



生存圏科学への招待

第二版 2015. 2. 15

Research Institute for
Sustainable Humanosphere (RISH)
Kyoto University



目 次

第 1 章 人類社会を支える生存圏

1.1 はじめに	1
1.2 「生存圏科学」とは	1
1.3 21 世紀社会が抱える問題	4
1.4 生存圏科学ミッション	8
1.5 生存圏研究所の活動の総括	10

第 2 章 地球環境

2.1 生存圏の現状・理解・方策	11
2.2 地球環境の変動と植物の環境応答	13
【コラム】DASH/FBAS	20
2.3 大気環境の先端モニタリング	21
【コラム】MU レーダー	26
【コラム】赤道大気レーダー	27
2.4 森林が支える地球環境	35
2.5 環境問題の解決に向けて	44
2.6 次の時代に向けて	50
【コラム】熱帯における年輪気候学に関する基礎研究	52
【コラム】インドネシア・アカシアマンガウム大規模造林地における降水観測	53

第 3 章 太陽エネルギー変換・利用

3.1 太陽エネルギー利用の現状と課題	57
3.2 太陽エネルギーの高度利用 - 宇宙太陽発電 -	60
【コラム】METLAB/SPSLAB	66
3.3 太陽エネルギー蓄積物である植物バイオマスの有用物質への変換	68
3.4 電磁波の生体影響	80
3.5 太陽エネルギーを利用した生存圏のあり方	87

第4章 木質資源

4.1 木質資源と生存圏の科学	91
4.2 熱帯におけるバイオマス生産	95
4.3 これからの木質バイオマス資源の生産と利用	102
4.4 バイオリファイナリー	109
4.5 これからのバイオマス材料	117
【コラム】 ADAM	130
【コラム】 DOL/LSF	131
【コラム】 木質材料実験棟	133
【コラム】 熱帯におけるアカシア植林事業	134

第5章 宇宙利用

5.1 地球と宇宙圏との関わり	137
5.2 宇宙環境利用研究で目指すもの	138
5.3 人類が利用する宇宙環境とは	139
5.4 宇宙圏と人間生活圏との関わり	146
5.5 宇宙環境の利用	150
5.6 宇宙環境アセスメント	154
5.7 まとめ	160
【コラム】 先端電波科学計算機実験装置 (A-KDK)	161
【コラム】 科学衛星が拓く宇宙環境理解の科学	162
【コラム】 木材でつくる宇宙用素材	163

第6章 持続的生存圏の構築に向けて

6.1 持続的生存圏構築に向けた取り組み	165
6.2 生存圏ミッションの役割	166
6.3 生存圏と人の健康	169
6.4 千年居住圏の科学 – 木質科学と木の文化の融合	176
6.5 生存圏科学の国際化推進	182
【コラム】 アジアリサーチノードを核とした生存圏科学の国際展開	184
【コラム】 赤道 MU レーダー計画	185
6.6 生存圏の未来へ向けて	186



第1章 人類社会を支える生存圏

1.1 はじめに

2007年に打ち上げられた日本初の月探査機「かぐや (SELENE)」が送信してきた地球のハイビジョン映像は、青くたおやかな海、ダイナミックに動く白い雲、森林に覆われた大地を描き出し、荒涼とした月面のかなたに浮かぶ奇跡のような美しい惑星「地球」に人類が生きていることの幸福を感じさせた。同時に、我々はこの限られた空間に生き続ける運命にあることが改めて認識された。現在、世界人口は70億人に達し、今世紀中には100億人を越える予想されている。有限なリソースしかない地球に、いかに持続的発展可能な社会を構築していくかが我々に課せられた喫緊の命題である。

太古より、人類の生存環境を形成する大気圏は太陽放射エネルギーで駆動され、森林は光合成により生育している。自然界の絶妙なバランスのもとで形成された環境のもとで、人類は、誕生からその進化の長い過程で、植物資源を活用しつつ文明を築き、自然界との調和のもとで人間生活圏が形成されてきた。しかし、近代文明の急速な発展にともない、我々は、数千万年をかけて地球が蓄積してきた化石燃料を、わずか3百年で消費し尽くそうとしている。さらに、資源・材料、食料の枯渇も目前に迫っている。不十分な統制のもとでの消費拡大によって地球環境が悪化し、森林生態系が荒廃するといった例で分かるように、人間活動が自然界のバランスを崩しうるほど強大になってきている。この劇的な変動の中で、我々はどのような将来像を描こうとしているのか、世界中が深い関心と不安を抱いているが、その答えは一義的には得られない。将来に向けて人類が取りうる選択肢が多岐にわたり、それらに内包される自然界への働きかけとフィードバックが複雑で予測が困難であることが要因である。

我々は、人類の様々な活動を支え、人類が協調的に相互作用する空間を「生存圏 (Humanosphere)」として捉え、それを俯瞰する壮大なパラダイムを創成するとともに、持続的発展可能な社会の構築に向けた科学技術の振興を基礎に、将来の発展に向けた道標を示すことが重要である。

1.2 「生存圏科学」とは

21世紀には環境、エネルギー、宇宙利用、資源・材料をはじめ人類の生存を脅かす様々な困難が起こっており、それらの解決が喫緊の課題となっている。生存圏研究所は、人類の生存を直接支える領域を「生存圏」と定義し、これが「宇宙圏」、「大気圏」、「森林圏」、および「生活圏」を連結することで構成されたと考える。ここで、「圏」は空間を指すだけでなく、そこに生起する様々な現象ならびにそれらに関係する科学・技術を含む。

「生存圏科学」は、「生存圏」の現状を精確に診断して評価することを基礎に、「生存圏」が抱える諸問題に対して、包括的視点に立って解決策（治療）を提示する学問分野を、科学研究と技術開発を

一体化することで創成することを理念としている。

まず、4 圏の特徴と、現在生存圏研究所（生存研）で取り組んでいる課題を述べる。

宇宙圏：

宇宙圏は地球周辺宇宙および太陽を中心とする惑星系を指す。地球外からのエネルギー・物質流入のほとんどは太陽を源としており、11 年周期を基本とする長期の太陽活動は地球の気候を制御している。また、突発的な太陽面爆発および太陽風により、地球周辺宇宙の状況は大きな影響を受ける。宇宙環境を探査機により直接観測し、同時に数値シミュレーションで宇宙プラズマ現象を再現し、その特性を科学的に理解することが重要である。

地球周回衛星は、通信、放送、測位、地球観測に広く用いられており、現代社会を維持するうえで必須の社会インフラとなっている。年々過密となって人工飛翔体（デブリ）や地球外からの隕石・流星による衝突は、社会インフラを機能不全にするだけでなく、人類の脅威にもなっている。安全な宇宙利用を維持するために、最先端の宇宙航行工学を駆使することが重要である。

太陽は 50 億年前に誕生し、これからも数十億年輝くとされている。700 万年にわたる人類活動とその環境は、太陽エネルギーを直接・間接的に享受することで維持されてきた。しかし、悠久の時間をかけて太陽エネルギーを蓄積してきた化石資源が短期間に消費つくされようとするなか、人類は安定したエネルギー源である太陽を能動的に活用することに帰着する必要がある。近未来に実現できるバイオマス燃料に加え、宇宙空間に無尽蔵に放たれている太陽放射を活用する「宇宙太陽発電」は世紀を超えて人類が生存するために重要な構想である。

大気圏：

大気圏は森林圏、生活圏と隣接し、同時に宇宙圏の影響を受けて形成されており、気温の高度構造によりいくつかの層に分類されている（下層から対流圏、成層圏、中間圏、熱圏）。高度約 100km までは、二酸化炭素をはじめとする温室効果気体が熱収支を支配するとともに、オゾン層が生命体にとって有害な太陽紫外線を吸収して地上の生命活動を保護している。しかし、人類の産業活動により放出される気体が温室効果を加速し、オゾン層破壊を引き起こしている。大気圏の現状を精緻に把握し、それを基礎に将来予測するための研究基盤が求められている。

大気の流れや大気質（微量成分、塵など）をレーダー等による光・電波リモートセンシング、気球測定、および人工衛星からのグローバル観測で知り、さまざまな時間・空間スケールの大気現象を理解する必要がある。天気予報の発展で風速・気温は比較把握されやすくなってきたが、大気質の時空間変動は未解明で、特に、気体発生源となる森林圏、生活圏（都市域）との相互作用が未知なため不確定な部分が多い。新しい観測技術開発による観測データの高精度化、ならびに環境情報の高度利用を進める必要がある。

地域としては、太陽加熱が最大となり活発な積雲活動が大気の熱的バランスに大きく寄与する熱帯域における大気圏情報が重要であり、インドネシアで運用されている赤道大気レーダーをはじめとした総合観測に期待が集まっている。さらに、微量気体の発生源である、植生を含む陸域生態系および水圏・地圏と大気圏との相互影響の探究が大きな鍵となる。一方、地表から惑星間宇宙につながる大気層の間の上下結合、さらに太陽地球結合過程の解明が、大気圏におけるエネルギー・物質輸送の観

点から重要である。

森林圏：

森林圏は、樹木が集積する場としての森林および森林近傍の物質循環系、物質生産系を指す。森林が生産する木質バイオマスは再生産可能な生物資源の中で生産量が最も多く、地球の炭素および水循環の重要な一翼を担っている。森林圏は、木材の生産の場であるのみでなく、樹木や草本、菌類、土壌微生物、昆虫、鳥類、爬虫類、両生類、哺乳類など様々な生物の生息の場を与えることにより、生物多様性、遺伝子資源の保持に寄与する。また、森林は、有機物の発散と吸収、水の保持・蒸散作用、酸素や温暖化ガスの吸収と排出などを通して、地球気候システムに大きな影響を与える。さらに、森林は文化をはぐくむとともに、土砂災害の防止、水源の供給、健康増進やレクリエーション機能をもつ。また、落葉などを通して土壌に養分を供給し、さらに河川を通じて海へ栄養を供給し、海洋の生態系にも影響を与えている。

森林圏は地球温暖化の原因となっている CO_2 の吸収・蓄積や、化石資源代替材料を供給することにより温暖化ガスの排出削減に貢献する。生存研では、森林圏が育む植物バイオマスから、燃料、化学品、機能性材料などを高効率で生産する変換方法を開発するとともに、木造住宅などの高耐久性木質構造体の開発、木材劣化生物の生理や劣化を受けにくい木質材料の開発を進めている。さらに、大気圏のリモートセンシングやフィールド観測による森林・大気相互作用のモニタリングを行うとともに、バイオ燃料などの物質生産に適した植物や、環境汚染物質の分解力に優れた植物を遺伝子組換えにより育種する研究を推進している。

生活圏：

生活圏は大気圏、森林圏等と接する日常的人間活動の場を指す。人口増や産業活動の爆発的な増大により資源・エネルギーの枯渇が問題となっている。無尽蔵の太陽エネルギーに依存した持続発展可能社会の基盤構築が解決策のひとつである。陸地面積の3割を占める森林において、光合成により持続的に生産される植物バイオマスは地球上に約1兆8千億トン蓄積されており、埋蔵が確認されている石油資源の10倍以上と見積もられる。バイオマス資源をベースとして持続的にマテリアルおよびエネルギーを循環生産させる社会を可能にするには、木質バイオマス供給先としての森林の持続性に加え、木質バイオマスからのセルロースナノファイバーなどの高機能素材やバイオケミカル、バイオマスエネルギーの開発が重要である。

また、古来から培われてきた、木材選択や建築利用の知恵をデータベース化し活用することは、持続発展可能な未来社会の構築に重要である。生活圏に対する大きな脅威である地震や台風などの自然災害に対し、安穩に暮らせる居住空間が必要なことはいうまでもない。我が国には自然災害に耐え千年を超えて実在する法隆寺や、部材交換により古の姿をとどめる建築技術が脈々と受け継がれてきている。そのような建築的技法を分析し、その手法を活用するとともに最先端材料・技術を融合することにより、安全で安心して生活のできる生活圏の創造を目指す。

これらの「宇宙圏」、「大気圏」、「森林圏」、「生活圏」は独立して存在するものではなく、個別の圏が相互に影響を及ぼしつつ人類が生存する場である「生存圏」を形成する。既存の学問分野は、この

生存圏を包括的に理解する取り組みが弱く、将来、人類が進むべき指針を与える新たな学問分野の創成が望まれていた。これらの4圏を統合する「生存圏科学」は、持続発展可能な社会を構築するために必須となる問題解決型の科学的体系を整えつつある新しい学理である。

未知の真理追究という科学研究と、差し迫った課題に対する定量的な解決策を提示する技術開発とでは、価値観や時間スケールが異なる場合があるが、科学と技術を調和的に一体化させることで課題解決型の学問分野の創成につながると考えている。生存圏研究所では、こうした生存圏の正確な診断を基礎に、生存圏の課題を科学的かつ包括的に理解し、問題解決に向けて異分野融合研究を展開する。

個別の研究グループ内での議論にとどまらず、学内・学外における異なる領域の専門家が人類の直面する現状と解決策を様々な視点から捉え、共通の理解を深める場を提供することに努めている。さらに、新たな価値観を持った若手人材の育成、ならびに共同研究集会などを通じて研究成果を社会に発信・還元する取り組みにも重点を置く。

1.3 21世紀社会が抱える問題

地球環境：

生存圏を構成する宇宙圏、大気圏、森林圏、生活圏すべてにわたって、人間の生存基盤を支えるのは太陽からの光のエネルギー（放射）である。この太陽からの放射エネルギーが、生存圏内においてどのように分配され、どう利用され、どういったバランス状態にあるのかを把握することは生存圏内に生起する現象を理解し将来の道筋を示す上で必須といえる。我々の地球環境は絶えずダイナミックに変動しているが、近年人間活動にともなう化石燃料の大量消費や人為起源物質の大量放出によって、急速にそのバランスが崩れつつある。いわゆる地球温暖化やオゾン層破壊として知られる環境問題が急速に顕在化してきている。この地球環境を健全な状態で維持し続けるために、われわれは生存圏について科学的に適切な現状認識を持って、そこから見いだされる問題点に対する対策を提示していかなければならない。そのためには、地上あるいは衛星からの高精度測定を通して大気圏の診断を行うことが基本となる。また、木質資源の持続的な生産利用システム構築に向けた基盤作り、特に大気圏と森林圏との接点に注目して、地球環境の変動と植物の環境応答の観点から問題を捉え、先端的なモニタリング手法にもとづいた測定を実施して地球の大気質変動の監視を行うことも必要となるであろう。このような診断的アプローチに加えて、再生可能資源により依存した循環型社会を構築することも忘れてはならない。再生可能資源の中でも最も多量に存在する木質資源は森林で生産されるので、自然林あるいは人工林の回復と保全を実現しながら、持続的に木質資源を蓄積・利活用するシステムを目指す地球再生プランの具体化が求められている。

このような問題意識のもと、研究所が取り組む4つのミッションの一つとして我々は「環境計測・地球再生」を掲げる。自然界において光合成というユニークな役割を果たす植物の機能に注目し、その機能を解明し改良していくこともまた一つのアプローチである。さらに、次の研究フロンティアとして土壌圏も視野に入れ、たとえば土壌中における持続可能な方法でのバイオマス生産の可能性を追及する。こういった地球環境に関わる課題に対して、科学的な知見の積み重ねによって問題解決を行い、その対応策をスピーディーに行うこと、言いかえると診断的確さと治療の迅速さを実践していく必要がある。

エネルギー：

石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料は過去の太陽エネルギーの堆積物であるため、その使用により、蓄積された二酸化炭素が放出され、現在の炭素循環系に余分な付加を与え、深刻な地球温暖化問題を引き起こしている。人類の持続的発展の為には炭素循環の平衡を壊さないよう、太陽エネルギーの変換・利用によるクリーンエネルギーの有効活用を積極的に推進する必要がある。また、地球人口の爆発的増大のため今世紀中盤以降には人類の経済活動に見合うエネルギーを化石資源から供給できないと予想されており、社会基盤を化石資源の消費から、再生産可能な太陽エネルギーの変換利用に転換することが強く求められている。

現在盛んに研究・産業化が図られている太陽エネルギー利用技術に太陽光発電と風力発電がある。しかし、これらの発電単価は他の石油火力発電や原子力発電の発電単価に比べるとまだ非常に高く、結局このコストは電気を利用する側が負担することになる。また、発電量の変動が大きいため、安定した電力供給が難しい。このように、再生可能エネルギーの利用では、既存の太陽光発電や風力発電のみに頼るのではなく、様々なエネルギー生産法のベストミックスにより、設備の生産から流通、発電、廃棄までのトータルライフでのCO₂排出負荷が小さく、安全性や経済性も高い安定したエネルギー供給システムを構築することが必要である。こうした点から、100万kW規模の巨大エネルギーを安定して供給する宇宙太陽光発電（SPS）を、次世代エネルギーの一つとして利用すべく研究を加速させる必要がある。生存圏研究所ではSPSの研究を進めると同時に、その研究資産を生かし、マイクロ波無線電力伝送応用の研究を進めてきた。マイクロ波無線電力伝送は、電気配線をマイクロ波無線に置き換える「マイクロ波建物」や電気自動車の無線充電など様々な応用が可能であり、人々の暮らしを便利にするとともに、省エネ技術を介して二酸化炭素の排出削減にも貢献する。

化石資源由来のCO₂排出量を用途別に比較すると、鉄鋼業や化学工業等の製造業や運輸の比率が高く、再生可能エネルギーを発電以外の用途に適用することがCO₂削減には最も重要であると言える。CO₂の排出源である石油が発電で消費されるのは10%にも満たず、運輸で約50%を消費する。つまり発電を再生可能エネルギーに置き換えるだけでは我々の環境問題は解決しない。そこで注目されているのが再生可能な唯一の炭素資源であるバイオマスである。自動車燃料としてのバイオエタノールの利用は、すでにブラジル、アメリカ、欧州などで進んでいる。植物油由来のディーゼル燃料であるバイオディーゼルも実用化されており、また、バイオエタノールよりエネルギー量が高く扱いが容易なバイオブタノールの実用化も目前である。体積エネルギー密度の点で電気（バッテリー）よりも液体燃料の方が数十倍優れており、バイオマス由来の液体燃料への期待は高い。さらに、石油化学品や機能性材料をバイオマスから生産する事業が活発化しており、バイオエタノールからポリエチレン、酢酸エチル、トリエチルアミンの生産がすでに実用化されている。バイオマスの利用では、荒廃地での森林再生ともリンクして、非可食資源であるセルロース系バイオマスからの燃料や化学品原料を生産する研究を拡大することが重要である。

電気は、送電線で長距離を輸送する際に大きな送電ロスが生じる。このため、消費地から遠い場所での発電は、エネルギー効率の面において不利となる。バイオマスは、人が住んでいない場所を含め地球上にあまねく降り注がれている太陽エネルギーが炭素資源として固定化されたものであり、固体のまま、あるいは液体に変換して輸送することができる。電力消費地近くのオンサイトでの太陽光発電や風力発電のみでは、地球に降り注がれる太陽エネルギーを、高い効率で利用することはできない。

こうした点からも、炭素固定資源であるバイオマスを紹介したエネルギー・物質変換や宇宙太陽光発電を、持続的な社会を構築するため積極的に進める必要があり、生存圏研究所の重要なミッションの一つとしてとりあげ、研究開発を推進している。

材料・資源：

材料の特性が部品の性能を決め、それが製品の価値に影響する。このことから、様々な材料が人類の手によって産み出され、改良されてきた。金属材料、セラミックス材料、高分子材料およびそれらの複合材料である。ガラスや陶器、磁器はセラミックス材料、木材や皮革は天然の高分子材料である。

特に、産業革命以降の社会において材料が果たした役割は大きい。鉄を耐熱材料として用いることで蒸気機関が発明され、工場生産を飛躍的に高めると共に、蒸気機関車や蒸気船が長距離にわたる人の移動や物の移動を活発化させ、人間の活動範囲を大きく拡大した。

21世紀に入って台頭したのは、石炭や石油を原料とした合成高分子（プラスチック）である。最初の工業化は1907年のフェノール樹脂であるが、20世紀の半ばから大量生産・大量消費の時代を支える素材として、合成高分子の種類、生産量が石油化学産業の繁栄と共に急増した。

プラスチックは、鋼鉄などの金属材料に比べ絶対的強度は低いが、軽くて、その割に強く成型性に優れているなど、使い勝手の良い材料である。車体の軽量化が燃費の向上に大きく貢献する自動車では、バンパーや燃料タンクなどが鉄製部品から軽量のプラスチック部品へと置き換えられつつある。プラスチックは繊維状の材料で補強することで強度を飛躍的に向上できることから、ガラス繊維でプラスチックを補強したガラス繊維強化材料（GFRP: Glass fiber reinforced plastic）が開発され、産業用大型タンクや船体の材料に使われてきた。GFRPより軽量で高強度の材料が、炭素繊維強化材料（CFRP: Carbon fiber reinforced plastic）である。CFRPは燃費の向上を目的としてロケットの燃料タンクや大型旅客機の主翼などに用いられようになっている。

このように高性能材料の開発は人類の生活を豊かにするとともに、人類の生存圏拡大に繋がる宇宙や深海といったフロンティアへの挑戦にも貢献している。その一方で、材料の発展に支えられた人間活動の拡大は、エネルギーや物質の大量消費をもたらし、20世紀の終わりには資源の枯渇や環境汚染、地球温暖化といった人類の生存を脅かす問題が顕在化してきた。

とりわけ、近年、中国やインドといった多くの人口を抱える国での人間活動の活発化は、エネルギーや資源の消費を加速化し、原油や鉄鉱石といった資源の価格高騰をもたらしている。これに対処するために、軽量で高強度の材料、高温強度に優れた材料、超伝導材料といった省エネルギー、省資源に貢献する材料や太陽電池や燃料電池に用いエネルギーを効率的に生み出す材料の開発が進められている。そこでは、ナノテクノロジーに代表される原子レベルや分子レベルでの材料の構造制御が主役である。

並行して、持続型社会の構築に向けて、持続型資源であるバイオマスを用いた材料開発が進められている。バイオマスは生物が生産する資源の総称である。そのなかで最も資源的に豊富なのは水と炭酸ガスから太陽光により生産される植物バイオマスであり、それを石油資源の代替として使おうとする動きがある。環境汚染、資源枯渇など、現代社会が抱える問題を克服して人類の生存圏を確保するには、植物バイオマスの理想的な物質循環システムの構築が必要不可欠になっている。

とりわけ、森林資源（木質）は再生産可能な生物資源の中で生産量が最も多く、生命圏の炭素およ

び水循環の重要な一翼を担っている。その生産過程では水土を保全し、二酸化炭素を吸収して酸素を供給するなど、多面的、公益的な機能を発揮する。また、木質は材料変換に要する加工エネルギーが小さく、比強度、耐久性に富み、人間に対する親和性に優れているばかりでなく、廃棄に際しては公害を発生しない。

このように木質資源は本質的に環境負荷が小さく、再生可能な資源ではあるが、人間活動の増大に伴って、近年、毎年1200万ヘクタールの割合で森林面積が減少を続けており、資源枯渇の危機に直面している。生存圏研究所では循環型資源・材料開発を掲げ、建築用資材や石油代替材料への利用に向けた木質資源の生産、加工、利用、廃棄に至る各段階の低環境負荷型要素技術の開発とともに、カスケード型利用技術を加え、これらを有機的に結合した複合循環的な木質生産利用システムの確立を目指すこととした。

宇宙利用：

宇宙圏、特に地球周辺のジオスペースと呼ばれる宇宙空間は、21世紀の人類の新たな生活圏として、生活に密着している測位衛星、気象衛星等による宇宙空間の利用を促進し、その宇宙圏を安心・安全な空間とすべく技術開発が進められなければならない。宇宙に起因する人類の生存圏に対する危機にかかわる主な課題として、巨大な太陽フレアによる極端宇宙天気、スペースデブリの除去、小惑星衝突の回避がある。

極端宇宙天気の課題は、さらに具体的な問題として、太陽からの高エネルギー粒子による被爆、磁気嵐の際に起こる放射線帯の高エネルギー電子フラックスの変動と極域大気への降下、電離層電流の急激な変動がもたらす電磁誘導により引き起こされる地上の電力系統の障害等、地上および宇宙空間での広範囲な人間活動において深刻な障害を引き起こす可能性がある。これらの過程には、プラズマ波動との非線形波動粒子相互作用が関与しており、その定量的な理解のために、波動生成、粒子加速に関わる素過程の解明が進められている。

また、これまでの人類の宇宙活動によって作り出された塵やゴミのことをスペースデブリと呼ぶが、これらのデブリは軌道上の衛星や宇宙ステーションに対して高速で移動しており、その衝突により多大な損傷が起これば危険である。このスペースデブリをモニターし、除去する技術の開発が宇宙利用における大きな課題となっている。

小惑星や隕石の地球への衝突は、人類が存在する以前から起こっており、地球の歴史の中で珍しいことではない。ロシアでは1908、2013年に大きな隕石が落下して、大気中で巨大な爆発を起こしている。現在、地球近傍で見つかっている小惑星が約1万個程度あり、その内、潜在的に地球に衝突する可能性があるものは約千個あると考えられており、これらの小惑星の軌道を変更する様々な手法が検討されている。

これらの課題の他にも人類が生活圏を宇宙に拡大してゆくのに必要となる惑星探査のための新しい宇宙航行技術の開発や宇宙電磁環境をモニターする技術、新しいエネルギー源としての宇宙太陽発電所を建設するための輸送技術など宇宙利用のために取り組むべき課題は多い。

1.4 生存圏科学ミッション

上に記した我々が抱える様々な課題を受け、生存圏研究所では自らの持つ研究技術や設備を駆使してそれらを解決するべく、4つの研究ミッションを設定し、その推進に当たっている。各ミッションとも、現在の人類生存圏に関する高精度な計測や自然現象の解明に関する基礎研究と、解決すべき課題に対する解決型の研究とで構成されている。それぞれのミッションは、宇宙、大気、森林、人間生活に関する4つの圏に関して重点的な役割分担はあるが、いずれも4圏全てと相互リンクした研究ミッションとなっている。

ミッション1「環境計測・地球再生」:

大気圏を中心とした計測に基づいて、それと隣接する宇宙圏・森林圏・人間生活圏の3圏との相互作用や環境変動を解明するとともに、森林圏で生産される多様な森林資源の構造並びに機能解明を基礎に、森林圏を構成する有用樹種や有用植物の利活用や、環境の保全や修復に役立つ遺伝子の解析、並びに分子育種を介した有用組換え植物によるに取り組む。

具体的な研究課題として、時空間スケールの大気質理解や観測データに基づく環境情報の高度利用、太陽地球結合過程の解明といった大気圏を中心とした研究課題に加え、森林圏から大気中に放出される揮発性有機化合物の大気化学に対するインパクトや、それが森林生物に対して果たす意義の解明、また持続的農業に資するため生態系の窒素循環で大きな役割を果たす生物学的窒素固定の機構解明を行う。人間生活圏と大気質との関係についても、最先端の計測技術を駆使してこれを解明する。より課題解決型の課題として、環境汚染物質の分解と浄化に関する研究はこのミッションの中で推進する。

ミッション2「太陽エネルギー変換・利用」:

化石燃料は何億年という時間をかけて光合成生物が太陽エネルギーを使って堆積した有機化合物であるが、人類は自らの活動のためにこれを燃焼し大量の CO_2 を放出している。これが地球温暖化の原因となり、また一方で化石燃料の枯渇は現実の問題となって来ている。人類の持続的発展のためには、炭素循環の平衡を壊さない太陽エネルギーの変換・利用による、クリーンエネルギーの有効活用を積極的に推進する必要がある。

このミッションでは、環境、エネルギー、宇宙利用、資源・材料をはじめ人類の生存を脅かす様々な困難が CO_2 排出の削減と太陽エネルギーの直接利用をめざし、宇宙太陽光発電とバイオマスエネルギーの実用化に向けた技術基盤の構築を行う。前者に関する根幹技術として、マイクロ波エネルギー伝送技術の開発、後者を支える基本技術としての木質バイオマスの微生物分解・熱化学変換技術の開発を行う。また、木質バイオマスを材料としたバイオケミカルや高機能炭素材料への変換などに取り組み、4圏の間を有機的に連携する太陽エネルギーの変換と利用に関する新しい学際的学問領域創成のための基盤技術の開発に取り組む。

ミッション3「宇宙環境・利用」:

地球周辺宇宙および太陽を中心とした宇宙空間は、人類の生活圏として、生活に密着している測位衛星、気象衛星等による宇宙空間の利用を支え、社会インフラとしての役割を果たしている。その宇

宙圏を安心・安全な空間とすべく技術開発がこのミッションの対象であり、巨大な太陽フレアによる極端宇宙天気、スペースデブリの除去、小惑星衝突の回避といった課題の解決に向けた研究に取り組む。

具体的な研究課題として、地上および宇宙空間での広範囲な人間活動において深刻な障害を引き起こす可能性が指摘されている、太陽からの高エネルギー粒子による被爆、電離層電流の急激な変動による電力システムの障害など、宇宙環境の精密観測と定量的な理解、宇宙プラズマの再現と科学的理解、波動生成、粒子加速に関わる素過程の解明に取り組む。また、人類の宇宙活動に起因するスペースデブリのモニターとそれらを除去する技術開発の研究を行い、宇宙空間の有効利用を推進する。さらに、常に起こりうる大きな自然災害としての小惑星や隕石の地球への衝突を回避するため、宇宙航行工学を駆使した必要な様々な手法の開発を行う。

ミッション4「循環型資源・材料開発」:

高性能材料の開発は人類の生活を豊かにするとともに、人間生存圏の拡大にも貢献している。その一方で、材料の発展に支えられた人間活動の拡大は、原料となる石油など埋蔵資源の大量消費をもたらし、20世紀の終わりには資源の枯渇や環境汚染、地球温暖化といった人類の生存を脅かす問題が顕在化してきた。このミッションでは、循環型資源であり地球上バイオマスの95%を占める木質資源の生産・加工・利用・廃棄の各段階において環境負荷低減技術を開発するとともに、環境保全とバイオマテリアル利活用を両立させるシステムの開発に取り組む。

具体的な研究課題として、森林圏と人間生活圏をリンクさせた木質資源の生産、加工、利用、廃棄に至るカスケード型利用技術開発、高耐久性木質構造体の開発、石油代替材料への利用に向けた新規な木材利用技術などを行う。また古来より伝統の千年に耐える建築技法を分析しそれを最先端材料と融合する研究、木材選択や建築利用に関する情報データベースの充実を図り、安全で安心して生活のできる持続発展可能な未来社会の構築を目指す。

1.5 生存圏研究所の活動の総括

生存圏研究所は、平成 16 年の設立から 10 年間にわたり、この 4 つミッションを推進してきた。平成 24 年度には所内のミッション推進委員会において、これまでのミッション活動を振り返り、(1) 達成できたもの、(2) 課題として残されたもの、(3) 次に推進すべきもの、の 3 つの観点から総括を行っている。

各ミッションで共通して言えることは、当初の計画に対して、概ね推進が順調で期待した成果、あるいはそれ以上の成果が認められたものが多くある一方で、10 年近くの期間の中で社会情勢に立脚した研究トレンドの推移により、研究内容の重要性が変わってきたものや、ミッション研究の具体的なテーマに当たる所員の異動や配置転換などにより、推進の見直しを余儀なくされたものも認められた。

平成 22 年度に行った研究所の外部評価では、生存圏の科学と人との関わりを重視すべきとの評価結果を受けて、研究所の新プロジェクト「生存圏科学の新領域開拓」を立ち上げ、平成 23 年度より各ミッション研究から、人の生活や健康維持などにより直接的に関係のある主要テーマ 5 つを立ち上げ、萌芽的研究テーマと共にその推進に当たることとなった。また、新しく複数の若手研究者が研究所に採用され、こうした構成員の変動に伴って、新しい国内・国際共同研究も発展してきていることがミッション研究の総括の中でも認められている。さらに平成 23 年 3 月 11 日には、従前予測もつかなかった大型災害である東日本大震災が発生し、大きな人的犠牲を出すとともにそこから生じた膨大な瓦礫処理など、新たな社会問題もまた喫緊の課題として持ち上がることとなった。それに対して、生存圏研究所からも、新領域開拓の中の 1 課題としてその対処に当たる新テーマも出てきた。

以上のように、この 10 年の間に社会情勢が目まぐるしく変わる中、従前設定したミッションの目標に向かって研究を推進するとともに、新しいコンセプトに基づいた多くの共同研究が現在様々な発展を見せている。生存圏科学の新領域開拓プロジェクトも含め、今後は次期中期目標・中期計画に向けて、新しいミッションの策定を考えるべき時期に来ている。



第2章 地球環境

2.1 生存圏の現状・理解・方策

生存圏を構成する宇宙圏、大気圏、森林圏、生活圏すべてにわたって、人間の生存基盤を支えるのは太陽からの光のエネルギー（放射）である。宇宙圏の一部である地球磁気圏は太陽から吹き出す極めて高温で電離したプラズマ粒子（太陽風）から地球を保護している。大気圏では、生物にとって有害な太陽からの紫外線を吸収するオゾン層の存在が地球における生命体の活動を可能にしている。さらに森林を形作る陸上植物は、太陽光をエネルギー源とした光合成を通して炭素を固定し地球の炭素収支に寄与している。このように太陽からのエネルギー（太陽放射、太陽風）さらには系外から入り込む宇宙銀河線が、生存圏内においてどのように分配され、どう利用され、どういったバランス状態にあるのかを把握することは生存圏内に生起する現象を理解し将来の道筋を示す上で必須といえる。

生存圏は静穏なバランス状態にあるのではなく、たえずダイナミックに変動している。そこではさまざまな時間・空間スケールでエネルギーの不均衡を解消すべく大気の流れがあつて、たとえば二酸化炭素や水蒸気が輸送されている。これら微量気体の構成要素である元素がどのような状態で、どう輸送され、いかなる変質を遂げるのかを理解することもそれらの収支を考える上で重要な観点となる。地球全体としてみたこの収支の状況は、これまでは比較的長い時間をかけてゆっくりと変動してきたが、近年人間活動にともなう化石燃料の大量消費や人為起源物質の大量放出によって、それまでとは比べものにならないスピードでそのバランスが崩れつつある。いわゆる地球温暖化やオゾン層破壊として知られる地球環境問題が急速に顕在化してきている。この状態がこのまま進行すれば近未来には、エネルギー資源の枯渇、廃棄物の大量発生、それにともなう地球環境の激変などの問題が地球規模で深刻化し、人類を含む生命体の存続すら危ぶまれる事態に陥ることが容易に想像される。

この地球を健全な状態で維持し続けるためには、われわれの生存圏について科学的に妥当な現状認識を持って、そこから見いだされる問題点に対する対策を提示していかなければならない。その一つの方向性が再生可能資源により依存した循環型社会を構築することである。再生可能資源の中でも最も多量に存在する木質資源は森林で生産されるので、自然林あるいは人工林の回復と保全を実現しながら、持続的に木質資源を蓄積・利活用するシステムを目指す地球再生プランの具体化が求められている。

このような問題意識のもと、研究所が取り組む4つのミッションの一つとしてわれわれは「環境計測・地球再生」を掲げた。ここでは、研究所が保有する大型大気観測レーダーによる大気計測や衛星からの観測、さらには現場での高精度測定などを中心としておもに大気圏の診断をおこなうとともに、木質資源の持続的な生産利用システム構築に向けた基盤作りをおこなうことを目的としている。以下では、この目的に向かって実施してきた研究成果について紹介したい。その構成は簡単に紹介すると次のようなものである。

まず、われわれの生存を可能にしている生存圏のうちでも、とくに大気圏と森林圏との接点に注目

して、地球環境の変動と植物の環境応答の観点から問題を捉えていく。一つは、大気微量成分を通して見た大気圏と森林圏の間の物質循環の問題であり、もう一つは植物が放出する微量成分が大気環境へ与える影響について、環境に対する植物の応答と耐性という観点から解明しようとするものである (2.2)。

次に、こういった横断的な視点を支える基盤となる大気環境の先端的なモニタリング手法についてみてゆく。生存圏研究所では MU レーダーや赤道大気レーダーなど世界最先端の大気観測装置を保有しており、これによって地上からの精細なリモートセンシングが可能になっている。この技術基盤と科学的な成果について紹介する。さらに近年、急速な発展を遂げている GPS 気象学について、地上からの観測および衛星からの観測それぞれの視点から得られる成果と、その社会に与えるインパクトについて見ていく。また、これまでにさまざまな切り口でグローバルな視点を提供してきた人工衛星搭載測器による宇宙からのリモートセンシングにもとづいて、大気観測を通してみた地球の大気質変動の監視あるいは森林域に関する多様な情報収集について紹介する (2.3)。

さらに、こういった診断的なアプローチばかりではなく、自然界において光合成というユニークな役割を果たす植物の機能に注目し、その機能を解明し改良していくことで、バイオマス資源によって食物資源や工業原材料を持続的に供給する方法について考える。一つ目には、近年、農業生産において大量の窒素肥料を土壤に供給し続けている問題に対して、植物が本来持っている土壌微生物を利用して窒素を固定する能力を向上させることによって、土壌中における持続可能な方法でのバイオマス生産の可能性について考える。さらに遺伝子レベルで木質を構成する主要成分の改変をおこなうことによって、より有効な植物バイオマスを作り出すと同時に、植物が持つ二酸化炭素の吸収固定機能を通じ環境修復に貢献する方策について論議する (2.4)。

いわゆる環境問題といわれるものも、旧来の温暖化や越境汚染のようなものから様態はより複雑化し多大な影響が局所的に現れるようなものが出てきている。たとえば人や動物が移動することによってウイルスをはじめとした感染症のリスクが高まっている。このような問題に対して、再生産可能な木質バイオマスの変換により人の健康や生活に寄与する有用な物質を生産しようとする新しい研究を紹介する。さらに、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災による原発事故から象徴的に読み取れるように、人類の生存圏における環境問題として放射性物質による土壌・水質汚染など人工的な災害も含んだ複合的な被害が大きな影響を及ぼす。こういった問題に対して能動的に取り組んできた試みを紹介する (2.5)。

最後に、次の時代に向けてさらにどういった切り口が重要になるのか一つの提言をおこないたい。これまでその重要性は認識されながらも、探索の手段が比較的限定的であることから解明の進んでいなかった領域として、われわれは次の重要な研究フロンティアの一つが土壌圏にあると考えている。大気と植物との関連も突き詰めていくとこの土壌圏で生起している現象に至りつく。大気圏と森林圏さらには土壌圏を加えることではじめて生存圏の全体像がより明確に見えてくると思われる (2.6)。

2 章のこの冒頭の節の最後に、人類が直面した最初のグローバルな環境問題といってよいオゾンホールの問題について、われわれがどう対処しそこから何を経験したのかについて簡単に紹介したい。オゾンホール発見の歴史についてはたとえば Farman ら (1985) の地上観測あるいは Stolarski ら (1986) の衛星観測などの論文を参照してもらおうとして、その発見の歴史を今から振り返るとわれわれ人類の対応はきわめて迅速であったといえる。原因物質である特定フロンの放出源とその影響の及ぶ場所が

異なり、それがまさに半球規模の空間スケールを持っていたことから、その後すぐにモントリオール議定書（1987）、ロンドン改正（1990）、コペンハーゲン改正（1992）などの国際的な協約にもとづき特定フロンの排出制限がなされたことはよく知られている。現時点では、オゾン減少は底を打ったかに見えるものの明瞭に回復していると言い切れる状況ではないが、人類が直面した最初のグローバルな環境問題に対して、われわれはそれなりにうまく対応したといえる。

最近、このオゾン層破壊の問題に対して一つの興味深い論文が出版されている。“World avoided”（回避された世界）を想定した数値実験をおこなった結果についての論文である（Garcia *et al.*, 2012）。ここでは、もしも人類が先に述べたような国際的な約束事を履行せずに特定フロンを放出し続けていたらわれわれのこの世界はどうなっていたのかを最先端の全球化学気候モデルによって再現したものである。それによると 2050 年頃にはオゾン層の厚さが全球的に約 3 分の 1（南極オゾンホールレベル）にまで破壊されてしまうというものであった。しかし、われわれ人類は特定フロンの放出を規制することにより、現在ではこの悲劇的な結末を迎えずに済んだといえる。この経験が語るところは、科学的な知見の積み重ねによって問題解決をおこない、それに対する対応策をスピーディーにおこなうことの重要性である。診断の的確さと治療の迅速さといってよい。現在われわれを取り巻く生存圏に起こっているさまざまな環境問題に対して、われわれは迅速な治療を促すために的確な診断結果あるいは適切な治療方法を提示できているであろうか。いかにそれらに対する答えを与えられるかが、このミッション 1「環境計測・地球再生」の果たすべき役割であるといえる。

2.2 地球環境の変動と植物の環境応答

2.2.1 大気圏－森林圏の物質循環

地球に存在する元素は、大気、海洋、岩石、生物といった地球の構成要素を、多様な物質や状態へと姿を変えながら循環している。例えば、植物は大気から CO_2 を吸収し、光合成をすることによって、葉を茂らせ、幹を太らせ、中には果物を実らせるものもある。動物は植物を食べて、体の一部にする。植物や動物が死ぬと、ほとんどの炭素は CO_2 として大気に出ていくが、一部は土壌にとりこまれ原油、石炭になる。原油や石炭を人間が燃やすと、 CO_2 が出る。炭素は海にもある。海洋生物は海中の炭素を使って成長できる。

ここでは炭素を例として地球規模の循環を紹介したが、炭素に限らず、地球規模での物質の循環を考えるうえで、森林を含む陸域生態系と大気との物質のやり取りを理解することは大変重要である。なぜならば、地球温暖化をはじめとする地球環境問題に深く関わっているからである。本項では、陸域生態系と大気との間で行き来する物質交換を探る最先端の研究例を紹介する。

最初の例に戻って、 CO_2 は陸域生態系と大気との間を行き来する炭素の一形態である。この行き来の量を定量的に調べると、炭素がどのくらい陸域生態系に蓄積されているのか、その蓄積量が時間的にどの程度変動しているのか、といった疑問に答えるためのデータを得ることができる。そうした研究が始まったのは比較的新しく、とりわけ 1990 年代になってからと言えるだろう。研究の勃興を後押ししたのは、地球規模での炭素循環を理解することが重要であるという人類の認識はもちろんであるが、 CO_2 を高感度に現場で観測できる分析機器の登場であったように思われる。2013 年現在、対

流圏大気における CO_2 濃度は約 385ppm である。ppm は 100 万分の 1 を意味する混合比の単位なので、百分率に換算すれば 0.0385% である。“これっぽっち”の CO_2 を検出できる高い感度と、さらにその濃度が数パーセント程度変動する様子を精確に捉えることが必要になる。非分散型赤外分光法と呼ばれる新しい分光法が、そうした高感度・高精度な性能を有する分析装置の登場を可能にした。

以降、森林に観測用タワーを設置するなどして、陸域生態系と大気圏との間の CO_2 の交換フラックス（単位時間・単位面積当たりの交換量）を調べる研究が花開き、世界的に観測網が発達し、観測されたデータの多くはインターネットを通じて閲覧できるようになってきた。一方、 CO_2 以外にも CH_4 や N_2O のように温室効果を有する気体が陸域生態系と大気圏との間で交換されているが、これらの分子の交換フラックスを計測することは、2000 年代後半になるまでほとんど事例がなかった。その理由は単純である。対流圏平均での CH_4 濃度は約 1.8ppm、 N_2O は約 0.35ppm であり、 CO_2 の計測に比べてより高い感度とより高い計測精度が必要になるからである。

現在、生存圏研究所では、京都大学農学研究科や大阪府立大学などの研究グループと共同で、森林生態系と大気圏との間の CH_4 の交換フラックスを計測する研究を行っている。大気中の CH_4 は強い放射強制力を持っていないが、その濃度変動の要因が十分に理解されていない分子である。例えば、1970 年代以降急激な増加を見せていた CH_4 濃度は、2000 年代になって増加傾向が鈍化したものの、2007 年には再び増加傾向を示している。この増加傾向が、2003 年などにも観測されたような一時的なものなのか、安定的な増加傾向

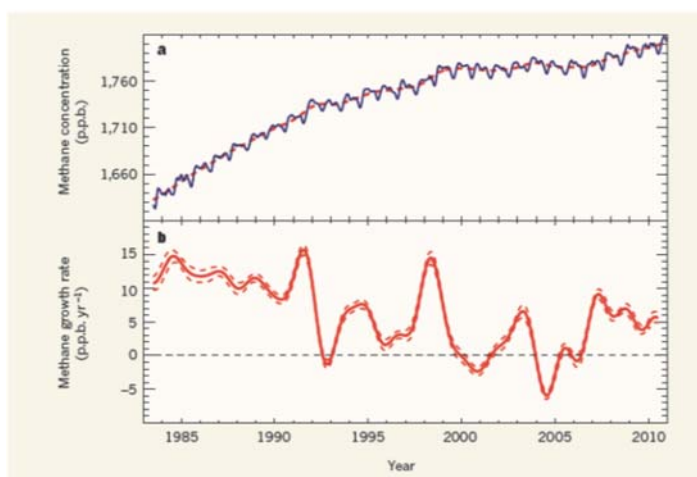


図 2-1：ハワイのマウナロア島で観測された近年の大気中メタン濃度の経年変化

向へシフトする前兆なのかについて、大きな注目を集めている（図 2-1）（Dlugokencky, 2013）。放出源毎の放出量と消滅源毎の消滅量の見積もりは IPCC（気候変動に関する政府間パネル）レポート（IPCC, 2014）にまとめられているが、それらの値は極めて不確実である。不確実性の要因は色々と考えられるが、概して言えば、本質的に CH_4 の生成源の分布と放出量が不均質であること、そして、それを観測する手法とネットワークの不足が挙げられよう。

森林をはじめとして野外で CH_4 を測定するには、採取したサンプルを実験室に持ち帰り、ガスクロマトグラフ-水素炎イオン化（GC-FID）分析を行う方法が一般的であった。しかし、採取や分析の際の人為ミスが懸念されるほか、採取と分析に掛かる手間のせいで、測定データ数が限られていた。私たちの観測チームでは、森林環境下での CH_4 の高感度・高精度な計測を可能にするために、Off-axis Integrated Cavity Output Spectroscopy 法と呼ばれる、元々は分子分光学の分野における室内実験研究で使用されてきた最先端の分光法と、 $1.65\mu\text{m}$ 帯の光通信用半導体レーザーを組み合わせた新しい超高感度分析装置を用いている。計測原理に関する詳しい説明は文献（高橋けんし, 2012）に譲るが、1800 ppb（1.8 ppm）における計測精度は、100 秒信号積算で 0.1 ppb 程度と極めて高い。また、半導

体レーザーのエネルギー分解能の高さのおかげで、 $1.65\mu\text{m}$ 領域にある CH_4 の単一振動回転遷移に選択的に同期させることができるため、レーザー波長を最適化することによって他の分子からの干渉を避けることができる。また、生存圏研究所の半導体レーザー分光

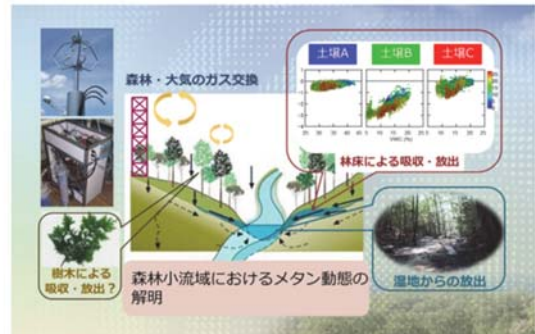


図 2-2：京都大学農学研究科桐生水文試験地にある全長は 29m の観測用タワー

装置は、野外でサンプリングしてきた大気試料を実験室で分析するのに使うのではなく、現場へ持ち出して実時間での計測が可能である。そのうえ、装置の性能を活かすための適切な工夫と努力によって、無人連続測定を可能にしている。

研究成果の一部を紹介しよう。観測を行っている場所の一つは、京都大学農学研究科桐生水文試験地ヒノキ林タワーサイト ($34^{\circ}58' \text{N}$, $136^{\circ}00' \text{E}$) である (図 2-2)。同サイトは、琵琶湖の南東に位置する樹齢約 50 年のヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) の壮齢林である。ここでは、簡易渦集積法と呼ばれるフラックスの計測システムとレーザー分光装置を組み合わせたシステムを開発し、生態系スケールでの CH_4 フラックスを計測することに成功している (Sakabe *et al.*, 2012)。特に、気象要素にリンクしたフラックスの日変化から季節性までを明らかにしてきている。例えば、降雨に伴って、嫌気的環境にある土壌からの CH_4 放出が散発的に増強される様子が観られるなど、従来の、現場サンプリングと実験室での GC-FID 分析では捉えることが困難であった、比較的短い時間スケールでのダイナミックなフラックスの変動も捉えられている。同サイトではさらに、自動開閉の閉鎖循環式チャンバー法を用いた葉群・幹・土壌各コンパートメントにおけるフラックスの連続観測も行っている (Takahashi *et al.*, 2012a) (図 2-3)。ドイツの研究グループが、好气的条件で生育するある種の樹木から CH_4 が放出され、その放出量は、従来の大気中の CH_4 収支の推定をも覆す多大なインパクトを持っていると報告した (Keppler *et al.*, 2006)。この報告は、植物から CH_4 が放出される機構に興味を持たれるという観点からは植物生理学の分野であり、大気中の CH_4 収支に対するインパクトという観点からは大気化学の分野であることから、まさに学問領域から見ると境界領域的な位置にある問題提起であると言えよう。生存圏研究所は、先行研究 (Keppler *et al.*, 2006) が行ったような、枝葉を切り取ってきて培養実験を行うのではなく、生きたままの植物体と大気との間の CH_4 交換フラックスを測定すべ

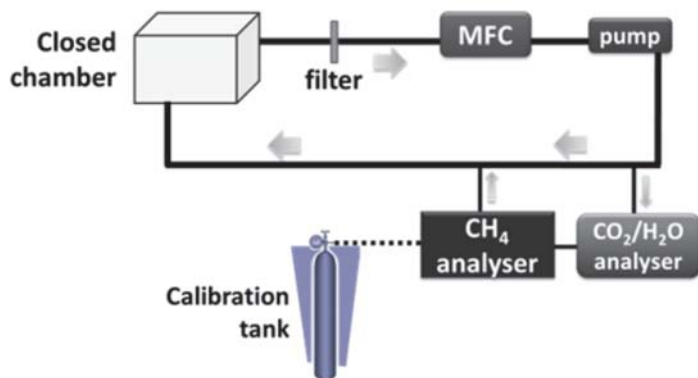


図 2-3：閉鎖循環式チャンバーフラックスの測定装置の概略図。
Filter: テフロンフィルター、MFC: マスフローコントローラ、pump: 小型ダイヤフラムポンプ、calibration tank: メタン分析装置校正用標準ガス

報告した (Keppler *et al.*, 2006)。この報告は、植物から CH_4 が放出される機構に興味を持たれるという観点からは植物生理学の分野であり、大気中の CH_4 収支に対するインパクトという観点からは大気化学の分野であることから、まさに学問領域から見ると境界領域的な位置にある問題提起であると言えよう。生存圏研究所は、先行研究 (Keppler *et al.*, 2006) が行ったような、枝葉を切り取ってきて培養実験を行うのではなく、生きたままの植物体と大気との間の CH_4 交換フラックスを測定すべ

きであると考えた。これが、自動開閉の閉鎖循環式チャンバー法を用いた研究の動機である。“生きた”ヒノキを試料として用いた測定は1年以上に及んだが、結局、ヒノキの葉と幹は、大気中の CH_4 の重要な供給源ではないことが明らかとなった。最近では、アラスカ大学フェアバンクス校内クロトウヒ林サイト、国立環境研究所富士北麓サイト、農業環境技術研究所真瀬水田サイト等でも共同観測を始めている (Ueyama *et al.*, 2013)。

生存圏研究所では、植物が放出する揮発性有機化合物 (biogenic volatile organic compounds; 以下BVOCと呼ぶ)に関する研究も進めている。BVOCとして、イソプレン(C_5H_8)、モノテルペン類($\text{C}_{10}\text{H}_{18}$)、セスキテルペン類($\text{C}_{15}\text{H}_{24}$)などがある。 CO_2 や CH_4 などの事例と似ているが、植物がこうした物質を大気中へ放出している様子は、人間の目では直接見えず、俄かにはイメージしがたい人がほとんどであろう。しかし、スギ、ヒノキ、マツといった身の回りで比較的良好に見かける樹木が、独特の香りを持っているのはご存じだと思う。それらの香りは樹木から放出されるテルペン類に起因している。樹木によって香りが異なるのは、そこから放出されるテルペン類の組成が違ふことや、テルペン類は分子ごとに独特な芳香を有していることに関連がある。植物からのBVOC放出を発見したのは、1960年のWentによる報告 (Went, 1960) が最初であろう。最近では、様々な植物からのBVOCの放出特性 (例えば、気温や日射と、BVOC放出量との関係性) など詳細に調べられるようになってきている他、地球規模でみたBVOCの放出量は、人間活動に伴って排出される非メタン系炭化水素の量よりも多いということも分かってきている。

BVOCが注目を集める理由の一つは、大気中に放出された後に、オゾンやOHラジカルと化学反応を起こし、アルデヒドやエアロゾル (大気中に浮遊する粒子状物質) を生成する点にある (Carlton *et al.*, 2009; 廣川ら, 2014)。大気エアロゾルは、直接的には太陽光を散乱・吸収することによって、間接的には雲凝結核として働くことによって、グローバルな気候変動に影響することが知られている。そのため、BVOCの大気化学反応によるエアロゾル生成過程の解明は重要な課題の一つである。近年の研究から、イソプレン、モノテルペン類、セスキテルペン類のいずれも、大気化学反応によってエアロゾルを生成することが分かっているが、その生成収量は、セスキテルペン類>モノテルペン類>イソプレンの順に並ぶことが知られている。これは分子内炭素数が多いほど、BVOCの大気化学反応によって、より大きな分子量、より蒸気圧の低い生成物 (= よりエアロゾルを形成しやすい) を与えることに起因する。一方で、代表的なBVOCとオゾン、OHラジカルとの反応速度係数はデータベース (<http://www.iupac-kinetic.ch.cam.ac.uk>) があるが、そのデータには大きな不確実性を伴っている例が少なくない。生存圏研究所では、時間分解レーザー分光法や質量分析法などを用いて、BVOCの大気反応過程を解明するラボ実験研究を行っている (Takahashi *et al.*, 2010; Enami *et al.*, 2012)。生存圏研究所ではまた、野外観測を通じて、エアロゾルの生成と成長過程を調べる研究も始めている。

BVOCが注目を集めるのには、別の理由もある。それは、植物がBVOCを生産・放出するという現象が、最初に述べた CO_2 や CH_4 などを介した陸域生態系-大気圏の炭素循環とも関連するからである。森林生態系と大気との間で交換される純生態系炭素交換量 (Net Ecosystem Exchange; NEE) を求めるときには、従来は呼吸のみを考慮している事例がほとんどである。しかしながら、例えばBouvier-Brown *et al.*, (2012) によって議論されているように、BVOCの形で植物から大気中へ抜けていく炭素もあるため、陸域生態系-大気圏の炭素交換量を CO_2 のみで評価することは、森林の炭素固定能力を過大評価する可能性がある。

このように見てくると、地球システムにおける物質循環を通じた陸域生態系と大気圏の相互リンクは、植物の炭酸同化作用や BVOC 合成経路といった植物生理学の研究と、温室効果気体やエアロゾルによる気候システムや大気質への影響といった大気化学の研究が、必然的に協同で進められるべきであるということをそのまま物語っているように思われる。

2.2.2 植物によるイソプレン放出の大気環境へのインパクトと生物的な意義

[植物と大気の相互作用]

植物のもつ大きな特色は、空気中の二酸化炭素を固定して炭素源として利用し、その副産物として酸素を放出する「光合成」である。植物が光エネルギーを使って固定したこの炭素が地球上の生物の食物連鎖を支えているが、植物はせっかく固定した炭素を別の化合物にして空気中に放出することもまた知られている。例えば、山岳地の森林地帯が青いモヤのようなものに覆われているのを見ることがあるが、あれを「ブルーヘイズ」と言う。1960 年代になると、そのブルーヘイズの原因物質が、植物が空気中に放出する揮発性有機化合物であることが分かってきた。その量は日照条件や植物種にもよるが、多いときには固定した二酸化炭素の 10% 近くも揮発性有機化合物として大気中に放出していると計算されている。後に詳しく述べるが、地球レベルでみるとこの植物起源の揮発性化合物の量は膨大で、しかも放出された揮発性化合物は大気中で様々な反応を受けることにより姿を変え、大気質に大きな影響を与えたり、雲の核になったり、大気化学分野にとっても大きなインパクトを持っている。

生存圏研究所の研究ミッションの 1 つ、「環境計測・地球再生」(ミッション 1) では、植物と大気との相互作用は、地球の大気環境を考える上で中心的な役割を果たすと考え、研究対象としてきた。ここでは、大気環境に大きな影響を及ぼす植物由来の揮発性成分、特にその量の多さからグローバルな大気化学研究の中でも注目を集めているテルペノイドの 1 つ、イソプレンに研究対象を絞り、大気環境へのインパクトを考慮に入れつつ、その植物における生理的な意義を明らかにしようとした研究を紹介しよう。この研究は、森林圏の主たる構成要因である植物の生育と大気との連関を深く理解するのに役立つものと考えられ、また持続可能な社会構築に照らし合わせたときに、このダイナミックな生命現象がどのような意味を持つのかを考察する際の重要な情報になると期待される。

[BVOC とイソプレン]

植物が大気中に放出する揮発性有機物質 (VOC) には、テルペン系の化合物が多く、そのグローバルな放出量は炭素換算で年間 11.5 億トンにもものぼる (Guenter *et al.*, 1995; Sharkey & Singsaas, 1995)。これらは生物起源であることから biogenic VOC (BVOC) ともよばれ、特に炭素数 5 のヘミテルペンであるイソプレンは、その中でも単一の化合物として最も量が多い (全 BVOC の 44%) ことから、大気化学のみならず、化学生態学、植物生理学など様々な研究分野で注目を集めている。地球全体で大気中に放出される量は、炭素換算で年間 5 億トンになると計算されている (Guenter *et al.*, 1995)。これは木材に換算すると年間 10 億トンになり、日本の標準的な木造家屋に直すと毎年 5 千万軒分の木材に相当する。

イソプレンはその量に加え、化合物としての反応性の高さから大気化学におけるインパクトが非常に大きい。それは、イソプレンの空気中の大気寿命が 2 時間程度と短く、その分解の初期過程でイソプレンが優先的に空気中の水酸化ラジカルと速やかに反応してしまうことに起因し、結果として大量

のイソプレンの放出は他の大気微量成分の寿命に大きな影響があるからである。とりわけ、 CO_2 の20倍以上ともされる大きな温室効果を持つメタンの分解を遅延させることが指摘され (Jacob & Wolsy, 1988)、イソブレンは間接的に温室効果ガスとして働くとの危惧が表面化しつつある。さらに大気化学の分野では、イソブレンは分解した後エアロゾルの質やオゾンにの量にも大きな影響を及ぼし、雲の核ともなることから研究例も多く (Trainer *et al.*, 1987)、大きな興味の対象となっている (図 2-4)。

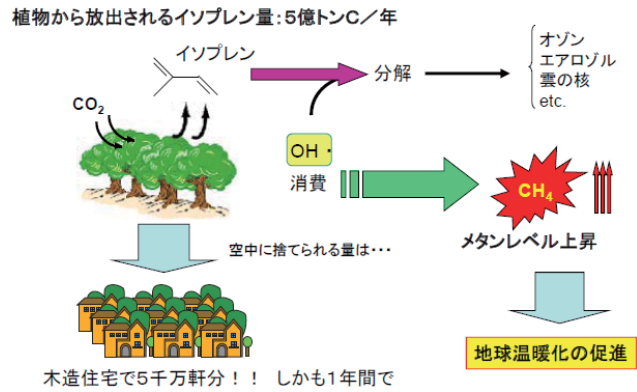


図 2-4: イソブレンの放出と大気環境に対する影響

イソブレンは全ての植物が放出するわけではないが、放出する植物としてはシダ類から木本にかけて多くの種が知られ、特に木本では落葉性の広葉樹、とりわけ生長の早いもので放出が多い傾向がある。しかし、反面でその生理的意義は良く分かっていない。ここでは、イソブレン合成酵素遺伝子を用いて、その植物における生理的意義を解明することを目的とした研究について紹介する。

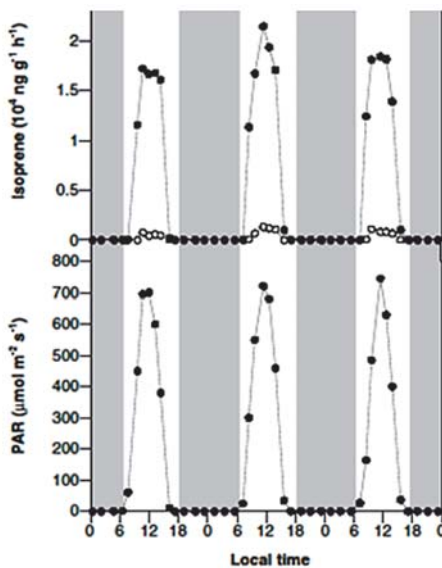


図 2-5: イソブレン放出の日周性 (Saito & Yokouchi, 2006)

[イソブレン合成酵素遺伝子]

イソブレン合成酵素活性は、*Quercus* 属や *Salix* 属植物等多くの樹木種から報告があったが、その遺伝子はハイブリッドポプラからクローニング例があったため (Miller *et al.*, 2001)、その配列を参考に *Populus alba* の葉から全RNAを抽出し、RT-PCRによりクローニングを行った。このcDNA (PaIspS) が実際にイソブレン合成酵素をコードしていることは、大腸菌の発現系にてこの遺伝子を発現させ、リコンビナント蛋白質でDMAPPを基質として酵素アッセイをし、イソブレンを特異的な酵素反応産物として与えることで証明した (Sasaki *et al.*, 2005)。なお、この酵素はDMAPPに対して高い基質特異性を示した。 (Saito & Yokouchi, 2006)

元々イソブレン放出は、夏の暑い期間、しかも日中に起こることが知られ、明瞭な概日リズムを示す (図 2-5)

(Saito & Yokouchi *et al.*, 2006)。またこの日周性はイソブレン合成酵素活性の変動と平行であることが報告されていたが、今回 PaIspS 遺伝子がクローニングできたことで、その発現解析を行ったところ、酵素活性の日周変動が遺伝子の発現レベルで調節されていることを示唆することができた。

植物の細胞にはイソプレノイド経路がメバロン酸経路と MEP 経路と2種類存在するが、この PaIspS 蛋白質がトランジットペプチドを有しており、実際に緑色蛍光蛋白質を用いた解析から、細胞内のイソブレン合成の場は葉緑体内であることを証明した (図 2-6) (Saito & Yokouchi, 2006)。このことは、光合成により固定された CO_2 がそのまま葉緑体で一部イソブレンに変換され、大気中に放出

されることを意味している。

次に、イソプレンを放出することが植物にとってどのような意味があるのかを検証するため、イソペン合成酵素遺伝子を持たないシロイヌナズナにこの PaIspS 遺伝子を高発現させ、イソペン放出が植物に与える影響を調べた。その結果、イソプレンを放出するようになったシロイヌナズナ形質転換体は、野生型に比べてややロゼット葉の数が増え、プラントマスとして増加する傾向を示した。これ以外に形質転換体は、通常の生育条件では大きな差異を示さなかった。ところが、この植物を熱ストレス条件下においたときには極めて明確な差が見られた。それは、

60℃、2時間半というシロイヌナズナの野生型では生き延びられない過酷な条件下で処理した場合、形質転換体はその処理に耐えることができ、その後通常の培養条件に戻したときに生育を続けることができた（図 2-7）。このことは、イソペンの放出が植物にとって熱ストレス耐性を担っていることの証明であると考えられる（Sasaki *et al.*, 2007）。なお、自然界では高温ストレスは光ストレスとはほぼ同時に負荷されるが、一定温度条件で強光ストレスに対して PaIspS 発現植物は明確な耐性を示さなかった。

[今後の展開]

植物にはイソプレンを放出するエミッター種と放出しないノンエミッター種があるが、地球レベルで見たときには、赤道下の熱帯雨林が圧倒的に主たるイソペンの放出源である。これは今回明らかにした熱ストレス耐性の機構を考えると理にかなった結果である一方で、イソプレンを放出する植物を詳しく見ると、コナラ属、ユーカリ属、ポプラ属など、いわゆる早生樹が多いのも事実である。イソペンとは上述のように間接的温室効果ガスと考えられており、イソプレンを大量に放出する樹種を大量に植えることは、地球温暖化防止にとってはデメリットの方向に働くものとも捉えることができる。しかし、地球の現状を考えて、今この時点で CO₂ 排出をゼロにすることはできず、地球の温暖化はさらにしばらくは続くものと見なされる。したがって、植物の高温ストレス耐性はこれからの生存圏にとっては、大きな問題でもあり、環境を守り人類の生存を支えるには植生の保護が不可欠であるのはいままでの間。これに伴い、高温化に向かう地球において、今後農作物の安定な供給を見据えた育種目標として高温ストレス耐性は重要なポイントとなってくるであろう。その分子育種戦略の一つとして、イソペン合成酵素が使えるのではないかと期待される。イソペン合成酵素の基質は、全ての生物が体内で作る DMAPP であり、イソペン合成酵素遺伝子 IspS の産物は単一でこの生体内物質からイソペン分子を生産することができる。これから、イソプレンを排出することのデメリットとイソプレンを排出することで得られるメリットとの両面から詳細なシミュレーションと実験を繰り返すことで、その総合的な評価が可能となるであろう。

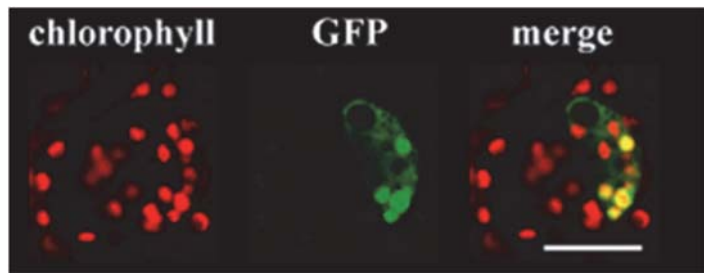


図 2-6 : PaIspS の葉緑体局在性 (Sasaki *et al.*, 2007。他の出版物に使用する場合に Oxford University Press の許可が必要)



図 2-7 : イソペン放出植物の高温ストレス耐性 (Sasaki *et al.*, 2007。他の出版物に使用する場合に Oxford University Press の許可が必要)

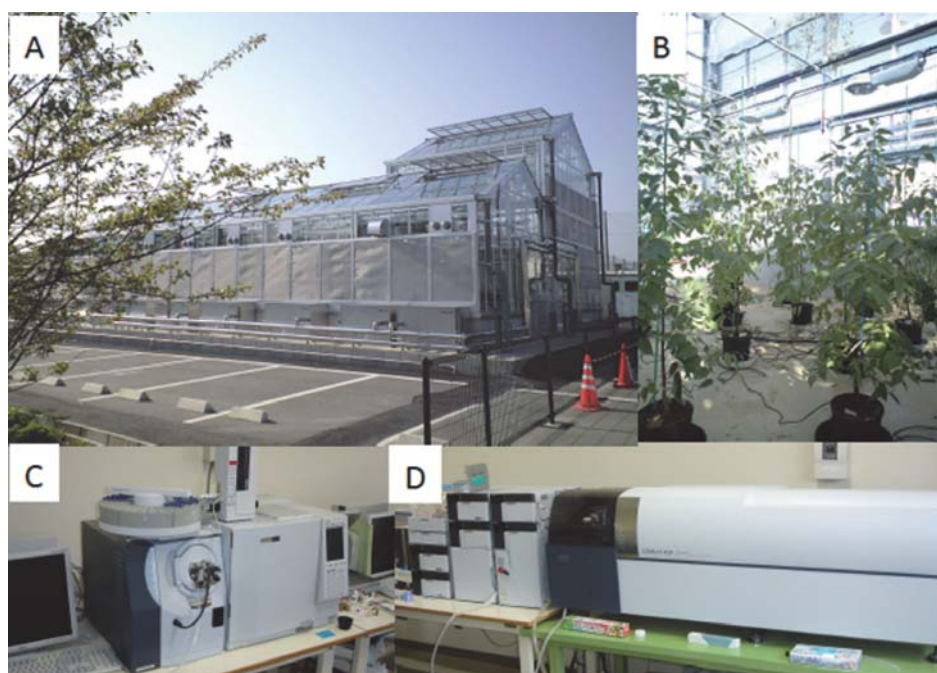
コラム

DASH/FBAS

持続可能生存圏開拓診断（DASH）／森林バイオマス評価分析システム（FBAS）は、平成 19 年度の京都大学概算要求（特別支援事業・教育研究等設備）で設置された「DASH システム」（生存圏研究所と生態学研究センターとの共同申請）と、生存圏研究所が平成 18 年度より運用してきた FBAS とを統合した全国共同利用設備である。この全国共同利用設備では、太陽エネルギーによる再生可能な植物資源確保、植物の能力を介した環境の保全・修復、植物を中心とした大気・土壌・昆虫・微生物など様々な要素との相互作用（生態系ネットワーク）といった研究を支援しており、樹木を含む様々な形質転換植物育成や分子育種を通じて、種々の有用遺伝子機能の検証、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、有用生物資源の開発などの研究を行っている。

DASH は「DASH 植物育成」と「DASH 分析装置」の 2 つのサブシステムで構成され、前者は培養室を含め 9 室からなる遺伝子組換え温室（A）であり、大型の組換え樹木にも対応している点に特徴がある（B）。後者は揮発性成分分析装置である GC-MS（C）、代謝産物分析装置 LCMS-IT-TOF/MS（D）と、土壌成分分析用のライシメータから成る。FBAS は、ニトロベンゼン酸化分解やアセチルプロマイド法などを駆使したリグニンの定量および構造分析を特徴としており、分析手法の提供をベースとした共同利用となっている。

DASH/FBAS 共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/DCRP/DASH.html>



DASH/FBAS : (A), (B) 遺伝子組換え温室、(C) 揮発性成分分析装置 GC-MS、
(D) 代謝産物分析装置 LCMS-IT-TOF/MS

2.3 大気環境の先端モニタリング

2.3.1 地上からの精細なリモートセンシング

[風の測定方法]

風を測る最も一般的な方法は、プロペラ型の風向風速計であり、気象庁のアメダスと呼ばれる約1300カ所の自動観測ステーションでも使われている。この風速計を鉄塔に設置すれば高度数十mまでの風速の高度分布を得ることができる。さらに上空の風を測定する手法として最も一般的なのはラジオゾンデ観測である。水素あるいはヘリウムガスを充填した気球に温度・湿度・気圧センサーをつり下げ、約6 m/sの速度で上昇させて、約30 kmまでの観測を行うことができる。観測値は電波にのせて送られると共にGPS等で時々刻々の気球の位置を知ること、風向風速を観測できる。高高度までの観測が可能であるが、1回の観測に2時間弱かかること、また手間がかかるため連続観測が困難で、気象庁においては通常9時と21時の1日に2回しか行われていない。特に下層大気では風向風速が時間と共に大きく変化するため、予報精度の向上には高時間分解能の連続観測が必要である。

風向風速の高度分布を連続的かつ自動的に観測するために有効な手段が地上からのリモートセンシングである。ここでは、天候に関係なく風を高時間高度分解能でリモートセンシングする「ウィンドプロファイラー」(大気レーダーとも呼ばれる)について述べる。

[大気レーダー (ウィンドプロファイラー) の歴史]

レーダー (RADAR: RAdio Detection And Ranging) は、電波を用いて物体の存在や距離を検知するもので、1940年に米国で命名された。世界で最初に降水の観測を行ったのは、1941年に英国で3GHzレーダーによるものと言われている (Atlas, 1990)。気象レーダーは、降水を電波散乱ターゲットとしているため降水時しか観測できない。しかし、非降水時の晴天大気からも電波は散乱される (晴天大気エコー)。この晴天大気エコーを受信し利用するレーダーは、大気レーダーと呼ばれており、特に風観測に特化したものはウィンドプロファイラーと呼ばれている (Hardy, 1990)。1940年代に晴天エコーの観測が行われ、風と共に移動する点状のエコーが観測された。人間の目には何も見えないところから電波が散乱されるためこのエコーは、「天使のこだま (angel echo)」と呼ばれた。この「天使のこだま」の原因解明のための精力的な研究が1950年代に行われ、大気中の乱流による大気屈折率の空間的な揺らぎ (スケールが電波波長の1/2) が電波を散乱させ、レーダーエコーとして受信されることが明らかになった (Tatarskii, 1961)。

1960年代後半から電離層中の自由電子の振る舞いを調べるために数十MHzの低い周波数の電波を用いる巨大レーダーの建設が開始された。最初に建設されたのがペルーのヒカマルカおよびプエルトリコのアレシボで、散乱波の位相がランダムなインコヒーレント散乱 (Incoherent Scattering) を利用するためISレーダーと呼ばれている。1960年代末ヒカマルカレーダーで、インコヒーレント散乱は存在しないと思われていた高度60~70 kmの中間圏で強いエコーが観測された。当初はあまり注目されなかったこの現象を解析したのがWoodman & Guillen (1974)で、上述した大気乱流による大気屈折率の揺らぎが強いエコーの原因であることを示した。このエコーを利用すれば中間圏や成層圏などの大気観測が可能になる。これは研究者に大きな刺激を与え次々とレーダーが建設されていくことになる。ISレーダーより小型だが、中間圏、成層圏そして対流圏が観測可能なレーダーがMSTレーダーと呼ばれている。

我が国でも、後に詳述するように、IS レーダーと MST レーダーの中間に位置する世界最先端の MU レーダー（加藤ら、1982）が滋賀県信楽町に、また赤道大気レーダーがインドネシアに建設され生存圏研究所により運用されている。さらに、大型レーダーで開発された技術がその後の気象用ウィンドプロファイラーの開発へと発展していくことになる。

[レーダーによる大気のリモートセンシング]

上で述べたように、中性大気の乱れ（乱流）は大気の電波屈折率変動をつくり出し、レーダー電波を散乱させエコーを返す。乱流は様々な大きさと強さを持つ乱渦と呼ばれる渦の集まりで表現され、エネルギーは大きな渦から小さな渦に移っていき、やがて粘性のため熱となって消える。様々な大きさを持つ乱渦の中でも、レーダー電波の散乱に寄与するものは電波の波長の半分の大きさの渦だけである（Bragg 散乱）。粘性でつぶれる乱渦の最小スケールは対流圏では 1cm 程度であるが、高度と共に指数関数的に大きくなる。したがって、高い高度からのエコーを受けるためにはレーダーの波長はできるだけ長い（周波数が低い）方がよい。

風のリモートセンシングには、ドップラー効果を用いる。近づいてくる救急車のサイレンは高く聞こえ、遠ざかる場合は低く聞こえるのがドップラー効果である。同様に、移動している物体に電波を当てると反射された電波の周波数は、その速度に応じて発射した周波数からずれる。乱流は背景の大気の流れ、つまり風に乗って移動（移流）していくので、これをトレーサーと考えてエコーのドップラーシフト（周波数のずれ）から風速の視線方向（レーダービーム方向）成分を求めることができる。鉛直流を含む風速三成分は、天頂付近の異った 3 方向にアンテナビームを向けて、それぞれの視線方向速度成分から計算により求める。観測の間隔（時間分解能）は観測高度にもよるが 1～10 分程度であり、ラジオゾンデなどに比べて、レーダー観測の時間分解能は格段に優れている。一般に鉛直流（上昇下降流）は水平速度に比べて 1 桁以上小さく測定が困難な量であるが、ウィンドプロファイラーでは鉛直上方にアンテナを向けることで、この量を直接に測定することかできる。これから大気微量成分やエネルギーなどの鉛直輸送を定量的に見積もることができるなど、鉛直流を直接測定できることは大気レーダーの最大の特長の一つである。

[京都大学で開発されたレーダーシステム]

生存圏研究所のグループは、ヒカマルカレーダーによる乱流エコーの発見に前後して、大型レーダーの建設を計画し、1984 年 11 月、陶器で有名な滋賀県信楽町の国有林内に完成させた（Fukao *et al.*, 1985a, b）。このレーダーは MST レーダーとして世界最高性能を誇る他、IS レーダーとして超高層大気（Upper atmosphere）の一部も観測できるので MU（Middle and Upper atmosphere）レーダーと名付けられた。直径約 100m の円形凹地に八木アンテナ 475 基を設置しており、送受信周波数は 46.5MHz である。MU レーダーには当時の最先端のレーダー技術が随所に取り入れられている。最大の特長は、475 基の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式（Active Phased Array System）を採用していることである。次の赤道レーダーも含めて、詳しくは「コラム（MU レーダー）、（赤道大気レーダー）」を参照されたい。

「海洋大陸」と呼ばれるインドネシア域は、赤道域の中でも特に積雲活動が活発で、大気大循環の駆動源と言われているが、これまで中緯度域に比べて観測データが不足していた。そこで、MU レーダーの成果を背景に「赤道大気レーダー」（Equatorial Atmosphere Radar; EAR）を開発し、2001 年にインドネシア共和国西スマトラ州に建設した（Fukao *et al.*, 2003）。赤道大気レーダーは、MU レーダーと

同様に分散型送受信方式を採用しており、MU レーダーより一回り大きい直径約 110 m の略円形フィールドに 560 基の 3 素子八木アンテナを配置している。

このほかに小型のレーダーとして、生存圏研究所は MU レーダー観測の経験を活かし、高度 2 ～ 3km 以下の大気境界層を対象とした小型可搬式の境界層レーダー (Boundary Layer Radar; BLR) を開発した。さらに、境界層レーダーの可搬性の特長を残しつつ、より高高度まで観測可能なレーダーを開発した (Hashiguchi *et al.*, 2004)。下部対流圏全域を観測可能なことから「下部対流圏レーダー」(Lower Troposphere Radar; LTR) と名付けた。図 2-8 に LTR の外観を示す。アンテナには 4 m × 4 m のフェーズド・アレイ・アンテナを用いており、境界層レーダー 1 号機と比較してアンテナ開口は 5 倍に向上しているが、設置に必要な面積はほとんど変わっていない。アンテナ素子には、電磁結合ダイポールアンテナを採用しており、それぞれに移相器を設けることで、ビームを ± 15° 範囲内の任意の天頂角で天頂及び東西南北の 5 方向に高速に走査可能である。同型機が次節で述べる気象庁のウィンドプロファイラー観測網「WINDAS」をはじめ複数の研究機関で採用され、全国（一部は海外）で使用されている。その後も、船舶に搭載して観測可能とする船舶搭載型下部対流圏レーダーや、ルネベルグレンズと呼ばれる球形のアンテナを用いたレーダーの開発を行っている。

気象庁は全国 25 地点に上記の下部対流圏レーダー (LTR) を設置し、これらによって構成される観測網により高層風の観測業務を 2001 年 4 月に開始した（現在は 33 地点で観測が行われている）。この観測網は「局地的気象監視システム；略称 WINDAS (Wind Profiler Network and Data Acquisition System; ウィンダス)」と名づけられ、各地点上空の高度 400m から 5km 程度までの風を時間的にほぼ連続して測定している (石原, 2001; Ishihara *et al.*, 2006)。WINDAS は、観測間隔 10 分、通報間隔 1 時間、北海道から九州の地域での観測地点間隔の平均が 133km という高い時間・空間分解能を有している。

ウィンドプロファイラー観測値がどの程度数値予報に効果をもたらすかを調べるため、気象庁数値予報課によりインパクト（効果）実験が実施された (石川, 2001)。2001 年 6 月 19 日から 20 日にかけて、西日本に梅雨前線が停滞して小規模な降水システムが発生



図 2-8：下部対流圏レーダーのアンテナ

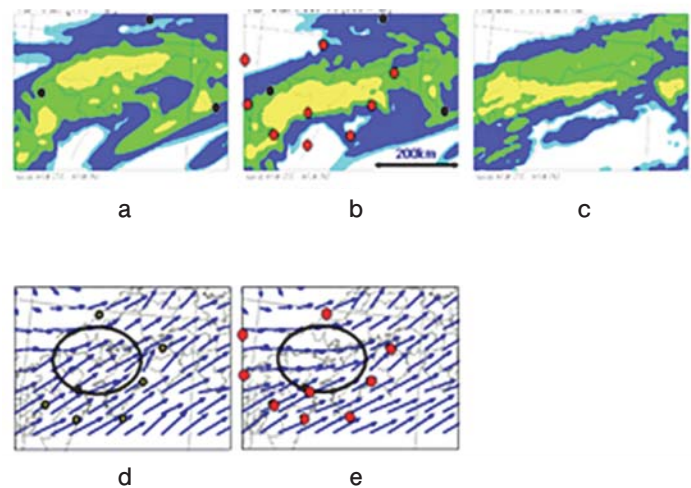


図 2-9：メソ数値予報モデル (MSM) による WINDAS インパクト (効果) 実験。(a) 2001 年 6 月 19 日 12UTC の初期値に WINDAS 観測値を使用せずに予報した 15UTC における 3 時間積算降水量。(b) 12UTC の 6 時間前から WINDAS 観測値をデータ同化して予報した 15UTC における 3 時間積算降水量。(c) 15UTC におけるレーダー・アメダス解析雨量の 3 時間積算降水量。(d) (e) それぞれ (a) (b) に対応する 850hPa における風の予報値

し、愛媛・和歌山・奈良の各県で土砂崩れが発生した事例について、ウィンドプロファイラー観測値を数値予報モデルに取り込んだ場合と、取り込まなかった場合の予報結果が比較された（図 2-9）。その結果、WINDAS 観測値を使用した予報（b）では、3 時間積算降水量が 30mm を超える強雨域が大分、愛媛両県を中心として予報されており、実況値（c）とよく一致している。一方 WINDAS 観測値を使用しない場合（a）には、強雨域は実況値より約 100km 北方にずれて山口、広島、岡山各県の南部に予想されている。（a）と（b）に対応する時刻の 850hPa における風ベクトルの予報値から、（d）では瀬戸内海西部に北向き成分をもつ風ベクトルが予報されているが、（e）では WINDAS 観測値を同化したことで（d）で予報された北向き成分が抑えられており、これによって実況に近い地域に強雨域が予報されたことがわかる。この事例では、強雨域を取り囲むように配置されたウィンドプロファイラーが対流圏下層の風をきめ細かく測定したことが、数値予報モデルが強雨域の発生位置を正確に予報することにつながっており、WINDAS 観測値が数値予報の精度向上に貢献することをよく示している。

〔大気レーダーによる気象現象の観測結果〕

以下、下部対流圏レーダー（WINDAS）と赤道大気レーダーによる観測結果について、それぞれ 1 例ずつ取り上げて紹介する。

1) 下部対流圏レーダーによる台風 0310 号の中心付近の観測

地上に固定されたウィンドプロファイラーの上を気象現象が西から東に動いていることを利用し、時間変化を空間構造に読み替えることで、現象の高さ・距離断面を得ることができる。2003 年 8 月 7 日に台風 0310 号が鹿児島県名瀬市付近を発達しながら最接近し通過した。図 2-10 は、WINDAS 名瀬サイトの下部対流圏レーダーで捉えられた台風中心付近の鉛直成分の台風中心からの距離・高度分布である。2m/s 以上の下降成分は雨滴の落下速度に対応しており、眼の壁雲と考えられるその領域では強い降水が見られたことが分かる。一方、距離 50km 以内では、降水は見られず、上昇流と下降流が激しく入れ替わっている様子が分かる。従来、台風の中心付近は下降流が支配的であると考えられていたが、本観測により、激しく上下に変動していることが初めて見出された（Teshiba *et al.*, 2005）。

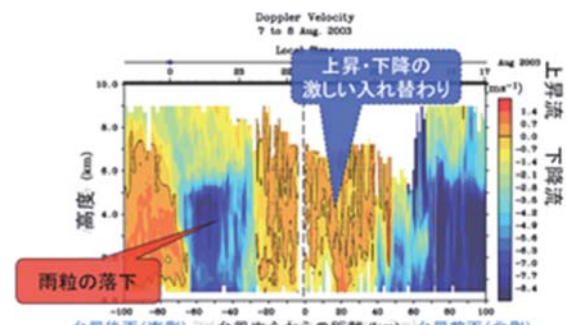


図 2-10：下部対流圏レーダー（WINDAS 名瀬サイト）で観測された鉛直成分の台風中心からの距離・高度分布

2) 赤道大気レーダーによる対流圏界面付近の観測

赤道域では地球上で最も活発な積雲対流活動により、各種の大気擾乱が励起されており、エルニーニョに代表される地球規模の気候・環境変動にも結びつく現象が発生している。しかしながら、従来の観測データの蓄積は余りに不十分であった。図 2-11 は赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化の一例である。×印はラジオゾンデ観測により得られた対流圏界面高度である。成層圏領域において、東西風が 10 日程度の周期で変

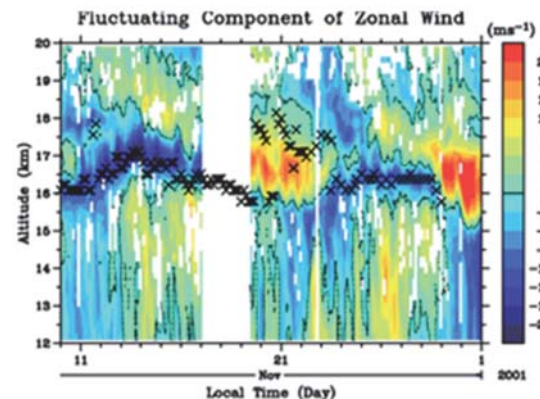


図 2-11：赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化

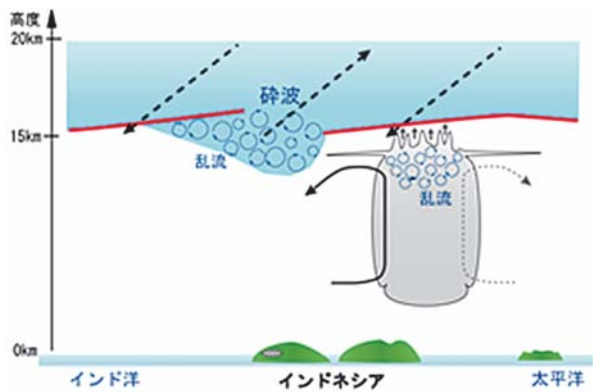


図 2-12：対流圏と成層圏の大気混合を示す模式図。

動しており、時間とともにその高度を下げる様子が見られる。東向き成分が対流圏界面に届いたところ（丸破線の部分，図 2-12）で、対流圏高度のジャンプが見られる。これは赤道ケルビン波と呼ばれる大気波動が、その領域で不安定（砕波，図 2-12）を引き起こす過程を詳細に捉えたものである。図は示さないが、赤道大気レーダーによる観測から砕波の発生と共に対流圏界面における大気乱流が増強しており、図 2-12 に示すように対流圏・成層圏の大気混合が発生していることが初めて明らかとなった（Fujiwara *et al.*, 2005）。このことは、通常は極めて交じり合いにくい対流圏と成層圏の大気塊が、大気波動現象と共に混合する様子を初めて観測的に実証したものである。

[今後の展開]

本節では、主に生存圏研究所で開発している大気レーダー（ウィンドプロファイラー）と気象庁で現業運用されているウィンドプロファイラー観測網及びそれらを用いた観測結果について述べた。近年、世界各地でウィンドプロファイラーのネットワーク利用が進みつつある。ウィンドプロファイラーの有効利用が 21 世紀における天気予報の精密化の鍵を握ると言っても過言ではなく、ウィンドプロファイラーによる地球大気の新しい計測技術の開発研究を今後も続けていく必要がある。

コラム MU レーダー

信楽 MU 観測所は陶器で有名な滋賀県甲賀市信楽町の国有林に囲まれた山中に 1982 年に開設された。その観測機器の中核を担う MU レーダー（中層・超高層大気観測用大型レーダー；Middle and Upper atmosphere radar）は、アジア域で最大級の大気観測用大型レーダーであり、高度 2 km の対流圏から、高度約 1000 km までの超高層大気（熱圏・電離圏）にいたる大気の運動、大気循環を観測する。1984 年の完成以来、全国共同利用装置として国内外の多くの研究者に利用され、当時、未知圏と言われていた中層大気（高度約 20 ～ 120 km）の研究の発展に大きく貢献した他、超高層物理学、気象学、天文学、電気、電子工学、宇宙物理学など広範な分野にわたる多くの成果を上げている。図に示すように、直径約 100 m の円形凹地に八木アンテナ 475 基を設置しており、送受信周波数は 46.5 MHz である。最大の特長は、475 基の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式（Active Phased Array System）を採用していることである。1 台の小型送受信機の送信電力は 2.4 kW であるが、475 台の小型送受信機を同時に働かせることにより合計 1 MW の大電力を実現している。またレーダーシステム全体がマイクロコンピュータを用いてソフトウェアにより制御される柔軟な構成となっており、その結果各アンテナについて送受信信号の自由な位相制御が可能となり、アンテナビーム方向を最高 1 秒間に 2500 回という高速で走査できる。また、MU レーダーのアンテナは 25 個の小アンテナ群に分割することが可能であり、それぞれ独立な小型レーダーとしても動作する。アンテナ全体を送信に用いて、散乱電波を複数の小アンテナ群で同時に受信し、受信された散乱電波の位相差を利用することで、乱流等の微細な構造を知ることができる。MU レーダーの技術と経験は、高度 5 km 程度までの下部対流圏領域を専用に観測する「下部対流圏レーダー」の開発に活かされた。同型機は気象庁の「局地的気象監視システム；略称 WINDAS（Wind Profiler Network and Data Acquisition System）」に採用され、全国 33 地点で得られたデータが気象予報モデルの初期値として利用され、日々の天気予報の精度改善に貢献している。

MU レーダー共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mutear.html>



MU レーダー：中央の円形の部分が 475 本の八木アンテナから構成されるフェーズド・アレイ・アンテナ（直径 103 m）

コラム 赤道大気レーダー

赤道域では地球上で最も活発な積雲対流活動により、各種の大気擾乱が励起されており、エルニーニョに代表される地球規模の気候・環境変動にも結びつく現象が発生している。インドネシア周辺の島嶼領域は、海と陸が共存するユニークな地理的特徴から、“インドネシア海洋大陸”と呼ばれる。インドネシア海洋大陸は、海水面からの豊富な水蒸気の供給により、地球上で最も積雲対流活動が活発な地域の一つであり、地球規模の大気循環・水循環に大きな影響を与える。しかしながら、従来の観測データの蓄積は不十分であった。生存圏研究所は1980年代から集中的な気球観測などを実施し、1990年代の小型レーダーによる連続観測を経て、2001年に赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar; EAR）を西スマトラ州の赤道直下に設置した。EARは、MUレーダーと同様に分散型送受信方式を採用しており、MUレーダーより一回り大きい直径約110 mの略円形フィールドに560基の八木アンテナを配置している。図に示すように、各八木アンテナの基部にそれぞれ半導体送受信モジュールが配置されており、電子制御によってアンテナビーム方向を1秒間に最大5000回の速度で高速に走査できる特長を持つ。中心周波数は47 MHz、最大送信電力は100 kWでMUレーダーと比べて1/10であるものの、高度約1.5～20 kmの対流圏及び下部成層圏や、高度90 km以上に分布する電離圏イレギュラリティなど、広い高度範囲を連続観測できる。運営はインドネシア航空宇宙庁（LAPAN）との協力関係のもとに進められており、現在まで10年以上にわたって赤道大気の連続観測を行ってきた。EARを中核とする赤道大気観測所には、現在では京都大学以外の観測装置も多数設置され、赤道域で最も充実した総合的な観測所に成長している。2005年から全国・国際共同利用に供しており、本研究所の重要な海外拠点として、国内外の研究者との共同研究によって生存圏の科学を推進するという大きな役割を担っている。

赤道大気レーダー共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mutear.html>



赤道大気レーダー：直径110 mの巨大アンテナが560本の八木アンテナから構成される。

2.3.2 GPS 気象学

[GPS 気象学：測定誤差から大気情報を得る]

カーナビゲーションシステムや携帯電話での位置情報の表示などに GPS (Global Positioning System) が使われていることはみなさんもお存知のことかと思う。この測位システムの原理は、高度約 2 万 km の上空にある衛星群から発射されるマイクロ波を受信して宇宙規模の三角測量を行うことによって、位置 (3 次元座標) と時刻の 4 つの未知数を正確に求めるものである。当初、米国で軍用航空機や艦船の航法支援のために開発されたが、現在では民生用にも開放されていて、正確な位置と時刻の情報を誰もが利用でき、社会生活にも広く浸透している。それら以外に、ロシアの GLONASS、欧州の Galileo、中国の北斗などの測位システムも進行中で、日本も 2010 年 9 月に準天頂衛星 (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) を打ち上げ、GPS と互換性のある信号を送っている。QZSS では高仰角に長時間連続して滞在する軌道の特徴を活かした応用が期待されている。地球観測でも GPS は多方面で利用されており、例えば、地殻変動や火山噴火の重要な監視技術となっている。ここでは、GPS 電波が大気中を伝播する際に起こる遅延 (誤差) から大気状態を測定する新しい観測手法「GPS 気象学」を紹介する。

電波が GPS 衛星から地表に到達するまでの時間を測り、それに光速を掛けて距離を求める。ところが、GPS に使われるマイクロ波は伝わる速度が大気中ではわずかに遅くなる。つまり、地球大気中には空気分子、水蒸気および電離層の電子が含まれるために、屈折率が真空中の値からごくわずかに異なるので距離測定に誤差が生じる。特に、水蒸気は比較的誘電率が大きいので屈折率への寄与が大きく、水蒸気分布は気象条件等に大きく依存するのでその補正はやっかいなものとなる。水蒸気による距離誤差は鉛直方向で 0.2 ~ 0.5m

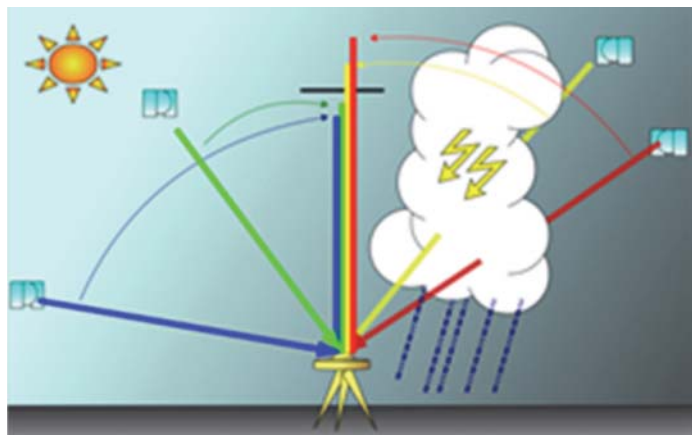


図 2-13 : GPS の伝搬遅延長から可降水量を推定する模式図。衛星測位電波が大気中を通過する際に、水蒸気の効果により伝搬遅延が起こる。これから経路に沿った水蒸気の積分量が推定できるが、これを天頂方向に投影し、受信機上空における水蒸気積分量（可降水量、PWV: Precipitable Water Vapor）を求める。

とわずかなため通信等では無視されるが、この誤差をうまく逆用すれば水蒸気量の情報を得ることが可能になる。具体的には水蒸気の鉛直方向の積分量である可降水量 (PWV: Precipitable Water Vapor) を測位誤差から推定できる (図 2-13)。こうして、One person's noise is another's signal (邪魔な誤差も、見方によっては重要な信号になる) という逆転の発想で、「GPS 気象学」と呼ばれる、気象学、測地学、衛星航行学の学際的分野が生まれた。

国土交通省の国土地理院が約 20 km の間隔で全国の約 1200 箇所に GPS の定常観測点 (GEONET: GPS Earth Observation Network) を連続運用している。このデータを用いて平成 21 年 7 月に起こった中国・九州北部豪雨を研究した例では、7 月 21 日 10 - 11 時頃に山口県防府市で局地的に急激な降水現象が発生し、この直後に大規模な土石流が発生したが、この集中豪雨にともなう水蒸気の動態を GPS で連続監視することに成功している。

生存圏研究所のグループは、集中豪雨のもととなる水平スケールが10 km 程度の大気現象にともなう可降水量の面的分布を得るために、多数のGPS受信機を1-2 kmの間隔で2次元に配置した稠密観測ネットワークを宇治キャンパス周辺に構築し、GEONETに比べて一桁優れた水平分解能で水蒸気分布を監視するシステムを開発した。大量の衛星測位データをリアルタイムで通信・収集することによって、可降水量水平分布の時間変動を解析し可視化することに成功した。特に、準天頂衛星による高仰角の測位電波を用いてPWV水平分解能の向上を図ることができた。この研究を基礎に「高精度衛星測位データを用いた気象予測システム」を提案しており、都市域で問題となっている集中豪雨による気象災害の未然防止に貢献したいと考えている。

[GPS 電波掩蔽]

GPS気象学では、高度約1,000 km程度の低軌道（LEO：Low Earth Orbit）を周回する人工衛星でGPS電波を受信して大気状態を計測する方法も開発されている。これは、GPSを人工電波源とするリム（縁）方向の衛星リモートセンシング法と分類でき、GPS（電波）掩蔽法（GPS RO：GPS Radio Occultation）と呼ばれている。GPS掩蔽では、低軌道衛星から見て地平線に沈みつつあるGPS衛星から大気層を通過して届く電波を検出する。この場合、大気屈折率の高度勾配により、電波経路がわずかに曲がる。この電波伝搬経路の曲がりにより、衛星間の直線距離に比べて、経路が少し長くなる。ここで、精密な衛星軌道要素をもとに、GPS電波の伝搬遅延長を求めれば、その経路の偏角を計算することができる。

図2-14に示すように、衛星の動きにつれて、順次、電波経路の高度が下がり、最終的には地球に隠されるが、この間に偏角の高度変化を求め、これを電波経路の接点（測定点）における屈折率の高度プロファイルに変換する。さらに、屈折率から電離層の電子密度、対流圏と成層圏の気温、また、対流圏下層の水蒸気の高度プロファイルを求めることができる。図2-14では誇張して描かれているが、衛星間の直線距離と実際の伝播経路長の差はごくわずかで、経路の接線高度が約70 kmの場合に1 cm、高度約50 kmで10 cm、約20 kmで10 m、そして高度約10 kmで100 mと見積もられる。この差異を検出するには、衛星の位置と速度をおよそ10 cm および0.1 mm/秒の精度で定める必要がある。

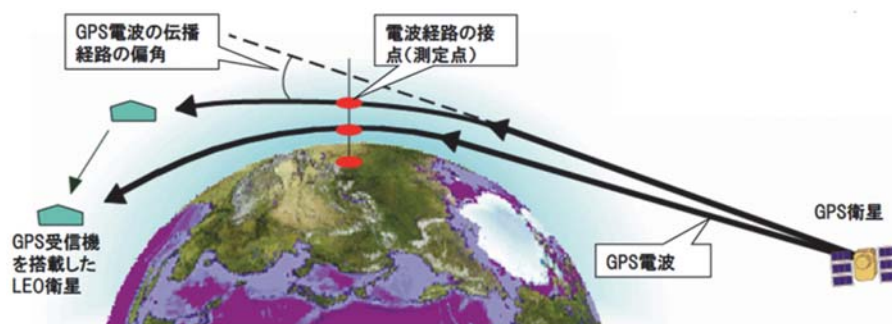


図2-14：GPS電波掩蔽の原理と特長。小型低軌道（Low Earth Orbit; LEO）衛星から見てGPS衛星が地平線に没する際に、大気層を通過してくるGPS電波をLEO衛星で受信する。精密な衛星軌道要素をもとに、GPS電波の伝播遅延長を求めその経路の偏角を計算する。偏角は電波経路の接点（測定点）における大気屈折率の高度プロファイルに変換され、さらに気温と水蒸気（および電子密度）の高度変化が求められる。とりわけ、気温（高度40km以下）および水蒸気（高度約10km以下）のプロファイルが、気球観測と同等の優れた精度および高度分解能で測定できる特長がある。GPS掩蔽は精密時計による電波伝搬距離測定に依拠するため、衛星の世代交代等に影響されず長期安定で精度校正が不要であり、地球温暖化や水循環等の環境変化の長期監視に適している。

が、最近の衛星測位ではこれが達成されている。

GPS 掩蔽による温度プロファイルは、従来の衛星搭載放射計観測に比べて高度分解能が数百 m ～ 1.5 km 程度と格段に優れていることが特長である（一方、水平分解能は電波経路に沿って約 250 km となる）。なお、高度な電波伝搬の解析手法を用いれば、さらに高度分解能を向上できることが研究されており、対流圏から成層圏の高度 30 km 付近まで、高度分解能約 100 m で気温プロファイルが求められている。

GPS 掩蔽データを数値予報モデルに同化すれば予報精度が格段に向上すると期待されている。例えば、2004 年 7 月に起こった梅雨前線に伴う新潟・福島豪雨では、発達した降水帯の南西側で GPS 掩蔽データが得られた。それをデータ同化した予報では、通常の観測データのみでは再現できなかった福島から新潟に伸びる強い降水域を再現することに成功した。一方、2007 年 8 月 2 日に九州を通過した台風 19 号（USAGI）では、GPS 掩蔽データを同化に加えた場合、台風の発生を正確に再現でき、台風発達過程も観測結果と良く一致した。これらのことから、GPS 掩蔽データは集中豪雨や台風の予報改善について大変有用であることが明らかになってきている。

2.3.3 宇宙からのグローバルなリモートセンシング

[衛星からの地球観測]

1957 年に世界初の人工衛星スプートニク 1 号が打ち上げられてから半世紀あまりが経過した。今では、気象衛星の雲画像や Google Earth で見られる画像まで、宇宙から眺めたグローバルな情報が私たちの回りにあふれている。一方では、オゾンホールや温暖化といったグローバルな環境変化が近年大きな社会問題となっている。人工衛星からの視点を持った人類が、グローバルな観点から自分自身を取り巻く環境、生存圏について考えるようになってきているわけであるが、これは決して偶然ではないであろう。衛星からの地球観測によって、多様なグローバルデータが得られるようになっただけでなく、われわれの地球環境に対するとらえ方にも大きな変化をもたらしたといえる。

最近、衛星からの地球観測の歴史と成果について "Earth Observations from Space: The First 50 Years of Scientific Achievements" という本が出版された。コンパクトな書籍であるが、過去 50 年にわたって衛星観測のもたらしたものが非常によくまとめられている。目次をたどってみると、1. はじめに、2. 宇宙からの地球観測：初期の歴史、からはじまって、具体的なテーマとしては、3. 気象、4. 地球の放射収支と気候システムにおける雲とエアロゾルの役割、5. 大気組成：オゾン破壊とグローバルな汚染、6. 水循環、7. 雪氷圏、8. 海洋力学、9. 生態系と炭素循環、10. 土地利用と土地被覆の変化、11. 固体地球、と衛星観測から得られる情報が実に多岐にわたっていることを見て取れる。最後に 12. 結論の節があって、ここでは衛星観測がわれわれにいったい何をもたらしたのかがまとめられている。まさにわれわれを取り巻く環境のさまざまな側面の理解が進んできていることが見て取れる。以下では、衛星からの大気圏あるいは森林圏のリモートセンシングの話題について紹介したい。

[国際宇宙ステーションからの地球大気観測]

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (JEM/SMILES) は、2009 年 9 月 11 日（日本標準時、以下同様）、HTV に搭載され H-IIB ロケットによって打ち上げられた。同月 25 日に国際宇宙ステーション (ISS)「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに取り付けられ、翌 26 日には稼働を開始した（図 2-15）。装置の初期チェックアウトを経て、10 月 12 日からは本格的な大気観測を開始し、装置の不具

合を起こした2010年4月21日まで、約半年間に渡りデータを取得した。SMILESは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と情報通信研究機構（NICT）とが共同開発した地球大気観測センサーで、地球大気から放出される微弱なサブミリ波帯の電磁波を測定して大気中の微量成分のグローバル分布を観測し、成層圏オゾン等の化学過程の詳細を明らかにすることを目的としている。特に SMILES は、オゾン収支を考える上で重要になる臭素系・塩素系の微量成分濃度を測定し、大気中の化学反応を多面的に捉えることで、地球大気質の変動に関わる諸問題の解決に貢献する。

SMILES を特徴づけるのは、地球大気から放射される微弱なサブミリ波を捉える高感度な検出器と、その検出器の雑音を理論限界近くまで抑えるための機械式冷凍機である。検出器には広い受信周波数帯と低雑音性能とを両立した超伝導 SIS ミキサを採用し、冷凍機は4K ジュール・トムソン冷却器とそれを予冷する二段式スターリング冷却器とからなっている。3つの観測周波数帯 624.32 ~ 625.52 GHz (バンド A)、625.12 ~ 626.32 GHz (バンド B)、649.12 ~ 650.32 GHz (バンド C) のうち2つを選択して同時に観測する（詳しくは Kikuchi *et al.*, 2010 参照）。

ISS の周回軌道は軌道傾斜角 51.6 度の太陽非同期軌道である。サブミリ波の測定方向（視野）を ISS 進行方向真正面に向けると、SMILES の観測緯度帯も南北 51.6 度に限られてしまう。人間活動に関連の深い北半球側について、より極域に近い高緯度域を観測するため、アンテナは ISS 進行方向から 45 度左に向くように設計されている。これにより、観測緯度帯は北緯 65 度～南緯 38 度の範囲となっている。1 回の走査時間は 53 秒であるため、観測点数は ISS の一周回で約 100 点、一日で約 1600 点となる（図 2-16 参照）。ただし実際には、SMILES の観測視野を太陽電池パネルが遮ることがあること、さらに JEM や ISS 全体の様々な運用制約があるため、観測数はこれよりも少なくなっている。

SMILES は、オゾンのほか HCl, ClO, HNO₃, HOCl, BrO とオゾン同位体などの大気成分から放射されるサブミリ波を輝度温度スペクトルとして捉える。ランダム雑音は 1K 程度と極めて低い。得られた輝度温度スペクトルから、高次データ処理の計算（リトリーバルアルゴリズム）にもとづいて各高度における各種大気成分の分布が求まる。図 2-17 ではオゾンの帯状平均値の一例を緯度と高さの断面で示している。高度 30km 付近のオゾン層のピークが南北 2 つに分かれているのを見て取ることができる。この特徴的なオゾン分布は、赤道域で顕著に見られる準 2 年周期振動と半年周期振動に関連した子午面循環によって引き起こされていると考えられる。

また ISS の軌道が太陽非同期であるため、SMILES の観測する地方時は日々変化してゆき、約 1.5 ヶ

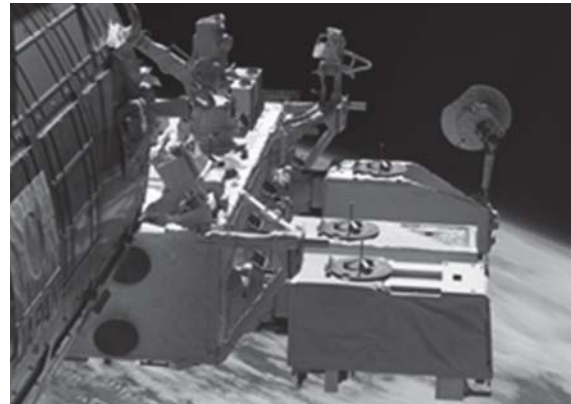


図 2-15：国際宇宙ステーション日本実験棟の曝露部に取付けられた SMILES（手前から 2 つ目）

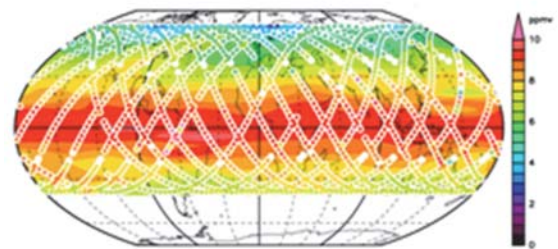


図 2-16：観測初日に得られたデータにもとづく高度 28km におけるオゾンの全球分布。白丸が実際に SMILES の観測のある場所を示す。

月で地方時1日分を走査することができる。これまでの衛星観測では太陽同期の軌道を取るものが多く日変化を捉えることができなかったが、SMILESでは微量成分分布の日変化を捉えることが可能になっている。図2-18はそのような例である。

このようにして得られたデータからは、これまでにない高い精度でオゾンとそれに関連する微量成分の変動が捉えられている。さらに、オゾン層回復シナリオの基礎となる中層大気中の塩素・臭素量が、HCl, ClO, HOCl, BrOなどの分布から得られており、今後、将来予測モデルの基礎データとして活用されることが期待される。

[衛星リモートセンシングを用いた熱帯早生樹のモニタリング]

地球表面から反射・放射される電磁波を測ることによって地上の状態（土地被覆）や性質（植生の状態など）を捉えることが可能になる。地表面情報を得る衛星センサには観測波長域により、大きくわけて（1）可視光線・赤外線を測定する光学センサと（2）可視光・赤外線より波長の長いマイクロ波を観測するセンサの2種類に分けられる。波長の長いマイクロ波は大気中の分子に散乱・吸収されにくいいため、昼夜にかかわらず、また天候に左右されずに地表面を観測できる。近年では、レーダーの一種である合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar: SAR）を搭載した人工衛星が打ち上げられ、マイクロ波帯において高分解能の画像の取得が可能になっている。さらに、水平偏波：Hと垂直偏波：Vの両方を同時に観測することのできる多偏波合成開口レーダー（Polarimetric SAR: PolSAR）によって、反射波の振幅と位相（偏波情報）を取得することも可能になる。各偏波に対する散乱特性は地表面の状態によって異なることから、PolSARデータの解析によって地表面情報をより精巧に解析することが可能となる。ここではマイクロ波センサから得られるデータを利用して、インドネシア・スマトラ島に位置するアカシア・マンガウム大規模植林地の熱帯早生樹を対象地として、衛星リモートセンシングを用いた森林バイオマス推定の手法開発を行った成果を示す。

現在、世界各地で増加する産業植林地を持続可能な形で利用していくことは大きな課題であり、そのためには、植林地の状態を長期的にモニタリング・評価していく必要がある。植林地では、定点観測プロットと呼ばれる限られた領域で、胸高幹直径（Diameter at breast height: DBH）・樹高・成立本数を定期的に測定し木の成長を調査しているが、地上観測だけでは広大な植林地全体の材積量（木の

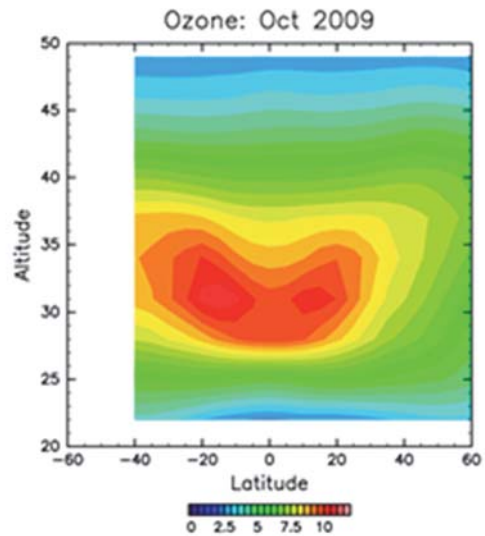


図2-17：2009年10月の月平均・帯状平均オゾンの緯度・高度分布

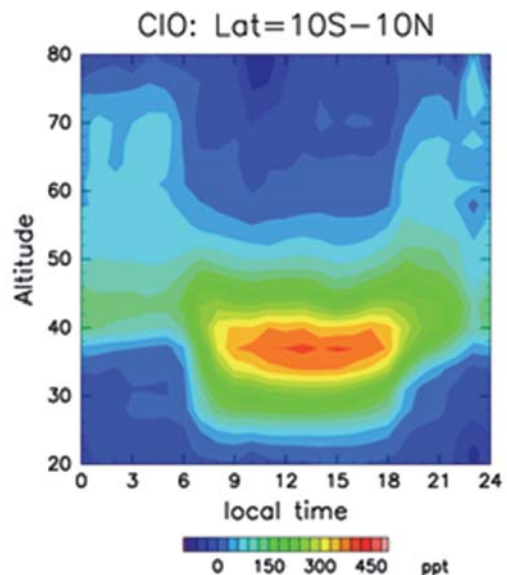


図2-18：赤道付近で見たClOの日変化を示す時間・高度断面図

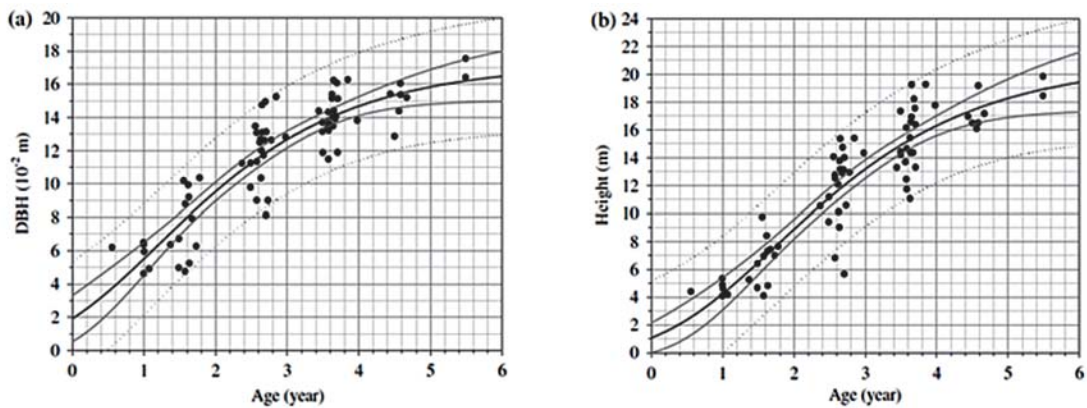


図 2-19 : (a) DBH の成長曲線、(b) 樹高の成長曲線

体積) や木の状態を空間的に把握することはできない。逆に、衛星観測データは、木の幹の物理量(バイオマス量)を直接示しているものではないため、衛星観測データのみによる解析は定量的にみて不確実性が高いことが指摘されている。そのため、森林の地上観測データとマイクロ波衛星データの関係性を理解した上で衛星データ解析を行い、森林資源を空間的に推定する必要がある。ここでは、①ALOS 衛星の偏波合成開口レーダー(PALSAR)によるマイクロ波衛星データを主データとして、②ALOS 衛星搭載の光学センサ(AVNIR2)による光学衛星データ、③森林観測データを用いた統合的な解析を行った。

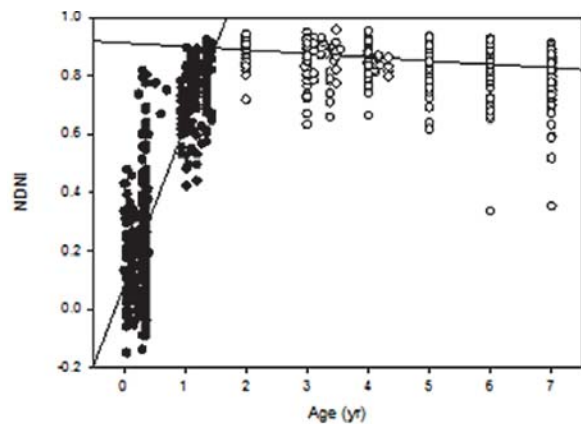


図 2-20 : 林齢と NDVI の関係

まず、地上観測データ(胸高幹直径・樹高)を基にアカシア林の成長曲線(図 2-19)を作成し、計算された成長曲線から連年成長量: 毎年の成長量(Current Annual Increment: CAI)を算出した。連年成長量をみると、0~3 年生の CAI は DBH で 3cm、樹高で 4m 程度であるが、3 年生を過ぎると徐々に減少し、7 年生の CAI は、DBH で 0.8cm、樹高で 0.6 m 程度となっており、アカシア林の成長期は 0~3 歳であることが分かる。

次に、林齢と植生活性度との関係を調べた。光学衛星データより算出される正規化植生指数(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)とは、植物の緑の葉が可視光域の青と赤(R)の波長を吸収する一方で近赤外線(IR)域の波長を強く反射するという特徴を生かし、 $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$ の式で求められる植生活性度の指標である(Schowengerdt, 2007)。アカシア林の林齢と NDVI の関係性を調べたところ、2~3 年生をピークに NDVI が減少傾向にあることが明らかになった(図 2-20)。成長期の後、NDVI 値の減少に伴って CAI も減少していることから、地上観測データより得られた成長量の推移と光学衛星より得られた NDVI の推移が一致していると考えられる。

マイクロ波衛星データの偏波行列情報を、各々の散乱メカニズム: 表面散乱・体積散乱・2 回反射散乱・ヘリックス散乱(図 2-21)より構築された散乱行列モデルにフィットさせ、衛星で観測された電力を分解することで各散乱成分の電力寄与の度合いを評価する四成分散乱モデル分解(Singh *et al.*,

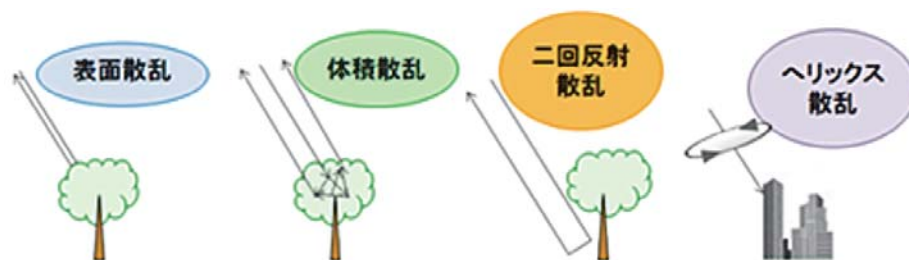


図 2-21：マイクロ波合成開口レーダデータの電力四成分分解

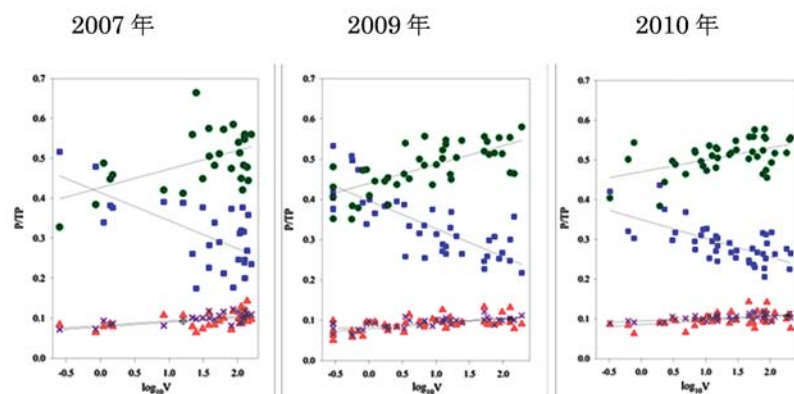


図 2-22：地上観測データ：幹体積とマイクロ波衛星データ：散乱電力の関係

2013) を適用した。(Yamaguchi, 2007) によると、「表面散乱」は地面などの表面で引き起こされる 1 回反射散乱、「体積散乱」はランダムな方向に分布する物体から引き起こされる散乱、「2 回反射散乱」は地面と幹など直角構造での 2 回反射により VV の偏波の位相が反転する散乱、「ヘリックス散乱」は直線偏波を円偏波に変える散乱のことで方向依存性のある散乱要素（森林域では枝など）により発生する（大内, 2009）。この四成分分解により得られた散乱電力と、定点観測プロットで測定された胸高直径・樹高・成立本数より算出される幹体積についてのデータとの相関解析を行った。

図 2-22 は、横軸に幹体積 ($\log_{10}V$)、縦軸に散乱電力（各散乱電力を全電力で割って正規化）をとり、相関解析を行った結果を示している。2007・2009・2010 年のデータにおいて、表面散乱が高い負の相関（相関係数： $\tilde{R} \approx -0.70$ ）、体積散乱（ $\tilde{R} \approx 0.58$ ）、2 回反射散乱（ $\tilde{R} \approx 0.50$ ）、ヘリックス散乱（ $\tilde{R} \approx 0.66$ ）が正の相関を示している。これらの結果は、マイクロ波の反射波の物理的メカニズムから理解できる。木（幹・林冠）の成長に伴い裸地が減少するため「表面散乱」は減少するが、一方、植生は広がりを持つようになるために、「体積散乱とヘリックス散乱」は増加、さらに、幹が太くなり樹高が高くなるにつれて 2 回反射が生じやすくなり「2 回反射散乱」も増加すると考えられる。これらの結果から、マイクロ波がアカシア林の林冠をある程度透過し、幹情報を得ていることは明らかになってきた。しかし、地上観測された幹体積と、それを「物理的に反映するはずの 2 回反射散乱」の間の十分な相関が得られていないのは、衛星と地表面の間に存在する林冠や下層植生により電波が遮られ減衰していることが大きな原因だと考えられる。

最新の電力分解アルゴリズムを森林分野へ応用し、マイクロ波衛星データと森林観測データ：幹体積との間の一定の関係性を明らかにするとともに、林冠の拡大や樹高・幹断面積の増加に伴って、電力分解によって得られたマイクロ波の各散乱電力が、どのように変化するのか次第に明らかになってきている。今後も、PolSAR によって取得される偏波情報の活用とアカシア林の森林構造の違いによる散乱メカニズムの変化に着目した森林資源の定量的評価手法開発を目指し、さらにはアジア地域に

拡大する産業植林地の持続的利用に向けた議論に繋げていきたいと考えている。

2.4 森林が支える地球環境

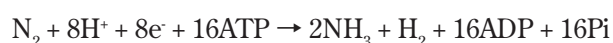
2.4.1 有用な代謝・輸送遺伝子の探索

[植物と元素]

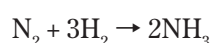
植物は太陽エネルギーを用いて光合成により水と二酸化炭素から糖を作ることができる生産者であるが、その生育には17種類の元素が必要である。植物の生長・生殖になくてはならない元素のことを必須元素といい、窒素、リン、カリウムなどのように多量に必要な多量必須元素と鉄やマンガンなどのように必要量の少ない微量必須元素に分けられる。木質バイオマスを利用するためや食糧生産のために、植物がこれらの養分を十分に吸収することが重要である。植物は水や二酸化炭素に含まれる水素、炭素、酸素以外の元素を土壌中から根を介して吸収する。近年、農業では大量の肥料が用いられているが、肥料として土壌に養分を供給し続ける方法には限界があり、持続可能な方法でのバイオマス生産が強く望まれている。本項では、まず、植物の必須元素の中で、特に窒素に焦点を絞って、その生態系での循環や植物がどのように窒素を利用しているのかを概説した後、植物の窒素獲得に関して生存圏研究所で行われた研究の成果を紹介する。

[窒素の循環]

大気の約80%は窒素(N_2)であり、窒素は私たちの最も身近な元素である。地球上のすべての生物には窒素が必要であるが、この大気中の窒素はNが三重結合でつながった非常に安定な構造をしているため、ほとんどの生物は直接利用することができない。植物はアンモニウムイオン(NH_4^+)や硝酸イオン(NO_3^-)の形態で土壌から窒素を吸収し、私たち動物は植物や他の動物が吸収して有機物となったタンパク質などを食べることで必要な窒素を獲得している。しかし、地球上にはこの安定な N_2 をアンモニアに変換して生育できる微生物が存在する。窒素固定細菌と呼ばれるこれらの微生物は、ニトロゲナーゼという酵素の力を使って大気中の窒素を以下の反応でアンモニアに変換することができる。



生成したアンモニアは微生物の中での有機物に変換されて利用される一方で、微生物の死滅により窒素を含む有機物が土壌に蓄積する。これらは分解され NH_4^+ となるが、さらに硝化作用を持つ微生物により NO_2^- 、 NO_3^- と変換される。多くの植物はこの NO_3^- を根から吸収して成長している。このように大気中の窒素がニトロゲナーゼを利用してアンモニアに変換されることを生物学的窒素固定という。工業的に窒素肥料が生産されるようになるまでは、植物が利用する窒素は、生物学的窒素固定によるものと、雷の放電や紫外線により窒素ガスが酸化され、これらが雨水に溶けることで土壌に供給される物理学的窒素固定によるものや、有機物の分解により生じたアンモニウムイオンや硝酸イオンであった。しかし、約100年前に、工業的に窒素と水素からアンモニアを製造するハーバー・ボッシュ法が発明され、化学的に大気中の N_2 をアンモニアに変換することが可能となった。これを化学的窒素固定と呼び、以下の反応でアンモニアが合成される。



現在、年間1億トン以上の窒素肥料が利用されているが、その多くはハーバー・ボッシュ法により生産されたものである。ハーバー・ボッシュ法は、窒素と水素を高温・高圧（500℃・300気圧）のもと固体触媒上で反応させるため、多量のエネルギーを必要とし、世界の年間消費エネルギーの1%以上がハーバー・ボッシュ法に使用されている。循環型社会の構築に向けてよりエネルギー消費の少ない方法でのアンモニア合成法の開発が望まれており、生体触媒であるニトロゲナーゼの反応を模倣するなど、鉄を主成分とした触媒に代わり常温・常圧下で反応が進行するような触媒の探索が進められている。

大気中の N_2 は様々な過程でアンモニウムイオンに変換され、植物、動物の体を構成する有機物に変換される一方、土壤中の窒素化合物が微生物の力で N_2 に変換され大気中に放出される「脱窒」という過程もある。脱窒は窒素循環に不可欠な反応であり、 $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ の過程で進行するが、一部は N_2 に変換されず、亜酸化窒素（ N_2O ）として大気中へ放出される。亜酸化窒素は二酸化炭素の300倍の効果を有する温室効果ガスであり京都議定書での削減対象に挙げられている。自然起源の亜酸化窒素として最大の発生源は土壌であるが、近年の農地への窒素肥料の大量投入により、農地から発生する亜酸化窒素の増加が問題となっている。

ハーバーボッシュ法により生産された窒素肥料は食糧増産のために不可欠であった。しかし、その生産に多量のエネルギーが必要であることや、農地への大量投入により地下水の汚染や亜酸化窒素の増加を引き起こすという問題を有している。食糧増産やバイオマス燃料用植物生産のため、今後ますます大量の窒素肥料が必要となると考えられるが、これまでのように化学的窒素固定に供給を頼るのはエネルギー資源の枯渇や環境への負荷から困難であり、持続可能な方法で植物の生育に必要な窒素を供給することが不可欠である。

[マメ科植物と根粒菌の共生窒素固定]

植物は4億5千万年前に陸上に進出したと考えられているが、窒素肥料が投入されるようになるまで、植物は常に窒素が欠乏した環境で生存してきた。その進化の過程で、細菌の持つ生物学的窒素固定の能力を活用し、大気中の窒素を利用して成長できるようになった植物が存在する。最も有名な例が、ダイズ（*Glycine max*）やインゲン（*Phaseolus vulgaris*）、エンドウ（*Pisum sativum*）などの作物やアルファルファ（*Medicago sativa*）などの牧草を含むマメ科植物である。マメ科植物と根粒菌の共生による共生窒素固定は、生物学的窒素固定全体の50~70%を占めることから、極めて重要な植物と微生物の相互作用と位置づけられる（Smil, 1999）。マメ科植物の根には土壌中の細菌との共生によって生じるこぶのような器官「根粒」が形成されるが、共生窒素固定においてはこの根粒と呼ばれる器官で、根粒菌のニトロゲナーゼにより大気中の窒素がアンモニアに変換される。直接大気中の窒素を栄養源として利用することができるため、マメ科植物は土壌中に窒素が少ない環境でも生育することができる。そのため荒廃地の植生回復にマメ科植物が利用されることが多く、インドネシアやマレーシアの荒廃地の造林にもマメ科樹木であるアカシアマンギウム（*Acacia mangium*）が利用されてきた。日本でも春にマメ科のレンゲソウ（*Astragalus sinicus*）が咲いているのが以前は多く見られたが、これはレンゲソウが共生窒素固定により獲得した窒素を稲作に利用しようとする古くからの知恵である。

[共生窒素固定で重要な役割を担う遺伝子の探索]

マメ科植物と根粒菌の共生プロセスは、化学物質を介したシグナル分子の交換から始まる。まず、

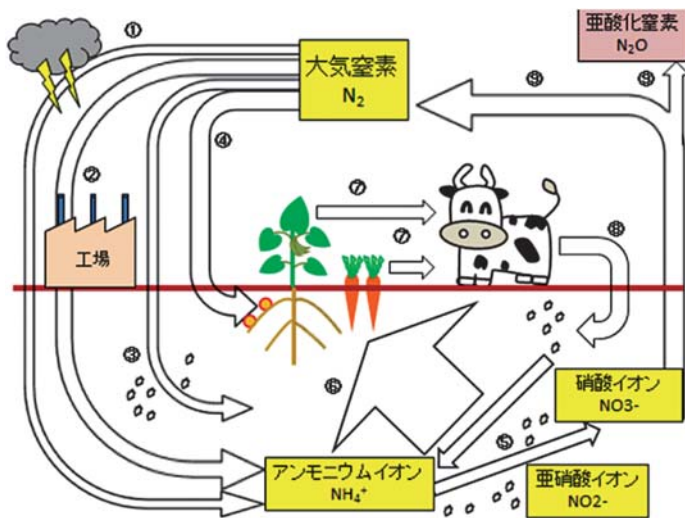


図 2-23：生存圏における窒素循環。大気中の窒素は形態を変化させ生存圏を循環する。
①物理的窒素固定、②化学的窒素固定、③生物学的窒素固定、④共生窒素固定（生物学的窒素固定）、⑤硝化、⑥植物の吸収、⑦栄養の摂取、⑧枯死、死滅、⑨脱窒

マメ科植物は、根からフラボノイドなど根粒菌を誘引し、根粒菌の転写因子 Nod D タンパク質（根粒菌が共生するプロセスの開始スイッチとなるタンパク質）を活性化させるシグナルを分泌する。次いで、根粒菌から植物へのシグナル分子である Nod ファクターが生合成され、分泌される。マメ科植物の中でもダイズと共生する根粒菌とアルファルファと共生する根粒菌が異なるように共生する相手を認識しているが、根粒菌の Nod ファクターは根粒菌の種類により構造が少しずつ異なるので、これによりマメ科植物が自らと共生できる根粒菌を区別していると考えられている。Nod ファクターは、根毛のカーリングを引き起こし、根粒菌は感染糸を形成してマメ科植物の根に侵入する。マメ科植物も根粒菌を囲い込む場所を作るため、細胞分裂を活発に行い、窒素固定が行われる成熟した根粒では感染細胞と非感染細胞からなる感染領域が形成される（図 2-24）。根粒菌は根粒菌感染細胞で、ペリバクテロイド膜という植物の膜で囲まれた「シンビオソーム」と呼ばれるオルガネラ（細胞内小器官）の内に取り込まれ、ここで共生窒素固定が行われる。シンビオソームに取り囲まれた根粒菌は、生育に必要な栄養源を植物からの供給に依存する。ハーバーボッシュ法では大量のエネルギーを消費するが、根粒菌のニトロゲナーゼも一分子の N_2 をアンモニアに変換するのに 16 分子もの ATP を必要とする。生体のエネルギー通貨である ATP は、植物から供給されるリンゴ酸等の有機酸を用いて生産されるため、マメ科植物は光合成で生産したショ糖を葉から根粒に輸送し、ショ糖を有機酸に分解してシンビオソーム内の根粒菌に受け渡している。有機酸以外にも、根粒菌の生育に必要な様々な代謝物や無機イオンが供給され、逆に根粒菌から植物へは窒素固定産物であるアンモニアが供給される。このように共生関係を維持す

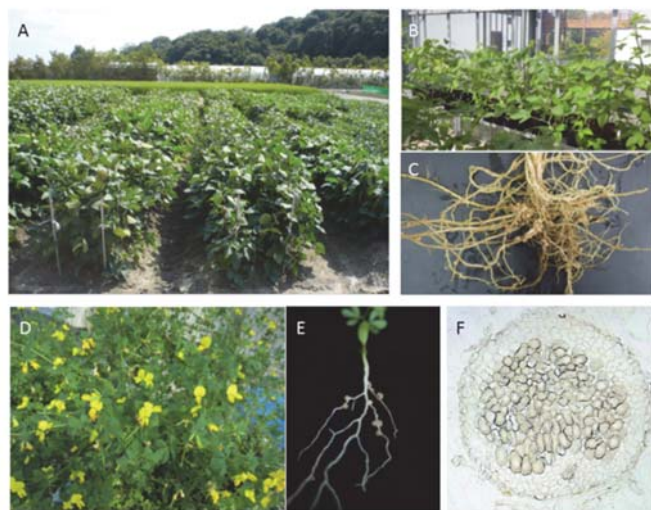


図 2-24：マメ科植物の根に着生する根粒。(A) 京都府の黒ダイズ畑、(B) 生存圏研究所の温室で栽培中のダイズ、(C) ダイズの根に着生した根粒、(D) マメ科のモデル植物ミヤコグサ、(E) ミヤコグサの根に着生した根粒、(F) 根粒の断面図

るためには、多種多様な代謝物やイオンを適切な方向に移動させなければならない。しかし、植物の細胞やシンビオソームは膜で囲まれているので、代謝物やイオンは自由に行き来することができず、トランスポーターと呼ばれるタンパク質がこれらの輸送に重要な役割を担っている。

トランスポーターは共生窒素固定に重要な役割を担うが、どのような種類のトランスポーターが根粒形成過程や成熟根粒で機能しているのかについて全容は明らかにされていない (Udvardi & Poole, 2013)。生存圏研究所では共生窒素固定で重要な役割を担うトランスポーターに着目して研究を行ってきた。まず根粒内でどのような種類のトランスポーターがどの部位でどの程度発現しているのかを調べるために、レーザーマイクロダイセクションにより根粒の各組織を切り分けた後、細胞内で発現している遺伝子を網羅的に解析できるトランスクリプトームという手法を用いて、根粒で働くトランスポーター候補をリストアップした (Takanashi *et al.*, 2012)。その結果、根粒で発現するトランスポーター遺伝子 68 個を見出した。各トランスポーター遺伝子は根粒の組織特異的な発現を示すものも多く、リストの中には、カリウムイオンやリン酸のトランスポーターも見出された。私たちはこれらのトランスポーターの中で植物が多くの遺伝子を有しているにもかかわらず根粒での機能が全く解明されていなかった MATE (Multidrug and toxic compound extrusion) 型ファミリーや ABC (ATP-binding cassette) タンパク質ファミリーの解析を進めた。次節ではその中から LjMATE1 の機能について紹介する。

[LjMATE1 と根粒への鉄の供給]

根粒において鉄 (Fe) は最も重要な元素の一つであり、窒素固定を担う根粒菌ニトロゲナーゼの活性中心に必須である。ニトロゲナーゼは酸素に弱いという性質があるが、マメ科植物はレグヘモグロビンというタンパク質を合成し、根粒細胞内に蓄積させることで根粒内の酸素分圧を低下させている。このレグヘモグロビンも私たちの血液中のヘモグロビンと同様に鉄を含むタンパク質である。ニトロゲナーゼやレグヘモグロビンは根粒の主要なタンパク質であることから、植物は土壌から吸収した鉄を積極的に根粒に供給しており、ダイズでは植物体全体の 40% もの鉄が根粒に存在する。

遺伝子発現を人為的に抑制して機能を調べる RNAi 法や、アフリカツメガエル卵母細胞を用いた輸送実験等の解析により、LjMATE1 は根粒において植物から根粒菌への鉄供給に重要な役割を担うことが明らかになった (Takanashi *et al.*, 2013)。鉄は植物の導管内でクエン酸 (Citrate) と錯体を形成した Fe-Citrate として輸送される。導管から根粒の細胞へと鉄が移動する経路はアポプラスト (細胞の外側の空間) を経由して輸送される経路と、種々の輸送体を介して細胞内を通る経路の 2 通り提唱されているが (Brear *et al.*, 2013)、LjMATE1 はアポプラスト経路で鉄を供給するために必要なクエン酸を細胞内からアポプラストに供給する役割を担うと考えられる。実際に、LjMATE1 の働きを抑制した植物では、鉄が根粒菌の働く感染細胞に十分に供給されず、根粒菌の窒素固定活性の低下や根粒の老化が見られ、窒素欠乏条件での生育が著しく抑制された。

[有用遺伝子の探索とその利用]

マメ科植物と根粒菌の共生はその農業上の重要性や、共生という基礎科学としての重要性から世界的に研究が盛んである。上記のようにリストアップされた遺伝子の中からある遺伝子に着目し、RNAi 法や遺伝子ノックアウト (遺伝子の機能を欠損させる方法) によってその遺伝子の機能を明らかにする逆遺伝学的アプローチの他、根粒形成や共生窒素固定の機能が不全になった変異体の原因遺伝子を突き止める順遺伝学的アプローチによって、マメ科植物の共生窒素固定に必須の遺伝子が明らかにさ

れている (Kouchi *et al.*, 2010)。

マメ科植物にはトウモロコシ、イネ、小麦に次いで世界で4番目に多く生産されているダイズを初め、インゲン、エンドウ、ソラマメ、小豆など多くの作物がある。ダイズは窒素固定により生育することができるが、作物として十分な収量を得るためには共生窒素固定により得られる窒素では不十分であり、多くの窒素肥料が投入されている。これらの研究で同定された共生窒素固定に関わる遺伝子は、マメ科植物の共生窒素固定能力を向上させるために活用されており、より少ない窒素肥料で十分な収量を得ることができる品種の育成に向けた研究が進められている。さらに、根粒形成や共生窒素固定に働く遺伝子を探索することの究極の目的は、イネやトウモロコシなどの穀物に共生窒素固定能力を付与し、窒素肥料が不要な食糧生産を実現することである。しかし、そのためには遺伝子の同定だけでなく、どのようにそれらの遺伝子を機能させ、根粒のような器官を構築し根粒菌を共生させるかという課題をクリアしなければならず、今後さらなる研究が必要である。

[生存圏科学における課題と展望]

窒素は生存圏で最も重要な元素の一つであり、大気圏、森林圏、人間生活圏をその形態を変化させながら循環している。生存圏科学の目指す持続可能な社会の構築に向けて、窒素を巡る生存圏科学の大きな課題は2つある。一つ目は、私たちの生存基盤である食糧生産に必要な窒素を持続可能な方法でどのように獲得していくかということである。大量のエネルギーを用いて窒素肥料を生産するという方法では、今後さらに増加し続ける人口を賄うのに十分な食糧を生産することは不可能であり、共生窒素固定のような植物が進化の過程で獲得した有用な性質をさらに有効に活用することが必要である。また、今後ますます増加が予想される資源作物の栽培にも化学的窒素固定による窒素肥料に頼らない方法を確立しなければならない。もう一点は、窒素肥料の大量投入による無機態窒素の地下水への流入や、温室効果ガスである亜酸化窒素の農地からの発生をどのように削減していくかということである。これらの課題を解決するため、生化学・分子生物学的手法で植物や微生物の持つ有用遺伝子を探索するとともに、それらを利用して生存圏全体での持続可能な窒素循環を構築することが重要である。

2.4.2 木質バイオマス形成の統御機構

[木質とは]

今後人類が生存を続けていくために、化石資源に対する依存度を下げ、再生可能資源に対する依存度を上げていく必要があることは自明と言ってよい。したがって、再生可能資源の科学は生存圏科学における中核的な重要研究領域の一つである。木質バイオマスは、再生可能資源の中で、もっとも大量に蓄積しているものであり、その純一次生産量は世界の年間一次エネルギー消費量の4倍以上に相当するとされている (依田, 1982; エネルギー白書, 2013)。また、世界におけるバイオマスの利用状況は、2010年において既に全一次エネルギー供給量の約10%を占めている (エネルギー白書, 2013)。したがって、森林バイオマスの持続的生産利用は、生存圏科学の主要課題の一つとして位置づけられている。

無論、再生可能資源・エネルギーにはいろいろなものがあり、何れも重要であるが、上記の量的要因以外のバイオマス資源一般の重要性を列記すると、まず、バイオマス資源は液体燃料や工業原材料などの有機化合物を供給することができる点が非常に重要である。また、植物バイオマスは大気中の

二酸化炭素の固定により生成されることから、その生産はいわゆるカーボンニュートラルであるとともに、生産系すなわち森林は、二酸化炭素の吸収固定機能を通じ環境修復に貢献しうる点や、バイオマスの提供以外にも様々な生態系サービスを提供する点が重要である。

[木質の化学成分組成]

木質を構成する主要成分は、セルロースおよびヘミセルロースなどの多糖と芳香族高分子化合物であるリグニンであり、全体の95%程度を占める。また、副成分として、中性の溶媒で抽出されてくる、いわゆる抽出成分がある。木質はリグニン・セルロース・ヘミセルロースの強固な複合体であり、高等植物（維管束植物）が重力と乾燥に抵抗しつつ地球上に繁栄する基盤となる成分である。すなわち、セルロースミクロフィブリルをヘミセルロースが被覆し、さらにその外側にリグニンが沈着することによりセルロースミクロフィブリルを固定している。ここで、リグニン自体は強度を担わないが、リグニンの沈着によりセルロースミクロフィブリルが強度を発揮することができるようになり、巨視的には植物組織が「かたく」なる。このように、木質は高等植物の体を支える構造成分であり、デンプンのような貯蔵物質とは異なりそもそもそう簡単に分解されるようにはできていない。ここでは、木質の成分利用の難しさは木質構成成分の存在状態（超分子構造）の強固さが重要である。

木質の利用、とりわけ酵素糖化等のような温和な反応条件における分解を用いる場合（木質利用の生化学プラットフォーム）では、如何にリグニン・セルロース・ヘミセルロース（リグノセルロース）複合体の強固な構造を緩めるかが最重要課題となっている。例えば様々な前処理による、強固なリグノセルロース構造の緩和が進められている。また、遺伝子組換え技術を用いる分子育種によりリグニン含量を低減させた組換え植物を作出し、前処理の負担を軽減する試みも多数報告されている（図2-25）。

木質の生化学変換プラットフォームは、多糖の変換を主眼としており、リグニンは残渣として産出される。この残渣リグニンは熱化学的に変換利用されるが、そもそもリグノセルロース自体を熱化学変換により利用する方向性も重要である（図2-25）。すなわちリグニンは地球上で最多蓄積量を誇る芳香族資源であり、その有効利用法の開拓やリグニンの増産をあらゆる角度から再度総合的に進める

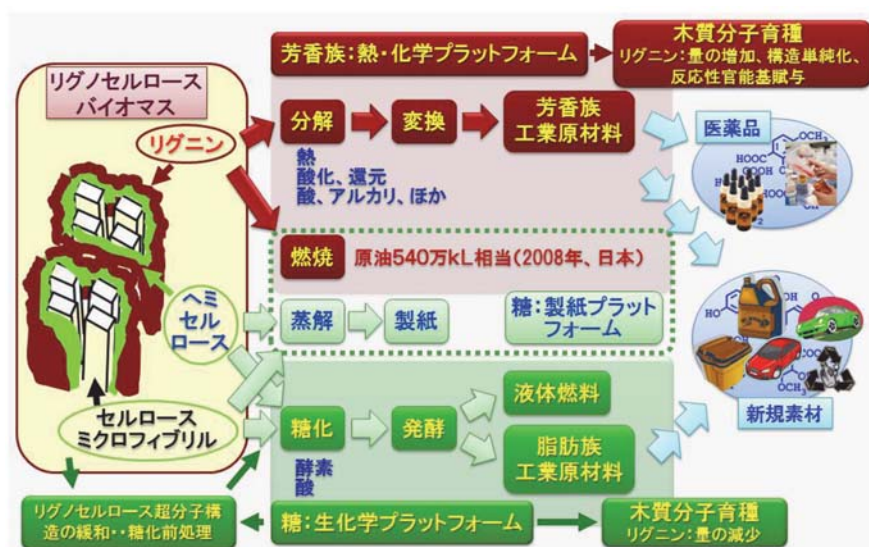


図 2-25：リグノセルロース利用の方向性

ことが強く求められている（日経バイオテク，2010）。この方向性は木質・リグニン化学分野の身最眞な願望ではなく、むしろ石油化学産業等の他領域関係者がより危機感を持って取りくみつつあるものである。

現在、リグニンの大規模な経済的利用は、パルプ廃液リグニンの燃料・分散剤・粘結剤としての利用などに限られている。このリグニン利用の難しさは、主にリグニン構造の複雑さ、単離の難しさ、及び誘導体化起点となる官能基が限定されていることに起因する。そこで、従来からのリグニン利用技術開発の一層の推進は無論重要であるが、今や、これと並行して遺伝子組換え技術等、近年格段に進歩したバイオテクノロジーを駆使して、リグニンの構造の複雑さの低減と新規官能基の付与など、上記の困難を緩和した利用し易いリグニンの作出を新規に進めることが緊要な段階となっている。そして、遺伝子組換えによる、利用に適した木質バイオマスの作出には、木質バイオマス形成の分子機構の解明が、必須となる（図 2-25）。

[木質バイオマス形成の遺伝子発現ネットワーク]

転写とは、DNA の塩基配列を鋳型として、RNA ポリメラーゼにより RNA が合成される現象であり、セントラルドグマの最初の段階である。転写は、遺伝子発現を時空間的に厳密に制御する代表的な代謝過程であることから、遺伝子発現において最も重要な段階として位置づけられている。

転写因子は、シス-エレメントという特定の DNA 配列に結合し、転写を促進または抑制するタンパク質の一群である。転写因子は、単独または他のタンパク質と複合体を形成することにより、転写を制御する。転写の促進因子および抑制因子は、それぞれアクティベーターおよびリプレッサーと呼ばれる。アクティベーターは、RNA ポリメラーゼ複合体を呼び寄せ、転写速度を上昇させる。一方、リプレッサーは、アクティベーターがシス-エレメントへ結合するのを阻害したり、RNA ポリメラーゼ複合体と反発したりすることによって、転写速度を下降させる。このように、転写因子は、転写において非常に重要な役割を担う。

一つの転写因子は、多数の遺伝子の転写を制御していることが多く、この点も重要である。さらに、ある転写因子が、別の転写因子遺伝子の転写を制御している例も知られている。つまり、ある生命現象における転写制御システムは、鍵となる転写因子（マスター転写因子）と、マスター転写因子によって転写制御を受ける下流の転写因子遺伝子や酵素遺伝子とから構成されている。

木質バイオマス形成という非常に複雑な一生命現象においても、当然ながら多数の転写因子遺伝子や酵素遺伝子が関わっている。木質バイオマスを効率的に改変し、人類の生存に有益な資源としてより一層活用してゆくためには、木質バイオマス形成における遺伝子発現制御機構の詳細を明らかにすることが必要である。

これまで、モデル植物であるシロイヌナズナやポプラを対象として、おおよそ3層の階層構造をもつ木質バイオマス形成の転写制御システムが明らかになりつつある（Yamaguchi & Demura, 2010）。最上層には、第一のマスター転写因子、中層には第二のマスター転写因子、そして最下層には、リグノセルロース生合成を直接制御するアクティベーターのほかに、上層のアクティベーターや酵素遺伝子の発現を抑制するようリプレッサーが含まれており、木質バイオマス形成の転写制御システムはかなり複雑であることが分かってきた（図 2-26）。木質バイオマス形成の転写制御システムを活用すれば、1つの転写因子遺伝子の発現制御により、多くの遺伝子の発現を制御することが出来るため、セルロースやキシランなどの多糖成分が多い木質や、細胞壁が厚く、高強度・高比重の木質の効率的

な創出が期待できる（鈴木, 2007）。

一方、転写因子を介した機構以外の木質バイオマス形成の遺伝子発現制御機構については、ほとんど知見がない。しかし、ごく最近、野田ら（Noda *et al.*, 2013a; 2013b）は、木質バイオマス形成に関わるユビキチンリガーゼを同定した。このユビキチンリガーゼの発現量を変化させると、木質バイオマス成分生合成やそれに引き続く細胞死に関わる多くの遺伝子の発現が変化した。一般に、ユビキチンリガーゼは標的タンパク質を特異的にユビキチン化し、ユビキチン化された標的タンパク質は、26Sプロテアソームによって分解される。従って、このユビキチンリガーゼは木質バイオマス形成において発現する

重要なタンパク質の分解に関わっている可能性が高い。これらの知見は、従来とは全く異なるアプローチによる木質バイオマス改変法の開発に結びつくと期待される。

[リグニンの形成統御機構とその制御]

木質形成の統御機構の解明は、木質成分（リグニン、セルロース、ヘミセルロース、抽出成分）の生合成機構の解明とこれらの代謝全体の統御機構の解明により進められてきた。ここで、フェニルアラニンからモノリグノール類（コニフェリルアルコール、シナピルアルコール、p-クマリルアルコール等）に至る経路をケイヒ酸モノリグノール経路と呼んでいる。現在までにこの経路の各段階を触媒する酵素それぞれについて、複数の遺伝子がある程度の数の植物からクローニングされ、機能が確定されてきた。また、リグニン生合成経路の統御機構も、ほかの細胞壁生合成関連代謝の統御機構の一環としてかなり解明が進んできた。ケイヒ酸モノリグノール経路は、碁盤の目状の様々な並行するルートが可能であるが、そのうちの生理的に主要と目されるルート、言い換えると各段階の酵素が植物体内で働いていると考えられる順番が、過去 15 年の間に大きく変更されてきた。

この経路に関し既に得られている知見をもとに、代謝工学によるリグニン量の改変が、広葉樹などの双子葉植物について、過去 20 年間で複数報告されてきた。これらの代謝工学研究の目的は、リグニン生合成遺伝子の機能解析と言う学術目的と共に、酵素糖化性・パルプ化特性・飼料特性（消化性）の向上と言う応用目的から世界的に注力されてきた。一方、大型のイネ科植物は木質（リグノセルロース）バイオマスの生産性が、樹木の数倍以上であり、今後のバイオマス生産において主力の一つになると期待されている。そして、イネは、言うまでもなく我が国を始めとする世界各国において主要な穀物であり、イナワラは重要な飼料であるうえ、様々なイネ科植物研究のモデル植物になるにもかかわらず、イネに関する系統的なリグニン代謝工学は報告されていなかった。そこで梅澤らは、リグニン生合成酵素および転写因子遺伝子の発現制御を行うことに依り、リグニン量が最大 50% 程度減少し、これに伴い酵素糖化性が最大 70% 増加したイナワラを持つイネの作出を報告した（Hattori *et al.*, 2012）（図 2-27）。また、トウモロコシ、ソルガム、パールミレットなどのイネ科植物には、いわゆるブラウンミッドリブ変異体と呼ばれる、褐色の中肋（葉の中心の葉脈）をもち、リグニン含量が低く消化性が向上した変異体が知られてきた。従来イネなどの C3 植物（光合成の過程で CO_2 濃縮経路を持ち、高温や乾燥、低 CO_2 、貧窒素土壌と言った、植物には苛酷な気候下で有利な光合成システムを持つ植

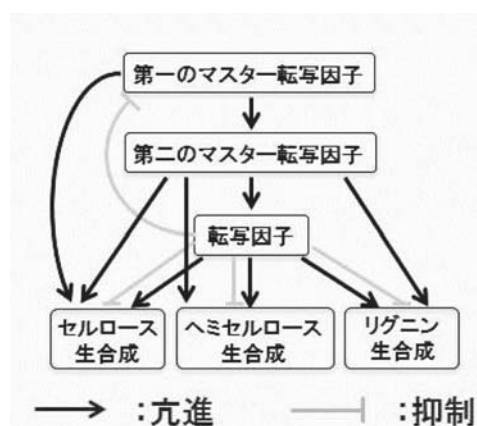


図 2-26：木質バイオマス形成の転写制御システムの概念図

物を C4 植物、このシステムを持たない植物を C3 植物と呼ぶ) にはこの変異が起こらないと言われてきたが、最近小柴と梅澤らはある種のリグニン生合成系遺伝子の発現が抑制されたイネの変異体がブラウンミッドリブ形質を示すことを報告している (Koshiba *et al.*, 2013b)。この変異体は、酵素糖化性が向上しており、交配による優良飼料イネやバイオ液体燃料生産に適したイネの作出にも展開が可能である。

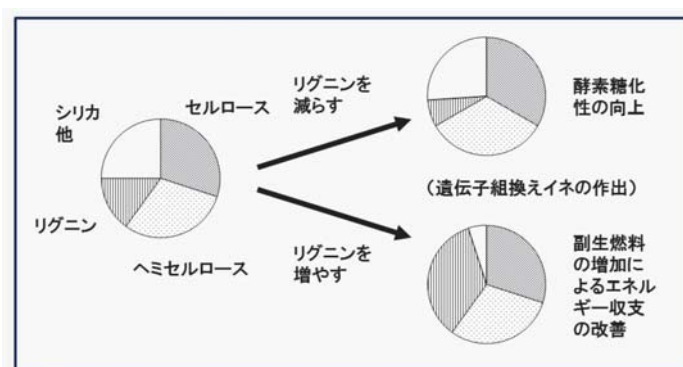


図 2-27: イネのリグニン量の制御の代謝工学
(イネ: 実用植物兼イネ科エネルギー植物のモデル)

一方リグニンの積極的利用を目指す場合は、リグニン生合成の増強が必要となる。転写因子の機能解析を目的として、本来リグニンが生合成されていない組織でリグニン生合成を誘起した例はかなりあるが、リグニン利用を目指してリグニンの積極増強を図った研究は殆どない。すなわち、梅澤らはリグニンの利用を目的として積極的にリグニン含量を増加させる研究を進め、転写因子などの遺伝子の発現制御によるリグニン量を増強したイネワラの作出を報告している (梅澤・坂本, 2010) (図 2-27)。

リグニンの構造改変、すなわちリグニン芳香核の種類の制御とリグニンサブストラクチャーの種類の制御もかなり可能となっている。芳香核の種類の制御について、シリングリリグニンはグアイアシルリグニンよりも分子の直線性が高く高分子素材として優れていると共に、リグニン分解酵素 (リグニンペルオキシダーゼ) による分解を受けやすく、さらにパルプ化が進みやすい。小柴と梅澤らは最近イネのシリングリリグニンの大幅増強を報告している (Koshiba *et al.*, 2013a)。

一方、リグニンへ反応性の高い官能基を導入した例としてアルデヒド構造の導入があげられる。すなわち、小柴・梅澤らは、ケイヒアルデヒド構造の増加に加えリグニン量の低減とそれに伴う酵素糖化性の向上を見た遺伝子組換えイネワラの作出を報告している (Koshiba *et al.*, 2013b)。

[ヘミセルロース生合成]

木質バイオマスの代表的なヘミセルロースであるキシランとグルコマンナンは、リグニンと共有結合していると考えられている。従って、これらのヘミセルロースの改変によって、木質バイオマスの糖化効率向上や強度向上が期待できる。しかし、ヘミセルロースの生合成については未だに未解明の点が多い。

現在、シロイヌナズナで少なくとも 10 種類の糖転移酵素遺伝子が、キシラン生合成に直接的に関与すると推定されている (Doering *et al.*, 2012)。このうち、キシラン主鎖の合成酵素遺伝子と推定されているものは 4 種類ある。残りの 6 種類のうち 4 種類は、キシラン主鎖還元末端にある特殊な糖鎖の合成に関わっていると推測されている。しかし、上記の遺伝子以外にも、遺伝子の欠損によって、キシランの顕著な減少や構造変化が起こる変異体が知られている。これらの遺伝子が、どのような生化学的な機能を持った糖転移酵素をコードしているかどうかの確証はなく、生化学的機能の解明が今後期待される。

もう一つの代表的なヘミセルロースであるグルコマンナンについては、主鎖合成酵素が生化学的機能解析により同定されている。ポプラでは、グルコマンナン合成酵素とマンナン合成酵素とが同定されており、前者は二次木部に、後者は二次木部以外のシュートなどの組織に発現していることが見出

されている (Suzuki *et al.*, 2006)。

キシラン生合成の抑制によって、木質バイオマスの酵素糖化性が向上するという報告がある (Lee *et al.*, 2009)。また、形質転換体におけるキシラン量と力学的強度が正の相関関係にあることが示されている (Li *et al.*, 2011)。キシランやグルコマンナン生合成の詳細な機構解明は、より高い分解性、強度、機能性を持つ木質バイオマス創製に向けて今後も重要となるだろうと思われる。

[抽出成分の形成統御機構とその制御]

抽出成分は、量的には木質全体の数パーセントを占める程度であることから、副成分として取り扱われているが、樹木の生育上、特に外的要因に対する抵抗性賦与など様々な重要な機能を果たしている。また、人間生活に於いても、これらの化合物の生理機能が医薬品や香り成分などの嗜好品として様々に利用されている。従って抽出成分の生理活性は、基本的に価格の安い木質の高付加価値化の観点から、今後ますます重要性が増加するものと考えられる。

代表的な木材抽出成分の一つとしてリグナンやノルリグナンが挙げられる。種々のリグナンは抗腫瘍性を示し、例えばアクチゲニン¹は、貧栄養条件下のがんに特異的に抗腫瘍性を示すことが知られている。梅澤らは、アクチゲニン生合成の最終段階を触媒する酵素、マタイレジノールメチル化酵素遺伝子を初めて取得した (Umezawa *et al.*, 2013)。これは、リグナンのメチル化を触媒する酵素遺伝子に関する初めての単離例である。また、ポドフィロトキシンも古くから知られている代表的抗腫瘍性リグナンであり、有機化学的にエトポシドに変換され臨床的に抗がん剤として使用されている。しかしポドフィロトキシン産生植物は希少となりつつあり、その生物工学的生産が望まれている。このためにはまず、ポドフィロトキシン生合成酵素遺伝子の取得が必須であるが、ラガムスタリと梅澤らは、ポドフィロトキシン合成酵素系の酵素であるツヤプリカチンメチル化酵素遺伝子を初めて取得した (Ragamstari *et al.*, 2013)。

一方ノルリグナンは、針葉樹特にスギ、ヒノキの心材の色の成分として知られている。特に日本人はこれらのスギ材、ヒノキ材の色を高く評価することから、心材色成分の生合成制御は、木材の高付加価値化につながると期待される。鈴木、山村、梅澤らは、モデル植物系としてアスパラガスを用い、ノルリグナン (*cis*-ヒノキレジノール) 合成酵素遺伝子を初めて取得した。さらに本酵素は反応機構的に大変興味深いものであった。すなわち、この酵素は二つのサブユニット (α 、 β サブユニットとする) から構成されているヘテロ二量体であるが、大腸菌を用いて作成した両サブユニットを用い、反応機構を検討したところ、 $\alpha\beta$ ヘテロ 2 量体は、光学的に純粋且つ *cis*- 型のヒノキレジノールを生成させるのに対し、 $\alpha\alpha$ もしくは $\beta\beta$ のヘテロ二量体では、光学純度の低い *trans*- 型ヒノキレジノールを生成されることが見いだされた。すなわち、サブユニット組成により反応のエナンチオ選択性と *cis/trans* 異性選択性が制御されるという、従来例のないユニークな立体化学制御機構を有している (Suzuki *et al.*, 2007; Yamamura *et al.*, 2010)。

2.5 環境問題の解決に向けて

2.5.1 木竹酢液の抗ウイルス活性

地球温暖化などによる環境変動、グローバル化による人、動物、物の移動により、ウイルスをはじ

めとした感染症のリスクが高まっている。生存圏研究所では、再生産可能な木質バイオマスの変換により人の健康や生活に寄与する有用な物質を生産するという新しい研究領域を開拓することを目的とし、木酢液及び竹酢液（木竹酢液）の抗ウイルス活性について京都大学ウイルス研究所や秋田県立大学などと共同研究を進めている（図 2-28）。木竹酢液とは、広葉樹や針葉樹、タケ類などの木竹材を炭化炉や乾溜炉により炭化する際に生じる排煙を冷却・凝縮させた後、90 日以上静置して 3 層に分離し、上層の軽質油ならびに下層の沈降タールを除いた中間層を集めた液体である。木竹酢液には、木竹材の熱分解により生じた酢酸を主とする有機酸、アルコール、エーテル、アルデヒド、ケトン、フェノールなど 200 種類以上の有機化合物が含まれている。木竹酢液は、これまでに消毒や土壌改良剤、皮膚疾患への薬効や抗菌性が報告されているが科学的な検証は十分ではない。

本研究では、バイオマスから生理活性物質・生体防御物質を生産するという新しい研究領域を開拓することを目的とし、これまでにほとんど知見がない木竹酢液成分の抗ウイルス活性について検討を行った。特に口蹄疫などの有害なウイルスの消毒薬を木質バイオマスから生産することを視野に入れて、木竹酢液成分の抗ウイルス性試験を行い、木竹酢液の消毒薬への応用の可能性を検討するとともに、木竹酢液に含有される抗ウイルス活性物質の探索を行った。

伝染性が高く甚大な被害をもたらす口蹄疫は、法定伝染病・海外伝染病に指定されており、国内で取り扱いが可能な研究機関は一箇所に限られる。このため、生存圏研究所では、これまでに口蹄疫ウイルスと同じピコルナウイルス科に属する脳心筋炎ウイルス（EMCV）を用いて、木竹酢液の抗ウイルス活性を評価した。また、人の健康に重大な影響を及ぼすインフルエンザウイルス（IAV）に対する抗ウイルス活性についても評価した。木竹酢液は材料、産地および製造法の違いによりその組成が異なる。木酢液を用いた脳心筋炎ウイルスの抗ウイルス活性試験では、木竹酢液と一時間混合した EMCV の感染性が低下するか否かを、各地から集めた製法と原料が明確な木竹酢液を用いて検討した。その結果、ウバメガシ、ミズナラ、モウソウチク、ヒノキ、カラマツ由来の木竹酢液が脳心筋炎ウイルス EMCV の感染性を低下させる高い抗ウイルス活性を有することを見出した。一方、アカマツ由来の木酢液には弱い抗ウイルス活性しか認められず、木竹酢液の種類によりウイルスの感染を抑制す

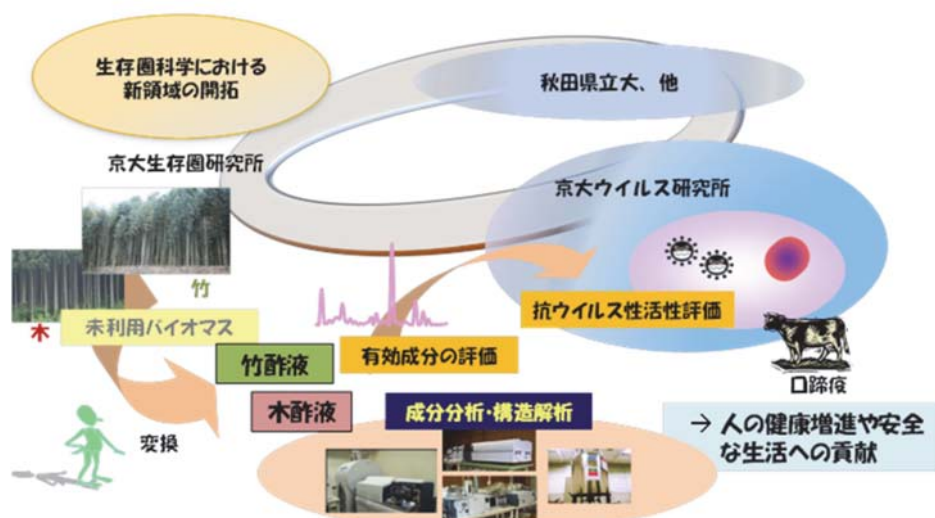


図 2-28：木竹酢液の抗ウイルス活性の評価と原因物質の探索研究

る活性が大きく異なることが明らかとなった（図 2-29）。木竹酢液は、酢酸などの酸を含むため酸性を示す。このため、中和した木竹酢液が抗ウイルス活性を示すか否かについても試験した。その結果、ヒノキやカラマツの木酢液は、中和した後も高い抗ウイルス活性を示すことが明らかとなった。

No.	試料名	種別	樹種	入手元・業者	産地	pH
A	白炭木酢液	常緑広葉樹	ウバメガシ	三前商店	和歌山	2.3
B	黒炭木酢液	落葉広葉樹	ミズナラ	北部産業	岩手	2.9
C	竹酢液	竹	孟宗竹	身延竹炭企業組合	山梨	3.5
D	アカマツ木酢液	針葉樹	アカマツ	秋田木高研	秋田	3.7
E	ヒノキ木酢液	針葉樹	ヒノキ	岐阜県小坂森林組合	岐阜	2.8
F	カラマツ木酢液	針葉樹	カラマツ	北海道下川町森林組合	北海道	3.5

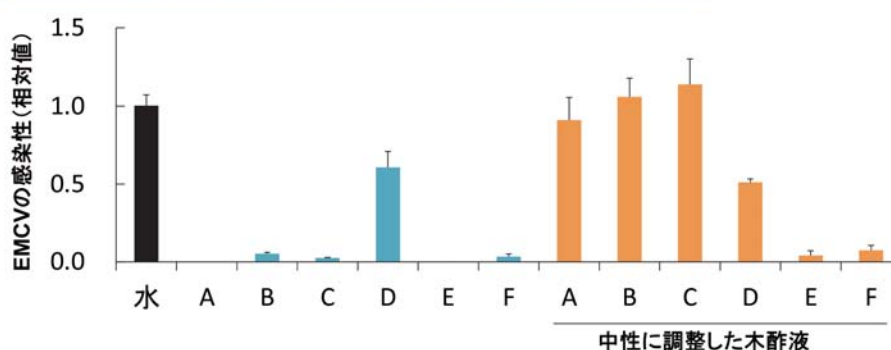


図 2-29：木竹酢液の抗ウイルス活性。

さらに、感染性を指標に竹酢液の成分を分離し、ウイルスの感染を抑制する原因物質を特定する研究も実施した。竹酢液のウイルスの感染を抑制する部分精製物の主要構成成分をすべて明らかにして、化学合成品を用いてこの部分精製物の組成を再構築し、再構築した成分再現液から一成分を除く方法により、ウイルスの感染抑制に影響を与える化合物を解析した。その結果、竹酢液に含まれるフェノールが感染抑制に大きく寄与していることが明らかになった。また、フェノール単独のウイルスの感染抑制活性が、部分精製物の活性より低いことからフェノールの活性を強める物質の研究を進め、酢酸がフェノールのウイルス感染抑制活性を増強することを示した (Marumoto *et al.*, 2012, 山元ら, 2012)。竹酢液はフェノールの濃度が高い上、酢酸も含むことから（表 2-1）、合理的にウイルスの感染性を抑える化学組成をもつと考えられる。木竹酢液は、フェノールの他にも多くの抗ウイルス性物質を含むため、これらの原因物質の分離と構造の解析研究を進めている。

インフルエンザは、インフルエンザウイルスによって引き起こされる急性感染症で、人類に甚大な被害を毎年もたらしている。このため、木竹酢液がインフルエンザウイルス IAV の感染抑制作用をもつか否かについても試験を実施した。

その結果、竹酢液、ウバメガシ、ミズナラ木酢液とその蒸留物およびアカマツ木酢液蒸留物は、インフルエンザウイルス IAV に対して抗ウイルス活性を示すことを明らかにした。これらの木竹酢液は、中和すると活性が低下するが、興味深いことに、アカマツ、ヒノ

表 2-1：木竹酢液に含まれるフェノールおよび酢酸の含有量 (Marumoto *et al.*, 2012; 山元ら, 2012)

試料名	樹種	フェノール含有量 (mg/mL)	酢酸含有量 (%)
木酢液	ウバメガシ	0.36	11.9
木酢液	ミズナラ	0.07	2.5
竹酢液	モウソウチク	1.20	3.5
木酢液	アカマツ	0.05	1.4

キおよびカラマツ木酢液は中和した方が強いウイルス感染抑制効果を示した。

以上のように、木竹酢液は、脳心筋炎ウイルスやインフルエンザウイルスの感染を抑制する効果をもつこと、木竹酢液の抗ウイルス活性は、原料や製造条件により大きく異なることを明らかにした。今後、ウイルスの感染を抑える原因物質をさらに詳しく分析し、木質バイオマスの熱分解物を人や家畜の健康に役立てる科学的基盤をより一層強固にしたい。

2.5.2 生活圏・農業圏における放射能汚染

人類生存圏における環境問題としては、自然災害や人工的災害も含めた複合的な被害が発生する状況が存在する。特に、2011年3月11日の東日本大震災による原発事故の影響は大きく、福島県内の放射性物質による土壌・水質汚染は、現在も解決の道筋が見えていない。報道等で知られている様に、現地の人々の生活に未だに大きな不安を与えている上に、農林水産業にも影響が出ているため、早急な対策が必要となっている。

原発事故によって種々の放射性核種が飛散したが、半減期の長さや、含有量の多さのため、中長期的には放射性セシウムの人体へ与える影響が最も大きい。そのため、生活圏・農業圏内における放射能除染は放射性セシウムの除去が主目的となる。現在、国を挙げての除染（放射性セシウムの除去）が行われているが、生存圏における放射能問題は解決しているとは言い難く、現在も種々の方法が提案されている。その一例として、除染に化学物質などを使う方法は、経済的な問題以外にも、使用する薬剤によっては土壌や森林、河川、生態系、ひいては人類への悪影響が懸念される。また、大規模な土木工学的な除染（アスファルトの表面除去など）は確かに有効な手法であるが、個人で利用可能な手法とは言い難く、より簡便な手法が求められる。そこで、生存圏研究所では水道水と大気のみから生成することのできる「微細気泡」水に着目し、これらの問題を解決しようと試みてきた（図2-30、2-31）。

「気泡」は、我々にとって身近な存在である。炭酸水は、二酸化炭素からなる気泡を含む水である。また、水をかき混ぜて気泡を水中に存在させることもできる。これらの気泡は、浮力によって水面へ浮上し、最終的には消滅する。この例における気泡の大きさ（直径）は、数ミリ程度である。近年、気泡の大きさが100マイクロメートル以下になると、通常の大きさの気泡とは異なった



図2-30：震災直後より連携研究を行ってきている福島県農業総合センターの写真。

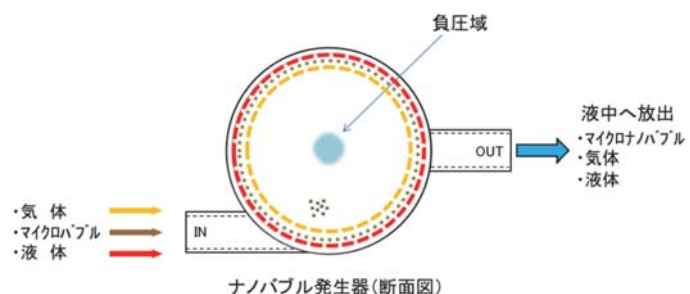


図2-31：気液混合剪断方式による微細気泡生成

性質を示すことが明らかとなってきた。マイクロメートルオーダーの気泡はファインバブルもしくはマイクロバブルと呼ばれ、通常の気泡より長く水中に留まることができる。また、気泡として含んでいる気体の溶解を促進する効果もある。これにより、水に溶解させることの難しいオゾンを利用でき、効率的な殺菌が可能である。また、多くの湖沼や貯水池に見られる富栄養化の解決のため、酸素をマイクロバブルとして送り込むことによる水質の浄化が行われている。また、ナノメートルオーダーの気泡はウルトラファインバブル（ナノバブル、以降微細気泡と定義）とも呼ばれ、マイクロバブルとは異なり、水中で数ヶ月

間安定して存在可能であるという、通常の気泡とは違った特性をもっている。その微細気泡を含む水の応用として、酸素微細気泡水の環境下では、魚が長期間生存可能になるなどの、生体への作用が認められている。このように、気泡が微細化することによって、通常の気泡とは異なった性質を示し、時として実用上、有用になることがある。しかしながら、微細気泡は、我々の望みを全てかなえてくれる魔法の技術ではなく、適用の対象ごとに効果を慎重に検証しなければならないことを明記したい。

微細気泡を生成する方式としては、細孔を持つパイプへ気体を圧入する細孔式、液体に超音波を照射する超音波式、過飽和状態の気体を析出させる加圧溶解式、気液二相流体を遠心分離して剪断する気液混合剪断方式などが知られている。生存圏研究所の研究では、微細気泡発生装置 BUVITAS HYK-32-D（Ligaric 製）を用いて、気液混合剪断方式による微細気泡の生成を行った（概念図としては図 2-31 を参照のこと）。また、気泡径の評価は、NanoSight LM-10（NanoSight 社製）により行った。BUVITAS により生成した微細気泡水は気泡の最頻直径は 100 nm で、7 日経過後にも依然として水中に存在することがわかった。

生存圏研究所は土壌の除染について東日本大震災直後から調査を開始し、その浄化技術に関する基礎データを集めてきた。その一例として、微細気泡を用いた洗浄効果について紹介する。洗浄サンプルの砂礫は、福島県農業総合センター（福島県郡山市）で採取した。洗浄後の砂礫を種々の水（精製水、微細気泡水、市販の中性洗剤）中にそれぞれ静置し、静置前後の乾燥状態での放射性セシウム（Cs-137）の放射線強度を比較した。この実験により、微細気泡発生装置の稼働時間とともに、気泡の最頻濃度（1ml 中の個数）が増え、Cs-137 の除去率が增加することがわかった。また、精製水、石けん水との比較を行った結果、精製水と比較して除染係数が 20 ポイント以上高くなり、中性洗剤の添加効果はほとんどなく、原水と微細気泡水単体での試験結果と同様となった（図 2-32）。この試験においては振とうを加えていないため、この結果は微細気泡水そのものの除染作用を示しており、中性洗剤と同程度以上の洗浄効果を示したことは特筆に値する。さらに、生成後 2 週間経過した微細気泡水を用いて砂利の浸漬洗浄試験（静置）を行った結果でも同様の傾向を示しており、比較で

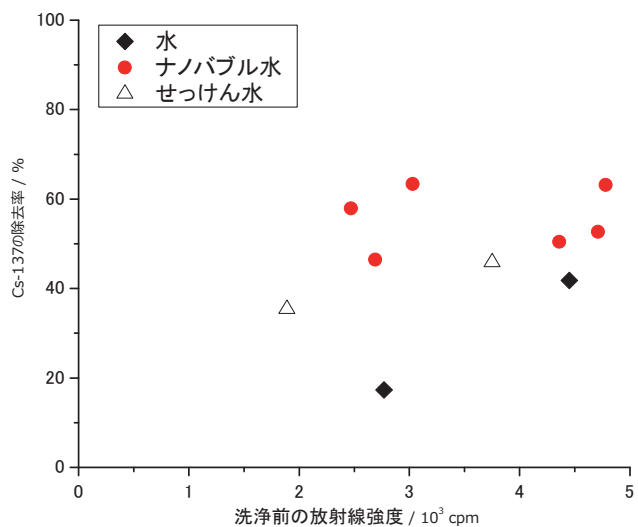


図 2-32：洗浄前の放射線強度に対してプロットした Cs-137 の除去率。●微細気泡水、△水、◆石けん水。微細気泡水は他の水よりも洗浄効果に優れる。

は20ポイント高い除染係数を示すことが明らかとなった。この結果は、微細気泡水が洗浄液として使用可能な保存時間が非常に長いことを示している。また、高圧洗浄と併用して福島県下のコンクリート、アスファルトからのセシウム除染係数の評価を行った結果、微細気泡水の除染係数が水と比較して同様に20ポイント程度高いことを見いだしている (Ueda *et al.*, 2013a; 2013b)。特に市販の高圧洗浄機と微細気泡水を組み合わせた場合、約80%という除染係数を示しており、この結果は既存の技術との組み合わせにより、洗浄効率が飛躍的に向上することを示唆している。

なぜ微細気泡を含む水が洗浄に有効で

あるかの要因として、表面吸着や表面電荷による影響、気泡が研磨剤として働く可能性、気泡の持ち上げ効果、表面張力の低下による浸み込みなどが考えられる。しかしながら現時点では、いずれの要因によるものかについての科学的説明は定かではない。ただし、微細気泡水により洗浄を行った洗浄液の方が、そうでないものと比べて濁っているため、砂礫の表面に付着した粘土質とともにセシウムが除去されたと推察される。昨年3月11日の事故以来、幾多の風雨に晒されたにもかかわらず、放射性セシウムが建物外壁や道路等の構造物に未だに存在している。これはセシウムが樹木などの多孔質面や、比表面積の大きな砂粒や塵に多く吸着していることに由来する。特に土壤に含まれる雲母類等の鉱物には、セシウムがイオン交換によって化学吸着するため、鉱物の付着した構造物が高い放射線密度を示したと考えている。今回の試験において微細気泡水による除染効果向上がみられたのは、汚染された砂粒、塵を微細気泡水が洗浄面から除去したためではないかと考えている。

最後に、生存圏研究所は同様に、洗浄力の向上を目的として、化学薬品を添加した微細気泡水を用いた洗浄も試みている (図 2-33, Ueda *et al.*, 2013c)。はじめにも述べたように、自然環境に影響を与えるような洗浄方法は好ましくない。そこで自然界にも存在する化学物質として、ケイ酸ナトリウムに着目した。使用薬品には、メタ珪酸ナトリウムを主剤とし、マイクロバブル・超音波処理を施す事で薬剤の安定化を行った JPAL® (クレハトレーディング社製) を用いた。ケイ酸ナトリウムは、その水溶液を中和することによってゲル化することが良く知られており、固液分離による減容化が可能である。排水処理プラントなどでの汚水の処理方法である共沈法 (塩化鉄などの共沈剤を加えて、目的とするイオンを分離する方法) と同様の効果を示す事もわかっており、今後の大規模実証試験に期待が持てる成果となっている。

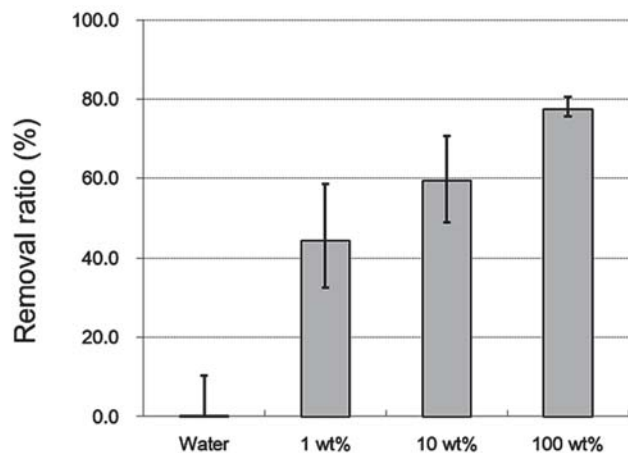


図 2-33：純水, JPAL® (1wt%), JPAL® (10wt%), JPAL® (100wt%) を洗浄剤とした場合の不織布の除染効果。

不織布洗浄には通常の洗剤による洗浄も出来るが、界面活性剤を含まない JPAL を用いると、すぎがほとんど必要なくなる。また、グラフからわかる様に、薄めて使用しても効率下がりにくいため、大規模洗浄も使用可能

2.6 次の時代に向けて

ここまでミッション1の「環境計測・地球再生」に関して生存圏研究所が取り組んできた研究内容について紹介してきた。そこでは宇宙圏、大気圏、森林圏、人間生活圏をまたぐ生存圏の現状の科学的な理解とそこから見えてくる問題点に対する対処方法について述べてきた。これまではこれら4つの圏に生起する現象を中心にわれわれの生存環境について考えてきたわけであるが、視野に入れるべき範囲はこれで十分であっただろうか。2.4.1節で扱った有用な代謝・輸送遺伝子の探索の問題、あるいは2.5.2節の生活圏・農業圏における放射能汚染問題などでは土壌圏とでもよぶべき広大な大地がフィールドとなっている。さらに2.2節で扱った地球環境の変動と植物の環境応答に関するテーマも、植物を中心とした生態圏と大気圏との間を結ぶ道筋を考えているのみのように見えるが、実は植生を支える土壌の問題を切り離して考えることはできない。大気と植物との関連を突き詰めていくと、この土壌圏で起こっている現象を理解することによってはじめて全体像が見えてくると思われる。生存圏科学研究を進めていく上で、次の重要なフロンティアの一つはこの土壌圏にあるのではないだろうか。以下では研究所内で進めつつあるそういった最近の研究を紹介したい。

[植物の生育と根圏微生物]

植物の根の周りには多種多様な微生物が存在する。根のごく近傍の土壌で植物の影響を直接的に受ける領域のことを根圏と呼び、そこに生息する微生物を根圏微生物という。植物の健康と成長に根圏微生物は重要な役割を担っており、根圏にはマメ科植物の根に共生して窒素を供給する根粒菌（2.4.1節参照）や、陸上植物の約80%に共生しリンや水分を供給する菌根菌のように植物の養分吸収を助けてくれる微生物の他、植物ホルモンの分泌、リンや鉄の可溶化、抗生物質の分泌などにより植物の生長を促進する微生物（PGPR, Plant growth promoting rhizobacteria: 植物生育促進性根圏細菌）が存在する。根圏にはこれらの微生物以外にも、植物に感染して発病させる病原菌の他、その働きが明らかになっていない微生物が多数生息し、コンソーシアム（根圏微生物叢）を形成している。ヒトの腸内細菌叢がアレルギーや肥満、メタボリックシンドロームなどに関連し、ヒトの健康的な生活に大きく影響することと同様に、植物の根圏微生物叢も植物の健康や成長に重要な役割を担っている。特に、作物の収量維持や持続型農業の推進において根圏微生物叢が担う役割は極めて大きいと考えられており、植物と根圏微生物の相互作用に関する研究は近年世界中で盛んに行われている（Berendsen *et al.*, 2012; Bakker *et al.*, 2013）。

数多くの根圏微生物の中で、試験管で培養できるものは1%程度であり、残りの大部分は培養して実験室内で解析することができない。そのため、根圏微生物叢の研究には土壌からDNAの配列情報を取得して研究する手法がとられてきた。近年、次世代シーケンサーと呼ばれる高速かつ大量に遺伝子配列情報を取得できる機器が登場したことにより、根圏微生物叢の研究は大きく推進し、どのような種類の微生物が根圏微生物叢に含まれているのかを包括的に明らかにすることができるようになった。さらに、根圏微生物全体をコンソーシアムとして解析するメタゲノム及びメタトランスクリプトーム解析と呼ばれる手法が開発され、植物の生育と根圏微生物の関係は様々な角度から研究されている。

[根圏微生物叢の形成]

植物の根から放出される代謝物、植物細胞壁の成分、根の形態、あるいは気候等の環境要因によって根圏微生物叢が変化することが知られているが、中でも根から放出される代謝物は微生物へのシグ

ナルや栄養源となり、根圏微生物叢の形成に極めて大きな役割を担うと考えられている。これらは根分泌物（根滲出物）と呼ばれ、タンパク質、多糖、脂質、アミノ酸、フラボノイドなどの二次代謝産物を含み、植物が光合成で獲得した炭素の10～40%を占める。根分泌物の量や組成は植物の種によって異なり、また同じ植物であっても生長段階や生育環境によって異なることから、これらの代謝物の違いが根圏微生物叢の形成に大きく影響していると考えられている。実際に、シロイヌナズナを用いた研究により、生育過程での根分泌物組成の変化と根圏生物叢の変化が示唆された（Chaparro *et al.*, 2013a; 2013b）

根圏にはその外側の土壌（非根圏土壌）と比較して少ない種の微生物がより高い密度で生育することから、植物が土壌微生物の中から選択的に根圏微生物を誘因あるいは忌避して根圏微生物叢を形成するという仮説がある（Berendsen *et al.*, 2012）。根分泌物にはダイズにおけるフラボノイドのように輸送体を介してエネルギー依存的に分泌される代謝物も多いが（Sugiyama *et al.*, 2007）、植物がエネルギーを使って代謝物を根圏に分泌している理由は、植物が生育に適切な根圏微生物叢を形成するためなのかもしれない。どのようなメカニズムで植物が多様な代謝物を根圏に放出しているのか、根圏に放出された代謝物がどのように変動し根圏微生物叢の形成や維持に影響しているのか、根圏微生物叢が植物の生育にどのように影響しているのかなど、植物の代謝物と根圏微生物の関わりについては不明な点が多く、今後さらなる研究が必要である。

〔生存圏から見た根圏微生物とその可能性〕

生存圏全体から見て根圏は極めて小さな領域である。しかし、根圏に生息する多種多様な微生物は植物との相互作用を通じて生存圏全体に大きな影響を与えている。生存圏の窒素循環や亜酸化窒素の発生に根圏微生物が重要な役割担うことは2.4.1節で紹介したが、炭素循環においても菌根菌などの土壌菌類が炭素の土壌中への隔離に貢献することがごく最近報告された（Clemmensen *et al.*, 2013）。このように根圏微生物は生存圏における窒素や炭素循環のキープレーヤである。また、作物生産においても、2050年には90億人に達するとされる人口に食糧を供給するためには、これまでのように埋蔵資源やエネルギーに依存した化学肥料により窒素やリンを供給する近代型農業では不可能であり、根圏微生物の有効な活用による持続型農業の実現が必要不可欠である。さらに、植物と根圏微生物の共生系を用いて土壌や水質を浄化する根圏浄化という技術も盛んに研究されており、地球再生という点からも根圏微生物は注目されている。

植物の根の周りの小さな領域には植物の生育のみならず生存圏全体に大きな影響を与える根圏微生物が存在する。生存圏科学では持続可能な生存圏の実現に向けて、その機能を解明し有効に活用していくことが求められている。

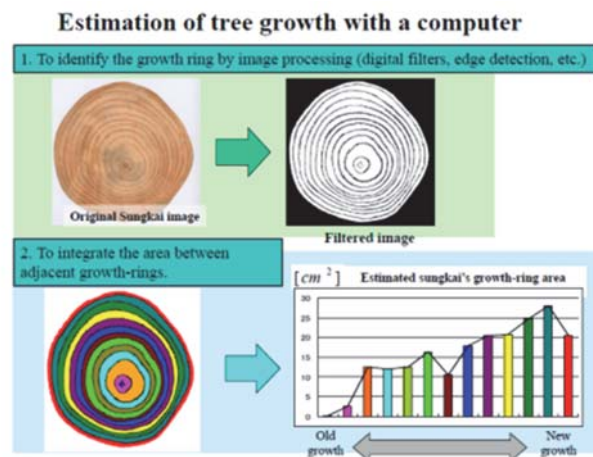
コラム 熱帯における年輪気候学に関する基礎研究

熱帯域での地上気象観測は歴史が浅いため、長期的にデータを蓄積している観測点が少なく、またデータの連続性・信頼度も低いとされている。樹木年輪から得られる樹木成長より気候変動を推定する年輪気候学を、直接気象観測が乏しい熱帯域に発展させられないかと考え萌芽的な研究を行った。特に熱帯では主に降雨量が樹木成長を規定すると考えられており、雨季・乾季の明瞭な地域では樹木は成長輪を形成すると期待される。

生存圏研究所ではこれまで研究交流があるインドネシアを選択し、実際にインドネシアで試料収集を行った結果、解析対象としてインドネシア産チーク (*Tectona grandis*) 及びスンカイ (*Peronema canescens*) を選定した。中高緯度における針葉樹と異なり、成長輪の形状が同心円から大きく変形するため、特定の径方向の成長輪幅が必ずしも成長率を代表しない。本研究ではデジタル画像解析手法を成長輪解析に適用し、成長輪の間の面積を積分してこの成長輪面積を求めた。まず、熱帯樹の横断面画像をパソコンに取り込み、輝度・濃度に関するデジタルフィルター処理を施し、成長輪を判別した。さらに、既存のデジタル画像解析技術を応用し成長輪境界をトレースし、こうして求めた成長面積を3年移動平均で割って標準化し、樹木成長の年ごとの新たな指標とした。従来から成長指数として用いられている成長輪幅が熱帯樹には適用しにくく、今回提案した成長輪面積により安定した結果が得られることが分かった。この指標は、成長輪境界が不連続かつ曖昧で同心円より逸脱した熱帯樹成長輪に適している。

この成長輪面積による推定法を実際に試料に適用して有効性の検証を試みた。まず、同じ個体の異なる断面で成長率を比較した。用いた木材試料は Kertsono (東ジャワ) 産チークで、結果としてよい一致が見られ、特定の一断面における成長輪解析により樹木成長を推定することの妥当性が確認できた。次に、同一地域 (Kertsono) の隣接した (約 10m 離れた) チーク個体間の成長を比較した。これもよい一致が見られ、同一地域内で樹木は同質な成長変動をすることが確認できた。これらの解析から、東ジャワ産チークについて、同一個体の異なる断面での成長の相似性、及び近接個体間の成長パターンの強い相関を確かめ、成長面積が気候因子の情報を含んでいることを示した。さらにインドネシアでの降雨量データ (年総降雨量) を入手し、樹木成長との比較を行ったところ、雨量と成長は Lampung 産スンカイについて一致をみた。また他の試料では一致が見られる場合もあったが、偽年輪の除去などについて、今後さらに詳しい解析を進める必要があるという課題が残っている。

この成長輪解析システムを完成させれば、熱帯植林などで伐採される多くの試料を短時間で統計処理できるため、針葉樹に比べて曖昧な熱帯樹の成長と気候変動の関係を解明でき、エルニーニョで代表される赤道大気起源の異常気象の解明に貢献できると期待される。



コンピュータによる樹木の成長予測

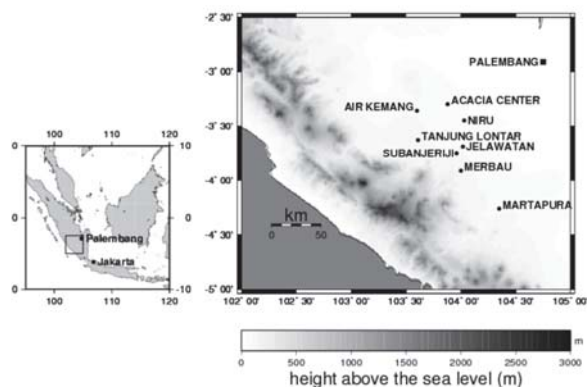
コラム インドネシア・アカシアマンガウム大規模造林地における降水観測

第2章でこれまで述べてきたように、森林と大気は相互に影響を及ぼしあっている。例えば、森林と大気の間では二酸化炭素や水蒸気、熱の交換が行われ、気温や降水の変動は樹木の成長や植生に影響を及ぼす。さらに熱帯域では、地上から運ばれた水蒸気が上空で凝結して雲や雨ができる際に放出される熱（潜熱）が地球規模の大気の流れに影響を及ぼしており、熱帯域の森林が大気に放出する水蒸気が地球の気候変動と密接に関係している。今後増加すると思われる熱帯域の大規模造林地における大気環境の変動特性を理解することは、地球規模の気候変動の理解、さらには自然環境の変動と調和した森林資源の持続的管理と活用にとって重要である。

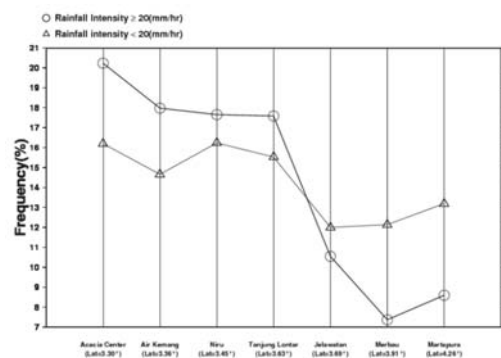
生存圏研究所は2005年から現在まで熱帯域の大規模造林地における大気環境の把握を目的とした気象観測を行っている。インドネシア南スマトラにおいて Musi Hutan Persada 社が経営・管理しているアカシアマンガウム大規模造林地（総面積約19万ヘクタール）に計8箇所の観測点を設けている。左図に観測点の分布と周辺の地形を示す。現在、これら8地点において転倒ます型雨量計による降水観測が行われている。本観測で得られたデータは、生存圏研究所のデータベースのホームページ (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/acacia/>) よりダウンロード可能である。

この林地では南側に比べて北側でより年降水量が多い。さらに降雨強度にも興味深い特徴が見られる。右図は、全観測点で合計した20mm/hr以上及び20mm/hr未満の1時間降水量（降水強度）の回数のうち各地点が占める回数の割合の分布を示したものである。横軸の左から右にかけて造林地の北側から南側の観測点を順に並べて示している。これを見ると、20mm/hr以上の降水強度の占める割合の分布は20mm/hr未満のそれと比べて南側と北側の差が大きく、林地の北側ほど降水強度がより大きい雨（より激しい雨）の占める割合が大きいという傾向を示していることがわかる。このように、造林地という比較的限られた領域の中において、北側と南側で年間降水量や降水強度に違いがあるという降水の地域性が本観測により明らかとなった（山根ら, 2009）。

今後さらなる研究の展開として、気候の変動と造林地における降水の関係性の解明が重要となる。例えば、数年スケールの変動周期を持つエルニーニョは、造林地を含めたインドネシア付近の降水と密接に関係していることが知られている。エルニーニョと造林地における降水の関係性の解明によって、観測を安定的に継続し、今後も長期にわたるデータの蓄積が必要不可欠である。



観測点の分布と周辺の地形：左図はインドネシアを含む広域の地図。左図中の造林地を含む四角領域を拡大したのが右図で、●は観測点を示している。



全観測点で合計した20mm/hr以上及び20mm/hr未満の1時間降水量（降水強度）の回数のうち各地点が占める回数の割合の分布。

[参考文献]

- Atlas, D. (1990) Radar in Meteorology, American Meteorological Society
- Bakker, P.A.H.M. *et al.* (2013) *Front. Plant Science* **4**,165
- Berendsen, R.L. *et al.* (2012) *Trends in Plant Science* **17**,478-486
- Bouvier-Brown, N.C. *et al.* (2012) *Atmos. Environ.* **60**, 527-533
- Breier, E.M. *et al.* (2013) *Front. Plant Science* **4**, 359
- Carlton, A.G. *et al.* (2009) *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 4987-5005
- Chaparro, J.M. *et al.* (2013a) *The ISE Journal*, in press
- Chaparro, J.M. *et al.* (2013b) *PLoSOne* **8**, e55731
- Clemensen, K.E. (2013) *Science* **339**, 1615-1618
- Dlugokencky, E.J. (2013) <ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/ch4/in-situ/>.
- Doering, A. *et al.* (2012) *Mol. Plant* **5**, 769-771
- "Earth Observations from Space" <http://www.nap.edu/catalog/11991.html>
- Enami, S. *et al.* (2012) *J. Phys. Chem. Lett.* **3**, 3102-3108
- エネルギー白書 2013 (2013) <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2013/index.htm>
- Farman, J.C. *et al.* (1985) *Nature* **315**, 207-210
- Fujiwara, M. *et al.* (2003) *Geophys. Res. Lett.* **30**, 1171
- Fukao, S. *et al.* (1985a) *Radio Sci.* **20**, 1155-1168
- Fukao, S. *et al.* (1985b) *Radio Sci.* **20**, 1169-1176
- Fukao, S. *et al.* (2003) *Radio Sci.* **38**, 1053
- Garcia, R.R. *et al.* (2012) *J. Geophys. Res.* **117**, D23303, doi:10.1029/2012JD018430.
- Gunter, A. *et al.* (1995) *J. Geophys. Res.* **100**, 8873-8892
- Hardy, K. R. & K. S. Gage (1990) Radar in Meteorology, American Meteorological Society
- Hashiguchi, H. *et al.* (2004) *J. Meteor. Soc. Japan* **82**, 915-931
- Hattori T. *et al.* (2012) *Plant Biotechnol.* **29**, 359-366
- 廣川淳ら (2014) エアロゾル研究, **29** (S1) 18-26
- IPCC (2014) 第五次報告書
- 石原正仁 (2001) 気象, **9**, 17378-17384
- Ishihara, M. *et al.* (2006) *J. Meteor. Soc. Japan* **84**, 1085-1096
- 石川宣広 (2001) 数値予報解説資料 **34**, 9-11
- Jacob, D.J. & Wolsy, S.C (1988) *J. Geophys. Res.* **93**, 1477-1486
- 加藤進ら (1982) 気象研究ノート **144**, 1-55
- Keppler, F. *et al.* (2006) *Nature* **439**, 187-191
- Kikuchi, K. *et al.* (2010) *J. Geophys. Res.* **115**, D23306, doi: 10.1029/2010JDO14379
- Koshiha T. *et al.* (2013a) *Plant Biotechnol.* **30**, 157-167
- Koshiha T. *et al.* (2013b) *Plant Biotechnol.* **30**, 365-373
- Kouchi, H. *et al.* (2010) *Plant Cell Physiol.* **59**, 1381-1397
- Lee, C *et al.* (2009) *Plant & Cell Physiol.* **50**, 1075-1089
- Li, Q *et al.* (2011) *Tree Physiol.* **31**, 226-236
- Marumoto, S. *et al.* (2012) *J. Agric. Food Chem.* **60**, 9106-9011
- Miller, B. *et al.* (2001) *Planta* **213**, 483-487
- 日経バイオテク「京都大学、バイオマスの“曲者”を増やす逆転の発想」(平成 22 年 2 月 16 日)
- Noda S. *et al.* (2013a) *Plant Biotechnol.* **30**, 169-177
- Noda S. *et al.* (2013b) *Plant Biotechnol.* **30**, 503-509
- Ragamustari, S.K. *et al.* (2013) *Plant Biotechnol.* **30**, 315-326
- Saito, T. & Yokouchi, Y. (2006) *Atmos. Environ.* **40**, 2806-2811
- Sakabe, A. *et al.* (2012) *Theor. Appl. Climatol.* **109**, 39-49
- Sasaki, K. *et al.* (2005) *FEBS Lett.* **579**, 2514-2518
- Sasaki, K. *et al.* (2007) *Plant Cell Physiol.* **47**, 1254-1262
- Schowengerdt, R.A. (2007) Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, 3rd Edition, Academic Press
- Sharkey, T.D. & Singaas, E.L (1995) *Nature* **347**, 769-769
- Singh, G. *et al.*, (2013) *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **51**, 3014-3022
- Smil, V. (1999) *Glob Biogeol. Cycl.* **13**, 647-662
- Stolarski, R.S. *et al.* (1986) *Nature* **322**, 808-811
- Sugiyama, A. *et al.* (2007) *Plant Physiol.* **144**, 2000-2008
- Suzuki, S. *et al.* (2006) *Plant Physiol.* **142**, 1233-1245
- Suzuki, S. *et al.* (2007) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**, 21008-21013
- 鈴木史朗 (2007) ウッディエンス・メールマガジン No. 5, <http://www.jwrs.org/woodience/mm005/suzuki.pdf>
- 高橋けんし (2012) 森林科学 **66**, 47-48

- Takahashi, K. *et al.* (2010) *J. Phys. Chem.* **A114**, 4224-4231
- Takahashi, K. *et al.* (2012) *Atmos. Environ.* **51**, 329-332
- Takanashi, K. *et al.* (2012) *Mol. Plant Microbe Interact.* **25**, 869-876
- Takanashi, K. *et al.* (2013) *Plant Cell Physiol.* **54**, 585-594
- Tatarskii, V. I. (1961) *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill, 285 pp
- Trainer, M. *et al.* (1987) *Nature* **239**, 705-707
- Teshiba, M.H. *et al.* (2005) *Geophys. Res. Lett.* **32**, L24805
- Udvardi, M. & Poole, P.S. (2013) *Ann Rev. Plant Biol.* **64**, 781-805
- Ueda, Y. *et al.* (2013a) *ECS Trans.* **50**, 1-6
- Ueda, Y. *et al.* (2013b) *Water Sci. Technol.* **67**, 5
- Ueda, Y. *et al.* (2013c) *J. Soc. Remed. Radioact. Contam. Environ.* **1**, 191-195
- Ueyama, M. *et al.* (2013) *Agri. Forest Meteorol.* **178-179**, 183-193
- 梅澤俊明、坂本正弘 (2010) 平成 21 年度バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発 (先導、要素) 成果報告会予稿集、p.94
- Umezawa, T. *et al.* (2013) *Plant Biotechnol.* **30**, 97-109
- Went, W. (1960) *Nature* **187**, 641-643
- Woodman, R.F. & Guillen, A. (1974) *J. Atmos. Sci.* **31**, 493-505
- Yamaguchi, M. & Demura, T. (2010) *Plant Biotechnol.* **27**, 237-242
- Yamaguchi, Y. (2007) *Radar Polarimetry from Basic to Applications: Radar Remote Sensing using Polarimetric Information* (in Japanese). The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers
- 山元誠司ら (2012) 生存圏研究 **8**, 49-54
- Yamamura, M. *et al.* (2010) *Org. Biomol. Chem.* **8**, 1106-1110
- 山根悠介ら (2009) 生存圏研究 **5**, 37-42
- 依田恭二 (1982) 地球化学 **G**, 78

第3章 太陽エネルギー変換・利用

3.1 太陽エネルギー利用の現状と課題

3.1.1 太陽エネルギーと地球

地球は、太陽風や極域での流失等一部の例外を除き、物質的にはほぼ閉じた系であるが、エネルギー的には太陽からの輻射などによる流入があり、閉じた系（孤立系）ではない。地球上の生物の生存はこの太陽輻射エネルギーに直接・間接的に依存している。人間の活動を支えるエネルギーもその大半が太陽エネルギーによるものである。石油に代表される化石燃料は過去の太陽エネルギーの堆積物であるため、その使用により、蓄積された二酸化炭素が放出され、現在の炭素循環系に余分な負荷を与え、深刻な地球温暖化問題を引き起こしている。人類が継続的に発展していく為には炭素循環の平衡を壊さないよう、太陽エネルギーの変換・利用によるクリーンエネルギーの有効活用を積極的に推進する必要がある。また、地球人口の爆発的増大のため今世紀中盤以降には人類の経済活動に見合うエネルギーを化石資源から供給できないと予想されており、社会基盤を化石資源の消費から、再生産可能な太陽エネルギーの変換利用に転換することが強く求められている。図3-1はその研究ミッションのイメージ図である。



図 3-1：「太陽エネルギー変換・利用」研究ミッションのイメージ図

3.1.2 太陽エネルギー変換・利用の現状

太陽エネルギー変換・利用手法の現状はどうであろうか。現在盛んに研究・産業化が図られている太陽エネルギー利用技術には太陽光発電と風力発電がある。太陽光発電は太陽光を直接電気に変換する技術であり、風力発電は太陽光を地球が受けることで発生する風という間接的な太陽エネルギーを利用し発電する技術である。共に再生可能エネルギーの代表として政府も普及に力を入れている。太陽光発電や風力発電を含むいわゆる再生可能エネルギーの普及の壁はまず発電コストであるため、日本政府は再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度（Feed in Tariff : FIT）を2012年7月から開始した。FITとは、エネルギーの買い取り価格を法律で定める方式の助成制度である。設備導入時に一定期間の助成水準が法的に保証されるほか、生産コストの変化や技術の発達段階に応じて助成水準を柔軟に調節できる制度であるとされ、国家レベルでは1990年代にドイツで初めて導入された。ドイツはFITによって再生可能エネルギーを大量に普及させると同時に生産コストを下げ、電力総需要に対するシェアを倍増させることに成功した。日本では導入当初、10kW以上の太陽光発電に対しては40円（+税）/kWhを、20kW以上の風力発電に対しては22円（+税）/kWhを20年間固定価格で買い取りを保証した。2012年度の我が国の新設計画は、再生可能エネルギー全体で2109万kWであり、うち太陽光発電が2002万kWと9割超を占めた。これが実際に稼働すれば、2011年度までに国内にあった太陽光発電設備（約530万kW）が一気に5倍近くに増え、原子力発電所20基分に達することになる。

しかし、この40円/kWhや20円/kWhという単価は他の石油火力発電や原子力発電の発電単価（10円/kWh以下とされる）に比べると非常に高く、結局このコストは電気を利用する我々が負担することになる。FITで先行するドイツでは2011年には買取総額が約168億ユーロ（約1兆8480億円）に達し、平均的な家庭（年間使用量3500kWh）の負担は月額1,000円を超過した。

我が国では太陽光発電は2013年度から太陽電池パネルなどの値下がりを受けて買い取り価格が同37.8円に引き下げられたため、条件が有利だった2012年度末までに駆け込み申請した業者も多い。そして買い取り価格は認定時の価格であり、実際に稼働するかがどうかは無関係であったため、2013年現在では太陽光発電の稼働率は認定量の1割に満たない。再生可能エネルギーの普及のための法律がもはや投機の対象になってしまっているのである。

百歩譲って我々一般市民が再生エネルギー普及のためのコストを負担することに納得したとして、今後再生可能エネルギーが増加していった場合に別の問題が起これらと思われる。再生可能エネルギーは発電が「自然任せ」であることである。太陽光発電の設備稼働率を例に取ってみよう。設備稼働率とは

$$\text{設備稼働率}\eta[\%]=\frac{\text{月当たりの累積発電量}[kWh]\times 100}{\text{設備容量}[kW]\times 24[h]\times 1\text{ヶ月当たりの日数}}$$

で定義され、24時間のうち、どれだけ発電しているかを示す指標である。我が国の太陽光発電の設備稼働率は2008-2009年平均で14.6%、2010年平均で14.1%であった（小西、2012）。これは極端に単純化して言えば、夜があることで半分（100%→50%）、雨等の気象条件で半分以下（50%→14%）ということである。よく雨が降らない砂漠に太陽電池を設置すればよいという意見があるが、地球の上にあ

る限り夜は来るため、太陽光発電の設備稼働率は50%を超えることはない。太陽光発電は一度太陽電池を設置すればあとは太陽光で発電するために運転費用（燃料費等）が不要であると言われるが、逆に設置の初期投資のみの設備の稼働率が14%程度というのは経済性を考えた発電設備としておかしい。そして残る86%の時間は他の発電方式が停電しないように賄っているのである。

発電所で発電した電気は基本的に溜めることはできず、発電した電気はその時に使わなければならない。この供給と消費のバランスを保てなくなると、電圧の低下や周波数変動が起こり、停電につながってしまう。電気の消費は沢山の人々によって気まぐれに変動する。そこで発電所で電気消費の変動を常にモニターしながら火力発電等で供給量を非常に正確に調整して停電を回避しているのである。再生可能エネルギーの導入量が少ないうちはいいが、導入量が増えたとこの努力では追いつかなくなる可能性がある。再生可能エネルギーは全く自然の気まぐれで発電したりしなかったりするものである。この事実を踏まえ、FITには例外規定として買取拒否と送配電ネットワークへの接続拒否ができるようになってきている。「発電量が契約よりも少なかった場合には、電力会社が不足分を補給する必要がある、その費用を発電する側が負担することに合意しなくてはならない」とあり、合意しない場合は、電力会社は買い取りを拒否することができるのである。安定な電力供給のためには自然エネルギーに加え、さらに安定化のシステムの導入が不可欠である。現在検討が行われているシステムとしては、(1) スマートグリッド（賢い送電網）、(2) 巨大な蓄電池、(3) 地理的に分散した再生可能エネルギーの連携、等があるが、まだ研究途上である。

コスト負担の問題をクリアし、安定度向上のためのプラスアルファのシステムによって電力供給が安定してもなお懸念される問題が残る。再生可能エネルギーとは本当にCO₂フリーであり、「環境に優しい」のであろうか。あるシステムの本当のCO₂排出量を評価するためにはライフ・サイクル・アセスメント（LCA）という手法がある。例えば太陽光発電であればその生産から流通、発電から廃棄までトータルのライフでのCO₂排出量をその産業の連関を含め評価するのである。またCO₂排出量と共に重要な指標にエネルギーペイバックタイム（EPT）という指標がある。これはそのシステムのライフサイクルに対し投入したエネルギー量に対し、生み出すエネルギーがどれくらいの期間で同量になるか、という指標である。仮にCO₂フリーであってもEPTが何百年となってしまうと、「やらない方がまし」となってしまう。LCAによるCO₂排出量も、EPTもパラメータによって大きく変動するが、一例として引用文献（伊藤、2012）で紹介された太陽光発電の評価例では30-45g-CO₂/kWhであり、EPTは1.7-2.7年であった。風力発電もCO₂排出量は日本では25-34g-CO₂/kWh、EPTは数ヶ月程度と計算されている。CO₂排出量はLNG火力発電で631 g-CO₂/kWhとされ、再生可能エネルギーの方が格段に少ないが、原子力発電では22 g-CO₂/kWhであり、再生可能エネルギーは同等かやや悪い数値となっている。

世界のCO₂排出に関し、発電等の電気業の寄与は実はそう多くはない。世界のCO₂排出の大部分は鉄鋼業や化学工業等の製造業である。再生可能エネルギーを発電以外の製造業に適用することが実はCO₂削減には最も重要なのである。また、CO₂の排出源である石油は発電で消費されるのは10%にも満たず、運輸で約50%を消費する。つまり発電を再生可能エネルギーに置き換えるだけでは我々の環境問題は解決しないのである。そこで注目されているのがバイオマスである。地球上の生物は植物、動物、菌、原生動物、モネラ（細菌）から構成されており、これら生物体の量をバイオマス（Biomass）という。地球上のバイオマスの総量（植物体）は乾燥重量で1.8兆トン、純生産量で1,700億トンと

される。バイオマスも太陽エネルギーを間接的に利用することになる再生可能エネルギーの一種である。バイオマスの利点としては、(1) 太陽エネルギーの変換貯蔵で再生産が可能、(2) 微生物により分解される、(3) 燃焼による環境負荷が小さい、(4) 燃焼後に残る灰は資源としてリサイクル可能、とされる半面、欠点として、(1) 広い範囲に拡散しており、効率的利用には集積が必要、(2) 化学的・物理的に複雑な構造、(3) 利用に際しては脱水、乾燥、粉碎等の前処理が必要、(4) 単位重要当たりの発熱量が小さい、となっている（岡野, 2004）。車の燃料としてのバイオエタノールは現在ブラジル、アメリカ等ですでに普及が進んでいる（湯本, 2008）。電気自動車を用いることで、さらにその電気を太陽光発電等で発生させることで、石油の消費量を抑え CO_2 排出を抑えるという取り組みもあるが、やはり体積エネルギー密度の点で電気（バッテリー）よりも液体燃料の方が数十倍まだ優れており、バイオマスによる液体燃料への期待は高い（林, 2012）。

バイオマスは「カーボンニュートラル」という考え方にに基づき、「自然に優しい」と言われる。しかし実際はバイオマス資源の生産・輸送等に CO_2 を排出する（親里, 2007）。現在のバイオマス資源の主力はとうもろこしや大豆であり、食用との競合も懸念される。

このように、一見バラ色に見える再生可能エネルギーを利用した未来も、現実には様々な問題を抱えている。それでも太陽エネルギーに頼るしか地球の将来はない。そのためには新しい科学技術のイノベーションが求められている。本章では様々な太陽エネルギー変換・利用技術のうち、宇宙太陽発電という太陽光直接利用の高度化技術と、太陽エネルギー蓄積物である植物バイオマスの有用物質への変換技術に関し説明し、太陽エネルギーの高度利用の今後を俯瞰する。

3.2 太陽エネルギーの高度利用 — 宇宙太陽発電 —

3.2.1 宇宙太陽発電とは

3.1 で述べたように、太陽エネルギーを含む再生可能エネルギーを用いた発電の問題の一つは日照及び気象条件に起因する不安定さにある。そこで、太陽光発電の安定度を格段に向上させる手法として、太陽電池を宇宙空間に設置して発電するという方式が提唱されている。

宇宙太陽発電所 SPS（Solar Power Satellite/Station）は、 CO_2 フリーでありながら大規模基幹電源として用いることが可能な将来構想である（篠原, 2012）。SPS 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電磁波 = マイクロ波やレーザー等に変換して送電アンテナから地上に設置されるアンテナと整流回路（マイクロ波 - 電力変換回路）が一体となった「レクテナ」へ伝送し、再び直流電力に戻す方式の発電所である（図 3-2）。発電量は地上で 100 万 kW 程度を想定しており、30 年の経済寿命の間発電 / 売電を行う想定である。SPS は 36,000km 上空の静止衛星軌道に建設する計画である。静止衛星軌道とは遠心力と重力のつり合いにより地球周回周期が 24 時間となる衛星軌道のことで、地球の周期も 24 時間であるために地上から見ると衛星が静止しているように見える衛星軌道のことである。地球の半径は平均で約 6,371km であり、公転面に対して地軸が傾いていることから、静止衛星軌道では地上が夜でも地球の影にはほとんど入らない。つまり、年間を通じてほぼ夜にならないのである。唯一の例外の時期は春分と秋分の時期で、太陽 - 地球 - SPS が一直線に並ぶため、この時期だけは夜になる。SPS の太陽電池は常に太陽を向くように制御し（太陽

指向)、逆にマイクロ波送電アンテナは常に地球の受電サイトを向くように制御するため(地球指向)、太陽光が常に最大限太陽電池に当たるようになっている。

さらにマイクロ波を用いた SPS から地上への無線電力伝送は電離層での反射・散乱や大気・雨での吸収・散乱がほとんどない「電波の窓」と呼ばれる周波数帯を用いているために、地上が雨でも減衰なくマイクロ波電力が届く。電波法の適合性から 2.45GHz か 5.8GHz のマイクロ波が選ばれることが多い。この 2 波は ISM バンドと呼ばれ、産業・科学・医療用にもっぱら用いることができる。周波数帯に相当する。その結果、SPS は夜や曇りや雨でも太陽光発電の電力を利用できることになり、日本に設置すると 14% 前後の設備稼働率の太陽光発電が、宇宙に設置しマイクロ波で無線電力伝送をするだけで 95% 以上の設備稼働率となるのである。

SPS は世界中で様々な設計が検討されているが、おおむね 100 万 kW を地上で利用するような設計が多い。100 万 kW 規模の SPS の大きさは数 km 角の衛星で、重量が 1 万トン前後という設計がほとんどである。これはマイクロ波無線電力伝送の理論と将来技術の予測、そして発電の経済性から設計されている。SPS を設計する上で必要となる概念とパラメータは以下のようにになっている(図 3-2)。

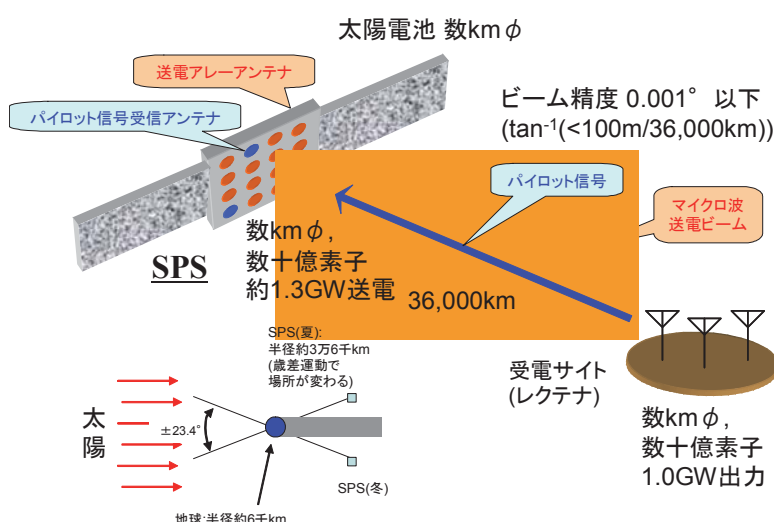


図 3-2: SPS の一般的な概念とパラメータ

- ① 太陽光発電の安定度を上げ、設備稼働率を上げたい(地上では稼働率 14% 前後)。
 - 静止衛星軌道 36,000km に太陽電池を設置
- ② 同太陽光発電の設備稼働率向上のために 36,000km 上空から天気に関係なく電力を地上に送りたい。
 - 電波の窓であるマイクロ波 (1-10GHz) で無線電力伝送
- ③ 1-10GHz のマイクロ波 (特に 2.45GHz や 5.8GHz) で 36,000km を高効率 (90% 以上) で電力伝送するのに必要なアンテナサイズを電磁界理論から計算すると
 - 5.8GHz で送電受電アンテナで約 2km, 2.5km が必要 (工学で小型化の余地はほぼない)
- ④ 数 km 規模のアンテナを宇宙で作って発電所として経済性を成立させなければならない。
 - 100 万 kW 位は発電しないと商売が成立しない (技術パラメータを経済性で最適化した結果)
- ⑤ 100 万 kW 位の発電に必要な太陽電池は
 - 地上と同じ Si を使うとやはり km 級の太陽電池が必要 (太陽光密度×面積×太陽電池効率)

⑥ 上記の流れに重量がでてこない。

→ 重さは技術のロードマップと経済性からの予想で1万トン級（工学に期待）

⑦ 1万トン級の衛星の打ち上げ、建設に必要なコストを目標として発電単価を推定

このような流れで1万トン級、100万kW級のSPSの建設は将来技術向上を想定して1.29兆円と推定され、30年間運用することで8.9円/kWhの売電を予想している。この計算には運用中の保守費3%や、年金利3%を仮定し、減価償却率+実質金利で5.21%を仮定したものである。その内訳を図3-3に示す。SPSは地上の太陽光発電に比べると、マイクロ波無線電力伝送の効率50%（発電した電力から無線送電して地上で再び電力に変換する効率）の係数がかかるために、発電効率は太陽電池が15%とすると単純に7.5%になる。また、地上太陽光発電所に比べ、打ち上げのロケットコストやマイクロ波無線電力伝送関連のコストが余分に加わっているが、設備稼働率が上がることで発電コストが低下しているのである。また、設備稼働率が上がる結果、EPTも約2年と予測されている。CO₂排出量も20g-CO₂/kWhと試算されている。他の太陽光発電と同様に、建設時のみにCO₂を排出する。建設時に必要な電力を様々なCO₂を排出する発電方式に頼っているなのでこの数字となるが、さらに将来SPS電力を利用し建設すれば11g-CO₂/kWhとなると試算されている。

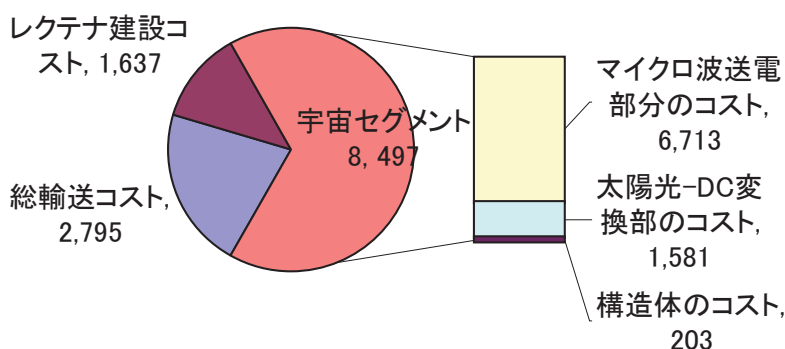


図3-3：SPSの建設コスト予測（JAXA試算）（単位：億円）

SPSは太陽エネルギーを高度利用し、持続的発展可能な生存圏に寄与できる。これは当面の地球上での閉鎖系における生存圏の維持だけを意味するのではなく、さらに将来の宇宙開放系への生存圏の拡大も意味している。生存圏の限界は地球という閉鎖系上で増えゆく人類の数と生活の質の向上を図るという矛盾した状況で発生する。SPSは1万トン級という巨大な宇宙構造物であり、これはこれまで人類が未だなしえていない大きさの宇宙構造物である。SPSを宇宙に建設、運用できるような技術を人類が手にすれば、いずれ宇宙コロニーの建設や月面移住等、人類の生存活動を宇宙へと広げることができるようになるはずである。そうすれば限られた資源を地球閉鎖系で取り合い、win-lose関係で争い合うよりも、宇宙開放系でwin-win関係で皆が充足されるような生存圏を実現できる。図3-4は1970年代に警鐘を鳴らされた「成長の限界」のシミュレーション結果に、SPSを加えて行われた生存圏シミュレーションの結果である（Yamagiwa, 1992）。地球閉鎖系では「成長の限界」があると予測されるのに対し、SPSを加えた宇宙開放系では人類は成長の限界を迎えることなく持続的発展をとげることができることがわかる。さらに社会学的見地を加えたSPSの意義に関する議論は引用文献（篠原・木村, 2012）を参照されたい。

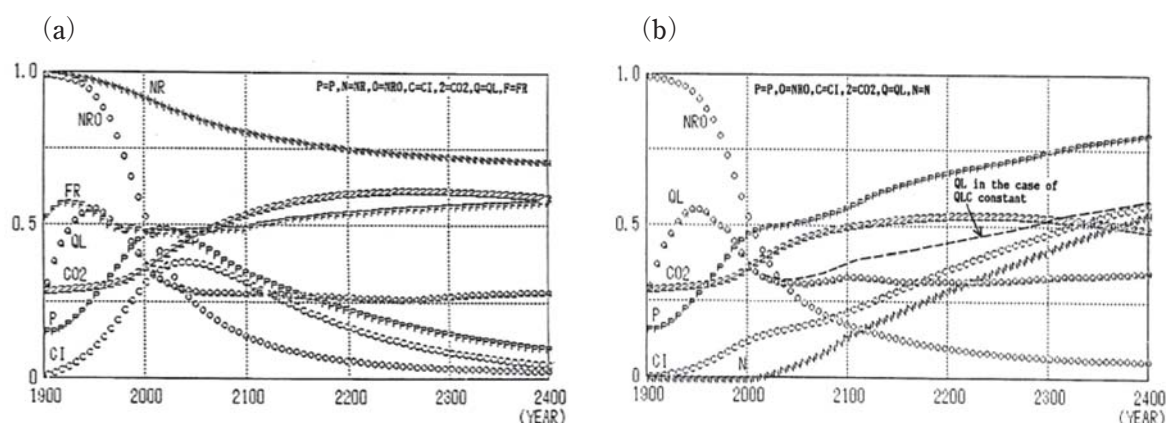


図 3-4：ローマクラブによる成長の限界シミュレーションに SPS を加味したシミュレーション結果 (Yamagiwa, 1992)

- (a) SPS なし Full Scale Values of Levels: Population ($P = 1 \times 10^{10}$ (People)), Capital Investment ($CI = 2 \times 10^{10}$ (Capital Unit)), Total Energy Resources ($NR = 3.24 \times 10^{13}$ (Barrels)), Oil ($NRO = 2 \times 10^{12}$ (Barrels)), CO_2 ($CO_2 = 1000$ (PPM)), Quality of Life ($QL = 2$), Food Ratio ($FR = 2$)
- (b) SPS あり Full Scale Values of Levels: Population ($P = 1 \times 10^{10}$ (People)), Capital Investment ($CI = 5 \times 10^{10}$ (Capital Unit)), SPS Number ($N = 4000$), Oil ($NRO = 2 \times 10^{12}$ (Barrels)), CO_2 ($CO_2 = 1000$ (PPM)), Quality of Life ($QL = 2$). Parameters: Energy Investment in SPS ($Et = 0.003 \times NRUR$ (MJ)), Start Year of Energy Investment: (IYEAR = 2000 (Year)), SPS Research Cost to Improve Value (RYEAR = 2100), SPS CI Discard Normal (SCIDN = 0.001)

3.2.2 宇宙太陽発電のための無線電力伝送システム

SPS のための無線電力伝送システムを考えた場合、地上で無線電力伝送応用を考えた場合よりも高い性能が要求される。一言で表現すれば「超巨大高効率高精度軽量安価フェーズドアレー」が必要なのである。フェーズドアレーとは多数のアンテナ素子から構成されるアンテナである。フェーズドアレーではアンテナ素子から放射されるマイクロ波の振幅と位相を制御し、放射マイクロ波を空間で合成することで任意のビーム形状を形成できるため、高速・高精度かつ、機械的なアンテナ面制御が不要という特徴を持っている。「超巨大」「高効率」「高精度」「軽量」「安価」という 5 つのキーワードに関し、これまでの SPS 設計で示されてきた数値は以下になっている

- ① 「超巨大」= $1.93\text{km} \phi$ 5.8GHz, 1.3GW, 素子間隔 0.77λ 波長 $\approx 4\text{cm} \rightarrow$ 約 18 億素子 ($\pi (1930/2)^2 / (0.04)^2$)
- ② 「高効率」= 76%[日 JAXA]、85%[米 NASA/DOE]
- ③ 「高精度」= マイクロ波ビーム全体で 0.0001° 以下の精度 (36,000km の距離) に対して 100m 以下の精度。アレー各素子アンテナの位相誤差に換算すると 5-10 度以下 (含目標追尾, 構造誤差)
- ④ 「軽量」= $2\text{g/W} = 2,600\text{t/}$ 送電システム (除発電)、厚さ 数 cm 以下 (打ち上げ時収納要求より)、アンテナ重量 300t/km^2
- ⑤ 「安価」= $<300 \text{円/W}$

これらのパラメータと現状の衛星用・民生用・軍事用フェーズドアレーと比べると「高精度」要件を除き他の 4 要件は桁違いに高い目標である。例えばリモートセンシング用の人工衛星フェーズドアレーの素子数は 100 素子程度、軍事用でも最大 1 万素子程度であるのに対し、SPS では 20 億素子弱である。通信用では第 4 世代携帯電話 LTE のために導入されている MIMO という数素子程度のアダプティブ

アレーを導入しているのが唯一である。アダプティブアレーはデジタルビームフォーミング (DBF) のためのビーム制御システムであり、位相制御方式等がフェーズドアレーとは異なっている。効率も単体のマイクロ波増幅器の例として、1.9GHz の F 級増幅器で最大 PAE (電力付加効率) 72.6%、最大ドレイン効率 80.1%、5.8GHz の F 級増幅器で最大ドレイン効率 76.5%、最大 PAE 68.7%、最大 PAE 時出力 33.9dBm、利得 10dB の実測値を得ているが、膨大な数の増幅器と制御回路で構成されるフェーズドアレーというシステムに組んだ場合の総合効率はまだ十分ではない。高効率で安価な電子管である電子レンジ用マグネトロンをフェーズドアレーに用いることも可能であり、効率も 70% 以上は量産民生用で実現しているが、システムとして SPS フェーズドアレーを組んだ場合にはまだビーム制御や精度に関する研究課題がある。この 5 要素を満たすフェーズドアレーを実現するためには通信技術やレーダー技術の進歩を待っているはおそらく実現は難しく、「マイクロ波無線電力伝送」という新しい電波応用領域を拡大し、マイクロ波無線電力伝送が技術を牽引する必要がある。京都大学ではこの無線電力伝送用高性能フェーズドアレーの実現を目指し、2010 年度に新しいフェーズドアレーを導入し、研究に用いている。このフェーズドアレーは 256 素子のアンテナで構成され、最新の大電力高効率半導体である GaN HEMT を用い、5.8GHz で終段増幅器効率 70% 以上、厚さ 30cm 以下で実現したものである。全体で 1.5kW 以上のマイクロ波エネルギーを放射、制御することが可能となっている。

SPS の提唱はマイクロ波無線電力伝送技術の研究が背景にあった。1960 年代にアメリカでマイクロ波無線電力伝送の実証実験が多く行われ、成果を上げていた (Shinohara, 2011)。しかし、マイクロ波無線電力伝送は高効率化のために理論上大きなアンテナを必要としたため、SPS 以外の研究や実用が

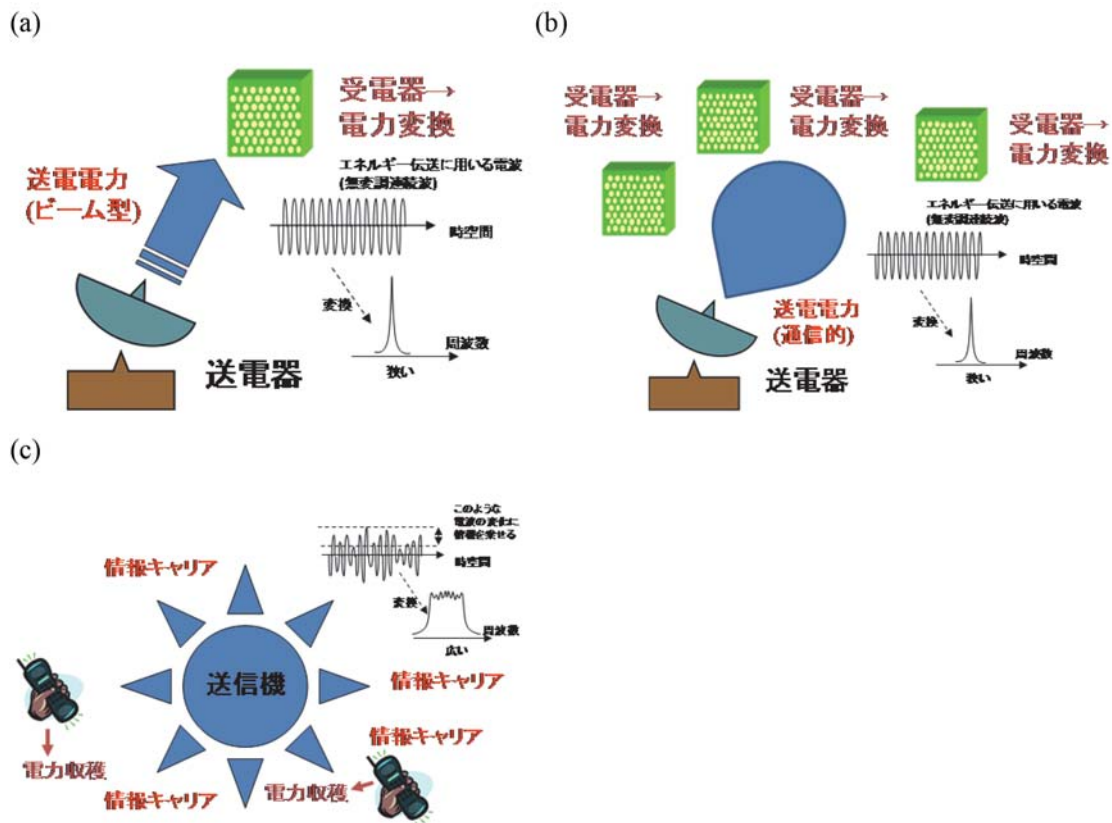


図 3-5 : (a) ビーム型マイクロ波無線電力伝送 (b) ユビキタス電源 (c) 電磁波からのエネルギーハーベスティング

進まなかった。しかし、マイクロ波という電磁波ではなく、非常に近距離を磁場を介して無線で電力を送る方式が21世紀に入り再注目され始めた（篠原・小柴, 2013）。コイル対を用いて磁場を介して無線電力伝送を行う電磁誘導方式と、コイルにキャパシタを加えて共振させ、送電距離を延ばす共鳴送電方式が現在商品化と標準化が進んでいる。

この無線電力伝送の再興に伴い、マイクロ波無線電力伝送技術も再注目されるようになり、SPS以外の民生応用が進み始めた。SPS 応用や20世紀のマイクロ波無線電力伝送研究の中心は図3-5 (a)にあるようなビーム型がすべてであったが、21世紀のマイクロ波無線電力伝送の商用システムは通信のように幅広くマイクロ波を放射し、位置精度を問わず、どこでも複数でも無線で電力を送れるようなユビキタスな無線電源（図3-5 (b)）や、さらに現存する通信放送波から無線電力を「収穫」するエネルギーハーベスティング型（図3-5 (c)）が中心となっている。ユビキタス電源やエネルギーハーベスティングは必要最小限の無線電力を送るように設計されており、無線という特徴を生かし、また現行の電波法の下で実用化を進めるために提案されたものである。

京都大学ではSPS研究の資産を生かし、いち早く1990年代から商用マイクロ波無線電力伝送応用の研究を行ってきた。ユビキタス電源は京都大学でいち早く実証実験が行われたものである。図3-6(a)は室内でのユビキタス電源で携帯電話を無線充電する実験の様子であり、図3-6 (b) は緊急時の非常用無線電源を想定して行われた上空50mからのマイクロ波無線電力伝送実験の様子である。共に弱い電力ではあるものの携帯電話の無線充電に成功している。また、京都大学ではマイクロ波無線電力伝送応用のさらに先を考え、電気配線をマイクロ波無線に置き換える「マイクロ波建物」の研究（Shinohara *et al.*, 2014）や10kW程度の大電力マイクロ波を用いた電気自動車の無線充電の研究（Shinohara *et al.*, 2013）等を企業との共同研究で実施してきた。



図3-6：京都大学による携帯電話のマイクロ波無線充電実験
(a) 室内ユビキタス電源（2004）、(b) 屋外緊急時電源（飛行船からのマイクロ波送電）（2009）

このようにユビキタス電源をはじめとするマイクロ波無線電力伝送という新しい応用が地上・民生用で拡大しつつある現状ではSPSの実現を悲観する必要はない。SPSのための宇宙技術の発展と、マイクロ波無線電力伝送という実用システムとの両軸で技術の発展が期待され、SPSという長期スパンの研究とマイクロ波無線電力伝送という短期スパンの研究が相互作用で発展できる。

コラム

METLAB/SPSLAB

「マイクロ波エネルギー伝送装置 METLAB (Microwave Energy Transmission Laboratory)」および「宇宙太陽発電所研究棟 SPSLAB (Solar Power Station/Satellite Laboratory)」は、主にマイクロ波エネルギー伝送、宇宙太陽発電所、電波科学一般に関する実験のために利用可能な研究施設であり、平成 16 年度より公募による共同利用を開始した。平成 21 年度には、新たに「高度マイクロ波エネルギー伝送実験棟 A-METLAB (Advanced Microwave Energy Transmission Laboratory)」が導入され、これらの共同利用設備はマイクロ波エネルギー伝送の研究活動拠点として発展している。

平成 8 年度に導入された METLAB は、電波暗室、測定室、機械室、前室で構成される実験棟である。電波暗室は、部屋の床、天井、全ての壁が金属壁であり、室内から放射されるマイクロ波が外部に漏洩しないと同時に、外部からのマイクロ波も室内に侵入しない構造をもつ。更に、全ての内壁には電波吸収体と呼ばれるマイクロ波を吸収する素材が設置されており、室内で放射されるマイクロ波は壁面で反射することなく吸収される。このように、電波暗室内はマイクロ波にとって非常にクリーンな環境である。METLAB 電波暗室の内寸が幅 7m × 奥行き 16m × 高さ 7m であり、最大の特徴は電波吸収体の一つの壁面に高耐電力電波吸収体 ($1\text{W}/\text{m}^2$ 以上、連続 8 時間、通常の電波吸収体の 5 倍の性能) を備えていることである。このような電波暗室が共同利用できる施設は世界にも類がない。

平成 13 年度に導入された SPSLAB は、100dB シールドルーム、30dB シールド実験室 (3 室)、吹き抜け実験スペースで構成される実験棟である。シールドルームとは、電波暗室から電波吸収体を外したものであり、外部へのマイクロ波漏洩や外部からのマイクロ波侵入はないが、室内で放射されるマイクロ波は壁面で反射する構造をもつ。100dB シールドルームには開口面上の電界分布や遠方放射界を評価できる近傍界装置が設置されており、アンテナ放射パターンを近傍界 (2 ~ 3 波長の送受信間距離) で計測できる。

A-METLAB は、METLAB と同様に電波暗室、測定室、機械室、前室で構成される実験棟であるが、電波暗室の内寸が幅 18m × 奥行き 17m × 高さ 7.3m であり、METLAB 電波暗室の 2 倍以上の空間をもつ。電波暗室の一つの壁面には METLAB と同様に高耐電力電波吸収体 ($1\text{W}/\text{m}^2$ 以上、連続 8 時間) を備えており、大電力かつ大規模なマイクロ波エネルギー伝送実験を実施できる。A-METLAB には、Plane-Polar 型近傍界装置および遠方界測定用アンテナポジショナーが設置されており、特に METLAB では測定できなかった大型アンテナを実測することが可能である。更に、A-METLAB 導入と同時に「高度マイクロ波送受電システム」も導入されており、本システムの主な装置である「高度マイクロ波無線電力伝送用フェーズドアレーシステム」は周波数 5.8GHz、アンテナ数 256 素子、最大出力 1.5kW のマイクロ波出力を得ることができる。

METLAB、SPSLAB の導入を皮切りに、近年では A-METLAB や高度マイクロ波送受電システムが導入され、また国内外多数のマスコミにおいて本設備が報道されている。これは、宇宙太陽発電所の実現に対する期待の表れとも言える。期待にたがわず、本設備を通じて世界最先端の研究成果を発信し続けたい。

METLAB 共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/metlab/>



METLAB 電波暗室



A-METLAB 電波暗室



SPSLAB 近傍界装置



高度マイクロ波無線電力伝送用フェーズド
アレイシステム

3.3 太陽エネルギー蓄積物である植物バイオマスの有用物質への変換

3.3.1 木質バイオマスのバイオエタノールへの変換

[はじめに]

地球温暖化と化石資源の枯渇を背景として、石油などの化石資源に代わって、カーボンニュートラルな資源であるバイオマスからバイオエタノールや化学品を生産するプロセスが注目を集めている。特に、木質バイオマスは、陸上で最も蓄積量、生産量が多いバイオマスであり、食糧と直接競合しない非可食資源であることから、バイオ燃料や化学品生産原料の主役になると期待されている（2.4.2 節参照）。木質バイオマスの6割から8割程度はセルロースやヘミセルロースなどの多糖類、2割から3割程度はリグニンと呼ばれる不規則な芳香族高分子からなる。これ以外に、低分子の抽出成分や灰分などが含まれるが、それらの量は樹種によるバラツキがあるものの、一般には合計でも数%程度と少量である。このため、木質バイオマスの主成分は、多糖類とリグニンと言える。この両成分を、燃料、化学品、機能性材料の原料として、最大限有効利用することが、今求められている。木質バイオマスの変換には、(1) 熱化学反応により、木質バイオマスの主成分を分離することなく、直接燃料や化学品原料、機能性材料に変換する方法（4.4.5 参照）と、(2) 多糖類とリグニンを分離した後、それぞれの成分を有用物質に変換する方法がある。ここでは、多糖類とリグニンを分離した後、酵素と微生物でバイオエタノールに変換するプロセスについて述べる。

木質バイオマスに含まれる多糖類を酵素により分解し、微生物で有用物質に変換するためには、リグニンにより覆われた植物細胞壁多糖を露出させる処理と、処理物を高効率で糖化・発酵するプロセスの開発が必要である。植物細胞壁からリグニンを分離して多糖を露出させるプロセスは前処理と呼ばれ、酸、アルカリ、酸化剤などの触媒や有機溶媒を用いる化学処理、粉碎、爆砕などの物理処理、木材腐朽菌などを利用する生物処理および、それらの複合処理がある。酵素糖化を利用するバイオエタノール生産では、セルラーゼと呼ばれる酵素の使用量がプロセス全体のコストに大きな影響を及ぼす。しかし、酵素量を少なくすると、セルラーゼが働かない状態で前処理物に吸着する現象（非生産的吸着）を起こすため、酵素の使用量を減らすことが難しくなる。このため、前処理を受けた植物細胞壁の精密な構造を解析し、細胞壁成分とセルラーゼとの相互作用を理解しつつ、酵素が最大限働けるようにする前処理法と非生産的吸着による阻害を受けないセルラーゼの開発が必要である。

[植物細胞壁のミクロ構造とセルラーゼの相互作用]

細胞は生物を構成する構造的・機能的な基本単位であり、植物バイオマスもこの細胞が集まった3次元構造体である。機能の異なる細胞間では構造も化学構成成分も異なるため、糖化酵素による分解性も多様である。たとえば、一般的な広葉樹に見られる道管要素は高い水分通道機能を保持するためにリグニンの沈着量が他の細胞に比べて多い。そのため、相対的に酵素分解を受けにくいとされている。リグニンは、木質細胞に疎水的性質を付与するだけでなく、細胞壁を構成する多糖類の接着ならびに細胞同士を接着させることによって、細胞壁および植物体に対して力学的強度を与えている。しかしながら、酵素糖化の観点からは基質を被覆してセルラーゼのアクセシビリティを低下させる阻害物質に他ならない。したがって、前処理によるリグニンの除去は有効な手段として古くから検討されている。さらに、糖化残渣に対して電気泳動を行うとリグニンには β -グルコシダーゼなど特定の酵素が吸着するため、低酵素濃度で糖化を行った場合には、糖化率の低下が認められる。そのため、前

処理にはリグニンを除くだけではなく、非特異的吸着を抑えるリグニンの改質も望まれる。

一方、セルロースは細胞壁の骨格成分として強靱かつしなやかな物性を発現する結晶性多糖であり、バイオマスの酵素糖化においては主たる基質でもある。しかしながら、精製したセルロースを糖化しても酵素量を減少させると非生産的吸着が引き起こされ、分解が停止してしまう。セルロースには結晶多形が存在し、それぞれの多形間では熱安定性などの物理化学特性が異なる。そこで、エチレンジアミンを用いて天然に存在するセルロース I からセルロース III_I へ結晶変態させたところ、低酵素濃度（市販セルラーゼ製剤 1mg/g-substrate）でも糖化阻害が起きずにほぼ完全分解できることが明らかとなった（渡辺・築瀬, 2010）。興味深いことに、僅かに残った分解残渣はセルロース III_I ではなく、典型的なセルロース I であった。これは未変態のセルロース I であると思われ、低濃度酵素による分解阻害の要因は天然セルロースの結晶構造と酵素の相互作用に起因することが重ねて示唆された。

以上から、バイオマスの前処理法は、リグニン含量の低下等、成分変化の観点で評価・選択するだけでなく、基質となるセルロースの結晶構造の観点でも評価・選抜することが重要である。上述の例では、セルロース III_I の例を示したが、セルロース II（特に低温膨潤処理による場合）についても、酵素糖化率の上昇が確認されている。したがって、糖化率 100% の究極酵素糖化を目指すためには、天然構造であるセルロース I を、II あるいは III_I へ変換するプロセスを積極的に活用する必要がある。

[マイクロ波と高速発酵細菌を用いた木質バイオマスからのバイオエタノールの生産]

様々な前処理法の中で、生存圏研究所ではマイクロ波反応やリグニン分解菌を用いた前処理法に注目し研究を進めてきた。ここでは、マイクロ波前処理法について述べる。バイオマスの化学的前処理では、反応効率や反応選択性を高めるため、ほとんどの場合最適温度まで加温して反応を行う。その加熱方法にヒーターや熱媒などからの伝熱を利用する外部加熱法と、マイクロ波を用いる誘電加熱法がある。マイクロ波による前処理手法は、外部加熱法と比較して短時間・省エネルギーで処理できる点で期待されている。これはマイクロ波が物質内部まで浸透してエネルギーとして吸収されるというマイクロ波加熱の原理に由来する。また、反応系によっては、マイクロ波反応の方が同一反応時間、同一温度でも反応収率や反応の選択性が外部加熱より高い例が知られており、マイクロ波の利用により前処理の効率化が期待できる（三谷・渡辺, 2013）。

これまで、有機溶媒を用いたマイクロ波前処理、金属触媒と過酸化水素を用いるマイクロ波酸化反応、マイクロ波水熱反応と白色腐朽菌の複合前処理などのバイオエタノール生産プロセスにおける有効性を明らかにしてきた。海外でもマイクロ波を利用した稲わらの分解やバイオマス廃棄物の分解が報告されている。図 3-7 に、マイクロ波前処理を用いた木質バイオマスからのバイオエタノール生産プロセスの一例を示す。このプロセスでは、マイクロ波照射によりバイオマス中のヘミセルロースは部分的に加水分解されて可溶化する。一方、セルロースは固体のままであるが、セルラーゼによる酵素分解を受けやすい状態へと変化する。前処理を受けたバイオマスは一つのタンク内で酵素により糖化されると同時に発酵菌によりエタノールへと変換される。発酵後エタノールは蒸留により回収・精製され、蒸留残滓として残るリグニンは分離して化学品原料やエネルギー源として利用する。京大大学生存圏研究所、鳥取大学、日本化学機械製造、トヨタ自動車に参加した NEDO プロジェクトでは、炭素数が 5 つの糖と炭素数が 6 つの糖を同時に発酵し、セルラーゼを表層や菌体外に発現する遺伝子組換え細菌とマイクロ波反応を組み合わせ、エタノールを高効率で生産した（図 3-8）。

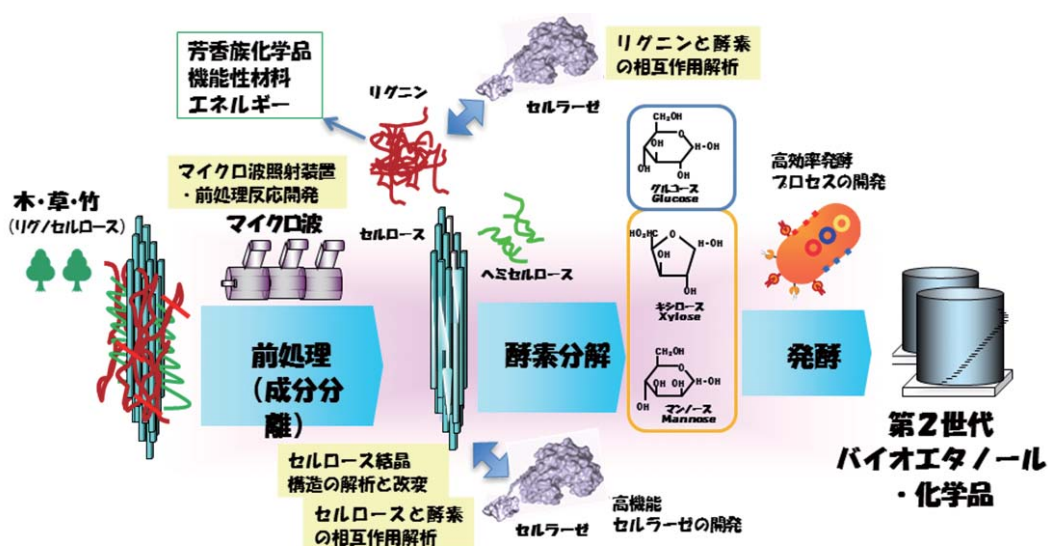


図 3-7：マイクロ波照射と高速エタノール発酵細菌を用いる木質バイオマスからのバイオエタノール生産プロセス

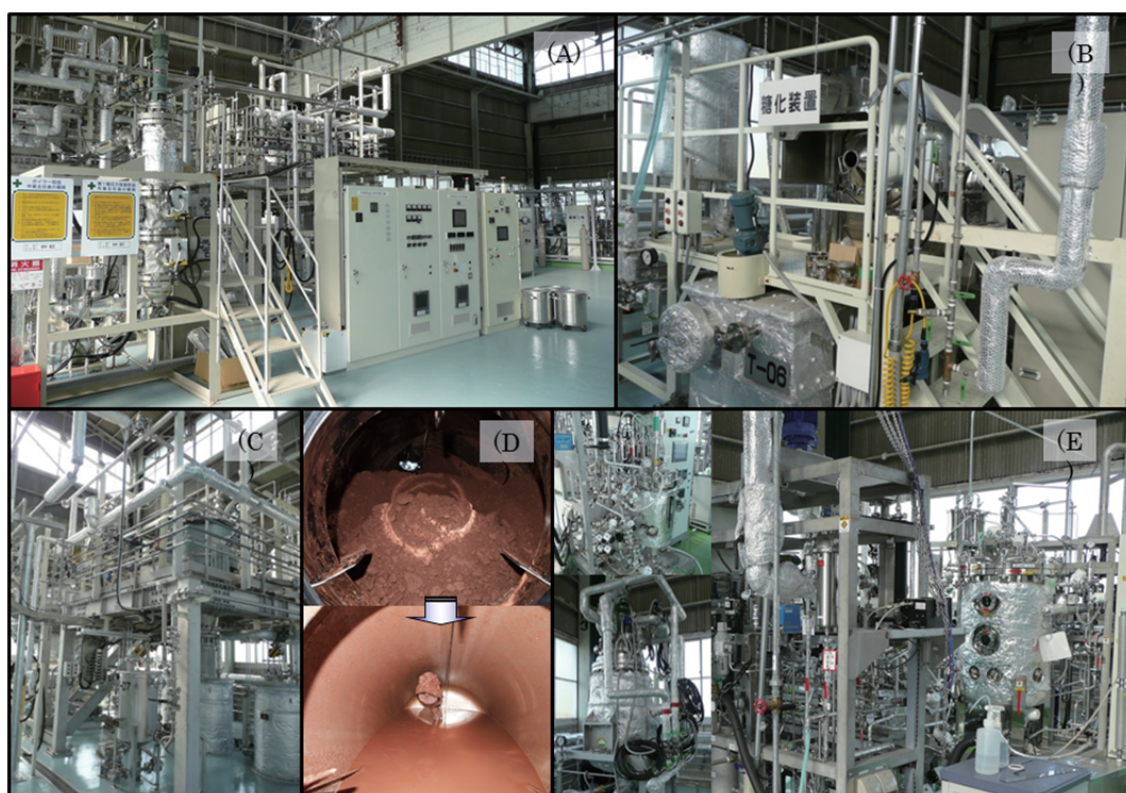


図 3-8：マイクロ波照射と高速エタノール発酵細菌を用いる木質バイオマスからのバイオエタノール生産ベンチプラント（NEDO プロジェクト）。(A) マイクロ波反応タワー、(B) 糖化槽、(C) 遠心分離機と成分分離ユニット、(D) マイクロ波反応で前処理したユーカリ材の酵素糖化前と後（20%固形分濃度）、(E) 発酵設備

[木質バイオマスマイクロ波前処理装置の研究開発]

マイクロ波を用いた木質バイオマス前処理の研究開発に関しては、1980 年に旧京都大学木材研究所での実施例がある。当時の装置は金属容器内に円筒セラミック管を設置し、木質バイオマスはセラ

ミック管内を流れる構造であった。マイクロ波は金属体に照射した場合は反射するが、セラミックに照射した場合は透過する性質をもつ。よって、金属容器内に照射されたマイクロ波は、金属壁で反射を繰り返しながらセラミック管を透過し、セラミック管内を流れる木質バイオマスに照射される。この装置は連続的に木質バイオマスをマイクロ波前処理できる特徴をもつ一方、セラミック管が高価であり採算性に課題があった。そこで、生存圏研究所では、2000年代後半から2010年代前半にかけて、セラミック管を用いずに円筒金属管内に木質バイオマスを流す構造を採用した。金属管の途中にT字型分岐をもつ金属管を挿入し、このT字型分岐よりマイクロ波を木質バイオマスに照射する。このT字型分岐金属管とマイクロ波照射装置を1つのユニットとして捉えることで、処理量、処理時間、処理速度に応じてユニット数を増減させることができる。

さらに、生産性の向上を目指すべく50L級の処理能力をもつ木質バイオマスマイクロ波前処理装置を開発した。本装置ではマイクロ波が4方向から照射される構造を採用し、このマイクロ波照射構造を2段重ねにすることで、合計8か所から最大12kWのマイクロ波が木質バイオマスに照射される。消費電力と木質バイオマスの温度上昇速度から計算したマイクロ波エネルギーから熱エネルギーへの変換効率は約79%であった。熱伝導や熱輻射による装置の熱損失を考慮すると極めて良好なエネルギー変換効率が得られた。

木質バイオマスマイクロ波前処理装置の大きな課題は、スケールアップの困難性である。マイクロ波を物質に照射する際において物理寸法の制約条件となるのが浸透深さと呼ばれるパラメータである。浸透深さは物質の電気定数およびマイクロ波周波数により決定され、マイクロ波吸収特性の良い物質ほど浸透深さが短くなり、また周波数が高いほど浸透深さが短くなる。よって単純な容器の大型化でスケールアップを目指してしまうと、容器の周辺部ではほとんどのマイクロ波エネルギーが吸収されてしまい、中心部分までマイクロ波が届かなくなる。したがって、木質バイオマスマイクロ波前処理装置のみならず一般的なマイクロ波加熱装置における生産性の向上に関しては、大型化という「ストックの改善」よりも短時間・高速処理化という「フローの改善」を目指すことが望ましい。

[森林の育成とリンクしたバイオ燃料の生産]

木質バイオマスなど、セルロース系バイオマスから生産するバイオエタノールの二酸化炭素排出削減は、デンプンやショ糖など可食性糖質からつくるバイオエタノールよりはるかに小さい。森林の育成とバイオ燃料の生産をリンクすると、森を育てて化石資源の大量消費による温暖化を抑制する社会に貢献できる。急速選択加熱が可能なマイクロ波反応はバイオマスからの有用物質生産に大きな可能性を提供する。これまで、バイオマスを処理する大型のマイクロ波装置は開発されてこなかったが、生存圏研究所のグループは、この課題に取り組み、大型で低コストの高性能マイクロ波反応装置を開発した。こうした技術が、化石資源の大量消費に依存しない社会の実現に貢献することを望む。

3.3.2 シロアリを用いた木質バイオマスからのバイオガスの生産

シロアリは木質バイオマスの分解者として最も重要な生物であり、特に熱帯地域ではその役割は特筆すべきものがある（安部, 1989）（4.2.4 参照）。シロアリに取り込まれ、咀嚼されて小片化した木質バイオマス中のセルロースは、シロアリ自身および消化管に共生する微生物（原生動物とバクテリア）の持つセルラーゼ系によってその構成単位であるグルコースにまで分解される（徳田, 2012）。その後、グルコースは最終的に後腸に共生する酢酸生成菌によって酢酸にまで分解され、この酢酸がエネルギー

ギー源としてシロアリに吸収・利用されると考えられている (Ohkuma, 2003)。この過程でグルコース 1 分子から水素が最大 4 分子生成することになる (Sugimoto *et al.*, 1998)。また、腸内に共生する古細菌、細菌、スピロヘータによって水素と二酸化炭素からメタンや酢酸が生成し、さらに水素と空気中の窒素からアンモニアが生成される (本郷, 2012)。下等シロアリと微生物が織りなす共生系によるセルロースの分解における水素の生成・消費過程、およびメタン・酢酸の生成過程を図 3-9 にまとめて示した。

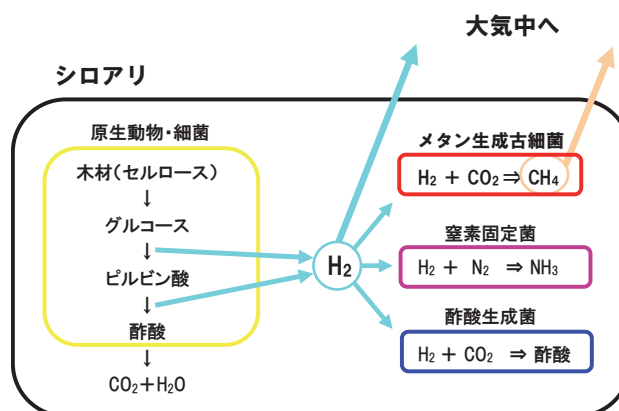


図 3-9: セルロース分解をめぐるシロアリ-微生物共生系

3.1 に述べられている通り、太陽エネルギーによって生成したバイオマスを基盤とした社会の構築は生存圏研究所における重要なミッションである。バイオマスエネルギーの重要な構成要素としてバイオガスがある。図 3-9 に示したように、シロアリは木質バイオマスの分解によって、バイオガスである水素とメタンを生成し大気中へ放出している。

水素は究極のエネルギーガスであり、燃焼によって水を生じるのみである。現状では、水素は天然ガスやナフサなどの化石資源を原料として膨大な電力を消費しながら生産されているが、将来的には再生可能資源であるバイオマスを原料とした方向へシフトすることが期待されている。これまでに、多くの微生物が有機物から水素を生成することが知られている (浅田ら, 2002)。Inoue らは、水素分圧が高い状態でも働く新規の鉄ヒドロゲナーゼをイエシロアリ共生原生動物から得ることに成功した (Inoue *et al.*, 2007)。彼らの報告によると、イエシロアリの水素生産能は $0.7 \mu\text{mol/g-termite/h}$ であり、餌の摂食量から換算してこれはグルコース 1 mol 当たり 0.75 mol の水素生成量に相当する。上述した様に、理論上は 1 mol のグルコースからは 4 mol の水素が生成することから、この生成能は 20% 弱ということになる。逆に言うと、セルロースの分解によって生じた水素の 80% が種々の微生物によってシロアリ体内で消費されてしまうということになる。

一方、シロアリは地球のメタン収支においてかなりの部分を担っていると言われている。実験室における測定と地球上のシロアリ生息数のかなり大胆な推定をベースにした計算結果によると、メタンガス排出量の最大 10% がシロアリ由来である (Zimmerman *et al.*, 1982)。メタンは天然ガスの主成分であり、水素 4 個と炭素 1 個から構成され、化石資源の中では最もクリーンなエネルギーガスである。メタン生成（メタン発酵）は、下水処理法として長い応用の歴史を持ち、また、中国やインドなどの農村地域においてバイオマス廃棄物の処理・エネルギー再生産システムとして現在でも活用されている (西尾・中島田, 2002)。日本産イエシロアリからのメタン排出量について、餌の違いおよび供試個体数の違いの影響が報告されている (Tsunoda *et al.*, 1993a; 1993b; Kawamura *et al.*, 2001)。

本項では、シロアリと腸内に共生する微生物相に注目し、バイオマスとシロアリを用いた水素とメタン、とくに水素の効率的な生産について紹介する。具体的には、①シロアリ生体を用いたセルロース系物質からのバイオガス発生量の最大効率化、②シロアリ共生微生物を用いた各種未利用バイオマス資源からの簡易なバイオガス生産の可能性、の 2 点である。

まず、種々のセルロース系物質とシロアリを用いたバイオガス生成の最大効率化について、餌の違い、および抗生物質処理の影響について検討した (Kawaguchi, 2006; Kawaguchi *et al.*, 2005; 吉村ら, 2012)。実験には、生存圏研究所共同利用施設である木材劣化生物飼育棟 (Deterioration Organisms laboratory, DOL) で室内飼育中のイエシロアリコロニーから成熟 (3 令以上) 職蟻を採取して使用した。イエシロアリは上述した Inoue らの報告でも使用されており、また、大規模な室内飼育に適した種類である。

あらかじめ2日間絶食処理を行ったイエシロアリ職蟻に各種セルロース系物質 (アカマツ木粉 (16 ~ 60 メッシュ)、木材の主成分で原生動物が主な栄養源としているセルロースパウダー、微結晶セルロース、非結晶セルロースである CMC、セルロースの分解中間物であるセロビオース、セルロースの分解産物であるグルコース) を一定期間摂食させ、密栓のできるバイアル瓶に一定時間封入することによって排出した水素およびメタンを定量した。測定には、効率よく水素とメタンを測定するために特別に設計した半導体ガスアナライザー (図 3-10) を用い、職蟻 1 頭・1 時間当りのバイオガス排出量を算出した。

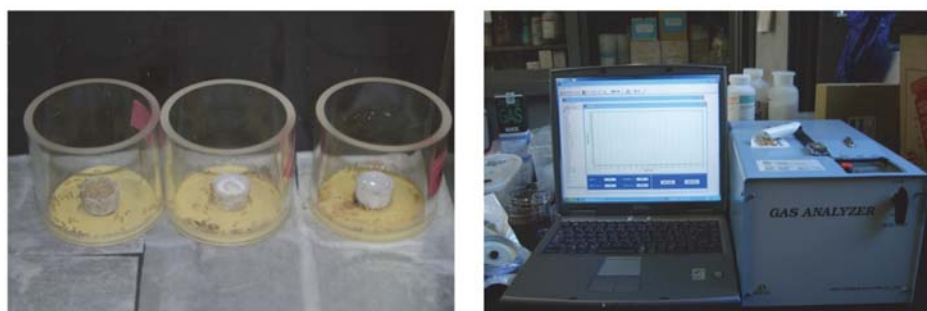


図 3-10：シロアリへのセルロース性物質の投与と水素・メタンの半導体ガスアナライザー

木粉および各種セルロース系物質を摂食させた職蟻 1 頭当りの水素とメタンの排出率の変化を図 3-11 に示した。2 日間の絶食で水素排出率は約 90% 低下した。木粉を摂食させた場合の水素排出率は 14 日目に最大となり、体重当りの水素排出率は絶食させる前と同じ水準にまで回復した。同様にセルロースおよび微結晶セルロースを摂食させた職蟻の水素排出率も 14 日目に最大となり、木粉と比べてそれぞれ 2.7 倍、1.5 倍となった。非結晶セルロース (CMC) を摂食させたシロアリからの水素排出率は、餌を投与して 5 日目以降に増加したが木粉を上回る値とはならなかった。しかしながら、セルロースの分解産物であり原生動物が利用できないと考えられるセロビオース、およびグルコースを摂食させた場合、水素排出率は絶食後と変わらず低いレベルのままであった。セロビオース、およびグルコースを摂食させると原生動物が死滅するか著しく減少することが報告されている (Kanai *et al.*, 1982)。これらの結果から、シロアリが体外に排出する水素ガスは原生動物、あるいは原生動物から栄養を得ている水素生成菌に由来するものであることが示唆された。グルコースを摂食させた場合、細菌によるグルコース発酵によって水素が生成されることが考えられるが (Taguchi *et al.*, 1993)、その量はごくわずかであり、シロアリ腸内で消費されてしまうのだろう。セルロースを摂食させてもイエシロアリに共生する 3 種の原生動物の数は変化しないことが報告されており (Yoshimura *et al.*, 1995)、セルロースの他にリグニン、ヘミセルロースを含む木粉よりもセルロースの方が原生動物の消化効率

が良かったために水素排出量が増加したと考えられた。

一方、餌物質の選択によってメタンの排出率を増加させることはできなかった。メタン排出率は絶食によって約 70% 低下した。どの餌を与えた場合においてもメタン排出率は餌を与えてから 1 日後に急増し、ほぼ絶食前の水準に回復した後、木粉を含めたセルロース系の餌では同程度の排出率を維持していたが、セロビオース、グルコースでは徐々に減少し 21 日目にはメタンは検出されなくなった。

セルロース、微結晶セルロースが 3 種の原生動物に利用されるのに対し、CMC は大型の原生動物 *Pseudotrichonympha grassii* には利用されず、*Holomastigotoides hartmanni* とメタン生成菌と共生している *Spiritrachonympha leidy* にしか利用されないという実験結果 (Kanai *et al.*, 1982) は本実験結果と一致している。

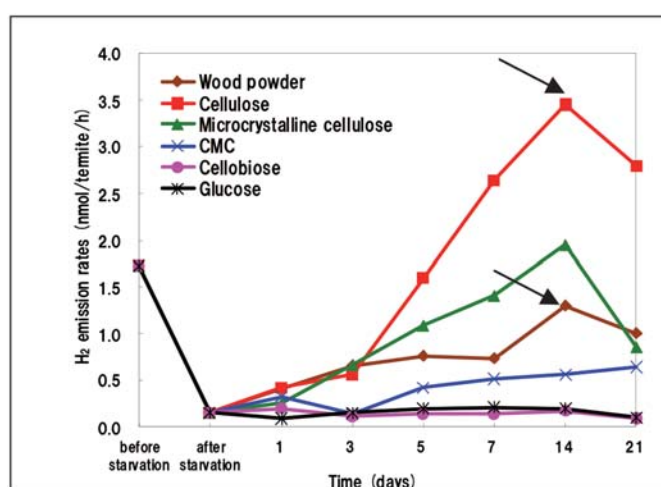


図 3-11：各種セルロース系物質を摂食したイエシロアリ職蟻からの水素の排出。セルロース摂食の最高値と木粉の最高値を→で示した。(吉村ら (2012) より改変)

次に、腸内細菌類による水素消費を抑制することを目指し、イエシロアリ職蟻に各種抗生物質（ペニシリン-G、カナマイシン、ストレプトマイシン、クロラムフェニコール、テトラサイクリン）で処理したろ紙を摂食させて、水素およびメタンの排出量の変化を調べた。測定方法はセルロース系物質摂食試験の場合と同様である。表 3-1 に各種抗生物質処理によって得られた水素とメタンの最大排出量をまとめて示す。水素排出量は抗生物質摂取前の 3.3 ~ 4.3 倍に増加し、これは抗生物質によって水素を消費する細菌類が死滅するか、活性が抑えられたためであると考えられた。最大値はペニシリン-G 処理における 17.6 nmol/termite/h であった。この値を、Inoue *et al.* (2007) の様にシロアリ 1 グラム当たりで換算すると約 0.6 μ mol/g-termite/h となり、彼らの結果とほぼ一致している。1 コロニー 100 万頭と仮定し、最大排出率から 1 日当りの水素排出量を計算すると、10 L/colony/day と推定される。一方、メタンについても、その生成量は抗生物質処理によって約 3 倍となったが、生成率の絶対量としては最大 2.4 nmol/termite/h と水素と比較すると 7 分の 1 程度であった。

より実用的なレベルでのシロアリを用いたバイオガス生産の可能性を考えたとき、農林産廃棄物は重要なターゲットとなる。バイオガス回収の基質として、その有効利用が望まれているモウソウチク、ケナフおよびバガス（サトウキビの絞りかす）を用い、日本産地下シロアリであるイエシロアリとヤマトシロアリに直接摂食させた場合と、腸内共生微生物培養液中に投入した場合とにおいて、水素とメタンの排出量を測定した (吉村ら, 2012)。

表 3-1：各種抗生物質処理を摂食したイエシロアリ職蟻からの水素とメタンの排出（吉村ら（2012）より改変）

抗生物質	最大水素 排出量 (nmol/termite/h)	最大メタン 排出量 (nmol/termite/h)
ペニシリン-G	17.6	2.4
カナマイシン	16.5	2.0
ストレプトマイシン	13.5	2.2
クロラムフェニコール	14.4	2.4
テトラサイクリン	17.3	2.1
抗生物質摂取前	4.1	0.8

シロアリ自身によるバイオガス生産については、2日間絶食させたイエシロアリ職蟻 50 頭およびヤマトシロアリ職蟻 100 頭に、餌として遊離糖（グルコース）含有量測定済みのアカマツ、モウソウチク、ケナフ、バガスおよびセルロース（ヤマトシロアリの場合のみ）を強制的に与え、一定期間後に水素とメタンの排出量を測定した。測定方法は前述の場合と同様である。

腸内共生微生物によるバイオガス生産については、以下の方法で実験を行った。体表面をエタノール殺菌したイエシロアリ職蟻およびヤマトシロアリ職蟻各 5 頭を、上記基質 200mg を加えた HP 培地 20ml（組成：ペプトン 2.0g/L + 酵母エキス 1.0g/L + Na₂HPO₄ 0.2g/L + NaCl 1.0g/L）を入れた 470ml 容ガラス瓶に投入し、ガラス棒ですりつぶした。ブタジエンゴムセプタムを用いて密栓した後、37℃で培養し、24 時間後に 1ml の容器内空気をサンプリングすることによってガス分析を行った。なお、対照として同量のグルコースを添加した HP 培地も実験に用いた。

イエシロアリはこれらの基質を良く摂食し、5～7 日後にはどの場合も絶食前のガス排出量とほぼ同等の水準にまで回復した。しかしながら、それ以降は、アカマツでは安定した水素排出量を示したものの、それ以外の基質では排出量の明らかな低下が認められた。一方、ヤマトシロアリでは、モウソウチクおよびバガスの場合に死亡率が高くなり、また基質にもカビによる汚染が観察され、水素の排出量は木粉およびセルロースの場合においても絶食前と比較して低い水準のままであった。これらの農林産物をシロアリ自身からのバイオガス回収のための基質として利用するメリットは小さいと考えられる。

一方、表 3-2 に示す通り、腸内共生微生物を用いた場合、両シロアリともモウソウチクおよびバガスから大量の水素を排出した。イエシロアリでは、グルコースの場合と比較してバガスで約 25%、モウソウチクで約 14% の水素排出量となり、ヤマトシロアリでは同じくそれぞれ約 75%、約 33% という高い排出量が観察された。これは、モウソウチクとバガスに含まれる遊離糖の分析結果から見ても著しく高い値である。また、ケナフについても排出の絶対量はそれほど大きくないものの、アカマツの場合と比較した排出効率は 10 倍に近い値となった。これらの結果は、シロアリ共生微生物を用いた水素回収の基質としての農林産廃棄物の可能性を示唆していると思われる。メタンについてはその排出量は水素と比較して著しく少なく、ほとんどの基質でアカマツの値を下回った。

したがって、こういった農林産廃棄物については、単離共生細菌類の大量培養による水素ガスの生成と回収が今後の方向性として考えられるだろう。生存圏研究所の実験の過程で分離することに成功した通性嫌気性水素生成菌 *Enterobacter cloacae* もその一つの候補として挙げられる。

表 3-2：モウソウチク、バガス、ケナフ、アカマツ、セルロースおよびグルコースを基質とした 1 日間の静置培養におけるイエシロアリおよびヤマトシロアリホモジェネートからの水素の排出量 (吉村ら (2012) より改変)

基質	イエシロアリホモジェネート水素生成量 (nmol/1 ml medium)	基質	ヤマトシロアリホモジェネート水素生成量 (nmol/1 ml medium)
アカマツ	0.003 (1)	アカマツ	0.011 (1)
セルロース	0.009 (3.0)	セルロース	0.062 (5.6)
モウソウチク	0.306 (6.9)	モウソウチク	1.223 (7.5)
バガス	0.564 (2.1)	バガス	2.753 (2.8)
ケナフ	0.032 (9.7)	ケナフ	0.098 (8.1)
グルコース	2.230 (0.7)	グルコース	3.679 (0.3)

注) () 内の値は、アカマツの場合の排出量と遊離糖量の値を 1 とした場合の、各基質の排出効率

最後に、共生微生物として原生動物を持たない高等シロアリであるタカサゴシロアリを対象に、簡便なバイオガス生産システムの構築を目指した検討を行った (高井ら、2007; 吉村ら、2012)。方法は、上述のホモジェネートを用いた実験と同様の方法である。キシランを炭素源として用いる事で、シロアリ飼育時と比較して最大 100 倍の速度で水素ガスを生産することができた。また、キシラン含有量が多いバイオマスである粕殻を用いても、水素ガスの効率的な生産が可能であった。この結果は、シロアリ種-基質を適切に選ぶことによって、共生細菌類による農林産廃棄物から水素生産の可能性が十分にあることを示唆している。

以上、日本産のシロアリを用いた効率的バイオガス生産に関する検討結果を紹介した。シロアリ自身を用いた場合、現状の最大生成量から計算した水素量は 100 万頭のイエシロアリコロニーで 1 日約 10 リットルである。しかしながら、この値はグルコースの嫌気発酵における理論的生成量の 20 ~ 30% に過ぎず、まだまだ改善の余地がある。一方、シロアリ種-基質を適切に選ぶことによって、共生細菌類による農林産廃棄物から水素生産の可能性が十分あることも明らかとなった。今後、生成効率のさらなる向上を目指した検討を行うとともに、熱帯の多様な食性を持つシロアリ種をターゲットとした微生物工学的取り組みを進めたい。

3.3.3 白色腐朽菌を用いたバイオマスのエネルギー変換

木、竹、草などの植物細胞壁多糖を発酵によりメタン、エタノール、化学品などへ変換するためには植物細胞壁を固め、細胞どうしを接着しているリグニンが大きな障害となる (3.3.1 参照)。リグニンは自然界では微生物により分解されるが、その中心的役割を担うのが白色腐朽菌である。白色腐朽菌の中である種のは、セルロースを残して高選択的にリグニンを分解する力を備えており、その機能の解

明と利用は、環境にやさしいバイオマスのエネルギー変換法の開発につながる。

白色腐朽菌は担子菌に属する木材腐朽菌であり、一般にセルロース、ヘミセルロースだけでなく、リグニンも同時に分解する。腐朽材が淡色化や白色化を呈するものが多いことから白色腐朽菌と呼ばれるが、白色腐朽菌であっても腐朽材が濃色化するものもある。白色腐朽菌には、シイタケ、ヒラタケ、ナメコ、エノキダケなど食卓に並ぶ食用菌も多い。白色腐朽菌によるセルロース、ヘミセルロース、リグニンの分解割合は、菌の種類、樹種、腐朽の進行状況により異なるが、腐朽の進展した木材では、3成分をほぼ同時に分解するものが多い。しかしながら、*Ceriporiopsis subvermispora* などの白色腐朽菌は、セルロースを残してリグニンとヘミセルロースを優先的に分解する。このタイプの菌は、選択的的白色腐朽菌と呼ばれ、パルプ化や酵素糖化発酵の前処理に有用である（図3-11）（渡辺, 2010; 渡辺, 2012）。

一般に白色腐朽菌が木材に進入すると、菌糸を木材細胞内孔（ルーメン）に伸ばして、リグニン分解酵素や多糖分解酵素などの酵素を菌体外に分泌する。しかしながら、これらの酵素の分子サイズは木材細胞壁の細孔直径より大きいために、分泌された菌体外酵素は木材細胞壁中に進入できない。このため、多くの白色腐朽菌は、活性酸素であるヒドロキシルラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）を鉄の酸化還元反応などを介して発生させることにより、木材細胞壁をぼろぼろに侵食し、結果として開いた木材細胞壁の大きな孔に自分の出すセルラーゼやリグニン分解酵素などの菌体外酵素を進入させる（図3-11）。このような腐朽形式を非選択的的白色腐朽とよぶ。非選択的的白色腐朽では、腐朽した箇所の多糖が失われるため、バイオマスの糖化・発酵前処理には利用価値が少ない。

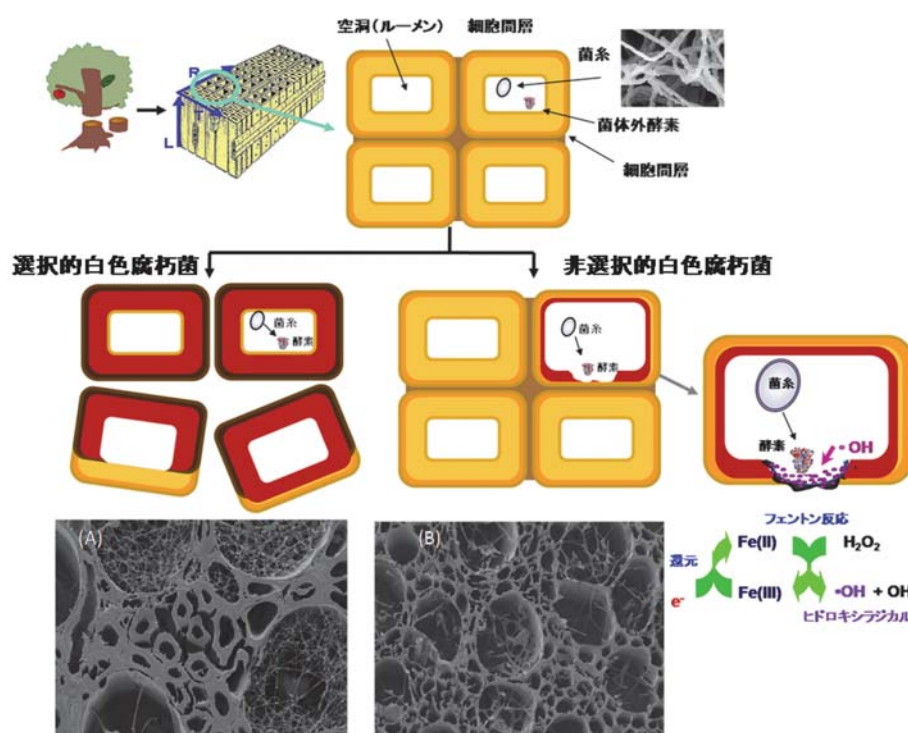


図3-11：選択的および非選択的的白色腐朽菌の木材腐朽様式（渡辺, 2010; 渡辺, 2012）

これに対し、*C. subvermispora* 等の選択的白色腐朽菌は、セルロースを残してリグニンを高選択的に分解する。選択的白色腐朽では、木材腐朽がかなり進行した段階になっても、菌が分泌した菌体外酵素を木材細胞壁内に進入させることなく、酵素から遠く離れた細胞間層や細胞壁深層のリグニンを低分子代謝物を利用して高選択的に分解する（渡辺, 2010; 渡辺, 2012）。即ち、選択的白色腐朽菌はリグニンのラジカル分解を止めることなく、酸素および鉄イオン存在下で $\cdot\text{OH}$ の生成を抑制する機構をもつ。渡辺らは、選択的白色腐朽菌の培養物からセルロースを分解して木材細胞壁を侵食する活性酸素ヒドロキシルラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）の生成を阻止する新規代謝物を単離・同定した。選択的白色腐朽菌 *C. subvermispora* は、木材腐朽の初期に飽和および不飽和脂肪酸とマンガンペルオキシダーゼ（MnP）を産生し、拡散可能な Mn^{3+} 錯体を開始剤とする脂質過酸化によりラジカル連鎖反応を起こし、リグニンを分解する。

選択的白色腐朽菌は、紙・パルプ製造のほか、木材の糖化エタノール発酵の前処理、メタン発酵の前処理、牛などの反すう（反芻）家畜の牧草飼料の消化性向上処理、木質成形材料の製造、環境汚染物質の分解、などに利用できる。

生存圏研究所では、選択的白色腐朽菌 *C. subvermispora* をスギ材のメタン発酵前処理に利用した。小麦フスマを含むスギ材チップに *C. subvermispora* を植菌し、8週間培養すると、腐朽スギ材の多糖（ホロセルロース）あたり 35%、原料スギ材あたり 25% の転換効率でバイオガス（メタン濃度 55-60%）が生成することを示した（図 3-12）。また、白色腐朽菌と爆砕の複合処理を行い、菌処理が木材のメタン発酵効率を大きく向上させることを見出した。爆砕温度を 180℃ 以下に下げることができれば、実用プラントにおいて、ボイラー管理の負担を軽減することが可能となり、操業時の管理を簡便にすることができると期待できる。実際、選択的白色腐朽菌 *C. subvermispora* や国産の新規白色腐朽菌 *Phellinus* SKM2102 による菌処理は、爆砕に必要な温度を顕著に低減させ、180℃ の爆砕との組み合わせでは、菌処理によりメタンへの転換率を 2.5～3 倍に向上させた（図 3-13）（坪田・渡辺, 2009）。ブナ材の 180℃ の爆砕と菌処理の組み合わせで、メタンへの最大転換効率は 75% を越えた。*Phellinus* sp.

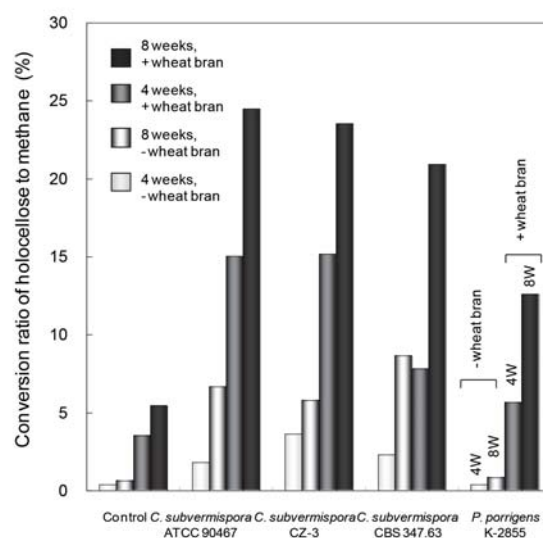


図 3-12: 白色腐朽菌処理スギチップのメタン発酵（坪田、渡辺, 2009; Amirta *et al.*, 2006）

白色腐朽菌処理（8週間）したスギチップを 30 日間メタン発酵した。

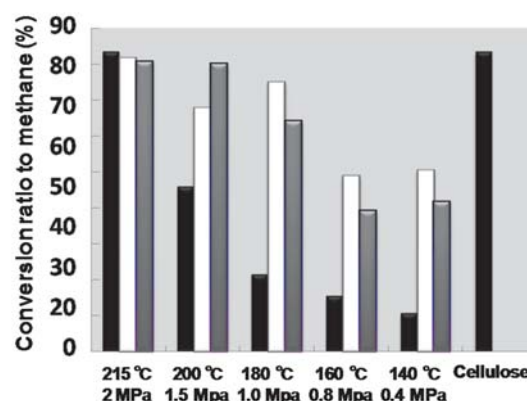


図 3-13: 白色腐朽菌・爆砕複合処理によるブナ材のメタン発酵（坪田・渡辺, 2009）

黒：爆砕処理のみ、白：*C. subvermispora*・爆砕複合処理、グレー：*Phellinus* sp. SKM2102・爆砕複合処理。セルロースからのメタンの生成量を比較例として示す。

SKM2102 株は、マンガンペルオキシダーゼとラッカーゼを産生し、腐朽初期からリグニンの主要結合である β -O-4 結合を激しく切断する。本菌は、*C.subvermispora* と同様、腐朽初期に木材中の脂質を分解し、スギ材などの酵素糖化を促進する。

選択的白色腐朽菌 *C. subvermispora* は、メタン発酵の他、木材の酵素糖化・エタノール発酵前処理においても、糖化促進効果を示した。*C. subvermispora* でブナ材チップを8週間腐朽させ、腐朽材を180℃でエタノールとともに加熱し、得られた不溶性パルプ画分をセルラーゼと酵母で併行複発酵すると、エタノール収率が1.6倍増加した。本菌は、さらにオイルパームの空果房 (EFB)、バガス、スギ材の糖化発酵促進効果を示した。

生存圏研究所と山岸らは、イナワラに対して酵素糖化前処理効果が高い白色腐朽菌を幅広くスクリーニングし、ヒラタケより前処理効果が高い菌として、ハタケチャダイゴケ (鳥の巣キノコ) の複数の菌株を見出した (図 3-14) (渡辺, 2012; Yamagishi *et al.*, 2013)。全国各地から分離したハタケチャダイゴケの培養試験を行い、前処理効果とセルラーゼやキシラナーゼ活性が負の相関をもつことを明らかにした (渡辺, 2012; Yamagishi *et al.*, 2013)。酵素糖化率とリグニン分解酵素活性との相関は低く、前処理のためには、多糖加水分解酵素活性が低いことが重要な因子であることが明らかとなった。菌処理の実用化では完全滅菌条件下での培養はコスト面において不利であるため、白色腐朽菌のスクリーニングは120℃、80℃、60℃でそれぞれ15分滅菌する滅菌条件で比較検討した。ハタケチャダイゴケは、草食動物のフン中で胞子の発芽と菌糸成長を行うため雑菌に強いと予想された。実際、ハタケチャダイゴケにおいてはどの菌株も、60℃、15分の弱い殺菌処理を施した稲わらを速やかに腐朽したが、糖化促進効果は菌株間で大きな違いが認められた。選抜した株は、60℃で15分間滅菌した稲わらの酵素糖化率を25日間の固体培養により5.2倍上昇させた (Amirta *et al.*, 2006)。また、水蒸気を75秒吹きかける簡易蒸気殺菌したイナワラの35日間の腐朽処理により、イナワラ重量当たりの酵素糖化による還元糖収量は50%、多糖 (ホロセルロース) 当たりの還元糖収量は70%を超えた。さらに、ハタケチャダイゴケの機能強化のための遺伝子導入系も開発した (Yamagishi *et al.*, 2011)。

白色腐朽菌をバイオマス変換に利用するための最大の課題は、培養にかかるコストである。安価なエネルギー生産を目的として、完全滅菌系で温度管理した条件で培養することは非現実的である。燃

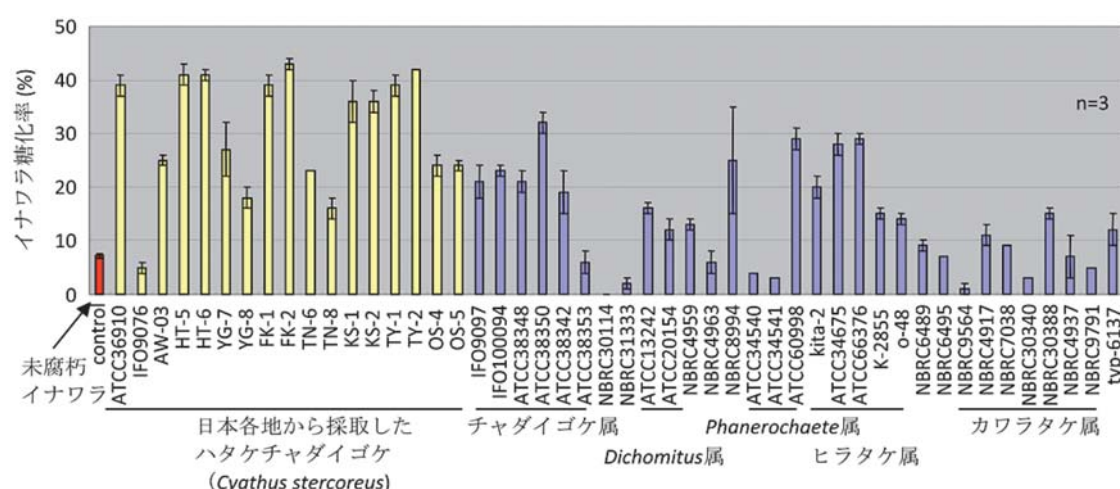


図 3-14：滅菌処理でイナワラ酵素糖化を促進する白色腐朽菌の選抜 (渡辺, 2012; Yamagishi *et al.*, 2013)
60℃、15分間滅菌処理したイナワラを35日間培養。糖化率 (%) は、腐朽イナワラ重量当たりの酵素糖化により遊離した還元糖量の重量百分率を示す。

料輸送が難しく温度が安定している東南アジアの離島などでは、半屋外に野積みした簡便な装置で白色腐朽菌を大量培養ができれば、リグノセルロースからのエネルギー生産に有用であると期待される。食用キノコを栽培した後の廃菌床を利用する方法もあるが、コストバランスをとるためには、エネルギーのみでなく、酵素、化学品などの高付加価値物の同時生産が必要である。

選択的白色腐朽菌は、酵素から遠く離れた場所でリグニンを分解する。この分解は化学反応とも呼べるものであり、その分解機構の解析は、新しい高効率リグニン分解法の開発につながる。このため、腐朽機構の解析を、遺伝子、酵素、代謝物レベルで進めるとともに、分解に関与するラジカル種を解析した (Nishimura *et al.*, 2012; Watanabe *et al.*, 2010; Ohashi *et al.*, 2011)。

3.4 電磁波の生体影響

3.4.1 現代社会と電磁波

現代社会は、目には見えないが生活環境に電磁波があふれている。高圧送電線、家庭内の電化製品、医療現場、それに携帯電話やその基地局などである。未来社会における人が生活する上で、定常磁場、低周波から高周波に至る多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどることが予想される。放射線と同様に、電磁波環境は目に見えないこともあり、このような背景から、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。ここでは、国内外における電磁波の生体影響研究の現状ならびに世界保健機関 (WHO) をはじめとした国際機関の健康への評価、ならびに新領域開拓研究の成果の一部を紹介する。電磁波影響を科学的に正しく理解することに主眼をおくが、まだ未解明な部分も多く残されている。放射線影響の研究の歴史は長い。しかしながら、低線量の影響評価は未だ結論が出ていないのも事実である。一方、電磁波と健康については、本格的な生体影響研究の歴史は浅い。図 3-15 は周波数別にみた生活環境における電磁波発生源の例を示す。電磁波の生体影響に関する詳細はほかの文献を参照されたい (宮越, 2005; 2008)。

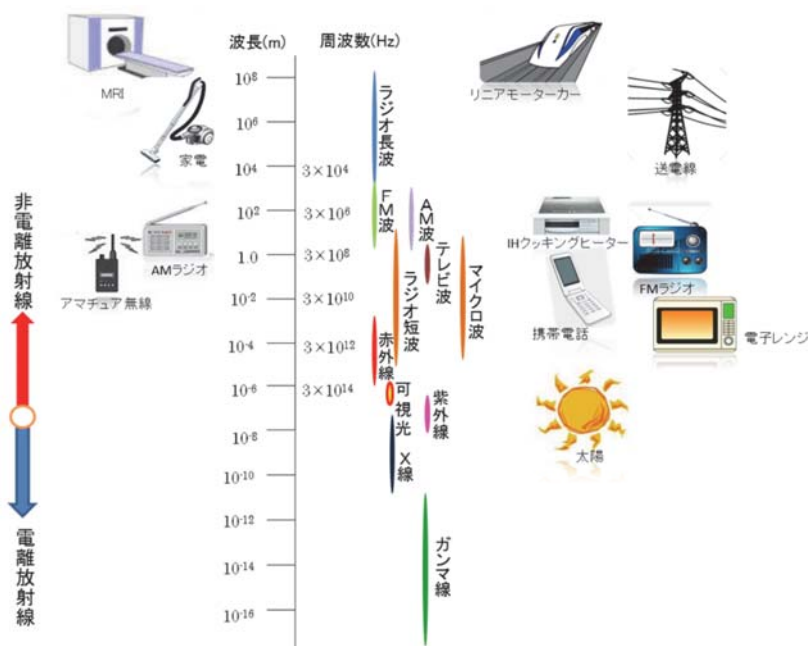


図 3-15：生活環境における周波数別電磁波発生源の例

3.4.2 電磁波問題の背景

1990年代に入ってから、電磁波（電磁界、電磁波とも称されるが、ここでは定常電磁波や低周波電磁波、高周波電波と記述する）曝露の健康への影響について、国際的に活発な議論が行われてきている。我々の生活環境には、家電製品の発生する電磁波をはじめとして、医療現場におけるMRI診断（核磁気共鳴）や電磁波加温治療、また、変電所や送配電線下の交流電磁波、誘導加熱調理器、携帯電話やその基地局からの高周波電波、さらに近未来に実用化が予想される無線送電によるエネルギー伝送など、地球上の自然界に存在する以上の電磁波に曝される機会が増している。

歴史的には、1979年に米国の疫学者が、高圧送電線の近くに住む子供の白血病発生率が高いことを発表したことが始まりである（Wertheimer *et al.*, 1979）。その後、1990年代に入り、送電線からの極低周波電磁波についての疫学研究に加えて、動物や細胞を用いた生物学的研究が活発に行われてきた。これまで、米国やヨーロッパを中心とした疫学調査により、生活環境において0.4 μ T（マイクロテスラ）を超える極低周波電磁波は、発がん影響として、特に小児白血病が約2倍に増加すると報告されている（Ahlbom *et al.*, 2000）。ただ、この結論は、疫学研究における他の要因の関与を全て除外したものでないことを申し添える。その一方、これらの疫学研究結果から、成人や小児の他のがんについては、影響なしと報告されている。極低周波電磁波の細胞や動物レベルの生物学的研究結果では、生活環境レベルでは影響がなく、この数万倍（磁束密度で数ミリテスラ）を超えると影響が出始めるとされている。多くの電磁波生体影響研究に用いられている磁束密度は、居住環境における影響を主眼にしているため、その曝露レベルは非常に低いものである。そのため、細胞や動物に対する顕著な影響が認められないのは当然かも知れない。このことは、よく知られている電離放射線でも、その低線量については、不明な点も多く、現在でも国際的に議論されていることによく似た傾向である。

電磁波生命科学は、その主たる目標の一つとしては、科学的に信頼のおける研究成果から、電磁波の生体影響を正当に評価することにある。その一方、環境レベルをはるかに超えた磁束密度での生体、細胞や高分子重合体などの電磁波応答研究の成果も本分野の将来への発展につながる重要なものである。これらの成果は、電磁波の線量-効果関係に基づいたしきい値の推定を可能とするばかりでなく、生命科学そのものに研究の道具として電磁波を利用すること、さらに応用面として、生命科学的に明らかな電磁波の効果を工学・農学分野や医療・健康面において積極的に活用していこうとする研究も進められている。

3.4.3 電磁波影響の国際動向

[疫学研究]

表3-3に、細胞レベル、動物レベルからヒト個体を対象として、これまで研究が行われてきている電磁波生体影響の主な評価指標をまとめた。疫学研究は、細胞や動物実験に比べて、ヒトのデータという意味で一般社会に対する結果の影響力は大きいものがある。しかしながら、その反面、我々人間はいろんな環境で生活しており、研究の主題となる因子について純粋に調査することは不可能であり、結果を左右しかねない集団の選別方法や他の影響因子（選択バイアスや交絡因子という）が統計的評価を狂わす可能性は排除できない。前述したように、極低周波電磁波の発がん影響を初めて指摘したのは、1979年の疫学研究報告である。その後、国際的な議論が高まる中、1990年代には、欧米で数多くの極低周波電磁波に関する疫学研究が実施された（Moulder *et al.*, 2005; Kheifets *et al.*, 2005）。

2000 年に入って、我が国でも国立環境研究所のとりまとめで、この分野の疫学研究が初めて行われた (Kabuto *et al.*, 2006)。

表 3-3：電磁波生体影響の主な評価指標

研究分類	対象	研究内容
細胞実験研究	細胞	細胞増殖、DNA合成、染色体異常、姉妹染色分体異常、小核形成、DNA鎖切断、遺伝子発現、シグナル伝達、イオンチャネル、突然変異、トランスフォーメーション、細胞分化誘導、細胞周期、アポトーシス、免疫応答など
動物実験研究	実験動物 (ラット、マウスなど)	発がん(リンパ腫、白血病、脳腫瘍、皮膚がん、乳腺腫瘍、肝臓がんなど)、生殖や発育(着床率、胎仔体重、奇形発生など)、行動異常、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能、血液脳関門(BBB)など
疫学研究	ヒト	発がんやがん死亡(脳腫瘍、小児および成人白血病、乳がん、メラノーマ、リンパ腫など)、生殖能力、自然流産、アルツハイマー症など
人体影響	ヒト	心理的・生理的影響(疲労、頭痛、不安感、睡眠不足、脳波、心電図、記憶力など)、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能など

極低周波電磁波（正確には ELF 磁場）と小児白血病の発生について、9 カ国のプール分析結果は、0.4 μ T 未満（ほぼ 99.2% の家庭が対象となる）の生活環境に住んでいる子供の極低周波磁場曝露と白血病発生リスクとの間には関連性がなく、「影響なし」と考えられる。しかしながら、居住環境の低周波磁場レベルが 0.4 μ T 以上の場合（約 0.8% の子供が対象となる）、白血病の相対リスクがほぼ 2 倍に増加し、これら疫学研究のプール分析の結果では、統計的な有意性があることを示している。なお、小児の他のがんや成人のがんに関する疫学研究結果からは、低周波電磁波の「影響はない（関連性が認められない）」と考えられている。疫学研究での低周波磁場による小児白血病増加という結果について、これまでのところその生物学的な作用機構は明らかではなく、また、前述した、疫学研究結果の精度を下げる選択バイアスや交絡因子の可能性も完全には否定できないと考えられている。

一方、携帯電話を対象とした高周波電波に関する疫学研究も国際的に活発に行われている。

WHO の下部組織、国際がん研究機関 (IARC) がとりまとめる形で、日本、イギリス、スウェーデンなど 13 ヶ国（ただし米国は不参加）が参加して「The INTERPHONE Study」として行われた。疾患対象として、聴神経腫瘍ならびに脳腫瘍が選ばれ、症例－対照研究 (case-control study) で実施された。これらの一部の研究は IARC でまとめられる前に、個別に発表され、「影響あり」とする報告では、例えば、10 年以内の携帯電話使用では影響は認められないが、10 年以上の長期使用で、わずかにリスクの増加が認められている (Schoemaker *et al.*, 2005; Cardis *et al.*, 2011)。IARC では参加国全ての研究をとりまとめ、本国際共同研究の最終結論の概要を昨年 (2010 年) 5 月にプレスリリースの形で発表した (WHO, 2010)。結果をまとめると、

- ① 定常的携帯電話の使用者の神経膠腫と髄膜腫でオッズ比 (OR) がやや低下した。これには、参加者のバイアスか、研究方法の限界が影響している可能性を示唆している。
- ② 10 年以上長期使用者についての、OR の上昇は観察されていない。
- ③ 1640 時間以上の累積長時間通話者で、神経膠腫の OR が 1.40 (95% 信頼区間：1.03 ～ 1.89)、髄

膜腫の OR が 1.15 (95% 信頼区間: 0.81 ~ 1.62) であった。

結論として「10 年以上の長期使用者に対する携帯電話使用による脳腫瘍（神経膠腫と髄膜腫）の上昇はないと考えられる。観察された OR の低下や、累積長時間通話者の OR の上昇、その他、携帯使用側頭葉での神経膠腫の上昇など、因果関係の正確な解釈は難しい。」と述べている。

その他、多くの疫学研究で、発がん増加を示す証拠は見つかっていない。しかし、スウェーデンでの疫学プール分析に見られるように、2000 時間を超える通話者は、神経膠腫が 3 倍になるという報告 (Hardell *et al.*, 2011)、我が国の疫学研究で、1 日 20 分以上の通話を超える場合に、聴神経腫瘍の増加を示唆する報告 (Sato *et al.*, 2011) がある。なお、職業的なマイクロ波ばく露と脳腫瘍、白血病、リンパ腫、などのがん、ラジオやテレビの電波塔、基地局などからの送信電波と発がん性については、明確な証拠は見つかっていない。子供の携帯電話使用と発がんに関する疫学研究は、Cefalo (デンマーク等 3 か国が参加) と MobiKids (日本を含む 14 か国が参加) の 2 つのプロジェクトが行われており、Cefalo のプロジェクトは研究が終了し (Aydin *et al.*, 2011)、MobiKids 研究は、現在進行中である (MobiKids, 2013)。

[動物実験]

極低周波の電磁波生体影響評価として、マウスやラットを用いた動物実験での検証が 1990 年代を中心として、数多く進められてきた。多くの動物実験研究では、そのほとんどが発がんへの影響を検討するものであったが、その他、生殖に関するもの（胎仔の発育や催奇形性について）、神経系に関するもの（行動や感覚機能について）や免疫機能に関するものも行われてきた。もし、極低周波電磁波曝露が発がん過程に影響を及ぼしているとするれば、正常な細胞をがん化細胞へと変化させるのか（イニシエーション）、または、イニシエーションを受けた細胞が極低周波電磁波曝露により更に悪性腫瘍形成を促進させるのか（プロモーション）、大きな議論であった。検討された極低周波電磁波の磁束密度は数 μ T から 1mT まで幅広く行われ、結果として、ごく一部の研究において、極低周波電磁波曝露により白血病や乳腺腫瘍の増加を認める報告はあったが、ほとんどの研究では、発がん影響はないという陰性結果であった (IARC, 2002)。発がん以外の研究（生殖、行動、免疫など）に関する結果も同様で、ほとんどの報告がいわゆる「影響なし」であった。したがって、これまで行われてきた動物実験からの検証において、明確な極低周波電磁波の影響は見られておらず、「影響あり」とする十分な証拠はない。

高周波については、1997 年にトランスジェニックマウスを用いて、電波の曝露により白血病が増加するという報告があり (Repacholi *et al.*, 1997)、2000 年代に入り高周波電波の発がんへの影響評価も活発に行われている。欧米や我が国を中心として動物実験研究が推進されてきている。これまでの研究報告からは、そのほとんどの結果は、動物の発がんをはじめ、体重や寿命に関して電波の影響を認めていない (News, 2011)。ただ、複合的発がん研究（化学物質とマイクロ波）では、発がんの増加が複数報告されている (Szmigielski *et al.*, 1982; Tillmann *et al.*, 2010)。

[細胞実験]

特に、細胞（分子・遺伝子レベルを含む）を対象とした電磁波影響研究は、世界各国で活発に行われてきている。数多くの論文発表があり、詳細は関連資料を参照されたい (宮越, 2005; 2008)。研究の多くは発がんとの関連性から、細胞の遺伝毒性 (DNA 損傷、染色体異常、突然変異など) や機能的変化としての遺伝子発現（がん遺伝子、熱ショックタンパクを主体としたストレスタンパクなど）

に対する電磁波の影響検証が行われている。生活環境レベル（おおむね1マイクロテスラ以下）の低周波電磁波については、初期の研究で陽性と報告された研究結果も、その後の研究で再現性に乏しく、「影響なし」または検出ができないほど極めて小さいものと考えられている。

携帯電話や基地局から発生する高周波電波についても、2000年以降、EU、米国、日本、韓国などで多くの研究が実施されてきた。これまでの研究成果から、細胞の遺伝毒性については、電波による熱効果のないレベルでは、多くの報告は高周波の影響に否定的である。一方、細胞の代謝機能による産物の一つとして熱ショックタンパクに注目した研究が行われている。電波による非熱的な作用としてある種の熱ショックタンパク（たとえばHSP-27）産生が増加するという報告がある。このことは携帯電話や基地局からの電波の生体影響を肯定的に捉える研究結果として、再現実験が行われている。この結果は、多くの研究室で確認されたものでなく、また、否定的な報告もあり、現時点では、科学的に明確な結論は出されていない。

〔国際機関の評価〕

電磁波と健康の議論が高まる中、WHOは、1996年に国際電磁界プロジェクト（International EMF Project）を立ち上げた。以来、本プロジェクトへの参加国が増え、60カ国に達している。すでに、極低周波電磁波（ELF）については、発がん性評価をIARCで2001年に、発がん以外の健康影響評価も含めたタスク会議を2006年にWHOで開催した。それぞれの刊行物として、モノグラフ80巻号（IARC, 2002）ならびに環境保健クライテリア（WHO, 2008）がある。マイクロ波については、2011年5月24－31日に、IARCで発がん性評価会議が開催された。

以下にその概要を紹介する。特記すべきことは、IARCの発がん性評価は、発がんの定性的性質を評価するものであって、定量化するものではない。この点をよく理解しないと、一般の人たちに誤解を与えかねない報道になることがたびたびある。評価会議に参加した15カ国30名のワーキンググループメンバーの結論は以下のとおりである。

- ① 疫学研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、上述した一部の“陽性結果”を判断材料の基礎として、ワーキンググループは、「限定的証拠（Limited evidence in humans）」と評価した。
- ② 実験動物研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、陰性の結果が多いものの、上述した一部の複合的発がん研究の“陽性結果”は発がんの証拠として認められ、ワーキンググループは、「限定的証拠（Limited evidence in experimental animals）」と評価した。
- ③ 細胞研究の評価：一部の論文で“陽性”を示す結果があるものの、ワーキンググループの総合的判断として、「発がんメカニズムについては、弱い証拠（Weak mechanistic evidence）」として評価した。
- ④ 総合評価：ヒトの疫学研究および実験動物の発がん研究について、それぞれ「限定的証拠」と評価した。細胞研究などの「メカニズムとしての弱い証拠」も含めて、ワーキンググループのマイクロ波発がん性総合評価は、「グループ2B（Possibly carcinogenic to humans）」（発がん性があるかもしれない）と決定した。

表3-4はIARCによるこれまでの発がん性分類例を示す。今回のマイクロ波に関する「2B」の評価は、あくまで、携帯電話からの電磁波と脳腫瘍との関係を「限定的な証拠」として認めたものである。この結果は速報として、その概要が報告されている（News, 2011）。詳細は、モノグラフ102巻として、すでに電子版は出版された（IARC, 2014）。また、WHOはIARCのマイクロ波発がん性評価を受けて、

発がん以外の健康影響を含めた総合評価、環境保健クライテリア（Environmental Health Criteria）策定作業を2014年に予定している。

表 3-4：IARC による発がん性分類の例

発がん性の分類及び分類基準	既存分類結果 [952 例]
グループ 1：発がん性がある (Carcinogenic to humans)	電離放射線、紫外線（100 ～ 400nm）、アスベスト、カドミウムおよびカドミウム化合物、ホルムアルデヒド、太陽光曝露、タバコの喫煙、アルコール飲料、コールタール、ディーゼルエンジンの排気ガス、受動的喫煙環境、ベンゾピレン、紫外線を用いた日焼け用ランプ、PM2.5（中国の一部都市の空間微粒子環境） [他を含む 109 例]
グループ 2A：おそらく発がん性がある (Probably carcinogenic to humans)	アクリルアミド、アドリアマイシン、シスプラチン、メタンスルホン酸メチル、ポリ塩化ビフェニル、木材などのバイオマス燃料の室内燃焼 [他を含む 65 例]
グループ 2B：発がん性があるかもしれない (Possibly Carcinogenic to humans)	極低周波（ELF）磁界、高周波（RF）電磁波、アセトアルデヒド、AF-2、プレオマイシン、クロロホルム、ダウノマイシン、鉛、メルファラン、メチル水銀化合物、マイトマイシン C、フェノバルビタール、コーヒー、漬物、ガソリン、ベンズアントラセン [他を含む 275 例]
グループ 3：発がん性を分類できない (Unclassifiable as to carcinogenicity to humans)	静磁界、静電界、極低周波電界、アクチノマイシン D、アンピシリン、アントラセン、ベンゾ（e）ピレン、コレステロール、ジアゼパム、蛍光灯、エチレン、6-メルカプトプリン、水銀、塩化メチル、フェノール、トルエン、キシレン、お茶 [他を含む 504 例]
グループ 4：おそらく発がん性はない (Probably not carcinogenic to humans)	カプロラクタム（ナイロンの原料） [1 例]

3.4.4 研究成果

これまでの研究成果は、論文として発表してきた（Miyakoshi, 2005; Miyakoshi *et al.*, 2005; Miyakoshi, 2006a; Miyakoshi, 2006b; Miyakoshi *et al.*, 2007; Koyama *et al.*, 2008; Rongen *et al.*, 2009; Narita *et al.*, 2011; Miyakoshi *et al.*, 2012; Sakurai *et al.*, 2012; Mizuno *et al.*, 2012; Miyakoshi, 2013; Mizuno *et al.*, 2014）。以下は現在進行中の研究について、その概要を紹介する。

[共鳴送電下における生体影響評価のためのばく露装置の開発]

近年、新しい無線電力伝送技術として、電磁共鳴方式が注目を集めている。この方式では、従来から実用化されている電磁誘導方式と異なり、送電側と受電側のコイルの共振周波数を一致させることで、数メートルの距離を高効率で伝送することが可能であり、早期の実用化が期待されている。しかしながら、共鳴送電下における生体影響の可能性について実験的に評価した例はない。

本研究では、共鳴送電下における生体影響評価を細胞実験により実施するために必要となる細胞実

験用ばく露装置の開発に取り組んだ。開発したばく露装置は、12.6MHz の共振周波数において 72.4% の伝送効率を有するとともに、細胞ばく露位置において、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）の定めるガイドラインで示される磁界強度 80A/m を実現している。CO₂ インキュベータの内部に構築したコイル類の外観を図 3-16 に示す。

開発したばく露装置で培養したサンプルにおける増殖能カーブと、一般の CO₂ インキュベータにおいて培養したサンプルにおける増殖能カーブは非常によく一致しており、この結果から、開発したば

く露装置は細胞培養に対して適切な条件を満たしている。細胞周期の評価においても、開発したばく露装置および CO₂ インキュベータで培養した細胞の細胞周期に差異は見られなかったことから、開発したばく露装置は細胞培養のために適切な条件を有している。今後は開発したばく露装置を用いて、共鳴送電下において細胞の発がん性に関する遺伝毒性や細胞機能を指標とした評価を実施することにより、共鳴送電下における生体影響の可能性を明らかにしていく。

[免疫細胞における高周波電波ばく露の影響評価]

生体の恒常性を保つために、我々の体には、生体内に侵入した異物を生体外にする、免疫と呼ばれる防御システムが存在する。この免疫力が低下すると、人は感染を引き起こしやすくなるなど、健康を保てなくなる。本研究では、周波数 2.45GHz のマイクロ波に対する細胞学的影響評価の一環として、1 ならびに 10W/kg の SAR で電波ばく露を行い、免疫細胞の基本的な機能であるサイトカイン分泌特性に対して ELISA 法を実施し、電波が細胞の免疫機能に影響を与えないかどうかについて検討する。

電波ばく露条件は、周波数：2.45GHz、SAR 1、10W/kg、4 時間ばく露で行った。2 種類の白血球由来細胞（U937、Jurkat）をサイトカイン分泌に関する免疫機能評価試験に用いた。サイトカイン定量は、ELISA 法を用いた。

U937 細胞から分泌された IL-1 β と IL-6、および Jurkat 細胞から分泌された IL-2 の分泌量を図 3-17 ～図 3-22 に示す。分泌量は、細胞数で標準化して示した。

U937 細胞及び、Jurkat 細胞を用いて、2.45GHz 電波の 4 時間連続ばく露（SAR：1、10W/kg）を行い、ELISA 法によって免疫細胞から産生される各種サイトカイン量への影響を検討した。これらの条件での、電波ばく露によって、いずれの細胞から分泌されたサイトカインにおいても、統計学上有意な差は見られなかった。本研究結果からは、細胞のサイトカイン産生を指標とした電波ばく露の影響は観察されなかったが、今後、今回検討しなかったサイトカインや貪食能など、さらに細胞の免疫機能への影響評価を進める予定である。

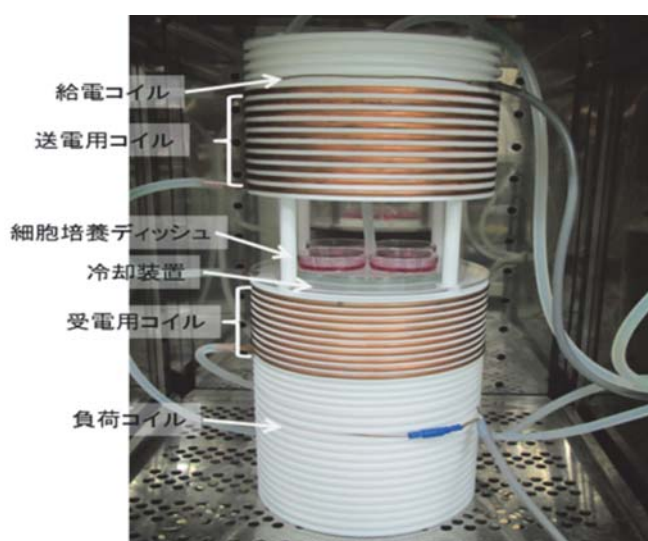


図 3-16：CO₂ インキュベータ内に構築した送受電コイル類

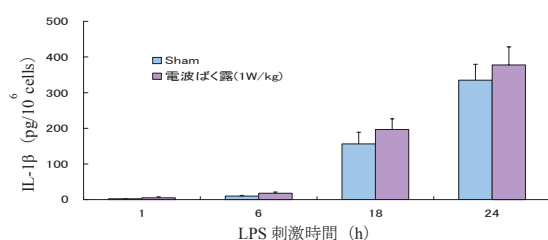


図3-17：U937 細胞による IL-1 β 分泌量
(1W/kg 4時間ばく露)

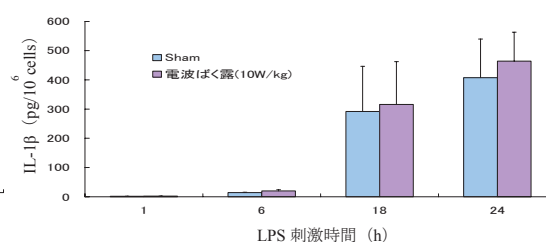


図3-18：U937 細胞による IL-1 β 分泌量
(10W/kg 4時間ばく露)

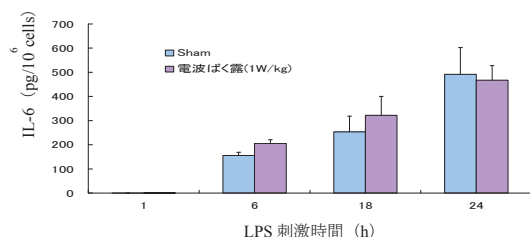


図3-19：細胞による IL-6 分泌量

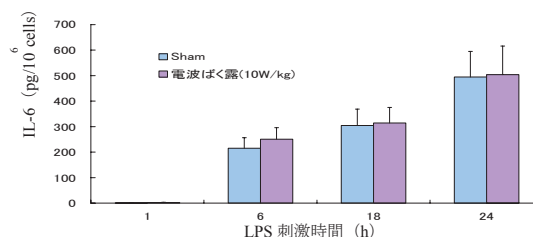


図3-20：U937細胞による IL-6 分泌量
(10W/kg 4時間ばく露)

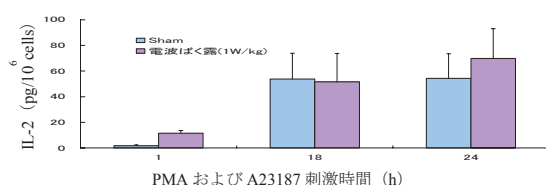


図3-21：Jurkat細胞による IL-2 分泌量
(1W/kg 4時間ばく露)

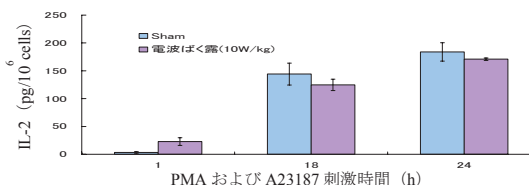


図3-22：Jurkat 細胞による IL-2 分泌量
(10W/kg 4時間ばく露)

3.4.5 おわりに

携帯電話やコンピュータのワイヤレスバッテリー、電気自動車の無線給電など、電磁誘導を用いた非接触エネルギー伝送技術をはじめとして、生存圏における近い将来の電磁波利用は高まるばかりである。このように増加の一途をたどる将来の電磁波環境を考えると、未解明な部分については、生命科学の先端技術を駆使して、さらに研究を推進してゆく必要があると考える。

3.5 太陽エネルギーを利用した生存圏のあり方

これらのように、本研究ミッションは、現在の太陽エネルギー利用の利点欠点を踏まえた上で、さらに太陽エネルギー変換・利用手法を多角的に研究し、将来の循環型社会に有用なエネルギーのベストミックスを目指し、化石資源に依存した社会からの脱却をはかることにある。原子力発電に頼る現在の日本の将来エネルギー供給構想は、現状で考えるエネルギーのベストミックスという観点では優位であるが、数十年先を考えた場合、逆にエネルギー源が単一化し、様々な問題が生じる。将来の循環型社会を支えるエネルギー源としては様々なものがあるが、本研究ミッションでは宇宙太陽発電所 SPS の研究と、光合成による炭素固定化物である木質系バイオマスのエネルギー・化学資源変換を推進する。

地球環境は人間だけのものではない。人間活動が地球上に存在するすべての生物・植物の生存を脅かすことがあってはならない。生物はそのすべてが有機的に複雑に関係し合い、単独では絶対に存在できない。人間は科学技術がなければ生存できない特殊な生物であるが、同時に他のすべての生物・植物との共生の生存圏でなければ生存できないのである。ここにも矛盾した生物である人間の特徴がよくあらわれている。「自然との共生」と「科学技術文明」、どちらかに偏る生存圏は真の生存圏ではない。生存のための科学技術を駆使して、太陽エネルギーという自然をすべての生物と共有する未来を作らなければならない。地球上での生物進化を考えると、植物が陸上に現れてからおよそ5億年と言われているが、植物は現在に至るまで地球上に存在し続けている。その蓄積量は、少なくとも1兆トンにもおよぶ莫大な量であり、このような量が、現在に至るまでの5億年間否定されずに生き残ったことは、一方で恐竜のように希少種としてすら残ることができずに絶滅した生物がいたことを考えると、ある種の奇跡である。この持続的発展を支えたのは、光合成能力とともに、植物を構成する重要な化学成分であるセルロースとリグニンであろう。持続的発展を具現化した生物に、人間が学ぶべき点が多いとするならば、セルロース及びリグニンとその複合体である植物バイオマス、さらに生物一般由来の広義のバイオマスには、まだ学ぶ点が多い。

なぜこれらの成分が持続的発展を支えることができたのか？ 一つはこれらが地球という系の中を、ある程度長い（ヒトの一生に相当するスケールの）緩和時間で循環することができたということが挙げられる。この循環プロセスを構成する、細菌類・菌類から動植物にいたる様々な生物によるバイオマス生合成および生分解を、ミクロ・マクロの両面で詳細に解明することで、持続可能な社会を構築するための科学的・哲学的指針を見出すことが、生存圏科学の一つの使命である。

さらに「生存圏を測る・診る」ことにより生存圏の現状を把握し（第2章）、太陽エネルギー利用の推進に役立てる。太陽エネルギーのソースは宇宙環境にあるため、「宇宙に広がる人類の生存圏である宇宙環境の理解と利用」を進めることで、同様に太陽エネルギー利用、特に宇宙太陽発電SPSの推進につながる（第5章）。「持続的生存圏と木質資源」の有効利用は植物バイオマスの有用物質への変換のために欠かせない知見を共有できる（第4章）。持続的生存圏のためにはそれぞれの研究が有機的に連携しつつ、研究を発展させなければならない。

[参考文献]

- 安部琢哉 (1989) シロアリの生態, 東京大学出版会
- Ahlbom A, *et al.* (2000) *Br J Cancer*, **83**, 692-698
- Amirta R. *et al.* (2006) *J. Biotechnol.*, **123**, 71-77.
- 浅田泰男ら (2002) 微生物利用の大展開 (今中忠行監修) エヌ・ティー・エス p.1107
- Aydin D, *et al.* (2011) *J. Natl Cancer Inst*, **103**, 1264-1276
- Cardis E, *et al.* (2011) *Occup Env Med*, **68**, 631-40
- Hardell L, *et al.* (2011) *Int J Oncol*, **38**, 1465-1474
- 林倫 (2012) 第3回日本電磁波エネルギー応用学会講演会資料
- 本郷裕一 (2012) シロアリの事典 (吉村剛他編) 海青社 p.37
- IARC (2002) IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. **80**, Part 1
- IARC (2014) IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Vol. **102**
- Inoue, J.-I. *et al.* (2007) *Eukaryot Cell* **6**, 1925-1932
- 伊藤雅一 (2012) 太陽エネルギー **38**, (1) 33-39
- Kabuto M, *et al.* (2006) *Int J Cancer*, **119**, 643-650
- Kanai, K. *et al.* (1982) *Wood Res.* No. **68**, 47-57
- Kawaguchi, S. (2006) *Sustainable Humansphere* No. **2**, 36
- Kawaguchi, S. *et al.* (2005) *Proc. 6th Int. Wood Sci. Symp.* 29-31
- Kawamura, S. *et al.* (2001) *Wood Res.*, No. **88**, 54-55
- Kheifets L, *et al.* (2005) *Bioelectromagnetics Supplement*, **7**, S51-S59
- 小西博雄 (2012) 太陽エネルギー **38**, (1) 15-20
- Koyama, S. *et al.* (2008) *Int. J. Radiat. Biol.*, **84** 53-59
- Miyakoshi, J. (2005) *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, **87**, 213-223
- Miyakoshi, J. *et al.* (2005) *Bioelectromagnetics*, **26**, 251-257
- Miyakoshi, J. (2006a) *Journal of Dermatological Science Supplement*, **2**, (Suppl. 1) S23-S30
- Miyakoshi, J. (2006b) *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **7**, 305-307
- Miyakoshi, J., *et al.* (2007) *Bioelectromagnetics*, **28** 529-537
- Miyakoshi, J., *et al.* (2012) *SANSAI*, No. **6** 53-60
- Miyakoshi, J. (2013) *Proceedings of the IEEE*, Vol. **101** (6), June
- 宮越順二 (2005) (編者) 電磁波生命科学. 京都大学学術出版会
- 宮越順二 (2008) アイソトープニュース, No. **651**, 10-17
- Mizuno, K. *et al.* (2012) *IMWS-IWPT*, 79-82.
- Mizuno, K. *et al.* (2014) *Bioelectromagnetics* (inpress)
- 三谷友彦, 渡辺隆司 (2013) マイクロ波プロセス技術Ⅱ, シーエムシー出版, 262-272
- MobiKids Study (FP7/2007-2013) The European Community's Seventh Framework Programme, <http://www.mbkds.com/>
- Moulder J.E. *et al.* (2005) *Int. J. Radiat. Biol.*, **81**, 189-203
- Narita, E. *et al.* (2011) *IMWS-IWPT*, 215-218
- News (2011) *The Lancet Oncology*, Volume **12**, Issue 7, Pages 624- 626, online June 22
- Nishimura, H. *et al.* (2012) *Org. Biomol. Chem.*, **10**, 6432-6442.
- 西尾尚道、中島田豊 (2002) 微生物利用の大展開 (今中忠行監修) エヌ・ティー・エス p.1114
- Non-Ionizing Radiation, Part II, <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol102/index>.
- Ohashi, Y., *et al.* (2011) *Org. Biomol. Chem.*, **9**, 2481-2491.
- Ohkuma, M. (2003) *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **61**, 1-9
- 岡野利明 (2004) 太陽エネルギー **30**, (4) 8-9
- 親里直彦 (2007) 太陽エネルギー **33**, (1) 25-28
- Repacholi, M.H. *et al.* (1997) *Radiat Res*, **147**, 631-640
- Rongen, E. V. *et al.* (2009) *J. Toxicol. Environ. Health*, Vol. **12** (8)
- Sakurai, T. *et al.* (2012) *Bioelectromagnetics*, Dec; **33** (8) 662-669
- Sato, Y, *et al.* (2011) *Bioelectromagnetics*, **32**, 85-93
- Schoemaker M.J. *et al.* (2005) *Br J Cancer*, **93**, 842-848
- Shinohara, N. (2011) *IEEE Microwave Magazine*, **12** (7) , S64
- Shinohara, N. *et al.* (2013) *Proc of 3rd Int. Electric Drives Production Conf. (E|DPC)* , 398
- Shinohara, N. *et al.* (2014) *Wireless Power Transfer*, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc.
- 篠原真毅 (2012) 宇宙太陽発電 (知識の森シリーズ) (篠原真毅編), オーム社
- 篠原真毅, 木村周平 (2012) 人間圏の再構築 - 熱帯社会の潜在力 - 講座生存基盤論第3巻 (速水洋子他編) 京都大学学術出版会, p.275

- 篠原真毅, 小紫公也 (2013) ワイヤレス給電技術—電磁誘導・共鳴送電からマイクロ波送電まで (設計技術シリーズ), 科学技術出版
- Sugimoto, A. *et al.* (1998) *Ecol. Res.* **13**, 241-257
- Szmigielski, S. *et al.* (1982) *Bioelectromagnetics* **3**, 179-191
- Taguchi, F. *et al.* (1993) *Can. J. Microbiol.* **39**, 726-723
- 高井晋理ら (2007) 第 59 回日本生物工学会要旨集
- Tillmann, T. *et al.* (2010) *Int. J. Radiat. Biol.*, **86**, 529-541
- 徳田岳 (2012) シロアリの事典 (吉村剛他編) 海青社, p.99
- 坪田潤、渡辺隆司 (2009) 第二世代バイオ燃料の開発と応用展開, シーエムシー出版, p.209.
- Tsunoda, K. *et al.* (1993a) *Wood Res.* No.**79**, 34-40
- Tsunoda, T. *et al.* (1993b) *Jpn. J. Environ. Entomol. Zool.* **5**, 166-174
- 渡辺隆司, 築瀬英司 (2010) 次世代バイオエタノール生産の技術革新と事業展開, フロンティア出版 287-294
- 渡辺隆司 (2010) セルロース系バイオエタノール製造技術—食料クライシス回避のために—, エス・ティー・エス, p.135.
- 渡辺隆司 (2012) バイオサイエンスとインダストリー, **70**, 15-22.
- Watanabe, T. *et al.* (2010) *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **87**, 215-224.
- Wertheimer, N. *et al.* (1979) *Am J Epidemiol*, **109**, 273-284
- WHO (2010) Interphone study reports on mobile phone use and brain cancer risk press Release N° 200, http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf
- WHO (2008) Extremely Low Frequency Fields-Environmental Health Criteria N° 238
- Yamagishi K. *et al.* (2011) *Biores. Technol.* **102**, 6937-6943.
- Yamagishi K. *et al.* (2013) *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **77**, 771-775.
- Yamagiwa, Y. and M. Nagatomo (1992) *Space Power* **11** (2), 121
- Yoshimura, T. *et al.* (1995) *Mokuzai Gakkaishi* **41**, 206-210
- 吉村剛ら (2012) シロアリの事典 (吉村剛他編) 海青社, p.329
- 湯本登 (2008) 太陽エネルギー **34** (5), 9-12
- Zimmerman, P. R. *et al.* (1982) *Science* **218**, 563-565



第4章 木質資源

4.1 木質資源と生存圏の科学

4.1.1 生存圏と森林

森林圏は生存圏において陸域生態系を保持する重要な構成要素であり、植物、動物をはじめ、菌類・細菌などの微生物を含む生物の生命活動の場である。また、大気圏との間で大気・水循環を担い、生活圏にとっては木質資源 / エネルギーの供給の場となっている。

人類は、農業革命や産業革命を経て生産手段を発達させ、周囲の生態ならびに自然環境を改変することによって人間圏を拡大してきたものの、基本的な生存基盤を森林を含めた生態系に大きく依存しているといえる。しかし、人間圏の成立拡大に伴い、陸域生態系の重要な基盤である森林圏は、農牧草地へと土地利用の転換がなされ、資源・エネルギーとして樹木が伐採された結果、一貫して減少が続いている。この過程で、森林圏への人間の働きかけが過度になり生態系への影響や生物多様性の減少が深刻になっている。産業革命以後は化石資源の採取・利用を通じた環境への影響が増大し、地球温暖化、大気汚染などの自然環境の劣化も顕在化している。FAO (国際連合食糧農業機関) の直近のデータによると、2010 年の世界の森林面積は 40 億 ha を少し上回っており、依然として陸域の 30% を占めるものの、今なお年間 520 万 ha (2000-2010 年) の森林が減少している (FAO, 2014)。とりわけ、南米、アフリカ、東南アジア等の元来バイオマス蓄積の大きい熱帯雨林を有する国での減少が目立ち、東南アジア諸国の中ではインドネシアの減少が著しい。

このため森林の消滅 (Deforestation) を防ぎ、荒廃地の植林 (Afforestation) によって森林を再生することが緊急の課題になっている。現在、世界の人工林面積は年平均で 500 万 ha (2005-2010 年) の割合で増加しつつあるものの、まだ地球上の森林面積の 7% (2.64 億 ha) に過ぎない。森林再生の鍵は積極的な植林 (とくに産業造林) にある。人間圏からの働きかけや管理が可能な経済林を増やすことが森林再生に対して直接的なインセンティブを与え、人口爆発に伴う木材資源・エネルギーの需要を賄うことを可能にするからである。またこのことは現存する原生 (保存) 林や保全林を維持するための実際的な方策でもある。熱帯域の大規模産業造林には、解決すべき技術的、環境的、また社会的な課題があるものの、経済と環境問題の折り合いを図る近道であり、生態系や地球環境に調和する人間圏のあり方を提示することが求められている。

4.1.2 農林業の特徴

生物圏を特徴づける最も大きな事象は「再生産 (Reproduction)」であり、持続、循環的なサイクルを維持していることである。生物圏のもう一つの特色は炭素を有機物として貯留し、その炭素や水などの循環による相互作用を通じて地球圏と人間圏に繋がっていることである。生物圏の再生産可能な有機物の総量をバイオマスと呼んでいる。化石資源もまた太古において生物が生産、蓄積した有機物ではあるが、地球圏に在り、もはや再生産が効かないのでバイオマスには勘定しない。地球上のバイ

オマスの総量は1兆8000億tと見積もられている。このうち森林バイオマスの蓄積は1兆6500億tに達し、総量の90%以上を占め、陸域最大の蓄積をもっている（佐々木ら, 2007）。

植物は有機物生産の基盤をなしているのも、その意味で生物圏への人間の働きかけによって植物生産をする農業と林業は人間の営みの中で生態系のエントロピーを減少させ得る数少ない生産業と言える。しかし、農業、とくに近代農法では農薬、化学肥料や耕作機械によるエネルギーの投入量が比較的大きくなっている。これに対して林業の場合は、例えば我が国における林業施業のデータをみると、下草刈り、枝打ち、除伐などの保育作業における環境負荷量はきわめて小さく、伐倒から集材、造材、運材にいたる伐採作業と作業路開設にともなう環境負荷量が90%以上を占める。原木丸太1m³の生産に要する消費エネルギー量を炭素換算しても炭素排出量はわずか0.005mgであり、原木丸太に吸収・蓄積される炭素量の1～2%に過ぎない（一重ら, 2013）。人為的なエネルギー投入量が小さく、また有機物を多量に蓄積できる点が林業の最も大きな特長である。持続型社会はこのように太陽エネルギーを効率よく利用し、大気中の炭素を吸収・蓄積して生態系のエントロピーを小さくする「生産業」を基盤にすることによって初めて構築可能になる。他のいわゆる製造業、ものづくり産業と呼ばれる産業、例えば自動車産業や建設業などの工業は系のエントロピーを大きく増大させ、炭素の排出が著しい点からは（炭素）消費産業と呼ぶべきものである。

4.1.3 HWP と木材利用：炭素貯留庫としての重要性

地球温暖化に関して、大きな可能性を持つ二酸化炭素排出削減技術の一つとして、HWP（Harvested Wood Products: 伐採木材）が挙げられる。HWP とは、伐採して森林の外に出したすべての木質資源のことで、木材製品と考えて良い（主に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や国連気候変動枠組み条約（UNFCCC）での用語）。HWP に含まれる炭素量、すなわち HWP 炭素貯留量は、一定ではなく、世界で年間1億2000万t-C増加していて、さらに増加量は増え続けている。HWP の炭素についてはそれが貯留庫に留まる期間、すなわち、生産から廃棄まで、木材が利用される期間が問題となる。ある年に生産された HWP 炭素が貯留庫に留まる量は、年が経つにしたがって徐々に減少し、やがて0になる。これは HWP の基本的な性格であり、貯留効果は永続的なものではない。しかし、炭素を空气中に排出せず、貯留庫にできるだけ長く、例えば200年間留めておくことができれば、その間に、これまで消失した熱帯林を再生させることができるであろうし、本質的な解決策を見出すための時間的猶予もできよう。HWP 炭素貯留庫の重要性はここにある。HWP 炭素の減少の仕方は各種想定可能であるが、最も単純な指数関数的な減少曲線に従うとする。HWP 炭素は毎年生産されるので、ある年の炭素貯留量はそれ以前の各年の指数関数の重ね合わせになり、ダーバン会合（LULUCF 決議2/CMP.7）で定められた以下の算定式が得られる。

$$C(i+1)=e^{-k} \cdot C(i)+\frac{(1-e^{-k})}{k} \cdot \text{Inflow}(i)$$

（IPCC2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory, Ch.12.2 Eq12.1）

ここで、C (i): i 年の HWP 炭素貯留量（C (1900) =0.0）、Inflow (i): HWP 炭素貯留庫への i 年の流入量、k: 減衰係数、k = ln2/HL（HL は半減期）。また、i 年1年間の吸収量 Δ C(i) は Δ C(i)=C(i+1)-C(i) で表される。

上式で Inflow と HL を定めれば、日本の HWP 炭素貯留庫のおおよその特徴をつかむことができる。ここでは Inflow を林野庁木材需給表および日本の総人口から推定し、HL は一例として 35 年とした。

図 4-1 に、国産材と輸入材の合計量を Inflow とした場合の、Inflow と炭素吸収量 ΔC の年変化を示す。図には、Inflow の変動による ΔC 挙動の二つの典型的なパターンが現れている。一つは、1900～1960 年のパターンである。この区間では、Inflow はほぼ直線的に増加している。この区間は初期値の影響を受け、値としては不正確ではあるが、このように一定割合で増加し続ける場合、 ΔC はほぼ一定値を保ち、0 とはならない。その後急増し、石油危機直前の 1973 年に最大となる。この付近の値は、京都議定書第一約束期間での、日本の森林の炭素吸収量上限値に匹敵する。二つ目は、1973～2000 年で見られるように、上下を繰り返すが、平均的にはほぼ一定となるパターンである。同じ区間で、 ΔC は、15 Tg から 4 Tg 付近まで急低下する。このように、Inflow がたとえ高い値であっても、一定値に留まる場合には、貯留庫入ってきた HWP 炭素は、いずれすべて排出側に回ることになるため、 ΔC は 0 に向かう。2000 年以後、Inflow がさらに低下すると、排出量が生産量を上回り、 ΔC はマイナスとなる。図 4-1 で 2009 年に ΔC は -1.5 Tg となっている。この値は天野による試算値 -1.06 Tg に近い（天野正博，次期枠組みにおける森林吸収量の推計について、内閣地球温暖化問題に関する懇談会第 5 回中期目標検討委員会資料 2009）。ここで見られるように、炭素吸収量をプラスに保つためには Inflow を増加させ続けることが重要であるが、もう一つの行き方として、木材をできるだけ長く利用し続けること、すなわち、HL を大きくすることが考えられる。図 4-2 で HL=35 年と 150 年の場合の ΔC の変化を示す。Inflow が一定の 1973～2000 年の間で、HL=35 年の場合の ΔC の大きな低下に比べて、HL=150 年の場合には、その低下はわずかな幅にとどまり、長期間に渡って高い炭素吸収量を示すことがわかる。

以上に述べた HWP は、国産材、輸入材を問わず、日本国内にあるすべての HWP を考慮した、いわゆるストックチェンジ法による Inflow 値をもとにしたものである。HWP 炭素のふるまいを理解するのに好都合であり、ここで取り上げた。しかし、ダーバン会合で定められた方法では、輸入材は考慮せず、国産材のみがその国の HWP 炭素貯留量としてカウントされる、プロダクション法が採用されている。

図 4-3 に国産材のみに基づく Inflow および得られる ΔC を示す。Inflow を見ると、輸入+国産材の場合より数年早くピークに達し、以後 2001 年まで低下の一途をたどる。これに対応して ΔC も低下を続け、1990 年にマイナスに転じている。その後、少し上昇し、2011 年に -2.0 Tg となった。天野は 2020 年で -0.62 Tg と推定している。

このように、上の二つの方法で、程度の差こそあれ ΔC がマイナス側にシフトしている状況が続くと

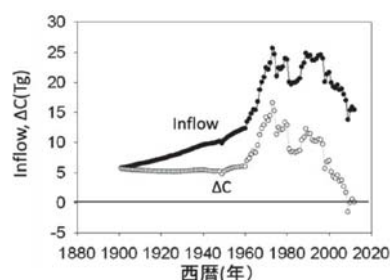


図 4-1：HWP 炭素貯蔵庫への流入量 Inflow と吸収量 ΔC の関係（国産材と輸入材による場合、HL=35 年）

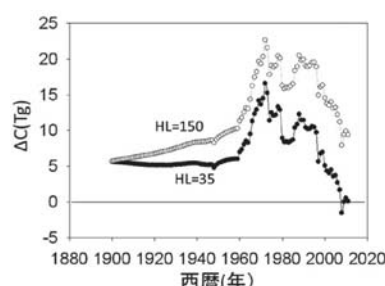


図 4-2：半減期 HL による吸収量 ΔC の差異

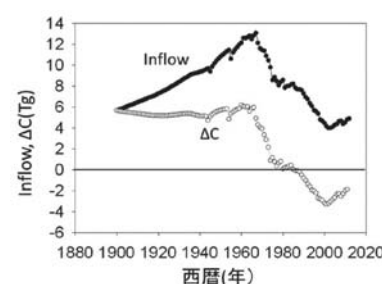


図 4-3：HWP 炭素貯蔵庫への流入量 Inflow と吸収量 ΔC の関係（国産材のみの場合、HL=35 年）

HWP は炭素吸収源としての意味をなさなくなる。それが有意であるためには、木材利用量が常に増加傾向にあること、あるいは、その利用期間が十分に長く、平均 100 年から 200 年程度となることが求められる。木造住宅や家具等の木材製品の 100 年利用を促す木質科学からのアプローチが求められる所以である。

4.1.4 木質資源の持続的な循環に向けて

図 4-4 は熱帯域のアカシア林、ユーカリ林などの林業プランテーション経営、ゴム林、アブラヤシ林などの農業プランテーション経営など土地利用と経営形態について類型化し、熱帯天然林、農耕地、疎林・草地などの植生と比較検討しながら、バイオマスの蓄積量（ストック）と資源生産量（フロー）の特徴を概念化したものである（川井ら，2012）。インドネシアなど東南アジア熱帯域では近年施肥・短伐期収穫が林業にも波及し、農林業の境界が曖昧になりつつある。この現象は、大規模一斉植栽を特徴とする上記の農林業プランテーション経営にも共通に認められる特徴である。図の縦軸、バイオマスフローはバイオマスとして年間にヘクタール当たりには伐採収穫され系外に排出される木質資源量である。バイオマスフローは資源生産面から重要であり、人間圏における社会経済的側面に強く関連する指標である。他方、横軸のバイオマスストックは系内に蓄積されるバイオマスの総量である。バイオマスストックは環境保全面から重要であり、生物圏の生態系維持や地球圏の炭素循環に影響する指標である。当然、フローの増加が農林業の第一の目標となるが、今後は「持続性」確保の観点が重要であり、種々の制約下において両者をバランスよく保つための管理、制度が必要である。

図 4-4 に示されるように熱帯域の農業プランテーションおよび林業プランテーションの場合、生産物（フロー）の占める割合が他の土地利用や経営形態に比べて際立って大きい。とくに、林業プランテーションは、農業プランテーションが植物油や天然ゴムなどの相対的に高付加価値製品の原料が主産物であるのに対して、樹木の原木丸太そのものが主生産物であり、伐出量としては圧倒的に大きい。さらに、樹木を基盤とするこれら大規模農林業プランテーションのバイオマス蓄積量もまた、天然林には及ばないものの、農耕地に比べて大きいことも注目し得る。一方、これら大規模農林業プランテーションにおいては短期的な収量確保が重視されるため、短い植栽ローテーションのもとで大規模・単一樹種による病虫害被害や土壌の劣化などバイオマス生産の持続性維持に関する課題を解決するための知識・技術が未整備であり、早急な検証と対策が求められる。このように農林業は、規模の如何を問わず資源生産を主たる目的としているので、生産物（フロー）の比重が大きいのにに対し、ストックはこれまで無視されがちであったが、自然・生態環境の劣化とともに次第に重要な要素となりつつあ

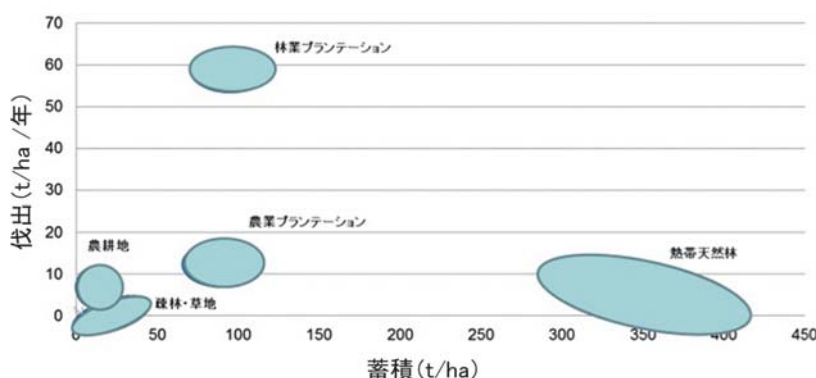


図 4-4：バイオマスの蓄積（ストック）と資源生産量（フロー）の関係：土地利用と形態についての類型化の試み（川井，2012）

る。このため社会林業を組み込んだ小農による農林複合経営の展開や在来優占種の植林により周辺環境と生態系に配慮して FSP 認証された林業プランテーション経営なども現れはじめている。とくに泥炭湿地のような脆弱な環境下にあっては後者が重要になるため、土地の適性に応じた利用形態について抜本的な検討が必要である。

生産の持続性に加え、生態環境の保続性を維持するには広域にわたる森林の機能に応じたゾーニング、すなわち生物圏生態系の維持保全機能を重視する保存林、緩衝ゾーンとしての二次林（保全林）、さらには人間圏の資源エネルギー供給機能を重視する生産林を適切に配置し、人間活動と生存基盤としての環境との調和を図る景観設計に関わる技術開発、制度の構築が新たな社会課題となる。人間圏との調和を図るためのバイオマス利用のあり方、地域コミュニティとの調和ある発展に向けた木質資源の持続的確保が重要な課題である。

4.2 熱帯におけるバイオマス生産

4.2.1 なぜ、熱帯域の植林が重要か？

植物は、光エネルギーと水、そしてごくわずかの栄養塩から省エネルギー的なプロセス（光合成）によって有機物を生産して生命活動を営んでいる。これにより一次生産者として生物圏の食物連鎖の基盤をなし、生物多様性の保持に貢献している。なかでも樹木は、陸域において唯一多量に有機物を蓄積した生命体である。その集合である森林は炭素を貯蔵し、地球圏における炭素、水循環の重要な構成要素である。森林は、生物圏からみれば生物多様性を保持する必要不可欠のエコシステムであると同時に、人間圏の視点からは再生産可能なバイオマス資源の貴重な供給源である。森林は陸域生物圏の最も重要な要素であり、生態系の生存基盤としての位置を占めると同時に、これら三圏にわたる物質・エネルギーおよび資源循環の一翼を担っている。

とりわけ、熱帯林は地球上の全森林面積の 47%、亜熱帯林（9%）を含めると過半を占める。現存するバイオマスの蓄積面から最も大きな存在である。低緯度地域のいわゆる熱帯域は、中高緯度に比べ太陽の放射エネルギーが 4 倍程度大きく、熱帯域の大気の動きは全球大気運動のエンジンとなっている。このため日照、気温、降雨量等の年間を通じた強度が全球でもっとも大きい。このことは植物バイオマスにも好ましい生育環境条件といえるので、一般に、温帯林や寒帯林に比べて熱帯林の成長はきわめて早い。例えば、温帯に属する日本の代表的な植林樹種であるスギの年平均成長量は地域や樹齢により変動するものの、幹材積（地際から末梢までの幹部の体積）でおよそ $4 \sim 8 \text{ m}^3/\text{ha}$ である。枝葉や根を含めた全バイオマスの年間成長量は $7 \sim 14 \text{ m}^3/\text{ha}$ 前後と見積もることができる（林野庁, 2001）。一方、近年始まった熱帯地域の大規模産業植林の場合をみると、例えばアカシア・マンギウム (*Acacia mangium*) の年平均成長量は、幹材積で $20 \sim 50 \text{ m}^3/\text{ha}$ であり、スギの場合の十倍近い値に達している。例えば、図 4-5 はインドネシア・スマトラ島南部のアカシア産業造林地における調査データ（約 1 万 ha の調査地において一定面積をもつサンプルプロット内の樹木の本数、胸高直径、高さを記したインベントリデータ）をもとに計算したアカシア・マンギウム林木のバイオマス蓄積量と樹齢の関係を示したものである。天然林木でも、また植林木でも、樹木のバイオマス蓄積量は極若齢林の段階では緩やかであり、その後の成長の旺盛な時期を経てやがて成長が鈍化

する、いわゆるシグモイド型の成長曲線を描く。しかし、成長パターンは同じでも、時間スパンは気温・降雨量、日射などの地域環境、樹種、管理方法により大きく異なる。アカシア林木のような熱帯早生樹は、一般に、成長はきわめて速いものの、10年余りで成長が停止するものが多い。このように熱帯地域の林業は、その生産性において温帯や寒帯地域に比べて産業として著しい優位性をもっている（川井, 2012）。

一方、生態系としての熱帯林は、有機物の生産・消費・分解等のプロセスが多段階であり、複雑多岐にわたり、そのため生物の多様性が豊かである。また、大気や土壌との炭素・水等の物質やエネルギーの交換が激しく、変動も大きい。このため、その変化の大きさや早さから生態系の脆弱性がしばしば指摘されている。加えて近年になって人間圏からの攪乱も激しさを増している。熱帯地域の天然林は世界の森林面積の1/2を占め、その蓄積が最も大きく、種の多様性が最も豊かであるが、近年の熱帯天然林（熱帯雨林および熱帯季節林）の減少と劣化によって生物多様性の維持保全が脅かされている。森林生態系の消失をとともなう森林減少、さらには森林生態系が提供する多様な機能・環境サービスの低下をとともなう森林劣化を食い止めることが今後の大きな課題である。

東南アジア地域では、チーク、マホガニーなどの限定された有用樹種の人工林を除けば、豊かな植生を背景にこれまで天然林から用材、薪炭材、薬用植物、食物等の林産物が採取されてきた。しかし、近年の天然林の減少・劣化と環境の重要性に対する認識の高まりにともない、木材の供給は天然木から造林木に急速に移行しつつある。1900年代初頭から本格化したパラゴムノキ、アブラヤシなどのプランテーション（農業）作物の植栽は、その後これらの樹木の廃棄立木のリサイクル利用のための木材加工技術の発達を促し、前者については製材から集成材、各種木質パネルにいたる様々な木質材料の重要な原料供給源となっている。

現在、東南アジア諸国の丘陵地や泥炭地では、20世紀後半以降、アカシア属（*Acacia* spp.）、ユーカリ属（*Eucalyptus* spp.）、ファルカタ（*Paraserianthes falcataria*）、あるいは在来優占種の早生樹植林による造林地が急激に拡大している。熱帯域の植林は、人間圏からの生物圏、とりわけ天然林の収奪を緩和し、生態系の保全に寄与することが期待される。また、荒廃地の森林再生によって緑を回復し、木材資源の天然林への依存からの脱却を促し、さらには地球温暖化抑制にも貢献できる可能性を秘めている。この実現には人間圏からの注意深い管理が重要であるのはいうまでもない。

一方、熱帯早生樹の林業に見られる短伐期の産業造林の歴史は新しく、未だ不明な点が多い。大規模な産業造林には、現実の課題として、土地集約的な短伐期植林にとともなう土壌の劣化や栄養塩の循環なども長期的な視点から観測が必要であり、世代間にわたる生産の持続性に関する評価検証が求められる。大規模植林地における単一樹種の植栽による

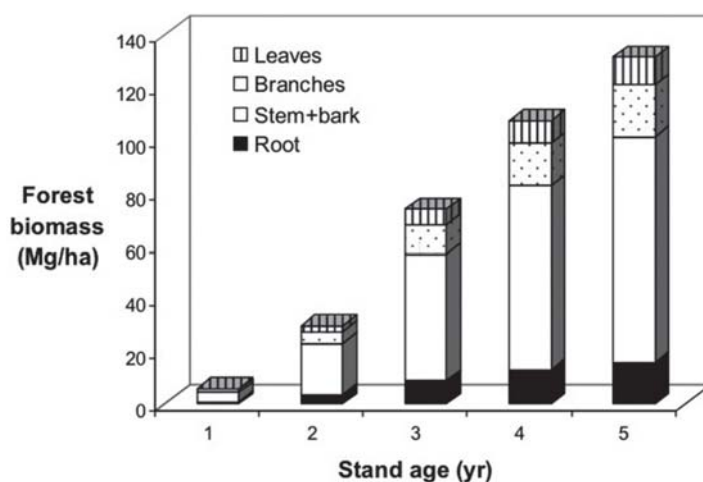


図 4-5：アカシヤマンギウム林木のバイオマス蓄積量と樹齢の関係

生物多様性の減少などの生態系維持保全に関しても課題が多い。さらには、地域住民との土地所有権、生活保証や経済振興といった社会・経済の課題や木質資源の効率的な材料・エネルギー変換やパルプチップ材のほか用材生産のための施業法の確立や加工技術の開発も急務である。このように産業造林には「持続性」確保に関わる社会課題が複合的に山積しているが、これらの課題に関する体系的、総合的な取り組みは未だ少ない。

4.2.2 森林の立木蓄積（ストック）と原木伐採（フロー）

物質（炭素）循環の観点からは、森林の立木蓄積（ストック）ばかりでなく、原木伐採（フロー）を合わせて考察することが大切である。4.1.1 で記したように、森林バイオマスの成長と環境維持の立場からは立木蓄積を重視することになるが、一方木材利用の立場からはバイオマス資源生産、すなわち、伐採による原木丸太の確保が重要である。図 4-6 は熱帯天然林、（疎林を含む）草地およびアカシア林のストックとフローを比較して示したものである（川井ら, 2012）。図より、例えば、熱帯雨林のバイオマス蓄積量は最大 400 t/ha 程度と最も大きいものの多くは成熟林である。すなわち、成熟林では成長による炭素吸収量と枯死・分解による炭素放出量とがバランスし、バイオマスの蓄積増分はほぼゼロとなる。また違法伐採など林外への原木伐出がないものと考えたとフローはゼロになる。同様に、チガヤ（*Imperata cylindrica*）が優占する草地においては、炭素蓄積は概ね 4 t/ha 以下と小さく、林外へのバイオマスの排出は最大 3 t/ha/year ときわめて小さい。また林内の年間蓄積増分に相当するバイオマスが枯死・分解により消失すると推定すれば、ストックの増分はゼロである。これに対して、1～6 年生のアカシア植林地では毎年一定面積の伐採と植栽が繰り返されるので、個別の林分では蓄積、増分およびフローに大きな変化があるものの、林分全体としてみれば、一定の安定した蓄積量と増分を期待できる。また、年ごとに原木伐出が行われるので、フローとしての木材資源を期待できる。前述したインドネシアスマトラ島南部のアカシア産業造林地の場合をみると、1～5 年生アカシア林分の平均蓄積量は 77.5 t/ha と必ずしも大きくはないが、一方、年ごとに 61.7 t/ha 程度の原木丸太の伐出フローが付加されるので、これら 2006 年時のストックとフローの総和は 139.2 t/ha と計算される。さらに、原木伐出時に林地に残される枝葉、末梢・端材等の残材は 50 t/ha 程度林地に残存すると推定され、今後の有効利用によってはフローが増加することも期待される。

林地全体の炭素循環については、林内樹木の成長量評価、すなわちバイオマス蓄積量および蓄積増

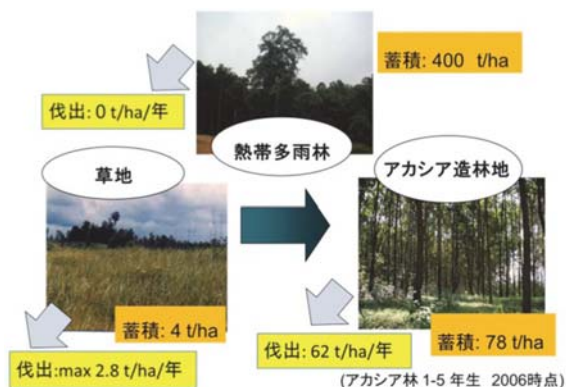


図 4-6: 天然林、人工林、草地のバイオマス蓄積量（ストック）と原木伐採（フロー）（川井 2012）

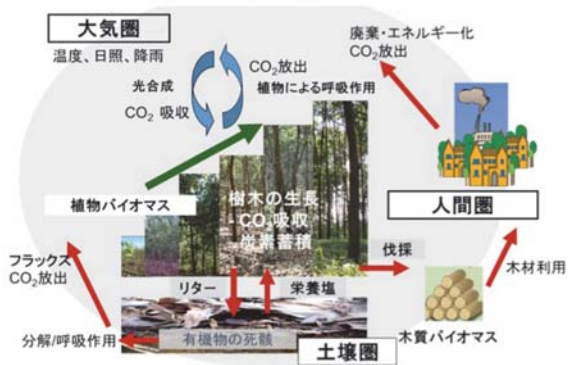


図 4-7: 樹木の成長にともなう炭素循環（川井 2012）

分を算定評価することの他、落葉や枯枝など樹木から土壌への炭素の移動（リター）と土壌内炭素の分解による CO_2 、 CH_4 の大気への放出（フラックス）の検討が必要になる。加えて、生産林では立木の伐出による原木の排出を考慮することになる。このような炭素の蓄積とフローに関わる概念を図 4-7 に示す。スマトラ州のアカシア林地の場合、リター量は樹齢の増加とともに増加し（Subarudi *et al.*, 2003）、これにともない土壌有機物が増加する傾向が認められている。また、伐採収穫時には枝葉、根、末梢等の残渣は林地に残されるが、裸地状態での表層土壌からの有機物の分解・消失はきわめて激しく、再植林時にはその大半の有機物が分解し、二酸化炭素として大気へ還流するものと推定される。さらに、泥炭地の場合には、土壌中の炭素の分解にも注意を払う必要がある。

4.2.3 大規模産業造林

4.1.1 で述べたように、国連食糧農業機関（FAO）の「世界森林資源評価 2010（FRA2010）」によると、2010 年の世界の森林面積は約 40 億 ha であり、世界の森林プランテーションの面積は 1 億 4 千万 ha となっている。ただし、半天然林の造林部分を含めた広義での人工林の面積は 2 億 6 千万 ha とされている（FAO, 2010）。一方、これらの森林から産出される世界の木材生産量は 35 億 m^3 程度（2008 年）であるが、人工林からの用材生産量は 14 億 m^3 （2005 年）とされている。すなわち、未だ天然林からの大量の用材取得は続いていることを示している。今後天然林伐採は一層厳しく制限されなければならず、消失した天然林の回復のための環境造林とともに、天然林伐採に依存しないバイオマス資源生産のための産業造林の拡大が切実な課題となっている。さらに、この天然林利用からの脱却に加え、世界の人口増、開発途上国の経済成長、化石資源からのバイオマス資源への移行などの要因により、今後木質バイオマスに対する需要は増加すると予測されている（世界森林白書 2009 年報告）。

このようなバイオマス需要の増加に対しては、単位面積当たりの収量増加（高成長性）、未利用荒地における植林・植栽、利用歩留りの向上などの技術革新によって対処することになると考えられる。新技術による育種については、「4.3.1 木質成分と遺伝子組換え」で述べられているが、高生産性のいわゆる早生樹植林がすでに大規模に実施されている。早生樹産業植林は、「強度に管理された商業植林で、あるブロックには単一の樹種が植栽され高い成長速度（年平均成長速度 $15\text{m}^3/\text{ha}/\text{year}$ 以上）で工業用の丸太材が生産され、そして植栽から 20 年以内に収穫されるもの」と定義されている（コサルター・パイスミス, 2005）。例えば代表的な熱帯早生樹であるアカシア・マンギウムの生産量は $10 \sim 30 \text{ t}/\text{ha}/\text{year}$ であるが、世界の人工林からの用材平均生産量は $5 \text{ t}/\text{ha}/\text{year}$ （用材の平均密度を $0.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ として）程度と見積もられるので、アカシア・マンギウムの生産量は世界の平均用材生産量を遥かに凌駕している。

化学成分利用を目指した木質バイオマス生産においては、樹木を凌駕する生産性を有するイネ科大型バイオマス植物も有力な対象植物種となるが、木質材料生産や紙パルプ生産を目的とする際は、樹木が対象となる。そこで、今後の人工林由来木質バイオマス需要の増加に対し、早生樹植林は有効かつ必要不可欠な存在となっているが、反面、数十万 ha にも及ぶ大面積の連続する土地にアカシアやユーカリなどの限られた外来樹種を大規模かつ一斉に植林することに起因する生態系や地域社会に及ぼす問題点が様々に指摘されている。すなわち、生物多様性の乏しさ、大規模な土地の囲い込みによる地域住民の生活基盤の喪失、伐採収穫・再植林の継続による地力の低下への危惧、均質かつ大規模な植相がもたらす環境変化の懸念、などである。岡部は、人工造林に依らない森林の造成は現在の市場経

済の中で競争力を持つことが困難であると述べており（岡部, 2003）、またコサルターとパイスミスは、早生樹産業植林は、本来的によいものでも悪いものでもなく、ずさんに計画・実行された場合には甚大な問題を引き起こし、綿密に計画・実行された場合には大量の木材に加え様々な環境的・社会的便益をもたらすものであると結論している。また、早生樹の大規模一斉植林に関わる諸問題については、岡部（2003）、岩崎ら（2012）および川井ら（2012）の書籍において多面的に詳述されている。

4.2.4 熱帯人工林における生物多様性

熱帯人工林の持続性を考えるとき、「生物多様性」は最も重要なファクターの一つである。東南アジア地域、特にスマトラ島、マレー半島、ボルネオ島、ジャワ島のいわゆる「スندگانランド」は、その高い生物多様性から世界の25の生物多様性ホットスポットの一つに挙げられている（Myers *et al.*, 2000）。このような生物多様性は、「森林圏」だけでなく「大気圏」や「生活圏」を通じて、地域のコミュニティに恵みをもたらしてきた（図4-8）。例えば、「森林圏」から直接もたらされる多様な食物や木材、さらに薬用植物などは「生活圏」における人々の生活そのものであり、また、「大気圏」から降り注いでくる雨や霧は、「森林圏」、「生活圏」の維持に必要なものであり、インドネシアに見られる飼鳥文化は「森林圏」における多様な生物相の存在があってこそ成り立つものである（藤田・鮫島, 2012）。さらに、これはすこし唐突ではあるが、「宇宙圏」開発における食料開発（例えば昆虫食）を考えたとき、そのバックグラウンドとしての生物多様性は重要な意味を持つであろう。もちろん生物多様性の問題は熱帯地域に限った話ではなく、身近なところでは、日本におけるメダカやスズメといった、かつてありふれていた生物の著しい減少は、我々の文化そのものに影響を与えている。ここでは、熱帯人工林、特にアカシア人工林に焦点を当て、生物多様性の保全を包含した持続的な植林地管理方法について考えてみたい。

本章で述べられているように、熱帯人工林からの木質資源が将来の「生活圏」を支える重要な資源であることは疑いない。近年、熱帯アジア地域における植林地の増加は急激で、Miettenen らはインドネシアのスマトラ島、ボルネオ島およびスラウェシ島での2000年からの急速な森林減少の60%以上が、植林地への転換や著しい択伐によるものであると報告している（Miettenen *et al.*, 2011）。このような土地利用の改変は当然生物相の変化を引き起こす。よく知られているように、生物多様性の低下要因として、①生息地の環境の改変、②動植物の乱獲、の2つが挙げられるが、天然林から人工林への転換は、重大な生息地の環境の改変に相当する。つまり、熱帯人工林の著しい増加は、その結果として著しい生物多様性の低下を引き起こす可能性を秘めている。実際、Brooks らによれば、東南アジアの島嶼部における森林の減少率と絶滅危惧種の数との間には高い相関性がある（Brooks *et al.*, 1997）。逆の見方をすると、生物多様性の調査から、土地利用の変化にともない環境の変化を評価することができると考えられる。また、樹木病虫害の発生抑制機構として、宿主側の高い多様性が重要であると指摘されており（Keesing *et al.*, 2006）、単一樹木からなる一斉植林地では被害が拡大することになる。つまり、生物多様性の維持は、熱帯人工林の持続的経営に明らかに貢献するものであると考えられるのである。

それでは、熱帯人工林において生物多様性をスポイルしない植林地経営とは、具体的にどのようなものになるのだろうか。以下、鮫島ら（2012）によるスマトラ泥炭湿地林における土地利用の変化と中・大型哺乳類および鳥類多様性の調査報告、ならびに吉村ら（2011）および竹松（2012）によるシロアリ、

木材腐朽性担子菌類、鳥類のアカシア人工林における多様性調査報告をもとに考えてみたい。

鮫島ら（2012）は、インドネシア・スマトラ島東岸の泥炭湿地林に設定されたギラム・シアク・クチループキット・バトウ生物圏保全区において自動カメラ撮影とポイントカウント法によって中・大型哺乳類と鳥類の定量的な調査を行った。本保全区は、おもに天然林からなるコア・エリア、主にアカシア人工林からなるバッファー・ゾーンおよび主に農耕地・オイルパー植林地からなるトランジション・エリアの三つのランドスケープから構成されている。自動カメラは野生動物保護区内に4カ所、保全林内に3カ所、アカシア人工林内に3カ所設置し、約1年間にわたって調査を実施した。また、鳥類については、天然林、アカシア人工林、ゴム林、集落周囲のそれぞれに1kmのラインを各3本設定し、各ライン上に250m間隔で四つの観察ポイントをおき、直接双眼鏡で観察するとともに、鳴き声による種類数と個体数を記録した。調査は年3回、朝夕2回ずつ、計6回行った。

野生動物保護区内、保全林内およびアカシア人工林で撮影された中・大型哺乳類の種類は、それぞれ、16種、18種および7種であり、アカシア人工林区で明らかに少なかった。また、前2者における種構成は類似していたのに対して、アカシア人工林は大きく異なっていた。レッドリスト記載種が11種類撮影されたが、そのうち8種は天然林のみで記録された。彼らは、天然林における不均一な環境が多様な種の生息を可能にしていると推察している。一方、鳥類については、天然林、アカシア人工林、ゴム林および集落周囲における種数の統計的期待値は、それぞれ83.6、20.3、45.6および57.1となり、哺乳類の場合と同様アカシア人工林が最も低い値となった。また、天然林では12種の森林性レッドリスト記載種が観察された。鳥類での結果は、広い面積での厳密なランドスケープ分けというものが、多様性の乏しい環境をつくっていることを示している。さらに、同じくスマトラ島・南スマトラ州ムアラエニムのアカシア人工林における鳥類相に関する吉村らの報告によると（吉村ら, 2011）、保全林で16～32種、残存二次林で18～26種、4年生のアカシア林で11～28種、うち残存二次林に近いアカシア林で11～26種、1年生のアカシア林で11～24種が観察された。アカシア林のうち、残存林近くのアカシア林を除いたすべての林分が同様の種組成を持つと判断され、一方、残存林近くのアカシア林は、保全林や残存二次林の種組成と同じ種組成をもっていた。すなわち、保護区のみならず残存林の価値は高く、周辺のアカシア林に多くの種を保全できることが示唆された。一方で1年生のアカシア林は種数も少なく、鳥類の生息地にはなりえないことがわかった。表4-1に鮫島ら（2012）の結果をまとめておく。

次に、吉村ら（2011）および竹松（2012）によるシロアリおよび木材腐朽性担子菌類のアカシア人工林における多様性調査報告を見てみる。シロアリと木材腐朽性担子菌は、生態系において枯死植物の「分解者」として物質・エネルギー循環に関与している重要な生き物であり、熱帯において著しい多様性を示すことが知られている。分解の出発点である植物の種構成が変化すれば、当然これら分解者の種構成も変化する。したがって、シロアリと木材腐朽性担子菌は森林環境の評価に有効な生物群であると言える。シロアリ相については、マレーシア・サバ州・ケニンガウ近郊の自然林とアカシア人工林内に2m×100mの区画設定し、それを5m×1mの40セクションに分け、1セクションを1人が30分間調査するという、いわゆる「トランセクト法」によって調査を行った。採集された種は、材食性シロアリ、キノコ栽培シロアリ、土壌食性シロアリといった「機能群」に分けて解析した。方法の詳細は竹松（2012）を参照されたい。同手法を用いたこれまでの研究から、原生林ではシロアリ科、特に土壌食性シロアリの多様性が非常に高く、攪乱がすすむにつれてその種数が急激に落ち込むこと、

さらに、材食性シロアリの種構成は、攪乱がすすむほど、害虫種が多くなることが知られている。したがって、調査地が健全な森林であるかどうかは、シロアリ科のシロアリがいかに多く、その多様性が高いか、材食性の種組成がどのようなものかに注目することで評価できる。

調査地の様子と結果のまとめを図4-9 および表4-2 に示す。自然林における約30という種数と比較して、アカシア人工林では林齢にかかわらず10種に満たないシロアリ種しか採集されず、多様性は非常に低かった。また、土壌食性シロアリの著しい減少と材食性シロアリの林齢による採集数の増加も明らかに観察された。一度伐採されてしまった森林は20～30年経過して外見では森林としての様相を呈していたとしても、アカシア人工林である限りはシロアリの種多様性や機能的多様性は自然林には遠く及ばないようである。したがって、アカシア植林を、紙・パルプ用短伐期施業から製材用長伐期施業へとシフトしたとしても、シロアリ相は容易には回復しないと考えられるのである。

それでは、木材腐朽性担子菌類についてはどうだろうか。これまでに、アカシア人工林においては、様々な種類の菌類による腐朽害が知られているが (Eyles *et al.*, 2008)、菌類の多様性についてはほとんど評価されていない。

調査地はシロアリ相調査の場合と同一である。60×4mのライントランセクトを3本互いに25m間隔になるように設置し、これをまとめてプロットとした。アカシア人工林については1林分につき一つのプロットを、自然林については1林分につき二つのプロットを設置した。プロット内から多孔菌類の子実体を採集し、種まで同定した。また、個体数の指標として、子実体が発生していた木材の本数を用いた。

調査の結果、102種658回の出現が記録され、全体の3%以上を占める優占種は *Microporus xanthopus*, *Trametes cf. pocas*, *Hexagonia tenuis* complex sp.3, *Flavodon flava* などであった。*Microporus xanthopus* は原生林各1林分において最も出現回数が多く、*Trametes cf. pocas* は4年生アカシア林で優先していた。各調査地においてプロット間で種多様性を比較したところ、プロット間の種多様性に有意差は認められなかった。一方、種構成についてみると、自然林においては *M. xanthopus* が優占していたものの、アカシア人工林では優占種がプロット間で大きく異なった。このことは、自然林では少数の広域分布種が優占するのに対して、アカシアを植林することによって乾燥耐性や高温耐性のある種が優占しやすい状況が生まれ、どの種が実際に優占するかは、侵入と定着の過程で確率的に決まるといった状況が生まれているのかもしれない。今後、時系列的かつ定量的なデータを積み重ねるとともに、腐朽機構に関する分子レベルの解明も進めることで、人工林という単一宿主環境における大規模な病害菌の発生機構の解明と対策につながることを期待される。

以上、アカシア人工林における哺乳類、鳥類、シロアリおよび木材腐朽性担子菌類の多様性について述べてきた。得られた結果をまとめると以下ようになるが、将来の資源の源である熱帯人工林においてどのようにして生物多様性を維持してゆくのか、人類の叡知が求められている。

① 一度伐採され草地化したランドスケープにおいては、アカシアの植林から20～30年経過した場合でもシロアリの種多様性は天然林には遠く及ばず、また、害虫化の可能性が懸念される材食性種が優先するようになる。したがって、アカシア人工林における生物多様性維持のためには長伐期化だけでは不十分であり、保護林（二次林）や残存林の配置を最初の段階から適切にデザインしておく必要がある。

② 鳥類や哺乳動物などの大型動物の維持のためには、林内に残される予定の保全林の維持は当然として、谷筋の残存林（放置林）を有効に利用して、生物回廊（コリドー）を形成させることも重要である。

③ シロアリ類や菌類など移動性の乏しい生物群については、アカシア植林による乾燥化が生物多様性において重要な意味を有している。特に泥炭地などの湿潤地域へのアカシアの植林とその結果として乾燥化が、地域の生物多様性に対して大きな影響を有している。

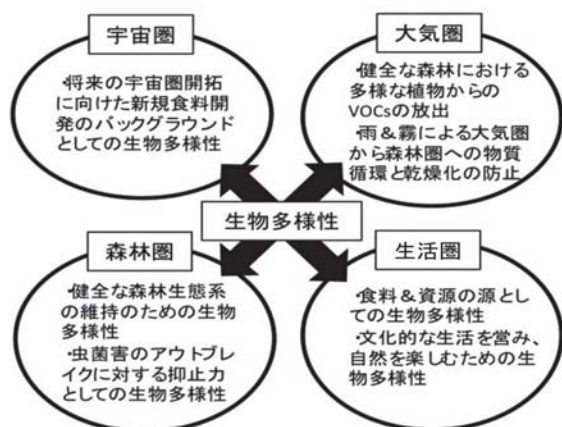


図 4-8：生物多様性と生存圏

表 4-1：泥炭湿地におけるランドスケープと哺乳類および鳥類の多様性（鯨島ら，2012）

	天然林（保護区 & 保全エリア）	アカシア 人工林	ゴム林（ジャン グルバー）	集落周辺
哺乳類	最高	低	—	—
鳥類	最高	低	中	高

表 4-2：マレーシア・サバ州の種々のランドスケープにおけるシロアリ相調査結果（吉村ら，2011 および竹松，2012）

	左 天然林（保全林）	中 アカシア人工林 1～6 年生	右 アカシア主体二次林 20～30 年生
材食性シロアリ	11 種	4 種	9 種
キノコ栽培シロアリ	4 種	1 種	2 種
土壌食性シロアリ	13 種	1 種	3 種



図 4-9：マレーシア・サバ州の種々のランドスケープにおけるシロアリ相調査の様子

4.3 これからの木質バイオマス資源の生産と利用

4.3.1 木質成分と遺伝子組換え

[木質成分の育種の方向性]

木質系バイオマスの主要なものは言うまでもなく樹木である。これに加えて、イナワラ、コーンストーバー、バガスやスイッチグラス、ミスカンサス（ススキ）、エリアンサス等の大型のイネ科植物の茎も重要なリグノセルロース資源であり近年とみに注目を集めている。

世界の木材生産量は 35 億 m³ 程度（2012 年）（FAO, 2012）であり、そのうちの半分は薪炭利用であ

る。先進国では薪炭利用は少なく、ほとんどは木質材料および紙パルプ用材として利用されている。一方世界の人工林からの用材生産量は14億 m^3 (2005年) (Carle & Holmgren, 2008) と言われており、未だ天然林からの大量の用材取得は続いている。しかし今後天然林伐採は一層厳しく制限されることになるだろう。したがって、現在の木質バイオマスの需要を天然林に依存せず、すべて人工林で賄うためには、単位面積当たりの収量増加や荒廃地における新たな植林などの技術革新が必須となる。加えて、化石資源依存を低減し、再生可能バイオマス資源に依存するバイオマスリファイナリーを構築するためには、廃木材のリサイクルによるバイオマスリファイナリーシステムの構築に加え、それでは不足する分を、バイオマスリファイナリー仕向け木質バイオマスとして、現在の木質需要に対して増産する必要がある。

以上を踏まえ、現在の木質材料業界および紙パルプ業界からの育種要求を含め、今後の木質系バイオマスの育種の方向性について以下に概略を述べる。

まず、共通する目標として、成長性・密度向上や耐病性の向上による増産、耐土壌酸性・耐湿性の向上による劣等地における植林拡大が挙げられる。これに加えて、木質材料用材生産に向けた育種目標としては、形態の改良（通直性、完満性、心円性の向上）による利用特性の向上、色素成分の増産などによる高付加価値化（銘木化）が求められている。

一方、紙パルプ用材生産に向けては、上記の共通目標のほかに、パルプ蒸解性の向上や紙力増強につながる繊維細胞の形態の制御が強く求められている。

バイオマスリファイナリー構築に向けては、共通目標とともに化学成分利用特性の向上（例えば、リグニンの量と構造の改変）が求められる。また、特に大型のイネ科バイオマス植物の生産性は、30～80 t（乾燥重量）／年程度であり、スギなどの温帯早生樹のそれ（～10 t/year）はおろか、高成長性を誇るアカシアなどの熱帯早生樹の生産量（20～30 t/year）をも圧倒的に凌駕する。加えて、一般に草本植物は樹木より脱リグニンが容易であることから、バイオマスリファイナリー構築に向けてのバイオマス増産では、イネ科エネルギー植物の植栽も重要な方向性である。

〔木質成分の分子育種〕

上記のような育種目標を達成する方法として、交雑による従来育種と遺伝子組換えなどによる分子育種がある。分子育種はすべてが遺伝子組換え技術によるわけではなく、ゲノム解析技術を利用したマーカー選抜育種も含まれる。遺伝子組換えによる育種は、従来は交雑不可能であった遠縁の植物、動物、微生物の遺伝子も利用可能、目的遺伝子のDNA領域のみを植物ゲノムに導入することにより、遺伝的背景を変えずに改良することができる、遺伝子導入という原因と形質の改良という結果の因果関係が明確であるなどの利点がある。一方、問題点としては、現時点では複数の遺伝子の同時導入が比較的難しい、導入遺伝子の効果が表現系に期待通り現れるとは限らない、実用に先立ち自然生態系や耕地生態系に対する影響調査や食品としての安全性の検査を行う必要があるがこれに長時間を要する、一般社会の容認が必ずしも得られていない（特に、食品安全性）などの点が指摘できる。

いずれにしても、遺伝子組換え作物の作付面積は、1996年には世界でわずか170万 haであったものが、2011年には16,000万 haにまで増加しており、これは世界の人工林面積にほぼ匹敵する値である。そして、あまり意識されていないように思われるが、我が国でも既に大量の遺伝子組換え作物が輸入利用されているのは間違いないようである (<http://www.life-bio.or.jp/topics/pdf/topics461.pdf>)。遺伝子組換え樹木は現在のところ森林認証を取ることができないが、それでも利益があると判断し、樹木

の遺伝子組換えを推進している外国企業は存在する。遺伝子組換え技術は現在も改良が続いており、遺伝子組換え植物と非組換え体の違いを網羅的に評価する技術（網羅解析技術）も近年格段に進展している。遺伝子組換え技術は、将来的には、より精緻で安全性が高く安心のできる技術へと改良が進むものと考えられる。また、遺伝子組換え植物の作出はとりもなおさず、当該遺伝子の機能解析と言う側面を有している。遺伝子組換え植物の表現型解析を行うことにより、当該遺伝子の機能が明らかとなれば、マーカー選抜や重イオンビーム照射育種など、非組換え育種へ展開することも可能である。

実際に遺伝子組換え植物を作出するにあたっては、あらかじめ基盤となる情報の取得や技術の確立が前提となる。まず、標的植物種の決定とその特性化、育種目標の決定が必要である。ついで、標的植物のゲノムデータベースあるいは少なくとも発現遺伝子の網羅解析データベース [Expressed sequence tag (EST) database] および標的植物に対する形質転換・個体再生系の構築が必須である。さらに、標的形質の原因遺伝子の取得が必要なことは言うまでもない。加えて、標的形質の迅速な評価系の確立も実際に実験を推進する上では鍵の一つとなる。なお、実用植物の分子育種に先立ちモデル植物を用いて効果を検討し、その後実用植物の分子育種へ進む場合も多い。これらについて、以下実例を挙げる。

上記のように大型イネ科エネルギー植物は、今後一層資源植物としての重要性が増すと考えられるが、リグニンの性状は酵素糖化性に関する情報は比較的少なかった。特にエリアンサスについては殆ど情報がなかった。そこで、Yamamura *et al.* (2013) は、*Erianthus arundinaceus* について、器官ごとにリグニンおよび関連化合物の構造解析と酵素糖化性について詳細に解析した。その結果、器官によりリグニンや関連化合物量、および酵素糖化性が大きく変動しており、酵素糖化に適する器官と熱利用に適する器官があることが見出された。さらに、リグニン量と酵素糖化性に全く相関がみられない器官の存在が見出され、リグノセルロース超分子構造の形成機構の解明に向けて貴重な基盤情報が蓄積された。

遺伝子の網羅解析データベースについては、代表的熱帯早生樹であるアカシア・マンガウム (*Acacia mangium*) の分化中木部の EST データベースが鈴木と梅澤らによって初めて構築された (Suzuki *et al.*, 2011)。またアカシアの形質転換・個体再生系はごく少数の報告があるのみであったが、ラーマンと梅澤らは耐湿性が高くパルプ用材として有用なアカシアであるアカシア・クラシカルバ (*Acacia crassicarpa*) の形質転換系の確立に成功した (Rahman *et al.*, 2013)。アカシアの分子育種については4.3.2で詳述する。

一方、リグニンの生合成の制御を行う際には、リグニンの量と構造を迅速に評価する系が必要である。従来のリグニン分析法は、必要試料量が多く、また迅速性に欠けており、一日当たり処理することのできる試料数は数検体程度であった。これでは、微量かつ多数の組換え体の分析には対応ができないので、鈴木、山村、梅澤らは、リグニンの定性、定量分析法について、必要試料量の低減と供試検体数の大幅増（10倍以上）を可能とする分析条件を報告した (Suzuki *et al.*, 2009; Yamamura *et al.*, 2010; Yamamura *et al.*, 2012)。なお、本法については、DASH/FBAS 共同利用の一環として分析講習会による詳細な技術公開がなされている。標的遺伝子は、様々な基礎研究の過程でも得られている。例えば、「2.4.2 木質バイオマス形成の統御機構」で示した成果でも様々な有用遺伝子が得られている。

実用植物であり他の大型イネ科エネルギー植物のモデルともなるイネを対象とした、バイオマスリファイナリー構築を目指したリグニンの代謝工学が報告されている。小柴、服部、梅澤らはリグニン

生合成に関わる酵素および転写因子をコードする合計 26 個の遺伝子について、それぞれ発現を制御した組換えイネを作出し、その特性を評価した (Hattori *et al.*, 2012; Koshiba *et al.*, 2013; 梅澤, 2013)。その結果、野生型と比べリグニン量が 50 ~ 120% の範囲となる組換えイネを得た。ここで、リグニン量を低下させた組換えイネでは大幅な酵素糖化性の向上を見た。リグニン量の低減による酵素糖化性の向上や消化性の向上を目指した代謝工学研究は、世界的に既に多数報告されているが、単一の植物種につき、リグニン生合成に与る酵素等の遺伝子の発現を網羅的に制御した例はない。また、副生燃料としてのリグニンの増強に関する報告は従来皆無である。上記結果は、イネにつきリグニン量をかなり自由に制御することができることを示しており、大型のイネ科エネルギー植物についても、形質転換系が構築されさえすれば、リグニン量を制御することができることを強く示唆している。また、リグニン量と酵素糖化率の相関解析を行うことにより、リグニンの存在そのものが酵素糖化における阻害要因となっているわけではなく、リグニンの存在状態こそが重要な阻害要因であることが示された。今後は、エネルギー植物のリグノセルロースの超分子構造の詳細な解明が急がれる。一方、リグニンの構造制御については、易分解性かつ高分子素材としてのハンドリングに優れたシリリングリグニンの増強にも成功している。

4.3.2 早生樹のバイオテクノロジー

[アカシアのバイオテクノロジー]

アカシアは、一般に高成長性出材の密度が大きいことから、代表的な熱帯早生樹となっており、主として紙パルプ用材および木質材料用材として使用されている。アカシアは、コサルターとパイスミスによれば既に 140 万 ha (特にアカシア・マンギウム、アカシア・アウリカリフォームスやアカシア・クラシカルパもある) (Cossalter & Pye-Smith, 2003)、アジアバイオマスハンドブック (http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Japanese/All_J-080917.pdf) によれば 832 万 ha (世界の人工林面積の 5%) 植栽されている。例えば、南スマトラ州のアカシアマンギウム植林地では、6 ~ 8 年の短伐期のパルプ用材林業が実施され、現在既に第三世代の造林地となっている (川井・渡辺, 2012)。しかし、熱帯における広葉樹林業は、数百年の歴史をもつ温帯地域の針葉樹林業と比べるといまだ始まったばかりと言ってもよく (岡部, 2003)、持続的経営に向けて多くの改良や検証が必要である。特に、マレーシアやインドネシアにおいては、アカシア植林は、アカシアより圧倒的に収益性に優れているオイルパームやゴムのプランテーションと競合することから、アカシア植林の経済性の向上が必須の課題となっている。

木質材料用材生産のためにアカシア植林事業者から特に強く求められているのは、成長性の一層の向上と形態の改良や心材腐朽の抑制である。すなわち、アカシアは、もともと成長が旺盛であるが、それでも木質材料用材生産のためには、定植後伐採まで 15 年程度が必要である。せめて 10 年以内で同程度の成長が達成されれば、大幅に経済性が向上するとの切実な要望がある。また、アカシアは、幹のねじれ、曲りや分枝が多く、幹断面形状のゆがみが大きいことなどから、例えばアカシア・マンギウムの場合は製材製品としての歩留りが僅か 2 割程度に留まっている。材料として利用されない残材は主に焼却されるか林地で腐朽に任されることから、形態不良のために、折角固定された二酸化炭素が、利用を経ずに大量に大気に戻ることになる。すなわち、熱帯早生樹として成長性が温帯樹よりはるかに大きくとも、利用可能部分が少なければ、実質的なバイオマス生産性はそう高くないことに

なる。アカシアの樹木形状が、スギに見られるような通直・完満・真円なものになれば、歩留りがスギと同程度の4～5割程度に向上し、その分実質のバイオマス生産性が容易に倍增以上となり経済性が大幅に向上する。ひいては、建築物・紙製品や家具として人間の生活圏に滞留するバイオマス量が大幅に上昇し、実質的な二酸化炭素固定量の増大にも貢献する。また、良好な形態は、パルプ・製紙用途においても原木運搬コストの低減に大きく貢献する。さらに、パルプ用材としては、高成長性とともパルプ蒸解特性の改善、繊維細胞形態の改良などが強く求められている。

アカシア・マンギウムとアカシア・アウリカリフォーミスには天然交雑がみられ、両者の雑種 (*A. mangium* × *A. auriculiformis*, 通称アカシア・ハイブリッド) が得られている。この雑種は、アカシア・マンギウムとアカシア・アウリカリフォーミスの欠点 (アカシアマングウム：断面形状不良、心材腐朽頻発、密度がやや低い、アカシア・アウリカリフォーミス：主幹が二股になるなどの樹形不良) がかなり改善されており、人為的な交雑育種とともに産業造林が進められている (吉田・佐藤, 2008) (コラム「熱帯におけるアカシア植林事業」参照)。しかし、形態や成長性などについて未だ改良の余地が多く、経済性の向上に向けた一層の改良が必須であり、分子育種を始めとする新規技術の導入が強く求められている。

4.3.1 で述べたように、代謝工学により実用植物について遺伝子組換え体を作成するにあたっては、あらかじめ基盤となる情報の取得や技術の確立が前提となる。標的遺伝子の取得は、それ自体大きな研究テーマとなり、実用標的樹種を用いた研究よりむしろ、扱いやすいモデル植物 (シロイヌナズナやポプラなど) を用いた基礎研究あるいは目的基礎研究で関連遺伝子の機能解析が進められているのが現状である。その一端は例えば、2.4.2 に記載の通りである。ついで、実用標的植物である各種アカシアについて、ゲノムデータベースあるいは少なくとも発現遺伝子の網羅解析データベース [Expressed sequence tag (EST) database] を整備し、基礎あるいは目的基礎研究で得られた遺伝子機能情報に基づき、育種標的遺伝子をアカシアから取得することになる。また、アカシアで代謝工学を進めるには、形質転換・個体再生系の構築が前提となることは言うまでもない。

アカシアの遺伝子網羅発現データ解析については、わずかしき報告がなく、Wang らが 2005 年にアカシア・マンギウムの花からの EST 作成を報告したのが初めてである (Wang *et al.*, 2005)。その後 Suzuki ら (2011) は、アカシア・マンギウムのシュートと分化中木部の平均化 cDNA ライブラリーから 8963 個の EST を作成し、解析した。その結果、この EST は、従来解析されていたマメ科植物 (ミヤコグサ、タルウマゴヤシ、およびダイズ) の EST の中で、ダイズの EST に対し相同性を示すものが最も多かった。また、細胞周期、形態形成、木部分化、二次細胞壁形成に関わると推定される EST 配列を抽出している。また、Yang ら (2011) は、アカシア・ハイブリッドの分化中木部から調製した 3182 個からなる EST を解析し、さらにリグニンおよびセルロース合成酵素系の遺伝子については定量 PCR による解析を行っている (Yang *et al.*, 2011)。

ただし、近年は DNA シークエンサーの能力が桁違いに向上し、それにともない分析費用がかなり廉価になってきていることから、発現遺伝子の網羅解析は一昔 (1990 年代) 前と比べると圧倒的に容易になってきた。加えて、各種質量分析計を駆使した代謝物の網羅解析系 (メタボロミクス) も近年急速に充実してきた。これらの技術基盤の進展により、今後は発現遺伝子と代謝物のバイオインフォマティクスによる網羅解析に基づくアカシアの遺伝子機能推定、あるいは、有用形質原因遺伝子候補の絞り込みが急速に進展すると期待される。特に、成長性や形態の制御は、二次木部形成機構の解明

と表裏一体となっており、応用面からきわめて重要であることに加え、植物学的にも全く未解明の課題で学術的に重要である。

形質転換・個体再生系の確立は、組織培養技術に負うが、一般に多大な時間と労力を要する。アカシアの形質転換の報告はきわめて限られているのが現状である。まず、Quoirin ら (Quoirin *et al.*, 2000, 2002) は、パーティクルガン法による一過的形質転換をアカシア・マンギウムとモリシマ・アカシア (*Acacia mearnsii*) について報告した。アグロバクテリウムを用いた安定的な形質転換については、Xie と Hong (2002) がアカシア・マンギウムヘレポーター遺伝子 (GUS 遺伝子) を導入したものが最初である。彼らは、成木の腋芽あるいは茎頂を若返り (rejuvenation) させたのち、茎から外植体を得て形質転換に使用している。ついで Vengadesan ら (Vengadesan *et al.*, 2006) は、オキナワネム (*Acacia siuata*) の胚軸を外植体として用い、アグロバクテリウム法による GUS 遺伝子導入を報告している。一方 Yang ら (Yang *et al.*, 2008) は、アカシア・クラシカルパの偽葉を外植体として用いたアグロバクテリウム法による形質転換体作出を報告した。彼らはポプラの 4-coumarate CoA ligase 遺伝子のプロモーターを用い同遺伝子のアンチセンス法によるノックダウンを行っている。得られた形質転換体の馴化・組換え温室での育成は報告されておらず、組換え体のリグニン分析、パルプ化特性などは検討中とのことである。アカシア・マンギウムについては、Hartati ら (Hartati *et al.*, 2011) がフローラルディップ法によるアグロバクテリウムを用いた形質転換を報告しているが、標的遺伝子のゲノムへの導入を示すデータは明示されておらず、今後の報告が待たれる。一方 Rahman ら (Rahman *et al.*, 2013) は、アカシア・クラシカルパのアグロバクテリウム法による形質転換を報告している。彼らは、腋芽を含む外植体に対し、GUS 遺伝子を含むアグロバクテリウムを感染させ、抗生物質耐性を指標に形質転換体を選抜し、多芽体形成、不定芽伸長、発根を経て、植物体を再生させた (図 4-10)。形質転換体の作成は、GUS 遺伝子の発現 (X-Gluc 添加による青色の発色) 確認、PCR 法による導入遺伝子断片の増幅、サザンブロット法による導入遺伝子断片の検出により確認した。また、サザンブロット法におけるパターンの違いから、遺伝子の導入位置の異なる独立したクローンが得られていることが確認された。

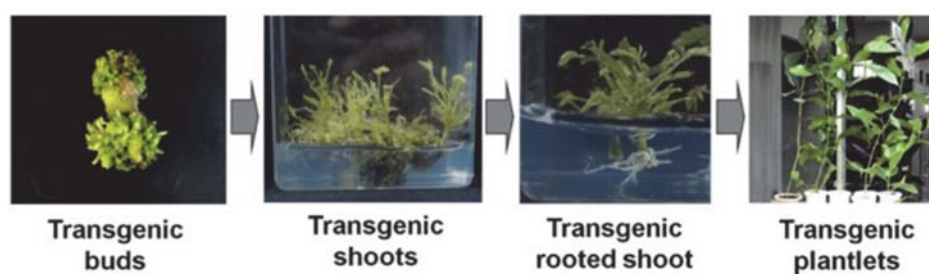


図 4-10：アカシアクラシカルパの形質転換

[ユーカリのバイオテクノロジー]

ユーカリはオーストラリアやタスマニア島に分布するフトモモ科の樹木で、500 以上もの種を擁する高木の属である。ユーカリは早生樹の一つであり、産業上はパルプ原料として重要な位置を占めている。EUCALYPTUS UNIVERSALIS の Cultivated Eucalypt forests global map 2008 によると、オーストラリアにおける 2008 年のユーカリ面積は 860,000 ha でその栽培の主たる目的がパルプ原料である。

我が国においてもパルプの主な原料はユーカリを代表とする広葉樹であり、チップの形で年間 959 万 t も輸入している。なお、ユーカリ樹 1 本を直径 20 cm、樹高 20 m と仮定すると、A4 コピー用紙 13,000 枚が製造される計算となっている。ちなみに、パルプ製造の過程は、樹木のセルロース部分を紙にし、リグニン部分は燃料として使うデザインとなっており、きわめて完成度の高い無駄の無い生産システムとなっている。現在、我が国における新聞や雑誌に使われる紙は、ほとんどがユーカリ由来のパルプが原料となっている。

ユーカリはパルプ原料となる以外に、ユーカリの葉から取れる精油（ユーカリオイル）は重要な香料原料として利用され、飲料食品やアロマセラピーなどに用いられている。実際、ユーカリオイルには鎮痛作用、抗炎症作用、抗菌作用、抗ウイルス作用などの生理活性が報告されている（Silva *et al.*, 2003; Delaquis *et al.*, 2002; Schnitzler *et al.*, 2001）。オーストラリアの先住民はこうした効果を経験的に知っていたのか、傷を癒すのにユーカリの葉を利用したとされる。また、現代においてもユーカリの葉そのものはハーブティーとしても利用され、さらに最近では、ユーカリオイルが抗アレルギーグッズに利用されるなど、その用途は非常に広い。このように有用性が認識されるユーカリオイルは、他の植物の精油と同様に組織当りの含有量は高くないため、非常に高価に取引されている。そこで、育種によるユーカリオイル含有量の向上が期待されているが、ユーカリは樹木であるために古典的な育種には、たとえ早生樹とはいえ数年以上の期間が必要であり、あまり現実的ではない。

近年、遺伝子工学の発展により、植物体内で精油成分が作られる際に働く酵素遺伝子の単離が可能になった。そこで、そうした遺伝子を分子ツールに用いた遺伝子組換えにより、植物が生産する精油成分の蓄積量を向上させる研究が可能となってきた（Dudareva & Pichersky, 2008）。ただし、こうした試みのいずれもが草本植物を対象としており、ユーカリのような樹木で遺伝子組換えによる香りのエンジニアリングを行った報告はなかった。その主な理由が、遺伝子導入の困難さと、草本に比べて必要とされる栽培期間の長さであり、重要性は認知されながらも、樹木の遺伝子組換えによる精油の代謝工学の実施は困難という一般認識であろう。そこで生存圏研究所は新しい挑戦として、日本製紙株式会社との共同研究で、遺伝子導入可能なユーカリ（*Eucalyptus camaldulensis*）を材料に遺伝子工学を応用し、従来育種と比較して短期間で飛躍的な精油含有量の向上を目指したユーカリオイルの代謝工学を行った（図 4-11）。

ユーカリに導入する遺伝子はモノテルペン合成酵素の 1 種、リモネン合成酵素の cDNA (PFLS) を用いた（図 4-11）（Yuba *et al.*, 1996）。代謝工学をデザインするに当たり、細胞内コンパートメントの改変を行った。すなわち、植物はテルペン類の生合成の共通前駆体であるジメチルアリルジリン酸（DMAPP）とイソペンテニルジリン酸（IPP）を、プラスチド（葉緑体に代表される色素体）とサイトゾルで、それぞれ別経路により供給できる。前者がバクテリアと共通の非メバロン酸経路（MEP 経路）

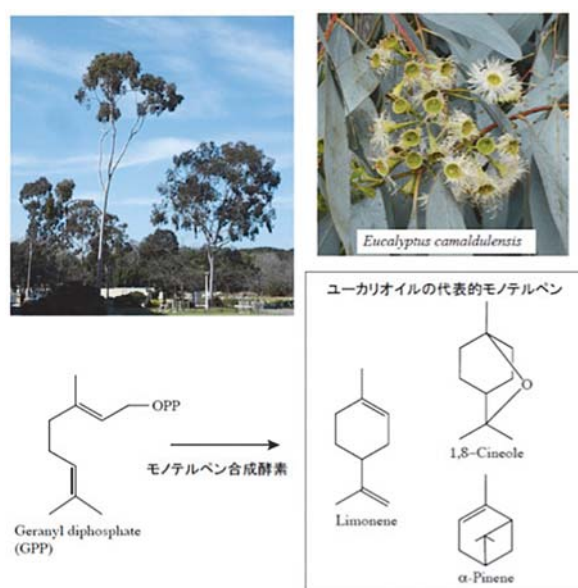


図 4-11：GPP の構造とユーカリの代表的モノテルペン

であり、後者がヒトや酵母と共通のメバロン酸経路である。モノテルペンは炭素数 10 のゲラニルジリン酸 (GPP) を基質とし (図 4-11)、葉緑体の中で合成されるが、この研究ではサイトゾルのメバロン酸経路を介したモノテルペンが合成可能か検証を行った。

その結果、色素体局在型 17 クローン、細胞質局在型 34 クローン、およびベクターコントロール 7 クローンの遺伝子組換えユーカリを得た。クローンの緑葉からヘキサンを用いて揮発成分を抽出し、ガスクロマトグラフィー (GC) による分析を行った結果、空ベクターを導入した対照植物のリモネン蓄積量は野生型と同程度であり、遺伝子組み換え自体はリモネン生産に影響を与えないことが確認できた。遺伝子組換えによるリモネン生産向上の効果を比較すると、野生型 11 個体のリモネン蓄積量は平均で $22.9 \mu\text{g/g}$ 、最も多いもので $73.0 \mu\text{g/g}$ であったのに対し、色素体型 PFLS を高発現した 9 クローンでは平均が $72.4 \mu\text{g/g}$ 、最も高いクローンでは $190 \mu\text{g/g}$ であり、いずれも野生型よりも高い蓄積量を示した (Ohara *et al.*, 2010)。興味深かったのは、天然型でない細胞質型 PFLS を発現した 7 クローンの平均では $120 \mu\text{g/g}$ 、最も高いクローンでは $327 \mu\text{g/g}$ にまで増加し、色素体型 PFLS を発現したクローンよりもさらに高いリモネン蓄積量が認められた点である。以上の結果をまとめると、野生型のリモネン蓄積量に対して、色素体型 PFLS で約 3 倍、細胞質型 PFLS では約 5 倍にまで緑葉のリモネン蓄積量を増加させることができた (Ohara *et al.*, 2010)。

この研究では、リモネン含量の増強以外にもう一つ興味深い知見を得た。それは、野生型と色素体型 PFLS、細胞質型 PFLS ではほぼ同様のプロファイルを示したことである。このことは、PFLS の遺伝子組み換えにより、1, 8-シネオールと α -ピネンの蓄積量も比例して上昇したことを意味しており、結果として組み換えユーカリは天然のユーカリオイルと同じ香り・品質そのものがそのまま含量だけ数倍に増えたものとなった。

この研究により、樹木の精油成分の蓄積量を向上させ産業に貢献するための可能性を一つ提供することができた。今後は、より大規模な遺伝子組換えクローンの作出と生産性スクリーニングにより、更なる高生産株の確立も可能であろう。今後、樹木の機能向上に向けた分子育種に関する研究分野がますます発展し、それにより将来、我々の生活がより豊かなものになることを期待する。

4.4 バイオリファイナリー

4.4.1 持続的生存圏創成に貢献するバイオリファイナリー

これまでの章でも紹介したように、化石資源の枯渇と温室効果ガスの排出による地球温暖化問題が深刻化するにつれ、化石資源の大量消費に依拠した 20 世紀型産業から脱却し、バイオマスを高度に変換してエネルギー、燃料、化学資源、機能性材料として利用する新しい産業体系、バイオリファイナリーの構築が求められている (渡辺, 2010; 2012a)。我々が社会の基盤を原油などの化石資源の消費からバイオマスなどの再生可能な資源の循環利用に転換しない限り、持続的な人類の生存は望めない。このことは逆に、生存のための社会基盤を再生可能な資源に転換することによって、20 世紀に固定化した国家間および地域間のパワーバランスを再構築し、先進的な地域のみならず、発展途上国や経済力の低い地域にも新たな光を与える大きな機会が到来する可能性を生み出すことを意味する。

バイオマスは再生可能な唯一の炭素資源である。石油から作られる液体燃料や化学品は、有機物で

あるバイオマスからは生産可能であるが、太陽光発電や風力発電などの他の新エネルギーでは作りだすことができない。このため、化石資源に依存した社会の限界が認識されるにつれ、木材などのバイオマスを、エネルギー、燃料、化学品、機能性材料に統合的に変換するシステムを確立することの重要性が急速に高まっている（渡辺, 2010; 2012a）。

再生可能な資源の中で樹木が生産する木質バイオマスは、地球上でもっとも生産量の多い有機資源であり、食糧と直接競合しないため、その生産と消費のバランスを保った形で化学品やエネルギーへの変換利用は、化石資源の急速な消費にともない資源枯渇問題や地球温暖化問題解決の決め手となる。また、木質バイオマスの利用は、森林の再生と周辺地域住民の生活や環境を復興させる契機になると期待される。木材は二酸化炭素が固定化されてきたものであるが、森林で朽ち果てると微生物により分解され再び二酸化炭素に戻る。木材を人間がエネルギー源などとして分解利用すると、やはり二酸化炭素が放出される。一見、両者は同じように見えるが、木材をエネルギー・化学資源として利用することによって人間が使う石油の使用量を減らすことができれば、その分大気中への二酸化炭素の放出は抑えられる。森林から生まれる木材を有機資源として利用することにより化石資源の消費量を減らす。同時にこうした変換プロセスから生まれた経済的恩恵を森林の育成に還元する。こうした社会の実現のためには、木材をエネルギー源としてのみでなく、有用な化学資源や機能性材料として多面的に利用すること、また、森林の育成と消費のバランスがとれていること、人工林が及ぼす環境や社会、経済に及ぼす影響を評価して、持続性を確保することが重要となる。

4.4.2 バイオリファイナリーによる新産業の創成

バイオリファイナリーでは、バイオマスの主要成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンを分離して高分子体として利用する方法、これらの成分を低分子化合物まで分解して利用する方法、両者を組み合わせる方法など様々な方法がある。セルロースナノファイバーの生産は、成分を高分子

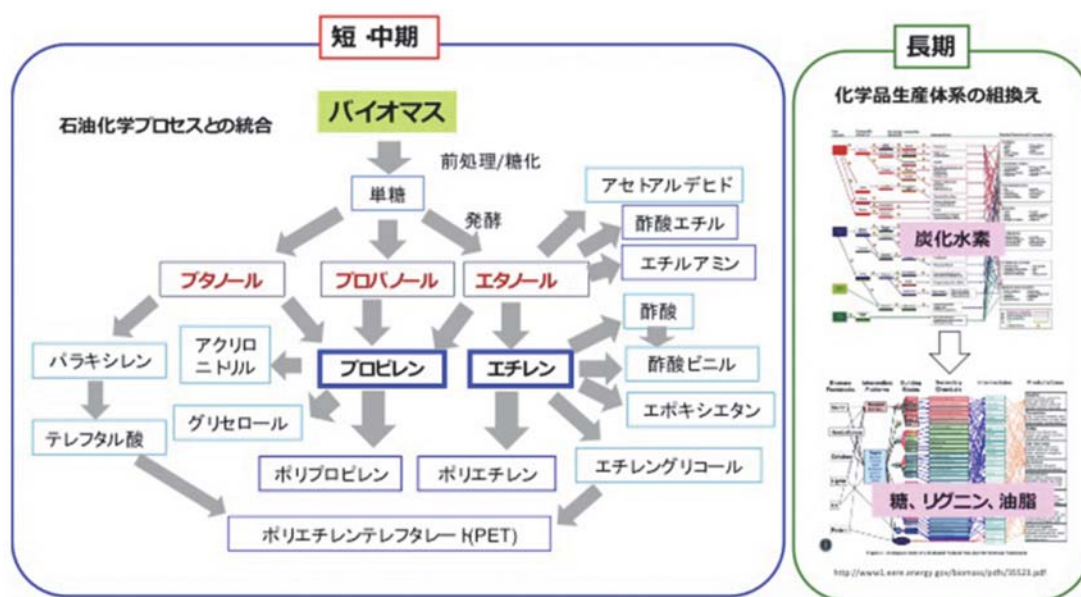


図 4-12：石油リファイナリーからバイオリファイナリーへの移行

体として利用する方法の代表例である (4.4.3 参照)。本項では、バイオマスを低分子体に変換して化学資源として利用する方法を中心に述べる。

20 世紀は石油化学の時代であり、エチレン、プロピレン、ベンゼンに代表される炭化水素をコア化学品とする体系的な化学産業が構築された。これに対し、バイオマスの原料である糖、リグニン、油脂は炭素、水素の他に酸素原子を多く含む。原料の構造や化学的性質が全く異なること、発酵が変換の大きなツールとなることから、バイオリファイナリーにおける化学品の生産体系は、石油リファイナリーとは根本的に異なる。このことは、バイオリファイナリーの上流に位置する基本化学品を決め、その基本化学品の生産技術を握った企業や国家が、バイオマスからの化学品生産という新しい産業体系全体を主導することを示す。米国は、この基本化学品の候補をいち早く提案し、以降国際競争が活発化している。こうした化学品生産体型の大変革とは別に、石油化学品の生産体系であるオイルリファイナリーにバイオマスからの化学品生産プロセスを融合する動きも加速化している。すでに、バイオエタノールからポリエチレン、酢酸エチル、エチルアミンを作るプラントが稼働しており、シェールガスなど新しい資源を含めて、多様な炭素資源から合理的に目的物を最小の環境負荷とコストで生産するプロセスが検討されている (図 4-12)。

4.4.3 木材多糖のバイオリファイナリー

まず、木質バイオマスに最も大量に含まれる多糖の利用法について考えてみる。一般に、糖の主な機能としては以下のものが考えられ、生物体の生命活動において重要な役割を担っている。

- ① 構造維持機能：高等植物の樹体維持（セルロース）、節足動物の外骨格（キチン）等
- ② エネルギー貯蔵：植物体中でのデンプン、動物体中でのグリコーゲン等。
- ③ 認識機能：糖タンパクに結合するオリゴ糖鎖として血液型の決定因子、抗原抗体の型認識、ウイルスの型決定因子等。
- ④ 代謝における補助的機能：補酵素等。
- ⑤ その他

本来、糖の利用にあたってはこれらの機能をうまく活かして行くことが重要であるが、ここでは主として地球上に最も大量に存在する植物体中の多糖の利用について考えてみる。

植物界には高等植物体の骨格を形成し樹体維持の機能を果たしている β -D- グルコースが 1、4 結合したセルロースと呼ばれる多糖 (図 4-13) と、植物体中でのエネルギー貯蔵物質である α -D- グルコースが 1、4 結合してできあがったアミロース部分と、さらに 1、6 結合した分岐を持つアミロペクチン部分の構造が混在するデンプンと呼ばれる多糖 (図 4-14) などのグルコースを構成要素とする糖が最も多量に存在している。他にマンノース、キシロース、ガラクトース、ラムノースやそれらの誘導体などを構成要素とするマンナン、キシラン、ガラクタン、ペクチン質など様々な形で糖が存在している。

これらの糖の利用に際しては、先ず (a) 高次構造を壊さず、そのまま木質材料として利用する方法がある。また、分子鎖構造は壊さずに、そのまま単離生成し、それを担体として側鎖に様々な官能基を導入して多糖分子鎖にいろんな機能を付与して利用する方法が考えられる。その一例としては生化学の研究分野でのゲル濾過クロマトグラフィーのためのカラムの担体として利用し、糖、タンパク、ペプチド、糖タンパクなどの分離精製に利用する方法がある。一方、(b) 多糖の分子鎖構造を壊し、単純な単糖にして利用するには様々な方法が考えられる。アルコール発酵などもその一例であるが、

ここでは単糖そのものを直接原材料として新たな化合物を調製して利用する方法の一例を紹介する。

多糖から単糖を調製するには、酸加水分解、酵素糖化など幾つかの方法がある。生成する単糖の構造は、一般には環状の構造を持った化合物として知られているが、それはヘミアセタールと呼ばれる構造を形成しているためであり、この環構造は鎖状の構造を経て二種類の異なる立体構造の間を可逆的に行き来している（図 4-15）。その鎖状構造を大まかに見ると、その構造はアルデヒド、或いはケトンの仲間の構造であり、石油から生成される炭化水素系のアルデヒドやケトンと同じ仲間である。つまり、石油化学製品と同じような物を、糖を原材料として製造することが可能であるということである。つまりバイオマスである多糖を原料として石油化学製品と同じような物を作り出すことが可能なのである。それゆえ、石油が枯渇するからと言ってこれまでの生活様式を一変させる必要はなく、バイオマスを原料として同じような類いの物を製造すれば、これからも従来の生活様式を続けて行くことが可能である。

ところで、一般的な単糖であるアルドースと呼ばれる単糖の基本的な鎖状構造を見てみると、一端にアルデヒド基を持ち、他端にヒドロキシメチレン基を持っており、さらにその間に複数のアルコール性水酸基をもっている。この単糖の両端の官能基を酸化したり還元したりすることはそれ程難しくはない。その場合、図 4-16 に示したような糖の誘導体が生成する。ところで、カルボキシル基とアルコール性水酸基があると縮合反応によりエステル結合が形成されることはよく知られている。それゆえ、図 4-16 上のこれらの誘導体を適当に組み合わせるとポリエステルを合成できることは容易に想像が付く。実際にこのような発想で単糖から製造された有用なポリエステルの例を紹介する。

トウモロコシから作ったプラスチックとして話題になったポリ乳酸（PLA）と言うポリエステルが

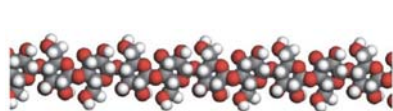


図 4-13：セルロース（ β -1, 4-D-グルカン）の分子鎖構造

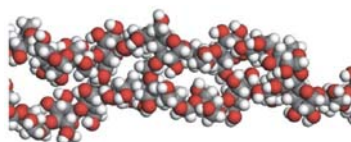


図 4-14：デンプンの構造の一例（アミロース+アミロペクチン）



図 4-15：グルコース分子の構造変換

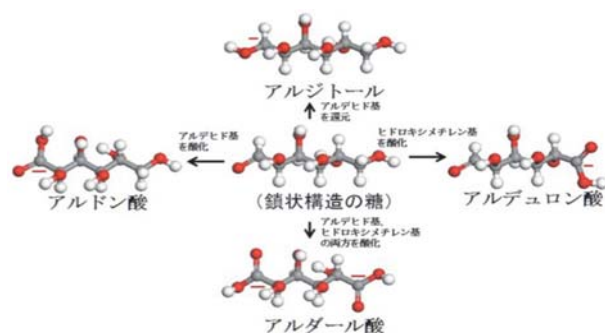


図 4-16：単糖から酸化、還元により精製する糖誘導体
(Modified from the article: Rao *et al.*, 1998)

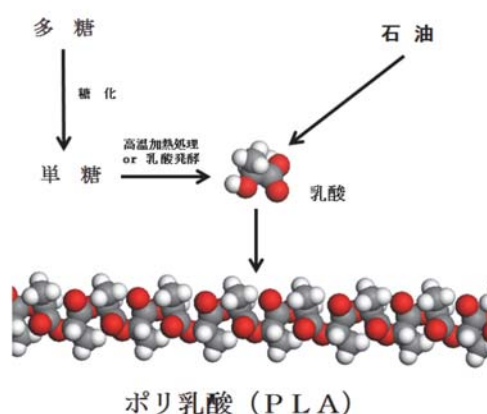


図 4-17：ポリ乳酸（PLA）の合成

ある。これは最も簡単な糖誘導体である分子内にカルボキシル基とアルコール性水酸基を持つ乳酸(2-ヒドロキシプロパン酸, 図 4-17) が縮重合してできた高分子化合物である。乳酸は単糖を高温で加熱処理したり、乳酸発酵をさせたりすることにより簡単に製造することができる。こうしてできた乳酸を縮重合させればポリ乳酸ができる。ポリ乳酸は、ヒドロキシアリカン酸が縮重合してできたポリヒドロキシアリカン酸 (PHA) と総称される一連のポリエステルの中でも最も簡単な例であるが、乳酸よりも炭素数の多いヒドロキシアリカン酸である、ヒドロキシブタン酸、ヒドロキシペンタン酸 (ヒドロキシバレリル酸) 等が縮重合してできたポリヒドロキシアリカン酸もよく知られている (土肥ら, 2003-2004)。これらのポリエステルは、例えば *Aeromonas caviae* などのバクテリアに餌として単糖や油脂類を与えることにより、省エネ的にポリマーにまで合成することができ、しかも生成したポリヒドロキシブタン酸 (PHB) やポリヒドロキシバレリル酸 (PHV) 等は優れた生分解性を持っているため、製造、利用、廃棄の一連の過程において、環境に与える負荷のきわめて少ない高分子材料として期待されている。

4.4.4 マイクロ波を利用したバイオリファイナリー

樹木や多くの草本性植物の細胞壁では、セルロースなどの多糖類がリグニンにより被覆されているため、細胞壁多糖をセルラーゼなどの酵素で加水分解してエタノールや化学品を発酵生産するためには、リグニンによって固められた細胞壁をほぐして細胞壁多糖を露出させる前処理が必要となる (3.3.1 参照)。リグニンを剥がす前処理と酵素による細胞壁多糖の分解のための技術開発が、木や草から効率よくバイオエタノールを生産する大きな鍵となる。また、多糖のみでなく、分離したリグニンの高付加価値利用も、プロセスを実現するための鍵となる。

リグノセルロースを原料とするポスト石油化学産業創成のためには、脂肪族化合物の生産とともに、化学産業にとって重要な芳香族化学品を同時生産する技術開発が重要である。バイオ燃料生産では、多くの場合リグニンを糖化発酵の阻害物質と位置づけて、前処理により分離したリグニンはエネルギー源にするか、ガス化によりリグニンの構造を破壊して利用することを想定している。バイオエタノールの製品価格は安く、原料費、生産規模、人件費などで有利な海外と価格面で競争するのは容易ではない。こうしたことから、糖の化学品変換と同時に、リグニンから高付加価値物を同時生産するプロセスの開発がバイオリファイナリー実現のための要の一つとなる。リグニンのすべての構成要素を高付加価値物に変換することはできないため、リグニンの変換により得られるファイングレードの原料は高付加価値物に変換し、残渣の部分はバルクの用途やエネルギー源として利用する。また、同時に分離される糖は、発酵原料やナノファイバーなどとして利用する。このプロセスを実現するためには、植物バイオマスや前処理物のリグニ

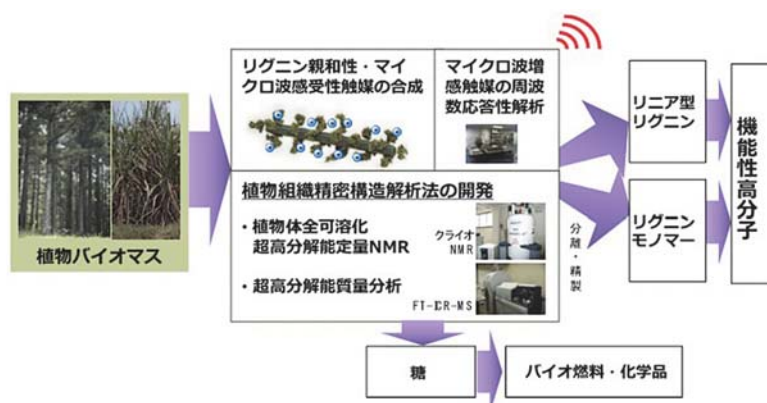


図 4-18: マイクロ波応答性触媒反応を介したバイオマスの変換

ン構造を精密に解析するとともに、リグニンの構造に基づいた物質変換の分子設計をすることが必要である。生存圏研究所が取り組んでいる CREST プロジェクトでは、植物体から高分子合成に適したリグニンを高効率で分離して、芳香族機能性高分子を合成する産学連携研究を実施している（図 4-18）。この研究では、リグニンへの親和性と電磁波吸収能を賦与したメタル化ペプチド触媒などを合成し、触媒の電磁波周波数応答性を精密に解析して、高効率・高選択的な新規リグニン分解反応系を開発する。このため、周波数をシームレスに変化できる電磁波反応装置を開発している。また、超高分解能植物体全可溶化定量核磁気共鳴（NMR）分析法や、フーリエ変換イオンサイクロトロン質量分析法（FT-ICR-MS）などによる植物組織やその成分の精密構造解析法を開発し、溶媒可溶であり構造制御が容易なりニア型高分子リグニンに富む植物の選抜と電磁波触媒反応による高効率な分離反応系を開発している。分離したリニア型リグニンは、分散性、耐衝撃性および紫外線吸収能に優れるポリマーに変換する。また、リグニンの側鎖開裂をともない電磁波反応を利用して植物からヒドロキシ芳香族カルボン酸類を生産し、耐熱性や溶媒耐性に優れるポリマーに変換する。マイクロ波によるリグニンの変換利用と同時に、多糖はバイオエタノールに変換する。このための変換システムと生産プラントを 3.3.1 に記載したように開発した（渡辺, 2013）。

またリグニンからの機能化学品の一つとして、マイクロ波反応による紫外線吸収剤の生産を花王株式会社と共同で研究している。太陽光線に含まれ地表に届く紫外線は、315 ~ 400 nm の長波長紫外線（UV-A）と 280 ~ 315 nm の中波長紫外線（UV-B）に分けられる。これら紫外線は、プラスチックの劣化、塗料の変色などを引き起こすとともに、人の肌へも大きなダメージを与える。UV-B は短時間で肌に紅斑や浮腫などの炎症を引き起こし、数日後メラニン色素沈着を生じさせる。UV-A は皮膚の奥まで入り込み、肌の張りや弾力の低下の原因となり老化を促進する。現在、肌への紫外線の影響を防御する目的で、化粧品用途として紫外線を効率良く吸収する紫外線吸収剤や、紫外線を散乱させる無機粉体が開発され、日焼け止め製品への配合が行われている。一般的に有機系紫外線吸収剤としてはベンゼン核を主に、より長波長の紫外線を吸収させるために共鳴構造を有する分子設計がなされており、主な基本骨格としてベンゾフェノン系、ベンゾトリアゾール系、メトキシ桂皮酸系他が挙げられる。特に化粧品に使用される場合には、肌への安全性を考慮された特殊な骨格をもつ分子が合成されている。生存圏研究所は、芳香族系天然高分子であるリグニンの基本骨格を利用した天然型有機系紫外線吸収剤を開発することを目的として、リグニンの酸化分解により、UV-A および UV-B 領域に吸収をもつリグニン分解物を分離した。

4.4.5 熱帯産早生樹のバイオリファイナリー

インドネシアの低地熱帯多雨林を対象として、集約的な森林管理と林産物の高度利用を実現することで、持続的な熱帯林利用を可能にし、森林再生と経済振興を同時に達成する方法が研究されてきた。京都大学が中心となり実施されたプロジェクトでは、インドネシアカリマンタン島西部の産業造林を対象としている（神崎, 2012）。この中で、現地に生育する未利用早生樹のバイオエタノール生産に対する適性を調べ、新たな高度林産物利用を図る研究を実施した（図 4-19）。建築や木質材料生産に適した樹木は、材料として十分な強度や耐久性を保持することが必要であり、紙・パルプ生産に適した樹木は、パルプ化や漂白のしやすさを持ち、繊維長が長く紙を製造した際に必要な強度をもつことが求められる。しかし、バイオエタノールでは、セルロースなどの多糖を分解して、分解物を発酵し目

的物を生産するため、多糖の分解のしやすさや糖収量が基準となる。現在の植林樹木はこうした基準では選抜されておらず、現地の未利用樹木から高い生産性をもつ樹種が選抜されれば、新たな産業を生み出す可能性が提供される。多糖の分解は、バイオエタノールのみでなく、糖の発酵で生産される様々な化学品製造にも適用することができる。こうした考えから、カリマンタン島西部の木材生産会社の産業造林で様々な早生樹をサンプリングして、その分解性を調べ、既存の樹種と比較した。その結果、熱帯産早生樹でも酵素分解による糖収率には大きな差があり、従来注目されていなかった未利用樹種から、バイオエタノールなどへの変換に適した樹種が見出された。遺伝子組換えにより熱帯産早生樹に有用な性質を賦与する研究（4.3.2 参照）と並んで、現地の森林から未利用樹種を探索する研究を継続することが必要である。

熱帯産早生樹に関しては、これまでに様々な利用法が検討されている（渡邊・渡辺, 2007; 渡辺, 2012b）。3.3.1 に記載したマイクロ波を利用したユーカリ材からのバイオエタノール生産はその一例である。この研究では、木部のみでなく、樹皮を含むユーカリ全木のバイオエタノールへの変換も実証した。木部と樹皮の両方を利用できると紙パルプ生産との相補関係が強化される。ユーカリ材などの熱帯産早生樹をバイオエタノールに変換して燃料として利用した場合、ガソリンに比較して温暖化ガスの排出削減効果があることが示されている。

木質バイオリファイナリーの考えを導入すると、木材多糖のすべてを紙パルプやバイオ燃料に変換するのではなく、ヘミセルロースをバイオ燃料や機能性高分子として利用し、セルロースは紙の原料として利用する多面的な利用法が合理的である。例えば、ヘミセルロースであるキシランをパルプ化前に抽出してバイオエタノールに変換し、キシランを抽出した残滓を脱リグニンしてセルロースからなるパルプを生産する方法が提案されている。これまで、キシランなどのヘミセルロースはパルプ収率を向上させるために、パルプ化による溶出や過分解を防ぐ方法が検討されてきたが、分解しやすいキシランをバイオエタノールなどの他用途に利用できるならば、パルプ化の条件をセルロース分離に最適化できる。これにより、パルプ化の条件の許容度が広がり、全体のコストバランスや木材の利用価値が向上する。キシランは、バイオエタノールの他、揮発性成分の蒸散を防ぐコーティング材、ハイドロコロイドなどの機能性ポリマーに変換される。

インドネシアなどの熱帯アジアでは窒素固定能力により旺盛な成長が可能なマメ科のアカシアが広範に導入されている。アカシア・マンギウムは、荒廃地への造林適用性が高いため、紙・パルプ、木質材料、燃料、活性炭、肥料、化学品などの原材料として広く利用されている（渡邊・渡辺, 2007; 渡辺, 2012b）。また、バイオエタノールの生産にも適するが、木質材料としてはドア、窓枠などの建築用造作材、家具、合板、パーティクルボード、ハードボード、LVL、MDF などのボード製造に



図 4-19：バイオエタノール生産に適した熱帯産早生樹のカリマンタン島での探索

利用される。例えば、世界的な家具メーカーである IKEA は、ベトナムでアカシア・マンギウムなどの熱帯産早生樹から家具を製造し、各国で販売している。同樹種については、樹皮に豊富に含まれるタンニンを利用してアミノ樹脂やフェノール樹脂系の接着剤に代わる接着剤の開発がなされている。また、その種子は食用にも利用される。また、葉は家畜飼料に利用される。

アカシア・デアルベータは、オーストラリア南東部原産で、アフリカに帰化植物として自生した。19 世紀初頭に観賞用としてヨーロッパに持ち込まれ、それ以降、野生化している。この樹木の精油はミモザと呼ばれ広く利用されているが、一方で、繁殖力が強く生態系を破壊する生物種と位置づけられている。このため、その利用拡大を図る方策の一つとして、バイオエタノール化が研究されている。

熱帯早生樹は、燃料材や土壌改良剤として利用されている。アカシアは灰分 (ash)、すなわち、無機物 (Ca, K, P, Mg, Si, Al, Ba, Fe, Ti, Na, Mn, Sr) 含量が高いことから、燃焼後に残る灰分を肥料として土地に散布することか可能である。パルプ生産の際にでるアカシア・マンギウムの樹皮の炭(charred bark)を土壌に肥料として散布すると、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。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アカシア・マンギウムは貴重な樹種である。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、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、タンニンやアカシア・アウリカリフォーミスに多く存在する抗真菌性およ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。熱帯産早生樹に、これまでに知られていない新しい付加価値を与え、多面的な用途開発をすることが必要である。

4.4.6 バイオリファイナリーを基盤とした持続的社会的構築に向けて

バイオリファイナリーは、熱帯雨林をもつ東南アジア地域に有利な産業であり、産油国が原油産出によって大きな富を得てきたように、バイオマスの生産と高度利用によってとくに東南アジア地域に新たな産業を興し、国際間および国内の地域格差の是正につなげるべきである(渡辺, 2010)。東南アジア地域は、植物の炭素固定量が大きいのみでなく、豊富な微生物資源をもつことから、生物資源をベースとした産業の地盤として最適である。こうした新しい産業を東南アジア地域に育成して、均衡ある発展を達成するためには、先端的なバイオマス利用の技術開発を行っている先進国と東南アジア諸国との国際協調が必須である。この国際協調は、技術供与や投資のみならず、バイオマスとバイオ製品の流通、二酸化炭素の国家間取引、環境や地域社会への影響評価、人材育成、およびそれらを統制する法制度の整備を含めるべきである。東南アジア地域を資源の供給基地としてのみ捉えるのではなく、アジアのパートナーとして、また宇宙船地球号に乗る運命共同体として、環境保全や地域社会への影響を評価しながら、技術や制度面を含めて支援していくことが必要である。バイオ燃料導入を図る際、バイオ燃料開発の利権が中央政府や一部企業に集中すると、環境破壊、利益の不公平な分配、労働搾取を招く恐れがある。例えば、現在インドネシアの東カリマンタンでは、エネルギー確保のために石炭の露天掘りによる森林破壊が進んでいるが、その開発の利益が中央政府や開発企業に流れ、現地の地域振興や環境保全に十分還元されていない実情がある。バイオリファイナリーにおいては、地域住民の人権や生活、環境保全を尊重する観点に立ち、人工林開発や工場設置の認可を行う政府、地方の行政機関、開発を請け負う企業、地域住民との相互関係を、公平かつ長期的視点から統制する

法制度の整備が必要である。

豊かな生物資源をもつ東南アジア地域に、バイオリファイナリーに立脚した地域社会を構築する機会が到来しようとしている。これを実現する上で、日本が果たすべき役割は計り知れないほど大きい。東南アジア地域にとどまらず、我々は、今人類と地球の未来を決定づける大きな責任を負っていると言えるであろう。

4.5 これからのバイオマス材料

4.5.1 セルロースナノファイバー

今、世界中で植物由来の高性能ナノ繊維：セルロースナノファイバー（CNF）に注目が集まっている。CNFは、すべての植物細胞の基本骨格物質で、植物バイオマスの約半分を占める幅4～20nmの均質で無尽蔵の持続型資源である。植物が進化の過程で構造支持物質として獲得した伸びきり鎖結晶構造は、CNFに鋼鉄の1/5の軽さで、鋼鉄の7～8倍の強度という、優れた機械特性をもたらしめている。精密部品や大型構造部材にとって重要な線熱膨張係数もガラスの1/50ときわめて小さい。

これまで我が国は、セルロースナノファイバーの製造と用途に関し世界をリードして多くの優れた研究成果を挙げてきたが（Eichhorn *et al.*, 2010; Moon *et al.*, 2011; 矢野ら, 2009; 矢野, 2011; 磯貝, 2012）、最近では、研究支援体制を整えた北欧、北米の国々に研究面、知財面で追い越されようとしている。中国のキャッチアップの速さも無視できない。一昨年からは、フィンランド、カナダ、米国の主導でISO化の議論も始まり、まさに国家レベルでの競争の様相を呈している。

〔セルロースナノファイバー〕

セルロースナノファイバーは、植物細胞壁中において、幅4nmのセルロースマイクロフィブリル（シングルセルロースナノファイバー）が数本のゆるやかな束となって存在している（図4-20）。木材の約半分はセルロースナノファイバーである。セルロースナノファイバーの長さは明らかでないが、電子顕微鏡では少なくとも数 μ mにわたって連続して観察される（図4-21）。長さ方向において200～300程度のグルコース残基ごとに4、5個のグルコース残基程度の大きさの非晶領域が存在しており、結晶領域と非晶領域の比率として求める結晶化度は60～70%である。

産業的に利用可能なセルロースナノファイバーには、後述する製造方法によって、シングルセルロースナノファイバーから、その束であるセルロースナノファイバー、セルロースナノファイバーが数十～数百nmの束となりクモの巣状のネットワークを形成しているマイクロフィブリル化セルロース（MFC）などがある。すなわち、製造方法によって様々な形態のセルロースナノファイバーを得ることができる。

セルロースマイクロフィブリルあるいはセルロースマイクロフィブリル束について強度を直接測定した例はないが、その集合体であるクラフトパルプについて引張試験で約100GPaの弾性率と1.7GPaの強度が得られている（Page & EL-Hosseiny, 1983）。パルプにおいてマイクロフィブリルの約7～8割が繊維長軸方向に配列していることを考えると、マイクロフィブリルの弾性率は結晶弾性率140GPaに近く（Sakurada *et al.*, 1962）、強度は少なくとも2～3GPaはあるといえる。結晶強度として10GPaをあげる研究者もいる。弾性率は-200℃から+200℃の範囲でほぼ一定である（Nishino *et al.*, 2007）。また、オー

ルセルロース繊維材料における線熱膨張係数として測定限界に近い 0.17 ppm/K が得られている (Nishino *et al.*, 2004)。これは石英ガラスに匹敵する値で E- ガラスの約 1/50 である。さらに、セルロースナノファイバーシートにおいて、熱伝導率がガラス並みに大きいことも明らかになっている (Shimazaki *et al.*, 2007)。このように天然の結晶構造およびナノ構造に基づき産業的にきわめて重要な物理特性が、比表面積が大きい均一ナノファイバーの状態で得られる点がセルロースナノファイバーの特筆すべき点である。また、セルロースナノファイバーの表面にはグルコース単位（セルロースの基本繰り返し構造）あたり三つの反応性が異なる水酸基が存在しており、その精密な化学修飾はセルロースナノファイバーに多様な物理的、化学的、生物的特性をもたらす。セルロースナノファイバーはカーボンナノチューブや電界紡糸ナノ繊維と比べ、改質の自由度がきわめて高いナノ繊維といえる。

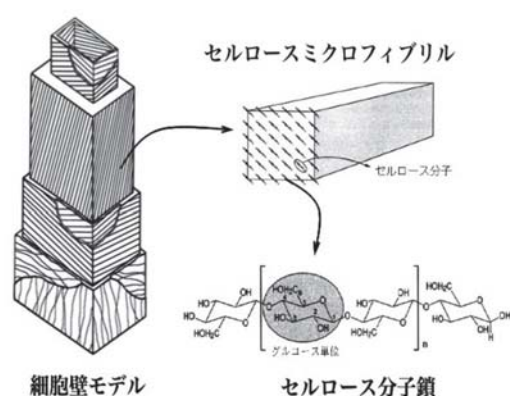


図 4-20: 木材の細胞構造とセルロースナノファイバー

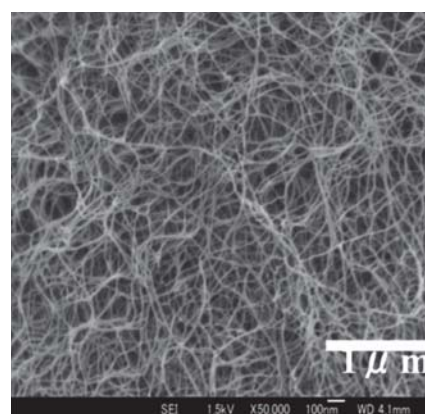


図 4-21: 木材細胞壁中のセルロースマイクロフィブリル束 (京都大学 栗野博士提供)

[セルロースナノファイバーの製造方法]

木材パルプなど植物系繊維材料からのセルロースナノファイバーの製造について様々な方法が開発されている。数%の低濃度で行うパルプスラリー解繊技術としては、高圧ホモジナイザー法、マイクロfluidizer法、水中カウンターコリジョン法、グラインダー磨砕法、凍結粉碎法、超音波解繊法、高速攪拌法、ビーズミル法などがある。

低濃度での解繊は均一なナノファイバーを得やすいが、解繊効率やその後の脱水プロセスに起因してコスト高である。これに対して、固形分が数十%程度のパルプ・水混合物を出発点とした解繊技術として二軸混練機などを用いた強せん断混練法やボールミル粉碎法がある。ポリマーやゴム存在下での混練や粉碎によるナノファイバー化は、ポリマー中へのフィラーの均一分散を同時に行える可能性があり、ナノファイバー強化プラスチックの製造に有利である。

低エネルギー、高効率でのナノ解繊を目的として、機械処理前のパルプに対する化学修飾や酵素処理、微生物処理、酸処理に関する研究が進められている。斉藤と磯貝は、TEMPO (2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxy radical) を触媒に用い、CNF 表面の 6 位の水酸基を選択的にカルボキシル化すると、水中でナノファイバー相互の反発性が高まり、ナノファイバー化が促進されることを明らかにしている (斉藤・磯貝, 2007)。この前処理により、ミキサー等のきわめて軽微な攪拌処理でマイクロフィブリルのレベルまで均一に解繊することができる。さらに、乾燥後、ナノファイバーを水中に

再分散させることも可能である。同様の効果はカルボキシメチル基の導入でも認められる。

セルロースナノファイバーには、酢酸菌などのバクテリアが産出するものもある。身近なデザート食品であるナタデココといったほうが、馴染みがあるかもしれない。植物原料は細胞壁からマトリックス成分を取り除き、機械的解繊によりナノファイバーを取り出す必要があるが、バクテリアセルロースではバクテリアが培養液中でナノファイバーを紡ぎながら移動し、かつ分裂するため、幅 50-100 nm のセルロースナノファイバーが凝集することなく溶液中に均一に分散したネットワーク構造体が容易に得られる。このため、高弾性のゲル状シートとして、人工血管や傷口治療用シートなど、医療関係への応用が多く研究されている。乾燥シートがスピーカ振動板として用いられている例もある。

北米では、木材パルプやコットンを強酸で処理して得られる針状のセルロースナノエレメント：セルロースナノクリスタル（Cellulose Nanocrystal）の製造と利用に関する研究が活発である。後述する様に、昨年の1月から固形分ベースで日産1tのセルロースナノクリスタル製造プラントが操業を開始し、その用途開発が活発化している。

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

〔セルロースナノファイバーの利用〕

セルロースナノファイバー、セルロースナノクリスタルについて、高比表面積、可食性、軽量・高強度、低熱膨張性、生分解性、生体適合性などの特徴を活かした様々な用途開発が進められている。

① 構造材料

軽量・高強度繊維の特性を活かし構造用途への検討が進められている。ナノファイバーシートにフェノール樹脂を注入後、積層、硬化すると繊維率約 90% で鋼鉄の 1/5 の軽さで鋼鉄なみの強度の成形体を得られている（図 4-22）。

樹脂強化フィラーとしての観点からは、自動車部材に多用されているポリプロピレン樹脂の補強が重要である。自動車では燃費の向上のため部材の軽量化が各方面から研究されており、その一つとして金属部品をポリプロピレンやポリエチレンといった軽量樹脂に置き換えることが進んでいる。しかしこれらの樹脂は強度が低いという熱膨張が大きく、金属部品の代替とするには限界がある。最近、生存圏研究所では、京都市産技研や企業と共同で行った NEDO プロジェクトにおいて、セルロースナノファイバー表面の水酸基を精密化学修飾することで、10% のセルロースナノファイバー添加で、ポリプロピレン、ポリエチレンの弾性率を 3～4 倍に、強度を 2～3 倍に向上させる技術を開発した。線熱膨張も 1/5 近くまで抑制できる。同様の補強効果はナイロン 12 や ABS 樹脂においても得られている。特筆すべき成果として、高密度ポリエチレン（HDPE）、ポリプロピレン、ポリアミド（ナイロン）では、ポリマーをシシ（串）としたシシケバブ構造とともに、射出成型後に樹脂中に均一分散した変性 CNF の表面からポリマーの結晶ラメラが成長し CNF をシシとしたシシケバブ構造が形成されることを見出した（図 4-23）。このことは、表面改質が容易なナノフィラーとして CNF の特性を活かすことでポリマーの結晶構造を制御し、より高機能の材料に変換できることを示すものであり、高分子材料における新たな学術分野を開拓したといえる。同様のシシケバブ構造は本研究で新たに開発した高

分子分散剤を CNF 強化樹脂材料に添加するだけでも得られており、高分子分散剤は CNF 材料の新展開に繋がる材料となっている。また、ナノコンポジットの微細発泡は自動車部材の軽量化の観点から注目されている新しい学問分野であるが、本プロジェクトで開発した変性 CNF 強化 HDPE の微細発泡により、自動車に多用されている無機フィラー強化ポリプロピレンと同等の強度特性を半分の軽さで達成した。セルロースナノファイバーを染色し、そのまま自動車部材を着色、補強する技術も開発した。バイオ系ナノ材料の開発として、ポリ乳酸樹脂や植物系エポキシ樹脂、天然ゴムの補強に関する研究も進められている。

一方、実用化の観点からは、化学変性したパルプを二軸押出機で樹脂ペレットと熔融混練して、パルプのナノ解繊と樹脂中への均一分散を一工程で行う技術を開発した。得られた複合材料は、ナノ繊維の分散性や物性において、化学変性パルプをナノ解繊した後に樹脂と混練することで得られる化学変性 CNF 強化材料と遜色ない。この技術によりコスト増の大きな要因となっていた二軸混練前のパルプのナノ解繊工程が無くなり、セルロースナノファイバー強化樹脂材料の実用化に向けて大きく前進した。本成果を活用し、本プロジェクトへの参加企業が経済産業省のイノベーション拠点整備事業により変性パルプ、変性 CNF 製造用のテストプラントの建設を始めた。

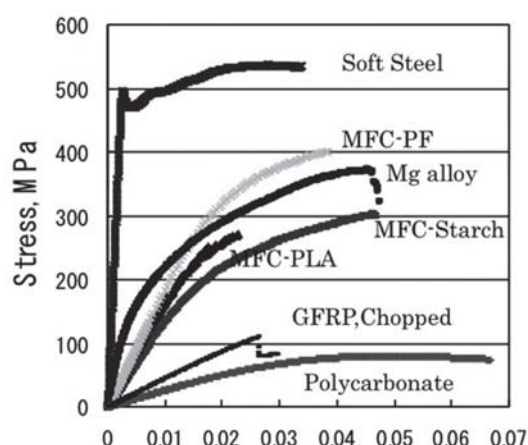


図 4-22：マイクロフィブリル化繊維成形材料と他材料の曲げ強度特性比較



図 4-23：射出成形後に観察されるシシケバブ構造（CNF 強化 HDPE）

②透明材料

可視光波長（400 ～ 800nm）に比べ十分に細いセルロースナノファイバーは可視光の散乱を生じない。このため、アクリル樹脂やエポキシ樹脂などの透明樹脂を、その透明性を大きく損なうことなく補強できる。均一なセルロースナノファイバーで強化した複合材料は、透明でプラスチックの様にフレキシブルでありながら（図 4-24）、ガラスのように線熱膨張が小さい。また、熱伝導率もガラス並に高い。このことから、ロール状シートに有機 EL 素子や有機トランジスタ、有機太陽電池を連続的に印刷していく Roll to Roll プロセス用の透明基板として注目されている。本材料は、2009 年から三菱化学と王子ホールディングスが共同で事業化に向けた検討を進めており、最近サンプル供給を開始した。

TEMPO 触媒を用いた酸化処理により幅 10 nm 以下にまで解繊したセルロースナノファイバーの

フィルムはそれだけで高い透明性を示す。適度な透湿性を保ちながら PET やポリ塩化ビニルの 1/100 以下の酸素ガス透過性を示すことから、包装容器のコーティング素材として検討されている。



図 4-24：セルロースナノファイバー補強透明材料（左）とそれを基板に用いた有機 EL 発光素子（右）

③その他

紙の表面平滑化や紙力増強にセルロースナノファイバーを利用する研究が、北欧や北米の製紙産業において活発に行われている。1%程度のセルロースナノファイバー添加で紙強度を大きく向上でき、紙の大幅な軽量化を図ることができる。

比表面積の大きい親水性の特徴を活かし、食品・化粧品の粘度やテクスチャー制御のための添加剤としての研究も行われており、食品用途で一部、実用化されている。水系ポリマーに添加して耐摩耗性の塗料とする研究も行われており、実用化に近いとの情報もある。

手術用コットンが何年間も体内に取り残された状態で見つかることから推測されるようにセルロースナノファイバーは生体親和性に優れている。その特性を生かし、人工血管や人工腱、人工軟骨における構造体、補強繊維としての検討が挙げられる。人工血管についてはラットへの移植試

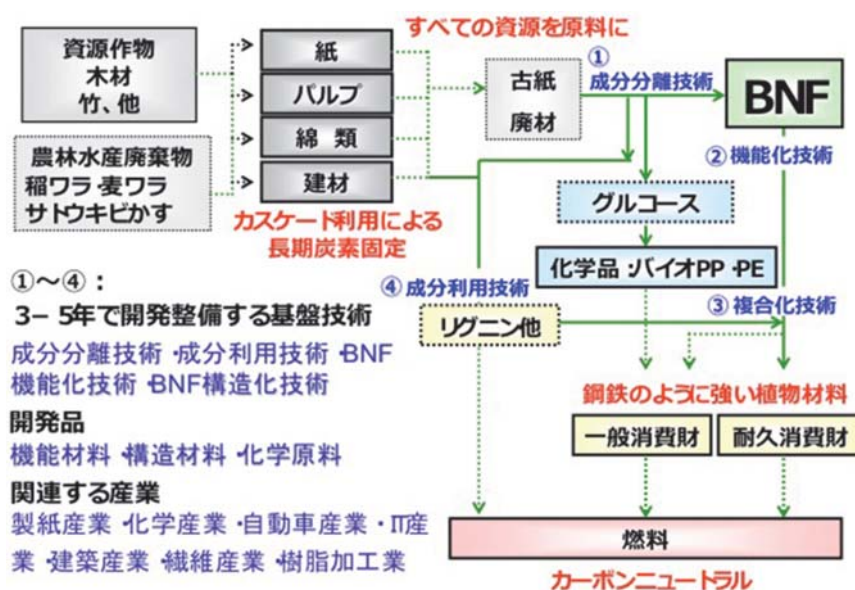


図 4-25：地域自立型バイオマスコンビナートを目指して（JCII・BNF 勉強会資料を改変）

験が行われ、毛細血管の再生が認められている。骨再生のためのスキャフォールドとしての利用研究も進められている。

その他、先進的利用として、触媒等の担持体、フィルター素材、二次電池セパレーターへの応用についても、特許や論文が出されている。

〔セルロースナノ材料の未来〕

セルロースナノ材料は、①高強度・低熱膨張、②リニューアブル（持続性）、③CO₂排出抑制（カーボンニュートラル）、④安全・安心（生体適合性）、⑤マテリアル・サーマルリサイクル可能、⑥低環境負荷（生分解性付与）、⑦農産廃棄物・産業廃棄物の再資源化、など多くの優れた特徴を有している。なかでも大型産業資材として高いポテンシャルを感じさせるのは、その価格である。木材パルプは均一なセルロースナノファイバーの集合体である。それが100円/kg以下で大量に安定して入手できる。炭素繊維やアラミド繊維といった高機能繊維やエレクトロンスピニングによる高分子ナノファイバーとの大きな違いは、この価格である。セルロースナノファイバーの優れた特性を有した材料が大型産業資材となるかどうかは、この優れた価格競争力をどのように最終製品まで維持するかにかかっている。その技術が達成されれば、セルロースナノファイバーは、我が国における川上から川下までの幅広い産業、すなわち、製紙産業、化学産業、繊維産業、自動車産業、IT産業、食品産業、医療産業、成型加工業等に関わる材料となる。さらには、日本の森林資源、バイオマス資源で製造した高機能材料をキラーマテリアルとして海外に輸出することも夢ではなく、大きな経済効果を期待できる素材である。そのためには、図4-25に示す1)セルロースナノファイバーとともにリグニンおよびヘミセルロースを工業原料として木材から分離する技術、2)分離した成分を機能化する技術、3)セルロースナノファイバーを複合材料化する技術、4)分離したリグニンおよびヘミセルロースを高度有効利用する技術、といった基盤技術を我が国において早急に整備する必要がある。

4.5.2 木質バイオマスの機能性炭素への変換

〔炭素化による高機能化〕

太陽エネルギーの産物である木質バイオマスから機能性材料を開発するには、木質バイオマスの微細構造と表面化学の両方を変えることのできる処理を行う必要がある。機能性材料とは、触媒、センサー、エネルギー変換等で必要とされる機能を利用する材料であり、強度を必要とする構造材料とは対照的である。原子や分子のスケールで制御するナノテクノロジーによって作られた炭素材料に関心を集めている。しかし木質バイオマスを原料にしたナノテクノロジーは遅れている。木質バイオマスの炭化による炭素素材を開発することにより金属や無機物などとの複合化が可能となり、木質バイオマスに新たな性質を付与することができる。

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行われており、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。木質バイオマスから高機能性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。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、

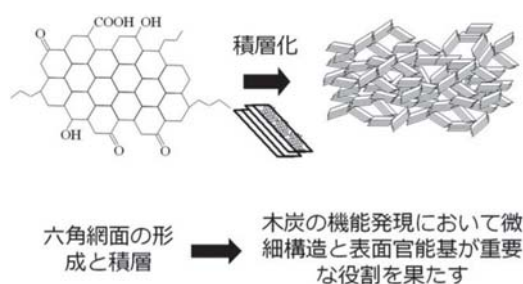


図 4-26：炭素六角網面の積層による乱層構造炭素の形成（畑，2007）

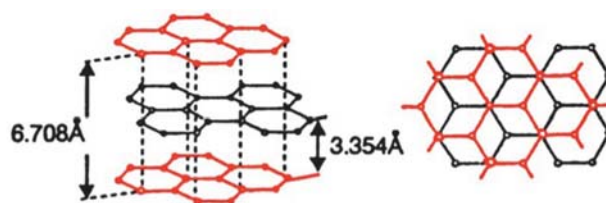


図 4-27：黒鉛の結晶構造

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℃ 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、半導体材料となる炭化ケイ素材料に注目が集まっている。木質セラミックスは木質炭素化物とセラミックスの両方の特性を併せもち、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。

〔炭素と黒鉛〕

炭素は元素名で "C" という記号で表すが、炭素材料の意味で使われる場合もある。一方、炭素材料学において "炭素" と "黒鉛" は厳密に定義されている。図 4-26 のように結晶の発達していないものを炭素（または乱層構造炭素）と呼ぶのに対し、結晶化が進み、三次元周期構造をもつものを黒鉛と呼ぶ。つまり、炭素六角網面（グラフェン）が積層構造を持ち二次元の周期構造をもっている、図 4-27 に示すように、隣あったグラフェンが半周期ずれた三次元的周期構造がなければ黒鉛とはいわない。そのため、高温炭や触媒炭素化により木炭中に観察される微細な黒鉛積層を "ミクロ黒鉛構造" と呼び、通常の黒鉛構造とは区別している（畑, 2012）。

〔微細構造と機能〕

図 4-28 はスギ木炭の走査型電子顕微鏡写真である。角ばった仮道管という円筒形の管（長さ 1～6 mm）が整然と配列している。樹木の中では、これら細胞構造が幹を支え、水を通す。木炭中の細胞壁にはこのように小さな孔が無数にあって大きな表面積をもち、いろいろな物質を吸着する。つまり、木炭は、細胞壁で構成されるマクロ構造と細胞壁表面上の無数の微細な孔を形成する炭素骨格で構成され

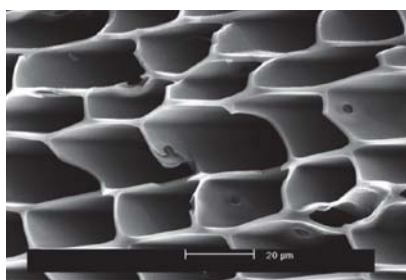


図 4-28：スギ木質炭素化物の細胞構造（畑，2007）

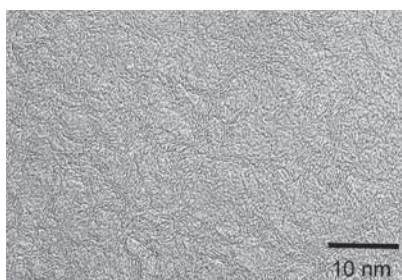


図 4-29：スギ炭素化物の乱層構造炭素

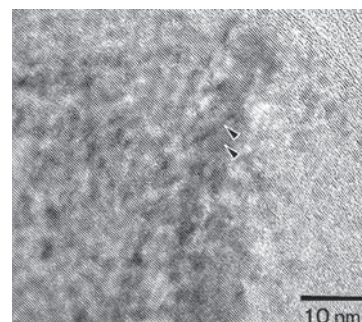


図 4-30：木炭中のミクロ黒鉛構造（2500℃）

るミクロ構造からできている（畑, 2007）。木炭中では気体を通し、気体中の分子を細胞壁表面で吸着する。細胞壁表面の吸着は炭素表面の状態、小さな孔の構造（直径、容積、形状）が大きな役割を果たす。

図 4-29 と図 4-30 は炭素構造を高性能の透過型電子顕微鏡で調べた写真で、前者が乱層構造、後者がミクロ黒鉛層である。図 4-29 でみられる無配向な乱層炭素が木炭のような難黒鉛化炭素の特徴である（畑, 1998）。なお、細胞壁表面への気体の吸着は物理吸着と化学吸着に分けられ、前者では吸着した物質は加熱などにより脱着可能であるのに対して、後者では物理的に脱着するのは困難である。これら構造上の特徴を活かし古くから木炭を利用してきたのである。木炭のような炭素材料の物性は、その微細構造と表面化学構造に起因しており、原料や炭素化温度により異なることが明らかにされている。マクロ構造とミクロ構造を合わせ持つという木炭のマルチスケール性を活かしてその物理的性質の新しい利用を進めることが可能である（畑, 2012）。

[木質バイオマスとナノ炭素同素体]

同素体とは、同一元素から成るが、原子の配列や結びつき方が異なるため性質も違う単体のことをいう。炭素の同素体には黒鉛、ダイヤモンド、フラーレン、ナノチューブ、グラフェンなどが挙げられる（図 4-31）。フラーレンは炭素原子が主に 60 個結びついたもの（70 個以上結びついたものもある）で、C₆₀ と記号で表される。フラーレンはサッカーボール型の 6 員環と 5 員環を組み合わせた原子配列をしている。ダイヤモンドの各炭素原子は四つの他の炭素原子によって取り囲まれていて、この構造が網目状に広がり結晶自体が一つの巨大な分子となっている。ダイヤモンドの機械的性質・電気的性質・工学的性質・熱的性質・化学的性質はこれらの結晶構造から説明できる。

スギ材を中心とした未利用木材の有効利用は、日本の林業においてメインピックスのひとつになっており、未利用材の有効利用のための方策が模索されている。木材の付加価値を向上させる上で未利用木材の炭素化は大きなポテンシャルをもっている。一般的な炭素材料の微細構造の解析では、X 線回折や各種分光分析などの手法が構造評価に用いられている。炭素化過程の初期では炭素六角網面の三次元規則性をもつ黒鉛構造はほとんどみられず、非晶質炭素主体の構造であるため、X 線回折や各種分光分析による解析が困難である。そのため、微細な組織構造を視覚的に明らかにできる透過型電子顕微鏡による観察が、炭素材料のキャラクタリゼーションの有力な手法として用いられており、特に非晶炭素の構造評価に適している。

スギ炭素化物は規則性のない乱層構造炭素からなる。600 ～ 800℃ では、吸着特性や電気特性などの物性が大きく変化することから、ナノ炭素構造を含め同じ乱層構造炭素ではあるが、炭素構造に大きな変化が生じている。触媒を混合し木質の加熱と同時に圧力を加えることにより、木炭の黒鉛化を進めることができる（Imamura, 1999; Yamane *et al.*, 1998）。アルミナを触媒に用い触媒炭素化を行い、スギ炭素化物中にミクロ黒鉛構造を作製した。1800 ～ 2000℃ まで加熱するとアルミナとカーボンが反応し中間体として炭化アルミニウムが形成する。これは準安定状態にあるので、すぐにガスとなってアルミニウムが放出され、ミクロ黒鉛層が残る（Hata *et al.*, 2002）。

通常の電気式炭化炉で、炭化温度 700℃、昇温速度 10℃/min、保持時間 1 hr の条件で、窒素ガス雰囲気下で炭化スギを炭化したところ、スギ炭素化物微粉末試料中に透過型電子顕微鏡による観察と電子線回折により、ナノダイヤモンド構造を同定した（Ishimaru *et al.*, 2001）。スギ炭素化物中にナノダイヤモンド構造が見出されたという事実は、伝統的な木炭の研磨剤としての利用の妥当性を示すとともに、工業用に用いられる人工ダイヤモンドをスギ炭素化物から製造できることを示している。生

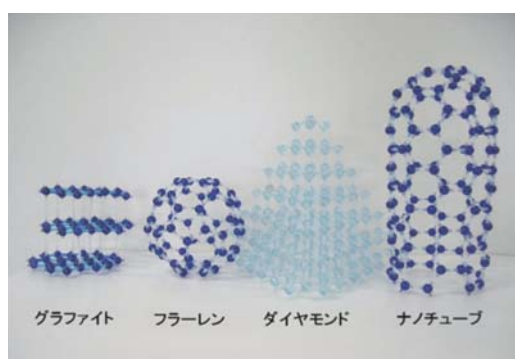


図 4-31：炭素の同素体

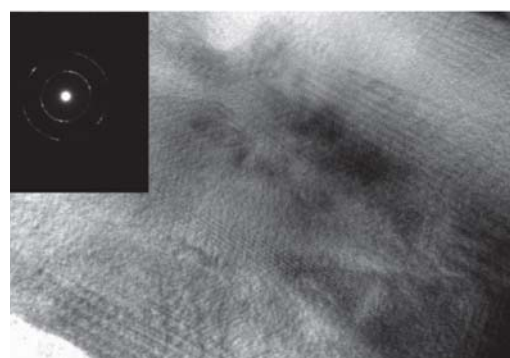


図 4-32：木材の 2200 °C における触媒黒鉛化により得られた木炭表面上のダイヤモンド状薄膜

存圏研究所は 2200°C で触媒黒鉛化を行うことによりダイヤモンド状薄膜を合成した（図 4-32）（Hata *et al.*, 2004）。ダイヤモンドの構造中の炭素原子同士は単結合で SP³ 結合をし、非常に強い力で結合しており高い機械的安定性を示す。さらに同じ 700°C で調製したスギ炭素化物中にナノ炭素構造の一種であるオニオン状炭素粒体を見出した（Hata *et al.*, 2000）。

世界中で、カーボンナノチューブ等のナノ炭素同素体の用途開発が行われている。カーボンナノチューブ自体、電子部品や燃料電池などへの用途が期待され研究が進められている。しかしながら、カーボンナノチューブの原料は化石資源からのものであり、化石資源の枯渇に対応するためにも、スギ炭素化物からナノチューブが生成できれば地球環境上、有用である。しかも木材を高付加価値材料にする技術の確立は第一次産業の衰退に希望を持たせることにもつながると考える。実際、スギ炭素化物表面に多層カーボンナノチューブの生成を行い、木質系炭素化物表面に直接成長することを確認した（Hata *et al.*, 2005）。

〔急速加熱法によるマクロポーラス炭素の形成〕

木炭ではかさ密度が小さく、空隙率の大きな炭素材料を作製することができる点が、石炭や石油ピッチを原料とした化石資源を原料とした炭素との相違点である。一方、木炭では炭素化過程における固相炭素化の進行により、酸素を含む官能基に起因する強固な三次元的架橋が形成される。通常の炭化では、出発原料の形状が保持された状態で木炭ができると前述した。例えば、スギを約 1000°C まで 4°C/min で加熱すると、細胞の形状を保持した状態で約 10 % 収縮する。一方、この炭素化過程の初期段階において酸素や水素を含む化合物の遊離と、炭素六角網面の形成・発達が行われ、炭素構造が劇的に変化する可能性がある。

急速加熱法を用いることで、従来の手法と全く異なる三次元網目状あるいは泡状の構造を有するマクロポーラス炭素を木質バイオマスから合成することができた（Kurosaki *et al.*, 2003）。準密閉系での反応を可能にするリアクターと急速加熱法を併用することで、細孔の均一性・高空隙性、高強度・成型性を特徴とする新規炭素材料の合成が実現される。多孔質炭素材料のマクロ構造および空隙構造を維持しつつ、比表面積の向上を試みたところ、670m²/g の比表面積を有する多孔質炭素材料を合成することができた。その結果、従来の手法では合成することが困難な細孔径 5 ~ 50 nm のメソ孔主体の炭素材料ができる（畑, 2012）。

[木質バイオマスのセラミックス化]

木炭は炭素化温度などを変化させることによって吸着性能や電気伝導度などの制御が可能な炭素材料である。スギ炭素化物は、細胞壁構造の異方性や60%の空隙率を有しながら適度な強度をもつユニークな材料である。一方、500°C以上の使用においては強度低下や酸化が生じるため、現在のところ限られた用途しかない。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。

木炭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体（図4-33）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（畑, 2007）。この木質セラミックス複合材料の製造過程で加熱処理中に、炭化ケイ素ロッドが複合材料中に副産物として生成することが見出されている（Castro *et al.*, 2004; Hata *et al.*, 2005; Fujisawa *et al.*, 2004）。厚さ約20 nmずつ連続してイオンミリングを行うことによって、厚さ約60 nmの炭化ケイ素の反応層が、細胞内孔内で壁を均一に覆っていることが確認できた。また炭化ケイ素は細胞内孔内でランダムに形成されていることが観察された走査型電子顕微鏡による細胞断面の観察から、炭化ケイ素ロッドが直径100～500 nmの多孔体により形成されていることも明らかになっている。炭化ケイ素ナノロッドは、炭化ケイ素膜上の炭化ケイ素核の触媒作用によって形成すると考えられる。透過型電子顕微鏡による解析から、炭化ケイ素ロッドが(111)方向に沿って成長することが確認されている。さらに数層からなるミクログラフィット層が炭化ケイ素ナノロッドの外部表面を薄い黒鉛層としておおっていることが明らかになった（畑, 2012）。

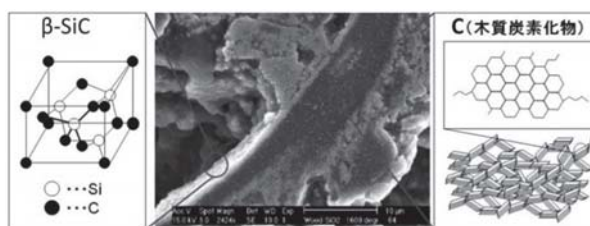


図4-33：木質バイオマス炭とSiCの複合体

[おわりに]

炭素材料の触媒黒鉛化により、特に電気・磁気・摩擦・熱的性質が影響を受ける。今後、炭化温度の範囲を広げ、適切な触媒を加えることが木質バイオマスからの機能性炭素の新規開発研究の進展につながるだろう。

4.5.3 これからの木質材料・接着

[木質材料]

木質材料には集成材、単板積層材、合板、配向性ストランドボード（OSB）、パーティクルボード、ファイバーボード、木片セメントボードなどがあり、最近では木材プラスチック複合材（WPC）が新たな材料として使用されつつある。WPCは、木材をはじめとしたリグノセルロースと、ポリプロピレンやポリエチレンなどの熱可塑性樹脂、さらに少量の酸変性樹脂とともに加熱混合してペレット化し、押し出し成形などによって得られる材料である。

世界森林白書（2009）によると、木材製品に対する世界の長期的需要に影響を与える要因と

して、世界人口の増加、開発途上国を中心とした経済成長の維持、環境政策・規制基準の進展、エネルギー政策の強化が挙げられている。この他、天然林からの収穫の低下、人工林の増大と生産性の向上、リサイクルの拡大、回収率の向上、新複合製品の普及などによる木材需要の軽減、セルロース系バイオ燃料の生産なども考えられている。合板やパーティクルボード、ファイバーボードなどの木質材料は今後も生産量の増加が見込まれ、特にアジア・太平洋地域で著しくなり（図4-34）、また普通合板からパーティクルボードやファイバーボードへのシフトが進むと予想されている。

木質材料は基本的に木質エレメントと接着剤とから構成され、木質エレメントの種類や形状、接着剤の種類によって様々な木質材料が製造されている。そこで、これからの木質材料について、木質エレメント、接着剤のそれぞれから考えてみたい。

[木質エレメント]

現在、世界の森林面積は約40億haであるが、毎年減少傾向にあり、特に南米やアフリカなどの赤道付近での減少が著しい。それにともない優良な南洋材の伐採が規制され、その代替として最近では北方の針葉樹材の利用が盛んである。我が国でも国産のスギを中心とした針葉樹材の利用が顕著であり、例えば合板における針葉樹化率は2000年で39%であったが2012年では92%であり、大半が針葉樹合板となっている。また、東アジアや東南アジアをはじめとした諸外国では森林資源の確保と有効利用を目指して早生樹の植林が活発に行われている。早生樹とは、5～15年で伐期を迎える成長の早い樹種で、例えばポプラ、アカシア、ユーカリ、ファルカタ、マツ類が知られている。特に、中国ではポプラやコウヨウザン、馬尾松、ユーカリなどの植林が非常に盛んに行われており、2008年での人工林面積は6000万haを超えるとされている（森林総合研究所編，2010）。それにともない、これらを原料とした各種木質ボードの生産量も大幅に増加し、当面はその傾向が続くと予想される。また、我が国での木質ボード原料には建築解体材からのリサイクルチップがおおよそ60%の割合で使用されており、資源の有効利用が図られている。

リグノセルロース資源の更なる有効利用を目指して非木材植物繊維や農産廃棄物にも注目が集まっている。代表的なものとして、コムギやイネなどのワラ類、トウモロコシやコーリャンなどの茎、

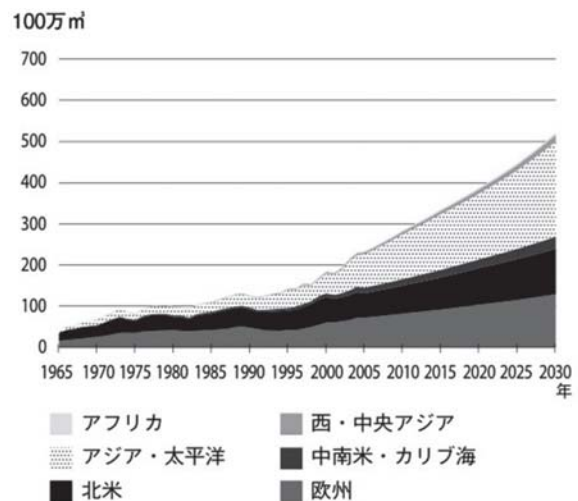


図4-34：世界における合板等の生産量の推移
（世界森林白書 2009）

バガス、ケナフ、ヨシ、竹などが知られ、これらを原料とした材料開発が活発に行われている。バガスを用いた研究として、接着剤を使用しないバインダレスボードの開発がある。例えば、バガスの表皮（ラインド）と芯部の柔細胞（ピス）のそれぞれを原料としたバインダレスボードの製造を試み、190℃の熱圧温度で熱圧方法（熱板プレス、蒸気噴射プレス）、圧縮時間（1.5～10分）、目標密度（0.5～0.8g/cm³）を変えてボード物性を評価した研究がある（Widyorini *et al.*, 2005）。力学物性はピスを原料として蒸気噴射プレスで高密度化したボードで良好な値が得られ、厚さ膨潤率は密度にかかわらずラインドを原料として蒸気噴射プレスで熱圧したボードで低い値を示す。この接着メカニズムは、熱圧中のヘミセルロースの分解にともなう低分子糖類の生成やリグニンの変性・可塑化が寄与していると考えられている。また、ラインドとピスの混合パーティクルを原料として200～280℃の高温で熱板プレスした研究（Nonaka *et al.*, 2013）では、260℃の加熱によって力学物性や耐水性に優れたボードが得られることが報告されている。このボードの特徴として、水分による強度低下が非常に小さいことが挙げられ、常態曲げ強度に対する湿潤曲げ強度の保持率が85%以上を示す。この他、WPCへの利用も活発に行われている。これまでのWPCでは主に木粉を使用してウッドデッキなどの外構材として使用されることが多かったが、近年は草本系植物繊維の利用が研究され、自動車部品として実用化が進みつつある。今後、環境問題を背景に各種植物繊維を用いたWPCの需要が伸びることが予想されているが、研究課題としては樹脂と植物繊維との界面の問題が挙げられる。これは、WPCに使用される樹脂（主に熱可塑性樹脂）と植物繊維との接着性が悪いためであり、何らかの処理を施す必要がある。昨今では、相溶化剤の開発や植物繊維の物理的・化学的改質などが検討されている。

〔接着剤〕

木質材料に使用されている接着剤には、ユリア樹脂やフェノール樹脂といったホルムアルデヒド系樹脂をはじめポリウレタン系樹脂や各種エマルジョン樹脂など、様々な合成樹脂が使用されている。これら接着剤原料は、表4-3に示すようにほとんどが石油や天然ガスといった化石資源を起源として製造されている。最近の木材用接着剤では、安全・安心、低VOC（Volatile Organic Compounds・揮発性有機化合物）、低環境負荷、非化石資源化などがキーワードとして挙げられ、研究開発が進められている。これらを考慮した研究として、非化石資源を原料とした天然系接着剤の研究がある。天然系接着剤は、表4-4に示すようにその構造によっていくつかに分類することができる。研究開発の方向性としては、①既存合成樹脂接着剤の原料としての利用、②合成樹脂やその他化合物との併用による接着剤化、③天然物の化学修飾による接着性能の付与や改善、および④これら①～③の複合化などがある。

梅村ら（2012a, 2012b, 2012c, 2013）は天然系接着剤の研

表 4-3：各種接着剤原料とその起源

資源	炭化水素	接着剤原料
原油（ナフサ）	エチレン	ポリビニルアルコール 酢酸ビニル スチレン
	プロピレン	フェノール アクリル酸 メタクリル酸メチル ビスフェノールA エビクロヒドリン
	C ₆ 留分	ブチレン ブタジエン クロロブレン 無水マレイン酸
	芳香族化合物	フェノール レゾルシノール スチレン ジフェニルメタンジイソシアネート 無水マレイン酸
天然ガス	メタン	ホルムアルデヒド 水素
水素+窒素 → アンモニア		尿素 メラミン

表 4-4：天然系接着剤の分類と原料名

分類	原料例
糖類系	デンプン セルロース
タンパク質系	大豆タンパク 膠 カゼイン
芳香族系	リグニン タンニン 漆
植物油系	ヒマシ油 カノーラ油
その他	天然ゴム 液化木材



図 4-35：クエン酸接着木質成形体



図 4-36：クエン酸とスクロースによって接着したパーティクルボード

究として、原料をすべて非化石資源由来の物質とし、さらに毒物や劇物に相当する物質を使わない接着剤の開発を進めている。例えば、ポリカルボン酸のクエン酸は、工業的には糖の発酵によって製造されている物質である。このクエン酸を木粉や樹皮粉末などのリグノセルロース粉末とともに金型を用いて $180 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 、10 分、4MPa で熱圧すると木質成形体が得られる（図 4-35）。20wt% クエン酸を添加して得られた木質成形体の曲げ強度は約 40 MPa、曲げヤング率は約 6GPa を示す。この成形体は、煮沸繰り返し処理によって多少の重量減少が見られるものの形状を維持し、高い耐水性を示す。FT-IR 測定の結果、木材中の水酸基とクエン酸のカルボキシル基がエステル結合を形成していることが示唆され、この木質成形体の接着機構が化学的な接着であることが明らかとなった。この接着機構を応用したパーティクルボードの製造では、接着性の向上を目的としてスクロースの添加を試みている。すなわち、所定の割合でクエン酸とスクロースを水に溶かした水溶液を接着剤として用いた。木材チップに水溶液を噴霧塗布し、マット成形後、 200°C で 10 分の熱圧により目標密度 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ のパーティクルボードを作製した（図 4-36）。クエン酸とスクロースの比率が 25 : 75 で作製したボードの曲げ性能やはく離強度は JIS A 5908 の 18 タイプに匹敵する値を示す。耐水性は、吸水厚さ膨張率 20% と JIS の基準値に比べると幾分劣り、性能の改善が課題である。

しかし、非化石資源由来の安全性の高い物質のみを用い、力学性能に優れたボードが得られる接着技術を見出したことは、今後の木質材料開発にとって更なるグリーンマテリアルへの可能性を示すものと考えられる。

コラム ADAM

先進素材開発解析システム（Analysis and Development System for Advanced Materials, ADAM）は、先進素材の開発と構造分析を支援する設備であり、平成 23 年度後期から共同利用を開始した。本設備は、「高度マイクロ波加熱応用及び解析サブシステム」、フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析装置（FT-ICR-MS）や多核核磁気共鳴装置からなる「超高分解能有機分析サブシステム」、無機用および有機用電子顕微鏡などからなる「高分解能多元構造解析システム」から構成され、先進素材の開発と構造解析研究に利用されている。

マイクロ波加熱装置は、マイクロ波による金属チタンの窒化機構の解明、マイクロ波金属加熱の機構解析、マイクロ波製鉄、マイクロ波チタン精錬、Ni ナノ粒子などの機能性金属やセラミックの合成、機能性高分子の合成、木質バイオマスの分解など、マイクロ波特有の効果を活かした新材料創成に向けた研究開発に活用している。フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析装置（FT-ICR-MS）や多核核磁気共鳴装置は、リグニンや多糖などのバイオマス成分の精密構造解析、酵素の構造分析、酵素とリグニンの複合体形成の解析、古文化財に含まれる有機物質の精密構造解析、木材腐朽菌の二次代謝物の構造解析、繊維虫の色素化合物の構造解析、機能性発光錯体の精密分析評価、などに利用している。「高分解能多元構造解析システム」を構成する有機用電子顕微鏡は、植物細胞壁多糖生合成酵素の解析、細菌による金属ナノ粒子形成機構の解析、シロアリの触角上感覚毛の内部神経細胞の観察、分子集合体の構造解析などに利用し、無機用電子顕微鏡は、機能性炭素ナノ材料の構造解析などの共同利用研究に利用している。本装置は生存圏研究所のフラグシップ共同研究「バイオマス・物質変換のためのマイクロ波高度利用共同研究」推進のための中核研究装置としても活用している。

ADAM 共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/DCRP/ADAM.html>



先進素材開発解析システム（ADAM）を構成する主要機器：(A) 高度マイクロ波加熱応用及び解析サブシステム、(B) 有機用透過電子顕微鏡、(C) 無機用電界放出形電子顕微鏡、(D) 多核核磁気共鳴装置、(E) FT-ICR-MS

コラム DOL/LSF

「居住圏劣化生物飼育棟（Deterioration Organisms Laboratory、以下 DOL と略）」および「生活・森林圏シミュレーションフィールド（Living-sphere Simulation Field、以下 LSF と略）」は、生存圏研究所が発足してから1年後の平成17年6月より全国共同利用を開始した施設である。当初は、別個の施設として運用を行ったが、その後、平成21年度より、統一した施設としての運用を開始し現在に至っている。

シロアリ飼育室、木材食害性甲虫類飼育室および木材劣化菌類培養室より構成される DOL は、木材や木質系材料を加害する生物を常時大量に人工飼育・保管し、木材・木質材料だけでなく樹脂製品や断熱材料などを含む各種材料の生物劣化評価試験およびそれらの劣化機構に関する基礎試験に供している。さらに、木材劣化生物と地球生態系・環境との相互作用（例えば、シロアリによるメタン生成）についても種々の共同研究を実施している。

人工飼育している生物種は以下の通りである。

- ・シロアリ類：イエシロアリ、ヤマトシロアリ、アメリカカンザイシロアリ
- ・ヒラタキクイムシ類：ヒラタキクイムシ、アフリカヒラタキクイムシ、ホソナガシンクイ、チビタケナガシンクイ
- ・木材腐朽性担子菌類：生体として約100菌株および1920年代からの乾燥子実体約1,300点。これらは、担子菌遺伝子データベースとして公開されている。

DOL はこれらの木材劣化生物を総合的に供給することのできる国内随一かつ国際的にも希有な施設であり、40年以上に渡って国内外の共同研究をリードしてきた。

一方 LSF は、鹿児島県日置市吹上町吹上浜国有林内に設置されたクロマツとニセアカシア、ヤマモモなどの混生林からなる約28,000平方メートルの野外試験地である。イエシロアリとヤマトシロアリという日本において経済的に最も重要な2種の地下シロアリが高密度で生息し、これまで既に30年近くにわたって木材・木質材料の性能評価試験、木材保存薬剤の野外試験、低環境負荷型新防蟻法の開発や地下シロアリの生態調査、大気環境調査等に関して国内外の大学、公的研究機関及び民間企業との共同研究が活発に実施されてきた。また、平成23年度には全自動気象測器が設置され、現地の気象データが蓄積されつつある。

両施設とも、日本木材保存剤審査機関の認定施設として、木材保存剤に関わる各種公的試験の実施にも協力を行っており、特に DOL については、より広範囲な生物の飼育・供給と試験の実施を目指した取り組みを行っている。LSF については、東シナ海に面した環境を生かし、環境・大気関連の研究フィールドとして、より広範囲の研究分野に解放したいと考えている。

DOL/LSF 共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/DCRP/LSF.html>



居住圏劣化生物飼育棟 (DOL): 左下より時計回りに、木材劣化菌類培養室、木材食害性甲虫類飼育室 (ヒラタキクイムシ)、シロアリ飼育室および侵入害虫として重要なアメリカカンザイシロアリ



生活・森林圏シミュレーションフィールド (LSF): 左より時計回りに、全自動気象測器、木材・木質材料の防蟻野外試験、シロアリの階級分化に関する国際共同研究

コラム 木質材料実験棟

循環型資源・材料開発を行うミッション4の研究を推進させる主要施設が、木質材料実験棟である。本実験棟は、1994年2月に宇治キャンパスに設置された大断面集成材を構造材料とする木造三階建ての大規模木造建築で、低環境負荷な木質材料およびそれらで構成される接合部・架構などの強度性能評価や、新素材開発研究を実施するための実験室と、学会講演会や国際シンポジウムが行える木質空間、通称『木質ホール』を備えている。また、この建物は、実用化を検討するために様々な新規木質材料が取り入れられた事や木質材料と他構造材料との混構造部分を持ち合わせている事などが特徴で、1995年度国立大学優秀施設技術部門の文教施設部長賞を受賞した。

本実験棟では、木質構造の大規模化に向けた検討として木質ラーメン構造の接合部や架構、新たな木質構造材料として注目されている CLT (Cross Laminated Timber) を用いた構造に関する研究(中図左)、伝統建築物の構造解析に関する検討として様々な仕口・継ぎ手接合などの力学モデルによる定式化の研究(中図右)、既存木質構造の耐震性能の精緻な評価を目指した残存性能評価と計測方法に関する研究、クエン酸やスクロース、タンニンなどを用いた天然接着剤の開発およびそれを用いた低環境負荷型木質材料の開発(4.5.3 参照)、燃料電池に使用されている白金の代替えとして木材を原料とした燃料電池用触媒材料の開発など、様々な方向から木材を見た研究や開発を実施している。

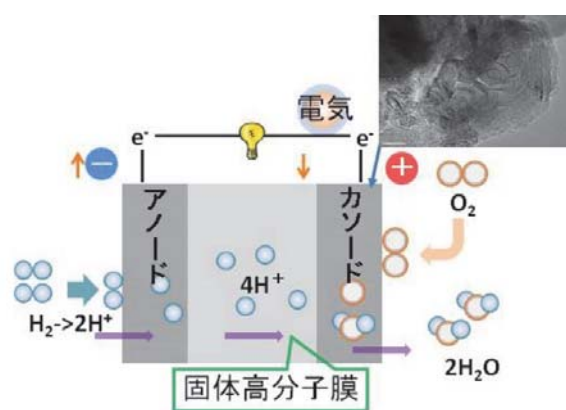
木質材料実験棟共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/DCRP/woodhall.html>



木質材料実験棟



CLT を用いた耐力壁の開発や伝統建築の仕口の力学挙動解明の実験



木材から燃料電池材料を作る仕組み

コラム 熱帯におけるアカシア植林事業

熱帯地域ではバイオマスの生産性が高く、樹木の成長速度も大きい。これまで複数の企業が、緑化や製紙用チップ生産目的の植林を熱帯地域で行い、それぞれ成功している。しかし、木質材料用材生産を目的とした植林は、多くの努力が払われたにもかかわらず産業的な大規模植林の例はなかった。一方、越井木材工業（株）では、1988年よりマレーシア・サバ州に合板工場を運営しており、合板用原木の安定確保のための植林が必要となっていた。そして、1999年マレーシア・サバ州北部のウルククで見出された通直且つ大径木であるアカシア・ハイブリッド（アカシア・マンギウムとアカシア・アウリクリフォーミスの自然交雑種）の母樹を挿し木増殖し、まず試験植林が行われた。すなわち、苗木生産（挿木増殖）、下刈り、枝打ち、植栽密度管理・間伐などに関する最適条件が検討された結果、施業技術（間伐、枝打ち）が確立しており、品種登録もされている。これらの試験結果に基づき、植林実施会社による本格的事業植林が行われている。現在のところ、10年生で胸高直径が約30cmに達しており、あと5年で約40cmまで成長することが期待される。そして、3000～5000haへの植林で150万本以上の収穫が目標になっているが、成長の一層の促進と幹の通直性及び形状の改善が望まれる。



アカシア・ハイブリッド植林地の施業
(左：ナーサリー、中：下刈り、右：枝打ち)



アカシア・ハイブリッド試験植林
同一地点における比較（左：2004年8月、右：2013年2月）



アカシア・ハイブリッド事業植林（6年生）

（写真提供（アカシア・ハイブリッド植林地の施業）、越井木材工業（株））

[参考文献]

- Brooks, T. M. *et al.* (1997) *Conserv. Biol.* **11**, 382-394
- Carle, J. & Holmgren, P. (2008) *Forest Prod. J.* **58**, 6-18
- Cossalter, C. & Pye-Smith, C. (2003) Center for International Forestry Research, p.7 (<http://www.cifor.org/online-library/browse/view-publication/publication/1701.html>)
- Castro, V. *et al.* (2004) *Key Eng. Mat.* **264-268**, 2267-2270
- Delaquis, P.J. *et al.* (2002) *Int. J Food Microbiol.* **74**, 101-109
- 土肥義治編 2003-2004 研究論文集、理化学研究所高分子化学研究室
- Dudareva, N. & Pichersky, E. (2008) *Curr Opin Biotechnol.* **19**, 181-189
- Eichhorn S. J. *et al.* (2010) *J. Mater. Sci.*, **45**, 1-33
- Eyles, A. *et al.* (2008) *For. Path.* **38**, 332-355
- FAO Forest products statistics, <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/> (Accessed on February 11, 2014)
- Food and Agriculture Organizations of the United Nations (FAO 国際連合食糧農業機関) (2008) Global Forest Resources Assessment 2005.
- Fujisawa, M. *et al.* (2004) *J. Eur. Ceram Soc.* **24/13**, 3575
- 藤田素子, 鮫島弘光 (2012) 熱帯バイオマス社会の再生－インドネシアの泥炭湿地から 講座生存基盤論 4 (川井秀一他編), 京都大学学術出版会, p.49
- 畑俊充 (2007) 森林と木材を活かす大事典, 産調出版, p.386
- 畑俊充 (2012) 材料 61 (8) 742
- Hata, T. *et al.* (1998) *J. Wood. Sci.*, **44**, 332
- Hata, T. *et al.* (2004) *CARBON* **42** (5-6), 961-964
- Hata, T. *et al.* (2000) *J. Wood. Sci.* **46**, 89
- Hata, T. *et al.* (2002) *Molecular Crystals and Liquid Crystals* vol. **386**, 33-38
- Hata, T. *et al.* (2005) *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* **13**, 435-445
- Hata, T. *et al.* (2005) *The 1st International Conference on Carbon for Energy Storage and Environment Protection*, 101
- Hartati, S. *et al.* (2011) *J Wood Sci.* **57**, 463-469
- Hattori, T. *et al.* (2012) *Plant Biotechnology* **29**, 359-366
- Imamura, Y. (1999) *Shokubai* **41** (4), 254-258
- Ishimaru, K. *et al.* (2001) *J. Wood Sci.* **47** (4) 414-416
- 磯貝明 (2012)、工業材料, **12**, 23-26
- 一重喬一郎、長谷川隆大、長谷川香織、寺澤健治、山中一憲、服部順昭 (2013) 木材学会誌 **59** (6), 269-277
- 神崎護 (2012) 熱帯多雨林における集約的森林管理と森林資源の高度利用による持続的利用パラダイムの創出, <http://tofreproj.kais.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- 川井秀一、渡邊一生 (2012) 熱帯バイオマス社会の再生－インドネシアの泥炭湿地から 講座生存基盤論第4巻 (川井秀一他編), 京都大学学術出版会, p.87
- Keesing, F. *et al.* (2006) *Ecol. Lett.* **9**, 485-498
- Koshiba, T. *et al.* (2013) *Plant Biotechnology* **30**, 157-167
- 国際連合食糧農業機関編 (2009) 世界森林白書 2009 年報告, (社) 国際農林業協働協会翻訳・発行, p.128
- Kurosaki, F. *et al.* (2003) *CARBON* **41** (15), 3057-3062
- Miettinen *et al.* (2011) *Global Change Biol.* **17**, 2261-2270
- Moon R. J. *et al.* (2011) *Chem. Soc. Rev.*, **40**, 3941-3994
- Myers, N. *et al.* (2000) *Nature* **403**, 853-858
- Nishino, T. *et al.* (2007) *Proc.2nd Intn'l Cellulose Conf. 2007*, p125
- Nishino, T. *et al.* (2004) *Macromolecules*, **37**, 7683-7687
- Nonaka, S. *et al.* (2013) *J. Wood Sci.*, **59** (1), 50-56
- Ohara, K. *et al.* (2010) *Plant Biotechnol. J.* **8**, 28-37
- 岡部廣二 (2003) 日本林業調査会, p.166
- Page D. H. and EL-Hosseiny F. (1983), *J. Pulp Paper Sci.*, **9**, 99-100
- Quoirin, M. *et al.* (2000) *Molecular Biology of Woody Plants Vol. 2* (Jain M. S. & Minocha, S. C. ed.), Kluwer Academic Publishers, p.161
- Quoirin, M. *et al.* (2002) *In Vitro Cell. Dev. Biol.—Plant* **38**, 487-492
- Rahman, M. *et al.* (2013) 第31回日本植物細胞分子生物学会 (札幌) 大会シンポジウム講演要旨集, p.135
- 林野庁 (2001) 森林・林業基本計画 (平成13年)
- Rao, V. S. R (1998) *Conformation of Carbohydrates*, Harwood Academic Publishers p.18
- Sakurada, I. *et al.* (1962), *J. Poly. Sci.*, **57**, 651
- 鮫島弘光ら (2012) 熱帯バイオマス社会の再生－インドネシアの泥炭湿地から 講座生存基盤論 4 (川井秀一他編) 京

- 都大学学術出版会 p.325
- 佐々木恵彦 (2007) 「第1章 はじめに－生物圏における森林の役割」佐々木恵彦、木平勇吉、鈴木和夫編著『森林科学』、文永堂、p1-15
- Schnitzler, P. *et al.* (2001) *Pharmazie* **56**, 343-347
- Shimazaki, Y. *et al.* (2007) *Biomacromolecules*, **8** (9), 2976
- Silva, J. *et al.* (2003) *J. Ethnopharmacol.* **89**, 277-283
- 森林総合研究所編 (2010) 中国の森林・林業・木材産業 現業と展望、(株) 日本林業調査会、p.231
- Subarudi, D, Djaenudin, Erwidodo, and O. Cacho (2003) . "Growth and carbon sequestration potential of plantation forestry in Indonesia I. *Paraserianthes falcataria* and *Acacia mangium*." Working paper CC08, ACIAR project ASEM 1999/093.
- Suzuki, S. *et al.* (2011) *J. Wood Sci.* **57**, 40-46
- Suzuki, S. *et al.* (2009) *Plant Biotechnology* **26**, 337-340
- 竹松葉子 (2012) シロアリの事典 (吉村剛他編) 海青社 p.18
- Umemura K. *et al.* (2012a) *J Wood Sci.* **58** (1), 38-45
- Umemura K. *et al.* (2012b) *J. Appl. Polym. Sci.* **123** (4), 1991-1996
- Umemura K. *et al.* (2012c) *Forest Prod. J.* **62** (1), 63-68
- Umemura K. *et al.* (2013) *J Wood Sci.* **59** (3), 203-208
- 梅澤俊明 (2013) リグニン利用の最新動向 (坂志朗監修), シーエムシー出版, p.48
- Vengadesan, G. *et al.* (2006) *Plant Cell Rep.* **25**, 1174-1180
- Wang, X. *et al.* (2005) *Tree Physiol.* **25**, 167-178
- 渡辺隆司 (2010) 地球圏・生命圏・人間圏 持続的な生存基盤を求めて、京都大学学術出版会、p.281
- 渡辺隆司 (2012a) 化学工学、**76**、444-448
- 渡辺隆司 (2013) 平成 25 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会バイオマス分野予稿集、p.31-42
- 渡邊崇人、渡辺隆司 (2007) 熱帯バイオマス資源のバイオリファイナリー、生存圏研究、**3**, 65-71
- 渡辺隆司 (2012b) 熱帯早生樹のバイオリファイナリー、生存圏研究、**No.7**, 73-77
- Widyorini, R. *et al.* (2005) *J. Wood Sci.*, **51** (6), 648-654
- Xie, D. & Hong, Y. (2002) *Plant Cell Tiss Organ Cult* **20**, 917-922
- Yamamura, M. *et al.* (2013) *Plant Biotechnology* **30**, 25-35
- Yamamura, M. *et al.* (2010) *Plant Biotechnology* **27**, 305-310
- Yamamura, M. *et al.* (2012) *Plant Biotechnology* **29**, 419-423
- Yamane, T. (1998) *Tanso* **182**, 95-100
- Yang, M. *et al.* (2008) *Plant Cell Tiss Organ Cult* **95**, 141-147
- 矢野浩之ら (2009) : Plastic Age Encyclopedia 進歩編 2010, Plastic Age Encyclopedia 進歩編編集委員会 2010, プラスチックス・エージ, p.73
- 矢野浩之 (2011) 新版 複合材料・技術総覧 (福田博他編)、産業技術サービスセンター, p.503
- Yang, S.C. *et al.* (2011) *Tree Genet. Genomes* **7**, 143-152
- 吉田温, 佐藤裕 (2008) 海外の森林と林業 **No.73**, 13-18
- 吉村 剛ら (2011) 生存圏研究 **No.7**, 95-100
- Yuba, A. *et al.* (1996) *Arch Biochem Biophys.* **332**, 280-287



5 章 宇宙利用

5.1 地球と宇宙圏との関わり

我々人類が知る限りこの世に生きとし生けるものは、すべて「地球」という奇跡的な環境をもつ星に根ざした形で繁栄してきた。この意味で地球は当然、我々の「生存圏」の中心にあるものであり、本書で定義する「宇宙圏」はその地球を覆う一番外側に存在する「圏」である。この宇宙圏に人類が直接アクセスできるようになったのは、1957年の旧ソ連による人類初の人工衛星「スプートニク1号」の打ち上げ成功からである。しかし、宇宙圏は地球に生命が誕生する前より地球の環境に影響を与えており、地球に生命体が誕生してからも宇宙圏は地球の環境に影響を及ぼし続けている。太陽が放出する莫大なエネルギーは地球上での生命体の持続的な繁栄の源であるし、宇宙線が生命進化に影響を与えている可能性についても議論されている。そして地球が宇宙圏から受ける影響は、生命にとってプラスに働くものばかりではない。例えば、宇宙を漂う小惑星と地球との衝突は、地球上の生命に致命的な打撃を与えるであろうし、地球上の環境そのものも変化させてしまうエネルギーをもつ。恐竜絶滅原因の一説に「巨大隕石衝突」があげられるのはこのためである。このように地球を基盤とする生存圏は宇宙圏とそもそも密接に関わっている。そしてその影響は、我々が生存している今この瞬間においても太古の昔と何ら変わりはなく存在しているのは明らかであるが、普段それに関する意識が薄いのは、その発生時間スケールが人間の営みの中で意識する時間スケールに比べて非常に長いからであろう。しかし一度「巨大隕石衝突」が発生した際のその生存圏への影響は計り知れないものがある。

上述のように地球が宇宙の中に存在している以上必ず関わらざるを得ない事象に加え、人類がその文明を発展させてきたからこそ宇宙との関わり合いが重要となってきた部分もある。例えば、宇宙環境が乱れることによる短波通信や衛星通信の乱れ、地上に張り巡らされた電力送電網への影響などがあげられる。これらは人類がその文明を築いたからこそ発生する宇宙からの影響である。

一方、宇宙利用としての宇宙圏はどうであろう。人類がロケットという輸送手段を手に入れて以来、宇宙圏は人類の生存圏として利用拡大がなされてきた。宇宙空間に晒された生存圏は直接宇宙と生存圏が相互作用する場所であり、その環境の理解というところから研究がスタートしたのは自然の流れである。地球周辺の宇宙空間環境の理解についてはかなり研究が進んできているものの、太陽活動と密接に関連したそのダイナミックな変化を理解するには、まだ課題は多い。特に現在人類が最も利用している宇宙空間である静止衛星軌道は地球の放射線帯の裾野に位置しており放射線帯の生成機構とその変動についての理解は重要である。

そして生存圏としての宇宙圏は新しい環境の利用をあたえてくれる。それは例えば宇宙空間が電磁的な環境で支配されていることを利用した、新しい飛翔体推進・姿勢制御手法である。搭載燃料をほとんど必要としないこの宇宙環境利用推進手法は、人類の宇宙圏への生存圏拡大に貢献していくポテンシャルをもっている。

このように宇宙圏により生成された地球上の環境で発生した人類は、宇宙圏の環境を理解しつつそ

の生存圏を拡大している。そして、地球上でそうであったように、この人類宇宙進出が宇宙においてもその環境に影響を与えつつある。それは人間が宇宙空間に人工物を持ちこむことによる宇宙空間環境の乱れ、あるいは、その人工物そのものである「宇宙ゴミ（スペースデブリ）」の問題である。これらはまさに地上における環境問題と同じで人類の活動そのものがもたらす環境への影響である。そうして宇宙における「環境アセスメント」も重要になりつつあるのである。

図 5-1 は人類を始めとする地球上の生命が宇宙圏との関わりをもつ上での課題とそれに対して「生存圏の科学」がなすべき役割について示したものである。

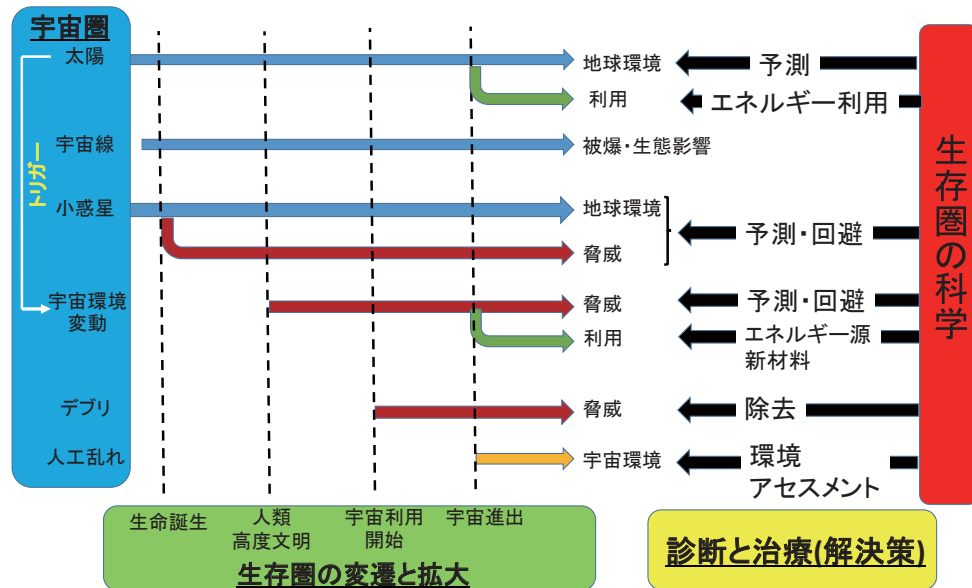


図 5-1：宇宙圏と人類の関わりと生存圏の科学がそこにもたらすもの。

5.2 宇宙環境利用研究で目指すもの

宇宙空間、特に地球周辺での宇宙空間は、21 世紀の人類の新たな生活圏として開拓が進められていく領域である。既に利用が開始され、生活に密着している通信衛星や気象衛星などによる宇宙空間の利用を更に発展させていくことが重要である。また、宇宙に起因する人類の生存圏に対する危機を理解して、それらに対応する方法を明らかにしていくことも重要である。例えば、太陽フレア、プラズマ、宇宙線、地球接近小惑星、宇宙ごみ等の極端宇宙天気や宇宙環境の理解と対応の手法を研究し、社会に提言していくことが重要である。

宇宙空間は地球上とはまったく異なった環境にある。それは、希薄で高温のプラズマ大気、無重力、太陽輻射の直接暴露などに代表される。特に、電離気体であるプラズマ大気の影響による電磁環境の変化、太陽輻射の影響による物資の材質変化、及び生物体への影響の調査などは重要である。また、宇宙ステーションや第 3 章でも紹介した宇宙太陽発電所 (SPS) などによる人工的な宇宙環境擾乱の定量的理解も急務である。一方、逆に、これらの特殊な環境を利用した新たな素材の開発なども宇宙環境の利用という観点でユニークである。宇宙空間という特殊・特異な領域の環境探査、そして、その特殊環境の利用による新技術・素材の開発などを通して、人類生活基盤の拡充、充実への貢献が期待されている。

本章では、人類の生活圏を宇宙に拡大していくにあたって必要となる宇宙環境の探査及びその探査技術の開発および計算機シミュレーションによる宇宙自然環境や飛翔体環境の定量解析を行なうことにより、人類の本格的な宇宙進出の準備を整えとともに宇宙環境下での木質素材の利用方法の開発などを行なうことを通じて、現在、未来の人類の生活圏拡大とその基盤の充実について言及する。

5.3 人類が利用する宇宙環境とは

5.3.1 宇宙環境概説

本書で扱う宇宙圏とは人類の手の届く範囲の宇宙と定義する。具体的には地球周辺から太陽系範囲の宇宙空間と考えればよい。この空間すなわち宇宙圏を満たしているのは電離した気体「プラズマ」である。宇宙圏の環境はこのプラズマが重要な媒質（プラズマ大気）となって決定されている。地球上の環境は中性大気によるダイナミクスで実現しているのに対し、宇宙ではプラズマ中における電磁的な現象が環境を決定している。この意味で宇宙環境は、「宇宙電磁環境」と呼べるものである。

太陽から放出されるエネルギーは主に、電磁波として放出されるもの、そして、太陽風として放出されるものに分けることができる。電磁波の放射源として太陽をみると、太陽は、約 5800K の黒体としてみなすことができる。そのスペクトルは、X 線などの高エネルギー領域からラジオ波に相当するような周波数にまでいたる非常に広い帯域にわたっている。地球の軌道上における太陽からのエネルギー流入量は、太陽定数（solar constant）とよばれ約 1.37kW/m^2 であり、地球に対する太陽からのエネルギー入力という意味で非常に重要なパラメータである。太陽からの電磁波エネルギーには、この定常的黒体輻射に加え、太陽表面爆発（フレア）現象によって急激に放射される X 線などの高エネルギー帯の増大現象がある。一方、太陽風は、太陽の上層大気でありプラズマ状態となっているコロナが宇宙空間に流出しているものである。この太陽風プラズマも定常的に流出しているものに加え、上述のフレア現象とも関連があると考えられている突発的なコロナガス噴出現象（CME: Coronal Mass Ejection）がある。フレアによる X 線の急激な上昇、CME の発生によるプラズマ雲の地球到達は、地球周辺の環境に大きな影響を与えるばかりでなく、その変化が生活圏における人々の活動にも影響を与えてくるのである。

表 5-1：太陽風プラズマの典型的なパラメータ（地球軌道付近）

プラズマ密度	数個 / cm^3
組成	イオン：水素イオン、ヘリウムイオン、酸素イオン、炭素イオン、ほか重イオン 電子
速度	数 100km/秒
温度	イオン、電子ともに 10^5K 程度で、やや電子の方が高い。
磁場	数 nT

[宇宙プラズマ]

この宇宙圏を満たすプラズマはその起源により 2 種類に分類できる。一つは惑星間空間を満たす「太陽風プラズマ」、もう一つは、惑星大気の上層部が太陽紫外線などにより電離した「惑星大気プラズマ」

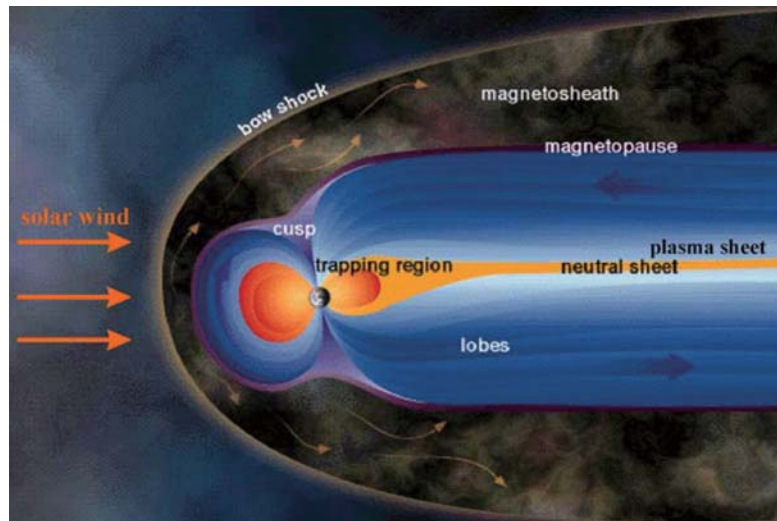


図 5-2：地球の磁気圏

(<http://pwg.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/images/Gusts/mag1.jpg> より)

である。太陽風は太陽大気の上層部である高温のコロナが宇宙空間へと流出したものである。太陽風プラズマは太陽系全体に広がっており太陽系惑星間はこの太陽風で満たされている。宇宙空間は「真空」で「無」の空間であると認識されがちであるが、太陽系にはこの太陽風という物質の流れが存在している。重要なのは、この太陽風が太陽から流出する際に太陽がもつ固有磁場をいっしょに引き出していることである。引き出された太陽磁場は太陽風とともに惑星間空間に運ばれている。この太陽風がもつ磁場のことを「惑星間空間磁場（IMF: Interplanetary Magnetic Field）」と呼ぶ。地球軌道付近における太陽風のパラメータを表 5-1 に示す。一方、惑星大気プラズマは「電離圏」と呼ばれる。地球の電離圏はおよそ高度約 100km から 1,000km 程度に到達する層状の構造をもつ。高度 400km 付近にある国際宇宙ステーション（ISS: International Space Station）も、この電離圏中を飛翔していることになる。電離圏はそのプラズマ密度に従って、中波帯から短波帯の電波を反射する特性をもつため、電離圏と大地の間で電波を反射して見通し外にも伝搬させることができる。そのため電離圏は古くから遠距離通信に使用されてきた。ロケットが発明される以前より電離圏は通信に使用されており、この意味では人類が宇宙を利用した最初がこの電離圏であるといえる。

後述の様に、宇宙空間の環境は太陽活動に大きく依存しているが、電離圏の様相も太陽の影響を強く受ける。その一例としてデリンジャー現象と呼ばれる現象がある。これは太陽表面での爆発現象（フレア）によって発生した X 線などにより電離圏の電離状態が異常となり短波帯の通信が途絶する現象である。1941 年（太平洋戦争開戦の年）8 月 2 日にこのデリンジャー現象が発生し、日本陸軍が傍受していた旧ソ連軍の国境付近での通信が聞こえなくなり、旧ソ連軍が軍事行動準備に入ったことを警戒したという出来事が起きている（防衛庁防衛研修所戦史室（1974））。太陽活動が人間の戦争行為にも影響を与えることを示唆したよい例である。

[磁気圏]

地球周辺での宇宙環境においては「地球磁場」の存在も重要である。地球の磁場は近似的にはダイポールであり北極側が S 極、南極側が N 極である。2010 年現在、この磁石の軸は地球の自転軸とは 10 度ほどずれており、地球の自転とともに磁極は首振り運動をすることになる。この地球磁場に対し

太陽風プラズマが吹き付けることになる。プラズマには磁力線を横切って移動しにくいという性質があり、そのため太陽風プラズマからみると地球の磁場構造は障害物となる。その結果、地球磁場の太陽側（昼間側）は圧縮される。太陽風は昼間側地球磁場を釣り合うまで圧縮した後、地球磁場を避けるように迂回して夜側へと流れていく。その結果、地球磁場の夜側磁力線は引き伸ばされる形となる。結局、地球磁場は太陽風によって変形・閉じ込められる形となる。この閉じ込められた地球磁場の領域を地球の「磁気圏」と呼ぶ。図 5-2 は地球の磁気圏における磁力線構造を表している。この太陽風によって地球磁場が閉じ込められた状況下における磁気圏を「閉じた磁気圏」という。実際は、後述のように太陽風が運んでくる IMF と地球磁力線が結合することにより地球磁気圏の環境は激変する。この IMF と地球磁力線が結合してできる磁気圏を「開いた磁気圏」と呼ぶ。開いた磁気圏では、地球の磁力線と太陽の磁力線がつながった形になる。

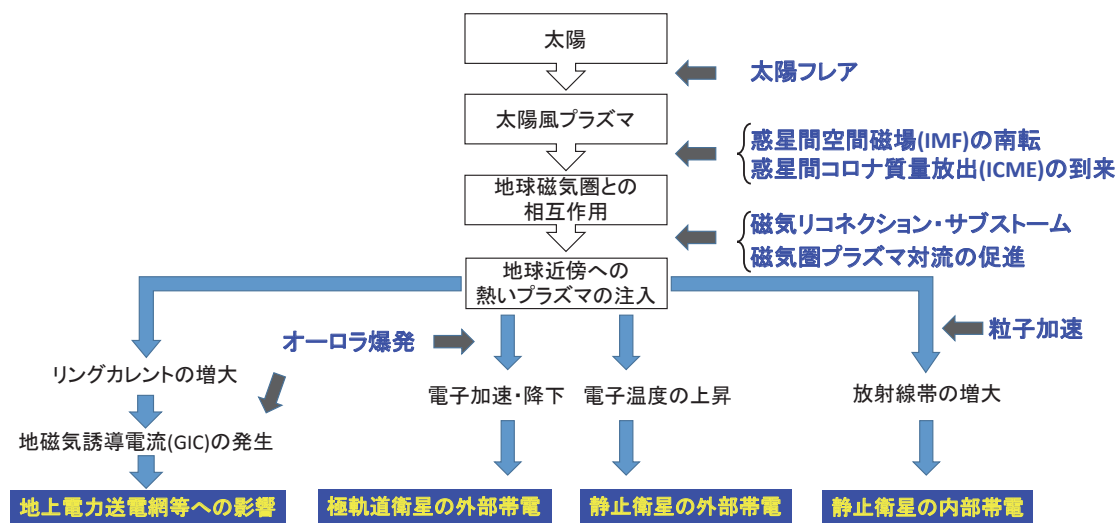


図 5-3：宇宙電磁環境が人間生活に与える影響

5.3.2 宇宙空間環境のダイナミックな変動

宇宙電磁環境は、太陽活動と密接に関係している。そしてその環境は常に大きく変動をしており、人類が宇宙空間を利用していく上で、この電磁環境を理解することは必須である。図 5-3 は、宇宙電磁環境に影響を与える太陽 - 地球磁気圏の相互作用とその結果がもたらす人間生活への影響についてまとめたものである。宇宙空間の電磁環境のダイナミックな変化を最も象徴的に表す自然現象の一つが大気の発光現象である「オーロラ」である。オーロラは人間が宇宙圏というものを意識する以前よりその眼前にあり、逆に、人類が宇宙環境を理解しようとするきっかけにもなっているといえる。ローマ神話で「あけぼのの女神」とされる「オーロラ」という名が、Gassendi (1621) によってこの発光現象につけられた。「太陽活動」－「地磁気の変動」－「オーロラの発生」という三つの現象が関連していることは、19 世紀半ば、即ち人類が人工衛星で観測を行う以前より知られており、この分野の研究が発展していくモチベーションの一つとなっている。

オーロラは、上空高度 100 km ～ 200km を中心に発生している大気の発光現象である（図 5-4）。高いエネルギー粒子が極域上空に降り込み、それが地球大気を構成する原子や分子を励起する。そして、



図 5-4：磁気嵐が発生したときのオーロラ。上方で酸素原子が放つ赤色のオーロラ、下方では緑色のオーロラが強く光る。

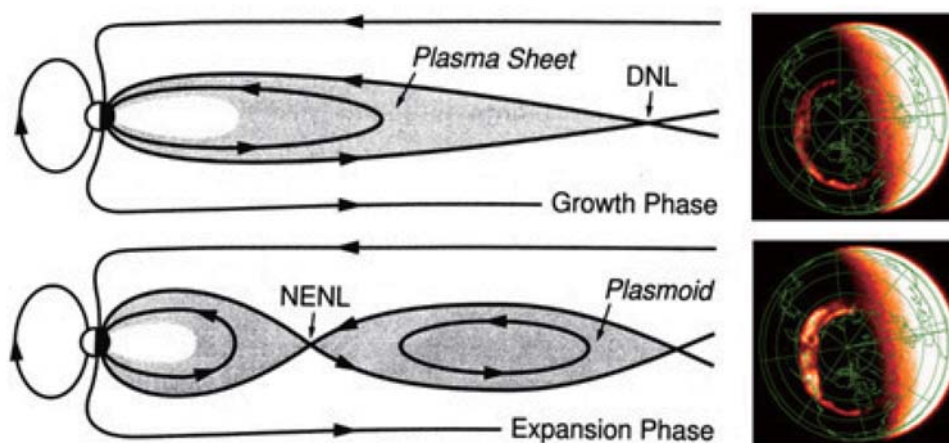


図 5-5：サブストームの発展（左）とオーロラ（右）(Baumjohan & Treumann(1996); <http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/substorm.html> より抜粋)

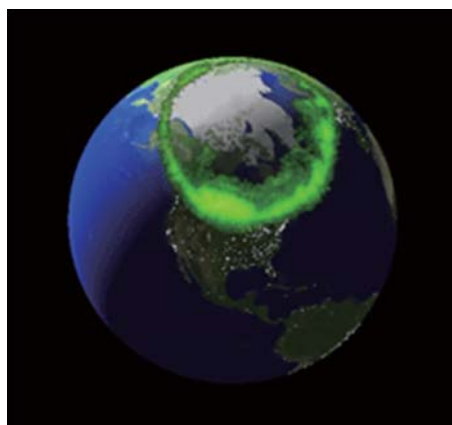


図 5-6：人工衛星が撮影したオーロラ。オーロラ・オーバルが極を取り囲む。
http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2008/polar_heart.html より

その励起された原子や分子が励起状態から基底状態に戻る際に光を放出する。可視光域におけるオーロラの典型的な色には3種類あり、「赤（波長：630.0 ナノメートル）」、「緑（波長：557.7 ナノメートル）」は酸素原子からの色で、「青（波長：427.8 ナノメートル）」は窒素分子イオンからの発光である。エネルギーとしては酸素原子の赤色が一番低く、また、その発光高度も高くなる。オーロラは高緯度地方でみられる現象であるが、北海道など比較的緯度の低い地域でも時折赤いオーロラを地平線あたりに見ることができるのは、可視光では赤色の発光高度が一番高いからである。

宇宙圏における電磁環境のダイナミックな変化がオーロラの発光につながる現象は、「サブストーム（極地磁気嵐）」として理解されている。サブストームが進行する様子を図5-5に示す。サブストームのスタートは南向きになる太陽風中の磁場 IMF である。IMF が南向きになると地球の昼間側の磁力線と IMF との間でつなぎ変わりが起き IMF と地球の昼間側磁力線がつながってしまう。これを「磁力線の再結合」と呼ぶ。IMF につながってしまった地球の磁力線は、太陽風によってそのまま地球の夜側（磁気圏尾部）へと運ばれる。つまり地球の昼間側の磁力線がはぎ取られて夜側にまわったことになる。こうなると夜側に磁場のエネルギーが蓄積されていき、やがて二番目の「磁力線の再結合」が突如発生する。この二番目の磁力線の再結合は、地球の半径の約 20 倍～30 倍のところで発生することが知られている。図5-5に示すようにこのとき、地球側へと戻っていく磁力線と反太陽方向へと流される磁力線とに分かれる。この地球方向へもどっていく磁力線が明るいカーテン状のオーロラを輝かせる原動力になっていると考えられている。この一連の地球磁場の動線を「磁気圏嵐（サブストーム）」と呼ぶ。後述する放射線帯の種となるような電子がこのとき地球側へ大量に放出されており、放射線帯をはじめとする宇宙環境変動を理解する上でもサブストームは重要である。

太陽フレアに伴い熱いプラズマの塊が太陽から放出されることがある（Riddle, 1970）。これをコロナ質量放出現象（CME）と呼ぶ。強い南向きの磁場を伴ったプラズマの塊が地球磁気圏に到達すると、第一、第二の磁気再結合を誘発し、オーロラが一層明るく、比較的低緯度で光ようになる（図5-5）。このとき熱いプラズマが地球方向に注入され、地球を取り囲むようにリングカレントは強く流れるようになる。リングカレント地球磁場を数日間大きく乱し、これを磁気嵐と呼ぶ。18世紀前半、ヨーロッパで羅針盤が数日間揺れることが記録されており、これが人類最初の磁気嵐の記録といえる。電流と磁場の関係をあらわすアンペールの法則が発見される1世紀も前のことであり、羅針盤が揺れる原因は当時分からなかったに違いない。地球を取り囲む電流が存在することが1910年に予想され、その電流の実態が高エネルギーのイオンであることがわかったのは1967年のことである（Frank, 1967）。リングカレントを担うイオンの全エネルギーは中規模の磁気嵐であってもマグニチュード7の地震と同程度のエネルギーに相当し、磁気嵐時には莫大なエネルギーが内部磁気圏に蓄えられることになる。そのため、リングカレントは電離圏で秒速1キロメートル近いプラズマの風を誘起し（Ebihara et al., 2009）、後述する放射線帯を大きく増減させ（Ebihara et al., 2008）、リングカレント自身の発達を抑制しようとする（Ebihara et al., 2005）など、宇宙環境変動に対する影響は大きい（Ebihara and Miyoshi, 2012）。

オーロラは常に現れている。その分布は極をとりまくような楕円型でありオーロラ・オーバルと呼ばれている（Feldstein, 1986）（図5-6）。オーロラ・オーバルを一周すると地方時によって性質の異なるオーロラを見ることができる。例えば、夜側ではサブストームに伴う明るいオーロラが、朝側では数秒から数十秒周期で明滅する脈動オーロラが、昼側では太陽風から直接流入した電子によるオーロ

ラが現れる。これは宇宙空間の状態が地方時によって異なるからである。電磁エネルギーと粒子の太陽風から磁気圏に流入する過程を理解するため、生存圏研究所と国立極地研究所を中心とするグループは南極点基地にオーロラ観測装置を設置し、多様なオーロラを24時間連続観測している（Ebihara *et al.*, 2010）（図5-7）。この日は13から17世界標準時（UT）にかけて赤いオーロラが卓越したことがわかる。赤いオーロラが卓越していることは太陽風に含まれる比較的冷たい電子がカスプと呼ばれる磁気圏の裂け目を通して地球に直接流入していることを意味している。カスプは太陽風が持つエネルギーが磁気圏の内側に取り込まれる現場であり、磁気圏・電離圏の大規模なプラズマ対流を駆動し、磁気圏を動的なものとしている原動力そのものである。カスプを精査することは、磁気嵐や放射線帯を含め地球近くの宇宙空間でおこる数多くの擾乱現象を根本的に理解する上で重要である。

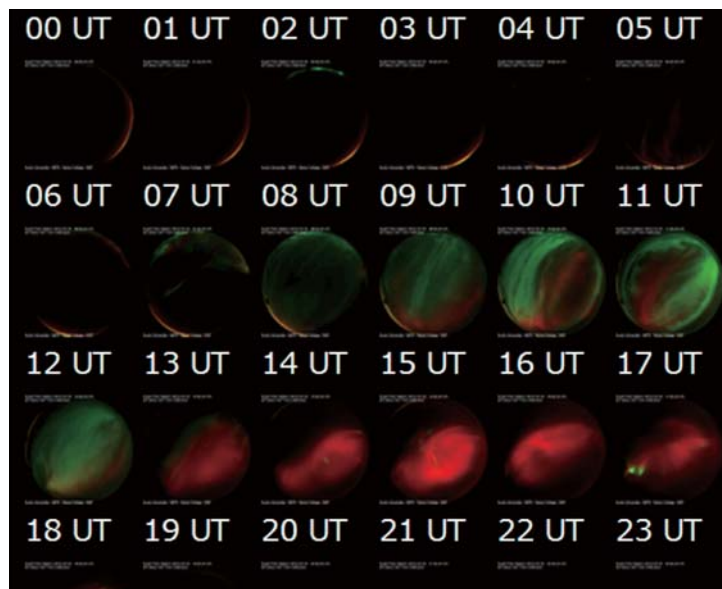


図 5-7：南極点基地で観測した一日のオーロラ
（世界標準時（UT）0時から23時まで）

5.3.3 放射線帯と宇宙利用への影響

米ソ冷戦の下で米国と旧ソ連の宇宙開発競争が行われていたことは、よく知られている。地球の放射線帯はこの宇宙開発競争の中で発見された。ドイツで急速に発達したロケット技術は第二次世界大戦後、米国と旧ソ連に引き継がれたが、その中で旧ソ連が先陣を切って1957年人類初の人工衛星スプートニク1号の打ち上げに成功した。それまで打ち上げ失敗を繰り返していた米国が、その威信をかけて初めて打ち上げに成功したのがエクスポローラ1号（1958）である。このエクスポローラ1号に宇宙線を観測する目的でアイオワ大のヴァンアレン博士が搭載した観測器（ガイガーカウンタ）が、予想もしない大量の高エネルギー粒子を捉えた（そのためにその観測器が飽和してしまった）。これが地球をとりまく高エネルギー粒子の帯「放射線帯」の発見である。

地球の放射線帯は、おおまかには、図5-8のようにドーナツ状に地球を取り囲む形をしており、高度が低く赤道上で5,000 km くらいまでの内帯と20,000 km 程度の外帯とに分けられる。外帯は、高度36,000 km に配置されている静止衛星軌道にまで広がっている。内帯は比較的その状態が安定して

いるが、外帯を構成する高エネルギー粒子は時間的に変化しており、粒子が増えたり、減少したりを繰り返している。

この放射線帯外帯における高エネルギー電子の増減については、前述の磁気嵐に代表される地球磁気圏の活動と密接に関連していることがわかっている。外帯は静止衛星軌道にまでかかっているため、その磁気圏活動に伴う変化は静止衛星に影響を及ぼすことになる。エネルギーの高い電子は、衛星そのものを帯電させるばかりでなく、衛星の内部にまで到達して、内部も部分的に帯電させる。このような帯電が局所的に高電位で発生すると放電

現象へとつながり衛星の故障や破損を引き起こす。この外帯高エネルギー電子の生成機構については、いくつかのメカニズムが提唱されており、その解明を目的とした米国の衛星 Van-Allen probe が 2012 年に打ち上げられた。我が国も 2015 年の打ち上げを目指した放射線帯観測衛星 ERG 計画が進められている (Miyoshi *et al.*, 2012)。

この放射線帯に深く関係して観測される特徴的な電波であるホイッスラーモード・コーラス放射は、数 kHz の周波数帯にありオーディオアンプに通すと鳥の鳴き声のように聞こえる (図 5-9)。この電波は半世紀前から世界中で研究されてきたにもかかわらず、その発生機構は謎であった。しかし、プラズマ中の基礎方程式を数値的に解きすすめる計算機シミュレーションが、このコーラス放射を再現することに成功した (Kato & Omura, 2007; Omura *et al.*, 2008; Hikishima *et al.*, 2010)。そしてその結果に基づいて提唱されたコーラス放射の発生理論が、最近のテミス (THEMIS) 衛星の観測によって実証された。コーラス放射は人工衛星の運用に大きな影響を与える放射線帯外帯の高エネルギー電子の生成に関与しており、その発生機構の解明は宇宙利用における放射線環境の予測に役立つ。また放射線帯の高エネルギー電子は数 Hz 以下の電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波のトリガード放射との相互作用によって効率良く散乱されて北極・南極上空へと落ちていくことが理論的に示され、放射線帯粒子の変動にコーラス放射や EMIC トリガード放射が深く関与していることが明らかになってきた。このようなプラズマ波動を人工的に発生させることで宇宙利用の障害となっている放射線帯を制御することが将来可能になるかもしれない。

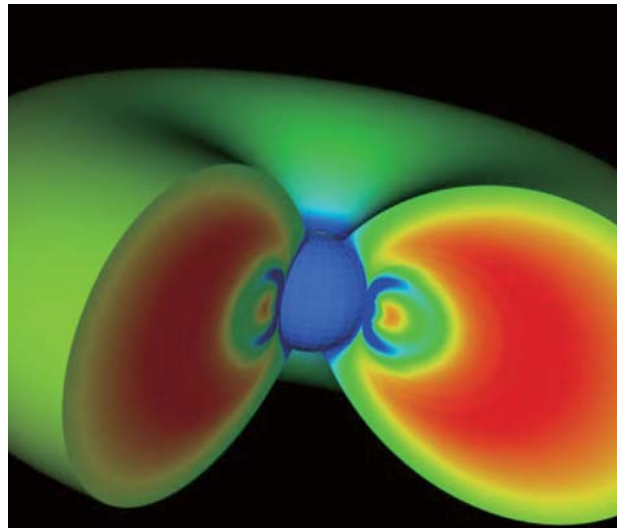


図 5-8：放射線帯の外観

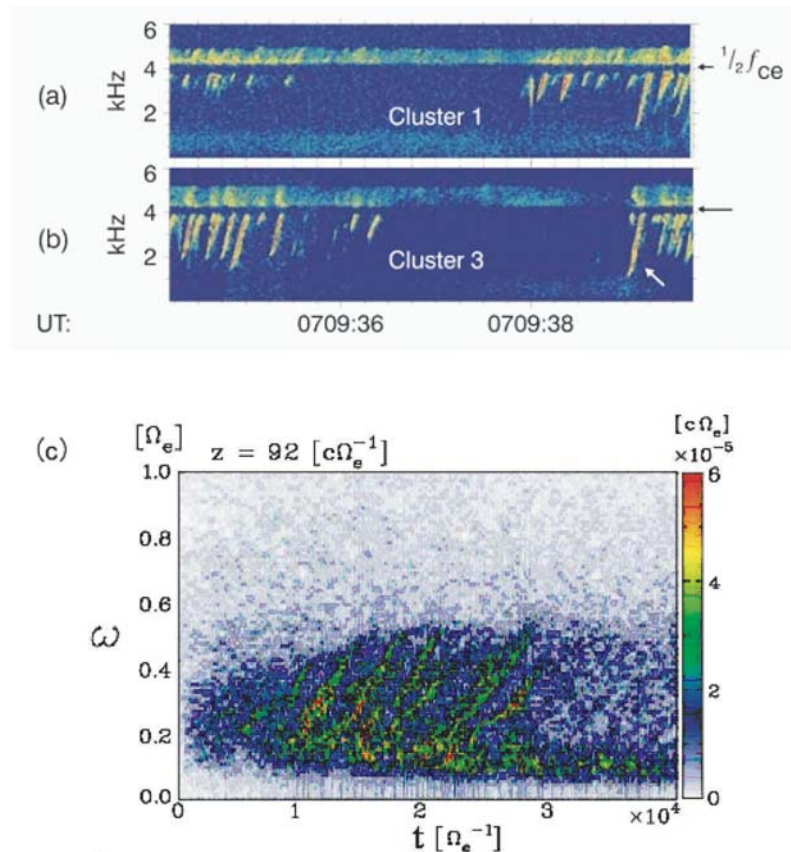


図 5-9: Cluster 衛星で観測されたコーラス放射スペクトル ((a), (b)) (Santolik *et al.*, 2004) と計算機シミュレーションで再現されたコーラス放射スペクトル ((c)) (Katoh & Omura, 2007)。いずれの図も横軸は時間、縦軸は周波数。

5.4 宇宙圏と人間生活圏との関わり

5.4.1 小惑星衝突と回避

小惑星や隕石の地球への衝突は、我々人類が誕生する以前から今に至るまで変わりなく存在している。月のクレーターが同様の衝突原因によってできていることを考えると、長い地球の歴史の中でそれは珍しいことではないと認識できる。もっとも地球には大気が存在するため、小規模の隕石は途中で燃え尽きてしまい生存圏としての地球環境に大きな影響を与えないことがほとんどである。しかし、一度大気中で完全に燃え尽きない程の隕石や小惑星と衝突すればその被害は想像を絶するものとなる。

これまでよく知られていた隕石の衝突としては1908年のロシアにおける Tunguska の大爆発がある。犠牲者こそ出なかったがその規模は TNT 火薬にして 15 メガトン程といわれている (Vasilyev, 1998)。そして、2013 年 2 月 15 日にロシア Chelyabinsk 州付近に落下した隕石は負傷者まで出したが、隕石の直径は 19 m 程度のもので上空数 10km のところで爆発したものと考えられている。この程度の隕石でもその爆発エネルギーは TNT500 キロトン程度であったと考えられている (Borovicka *et al.*, 2013)。このような隕石が人口密集地に落ちるだけでも甚大な被害を与えるし、また、より大規模な衝突の場合、地球の環境すら変えてしまう可能性がある。

このような小惑星や巨大隕石の地球への衝突回避へ向けた研究が各国で進められている。特に 2013

年の Chelyabinsk の衝突は更に研究を加速させるきっかけとなっている。現在、地球近傍でみつっている小惑星が約 10,000 個あり、その内、潜在的に地球に衝突する可能性をもつものが約 1,000 個程度と考えられている。

米国は NASA の 2014 年度予算要求に地球に影響を及ぼす可能性がある小惑星の探索とその回避法に関する研究を盛り込んだ。図 5-10 は捕獲した小惑星を人間が探査しているところの想像図である。NASA では無人の捕獲機により小型の小惑星をとらえ月軌道まで曳航後、現在開発中のオリオン宇宙船で人間を運び調査する計画である。衝突回避を直接目的としたミッションではないが、小惑星を直接捕獲して曳航する手法の開発は重要であり国際協力のもと推進しようとしている。

欧州宇宙機関（ESA）も NASA 等と協力の下、小惑星に飛翔体を衝突させてその軌道に与える影響を評価するためのミッションを計画している。AIDA（Asteroid Impact & Deflection Assessment）と呼ばれているこのミッションは、小惑星にランデブーして衛星の軌道や形状を精密に計測する衛星と小惑星に衝突する衛星の 2 機から構成される（図 5-11）。

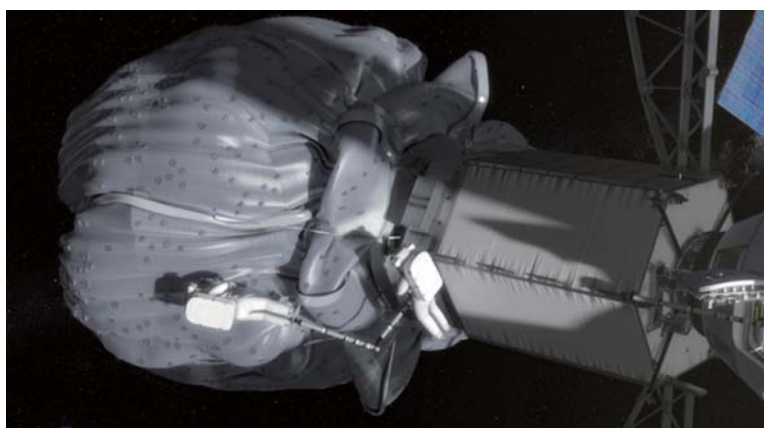


図 5-10：NASA の小惑星捕獲計画

(<http://www.nasa.gov/content/asteroid-initiative-concept-image-gallery/#lowerAccordion-set1-slide6> より)

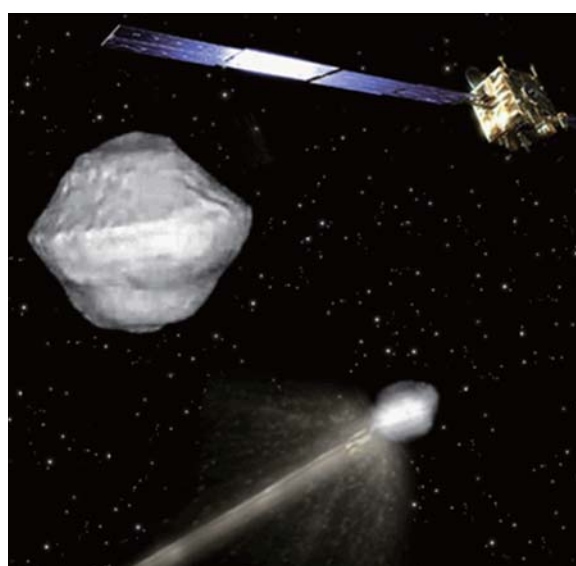


図 5-11：ESA と NASA による小惑星ランデブー計画

(http://www.esa.int/Our_Activities/Technology/NEO/Asteroid_Impact_Deflection_Assessment_AIDA_study より)

地球に衝突する可能性のある小惑星の軌道変更手法については、我が国で提案されている「帯電セイルを小惑星に衝突させる方法」と「小惑星に人工飛翔体をランデブーさせ、両者を帯電させることによってクーロン力を発生させて軌道を変更する方法」について次に述べる。

[帯電セイルの衝突による軌道変更]

帯電セイルとは、図 5-12 のように宇宙空間に導電性のテザーを展開しそれを 10kV 程度に帯電させて太陽風との間にクーロン力を発生させる推進手法である。通常使われている化学推進や電気推進のような燃料を必要としないため、効率の良い推進が実現できる。この帯電セイルを用いてターゲットとなる小惑星に近づき衝突させる時の軌道を計算したものが図 5-13 である(山口・山川, 2014)。

帯電セイルは小惑星が地球に衝突する 14 年前に打ち上げ、3 年間の飛行の後、小惑星に衝突させるという場合で最適化を行った結果である。

この計算では帯電セイルが小惑星に到達した際の相対速度は毎秒 24 km となり、帯電衛星が衝突すると、地球の軌道付近における小惑星の軌道が約 2 万 km 変化するという計算結果が得られている。

[クーロン力による軌道変更]

小惑星とそれにランデブーしている衛星の両者を強制的に帯電させ、その両者に働くクーロン力を用いて小惑星の軌道変更を行おうとするものである。このクーロン力で牽引する手法をクーロンアトラクタと呼ぶ。前項の帯電セイルの衝突による軌道変更では短時間に衝撃を小惑星に与えて加速度を得ようとするものである。それに対し、このクーロンアトラクタによる軌道変更は、長期間にわたり小惑星に対して力を加え続けることにより軌道を変更しようとするものである (Yamaguchi & Yamakawa, 2014)。図 5-14 にクーロンアトラクタによる小惑星の軌道変更シミュレーションのモデルを示す。衛星は小惑星から 150 m の距離を保った状態でランデブーしている。小惑星と衛星は違う極性の電位 -20kV、+20kV に帯電させ、この間に発生するクーロン力により小惑星を引っ張ることになる (衛星はこのクーロン力にみあう推力をもつものとする)。このシミュレーションの結果では、2 年間連続して牽引し続けたとして、地球接近時における軌道変更距離は 6km 程度となっている。

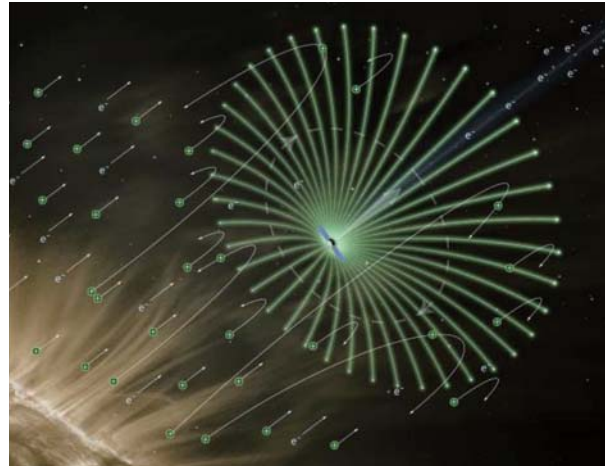


図 5-12: 帯電セイル
(<http://www.electric-sailing.fi/> より)

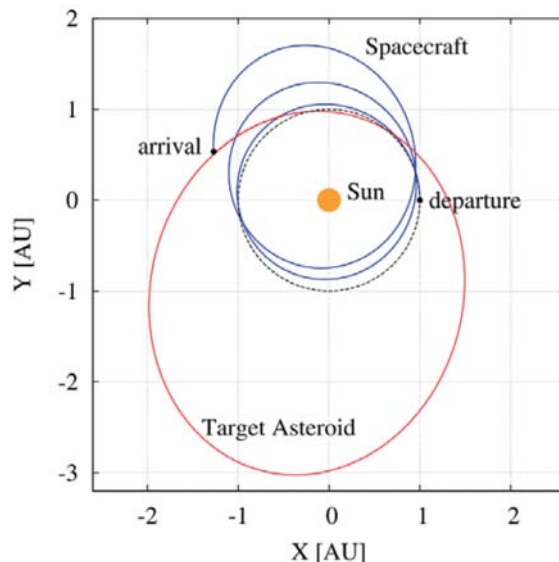


図 5-13: 帯電セイルによる小惑星衝突回避軌道

5.4.2 地磁気誘導電流

1989 年 3 月 13 日カナダのケベック州において大停電が発生した。トランスに規格外の電流が流れてトランスが焼き切れたためであった。このトランスを焼き切った原因として考えられるのが、地磁気誘導電流 (GIC: Geomagnetically Induced Current) である。地球は先に述べたように太陽風と自己磁場が相互作用して磁気圏を形成している。そして、その磁気圏内には様々な電流系が存在している。特にオーロラ領域の電離圏には絶えず電流が流れている (オーロラジェット電流)。太陽から CME が放出されそのプラズマ雲が地球に到達して地球磁気圏を圧縮すると、それに伴って電流系を流れる電流が増大する。電離圏中を流れる

電流が増大すると、それによる磁場も増大する。その増大する磁場の磁力線が鎖交する閉ループがあると、そこに起電力が発生して電流が流れる (ファラデーの電磁誘導の現象である)。これが GIC である。図 5-15 では大地内に発生する電位差により電力供給回路の接地間に電位が発生し電力線に異常な電流が流れることになる (この他、閉ループは、ガスや石油のパイプラインであったり、水道管であったりもする)。電離圏を流れる電流の増大時間変化が大きければ大きいほど、GIC は大きくなる。

このような GIC は、すでに地下に流れる電流として観測的にも実証されているが、オーロラジェット電流の変化を受けやすい高緯度ほど、巨大な GIC が流れやすくなる。一方、低緯度地域は通常、この点から安全と考えられているが、それでも数 100 年から数 1000 年に一度起こると言われてスーパーフレアでは、オーロラ帯が低緯度地域まで下がってくることが想定されるので、低緯度地域でも大きな GIC が流れる可能性がある。

小惑星・宇宙機の位置関係

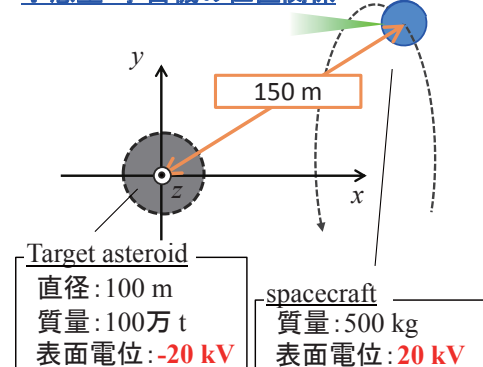


図 5-14：クーロンアトラクタによる小惑星ランデブー

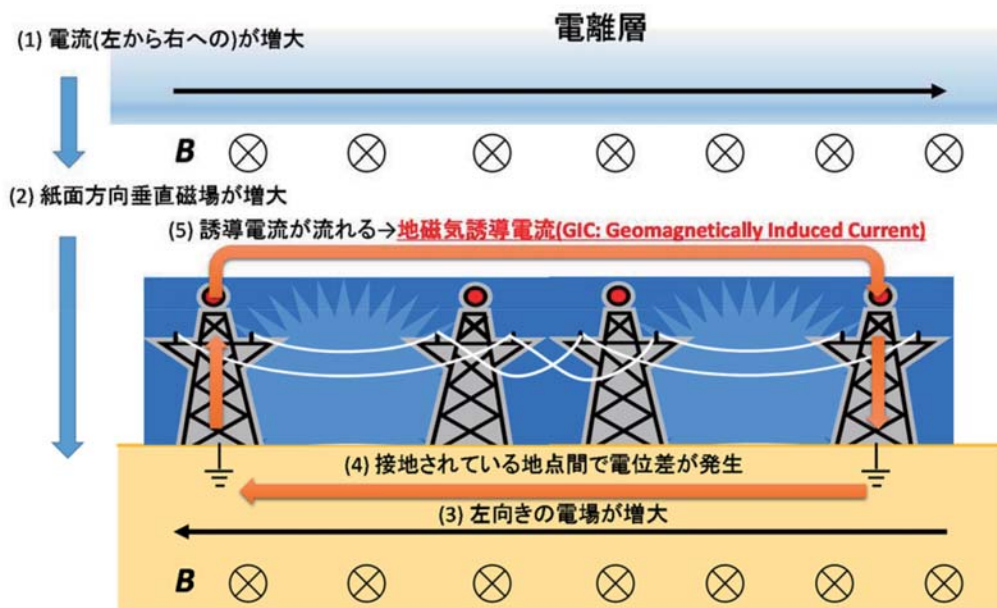


図 5-15：GIC メカニズムの模式図

人類が送電線やパイプラインなどを構築しその上に成り立つ生存基盤を構築していなければこの GIC の人間生活への影響は本来ほとんど想定しなくてよいものである。この意味で逆に現在の我々はこの GIC による影響を回避する「すべ」をもつ必要がある。GIC の影響を軽減するには電流ルートが形成されないようそのループを切断することである。しかし、もちろん送電線のように常に電流ルートが切られてしまつては実用にならないものが多い。従つて、「GIC がいつ流れるか」、「どれほどの GIC がどこでどれだけ流れるか」ということを予測し、それに従つて危険な期間だけ電流ルートを遮断するという手法をとるのが妥当である。では、その予測をするにはどうすればよいであろうか。GIC は太陽で発生した CME が地球の磁気圏と衝突することによって発生する。従つて、この CME の規模と地球との衝突確率、および、衝突した際に地球磁気圏内の電流増大規模を予測することが重要となる。

5.5 宇宙環境の利用

5.5.1 太陽光の利用：ソーラー電力セイル宇宙機による地球磁気圏探査

2010 年小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS が、金星探査機あかつきとともに打上げられ、14m 四方のセイルの展開を行い、太陽光をそれで受けることにより推力が発生することを実証した。現在、この実績をもとに 2020 年頃を目処に中型ソーラー電力セイル宇宙機による木星探査が計画されており、ソーラー電力セイルは惑星間航行推進システムとして注目を集めている。一方、ソーラー電力セイルは、地球磁気圏の探査にも有効であることが示されている。図 5-16 は、地球を

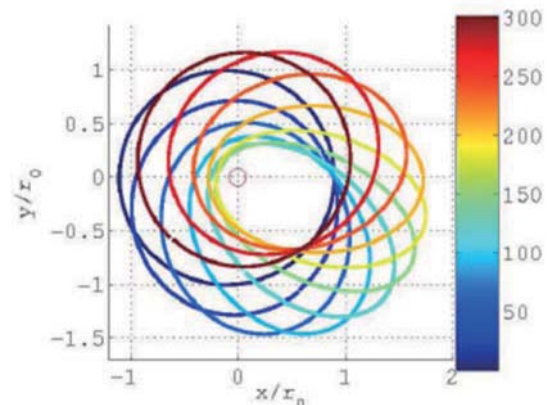


図 5-16：ソーラーセイルによる地球周回楕円軌道の軸方向制御

している (Oyama *et al.*, 2008)。図では、 x 軸の負方向に太陽があり、 Z 軸の正方向が地球の自転軸北方向にあたる。この図ではソーラー電力セイルを用いることによって、軌道が青から赤遷移していることを示している。このとき、その楕円軌道の長軸の方向が徐々に地球の夜側に移動してきている。これはちょうど月スイングバイを利用した軌道制御と類似した変化であり、ソーラー電力セイルにより月スイングバイを利用しなくても同様の軌道を実現することを示している。これは、太陽光を宇宙空間で利用することによって得られる有効な軌道制御の例である。

5.5.2 太陽大気流の利用：マグセイル

現在実用化されている推進システムは、大別してロケットなどの化学推進と、小惑星探査機はやぶさに用いられたイオンエンジンなどの電気推進の 2 種類がある。化学推進は、高い推力が得られるが、その推進剤利用効率を表す比推力は小さい。一方電気推進は、得られる推力は小さいが高い比推力を得ることができ、地球周回軌道から脱して深宇宙探査を行うミッションに適している。ま

た新たな推進システムとして太陽光を大きな帆で受け止め、太陽光の運動量を推進力として得るソーラー電力セイルが期待されている。ソーラー電力セイルが、機械的に薄膜でできた帆を展開して、太陽光を受けて推力を得ていることに對し、磁場でできた帆を宇宙空間に展開して推力を得るものが磁気セイル (Magnetic sail) である。磁気セイルでは、人工的に磁場をつくりだすことにより、太陽風プラズマと相互作用して推力を得る。すなわち、ソーラー電力セイルでは、光子が機械的な帆に当たって推力となるのに対し、磁気セイルでは太陽風プラズマが磁場の帆に当たって推力となる。磁気セイルが推力を得る原理を簡単に述べる。図 5-17 は磁気セイルが推力を得るイメージ図である。

超伝導コイルを搭載した宇宙機が磁場を作り出し、太陽風が惑星間空間磁場を伴って太陽から放出されると、地球磁気圏と同じように太陽風と宇宙機が作る磁場が相互作用を行い磁気圏が形成される。磁気圏の境界は、宇宙機の作る磁場と太陽風がもたらす磁場の境界であり、この境界に太陽風により誘導電流が流れる。その誘導電流が宇宙機のコイル付近に磁場を作り出し、その磁場からコイルを流れる電流に力が生じ推力を得ることができる。磁場を生成するコイルには、効率をよくするために超伝導コイルを用いる。これにより通常のコイルよりも大電流を流すことができるため、そこで発生する磁場強度が大きくなり、それに伴い形成される磁気圏の帆も大きくなる。そして更に、この磁気セイル宇宙機から少量のプラズマを噴射させると、噴射プラズマが超伝導コイルの作る磁場を押し広げる役割をなして磁気圏が拡大し、プラズマを噴射しないときに比べて大きな推力が得られるようになる。これを磁気プラズマセイルと呼ぶ。磁気プラズマセイルはイオンエンジンと同程度の推力及び比推力で、イオンエンジンに比べて高い投入電力に対する推力の比を目指している。

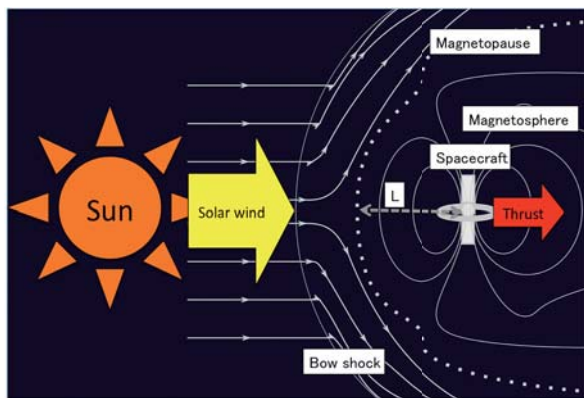


図 5-17：磁気セイルの模式図

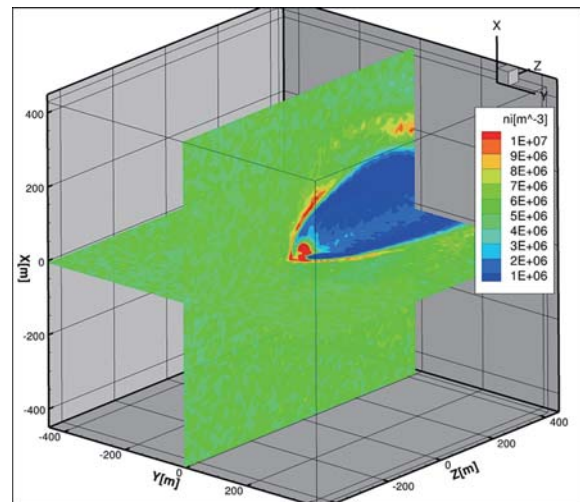


図 5-18：磁気セイルに関する計算機シミュレーション

[数値計算による推力解析]

磁気セイル及び磁気プラズマセイルの実現には、どれだけのコイルでどれほどの電流を流せば推力が得られるのかがわからなければならないことはいうまでもない。しかしプラズマである太陽風と磁場の相互作用を正確にモデリングし、推力を計算するのは現在の計算機の性能では現実的でない。一方、現実的に計算が可能であるような近似を用いた場合は用いるコイルの大きさが現実的でない。さらに実験により推力を検証することは常伝導コイルを用いては為されているものの、実際に宇宙空間で運用する場合とは異なった条件である。つまり実現が現実的な磁気セイル及び磁気プラズマセイルの推力を計算する、あるいは実験により測定する手法は確立されていない。

この状況を打開するために磁気セイル宇宙機の推力を現実的な計算負荷で求めることができるモデルの構築が重要である。図 5-18 は磁気セイル宇宙機周辺の電子密度分布である。宇宙機近傍では、電子密度分布が小さくなり磁気圏が形成されようとしている様子を示している。このモデルは、磁気圏が数十 m 程度の様子であり、十分な推力を得るには、より大きな磁気圏が形成される必要があり、その場合については現在モデルの検討が行われている。

[超伝導コイルを用いた実験系の構築]

磁気セイル及び磁気プラズマセイルが作る磁場は、数 m 以下の大きさで十分な推力を得られるだけの電流を流す必要があり、非常に低損失である超伝導コイルが適している。しかし超伝導特性は、超伝導特性を保つ最大電流（＝臨界電流）が存在するなど、常伝導コイルにはない複雑な特性を有するため、実際に超伝導材料を用いてどのようなコイルが必要であるのかを検討している。また極く僅かに存在する損失によっても発生する磁場が減衰するという問題がある。このため超伝導コイルを励磁する電源が必要となり、その励磁回路の設計も行っており、超伝導コイルを励磁し続けられるかの検証を行う。図 5-19 は、超伝導コイルを励磁するための真空チャンバであり、これを用いて超伝導コイルの基本特性を測定し、また励磁回路の検討を行う。



図 5-19：磁気セイル超伝導コイル実験用チャンバ

5.5.3 プラズマの利用：帯電現象を利用した宇宙機ダイナミクス制御

人工衛星の帯電は、地球周辺のプラズマ中のイオンや電子との衝突により起きる。日照時には、光が衛星表面に当たることによって表面の電子が光電子として真空中に放出されやすいために、衛星電位は一般に正の値（＋数 V ～ 数十 V）になり、逆に日陰の場合は負の値になる（電離圏中ではプラズマの密度が高いため、光が当たっても負に帯電している）。この衛星の帯電量を自然現象に任せるのではなく、積極的に制御することにより、地球磁場と帯電衛星との相互作用によって、磁場方向と人工衛星の速度方向の双方に対して垂直方向に働くローレンツ力、あるいは、複数の帯電衛星間に働く引力あるいは斥力であるクーロン力（図 5-20）を用いて、地球を周回する複数の人工衛星の相対位置や軌道・姿勢の制御を行うことができる。

一般に、衛星における帯電現象は、放電の危険性を高め、また、科学衛星の場合は、その観測にも支障がある場合がある。我が国の GEOTAIL 衛星を始め、科学衛星の目的によって、低エネルギーのプラズマを計測するために、周辺のプラズマで満たされている空間の電位と等しくなるように衛星の電位を制御している。このように衛星帯電量の制御という既存の技術を積極的に用いて、新たに人工衛星の軌道制御や姿勢制御に応用することができる。

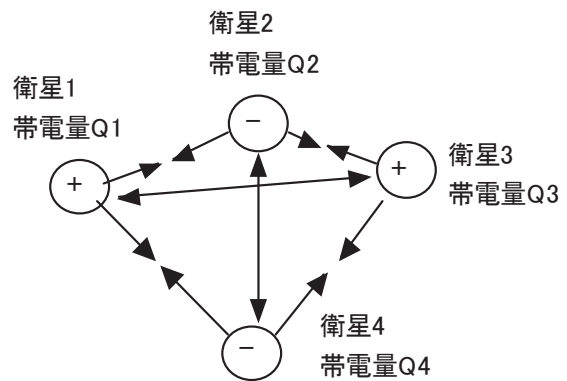


図 5-20：クーロン力によるフォーメーションフライト

人工衛星の帯電量の制御は、能動的な電子放出、あるいは、イオン放出により行うことを想定しており、既に衛星用に開発されているイオンエミッタ（放出装置）や電子エミッタと同じ原理の軽量の装置を用いることにより実現できる。人工衛星の帯電量のコントロールのためのイオンあるいは電子の放出量は僅かであり、これにより、軌道を修正することができれば、ほぼ燃料（プロペラント）が不要となる「プロペラントレス」な推進機関と捉えることができる。また、電子やイオン放出の量が、一般のエンジンでのガス放出量と比較すると非常に小さいために、衛星の質量変化は、ほぼなくて質量一定と考えることができ、放出による人工衛星の速度（ひいては運動量）、および、人工衛星周辺のプラズマ環境に与える影響は無視可能となる。さらに、帯電量の制御に必要な電力は 1W 程度と小さく、また、帯電量制御に要する時間は数ミリ秒であるために、ほぼ瞬間的に帯電量を制御可能と考えられる。現在は、この積極的に帯電をさせた人工衛星が、地球磁場中を動くときに受ける力（ローレンツ力）や、複数の帯電衛星がお互いに電気的な力で引きあう力（クーロン力）の影響を受けたときに、従来の通常的人工衛星では実現できない固有の軌道運動や姿勢運動を解析している段階である。燃料が不要なことを利用して超小型の人工衛星群の実現、そして、それらによる宇宙環境の観測・利用・改善等、近い将来の新たな宇宙ミッションにつながっていく。

【クーロン力によるフォーメーションフライト】

2つ以上の帯電した衛星間の距離が、デバイ長よりも小さい場合、プラズマによるデバイ遮蔽の効果が及ばないため、これらの衛星はお互いにクーロン力を及ぼす。2つの帯電した衛星が、互いに距離を一定に保ちながら静止軌道を周回するような軌道が存在することがわかっており、デバイ長が十分に大きな領域ではクーロン力によるフォーメーションフライトが可能である。

【ローレンツ力によるフォーメーションフライト】

クーロン力によるフォーメーションフライトは、デバイ長が十分大きくなければデバイ遮蔽によりクーロン力が働かないため有効でない。例えば LEO などの低軌道ではデバイ長は数 m かそれよりも小さくクーロン力によるフォーメーションフライトは不可能である。しかし、地球近傍であれば地球磁場によりローレンツ力が働くため、これにより帯電した衛星の軌道制御が可能となる。例えば、地球を周回する非帯電衛星（ターゲット）を基準とし、このターゲット衛星から僅かに離れた距離にあり地球を周回する帯電衛星（チェイサー）の軌道を考える。帯電衛星（チェイサー）の帯電量を時間ごとにうまく変化させれば、非帯電衛星（ターゲット）に対して、ある相対位置から別の相対位置に

移動させることができる。つまり、ターゲットに接近したり、ターゲット周りの相対的に周回をする軌道上に投入したりすることが可能であることがわかっている。

5.6 宇宙環境アセスメント

5.6.1 人間活動が汚す宇宙環境：スペースデブリと除去

[人類の宇宙活動とデブリの発生]

自然に宇宙空間に存在する塵や隕石ではなく、人類が宇宙空間を利用することによって発生する塵やゴミのことをスペースデブリと呼ぶ。具体的には、宇宙空間にもっていった装置のカバーやボルト、ナット、および、使い捨て部ロケットの最終段部などである。その直径は 0.001mm から 10m 程度のもまで存在する。これらは実際のロケットや衛星から発生したこれらのスペースデブリは、軌道上の衛星などに対して平均的に 11km/s の相対速度をもっており非常に高速である。スペースデブリが衛星などから発生していることからその密度はアルミニウムの 2.8g/cm^3 程度であるので、その衝突エネルギーは非常に大きくなる。例えば、1mm を超える大きさのスペースデブリでも国際宇宙ステーションに対して影響が出ると考えられている。

図 5-21 は、地球周辺のスペースデブリの年増加を示したグラフである。これは地上からの観測によりカタログ化されたものであり、すでに 16,000 個を超えていることがわかる（2007 年における急激な増加は中国による軌道上衛星のロケット破壊実験の効果である）。ここに現れない 1mm 以下の微小なものまで含めるとその数は数千万個以上になると言われている。スペースデブリは、人類の宇宙活動の活発化により増え続けているが、それに加え発生したデブリどうしの衝突により更に多くのデブリを生じさせてしまう効果も現れ始めている。このようにスペースデブリは、人類が宇宙圏を利用し始めることによってその環境を汚染している。地上でも産業廃棄物等、ゴミの問題がクローズアップされているが、それと同種の問題が宇宙空間においてもすでに発生しているのである。

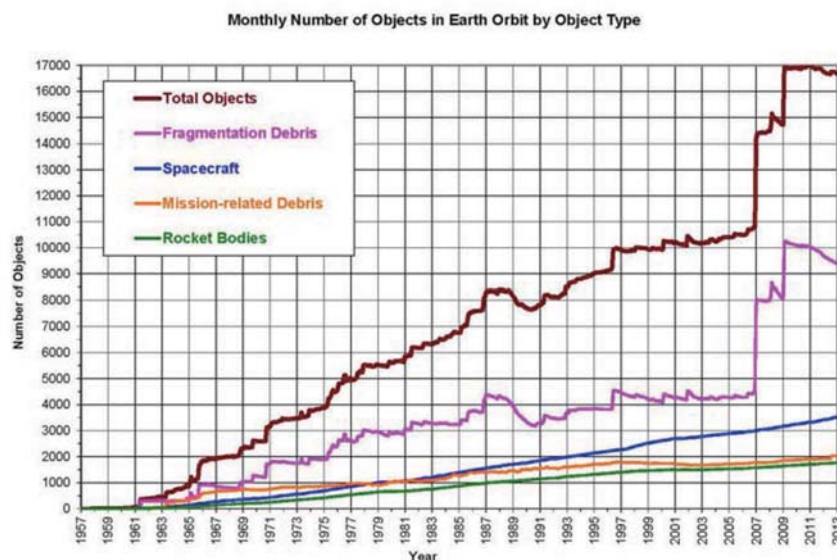


図 5-21：スペースデブリの増大（NASA, 2013）

スペースデブリは、宇宙空間に一様に存在しているのではなく、高度 2,000km 以下の低軌道や太陽同期軌道の極軌道に沿って多く存在している。図 5-22 は、低軌道に存在するスペースデブリに対し対策を施した場合の個数変化の予測を示している。ADR は Active Debris Removal の略で、なんらかの方法でスペースデブリを除去することを示しており、ADR02 が 2 個 / 年、ADR05 は 5 個 / 年で除去していくことを想定したカーブとなっている。PMD というのは、Post Mission Disposal の略でミッション終了後にスペースデブリにならないような対策を施すことを示している。即ち、新しいスペースデブリをつくらず、且つ、年 5 個程度のスペースデブリの除去を行って初めてスペースデブリの個数増加を抑えることができることを示している。

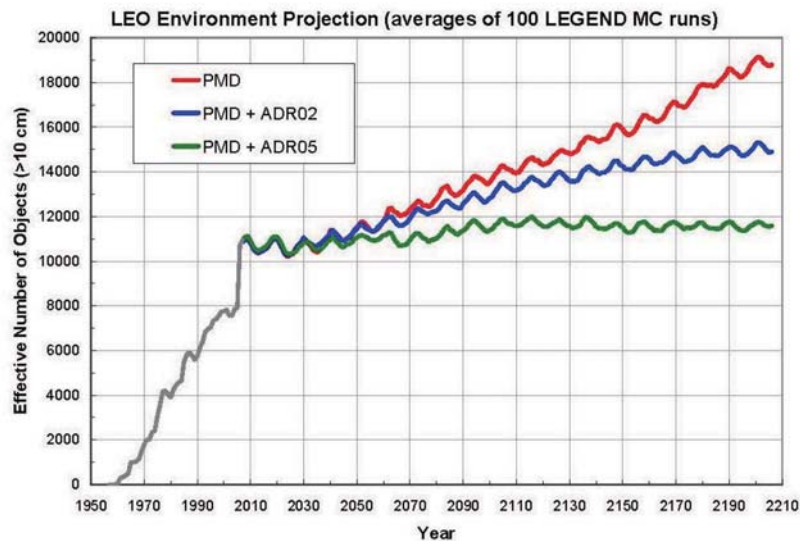


図 5-22：スペースデブリの変化予測（NASA, 2008）

[スペースデブリの除去]

スペースデブリを除去するには、その高度を落とすことにより大気圏に突入、燃え尽きさせてしまうのが良い。しかし、実際に地球を周回しているデブリの軌道を変更して落下させるには、相当のエネルギーが必要であり、それをなんらかの推進剤を用いた系で行うことはその必要燃料の量からして現実的ではない。そこで、一般的な推進系を用いないでデブリを落下させる手法の研究が進められている。

図 5-23 は JAXA で検討されているテザーを用いたデブリの除去方法である。デブリに 10 km 程度の長さの導電性テザー（ひも）を装着する。このテザーは地球方向に向けて伸ばされ、デブリが地球磁場を横切りながら運動することによって、このテザーに起電力が生じ、更に、テザーの先端に電子を放出させるエミッターをつけることによって、デブリ－テザー

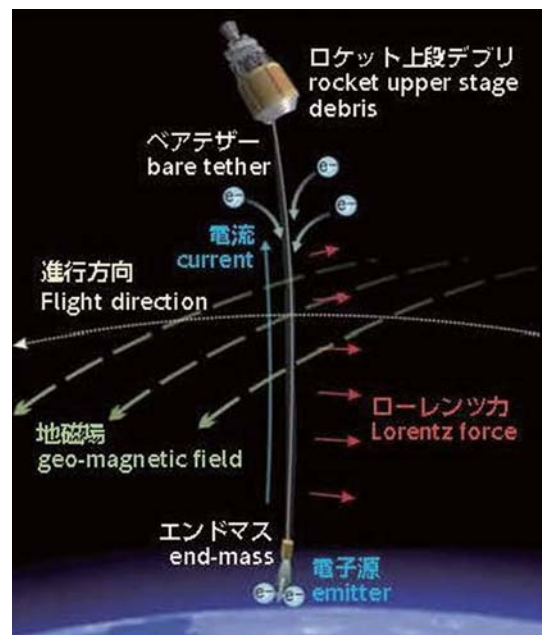


図 5-23：JAXA のテザーによるデブリ除去計画（JAXA 提供）

ー宇宙プラズマでの回路が形成され、テザーに電流が流れることになる。そうするとローレンツ力がテザーに働くので、その結果、デブリの軌道速度を低下させることにつながり、やがて大気圏に突入できる、という手法である。

このテザーを用いたスペースデブリの除去では、10km という長いテザーをデブリに対して装着する必要がある。実際はデブリに巻き取ったテザーを装着してから伸ばしていくことになるが、その仕組みは複雑である。また、デブリが大気圏に突入するには1年ほどかかると考えられるが、その間にこの長いテザー自身がデブリによって切断されてしまう可能性もある。そこで、このテザーを用いない手法についても現在研究が進められている。それは、5.5.3 で触れた宇宙空間における帯電現象を利用することである。スペースデブリは衛星やロケットから発生していることからアルミを主体とした金属導体でできている。この金属導体は宇宙空間に配置されると周辺からの電子やイオンの流入により帯電する。帯電したデブリが地球磁場を横切って運動することにより、テザーと同様ローレンツ力が働きデブリの運動に影響を与える。もっともデブリの自然帯電量は大きなものではないため、そのままでは、デブリを地球の大気圏に突入させることはできない。そこで、デブリの帯電量を能動的に制御できるようにイオン銃、ないしは、電子銃をデブリに装着する。そして帯電制御を軌道周期と同期させることにより、デブリの軌道を大きく変化させることが可能であることがわかっている（図 5-24）。

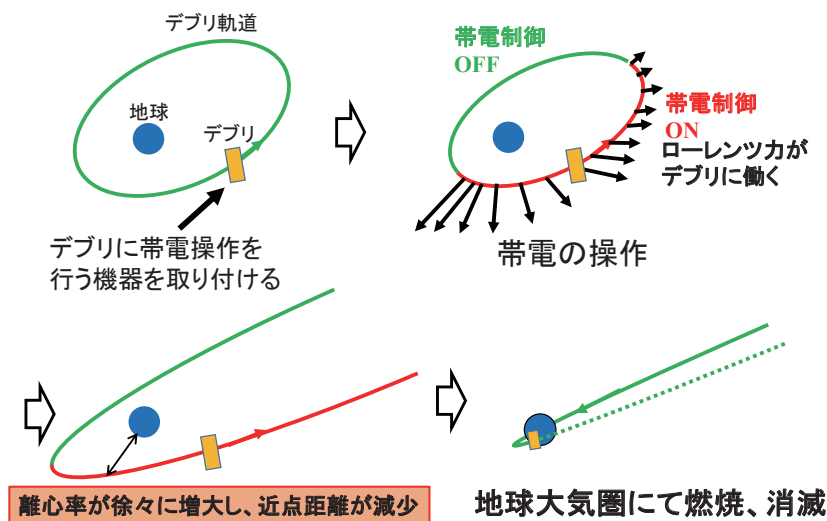


図 5-24：帯電制御によるデブリ除去

5.6.2 人間活動が乱す宇宙環境：電磁環境の乱れ

5.3.2 で述べたように宇宙空間はプラズマという電離気体で満たされている。この電離気体内で人間がその生存活動を行うとどのようなことが起こるであろうか。本書の執筆時点で宇宙空間における大規模な生存活動を人間が行っているわけではない。せいぜい、地球と宇宙の往還用ロケットや国際宇宙ステーション程度の規模である。しかし、このような小規模の人工の構造物が宇宙に置かれるだけで宇宙空間の環境に変化を及ぼすことがわかっている。

地球を周回するこれらの構造物は一定以上の速度をもたないと落下してしまう。そのため構造物は周囲のプラズマに対して必ず相対速度をもっている。つまり構造物に乗っている人からみれば、プラ

ズマの風が吹き付けていることと同じであり、その速度は典型的には、毎秒数 km 程度である。地球でも風が吹いて構造物に当たれば、そこで空気の動きの「乱れ」が発生する。例えば、建物の周辺でつむじ風が起きたりする。海の上を船が動けばその背後には、航跡が残るであろう。このように人工物が環境に対して何らかの変化を与えるということは、宇宙においても発生する。地上や海上と宇宙が異なるのは、その媒質が電気を帯びた粒子、すなわちプラズマである、ということである。

ではプラズマ大気が媒質であるとき環境の変化の現れ方が地上と大きく異なってくるのは、それが電磁気的な現象となることである。すでに述べたように宇宙空間に物体をもちこむと「帯電」が起きる。帯電が起きればその周囲に電界が発生してそれに従ってプラズマを構成する電子やイオンが移動する。その時、地球周辺であれば地球磁場があり、その磁場の影響も受けた形で電子やイオンは移動することになる。そしてこれらは毎秒数 km の流れの中で起きることになる。その結果、この流れの下流、物体の後ろ側には、船と同様の航跡に相当するプラズマの乱れ（Wake）が発生していることがわかっている。そしてプラズマ中であることの大きな特徴は、このような環境変化に伴って電波が発生するということである。図 5-25 は、極軌道衛星がオーロラ帯を横切っている際の衛星そのものの帯電とその周辺の電位分布を計算機シミュレーションにより求めたものである（Usui *et al.*, 2008）。衛星は太陽電池パネルをもちその表面には誘電体のカバーガラスで覆われているモデルとなっている。衛星は図の下方向へと飛翔しており、そのため周辺のプラズマが流れとなって衛星に下から流れ込んでいることになっている。色は衛星あるいはその周辺の電位分布を表している。例えば、太陽電池パネルの表面は -65V に帯電している。そして、顕著なのは、衛星の周囲の電位分布が大きく空間的に非一様になっていることである。この計算機シミュレーションでは電位の 0V をプラズマ電位にとっている。従って、0V というのが本来の電位であり、それ以外の部分の空間電位は、「衛星がそこにいることによって」変化してしまった電位である。つまり衛星を宇宙空間に配置することによって、電位変化としての影響を周辺に与えてしまっていることを示している。

宇宙プラズマを構成する粒子（イオンや電子）は、それ自身がもっている運動エネルギーを電波を介して交換することができる。電離圏の場合は大気を構成する中性粒子とプラズマとの衝突によるエネルギー交換ができるが、太陽風のように中性粒子の密度が低いと、プラズマ粒子は誰とも衝突することなく太陽から地球の軌道くらいまで飛行することができる。このようなプラズマを「無衝突プラ

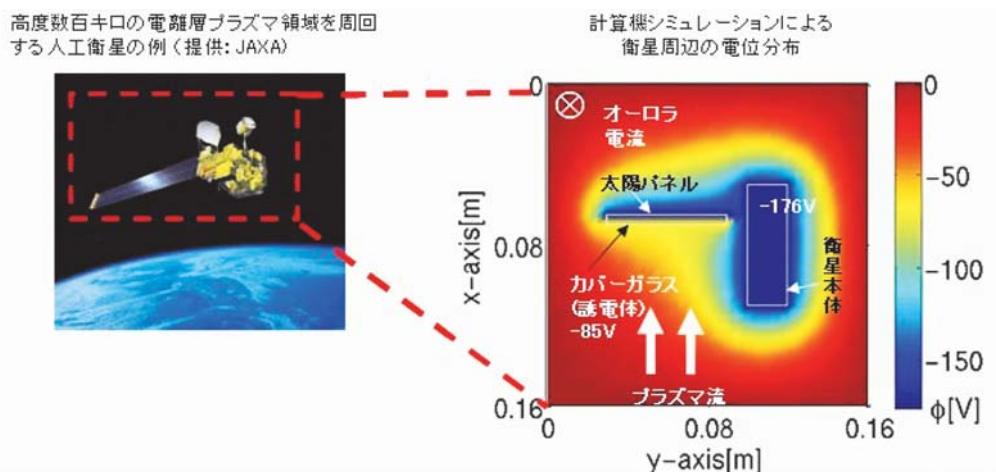


図 5-25：衛星周辺に形成される静電ポテンシャルの変化（シミュレーション）

ズマ」と呼ぶが、無衝突プラズマ中では電波（プラズマ波動と呼ぶ）を介してエネルギーが交換されることが多いため、宇宙環境の変化がプラズマ波動の励起としてとらえることができる。

プラズマ波動を観測する観測器のことを「プラズマ波動観測器」と呼ぶ。これは非常に感度の高いラジオ受信器であるとみなしてよいものであるが、図 5-26 は、そのプラズマ波動観測器を用いてスペースシャトルの周辺で観測したスペクトルの時間変化である（Cairns & Gurmet, 1991）。横軸が観測時間、縦軸が観測している周波数で、色がそれぞれの時間で観測したプラズマ波動の強度を表している。この時、プラズマ波動観測器はスペースシャトルがもつロボットアームの先端にとりつけられており、観測したスペクトルはスペースシャトルから 10 m 以内でのプラズマ波動現象を捉えている。図 5-26 からみてとれるようにプラズマ波動がこのスペースシャトル周辺で発生していることがわかる。このプラズマ波動はスペースシャトルがそこになければ発生していない現象である。このスペースシャトルは高度 320km の電離圏中を飛行しており、このプラズマ波動は、スペースシャトル本体からガスとなってでている水分子が、電離圏中の酸素イオンと衝突して電荷交換を行って水イオンとなって発生させているのと現在のところ理解されている。このように宇宙空間に構造物を設けた場合その周辺における環境の乱れはプラズマ波動をモニターすることで調べることができる。スペースシャトルも国際宇宙ステーションもそうであるように、宇宙構造物は対称な形をしているとは限らない。また、地球を周回している場合、進行方向とその反対側とでは、環境は大きく異なるであろう（Wake の存在である）。そうすると、その環境変化も空間的に一様ではなく、偏りをもったものになっていると考えられる。これを空間における現象の非一様性という。空間的に一様でない現象を捉えるためには、計測ポイントを空間に多数配置する必要がある。例えば大規模宇宙ステーションのような構造物であれば、その壁面などの複数箇所にプラズマ波動観測装置を装着しておく必要があるであろう。また、自然現象なり人間活動なりで発生する非一様な宇宙空間での環境変化を捉えるには、その目的となる領域に分散させたセンサー（センサーノードと呼ぶ）が必要になる（Kojima *et al.*, 2010）。図 5-27 は乱れた領域に分散されたセンサーノードの様子を示している。これらひとつひとつに非常に小型化されたプラズマ波動観測装置がインプリメントされている（Fukuhara *et al.*, 2012）（図 5-28）。計測されたデータは宇宙ステーションなどの基地局へ集約される。計測を終えたセンサーノードは大気圏に突入して燃え尽きる。図 5-29 はこのセンサーノードの構造モデルである。プラズマ波動観測器など必要な通信装置とともにおさめる中央の筐体は 10cm 角の立方体で、それに 1 辺 12cm のループアンテナと 3 方向に伸びた 2.4m の電界アンテナをそなえている。

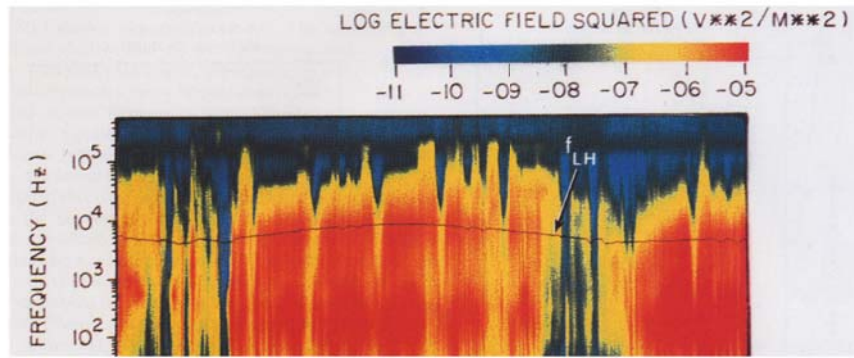


図 5-26：スペースシャトル周辺での環境の乱れ（プラズマ波動スペクトル変化）（Cairns and Gurnett, 1991）.



図 5-27：宇宙空間の乱れを多点で計測する小型プローブ（想像図）（Kojima *et al.*, 2010）

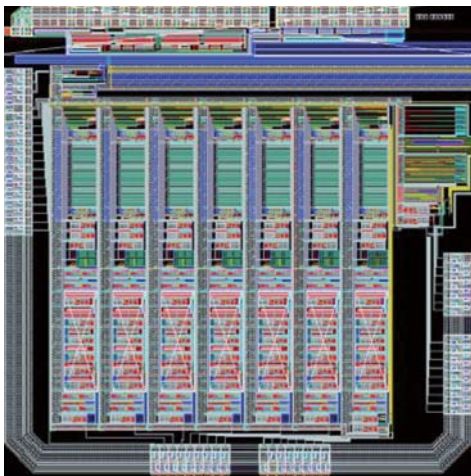


図 5-28：4mm × 3mm に収められたプラズマ波動観測器のチップ内アナログ回路（Fukuhara *et al.*, 2012）



図 5-29：小型センサープローブの構造モデル（Kojima *et al.*, 2010）

5.7 まとめ

宇宙圏は地球上で生活をする人類を含む生物とは、物理的な距離が最も遠い「圏」である。しかし、そこに存在する太陽は、地球上の環境や生命そのものに常に影響を与えているものである。そしてその太陽活動が、宇宙環境を変化させ、その影響が更に我々の生活に及んでくる。これが本章でとりあげている、電離圏の乱れによる電波通信障害の発生であったり、地磁気誘導電流による電力送電系の故障であったりするわけである。また小惑星からの驚異も宇宙から地上で暮らすもの達への驚異である。そして人類が宇宙空間に進出を始め、人工衛星の運用、宇宙ステーションによる人間生活の営みが本格的に始まるに従い、宇宙空間環境を積極的に利用していく試みも開始されている。宇宙空間での帯電や太陽風などを用いた新しい推進手法の試みである。そしてこれらを小惑星の地球への衝突回避に用いるなど宇宙からの驚異を取り除く方法への利用も期待されている。そして、忘れてはならないのは、人類が宇宙を利用しはじめることによって、すでに宇宙空間の環境に影響を与え始めているということである。人工飛翔体を宇宙空間におくことによって、その周辺の空間電位を変えてしまったり、それによってプラズマ波動が励起されて電磁環境が変化してしまったりしている。また、ロケットや衛星の破片はスペースデブリとなって宇宙空間を漂っている。これらは我々人間の宇宙環境での活動に逆に影響を及ぼしてくる。人類はその文明を進歩させる過程において、地球環境への影響に対しあまりにも無頓着であったため現在の環境問題が発生するに至っている。同じ過ちを宇宙空間の利用において繰り返してはいけない。宇宙空間における環境アセスメントは避けては通れない重要な課題である。

生存圏の科学を構成する宇宙圏についての科学は、上記のような問題に対して回答を与えていく義務がある。「宇宙圏からの影響の評価と予測」、「宇宙圏からの脅威の回避」、「宇宙圏の新しい利用分野の開拓」そして「宇宙圏の環境アセスメント」である。生存圏の科学が扱う宇宙圏における科学は、人類の持続的な生存活動と繁栄という観点でこれらを包括的にとらえていく学問分野である。

コラム 先端電波科学計算機実験装置 (A-KDK)

生存圏でおこる複雑な相互作用過程を理解することを目的として、京都大学生存圏研究所では「先端電波科学計算機実験装置 (Advanced Kyoto-daigaku Denpa-kagaku Keisanki-jikken Computer; A-KDK)」を全国・国際共同利用型の設備として運用している。平成 5 年度に KDK として第一世代機を導入して以来、A-KDK としてレンタル更新され、電波科学、超高層物理学、宇宙工学、大気科学、太陽科学を中心に数多くの成果を上げてきた。近年では、地球磁気圏でのコーラス放射・電磁イオンサイクロトロン放射、宇宙プラズマ中の電界アンテナ特性、磁気プラズマセイルの推力特性などのユニークな研究が A-KDK によって展開されている。平成 24 年度には第五世代機として最大 5120 並列もの大規模計算が可能な超並列機を中心とするシステム（図）を導入し、理論性能は計 67.4 テラ・フロップス、メモリ容量は計 20 テラ・バイトに達した。現実に近い計算機実験が可能となる環境を広く共同研究者に提供し、生存圏の正しい理解と有効な利用に向けて貢献している。

A-KDK 共同利用のホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/DCRP/KDK.html>



平成 24 年度に導入した第五世代機：京都大学学術情報メディアセンターに設置され、同センターと共同運用している。

コラム

科学衛星が拓く宇宙環境理解の科学



水星を探索するベピコロンボ探査機
(イラスト：池下章裕氏、提供：JAXA)



各国からもちよった装置基板をクリーンブース
内にセッティングしている。

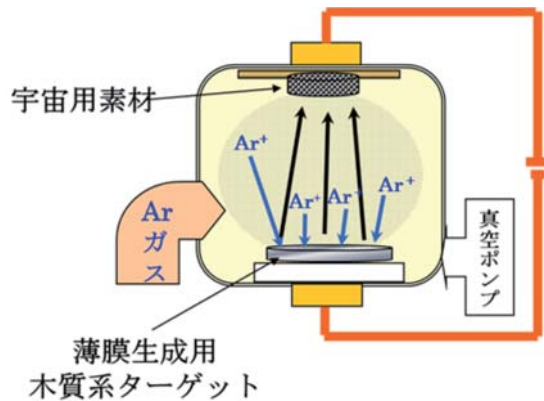
宇宙電磁環境は、それを満たすプラズマ、そのプラズマが放射するプラズマ波動、そして太陽や惑星の固有磁場や空間電場などに象徴される。中でもプラズマ波動は、その宇宙環境のダイナミックな変化を敏感に反映した形で発生しており、プラズマ波動を捉えることは宇宙電磁環境を理解する上で非常に重要である。基本的に無衝突状態にある宇宙プラズマは、プラズマ粒子がもつ運動エネルギーは衝突によって伝わるのではなく、プラズマ波動を介して別の粒子へと伝えられていく。これを「波動粒子相互作用」と呼ぶ。波動粒子相互作用で発生するプラズマ波動を捉えることで、そこで発生している物理過程を知ることができる。そのため宇宙環境を探索する科学衛星には、プラズマ波動を観測する「プラズマ波動観測装置」とプラズマ粒子を直接捉える「プラズマ粒子観測装置」がペアとなって搭載されている。生存圏研究所ではこのプラズマ波動を捉える科学衛星搭載用観測装置の開発を行っている。

上図は2015年に打ち上げが予定されている水星探査機ベピコロンボであるが、この探査機にも日欧の共同研究者とともにプラズマ波動観測器を搭載している。このプラズマ波動観測器は非常に高感度な装置で

あるため、その開発や機能試験は電磁的にノイズの少ないクリーンな環境で行う必要がある。生存圏研究所がもつ「宇宙圏電磁環境計測装置性能評価システム（PEMSEE: Performance evaluation system for measurement instruments of space electromagnetic environments）」は、外部からの電磁波を遮断するシールドルームとその内部に衛星搭載装置を試験するためのクリーンブース（Class 10000）をもち科学衛星用のプラズマ波動観測器の開発や試験を行うことのできる環境をあたえている。下図は上記の水星探査機に搭載するプラズマ波動観測器を構成するコンポーネント基板を各国の研究者・技術者が、PEMSEE クリーンブース内に設置しているところである。このように施設内に設置した各コンポーネントを接続した試験を何度も繰り返し行うことにより、高性能プラズマ波動観測装置ができあがっていく。この PEMSEE 施設は、これらの試験を行うための各種計測機器および温度試験装置も備えている。本施設で開発・試験された観測装置が科学衛星へと搭載され、宇宙電磁環境中におけるプラズマ波動を観測し貴重なデータをもたらしてくれる。

PEMSEE はプラズマ波動観測器の開発以外に、その他衛星搭載機器の電磁適合性試験にも利用され電磁的にクリーンな衛星の実現にも貢献している。

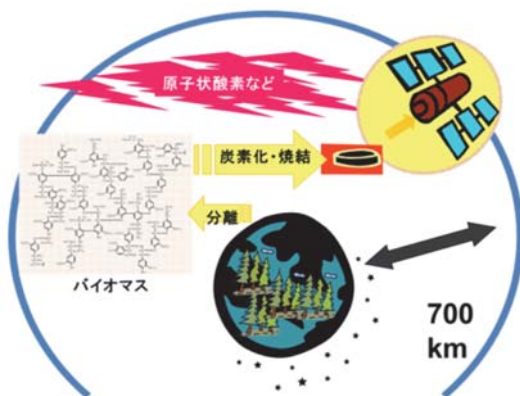
コラム 木材でつくる宇宙用素材



スパッタリングによる炭素皮膜形成



スパッタリング装置の外観



木材を宇宙で使うイメージ図

木材はもともと電気絶縁材料だが、無酸素下で加熱すると、水素、酸素、窒素などを遊離し、最終的に炭素のみからなる物質に変化する。例えば、木材を無酸素下、約 700 から 900℃ の条件で予備加熱して得られる木質炭素化物の電気伝導度は導体として十分な値を示す。また、このような材料の電磁波遮へい性能はアルミニウム板と同等の電磁波遮へい効果を有する。一方、宇宙空間で使われる材料は、局所的帯電を防ぐために導電性である必要があり、真空中でガスが揮発してはいけない。木質炭素化物は、こういった条件を満たしており、さらに電気伝導性、軽量、高強度といった特性をもつ。

宇宙用材料の表面保護のために、図に示すようなスパッタリングによる炭素皮膜形成の手法により DLC（ダイヤモンドライクカーボン、Diamond-like carbon）膜で被覆する実験を行った。この手法を使って木質系 Si-炭素膜形成することにより、材料表面へ導電性と AO（原子状酸素、Atomic Oxygen）に対する抵抗性を付与する事ができる。さらに宇宙では無重力下におかれるため、粉塵がでると浮遊し始め、電子回路部などに触れて故障発生の原因になる。スパッタリングによる宇宙用材料の表面被覆により、粉塵発生の抑制も期待される。

高度 200-700km の LEO（低地球軌道、Low Earth Orbit）では宇宙機の表面材料は AO 等の複合宇宙環境下で急速な劣化を生じることが知られている。一般的な宇宙機では、熱制御材料としてポリイミドやフッ素系の高分子に保護コーティングを施した材料を使用しているが、これらの保護コーティングは微少亀裂等により十分にその性能を発揮できない例が報告されている。上記の手法により耐環境性能を付与することができれば LEO を周回する宇宙機の機能性材料として適用できる。木材に耐酸化性と導電性を付与することにより、極限宇宙環境における木材利用が広がる。

[参考文献]

- Borovicka, J., *et al.* (2013) *Nature*, doi:10.1038/nature12671
- 防衛庁防衛研修所戦史室 (1974), 大本営陸軍部大東亜戦争開戦経緯 4 巻, 307
- Cairns, I. H., and D. A. Gurnett (1991) *J. Geophys. Res.* 96, 13913
- Ebihara, Y. and Y. Miyoshi (2011) IAGA Special Sopron Book Series Vol. 3, 145-187
- Ebihara, Y., *et al.* (2005) *J. Geophys. Res.* **110**, A02208
- Ebihara, Y., *et al.* (2008) *J. Geophys. Res.* **113**, A07221
- Ebihara, Y., *et al.* (2009) *J. Geophys. Res.* **114**, A01306
- Ebihara, Y., *et al.* (2010) *J. Geophys. Res.* **115**, A04301
- Feldstein, Y. I. (1986), *Eos Trans. AGU*, **67** (40), 761-767
- Frank, L. A. (1967) *J. Geophys. Res.* **72**, 3753-3767
- Fukuhara, H., *et al.* (2012) Measurement science and technology, doi: 10.1088/0957-0233/23/10/105903
- Funaki, I. and H. Yamakawa (2007) *J. Plasma Fusion Res.* **83**, 281-284
- Hikishima, M. *et al.* (2010) *J. Geophys. Res.* **115**, A12246, doi:10.1029/2010JA015860
- Katoh, Y., and Y. Omura (2007) *Geophysical Research Letters*. **34**, L03102, doi:10.1029/2006GL028594
- Kojima, H., *et al.* (2010) *Advances in Geosciences* 20, 461
- NASA (2008) The Orbital Debris Quarterly News **16-1** (2008 Oct.)
- NASA (2013) The Orbital Debris Quarterly News **16-1** (2013 Jan.)
- Miyoshi, Y., *et al.* (2012) AGU monograph, doi:10.1029/2012BK001304, 103-116
- Omura, Y., *et al.* (2008) *J. Geophys. Res.* **113**, A04223, doi:10.1029/2007JA012622
- Oyama, T. *et al.* (2008) *J. of Spacecraft and Rockets* **45**, No. 2, pp. 316-323
- Riddle, A. C. (1970) *Solar Phys.* **13**, 448-457
- Santolik, O., *et al.* (2004) *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2003GL018757
- Usui, H., *et al.* (2008) *AIP Conf. Proc.* **1084**, 877
- Vasilyev, N. V. (1998) *Planet. Space Sci.* **46**, 129
- 山口皓平、山川宏 (2014) 日本航空宇宙学会プロシーディング.
- Yamaguchi, K. and H. Yamakawa (2014) The ISTS special issue of transactions of JSASS



第6章 持続的生存圏の構築に向けて

6.1 持続的生存圏構築に向けた取り組み

今世紀に入り、人類の生存を脅かす様々な環境、エネルギー、資源問題などが深刻化しており、それらの問題の解決が喫緊の課題となっている。古来、生物の生存環境は太陽放射エネルギーを基に、自然界の絶妙なバランスのもとで形成された大気圏によって保護されてきた。大気圏とそれにつながる地圏、水圏とのエネルギーや物質循環のバランスは、この太陽放射エネルギーと、人類の活動に起因するエネルギーや炭素などの物質移動、森林破壊などの土地利用の形態変化により大きな影響をうける。人口爆発と近代文明の急速な発展にともなう化石燃料の大量消費や土地利用の変化により、このエネルギーや物質循環のバランスが大きくくずれ、地球温暖化や異常気象を引き起こし、さらには、資源枯渇、大気、海洋、土壌の汚染、食料の枯渇、伝染病の蔓延などが深刻化し、人類は存続の重大な危機に瀕している。このように、人間活動が自然界のバランスを崩しうるほど強大になるにつれ、人類の活動の選択が、人類の生存や、それを支える地球環境の持続性を決める大きな要因となっている。未来のために人類がなすべき選択について多くの議論がなされているが、一つの選択は様々な因子に複層的に影響するため、その答えは一義的には得られない。しかしながら、人類が直面する生存環境の現状を正確に診断して、生存を脅かす要因を取り除く強力な手段を得るとともに、人類がとる行動の将来にわたる影響を様々な学問分野の連携のもとにできる限り正確に予測し行動することは、今に生きる我々に課せられた大きな使命である。

生存圏研究所は、人類の生存を支え人類と相互作用する場を「生存圏」としてとらえ、「生存圏」の正確な診断と理解に基づき、人類の持続的な発展につながる道を見出すとともに、それを達成する手段を確立する新しい学際融合科学「生存圏科学」の創成にむけた活動に取り組んでいる。人類が進むべき道の選択を導き出すためには、特定の分野の研究を深めるのみでなく、人類の持続的生存を支える場を作り出すという共通の目的意識のもと、多様な分野の専門家が連携して「生存圏科学」を推進し、さらには、「生存圏科学」を学び実践する人材の輪を広げて、「生存圏科学」の考えや成果を社会に反映させる活動を実践することが何よりも大切である。

生存圏研究所は、こうした「生存圏科学」の理念のもと、「環境計測・地球再生」、「太陽エネルギー・変換利用」、「宇宙環境・利用」、「循環型資源・材料開発」の4ミッションを基軸として、国内外の関連研究者と協力しながら持続的な生存圏の構築に向けた研究・教育活動を進めてきた。また、これらの4つのミッションに加えて、人の健康に直接影響及ぼす環境変動を正確に理解し、その負の因子を無くするための研究活動や、木の文化や木質の特性の科学的理解により森林と人との豊かな関係や持続的な居住空間を構築する「千年居住圏」に関する研究活動を推進してきた。さらに、人類の生存に影響を及ぼす様々な環境変動は地球規模、宇宙規模で起こるため、海外の研究拠点も活用した国際共同研究を積極的に展開してきた。本章では、生存圏研究所がこれまで果たしてきた活動と役割を検証するとともに、持続的な生存圏を創成するために今後行うべき活動を議論する。

6.2 生存圏ミッションの役割

生存圏研究所は、人類をとりまく生存圏で生ずる自然・人為起源の現象の様態を明らかにするとともに、そのメカニズムを空間的にも、時間的にも統合的に解析し、生存圏の悪化の現状を打破し、「治療」に結びつく活動を行い、宇宙空間から地表に至る生存圏の新たな開発創成に努めてきた。こうした活動の基軸として、「環境計測・地球再生」、「太陽エネルギー・変換利用」、「宇宙環境・利用」、「循環型資源・材料開発」の4ミッションを設定し、国内外の関連研究者と協力しながら持続的な生存圏の構築に向けた研究・教育活動を進めてきた。ここでは、それぞれのミッションの総括に基づく今後の活動の方向性を述べる。

・ミッション1「環境計測・地球再生」

ミッション1「環境計測・地球再生」が取り組もうとするところは、人類の生存基盤を支える太陽からの光のエネルギーが生存圏の中でどのように分配されどういったバランス状態にあるのかを今日の技術で把握すると同時に、森林を形成する陸上植物が太陽光をエネルギー源とした光合成をおこなうことで地球の炭素収支にどのように寄与しているのかを明らかにすることである。そしてさらに、われわれの地球環境を健全な状態で維持するための環境修復に貢献する方策について考えていく必要がある。

こうした問題意識のもとで、本書の中では以下のような研究の取り組みについて紹介した。まず大気圏と森林圏との接点に注目して、大気微量成分を通して見た大気圏と森林圏の間の物質循環の問題と、植物が放出する微量成分が大気環境へ与える影響について考えた。次に、こういった横断的な視点を支える基盤となる大気環境のモニタリング手法について、世界最先端の大気観測装置による地上からの精細なリモートセンシングや人工衛星搭載観測器による宇宙からのリモートセンシングにもとづく地球の大気質変動の監視あるいは森林域に関する多様な情報収集について見てきた。

このような診断的なアプローチに加えて、光合成というユニークな役割を持った植物の機能を改良していくことで、バイオマス資源によって食物資源や工業原材料を持続的に供給する方法について考えた。さらに複雑化する地球環境問題のなかでも感染症の問題を想定して、再生産可能な木質バイオマスの変換により人の健康や生活に寄与する有用な物質を生産しようとする新しい研究を紹介した。また、東日本大震災による原発事故に象徴されるように、放射性物質による土壌・水質汚染などに対する方策について紹介した。

こういったこれまでの取り組みを踏まえて、次の時代に向けた提言をおこなった。それはこれまでその重要性は認識されながらも、探索の手段が比較的限定的であることから解明の進んでいなかった領域としての土壌圏への展開である。大気と植物との関連も突き詰めていくとこの土壌圏で生起している現象に至りつく。大気圏と森林圏さらには土壌圏を加えることではじめて生存圏の全体像がより明確に見えてくると考えられる。

2014年5月に世界気象機関が発表した情報によると、地球温暖化の原因となる二酸化炭素の濃度が北半球のすべての観測点で400ppmを越えたと報告された。またIPCCが公開した最新の報告では、温暖化ガスの排出を今世紀末にほぼゼロにする必要があると分析している。これらはわれわれ人類の活動する生存圏環境が待ったなしの危機的な状況に突入しつつあることを示しており、その対応策を

スピーディーに実施できるかどうかが問われている。現在われわれを取り巻く生存圏に起こっているさまざまな環境問題に対して、われわれは迅速な治療を促すために的確な診断結果あるいは適切な治療方法を提示できているであろうか。いかにそれらに対する答えを与えられるかが、このミッション1「環境計測・地球再生」の果たすべき役割であるといえる。

・ミッション2「太陽エネルギー変換・利用」

ミッション2「太陽エネルギー変換・利用」の目的は、人類の生存基盤を支える太陽からの光のエネルギーを持続的発展が可能な形でエネルギーや物質へ変換し、また高度に利用することである。人類の生存圏はこれまで過去の太陽エネルギーの蓄積である化石燃料にその活動の多くを依存し、その大量消費によって発展を遂げてきた。しかし、今後は現在の太陽エネルギーをいかに有効に利用するかが課題であり、電気エネルギーだけではなく物質・材料等の資源も現在の太陽エネルギーをどう活用するかが課題となっている。

こうした問題意識のもとで、本書の中では以下のような研究の取り組みについて紹介した。まず太陽エネルギーの高度利用方法としての宇宙太陽発電の研究現状を紹介した。宇宙太陽発電は光エネルギーから電気エネルギーへの変換利用の高度化のみならず、さらに電磁波エネルギーへと変換することでエネルギー利用の更なるパラダイムシフトを起こすことができることを示した。エネルギーとしての電磁波の安全性に関しても十分な知見を得るための研究活動についても合わせて本書で紹介している。さらに太陽エネルギー蓄積物である植物バイオマスの有用物質への変換に関し、バイオエタノールやバイオガスという新しいエネルギーを生み出す研究例を示した。バイオエタノール生産のためには宇宙太陽発電でも用いられる電磁波エネルギー（マイクロ波エネルギー）が利用されている。

以上の研究成果を総括し、ミッション2から次の時代に向けた以下のような提言を行った。それは森林圏と人間生活圏の今後の密接な相関を深めることの重要性（植物バイオマスの有用物質への変換）を改めて示すとともに、太陽エネルギーの更なる有効利用のためには宇宙圏利用の深化（宇宙太陽発電）が必須であることを示した。地球閉鎖系における成長の限界を打破するとともに地球再生を合わせて行うという矛盾した命題のためには宇宙圏・森林圏・人間生活圏の関係性を深め、宇宙開放系という持続的成長可能な生存圏を構築することが必須であると結論した。我々は現状を「診断」するのみでは持続的成長可能な生存圏を構築することは不可能であり、さらに能動的に生存圏を「治療」する必要がある。「治療」のためには活動のためのエネルギーは必須であり、かつそのエネルギーは持続的再生産が可能な太陽エネルギーに依拠するものでなければならないと考える。

・ミッション3「宇宙環境・利用」

ミッション3「宇宙環境・利用」が目指すものは、人類と地球、宇宙との関わり方が地球誕生から現在、未来に至る間に絶えず変化し続けているという立場にたち、宇宙がもたらす地球環境への影響を精査・予測するとともに、宇宙環境を人類の持続的発展のために利活用する方策を見出していくことである。生存圏の拡大としての宇宙があり、その環境を利用していく上で必要となる知見の積み重ねが必要である一方で、その環境への人間活動の影響も考慮する必要がある。また、高度に発達した我々の文明に対して宇宙が影響を及ぼす影響についても宇宙環境に晒された地球という場所で人類が継続的に発展していくためには、考慮していく必要がある。

本書では、ミッション3が目指す上述の問題意識のもと、太陽エネルギーがもたらす地球周辺宇宙環境のダイナミックな変化を一つのエネルギーフローとしてとらえ人類が利用する宇宙環境についての現在までの知見をまとめた。そして、その太陽エネルギーを積極的に利用した宇宙機の新しい推進方法の研究についても述べた。また、宇宙が地球上で生活する人類に与える影響とその回避についても述べた。これは、地球が人類の有無に関係なくもっている宇宙からの脅威である「小惑星と地球との衝突」およびその回避法、また、人類が文明を高度に発展させたからこそ問題となった地磁気誘導電流についてまとめている。

一方、人類が地球上で引き起こしてしまった環境汚染の問題が、宇宙空間でも問題になり始めている。それはデブリの問題である。宇宙環境利用を推進する上で発生した宇宙ゴミが、逆に宇宙圏を利用していく人類にとって脅威となっているのである。このデブリ問題の解決もミッション3の重要な課題である。

このように、ミッション3の「宇宙環境・利用」では、地球が宇宙からうける影響を理解するのみならず、人間が宇宙を積極的に利用するために必要となる宇宙空間環境に関する理解を深め、さらには、人間が宇宙で活動することによって生じる宇宙空間環境への影響も予測して、人類の持続的発展のために宇宙環境を利活用する方策を見出していくことを使命としなければならない。人間が地球上に築いた生存圏はこれまで一方的に宇宙から影響を受けてきた。しかし、その生存圏を継続して維持するには、宇宙からの脅威を予測し回避するための科学技術の確立は必須である。また、人間が宇宙へと飛び出すことができるようになった現在、地球上で人類が行ってしまった「環境への影響を無視した人間活動拡大」という失敗を繰り返さないよう、宇宙環境と調和しながら宇宙を利活用していくための技術開発、これも生存圏科学の重要な研究課題であり、今後も国際ネットワークを活用しながら、宇宙と人類活動との関係に注力して、研究・教育活動を続けていく。

・ミッション4「循環型資源・材料開発」

ミッション4「循環型資源・材料開発」では、再生可能な生物資源の循環利用により、環境保全とバイオマテリアル利活用を両立させ、化石資源の大量消費に基づく生存圏の悪化を防ぐとともに、生物の構造や機能を最大限引き出す新しい産業を創成して、安全・安心で豊かな人々の生活をつくり出すことを目的として取り組んできた。

本書では、持続型バイオマス資源、特に、その多くを占める木質資源の利用について、圏をまたがった技術開発を進める生存圏科学の観点から紹介してきた。すなわち、環境保全とバイオマテリアル利活用を両立させるシステムの開発に取り組む具体的な研究課題として、森林圏と人間生活圏をリンクさせた木質資源の生産、加工、利用、廃棄に関わる様々な研究、技術を紹介してきた。ここでは、それらをどの様に組み合わせ、発展させていくべきか、今後の方向性について考えてみたい。

アメリカの著名な木材研究者から聞いた笑い話である。“結晶性のナノ繊維で補強され、3次元的に構造制御された多孔性の高分子材料”。アメリカの化学会でこの材料の化学的構造制御について紹介するといったら、立ち見が出るほど人が集まった。同じ内容を、その前の機会で、“木材の化学修飾”というタイトルで話した時には全く人が集まらなかったのに。

何億年も前から地球上に存在する木材は、古くから人類の生活に溶け込み、あまりに身近すぎて、その高性能素材としてのポテンシャルを考えることが無かった。改めて今風に木材の構造を眺めてみ

ると、鋼鉄の1/5の軽さで鋼鉄の5倍以上の強度を持つ結晶性ナノファイバーから出来た3次元多孔性高分子複合材料、という先端素材の匂いの濃い素材となる。製造過程で二酸化炭素を固定し、廃棄にあたっては地球環境下での分解性をコントロールできる。しかも、その生産に要するエネルギーは、金属やプラスチック、セラミックスと比べ圧倒的に少ない。そのため価格も安い。

このような特徴を持つバイオマス資源をベースに次世代の材料を開発していく上で大切なことは、バイオマス資源材料には、化石資源材料と異なり、植物、動物などの作り手がいるという意識である。植物や動物には、その構造を作るにあたって種の保存、生存に向けた思い、戦略がある。この観点に立つと、樹木にとっては、グルコースよりはセルロースナノファイバー。セルロースナノファイバーよりは木材繊維。木材繊維よりは木材の方が、材料としての完成度が高い。すなわち、“結晶性ナノファイバーから出来た3次元多孔性高分子複合材料”である木材を、直接、飛行機や自動車の材料に変換する方が、セルロースナノファイバーを作り、再構築するよりも、高性能の材料を環境負荷が少なく、かつ省エネルギー的に製造できるはずである。一方で、作り手の思いが強くなればなるほど、使い手である人間の思いとのずれは大きくなり、扱いが難しくなる。木質資源ベースの材料開発には、20世紀をリードした要素還元的な材料開発を脱却して、生き物の力を借りて、人間が作れない材料を創りだせる可能性がある。そのためには、これまで以上に作り手の思いに立って生物の構造や機能の理解を深化させるとともに、現在の木材加工技術や遺伝子組み換えとは異なるアプローチによる技術開発が必要である。

並行して、環境保全とバイオマテリアル利活用を両立させるシステムの開発を目指し、本章で紹介したように、深化した木質バイオマスの分子育種や生産に関する知識、先進的なバイオリファイナリー技術やバイオマス材料、低環境負荷材料を駆使して、将来の資源の源である熱帯人工林などで、どのようにして生物多様性を維持してゆくのか、等、生態系や地球環境、地域環境に調和する形での木質バイオマス利用を考える必要がある。地震や風水害の影響を軽減し安全・安心で豊かな人々の生活を支える木質構造の開発や、他の材料との複合構造体をつくり出す技術開発も求められる。また、耐久性のみでなく、心身の健康を維持・増進する居住空間を作り出すため、人間工学や医学など他分野との連携が益々重要となっていくであろう。循環型資源・材料に基づく持続型社会の構築は、現代社会の強い要請であり、ミッション4に課せられた使命は大きい。

生存圏研究所は、これら4つのミッションと次節で述べる生存圏と人の健康の総括に基づき、これまでのミッションを発展させる形で新しいミッションを定義した。この内容については、6.6.4の「生存圏科学の確立を目指して」に記載する。

6.3 生存圏と人の健康

人類の産業経済活動の急速な拡大により、人が棲息する空間には大きな変化が生じてきており、人の健康や安心・安全な生活が脅かされている。このため、平成23年度からは、「生存圏科学の新領域開拓-ロングライフイノベーション共同研究」を立ち上げ、人が生活する空間の診断と、健康や安心・安全な生活に寄与する方策を見出す共同研究を展開してきた。

人を取り巻く生存環境は、急激に変化している。例えば、輸送手段の広域・高速化と地球温暖化に伴い、ウイルス・菌類による感染症が広汎かつ迅速に蔓延している。エボラ出血熱、デング熱、SARS、トリインフルエンザ、ノロウイルスなど、感染症は人類生存の大きな危機となっている。一方、居住空間にも多種多様な人工物が組み込まれ、人はそこから揮散する物質が混ざった空気を呼吸している。一見透明な大気は、人工的に発射される電磁波で満たされている。さらに、人間活動に伴って放出される微量な気体や粒子状物質が、ローカルな大気汚染からグローバルな気候変動まで多岐に亘る影響をもたらす。我々はこれらの状況を鑑み、健康で安心・安全な人類の生存環境を構築することを主題にした研究課題（1）バイオマス由来の生体防御物質、（2）木質住環境と健康、（3）電磁場の生体影響、（4）大気質と安心・安全、に取り組んできた（図 6-1）。これらの研究を通して、人を取り巻く「圏（空間）」の特性変化と健康や安心・安全な暮らしの因果関係を科学的に解明し、持続的な生存圏の構築に貢献する新しい学問領域を打ち立てる活動を推進している。ここでは、人の健康と生存圏に関連する 4 つの研究活動を展望する。

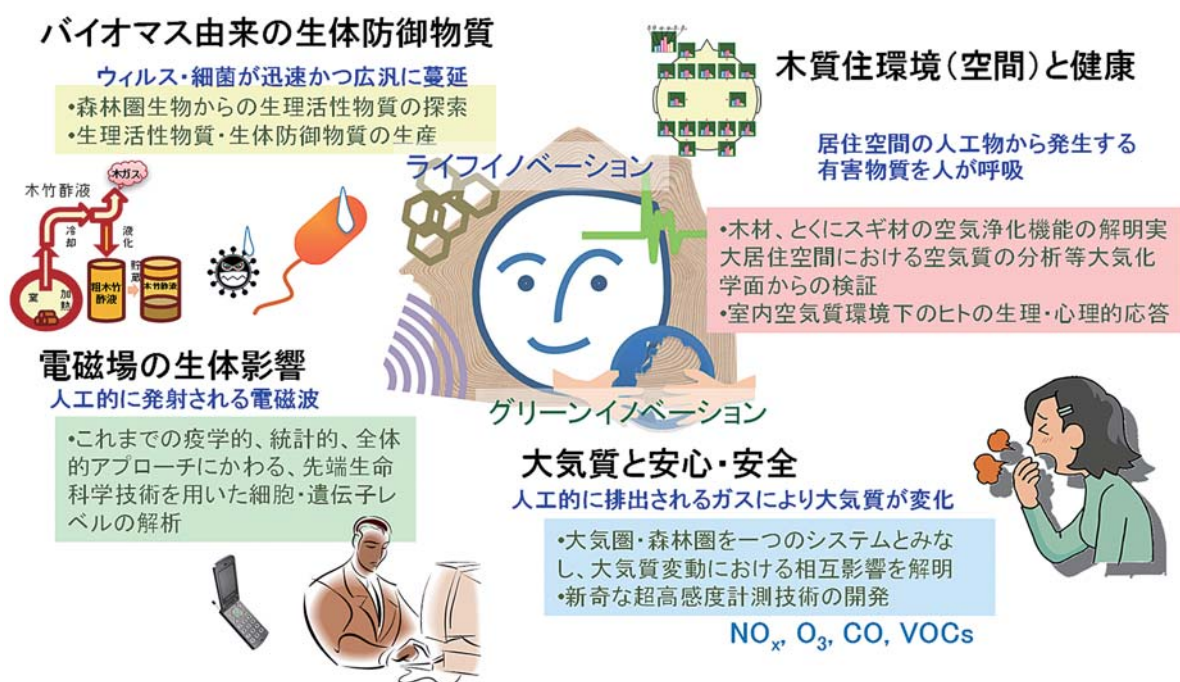


図 6-1：人の健康と生存圏に関する新領域研究

6.3.1 バイオマス由来の生体防御物質

輸送手段の広域・高速化と地球温暖化に伴う感染症が拡大し、人や家畜の健康が脅かされている。植物の薬効成分は古来より、生薬として人の疾病の治療や健康維持に利用されており、一部の有効成分については、作用機構の科学的な解明も進んでいる。一方、木酢液や竹酢液に代表されるバイオマスを分解して得られる成分については、消毒効果や皮膚疾患の治療効果などが報告されているが、有効な化学成分については十分な解明は行われていない。バイオマスは、様々な熱的、生物的、あるいは化学的変換を加えることによって、多岐に亘る生理活性物質を産生し、人の健康の増進や安全な生活に寄与する可能性を秘めている。我々は、再生可能であり量的にも多い木質バイオマスを人為的に

構造変換して有用な生体防御物質を合成するとともに、植物による生理活性物質の生合成や輸送メカニズムを明らかにすることにより、バイオマスから人の健康に有用な物質を生産する新しい領域を開拓することを目的に研究を進めてきた。

生存圏研究所は、口蹄疫ウイルスによる家畜への被害などを想定して、木質バイオマスの熱分解物である木竹酢液から抗ウイルス活性をもつ生理活性物質を探索する研究を進め、2.5.1に記載したように、木竹酢液の種類により抗ウイルス活性が大きく異なることを示すとともに、竹酢液に含まれる抗ウイルス物質を始めて明らかにした (Marumoto *et al.*, 2012; 山元ら, 2012)。グローバル化や地球温暖化が進む現在、人、動物、植物への病原性ウイルスや細菌の感染、食品の汚染などの脅威が増大しており、こうした環境変動による新たな驚異に対抗する生体防御物質を森林圏バイオマスからつくり出すことの意義は大きい。未利用木材を含む木質バイオマスの人為的変換と、植物機能を代謝工学を駆使して最大限引き出す生理活性物質の生産により、安心・安全な暮らしに貢献していきたい。

6.3.2 木質住環境と健康

生活する空間に満ちた有害物質は、健康への長期にわたる影響が予想される。このため、住環境における空気質を正確に定量するとともに、汚染物質の健康に与える影響を評価することが重要である。同時に、住環境の中に有害物質を効率的に吸着・除去する材料を組み込む技術開発により、健康で快適な住環境を提供する工夫も必要である。

生存圏研究所は、これまでに木材（とくにスギ材）が二酸化窒素 (NO_2)、オゾン (O_3)、ホルムアルデヒド (HCHO) などの大気汚染物質を吸収・吸着すること、またこの効果は木口面において著しく、木材の抽出成分や含有水分の影響が大きいこと等を産学官の学際共同研究により明らかにしてきた。さらに、板目材あるいは柃目材にスリット加工（図 6-2）を施して木口面を露出させることにより、吸着効果を高める技術を開発し、内装材や外構材への実用化に向けた検討を進めてきた。

このような効果が木材のどのような性質に起因するのか、その科学的根拠を明らかにすることも重要である。人類は木材と太古の時代から共生しており、単純な単一成分のみならず、いくつかの成分が複合的に相乗あるいは相加的に作用している可能性も考えられる。さらに、木材の抽出成分である精油にはストレス症状を緩和する効果のあることが知られている。一方、木材が発散する揮発性有機物 (VOC) についてはネガティブな効果が指摘されることもあり、これら VOC に対する人の生理的・心理的応答について科学的な究明を行うことが必要である。

他方、京都議定書の発効（2005年2月）に伴いわが国の森林整備が急務となっているが、作業道整備の遅れによってスギ、ヒノキ人工林から排出される間伐材の8割は未使用のまま林内に放置されている。間伐の促進、森林の活性化、環境や生態系の保全には、木材を有効に活用する技術や用途開発が急務となっている。

このような社会的背景とこれまでの研究を踏まえ、生存圏研究所は木材、とくにスギ材に着目して、その空気浄化機能を解明するとともに、実大居住空間における空気質の分析等大気化学面からの検証、室内空気質環境下の人の生理・心理的応答について検証している。この研究は、健康維持増進、持続可能な環境、森林保全をキーワードとする「人と木材と住まい」に関する新たな学際複合領域の開拓を目標としている。

スギ材が人の生理作用に及ぼす影響を評価した研究例を紹介する。生存圏研究所では、板目面に繊

縦直交方向に多数の溝を等間隔に切削加工して木口を露出させた（スギ木口スリット）材を用いて内装パネルを作製し、実験室に設置した（図 6-2, 6-3）。実験室内の空気質を評価するため、GC-MS（ガスクロマトグラフ質量分析計）分析に供してスギ材由来揮発成分（VOC）を同定、濃度を測定した。次に、実験被験者には室内での計算作業に従事させた。作業の前後に唾液中の酵素活性を測定し、ホルモン定量用の唾液検体を採取するとともに、作業後に部屋の印象を問う調査表に記入させた。その結果、スギ材内装空間では、空气中にスギ材由来の VOC が放出されており、それらは δ カジネンを主成分とするセスキテルペン類であることが明らかになった。また、アロマセラピー等でよく利用される樹木の精油成分であるセロドールやオイデスマールなども微量成分として含まれていることが分かった。さらに、スギ材室では作業後の唾液中アミラーゼ活性増大を抑制、すなわち、交感神経活動の抑制を示唆する状態が観察された（図 6-4）（Matsubara & Kawai, 2014）。また、印象評価の調査表より、スギ材内装居住空間は被験者に自然な印象を与え、居心地の良い部屋と感じさせることが明らかとなった（図 6-5）（松原ら, 2014）。これらの結果は、スギ材居住環境では被験者は生理的にも、心理的にも落ち着いた状態となること、つまりリラックスできることを示唆している。また、これらの結果は、いわゆるシックハウス症候群等に関連する症状や、抑うつ、不安、不眠等を呈する居住者の家屋において、木材（特にスギ材）による内装仕上げを行った後、多くの居住者の症状改善や睡眠の質改善が施工者等により観察されることとよく符号している。

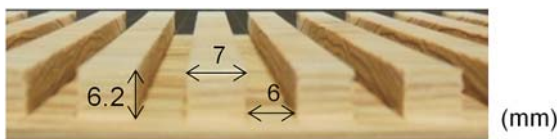


図 6-2：スギ材のスリット加工



図 6-3：スギ木口スリット内装パネル

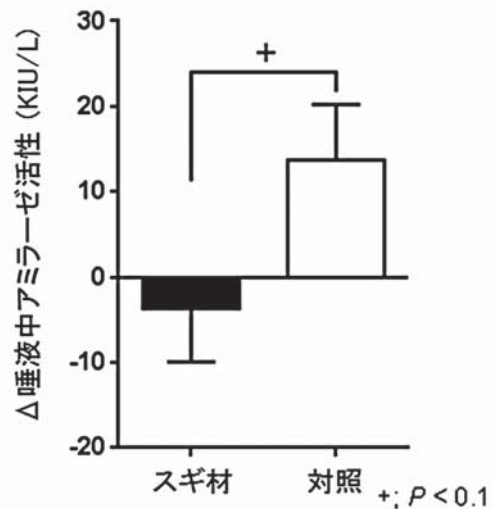


図 6-4：唾液中アミラーゼ活性の変化量

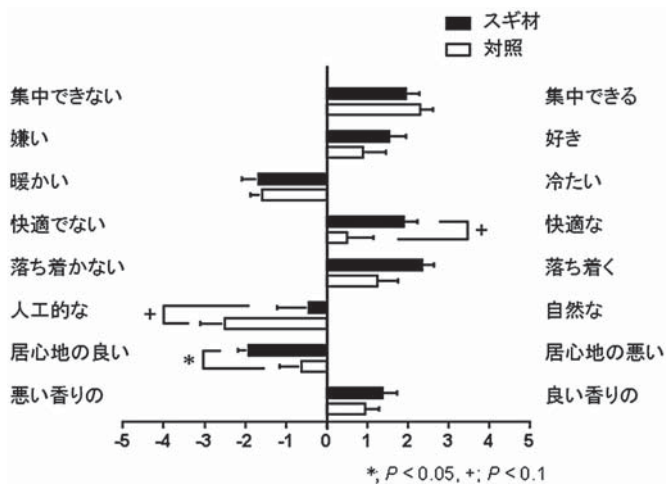


図 6-5：実験室に対する主観評価

このように、人が居住する場である木質住環境は人の健康に直接的に生涯に渡って影響を及ぼす。木質住環境の空気質の改善効果に焦点を当て、木材を使った心身を癒す健康な空間づくりにつながる研究の重要性は大きい。

6.3.3 電磁波の生体影響

人間の持続的発展のための生存圏を実現するためには技術による環境の診断と治療が必須である。今後は自然環境のみならず技術の発展に伴う人為環境の診断と治療も必須研究項目であると考え。その中でも生存圏研究所で推進する電磁波の新しい応用であるマイクロ波無線電力伝送や宇宙太陽発電所 SPS は、これまで人間があまりばく露されてこなかった「エネルギー輸送のための電磁波」環境を作り出すため、研究を進める際には必ず電磁波の安全性に関する議論があり、技術のパブリック・アクセプタンスのための研究と説明責任が求められている。

1979 年米国の疫学研究において、高压送電線の低周波電磁場により小児白血病が増加するという報告がなされて以来、今日に至るまで、電磁環境の健康影響について国際的に活発な議論が行われている。世界保健機構（WHO）も 1996 年に電磁場プロジェクトを立ち上げ、WHO の内部期間である国際がん研究機関（IARC）での低周波電磁場に関して発がん評価や WHO 本部のプロジェクトによる環境保健クライテリアを作成したが、明確な結論を出すに至っていない。その一方で、生活環境における電磁場の種類と曝露される頻度は年を追うごとに増しており、この傾向は将来ますます高くなることが予想される。地球上の自然界に存在する以上の人工的電磁場の代表例として、医療における診断用 MRI や将来のリニアモーターカーなどの定常磁場、家電製品や送電線などからの低周波電磁場、IH クッキングヒーターや電気自動車内などの中間周波数帯電磁波、携帯電話やその基地局などからの高周波電波や将来のマイクロ波無線電力伝送システム、宇宙太陽発電所 SPS からの高周波電波があげられる。このように電磁環境の急速な増加に伴い、社会的な健康への不安も高まってきているが、電磁波利用の技術的な開発が常に先行しており、それらの生体健康影響評価が追いついていないのが現状である。図 6-6 に、電磁波の生体影響研究・評価とその規制に関して、国際的な流れを簡単に示す。

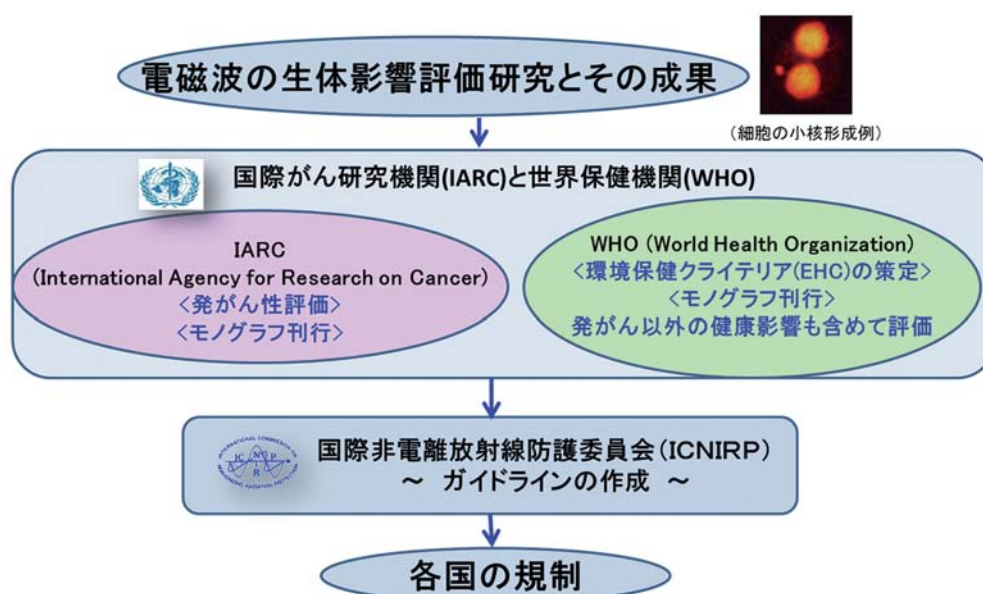


図 6-6：電磁波生体影響評価と規制の流れ

研究で得られた成果は、国際がん研究機関（IARC）で発がん性評価、世界保健機関（WHO）で健康全体に対する評価が行われ、その結果を踏まえて、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）がガイドラインを制定する。この国際ガイドラインを参考に各国が規制値を定めている。

これまで、生存圏研究所の生存圏電波応用分野と関連分野が中心となり、電磁波の生体影響に関する共同研究を展開している。未だ解明されていない高圧送電線などの低周波電磁場と小児白血病の増加について、細胞の電磁場ばく露刺激による遺伝子応答の先端生命科学技術による検索と、候補遺伝子の探索やそのメカニズムについて研究を行ってきた。さらに普及の目覚ましい携帯電話や家庭内のIHクッキングヒーター、また将来の無線電力伝送システムからの電磁波による生体影響評価研究として、発がんに結びつく細胞遺伝毒性の評価や、その他、細胞免疫能、細胞分化過程などへの影響について研究を推進している。これらの成果は、上述した国際機関による電磁波生体影響評価ならびにガイドラインの作成に貢献するばかりでなく、電磁波に対する人々の安心・安全に関して大きく寄与するものとする。電磁波の生体への影響を科学的に解明し、人類が安心して生活できる場を提供する意義は大きい。

6.3.4 大気質と安心・安全

第2章などでも述べたように、人間活動や自然から大気中へ放出されるごく微量な気体成分や粒子状物質（エアロゾル）、および、それらが大気中で化学反応を起こして生成される物質は、人の健康や植生、グローバルな気候など、生命体を育む生存圏に様々な影響を及ぼすことが懸念されている（図6-7）。



図6-7：光化学オキシダントとエアロゾルがもたらす種々の影響を示す概念図

例えば、光化学オキシダントの主要な成分である対流圏オゾンは、太陽光の存在下で、窒素酸化物や揮発性有機化合物（VOCs）の化学反応により生成される。大気中のオゾンの大半は成層圏に在るが、約1割は対流圏にある。対流圏オゾンは人や植生に対して毒性を示すほか、赤外域に強い光吸収帯を有する重要な温室効果気体の一つでもある。対流圏オゾンのグローバルな平均濃度は、上昇トレンドを示していることが分かってきている（Meiyun *et al.*, 2014）。また、オゾンや窒素酸化物、VOCsは大気中で化学反応を起こし、二次有機エアロゾル（Secondary Organic Aerosol; SOA）を生成する。こ

ここで、“二次”という単語は、人間活動や自然から直接エアロゾルとして生成されるのではなく、大気中での微量気体の化学反応によって副次的に生成されるエアロゾルであることを強調する意味合いを持っている。大気中における SOA の生成機構や動態については解明されていない問題が多く、したがって、地球環境や健康に与える影響評価もまた不確定要素が多い。

SOA に寄与する VOCs は人為起源に限ったものではない。森林圏から放出されるイソプレンやモノテルペン、セスキテルペンは、SOA 生成の重要な前駆物質であると考えられている（第2章参照）。近年は衛星センサーによるエアロゾルやホルムアルデヒドの時空間分布がスナップショットとして観測できるようになったこともあり（Dufour *et al.*, 2009）、森林圏が VOCs の重要な発生源であるという証拠は多い。地球上で人間活動が急速に拡大するよりも遥か昔から、森林圏と大気圏は、物質循環や地球環境変動を通じて相互に作用し合っていたということは興味深い。一方で、グローバルな温暖化によって、植物からの微量気体量が変化し、大気圏—森林圏の結びつきもまた変わってくるというシナリオ（Lathière *et al.*, 2010）も注目される。

読者の多くの記憶に新しいと思われる環境問題として、日本を含む半球レベルでの大気汚染問題が挙げられる。これは、急速な経済発展を遂げつつある東アジア地域の新興国から、人間活動に伴う微量気体やエアロゾル粒子が大量に放出され、広域に拡散・輸送されたことが一因である。しかしながら、越境大気汚染の問題は今に始まったことではなく、大気環境学の研究分野では早くから憂慮されてきた。こうした環境問題を殊更誇張して捉えるのではなく、現在の環境変動の動態を科学的に正しく理解し、将来的な変動を可能な限り正確に予測する方向へと結び付けていくことが肝要である。

生存圏研究所では、地球システムで生起する環境変動のプロセスとメカニズムを明らかにする研究を進めている。とりわけ、大気中における微量気体および粒子状物質の質的・量的な変動に注目し、その輸送および変質過程を明らかにする必要がある。そのために、現場での精緻な測定、衛星からのグローバルな観測、さらには高精度な室内実験を相互補完的に実施・利用し、これら大気質変動に関わる情報を総合的に解析することによって、これらの問題解明に向けた地球大気状態のモニタリング・診断を目指している（高橋ら, 2012）。野外計測では、レーザー分光法や質量分析を用いた in-situ（その場）計測装置と、レーザーレーダー（ライダー）やドップラーソーダーといったリモートセンシング技術を融合的に利活用し、微量気体およびエアロゾルの地表付近における立体分布を精密に探査する手法の開拓を推し進めている。

また、“大気質と安心・安全”プロジェクトでは、“木質住環境と健康”プロジェクト（6.3.2 参照）と協同して、居住圏内における微量気体およびエアロゾルの動態を詳しく探る研究も進めている。我々是一日の多くを室内で過ごすため、居住圏内における空気質の動態を理解することは、それを取り巻く大気圏における微量成分の動態を把握することと並んで重要である。とりわけ本プロジェクトでは、人の健康影響と居住圏環境の時代変化の関連性に着目した研究を始めている。日本を例にとれば、我が国の伝統家屋は優れた通気性が長所の一つであったが、エネルギー効率の観点から気密性の高い住宅へと取って代わられた。以前は、小動物や昆虫が媒介する感染症が居住圏における主要な健康リスクであったが、現代の高気密な居住圏環境にあつては、室内空気の滞留による化学物質への長時間の曝露が重要な健康リスクとなっている。化学物質の例として、建材からのホルムアルデヒドや VOCs があり、これらがシックハウス症候群と呼ばれる健康被害をもたらすことは近年よく知られるようになった。また、屋外からの大気汚染物質の移流による室内空気質への影響も忘れてはならない問題で

ある。生存圏研究所では、“大気質と安心・安全”プロジェクトで開発した様々な大気計測手法を、居住圏環境における空気診断へ応用し、居住圏環境における微量気体およびエアロゾルの生成・消滅過程を詳しく調べる研究に着手している。このように、大気質は、人の健康に直接影響を及ぼすのみでなく、植生、気候など、生命体を育む生存圏に様々な影響を与えることから、その解析は持続的な生存圏創成の重要なテーマと言える。

6.4 千年居住圏の科学 ―木質科学と木の文化の融合

前節で紹介した「生存圏科学の新領域開拓-ロングライフイノベーション共同研究」では、多種多様な人工物質や人工的な電磁波で満たされ急激に変化しつつある人を取り巻く生存環境を対象とし、人の健康に係わる4つの研究課題を推進している。

一方、人間生活圏の未来をマテリアルから展望した場合、本書で繰り返し述べてきたように再生可能かつ未来型の資源である木質資源、すなわちウッドマテリアルがその基礎となる。日本にはウッドマテリアルに関する固有の文化（「木の文化」）が存在する。なかでも、その中核をなすのが、世界最古の木造建築物である法隆寺や世界最大の木造建築物である東大寺に代表される木造建築物の文化である。「木の文化」に関する人類の叡知を最先端の手法を用いて統合的に解析し、次の千年を健康に安心して暮らすことのできる環境未来居住圏（＝千年居住圏）を開拓するとともに、その成果を国際的に展開することが求められている。生存圏研究所では平成24年度より、①アジアの人類の叡知の収集・維持、②ミクロ劣化機構の解析、③居住空間のマクロ解析、の3つの研究課題を「千年居住圏の科学」と位置づけ、その開拓に取り組んでいる（図6-8）。ウッドマテリアルに関して過去千年以上の長きに渡って蓄積され続けてきた有形無形の膨大な叡知をこれからの人類の千年にどのように活かすべきなのか、これは生存圏研究所に託された大きな課題である。



図6-8: 「千年居住圏の科学」における3研究課題

6.4.1 アジアの人類の叡知の収集・維持

材鑑調査室は、1978年に国際材鑑室（木材標本室）総覧に機関略号 KYOW として正式に登録された

のを契機に、研究所創設以来収集された木材標本を機能的に保管すべく、1980年に設立された。現有材鑑数は19000点以上で、180科、1130属、3620種以上の分類群に及び、永久プレパラート数は10000枚に達し、全国の大学において最も充実した木材標本室となっている。平成17年より、データベース型の全国共同利用施設として運用され、森林科学のみならず、植物学、考古学、美学・美術史学、建築学等々の国内外の多方面の研究者等との共同研究に供することにより「木の文化と科学」を推進すると同時に、木材解剖学ならびに木材の諸性質に関わるデータベース構築を推進している（図6-9）。

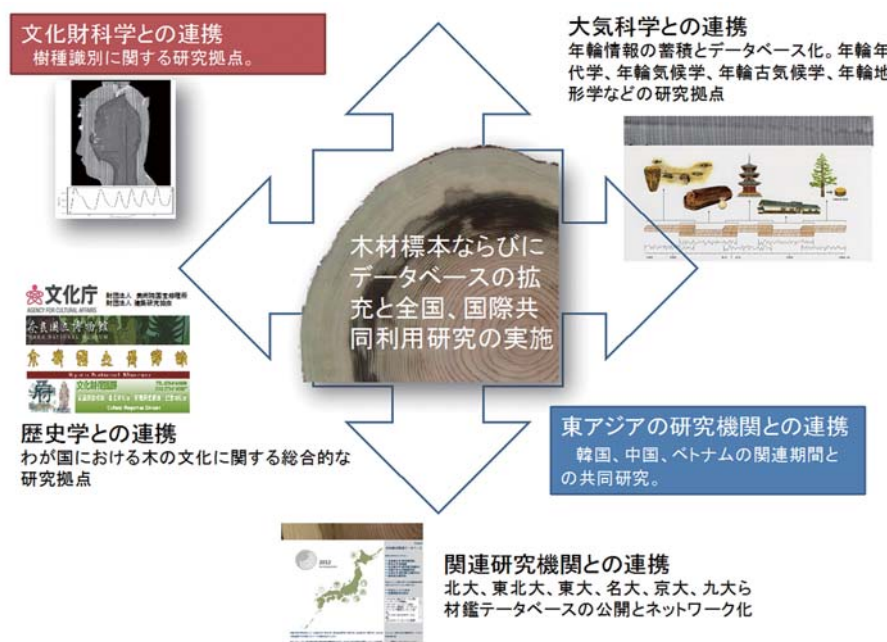


図6-9：木材標本ならびにデータベースによる共同利用・共同研究

京都大学のみならず、大学や公的研究施設にはこのような貴重な木材が管理されているが、その全てにおいて維持・管理が十分とは言えない状況である。そこで、生存圏研究所が窓口となり、北大農学部、東北大植物園、東大農学部、名大農学部、九大農学部と協力して、我が国の大学が保有する木材標本データベースをオールジャパンで整備・公開を推進している。本学に特徴的な木材標本に、歴史的な建築物用材のコレクションをはじめとする「古材標本」すなわち文化財木材標本がある。これらは、歴史的、文化的にも価値のある資料であるだけでなく、わが国の木の文化を科学的に解析するための唯一貴重な試料であり、材料寿命解析や保存科学に利用されている。

文化財は過去を語る。過去は、未来の生存圏を予測する上でも重要な知見をもたらす。特に木の文化を誇る日本においては、例えば木質文化財に利用されている樹種やその意味を丹念に調べてゆけば、わが国固有の文化を支えてきた「適材適所」の木使いの知識が学べるのではないかと想像できる。しかし文化財の調査は可能な場合であっても非破壊が原則である。どのように文化財を科学し、情報を抽出するか。これは、潤沢な木質文化財を誇る日本をはじめとした世界共通の課題でもある。そこで、X線トモグラフィー（Mizuno *et al.*, 2010）や近赤外分光法と多変量解析を併用したケモメトリクス解析（Horikawa *et al.*, 2015）などを利用し、非破壊で材質を特定する方法の開発を進めてきた。

現在進行中の研究テーマとして、「画像の自動認識」による樹種識別法（Kobayashi *et al.*, 2014）の

開発がある。九州国立博物館は、日本における第四番目の国立博物館で、美術品の科学的調査が主要なミッションとなっている。大規模な X 線 CT 装置の設置後、多数の文化財が「維持と保存のための健康管理」として診断され、その結果貴重な画像が収録されている。しかし残念なことに、解像度が光学顕微鏡を下回るため、確立された解剖学的特徴を用いた木材識別法を適用することができず、樹種の検証もなされてこなかった。そこで画像のテクスチャー情報を用いた自動認識に着手した。その結果、文化財に頻用される木材の画像データベースを整備することで、樹種の識別が可能であることが分かってきた。また、画像情報の定量化は樹種の判別に役立つだけでなく、同属異種間の微妙な樹種特性も数値化できる可能性も示され、木材解剖学の新しい切り口としても期待される。

このように、木材の標本収集、維持管理、非破壊検査法の確立を基軸として、木の文化を誇る我が国の木の文化についての研究を今後も継続していきたい。

また、我が国の木の文化の形成において、特に影響のあったアジア諸地域との交流をさぐる目的で、韓国、中国、インドの文化財や木材研究者と連携した、東アジア地域の木の文化に関する共同研究を推進している。現在進めている研究の一つに、黄腸木（ファンジャンボク）がある。この黄腸木は国によって樹種が異なる。朝鮮半島では幹が通直な最高級のアカマツを意味し、王宮などの建築物に重用された木材である。名の謂れは心材が黄色いことによる。中国においても黄腸木は、棺材として利用されていたが、樹種は松ではなくある種のヒノキ科の木であることが知られている。一方日本ではカヤや水に強いコウヤマキが使われてきた。飛鳥・奈良期の日本において、一木彫をみると、6 - 7 世紀にはジャクダンの代替としてカヤが使われた。その理由は、芳香と難腐朽性という材としての特徴によるとされているが、大切な人々、死者を永遠に守る箱物に黄色のものをを用いるという文化的な共通点があることも示唆されている。日本の歴史が始まる 6 世紀頃、朝鮮半島から渡来した秦氏は、京都の太秦に広隆寺を建て、そこに弥勒菩薩を祀る。ソウル国立博物館所蔵の弥勒菩薩半跏像とそっくり同じのこの仏像は、朝鮮半島から伝来したとされるが、日本の国宝級仏像では唯一アカマツで作成された貴重な彫刻である。この材質が黄腸木であれば、誰が、いつ、どこから仏像をもたらしただか、歴史書にかかれていない証拠となるかもしれない。

木材の「もの」と「知」に関する情報を科学することで、文化財科学（劣化、診断、保存）、歴史学（交流、交易、加工技術）、建築学（木造、耐震）、環境科学（水理、気象）などの異分野交流が進み、次世代を担う研究者による文理融合、学際的な研究展開が拡大する。地球環境問題が 21 世紀における人類共通の課題となり、持続的発展が可能な循環型社会の形成が求められる中で、森林と人との豊かな関係を構築し、環境との調和や資源の循環利用に寄与する観点から、日本人と木の文化に関する教育を推進していくことが重要である。

6.4.2 ミクロ劣化機構の解析

人が千年居住できる木質住環境を得るには、木質材料の生物劣化や老化、風化のメカニズムを理解し、それを最小限に抑える方策を獲得することが必要である。木質材料すなわちウッドマテリアルは生物が作り出した材料であり、いろいろな使用環境下において必ず生物による食害あるいは分解、いわゆる生物劣化を受けることになる。また、日光や風雨に暴露される環境では、物理化学的な現象としての風化（気象劣化：weathering）が発生する。さらに、建築物内部などで使用されたウッドマテリアルは、老化（aging）による経年変化を生じる。

生物劣化はどのような環境、条件でも発生する可能性があり、千年居住圏を考える場合に最も重要な課題の一つとして挙げられるものである。一方、風化は、屋外で使用された木材の細胞壁成分、特にリグニンが紫外線により分解し、風雨によってその分解物が溶脱することの繰り返しによって進行し、針葉樹の早材部で最大100年で5～6mm程度の深さまで達すると言われている（古野、1997）。老化については、まだそのメカニズムが完全に明らかになったわけではないが、緩慢な熱酸化反応としてとらえることができる。

生存圏研究所・全国共同利用設備である居住圏劣化生物飼育棟／生活・森林圏シミュレーションフィールド（DOL/LSF）は、ウッドマテリアルの生物劣化に関連する日本で最も優れた設備として、国内外のコミュニティーによる共同利用研究に活用されてきた（第4章コラム参照）。しかしながら、現在保有している生物、すなわち共同利用として実験に供することのできる生物群としては、シロアリ類とヒラタキクイムシ類、および木材腐朽性担子菌類に限られている。つまり、残念ながら、「木の文化」そのものである古い木造建築物や木製文化財を攻撃する生物－例えばケブカシバンムシなどの食材性シバンムシ類－については、現在、日本を含むアジア域においてその人工飼育は全く行われておらず、研究そのものが不可能な状況となっている。さらに、近年、海外から輸入木材とともに侵入した害虫による被害例が増加しつつある。生存圏研究所は、西日本におけるヒラタキクイムシからアフリカヒラタキクイムシへの害虫種の変化の証明（古川ら、2005）、北米からの侵入種であるネバダオオシロアリやアメリカカンザイシロアリの生態調査とその対策に関する取り組み（吉村、2011）、さらには、近年その被害が報告されるようになった熱帯性の大型木材害虫であるオオナガシנקイやホソナガシנקイに関する生態調査、などを先導的に進めてきている（図6-10）。アジア域における木材劣化生物研究の中心的研究施設として、ハイパーロングライフなウッドマテリアル、木質住環境を生み出すべく、国際的な調査と共同研究を今後も進めて行きたいと考えている。

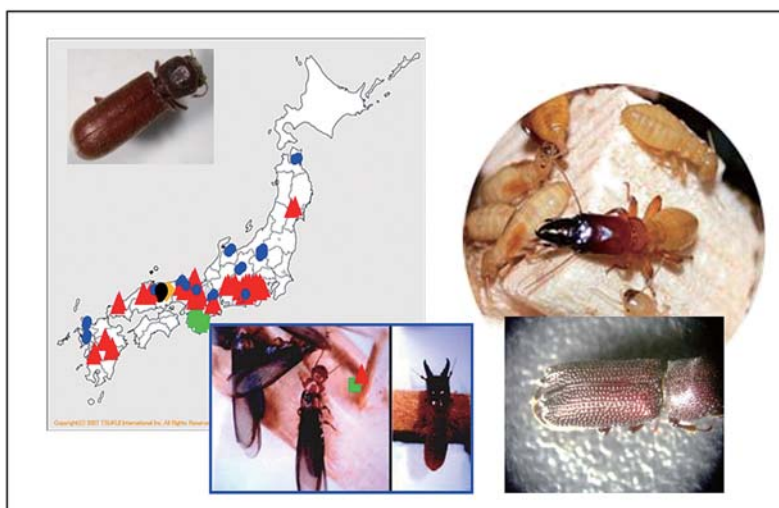


図6-10:新たな木材害虫達。左上:アフリカヒラタキクイムシとその分布域（赤のポイント（古川ら、2005より）、中央下:アメリカカンザイシロアリ、右上:ネバダオオシロアリ、右下:ホソナガシנקイ

また、木材の老化機構の解明は、木質材料を幾世代にもわたり使用する上で重要な課題であるが、未解明な点が多い。生存圏研究所では、木材の老化機構の解明を目指し、木材の熱処理による色の変

化 (Matsuo *et al.*, 2011) や古材の物性などの解析 (Yokoyama *et al.*, 2009) を進めてきた。年代や樹種などが異なる様々な古材を用いた研究は、日本で唯一まとまった形で古材標本を有する生存圏研究所でしか行うことのできない研究である (本章材鑑調査室のコラム参照)。木材の生物劣化に関しては、これまでの予備的な研究から木材に含まれるある種の抽出成分が酸化反応によってエポキシ化し、結果として木材のシロアリに対する抵抗性に寄与する可能性があることを、クロマツの新材と古材との比較によって示した (竹迫ら, 2013)。今後、集積した古材標本を有効に活用し、古材の生物劣化に関する包括的調査を行うことにより木材の老化と生物劣化に係わる謎を解き明かし、長期にわたる健康で安心な暮らしに寄与するウッドマテリアルや劣化防御法の開発につなげたい。

さらに、「劣化 (耐久性)」の専門化と「構造」の専門化の協働作業が可能な生存圏研究所の強みを生かし、「構造耐力」と「耐久性」について、総合的かつ長期的な耐久診断評価システムとして研究を進展させたい。千年というスパンを対象としたウッドマテリアル居住空間の劣化現象について、その原因と対処法に関する総合的な解析と理論構築を行い、千年居住圏の開拓に向けた提言を発信したいと考えている。

6.4.3 居住空間のマクロ解析

持続可能な資源循環型社会の実現において、木造建築物は、①再生産可能な資源 (木材) を用いる点、②建設時の消費エネルギーが比較的少ない点、③炭素を構造躯体の中で長期・大量に固定する点で重要である。機械産業が発展する以前の日本を含むアジア諸国の伝統建築物では、様々な構法上の工夫により、安全にそして快適に長く住まうという建築物の必要性能を満たしつつ、循環社会に即した構法を発展させてきた。

構造面において貫のような多数の接合部を並列的に用いたり、多数の太い柱を分散配置することなどは、力を集中させずに一部の損傷を他で性能を補う、冗長性を確保するものと言える。耐久性面では、木組みの技術により部分的な補修や部材の取り替えを容易に行えるシステムとなる。図 6-11 (a) のインドネシアの民家では、上部・下部構造が分離でき、貫構造で作られた下部構造は、腐朽が生じても容易に部分補修が可能である。居住環境面では、地域環境や使用条件に即した構法が選択される。例えばブータンの民家 (図 6-11 (b)) は 1 層と 2 層の 3 方向壁面を気密性・蓄熱性に優れた版築構造で構成し、一方、居室空間となる 2 層南壁面は採光性の良い軸組工法土塗り壁を用いる。伝統建築物は、地震等自然災害に対して脆弱な面を持つこともあり、現代の工学に照らして構造性能を評価することが重要であるが、未だ評価が難しい点もある。インドネシアの Joglo 建築 (図 6-11 (c)) では外周部の大屋根を中央のコアから吊り構造とする事で、地震力の入力軽減に配慮している。また、基礎と緊結しない構造において、大地震時に生じる柱脚部の滑りや浮き上がりも同様な働きを持つと考えられている。これら複雑な柔構造の挙動の評価・解明により、より安心で安全な建築物が生み出されると期待される。

熱帯早生樹植林材 (アカシア, ファルカータなど) における高付加価値な利用の一つとして建築用材 (村田ら 2011) があり、特に構造材料では、製材や木質材料が挙げられる。インドネシアの早生樹の製材に関する研究としてはアカシアマンギウム、ファルカータなどについて Firmanti ら (2010) などがあり、木質材料については合板や LVL (村田ら 2011)、または MDF や OSB (Febrianto *et al.*, 2010) などがある。また木質材料を開発するために重要な接着性能に関する検討としても、熱帯早生

樹と接着特性に着目した Alamsyah ら（2006）の研究などもおこなわれている。

現在インドネシアは、様々な年収に合わせた異なる価格帯の住宅を多数建設することを目指しており、木造住宅がその一つに含まれている。特に低所得者を対象とした木造住宅としてローコスト化が重要となり、材料および構法のプレファブ化が一つの命題となっている。このことから、小松（2011）の報告にあるようなアカシアマンギウムを用いたプレファブ型の耐震性能の高い木造住宅に関する研究がおこなわれている。

木造建築の新たな可能性として、2000年の建築基準法の性能規定化によって実現が可能となった4階建て以上の建物や、CLTや集成パネルなどの密実な木材を用いた構造、さらに木質構造と他構造との併用構造が考えられる。それらの現状と今後の展望を以下に示す。

1) 耐火木造

性能規定化により木材を主要構造材として用いた構造であっても耐火部材とすれば4階建て以上の建築物が建てられるようになった。これまでは耐火のために他材料と複合したが、その材料を構造上も活かすことによって、より低コストの部材開発が期待される。

2) CLTなどのパネル

枠組壁工法や集成材に使われていた比較的小さな断面を接着することにより一体の大きな版、パネルの開発が盛んである。この部材の魅力は比較的小断面の部材により構成されるため小径木を有効利用できること、さらに低質材であっても応力の小さくなる部分に用いることにより強度性能を低下させずに済むことなどである。木造の高層化、さらには、鉄筋コンクリート造や鉄骨造の壁や床版としての展開も期待される。

3) 木造と他の構造との併用構造

下階をRC造として上階を木造とした例は数多い。この建築物の利点は、遮音性に難のある木造の床をRCの床に置き換えること、さらに上階に軽い木造を使うことにより地震に対する安全性をあげられること、などである。上下階で複合する立面的な併用構造に加え、木造と鉄筋コンクリート造などの他構造を平面的に併用した図6-12のような構造も開放的で耐震安全性や火災時安全性を確保した木質構造として普及が期待される。

こうした新しい建築構造の開発は、安心で安全な千年居住圏を生み出すための重要な課題である。

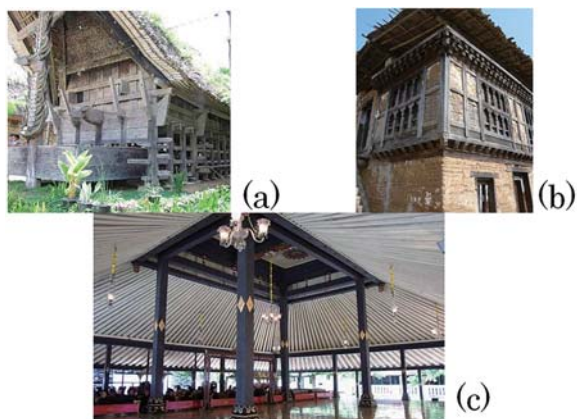


図 6-11：アジアの伝統的建築物の例



図 6-12：RC造と木造を組み合わせた構造

6.5 生存圏科学の国際化推進

エネルギー、環境、資源・材料、宇宙利用をはじめ人類の持続的発展に係る問題は、地球規模で相互に連環しており、持続的な生存圏を確立するためには、個別の学問分野の追求のみでは解決が難しく、多角的視点で課題を捉える学際的かつ国際的な取り組みが不可欠である。このため、生存圏研究所は、アジアを中心に（図 6-13）、北米や欧州などの諸外国の大学・研究機関等と多くの学術交流協定を締結し、大型の海外研究拠点を運用しつつ国際的な枠組みで生存圏科学を推進してきた。大気科学に関しては、1980 年代から赤道大気研究を始め、インドネシア航空宇宙庁（LAPAN）他の諸機関と共同研究を実施してきた。2001 年にはスマトラ島の赤道直下に赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar; EAR）を設置し、LAPAN と共同で赤道大気の長期連続観測を実施中である。EAR は全国・国際共同利用設備として国内外の研究者にも開放的に運用している。またインド国立大気研究所（NARL）が運用する大型レーダー等との国際共同研究も活発である。地表から境界層、対流圏、中層大気（成層圏と中間圏）さらに超高層大気に至る広い大気圏において、赤道域で共通して起こっているエネルギー・物質の噴流・循環過程は地球大気全域に大きな影響を与える。このため、赤道大気の研究は、地球環境の変動予測の要となる情報を与える。

東南アジアは、豊富な植物バイオマス資源に恵まれており、環境と調和したその利活用は、化石資源に依存した社会の変革や、東南アジアの地域経済の発展にも大きく寄与する。こうした点から、生存圏研究所は、インドネシア、マレーシア、タイ、フィリピンなどと国際共同研究を活発に展開し、インドネシア科学院（LIPI）にサテライトオフィスを設置している他、スマトラ島パレンバン近郊における大規模人工産業林を研究フィールドとした持続的森林活用に関する研究を、LIPI および地元企業と共同で進めている。インドネシアでは、この他、伝統建築工法やローコストハウスの研究、アカシアの分子育種の研究など多くの共同研究を実施している。また、タイでバイオリファイナーの共同研究、東南アジア全域で都市昆虫の共同研究なども進行中である。東アジアとは、「東アジアの木文化」に関する国際共同研究が特筆される。日韓文化財関連国際共同研究ワークショップ「東アジアの木文化」（平成 25 年 8 月）を皮切りに、材質にすぐれる黄腸木の解剖学と耐久性に関する研究、海印寺所蔵の八萬大蔵經に使用された木材に関する共同研究を実施した。また、ベトナムタンロン遺跡より出土する木材の樹種識別と保存に関する調査、チベットシッキム地域の寺院用材に関する調査を行っている。これらの成果は、第 12 回木の文化「木の文化へのいざないーインド・東ヒマラヤ」など多くのシンポジウムを開催して発表し、一般社会にも広く啓蒙している。

生存圏科学の国際化推進には、国外の大学院生・若手研究者の育成が重要である。これまでに、多くの留学生を招いて学位取得者を輩出し、インドネシアでは卒業生が中心となり同国に木質学会を設立した。生存圏研究所では、さらに独自の教育的プログラムとして、2008～2010 年度には JSPS アジアアフリカ学術基盤形成事業によって日本・インドネシア・インドを結んで研究水準の向上を図り、2009 年には JSPS 若手研究者招聘事業－東アジア首脳会議参加国からの招聘－によってインドネシア、マレーシア、タイ、ベトナム、インドから若手研究者を招いて相手国の研究水準の向上に貢献した。さらに海外に出かけて行う、国際教育プログラム「生存圏科学スクール」(Humanosphere Science School)を過去 7 年間にわたって連続開催するなど、アジア地域への研究普及活動に力を入れている(図 6-14)。

生存圏科学を担う人材を海外でも育成し、地球規模での国際交流ネットワークを結ぶことは、持続的生存圏の創成の要となる。大型の海外拠点と、これまでに築いてきた人材ネットワークを基盤に、一層の国際化を推進していきたい。

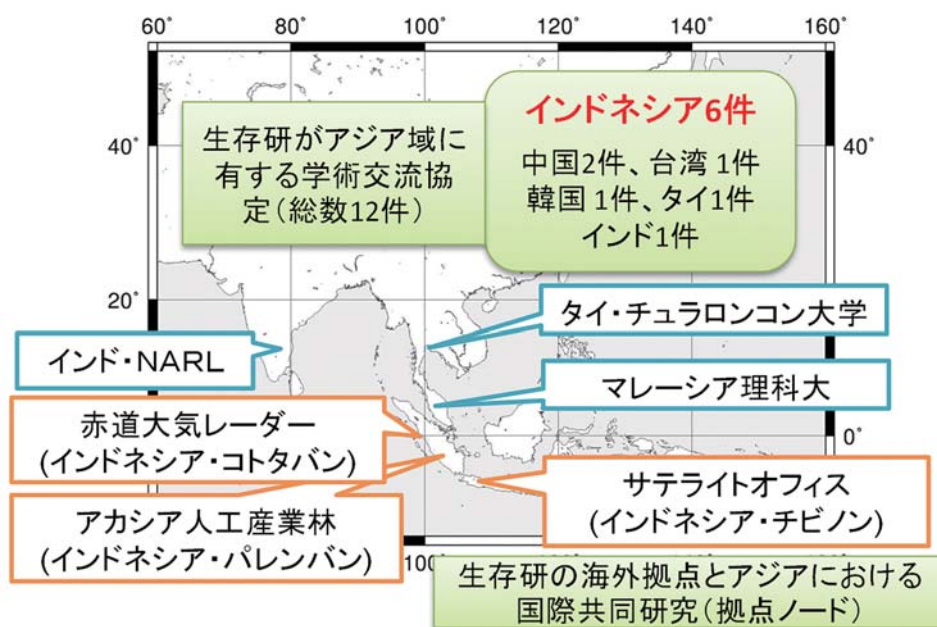


図 6-13：当研究所の海外拠点、アジア域における主要な研究協力体制、アジア諸国との研究協力協定。

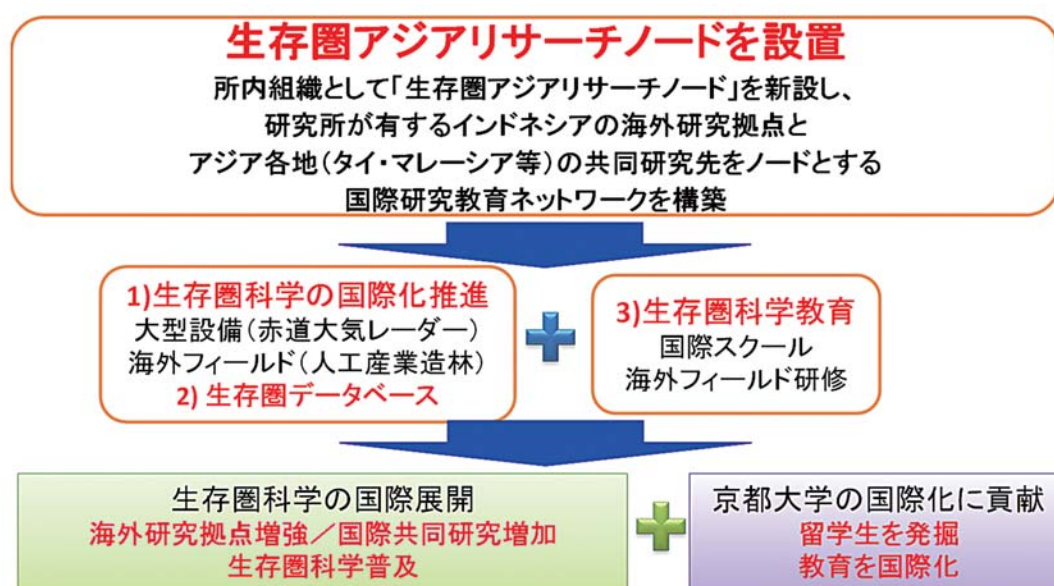


図 6-14：生存圏科学スクール（2013 年、インドネシア・ベンクルにおいて開催）

コラム アジアリサーチノードを核とした生存圏科学の国際展開

生存圏研究所では、生存圏科学の国際展開をさらに強化し、アジアをリードする若手研究者・技術者を養成し、生存圏科学の広範な普及を図るとともに、その水準を飛躍的に向上させることを目的として、新しい国際化推進プロジェクト「アジアリサーチノードを核とした生存圏科学の国際展開」を提案している。アジアは世界人口の多数を占め、これからの人類社会を牽引する重要な地域である。またアジア（特に熱帯域）では生存圏科学の課題が顕在化しているため、この地域に実際に生存圏科学の成果が適用されると改善効果が大きいと考えられる。生存圏研究所の新しい国際化推進プロジェクトは、生存圏科学の有効性を社会に示し、将来に向けて持続的発展可能な社会を構築する良き前例を示すことを目指している。

このプロジェクトでは、所内に「生存圏アジアリサーチノード」を設け、海外「中核ノード」をインドネシアの LIPI チビノン研究拠点に、「拠点ノード」を各研究拠点に設置することで、生存圏科学の国際展開を支えるネットワークを整備し、国際的かつ分野横断的共同研究教育を推進する。プロジェクトに含まれる研究課題は、EAR を中心とする赤道大気の研究、人工産業林やバイオリファイナリー、都市昆虫の研究によるウッドマテリアルの生産・循環利用・環境保全等である。さらにアジア諸国の宇宙開発への機運の高まりに呼応して、宇宙科学技術の共同研究と講習に取り組む。生存圏研究所が取り組む宇宙太陽光発電では地上の受電設備は赤道付近に設置されるため、そのフィージビリティスタディ等も重要である。さらに学際性が高い生存圏科学においては、個別の研究成果を蓄積し相互参照を推進するためデータベースの整備が極めて重要である。生存圏研究所ではデータ公開を積極的に進めており、独自の「生存圏データベース」へのデータアクセス回数は年間約1億回に達している。また名古屋大学太陽地球環境研究所など5機関との連携で「超高層大気長期変動の全球地上観測ネットワーク・研究 (IUGONET)」プロジェクトを推進しデータ利用効率の向上を進めてきた。新しいプロジェクトでは、生存圏データベースの国際化をさらに推進する。複製を各地に配置してアクセス性を向上することから始め、各国の研究者が積極的にデータベースを構築するまで成長することを目指す。



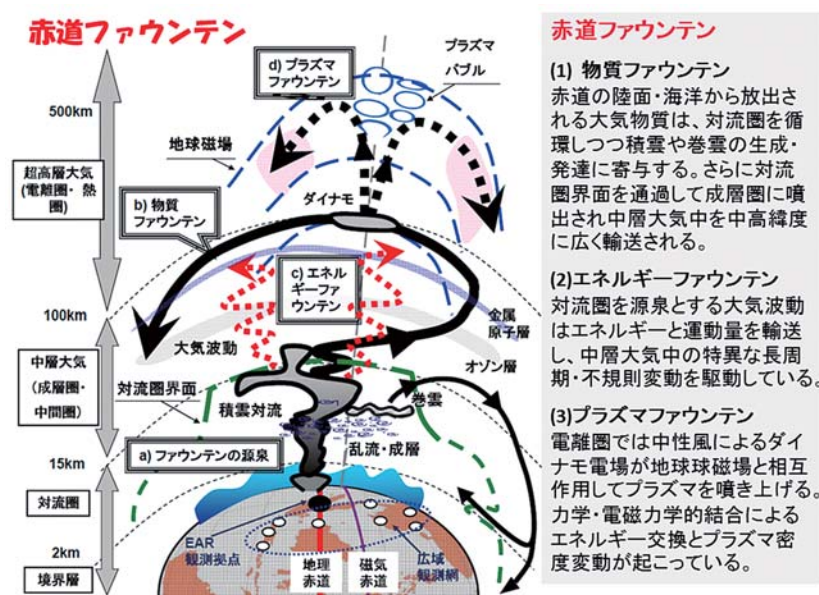
アジアリサーチノードを核とした生存圏科学の国際展開：プロジェクトの概要

コラム 赤道 MU レーダー計画

生存圏研究所では、MU レーダー（中緯度域の大気レーダー；1984 年設置）と赤道大気レーダー（低緯度域の大気レーダー、EAR；2001 年設置）の 2 つの大型レーダーを有して大気研究を推進してきた。さらに国立極地研究所では、東京大学と共同で南極昭和基地に大型大気レーダー PANSY を建設中で既に一部システムによる運用が開始されており、完成が近づいている。これらによって、我が国は、低緯度・中緯度・高緯度域にそれぞれユニークな観測装置を有する世界でも希な状況にある。しかし赤道大気レーダーは、残念なことに、MU レーダーや PANSY に比べて感度が 1/10 と低くバランスを欠いている。そこで赤道大気レーダーの飛躍的な拡充をめざし、MU レーダーと同等の感度を有する高機能大気レーダー「赤道 MU レーダー（Equatorial MU Radar; EMU）」をインドネシア共和国に設置することを提案している。EMU によって、現在の EAR では不可能な中層大気（高度 15 km ～ 100 km）の観測能力が飛躍的に高まり、高度 100 km 以上の電離圏においてもプラズマ密度・速度・温度の測定が可能になるなど、赤道大気の上下結合を研究する能力が大幅に強化される。

赤道域は太陽放射エネルギーを最も強く受ける領域であり、地球大気の種類現象の駆動源であって地球環境変動研究上の最重要地点である。特にインドネシア域は太陽光による島嶼（とうしょ）の加熱と周辺の海洋からの水蒸気供給によって、地球上で最も活発な対流現象が発生しており、この地域の大気諸現象が日本の気象・気候変動に与える影響も小さくない。インドネシア域赤道大気の観測感度と機能を飛躍的に高め、赤道の下層大気で発生した大気波動が上方へ伝搬し上層大気の運動を変化させる様子など、赤道を中心とする地球大気の上下結合すなわち「赤道ファウンテン」と呼ぶべき大気の構造・運動の解明を進めることが必要不可欠である。

本計画は、日本学術会議のマスタープラン 2014 に重点大型研究計画として採択され、さらに文部科学省のロードマップ 2014 に取り上げられた研究プロジェクト「太陽地球系結合過程の研究基盤形成（提案責任者：京都大学生存圏研究所・教授・津田敏隆）」の重要な一部であり、早期の実現が期待される。



赤道ファウンテンの概念図

6.6 生存圏の未来へ向けて

未来の生存圏を考えるため、過去の地球の概況を振り返ってみる。今から40年ほど前を例にとると、地域差は大きいものの、多くの国家では衣食住環境はゆるやかに向上していた。しかし、技術の開発と移動、人口爆発、発展途上国の経済発展、インターネットの普及を代表とする情報革命、金融革命、価値観の変化などにより、地域社会や地球環境の変動が大きくなり、将来の予測が難しくなっている。現在という時代が、急激な変化の中にいることは明らかである。そして、その変化により、国家、地域、個人間に様々な軋轢が生じ、種々の問題を引き起こしている。これらの問題を具体的に解決するためには、新しい技術の開発は必要であるが、問題を根本的に解決するためには、その問題の本質を見極めた上で、問題解決の指針を定めることが必要である。このための指針として「生存圏科学」は存在する。地域にとどまらず地球規模での持続的な生存環境を確立するという目標を共有して、地球の現状と将来を包括的に解析・予測し、広範な学問分野が連携して問題解決に取り組む「生存圏科学」を確立することが、何よりも必要である。「生存圏科学」の確立に向けて、生物の進化から学ぶことは多い。また、地球環境の変化に大きな影響を与えるエネルギー問題や大気・気候問題、地球環境を観測するとともに人類活動の場を広げる宇宙利用の視点から、今我々が取り組むべきことを考えることも大切である。以降、これらの視点から「生存圏科学」を考察した。

6.6.1 生物の進化と生存圏

地球の年齢は約50億年と言われており、初めて地球上に生物が出現したのは40-32億年前と言われている(石川, 1985)。その後、進化という過程を経て、多様な生物種が生まれたことは、一般的に受け入れられている。この40億年と言う時間に沿って、生物は遺伝子レベルでの変異を繰り返し、様々な生物種が生まれては消えていった。恐竜が良い例であろう。現在の地球上に生きている生物はすべて、地球という変動する環境の中で、総力戦で生き残ってきた。それぞれの生物は、それぞれの長所を活かして生き残ってきたのであり、生物多様性は、その長所が一義的に決まるものではないことを意味している。

ここで、植物に注目し生物学的な考察をおこなおう。植物に特有の性質として、光合成を挙げることができる。しかし、ギンレイソウのような、光合成能力(葉緑素)を持たない植物が存在することは、光合成能力が失われても、植物として生き残ることができることを示唆している。一方で、植物が、その細胞の周りに細胞壁を持っているという点も、植物の重要な特徴として教科書でも紹介される。しかし、知る限りで、細胞壁を持たない植物種は存在しないと思われる。すなわち、細胞壁を外側に持つことで細胞を防護する戦略は、どんな植物でも共通しているようだ。そして植物が水の中から陸の上にあがったのがおよそ6.5億年前と言われていが(Heckman *et al.*, 2001)、このタイミングで、植物細胞壁を固める接着剤の役割をするリグニンの合成能と多細胞体制を獲得したと推測される。以降の5.6億年間にわたり、植物が繁茂してきた事実から、細胞を細胞壁で被い、リグニンを細胞壁内に沈着させ、多細胞体となることが多くの植物の生き残りにとって、有効な戦略だったと結論できる。

こうしたことから、リグニンの生合成の仕組みを知ることや、多細胞体制維持の仕組みを知することは、生物の生き残り術(持続的生存術)を考える上で重要である。また、バイオマスからアルコールや化成品原料を得るバイオリファイナリー開発研究にとって、前者の課題は新技術開発へ直接つなが

りうる重要な研究である。一方、後者の課題は、動物では医学に関連する点もあり、研究が進んでいるが、植物ではそれほど研究は進んでいない。植物では、一つの細胞をとりまく細胞壁はセルロース、ヘミセルロースという多糖類とリグニンの複合体となっているが、植物全体では、様々な形状や役割をもつ細胞の集合体として、全体の機能がなりたっている。木材の場合は、多くの細胞の細胞質は抜け落ちて、周囲の細胞壁が残る形状をとっている。これが集合してできた多孔体の集積構造が木材である。樹木が多孔性の集積構造として形成される仕組みの本質が解明されれば、新しい機能性多孔性材料を植物の形成と変換を含めて設計する分野も創成されると予想される。

また、陸上植物の直接の進化的祖先となった接合藻類や、さらに進化的に遡って分類される多くの藻類の細胞壁にもセルロースは含まれており、植物が陸に上がるより前に、セルロース合成能を獲得した生物が存在していたことは間違いない。したがって、セルロース合成能は、リグニン合成能の出現よりも長い間、地球上に存在してきた生物的能力であると考えられる。このこともまた、セルロース性の細胞壁を持つことが、細胞の防護という目的を果たすのに有効だったことを意味している。そして、様々な生物が年間二千億トンともいわれる大量のセルロースを地球上で合成しても（セルロース学会、2000）、何ら負の問題を引き起こさなかったことは、セルロースという物質が、細胞防護を担うだけの性質を持ちながら、地球環境に適した材料であったことを意味している。全世界で数億トンの生産量である人工樹脂（日本プラスチック工業連盟統計資料）が、無視できないレベルで環境破壊を起こした事実には照らすと、セルロースの低環境負荷性能は大変優れたものであることが分かる。

人間にとって「持続的な生存圏」を形にするに当たり、上述のような生物進化の歴史を認識することは、一面的ではあるが、大変示唆に富んでいると考えられる。具体的に言えば、持続的生存圏のベースとなる材料は、「生存圏」という系の中で滞留してはならず、常に系の中を循環するものでなければならない。木質を含めた植物細胞壁の主要構成成分であるセルロース・ヘミセルロースとリグニンは、まさにこの条件を満たす高分子物質であり、それ故に、現在の地球上で、多くの生物が莫大な量のバイオマスを生産する状況が、数億年以上の間持続してきたのである。

今度は樹木という生き物を、材料の観点から考察しよう。アメリカ・カリフォルニアのセコイア国立公園には高さ 80 m を越える樹木がそびえ立ち、その重量は 1,000 t を優に超えるといわれる。仮に私たちの体長がわずか 10 倍になったとしても、その体重は 1,000 倍となり、とてもその自重を支えきれない。これまで、多様な生物進化の流れから巨大な生物がいくつも登場してきたが、生物史上最も巨大な体を有し、今なお生き続けている生物が「樹木」である。このような樹木の力強さこそが、私たちの生活を支える資源としての可能性を担保しているように思われる。風雪に耐え直立する樹木の巨躯は、複雑な階層構造によって支えられている。

樹木（植物）が有する緻密な階層構造の一層一層が、木質資源における有効利用の可能性、幅を示唆している。第4章に示したように、これまでの科学・技術の発展によって、木質資源における有効利用の幅は広がるばかりである。植物資源の重要性が再認識される今、その利用技術の開発・発展はますます重要な課題となるであろう。全ての資源開発に言えることであるが、木質（植物）資源の利用開発においては植物の深い理解が必要不可欠である。高分子科学的には 70 年も前に発見されていたセルロースマイクロフィブリルが、ここ 10 年で新たなナノ材料（セルロースナノファイバー、4.5.1 参照）として注目を集めている。それによりさまざまな単離法の開発や特性解析が精力的に進められ、現在その技術はセルロースまたは植物細胞壁の性質解明にも役立てられている。これはほんの一例で

ある。長い進化の歴史の中で植物が徐々に構築した階層構造を丹念に繙き、その性質を仔細に探ることによって、木質資源利用の新しい道が拓かれる。こうした、木質資源の利用においては、材料自体の持続利用性はもとより、生物材料の形成、変換、利用を通して炭素源の循環が達成され、地球環境に炭素負荷を与えないことも大切である。

以上のように、木材を含む植物バイオマスの構成成分の活用は、「持続的な生存圏」を形成するための必須のピースであり、その応用研究にますますの期待がかかる。同時に、なぜ樹木という生物およびセルロース、リグニンといった物質が、「持続的発展」を遂げたのか、基礎科学に基づいて本質的な解答を得ることは、「持続的な生存圏」を構築する際に、より高次から指針を与えてくれると期待される。そのためには、様々な分野から基礎的知見を突き合わせて、活発な議論が必要となろう

6.6.2 気象・大気・宇宙からの視点

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の最新の報告書によれば、過去 100 年程度の気候変動については、二酸化炭素濃度の上昇、大気・海洋の温度上昇、海面水位の上昇、雪氷の減少などの傾向から、「気候システムの温暖化は疑う余地がない」と結論している。温室効果ガスの排出削減の程度により変動幅は変わるが、今後も温暖化傾向は続くと言われている。温暖化が進むと、干ばつ、大雨、熱波、台風など「極端な気象現象」の発生頻度が増すと言われており、生存圏研究所の進める先端的な大気計測技術の開発が益々重要になる。一方、温室効果ガス濃度の増大は、中層・超高層大気における平均気温の低下や電離圏電子密度のピーク高度の低下など、下層大気だけでなく、中層・超高層大気にも大きな影響を与えていると言われている。中層・超高層大気は大気密度が小さいために、下層大気に比べて温室効果ガス増加に伴う変動がより顕著に現れると考えられ、下層大気では地球温暖化の有無やその程度がはっきりしない場合でも、中層・超高層大気では明瞭な「シグナル」を検出でき、下層大気での地球温暖化の前駆現象を発見できる可能性もあることから、中層・超高層大気の観測を長期に渡って継続することも極めて重要である。

地球大気では、下層、中層および超高層大気各領域において特有の南北方向の大気大循環があり、ある地域における現象がそこだけにとどまらず、全球に影響を与えることになる。大気領域間を結びつけるのに大気波動が重要な役割を果たしていることが明らかになりつつあるが、様々な大気波動の科学的理解がこれまで以上に求められる。特に、赤道域における活発な積雲対流は、様々な大気波動の発生源となっていることから、赤道域の積雲対流に関する力学・雲物理過程の解明は、大気波動を通じた大気の上下結合の本質的理解に重要である。さらに、下層大気で発生した大気波動がどのように伝搬し、どこで消失するか、また大気波動の消失に伴って発生する大気乱流や二次的な大気波動について、全球規模で理解する必要がある。また、大気波動の電離圏に対する影響を理解し、電離圏擾乱の発生を予測することが、GPS に代表される衛星測位や衛星通信などの、電離圏を通過する電波を利用する社会インフラにとって今後益々重要になる。

人類が宇宙空間へ進出し、宇宙から地球を眺めたとき、宇宙船地球号に乗った運命共同体としての価値観の変革があった。多くの人にとって実際に宇宙へ行くことはなかったが、月から見た地球の姿、スペースシャトルからのリアルタイムの映像により、人類の共通理解、地球環境問題への意識変換があっただろう。そしてその一方で、この美しい星があまりにも無防備な状態で宇宙空間に露出していることをあらためて認識した人も多いのではないだろうか。5 章で触れたように地球は宇宙圏からの

影響を継続的に受けているし、これからも受けることは間違いない。人類を始めとする地球上の生命はこれまで宇宙からの影響をなすがままに受け入れてきた。それは隕石の衝突しかり、太陽表面爆発により多量の高エネルギー粒子の到来やそれに伴う磁気圏の乱れから発生する電子機器の不具合もしかりである。

しかし、これからの人類はこの宇宙からの影響に対してその叡智で果敢に挑み防御と制御を行っていくであろう、と推測するのはあまりにも、おこがましいことであろうか。本書で述べている生存圏の科学は、どこまで宇宙圏を理解してその環境を制御・利用しながら、そこから受ける甚大な影響を防御できるだろうか。

地上では何度となく繰り返される地震や津波という自然災害ですら科学は制御できていない。これらに比べて宇宙空間が地上に及ぼすエネルギーは更に大きなものであり、そのエネルギーを制御することは更に困難かもしれない。しかし、一方で宇宙圏がわかりやすいのは、地下で発生する地震などと違って、そのエネルギー源を調査するための障害物が少ない、ということである。太陽系のエネルギーのほとんどを担う太陽も、地球に向かってくる小惑星も、望遠鏡や電波観測などで見やすいのは、つまり間に「障害物」がないからである。それから「距離」も重要である。情報は光速で伝わっても実際にエネルギーが地球に影響を及ぼすには、それよりも時間が遅れることが多い。従って、生存圏の科学はその時間差を有効に利用して宇宙圏との人類のつきあい方を提示するであろう。

一方、「環境利用の先行」ではいずれ破綻することを我々は地球上での文明発達の過程で痛いほど理解しているはずである。それを宇宙環境で繰り返してはいけませんが、残念ながら現状は、宇宙デブリの存在など、地球上での経験が活かされているとはいいがたい。生存圏の科学は、この意味で、人類自身の活動に対しても制御をおこなっていく義務があるであろう。

6.6.3 生存圏科学がいざなうエネルギーの多様性

地球上の生物が多様性を織りなすのと同様に、生存圏には太陽エネルギーを主な由来とした多様なエネルギー源が存在する。そのエネルギー源の中から、我々人類は利便性と経済性の観点から化石資源や原子力資源を大量に採掘し大量に消費してきた。その因果としての地球環境問題や資源の枯渇問題あるいは原子力技術に対する不安が顕在化してきた。人類が利用すべきエネルギーにも多様性が求められる時代が到来したと言えよう。既存の資源から太陽エネルギーを中心とした再生可能エネルギー資源への転換は、経済的な課題を多く含むものの中長期的に渡って人類が取り組まなければならない課題である。

バイオマスエネルギーは比較的近い将来での利用が期待されるエネルギー源である。ガソリン代替としてのバイオエタノール生産技術のみならず化学品原料としてのバイオマスも含めたバイオリファイナリー技術は、特にエネルギー輸入国である我が国が戦略的に開発すべきである。また中長期的なエネルギー源としては、地球上のみならず宇宙でのエネルギー生産技術の獲得も重要な視点である。宇宙太陽光発電所の研究開発をはじめとした宇宙エネルギー開発は、エネルギーの多様性を宇宙圏まで拡大する試みである。

平成26年2月に日本政府原案として出された新しい「エネルギー基本計画（案）」では、決して国家政策としての資源確保だけではなく、省エネルギー社会の構築や再生可能エネルギーの導入など、世界規模で取り組むべき課題が多く記述されている。生存圏研究所が進めてきたバイオマス利用や宇

宙太陽光発電も計画案で取り上げられている。生存圏科学は、これらのエネルギーを含め様々なエネルギー手段のベストミックスと基盤技術の確立を目指し、エネルギーの多様性をいざなう科学として発展する必要がある。

6.6.4 生存圏科学の確立を目指して

現代社会は化石資源をエネルギー源として利用することで発展してきたが、化石資源は何万年もの時間をかけてエネルギーが利用しやすい形に集約・蓄積されたバイオマスともいえ、この炭素資源に蓄えられたエネルギーを短時間に解放することによる不均衡がさまざまな問題を引き起こしている。本章の最初に述べたように、人口爆発と近代文明の急速な発展にともなう化石燃料の大量消費や土地利用の変化により、エネルギーや物質循環のバランスが大きくくずれ、地球温暖化や異常気象を引き起こし、さらには、資源枯渇、大気、海洋、土壌の汚染、食料の枯渇、伝染病の蔓延などが深刻化し、人類は存続の重大な危機に瀕している。自然界のバランスを大きく損なうことなく人類が持続的に発展するために、人類が今とるべき行動は何であろうか。この行動の選択は大変難しいが、明白なことは、未来への様々な影響を予測して行動を選択することは特定の学問分野を深めるのみではできないことである。生存圏研究所は、人類が直面する生存環境の現状を正確に診断して、生存を脅かす要因を取り除く強力な手段を得るとともに、人類がとる行動の将来にわたる影響を様々な学問分野の連携のもとにできる限り正確に予測し行動することを使命として活動してきた。即ち、生存圏研究所は、人類の生存を支え人類と相互作用する場を「生存圏」としてとらえ、「生存圏」の正確な診断と理解に基づき、人類の持続的な発展につながる道を見出すとともに、それを達成する手段を確立する新しい学際融合科学「生存圏科学」の創成にむけた活動に取り組んできた。

生存圏とは空間的・時間的に広がる包括的な概念であり、便宜的に分けられた圏はそれぞれが密接に有機的に関わっている。本章で述べたとおり、生存圏科学は、自然現象と生物の成り立ちを深く理解する基礎科学に立脚しつつ、問題解決のための技術開発を行うとともに、将来を予測して人類が進むべき指針を与える学際的な学問分野の構築を目指している。こうした思想を基に、人類の活動により顕在化してきた諸問題を解決するため、生存圏の現状を正確に診断して未来を予測するとともに、持続的なエネルギー、マテリアル、宇宙利用を推進する。生存圏研究所が設定した4つのミッションは、こうした「生存圏科学」の方向性に合致したものであり、本書に記載したように研究と教育の両面において多くの成果をあげてきた。しかしながら、成果を積み上げてきた個別の課題は多いものの、人類が進むべき指針を与える「生存圏科学」の全体像を明確にして問題解決の手段と指針を提供するためには、それぞれのミッションの研究成果をより有機的に連携させて圏間科学を深めるとともに、「生存圏科学」の国際化を促進して、地球規模で起こる課題の取り組みをさらに充実化することが必要である。また、得られた成果を社会に還元する活動も加速させなければならない。こうした考えに基づき、生存圏研究所は、これまでの4つのミッションを発展的に強化・変革するとともに、生存圏科学の新領域開拓を5番目のミッションとして定義し、研究・教育活動を強化する。この5番目のミッション「高品位生存圏」では、4つのミッション活動で得られる研究成果や研究コミュニティを統合して、人の健康や安心・安全な暮らしに直結する重要課題を抽出し、ミッション間、圏間の融合を図りつつ課題解決にむけた共同研究を行う。

これにより、生存圏の科学を、人の健康や生活の質の向上につながる応用研究に発展させ、生存圏

科学の社会還元を促進する。新たなミッションは、6.2の「生存圏ミッションの役割」で議論した従来のミッションの総括から導き出されたものである。以下にその内容を以下に記す。

新ミッション1「環境診断・循環機能制御」

地球温暖化や極端気象現象の増加といった環境変動の将来予測に資するため、大型大気観測レーダーや衛星等を用いた精密測定により、現状の大気環境を診断する。また、生物圏から大気圏にわたる物質輸送・交換プロセスのメカニズムを解明するとともに、物質循環に関わる植物・微生物群の機能の解析と制御を通じて、化石資源に依らない植物由来有用物質の持続的な生産利用システムの構築を目指す。新ミッション1では、扱う領域を土壌圏まで広げ、物質循環の観点から生存圏全体を俯瞰する。

新ミッション2「太陽エネルギー変換・高度利用」

太陽エネルギーを変換し高度に利用するために、マイクロ波応用工学、バイオテクノロジーや化学反応等を活用し、太陽エネルギーを直接に電気・電波エネルギーや熱等に変換するとともに、光合成による炭素固定化物であるバイオマスを紹介して高機能な物質・材料に変換して有効利用する研究に取り組む。新ミッション2では、高機能物質への変換を重点化し、要素技術のみでなく全体システムにも展開する。

新ミッション3「宇宙生存環境」

人工衛星、宇宙ステーション、ロケット、地上レーダー、計算機シミュレーション等を用いて、宇宙圏・大気圏の理解のための研究をより深化・融合させ、生活圏や森林圏との接続性の解明に取り組む。また、太陽フレアを原因とする放射線帯や磁気嵐の変動等の理解を深め、スペースデブリや地球に接近する小惑星等の宇宙由来の危機への対策を提案することで、気象・測位・通信衛星等の宇宙インフラの維持発展にも貢献し、宇宙環境の持続的な利用という社会的要請に応える。新ミッション3では、宇宙圏環境の理解と利用だけでなく、生存環境としての維持・改善、さらに、大気圏、森林圏、生活圏との接続性も重点化する。

新ミッション4：「循環材料・環境共生システム」

環境共生とバイオマテリアル利活用を両立するためのシステムを構築し、循環型生物資源の持続的利用を進める。これにより埋蔵資源の大量消費に基づく生存圏の環境悪化を防ぐとともに、生物の構造や機能を最大限に引き出す材料と利用技術を創成して、安全・安心で豊かな生活環境をつくり出すことを目的とする。新ミッション4では、木質資源をベースに環境と共生した技術、材料を開発する、“創造”を意識したミッションに発展させる。

ミッション5：「高品位生存圏（Quality of Future Humansphere）」

人類の産業経済活動の急速な拡大により、人が棲息する空間の特性に大きな変化が生じてきており、人の健康や安心・安全な生活が脅かされている。このため、生存圏研究所の4つのミッション活動で得られる研究成果や研究コミュニティを統合して、人の健康や安心・安全な暮らしに直結する重要課

題を抽出し、ミッション間、圏間の融合を図りつつ課題解決にむけた共同研究を行う。具体的には、「人の健康・環境調和」、「脱化石資源社会の構築」、「生活情報のための宇宙インフラ」、「木の文明の科学による社会貢献」の4つのサブ課題を設定し、これにより、生存圏の科学を、人の健康や生活の質の向上につながる応用研究に発展させ、22世紀に向けて生存圏の質を向上させる。

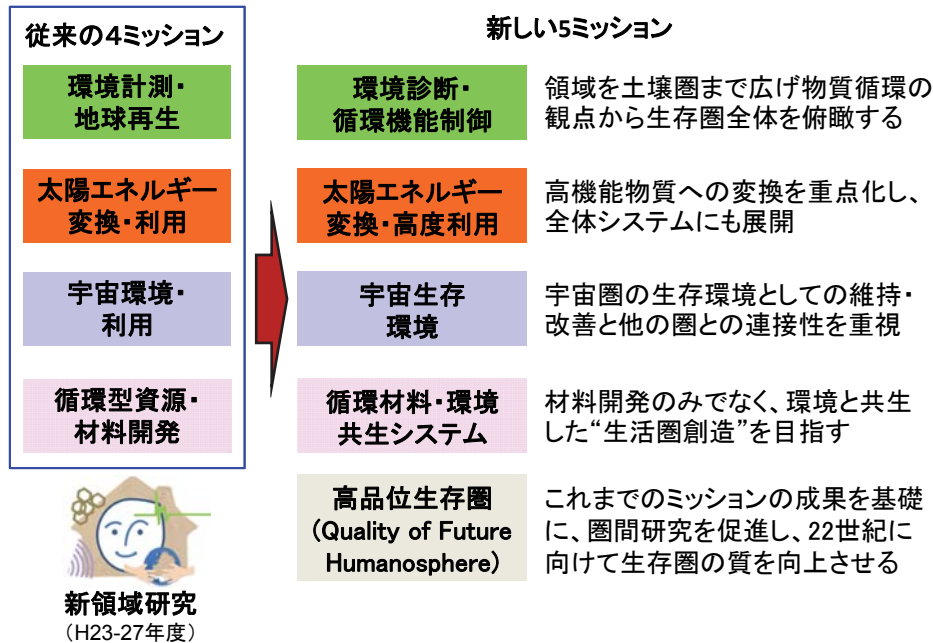


図 6-15：生存圏科学ミッションの再編

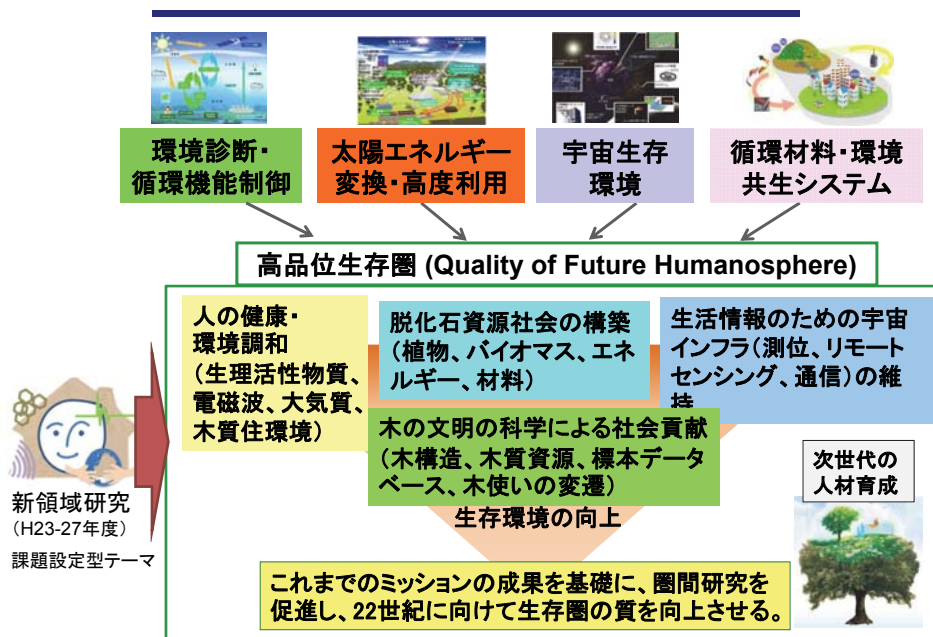


図 6-16：新ミッション「高品位生存圏」の研究課題と役割

生存圏研究所は、今後この新しいミッションを基軸として生存圏科学を発展させ、様々な専門家や市民との対話を通じて、我々の生きる世界を、生存圏として捉えることによる、ものの見方、考え方を提供し、相互に理解を深める努力を続けていく。現代社会においては、個々の組織、国や人種などのアイデンティティに依拠した思考をしがちであるが、宇宙、大気、森林、生物、生態系からの視点、自然の神秘とすばらしさといった生存圏の俯瞰的な視点と人類に迫る危機をわかりやすく伝え、いたずらに危機をあおることなく適切な提言と対話を進め、相互に議論する場をつくることで、生存圏科学を科学者だけのものではなく精神的にも文化的にも深化させていきたい。生存圏研究所は、これからも俯瞰的に生存圏を診断し、未来への持続的な豊かな環境を希求する「生存圏科学」の発展を目指していく。

[参考文献]

- Alamsyah, E.M. *et al.* (2006) 日本材料学会誌, **42**, 499-505
 Dufour, G. *et al.* (2009) *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 1647-1664
 Febriant, F. *et al.* (2010) *J. Biological Sciences*, **10**, 267-272
 Firmanti, A. *et al.* (2010) *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Utilization of Acacia mangium*, Oct. 21-22, Kyoto, Japan
 古川法子ら (2009) 木材保存 **35**, 260-264
 古野毅 (1997) 木材科学講座 12 保存・耐久性 (屋我嗣良他編) p.165
 Harada, M. *et al.* (2014) *Geochem. J.* (in press)
 Heckman D. S. *et al.* (2001) *Science* **293**, 1129-1134
 Horikawa, Y. *et al.* (2015) *J. Wood Science* (投稿中)
 石川統 (1985) 基礎生物学選書 9. 分子進化 裳華房
 金子啓明ら (1998) *MUSEUM* No.555, 3-54
 Kobayashi, K. (2014) The 9th Joint Seminar of China-Korea-Japan on Wood Quality and Utilization of Domestic Species, October 29-31, Akita, Japan.
 小松幸平 (2011) 生存圏研究 No.7, 103-115
 Lathière, J. *et al.* (2010) *Global Biogeochem. Cycles* **24**, GB1004, doi:10.1029/2009GB003548, 2010.
 Marumoto, S. *et al.* (2012) *J. Agric. Food Chem.* **60**, 9106-9011
 Maryoko, H. *et al.* (2012) *Open Journal of Civil Engineering*, **2**, 1-9
 松原恵理ら (2014) 第 64 回日本木材学会大会研究発表要旨集
 Matsubara, E. and Kawai, S. (2014) *Building and Environment* **72**, 125-130
 Matsuo, M. *et al.* (2011) *Holzforschung* **65**, 361-368
 Meiyun, L. *et al.* (2014) *Nature Geosci.* doi:10.1038/ngeo2066
 Mizuno, S. *et al.* (2010) *J. Archeol. Sci.* **37**, 2842-2845
 水野寿弥子ら (2011) 考古学と自然科学 **62**, 85-95
 村田功二ら, (2004) 木材学会誌 **50**, 294-300
 村田功二, 横尾国治 (2011) 木材工業 **66**, 246-251
 日本プラスチック工業連盟統計資料 http://www.jpif.gr.jp/5topics/conts/world3_c.htm
 Prihatmaji, Y.P. *et al.* (2011) *Wood Research Journal* **2**, 46-53
 セルロース学会編 (2000) セルロースの事典、朝倉書店
 Suzuki, H. (2013) 『アジア・アフリカ地域を理解するためのトライアングレーション・プロジェクト：平成 22~24 年度実施最終報告書』, (坂井紀公子・小川裕子編) 京都大学大学院アジア・アフリカ地域研究研究科, pp.28
 田鶴 (水野) 寿弥子ら (2013) 滋賀県立安土城考古博物館 **第 21 号** 71-94
 高橋けんしら (2012) 生存圏研究 **No.8**, 39-48
 竹迫利喜也ら (2013) (公社) 日本木材保存協会第 29 回年次大会論文集, 8-13
 山元誠司ら (2012) 生存圏研究 **No.8**, 49-54
 Yokoyama, M. *et al.* (2009) *COMPTES RENDUS PHYSIQUE* **10**, 601-611
 吉村 剛 (2011) 木材学会誌 **57** (6), 329-339

あとがき

平成 16 年に設立された生存圏研究所は今年創立 10 周年を迎えました。本書は、生存圏研究所が推進してきた「生存圏科学」の 10 年間の研究成果をとりまとめたものです。

4 つの圏（宇宙圏、大気圏、森林圏、生活圏）と 4 つのミッション（環境計測・地球再生、太陽エネルギー変換・利用、宇宙環境・利用、循環型資源・材料開発）が織りなす研究テーマは多岐にわたっています。それらはすべて、持続的発展が可能な生存圏を構築するための重要な基礎科学技術を振興して、その成果を社会に還元するという生存圏研究所の目標に向かって間違いなく取れんしています。

10 年という期間は、新しい学問分野の研究成果を眼に見える形で社会に還元するためにはまだまだ短いと思います。本書で紹介した研究成果を次の 10 年でどのように発展・深化させるのか。生存圏研究所に課せられた大きな使命です。今後も、「生存圏科学」に関する議論を続けながら、内容の改訂を随時行ってゆく予定です。

最後に、「生存圏フォーラム」初代会長の飯塚堯介先生、第 2 代会長の佐藤哲也先生、そして第 3 代会長の谷田貝光克先生には、原稿の隅々にまで目を通していただき、貴重なご助言をいただきました。改めてお礼申し上げます。

平成 27 年 2 月

編集担当一同

生存圏科学への招待 第二版

発行日 2015 年 2 月 15 日
編集兼発行者 京都大学 生存圏研究所
京都府宇治市五ヶ庄
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/>
組版兼印刷所 株式会社田中プリント
京都市下京区松原通麩屋町東入
ISBN 978-4-908540-00-4