

生存圏研究



No. 7

2011年



京都大学 生存圏研究所



「生存圏研究」は、京都大学生存圏研究所がその活動と生存圏の研究に関する報告を行うことを目的として年一回発行する紀要です。本誌は京都大学木質科学研究所の「木材研究・資料」の後継も兼ねています。生存圏の研究に関心を持たれる機関や研究者に広く行き渡るよう無料で配布しています。お問い合わせは当研究所までお寄せください（〒611-0011 宇治市五ヶ庄、電話番号0774-38-3346、E-mail: wabunshi@rish.kyoto-u.ac.jp）。

本第7号は、平成22年度の成果を基に発行します。引き続き、平成23年度の成果に基づく第8号を発行予定です。

編集委員

山本 衛	小嶋 浩嗣	本田 与一
今井 友也	梅村 研二	服部 武文
上田 義勝	森 拓郎	鈴木 史朗
古本 淳一	北守 顕久	反町 始
岸本 芳昌	上地 恭子	渡邊 崇人

目 次

総説

木材の寿命を考える	1
	川井 秀一
熱帯の風・雨・雲を測る ～赤道大気レーダーの挑戦～	7
	山本 真之
宇宙で電波を測るなんて？☆	15
	小嶋 浩嗣
バイオマスが拓く持続的社會	23
	渡辺 隆司

資料

木床義歯の樹種識別調査	29
	田鶴（水野）寿弥子，高瀬 克彦，杉山 淳司
アカシアマンギウム樹皮からの接着剤および成型物の製造	35
	小川 莊介，矢野 浩之
アカシア材からのナノファイバー製造	45
	矢野 浩之，阿部 賢太郎
熱帯アジアに分布するアカシア 一分類、生育特性、病害一	51
	黒田 宏之
熱帯 <i>Acacia</i> の化学成分調査	57
	梅澤 俊明
熱帯域の森林再生に向けて	63
	川井 秀一
熱帯造林地におけるバイオマス生産の持続性	67
	川井 秀一，ラギール ウドヨリーニ
熱帯早生樹のバイオリファイナリー	73
	渡辺 隆司
熱帯アカシアのバイオテクノロジー	79
	鈴木 史朗
熱帯早生樹の年輪年代・古気候学	85
	田鶴 寿弥子，杉山 淳司，津田 敏隆，田上 高広，渡邊 裕美子

アカシア材の組織構造	89
Yahya Ridwan, 高瀬 克彦, 今井 友也, D. Silsia, Joseph Gril, 杉山 淳司	
熱帯人工林の生物多様性	95
吉村 剛, 竹松 葉子, 山下 聰, 藤田 素子, 服部 武文, 本田 与一, 大村 和香子, 築瀬 佳之, 土居 修一	
ユーカリの形質転換による代謝工学	101
矢崎 一史	
アカシアマンギュウム材を用いたプレファブ型モデル耐震木造住宅建設のインドネシアでの試み	103
小松 幸平	
共同利用	
MU レーダー全国国際共同利用	117
電波科学計算機実験装置 (KDK) 全国国際共同利用	125
METLAB 全国国際共同利用	131
赤道大気レーダー全国国際共同利用	139
木質材料実験棟全国国際共同利用	145
居住圏劣化生物飼育棟／生活・森林圏シミュレーションフィールド全国国際共同利用	151
持続可能生存圏開拓診断 (DASH) ／森林バイオマス評価分析システム (FBAS) 全国国際共同利用	155
生存圏データベース全国国際共同利用	161
生存圏学際萌芽研究センター	165
研究業績	
	225

木材の寿命を考える*

川井 秀一**

1. はじめに

木材は古来よりわれわれの身近な暮らしにあって、加工しやすく、丈夫な材料として住宅や道具に多用されている。とくに、わが国は樹木の生長に適した温暖多湿な自然風土に恵まれ、“木の文化”と端的に表現される木質系文化遺産を数多く保有するに至っている。1300 年の時を越えて現存する法隆寺をはじめとする多くの歴史的木造建造物、木彫像や木工芸に代表される豊かで多様な木質系文化財は、日本文化の際立った特徴となっている。このことはわが国の国宝・重要文化財指定建造物 4,339 棟の 90% が木質系文化財であることからも伺える。

ところで、木材の材料寿命はどの程度であろうか？

歴史的木造建造物や木彫文化財は、日々年々のメンテナンスに加え、100～200 年毎に大修理が行われることが多い。時に応じて取り替え材を使用することもあるが、人手をかけて守られた当初の材料が大切に使われ続けられていることが多い。薬師寺西塔の再建で有名な西岡常一棟梁は、「木は二度生きる」という¹⁾。樹木として第一のいのちを生き、伐採されたのち、木材として第二のいのちを生きるという意味である。

本講演では、材料としての木材の寿命や経年変化について、歴史的木造建造物由来の古材と熱処理(現生)木材を比較検討しながら考える。

2. 木材の風化と老化、生物劣化

木材の経年変化にはさまざまな要因が考えられる。腐朽菌やシロアリなどの生物による劣化、紫外線や水分による風化のほか、長期にわたる劣化については通常の環境下における老化（エージング）も重要な因子である。生物劣化は原因が明確であり、また、生物活性の高い条件、すなわち、1) 酸素の存在、2) 水分の存在、3) 高気温、4) 栄養(木材)の存在などの条件が整えば、数年のオーダーで木材の劣化が進行する²⁾。風化は紫外線によるほか、環境湿度の変動などによる加水分解によ



図 1：木材の生物劣化、風化、老化（左：シロアリおよび腐朽菌による劣化、中央：風化、右：法隆寺部材の老化）

*2011 年 6 月 18 日作成 本稿は第 7 回生存圏研究所公開講演会（2010 年 10 月 24 日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所循環材料創生分野
E-mail: skawai@rish.kyoto-u.ac.jp

ると考えられるので、通常、材料表面に影響が強く現れる数十年オーダーの劣化である。

これに対して、老化は極めて長時間にわたる劣化であり、そのメカニズムも明確ではない。サンプルとなる出自の明らかな古材資料を集めることが難しいため、観測データも少ないので現状である。ここでは、木材が適切に管理され、健全に保存された状態での経年変化を老化として、材料としての寿命を追ってみたい。

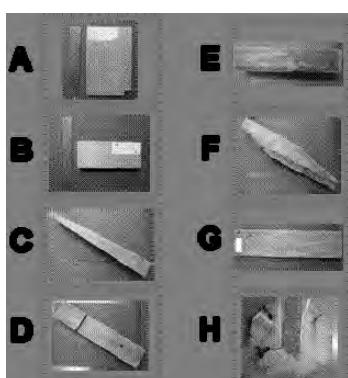
3. 木材の生年を測る

いわゆる古材の生年を知ることは容易ではない。建築史、美術史では、古文書など人文科学的な記載を基にした文献学的手法や部材の様式、加工痕などを頼りに考証が進められることが多い。建物小屋裏の棟札や木彫仏の胎内文書の発見等によって建築年代や製作年が特定されることもある。一方、自然科学的な手法には、年輪年代学のほか、放射性炭素同位体 (C^{14}) 年代学などで材形成年代を同定することが行われている。しかし、同一試料について、人文系と自然系の手法を駆使し、総合的な観点からこれを論じたものはほとんど見あたらない。

木質科学、年輪年代学、放射性炭素年代学の研究者、建築史・美学など人文科学の研究者や仏師らが共同して、生存圏研究所材鑑調査室に所轄される歴史的建造物由来の古材試料について実施した研究事例を紹介したい³⁾。

試料として飛鳥時代から現生に至るヒノキ材 (*Chamaecyparis obtusa*) 9 点を選び、指定文化財の付帯文書や材料表面の加工痕跡を含め、生育および使用履歴についての詳細を調査したうえで、同一試料を用いて年輪年代測定法と放射性炭素ウィグルマッチング法による年代評価を行い、比較検証した結果を表 1 に示す。表より、年輪年代法と放射性炭素年代法の結果は大変良い一致をみていることがわかる。

表 1 : ヒノキ材試料の外観と年輪年代測定法および放射性炭素ウィグルマッチング法による年代評価



	由来	年輪年代(AD)	放射性炭素年代(AD)	
A	伝法隆寺古材	343/434	367/458	KYOw2701
B	伝法隆寺古材	458/612	418/572	KYOw2737
C	伝法隆寺古材	400/502	418/520	
D	伝法隆寺古材	431/537	421/527	
E	伝法隆寺古材	584/792	587/795	
F	伝法隆寺古材	1029/1086	1000/1059	
G	伝法隆寺古材	1106/1270	1098/1262	
H	専修寺	1069/1438	1071/1438	
I	木曽産	1622/1988	1631/1973	

4. 木材の老化と寿命

木材の経年変化・寿命予測に関する研究は、木造建築物の保存修復のうえで、また材料としての木材の基礎物性を理解するうえで大変重要であり、これまでに多くの研究がなされている。その中で、古材の強度および諸性質を評価した先駆的研究として小原二郎氏の報告がよく知られている⁴⁻⁵⁾。

建築史の記述と矛盾がなく、年輪年代学、放射性炭素年代による年代測定によって履歴を明らかに

した歴史的建造物由来のヒノキ古材（前章表1参照）を用いて経年による木材物性の変化について体系的に検討した結果は以下のとおりである。なお、評価の項目は、密度、平衡含水率などの諸物性、ヤング率、強度、破壊靭性などの強度特性、木材構成成分ならびに細胞壁組織構造の経年変化などで

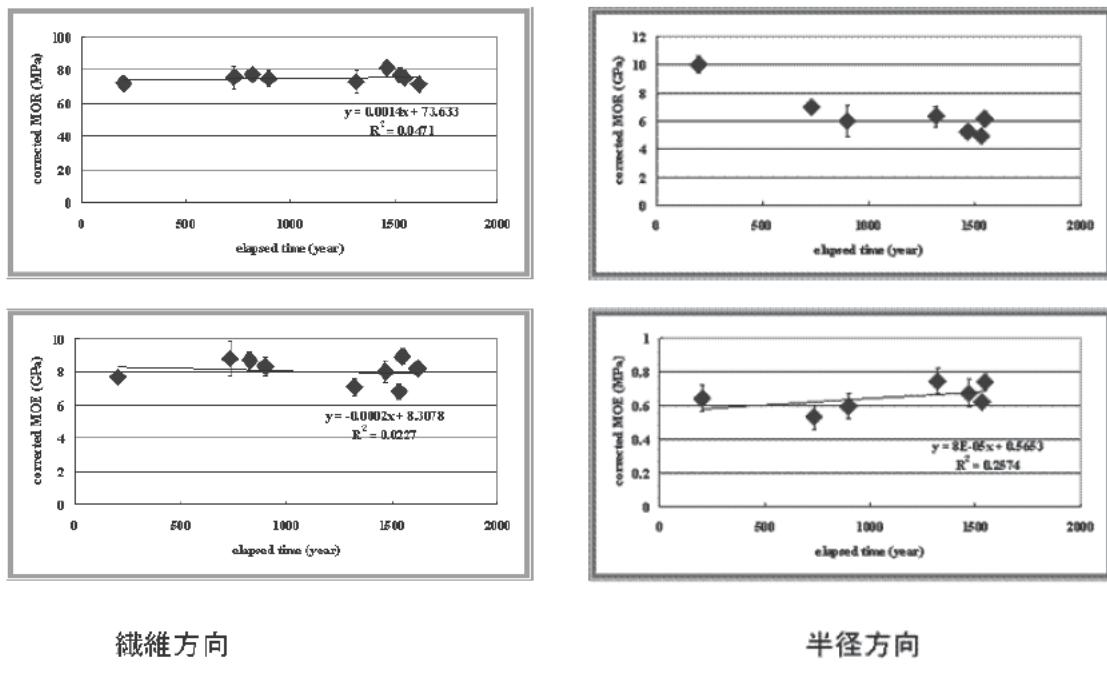


図2：ヒノキ材の曲げ強度(MOR)・ヤング率(MOE)の経年変化(織維方向および半径方向)

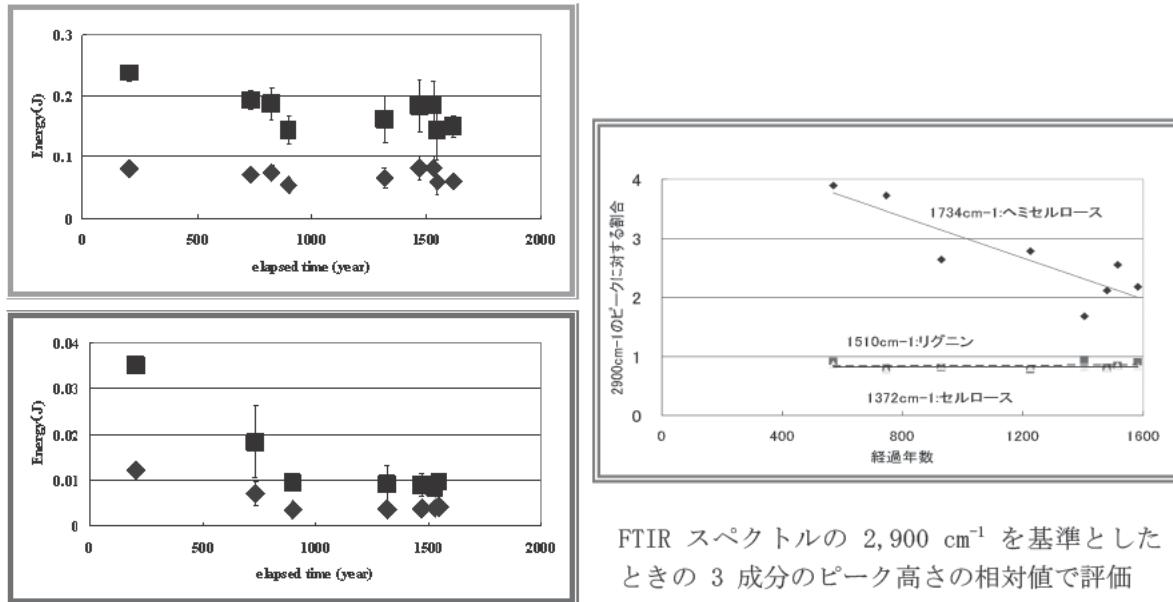


図3：ヒノキ材の破壊靭性の経年変化
上図：織維方向、下図：半径方向

図4：木材成分の経年変化の一例

ある³⁾。顕著な結果についてみると、ヒノキ材の1,600年間に及ぶ纖維方向曲げ強度(MOR)・ヤング率(MOE)の変化や劣化は極めて小さい(図2左)。これに対して、纖維直交(半径)方向の曲げ性能は時間の経過と共に低下し(図2右)、また両者の破壊靭性は共に低下して脆性が増す(図3)。一方、細胞壁内のセルロース結晶は経年に対して比較的安定であり、ヘミセルロースは量的に低減し(図4)、リグニンは質的变化を生じていることを示唆する結果が得られている⁶⁾。

5. 木材の老化を再現する試み

木材の色は経年に伴い赤みと黄みが増し、濃色化することが知られている。図6は古材の見かけの色調を示す。これら古材の色変化を熱処理した現生材のそれ(図7)と比較すると、極めて類似性が高いことがわかる。試料の色の差異を分光測色計で精密に測定して、反応速度論的な解析を行い、両者の類似性を検証した。この結果、色の経年変化は反応速度論(アレニウス式)に従い、時間-温度加算則が概ね成り立つことが示された。この研究結果は木材の老化が常温下の緩やかな熱酸化反応であることを示唆している。さらに、熱処理セルロースについて同様の解析を行った結果、木材の主成分であるセルロースの色変化もまた同様の傾向を示し、木材の色の経年変化の主たる要因であることが推察された⁷⁻⁸⁾。

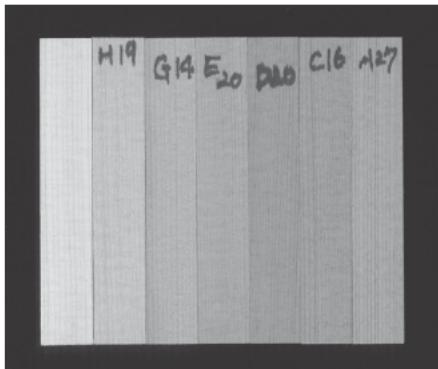


図6：古材の見かけの色の経年変化
(左端：現生材、右端：1,600年経年)

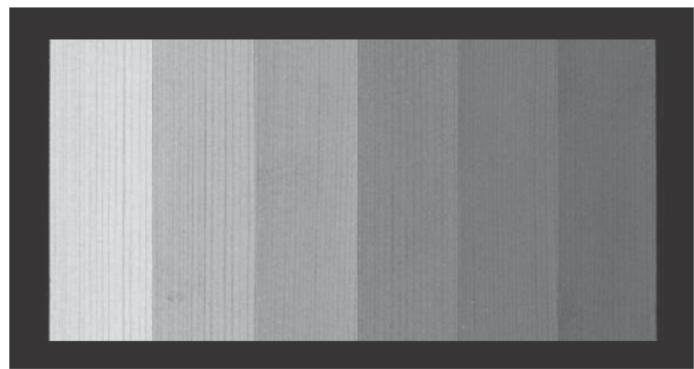


図7：熱処理材の見かけの色の経年変化
(左端：現生材、右端：180°C、120時間処理)

さて、本研究は木材の老化のメカニズム解明のうえで重要であると同時に、いくつかの実用的な観点から応用研究がなされている。木材の経年はその色や密度、寸法安定性の変化に現れ、木彫文化財に携わる技術者は経験的にこれを推測の指標としてきた。一方、木彫仏等の保存修復においては欠損部を補う後補材として色や寸法安定性が元の古材と調和し、かつ加工性のよい材料が求められる。たとえば、仏像の補修に後補材を用いる場合、予め熱処理を施し、当初材に色調や物性を合わせることにより、より安定した修復が可能になり、古色仕上げとして補彩の手間を省くこともできる(図8)。

また、常温下で何年も保管されて経年変化した書画用紙(宣紙)は、「寝かせた紙」「枯れた紙」などと呼ばれ、見た目や書き心地の面で優れた性質を示すと言われている。これは、紙が保管されている過程で何らかの化学反応が起こり、紙の諸物性が変化するためである。熱処理によって経年変化を人為的に促進(促進劣化処理)した中国宣紙について書家の官能検査を行った結果、色特性や墨の浸透特性に関して、経年変化と同様の変化が熱処理をした紙にも起こっていることが明らかになっている(図9)。

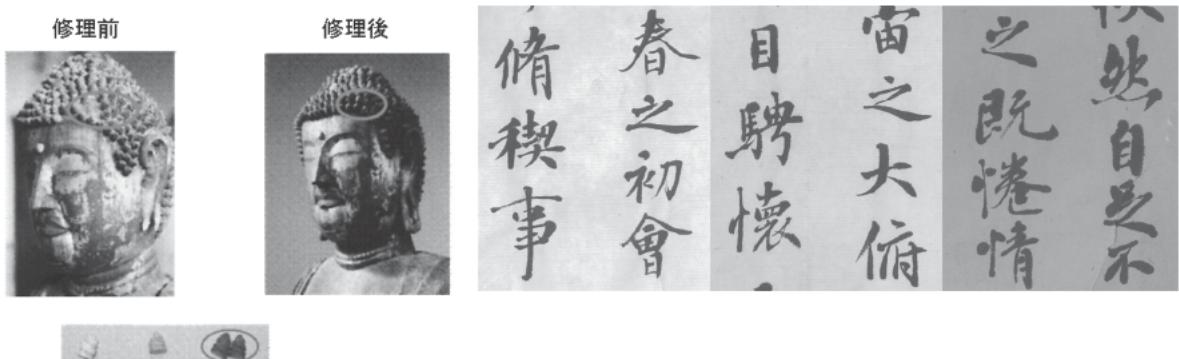


図8：修復前後の仏像の羅髪（らほつ） 図9：書家、杭迫柏樹氏による臨書「王羲之 蘭亭序」（左：未処理、中央：180°C 8 時間処理、右：180°C 48 時間処理）

6. おわりに

木材の老化に関する研究は、木質科学において材料の耐久性や寿命を考えるうえで重要である。また、文化財の保存修復という実用的な観点からも大切である。本講演で紹介した古材に関する一連の取り組みは、これまで個別的にしか実施されなかった科学的調査を分野の異なる多くの研究者・技術者の協働によって総合的かつ複合的手法で行った初めての研究事例である。今後さらに古材の諸性質に関する現象の記述を集約し、経年変化のメカニズムの詳細について検討したいと考える。

謝辞

本稿の取りまとめにあたり、日本学術振興会特別研究員横山操氏ならびに本学農学研究科博士課程松尾美幸氏に大変お世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 西岡常一, 小原二郎, 「法隆寺を支えた木」 NHK ブックス, 日本放送出版協会刊, 1978.
- 2) 安藤直人, 今村祐嗣, 中島正夫, 安全で長持ちする木の家, (株) ラトルズ, 2010.
- 3) 川井秀一他, 木材の材料寿命—歴史的木造古建築および木彫文化財由来の試料を用いた検討—, 平成 17 年度～平成 19 年度科学研究費補助金基盤研究 (B) 報告書
- 4) 小原二郎, 古材の研究, 千葉大学工学部研究報告, 9 (15), 1–55, 1958.
- 5) 小原二郎, 古材の研究, 千葉大学工学部研究報告, 9 (16), 23–65, 1958.
- 6) Yokoyama, M., Gril, J., Matsuo, M., Yano, H., Sugiyama, J., Clair, B., Kubodera, S., Mitsutani, T., Sakamoto, M., Ozaki, H., Imamura, M., and Kawai, S., Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, *Comptes Rendus Physique*, **10**, 601-611, 2009.
- 7) Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Gril, J., Yano, K., and Kawai, S., Color changes in wood during heating: Kinetic analysis by applying a time-temperature superposition method, *Appl. Phys. A*, **99**, 47-52, 2010.
- 8) Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Sugiyama, J., Kawai, S., Gril, J., Kubodera, S., Mitsutani, T., Ozaki, H., Sakamoto, M., and Imamura, M., Aging of wood -Analysis of color changes during natural aging and heat treatment-, *Holzforschung*, **65** (3), 361-368, 2011.

熱帯の風・雨・雲を測る～赤道大気レーダーの挑戦～*

山本 真之**

1. はじめに

本総説では、インターネットなどで簡単に入手できる文献を参考しつつ、基礎的なところからインドネシアのスマトラ島にある赤道大気レーダーの紹介を行います。

リモートセンシングという言葉をご存じでしょうか。物体から放射あるいは散乱される電磁波を利用して、その物体の種類や状態を測定することをリモートセンシングと呼びます。リモートセンシングは、私たちにもとても身近な技術です。建物への不法侵入者を検知する赤外線センサーや監視カメラなどは、リモートセンシングの代表的な例です。近年、一人暮らしのお年寄りの家庭にある湯沸かしポットの使用状況をメールで連絡し、お年寄りの安否を確認するサービスが話題になりました¹⁾。これも、離れた場所での状態を知るという意味では、リモートセンシングと言えるでしょう。

気象状況の短期（数時間以下）・長期（数十年以上）の変化は、傘を携帯する・洗濯や布団干しをするといった日常生活から、水資源・農水産物の収穫・交通などの人間生活や産業に大きな影響を与えます。そのため、気象状況を監視するためにリモートセンシングが幅広く使われています。テレビやインターネットで目にする気象衛星ひまわりで観測された雲の画像²⁾ や、気象レーダーで観測された雨の分布³⁾ は、その代表的な例です。

2. 大気を観測するレーダー

2.1 大気レーダーと気象レーダー

レーダーは電波のパルスを目標物に当て、目標物からの散乱電波を受信し、標的の位置や状態を測定する装置です⁴⁾。レーダーは、大気の観測のみならず、車や船舶の衝突防止・航空管制・地中管の探査など、事故防止や安全確保に広く使われています。前述の気象レーダーは、雨粒からの散乱電波の強度を降水量に換算することで、雨の分布を観測します。気象レーダーでは、雨の分布を捉るために、パラボラアンテナを回転させて全方位の観測を行います（図1a）。

大気の運動を表す風速の測定も、気象状況の把握・予測に不可欠です。風速の測定は、大気の屈折率の揺らぎを利用します。日常目にする星のまたたきや陽炎は、光が直進しないために、景色や物体がぼやけて見える現象です。光が直進しないのは、大気乱流の影響などにより温度や水蒸気が大気中で一様でないため、大気の屈折率が揺らぐためです。この大気の屈折率の揺らぎは、ごく僅かな電波を散乱します。大気の屈折率の揺らぎによる電波の散乱を利用して風速を測定するレーダーを、大気レーダー（またはウインドプロファイラ）と呼びます。大気レーダーでは、アンテナを上方に向けて、アンテナの上の数百mから数kmまでの水平範囲の風速を測定します（図1b）。気象庁では、“局地的気象監視システム（WINDAS）”と呼ばれる小型大気レーダー観測網で得られた風速観測データを中央監視局に集め、スーパーコンピュータを用いた天気予報の精度向上に活用しています⁵⁾。WINDASで用いられている小型大気レーダーは、生存圏研究所で開発されたものです。

*2011年8月2日作成 本稿は第7回生存圏研究所公開講演会（2010年10月24日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所レーダー大気圏科学分野
E-mail: m-yamamo@rish.kyoto-u.ac.jp

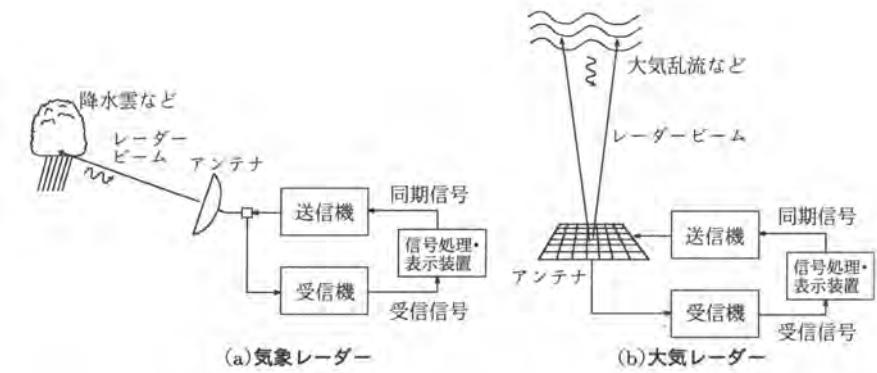


図1：気象レーダーと大気レーダーの基本概念図。

2.2 大型大気レーダー

地球の大気は地表から高度数 100 km の広い高度範囲に広がり、その高度毎に特有のさまざまな現象が発生します。成層圏である高度 15-35 km に発生するオゾンホールによる有害な紫外線の増加⁶⁾や、電離圏（高度 100 km 以上）に発生する電子密度擾乱に伴う GPS 衛星による位置測定精度の低下⁷⁾は、私たちの生活に大きく影響する代表的な例です。対流圏（高度約 10 km 以下）において積雲対流・地形（山岳など）などにより発生する大気の波（大気波動）のエネルギーは、大気の上方に伝搬し、成層圏・中間圏（高度約 10-100 km）における地球規模の大気循環や電離圏の電子密度擾乱に大きな影響を及ぼします⁸⁻¹⁰⁾。生存圏研究所では、高度 1 km から高度数 100 km の広い高度範囲にわたる大気計測を行うため、アンテナの直径約 100 m という大型の大気レーダーを開発し、さらに開発した大型大気レーダーを用いて大気現象を解明してきました。滋賀県甲賀市信楽町に設置された MU レーダーは、最新のデジタル信号処理技術を活用した性能向上により、観測開始から 25 年を経た今でも、世界最先端・最高性能の大気レーダーとして国内外の多くの研究者により活用されています¹¹⁾。MU レーダーには、対流圏の風速観測や電離層の電子密度観測などのさまざまな観測を行うため、ラジオの FM 放送（76-90 MHz）より少し低い周波数である 46.5 MHz（電波の波長で約 6.5 m）を使用しています。さらに、大気からの微弱な電波散乱を捉えるため、大型の放送局よりも大きい 1 メガワットという大きな送信出力を持っています。

3. 赤道大気レーダーで見る大気のすがた

3.1 なぜ、インドネシアなのか？

熱帯の気候と聞いて思い浮かぶイメージはなんでしょうか。観光や仕事で熱帯を訪れたことのある多くの方は、燐燐と降り注ぐ太陽・温暖な気候・そして激しいにわか雨（スコール）を想像されると思います。インドネシアとその周辺は海面温度が世界で最も高く、海洋から豊富な水蒸気が供給されます。また、この地域は複雑な地形を持つ大小の島々が存在し、海陸や地形のコントラストにより発生する上昇気流が、高度 15 km 以上に到達する積乱雲を頻繁に発生させます。そのため、インドネシアは世界で最も降水量が多い地域であり¹²⁾、地球の水循環に大きな役割を果たしています。また、インドネシアでの強い上昇気流により成層圏に輸送される大気中の微量物質は、オゾン層の破壊や地球温暖化に大きく影響することが指摘されています¹³⁻¹⁴⁾。

インドネシアの活発な積乱雲活動に伴い発生する大気波動は、大気のエネルギーを成層圏・中間圏（高度約 10-100 km）に輸送し、準 2 年周期振動や半年周期振動といった、熱帯域特有の大気変動を発生させます¹⁵⁻¹⁶⁾。また、大気波動の一部は高度数 100 km 以上の大気最上層（電離圏）まで到達し、

熱帯域特有の電子密度擾乱であるプラズマバブルを引き起こします¹⁰⁾。

インドネシア及び付近における大気現象は日本における気象状況にも大きく影響します。例えば、インドネシア付近の熱帯域で発生し、その後北上して日本に到来する熱帯低気圧（台風）は、強風や大雨による大きな被害を時としてもたらしますが、ダムのある山岳地帯に大雨を降らせることで水資源の確保に寄与するという側面を持ちます。また、エルニーニョ現象やラニーニャ現象は、日本から遠く離れた東太平洋の赤道付近で海水の温度が変化する現象です。しかし、エルニーニョ現象の影響は地球規模に及ぶため、エルニーニョ現象の発生時に日本は冷夏・暖冬の傾向があるなど、日本の天候にも大きな影響を及ぼします¹⁷⁾。エルニーニョ現象が発生するとインドネシアでは降水量が減るため、飢餓を引き起こす要因になります。そのため、エルニーニョ現象はインドネシアに住む人々にも非常に大きな関心事となっています。

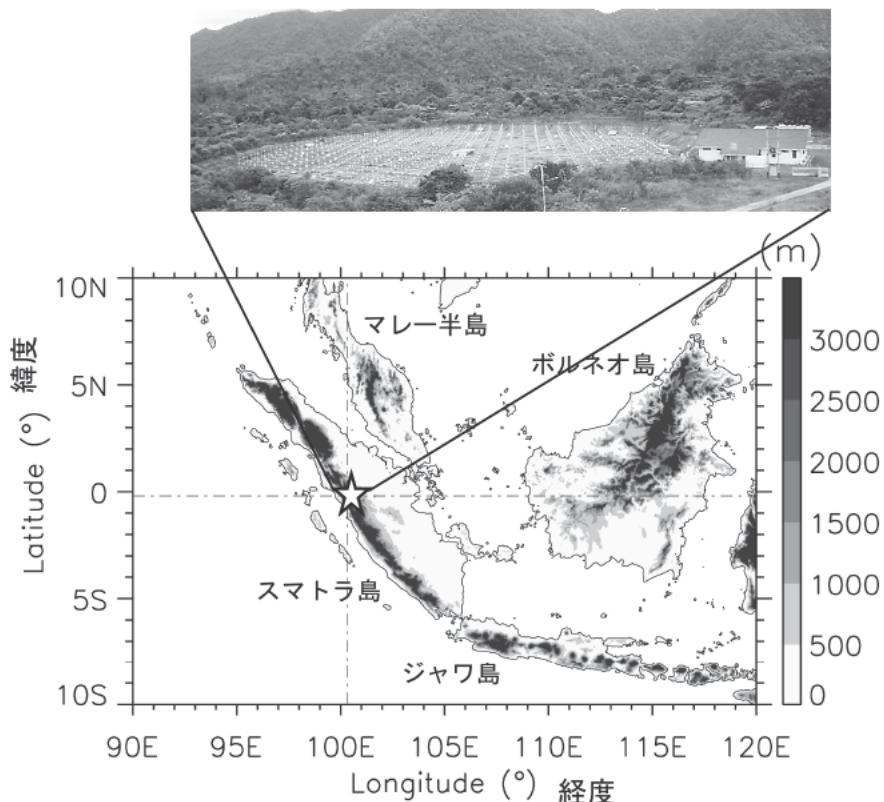


図2：赤道大気レーダーの設置位置（☆印）と外観。

3.2 赤道大気レーダー観測システム

インドネシアは、地球規模の大気現象の把握及び予測に非常に重要であるにもかかわらず、インドネシアにおける大気観測は十分実施されていません。日本では WINDAS による対流圏下層の風速の観測のほか、ラジオゾンデと呼ばれる気球搭載センサーを用いた温度・風速の定常的な観測が実施されています¹⁸⁾。しかし、インドネシアは東西 5,000 km にわたり広がる広大な国であるにもかかわらず、ラジオゾンデの定常観測点はわずか 12 点しかありません。そのため、大気の観測に基づくインドネシアの気象現象の解明は、未だに不十分です。特に、大気の下層から上層まで観測できる大型大気レーダーがないために、高度 1 km から高度数 100 km の広い高度範囲にわたる大気を詳しく観測することができませんでした。

赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar ; 略称 EAR) は、2001 年に生存圏研究所がイン

ドネシア・スマトラ島に設置した大型大気レーダーです¹⁹⁾（図2）。赤道大気レーダーの運用は、生存圏研究所とインドネシア航空宇宙庁（LAPAN）により行われています。赤道大気レーダーにはフェーズドアレイアンテナ²⁰⁾が用いられています。図3に赤道大気レーダーのアンテナ素子配置を示します。直径 110 m の円形領域に 560 本のアンテナ素子が配置されており、それぞれのアンテナ素子に送受信機が取り付けられています。赤道大気レーダーでは、それぞれのアンテナ素子から放射される電波の進みや遅れ（位相）を制御することで、観測したい方向にレーダービームを向けます。フェーズドアレイアンテナを用いることにより、大気中の現象を素早く捉えることを目的に、最大で毎秒 5,000 回の早さで観測方向を変えることができます。アンテナ素子に取り付けられた送受信機はそれぞれ約 180 ワットの送信出力を持つため、560 本のアンテナ素子全体で 100 キロワットの電波の送信を行います。

赤道大気レーダーが設置された赤道大気観測所には、気象レーダー・レーザーレーダー（ライダー）・流星レーダー・電離圏観測レーダーなどの大気の下層から上層までを網羅する観測機器も併設されており、熱帯域で随一の充実した観測拠点となっています。

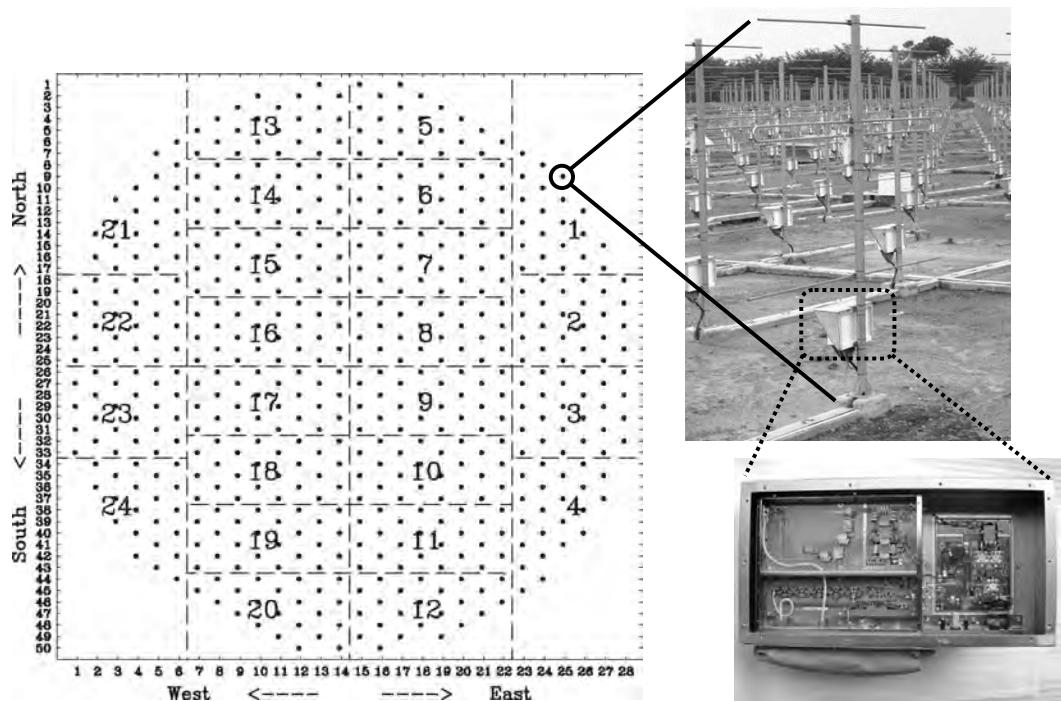


図3：赤道大気レーダーのアンテナ配置（左）、アンテナ素子（右上）、及び送受信機の内部（右下）。

3.3 赤道大気レーダーで見る降水と大気不安定のすがた

赤道大気レーダーを用いた研究テーマは、高度範囲だけ見ても対流圏から電離圏に至るまで非常に幅広いのですが、ここでは、筆者が共同研究者と取り組んだいくつかの研究成果に絞って紹介します。

降水雲内の風速の鉛直成分（鉛直風速）は、降水粒子の生成や成長を決定する重要な物理量であるにもかかわらず、その観測は困難であることが知られています。しかし、MU レーダーや赤道大気レーダーなどの 50 MHz 帯の周波数を用いる大型大気レーダーは、降水雲内の鉛直風速を鉛直数 100 m 以下、時間 1 分以下の優れた分解能で測定できます。図4は降水雲中の鉛直風速の非常に細かい変化を赤道大気レーダーで捉えた観測事例です。13 時半頃までは、活発な積雲内での乱れた鉛直風速の変動を捉えており、14 時半から 17 時頃までは、高度 6-12 km において層状性降水雲の中に存在する緩

やかな上昇気流を捉えています。この観測結果は、降水粒子の成長メカニズムに新たな知見を与えるものです。2010年12月には、降水粒子の成長機構をさらに明らかにすることを目的に、赤道大気レーダー・気象レーダー・ライダー・ラジオゾンデの同時観測キャンペーンが実施されました。

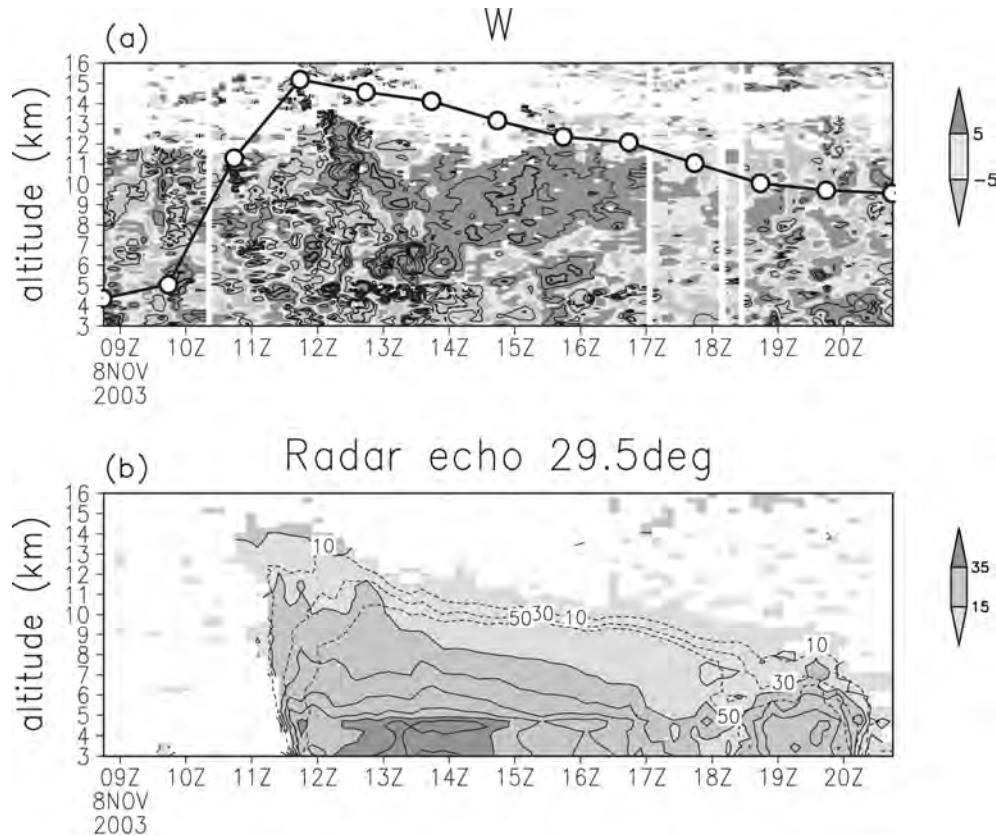


図4：(a) 赤道大気レーダーで観測された鉛直風速の時間高度変化。横軸は時間（単位は時）であり、縦軸は海拔高度（単位はkm）である。正の鉛直風速は地面に対する上昇を、負の値は下降を示す。等値線は20 cm/s毎に示されている。(b) 気象レーダーで観測されたレーダー反射因子（降水粒子の大きさと数の指標）の時間高度変化。単位はdBZで、値が大きいほど大きい降水粒子が多く存在することを示す。等値線は実線で5 dB毎に示されており、点線は%で示した赤道大気レーダー周辺における降水雲の存在頻度を示す。

大気中の不安定に伴い発生する大気混合は、大気中のエネルギーと物質の輸送を理解する鍵となります。水平風速の鉛直方向の変化が大きい領域では、ケルビン・ヘルムホルツ不安定（シアーアンダウト）と呼ばれる不安定現象により、大気の成層構造が崩されて大気混合が発生します。ケルビン・ヘルムホルツ不安定は、しばしば雲にその形状を見ることができます²¹⁾。図5に、ケルビン・ヘルムホルツ不安定に伴い発生した大気不安定波の観測結果を示します。受信エコー強度の時間高度変化より、大気不安定により発生した大気混合の鉛直スケールは1 km程度であることがわかります。さらに、ラジオゾンデなど他の観測データと組み合わせることで、発生した大気不安定波の水平スケールが5-7 km程度であることや、熱帯域の対流圏と成層圏の境界付近に存在する赤道ケルビン波と呼ばれる大規模な大気波動がこの高度で潰れる（碎波する）ことが、ケルビン・ヘルムホルツ不安定の発生要因になることも解明されました。

図5に示すような大気不安定波の微細構造を捉えるために、赤道大気レーダーでは、レンジイミージング（複数の周波数を送信し適応信号処理を行うことで、鉛直方向の分解能を30 m程度に高める

技術)を用いています。経済成長が著しく進むインドネシアでは、人間生活に影響を与える物質が大量に大気に放出されており、大気中におけるこれらの物質の拡散や輸送機構を知ることが求められています。近年、大気レーダーの新しい観測手法として、レンジイメージングと同時にアンテナを分割した多チャンネル受信を行うことで、大気乱流の立体構造を捉える3次元イメージング技術の開発が進んでいます。近い将来、赤道大気レーダーに大気乱流の3次元イメージング測定機能が備えられることが期待されています。

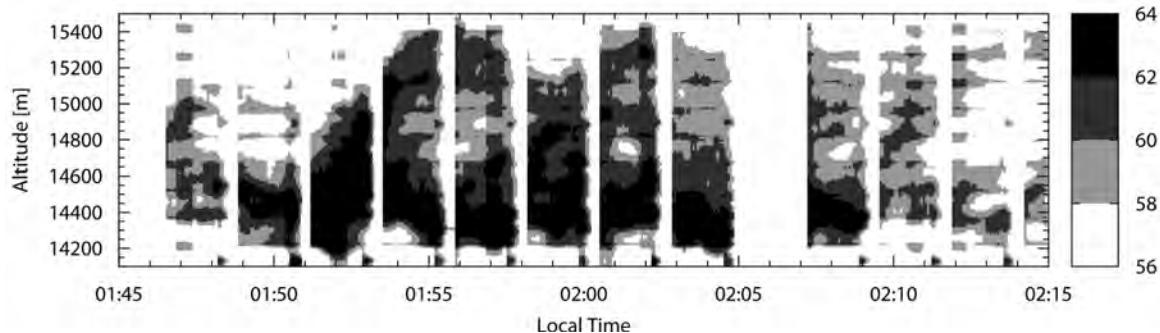


図5：赤道大気レーダーで捉えた、ケルビンーヘルムホルツ不安定の発生に伴う受信エコー強度の時間高度変化。横軸は時間（単位は時：分）であり、縦軸は海拔高度（単位はm）である。濃淡で示す受信エコー強度の単位はdBである。

4. おわりに

本総説では、インターネットなどで簡単に入手できる文献を参考しつつ、大気を観測するレーダーシステムの概要と、赤道大気レーダーで見る大気のすがたを紹介しました。赤道大気レーダーに少しでも興味を持っていただければ、筆者にとっては望外の喜びです。

2001年に運用を開始した赤道大気レーダーは、運用開始から10年を迎えました。この10年間に地球シミュレータをはじめとする気象モデルの飛躍的発展²²⁾や、人工衛星搭載レーダーによる雲観測²³⁾など、熱帯の気象現象を知る他の手段がますます充実してきました。赤道大気レーダーは、大気下層である対流圏における降水や大気重力波、大気上層である電離圏におけるプラズマバブルなど、従来は未知であった赤道大気中の諸現象を次々と解明してきました。しかし、熱帯気象の現象解明とその予測に向けては、まだまだ取り組むべき課題があります。赤道大気レーダー及びその周辺の観測機器の発展・充実はもちろん、この10年に飛躍的に発展した気象モデルや観測手段とも連携しながら、さらに知恵を絞って熱帯気象における課題を解明していくことが必要となっています。赤道大気レーダーがこれから解明すべき課題に、筆者も日々わくわくしながら取り組んでいます。

参考文献

- 1) 象印マホービン株式会社, みまもりほっとライン—親の元気がポットでわかる—,
<http://www.mimamori.net/>
- 2) 気象庁, 気象衛星ひまわりによる衛星画像, <http://www.jma.go.jp/jp/gms/>
- 3) 気象庁, レーダー・ナウキャスト(降水・雷・竜巻), <http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>
- 4) Wikipedia, レーダー, <http://ja.wikipedia.org/wiki/レーダー>
- 5) 気象庁, ウィンドプロファイルについて, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/windpro/kaisetsu.html>
- 6) 学研教育出版, オゾンホールとは何ですか? | 環境なぜなぜ 110 番 | 学研サイエンス kids,
<http://kids.gakken.co.jp/kagaku/eco110/answer/a0009.html>

- 7) 石井守, 超高層大気の乱れから電波を守る, NICT NEWS 2006 年 11 月号 (No. 368),
<http://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/0611/research/index.html>
- 8) 小倉義光, 成層圏と中間圏の大規模な運動, 一般気象学第 2 版, 東京大学出版会, 248-266, 1999.
- 9) 佐藤薰, 中緯度の研究,
<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kaoru/Research/mid-latitude-region/index.html>
- 10) 小川忠彦, 大気の波動が引き起こす赤道熱圏・電離圏の擾乱, STEL Newsletter, **48**, 1-3.
<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/pub/ste-nl/newsletter48clr.pdf>
- 11) 京都大学生存圏研究所, MU レーダー, <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/>
- 12) 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター, GSMAp 降水プロダクトの動画や図の例 (“GSMAp_MWR(気候値, 1998-2006)” を参照), http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMAp_crest/htmlf/sample_j.html
- 13) 国立環境研究所 環境情報メディア 環境展望台, アメリカ海洋大気庁、オゾン層破壊物質として N₂O が最大の要因と指摘, <http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=2730>
- 14) 国立環境研究所 環境情報メディア 環境展望台, トリフルオロメタン、地球温暖化を加速,
<http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=3240>
- 15) 内藤陽子, 赤道準二年周期振動 (QBO) について,
<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/mete/J/benkyo/QBO/>
- 16) 廣田勇, 赤道大気, グローバル気象学, 東京大学出版会, 115-129, 1992.
- 17) 気象庁, エルニーニョ/ラニーニャ現象, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/index.html>
- 18) 気象庁, ラジオゾンデによる高層気象観測について,
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/upper/kaisetsu.html>
- 19) 京都大学生存圏研究所, 赤道大気レーダー, <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>
- 20) 深尾昌一郎, 浜津享助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング改訂第 2 版, 京都大学学術出版会, 245-256, 2009.
- 21) Wikipedia, ケルビン・ヘルムホルツ不安定性
<http://ja.wikipedia.org/wiki/ケルビン・ヘルムホルツ不安定性>
- 22) 海洋研究開発機構, 地球シミュレータセンター, <http://www.jamstec.go.jp/esc/index.html>
- 23) CloudSat, <http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>

宇宙で電波を測るなんて？☆*

小嶋 浩嗣**

1. はじめに

私たちの日常生活で「電波」の存在を意識するのは、どんな時でしょうか？実は、ほとんど意識せずにもう皆さん使っていると思います。たぶん、携帯電話で「ハタが何本？」という意識がせいぜいではないでしょうか。実際は、携帯電話はもとより、テレビ・ラジオ放送をはじめとする情報通信、レーダーなど、非常に多岐にわたって我々は電波を利用しています。このように人間が電波を利用できるようになった、つまり、制御できるようになったのは、マルコーニによる無線通信実験の成功からと考えてよいでしょう。そう、電波を「利用」できるようになったのは、電波を「制御」できる術を人間が身につけたことによります。つまり、人間が「必要な時に必要な情報を載せた必要な種類の電波を出し、そこから必要な情報を抜き出せる」ようになったわけです。しかし、電波そのものは、この世の中いくらでも発生しています。自然に発生してくるもの、人間が知らないうちにしているもの、様々です。電波を「電磁波」という広い範囲でとった場合、温度をもつもの必ずなんらかの電波（電磁波）を出しているともいえます。ここでお話しする電波は、宇宙、特に太陽系で自然に発生している電波です。今回は、そこで発生している電波を人工衛星で測る研究についてお話ししましょう。

2. 宇宙惑星間空間って

2.1 すれ違ってよい香り

あなたが、道を歩いています。花束をいっぱい積んだお花屋さんのバイクが前から走ってきて、あなたの横を通り過ぎていきました。あなたは、きっと花束のよい香りをのせたちょっとした風を感じて快い気分になるでしょう。でももし、前から走ってきたのが、超音速ジェット機だったら、いくら山のような花束をそれが抱えていても、あなたは、花の香りを楽しむ暇もなく、衝撃でなぎ倒されてしまうでしょう。どうしてこんなことが起こるのでしょうか。それは、地球上に大気があるからですね。大気をかき分け走ってきたバイクで風が起きて、あなたに花束のよい香りを届けてくれますし、大気中を超音速で飛んできたジェット機で発生した衝撃波であなたはなぎ倒されてしまうのです。

大気が、窒素、酸素、二酸化炭素などで構成されていることは多くの人がご存知と思います。これらのつぶつぶ（分子ですね）が、集団で、右に動いたり、左に動いたりして空気の流れができます。それぞれの分子は電気的にプラスとマイナスが釣り合った状態にあり、このような分子からなっている気体を、「中性気体」といいます。地球上の大気現象は、バイクですれ違う風にしても台風で吹いてくる強風にせよ、この中性気体が動くことで発生している現象です。地球のように中性の気体できている大気のことを「中性大気」といいます。

2.2 宇宙空間に大気？

ところで、「大気」の定義って何でしょうか？広辞苑（岩波書店 第五版）を引いてみます。まず、

*2011年6月18日作成 本稿は第7回生存圏研究所公開講演会（2010年10月24日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所宇宙圏航行システム工学分野
E-mail: kojima@rish.kyoto-u.ac.jp; Web: <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~kojima>

一番目に「度量の広いこと」と、あります。おやおや、最初にこれがでているのは意外でしたが（「大器」とはよく書きますよね）、ここでは関係ないので、次ぎをみます。「地球を取り巻いている気体の総体」なるほど、これはよくわかりますね。その次ぎはどうでしょう。「天体の表面を取り巻く気体」。ふむふむ、なるほど、例えば火星にも希薄な大気があるのはわかっていますからね。この定義からすると、実は、皆さんご存知のスペースシャトルや国際宇宙ステーションも地球大気の中を飛んでいることになります。

宇宙空間、ここでは、太陽系に限って考えてみますが、この宇宙空間は気体で満たされています。この気体は電気を帯びているもので、これを宇宙プラズマと呼びます。プラズマというのは、その気体を構成している成分の原子でプラスとマイナスがばらばらになった状態のことをいいます。遠目みると一見、中性気体なのですが、なかみは、実は、プラスの電気をもつ粒子（イオン）とマイナスの電気をもつ粒子（電子）が、ばらばらに動いている状態です。このような状態は宇宙だけではなくて、みなさんの携帯電話の中に使われている半導体というデバイスの中身もプラズマですし、最近よく耳にするとこでは、プラズマディスプレイがありますね。

宇宙プラズマには、大きく分けて二種類のものがあります。

太陽風プラズマ

惑星大気プラズマ

です。

「太陽風プラズマ」というのは、文字通り、太陽から吹いてくるプラズマの流れです。太陽の大気が宇宙空間に流れ出しているものです。広辞苑の定義でいうところの、天体の表面を取り巻く気体（太陽の場合はプラズマ）が、太陽系空間に流出しているということです。その流れのスピードたるや、地球付近まできても、まだ、秒速 500 km くらいもあります。もっとも密度は薄くて、つぶつぶの個数で、 1 cm^3 あたり、数個ある程度です。太陽から噴出した大気はそれなりの濃さがありますが、太陽系全方位に向かってひろがっていくので、どんどん薄くなっていくわけです。太陽風プラズマの中身のほとんどはプロトン (H^+) と電子です。このような太陽風プラズマが惑星と惑星の間の宇宙空間を満たしているということになり、そういう意味では、「太陽系は太陽大気の中にあり」と、いつてもいいのかもしれませんですね。

「惑星大気プラズマ」というのは、もともと中性大気である惑星の大気上層部が、太陽からの紫外線などのエネルギーによって、イオンと電子に引き裂かれてしまい（これを電離といいます）、ばらばらになってプラズマ状態になったものをいいます。地球にもこれはあって、古くから電離層、と呼ばれているものです。高度 1,000 km くらいまであります。スペースシャトルや国際宇宙ステーションはこの電離層の中を飛んでいます。なので、そこはまだ広い意味で地球の大気の内側ということになります。「な~んだ、まだ、地球の大気中なのか」と、思わないで下さい。人類がここまで進出できたその過程には、非常に多くの人々の膨大なエネルギーが投入されているのです。それに電離層も立派な宇宙プラズマです。密度はさすがに濃くて、高度にもよりますが、 1 cm^3 あたり、10 万個以上あるところもあります。これでも地上の空気の密度よりはずっと薄いですけれども。

さて、スペースシャトルや国際宇宙ステーションは、地球の大気中ではあるが、その電離している部分である宇宙プラズマ中を飛翔しています。その中で生活している人はプラズマ大気に囲まれて生活しています。一方、先日、感動の帰還を果たした、日本の探査機はやぶさは、太陽風プラズマ中をずっと航行して地球にもどってきたことになります。

宇宙はこのように、電離した気体、つまりプラズマによって満たされています。地上で中性大気である空気が引き起こす現象は、宇宙では、希薄なプラズマによる現象に置き換えられます。お花屋さんのバイクとすれ違った時に感じる空気の流れも、超音速ジェット機になぎ倒される現象も、すべて宇宙ではプラズマの流れ、プラズマ中の衝撃に置き換えられます。難しくいうと、これらの現象を記述する方程式系が、中性気体のものから電離気体となるプラズマのものに変わることになります。

2.3 ぶつからない奴ら

私は、自分でもあきれてしまう程、絵がへたくそです。悲しいことに小中学校では必ず美術の時間には絵を描く機会がありました。でも小学校の時、一度だけほめられた絵がありました。それは「学校の廊下を走ってはいけません」、ということを呼びかけるポスターでした。私の通っていた小学校では、廊下を走ってはいけない理由が二つありました。一つは、廊下の曲がり角で向こうから来た人とぶつかって怪我をする、ということ。もう一つは、古い校舎だったので、廊下を走ると床が抜けてしまうことでした（床を抜いてしまった子供は、罰として自分で木材を拾ってきて、抜けた廊下を自分で修復することが暗黙のきまりになっていました。なので、廊下はいろんな木で穴がふさがれ、まだら模様でした）。私は、前者の理由で走ってはいけない、というポスターを描きました。二人の子供がぶつかって目から火花が散っているものだったと思います。なぜか、奇跡的にうまくかけたようで、このときばかりは、ほめられたのを覚えています。

さて、子供がふたり走ってきてぶつかったら、本当に目から火花がでるのでしょうか？走ってきた二人はそれぞれ運動エネルギーをもっています。それがぶつかると、まず、ふたりとも、別の方向にぶっ飛んでしまうでしょう。そして、ぶつかった時に、「どーん」という音がすることでしょう。あたり方が悪いと、ぶつかったところの肩などの骨が折れてしまうかもしれません。でも目から火花は出ませんね。「走る」という行為によってもっていった運動エネルギーを火花に変換する「仕組み」を人間がもっていないからです。二人がぶつかったことによって、二人の運動エネルギーは、二人がはじき飛んだエネルギー、「どーん」という音として空気を振動させるエネルギー、あるいは、お互いの肩の骨を骨折させてしまうエネルギーに変換されたことになります。

宇宙プラズマを構成するつぶつぶ達には、実は、こんな衝突防止ポスターは無意味です。それは、彼らはめったにぶつかることがないからです。どのくらいぶつからないかというと太陽風プラズマだと、太陽から出発して、地球に到着するまでに、一回当たるか当たらない程度なのです。これでは、ほとんどぶつからないのと同じですね。私たちは、これを「無衝突プラズマ」と呼びます。ぶつからないなら粒子がもっている運動エネルギーは変わらないのか、というと、実はそうではありません。なぜか？ それは、彼らが電気を帯びた気体、つまりプラズマだからです。電気を帯びたつぶつぶは、自分のエネルギーの一部を変換して電波を出します。逆に、電気を帯びたつぶつぶは、電波を感じて自分のエネルギーに変換できます。つまり、他のつぶつぶが出した電波を、別のつぶつぶが感じることによって、エネルギーを交換できるのです。おっと、やっと、ここで「電波」がでてきました。そう、この記事は宇宙で電波を測るお話でしたね。イメージとしてかくと、衝突すると図1のような感じで、無衝突で電波を介して影響しあう状況は図2のような感じでしょうか。図2では片方が出した電波を片方がビリビリ感じて影響を受けています。

3. 宇宙で電波を測る

3.1 宇宙プラズマ中の電波

「世の中で一番速いのは、光」。と、いうのは、割と多くの皆さんがなんとなくわかっておられるのではないでしょうか。かくいう私も、心底よくわかっているわけではないですが、そう捉えています。私たちが使っている電波は、この光と同じ種類のものです、というか、光は「電磁波」という範疇で電波と同じ仲間となります。なので、携帯電話の電波も衛星放送の電波も光速で飛んできます。中性大気中（あるいは真空中）では、電波は光速で伝わる1種類しかないので。

ところが宇宙プラズマ中では、こうならないのです。もちろん、光速で伝わる地上と同じ種類の電波もあります（太陽の光は宇宙プラズマを突っ切って光速で地球まで伝わってきています）。しかし、それに加えて非常に多岐にわたる複雑な種類の電波が宇宙プラズマ中に存在するのです。難しいことは書きませんが、宇宙プラズマ中の全部の電波の種類を完璧に説明できる人は、それほど多くない



図1：つぶつぶ衝突！
(イラスト：熨斗千華子さん)



図2：つぶつぶ無衝突！
(イラスト：熨斗千華子さん)

のではないかと思います（すいません、私もできません）。電波の種類のことを「モード」といいます。つまり、中性大気中（真空中）では、電波のモードは、1つだけですが、宇宙プラズマ中では非常に多く存在する、ということになります。そして、宇宙プラズマ中での多くの電波モードそれぞれに対して、「プラズマのつぶつぶがどのような状態になったら、どのモードの電波が放射される」という決まりがあります。また、それぞれのモードの電波があったら、つぶつぶに対してどのような影響を与えるのか、ということもわかります。こういうわけで、「電波」を測ると、「宇宙空間を満たしているプラズマ中で、どんなことが起こっているのか」を、研究することができるのです。プラズマ中に存在する特有の電波のことを、「プラズマ波動」と呼びます。

3.2 電波をつかまえるもの

では、宇宙プラズマ中で発生しているプラズマ波動をどうやってつかまえるのでしょうか？最近の携帯電話はアンテナを内蔵しているものが多いので、目に入りにくくなりましたが、それでも屋外で、見上げれば、家やマンションにテレビアンテナや衛星放送用のパラボラアンテナが目にに入ってくることを皆さんもご存知のはずです。そう、電波をとらえるためには、アンテナが必要なのです。宇宙で電波を測定するときもアンテナが必要です。もちろん、宇宙に行くには、ロケットが必要で、更に、アンテナはロケットによって運ばれる人工衛星に装備されることになります。

図3を見てください。これは、私が大学に就職して最初に携わった科学衛星で「ジオテイル（日本語になおすと、「地球のしっぽ」という意味です）」という名前がついています。日本でつくった衛星

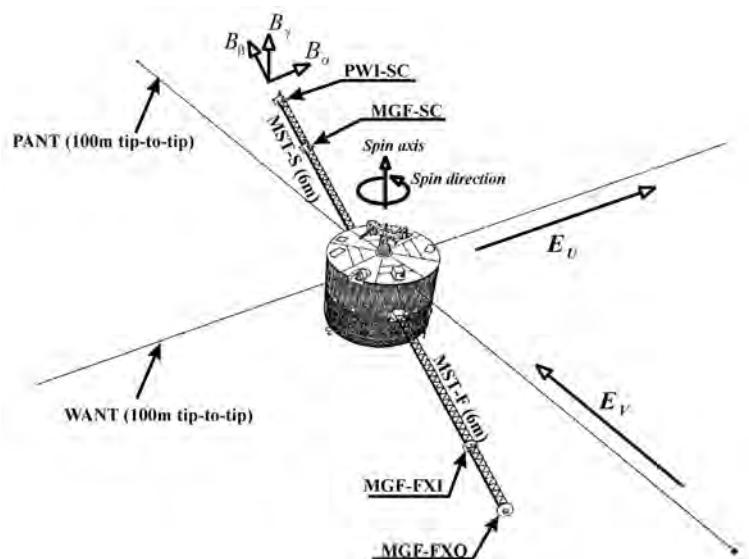


図3：ジオテイル衛星（1992年）

ですが、日米共同プロジェクトの中で推進され、打ち上げは、1992 年にフロリダのケネディ宇宙センターから米国のロケット Delta-II で行われました。

電波は、電気の振動としての「電界振動」と磁気の振動としての「磁界振動」の組み合わせからなっています(これは、中性大気中でも宇宙プラズマ中でも同じですが、更に宇宙プラズマ中では、「電界振動」だけで、磁界振動と組み合わさらない電波もあります)。このうち電界振動は、長いワイヤーからなるアンテナで測ります。図 3 で、WANT、PANT と書かれているものです。長さは端から端まで 100 m もあります。長いアンテナですね。こんな長いアンテナは打ち上げ前に伸ばしておけないので、宇宙に打ち上げられてから、ゆっくりと伸ばすのです。なんで、こんなに長いのか、ということですが、長ければ長いほどよい、というわけではありません。長くすることで感度が下がってしまうこともあります。測りたい対象の電波の様子と人工衛星からどのくらいの長さのアンテナを伸ばしても衛星が壊れないか、という条件などから決められたものです。磁気振動の方は、サーチコイルというアンテナで測ります。PWI-SC という名前の矢印のとおり、衛星本体から 6 m 伸ばした腕の先端につけられています。サーチコイルというのは、昔、ラジオ作りをされたことのある人なら見たことがあると思いますが、いわゆる「バーアンテナ」と呼ばれていたのと同じ原理です。コイルがいっぱい巻いてあるもので、その中を横切る磁界振動によって、電気がコイルに発生してそれを使って磁界振動を測るのです。なぜ、6 m もある腕の先端にこのアンテナがつけられているのか、というと、衛星本体も電気で動いていてそこから磁気振動の電波が出てしまってから、その電波の影響を受けないように、衛星から少し離してあるのです。

3.3 とらえた電波をどうする？

アンテナで捉えられた電波は、電界振動も磁界振動も、電気信号に変換されます。テレビやラジオは、変換された電気信号から必要なレベルに大きくし、更に、そこから情報を抜き出し、人間の目に見えるようにしたり、耳に聞こえるようにしたりして、液晶画面やスピーカーから出力されるわけです。これはデジタルテレビでもデジタルラジオでも同じです。

プラズマ波動をアンテナでとらえて変換された電気信号は、非常に弱いので大きくしてやるなどの必要があります。このような役割をもつのが、「プラズマ波動受信器」です。プラズマ波動受信器は、ラジオによく似た機能をもっている電子回路の固まりになります。問題はプラズマ波動の場合は、人間が制御して出した電波と異なり、「必要な情報」、「不必要な情報」の区別を事前に知ることができない、ということです。例えば、ラジオで NHK のニュースが聞きたかったら、最寄りの NHK 第一放送の電波にのってくる情報だけを取り出してスピーカーに出してやればよいです。しかし、プラズマ波動というのは、自然がもつ原理にのっとって「自然に」発生しているものです。どんな情報がそこ

にあるのか事前に人間は予測することはできても正確に知ることはできません。そのため、アンテナで計測され電気信号に変換された信号は基本的にすべて計測することになります。人工衛星の場合、計測した結果は、当然ながら液晶画面やスピーカーに出力するわけではなく、地球にデータとして送り返す必要があります。そのために、計測結果をデジタル化して、再び、「電波」に、しかし、今度は、人間が制御している光速で伝わる電波に「情報」として載せて、地球に送り返されます。

3.4 具体的なプラズマ波動の観測例

それでは、具体的に宇宙で測ったプラズ

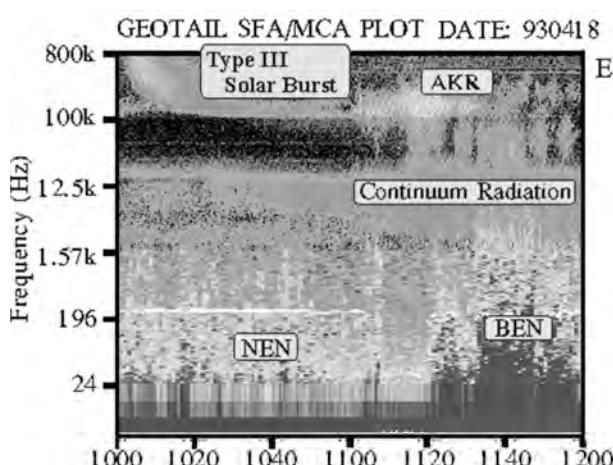


図 4 : 代表的なプラズマ波動観測結果

マ波動の例をみてみましょう。図4は、上述のジオテイル衛星が地球の周辺で観測したプラズマ波動のスペクトルの時間変化です。縦軸が周波数、横軸が時間です。周波数というのは、1秒間に何回そのプラズマ波動が振動しているのか、ということを示します。例えば、100 kHz というのは、1秒間に10万回振動しているプラズマ波動です。ちなみに、NHK 第一放送の大坂は、666 kHz ですから、1秒間に66万6千回振動している電波で、図4だと一番上のメモリとその次ぎのメモリの間よりやや上あたりの周波数です。横軸の時間は例えば、1020 というのは、10時20分という意味です。この時間はユニバーサルタイムというもので、日本時間 - 9時間です。スペクトルというのは、「ある周波数でのその電波の強度」と考えてください。なので、図4では、「ある時間(横軸)でのある周波数(縦軸)でのプラズマ波動の強度(色)」を表しているものです。

図4のような図、わかりにくくですよね。私たちは衛星で観測したプラズマ波動の様子を眺めるのに、このような図からスタートするのですが、私も慣れるまで何が起こっている図なのか、さっぱりわかりませんでした。

図の中に私たちの分野で呼ばれているプラズマ波動の「名前」もいつしょに書かれています。この中でわかりやすいのは、Type III Solar Burst と AKR です。Type III Solar Burst というのは、太陽の大気中で発生したプラズマ波動が地球まで飛んできているものです。太陽表面からプラズマを構成している電子が速度を増して飛び出していく時に発生する波動と言われています。一方、AKR は Auroral Kilometric Radiation と呼ばれるプラズマ波動で、これは地球の北極、南極上空で発生しているもので、オーロラの発生と密接な関係があります。

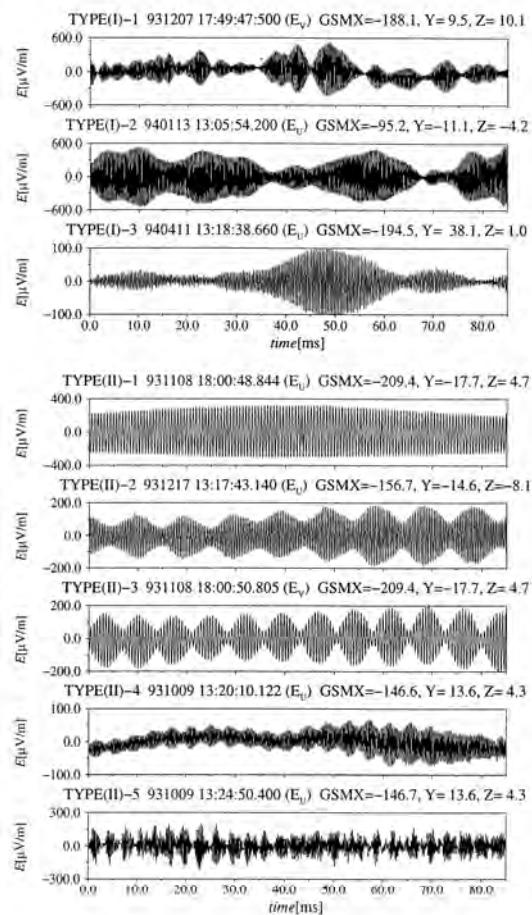


図5：プラズマ波動の波形(例)。

図5はジオテイル衛星で観測されたプラズマ波動の「波形」です。グラフ毎に連続した波動の波形で、いくつかの例を縦に並べたのですが、いずれも地球の周辺で発生している加速された電子によって発生するプラズマ波動です。縦軸が電波の強さ、横軸が時間で一番左から一番右まで 85 msec (1 msec は 1 秒の 1,000 分の 1) です。

私は、初めてこれらの波形を JAXA の衛星管制室で見たとき、「自然はなんてきれいな波形を産み出しているんだろう」と思いました。宇宙という英語には、space という単語の他に、cosmos という単語があります。Cosmos は宇宙ですが、同時に、「秩序正しくととのっている」という意味をもっています。まさにこの波形をみて cosmos という言葉を思い出したのでした。

4. 宇宙で電波を測るなんて?☆

4.1 「なんて」は、「なんで」

宇宙空間観測において、プラズマ波動の観測は日本の宇宙開発において比較的早い時期から取り組まれてきました。そして実は、そのスタートについては、京都大学工学部と生存圏研究所の源となっている電離層研究施設が大きな貢献を果たしてきたそうです（私が生まれる前の

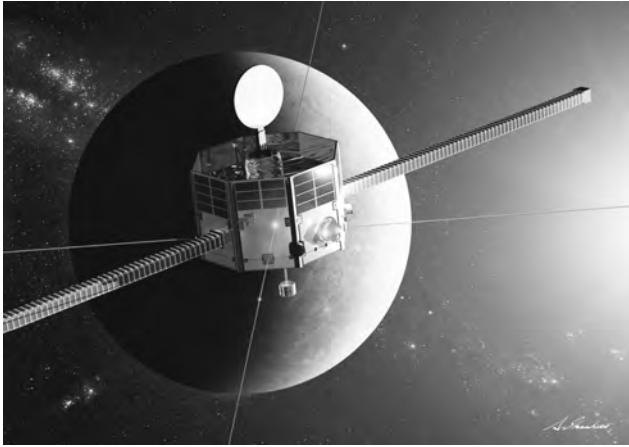


図 6：日欧共同水星磁気圏探査衛星 BepiColombo Mercury Magnetospheric Orbiter (2014 年打ち上げ予定。
(イラスト：池下章裕氏、提供：JAXA))

利用・生活することを前提として、「宇宙空間の理解」から、「宇宙空間の環境の理解」という言い方が適した言い方になっていると思います。

宇宙空間を満たしたプラズマは、衝突ではなくてプラズマ中に存在する電波であるプラズマ波動によってエネルギーを交換するということを書きました。すごいスピードで集団となって一方向に動く電子などがあるとそこからプラズマ波動が出て、電子のエネルギーの一部をプラズマ波動にわたします。そのような場合に限らず、宇宙プラズマの動きがちょっと乱されたりするだけでもプラズマ波動は放射されます。スペースシャトルが宇宙空間を飛行すればその周りで、プラズマ波動が発生していることがわかっています。きっと国際宇宙ステーションでも同様だと考えられます。人間が宇宙空間で活動をするため、その宇宙空間を乱しているということです。それが、今、直接、宇宙空間やそこで生活をしている人に何か問題を起こすということではありませんが、自然の宇宙空間の様子を知りたいと同時に、人間が乱している様子も知りたい、知っておかなければ、という気持ちがあります。これは宇宙における環境アセスメントということになるかもしれません。

4.2 水星へ

一方で、私たちは、地球周辺から離れて、もっと遠くを探査できるようになってきました。惑星探査です。惑星探査では、私たちが地球周辺で探ってきた宇宙とは、また違う未知の宇宙空間環境が広がっていると考えられます。私たちは、今、2014 年に打ち上げられる科学衛星 BepiColombo Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) (図 6) に搭載するプラズマ波動観測器の開発を行っています。この衛星は日本と欧州の共同プロジェクトで、欧州側がつくる Mercury Planetary Orbiter (MPO) と日本側がつくる MMO をセットで打ち上げて水星に投入するものです。現在、観測装置の試作段階を終え、衛星に実際に搭載する本物 (フライトモデル) の観測装置の製造が始まっているところです。このプラズマ波動観測装置そのものも、日欧共同で開発しています。それぞれ各国のチーム毎にばらばらに開発して、2011 年の 2 月に私たちの生存圏研究所にみんな集まって、一つにまとめてちゃんと動くかどうかの試験が始まります。

実は、この BepiColombo 衛星は、水星に到着するのは 2020 年です。打ち上げが 2014 年ですから、6 年間かけて水星までたどりつくことになりますね。水星に到着してから観測データが出てくるわけですから、観測データを実際に解析するのは、今の中学生や高校生の皆さん、ということになります。

太陽系惑星探査で、冥王星が惑星から抜けたことにより、人間の探査機による訪問を受けていない

ことです)。

もともと宇宙で電波を観測しようとする研究者達のエネルギーは、「宇宙空間で発生している物理現象を観測して、理解したい。宇宙空間の様子を知りたい」という研究者の知的探求心から出ていたと思います。それは、今の私たちも変わりがあるわけではありません。しかし、宇宙開発がスタートした 1960 年代に比べれば、宇宙は私たちにとってずっと身近な存在になりました。人間が造った構造物が宇宙空間を飛翔し、人間も長期にわたって宇宙空間で生活できるようになってきました。このような中で、地球周辺の宇宙空間の理解というテーマに、更に、いくつかのテーマが加わってきているように思います。人間が

惑星はなくなりました。何事も「一等最初の」ということには、それなりにわくわくするものがあります。惑星ミッションでも「人類で初めて、その惑星の様子を観測する」というのはかなり魅力的ですね。プラズマ波動に関しては、金星から海王星まで、この「一等最初のプラズマ波動観測」というのは、米国に先んじられてしまいました。ただ、この水星については、もし BepiColombo がうまくいけば、人類最初の水星のプラズマ波動観測を私たちが行うことになります。

5. おわりに

私自身は、宇宙観測や宇宙開発がやりたくて大学に入りました。私は、幼稚園の時にアポロの月着陸をテレビで目の当たりにし、中学でヴォイジャーの惑星探査、高校でスペースシャトルの打ち上げ成功と、その都度かなり刺激を受けてきました。これらは米国のことばかりで残念ですが、今年は日本も「はやぶさ」で盛り上りました。きっと、宇宙科学や宇宙開発を目指す若い人達が増えてくるのではないかと期待しています。

満身創痍で帰還した「はやぶさ」が大きな感動をうみました。宇宙ミッションにおいては、その成功・不成功の裏には、多かれ少なかれ、なんらかのドラマがあります。非常に複雑なシステムが動く探査機を、自分の手で直接触れることのできなくなる宇宙空間に投入し機能させる上で、長期にわたる研究者や技術者の多大な努力にもかかわらず、なんらかのトラブルが発生してしまうことはしばしばです。そして、そのトラブルが発生する度に、技術者や研究者達は、その原因を探り、その対処方法を考え、工夫します。その方法がうまくいってミッションが成功することもあれば、残念ながら最後までうまくいかない場合もあります。

これまで宇宙開発を牽引してきた先進諸国における国家財政状況の逼迫は、日本における宇宙開発・研究の進め方にも避けては通れない曲がり角を用意しています。多大な予算を必要とするビッグサイエンスと呼ばれる分野の一つである、宇宙科学、そして宇宙開発は、今後、その進み方が遅くなることが懸念されます。ロケットや衛星の打ち上げ機会が減ると、ミッションを支える人材の育成もままならなくなり、その分野そのものが閉塞した状態に陥ってしまいます。

宇宙プラズマ波動の研究は、それがそのまま地上での人間の生活に直結していく成果を生むことはなかなか難しい分野です。自分達の研究の目的をあたかも人間生活に直結するかのような目的に、すり替えて話しをするような安易な妥協をするつもりはありませんが、より多くの皆さんに、私たちの研究内容や未知の領域や現象を探るおもしろさ、宇宙ミッションに関わる多くの人達の努力を伝えていく義務は最近、特に感じているところです(私も年をとったということですね)。それはさておき、衛星や観測器の開発は非常に多くの人達による共同・協調作業なので、(私の知る限り)気のいい人達が多いですよ。

バイオマスが拓く持続的社會*

渡辺 隆司**

1. はじめに

地球の総人口は爆発的に増大しており 2050 年には 90 億を超えると推定されている。爆発的な人口増加に加えて、発展途上国の生活スタイルがエネルギー多消費型に移行すると、化石資源の燃焼による二酸化炭素の排出量が加速度的に増大し、その結果、我々をとりまく地球生存圏の炭素平衡は破綻すると予想されている。一方で、容易に採掘できる化石資源の枯渇が社会経済活動に深刻な打撃を与えることも指摘されている。我々が直面するこうした資源・環境問題を解決するためには、社会の基盤を石油などの化石資源の大量消費から自然エネルギーの直接利用や再生可能なバイオマスの循環利用に転換することが何よりも必要である。バイオマスは、二酸化炭素の固定化により生産されるため、その生産と消費のバランスを保った形での変換利用は、化石資源の急速な消費に伴う資源枯渇問題と地球温暖化問題解決の切り札となると期待されている。バイオマスは有機質資源であり、太陽光や風力などと異なりエネルギー以外に様々な化学品に変換できる。このため、石油化学にかわってバイオマスから化学品を体系的に生産する産業を作り出すこの重要性は極めて高い。バイオマスから化学品、燃料、エネルギーを体系的に生産することを「バイオリファイナリー」とよび、近年研究開発が活発に行われている。

地球上のバイオマスの量はホイッタカーとライケンスによると 1.8 兆トンにおよぶ。そのうち、90% 以上が森林バイオマスであると推定されている。また、陸地のバイオマスの年間の生産量は、ホイッタカーとライケンスによると 1,173 億トンに達する。膨大な炭素固定可能をもつ森林からエネルギー・機能性物質を生産できれば、得られた経済的価値を植林、間伐など森林の育成に還元することが可能となる。森林を放置せず循環利用することにより、炭素固定化速度が上昇する。このように、環境に対する貢献が大きく、食料との競合もない木質系バイオマスを森林の育成とリンクしたかたちで、エネルギーや化学品へ変換することは人類が持続的活動を行うために必須な課題である¹⁾。

2. バイオマス産業の創成

バイオマスを活用するために革新的なバイオマス変換技術を開発することは、(1) 地球温暖化問題と資源枯渇問題解決の国際的イニシアティブをとること、(2) 石油産業からバイオマス産業に移行した後の国際社会において産業競争力をもつこと、(3) 農山村を中心とした地域経済を活性化すること、(4) エネルギー安全保障を得ること、(5) 太陽エネルギーに依存する循環型社会を構築すること、等につながる。

石油リファイナリーでは、産油国、原油を運搬する海運会社、石油コンビナートをもつ大企業や臨海工業地帯に投資が集中する。これに対し、廃棄物系バイオマスを別とすると、バイオマスは一般に都市部ではなく農村部に広く分散して存在することから、農業や林業とリンクした小規模なバイオマス変換工場が農村部に建設されることになる。このため、バイオリファイナリーでは、投資が地方に

*2011 年 12 月 24 日作成 本稿は第 7 回生存圏研究所公開講演会（2010 年 10 月 24 日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野
E-mail: twatanab@rish.kyoto-u.ac.jp

分散し、地方の経済と雇用を活性化するメリットを生む。離島など中央からの電力やガスの供給が難しい地域においては、バイオマスからの地産地消によって電力や熱エネルギーを供給することができる。

バイオリファイナリーは、エネルギー安全保障に貢献する。原油産出国の多くは中東にあり、政情が不安定な国も多い。これらの国が非友好国である場合には、安定的に原油を輸入するために、外交や軍事力によって一定の影響力を保持することが必要となる。日本の一次エネルギーの化石資源への依存度は 84.6% (2008 年)、エネルギー自給率 7.1% (2008 年；ただし、原子力を含めると 17.5%) であり、エネルギー安全保障は日本にとっても大きな問題である。また、インドネシアでは、原油のストックが 15 年から 20 年後には不足すると予測されており、発展途上国においても、新エネルギーの創出はエネルギー安全保障にかかわる大きな問題である。このように、バイオマスは、軍事や世界経済のバランスに大きな変化をもたらす。

バイオリファイナリーの導入は、多段階のフェーズを経て進行すると予想される（図 1）。第一フェーズは、既存の農業体系で発生するバイオマスをバイオ燃料用原料として転用することから始まった。トウモコロシやサトウキビの巨大なプランテーションをもつ米国とブラジルが、バイオエタノール生産の 90% 以上を占め、バイオ燃料産業をリードしてきた。こうしたバイオ燃料ブームは、食糧用農地の転用や投機に起因する食糧価格の高騰、天然林の破壊など、様々な負の影響も及ぼした。このため、バイオリファイナリーの第二フェーズとして、食糧と直接競合しない木や草からバイオ燃料を生産する技術開発に注目がシフトしている。木や草の利用においても、持続的なバイオマスの生産と環境保全、均衡ある富の分配のための、法制度の整備は必須である。バイオリファイナリーの第三フェーズは、バイオマスの構造上の特徴を活かした新しい機能性材料の生産、バイオマスからの石油代替え化学品の生産である。付加価値の高いバイオ化学品の生産は、生産に関わる全体のコスト効率を向上させるとともに、個別の技術に立脚した多様性を生み出す。こうした動きには、バイオマスを原料とする様々な産業の統合が同調する。従来、紙パルプと建材の生産工場に化学品や食品、機能性材料、エネルギー供給の工場が合体し、コンビナート化するであろう。実際、スウェーデンやオーストリアなどには、こうしたバイオマスコンビナートが誕生している。一方、石油化学とバイオマスの融合もすでに始まっている。石油化学品製造プロセスの一部にバイオマス由来の化学品が使えば、石油化学で培った技術や設備がそのまま活かせる。実際、基幹石油化学品であるエチレン、プロピレンをバイオエタノール、バイオプロパン、バイオブタノールから作る研究開発が世界各国で行われている。すでに、ブラジルの大手石油会社である Braskem 社はバイオエタノールからポリエチレンの生産を開始するとともに、ポリプロピレン生産の研究開発を進めている。また、Dow Chemical 社と三井物産が出資するブラジルの Santa Vitória Açúcar e Álcool Ltda (SVAA) 社もポリエチレンの生産を行う計画を発表している。さらに、ベルギーの最大手化学会社 Solvay 社は、バイオエタノールから製造したエチレンを原料とし、ポリ塩化ビニル (PVC) を生産する計画である。

日本の経済産業省と
Vitória Açúcar e
Álcool Ltda (SVAA)
社もポリエチレンの
生産を行う計画を発
表している。さらに、
ベルギーの最大手化
学会社 Solvay 社は、
バイオエタノールか
ら製造したエチレン
を原料とし、ポリ塩
化ビニル (PVC) を
生産する計画である。

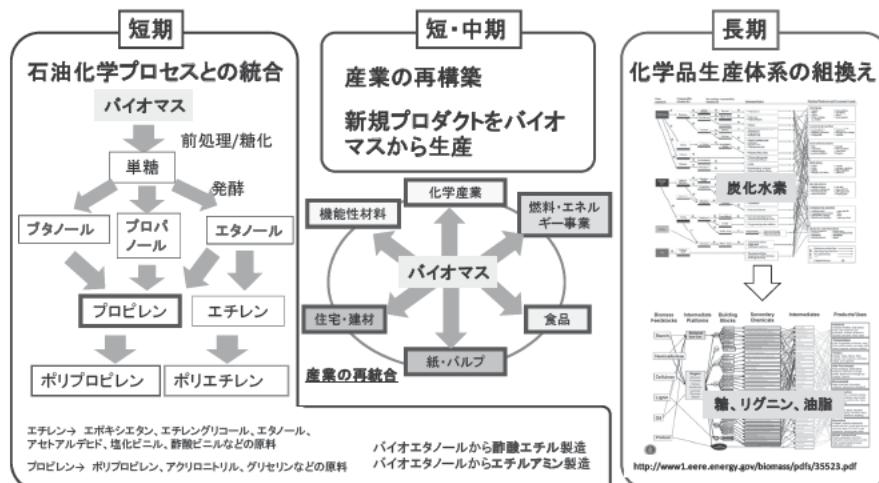


図 1：石油リファイナリーからバイオリファイナリーへの展開

農林水産省が中心になって設立したバイオ燃料技術革新協議会でも、バイオエタノールをプロピレンへ変換する技術開発のロードマップが示されており、現在 NEDO のプロジェクトでバイオプロピレン製造の研究開発を実施中である。

バイオリファイナリーの第四フェーズは、化学品の製造体系を、石油原料からバイオマス原料に根本的に変えていく化学産業の変革である。これは、前述の通り、プラットフォーム化合物の生産と変換の技術開発が鍵となる。バイオ燃料は、一定の品質をクリアすればどこの国で製造したバイオエタノールも区別がつかない。そうなると、遠隔地など地産地消のエネルギー供給を別とすれば、資本や技術開発でリードする国が国際的な優位性をもつことが予想される。こうした理由から、バイオマスからエネルギー、化学品を製造する基本特許を取得することは、今世紀後半以降の世界経済の主導権を握ることに直結するであろう。米国では、こうした認識が石油ショック以前から浸透しており、多面的なバイオマス変換法の開発が継続的に行われている。例えば、遺伝子組換え技術を用いて大腸菌にアルコール発酵能を付与する基本特許は、すでに 1991 年に米国で登録されており、1990 年代前半のアルコール発酵菌の分子育種に関する広範な国際特許が、日本や欧州におけるバイオマスからのアルコール生産の戦略に大きく影響したことは広く知られている。米国のバイオマス政策の大きな特徴は、1999 年 8 月のクリントン大統領による「バイオマス利用の声明」、2002 年 10 月のブッシュ大統領による「米国におけるバイオエネルギーとバイオ製品のビジョン」に見られるように、経済戦略とエネルギー安全保障の面から、バイオマス変換が“国益”と一致することが明確に謳われている点である。こうした国家戦略は、米国の民間企業にも浸透しており、一部の化学系有力企業では、石油化学品からバイオマス由来の化学品への移行が進んでいる。例えば、DuPont 社では、2004 年に合成ポリエステルの原料である 1,3-プロパンジオールの生産を石油からの化学合成からトウモロコシデンプンの発酵プロセスに切り替えた。バイオマス産業へ転換する動きは今後益々加速するであろう。

米国のバイオマス政策に対し、わが国では、21 世紀初頭まで、政令（新エネルギー利用などの促進に関する特別措置法施行令、第 1 条）で規定される新エネルギーの項目に「バイオマス」が含まれていないという低い認識であったが、2002 年 1 月 25 日に政令で定める新エネルギーのひとつとして「バイオマス」が新たに盛り込まれ、以降バイオマス利用への関心が高まってきた。平成 14 年 12 月には、「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定され、バイオマス利用を促進する様々な補助事業が行なわれてきた。以降、バイオ燃料を中心とした研究開発が行われてきたが、近年では、バイオマスを化学品を含めて変換するバイオリファイナリーに注目が集まっている。

3. アジアにおけるバイオマスの活用

バイオリファイナリーは、熱帯雨林をもつ東南アジア地域に有利な産業であり、産油国が原油産出によって大きな富を得てきたように、バイオマスの生産と高度利用によってとくに東南アジア地域に新たな産業を興し、国際間および国内の地域格差の是正につなげるべきである。東南アジア地域は、植物の炭素固定量が大きいのみでなく、豊富な微生物資源をもつことから、生物資源をベースとした産業の地盤として最適である。こうした新しい産業を東南アジア地域に育成して、均衡ある発展を達成するためには、先端的なバイオマス利用の技術開発を行っている先進国と東南アジア諸国との国際協調が必須である。この国際協調は、技術供与や投資のみならず、バイオマスとバイオ製品の流通、二酸化炭素の国家間取引、環境や地域社会への影響評価、人材育成、およびそれらを統制する法制度の整備を含めるべきである。東南アジア地域を資源の供給基地としてのみ捉えるのでなく、アジアのパートナーとして、また宇宙船地球号に乗る運命共同体として、環境保全や地域社会への影響を評価しながら、技術や制度面を含めて支援していくことが必要である。

4. キノコに学ぶ木質バイオマスの生物的変換

樹木や多くの草本植物の細胞壁では、セルロースなどの多糖類がリグニンにより被覆されているため、細胞壁多糖をセルラーゼなどの酵素で加水分解するためには、リグニンによって固められた細胞壁をほぐして細胞壁多糖を露出させる前処理が必要となる。リグニンを剥がす前処理と酵素による細胞壁多糖の分解のための技術開発が、木や草から効率よくバイオエタノールを生産する大きな鍵となる。リグニンの分解は、バイオエタノールのみでなく、糖やリグニンそのものから様々な化学品を作る鍵ともなる。リグニンとは、ベンゼン環に炭素が3つつながったユニットが多数手をつないでできた

不規則な高分子である。樹種によって異なるが、重量比では、針葉樹木材のおよそ3割、広葉樹では2割ほどがリグニンで占められている。このリグニンによる被覆を壊すために、これまで、様々な物理的、生物的、および化学的前処理法が検討してきた。

一方自然界に目を移すならば、リグニンを室温で分解するキノコ（白色腐朽菌）の利用が注目される。ほとんどの白色腐朽菌は、リグニンばかりではなくセルロースも同時に分解する。リグニンも多糖も失われるこのタイプの菌処理は、バイオマス変換の前処理としては利用価値が低い。これに対し、選択的白色腐朽菌と呼ばれるキノコは、セルロースを残して、リグニンを高選択的に分解するため、バイオマス変換に有用である（図2）²⁻¹¹⁾。筆者らは、この種のキノコの木材分解機構に興味をもち、その機構解明に向けた研究を行っている。これまでに、セルロースの分解を抑える新規な代謝物を見出し、その機能解明を行った。また、選択的白色腐朽菌は、酵素から遠く離れた場所でリグニンを分解する。そこでは、低分子代謝物を介したラジカル反応が、リグニンを分解する。リグニン分解に関わるラジカル種を解析し、その反応性を明らかにするとともに¹⁰⁾、ラジカル生成を人工的に制御することで、室温、水溶液中で木材中のリグニンが分解されてセルロースが露出することを見出した。

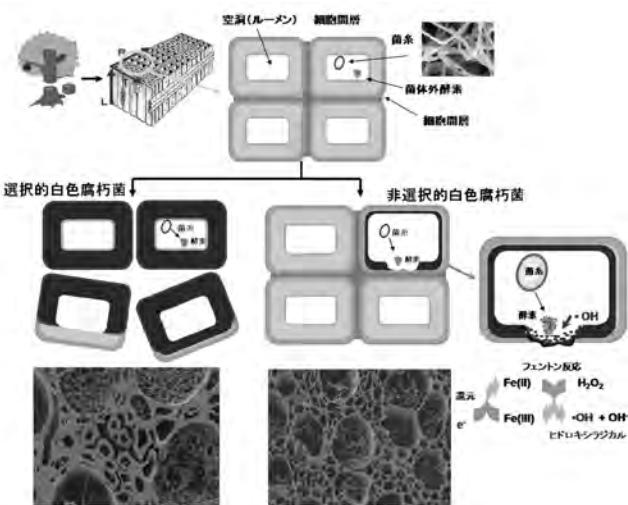


図2：リグニンを分解するキノコの異なる木材腐朽様式

5. マイクロ波を利用した木質バイオマスの生物的変換

木材の成分を分離する方法として、マイクロ波を利用する方法がある。様々な溶媒や触媒を含む液に木材を浸して、マイクロ波を照射するとリグニンが分解してセルロースが露出する^{8, 11-15)}。筆者らは、このプロセスを利用してエタノールを製造するプロセスの共同開発に取り組み、ベンチプラントを建設した（図3）¹¹⁾。また、マイクロ波増感作用を利用して木材から紫外線吸収剤などの高付加価値物をつくる研究も同時に進めている。こうした処理では、木材細胞壁の破壊により糖鎖が露出するとともに、リグニンの構造が変化する。酵素分解の効率化や有用物質の生産のため、これらの微細構造の変化を、糖鎖に特異的に吸着するタンパク質や超高感度NMR、高分解能質量分析機などを用いて解析している¹⁶⁻¹⁷⁾。

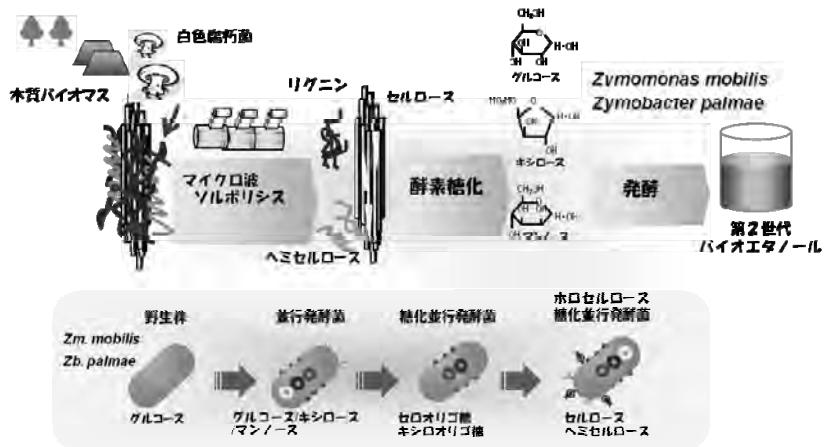


図3：キノコ、マイクロ波、高速発酵細菌を用いる木質バイオマスからのエタノールの生産プロセス¹¹⁾

6. おわりに

バイオマスにおいて森林の育成は、動植物の生態系は言うまでもなく、海洋生態系を含む地球環境全体に計り知れない恩恵を与える。例えば、沿海部の森林を伐採したために近海漁業が壊滅的なダメージを受けた例は良く知られている。また、森林を伐採したために、大規模な土石流が発生して多くの被害者を出した例は多い。バイオマスの化学資源化においても、エネルギー供給効率のみに注目した経済活動をするならば、将来大きな代償を払うことになるであろう。木質バイオマスの活用においては、森林の持続的育成、地域の生態系の維持、健全な雇用、森林文化の継承、災害や気候変動への影響など、経済性とそれ以外の要素を多面的に解析し、長期的な視点から政策を主導する枠組みが必要である。

バイオマスは、再生可能な唯一の有機物であるために、エネルギー以外への有機物質生産への貢献が大きい。一方、エネルギーへの利用では、地上や宇宙での太陽光発電やの役割も大きく、これらのベストミックスが必要である。宇宙太陽光発電は、将来の大規模エネルギー供給システムとして期待される。



図4：化石資源から太陽エネルギーを利用した社会への変革

参考文献

- 1) 渡辺隆司, 産業構造の大転換—バイオリファイナリーの衝撃—, 地球圏・生命圏・人間圏 持続的な生存基盤を求めて, 京都大学学術出版会, 281-300, 2010.
- 2) 渡辺隆司, リグノセルロースバイオリファイナリーのための担子菌特異的リグニン分解能の解析と応用, グリーンスピリッツ, 5, 3-11, 2010.

- 3) 渡辺隆司, 白色腐朽菌によるリグニン分解, バイオマスハンドブック (第二版), オーム社, 189–196, 2010.
- 4) Nishimura, H., Tsuda, S., Shimizu, H., Ohashi, Y., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., *De novo* synthesis of (*Z*)- and (*E*)-7-hexadecenylitaconic acids by a selective lignin-degrading fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Phytochemistry*, **69**, 2593–2602, 2008.
- 5) Nishimura, H., Murayama, K., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Diverse rare lipid-related metabolites including ω -7 and ω -9 alkenylitaconic acids (ceriporic acids) secreted by a selective white rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Chem. Phys. Lipids*, **165**, 97–104, 2012.
- 6) Nishimura, H., Setogawa, Y., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Epoxy ceriporic acid produced by selective lignin-degrading fungus *Ceriporiopsis subvermispora*, *Chem. Phys. Lipids*, **164**, 707–712, 2011.
- 7) Ohashi, Y., Kan Y., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Redox silencing of the Fenton reaction system by an alkylitaconic acid, ceriporic acid B produced by a selective lignin-degrading fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*. *Org. Biomol. Chem.*, **5**, 840–847, 2007.
- 8) Sasaki, C., Takada, R., Watanabe, T., Honda, Y., Karita, S., Nakamura, Y. and Watanabe, T., Surface carbohydrate analysis and bioethanol production of sugarcane bagasse pretreated with the white rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispora* and microwave hydrothermolysis, *Biores. Technol.*, **102**, 9942–9946, 2011.
- 9) Yamagishi, K., Kimura, T. and Watanabe, T., Treatment of rice straw with selected *Cyathus stercoreus* strains to improve enzymatic saccharification, *Biores. Technol.*, **102**, 6937–6943, 2011.
- 10) Ohashi, Y., Uno, Y., Amirta, R., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Alkoxyl and carbon-centered radicals are primary agents to degrade non-phenolic lignin substructure model compounds, *Org. Biomol. Chem.*, **9**, 2481–2491, 2011.
- 11) 渡辺隆司, 築瀬英司, 担子菌・マイクロ波照射前処理と高速発酵細菌を用いる高効率バイオエタノール生産システム, 次世代バイオエタノール燃料製造の最新技術と事業化, フロンティア出版, 287–294, 2010.
- 12) Mitani, T., Oyadomari, M., Suzuki, H., Yano, K., Shinohara, N., Tsumiya, T., Sego, H. and Watanabe, T., A Feasibility Study on a Continuous-flow-type Microwave Pretreatment System for Bioethanol Production from Woody Biomass, *J. Japan Inst. Energy*, **90**, 881–885, 2011.
- 13) Liu, J., Takada, R., Karita, S., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Microwave-assisted pretreatment of recalcitrant softwood in aqueous glycerol, *Bioresour. Technol.*, **101**, 9355–9360, 2010.
- 14) Verma, P., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Microwave-assisted pretreatment of woody biomass with ammonium molybdate activated by H_2O_2 , *Biores. Technol.*, **102**, 3941–3945, 2011.
- 15) Baba, Y., Tanabe, T., Shirai, N., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Pretreatment of Japanese cedar wood by white rot fungi and ethanolysis for bioethanol production, *Biomass Bioenergy*, **35**, 320–324, 2011.
- 16) Kawakubo, T., Karita, S., Araki, Y., Watanabe, S., Oyadomari, M., Takada, R., Tanaka, F., Abe, K., Watanabe, T., Honda, Y. and Watanabe, T., Analysis of exposed cellulose surfaces in pretreated wood biomass using carbohydrate-binding module (CBM)-cyan fluorescent protein (CFP), *Biotechnol. Bioeng.*, **105**, 499–508, 2010.
- 17) Yoshioka, K., Ando, D. and Watanabe, T., A comparative study of matrix- and nano-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry of isolated and synthetic lignin, *Phytochem. Anal.*, in press, DOI 10.1002/pca.1350, 2011.

木床義歯の樹種識別調査*

田鶴（水野）寿弥子**, 高瀬 克彦**, 杉山 淳司**

Wood identification of wooden artificial denture*

Suyako Tazuru-Mizuno **, Katsuhiko Koze ** and Junji Sugiyama **

概要

日本人は古くより樹種特性と用途における明確な体系を確立してきた。樹種調査は樹種情報を得る以外に、歴史を紐解く側面にも役立ってきている。ここでは、製作に仏師が関わったと推定されている昔の入れ歯、いわゆる木床義歯の樹種調査の一例を報告する。

1. はじめに

歯列の欠損部位を人工的に修復し、咀嚼の回復を図る方法、装置が義歯である¹⁾。現在、世界各地で、薄く丈夫なチタンなどを用いた金属義歯をはじめとして、審美性と機能性の両方を兼ね備えた様々な素材の義歯が用いられている。歯は、人間が生存するために必要な「食」という行為になくてはならないものであり、歯列の欠損を修復する技術は古くより世界各地で行われてきた。その歴史は古く、ヨーロッパをはじめとして様々な地域で紀元前より義歯が製作されてきたとされている。例えば、ヨーロッパでは、紀元前3000年頃には義歯が製作されていたと言われている。それらは主に審美的なものであり、金を用いてぐらついた歯を固定するタイプ、雄牛の歯や骨を加工したタイプ、金属を用いたブリッジタイプなどが主であったとされる。一方、日本では、木製の義歯が使用されていたことが明らかになってきた。木製の義歯、すなわち木床義歯は、中国や韓国といった他のアジアの地域においては、現在のところ認知されておらず、日本固有の文化であったと考えられている。

木床義歯の製作の始まりについては、未だ定かではないがその形状調査や文献による歴史、文化、変遷、形態といった調査が近年多く行われてきている。特に木床義歯の発生について日本歯科医史学会では、新藤恵久氏の「時代が遡るにつれて、仏教関係者使用の義歯が多くみられることなどから、木彫義歯は仏師の手なぐさみから始まったのではないかと考えられる」という説を支持している。

日本人は古くより樹種特性と用途における明確な体系を確立してきた。木質文化財のうち特に、仏像や神像をはじめとした宗教・信仰の対象物の製作には、何らかの意味・重要性をもつ樹種が選択されたと想像できる。人類の生存基盤には、物理的な発展が必要であったとともに、世界共通に、超越的存在（神、仏、法、原理、道、靈など）をみとめる特定の観念の発展、つまり宗教や精神世界の充実化が不可欠であったことは言うまでもない。神と仏教の観念が混在する日本独特の宗教觀を支えたものが、「木」であった。その証拠に、仏教を信仰している国の中で、日本ほど仏像を特定の樹種で造ることにこだわった国はない。さらに世界遺産や国宝などに指定されている寺社仏閣をはじめとした宗教関連の非常に多くの木造建造物群は、日本が木の文化の国であることを象徴的に示している。で

*2011年7月14日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報分野

E-mail: mizunosuyako@rish.kyoto-u.ac.jp

あるとすれば、仏師が製作した可能性が示唆されている木床義歯には、どのような樹種が使用されているのであろうか。

木床義歯は現在、各地の歯科大学や歯科医師会、博物館などに保管・展示されていることが多い。そのほとんどは、ツゲ製と記されているものが多く、そのほとんどは目視および一部の文献に習って書かれたものも多いため、科学的調査例はほとんどない。仏師による製作であること、歴史上身分の高い人々が用いたとされることなどからも、木床義歯が珍重されたものであることは明らかであり、木の文化を誇る日本人にとって、どのような樹種を用いて製作されたのかについて明確にすることは大変重要な意味を持つ。

従来、その人文学的側面が重視されてきた木床義歯の調査に、樹種という科学的側面からの知見を付与することで、新情報の共有を目標とし、現在木床義歯の科学的な調査を開始している。本論文ではその一例について報告したい。

2. 試料と方法

愛知県歯科医師会歯の博物館館長より調査依頼のあった木床義歯3点を試料とした。試料計3点のうちNo. 1(図1)については、図1(b)の矢印部分が欠けており、微小片を調査に用いる許可が得られたことから、放射光X線マイクロトモグラフィーによる樹種識別調査を行った。残り2点No. 2(図2)およびNo. 3(図3)については、光学顕微鏡観察などの破壊を伴う観察が許されない状況であったことから、実体顕微鏡観察による樹種識別調査を行った。

一般的に木製文化財の樹種を識別するためには、光学顕微鏡観察などに必要な微細木片を採取する必要がある。しかし微細木片が小さすぎる場合には、従来の光学顕微鏡観察などによる樹種識別方法が適用できないものも多くある。近年、筆者らはこのようなサンプルの識別に、放射光X線マイクロトモグラフィーが有効であることが明らかにしてきた²⁾⁻⁵⁾。

従来、木材の樹種識別では従来、木材の3断面(木口面・板目面・柾目面)の観察が必要不可欠であり、片刃・両刃剃刀などを用いて薄片を切り出し、プレパラートにして光学顕微鏡で観察する作業が必要であった。一方、放射光X線マイクロトモグラフィー法では、微小片から薄片を切り出すことなく、非破壊的に木材組織を観察し樹種を識別することができる。一般的に、木材の樹種識別のためには、マイクロメーターオーダーの分解能が不可欠で

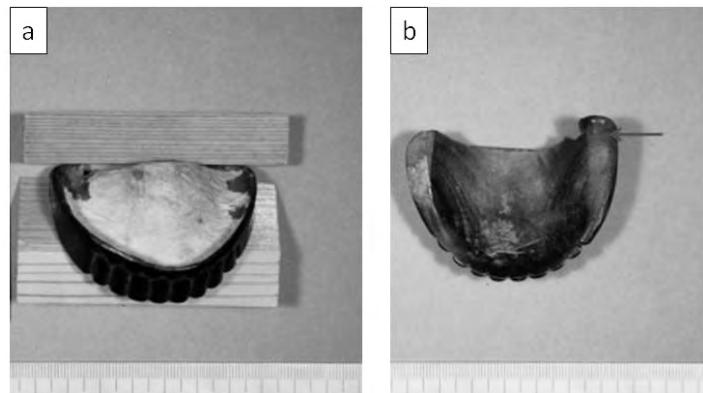


図1：No. 1 の外観(a, b)。上顎部分には白い紙(和紙か)が貼られていた(a)。(b)の矢印部分から採取できた木片を調査に使用した。

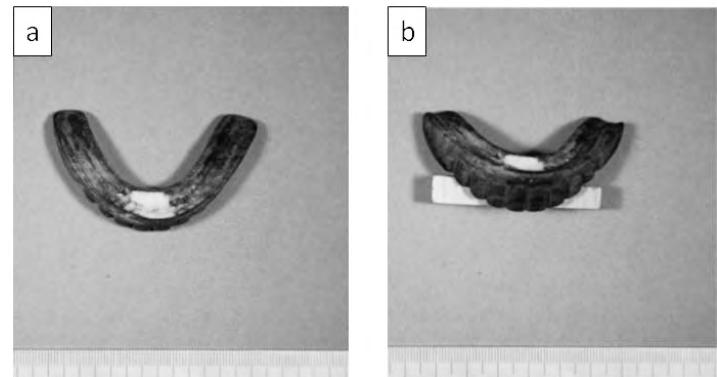


図2：No. 2 の外観(a, b)。上顎部分を欠いているタイプであり、表面は黒色を呈していた。

あり、市販の X 線 CT はそれに足る分解能をもっていない。一方で、大型放射光施設(SPring-8)に設置されたトモグラフィーのセッティング BL20XU では、極めて平行に近い X 線ビームが利用可能で、木材の解剖学的観察に必要な組織の特徴の観察に十分である 0.5 μm の分解能が得られることがわかつている。

そこで、No. 1 の微小片については兵庫県佐用町の大型放射光施設(SPring-8)の医用ビームライン BL20XUにおいて、放射光 X 線マイクロトモグラフィーによる撮影を行った(課題番号: 2009B1093, 2009B1981)。

放射光 X 線マイクロトモグラフィー

による撮影では、サンプルホルダーに直径 0.7 mm、長さ 0.5 mm 程度の木片を固定し、サンプル台を 0.1 度回転角刻みで 180 度回転させながら、1800 枚の透過像を 2000×1300 pixel (0.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) の高精細カメラを用いて撮影した。1800 枚の透過像より必要な補正を行った後、フィルター補正逆投影法により Z 方向に 1300 枚の断層像を再生した。これらの像の変換や再生は BL20XU で開発されたコマンドラインプログラムを用いた。このようにして 3D レンダリング像が構築可能であり、解剖学的特徴の観察のための任意の断面観察などには Slice や ImageJ を用いた。

また、No. 2 および No. 3 については、破壊を伴う試験が不可能であったため、実体顕微鏡を用いて表面観察をするにとどまった。

一般的に樹種識別においては、解剖学的特徴により、木材の属レベル(時には種まで)の識別が可能である。解剖学的特徴については「針葉樹材の識別」⁶⁾を参考にした。なお、プレパラート、SRX-ray μCT に供したサンプル、画像データについては京都大学生存圏研究所材鑑調査室にて保管している。

3. 結果

① No. 1

図 1(a)に示したとおり上顎に接する部分には、白い紙(和紙とみられる)が貼られていた。No. 1 の試料からは、図 1(b)の矢印で示した部分から剥落した木片を得ることができたため、放射光 X 線マイクロトモグラフィーによる樹種識別調査を行った。図 4 は、放射光 X 線マイクロトモグラフィーにより得られた像である。

図 4 のとおり、散孔材(道管径約 60 μm)で内腔にガム状物質が多く充填されており、道管及び木部纖維にらせん肥厚が認められた。また道管の穿孔板は単穿孔であった。さらに放射柔細胞は多列で 4~10 列で異性であった。以上の解剖学的特徴から、サクラ属 *Prunus* sp. と同定した。

② No. 2

図 2 に示すとおり、他の 2 体とは異なり、上顎に接する部分の無いタイプの木床義歯である。表面は黒色を呈しており、お歯黒とも考えられる。剥片や木片を切り取ることは許されなかつたため、実体顕微鏡により表面を観察した。図 5 は実体顕微鏡観察で撮影できた画像である。その結果、やや大きめの道管径、散孔材、単穿孔らしきものがみられる、放射組織は異性で 1~2 列、放射組織が層階状に並ぶ、という特徴が観察され、特に放射組織の層階状配列などの特徴から、カキ属(*Diospyros* sp.)と同定した。

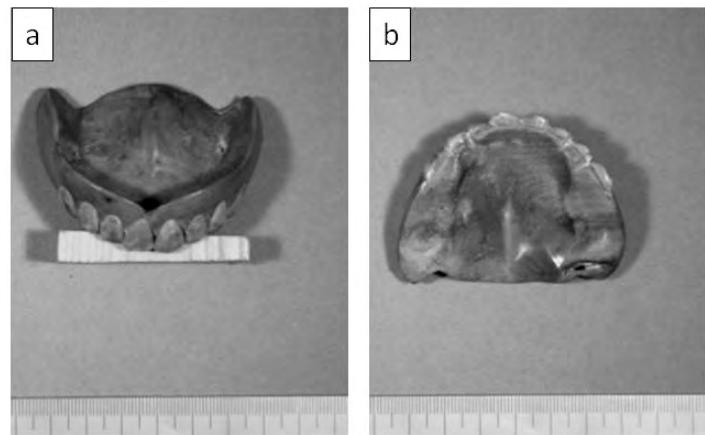
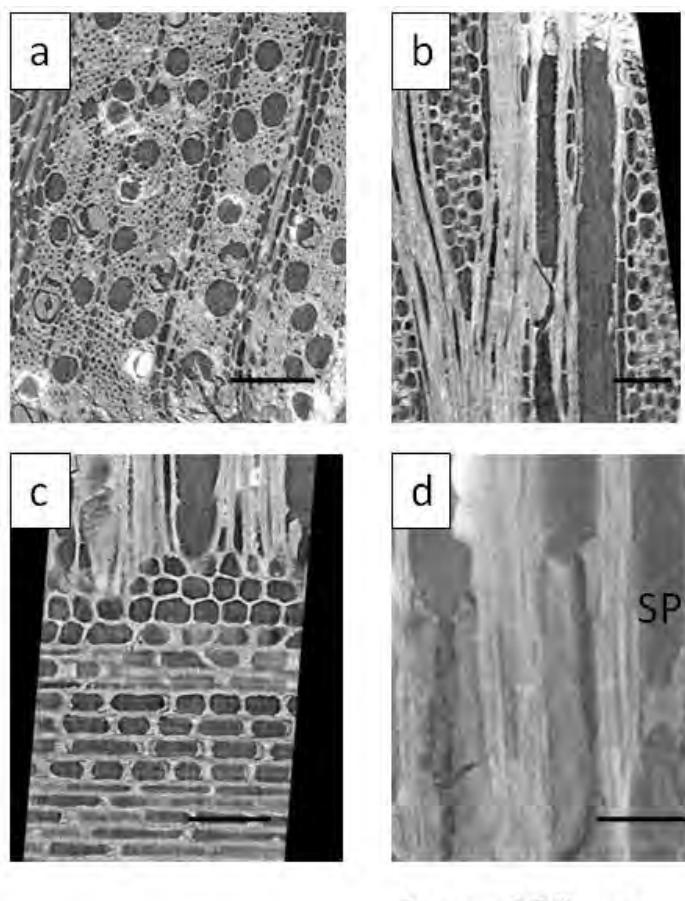


図 3 : No. 3 の外観 (a, b)。上顎に接する部分があり、歯の部分に木材以外の白い物質が使用された木床義歯である。



Bar=100 μm

図4：No. 1 の放射光 X 線マイクロトモグラフィーを用いて撮影した縦断面像から Slice を用いて横断面像（木口面）を構築したもの(a)と画像より切り出した板目(b)、柾目(c)に相当する断層像、および柾目面で観察できた単穿孔(SP)の拡大図(d)。

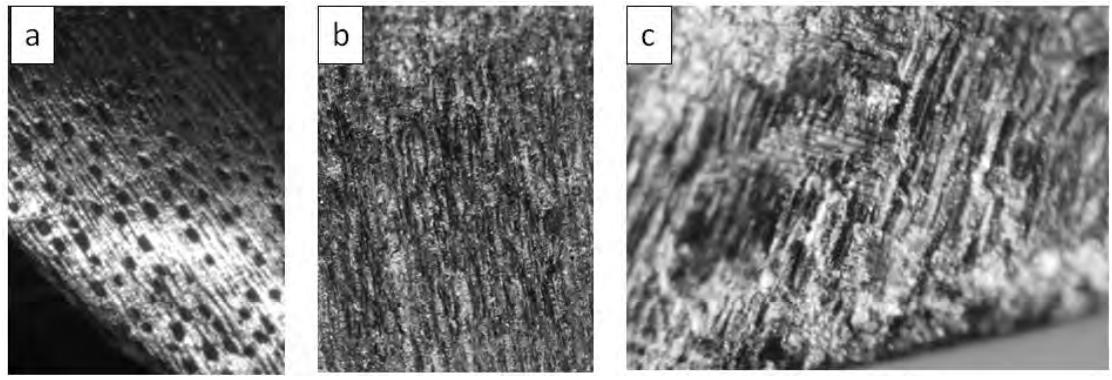


図5：No. 2 の実体顕微鏡で撮影した写真。(a): 木口面、(b): 板目面、(c): 柾目面。放射組織が層階状を呈しており(b)、異性(c)であることが確認できた。また表面は黒色を呈していた。

③ No. 3

図3(a)(b)に示すとおり、上顎に接する部分があり、他の2体と異なり歯の部分に木材以外の物質が使用されたタイプの木床義歯である。No.2同様、剥片や木片を切り取ることは許されなかつたため、実体顕微鏡により表面を観察した。図6は実体顕微鏡観察で表面を撮影できた画像である。その結果、散孔材、放射組織が異性で1-2列、階段穿孔といった解剖学的特徴が認められ、ツゲ科ツゲ属(*Buxus* sp.)の可能性が高いと考えられた。ツゲ属の解剖学的特徴に似たものとしてモチノキ科モチノキ属のイヌツゲが挙げられる。イヌツゲは、ツゲ属に比べて道管径が平均して20 μm 程度大きいほか、道管内腔にらせん肥厚がみられる特徴をもつ(表1)ほか、放射組織は、1-10列をなす⁷⁾。実体顕微鏡観察では、らせんの有無までは観察できなかつたが、道管径が非常に小さいこと、放射組織が1-2列であったことから、ツゲ属の可能性が高いと考えられたが同定にまでは至らなかつた。

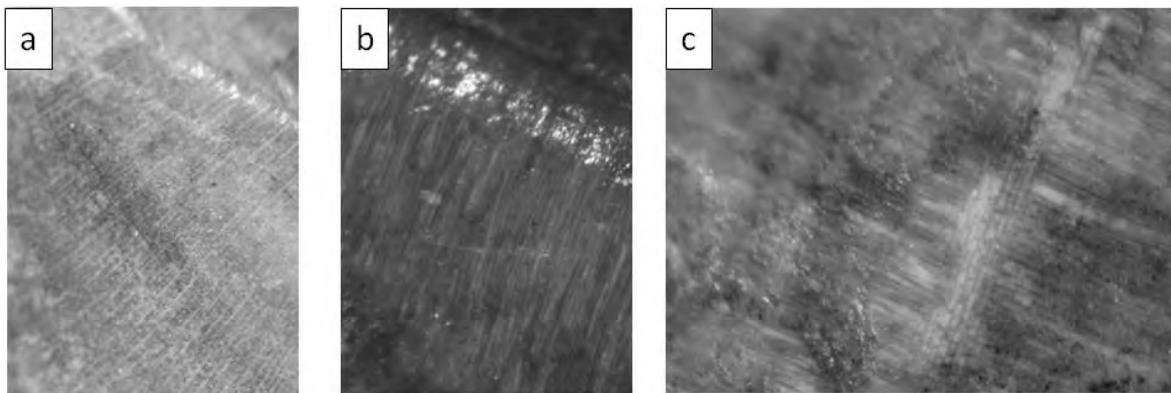


図6：No. 3 の実体顕微鏡で撮影した写真。(a)：木口面、(b)：板目面、(c)：柾目面。放射組織が異性で1-2列(b)、異性(c)であることが確認できた。

表1：樹種ごとの標準的な道管径比較

樹種	道管径
サクラ属	50-70 μm
カキノキ属	200 μm
イヌツゲ属	~60 μm
ツゲ属	30-40 μm

4. 考察

木床義歯製作の始まりについては未だ定かではないが、室町時代後期には義歯を専門的に作る者が出現したとされる。現存する最も古い木床義歯は一五三八年に亡くなった和歌山県願成寺の中岡泰通称佛姫の使用した木床義歯である。この佛姫の木床義歯は、黄楊(ツゲ)製で一木彫であるとされている¹⁾。木床義歯の製作法を記載した最も古い文献によると、「黄楊(ツゲ)にてつくるべし。其の法、歯様に臍脂を筆にて染め、その上に真粉を押し付ける。臍脂の付きたる通りに削りて、幾邊も斯の如くして削り、上下共に作り蠟石にて歯を作りて植えるなり。又その人の落ちたる歯を漆にて植えるも生歯に異る事なくして尤もよし」(一八二六年 佐藤成裕著 中陵漫録)とあり、選択的にツゲが使用されたことがわかる¹⁾。また、杉田玄白といった著名人も、木床義歯を使用していたことが彼の隨筆「耄耋独語」により明らかであり、「…すでに入歯を作り用いし事ありしに、物喰うため、物言ひのためには少し良きように覚えたけれども、下地を黄楊(ツゲ)の木にて作り、…」とあることからも、ツゲの木床義歯を用いていたことがわかる。ただし、杉田玄白は、黄楊(ツゲ)製の木床義歯になじめなかつたとされている¹⁾。このように、多くの木床義歯がツゲであると考えられてきたが、その

科学的根拠は皆無であった。

本研究では、愛知県歯科医師会歯の博物館館長より調査依頼のあった木床義歯3点について、樹種識別調査を行った結果、それぞれサクラ属、カキ属、ツゲ属（の可能性が高い）の3樹種が識別できた。現在まで日本各地で残っている木床義歯の多くは、おそらく目視などによりツゲ製であると考えられているものが多いが、今回わずか3例の調査からそれぞれ異なる樹種が同定できることから、樹種の選択的利用を明らかにするためにも、現在継続して科学的調査を進めているところである。特に、古くより樹種特性と用途における明確な体系を確立してきた日本で、仏師が製作に関連していると推定できる木床義歯は、人間の生存や健康に関わる口に使用されたものであることからも、当時の技術や木材選択の知恵がふんだんに盛り込まれていることは予想できる。

海外では、18-19世紀にアメリカで活躍した歯科医Greenwood親子が、継続歯の合釘に木製合釘を使用していたことが判明している¹⁾。Greenwoodがイギリス人紳士の継続歯を治療した際に、ナシかカエデの丈夫な木材で作成された合釘が使用されていたのを見て、従来使用していた金属合釘の代わりに北米のサワグルミを選択したとしている¹⁾。現在、木床義歯そのものについては、日本独自の文化であると考えられているが、今後調査を進めるにあたり、日本のみならず、海外の義歯に使用された合釘をはじめとした部品の樹種についても調査できればと考えている。

文化財を科学的に調査することは、伝統技術に秘められた歴史、謎を解く鍵となりうる。いわゆる伝統文化を支えるための職人が少なくなっている現在、技術の伝承・技術の可視化という意味からも重要な作業であると考えられる。また、文化財を科学することは、大型科学装置の社会貢献の事例としても意義があると思われる。今後、日本各地に点在する木床義歯について包括的に調査を進め、京都大学材鑑調査室の樹種データベースの拡充、および学際領域への貢献を進めたい。

5. 謝辞

本稿をなすにあたり、調査および樹種同定結果の公表にご理解をいただきました愛知県歯科医師会歯の博物館牛田正行様、住友金属テクノロジー株式会社渡邊緩子様に心よりお礼を申し上げます。なお本研究は、高輝度光科学研究センターの課題研究 課題番号：2009B1093 ならびに 2009B1981 によって、ビームラインBL20XUにおいて得られた成果に基づき纏めたものです。ここに銘記し謝意を表します。放射光実験に際しては(財)高輝度光科学研究センターBL20XU担当の鈴木芳生博士、八木直人博士、竹内晃久博士、上杉健太朗博士に多大な協力をいたしました。この場をお借りして心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 長谷川、「江戸の入れ歯師たち - 木床義歯の物語 -」, 一世出版株式会社, 1-196, 2010.
- 2) Mizuno, S., Torizu, R., and Sugiyama, J., Wood identification of wooden mask using a synchrotron X-ray micro-tomography, *J Archaeol Sci*, **37**, 2842 - 2845, 2010.
- 3) 水野, 高瀬, 杉山, シンクロトロン放射光X線トモグラフィー (SRX-ray μ CT) を用いた木質文化財の樹種識別, 考古学と自然科学, **63**, 1-11, 2011.
- 4) 水野, 杉山, 豊国神社茶室「豊秀舎」における樹種識別調査, 茶の湯文化学, **18**, 1-9, 2011.
- 5) Mizuno, S., Messages from the Asian mask unveiled by SPring-8 experiment, The meeting of Korean Society of Wood Science and Technology, Korea, March 11-12th, 173-174, 2010.
- 6) 伊東, 藤井, 佐野, 安部, 内海, 「針葉樹材の識別」IAWAによる光学顕微鏡的特徴リスト, 海青社, 1-70, 2006.
- 7) 林, 日本産木材顕微鏡写真集, 京都大学木質研究所, 1-147, 1991.

アカシアマンギウム樹皮からの接着剤および成型物の製造*

小川 莊介****, 矢野 浩之**

Utilization of *Acacia mangium* bark for adhesives and molding

materials*

Sousuke Ogawa**** and Hiroyuki Yano**

概要

アカシアマンギウムの樹皮には、多くの縮合型タンニンが含まれている。本稿では、樹皮の有効利用の観点から、樹高方向での樹皮、抽出物の量的分布や伐採直後からの貯蔵期間あるいは樹皮乾燥条件が抽出物量およびその硬化特性に及ぼす影響などについて報告する。また、樹皮粉末の用途の一つとして評価した樹皮粉末接着剤の性能、樹皮粉末成形体の性能についても報告する。

1. はじめに

アカシア類の樹皮には、縮合型タンニンが多く含まれる。縮合型タンニンは、ホルムアルデヒドあるいはホルムアルデヒド系接着剤と反応して縮合硬化することから、接着剤や成形物用材料としての利用が期待される。近年、アカシアマンギウムの樹皮に特に多くのタンニン（レゾルシノール型）が含まれていることが見いだされた¹⁾。さらに、我々は、その外樹皮をミルで粉碎し機械的に篩うと、粒径 63 μm 以下に、縮合型タンニンを 50~60% も含む微粉末を 50% 近い収率で集められることを見いだした²⁾。この微粉末は、ホルムアルデヒド水溶液と混合すると、タンニン抽出プロセスを経ることなく耐水性のある合板用接着剤として直接利用できる。このことから、工業的レベルでの樹皮粉末の利用を目指し、様々な検討を行ってきた。

本稿では、2002 年 5 月、インドネシアにおいて伐採したアカシアマンギウムに関し、樹高方向での樹皮、抽出物の量的分布、質的変化、さらには伐採直後からの貯蔵期間あるいは乾燥条件が樹皮抽出物量およびその硬化特性に及ぼす影響などについて報告する。また、樹皮粉末の用途として検討した樹皮粉末接着剤の性能および合板用フェノール樹脂接着剤への粉末添加の効果、さらには樹皮粉末成形体の性能について報告する。



図 1 : 10 年生のアカシアマンギウム
林地、ボゴール

*2011 年 8 月 19 日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生物機能材料分野 E-mail: yano@rish.kyoto-u.ac.jp

***現(株)ウッドワン

2. 高さ方向における樹皮量の分布

インドネシア、ボゴールの10年生の植林地（KANTOR KEBUN BENIH B.T.P PARUNG PANJANG KAB. BOGOR、図1）において、アカシアマンギウムを2本伐採し（個体A、B）、地際から3mごとに幹部を切断、重量を測定した。個体Aについては、各丸太のほぼ中央部から、円周方向に樹皮を剥離した。また、個体Bについては、樹皮をすべて剥離、重量を測定し、樹幹に占める樹皮量の高さ方向での変化等を明らかにした（図2）。結果を表1に示す。

表より、丸太重量の約1割を樹皮が占めていることがわかる。乾燥により樹皮重量は減少したが、その程度は、採取位置が高いほど大きかった。

樹皮は、褐色の外樹皮と白色の内樹皮に分けることができる。アカシアマンギウムでは、タンニンは主に外樹皮に含まれており、内樹皮のタンニン量はわずかである。そこで、採取高さと樹皮に占める外樹皮の比率との関係について検討した。外樹皮乾燥重量の高さ方向における変化を表1に、樹皮に占める外樹皮の比率について表2に示す。表2より、採取位置が高くなるにつれて、個体A、Bともに外樹皮の比率は減少することがわかる。地際から1.3mでは、個体A、Bともに約8割が外樹皮であったが、13.3mでは、それは約5割にまで低下した。この様な変化は樹皮の外観とも対応しているように思われる。すなわち、地際から3m程度までは、樹皮は褐色の荒い、ゴツゴツした状態であるが、高くなるにつれて、次第になめらかな性状になり、色も緑味を帯びてくる（図3）。また、乾燥後の外樹皮重量は、表1から計算できるよう、地際から6mまでの範囲で全乾燥外皮重量の約3/4を占めていた。



図2：樹皮の剥離

表1：個体Bにおける高さ方向での樹皮量分布

樹高 (m)	丸太 (kg)	樹皮 (kg)	乾燥外樹皮 (kg)
0-3	235	21.8	9.6
3-6	178	14.5	5.1
6-9	130	10.4	3.3
9-12	60	5.7	1.4
12-15	26	2.8	0.6

表2：樹皮の採取高さと外樹皮率

採取高さ (m)	個体A	個体B
	外樹皮 (%)	外樹皮 (%)
1.3	83.2	79.8
4.3	74.9	72.2
7.3	64.1	66.0
10.3	59.7	56.4
13.3	55.2	52.1

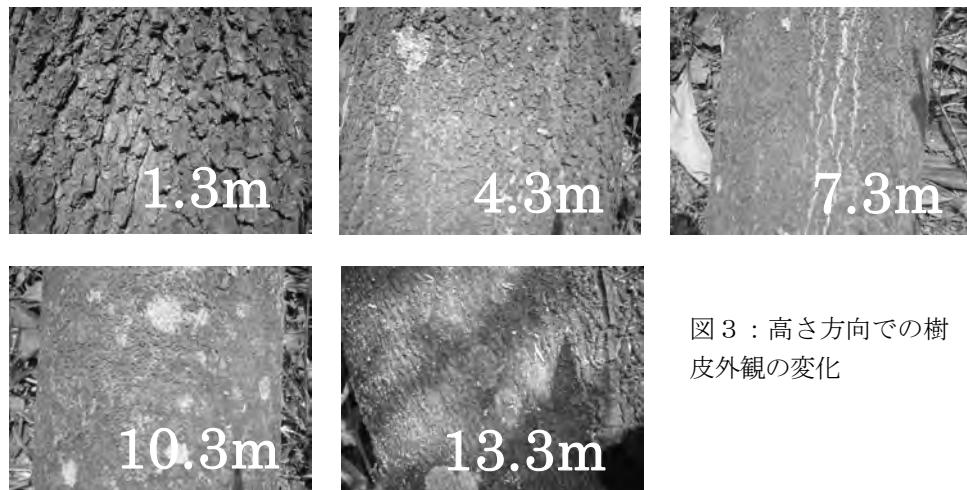


図3：高さ方向での樹皮外観の変化

3. 高さ方向におけるタンニン量の分布

高さごとに採取した樹皮について、含水率 10% 前後に乾燥した後、外樹皮と内樹皮に分け、それぞれ ウィリーミル (0.5 mm メッシュ) を用いて粉碎し、樹皮粉末を得た。

この樹皮粉末について、乾燥粉末約 30 g に重量比 5 倍のメタノールを加えて 30°C で 30 分間攪拌した後、フィルターペーパー (#100) を用いて濾過した。その際、15 ml のメタノールで 3 回洗浄を行った。得られたメタノール抽出物溶液をエバポレーターにより濃縮した。メタノール量が抽出物に対して少なくなり、徐々に沸騰し始める時点で濃縮を停止し、これに蒸留水を約 30 ml 加えて良く攪拌した後、凍結乾燥により固体抽出物を得た。抽出前の樹皮粉末全乾重量と固体抽出物重量の比率からメタノール抽出物の収率を求めた。

外樹皮に含まれるメタノール抽出物の収率と採取高さの関係について表3に示す。表より、採取高さが高くなるにつれてメタノール抽出物の量が急激に減少することがわかる。すなわち、高さ 1.3 m で採取した樹皮は、いずれの個体でも、メタノール抽出物は樹皮重量の約半分にまで達したが、高さ 13.3 m からの樹皮ではメタノール抽出物の収率は 10% 以下にまで低下した。

表3：樹皮採取高さと外樹皮メタノール抽出物の収率

採取高さ (m)	個体 A	個体 B
	収率 (%)	収率 (%)
1.3	48.0	43.7
4.3	30.0	32.7
7.3	21.2	18.3
10.3	11.6	13.5
13.3	9.6	8.8

アカシア樹皮からのメタノール抽出物は、すべてがタンニンではない。そこで、メタノール抽出物中のタンニン量について、抽出物とホルムアルデヒドとの反応性を示す値である Stiasny 値³⁾を用いて評価した。Stiasny 値はタンニンの純度を示すだけでなく、接着剤原料としての性能にも関わる指標で、本研究では以下の方法で求めた。すなわち、メタノール抽出物を約 100 mg ナスフラスコにとり、蒸留水を 10.0 ml 加え、さらに 37% ホルマリンを 2.0 ml、触媒としての塩酸 (10 N) を 1.0 ml 加えて、還流管を取り付けて、溶液が沸騰し始めてから 30 分後にグラスフィルター (No. 3) た。その際、ナスフラスコを 20 ml の温水で 2 回、20 ml のメタノールで 1 回洗浄し、グラスフィルターを通した。堆積物が残留してい

るグラスフィルターごと 105°C の乾燥機内で 1 日間乾燥させた。グラスフィルター上の残留物の重さを測定し、それを最初の抽出物量で除して Stiasny 値を求めた。さらに、タンニン量としてより正確に評価するために、抽出物の Stiasny 値をタンニンの基本単位であるカテキンの Stiasny 値で割り、Adjusted Stiasny 値とした。

表4に、採取高さとメタノール抽出物の Adjusted Stiasny 値の関係について示す。Adjusted Stiasny 値が 100% であると言うことは、抽出物がホルムアルデヒドに対しカテキンと同じ反応性を示す、すなわち、抽出物の 100% がホルムアルデヒドと反応し縮合硬化するタンニン（厳密な定義はここでは行わない）であることを意味している。表より、1.3 m の高さから採取した外樹皮からのメタノール抽出物は、そのほとんどがタンニンであることがわかる。しかし、採取高さが高くなるにつれてタンニン含有率は減少し、13.3 m では 60~70% であった。

表4：樹皮採取高さと抽出物 Adjusted Stiasny 値

採取高さ (m)	個体 A	個体 B
	Ad. Stiasny 値 (%)	Ad. Stiasny 値 (%)
1.3	95.3	99.4
4.3	88.9	93.1
7.3	85.4	83.4
10.3	76.7	76.1
13.3	63.9	69.6

以上の表1～表4の結果より、アカシアマンギウムでは、地際に近いほど、外樹皮の絶対量が多く、また、樹皮に含まれるタンニン量も多いことがわかる。採取位置 1.3 m では、樹皮（内樹皮も含む）の約 40% がタンニンであり、高さ方向における樹皮量の分布を考慮すると、今回伐採した 10 年生のアカシアマンギウムでは、地際から 6 m までの間に、全タンニン量の約 9 割が存在しており、また、個体 B については、総樹皮量調査から高さ 6 m までの樹皮をすべて採取しメタノール抽出を行うと、約 5.9 kg のタンニンが得られることがわかる。表1に示した様に、今回伐採したアカシアマンギウムの 6 m までの幹では、生材重量は 370 kg であった。その含水率を 100% と仮定すると、乾燥木材の重量は 185 kg になる。したがって、高さ 6 m までの丸太を利用する場合は、乾燥木材重量の約 3% のタンニンが同時に得られることになる。合板のような接着剤成分が製品重量の 3% 程度を占める木質材料であれば、計算上は、アカシアマンギウムだけから、木材エレメントだけでなく接着剤もまかなえる計算になる。

4. 高さ方向における抽出物のゲル化時間の変化

メタノール抽出物のホルムアルデヒドとの反応性については、上述したとおり Stiasny 値により評価できるが、接着剤あるいは成型物原料としての、より実用的な見知からは、ホルムアルデヒドとの混合後のゲル化時間の評価が有用である。そこで、メタノール抽出物 (0.7 g) とパラホルムアルデヒド (0.07 g) を試験管に取り、蒸留水 (1.5 g) を加えて 90°C の温浴に入れ、ガラス棒で攪拌しながらゲル化時間を測定した。採取高さとゲル化時間の関係について表に示す。採取位置が低いほど、タンニン含有率が高いため、ゲル化が早く起こると考えられたが、実際は、採取位置が高くなるにつれてゲル化時間は短くなり、13.3 m では、約 14 分であった。これについて、さらに低いゲル化温度で検討したところ、高さ 13.3 m からの抽出物は、蒸留水を加え室温で攪拌するだけで、ゴム状に変化することが知られた。既往の文献などから推測すると、高い位置から採取した樹皮には、高分子量の多糖類が多く含まれており、それにより見かけ上ゲル化している様になるとと考えられた。一方、タンニン含有率がほぼ 100% である、採取位置 1.3 m からのメタノール抽出物は、ゲル化時間は 90°C で約 30 分である。高い位置から採取したメタノール抽出物に比べ、ホルムアルデヒドとの混合後も急激な粘度の増大は起こりにくい、すなわち、ポットライフの長い、取り扱いの容易な接着剤となることが推測される。

表5：樹皮採取高さとメタノール抽出物のゲル化時間

採取高さ (m)	個体 A	個体 B
	ゲル化時間 (分)	ゲル化時間 (分)
1.3	31.3	29.0
4.3	17.5	23.5
7.3	13.8	14.5
10.3	3.0	1.0
13.3	0.5	0.5

5. 樹皮粉末の特性に及ぼす貯蔵期間、乾燥条件の影響

以上の結果から、今回伐採した 10 年生のアカシアマングイウムは、地際から 6 m までの範囲の樹皮に、ホルムアルデヒドと反応しゲル化するメタノール抽出物を極めて高濃度で含むことが明らかになった。これまでの検討で、我々は、その様な樹皮は、外樹皮をミルで粉碎し機械的に篩うと、粒径 63 μm 以下に、縮合型タンニンを 50 ~ 60% も含む微粉末を 50% 近い収率で集められることを見いだしている²⁾。さらに、その微粉末は、ホルムアルデヒド水溶液と混合するだけで耐水性を有する合板用接着剤として直接利用できた。このことは、溶媒等を用いたタンニン抽出プロセスを経ることなく、微粉末を接着剤や成型材料の原料として直接利用できることを示している。機械的手法によるタンニンの濃縮は、溶媒を用いた化学的抽出システムより明らかに環境負荷が少なく、また、装置的にも簡便であることから、実用化は比較的容易であると思われる。そこで、実用化にあたっての重要な検討事項として、メタノール抽出物の特性に及ぼす樹皮の保存期間、乾燥条件の影響について検討した。

a) 保存性

最初に、樹皮の保存性の評価として、個体 A について、1) 伐採した幹の一部を室内に放置し、そこから定期的に樹皮を剥離した場合（採取位置：地際から 1 m 付近および 10 m 付近）と、2) 剥皮後、直ちに 50°C で二日間乾燥し、含水率を 10% にまで低下させてから室内に放置した場合について、伐採直後、2 週間後、1 ヶ月後、3 ヶ月後にメタノール抽出物の収率、Stiasny 値、ゲル化時間を測定した。結果を図4に示す。

上述したとおり、約 1 m の高さから採取した樹皮はタンニン含有率、含有量ともに高い値を示すが、図より明らかな様に、伐倒後、剥皮しないで置いた場合も、伐倒後、乾燥して室温で貯蔵した場合も、メタノール抽出物収率、Stiasny 値、ゲル化時間は、ほとんど変化しなかった。地際に近い部分の樹皮は、多くのタンニンを含むだけでなく、その保存性も良いといえる。一方、約 10 m の高さから採取した、緑味を帯びた外観を示す樹皮では、経過時間とともにメタノール抽出物収率が低下した。タンニン以外の成分が構造変化を生じ、それにより樹皮中のタンニンが抽出されにくくなっていると考えられる。また、Stiasny 値も時間経過にともない低下したことから、保存

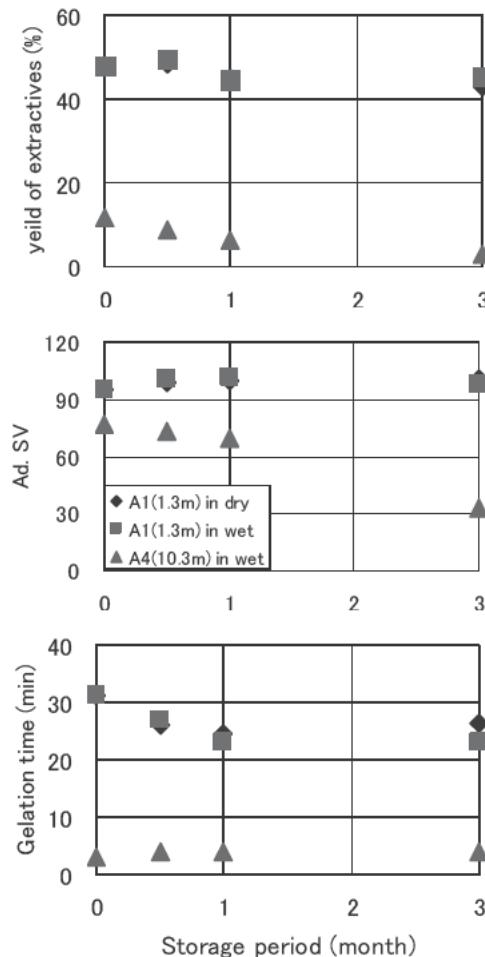


図4：貯蔵期間とメタノール抽出物収率、Adjusted Stiasny 値、ゲル化時間の関係

性を考えた場合も、アカシアマンギウムでは、樹皮は出来るだけ低い位置から採取した方が良いと思われる。

b) 乾燥温度の影響

個体 A の 1.25 m より下に向かって 15 cm 巾で、また、10.3 m より上に向かって 40 cm 巾で、それぞれ樹皮を採取した。その後、樹皮を 5 つに分けて、105°C、90°C、70°C、50°C および全く熱を加えない方法として凍結乾燥を用いて、それぞれ 2 日間乾燥させた。乾燥温度とメタノール抽出物の収率、Stiasny 値、ゲル化時間の関係について図 5 に示す。105°C で二日間乾燥しても、凍結乾燥した樹皮とほぼ等しいメタノール抽出物の収率、Stiasny 値、ゲル化時間を示すことがわかる。105°C、二日間という乾燥条件あるいは熱処理条件は、木材の吸湿性、寸法安定性に有意な影響を及ぼす条件である。そのような木材構成成分の一部に変性を生じる熱処理条件であっても、樹皮からのタンニン抽出率に変化が起こらないということは、特筆すべきことである。もちろん、この結果は、タンニンの構造が変化していないことを示すものではなく、その点については、さらなる検討が必要である。しかし、ホルムアルデヒドとの反応性を示す Stiasny 値、ゲル化時間においてほとんど変化が起こっていないという事実は、接着剤原料あるいは成型物原料としての利用を考えた場合、樹皮粉末が極めて熱的に安定した原料であることを示しており、その実用化の根本を支える重要な知見といえる。

6. 接着剤原料としての樹皮粉末の利用

以上の結果を基に、接着剤原料としての樹皮粉末の性能について検討した。すなわち、個体 B の 1.3 m 付近の樹皮を、伐採後すぐに 50°C で二日間乾燥し、その後 2 ヶ月放置した後、内樹皮と外樹皮に分け、外樹皮のみをウィリーミル (0.5 mm パス) を用いて砕き、500-250、250-125、125-63 および 63 μm 以下に篩い分けた。各サイズの樹皮粉末について、重量比率、メタノール抽出物収率ならびに Stiasny 値を表 6 に示す。

表より、0.5 mm のメッシュを有するウィリーミルで粉碎した場合、粒径 63 μm 以下の微粉末が全樹皮粉末の約 50% を占め、さらに、その 63 μm 以下の微粉末は、約 60% もの高濃度でメタノール可溶のタンニンを含有していることがわかる。粒径 500-250 μm サイズの粉末と比べると、タンニン収率は 2 倍に達しており、粉碎、篩い分けという機械的手法により、タンニン量の多い部分を集められることがわかる。

表 6 : 粒径分布とメタノール抽出物収率および Ad. Stiasny 値

粒径 (μm)	重量比率 (%)	抽出物の収率 (%)	Ad. Stiasny 値 (%)
500-250	7.5	30.8	100.2
250-125	22.7	31.9	99.8
125-63	22.6	35.5	98.9
63-	47.2	63.9	98.0

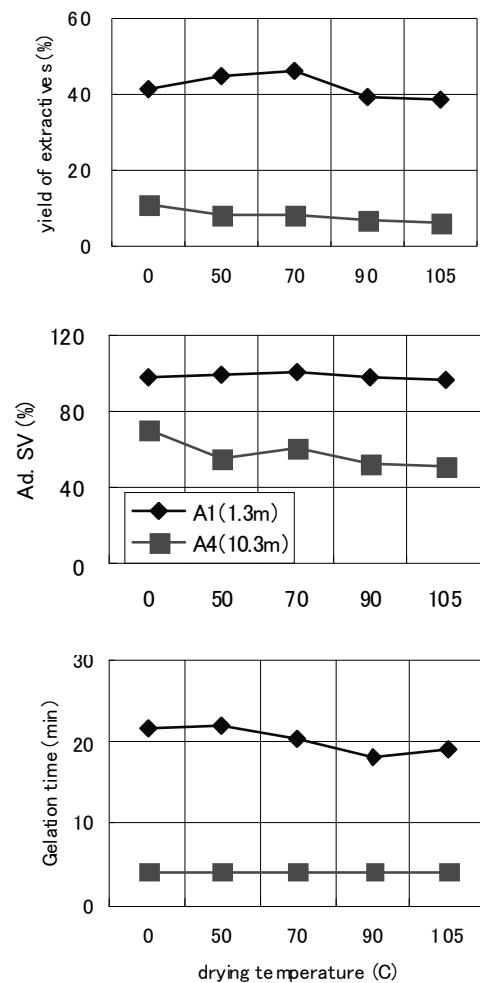


図 5 : 乾燥温度とメタノール抽出物収率、Adjusted Stiasny 値、ゲル化時間の関係。

のことから、粒径が $63 \mu\text{m}$ 以下の樹皮粉末を用いて接着剤原料としての性能を評価した。樹皮粉末 : 100 部、パラホルムアルデヒド : 10 部、水 : 165 部として、不揮発分が 40% になるように接着剤を調整し、さらに水酸化ナトリウム水溶液により pH を 8 に調節して 3 層合板を作製した。合板用単板には含水率約 10% のロータリーレースにより作成したレッドメランチ単板（厚さ : 1.6 mm）を使用し、塗布量は 100、200 あるいは $400\text{g}/\text{m}^2$ （片面塗布）とした。圧縮圧力 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ で 30 分間コールドプレスをした後、圧縮圧力 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ で 5 分間熱圧縮した。圧縮温度は 90°C から 130°C まで 10°C 刻みで変化させた。得られた 3 層合板については、JISK6851 にしたがって常態試験と 72 時間連続煮沸試験により性能を評価した。塗布量 $200\text{g}/\text{m}^2$ （片面）の結果を図 6 に示す。

図 6 および表 7 の木破率より、樹皮粉末とホルムアルデヒドだけで耐水性を有する合板が得られていることがわかる。さらに、圧縮温度が 100°C でも、 130°C と同等の接着強度が、常態だけでなく煮沸試験後も得られたことは注目に値する。これは、アカシアマンギウムに含まれる縮合型タンニンがレゾルシノール型で、ホルムアルデヒドと比較的低温で付加・縮合反応するためといえる。このことは、ホルムアルデヒド系接着剤への樹皮粉末添加により、熱圧温度を低下できることを示唆している。そこで、フェノール樹脂接着剤への樹皮粉末添加の効果について検討した。

表 7 : 樹皮粉末接着剤合板の木部破断率 (%)

熱圧温度 ($^\circ\text{C}$)	90	100	110	120	130
常態	85	80	65	80	78
72 時間煮沸	68	92	80	85	87

7. フェノール樹脂への樹皮粉末添加の効果

フェノール樹脂接着剤 (PL-251N, pH 11.4, 群栄化学) に接着剤の不揮発分が 40% になるように水、樹皮粉末を加えて接着剤を調整した。フェノール樹脂接着剤と外樹皮粉末の重量比率は 80:20 である。コントロールとしてフェノール樹脂のみ (100:0) の接着剤も調整した。合板の製造は、レッドメランチのロータリーレース单板を用い、接着剤塗布量は $200\text{g}/\text{m}^2$ とした。 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ で 30 分間コールドプレスした後、 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、5 分間熱圧縮した。熱圧温度は、 90°C から 130°C まで 10°C 刻みで変化させた。合板における接着強度について図 7 に示す。

図より、常態では樹皮粉末を添加した接着剤の方がフェノール樹脂のみの接着剤より高い接着力を示すことがわかる。その傾向は熱圧温度が低いほど顕著で、特に 90°C での熱圧において明確な差が認められる。これはレゾルシノール型タンニンによる硬化温度の低下効果によると考えられる。

樹皮粉末添加の効果は 72 時間煮沸後の接着強度でも明確であった。すなわち、 100°C での熱圧では、フェノール樹脂接着剤のみで製造した合板は、煮沸実験中に剥離したが、樹皮粉末を 20% 添加した接着剤では、 90°C の熱圧においても、煮沸後も高い接着強度を示した。また、木破率も高い値を示した(表 8)。以上の結果から、アカシアマンギウム外樹皮の微粉末は、木材用接着剤への添加剤として、熱圧温度の低減、耐水性の向上において極めて有用であるといえる。

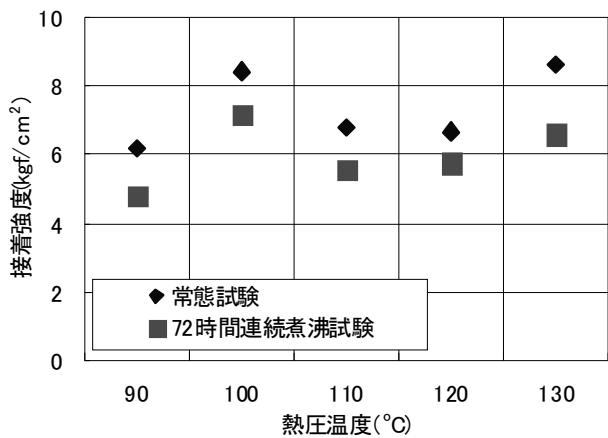


図 6 : 樹皮粉末接着剤合板の接着強度

表 7 : 樹皮粉末接着剤合板の木部破断率 (%)

熱圧温度 ($^\circ\text{C}$)	90	100	110	120	130
常態	85	80	65	80	78
72 時間煮沸	68	92	80	85	87

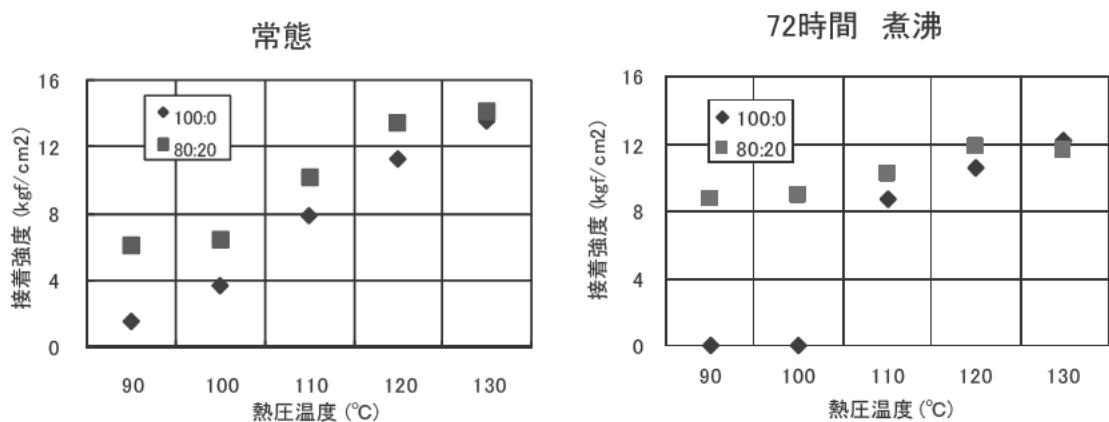


図7：樹皮粉末添加フェノール樹脂接着剤の接着性能

表8：樹皮粉末添加フェノール樹脂接着剤を使用した合板の木部破断率 (%)

熱圧温度 (°C)	90	100	110	120	130
常態	28	45	55	60	93
72時間煮沸	93	92	93	93	100

8. 樹皮粉末を用いた成型物の製造

パルプ (NBKP、ロジポールパイン 50%、ホワイトスプルース 40%、ダグラスファー 10%) を固形分として 10% 含むスラリーを調整し、これに、粒径 63 μm 以下の外樹皮粉末とパラホルムアルデヒドを乾燥パルプ重量にして 10、30、50 および 70% になるように加えて良く攪拌した。パラホルムアルデヒドの量は外樹皮粉末に対して 10% とした。その後、凍結乾燥により成型用粉末とした。これを含水率約 10% に調整してから金型に入れ熱圧成型した。熱圧条件は 160°C、80 MPa、20 分間とした。得られた成型物 (直径 70 mm, 厚さ 2.5 mm) について、試料を作成後、3 点曲げ試験により、常態および水中に 24 時間浸せき後の強度特性を測定した。成型物の曲げ強度特性とパルプ混合比率の関係について図 8 に示す。

図より、気乾状態では、曲げヤング率、曲げ強度共に、パルプの添加率が増えると増大することがわかる。パルプを 70% 添加した状態では、曲げヤング率は約 12 GPa に、また、曲げ強度は約 100 MPa にそれぞれ達した。これらの値は、代表的な高強度エンジニアリングプラスチックであるフェノール樹脂やポリカーボネートに匹敵する値である。しかしながら、パルプ添加率 50% 以上では、パルプの吸湿性に起因して、冷水浸漬後の弾性率、強度は大きく低下した。全体として見ると、パルプ添加率 30% 前後

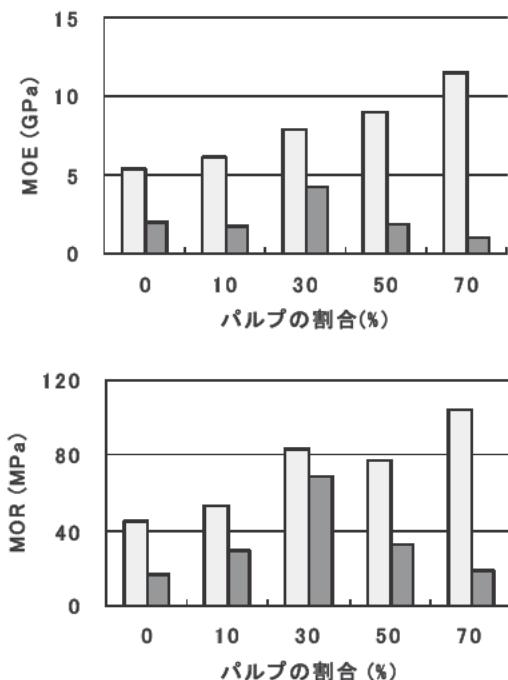


図8：樹皮粉末・パルプ成型物の強度特性
左：気乾、右：冷水浸漬

において、気乾状態ではフェノール樹脂成形体相当のヤング率、強度を有し、かつ、ある程度の耐水性を有する成型材料が製造できることがわかる。タンニンを多く含む樹皮粉末を原料として高性能成型物の製造が可能である。

9. まとめ

本研究を行った 2002 年頃には 1 バレル 20-30 ドルであった原油価格が、最近は中近東の政情不安も影響し 100 ドルを越えている。バイオリファイナリーの観点からアカシアマンギウムの利用を考えたとき、接着剤や成形材原料としてチップ材の 10-20 倍の高付加価値が期待できる樹皮タンニンは、石油代替品として、経済的観点からもその重要性を急速に増している。アカシアマンギウムの用途は現在はパルプ用材や建築用材に限られているが、今後は木部以外の利用も含めた総合的利用における重要な成分として樹皮タンニンの有効利用を考える必要があるといえる。

本研究は、主として小川が京都大学農学研究科修士課程在籍中に行った研究成果の一部をまとめたものである。また、アカシアマンギウムの伐採ならびに樹皮の採取にあたっては、インドネシア科学院バイオマテリアル研究ユニットの皆さんに大変お世話になった。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Yazaki, Y., Morita, S. and Collins, P. J., Potential use of *Acacia mangium* bark for waterproof wood adhesives, *Proceedings of the Fourth Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*, November 2-5, 1998, Bogor, Indonesia, 36-44.
- 2) Ogawa, S., Susanti, C. M. E. and Yano, H., Direct utilization of *Acacia mangium* bark as water proof wood adhesives, *Proceedings of the Fourth International Wood Science Symposium*, September 2-5, 2002, Serpong, Indonesia, 182-187.
- 3) Yazaki, Y. and Hillis, W. E., Molecular size distribution of *Radiata* pine bark extracts and its effect on properties, *Holzforschung*, **34**(4), 125-130, 1980.

アカシア材からのナノファイバー製造*

矢野 浩之**, 阿部 賢太郎***

Extraction of nanofibers from *Acacia mangium**

Hiroyuki Yano** and Kentaro Abe***

概要

パルプの主たる構成要素は、高強度・高弾性・低熱膨張のセルロースナノファイバーである。この様な高性能ナノファイバーでありながら、セルロースナノファイバーの工業的利用は解纖コスト、ナノファイバー故の取り扱いの難しさなどから、これまでほとんどなされてこなかった。しかし、持続型低炭素社会の早期実現に向け、新規の低環境負荷グリーンナノ材料として、近年、北欧や北米で急速に研究が活発化し、多くの新規技術が開発されている。本稿では、セルロースナノファイバーの製造技術と利用について概説した後、アカシアマンギウムからのナノファイバー製造について紹介する。

1. はじめに

紙・パルプは、成長が旺盛なアカシアマンギウム、ユーカリを始めとする早生樹の重要な用途の一つである。パルプは、言うまでもなく木材を始めとする植物資源を細胞レベルまで解したものであるが、その細胞が、幅 10 - 50 nm のセルロースナノファイバーで構築されていることは、ほとんど知られていない（図 1）。リグニンやヘミセルロースを取り除いた溶解パルプでは、そのほとんどを、このナノファイバーが占める。地球上には 1 兆 8 千億トンのバイオマス資源が存在すると言われているが、約半分はセルロースである。その全てがおそらくこのナノファイバーの形態を取っていると考えられることから、セルロースナノファイバーはほぼ無尽蔵のナノファイバーと言って良い。

驚くべきことに、このナノファイバーは細いだけでなく、セルロースの伸びきり鎖の微結晶で出来ていて、鋼鉄の 1/5 の軽さで、その 5 倍以上の強度 (2-3 GPa) を示す¹⁾。これは防弾チョッキに用いられるアラミド繊維に匹敵する強度である。また、線熱膨張係数 (CTE) がガラスの 1/50 以下 (0.1 ppm/K) と極めて小さい²⁾。さらに、弾性率が -200°C から +200°C の範囲でほとんど動かない³⁾。

このような高性能ナノファイバーでありながら、その工業的利用はナノファイバーレベルまでの解纖コ

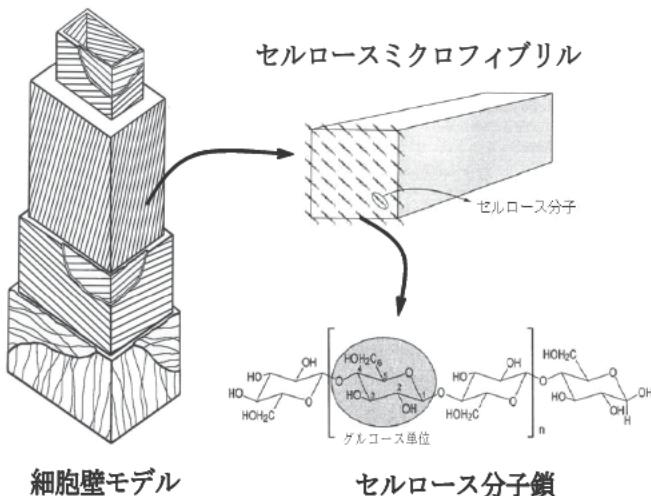


図 1 : 木材の細胞構造とセルロースナノファイバー

*2011 年 8 月 9 日受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生物機能材料分野 E-mail: yano@rish.kyoto-u.ac.jp

*** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生物機能材料分野 E-mail: abekentaro@rish.kyoto-u.ac.jp

スト、ナノファイバー故の取り扱いの難しさなどから、これまでほとんどなされてこなかった。しかし、持続型低炭素社会の早期実現に向け、新規の低環境負荷グリーンナノ材料として、近年、北欧や北米で急速に研究が活発化している。昨年末からは国際標準化に向けた動きも始まった。本稿では、セルロースナノファイバーの製造技術と利用について概説した後、アカシアマンギウムからのナノファイバー製造について紹介する。

2. セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーには、解纖方法によって、もっとも基本となる単位である幅 4 nm のセルロースミクロフィブリル（シングルセルロースナノファイバー）から（図1）、それが数本のゆるやかな束となって細胞壁中の基本単位として存在するセルロースミクロフィブリル束（図2、幅 10–20 nm）、ミクロフィブリル束がさらに数十–数百 nm の束となりクモの巣状のネットワークを形成しているミクロフィブリル化セルロース（MFC）などがある⁴⁾。

木材パルプなど植物系纖維材料からのセルロースナノファイバー製造について種々の方法が開発されている⁵⁾。数% 濃度のパルプスラリーについて行う低濃度での解纖技術としては、高圧ホモジナイザー法、マイクロフリュイダイザー法、グラインダー磨碎法、凍結粉碎法、超音波解纖法がある。最近では、パルプ水溶液を高速で攪拌するだけでナノファイバー化出来るようになっている⁶⁾。低濃度での解纖は均一なナノファイバーを得やすいが、解纖効率やその後の脱水プロセスに起因してコスト高である。これに対して、固形分が数十%程度のパルプ・水混合物を出発点とした解纖技術として二軸混練機などを用いた強せん断混練法やボールミル粉碎法などがある。ポリマー存在下での混練や粉碎によるナノファイバー化は、ポリマー中への均一フィラー分散を同時に行える可能性があり、複合材料におけるナノファイバー利用に有利である。

斎藤・磯貝らは、TEMPO (2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy radical) を触媒に用い、非晶領域にある 6 位のセルロース水酸基を水系で選択的にカルボキシル化すると、ナノファイバー相互の反発性が高まり、ナノファイバー化が促進されることを明らかにしている⁷⁾。ミキサー等の極めてゆるやかな攪拌処理でミクロフィブリルのレベルまで均一にナノファイバー化できる。さらに、乾燥後、ナノファイバーを水中に再分散させることも可能である。同様の効果は、カルボキシメチル化処理でも認められている。ナノファイバー化の促進については酵素処理による検討も行われている⁸⁾。また、植物パルプや動物性セルロースナノファイバー（ホヤ）を強酸で処理し、ホモジナイザー等で切断すると針状結晶物質、ナノウイスカーゲが得られる⁹⁾。これら化学処理や酵素処理、酸処理等の複合で、解纖時のエネルギーを大きく低下させ、ナノファイバーの生産性を向上できるが、一方で、得られるナノファイバーの強度や耐熱性、吸湿性といった特性に注意を払う必要もある。また、実用化にあたっては、これらの処理にかかるコストも考慮しなければならない。

セルロースナノファイバーの特徴として、すべての植物資源を原料にできる点が挙げられる。木材以外に、稻ワラや麦ワラ等の農産廃棄物、古紙、砂糖大根やジャガイモの絞りかす、焼酎カス等の産業廃棄物からも幅 10–50 nm 幅のナノファイバーが得られている^{8–10)}。薄く広く分布するバイオマス資源の特徴を活かせば、ありふれた資源からの地域自立型高性能ナノファイバーの製造と利用が可能である。

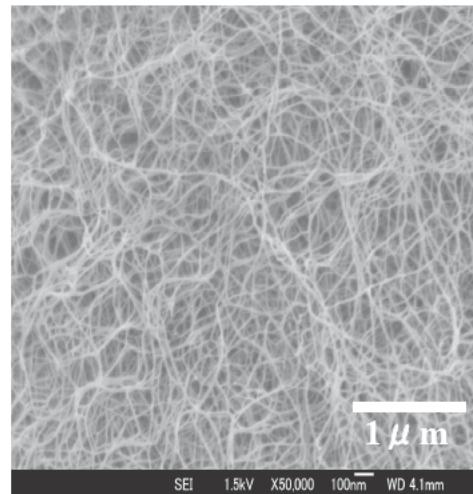


図 2：木材細胞壁中のセルロースナノファイバー束の走査型電子顕微鏡写真。京都大学 栗野博士提供

3. ナノファイバー補強透明材料¹¹⁻²¹⁾



図3：セルロースナノファイバー補強透明材料（左）とそれを基板に用いた有機EL発光素子（右）

グラインダー処理で得た均一ナノファイバーは、光の波長（可視光波長：400–800 nm）に比べ十分に細いことから、透明性を損なうことなく透明材料を補強できる^{6,12-20)}（図3）。セルロースナノファイバーで強化した透明材料（アクリル樹脂、エポキシ樹脂）は、プラスチックの様にフレキシブルでありながら、ガラスのように線膨張が小さい。また、熱伝導率もガラス並に高い。このことから、ロール状シートに有機発光素子や有機トランジスター、有機太陽電池を連続的に印刷していく、Roll to Roll プロセス用の透明基板として注目されている。セルロースナノファイバーの優れた環境調和性は、Roll to Roll プロセスで大量製造されたフラットパネルディスプレーや太陽電池の廃棄においても重要であろう。本材料については、三菱化学と王子製紙が事業化に向けた検討を共同で行っている（平成22年1月7日プレスリリース）。

さらに、ナノファイバー間の空隙をナノレベルにまで小さく制御し、シート表面を平滑化することにより、セルロースナノファイバーだけで透明な低熱膨張材料（CTE: 8.5 ppm/K）が得られている（図4）。この材料は、紙の様に折りたたむことができる。

これまで我々は何世紀にもわたり紙に印字することで情報を伝えてきたが、セルロースナノファイバー材料がディスプレーの基板材料として実用化されれば、持続型で低環境負荷の“透明紙”に印刷された電子回路や発光素子を通じて情報を得ることになる。そうなれば21世紀も情報媒体は紙である。

4. 構造用ナノファイバー補強材料²²⁻³⁰⁾

軽量・高強度のセルロースナノファイバーには、構造用プラスチックの補強繊維としての期待も大

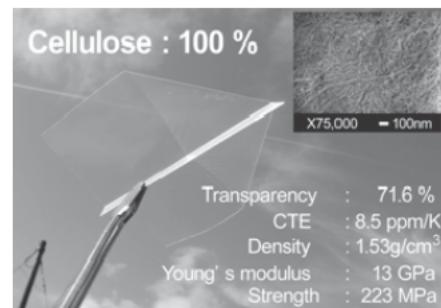


図4：100% セルロースナノファイバーで出来た透明材料

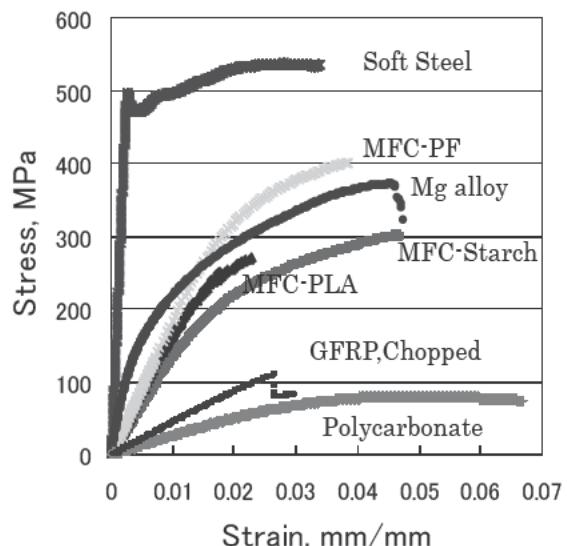


図5：ミクロフィブリル化纖維成形材料と他材料の強度特性比較

きい。高圧ホモジナイザーで解纖したナノファイバー（ミクロフィブリル化セルロース：MFC）を用いてシートを作製し、フェノール樹脂を注入後、積層、硬化すると（シートモールディング法）、鋼鉄の1/5の軽さで鋼鉄なみの強度の成形材料が得られる（図5、MFC-PF、繊維率約90%）²²⁻²⁶⁾。軽量、高強度は材料の基本である。自動車・航空機・電車など移動体においては、車体の軽量化を通じた燃費の向上、炭酸ガス排出の削減が必須であることから、その特性は特に重要である。

バイオベースのナノファイバーとしての特徴を強調するのであれば、同じくバイオベースのポリマーであるポリ乳酸樹脂との複合化が考えられる²⁷⁻³⁰⁾。100%バイオベースのナノコンポジットである。10%のセルロースナノファイバー添加で結晶性ポリ乳酸樹脂の弾性率および強度は、それぞれ約1.3倍にまで増大する。面白いのはナノファイバーネットワークにより、高温側で高い弾性率が保たれる点である²⁸⁻²⁹⁾。通常、ポリ乳酸樹脂単体では完全に結晶化しないと高温の金型から取り出せないが、セルロースナノファイバーで補強すると結晶化度15%の樹脂であっても変形せずに取り出すことが出来る。ここに結晶核剤を加え結晶化を促進すると、結晶化ポリ乳酸樹脂単体より優れた力学的特性を有する射出成形体を、ポリプロピレン樹脂に匹敵する短い成形サイクルで製造できる³⁰⁾。

5. アカシアマンギウムからのナノファイバー製造

アカシアマンギウムの木粉から、亜塩素酸ナトリウムおよび水酸化カリウムによりリグニン、ヘミセルロースを除去しパルプを得た。その0.8%濃度懸濁液をグラインダーで処理することで、パルプのナノ解纖を試みた。パルプと得られたナノファイバーについて図6に示す。

図に示すスケールバーからアカシアマンギウムパルプ（幅約20μm）の1,000分の1の細さのナノファイバーから構築されていることがわかる（図6）。さらに、図6の右図より、そのナノファイバーが、同じ繊維径を保った状態で取り出されていることがわかる。アカシアマンギウムパルプは細胞壁が厚壁のためか、ヒノキやスプルースなどの針葉樹パルプに比べ解纖性に多少難があつたが、ナノ化における大きな支障とはなっていない。本結果より、アカシアマンギウムもセルロースナノファイバー源として利用出来ることが明らかになった。

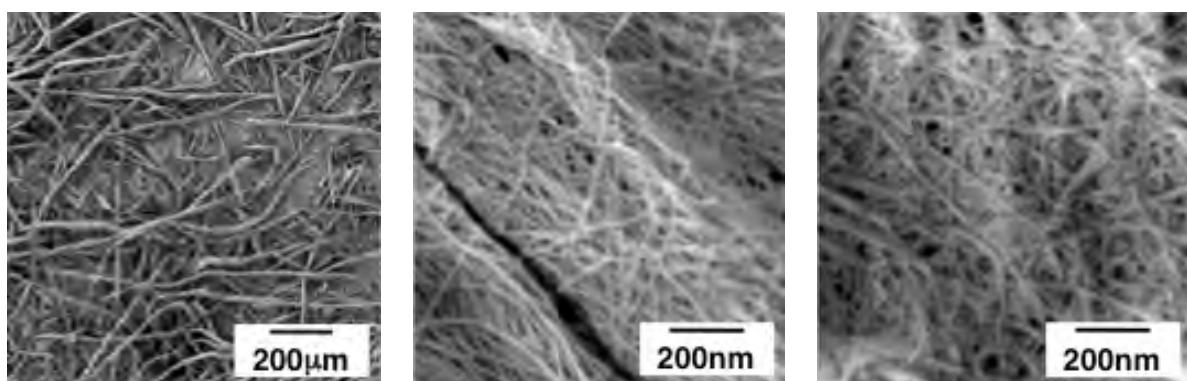


図6:アカシアマンギウムパルプ(左、中)とそれを解纖したセルロースナノファイバー(右)
の走査型電子顕微鏡写真

6. おわりに

セルロースナノファイバーは、我が国における川上から川下までの幅広い産業、すなわち、製紙産業、化学産業、繊維産業、自動車産業、IT産業、食品産業、医療産業、成型加工業等に関わる材料であり、即効性があるため、短期間での大きな経済効果が期待できる。

これまで我が国の化学産業は、海外から持ってきた石油を始めとする化石資源を使って、様々な材料や製品を作ってきた。また、それらが現在の快適な生活を支えている。しかし、10数年前に1バレル20ド

ル前後を推移していた原油価格は、最近は 100 ドルを超える。工業原料としての利用が難しくなって来ている。将来的には、植林から紙・パルプの製造加工まで幅広い範囲でバイオマス利用に関する多くの技術を蓄積している製紙産業と、化石資源からの多様な材料製造について多くの技術を蓄積している化学産業が連携して、セルロースナノファイバーをベースに様々なナノ材料を製造し、自動車、家電、建材、IT、包装容器にどんどん使っていく時代が来るだろう。それにより化石資源ベースの材料の単なる置き換えではなく、もっと強い、もっと優れた材料を、植物資源から創ることが可能になる。

参考文献

- 1) Page, D. H. and EL-Hosseiny, F., The mechanical properties of single wood pulp fibres, *Journal of Pulp and Paper Science*, **9**, 99–100, 1983.
- 2) Nishino, T., Matsuda, I. and Hirao, K., All-cellulose composite, *Macromolecules*, **37**, 7683–7687, 2004.
- 3) Nishino, T., Kotera, M. and Kimoto, M., Temperature dependence of the elastic modulus of the crystalline regions of cellulose, *Proc. 2nd Intn'l Cellulose Conf. 2007*, 125pp, October, 2007.
- 4) Turbak, A. F., Snyder, F. W. and Sandberg, K. R., Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential, *Applied Polymer Symposium*, **37**, 815–827, 1983.
- 5) 矢野浩之, セルロースナノファイバーの製造と利用, 日本エネルギー学会誌, **89**(12), 1134–1140, 2011.
- 6) Uetani, K. and Yano, H., Nanofibrillation of Wood Pulp Using a High-Speed Blender, *Biomacromolecules*, *in press*
- 7) Saito, T., Nishiyama, Y., Putaux, J., Vignon, M., Isogai, A., Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose, *Biomacromolecules*, **7**(6), 1687–1691, 2006.
- 8) Abe, K. and Yano, H., Comparison of the characteristics of cellulose microfibril aggregates of wood, rice straw and potato tuber, *Cellulose*, **16**(6), 1017–1023, 2009.
- 9) Abe, K. and Yano, H., Comparison of the characteristics of cellulose microfibril aggregates isolated from fiber and parenchyma cells of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*), *Cellulose*, **17**(2), 271–277, 2010.
- 10) 矢野浩之, H19 年度 NEDO 国際共同研究先導調査報告書
- 11) Yano, H., Sugiyama, J., Nakagaito, A. N., Nogi, M., Matsuura, T., Hikita, M. and Handa, K., Optically Transparent Composites Reinforced with Networks of Bacterial Nanofibers, *Advanced Materials*, **17**(2), 153–155, 2005.
- 12) Nogi, M., Handa, K., Nakagaito, A. N. and Yano, H., Optically transparent bionanofiber composites with low sensitivity to refractive index of the polymer matrix, *Applied Physics Letters*, **87**, 243110, 2005.
- 13) Nogi, M., Ifuku, S., Abe, K., Handa, K., Nakagaito, A. N. and Yano, H., Fiber-content dependency of the optical transparency and thermal expansion of bacterial nanofiber reinforced composites, *Applied Physics Letters*, **88**, 133124, 2006.
- 14) Nogi, M., Abe, K., Handa, K., Nakatsubo, F., Ifuku, S. and Yano, H., Property enhancement of optically transparent bio-nanofiber composites by acetylation, *Applied Physics Letters*, **89**, 233123, 2006.
- 15) Ifuku, S., Nogi, M., Abe, K., Handa, K., Nakatsubo, F. and Yano, H., Surface Modification of Bacterial Cellulose Nanofibers for Property Enhancement of Optically Transparent Composites: Dependence on Acetyl-Group DS, *Biomacromolecules*, **8**(6), 1973–1978, 2007.
- 16) 矢野浩之, 能木雅也, 半田敬信, 久保田広文, ナタデココから作る有機ELディスプレイ, バイオサイエンスとインダストリー, **63**(11), 28–29, 2005.
- 17) Nogi, M. and Yano, H., Transparent nanocomposites based on cellulose produced by bacteria offer potential innovation in electronics device industry, *Advanced materials*, **20**, 1849–1852, 2008.
- 18) Iwamoto, S., Nakagaito, A. N. and Yano, H., Nano-fibrillation of pulp fibers for the processing of transparent nanocomposites, *Applied Physics A*, **89**, 461–466, 2007.

- 19) Okahisa, Y., Yoshida, A., Miyaguchi, S. and Yano, H., Nanofibrillation of Wood Pulp Using a High-Speed Blender, *Biomacromolecules, Composites Science and Technology*, **69**, 1958–1961, 2009.
- 20) Nogi, M., Iwamoto, S., Nakagaito, A. N. and Yano, H., Optically transparent nanofiber paper, *Advanced Materials, Advanced materials*, **21**(16), 1595–1598, 2009.
- 21) Nogi, M. and Yano, H., Optically transparent nanofiber sheets by deposition of transparent materials - A concept for a roll-to-roll processing -, *Applied Physics Letters*, **94**, 233117, 2009.
- 22) Nakagaito, A. N., Yano, H. and Kawai, S., Production of high-strength composites using microfibrillated kraft pulp, *Proceedings of 6th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium*, 171–176, 2002, Oregon State University.
- 23) Yano, H., Nakahara, S. and Nakagaito, A. N., The potential of microfibrillated plant fiber-based materials, *Proceedings of 6th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium*, 188–192, 2002, Oregon State University.
- 24) Nakagaito, A. N. and Yano, H., The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites, *Applied Physics A*, **78**(4), 547–552, 2004.
- 25) Nakagaito, A. N. and Yano, H., Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure, *Applied Physics A*, **80**(1), 155–159, 2005.
- 26) Yano, H. and Nakahara, S., Bio-composites produced from plant microfiber bundles with a nanometer unit web-like network, *Journal of Materials Science*, **39**, 1635–1638, 2004.
- 27) Iwatake, A., Nogi, M. and Yano, H., Cellulose nanofiber-reinforced polylactic acid, *Composites Science and Technology*, **68**(9), 2103–2106, 2008.
- 28) Suryanegara, L., Nakagaito, A. N. and Yano, H., The effect of crystallization of PLA on the thermal and mechanical properties of microfibrillated cellulose-reinforced PLA composites, *Composites Science and Technology*, **69**, 1187–1192, 2009.
- 29) Suryanegara, L., Nakagaito, A. N. and Yano, H., Thermo-mechanical properties of microfibrillated cellulose-reinforced partially crystallized PLA composites, *Cellulose*, **17**, 771–778, 2010.
- 30) Suryanegara, L., Okumura, H., Nakagaito, A. N. and Yano, H., Acceleration of the injection molding cycle of PLA by cellulose nanofiber reinforcement, *Cellulose*, *in press*.

熱帯アジアに分布するアカシア* —分類、生育特性、病害—

黒田 宏之**

Acacia Species in Tropical Asia* —phylogeny, habitats, diseases—

Hiroyuki Kuroda*

概要

東南アジアのアカシア属について、分布・生育特性・分類などを概説した。病害の記述では、アカシアマンギウムを例にあげた。健全な森林を維持管理するための DNA バーコードについても論じた。

1. はじめに

熱帯での木材生産は、長らく原生林の開発と伐採・利用が主流であった。近年、資源枯渇や環境保全の機運が高まり、熱帯でも持続的な木材生産に軸足が移りつつある。温帯地域では、持続的な木材生産の基盤となる人工林更新（世代交代）が普通に行われているが、熱帯では、人工林の歴史が浅いため、世代交代（更新）後に起こるかもしれない問題が検証されていない。ここでは東南アジアの熱帯人工造林の中で、木材やパルプ原料などのバイオマス資源として注目されているアカシアマンギウム *Acacia mangium* に着目し、その生育特性や病害、系統分類学的な位置づけについて概説することで、熱帯アカシア林の生物学的な特性について考える。

2. 热帯アカシア属の分布・生育特性・分類

アカシアマンギウム *Acacia mangium*¹⁾ は、東モルッカ諸島、ニューギニア島、オーストラリア大陸北部に点在して天然分布する有用樹木で、熱帯を中心に世界各地に植林されている。いわゆるアカシア属（約 960 種）は、植物分類学上、マメ科 Mimosoideae（ネムノキ）亜科に属し、樹種により 0.5 m 程度の低木から 35 m 程度の高木となる。オーストラリア北部からインドネシアの熱帯アジアに生息する大部分のアカシアは乾燥地からやや湿潤な地域を好むので、本来は湿潤地や熱帯雨林を代表する樹木とはならない²⁾。しかし、*Acacia mangium* や *A. auriculiformis* は、例外的に湿潤な環境や荒れ地にも耐え、熱帯雨林の周辺にも分布できる。前者は後者より根が浅いため、台風で倒れるなどの被害を受けやすい。*A. mangium* は高温や酸性土壤には強いが、塩分濃度の高い土壤では成長が低下する¹⁾。

この属にはバイオマスを短いサイクルで生産できる樹種が存在し、ウェブ上でも検索できる³⁻⁴⁾。低木の *A. crassarpa* や *A. diffcilis* は亜熱帯地域のバイオマス生産や荒れ地の緑化先兵、いわゆるパイオニアプラントとして利用されている。マレーシアでは *A. aulacocarpa* と *A. richii* の導入例などがある。しかし、早く成長し土地を選ばないアカシア属の種は、時として侵略者として嫌われる。オース

*2011 年 9 月 14 日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林圏遺伝子統御分野

E-mail: hkuroda@rish.kyoto-u.ac.jp

トラリア大陸北部、ニューギニア島原産の *A. auriculiformis* は、東南アジア、中国、インドばかりでなくアフリカ、南米にも植林されているが³⁾、一部の地域では野生化して生態系を乱すとされる⁶⁾。古い分類体系のアカシア属（1,352 種）は南極と欧州を除く全ての大陸に分布している（図 1）。しかし、分子系統学や形態学的な研究から、この属の一部は複数の系統群⁸⁾に分かれることが判明した。そこで属全体を整理・再分類して 5 属に分け、各属に新たな名前を与える提挙がなされた^{3, 5, 7)}。一番種の樹種数が多い属（便宜的に *Racosperma* と記す）には、*Acacia mangium* や *A. auriculiformis* が存在し、オーストラリア大陸（948 種）とその周辺の熱帯アジア（7 種）に分布している。次に大きな属（*Senegalia* と記す）は、アメリカ大陸（97 種）、アフリカ（69 種）、アジア（43 種）、オーストラリア（2 種）に分布する。3 番目の属（*Acacia*）はアフリカ（73 種）、アメリカ（60 種）、アジア（36 種）、オーストラリア（7 種）が分布している。残りの 2 属（*Acaciella*, 15 種と *Genus 'X'*, 13 種）は南北アメリカ大陸に分布する（図 1）⁷⁾。括弧内の樹種数は、全ての種の遺伝子情報が検定されているわけではないので、目安と捉えていただきたい。

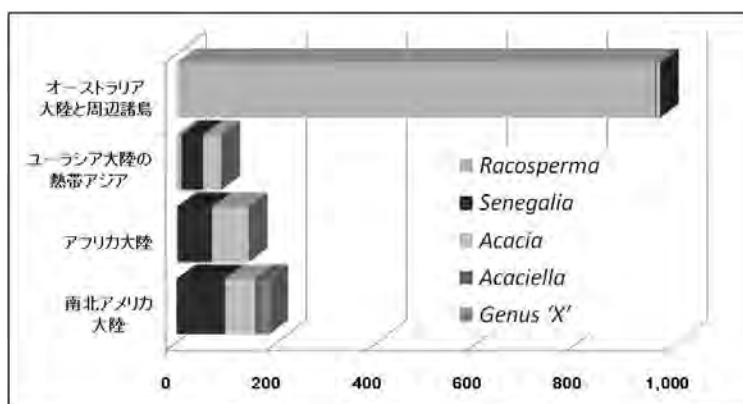


図 1：5 つの属からなるアカシア分類群の天然分布と樹種数。横軸は各属に存在する樹種数を示す。正式な属名は審議中である（本文参照）

ここまで読んで気づかれた方もあると想像するが、アカシアマンギウムは *Racosperma* 属となってしまう。*Acacia* の属名は、命名上の基準種である *Acacia nilotica* に見られる鋭いトゲを指すギリシャ語の akazo (sharpen) に由来する。新たに属名を決める場合、命名規約としては、基準種 (*Acacia nilotica*) の属するグループがアカシア属となる。言い換えると、アカシアマンギウムは *A. nilotica* とは系統が異なるため *Acacia* の属名をつけることができない。しかし、この *Racosperma* 属は千種近い樹種数からなる系統的に单一のグループであり、名称変更に異論が続出した⁸⁻⁹⁾。2011 年 5 月時点で学名批准の困難な状況は続いている⁹⁾。以上の経緯を説明するために、図 1 には未決定の属名をえて記載した。日本ではアカシアマンギウム *Acacia mangium* が一般的な呼称なので、本文でも基本的にこの慣習に従う。なお、アカシアの命名について脱稿後の動きを補足する。国際植物科学会議（2011 年 7 月、メルボルン）の命名委員会で、オーストラリアのアカシアを *Acacia* 属とすることが議決された。*A. nilotica* を含むアカシア属には、新たな名前の付与を検討することとなった。

3. アカシアマンギウムの病害

人工林生産業者は、高収量を得るために種の遺伝的な変異を少なくしようとする傾向があり、また、本来の分布域外に植栽することもある。種内の変異、樹齢の変異、遺伝的変異（多様性）などが減じると、病原菌の発育と蔓延に都合がよい状態となる¹⁰⁾。この点が生物多様性を重要と考える理由の 1 つである。病害発生は巨大な経済的損失を発生させるという認識に至ることができれば、人工林における病害発生の早期の検知と防除の重要性がわかる。今日まで、アカシアマンギウムでは深刻な病気の発生は報告されていない。しかし、この樹種が完全に病気にかかりないということではない。以下にこれまでに報告された病例について要約する¹⁰⁻¹⁷⁾。なお、植林され始めて長年月を経ていないので、人工林が更新された場合、ここに示した以外の病気が発生する可能性は捨てきれない。

苗木は、土壤や種子の衛生管理を徹底することによって制御することが可能と考えられている（表1）。一方、成木では、根腐れ^{10, 12-13)}、心材腐朽（芯腐れ）^{10, 13-17)}、葉の病気¹⁰⁾が主な病害で、大面積に症状が広がると制御が難しくなる。このうち根腐れは症状が進むと木が枯れる深刻な病気であり、芯腐れは木材生産する植林地では歩留まりの低下を引き起こすため問題となる（表1）。

根腐れは複数の担子菌類が原因で、「赤腐れ」（red rot）は *Amauroderma cf. parasiticum*, *Ganoderma philippii* により、褐色腐朽は *Phellinus noxius* や *Tinctorius epimiltinus* により、白色腐朽は *Rigidoporus lignosus* により引き起こされる。芯腐れは白色腐朽菌の *Hymenomycetes* 帽菌類により起こる。対策としては、抵抗性の品種開発などが有効と考えられている。*A. auriculiformis* の心材フェノール性化合物量は *A. mangium* の約5倍存在し、心材成分の多さが芯腐れに対する抵抗性に関係すると推定された¹⁵⁾。モデル植物における抵抗性の分子機作と対比できる情報蓄積¹⁸⁾や病害防御の戦略構築は必要であるが、興味深い結果である。アカシア・ハイブリッドと呼ばれる *A. mangium* と *A. auriculiformis* の交配種は、強度や比重などの材質が *A. mangium* より優れており、芯腐れも少ないときれている。このハイブリッドは1代雑種であり挿し木による繁殖が可能で、事業化が進みつつある¹⁹⁻²¹⁾。一方で、Pink diseaseによるハイブリッド生産量減少の報告²²⁾もある。

表1:アカシアマンギウムで報告された病害

病名と特徴	病原体	防除等	宿主／病原体
苗立枯病 (damping off)：芽生えが土壤から出る前に枯れる場合と、土壤中の根がやられて、結果として地上部が枯れる場合がある。前者は、誤って播種ロットの発芽率が悪いと判断されることがある。	<i>Chaetomium</i> sp., <i>Curvularia</i> sp., <i>Cylindrocladium</i> sp., <i>Fusarium solani</i> , <i>Fusarium</i> sp., <i>Pythium</i> sp., <i>Phytophthora</i> sp., and <i>Rhizoctonia solani</i>	土壤と種子の殺菌・消毒	苗木／カビ ¹¹⁾
ウドンコ病 (powdery mildew)：蜘蛛の巣状の白い斑紋が新葉から成熟葉や葉状体にひろがり、葉面上部が菌糸や胞子でうどん粉様の白い粉で覆った状態になる。	<i>Oidium</i> sp., <i>Erysiphe acaciae</i>	葉剤の葉面散布	苗木／カビ
茎瘤 (stem galls)：苗木の地上部に、褐色で表面がなめらかな直径1~2 mmの球状塊が集まってつく。	桿状グラム陰性バクテリア(未同定)	衛生管理の徹底。傷つけた苗木を除去、感染植物の焼却など。抵抗性品種開発は有効。	苗木／細菌
枝枯れ (dieback)：苗木の先端が壊死はじめ、それが下方へ広がり枝枯れが起こる。通常被害は小さいので防除対象となることはめったにない。	<i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Phoma</i> sp., <i>Lasiodiplodia theobromae</i> などが病原部から分離されているが病原菌は未同定。	殺菌剤の散布	苗木／カビ
斑点病 (leaf spots)：若い葉のみならず葉状体に起こる。通常大きな被害となることはない。	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i> , <i>Glomerella cingulata</i> , <i>Lasiodiplodia theobromae</i> , <i>Fusarium</i> sp., <i>Gloeosporium</i> sp., <i>Corynespora</i> sp., <i>Hendersonula</i> sp.	殺菌剤の散布	苗木／カビ
Charcoal root disease：根から侵入して、地上部の生育阻害と退緑色が観察される。深刻な被害の記載はない。根の変色が病名の由来。	<i>Macrophomina</i> sp. (根に病気をもたらすカビ)	土壤の殺菌・消毒	苗木／カビ
根こぶ (root knot)：生育阻害と葉の淡緑色～黄色化が観察され、しおれやすくなる。こぶは楕円形 (1.5-2.5 cm × 1.0-2.0 cm) で木化している。	<i>Meloidogyne</i> sp. (根こぶ線虫)	殺線虫剤の土壤投与。連作を避け、線虫のつかない作物を間に植える。休閑期を設ける、	苗木／線虫

根腐れ (Root Rots) : 初期は貧栄養症状に似る。葉は黄色く小さくなり、若いシートがしおれる。症状が進むと、多くの根が腐り樹冠が枯れあがり枯れてしまう。感染した根は、感染菌の種類によって、特色のある瘡蓋（根状菌糸束）で覆われている。	<i>Ganoderma</i> sp. (最も一般的、根状菌糸束は暗赤色), <i>Phellinus</i> sp. (根状菌糸束は球状で堅い褐色、年を経るとより黒くなる), <i>Rigidoporus lignosus</i> , (根状菌糸束は白い糸状、ゴム園で被害)	人工林更新時に、問題となりえる病気。枯損木・廃材・切株の焼却・土壤消毒が有効だが、植林面積が広い場合、コストや労力面で、実際的でない。	成木／カビ
Pink disease : 枯れ枝上に葉がしなびて残る樹皮の病気。初期には枯損樹皮表面にピンクから白色の斑紋が現れる。症状が進むと、樹皮全体にピンクの菌糸が広がる。後期では、樹皮は汚い白色に変わる。枝の樹皮は剥離し、樹皮にひび割れや瘤ができる。	<i>Corticium salmonicolor</i> Berk. & Br. (担子菌), <i>Pentherodes farinosa</i> (ハゴロモの1種) が媒介。	感染・落枝した小枝を焼却する。被害が深刻なら殺菌剤散布・消毒。ゴムノキ、コショウなど熱帯の多くの作物・樹木で多くの報告がある。	成木／カビ
心材腐朽・芯腐れ (Heart Rot) : 通常、木材の全体積の1割程度が腐朽するが、時に心材全体に腐朽がおよび木材としての価値がなくなる。主に切枝の直りきらない傷から病原菌が侵入し、心材の変色と腐朽が起こる。外見上はわかりにくいが、枯れ枝、傷、癌腫などが病兆となる。腐朽した心材色には変異があり、いくつかの病原菌が存在。	傷害を受けた後、 <i>Ceratocystis fimbriata</i> , <i>Chalara</i> sp., and <i>Phialophora</i> sp.などが最初に侵入して、宿主樹木の防御系を乱す。その後に腐朽菌 <i>Phellinus noxius</i> , <i>Trametes</i> sp., <i>Forms</i> sp.が侵入すると考えられている。	現時点では対処法がない。傷口の治療は効果がないことがわかった。サラワクの罹病率は半島のそれより低い、南スマトラの罹病率が低いなどの報告がある。	成木／カビ

4. DNA バーコード

生物種の同定は、「国際 DNA バーコードプロジェクト」により塩基配列による種同定の方法論が規格化され、また、大量の塩基配列情報が短時間に得られるようになったことで、生態系における微生物を含む生物種の同定が急速に進みはじめた。この国際プロジェクトは、2～3種類の遺伝子の部分塩基配列を2～3次元バーコードに見立て、これらの塩基配列の違いから生物種を同定することで、生態系における生物多様性保全や生物利用に役立てる意図がある。動物では比較的早期に対象遺伝子が確立されたが、植物種同定のための対象遺伝子は、2009年になって、基本方針がまとめられた（表2）²³⁻²⁵。アカシア属において、DNA バーコード情報が完備している種は、今のところ、*Acacia exuvialis*, *Acacia nigrescens*, *Acacia tortilis* などわずかな樹種に過ぎない。将来的には、分析対象とする遺伝子の選択改良によって、樹種特定のみならず個体識別や品種識別に DNA バーコード情報が利用できるようになると考えられる。また、病原菌の同定や土壤微生物相の情報が容易に明らかになり、その防除や生育管理に役立つものと思われる。

表2:DNA バーコードとして用いられる遺伝子

植物の国際基準	葉緑体 DNA 上の2つの領域 (<i>rbcL</i> と <i>matK</i>) を骨子にする。詳細に識別する必要のある場合には、いくつかの領域 (<i>trnH-psbA</i> など) を併用。
植物	葉緑体 DNA の <i>matK</i> や <i>rbcL</i> 領域で比較 → 属の同定は可能、種の同定は難しい。
	葉緑体 DNA の <i>matK</i> と <i>rbcL</i> 領域に加え、 <i>trnH-psbA</i> 遺伝子間領域の情報を併用する --> 多くの植物で「種」の同定が可能になる
	<i>rbcL</i> による同定率*：被子・裸子・シダ植物 > 95%。 <i>matK</i> による同定率*：被子植物 (90%) > 裸子植物 (83%) > シダ植物 (10%)。 * PCR 増幅と塩基配列決定の成功率
魚類や昆虫類	ミトコンドリア DNA や核 DNA 上のリボソーム遺伝子 ITS 領域の短い配列を比較 → 種の同定が可能
ITS	Internal Transcribed Spacer (ITS:遺伝子間領域)。リボソーム RNA (rRNA) 遺伝子に挟まれた領域。たとえば、(18S) - ITS - (5.8S) - ITS - (28S) のように並んでいる。この例では、ITS 領域は、2つの ITS と 3つの rRNA 遺伝子が一繋ぎで転写された後、2つの ITS が切り出される。

<i>matK</i>	葉緑体 DNA に含まれる遺伝子で、イントロンを切り取る酵素 (maturase K) をコードする。葉緑体 DNA の中では比較的進化速度が速いため、植物の系統解析に良く用いられる。
<i>rbcL</i>	葉緑体 DNA に存在するリブロース-2-リン酸カルボキシラーゼ (RuBisCO) の大サブユニットをコードする遺伝子。光合成に関与する遺伝子で陸上植物に普遍的に存在し、多くの植物で塩基配列が決定。コケ類・裸子植物・被子植物間など、離れた系統の解析に使用。種によっては近縁植物間の配列変異が少なく、属間や種間解析には不適。
<i>trnH-psbA</i>	配列が長いうえに反復配列が多く含まれる --> 短い配列の比較を目的とするバーコーディングには必ずしも適切ではない

参考文献

- 1) Pinyopasarak, K., Liang, S. B., Gunn, B. V., Taxonomy, distribution, biology and use as an exotic. In “*Acacia mangium* Growing and Utilization”, Awang, K., Taylor, D. eds. pp.1-19, Winrock International and FAO, 1993.
- 2) Boland,D.J. et al., Forest Trees in Australia, pp.147-167, Nelson-CSIRO, 1985.
- 3) Maslin, B. R., Orchard, A. E., West, J., The nomenclatural history of *Acacia*, <http://www.worldwidewattle.com/infogallery/taxonomy/nomen-class.pdf>.
- 4) <http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/taxgenform.pl>
- 5) Orchard, A.E., Maslin, B. R., Proposal to conserve the name *Acacia* (Leguminosae: Mimosoideae) with a conserved type, *Taxon* **52**, 362–363, 2003.
- 6) PIER (Pacific Islands Ecosystems at Risk). 2002. Invasive Plant Species: *Acacia auriculiformis*. , Available: <http://www.hear.org/pier>
- 7) Brummitt, R. K., Report of the Committee for Spermatophyta: 55. Proposal 1584 on *Acacia*, *Taxon* **54**, 826–829, 2004.
- 8) Luckow, M. et al., *Acacia*: the case against moving the type to Australia, *Taxon* **54**, 513–519, 2005.
- 9) Moore, G. et al., *Acacia*, the 2011 Nomenclature Section in Melbourne, and beyond, *Taxon* **59**, 1188-1195, 2010.
- 10) Lee, S. S., Diseases. In “*Acacia mangium* Growing and Utilization”, Awang, K., Taylor, D. eds. pp.203-223, Winrock International and FAO, 1993.
- 11) Tarigan, M., Roux, J., Wyk, M. V., Tjahjono, B., Wingfield, M.J., A new wilt and die-back disease of *Acacia mangium* associated with *Ceratostysis manginecans* and *C. acaciivora* sp. nov. in Indonesia., S. Afr. J. Bot., doi:10.1016/j.sajb.2010.08.006, 2010.
- 12) Glen, M., Bouger N. L., Francis, A.A., Nigg S.Q., Lee S.S., Irianto, R., Barry, K. M., Beadle, C. L., Mohammed, C.L. *Ganoderma* and *Amauroderma* species associated with root-rot disease of *Acacia mangium* plantation trees in Indonesia and Malaysia, Aust. Plant Pathol. **38**, 345-356, 2009.
- 13) Caroline L. Mohammed, Karen M. Barry and Ragil S.B. Irianto, Heart rot and root rot in *Acacia mangium*: identification and assessment, Potter, K., Rimbawanto, A. and Beadle, C., eds., 2006. Heart rot and root rot in tropical *Acacia* plantations. pp. 24-33, Proceedings of a workshop held in Yogyakarta, Indonesia, 7–9 February 2006. Canberra, ACIAR Proceedings No. 124, 2006.
- 14) Barry, K. M., Irianto, R. S. B., Santoso, E., Turjaman, M., Widyati, E., Sitepu, I. and Mohammed, C. L., Incidence of heartrot in harvest-age *Acacia mangium* in Indonesia, using a rapid survey method, Forest Ecology and Management, **190**, 273–280, 2004.
- 15) Barry, K. M., Mihara, R., Davies, N. W., Mitsunaga, T. and Mohammed, C. L., Polyphenols in *Acacia mangium* and *A. auriculiformis* heartwood with reference to heartrot, J. Wood Sci., **51**, 615–621, 2005.
- 16) Mihara, R., Barry K. M., Mohammed C. L. et al., Comparison of antifungal and antioxidant activities of *Acacia mangium* and *A. auriculiformis* heartwood extracts, J. Chem. Ecology, **31**, 789-804, APR 2005.
- 17) Barry, K.M., Irianto, R.S.B., Tjahjono, B., Tarigan, M., Agustini, L., Hardiyanto, E.B. and Mohammed, C.

- L., Variation of heart rot and extractives with provenance of *Acacia mangium*, *Forest Pathology*, **36**, 183–197, 2006.
- 18) Umezawa, T., Suzuki, S., Shibata, D., Tree biotechnology of tropical Acacia, *Plant Biotech.*, **25**, 309–313, 2008.
- 19) Ibrahim, Z., Reproductive Biology, In “*Acacia mangium* Growing and Utilization”, Awang, K., Taylor, D. eds. pp.21-34, Winrock International and FAO, 1993.
- 20) Sedgley, M., Harbard, J., Smith, R. M. M., Wickneswari, R, Griffin, A. R., Reproductive biology and interspecific hybridisation of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth, *Austral. J. Bot.*, **40**, 37-48, 1992.
- 21) Chin-Hong, N. G., S.-L. Lee, K. Kit-Siong N. G., N. Muhammad and Wickneswari Ratnam, Mating system and seed variation of *Acacia* hybrid (*A. mangium* × *A. auriculiformis*), *J. Genet.*, **88**, 25–31, 2009.
- 22) Parasurama, Janagiri and S. T. Naik, Monetary losses in *Acacia* hybrid due to pink disease caused by *Corticium salmonicolor*, *Karnataka J. Agri. Sci.*, **18**(2), 443-446, 2005.
- 23) CBOL Plant Working Group, A DNA barcode for land plants, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **106**, 12794–12797, 2009.
- 24) Fazekas, A. J. *et al.*, Are plant species inherently harder to discriminate than animal species using DNA barcoding markers?, *Mol. Ecol. Resources*. 9 (Suppl. 1), 130–139, 2009.
- 25) Wojciechowski, M. F., Lavin, M. and Sanderson, a phylogeny of Legumes (Leguminosae) based on analysis of the plastid *MatK* gene resolves many well-supported subclades within the family, M. J., *Amer. J. Botany*, **91**(11), 1846–1862, 2004.

熱帯 *Acacia* の化学成分調査*

梅澤 俊明***

Chemical components of tropical *Acacia* spp.*

Toshiaki Umezawa ***

概要

Acacia mangium、*Acacia auriculiformis* および *Acacia crassicarpa* が産生する化学成分に関する最近の文献調査結果について取りまとめた。

1. はじめに

今後人類が持続的生存を続けるためには、化石資源・エネルギーに対する依存度を下げ、バイオマス資源・エネルギーに対する依存度の大幅上昇が必須であると言われるようになり既に久しい。さらに、本年の福島第一原子力発電所における事故を契機に、バイオマス資源・エネルギーを含む再生可能資源・エネルギーの開発に対する要求が一層上昇していると思われる。

バイオマス資源は、その資源密度が低く、原子力発電所で得られるエネルギーを全て直ちに代替することは難しい。しかし、太陽光、風力、地熱発電等では、工業原材料が直接得られないのに対し、バイオマス資源には工業原材料を与えると言う重要な特性がある。

バイオマス資源のうち、木質資源はバイオマス資源蓄積量の 約 90% を占める¹⁻²⁾ので、森林環境保全と地球温暖化防止を前提とした、最先端の手法による樹木品種改良、持続的管理栽培、木質のバイオエネルギー・バイオ燃料および材料への地域分散型変換利用を総合的に図ることが必須となっている³⁾。

そこで、生存圏研究所においては、熱帯人工林の環境貢献と持続的生産利用を研究所の重要なミッションのひとつに掲げ、その発足以来「アカシアプロジェクト」の通称の下、研究所を挙げての取り組みを続けた。さらに平成 21 年度からは、同プロジェクトをフラッグシッププロジェクト「熱帯人工林の持続的生産利用に関する多角総合的共同研究」に組換え、関連研究を推進している。

主要な熱帯造林樹種としての *Acacia* には、*Acacia mangium* と *Acacia auriculiformis* およびこれらのハイブリッド (*Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*, *Acacia hybrid*)、並びに *Acacia crassicarpa* などがある。*A. mangium* については、1993 年に Kamis Awang と David Taylor の編集に拠る “*Acacia mangium* Growing and Utilization”⁴⁾ が出版され、生物学的特長から病害、木質材料特性や市場性まで広範に記載されている。しかし、化学成分に関する記載はほとんど無かった。そこで、上記、アカシアプロジェクトの一環として平成 18 年度に推進した京都大学総長裁量経費「熱帯人工林の環境貢献と持続的生産利用」のプロジェクトの中で、*A. mangium*、*A. auriculiformis* および *Acacia hybrid* に関する化学成分の 2006 年までの文献調査結果について取りまとめた⁵⁾。そこ

* 2011 年 9 月 14 日受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野

*** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存基盤科学研究ユニット

E-mail: tumezawa@rish.kyoto-u.ac.jp

で、本稿では同調査以後の文献について取りまとめを行った。

2. *A. mangium*、*A. auriculiformis*、*Acacia hybrid*および*A. crassicarpa*の化学成分

2.1 *A. mangium*

“*Acacia mangium*”をキーワードとしてSciFinder Searchを行ったところ(平成23年4月2日)、2007年以降の文献で148文献がヒットした。前回の調査⁵⁾では2003～2006年の文献が95報、1995～2002年の文献が92報、1994年以前の文献が23報であり、明らかに近年の報文数の増加が見て取れる。これらの148文献のうち、化学成分関係が22報⁶⁻²⁷⁾、パルプ化関係が4報²⁸⁻³¹⁾であった。

化学成分関係22報の内容は、タンニンに関するものが12報⁶⁻¹⁷⁾、リグニン構造に関するもの2報¹⁸⁻¹⁹⁾、微生物に対する活性成分が2報²⁰⁻²¹⁾、脂肪酸・レジン関係が2報²²⁻²³⁾、発熱量・バイオエタノール関係が2報²⁴⁻²⁵⁾、セルロールミクロフィブリル傾角関係が1報²⁶⁾、リグニンの微生物分解関連が1報²⁷⁾である。これらの結果は、*A. mangium*樹皮タンニンの利用が進んでいることを反映している。また、リグニン合成酵素遺伝子³²⁾と二次木部形成部位での遺伝子発現データベース³³⁾に関する報告がそれぞれ1報見られた。

2.2 *A. auriculiformis*

一方、“*Acacia auriculiformis*”をキーワードとした場合、2007年以降で73文献がヒットした(平成23年4月2日)。これらの文献のうち、化学成分関係が8報³⁴⁻⁴²⁾、パルプ化関係が2報^{42, 43)}である。

化学成分関係7報の内容は、一般化学成分分析に関するものが1報³⁴⁾、脂肪酸分析関係が1報³⁵⁾、抗酸化性・ラジカル補足関係3報³⁶⁻³⁸⁾、堆肥化へのリグニン・ポリフェノールの影響に関するものが1報³⁹⁾、生理活性成分関係2報^{40, 41)}である。また、リグニン合成酵素遺伝子³²⁾に関する報告が1報見られた。

2.3 *Acacia hybrid* (*Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*)

“*Acacia mangium*”もしくは“*Acacia auriculiformis*”をキーワードとして検索した際、*Acacia hybrid*も検索にかかってきた。すなわち、近赤外分光分析によるリグニン解析に関する1報¹⁹⁾、パルプ化関係2報^{30, 44)}見いだされた。

2.4 *Acacia crassicarpa*

また、“*Acacia crassicarpa*”をキーワードとした場合、47文献がヒットした(平成23年4月2日)。本種については前回の検索⁵⁾に加えていないので、年代を区切らずに検索した。その結果、パルプ化関係6報^{30, 45-49)}、近赤外分光分析によるリグニン解析1報¹⁹⁾、微生物に対する抵抗性成分関連1報²⁰⁾、抗酸化成分関係1報⁵⁰⁾、多糖分析関係1報⁵¹⁾、フラボノイド関連1報⁵²⁾、抽出成分分析関連2報^{53, 54)}が認められた。本種はパルプ用材として湿性土壤にも植栽されていることから、パルプ関連文献が多く見出されたと考えられる。

2.3まとめと将来展望

A. mangium、*A. auriculiformis*、*Acacia hybrid*および*A. crassicarpa*の化学成分関連の報告については、これらのパルプ用材としての実績を反映して、パルプ関係のものが比較的多い。化学成分の分析に関しては、ある程度報告されているものの、総合的な成分分析はいまだなされていない。アカシアの植栽面積は全人工林面積の約5%とされており(ユーカリは約10%)⁵⁵⁾、アカシアは実用樹種のうちでも重要なもののひとつであることからすると、実用アカシアの成分表を完備することが求められる。また、熱帯アカシアのバイオテクノロジーは、ポプラやユーカリのそれと比べてかなり後れを取っている。今後これらのアカシアの利用を一層進めるに際し、育種目標に関連した化学成分

をメタボロミクスの手法を適用して網羅的に解析する必要があると思われる。例えば、心材腐朽抵抗性品種と感受性品種に関する網羅的成分分析を行うことにより、抵抗性成分の同定が可能となる。次いで、心材腐朽抵抗性の原因遺伝子を単離するため、心材腐朽抵抗性成分とその生合成前駆体に関する網羅的成分分析が必要となろう。同様の解析は、有機化合物が関与する様々な有用形質についても適用可能である。これらの手法を適用して有用形質原因遺伝子が取得されれば、並行して検討が進んでいる分子育種技術を用いて、有用形質を持つ *Acacia* spp. の育種が可能となろう。

参考文献

- 1) 藤森隆郎, 地球温暖化における森林の役割, 農林水産技術研究ジャーナル, **21**, 43-49, 1998.
- 2) 依田恭二, 大気中の二酸化炭素濃度に対する陸上生態系の影響, 地球化学, **16**, 78-85, 1982.
- 3) 梅澤俊明, バイオマス研究, 学術の動向, **15**, 72-74, 2010
- 4) Kamis Awang and David Taylor (Eds.), *Acacia mangium* Growing and Utilization, Winrock International and The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, Thailand, pp. 280 (1993)
- 5) 梅澤俊明, 鈴木史朗, *Acacia mangium* と *Acacia auriculiformis* の化学成分調査, 生存圏研究, **3**, 43-47, 2007.
- 6) Chen, C., Jiang, D., Hu, H., Li, Y., Study on extraction process of total polyphenol from acacica mangium leaves by microwave, *Yingyong Huagong*, **37**, 780-783, 2008.
- 7) Chen, C., Hu, H., Li, Y., Huang, X., Zhang, B., Extraction of total polyphenols from *Acacia mangium* leaves by microwave pretreatment, *Yingyong Huagong*, **37**, 544-547, 2008.
- 8) Chen, C.-J., Hu, H.-Y., Li, Y., Huang, Y.-S., Qin, Y.-B., Optimum process for extraction of total polyphenols from *Acacia mangium* leaves by orthogonal test, *Guangpu Shiyanshi*, **25**, 828-832, 2008.
- 9) Liu, J., Ando, R., Shimizu, K., Hashida, K., Makino, R., Ohara, S., Kondo, R., Steroid 5 α -reductase inhibitory activity of condensed tannins from woody plants, *J. Wood Sci.*, **54**, 68-75, 2008.
- 10) Chen, C.-j., Jiang, D.-h., Li, J.-j., Yang, G.-e., Huang, K.-y., Photometric determination of polyphenols in leaves of *Acacia mangium* with Folin-Ciocalteu reagent, *Huaxue Fence*, **45**, 1191-1193, 2009.
- 11) Hoong, Y. B., Paridah, M. T., Luqman, C. A., Koh, M. P., Loh, Y. F., Fortification of sulfited tannin from the bark of *Acacia mangium* with phenol-formaldehyde for use as plywood adhesive, *Industrial Crops Prod.*, **30**, 416-421, 2009.
- 12) Maki, A., Ogimoto, K., Ishida, Y., Ohtani, H., Hasegawa, T., Kitagawa, K., Homma, Y., Inai, A., Structural analysis of condensed tannins in hydrothermal extracts from wasted bark by matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry, *Bunseki Kagaku*, **58**, 731-736, 2009.
- 13) Hoong, Y.B., Paridah, M.T., Loh, Y.F., Koh, M.P., Luqman, C.A., Zaidon, A., *Acacia mangium* tannin as formaldehyde scavenger for low molecular weight phenol-formaldehyde resin in bonding tropical plywood. *J. Adhesion Sci. Technol.*, **24**, 1653-1664, 2010.
- 14) Zhang, L., Chen, J., Wang, Y., Wu, D., Xu, M., Phenolic extracts from *Acacia mangium* bark and their antioxidant activities, *Molecules*, **15**, 3567-3577, 2010.
- 15) Hoong, Y. B., Pizzi, A., Tahir, P. M., Pasch, H., Characterization of *Acacia mangium* polyflavonoid tannins by MALDI-TOF mass spectrometry and CP-MAS ^{13}C NMR, *Europ. Polymer J.*, **46**, 1268-1277, 2010.
- 16) Hariadi, B. T., Santoso, B., Evaluation of tropical plants containing tannin on *in vitro* methanogenesis and fermentation parameters using rumen fluid, *J. Sci. Food Agric.*, **90**, 456-461, 2010.
- 17) Hoong, Y. B., Paridah, M. T., Loh, Y. F., Jalaluddin, H., Chuah, L. A., A new source of natural adhesive: *Acacia mangium* bark extracts co-polymerized with phenol-formaldehyde (PF) for bonding Mempisang

- (*Annonaceae* spp.) veneers, *Intern. J. Adhesion Adhesives*, **31**, 164–167, 2011.
- 18) Yamamura, M., Hattori, T., Suzuki, S., Shibata, D., Umezawa, T., Microscale alkaline nitrobenzene oxidation method for high-throughput determination of lignin aromatic components, *Plant Biotech.*, **27**, 305–310, 2010.
- 19) Yao, S., Wu, G., Xing, M., Zhou, S., Pu, J., Determination of lignin content in *Acacia* spp. using near-infrared reflectance spectroscopy, *BioResources*, **5**, 556–562, 2010.
- 20) Vaelimaa, A.-L., Honkalampi-Haemaelainen, U., Pietarinen, S., Willfoer, S., Holmbom, B., Von Wright, A., Antimicrobial and cytotoxic knotwood extracts and related pure compounds and their effects on food-associated microorganisms, *Intern. J. Food Microbiol.*, **115**, 235–243, 2007.
- 21) Jeon, Y.-T., Ryu, K.-H., Kang, M.-K., Park, S.-H., Yun, H., Qt, P., Kim, S.-U., Alternariol monomethyl ether and α , β -dehydroucurvularin from endophytic fungi *Alternaria* spp. inhibit appressorium formation of *Magnaporthe grisea*, *J. Kor. Soc. Appl. Biol. Chem.*, **53**, 39–42, 2010.
- 22) Joshi, L., Malinen, R. O., Holmbom, B., Deresination of *Acacia mangium* pulp – role of cooking and washing additives and removal of fines, *Appita J.*, **62**, 226–231, 2009.
- 23) Mizumoto, M., Shimokita, E., Ona, T., Seino, T., Ishida, Y., Ohtani, H., Rapid and direct characterization of total fatty acids in wood by thermochemolysis-gas chromatography-flame ionization detector/mass spectrometry with tetrabutylammonium hydroxide, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **87**, 163–167, 2010.
- 24) Zeng X.-p., Cai X.-a., Zhao P., Rao X.-q., Caloric value and ash content of dominant plants in plantation communities in Heshan of Guangdong, China, *J. Appl. Ecol.*, **20**, 485–492, 2009.
- 25) Kaida, R., Kaku, T., Baba, K., Oyadomari, M., Watanabe, T., Hartati, S., Sudarmonowati, E., Hayashi, T., Enzymatic saccharification and ethanol production of *Acacia mangium* and *Paraserianthes falcataria* wood, and *Elaeis guineensis* trunk, *J. Wood Sci.*, **55**, 381–386, 2009.
- 26) Tabet, T. A., Abdul, A., Fauziah, H., Radiman, S., Application of small-angle X-ray scattering to predict microfibril angle in *Acacia mangium* wood, *Advanced Materials Res.*, **173**, 72–77, 2011.
- 27) Djarwanto, Tachibana, S., Decomposition of lignin and holocellulose on *Acacia mangium* leaves and twigs by six fungal isolates from nature, *Pakistan J. Biol. Sci.*, **13**, 604–610, 2010.
- 28) Chen, N.-m., Deng, Y.-j., Han, S.-m., Jiao, J., Fang, G.-g., Comparative pulping properties of *Eucalyptus urograndis* \times *E. grandis* and *Acacia mangium* Willd. woods using P-RC APMP process, *Linchuan Huaxue Yu Gongye*, **28**, 25–30, 2008.
- 29) Wan Rosli, W. D., Mazlan, I., Law, K. N., Effects of Kraft pulping variables on pulp and paper properties of *Acacia mangium* kraft pulp, *Cellulose Chem. Technol.*, **43**, 9–15, 2009.
- 30) Chen, C., Pu, J., Yao, S., Jiang, Y., A study on pulping performances of five *Acacia* species, *Zhonghua Zhiye*, **30**, 80–82, 2009.
- 31) Pramod, B. K., Pratima, B., *Acacia* an emerging raw material for pulp, *Ippta J.*, **22**, 107–111, 2010.
- 32) Fariza, M. S. N., Pang, S. L., Choong, C. Y., Wickneswari, R., Extensive DNA sequence variations in two lignin genes, cinnamate 4-hydroxylase and cinnamyl alcohol dehydrogenase from *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis*. *J. Biol. Sci.*, **8**, 687–690, 2008.
- 33) Suzuki, S., Suda, K., Sakurai, N., Ogata, Y., Hattori, T., Suzuki, H., Shibata, D., Umezawa, T., Analysis of expressed sequence tags in developing secondary xylem and shoot of *Acacia mangium*, *J. Wood Sci.*, **57**, 40–46, 2011.
- 34) Chew, Y. L., Chan, E. W. L., Tan, P. L., Lim, Y. Y., Stanslas, J., Goh, J. K., Assessment of phytochemical content, polyphenolic composition, antioxidant and antibacterial activities of Leguminosae medicinal plants in Peninsular Malaysia, *BMC Complement. Alternat. Med.*, **11**, 12, 2011.
- 35) Mizumoto, M., Shimokita, E., Ona, T., Seino, T., Ishida, Y., Ohtani, H., Rapid and direct

- characterization of total fatty acids in wood by thermochemolysis-gas chromatography-flame ionization detector/mass spectrometry with tetrabutylammonium hydroxide, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **87**, 163–167, 2010.
- 36) Singh, R., Singh, S., Kumar, S., Arora, S., Evaluation of antioxidant potential of ethyl acetate extract/fractions of *Acacia auriculiformis* A. Cunn., *Food Chem. Toxicol.*, **45**, 1216–1223, 2007.
 - 37) Singh, R., Singh, S., Kumar, S., Arora, S., Studies on antioxidant potential of methanol extract/fractions of *Acacia auriculiformis* A. Cunn., *Food Chem.*, **103**, 505–511, 2007.
 - 38) Singh, R., Singh, S., Kumar, S., Arora, S., Free radical-scavenging activity of acetone extract/fractions of *Acacia auriculiformis* A. Cunn., *Food Chem.*, **103**, 1403–1410, 2007.
 - 39) Ganesh, P. S., Gajalakshmi, S., Abbasi, S. A., Vermicomposting of the leaf litter of acacia (*Acacia auriculiformis*): Possible roles of reactor geometry, polyphenols, and lignin, *Biores. Technol.*, **100**, 1819–1827, 2009.
 - 40) Pal, D., Chakraborty, P., Ray, H. N., Pal, B. C., Mitra, D., Kabir, S. N., Acaciaside-B-enriched fraction of *Acacia auriculiformis* is a prospective spermicide with no mutagenic property, *Reproduction*, **138**, 453–462, 2009.
 - 41) Datta, S., Maitra, S., Gayen, P., Sinha, B. S. P., Improved efficacy of tetracycline by acaciasides on *Dirofilaria immitis*. *Parasitol. Res.*, **105**, 697–702, 2009.
 - 42) Jahan, M. S., Sabina, R., Rubaiyat, A., Influence of cooking conditions on pulp properties of *Acacia auriculiformis* in kraft pulping, *Kami Pa Gikyoshi*, **61**, 1367–1375, 2007.
 - 43) Jahan, M. S., Sabina, R., Rubaiyat, A., Alkaline pulping and bleaching of *Acacia auriculiformis* grown in Bangladesh, *Turkish J. Agric. For.*, **32**, 339–347, 2008.
 - 44) Sukeno, S., Improvement of pulpwood productivity of fast grown eucalyptus and acacia tree species in southeast Asia, *Kami Pa Gikyoshi*, **63**, 57–60, 2009.
 - 45) Balodis, V., Clark, N.B., Tropical acacias — the new pulpwood, *Appita J.*, 51, 179–181, 1998.
 - 46) Xue, G.-x., Zheng, J.-w., Matsumoto, Y., Meshitsuka, G., Pulping and bleaching of plantation fast-growing Acacias. Part 1. Chemical composition and pulpability, *Kami Pa Gikyoshi*, **55**, 366–372, 2001.
 - 47) Gong, M., Li, Z., Comparison of pulping properties of *A. mangium*, *A. auriculaeformis* and *A. crassicarpa*, *Zhongguo Zaozhi*, **21**, 1–3, 2002.
 - 48) Deng, Y., Fang, G., Ping, L., Liu, J., Jiang, Z., Elemental chlorine bleaching (ECF) of kraft pulp from four species of acacia woods, Editor(s): He, B., Fu, S., Chen, F., Research Progress in Pulping and Papermaking, [International Symposium on Emerging Technologies of Pulping and Papermaking], 3rd, Guangzhou, China, pp. 240–246, 2006.
 - 49) Deng, Y.-j., Fang, G.-g., Li, P., Liu, J.-l., Jiang, Z.-h., Study on elemental chlorine-free bleaching properties of kraft pulp of *Acacia* wood species, *Linchuan Huaxue Yu Gongye*, **26**, 34–38, 2006.
 - 50) Pietarinen, S. P., Willfor, S. M., Ahotupa, M. O., Hemming, J. E., Holmbom, B. R., Knotwood and bark extracts: strong antioxidants from waste materials, *J. Wood Sci.*, **52**, 436–444, 2006.
 - 51) Willfoer, S., Sundberg, A., Pranovich, A., Holmbom, B., Polysaccharides in some industrially important hardwood species, *Wood Sci. Technol.*, **39**, 601–617, 2005.
 - 52) Pietarinen, S. P., Willfoer, S. M., Sjoeholm, R. E., Holbom, B. R., Bioactive phenolic substances in important tree species. Part 3: knots and stem wood of *Acacia crassicarpa* and *A. mangium*, *Holzforschung*, **59**, 94–101, 2005.
 - 53) Pietarinen, S. P., Willfor, S. M., Sjoholm, R. E., Holmbom, B. R., Extractives in *Acacia mangium* and *Acacia crassicarpa* stem wood and knots, Appita Annual Conference and Exhibition, **58th (Vol. 2)**, 557–564, 2004.

- 54) Pietarinen, S., Willfoer, S., Holmbom, B., Wood resin in *Acacia mangium* and *Acacia crassicarpa* wood and knots, *Appita J.*, **57**, 146–150, 2004.
- 55) http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Japanese/A11_J-080917.pdf

熱帯域の森林再生に向けて*

川井 秀一**

Towards the Reforestation in Tropics*

Shuichi Kawai**

概要

熱帯域の森林減少と劣化を防ぐための方策について考察して植林による森林再生が重要であることを指摘し、大規模産業造林の現状と課題について検討すると共に、熱帯地域の今後の林業・木材利用のあり方を展望した。

1. 热帯域植林の必要性

植物は、光エネルギーと水、そして極くわずかの栄養塩から省エネルギー的なプロセス、すなわち光合成によって有機物を生産して生命活動を営み、一次生産者として生命圏の食物連鎖の基盤をなし、生態系の保持に貢献している。なかでも樹木は、陸域において唯一多量に有機物を蓄積した生命体である。その集合である森林は炭素を貯蔵し、地球圏における炭素、水循環の重要な構成要素として働き、生命圏からみれば生物多様性を保持する必要不可欠のエコシステムであると同時に、人間圏の視点からは再生産可能なバイオマス資源の貴重な供給源である。森林は陸域生命圏に在って、その生存基盤としての位置を占めると同時に、これら三圈、すなわち、人類の生存圏全体にわたる物質・エネルギーおよび資源循環の一翼を担っている。

「バイオマス」を再生産可能な生物の総量と定義すれば、熱帯には豊かなバイオマスを原型のまま低次利用する伝統的社會が存在する。一方、化石資源の枯渇に伴い先進国では新たなグリーンエネルギーの創出を目指し、バイオマスのポテンシャルを最大限に引き出す高度バイオマス社会への動きが加速している。21世紀になって化石資源の枯渇が現実となりつつあり、バイオマス変換の技術革新をテコに地域社会・経済の再構築が必要とされている。われわれの生存基盤を化石資源から再びバイオマス資源に移すと共に、人間圏、生命圏、および地球圏の関係性と相互作用を明らかにして、生存圏の持続性確保に向けた取り組みが求められる。植物バイオマスを基盤とする産業の創出と新たなバイオマス社会構築の可能性についての検討が必要な所以である。

森林、とくに、熱帯アジア地域の大規模産業造林と地域環境の調和ある共存は、直近の重要な課題の一つである。日射や降雨の豊富な熱帯地域における持続的な植物生産は、森林再生の試金石でもある。地球温暖化と化石資源枯渇に対処する切り札として期待される。また持続的、循環的な木材資源の生産基盤として地元住民の経済活動や福祉への貢献も期待される。一方、土地集約的な短伐期植林、栄養塩の継続的な収奪に伴う土壤劣化など「生産の課題」、単一樹種による大規模植林地における生物多

*2011年9月15日受理；本稿は、地球圏・生命圏・人間圏—持続的な生存基盤を求めて—（杉原薰、川井秀一、河野泰之、田辺明生共編著、京都大学学術出版会、2010）から川井秀一著の熱帯林生命圏の創出（第7章、pp. 215-231）から関連する部分を抽出・再構成したものを基に、増補改訂したものである。

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所循環材料創生分野
E-mail: skawai@rish.kyoto-u.ac.jp

様性減少などの「生態系の課題」、地域住民との土地所有権、生活保証や経済振興といった「社会・経済の課題」、木質資源の効率的な材料・エネルギー変換やバイオリファイナリーなど新たな加工技術に関わる「利用の課題」など、持続性に関して解決すべき課題も多い。

人間活動の拡大に伴い、森林は農牧草地への土地利用の転換や資源・エネルギーとして収奪された結果、一貫して減少を続けた。産業革命以後この傾向はとくに顕著になっている。たとえば、FAO（国際連合食糧農業機関）の直近のデータ¹⁾によると、2005 年の世界の森林面積は 39 億 ha であり、依然として陸域の 30% を占めるものの、今なお年間 890 万 ha (1990-2000 年) から 730 万 ha (2000-2005 年) の森林が減少している。中でも南米、アフリカ、東南アジア等の元来蓄積の大きい熱帯雨林を有する国での減少が目立ち、東南アジア諸国の中ではインドネシアの減少が著しい。

地球温暖化防止策として京都議定書が 2005 年に発効し、気候変動に関する政府間パネルの第 3 作業部会第 4 次評価報告書²⁾では森林、林業、および木材利用の地球環境貢献について、これら林業部門の活動が低コストで排出量の削減及び吸収源の増加の両方に大きく貢献すると位置づけている。具体的方策として、森林、林業および木材利用について、それぞれ (1) 森林面積の維持増加（森林減少、土地利用変化の防止）、(2) 持続可能な森林経営による炭素蓄積の維持増加、(3) 木材製品の炭素蓄積の増加、高エネルギー製品の代替、およびバイオマスエネルギーの利用増加などが気候変動枠組条約締約国会議 (COP) において協議されている。とくに、インドネシアスマトラ島およびカリマンタン島では 1990 年以降の急激な泥炭湿地の開発に伴う土地利用変化により湿地の乾燥化が進み、森林火災等も相まって土壤中に蓄積された膨大な泥炭の消失し、その結果炭素の排出が進んでいる。このため、第 13 回締約国会議 (COP13, 2007 年バリ会議) 以降、途上国の森林減少・劣化に由来する排出の削減 (REDD) を次期枠組みに組み込む検討が開始され、実証活動や能力開発に取り組みについて協議されている。

このように森林の消滅を防ぎ、荒廃地の植林によって森林を再生することが緊喫の課題となっている。地球上の人工林面積は年間 280 万 ha (2000-2005 年) の割合で増加しつつあるが、まだ全森林面積の 3.8% (1.4 億 ha) に過ぎない。森林再生の鍵は産業造林にある。人間圏からの働きかけや管理が可能な生産林を増やすことが森林再生に対して直接的なインセンティブを与え、人口爆発に伴う木材資源・エネルギーの需要を賄うことを可能にするからである。またこのことは現存する原生（保存）林や保全林を維持するための実際的な方策でもある。今後、解決すべき様々な技術的、環境的、また社会的な課題があるものの、経済問題と環境問題の折り合いを図る近道であり、生命圏と地球圏に調和する人間圏のあり方を提示すると考える。

2. 热帯産業造林の課題

熱帯林は全森林面積の 47%、亜熱帯林 (9%) を含めると過半を占め、現存するバイオマスの蓄積面から最も大きな存在である。また、湿潤熱帯地域は、新規の産業造林地として、大きな木材資源の収量を期待できる。低緯度地域のいわゆる熱帯域は、中高緯度に比べ太陽の放射エネルギーが 4 倍程度大きく、熱帯域の大気の動きは全球大気運動のエンジンとなっている。このため日照、気温、降雨量等の強度が全球でもっとも大きい。このことは植物バイオマスの生産にとっても好ましい環境といえる。

ユーカリ、ポプラ、ラジアータマツなど温帯域にも成長に優れた植林樹種があるが、一般に温帯林や寒帯林に比べて熱帯林の成長は年間を通じて持続的であり、その年平均成長量は極めて大きい。日本の代表的な植林樹種であるスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don.) の年平均生長量は地域や樹齢により変動するものの、幹材積（地際から末梢までの幹部の体積）でおよそ 4 ~ 8 m³/ha である。枝葉や根を含めた全バイオマスの年間生長量は 7 ~ 14 m³/ha 前後と見積もることができる³⁾。一方、近年になって始まった熱帯地域での大規模産業植林の場合をみると、たとえばアカシアマンギウム (*Acacia mangium* Willd.) の年平均成長率は、幹材積で 20 ~ 50 m³/ha であり、スギの場合の 5 倍以上の値に達している。このように熱帯地域の林業は、その生産性において温帯や寒帯地域に比して産業としての

優位性をもっている。

一方、生態系としての熱帯林をみると、有機物の生産・消費・分解等のプロセスが多段階で複雑多岐にわたり、そのため生物の多様性が豊かである。また、大気や土壤間との炭素・水分等の物質・エネルギーの交換が激しく、変動が大きい。このため、その変化の大きさから生態系の脆弱性がしばしば指摘されている。加えて近年になって人間活動による擾乱も激しさを増しており、天然林の減少と劣化によって生物多様性の維持保全が脅かされている。とくに熱帯地域の天然林（熱帯雨林および熱帯季節林）は世界の森林面積の 47% を占め、その蓄積が最も大きく、種の多様性が豊かであり、森林生態系として決定的に重要である。それ故に、人口圧の増加と共に人間圏からの干渉を激しく受け、現在消滅と劣化の進行が最も大きい森林となっている。森林生態系の消失を伴う森林減少、さらには森林生態系が提供する多様な機能・環境サービスの低下を伴う森林劣化を食い止めることが大きな課題である。

熱帯産業造林は、このような人間圏からの生命圏、とりわけ天然林への干渉を緩和して生態系の保全に寄与することができる。また、荒廃地の森林再生によって緑を回復し、木材資源の天然林への依存からの脱却を促し、さらには地球温暖化抑制にも貢献できる可能性を秘めている。しかし、天然林の劣化を抑制し、違法伐採を防いで生態系保全を実現するには、地域住民の参画を含め人間圏からの注意深い管理が必要であるのはいうまでもない。植林を標榜して天然林の劣化を助長する動きがしばしば認められるが、これを防止する政策やガイドライン策定が急がれる。

近年の資源獲得競争の結果、インドネシアスマトラ島およびカリマンタン島の沿岸低地に分布する泥炭湿地にまで開発が及んでいる。焼き畑などの農地への土地利用変換、森林火災、違法伐採による森林消失や劣化のほか、アブラヤシ・パラゴムノキの農業プランテーションやアカシア植林などの大規模な開発が実施されている。この際、排水により土壤に好気的条件が成立するため土壤有機物が急速に分解・消失し大気中の CO₂ 増加の大きな要因となると共に、泥炭湿地の基底にあるパイライト (FeS₂) などの硫化鉄鉱物が酸素と反応して土壤の酸性化をもたらす。熱帯域の泥炭湿地林では、このような大規模開発の結果、有機物の急速な消失と酸性化により土壤が著しく劣化し、荒廃地化した土地が放棄される例がしばしば見られる。

WWF (世界自然保護基金) のインドネシアスマトラ島リアウ州の森林消失と劣化、ならびに生物多様性の減少と CO₂ 排出に関する最近のレポートは同州泥炭湿地林の開発に深刻な警告を発している⁴⁾。インドネシアの泥炭地面積は 3,000 万 ha ~ 4,500 万 ha に達し、世界第 4 位の大きさ (10 ~ 12%) を占めている。その中でリアウ州の泥炭地は約 400 万 ha を占めている。泥炭土壤は 10 m 以上の深さに及ぶ所もあり、泥炭土壤の総量や貯蔵される炭素量はインドネシア最大で 14.6 ギガトン (GtC) にのぼると推定されている。このような泥炭地の上に成立した湿地林が開発の脅威にさらされている。過去 25 年間 (1982 年～2007 年) の間に、リアウ州の泥炭土壤からの森林消失は 57%、また非泥炭土壤からの消失は 73% に及び、合わせて 65%、400 万 ha に達している。皆伐された森林のうち、28.7% (111 万 ha) はアブラヤシ農園に転換され、24.4% (95 万 ha) がパルプ材用のアカシア植林への転換、いわゆる「荒地」に変わったのは 17.0% (66 万 ha) である。残りの 29.9% のうち、小規模のアブラヤシ農園への転換 (7.2%)、将来の使途目的が不明の新たな皆伐地 (7.2%)、インフラ、ゴムやココナッツ農園など、その他用途への転換とされている。

インドネシアの LULUCF (土地利用、土地利用変化および林業部門) による排出 (2000 年) は 2,563 MtCO₂ と推計されているが、この値は全インドネシアの炭素排出の 51% を占め、世界の LULUCF の 34% に達している。この原因は上述したように森林の減少と劣化によるものであり、その多くは炭素の多い泥炭土壤で発生している。LULUCF による排出に泥炭の分解や燃焼 (2,000 MtCO₂) を加えると、2000 年におけるインドネシア全体の温室効果ガスの排出源の 90% 以上を占めている。

3. 天然林から人工林の利用へ

東南アジア地域では、チーク、マホガニーなどの限定された有用樹種の人工林を除けば、豊かな植

生を背景にこれまで天然林から用材、薪炭材、薬用植物、食物等の林産物が採取されてきた。しかし、近年の天然林の減少・劣化と環境保全の重要性に対する認識の高まりに伴い、原木の供給は天然木から造林木に急速に移行しつつある。1900 年代初頭から本格化したパラゴムノキ、アブラヤシなどの農業プランテーション作物の植栽は、その後これらの樹木の廃棄立木のリサイクル利用のための木材加工技術の発達を促し、前者については製材から集成材、合板やパーティクルボード/ファイバーボードなどの各種木質パネルにいたる様々な木質材料の重要な原料供給源となっている。

インドネシアにおける産業造林政策は、カリマンタン島およびスマトラ島を中心に 1960 年代から推進されてきた。1966 年に森林コンセッションが開始され、天然林の減少に拍車がかかる反面、アカシア・マンギウム、メライナ (*Gmelina arborea* Linn.)、カメリレ (*Eucalyptus deglupta* Bl.)、ファルカータ (*Paraserianthes falcata* Backer) に代表される早生樹による植林の試みが盛んになっている。これら早生樹種の物理的、力学的性質をはじめ、木質材料への加工利用特性について多くの研究が見られる⁵⁻⁹⁾。1980 年代からは産業造林 (HTI) 政策がカリマンタン島、スマトラ島を中心に推進され、1990 年代にはアカシアやファルカータなどの早生樹の産業造林が本格化している。アカシア材は紙パルプあるいは木質ボード用のチップ用材として、ファルカータ材は製材や単板積層材 (LVL) などの木質材料用材として供給されている。いずれも 10 年未満の短伐期林業である。

2000 年代以降になって単一樹種、短伐期、一斉大規模造林以外の産業造林の試みも始まっている。すなわち、マレーシアサバ州においてアカシアハイブリッドの植林が、またインドネシア中央カリマンタン丘陵地においては在来優占樹種である広葉樹(フタバガキ科)の植林が開始されている。前者はアカシアマンギウム (*A. mangium*) とアカシアアウリカリフォルミス (*A. auriculiformis*) の自然交配種を用いているが、枝打ち、除伐、間伐などこれまでの熱帯造林には見られない集約的な施業を施し、製材・合板用材を目指した造林を行っている。後者はフタバガキ科が優先する天然林の択伐施業の後、列状皆伐・再植林を実施しており、FSC 認証を取得している。いずれも 15 年～20 年の中伐期施業の産業造林である。

参考文献

- 1) Food and Agricultural Organization 2008. Global Forest Resources Assessment 2005.
- 2) IPCC: 第 4 次評価報告書（第 3 作業部会）IPCC AR4WGIII Technical Summary
- 3) 林野庁, 森林・林業基本計画（平成 13 年 10 月）, 2001.
- 4) Uryu, Y. et al., Deforestation, Forest Degradation, Biodiversity Loss and CO₂ Emissions in Riau, Sumatra, Indonesia. WWF Indonesia Technical Report, Jakarta, Indonesia, 2008.
- 5) 王潛, 佐々木光, Razali A. Kader, サバ産植林木間伐材の性質, 木材研究・資料, **25**, 45-51, 1989.
- 6) 王潛, 林知行, 佐々木光, 長谷泰弘, サバ産植林木 LVL の複合梁フランジとしての利用（第 1 報）LVL 化による材質の信頼性向上, 木材学会誌, **36**(8), 624-632, 1990.
- 7) Firmanti, A., Subiyanto, B., Takino, S., and Kawai, S., The critical stress in various stress levels of bending member on fire exposure for mechanical graded lumber, *J. Wood Sci.*, **50**, 385-390, 2004.
- 8) Firmanti, A., Bachtiar, E. T., Surjokusumo, S., Komatsu, K., and Kawai, S., Mechanical stress grading of tropical timber without regard to species, *J. Wood Sci.*, **51**, 339-347, 2005.
- 9) Firmanti, A., Subiyanto, B., and Kawai, S., Evaluation of the fire endurance of mechanically graded timber in bending, *J. Wood Sci.*, **52**, 25-32, 2006

熱帯造林地におけるバイオマス生産の持続性*

川井 秀一**, ラギール ウドヨリーニ**

Sustainability on the Biomass Production in the Tropical Forest Plantation*

Shuichi Kawai** and Ragil Widyorini**

概要

炭素循環の観点から森林の蓄積（ストック）と原木伐採（フロー）について考察し、森林バイオマスの特徴を明らかにした。さらに、ケーススタディとして熱帯地域の大規模造林地における森林バイオマスのストックとフローを推定評価した。森林バイオマスの生産と環境維持の観点から蓄積を重視すると共に、木材利用の立場からは原木伐採が重要であり、これらの二つの持続性維持が図る点で、天然林とは異なる人工造林の有用性を示した。

1. 森林バイオマスの蓄積（ストック）と原木伐出（フロー）

森林の炭素蓄積機能は、大気の二酸化炭素削減と原木生産の両面から重要である。天然林でもまた人工林でも、一般に、森林の蓄積量は極若齢の段階では緩やかであり、その後成長の旺盛な時期を経て、やがて成長が鈍化する、いわゆるS字型の成長曲線を描く。スギの場合のように適切な施業管理によって100年以上成長が持続する樹種もあるが、アカシアのような熱帯の植林木は一般に成長が極めて早いものの、10～20年で成熟して成長が停止するものが多い。このように地域、樹種、管理方法によって成長曲線の時間スパンは大きく異なるが、その基本的な形はあまり大きく変わらない。

天然林でも、また人工林の場合も同様に、成熟段階において炭素蓄積（ストック）が最大となるが、この段階では成長による炭素吸収量と枯死・分解による炭素排出量とがバランスし、炭素蓄積の増分はゼロになる。人工造林（の多くは経済林であるが）において成長が鈍化する段階で伐採・再植林をする場合、炭素蓄積は最大にはならない反面、比較的大きな炭素の蓄積増分を期待することができる。生物多様性の維持機能を重視する保存林の場合には炭素蓄積量が大事であり、一方、木材生産機能を重視する経済林（生産林）では蓄積増分が重要である。後者の場合、増分に見合う原木の伐出（フロー）をして、これを最大限有効に活用する加工利用技術を開発し、生産と利用の持続性を確保することになる。そのためには年々の炭素蓄積量と蓄積増分、伐出の動的な解析把握が必要である。単位面積当たりの森林バイオマスの蓄積、増分、エネルギー投入量などを正確に把握することが基本となる。

樹木に蓄積されている炭素量は、樹木の体積（材積）から算出される。用材利用の場合には、材積は幹の材積（幹材積）で表すほうが実用的である。一方、地球温暖化抑制など大気の二酸化炭素吸収源としての役割に関わる場合は、蓄積炭素量は幹材積の他に枝葉、根の要素を考慮し、以下のように算出される。すなわち、①根の量（地下部・地上部比）②枝葉の量（拡大係数）、③材積当たりの重量

*2011年9月16日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所循環材料創生分野
E-mail: skawai@rish.kyoto-u.ac.jp

(容積密度、樹種によって異なるが、一般に $0.5\text{g}/\text{cm}^3$)、および④重量に占める炭素量の割合（樹木重量中に炭素が占める割合は約 0.5）。①および②についてアカシア立木の部位別の重量比調査をみると、根、幹、枝、葉についてそれぞれおよそ 12、65（内、樹皮 10%）、15、8% となっている。したがって、次の式により炭素量は求められる。

$$\text{炭素量} = (\text{幹材積}) \times (1 + (\text{地下部・地上部比})) \times (\text{拡大係数}) \times (\text{容積密度}) \times 0.5$$

炭素量を二酸化炭素の重量として算出するには、上式に $44 \div 12 (\approx 3.67)$ を乗じることにより得られる。

2. 热帯造林地におけるバイオマスの推定と評価¹⁾

インドネシアにおいては大規模産業造林が 1990 年代以降に本格化し、2006 年にはスマトラ、カリマンタンを中心に 280 万 ha に及ぶ造林がなされている。造林木の多くはアカシアやファルカータなどの早生樹種である。インドネシア南スマトラ州丘陵地において無秩序な開発や過伐によって荒廃地化し、草地となった地域にムシ・フタン・ペルサダ社 (PT Musi Hutan Persada, MHP 社) が 1990 年よりアカシアマンギウムの産業造林を開始している（図 1）。



図 1：南スマトラ州のアカシア大規模植林 (MHP 社)

30 万 ha のコンセッション面積のうち、植林面積は 12 万 ha に及んでいる。MHP 社では、精英樹からの種の収穫、苗床への播種、ポットへの移植、林地の地拵え、植栽、下草刈り、伐採まで一連の施業・管理によって年間 240 万 m^3 の紙パルプ用チップを生産している。伐採に際して直径 8 cm 未満の末梢、枝葉、根は林地に残し、樹皮付きの幹材を搬出している。6 年～ 8 年の短伐期林業を実施し、いまでは第 3 世代の造林地となっている。

MHP 社造林地内のスパンジリジ地区を調査フィールドとして抽出し、森林バイオマス生産について調査測定し、その持続性評価を試みたケーススタディを紹介したい²⁾。使用したデータは 2000 年～ 2005 年に植栽された第 2 世代、1 年生から 6 年生までの樹木のバイオマス生産を含むインベントリ (2001 年～2006 年、6 年生を主体に場合により 8 年生を伐採) であり、その蓄積量 (ストック) と伐出量 (フロー) について時系列解析を実施した。すなわち、スパンジリジ地区 9,300 ha 内にランダムに設定された 0.05 ha のパーマネントサンプルプロット (PSP) のうち 51 プロットを調査対象

とした。植栽密度は 1,100 本/ha であり、植林初期段階での下草刈りのほかは、除伐・間伐等の施業は施されていない。インベントリデータは各 PSP にナンバリングされた 60 本の毎木調査を毎年実施して得られた胸高直径、樹高のデータからなり、これを元に平均年生長量を算出し、さらに単位面積当たりの幹材積ならびにバイオマス生産量を推定・評価した。

胸高直径と樹高は樹木の生長量に直接関係するので樹齢と正の相関を示す。伐期となる 6 年生の胸高直径は 16.0 ~ 20.6 cm、樹高は 16.7 ~ 22.1 m に達する。各 PSP の各年毎の幹材積プロットを基に算出される単位 ha 当たりの平均年生長量は、図 2 に示されるように、3 年生の立木で最大を示し、その後減少に向かう。5 年生立木の年生長量は $48.6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ であり、5 年間の年平均成長量は $36.8 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ に達する。このような年成長を示すので幹材積は樹齢に対して S 字型曲線を示し、およそ 8 ~ 10 年で成長が止まって成熟林となる。5 年生アカシア林の幹材積は約 $188\text{m}^3/\text{ha}$ と見積もられる。アカシア材の容積密度は 0.5 Mg/m^3 、したがってその幹材重量は 94 Mg/ha である。各年の樹齢毎の植林面積から調査林地全体の材積を見積もることができるが、この値は植栽と伐採が伴うので年毎に変動し、その動態を把握することが重要になる。

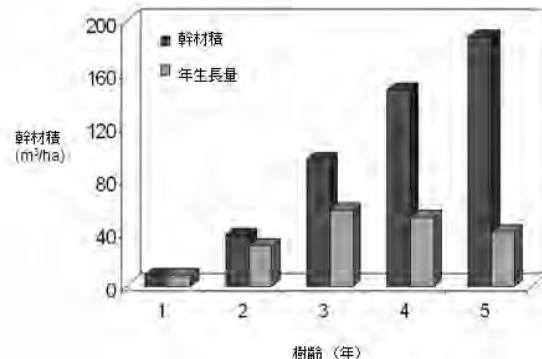


図 2 : AM の成長量

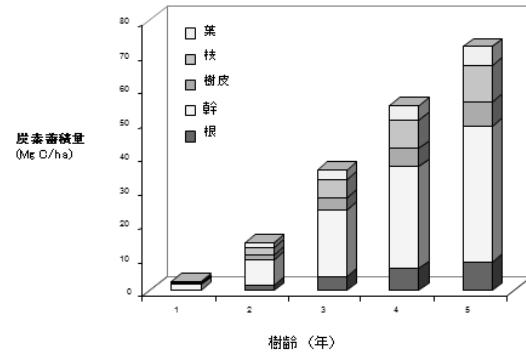


図 3 : AM のバイオマス生産量

さらに、調査林区の立木バイオマス蓄積には、枝葉幹根の比に関するアカシア立木の文献を参考に、根、幹、枝、葉についてそれぞれ 12、65（内、樹皮 10%）、15、8% として炭素量換算で算出すると³⁾、図 3 に示されるように、5 年生のアカシア林のバイオマス蓄積量は炭素換算で 72 Mg C/ha と算出される。したがって、二酸化炭素換算で $264 \text{ Mg-CO}_2/\text{ha}$ となる。一方、熱帯天然林（原生林）のバイオマス蓄積量は $254 \sim 390 \text{ Mg C/ha}$ と評価されている⁴⁾。このうち大きい数値は土壤中の蓄積炭素を含み、とくに泥炭湿地林ではこの値が大きくなっているものと推察される。天然林の平均蓄積量を概略 300 MgC/ha とすると、5 年生アカシア林の蓄積はその 1/4 程度である。他方、アラン・アラン (*Imperata cylindrica*) など草地や荒廃地のそれは $1.6 \sim 20 \text{ Mg C/ha}$ と見積もられているので、その 10 倍近い蓄積をもつていると推定される。世界の森林 39 億 ha の地上部木質バイオマスは 4,220 億トンと推計されているので、森林 1 ha 当たりの炭素蓄積は平均 60 トン (Mg C/ha) と見積もられる。植え付けから 5 年を経過したアカシア林の蓄積はこれを約 20% 上回る程度の炭素蓄積と評価される。

一方、産業造林であるアカシア林の場合、上記のような炭素蓄積評価に加えて資源として利用している立木伐出量（フロー）を合わせて評価すべきである。産業造林における森林バイオマス「持続」の基本は植林を基盤とする生産を上回る伐採・消費を抑えて蓄積（ストック）を維持し、その増分のみを安定的に利用することが持続性確保の必須条件である。例えば、MHP 社スバンジリジ地区におけるアカシア造林地の 2006 年時点（実植林面積 8,340 ha）での蓄積は幹材積換算で 83.2 万 m^3 で

あり、その蓄積平均は $100.8 \text{ m}^3/\text{ha}$ と推定される。したがって、この造林地が蓄える全バイオマスの炭素換算蓄積量は 45.9 Mg C/ha と計算される。他方、同年の伐採面積は $1,549 \text{ ha}$ 、原木伐出量は 19.1 万 m^3 である。ヘクタール当たりの原木伐出量（幹材積）は $123.3\text{m}^3/\text{ha}$ (30.8 MgC/ha) であり、残材として伐根と枝葉のほか、造材時の端材等の発生や幹径 8 cm 未満の末梢が林地に残されている。

6 年伐期とすれば、およそ $1/6 (9,300 \text{ ha} / 6 = 1,550 \text{ ha})$ に相当する林地の伐採と植林により持続性確保が可能であり、伐採と植林により個別小林区のバイオマス蓄積に動きがあつても、ある程度の面積をもつ林地全体としてみれば、安定したバイオマスの蓄積ストックと共に、伐採フロー、すなわち原木生産を維持することが理想である。しかし、実際には原木の供給は需要の変動に影響されるほか、樹木生長量も年毎に変わるので、バイオマスの蓄積とその年間変動を長期的な視点で観測解析し、安定を図ることが必要になる。図4は天然林、荒廃地・草地および 2006 年時点のアカシア林のバイオマスストックとフローを比較して示したものである。森林バイオマスの生産と環境維持の観点から蓄積が重要である反面、木材利用の立場からは伐採が大切であり、これらの二つのストックとフローの調和を保ち、その持続性維持を図る点で人工造林は有用であるといえる。

このほかに熱帯早生樹の植林に見られる短伐期の産業造林では、土壤の劣化や栄養塩の循環なども長期的な視点からの観測が必要であり、世代間にわたる生産の持続性に関する評価検証も求められる。熱帯地域の産業造林の歴史は新しく、未だ不明の点も多い。パルプチップ材のほか、用材生産のための造林手法確立も急務となっている。森林バイオマスの生長量はもとより気温、降雨量の影響も受け、いわゆるエルニーニョ現象による少雨の影響は植え付け直後の樹木の成長に大きな影響を及ぼす可能性が高い。

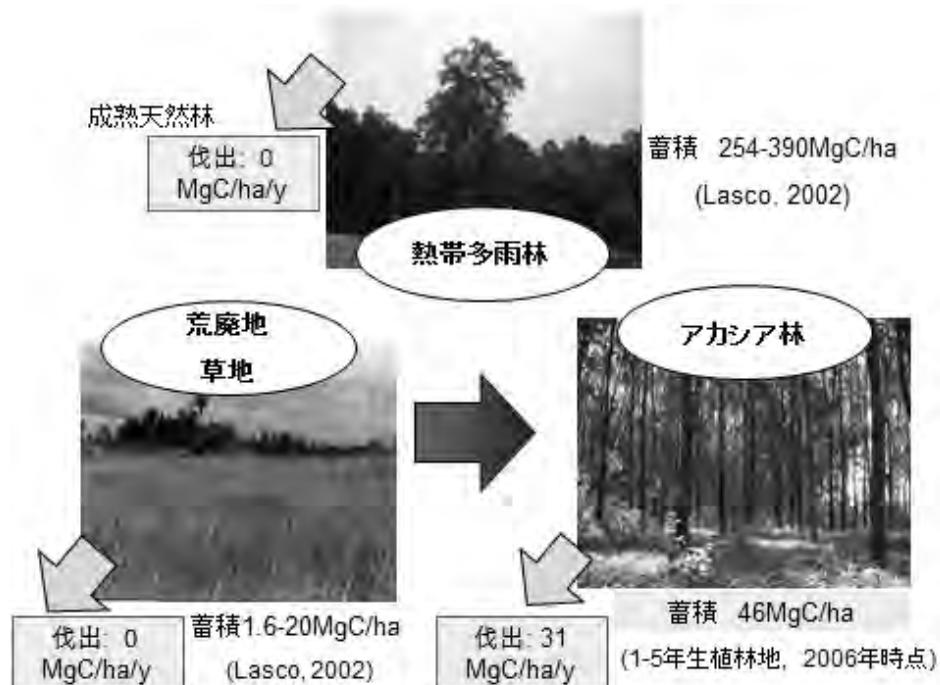


図4：天然林、アカシア林、草地のバイオマスストックとフロー

なお、林地全体の炭素循環については、落ち葉や枯れ枝などのリター量と共に土壤内の炭素の動きの検討が必要である。林地のリター量は樹齢の増加と共に増加し⁵⁾、これに伴い土壤有機物が増加する傾向が認められている。加えて、伐採収穫時には枝葉根、末梢等、相当量の残渣が林地に残されるが、裸地状態での表層土壤からの有機物の分解・消失は極めて激しく、その大半の有機物は短期間の

うちに大気圏へ還流するものと推定される。

このような生産の持続性に加え、生態環境の持続性を確保するには広域にわたる森林の機能に応じたゾーニング、すなわち生命圏生態系の維持保全機能を重視する保存林、緩衝ゾーンとしての2次林（保全林）、さらには人間圏の資源エネルギー供給機能を重視する持続循環型生産林を適切に配置し、人間活動と生存基盤としての環境との調和を図る技術の開発、制度の構築が課題となっている。人間圏との調和を図るためのバイオマス利用のあり方、地域コミュニティとの調和ある発展、社会林業との共存も産業造林の持続性確保のうえで重要な課題である。

謝辞

本論文の熱帯造林地におけるバイオマスの推定と評価に関するケーススタディの実施において、ムシ・フタン・ペルサダ社 (PT Musi Hutan Persada, MHP) の全面的な協力を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉原薰, 川井秀一, 田辺明生, 河野泰之 (共編著) : 第7章 热帯林生命圏の創出, 地球圏・生命圏・人間圏—持続的な生存基盤を求めてー, pp. 215-231, 京都大学学術出版会, 2010
- 2) Widyorini, R., Kawai, S., Subiyanto, B., Hardiyanto, E. B., Firmanti, A., Gunawan, R., Suryanti, T., and Wicaksono, A., Evaluation of tree growth and biomass production of *Acacia* plantation forest in tropical area, *Proceedings of the 92th RISH Symposium*, pp. 37-39, Cibinong, Indonesia, 23 February, 2008.
- 3) Sunarminto, B., Effect of litter non-productive biomass on supporting availability of soil nutrients, Technical Notes, 1(4), pp. 10, 2000, Research and Development Division, PT. Musi Hutan Persada.
- 4) Lasco, R. D., Forest carbon budgets in southeast asia following harvesting and land cover change, *Science in China*, **45**, 55-64, 2002.
- 5) Subarudi, D., Djaenudin, Erwidodo and Cacho, O., Growth and carbon sequestration potential of plantation forestry in Indonesia I. *Paraserianthes falcataria* and *Acacia mangium*, Working paper CC08, ACIAR project ASEM 1999/093, 2003.

熱帯早生樹のバイオリファイナリー*

渡辺 隆司**

Biorefinery of tropical fast-growing wood^{*}

Takashi Watanabe **

概要

東南アジア地域は熱帯雨林に代表される豊かな生物資源を有しており、熱帯産早生樹などのバイオマスを高度に変換してエネルギー、燃料、化学資源として利用するバイオリファイナリーを実現する場として大きな可能性を秘めている。熱帯産早生樹を利用した新しい産業の創成は、化石資源依存型産業からの脱却、地球温暖化ガスの排出抑制、地域活性化、新産業の育成などにつながる¹⁾。ここでは、熱帯早生樹のバイオ燃料化に関する最新の研究を調査するとともに、熱帯早生樹バイオリファイナリーの可能性を論じる。

1. バイオマスからのバイオエタノールや化学品の製造

リグノセルロース系バイオマスからエタノールなどの発酵化学品を生産するためには、セルロースなどの植物の細胞壁を構成する多糖類を加水分解して単糖にする工程が必要となる。植物細胞壁中の多糖を加水分解する技術には、硫酸などの強酸を用いる方法、超臨界水あるいは亜臨界水を用いる方法、酵素を用いる方法などがあるが、ここでは現在研究開発の中心となっている酵素分解法について述べる。

樹木や多くの草本性植物の細胞壁では、セルロースなどの多糖類がリグニンにより被覆されているため、細胞壁多糖をセルラーゼなどの酵素で加水分解するためには、リグニンによって固められた細胞壁をほぐして細胞壁多糖を露出させる前処理が必要となる。リグニンを剥がす前処理と酵素による細胞壁多糖の分解のための技術開発が、木や草から効率よくバイオエタノールを生産する大きな鍵となる。このリグニンによる多糖の被覆を壊すために、これまで、様々な物理的、生物的、および化学的前処理法が検討されてきた。爆碎法や蒸煮法など水を加熱して反応させる前処理法の多くは、一般に広葉樹材と比較して針葉樹材に対する前処理効果が低いことが知られている。広葉樹でも、樹種により分解の受けやすさには大きな差がある。産業造林用樹木は、紙パルプや建築材料の生産を目的として選抜・育種されており、燃料や化学品生産を主目的とした選抜や育種は行われていない。バイオリファイナリーに適した樹種は、成分分離や変換の容易さ、分離した成分からの機能物質への変換などを基準にして選抜されるものであり、これまで注目されてこなかった熱帯産早生樹にも、バイオリファイナリーに適した有用樹種が見出される可能性がある。近年、バイオ燃料化に適した樹木を育種する研究や、酵素糖化性を指標としてバイオ燃料化に適した未利用熱帯産早生樹を探索する研究が活発化している。

*2011年9月13日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野
E-mail: twatanab@rish.kyoto-u.ac.jp

2. 热帯産早生樹からのバイオエタノールの生産

木材の細胞壁多糖を前処理により露出させ、露出した多糖を酵素加水分解して单糖を生産し、生成した单糖を酵母などのアルコール発酵性微生物で発酵するとバイオエタノールが生産される。表1に、热帯産早生樹からバイオエタノール生産を主目的とした研究例を列記した。エタノリシス、白色腐朽菌処理、水熱反応、希硫酸処理、爆碎処理、イオン液体処理、粉碎処理など様々な酵素糖化前処理法が検討されている²⁻¹⁵⁾。

热帯産早生樹材に含まれるセルロースは紙パルプに変換し、ヘミセルロースであるキシランはエタノールに変換利用する研究も実施されている¹⁴⁻¹⁵⁾。この考えでは、キシランをパルプ化前に抽出してエタノールに変換し、キシランを抽出した残滓を脱リグニンしてパルプを生産する。これまで、キシランなどのヘミセルロースはパルプ収率を向上させるために、パルプ化による溶出や過分解を防ぐ方法が検討されてきたが、分解しやすいキシランをバイオエタノールなどの他用途に利用できるならば、パルプ化の条件をセルロース分離に最適化できる。これにより、パルプ化の条件の許容度が広がり、全体のコストバランスや木材の利用価値が向上する。一方、こうした前抽出とは異なり、漂白クラフトパルプからアルカリでキシランを抽出して利用する方法や、パルプ黒液からキシランを膜分離して利用する方法も検討されている。キシランは、バイオエタノールの他、揮発性成分の蒸散を防ぐコーティング材、ハイドロコロイドなどの機能性ポリマーに変換される²⁾。

表1は、木部を原料として使う酵素糖化・発酵を試験した研究例であるが、ユーカリ内樹皮から二酸化炭素添加水熱前処理により酵素糖化を促進する試みが近年行われた。ユーカリ内樹皮の水熱前処理に二酸化炭素を添加すると酵素糖化が促進され、 α -セルロースベースで最大80%の収率でグルコースが得られた¹⁶⁾。ユーカリ内樹皮の80メッシュ以下のフラクションには、60%以上のシュウ酸カルシウムが含まれており、これは内樹皮全体の24.6%に相当する¹⁷⁾。

表1：热帯産早生樹からのバイオエタノール生産を目的とした研究

樹種	前処理法	酵素糖化、エタノール発酵	文献
<i>Acacia mangium</i>	オートクレーブ水熱処理 超音波処理	120°C、3分のオートクレーブ処理後、メイセラーゼで酵素糖化し、木粉100mg当たり8mgの還元糖が生成。セルロースの8.2%が糖化。超音波処理により収率は、1.5倍増加。酵母 <i>Saccharomyces cervisiae</i> (SH1089) を用いた並行複発酵により、木粉100mg当たり約6mgのエタノールが生成。	4)
<i>Acacia dealbata</i>	エタノリシス+白色腐朽菌処理	白色腐朽菌 <i>Ceriporiopsis subvermispora</i> と <i>Ganoderma australe</i> で30日間処理後、60%エタノールで200°C、1時間オルガノソルボリシス処理。酵母 <i>Saccharomyces cerevisiae</i> で逐次発酵あるいは並行複発酵を行い、それぞれ原料木材ベース51%と65%の転換率でエタノールを生産。	3)
<i>Acacia dealbata</i>	希硫酸前処理	0.8%希硫酸による180°C、15分の前処理と <i>Pichia stipitis</i> CBS 5773による逐次発酵により、水不溶性画分から10.31g/Lのエタノールを24時間で生産。並行複発酵では、7.53g/Lのエタノールを48時間で生産。	5)
<i>Eucalyptus globulus</i>	水熱反応	224°Cまでの水熱反応による主成分の可溶化を定量。水熱処理により、最大90.4%のキシランが可溶化。リグニン	10)

		は最大 13.8% 脱離。セルロースは、ほぼパルプ画分に残存。酵素分解は実施せず。	
<i>Eucalyptus dunnii</i>	2% 希硫酸 134°C、60 分前処理	2% セルラーゼと 4% β -グルコシダーゼを用いた 50°C、22 時間の酵素処理で収率 54% で前処理物を糖化。60°C の糖化では、収率 34%。 <i>Zymomonas mobilis</i> ZM4 により発酵収率 71% でエタノールを生産。	6)
<i>Paraserianthes falcataria</i>	オートクレーブ水熱処理 超音波処理	120°C、3 分のオートクレーブ処理後、メイセラーゼで酵素糖化し、木粉 100 mg 当たり 29 mg の還元糖が生成。セルロースの 38.1% が糖化。超音波処理により収率は、1.2 倍増加。酵母 <i>Saccharomyces cervisiae</i> (SH1089) を用いた並行複発酵により、木粉 100 mg 当たり約 18 mg のエタノールが生成。	4)
<i>Eucalyptus globulus</i>	爆碎処理	42°C、基質濃度 10% の条件で、15 FPU/g 基質のセルラーゼと耐熱性酵母 <i>Kluyveromyces marxianus</i> CECT 10875 を用い並行複発酵。グルコースベースの理論収率 50-72% でエタノールを生産。	7)
<i>Eucalyptus globulus</i>	イオン液体処理	イオン液体 1-ethyl-3-methylimidazolium chloride ([EMIM+] [Cl-]) を用い前処理。150°C、60 分の前処理物から酵素糖化により 30% の収率で還元糖を得た。	11)
<i>Eucalyptus globulus</i>	水熱反応	水熱反応前処理の温度、処理時間が与える酵素糖化への影響を評価。230°C の水熱反応後、前処理物の並行複発酵によりエタノールを最大 26.7 g/L で生産。	12-13)
<i>Eucalyptus globulus</i>	水熱反応	パルプ化の前にキシランを水熱処理で可溶化し、バイオエタノールに変換。ペントース発酵能をもつ酵母 <i>Pichia stipitis</i> を用いて、濃度(12 g/l)、生産性 (0.22 g/l/h) で水熱可溶化キシランからバイオエタノールを生産。	14-15)
<i>Eucalyptus チップ^a</i>	加圧熱水 +ボール ミル処理	加圧熱水処理 (160°C, 30 分) とボールミル処理 (20 分) により、4 FPU/g 基質のセルラーゼで 70% の糖収率で酵素糖化。	8)
<i>Eucalyptus チップ^a</i>	エタノリシス	1% の酢酸を含む 25% エタノール水溶液でソルボリシス。200°C の前処理条件で、セルロースをほぼ定量的に酵素糖化。	9)

^a種の記載なし。

3. アカシアの変換利用

インドネシアなどの熱帯アジアでは窒素固定能力により旺盛な成長が可能なマメ科のアカシアが広範に導入されている¹⁸⁻¹⁹⁾。*Acacia mangium* は、荒廃地への造林適用性が高いため、紙・パルプ、木質材料、燃料、活性炭、肥料、化学品などの原材料として広く利用されている。木質材料としては、ドア、窓枠などの建築用造作材、家具、合板、パーティクルボード、ハードボード、LVL、MDF などのボード製造に利用される¹⁹⁾。例えば、世界的な家具メーカーである IKEA は、ベトナムで *Acacia mangium* などの熱帯産早生樹から家具を製造し、各国で販売している²⁰⁾。*Acacia mangium* については、樹皮に豊富に含まれるタンニンを利用してアミノ樹脂やフェノール樹脂系の接着剤に代わる接着剤の開発がなされている。*Acacia mangium* の種子は、食用にも利用される。また、葉は、家畜飼料に利用される¹⁹⁾。

Acacia dealbata は、オーストラリア南東部原産で、アフリカに帰化植物として自生した。19世紀初頭に観賞用としてヨーロッパに持ち込まれ、それ以降、野生化している。*Acacia dealbata* の精油は、ミモザと呼ばれ広く利用されている。*Acacia dealbata* は、繁殖力が強く、生態系を破壊する生物種と位置づけられている。このため、*Acacia dealbata* の利用拡大を図る方策の一つとして、バイオエタノール化が研究されている^{3, 5)}。

熱帯早生樹は、燃料材や土壤改良剤として利用されている。アカシアは灰分(ash)、すなわち、無機物(Ca, K, P, Mg, Si, Al, Ba, Fe, Ti, Na, Mn, Sr)含量が高いことから、燃焼後に残る灰分を肥料として土地に散布することも可能である。パルプ生産の際に出る *A. mangium* の樹皮の炭(charred bark)を土壤に肥料として散布し、トウモロコシやピーナッツなどの農作物の収穫量が増加したという報告もある²¹⁾。その他、土壤の化学成分の改善として、pH、総窒素、可吸態リンの増加など降水量が多く、土地が痩せやすい熱帯土壤に効果的である。また、高Al飽和度であるアルティソル土壤で適応できる樹種として *Acacia mangium* は貴重な樹種である²²⁾。

アカシアは微生物酵素(リグニン分解酵素やセルラーゼ系酵素)生産の誘導基質となり²³⁾、また、微生物による廃材やチップからのアルコール発酵やメタン発酵が可能である。さらに、タンニンや *A. auriculiformis* に多く存在する抗真菌性及び抗酸化性抽出物についてはバイオリファイナリーの利用価値が強く期待される²⁴⁻²⁵⁾。

4. 東南アジアにおける熱帯産早生樹バイオリファイナリーの構築に向けて

バイオリファイナリーは、熱帯雨林をもつ東南アジア地域に有利な産業であり、バイオマスの生産と高度利用によって東南アジア地域に新たな産業を興し、国際間および国内の地域格差の是正につなげる新たな機会を与える¹⁾。バイオ燃料の生産は、離島や遠隔地など電力や燃料の供給が難しい地域に地産地消のエネルギーをもたらす上でも大きな意義がある。地域の文化や経済、環境への影響を最大限配慮しつつ、先進的な変換技術をもつ国とバイオマス資源国が緊密に連携して、持続的な熱帯産早生樹バイオリファイナリーが構築されることを強く望む。

参考文献

- 1) 渡辺隆司：産業構造の大転換—バイオリファイナリーの衝撃—，地球圏・生命圏・人間圏 持続的な生存基盤を求めて，京都大学学術出版会，pp. 281-300, 2010.
- 2) Talja, R. and K. Poppius-Levlin, Xylan From Wood Biorefinery-A Novel Approach, Workshop, EU 7th Framework program, Lyon, France, May 10, 2011.
<http://www.flexpakrenew.eu/docs/filesProject/1/C1A5127A-188B-310B-B8EB8F5C212F9D42.pdf>
- 3) Muñoz, C., Mendonça, R., Baeza, J., Berlin, A., Saddler, J., and Freer, J., Bioethanol production from bioorganosolv pulps of *Pinus radiata* and *Acacia dealbata*, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **82**, 767–774, 2007.
- 4) Kaida, R., Kaku, T., Baba, K., Oyadomari, M., Watanabe, T., Sudarmonowati, S. H. E., and Hayashi, T., Enzymatic saccharification and ethanol production of *Acacia mangium* and *Paraserianthes falcataria* wood, and *Elaeis guineensis* trunk, *J. Wood Sci.*, **55**, 381–386, 2009.
- 5) Ferreira, S., Gil, N., Queiroz, J. A., Duarte, A. P., and Domingues, F. C., An evaluation of the potential of *Acacia dealbata* as raw material for bioethanol production, *Biores. Technol.*, **102**, 4766–4773, 2011.
- 6) Jeon, Y. J., Xun, Z., and Rogers, P. L., Comparative evaluations of cellulosic raw materials for second generation bioethanol production, *Letters in Appl. Microbiol.*, **51**, 518–524, 2010.
- 7) Ballesteros, M., Oliva, J. M., Negro, M. J., Manzanares, P., and Ballesteros, I., Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875, *Process Biochem.*, **39**, 1843-1848, 2004.
- 8) Inoue, H., Yano, S., Endo, T., Sakaki, T., and Sawayama, S., Combining hot-compressed water and ball milling

- pretreatments to improve the efficiency of the enzymatic hydrolysis of eucalyptus, *Biotechnology for Biofuels*, **1**:2, 1-9, 2008.
- 9) Teramoto, Y., Lee, S.-H., and Endo, T., Cost reduction and feedstock diversity for sulfuric acid-free ethanol cooking of lignocellulosic biomass as a pretreatment to enzymatic saccharification, *Biores. Technol.*, **100**, 4783–4789, 2009.
 - 10) Garrote, G., and Parajó, J. C., Non-isothermal autohydrolysis of *Eucalyptus* wood, *Wood Sci. Technol.*, **36**, 111–123, 2002.
 - 11) Pezoa, R., Cortinez, V., Hyvärinen, S., Reunanen, M., Hemming, J., Lienqueo, M. E., Salazar, O., Carmona, R., Garcia, A., Murzin, D. Y., and Mikkola, J.-P., Use of ionic liquids in the pretreatment of forest and agricultural residues for the production of bioethanol, *Cellulose Chem. Technol.*, **44**, 165-172, 2010.
 - 12) Romaní, A., Garrote, G., Alonso, J. L., and Parajó, J. C., Bioethanol production from hydrothermally pretreated *Eucalyptus globulus* wood, *Biores. Technol.*, **101**, 8706–8712, 2010.
 - 13) Romaní, A., Garrote, G., Alonso, J. L., and Parajó, J. C., Experimental assessment on the enzymatic hydrolysis of hydrothermally pretreated *Eucalyptus globulus* wood, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 4653–4663, 2010.
 - 14) Vanessa, C., Mendes, T., Baptista, C. M. S. G., Rocha, J. M. S., and Carvalho, M. G. V. S., Prehydrolysis of *Eucalyptus globulus* Labill. hemicelluloses prior to pulping and fermentation of the hydrolysates with the yeast *Pichia stipitis*, *Holzforschung*, **63**, 737–743, 2009.
 - 15) Mendes, C. V. T., Carvalho, M. G. V. S., Baptista, C. M. S. G., Rocha, J. M. S., Soares, B. I. G., and Sousa, G. D. A., Valorisation of hardwood hemicelluloses in the kraft pulping process by using an integrated biorefinery concept, *Food and Bioproducts Processing*, **87**, 197–207, 2009.
 - 16) Matsushita, Y., Yamauchi, K., Takabe, K., Awano, T., Yoshinaga, A., Kato, M., Kobayashi, T., Asada, T., Furuyjo, A., and Fukushima, K., Enzymatic saccharification of *Eucalyptus* bark using hydrothermal pre-treatment with carbon dioxide, *Biores. Technol.*, **101**, 4936–4939, 2010.
 - 17) NEDO 「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発／バイオマスエネルギー先導技術研究開発／未利用木質バイオマス（樹皮）の高効率糖化先導技術の開発」平成 18 年度～平成 21 年度のうち平成 19 年度中間年報, 名古屋大学, 06990718-0
 - 18) 渡邊崇人, 渡辺隆司, 热帶バイオマス資源のバイオリファイナリー, 生存圏研究, **3**, 65-71, 2007.
 - 19) *Acacia mangium* Growing and Utilization, MPTS Monograph Series No. 3., eds by Awang, K., and Taylor, D., Winrock International and The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, pp. 1-280, 1993.
 - 20) ASEAN バイオマス研究開発総合戦略 1. バイオマス賦存量・利用可能量の調査, 森林総合研究所, 2005, <http://unit.aist.go.jp/btrc/ASEANHP/seika2005FFPRI.pdf>.
 - 21) Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F., Anshori, S., and Ogawa, M., Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in south Sumatra, Indonesia, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **52**, 489-495, 2006.
 - 22) 富田健太郎, *Acacia mangium* によるアルティソル土壤の理化学性改善に関する事例研究, 2000 年度帰国隊員支援プロジェクト報告書「パナマのアルティソル地帯におけるアグロフォレストリー・システムの確立に関する事例研究」, 2001: <http://www.tuat.ac.jp/~tropical/agroforestry/report20.htm>.
 - 23) Khanongnuch, C., Saowapark, T., Lumyong, S., Honda, Y., and Watanabe, T., Lignocellulolytic enzymes from thermotolerant white rot fungus *Coriolus versicolor* cultured on tropical fast-growing tree wood meal, *Abstracts of International Symposium on Sustainable Utilization of Acacia mangium*, Oct. 21-22, 2003, Kyoto, Japan, pp. 155-158.
 - 24) Mihara, R., Barry, K. M., Mohammed, C. L., and Mitsunaga, T., Comparison of antifungal and antioxidant activities of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis*, *J. Chem. Ecol.*, **31**, 789-804, 2005.
 - 25) Singh, R., Singh, S., Kumar, S., and Arora, S., Studies on antioxidant potential of methanol extract/fractions of *Acacia auriculiformis* A. Cunn, *Food Chem.*, **103**, 505-511, 2007.

熱帯アカシアのバイオテクノロジー*

鈴木 史朗**

Tree biotechnology of tropical *Acacia**

Shiro Suzuki**

概要

熱帯アカシアは、旺盛な成長性が注目され、熱帯性の早生樹として、東南アジアを中心に大規模に植林されてきた。しかし、病害や材質などの改良すべき欠点も報告されており、今後、生産性を増大させるためには、これらの欠点を克服するための樹木バイオテクノロジーの発展が不可欠である。現在、熱帯アカシアのバイオテクノロジーとして、マイクロプロパゲーション、EST 解析、形質転換・個体再生に関する報告があるが、今後、形質転換・個体再生の高効率化や次世代シークエンサーによるトランスクリプトーム解析などの基盤整備が行われるとともに、病虫害抵抗性や成長性のような産業的に重要な形質を担う遺伝子の機能解析が優先的に進むと期待される。

1. はじめに

熱帯アカシアとは、熱帯地方に生育するマメ科の *Acacia* 属樹木を指すが、熱帯の人工造林木として重要な *Acacia mangium*、*A. auriculiformis*、*A. crassicarpa* と、これらの種間雑種を含んでいる。

A. mangium、*A. auriculiformis*、*A. crassicarpa* は、いずれもクイーンズランド州（オーストラリア）、ニューギニア島（インドネシア及びパプアニューギニア）や、モルッカ諸島（インドネシア）にかけて自生する種で、20～30 m に達する常緑高木である。*A. mangium* は、インドネシアなどでは、熱帯雨林が伐採された後に生じるチガヤの生育するような日当たりの良い草原に先駆的に進出するバイオニア植物であり、比較的排水の良い土壤を好んで生育し、湛水状態では生育が悪いとされている。*A. auriculiformis* は、*A. mangium* よりも水分を好み、川や沢沿いに生育し、群落を作つて自生することは少ないが、*A. mangium* と同様にチガヤの生育するような草原でよく生育する。*A. crassicarpa* は、クイーンズランド州では海浜や海沿いの平野に生育しているため、塩害に強いとされており、他の場所では、粘土がちで排水が悪い泥炭湿地のような場所でも生育する。なお、種間雑種としては、*A. auriculiformis* と *A. mangium* との交雑種 (*A. auriculiformis* × *mangium*) がよく知られており、*A. mangium* の通直な幹と良好な成長性、*A. auriculiformis* の心材腐朽耐性と硬くて重い材（比重 0.6）の形質を併せ持ち、アカシアハイブリッドと通称されている。以上の種は、インドネシア西部（スマトラ島など）、マレーシア、ベトナム、ラオス、タイ、インドなど、東南アジアから南アジアにかけて、本来自生地ではない地域においても多く植林されている。

これらの熱帯アカシアは、旺盛な成長性が注目され、熱帯性の早生樹として、各々の植林地の土壤や環境に適した種が選択され、大規模に植林されてきた。しかし、病害や材質などの改良すべき欠点も報告されており、今後、生産性を増大させるためには、これらの欠点を克服するための樹木バイオ

*2011年9月26日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野

E-mail: shiro-s@rish.kyoto-u.ac.jp

テクノロジーの発展が不可欠である。

樹木バイオテクノロジーとは、樹木を対象としたバイオテクノロジーを意味する。ここで、植物分野におけるバイオテクノロジーは、大きく分けてオールドバイオテクノロジーとニューバイオテクノロジーに分けられる。オールドバイオテクノロジーとは、組織培養技術を基盤としたマイクロプロパゲーション、再分化、細胞培養などが中心である。一方、ニューバイオテクノロジーは、遺伝子情報を活用し、遺伝子操作を基盤とした遺伝子組換え技術による形質改変が中心である。なお、ゲノム情報の整備によって可能となる DNA マーカーを利用した交雑による育種（DNA マーカー育種）もまた、植物バイオテクノロジーに含まれる。

樹木の分野では、2006 年にポプラ (*Populus trichocarpa*)、2007 年にはブドウ (*Vitis vinifera*) のゲノム配列が公開され、2011 年現在、ユーカリのゲノムのドラフト配列が決定されている。ゲノム配列が明らかにされている実用植物のイネでは、ゲノムの配列を活用した機能解析と、DNA 組換え技術を使わない分子育種の方法である DNA マーカー育種が急速に発展してきており、樹木の育種分野においても同様な DNA マーカー育種が今後発展する可能性がある。

しかし、将来的に DNA マーカー育種によって、樹木の育種を効率的に行うとしても、その前段階で、樹木における遺伝子機能の検証が必要である。樹木における遺伝子機能の検証は、その遺伝子が通常より発現が変化した場合に、どのような表現型の変化を生じるのかを調べることによってなされる。従って、遺伝子の発現を人工的に制御した個体を作出する技術である形質転換・個体再生の技術は不可欠である。また、得られた優良個体を大量に増殖する様々な組織培養の技術も実用化に必須である。そこで、本稿では、熱帯アカシアにおける組織培養、遺伝子組換え、ゲノミクスなどの樹木バイオテクノロジーの要素技術の現況と、各樹種の特性を踏まえた今後の樹木バイオテクノロジーの方向性について、議論することとした。

2. 热帯アカシアの樹木バイオテクノロジーの現状

2.1 マイクロプロパゲーション・再分化系

これまで、*A. mangium* のマイクロプロパゲーションや再分化についてはいくつか報告がある。まず、マイクロプロパゲーションについてであるが、Nanda ら¹⁾は 10 年生の成熟した有節外植体を用いて Murashige & Skoog 培地で多芽体を誘導し、続いて発根培地に移植することにより確立しており、RAPD マーカーを用いた変異検定では変異は確認されなかったことを報告している。Bhaskar と Subhash²⁾ は、8 年生の精英樹の有節外植体より同様にマイクロプロパゲーションを行っている。Xie と Hong³⁾ は外植体を若返り (rejuvenation) させた多芽体より、試験管内個体再生系を確立している。一方、Douglas ら⁴⁾ は、発芽させた苗の子葉の節を傷付け、そこから多芽体を得ている。Saito ら⁵⁾ は側芽をもちいて多芽体を得ている。

一方、再分化についてであるが、不定胚形成 (somatic embryogenesis) についての報告が一報あるのみである。Xie と Hong⁶⁾ は、*A. mangium* の未熟種子から胚分化能を有するカルス (embryogenic callus) を誘導し、体細胞胚発生を経由した個体再生系を報告している。

2.2 遺伝子導入

Xie ら⁷⁾ は、*A. mangium* を用いて、*Agrobacterium* を介した安定形質転換を行い、形質転換体において外来遺伝子である GUS 遺伝子の発現を確認している。一方、一過的形質転換については、パーティクルガンを用いた Quoirin ら⁸⁾ による報告がある。

Yang ら⁹⁾ は *A. crassicarpa* の偽葉（葉柄が平たい葉のように変化した器官）由来の外植体を用いて、*Agrobacterium* を介した安定形質転換により、ポプラの 4-coumarate CoA ligase プロモーターの下流に 4-coumarate CoA ligase 遺伝子のアンチセンス配列を接続したコンストラクトを導入している。

2.3 EST 解析

Wang らは、*A. mangium* の花から発現配列タグ (expressed sequence tags, EST) を作成¹⁰⁾ していたが、

最近 Suzuki ら¹¹⁾は、*A. mangium* のシートと分化中の木部の平均化 cDNA ライブライアリから作成した 8,963 個の EST を解析した。その結果、*A. mangium* の EST は、これまで解析されているマメ科植物（ミヤコグサ、タルウマゴヤシ、ダイズ）の EST の中で、ダイズの EST に対して相同意を示すものが最も多かったことを明らかにした。さらに、細胞周期、形態形成、木部分化、二次壁形成に関わる EST 配列を報告している。

Yong ら¹²⁾は、*A. auriculiformis × mangium* の分化中の木部 (inner bark) の 3,182 個の EST を解析し、EST 配列を基に、リグニンおよびセルロース合成酵素遺伝子 (PAL, CAD, COMT, CCoAOMT, CCR, C4H, CesA) について定量 PCR による発現解析を行っている。

3. 热帯 *Acacia* のバイオテクノロジーの課題と方向性

3.1 形質転換・個体再生系

どの熱帯アカシアにおいても、オールドバイオテクノロジーの範疇に含まれる、マイクロプロパゲーションによる同一クローンの分化個体の大量増殖は比較的容易であると考えられる。しかし、現在の *Agrobacterium* による安定形質転換系は、安定した形質転換個体が得られる確率が低く（数%）、また、馴化可能な形質転換体を得るまでに 1 年近く必要とする^{6,9)}。従って、現状では、機能の確定した一遺伝子を熱帯アカシアに導入するだけでも大変な手間暇がかかることから、今後、形質転換・個体再生の高効率化（10% 以上）と迅速化が必要である。

3.2 機能ゲノミクス

熱帯アカシアの遺伝子機能解析はほとんど手つかずといってよい状態であり、ようやく EST が整備されてきた状況である¹¹⁻¹²⁾。しかし、最近、次世代シークエンサー (Roche 社 GS-FLX Titanium など) の登場により、大規模な EST 作成が極めて廉価となり、状況が一変してきており、産業的に重要な熱帯アカシアの EST が急速に整備される可能性がある。EST が整備されれば、個々の遺伝子に関する機能解析を行う段階となる。樹木に共通の生命現象については、ポプラやユーカリなどで研究が先行しているので、熱帯アカシアでは、産業的に重要かつ熱帯アカシアに特有の生命現象を担う遺伝子の同定が優先的に進むと期待される。

3.3 病虫害抵抗性

熱帯アカシアは強健で成長性が高いことから、早生樹として熱帯東南アジアで広く植林されているが、それでも種々の病虫害が報告されている¹³⁾。例えば、*A. mangium* は、白色のカビによる心材腐朽が報告されており、またマレーシアでは、17% もの *A. mangium* が *Corticum salmonicolor* による赤衣病による感染を受けていると報告されている。虫害としては、葉を食害する *Pteroloma blagiophelps* やイナゴによる食害がインドネシアの多くの植林地で報告がある。また、樹液を吸う *Helopeltis* はスマトラ島での主な害虫である。

A. auriculiformis については、病害虫による被害は少ない。インドネシアでは、さび病菌 *Uromyces digitatus* による成長阻害が、インドでは、*Ganoderma lucidum* による根腐れ病が報告されている。*Xinoxylon* による若い茎の食害も報告がある。*A. crassicarpa* の場合、*Platypus xyleborus* や pin hole bore 等による食害が報告されている。

病虫害による熱帯アカシアの生産性低下を抑えるため、病原菌や害虫に対する殺菌・殺虫成分や忌避成分の产生は今後の育種目標として重要である。例えば、*A. auriculiformis* の心材には、*A. mangium* と比べ、抗菌性のフラボノイド化合物である teracacidin が蓄積するため¹⁴⁾、心材腐朽による被害が少ないとされていることから、材質に優れ、心材腐朽抵抗性の高いアカシアハイブリッドの分子育種は産業的に重要である。Teracacidin 生合成に関わる遺伝子の同定を行い、teracacidin 含量とゲノムの遺伝子配列とを関係づけることが出来れば、DNA マーカーによって、心材腐朽抵抗性の高いアカシアハイブリッドを効率的に選抜することが出来ると期待される。

3.4 成長性

熱帯アカシアは概して成長が良いと言われている。例えば、*A. mangium* は、定植後最初の 4~5 年で、年間胸高直径は 5 cm、高さは 5 m の増加が認められる。サバ州やスマトラ島では、定植後 1 年間に 3 m の高さに成長すると報告され、フィリピンでは 3 年間で平均 8.3 m、胸高直径は約 10 cm に達する。しかしながら、7~8 年目以降は、急速に成長速度が低下し、理想的な環境や定植後 20 年以上経過しなければ、直径 40 cm、高さ 30 m 以上を超えることは少ない¹³⁾。

A. auriculiformis は、*A. mangium* よりも成長性は劣り、通常の栄養条件では、定植後数年間は年間 2~4 m の高さの増加が認められる。*A. crassicarpa* は、前 2 種よりも高く成長しないが、それでも年間高さは 1.2 m ほどの成長速度で生育するとの報告がある¹³⁾。

成長速度は、木質バイオマスの生産性を評価する一つの尺度であり、成長性を増大させる育種は今後も大きな育種目標の一つであろう。熱帯アカシアは、多くの場合、パルプチップ用で定植後 7~8 年に伐採、製材用ではそれより長く、12~20 年後に伐採するとされているが、*A. mangium* に見られるように、7~8 年ごろから、成長速度が急速に低下するため¹⁵⁾、成長速度低下の機構を解明し、短期伐採可能な品種の開発が望まれる。

参考文献

- 1) Nanda, R. M., Das, O., and Rout, G. R., *In vitro* clonal propagation of *Acacia mangium* Willd. and its evaluation of genetic stability through RAPD marker, *Ann. Forest Sci.*, **61**, 381-386, 2004.
- 2) Bhaskar, P., and Subhash, K., Micropropagation of *Acacia mangium* Willd. through nodal bud culture, *Indian J. Exp. Biol.*, **34**, 590-591, 1996.
- 3) Xie, D., and Hong, Y., *In vitro* regeneration of *Acacia mangium* via organogenesis, *Plant Cell Tissue Organ Cult.*, **66**, 167-173, 2001.
- 4) Douglas G. C., and McNamara J., Shoot regeneration from seedling explants of *Acacia mangium* Wild., *In vitro Cell Dev. Biol. Pl.*, **36**, 412-415, 2000.
- 5) Saito, Y., Kojima, K., Ide, Y., and Sasaki, S. *In vitro* propagation from axillary buds of *Acacia mangium*, a legume tree in the tropics, *Shokubutsu Soshiki Baiyo*, **10**, 163-168, 1993.
- 6) Xie, D. Y., and Hong, Y. Regeneration of *Acacia mangium* through somatic embryogenesis, *Plant Cell Rep.*, **20**, 34-40, 2001.
- 7) Xie, D. Y., and Hong, Y., *Agrobacterium*-mediated genetic transformation of *Acacia mangium*, *Plant Cell Rep.*, **20**, 917-922, 2002.
- 8) Quoirin, M., Franche, C., and Koehler H., Transient expression of reporter genes introduced in tissues of two *Acacia* species using a biolistic method, *In vitro Cell Dev. Biol. Pl.*, **38**, 487-492, 2002.
- 9) Yang, M., Xie, X., Zheng, C., Zhang, F., He, X., and Li, Z., *Agrobacterium tumefaciens*-mediated genetic transformation of *Acacia crassicarpa* via organogenesis, *Plant Cell Tissue Organ Cult.*, **95**, 141-147, 2008.
- 10) Wang, X. J., Cao, X. L, Hong, Y., Isolation and characterization of flower-specific transcripts in *Acacia mangium*, *Tree Physiol.*, **25**, 167-178, 2005.
- 11) Suzuki, S., Suda, K., Sakurai, N., Ogata, Y., Hattori, T., Suzuki, H., Shibata, D., and Umezawa, T., Analysis of expressed sequence tags in developing secondary xylem and shoot of *Acacia mangium*, *J. Wood Sci.*, **57**, 40-46, 2011.
- 12) Yong, S. C. Y., Choong, C. Y., Cheong, P. L., Pang, S. L., Nor Amalina, R., Harikrishna, J. A., Mat-Isa, M. N., Hedley, P., Milne, L., Vaillancourt, R., and Wickneswari, R., Analysis of ESTs generated from inner bark tissue of an *Acacia auriculiformis* × *Acacia mangium* hybrid, *Tree Genet. Genomes*, **7**, 143-152, 2011.
- 13) Agroforestry Database, <http://www.worldagroforestrycentre.org>

- 14) Mihara, R., Barry, K. M., Mohammed, C. L., and Mitsunaga, T., Comparison of antifungal and antioxidant activities of *Acacia mangium* and *A. auriculiformis* heartwood extracts, *J. Chem. Ecol.*, **31**, 780–804, 2005.
- 15) Awang, K., and Taylor, D., *Acacia mangium* -growing and utilization-, MPTS Monograph Series No. 3, Winrock International and Bangkok, FAO, 1993.

熱帯早生樹の年輪年代・古気候学*

田鶴 寿弥子**, 杉山 淳司**, 津田 敏隆***, 田上 高広****, 渡邊 裕美子****

Paleoclimate reconstruction and Dendrochronology using tropical wood species*

Suyako Tazuru **, Junji Sugiyama **, Toshitaka Tsuda ***,
Takahiro Tagami **** and Yumiko Watanabe ****

概要

熱帯地域、特にインドネシア周辺は、アジアモンスーン、エルニーニョ・南方振動、インド洋ダイポールモード現象などの支配下にあり、気候システムの関係を解き明かすのに絶好の場所に位置している。インドネシア産樹木の成長輪の形態観察・安定同位体比測定を行い現在から過去に渡る気候変化を再現することで、将来の気候予測が可能となる可能性が高まった。

1. はじめに

樹木の形成層細胞の分裂活動には周期性があり分裂期と休眠期がある。それにより成長輪 (growth ring) が形成されるが、特に日本のような温帶や寒帶に生育する樹木についてはその周期が 1 年であるために年輪が形成される。一方熱帯などの地域では明確な周期性を持たない樹木が多く、周期性が見られても 1 年ではなく乾季と雨季に対応している場合が多い。Dendrochronology (dendros…樹木 chromos…年代 ology…学問) は、樹木の年輪パターンを分析することによって、年代を科学的に決定する学問で、近年、気象学、考古学、同位体化学などの他分野と関連して日々進化しており、幅広く応用されている。

近年、樹木の年輪研究は様々な分野との共同研究によって、多くの結果を生み出している。その中でも特に、熱帯樹木の有効利用という観点から熱帯樹木の生長に関心がもたれており、また年輪から環境の復元や気候の復元の可能性もあることから、グローバルな気候の変化の履歴や予測のために、熱帯地域の樹木の年輪研究が重要視されている¹⁻⁴⁾。地球上では森林、特に熱帯の森林の減少が著しい。世界では、1990 年からの 10 年間で日本国土の 2.5 倍もの面積にあたる 94 百万 ha の森林が減少している。その 96% がアフリカや南米の熱帯林である。東南アジアでも 23 百万 ha が減少したが、東アジアでの造林面積の増加によって 4 百万 ha の減少にとどまっている。

多くの熱帯の広葉樹は高い商業価値があり、熱帯の国での主要な財源となっている。年輪分析による成長率の情報は資源の更新についての重要な指標となる。気候（干ばつや洪水）の解明においても長期間にわたる熱帯の気候の記録が必要である。周期的な輪の成長と気候との関連づけができるれば、現在から過去に渡る年輪・成長輪の情報から気候変化を再現することができる。このような目的のた

*2011 年 10 月 12 日受理

** 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報
E-mail: tazurusuyako@rish.kyoto-u.ac.jp

*** 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏精測診断分野

**** 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学理学研究科

め、研究会レベルの集まりから始まり、分科会、国際会議へというように「熱帯樹木の成長輪解析」という一つの学問領域が発展してきている¹⁻⁴⁾。

熱帯樹木の周期性リズムは温帯の樹木などに比べて非常に複雑で、熱帯の樹木の年輪学は依然として課題が多いが、年輪は一年一回であるのに対して、熱帯樹木の成長輪はそれよりも短い時間における環境、気候の歴史が、刻まれていると科学者の注目が高まっている。1680年1月12日付のLeeuwenhoekのRoyal Society of Londonへの報告は、モーリシャス諸島の黒檀(ebony)についての木材解剖学を記述したもので、熱帯の樹木の成長輪が欠如しており、絶え間なく成長していることを示す驚きの報告であった。明確な成長輪を持たない性質のため、熱帯樹木は長い間年輪年代学者の中では取り扱いにくい対象とされてきたが、1930年代にはインドネシアでチークについて年輪気候学的な研究が試みられた⁵⁻⁶⁾。また、近年では熱帯樹木の木部形成の周期性が樹木生理的な側面から研究されている。一例を挙げると、Nobuchiら⁷⁾の研究ではタイの乾季と雨季のある熱帯季節林において、そこに生育するチークなどの樹木の木部形成のフェノロジー的調査を行い、雨季から乾季に移行する際に成長輪が形成されるが、それ以外にも雨季における異常気象による雨の減少にも形成層が敏感に反応して成長輪構造を作ることなどが報告されている。

2. 研究例

このような背景のもと、本プロジェクトでは、熱帯樹木の生長と気候変動との関係性についての多角的な調査が進められてきた。以下 2.1-2.2 に例を示す。

2.1 热帯樹木における年輪気候学に関する基礎技術開発

インドネシア産熱帯樹のうち特に環孔材と呼ばれる最も明瞭な成長輪を形成する樹木(チーク・スンカイ)についてデジタル画像解析手法を生長輪解析に適用し解析の自動化を試みられた⁸⁾。これにより、特に東ジャワ産のチークについて、同一個体の異なる断面での生長の相似性と、近接個体間の生長パターンの間の強い相関を確かめ、生長輪面積が気候因子の情報を含んでいる可能性を示唆した。また特にランパン産のスンカイについては雨量と生長との間によい相関があることも明らかとなった。これらのことから、デジタル画像解析手法を今後より発展させることで、熱帯植林地などで伐採される多くの熱帯樹木を短時間で統計処理でき、エルニーニョで代表される赤道大気起源の気象現象の解明に寄与できるとした。

2.2 インドネシア産スンカイによる古気候復元

太平洋とインド洋に挟まれアジア大陸の縁辺に位置するインドネシアは、アジアモンスーン、エルニーニョ・南方振動、インド洋ダイポールモード現象の支配下にあり、これらの気候システムの関係を解き明かすのに絶好的の場所に位置している。しかし、近代的な気象観測記録が乏しく、記録がある場所も限られているため、長期間にわたる気候変動を理解するためには気象観測記録と同等に扱える代替指標を確立する必要がある。古気候復元媒体としての樹木年輪には正確な年代決定ができ時間分解能が高いという大きな特長があるが、インドネシアでの樹木年輪気候学研究は非常に限られており、年輪幅が降水量やENSOの代替指標として確立されているにすぎない。年輪を構成する諸要素はそれぞれ別の時期の気候要素に反応するので、年輪幅以外の年輪構成要素と降水量以外の気候要素に有意な相関が発見されれば、より詳細な気候復元が可能になる。より詳細な気候復元のため、インドネシアの年輪気候学で用いられてきたチークと極めて近縁の関係にある、スンカイ(図1)を用いて、年輪幅の他に、孔圈道管の平均面積、年輪セルロース中の炭素・酸素同位体比も測定し、これらを降水量、相対湿度、日照時間と相関解析した⁹⁾。その結

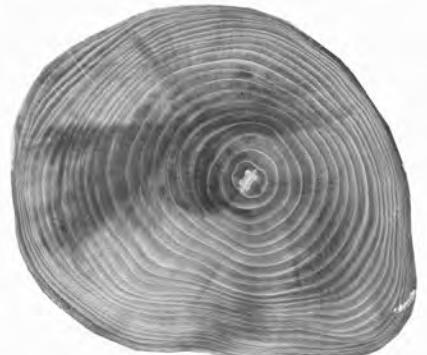


図1：インドネシア産スンカイの年輪

果、スンカイにおける複数の年輪構成要素と気候要素との間に有意な相関があることが明らかとなつた。さらに代替指標を確立するためにインドネシア産スンカイにおける年輪セルロース中の炭素・酸素・水素安定同位体比の測定が進められた。それにより、酸素安定同位体比が、雨期の相対湿度の情報を記録している可能性が高いことが明確となった他、スンカイが古気候復元に有用な樹種であることが示唆された（投稿準備中）¹⁰⁾。また、インドネシア産チークについても、スンカイと同じく、セルロースの酸素安定同位体比が古気候代替指標となる可能性が高いことが判明した¹¹⁾。

熱帯樹木の成長輪解析に関しては、1988 年の IUFRO の会議²⁾以来、①熱帯の国では年輪・成長輪を研究する研究者が少ないとから技術的、経済的なサポートが必要である、②熱帯の樹木に関する研究の中心は熱帯で設立され、研究者同士のコミュニケーションが出来るような協力体制が必要である、③年輪分析が広く応用されるために多くの方法、結果、可能性を広く広めるべきである、④熱帯資源を保全の面からも国際的に認知され、またそのような研究プロジェクトが高い評価を受けるべきである、と認識されている。熱帯の一つであるインドネシアは、アジアモンスーン、エルニーニョ・南方振動、インド洋ダイポールモードの支配下にあり、そこに生育する熱帯樹木は、地球規模での気候システムの関係を解き明かすのに絶好な情報を保存しているはずである。未来の気候変動予測のために今を生きる我々ができるることは、熱帯樹木が知る過去を、より正確に抽出し、未来の予測能力を向上させることである。今後も、上記の①～④を念頭におき、引き続き熱帯樹木と気候変動に関する研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Cultural Diversity, Environmental Variability (Chen, L., Qiu, H.-Y., Wamg, X.-C., and Zhang, Q.-B. eds), Programme and Abstract Book of 7th International Conference on Dendrochronology, Jun. 11-17, 2006, Beijing, China, pp. 1-153.
- 2) Growth Rings in Tropical Woods (Baas, P., and Vetter, R. E. eds.), IAWA Bull. n.s. 10, pp. 95-174, 1989.
- 3) Growth periodicity in Tropical Trees (Eckstein, D., Sass, U., and Baas, P. eds.), IAWA Bull. n.s. 16, pp. 323-442, 1995.
- 4) Dendrochronology in Monsoon Asia (Eckstein, D., and Baas, P. eds.), IAWA Bull. n. s. 20, pp. 223-350, 1999.
- 5) Coster, Ch. Zur Anatomie und Physiologie der Zuwachszenen und Jahresringbildung in den Tropen., *Ann. Jard. Bot. Buitenzorg*, **37**, 49-160, 1927 & **38**, 1-114, 1928.
- 6) Berlage, H. P., Jr., Over het verband tusschen de dikte der jaarringen van djatiboomen (*Tectona grandis* L.f) en den regenval op Java. *Tectona*, **24**, 939-953, 1931. (Translated by Bei, M., 1988).
- 7) Nobuchi, T. et al.: *IAWA J.*, **16**, 361-369, 1995.
- 8) 谷尾元聰, 热帯における年輪気候学に関する基礎技術開発, 京都大学情報学研究科修士論文, 2006.
- 9) 田村茂樹, インドネシア産スンカイを用いた古気候復元の可能性, 京都大学大学院理学研究科修士論文, 2009.
- 10) 原田麻央, Basic study of paleoclimate reconstruction using tree-ring structure, oxygen and carbon isotopic ratios of Sungkai (*Peronema canescens* Jack) in West Java, Indonesia, 京都大学大学院理学研究科修士論文, 2011.
- 11) ブリーン佐助, インドネシア産チーク年輪を用いた古気候復元のための基礎的研究, 京都大学理学部卒業論文, 2011.

アカシア材の組織構造*

Yahya Ridwan**, 高瀬 克彦**, 今井 友也**, D. Silsia***,

Joseph Gril****, 杉山 淳司**

Anatomical Structure of *Acacia* Trees*

Yahya Ridwan**, Katsuhiko Koze**, Tomoya Imai**, D. Silsia***,
Joseph Gril**** and Junji Sugiyama**

概要

アカシアは、近年、東南アジア諸国で大規模造林が行われている熱帯早生樹である。早生樹ゆえに10年以下で伐採されることもあり、特にその場合、材が未熟なうちに利用されることになる。そこで、特にパルプ用材として使用されることが多い。パルプ材としての質（パルプ収量や紙とした時の強度）を評価するためには、密度の評価やいくつか方法があるが、本稿では材の解剖学的特徴に基づいてパルプ材としての評価と、熱帯材の組織構造の三次元での解析について概説する。

1. はじめに

樹木を木材の供給源として見た時、短期間で生産量を多くすることが、産業的側面から非常に重要である。この観点から、ユーカリ、ポプラ、ラジアータマツなどの早生樹の植林が広く行われ、実際に産業として成り立っている。以上は温帯域に生育する樹種であるが、熱帯においても、早生樹としてアカシア、ファルカラタなどの植林が近年盛んに行われている。インドネシアにおいては、アカシアの植林が近年盛んに行われている。アカシアは非常に成長が早く、多くの場合、10年以下で伐採されてパルプ材として使用される。早生樹ではあるが、材積が相当量あっても、木材としては未成熟の状態で伐採している。従って、強度や寸法安定性などの物理的性質が不安定となり、用材としてよりもパルプとしての利用に適しているからだと考えられる。

パルプ用材として木材を利用するとき、当然マスが大きければ大きいほど生産量が高くなるので、材の重量は原料取引時の値付けの大きな根拠となる。したがって輸送コストを考えると、かさ



図1：ハイブリッド・アカシアの植林地

*2011年9月12日受理(本稿は、参考文献1と2で発表した学術記事の内容を要約したものである。)

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報分野

E-mail: ridwany@rish.kyoto-u.ac.jp; timai@rish.kyoto-u.ac.jp; sugiyama@rish.kyoto-u.ac.jp

*** Faculty of Agriculture, University of Bengkulu, Kota Bengkulu 38371 A, Indonesia

**** Laboratoire de Mecanique et Genie Civil, Universite Montpellier 2, CNRS, Place E Bataillon, cc 048, 34095 Montpellier cedex5, France

の低い木材が好まれる。アカシアとして当初植林されたのは、マンギウム (*Acacia mangium*) と言う種であったが、近年、別の種のアカシア (*A. auriculiformis*) との自然交配種（以降、ハイブリッド・アカシアと呼ぶ）が、幹の通直性、枝打ち作業の簡便さ（枝が少なく、勝手に枯れ落ちてくれる）、そして親の両種よりも成長が早いという特徴を持つために、パルプ用材として注目を浴びている。このハイブリッド・アカシアは、自然に交雑種ができるのを待つしかなかったが、最近では、その人工的繁殖維持も可能となり、重要な熱帯早生樹として注目されている。

しかし、パルプ用材として優れた木材かどうかは、重量だけでは分からぬ。また、木材の密度とパルプ化、あるいはそれから抄く紙の性質に相関があるという報告もあるが、その関係は直接的ではないと思われる。そこで、パルプ用材としての木材の性質を調べる一つの方法に、化学成分の定量や解剖学的特徴を調べると言う方法がある。例えば、パルプ用材として、あるいはそれから抄く紙がより優れた性質を持つためには、リグニンや抽出成分が少ない（=セルロースが多い）、纖維細胞長が適当な長さであり、道管が短い・小さい、などの特徴を持つ木材が好ましいとされる³⁾。本稿では、パルプ材としての評価を念頭に、解剖学的特徴の調査を、ハイブリッド・アカシアについて行った。また、熱帯材の解剖学的研究を行うに当たり、三次元構造データの有用性について議論する。

2. 試料・方法

2.1 試料

ハイブリッド・アカシアと、その親であるマンギウム (*Acacia mangium*) と、アウリキュリフォルミス (*A. auriculiformis*) を、インドネシア MHP 社の試験地より伐採して得た。いずれも 7 年生のものを選んだ。幹の直径が 8 cm になる箇所と、地際から 10 cm の箇所の中間点で円盤を採取し、実験に供した。

2.2 定法による解剖学的記述

円盤より 2.5 cm 角の立方体を切り出し、TAPPI⁴⁾ の規格に従い各化学成分量を求めた。また 2 cm 角の立方体を切り出し、冰酢酸と過酸化水素水混液処理による細胞解離を行い、各細胞（纖維細胞、道管、放射方向柔細胞など）を顕微鏡観察に供した。またブロックからスライディングミクロトームを使って切片を切り出し、サフラニンで染色の上、顕微鏡観察に供した。観察から得られた纖維細胞の直径 (D)、壁厚 (T_{CW})、内孔径 (D_L)、長さ (L) を使い、次の値を算出した。

- RR (Runkel Ratio) : $\frac{2 \cdot T_{CW}}{D_L}$
- MR (Muhlsteff's Ratio) : $\frac{D^2 - D_L^2}{D^2}$; 断面積ベースでの、細胞に対する細胞壁部分の比
- SR (Slender Ratio) : $\frac{L}{D}$

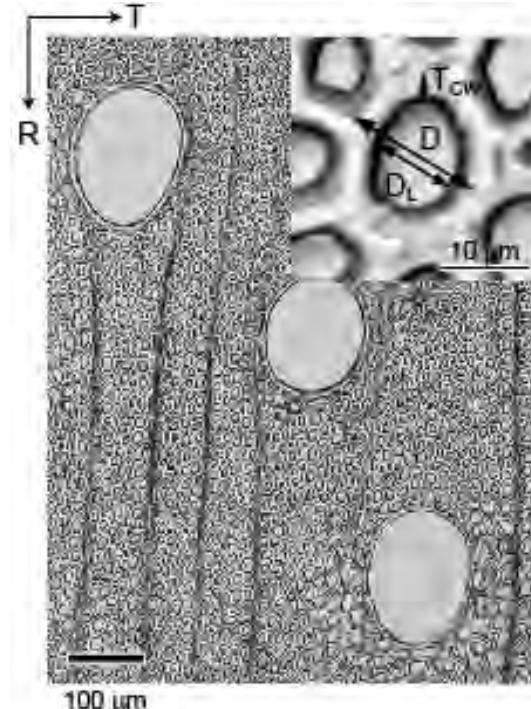


図2：アカシアの横断面切片（上が樹皮側）
Inset: 繊維細胞の拡大像と、各計測パラメーター

- CR (Coefficient of Rigidity) : $\frac{T_{CW}}{D}$
- CF (Coefficient of Flexibility) : $\frac{D_L}{D}$

2.3 三次元再構成データによる解析

10×5×20 mm (T×R×L) のブロックから、長さ方向に 200 枚の連続切片を 25 μm 厚で作製し、無染色でスライドガラスに封入した。これを、共焦点レーザー顕微鏡を使って観察し、切片の厚み中央付近の一焦点面からのリグニンの自家蛍光を使って結像させた。得られた画像データ群は、お互いに xy- 方向で微妙にずれているため、Reconstruct パッケージ⁵⁾を使いそのズレを補正（アライメント）し、その上で積み重ねを行い、三次元構造データを再構成した。200 枚の連続切片を使用した。そのデータセットを使って Image J により三次元構造の解釈を行った。図 3 にその概要を示す。なお、一スライスを切片厚の 25 μm として解釈を行った。

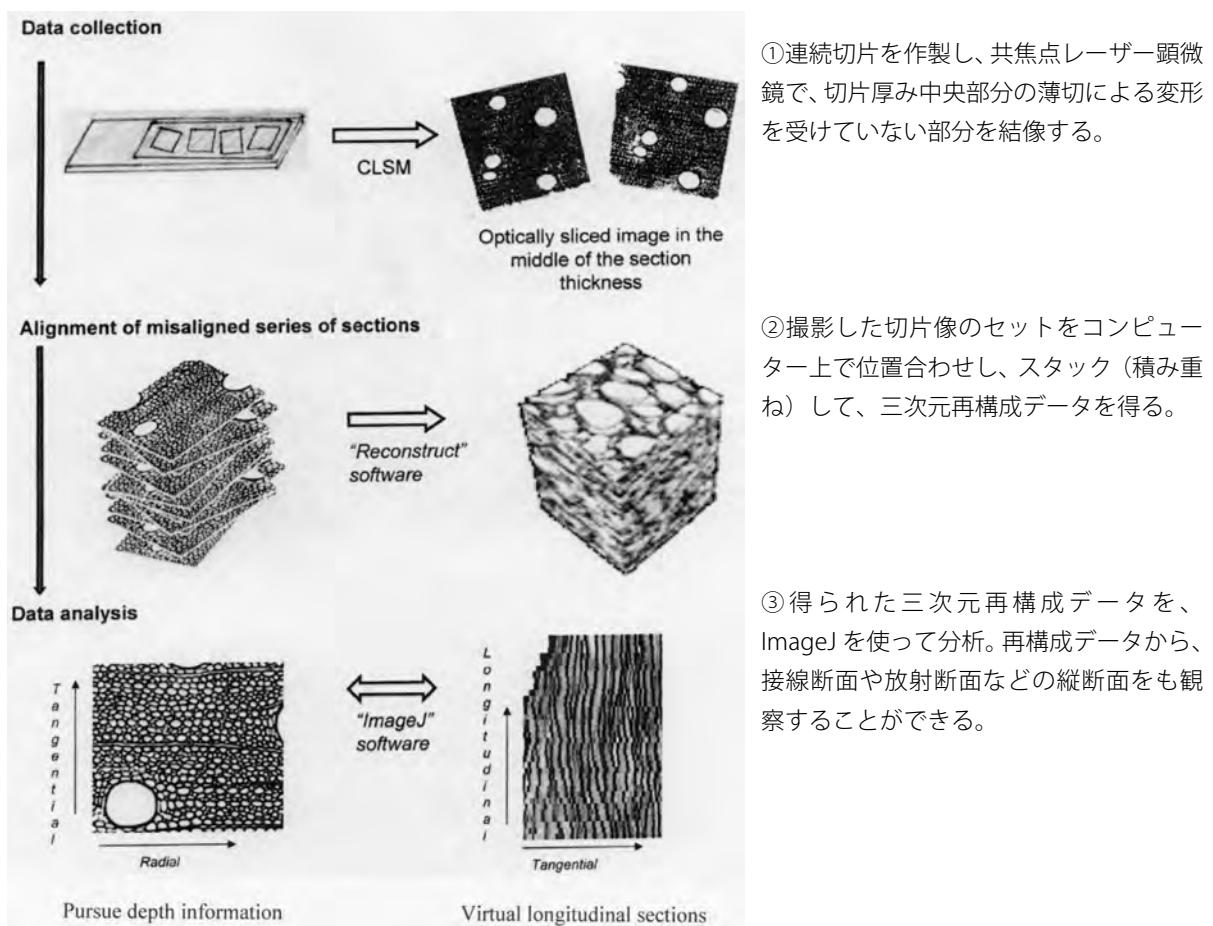


図 3：三次元像再構成の流れ（参考文献 2 より引用）

3. 結果・考察

3.1 化学成分分析

まず、化学成分をハイブリッド・アカシア、マンギウム、アウリキュリフォルミスの 3 樹種で同

定したところ（表1）、リグニン量と密度では有意差は認められなかつたが、抽出成分量（アルコール・ベンゼン抽出画分）は、ハイブリッドが他の二種よりも有意に低く、パルプ化工程でハイブリッドが有利であることが推測された。またパルプの実質成分である多糖成分については、ホロセルロース量では、ハイブリッドは他の二種よりも有意に高かつた。 α -セルロース量では、ハイブリッドはアウリキュリフォルミスより有意に高かつたが、マンギウムとは有意な差は認められない。またこれらの違いも大きいものではないことから、パルプ化工程が理想的に進めば、これらのアカシア間でパルプ収率に大きな違いはないと思われる。

表1：アカシア3樹種の化学成分値（参考文献1より引用）

Species	Alcohol-benzene extraction (%)	Holocellulose (%)	α -cellulose (%)	Lignin (%)	Density (g cm ⁻³)
<i>Acacia hybrid</i>	2.9	82.9	45.4	30.9	0.49
<i>Acacia mangium</i>	5.4**	80.4**	45.7	31.3	0.46
<i>Acacia auriculiformis</i>	6.0**	71.3**	40.6*	34.1	0.52

*95% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差； **99% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差（Student の *t*-検定による）

3.2 解剖学的特徴

次に、解離した細胞試料および切片の顕微鏡観察から得られたデータを表2に示す。いずれもルンケル比は1以下で、製紙に適したものである。しかし、ハイブリッドは他の二種よりも纖維細胞が若干長く、またハイブリッドのスレンダー比は有意に高い。紙力やしなやかさの点で親の二種と異なる紙質を持つことが推測される。また、道管の割合は低いことから、ハイブリッドから作った紙の印刷インク顔料によるピックアップの可能性は低いと推測される。要約すると、ハイブリッドは、親の二種と比較して異なる性質を持つ紙を与え、それはより強くしなやかな性質であると推測される。

表2：アカシア3樹種の解剖学的特徴（参考文献1より引用）

Species	Characters of fiber cells				Morphological parameters of fiber cells						Proportion (%)		
	Length (μm)	Diameter (μm)	Lumen Diameter (μm)	Cell Wall Thickness (μm)	RR	MR	SR	CR	FC	Fiber	Ray cells	Paren- chyma	Vessels
<i>Acacia hybrid</i>	1068	18.76	13.74	2.51	0.37	46.2	57.4	0.13	0.73	73	8.5	9.4	9.5
<i>Acacia mangium</i>	982**	19.39	14.29	2.55	0.37	45.9	51.3*	0.13	0.73	62**	9.8	16*	12**
<i>Acacia auriculiformis</i>	879**	16.74*	11.13*	2.81	0.55	55	52.7**	0.17	0.67	68*	9.1	11	12**

*95% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差； **99% 信頼区間によるハイブリッドとの有意差（Student の *t*-検定による）

3.3 三次元特徴

以上のような通常の光学顕微鏡観察では、物体の投影像を情報とする。したがって、ある平面で物体を切り取ったときに見られる特徴をもとに分析を行う。したがって、どうしても情報は二次元でのものに限られてしまう。本庄らは、軸方向柔細胞の長さが、紡錘形始原細胞とほぼ同じであることを根拠に、一枚の横断面切片から纖維細胞の長さを推定する方法を提案している⁶⁾。この方法は、横断

面像という二次元データから、データ平面と直交方向の情報である細胞の長さを、簡便に測定できる点で優れている。一方で、三次元構造を再構成する本法ならば、連続切片を作製する手間は必要だが、解剖学上の特徴を三次元で設定することができると考えられる。事実、図2からは、一つの纖維細胞の上端と下端が xy - 方向に並進していることが見られる。このような特徴は、解纖した纖維細胞では観察できず、材組織中における真の形状を表していると考えられる（図4）。よって、例えば、纖維細胞の頂端部の分布などから纖維細胞の伸長成長の様子（挿入成長の様子）に関する情報や、成長応力に関する考察など、基礎的研究においても重要なデータを提供してくれるものと期待される。応用面においても、纖維細胞の先細りの程度を定量することで、パルプ特性のより細かな評価が可能となるなど、従前にはなかった観点から解剖学的特徴の評価が可能になると考えられる。

また、もう一つの長所として、三次元構造の中で一つ一つの細胞の特徴を調査することができる点が挙げられる。この点を生かし、道管からの距離と纖維細胞の長さをプロットしたのが図5である。道管から離れた纖維細胞ほど長い傾向が明らかに見られた。また、接線方向と放射方向両者において、道管からある一定距離（細胞数）離れると纖維長が一定になることが分かる。道管に近い纖維細胞は、どうしても短い道管要素細胞と合わせる形で短くなってしまうために、道管からの距離は纖維細胞長に影響する大きな因子となることは容易に想像できる。しかし興味深いことに、放射方向の方が、より遠くの纖維細胞まで影響を与えることが判明した。道管の断面形状（図2）から、道管分化時の道管要素細胞は放射方向により拡大すると考えられる。このために、纖維細胞がその長さを決定する際に道管から受ける影響は、接線方向よりも放射方向でより強いという解釈が、一つの可能性として考えられる。放射方向に長く伸びた道管の形状は、樹木一般にしばしば見られる特徴であり、様々な樹種でも同様な傾向を示すのか、大変興味深い。

以上のように、木材の解剖学的特徴を三次元で捉えることで、今までにない、様々な解剖学研究が進むものと期待される。特に年輪構造がはっきりしないなど、解剖学的特徴が乏しいと考えられてきた熱帯材の研究にとって、有用なツールとなることが期待される。

参考文献

- Yahya, R., Sugiyama, J., Silsia, D., Gril, J., Some anatomical features of an *Acacia* hybrid, *A. mangium* and *A. auriculiformis* grown in indonesia with regard to pulp yield and paper strength, *J. Tropical Forest Sci.*, 22, 343-351, 2010

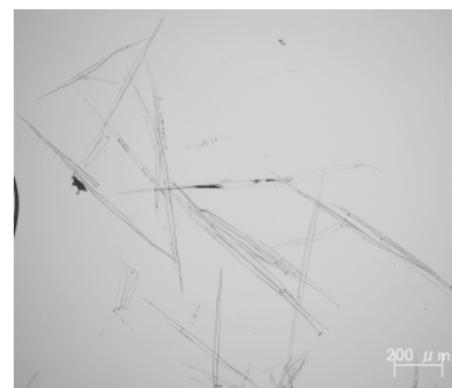


図4：解纖した纖維細胞。図2の三次元再構成データの縦断面で見られるような波打ちは見られない

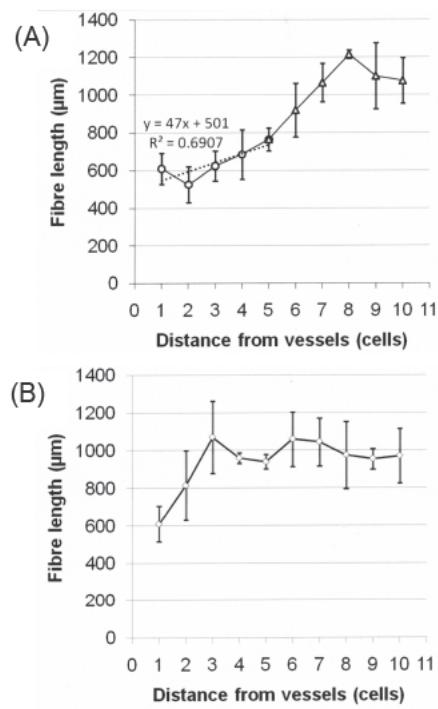


図5：纖維細胞における、道管からの距離（細胞数）と細胞長との関係
(参考文献 2 より引用)

A: 放射方向; B: 接線方向

- 2) Yahya, R., Koze, K., Sugiyama, J., Fibre length in relation to the distance from vessels and contact with rays in *Acacia mangium*, *IAWA J.*, **32**, 341-350, 2011.
- 3) 日本木材学会編「パルプおよび紙」, 文永堂出版, 12pp., 1991.
- 4) TAPPI, *Tappi Test Methods*, T204, T222, T9 and T203, Tappi Press, 1994
- 5) Fiala J. C., *Reconstruct: a free editor for serial section microscopy*, *J. Microscopy* **218**, 52-61 2005.
- 6) Honjo, K., Ogata, Y., Fujita, M., Introduction and verification of a novel method for measuring wood fiber length using a single cross section in *Acacia mangium*, *Trees*, **20**, 356-362, 2006.

熱帯人工林の生物多様性*

吉村 剛**, 竹松 葉子***, 山下 聰^{*4}, 藤田 素子^{*5}, 服部 武文^{*6},

本田 与一^{*7}, 大村 和香子^{*8}, 築瀬 佳之^{*9}, 土居 修一^{*10}

Biodiversity in the tropical plantation forest*

Tsuyoshi Yoshimura^{**}, Yoko Takematsu^{***}, Satoshi Yamashita^{*4}, Motoko Fujita^{*5},
Takefumi Hattori^{*6}, Yoichi Honda^{*7}, Wakako Ohmura^{*8}, Yoshiyuki Yanase^{*9},
and Shuichi Doi^{*10}

概要

マレーシア・サバ州、ベトナムおよびタイの計3箇所のアカシア植林地と自然林について、シロアリ相と木材腐朽菌類（多孔菌類）相の定量的調査を行った。また、インドネシア・南スマトラ州のアカシア植林地において、鳥類相の調査を実施した。これらの調査結果から、生物多様性を考慮した持続的植林地管理方法について考察を行った。得られた結果は、大規模植林地における生物多様性維持のためには長伐期化だけでは不十分であり、保護林（二次林）や残存林の配置を適切に行う必要があることを明らかに示していた。さらに、シロアリ類や菌類など移動性の乏しい生物群については、アカシア植林による乾燥化が生物多様性においても重要な意味を有していることが示唆された。

1. はじめに

近年、東南アジアでのプランテーションの増加は非常に顕著であり、アカシア、パラゴムノキ、アブラヤシなどが、天然の二次林にとってかわりつつある¹⁾。このような土地利用の改変は生物相の変化を引き起こすことが多い²⁾。逆の見方をすると、生物相の調査から、土地利用の変化に伴う地域環境の変化を評価することができる。また、生物多様性のもたらす生態系サービスである病虫害の発生抑制機構として、宿主側の高い多様性が重要であると指摘されている³⁾。これに対して、寄生者の多様性が高い場合は、宿主の防御機構を打ち破る種が含まれる可能性が高いため、病虫害が発生する可能性が高くなるものと考えられ、植林地のような単一の宿主しかいない環境では、被害が拡大することになる。つまり、生物多様性の維持は、熱帯におけるプランテーションの持続的管理に貢献するも

*2011年9月26日受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所居住圏環境共生分野

E-mail: tsuyoshi@rish.kyoto-u.ac.jp

*** 〒753-8515 山口市吉田 1677-1 山口大学農学部生物資源環境科学科

*4 〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町 京都大学地球環境学堂

*5 〒606-8501 京都市左京区吉田下阿達町 46 京都大学東南アジア研究センター

*6 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野

*7 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野

*8 〒305-8687 つくば市松の里 1 (独) 森林総合研究所 木材改質研究領域

*9 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻

*10 〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学大学院生命環境科学研究科国際地縁技術開発科学専攻

のであると考えられる。

シロアリは木材害虫として有名な昆虫であるが、この「木を食べる」という性質は、森林生態系において別の重要な意味を持つ。すなわち、シロアリは生態系において枯死植物を食べる「分解者」として、物質・エネルギー循環に関与している。分解者であるシロアリは、森林環境に敏感に反応し、その種組成を変える。したがって、シロアリは森林環境の評価に有効な生物と言えよう。

一方、シロアリとともに枯死植物の分解者として重要な生態的位置を占める菌類は、東南アジア熱帯地域において肉眼で子実体が確認できる大型種だけで 1 万～ 2.5 万種が生息していると推定されている⁴⁾。

さらに、シロアリや菌類などバイオマスの分解に直接関わる生物とは異なり、上述した病害虫の抑制機構として、鳥類による捕食も重要な役割を果たしている。また、鳥類は空中を自由に移動できるという特性から、種々のランドスケープ間での栄養物質の移動に寄与していることも知られている⁵⁾。

本報告では、大規模プランテーション化などの土地利用変化がシロアリ類、菌類及び鳥類の多様性に及ぼす影響について、熱帯アカシア人工林を対象とした著者らの調査結果を紹介するとともに、プランテーションの周辺や内部に残された天然林（二次林も含む）の役割について考察する。

2. 热帯アカシア林の生物多様性

2.1 热帯アカシア林におけるシロアリ多様性

シロアリの多様性調査には、一定の面積内で一定の調査労力によって採集された種数及び遭遇回数を記録する方法が用いられる。この手法は一般に「トランセクト法（方形区法）」と呼ばれる。さらにトランセクト法で採集されたシロアリは、種に同定されたのちにそれぞれの種の分解者としての役割によって、材食性シロアリ、キノコ栽培シロアリ、土壤食性シロアリといった「機能群」に分けられる。

これまでの研究で様々な環境とシロアリ相の関係が調べられてきており、その研究成果はシロアリの種組成を用いた環境評価に役立つ。シロアリの多様性はその地域の環境に大きく影響され、自然環境の違いのみならず、森林伐採、プランテーション、焼畑などによる人為的搅乱もシロアリの地域的な多様性に影響を与えることが分かっている。原生林ではシロアリ科、特に土壤食性シロアリの多様性が非常に高く、搅乱がすすむにつれてその種数は急激に落ち込むことが観察されている。さらに、材食性シロアリの種構成は、搅乱がすすむほど、害虫種が多くなる。従って、原生林のような健全な森林であるかどうかは、シロアリ科のシロアリがいかに多く、その多様性が高いか、材食性の種組成がどのようなものかに注目することで評価できる。

熱帯雨林の代表としてマレーシア・サバ州・ケニンガウ近郊の自然林とアカシア植林地を、熱帯乾燥林の代表としてタイ・サカエラートおよびベトナム南部の自然林とアカシア植林地を選定し、シロアリ多様性をトランセクト法によって用いて調査した。得られた結果から、植林後の年数経過に伴うシロアリ種組成の変化を考察するとともに、植林地と自然林の環境の比較を行った。本調査でのトランセクト調査法は、Jones and Eggleton⁶⁾ の 100 m トランセクト法をさらに細分した手法を採用した。この方法では、森林内に 2 m × 100 m の区画を設定し、それを 5 m × 1 m の 40 セクションに分け、1 セクションを 1 人が 30 分間調査する（図 1）。

その結果、マレーシア・サバ州においては、自然林における約 30 という種数と比較して、アカシア植林地では林齢にかかわらず 10 種に満たないシロアリ種しか採集されず、多様性は非常に低かった。また従来報告されてきた土壤食性シロアリ及び材食性シロアリの搅乱による影響も浮き彫りになってきた。一度伐採されてしまった森林は、20 ~ 30 年経過して外見では森林としての様相を呈していたとしても、シロアリの種多様性や機能的多様性は自然林には遠く及ばないようである。つまり、アカシア植林を、紙・パルプ用短伐期施業から製材用長伐期施業へとシフトしたとしても、シロアリ相は容易には回復しないのである。

一方、タイ・サカエラートおよびベトナム南部においては、まだ完全にデータがまとまつてはいな

いものの、全体としてアカシア植林地におけるシロアリ多様性は自然林と比較して低かった。種構成の特徴は、上述したマレーシアの熱帯雨林の結果とは大きく異なり、自然林とアカシア林で共通種が多く採集されることと、キノコシロアリ亜科が大きな割合を占めることであった。その要因として、湿潤なマレーシアの自然林に比べてもともと乾燥林であるタイの自然林では、搅乱による乾燥が進んだアカシア林でも同じ種が生息可能であるためと考えられた。したがって、このような環境変動の指標はそれぞれの地域ごとに作成する必要性があることが示唆された。

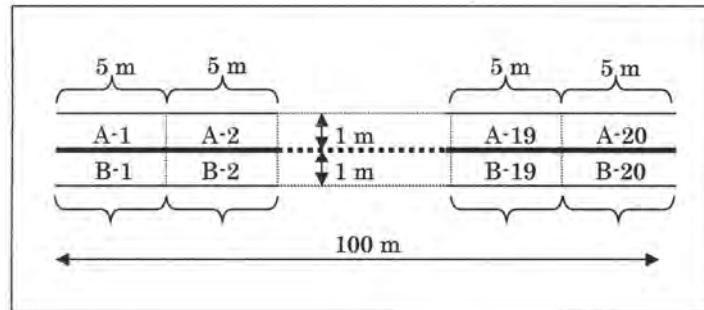


図1：シロアリ相の調査方法（ベルトランセクト法）。1 m × 5 m の小区画（図では A-1 ~ A-20 と B-1 ~ B-20 の 40 区画）を 1 人が 30 分で調査

2.2 热帯アカシア林における木材腐朽性担子菌の多様性

これまでに、アカシア植林地においては、様々な種類の菌類による腐朽害が知られているものの⁷、菌類の多様性についてはほとんど評価されていない。

調査地は 2.1 で述べたシロアリ相調査の場合と同一である。60 × 4 m のライントランセクトを 3 本互いに 25 m 間隔になるように設置し、これをまとめてプロットとした。アカシア植林地については 1 林分につき 1 つのプロットを、自然林については 1 林分につき 2 つのプロットを設置した。プロット内から多孔菌類の子実体を採集し、種まで同定した。また、個体数の指標として、子実体が発生していた木材の本数を用いた。なお、種同定にあたっては森林総合研究所関西支所の服部力博士にご協力をいただいた。

調査の結果、102 種 658 回の出現が記録された。*Microporus xanthopus*, *Trametes cf. pocas*, *Hexagonia tenuis complex* sp.3, *Flavodon flava* などが優占した（ここでは全体に占める割合が 3% 以上の場合を優占とみなした）。*Microporus xanthopus* はマレーシアとベトナムの原生林各 1 林分とタイの自然林 2 林分において最も出現回数が多かった。また、*Trametes cf. pocas* はマレーシアとベトナムの 4 年生アカシア林で、*H. tenuis complex* sp.3 はベトナムの 9 年生アカシア林において最も優占的であった。*Flavodon flava* はタイの 3 年生アカシア林で優占した。

また、各調査地においてプロット間で種多様性を比較したところ、マレーシアではプロット間の種多様性に有意差は認められなかった。一方、ベトナムでは原生林 1 林分よりも 9 年生アカシア林において、タイでは 3 年生および 5 年生アカシア林よりも自然林 2 林分において、それぞれ種多様性が高かった。

このように菌類の種多様性については、調査地間で結果が異なった。一方、種構成についてみると、自然林においてはいずれも共通して *M. xanthopus* が優占していたものの、アカシア林では優占種がプロット間で大きく異なる。このことは、自然林では少数の広域分布種が優占しているのに対して、アカシア植林地化することで、乾燥耐性や高温耐性のある種が優占しやすい状況が生まれ、どの種が実際に優占するかは、侵入と定着の過程で確率的に決まるといった状況が生まれているのかもしれない。この仮説を検証していくためには、①資源量を定量化する、②枯死材中に生存している菌糸体も考慮した採集を行う、③調査地面積を広げ、空間的異質性を十分に反映させる、④優占種の生理的特

性を明らかにする、⑤種構成の経時的な変化を調査する、といったことが必要となるであろう。

今後、これらの点を踏まえたうえで生態的なデータを重ねるだけでなく、腐朽機構の分子レベルでの解明もすすめることで、植林地のような単一の宿主しかいない環境における、大規模な病害の発生機構の解明とそれに対する抑制機構の創出に寄与できるものと考える。

2.3 热帯アカシア林における鳥類多様性

調査地はインドネシア・スマトラ島南スマトラ州ムアラエニムに位置するアカシア・マンギウム産業植林地(26万ha)である。伐期は6年で、林齢の異なる林分がモザイク状に入り組んでいる。天然林は保護区域として保全されているが。大半は2006年の火災で焼け、荒地となっていた。植林区域には谷部を中心として天然林(二次林)が残されている場合が多くた。保全林から異なる距離(0.5km, 1-2km, 6-7km, 10-15km)にある1年生および4年生のアカシア林数箇所と保全林、残存二次林において、鳥類の調査を行った。調査は双眼鏡を用いて見通しのよい林内で10分間観察し、出現した鳥類種、個体数、および観察した距離を記録した。それにより、各林分における鳥類相の違いおよび各地域における鳥類相の違いを明らかにした。調査は2007年雨季(11~12月)と2008年乾季(7~8月)に行った。

それぞれの環境で観察された鳥類種数は、保全林で16~32種、残存二次林では18~26種、4年生のアカシア林では11~28種、うち残存二次林に近いアカシア林では11~26種、1年生のアカシア林では11~24種であった。保全林からの距離に伴った変化は明確ではないが、やや減少傾向にあった。一方、TWINSPAN⁸⁾による調査地点の分類では、種組成に関しては明らかな違いがみられた。アカシア林のうち、残存林近くのアカシア林を除いたすべての林分が同様の種組成を持つと判断された(図2)。さらに、残存林近くのアカシア林は、保全林や残存二次林の種組成と同じ種組成をもつが、グループ1のアカシア林とは異なるという結果となった。これらのことから、保護区のみならず残存林の保全的価値は高く、それがあることで周辺のアカシア林に生息する鳥類種は二次林を好む種が多くみられ、二次林から遠いアカシア林よりも多くの種を保全できることが示唆された。一方で1年生のアカシア林は種数も少なく、鳥類の生息地にはなりえないことがわかった。今後も景観要素の配置や伐採システムなどに着目し、知見を積み重ねる必要がある。

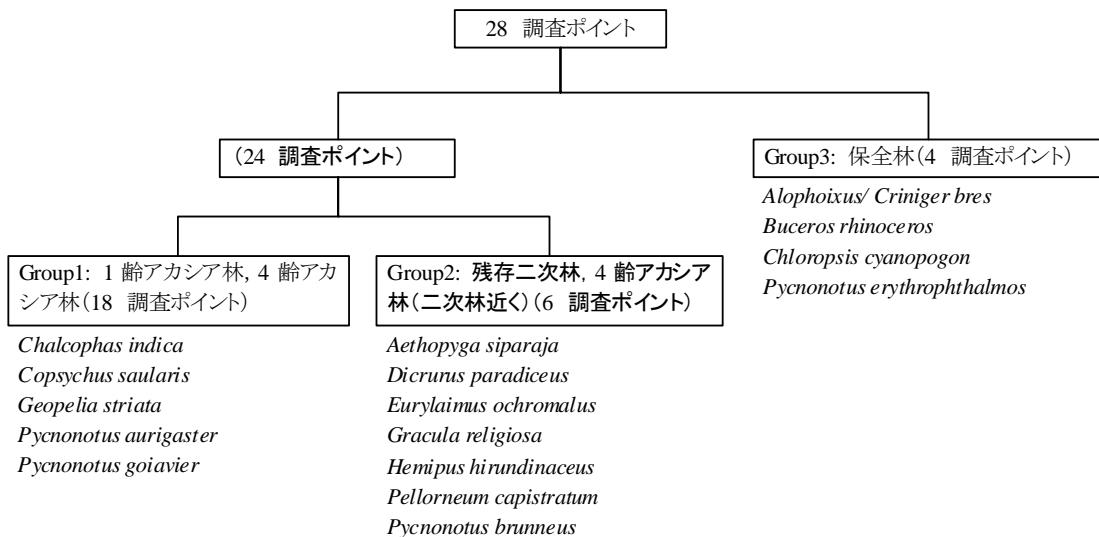


図2：調査ポイントの鳥類種組成に基づく分類。枠外のリストは、グループごとの代表的な鳥類種

3. 热帯人工林において生物多様性を維持する仕組み

本研究の結果は、以下の 3 点に集約される。

- ① 一度伐採されてしまった森林は、20～30 年経過して外見的には森林としての様相を呈していたとしても、シロアリ相の種多様性や機能的多様性は自然林には遠くおよばない。
- ② 菌類の種多様性や種構成に関しては、アカシア植林地化による環境変化、すなわち乾燥化や高温化が大きく影響する。
- ③ 保護区のみならず残存林の保全的価値は高く、それがあることでアカシア植林地により多く鳥類種を維持できる可能性が高い。

①については、伐採サイクルの長期化、すなわちパルプ・製紙用としてのアカシア植林から製材用としてのアカシア植林に転換したとしても、バイオマスの循環を支えるシロアリ相の回復は容易には望めないということを明確に示している。つまり、大規模植林地においては、最初の段階から植林地と保護林の配置についてきちんとデサインを行っておく必要があるということである。

②に関しては、これまでにも指摘されていることであるが、例えば泥炭地などの湿潤地域へのアカシアの植林とその結果として乾燥化が、地域の生物多様性に対して大きな影響を有していることを如実に示している。植林に使用する樹種の選択について、“この土地に育つか？”, だけでなく、“この土地に植えることで将来的に地域環境にどのような影響があるか？”, という点について最大限の配慮を行わなければならない。

最後の③は①とも深く関連しており、大規模な少数の保護区を設置するだけでなく、できるだけ多くの残存林を一定の距離以下の間隔で配置することが生物多様性の維持という点からは重要である。

参考文献

- 1) FAO. Global Forest Resources Assessment 2005, Progress towards sustainable forest management, Food and Agriculture Organization - United Nations, 2005.
- 2) Sheldon, F. H., Styring, A. and Hosner, P. A., Bird species richness in a Bornean exotic tree plantation: a long-term perspective, *Biol. Conserv.*, **143**, 399-407, 2010.
- 3) Keesing, F., Holt R. D. and Ostfeld, R. S., Effects of species diversity on disease risk, *Ecol. Lett.* **9**, 485-498, 2006.
- 4) Mueller, G. M., Schmit, J. P., Leacock, P. R., Buyck, B., Cifuentes, J., Desjardin, D. E., Halling, R. E., Hjortstam, K., Iturriaga, T., Larsson K. H., Lodge, D. J., May, T. W., Minter, D., Rajchenberg, M., Redhead, S. A., Ryvarden, L., Trappe, J. M., Watling, R. and Wu, Q., Global diversity and distribution of macrofungi, *Biodivers. Conserv.*, **16**, 37-48, 2007.
- 5) Fujita, M. and Koike, F., Birds transport nutrients to fragmented forests in an urban landscape, *Ecol. Applications*, **17**(3), 648-654, 2007.
- 6) Jones, D. T. and Eggleton, P.: J., Sampling termite assemblages in tropical forests: testing a rapid biodiversity assessment protocol, *J. Appl. Ecol.*, **37**, 191-203, 2000.
- 7) Eyles, A., Beadle, C., Barry, K., Francis, A., Glen, M. and Mohammed, C., Management of fungal root-rot pathogens in tropical *Acacia mangium* plantations, *For. Path.* **38**, 332-355, 2008.
- 8) Hill, M. O. TWINSPLAN –A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes, Cornell University, 1979.

ユーカリの形質転換による代謝工学*

矢崎 一史**

Metabolic engineering in transgenic *Eucalyptus* species*

Kazufumi Yazaki**

概要

本我が国の主たるパルプ原料として重要なユーカリはオーストラリアで大規模栽培されるが、その葉から取れる精油も貴重な芳香資源として使われている。本稿では、ユーカリを使ったバイオテクノロジーの例として、ユーカリオイルの主成分であるモノテルペンの代謝工学について紹介する。

ユーカリのバイオテクノロジー

ユーカリはフトモモ科に属する常緑樹木であり、コアラの主食としても有名だが、主にオーストラリアに分布している。ユーカリは、我が国が主立った製紙会社が主たるパルプ原料として大規模に商業栽培することで知られるが、一方でその葉から取れる精油（ユーカリオイル）は香料の重要な原料として利用され、飲食品やアロマセラピーに用いられている。実際、ユーカリオイルには鎮痛作用、抗炎症作用、抗菌作用、抗ウイルス作用などの生理活性が報告されている。オーストラリアの先住民族はこうした効果を経験的に知っていたのか、傷を癒すのにユーカリの葉を利用したとされる。また、現代においてもユーカリの葉そのものはハーブティーとしても利用され、さらに最近では、ユーカリオイルは抗アレルギーグッズに広く利用されるなど、その用途は非常に広い。このように有用性が認識されるユーカリオイルも、他の植物の精油と同様に組織当たりの含有量は高くないため、非常に高価に取引されている。一方で、遺伝子工学の発展により、植物体内で精油成分が作られる際に働く酵素遺伝子の単離が可能になった。近年では、こうした遺伝子を分子ツールに用いた遺伝子組換えにより、植物が生産する精油成分の蓄積量を向上させる研究が可能となってきた。ただし、こうした試みのいずれもが草本植物を対象とした報告であり、ユーカリのような樹木で遺伝子組換えによる香りのエンジニアリングを行った例はなかった。そこで我々は、ユーカリを材料に遺伝子工学を応用し、従来の育種と比較して短期間での飛躍的な精油含有量の向上を目指したユーカリオイルの代謝工学を行った。なお、本研究でユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) の形質転換に関しては、日本製紙株式会社にご協力を頂いた。

精油には揮発性の有機化合物が多種類含まれるが、主たる成分となっているのは炭素 10 個から成るモノテルペンと総称される化合物である。ユーカリオイルにも、ユーカリピトール (1,8-シネオール)、 α -ピネンのようなモノテルペンが含まれ、清涼感のある特徴的な香りの本体となっており、これらはまたユーカリオイルの様々な生理活性にも大きく寄与している。我々は、ユーカリにおける代謝工学のターゲット化合物として、元来ユーカリが生産するモノテルペンの一つであるリモネンを選択した。リモネンの基質は炭素数 10 のゲラニル二リン酸 (GPP) で、植物細胞の中で GPP は主にプラスチ

*2011 年 9 月 13 日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林圏遺伝子統御分野

E-mail: yazaki@rish.kyoto-u.ac.jp

ドで供給される。我々は、リモネンを高生産させるための分子ツールとして、香料植物の 1 種であるシソから単離されたリモネン合成酵素遺伝子 (PFLS) を用いた¹⁾。PFLS は炭素数 10 の GPP から 1 反応でリモネンを作る酵素蛋白質であり、色素体に移行するのに必要なシグナル配列をその N 末端に有し、通常は他のモノテルペン合成酵素同様に色素体に存在している。この研究で我々は、プラスチドのみならず、PFLS の N 末端を改変し細胞質に局在するようにデザインした酵素もユーカリで発現させた。PFLS の発現には構成的発現プロモータである CaMV35S プロモータを用いた。その結果、色素体局在型 17 クローン、細胞質局在型 34 クローンの遺伝子組換えユーカリを得た。得られた組換えユーカリは、いざれも通常の生育を示し、形なども野生型と比べ特に差が認められなかった²⁾。

リモネンの蓄積量を確認するため、組換えユーカリのクローンの緑葉からヘキサンを用いて揮発成分を抽出し、ガスクロマトグラフィー (GC) による分析を行ったところ、野生型ユーカリのリモネン蓄積量は平均で 22.9 μg/g であるのに対し、プラスチド型 PFLS を高発現した 9 クローンでは平均が 72.4 μg/g、最も高いクローンでは 190 μg/g であり、いざれも野生型よりも高い蓄積量を示した (図 1)。さらに、細胞質型 PFLS を発現した 7 クローンの平均では 120 μg/g、最も高いクローンでは 327 μg/g にまで増加し、プラスチド型 PFLS を発現したクローンよりも高いリモネン蓄積量が認められた。これは野生型の 5 倍近いリモネン量に相当する。

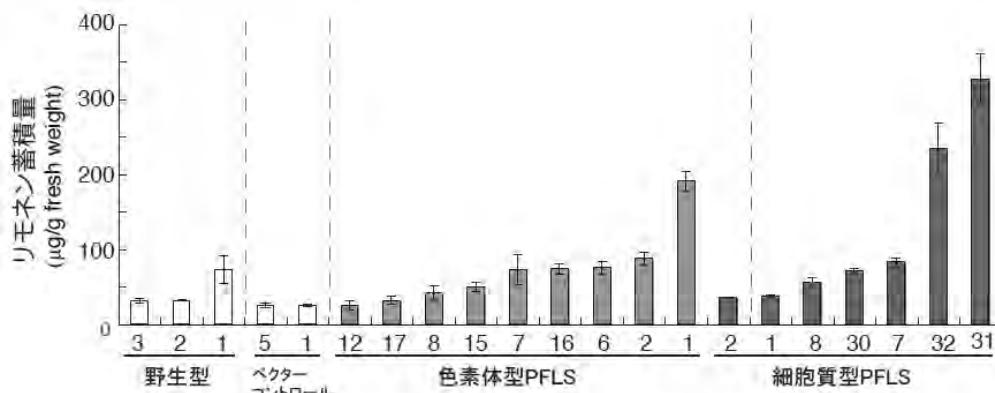


図 1 : PFLS 導入ユーカリの葉におけるリモネン生産量

ここで興味深かったのは、本来モノテルペンの生産が行われるプラスチドにリモネン合成酵素をこう発現させた時よりも、非天然型の細胞内局在部位である細胞質にこのシソ由来の外来蛋白質を発現させた方が、最終産物であるリモネンの生産レベルは高いクローンが得られたことである。これは単に、細胞質で FPP の生合成中間体として作られる GPP をリモネン合成酵素がトラップできた、という事実のみでなく、非天然型の細胞内コンパートメントに生合成酵素を局在させることができたことが、最終的な物質の蓄積にとってメリットがあることを示唆している。そのメカニズムの解明は今後の解析を待たねばならないが、本研究は樹木を使った遺伝子組換えによる香りのエンジニアリングの最初の例となつた。

参考文献

- Yuba, A., Yazaki, K., Tabata, M., Honda, G. and Croteau, R., cDNA cloning, characterization, and functional expression of 4S-(-)-limonene synthase from *Perilla frutescens*, *Arch. Biochem. Biophys.*, **332**, 280-287, 1996.
- Ohara, K., Matsunaga, E., Nanto, K., Yamamoto, K., Sasaki, K., Ebinuma, H. and Yazaki, K., Monoterpene engineering in a woody plant *Eucalyptus camaldulensis* using a limonene synthase cDNA, *Plant Biotechnol. J.*, **8**, 28-37, 2010.

アカシアマンギュウム材を用いたプレファブ型 モデル耐震木造住宅建設のインドネシアでの試み*

小松 幸平**

An attempt in Indonesia for constructing
earthquake-resisting prefabricated wooden house
made of *Acacia Mangium* (*Acacia Mangium* Willd.)^{*}

Kohei Komatsu **

概要

本稿は、インドネシアのボゴール農科大学 (IPB) で 2006 年に実施されたプレファブ耐震木造住宅の試作実験の報告を日本語で紹介するものである。原文はインドネシア語で執筆されており、それをインターネット配信されている自動翻訳機能で一度英文化し、筆者がこれまでのインドネシアにおける耐震木造住宅に関する経験を基に、独自の判断で日本語に意訳したものである。原著論文は以下に示すとおり、IPB の森林学科・木材工学研究室のヌグロホ教授の指導の下で、同研究室のリナ・カリナサリー博士が筆頭で執筆された研究所報告である。

Lina Karlitasari dan Naresworo Nugroho: “Pembangunan Rumah Contoh Tahan Gempa Untuk Daerah Bencana Dengan Sistem Pre-Pabrikasi” LAPORAN AKHIR KEGIATAN PEMBERDAYAAN MASYARAKAT DEPARTEMEN HASIL HUTAN, FAKULTAS KEHUTANAN, INSTITUT, PERTANIAN BOGOR (IPB), 2006

1. はじめに

1.1 研究の背景

インドネシアは地震多発国である。地震による建物被害の発生率を減らすために、地震が発生する可能性を考慮にいれてインドネシアに存在する建物一戸建て住宅を含めて一を建設する必要がある。

2006 年 5 月 27 日、ジョグジャカルタで発生したリヒタマグニチュード 5.9 の地震（訳者注：アメリカ地質調査所 USGS の発表したモーメントマグニチュードでは 6.3）によって被害を受けた建物は少なくなかった。2006 年 6 月 6 日までに、地方自治区がまとめたデータによると、損傷、又は倒壊家屋の総数は 71,482 戸に達すると推定されている¹⁾。

建物の構造要素単体（訳者注：柱、梁、壁、床、屋根要素等）が地震の揺れに耐えられるなら、基本的に建物全体は地震に耐えられると言われている。建築物は強いだけではなく、揺れが起った際に十分な変形能力を有していかなければならない。地震が発生した際、建物は地震の力を受け止めて、

*2012 年 1 月 25 日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生活圏構造機能分野
E-mail: kkomatsu@rish.kyoto-u.ac.jp

いかなる構造要素も破壊することなく、大きな変形に耐える能力も持ち合わせねばならない。すなわち、建物の構造要素は延性的に造られるべきであり、たとえ被害があったとしても、構造要素の強度は低下してはならない。木造建築物はこの変形能力の大きな建物の一つであり、その結果、地震が発生した場合、木造建築物はコンクリート造等の建物に比べ崩壊しない場合が多い（訳者注：最後の波線部分は著者の思い入れが強く、実際には様々な条件によって結論は異なる）。

1.2 期待される成果

このプロジェクトの目的は、住宅用建物に広く要求される頑丈な耐震住宅をプレファブ化した部材を組み合わせることで建設できることを明らかにすることにある。この戸建て住宅の設計はプレファブ住宅或いはその部品を製造している住宅産業に委託した。その理由は、このプレファブ住宅の性格からして、震災を受けた地域の人々に可及的速やかに成果物が送られることを期待するからである。

1.3 行動の目標

市場性のある耐震住宅を選択する上で、プレファブ化が一つの目標となった。さらに、住宅構造の目的（低コスト、短期施工、緊急性など）からも、（入手容易な）早生樹の利用が提案された。

1.4 利点

ノックダウン式耐震住宅の基本的な利点は、プレファブ化できる点にある。（訳者注：インドネシアでは、簡単に建設でき、解体も容易な住宅システムが盛んで、ノックダウン式住宅と呼んでいる）耐震住宅を建設する人は、学生を含む、大工仕事のできる労働者を想定する。

2. 思考の枠組

2.1 地震

地震というのは、地球の地殻変動に基づいた局所的な地面の動きによる自然現象であり、確率的な事象である。従って、ある再現期間の長さで見ると、小さな地震は沢山発生し、大きな地震の発生確率は小さい。言い換えると、小さい地震の再現期間は短く、巨大地震のそれは比較的長い。

インドネシア基準 SNI03-1726-2002¹¹⁾によると、耐震構造を設計するための地震の再現期間は 500 年されている。建築物の耐震安全計画の基礎をなす土地の動きは、一般的には表層土の最大加速度で表される。また表層土の動きは、地下深くの岩盤の振動が地震波として伝搬することに起因する。地下深くの岩盤から地表に伝わる地震波は増幅されてくる。岩盤の上に柔らかい土が堆積していればいるほど、地震の強さは増幅される。インドネシアで過去に発生した地震の記録は全て調べられている²⁾。

図 1 に示すインドネシアの地震発生図から分かるように、インドネシアの地震ゾーンは 6 つの領域に分けられている。すなわち、最も弱い地震の領域が 1 で最も烈しい地震の領域が 6 である。地下深くの岩盤レベルにおける平均最大加速度は、地震ゾーン 1 から 6 まで、それぞれ、0.03 g、0.1 g、0.15 g、0.2 g、0.25 g、そして 0.3 g である。（訳者注：g は重力加速度である）

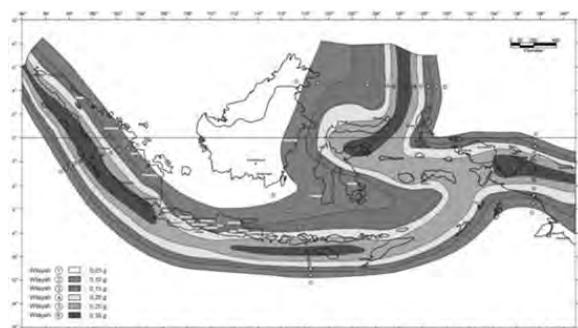


図 1：インドネシアの地震発生地域における岩盤レベルでの 500 年周期の平均最大加速度の分布

2.2 耐震住宅

基本的に、耐震住宅とは、地震が起きた場合崩壊しない住宅という意味ではない。耐震住宅には以下の3つのレベルが考えられる³⁾

1. たとえ地震があっても、主要構造部材（柱、梁、屋根、壁、基礎）も非構造部材（タイルやガラス）に被害のないもの。
2. 非構造部材のみに被害が出て、構造部材は健全であるもの。
3. 大地震が起こった場合、たとえ構造部材に被害が出ても、少なくとも人命は損なわれず、建物が崩壊する前に人は屋外に逃げられるもの。

耐震住宅を設計する際に考慮すべき点は；

1. 住宅の形状はシンプルで、対称形（偏心がなく）、大きすぎないこと。
2. 屋根は、軽い材料で単純な構造とする。
3. 土は乾燥しており、密度が高く、均質に分布していること。基礎はブロックを住宅の土台周に切れ目無く一周回るように配置すること。

2.3 プレファブ木造住宅 2.2 耐震住宅

住宅設計に当たっては以下の6項目の条件を満たす必要がある。1) 耐候性、2) 生物劣化に対する抵抗性、3) 耐震性、4) 解体・再構築容易性、5) 安全で快適な居住性、6) 審美性と建築性⁴⁾。以下に各項目別に見ていく。

1) 耐候性

住宅は様々な日々の自然現象から人間を守る避難場所である。自然現象に対する待避場所として、住宅建築物は雨や熱を常に受け、温湿度の変動による内部構造の変化も受ける。これは常時発生し、建物の寿命に大きな影響を与える。耐候性のある建物の一つとして木造建築が挙げられる。インドネシアにおける王室の宮殿や古いモスクといった建物は何百年にも渡って致命的な劣化を受けずに存続している。これは、十分なメンテナンスが建物の寿命を延ばすことを明示している。

2) 生物劣化に対する抵抗性

インドネシアでは建築部材の60%以上が木材で造られている。屋根、柱、梁などの構造要素と壁、ドア、窓や天井と言った非構造部材がそうである。有機材料である木材は、菌、虫、乾材シロアリ、土中に住むシロアリといった生物の食料でありかつ住処でもある。これらの生物の攻撃は構造部材に損傷を与え性能を劣化させる。1986年の記録では、年間300万件のシロアリ被害が世界中で記録されている。これらのシロアリ被害は年間US\$750,000という莫大な額で、台風による被害が年間US\$350,000であることから、その倍の経済的損失である。更に、インドネシアはシロアリの被害が世界最大の国である。研究によると、ジャカルタ市内に建つ建物の70%以上がシロアリの被害を被っている。スラバヤ、ボゴール、バンドン、そしてインドネシアのその他の都市でも、同じような結果である。このような大きな経済損失を受けて、害虫の抑制がインドネシアの住宅にとって第1の重要な課題となっている。様々な方法が木造住宅の使用年数を延ばすために適用してきた。すなわち、燻蒸、土壤処理、木材の保存処理、物理的シロアリバリア法や生物学的抑制法などである。これらの技術を導入することで害虫をある程度は制御することができる。

3) 耐震性

木造建築物は安定性と高潔さを持っている。構造は非常に高性能である。木材は鉄やコンクリートよりも重量辺りの強さは高い。建物要素の接合は粘り強く木材は容易には破断しない。たとえ1個の木材の部品が損傷しても、応力の再配分で新しい釣り合い状態に移るので木造建築物はそれに打ち勝

てる。このような性質で木造建築は地震に対してより抵抗性がある。(訳者注: この部分はかなり思い入れが強く、やや科学的な根拠が薄い)

4) 解体・再構築容易性

長年にわたって非常にシンプルで解体・再組み立ての容易な木造住宅の伝統が継続されている。中部ジャワや東部ジャワでは、住宅を立ち上げる際に相互補助の伝統が完全な姿で伝えられてきた。この伝統が衰え始めた時、木造住宅を部材単位に解体し、他の場所へ移動させ、再び簡単に構築できる「ノックダウン」という技術が確立された。

5) 安全で快適な居住性

その人生の半分以上を人は家の中で生活する。それ故、家はその主人を自然現象、動物、そして人間によって引き起こされる様々な災害から守ることが出来なければならない。加えて、家は快適な住み手の宮殿でなければならない。その特徴ある性質から、木造建築は自然の暖かみを与えてくれる。木造住宅は冬には暖かみを夏にはクールさを与えることができるので、住宅としての有利性に富む。
(訳者注: この部分もかなり思い入れが強く、やや科学的な根拠が薄い)

6) 審美性と建築性

家は荒野の中の一軒屋として建つのではない。家は環境を形成するので、高い審美的センスを持って設計されなければならない。この段階において、非常に重要な設計のフォルムであると証明された建築は、住宅による美しい近隣関係を創り出す形、寸法、必要性を合わせ持つものである。

3. 方法論

3.1 時期と場所

IPBにおける耐震住宅の開発は2006年6月から9月までの3ヶ月間実施された。しかし、準備は同年5月から始められた。レポートの仕上りは10月であった。場所はボゴール農科大のダルマガ森林学科キャンパス内の中央棟の裏地である。

3.2 基礎

2種類の基礎が推奨された。すなわち、a) 土地との直接接触による水分を避けるために30cm以上の高さを持った土台。b) 50cm以上の高さをもったステージでその上に木製床を敷く。

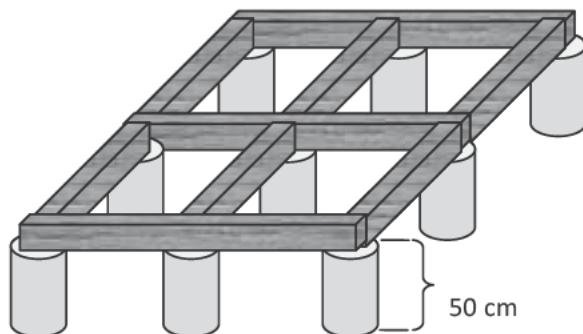


図2：耐震住宅の基礎構造

3.3 壁要素

壁要素としては数種類の候補から選択出来るようにした。

a) ダイアフラム構造（面材両面張り）

アカシアマンギュウム材を構造要素として、面材に合板、木質パネル（ブロックボード、パーティク

ルボード、セメントボード、中比重繊維板、OSB、あるいは竹を用いる（訳者注：これらは案であつて、実際の試設計住宅には結果的には使われなかつたようである）。

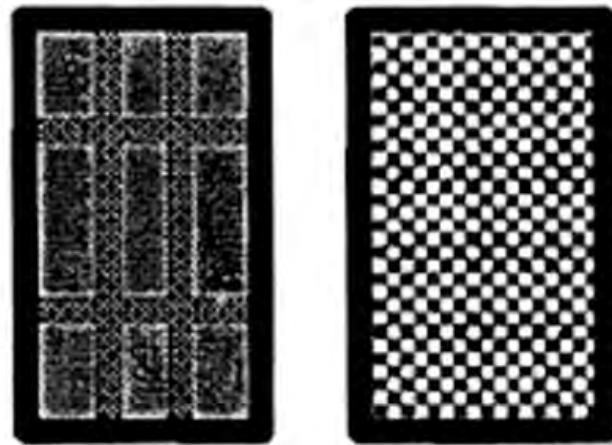


図3：耐震住宅に使用したダイアフラム構造の案（実際の試設計住宅には使われていない）

b) ストレススキン要素（片面張り）

ストレススキン要素として図4に示す面材を片面に45度傾けたものを開発した。乾燥収縮による隙間発生の防止策として板の間に枠材を入れることができる。この壁要素には2種類の仕様を提案した。すなわち、面材は45度に貼るか、図4の右に示すような配列も考えた。これらの面材は審美性と構造の両方の機能を兼ね備えている（訳者注：実際にはこちらが、試設計住宅に使われた）。

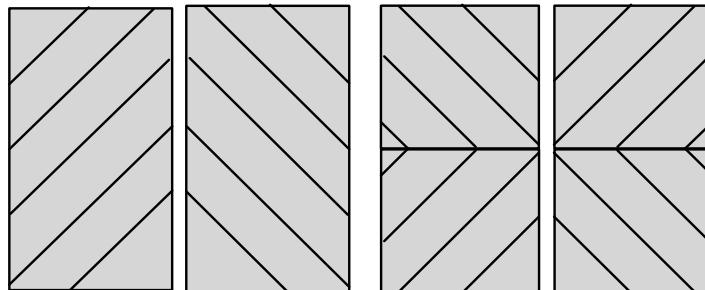


図4：ストレススキン要素

3.4 屋根要素

屋根要素はポータル架構、天井、屋根からなる。ポータル架構は解体と建て方が容易なように面材釘打ちとして設計した。図5に示すように、ポータル架構は2つの部材に分けて製造し、組立時に連結する方式とした。天井は現場で容易に取り付けられるよう別途用意した。屋根葺き材料はトタンもしくは石綿とした。上述した方法は、経済的な発展があった場合容易に増加させ修復できる家庭を想定している。この住宅を建設する過程において、森林学科の学生達は熟練労働者と一緒に共同作業を手伝った。学生達は如何にして木材要素を組み合わせるか、面材釘打ちによるポータルの造り方、床パネルの接合法等をモデル住宅の建築を通じて学んだ。図6に壁パネルの図を、図7に住宅の立面を示す。

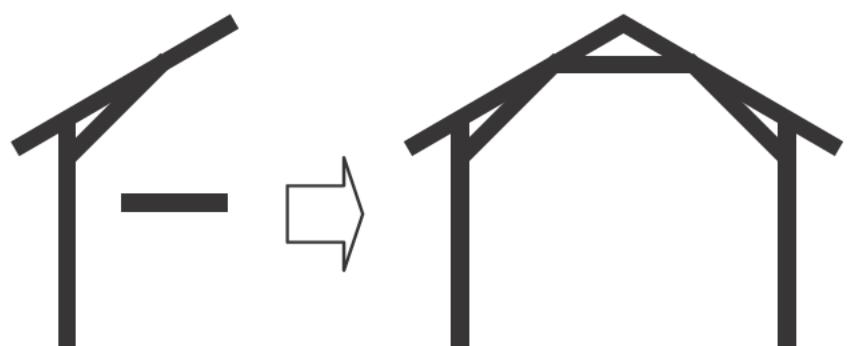


図5：耐震住宅の要素モデル



図6：壁パネルをプレファブ化した耐震住宅の設計（単位：cm）

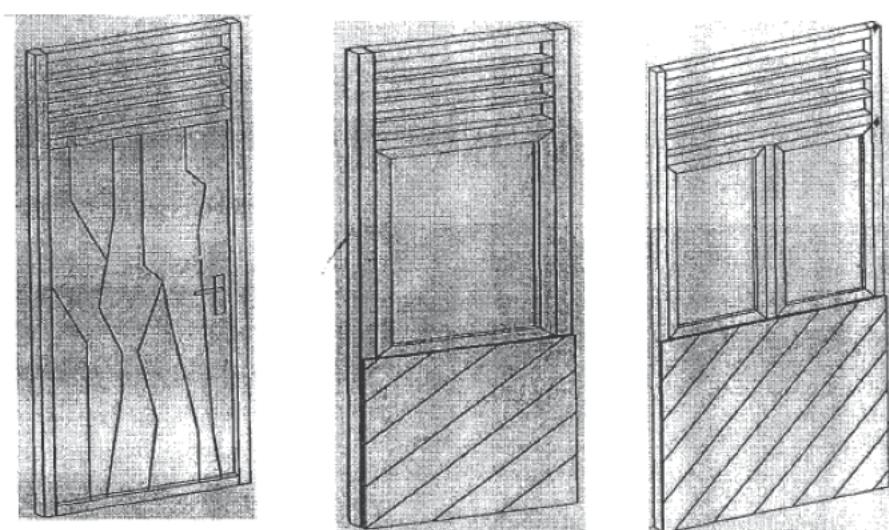


図7：耐震住宅に用いたドアパネルと窓

4. 結果と考察

プレファブシステムで造られた耐震モデル住宅という形での活動の結果を図8に示す。



図8：プレファブシステムで造られた耐震モデル住宅

建築されたモデル住宅には幾つかのメリットがある。その一つはプレファブシステムにある。このシステムを用いることによって建て方が容易になり、また必要に応じて解体（ノックダウン）も容易である。壁要素は簡単に取り外しが効くので、もし洗濯場やトイレなどを拡張する必要が生じた場合や、追加する必要が生じた場合は、簡単に建物を拡張可能である。加えて、十分に高さのある基礎杭はシロアリの食害に対する有効な防衛ラインとなる。ストレススキン構造であるモデル耐力壁はこの建物を少し柔軟な構造としており、地震の揺れを打ち消す効果がある。その結果地震が発生しても建物は直ちには崩壊せず衝撃を逃がして人間が退避できる機会を与えてくれる。（訳者注：必ずしも地震に対してこのような応答が期待されるものではない。この予測を検証するには実験が必要である。）また、プレファブシステムの良さは、建設材料や人手などが不足している地域においても家を容易に建設できるという点にある。

アカシアマンギュウム (*Acacia Mangium* Willd.) で造られたモデル住宅について

この木材は今後が期待される木材である。早生樹の範疇に含まれるが、この木材については構造用用途への利用を目指して広く研究が進んでいる。既往の研究例としては、Dharmasep fianti⁵⁾、Firmanti *et al.*⁶⁻⁷⁾、Karlina sari and Paradipto⁸⁾、Surjokusumo and Karlina sari⁹⁾ 等がある。研究の結果、マンギュウム材の機械的性質はこれまで常用されてきたメランティ材と比べても十分遜色のないものであることが判明した（表1及び表2）。

表1：アカシアマンギュウム材の物理的・力学的性質の一覧

	n	含水率 (%)	密度 (g/cm ³)	MOE (GPa)		MOR (MPa)	研究者引用元
				平使い	縦使い		
1	60	16.5 (8.9)	0.41 – 0.60 (10.9)	8.80 (31.9)	11.6 (28.7)	43.6 (36.0)	Firmanti <i>et al.</i> (2003) ⁶⁾
2	120			8.9 (29.2)		42.2 (37.4)	Firmanti <i>et al.</i> (2005) ⁷⁾
3	27	18.2 (4.4)	0.6 (5.0)	7.10 (20.2)	8.19 (31.1)	42.7 (39.6)	Sumarto (2005)*
4	80	17.8 (11.8)	0.58 (6.9)	9.5 (3.2)			Karlina sari and Paradipto (2005) ⁸⁾

MOE, 曲げヤング係数； MOR, 曲げ破壊係数； n, 試験体数；カッコ内の数字は変動係数 (CV)。

*この文献は原著論文にも見つからなかった。

構造材の修理などでこの木材の潜在的な有用性が明らかとなろう。アカシアマンギュウム材の主たる欠点は目視で確認できる沢山の欠点を含むと言う点であるが、これらの欠点は育林技術（枝打ち等）によって是正されることを期待したい。

表2：幾つかの木材における物理的・力学的性質の比較^{5, 10)}

木材の性質	<i>Acacia mangium</i>	<i>Maesopsis eminii</i>	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Acacia chinensis</i>	<i>Kayu karet</i>	<i>Nyatoh</i>	<i>Meranti merah</i>
密度(g/cm ³)	0.42-0.56	0.48-0.62	0.35-0.42	0.22-0.38	0.55-0.65	0.55-1.0	0.52-0.60
曲げ性能							
MOR (MPa)	97-102	50-60	57-62	45-52	58-66	75-82	63-75
MOE (MPa)	11,600	12,000	9,200	6,900	9,200	12,200	10,200
収縮性能							
半径方向	3.4	3.8	3.0	3.0	3.0	3.0	2.7
接線方向	6.5	6.7	6.3	5.5	7.0	7.0	7.5
人工乾燥法	長時間	長時間	容易	容易	容易	中庸	容易
加工特性							
製材加工	良好	良好	良好	毛羽立つ	良好	良好	良好
切削加工	良好	良好	良好	繊維の引き裂き	良好	良好	良好
単板切削性	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
旋盤切削性	良好	良好	良好	繊維の引き裂き	良好	良好	良好
研磨仕上げ	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好

このモデル耐震住宅の面積は 21 m² あるいは、シンプルハウスプラン 2 1 と同等である。モデル住宅は主リビングルームと寝室、及び台所としても使える空間からなる (1LDK) (住宅の平面図は図9に示す)。住宅建設に要した木材量は 5 m³ であった。アカシアマンギュウムの市場価格は 1 m³ 当たり Rp. 1,000,000 (注: 約 1 万円) であったので、5 m³ のアカシアマンギュウムを使ったので、木材価格は Rp. 5,000,000 (注: 約 5 万円) となった。このモデル耐震住宅の総建設費は Rp. 25,000,000 (注: 25 万円) となった (表3, 詳細な積算は表4)

表3：プレファブ化された耐震住宅の積算表

No.	項目	価格 (Rp.) (注: カッコ内は円)
1	準備作業	777,421 (7,774)
2	基礎作業	777,681 (7,768)
3	パネル作業	10,018,008 (100,180)
4	屋根作業	6,266,410 (62,664)
5	開口部	2,304,384 (23,043)
6	電気工事	660,000 (6,600)
7	仕上げ作業	4,120,448 (41,204)
8	組立作業費	200,000 (2,000)
	合計	25,124,351 (251,243)
備考: 木材の料金は上記の「パネル作業」、「組立作業」、そして一部「屋根作業」に含まれる。		

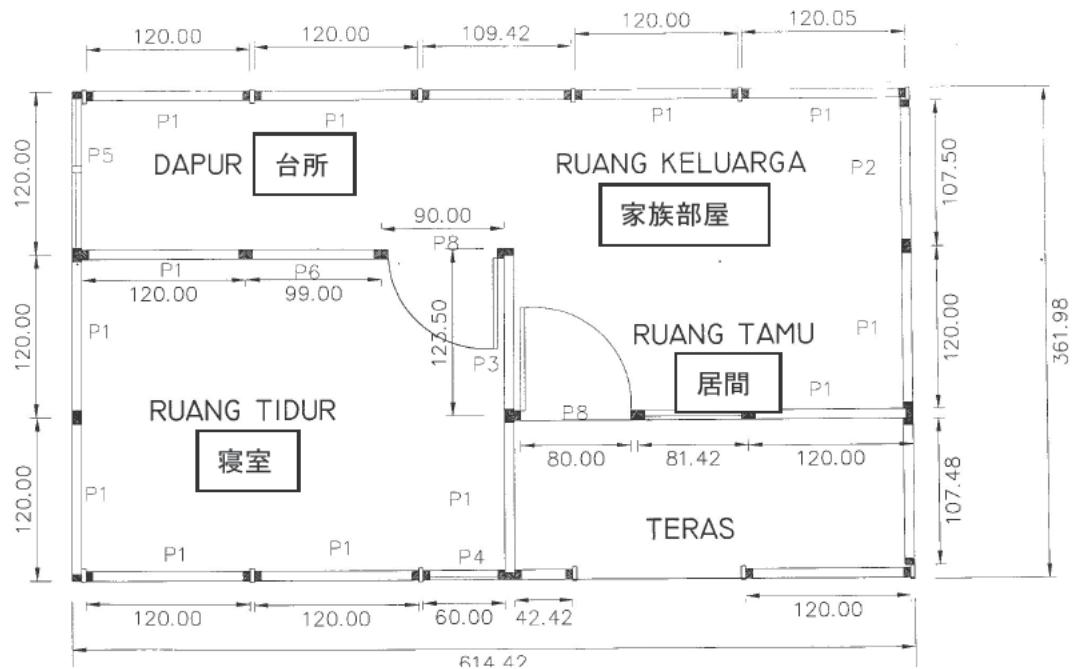


図9：プレファブシステムを用いた耐震住宅平面図の例

表4：モデル耐震住宅の建設に要した作業と材料の詳細

No.	作業分類	単位	使用量	単価 (Rp.)	小計 (Rp.)	総計 (Rp.)
I	準備作業					
1	書類作成		1.00	150,000	150,000	
2	整地と水準	m ²	28.00	9,500	266,000	
3	測量	m ²	22.59	16,000	361,421	
					No. I	777,421
II						
1	基礎工事	bh(セット)	1.2	622,145	777,681	
					No. II	777,681
III						
1	壁パネル	m ²	66.24	84.350	5,587,344	
2	窓付き壁パネル	m ²	2.88	98,000	282,240	
3	2個窓付き壁パネル	m ²	2.88	122,500	352,800	
4	ドアパネル	m ²	5.76	143,000	823,680	
5	玄関ポーチパネル	m ²	2.16	46,900	101,304	
6	ペット用特注	m ²	21.6	60,700	1,311,120	
7	床カバー	m ²	21.6	72,200	1,559,520	
					No. III	10,018,008
IV						
1		m ³	0.51	2,578,700	1,315,137	
2		m ³	0.22	2,577,450	567,039	
3		m	16	27,750	444,000	
4	妻面カバー材料	m ²	11.2	72,200	808,640	
5	換気扇	ls(ユニット)	2	200,000	400,000	
6	アスベスト屋根葺き	m ³	70.24	34,640	2,433,114	
7	棟カバー	m	8	37,310	298,480	
					No. IV	6,266,410

V						
1	天井板（注文）	m ²	22.59	74.884	1,691,540	
2	窓ヒンジ	セット	8	22,500	180,000	
3	両開き窓ロック	セット	4	20,000	89,000	
4	ドアハンドル	セット	2	73,500	147,000	
5	ドアのヒンジ	セット	2	25,000	50,000	
6	ガラス	m ²	2.16	72,150	155,844	
					No. V	2,304,384
VI						
1		ttk（点）	5	55,000	275,000	
2	コンセント	bh（個）	3	45,000	135,000	
3		セット	5	50,000	250,000	
					No. VI	660,000
VII						
1		m ²	112.4	32,530	3,656,372	
2	天井の塗装	m ²	21.6	21,485	464,076	
					No. VII	4,120,448
VIII						
1		ls(ユニット)	1	200,000	200,000	
					No. VIII	200,000
					総計	25,124,351

※作業の一部を図 10 に示す。



a) コンクリート製独立基礎と床構面の施工



b) 骨組み架構の製造と建ち上げ

図 10 : 写真



c) 骨組み架構建ち上げ作業の完成



d) プレファブ生産された耐力壁ユニットの組み込み



e) プレファブ耐力壁ユニットの組み込みとバルコニーの設置

図10 (続き)



f) 耐震住宅の完成

図 10 (続き)

5. 結論並びに示唆

5.1

IPB 林学部木材工学研究室のプレファブシステムを用いた耐震住宅の建設は、ある種の建物に関する一つの選択肢を示した。モデルプレファブシステムは建築物自体の拡張機能を有するものである。壁のダイアフラム構造は地震の衝撃に追随する鍵となる柔軟性を有している。アカシアマンギュウムのような木材を建設材料に選択することは早生樹の活用を促す。木材量 5 m^3 を用い、総工費 Rp. 30,100,000 で耐震住宅は建設された。

5.2 示唆

地震に対する強さと復元性の試験は経験的に必要である。(本論文で提案された耐力壁や骨組架構の実大部分試験体を用いた静的加力実験を行って、本当に十分な耐震性能が発揮されるかどうかを確認することが重要である: 訳者注) インドネシアの研究機関でこの種の実験が可能な所は限られている。なかでも、バンدون市の建築研究所の構造研究室が最適である。

謝辞

この邦訳は、インドネシア・ボゴール農科大学 (IPB) 森林学科 木材工学研究室の N. ヌグロホ教授と L. カリナサリー博士が取り纏めた原著 “Pembangunan Rumah Contoh Tahan Gempa Untuk Daerah Bencana Dengan Sistem Pre-Pabrikasi” を小松がコンピュータの自動翻訳機による英訳を通じて日本語に意訳したものである。文中のカラー写真や図版は、IPB のヌグロホ教授の特別のご好意により頂戴

したものを使わせていただいた。ここに、同教授の御厚情に対して深甚なる謝意を表します。また、自動翻訳で翻訳しきれなかつた単語については、我々の研究室に所属するインドネシア・イスラム大学建築学科講師で京都大学大学院博士後期課程の Y. プリハトマジー氏に教えて貰つた。彼の助力に対しても、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Rumah, T., Earthquake resistant houses built to reduce victims IV, **88**, Jun. 13- 26, 2006. (インドネシア語)
- 2) Wangadinata, W., Planning standards for earthquake resistance building structure, Annual Seminar Paper on IPR "Professionalism in Construction World Indonesia", Jakarta, Aug. 20-21, 2002. (インドネシア語)
- 3) Settlement, P., Module dissemination: Building planning earthquake resistant, Center of structure and construction of the building, Puslibankim Settlements, Bandung, 2004. (インドネシア語)
- 4) Surjokusumo, S. and Nugroho, N., Prefab houses Fahutan IPB: Knock down, Sturdy and Earthquake, Prefab houses assessment team, Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Bogor, 2006.(インドネシア語)
- 5) Dharmasepifianti, D., Comparison between mechanical and physical properties of wood, Adult juvenile with wood on wood Africa (Maesopsis eminii Engl), Faculty of Forestry, Thesis, 1991. Not Published.(インドネシア語)
- 6) Firmanti, A., Surjokusumo, S., Komatsu, K., Kawai S. and Subiyanto B., Utilizing *Acacia Mangium* for construction materials, *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Utilization of Acacia mangium*, Oct. 21-22, Kyoto, Japan, 2003.
- 7) Firmanti, A., Bactiar, T. B., Surjokusumo, S., Komatsu, K. and Kawai, S., Regardless of species application of conception for mechanical stress grading on tropical timbers, International Workshop on Timber Structures, Nov. 15-16, Bandung, Indonesia, 2005.
- 8) Karlinasari, L. and Paradipito, S., 80 minutes of disabilities *Acacia Mangium* wood samples, Forest Products Department, Faculty of Forestry, IPB, 2005.(インドネシア語)
- 9) Surjokusumo, S. and Kalinasari, L., Current state and future chances of low density timber utilization, International Workshop on Timber Structures, Nov. 15-16, Bandung, Indonesia, 2005.
- 10) Djodjosobroto, J., Potential wood construction and *Acacia mangium*, Papers inauguration of National Seminar in the Framework of Timber Construction Study Centre, FT Civil and Planning, University of Trisakti, Aug. 12, Jakarta, 2003.(インドネシア語)
- 11) SNI 03-1726-2002, Planning Standards for Earthquake Resistance Structure Building. (インドネシア語)

MU レーダー全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

信楽 MU 観測所は、滋賀県甲賀市信楽町神山の国有林に囲まれた山中に 1982 年に開設された。観測機器の中核を担う MU レーダー（中層・超高層大気観測用大型レーダー；Middle and Upper atmosphere radar）（図 1）は、アジア域最大の大気観測用大型レーダーであり、高度 2 km の対流圏から、高度 500 km の超高層大気（熱圏・電離圏）にいたる大気の運動、大気循環を観測する。1984 年の完成以来、全国共同利用に供され、超高層物理学、気象学、天文学、電気、電子工学、宇宙物理学など広範な分野にわたる多くの成果を上げている。

MU レーダーの最大の特徴は、アンテナ素子毎に取り付けた小型半導体送受信機（合計 475 個）を個別制御することにより、1 秒間に 2500 回という高速でレーダービーム方向を変えることが可能であり、また、25 個のサブアレイアンテナに分割して使用することも可能である点である。こうした柔軟なシステム設計のため、大型大気レーダーとしての感度は世界 4-5 番目ではあるものの、開発後 25 年を経た今も世界で最も高機能な大型大気レーダーとして活躍を続けている。なお、2010 年 9 月 3-4 日には MU レーダー 25 周年記念祝賀式典および 25 周年記念国際シンポジウムが京都大学宇治キャンパス宇治黄檗プラザにおいて開催された。

なお、MU レーダーシステムには、レーダー、計算機工学の進歩に合わせ最新のレーダー観測技術を導入しシステム拡充が行なわれている。すなわち 1992 年に「実時間データ処理システム」、1996 年に「高速並列レーダー制御システム」、2004 年に「MU レーダー観測強化システム」が導入された。特に、最近導入されたが MU レーダー観測強化システムでは、空間領域及び周波数領域の柔軟なレーダーイメージング観測が可能となった。

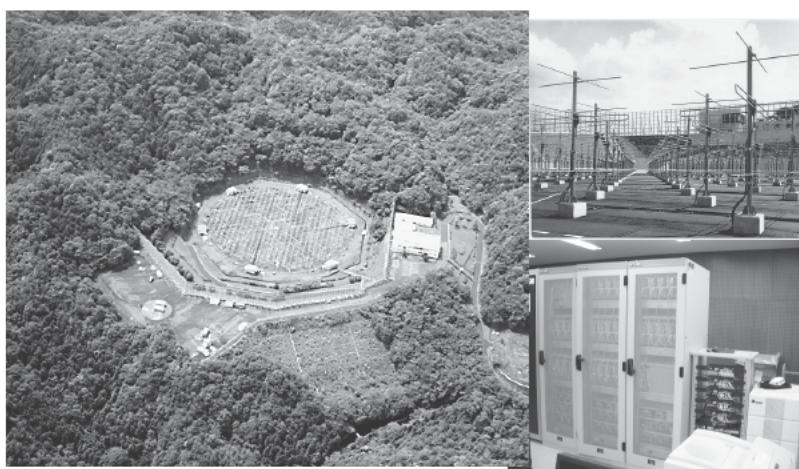


図 1：信楽 MU 観測所全景（左）と MU レーダー アンテナ アレイ（右上）、MU レーダー 観測強化システムで導入された超多チャンネルデジタル受信機（右下）。

信楽 MU 観測所には、アイオノゾンデ、ラジオゾンデ受信機、レイリー・ラマンライダー装置、L 帯境界層レーダー、RASS 用音波発射装置等の機器が設置されている他、地上気象観測装置、高感度自記雨量計による地上の気圧・気温・湿度・風向・風速・降雨量の同時測定が行なわれ共同利用に供されている。アイオノゾンデは地上から送信電波周波数を変化させながら電波を発射し、電離層からの反射波を受信することで電子密度の高度分布を観測する。一方で、ラジオゾンデ観測は、ヘリウムを充填した小型気球に観測装置を取り付けて放球し、高度 30km 付近以下の気圧、気温、湿度、風向、風速分布を測定する。なお、1999 年には「レーダー・ライダー複合計測システム」によりレイリー・ラマンライダーシステムおよび下部熱圈プロファイラレーダー(LTPR)が導入され、中層大気及び下部熱圈の観測体制が強化された。

信楽 MU 観測所は、MU レーダーと協同観測するさまざまな大気観測機器の開発フィールドとしても活用されている。例えば、MU レーダーが観測できない高度 2km 以下の風速を測定するために開発された下部対流圏レーダー(LTR)は、気象庁の全国 31 カ所の現業用ウインドプロファイラとして採用されている。

上記の通り、近年は信楽 MU 観測所に多くの関連観測装置が集積しつつあり、大気観測的一大拠点となりつつある、今後は MU レーダーの新機能や周辺観測装置を一層充実させこれらの共同利用を推進する。

なお信楽 MU 観測所には共同利用者のための研修室、宿泊施設が整っており、インターネット環境やテレビ会議システムも整備されており、利用者からの積極的な測定機器等の持ち込みや、研究会の開催などへの利便性も計られている。

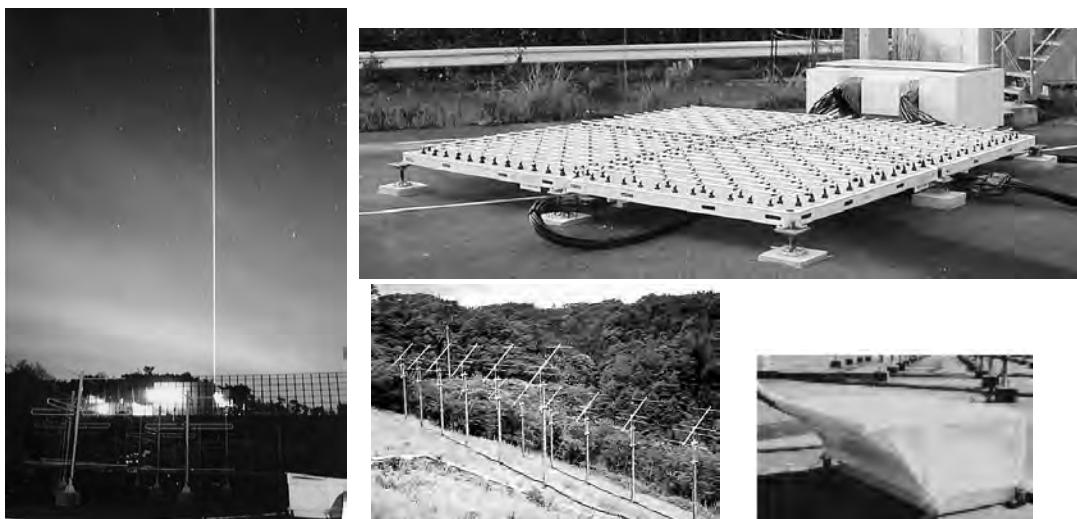


図 2：信楽 MU 観測所に設置されたレイリー・ラマンライダー（左）、下部対流圏レーダー（右上）、下部熱圈プロファイラレーダー(LTPR)(下中)、RASS スピーカー(下右)

2. 共同利用研究の成果

下記に、近年の共同利用研究の成果を2件記述する。また主な修士論文、博士論文のリスト、共同利用研究の成果による学術賞および学術論文誌に発表された論文リストを文末に示す。

1. 「対流圏の3次元超多チャンネルイメージング」

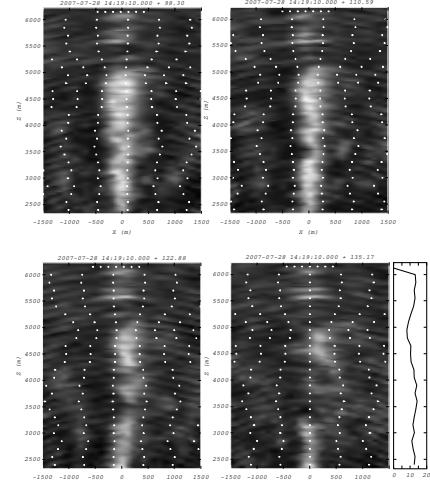
西村耕司（情報・システム研究機構）、佐藤亨（京大院情）、佐藤薰（東大院理）

乱流散乱の微細構造を可視化するため、MU レーダーによる空間・周波数多チャンネル干渉計観測を利用した3次元高分解能イメージング法の開発を行っている。高い空間・時間分解能を実現することで、レーダーの視野を通過する間の散乱構造の変化が観測可能となり、乱流現象の理解が深められることが期待される。

MU レーダーは5周波までの送受信周波数切り替え機能および25群のサブアレイ分割受信機能を有しており、これにより最大125チャンネルの空間・周波数干渉計を構成することができる。基本的には、対象の3次元位置に対応する位相回転を与えて受信信号を加算することにより、3次元空間各点における散乱信号強度の推定像を得ることができる。高分解能な推定像を得るために、注目する空間位置以外からの散乱信号を除去した推定を行う必要があり、最小分散推定(Capon 法など)や雑音部分空間射影を用いる方法(MUSIC 法など)いくつかの選択肢が存在する。ここでは、分布散乱体に対して最も良い特性を示すCapon 法を用いる。

散乱体となる乱流は背景風による移流によりレーダーに対して移動しているが、チャネル間相関行列の積分時間内の移流が一定以上になると正しい像が得られなくなる(Nishimura and Sato, 2008)。そこで強度推定の対象とする空間を仮想的なセルに分割し、各セル毎の可視化処理において、移流によるチャンネル間位相差の時間変化が0となるよう位相補正を行う。この処理では、各セル毎に125次元の一次方程式の解を求めるため、計算量は比較的大きなものとなる。

2007年7月28日の観測で得られたデータに対してイメージング処理を行った結果のXZ(東西-鉛直)断面を図3に示す。送受信ビーム方向は天頂、時間分解能は6秒とした。高度3000から4000m付近で西側より移流してきた構造が、変化しながら視野内を通過していく様子を捉えている。東西背景風はおよそ東向き15m/sである。分解能は対象の構造に依存するため一様でないが、レンジ方向、クロスレンジ方向共に最高で5倍程度になっている。各画像中央部(X=0)で上下に伸びる高輝度のカラムは、主にビームパターンと散乱の非等方性による強調効果によるものである。このようにエコー強度の推定空間分布は、所望の乱流強



度分布にシステムティックなオフセットが重畠したものとなる。特に非等方性による変化はダイナミックであり、時間平均による推定が困難なため除去が容易でない。このため、移流を積極的に利用した乱流強度の推定を試みている。

2. 「成層圏突然昇温時の電離圏観測」

H. Liu・山本衛（生存研）、大塚雄一（名大 STE 研）、川村誠治（NICT）

成層圏突然昇温(SSW)は、冬季の極域で成層圏の気温が急激に数十度も上昇する現象である。最近、SSW が全球の電離圏に大きく影響することが明らかになり、国際的な共同観測が実施されている。MU レーダーでは、2010 年 1 月に SSW イベントが電離圏標準観測中に発生したため、観測時間をやりくりして初めて対応できた。本年度は観測課題を得て準備し、2 月 1 日のイベントを 含む 1 月 29 日～2 月 5 日に観測できた。解析結果が楽しみである

3. 共同利用状況

MU レーダー観測全国国際共同利用の公募は年間 2 回（前期(4~9 月)と後期(10~3 月)）にわけて実施している。応募課題は「MU レーダー全国国際共同利用専門委員会」によって審査され観測スケジュールが決定されている。その運用時間は年間約 3,000 時間以上であるが、申請される観測延べ時間は共同利用観測に供することのできる合計を上回るため「大気圏」および「電離圏」の標準的観測を定期的に設けて、複数の研究課題が同じ標準観測データを共用している。また、観測時間を重点的に割り当てる「キャンペーン観測」も行われている。表 1 に過去 7 年間の採択課題数および共同利用者数の推移を示す。またこれまでの共同利用課題数と観測時間の推移を図 4 に示す。観測データのうち標準観測については観測後直ちに、その他の観測については 1 年を経過したデータを「生存圏データベース共同利用」の一環として共同利用に供している。

表 1: 過去 7 年間の採択課題数、共同利用者数

年度	平成 16 年	平成 17 年	平成 18 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年
採 択 課 題 数 *	48 (0)	48 (2)	54 (6)	49 (2)	59 (8)	54 (10)	51 (5)
共 同 利 用 者 数 **	223	162	102	215	310	261	292 (学内 103 学外 189)

* () 内数字は国際共同利用課題数、 ** 研究代表者および研究協力者の延べ人数

4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成 22 年度）

○委員会開催実績：

第 1 回委員会 2010 年 9 月 3 日 11:30-13:00、第 2 回委員会 2011 年 3 月 7 日 14:00-16:00

○委員会構成：

藤吉康志（北大）、岡野章一（東北大）、高橋正明（東大）、塩川和夫（名大）、山中大

学（海洋研究開発機構）、廣岡俊彦（九大）、中村卓司（国立極地研究所）、村山泰啓（情報通信研究機構）、Robert D. Palmer（オクラホマ大）、A. K. Patra（NARL）、家森俊彦（京大理学）、佐藤亨（京大情報学）、津田敏隆（京大 RISH）、塩谷雅人（京大 RISH）、山本衛（委員長・京大 RISH）、橋口浩之（京大 RISH）、吉村剛（京大 RISH）、高橋けんし（京大 RISH）、山本真之（京大 RISH）、古本淳一（京大 RISH）

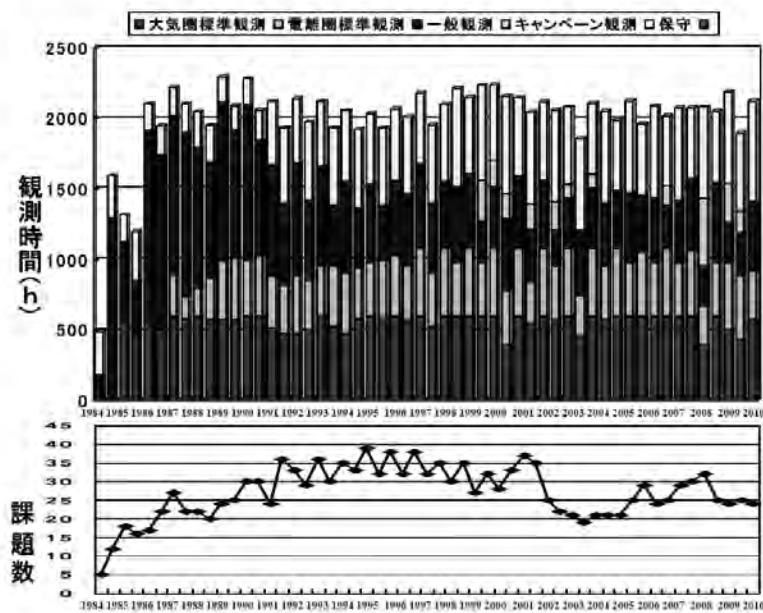


図 6 MU レーダー観測共同利用の観測時間及び課題数の年次推移

修士論文リスト(2004 年以降)

(所外)

- 松村充、「地表-熱圏間の音波共鳴の観測的研究」、京都大学理学研究科修士論文、2009.
- 坂崎貴俊、「WINDAS および MU レーダで明らかになった日本上空の対流圏～下部成層圏の風の日変動」、北海道大学大学院環境科学院修士論文、2010.
- 原田 知幸、「マルチスタティック大気レーダーと適応信号処理による高空間分解能 3 次元風速場推定法」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2008.
- 伊藤毅、「B S 受信レベル変動を用いたK u 帯電波対流圏シンチレーションの変動特性の解析」、大阪電気通信大学大学院工学研究科修士論文、2007.
- 後藤 英公、「赤道大気レーダーのマルチスタティック化による 3 次元風速場推定法の開発」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.
- 小野間史樹、「レーダー・光学同時観測による電離圏 E 領域電子密度不規則構造に関する研究」、名古屋大学大学院工学研究科修士論文、2005.
- 福井 哲央、「MU レーダー観測による晴天自由大気における乱流拡散に関する研究」、京都大学大学院理学研究科修士論文、2004.
- 福尾 慶司、「マルチスタティック大気レーダによる風速推定精度の検討」、京都大学大学

院情報学研究科修士論文、2004.

小竹論季、「GPS 観測網を用いた日中の中規模伝搬性電離圏擾乱の研究」、名古屋大学大学院工学研究科修士論文、2004.

鈴木臣、「A study of gravity waves in the mesopause region using all-sky airglow imagers (全天大気光イメージヤーを用いた中間圏重力波の研究)」、名古屋大学大学院理学研究科修士論文、2004.

柏柳太郎、「擬似雑音系列を用いた風観測用流星レーダに関する研究」、東京都立大学大学院工学研究科修士論文、2004

(所内)

池野伸幸、「可搬型 X 帯及び Ka 帯気象レーダーの開発に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2011.

脇阪洋平、「ソフトウェア無線技術を用いたウインドプロファイラー用ディジタル受信機の開発」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2011.

太田修史、「小型ラマンライダーを用いた地表付近の水蒸気分布のフィールド観測」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2010.

森谷裕介、「大気境界層観測用イメージングウインドプロファイラの開発」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2010.

篠田智仁、「Continuous observation of temperature profile by the 443MHz wind profiling radar with RASS in Okinawa」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2009.

岸豊久、「VHF 帯大気レーダーとライダーによる日抗す院内および周辺の風速観測」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2008.

青木祐一、「統合観測 FERIX-2 による中緯度電離圏 E-F 領域相互作用に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2008.

松ヶ谷篤史、「Frequency domain interferometric imaging to monitor detailed temperature profiles with the MU radar-RASS measurement」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2007.

高井智明、「Characteristics of scattering layers in the troposphere revealed by simultaneous observations with a Raman/Mie lidar and the MU radar」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2007.

前川暁紀、「レーダーと GPS-TEC 観測に基づく中緯度電離圏 E・F 領域の電磁気的相互作用に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.

井村真悟、「Development of a new humidity-retrieval algorithm from turbulence echo power」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.

杉本尚悠、「Development of a water vapor Raman LIDAR for boundary layer observation」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.

福島徹也、「A study on variability of airglow structure with dual-site imaging

observations」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.

博野雅文、「Investigations on the Spatiotemporal Structure of Turbulence Back-scattering in the Troposphere and Lower Stratosphere Based on the MU radar Observations」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.

丸本雅人、「SEEK-2 観測キャンペーにおける中緯度電離圏(E)領域イレギュラリティの空間構造に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.

岩井聰、「An estimation method of humidity profiles using a wind profiler radar with RASS」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.

博士論文リスト(2004年以降)

梅本泰子、”Studies on orographic rainbands based on combined wind profiler-weather radar observations”、京都大学大学院理学研究科博士論文、2007

小竹論季、”Statistical study of global behavior of medium-scale traveling ionospheric disturbances based on GPS observation”、名古屋大学大学院工学研究科博士論文、2007.

鈴木臣、”Study of mesospheric gravity wave dynamics based on airglow imaging observations at middle and low latitudes”、名古屋大学大学院理学研究科博士論文、2007.

植松明久、”An Observational Study of Fog Structure and Dynamics with a Millimeter-Wave Scanning Doppler Radar”、京都大学大学院情報学研究科博士論文、2006.

吉村玲子、”Contribution of gravity waves to ionization layers in the lower E region (Rocket-ground-based observations of the lower thermosphere/ionosphere)”、東京大学大学院理学研究科博士論文、2004.

Gernot Hassenpflug、”Study of Turbulence Structures in the Lower Atmosphere Using Spaced Antenna Techniques With the MU Radar”、京都大学大学院情報学研究科博士論文、2004.

横山竜宏、”A study of midlatitude ionospheric E-region irregularities with rocket/radar experiment and numerical simulation”、京都大学大学院情報学研究科博士論文、2004.

学会賞(2004年以降)

中村卓司、平成22年5月26日 光学・電波協同観測による大気波動の励起・伝播・碎波の研究、地球電磁気・地球惑星圏学会、田中館賞、2010.

深尾昌一郎、「大気レーダーの開発と活用による気象学・気象技術の発展への貢献」、日本気象学会藤原賞、2009.

橋口浩之、「下部対流圏レーダーの開発とその大気観測研究への応用」、日本気象学会堀内

賞、2008.

山本 衛、中緯度電離圏イレギュラリティの構造と発生機構に関する研究、地球電磁気・
地球惑星圏学会、田中館賞、2007.

主な学術論文

特に被引用回数の多い論文 10 件を示す（回数を[括弧内]に表示）。末尾に「*」を付した 3 件は、第三者が研究成果を 2 次的に利用（引用）した論文で、キーワードに「MU radar」を含んでおり、学会への MU レーダーの浸透の深さを示す例となっている。

- Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, et al., The MU radar with an active phased-array system,
1. Antenna and power-amplifiers, *Radio Sci.*, **20** (6), 1155–1168, 1985. [被引用
回数：179]
- Tsuda T., M. Nishida, C. Rocken, et al., A global morphology of gravity wave activity
in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET), *J. Geophys.
Res.*, **105** (D6), 7257–7273, 2000. [164]
- Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, et al., The MU radar with an active phased-array
system .2. In-house equipment, *Radio Sci.*, **20** (6), 1169–1176, 1985. [144]
- Alexander, M. J., Interpretations of observed climatological patterns in
stratospheric gravity wave variance, *J. Geophys. Res.*, **103** (D8), 8627–8640, 1998
[132] *
- Yamamoto, M., S. Fukao, R. F. Woodman, et al., Midlatitude E-region field-aligned
irregularities observed with the MU radar, *J. Geophys. Res.*, **96** (A9), 15943–15949,
1991. [124]
- Mathews, J. D., Sporadic E: current views and recent progress, *J. Atmos. Solar-Terr.
Phys.*, **60** (4), 413–435, 1998. [118] *
- Woodman, R. F., M. Yamamoto, S. Fukao, Gravity-wave modulation of gradient drift
instabilities in the midlatitude Sporadic-E irregularities, *Geophys. Res. Lett.*,
18 (7), 1197–1200, 1991. [112]
- Oullivan, D., T. J. Dunkerton, Generation of inertia-gravity waves in a simulated
life-cycle of baroclinic instability, *J. Atmos. Sci.*, **52** (21), 3695–3716, 1995.
[105] *
- Fukao, S., M. D. Yamanaka, N. A0, et al., Seasonal variability of vertical eddy
diffusivity in the middle atmosphere. 1. 3-year observations by the Middle and
Upper-atmosphere radar, *J. Geophys. Res.*, **99** (D9), 18973–18987, 1994. [103]
- Fukao, S., M. C. Kelley, T. Shirakawa, et al., Turbulent upwelling of the midlatitude
ionosphere. 1. Observational results by the MU radar, *J. Geophys. Res.*, **96** (A3),
3725–3746, 1991. [102]

電波科学計算機実験装置（KDK）全国国際共同利用専門委員会

1. 計算機実験装置概要

電波科学計算実験装置（KDK）は宇宙プラズマ、超高層・中層大気中の波動現象および宇宙電磁環境などの計算機実験による研究を推進させるために導入された専用計算機システムである。電波科学計算実験装置は京都大学学術情報メディアセンターに設置されており、富士通製 SPARC ENTERPRISE M9000 の 2.5 ノード（1 ノードあたり 128 コア、1TB 共有メモリ）および 190TB 程度の補助記憶装置を使用している。また外部には 190TB の容量を持つ RAID 型補助記憶装置を具備している。

柔軟な計算機システム運用によって、大規模計算を長時間実行する環境を提供し、宇宙圏を中心とした生存圏科学において、従来の小規模な計算機実験では知り得なかつた新しい知見を得ることに貢献している。

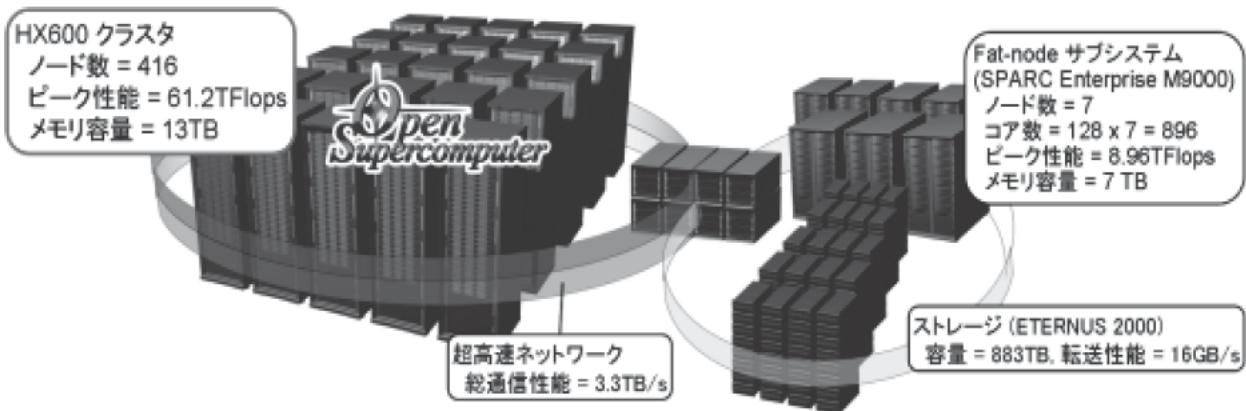


図 1： 計算実験装置（京都大学学術情報メディアセンターに設置）

2. 共同利用研究の成果

2-1 研究課題

電波科学計算実験装置 全国共同利用では以下の課題を募集しており、今年度の利用代表者数は 23 名である。

- ・宇宙プラズマ電磁環境解析（波動粒子相互作用、プラズマ波動解析等）
- ・宇宙機-プラズマ相互作用解析（衛星帶電、非化学推進等）
- ・中性大気波動力学解析
- ・電波応用、電波科学一般
- ・その他の生存圏（森林圏、人間生活圏など）関連の計算機実験
- ・大規模計算機実験に有効な数値解析手法開発

2-2 公表論文

1. 芦田康将, 船木一幸, 山川宏, 梶村好宏, 小嶋浩嗣, “磁気セイル推力解析のための簡易モデルの検討”, 日本航空宇宙学会論文集, submitted.
2. T. Fujino, T. Yoshino, and M. Ishikawa: Aerodynamic Heating of Reentry Body Equipped with Onboard-Surface Hall Magnetohydrodynamic Generator,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 26, No. 4, pp. 638–648, 2010.
3. Hamada, A., and N. Nishi, 2010: Cloud-Top Height Estimation Table by Geostationary Satellite Split-Window Measurements using CloudSat Data. *J. Appl. Meteor. Climatol.* **49**, 2035–2049.
4. Hikishima, M., Y. Omura, D. Summers, Microburst precipitation of energetic electrons associated with chorus wave generation, *Geophysical Research Letter*, **37**, L07103, doi:10.1029/2010GL042678, 2010.
5. Hikishima, M., Y. Omura, and D. Summers, Self-consistent particle simulation of whistler mode triggered emissions, *Journal of Geophysical Research*, **115**, A12246, doi:10.1029/2010JA015860, 2010.
6. Kalaee, M. J., Y. Katoh, A. Kumamoto, T. Ono, and Y. Nishimura, Simulation of mode conversion process from upper-hybrid waves to L0-mode waves in the vicinity of the plasmapause, *Ann. Geophys.*, **28**, 1289–1297, 2010.
7. Katoh, Y. and Y. Omura, Amplitude dependence of frequency sweep rates of whistler-mode chorus emissions, *J. Geophys. Res.*, in press.
8. Yoshihiro KAJIMURA, Kazuma UENO, Ikkoh FUNAKI, Hideyuki USUI, Masanori NUNAMI, Iku SHINOHARA, Masao NAKAMURA and Hiroshi YAMAKAWA, ” 3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail Including Ion-Neutral Collision Effect in Laboratory”, Transaction of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences Aerospace Technology Japan, Vol. 8, No. ists27, pp. Pb_19–Pb_25, 2010.
9. Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Hiroyuki Nishida, Hideyuki Usui, Iku Shinohara, Hiroshi Yamakawa, Hideki Nakashima, “Quantitative Evaluation of Ion Kinetic Effect in Magnetic Field Inflation by Injection of Plasma Jet”, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Accepted.
10. Mastuda, K., H. Misawa, N. Terada, and Y. Katoh, Asymmetrical features of frequency and intensity in the Io-related Jovian decametric radio sources: Modeling of the Io-Jupiter system, *J. Geophys. Res.*, **115**, A12222, doi:10.1029/2010JA015844, 2010.
11. Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, Heating and acceleration of ions in non-resonant Alfvénic turbulence, *Phys. Plasmas*, **17**, 072301, 2010.
12. Shoji, M., and Y. Omura, Simulation of the Electromagnetic Ion Cyclotron Triggered Emissions in the Earth’s Inner Magnetosphere, *submitted to J. Geophys. Res.*

13. Shoji, M., Y. Omura, and L. C. Lee, Three-dimensional Nonlinear Mirror-mode Structures in the Earth's Magnetosheath, *to be submitted to J. Geophys. Res.*
14. Umeda, T., Electromagnetic plasma emission during beam-plasma interaction: Parametric decay versus induced scattering, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, No. A1, A01204, doi:10.1029/2009JA014643, 2010.
15. 吉野智之、藤野貴康、石川本雄、「輻射加熱を考慮した MHD Heat Shield の数値シミュレーション」日本航空宇宙学会論文集、第 58 卷、第 683 号、19-26 頁、2010 年 12 月。

2-3 学会賞

1. 芦田康将, “磁気セイル推力推定のための解析モデルに関する研究”, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 平成 22 年 11 月 17 日~19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」. (本ポスター発表において、学生優秀賞(銀賞)を受賞)
2. M. Hikishima, Young Scientist Award of 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama, Japan, September, 2010.

3. 共同利用状況

平成 22 年度（2010 年 4 月～2011 年 1 月）の月別システム利用状況。

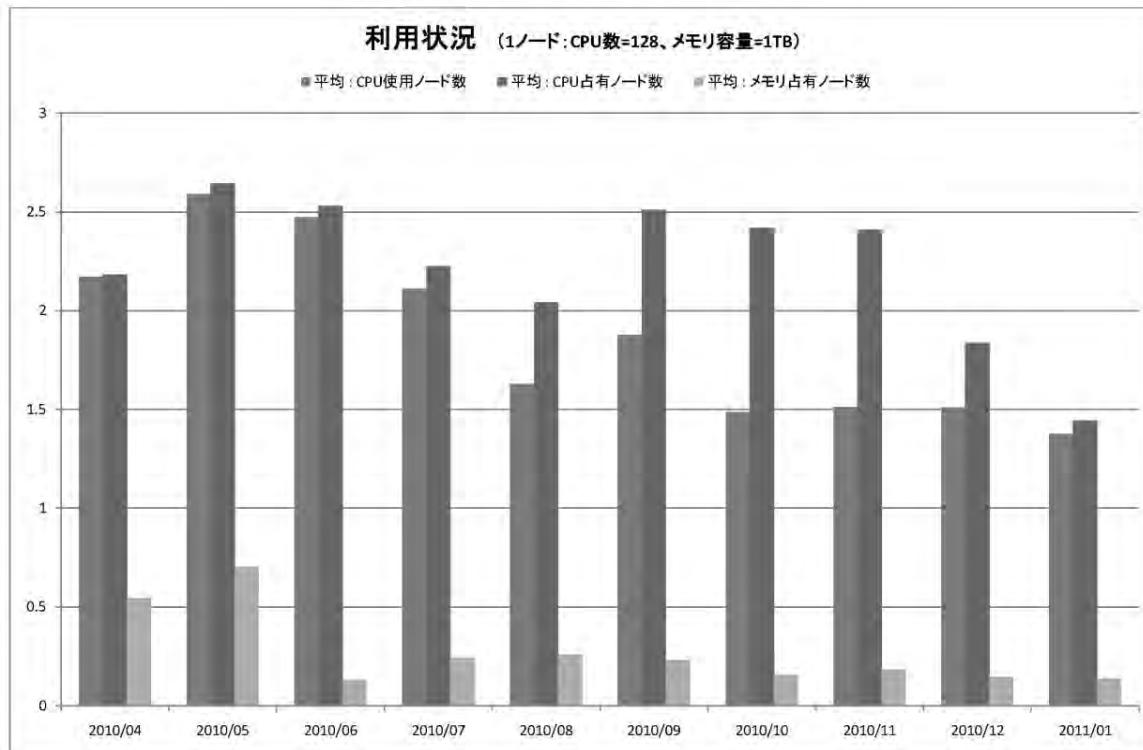


図 2 : 利用状況

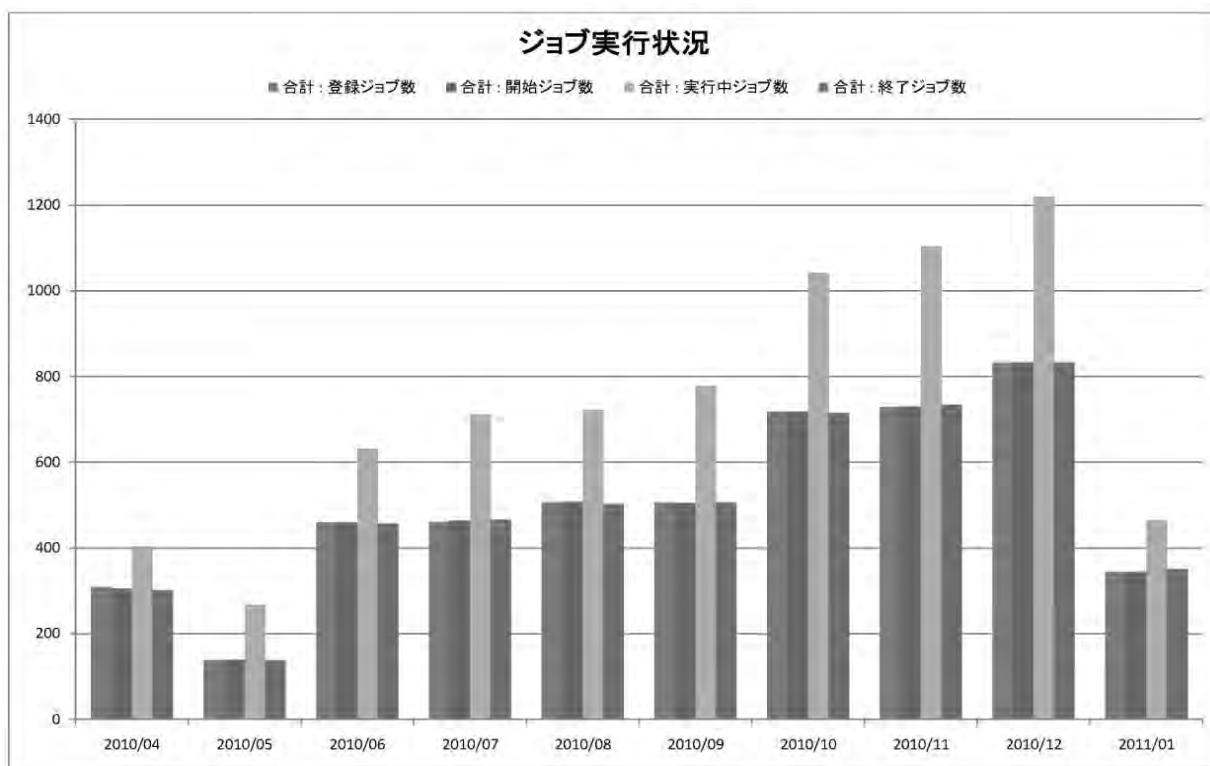


図 3 : ジョブ数

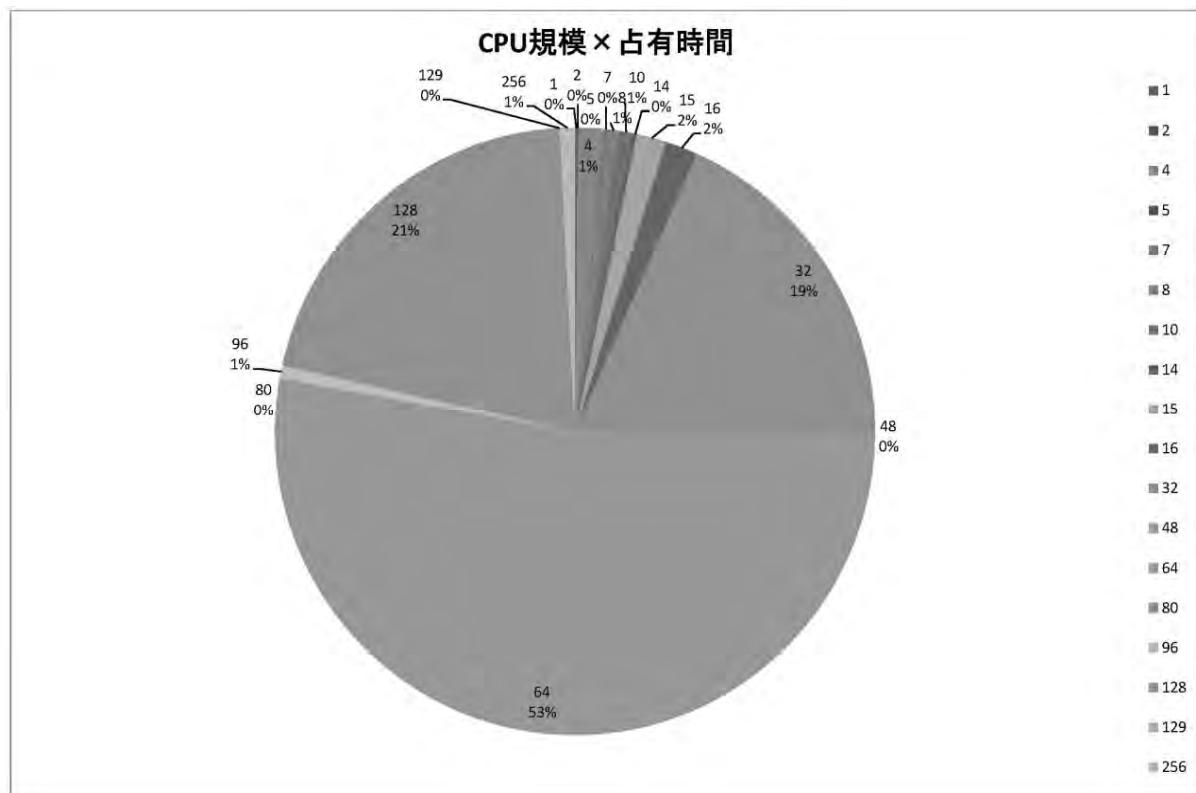


図 4 : CPU 占有状況

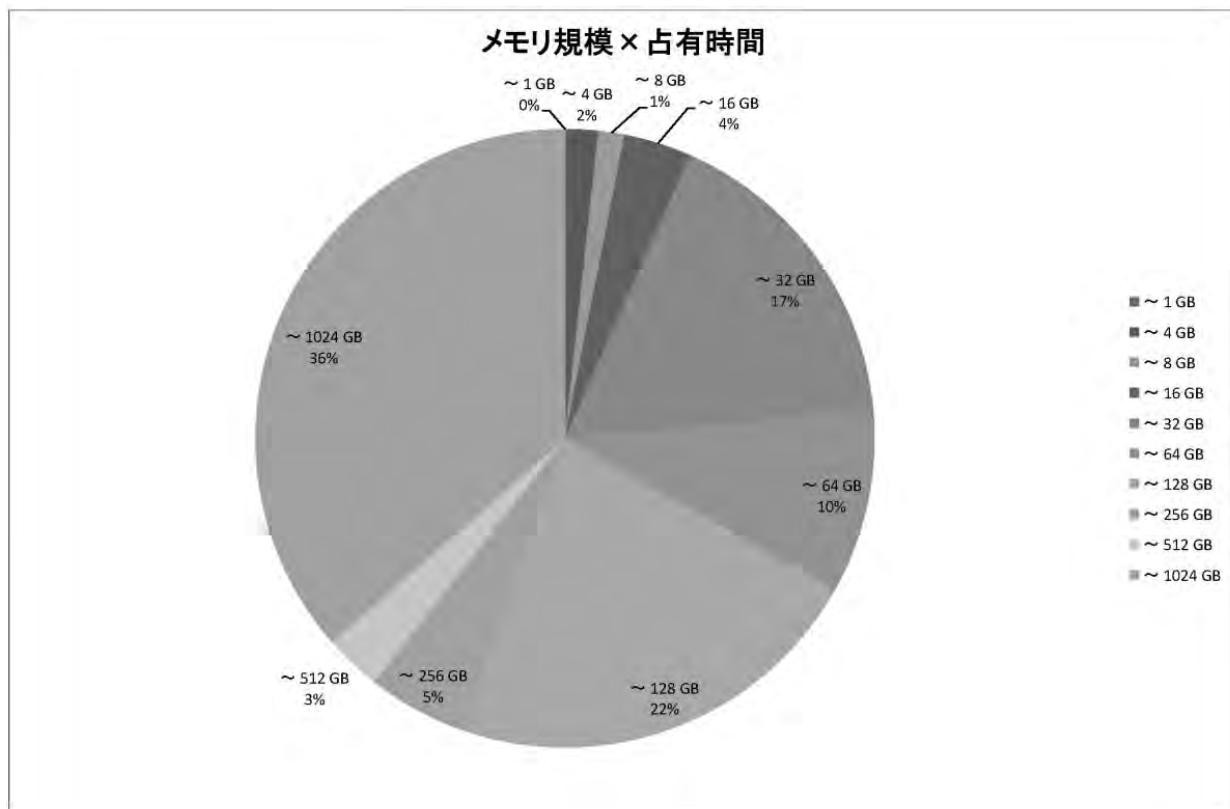


図 5：メモリ占有状況

4. 専門委員会の構成および開催状況

小野高幸(東北大)、三浦彰(東大)、荻野瀧樹(名大 STE 研)、鵜飼正行(愛媛大)、松清秀一(九州大)、篠原育(JAXA)、臼井英之(神戸大)、八木谷聰(金沢大)、町田忍(京大 理学研究科)、佐藤亨(京大 情報学研究科)、石岡圭一(京大 理学研究科)、大村善治(委員長、京大生存研)、山本衛(京大生存研)、小嶋浩嗣(京大生存研)、橋口浩之(京大生存研)、田中文男(京大生存研)

専門委員会開催日：平成 23 年 3 月 8 日（火）

主な議題： 平成 23 年度電波科学計算機実験装置利用申請課題の審査

内規改定の審議等

5. 特記事項

- 電波科学計算機実験装置のホームページ

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/kdk/index.html>

- KDK シンポジウム開催（第 168 回生存圏シンポジウム）

日時：平成 23 年 3 月 7, 8 日

場所：京都大学生存圏研究所

METLAB 全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

生存圏研究所ではこれまで宇宙太陽発電所 SPS(Space Solar Power Satellite/Station)とマイクロ波エネルギー伝送の研究を長年行ってきた。SPS は太陽電池を地球の影に入らない静止衛星軌道(36,000km 上空)に配置し、雨でもほとんど吸収されないマイクロ波を用いて無線で地上に電力を伝送しようという発電所構想である。マイクロ波による無線エネルギー伝送は、SPS だけでなく、携帯電話の無線充電や電気自動車の無線充電にも応用可能で、近年急速に産業化が進んでいる技術である。生存圏研究所ではマイクロ波エネルギー伝送技術を中心として研究を進め、世界の SPS とマイクロ波エネルギー伝送研究の中心となっている。

本共同利用設備は平成 7 年度にセンター・オブ・エクセレンス (COE) による先導的研究設備経費として導入されたマイクロ波無線電力伝送実験用及び生存圏電波応用実験用電波暗室及び測定機器で構成される「マイクロ波エネルギー伝送実験装置 METLAB (Microwave Energy Transmission LABoratory)」(図 1(a))と、平成 13 年度に導入された宇宙太陽発電所研究棟(略称 SPSLAB)(図 1(b))が中心となる。

METLAB は高耐電力電波吸収体(1 W/cm^2 以上)を配した $7\text{m} \times 7\text{m} \times 16\text{m}$ の電波暗室で、ターンテーブルと X-Y ポジショナを設置してある。その横の計測室にはスペクトラムアナライザやネットワークアナライザ、パワーメータ等の各種マイクロ波測定器を備える。暗室には、 2.45GHz 、 5kW のマイクロ波電力をマグнетロンで発生させ、直径 2.4m のパラボラアンテナから電波暗室内部に放射することが出来る設備も備えている。

SPSLAB は、平成 12 年度に導入された研究設備「宇宙太陽発電所マイクロ波発送受電システム」SPORTS2.45(Space PPower Radio Transmission System for 2.45GHz)の一部として導入された近傍界測定サブシステムが設置されている 100dB シールドルームをはじめ、 30dB シールド実験室や実験準備室等を備え、マイクロ波エネルギー伝送及び宇宙太陽発電所の研究を発展させることができる。

(a)



(b)



図 1 (a) METLAB 内部 (b) SPSLAB 概観

平成 16 年度の共同利用開始から、METLAB と SPSLAB を中心に全国共同利用を行ってきたが、平成 22 年度には高度マイクロ波エネルギー伝送実験装置 A-METLAB(Advanced Microwave Energy Transmission LABoratory)(図 2(a)(b))と、実験用の「高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレー・受電レクテナシステム」(図 2(c))が導入され、平成 23 年度から共同利用に供する予定である。

A-METLAB は 34.0m(L) x 21.0m(W) x 9.97m(H)の建物(建築面積 714.00 m²、述べ床面積 824.72 m²)の内部に設置された 18m(L) x 17m(W) x 7.3m(H)の電波暗室と、10mΦ, 10t, 10kW のフェーズドアレーを測定可能な plane-polar 型の近傍界測定装置で構成される。暗室には 1W/cm² に耐える電波吸収体を備え、class 100,000 のクリーブースとしても利用できるようになっているため、将来のマイクロ波エネルギー伝送を行うための人工衛星(最大 10mΦ, 10t, 10kW のフェーズドアレー衛星を想定)を測定することが出来る世界唯一の実験設備である。

高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレー・受電レクテナシステムは世界最高性能を持つマイクロ波エネルギー伝送用フェーズドアレーとレクテナアレーである。フェーズドアレーは 256 素子の GaN FET を用いた F 級増幅器(7W, >70% (最終段))と同数の MMIC 5bit 移相器で構成され、5.8GHz、1.5kW のマイクロ波を放射・制御可能である。レトロディレクティブ、REV 法、PAC 法、並列化法他の目標推定手法とビームフォーミング手法を備えている。レクテナアレーは 1mW 入力時に 50% 以上の変換効率を持つレクテナ 256 素子で構成され、再放射抑制用 FSS(Frequency Selective Surface)や負荷制御装置を備えた実験設備である。本設備は、様々なビームフォーミング実験、目標追尾アルゴリズム実験、制御系を利用したアンテナ開発研究、アンテナを利用した回路開発研究、レクテナ実験、無線電力伝送実験等が可能な実験設備である。

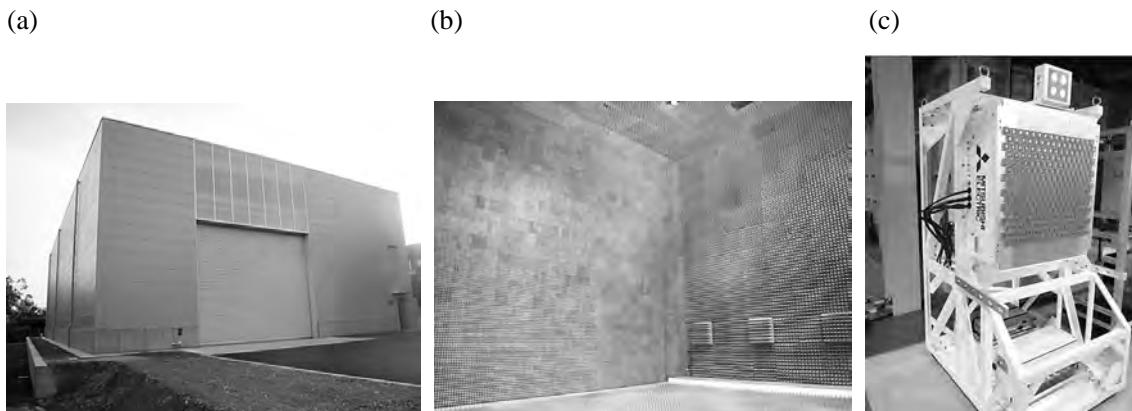


図 2 (a) A-METLAB 概観 (b) A-METLAB 暗室 (c) 高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステム

2. 共同利用研究の成果

毎年年度末には共同利用の成果を元にシンポジウムを実施しており、毎年電子情報通信学会通信ソサイエティ宇宙太陽発電研究会との共催で実施されている。これまでの採択課題から研究課題を大まかに分けて示すと、次のように多彩な方面で利用されている。「無線送電関係」：SPS用排熱機能付アンテナの熱特性評価、マイクロ波エネルギー伝送駆動による火星飛行探査機の研究、マイクロ波送電電気駆動車両の開発、マイクロ波電力伝送用レクテナ設計と性能評価試験、レクテナ再放射特性試験、マイクロ波送電用レトロディレクティブシステムの開発及び屋外実験、他。「アンテナ関係」：全方向性UHF帯アンテナ、電波天文用多モードホーンの開発、3素子エスパアンテナの水平面内指向性の測定、超小型衛星用ヘリカルアンテナのアンテナパターン試験、他。「リモートセンシング他」：多偏波SARを用いた都市モデルの構築、マイクロ波を利用したRC構造物中の鉄筋および欠陥探査方法に関する研究、自己組織化アルゴリズムによる宇宙圏電磁環境モニターセンサーノードの位置捕捉手法、他。「加熱関係」：木質バイオマスからのバイオエタノール生産を目指したマイクロ波照射前処理用装置の研究開発、空間伝送マイクロ波エネルギーによる物質の加熱実験、長波長マイクロ波を用いた低侵襲ハイパーサーミアの基礎研究、他。

その一例として SPS 用排熱機能付アンテナの熱特性評価に関し報告する。マイクロ波を用いた宇宙太陽発電システム（SPS）では、送電器の電力増幅器において発熱を伴うため、その熱の適切な処理が必要である。そこで、発熱体である電力増幅器からアンテナに熱伝導させ、アンテナ面から輻射によって排熱させる構造の検討が IHI エアロスペースと京都大学のグループにより今期行われた。アンテナ構造は、背面とアンテナ面をビア接続して電力増幅器から効率よく伝熱させる構造とし、アンテナ面から効率よく輻射させるために、広い金属面を有するクロススロットアンテナとした。さらにアンテナ面に波長選択体を装着することで、太陽光などの外部からの入熱を遮断するとともに内部からの熱を赤外線で効率よく排熱できる構造とした。今年度は、検討したアンテナの熱特性試験を行い、取得した特性を用いた軌道上の熱シミュレーションを行った。

また、マイクロ波エネルギー伝送駆動による火星飛行探査機の研究も継続して行われている。本研究は九州工業大学と京都大学との共同研究・利用により行われている。本研究ではマイクロ波電力伝送を利用した火星飛行探査機の成立性の検証と飛行探査システムの構築を目的として、電波暗室における飛行実験を進めている。小型飛行体に搭載する高効率軽量(1g/個)レクテナを開発し、小型飛行実験機に搭載して飛行実験に成功している。実験では最も受電能力が小さい覆域でも飛行可能な 1.06W を得られた。さらに位相制御マグネットロンを利用した新しいマイクロ波送電器も開発し、画像認識トラッキング方式で目標を追尾しつつマイクロ波ビーム方向も制御するシステムを開発中である。

3. 共同利用状況

表 1 METLAB 共同利用状況

年度	平成 16 年	平成 17 年	平成 18 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年
採択 課題数	8	12	10	16	14	9	9
共同利用 者数 **	45	52	69	112	69	54	49

** 研究代表者および研究協力者の延べ人数

4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成 22 年度）

- ・佐々木 進 (JAXA/ISAS, 教授)
- ・高野 忠 (日本大学理工学部電子情報工学科, 教授)
- ・藤野 義之 (ICT新世代ワイヤレス研究センター 宇宙通信ネットワークグループ, 主任研究員)
- ・野木 茂次 (岡山大学大学院 自然科学研究科, 教授)
- ・多氣 昌生 (首都大学東京大学院理工学研究科 電気電子工学専攻, 教授)
- ・大平 孝 (豊橋技術科学大学 情報工学系, 教授)
- ・臼井 英之 (神戸大学大学院 システム情報学研究科, 教授)
- ・川崎 繁男 (JAXA/ISAS, 教授)
- ・北野 正雄 (京都大学大学院工学研究科電子工学専攻, 教授)
- ・佐藤 亨 (京都大学大学院 情報学研究科通信情報システム専攻, 教授)
- ・宮坂 寿郎 (京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻, 助教)
- ・渡邊 隆司 (生存圏研究所 バイオマス変換分野, 教授)
- ・山本 衛 (生存圏研究所 レーダー大気圏科学分野, 教授)
- ・篠原 真毅 (委員長)(生存圏研究所 生存圏電波応用分野, 教授)
- ・小嶋 浩嗣 (生存圏研究所 宇宙圏電波科学分野, 准教授)
- ・橋口 浩之 (生存圏研究所 レーダー大気圏科学分野, 准教授)
- ・三谷 友彦 (生存圏研究所 生存圏電波応用分野, 助教)
- ・Tatsuo Itoh (国際委員(アドバイザー))(TRW Endowed Dept. of Electrical Engineering, UCLA, Chair)

平成 22 年度は平成 23 年 3 月 7 日に専門委員会を開催。あわせて第 10 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会を実施し、共同利用成果の発表を行う予定である。

5. 特記事項

本共同利用設備は特に開発結果を測定に来る利用方法であるために、隨時申請を受け付け、審査を行っている。また後期に利用が集中する傾向にある。また、実験型の運用であるため、実験補助員は必須であるが、現状では研究所スタッフがこれを勤めており、今後は実験補助員の充当が必要である。

平成 22 年度共同利用研究活動の中で作成された修士論文、博士論文
共同利用研究の成果による学術賞および学術論文誌に発表された論文

1) 著書

- M. Matsunaga and T. Matsunaga, "Electromagnetic Waves Propagating around Buildings," INTECH, ISBN 978-953-307-275-3, 出版決定 2011 年 2 月
- 篠原 真毅, “マイクロ波で宇宙から電力伝送 電気自動車や携帯機器も, ワイヤレス給電 2010 第 3 章技術動向”, NE Books, 日経 BP 社, 2010, pp.104-117
- 篠原 真毅, “11.5.3 マイクロ波無線電力伝送”, パワーエレクトロニクスハンドブック 第 11 章エネルギーの伝送と貯蔵, オーム社, 2010, pp.198-200
- 篠原 真毅, “エネルギー・ハーベスティングの最新動向 (監修: 桑原博喜), 3 編 エネルギー ハーベスティング技術 1 章 電磁エネルギー利用 5 電波エネルギー・ハーベスティング”, シーエムシー出版, 2010, pp.62-72
- 篠原 真毅, “エネルギー・ハーベスティングの最新動向 (監修: 桑原博喜), 3 編 エネルギー ハーベスティング技術 5 章 エネルギー伝送 1 マイクロ波エネルギー伝送”, シーエム シー出版, 2010, pp.222-230
- 篠原 真毅, “ワイヤレス・エネルギー伝送技術の最前線, 第 1 編 ワイヤレス・エネルギー伝送技術開発の最前線 第 1 章 エネルギー伝送方式の基礎原理と課題 第 1 節 マイクロ波 方式による伝送技術”, ニッケイ印刷, 2011, pp.40-50
- 篠原 真毅, “電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ整備 (監修: 堀洋一, 横井行雄) 第 I 編 7 章 マイクロ波ワイヤレス給電 (電気自動車) ”, シーエムシー出版, 2011

2) 学術論文誌

- Naoki Shinohara, "Beam Efficiency of Wireless Power Transmission via Radio Waves from Short Range to Long Range", Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.10, No.4, 2011, pp.224-230

3) 修士論文

- 鈴木望, “ZigBee 端末のためのマイクロ波無線電力供給システムの研究開発”, 京都大学大 学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 2011
- 辻直樹, ”マイクロ波電力伝送用レクテナ群の最適配置と飛行実験”, 平成 22 年度九州工業 大学院修士論文, 2011
- 渡邊宏弥, "固体天体地下浅部探査を目指した地中レーダーの検討,"東京大学大学院理学系 研究科地球惑星科学専攻修士論文, 2011
- 飯田崇一朗, “Fe, Fe₂O₃, Fe₃O₄ 成形体のマイクロ波場での加熱特性及び Fe-Fe₃O₄ 複合化 に伴う Fe の加熱特性向上メカニズムの解明”, 広島大学大学院工学研究科修士論文, 2011

横田真吾, “起伏のある地形における地下構築物内の電波伝搬に関する研究”, 福岡工業大学
大学院工学研究科情報通信工学専攻修士論文, 2011

4) 卒業論文

長濱章仁, “火星飛行探査機へのマイクロ波無線電力供給用送電システムの研究”, 京都大学
工学部電気電子工学科学士論文, 2011

橋爪 康佑, “損失のあるディジタル移相器を用いたフェーズドアレイアンテナにおけるエッ
ジテーパリングと不等素子間隔の効果”, 京都大学工学部電気電子工学科学士論文, 2011

佐藤伸宙, “鉄・酸化鉄圧粉体のマイクロ波場における加熱特性”, 広島大学工学部学士論文,
2011

5) 学会発表

T. Mitani, S. Tanaka and Y. Ebihara, "A Study on a Phased Array Antenna including Imbalanced
Loss of Digital Phase Shifters for Microwave Power Transmission", 2010 Asia-Pacific Radio
Science Conference (AP-RASC '10), CBH-4, Toyama, 2010.9.22-26

Nozomu Suzuki, Tomohiko Mitani, and Naoki Shinohara, "Study and Development of a Microwave
Power Receiving System for ZigBee Device", 2010 Asia-Pacific Microwave Conference
(APMC), Yokohama, 2010.12.8-10, CD-ROM WE1C-02.pdf

渡邊宏弥, 宮本英昭, 西堀俊幸, 春山純一, 真鍋武嗣, "固体天体用地中レーダー(GPR)シ
ステムの検討と開発," 第 43 回月・惑星シンポジウム, 相模原, 2010.8.4-6

渡邊宏弥, 春山純一, 西堀俊幸, 真鍋武嗣, 宮本英昭, "固体天体用地中レーダー(GPR)シス
テムの開発, 2010 年日本惑星科学会秋季講演会, P024, 名古屋, 2010.10.6-8

鈴木望, 篠原真毅, 三谷友彦, "ZigBee 端末用マイクロ波受電システムの研究開発", 電子情
報通信学会第 3 回無線電力伝送研究会, 2010.10.15, 信学技報 WPT2010-12 (2010-10)
pp.27-31

小澤雄一郎, 藤原栄一郎, 藤原暉雄, "マイクロ波無線送受電システム 受電部開発計画", 第
13回SPSシンポジウム, pp.71-74, 東京, 2010.10.29

三谷 友彦, 田中 俊二, 蟹原 義雄, "ディジタル移相器損失を考慮したフェーズドアレーアン
テナにおける無線電力伝送の最大化", 第 13 回 SPS シンポジウム, pp.75-78, 東京,
2010.10.29

飯田崇一朗、西野信博、竹内貴季、佐藤元泰、樋村京一郎、田中基彦、Ignatenko Maxim, “円
筒状マグネタイトを使ったマイクロ波加熱 効果”, 第二十七回プラズマ核融合学会,
2010

田中 俊二, 三谷 友彦, 蟹原 義雄, “宇宙太陽光発電の送電アレイアンテナ位相最適化によ
る無線伝送電力最大化”, 第 53 回自動制御連合講演会, pp. 1093-1098, 高知, 2010.11.4-6
小澤雄一郎, 藤原栄一郎, 藤原暉雄, “受電部技術実証モデルの検討”, 第54回宇宙科学技術連

合講演会, CD-ROM 1S14.pdf, 静岡, 2010.11.17

北野遼, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, "月・小惑星探査用地中レーダのアンテナに関する基礎検討,"
平成 22 年電気関係学会関西連合大会, 3A303-7, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス,
2010.11.13-14

西堀俊幸, 宮本英昭, 渡邊宏弥, 春山純一, 北野遼, 真鍋武嗣, "月火星の溶岩チューブの
レーダによる探査," 月と火星の縦孔・溶岩チューブ探査研究会, 相模原, 2010.12.2-3

宮本英昭, 西堀俊幸, 真鍋武嗣, 渡邊宏弥, 平田直之, 北野遼, 春山純一, "小惑星の内部
構造とレーダー探査," 第 2 回はやぶさ 2 から考えるサイエンス研究会, 東京, 2011.1.13
鈴木望, 篠原真毅, 三谷友彦, "ZigBee センサー ネットワークに対するマイクロ波無線電力
供給システムの研究開発 II", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第 10
回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7

小澤雄一郎, 平野敬寛, 藤原栄一郎, 藤原暉雄, 飯田光人, 篠原真毅, 三谷友彦, "排熱機能付
アンテナの熱特性評価", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第 10 回宇
宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7

中川真也, 宮坂寿郎, 大土井克明, "マイクロ波送電技術を応用した農業機械の電動化", 電
子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第 10 回宇宙太陽発電と無線電力伝送
に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7

氏原秀樹、川口則幸、武士俣健、本間希樹、木村公洋、松本浩平、小川英夫、上妻昇志、
中西裕之、中川亜紀治、大田泉、三谷友彦, "電波天文用広帯域フィードシステムの基礎
開発", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第 10 回宇宙太陽発電と無線
電力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7

北野遼, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, 渡邊宏弥, 宮本英昭, 春山純一, "固体惑星内部探査レーダ用
Vivaldi アンテナの基礎検討と試作性能評価", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時
限研究会, 第 10 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパ
ス, 2011.3.7

松永真由美, 掛水健司, Massimo Candotti, 松永利明, "多偏波・周波数共用全方向性アンテ
ナ", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第 10 回宇宙太陽発電と無線電
力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7

佐藤元泰, 横村京一郎, 福島潤, 高山定次, "マイクロ波照射下における物質電子の応答に關
する測定の試み", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第 10 回宇宙太陽
発電と無線電力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7

田中俊二, 三谷友彦, 蛭原義雄, "ディジタル移相器損失を考慮した宇宙太陽発電所送電シ
ステムの高効率化", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第 10 回宇宙太
陽発電と無線電力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7

辻直樹, 福田敬大, 可成理高, 長濱章仁, 三谷友彦, 米本浩一, "マイクロ波電力伝送レク
テナ群の最適配置と飛行実験", 電子情報通信学会 第 5 回無線電力伝送時限研究会, 第

10回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会, 京都大学宇治キャンパス, 2011.3.7
辻直樹, 福田敬大, 可成理高, 長濱章仁, 三谷友彦, 米本浩一, ”マイクロ波電力伝送レク
テナ群の最適配置と飛行実験”, 日本機械学会 九州支部第 64 期総会・講演会, 九州大
学伊都キャンパス, 2011.3.17

赤道大気レーダー全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

1. 1. 概要

赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; 以下では EAR と表記) は平成 12 年度末に完成した大型大気観測用レーダーであり、インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に位置している。同種の MU レーダーと比べても最大送信出力が 1/10 である以外はほぼ同等の性能を持っている。運営はインドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との協力関係のもとに進められている。平成 13~18 年度には、EAR を中心として赤道大気の地表面から宇宙空間に接する領域までの解明を目指した科研費・特定領域研究「赤道大気上下結合」を実施し、事後評価において最高位の評価結果 : A+ (期待以上の研究の進展があった) を得た。現在では図 1 のように観測装置が充実した総合的な観測所に成長している。平成 17 年度から全国国際共同利用を開始し活発に実施中である。

1. 2. 共同利用に供する設備

赤道大気レーダー 地上気象観測器（気圧・気温・湿度・風速・降雨）

シーロメータ 流星レーダー 境界層レーダー

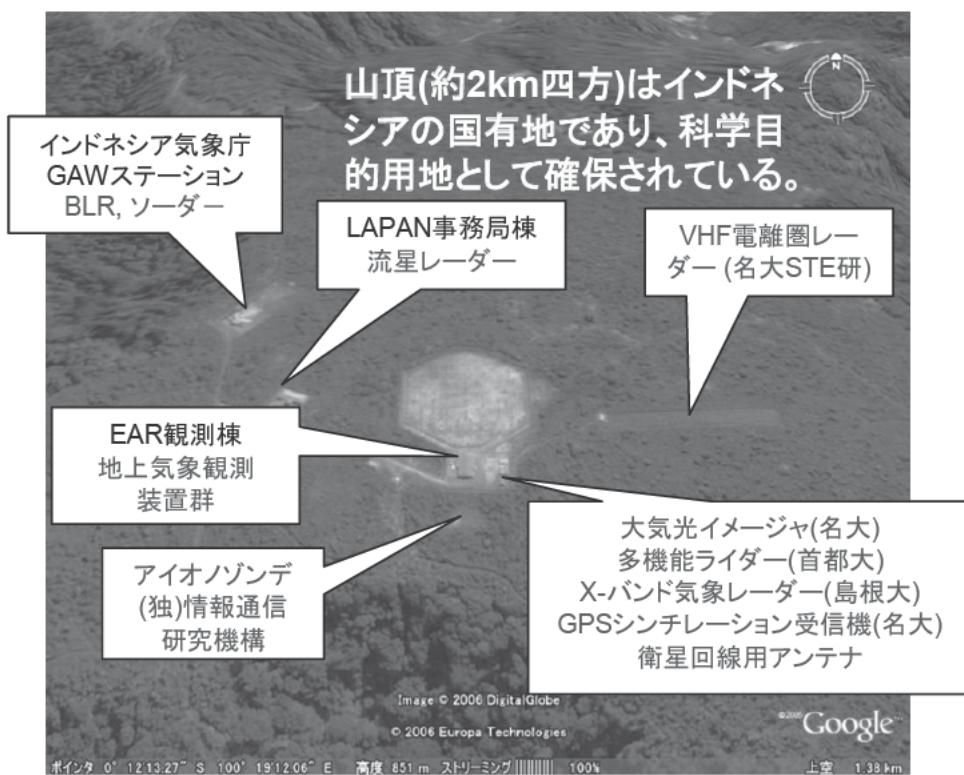


図 1 赤道大気レーダー (中央) を含む観測所全景と観測装置群

1. 3. 共同利用の公募

- 共同利用の公募は年1回とする。専門委員によって審査を行ない、EAR運営状況について議論を行ない、観測時間の割当て等を行なう。
- 国際的な共同研究プログラムからの観測依頼など、緊急を要する場合は専門委員長が採否を決定する。必要に応じて電子メールベースで委員に回議する。
- 赤道大気レーダーのホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>

1. 4. 長期連続観測と観測モード

EARは平成13年の完成以来、赤道大気の長期連続観測を実施してきた。観測時間の実績を図2に示す。主たる長期連続観測のモードは高度20km程度までの対流圏・下部成層圏観測である。またEARは電離圏の研究にも有用であり、電離圏イレギュラリティ(FAI)観測も適宜実施されている(図2の濃色で示した期間に実施)。22年7月からは、科学技術振興調整費「インドネシア宇宙天気研究の推進と体制構築」(22~24年度; 山本衛代表)の課題に対応するため、対流圏・下部成層圏・電離圏の切替観測を標準的に実施している。観測データについては、一次解析で得られる風速、スペクトル幅、エコー強度等の10分値を、ホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/data/>において公開している。

1. 5. 運営と予算状況

EARの運営はインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)とのMOUに基づき共同で行なっており、例えば現地オペレータにはLAPAN職員が就いている。その他の運営費は日本側の負担であり、装置維持費と特別教育研究経費の一部が充てられている。運営費は決して充分ではないため、時々の競争的資金を活用している。

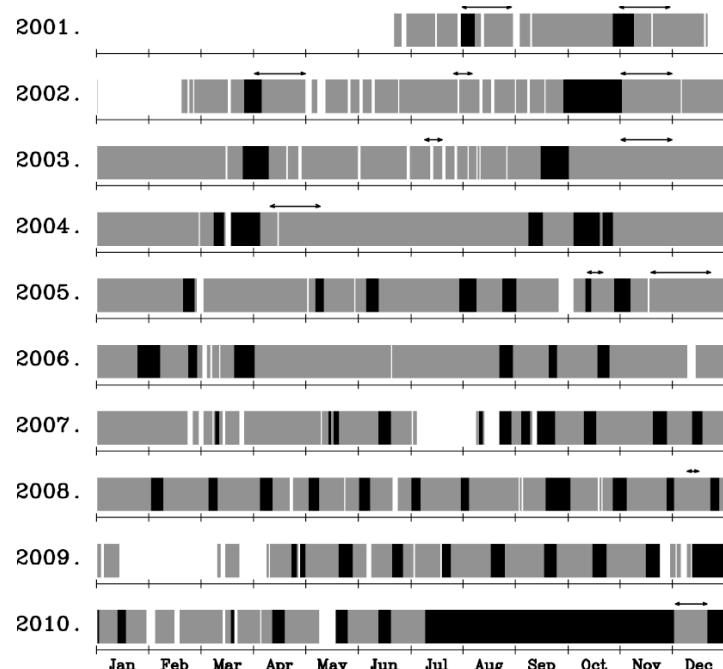


図2 赤道大気レーダー長期連続観測の実績（濃色部分：電離圏観測を同時実施）

2. 共同利用研究の成果

○熱帶性降雨に関する研究

赤道域では、強い日射と豊富な水蒸気量に伴い降水量が非常に多いため、共同利用では熱帶性降雨に関する研究が数多く行なわれている。EAR・境界層レーダー・ディストロメータによる降雨粒径分布の研究（古津・下舞・Findy 他）、EAR 及び X 帯気象レーダーの長期間データの解析による季節内変動に伴う降水活動の研究（柴垣他）、EAR 及びライダーによる層状性降水特性の研究（妻鹿・山本真之他）、降雨量の変動に直結する赤道大気の季節内変動の研究（Seto 他）、X 帯気象レーダーを用いた衛星回線降雨減衰統計に関する研究（前川他）などが行われている。

○大気層の構造に関する研究

EAR の特徴は大気乱流の微細構造の観測にある。EAR の重要機能であるレンジイメージングを利用した大気の擾乱・成層構造の観測が実施されている（妻鹿・Luce 他）、また EAR と 95GHz 雲レーダーの同時観測による非降水雲とその周辺の大気運動の関連が研究されている（山本真之他）。熱帶対流圏界層は対流圏の大気が成層圏に侵入する入口であり、EAR・ライダー・ラジオゾンデ等を用いた研究が積極的に展開されている（藤原他）。

○ライダーによる対流圏・成層圏・中間圏の観測

高機能ライダーが設置されており、対流圏から成層圏にかけてのエアロゾル層、目に見えない薄い巻雲が長期間連續に観測され、EAR との比較研究が行われている（阿保・山本真之他）。レイリーライダーによる成層圏～中間圏領域及びラマンライダーによる対流圏上部～成層圏領域の気温分布や、中間圏上部に存在する金属原子層の観測が行われ、赤道域における非常に貴重なデータを提供している。また下部対流圏における気温分布を観測するためのカリウム原子フィルターを用いた高スペクトル分解能ライダーの開発が進められている（長澤・阿保・柴田他）。

○電離圏イレギュラリティの研究

磁気赤道を中心として低緯度電離圏にはプラズマバブルと呼ばれる強い電離圏イレギュラリティ (FAI) が発生し、衛星=地上間の通信に大きな悪影響を与える。EAR・大気光イメージヤ・GPS 受信機・VHF レーダー・イオノゾンデを駆使した研究が展開中である（大塚・塩川・石井・長妻他）。例えば、真夜中前の F 領域 FAI はプラズマバブルに伴うものであり、3～5 月に発生頻度が高く、GPS シンチレーションを伴っていること、一方、真夜中過ぎの F 領域 FAI は 5～8 月に発生頻度が高く、GPS シンチレーションを伴わず、FAI エコー領域は西向き伝搬が多く、FAI のドップラー速度は西向き成分をもつことなどが明らかとなった。また昼間の 150km 高度に現れるエコーについて、従来は磁気赤道周辺のみに特有な現象とされてきたが、磁気緯度 10 度に達する EAR からの観測に成功した（大塚・横山・Patra 他）。

3. 共同利用状況

本共同利用は平成 17 年度に開始されており、下表に示すとおり、利用件数は 20~30 件程度で順調に推移している。また当初から国際共同利用を実施しており（17~18 年度はインドネシア国内からの申請のみに制限したが、19 年度からはその制限をなくした）、約 3 割が国際共同利用課題である。平成 19 年度からは毎年度に赤道大気レーダーシンポジウムを開催しており、平成 22 年度には 9 月 1~2 日に第四回を開催した。

年度	平成 17 年	平成 18 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年
採択課題件数 *	21 (4)	22 (2)	33 (9)	34 (10)	30 (9)	25 (7)
共同利用者数 **	108	165	205	214	190	156 (学内 42 学外 114)

* () 内数字は国際共同利用課題数

** 研究代表者および研究協力者の延べ人数

4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成 22 年度）

委員会の構成

橋口浩之(委員長、京大 RISH) 津田敏隆(京大 RISH) 山本衛(京大 RISH)
矢野浩之(京大 RISH) 山本真之(京大 RISH) 長澤親生(首都大)
山中大学(海洋研究開発機構) 大塚雄一(名大 STE 研) 古津年章(島根大)
国際委員(アドバイザー) Dr. Bambang Tejasukmana (インドネシア LAPAN 次官)

平成 23 年 2 月 17 日に国際委員の出席 (LAPAN の Muzirwan 氏による代理出席) を得て専門委員会を開催し、平成 23 年度申請課題の選考を行なった。

5. 特記事項

平成 20 年度の全学経費（全学協力経費 設備整備）を得て、EAR の改修を実施した。これは EAR の感度と、落雷からの電気的ショックに対する耐性を飛躍的に向上することを目的としている。更にアンテナ面を這う同軸ケーブルの取替と敷設方法の改善により、ネズミ食害に対する耐性を向上した。改修後の EAR は、受信系のゲイン 27dB 以上、ノイズフィギュア 5dB 以下、サージ耐電圧 1kV 以上といった特性が確認されており、以前は観測が難しかった高度十数 km の領域のデータ取得率が向上するなどの成果を得た。

EAR は平成 23 年に完成から 10 周年を迎える。これを記念して、平成 23 年度にジャカルタにおいてシンポジウム・式典を開催することを計画している。

6. 論文リスト

・修士論文

宮本将佑, X 帯気象レーダーを用いた赤道域衛星通信回線の降雨減衰統計の推定, 大阪電気
通信大学大学院工学研究科電子通信工学専攻, 2011.

・博士論文

稻飯洋一, Cold trap dehydration in the tropical tropopause layer estimated from the water vapor
match, 北海道大学大学院環境科学院, 2010.

田畠悦和, Observational study on diurnal precipitation cycle over Indonesia using 1.3-GHz wind
profiling radar network, 京都大学大学院理学研究科, 2011.

・学術論文誌

Fujiwara, M., H. Voemel, F. Hasebe, M. Shiotani, S.-Y. Ogino, S. Iwasaki, N. Nishi, T. Shibata, K.
Shimizu, E. Nishimoto, J. M. Valverde-Canossa, H. B. Selkirk, and S. J. Oltmans, Seasonal to
decadal variations of water vapor in the tropical lower stratosphere observed with balloon-borne
cryogenic frostpoint hygrometers, *J. Geophys. Res.*, **115**, D18304, doi:10.1029/2010JD014179,
2010

Kawashima, M., Y. Fujiyoshi, M. Ohi, T. Honda, S. Mori, N. Sakurai, Y. Abe, W. Harjupa, F.
Syamsudin, and M. D. Yamanaka, Case study of an intense wind event associated with a
mesoscale convective system in west Sumatera during the HARIMAU2006 campaign, *J. Meteor.
Soc. Japan*, **89A**, in press, 2011.

Li, G., B. Ning, L. Hu, L. Liu, X. Yue, W. Wan, B. Zhao, K. Igarashi, M. Kubota, Y. Otsuka, J. S. Xu,
J. Y. Liu, and J. L. Chau, Longitudinal development of low-latitude ionospheric irregularities
during the geomagnetic storms of July 2004, *J. Geophys. Res.*, **115**, doi:10.1029/2009JA014830,
2010.

Marzuki, T. Kozu, T. Shimomai, H. Hashiguchi, W.L. Randeu and M. Vonnisa, Raindrop size
distributions of convective rain over equatorial Indonesia during the first CPEA campaign,
Atmospheric Research, in press, 2010.

Mega, T., M. K. Yamamoto, H. Luce, Y. Tabata, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, M. D. Yamanaka,
and S. Fukao, Turbulence generation by Kelvin-Helmholtz instability in the tropical tropopause
layer observed with a 47 MHz range imaging radar, *J. Geophys. Res.*, **115**, D18115,
doi:10.1029/2010JD013864, 2010.

Mori, S., Hamada J.-I., N. Sakurai, H. Fudeyasu, M. Kawashima, H. Hashiguchi, F. Syamsudin, A.A.
Arbain, R. Sulistyowati, J. Matsumoto, and M.D. Yamanaka, Convective systems developed along
the coastline of Sumatera Island, Indonesia, observed with an X-band Doppler radar during the
HARIMAU2006 Campaign, *J. Meteor. Soc. Japan*, **89A**, 23-43, 2011.

Nishimura, K., T. Harada and T. Sato, Multistatic Radar Observation of a Fine-Scale Wind Field with a Coupling-Compensated Adaptive Array, Technique, *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 409-424, 2010.

Tabata Y., H. Hashiguchi, M. K. Yamamoto, M. Yamamoto, M. D. Yamanaka, S. Mori, Fadli Syamsudin, and Timbul Manik, Observational study on diurnal precipitation cycle in equatorial Indonesia using 1.3-GHz wind profiling radar network and TRMM precipitation radar, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, doi:10.1016/j.jastp.2010.10.003, 2010.

Tabata, Y., H. Hashiguchi, M. K. Yamamoto, M. Yamamoto, M. D. Yamanaka, S. Mori, Fadli Syamsudin, and Timbul Manik, Lower tropospheric horizontal wind over Indonesia: A comparison of wind profiler network observations with global reanalyses, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, doi:10.1016/j.jastp.2010.09.016, 2010.

Uemoto, J., T. Maruyama, S. Saito, M. Ishii, and R. Yoshimura, Relationships between pre-sunset electrojet strength, pre-reversal enhancement and equatorial spread-F onset, *Ann. Geophys.*, **28**, 449-454, doi:10.5194/angeo-28-449-2010, 2010.

木質材料実験棟全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

木質材料実験棟（Wood Composite Hall）は、1994年2月に完成した大断面集成材を構造材とする三階建ての木造建築物である（写真1）。1階には、木質構造耐力要素の性能評価試験装置、木質由来新素材開発研究用の加工、処理、分析・解析装置等が備えられている。3階には、140名程度収容可能な講演会場の他、30名程度が利用できる会議室がある。付属的施設として実験住宅「律周舎」（写真2）の他に、北山丸太の活用法をアピールする木質系資材置き場（写真3）が平成22度から新たに加わった。



写真1 木質材料実験棟全景

写真2 実験住宅「律周舎」

写真3 北山丸太製資材置き場



写真4 横型油圧試験機



写真5 鋼製反力フレーム



写真6 X線光電子分析装置

1階の実験室に設置されている主たる設備と活動状況は以下の通り

- 1) 1000 kN 横型サーボアクチュエーター試験機（写真4）：試験体最大寸法は高さ 2.5 m、幅 0.8 m、奥行き 0.8 m 程度まで適用可能。集成材各種接合部の静的・動的繰り返し加力実験、疲労実験、丸太や製材品の実大曲げ実験、実大座屈実験その他に供用されている。
- 2) 500 kN 鋼製反力フレーム水平加力実験装置（写真5）：試験体最大寸法：高さ 2.8 m、長さ 4.5 m（特別の治具を追加すれば 6 m まで可能）、奥行き 1 m。PC 制御装置と最大ストローク 500 mm の静的正負繰り返し加力用オイルジャッキを備えている。耐力壁、木質系門型ラーメン、その他構造耐力要素の実大（部分）加力実験に供用されている。木質材料実験棟で稼働率が非常に高い装置の一つである。

3) X 線光電子分析装置 (ESCA) (写真 6) : 試料の最表面 (5 nm) を分析可能。イオンエッティングを行うことで深さ方向の分析も可能である。現在の所、主に、木質系炭素材料の表面分析に供用されている。

4) 木造エコ住宅 (律周舎 : 写真 2) : 平成 18 年 11 月に完成した自然素材活用型木質軸組構法実験棟。金物を一切使わず、木、竹、土等の自然素材だけで構造体を構築したユニークな木造実験住宅である。各種外壁材の耐候性実験、振動性能評価実験、床下菌類の分布計測実験、シロアリの木造住宅食害実験、屋根裏温度分布の計測等を継続中。

平成 22 年度の採択課題数は 16 件で、表 1 に平成 22 年度の受付課題名、代表研究者、所内担当者の一覧を示す。

表 1 平成 22 年度木質材料実験棟共同利用採択課題一覧

課題番号	研究課題	研究代表者名(共同研究者数)所属・職名/所内担当者
22WM-01 新規	高フィラー含有量の混練型 WPC の試作	高谷政広 (4) 近畿大学農学部・教授/梅村研二
22WM-02 継続	木口挿入型接合具を用いた木材接合法の設計法の検討	井上正文 (5) 大分大学工学部教授/森拓郎
22WM-03 新規	強制腐朽処理接合部における残存耐力耐力の定量評価に関する研究	野田康信 (3) 北海道立林産試験場・研究職員/森 拓郎
22WM-04 新規	木造建築部材の耐久性向上技術に関する研究	福留重人 (2) 鹿児島県工業技術センター・研究専門員/小松幸平
22WM-05 新規	木質ラーメンフレームと構造用合板を用いた耐力壁を併用した門型フレームの水平加力実験	瀧野敦夫 (2) 大阪大学大学院工学研究科・助教/森 拓郎
22WM-06 新規	エネルギーディバイスへの応用を目的とした小角 X 線散乱を用いた多孔質炭素材料の構造解析	押田京一 (5) 国立高等専門学校機構長野工業高等専門学校・教授/畠 俊充
22WM-07 継続	住宅床下への木材劣化生物の侵入生態の把握とその予防に関する基礎的検討	築瀬佳之 (5) 京都大学大学院農学研究科・助教/吉村 剛
22WM-08 継続	木質起源物質の化学修飾と炭素化物への物質変換	木島正志 (2) 筑波大学大学院数理物質科学研究科・准教授/畠 俊充
22WM-09 継続	木質炭素材料の化学構造解析と電磁波シールド性能に及ぼす影響の評価	西宮耕栄 (1) 北海道立林産試験場・研究職員/畠 俊充
22WM-10 継続	高韌性型 LSB 接合部の開発	小松幸平 (8) 京都大学生存圏研究所・教授/小松幸平
22WM-11 新規	リグニンの炭素化による酸化劣化制御表面材料の開発	梶本武志 (1) 和歌山県工業技術センター・主査研究員/畠 俊充
22WM-12 継続	木造建物における非構造部材が耐震性能に与える影響に関する研究	五十田博 (6) 信州大学工学部・准教授/森 拓郎
22WM-13 新規	東アジア地域における伝統的組物構造物の耐震性能の比較研究における静的/動的加力試験	北守顕久 (5) 京都大学生存圏研究所・助教/北守顕久

22WM-14 新規	非破壊的手法による土塗り壁の強度性能の推定	鄭 基浩 (1) 静岡大学教育学部・助教/北守顕久
22WM-15 継続	熱電変換材料の構造解析と物性評価	北川裕之 (2) 島根大学総合理工学部・准教授/畠 俊充
22WM-16 継続	地域材の有効活用と木造住宅の修理・修復技術に関する研究	田淵敦士 (3) 京都府立大学生命環境科学研究科・講師/森 拓郎

2. 共同利用研究の代表的成果

1) 課題番号 22WM-07 では、エコ住宅実験棟床下に営巣させたヤマトシロアリのコロニーの上に石粉造粒材料、ゼオライト（造粒物、破碎物）、シリカゲル（破碎物、ビーズ）、カルサイト（炭酸カルシウム）、ガラスビーズ、砂壌土（コントロール）と餌の木片を写真7の様に敷設した49基のコンクリート製会所枠を置き、シロアリの侵入阻止効果を2年にわたって調べた。砂壌土は1年目でシロアリに貫通されたが、各種粒子材料はシロアリに貫通されることはなく、粒子層物理バリアとしての効果が認められた。

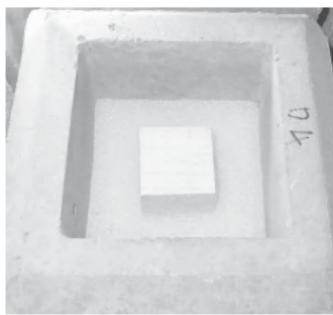


写真7 エコ住宅床下での粒子材料貫通試験状況。左：シリカゲルビーズ層(貫通無し)右：コントロール(貫通有り)

2) 課題番号 22WM-06 では、メソ孔とミクロ孔を含む活性炭および金属微粒子を担持したカーボンナノチューブを供試し、小角X線散乱装置(SWXD)と市販の解析ソフト(NANO-Solver, Ver.3.5)を用いて各孔の分布状態を測定・解析した。その

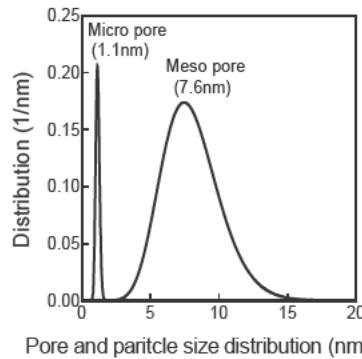


図8 小角X線散乱法による活性炭の細孔径分布測定

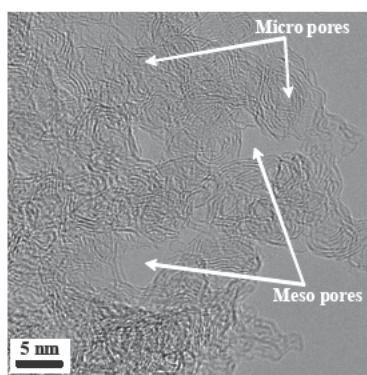


図9 メソ孔を含む活性炭の透過電子顕微鏡(TEM)像

結果、活性炭のメソ孔の細孔径は7.6nm付近に、マイクロ孔径は1.1nm付近に分布していることが分かった(図8)。また、直径10nm程度の金属微粒子の平均的な凝集状態が19nm付近であることがSWXD測定から明らかとなった。TEM(図9)、SWXD等の複数の測定により機能性炭素材料の正確な3次元構造が明らかとなり、今後エネルギーデバイスの高性能な電極開発に資するデータとなるものと考えられる。

3) 課題番号 22WM-02 では、繊維直交方向に接合金物を挿入し接着剤で固定する接合法の剛性と耐力に及ぼす縁距離の影響を把握するための引抜試験を行った。破壊性状は、試験

体上面が接合具の抜けと同時に盛り上がって接着界面がせん断破壊するタイプと接合具の先端で集成材が横引張破壊するタイプが観察された。図 10 にせん断破壊の形状を図 11 に実験値と耐力推定式との適合性を示す。

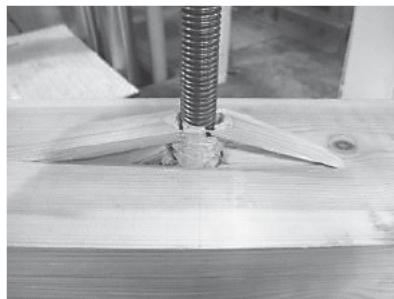


図 10 接着界面でのせん断破壊による接合具の引き抜け状況。

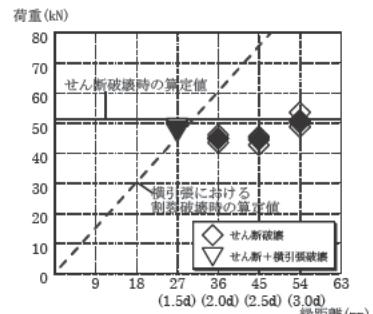


図 11 実験値と計算値の比較

3. 共同利用状況

平成 18 年度から 22 年度までの共同利用状況の推移を表 2 に示す。

表 2 木質材料実験棟過去 6 年間の利用状況の推移

期間	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	平成 21 年度	平成 22 年度
採択課題数	18	20	20	22	15	16
共同利用者数 (延べ人数)	55	97	105	111	74	81

4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成 22 年度）

小松幸平（委員長、京大 RISH）、井上正文（大分大工）、巽太輔（九大農）、川瀬博（京大防災研）、林知行（森林総研）、仲村匡司（京大農）、篠原直毅（京大 RISH）、山内秀文（秋田木高研）、野田康信（北林産誌）、矢野浩之（京大 RISH）、佐々木貴信（秋田木高研）、渡辺 浩（福岡大工）。平成 22 年度の専門委員会は、全てメール回議によって行った。

5. 特記事項

本共同利用の研究活動の中で作成された論文や報告類の代表的なものを以下に示す。

[査読付き論文]

- Hiroyuki Kitagawa, Toshimitsu Kunisada, Yasuji Yamada and Shugo Kubo, "Effect of Boron-doping on Thermoelectric Properties of Rutile-type Titanium Dioxide Sintered Materials", Journal of Alloys and Compounds, 508 (2010) pp.582-586.
- 田中 圭、佐藤 烈、中城勇太郎、天曇梨沙、森 拓郎、井上正文、木材の材料特性を考慮した GIR 継手接合部の耐力算定法の提案、構造工学論文集, Vol.56B, 2010 年 3 月, pp.303-208

[修士論文・卒業論文]

- 佐藤 烈：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究-木材の材料強度を考慮した GIR 接合部の引張耐力算定法の提案-、平成 21 年度大分大学工学部建築学科修士論文
- 野口 雄司：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究-注入用接着剤の違いによる強度性能への影響-、平成 21 年度大分大学工学部建築学科卒業論文
- 國貞 俊光 「パルス通電焼結によるホウ素添加ルチル型酸化チタンの作製と電気的特性」 平成 20 年度 島根大学大学院 総合理工学研究科 物質科学専攻 修士論文
- 牧野 友一 「ZnSb 系熱電半導体へのドーピングと低-中温域輸送特性」 平成 19 年度島根大学大学院 総合理工学研究科 物質科学専攻 修士論文
- 荒木 洋志 「メカニカルアロイング-ホットプレス法により作製した Bi0.5Sb1.5Te3 における熱電特性の Te 濃度依存性」 平成 18 年度 島根大学大学院 総合理工学研究科 物質科学専攻 修士論文

共同利用研究活動の中で作成された修士論文、博士論文
共同利用研究の成果による学会賞、および学術論文誌に発表された論文

1) 課題番号 22WM-02 「木口挿入型接合具を用いた木材接合法の設計法の検討」

研究代表者：井上正文（大分大学工学部教授）

<21 年度の成果>

- 1) 佐藤 烈：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究-木材の材料強度を考慮した GIR 接合部の引張耐力算定法の提案-、平成 21 年度大分大学工学修士論文
- 2) 野口 雄司：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究 -注入用接着剤の違いによる強度性能への影響-、平成 21 年大分大学工学部卒業論文
- 3) 佐藤 烈、天雲梨沙・田中 圭・森 拓郎・後藤泰男・井上正文：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究（その 9）纖維直交方向引抜きにおける強度性能について、日本建築学会九州支部研究報告 第 49 号・1, 2010 年 3 月, pp.645-648
- 4) 佐藤 烈, 野口雄司, 天雲梨沙, 田中 圭, 森 拓郎, 後藤泰男, 井上正文：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構について、その 8 繊維直交方向引抜きにおける強度性能について、日本建築学会大会学術講演梗概集,C-1 分冊, 2010 年 9 月, pp.193-194
- 5) 田中 圭、佐藤 烈、中城勇太郎、天雲梨沙、森 拓郎、井上正文：木材の材料特性を考慮した GIR 繼手接合部の耐力算定法の提案、構造工学論文集, Vol.56B, 2010 年 3 月, pp.303-208

<22 年度の成果（予定）>

- 1) 天雲梨沙：「接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する実験的研究—纖維直交方向に挿入された接合金物の引抜耐力算定法の提案—」平成 22 年度大分大学工学部修士論文：
- 2) 大倉沙織：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究 —木材と接着層の界面の強度性能—、平成 22 年度大分大学工学部卒業論文
- 3) 野口雄司, 天雲梨沙, 田中 圭, 森 拓郎, 井上正文：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究（その 10）木材と接着層の界面の強度特性、日本建築学会九州支部研究報告 第 50 号・1, 2011 年 3 月（投稿中）
- 4) 森 拓郎, 野口雄司, 天雲梨沙, 田中 圭, 後藤泰男, 井上正文：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究（その 11）纖維直交方向引抜きにおける縁距離が強度性能に与える影響について、日本建築学会九州支部研究報告

第 50 号・1, 2011 年 3 月 (投稿中)

- 5) 田中 圭, 天雲梨沙, 野口雄司, 森 拓郎, 井上正文 : 集成材の纖維直交方向に挿入した GIR 接合具の引抜耐力算定法の提案、構造工学論文集, Vol.57B, 2010 年 3 月 (投稿中)

2) 課題番号 22WM-15 「熱電変換材料の構造解析と物性評価」

研究代表者 : 北川裕之 (島根大学総合理工学部准教授)

- 1) Hiroyuki Kitagawa, Toshimitsu Kunisada, Yasuji Yamada and Shugo Kubo, "Effect of Boron-doping on Thermoelectric Properties of Rutile-type Titanium Dioxide Sintered Materials", Journal of Alloys and Compounds, 508 (2010) pp.582-586.
- 2) 國貞 俊光 「パルス通電焼結によるホウ素添加ルチル型酸化チタンの作製と電気的特性」 平成 20 年度 島根大学大学院 総合理工学研究科 物質科学専攻 修士論文
- 3) 牧野 友一 「ZnSb 系熱電半導体へのドーピングと低一中温域輸送特性」 平成 19 年度 島根大学大学院 総合理工学研究科 物質科学専攻 修士論文
- 4) 荒木 洋志 「メカニカルアロイングーホットプレス法により作製した Bi0.5Sb1.5Te3 における熱電特性の Te 濃度依存性」 平成 18 年度 島根大学大学院 総合理工学研究科 物質科学専攻 修士論文

表彰等

1. 日本鉄鋼協会・日本金属学会 中国四国支部 鉄鋼第 51 回・金属第 48 回 合同支部講演大会 優秀講演学生 (2008) 國貞 俊光 "放電プラズマ焼結によるホウ素ドープ TiO₂ の作製と電気的特性"
2. 日本鉄鋼協会・日本金属学会 中国四国支部 鉄鋼第 50 回・金属第 47 回 合同支部講演大会 優秀講演学生 (2007) 牧野 友一 "ZnSb 系材料の熱電特性に及ぼす Ag, Cu の添加効果"

3) 課題番号 22WM-16 「地域材の有効活用と木造住宅の修理・修復技術に関する研究」

研究代表者 : 田淵敦士 (京都府立大学生命環境科学研究科・講師)

Atsushi TABUCHI, Takuro MORI, Satoru MURAKAMI, Kohei KOMATSU : An Effect of Lapped Length Of Kanawa-Tsugi Connection on a Bending Performance as a Japanese Traditional Connection, Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Italia, 2010

4) 課題番号 22WM-10 「高韌性型 LSB 接合部の開発」

研究代表者 : 小松幸平 (京都大学生存圏研究所・教授)

小松幸平、中島昌一、中谷浩之、大倉憲峰、川原重明、清水 武 : LSB を用いた柱-梁接合部設計式の精密化、第 14 回木質構造研究会技術報告集、東京、2010

居住圏劣化生物飼育棟/生活・森林圏シミュレーションフィールド

全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

平成17年6月から別個に全国共同利用施設としての使用を開始した京都大学生存圏研究所居住圏劣化生物飼育棟（以下DOLと略記）と生活・森林圏シミュレーションフィールド（以下LSFと略）は、平成20年度から統合され、全国・国際共同利用施設として新たな一步を踏み出すことになった。年度の過渡期での統合決定であったことから、共同利用研究申請は従前通り、DOLとLSFがそれぞれ公募し、申請課題を採択した。平成20年度に入り、実質的に統合され、同時に両委員会が合体した。共同利用を開始以来、懸案であった国際共同利用を開始した。平成21年度は、国際共同利用5件を含む21件の研究課題を採択した。

DOLは木材及びそれに類する材料を加害する生物を飼育し、材料の生物劣化試験、生物劣化機構、地球生態系・環境への影響(例えば、シロアリによるメタン生成)などを研究する生物を供給できる国内随一の規模を有する施設である。飼育生物としては、木材腐朽菌、変色菌、表面汚染菌(かび)などの微生物とシロアリやヒラタキクイムシなどの食材性昆虫が含まれる。従前より、木材や新規木質系材料の生物劣化抵抗性評価や防腐・防蟻法の開発・研究に関して、大学だけでなく、公的研究機関、民間企業との共同研究を積極的に遂行してきた。



ヒラタキクイムシ飼育室

乾材シロアリ

イエシロアリ飼育槽



イエシロアリ

微生物培養室

丸太に発生した変色菌

一方 LSF は、鹿児島県日置市吹上町吹上浜国有内に設置されたクロマツとニセアカシア、ヤマモモなどの混生林からなる約 28,000 平方メートルの野外試験地であり、日本を代表する 2 種の地下シロアリが高密度で生息し、これまで既に 30 年近くにわたって木材・木質材料の性能評価試験、木材保存薬剤の野外試験、低環境負荷型新防蟻穂の開発や地下シロアリの生態調査、大気環境調査等に関して国内外の大学、公的研究機関及び民間企業との共同研究が活発に実施してきた。



2. 共同利用研究の成果

昨年度に引き続き採択された植物由来の抗シロアリ活性物質の単離と構造決定、日本および米国産地下シロアリ *Reticulitermes* 属 4 種の階級別性比に関する研究成果概要とそれらの学術的意義について紹介する。

○インドネシア薬用植物の抗シロアリ活性物質の探索

木材は人間生活にとって不可欠の材料・原料であり、その利用の歴史は極めて長い。樹種によっては高い耐蟻性を備えているが、資源量が豊富でない場合が多く、一方、汎用樹種の耐蟻性は一般的には低く、蟻害発生の脅威に曝されている。インドネシア産樹種の中には耐蟻性を示す物が知られており、*Protium javanicum* Burm. f. もその 1 種である。*Protium javanicum* の粗抽出物から抗シロアリ活性を示す化合物を単離、構造解析の結果、スコポレチンに最も高い活性を認めた。有機合成したスコポレチンの類縁体 10 種の殺蟻性および摂食阻害性を比較評価したところ、構造活性相関が認められ、6 位と 7

位の置換基が活性に影響を与えることを確認した。これらの研究成果は、すでに学術誌に掲載された(Adfa, M., Yoshimura, T., Komura, K. and Koketsu, M. 2010 Antitermite activities of coumarin derivatives and scopoletin from *Protium javanicum* Burm. f. *J. Chem. Ecol.* 36: 720–726)。

○日本及び米国産地下シロアリの性比(国際共同研究)

社会性昆虫であるシロアリにとって性比は、繁殖や階級分化に関して重要な情報である。本研究では、野外の日本および米国産 *Reticulitermes* 種の性比を調べた。無水アルコールに保存した京都およびジョージアで採集したシロアリの職蟻、兵蟻、ニンフを形態的特徴から識別して性を決定し、雄/雌比が 0.67–1.50 を雌雄バイアスなし、<0.67 を雌バイアス、>1.50 を雄バイアスとした。全採集地の性比の概要は、下表 1 の通りであった。また、シロアリ種別の雌雄バイアスなし、雌バイアス、雄バイアスの割合は表 2 の通りであった。

表 1 *Reticulitermes* 4 種の職蟻、兵蟻およびニンフの平均性比

階級 シロアリ種	職 蟻	兵 蟻	ニンフ
日本産			
<i>R. speratus</i>	1.00 ± 0.24 [n=6]	1.14 ± 0.65 [n=6]	1.14 ± 0.65 [n=6]
米国産			
<i>R. flavipes</i>	1.12 ± 0.33 [n=79]	1.50 ± 0.68 [n=27]	0.92 ± 0.38 [n=32]
<i>R. spp.</i>	1.42 ± 0.53 [n=58]	1.72 ± 1.06 [n=18]	0.67 ± 0.31 [n=16]
<i>R. virginicus</i>	1.25 ± 0.18 [n=7]	0.1 [n=7]	No samples

表 2 *Reticulitermes* 4 種の階級別雌雄バイアスなし(♀・♂)、雌バイアス(♀)、雄バイアス(♂)の割合(%)

階級 シロアリ種	職 蟻			兵 蟻			ニンフ		
	♀・♂	♀	♂	♀・♂	♀	♂	♀・♂	♀	♂
日本産									
<i>R. speratus</i>	80.0	20.0	0	60.0	20.0	20.0	75.0	0	25.0
米国産									
<i>R. flavipes</i>	81.0	3.8	15.2	48.2	7.4	44.4	62.5	18.8	18.7
<i>R. spp.</i>	64.4	3.3	32.2	50.0	0	50.0	25.0	62.5	12.5
<i>R. virginicus</i>	85.7	0	14.3	0	100	0	No samples		

得られた結果から、性比は採集時期と場所によって大きく異なり、検体数が増えると雌雄バイアスなしの傾向が強くなることが判った。

○学術論文誌に発表された論文リスト

Adfa, M., T. Yoshimura, K. Komura and M. Koketsu 2010 Antitermite activities of

coumarin derivatives and scopoletin from *Protium javanicum* Burn. f. *J. Chem. Ecol.* **36**: 720–726.

Lenz, M., C.-Y. Lee, M. J. Lacey, T. Yoshimura and K. Tsunoda 2011 The Potential and limits of termites (Isoptera) as decomposers of waste paper products. *J. Econ. Entomol.* **104**: 232–242.

3. 共同利用状況

年度	平成 17 年	平成 18 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年
採択課題*	12	16	17	16(2)	21 (4)	16(3)
LSF						
DOL	13	13	7	12(2)	109	75 (学内 30 学外 45)
共同利用者数**	53	72	80	81		
LSF						
DOL	45	51	46	50		

* () 内数字は国際共同利用課題数

** 研究代表者および研究協力者の延べ人数

4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成 22 年度）

国内委員：角田邦夫(委員長、京大生存研)、吉村 剛(京大生存研)、上田義勝(京大生存研)、陀安一郎(京大生態学センター)、大村和香子(森林総合研究所)、青柳秀紀(筑波大)、栗崎宏(富山県農林水産総合技術センター・木材研究所)、秋野順治(京都工芸纖維大)、森満範(北海道立総合研究機構 森林研究本部・林産試験場)、板倉修二(近畿大学)

国際委員(アドバイザー) : Brian T. Forschler (ジョージア大学)、Chow-Yang Lee(マレーシア理科大学)

☆専門委員会開催状況

平成 23 年 2 月 22 日 (平成 22 年度第 1 回委員会)

議題：平成 23 年度申請課題の審査他

申請課題の審査は、予め各委員に申請書類を配信し、委員会開催までに委員長が纏めており、委員会開催時に出席委員の議を経て採択した。

5. 特記事項

(1) DOL/LSF で行われた研究成果を広く社会に公開するため、研究成果報告会を第 166 回生存圏シンポジウムとして平成 23 年 2 月 21 日に実施し、併せて成果要旨集を出版した。

(2) 研究課題毎の LSF 利用区画を標識とロープで明示・整備した。

持続可能生存圏開拓診断(DASH)/森林バイオマス評価分析システム

(FBAS)全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

人類が持続的生存を維持するためには、太陽エネルギーによる再生可能な植物資源によって、食糧生産、資源確保、エネルギー供給を支えるシステムを構築することが、世界的な緊急課題となっている。また地球環境の保全のためには、植物を中心として、それを取り巻く大気、土壌、昆虫、微生物など様々な要素の相互作用、すなわち生態系のネットワークを正しく理解することも必要である。これらは当研究所のミッション1、4、およびアカシアプロジェクトに密接にかかわっている。そして、環境修復、持続的森林バイオマス生産、バイオエネルギー生産、高強度・高耐久性木質生産などを最終目標として、種々の有用遺伝子機能の検証と並び、樹木を含む様々な形質転換植物が作成されている。

こうした研究を支援するため、平成19年度の京都大学概算要求（特別支援事業・教育研究等設備）において、生存圏研究所は生態学研究センターと共同で「DASH システム」を申請し、これが認められて生存圏研究所に設置された。本システムは、樹木を含む様々な植物の成長制御、共生微生物と植物の相互作用、ストレス耐性など植物の生理機能の解析を行なうとともに、植物の分子育種を通じ、有用生物資源の開発を行なうものである。一方、平成18年度より全国共同利用として運用してきた FBAS は、前者の分析装置サブシステムと内容的に重複するところが多いことから平成20年度より DASH システムと協調的に統合し、一つの全国・国際共同利用として運用することとした。後者は複雑な木質バイオマス、特にリグニンおよび関連化合物を中心として、細胞レベルから分子レベルにいたるまで正確に評価分析する、分析手法の提供をベースとした共同利用研究である。

本システムを構成する主要な機器と分析手法は以下の通りである。

主要機器

・DASH 植物育成サブシステム

組換え植物育成用（8温室+1培養室+1準備処理作業室） [図 A]

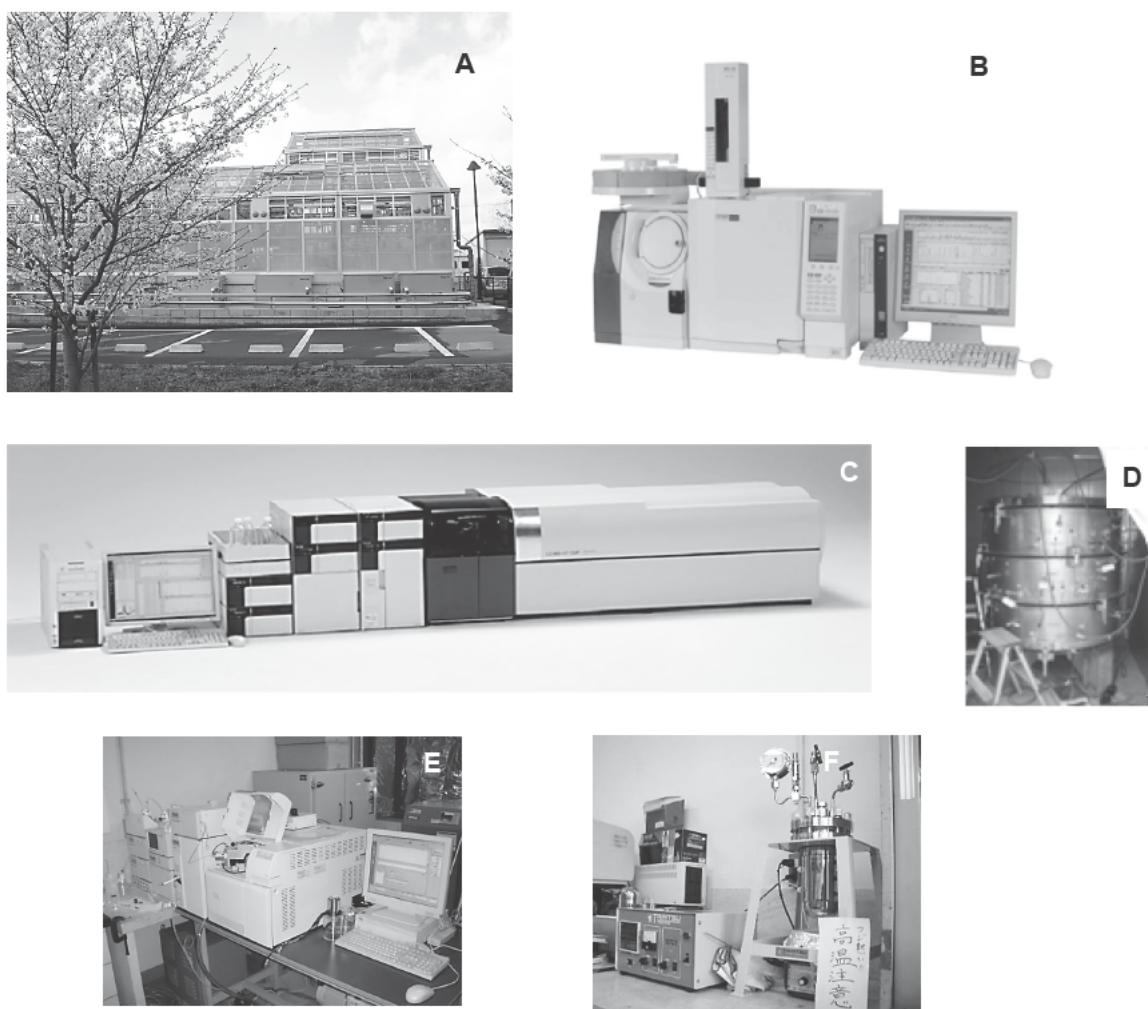
大型の組換え樹木にも対応（温室の最大高さ 6.9m）

・DASH 分析装置サブシステム

1)代謝産物分析装置 LCMS-IT-TOF 1台 [図 C]

2)植物揮発性成分分析装置 GC-MS 2台 [図 B]

3)土壤成分分析装置 ライシメータ 2台 [図 D]



図：DASH/FBAS 構成機器（抜粋）

・FBAS として共同利用に供する設備

四重極型ガスクロマトグラフ質量分析装置

高分解能二重収束ガスクロマトグラフ質量分析装置 [図 E]

四重極型液体クロマトグラフ質量分析装置 [図 F]

ニトロベンゼン酸化反応装置

その他の装置

核磁気共鳴吸収分光装置

透過型電子顕微鏡

主な分析手法

チオアシドリシス、ニトロベンゼン酸化分解（リグニン化学構造分析）

クラーソンリグニン法、アセチルプロマイド法（リグニン定量分析）

2. 共同利用研究の成果

共同利用研究の成果の代表的な例として、本年度は遺伝子組み換えユーカリに関する共同利用（学外）と、遺伝子組み換えダイズを用いた機能性物質生産に関する共同利用（所外）の2例を取り上げて後に紹介する。

また共同利用研究活動の中で作成された修士論文、博士論文のリスト、共同利用研究の成果による学術賞および学術論文誌に発表された論文リストは以下のとおりである。

共同利用の研究活動の中で作成された修士論文（平成22年度）

- ・植物からのイソプレン放出の高温耐性メカニズム（馬場 奈央登）
- ・ミヤコグサの根と根粒で発現するトランスポータ LjABCG1 の生理機能（福田 正充）
- ・ダイズ β -コングリシニン高集積米の開発（加藤 直樹） 平成22年度
- ・セルロース合成酵素の電子顕微鏡による三次元再構成（菅野 亜美）
- ・イネカフェー酸OMTの機能解析（廣瀬孝江）

共同利用の研究活動の中で作成された博士論文（平成22年度）

- ・ミヤコグサ-根粒菌の共生に関する機能性低分子の動態と生理的役割（高梨 功次郎）

共同利用研究の成果による学術賞、及び学術論文誌に発表された論文

<学会発表>

- 1) 加藤 直樹、甘利 芳樹、恵京 敦史、澤田 真千子、奥田 英子、増田 太郎、高岩 文雄、内海 成、丸山 伸之
ダイズ β -コングリシニン高集積米の開発
日本農芸化学会 2010 年度大会
- 2) 加藤 直樹、甘利 芳樹、恵京 敦史、澤田 真千子、奥田 英子、増田 太郎、長岡 利、黒田 昌治、高岩 文雄、内海 成、丸山 伸之
ダイズ β -コングリシニン高集積米の開発
日本育種学会 2010 年度秋季大会

<論文>

- Nakagawa, T., Kaku, H., Shimada, Y., Sugiyama, A., Shimomura, M., Takanashi, K., Yazaki, K., Aoki, T., Naoto, S., Kouchi, H., From defense to symbiosis: Limited alterations in the kinase domain of LysM receptor-like kinases are crucial for evolution of legume-*Rhizobium* symbiosis, Plant J., in press.
- Koeduka, T., Shitan, N., Kumano, T., Sasaki, K., Sugiyama, A., Linley, P., Kawasaki, T., Ezura, H., Kuzuyama, T., Yazaki, K., Production of prenylated flavonoids in tomato fruits expressing a prenyltransferase gene from *Streptomyces coelicolor* A3(2), Plant Biol., 13 (2), 411–415 (2011).
- Ohara, K., Sasaki, K., Yazaki, K., Two solanesyl diphosphate synthases with different subcellular localizations and their respective physiological roles in *Oryza sativa*. J. Exp. Bot., 61 (10), 2683-2692, (2010).
- Harada, E., Hokura, A., Takada, S., Baba, K., Terada Y., Nakai, I., Yazaki, K., Characterization of cadmium accumulation in willow as a woody metal accumulator using synchrotron radiation-based X-ray microanalyses. Plant Cell Physiol., 51 (5), 848-853 (2010).

- Tsurumaru, Y., Sasaki, K., Miyawaki, T., Momma, T., Umemoto, N., Yazaki, K., An aromatic prenyltransferase-like gene HIPT-1 preferentially expressed in lupulin glands of hop. Plant Biotech., 27 (2), 199-204 (2010).
- Motoyama, T., Okumoto, Y., Tanisaka, T., Utsumi, S., Maruyama, N. Co-expression of α' and β subunits of β -conglycinin in rice seeds and its effect on the accumulation behavior of the expressed proteins. Transgenic Research 19, 819-827 (2010)
- Motoyama, T., Amari, Y., Tandang-Silvas, M.R., Cabanos, C., Kimura, A., Yoshikawa, M., Takaiwa, F., Utsumi, S., Maruyama, N. Developing transgenic rice with mutated β subunit of soybean β -conglycinin containing phagocytosis-stimulating peptide. Peptides 31, 1245-1250 (2010)
- Watanabe, T., Shitan, N., Shiro, S., Umezawa, T., Shimada, M., Yazaki, K. and Hattori, T.: An oxalate efflux transporter from the brown-rot fungus *Fomitopsis palustris*. Applied and environmental microbiology, 76, 7683-7690 (2010).
- Muroi A., Arimura G., Future prospects of GM plant-based plant-plant communications. J. Plant Interact. in press.
- Yamamura M, Hattori T, Suzuki S, Shibata D, Umezawa T, Microscale alkaline nitrobenzene oxidation method for high-throughput determination of lignin aromatic components, Plant Biotechnology (2010) 27, 305-310
- Yamamura M, Wada S, Sakakibara N, Nakatsubo T, Suzuki S, Hattori T, Sakurai N, Suzuki H, Shibata D, Umezawa T, Occurrence of guaiacyl/p-hydroxyphenyl lignin in *Arabidopsis thaliana* T87 cells, Plant Biotechnology (2011) 28, 1-8.

<総説>

Maruyama, N., Mikami, B., Utsumi, S., Development of transgenic crops to improve human health by advanced utilization of seed storage proteins, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry (2011) in press

<著書>

Maruyama, N., Motoyama, T., Yoshikawa, M., Takaiwa, F., Utsumi, S. Seed storage proteins; Application to develop crops promoting a human health, Soybean, In Tech, Vienna Austria (2011) in press

共同利用研究の成果の例

1) 組換えダイズによる機能性ペプチド生産技術の開発

研究代表者：丸山 伸之（京都大学大学院農学研究科）

【研究目的と意義】ダイズ種子は貯蔵タンパク質をイネやトウモロコシに比べ豊富に含有しており、医薬品および健康食品素材などの有用タンパク質やペプチドを生産する植物工場として最も有効である。また、我々が解析したダイズ種子貯蔵タンパク質の立体構造および種子細胞内輸送・高蓄積機構の知見を利用することにより、高度に有用タンパク質やペプチドをダイズ種子に蓄積させることが可能である。そこで、ダイズ形質転換体の作出

技術を用いて、アルツハイマー型痴呆症予防ペプチドをダイズ種子に蓄積させ、遺伝子組換えダイズを用いてアルツハイマー型痴呆症に対するワクチンの開発を行った。

【研究成果】ダイズの主要な種子貯蔵タンパク質であるグリシニンの A1aB1b サブユニットをアルツハイマー型痴呆症予防ペプチドを導入するキャリアーとして利用した。立体構造上のディスオーダー領域をペプチドを導入するターゲットとして導入型 A1aB1b サブユニットを設計し、ダイズ種子でそれらの発現タンパク質が蓄積することを確認した。さらに、内在性の貯蔵タンパク質を欠失しているダイズ系統をホストとして利用することにより、導入型 A1aB1b サブユニットの蓄積量が増加することを明らかにした。電子顕微鏡観察から、1-3 ヶ所にペプチドを導入した A1aB1b サブユニットの多くは、導入前のものと同様にタンパク質貯蔵液胞に輸送され、蓄積していた。以上より、アルツハイマー型痴呆症予防ペプチドを高含有するダイズの開発に成功した。

2) 形質転換植物の細胞壁成分の解析

研究代表者：日尾野隆（王子製紙株式会社）

【研究目的と意義】ループ原料のための新品種ユーカリの開発を目指して遺伝子組換えによる木部材質の改良を行っている。これまでに材質の本質である細胞壁の形成に関わる転写制御因子をコードするユーカリ遺伝子を同定し、これを構成的に、あるいは木部特異的に過剰発現させた形質転換ユーカリを作出した。形質転換ユーカリにおける導入遺伝子の発現量と表現型の強さに相関がみられた形質転換群について、細胞壁成分等の分析をおこない、実用化への基礎データとする。

【H21年度の成果】P35S:EcHB1 と PEcCCOMT:EcMYB2 形質転換ユーカリで導入遺伝子発現量に相関する表現型が観察されている。リグニン分析を行った結果、PEcCCOMT:EcMYB2 形質転換ユーカリでは細胞壁残渣のリグニン含量の減少、細胞壁抽出成分量の増加、リグニン組成のうちのシリンガアルデヒドの減少が観察された。一方、P35S:EcHB1 形質転換ユーカリでは、セルロース含量の増加、並びに細胞壁が厚くなることが示された。また、P35S:EcHB1 形質転換ユーカリにおいて、水利用効率の上昇も確認されており、EcHB1 遺伝子の実用利用効果が高いことが示唆された。

3. 共同利用状況

平成 17 年度から 21 年度に渡って共同利用状況については以下の通りである。本全国共同利用設備は、平成 18 年度と 19 年度 FBAS として共同利用を開始した。その後平成 19 年度の京都大学概算要求にて DASH の設置が認められた。内容的に両者で重複する部分が多くなったため、平成 20 年度からは両者を融合して DASH/FBAS として全国共同利用の運用をしている。

DASH/FBAS の利用状況

期間	平成 17 年	平成 18 年 FBAS	平成 19 年 FBAS	平成 20 年 DASH/FBAS	平成 21 年 DASH/FBAS	平成 22 年 DASH/FBAS
採択課題数		8	8	15	22	17
共同利用者数(延べ人数) **		25	45	97	129	95 (学内 68 学外 27)

* : 共同利用者数は各課題の研究代表者と研究協力者の延べ人数

4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成 22 年度）（18 名）

平成 23 年 3 月現在の専門委員会を構成する委員名・所属先は以下の通りである。

矢崎一史（生存圏研究所・委員長）、西谷和彦（東北大学大学院）、村中俊哉（横浜市立大学）、青木俊夫（日本大学）、河合真吾（静岡大学）、重岡成（近畿大学）、太田大策（大阪府立大学大学院）、松井健二（山口大学大学院）、柴田大輔（財団法人かづさDNA研究所）、明石 良（宮崎大学）、高林純示（生態学研究センター）、大串孝之（生態学研究センター）、塩谷雅人（生存圏研究所）、渡邊隆司（生存圏研究所）、梅澤俊明（生存圏研究所）、杉山淳司（生存圏研究所）、山川 宏（生存圏研究所）、黒田宏之（生存圏研究所）

平成 22 年度の専門委員会は、共同利用申請課題の審査、採択に関して、メール会議にて開催した。主な開催日は以下の通りである。

平成 23 年 1 月 31 日 申請研究課題の審査依頼

平成 23 年 3 月 17 日 申請研究課題の採択結果について承認

5. 特記事項

この年度は夏の猛暑が顕著で、DASH 植物育成サブシステムの電気代の消費が大きかった。また利用形態にもよるところが大きいが、今年度は藻の発生が著しく排水槽のフィルターの目詰まりがひどく、夏場はトラブルシューティングに追われた。そのため、不織布を利用するなど運用面での工夫に加え、新たな改良工事を行い、前室（植物処理室）にある流路系にプレフィルターを設置した。さらに排水効率の改善のため D-室の排水溝の傾斜を上げる等の工事を行った。また、耐震改修の第 4 工区が完成したこの期に利用者の便宜を図るため、北棟 5 階に DASH 利用者のための植物培養室を設置することとした。

生存圏データベース全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

「生存圏データベース」は、生存圏研究所が蓄積してきたデータの集大成で、材鑑調査室が収集する木質標本データと生存圏に関するさまざまな電子データとがある。材鑑調査室では1944年以来、60年以上にわたって収集されてきた木材標本や光学プレパラートを収蔵・公開している。また、大気圏から宇宙圏、さらには森林圏や人間生活圏にかかるデータを電子化し、インターネット上で公開している。これら生存圏に関する多種多様な情報を統括し、全国・国際共同利用の中の一形態であるデータベース共同利用として管理・運営を行なっている。

1-1. 材鑑調査室

材鑑調査室は、1978年に国際木材標本室総覧に機関略号 KYow として正式登録されたことを契機に、1980年に設立された。現在も、材鑑やさく葉標本の収集をはじめとし、内外の大学、研究所、諸機関との材鑑交換を積極的に行なっている。現有材鑑数は18233個（178科、1131属、3617種）、永久プレパラート数は9619枚である。わが国では森林総合研究所に継ぐ2番目の規模である。生存圏研究所に特徴的なものとして、古材コレクション（400点）がある。これらは指定文化財建造物の修理工事において生じる取替え古材を文化財所有者や修理事務所の協力に基づき、系統的に収集したものである。実験試料として破壊試験を行なうことができる我が国唯一のコレクションであり、木の文化と科学に寄与する様々な研究テーマに供されている。また木材の組織構造観察にもとづく樹種同定を通して、昨今耐震改修の進む歴史的な建造物の部材毎の樹種や、木彫像を初めとする文化財の樹種のデータベース化を推進している。



収集している古材コレクションの一例(左)、生存圏バーチャルフィールド：世界の木材、歴史的木材、木製品の展示ならびに顕微鏡観察コーナ、情報端末をそなえる(右)。

2008年の改修により、管理室と見学スペースを分離して能率化すると同時に、生存圏データベース共同利用の拠点設備として生存圏バーチャルフィールドを開設した。現在は、

法隆寺五重塔心柱、祇園祭船鉢車輪をはじめとして、数多くの文化財級の部材や工芸品を展示し、年間 1000 名に達する見学者に随時公開している。さらに、2009 年には増加する歴史的建造物資料の保管スペースのために、小屋裏倉庫を設けた。現在、柱材や梁などの大型古材や、木材解剖学関連の文献・書籍などが収納されている。

1-2. 電子データベース

生存圏データベースの一環として、研究成果にもとづいて蓄積してきた電子情報にもとづく、以下のような種々のデータベース（現在のところ 8 種類）がある。

宇宙圏電磁環境データ：1992 年に打ち上げられ地球周辺の宇宙空間を観測し続けている GEOTAIL 衛星から得られた宇宙圏電磁環境に関するプラズマ波動スペクトル強度の時間変化データ。**レーダー大気観測データ**：過去 20 年にわたってアジア域最大の大気観測レーダーとして稼働してきた MU レーダーをはじめとする各種大気観測装置で得られた地表から超高层大気にかけての観測データ。**赤道大気観測データ**：インドネシアに設置されている赤道大気レーダーで取得された対流圏及び下部成層圏における大気観測データと電離圏におけるイレギュラリティ観測データを含む関連の観測データ。**グローバル大気観測データ**：全球気象データ（現在は、ヨーロッパ中期気象予報センターの再解析データと気象庁作成の格子点データ）を自己記述的でポータビリティの高いフォーマット（NetCDF）で公開。

木材多様性データベース：材鑑調査室が所蔵する木材標本ならびに光学プレパラートの情報を、また日本産木材データベースでは日本産広葉樹の木材組織の画像と解剖学的記述を公開。

植物遺伝子資源データ：植物の生産する有用物質（二次代謝産物）とその組織間転流や細胞内蓄積に関与すると考えられる膜輸送遺伝子に焦点を絞り、有用な遺伝子の EST 解析を行ない、その遺伝子の情報を集積。

木質構造データ：大規模木質構造物・木橋等の接合方法や伝統木造建築の構造特性などの観点から、国内の主たる木質構造について、接合部などの構造データ、建物名や建築年代、使用樹種などのデータを集積。

担子菌類遺伝子資源データ：第二次世界大戦以前より収集されてきた希少な標本試料(木材腐朽性担子菌類の乾燥子実体標本；写真も含まれる)の書誌情報や生体試料の遺伝子情報を収集。

電子データベースは、<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/>から公開している。

京都大学生園研究所 Research Institute for Sustainable Environment

生存圏データベース RISH Data Server

宇宙圏電磁環境データ

人工衛星によって得られた宇宙空間を観測して、宇宙圏電磁環境に関するデータです。中でも、1992年に打ち上げられた「GEOTAIL」衛星によって得られた宇宙空間を13年間にわたり観測・統計している。

レーダー大気観測データ

過去20年にわたりアジア域最大の大気観測レーダーとして稼働してきたMUレーダーをはじめ、京都大学農山林研究室の各種大気観測装置（中程度（北緯35度）の大気の地図から超高层大気、すなはち森林圏、大気圏から宇宙圏にかけての重要な観測をおこなっています。これらについて得たデータを公開しています。

赤道大気観測データ

赤道大気レーダーで取得された対流圏及び下部成層圏における大気観測データと電離圏におけるイレギュラリティ観測データを含む、特定領域研究「赤道大気上下結合(CPEA)」により取得された赤道大気間層の観測データを公開しています。

グローバル大気観測データ

全球気象データをもとに各機グローバル衛星観測データなどを用いて、GEOTAIL衛星による観測データ（NetCDF）で公開しています。現在、ECMWF（ヨーロッパ中期気象予報センター）の再解析データ（ERA-40）、NCEP（アメリカ気象予報センター）の再解析データ、気象業務支援データを用いて接続される気象部門内の遺伝子情報データベースを公開しています。

木材多様性データベース

木材標本、日本産広葉樹、IAWA用語、学名などデータベースから構成されています。主な用語は、日本産広葉樹（KYoto）で用いられています。また、光学プリカバード（オーバーライド）の用語を、また日本産木材の用語を、日本産広葉樹の木材組織の西側に複合表示で公開しています。

植物遺伝子資源データ

植物の生産する有用物質（二次代謝産物）とその組織間転流や細胞内蓄積に関与する遺伝子を網羅的に蓄積するデータベースです。また、植物遺伝子のEST 解析を行なっています。そのため、二次代謝産物が生産に特化した植物遺伝物を遺伝子資源として、有用植物の生産時に活用している遺伝子のEST 解析を行なって、その遺伝子情報を想定される遺伝子機能と共に公開しています。

木質構造データ

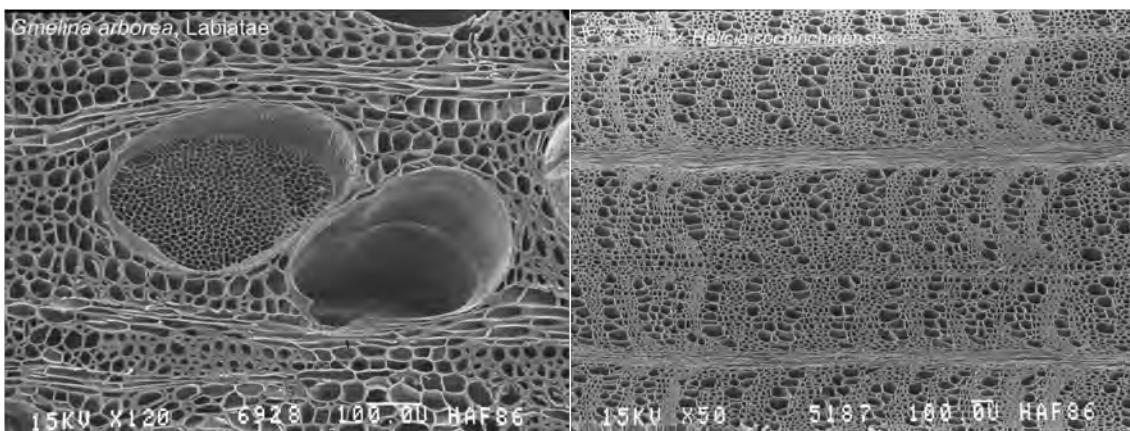
主な用語では、これまで集められた用語を用いて木質構造物や木構造の主な用語の開発を行なっています。また、最近では伝統木造建築の構造特性に対する研究も進められています。このデータベースでは、これらの研究に用いた全国に主たる木質構造について、接合部等の構造データ、建物名や接合部等の使用樹種などのデータをまとめています。

担子菌類遺伝子資源データ

第六世界農山林研究会で集められてきた寄生菌の生体試料や担子菌類の乾燥子実体は主にその栽培情報や接合子情報を検索することができます。また、生体試料の接合子情報を検索できます。

2. 共同利用研究の成果

- ① 全国大学間ネットワーク：北海道大学、東北大学、東京大学、森林総合研究所、京都大学、九州大学が参加して、国内に所蔵される材鑑のデータベース化とネットワーク化の推進を目的としている。本年度は科学研究費（研究成果データベース）の交付を受け、各機関のデータベース化を支援した結果、飛躍的な進展がみられた。北海道大学の大谷 SEM 写真コレクション、東北大学の材化石コレクション、九州大学の金平コレクション、ならびに京都大学の古材コレクションについては新しい電子データが公開間近である。
- ② 木材標本採集会：森林総合研究所が中心となり推進する国産樹種採集会を 4 年前から全国共同利用研究の一つとして行なっている。今年度は上半期に宮崎県、下半期に和歌山県を中心とした地域で標本採集を行った。参加者の専門は、木材学のみならず、植物学、歴史学、考古学、年輪学と広く、学際的な雰囲気の中、採集のノウハウ、植物分類学の基礎、植生と気候区分などを学ぶ貴重な機会となっている。
- ③ 中国産木材解剖学大成：約 8 千種ともいわれる中国産材から有用な 1000 種を扱った中国木材に関する集大成が完成間近である。京都大学と南京林業大学の研究者の協力のもと、日、英、中 3ヶ国語による解剖学の書籍の出版を予定している。
- ④ 樹種識別講習会：大学院生ならびに学部生を対象に、解剖学の基礎講義に加えて寺社等の実地サンプリング・同定作業の体験プログラム。本年度は萬福寺ならびに京都府教育委員会文化財保護課のご協力を得て、修理現場でのサンプリングと同定実習を行った。樹種同定を通して人と木とのかかわりを調べる文理融合的な研究を推進する若手研究員の育成を目指す。



北海道大学大谷 SEM コレクションの一例（佐野雄三先生提供）

3. 共同利用状況

平成 18 年度から 22 年度に渡る共同利用状況については、以下の通りである。

期間	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	平成 21 年度	平成 22 年度
材鑑調査室 採択課題数	18	15	18	18	16
材鑑調査室 共同利用者数*	73	88	76	60	67 (学内 32, 学外 35)
電子データベース スへのアクセス	1,996,398 件 10,185GB	1,789,152 件 9,170GB	5,328,254 件 50,065GB	6,340,066 件 197,654GB	13,890,937 件 240,608GB

* 共同利用者数は各課題の研究代表者と研究協力者の延べ人数

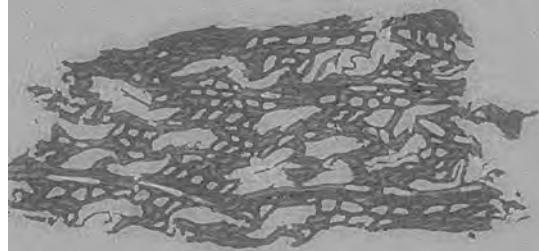
4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成 22 年度）

専門委員会は、所外委員 11 名[林祥介（神戸大）、鈴木三男（東北大）、中島英彰（NIES）、藤井智之（森林総研）、村山泰啓（NICT）、村田健史（NICT）、船田良（東京農工大）、中村卓司（極地研）、堀之内武（北海道大）、斎藤幸恵（東大・農）、高部圭司（京大・農）]と所内委員 6 名[川井秀一、塩谷雅人、矢崎一史、杉山淳司、小嶋浩嗣、橋口浩之]、および海外委員 1 名[金南勲（江原大、韓国）]からなっている。

平成 22 年度の委員会は平成 23 年 2 月 23 日午前 15 時～16:30 時に開催し、平成 22 年度の活動報告、平成 23 年度生存圏データベース（材鑑調査室）共同利用申請課題の選考などについて論議を行なった。

5. 特記事項

- ① 2010 年春季に総合博物館が京都大学の X 線に関する企画展示会に参加。材鑑調査室からは興福寺国宝世親菩薩立像の X 線トモグラフィーによる樹種同定結果を展示。
- ② バーチャルフィールド内の展示資料の整備に着手した。特に注目度の高い 9 項目について新しいパネルを作成した。また関連の内容について、見学者がモバイル端末から検索できるシステムを構築して公開予定である（来年度夏時期の予定）。



(左) 世親菩薩立像の CT 断層像。解剖学的特徴よりカツラと識別された。

(右) 新しい展示ポスターの一例（国寶優美さん作成）。

生存圏学際萌芽研究センター

1. 活動の概要

生存圏学際萌芽研究センターは、生存研の4つのミッション（環境計測・地球再生、太陽エネルギー変換・利用、宇宙環境・利用、循環型資源・材料開発）に関わる萌芽・学際的な研究を発掘・推進し、中核研究部および開放型研究推進部と密接に連携して、新たな研究領域の開拓を目指すことを目的として設置された。そのために、所内教員のほか、ミッション専攻研究員、学内研究担当教員、学外研究協力者と共に生存圏学際新領域の展開に努めてきた。生存圏研究所は、平成22年度から共同利用・共同研究拠点研究所として、従来から実施してきた施設・大型装置およびデータベースの共同利用に加えて、プロジェクト型の共同研究を推進する。このため、生存圏学際萌芽研究センターが共同研究拠点として機能するための組織変更を平成21年度に実施した。また、組織変更と合わせて、従来学内あるいは所内に限定していた研究助成の応募対象者を学外研究者まで拡大する変革を行った。さらに、生存圏研究所に特徴的なプロジェクト型共同研究を支援・推進するため、フラッグシップ共同研究を立ち上げた。

平成22年度は6名のミッション専攻研究員を公募によって採用し、萌芽ミッションの研究推進を図るべく、生存圏科学の新しい領域を切り開く研究に取り組んだ。

また、所内のスタッフだけではカバーできない領域を補うために、22年度は理学研究科、工学研究科、農学研究科を含む19部局、計61名に学内研究担当教員を委嘱した。

平成21年度からは、共同利用・共同研究拠点化に向けて、従来ミッション代表者が所内研究者に配分した研究費を、学外研究者を含む公募型研究「生存圏ミッション研究」に変更し、平成22年度は、20件を採択・実施した。また、従来学内に限定した「萌芽ミッションプロジェクト」を学外まで拡大し、40歳以下の若手研究者を対象とする公募プロジェクト「生存圏科学萌芽研究」に改革した。平成22年度は16件を採択・実施した。さらに、平成21年度に生存研に特徴的なプロジェクト型共同研究を支援するため、「生存圏フラッグシップ共同研究」を立ち上げ、公募により3件を採択した。従来、中核研究部を中心とした一部の共同研究プロジェクトは、所内研究費の配分が無いなどの理由により外部から認識されにくいう場合があったが、研究所を代表するプロジェクト型共同研究としての地位を賦与することにより、共同研究拠点活動の一環としての可視化を図るものである。現在進めている「生存圏フラッグシップ共同研究」は、以下の3件である。

- 1) 热帯産業林の持続的生産利用に関する多角総合的共同研究
- 2) バイオナノマテリアル共同研究
- 3) バイオマス・物質変換のためのマイクロ波高度利用共同研究

さらに、バイオマス由来物質、大気質および電磁場の生体影響などに関する学際萌芽的課題と、健康な木質居住環境の構築に焦点を当て、人の健康と安心・安全に資する独創的な研究を展開する“生存圏科学における新領域開拓”プロジェクトを立ち上げ、ミッション専攻研究員、国内外の共同研究者とともに研究を開始した。

また、共同研究集会として生存圏シンポジウムや定例オープンセミナーを開催し、生存圏が包摂する4つの相互理解と協力を促し、これに基づく生存圏にかかわる学際的な萌芽・融合研究について新たなミッション研究を創生・推進することに努めている。今年度は、28件の生存圏シンポジウムを主催・共催し参加者の総数は1379名を数えている。オープンセミナーについては、所員やミッション専攻研究員だけでなく所外の様々な領域の研究者を囲み学生達とも一緒になって自由に意見交換を行い、より広い生存圏科学の展開に向けて相互の理解と研鑽を深めるとともに、新しい研究ミッションの開拓に取り組んだ。

センター運営会議およびセンター会議を開催し、センターやミッション活動の円滑な運営と推進を図るための協議を定例的に行った。

1.1 センター運営会議委員

林 知行（独立行政法人 森林総合研究所）
荻野瀧樹（名古屋大学 太陽地球環境研究所）
廣岡俊彦（九州大学 大学院理学研究院）
小原隆博（宇宙航空研究開発機構 研究開発本部）
窟寺 茂（建築装飾技術史研究所）
青柳秀紀（筑波大学 大学院生命環境科学研究科）
翼 大輔（九州大学 大学院農学研究院）
センター長（矢野浩之）、副所長（渡辺隆司）、
開放型研究推進部長（塩谷雅人）、ミッション推進委員会委員長（塩谷雅人）、
ミッション代表：矢崎一史、篠原真毅、山川 宏、小松幸平

1.2 センター構成員

- センター長（矢野浩之（兼任））
- 所内教員（学際萌芽研究分野：篠原真毅・吉村 剛・橋口浩之・本田与一・畠 俊充
国際共同研究分野：山川 宏、全国共同研究分野：今井友也（いずれも兼任））
- ミッション専攻研究員（Md. Mahabubur Rahman、疋島 充、肥塚崇男、王 悅、中谷 誠、西村裕志）
- 学内研究担当教員（兼任）
- 学外研究協力者

1.3 ミッション専攻研究員の公募

生存圏研究所では、ミッション専攻研究員を配置している。ミッション専攻研究員とは、研究所の学際萌芽研究センターあるいは開放型研究推進部に所属し、生存圏科学の創成を目指した4つのミッション（環境計測・地球再生、太陽エネルギー変換・利用、宇宙環境・利用、循環型資源・材料開発）に係わる萌芽・融合的な研究プロジェクトに専念する若手研究者で、公募によって選任している。

2. 本年度の実績

2.1 ミッション専攻研究員の研究概要

氏名、（共同研究者）、プロジェクト題目、研究内容

疋島 充（大村善治）： 地球磁気圏放射線帯における高エネルギー粒子ダイナミクスの解明

半世紀近く前から、地上から地球磁気圏へ向けた人工波動放射の実験結果として、トリガード放射と呼ばれる波動が多く観測されている。だが、宇宙空間においてどのような過程を経てトリガード放射が生成されるかは詳しく分かっていない。そこで本研究では、大規模プラズマシミュレーションを用いることによりトリガード放射の生成に取り組んだ。シミュレーションモデルは磁気赤道面付近において、磁力線に沿った1次元のモデルを想定した。人工波動を取り入れるために單一周波数の波動を磁気赤道面から注入し、磁力線に沿って高緯度領域へ伝搬させた。注入波動は共鳴を介して、粒子の非線形的なトラップを生じさせ共鳴電流を生み出す。この共鳴電流が新たに波動を励起する。シミュレーション研究により、磁気圏で生じるトリガード波動の生成過程を詳細な時間変化で確認することが可能となった。また、トリガード放射は非線形トラップにより、粒子の加速および減速を生じさせることを確認した。この結果は波動を介した磁気圏での粒子フラックスの増加・減少に結びつく重要な証拠となる。

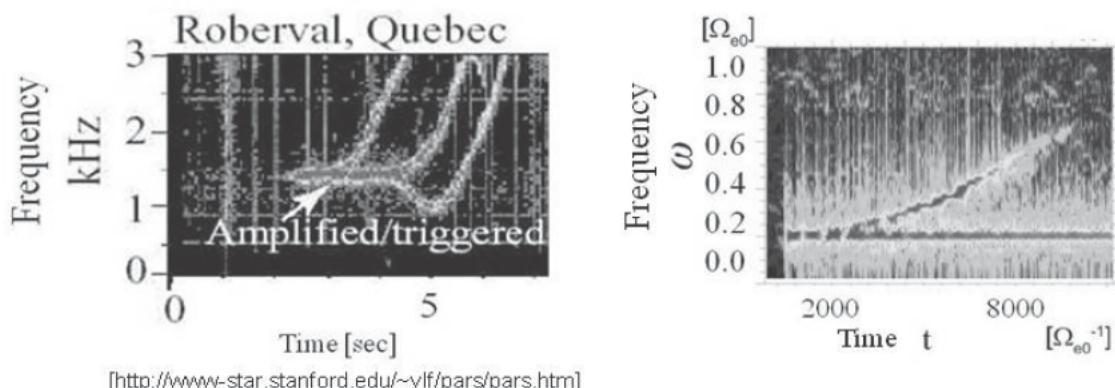


図1：(左) 人工波動の放射実験によって観測されたトリガード放射、および
(右) シミュレーションによって再現されたトリガード放射。

西村裕志（渡辺隆司）：バイオマス系生理活性有機分子に関する研究

地球温暖化などによる環境変動、グローバル化による人・動物・物の移動によりウイルスをはじめとした感染症のリスクが高まっている。本研究では、未利用バイオマスから薬効成分・生理活性物質を生産し、人の健康や安全な生活に貢献するという新しい研究領域を開拓することを目指し、多様な構造の天然物の分析と抗ウイルス活性評価を行うことを目的とした。木酢液や竹酢液に代表される木質バイオマスの熱分解物は、植物由来の天然物とその分解過程で生じる多様な化合物群を含み、薬効成分・生理活性物質として、人の健康増進や安全な生活の維持に寄与する可能性を秘めている。本研究では、製法が明確で認証評価を受けた代表的な広葉樹、針葉樹由来の木酢液および竹酢液について、GC/MS等による成分分析および化学的性質に基づいた分画を行い、これまでにほとんど知見がない木酢液、竹酢液の抗ウイルス活性および消毒効果について評価することを目的とした。特に昨年来、日本、韓国をはじめアジア各国で猛威をふるってきた口蹄疫ウイルスの消毒薬を未利用バイオマスから生産することを視野に入れて、同科のピコルナ科ウイルスに対する抗ウイルス活性評価を、ヒトやマウスの培養細胞およびマウスを用いた動物実験により検討した。本研究の概要と研究体制を図1に示す。

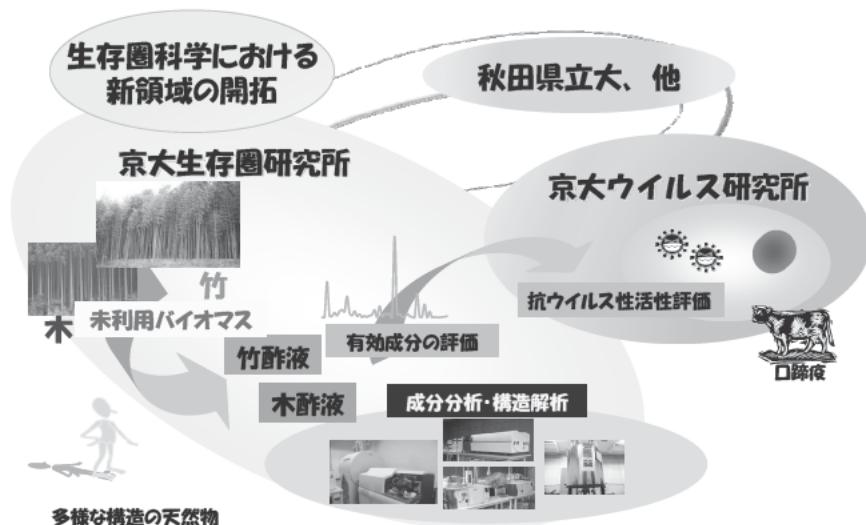
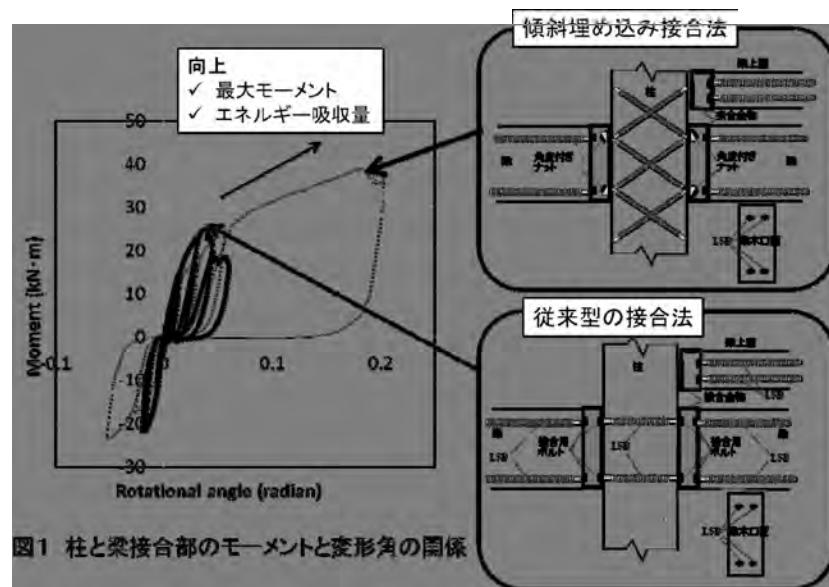


図1：本研究の概要と研究体制(京大生存圏研究所、ウイルス研究所、秋田県立大木材高度加工研究所などの共同研究)。構造変換された未利用バイオマスから生理活性物質など有効成分を得ることで人の健康・安全への貢献を目指す。

培養細胞を用いて細胞毒性、坑ウイルス活性評価を行った結果、蒸留木竹酢液処理細胞の生存率に若干の効果が認められた。一方、木竹酢液中の酢酸、ホルムアルデヒド、フェノール類などの成分分析(GC/MS)を行った結果、酢酸、ホルムアルデヒド含有量と細胞毒性、坑ウイルス性に直接の相関は見られなかった。このことから、木竹酢液中の酢酸、ホルムアルデヒド以外の成分が寄与している可能性が考えられる。また赤外線サーモグラフィーを用いたマウスによる動物試験、分画木竹酢液での抗ウイルス活性の検討を行った。

中谷 誠（小松幸平）：ラグスクリューボルトの傾斜埋め込み接合の開発

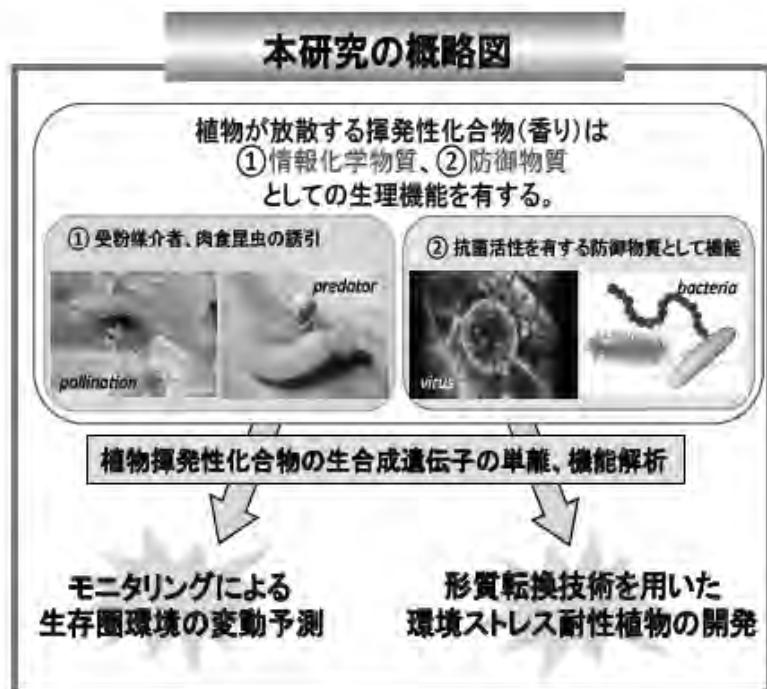
既往の研究成果より、大型のネジ型接合具であるラグスクリューボルト（以下、LSB）による木質ラーメン構造が提案されている。現行の接合方法は、部材に対して直交方向もしくは平行方向に LSB を埋め込む。これまでの研究により、柱と梁の接合部において部材の寸法や接合部の構成により LSB によって囲まれた柱材でせん断破壊を引き起こすこと、そして LSB の引き抜き破壊が先行して生じる場合に脆性的な破壊となることが報告されている。そこで本研究では、LSB が接合部でクロス状になるように柱材に傾斜を付けて埋め込むことで、柱材のせん断補強効果と LSB の引き抜け変形能力の向上を期待する新たな接合形式『ラグスクリューボルトの傾斜埋め込み接合』を提案した。柱に梁が片方だけ接合された L 型接合部、そして両側に梁が接合された十字型接合部について提案する接合方法の性能評価実験を行った。その結果、十字型試験体では従来型が柱材のせん断破壊を生じたのに対し、提案型では LSB の柱へのめり込みと斜め引き抜き破壊による補強効果が認められた。また回転剛性は 50% に低下したが、最大モーメントが 55%、エネルギー吸収量が 7.6 倍向上した。L 型試験体でも従来型に比べ変形性能が向上した。



肥塚崇男（矢崎一史）：植物揮発性化合物を利用した環境変動予測と環境ストレス耐性植物の開発

植物が作り出す揮発性化合物は、周りの生態系に対する情報化学物質、直接防御物質としての機能が知られている。本研究では、植物が持つ有用揮発性成分の合成遺伝子を単離し、それら遺伝子を分子ツールとして利用した環境ストレス耐性植物の作出を目指している。GC-MS 分析により、日本特有の常緑樹であるシキミ (*Illicium anisatum*、シキミ科) が生産する多様なフェニルプロペソ類の揮発性成分組成を明らかにした。そこで、成分分析に用いたシキミからフェニルプロペソの 1 つであるオイゲノールのプレニル

化、メチレンジオキシ環形成に関与する候補酵素遺伝子を取得した。現在、異種発現系による組換え酵素の解析ならびに形質転換植物の作出を行っている。



Md. Mahabubur Rahman (Toshiaki Umezawa) : Improvement of wood characteristics of tropical *Acacia* by molecular breeding

As the first step towards the improvement of wood characteristics of *Acacia mangium* and *Acacia crassicarpa* by molecular breeding, we have established the efficient micropropagation system and the genetic transformation and regeneration systems. Thus, we have established: 1) mass plantlets propagation technique for both *Acacia* species from nodal segments, 2) micropropagation of plantlets regenerated from phyllode segments of *A. crassicarpa* by somatic embryogenesis and 3) *Agrobacterium*-mediated genetic transformation system of *Acacia crassicarpa* with the integration of β -glucuronidase (GUS) reporter gene. The established procedures in the present investigation can be used as tools in the genetic improvement of these *Acacia* species.

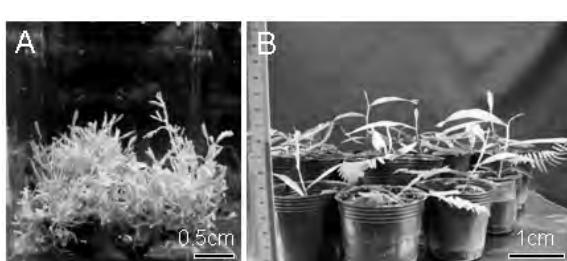


Fig. 1. Micropropagation of *A. mangium*. A. Multiple proliferated shoots, B. Acclimatized plantlets.

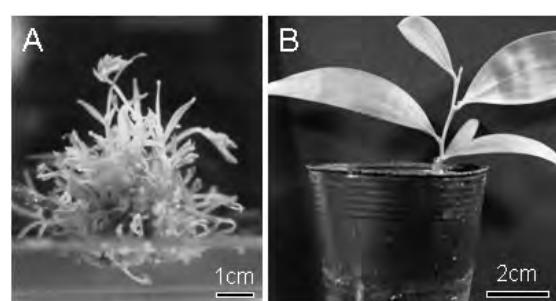
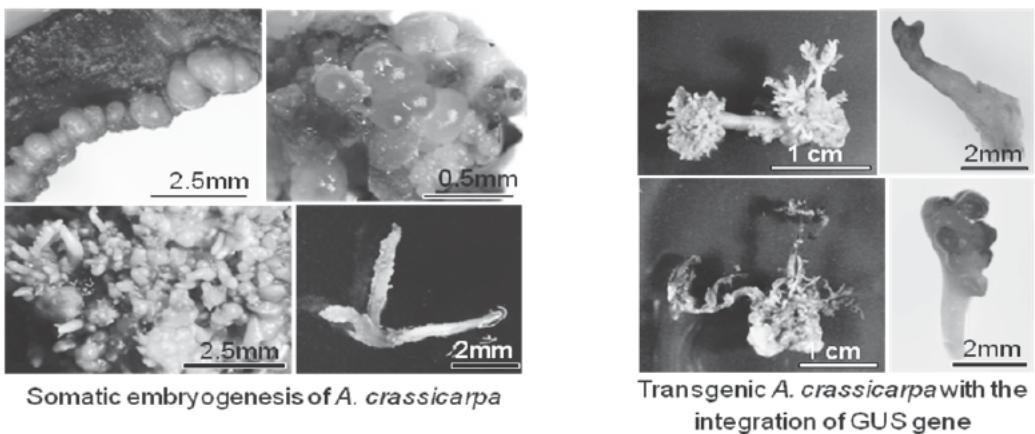


Fig. 2. Micropropagation of *A. crassicarpa*. A. Multiple proliferated shoots, B. Acclimatized plantlets.



王 悅（杉山淳司）：木材の液体浸透機構の解明による中国産低質材の改質技術の確立

本年度の研究では、我々は以下の4点を着目し、実験を行った。1) 有縁壁孔の力学的性質の相違；2) 閉そく壁孔壁の破壊に対する横圧縮処理の有効性；3) 抽出処理法による浸透性の相違；4) 樹種特性。具体的には、針葉樹4樹種を用いて、横圧縮処理や抽出処理を施し、閉そく壁孔のトールス、マルゴにおける破壊、変形、堆積物の除去などの違いを調べ、壁孔壁の性質の樹種特性を明らかにするとともに、処理による浸透促進効果にどのように影響するかを論じた。その結果、閉そく壁孔の微細構造と力学的性質の相関性が認められ、横圧縮の浸透促進効果には樹種特性が存在することを明らかにした。また、アルベン抽出処理は、浸透性に負の影響を及ぼす可能性については、さらに研究を進める必要がある。

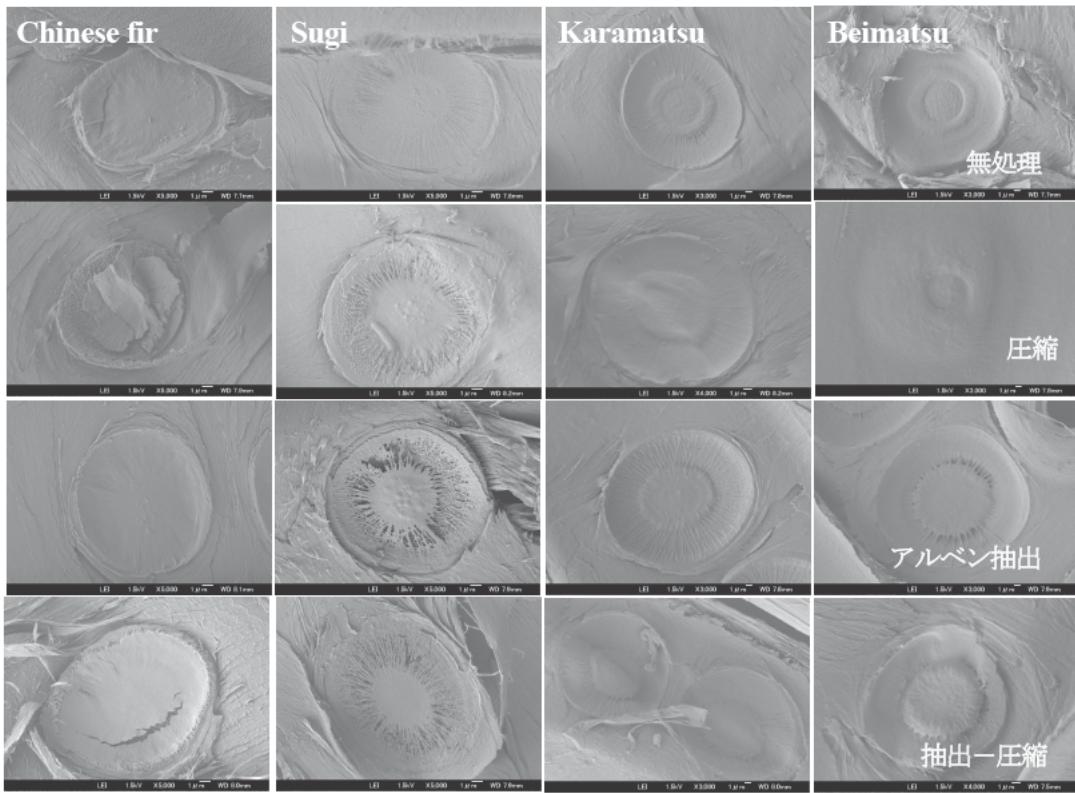


図1：各処理における壁孔壁の形態

2.2 平成 22 年度 生存圏学際萌芽研究センター学内研究担当教員

部局名	職名	氏名	研究課題
文学研究科・文学部	准教授	伊勢田 哲治	環境科学における科学知とローカル知の協同
理学研究科・理学部	教授	余田 成男	赤道域大気変動と物質輸送に関する数値実験的研究
	教授	柴田 一成	太陽活動現象
	教授	里村 雄彦	赤道域降水変動に関する観測的及び数値実験的研究
	教授	鍵山 恒臣	火山からの火山ガス放出の遠隔測定の研究
	教授	一本 潔	太陽活動と宇宙天気
	教授	嶺重 慎	宇宙プラズマ現象
	教授	長田 哲也	宇宙空間ダストの赤外線観測
工学研究科・工学部	教授	永田 雅人	回転系対流パターンの非線形安定性解析による大気圏流れの解明
	教授	引原 隆士	マイクロ波エネルギー供給に関連した SiC パワーデバイスの応用に関する研究
農学研究科・農学部	教授	太田 誠一	熱帯林の土壤生態
	教授	東 順一	未利用生物資源の有効利用による資源循環的社会の構築
	教授	谷 誠	森林利用の水資源に及ぼす影響
	教授	井上 國世	リグナン類の酵素機能調節に関する研究
	教授	木村 恒久	セルロースの機能化に関する研究
	准教授	藤井 義久	木材の生物劣化の非破壊診断技術開発
	准教授	山内 龍男	木材パルプ繊維のリサイクル使用に関する研究
	准教授	高部 圭司	木質バイオマスの基本構造と多面的利用に関する研究
	講師	坂本 正弘	タケ資源の有効利用
	助教	小杉 緑子	森林・大気間における熱・水・CO ₂ 交換過程
人間・環境学研究科・総合人間学部	教授	内本 喜晴	リチウムイオン二次電池および燃料電池材料の開発
エネルギー科学研究科	教授	坂 志朗	ヤシ科植物の総合的エネルギー利用の研究
	准教授	河本 晴雄	ヤシ科植物の総合的エネルギー利用の研究
	助教	陳 友晴	鉱山開発による周辺生存圏の変化に関する研究
アジア・アフリカ地域研究研究科	教授	荒木 茂	熱帯強風化土壤における作物栽培の地域間比較
	教授	小杉 泰	イスラーム世界における生存基盤論
	教授	池野 句	地域経済圏の形成に関する、アジア・アフリカの比較研究
情報学研究科	教授	佐藤 亨	大気レーダーイメージング技術の開発
	教授	酒井 徹朗	循環型社会における流域情報システム
	教授	守屋 和幸	繁殖雌牛を利用した小規模放牧管理技術
	准教授	荒井 修亮	バイオロギングによる水圏生物の生態解明
	准教授	小山 里奈	陸上生態系の物質循環における植物の役割の評価
	助教	三田村 啓理	バイオロギングによる水圏生物の生態解明
	特定助教	奥山 隼一	バイオロギングによる水圏生物の生態解明

地球環境学堂	准教授	市岡 孝朗	森林生態系における生物間相互作用に関する研究
	准教授	須崎 純一	マイクロ波リモートセンシングによる農地の水資源モニタリング
化学研究所	教 授	中村 正治	化学資源活用型の有機合成化学の開拓
エネルギー理工学研究所	教 授	長崎 百伸	先進核融合エネルギー生成
	教 授	片平 正人	NMR 法を用いた木質バイオマスの活用の研究
	准教授	佐川 尚	光合成型エネルギー変換
防災研究所	教 授	寶 馨	生存圏諸過程における防災技術政策に関する研究
	教 授	千木良 雅弘	地圏・水圏インターフェースでの岩石風化現象の解明
	教 授	中北 英一	大気レーダーの水文学への応用に関する研究
	教 授	石川 裕彦	境界層レーダーによる境界層観測とその気象防災への応用
	教 授	釜井 俊孝	都市圏における地盤災害
	准教授	林 泰一	「伝染病に対する気象、気候要素インパクト」「スマトラアカシア林上の乱流輸送過程の研究」
	准教授	福岡 浩	森林圏における土砂災害・土砂環境の研究
	助 教	王 功輝	森林圏における土砂災害・土砂環境の研究
原子炉実験所	准教授	茶竹 俊行	中性子・X 線による蛋白質・核酸の立体構造の研究
東南アジア研究所	教 授	松林 公藏	医学からみた人間の生存圏
	教 授	水野 廣祐	東南アジアにおける持続的経済社会とエントロピー
	教 授	藤田 幸一	熱帯アジアの水資源利用・管理に関する研究
	教 授	河野 泰之	東南アジアの生活・生業空間の動態
	准教授	甲山 治	泥炭湿地における大規模植林が周辺環境に与える影響評価
学術情報メディアセンター	教 授	中島 浩	生存圏に関する計算実験への計算機科学的アプローチ
	准教授	岩下 武史	生存圏に関する計算実験への計算機科学的アプローチ
生態学研究センター	准教授	陀安 一郎	集水域の同位体生態学
地域研究統合情報センター	准教授	柳澤 雅之	生態環境資源の地域住民による利用と管理に関する研究
	助 教	星川 圭介	人間の自然環境への適応形態と生存基盤の変化に関する研究
フィールド科学教育研究センター	教 授	柴田 昌三	竹資源の有効活用の促進
	助 教	坂野上 なお	木造住宅生産システムと木質材料の供給に関する研究
アフリカ地域研究資料センター	教 授	重田 真義	アフリカにおける在来有用植物資源の持続的利用

2.3 平成 22 年度 生存圏科学萌芽研究プロジェクト一覧

	氏 名 (五十音順)	研究プロジェクト題目	共同研究者	関連部局
1	阿部 賢太郎 (京都大学次世代開拓研究 ユニット・特定助教)	古くて新しい紙の超高強度化に関する研究	矢野 浩之 梅村 研二	京都大学次世代開拓研究ユニット
2	有村 源一郎 (京都大学理学研究科・ 准教授)	揮発性物質が媒介する植物間情報ネットワークのメカニズム	矢崎 一史 室井 敦	京都大学理学研究科

3	浅井 歩 (京都大学宇宙総合学研究ユニット・特定助教)	深宇宙探査機への宇宙天気アラートの研究	大村 善治 磯部 洋明 塙田 大幸 石井 貴子 羽田 裕子	京都大学宇宙総合学研究ユニット 理化学研究所 京都大学理学研究科
4	伊福 伸介 (鳥取大学工学研究科・講師)	海洋生物由来の微細纖維「マリンナノファイバー」を配合した機能性纖維材料の開発	矢野 浩之 南 三郎 アントニオ・ノリオ・ナカガイト 梶田 秀樹	鳥取大学農学研究科 鳥取大学工学研究科 オーミケンシ(株)
5	上野 悟 (京都大学理学研究科・助教)	太陽物理学との連携による超高層大気変動現象の研究	林 寛生 磯部 洋明 浅井 歩 新堀 淳樹	京都大学宇宙総合学研究ユニット
6	粳間 由幸 (国立米子工業高等専門学校・助教)	マイクロ波エネルギー選択捕集能をもつイオン液体の合成と木質バイオリファイナリーへの展開	渡辺 隆司 吉岡 康一	国立米子工業高等専門学校
7	肥塚 崇男 (京都大学生存圏研究所・ミッション専攻研究員)	木質バイオマス利用の新展開－形質転換による木質バイオマスの効率的な改質と有用物質生産－	鈴木 史朗	
8	成行 泰裕 (高知工業高等専門学校・助教)	宇宙空間における人体・衛星保護のための磁気シールド開発に関する基礎研究	小嶋 浩嗣 臼井 英之 永野 優一	神戸大学システム情報学研究科 高知工業高等専門学校電気工学科
9	西岡 未知 (名古屋大学太陽地球環境研究所・研究機関研究員)	プラズマバブルの出現特性の理解に向けた全球的な地上 GPS 受信機データベースの構築	橋口 浩之 大塚 雄一 斎藤 昭則	名古屋大学太陽地球環境研究所 京都大学理学研究科
10	西宮 耕栄 (北海道立総合研究機構森林研究本部・研究主任)	木質バイオマス燃焼灰からの新規BDF触媒の開発とその評価	畠 俊充	北海道立総合研究機構 森林研究本部
11	能木 雅也 (大阪大学産業科学研究所・助教)	銀ナノインクのバイオナノファイバーアルゴンへの印刷特性評価	矢野 浩之 伊福 伸介 阿部賢太郎	鳥取大学工学研究科 京都大学次世代開拓研究ユニット
12	三谷 友彦 (京都大学生存圏研究所・助教)	宇宙太陽発電所の超大規模フェーズドアレーアンテナにおける位相最適化問題の研究	田中 俊二 姥原 義雄	京都大学工学研究科

13	山口 弘誠 (京都大学生存基盤科学研究ユニット・特定研究員)	水蒸気量の鉛直分布のデータ同化による降水予測精度へのインパクト評価	古本 淳一 中北 英一	京都大学生存基盤科学研究ユニット 京都大学防災研究所
14	山根 悠介 (常葉学園大学教育学部・講師)	東南アジア・南アジア域における大気環境診断パラメータを用いた大気環境変動の把握	塙谷 雅人 林 泰一 木口 雅司	京都大学防災研究所 東京大学生産技術研究所
15	山本 真之 (京都大学生存圏研究所・助教)	大気レーダー・気象レーダーによる降水粒子の粒径分布リトリーバル手法の開発	妻鹿 友昭 足立アホロ 下舞 豊志 西 憲敬	気象研究所 島根大学総合理工学部 京都大学理学研究科
16	渡辺 文太 (京都大学化学研究所・助教)	高機能木質材料生産への応用を目指したケイ皮酸ノモノリグノール経路阻害剤の開発	梅澤 俊明 平竹 潤	京都大学化学研究所

生存圏科学萌芽研究 成果の概要

(1) 古くて新しい紙の超高強度化に関する研究

1. 研究組織

代表者氏名：阿部賢太郎（京都大学次世代開拓研究ユニット）

共同研究者：矢野浩之（京都大学生存圏研究所）、梅村研二（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

本研究は植物繊維から単離したセルロースナノファイバーから、新しい紙の形態であるセルロースナノペーパーの開発を行った。ナノファイバーから作製する新しい紙の製造方法を検討するとともに、これまでの紙の改質に関する蓄積技術を活用することにより従来の紙の力学性能をはるかに上回る紙を製造した。

精製した針葉樹木粉をグラインダーで1回処理することにより幅15nm、長さ2-3μm以上のセルロースナノファイバーが得られる。ナノファイバー水懸濁液を抄紙後、120°Cの熱圧乾燥により基本となるセルロースナノペーパーを作製した。本シートの密度は1.5-1.6g/cm³とセルロースの密度とほぼ同等であることから内部の空隙率はほぼ零に等しく、極めて高い充填構造を有することが示唆される。本シートを引張試験に供したところ、従来の紙の力学性能を大きく上回り、ヤング率約15GPa程度および引張強度約250MPaという高い性能を示した。

また、シートの力学性能は試料となる木粉の粒径により変化することが明らかとなった。小粒径から作製するナノファイバーのほうが解纖度が高く、シートのヤング率および強度が向上したと考えられる。さらに、ナノペーパー作製後に様々な処理を施すことによって、紙の力学性能を改質した。例えば、アルカリ処理による引張伸びの増大やクエン酸水溶液に浸漬した後高温で熱圧することによりヤング率確認された。

セルロースナノペーパーは軽量ながら高強度性を示し、非常に高比強度な材料であると言える。その値はマグネシウム合金に匹敵することから、セルロースナノペーパーは今後従来の紙の用途を超える幅広い用途展開が期待される。

(2) 挥発性物質が媒介する植物間情報ネットワークのメカニズム

1. 研究組織

代表者氏名：有村源一郎（京都大学理学研究科）

共同研究者：矢崎一史（京都大学生存圏研究所）、室井 敦（京都大学理学研究科）

2. 研究概要

植物由来の揮発性テルペノイドは、植物が害虫からの食害を受けた際に大気環境に放出し、周囲の植物は害虫に対する防御応答を向上させることができる。本研究では植物間の情報伝達の役割を担う揮発性テルペノイドの生合成遺伝子を恒常的に過剰発現させた組換えタバコを用いて、組換え植物が放出するテルペノイドが周囲の植物に与える影響について室内の風洞装置および自然環境に近い遺伝子組換え用ガラス温室内で解析した。

植物間の情報伝達の役割を担う揮発性テルペノイドの生合成遺伝子（リママメ由来のオシメン合成酵素）を恒常的に過剰発現させた組換えタバコを基軸にした植物間相互作用実験を実施した。風洞装置内で、組換え植物の風下にリママメおよびトウモロコシを設置し、害虫防除に関する直接防御（害虫に対する直接抵抗性）と間接防御（害虫の天敵種の誘引）をタバコ野生株の風下に設置した同栽培種と比べた結果、いずれの場合も組換え植物の風下の栽培種の害虫に対する抵抗性が高まることがわかった。同様に、生存圏研究所内の遺伝子組換え植物用ガラス温室内で、組換えタバコの周辺にリママメを設置し、1週間生育させた結果、組換えタバコの近傍（30 cm）のリママメは、ハダニの捕食性天敵であるチリカブリダニの誘引効果が高まることが見出された。これらの結果から、揮発性テルペノイドを恒常的に放出する組換え植物の周囲に栽培種を設置することで栽培種を有機的に害虫から防除できる可能性が示唆された。

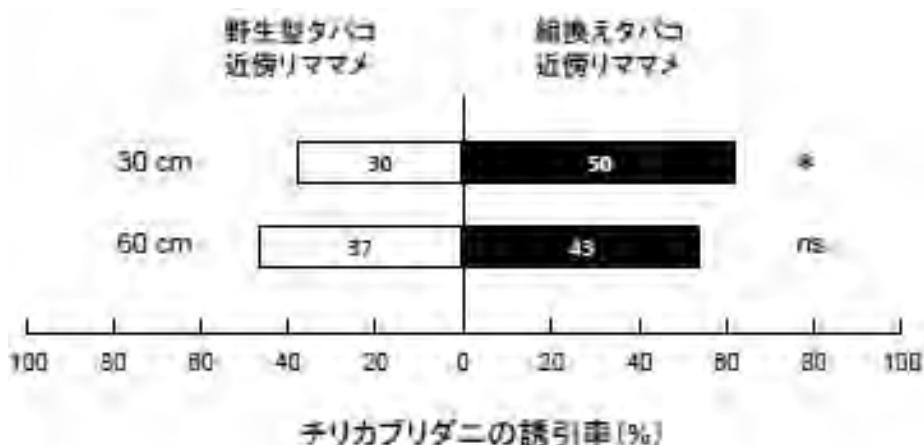


図1：チリカブリダニの誘引実験

ガラス温室内で組換えタバコおよび野生型タバコの近傍でリママメを1週間生育させた（距離：30 cm および 60 cm）。近傍リママメにハダニ処理を施し、ハダニの捕食性天敵であるチリカブリダニの誘引効果をY字管アッセイ装置を用いて解析した。*:有意差あり； ns: 有意差なし。

(3) 深宇宙探査機への宇宙天気アラートの研究

1. 研究組織

代表者氏名：浅井 歩（京都大学宇宙総合学研究ユニット）

共同研究者：大村善治（京都大学生存圏研究所）、磯部洋明（京都大学宇宙総合学研究ユニット）、

塩田大幸（理化学研究所）、石井貴子（京都大学理学研究科）、

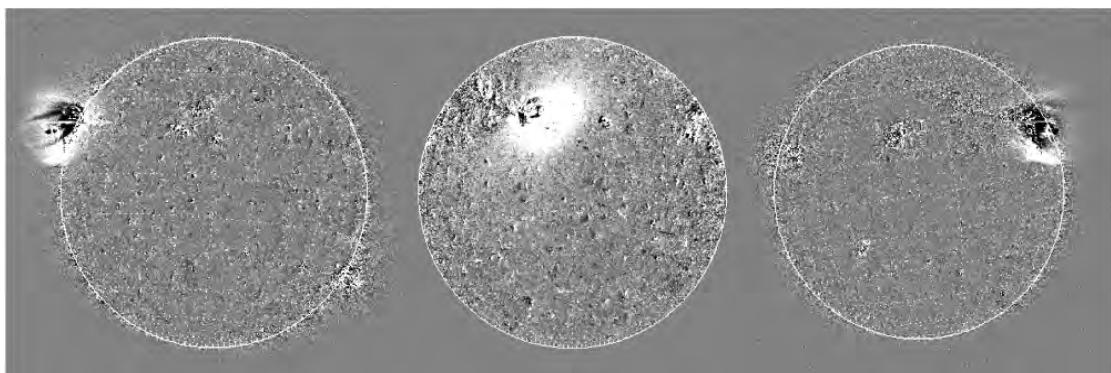
羽田裕子（京都大学理学研究科）

2. 研究概要

太陽フレアの発生機構及びその人類生存圏への影響を理解・予測するための「宇宙天気予報」研究は世界中で活発に行われている。ただしここれまでの宇宙天気研究は、地球周辺環境に対して主に行われ、金星探査機「あかつき」など地球周辺にない「深宇宙探査機」に対してはほとんど行われていない。また、そのような探査機への宇宙天気予報システムの構築に必要となる情報の収集も不十分な状況である。私たちは、太陽を地球公転軌道上の2方向から観測しているSTEREO衛星の特徴を生かし、深宇宙探査機が受ける電磁放射や加速粒子の定量的な評価、ひいては宇宙天気アラートの実現を目指している。本研究ではその基礎研究として、太陽活動に伴う様々な擾乱成分の中で衛星・探査機に深刻な影響を与えるものを、極端紫外線(EUV)太陽全面画像という限定されたデータのみからどこまで予測可能か検証した。

私たちは、過去のフレアに対してSOHO衛星のEITによるEUV放射量とGOES衛星のX線強度をフレアについて比較し、両者の間に正相関が見られることを確認した。このことから、EUV放射からでも、ある程度フレアにおけるX線強度を推定することが可能であることを確かめた。次に、活動領域全体のEUV放射量の変動についても調べ、フレアを活発に引き起こす活動領域の成長を推定できる可能性を示した。

今後は、引き続きSOHO衛星や地球近傍の観測データを解析することで、フレアやSEPの発生予報に有効なパラメタを太陽物理学的見地からより一層明らかにする。また、今ある深宇宙探査機に対し、地球から見えない側で発生する太陽活動の影響をモニターすることで、太陽起因による探査機の不具合を突き止め、どの程度の擾乱であったかの推定も試みる。



図：2010年2月7日に発生したフレアを、地球側(中央: SOHO衛星で撮影)と
前面(左: STEREO-A機)/後面(STEREO-B機)のそれぞれから撮影したもの。

(4) 海洋生物由来の微細纖維「マリンナノファイバー」を配合した機能性纖維材料の開発

1. 研究組織

代表者氏名：伊福伸介（鳥取大学工学研究科）

共同研究者：矢野浩之（京都大学生存圏研究所）、南三郎（鳥取大学農学研究科）、
アントニオ・ノリオ・ナカガイト（鳥取大学工学研究科）、梶田秀樹（オーミケンシ（株））

2. 研究概要

本研究ではカニ殻より単離したキチンナノファイバーを配合した天然纖維を作成した。また、天然纖維への配合を容易にするために、キチンナノファイバーの表面改質を行い、一方でキチンナノファイバーの生体機能も見出した。キチンナノファイバーの潜在性を十分に引き出した、物性と機能に優れる高付加価値な纖維材料を開発し、世に送り出していく。

3. 研究の成果

・キチンナノファイバーを配合したレーヨンの作成

溶剤に溶解した天然纖維にキチンナノファイバーを混合した後、ノズルより再生浴の水溶液に噴出して紡糸し、キチンナノファイバー配合天然纖維の製造に成功した（図1）。



図1. マリンナノファイバーを配合天然繊維. (左) ワタ、(中) 不織布 (ニードルパンチ)、(右) 不織布 (スパンレース).

- ・キチンナノファイバーの化学処理

キチンナノファイバーは酸性の水溶液に対して分散性が高いが、天然繊維の溶剤はアルカリ性である。よってビスコースに対して均質に分散しにくいことが分かった。この問題の解決のため、ポリアクリル酸をキチンナノファイバーの表面にグラフトしたところ、アルカリ水溶液中で安定に分散することが見出された。

- ・生体機能評価

キチンナノファイバーの生体への効果・効用を評価した。ヘアレスマウスの皮膚にキチン、キトサンナノファイバーを塗布した後、皮膚の切片を採取して皮下の組織の経時変化を顕微鏡により観察したところ、真皮の厚みおよび皮下のコラーゲンの密度が増大することが見出された。

(5) 太陽物理学との連携による超高層大気変動現象の研究

1. 研究組織

代表者氏名： 上野 悟（京都大学理学研究科）

共同研究者： 林 寛生（京都大学生存圏研究所）、磯部洋明（京都大学宇宙総合学研究ユニット）、浅井 歩（京都大学宇宙総合学研究ユニット）、新堀淳樹（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

超高層大気における諸現象は、下層大気からのエネルギー・運動量の流入、電離圏・プラズマ圏での電磁エネルギー輸送・化学反応、磁気圏-電離圏結合等によって引き起こされているが、この研究では、それの中でも太陽からの紫外線照射による電離層の反応・エネルギー輸送と言う点に着目し、太陽紫外線放射量の変動に対する地磁気日変動 Sq の振幅の変動現象に焦点を当てた研究を行なった。この Sq 振幅変動を今回超高層大気変動現象の典型例として選択した理由は、最近、 Sq 振幅の時系列データから太陽電波放射量 $F10.7$ により推定される太陽活動（紫外線放射量）の 11 年周期変動成分を差し引いた結果、第 22 太陽活動周期の終りまでは Sq 振幅は約 30 年間ずっと増加傾向にあり、これは CO_2 増加による地球温暖化 & 热圈寒冷化による影響ではないかと指摘する報告が発表されたからである。この現象とその解釈が果たして真実であるのか、あるいは別の地球大気固有の原因があるのか、はたまた太陽活動周期成分を見積もる段階でのデータ解析手法の問題に依る見せかけだけのものなのか、それをはっきりさせることを当研究グループの今年度の第一の課題として、IUGONET メタデータデータベースを利用して収集した長期的・広範な地磁気データや各種人工衛星による太陽の紫外線 2 次元画像データ、京大・理・附属天文台保有の可視光域の太陽彩層 2 次元画像データなどの解析を通して、 Sq 振幅変動の振舞いの全貌の把握と超高層大気に直接影響を与える紫外線放射量の特徴の把握を試みた。その結果、上記 30 年間に渡る Sq 振幅増加傾向は、地球全球的に見た場合、さらにより長期的に見た場合、非一般的なものであり、地球全体の CO_2 増加による影響として説明することは困難であるとの結論に達しつつある。では、果たして Sq 振幅の長期変動が CO_2

ではなく、太陽紫外線起源なのか、地球大気起源なのか、については、現在もなお明確な結論を得るために解析を続行中ではあるが、少なくとも暫定的な結論として、これまでの過去の様々な研究で用いられてきた太陽紫外線量の指標として用いられることが多かった F10.7 放射量や黒点相対数では大きな変化が認められないような太陽活動の停滞期においても、紫外線放射量自体はより大きく変動している、と言うことが原因の一つではないかと言うことが分かつてきた。

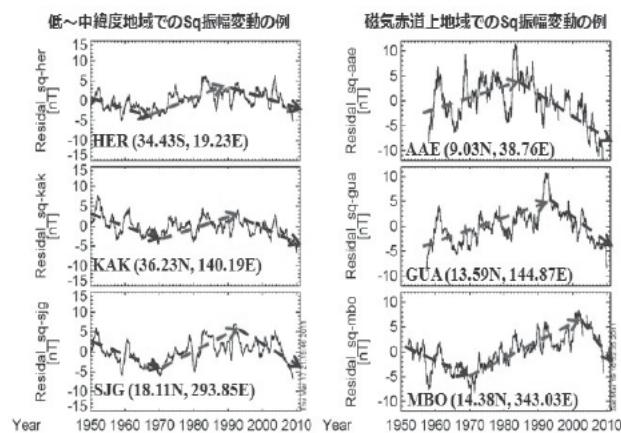


図1：グローバル・長期的に見た地磁気 Sq 振幅の変動の様子。継続的な Sq 振幅増加現象は、長期的な増減変動の極一時期を見ているに過ぎない。

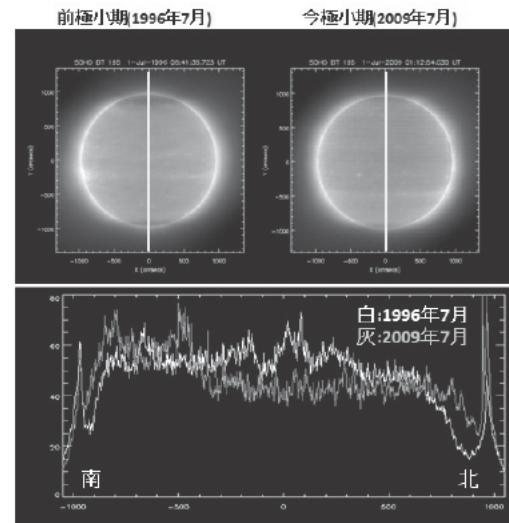


図2：異なる2つの太陽活動極小期における太陽面上紫外線輝度分布（1ヶ月平均）。F10.7 放射量や黒点相対数では数%の違いしか確認できないが、紫外線放射量は十数%もの違いが認められる。

(6) マイクロ波エネルギー選択捕集能をもつイオン液体の合成と木質バイオリファイナリーへの展開

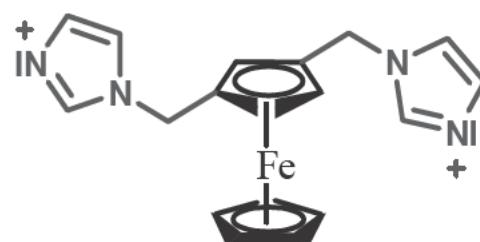
1. 研究組織

代表者氏名：穂間由幸（国立米子工業高等専門学校）

共同研究者：渡辺隆司（京都大学生存圏研究所）、吉岡康一（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

石油や石炭の代替のエネルギー資源として、再生可能であり、唯一の炭素資源とした木質バイオマスが脚光を浴びている。植物細胞壁は多糖類のセルロース・ヘミセルロースと芳香族性の高分子であるリグニンが含まれている。これらの成分を最大限に利用するためには、環境負荷が小さく効率的なリグニンの分離が必要である。分解反応によるリグニン除去では、アルカリ条件下や酸性条件下で高温・高圧条件が必要であり、環境調和型社会に適さない。これらの問題点を改善するため、リグニンの可溶化およびリグニン分解に適用可能な環境調和型新規溶剤の開発が必須である。そこで、近年、環境調和型溶媒として利用されているイオン液体（以下 IL: ionic liquid）に注目し、マイクロ波エネルギー選択捕集能をもつ金属含有の新規 IL の合成と、木質バイオリファイナリーへの展開を目指した。フェロセンチルトリメチルアンモニウムヨージドを出発物質とし、2段階収率 65%で、鉄原子含有の新規 IL (a) を得た。これ



新規 IL (a)の化学構造

を含む系で、種々のバイオマスに対して、マイクロ波照射をおこなった。得られた残渣の酵素糖化をおこなったところ、マイクロ波と金属含有 IL との相乗作用による顕著な差は見られなかつたが、今後は、単離リグニンや木材を試料として、マイクロ波照射反応による有意性を見出し、リグニン分解系および酵素糖化前処理のための金属含有 IL を発展させたい。

(7) 木質バイオマス利用の新展開

—形質転換による木質バイオマスの効率的な改質と有用物質生産—

1. 研究組織

代表者氏名：肥塚崇男（京都大学生存圏研究所）
共同研究者：鈴木史朗（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

近年、新たな化学資源の1つとして木質バイオマスの多糖成分から酵素糖化を経由してバイオ燃料（エタノール）を得る取り組みが脚光を浴びている。しかしながら、その過程では多糖を厚く被覆しているリグニンが、糖化酵素のアクセスibilityを低下させているため、高い糖化効率を達成するのは比較的困難である。しかし、リグニンをある程度低減させた木質バイオマスを生産出来れば、比較的容易に糖化効率を向上させることが出来るのではないかと考えられる。

そこで、本研究では、2種類のフェニルプロパン合成酵素遺伝子 (*Coniferylalcohol acetyltransferase, CfAT* と *Eugenol synthase, EGS*) をモデル樹木であるポプラで過剰発現させることによって、リグニン生合成の直前の前駆体であるコニフェリルアルコールからフェニルプロパンへと至る代謝経路を新規に導入し、リグニンへの代謝フローを生理活性物質であるオイゲノールへの代謝フローへリダイレクトさせた形質転換樹木の作成を目的とした。このようにして得られた形質転換樹木はリグニン含量が低下していることが予想され、比較的容易に糖化効率を向上させることが出来るのではないかと考えられる。さらに、抗菌作用など多彩な生理活性を持つオイゲノールが產生されることが期待され、樹木自体の耐病性増強にも役立つのではないかと期待される。

(8) 宇宙空間における人体・衛星保護のための磁気シールド開発に関する基礎研究

1. 研究組織

代表者氏名：成行泰裕（高知工業高等専門学校）
共同研究者：小嶋浩嗣（京都大学生存圏研究所）、臼井英之（神戸大学システム情報学研究科）、永野優一（高知工業高等専門学校）

2. 研究概要

太陽風は高エネルギーの電子や陽子で構成されたプラズマに満たされている。これらのプラズマの中でも高エネルギーの粒子は宇宙線と呼ばれ、そのエネルギーは最高で 10^8 eV にも達することが知られている。地球に住む我々は、地球の固有磁場と大気によって、有害な宇宙線から守られてきた。しかし20世紀中盤以降、人類は大気圏外・地球磁気圏外へと活動の場を広げ、それに伴い宇宙線の脅威に直接さらされるようになった。近年、衛星を宇宙線の影響から守るために磁場を使用して防ぐ実験やシミュレーション研究が行われているが、実験に使用されるモデルやパラメータは現実的な値ではなく、高エネルギー宇宙線に対する議論はほとんど行われていない。そこで本研究では、有人飛行に向けた磁気シールドの開発を目的として、数値計算を用いた相対論的な宇宙線に対する磁気シールドの解析を行った。数値解析の結果、シールド内に侵入する粒子数の最大値は粒子のエネルギーの増加により減少する一方で、侵入粒子数が最大となるときの磁気モーメントの値はエネルギーの増加に伴い増加することが分かった。本研究で用いた双極子磁場は、直径 4[m] の超伝導コイルに最大 127.16[A] の電流が流れた場合に作られる磁場に対応

しているが、この値は 2020 年の実行が計画されている磁気セイルの実証衛星の提案(内径直径 3.35[m], 起磁力 10^6 [A])と比較して十分現実的な値であると言える。

(9) プラズマバブルの出現特性の理解に向けた全球的な地上 GPS 受信機データベースの構築

1. 研究組織

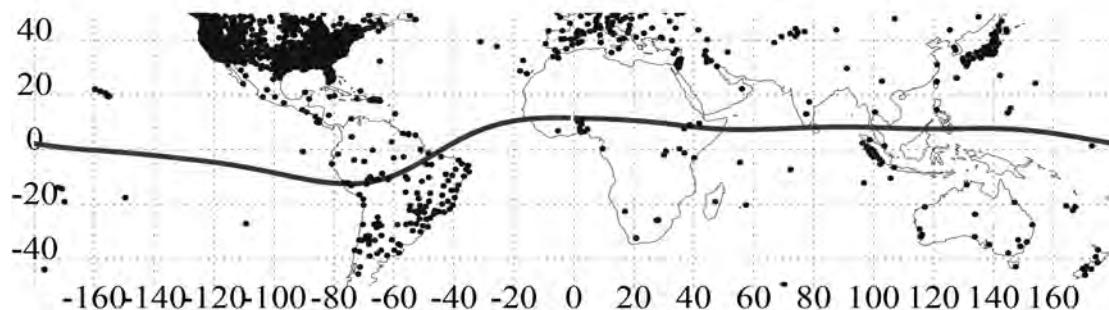
代表者氏名：西岡未知（名古屋大学太陽地球環境研究所）

共同研究者：橋口浩之（京都大学生存圏研究所）、大塚雄一（名古屋大学太陽地球環境研究所）、斎藤昭則（京都大学理学研究科）

2. 研究概要

プラズマバブルの出現率の春/秋非対称性や地域性を詳細に調べるために、赤道域における地上 GPS 受信機データを収集し、全電子数絶対値や電離圏擾乱指数などをデータベース化した。その結果、International GNSS Service 等によって提供され全球的に分布する地上 GPS 受信機約 3,000 点のデータを収集することができ、赤道域では 300 点以上の観測点でのデータをデータベース化することができた。

地球の上空 60 km から 1,000 km には、太陽放射によって生成されたプラズマで構成される電離圏と呼ばれる領域が広がっており、プラズマ不安定性を原因とする多種多様な電離圏プラズマ擾乱が頻発する。赤道域に特有のプラズマ擾乱であるプラズマバブルは、激しい電離圏シンチレーションを発生させ、衛星電波障害や通信障害を引き起こす。プラズマバブルの出現には電離圏中性風や電離圏電場、電子密度、電気伝導度、地球磁場などの電磁気学的要素が複雑に関わっているため、その出現特性は複雑であり、未だ理解されていない点が多い。近年、全球的に展開されている地上 GPS 受信機網を用いプラズマバブルをモニタリングすることが可能となった。本研究では、プラズマバブルの出現率の春/秋非対称性や出現特性の地域性の理解を目的とし、全球的な地上 GPS 受信機データベースの構築を行った。



本研究でデータベース化を進めた地上 GPS 受信機の分布図。

青丸が地上 GPS 受信機の位置、赤線は磁気赤道を示す。

その結果、International GNSS Service や UNAVCO 等の全球的な地上 GPS 受信機ネットワークに加え、南アメリカ地域の Low-latitude Ionospheric Network (LISN) やインドネシアの Sumatran GPS Array (SUGAR) 等のネットワークデータを収集することで、全球で 2,991 点、緯度 30 度以下の赤道域で 333 点の受信機データをデータベース化することができた。

(10) 木質バイオマス燃焼灰からの新規 BDF 触媒の開発とその評価

1. 研究組織

代表者氏名：西宮耕栄（北海道立総合研究機構森林研究本部）

共同研究者：畠 俊充（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

木質ペレット燃料の利用拡大のため、燃料に使用した後に発生する燃焼灰の高度な利用法として、バイオディーゼル燃料（BDF）製造用固体触媒への応用可能性を検討した。まず、成型にバインダーレスで成型可能な通電焼結法を適用し、その成型性を評価した。通電焼結はエス・エス・アロイ（株）製プラズマン2を用い、成型寸法は、直径10mm、厚さ2mmを目標とした。燃焼灰単体では、焼結温度500°C、焼結時間5分で成型可能であったが、脆く割れやすく、成型性は劣るものであった。燃焼灰とトドマツ木炭を3:1で混合したものを焼結温度500°C焼結時間15分の条件で成型した場合の成型性が良好であった。また、木炭の量を増やしても成型は可能であるが、徐々に脆くなる傾向が認められた。

燃焼灰単体の成型物のX線光電子分光法（XPS）による分析結果から評価した結果、炭素、酸素の他に、カリウム、ナトリウム、カルシウムのピークが確認された（図1）。元素分析の結果、特にカリウムを多く含有していることが確認された。これらアルカリ成分が残存していることから、木質バイオマス燃焼灰のBDF製造用固体触媒への応用可能性を見いだした。

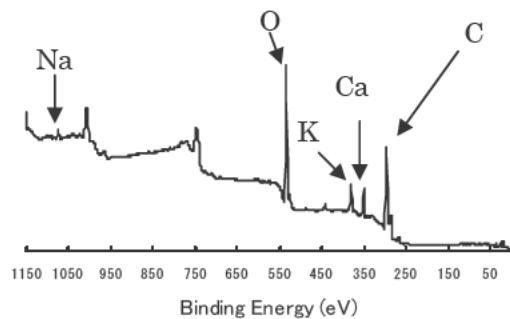


図1 燃焼灰単体の成型物 XP ワイドスペクトル

(11) 銀ナノインクのバイオナノファイバー基板への印刷特性評価

1. 研究組織

代表者氏名：能木雅也（大阪大学産業科学研究所）

共同研究者：矢野浩之（京都大学生存圏研究所）、伊福伸介（鳥取大学工学研究科）、

阿部賢太郎（京都大学次世代開拓研究ユニット）

2. 研究概要

インクジェット印刷は、スクリーン印刷のような版（マスク）が不要であり、被印刷体と非接触印刷が可能、曲面への印刷体も可能といった特徴をもつ。一方で、その印刷メカニズムから適用可能なインク粘度は低いものに限られる。そのように低粘度の金属ナノ粒子インクを使って、インクジェット印刷で幅100μm以下の微細な金属配線を作製すると、コーヒーリング効果によって金属配線の断面形状は凹み、得られた金属配線は大きな電気抵抗を示すことが、我々の研究成果によって明らかになった。しかし、そのような低粘度金属ナノインクをバイオナノファイバー基板へインクジェット印刷しても、得られた配線は矩形断面を保っており、その電気抵抗は小さかった。この研究成果は、バイオナノファイバーシートの電子デバイス用基板への応用に向け、非常に重要な成果である。

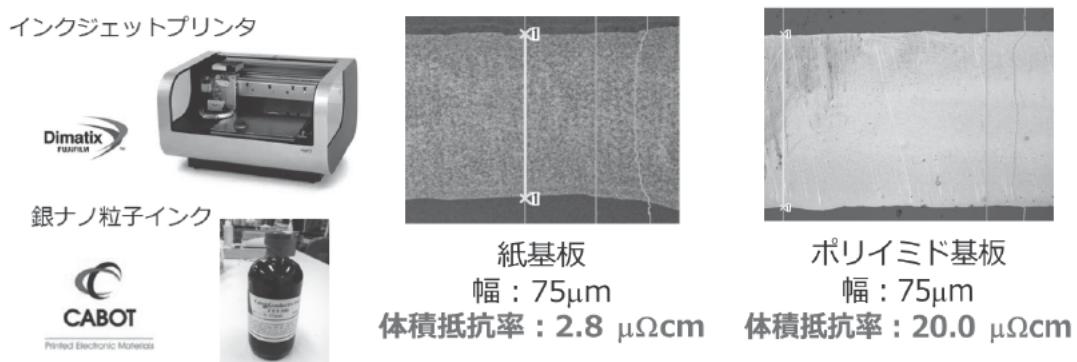


図1：左：インクジェットプリンタと銀ナノ粒子インク、中央：紙基板上に印刷した低電気抵抗な銀配線、右：プラスチック基板上に印刷した銀配線

(12) 宇宙太陽発電所の超大規模フェーズドアレーアンテナにおける位相最適化問題の研究

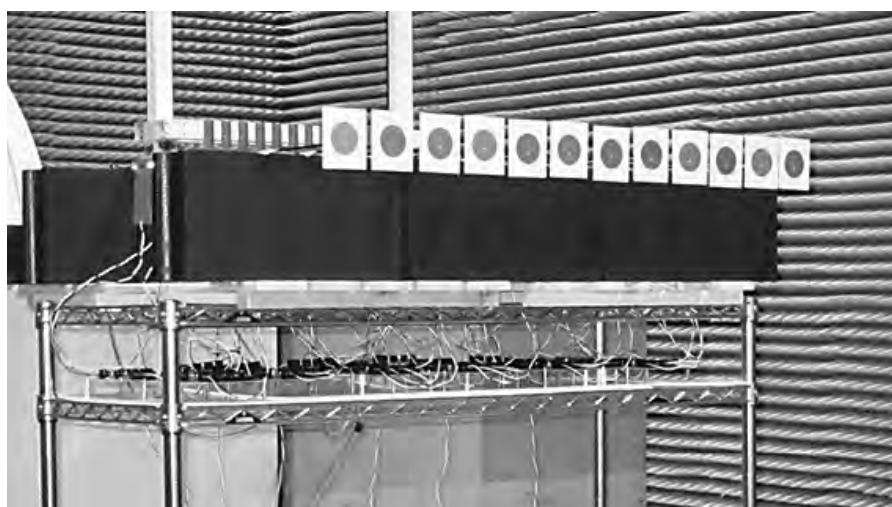
1. 研究組織

代表者氏名：三谷友彦（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：田中俊二（京都大学工学研究科）、蛯原義雄（京都大学工学研究科）

2. 研究概要

宇宙太陽光発電においてはアンテナ素子を平面上に多数配置したフェーズドアレイアンテナにより無線電力伝送を行うことが最有力視されている。フェーズドアレイアンテナでは、各アンテナ素子に移相器を挿入し、励振位相を能動的に制御することでビームパタン（各アンテナ素子から放射される電界の合成により決まる）を変化させることができる。ただし宇宙太陽光発電では、移相器を挿入することによる電力損失が発生する。その電力損失は移相の段数により決まるため、励振位相をきめ細かく変化させるとそれだけ電力損失も大きくなってしまう。そこで本研究では、電力損失を考慮したフェーズドアレイアンテナにおけるマイクロ波無線電力伝送の送電電力最大化を目的とする。研究目的を達成するために、フェーズドアレイアンテナで発生する電力損失をデジタル移相器で発生する挿入損失として定義し、デジタル移相器損失を考慮したフェーズドアレイアンテナの送電電力最大化問題を組合せ最適化問題として定式化した。この組合せ最適化問題を短時間で解くためのアルゴリズムを開発し、2次元等間隔フェーズドアレイアンテナにおいて開発アルゴリズムを適用することによって得られるビームパタンを計算機実験により求めた。さらに、デジタル移相器での電力損失が発生する1次元12素子等間隔フェーズドアレイアンテナを実際に製作し、開発したアルゴリズムの有効性を示す実証実験を行った。計算機実験の結果、今回開発したアルゴリズムを用いずに等振幅フェーズドアレイアンテナと仮定して位相決定した場合には、送電電力が平均で89.5%程度、最悪47.9%に低下することが判明した。また、実証実験結果より、従来の等振幅フェーズドアレイアンテナと仮定して位相決定した場合よりも開発アルゴリズムにより求まる位相値を適用した場合の方が、主ビーム方向の送電電力が改善される場合があることが明らかとなった。以上より、本研究で対象とした送電電力最大化問題を解決するアルゴリズムを開発し、アルゴリズムの有効性を計算機実験と測定実験の両面から実証した。



実証実験を行った1次元12素子フェーズドアレーアンテナの写真

(13) 水蒸気量の鉛直分布のデータ同化による降水予測精度へのインパクト評価

1. 研究組織

代表者氏名：山口弘誠（京都大学生存基盤科学研究ユニット）

共同研究者：古本淳一（京都大学生存圏研究所）、中北英一（京都大学防災研究所）

2. 研究概要

都市部で豪雨災害が頻発しており、防災の観点から、数時間先～半日先における降水量を高精度に予測することが重要である。気象予報モデルを用いた降水予測において、観測値をモデルに取り込み（データ同化）、モデル初期値をより現実らしく与えることが有効であり、水蒸気量をモデル初期値に正確に与えることで降水予測精度が格段に向上することが明らかになってきた。さて、最先端の研究レベルにおける水蒸気量の観測手法として、GPS遅延量観測と鉛直方向の音波観測を組み合わせることで水蒸気の鉛直分布を推定することができる。そこで、水蒸気量の鉛直分布をモデルへデータ同化する手法を開発することで、従来までの鉛直積算量をデータ同化する場合と比較してどれほど降水予測へ効果があるのか明らかにする。本研究では、Observing System Simulation Experiment という観測値を模擬的に作成する理想実験を行い、水蒸気の鉛直分布の同化の効果を調べた。モデルにはCReSS、同化手法にはLETKFを用いる。2時間先の降水予測結果を図1に示す。沖縄本島北東部の対流性の降水システムに関して、予測精度が大きく向上した。今後の目標として、水蒸気量の鉛直分布だけではなく、日本において国土交通省が現業用として平成22年度から都市部に配備しているXバンド偏波ドップラーレーダー網で得られる観測値を加えて、複数の観測情報のデータ同化による相乗効果が得られるかどうかを明らかにしていく予定である。

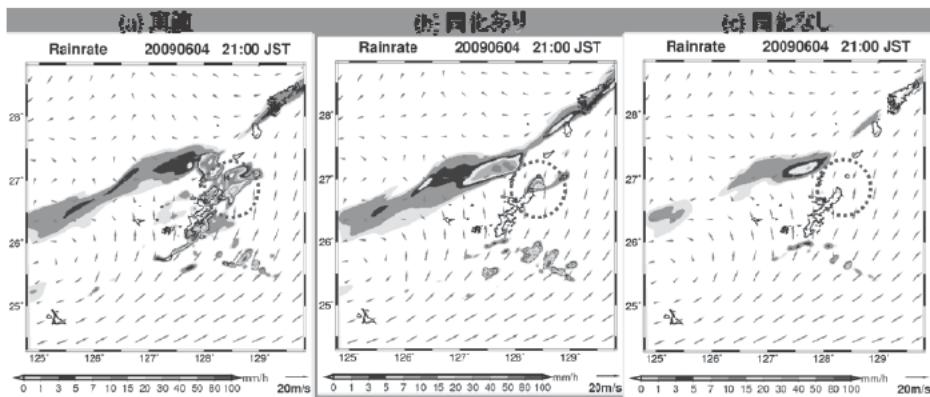


図1：2時間先降水予測の結果. (a)真値, (b)同化あり, (c)同化なし

(14) 東南アジア・南アジア域における大気環境診断パラメータを用いた大気環境変動の把握

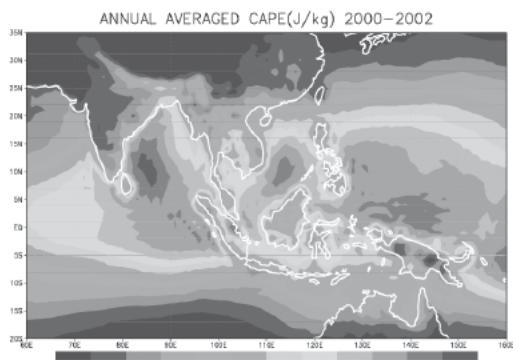
1. 研究組織

代表者氏名：山根悠介（常葉学園大学教育学部）

共同研究者： 塩谷雅人（京都大学生存圏研究所）、林 泰一（京都大学防災研究所）、
木口雅司（東京大学生産技術研究所）

2. 研究概要

本研究は東南アジア・南アジア域において降水をはじめとする多彩な大気現象をもたらす大気環境変動を、大気環境診断パラメータを用いて把握しようというものである。当該地域における大気環境診断パラメータのデータベースを構築し、これを活用してこの地域における大気環境の時空間変動、特に対流活動と関わりの深い大気の潜在不安定度の時空間変動について調べた。大気環境診断パラメータは大気の安定度や水蒸気量など大気の状態を表す指標である。本研究ではNCEPのFNLデータセットを用いて当該地域における2000年～2010年までのデータセットを構築した。構築された



図：年平均の対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy, CAPE) の分布

データセットを用いて潜在不安定の指標である対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy, CAPE) の年平均値の分布について調べた結果 (下図)、幾つかの海上域 (例えばベンガル湾の南西部など) において CAPE が顕著に高い領域が見られた。また陸上域ではバングラデシュやスマトラ島の一部で CAPE が比較的高い領域が見られた。このような CAPE の分布から対流活動の発生環境を定量的に把握することが可能となる。今後は、我々が現在雨量観測を展開しているインド亜大陸北東域及びインドネシアスマトラ島における降水及び対流活動の変動 (季節変動、季節内変動、日変動) と大気環境の変動の関連性について明らかにすべく、雨量計データと本研究で構築した大気環境診断パラメータのデータベースを活用した研究を進めて行きたい。

(15) 大気レーダー・気象レーダーによる降水粒子の粒径分布リトリーバル手法の開発

1. 研究組織

代表者氏名：山本真之（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：妻鹿友昭（京都大学生存圏研究所）、足立アホロ（気象研究所）、

下舞豊志（島根大学総合理工学部）、西 憲敬（京都大学理学研究科）

2. 研究概要

50MHz 帯大気レーダーは風速3成分（鉛直流・東西風・南北風）が精度良く計測できる。気象レーダーは、粒径の小さい降水粒子の検出感度に優れる。そのため、50MHz 帯大気レーダーと気象レーダーを併用することで、推定精度に優れる降水粒子粒径分布 (DSD) のリトリーバルが可能となる。本研究では、DSD の精度良いリトリーバルに不可欠である、気象レーダー観測量におけるキャリブレーション手法開発などに取り組んだ。2009 年実施の REQUIPP 観測キャンペーンにおいて運用された X バンドドップラー気象レーダー (XDR)・Ka バンドドップラー気象レーダー等の観測データを用いた。図は、地表設置の雨量計とマイクロレインレーダー (MRR) を併用することで得られた、XDR で測定されたレーダー反射因子 (Z_e) の評価結果である。雨量計で精度が確認された MRR と、工場での計測値から見積もられた XDR の Z_e の差異は 0.75dB であり、この値 (0.75dB) を用いて XDR の Z_e を較正できる。そのほか、大気レーダーの鉛直流を用いた降水粒子落下速度の観測精度改善を示すことにも成功している。

研究成果発表：

- Yamamoto, M.K., et al., Doppler velocity measurement of portable X-band weather radar equipped with magnetron transmitter and IF digital receiver, IEICE Trans. B., in press.
- Yamamoto, M.K., et al., Assessment of radar reflectivity and Doppler velocity measurement by FMCW Ka-band Doppler weather radar, J. Atmos. Electr., in revision.
- 妻鹿友昭・山本真之他, 赤道大気レーダーと偏光ライダーによる融解層およびその周辺の詳細構造観測, 第4回赤道大気レーダーシンポジウム(第157回生存圏シンポジウム)プロシードィング、pp. 35-40, 2010.

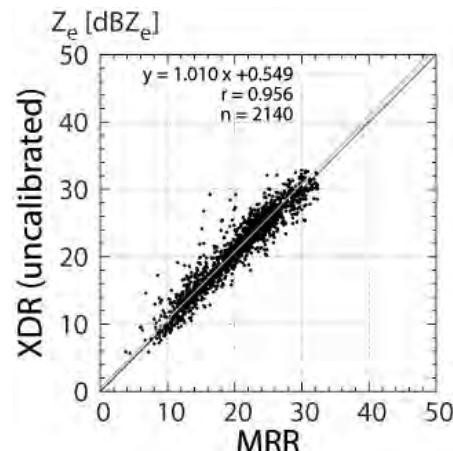


図:MRR で測定された Z_e (横軸) と XDR で測定された Z_e (縦軸) の散布図。

(16) 高機能木質材料生産への応用を目指したケイ皮酸／モノリグノール経路阻害剤の開発

1. 研究組織

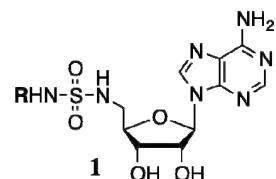
代表者氏名：渡辺文太（京都大学化学研究所）

共同研究者：梅澤俊明（京都大学生存圏研究所）、平竹 潤（京都大学化学研究所）

2. 研究概要

ケイ皮酸／モノリグノール経路によって生合成されるフェニルプロパノイドは、植物体の環境適応性に加え、色や味、香りなどと密接に関わっているため、その生合成を精密に調節することで、人類にとって付加価値の高い植物資源を獲得できると考えられる。しかし、本経路は多数の酵素が関与する複雑なものであり、遺伝子改変による制御は困難な場合がある。そこで本研究では、ケイ皮酸／モノリグノール経路の化学的な調節剤の創製を目指し、鍵酵素 4CL に着目して、4CL に対する選択的阻害剤を設計・合成し、それらの酵素阻害活性および生物活性を評価した。

4CL の触媒機構に基づいてデザインされたスルファミド系化合物 **1** は 4CL を強く阻害した。特に、4CL の良好な基質となるカルボン酸の部分構造を有する阻害剤ほど、阻害活性は高かった（表 1）。このことから、阻害剤は酵素反応中間体アログとしてはたらき、また、4CL は本来の反応中間体と同様に阻害剤のベンゼン環上の置換基を強く認識することが明らかとなった。さらに、阻害剤 **1a** あるいは **1b** を添加した培地でシロイヌナズナを生育させたところ、根に含まれるクマリン化合物（フェニルプロパノイドの一種）の内生量が有意に減少した。クマリン化合物は 4CL の酵素反応生成物である 4-クマル酸 CoA やフェルラ酸 CoA より生合成されることから、阻害剤が植物体に取り込まれ、*in vivo* においても 4CL を阻害していることが示唆された。



1	R	IC ₅₀ (μM)	substrate specificity (%)	
			a	b
a	4-coumaroyl	0.28 ± 0.02	100	
b	feruloyl	1.98 ± 0.05	24	
c	cinnamoyl	13.1 + 0.4	4	
d	octanoyl	141 ± 2.1	—	
e	H	NI ^{a)}	—	

a) No inhibition at 1 mM.

表 1 : 中間体アログの 4CL 阻害活性

2.4 平成 22 年度 生存圏ミッション研究プロジェクト一覧

	氏名 (五十音順)	研究プロジェクト題目	共同研究者	関連部局	関連ミッショ
1	伊藤 嘉昭 (京都大学化学研究所・准教授)	化学状態から見た蛍光X線分析法による植物における環境の影響評価	矢崎 一史 福島 整	京都大学化学研究所 物質材料研究機構	1
2	入江 俊一 (滋賀県立大学 環境科学部・准教授)	白色腐朽菌リグニン分解機構マスター・レギュレーターの検索	本田 与一	滋賀県立大学環境科学部	1,2,4
3	上田 義勝 (京都大学生存圏研究所・助教)	燃料電池利用に向けた有機-無機ハイブリッド膜のメソ構造制御と電気化学特性の評価	横尾 俊信 徳田 陽明	京都大学化学研究所	3
4	梅澤 俊明 (京都大学生存圏研究所・教授)	熱帯産業造林樹種の分子育種基盤構築	矢崎 一史 服部 武文 鈴木 史朗 Md.Mahabubur Rahman 柴田 大輔 三位 正洋	かづさDNA研究所 千葉大学園芸学部	1,2,4

5	片岡 靖夫 (中部大学工学部 建築学科・教授)	自然素材活用型住宅における 耐力要素の動的構造特性の検 証実験	小松 幸平 森 拓郎 北守 顕久 脇田 健裕 宋 成彬 鄭 基浩	中部大学工学部 早稲田大学理工学部 静岡大学教育学部	4
6	片平 正人 (京都大学エネルギー理工学 研究所・教授)	超高感度二次元NMRによるバ イオマス全成分解析法の開発	渡辺 隆司 小瀧 努 西村 裕志 吉岡 康一	京都大学エネルギー理工学 研究所	1,2,3
7	川井 秀一 (京都大学生存圏研究所・ 教授)	熱帯植林地のバイオマス生長量 の評価に関する調査研究	R. Widyorini EB.Hardiyanto B. Subiyanto A. Firmanti 大村 善治 甲山 治 渡邊 一生 定道 有頂	Gadjah Mada Univ., Indonesia LIPI, Indonesia Res.Inst.for Human Settlements, Indonesia 京都大学東南アジア研究所	インターミ ッション
8	河合 真吾 (静岡大学農学部・教授)	窒素固定能に優れたアクチノリ ザル樹木の抽出成分ミリカノー ルの生合成と共生菌フランキア との化学生物学的検討	梅澤 俊明 服部 武文 鈴木 史朗 市澤 博生	静岡大学農学部	1
9	熊本 篤志 (東北大学理学研究科・ 准教授)	宇宙空間におけるプラズマ密度 計測のための高周波数分解能 受信機の開発	小嶋 浩嗣 笠羽 康正	東北大学理学研究科	3
10	小嶋 浩嗣 (京都大学生存圏研究所・ 准教授)	科学衛星における電磁適合性 (EMC: ElectroMagnetic Compatibility)に関する研究	早川 基 高島 健 松岡 彩子 齋藤 義文 平原 聖文 笠羽 康正 八木谷 聰 中澤 曜 上田 義勝	宇宙航空研究開発機構 東京大学理学研究科 金沢大学理工研究域	3
11	塩原 匠貴 (国立極地研究所・ 准教授)	多波長ライダー計測による対流 圏エアロゾル・雲の物理特性の 研究	津田 敏隆 中村 卓司 矢吹 正教	国立極地研究所	1
12	柴田 裕実 (京都大学工学研究科・ 准教授)	超高速に加速したマイクロ粒子 と固体との衝突実験	山川 宏 大橋 英雄 佐々木 晶 岩井 岳夫 平井 隆之 中村 真季 池田 卓矢	東京海洋大学海洋科学部 国立天文台 東京大学工学系研究科 総合研究大学院大学 東京大学新領域創成科学研 究科 京都大学工学研究科	3

13	下舞 豊志 (島根大学総合理工学部・助教)	多波長リモートセンシングによる汽水域懸濁物質起源推定方法の開発	古本 淳一 古津 年章 三瓶 良和 瀬戸 浩二	島根大学総合理工学部 島根大学汽水域研究センター	1
14	園部 太郎 (京都大学エネルギー科学 研究科・特定助教)	マイクロ波励起超活性固体境界層反応によるバイオリファイナリーケミカルプラットフォームの構築	渡辺 隆司 篠原 真毅 三谷 友彦 畠 俊充 杉山 淳司 大橋 康典	京都大学エネルギー科学 研究科	2,4
15	仲村 匡司 (京都大学農学研究科・講師)	スギ材の空気浄化機能の解明とヒトの心身への影響に関する研究	川井 秀一 梅村 研二 東 賢一 辻野 喜夫 上堀美知子 藤田佐枝子 山本 哲子	京都大学農学研究科 近畿大学医学部 大阪府環境農林水産総合研究所 (有)ホームアイ (有)オフィスプランニング	4
16	西 憲敬 (京都大学理学研究科・助教)	熱帯上部対流圏循環の解明	塩谷 雅人 鈴木 順子 濱田 篤	京都大学理学研究科 海洋研究開発機構 総合地球環境学研究所	1
17	畠 俊充 (京都大学生存圏研究所・講師)	原子状酸素照射による木質炭素化物の構造変化の解明	梶本 武志 田川 雅人 小嶋 浩嗣	和歌山県工業技術センター 神戸大学大学院工学研究科	3,4
18	本間 千晶 (北海道立総合研究機構・主査)	直パルス通電加熱による木質バイオマスの選択液化	渡辺 隆司 畠 俊充	北海道立総合研究機構	2,4
19	山本 真行 (高知工科大学工学部・准教授)	昼間の熱圏中性大気風速計測のためのロケット放出リチウム観測用光学機器の開発と観測	山本 衛 渡部 重十 阿部 琢美 羽生 宏人	高知工科大学工学部 北海道大学理学研究院 宇宙航空研究開発機構	1,3
20	渡邊 崇人 (京都大学生存圏研究所・助教)	担子菌 <i>Trametes versicolor</i> RC3 株の発酵阻害物質分解性ラッカーゼ遺伝子の単離・同定と異種発現解析	Chartchai Khanongnuch Woottichai Nachaiwieng	Chiang Mai Univ	2

生存圏ミッション研究 成果の概要

(1) 化学状態から見た蛍光X線分析法による植物における環境の影響評価

1. 研究組織

代表者氏名：伊藤嘉昭（京都大学化学研究所）

共同研究者：矢崎一史（京都大学生存圏研究所）、杉山暁史（京都大学生存圏研究所）、

高梨功次郎（京都大学生存圏研究所）、福島 整（物質材料研究機構）、吉門進三（同志社大学理工学部）、坂東 篤（株式会社堀場製作所）、大野ひとみ（株式会社堀場製作所）

2. 研究概要

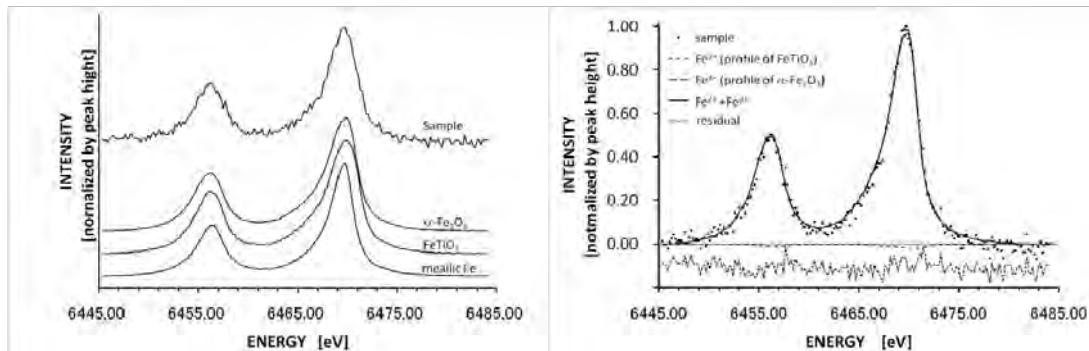
生存圏を取り巻く大気の主要成分は窒素であり、窒素は生物の体の主要構成元素である。大気から生態系に取り込まれた窒素は生態系を循環してまた大気に戻る。その循環の主な駆動力の一つが、マメ科植物と根粒菌に代表される共生窒素固定である。マメ科植物の根に土壤中の根粒菌が感染することにより形成する根粒は共生窒素固定のために特化した器官であり、大気中の窒素がアンモニアに還元され、生態系の多くの生命を支えている。しかしそこに関わる無機元素の役割や、土壤中の無機汚染物質の動態は殆ど分かっていない。それ故、微量元素が得意なX線元素分析及びX線状態分析の手法を、植物或いは土壤中物質の挙動を調べる実用分析技術を確立することは重要である。

3. 研究の目的

高分解能2結晶X線分光装置による状態分析法により、マメ科植物の根粒における窒素固定に関わるFeを中心とした無機元素精密分光測定を行って、その化学状態をなるべく *in vivo* に近い状態で解析することを試みる。

4. 研究成果及び展望

根粒の $Fe K\alpha_{1,2}$ スペクトルを酸化鉄標準物質のそれを一緒に左図に示す。標準物質のスペクトルのプロファイルを基にして、根粒の $Fe K\alpha$ スペクトルを解析した結果を右図に示す。2価と3価のFe酸化物標準物質のスペクトル位置とプロファイル両方を仮定し、非線形最小自乗法による解析の結果、根粒のスペクトルは選択的に3価のスペクトルだけからなることが判明した。しかしながら今後の測定結果からの展望として、試料調整の検討があげられる。今回の試料は一定量の根粒をそのまま測定しているので比較的本来の状態を保った測定になっている。試料は本来生体であるのでサンプリングしてから測定までの時間の影響、すなわち生体内の様々な反応による状態変化の可能性を検討する必要がある。



左図：根粒と標準物質の $Fe K\alpha_{1,2}$ スペクトル

右図：標準物質を基にした根粒の解析結果

(2) 白色腐朽菌リグニン分解機構マスターレギュレーターの検索

1. 研究組織

代表者氏名：入江俊一（滋賀県立大学環境科学部）

共同研究者：本田与一（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

リグニン分解酵はリグニン分解の初期において重要な役割を果たすと考えられている。白色腐朽菌 *Phanerochaete chrysosporium*におけるリグニン分解酵素生産は、カルモデュリン (CaM) シグナルにより調節されていることが判明している。*P. chrysosporium*のリグニン分解酵素、およびCaM発現はサイクリックAMP (cAMP) 阻害剤アトロピンにより抑制されるが、アトロピンが細胞内cAMP濃度を減少させる作用機序は未解明のため、cAMPシグナルがCaMシグナル、またはリグニン分解酵素発現と関連する直接的な証拠は存

在しない。本研究において、*P. chrysosporium*培養物にcAMPとホスホジエステラーゼ阻害剤としてIBMXを添加したところ、有意にリグニンペルオキシダーゼ (LiP) 活性およびマンガンペルオキシダーゼ (MnP) 活性が増加した。これにより、cAMPシグナルがLiPおよびMnP活性に関与する直接的な証拠が初めて得られた。cAMP、IBMXに加えてCaM阻害剤としてW-7を添加したところ、酵素活性は消失した。また、添加したW-7は細胞内cAMP濃度に変化を生じさせなかった。以上のこととは、LiPおよびMnP発現において、CaMシグナルがcAMPシグナルの下流に位置することを示唆している。一方、ファージディスプレイ法によりLiPおよびMnP生産時に発現しているCaM相互作用タンパクの検索を試みたところ、多数の推定的CaM結合性タンパクが得られた。今後は、これらの情報を元にリグニン分解機構発現の詳細について更に解析を進めていきたい。

(3) 燃料電池利用に向けた有機-無機ハイブリッド膜のメソ構造制御と電気化学特性の評価

1. 研究組織

代表者氏名：上田義勝（京都大学生存圈研究所）

共同研究者：横尾俊信（京都大学化学研究所）、徳田陽明（京都大学化学研究所）

2. 研究概要

将来の生存圏における低炭素化社会に向けたクリーンエネルギー源の一つとして燃料電池は非常に注目されており、特に中温作動型の燃料電池はポータブル用途での実用化を見据えた研究が広く行われている。燃料電池を構成するPt触媒の被毒を防止するためには、150°C程度での中温での動作が適切とされているが、その温度域での使用に耐えうる電解質膜材料が無いため、現状では80°C程度での動作が上限とされている。また、電解質膜は動作温度の上昇により発電効率が向上することが知られており (NAFION比125%の報告例あり)、多くの研究開発が試みられているが、今なお十分なパフォーマンスを有する電解質膜は得られていない。

本研究では、中低温域で作動する燃料電池用電解質膜の合成を目的とし、リン酸ベースの電解質膜の合成を行った(Fig. 1)。P-OH基を有する vinylphosphonic acid (VPA)は、ビニル基を有するため分子鎖に固定が可能な亜リン酸であり、広く伝導体として研究されている [Tokuda et. al, J. Mater. Res. 2011]。しかし、VPAの欠点として、①ポリマー化による伝導度の低下、②耐水性の低さ（発電時に水が発生するため、劣化の原因となる）が知られている。本研究では、チタン化合物の紫外吸収による光重合阻害を利用し、表面層と内部のVPAの重合率を変化させ、表面層に耐水性を賦与し、かつ内部で高いプロトン伝導性を示す電解質膜の作製を試みた(Fig. 2, 3)。

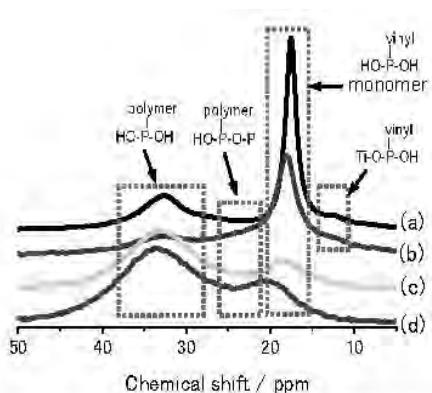


Fig. 2 ^{31}P MAS NMR spectra of (a) VET, (b) VET-ht, (c) VE and (d) PVPA

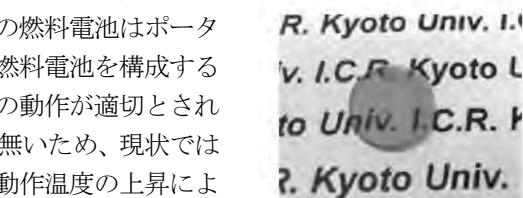


Fig. 1 Photograph of sample VET

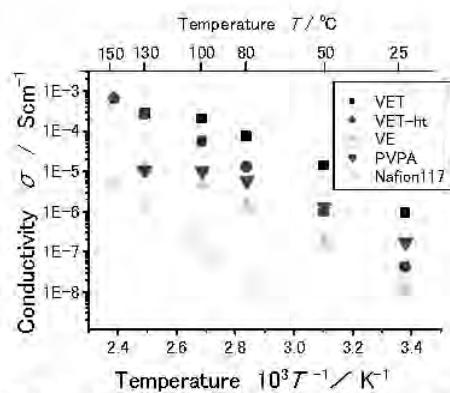


Fig. 3 Temperature dependence of proton conductivities measured without humidification

(4) 热帯産業造林樹種の分子育種基盤構築

1. 研究組織

代表者氏名：梅澤俊明（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：矢崎一史（京都大学生存圏研究所）、服部武文（京都大学生存圏研究所）、

鈴木史朗（京都大学生存圏研究所）、Md. Mahabubur Rahman（京都大学生存圏研究所）、

柴田大輔（かづさDNA研究所）、三位正洋（千葉大学園芸学部）

2. 研究概要

木質は再生可能バイオマス資源の内最も蓄積量が多く、今後人類が持続的に生存を続けるうえで必須の再生可能バイオマス資源である。そこで、木質の持続的生産・利用を経済的に成り立たせるために、代謝工学に基づく木質の高付加価値化や劣等な生育条件での高成長性の付与等が強く求められている。

熱帯早生樹に限らず、実用植物の分子育種には、標的植物種のゲノム情報あるいは発現遺伝子の網羅的情報の取得、及び育種目標の原因遺伝子の取得が必須である。さらに、遺伝子を標的植物に導入すると共に形質転換植物体を再生させる技術の確立が必須である。そこで、本研究ではアカシアの形質転換系の確立に向けた研究を行った。すなわち、代表的熱帯アカシアであるアカシアマンギウムとアカシアクラシカルパの大量増殖法の開発、アカシアクラシカルパの体細胞胚発生系の確立、及びGUSレポーター遺伝子とアグロバクテリウムを用いたアカシアクラシカルパの形質転換に成功した。

また日本のパルプ生産を支えるユーカリも早生樹として商業栽培されているが、この樹木は有用物質として精油系を生産する特性をもつ。そこでパルプ以外の利用展開を視野に入れ、モノテルペンの代謝工学を行った。シソ由来のリモネン合成酵素遺伝子 *PfLS-1* を使い、その蛋白質レベルでの細胞内局在を、細胞質、あるいはプラスチドに改変した発現コンストラクトを作製し、形質転換が比較的容易なユーカリである、*Eucalyptus camaldulensis* に導入した。結果として、ユーカリの葉におけるモノテルペン生産を野生型より大きく上昇させることに成功した。興味深いことに、もっとも生産性の高かったクローンはリモネン合成酵素を細胞質に局在させたクローンであり、その生産量は対照の約5倍であった。これは生合成酵素を本来のコンパートメントに局在させない場合に、むしろ最終産物の蓄積が高いことを意味しており、更なる解析が待たれる。

(5) 自然素材活用型住宅における耐力要素の動的構造特性の検証実験

1. 研究組織

代表者氏名：片岡靖夫（中部大学工学部）

共同研究者：小松幸平（京都大学生存圏研究所）、森 拓郎（京都大学生存圏研究所）、

北守頭久（京都大学生存圏研究所）、脇田健裕（中部大学工学部）、

鄭 基浩（静岡大学教育学部）、宋 成彬（早稲田大学創造理工学部）

2. 研究概要

自然素材活用型住宅建物を構築する構造要素はすべて本研究グループが新しく研究開発したものであり、それら構造要素は理論的及び実験的に構造性能評価を行なってきた。本研究の初年度は、実験住宅の強制加振実験を行って振動特性を明らかにして報告した。研究の2年目は、建物全体の弾塑性時刻歴応答解析を可能にするために必要な、土壁ユニット内臓の在来軸組み（図1）の動的振動特性を解析学的に明らかにすること、そしてその解析手法が妥当であることを実験的に検証することを目的にした。

3. 研究方法と研究成果

自然素材活用型木造住宅建設プロジェクトで提案したプレファブ土壁を研究対象とし、プレファブ土壁の軸組内部での配置場所を変えた6種類のパターン（図1）と動的挙動を求めるための力学モデルに基づくシミュレーション計算を行い、その解析法の妥当性を振動実験によって検証する。

単位プレファブ土壁のせん断応力ーせん断歪みの関係は、市販のFEMプログラムで使用可能なように、P(軸

力) $- \delta$ (軸伸縮) が等価なプレース置換モデルを作成して用いた。土壁試験体について、桁一柱端部の接合は長ほぞ込み栓打ち、方立ての各接合部は貫接合と見なし、非線形回転バネ常数を求めて FEM (SNAP-Ver. 5) での時刻歴応答解析に使用した。

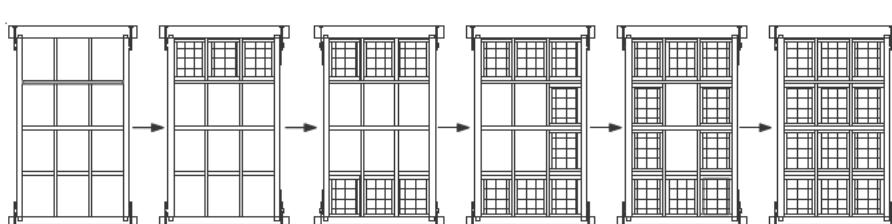


図1 土壁ユニット内蔵軸組パターン

図2は、土壁ユニットの実験結果と解析結果を同時に示したものであり、両者は極めて良く一致していることを示している。図3は、このことを動的な振動実験で確認するためのシステム図である。

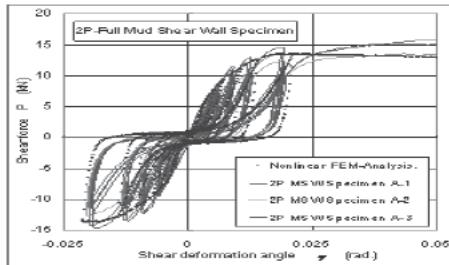


図2 実験結果と解析結果の整合

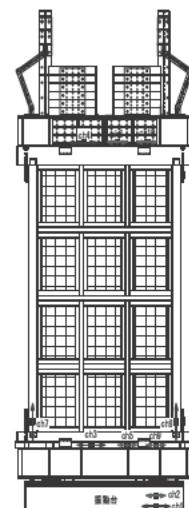


図3 振動実験構成図

4. 今後の研究課題と期待される成果

今後、図1の各パターンの振動実験結果と解析結果の比較検討を行うことによって、建物全体の信頼性の高い時刻歴応答解析結果が得られるとの確信が得られた。このことは、極稀に発生する各種巨大地震に対する建物の弾塑性振動特性を解析的に求めることができる意味している。

(6) 超高感度二次元NMRによるバイオマス全成分解析法の開発

1. 研究組織

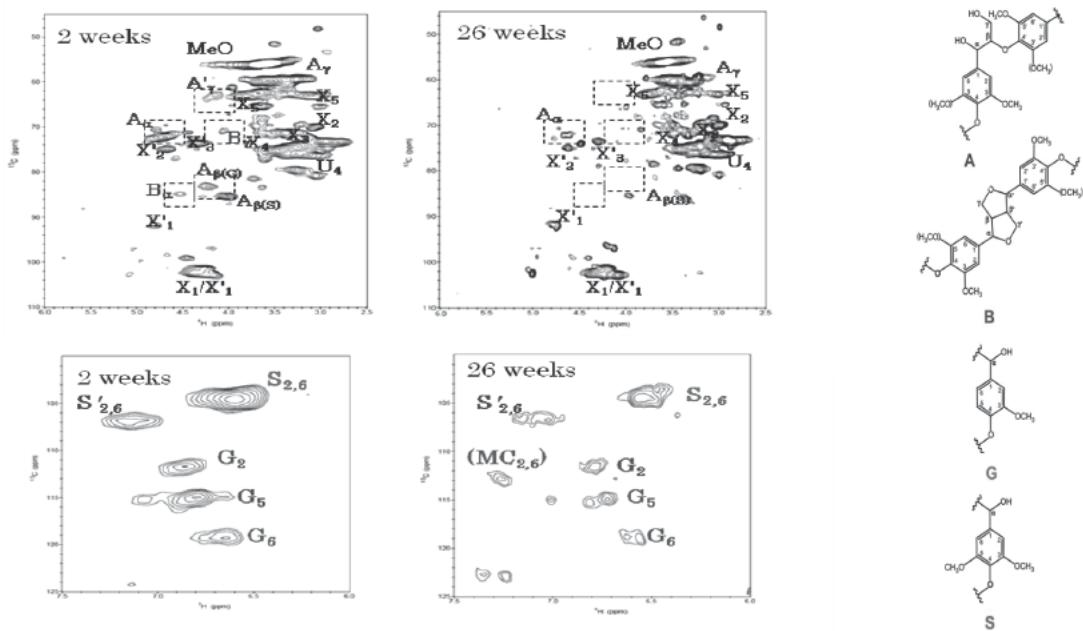
代表者氏名：片平正人（京都大学エネルギー理工学研究所）

共同研究者：渡辺隆司（京都大学生存圏研究所）、小瀧 努（京都大学エネルギー理工学研究所）、西村裕志（京都大学生存圏研究所）、吉岡康一（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

白色腐朽菌は、木質バイオマス中の難分解性成分であるリグニンを選択的に分解するという特徴を有しており、木質バイオマスの有効活用を図る上で有益な菌である。リグニン選択的な分解には代謝物であるセルボリック酸が鍵となる事が渡辺等によって見出された。しかしリグニンの分解過程に関する分子・原子レベルの情報は乏しい。そこで今回超高感度クライオプローブを装着したNMR装置を用い、二次元NMR法を適用する事で、リグニンの分解過程に分子・原子レベルで迫る事を目指した。リグニンの分解過程を理解する事は、高付加価値化合物の原料としてリグニンを活用する道を開く事に繋がる。また難分解性のリグニンを除去する事で、セルロースの活用がさらに促進される事も期待できる。

腐朽の進行に伴い、リグニン由来のNMRシグナルが選択的に消失してゆく事が観察され、白色腐朽菌がリグニンを選択的に分解する事が確認された。またリグニンの分解においては、フェノールの2量体構造がまず壊れ、その後にフェノール環が破壊される事が、各々に特徴的なNMRシグナルの強度の時間変化から分かった。さらにフェノール環の破壊は、概ねシリンギルの方がグアイアシルに優先して生じる事も、NMRシグナルの強度の時間変化から分かった。リグニン選択的な分解のキープレーヤーがセルボリック酸である事が渡辺等によって見出されているが、腐朽の進行に伴ってセルボリック酸のNMRシグナルが生じてくる事も、確認できた。



図：白色腐朽菌による木質バイオマスの腐朽過程の超高感度二次元NMR法による丸ごと（全成分）解析。（左）2週間及び26週間腐朽後の¹H-¹³C HSQCスペクトル。（右）リグニンのサブ構造。

（7）熱帯植林地のバイオマス生長量の評価に関する調査研究

1. 研究組織

代表者氏名：川井秀一（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：R. Widyorini (Gadjah Mada Univ. Indonesia)、EB. Hardiyanto (Gadjah Mada Univ. Indonesia)、B. Subiyanto (LIPI, Indonesia)、A. Firmanti (Res. Inst. for Human Settlements, Indonesia)、大村善治(京都大学生存圏研究所)、甲山 治(京都大学東南アジア研究所)、渡邊一生(京都大学東南アジア研究所)

2. 研究概要

MHP 社のユニット 5 における地表ランダムサンプル区域の樹木生長量のデータについて時間スケールを拡大(2000-2008)して、地上データの充実とバイオマス成長量の高精度解析をおこない、これを衛星データと関連づける衛星リモートセンシング手法の開発を試みた。さらに、これまでのスマトラ丘陵林におけるアカシア植林地の調査研究に加え、マレーシアボルネオ島アカシア林地 (KHP 社)、ならびにスマトラ島中部の Riau Biosphere を新たに研究対象に加えた。前者については、用材を目的とした植林であり、長期にわたるバイオマス成長量の経年変化を樹種、気象の影響等について検討を開始している。また後者については泥炭地における種々の植生、たとえば農業開発区のアブラヤシ、ゴム林、植林区のアカシア林、2次(原生)林等のバイオマス現存量の調査を実施した。

結果の一例として、マレーシア KHP 社におけるデータを以下に示す。バイオマス評価の基礎データとして植林を実施する前の草地、劣化アカシア 2 次林のバイオマスの地上賦存量を求め、それぞれ 3.9 および 86.9ton/ha を得た。2, 3 年生アカシアマンギウムおよびハイブリッドのバイオマス総量を調べ、各部位の比率(図 1)が既存データを大きな差異がないことを見いだした。植林後 4 年を経過したアカシアハイブリッド及びマンギウムの年平均生長量(MAI)はそれぞれ 19.4 および 15.4m³/ha/y であり、前者のそれが大きい。(図 2)

今後、引き続き異なる地域、気象条件のもとでの樹木生長量に関する地表観測データを蓄積拡充し、バイオマス生長量の高精度解析を図ると共に、それぞれのデータを相互に関連づける解析を進める。さらに、大気水蒸気量・雲被覆の影響を受けにくいマイクロ波リモートセンシング技術を応用して衛星データに関する手法開発に取り組む。

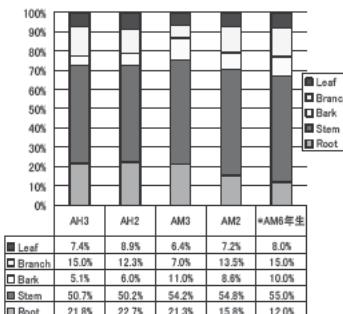


図1：樹木部位別バイオマス量

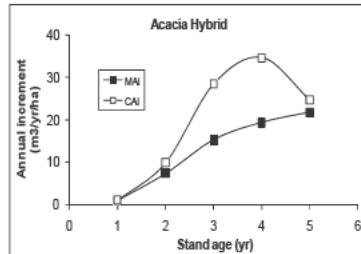


図2-1 ハイブリッド

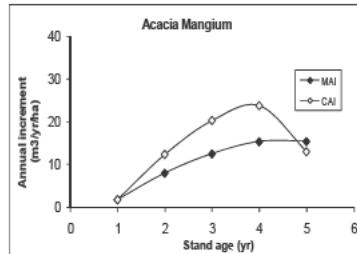


図2-2 マンギウム

(8) 窒素固定能に優れたアクチノリザル樹木の抽出成分ミリカノールの生合成と共生菌フランキアとの化学生物学的検討

1. 研究組織

代表者氏名：河合真吾（静岡大学農学部）

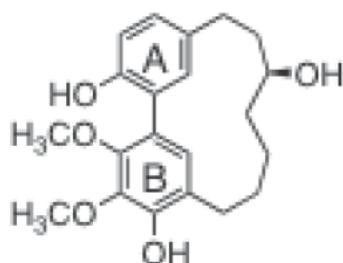
共同研究者：梅澤俊明（京都大学生存圏研究所）、服部武文（京都大学生存圏研究所）、

鈴木史朗（京都大学生存圏研究所）、市澤博生（静岡大学農学部）

2. 研究概要

ヤマモモ属・ハンノキ属・グミ属などの樹木はアクチノリザル樹木と呼ばれ、土壤放線菌であるフランキアとの共生によって、窒素の供給を受ける。しかしながら、これら非マメ科根粒樹木とフランキアとの共生メカニズムについての研究はほとんどない。一方、本樹木群は、C₆-C₇-C₆骨格を有するジアリールヘプタノイド類を特異的に産生しており、これらジアリールヘプタノイドが、フランキアとの共生関係における情報伝達に関わる可能性が期待される。

本研究では、アクチノリザル樹木であるヤマモモ (*Myrica rubra*) ジアリールヘプタノイドであるミリカノール（右図）に注目し、その生合成経路を検討している。実験は、ヤマモモ若枝に各種桂皮酸誘導体6種の¹³C標識前駆体を競争的に投与し、生成するミリカノールを¹³C-NMR解析した。その結果、A環部分の前駆体として、1-(4-ヒドロキシフェニル)プロピオン酸が利用されるのに対し、B環部分の前駆体として芳香環の水酸化およびメチル化が進んだ前駆体である 1-(4-ヒドロキシ-3-メトキシフェニル)プロピオン酸が、優先的にミリカノール分子に取り込まれる傾向が見られ、双方の芳香環を区別して生合成が進行することが推定された。そこで、詳細な生合成機構を明らかにするため、ヤマモモ内樹皮 Total RNA より cDNA を調製し、既知の植物 III型ポリケチド合成酵素 (PKS) 遺伝子の配列を鋳型にして、ヤマモモ III型 PKS 遺伝子の一部配列を取得した。



(9) 宇宙空間におけるプラズマ密度計測のための高周波数分解能受信機の開発

1. 研究組織

代表者氏名：熊本篤志（東北大学理学研究科）

共同研究者：小嶋浩嗣（京都大学生存圏研究所）、笠羽康正（東北大学理学研究科）

2. 研究概要

人類の生存圏となりつつある地球周辺の宇宙空間（ジオスペース）において、プラズマ密度計測に用いるための高周波数分解能プラズマ波動受信機を実現するため、その核となるデジタルデータ処理部の基礎開発を行った。

3. 研究の背景と目的

地球周辺の宇宙空間（ジオスペース）には、気象観測・放送通信・測位のための人工衛星など我々の生活をささえるインフラストラクチャ群が展開されており、人類の生存圏の一部となっている。宇宙空間は電離気体（プラズマ）によって満たされ、磁気嵐に代表される様々な電磁気現象が生起する。プラズマの基本パラメータであるプラズマ密度を計測する手段の1つにプラズマ波動観測がある。地球電離圏上層から磁気圏にかけて観測を行う場合、観測周波数はおよそ 10MHz までをカバーする必要があるが、この全てを高分解能(<1kHz)でカバーしようとすると、過大なデータ量が問題となってくる。そこで本研究では、限られたデータレートの範囲内で、広帯域をカバーしつつ、目的のプラズマ波動が出現する周波数帯を高周波数分解能で観測する機能を備えた新たな高周波数分解能受信機を実現するため、核となるデジタルデータ処理部の基礎開発を実施した。

4. 研究の結果

高周波数分解能受信機全体のブロック図を図1に示す。本研究では受信機の核となる

FPGA のファームウェアの開発を実施した。選択帯域を高分解能計測する Ch-B の出力例を図2に示す。入力データのスペクトル（赤）に対応した出力（緑）が得られていることがわかる。本研究では FPGA のターゲットデバイスは Altera 製 Cyclone III としたが、将来、

宇宙機搭載が可能な ACTEL 製 FPGA への置き換えが必要になることを想定して、内蔵乗算機は用いず、広帯域をカバーする Ch-A、選択帯域を高分解能計測する Ch-B は逐次処理としてリソースを共用するようなファームウェアを開発することで、必要となるロジックセル数の見積もりを行うことができた。

5. 関連する学会発表

Kumamoto, A., T. Ono, Y. Kasaba, K. Higuchi, T. Kobayashi, T. Suzuki, M. Wakabayashi, M., and J. Uemoto, Development of radar sounder and impedance probe for observations in the future planetary missions, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama, September 22-26, 2010.

(10) 科学衛星における電磁適合性(EMC: ElectroMagnetic Compatibility)に関する研究

1. 研究組織

代表者氏名：小嶋浩嗣（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：早川 基（宇宙航空研究開発機構）、高島 健（宇宙航空研究開発機構）、

松岡彩子（宇宙航空研究開発機構）、齋藤義文（宇宙航空研究開発機構）、

平原聖文（東京大学理学研究科）、笠羽康正（東北大学理学研究科）、

八木谷 聰（金沢大学理工研究領域）、中澤 晓（宇宙航空研究開発機構）、

上田義勝（京都大学生存圏研究所）

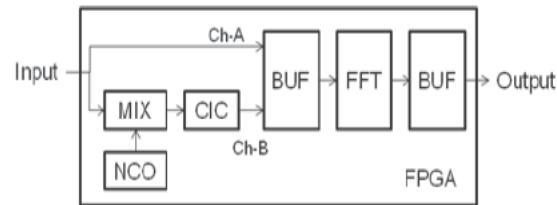
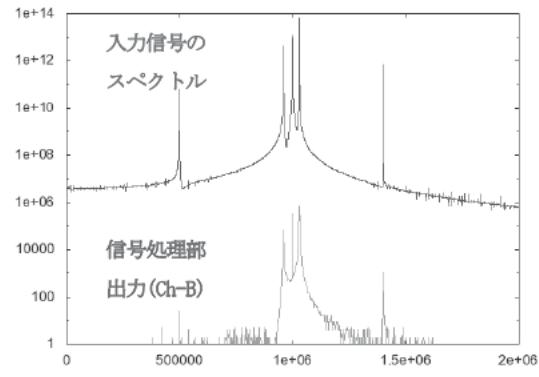


図1：高周波数分解能受信機ブロック図



2. 研究概要

科学衛星において「ノイズ計測を行い、軽減させる」ための EMC 技術は他の地上機器に対してのそれと大きく異なっており、科学衛星に的を絞った技術の確立が重要である。科学衛星におけるノイズ測定手法や対処方法を確立し、統一したコンセプトのものとで EMC に取り組めるよう、本研究では、実際の搭載機器の試験を繰り返し、改良を加えていく。また同時に、EMC 用の小型高感度電磁界センサーの開発も行い、EMC 計測の現場で効果を発揮できるようにする。

本年度は EMC に関する測定を 12 の搭載装置について行った。特に、バス機器に対する EMC が多く行われ、近年、太陽電池の動作点を負荷変動に合わせて適正化する仕組みが取り入れられている部分について、実は、EMC 的には大きなノイズに関する問題点を含んでいることがわかった。それは効率のため非絶縁型のコンバーターを離礁することに原因があり、そのため一次側のノイズもかなり二次側に回り込んでいくことが理由であった。このような configuration を容認した上で、ノイズを軽減するための試験を繰り返し 1 点接地の場所の検討や Common mode noise の軽減などに関する対処方に関する知見の蓄積を行った。また、アナログ ASIC によって小型化をはかったセンサーノードを実際の EMC で用いて、ノイズの空間分布を測定するなど、実際の計測に利用できることを示すことができた。

(11) 多波長ライダー計測による対流圏エアロゾル・雲の物理特性の研究

1. 研究組織

代表者氏名：塩原匡貴（国立極地研究所）

共同研究者：津田敏隆（京都大学生存圏研究所）、中村卓司（国立極地研究所）、
矢吹正教（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

本研究では、対流圏エアロゾル・雲の物理特性導出の適切な計測手法の確立を目指して、信楽 MU 観測所にて多波長偏光ライダーを構築するとともに実証試験観測を実施した。試験計測を行うサイトには、人為・自然起源粒子の両方の寄与が望める地理的条件を有し、ライダーとの比較計測が可能な気象要素の計測装置が揃う京大生存研の信楽 MU 観測所を選んだ。ライダーは、Nd:YAG レーザ波長 355、532、1064 nm の弾性散乱、波長 532 nm の偏光解消度、波長 387、607 nm の窒素ラマン散乱光を、口径 30 cm および 25 cm の 2 つの望遠鏡を用いて受光するシステムとなっている。このシステムの特徴は、低高度からの観測が可能であり、大気境界層内の大気物質の計測可能のこと、多波長偏光計測から粒子の大きさと形状の情報が抽出可能なことが挙げられる。

多波長ライダーおよび地上 in-situ 計測との同期計測を断続的に実施し、夜間から早朝にかけての混合層内における高湿度条件下でのエアロゾル粒子の成長過程や、黄砂や巻雲の特徴的な物理特性の変動を捉えることができた。今後の課題としては、極域をはじめとする特異な観測サイトにおいても、本システムが長期間、安定して稼働可能かどうかの検証や、膨大なデータを効率良く解析するためのツールの開発が挙げられる。



図 本研究で設置した多波長ライダー射出装置（左）と受光装置（右）

(12) 超高速に加速したマイクロ粒子と固体との衝突実験

1. 研究組織

代表者氏名：柴田裕実（京都大学工学研究科）

共同研究者：山川 宏（京都大学生存圏研究所）、大橋英雄（京海洋大学海洋科学部）、

佐々木 晶（国立天文台）、岩井岳夫（東京大学工学系研究科）、

平井隆之（総合研究大学院大学）、中村真季（東京大学新領域創成科学研究科）、

池田卓矢（京都大学工学研究科）

2. 研究概要

惑星間や星間における超高速微粒子（ダスト）と固体との衝突によって起こる現象を実験室で模擬する実験を行う。直径数 10 nm から数 10 μm の微粒子を MV 級高電圧静電加速器で毎秒数 km から数 10 km の超高速に加速し、金属、高分子、セラミックスなどの物質に衝突させ、電荷測定、二次イオン質量分析、発光測定などにより衝突機構を解明することを目的とする。

速さ km/s 領域のミクロンサイズの粒子が加速されると、その運動エネルギーは数 100 GeV～数 TeV となる。それが固体に衝突するとその全エネルギーがフェムト秒からピコ秒の極めて短い時間に開放され、衝突付近はプラズマや衝撃波が生成される。そこでは局所的に高温（数万°C）、高圧（100 万気圧）状態になり、クレーターが形成され、物質の改変や相変化が起こると考えられる。そのような超高速マイクロ粒子衝突実験を、研究代表者が開発した東京大学（東海村キャンパス）の 3.75MV バンデグラーフ加速器、京都大学の 100kV 加速器、及びドイツ・ハイデルベルクのマックス・プランク核物理学研究所の 2MV バンデグラーフ加速器を用いて行う。

実験では図 1 のように、加速された微粒子の電荷量をビームライン上に設置された 3 個のビームモニターで測り、その飛行時間から速度の弁別を行い、入射微粒子のパラメータを決定する。その後、微粒子が標的チャンバー内に設置された固体標的に衝突すると、標的に電荷を生じ、電子、イオン、光（X 線、UV から赤外）等を放出するので、それらを電荷測定器、飛行時間型質量分析器、光マルチチャンネル分光器等を用いて測定する。これらの測定から微粒子衝突の際のエネルギーの蓄積及び散逸過程について考察し、適切な衝突モデルの構築を試みる。

なお、東大にある日本唯一の超高速ダスト加速器はイオンの加速も行っており年 2 回 1 ヶ月ずつしか運用しない（本実験日数としては年 2、3 日）ので、微粒子専用加速器を所持するマックスプランク研究所でも実験を行う。京大の 100kV 加速器では数 km/s 以下のダストの衝突実験を行う。

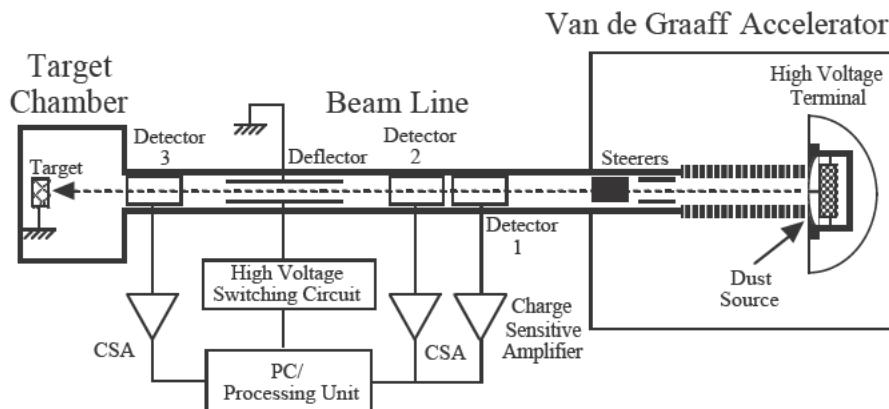


図 1：超高速マイクロ粒子衝突実験の概要。ビームラインの測定系はダストの電荷、速度、質量を計測する。

(13) 多波長リモートセンシングによる汽水域懸濁物質起源推定方法の開発

1. 研究組織

代表者氏名：下舞豊志（島根大学総合理工学部）

共同研究者：古本淳一（京都大学生存圏研究所）、古津年章（島根大学総合理工学部）、

三瓶良和（島根大学総合理工学部）、瀬戸浩二（島根大学汽水域研究センター）

2. 研究概要

汽水域の環境を広範囲にモニターするためには、リモートセンシングが有効だと考えられるが、リモートセンシングによる水中懸濁物質(SS)の起源推定方法はまだ開発されておらず、昨年度から島根大学において予備的検討が始まった段階である。本研究では、多バンドを用いた人工衛星による観測を念頭において、分光反射計によって測定された水の反射率と直接採取した懸濁物質から、その起源と割合を推定するための方法の開発を目標とする。懸濁物質の主な起源はプランクトン、河川からの流入、湖底堆積物の巻き上げである。乾燥した懸濁物質中の有機炭素濃度と全有機炭素(以下 TOC)濃度、全有機炭素と全窒素の比を C/N 比という。各起源における SS 中の有機炭素(TOC)の濃度、有機炭素と窒素の比率(C/N 比)、無機 SS の濃度は異なっている。分光反射計によって得られた水の分光反射率から、これらの値を重回帰分析によって推定した。図 1 に TOC 濃度、C/N 比、無機 SS 比率の関係を示す。結果を総合すると、「河川からの流入が主体」とそれ以外の懸濁物質の判別は、精度よく行えると考えられる。また、「プランクトンが主体」とそれ以外の懸濁物質の判別は、誤差が大きいがある程度は可能であると考えられる。結果から、人工衛星による懸濁物質起源推定の可能性が示唆されたが、まだ観測データが少なく、手法確立のために今後さらに観測データの蓄積と事例解析の積み重ねが必要である。

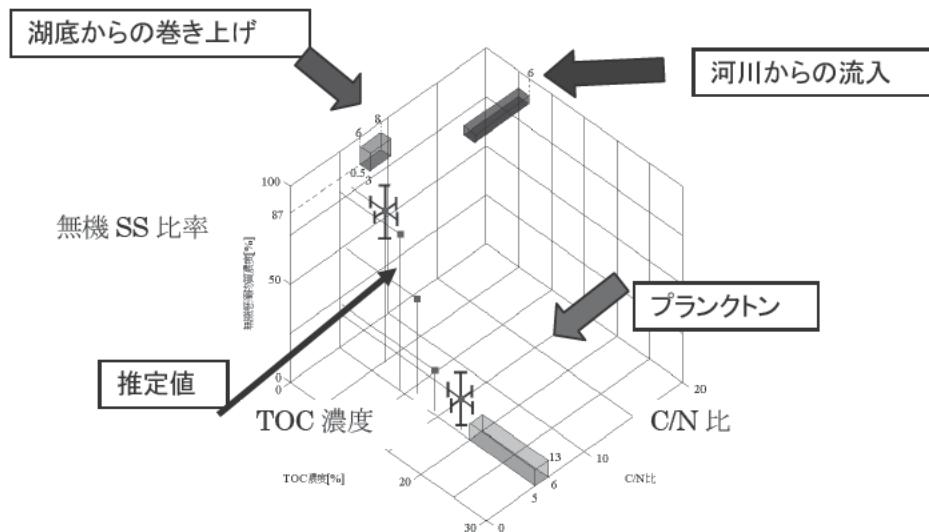


図 1. 水面の反射率から推定した TOC 濃度、C/N 比、無機 SS 比率の関係。

(14) マイクロ波励起超活性固体境界層反応によるバイオリファイナリーケミカルプラットフォームの構築

1. 研究組織

代表者氏名：園部太郎（京都大学エネルギー科学研究所）

共同研究者：渡辺隆司（京都大学生存圏研究所）、篠原真毅（京都大学生存圏研究所）、

三谷友彦（京都大学生存圏研究所）、畠 俊充（京都大学生存圏研究所）、

杉山淳司（京都大学生存圏研究所）、大橋康典（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

バイオマスは再生可能な唯一の有機物資源であるため、石油化学産業に代わる新しい低炭素負荷化学産業プロセスを構築する土台となる使命をもつ。本研究では、炭素負荷の小さい持続的な次世代化学産業の構築を目指して、食糧と直接競合しない木質バイオマスをマイクロ波励起超活性固体境界層反応場により有用基本化学品を製造するプロセスを生み出すことを目的とする。そこで、マイクロ波効果を最大限出すために、マイクロ波励起による超活性固体境界層反応を用いた木質バイオマスの急速熱分解反応の開発、反応特性解明、生成物質の分析、装置の設計・開発を、専門の異なる研究者が連携して行った。その結果、マイクロ波出力 100W、1 分間で木粉(200mg)から液化収率約 50%を達成できる省エネルギー転換プロセスの開発に成功した。

本研究は、生存圏学際萌芽研究センターの共同研究拠点活動の一つである生存圏フラッグシップ共同研究の一環として位置づけられる。これまで、マイクロ波熱分解による外部資金は受けておらず、本申請の研究成果をバネに外部資金申請につなげ、バイオエタノールに続く共同研究プロジェクトにつなげたい。

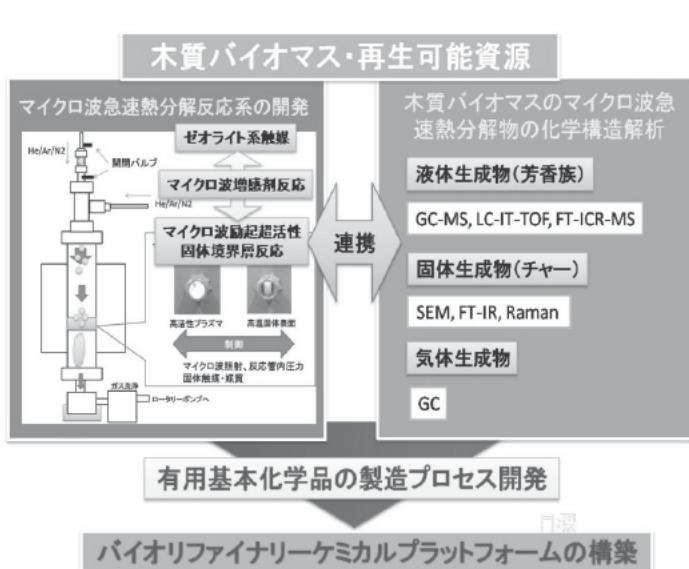


図1：バイオリファイナリー・ケミカル
プラットフォーム構想

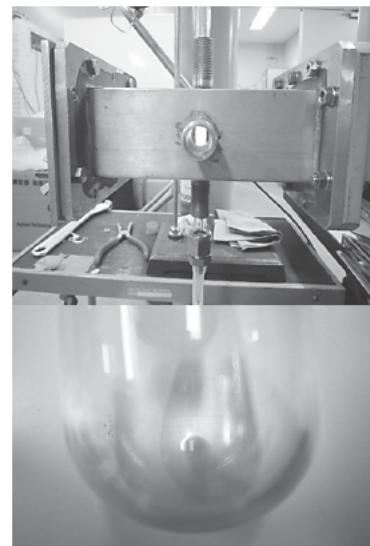


図2：(上) マイクロ波熱分解リアクター
(下) マイクロ波熱分解油

(15) スギ材の空気浄化機能の解明とヒトの心身への影響に関する研究

1. 研究組織

代表者氏名：仲村匡司（京都大学農学研究科）

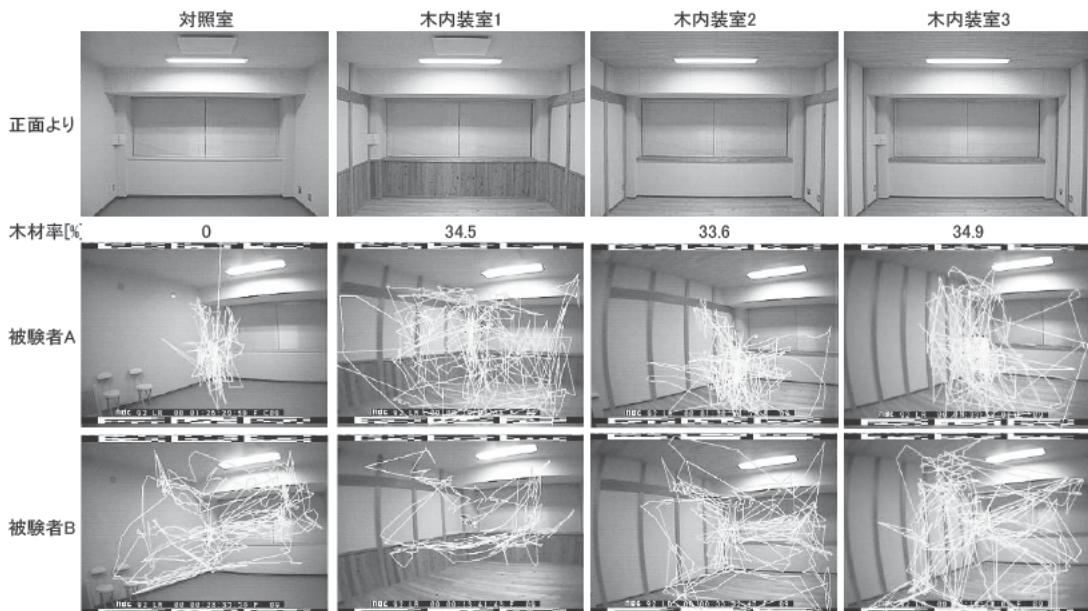
共同研究者：川井秀一（京都大学生存圏研究所）、梅村研二（京都大学生存圏研究所）、東 賢一（近畿大学医学部）、萬羽郁子（近畿大学医学部）、辻野喜夫（大阪府環境農林水産総合研究所）、上堀美知子（大阪府環境農林水産総合研究所）、藤田佐枝子（（有）ホームアイ）、山本堯子（（有）オフィスプランニング）

2. 研究概要

本研究の目的は、スギ材の空気浄化機能を解明するとともに、スギ材が存在する実大居住空間がヒトの心身に及ぼす影響を究明することにある。今回はスギ材の構成成分および含水率が NO₂ 収着に及ぼす影響について検討するとともに、実大木質内装実験のパイロット・スタディとして、内装にあらわしになったスギ材が被験者の視覚心理や認知反応に及ぼす影響、および、スギ材内装への短時間の暴露が被験者の気分やストレスレベル及ぼす影響などを調べた。スギ材への NO₂ 収着はスギの構成成分への吸着だけでなく、成

分と NO_2 が反応することによって、あるいは、構成成分が水分と NO_2 の反応の触媒となることによって起こること、含水率によって木材が反応物および触媒として働く割合が異なることなどが示唆された。吉野スギを用いて構成された実大木質内装（下図）における被験者実験

では、被験者は木内装室の木の香りをはっきりと感じ取り、しかも「快」と評価した。さらに、そのにおいの質を「落着きやすい」「親しみしやすい」「生き生きとした」と判断した。そのような部屋を観察する被験者の視線は、木内装室 1 および 2 では、壁面に現れた軸材に沿って移動しやすかったが、木内装室 3 では柱から柱へと視線がホッピングする場合が多かった。部屋の見た目の印象評価では、木内装室 1 および 2 は同程度に強く「快適」と評価されたが、木内装室 3 の快適感は弱く、4 室の中で最も「気が散る」と評価された。



吉野スギを用いた実大木質内装室とこれを観察する被験者の視線移動の例

(16) 热帯上部対流圏循環の解明

1. 研究組織

代表者氏名：西 憲敬（京都大学理学研究科）

共同研究者：塩谷雅人（京都大学生存圏研究所）、鈴木順子（（独）海洋研究開発機構）、
濱田 篤（東京大学大気海洋研究所）

2. 研究概要

熱帯上部対流圏（高度 9–18km）における大規模循環・波動の性質を調べる。さらに、循環形成や波動励起に関係の深い巻雲・乱層雲などの雲活動に関する解析を行った。

a. 赤道ケルビン波を中心とする循環場や波動の解析

上部対流圏にみられる赤道ケルビン波の速度について解析を行った。振幅増大時に経度的に局在化した局面でみられる速度（15m/s）と、グローバルなスペクトルで最大のエネルギーをもつ速度（25m/s）の違いを認識することが重要であることを指摘した。それぞれの速度をもつ波の活動強度の経度・季節依存性を調べ、それらが相当に違う分布を示すことが明らかになった。また、ENSOにともなう太平洋域の上部対流圏における風系の変化によって、この領域を通過する赤道ケルビン波の数に明瞭な増減がみられることがわかった。

b. MTSAT 赤外データを用いた雲頂高度データセットの開発

上部対流圏の雲活動を知るための雲頂高度データを拡充した。衛星天頂角の補正スキームを確立し、より広域での利用が可能になった。その結果、赤道大気レーダー付近でも使用可能なテーブルが作成できた。

c. 乱層雲および巻雲の消長に関する解析

上部対流圏の雲活動における興味深い現象として、ITCZ域で東西3000kmに伸びた雲域の同時南北分割(2007年4月)を解析した。主にマイクロ波を用いたGSMaPによる降雨分布データとの比較により、分割進行時には潜熱解放が続いている、それに伴う上昇流上端の発散風が南北分裂を促進している可能性を示唆した。また、雲頂高度データを用いることによって、分割進行時の雲頂変化を正確に記述することができた。

(17) 原子状酸素照射による木質炭素化物の構造変化の解明

1. 研究組織

代表者氏名：畠 俊充（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：田川雅人（神戸大学工学研究科）、小嶋浩嗣（京都大学生存圏研究所）、
梶本武志（和歌山県工業技術センター）

2. 研究概要

低地球軌道（地上約200–700km）を航行する宇宙機の外表面は、放射線や原子状酸素、紫外線に曝露される。そのため宇宙機の外表面には原子状酸素によって劣化しにくい材料を使用する必要がある。一般に有機物を高温で処理して得られる炭素材料は耐熱性があり、軽くて高強度であるため宇宙機での外表面に使用が試みられている。木質炭素化物は電気及び熱の伝導性があり、燃料用途以外に様々な機能を付与することが可能である。本研究では原子状酸素に抵抗性のある木質炭素材料を開発するため、木質炭素化物にSiを含有させた焼結体試料を作成し、宇宙環境下のシミュレート実験を行った。作成した試料表面に原子状酸素を照射し、照射前後の木質炭素化物表面性状を小角X線、TEM-EELSなどにより分析した。

TEM-EELSによる分析の結果、試料内において木質炭素化物中のSiは酸化物になっていることが明らかとなった。原子状酸素照射時に炭素はCOもしくはCO₂となって気化することにより材料の浸食が進行し同時にSiも酸化される。浸食の程度は材料中のSiの配合比やカーボンの化学結合の状態に依存していることが明らかとなった。また、原子状酸素照射によりSiが酸化物を形成するとともに酸化物以外のSiとの反応物生成物による浸食防止の可能性が推測された。木質炭素化物とSiの焼結体による原子状酸素に対する抵抗性発現のメカニズムを構造の面から検討した結果、Si複合木質炭素化物が宇宙機の外表面に使用できることが示唆された。

(18) 直パルス通電加熱による木質バイオマスの選択液化

1. 研究組織

代表者氏名：本間千晶（北海道立総合研究機構）

共同研究者：畠 俊充（京都大学生存圏研究所）、渡辺隆司（京都大学生存圏研究所）

2. 研究概要

本研究では外部直流に24,000Hzの周波数パルスが付与された直パルス通電加熱（通電焼結）を適用し、木質バイオマスから得られた液化物、熱分解残渣を有用物質として活用することを目的として、直パルス通電加熱の条件が生成物、液化物組成に及ぼす影響、熱分解残渣性状の分析、機能化の検討を行った。

加熱条件および触媒の添加が熱分解反応に及ぼす影響を把握するため、木質材料の熱分解液化の挙動および生成物の組成を検討した。また、加熱条件が熱分解残渣の組織構造、化学組成、性質に及ぼす影響を把握するため、熱分解残渣の性状および機能に関する検討を行った。さらに、熱分解機構の解明に向けた基礎データを得るために、熱分解液化物のGC-MS分析を行った。

その結果、熱分解により生成する残渣量、液化物量の分析により、液化物収率が500°Cで最大となることなど加熱条件及び触媒の有無と熱分解生成物組成との関係が示された。また、性状および機能に関する検

討として、FT-IR 分析、液相吸着試験、化学組成分析を行った結果、処理温度と熱分解残渣の化学構造、アンモニア吸着能等との関係が示された。TEM 分析では触媒の有無が熱分解残渣の微細構造に及ぼす影響が示された。熱分解液化物の GC-MS 分析等の結果、液化物構成成分と処理温度との関係、触媒添加の影響が一部明らかとなった。

(19) 昼間の熱圏中性大気風速計測のためのロケット放出リチウム観測用光学機器の開発と観測

1. 研究組織

代表者氏名：山本真行（高知工科大学工学部）

共同研究者：山本 衛（京都大学生存圏研究所）、渡部重十（北海道大学理学研究院）、

阿部琢美（宇宙航空研究開発機構）、羽生宏人（宇宙航空研究開発機構）、

石田遼太（高知工科大学工学部）、村上睦彦（高知工科大学工学研究科）

2. 研究概要

熱圏大気は中性大気と電離大気（プラズマ）に分かれるが、中性大気が主成分であるにもかかわらず、その計測の困難性から熱圏の十分な理解が得られていないのが現状である。超高層大気も生命活動に必須の大気圏と捉えれば、熱圏観測法の確立は、惑星大気全体の循環を踏まえた長期気候変動等を勘案した地球生存圏の理解の上で非常に重要な基礎データを生む。代表者らは、JAXA 宇宙科学研究所の観測ロケット搭載のリチウム放出装置（LES）から熱圏大気中にリチウム原子を放出し、同原子の波長 670.8 nm の太陽共鳴散乱光を用い熱圏中性大気風を観測することを目的として基礎研究を進めてきた。

我々は 2007 年 9 月に LES を用いた実験に成功し、夕方の熱圏大気 400 km までの風速計測の手法を確立した。観測には帯域 20 nm のバンドパスフィルタを用いた。2011 年 6 月には米国と共同して米国東海岸ワロップスにおいて昼間条件下の高度 120 km までの下部熱圏の風速計測を、また同年夏以降には鹿児島県内之浦において明け方条件下での高度 400 km までの熱圏大気風の計測実験を実施予定である。

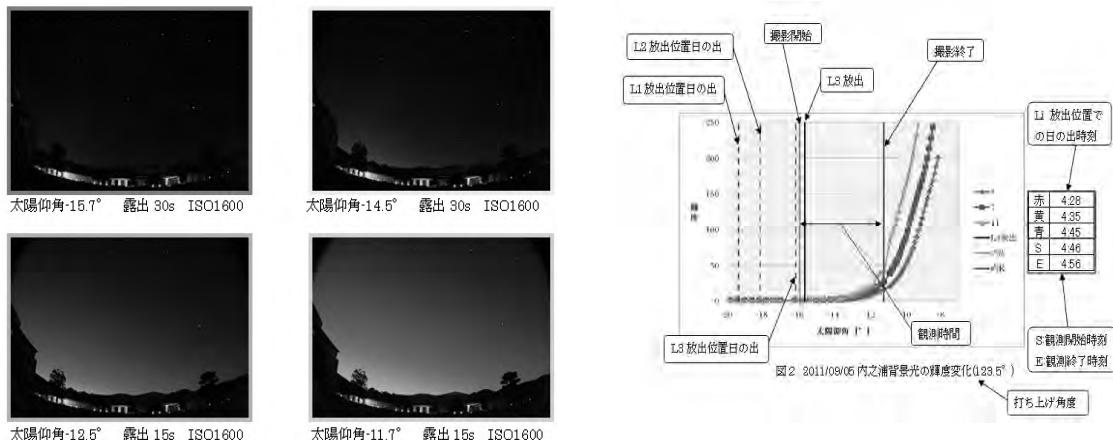


図1 リチウムイメージヤによる背景光計測結果画像

本研究では、明け方および昼間条件下的実験を想定し、実験条件として重要な背景光の定量的計測と装置の検討ならびに装置開発を実施した。明け方条件の背景光計測、ならびにその延長として昼間条件に至る条件下での背景光の計測は、大学院生の村上、学部学生の石田を中心に、2010 年 9 月および 11 月に 3 回実施した。リチウムイメージヤは夕方・明け方用の帯域 12 nm のバンドパスフィルタを用いて計測し、内之浦での実験に対しては、ロケット打上げ方位角を 123.5 度、地上光学観測地点としては、足摺岬、内之浦、奄美大島の 3 地点の選定が妥当という結論を導いた（石田、2011）（図 1、図 2）。

昼間観測用リチウムイメージヤーとしては、研究チームならびに米国側実験担当者の Miguel F. Larsen 教授と相談の上、視野角 40 度、F/6 のテレセントリック光学系に帯域 2 nm バンドパスフィルタを用いる解を得て、フォトコーディング社に依頼し本ミッション研究費を活用し製作した。装置完成が年度末となつたため、4月に、山本真行、村上を中心として、同装置を用いた試験観測を実施し、6月の観測本番を成功に導く。さらに夏以降に予定される内之浦での明け方～昼間条件に至る観測でも、既存の 20 nm, 12 nm フィルタに加えて、本研究で製作した帯域 2 nm の昼間用イメージヤーを用いることで、近い将来の計画として我々のチームが提案している昼間の熱圏上部における観測を実施する際の基礎データを得て、定量的な検討を行い、同実験を軌道に乗せたいと考えている。

参考文献：石田遼太，ロケット放出 Li 観測の為の S/N 測定と WIND-2 打ち上げ条件の設定，高知工科大学卒業研究報告，2011.

(20) 担子菌 *Trametes versicolor* RC3 株の発酵阻害物質分解性ラッカーゼ遺伝子の単離・同定と異種発現解析

1. 研究組織

代表者氏名：渡邊崇人（京都大学生存圈研究所）

共同研究者：Chartchai Khanongnuch (Chiang Mai Univ.)、Woottichai Nachaiwieng (Chiang Mai Univ.)

2. 研究概要

木質バイオマスからエタノールを生産する際、リグニン由来の分解物（フルフラール、バニリン等）が酵母のエタノール発酵を阻害することがあり、その影響を最小限に抑えることが必要となる。研究代表者の所属する研究室では、タイで単離され、42°Cでも生育可能な担子菌 *Trametes versicolor* RC3 株のラッカーゼ（リグニン分解酵素の一種）画分が木質バイオマス前処理後の発酵プロセスの阻害物質を分解することを明らかにしている。今回は、RC3 株のラッカーゼの高產生条件の検討と諸性質の解析を行い、また、その遺伝子の単離・同定と異種発現を試みた。

本ラッカーゼは、米ぬか培地や銅存在下で活性が高く、アセトンやエタノール等の有機溶媒による沈殿濃縮でも活性は保持されていた。また、ドデシル硫酸ナトリウムポリアクリルアミドゲル電気泳動 (SDS-PAGE) 後のゲル上でも活性染色が可能であった。さらに、経時に抽出した RC3 株の菌体外酵素を等電点電気泳動 (IEF) 及び SDS-PAGE に供し、活性染色した結果、本菌のラッカーゼには複数のアイソザイムが存在することが明らかとなった。一方、PCR をベースにした方法でラッカーゼ遺伝子の cDNA を取得することに成功した。これを発現ベクターに連結後、メタノール資化性酵母 *Pichia pastoris* へ形質転換したところ、メタノール資化性とラッカーゼ遺伝子を有する形質転換体を多数取得した。

2.5 生存圈フラッグシップ共同研究

生存研に特徴的なプロジェクト型共同研究を支援するため、フラッグシップ共同研究を立ち上げ、公募により 3 件を採択した。フラッグシップ共同研究は、従来中核研究部などで個別に実施していたプロジェクト型共同研究を、可視化・研究支援することを主な目的とする。



(1) 热帯産業林の持続的生産利用に関する多角総合的共同研究

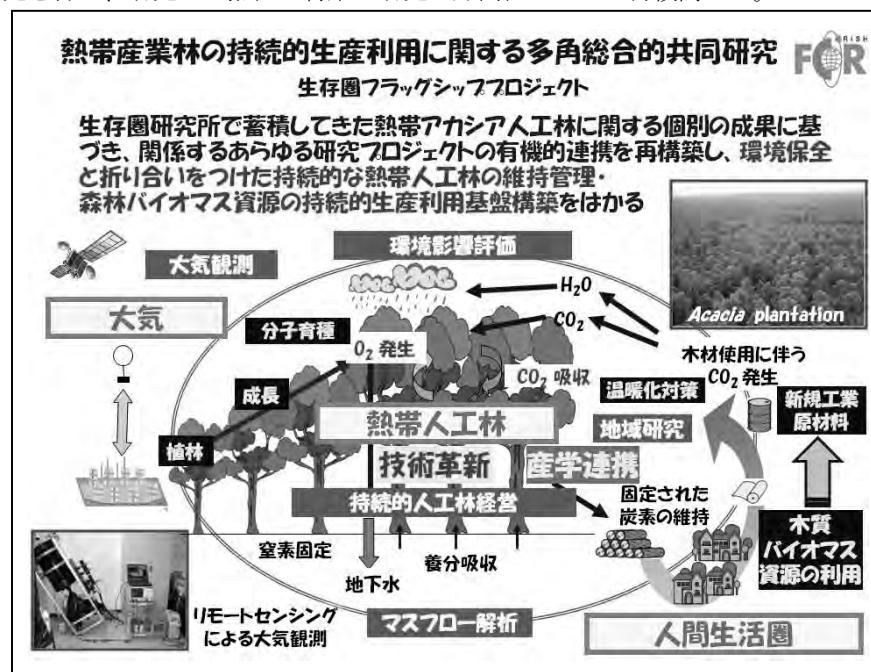
研究代表者：梅澤俊明

化石資源の大量使用に基づく急激な地球環境の悪化や化石資源の枯渇予想により、エネルギー・食糧・工業原材料の供給を、環境保全及び経済成長との折り合いのもとに達成する方策の確立が今後の人類の生

存に必須となっている。そして、この方策の確立こそ、生存圏科学に与えられた使命と言える。

化石資源に代わり、再生可能資源に対する依存度を上昇させることへの必然性は、既に世界的共通認識となっている。再生可能資源には様々なものがあるが、エネルギー供給に加え、炭素系工業原材料の供給が可能な植物バイオマス資源はとりわけ重要であり、その資源育成と有効利用システムの確立が、世界的に強く求められている。とりわけ、熱帯地域における樹木生長量は、温帯域のそれをはるかに上回っており、熱帯産業造林の持続的維持管理とそこで得られる森林バイオマスの効率的利用が、再生可能資源依存型社会において極めて重要となる。以上に鑑み、京都大学生存圏研究所では、その発足と共に、国内外の研究機関と連携して、アカシアマンギウムやアカシアハイブリッド植林地において、大気圏・森林圏・人間生活圏の物質循環の精測を行い、それに基づき、地域の環境を損ねることなく木材生産の持続性と循環性を保証する方策を考えることを目的とした統合的・融合的研究を推進してきた。

本共同研究では、熱帯アカシア資源の持続的生産利用基盤の確立を最終目的として、従来生存圏研究所で蓄積してきた熱帯アカシア人工林に関する個別の成果に基づき、関係するあらゆる研究プロジェクトの有機的連携を再構築するための総合研究を実施した。まず、平成22年5月25日にキックオフミーティングとして「第1回生存圏フラッグシップシンポジウム（第150回生存圏シンポジウム）環境を考慮したバイオマス資源の確保戦略」を開催した。さらに、本研究では、従来の関連研究を継続すると共に、熱帯人工林の持続性、熱帯早生樹の特性、熱帯早生樹の利用、熱帯早生樹のバイオテクノロジー、の4項目に関する調査研究を行い、研究の必然性と将来の研究の方向性について再検討した。



熱帯産業林の持続的生産利用に関する多角総合的共同研究に関する調査報告書

研究代表者： 梅澤俊明（生存圏研究所 森林代謝機能化学分野）

報告者： 梅澤俊明

調査日：平成23年2月7日～3月31日

(調査結果)

本調査研究の目的は、従来生存圏研究所で進めてきたアカシアを中心とする熱帯早生樹の人工林の持続的維持と利用の現状について俯瞰的に把握し、得られた情報を合理的に解析することにより、今後の関連研究の方向性の再構築を行うことである。

熱帯地域における持続的な大規模産業造林は、持続的、循環的な木質バイオマス資源の生産基盤として、

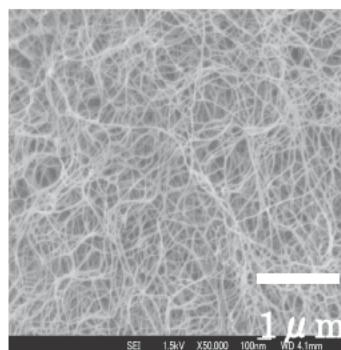
我が国の資源確保や地元住民の経済活動・福祉に大きく貢献している。その一方で、遺伝的多様性に乏しい限られた系統の連続的かつ土地集約的な植林に伴う「生産の問題」、土壤栄養分の短期収奪に関する「持続性の問題」、地域住民の生活保証や経済振興といった「社会問題」、木質資源の効率的な材料変換やエネルギー変換に関わる「利用の問題」など生存圏全体に関わる様々な課題が存在している。これらの課題の解決には、従来の技術では不十分であり、関連学術基盤の深化に基づく圧倒的な技術革新が必須である。これらの課題解決に向けて、生存圏研究所では、その発足とともに、国内外の研究機関と連携して、インドネシア南スマトラ州、リアウ州、マレーシアサバ州などの事業植林地をフィールドとして、大気圏・森林圏・人間生活圏の物質循環の精測を行い、それに基づき、地域の環境を損ねることなく木質バイオマス資源生産の持続性と循環性を保証する方策を考えることを目的とした総合的研究を行ってきた。その結果、アカシア人工林の育成と利用に関して、多くの個別的プロジェクトが進行し、それぞれ成果を上げてきた。しかしこれらの個々のプロジェクトの発足以来既に6年が経過したことから、フラッグシッププロジェクトの一環として研究の方向性について検証することとした。

具体的には、熱帯人工林の持続性、熱帯早生樹の特性、熱帯早生樹の利用、熱帯早生樹のバイオテクノロジー、の4項目について、それぞれに4～6個程度の小項目を設定し、熱帯早生樹（特にアカシアを対象とし、ユーカリも含める）の持続的生産利用の現状把握と将来展望について合理的評価を行っている。調査結果は、生存圏シンポジウムに於いて報告し、今後の方向性について討議すると共に、結果の取りまとめを生存圏研究に報告する。

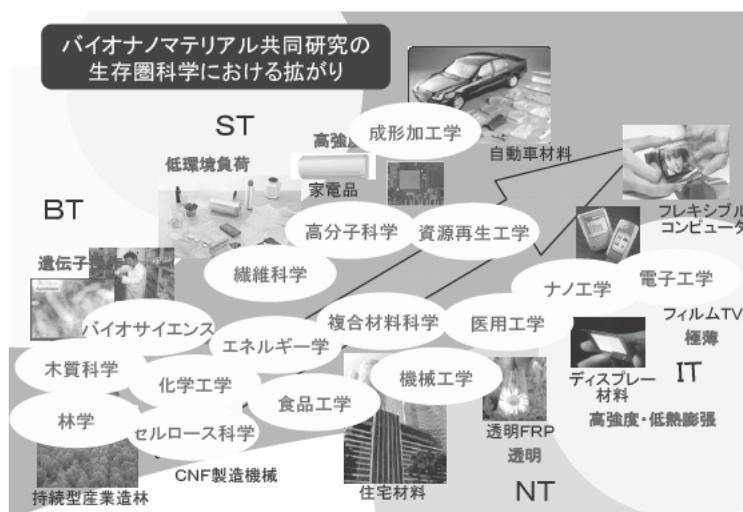
(2) バイオナノマテリアル共同研究

研究代表者：矢野浩之

植物細胞の基本骨格物質であるセルロースナノファイバーは、鋼鉄の1/5の軽さで、その5倍以上の強度(2-3GPa)、ガラスの1/50以下(0.1ppm/K)の線熱膨張係数を有するスーパーナノ纖維である。木材等、植物資源の50%以上を占めるほぼ無尽蔵の持続型資源でありながら、ナノファイバーレベルまでの解纖コスト、ナノファイバー故の取り扱いの難しさなどから、これまで工業的利用はほとんどなされていない。しかし、低炭素社会の早期実現に向けて、20世紀を支えた「炭酸ガス排出型マテリアル」から、「炭酸ガス吸収固定型マテリアル」へのパラダイム転換が叫ばれる中、新規の低環境負荷ナノ材料として、世界中で、近年、急速に研究が活発化している。このような背景のもと、本フラッグシップ共同研究は、生存研が有するセルロースナノファイバー材料やキチンナノファイバー材料といったバイオナノマテリアルに関する10年近い共同研究実績を基に、生存研にバイオナノ材料において世界をリードする共同研究拠点を構築することを目的として行っている。



図：セルロースナノファイバー(上)とそれを基盤としたバイオナノマテリアル研究の拡がり(右)。



本共同研究の特色は“異分野連携”、“垂直連携”といった“連携”である。生存圏科学の拡がりを活用して、生物資源材料を扱う研究者、そのナノエレメントの化学変性や再構築を行う研究者、さらには材料を部材化し自動車や電子機器への応用に取り組む研究者、といったこれまでつながりの薄かった分野の研究者が垂直連携して、持続型生存圏の構築に資する先進的生物材料の開発、実用化を目指している。

セルロースナノファイバーの製造方法に関する調査報告書

研究代表者： 阿部賢太郎（京都大学次世代開拓研究ユニット）

報告者： 阿部賢太郎

調査日：平成23年2月1日～2月28日

(調査結果)

1) はじめに

近年、様々なナノ材料が生み出される中で、植物由来のミクロフィブリルが持つ優れた性質と形状に注目が集まり、新しいナノファイバー材料として利用するための研究が数多く行われている。以下に、植物から単離されるナノファイバー状のセルロース（=セルロースナノファイバー）の製造方法についていくつかの研究例を交えて紹介する。

本稿に表記するナノファイバーは全て直径がナノメートルサイズ（主に100nm以下）の長纖維を意味する。また論文によっては cellulose nanofibril や nanofibrillated cellulose などと呼ばれることがあるが、ここでは全てセルロースナノファイバーもしくは単にナノファイバーとした。

2) セルロースナノファイバーの製造

2.1. 原料について

セルロースミクロフィブリルは植物細胞壁の主要な構成要素であるため、あらゆる植物がナノファイバー原料になりえる。他にも微生物が生産するバクテリアセルロースやホヤ類の被囊も原料として用いられる。ここではナノファイバーの原料に最も広く用いられている植物資源について簡単にまとめる。

木材は植物原料の中でも最も豊富に存在する資源であり、一般に紙パルプとして身近にあるため、ナノファイバー製造においても多く用いられる。次いで広く用いられている原料は農業副産物である。つまり農作物の非食用部や、農作物から食品を製造する際に生じる副産物のことである。地域に適した数多くの農作物があることから、世界中で幅広い植物原料が用いられている。いくつか挙げると、ポテト・ショガービートパルプ（デンプンおよび砂糖の搾りかす）、稻・麦わら、バガス、大豆の豆皮や豆殼およびバナナの花軸や偽茎⁷⁾等からナノファイバーが単離されている。他にも緑藻類のシオグサもナノファイバー原料の候補になりえる。

2.2. 単離法について

ミクロフィブリルはヘミセルロースやリグニンなど他の細胞壁成分と共に複雑な多層構造をもつ細胞壁を形成している。それゆえナノファイバーを単離するためには、まず精製処理を行い、その後何らかの解纖処理を施す必要がある。セルロースの精製法はすでに広く知られているため、ここでは解纖処理についてまとめる。

解纖処理には大きく分けて化学的解纖と機械的解纖の2種類がある。

化学的処理として挙げられるのは主に酸加水分解と TEMPO 酸化である。硫酸等を使ってセルロースの非結晶領域を加水分解することによって得られるセルロースは、高い結晶性を示し幅は10-20nmとなるが、長さが200nm程度と一般的なナノファイバーに比べて短い。そのため、ウィスカ（ナノウィスカ）やナノクリスタルとも呼ばれる。1995年に Favier らがホヤから調製したセルロースウィスカを補強繊維として初めて利用しゴムの物性を飛躍的に向上させて以来、ウィスカの製造および利用は今日でも広く行われている。

機械的解纖とは、様々な機械を用いて細胞壁をほぐしてナノファイバーを単離する手法である。色々な

装置の中で最も広く用いられている装置は高圧ホモジナイザーである。高圧ホモジナイザーとは、試料懸濁液を細いノズルから高圧下で押し出し、その際に生ずる高い剪断力によって試料を粉碎する装置である。繰り返して処理することで木材パルプの外側からリボン状の薄片が剥がれ、さらにその薄片がナノファイバーへと徐々にほぐれる。しかし、解纖が不十分で単独のナノファイバーにまでほぐれていなければ、ミクロフィブリル化セルロースとも呼ばれる。Microfluidizer™と呼ばれる装置もここに含まれ、同様に広く用いられている。また、これら機械的解纖を効果的に行う前処理として酵素処理を行う例もある。

その他の機械的解纖として、セルロース試料の水懸濁液を高速で衝突させることでナノファイバーを得る対向衝突（ウォータージェット）法や、超音波処理法がある。

最後に紹介する装置がグラインダーである。グラインダーとは、高速で回転する2枚の砥石の微小な隙間に試料懸濁液を通過させることによって試料を磨碎する装置である。

機械的解纖は基本的に10–30回程度の繰り返し処理を必要とする。しかし、それに伴い得られる。

ナノファイバーのセルロース結晶性や分子量が徐々に低下するという報告もあり、機械的解纖はできる限り簡便に行うことが望まれる。特に市販の乾燥パルプを原料に用いた場合、ナノファイバーの単離は困難となる。これは、精製処理によりむき出しへなったセルロースが乾燥下で水素結合し強力に凝集するためである。

そこで乾燥凝集を避けるために、木粉を精製処理した後に未乾燥状態のままグラインダー処理によって解纖を行ったところ、わずか1回の解纖処理によって幅約15nmの均質なナノファイバーを単離することが可能となつた（図1）。これは細胞壁中に本来存在しているミクロフィブリル束ではないかと考えられる。この結果から、出発原料は乾燥していても良いが、精製後の試料は乾燥させないほう良いと言える。乾燥パルプは確かに便利な原料ではあるが、そもそもナノファイバーを単離する行程で乾燥処理は必要ない。今後セルロースナノファイバーを広く利用するためには解纖処理だけでなく、その前の精製処理についても深く検討する必要がある。

3) おわりに

現在では多様な植物原料から様々な手法によってセルロースナノファイバーを単離できるようになっており、単離技術のみについて最近の報告例は少ない。単離することが最終目的ではないため、今後はこのナノファイバーを幅広い分野でいかに有効に使いこなすかが課題となる。現在は補強繊維としての利用が主であるが、今後ゲルや不織布シート等様々な形でナノファイバーの利用がさらに展開されることを期待する。

Bio-nanofibers and their nanocomposites for structural applications—current state and beyondに関する調査報告書

研究代表者： Antonio Norio Nakagaito（徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部）

報告者： Antonio Norio Nakagaito

調査日：平成23年2月1日～2月28日

（調査結果）

Cellulose is a polysaccharide forming the framework of green plant cell walls and it is the most abundant form of biomass on Earth. Cellulose is always present in fibrillar form, nanofibers comprised of straight molecular chain polymers arranged parallel to their axes with hydroxyl groups connected laterally by hydrogen bonds. This unique

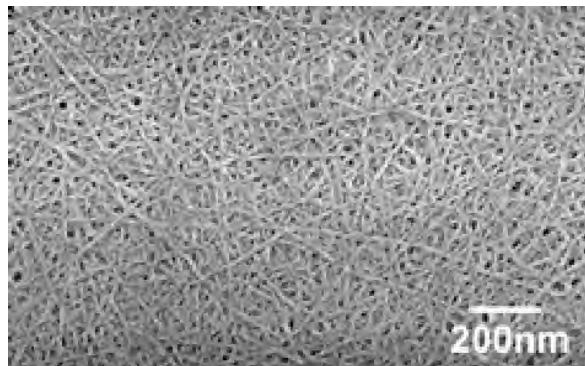


図1 木材から単離した幅15nmのセルロースナノファイバー

configuration grants remarkable mechanical properties to these nanofibers, which are comparable to those of aramid fibers. Cellulose nanofibers compete well with synthetic fibers as they are relatively less costly, renewable, recyclable, and possess high strength per weight. Chitin is another abundant polysaccharide and is found in the hard material forming the exoskeleton of marine crustaceans, insects and in the cell walls of many filamentous fungi. The molecular structure of chitin is identical to that of cellulose with the exception of a hydroxyl group replaced by an acetamido group. The only way to exploit these bio-nanofibers in useful load bearing materials is to extract them from the original tissues to use as reinforcement in nanocomposites.

Research on cellulose nanofibers and whiskers has been initiated by researchers at CERMAV-CNRS in France. In 1995, Favier *et al.* [1, 2] reported the production of polymer films reinforced with whiskers extracted from sea animals, tunicates. An aqueous suspension of latex obtained by copolymerization of styrene and butyl acrylate was mixed with an aqueous suspension of tunicin whiskers and film casted at room temperature. This method allowed well dispersed whiskers throughout the composite. Films up to 6 wt% of cellulose exhibited an increase in shear modulus in the rubbery state of more than two orders of magnitude. Moreover, whereas the modulus of the matrix decreased with temperature, the modulus of the composites remained constant up to the temperature where cellulose starts to decompose. The unusually large reinforcing effect was explained by the phenomenon of percolation, a mutual interaction of nano-elements forming a rigid network of hydrogen bond-connected reinforcing phase.

In following works [3, 4], Dufresne and coworkers reinforced plasticized potato starch with potato parenchymal nanofibers to improve the modulus above T_g and water sensitivity, two typical drawbacks of starch. Above T_g a modulus increase of about 2 orders of magnitude was reported even at a filler content of 5 wt%. But when Angles and Dufresne [5, 6] produced composites filling plasticized starch with tunicin whiskers, the storage modulus of a 25 wt% whisker at 365K (above T_g) was just about 20 times higher than that of the matrix, contrasting with the much higher reinforcing effect of plasticized starch filled with cellulose nanofibers [3]. They concluded that the disparity was due to differences in flexibility, of stiff and straight whiskers contrasted to flexible, hairy nanofibers. They suggested that in composites with whiskers, the reinforcing effect is based on the formation of hydrogen-bound network while for composites with nanofibers the reinforcement is accomplished by the same rigid network but also by an additional entangling effect. The entangling effect of microfibrils was confirmed in a later study by Samir *et al.* [7]. Cellulose whiskers are stronger than cellulose nanofibers if considered in terms of mechanical properties of the individual elements, since whiskers consist of monocrystals whereas nanofibers are comprised of crystalline cellulose with weaker amorphous domains along their axis. However, if the collective behavior of these elements inside a composite is taken into account, nanofibers deliver more effective reinforcement than whiskers owing to the percolation through hydrogen bonds supplemented by mutual entanglements.

A conclusive evidence of the cellulose nanofibers reinforcing potential was shown by Yano and Nakahara [8] when they described the production of molded materials based on microfibrillated cellulose (MFC), a commercially available cellulose nanofiber morphology obtained from kraft pulp. Materials fabricated without any adhesive achieved a bending strength of 250 MPa. With the addition of only 2 wt% oxidized starch, the yield strain doubled and the bending strength increased to 310 MPa. This unusually high strength was attributed to the interactive secondary forces developed between the nanometer scale web-like network of cellulose fibrils. Considering the good compatibility between cellulose and phenolic resin, sheets obtained by filtration of MFC slurries were impregnated with a thermoset resin phenol formaldehyde (PF), stacked in layers and compression molded under pressures as high as 100 MPa [9]. The mechanical properties obtained were significantly enhanced, the Young's modulus achieved 19 GPa and the bending strength attained was about 370 MPa, figures comparable to those of commercial magnesium alloy. When compared to composites based on non-fibrillated pulp fibers fabricated following the same compression molding of PF impregnated sheets, MFC nanocomposites had slightly higher Young's modulus, but exhibited about 1.5 times higher bending strength. Having similar modulus, the higher strength was a direct consequence of a higher strain at fracture of MFC-based composites.

In order to determine how the degree of fibrillation of kraft pulp reinforcements affects the final composite's strength, samples were produced using wood pulp with different levels of refining and homogenizing treatments [10]. MFC is obtained by repeated mechanical action of a high-pressure homogenizer on wood pulp previously treated by a disk refiner. The number of passes through the homogenizer as well as the number of passes through the refiner determines the degree of fibrillation, resulting in different cellulose morphologies. PF was used again as the binder and the method to produce the composites followed the procedure adopted previously. There was no change in strength for composites prepared using pulp fibers treated by refiner up to 16 passes, however, a stepwise increase occurred when the treatment attained 30 passes through the refiner. The strength suddenly increased from about 200 MPa to 300 MPa. Scanning electron microscopy observations revealed that fibrillation of the fibers surface solely did not increase fiber interactions. Only the complete fibrillation of the bulk of the fibers resulted in an increment of mechanical properties, and additional fibrillation by homogenization treatment led to a linear increase of strength. Nanofibrillation eliminates defects or weaker parts of the original fibers that would act as the starting point of cracks. Besides, the work of fracture is enhanced due to the highly extended surface area of networked nanofibers which generates an increased bond density that slows down crack propagation. This study demonstrated the need of nanofibrillation to attain enhanced strength, which is not possible to achieve with micro-scale fibers.

Currently, the major obstacle to a widespread adoption of cellulose nanofiber-based composites is the high energy input needed for the nanofibrillation process. The cost of nanofiber extraction is still high and the yields are low. The production of commercially available microfibrillated cellulose, for instance, requires an energy consumption of 30,000 kWh/tonne. However, recent developments in pre-treatments like enzymatic, anionization, and cationization with posterior fibrillation through a microfluidizer, accomplished at Innventia in Sweden, brought the energy input down to 500-2,000 kWh/tonne [11]. While cellulose is quite difficult to nanofibrillate, chitin seems to be less demanding. Ifuku et al. [12, 13] have demonstrated that by cationization of chitin prior to grinding treatment, it is possible to nanofibrillate even previously dried purified chitin. Drying produces strong interactions among nanofibers by hydrogen bonds, making it harder to separate them. Other possibilities are related to the source of cellulose, parenchyma cells from fruits and roots can be fibrillated more easily than wood fibers. These raw materials can be obtained as agricultural by-products after the extraction of juice or starch. These examples are sure indications that progresses in nanofibrillation techniques will soon overcome the cost barrier to produce inexpensive nanofibers as production scales up. Considering that the research interest in cellulose nanofiber applications started to grow about five years ago and we have seen such a progress, it is not inconceivable to bet that commoditization of nanofibers will be possible within another five years.

Another major issue concerning the production of nanocomposites is the burden in dispersing hydrophilic nanofibers in hydrophobic polymer matrixes. Up to now most of the high strength nanocomposites were fabricated by impregnating paper-like sheets of nanofibers with polymeric resin, especially thermosets. However, successful reinforcement of thermoplastic polymers with nanofibers is still rare. Perhaps the method closest to an industrial process is that reported by Jonoobi et al. [14] who accomplished compounding through a twin-screw extruder. To attain good dispersion of nanofibers, a master batch was prepared by dissolving polylactic acid into an organic solvent to disperse nanofibers at high concentration. The mixture was diluted to final nanofiber contents during extrusion. This approach is similar to those proposed by Iwatake et al. and Suryanegara et al., but limited only to the initial step. The subsequent extrusion step is the same adopted by plastics manufacturers. Ideally the solvent use should be eliminated to make the process completely environmentally friendly. In other studies, Tingaut et al. [15] have successfully dispersed acetylated cellulose nanofibers in chloroform upon drying, whereas Eyholzer et al. [16] prepared carboxymethylated cellulose nanofibers that could be redispersed in water after freeze-drying. These accomplishments show the potential to chemically hydrophobize nanofibers in order to avoid agglomerations in polar and nonpolar media. Even though nanocomposites cannot yet be produced exclusively by extrusion compounding, an adequate chemical modification of cellulose nanofibers seems to be the key to attain good dispersion in thermoplastic matrixes.

More research will concentrate on the compounding of nanofibers with thermoplastics in the next years so as to bring these materials closer to industrial production. Once it happens, a potential application would be in automotive body panels (e.g., the Smart Fortwo), where weight reduction is essential to improve mileage in both combustion engine cars and electric vehicles. Cellulose nanofibers would provide stiffness, impact strength and very low thermal expansion for reduced gap tolerances in such applications.

As high performance composites have been produced using bio-nanofibers, the research will naturally extend to the reinforcement of biopolymers to clear up some of the shortcomings that keep these sustainable plastics still out of the market. The development of high performance and completely bio-based composite materials will be the most promising area of research in the forthcoming years.

References

- [1] V. Favier, H. Chanzy, J. Y. Cavaille, *Macromolecules*, **28**, 6365 (1995)
- [2] V. Favier, G. R. Canova, J. Y. Cavaille, H. Chanzy, A. Dufresne, C. Gauthier, *Polym. Adv. Technol.*, **6**, 351 (1995)
- [3] A. Dufresne, M. R. Vignon, *Macromolecules*, **31**, 2693 (1998)
- [4] A. Dufresne, D. Dupeyre, M. R. Vignon, *J. Appl. Polym. Sci.*, **76**, 2080 (2000)
- [5] M. N. Angles, A. Dufresne, *Macromolecules*, **33**, 8344 (2000)
- [6] M. N. Angles, A. Dufresne, *Macromolecules*, **34**, 2921 (2001)
- [7] M. A. S. A. Samir, F. Alloin, M. Paillet, A. Dufresne, *Macromolecules*, **37**, 4313 (2004)
- [8] H. Yano, S. Nakahara, *J. Mater. Sci.*, **39**, 1635 (2004)
- [9] A. N. Nakagaito, H. Yano, *Appl. Phys. A-Mater.*, **80**, 155 (2005)
- [10] A. N. Nakagaito, H. Yano, *Appl. Phys. A-Mater.*, **78**, 547 (2004)
- [11] <http://www.sustaincomp.eu/upload/16149/Mikael%20Ankerfors%20and%20Tom%20Lindstr%C3%B6m,%20Innventia.pdf>
- [12] S. Ifuku, M. Nogi, K. Abe, M. Yoshioka, M. Morimoto, H. Saimoto, H. Yano, *Biomacromolecules*, **10**, 1584 (2009)
- [13] S. Ifuku, M. Nogi, M. Yoshioka, M. Morimoto, H. Yano, H. Saimoto, *Carbohydr. Polym.*, **81**, 134 (2010)
- [14] M. Jonoobi, J. Harun, A. P. Mathew, K. Oksman, *Compos. Sci. Technol.*, **70**, 1742 (2010)
- [15] P. Tingaut, T. Zimmermann, F. Lopez-Suevos, *Biomacromolecules*, **11**, 454 (2010)
- [16] C. Eyholzer, N. Bordeanu, F. Lopez-Suevos, D. Rentsch, T. Zimmermann, K. Oksman, *Cellulose*, **17**, 19 (2010)

プリンテッド・エレクトロニクスにおけるセルロースナノファイバー研究開発に関する調査報告書

研究代表者： 能木雅也（大阪大学産業科学研究所）

報告者： 能木雅也

調査日：平成23年2月1日～2月28日

(調査結果)

1) はじめに

プリンテッド・エレクトロニクス (PE) とは、新聞や雑誌を刷るように、印刷により大量に高速に電子部品や機器を製造する新技術である。PE の対象となる製品群は極めて幅広く、今後 20 年間で 40 兆円の新たな規模に成長すると期待されている。そこで、インクとなる有機・無機・金属のナノ材料、高詳細に制御された印刷技術など極めて広範囲な技術基盤形成が望まれ、その技術開発を世界中で競い合っている。

現在、PE 用基板として、薄板ガラス、ポリイミド、PET などが候補であるが、いずれも性能や価格にそれぞれ長所・短所がある。そのため、セルロース基板（紙）も PE 用基板の一つとして考えられ、幾つかの研究報告がある。そこで、PE を中心にデバイス開発分野での、紙からセルロースナノファイバーまで

セルロース材料の開発事例を紹介する。

2) 既存技術で作製した「紙基板デバイス」

本節では、フォトリソグラフィー、エッチング、真空蒸着など従来のデバイス作製技術を利用して、セルロース基板上にデバイス作製を試みた研究事例を紹介する。

Korea Electron. Technol. Inst. の Han グループは、インクジェットプリント用紙へ有機 TFT 回路の作製した¹⁾。Georgia Institute of Technology の Tentzeris グループは、耐水ポリマーをコートした紙の上に銅箔を貼り付け、RFID タグ (Radio Frequency Identification タグ、電波による個体識別用タグ) を作製した²⁾。ポルトガルの Fortunato は、セルロースシートを誘電体基板とした FET (field-effect transistor) を作製した³⁾。東京大学 染谷グループは、ポリイミドを塗布したミクロフィブリル化セルロース基板で、メカニカルスイッチデバイスを作製した⁴⁾。ハーバード大の Whitesides グループは、ゼロックスインクジェットプリント用紙へ導電性ワイヤ (ヒーター) を蒸着し、その裏側へ熱変色インクを塗布し、サーモクロミックディスプレイを開発した⁵⁾。

3) 印刷技術で作製した「紙基板デバイス」

本節では、印刷技術を利用して、セルロース基板上にデバイス作製を試みた研究事例を紹介する。

スウェーデン Linkoping 大の Berggren グループは、Cellulose-based fine paper 上へ導電性高分子 (PEDOT:PSS) を印刷し、2002 年にアクティブマトリクスディスプレイ⁶⁾、2005 年にロジックサーキット⁷⁾を作製し、2007 年にはボタン入力装置とバッテリーを普通紙の上に印刷したデバイスを紹介した⁸⁾。ルーマニアの Dragoman グループは、normal paper へカーボンナノチューブインクをレーザープリンターして RFID アンテナを作製した⁹⁾。オーストラリアの Clark グループは、亜鉛・カーボン・ポリマーコンポジット (陰極) と PEDOT (陽極) を紙 (glossy photo paper と copy paper) に印刷 (スクリーン印刷・インクジェット印刷) したフレキシブルなリチウムイオンバッテリーを作製した¹⁰⁾。スタンフォード大の Liangbing Hu らは、カーボンナノチューブ (CNT) とセルロースを利用したフレキシブルなバッテリーの開発を精力的に行っており、CNT や銀ナノロッドを普通紙や Xerox 紙へ塗布した導電性スーパーイヤパシタ¹¹⁾、CNT をコットンシートで漉き上げた導電性スーパーイヤパシタ¹²⁾、CNT シートを Xerox 紙へ貼り付けたリチウムイオンバッテリー¹³⁾を開発している。

セルロース基板上にデバイスを作製するためには、セルロース基板への金属ナノインクの印刷・加熱し、基板上へ金属配線を作製する必要がある。ドイツ KIT の Feldmann グループは、室温で還元可能な銅化合物ナノ粒子インク (水素化ホウ素ナトリウム水溶液使用) を開発し、紙基板上へ銅配線の作製に成功した¹⁴⁾。フィンランド VTT の Allen グループは、市販インクジェットプリンタ用紙のシリカ系の無機材料受理層では、銀ナノ粒子インクの焼結が促進されることを報告した¹⁵⁾。

4) セルロースナノファイバー用いたデバイス作製へ応用可能な基礎技術

最後に、セルロースナノファイバーを用いた研究事例をいくつか報告する。これらの論文ではデバイス作製を行っていないが、いずれもデバイス作製へ応用可能な基礎的な研究成果である。

導電性高分子ポリピロールの補強フィラーとして、ミクロフィブリル化セルロース¹⁶⁾、セルロースナノファイバー¹⁷⁾が使用されている。TEMPO 酸化処理したセルロースナノファイバーは、銀ナノ粒子¹⁸⁾や金ナノ粒子¹⁹⁾を担持させることが可能である。Niu らは、ゾルゲル法を利用して、セルロースナノファイバー上 (濾紙) へ CdSe (セレン化カドミウム) ナノ粒子を凝集させ、緑色の蛍光発色するシートを作製した²⁰⁾。II-VI 族半導体の 1 つである CdSe は、太陽電池や光センサ (電気抵抗が光の強さによって変化するフォトレジスタ) などへ用いられる。Berglund らのグループは、磁性セルロースエアロゲルを開発した²¹⁾。磁性材料は、メモリが開発可能である。

5) まとめ

「セルロースまたは紙を用いたデバイス作製」は、非常に幅広く・活発に研究がなされている。しかし現在、デバイス技術は、重厚長大なデバイス作製技術からロールトゥーロールに代表されるようなプリントエド・エレクトロニクスへの過渡期である。一方、セルロース分野においても、セルロース繊維からセルロースナノファイバーへとトレンドが変わりつつある。したがって、「セルロースナノファイバ

一を用いたプリントエレクトロニクス」という観点での研究事例は、まだ、報告されていなかった。

- 1) Y. H. Kim *et al.* “Organic TFT Array on a Paper Substrate” *IEEE Electron Device Lett.* 25 (2004) 702-704.
- 2) Li Yang *et al.* “RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate using Inkjet-Printing Technology” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 55 (2007) 2894-2901
- 3) E. Fortunato *et al.* “High-Performance Flexible Hybrid Field-Effect Transistors Based on Cellulose Fiber Paper” *IEEE Electron Device Lett.* 29 (2008) 988-990
- 4) S Couderc *et al.* “A mechanical switch device made of a polyimide-coated microfibrillated cellulose sheet” *J. Micromech. Microeng.* 19 (2009) 055006
- 5) A. C. Siegel *et al.* “Thin, lightweight, foldable thermochromic displays on paper” *Lab on a Chip* 9 (2009) 2775-2781
- 6) P. Andersson *et al.* “Active matrix displays based on all-organic electrochemical smart pixels printed on paper” *Advanced Materials* 14 (2002) 1460-1464.
- 7) D. Nilsson *et al.* “Electrochemical logic circuits” *Advanced Materials* 17 (2005) 353-358.
- 8) Berggren *et al.* “Organic materials for printed electronics” *Nature Materials* 6 (2007) 3-5.
- 9) M. Dragoman *et al.* “Writing simple RF electronic devices on paper with carbon nanotube ink” *Nanotechnology* 20 (2009) 375203
- 10) M. Hilder *et al.* “Paper-based, printed zinc-air battery” *Journal of power Sources* 194 (2009) 1135-1141
- 11) Liangbing Hu *et al.* “Highly conductive paper for energy-storage devices” *PNAS* 106 (2009) 21490-21494
- 12) Liangbing Hu *et al.* “Stretchable, Porous, and Conductive Energy Textiles” *Nano Letters* 10 (2010) 708-714
- 13) Liangbing Hu *et al.* “Thin, Flexible Secondary Li-Ion Paper Batteries” *ACS Nano* 4 (2010) 5843-5848
- 14) S. Wolf *et al.* “Cu₂X(OH)₃ (X=Cl-, NO₃-): synthesis of nanoparticles and its application for room temperature deposition/printing of conductive copper thin-films” *J. Mater. Chem.* 20 (2010) 7694-7699
- 15) M. Allen *et al.* “Substrate-facilitated nanoparticle sintering and component interconnection procedure” *Nanotechnology* 21 (2010) 475204
- 16) C. Sasso *et al.* “Highly Conducting Polypyrrole/Cellulose Nanocomposite Films with Enhanced Mechanical Properties” *Macromolecular Materials and Engineering* 295 (2010) 934-941.
- 17) G. Nystrom *et al.* “A Nanocellulose Polypyrrole Composite Based on Microfibrillated Cellulose from Wood” *J. Phys. Chem. B* 114 (2010) 4178-4182.
- 18) S. Ifuku *et al.* “Synthesis of Silver Nanoparticles Templatized by TEMPO-Mediated Oxidized Bacterial Cellulose Nanofibers” *Biomacromolecules* 10 (2009) 2714-2717.
- 19) H. Koga *et al.* “Topochemical synthesis and catalysis of metal nanoparticles exposed on crystalline cellulose nanofibers” *Chem. Commun.* 46 (2010) 8567-8569.
- 20) Tao Niu *et al.* “Luminescent cellulose sheet fabricated by facile self-assembly of cadmium selenide nanoparticles on cellulose nanofibres” *J. Mater. Chem.* 21 (2011) 651-656.
- 21) R. T. Olsson *et al.* “Making flexible magnetic aerogels and stiff magnetic nanopaper using cellulose nanofibrils as templates” *Nature Nanotechnology* 5 (2010) 584-588

キチンナノファイバーの製造方法およびその利用開発に関する調査報告書

研究代表者： 伊福伸介（鳥取大学工学研究科）

報告者： 伊福伸介

調査日：平成23年2月1日～2月28日

(調査結果)

1) はじめに

ナノテクノロジー分野の研究においてナノファイバーがその中核を担う材料として注目されている。ナノファイバーはそのサイズ効果により、マイクロサイズの繊維では発現し得なかった機能や特性が期待できるため、ナノファイバーの製造および利用開発が精力的に進められている。

近年では地球上で最も豊富に存在するバイオマスであるセルロースおよびキチンがナノファイバーの原料として注目されている。セルロースやキチンはナノサイズの繊維が集合し、緻密な階層構造を経て複雑な組織体へと展開していく。このことはマクロな構造を解きほぐすことにより、微細な繊維に分解できることを示唆している。本稿ではカニやエビの殻の緻密な造形に着目し、このコンセプトに基づいて作成された、キチン質のナノファイバーの単離技術およびその利用開発について紹介する。

2) カニ、エビ殻から単離されるキチンナノファイバー

キチンとは *N*-アセチルグルコサミンが直鎖状に連なった多糖類であり、セルロースと類似した化学構造を有する。キチンは地球上に広く存在し、例えばカニやエビの殻、昆虫類の外皮、あるいは、カビ、キノコ、藻類の細胞壁を形成する構造材料としての役割を果たす。年間合成量は地球上で最も豊富なバイオマスであるセルロースに匹敵する 1×10^{11} トンとも推定されている。カニやエビの殻にはおおよそ、20~30%程度のキチンが含まれており、その構造はナノファイバーが階層的に組織化された極めて緻密な高次構造で構成されている。よって、適切な処理によってカニやエビ殻を構成するキチンをナノレベルにまでダウンサイジングできる。

キチンナノファイバーの調製は次の操作により行う。カニ殻に含まれる炭酸カルシウム、タンパク質、脂質、色素を順次取り除きキチンを得る。精製したキチンに酢酸を添加した後、グラインダーを用いて繊維の微細化を行う。解纖したキチンは幅がわずか $10\text{ }\mu\text{m}$ と極めて細く、均質であり、非常にアスペクト比の高いナノファイバーである¹⁾。キチンナノファイバーの調製において、酢酸の添加が重要な鍵となる。すなわち、キチンは *N*-アセチルグルコサミンが直鎖状に配列した化学構造をしているが、わずかにグルコサミン単位が含まれている。グルコサミンのアミノ基は酸性条件下でカチオン化され、繊維間で電荷による反発力を生じるため、解纖処理をする際に解纖効率が向上する²⁾。なお、解纖の効率化には酢酸以外の有機酸も利用可能である。

この「アミノ基のカチオン化に伴う反発力」を利用して、精製済みの市販されている乾燥キチンから手軽にキチンナノファイバーに変換することも可能である³⁾。一般にセルロースナノファイバーの調製においては、水素結合に伴うナノファイバー間の強固な凝集を避けるため、一連の製造工程を未乾燥で進めることが必須とされる。しかしながら、この制約は工程が煩雑になり、コスト高に繋がるため事業化において不利である。一方、キチンの場合は電荷による反発力をを利用して市販の乾燥キチンから速やかにナノファイバーを製造可能である。また、この反発力を利用することによって、グラインダーよりも安価で負荷の小さい高速ブレンダーを用いてナノファイバーに解纖することも可能である。⁴⁾

なお、カニ以外の様々な生物の外皮、例えばブラックタイガー、甘エビ、クルマエビなど一般的に食されるエビの殻からも同様の形状のナノファイバーが単離できることが確かめられている⁵⁾。また、最近では菌類に分類される多彩なキノコの細胞壁からもキチンナノファイバーが得られることが見出され始めている。

3) キチンナノファイバーで補強した透明フレキシブルフィルムの開発

キチンナノファイバーは無数のキチン分子が並列に束になった伸びきり鎖結晶であるため、分子レベルでの構造的な欠陥が少なく、強度、弾性率、熱膨張、耐熱性などに優れている。よって、キチンナノファイバーの形状と優れた物性を効果的に活かすためには、補強用のナノフィラーとしての利用が有効である。そこで、キチンナノファイバーを補強繊維として用いたプラスチックフィルムの開発が進められている。キチンナノファイバー補強プラスチックはシート状に成形したナノファイバーにアクリル系のモノマーを含浸した後、重合し作成される。得られるキチンナノファイバー複合プラスチックフィルムは補強効果によりフレキシブルであり、また、繊維含有率が 50%以上であるにも関わらず非常に透明であった。これはナノファイバーのサイズ効果に他ならない。すなわち、補強繊維のサイズが可視光の波長（およそ $400\text{ }\sim 800\text{ nm}$ ）よりも十分に小さいと、繊維とプラスチックの界面において光の散乱が生じ

にくくなる。キチンナノファイバーは纖維径が 10~20 nm であり、可視光の波長よりも十分に小さい。よって、屈折率を厳密に合わせなくても高い透明性を発現することができる。⁶⁾ よって、キチンナノファイバーを透明複合化した場合、様々な屈折率を持つ樹脂を用いても高い透明性を保持することができる（図 4）。この透明材料の重要な特徴として熱膨張が挙げられる。キチンナノファイバーは伸びきり鎖結晶の纖維であるため、低熱膨張である。補強用フィラーとして用いることにより、プラスチックに透明性とフレキシビリティを維持したまま低熱膨張性を付与することができる。本実験で使用したアクリル系樹脂の熱膨張率は 100 ppm/K 以上であったが、キチンナノファイバー不織布の熱膨張率はわずか 10 ppm/K 以下であるため、その纖維補強効果により、ナノファイバーが樹脂の熱膨張を抑え込み、十数 ppm/K まで低減させることができた。本研究は汎用的なプラスチックの熱膨張を大幅に抑制することができるため、長年の課題を克服するための大きな足掛かりになると考えている。

4) キチンナノファイバーの生体機能

キチンは生体への親和性が高く生体内で代謝され、創傷治癒、抗炎症作用など多彩な生体機能が報告されている。キチンナノファイバーは粘性の分散液として得られるため、生体への機能性の評価が容易であり、優れた効果が見出されている。例えば、キチンナノファイバーの分散液をヘアレスマウスの皮膚に塗布したところ、わずか 8 時間で上皮の厚みおよび膠原纖維（コラーゲン）の面積率が大幅に増大した。

5) おわりに

近年、キチンはようやくバイオマスとしての重要性が認識される機運が高まっており、地球上で大量に利用可能な最後のバイオマスと言われている。しかしながらその量に見合った有効な利用法は未だ見出されていない。その大きな要因の一つとして、キチンが水に対して不溶であり、加工性に乏しいことが挙げられる。キチンナノファイバーはキチンがナノレベルで均質に分散しており、用途に応じて様々な形状に加工することができる。本成果によりカニやエビが紡ぎだすキチンナノファイバーをありのままの形で、簡単かつ大量に単離できることになった。これもひとえに生物だからこそ作り得る緻密な造形の賜であろう。キチンナノファイバーは工業的なキチン製造法と大きな違いは無いため、事業化は比較的容易と考える。また、キチンは生体に対する様々な特性が多数報告されている。ナノファイバーの持つ莫大な表面積と優れた物性、分散性はキチンの潜在的な機能を効果的に引き出すことができると考えている。今後、ナノ新素材、纖維、製紙、化成品、医療、医薬、食品など、多方面の分野においてキチンナノファイバーの特徴を活かした有効な用途が続々と見出されると期待している。

参考文献

- 1) S. Ifuku, M. Nogi, K. Abe, M. Yoshioka, M. Morimoto, H. Saimoto, H. Yano, *Biomacromol.*, 10, 1584 (2009).
- 2) Y. Fan, T. Saito, A. Isogai, *Biomacromol.*, 9, 1919 (2008).
- 3) S. Ifuku, M. Nogi, K. M. Yoshioka, M. Morimoto, H. Yano, H. Saimoto, *Carbohydr. Polym.*, 81, 134 (2010).
- 4) M. I. Shams, S. Ifuku, M. Nogi, T. Oku, H. Yano, *Appl. Phys. A.*, 102, 325 (2011).
- 5) S. Ifuku, M. Nogi, K. Abe, M. Yoshioka, M. Morimoto, H. Saimoto, H. Yano, *Carbohydr. Polym.*, 84, 762 (2011).
- 6) M. Nogi, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 87, 243110 (2005).

(3) バイオマス・物質変換のためのマイクロ波高度利用共同研究

研究代表者：篠原真毅

生存圏研究所では研究所に特徴的なプロジェクト型共同研究を支援するため、フラッグシップ共同研究を立ち上げ、公募により 3 件を採択した。フラッグシップ共同研究は、従来中核研究部などで個別に実施していたプロジェクト型共同研究を、可視化・研究支援することを主な目的とする。その一つが本共同研究である。本共同研究の目的はマイクロ波プロセスを応用した木質バイオマスからのバイオエタノール、バイオケミカルス生成の高効率化、及び無機系の材料創生のマイクロ波プロセスの開発である。本フラッグシップ共同研究は、生存圏研究所の特色を生かし、マイクロ波工学と化学研究者、及び物質構造解析の研究

者が参加することにより、マイクロ波プロセッシング科学の発展と応用技術開発を目指す。マイクロ波プロセスを応用した木質バイオマスからのバイオエタノールはNEDO「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/バイオマスエネルギー先導技術研究開発」に採択され、バイオエタノール量産化のための効率・コスト・環境影響の評価等を行い、バイオエタノールの量産に向けて研究を発展させている。また、これまでの研究実績が認められ、平成21年度には「先進素材開発解析システム(Analysis and Development System for Advanced Materials, ADAM)」研究設備が認められた(図1)。マイクロ波アプリケータ、様々な周波数対応の大電力マイクロ波発生装置、マイクロ波測定装置、質量分析器、有機用/無機用の2種類の電子顕微鏡等で構成された本システムを用いた研究は生存圏研究所のフラグシップ研究としての大きな特色であり、今後の全国共同利用化への展開と共同研究の発展が期待できる。

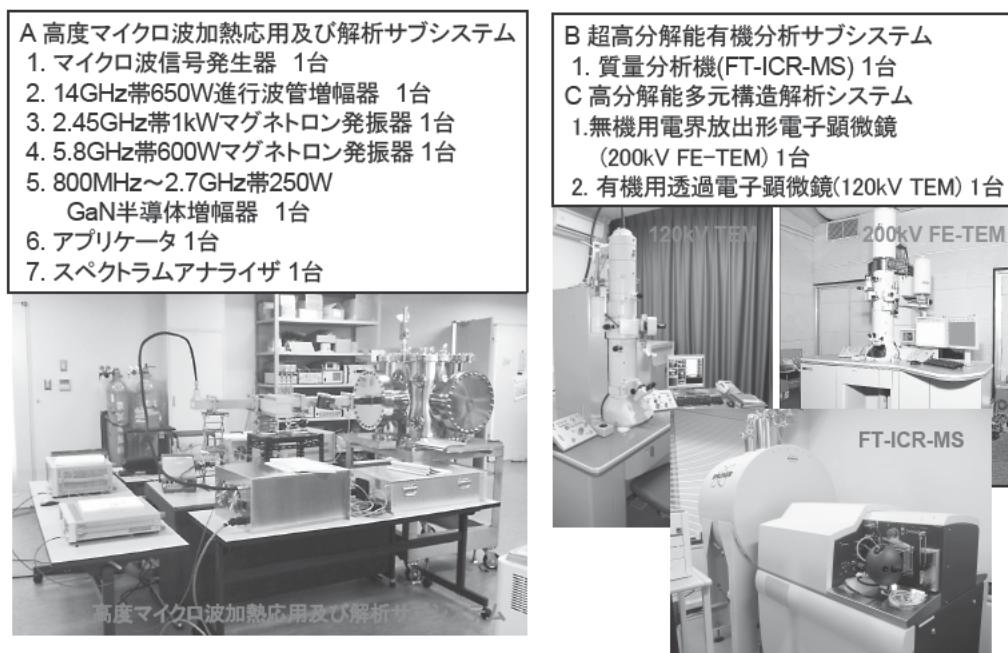


図1：先進素材開発解析システムの代表的な設備

バイオマス・物質変換のためのマイクロ波高度利用共同研究に関する調査報告書

研究代表者： 篠原真毅（生存圏研究所 生存圏電波応用分野）

報告者： 篠原真毅

調査日：平成23年度

(調査結果)

本共同研究の目的はマイクロ波プロセスを応用した木質バイオマスからのバイオエタノール、バイオケミカル生成の高効率化、及び無機系の材料創生のマイクロ波プロセスの開発である。本共同研究は、生存圏研究所の特色を生かし、マイクロ波工学と化学研究者、及び物質構造解析の研究者が参加することにより、マイクロ波プロセッシング科学の発展と応用技術開発を目指す。

今年度は

- 1) 2011年1月28日(金) 東京工業大学 大岡山キャンパス
第4回 日本電磁波エネルギー応用学会研究会・見学会
- 2) 2011年2月22日(火) 富士電波工機株式会社
マイクロ波加熱装置工場見学・研究打ち合わせ

3) 2011年2月23, 24日(水,木)核融合科学研究所
マイクロ波加熱応用に関するフィージビリティ実験および打ち合わせ (出張者:三谷友彦)
を行った。その結果、1)ではマイクロ波製鉄に関する最新研究現状の知見を得、同時に東工大研究グループとの共同研究提案についても打ち合わせを行うことが出来た。2)では最新マイクロ波加熱装置に関する知見を得ることが出来、本フラグシップ共同研究への研究還元を行うことが出来る見込みである。また3)では核融合研との共同実験によりマイクロ波加熱に関する新発見の萌芽が得られた(特許出願見込みのため未公表)。今後本調査研究で得られた、または推進した協力関係を今後さらに発展させ、フラグシップ共同研究を推進していく予定である。

2.6 生存圏科学の新領域開拓研究

古来、生物の生存環境は太陽放射エネルギーを基に、自然界の絶妙なバランスのもとで形成された大気圏によって保護されてきた。しかし、人類の産業活動の増大により、我々が棲息する空間(圏)には大きな変化が生じてきており、ときとして人の健康や安心・安全な生活の維持に悪影響を及ぼしている。例えば、輸送手段の広域・高速化に伴い、ウィルス・菌類が広汎かつ迅速に蔓延している。さらに地球温暖化にともない、これらの地域分布も変化しつつある。一方、居住空間にも多種多様な人工物が組み込まれ、人はその抽出物が混ざった空気を呼吸している。一見透明な大気は、自然界からの太陽放射に加えて、人工的に発射される電磁波で満たされている。さらに、人工的に排出されるガス等により大気質(大気微量成分の組成)が急速に変化している。我々はこれらの状況を鑑み、「生存圏科学の新領域開拓」を目指して、健康で安心・安全な人類の生存環境を構築することを主題にした以下の共同研究を開始した。

1. バイオマス由来の生体防御物質
2. 木質住環境と健康
3. 電磁場の生体影響
4. 大気質と安心・安全

これらの4課題のうち、「バイオマス由来の生体防御物質」については、平成22年度より学内措置経費を利用して、本学ウイルス研究所、秋田県立大学などと竹酢液・木酢液の抗ウイルス活性に関する共同研究を開始した。また、他の3課題についても、特別経費を用いて平成23年度から共同研究を本格実施するが、それに先立ち、平成22年度に「バイオマス由来の生体防御物質」とともに、以下のように調査研究を実施した。

(1) バイオマス系生理活性有機分子に関する調査研究

研究代表者: 渡辺隆司(生存圏研究所 バイオマス変換分野)

報告者: 西村裕志(生存圏学際萌芽研究センター)

調査日: 平成23年2月15日~3月19日

(調査結果)

本研究課題では、未利用バイオマスにおいて、生理活性物質をはじめとする高機能性有用成分としてのポテンシャルを探ることにより、バイオ燃料やバイオマテリアルのみならず、人々の健康の増進や安全な生活に貢献する新しい生存圏科学の創生を目指している。特に本年度は、木炭、竹炭生産の副産物である木酢液、竹酢液に着目し、この成分分析および抗ウイルス性を中心とした生理活性評価を行っている。本調査では、メルクマニュアル18版(日経BP社)により薬効成分に関する基礎知見を収集するとともに、ウイルス・細菌と感染症がわかる(吉開 泰信編、羊土社)、抗ウイルス自然免疫応答(細胞工学、秀潤社)によ

り、ウイルスに関する基礎的な知見を得、植物抽出成分の特性とその利用(谷田貝光克著、八十一出版)、炭・木竹酢液の用語辞典(谷田貝光克著、フラグランスジャーナル社)により木竹酢液、および抽出成分の情報を調査した。その他、化合物分析法、ウイルス対策、既知の生理活性物質に関する情報について専門書籍により調査を実施した。

ウイルスは、核酸(DNA, RNA)と殻(カプシド)からなり、一部のウイルスはエンペロープをもつ。口蹄疫ウイルスの場合、最も小さいピコルナ科ウイルスであり直径 30 nm 程度、エンペロープは持たない。口蹄疫ウイルス(FMDV)には 7 つの型があるが、昨年来問題になっているのは O 型であり、感染力が強く糞に付着したウイルスは夏で 4 週、冬で 9 週生存するといわれている。以上の点から、木竹酢液による消毒、予防効果の検証として、マウスを用いた動物試験の際にゲージ内敷物への木竹酢液噴霧による効果の検証が重要であると認識した。

木竹酢液については、原料、製法により含有成分が異なるが、日本炭窯木酢液協会(JEWA)、木竹酢液認証協議会によって品質管理、認証が行われている。国内生産量は木酢液 2323 kL、竹酢液 357 kL(H21)であり、未利用バイオマスとしてのポテンシャルは高いと思われる。

木竹酢液中の抗ウイルス成分についての知見はほとんどないが、抗ウイルス性の木材抽出物としてシベリアモミ(*Abies sibirica*)由来の polyphenol をエアロゾルにして抗インフルエンザウイルス効果が報告されている。また、木竹酢液中の熱分解生成物であるシリゴール(2, 6-dimethoxy phenol)によるサルモネラ菌への抗菌作用が報告されている。このようにイソプレン骨格やフェノール骨格をもつ化合物が生理活性候補化合物となる可能性が考えられる。また、木竹酢液中には多種の成分が含まれており、抗菌活性には複数の化合物による相乗効果が確認されている。以上の点から、抗ウイルス活性画分のスクリーニングにおいても、含有成分の分析とともに、複数成分の相乗効果を視野にいれて抗ウイルス活性評価を実施していく必要性が確認できた。

(2) 木質住環境と安全/健康に関する調査研究

研究代表者：川井秀一（生存圏研究所 循環材料創生分野）

報告者：川井秀一

調査日：平成23年2月15日～3月19日

(調査結果)

生存環境においては工場の排煙や自動車の排気ガスから排出される窒化酸化物や硫黄酸化物などさまざまな大気汚染物質が存在している。住環境に固有の汚染物質として、ホコリやダニのほか、揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOC) が指摘される場合が多い。とくに後者は近年増加が著しい化学物質過敏症と関係したシックハウス症候群の原因として注目されている。

本研究課題では、各種の文献や書籍、講演会等の報告をもとに、木質居住空間におけるシックハウス症候群に関わる課題、健康住宅に関する調査を実施した。

住宅では床下から防腐防蟻剤、内装/家具下地材に使われるパーティクルボードや合板からホルムアルデヒド、また表面仕上げ塗装剤からトルエンやキシレン、カーペットからは防カビ剤、畳からは防ダニ剤など、さまざまな VOC が室内空気質を劣化させる要因となっている。厚生労働省では、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、トルエン、キシレン、エチルベンゼンなど主たる 13 品目について濃度の指針値を定めているほか、TVOC として総量規制がなされている。

TVOC には針葉樹材中に含まれる抽出成分としてよく知られている α -ピネンなどのテルペン類も含まれており、森林浴など人の健康に資すると思われる VOC をも含むので、これらの関係について明快な論理を求

める声も強い。

上述のように伐採された木材が、その材形成の基である樹木と同様に、VOC を放出する反面、二酸化窒素 (NO₂) 、オゾン (O₃) などの大気汚染物質やホルムアルデヒドなどの室内空気汚染物質を吸着除去し、室内環境の改善に役立つことはあまり知られていない。木造建造物の内部では二酸化窒素、オゾン等が外気よりも70~90%減少し、その現象が1,250 年前の東大寺正倉院のヒノキ材校倉やスギ材唐櫃の内部でも観察されている。木造建造物内の環境は、文化財の保存だけではなく、人間の居住空間としても適切と考えられる。

筆者らの研究グループも、スギ材の二酸化窒素、オゾン、ホルムアルデヒドなどの空気質汚染物質の浄化機能について調べた結果、1) スギ心材に大気汚染物質を浄化する能力が高い、2) 木口面において効果が大きい、3) 含水率の影響が顕著であることなどを見いだし、スギ材の空気質浄化に関する諸条件とこの機能を活かした加工技術や内装建材への適用について検討している。

以上のように、木質居住空間と空気質、さらには人間の健康や安全との関係についてはまだ不明の点が多いが、今後木質科学、大気化学、環境医学・生理学・疫学にまたがる学際分野の発展が健康維持増進する住空間の創出に向けた貢献が期待される。

(3) 電磁場の生体影響に関する調査研究

研究代表者：篠原真毅（生存圏研究所 生存圏電波応用分野）

報告者：宮越順二（生存圏研究所 生存圏電波応用分野）

調査場所・研究者：東北大学大学院医工学研究科・松木英俊教授

調査日：平成23年1月18日～19日

（調査結果）

新領域開拓研究における、本サブプロジェクトの主たる研究テーマは、現在ならびに近い将来に予想される、生活環境における電磁場の生体への影響を探り、評価するものである。すでに我々の生活環境では、医療、通信、送電、運輸などで多種多様な電磁場があふれている。世界保健機関（WHO）も電磁場の専門プロジェクトを立ち上げ、健康への影響研究を各国に推奨している。

本サブプロジェクトでは、近い将来に実用化が迫っている、無線エネルギー伝送に着目し、その技術応用から発生する電磁場の生体影響を研究・評価することを計画している。

今回は、医工学分野における生体の電磁場応答研究調査として、東北大学大学院医工学研究科・松木英俊教授を訪ねた。この研究グループは、すでにワイヤレス給電技術の開発とその医療や交通への応用をいち早く進めている。非接触エネルギー伝送の利用として、家電ではテレビ、パソコン、デジタルカメラ、携帯電話など、医療では人工心臓、ペースメーカー、除細動器、人工内耳など、交通産業界では電気自動車、電気バス、LRTなどへの電力供給がすでに試験段階に入っている。非接触電力伝送方式としては、遠方界でマイクロ波伝送方式、近傍界で電磁誘導方式、磁界共鳴方式などが有望視されている。近傍界の実用化に向けては、伝送距離、伝送電力量、装置重量など、解決しなければならない技術的問題がかなり残されている。さらに、その一方で、無線エネルギー伝送空間でのヒトへの健康影響、安全性については、ほとんど研究されていないのが現状である。法的な電磁場の基準としては、わが国を含めて、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）のガイドラインを参考にしている国々が多い。しかしながら、ICNIRPのガイドラインを遵守しつつ、上述のワイヤレス給電技術を実用化するには、現状、きわめて困難なことも事実である。

このような背景から、ワイヤレス給電の技術的改良を行い、実用化が可能な開発を進めることが重要である。さらに、このような技術開発と同時に、無線エネルギー伝送空間でのヒトへの安全性を評価することは不可欠で、ヒトの健康を守ることもきわめて重要な研究である。この研究調査結果として、電磁場の生体影響を主題とした本サブプロジェクトの目標を達成することが、近い将来の無線エネルギー伝送の実用化に向けて大きく貢献することを強く認識した。

(4) 大気質と安全・安心に関する調査研究

研究代表者：高橋けんし（生存圏研究所・大気圏環境情報分野）

報告者：高橋けん

調査場所：生存圏研 MU 観測所（滋賀県甲賀市信楽町）

調査日：平成22年10月23日～11月6日および平成23年3月16日～20日

（調査結果）

大気環境中における微量物質（ガス、エアロゾル）の量や組成の時間的・空間的変動は、気候変動に代表される地球システムの環境改変と深く結びついていると考えられている。大気質変動における生物起源物質の役割を明らかにすることは、iLEAPS や IGBP 等の国際的なフレームワークにおける重要な key issue として認識されつつある。本新領域開拓研究では、フィールド観測や室内実験によって、大気圏・森林圏・人間生活圏に跨る微量物質の動態把握を目指している。

我々は、フィールド観測のサイト候補地として MU 観測所を選定し、現地調査と初期観測を実施した。同観測所は周辺の植生のほとんどがアカマツであり、標高は 410m である。植生起源物質の一次放出と、滋賀県や大阪方面から輸送される人為起源物質とが相互作用していると期待される興味深いサイトである。今回の調査の結果、対流圏下層のエアロゾル・雲計測が可能な 3 波長偏光ミー・ラマンライダー、小型水蒸気ライダーの設置が完了しており、現在、観測を実施していることを確認した。また、上記の調査期間中に集中観測を試験的に実施し、興味深いデータを得ることに成功した。この集中観測期間中には、MU 観測所としては初めて、エアロゾル、オゾン、二酸化硫黄、窒素酸化物 (NO , NO_2) の化学成分を連続計測できる機器を持ち込んで同時運用した。地上観測機器は、同観測所の三階スペースに設置した。大気の連続サンプリングを行うために、PFA 樹脂チューブを用いたサンプリングポートを建物屋上に設置した。また、名古屋大学太陽地球環境研究所との協同により、エアロゾル消散係数を地上で連続計測できるレーザーキャビティーリングダウン分光計測装置を併設し、光学特性に関する詳細なデータを取得した。これらの地上観測データと、ライダーや気象観測のデータとの比較検討を行った。

データ解析は現在も進行中であるが、初期解析結果として、自由対流圏から地上への気塊の流入が数時間程度の時間スケールで起こっている様子をライダーから捉えられたのと同時に、地上のオゾン混合比変動からもトレースすることに成功した。これは、地上で観測される微量物質の動態把握のためには、混合層の動的挙動の理解が不可欠であることを示す直接的事例である。従前より我が国で実施されている大気質の地上モニタリングは、面的な配置こそ幅広く展開されているが、地上付近の鉛直分布とその変化を探る研究は行われていない。本調査により、地上における大気質変動の理解のためには、鉛直・地上同期観測が非常に有用であることが強く示唆された。

2.7 平成 22 年度 オープンセミナー

回	開催月日		演 著	題 目	参加者 数
114	6 月	16 日	肥塚 崇男 (京都大学生存圏研究所・ ミッション専攻研究員)	植物が香りを作り出す仕組みと生存圏科学への応用	30
115		23 日	Md. Mahabubur Rahman (京都大学生存圏研究所・ ミッション専攻研究員)	分子育種による熱帯アカシアの材質改良	15
116	7 月	14 日	疋島 充 (京都大学生存圏研究所・ ミッション専攻研究員)	地球放射線帯におけるコラス放射の生成と粒子ダイナミクスへの寄与	16

117	7月	21日	中谷 誠 (京都大学生存圏研究所・ミッション専攻研究員)	施工性と審美性に優れた木質ラーメン構造の開発	23
118		28日	王 悅 (京都大学生存圏研究所・ミッション専攻研究員)	木材における液体流動の経路を開こう —壁孔の破壊を中心に—	27
119	9月	8日	三谷 友彦 (京都大学生存圏研究所・助教)	宇宙太陽発電に関するよくある疑問と回答 —焼き鳥にさせないために—	23
120		15日	片平 正人 (京都大学エネルギー理工学研究所・教授)	超高感度 NMR によるタンパク質と木質バイオマスの構造生物学	27
121		22日	山根 悠介 (常葉学園大学教育学部・講師)	東南アジア・南アジア域における大気環境診断パラメータデータベースの構築	9
122		29日	本田 与一 (京都大学生存圏研究所・准教授)	白色腐朽菌によるリグニン生分解系の分子メカニズム解明における新規研究手法の開発	25
123	10月	13日	矢野 浩之 (京都大学生存圏研究所・教授)	植物で自動車を創る —生存圏フラッグシップ共同研究 “バイオナノマテリアル” の紹介—	38
124		20日	西 憲散 (京都大学理学研究科・助教)	熱帯域上部対流圏循環の構造	18
125		27日	篠原 真毅 (京都大学生存圏研究所・教授)	バイオマス・物質変換のためのマイクロ波高度利用共同研究	30
126	11月	17日	荻田 信二郎 (富山県立大学工学部・准教授)	植物細胞培養 —その確立と応用—	18
127		24日	岸本 久太郎 (独)農業・食品産業技術総合研究機構・研究员)	植物はなぜ青臭い?	14
128	12月	8日	田淵 敦士 (京都府立大学生命環境科学研究科・講師)	里山保全ツールとしての建築 -笹葺民家の修理を通じて	20
129	1月	12日	西村 裕志 (京都大学生存圏研究所・ミッション専攻研究員)	木竹酢液の成分分析と生理活性評価 —抗ウイルス活性を中心として—	34
130		19日	池田 武文 (京都府立大学生命環境科学研究科・教授)	樹木の樹勢判定 —水分整理の視点から—	11
参加者数合計					378

2.8 「生存圏ミッションシンポジウム」の開催

(東北地方太平洋沖地震により 6 月に延期)

第 175 回 生存圏シンポジウム 生存圏ミッションシンポジウム

プログラム

6月 15 日(水) (生存圏研究所 木質ホール 3 階)

13:00 挨拶 津田敏隆 (京都大学生存圏研究所 所長)

【生存圏研究所ミッション活動紹介】

- 13:10 ミッション 1 : 環境計測・地球再生
「木材腐朽担子菌のシュウ酸輸送タンパク質」
服部武文 (京都大学生存圏研究所)
- 13:22 「超高感度レーザー分光法を用いた大気圏—森林圏ガス交換フラックスの長期観測」
高橋けんし (京都大学生存圏研究所)
- 13:34 ミッション 2 : 太陽エネルギー変換・利用
「直パルス通電加熱による急速熱分解法」
畠 俊充 (京都大学生存圏研究所)
- 13:46 「シロアリの糞を利用した水素ガスの効率的生産」
吉村 剛 (京都大学生存圏研究所)
- 13:58 ミッション 3 : 宇宙環境・利用
「超小型プラズマ波動観測装置」
小嶋浩嗣 (京都大学生存圏研究所)
- 14:10 「地球内部磁気圏における電磁イオンサイクロトロントリガード放射」
小路真史 (京都大学生存圏研究所)
- 14:22 ミッション 4 : 循環型資源・材料開発
「クエン酸を用いた新しい接着技術の開発」
梅村研二 (京都大学生存圏研究所)
- 14:34 「生活圏を支える木質構造物における生物劣化の評価の一考察」
森 拓郎 (京都大学生存圏研究所)

【平成 22 年度 ミッション専攻研究員 研究紹介】

- 15:00 「植物揮発性化合物を利用した環境変動予測と環境ストレス耐性植物の開発」
肥塚崇男
- 15:15 「Improvement of Wood Characteristics of Tropical *Acacia* by Molecular Breeding」
Md. Mahabubur Rahman
- 15:30 「磁気圏放射線帯でのトリガード放射生成に関する計算機シミュレーション」
疋島 充
- 15:45 「壁孔壁充填様式の変動が木材浸透性の改善に与える影響」
王 悅

16:00 「ラグスクリューボルトの傾斜埋め込み接合法の開発」
中谷 誠

【生存圏科学の新領域開拓共同研究 紹介】

16:25 「概要紹介」
渡辺隆司（京都大学生存圏研究所）
16:30 「木酢液・竹酢液の成分分析と抗ウイルス活性評価」
西村裕志

【生存圏フラッグシップ共同研究 紹介】

16:45 「熱帯産業林の持続的生産利用に関する多角総合的共同研究」
梅澤俊明（京都大学生存圏研究所）
17:00 「バイオナノマテリアル共同研究」
矢野浩之（京都大学生存圏研究所）
17:15 「バイオマス・物質変換のためのマイクロ波高度利用共同研究」
篠原真毅（京都大学生存圏研究所）

17:50 ポスター発表・交流会（宇治おうばくプラザ2階 ハイブリッドスペース）
萌芽研究 16件
ミッション研究 20件
ミッション専攻研究員 6件

6月16日(木) （生存圏研究所 木質ホール3階）

【開放型研究推進部共同利用専門委員会 活動紹介】

9:30 MU レーダー
「活動報告」
山本 衛（京都大学生存圏研究所）
9:35 「対流圏の3次元超多チャンネルイメージング」
西村耕司（情報システム研究機構・新領域融合研究センター）
9:55 先端電波科学計算機実験装置(A-KDK)
「活動報告」
大村善治（京都大学生存圏研究所）
10:00 マイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB/SPSLAB)
「活動報告」
篠原真毅（京都大学生存圏研究所）
10:05 「排熱機能付アンテナの熱特性評価」
小澤雄一郎（(株) IHI エアロスペース）
10:25 赤道大気レーダー(EAR)
「活動報告」
橋口浩之（京都大学生存圏研究所）
10:30 木質材料実験棟
「活動報告」
森 拓郎（京都大学生存圏研究所）

10:35	「木口挿入型接合具を用いた木材接合法の設計法の検討」 田中 圭（大分大学工学部）
10:55	居住圏劣化生物飼育棟(DOL)/生活・森林圏シミュレーションフィールド(LSF) 「活動報告」 角田邦夫（京都大学生存圏研究所）
11:00	持続可能生存圏開拓診断(DASH)/森林バイオマス評価分析システム(FBAS) 「活動報告」 矢崎一史（京都大学生存圏研究所）
11:05	「組換えダイズによる機能性ペプチド生産技術の開発」 丸山伸之（京都大学大学院農学研究科）
11:25	生存圏データベース 「活動報告」 塩谷雅人（京都大学生存圏研究所）
11:30	「関西・北陸地域における木質文化財の樹種識別調査」 田鶴寿弥子（京都大学生存圏研究所）
11:50	先進素材開発解析システム 「活動予定紹介」 渡辺隆司（京都大学生存圏研究所）

3. 共同研究集会

生存圏の正しい理解と問題解決のために、環境計測・地球再生、太陽エネルギー変換・利用、宇宙環境・利用、循環型資源・材料開発をミッションとし、ミッションと深く関わる研究テーマについて、全国・国際レベルでプロジェクト研究を展開するとともに、公開シンポジウムを積極的に開催して成果を社会に発信する。

本年度のシンポジウム実施状況

本年度は第149回から第170回、第173回の生存圏シンポジウムを開催（※東日本大震災の影響により4件開催延期、1開催中止）した。23件のうち、生存圏研究所の全国共同利用の展開と研究所ミッションの推進に関連した専門委員会主催のシンポジウムが7件である。残りの16件は生存圏科学的研究の関連分野における萌芽的研究に関するテーマや生存圏プロジェクトに関連の深いテーマについて全国の研究者が集中的に討議する「公募型シンポジウム」である。また、国際会議も2件（第152、156回の2件、参加人数208人）を数える。参加人数は1379名であった。

生存圏シンポジウム

回	開催日（開催場所）	シンポジウムタイトル
第149回	平成22年6月16-17日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ セミナー室1)	CAWSES-II キックオフシンポジウム
第150回	平成22年5月25日 (生存研/木質ホール)	第1回生存圏フラッグシップシンポジウム 環境を考慮したバイオマス資源の確保戦略
第151回	平成22年6月1日 (生存研/セミナー室HW525)	DASH/FBAS 全国共同利用成果報告会—第1回—

第 152 回	平成 22 年 6 月 10-12 日 (インドネシア・ヨゴジヤカルタ市/ガジャマダ大学)	生存圏科学スクール 2010 : 持続的生存圏の構築に向けて Humanosphere Science School 2010 (HSS2010) : Towards Establishment of Sustainable Humanosphere
第 153 回	平成 22 年 8 月 6 日 (生存研/木質ホール)	宇宙生存環境学の開拓
第 154 回	平成 22 年 8 月 16-17 日 (情報・システム研究機構国立極地研究所/2F 大会議室)	メタ情報のデータベースを利用した分野横断型地球科学研究の進展
第 155 回	平成 22 年 11 月 17 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ セミナー室 1)	第 7 回伸木会シンポジウム 木質構造に関する最新研究成果発表・討論会
第 156 回	平成 22 年 9 月 2-3 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ きはだホール、ハイブリッドスペース)	MU レーダー25 周年記念国際シンポジウム International Symposium on the 25th Anniversary of the MU Radar
第 157 回	平成 22 年 9 月 1-2 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ きはだホール)	第 4 回赤道大気レーダーシンポジウム
第 158 回	平成 22 年 11 月 19 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ セミナー室 4, 5)	視覚と化学物質による植物の相互作用 : 発信と受容のメカニズム
第 159 回	平成 22 年 12 月 11 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ きはだホール)	第 3 回生存圏フォーラム総会
第 160 回	平成 22 年 12 月 20 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ セミナー室 4, 5)	第 3 回宇宙環境・利用シンポジウム 「太陽活動と地球・惑星大気」
第 161 回	平成 23 年 2 月 4 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ セミナー室 4, 5)	熱帶大規模人工林における木材劣化生物の多様性評価と持続的管理の提案
第 162 回	平成 23 年 2 月 5 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ きはだホール)	木の文化と科学 X
第 163 回	平成 23 年 1 月 20 日 (京都大学宇治キャンパス/総合実験棟 CB207)	第 7 回持続的生存圏創成のためのエネルギー循環シンポジウム -太陽光発電、マイクロ波応用、バイオマス変換のマルチリングに向けで-
第 164 回	平成 23 年 2 月 17 日 (京都大学化学研究所/共同研究棟大セミナー室)	リグノセルロース超分子構造をどうやって見るか
第 165 回	平成 23 年 2 月 20 日 (京都大学防災研究所/大会議室 D1518)	第 6 回南アジアの自然環境と人間活動に関する研究集会 インド亜大陸北東部、アッサム、メガラヤ、バングラディッシュの自然災害と人間活動
第 166 回	平成 23 年 2 月 21 日 (京都大学宇治キャンパス/共通会議室 CB207)	居住圏劣化生物飼育棟 (DOL)/生活・森林圏シミュレーションフィールド (LSF) 全国・国際共同利用研究成果報告会

第 167 回	平成 23 年 3 月 7 日 (生存研/木質ホール)	第 10 回 宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会
第 168 回	平成 23 年 3 月 7-8 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ セミナー室 1, 2, ハイブリッドス ペース)	平成 22 年度 RISH 電波科学計算機実験シンポジウム (DKK シンポジウム)
第 169 回	平成 23 年 3 月 9-10 日 (生存研/木質ホール)	SGEPSS 波動分科会 「宇宙プラズマと航空宇宙工学との接 点」
第 170 回	平成 23 年 3 月 10 日 (京都大学宇治おうばくプラザ/ きはだホール)	第 6 回バイオ材料プロジェクト 「セルロースナノファイバ ー最前線」
第 173 回	平成 23 年 3 月 23 日 (生存研/木質ホール)	生存圏におけるきのこの多様な働き

研究業績

当研究所の研究業績は、京都大学教育研究活動データベースにまとめられており、平成 22 年度の研究業績についても本データベース <http://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/view/index.html> を参照されたい。

生存圏研究 第7号

発 行 日 平成24年2月29日

編集兼発行者 京都大学 生存圏研究所
京都府宇治市五ヶ庄

印 刷 所 株式会社 田中プリント
京都市下京区松原通麿屋町東入

