

マツ枯れを巡る生物学*

黒田 宏之**

マツ枯れについての総説や単行本はかなりの数が発行されている¹⁻³⁾。ここでは材線虫病と関連する現象を、これまでの解説とは異なる切り口で考えてみたい。しかし、公開講演という性格上、広い話題を対象としたため、最近の裸子植物の遺伝子情報に関しては深く触れることができなかった。

1. マツのストレス応答が人類の地域経済発展に寄与してきた

約 300 年前の江戸時代の儒学者、熊沢蕃山といえ、今日、森林を蘇らせた先駆者として評価されている。蕃山は、岡山周辺の禿げ山に藩の費用で植林や砂防工事を行い、藩内にマツを植えるよう指導した。しかし、官学であった朱子学と対立した彼は、中央幕府の政策とも対立し、安易に海岸や山に生育が早くて栽培が容易なアカマツを植林することを批判している。この例のように、日本ではマツ林は、海岸の防風林や荒れ地の砂防林など保安林、寺社や庭園の景観、マツタケ山、薪炭林など環境保全と関連したイメージが先行しがちである。しかし、マツ属は、裸子植物の中では最も種が多く、100 種類を超える樹種が、赤道を含む汎北半球に天然分布している。また、南半球でも、真っ直ぐ、よく成長するラジアータマツ (*P. adianta*) のような樹種が、構造用材や合板生産のために大規模に人工植林されてきた。したがって、古来より、マツ材をはじめ、マツの樹皮タンニン、樹脂 (マツヤニ)、マツタケなど生産は、世界各地の地域経済発展に重要な役割を果たしてきた。これらの生産は、20 世紀末には、ほかの天然資源と同じく、乱伐や石油化学製品に押されて衰退したかに見える。しかし、21 世紀に入って、マツをはじめとする遺伝子情報が利用できるようになり、新たなビジネスチャンスが生まれる兆しも見える。

マツヤニ由来の成分を塗布した製品は撥水性に優れる。このため、マツヤニは英米海軍御用達の必需品として、石油化学製品が発達するまで重用されていた⁴⁾。ロジンは、マツヤニを水蒸気蒸留し、揮発成分を除いた褐色ガラス様の物質である。ジテルペン樹脂酸を主体とする混合物で、欧米では主としてパルプ製造時の廃液から副産物として生産される。製紙用サイズ剤、印刷インキ、塗料、接着剤以外に、弦楽器の弓への塗布、ガム、香料、薬剤などにも使用されている。財務省の輸入統計によれば、我が国のロジン市場規模は減少傾向にあるものの、年間約 40 億円規模で、輸入量の 9 割以上は中国製品である。このマツヤニ生産に用いられているマツは、スラッシュマツ (*Pinus elliotii*)、馬尾松 (台湾アカマツ, *Pinus massoniana*)、雲南松 (*Pinus yunnanensis*) などがある。近年では、フランス海岸松 (*Pinus pinaster*) やラジアータマツの樹皮から得られるプロシアニジン誘導体の抗酸化能力が注目され、化粧品やサプリメント原料としての利用に関心が注がれている。

マツヤニやタンニン成分は、元来進化の過程でマツが獲得した防御物質と考えられる。マツヤニ生産では、幹に、切る・叩くなどの傷害ストレス、酸などの薬品ストレス、温熱ストレスを与え、マツの防御反応を起こさせることで生産量を高める工夫がなされてきた。タンニン生産についても、後で触れるように種々のストレスで含有量や成分が変化する。ストレスの与え方には、植物ホルモン投与などを含め多くの特許や研究があるが、中にはパラコート処理のように、現在では使用が禁止されている人体に有害な薬剤処理もあった。マツヤニなどの生産量を増やすために用いられる薬剤は、製品中に混入する可能性がある。また、酸化が進んだマツヤニ成分は人によってはアレルギー反応を起こ

* 2007 年 6 月 8 日作成。第 3 回生存圏研究所公開講演会 (2006 年 10 月 14 日) 要旨を書き直したものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林圏遺伝子統御分野。E-mail: hkuroda@rish.kyoto-u.ac.jp

すこともある。したがって、これらの製品取扱いの安全性に関しては無関心であってはいけない。いずれにしても、人類は古くからマツのストレス応答と付き合ってきたのである。

先の蕃山は、「アカマツの露は樹下に生える作物や草に有害である」と述べたとされる。この記述は、マツの成分が生理学的な影響を及ぼす例として興味深い。マツでは、これとは別の生理学的影響も報告されている。たとえば、昆虫の誘引活性、抗カビ活性、殺線虫活性、弱い性ホルモン様活性や、人によっては接触皮膚炎やアレルギーを引き起こす化合物の存在が知られている⁵⁾。もっとも、このような生理活性は、マツに限らず多くの植物に多かれ少なかれ存在し、マツが特に問題となっている訳ではない。マツは古来人類と共存してきた樹木で、ヒトに対しての有害成分のレベルは一般に低いと考えられている。例外としては、北米のマツ属のいくつかの樹種では、その針葉を食べた妊娠中の放牧牛が早産や流産をするという事例が古くから知られており、その原因化合物も特定されている。

40年ほど前までは、北海道を除いて、どこにでもあった海岸線のクロマツや、マツタケ山のアカマツは、開発や材線虫病で激減してしまった。マツ枯れ被害の特徴は、病気が非常に強力で、伝染性の流行病的な枯れ方をすることである。この特徴は、典型的な外来性の病原生物の病徴と一致する。事実、病原体とされるマツノザイセンチュウ（材線虫）は、アメリカから20世紀初頭に我が国に入ってきた外来線虫である。単離した材線虫をマツに接種すると、自然界の松枯れと同じ症状を呈してマツは枯れる。また、材線虫は、我が国に生息していたマツノマダラカミキリ（カミキリ）に乗って移動できるために、松枯れの被害が拡大した。我が国では、ロジン輸入と松枯れ防除関連の薬剤使用だけで、少なくとも年間100億円を超える経費が動くと推定される。これにマツ材の輸入やマツタケ輸入が加わると、マツの関連産業は、我が国だけでも、それなりの経済規模を持つことになる。マツ枯れのような病害が国境を越えて広がると、木材生産、ロジン生産、マツタケ生産、サプリメント生産などの各国の地域経済に深刻な影響が出る。さらに、急激なマツ林の枯損は、地域環境バランスの変調につながる危険性が高い。

2. マツ材の樹脂道ネットワークを材線虫がゆく

材線虫は、培地上で1時間に2cm程度、実際の樹幹内では一日に50cm以上移動できると言われる。材線虫の胴回りは、約0.03mm、体長は1mm前後である。口針を持っており、細胞内容物を吸うことはできるが、物理的に細胞を食い破って素早い移動をすることはむずかしい。このような生物が、若いシュートから侵入した後、マツ全体に広がるための移動通路はどこに存在するのだろうか？

仮道管は、細胞の死後、細胞内容物が無くなり壁だけが残った細胞である。水、ミネラル、ホルモン等を木部の内部や樹冠へと運搬するパイプとして働いている⁶⁾。仮道管のうち、軸方向のものは、長さが2-3mm程度、太さは0.03mm程度で、木部体積の96%前後を占める（図1 a, b）。これらの細胞は、水を運ぶパイプとしての役割だけでなく、物理的な強度を木の大きなからだに付与している。仮道管の細胞壁には複数の弁付きの孔（有縁壁孔）が開いている。この弁は樹液のpH変化に連動して、逆止弁として働くと考えられている。この細胞のパイプの太さは、材線虫の胴回りほどの大きさで、細胞壁の孔に材線虫が頭を入れることはできても、通路として利用することはむずかしい。軸方向の仮道管以外に、マツ属には放射方向に並ぶ放射仮道管が存在する。この細胞群は組織学的にマツ属であることを判定するときの重要な指標となるが、材線虫の通り道としてはやはり小さすぎる。

マツ属のシュートや樹幹には、隣り合った柔細胞が分化中に剥がれてできた細胞間隙が存在する。この円筒状の空間は樹脂道（細胞間道）と呼ばれており、木部体積の1%前後を占める。日本産のマツの木口面では、その直径は0.1-0.2mmである（図1 b）。この空間の樹体内での連続性は検証されていないが、教科書的には「かなりの長さ」とか「長さ不定」と記載されている。樹脂道には樹脂が貯まるとよく言われるが、マツが健全な状態では、一般にこの空間が樹脂で満たされることはない。胴回りが約0.03mm程度の材線虫は、この細胞間隙をおもな通り道として利用する。組織学的に見ると、材線虫が通ることのできるマツのシュートや幹の空間は樹脂道しか考えられない。材線虫は、枝

先から侵入して、やがてマツの全身に広がることから、この樹脂道のネットワークは、シュートから幹を經由して根までマツの全身にはり巡らされていると想像される。

樹脂道の直径は、マツの材線虫に対する抵抗性に関連する要因の 1 つと考えられている。また、材線虫に対する別の組織学的な抵抗性要因として、枝の付け根の構造が関係している例が報告されている。少し詳しくこの樹脂道ネットワークについて見てみよう。若い伸長中のシュート（一次組織）では、師部側の皮層と一次木部の両方に樹脂道が存在する。成熟した二次組織では、皮層が脱落して存在しないので材線虫の軸方向の通路は師部には存在せず、木部に限られると考えられている。樹脂道の周りは、エピセリウム細胞と呼ばれる柔細胞で囲まれている。この柔細胞は、いわゆるマツヤニの分泌細胞である。心材に大量の樹脂を蓄積する熱帯産のカリビアマツ (*P. caribaea*) などには、樹脂道周辺にさらに特殊なストランド細胞（樹脂細胞）が発達している。枝の付け根では、樹脂道が複雑に交錯しており、枝から幹への材線虫通過が困難な組織構造となっている。事実、例外もあるが、枝数の多い家系で材線虫に対する抵抗性が高いことが報告されている⁷⁾。

材線虫の通路沿いである樹脂道内の空間はエピセリウム細胞で囲まれている。感染初期には、材線虫はこれらの柔細胞に口針を刺して、養分を摂取していると考えられる。マツ属のエピセリウム細胞は細胞壁が他の針葉樹に比べ薄く切片作成時に壊れやすい。このような細胞壁の性質は、材線虫が細胞に口針を突き刺す場合、有利に働くだろう。したがって、材線虫はエピセリウム細胞を破壊すると考えられているが、材線虫の通過跡が、エピセリウム細胞の破壊跡として簡単に追跡できる訳ではない。また、エピセリウム細胞の内容物が化学的に分析された例を見つけることはできなかった。材線虫に対する抵抗性を考えた場合、このような細胞の細胞壁が厚くなる、あるいは、この細胞が材線虫に対する防御物質を産生するなどによって、その個体の材線虫に対する抵抗性は高まると予想される。

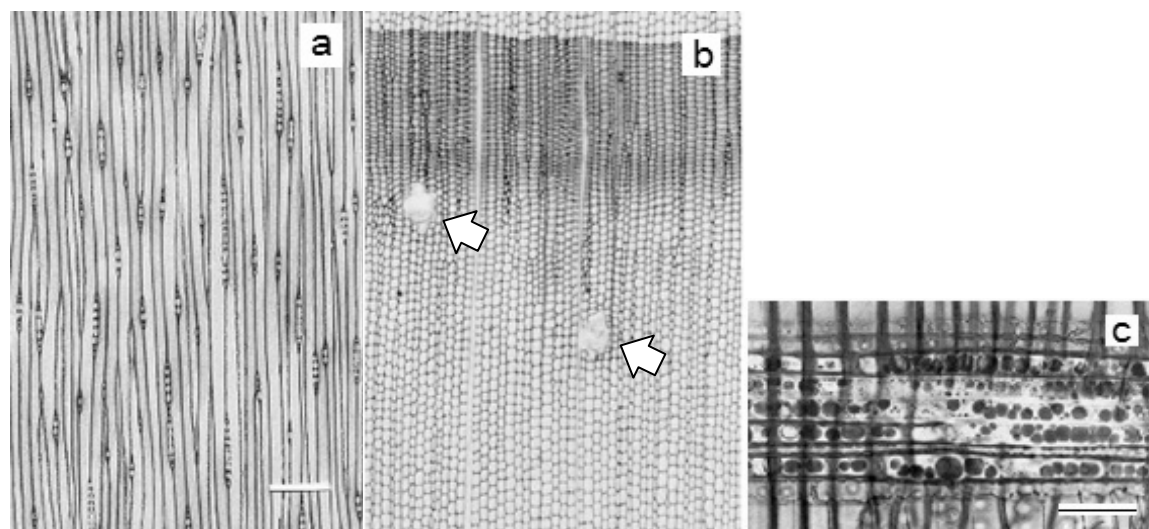


図 1：正常なアカマツ木部組織断面の光学顕微鏡増

a. 接線面切片像（線の長さは 0.2 mm）、b. 木口面切片像（倍率は a. に同じ、矢印は樹脂道）、c. 放射面切片像（線の長さは 0.05 mm、放射柔細胞には油脂粒の貯蔵がみられる）

3. マツ材中で 20 年以上生き続ける細胞の営み

放射柔細胞は、先に述べた樹脂道やエピセリウム細胞とともに、材線虫に対する抵抗性を考えるうえで重要なマツの要素である。この柔細胞は、木材中の体積の約 2~3% を占めている。クロマツよりアカマツの放射柔細胞の割合が高いとされるが、この存在割合と材線虫抵抗性との関連は研究されていない。形成層から 20 年以上経過した年輪でも、この細胞には核や細胞内容物が観察され、長年月にわたり生き続けることができる¹³⁾。マツの放射方向の柔組織は、先に述べた樹脂道ネットワーク

と隣接箇所を持つ。たとえば、放射柔組織のいくつかは、その中央部に水平方向の樹脂道が存在する。この放射方向の樹脂道を利用して、材線虫は師部・木部間を移動する。また、軸方向柔細胞が放射柔細胞と交わる場所も存在する。このような場では、直接・間接に放射柔細胞が材線虫の影響を受ける可能性が高い。現に、放射柔細胞もまた、材線虫接種によって大きな変化の観察される細胞である。

正常な放射柔細胞には、顕微鏡観察で澱粉粒や中性の脂溶性成分が存在する(図 1c)。辺材の脂溶性成分の分析結果では、中性の脂溶性物質に相当する成分としてトリアシルグリセロールや、ホスホグリセリド、ステロールなどが検出できる。これらのうち、顕微鏡下で観察される脂溶性物質の主な実体は、乾燥辺材重量当たり 1.6-5.1% 存在するトリアシルグリセロールであり、後の 2 者は細胞膜成分と推定される⁸⁾。この分析値は、マツが“FAT TREE”と呼ばれることを化学的に裏づける。動物では、このような中性脂質が細胞質中に油滴として存在し、ミトコンドリアへエネルギーを供給していることがよく知られている。おそらく、マツも動物同様に、これらの油滴やデンプン粒がエネルギー源となるのであろう。一方、このような成分は、材線虫の餌となる可能性が高い。

夏の終わりから秋にかけて、老化した柔細胞は死ぬ。この時に辺材と心材の移行部では仮道管中から水が追い出される。この部分は、マツではそれほど顕著でないが、木部水分含量の高いスギでは顕著な「白線帯」として明瞭に観察される。このような水が追い出される時期以降、マツの柔細胞は、殺線虫物質(ピノシルビン誘導体)⁹⁾や抗菌物質(ピノセンブリン誘導体)などのフェノール性二次代謝産物を産生する¹⁰⁾。マツ属心材成分中の主要なフラボノイドは、フラバノン、フラバノール、フラボンのように、必ずC環にカルボニル基が存在する。一方、フラボノイド C 環 4 位のカルボニル基が $-CH_2-$ 基まで還元されると、反応性が高くなり、分子間で結合して高分子化する。いわゆるタンニンの生成である。これらの成分は樹皮に豊富に存在するが、針葉樹辺材での報告例を見つけることは難しい。ダグラスファー(*Pseudotsuga menziesii*)の乾燥辺材では、乾燥重量当たり最大で 0.03% 前後のタンニンが含まれることが化学的に証明されている¹¹⁾。検出されたタンニンは、恐らく木材の伐採後の乾燥中に生成したと考えられる。一方、同じ木材試料中の心材部にはタンニンが検出できなかった。言い換えると、針葉樹の心材化では、生合成経路の上流に位置するフェノール性化合物のみが生成し、それより下流に存在するタンニン生合成系はほとんど働いていないと考えられる。

4. 材線虫はどのようにしてマツを枯らすのか？

材線虫病に関連する化学成分の研究は、細胞毒素のスクリーニングという戦略で研究が進められた例がかなりある。また、材線虫に寄生する細菌の毒素が材線虫病や材線虫の分泌酵素が細胞を殺すという報告もある。一般に、細胞の死が植物個体の死に結びついているという議論は広くなされているし、材線虫病にも当てはまる部分がないとは言いきれない。しかし、マツのように大きなからだをもつ樹木の場合は、細胞死=個体死という議論は成り立ちにくい。現に、分化中の木部や心材化では木部の多くの細胞が死に絶えるけれども、個体の生命は維持されている。草本植物は、環境の悪化を種子形成の間隔を短くして世代交代させることで乗り越える。これに対して樹木は、環境悪化に対抗して、木部や師部などの組織や時に器官の一部を切り捨ながらも個体全体は生き長らえさせる能力を備えている¹⁵⁻¹⁷⁾。細胞が死んでも個体が生き残るという特徴は長年月を生き抜くために都合がよい。細胞の死が個体の死と直接結びつきにくいのなら、どのようにして材線虫はマツを枯らすのだろうか？次に、細胞死とは結びつかないマツ枯れ説を紹介する。

材線虫感染初期にマツから生成されるのは、揮発性のモノテルペン類である。材線虫感染初期には、辺材中の水が追い出された跡が、実体顕微鏡下で白い斑点として放射組織に沿って観察される。これがさらに進むと、樹幹の断面全体が白くなって通水が遮断される。白い斑点を抽出しガスクロマトグラフィー分析した結果、材線虫感染後にモノテルペンレベルが顕著に上昇することが明らかにされた^{18, 19)}。この結果を顕微鏡観察結果に照らし合わせると、つぎのように考えられた。正常な状態では、キャビテーション(蒸散による張力などで樹幹の通水パイプが切れる現象)で切れた水パイプは、再

びつながり、蒸散流が回復する。しかし、仮道管内腔に疎水性のモノテルペンが排出されることによって水パイプが切れたまま回復できなくなる。この現象は、心材化の段階で言う白線帯の形成に相当する。心材化では、このような部分は心材と辺材の境界域に限られるが、材線虫病での白線帯化は通水している木部断面の全面を覆うように分布する。こうなると、蒸散流が完全に遮断され、樹冠へ水が全く供給されない。マツ属では、必ず 1 本の仮道管に複数の放射柔細胞列が隣接している (図1a)⁶⁾。この放射柔細胞群が仮道管に接する部分では、細胞壁の薄い窓状の隔壁が存在する。モノテルペン類は仮道管に隣接している放射柔細胞から通水パイプである仮道管内に直接放出されるのだろう¹⁸⁾。¹⁹⁾。通常、材線虫に感染後、2 週間程度では、蒸散流の上昇がテルペンで抑制されてもマツの外見が変化することはない。しかし、3 週間を超える頃から下枝の針葉が黄色く変色しはじめて、1ヶ月を超えるころには、針葉は萎れ、最後には赤くなって外見上も枯れたことが明らかになる。これらの観察結果は、材線虫病が萎凋病 (いちょうびょう) であることをよく説明している。

材線虫感染後に放射柔細胞に観察される変化と、心材形成時の変化を対比させると、次のように説明できる。両者の共通点は、木部に不可逆的なキャビテーションが起こることである。その現象をきっかけとして、次に起こるフェノール生成では、成分組成の違いが認められる。マツの心材成分は、すでに述べたように、タンニン以外のフラボノイドやスチルベノイドが主成分である。一方、材線虫接種に応答してストロブマツ (*P. strobus*) では、これらの心材成分の上昇が観察される¹²⁾。これに対して、我が国のクロマツ (*P. thunbergii*) では、材線虫の感染で頻繁に検出される主な木部の成分は安息香酸やカテコールなどである²⁾。また、クロマツやアカマツ (*P. densiflora*) では、材線虫感染で放射柔細胞中のタンニン生成が推定されているが、化学的に確認されていない^{1,14)}。材線虫を接種したアカマツの放射柔細胞は油滴やデンプン粒の崩壊・変質がはじまり細胞外へ漏出する^{1,14)}。

材線虫病に対するフェノール成分生成が樹種間で異なることは、材線虫抵抗性の要因が単一でないことを示している。我が国のマツにおいては、材線虫病の場合は若い細胞の外敵に対する病原応答であり、他方の心材化の場合は老化細胞の環境ストレス応答である。このような違いが、フェノール成分の組成の違いに現れるのだろうか。また、材線虫感染に応答して生成するフェノール成分の持つ意味については、材線虫に対する毒物、マツの細胞毒、酸化ストレスの緩和ほかの説があり、明快な結論が得られていない。化学構造ではモノテルペンの親戚である樹脂は酸化されると、材線虫に対して毒性がある。樹皮からの樹脂の滲出、すなわちエピセリウム細胞の樹脂生成能は次第に減じることが広く知られている。材線虫に感染したマツでは、3 週間前後で樹脂の滲出力が低下する。見方をかえると、材線虫はマツの殺線虫成分や樹脂の生成を抑制して、樹幹を自分の生育に適した環境に変えているように見える。キクイムシに生息する青変菌をマツやトウヒに接種すると病原応答して、師部のポリフェノール含有柔細胞が膨らむ、シュウ酸カルシウムの結晶が増える、傷害樹脂道が形成されるなどが報告されている。トウヒの場合は、反応が顕著で数メートル離れていても病原応答が観察されるのに対して、マツの応答は感染部位に限られる。これら師部細胞の変化は、しかし、材線虫病の感染初期では報告されていない。

5. 樹木遺伝子の解析で材線虫病が解明できるか？

はじめに、広葉樹のゲノム研究についての世界の趨勢に簡単に触れておこう。樹木のゲノム研究は、イネやシロイヌナズナに比べて、やや遅れてスタートした。しかし、ポプラ (*Populus trichocarpa*) では、アメリカ・エネルギー省の Joint Genome Institute とカリフォルニア大学の主導により、ドラフトゲノムの塩基配列決定がすでに終了している^{20, 21)}。石油枯渇の危機管理と関連して、樹木バイオマスが化石エネルギーに代わる資源として着目され、採択されたアメリカの国家プロジェクトの 1 つであった。2008 年度からは、ユーカリで同様のプロジェクトが同じ組織により始まる。ユーカリのバイオ燃料としての価値に着目した開発・研究として着目されている。このプロジェクトは、各国を刺激して同様の研究を促し、大きな波及効果をもたらした。特に、樹木の様々な形質に対応する遺伝子

の配列情報が網羅的に蓄積され、樹木遺伝子の研究基盤が築かれた意味は大きい。遺伝子を対象とする研究では、一般に、大量の配列情報の中から意味のある遺伝子を選ぶことによって新たな研究の進展につながることが多い。このような観点から、樹木遺伝子の場合にも、木材形成などの形質発現において階層構造の上位に位置することの予想される転写因子や、成分生成の鍵となる遺伝子などが最初の研究開発の対象として選ばれる傾向にある。

裸子植物は、ヒトに比べて約 3 倍、シロイヌナズナの約 10 倍のゲノム量を持つ。ゲノム塩基配列解析に要する経費や時間を考えると、裸子植物のゲノム塩基配列解析は、非常に困難であると判断される。遺伝子を導入して形質転換体をつくる実験系は、特別な場合を除いて裸子植物では一般的でない。また、種子が得られるまでの世代時間は、数年以上と草本植物に比べて長く、遺伝子の欠損株が整備されている訳でもない。このように、被子植物と比べて、裸子植物の遺伝子研究を推進するための環境は、整備されているとはいえない。これまでの裸子植物の遺伝子研究では、必然的に、発現している遺伝子を網羅的に捕まえることに注意が向けられてきた。

発現配列タグ (EST: Expression Sequence Tags) は、cDNA ライブラリー中のあるクローンをランダムに選択し、各クローンの塩基配列を次々に 1 回だけ読んで決定した配列情報である。一旦、EST データが大量に蓄積されると、塩基配列解析による迅速な発現遺伝子の同定が可能となる。マツの EST は、1990 年代後半から、ノースカロライナ大学の Sederoff のグループによって始められた²²⁾。テードマツ (*Pinus taeda*) の樹幹で発現している EST データに、種子形成過程の発現遺伝子群、フランス海岸マツ (*P. pinaster*) の発現遺伝子群、種々のマツ属樹種における発表された塩基配列などを加えた EST データベースが、TIGER (The Institute for Genomic Research, Rockville MD) や、ハーバード大学 DFCI (Dana-Farber Cancer Institute) の TGI (The Gene Index) で、まとめられている (表1)²¹⁾。TGI では、マツ属の発現遺伝子は実に 30 万個以上の EST 配列が登録されている。NCBI (The National Center for Biotechnology Information) が運営する 2007 年 3 月の dbEST バージョンでは、マツの EST 数は、植物では、シロイヌナズナ、イネ、トウモロコシ、コムギ、オオムギ、ダイズに次ぐデータベース量を誇る。ちなみに、樹木塩基配列の 3 大データベースは、マツ、トウヒ、ポプラである。ポプラの EST 数 (表1) は、ゲノム由来の仮想 EST が混在して大きな値となっている。現在では、これらの樹木の遺伝子クローニングは標的遺伝子をはっきりしていれば比較的簡単にできる。

EST の部分塩基配列をコンピュータ上で類似配列群にまとめた (クラスター化) 後、あるクラスター中で末端に共通配列を持つ断片をつないだ配列を仮想転写産物 (TC) と呼ぶ。NCBI のサイトが使用している UniGreene という用語に対応する。マツ属では、古典的な方法で単離された cDNA クローンと TC の総数は 2 万 4 千弱、つながる相手がみつからない EST や塩基配列 (Singlet 総数) が 4 万 6 千弱存在する (表1)。TC は半数が 1 kb 以下、残りの半数の 9 割以上が 1~2 kb の間に分布している (表2)。複数の樹種が混在しているため、これらの数値は単一樹種における発現遺伝子数であるとは言えない。ちなみに、テードマツ単独の TC 総数は約 1 万 5 千強が登録されている。これらの TC 数はマツにおいて、働いている遺伝子総数の目安となる。

マツの遺伝子に関して個々のケースを記述する前に、発現遺伝子を網羅的に捕まえて解釈する際の注意点について考えてみたい。TC の配列を解析する場合、「Blast」などの検索ソフトを用い、期待値という統計量を指標として、データベース中に類似配列を見つける。この場合、通常は、塩基配列をアミノ酸配列に変えて検索する。期待値は、低いほど互いの配列が類似していることを示している。データベース中に期待値が、たとえば、 10^{-10} 以下の値を示す配列が見つかったら、一応、両者は類似の機能を持つことが期待される。ここで、期待値の持つ意味について、もう少し詳しく考えよう。機能を推定したいマツの TC 配列と、データベース中の遺伝子配列を突き合わせ、両者で一致するアミノ酸の割合について考える。短い TC 配列の中でアミノ酸の一致する割合が高い場合と、長い TC 配列の中で一致する割合が低い場合は、期待値を基準にすると等価で、両者の期待値は類似の値を取る。したがって、期待値を指標とする限り、マツの TC 配列が長くなるほど、データベース中の配列にヒットする確率は高い。1000 bp を超える遺伝子配列の中には、通常、機能を発現するために重要な保存

領域が存在し、このような領域は進化の過程で配列が変化しにくいと考えられる。

表 1: EST ライブラリー解析結果の比較²¹⁾

学名	普通名	TCs* の元となるデータ		TC* 総数	Singletons* の元となるデータ		Singleton *総数	The Gene Index 版(公開日)
		ESTs	ETs*		ESTs	ETs*		
<i>Pinus sp.</i>	マツ類	305,583	2,078	23,531	21,901	125	45,557	6.0 (July 19, 2005)
<i>Picea sp.</i>	トウヒ類	219,883	520	30,427	28,795	81	59,303	2.0 (June 21, 2006)
<i>Populus sp.</i>	ポプラ類	330,034	1,198	44,764	41,484	76	86,324	3.0 (June 19, 2006)
<i>Arabidopsis thaliana</i>	シロイヌナズナ	580,869	70,591	34,155	39,039	8,632	81,826	13.0 (June 16, 2006)
<i>Oryza</i>	イネ	1,922	95,560	77,158	85,212	19426	181,796	17.0 (June 20, 2006)

* TC, Tentative Consensus sequences (仮想コンセンサス配列) : 2 つ以上の ESTs (時に ET も) をつないで得られたコンセンサス (共通) 配列で、それらの ESTs は少なくとも 94% の配列同一性を持ち、少なくとも 40 塩基は重なり合う。

* ET (転写産物) : 対象とする植物種において、ESTs を除く全ての配列を GenBank から取り出して、cDNA とゲノム DNA の非コード領域を除去した配列情報。

* Singletons : TC を作る過程で相手の見つからなかった ESTs

表 2: TC の長さ分布²¹⁾

TC の大きさ		< 1kb	≥1kb <2kb	≥2 kb < 3kb	≥3 kb < 4kb	≥4 kb < 5kb	≥5 kb	TC 総数:
<i>Pinus sp.</i>	マツ類	49.7	45.7	4.31	0.28	0.03	0.01	23,531
<i>Picea sp.</i>	トウヒ類	69.3	29.7	0.95	0.03	0.01	0	30,427
<i>Populus sp.</i>	ポプラ類	74.7	24.5	0.77	0.07	0.00	0	44,764
<i>Arabidopsis thaliana</i>	シロイヌナズナ	43.7	38.2	12.6	3.87	1.07	0.67	34,155
<i>Oryza</i>	イネ	55.4	27.6	10.5	4.56	1.31	0.69	77,157

TC の長さ分布 : 数値は TC 総数に対する割合 (%)

マツとシロイヌナズナを比較した場合 (表 2)²¹⁾、このような長い TC 間では、シロイヌナズナの中に類似の配列が見出される可能性が高くなる。事実、塩基長が 1 kbp を超えるテラダマツの TC では、90% 以上がシロイヌナズナに類似配列を見つけることができた²³⁾。また、このような TC では、シロイヌナズナの相当する遺伝子との配列類似性は、特別な領域に限られることなく全コード領域にわたり認められた。したがって、裸子植物と被子植物間には系統的に大きな隔りがあるにもかかわらず、重要な遺伝子の配列は保存されていると言える²³⁾。しかし、解釈が難しいのは、マツの TC の半分を占めるシロイヌナズナに見出されない短い TC 配列やシングレットの存在である。これらが裸子植物に特異的で意味のある配列である可能性は否定できない。一方、単なる人為的な副産物である可能性

もあり得る。たとえば、5' および 3' 末端の非転写領域、ゲノムDNAの混入、データベースに登録されていない微生物DNA等の混入、転写反応時の種々の人為的副産物などの可能性を吟味する必要がある。ゲノム DNA の混入はマツゲノムの約 1% を占めるレトロポゾンが、EST 中に存在しないことを示すことで、人為的な副産物の可能性から除外できるかもしれない。しかし、遺伝子機能を何らかの方法で直接証明できない限り、多くの短い TC の意味を見出すことは難しい。このような状況は異なる生物のゲノム研究でも指摘されている。一方、短い配列は単なる人為的な副産物あるいはジャンク配列ではなく、機能を持つという報告も出始めており²⁷⁾、今後の進展が期待される。

樹木の EST 解析は、初期の研究では木部形成に関与するものが多かった。近年、トウヒに対する網羅解析²⁴⁾が進んだのと並行して、病虫害に対する応答の網羅的解析も急速に進んでいる^{25, 26)}。現在は、針葉樹の病原応答に対しての候補遺伝子が勢揃いし、個々の遺伝子解析が始まる前段階にあると考えられる。たとえば、マツの TC の中では、酵素遺伝子は約 2600 分子種存在しており TC 総数の約 1/10 に相当する。二次代謝に関与する酵素分子種は、さらにそのうちの 1/10 の 270 程度である。その内訳は、テルペン類、リグニン生合成に関与する遺伝子群等からなる。奇妙なことに、抗生物質生合成に関連する遺伝子がかかり見られるが、マツが抗生物質を生成するのではなく、プログラムが生んだ人工産物と考えられる。今後、個々の意味のある遺伝子やその産物の解析が進むものと期待できる。

参考文献

- 1) 二井一禎, 佐橋憲生 編, 特集「マツ枯れ」, 日本森林学会誌 **88**, 363-428, 2006.
- 2) 河津一義 編, ミニレビュー「マツノザイセンチュウによる松枯れ発病のメカニズム」, 日本農芸化学会誌, **64**, 1241-1264, 1990.
- 3) Wingfield, M. J. ed., Pathogenicity of the pine wood nematode, pp.122, APS press, 1987.
- 4) Zenkel, D. F., The utilization of wood extractives, Natural Products of Woody Plants (Rowe, ed), Springer-Verlag, 953-978, 1989.
- 5) 黒田宏之, マツ枯損防止のための新戦略構築, 木材研究・資料, **35**, 32-46, 1999.
- 6) Kuroda, H. and Kuroda, K., Candidate genes involved in water pump of trees, Tree Sap II (Terazawa, M. ed), Hokkaido Univ. Press, 67-75, 2000.
- 7) Kuroda, K., Inhibiting factors of symptom development in several Japanese red pine (*Pinus densiflora*) families selected as resistant to pine wilt, *J. For. Res.*, **9**, 217-224, 2004.
- 8) Piispanen, R., Saranpää, P., Neutral lipids and phospholipids in Scots pine (*Pinus sylvestris*) sapwood and heartwood, *Tree Physiol.*, **22**, 661-666, 2002.
- 9) Suga, T., Ohta, S., Munesada, K., Ide, N., Kurokawa, M., Shimizu, M. and Ohta, E., Endogenous pine wood nematocidal substances in pines, *Pinus massoniana*, *P. strobus* and *P. palustris*, *Phytochem.*, **3**, 1395-1401, 1993.
- 10) Kodan, A., Kuroda, H. and Sakai, F., A stilbene synthase from Japanese red pine (*Pinus densiflora*): Implications for phytoalexin accumulation and down-regulation of flavonoid biosynthesis, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **99**, 3335-3339, 2002.
- 11) Dellus, V., Mila, I., Scalbert, A., Menard, C., Michon, V. and Penhoat, CLMH., Douglas-fir polyphenols and heartwood formation, *Phytochem.*, **45**, 1573-1578, 1997.
- 12) Yamada, T. and Ito, S., Chemical defense responses of wilt-resistant pine species, *Pinus strobus* and *P. taeda*, against *Bursaphelenchus xylophilus* Infection, *Ann. Phytopathol. Soc. Jpn.*, **59**, 666-672, 1993.
- 13) Nobuchi, T. and Hasegawa J., Radial distribution of heartwood phenols and the cytological changes of ray parenchyma cells associated with heartwood formation in Japanese red pine, *Bull. Kyoto Univ.*

- For.*, **66**, 132-142, 1994.
- 14) Nobuchi, T., Tominaga, T., Futai, K. and Harada, H., Cytological study of pathological changes in Japanese black pine (*Pinus thunbergii*) seedlings after inoculation with pine-wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*), *Bull. Kyoto Univ. For.* **56**, 224-233, 1984.
 - 15) 黒田宏之, 草にはなく木にあるもの, 木材研究・資料, **23**, 1-13, 1987.
 - 16) 黒田宏之, ライフスタイルとしての木と草の誕生, 木のひみつ (京都大学木質科学研究所創立50周年記念事業会編), 東京書籍, 26-30, 1994.
 - 17) 黒田宏之, 木の誕生, ブルーバックス木材なんでも小事典 (木質科学研究所 木悠会編), 講談社, 16-23, 2001.
 - 18) Kuroda, K., Yamada, T., Mineo, K. and Tamura, T., Effect of cavitation on the development of pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*, *Ann. Phytopath. Soc. Jpn.*, **54**, 606-615, 1988.
 - 19) Kuroda, K., Terpenoids causing tracheid cavitation in *Pinus thunbergii* infected by pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*), *Ann. Phytopath. Soc. Jpn.*, **55**, 170-178, 1989.
 - 20) Tuskan, G. A. et. al., The Genome of Black Cottonwood, *Populus trichocarpa* (Torr. & Gray), *Science*, **313**, 1596-1604, 2006.
 - 21) The DOE Joint Genome Institute (JGI): <http://compbio.dfci.harvard.edu/index.html>;
<http://genome.jgi-psf.org/Poptr1/Poptr1.home.html>
 - 22) Allona, I., Quinn, M., Shoop, E., Swope, K., SCS, Carlis, J., Riedl, J., Retzel, E., Campbell, M. M., Sederoff, R. and Whetten, R. W., Analysis of xylem formation in pine by cDNA sequencing, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **95**, 9693-9698, 1998.
 - 23) Kirst, M., Johnson, A. F., Baucom, C., Ulrich, E., Hubbard, K., Staggs, R., Paule, C., Retzel, E., Whetten, R. and Sederoff, R., Apparent homology of expressed genes from wood-forming tissues of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) with *Arabidopsis thaliana*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 7383-7388, 2003.
 - 24) Pavy, N., Paule, C., Parsons, L., Crow, J. A., Morency, M. J., Cooke, J., Johnson, J. E., Noumen, E., Guillet-Claude, C., Butterfield, Y., Barber, S., Yang, G., Liu, J., Stott, J., Kirkpatrick, R., Siddiqui, A., Holt, R., Marra, M., Seguin, A., Retzel, E., Bousquet, J. and MacKay, J., Generation, annotation, analysis and database integration of 16,500 white spruce EST clusters, *BMC Genomics*, **6**: **144**, 1-19, 2005.
 - 25) Ralph, S. G., Yueh, H., Friedmann, M., Aeschliman, D., Zeznik, J. A., Nelson, C. C., Butterfield, Y. S. N., Kirkpatrick, R., Liu, Jones. S. J. M., Marra, M. A., Douglas, C. J., Ritland, K. and Bohlmann, J., Conifer defense against insects: microarray gene expression profiling of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) induced by mechanical wounding or feeding by spruce budworms (*Choristoneura occidentalis*) or white pine weevils (*Pissodes strobi*) reveals large-scale changes of the host transcriptome, *Plant, Cell Env.*, **29**, 1545-1570, 2006.
 - 26) Wanga, D., Eylesa, A., Mandich, D. and Bonello, P., Systemic aspects of host-pathogen interactions in Austrian pine (*Pinus nigra*): A proteomics approach, *Physiol. Mol. Plant Path.*, **68**, 149-157, 2006.
 - 27) Lu, S, Sun, Y-H., Amerson H. and Chiang, V. L., MicroRNAs in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) and their association with fusiform rust gall development, *Plant J.*, **51**, 1077-1098, 2007.

木造ラーメン構造の魅力

小松 幸平*

1. はじめに

ラーメンという言葉は、ドイツ語の Rahmen から来ており、本来の意味は「額縁」という意味です。従って、図1に示す額縁のような長方形の枠で構成された骨組みがラーメン構造の基本形（このようなラーメンを門型ラーメンと呼びます）ということですが、他に、図2に示すような山型ラーメンと呼ばれる「傾斜屋根の付いた骨組み」の場合も、木造ではよく見かけます。

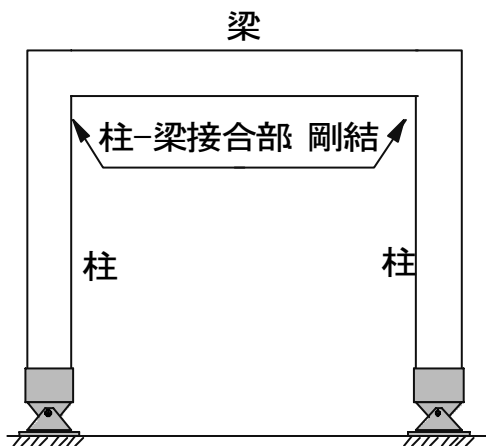


図1：門型ラーメン構造

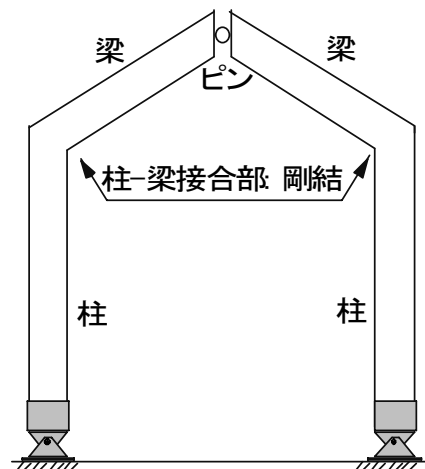


図2：山型ラーメン構造

ラーメン構造の厳密な定義は、図3に示すように柱部材と梁部材が強固に結合されていて、たとえそこに大きな力が作用しても、最初に結合された角度が保持された状態で、少なくとも接合部分は角度変化や伸縮変形、そしてずれ変形等を起こさず、逆に部材の方が曲がって、骨組み全体として一定量の水平変形や垂直変位を生じるような骨組み構造を言います。非常に分かりにくい話ですが、早い話が、鉄骨で出来た多くのビルディングは、このラーメン構造の定義にほぼ近いものと考えて良いでしょう。

しかし、これから話をします「木造ラーメン構造」の場合は、この定義から外れてしまう物が大部分です。一部の例外を除いて、柱と梁をどんなに強固に結合したつもりでも、接合部で若干の角度変化や伸縮変形や、ずれ変形が生じて、鉄骨のような完璧なラーメンという訳にはいかないのです。この辺の状況については、後ほど詳しく述べます。

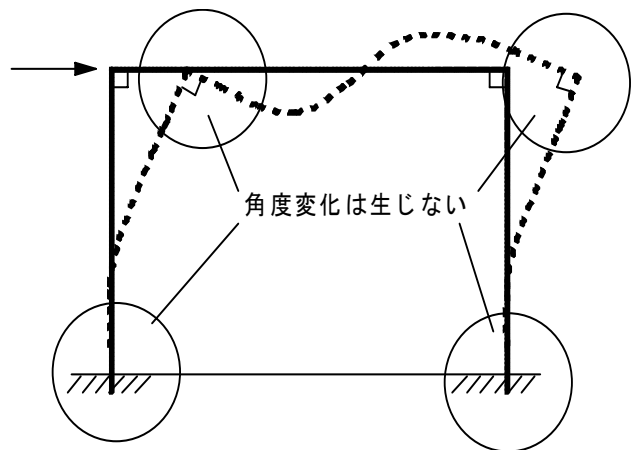


図3：ラーメン構造の定義

* 〒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

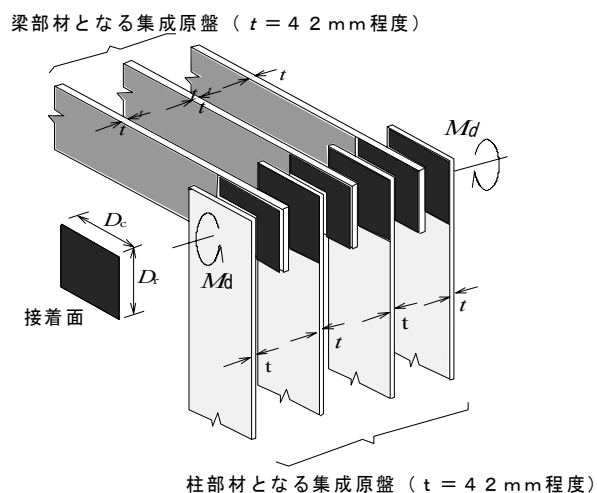
2. 禁断の木造ラーメンの世界へ飛び込む

不完全なものに遭遇した場合、それを避けるように行動するのが一般的です。ラーメン構造の場合、柱と梁が結合されている接合部分には、接合部を分離させようとする大きな力が作用しますので、この大きな力に抵抗できる接合を造ることが困難であった時代には、「木造でラーメンを造ることは避けた方がよい」という考え方が建築界では常識的な見方でした。しかし、「やらない方がいい」と言われると、「やって見たくなる」のが人間の性です。私の場合も大学院を修了し、無事博士号を頂いて北海道立林産試験場という林産物を扱う試験場に就職して数年も経たない内に、このラーメン構造を木材で造るといふ禁断の世界に飛び込む機会がやって来ました。

たまたま研究所の掲示板にポツンと貼ってあった NZ 政府招聘研究員募集の張り紙を見て、「NZ って羊の沢山いる南の国、写真で見ると綺麗な国で、行ってみたいなー」という漠然としたあこがれの気持ちで応募してみたら、何と「貴方の応募が採択されました」というすぐには理解出来なかった英文電報が舞い込み、そうこうしている間に NZ の北島のロトルアという町にある NZ 森林研究所に 2 年間留学できることになりました。そこで初めて出会ったのが今日まで私の研究テーマとして最も相性のいいラーメン構造です。



(a) 実際の例 (マッキントッシュ社工場)



(b) 接合の仕組み

図 4: NZ 独特の交差重ね合わせ接着接合によるラーメン構造接合部の仕組み

NZ で初めて出会ったラーメン構造は、最初に紹介した鉄骨のラーメン構造に近い柱-梁接合部が木造ラーメンとしては例外的に固く結合されている「交差重ね合わせ接着接合法」という特殊な構造のラーメン構造でした。図 4 にその構造の仕組みと写真を示します。

厚さが 3~4 cm 程度の板 (集成材を薄くスライスしてこの板自体を造る場合が多い) を何枚も交差し重ね合わせ、積層界面に接着剤を塗布して最終的に接合部を強固に接着接合するというものです。こうすることによって、ちょっとやさそとでは柱と梁の接合部が変形を起こさない、鉄骨のように強固なラーメン構造を木材を使って造ることが可能となります。ただし、問題は幾つかあります。一つは、接着接合という方法は非常に固い接合を構成するので、接合部の変形は無視できるほど小さいですが、接合部の破壊が突然、大音響と共に発生するという、木構造における破壊形態としては最も好ましくない形態で起こるといふことです。また、交差重ね合わせ接合の場合、一般的には工場で予め柱と梁を接着して「への字」型の骨組みを造り、それを大型のトレーナーに載せて「のろのろと」建設現場まで運びますが、後で出てくる事例のように極めて大きな構造になると、よほど道路事情に余裕がない限り輸送にも限界があります。よって、この交差重ね合わせ接着接合法による木造ラーメン

構造の場合は、NZ という人間より羊の方が圧倒的に多い文字通り牧歌的な楽園においても、大型の構造は最近ではめっきり少なくなってきたようです。以下にいささか古い写真で恐縮ですが、幾つか実例を示します。



(a) 遠景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 1：交差重ね合わせ接着構法で建てられた巨大な貨車引込用倉庫。(オークランド市、NZ)

写真 1 はこの構法で建てられた構造物としては NZ 最大のもので、非木質建材メーカー大手のアレックス・ハーヴェイ・インダストリー、通称 AHI（現在はカーターホルツ社になった）の貨物列車専用の倉庫です。構造は 3 連山形ラーメンで面積は 7,000 m² を超える超大型の集成材構造建築物です。

写真 2 は比較的新しい NZ 羊毛市場組合の羊毛倉庫で、山型ラーメンが 2 つ並列に並んだ構造です。この程度の規模であれば輸送に拘わる問題は少なく、現場での組立が非常に容易ため、交差重ね合わせ接着接合構法は今でも重宝がられています。この構法の特徴として、軒肩部分が幾何学的ですっきりしていることが分かります。



(a) 遠景



(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 2：交差重ね合わせ接着構法による羊毛倉庫、建物は山型ラーメンが 2 棟並んだ型になっている。(N.Z. 羊毛組合倉庫、オークランド市、NZ)

写真 3 はコミュニティーカレッジの木工教室に使用された交差重ね合わせ接着構法による山型ラーメン構造で、屋外環境に曝されて使用されるため、骨組み全体がペイントで保護されたうえ、万一同も接着接合が剥離を起こさないように、安全のため 4 本のボルトで締めてあります。

以上、昔 NZ に留学した当時の懐かしい研究を紹介しました。交差重ね合わせ接着によるラーメン構造は、小さいものから、極めて大きいものまで様々な種類が存在しますが、最近の傾向として、輸送の面で不利な大形の構造は少なくなってきたようですが、運搬が楽な小型のものは建て上げが早いので今でも重宝がられています。

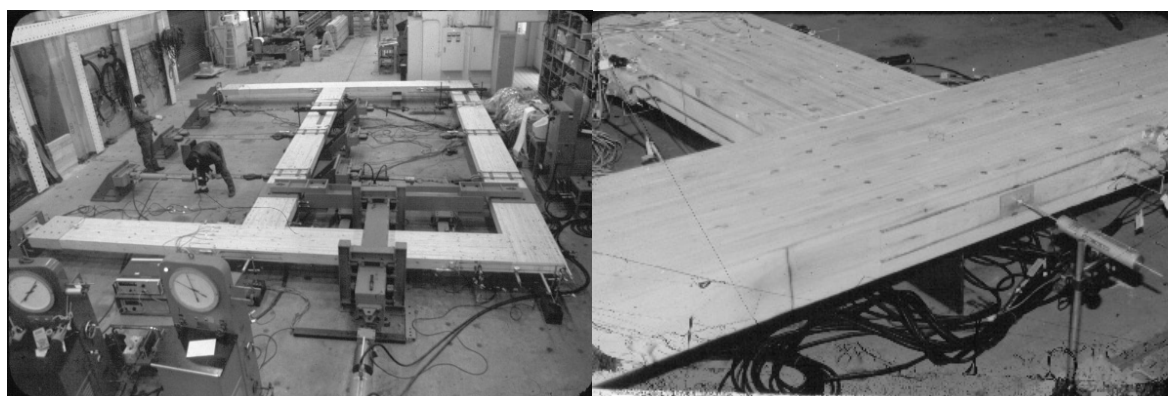


(a) 木工棟全景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 3：屋外環境に曝されて使用されている交差重ね合わせ接着構法による山型ラーメンの例
(コミュニティーカレッジの木工棟、オークランド市、NZ)

3. 我が国における大型木造ラーメン構造の開発



(a) 実験状況の全景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 4：小学校の 2 階建て校舎を目標とした 2 層門型ラーメン架構の実大実験（林業試験場、筑波）

留学から戻り、北海道で幾つか特殊なラーメン構造の開発を経験した後、筑波にある農林水産省の林業試験場（現在の森林総合研究所）の構造性能研究室という木構造を専門に研究する研究室に転出しました。その当時、集成材を構造材料とした大型の木造建築が新しい研究トピックスとして注目されるようになっていました。早速、海外で仕入れてきた知見を日本風にアレンジする作業に取りかかりました。写真 4 は柱と梁に開けた幅 11 mm のスリットに 2 枚の大きな鋼板ガセット板を挿入し、現場でドリフトピン（当時は打ち込み鋼棒とか丸鋼ジベルとか呼んでいました）を多数打ち込む方式（接合部の概念については図 5 を参照して下さい）で集成材による 2 階建て門型ラーメンの実大破壊実験を行っている様子です。(a) の写真に見える T 字型の治具で地震力を模した力を与えています。

また建物に作用する上からの荷重（固定荷重と言います）はプーリーとワイヤーを利用して与えるように工夫しています。この実験は小学校の校舎（スパンが 8m 程度）をイメージしたもので、この実験結果を使って、その後写真 5 に示すような小学校が実際に建設されました。

しかし、この方法は現場で大きく重たい鋼板を扱うこと、十分な設備のない現場ではすべてのドリフトピンを正確に打ち込むことが困難な場合が多いこと等の理由で、施工法の改良が期待されました。



(a) 建設途中の全景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真 5：実大実験の結果を利用して実際に建設された小学校の 2 階建て校舎

そこで、この難点を改良するため、精確な作業の要求される鋼板挿入作業とドリフトピン打ち込み作業は設備の整った集成材工場で行われ、施工現場では鋼板同士を数本の高張力ボルト（図 6 中の HTB と書いた物）で結合するだけで柱-梁接合部が完成する図 6 のような接合法を開発しました。

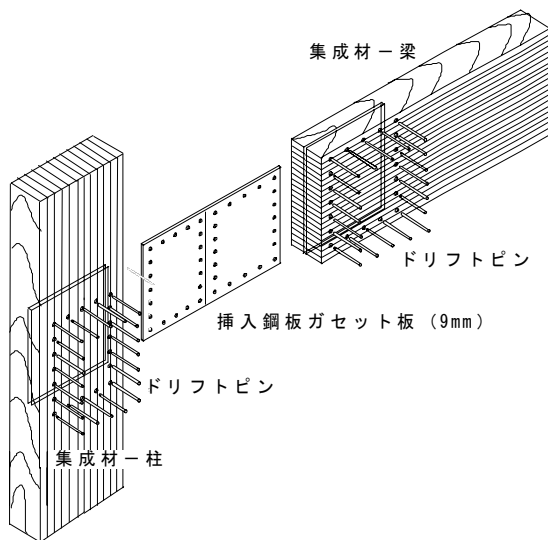


図 5：初期の鋼板挿入ドリフトピン接合

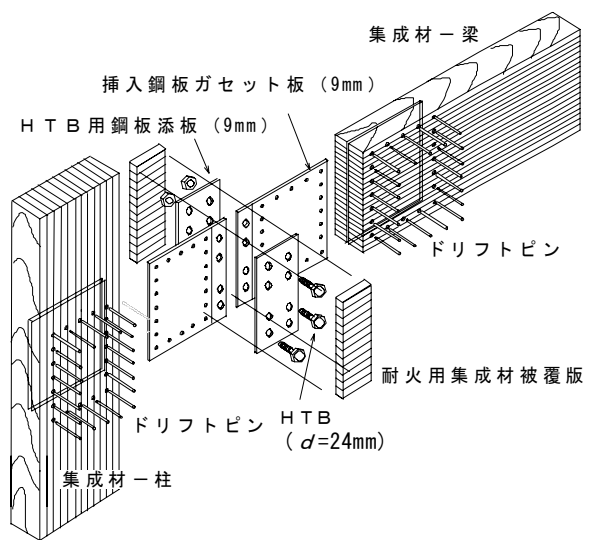


図 6：改良型鋼板挿入ドリフトピン接合

改良型の接合法によって、現場施工性が大幅に改善された他に、集成材部材間に介在する鉄同士を接合する高張力ボルト（HTB）接合部が安全弁的な役割を演じ、ドリフトピン接合で破壊が起こる荷重レベルの前段階で、高張力ボルトが先にすべりを起こすよう設計することによって、見かけ上鉄骨同士の摩擦接合部と同じ延性に富んだ荷重-変形挙動を起こす接合部の開発に成功しました。これによって、施工が楽で、且つ鉄骨ラーメン並の安全性を備えた集成材ラーメン構造を造ることが出来るようになりました。それ以降、この方法は我が国における集成材ラーメン構造の標準的な接合法として広く使われています。写真6はこの改良型接合法を用いて建設された我が国最大規模の集成材3階建てラーメン構造の建設時の様子を示します。



(a) 建設途中の全景

(b) 柱-梁接合部のクローズアップ

写真6：集成材3階建て構造物としては我が国最大級の帯広営林支局庁舎棟（帯広市）

4. スケルトン-インフィル（SI）住宅へのラーメン構造の適用

スケルトンとは骨格のことを意味します。またインフィルとは内部の間仕切りのことです。従ってSI住宅というのは家の外側が頑丈な骨格で、内部の間仕切りは住手の要望や家族構成の変化に応じて比較的容易に変更できる住宅のことを意味します。木造ラーメン構造は、このSI住宅のS、つまり骨格を形成することのできる魅力的な構造と言えます。集成材の柱と梁は構造材であると同時にその美しく、かつ力強い質感を生かして、むしろ積極的に住宅内部に「現し」で使うことが出来ます。コンクリートや鉄骨では真似のできない芸当です。

上で紹介した鉄板を集成材の中に挿入してドリフトピンという鉄のピンを集成材の側面から打ち込む方法も捨てたものではありませんが、住宅ですの

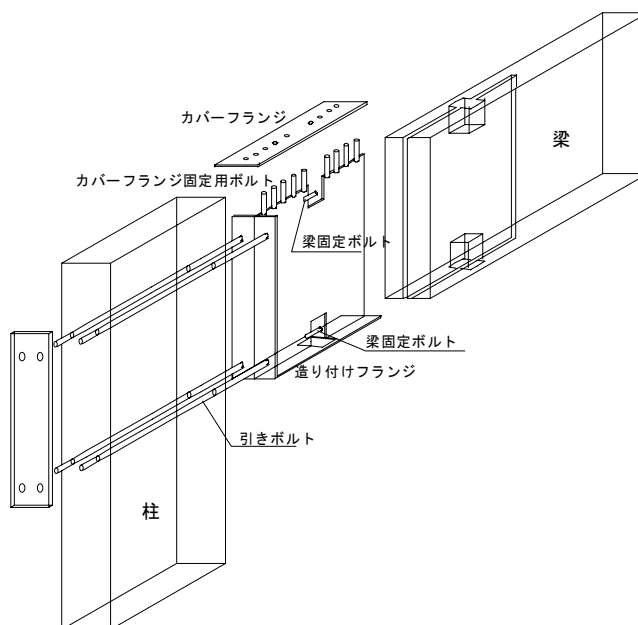


図7：締め付け型フランジ引きボルト接合法

で、もっと徹底的に集成材の美しさを生かした接合法として、室内に見える部分には全く鉄のピンが現れてこない非常に綺麗な接合法が最近開発されました。締め付け型フランジ引きボルト接合法という長い名前と呼ばれています。図7はその接合部の仕組みを模式的に描いたものです。最終的な形としては、集成材の端部に軽量鉄骨で造ったH型のガセット板が挿入されていて、集成材の狭い面の外側で力を伝達するように工夫されています。

写真7(a)は柱-梁接合部のガセット板を取り付けている状況を、また同(b)は柱脚接合部のガセット板を取り付けている状況を示します。



(a) 柱-梁接合部の取り付け状況



(b) 柱脚接合部の取り付け状況

写真7：締め付け型フランジ引きボルト接合法による集成材ラーメン構造の開発

図8はこのラーメン構造の柱が横からの力を受けた際に、ガセット板の各部に生じる力の状況を模式的に現したものです。全ての力が集成材の外側の層に限定的に発生する仕組みとなっています。この事より、なるべく外側の層に強度性能の高いラミナを積層した特別の集成材を部材に使用した方が有利となるのが容易に予想されます。そこで我々はこの条件にピッタリの集成材である異樹種集成材と呼ばれる新しく開発された集成材をこのラーメン構造に使うことにしました。我々が注目した異樹種集成材は、外側に力の強いベイマツのラミナを、内部に日本の針葉樹として蓄積の最も多いスギを使用しています。

写真8は京大生存圏研究所の木質材料実験棟の設備を使って、最近この型式のラーメン構造の実大加力実験を行った時の様子を示します。形はいわゆる門型ラーメンと呼ばれるもので、スパンは6m、高さは2.73mで、集成材の寸法は、柱が幅120mm x せい360mm、梁は幅120mm x せい420mmです。実験で与えた荷重は、このラーメン構造に地震の力が繰り返し作用した時の抵抗能力が分かるように、小さい変形から初めて段階的に大きな変形を与え、最終的にはせん断変形角が1/6ラジアンになるまで押ししてみました。この1/6ラジアンという角度は門型ラーメンが平行四辺形に変形した場合、上部の変形量を高さ2,730mmで除した比のことを言います。こ

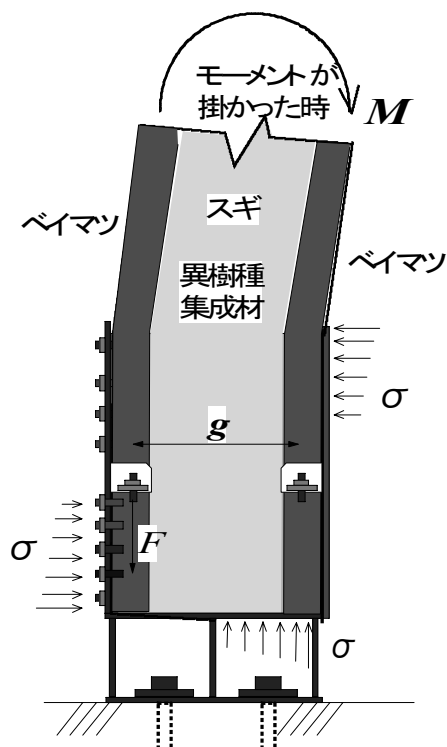


図8：締め付け型フランジ引きボルト接合

の 1/6 という変形量は極めて大きな変形で、通常はここまで変形すると門型ラーメンは部材のどこかが破壊してしまうものですが、今回開発したラーメン構造の場合、鉄板の板厚を含め、各部材の寸法のバランスがうまくとれていたため、変形能力の極めて大きな鉄の柱脚が先に降伏し（鉄はある値以上の応力になると変形だけが進み外部からのエネルギーを吸収する能力が大きい、その変形が進み出す最初の荷重を降伏と呼ぶ）変形能力の少ない木材に過剰な力が伝わらない状態が生み出されたので、集成材で破壊が先行することはありませんでした。



写真 8：スパン 6 m の異樹種集成材門型ラーメン構造の実大加力実験における終局状態

このような変形能力の極めて大きなラーメン構造を実現することが、現在木造ラーメン構造の開発を進めている多くの人達の目的です。そういう意味から言えば、我々の研究は一応目標に到達出来たと言えましょう。この研究の成果を受けて実際に建設された SI 住宅の内部の写真写真 9 に示します。内部間仕切りのない自由な空間が生み出されていることが分かります。

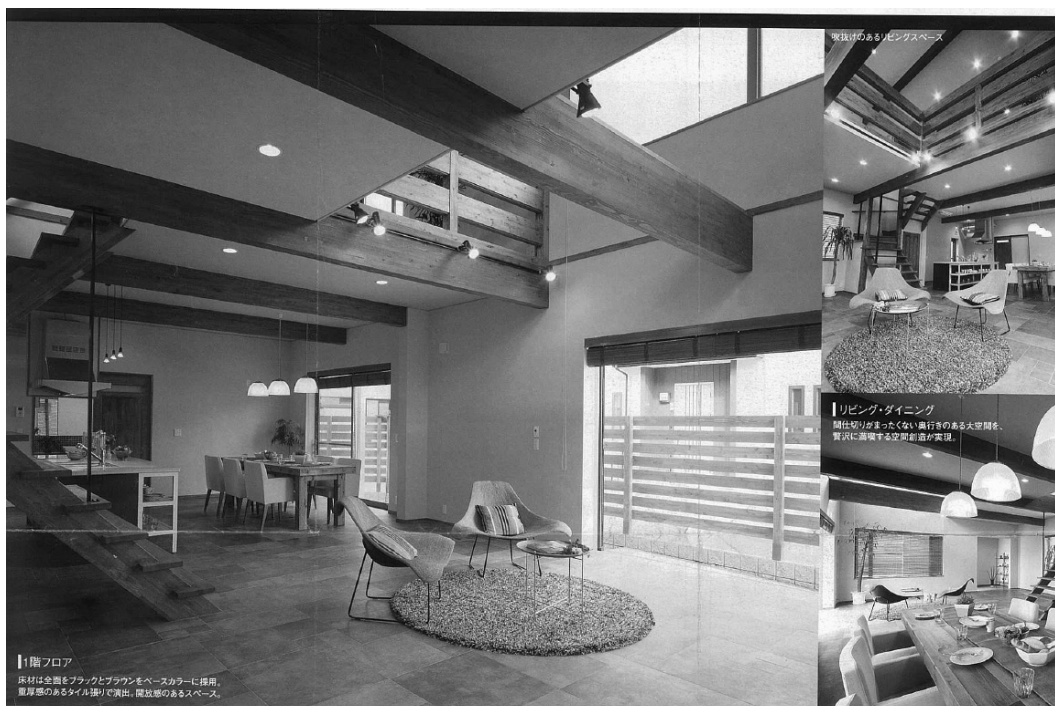


写真 9：異樹種集成材門型ラーメン構造を利用して建設された SI 住宅の内観（住宅メーカーの宣伝用写真を複写したもの）

5. おわりに

大規模な集成材建築への適用から始まった木造ラーメン構造は、最近では戸建て住宅への応用が盛んになっています。しかし、この構造は見よう見まねで造ると大変危険です。しっかりとした構造計算に基づいた余裕のある設計を心がけることが大切です。

超高層大気をさぐる

山本 衛*

1. 超高層大気とは何か

地球の大気は高度が増すにしたがって圧力と密度が指数関数的に減少し、最終的には宇宙空間につながっていきます。大気の層はその温度構造によって分類されており、下層から対流圏（地表から高度 15 km 程度まで）、成層圏（その上部から高度 50 km 程度まで）、中間圏（その上部から高度 90 km 程度まで）、熱圏（さらにその上部）と広がっています。「超高層大気」とは、熱圏の別名であり、その特徴は、温度は高いものの極めて希薄であることと、太陽光に含まれる紫外線やX線の作用によって一部が電離状態（イオンと電子の混合状態＝プラズマ）になっていることです。この性質から、電離圏という呼び名もあります。我々は超高層大気を研究しています。ここでは地表からの高度 90-1000 km の範囲を様々な研究する手法について紹介しようと思います。

超高層大気には、まず上述のように、太陽からやってくる非常にエネルギーの高い放射である紫外線・X線をさえぎる役割があります。超高層大気にあつた紫外線・X線のエネルギーは、電離のために消費され、下層には伝わりません。これは非常に効率の良い遮へい作用であり、結果的に地球の生命を保護する役割を果たしています。オゾン層も紫外線を吸収するのですが、その中心高度は 30 km 程度であり成層圏に位置しています。超高層大気を通り抜けてしまう比較的波長の長いグループの紫外線がオゾン層で吸収されます。つまり超高層大気とオゾン層の組合せによって、太陽光に含まれる有害成分が除去されています¹⁾。

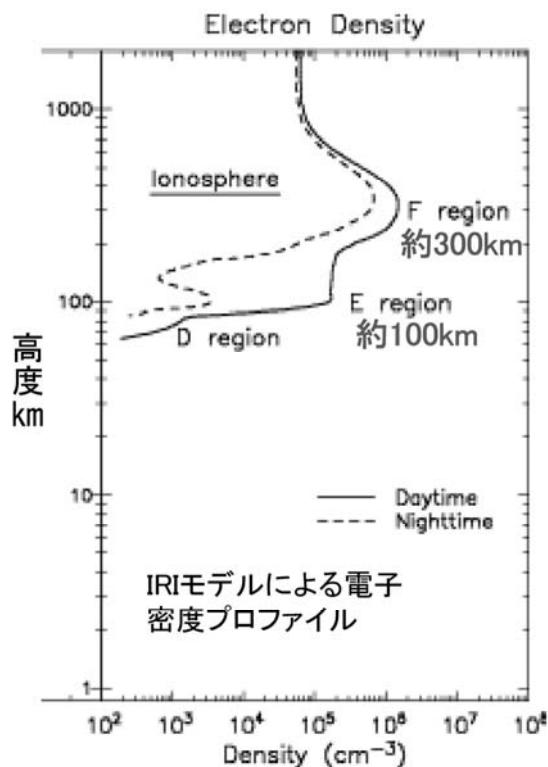


図 1：電離圏の電子密度高度分布

太陽光の遮蔽作用の結果として生じる電離圏は我々の生活と深くかかわっています。平均的な電子密度の高さ分布を図 1 に示しますが、最下層は D 層、高度 100-150 km 付近の E 層、高度 300 km 付近を中心とする F 層と名づけられています。我々は電波を使って無線通信をしますが、周波数 30 MHz 程度までの短波帯の電波はこれらの層で反射してしまいます。短波通信・短波ラジオが遠方との通信を可能であるのは、電波が地表と電離圏の間を反射しながら見通し外まで伝わっていくからです。遠距離通信が短波通信に頼っていたころ、電離圏の電波伝搬に関する性質を知ることが非常に重要であり、電離圏の研究は高い位置づけを得て広く行われました。現在では人工衛星を使

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

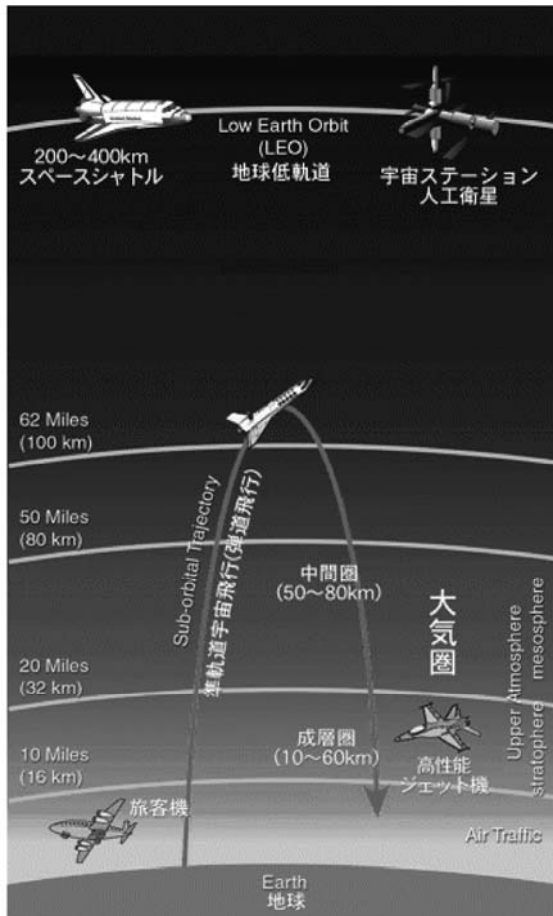


図 2：JTB が売り出している宇宙体験飛行（弾道飛行）²⁾

った遠距離通信が一般化しており、電離圏の電波反射の性質の重要性は低下しています。しかし電離圏は人工衛星と地表の間の障害物となりますので、その点では重要な研究対象でありつづけています。

2. 環境としての超高層大気

人間の生存環境としての超高層大気について考えてみます。最近では旅行会社が「宇宙旅行」をパッケージ旅行として売り出すようになっているようです。例として、(株)ジェイティービー(JTB)がホームページに掲げている概念図を図 2 に示します²⁾。売り出されている旅行は、簡便なものとして到達高度 100 km 超まで上昇し下降する弾道飛行と、本格的なものとして高度 200-400 km の地球周回軌道への 1 週間程度の旅行です。多くの人工衛星が飛び交い、宇宙飛行士が常時滞在を続けている国際宇宙ステーションも高度 400 km 程度にあります。これらは実はどちらも我々がいう超高層大気の内側です。超高層大気はこれまで人類からは遠く離れた存在でしたが、そろそろ人間の生活環境の一部として考えるべき時代になりつつあることがご理解いただけると思います。また非常に希薄であることから、大気の下層における変動の影響を大きく受けると言われており、例えば地震の波が超高層大気に変動を与えることは

良く知られています。このように超高層大気の研究は、環境問題としての重要性を持つようになってきています。

3. いろいろな観測方法

3.1 レーダー観測

超高層大気の観測方法として、地上に設置したレーダーによる方法があります。レーダーとは、強い電波を送信して標的（この場合は超高層大気）にぶつけ、反射して帰ってくる電波を捉えることによって、標的の性質を知る観測手法です。性質のわかった送信電波と受信電波の性質の差を調べることが観測につながります。身近な例では自動車の速度取締りに使われる小さなレーダーが有名です。また気象レーダーが天気予報の観測に使われていることは良く知られていますが、これは空気中の雨粒の分布と動きを知る（つまり雨粒を標的とする）レーダーです。



図 3：滋賀県甲賀市信楽町にある MU レーダー全景写真

我々生存圏研究所では、1984 年に大型の大気観測用レーダーである MU レーダーを滋賀県甲賀市信楽町の信楽 MU 観測所に完成し、現在まで様々な研究を行ってきました³⁾。図 3 に MU レーダーの全景写真を示します。丸く見えるのはアンテナシステムであり、直径 100 m の円形の敷地内に 475 本の八木アンテナ（詳しくは、3 素子のクロス八木アンテナ）が整然と並んでいます。アンテナ面の回りには 6 棟の小屋が並んでいますが、この中には各々のアンテナについて 1 台ずつ対応する半導体の送受信機が収容されています。MU レーダーは多くの送受信機とアンテナから構成されていますが、電子制御によってそれらを一体のものとして運用します。即ち、全体を中心周波数 46.5 MHz、送信時の最大電力は全体で 1 MW に及ぶ巨大なレーダーとして使用します。MU レーダーのアンテナの働きは、同じ大きさの開口をもつパラボラアンテナと同等であり、更に送受信の電波の位相を制御することによって、電波の発射方向を電子的に振ることができます。こういう構成のアンテナは、アクティブ・フェーズド・アレイと呼ばれます。MU レーダーの観測領域は、地表面近くから高度約 1,000 km 程度の地球大気全域に及びますが、超高層大気に関しては、(1) 電離圏の電子 1 個 1 個からの超微弱な散乱電波を捉える「非干渉計散乱エコー」と、(2) 電離圏プラズマの不安定現象に関連して生じる電子密度の不規則構造に伴う「電離圏イレギュラリティエコー」の観測が主となります。また (3) 役目を終えた人工衛星やその破片などからなるいわゆるスペースデブリの観測も実施されています。

生存圏研究所には、MU レーダーに良く似た大型のレーダーがインドネシア共和国西スマトラ州のコタババンにもう一台あります⁴⁾。赤道大気レーダーと呼ばれるこのレーダーの全景とアンテナ部を図 4 に示します。周波数 47 MHz で直径約 110 m のアンテナを備えています。アンテナと直下の小型送受信モジュールの総数は 560 に達します。MU レーダーと同様にアクティブ・フェーズド・アレイ構成であり、全体の送信出力が 100 kW と MU レーダーの 10 分の 1 である以外は、ほぼ同様の機能を備えています。超高層大気に関しては、MU レーダーで説明した (2) のタイプのエコーを観測することができます。赤道大気レーダーの運営は、インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との密接な協力の下で進められています。設置場所の特徴を活かして、低緯度・赤道地域に特徴的なプラズマバブルという現象の研究を精力的に実施しています。

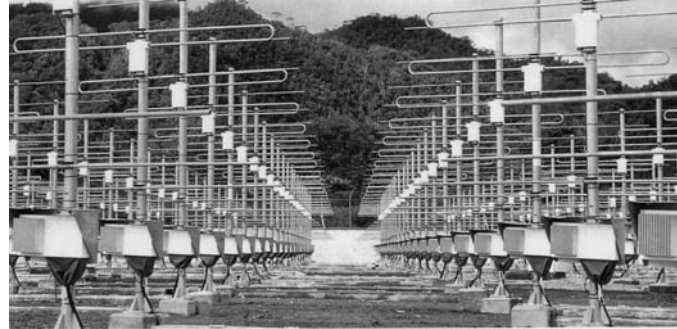


図4：インドネシア共和国西スマトラ州にある赤道大気レーダー全景(上図)とアンテナ・送受信モジュール写真(下図)

3.2. GPS 受信機網

超高層大気の測定手法として、最近、GPS (Global Positioning System) 衛星を利用した観測が注目を集めています。GPS は地球上どこでも簡便に位置が測定できるシステムで「カーナビ」を支える基盤となっています。図5に概念図を示すように、GPS では衛星から地上まで地球大気を通過して伝搬してくる電波を使って測位をします。電離圏を通過する電波はプラズマの影響によって速度が微妙に変化するため、測定結果には電離圏に含まれる電子の総数(全電子数 (Total Electron Content; TEC) と呼ばれる)に比例する誤差が含まれます。GPS はこれを補正して測定を行います、補正量を

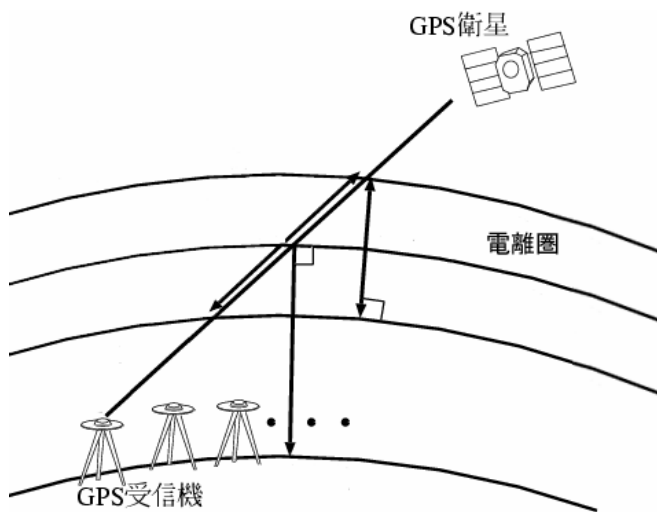


図5：GPSによる測位と電離圏の関係

うまく取り出すことによって、電離圏の TEC を求めることができます。更に我が国では、国土地理院によって GEONET (国土地理院 GPS 連続観測システム) と呼ばれる千点を越える GPS 受信機のネットワークが完備しており、30 秒毎の測位データがデータベースに刻々と蓄積されています。

我々は、これを利用して日本上空の電離圏全電子数を算出・蓄積するシステムを作り上げ、運用してきました。図6はその観測例を示しますが、GPS 観測網から得られた日本上空の総電子数変動の水平分布には電離圏内を伝搬する大気波動の様子ははっきりと捕えられています⁵⁾。この例は波面が北西から南東に延び時間

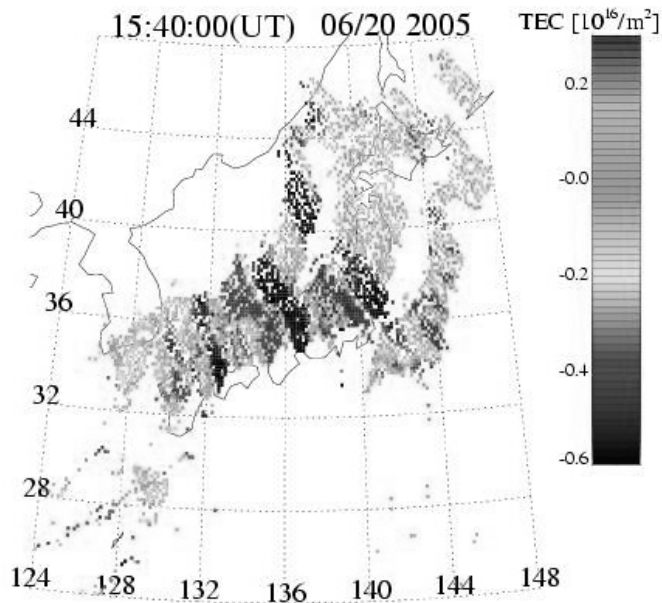


図 6 : GPS 受信機網で観測された日本上空の電離圏に現れた波動⁵⁾



図 7 : 観測ロケットの開発風景

とともに南西に伝搬していく、中規模 TID (Traveling Ionospheric Disturbance) と呼ばれる波の種類ですが、GPS 観測網を用いた研究により、特に夏季の夜間に卓越する現象であることがわかってきています。またこれ以外にも全世界にわたる GPS 観測網が構築されており、更には人工衛星に GPS 受信機を搭載して行う先進的な観測が実現するなど、この分野の観測技術の開発は非常に進んでいます。

3.3. 観測ロケット

超高層大気の詳しい様子を観測するには、観測装置を持ち込んで「その場」の観測をすることが望ましいことは言うまでもありません。おおよそ高度 400 km を越える高度では、人工衛星による観測が盛んに行われています。しかしそれ以下の高度では、大気密度が大きいために衛星が周回軌道に長く留まることができません。そこで、弾道飛行をする観測ロケットによる観測が、現在でも有力な観測手段となっています⁶⁾。図 7 に観測ロケットの開発風景の写真を示しますが、ここに示すロケットの頭部に観測装置を数多く積み、ロケット本体の先端に取り付けて発射するわけです。ロケットの頭部は上空で開いて観測装置が露出し、電離圏の電子密度、電子温度、磁場変動などの量を直接に測定します。また、後述しますが、ロケットから化学物質を撒き散らして発光する軌道を作り出し、地上から写真撮影して風速等を計る観測手法もあります。これらの観測は、日本では JAXA 宇宙科学研究本部が実施しており、鹿児島県にある内之浦宇宙空間観測所から太平洋に向かって 1 年に数回の観測が行われています。

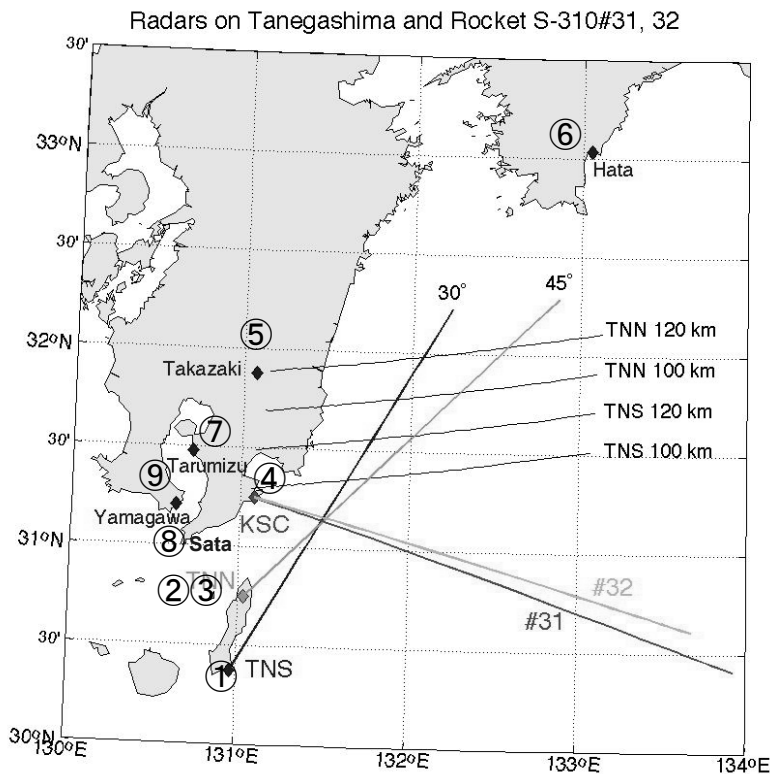


図 8 : SEEK-2 観測の領域

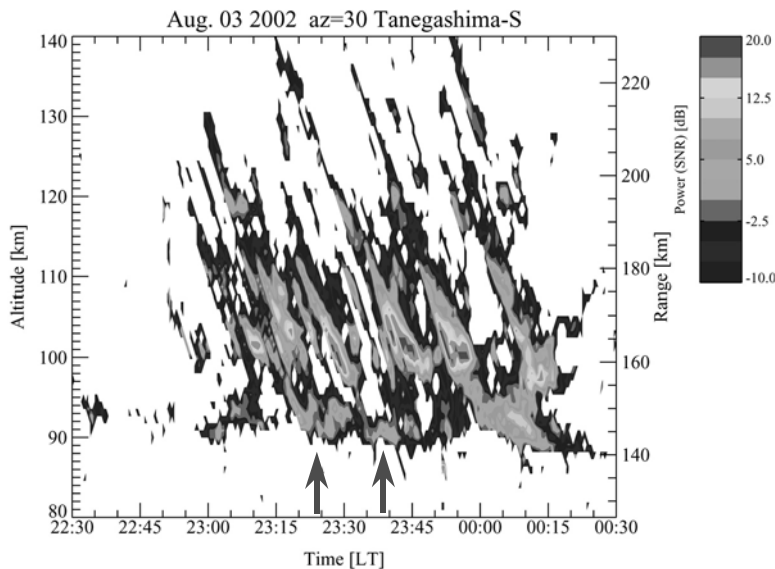


図 9: 種子島南部(①)のレーダーで観測された電離圏イレギュラリティからのエコー強度の時間・高度分布図。
矢印の時刻にそれぞれ観測ロケットが発射された。

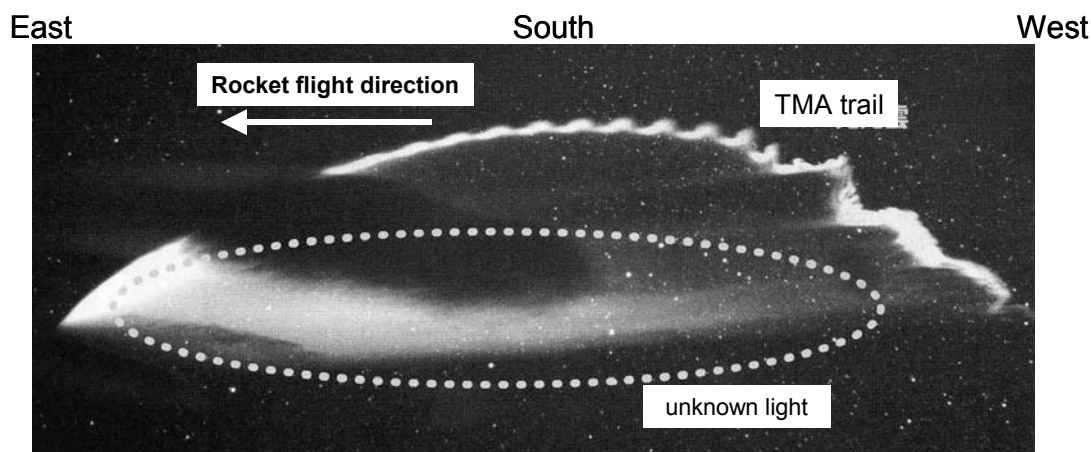
4. 総合的な観測の例

今まで示したような観測装置を利用した総合的な観測の例として、2002 年夏に行われた SEEK-2 (Sporadic-E Experiment over Kyushu 2) と呼ばれる観測を紹介します。これは高度 90–120 km 付近に現れるスポラディック E 層(以下では Es 層と表記)の周りに発生する電離圏のイレギュラリティの観測でした。MU レーダーでは「準周期エコー」と呼ばれる、特徴的な波動現象を発見してきましたが、その発生原因を突き止めることを目的として実施されたものです⁷⁾。

SEEK-2 の観測領域を図 8 に示します。種子島に設置された 2 機のレーダー(図中の①と②)によって Es 層に伴う電離圏 FAI の準周期構を観測中に、内之浦(④)から 2 機の観測ロケット(S-310-31 と-32 号機)を連続して打上げることを目指しました。観測ロケットからは、Es 層付近の電子密度、温度、電界、磁界を直接測定するとともに、ロケット搭載の 2 周波ビーコン送信機の電波を地上観測点で受信してロケットから地上までの全電子数を観測しました。またロケット搭載の圧力容器から TMA (トリメチルアルミニウム)を噴出して発光雲を生成し、地上のカメラから連続撮影することで中性大気風速を測定する TMA 観測も実施しました。これらのロケット観測と並行して、地上には種子島から幡多(高知県)にかけて計 9 個所の地上

観測点を設置しました。上記のように種子島の南部(①)と北部(②)に小型で持ち運びできるタイプのレーダーを設置し、電話回線で内之浦と結んで観測状況をリアルタイム表示するシステムを構築しました。更にロケットビーコン実験及び TMA 実験のための地上観測点、その他のレーダー装置や GPS 受信機からなる地上観測体制を敷いて実施しました。

図 9 に示すように、2003 年 8 月 3 日の 23 時過ぎから、種子島南部及び北部のレーダーによって強い Es 層に伴う電離圏イレギュラリティの準周期構造が観測されました。このリアルタイムモニター情報をもとに観測ロケット S-310-31 号機と S-310-32 号機が、それぞれ 23 時 24 分と 23 時 39 分に 15 分間隔で連続して打上げられ、それぞれ高度 157 km と 117 km に到達しました。図中の矢印の時刻がロケット発射に対応しています。電子密度・温度、電界、磁界、大気風速など多くの物理パラメータを、地上観測装置との連携によって一挙に観測することに成功し、観測目的であるイレギュラリティの準周期構造を完全に捉えることに成功した例です。この観測から、イレギュラリティに伴う電子密度の変動や電界の振る舞いについて多くの詳しいデータが得られています。図 10 にはこのときロケットから放出された発光雲の写真を示します(アマチュア写真家の田村竜一さんが撮影し雑誌「星ナビ」2003 年 2 月号に発表したもの)。上部に見える波状の変形は、ロケット軌道に沿った発光雲が超高層大気の変動によって変形した様子を示しますが、このような細かい変動が卓越することは我々の事前の予想を越えていました。また下部には薄い発光領域が見られますが、これの生成原因はまだ分かっておりません。このように大規模な観測は、それまでの研究で得られた成果の検証に有効である一方、驚くような成果や道の現象の発見に繋がるもので、非常に重要です。



(Picture from "Hoshinabi" magazine, February, 2003)

図 10 : SEEK-2 観測ロケットから放出された TMA 発光雲の写真
(雑誌「星ナビ」2003 年 2 月号から)

5. おわりに

以上ご紹介してきたように、地上高度 90 km 以上からはじまる超高層大気には面白い現象があり、我々はその観測・研究を様々な手段を用いて実施しています。超高層大気は宇宙空間への入口にも当たっており、そこへのトビラは、そろそろ普通の人々にも開こうとしているようです。地球環境全体の理解のためにも、超高層大気の研究は重要であると考えています。このような研究に興味を持って見守っていただきたいと思います。

参考文献

- 1) 恩藤忠典, 丸橋克英, 宇宙環境科学, オーム社, 302pp., 2000.
- 2) ホームページ「JTB 宇宙旅行」: <http://www.jtb.co.jp/space/>
- 3) 深尾昌一郎, 浜津亨助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 491pp., 2005.
- 4) Fukao, S., Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA): A Project Overview, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84A**, 1-18, 2006.
- 5) Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki, High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3079-3082, 1998.
- 6) ホームページ「宇宙科学研究本部 観測ロケット」
<http://www.isas.ac.jp/j/enterp/rockets/sounding/index.shtml>
- 7) Yamamoto, M., S. Fukao, R. T. Tsunoda, R. Pfaff, and H. Hayakawa, SEEK-2 (Sporadic-E Experiment over Kyusyu 2) -Project Outline and Significance-, *Ann. Geophys.*, **23**(7), 2295-2305, 2005.

宇宙という生存圏と宇宙太陽発電

臼井 英之*

1. 概要

実用衛星利用、宇宙ステーション構築など、すでに人類の生存基盤として宇宙は利用されており生存圏の一部と考えられる。本講演では、人類生存基盤としての宇宙圏の紹介と、現在検討が進められている、将来のクリーンな大型基幹電力供給源である宇宙太陽発電所（SPS）の概要、および、予想される宇宙環境との相互作用に関する研究を紹介する。

2. 宇宙という生存圏

2.1 太陽-地球環境

まず始めに、本講演で対象とする宇宙空間は、人類が生存基盤として現在利用している、または、将来利用する可能性のある比較的地球に近い宇宙であり、地球を含む太陽系宇宙空間を意味する。ご存知の方も多いかもしれないが、宇宙空間は真空ではなく、その 99.9% 以上は宇宙プラズマという希薄な電離気体で満たされている。太陽表面からは太陽風と呼ばれる高速プラズマ流が四方八方に常に放出されており、地球を含む惑星はその太陽風にさらされている。しかし、幸いなことに、地球には固有磁場があり、これと太陽風との相互作用によって磁気圏が地球近傍宇宙空間に形成されている。この磁気圏の存在によって地球表面は太陽風からの直接の影響を免れている。

図 1 に地球磁気圏の概念図を示すが、太陽風の圧力の影響によって太陽側では圧縮される一方、太陽とは逆方向では尻尾のように引き伸ばされていることがわかる。大切なことは、この磁気圏の構造は静的なものではなく、太陽活動度変動によって刻々と変化する太陽風プラズマの影響により、磁気圏自体もダイナミックに変動するということである。星の誕生、爆発など目に見える変化だけではなく、それらの間を満たす宇宙プラズマ環境もダイナミックに変化し、地球近傍の宇宙環境にも大きく影響を与えているのである。人間が地上から目にすることのできるその現象の一つとして、オーロラがある。

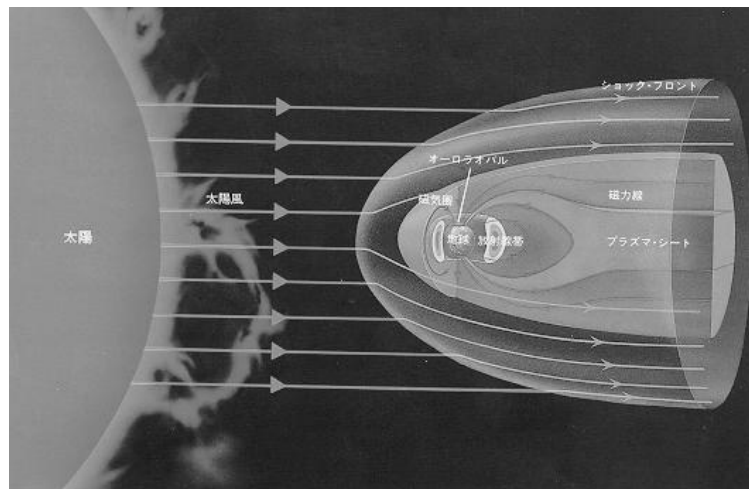


図 1：地球磁気圏の概念図

オーロラは、通常「オーロラ楕円帯 (Auroral oval)」と呼ばれる特別な地域にのみ高い頻度です。磁軸極を中心に、太陽に対して昼側では地磁気緯度で 77~78 度、夜側では 69~70 度の低緯度側にずれた楕円形の地域にオーロラ出現の頻度が高い。高度は 90~110 km の高さに出現し、カーテ

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存科学計算機実験分野. E-mail: usui@rish.kyoto-u.ac.jp

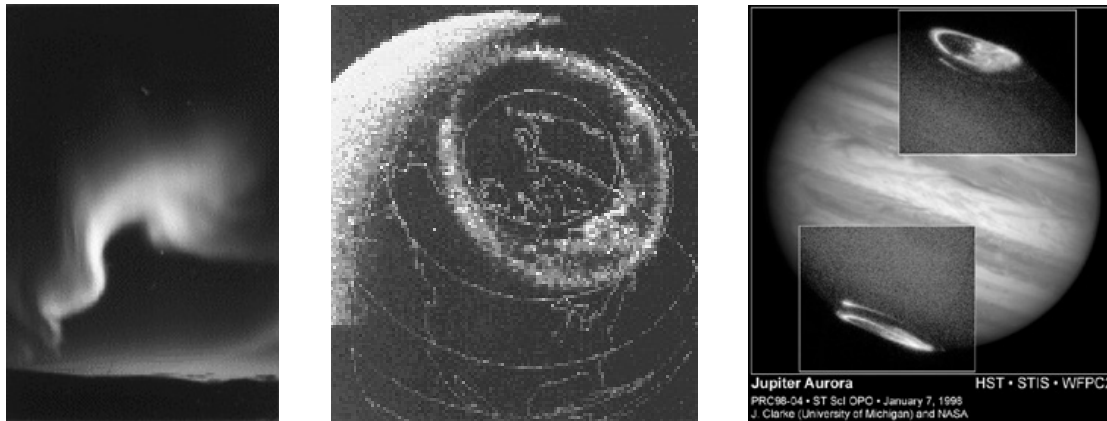


図 2：オーロラの姿（左：地上から、中央：宇宙から、右：木星のオーロラ）

ンの高さは 100 km 程度が通常である。水平方向の長さも、数百 km から 1,000 km をこえ、5,000 km に達するものまでである。この神秘的なオーロラは、実は太陽風と地球磁気圏の相互作用によって生じるダイナミックな現象である。詳細は省くが、磁気圏に吹き付ける太陽風の変動に伴い磁気圏の尾部（地球から見て太陽と反対側）が圧縮を受け、磁気圏に一旦蓄積された太陽風エネルギーが放出される現象と密接に関係している。磁気圏内部で蓄積されたエネルギー開放があると極域につながった磁力線沿いに電子の高速流を発生させ、それが電離層形成領域とほぼ同じ高度で中性粒子と衝突しエネルギーを失います。同時に、衝突を受けた気体（酸素や窒素）はそのエネルギーレベルが上昇し（励起状態）、それが基底状態に戻るときにオーロラの発光が起こる。すなわち、太陽活動が活発なときはオーロラが起こりやすいわけである。

このように、宇宙環境は静的なものではなく、まさに地球上の天気のように常に変動している¹⁾。このような観点から、近年では、太陽活動変動による地球近傍環境への影響を「宇宙天気」として研究することが世界的な動きとなっている。日本でも宇宙天気ニュースは毎日配信されており、インターネット経由で太陽活動や太陽風、オーロラ活動の状況が報告されているので、ご興味のある方は一度アクセスしてもらいたい (<http://swnews.nict.go.jp/swnews.html>)。

2.2 宇宙環境利用

アポロ計画によって人類が月に降り立ってから 40 年近くたち、その間にスペースシャトルの実用化、宇宙ステーションの建設、日本人宇宙飛行士の誕生など、宇宙は人類にとって確実に近くなってきた。また、通信衛星や GPS、気象衛星などの利用も日常的となり、宇宙はすでに我々の生活のインフラストラクチャーを支える生存基盤圏のひとつとなっている。今後、無重力や高高度観測などの利点を使って新素材開発や地球環境観測、資源探査など、宇宙環境の新しい利用もますます増えていくことは確実である。

宇宙環境利用のひとつとして本研究所が取り組んできているものとして、宇宙太陽発電所（Space Solar Power Station: SSPS）構想がある。これは、太陽エネルギーを宇宙で受けて電波に変換し、宇宙からその電波を地上に向けて送信し、それを地上でエネルギーとして利用する、というものである。昨今の報道で、エネルギー枯渇、人口増加、地球温暖化などの地球規模の問題が取沙汰されている。当研究所では、人類の持続可能型社会の実現にむけて、最先端技術を用いた解決方法を研究しており、そのひとつとして、太陽エネルギー利用に基づくクリーンな大型基幹電力供給源である SSPS の実現を目指し、その基盤研究、特に電波によるエネルギー伝送技術開発や宇宙環境との相互作用などについて研究を行っている。

3. 宇宙太陽発電所 (SSPS)

3.1 SSPS 概略

宇宙太陽発電所 SSPS (Space Solar Power System) は宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力をマイクロ波に変換して送電アンテナから地球や宇宙都市の受電所に設置されるレクテナと呼ばれる受電アンテナへ伝送し、再び直流電力に戻す方式の発電所である(図3 参照)。この SSPS は、地球上のエネルギー不足を補い、放射性廃棄物問題を抱える原子力発電所の不足を補い、環境破壊や地球温暖化をもたらす火力発電所に代わる大型基幹電力供給源となり得るものとして 1968 年に米国のピーター・グレーザーによって提案された²⁾。SSPS は太陽エネルギーを利用する発電であるため、温暖化ガス抑制に大きく貢献できると考えられる。

SSPS では無線による電力伝送技術が重要である³⁾。SSPS は上空 36,000 km の静止衛星軌道をとおり、それから地上に向かって無線送電を行う。地上の受電側ではマイクロ波をレクテナと呼ばれる整流アンテナで再び電気エネルギーに再変換して利用する。マイクロ波は ISM バンド(産業・科学・医療用バンド)である 2.45 GHz や 5.8GHz の周波数を用いることが検討されている。SSPS の基盤技術であるマイクロ波送電は 1960 年代以降、様々な研究・実証実験が行われてきた⁴⁾。1960 年代、70 年代の研究の中心はアメリカの W. C. Brown であったが、1980 年代以降は本研究所の研究グループが研究の中心となり、世界初のマイクロ波送電ロケット実験 MINIX や無燃料飛行機へのマイクロ波送電実験 MILAX 等を実施してきた⁵⁾。本研究所では文部科学省の中核的研究機関 (COE) プログラムの一環の支援を受け、SSPS を目指した大型マイクロ波送受電実験装置 METLAB (Microwave Energy Transmission Laboratory) や SPSLAB (SPS Laboratory) を導入し、研究拠点として研究を推進して

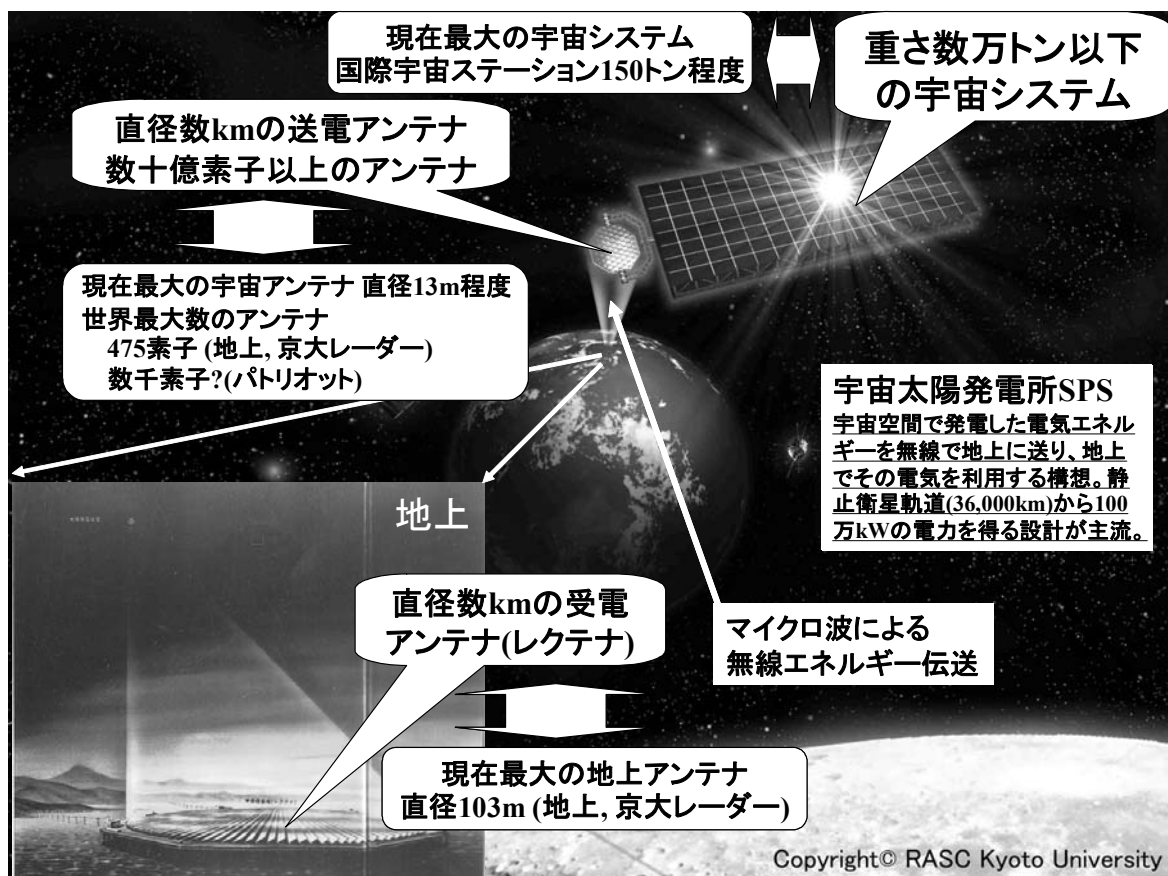


図3: 宇宙太陽発電所 SSPS の概念図と特徴

いる。近年は本研究所で開発した新方式のマイクロ波送電システムをベースとした SPORTS2.45, SPORTS5.8 (Space Power Radio Transmission System) と呼ばれるマイクロ波送受電システムを導入し、マイクロ波送受電の基礎実験を進めている。本研究所の SSPS 研究グループは 2002 年度から文科省で導入された 21 世紀 COE プログラムにも選ばれ、SSPS の研究拠点化が進んでいる。

3.2 マイクロ波ビームの電離層プラズマ環境への影響

SSPS において考慮しなければならない問題のひとつに、マイクロ波ビームによる地球の電磁環境、特に電離層への影響評価があげられる。電離層プラズマに対するマイクロ波ビームの影響としては、①中性粒子と電子の衝突による電子加熱、密度擾乱。マイクロ波ビームの熱的自己収縮現象 ②非線形効果による低周波プラズマ波動励起 ③ポンデロモータYP非線形力による密度擾乱、ビームの自己収束現象などが考えられる。

①は、過去に Perkins and Roble⁶⁾ によって線形理論的考察がなされているが、SSPS モデルでの実験的検証は行われていない。予想される現象としては、以下の通りである。

電離層を伝搬する電波は電子がイオンや中性粒子と衝突することによって吸収を受けるとともに、吸収された電波のエネルギーは電子の加熱エネルギーとなる。この電子加熱によりマイクロ波ビームの自己収縮(熱的自己収縮)が生じる。すなわち、電子密度ゆらぎが生じると電波屈折のため電子密度の薄いところに電波が収束するようになり、その結果密度の薄いところでさらに電界が強くなる。そこでは電子加熱が強く、電子が膨張し密度はますます薄くなる。逆に電子密度の濃いところでは、電界強度は弱く加熱も弱く、相対的に密度は濃くなる。このような増幅作用によって不安定が生じ電子の不規則分布構造を伴って電波の自己収縮(フィラメンテーション)が起こる。これを電波の熱的自己収縮と呼ぶ。これらの現象に関しては過去にいくつかの研究がなされている。

②に関しては、大振幅電磁波とプラズマとの非線形相互作用であり、これまで京都大学 生存圏研究所のスペースプラズマ・グループを中心として研究が進められてきた⁷⁾。電離層プラズマ中を強いマイクロ波が伝搬する場合、非線形結合を経てマイクロ波のエネルギーの一部が種々のモードのプラズマ波に変換される。その結果、ラングミュア波などのメガヘルツ帯の低周波波動が発生、成長してゆく。この現象は非線形 3 波共鳴現象の一種である。1982 年

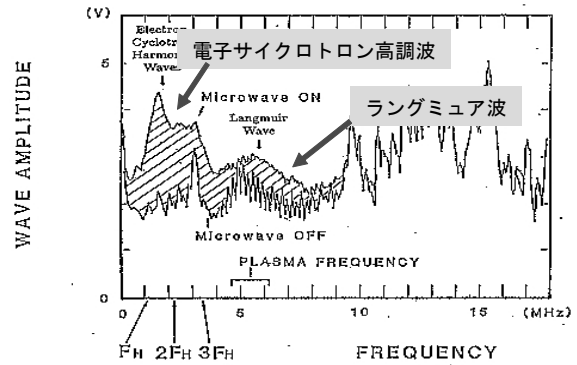


図 4: MINIX ロケット実験で観測された波動スペクトラム

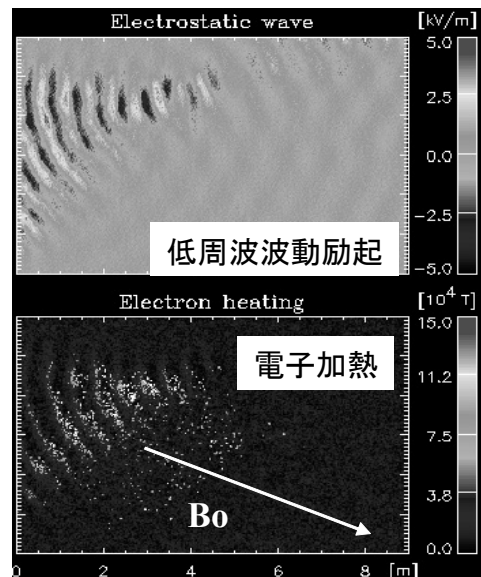
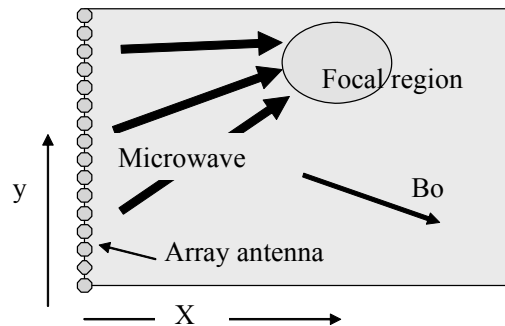


図 5: 2 次元計算機実験モデル(上図)、低周波(MHz 帯)プラズマ波動励起(中図)とそれに伴う電子加熱(下図)

に行われた MINIX ロケット実験においてこの現象は観測された。図 4 には MINIX ロケット実験で観測された波動スペクトルを示す。親ロケットに搭載された 830 W のマグネトロン 2 基から 2.45 GHz マイクロ波を電離層に放射し、切り離された子ロケットによりスペクトルを観測した。図からわかるように、マイクロ波放射時には MHz 帯のラングミュア波と電子サイクロトロン高調波に相当する波動が強く受かった。この結果は大振幅マイクロ波放射による非線形 3 波共鳴現象を示唆している。この現象をより定量的に解析するため、電磁粒子コード KEMPO (Kyoto university ElectroMagnetic Particle cOde)⁸⁾ を用いた宇宙プラズマ計算機実験が行われた。図 5 にモデルとその結果を示す。2 次元空間の左に並べられたアレイアンテナからマイクロ波に相当する大振幅電磁波を放射し、ある領域に集中させる。図 5 の中図、下図はそれぞれ 3 波共鳴によって励起された低周波波動の空間分布とそれによって加熱された電子の様子をスナップショット的に示したものである。この低周波励起の時間的な成長率はマイクロ波の周波数、強度、地球磁場との角度などに依存する。マイクロ波の周波数は大きいほど成長率は小さくなる。また、当然ながら、マイクロ波の強度が大きければ、成長率は大きくなり、低周波波動は発生しやすくなる。図 5 に示した計算機実験では、現象を見やすくするためマイクロ波の強度を SPS で想定されている場合の数百倍大きい (60,000 V/m) ものをを用いた。この場合、数十マイクロ秒で電子加熱が発生するが、電界強度を下げて SPS の場合を想定すると、同じような現象が起こるには数百ミリ秒かかる。問題はこの現象によりマイクロ波エネルギーの何% が低周波波動や電子加熱に費やされるかであるが、上に延べた理論解析によると、エネルギー消失という観点からも、余計な波動の励起という観点からも実用上ほとんど問題はないと思われる。しかし、その発生レベルを事前に検証し、発生メカニズムを解明することは非常に重要であり、電離層環境への影響とともに今後計算機シミュレーションによる定量的な解析を進める必要がある。また、電離層の電子密度も太陽活動度や季節により変動しており、この密度変動も考慮に入れてマイクロ波と電離層の相互作用を考える必要がある。

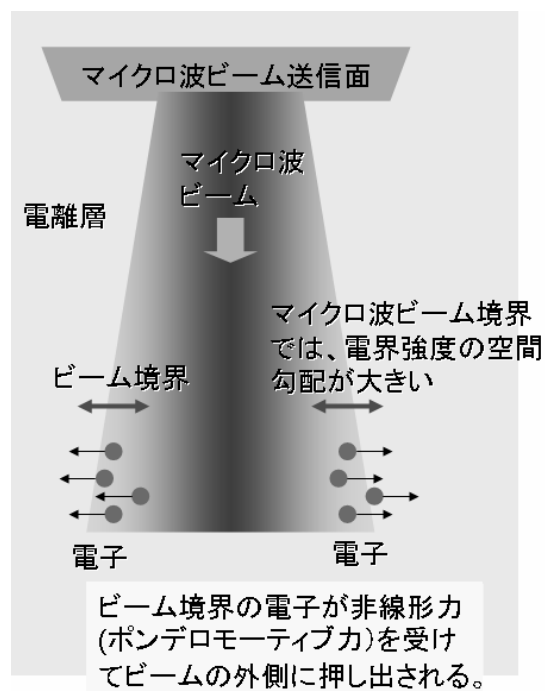


図 6：マイクロ波ビーム境界における電界強度の空間勾配によるポンデロモーティブ力

③については、上記グループで平成 16 年度から調査している。大振幅マイクロ波がプラズマ中を伝搬していく際に生じるマイクロ波電力密度ゆらぎの成長やマイクロ波ビームの自己収束には、上述のプラズマ加熱に起因するもの以外にマイクロ波電力密度の空間勾配の存在により発生するポンデロモーティブ力という非線形力によるものがある。熱的自己集束現象はプラズマ密度に比例するため電離層以外の宇宙空間では問題は発生しにくい。しかし、マイクロ波ビームの強度の空間勾配によって発生するビームの自己集束現象はビームの強度の空間勾配によって大きく発生することがあり、電離層以外でも発生する可能性がある」と理論的に予測されている。この不安定性が生じると、マイクロ波ビームの自己収束によりビーム中心のマイクロ波強度が仮定したものより強くなり、電離層の加熱の問題や地上での強い電力密度の問題が発生する可能性がある。

ポンドロモーティブ力については、レーザー加速器や核融合の分野では、多くの研究がなされているが、このマイクロ波ビーム強度の空間勾配によって発生するポンドロモーティブ力による電離層プラズマ密度擾乱現象 (図6 参照) については、いまだ詳細な研究はなされていない。そこで、マイクロ波ビームによって発生するポンドロモーティブ力が電離層電子に与える影響についての基礎的な理解を深めるために計算機シミュレーションを開始した。

電界強度に空間勾配をもつ高周波数の電磁波がプラズマ中を伝搬すると、その領域内の荷電粒子にはポンドロモーティブ力と呼ばれる非線形力が働く。高周波電界を $E(x, t) = E_0(x) \cos \omega t$ としその中の置かれた荷電粒子の運動を考える。電界振幅 E_0 が空間の滑らかに変化する関数であり、左側が弱く、右側が強い場合を考える。粒子は電界による振動で電場の強い領域にはいると左向きに強く押されることになる。電場の向きが変わると粒子は電場の弱い領域に入るために右向きに押される力はそれほど強くない。その結果、1 周期後粒子は左に変位する。これが次々の周期で繰り返され、粒子は電場の強い領域から遠ざかる向きに加速され続ける。すると電界の強い領域からプラズマ粒子が逃げていき、電界の強い領域のプラズマ密度が下がる。

ポンドロモーティブ力 F_p は以下の式で表すことができる。

$$F_p = -\frac{q_e^2}{4m_e \omega^2} \frac{d}{dx} (E_0^2) \quad (1)$$

式 (1) において、 m_e , q_e は電子の質量と電荷量、 ω は電磁波の周波数、 E_0 は荷電粒子の位置での電界をそれぞれ示す。マイクロ波ビームでは一般に、ビーム中心を原点とする極座表系においては径方向内向きのベクトルと考えられるので、ビーム伝搬領域の電子やイオンには径方向外向きにポンドロモーティブ力が作用する。そのためポンドロモーティブ力により電子やイオンは次第にビーム中心から外向きに変位し、結果としてビーム領域のプラズマ密度が減少することが予想される。計算機シミュレーションでは、長年にわたり京大生存圏研究所スペースプラズマシミュレーション研究グループにおいて開発されてきた 3 次元電磁粒子コード KEMPO3D (Kyoto university's ElectroMagnetic Particle cOde、図7 参照) を用いる。この KEMPO3D は、空間をグリッドで実現し、荷電粒子に対しては運動方程式、電磁界に対してはマクスウェル方程式(及びポアソン方程式)を自己矛盾なく解き進

3次元電磁粒子コード

KEMPO3D (Kyoto university's ElectroMagnetic Particle cOde)

を使用。

基礎方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}_s}{\partial t} &= \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_s \times \mathbf{B}) \\ \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial t} &= \mathbf{v}_s \end{aligned} \right\} \text{粒子に対しては運動方程式}$$

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{電磁界についてはMaxwell方程式}$$

図7: KEMPO3D シミュレーションコードで用いられる基本方程式

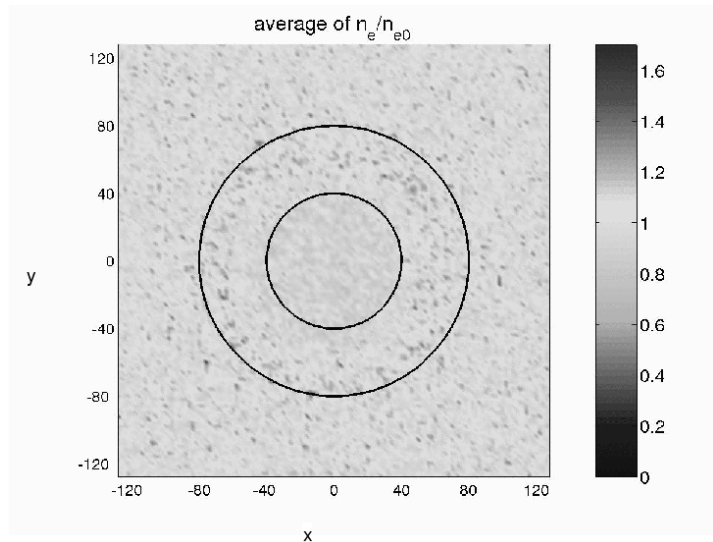


図8: ポンドロモーティブ力によるプラズマ擾乱の例

めて行くプログラムである。

図8に計算機シミュレーション結果の一例を示す。図はプラズマの密度のコンター図であり、紙面垂直方向にマイクロ波ビームが伝播している。内側の円内部がビーム強度一定で内外の円の間がマイクロ波強度の空間勾配が存在する領域である。コンター図の色の違いからわかるように、強度に空間勾配を持つマイクロ波中では、プラズマにポンデロモータティブ力が作用し、それにより電界強度の強い領域からより弱い領域、すなわちビーム中心から外側にプラズマが押し出されてその密度に擾乱が発生することが分かった。現在、SSPSのパラメータや電離層での実証実験衛星のパラメータを用いて、ポンデロモータティブ力による電離層密度擾乱に関する定量評価を行っている。

3.3 SPS 建設に伴う宇宙環境への影響

マイクロ波ビームとは直接関係はないが、SPS 輸送時に用いる電気推進エンジン、たとえばイオン推進エンジンから放出されるキセノンやアルゴンなどの重イオンによる地球磁気圏、プラズマ圏への影響は無視できない。Chiu (1980)⁹⁾によると、SPS を LEO から GEO へ輸送する場合、イオン推進エンジンから総量で 106 kg のアルゴンが放出され、これは高度 500 km 以上の電離圏、プラズマ圏に存在するイオン総量に匹敵すると算出している。この重イオン放出とプラズマ圏、磁気圏プラズマとの相互作用によりプラズマ不安定性が予想され、その結果、プラズマショック構造の形成、低周波波動の励起、電子加熱などの現象が生じる。これらの点について、理論予測、計算機シミュレーション解析が開始されている。また、放出された重イオンは太陽活動変動によって生じるサブストームなどにより拡散すると予想されるがその時間的変化、空間分布についても今後なんらかの手法により調べていく必要がある。

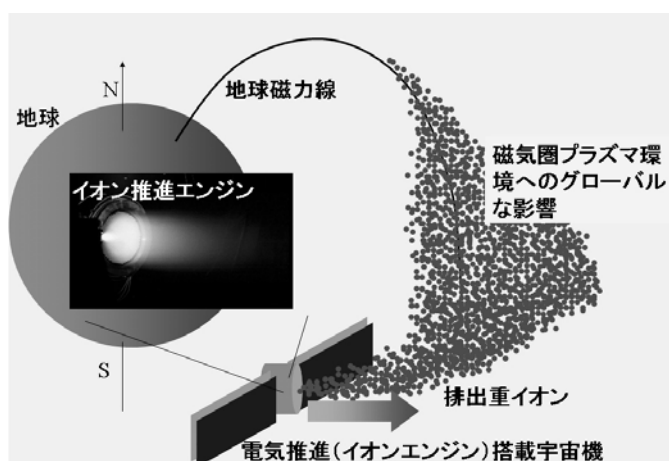


図9：SSPS 軌道間輸送に使われるイオン推進エンジンによる磁気圏環境への影響

3.4 宇宙環境からの影響

前章において動的な宇宙環境について述べたが、宇宙利用においてはこの動的な宇宙環境の影響を考慮する必要がある。これまで、衛星設計において放射線や熱放射対策が恒常的な問題として対処されてきたが、これに加えて、宇宙プラズマとの相互作用による衛星帯電や放電についても長年問題となってきた。衛星帯電の度合いは衛星表面からの光電子放出、2次電子放出の量と衛星に流れ込む周辺プラズマの量に大きく依存する。すなわち、衛星帯電は、衛星の表面形状、素材だけでなく、宇宙プラズマ環境に影響を受ける。衛星の各部位がすべて接地されており等電位であれば放電の可能性は少ないが、金属だけでなく誘電体なども素材として用いられるため、衛星表面において部分的に帯電値が違う場合がある。この電位差がある閾値を超えると、その電位差を緩和するために回りに存在するプラズマを通じて急激な放電が生じ、衛星システムに障害を与える原因となる。このような衛星障害を未然に防ぐために、部分帯電を最小限に防ぐ衛星表面素材の工夫や、プラズマを衛星から噴射して衛星の帯電量を調節する装置の搭載などが行われている。しかし、これらの試みも万全ではなく、宇宙プラズマ環境の急激な変動が原因となって生じる帯電・放電、それによる衛星システム障害が依然としてあとを絶たない。特に、上に述べたオーロラ領域における急激な高エネルギー電子流の影響や、放射線帯と呼ばれる高エネルギープラズマが存在する領域を通過する衛星に帯電・放電による障

害が多い。今後、衛星システムの大規模化に伴う高電圧化、高電力化によって、ますます宇宙プラズマとの相互作用が懸念される。SSPS においては、これまでにない超大型太陽電池パネルの利用により高電力システムとなる。この場合における帯電問題についても事前の対処が必要となる。

4. まとめ

本稿では、人類の生存基盤領域となりつつある地球近傍の宇宙環境について概説し、そこでの宇宙利用のひとつとして宇宙太陽発電所 SSPS について簡単に説明した。また SSPS と宇宙環境との相互作用として、SSPS から無線電力伝送のために用いられるマイクロ波ビームによる電離層大気への影響に関する計算機シミュレーション研究を紹介した。マイクロ波が電離層プラズマを通過する際に、プラズマのオーム加熱に加えて、大振幅マイクロ波と電離層プラズマとの非線形相互作用として、低周波静電波動の励起現象やマイクロ波のセルフフォーカス作用、プラズマの穴開き現象などがあげられる。これらは理論的に予測されているものであり、その現象も理解され始めている。しかし、実際の物理現象としてロケット実験など、電離層中の現象として確認されているのは低周波静電波動の励起現象だけである。その他の現象は理論予測または実験室レベルでの確認にすぎない。これまで Perkins らにより電離層でのビーム電力密度として 23 mW/cm^2 の閾値が得られており、リファレンスモデルにも採用されているが、この閾値は電子衝突による加熱という観点から得られたものである。今後この値の正当性について計算機シミュレーションなどの数値的手法を通して議論する一方、マイクロ波と電離層プラズマとの相互作用を最小限に抑え高効率なマイクロ波エネルギー伝送を実現するための基礎データ取得のために、電離層における実証実験を早急に実現する必要がある。

参考文献

- 1) 恩藤忠典、丸橋克英、宇宙環境科学、オーム社、2000.
- 2) Glaser, P. E.; "Power from the Sun; Its Future", Science, **162**, 857-886, 1968.
- 3) 電波研究所季報：太陽発電衛星 (SPS) 特集号, 電波研究所, **28(148)**, Dec. 1982.
- 4) Brown, W.C.; "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, No. 9, 1230-1242, 1984
- 5) Matsumoto, H., "Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan: Review and Perspectives", IEEE Microwave Magazine, 36-45, Dec. 2002.
- 6) Perkins, F. W. and R. G. Roble, "Ionospheric heating by radio waves; predictions for Arecibo and satellite power station", JGR, No. 83, 1611-1624, 1978.
- 7) Usui, H., H. Matsumoto, R. Gendrin, and T. Nishikawa, Numerical simulations of a three-wave coupling occurring in the ionospheric plasma, Nonlinear Processes in Geophysics, **9**, 1-10, 2002.
- 8) H. Matsumoto, Y. Omura, Computer Space Plasma Physics, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 21-65, 1992.
- 9) Chiu. Y. T., Fate of argon-ion injection in the magnetosphere, AIAA-80-0891, 1980.

熱帯大規模一斉植林における生物多様性の確保*

吉村 剛**, 服部 武文***, 竹松 葉子****

Conservation of biodiversity in the tropical plantation forest*

Tsuyoshi Yoshimura**, Takefumi Hattori*** and Yoko Takematsu****

概要

大規模一斉植林の生物学的影響、すなわち森林の攪乱レベルを評価するための指標生物としてシロアリが有用であることが明らかになった。*Acacia mangium* 材を例とした場合、耐朽・耐蟻性能を向上させるための第一段階の方策として、立木における微生物との共生関係の詳細な解析および心材・根腐朽や虫害の発生機構の解明がまず必要である。

1. はじめに

熱帯の天然林が生物多様性に最も優れていることは言うまでもない。そこでは途方もない数の生物種が食物連鎖の中で互いに作用を及ぼしながら、全体として健全な森林生態系を維持し続けている。このような生態系の中では病害虫の大発生というものは生じ難い。言い換えれば、一斉植林における最も大きな生物的脅威である病害虫の大発生というものは、天然林においては生物多様性によって担保されているということになる。つまり、生物多様性の正確な把握というものは、一斉植林における生物的健全さの評価につながるものであり、ひいては、一斉植林の持続的経営の可否に大きな影響を有するものであると言えるのである。

本稿では、まず熱帯の生物多様性評価における指標生物としてのシロアリの可能性について検討する。さらに、熱帯造林樹種として *Acacia mangium* を取り上げ、想定される病害虫と立木との相互作用、およびその対策と今後の研究の方向性について考えてみたい。

2. シロアリを用いた生物多様性評価

シロアリはその存在量の多さから熱帯の森林を代表する昆虫である¹⁾。熱帯に生息するシロアリはその食性から 3 つのグループに分類することができる。すなわち、①木材食シロアリ、②キノコ栽培シロアリ、および③土壌食シロアリである。前 2 者が森林の生態系における腐食連鎖に直接関与するのに対して、後者は土壌環境の改変に関わるエコシステムエンジニアとしての大きな役割を有している²⁾。すなわち、これら 3 グループは熱帯の物質循環において異なった役割を有しており、環境の攪乱に対しても異なった反応を示すと推定されるのである。したがって、ある地域に生息するシロアリ相を標準的な方法で調査し、グループ分けすることによって環境の攪乱レベルを比較することが可能

* 2007 年 7 月 9 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

*** 〒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

**** 〒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

になると考えられるのである。

筆者らは、これまでに 100 m x 2 m のベルトトランセクトを用いたシロアリ相の調査を実施した。その結果、東南アジア熱帯林において伐採・山火事等による攪乱からの回復度合いと土壌食シロアリの多様性との間に明確な相関が認められ（竹松、未発表）、熱帯における一斉植林と生物多様性に関する空間的・時間的考察にシロアリ相の調査が有用であると考えられる。熱帯人工林の適切なデザインを考える上で、今後の重要な研究テーマであろう。

3. *Acacia mangium* を例とした微生物および昆虫との相互作用

3.1 *Acacia mangium* における微生物との相互作用

A. mangium が様々な自然環境において生育できる一つの理由は、窒素固定菌である *Bradyrhizobium* 属菌と共生しているからである。また、アーバスキュラー菌根菌との共生も、特にリン欠乏の環境下においては重要性が高いと指摘されている³⁾。さらに、外生菌根菌との共生に関する報告もある⁴⁾。今後の研究の方向として、これらの菌と *A. mangium* との共生相互作用における分子機構を解明し、共生力を向上させた形質転換樹木の作出を試みる事が挙げられる。一方、*A. mangium* は *Phellinus* 属、*Trametes* 属、*Fomes* 属などにより激しい心材腐朽を受けることが知られており、マレーシアにおいて 7 年生では 50% という高い被害率が報告されている⁵⁾。また、*Phellinus* 属、*Ganoderma* 属、*Rigidoporus* 属などによる根腐朽も発生頻度が高く、例えば *Ganoderma* 属による赤色根腐れ病は最大 30% の枯損被害が報告されている⁶⁾。さらに、木材そのものも低い耐朽性しか示さない⁷⁾。興味深い事に、*A. auriculiformis* および *A. auriculiformis* と *A. mangium* のハイブリッドには心材腐朽は発生しないことから⁵⁾、腐朽機構を分子レベルで解明することによって、将来の目標の一つとして、耐朽性を向上させた形質転換樹木の作出に基礎知見を供給できると考える。

3.2 *Acacia mangium* における昆虫との相互作用

A. mangium の耐蟻性は低く、立木および木材の状態でもシロアリによって激しい被害を受ける。例えば、ペナン市マレーシア理科大学キャンパス内の植栽木のうち 87.5% がシロアリによる被害を受けており（Lee、未発表）、植林地においても最大 23% という *Coptotermes curvignathus* による被害率が報告されている⁸⁾。同シロアリを用いた野外試験ではゴムノキやオウシュウアカマツとほぼ同程度の激しい質量減少を示し、また、イエシロアリを用いた強制摂食試験ではゴムノキと同程度の耐蟻性しか観察されなかった⁹⁾。シロアリ被害は心材腐朽と共存していることも多く、立木も木材も穿孔性昆虫による被害が多い¹⁰⁻¹¹⁾。木材としての持続的利用を図るためには、耐蟻性の改善は不可欠の課題である。

参考文献

- 1) 安倍琢哉, シロアリの生態—熱帯の生態学入門, 東京大学出版会, 156pp., 1989.
- 2) 陀安一郎, 住まいとシロアリ (今村祐嗣他編), 海青社, 174pp., 2000.
- 3) Weber, J., Ducouso, M., Tham, F.Y., Nourissier-Mountou, S., Galiana, A., Prin, Y. and Lee, S.K., Co-inoculation of *Acacia mangium* with *Glomus intraradices* and *Bradyrhizobium* sp. in aeroponic culture, *Biol. Fertil. Soils*, **41**, 233-239, 2005.
- 4) Duponnois, R., Founoune, H. and Lesueru, D., Influence of the controlled dual ectomycorrhizal and rhizobal symbiosis on the growth of *Acacia mangium* provenances, the indigenous symbiotic microflora and the structure of plant parasitic nematode communities, *Geoderma*, **109**, 85-102, 2002.
- 5) Ito, S. and Nanis, L. H., Survey of Heart Rot on *Acacia mangium* in Sabah, Malaysia, *Japan Agricultural Research Quarterly*, **31**, 65-71, 1997.
- 6) 山口和穂, 中部ジャワ州ウオノギリ郡の試験地におけるアカシヤマンギウムの赤色根腐れ病の発生と拡大

経過について, 海外林木育種技術情報 1, **13**, 9-11, 2004.

- 7) Yamamoto, K., Nhan, N. T. and Bich D. T. N., Decay resistance of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid *Acacia* wood, *Abstracts of International Symposium on Sustainable Utilization of Acacia mangium*, Oct. 21-22, 2003, Kyoto, Japan, 151-154.
- 8) Kirton, L. G., The pest status of the termite *Coptotermes curvignathus* in *Acacia mangium* plantations: incidence, mode of attack and inherent predisposing factors, *J. Trop. For. Sci.*, **11(4)**, 822-831, 1999.
- 9) Grace, J. K., Wong, A. H. H. and Tome, C. H. M., Termite resistance of potential forest plantation woods in Malaysia, *Proceedings of the Fourth Conference on Forestry and Forest Products Research 1997*, 386-391, 1997.
- 10) Intachat, J. and Kirton, L. G., Observation on insects associated with *Acacia mangium* in Peninsular Malaysia, *J. Trop. For. Sci.*, **9(4)**, 561-564, 1997.
- 11) Ho, Y. F. and Omar, M., Insect pests of *Acacia mangium* timber, *J. Trop. For. Prod.*, **1(2)**, 113-116, 1995.

アカシア属に関するノート*

黒田 宏之**

A note for genus *Acacia**

Hiroyuki Kuroda**

概要

マメ科植物のアカシア属は、0.5 m 程度の低木から 35 m 程度の高木までの木本で、1,400 種近くの記載がある。分子系統樹などの研究から、この属は系統の異なる 3 つの属と、種の数が少ない 2 つの属に分ける必要があると考えられている。一番樹種の多いグループは、1,000 種近く存在し、大半がオーストラリア大陸に分布する。このグループの多くは乾燥地からやや湿潤な地域に分布する。しかし、アカシアマングium (*Acacia mangium*) のように、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樹種もある。熱帯地域では、短伐期で収率よく木材生産できる *A. mangium* と *A. auriculiformis* の雑種は、パルプ用材ほかの利用開発が期待されている。

1. はじめに

熱帯雨林を切り開いたアグロフォレストリーの歴史はゴム園などに代表されるように比較的古い。アカシアマングiumは、当初、熱帯林を切り開いて生じた荒地を回復させるための緑の先兵、いわゆるパイオニアプラントと位置づけられていたが、現在では短いサイクルでのバイオマス収穫用資源となっている。ここでは、アカシア属全体を概観することで、この樹種の新たな可能性が浮かび上がるのではないかと考え、アカシア属全体の分類、用途、分布・植生などについて概観することにした。

2. アカシア属の分類

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。アカシア属は南極と欧州を除く全ての大陸に分布し、1,400 種近い記載がある¹⁾。しかし、この属は単一の系統群ではない¹⁻²⁾。すなわち、3 つの亜属(約 160 種の *Acacia* 亜属、約 200 種の *Aculeiferum* 亜属、約 960 種の *Phyllodineae* 亜属)と、1 つの節(*Filicinae* 節: 15 種)、1 つの属 (Genus x (*A. coulteri* group): 13 種) の混ざった人為的分類群である。前 3 亜属のうち、最大の *Phyllodineae* 亜属の大部分はオーストラリアに分布する。また、後 2 者の分布域はメキシコや中米が中心となる。分子系統学的分類が確定した樹種は一部に過ぎない。また、命名法についても問題がある。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。すなわち、オーストラリア産を中心とするアカシア群は *Racosperma* 属となるはずだった。しかし、オーストラリア産のアカシア群を *Acasia* 属と名付けたグループが命名規約の例外適用を主張し、このアカシア群 (*A. mangium* を含む) を *Acasia* 属と命名

* 2007 年 7 月 18 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

する手続きを進めたため、現在、激しい論争が展開されている¹⁻²⁾。また、アカシアマンギウムとハイブリッドをつくる *A. auriculiformis* の樹種名は、少し古い記述では他の樹種と混同されていた³⁾。

3. アカシア属の用途

3.1 タンニンとゴム^{3, 5)}

広義のアカシア属の主な用途は、花の観賞用、雑草駆逐用、飼料用、砂防用、染料用のほか、Wattle と呼ばれるように、多くは柴木として用いられてきた。多くのアカシア樹皮はタンニン原料となり、*A. mearnsii* (南アフリカ) は、タンニン含量が樹皮の 30-54% にも及ぶ代表的ななめし皮や食用タンニンの原料である。また、アカシア属には樹液や茎がガム質の原料となる樹種が多く存在する。たとえば、セネガルからエチオピアにかけての乾燥地域に生育する *Acacia senegal* (アラビアゴムノキ) の樹液は、丸剤、乳剤、糊料、錠剤、アイスクリームなどの粘着剤として用いられるアラビアゴムの原料として有名である。*A. campylacantha* は、キャンディの原料となる良質な粘着性のガムがとれる。

3.2 ファインケミカルス^{3,5)}

蜂蜜の蜜源として、*A. roemeriana* (メキシコおよびアメリカ西南部) は名高い。この属の花が香水 (Cassie Ancienne) の原料となる例は多いが、代表は、*A. farnesiana* (ギンネムアカシア; 亜熱帯および熱帯アメリカ) である。スミレの香りの *A. excelsa* は西オーストラリアでは最高級木材といわれる。そのほか、*A. pendula*、*A. rigens*、*A. microbotrya* の材には芳香があり、*A. glaucescens* では材と花から香水をつくる。伐採直後の *A. acuminata* 材は木イチゴジャムの香りがする。豆果を魚毒として用いている例に *A. falcata*、*A. penninervis*、*A. pennata* がある。タンニンの収斂作用や殺菌作用と関連して、収斂止血や胃薬用の民間薬として利用できる樹種が比較的多く記載されている。これ以外の薬用では、アフリカ南部の *A. xanthophoea* にマラリア解熱の効用があると言われる。スーダンの *A. nilotica* はハンセン病の治療に用いる。そのほか、生化学試薬や薬品として、「レクチン」のようなファインケミカルスの観点からの *Acacia* の新しい用途開発も考えられる。

3.3 バイオマス

アカシア属の中で、Phyllodineae 亜属の多くは乾燥地からやや湿潤な地域に分布し、湿潤地や熱帯雨林を代表する樹木とはならない⁴⁾。しかし、アカシアマンギウムや *A. auriculiformis* は、多くの Phyllodineae 亜属とは異なり、熱帯雨林の周辺にも分布できるため、分類の分子系統学的な再検討が待たれる。*A. mangium* は湿潤な環境や荒地にも耐え、高温や酸性土壌には強いが、亜熱帯気候やアルカリ性土壌では、成長は極端に低下する⁶⁾。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既に利用されている。注意点として、アカシア属は早く成長し土地を選ばないので、その移植、特に温帯地域でも生育可能な樹種の移植に関しては、地域の固有種を駆逐して繁茂する危険性が指摘されている。

参考文献

- 1) Orchard, A. E. and Maslin, B. R., The case for conserving *Acacia* with a new type, *Taxon* **54**, 509-512, 2005.
- 2) Luckow, M., et al., *Acacia*: the case against moving the type to Australia, *Taxon* **54**, 513-519, 2005.
- 3) <http://www.worldwidewattle.com/speciesgallery/home.php>
- 4) Boland, D. J., *Forest Trees in Australia*, Nelson-CSIRO, pp. 147-167, 1985.
- 5) 近藤典生監修 湯浅浩史・前川文夫編、「マメ科資源植物便覧」, 内田老鶴徳圃, 3-43, 1987.
- 6) Awang, K. and Taylor, D. eds, *Acacia mangium* Growing and Utilization, Winrock International and FAO, 35-57, 1993.

マメ科 *Acacia* 属樹木バイオテクノロジー研究の現況について*

鈴木 史朗**, 梅澤 俊明**,***

Recent advances of tree biotechnology in *Acacia mangium* (Fabaceae)

Shiro Suzuki** and Toshiaki Umezawa***

1. はじめに

グローバルな経済活動の活性化により、これまでになく人類は森林資源を大量に消費しており、森林資源の枯渇が危惧されている。また、化石資源の利用により二酸化炭素が大量に排出され、森林資源の減少とともに、地球温暖化に拍車をかけている。このような状況で、近年森林資源の重要性が増大しているのは言うまでもない。

熱帯は、日照量が多く年間を通じ気候が温暖で、樹木の成長量は総じて高い地域である。したがって、このような地域に成長が活発で、多目的用途に耐える早生樹を品種改良により創出し、大規模植林することにより、持続開発可能な森林資源を生産することが可能である。そして、こういった方法によって、増え続ける地球の人口を支えるだけの森林を維持し、地球環境破壊、資源枯渇による破滅的終局を防ぎ、持続的な社会へと導くことが可能であると思われる。

Acacia mangium は、オーストラリアからニューギニアにかけて自生するマメ科の常緑高木であるが、旺盛な成長性と耐貧栄養性が注目され、東南アジア各地で大規模に植林されている。今後も熱帯性早生樹として有望な *Acacia mangium* の樹木バイオテクノロジー研究が、上述のような戦略を進めるための基盤となるのは明らかである。

このような観点から、今回 *Acacia mangium* などの熱帯アカシアにおける樹木バイオテクノロジー研究の現況について概説してみたい。

2. *Acacia* spp. 樹木バイオテクノロジー

2.1 マイクロプロパゲーション・再分化系

Nanda ら¹⁾ は 10 年生の成熟した有節外植体を用いて Murashige & Skoog 培地で多芽体を誘導し、続いて発根培地に移植することにより確立した。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。Bhaskar と Subhash²⁾ は、8 年生の精英樹の有節外植体より同様にマイクロプロパゲーションを行っている。Xie と Hong³⁾ は外植体を若返り (rejuvenation) させた多芽体より、試験管内個体再生系を確立している。一方、Douglas ら⁴⁾ は、発芽させた苗の子葉の節を傷付け、そこから多芽体を得ている。Saito ら⁵⁾ は側芽をもちいて多芽体を得ている。Xie と Hong⁶⁾ は、以上のような organogenesis を経由しない、*Acacia mangium* の未熟種子から胚分化能を有するカルスを誘導し、体細胞胚発生を経由した個体再生系を報告している。

* 2007 年 7 月 15 日受理

** 〒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: shiro.suzuki@iss.iae.kyoto-u.ac.jp

*** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野
E-mail: tumezawa@rishi.kyoto-u.ac.jp

2.2 遺伝子導入

構成的な遺伝子導入に関しては、ミシガン工科大学の Kao⁷⁾ は、学位論文ではあるが、*Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis* について報告している。シンガポールの Xie ら⁸⁾ は *Agrobacterium* を介した *Acacia mangium* の形質転換を行い、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。また、一過性の遺伝子発現についても Quoirin ら⁹⁾ による報告がある。なお、最近の熱帯アカシア類の遺伝子導入・個体再生については Quoirin ら¹⁰⁻¹¹⁾、Rastogi と Dwivedi¹²⁾ の総説にまとめられている。

2.3 遺伝子解析

シンガポールの Wang ら¹³⁾ は、*Acacia mangium* の花特異的に発現する転写産物の単離とキャラクタリゼーションについて報告している。彼らは小規模ながら、花とその他の組織との間のサブトラクティブ cDNA ライブラリを作成し、1,123 個の EST を解析し、523 個の互いに異なる遺伝子を同定している。

参考文献

- 1) Nanda, R.M., Das, O., Rout, G. R., In vitro clonal propagation of *Acacia mangium* Willd. and its evaluation of genetic stability through PAPD marker, *Ann. For. Sci.*, **61**, 381-386, 2004.
- 2) Bhaskar, P., Subhash, K., Micropropagation of *Acacia mangium* Willd. through nodal bud culture, *Indian J. Exp. Biol.*, **34**, 590-591, 1996.
- 3) Xie, D., Hong, Y., In vitro regeneration of *Acacia mangium* via organogenesis, *Plant Cell Tiss. Org.*, **66**, 167-173, 2001.
- 4) Douglas G. C., McNamara J., *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant*, **36**, 412-415, 2000.
- 5) Saito, Y., Kojima, K., Ide, Y., 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., Hong, Y. Regeneration of *Acacia mangium* through somatic embryogenesis, *Plant Cell Rep.*, **20**, 34-40, 2001.
- 7) Kao, Y. Y., Genetic transformation of *Acacia mangium* cross *Acacia auriculiformis* and molecular characterization of phenylalanine ammonia-lyase in quaking aspen, Dissertation, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA, 2001.
- 8) Xie, D. Y., Hong, Y., *Agrobacterium*-mediated genetic transformation of *Acacia mangium*, *Plant Cell Rep.*, **20**, 917-922, 2002.
- 9) Quoirin, M., Franche, C., Koehler H., Transient expression of reporter genes introduced in tissues of two *Acacia* species using a biolistic method, *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant*, **38**, 487-492, 2002.
- 10) Quoirin, M., Franche, C., Duhoux, E., Gatiana, A., Advances in tissue culture and genetic transformation of four tropical *Acacia* species: *A. crassicarpa*, *A. mearnsii*, *A. mangium* and *A. albida*, *Recent Research Developments in Plant Physiology*, **3**, 7-25, 2002.
- 11) Quoirin, M., Galiana, A., Goh, D.K.S., Limanton, A., Gratio, V., Ahee, J., Rio, M., Oliveira, D., Duhoux, E., Franche, C., Progress towards the genetic transformation of four tropical *Acacia* species: *Acacia mangium*, *Acacia crassicarpa*, *Acacia mearnsii* and *Acacia albida*, *Forestry Sci.*, **66**, 161-178, 2000.
- 12) Rastogi, S., Dwivedi, U.N., Regeneration and genetic transformation of tree legumes with special reference to *Leucaena* species, *Focus on Biotechnology*, **10B**, 301-326, 2003.
- 13) Wang, X. J., Cao, X. L., Hong, Y., Isolation and characterization of flower-specific transcripts in *Acacia mangium*, *Tree Physiol.*, **25**, 167-178.

Acacia mangium と *Acacia auriculiformis* の化学成分調査*

梅澤 俊明** ***, 鈴木 史朗***

Chemical components of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis**

Toshiaki Umezawa** ***, and Shiro Suzuki ***

概要

Acacia mangium, *Acacia auriculiformis* および *Acacia* hybrid に関する化学成分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バイオマス資源に対する依存度の大幅上昇が必須であることは論を俟たない。特に樹木はバイオマス資源蓄積量の 95% を占めるので、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、木質のバイオエタノール・バイオエネルギーおよび材料へのカスケード型変換利用を総合的に図ることが必須となっている。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、「アカシアプロジェクト」の通称の下、研究所を挙げて取り組み始めた。主要な熱帯造林樹種としては、*Acacia mangium* と *Acacia auriculiformis* およびこれらのハイブリッド (*Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*, *Acacia* hybrid) が挙げられる。*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” 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いこと、さらに、本書の出版以降現在に至る過去 10 年間に *Acacia* spp. の利用は格段に進んでいる。

平成 18 年度には、アカシアプロジェクトの一環として、京都大学総長裁量経費に「熱帯人工林の環境貢献と持続的生産利用」を課題名として応募したところ、幸い採択された。そこで、この総長裁量経費研究では、熱帯人工林の環境貢献と持続的生産利用に関する研究基盤整備を第一の目的として、さまざまな基礎的文献調査を行うこととした。本項では、*A. mangium*、*A. auriculiformis* および *Acacia* hybrid に関する化学成分の文献調査結果について取りまとめる。

2. *A. mangium*、*A. auriculiformis* および *Acacia* hybrid 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 18 年 12 月 30 日) 210 文献がヒットした。このうち 2003 年以降の文献が 95 報、1995 ~ 2002 年の文献が 92 報、

* 2007 年 8 月 20 日受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野
E-mail: tumezawa@rishi.kyoto-u.ac.jp

*** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存基盤科学研究ユニット

1994 年以前の文献が 23 報であり、明らかに近年報文数が増加していることが見て取れる。これらの文献のうち、パルプ化関係が 22 報、化学成分関係が 14 報であり、*A. mangium* がパルプ化の実用に供せられていることを反映している。

化学成分関係 14 報の内容は、一般化学成分分析に関するものが 4 報¹⁻⁴⁾、リグニン構造に関するもの 1 報⁵⁾、多糖成分分析が 1 報⁶⁾、抽出成分関係が 8 報⁷⁻¹⁴⁾である。抽出成分関係 8 報のうち、セメント硬化阻害成分に関する総説が 1 報¹⁰⁾、タンニンの構造に関するもの 2 報^{7,8)}、心材腐朽抵抗性成分に関する報告が 2 報^{9, 14)}見られる。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、および心材腐朽が大きな問題となっていることを反映している。

2.2 *A. auriculiformis* と *Acacia hybrid*

一方、“*Acacia auriculiformis*” をキーワードとした場合 210 文献がヒットした (平成 18 年 12 月 30 日)。このうち 1999 年以降の文献が 99 報、1998 年以前の文献が 62 報であり、*A. mangium* と同様近年報文数が増加しているようである。これらの文献のうち、パルプ化関係が 7 報¹⁵⁻²¹⁾、化学成分関係が 31 報²²⁻⁵²⁾である。

化学成分関係 31 報の内容は、一般化学成分分析に関するものが 7 報²²⁻²⁸⁾、タンニン・ポリフェノール・フラボノイドに関するもの 4 報²⁹⁻³²⁾、生理活性成分関係 3 報³³⁻³⁵⁾、糖分析が 5 報³⁶⁻⁴⁰⁾、トリテルペン・サポニン関係が 11 報⁴¹⁻⁵¹⁾、トリグリセライド関係 1 報⁴¹⁻⁵²⁾である。サポニン関連の文献が比較的多いのが特徴的である。

“*Acacia hybrid*” をキーワードとした場合 6 文献がヒットした (平成 18 年 12 月 30 日)。このうち化学成分関係といえるのは、パルプ化に関するもの 1 報⁵³⁾であった。

2.3 まとめ

A. mangium、*A. auriculiformis* および *Acacia hybrid* の化学成分については、総合的な成分分析はいまだなされていない。今後これらの樹種の利用を一層進めるなら、成分表を確立しておくことが必要であろう。特に化学成分がかかわるさまざまな形質、例えば心材腐朽抵抗性、の原因遺伝子を単離するためには、まず網羅的成分分析が必要となる。

参考文献

- 1) Lee, Y.L., Kubota, M., Saito, N., Minemura, N., Chemical components and photoinduced discoloration of wood from Malaysia, *Rinsan Shikenjoho* (Hokkaido, Japan), **3**, 1-5, 1989.
- 2) Mansor, H., Preliminary studies on the chemical composition of sound and decayed wood of *Acacia mangium*, *Pertanika*, **12**, 405-408, 1989.
- 3) Fidel, M.M., Tamayo, J.P., Chemical properties of *Acacia mangium*: implications for pulp and paper production, *FPRDI J.*, **25**, 107-114, 2003 (Volume data 1999)
- 4) Pinto, P.C., Evtuguin, D.V., Pascoal N.C., Chemical Composition and Structural Features of the Macromolecular Components of Plantation *Acacia mangium* Wood, *J. Agric. Food Chem.*, **53**, 7856-7862, 2005.
- 5) Akiyama, T., Goto, H., Nawawi, D.S., Syafii, W., Matsumoto, Y. Meshitsuka, G., *Erythro/threo* ratio of β -O-4-structures as an important structural characteristic of lignin. Part 4: Variation in the *erythro/threo* ratio in softwood and hardwood lignins and its relation to syringyl/guaiacyl ratiom *Holzforschung*, **59**, 276-281, 2005.
- 6) Willfoer, S., Sundberg, A., Pranovich, A., Holmbom, B., Polysaccharides in some industrially important hardwood species, *Wood Sci. Technol.*, **39**, 601-617, 2005.
- 7) Cespedes, R., Chacon, S., Mora A., Luis, Study of the content of tannin extracts of some plants in Costa Rica., *Ingenieria y Ciencia Quimica*, **14**, 6-10, 1992.
- 8) Jackson, F.S., Barry, T.N., Lascano, C., Palmer, B., The extractable and bound condensed tannin

- content of leaves from tropical trees, shrubs and forage legumes, *J. Sci. Food Agric.*, **71**, 103-116, 1996.
- 9) Lange, W., Hashim, R., The composition of the extractives from unaffected and heartrot-affected heartwood of *Acacia mangium* Willd. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **59**, 61-66, 2001.
 - 10) Yasuda, S., Matsushita, Y., Cement-hardening inhibitory components in wood and its countermeasures, *Mokuzai Kogyo*, **58**, 252-257, 2003.
 - 11) Pietarinen, S., Willfoer, S., Holmbom, B., Wood resin in *Acacia mangium* and *Acacia crassiparpa* wood and knots, *Appita J.*, **57**, 146-150, 2004.
 - 12) Pietarinen, S.P., Willfor, S.M., Sjöholm, R.E., Holmbom, B.R., Extractives in *Acacia mangium* and *Acacia crassiparpa* stemwood and knots, *Appita Annual Conference and Exhibition*, **58th(Vol. 2)**, 557-564, 2004.
 - 13) Pietarinen, S.P., Willfoer, S.M., Sjöholm, R.E., Holbom, B.R., Bioactive phenolic substances in important tree species. Part 3: knots and stemwood of *Acacia crassiparpa* and *A. mangium*. *Holzforschung*, **59**, 94-101, 2005.
 - 14) Mihara, R., Barry, K.M., Mohammed, C.L., Mitsunaga, T., Comparison of Antifungal and Antioxidant Activities of *Acacia mangium* and *A. auriculiformis* Heartwood Extracts, *J. Chem. Ecol.*, **31**, 789-804, 2005.
 - 15) Phillips, F. H., Logan, A. F., Papua New Guinea hardwoods: Future source of raw material for pulping and papermaking, *Appita*, **30**, 29-40, 1976.
 - 16) Kariyappa, G.S., Mohamed Amanulla, B.K., Nagaraj, S., Devaiah, P.K., *Acacia auriculiformis* -- a potential pulp-wood species for industrial plantations in India, *IPPTA*, **8**, 13-20, 1996.
 - 17) Balodis, V., Clark, N.B., Tropical acacias -- the new pulpwood, *Appita J.*, **51**, 179-181, 1998.
 - 18) 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.
 - 19) Xue, G.-X., Zheng, J.-W., Matsumoto, Y., Meshitsuka, G., Pulping and bleaching of plantation fast-growing acacias. Part 2. Comparison of conventional and modified kraft cookings. *Kami Pa Gikyoshi*, **55**, 522-527, 2001.
 - 20) Gong, M., Li, Z., Comparison of pulping properties of *A. Mangium*, *A. Auriculaeformis* and *A. Crassiparpa*. *Zhongguo Zaozhi*, **21**, 1-3, 2002.
 - 21) Nakayama, K., Okayama, T., Kojima, Y., Ona, T., Assessment of recycling on handsheet properties of unbleached kraft pulp of Acacias, *Kami Parupu Kenkyu Happyokai Koen Yoshishu*, **71st**, 76-79, 2004.
 - 22) Chowdhury, A.R., Banerji, R., Misra, G., Nigam, S.K., Chemical composition of *Acacia* seeds, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **60**, 1893-1894, 1983.
 - 23) Sarjekar, P., Shrivastava, S.K., Chemical composition of some cultivated and wild leguminous seeds. *Scientist of Physical Sciences*, **5**, 216-217, 1993.
 - 24) Chakrabarty, V., Das, P.K., Leaf nitrogen and phenol content in some arboreal legumes and their possible implications in their defense, *Indian Biologist*, **30**, 40-41, 1998.
 - 25) Mahato, S.B., Chemistry of some natural products of biological interest, *Stud. Nat. Prod. Chem.*, **23 (Part D)**, 387-529, 2000.
 - 26) Prakash, D., Niranjana, A., Tewari, S.K., Pushpangadan, P., Underutilised legumes: Potential sources for low-cost protein, *Int. J. Food Sci. Nutr.*, **52**, 337-341, 2001.
 - 27) Agbede, J.O., Characterisation of the leaf meals, protein concentrates, and residues from some tropical leguminous plants, *J. Sci. Food Agric.*, **86**, 1292-1297, 2006.
 - 28) Oyun, M.B., Chemical characterization of selected tree legumes as indices for their litter quality, *J. Appl. Sci.*, **6**, 2321-2324, 2006.
 - 29) Devi, S.R., Prasad, M.N.V., Tannins and related polyphenols from ten common *Acacia* species of India,

- Biores. Technol.*, **36**, 189-192, 1991.
- 30) Barry, K.M., Mihara, R., Davies, N.W., Mitsunaga, T., Mohammed, C.L., Polyphenols in *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis* heartwood with reference to heart rot susceptibility, *J. Wood Sci.*, **51**, 615-621, 2005.
 - 31) Drewes S.E., Roux D.G., A new flavan-3,4-diol from *Acacia auriculiformis* by paper ionophoresis, *Biochem. J.*, **98**, 493-500, 1966.
 - 32) Sahai, R., Agarwal, S.K., Rastogi, R.P., Auriculoside, a new flavan glycoside from *Acacia auriculiformis*, *Phytochemistry.*, **19**, 1560-1562, 1980.
 - 33) Kaur, K., Arora, S., Hawthorne, M.E., Kaur, S., Kumar, S., Mehta, R.G., A correlative study on antimutagenic and chemopreventive activity of *Acacia auriculiformis* A. Cunn. and *Acacia nilotica* (L.) Willd. Ex Del., *Drug Chem. Toxicol*, **25**, 39-64, 2002.
 - 34) Ghosh, N.K., Babu, S.P., Sukul, N.C., Ito, A., Cestocidal activity of *Acacia auriculiformis*, *J. helminthol.*, **70**, 171-172, 1996.
 - 35) Mihara, R., Barry, K.M., Mohammed, C.L., Mitsunaga, T., Comparison of Antifungal and Antioxidant Activities of *Acacia mangium* and *A. auriculiformis* Heartwood Extracts, *J. Chem. Ecol.*, **31**, 789-804, 2005.
 - 36) Ray, B., Ghosal, P.K., Thakur, S., Majumdar, S.G., Structural studies of an acidic polysaccharide from the seeds of *Acacia auriculaeformis* A. Cunn., *Carbohydrate Research*, **185**, 105-112, 1989.
 - 37) Singh, R.B., Periodate oxidation of *Acacia auriculiformis* gum polysaccharide, *Asian J. Chem.*, **11**, 1046-1047, 1999.
 - 38) Singh, R.B., Methylation of *Acacia auriculiformis* gum polysaccharide, *Asian J. Chem.*, **11**, 1048-1050, 1999.
 - 39) Singh, R.B., Kumar, V., Jindal, V.K., Carbohydrate contents of *Acacia auriculiformis* gum, *Acta Ciencia Indica, Chemistry*, **25**, 29-30, 1999.
 - 40) Singh, R.B., Kumar, V., Jindal, V.K., Structure of aldobiouronic acid from *Acacia auriculiformis* gum polysaccharide, *Acta Ciencia Indica, Chemistry*, **25**, 59-61, 1999.
 - 41) Garai, S., Mahato, S.B., Isolation and structure elucidation of three triterpenoid saponins from *Acacia auriculiformis*, *Phytochemistry.*, **44**, 137-140, 1997.
 - 42) Mahato, Shashi, B., Pal, B.C., Price, K.R., Structure of acaciaside, a triterpenoid trisaccharide from *Acacia auriculiformis*, *Phytochemistry.*, **28**, 207-210, 1988 (Volume date 1989).
 - 43) Uniyal, S.K., Badoni, V., Sati, O.P., A new triterpenoidal saponin from *Acacia auriculiformis*, *J. Nat. Prod.*, **55**, 500-502, 1992.
 - 44) Mahato, S.B., Pal, B.C., Nandy, A.K., Structure elucidation of two acylated triterpenoid bisglycosides from *Acacia auriculiformis* Cunn., *Tetrahedron*, **48**, 6717-6728, 1992.
 - 45) Ghosh, M., Babu, S.P.S., Sukul, N.C., Mahato, S.B., Antifilarial effect of two triterpenoid saponins isolated from *Acacia auriculiformis*, *Indian J. Exp. Biol.*, **31**, 604-606, 1993.
 - 46) Mahato, S.B., Saponins with antifilarial activity from *Acacia auriculiformis*, Book of Abstracts, 210th ACS National Meeting, Chicago, IL, August 20-24 (1995), (Pt. 1), AGFD-091.
 - 47) Garai, S., Mahato, S.B., Isolation and structure elucidation of three triterpenoid saponins from *Acacia auriculiformis*, *Phytochemistry.*, **44**, 137-140, 1996 (Volume date 1997).
 - 48) Mahato, S.B., Saponins with antifilarial activity from *Acacia auriculiformis*, *Adv. Exp. Med. Biol.*, **404** (Saponins Used in Traditional and Modern Medicine), 173-184, 1996.
 - 49) Babu, S.P.S., Sarkar, D., Ghosh, N.K., Saha, A., Sukul, N.C., Bhattacharya, S., Enhancement of membrane damage by saponins isolated from *Acacia auriculiformis*, *Jpn. J. Pharm.*, **75**, 451-454, 1997.
 - 50) Makkar, H.P.S., Sen, S., Bluemmel, M., Becker, K., Effects of Fractions Containing Saponins from *Yucca schidigera*, *Quillaja saponaria*, and *Acacia auriculiformis* on Rumen Fermentation, *J. Agric. Food Chem.*, **46**, 4324-4328, 1998.

- 51) Mandal, P., Babu, S.P.S., Mandal, N.C., Antimicrobial activity of saponins from *Acacia auriculiformis*, *Fitoterapia*, **76**, 462-465, 2005.
- 52) Agarwal, R., Jamal, S., Ahmad, I., Ahmad, M., Osman, S.M., Vernolic acid from the two Leguminosae seed oils, *Journal of the Oil Technologists' Association of India*, **18**, 10-12, 1986.
- 53) Nakayama, K., Okayama, T., Kojima, Y., Ona, T., Assessment of recycling on handsheet properties of unbleached kraft pulp of Acacias, *Kami Parupu Kenkyu Happyokai Koen Yoshishu*, **71st**, 76-79, 2004.

アカシア材の利用*

矢野 浩之**, 森 拓郎***, 梅村 研二****

Acacia mangium for building materials

Hiroyuki Yano **, Takuro Mori*** and Kenji Umemura****

概要

アカシアマンギウム材の建築用途や家具用途への利用に関係する乾燥特性、強度特性、塗装・接着性能について整理すると共に、樹皮の利用について紹介した。アカシアマンギウムは乾燥の難しい材であるが、強度特性は優れており、グレーディングを行うことで住宅構造材料として利用可能である。また、塗装性・接着性においても、塗膜や接着層の硬化不良等は認められていない。また、樹皮は多量のタンニンを含み、粉砕によって得られる樹皮微粉末は接着剤成分あるいは添加剤として利用できる。

1. はじめに

アカシアマンギウムは、東南アジア一帯で広く植林されている早生樹である。中でも、インドネシアでは、100 万ヘクタールにおよぶ植林が行われている。主としてパルプや繊維板 (MDF) 原料用に植えられたものであるが、環境意識の高まりや伐採可能な天然林の減少に伴い、アカシアマンギウムからの製材品や集成材、合板製造に対するニーズが年々高まっている。また、アカシアマンギウムは、外観がチークに似ていることから、家具用途や住宅内装材用途への利用にも期待が集まっている。

本稿では、アカシアマンギウム材の建築用途や家具用途への利用に関係する乾燥特性、力学特性、接着特性を整理する。さらに、パルプ用チップの製造や製材過程で大量に排出される樹皮の利用について述べる。

2. アカシアマンギウム材の乾燥特性¹⁾

乾燥は、木材を建築や家具用途に利用する上で最も重要なプロセスの一つである。木材加工において最もエネルギーと時間を消費するプロセスであるとともに、その間に生じる製材品のねじれや割れ、変色が製品の歩留まりに直接影響する。アカシアマンギウムは、急激に成長するためか、乾燥においてねじれが生じやすい。また、乾燥に長い時間がかかり、かつ乾燥歩留まりが低いなど、一般に乾燥の困難な材である。林¹⁾は、アカシアマンギウムの乾燥特性について次のように述べている。① 高温で乾燥すると内部割れが生じやすい ② 60℃ 程度の穏和な乾燥であれば、変色や収縮の可能性は残るが、内部割れは防げる ③ 乾燥時間短縮のためのスチーミング処理は変色を助長する。その上で、林は除湿乾燥法 (shed) と太陽光と廃材の燃焼エネルギーを併用した加熱乾燥法 (solar/biomass energy) でアカシアマンギウムの乾燥特性を評価している。除湿乾燥は生材状態から含水率 15% にまで乾燥するのに平均で 32 日間必要としたが、

* 2007 年 8 月 16 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活圏構造機能分野
E-mail: moritakuro@rish.kyoto-u.ac.jp

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

変色や収縮を生じなかった。一方で、加熱乾燥法では、18 日間で含水率 15% にまで乾燥出来たが、そり (warp) が生じた。アカシアマンギウムについては、低コストで変色やそりを生じない乾燥技術についてさらなる開発が必要である。

Table 1: Comparison among drying properties of *Acacia mangium** wood by three drying methods¹⁾

Drying method	Average drying time from green 90% to 15% Mc., days	Drying quality		
		Warp	Honey-comb	Color
1. Shed	32	X	X	bright
2. Solar + biomass energy	18	fair	X	pale
3. Combination	23	X	X	rather pale

The main material used was 10-year old *Acacia mangium*, originally from plantation estate in Subanjeriji, Sumatera Selatan. The samples were taken from the heartwood portion of *Acacia mangium*. The green moisture content of freshly sawn *Acacia mangium* timber ranged from 85% to 125%. The specific gravity of 10-year old *Acacia mangium* was 0.52.

3. アカシアマンギウム材の強度特性¹⁾

アカシアマンギウムは密度が 0.5–0.6 g/cm³ あり、それに比例して木材の中では弾性率が高く強度面では建築構造用途に利用可能な材であるといえる。このことからインドネシアでは、政府系の研究機関の主導でアカシアマンギウム材を用いた住宅に関する研究が進められている。Table 2 に、Firmanti が行った実大材試験の結果を示す。

Table 2: Physical and mechanical properties of full-scale *Acacia mangium*¹⁾

Timber Properties	Minimum	Maximum	Average	Standard Deviation	Coefficient of variation
Indramayu					
Moisture content (%)	14.9	19.5	16.5	1.5	0.1
Density (g/cm ³)	0.41	0.60	0.47	0.10	0.05
MOE flat-wise (GPa)	4.1	14.3	8.5	2.8	0.3
MOE edge-wise (GPa)	6.6	20.8	11.6	3.3	0.3
MOR (MPa)	15.3	92.0	43.6	15.7	0.4
Banten					
Moisture content (%)	15.2	19.4	16.9	1.8	0.1
Density (g/cm ³)	0.45	0.67	0.56	0.06	0.1
MOE flat-wise (GPa)	5.3	15.8	9.3	2.26	0.2
MOE edge-wise (GPa)	5.7	19.1	10.1	2.82	0.3
MOR (MPa)	11.6	75.7	41.6	15.8	0.4
For both locations					
Moisture content (%)	14.9	19.5	16.7	1.6	0.1
Density (g/cm ³)	0.41	0.67	0.53	0.06	0.1
MOE flat-wise (GPa)	4.1	15.8	8.9	2.6	0.3
MOE edge-wise (GPa)	5.7	20.8	10.9	3.2	0.3
MOR (MPa)	11.6	92.0	42.2	15.9	0.4

Remark: MOE, modulus of elasticity; MOR, modulus of rupture

供試体の平均密度は 0.53 g/m³ である。試験体のほとんどに節が認められたが、曲げ強度 (MOR) は弾性率との間で高い相関を示した。平均曲げ強度は約 40 MPa であった。また、Table 3 に示す様に、グレーディング材の許容応力度は、E15 グレードでは 25.2 MPa であり、これは一般の木材よりも高い。

Table 3: The allowable stress of mechanical-graded *Acacia mangium* timber¹⁾

No.	Grade	MOE (GPa)	Allowable stress (MPa)
1	E 15	15.0	25.2
2	E 13.5	13.5	22.7
3	E 12	12.0	20.3
4	E 10.5	10.5	17.8
5	E 9	9.0	15.4
6	E 7.5	7.5	13.0
7	E 6	6.0	10.5

これまでアカシアマンギウムは、パルプ用途や MDF 原料用途として育種や植林がなされてきたため、樹幹が通直ではなく、また、横断面も真円ではない。したがって、現時点では製材品の歩留まりが低く、またバラツキも大きい。今後は、建築用途を目指した育種や森林施業が、集成材製造技術の開発やグレーディングの精度向上といった木材側の技術開発ともに重要である。

4. アカシアマンギウム材の塗装・接着性

アカシアマンギウム材の建築や家具への用途に関係して、塗装性能や接着性能が研究されている。平林、中野²⁾は、8年生の若齢木と30年生の老齢木について代表的な木材用塗料であるポリウレタン樹脂塗料、アミノアルキッド樹脂塗料、不飽和ポリエステル樹脂塗料の塗装性能を評価し、いずれの塗料においても抽出成分等による硬化阻害や塗装不良は生じず、また、塗装接着力についても実用上の問題は無かったことを報告している。さらに、接着性能について、レゾルシノール樹脂接着剤、水性高分子-イソシアネート樹脂接着剤、ユリア樹脂接着剤、酢酸ビニル樹脂エマルジョン接着剤を用いブロックせん断試験およびはく離試験による評価を行っている。せん断強度については、すべての接着剤で若齢木、高齢木ともに JAS の樹種区分 1 を満たしており、抽出成分等による硬化阻害や接着不良は生じていないと考えられる。また、耐水性のあるレゾルシノール樹脂接着剤を用いた場合は、若齢木、高齢木ともに JAS の煮沸試験に合格した。Alamsyah³⁾もアカシアマンギウム材の接着特性について、種々の接着剤を用い構造用集成材の JAS 規格に基づいた常態および促進劣試験により評価している³⁻⁴⁾。それによると、レゾルシノール樹脂接着剤や水性高分子-イソシアネート樹脂接着剤のような構造用木材接着剤を用いた場合は良好な接着性が得られることを明らかにしており、構造材料としての可能性を示唆している。

5. 樹皮の利用

一般に、アカシアは樹皮に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縮合型タンニンが含まれている。アカシアマンギウムの樹皮には、特に多くのタンニン (レゾルシノール型) が含まれており⁵⁾、その外樹皮を粉碎し機械的に篩うと、粒径 63 μm 以下に縮合型タンニンを 50~60% も含む微粉末を 50% 近い収率で集められる⁶⁾。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高耐久性の合板用接着剤として直接利用できる。また、ホルムアルデヒドとの反応性は長期にわたり安定しており、105°C で 48 時間加熱しても、抽出物量や抽出物

のゲル化時間には明確な変化は認められない。このことから、樹皮粉末の工業的利用を目指し、フェノール樹脂への樹皮粉末の効果が検討されている。

外樹皮粉末を固形分換算で 20% を加えたフェノール樹脂接着剤 (80:20) を利用して製造したレッドメランチ三層合板について、熱圧温度と合板の接着強度の関係を Figure 1 に示す。熱圧時間は 5 分である。図より、常態では樹皮添加接着剤の方が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℃ 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においてより明確で、100℃ 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℃ の熱圧においても高い接着強度を示した。また、木破率も高い値を示した (Table 4)。

上記の成果を踏まえ、実際の合板工場の製造ラインを用いて、アカシアマンガウム樹皮粉末の接着剤添加に関するファクトリートライアルを行った。合板を約 1,000 枚製造し、諸製造条件と製品の外観、耐水性等との関係を調べたところ、樹皮粉末の添加でプレス時間を 2/3 に低下でき、ラインの生産効率を飛躍的に向上できた。さらに、接着剤の染み出しによる汚染も防げることが明らかになった。

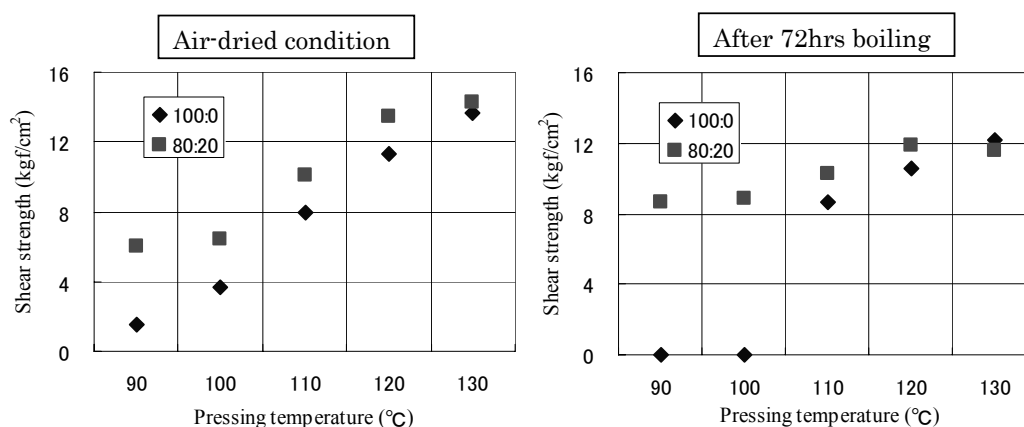


Figure 1: Effect of bark powder adding to PF resin on bonding strength of plywood

Table 4: Wood failure (%) of plywood using bark powder mixed PF resin

Pressing Temp. (°C)	90	100	110	120	130
Air-dried condition	28	45	55	60	93
After 72 hours boiling	93	92	93	93	100

6. おわりに

アカシアマンガウムはそりや変色の生じやすい乾燥の難しい材であるが、強度特性は優れており、グレーディングを行うことで住宅構造材料として利用できる。また、塗装・接着に際しても塗膜や接着層の硬化不良等は認められていない。また、樹皮は多量のタンニンを含み、粉砕によって得られる樹皮微粉末は接着剤成分あるいは添加剤として利用できる。アカシアマンガウムは熱帯の人工造林木として、今後ますますその重要性は増していくといえる。

参考文献

- 1) Yano, H., Kawai, S., Tanaka, E., Hayashi, K., Basri, E., Firmanti, A., Susanti, C. M. E., Subiyanto, B. and Subyakto, Total Utilization of *Acacia mangium* wild, Sustainable development and utilization of tropical forest resources, (Immaura, Y., Umezawa, T. and Hata, T. eds), Universe Printing, Kyoto, Japan, 101-107, 2006.
- 2) 平林靖、中野隆人, アカシア造林木の塗装性能と接着性能, 林産試験場報, **14(6)**, 6-12, 2000.
- 3) Alamsyah, E. M., Nan, L. C., Yamada, M., Taki, K. and Yoshida, H., Bondability of tropical fast-growing tree species I: Indonesian wood species, *J. Wood. Sci.*, **53**, 40-46, 2007.
- 4) Alamsyah, E. M., Yamada, M., Taki, K., Yoshida, H. and Inai, A., Bondability of tropical fast-growing tree species II: Malaysian wood species, *J. Adhesion Soc. Japan*, **42(12)**, 499-505, 2006.
- 5) 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*, Nov. 2-5, 1998, Bogor, Indonesia, 36-44.
- 6) 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*, Sep. 2-5, 2002, Serpong, Indonesia, 182-187.

樹木の成長輪の解析と関連科学の動向*

水野 寿弥子**, 杉山 淳司**

Recent trends in dendrochronology

Suyako Mizuno and Junji Sugiyama

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。そのことによって成長輪 (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 (annual ring) が形成される。しかし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ことが多い。

Dendrochronology (dendros: 樹木+chronos: 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。

2006 年には中国の北京で Dendrochronology の国際学会¹⁾が開催された。本稿では、この学会での発表内容を検討し、①樹種と研究目的、②熱帯樹木の年輪研究の現状と展望、についてまとめたので報告する。

本学会では、以下の 16 個のセッションに分けて研究成果が発表されている。すなわち、S1: 年輪と同位体について、S2: 地形学における年輪の応用、S3: 青海-チベット高山での年輪学、S4: 環境に応じた樹木生理学、S5: 熱帯での年輪年代学、S6: 年輪と古環境記録について、S7: アジアにおける年輪年代法、S8: 年輪年代学と文化遺産、S9: 森林における害虫発生の指標としての年輪、S10: 資源活用における年輪年代法の利用、S11: 森林の生態とマネージメント、S12: 年輪気候学における方法とモデル、S13: 年輪化学、S14: 環境の因子に反応した年輪形成、S15: 年輪から気候を復元する、S16: 年輪水文学である。参加者は 33 カ国、利用された樹種は 73 属にわたる。国別にはアメリカ、中国、日本、ヨーロッパで研究が盛んであり、東南アジアの諸国も、先進国の研究機関との共同研究という形で研究を進めている。

研究例の一部を列举すると、次のようである。年輪と同位体に関連した古環境の復元や気候変動 (S1)、ポーランドの地すべり発生地域における年輪応用の研究 (S2)、青海-チベット高山での過去の気候や降水量の復元 (S3)、環境に応じた樹木生理学として、干ばつや洪水が年輪に与える影響 (S4)、降雨と気温の影響で出来たと考えられるタイのチークにおける 448 年分の年輪データの構築 (S5)、中国乾燥地域における年輪を用いた乾燥の歴史の復元 (S6)、東日本における広葉樹のブナの年輪幅暦年変動を民芸品にも応用した研究 (S7, 8)、昆虫の発生と年輪との関連性の研究 (S9)、西アメリカやカナダでの年輪を用いた過去の森林火災や気候の復元 (S10)、中央アフリカのガボンに生育するオコウメの年輪解析をプランテーションに生かす研究 (S11)、年輪年代法における C14 ウィグルマツチング法の応用 (S12)、年輪中のストロンチウム 90 を放射能汚染の指標とした研究 (S13)、降雨や気

* 2007 年 8 月 17 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

温によって変動する年輪の研究 (S14)、北方チベットでの過去 500 年に渡る乾湿の変動履歴や年輪年代を用いたフィンランドでの 7,520 年間にわたる気候の復元 (S15)、中国の黄河上流での過去 700 年間の水量の復元 (S16) などである。

このように、近年、樹木の年輪の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 (S7, S5)、また年輪から環境の復元や気候の復元の可能性もあることから、グローバルな気候の変化の履歴や予測のために、熱帯地域の樹木の年輪研究が重要視されている¹⁻⁴⁾。

2. 年輪学における樹種とその利用目的

本学会¹⁾での研究例が年輪学 の研究成果を全て網羅している訳ではないが、近年の研究トレンドを知る上での参考として、目的毎の使用樹種についてまとめた結果を表 1 に示す。

表 1：樹種と研究内容について

属名	気候学	解剖学・方法	環境学	年代学	化学	考古学	水文・地形学	生態学	総計
マツ属	21	14	11	12	8	2	2	3	73
コナラ属	15	15	5	5	5	3	1	2	51
トウヒ属	15	9	5	3	8	3	3	5	51
モミ属	3	5	7	4	1	4	1	3	28
カラマツ属	3	6		2	2	2	2		17
アオカズラ属	6	3	1			1			11
ハンノキ属	1	3	5			1	1		11
ブナ属	2	3	2		1	1	2		11
シラカンバ属	3	2	3	1		1			10
チーク属	3	2	1	1		2		1	10
ハコヤナギ属	2	3	3		1				9
ヒメツバキ属	3		3	1		1			8
ビャクシン属	2	1	1		2	1		1	8
スギ属	1	1	2		3				7
トネリコ属		2	4			1			7
ヒノキ属	1	1				2	1		5
カエデ属		1	1	1			1		4
クリ属		2	1	1					4
ヌマスギ属	3						1		4
トーナ属	2			1					3
トガサワラ属	2	1							3
マテバシイ属		2	1						3
その他	10	21	12	4	4	4	5	3	63
総計	98	97	68	36	35	29	20	18	401

総計約 73 属 192 種の樹木が研究に用いられており、これらの内容を主観的に 8 つの内容項目に当てはめて分類した。古気候の復元や気候変動の復元については気候学、年輪部位の組織構造や年輪データの読み取り法は解剖学的方法、過去の森林火災の痕跡や害虫の発生、古環境復元は環境学、年

輪データの構築は年代学、年輪解析に安定同位体を用いたものは化学、年輪データを考古学的に適用したものは考古学、地すべりや森林水文学と年輪の関連は水文・地形学、森林マネージメントや森林資源の有効活用関連は生態学というようにそれぞれに分類した。

73 属の樹木について、針葉樹と広葉樹の比率は 21:52 であった。用いられた樹種は多い順にマツ属、コナラ属、トウヒ属、モミ属、カラマツ属となっており、針葉樹の研究例が圧倒的に多い。また研究内容は、多い順に気候学、解剖学・方法、環境学、年代学、化学、考古学、水文・地形学、生態学となっており、特に気候復元や、環境学に年輪情報が積極的に活用されていることがわかる。熱帯樹木については、年輪（成長輪）が明瞭なチークやトーナ属の樹木が使用されており、降水量やエルニーニョ現象などの気候との関連が研究されていた。また年代学においては、年輪年代データ（マスタークロノグラフ：年代の特定に使うもっとも重要なものさし）が得られた樹種（日本ではスギやヒノキ）について考古学や環境復元などが行われており、今後さらに多くの樹種についての時代を超えた幅広い年輪サンプルが収集解析されることによって、年代を特定する指標として貴重なデータとなるであろう。その意味では、我が国においてもブナが年輪年代学に用いることができるようになったことは意義深い⁵⁻⁶⁾。

3. 樹木の年輪研究の現状と展望

前節でも記したように熱帯樹木の年輪学は近年注目されている。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。このような多方面への要求にこたえるために、研究会レベルの集まりから始まり、分科会、国際会議へというように「熱帯樹木の成長輪解析」という一つの学問領域が発展してきている¹⁻⁴⁾。

熱帯樹木の成長輪解析に関しては、1988 年の IUFRO の会議²⁾以来、① 熱帯の国では年輪・成長輪を研究する研究者が少ないことから技術的、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、可能性を広めるべきである、④ 熱帯資源保全の面からも国際的に認知され、またそのような研究プロジェクトが高い評価を受けるべきである、と認識されている。その中でも特に重要なのは ③ であり、現在インターネットを通してデータの閲覧が可能であるが⁷⁾、それも国によりやや隔たりがあるようである。マスタークロノグラフ等は、誤った利用をされた場合は歴史を変えることにもなりかねないので、やはりデータの公開の仕方や、利用者については今後も議論の対象となるだろう。いずれにせよ、方向としてはグローバルな研究目標に対してデータを共有してゆくの必然といえる。

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⁸⁻⁹⁾。

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、Nobuchi¹⁰⁾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。

またこのような解剖学・植物生理学上の進展と平行して、木口断面の周期構造の画像処理などにより、道管分布、道管率、密度変化など様々な側面からのデータと、精密な気象データと照らし合わせることで、熱帯樹木の生長と気候変動すなわち、正確な時間軸を与えることが出来る可能性が高くなってきた¹¹⁾。

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。

参考文献

- 1) Cultural Diversity, Environmental Variability, *Programme and Abstract Book of 7th International Conference on Dendrochronology* (Chen, L., Qiu, H-Y., Wang, X-C. and Zhang, Q-B. eds), Jun. 11-17, 2006, Beijing, China, pp. 1-153.
- 2) Growth Rings in Tropical Woods, *Proceedings of the joint session of IUFRO P5.05 Tree Ring Analysis and IAWA on Age and Growth Rate Determination in Tropical Trees* (Baas, P. and Vetter, R. E. eds), *IAWA Bull. n. s.*, **10**, 95-174, 1989.
- 3) Eckstein, D., Sass, U. and Baas, P., Growth periodicity in Tropical Trees, *IAWA Bull. n. s.*, **16**, 323-442, 1995.
- 4) Eckstein, D. and Baas, P., Dendrochronology in Monsoon Asia. *IAWA J.*, **20**, 223-350, 1999.
- 5) Hoshino, Y., Dendrochronology of Japanese Beech (*Fagus crenata* Bl.) on the Eastern Honshu Island, Japan. Ph. D. Thesis, Kyoto University, pp. 1-64, 2007.
- 6) 星野安治, 米延仁志, 安江恒, 野堀嘉裕, 光谷拓実, 東日本におけるブナ年輪幅暦年変動パターンの広域ネットワーク構築, *日本文化財科学学会誌*, **54**, 69-79, 2006.
- 7) National Climatic Data Center. WDC for Paleoclimatology:
<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>
- 8) Coster, Ch., Zur Anatomie und Physiologie der Zuwachszonen- und Jahresringbildung in den Tropen. *Ann. Jard. Bot. Buitenzorg*, **37**, 49-160, 1924 & **38**, 1-114, 1928.
- 9) Berlage, H. P., Over het verband tusschen de dikte der jaarringen van djatiboomen (*Tectona grandis* L. f) en den regenval op Java, *Tectona*, **24**, 939-953, 1931.
- 10) Nobuchi, T., Ogata, Y. and Siripatanadilok, S., Seasonal characteristics of wood formation in *Hopea odorata* and *Shorea henryana*, *IAWA J.*, **16**, 361-369, 1995.
- 11) 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, pp. 1- 65, 2006.

熱帯バイオマスの炭素材料としての利用*

畑 俊充**, Joko Sulisty**

Carbon materials based on tropical fast growing trees

Toshimitsu Hata** and Joko Sulisty**

概要

熱帯産早生樹から先端的な機能性炭素材料を開発しその応用を進めるために、材料の全体的構造や微細構造のみならず表面化学的な性質を制御することが重要である。ここでは *Acacia* 材の炭化によって得られる材料の微細構造や表面化学的性質についての既往の文献を紹介する。

1. 地球温暖化と環境との調和¹⁻²⁾

地球温暖化は、大気中に放出された二酸化炭素、メタン、フロン、亜酸化窒素などの温室効果ガスの増加によって引き起こされると考えられている。その原因は、石油・石炭などの化石燃料が大量に使用されることによる。二酸化炭素の増加は、植物や一部の微生物が行う光合成などの炭素固定による二酸化炭素の処理量が追いつかなくなっているためである。地球温暖化は人類の営みと環境との調和とが崩れた結果だと言っても過言ではない。

温暖化ガス排出削減のためにさまざまな試みがなされている。最近、化石燃料の利用を減らしつつエネルギー効率を高める技術や燃料電池など水素利用の技術、バイオマス発電のような自然エネルギーの利用などに関心が寄せられている。自然エネルギー利用の中でもバイオマス発電は、ライフサイクル全体から見れば理論的には温暖化ガスの増加がゼロとされている。実際には、バイオマスを燃焼すれば二酸化炭素は必ず発生する。さらに、地球上のバイオマスの 95% を占める森林資源をバイオマス発電の原料とした場合、樹木が成木になるまでに多くの人手がかかるうえ、運搬に際して多大なエネルギーを要し、莫大な二酸化炭素が排出される事になる。

2. 木質資源の理想循環系の確立

木質資源を生産から廃棄までの循環系を確立するという環境面から考えてみる。仮に木材から安価で品質の良い燃料が得られれば、木材消費が急速に伸び、木材資源の循環系は破壊される可能性がある。一方、木質から熱変換によって高機能の炭素材料が開発された場合は、木材の付加価値が飛躍的に高まりそれに伴い木材消費も増すかもしれない。しかし、それは一時的なものである。これらの炭素材料では燃える・腐る・狂うといった木材の欠点は克服されており、永く使用可能なため木材消費は安定し、二酸化炭素を回収、輸送し、長期にわたり安定に貯蔵する炭素隔離にも可能となる。

同じ燃やすなら化石燃料より再生可能な廃棄物の方がまだまし、という選択ではバイオマスの利用を行っても生存圏の維持は難しい。今こそバイオマスの高機能化を積極的に進めていくべき時にある。

* 2007 年 7 月 25 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: hata@rish.kyoto-u.ac.jp

3. 木質系高機能化炭素材料の開発

ナノテクノロジーによる新材料開発は、世界的に関心を集めている。しかし熱帯早生樹を原料にしたナノテクノロジーは遅れており、産業界において早急にこの研究に取り組む必要性が求められている。豊かな森林資源をもつ日本ではなおさらのことである。

これまで、高機能化炭素の合成は液相あるいは気相で石油由来の溶剤を用いて回収されており、木質の固相での炭素化の過程で高機能化炭素を連続的に製造するという環境調和型手法については検討されてこなかった。熱帯早生樹から高付加価値材料の効率的な創造が可能となれば、木材資源の有効利用の鍵として活用することができる。木炭の微細構造解析と急速熱分解法を用いることにより、再生可能な木質バイオマスの有効利用、木質廃棄物の減量化が促進される。環境と調和しながら工業生産を可能とする技術を開発するという成果が期待される。

一方、木質炭素化物は吸着性能や電気伝導度など、炭素化過程において制御することが可能な炭素材料として注目を集めている。木質炭素化物は、細胞壁構造の異方性や 60% の空隙率を有するにもかかわらず適度な強度をもつ興味深い材料である。しかし現状では木質炭素化物は、500°C 以上の使用において強度低下や酸化が生じるため、限られた用途しかない。これは他元素との複合化により解決できる。例えば、炭化ケイ素は高い圧縮強度をもつ上に高温下での使用が可能であり、近年、炭化ケイ素複合材料に多くの注目が集まっている。木質炭素化物とセラミックスの両方の特性を併せもつ木質セラミックス複合材料は、エネルギー分野における排気フィルター、化学工業で用いられる触媒担持体、医学分野での生物活性物質の固定などへの使用が可能な新材料である。

4. 炭素化による熱帯バイオマスの利用

バイオマス資源から先端的な機能性炭素材料を開発し、その応用を進めるために、材料の全体的構造や微細構造のみならず表面化学的な性質を制御することが重要である。ここではアカシア材の炭化によって得られる材料の微細構造や表面化学的性質について調べた既往の文献を紹介する。

木質炭素化物の工学分野における最近の応用の発展は、ガスや重金属の吸着、電気伝導性、活性炭、繊維、複合材料、難燃性材料、燃料、脱臭および電磁波シールドなどへのカーボンの応用例と環境への関心が関連している³⁻⁸⁾。また、物理・化学的構造や特性が炭化条件によって変化することが木質炭素化物の用途を広げている。

多くの国においてプランテーションで伐採される熱帯産早生樹は、一般に、幹からは製材が、枝や端材からはファイバー、チップなどが得られる。近年、これら木繊維は炭化され、暖房、料理および活性炭など限られた用途に使われるだけでなく、炭素隔離の提案もなされている⁹⁻¹¹⁾。熱帯産材からの木質炭素化物の開発においては、電磁波遮蔽性、摩擦摩耗特性、電氣的性質といった性質に最適な物理・化学的構造を持った木質炭素化物を作成するために最適な炭化方法と炭化条件を選択することが最も重要である。ここでは熱帯早生材の炭化に関する最近の研究と機能性木質炭素複合材料の開発における努力を炭化プロセスに関連づけて述べてみたいと思う。

5. 熱帯バイオマスの炭化研究

熱帯産樹種からの炭素化に関するこれまでの研究はそれほど多くなく、それらは次の三つに分類することができる。(1) 燃料用木炭の性能評価、(2) 木質炭素化技術の開発、(3) 燃料用以外の用途のための木質炭素化物のキャラクタリゼーション。一般的に、熱帯産樹種からの炭素化に関する研究は、大半が燃料用途に向けられていた。一方、燃料用以外の用途に関する研究は最近になってようやく手がつけられたところである。

燃料用の樹木選抜のため木材の物理化学的性質と発熱量について検討されている。Kumar と Gupta は *Acacia nilotica* の化学成分分析を行い揮発物 85.0%, 灰分 1.03%, 固定炭素 14.97% であることを示した⁷⁾。さらにさまざまな熱帯産材の熱量を調べることにより *Acacia nilotica*, *Acacia auriculiformis* および *Acacia mangium* および *Acacia mangium* の発熱量が 20.44, 19.67 および 18.86 kJ/kg であり優れた特性をもちエネルギー用に優れた性質を示した^{9, 13)}。

木炭生産の技術に関する研究のためさまざまな炭化炉が開発された。Nurhayati 等は木炭と木酢液を副産物として生産する炉を開発し、400°C で約 23-35 wt% の収率を得た¹⁴⁾。伝統的な伏せ窯と金属製の炉を用いて、アカシア材の発熱量を 18.07 から 520 kJ/kg に向上させた¹⁵⁾。

製鉄の還元材として必要な性質、発熱量、二酸化炭素との反応性、電気抵抗、強度などを検討するために、アカシア炭に関する研究が Kumar 等によって精力的に行われた¹⁶⁻²¹⁾。*Acacia nilotica* を対象に、加熱速度 4°C/分、炭化温度 400-1,200°C、炭化時間 1-5 時間の条件で行った。Kumar 等はさらに走査型電子顕微鏡 (SEM) や X 線回折 (XRD) 装置を用いて、炭化条件が木質炭素化物の形態や結晶構造に及ぼす影響を検討し、アカシア炭の特性が、加熱速度、炭化温度、炭化時間によって大きな影響を受けることがわかった¹⁶⁻²¹⁾。その要旨は次の通りである：

- (1) 反応温度、炭化時間が増加すると、固定炭素および灰分量がそれぞれ 73.85 から 88.64%, 2.95 から 4.46% へ増加したが、揮発物量は 23.20% から 6.90% へ減少し、炭素率は増加、水素率は低下した¹⁶⁾。
- (2) 1,200°C までの炭化温度ではアカシア炭中の木繊維の形態に変化が無く、600°C 以上の温度における急速炭化では繊維構造が壊れることが SEM によりあきらかとなった¹⁷⁾。
- (3) カーボン X-線回折ピークはブロードで、ハードカーボンの特徴を示しており乱層構造炭素からできていることがわかった。炭化温度、時間が増加すると、面間隔 d_{002} は増加し、結晶子直径 L_a 直径は著しく増加した¹⁸⁾。
- (4) アカシア炭の粉砕強度と衝撃強度は 600°C まで減少し、それ以上の温度では減少した。4°C/min の加熱速度の炭素化物と比較すると 30°C/min では粉砕強度が低下した¹⁹⁾。
- (5) 800°C までの炭化温度の増加によって電気抵抗は激減し、それ以上の温度では 1,200°C までわずかに低下した²⁰⁾。
- (6) 炭化温度を上昇することにより得られたアカシア炭の CO₂ 吸着能は低下した。大きい加熱速度で炭化したアカシア炭の CO₂ 吸着能は著しく向上した。加熱速度が小さく炭化時間を長くすると CO₂ 吸着能は低下した²¹⁾。
- (7) Wang と Hung は樹種、加熱速度、炭化温度が電磁波遮蔽 (ESE) に及ぼす影響を検討した⁸⁾。炭素化物の電気抵抗は、500 から 1,100°C へ炭化温度を上昇することにより減少し、ESE は電気抵抗の減少に伴って増加した。1,100°C で炭化した台湾アカシア炭の ESE は約 38 db だった。

これまでのアカシア炭研究で得られた情報は限られており、今後下記の項目について検討する必要がある。

- (1) 1,200°C より大きい温度域での炭化と加熱速度の制御。
- (2) 熱化学変化過程と炭素化過程における構造変化についての分析。
- (3) 黒鉛化の挙動。

6. 熱帯バイオマスからの機能性炭素化物

炭素材料の黒鉛化によって、特に電気・磁気・摩擦・熱的性質が影響を受ける²²⁾。1,200°C 迄の温度で炭素化されたアカシア材の X 線回折から炭素が乱層構造を示すことがわかった^{8, 14, 16)}。Byrne と Nagle は炭化温度の上昇により黒鉛の結晶面が発達し配向性が向上することを示した^{18, 23)}。アルミナの触媒効果によっても黒鉛化度は大幅に向上する²⁴⁾。したがって、炭化温度の範囲を広げ、触媒を加えることが熱帯産早生樹の機能性炭素開発研究の進展につながるだろう。

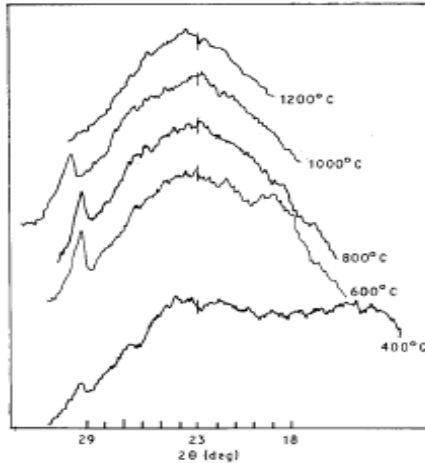


Fig. 1: Changes in diffraction profile of *Acacia* wood char with carbonization temperature⁶⁾

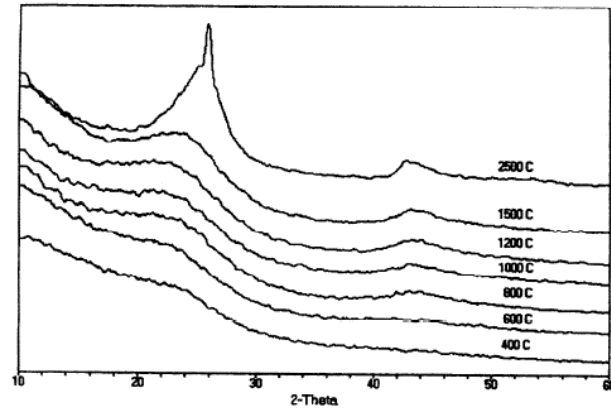


Fig. 2: X-ray diffraction scans of carbonized poplar for a range of HTTs⁷⁾

一般的に木材は複数のプロセスを経て炭化される²⁵⁾。西宮等は炭化温度と炭素構造の関係を示した²⁶⁾。約 600°C において炭素の二重結合と芳香環の形成が見られ、芳香環の比率が 800 と 1,000°C の間で増加することを示した²⁶⁾。同じ 600°C において電気抵抗の著しい減少が見られた^{20, 27)}。以上のことより、芳香環比率の増加が電気抵抗の低下と何らかの関係があることがわかった。これらはアカシア以外の木質炭素化物についての知見であり、Kumar と Gupta が調べた以外は、アカシア炭の温度変化に伴う構造変化については現在までのところまだわかっていない。アカシアからの高機能炭の開発のためには分析装置を用いた構造解析が必要不可欠である。

木質炭素化物に関するこれまでの研究から、形態変化・吸着性・多孔性・表面積・微細構造・熱的性質などの物理・化学的性質にたいして炭化温度が大きな影響を示すことがわかっている^{5, 28-32)}。細胞の形状・配列は流体移動に適しているので、Byrne と Nagle は加熱速度を制御することにより細胞に裂け目や変形を起こすことなく炭化する手法について検討した⁴⁾。物質吸着に関しては木質炭素化物の空隙特性、吸着性、表面積が重要である。Pulido 等は木質炭素化粉末のヨウ素吸着性能に対する炭化温度の影響について調べた。800°C で最大の吸着性能が得られたが、それ以上の炭化温度では低下した³⁰⁾。大きい表面積と空隙率が吸着性能の向上につながる。通電焼結法による高温焼結により木質炭素化物の微細構造解析により黒鉛構造が生成していることを示した³¹⁾。アカシア炭については類似の研究はまだ行われていない。高機能性炭素材料を開発するためには、製造条件がアカシア炭の物理・化学性能に及ぼす影響についての検討が今後必要であろう。

参考文献

1. 佐々木光, 木質材料の研究—今後の方向, 木材研究・資料, **19**, 26-32, 1984.
2. 畑 俊充, Bonnamy, S., Breton, Y., Bronsveld, P., Castro, V., 炭素固定のための高機能化スギ炭素材料の開発, 第 49 回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集, 499-500, 2005. (改編)
3. Pulido, L., Hata, T., Kurimoto, Y., Doi, S., Ishihara, S. and Imamura, Y., Adsorption capacities and related characteristics of wood charcoals carbonized using a one-step or two-step process, *J. Wood Sci.*, **47**, 48-57, 2001.
4. Byrne, C. E. and Nagle, D. C., Carbonization of wood for advanced materials application, *Carbon*, **35**(2), 259-266, 1997.
5. Subyakto, Hata, T., Kawai, S., Imamura, Y. and Ide, I., Anisotropic thermal properties of molded carbon phenolic spheres, *J. Wood Sci.*, **46**, 16-21, 2000.
6. Dermirbas, A., Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals, *Energy Conv. and Manag.*, **42**, 1357-1378, 2001.
7. Oya, A. and Iu, W. G., Deodorization performance of charcoal particles loaded with orthophosphoric acid against ammonia and trimethylamine, *Carbon*, **40**, 1391-1399, 2002.
8. Wang, S. and Hung, C., Electromagnetic shielding efficiency of the electric field of charcoal from

- six wood species, *J. Wood Sci.*, **49**(5), 450-454, 2003.
9. Kataki, R. and Konwer, D., Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India, *Biomass and Bioenergy*, **22**, 433-437, 2002.
 10. Maniatis, K. and Nurmala, M., Activated carbon production from tropical biomass, *Biomass Energy Ind. Environ.*, **274**, 1034-1308, 1992.
 11. Ogawa, M., Okimori, Y. and Takahashi, F., Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: three case studies, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**, 429-444, 2006.
 12. Kumar, M. and Gupta, R. C., Properties of Acacia and Eucalyptus wood, *J. Mat. Sci. Lett.*, **11**, 1439-1440, 1992.
 13. Shanavas, A. and Kumar, B. M., Fuelwood characteristics of tree species in homegardern of Kerala, India, *Agroforestry System*, **58**, 11-24, 2003.
 14. Nurhayati, T., Waridi, Y. and Roliadi, H., Progress in the technology of energy conversion from woody biomass, *Forest Study of China*, **8**(3), 1-8, 2006.
 15. Khristova, P. and Khalifa, A. W., Carbonization of some fast-growing species in Sudan, *Applied Energy*, **45**, 347-354, 1993.
 16. Kumar, M., Gupta, R. C. and Sharma, T., Effect of carbonization conditions on the yield and chemical composition of Acacia and Eucalyptus wood chars, *Biomass and Bioenergy*, **3**(6), 411-417, 1992.
 17. Kumar, M. and Gupta, R. C., Scanning electron microscopic study of acacia and eucalyptus wood chars, *J. Mat. Sci.*, **30**, 544-551, 1995.
 18. Kumar, M., Gupta, R. C. and Sharma, T., X-ray diffraction studies of acacia and eucalyptus wood chars, *J. Mat. Sci.*, **28**, 805-810, 1993.
 19. Kumar, M., Verma, B. B. and Gupta, R. C., 1999, Mechanical properties of acacia and eucalyptus wood chars, *Energy Sources*, **21**(8), 675-685, 1999.
 20. Kumar, M. and Gupta, R.C., Electrical resistivity of acacia and eucalyptus wood chars, *J. Mat. Sci.*, **28**, 440-444, 1993.
 21. Kumar, M. and Gupta, R.C., Influence of carbonization conditions and wood species on carbon dioxide reactivity of resultant wood char powder, *Fuel Processing Technology*, **38**, 223-233, 1994.
 22. Cheng, H. M., Endo, H., Okabe, T., Saito, K. and Zheng, G. B., Graphitization behavior of wood ceramics and bamboo ceramics as determined by X-ray diffraction, *J. Porous Mat.*, **6**, 233-237, 1999.
 23. Byrne C.E. and Nagle, D.C., Carbonization of wood monolith-characterization, *Carbon*, **35**(2), 266-273, 1997.
 24. Nishimiya, K. Hata, T., Kikuchi, H. and Imamura, Y., Effect of aluminum compound addition on graphitization of wood charcoal by direct electric pulse heating method, *J. Wood Sci.*, **50**, 177-181, 2004.
 25. Tang, M.M. and Bacon, R., Carbonization of cellulose fibers-I low temperature pyrolysis, *Carbon*, **2**, 211-220, 1964.
 26. Nishiyama, K., Hata, T., Imamura, Y. and Ishihara, S., Analysis of chemical structure of wood charcoal by X-ray photoelectron spectroscopy, *J. Wood Sci.*, **44**, 56-61, 1998.
 27. Nishiyama, K., Hata, T. and Ishihara, S., Mechanism and clarification of electrical conduction through wood charcoal, *Wood Res.*, **82**, 33-35, 1994.
 28. Cutter, B. E., Cumbie, B. G. and McGinnes Jr., E. A., SEM and shrinkage analysis of southern pine wood following pyrolysis, *Wood Sci. Tech.*, **14**, 115-130, 1980.
 29. Kim, N. H. and Hanna, R. B., Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at different temperatures, *Wood Sci. Tech.*, **40**, 392-401, 2006.
 30. Pulido, L., Hata, T., Kurimoto, Y., Doi, S., Ishihara, S. and Imamura, Y., Adsorption capacities and related characteristics of wood charcoals carbonized using a one-step or two-step process, *J. Wood Sci.*, **47**, 48-57, 2001.
 31. Hata, T., Yamane, K., Kobayashi, E., Imamura, Y. and Ishihara, S., Microstructural investigation of wood charcoal made by spark plasma sintering, *J. Wood Sci.*, **44**, 332-334, 1998.
 32. Ehrburger, P., Lahaye, J. and Wosniak, E., Effect of carbonization on the porosity of beech wood, *Carbon*, **20**(5), 433-439, 1982.

熱帯バイオマス資源のバイオリファイナリー*

渡邊 崇人**, 渡辺 隆司**

Biorefinery of tropical biomass

Takahito Watanabe and Takashi Watanabe

概要

世界のバイオマス資源の約 4 割が集中するアジア、特に熱帯アジア地域のバイオリファイナリーの現状、また、アカシアを始めとする熱帯早生樹利活用の可能性、さらに、熱帯バイオマス資源を取り巻く諸事情を概説する。

1. はじめに

20 世紀に発達した石油、石炭、天然ガスなどの化石資源を原料とするエネルギー・化学産業は、我々の生活を便利にしたが、その一方で、地球温暖化などの深刻な環境問題や資源枯渇問題を引き起こした。化石資源の大量消費による資源の枯渇と地球温暖化の加速という根本的な問題は、我々が直面する現実の問題として強く意識されるに至っている。今、人類が抱えているこうした諸問題を解決し持続的な社会を構築するために、物質・エネルギーの基盤を化石資源からバイオマスなどの再生可能資源に転換することが求められている。植物バイオマスは、燃焼や分解によって大気中に二酸化炭素が放出されても、それに見合う量の二酸化炭素量が光合成によって固定化されているため、原理上は、炭素の収支はプラスマイナスゼロ（カーボンニュートラル）である。また、植物バイオマスと同様に動物や微生物のバイオマスも植物の光合成によって固定化された炭素源を複次的に利用しているため、カーボンニュートラルな特性を有している。実際には、バイオマスの変換には化石資源を使用する 경우가多く、二酸化炭素の収支はゼロではないが、化石資源のみを原料としてエネルギーや化学品（ケミカルス）を製造した場合に比べ、炭素の放出量は少ないと考えられている。

バイオマス由来のエタノールが化石燃料の消費を抑え二酸化炭素の排出抑制につながるか否かについては活発な議論がなされた。エタノールのエネルギー効率・二酸化炭素削減効果に関して、2005 年 3 月にコーネル大学の Pimentel とカリフォルニア大学バークレー校の Patzek は共著で LCA 解析（ライフ・サイクル・アセスメント解析：製品のライフサイクル全体に渡って環境への負荷を分析する手法）を行い、トウモロコシの穀物からのエタノール生産の正味エネルギーバランスはマイナス 29% であると発表した¹⁾。その後、LCA 解析が数多くなされ、最近では Pimentel らの使用したデータは古い農業技術やエタノール変換技術をベースとしたものであり、最新の技術を基にシミュレーションするならば、バイオエタノールは、二酸化炭素の排出抑制につながるとの結論がほぼ定着している²⁾。米国アルゴン研究所の Wang は、セルロースを原料とするエタノールとデンブンを原料とするエタノールの温室効果ガスの排出抑制効果を比較し、E85（エタノールを 85% 含むガソリン）で比較した場合、セルロース系エタノールが温室効果ガスの排出を 64% 抑制するのに対し、

* 2007 年 7 月 22 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: takahito@rish.kyoto-u.ac.jp

デンプン系エタノールの抑制効果は 17-23% にとどまると報告している³⁾。すなわち、バイオエタノールの二酸化炭素排出量は、穀物のデンプンを原料とした場合に比べ、リグノセルロースを原料とした場合は、その排出量が大きく低下する。リグノセルロースにおいては、管理栽培されていない未利用資源や廃棄物系資源を利用すれば、植物の育成管理に必要な化石資源が必要とならなくなるため、その排出量はさらに下がる。このように、温室効果ガスの排出量には、栽培、収穫、肥料の供給、灌漑、土地管理、運搬、加工産業など様々な要因が関係している。

今後の経済発展及び人口増加に伴い、再生可能なバイオマス資源の利活用だけでなく、原料をいかに多く生産し、或いは、確保するかが世界各国のエネルギー戦略となる。資源問題が深刻化するにつれ、食糧とエネルギー・化学品の生産が競合する事例が増えている。このため、食糧と競合しないリグノセルロース系バイオマスからエタノールなどの有用化学品を生産することが求められている。リグノセルロース系バイオマスの利用法には、樹木などの非食糧系バイオマスを生産・利用する場合と、穀物を収穫して残った茎や葉などのリグノセルロースを利用する場合がある。後者の例では、トウモロコシを収穫して残った残滓であるコーンストーバーの例が代表的であり、米国を中心にエタノールへの変換方法が活発に研究されている⁴⁾。リグノセルロースは原料としては食糧と競合しないが、土地利用に関しては、食糧と競合する場合がある。アマゾンの熱帯雨林を切り開いて、食糧やエネルギーの原料となるサトウキビや大豆が栽培されている例が社会問題化されている。企業や個人レベルの利益追求のみでバイオマス利用が進むと環境破壊を招くことがある。有用性ばかりに目を奪われて、「とにかくバイオマスを使えさえすれば良い」という段階から、環境保全という本来の目的により適した持続可能なバイオマスの生産と利用を行う新しい段階へ軌道修正する必要が出てきたといえる。

バイオマスは、再生可能な唯一の炭素資源であることから、エネルギーのみでなく化学品の原料としても期待されている。バイオマスから、エネルギー、燃料、ケミカルスを産業として体系的に生産することをバイオリファイナリー (biorefinery) と呼び、近年、石油リファイナリー (oil refinery) からバイオリファイナリーへ転換する動きが加速している。バイオリファイナリーでは、木の幹に枝葉がつくように、基幹となる骨格物質 (プラットフォーム化合物) とそれから派生する誘導体により体系的な生産がなされる。石油リファイナリーがエチレンやプロピレンなど炭化水素の変換を基本とするのに対し、バイオリファイナリーでは、糖、リグニン、油脂など、炭素、水素、酸素からなる原料を変換する。このため、バイオリファイナリーと石油リファイナリーでは、誘導体化の体系が根本的に異なる。すなわち、バイオリファイナリーにおいてプラットフォーム化合物が決まると、化学品生産体系全体が大きな影響を受ける。このため、プラットフォーム化合物の生産技術を握る企業や国家は化学産業の主導権を握ると予想され、米国企業を中心に開発競争が激化している⁴⁻⁵⁾。

2. バイオリファイナリーの中核：バイオ燃料

バイオリファイナリーの中核物質の一つであるバイオ燃料について熱帯アジア、特にインドネシアを例に紹介する。バイオ燃料とはバイオマスを原料として生産される燃料で、固体、液体、気体があり、その中でもバイオエタノールやバイオディーゼルはその代表的な液体燃料である。バイオエタノールはサトウキビやトウモロコシといった植物資源を糖化発酵させ、蒸留などにより精製して作られる。バイオディーゼルは植物や動物油脂を原料につくられたディーゼルエンジン用の軽油代替燃料である。構成成分は脂肪酸メチルエステルである。バイオエタノールは、直接、或いは、ETBE (エチル・ターシャリー・ブチル・エーテルの略でエタノールとイソブテンから合成される) に変換してガソリンに混ぜることができる。一方、バイオディーゼルはそのままディーゼルエンジン用の液体燃料として、或いは、軽油に混合して使用できる。

世界各国はすでにバイオ燃料の有用性を認識し、国家戦略としてその普及に努めている。主な目的としては、以下のことが挙げられる。(1) 石油依存度の低減 (エネルギー供給の安全保障対策)、(2) 温室効果ガスの排出削減 (京都議定書への対応)、(3) 大気汚染対策 (バイオエタノールやバイオディー

ゼルは構成元素に酸素原子を含むことから、燃料時の一酸化炭素などの発生を抑える。その他、窒素酸化物、揮発性有機化合物、粒子状物質の排出も削減する)、(4) 雇用確保・新規産業創出(地域内の資源を有効利用した再生可能エネルギーを生産することで、地域内の需要及び雇用が増大)、(5) 農業振興(バイオ燃料用の作物、いわゆる、エネルギー作物の栽培、プランテーション栽培が盛んになる)。

エネルギーや化学品の製造には原料が必要だが、バイオエタノールを例にとると、世界中で使用されている原料はサトウキビ抽出液などのショ糖系原料(スクロースの他、フルクトース、グルコースを含む)が6割、トウモロコシなどのデンプン質原料は4割となっている⁶⁾。ただし、デンプン質原料の場合、デンプンを糖化する工程が必要で、糖化が不要なショ糖系原料による生産の方がこの分だけエネルギー収支上有利である。その他の原料としては、小麦、テンサイ、廃ワイン、キャッサバ(タピオカ)などそれぞれの国の風土に適したものが用いられている。熱帯のアジア、例としてインドネシアでは、サトウキビのプランテーション栽培から砂糖及びエタノールの生産までを一通り行っている企業や石油会社が多い。原材料については、廃糖蜜(砂糖を精製する時に発生する糖分以外の成分も含んだ粘性の黒褐色の液体)やデンプン質系のキャッサバが主として使われている。なお、ショ糖系原料の場合、すべてをエタノール生産に使う場合と砂糖を作りながら副生する糖蜜をエタノールの原料にする場合がある。サトウキビの抽出液から砂糖を結晶化により得るには、通常3回の結晶化を行う。3回結晶化を行った残液の廃糖蜜には、発酵原料となる糖質が少ないため、エタノール生産と砂糖の生産を同時に行う場合には、結晶化を1回のみを抑える方法が試験されている。サトウキビを原料とする製糖工場では、廃糖蜜はエタノールの原料として使用されるが、その一方で、サトウキビの搾りかすであるバガスが大量に副生する。バガスの9割程度は製糖工場の熱源および発電の燃料として使用することができるが、残りは未利用のまま廃棄されるか、肥料など低付加価値物に変換されて利用される。また、パルプやパーティクルボードへの利用も報告されている⁷⁾。近年、ボイラーの性能が向上することにより未利用バガスの量は増大する傾向にある。我々はバガスに白色腐朽菌処理を施すことでバイオエタノールの生産性が向上することを報告している⁸⁻⁹⁾。

インドネシアでは、2010年までに国内におけるバイオ燃料の割合を10%まで引き上げることを目標にしている。廃糖蜜やキャッサバからバイオエタノールを、アブラヤシ(ギニアアブラヤシ: *Elaeis guineensis*)のパームオイル及びヤトロファオイルからバイオディーゼルの生産を行う¹⁰⁾。ヤトロファ(ナンヨウアブラギリ: *Jatropha curcas*)については、国営の石油会社 Pertamina が2005年に *Jatropha Curcas* バイオディーゼルプロジェクトを結成し、ヤトロファ栽培とヤトロファからのバイオディーゼル製造に着手している¹¹⁻¹²⁾。ヤトロファは成長が早く、容易に定着する多年生植物である。干ばつや害虫に強く、年間降水量400ミリメートル以下でも生き延び、砂漠などの痩せた土地にも植樹可能で農薬や肥料の投入量も少なく済む。種子から採取できる原料油量は同量のパームの35%程度であるが、大豆と比べると5倍、菜種では3倍搾り取れる。食用油と競合することなく、安価で安定供給可能なのが特徴である¹³⁾。

3. バイオマス資源としての熱帯早生樹利活用の可能性

インドネシアなどの熱帯アジアでは自身の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。インドネシアだけでもアカシアの植栽面積は100万ヘクタールにも及ぶ。一方、我が国の製紙会社は森林再生と木質バイオマス資源の確保を目的とし、1970年代から熱帯早生樹の木質系バイオマスプランテーションの造成を鋭意に進めている¹⁴⁾。プランテーション栽培においては短期間に伐採・収穫を繰り返すことから林地からの養分の収奪が大きく、結果として地力の低下を招くと指摘されている。しかしながら、「成長が早い」「大量の炭素固定が短期間に行われる」「貧栄養土壌でも生育可能」さらに「食糧と競合しない」セルロース系バイオマスであるアカシアなどの熱帯早生樹は大変有望なバイオマス資源と言える。アカシアは、「紙・パルプ」「材料」「燃料」「肥料」「ケミカルス」などの原材料として利用されている。

「紙・パルプ」においては、熱帯早生樹の各種 (*Paraserianthes falcataria*, *Gmelina arborea*, *Acacia mangium*, *Acacia auriculiformis*, *Eucalyptus deglupta*) について化学成分の解析、パルプの物理的性質、紙の機能性について研究がなされている。*Acacia mangium* はホロセルロース（セルロースとヘミセルロース）含量が他の熱帯早生樹より高く、一方、パルプ残留リグニン量の指標になるカップ値 (Kappa number) については、*A. mangium* は他の早生樹よりも低い¹⁵⁾。すなわち、パルプ化による脱リグニンが進んでおり、化学漂白剤の使用量が少なく済み、環境への負荷が低くなる。上述の熱帯早生樹のクラフトパルプの収量については、*Eucalyptus deglupta* が最も低く、*Acacia auriculiformis* が最も高い¹⁶⁾。

「材料」については、ケナフボードや MDF (Medium-Density Fiberboard: 中密度繊維板、主に木材などの植物繊維を成型した繊維板のうち、密度が 0.35g/cm^3 以上でドライプロセスによるもの) の生産に利用されている。特に、*Acacia* 樹皮粉末を混合することでパーティクルボードの強度・機能性を向上させることが可能である。樹皮粉末については、褐色腐朽菌 *Daedalea quercina* を用いてホロセルロースを処理し、高タンニン及び高リグニンの樹皮粉末の生産が可能という報告がある¹⁷⁾。*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取って代わる接着剤の開発がなされている。なお、これらの接着剤の生産過程ではホルムアルデヒドの発生がなく環境負荷が低い。

「燃料」及び「肥料」については、まずインドネシアの都市部を除く一部の田園地域において、熱帯早生樹が燃料材として普通に利用されている。アカシアの発熱量 (calorific value) が比較的高いことが理由の一つのようだ。また、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。化学肥料が化石燃料から製造されることを踏まえれば、アカシア由来の肥料は循環型バイオマス生産サイクルに有用である¹⁸⁾。一方、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¹⁹⁾。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²⁰⁾。

「ケミカル」の点では、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²¹⁾、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²²⁻²³⁾。

以上、アカシアの利用についていくつか列挙してきたが、アカシアを用いたバイオリファイナリーとなると現段階では実用的なところまではまだ到達していない。アカシアに限らず、リグノセルロース系バイオマスからエタノールを生産するとしても、セルロースなどの細胞壁多糖がリグニンにより被覆されていることから、これらを酵素糖化するには、まず、このリグニンのネットワークを事前に破壊する、すなわち、前処理が必要となる。細胞壁多糖を取り出す前処理については様々な方法があるが、例えば、熱化学的処理をした場合、必要なエネルギーはどれくらいか？処理によっては、その後の糖化・発酵などのプロセスに影響を及ぼす発酵阻害物質などが発生するのではないか？一方、白色腐朽菌を用いた温和な前処理をするにしても、タンニンや抗真菌性の物質が豊富なアカシアで良好に生育するのか？生育可能な場合でも十分に前処理ができるのか？さらには、そもそも既存の微生物を利用した前処理、糖化・発酵プロセスをアカシア用に最適化させるのか？それとも、アカシアを品種改良して既存のプロセスに適用させるのか、どちらが良いか見極める必要がある。アカシアが群生している地域での微生物コンソーシアムの生態学的研究やアカシアと微生物 (木材腐朽菌など) を用いたバイオマス変換に関する知見などがほとんどないためその辺りの基礎データをまずは集める必要があるだろう。なお、我々は、タイで単離した白色腐朽菌のラッカーゼ (リグニン分解酵素の一種) がエタノール生産の障害となる発酵阻害物質を著しく軽減することを発見している²⁴⁻²⁶⁾。そのような事

例を踏まえると、熱帯地域の豊富な植物資源だけに目を向けるのではなく、微生物資源も豊富であると考えられることから、アカシアのバイオマス変換に力を発揮する微生物のスクリーニングも有用であるのではないだろうか。

4. 熱帯バイオマス資源を取り巻く諸事情と日本

2007年3月上旬に欧州連合(EU)が2020年までに温室効果20%削減を承認し、バイオ燃料に関しても自動車燃料比率1割を目標にした²⁷⁻²⁸⁾。バイオディーゼル世界最大の生産を誇るEUだが、最近、菜種油よりも安価なパーム油を原料としたバイオディーゼルが魅力ということから、パーム油及びパーム油由来のバイオディーゼルの輸入する動きが出始めた。そのような先進国のバイオ燃料市場の拡大を受け、世界最大のパーム生産国であるマレーシアやインドネシアなどでは熱帯雨林を伐採して、先進国に輸出するパームを栽培する動きもあり、パーム油から作ったバイオディーゼルは石油よりも熱帯雨林を破壊していると批判されている。また、単一のエネルギー作物の栽培は果たして環境に良いのかという問題、さらには、東南アジアからEUなどの先進国まで輸送することへの批判が出ている^{11, 29)}。ただ単に「バイオマス資源からバイオ燃料を生産して使えば良い」というコンセプトから、「原料の種から燃料タンクまで」という全体における環境負荷を考慮した持続可能なバイオ燃料のみを推奨するコンセプトが極めて重要になってきている。

日本の温室効果ガス総排出量(2005年度)は13億6,000万トンで、京都議定書の規定による基準年(原則1990年)と比べ7.8%増である。京都議定書の削減目標は6%であることから、単純計算で約14%もオーバーしている。なお、温室効果ガス総排出量の中で95%以上を占め、最も温暖化への寄与が高い二酸化炭素は、2005年度の排出量が12億9,300万トンで、基準年と比べて13.1%も増加し、6%の削減目標を考慮すると20%近くもオーバーしている³⁰⁾。一方、日本の中東への原油依存度は88.4%(2005年)、エネルギー自給率4%(2004年;ただし、原子力を含めると18%)である³¹⁻³²⁾。2002年に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定され、未回収の資源の資源化について調査が進められた³³⁾。しかしながら、国土に占める農地の割合が少ない、大規模な生産、効率的回収・資源化は容易でないことが判明した。一方、世界の4割以上のバイオマス資源を保有し、輸送などのコストの優位性のあるアジア諸国は資源の乏しい日本にとっては魅力的である。ところが、バイオマスを生産できる土地は「有限」で、しかも、EU、アメリカ、中国、韓国は、東南アジアにおいてすでにバイオマス資源確保で先行している。日本が海外のバイオマスを必要としているときに、日本が関わられる資源がないという状況は絶対避けなくてはならない。

その後、2006年3月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」の見直しが閣議決定された。その中では、「バイオマス由来燃料の本格的導入」「アジア諸国におけるバイオマスエネルギー導入への積極的関与・関連技術移転推進」と表現されている。バイオマス利用の面では、食糧と競合しないセルロース系バイオマスのバイオリファイナリーはかなり重要な位置を占めるのは必然で、アカシアなどの熱帯早生樹などはバイオマス資源として有望視されると思われる。一方、バイオマス以外においては、日本が誇る高い技術、例えば、太陽光発電や燃料電池などの非化石燃料のさらなる普及と技術力の向上³⁴⁾、さらには、原子力の積極的な利用も重要と思われる³⁵⁾。一極集中型のエネルギーへの依存はせずに、小規模に分散させる再生可能なエネルギー資源の確保及び分散型エネルギーネットワークの構築が日本のエネルギー供給の安全保障上不可欠なのではないだろうか。

参考文献

- 1) Pimentel, D. and Patzek, T. W., Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower, *Nat. Resour. Res.*, **14**, 65-76, 2005.
- 2) Elbehri, A., Cellulosic biomass for bioenergy: Economic and analytical issues, *Economic Research*

- Service and Farm Foundation Workshop on Biofuels, Washington, D. C., Feb. 27, 2007:
<http://www.farmfoundation.org/projects/documents/ElbehriCellulosic.pdf>
- 3) Wang, M., Energy and greenhouse gas emissions impacts of fuel ethanol, NGCA Renewable Fuels Forum, the National Press Club, Aug. 23, 2005: <http://www.oregon.gov/ENERGY/RENEW/Biomass/forum.shtml>
 - 4) 渡辺隆司, バイオフィファイナリーの最近の展開と白色腐朽菌によるリグノセルロース前処理, 木材学会誌, **53**, 1-13, 2007.
 - 5) <http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/35523.pdf>
 - 6) 大聖泰弘, 三井物産株式会社, 図解バイオエタノール最前線, 工業調査会, 東京, pp. 12-17, 2004.
 - 7) 社団法人日本エネルギー学会, バイオマス用語辞典, オーム社, 東京, pp. 180-183, pp. 356-357, 2002.
 - 8) Samsuri, M., Prasetya, B., Hermiati, E., Idiyanti, T., Okano, K., Syafwina, Honda, Y. and Watanabe, T., Effects of fungal treatments on ethanol production from bagasse by simultaneous saccharification and fermentation, *Proceedings of the 5th International Wood Science Symposium*, Sep. 17-19, 2004, Kyoto, Japan, 317-323.
 - 9) Watanabe, T., Samsuri, M., Amirta, R., Rahmawati, N., Syafwina, Prasetya, B., Tanabe, T., Ohashi, Y., Watanabe, T., Honda, Y., Kuwahara, M. and Okano, K., Lignin-degrading fungi as a biotechnological tool for biomass conversion, Sustainable Development and Utilization of Tropical Forest Resources (Imamura, Y, Umezawa, T. and Hata, T. eds), Universe Printing, Kyoto, Japan, pp. 167-173, 2006.
 - 10) Wirawan, S. S., Current and future usage of biofuels in Indonesia, *Conference proceedings in Australia-Indonesia Joint Symposium in Science and Technology*, Sep. 13-14, 2006, Jakarta, Indonesia: <http://www.science.org.au/events/indonesia/wirawan.htm>
 - 11) 松村正利, サンケアフューエルズ株式会社, 図解バイオディーゼル最前線, 工業調査会, 東京, pp. 70-73, 2006.
 - 12) The Jatropha network worldwide: <http://www.jatropha.net/network.htm>
 - 13) 日本植物燃料株式会社 Jatropha Project: <http://www.nbf-web.com/japanese/jatropha.html>
 - 14) 社団法人日本エネルギー学会, バイオマスハンドブック, オーム社, 東京, pp. 259-263, 2002.
 - 15) Muladi, S., Kusuma, I. W., Amirta, R., Kordsachia, O. and Patt, R., Elementary chlorine free bleaching in Kraft pulping process for several timber species in East Kalimantan, Tropical woods, properties and utilizations (Muladi, S. and Arifin, Z. eds), Gadjah Mada University Press, Indonesia, pp. 215-222, 2005.
 - 16) Muladi, S., Arifin, Z., Arung, E. T., Yuliansyah, Amirta, R. and Patt, R., The prospect of *Acacia mangium* Willd. as a raw material of pulp and paper in Indonesia, Tropical woods, properties and utilizations (Muladi, S. and Arifin, Z. eds), Gadjah Mada University Press, Indonesia, pp. 174-184, 2005.
 - 17) Prasetya, B., Subyakto, Sudijono and Idiyanti, T., Utilization of *Acacia mangium* bark as binder for production of kenaf-fiber board and possibilities to increase its lignin and tannin content by degradation of holocellulose using brown rot fungi, *Proceedings of the 3rd International Wood Science Symposium*, Nov. 1-2, 2000, Kyoto, Japan, p. 347.
 - 18) Kuspradini, H., Yusuf, S., Meshitsuka, G., Suprptono, B. and Sardjono, M. A., An analysis of caloric values and characteristics of wood fuel quality preferred by some forest communities of Malinau in East Kalimantan, Tropical woods, properties and utilizations (Muladi, S. and Arifin, Z. eds), Gadjah Mada University Press, Indonesia, pp. 318-326, 2005.
 - 19) 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.
 - 20) 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>

- 21) 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, 155-158.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) Chawachart, N., Watanabe, T., Khanongnuch, C. and Lumyong, S., Rice bran as an efficient substrate for laccase production from thermotolerant basidiomycete *Coriolus versicolor* strain RC3, *Fungal Divers.*, **15**, 23-32, 2004.
- 25) Khanongnuch, C., Wanphrut, N., Lumyong, S. and Watanabe, T., Thermotolerant wood rotting fungi isolated from northern Thailand and their potential uses in lignin degrading applications, *Fungal Divers.*, **15**, 187-196, 2004.
- 26) Nishi, K., Treatment of the fermentation inhibitors from wood by *Trametes versicolor* RC3 laccase, *Sustainable Humanosphere*, **2**, p. 32, 2006.
- 27) 温室効果ガス EU, 20% 削減 首脳会議「20年までに」承認, 産経新聞社記事, 2007年3月10日.
- 28) バイオ燃料:自動車燃料比率, EUは1割目標—20年までに, 毎日新聞社東京朝刊記事, 2007年2月25日.
- 29) 松村正利, サンケイフェューエルズ株式会社, 図解バイオディーゼル最前線, 工業調査会, 東京, pp. 42-44, 2006.
- 30) 環境省 日本の温室効果ガス排出量・排出係数: <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/index.html>
- 31) 外務省 主要各国における原油輸入の中東依存度・OPEC 依存度の推移:
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/energy/pdfs/b-6.pdf>
- 32) 北海道電力株式会社 日本のエネルギー自給率はわずか4%:
http://www.hepco.co.jp/ato_env_ene/atomic/pluthermal/02-02.html
- 33) 農林水産省 バイオマス・ニッポン: <http://www.maff.go.jp/biomass/>
- 34) 中谷巖, 日本は地球温暖化対策で指導力を, 正論, 産経新聞社, 2007年3月10日:
<http://www.sankei.co.jp/ronsetsu/seiron/070310/srn070310000.htm>
- 35) International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2006:
<http://www.worldenergyoutlook.org/nuclear.asp>

森林バイオマス評価分析システムにおける リグニン分析プロトコール*

梅澤 俊明^{** ***}, 和田 将平^{**}, 山村 正臣^{**}, 榊原 紀和^{**}, 中坪 朋文^{**}, 鈴木 史朗^{***},
服部 武文^{**}, 幸田 みどり^{**}

Protocols for lignin analysis for Forest Biomass Analytical System of RISH, Kyoto University*

Toshiaki Umezawa^{** ***}, Shohei Wada^{**}, Masaomi Yamamura^{**}, Norikazu Sakakibara^{**},
Tomoyuki Nakatubo^{**}, Shiro Suzuki^{***}, Takefumi Hattori^{**}, and Midori Koda^{**}

概要

京都大学生存圏研究所森林バイオマス評価分析システムにおいて、技術員向けにリグニン分析プロトコールを改変した。

1. はじめに

今後人類が持続的生存を維持するためには、再生可能バイオマス資源に依拠する社会の構築が必須である。ここで、優良土地は食料生産に譲らざるを得ず、資源・エネルギー生産用森林バイオマスの生産適地の拡大は今後望めない。従って、先端樹木バイオテクノロジーを用いた、劣悪環境林地における効率的な森林バイオマス系原材料・エネルギーの安定供給と利用システム構築が世界的に緊急の課題となっている。これらは、当研究所のミッションのうち、環境計測・地球再生、太陽エネルギー変換・利用、循環型資源・材料開発、およびアカシアプロジェクトに密接にかかわっている。そして、環境修復、持続的森林バイオマス生産、バイオエネルギー生産、高強度・高耐久性木質生産などを最終目標として、現在さまざまな形質転換樹木の作出が試みられつつある。加えて、関連する基礎科学分野においても、種々の遺伝子機能を検証するために様々な形質転換植物が活発に作成されている。

これらの研究開発においては、木質バイオマスの本体である細胞壁の性質が、形質転換体と野生型とでどう違うかを正確に解析することが必須である。木質バイオマスは細胞レベルから分子レベルにいたるまできわめて複雑であり、その正確な評価には専門的技術を要する。これらの評価方法はいわゆる木材分析であるが、確立されて久しい技術であり、それ自体は先端研究対象となるものではない。しかし、熟練を要し、昨今流行の試薬キットなどとは異なり、未習熟の誰でもが簡単に結果を出せるような手法ではない。よって、昨今、木材分析に不慣れな研究者から、形質転換植物の評価分析に関する依頼が多く寄せられていた。さらに、バイオマスから燃料、有用化学品などを生産するバイオリ

* 2007年8月20日受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林代謝機能化学分野
E-mail: tumezawa@rish.kyoto-u.ac.jp

*** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存基盤科学研究ユニット

ファイナリーが近年急展開しており、木質バイオマスの変換効率を左右するリグニンの構造分析に関する要望が増加している。

そこで、これらの要望に応えるため、本研究所では、平成 18 年 4 月 1 日付で森林バイオマス評価分析システム (Forest Biomass Analytical System, FBAS) を立ち上げ、全国共同利用施設としての運用を開始した。

ここで、リグニンの構造解析手法であるチオアシドリシスおよびニトロベンゼン酸化分解、リグニン定量法であるクラソンリグニン法およびアセチルブロマイド法の標準プロトコールは、研究者や学生が時間無制限に行うことが暗黙の前提となっていることから、まず、技術員の勤務形態に即したものに改良した。

2. リグニンの化学分析プロトコール

リグニン分析のうちアセチルブロマイド法、チオアシドリシス法、ニトロベンゼン酸化分解法について、プロトコールの改変を行なった。それぞれにつき、参照した文献は、以下の通りである。アセチルブロマイド法¹⁻²⁾、チオアシドリシス法³⁾、ニトロベンゼン酸化分解⁴⁾。これらの文献の実験条件を、技術員の勤務時間 (9:00 ~ 17:00) 内で消化できるものに改変したものが以下のプロトコールである。

2.1 アセチルブロマイド法

1. 前日によく乾燥させたサンプルを、実験直前に再度 1 時間ほど真空ポンプで乾燥させる。
2. キャップ付試験管に試料 10 mg とスターラーバーを入れる (湿気を取りこむのですばやく)。
3. *アセチルブロマイド試薬を 5 mL 入れ、キャップを閉じ、さらにパラフィルムを巻いて密封する。
(作業はドラフトで行い、試験管内のガスを吸わないようにする)
4. 50°C のオイルバス中で 6 時間反応させる。
5. 100 mL メスフラスコに酢酸 20 mL、2M NaOH 10 mL を入れ、そのメスフラスコに 6 時間後の反応液を全て移す (酢酸で何度か洗う)。0.5 M 塩酸ヒドロキシルアミン 3.5 mL を加え、100 mL まで酢酸でメスアップする。(作業はドラフトで行い、試験管内のガスを吸わないようにする)
6. 石英セルを用いて、分光光度計で 200 ~ 400 nm のスペクトルを測定する。
7. 280 nm における吸光度の値を**計算式に代入することで、リグニン含量を算出する。

*アセチルブロマイド(99%)-酢酸 ; 1:3 (v/v)

**リグニン含量 (%) = {(100 x 吸光度 x V) / (A x W)} - B

V: 溶液の量 (L) (本プロトコールではこの値は 0.1)

A: 標準リグニンの吸光度係数 = 20.09

W: 試料の重量 (g)

B: パルプのときのみ使用する補正係数

2.2 チオアシドリシス法

1. 前日によく乾燥させたサンプルを、実験直前に再度 1 時間ほど真空ポンプで乾燥させる。
2. キャップ付試験管に試料 10 mg とスターラーバーを入れる (湿気を取りこむのですばやく)。
(以下の作業はドラフトで行い、試験管内のガスをなるべく吸わないようにする)
3. サンプルが入っている試験管に*チオアシドリシス試薬を 3 mL、内標としてドコサン (1 mg/mL) 50 μ L を加え、キャップし、パラフィルムを巻いて密封する。
4. 100°C のオイルバスで 4 時間反応させる。
5. 4 時間後、試験管を氷水で冷却し、0.4M NaHCO₃ を 5 mL 加える。
6. 希塩酸を用いて反応液を pH 3~4 にあわせる。
7. ジエチルエーテルで抽出し、エーテル層を回収する。(3 回)

8. 回収したエーテル層をエバポレーターで濃縮する。
9. 濃縮したエーテル層に適量の無水硫酸ナトリウムを加え、マイクロチューブに数滴（1, 3, 10 滴など）移し、減圧溜去する。
10. BSA 8 μ L 加え、TMS 化する（60 $^{\circ}$ C, 45 min）。
11. GC-MS 分析に供する。

*チオアシドリシス試薬：エタンチオール（97%） 2.5 mL
 $\text{BF}_3 \cdot \text{Et}_2\text{O}$ （47%） 0.625 mL
 1,4-ジオキサンで 25 mL までメスアップ

2.3 ニトロベンゼン酸化法

1. 前日によく乾燥させたサンプルを、実験直前に再度 1 時間ほど真空ポンプで乾燥させる。
2. テフロンチューブに試料 100 mg 入れる（湿気を取りこむのすばやく）。
3. 2M NaOH を 2 mL、ニトロベンゼンを 0.24 mL 加え、ソニケーターを用いて液内のサンプルの塊をつぶす。このときサンプルがまだつぶれないようであればスパテルを用いてつぶす。
4. さらに 2M NaOH 2 mL で壁を洗う。
5. テフロンチューブを専用のオートクレーブに入れ、反応させる（170 $^{\circ}$ C, 1 h）。
6. オートクレーブ温度が 100 $^{\circ}$ C 以下になったところで、テフロンチューブを取り出し氷水で冷ます。
7. 内標としてアセトバニロン（10 mg/mL）100 μ L を添加する。
8. 綿を詰めたカラムで反応液をろ過する。
9. 0.1M NaOH 2 mL でテフロンチューブ内壁を洗い、カラムに通しろ過する。（5 回）
10. ろ液に酢酸エチルを加え、抽出する。（3 回）
11. 水層のみを回収し、4M HCl を用いて pH 2~3 にする。
12. この水層に酢酸エチルを加え、抽出する。（3 回）
13. 酢酸エチル層のみ回収し、これに飽和食塩水を加え脱水する。
14. 酢酸エチル層のみ回収し、これに適量の無水硫酸ナトリウムを加え、さらに脱水する。
15. 酢酸エチル層を減圧溜去する。
16. 減圧溜去したサンプルを 25 mL の酢酸エチルに溶解させ、そのうち適量をマイクロチューブに移し、再度減圧流去する。
17. BSA 8 μ L を加え、TMS 化する（60 $^{\circ}$ C、45 min）。
18. GC-MS 分析に供する。

2.4 GC-MS 分析条件

ガスクロマトグラフィーカラムは SHIMADZU Hicap CBP-10-M25-025 (20 m x 0.2 mm) を使い、インジェクションポートの温度は 240 $^{\circ}$ C、インターフェースの温度は 250 $^{\circ}$ C に設定する。分析時のカラムの昇温条件は 0~2 min の間は 40 $^{\circ}$ C で、その後 230 $^{\circ}$ C まで 40 $^{\circ}$ C/min で昇温する。キャリアーガスとして He を使い、スプリットレスインジェクションで行う。キャリアーガスの全流量は 0.5 mL/min に設定している。

参考文献

- 1) Dence, C. W., The Determination of Lignins, in *Methods in Lignin Chemistry*, Lin, S. Y. and Dence, C. W., eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 33-61, 1992.
- 2) Hatfield, R. D., Grabber, J., Ralph, J., Brei, K., *J. Agric. Chem.*, **47**, 628-632, 1999.
- 3) Saito, K., Fukusima, K., *J. Wood. Sci.*, **51**, 246-251, 2005.
- 4) Katahira, R., Nakatsubo, F., *J. Wood. Sci.*, **47**, 378-382, 2001.