

# 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到っている。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も多い。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<sup>1)</sup>。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的环境下における老化(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<sup>2)</sup>。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が現状である。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、人文系と自然系的手法を駆使し、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<sup>3)</sup>。

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	KYQw2701
B	伝法隆寺古材	458/612	418/572	KYQw2737
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	木曾産	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<sup>4-5)</sup>。

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、破壊靱性などの強度特性、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

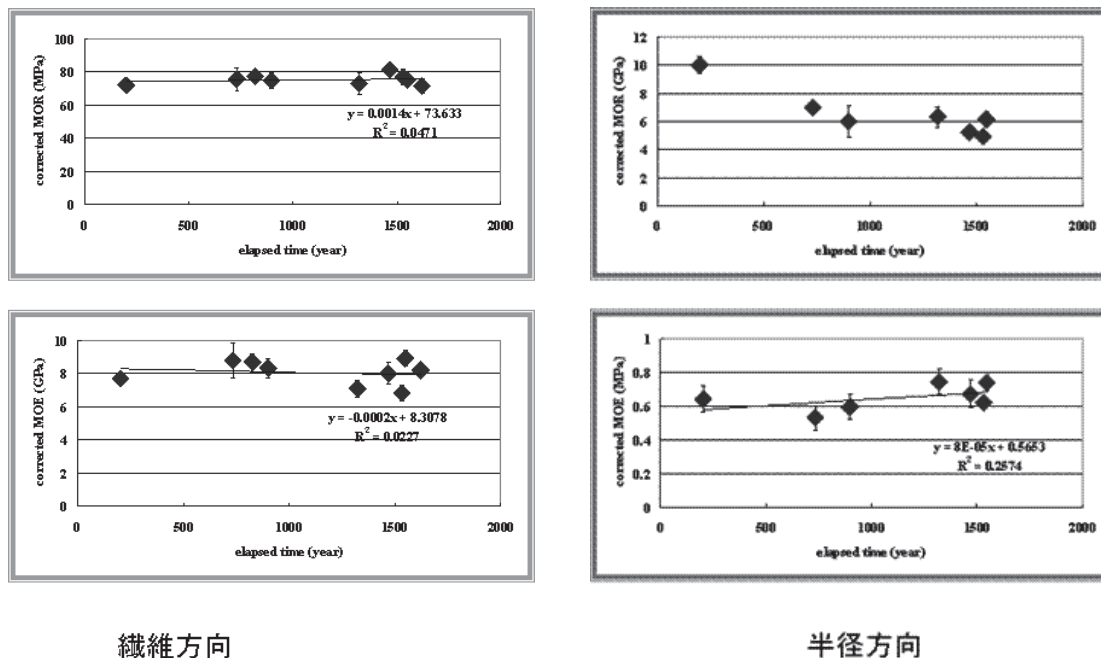
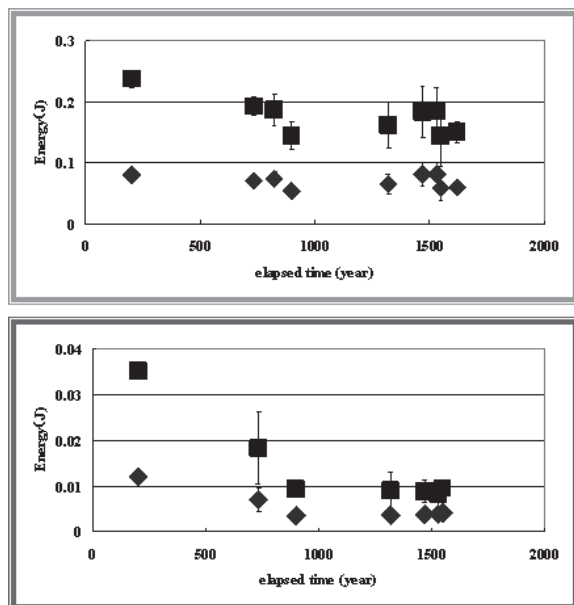
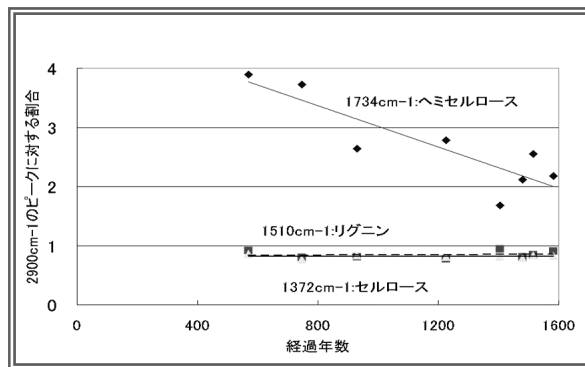


図 2：ヒノキ材の曲げ強度 (MOR)・ヤング率 (MOE) の経年変化 (繊維方向および半径方向)



破断エネルギー

図 3：ヒノキ材の破壊靱性の経年変化  
上図：繊維方向、下図：半径方向



FTIR スペクトルの 2,900 cm<sup>-1</sup> を基準としたときの 3 成分のピーク高さの相対値で評価

図 4：木材成分の経年変化の一例

ある<sup>3)</sup>。顕著な結果についてみると、ヒノキ材の1,600年間に及ぶ繊維方向曲げ強度(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、繊維直交(半径)方向の曲げ性能は時間の経過と共に低下し(図2右)、また両者の破壊靱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<sup>6)</sup>。

## 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<sup>7-8)</sup>。

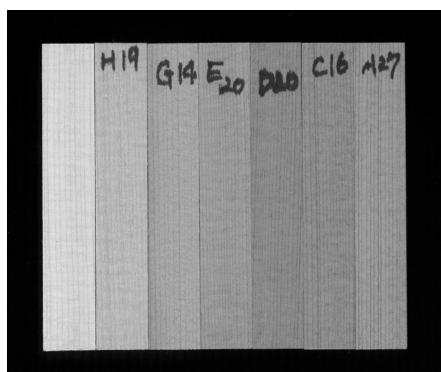


図6：古材の見かけの色の経年変化  
(左端：現生材、右端：1,600年経年)

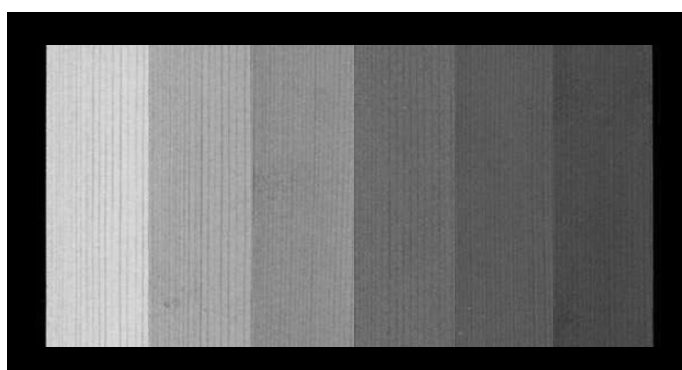


図7：熱処理材の見かけの色の経年変化  
(左端：現生材、右端：180℃、120時間処理)

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で、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)。



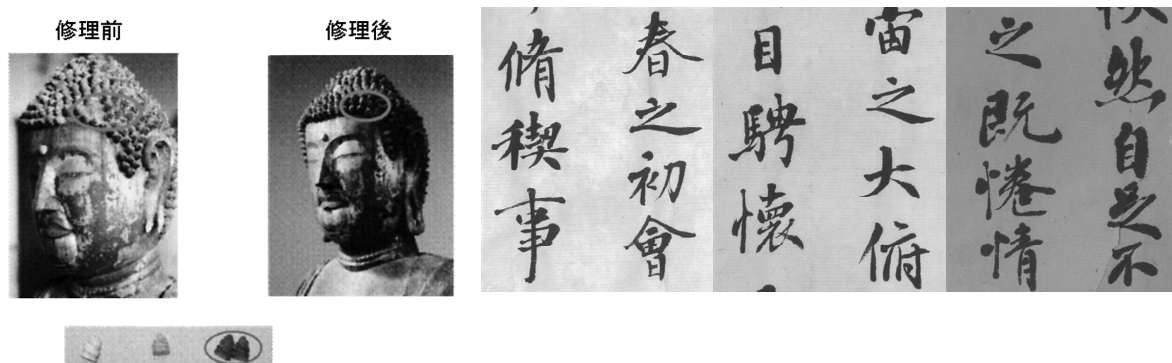


図8：修復前後の仏像の羅髪（らほつ） 図9：書家、杭迫柏樹氏による臨書「王羲之 蘭亭序」（左：未処理、中央：180℃ 8 時間処理、右：180℃ 48 時間処理）

## 6. おわりに

木材の老化に関わる研究は、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、これまでは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照しつつ、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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>や、気象レーダーで観測された雨の分布<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>。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、雨の分布を捉えるために、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（またはウィンドプロファイラ）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<sup>5)</sup>。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 京大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

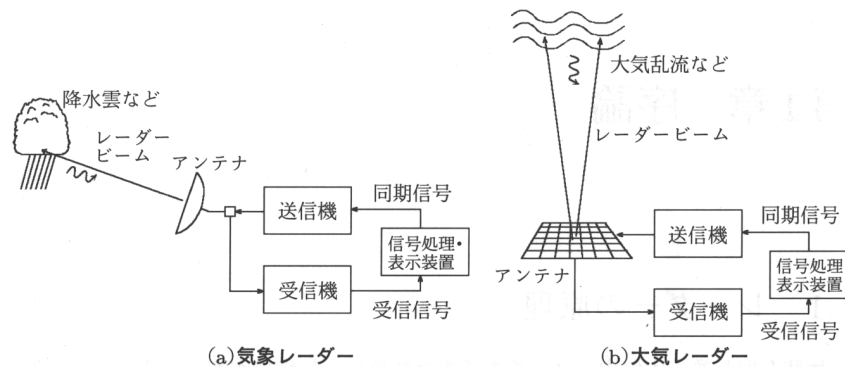


図1：気象レーダーと大気レーダーの基本概念図。

## 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<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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<sup>8-10)</sup>。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<sup>11)</sup>。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、燦燦と降り注ぐ太陽・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<sup>12)</sup>、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<sup>13-14)</sup>。

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<sup>15-16)</sup>。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<sup>10)</sup>。

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めますが、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<sup>17)</sup>。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、飢饉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。

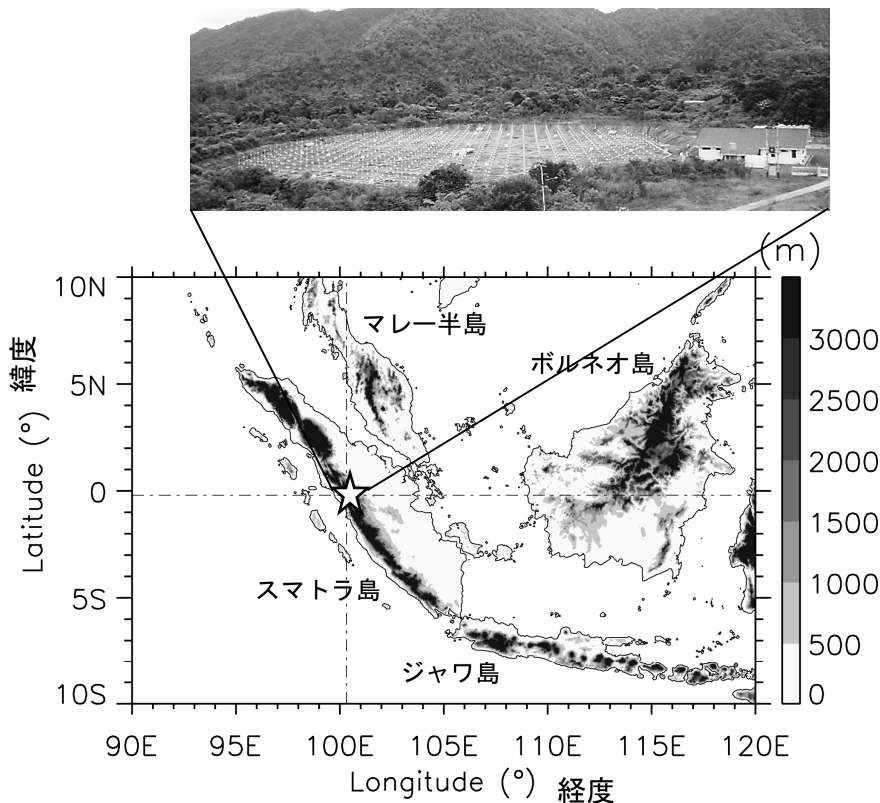


図2：赤道大気レーダーの設置位置（☆印）と外観。

### 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<sup>18)</sup>。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<sup>19)</sup> (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<sup>20)</sup>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。

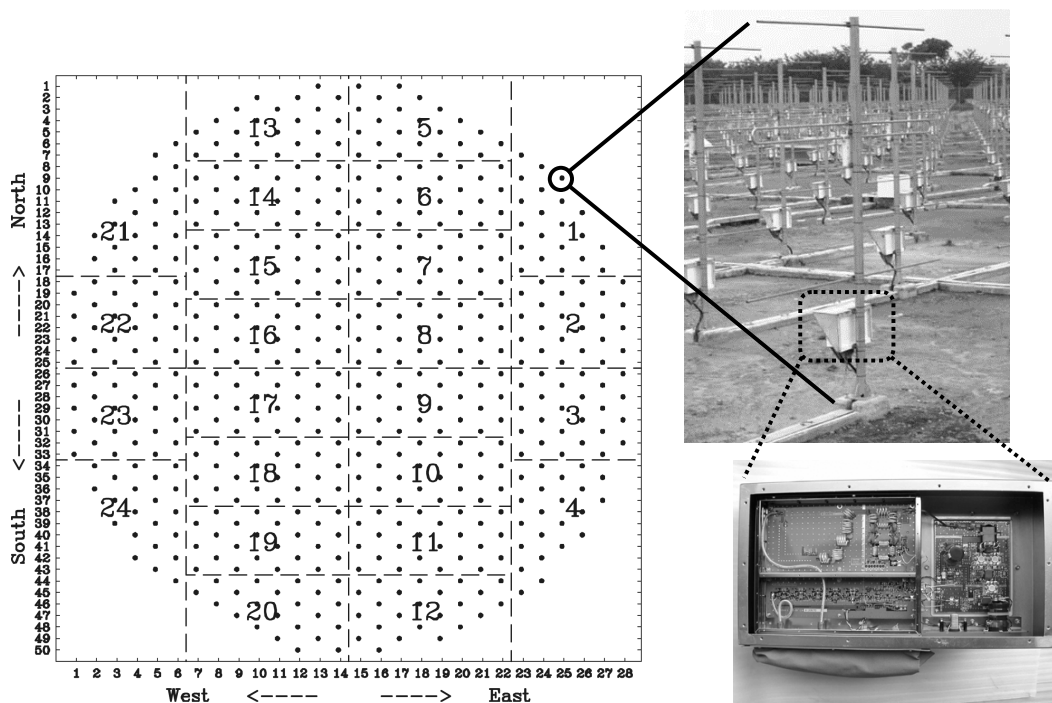


図3：赤道大気レーダーのアンテナ配置 (左)、アンテナ素子 (右上)、及び送受信機の内部 (右下)。

### 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結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 時半頃までは、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 年の 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。

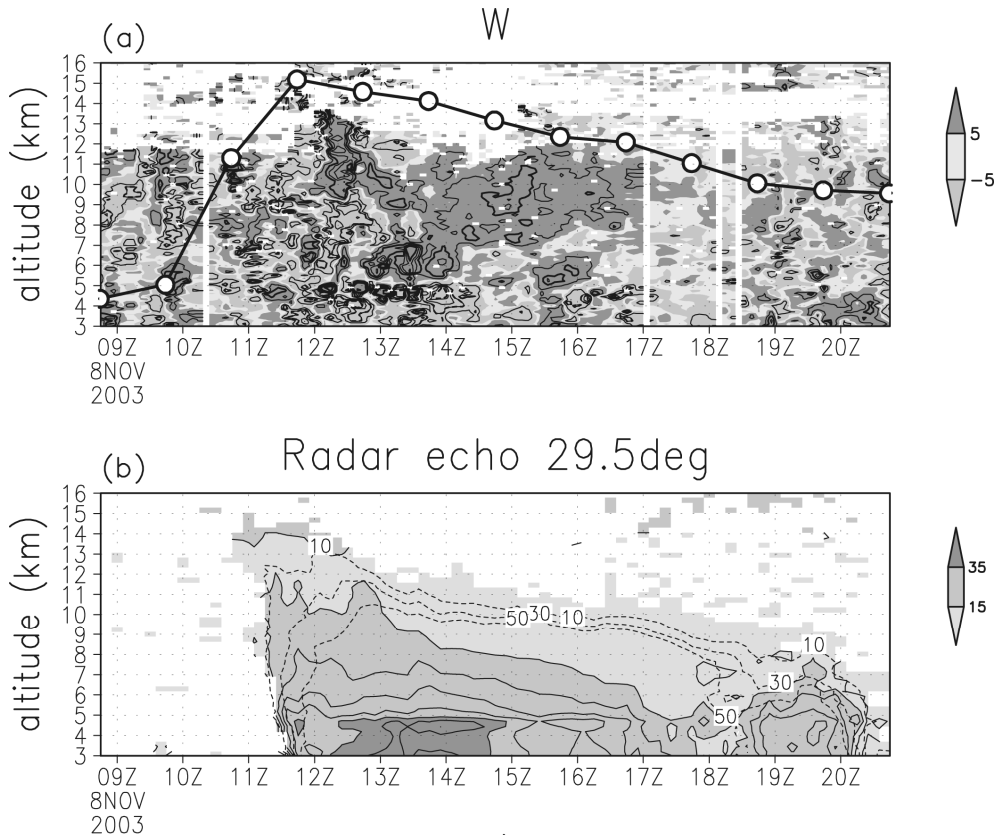


図 4 : (a) 赤道大気レーダーで観測された鉛直風速の時間高度変化。横軸は時間 (単位は時) であり、縦軸は海拔高度 (単位は km) である。正の鉛直風速は地面に対する上昇を、負の値は下降を示す。等値線は 20 cm/s 毎に示されている。(b) 気象レーダーで観測されたレーダー反射因子 (降水粒子の大きさと数の指数) の時間高度変化。単位は dBZ で、値が大きいほど大きい降水粒子が多く存在することを示す。等値線は実線で 5 dB 毎に示されており、点線は % で示した赤道大気レーダー周辺における降水雲の存在頻度を示す。

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や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 (シアー不安定) 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<sup>21)</sup>。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 (砕波する) 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、レンジイメージング (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で、熱帯大気中における物質の拡散や輸送機構が解明されることが期待されています。

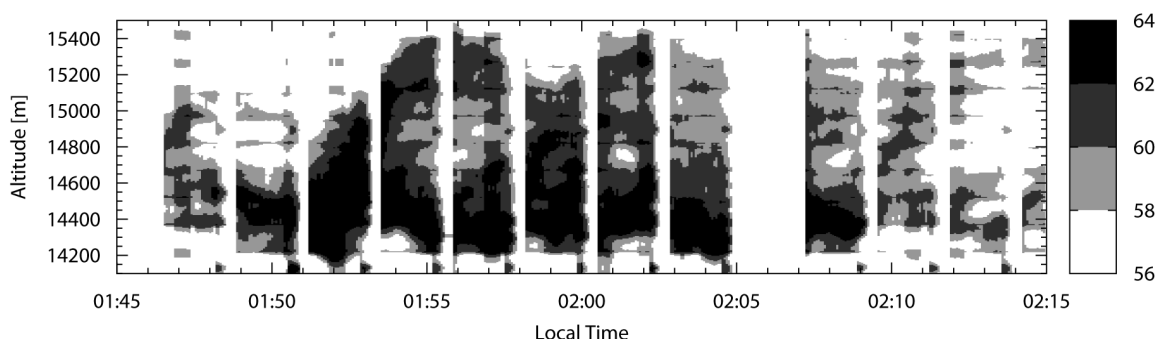


図5：赤道大気レーダーで捉えた、ケルビン-ヘルムホルツ不安定の発生に伴う受信エコー強度の時間高度変化。横軸は時間（単位は時：分）であり、縦軸は海拔高度（単位は m）である。濃淡で示す受信エコー強度の単位は dB である。

#### 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照しつつ、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年の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<sup>22)</sup>や、人工衛星搭載レーダーによる雲観測<sup>23)</sup>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るべき課題に、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ラについて, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/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 | 学研サイエンスキッズ, <http://kids.gakken.co.jp/kagaku/ecol10/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, 成層圏と中間圏内の大規模な運動, 一般気象学第 2 版, 東京大学出版会, 248-266, 1999.
- 9) 佐藤薫, 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](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 N<sub>2</sub>O 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/known/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出しているもの、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。ここで話す電波は、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。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方がご存知だと思います。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氣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、最初にこれが出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。遠目にみると一見、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ろでは、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、地球付近まで来ても、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、 $1\text{ cm}^3$  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 ( $\text{H}^+$ ) 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、いつでもいいのかもしれないですね。

「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、 $1\text{ cm}^3$  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が、それでも。

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、プラズマ中で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、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や、「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となります。

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のでしょうか。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種類しかないのです。

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、宇宙プラズマ中で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)

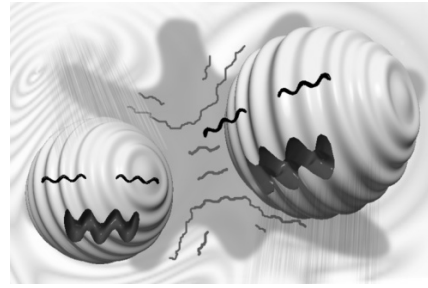


図2：つぶつぶ無衝突！  
(イラスト：熨斗千華子さん)

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をみてください。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

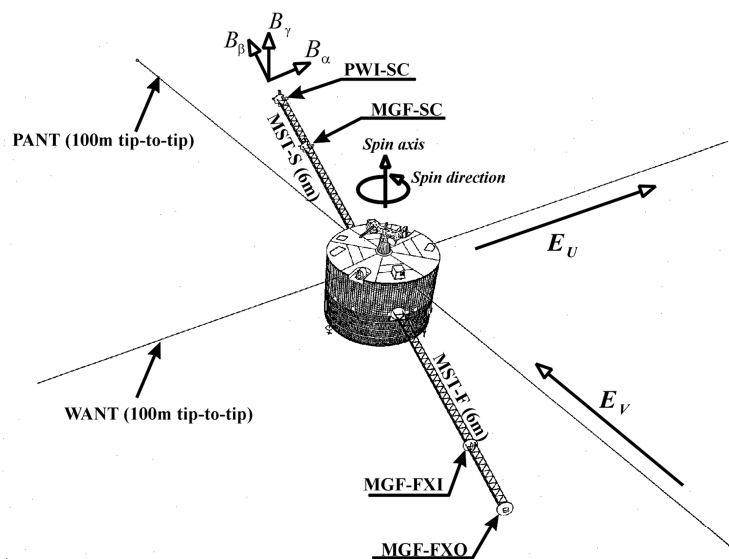


図3：ジオテイル衛星(1992年-)



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せられ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100m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6m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、6m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いますから、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第一放送の電波の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かって「自然に」発生しているものです。どんな情報がそこ

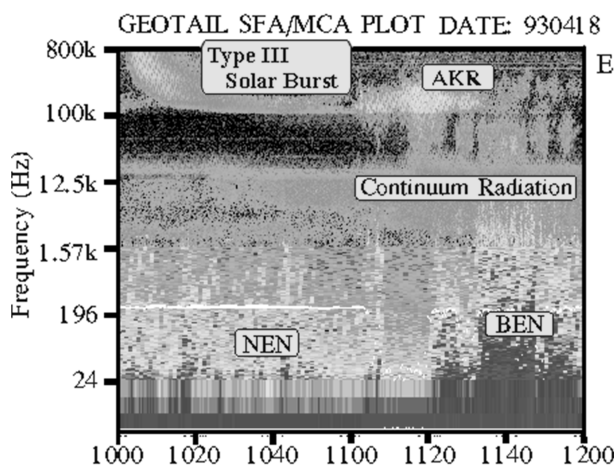


図4：代表的なプラズマ波動観測結果

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た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



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 第一放送の大阪は、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、わかりにくいですね。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きている図なのか、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」もいっ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ものですが、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込まれてきました。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

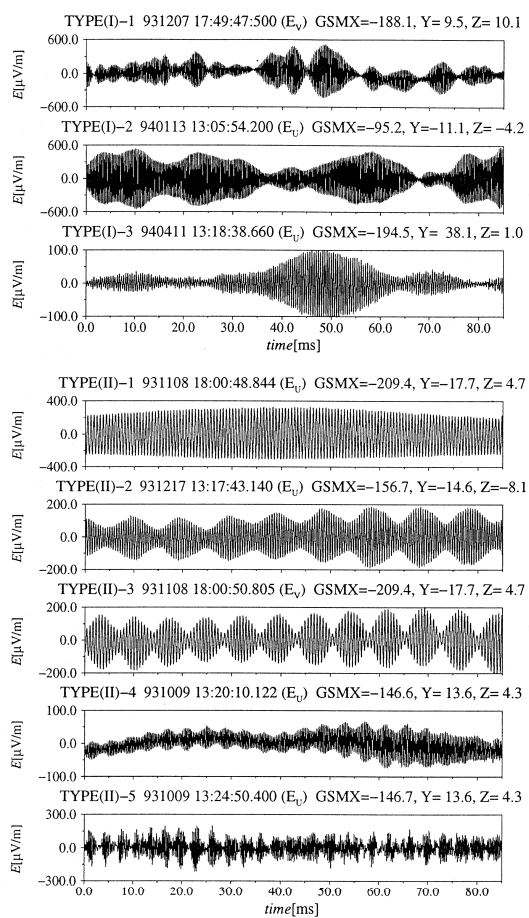


図5：プラズマ波動の波形(例)。

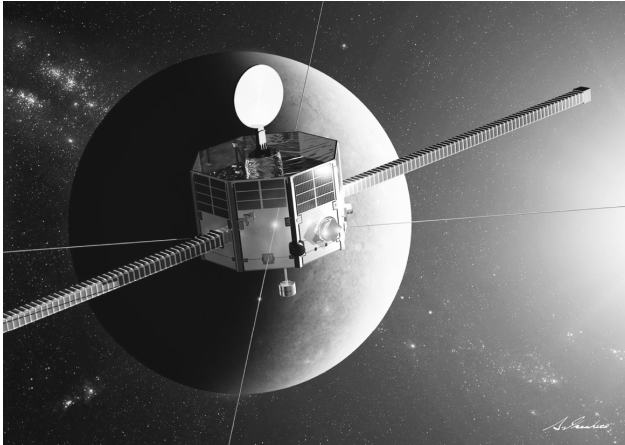


図 6 : 日欧共同水星磁気圏探査衛星 BepiColombo Mercury Magnetospheric Orbiter (2014 年打ち上げ予定。  
(イラスト: 池下章裕氏、提供: JAXA))

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行し、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

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よ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のかもしれませんが。

## 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

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となります。

## 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、今年も日本も「はやぶさ」で盛り上がりました。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<sup>1)</sup>。

## 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。トウモロコ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れば、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、バイオプロパノール、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

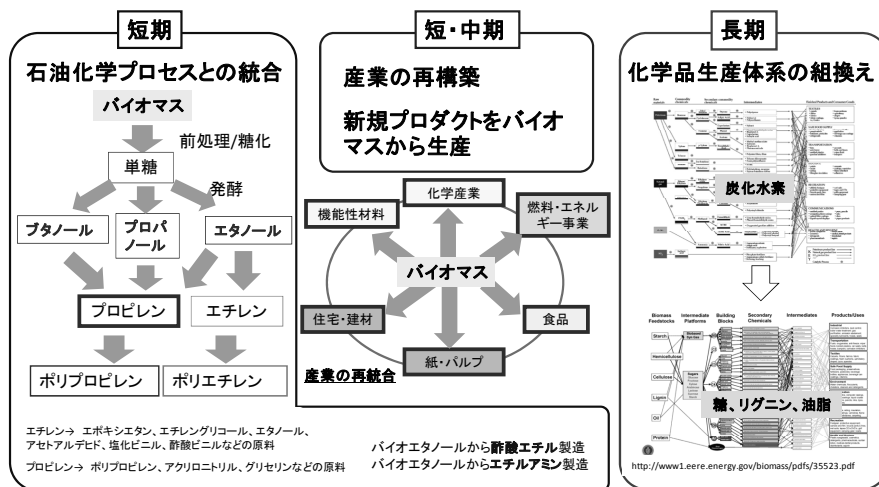


図 1：石油リファイナリーからバイオリファイナリーへの展開



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はなく、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学的変換

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

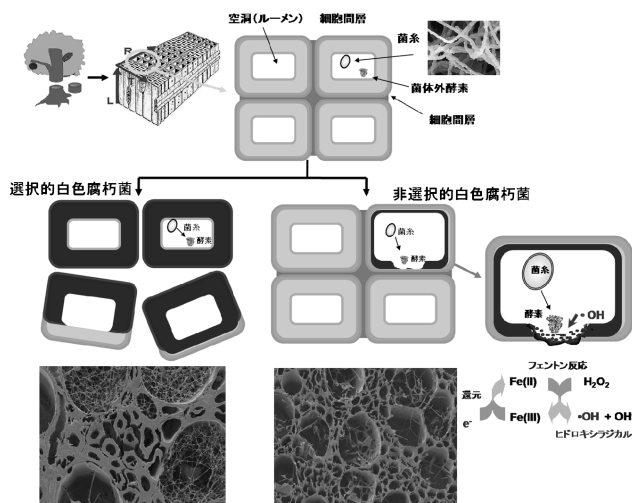


図2：リグニンを分解するキノコの異なる木材腐朽様式

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されてきた。

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、選択的白腐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）<sup>2-11)</sup>。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発見し、その機能解明を行った。また、選択的白腐菌は、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<sup>10)</sup>、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。

#### 5. マイクロ波を利用した木質バイオマスの生物学的変換

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<sup>8, 11-15)</sup>。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）<sup>11)</sup>。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<sup>16-17)</sup>。

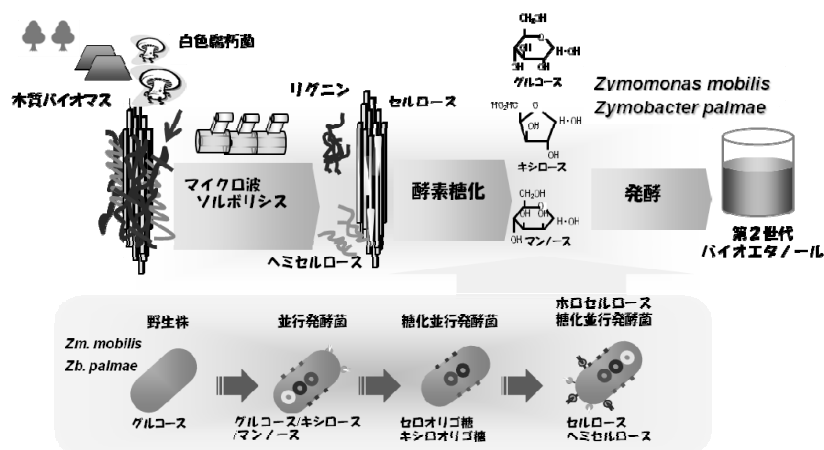


図3：キノコ、マイクロ波、高速発酵細菌を用いる木質バイオマスからのエタノールの生産プロセス<sup>11)</sup>

## 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  $\omega$ -7 and  $\omega$ -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., Alkoxy 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *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<sup>1)</sup>。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、霊など）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観を支えたものが、「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ような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<sup>2)5)</sup>。

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・柁目面)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、マイクロメートルオーダーの分解能が不可欠で

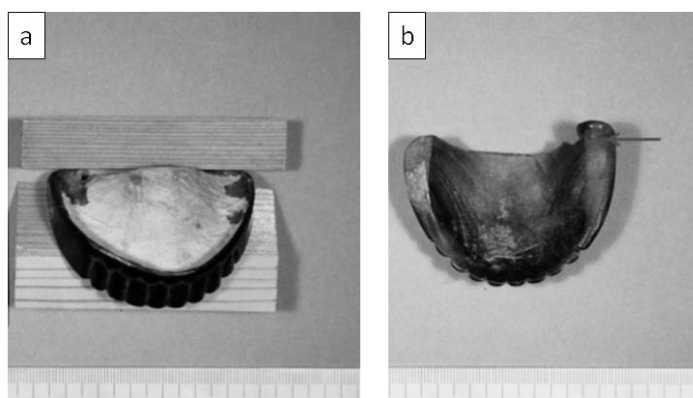


図1 : No. 1の外観 (a, b)。上顎部分には白い紙(和紙か)が貼られていた(a)。(b)の矢印部分から採取できた木片を調査に使用した。

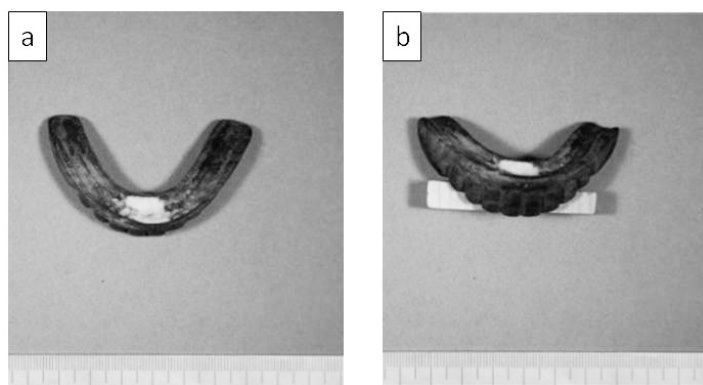


図2 : No. 2の外観 (a, b)。上顎部分を欠いているタイプであり、表面は黒色を呈していた。

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  $\mu\text{m}$  の分解能が得られることがわかっている。

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 $\times$ 1300pixel (0.5 $\mu\text{m}$ /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」<sup>6)</sup>を参考にした。なお、プレパラート、SRX-ray  $\mu\text{CT}$  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  $\mu\text{m}$ )で内腔にガム状物質が多く充填されており、道管及び木部繊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ったため、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。

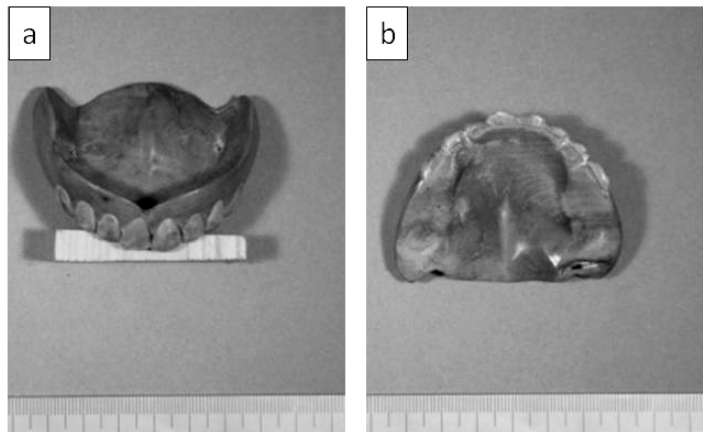
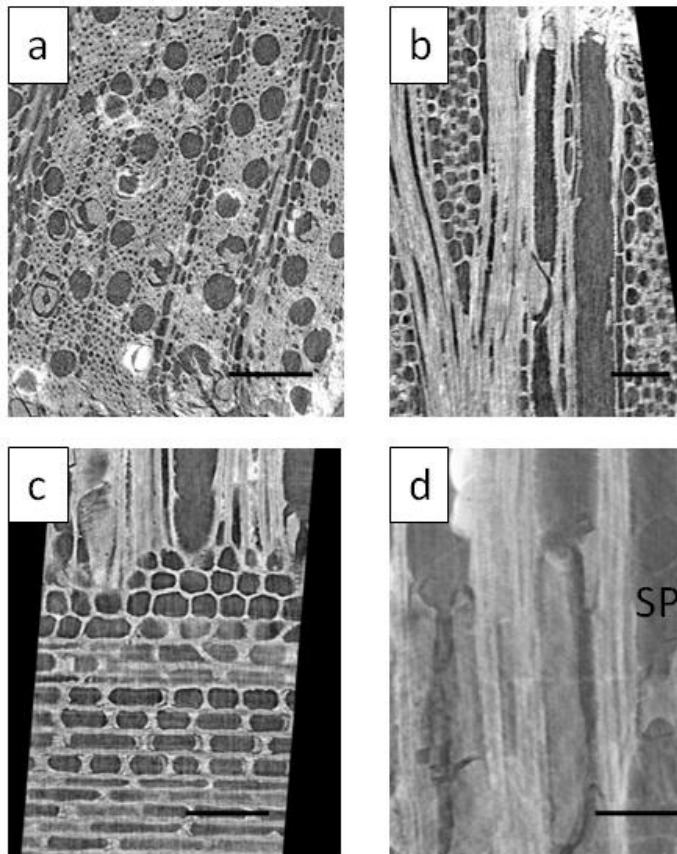


図 3 : No. 3 の外観 (a, b)。上顎に接する部分があり、歯の部分に木材以外の白い物質が使用された木床義歯である。



Bar = 100  $\mu$ m

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)。

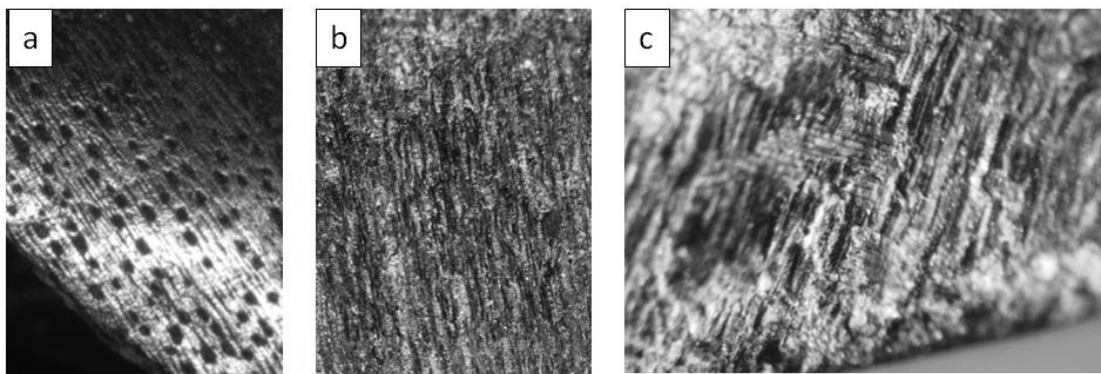


図5：No. 2の実体顕微鏡で撮影した写真。(a)：木口面、(b)：板目面、(c)：柾目面。放射組織が層階状を呈しており(b)、異性(c)であることが確認できた。また表面は黒色を呈していた。



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ったため、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<sup>7)</sup>。実体顕微鏡観察では、らせんの有無までは観察できなかったが、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った。

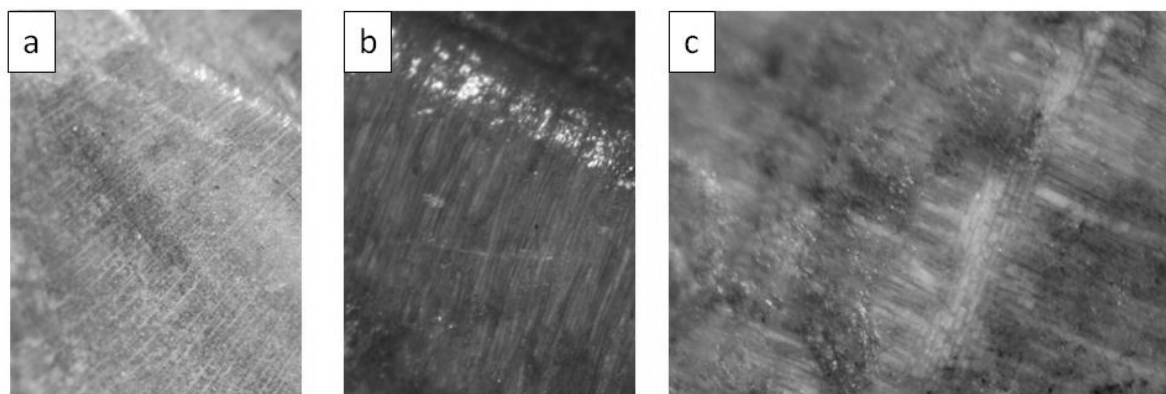


図6：No. 3の実体顕微鏡で撮影した写真。(a)：木口面、(b)：板目面、(c)：柁目面。放射組織が異性で1-2列(b)、異性(c)であることが確認できた。

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テイ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<sup>1)</sup>。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、歯様に臘脂を筆にて染め、その上に真粉を押し付ける。臘脂の付きたる通りに削りて、幾辺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<sup>1)</sup>。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随筆「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、物言い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、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ったとされている<sup>1)</sup>。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たことから、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で使用されたものであることから、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<sup>1)</sup>。Greenwood がイギリス人紳士の継続歯を治療した際に、ナシカ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<sup>1)</sup>。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、上杉健太郎博士に多大な協力をいただきました。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  $\mu$ 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.



# アカシアマング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

アカシアマングウムの樹皮には、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、アカシアマング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<sup>1)</sup>。さらに、我々は、その外樹皮をミルで粉砕し機械的に篩うと、粒径 63  $\mu\text{m}$  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<sup>2)</sup>。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グウムに関し、樹高方向での樹皮、抽出物の量的分布、質的变化、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グウム林地、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@rishi.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 3 m 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。



図 2 : 樹皮の剥離

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、採取高さで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 1.3 m では、個体 A, B ともに約 8 割が外樹皮であったが、13.3 m では、それは約 5 割にまで低下した。このよう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 3 m 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に、地際から 6 m までの範囲で全乾燥外皮重量の約 3/4 を占めていた。

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 : 樹皮の採取高さで外樹皮率

採取高さ (m)	個体	
	A 外樹皮 (%)	B 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

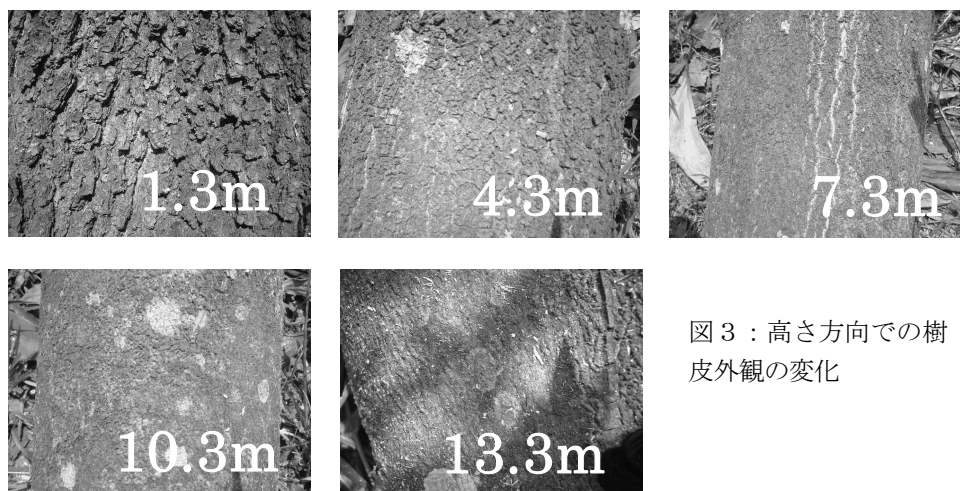


図3：高さ方向での樹皮外観の変化

### 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℃ 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、凍結乾燥により固形抽出物を得た。抽出前の樹皮粉末全乾重量と固形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：樹皮採取高さとお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<sup>3)</sup>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 分後にガラスフィルター (No. 3) を通した。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、ガラスフィルターを通した。堆積物が残留してい

るガ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。ガ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、採取高さと同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：樹皮採取高さと同抽出物 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。採取高さと同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：樹皮採取高さで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ギウムは、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  $\mu\text{m}$  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<sup>2)</sup>。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℃ 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ことが考えられる。また、Stiasny 値も時間経過とともに低下したことから、保存

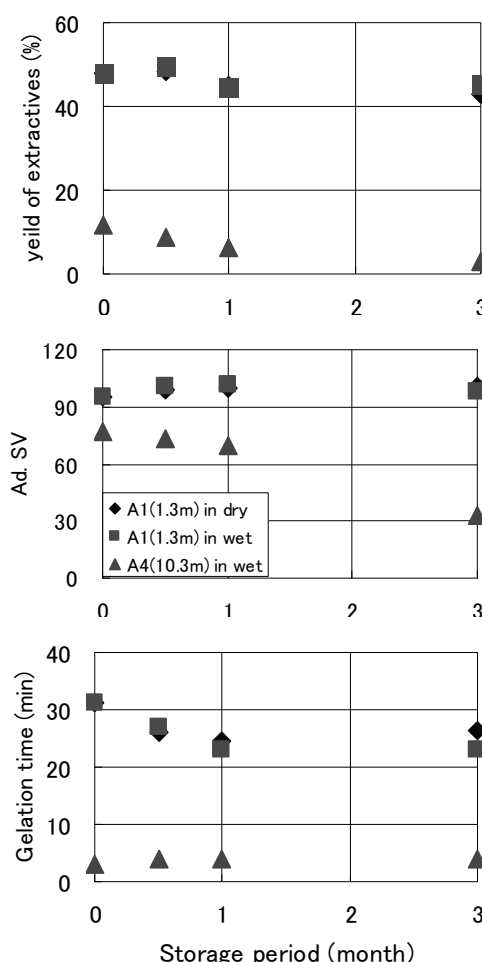


図 4：貯蔵期間とメタノール抽出物収率、Adjusted Stiasny 値、ゲル化時間の関係



性を考えた場合も、アカシアマンガウムでは、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  $\mu\text{m}$  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砕した場合、粒径 63  $\mu\text{m}$  以下の微粉末が全樹皮粉末の約 50% を占め、さらに、その 63  $\mu\text{m}$  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含有していることがわかる。粒径 500-250  $\mu\text{m}$  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、粉砕、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 ( $\mu\text{m}$ )	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

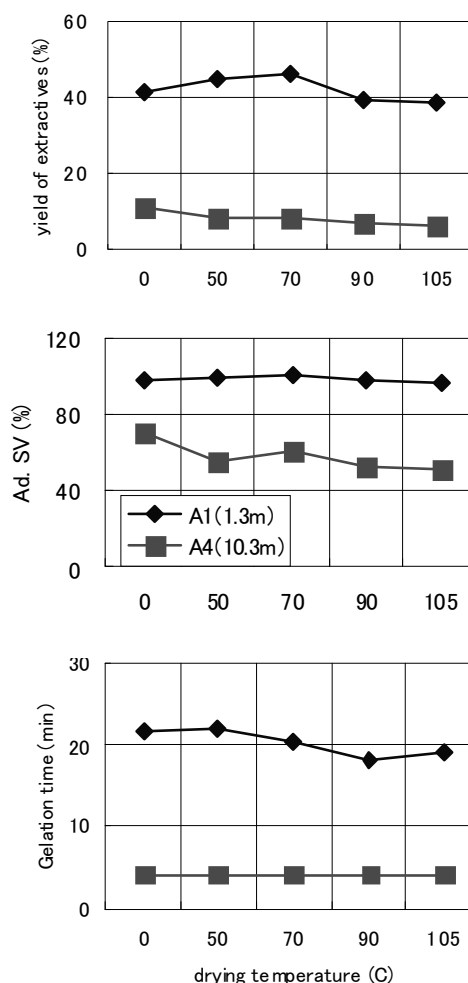


図 5 : 乾燥温度とメタノール抽出物収率、Adjusted Stiasny 値、ゲル化時間の関係。

このことから、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 $^{\circ}\text{C}$  から 130 $^{\circ}\text{C}$  まで 10 $^{\circ}\text{C}$  刻みで変化させた。

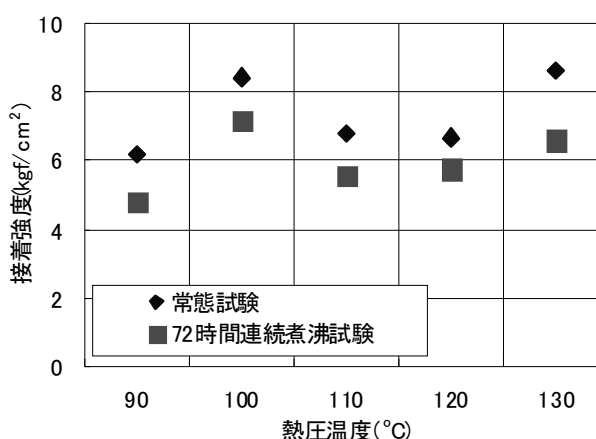


図6：樹皮粉末接着剤合板の接着強度

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 $^{\circ}\text{C}$  でも、130 $^{\circ}\text{C}$  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し値する。これは、アカシアマンガ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 (°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単板を用い、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 $^{\circ}\text{C}$  から 130 $^{\circ}\text{C}$  まで 10 $^{\circ}\text{C}$  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 $^{\circ}\text{C}$  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 $^{\circ}\text{C}$  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 $^{\circ}\text{C}$  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、アカシアマンガ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。

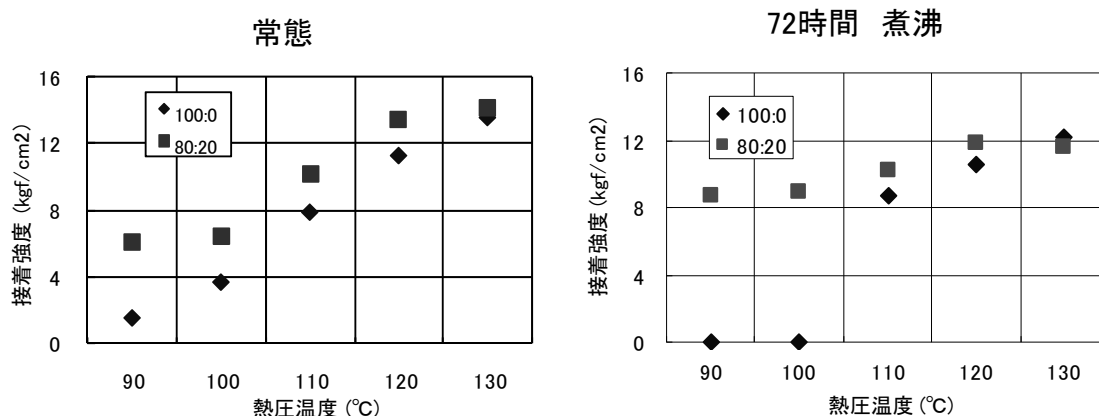


図7：樹皮粉末添加フェノール樹脂接着剤の接着性能

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  $\mu\text{m}$  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

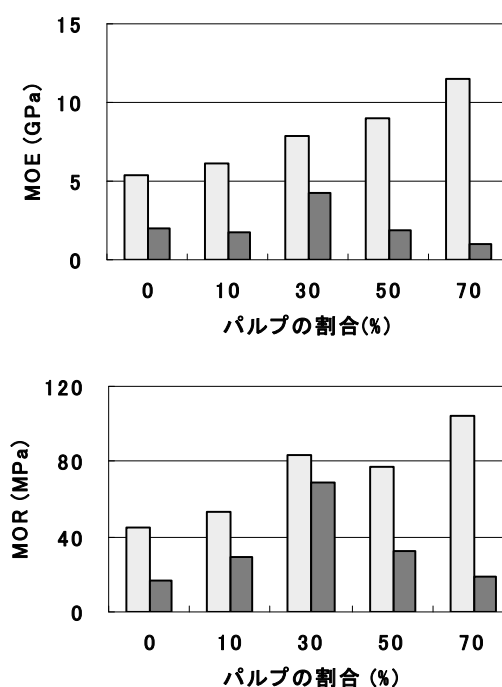


図8：樹皮粉末・パルプ成型物の強度特性  
左：気乾、右：冷水浸漬

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、最近で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繊コスト、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るため、鋼鉄の 1/5 の軽さで、その 5 倍以上の強度 (2-3 GPa) を示す<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

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繊コ

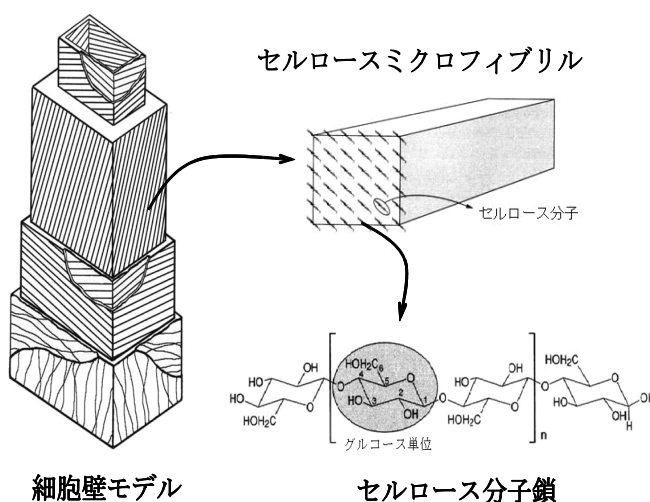


図 1 : 木材の細胞構造とセルロースナノファイバー

\*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、解繊方法によって、もっとも基本となる単位である幅 4 nm のセルロースマイクロフィブリル（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での基本単位として存在するセルロースマイクロフィブリル束（図2、幅 10-20 nm）、マイ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マイクロフィブリル化セルロース（MFC）などがある<sup>4)</sup>。

木材パルプなど植物系繊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<sup>5)</sup>。数%濃度のパルプスラリーについて行う低濃度での解繊技術としては、高圧ホモジナイザー法、マイクロフリュイダイザー法、グラインダー磨砕法、凍結粉碎法、超音波解繊法がある。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<sup>6)</sup>。低濃度での解繊は均一なナノファイバーを得やすいが、解繊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繊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。

斉藤・磯貝らは、TEMPO (2, 2, 6, 6-tetramethyl-1-piperidinyloxy radical) を触媒に使い、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ことを明らかにしている<sup>7)</sup>。ミキサー等の極めてゆるやかな攪拌処理でマイ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<sup>5)</sup>。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、ナノウィスカーが得られる<sup>5)</sup>。これら化学処理や酵素処理、酸処理等の複合で、解繊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、稲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<sup>8-10)</sup>。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。

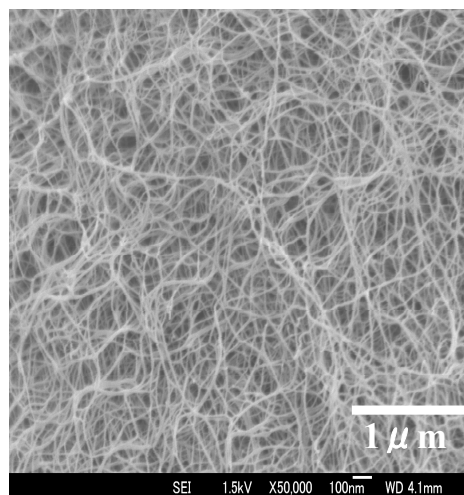


図2：木材細胞壁中のセルロースナノファイバー束の走査型電子顕微鏡写真。京都大学 栗野博士提供

### 3. ナノファイバー補強透明材料<sup>11-21)</sup>



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<sup>6,12-20)</sup>（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、ガラスのように線熱膨張が小さい。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イ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）。



図4：100%セルロースナノファイバーで出来た透明材料

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イ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<sup>22-30)</sup>

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

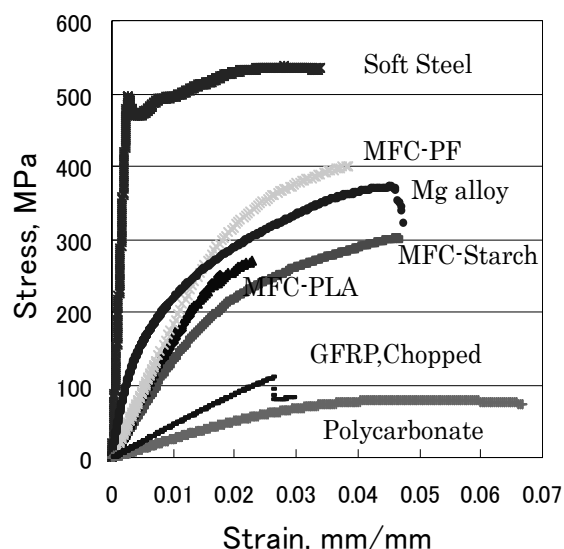


図5：マイクロフィブリル化繊維成形材料と他材料の強度特性比較

きい。高圧ホモジナイザーで解繊したナノファイバー（マイ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（シートモールドニング法）、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%）<sup>22-26</sup>。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<sup>27-30</sup>。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<sup>28-29</sup>。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<sup>30</sup>。

## 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、パルプのナノ解繊を試みた。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 20  $\mu\text{m}$ ）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、ヒノキやスプルスなどの針葉樹パルプに比べ解繊性に多少難があったが、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。

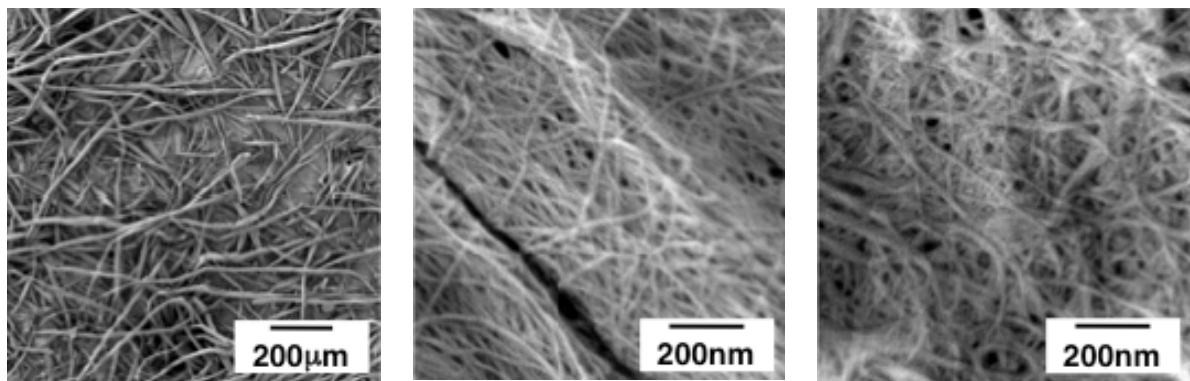


図 6：アカシアマンギウムパルプ（左、中）とそれを解繊したセルロースナノファイバー（右）の走査型電子顕微鏡写真

## 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、最近では 100 ドルを超え、工業原料としての利用が難しくなっている。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、アカシアマングウムを例にあげた。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グウム *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. 熱帯アカシア属の分布・生育特性・分類

アカシアマングウム *Acacia mangium*<sup>1-5)</sup> 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<sup>2)</sup>。しかし、*Acacia mangium* や *A. auriculiformis* は、例外的に湿潤な環境や荒地にも耐え、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* は高温や酸性土壌には強いが、塩分濃度の高い土壌では成長が低下する<sup>1)</sup>。

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<sup>3-4)</sup>。低木の *A. crassicarpa* や *A. difficilis* は亜熱帯地域のバイオマス生産や荒地の緑化先兵、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<sup>3)</sup>、一部の地域では野生化して生態系を乱すとされる<sup>6)</sup>。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<sup>8)</sup>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議がなされた<sup>3, 5, 7)</sup>。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)<sup>7)</sup>。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。

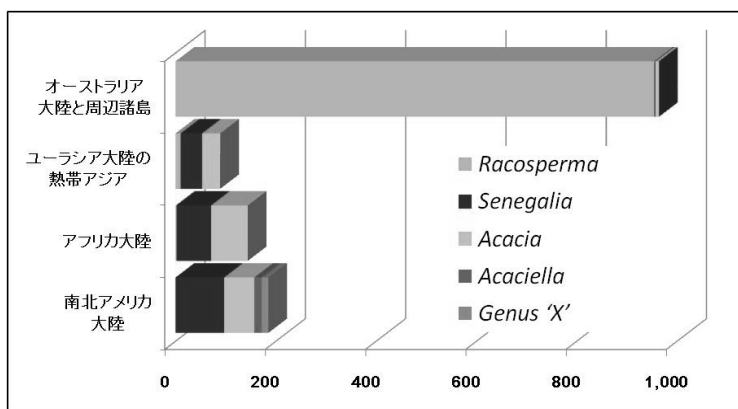


図1：5つの属からなるアカシア分類群の天然分布と樹種数。横軸は各属に存在する樹種数を示す。正式な属名は審議中である (本文参照)

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* 属になってしまう。*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単一のグループであり、名称変更にも異論が続出した<sup>8-9)</sup>。2011年5月時点で学名批准の困難な状況は続いている<sup>9)</sup>。以上の経緯を説明するために、図1には未決定の属名をあえて記載した。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<sup>10)</sup>。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ら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<sup>10-17)</sup>。なお、植林され始めて長年月を経っていないので、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、土壌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<sup>10, 12-13</sup>、心材腐朽（芯腐れ）<sup>10, 13-17</sup>、葉の病気<sup>10</sup>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 *Tinctoporellus 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<sup>15</sup>。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<sup>18</sup>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、芯腐れも少ないとされている。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<sup>19-21</sup>。一方で、Pink disease によるハイブリッド生産量減少の報告<sup>22</sup>もある。

表1:アカシヤ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
苗木枯病 (damping off): 芽生えが土壌から出る前に枯れる場合と、土壌中の根がやられて、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>	土壌と種子の殺菌・消毒	苗木/カビ <sup>11)</sup>
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>	薬剤の葉面散布	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。傷ついた苗木を除去、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): 苗木の先端が壊死しはじめ、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)	土壌の殺菌・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)	殺線虫剤の土壌投与。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 Rot): 初期は貧栄養症状に似る。葉は黄色く小さくなり、若いシュートがしおれる。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・土壌消毒が有効だが、植林面積が広い場合、コストや労力面で、实际的でない。	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>Penthicodes 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、コン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、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つ意図がある。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)<sup>23-25)</sup>。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、病原菌の同定や土壌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がある場合には、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 遺伝子が一繋がりで転写された後、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ズ-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>	配列が長い上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) Pinyopusarek, 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 *Ceratocystis manginecans* and *C. acaciivora* sp. nov. in Indonesia., *S. Afr. J. Bot.*, doi:10.1016/j.sajb.2010.08.006, 2010.
- 12) Glen, M., Bougher 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<sup>1-2)</sup>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<sup>3)</sup>。

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”<sup>4)</sup> 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<sup>5)</sup>。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<sup>5)</sup>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<sup>6-27)</sup>、パルプ化関係が 4 報<sup>28-31)</sup>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<sup>6-17)</sup>、リグニン構造に関するもの 2 報<sup>18-19)</sup>、微生物に対する活性成分が 2 報<sup>20-21)</sup>、脂肪酸・レジン関係が 2 報<sup>22-23)</sup>、発熱量・バイオエタノール関係が 2 報<sup>24-25)</sup>、セルロース・マイクロファイブール傾角関係が 1 報<sup>26)</sup>、リグニンの微生物分解関連が 1 報<sup>27)</sup>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<sup>32)</sup>と二次木部形成部位での遺伝子発現データベース<sup>33)</sup>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<sup>34-42)</sup>、パルプ化関係が 2 報<sup>42, 43)</sup>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<sup>34)</sup>、脂肪酸分析関係が 1 報<sup>35)</sup>、抗酸化性・ラジカル補足関係 3 報<sup>36-38)</sup>、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<sup>39)</sup>、生理活性成分関係 2 報<sup>40, 41)</sup>である。また、リグニン合成酵素遺伝子<sup>32)</sup>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* も検索にかかっていた。すなわち、近赤外分光分析によるリグニン解析に関係 1 報<sup>19)</sup>、パルプ化関係 2 報<sup>30, 44)</sup>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<sup>5)</sup>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<sup>30, 45-49)</sup>、近赤外分光分析によるリグニン解析 1 報<sup>19)</sup>、微生物に対する抵抗性成分関連 1 報<sup>20)</sup>、抗酸化成分関係 1 報<sup>50)</sup>、多糖分析関係 1 報<sup>51)</sup>、フラボノイド関連 1 報<sup>52)</sup>、抽出成分分析関連 2 報<sup>53, 54)</sup>が認められた。本種はパルプ用材として湿性土壌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%)<sup>55)</sup>、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 *Acacia 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 $\alpha$ -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 <sup>13</sup>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-Haemaelaeninen, 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  $\alpha$ ,  $\beta$ -dehydrocurvularin 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, *Linchan 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, *Linchan 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*, *Holzforchung*, **59**, 94-101, 2005.
  - 53) Pietarinen, S. P., Willfor, S. M., Sjoeholm, R. E., Holmbom, B. R., Extractives in *Acacia mangium* and *Acacia crassicarpa* stem wood and knots, Appita Annual Conference and Exhibition, **58<sup>th</sup> (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/All\\_J-080917.pdf](http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Japanese/All_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. 熱帯域植林の必要性

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、これら三圏、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会が存在する。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壌劣化など「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—（杉原薫、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 京大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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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. 熱帯産業造林の課題

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4~8m<sup>3</sup>/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7~14m<sup>3</sup>/ha前後と見積もることができる<sup>3)</sup>。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20~50m<sup>3</sup>/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、大気や土壌間との炭素・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攪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、排水により土壌に好氣的条件が成立するため土壌有機物が急速に分解・消失し大気中の CO<sub>2</sub> 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 (FeS<sub>2</sub>) などの硫化鉄鉱物が酸素と反応して土壌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壌が著しく劣化し、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 CO<sub>2</sub> 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<sup>4)</sup>。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。泥炭土壌は 10 m 以上の深さに及ぶ所もあり、泥炭土壌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、リアウ州の泥炭土壌からの森林消失は 57%、また非泥炭土壌からの消失は 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 MtCO<sub>2</sub> 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壌で発生している。LULUCF による排出に泥炭の分解や燃焼 (2,000 MtCO<sub>2</sub>) 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年に森林コンセプションが開始され、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.)、カメレレ (*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も多くの研究が見られる<sup>5-9)</sup>。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 CO<sub>2</sub> Emissions in Riau, Sumatra, Indonesia. WWF Indonesia Technical Report, Jakarta, Indonesia, 2008.
- 5) 王潜, 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) 王潜, 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、大気中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中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  $0.5\text{g/cm}^3$ )、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。

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

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. 熱帯造林地におけるバイオマスの推定と評価<sup>1)</sup>

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  $\text{m}^3$  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 社造林地内のスバ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<sup>2)</sup>。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、スバンジリジ地区 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 m<sup>3</sup>/ha/yr であり、5 年間の年平均成長量は 36.8 m<sup>3</sup>/ha/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 188m<sup>3</sup>/ha と見積もられる。アカシア材の容積密度は 0.5 Mg/m<sup>3</sup>、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。

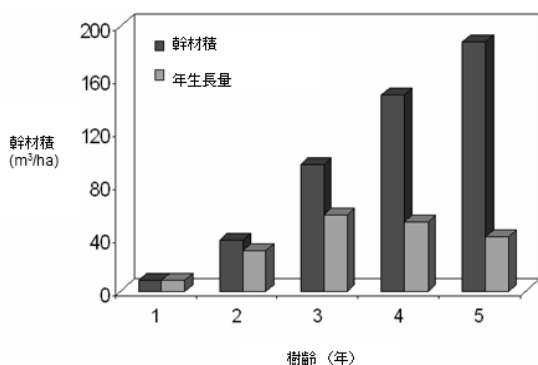


図 2 : アカシマンギウム (AM) の成長量

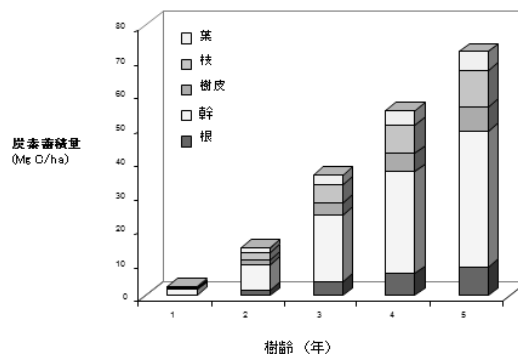


図 3 : AM のバイオマス生産量

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<sup>3)</sup>、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 Mg-CO<sub>2</sub>/ha となる。一方、熱帯天然林 (原生林) のバイオマス蓄積量は 254~390 Mg C/ha と評価されている<sup>4)</sup>。このうち大きい数値は土壌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 1.6~20 Mg C/ha と見積もられているので、その 10 倍近い蓄積をもっ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 社スパ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<sup>3</sup> で

あり、その蓄積平均は 100.8 m<sup>3</sup>/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 ha、原木伐出量は 19.1 万 m<sup>3</sup> である。ヘクタール当たりの原木伐出量（幹材積）は 123.3m<sup>3</sup>/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 ha /6 = 1,550 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っても、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、土壌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。

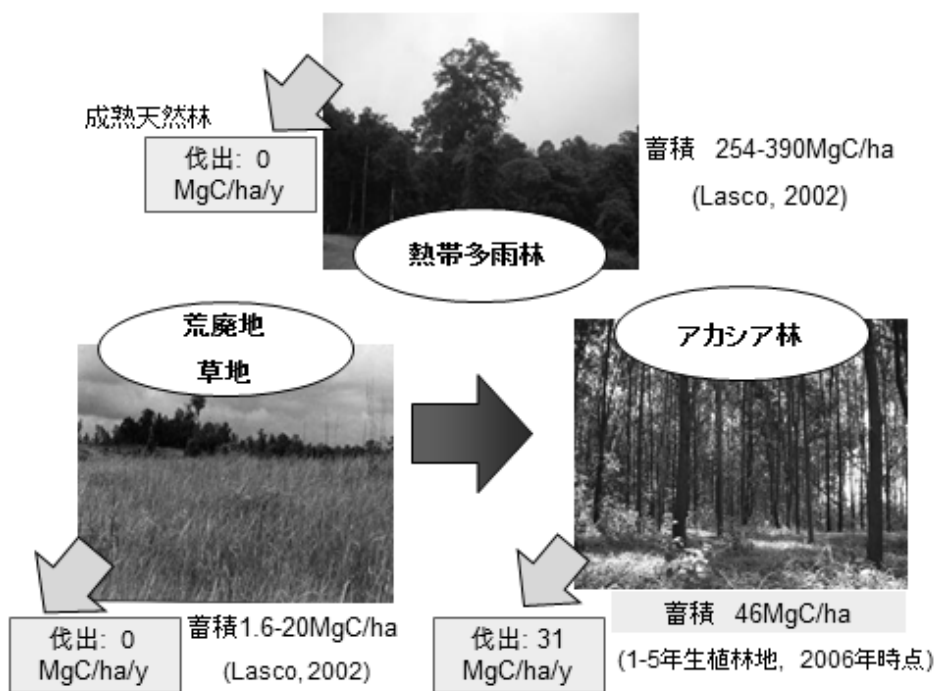


図 4：天然林、アカシア林、草地のバイオマスストックとフロー

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壌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<sup>5)</sup>、これに伴い土壌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壌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。

#### 参考文献

- 1) 杉原薫, 川井秀一, 田辺明生, 河野泰之 (共編著): 第 7 章 熱帯林生命圏の創出, 地球圏・生命圏・人間圏—持続的な生存基盤を求めて—, 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., Djaenuidin, 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<sup>1)</sup>。ここでは、熱帯早生樹のバイオ燃料化に関連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。爆砕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. 熱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単糖を生産し、生成した単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、熱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、爆砕処理、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<sup>2-15)</sup>。

熱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<sup>14-15)</sup>。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<sup>2)</sup>。

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、 $\alpha$ -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<sup>16)</sup>。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<sup>17)</sup>。

表1：熱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、メイセラールで酵素糖化し、木粉 100 mg 当たり 8 mg 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 cerevisiae</i> (SH1089) を用いた並行複発酵により、木粉 100 mg 当たり約 6 mg 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 10.31 g/L のエタノールを 24 時間で生産。並行複発酵では、7.53 g/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℃、60分前処理	2% セルラーゼと 4% $\beta$ -グルコシダーゼを用いた 50℃、22 時間の酵素処理で収率 54% で前処理物を糖化。60℃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℃、3 分のオートクレーブ処理後、メイセラゼで酵素糖化し、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 cerevisiae</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>	爆砕処理	42℃、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℃、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℃ 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 26.7g/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</i> チップ <sup>a</sup>	加圧熱水 + ボールミル処理	加圧熱水処理 (160℃, 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</i> チップ <sup>a</sup>	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℃ の前処理条件で、セルロースをほぼ定量的に酵素糖化。	9)

<sup>a</sup>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<sup>18-19)</sup>。*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<sup>19)</sup>。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<sup>20)</sup>。*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<sup>19)</sup>。

*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<sup>3, 5)</sup>。

熱帯早生樹は、燃料材や土壌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か可能である。パルプ生産の際に出る *A. mangium* の樹皮の炭 (charred bark) を土壌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<sup>21)</sup>。その他、土壌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壌に効果的である。また、高 Al 飽和度であるアルティソル土壌で適応できる樹種として *Acacia mangium* は貴重な樹種である<sup>22)</sup>。

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<sup>23)</sup>、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<sup>24-25)</sup>。

#### 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がる新たな機会を与える<sup>1)</sup>。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：産業構造の大転換ーバイオリファイナリーの衝撃ー，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) Romani, 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) Romani, 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*, *Holzforchung*, **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., Furujiyo, 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，熱帯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/ASEANHHP/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壌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パイオニア植物であり、比較的排水の良い土壌を好んで生育し、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、群落を作っ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、各々の植林地の土壌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 京大大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野  
E-mail: shiro-s@rishi.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成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い。

## 2. 熱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<sup>1)</sup>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 Subhash<sup>2)</sup>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 Hong<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>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 Hong<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>による報告がある。

Yang ら<sup>9)</sup>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<sup>10)</sup>していたが、

最近 Suzuki ら<sup>11)</sup> は、*A. mangium* のシュートと分化中の木部の平均化 cDNA ライブラリから作成した 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 に対して相同性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<sup>12)</sup> 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生合成の酵素遺伝子 (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. 熱帯 *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<sup>6,9)</sup>。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<sup>11-12)</sup>。しかし、最近、次世代シーケンサー (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<sup>13)</sup>。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 *Corticium 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、病虫害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産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<sup>14)</sup>、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<sup>13)</sup>。

*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<sup>13)</sup>。

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<sup>15)</sup>、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であり、気候システムの関係を読み解く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帯や寒帯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<sup>1-4)</sup>。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め

\*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<sup>1-4)</sup>。

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<sup>5-6)</sup>。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<sup>7)</sup>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 熱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<sup>8)</sup>。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中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り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であり、これらの気候システムの関係性を解き明かすのに絶好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、孔圏道管の平均面積、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<sup>9)</sup>。その結

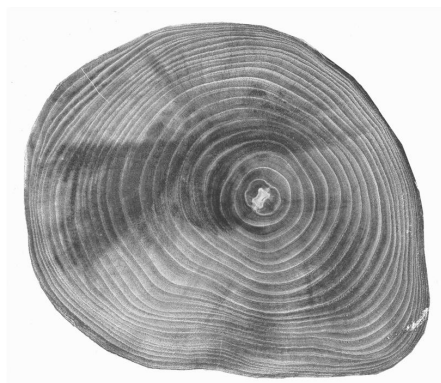


図1：インドネシア産スンカイの年輪



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った。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）<sup>10)</sup>。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<sup>11)</sup>。

熱帯樹木の成長輪解析に関しては、1988年のIUFROの会議<sup>2)</sup>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ことから技術的、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も多くの方法、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読み解く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., Wang, 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 Zuwachszonen 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) 谷尾元聡, 熱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、短時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、ファルカー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 宇治市五ヶ庄京大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 Mécanique et Génie Civil, Université Montpellier 2, CNRS, Place E. Bataillon, cc 048, 34095 Montpellier cedex 5, 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、マンガウム (*Acacia mangium*) という種であったが、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ない。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いう方法がある。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)、繊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<sup>3)</sup>。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、その親であるマンガウム (*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 の箇所の間で円盤を採集し、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、TAPPI<sup>4)</sup> 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、氷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 (繊維細胞、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マイ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。観察から得られた繊維細胞の直径 ( $D$ )、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) :  $\frac{L}{D}$

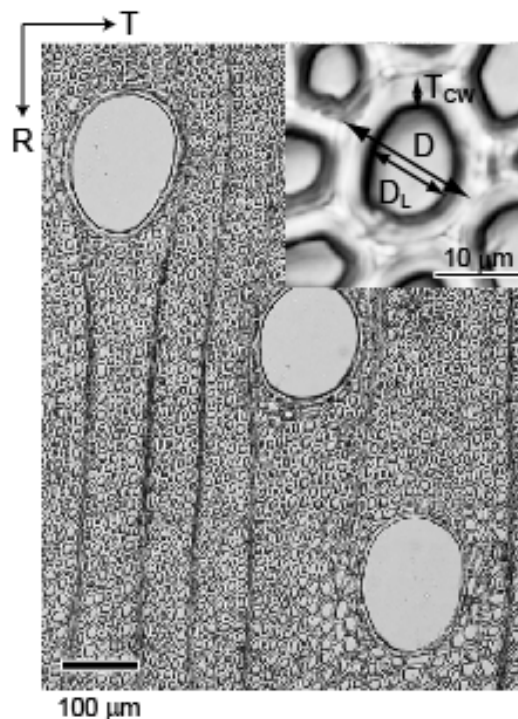


図 2 : アカシアの横断面切片 (上が樹皮側)  
Inset: 繊維細胞の拡大像と、各計測パラメーター

- 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、切片の厚み方向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<sup>5)</sup> を使いそのずれを補正 (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。

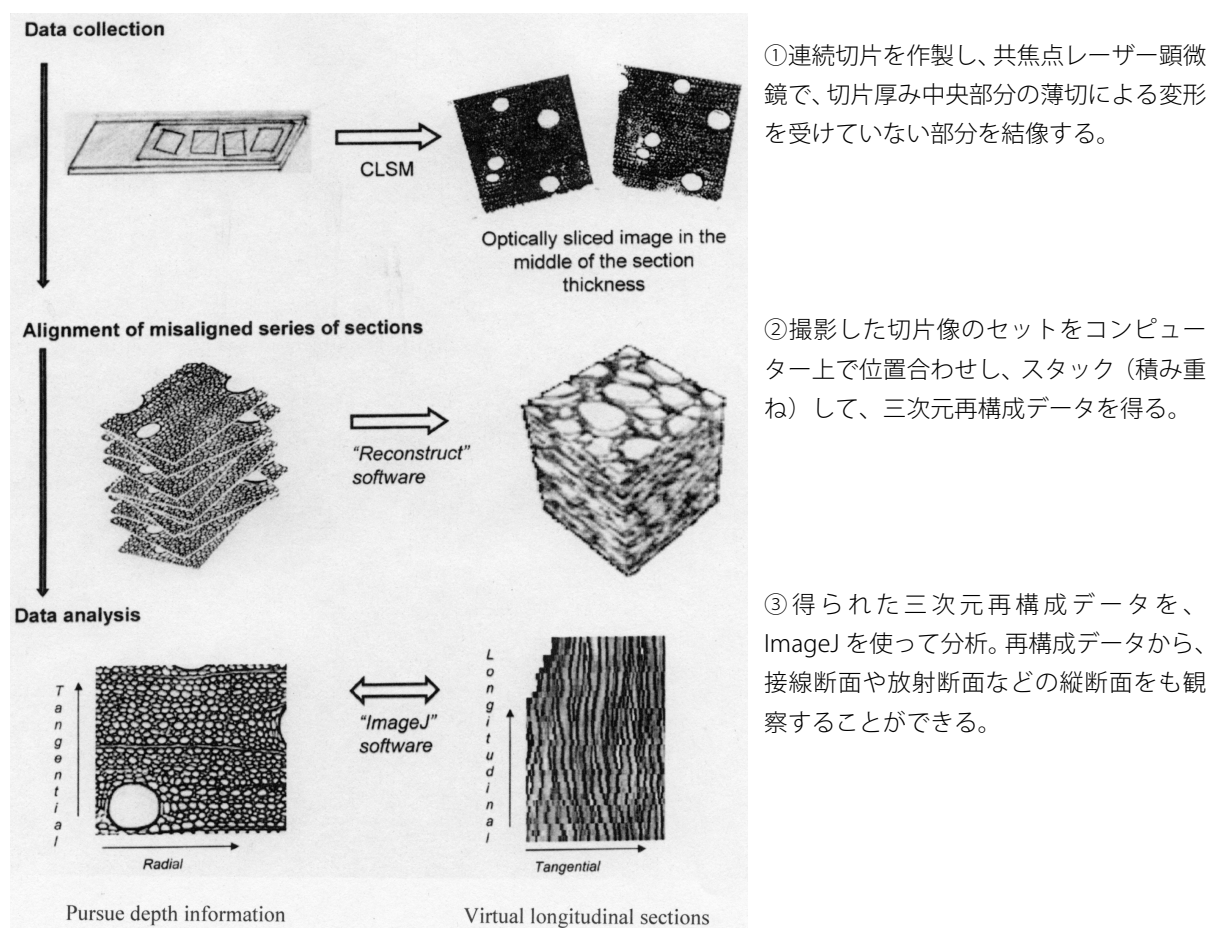


図 3 : 三次元像再構成の流れ (参考文献 2 より引用)

## 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ったが、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った。 $\alpha$ -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ったが、マンガ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 (%)	$\alpha$ -cellulose (%)	Lignin (%)	Density (g cm <sup>-3</sup> )
<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繊維細胞が若干長く、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 ( $\mu$ m)	Diameter ( $\mu$ m)	Lumen	Cell Wall	RR	MR	SR	CR	FC	Fiber	Ray cells	Parenchyma	Vessels
			Diameter ( $\mu$ m)	Thickness ( $\mu$ m)									
<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繊維細胞の長さを推定する方法を提案している<sup>6)</sup>。この方法は、横断

画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、一つの繊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、解繊した繊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、繊維細胞の頂端部の分布などから繊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、繊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、道管からの距離と繊維細胞の長さをプロットしたのが図5である。道管から離れた繊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)離れると繊維長が一定になることが分かる。道管に近い繊維細胞は、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いうために、道管からの距離は繊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、より遠くの繊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、繊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

- 1) 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

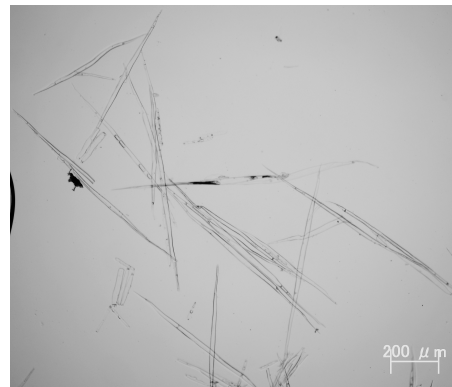


図4：解繊した繊維細胞。図2の三次元再構成データの縦断面で見られるような波打ちは見られない

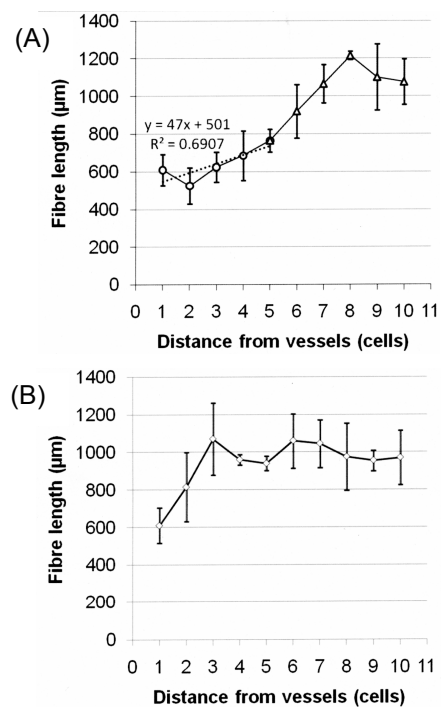


図5：繊維細胞における、道管からの距離(細胞数)と細胞長との関係(参考文献2より引用)

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*, *IWA 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 聡<sup>\*4</sup>, 藤田 素子<sup>\*5</sup>, 服部 武文<sup>\*6</sup>,

本田 与一<sup>\*7</sup>, 大村 和香子<sup>\*8</sup>, 築瀬 佳之<sup>\*9</sup>, 土居 修一<sup>\*10</sup>

## Biodiversity in the tropical plantation forest\*

Tsuyoshi Yoshimura<sup>\*\*</sup>, Yoko Takematsu<sup>\*\*\*</sup>, Satoshi Yamashita<sup>\*4</sup>, Motoko Fujita<sup>\*5</sup>,  
Takefumi Hattori<sup>\*6</sup>, Yoichi Honda<sup>\*7</sup>, Wakako Ohmura<sup>\*8</sup>, Yoshiyuki Yanase<sup>\*9</sup>,  
and Shuichi Doi<sup>\*10</sup>

### 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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。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学

\*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<sup>4)</sup>。

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、上述した病虫害の抑制機構として、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<sup>5)</sup>。

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. 熱帯アカシア林の生物多様性

### 2.1 熱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、土壌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攪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、特に土壌食性シロアリの多様性が非常に高く、攪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、攪乱がすすむほど、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よく多く、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 Eggleton<sup>6)</sup>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壌食性シロアリ及び材食性シロアリの攪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、アカシア植林地を、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ってはいな



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、攪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。

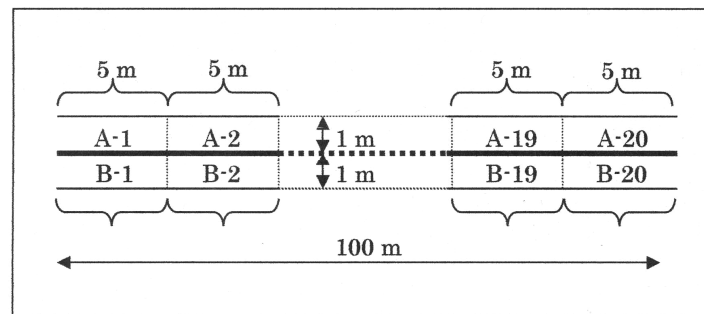


図1：シロアリ相の調査方法（ベルトトランセクト法）。1 m × 5 m の小区画（図では A-1 ~ A-20 と B-1 ~ B-20 の 40 区画）を 1 人が 30 分で調査

## 2.2 熱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<sup>7)</sup>、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った。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する。

### 2.3 熱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。植林地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かった。保全林から異なる距離 (0.5 km, 1-2 km, 6-7 km, 10-15 km) 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、TWINSPAN<sup>®</sup> 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、それがあつて周辺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。

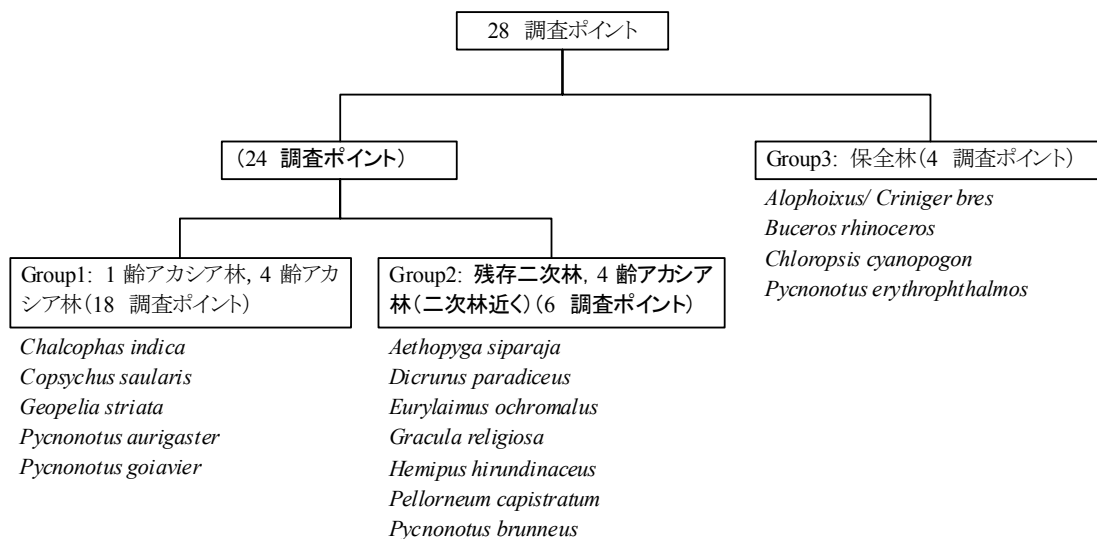


図 2 : 調査ポイントの鳥類種組成に基づく分類。枠外のリストは、グループごとの代表的な鳥類種

### 3. 熱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、それがあつて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確認している。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したデザインを行つ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., Ryvarde, 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対規模栽培されるが、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、我が国の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、そ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、ユーカリプトル (1,8-シネオール)、 $\alpha$ -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<sup>1)</sup>。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ウカリで発現させた。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ウカリを得た。得られた組換えユウカリは、いず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<sup>2)</sup>。

リモネンの蓄積量を確認するため、組換えユウ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、野生型ユウカリのリモネン蓄積量は平均で 22.9  $\mu\text{g/g}$  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  $\mu\text{g/g}$ 、最も高いクローンでは 190  $\mu\text{g/g}$  であり、いず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  $\mu\text{g/g}$ 、最も高いクローンでは 327  $\mu\text{g/g}$  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。

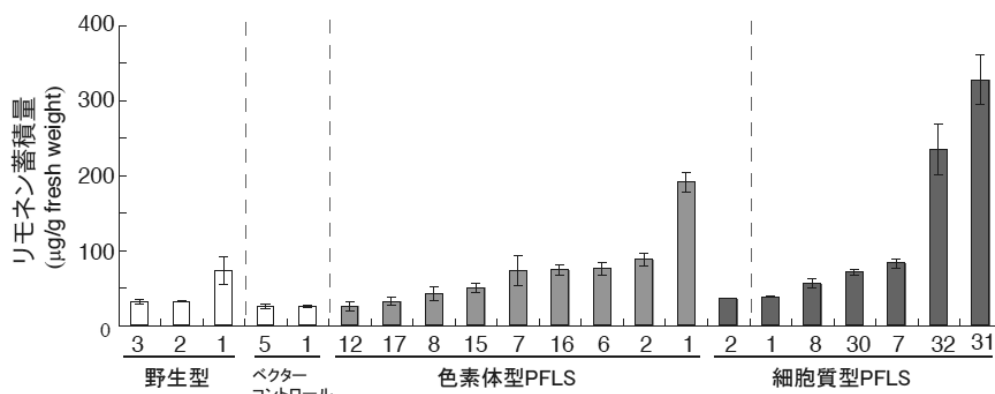


図 1 : PFLS 導入ユウカリの葉におけるリモネン生産量

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、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った。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

# アカシヤマンギ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 Karlinasari 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ーマグニチュード 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、地方自治体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<sup>1)</sup>。

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なく、揺れが起こった際に十分な変形能力を有していなければならない。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

ロ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、ロ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 SNI03-1726-2002<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>。

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 で最も強い地震の領域が 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）

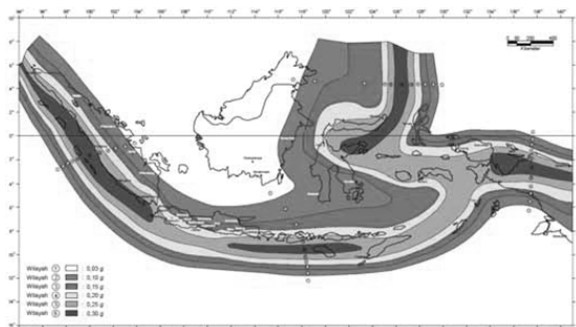


図 1：インドネシアの地震発生地域における岩盤レベルでの 500 年周期の平均最大加速度の分布

## 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<sup>3)</sup>

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、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<sup>4)</sup>。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されてきた。すなわち、燻蒸、土壌処理、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ー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 30 cm 以上の高さを持った土台。b) 50 cm 以上の高さをもったステージでその上に木製床を敷く。

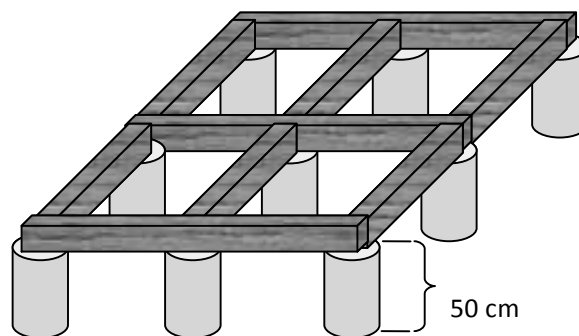


図 2：耐震住宅の基礎構造

#### 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)

アカシヤマンギユ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、パーチク



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ったようである）。

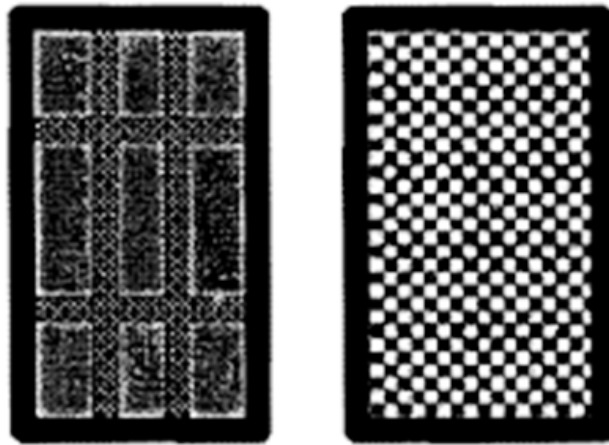


図3：耐震住宅に使用したダイアフラム構造の案（実際の試設計住宅には使われていない）

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）。

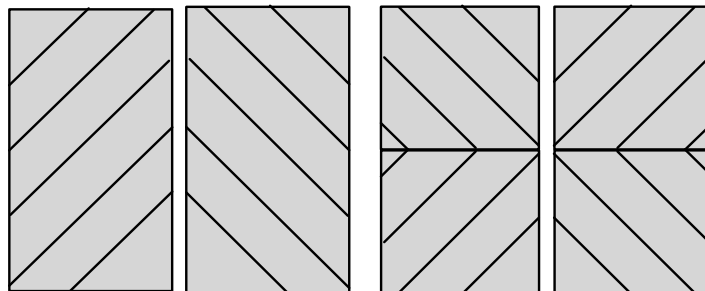


図4：ストレススキン要素

### 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。

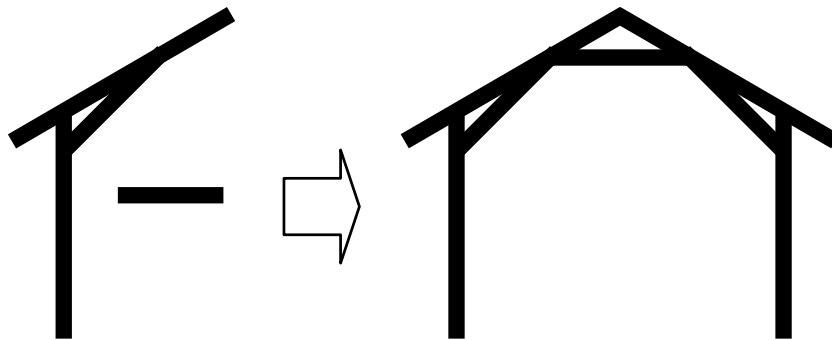


図5：耐震住宅の要素モデル

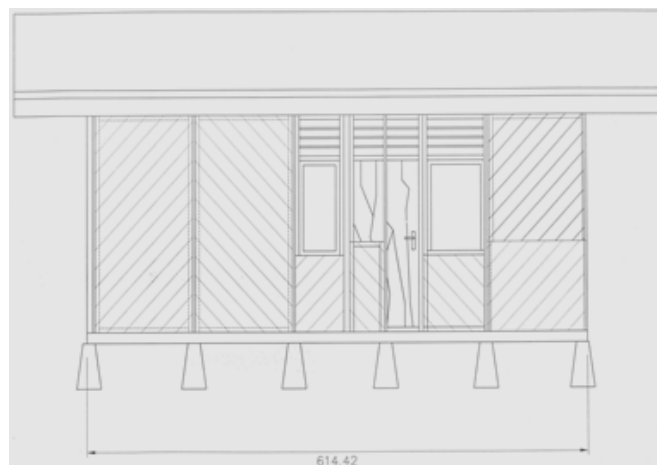


図6：壁パネルをプレファブ化した耐震住宅の設計（単位：cm）

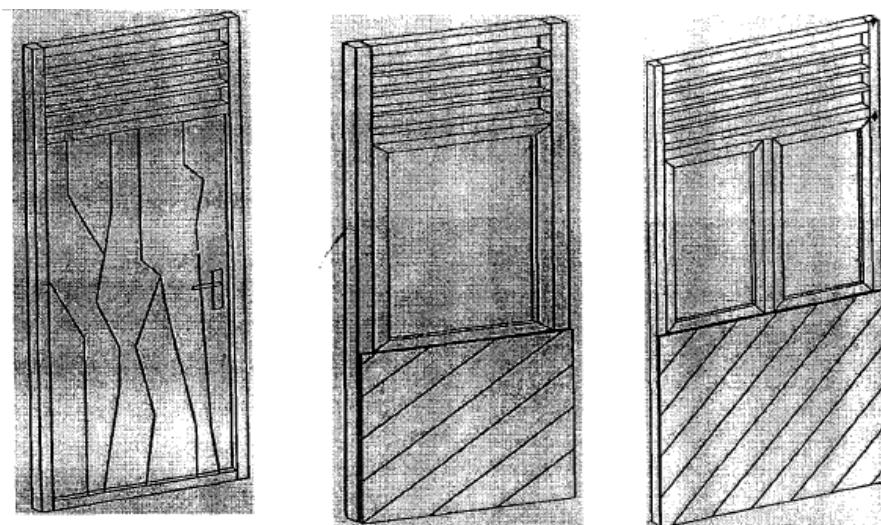


図7：耐震住宅に用いたドアパネルと窓

## 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、Dharmasepfianti<sup>5)</sup>、Firmanti *et al.*<sup>6-7)</sup>、Karlinasari and Paradipto<sup>8)</sup>、Surjokusumo and Karlinasari<sup>9)</sup> 等がある。研究の結果、マンギ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：アカシアマンギウム材の物理的・力学的性質の一覧

	n	含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	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) <sup>6)</sup>
2	120			8.9 (29.2)		42.2 (37.4)	Firmanti <i>et al.</i> (2005) <sup>7)</sup>
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)			Karlinasari and Paradipto (2005) <sup>8)</sup>

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。アカシアマンギユ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）によっては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<sup>5, 10)</sup>

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 <sup>3</sup> )	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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup> であった。アカシアマンギユウムの市場価格は 1 m<sup>3</sup> 当たり Rp. 1,000,000 (注：約 1 万円) であったので、5 m<sup>3</sup> のアカシアマンギユウムを使ったので、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。		

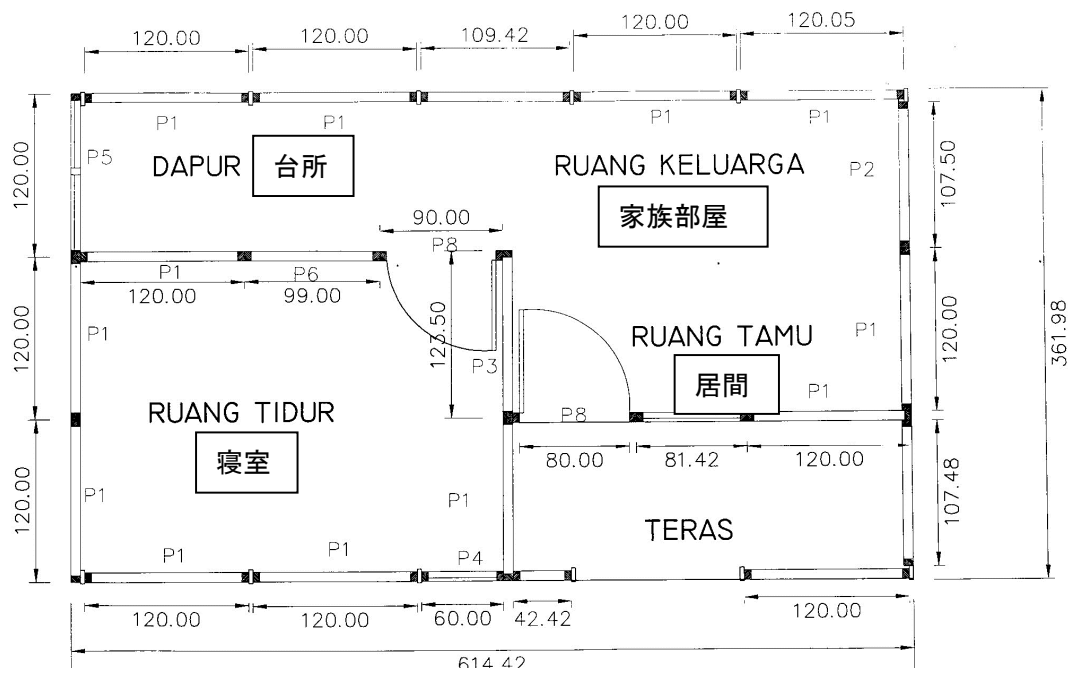


図9：プレファブシステムを用いた耐震住宅平面図の例

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.)
<b>I</b>						
準備作業						
1	書類作成		1.00	150,000	150,000	
2	整地と水準	m <sup>2</sup>	28.00	9,500	266,000	
3	測量	m <sup>2</sup>	22.59	16,000	361,421	
					No. I	777,421
<b>II</b>						
1	基礎工事	bh(セット)	1.2	622,145	777,681	
					No. II	777,681
<b>III</b>						
1	壁パネル	m <sup>2</sup>	66.24	84,350	5,587,344	
2	窓付き壁パネル	m <sup>2</sup>	2.88	98,000	282,240	
3	2個窓付き壁パネル	m <sup>2</sup>	2.88	122,500	352,800	
4	ドアパネル	m <sup>2</sup>	5.76	143,000	823,680	
5	玄関ポーチパネル	m <sup>2</sup>	2.16	46,900	101,304	
6	ペット用特注	m <sup>2</sup>	21.6	60,700	1,311,120	
7	床カバー	m <sup>2</sup>	21.6	72,200	1,559,520	
					No. III	10,018,008
<b>IV</b>						
1		m <sup>3</sup>	0.51	2,578,700	1,315,137	
2		m <sup>3</sup>	0.22	2,577,450	567,039	
3		m	16	27,750	444,000	
4	妻面カバー材料	m <sup>2</sup>	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 <sup>3</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	112.4	32,530	3,656,372	
2	天井の塗装	m <sup>2</sup>	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



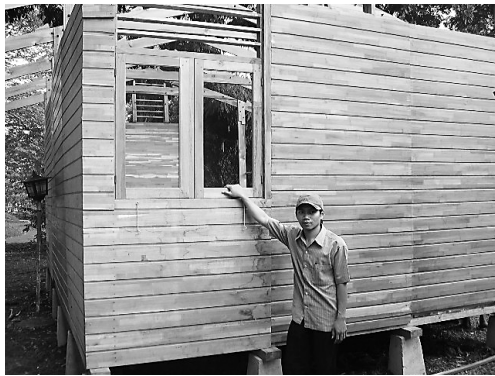
d) プレファブ生産された耐力壁ユニットの組み込み



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従する鍵となる柔軟性を有している。アカシアマンギユ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  $5 \text{ m}^3$  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、バンドン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った単語については、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った。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) Wangsadinata, 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) Dharmasepfianti, 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 Paradipto, 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) Djodjosebroto, 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)