

生存圈研究



No. 11

2015年



京都大学 生存圏研究所



「生存圏研究」は、京都大学生存圏研究所がその活動と生存圏の研究に関する報告を行うことを目的として年一回発行する紀要です。本第11号は、平成26年度の成果を基に発行します。生存圏の研究に関心を持たれる機関や研究者に広く行き渡るよう無料で配布しています。お問い合わせは当研究所までお寄せ下さい（〒611-0011宇治市五ヶ庄、電話番号0774-38-3346、E-mail: edit-j-journal@rish.kyoto-u.ac.jp）。

編集委員

| | | |
|-------|-------|-------|
| 阿部賢太郎 | 上地 恭子 | 岸本 芳昌 |
| 日下部利佳 | 杉山 淳司 | 反町 始 |
| 高橋けんし | 馬場 啓一 | 古本 淳一 |

目次

総説

| | |
|---|---------------|
| 電磁波がつくる大気環境、電磁波でさぐる地球環境 | 1 |
| | 津田 敏隆 |
| 新材料と伝統技術で安全安心な木材の建物をつくる | 9 |
| | 五十田 博 |
| ダイズの生育と根圏微生物 | 16 |
| | 杉山 暁史 |
| 害虫の目から見る生存圏 | 21 |
| | 柳川 綾 |
| IUGONETデータ解析システムを用いた地球大気環境の長期変動に関する研究 －地磁気日変化振幅に見られる電離圏・熱圏の長期変動－ | 27 |
| | 新堀 淳樹 |
| 温冷感に視覚情報が与える影響 | 36 |
| | 高橋 良香 |
| 植物バイオマス由来抗ウイルス活性物質の探索 | 42 |
| | 成田 亮, 李 瑞波 |
| 日本におけるナガシクイムシ科昆虫による住宅被害 (概要) | 48 |
| | Bong, Lee-Jin |
| グローバル電磁流体シミュレーションと THEMIS衛星観測を組み合わせたサブ ストームの研究 (概要) | 49 |
| | YAO, Yao |
| 大気エアロゾルの「老化」のメカニズムを探る | 50 |
| | 江波 進一 |

論文

| | |
|---|-----------------------------|
| 地形や地表環境が接地層内におけるオゾン消失に与える影響 －自動車を利用したトラバース計測の試み－ | 56 |
| | 高橋 けんし, 矢吹 正教 |
| 安政江戸台風(1856)の被害と当時の気象場推定 | 64 |
| | 坂崎 貴俊, 加納 靖之, 大邑 潤三, 服部 健太郎 |

資料

| | |
|----------------------------|-------|
| 特定網室におけるポプラ経年育成の環境設定 | 71 |
| | 馬場 啓一 |
| 生存圏科学の新領域開拓 | 75 |
| 研究業績 | 102 |

「電磁波がつくる大気環境、電磁波でさぐる地球環境」

Effects of solar radiation on the Earth's environment and radio-optical remote sensing techniques of the atmosphere

津田 敏隆*

Toshitaka Tsuda*

1. はじめに

私たちは人類の生存を支える領域を「生存圏」と捉え、これが「生活圏」、「森林圏」、「大気圏」および「宇宙圏」を中心に構成されると考えています。ここで、「圏」とは空間（場所）を指すだけでなく、そこに起こる様々な現象に加えて、それらに関する科学研究と技術開発とを含んでいます。これらを一体化した学問分野として「生存圏科学」を創成しようとしています。

21世紀社会は様々な問題を抱えていますが、生存圏研究所では特に環境、エネルギー、宇宙利用、資源・材料を喫緊の課題と考え、まずその現状を精確に調べて評価すること（診断）を基礎に、それらに対して具体的な解決策（治療）を提示することを目指しています。将来的に持続的発展可能な社会（Sustainable Humanosphere）を実現するために人類が選択すべきシナリオを示したいと考えています。

我々の生存環境である大気圏は主に太陽エネルギーによって生成・維持されています。太陽が放射する電磁波（電波と光）の影響を受け、地球大気は様々な時間・空間スケールの変動を示します。一方、大気環境を診断するために、電磁波が活用されています。つまり、大気環境が電磁波によってつくられ、同時に環境計測に電磁波が用いられるという、地球環境と電磁波とが相互に密接な関係を持っていることが分かります。本講演では太陽と地球の関係（太陽地球系結合過程）を説明し、さらに電磁波を用いた地上および人工衛星からの計測技術（リモートセンシング）を紹介します。

2. 生存圏における太陽の重要性

我々は「宇宙圏」として地球周辺宇宙および太陽を中心とする惑星系を研究対象にしています。地球外からのほとんどのエネルギー・物質の流入は太陽を源としています。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ます。700万年にわたる人類活動とその生存環境は、太陽エネルギーを直接あるいは間接的に享受することで維持されてきました。太陽活動は黒点数の変動で知られている11年周期を基本とし、さらに長期の変化を示し、その影響は地球の気候変動にも及ぶとされています。また、突発的な太陽面爆発および太陽からのプラズマの流れ（太陽風）により地球周辺宇宙の状況は大きく乱され、例えば、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通信、放送、測位、地球観測衛星が深刻な影響を受けることがあります。

太陽光は植物の生育に必須です。陸地面積の3割を占める森林圏において、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1兆8千億トンも蓄積されていて、埋蔵が確認されている石油

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所大気圏精測診断分野。
E-mail: tsuda@rishi.kyoto-u.ac.jp

資源の10倍以上と見積もられています。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(CO₂)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ています。また、落葉により土壌に養分を与え、さらに河川を通じて海へ栄養を供給して海洋の生態系にも影響しています。森林は土砂災害を防止し水源を供給する一方、文化をはぐくみ、健康増進機能も持っています。

大気圏は森林圏と隣接し、同時に宇宙圏の影響を受けています。気温の高度変化にしたがって大気圏はいくつかの層に分類されています。[注：下層から対流圏(～10 km)、成層圏(10～50 km)、中間圏(50～90 km)、熱圏(90 km～1,000 km)と呼ばれており、また成層圏と中間圏を合わせた領域を中層大気(10～100 km)ともいいます。]高度約100 km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、太陽光による光化学反応で生成される電離層およびオゾン層が生命体にとって有害な太陽紫外線を吸収・除去して地上の生命活動を保護しています。しかし、近年の産業活動増大により、人為的に放出される気体が温室効果を加速しており、またオゾン層破壊を引き起こしていることが問題となっています。

こういった現状に鑑み、大気圏の状態を精緻に把握し、それを基礎に将来予測をする研究が求められています。大気の流れや大気質(微量成分、塵など)をレーダーやライダーで代表される地上リモートセンシング、あるいは人工衛星でグローバル観測し、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ります。さらに、これらの観測で得られる新たな環境情報を整理したデータベースを構築し、それを高度利用することも重要です。

3. 電磁波を用いた環境計測

携帯電話をはじめとする通信、TV・ラジオ放送ならびに測位(GPS)などに広く電波が使われています。図1に示すように電波は周波数で識別されます。一方、光は波長で区別されます。可視光の波長はおよそ360～800 nmで、それより短い光は紫外線、長い方は赤外線と呼ばれます。電波と光をまとめて電磁波と呼びます。

物体の中にある荷電粒子が振動すると電場を作ります。これにより磁場振動が誘導され、電磁波が放射されます。実はすべての物体は電磁波を輻射していて、その波長分布は物体の温度に依存します。太陽(光球)の表面温度は約6000Kなので、太陽光は可視光(黄色)で最大になります。一方、宇宙空間から見た地球の平均気温は約255 Kで、赤外線を中心に放射しています。地球は太陽放射の可視光で加熱され、逆に地球全体から赤外線を放射して冷却することで熱収支がバランスしています。このバランスから求まる地球の等価温度が255 K(–18° C)なのです。しかし、地表気温は全球平均でおよそ15° Cとされています。実は、大気中の微量成分が地表からの赤外放射をいったん吸収し、地表に向けて再放射します。その結果、温室効果が起こり地表付近は上記のように、約30度も暖められています。現在、人工的に排出されるCO₂等の温室効果気体の増加により、保温効果が少し過剰になっていることが地球温暖化の原因です。しかし、もし温室効果がなくなったら地球は水の惑星になったことでしょうか。また、既に触れましたが、大気は太陽光に含まれる紫外線を吸収する働きを持ち(その結果、オゾン層等ができる)、紫外線が生命に危険を及ぼさないように保護する役割を果たしています。これらの例からも分かるように、電磁波と大気が相互作用することで快適な生存環境が作り出されています。

ところで、電磁波を情報通信に使う際、大気が伝搬路となります。一般に大気を通信路として扱う場合は、大気は電波に対して透明でなんの干渉もしないと仮定されています。しかし、詳しく見ると、電磁波と大気とは様々な相互作用を起こしています。

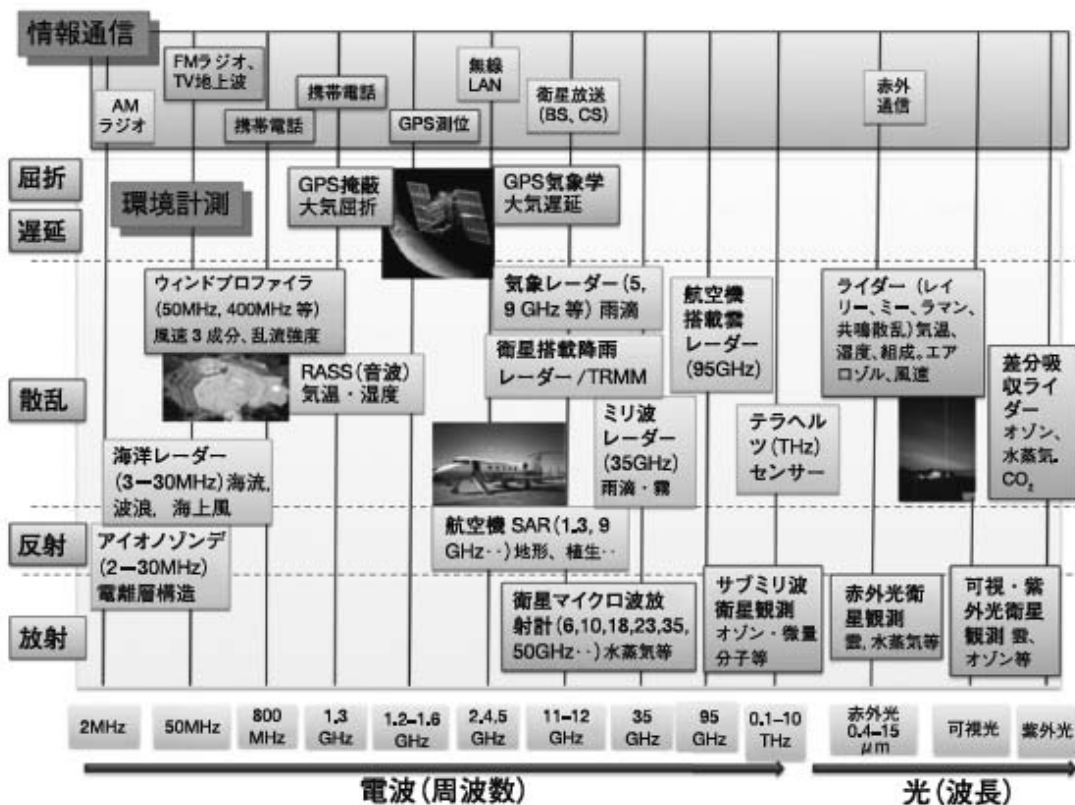


図1：情報通信および環境計測に用いられる電磁波（電波と光）と大気との相互作用

それらの物理現象をうまく活用すれば、大気の状態を計測することができます(石原、津田、2012)。これまでに開発されている主な大気リモートセンシング法について、電波周波数あるいは光波長について図1に例示しています。

まず、地上あるいは衛星搭載の装置により大気が放射する電磁波を受信すれば、気温や組成などの大気情報を得ることができます。これは自然界の電磁波を用いるため、受動的 (passive) 手法に分類されます。一方、人工的に電磁波を放射して大気を計測する場合は、能動的 (active) 手法と呼ばれます。電波が大気中で散乱・反射される現象を用いるレーダーが典型例です。京大・生存研では特に大型大気レーダーの開発で国際的に先駆的研究をしており、滋賀県の信楽にMUレーダー (Middle and Upper atmosphere radar) を1984年に建設したのに加え、2001年にインドネシアの西スマトラに赤道大気レーダー (EAR:



図2：様々な大気計測法

Equatorail Atmosphere Radar) を設置しています。これについて後節で詳しく説明します。

電磁波の伝搬速度は真空中では光速に等しくなることが知られています。しかし、大気中ではわずかに真空中より遅くなり、その速度比を屈折率と定義します。屈折率に高度勾配があると、電波は屈折率の大きい側に曲がる性質があり、地球大気の外にある衛星等から侵入する電波は地球に近づく方向にわずかに曲がります。これらの遅延あるいは屈曲により電波伝搬が真空中の状態からずれる効果はごくわずかなので、一般に通信・放送では問題にされません。しかし、GPS で代表される衛星測位では衛星から発射される電波の到達時間を元に宇宙規模での三角測量をしていて、1 mm の精度が要求されていることから、伝搬誤差が問題になっています。その誤差を評価して除去するうちに、誤差から有用な信号を取り出せることに気が付きました。つまり、GPS 電波が大気中で遅延や屈折することから、その原因となる大気状態（気温、湿度など）を計測する「GPS 気象学」が進展しています。測位にとって邪魔なノイズを大気信号と捉える、“One person’s noise is another’s signal “という理念が新発想の計測技術を生んだのです。

図2は地上および衛星からのリモートセンシング法および飛翔体（気球、航空機、ロケット）による直接観測を併用した地球大気の複合観測の概念図を示します。大気環境の長期的な変化、あるいは集中豪雨といった極端気象を理解し、現象の将来予測をするには精密かつ正確な計測を続けることが重要です。

4. 「太陽地球系結合過程」に関する研究プロジェクト

太陽地球結合過程の研究は、太陽から地球に流入するエネルギー、およびそれに対する地球環境の応答を解明することを目的としています。ICSU (International Council for Science : 国際科学会議) 傘下の SCOSTEP (Scientific Committee of Solar Terrestrial Physics : 太陽地球系物理学科学委員会) はこれまで地球惑星科学に関する多くの国際共同研究プロジェクトを過去 50 年以上にわたって実施してきました。最近では、2004~2013 年の 10 年にわたって行われた CAUSES: Climate and Weather of the Sun-Earth System 「太陽地球系の気候と天気」において太陽と地球の長期的（気候）および短期的（天気）な結合関係が主題でした。我が国は SCOSTEP のプロジェクトで中心メンバーとして当初から幾多のプロジェクトに参加し、特に地上からのリモートセンシング観測で貢献してきています。

地球大気の基本状態は太陽エネルギー入力に対するバランスで規定されています。しかし太陽活動には長期・短期の変動がある上に、自然界に内在する擾乱および人為起源の変動があり、それらへの応答は複雑で未解明です。太陽活動の変動と大気圏の応答過程を知り、太陽地球系の結合過程を解明し、統一システムとしての定量的な理解を深めることが重要です。

図3に示すように、太陽からのエネルギー入力は放射エネルギーと太陽風（高エネルギー粒子の流れ）から構成されます。前者は赤道域で最大であり後者の電磁エネルギーは磁力線を通じて極域に集中的に流入します。これらのプロセスを解明することを目指し、国内の関連コミュ

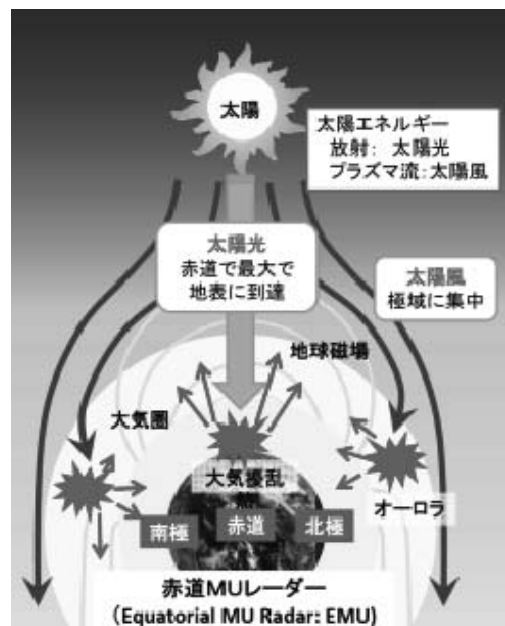


図3：太陽からのエネルギー流入過程

ニティにおける議論を重ねた結果、「①赤道大気」と「②極域現象」という特異点に大型レーダーを建設し、全球にわたる「③広域観測網」を整備し、衛星観測等との連携を踏まえて研究推進する大型研究プロジェクト「太陽地球結合系の研究基盤形成（研究代表者：津田敏隆）」が提案されました。以下に主要3課題の研究内容を概説します。

- ① 赤道大気： 太陽からの放射エネルギーは赤道域の地表を暖め活発な積雲対流を生み大気波動を発生させます。大気波動のエネルギーと運動量は姿を変えつつ電離圏まで運ばれ地球周辺環境を変動させます。赤道域の地表から放出される大気物質は、対流圏を循環しつつ積雲や巻雲の生成・発達に寄与し、対流圏界面を通過して噴出され中高緯度まで広く輸送されます。赤道域における複合観測によって、大気の高高度域に現れるエネルギー・物質フローを解明することが求められます。我々は地球上で最も大気擾乱現象が活発なインドネシアの総合観測拠点に最新式の大気レーダーである「赤道 MU レーダー (EMU: Equatorial MU Radar)」を設置し、地表付近の対流圏、中層大気、から電離圏（超高層大気）に至る高度領域に共通するエネルギー・物質の噴流・循環過程（赤道ファウンテン）を解明したいと考えています。
- ② 極域現象： 南極、北極は太陽を起源とする高エネルギー粒子や太陽風、電磁エネルギーが直接流入するユニークな領域です。プラズマ流の立体構造を高解像観測し、オーロラ微細構造やプラズマ-中性大気相互作用等の素過程を理解し、磁気圏最大のエネルギー解放現象であるサブストームをはじめとする重要現象の解明を目指します。国立極地研究所を中心に、北極域のスカンジナビア半島北部に大型レーダーシステム EISCAT_3D を6ヶ国の共同出資で建設することが提案されています。太陽風エネルギー流入により大きく変動する電離圏・磁気圏を高解像度で3次元観測し、極域の電離圏・中層大気へのエネルギー流入とその応答過程を解明します。
- ③ 広域観測網： アジアとアフリカの赤道域を中心に極域までつながる子午面観測網によりエネルギー・物質の経度方向の循環過程を研究します。さらに太陽および大気圏の衛星観測、数値モデリング、データベースを組み合わせ、地球規模でのグローバルなエネルギーと物質の流れを明らかにします。既に国内外の多くの研究機関が実施してきた地上観測データを統合したメタデータ交換システム（IUGONET: Inter-University Upper Atmosphere Global Observation Network <http://www.iugonet.org/>）の構築に2009～2014年に取り組んでおり、観測データを相互に有効利用し、学際的な視点で地球環境変化を研究する仕組みができています。

この大型研究プロジェクトを国内の研究機関が共同で推進しますが、①赤道は京大・生存研、②は

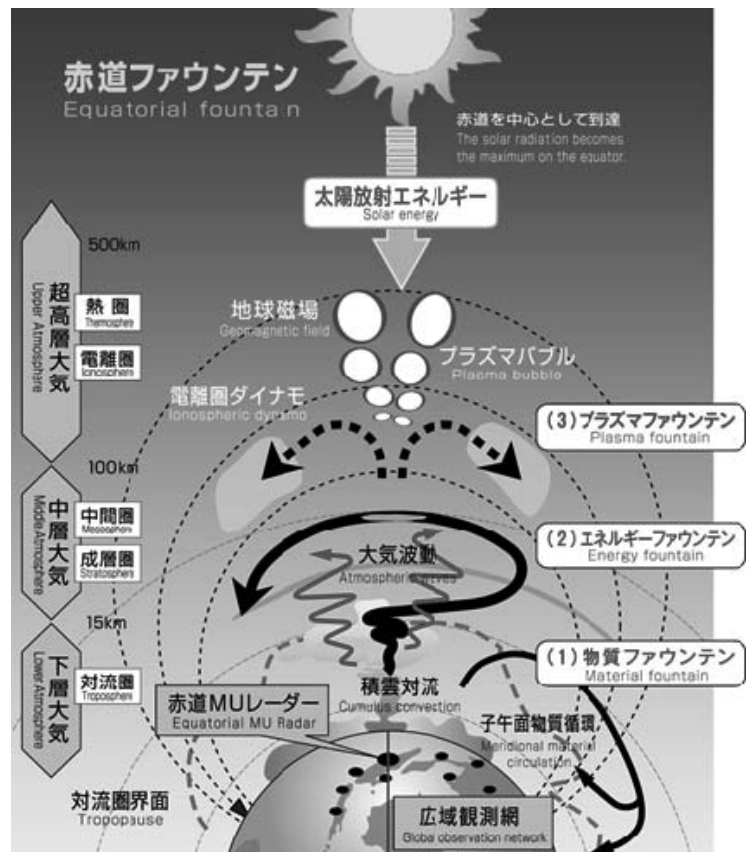


図4：「赤道ファウンテン」の研究課題

極地研が、また③では名大・太陽地球環境研究所 (STE 研)、九大・国際宇宙天気科学・教育センター (ICSWSE)、京大・生存研をはじめ多くの大学・研究機関がフィールド観測を担当します。

我々のプロジェクトは日本学術会議が審査した「大型研究計画のマスタープラン 2014」における 29 件の重点課題に選ばれました。さらに文科省が審議会における議論をもとに 10 件を選定した「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 (ロードマップ 2014)」に採択されました。今後、速やかに研究計画が具体化することを期待しています。次に京大・生存研が主導する赤道大気研究について詳しく説明します。

5. 赤道ファウンテン

太陽放射は赤道で最大になり、南北30度以内の緯度域で太陽エネルギーのほぼ2/3を受け取っています。強い太陽加熱により大気擾乱 (積雲対流) が活発に起こっています。なかでもインドネシアを中心にインド洋から西太平洋に広がる領域は海洋と諸島が混在する「海洋大陸 (maritime continent)」と呼ばれ、世界中でも最も気象擾乱が激しく、かつその変動が大きいことが知られています (Tsuda, 2014)。

先進国が集中している中緯度域の地表付近で人工的に排出された気体を含む大気はいったん赤道域に集められ、赤道域の対流圏界面を通過してのみ成層圏に吹き上げられます。中層大気に持ち込まれた大気成分は、緯度方向の子午面循環によって全球に広く輸送されます。

赤道域の対流圏では、積雲や巻雲が生成され発達します。特に、積雲対流と呼ばれる大気擾乱が活発に起こり、これがさらに様々な大気波動を励起します。大気波動は中層大気の特異な長周期・不規則変動を駆動しています。さらに、電離圏では中性風によるダイナモ電場が地球磁場と相互作用してプラズマを噴き上げています。

赤道域で特徴的な物質・エネルギーフローを「赤道ファウンテン」として総括的に捉え、その変動が特に激しい熱帯アジア・西太平洋域で研究を進めます。このため、インドネシアの西スマトラで運用している赤道大気レーダーに各種のリモートセンシング装置を結集して拠点観測を行います。同時に、広域ネットワーク観測、衛星データ、数値モデルを駆使して、赤道ファウンテンの動態を解明し、全球に及ぶ大気変動を引き起こすメカニズムを定量的に理解することを目指しています。

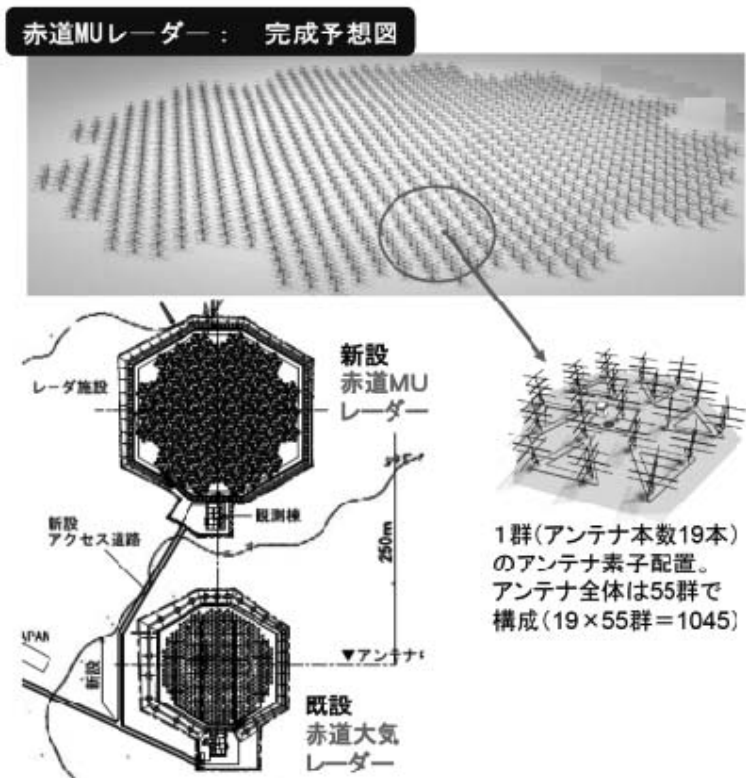


図5：赤道MUレーダーの完成予想図

6. 赤道MUレーダー

赤道大気は地球環境全体に大きな影響を与えていることから、風速変動をはじめとする大気状態の観測データが重要で、生存研がインドネシアで運用している赤道大気レーダーを中心とした総合観測に期待が集まっています。さらに、大気質に影響を与える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ります。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す。我々は赤道大気的重要性を鑑み、1980年代後半からインドネシアの政府研究機関や大学等との共同研究を続けてきています。インドネシアの西スマトラに2001年に赤道大気レーダー（EAR）を建設し、多くの光・電波リモートセンシング装置を持ち込んで、総合観測所を構築しました。EARを中心に赤道大気集中観測計画「赤道大気上下結合 CPEA: Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere（代表者：深尾昌一郎）」を2001～2006年に実施し国際的にも注目される研究成果をあげました（Fukao, 2006, 2009）。さらに、連続観測を行い2011年には観測所10周年記念行事を、インドネシア科学技術大臣、在インドネシア公使、文科省学術機関課長をはじめ多くの来賓のご出席を得て盛大にジャカルタで開きました。15年近くに及ぶ実績をもとに、次期計画としてEARの10倍の測定感度を持ち、より高機能の大型大気レーダー「赤道MUレーダー（EMU）」を建設するプロジェクトを推進しています。EMUでは、直径約163mの大型アレイアンテナを構成する1045本の個々の八木アンテナに半導体化した送受信モジュールを取付けます。EMUはフェーズドアレイを用いたイメージング観測に特徴を有していて、電波リモートセンシング技術や超高速信号処理技術の点で電子情報通信工学への貢献が期待できます。また、この設備は全国・国際共同利用に供されますので、インドネシアのみならずアジア諸国および欧米の研究者が集う研究拠点になることは間違いありません。EMUにより、既に述べた「赤道ファウンテン」の解明を画期的に推進することができると期待されています。

さらに副次効果もあります。地球周辺の宇宙空間には多数の人工衛星が飛び、有人宇宙活動も常時行われていますが、この計画の成果は宇宙天気予測の精度向上に貢献できるので、衛星システムの安全・安心な運用に役立ちます。さらに衛星測位システムや衛星通信・放送に対する太陽活動の影響の回避にも貢献できます。大気観測レーダーによる風速データの活用によって天気予報の精度が向上すると期待されます。赤道MUレーダー（EMU）や広域地上観測網による共同研究や国際スクールの実施などを通じて、アジアやアフリカ地域等の発展途上国の若手研究者を育成でき、これは科学技術を通じた平和外交ともなるでしょう。

7. むすび

持続的発展が可能な社会である生存圏（Sustainable Humanosphere）を構築するには、21世紀に顕在化した多くの課題を科学的に理解し、その解決策として先端技術を基礎とした具体的な方策を示すことが求められています。生存研では喫緊の課題として「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ミッションを掲げ、電波科学、木質材料科学、地球惑星科学、応用生命科学などを基軸とした学際的研究を推進しています。これらの研究に



図6：生存圏フォーラムのロゴ

大学院生や博士研究員も参加させ、新たなパラダイムを理解した若手人材の育成にも配慮しています。

4ミッションを中核とした生存圏科学の進展により、今後千年にわたり人類が安寧な生活を過ごし、同時に調和のとれた産業発展を進められると期待しています。我々の目標は、その道標を科学的に示すことだと考えています。文理、理工にまたがる多岐にわたる学問分野を糾合して生存圏科学を創成しようとしています。このような幅広い研究分野は単一の学協会では対応できないことから、一般市民、産業界も含めて広く議論をする場として「生存圏フォーラム」を組織しています。是非皆様にも会員になって頂き、情報・意見交換の議論に0参加して頂きますようお願い致します。

参考文献

- 1) 石原正仁、津田敏隆, 「最先端の気象観測」, シリーズ新しい気象技術と気象学第 6 巻, 東京堂出版, ISBN : 9784490207613, 2012 年 10 月.
- 2) Fukao, S., Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA): A Project Overview, *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol. 84A, pp. 1-18, 2006,
- 3) Fukao S. (ed.), Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere, special issue, *Earth, Planets and Space*, vol 61, pp 383-552, 2009.
- 4) Tsuda, T., Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation, *Proc. Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences*, Vol. 90, No. 1, pp. 12-27, 2014

新材料と伝統技術で安全安心な木材の建物をつくる

Safety and security of timber-based construction with new materials and technologies

五十田 博*

Hiroshi Isoda*

1. はじめに

地球環境の保護が叫ばれる昨今、建築材料も再利用、再生を繰り返すことが重要となる。木材は利用、植樹、再利用、そして材料を小割にして木質材料として再生しての利用など、環境負荷の少ない材料として知られている。鉄は原料である鉄鉱石が豊富にあり、再利用、電炉鋼としての再生をはかっている。コンクリートもフライアッシュなどの再生材料などによって再利用を図る。このように材料の循環はいずれも可能となっている。しかし、植樹、利用のサイクルによって資源を無限に供給可能な木材と、元資源が限られている鉄やコンクリートでは決定的に異なる。木材の循環サイクルは図1のように森林・林業白書などにも示されている。

平成 22 年には「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が成立し、建築分野での木材の利用促進が叫ばれている。これは前述した資源、材料の循環が可能な木材を有効利用することによって地球環境の保護に資するという目的に加え、利用可能な木材が多く、山に木が余った状態にあることも一因である。この状態は木を間引いて、山を健康な状態に保つことや、土砂災害を引き起こさないように森林を整備するという観点からも適切ではない。といったように、さまざまな観点・理由により、現在木材の利用促進が社会的に喫緊な課題となっている。

本資料では木材という材料の特徴をまず示し、その後、これまでの建築分野での木材の利用やあらたな材料によるこれからの展開について述べていくことにしたい。



図1 木材利用のサイクル 森林・林業白書¹⁾

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

2. 木材の特性と他材料との比較

建築物を構成する材料には、木材に加え、鉄、コンクリートなどがある。そのほかにアルミニウム、ガラス、紙など特殊なものもあるが、一般的に木材、鉄、コンクリートが主たる構造材料である。「日本は木の文化、欧州は石の文化」といわれるように、木材は我々日本人にとってもっとも身近な建築用材として広く使用されてきた。燃える、腐るなどの欠点もあるが、重さの割には強度も高く、乾燥状態で使えば長期間の使用にも耐えることは7世紀後半の建物といわれる法隆寺がいまも建ち続ける、といった例を出すまでもなく、よく知られているところである。一方、鉄は産業革命以後、橋や塔などに使われはじめ、現在は大規模建築物、高層建築物に用いられている。錆びることや製造当初、強度は高いが“もろい”などの欠点があるとされたが、炭素含有量の少ない「鋼」（以下、鋼材と呼ぶ）がつくられるようになるとそれらの欠点も克服された。強さは木材の10倍程度あり、優れた構造材料である。このことは割り箸が人力で容易に曲げ壊すことができるのに対し、同寸法の鉄になると曲げ壊すのが容易でないことから想像が可能と思われる。一方、コンクリートは明治以降の欧米列強諸国と並ぶインフラ整備のためにポルトランドセメントの輸入が始まりであり、港湾、ダム、構築、そして、現代では中層建築から大規模な構造の建築物まで広く用いられている。コンクリートとはセメントと水と砂と砂利などを混合した材料で、耐久性、耐火性、耐熱性などに優れ、圧縮したときの強さは木材と同じ程度のものから3~5倍程度までさまざまである。ただし、引っ張ったときの強さは圧縮時の1/10程度に過ぎず、引っ張りに優れた鉄と組み合わせる鉄筋コンクリートとして構造物には使用される。このように主たる建築用の構造材料にはそれぞれに長所短所があり、短所については欠点を克服すべく日々努力が重ねられている。

さて、もう少し強さなどの建物の安全性や居住性にかかわる必要な性能、構造性能を比較していくことにしたい。ただ、木材とひとことでいっても、スギ、ヒノキ、マツといったように同じではなく、構造性能も異なる。鋼材も材種により強さは異なり、コンクリートも混合するセメント水や砂や砂利の割合により強さが違うが、ここでは一般的な材料として比較していく。木材の強さを1 (30N/mm²) とすると、鋼は13 (400N/mm²)、コンクリート0.8 (24N/mm²) 程度である。この強さは、建物が倒壊したり破壊したりしないように作るために必要な性能であるが、変形が大きくなって壊れないまでも損傷が出たりしないようにはかたさ、専門用語では剛性が必要である。かたさの比は木材1 (10kN/mm²) に対し、鋼24 (24kN/mm²)、コンクリート2.1 (21kN/mm²) である。もう一つ比較しておきたい材料の指標が比重である。比重は水を1.0とした時の重さを表す指標というのはなじみのあるところであるが、木材は0.5、鋼は7.8、コンクリートが2.3程度である。これは木材が水に浮いて、鋼やコンクリートは沈むことから比較的容易に想像ができる。ここで、それぞれの材料をどんどん大きくする、あるいは長くして、壊れないままどこまで大きくできるか、あるいは長くできるかを考える。たとえば橋をどんどん長くしていくという具合である。この性能は強さを比重で割った比強度と呼ばれる指標を比較すればよい。計算の結果、木材60N/mm²、鋼材51N/mm²、コンクリート10N/mm²となる。強さでは鋼材に大きく引けをとる木材であるが、比強度にすると鋼材よりも優れた性能を示すことになる。また、地震の時は建物に加速度が作用するが、どの程度の力が建物に作用するかは、その建物の重量に加速度を乗じて計算ができる。つまり、重量が軽いということは、地震の時に作用する外力が小さいということである。絶対値として性能が低い木材であるが、その性能を軽さによって克服しているともいえる。しかし、ここまでの議論は素材だけであり、建物の中に本棚、家具といった重量物が別途積載され、その重量が大きくなるような場合には、強さの絶対値が重要な因子となる。このように比較的軽いものしか乗らず、面積もあまり大きくないような場合には木造が適しているのだとか、ケースバイケースで材料の選択がされる。また、強度やかたさが足りなければその断面を大きくすればいいという考え方もある。例えば、鋼材がいくら強いとはいえ、針金程度の断面であれば人間のちからで曲がってしまう。木材も同様に割り箸を折ることはできるが、割り箸を何本も束ねれば割れにくくなる。このように性能を確保するためには断面を増せばよく、この辺は設計次第である。

さて、製材された木材をそのまま建築用材として利用していた時代は、部材の長さや断面の大きさは、樹木の長さ大きさに依存した。さらに、たとえ職人の手による高度な加工技術によって組み上げたとしても材料強度以上につなぎの部分である接合を構成することは難しいため、その結果として、おのずと利用できる建築物の大きさにも限界があった。ゆえに、主たる材料の供給先を小規模な住宅として、木材の利用は発展をしてきた。そのような状況下であっても、1950年に建物の規模や材料などを制限した建物の法律、つまり建築基準法、が整備される以前は、社寺建築や、書店、記念館などの比較的大規模な木造建築も建てられていた。近年では木材を接着して大きな材とした、図2に示すような集成材、LVLなど、集成板（集成パネル）、直交集成板（クロスラミネティドティンバー、以下CLT）によって大規模な建築物が建てられる環境となった。このことについては後ほど詳しく述べる。

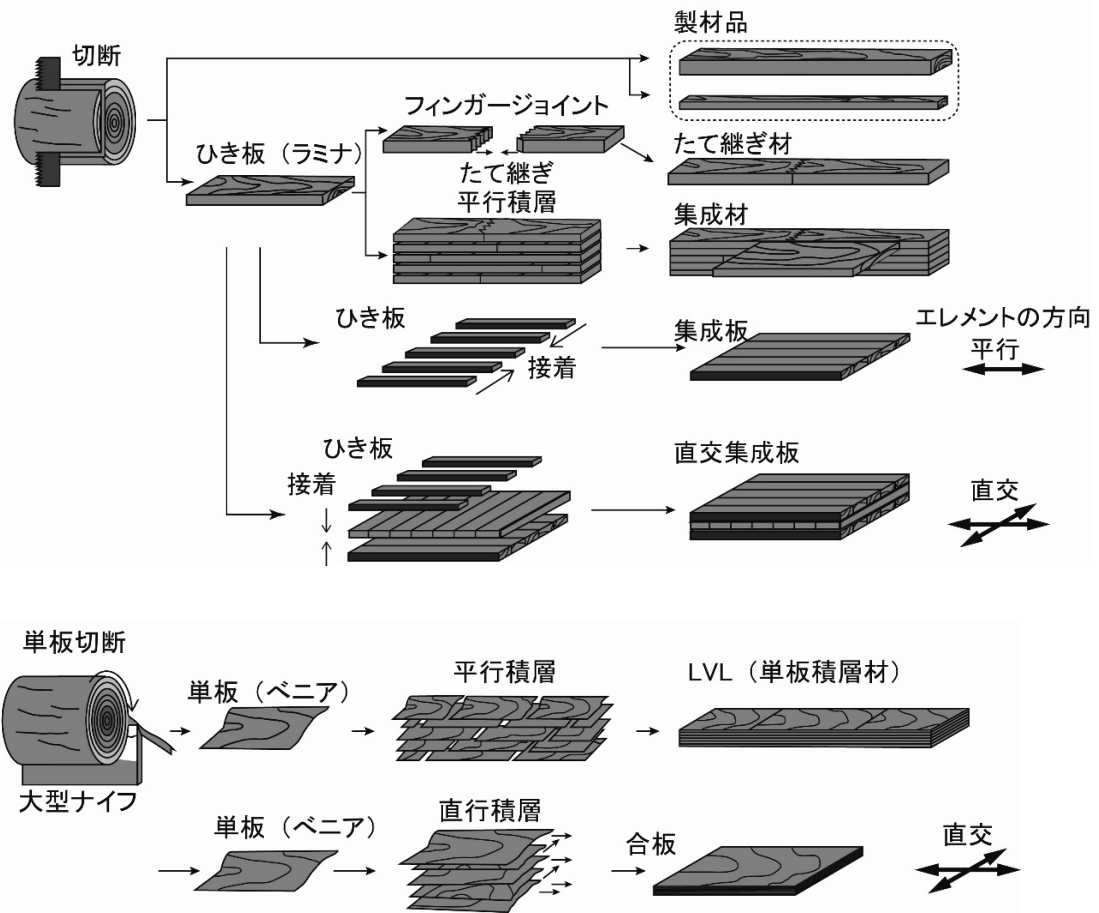


図2 さまざまな木材をベースとする材料²⁾

3. 建築物に求められる性能と木材でつくる建物

建築物に求められる性能としては、遮音性や断熱・遮熱性、遮蔽性のほかに、日常的な振動に対する機能性や地震や台風に対する安全性がある。これまで材料レベルで説明してきたが、ここでは木造建築について、それぞれの性能をみていくことにしたい。

遮音性は上下の階と、部屋と部屋の間の界壁部分での音の伝搬が考えられる。集合住宅では特に遮音性に気を配らなければならないところである。上下階の音について考えると人間などが飛び跳ねた

り、歩いたりするときには生じる重量床衝撃音と、テーブルの上などにあるものが床に落ちた際に生じる軽量床衝撃音にわけて評価がされている。木造の床は比較的軽いため、重量床衝撃音に対しての性能が低く、今後木造でも集合住宅への展開を考えると重量床衝撃音に対しての対策が必要である。場合によっては、柱は木材だが、床などの仕上げにコンクリートを使うということもあり得る。遮熱性については木材自体優れた断熱性能を持つものであるが、過剰な期待は禁物であり、さらに材同士の接合に注意を払わないと隙間風によって断熱性が損なわれる危険がある。先ほど述べたように木材は他の主要な構造材料に比べると剛性が小さく変形が大きくなりがちである。よって、日常的な振動についても十分な注意が必要である。また、重量物を長期間載せたままにしておくとも荷重が増えずとも変形が増加する。これはクリープ現象と呼ばれるもので、多かれ少なかれすべての材料において起こる現象であるが、木材では特に注意を要する。設計時に変形を十分に配慮したとしてもクレームにつながることであり、音の問題も含め床に関しては課題がいくつか残されている。また、木造住宅はこれまで度重なる大地震によって、多くが倒壊したこともあり、地震に弱いと思われていた。しかし、現在ではすでにその問題は解決しており、他の構造と耐震性能の差はなくなっている。台風に対する性能も屋根瓦などの飛散の問題も含め、設計行為により安全性が確保できる環境が整っている。

4. 伝統的な木造建物の安全性

伝統的な木造建築のなかには、歴史的価値、文化的価値のあるもの、さらに地域の象徴的な施設もある。地域遺産の保存や景観継承という観点から未来に残そうとはするものの、耐震性能が現代の評価体系によって不足するような場合には、文化的な価値を損なわないための耐震補強にかなりの困難が伴う場合がある。また、地域の学校などでは親しみや郷愁といった観点で保存運動がおこるが、居住性、機能性などにおいて質的な向上も必要なため、老朽化がひどく、大規模な改修となる場合には、建て替えを余儀なくされることもある。伝統的な建物の特徴、技法といえば、大きな断面の柱やはり、土壁や接着剤が使われていない板壁、金物を極力使わない木組の接合、などである。過去から使われてきた技法であり、大地震などを経験し、その方法も古来の技法と比べれば、変化してきているものと予想される。このような技術を単に強さやかたさの観点から現在の技術と比較するとやや劣るが、前述したように量を増すことにより、断面を増やすことにより、構造用合板などの現代的なものと同様強さやかたさにおいて同等の性能とすることもできる。ただし、量を増やすという意味は建物の中に壁が多くなることを、さらには柱の断面を増やすことになり、建物の居住性や機能性に支障をきたす場合もある。また、地震に耐える伝統的に継承されている技術のひとつに、建物を地盤とは固く結合せず、滑ることを許したり、部分的に浮き上がらせたりする技術がある(図3)。これらの技術は現代において免震構造やロッキング構造と呼ばれるものに活かされ、大地震時にも大きな損傷をしないよう設計が可能である。しかしながら、伝統的な技術のままでは現在の設計には活かしきれないこともある。一例をあげよう、図4は3階建ての建物を地盤の揺れを再現できる震動台に乗せ実験をした結果である。左は建築基準法を守って建てた建物、右は接合部の浮き上がりを許容した建物である。左は建築基準法で想定している大地震に対して、1.8倍の入力をした際に倒壊した。同じ地震で右は建物が浮き上がって倒壊を免れた。1.8倍で倒壊することはその後の計算によってその挙動を追跡できるが、浮き上がる方についてはどこがどのようにどの程度浮き上がるかの計算が極めて難しいことがわかった。挙動を追跡できることは技術であるが、挙動を追跡できない以上、浮き上がる構造はなりゆきや結果論となる。なりゆきに人命を任せることは難しく現在では設計できる技術を選択せざるを得ない。そこで、滑らせることを前提に、あるいは浮き上がらせることを前提に設計するのが免震構造やロッキング構造である。



図3 すべりと浮き上がり

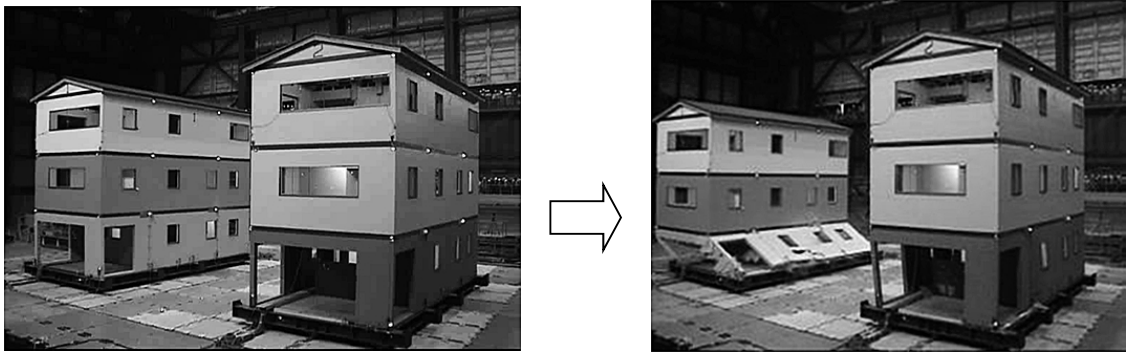


図4 3階建て震動台実験 倒壊現象（右が浮き上がりを許す建物）³⁾

5. これからの木造建築

今後の木造建築の新たな可能性として、2000年に建築基準法が改正されたことによって実現が可能となった4階建て以上の建築物の更なる発展や、最近新たに開発がなされている集成パネルやCLTなどを用いた構造、さらには大規模木造で耐火危険性を最小限に抑え、かつ開放的な木造建築を実現するための他の構造との併用構造がある。それらの現状と今後の展望を以下に示しておく。

<耐火木造>

2000年建築基準法の改正により、木材を主要構造材として用いた構造であっても火に強い耐火部材とすれば4階建て以上の建築物を建てられるようになった。この改正を背景に、木材を使った耐火部材の開発が盛んにおこなわれている。現在までに開発がされている木材を用いた耐火部材は大きく2つに区分され、「被覆型」と「燃えどまり型」である。「被覆型」は、燃えないせっこうボードやコンクリートの版などで木材を被覆し、木材への着火を避けたものである。「燃えどまり型」は、まだ学術用語としてはなじみのないもので最近新たに開発された技術である。木材は可燃物であり着火後無限時間放置すると燃え尽きる。しかし、「燃えどまり型」では木材の内部に燃えどまり層と称する燃焼をしにくい層をつくる、あるいは木材だけでは無限時間放置すると燃え尽きることで、こもった熱を放出することにより木材の燃焼を留める、のである。最初に開発された「燃えどまり型」の耐火部材は、木材にHの形をした鋼材を内蔵したものであった。同じような組み合わせで作った柱を燃やした後の状

況を示したものが図5で木材が燃え尽きることなく、途中で燃焼が停止していることがみてとれる。最近では、セメントと水を混ぜたモルタルを木材内部に配した部材が開発されている。鋼材を内蔵したような部材では、耐火上必要な鋼材を、構造の強さやかたさにも活かす方法によって、より低コストとした部材の開発が期待されている。図6は耐火実験により耐火性能を確認して建てることのできた建物の一例である。



図5 耐火木造柱の耐火実験⁴⁾

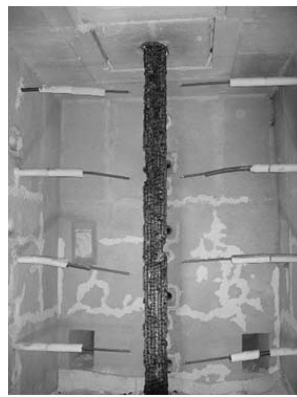


図6 耐火木造の例

<CLTなどのパネル>

38mm×89mm の材料によって構成される枠組壁工法やひき板と呼ばれる 30mm 厚程度の集成材に使われていた比較的小さな材料を接着することにより一体の大きな版、パネルとして用いる構造が開発されている。ヨーロッパではすでにこのようなパネルを用いた9階建ての集合住宅が実現した。カナダなどでも15階建てといったこれまでの木造では考えられないような構造のスタディがおこなわれている。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、さらに比較的抵抗力が小さくて済むパネル内部に低い強さの材を利用できるなど、木材の有効利用が図れる点である。また、一体の版、パネルであるがゆえに、これまで柱とかはりといった線材で抵抗していた要素が面で抵抗でき、高性能な部材が作れるところにも利点がある。例えば、床として利用すれば前述したとおり中央部は比較的低強度材で構成でき、しかし2次元的な広がりを持った版であるため、床版としての性能の確保が可能となる。壁として用いれば高強度の壁の構成が可能である。このようなパネル材は木造のパネル構造としてだけではなく、鉄筋コンクリート造や鉄骨造の壁や床版としての利用の展開も今後十分考えられる。

<木造と他の構造との併用構造>

下の階を鉄筋コンクリート造として上の階を木造とした例は数多い。小規模な例では積雪地域の住宅である。これを一般の建築物にまで拡大した例が最近いくつか建てられ始めている。そして、最近になって3,000㎡まで、つまり1階を鉄筋コンクリート造として1,500㎡、2階を木造として1,500㎡の建築物の設計を容易にするような環境が整い、今後建築数が増えていくことも予想される。この建築物の利点は、遮音性に難はあるが軽い木造を上階に使うことにより音の問題をクリアしたうえで地震に対する安全性を上げるものである。海外でもこの事例は多く、米国西海岸地域では大半の木造のアパートがこの形式といっても過言でないほど、普及している。それらの建物の地震時の安全性を確認するために日本で実施した7階建ての実験の写真を図7に示す。このような上の階と下の階の構造材

料が異な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同じ階で併用した平面的混構造も今後開発が期待されている。図8はその例を示したものである。木造は鉛直方向に生じる荷重を主に負担し地震力は鉄筋コンクリート構造によっている。その結果として木造の壁は不要で、柱断面も小さくでき、開放的で魅力的な木造空間が実現されている。この地震力の伝達を可能にするためにはかたたくて強い床と、床と鉄筋コンクリートの接合が要となる。実際にどの程度の床や接合が必要になるかを、現在ケースバイケースで事例を重ねている段階である。今後一般の設計者でも容易に安全な建築物を設計できるような方法の確立が期待される。



図7 7階建ての震動台実験⁵⁾



図8 平面的混構造の⁶⁾
(手前が木造で奥が鉄筋コンクリート造)

6. おわりに

木造住宅は大工棟梁の手によるいわば経験工学に基づいて発展を遂げてきた。新しい材料であるCLTや集成材などを用いた建築物は、性能本位の設計体系に基づいて建てる。これは木造以外の鋼材やコンクリートの構造と同じである。1995年の阪神・淡路大震災以降、住宅であっても経験や勘といった建て方ではなく、大地震時に必要な性能を実験データに裏付けされた抵抗能力によって確保した性能本位の建物が建てられるようになりつつある。外見上の流行とは別に、設計によって中身も変化し、日々進化、新たな展開がなされている。伝統的な建物であってもよいものを活かし、現代に見合った性能を確保するための変化が求められている。このような展開に対して対応可能な技術者集団も今後必要となろう。

参考文献

- 1) 森林・林業白書平成25年度版第1部 第I章 第3節 今後の課題 (1)
http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo_h/all/a12.html
- 2) 国産材・木の家づくりセミナー資料(木材・材料編)、2010を参考に編集、追加
- 3) 河合直人、榎本敬大、五十田博ほか：木造3階建て軸組構法住宅の設計法と震動台実験 その1～14；日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1分冊、229～254、2010年
- 4) 日本集成材工業協同組合提供
- 5) John W. Van De Lindt, Hiroshi Isoda and et al. : Experimental Seismic Response of a Full-Scale Six-Story Light-Frame Wood Building; Journal of Structural Engineering ASCE, (Volume 136, Issue 10), 1262-1272, 2010.
- 6) バターリビング つくば建築研究試験センター の案内より

ダイズの生育と根圏微生物

Soybean growth and its rhizosphere microbes.

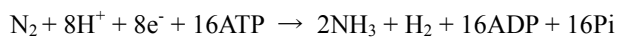
杉山 暁史*

Akifumi Sugiyama*

1. 植物の生育に必要な元素

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が、その生育には17種類の元素が必要である。植物が生長し種子（次世代）を残すためになくてはならない元素のことを必須元素と呼び、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がある。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壤中から根から吸収する。特に窒素は植物の生育にとって最も重要かつ不足しやすい元素で、農業でも窒素肥料が大量に使われている。まず、この窒素が生存圏をどのように循環しているのかについて紹介する（図1）¹⁾。

大気の約80%は窒素（N₂）だが、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（NH₄⁺）や硝酸イオン（NO₃⁻）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する。地球上にはこの安定なN₂をアンモニアに変換して生育できる微生物も存在する。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次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有機物に変換されて利用されるが、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NH₄⁺となり、さらに硝化作用を持つ微生物によってNO₂⁻、NO₃⁻と変換される。多くの植物はこのNO₃⁻を根から吸収して生長している。このように大気中の窒素を酵素（ニトロゲナーゼ）の力でアンモニアに変換することを生物学的窒素固定という。従来、植物が利用する窒素は、この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。

2. 農業のはじまり

地球上に誕生した私たちの祖先は、自然の中に生育する植物を採集し動物を狩猟するという生活様式だったが、約1万年前の新石器時代に農耕が始まったと考えられている。鍬や鋤の原型のような道具を使って土を耕し、栽培しようとする植物の集団に淘汰を加えていった²⁾。現在では様々な農業機械が開発され、有用な形質（収量、食味、耐性など）を持った作物の品種を大規模に栽培するようになった。農業の発展で最も重要な出来事の一つとして、化学肥料の開発が挙げられる。今から200年近く前、19世紀の初頭では、植物は土の中の腐植（動植物の遺体や排泄物が、土壌中の微生物によって分解されてできた有機化合物の総称）を吸収して生長するという腐植栄養説が受け入れられており、堆肥が広く用いられていた。しかし、植物は窒素やリン、カリウムなどの無機元素を吸収して生長す

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

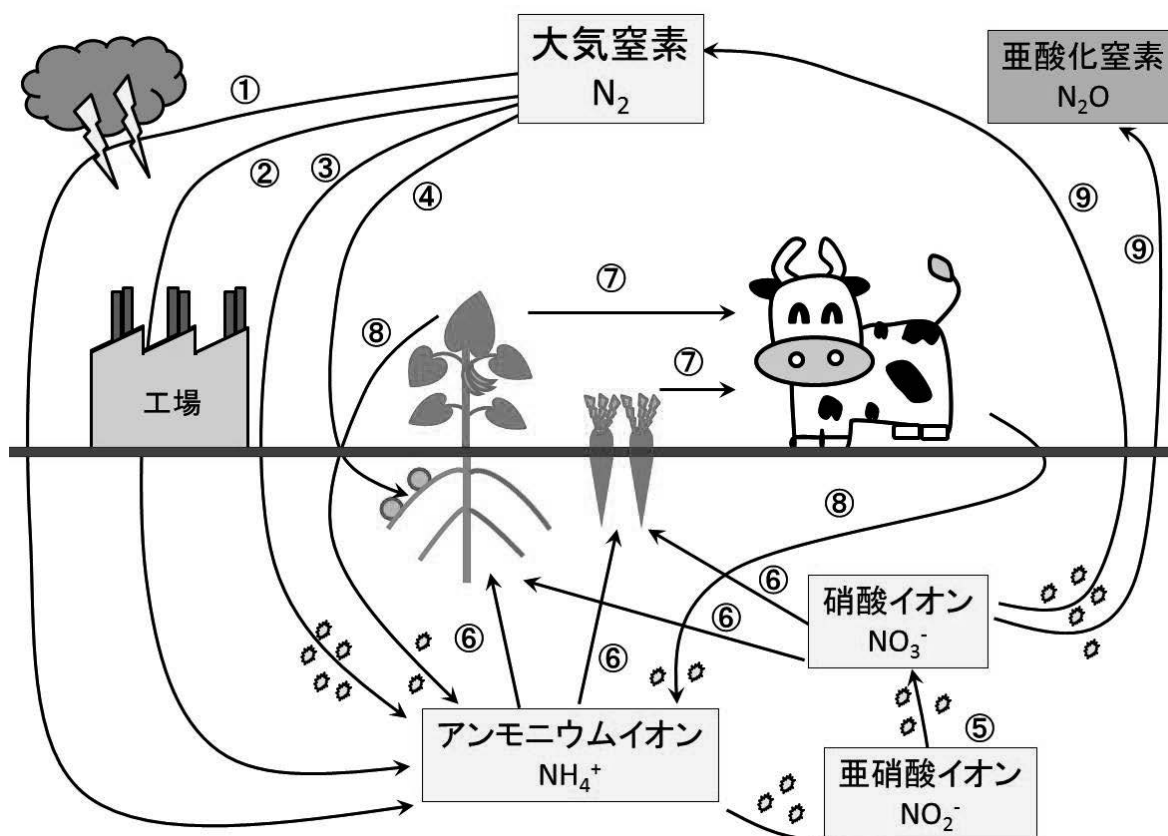
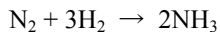


図1 生存圏における窒素循環

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。

るといふ植物無機栄養説が提唱され始め、1860年にはこの説が証明された。無機元素が作物の肥料として用いられると分かったので、まずは鉱物（グアノやチリ硝石）が肥料として用いられた。さらに、約100年前には、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・ボッシュ法が發明された。ハーバー・ボッシュ法では、以下の反応でアンモニアが合成さる。



工業的にアンモニアを合成できるようになったことにより、鉱物や堆肥とことなり大気中の窒素から肥料が供給されるようになった。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）の条件で反応させるため、多く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と言われている。

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なものであった。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温室効果ガスである亜酸化窒素の増加を引き起こすという問題もある。21世紀中には増え続ける人口を賄うための食糧増産やバイオマス燃料（バイオエタノール）の生産のため、今後ますます大量の窒素肥料が必要となると考えられている。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極めて重要になってきている。

3. ダイズと根粒菌

世界的にみると、ダイズはトウモロコシ、イネ、小麦に次いで4番目に多く生産されている作物である。日本では豆腐、醤油、味噌など私たちの食卓に欠かせない大豆製品を思い浮かべるが、世界中で生産されるダイズの約90%は油の原料に使われており、さらにその絞りかすは脱脂大豆として家畜の飼料として利用されている。乾燥したダイズの40%はタンパク質で（白米は5%）、「畑の肉」とも呼ばれているが、ビタミンEやサポニン、イソフラボンなどの機能性成分も豊富に含み、私たちの健康的な生活を支える上で最も重要な作物の一つある³⁾。

ダイズはイネやトウモロコシにはない面白い性質がある。ダイズの根を掘り起こしてみると、根に丸いコブがついているのが観察できる（図2）。これは「根粒」という器官で、この中には根粒菌と呼ばれる土壤細菌が共生し、根粒菌のニトロゲナーゼの力により大気中の窒素がアンモニアに変換されている。そのため、ダイズは土壤中から硝酸イオンなどの窒素以外に、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。この共生窒素固定という性質は、マメ科植物の多くで見られるが、共生窒素固定によりマメ科植物は土壤中に窒素が少ない環境でも生育することができるため、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が利用されてきた。日本でも春にマメ科のレンゲソウ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。

土壤中には何億という微生物がいるが、その中でダイズは *Bradyrhizobium japonicum* や *Bradyrhizobium elkanii* など特定の根粒菌のみと共生する。このお互いを認識するメカニズムには、化学物質を介したシグナル分子の交換が重要な役割を担っている。まず、ダイズは、根からフラボノイドなど根粒菌を誘引する物質を分泌する。フラボノイドは共生するプロセスの開始スイッチとなるタンパク質である NodD を活性化させる。根粒菌は NodD タンパク質を活性化させると、ダイズへのシグナル分子である Nod ファクターを生合成して、分泌する。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、これにより共生する相手を区別していると考えられている。ダイズが根粒菌の Nod ファクターを認識すると、ダイズの根毛がカーリングし、根粒菌は感染糸（侵入するための管のようなもの）を形成してマメ科植物の根に侵入する。ダイズは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、根粒菌は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ダイズ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必要とするが、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（生体内のエネルギー）を必要とする。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ので、ダイズ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。

ダイズと根粒菌の共生関係はお互いに互恵的にも見えるが、ダイズの生産に必要な窒素がすべて根粒菌の窒素固定によって賄われているわけではない。生育環境にもよるが、ダイズの生育に必要な窒素の50~60%程度が根粒菌の窒素固定によるもので、残りはダイズが土壤から吸収している。そのため、マメ科植物であるもののダイズの生産には多くの窒素肥料が用いられている。根粒菌はダイズの生長を助けるために窒素固定をしているのではなく、根粒菌自身の生存のため（栄養分をダイズからもらうため）に「必要最低限の」窒素固定をしているとも考えられている。窒素肥料に依存しない農業を進める上で、根粒菌の力をもっと利用できるようにするためにはどうすればよいかさまざまな研究が世界中で進められている。



図2 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) ダイズの根に着生した根粒

4. 持続可能な生存圏の基盤となる農業生産

根粒菌以外にも根の周りには多種多様な微生物が存在する。根のごく近傍を「根圏」といい、そこに生息する微生物を根圏微生物と呼ぶが、ダイズに共生する根粒菌の例からもわかるように、根圏微生物は植物の生長に重要な役割を担っている。たとえば、菌根菌はダイズのみならず地上の約8割の植物と共生し、植物にリンを供給している。さらに、まだ機能のよくわかっていない多くの微生物がコンソーシアムを形成していることが明らかになっており、根圏微生物は私たちの腸に生息する腸内細菌と似ているのではないかと考えられている。近年の研究で、腸内細菌は私たちの健康（アレルギー、免疫、肥満など）と関連していることが報告されているが、根圏微生物も植物の健全な生長に大きな影響を与えていると推測されている。

根圏微生物の研究はシャーレの上で多様な微生物を培養してその機能を調べたり、分子生物学の手法を用いて遺伝子情報を解析するなど、盛んに行われてきた。近年では、シーケンサーという遺伝子の配列を解析する装置の性能が格段に向上し、ごくわずかなサンプルから何億という微生物の情報を取り出せるようになった。この技術を用いてダイズの根圏微生物を調べたところ、ダイズの生育過程で根圏微生物相を形成する細菌の種類が大きく変化していくことが明らかになった⁴⁾。その中には植物の生育を促進することが報告されている微生物 (PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria) の仲間も多く見いだされた。ダイズは栄養生長 (体を大きくする時期) ⇒生殖生長 (花を咲かせ種子をつける時期) と転換する過程で私たちが腸内環境を整えるかのように根圏微生物相を変えているのかもしれない。

地球上の人口は今世紀中には 90 億人を超えると予想されているが、肥料を大量に投入して多くの作物を得るという方法では 90 億人分の食糧を生産することは困難である。そのため、根粒菌、菌根菌を含め、根圏微生物の力を活用して、肥料や農薬の使用を抑えて、かつ収量を高めていく「次世代型の持続可能な農業」を確立していくことが、私たちの生存圏を支える上で極めて重要である。

参考文献

- 1) 「生存圏科学への招待」京都大学生存圏研究所, 2014.
- 2) 山末祐二編集, 作物生産の未来を拓く (生物資源から考える21世紀の農学), 京都大学学術出版会, 2008.
- 3) 農林水産省編, 平成26年度 食料・農業・農村白書, 一般財団法人農林統計協会, 2014.
- 4) Sugiyama A, Ueda Y, Zushi T, Takase H, Yazaki K, Changes in the bacterial community of soybean rhizospheres during growth in the field. *PLoS One*. 9(6):e100709. 2014.

害虫の目から見る生存圏

Thinking about humansphere from pest insect view

柳川 綾*

Aya Yanagawa*

1. はじめに

最近では消費者意識の高まりもあって、野菜の産地や、その規格、例えば、有機農法であるか、無農薬であるかといったことも視野にいれつつ、農産物を購入される方も多くなった。害虫駆除の方法も、時代あるいは農業の発達とともに変化しており、対象作物や標的害虫によって異なる。代表的な防除法には、化学的防除、機械的・物理的防除、耕種的防除および生物的防除の4手法がある。農薬など化学薬品を使用して害虫を防除する手法が化学的防除で、もっとも一般に使用されている。捕獲や移動阻害など、害虫そのものに物理的に働きかける処置を行うことで被害を抑制したり、また光線、音波、超音波、熱線、高圧電流および放射線などの物理的エネルギーを利用して、害虫の行動制御（誘引・忌避、抑圧・攪乱）、生殖能力の無効化および殺虫などを行うことを機械的・物理的防除という。耕種的防除は、作物栽培法の工夫、耕耘などによる環境条件の調整あるいは適切な品種を選択することによって害虫個体群の生存・増殖・定着を抑制し、被害の回避・軽減を図るものである。生物的防除は、天敵、すなわち捕食者、寄生者および病原微生物を利用し、標的害虫の生存個体群数を管理していくことで作物を守る。近年では、地球環境保護の観点から、薬剤を用いない手法を主軸に、複数の防除法を組み合わせた総合的な害虫管理（Integrated Pest Management: IPM）が指向されるようになった¹⁾。農薬に対する薬剤耐性害虫の出現やミツバチへの悪影響も、この流れを後押しした。また、害虫管理と言えば、農産物収量増を目指した田畑の管理が一番に思い浮かぶかもしれないが、穀物の貯蔵や輸送時に行われるポストハーベスト処理も、農産物が消費者に届くまでの過程で行われる大切な害虫管理ステージである。本稿では、生存圏研究所で行われている、木材害虫を対象とした生物的防除のための研究を紹介する。

2. 昆虫病理という学問

人の観点で生存圏の生き物を分類すると、まず人類を含む哺乳類が存在し、鳥類、両生類、爬虫類、魚類など、比較的大型の生物を主役に生態系を考えることが多い。昆虫は、多くの場合において不快害虫にすぎず、生態系において彼らがきちんと役立っていることを義務教育の過程で学んだから存在していてもいい、という程度の評価をようやくもらっているのではないだろうか。さらに大きさとしてはもっと小さく、肉眼では認識できない微生物に至っては、病気や食中毒を通してその厄介さを、酒やパンを通じてその利便性を認識されてはいるが、こうした生物の存在を生存圏という大きなスケールでとらえることは依然として難しい。しかし、自然界の中では、こうした生物たちは人間活動から生まれる環境ストレスに耐えながら、あるいはそんなものそっちのけで、様々な相利／片利関係を

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存基盤科学分野 E-mail: ayanagawa@rish.kyoto-u.ac.jp

築いて複雑に、しかし見事に存在している。微生物の中には、その養分を動物体内から得る能力を勝ち得て繁殖したものが多くいる。人体に微生物が侵入し増殖し、その生命活動に支障をきたす状態を病気と呼ぶように、私たちは昆虫のそのような状態を病気と呼んでいる(図1、写真1)。この広い生態系の中には昆虫にしか感染しない微生物や植物にしか感染しない

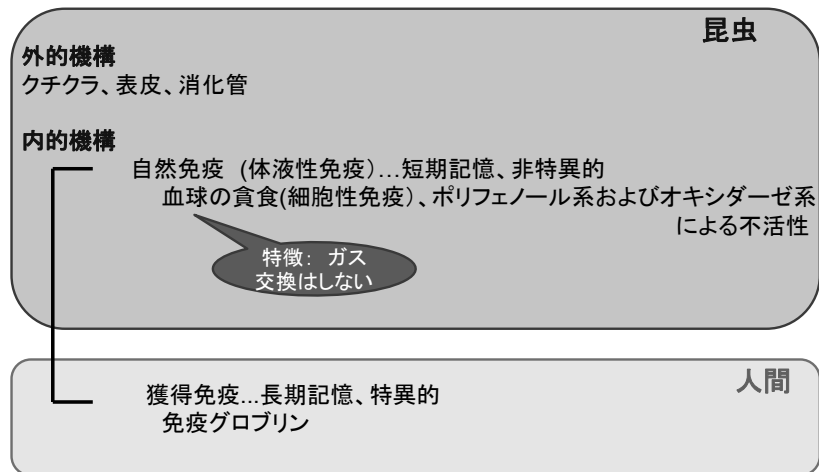


図1 人間と昆虫の生体防御システムの違い

微生物が多く存在している。同様に、人に感染する微生物の中に、昆虫や植物を加害する能力を持つものがあることは滅多にない。このためゴキブリを害虫と呼んで駆除を試みることは、私たちが病気の蔓延から守るために大切なことである。それはゴキブリが肝炎ウイルスなど、人には深刻な病気をもたらすがゴキブリには無害な微生物を体表に付けて、食物上を横切ることで、病気を伝播するためである。これとは逆に、ごく近年、とはいえここ50年ほど盛んに研究されているのだが、人には感染しないが昆虫にだけ感染する微生物を有効利用して害虫を管理しようという、レスケミカルな有機農法として注目を集めているのが生物的防除である。人には無害だが昆虫には病気を引き起こす微生物と、昆虫との接触をお膳立てすることで害虫を管理しようという試みである。本手法は、家畜の病気を媒介するハエやアザミウマなどの作物害虫を対象とした農業生産の向上を目指した害虫管理においてだけでなく、ゴキブリなど生活圏に存在する不快害虫を管理する上でもその有用性が期待されている。昆虫病理という学問は、そもそもミツバチや蚕などの益虫保護を試みるために生まれた。昆虫は大きな注目を集めていない、と前述したばかりだが、養蜂や養蚕の文化は紀元前から行われている。昆虫の病気は、アリストテレスがその著書に記しているほど昔から知られている²⁾。しかし、人類の現行の技術では、病気になった昆虫を治癒する力はない。益虫を大量飼育することができなくなった時に、その原因を見つけ出し、それが病原性微生物によるものであれば、すみやかに感染集団を排除するしかない。つまり、病気を治癒することは現在でも我々の手には負えないため、病気を広げて害虫を管理する、という方向で、この学問は活路を見出している。害虫の管理は田畑を対象に行われるので、本手法を適用することによる生態系への影響は田畑を基準に考慮する。とはいえ、生物的防除手法を大規模に実施している多くの国で、その実施状況に基づいた対象農地および周辺環境への影響査定は依然として課題である。大量の生物的防除資材を人為的に持ち込むことによって生じる生態系への影響を調査する方法を確立するため、国家間を超えた協力が必要である。

3. 行動による生体防御と生物的防除による害虫管理

居住圏環境共生分野では、家屋という身近な生活圏に存在する害虫であるシロアリをモデルに、人体に安全なシロアリ管理法を研究している。シロアリの防除にはこれまで有機塩素系殺虫剤などが用いられてきたが、環境および人体への影響が問題視されて、近年、エコフレンドリーな管理法の確立が望まれている³⁻⁶⁾。中でも病原性糸状菌を用いた生物的防除試験は世界でも比較的多く行われてきて

いるが、実験室レベルでは有効な試験結果が得られるにもかかわらず、野外で安定的な効果を得るには至っていない(図2)。このため、シロアリ管理に生物的防除手法を適用することは不可能ではないのかという意見もある⁷⁾。しかし、ここ10年ほどの研究成果により、ただ失敗の連続であった50年間には明らかでなかった多くのことが解ってきた。例えば、シロアリは社会性昆虫である。彼らは、アリやハチほどの学習能力はない(と現在は考えられている)

天敵微生物を用いた生物的防除

<利点>

- ・ 人畜に被害を与えない
- ・ 植物に病気や葉害を起こさない
- ・ 宿主域が狭く標的害虫を絞れる
- ・ 害虫に抵抗性を与えにくい
- ・ 生態系に定着・残存
- ・ 製剤化が比較的単純

<問題点>

- ・ 宿主域が狭く、一つの薬剤で一種のみ
- ・ 即効性に欠く
- ・ 伝播が他力本願
- ・ 製薬の均一性。安定性の保持が難しい
- ・ 昆虫の発育段階および個体密度により感染性に差が生じる

昆虫病原性糸状菌



Metarhizium anisopliae

土や水の中に普遍的に存在。

図2 生物的防除のメリットとデメリット

が、集団では「超個体」と呼ばれる複雑に統一された生態を有する⁸⁾。集団内では、栄養交換やグルーミングを始めとする衛生行動などの社会行動が行われ、個体レベルでの統率は一見なさそうに見えるが、集団として非常に統合された行動をとるのである。このうち、社会的な衛生行動として行われる相互グルーミング、埋葬行動あるいはカンニバリズムが、シロアリの病気感染阻止に大きな役割を持つことが解ってきた⁹⁾。本研究所では、糸状菌と昆虫の相互関係、特に昆虫の糸状菌に対する生体防御戦略を明らかにし、そこを阻止していくことで、糸状菌を利用した生物的なシロアリ管理が可能になるのではないかと考え、昆虫の生体防御行動の研究をしている。なかでも、微生物感染成立の初期段階において重要な「微生物の宿主表皮への付着」を阻止するグルーミング行動に焦点を当てて研究している。

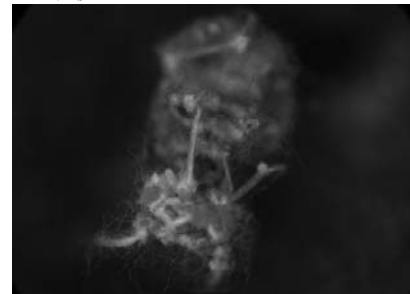
アリステレスによる社会性昆虫であるミツバチの病気が世界初の昆虫の病気の記述であったが、学問としてはその後、蚕やショウジョウバエなど単独性昆虫を中心に、個体レベルにおける血球貪食作用や、消化管内作用などが研究され、発展してきた。一方で、「行動」を利用した抵抗性の増強に関しては、生体防御機構として捉われるよりも、行動の結果生じる生態系の中での他個体や植物との相互作用の方が研究対象とされることが多かったために、世界的にもあまり多くの研究例がなく依然として不明な点が多い。シロアリでは社会行動であるグルーミング行動により、巣仲間上に付着している病原体を摂食除去し、

消化管を通して体外に排出するという仕組みを持つことが分かっている¹⁰⁾、この機構が、糸状菌感染に抵抗する生体防御機構として大きな役割を持つことが認められている。しかし、例えばシロアリがどのような仕組みで病原菌の存在を知り、社会行動による防御を行

感染後1-2日



感染後7-10日



*Metarhizium*感染虫

写真1 昆虫病原性糸状菌に感染したイエシロアリ職蟻

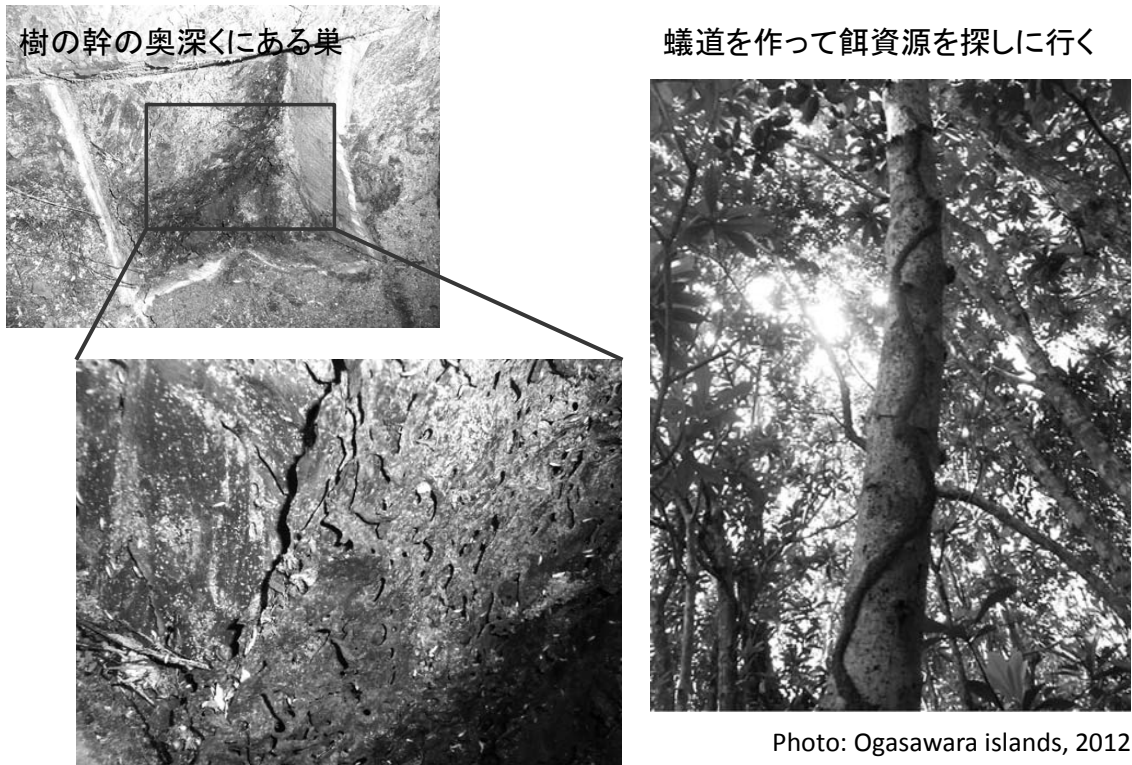


図3 森林の中で見られるシロアリの活動

うに至るのかなど、本機構解明に向けてはさらなる研究が必要である。シロアリの病気感染抵抗性行動を明らかにすることで、アリや亜社会性スズメバチなど温暖化に伴い北上してきたその他の社会性害虫の管理の発展にも貢献できると考える。現在は、シロアリにおける生物的防除の向上を目指して、シロアリが有する病原性糸状菌知覚能力を調査している。また、本機構を解明することによって、より環境と調和した新たな生物的防除法開発を模索している。

4. 研究を通じて見聞きし、思うこと

私は昆虫の生体防衛行動を、多くの場合、実験室内で研究している。自然界には、考慮すべき要因があまりに多いため、まずは少ないファクターを通して小さな現象を捉え、実験の規模を少しずつ大きくし、やがて野外で実施できる規模まで展開することが目標である。一方で、家屋の大害虫であったシロアリでは、例えば新規薬剤効果の確認など、これまで野外における実践的な駆除のための研究が主に行われてきている。このため、その生理学的なメカニズムの多くは謎のままであった。将来もっと少ない薬剤で、耕種や生物的な防除を組み合わせながら、環境により安全で、より持続的な、害虫管理および農業生産を目指すうえで、それらのメカニズムを知ることは大切なことである。農業は、人間と自然の共存のための最初の一步である。家を建て、その中で大切な家族と快適に生活しながら、自然と調和した美しい農地から、日々食べる安全な作物を収穫し、おいしくいただくことを忘れない、そうした産業と農業の両立の中で初めて人類の持続的な発展が成り立つと考える。昆虫の生理特性を解明し、彼らの生態系における共存の知恵を知ることで、強欲ではない、調和の在り方を目指したい。

とりとめのないことではあるが、私がまず感じることは、呼び名が与える先入観の強さである。私たちは人類で日本人なので、同じ *Blattodea* 属の昆虫でも黒くてカサカサ動く昆虫をひとまずゴキブリ

と呼ぶし、白っぽくてアリみたいな外見で木を食べる昆虫をシロアリと呼んでいる。ミツバチは蜂蜜が取れるので、ひとまず益虫となるし、アブラムシは作物の葉を食べてしまうので害虫である。ところが、野外でアブラムシがいなくなってしまうと、テントウムシとアリはとても困るので、テントウムシとアリにとって、アブラムシは益虫である。私たちが自然と調和した生活を送るために、言葉が与える印象を超えた目で物事を考える複雑さを学んだ時、自分が人類という枠の中からだけ、世界を見ていることを感じる。生態系は複雑な相互作用を内包するが無駄のない循環型の系なので、害虫たちもそれぞれの役割を果たしたうえで存在する。次に、近年取りざたされる「多様性」という言葉の難しさである。多様性は良いことだと、深く考えることなくずっと思っていた。人類が発展するために開発され失われた多くの動植物たちを取り戻すこと、失われそうな動植物を守ること、あるいは少数民族の人々の生活様式文化を忘れないこと、言語や文化の多様性は、確かに大切で、精神的な豊かさに繋がる。しかし「多様性」にも多面性がある。シロアリの調査で小笠原諸島へ行ったことが一度だけある(図3)。小笠原は東京都からおおよそ1000kmのところに位置し、独自の生態系を発展させているため、外敵の侵入に非常に弱い。このため、シロアリをはじめとし、グリーンアノールやネズミやヒキガエルなどの侵入種のすさまじい繁殖と、そうした侵入種の加害による島の固有種の減少に苦しんでいる。つまり、自然世界遺産に指定された小笠原には「多様性」を持ち込むことが、「小笠原の自然」という世界規模での一つの多様性を失わせることにつながるのである。時代と共に多くのことが変化し、その中で私たちは守るべき多様性を取捨択一している。そうして残る「多様性」とは何だろうか。また、森林資源しかもたない貧しい国もある。こうした国、あるいは地域の人々に、持続的な森林資源の生産を長期的に助け、教育や施設に関与し扶助し続けることのできる国や団体は世界にいくつほどあるのだろうか。「明日」というぎりぎりの選択をしている人々に理想を押し付けることは難しい。私たちの誰でも、農薬の会社で就職すれば、農薬を普及させなくては行けないし、重油の会社で働けば、森林を伐採して重油を採掘する。そしてその仕事は確かに誰かを助けて、社会に貢献している。多様性というのはシンプルな言葉だが、この言葉を社会に体現することは、とても複雑な迷路の中で出口を探しているように感じている。その点で「多様性」という言葉は諸刃の剣だと思う。それでも、多様性を保つことは持続的で柔軟な社会を持つためにとても大切なことだと思う。多様性に通じることだが、最後に、生物的防除を実施する上での事前調査の難しさについて考えてみたい。生物的防除では、ある国、ある場所で成功したものを、他の国、他の環境で、しかし同じ害虫や侵入植物が問題となっている場所に適用しようとした結果、有益とみなされて持ち込まれた防除資材が問題化した例がいくつかある。防除資材は、環境からのできるだけたくさんの候補種、カビならカビ、を採集し、その中から標的害虫/標的植物に病原力の強いものを選択、その後大量培養の可否や環境安定性など多くの試験を経て初めて野外で試される。多くの手間と時間が必要とされること、またどの程度広範囲での利用が可能なのか未知数であるため、普遍的な基準を設けることは不可能なのだ。そのため、適用する前に同じ作業をその国でも行うことが望ましいが、生産者や消費者の経済的な理由、また事態の緊急性など様々の理由から難しい。人間あるいは各国間にあるそれぞれの作用を含めて生態系の相互作用はあまりに複雑で、現状把握さえ難しい。

本稿を通じて、害虫防除を通して学んだ、害虫の目から見た生存圏、そこに存在する問題を少しでも共有できればうれしく思う。

参考文献

- 1) Gray, M. E., S. T. Ratcliffe and M. E. Rice, Chapter 1 the IPM paradigm: concepts, strategies and tactics in Integrated Pest Management—Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies—, edited by Radcliffe EB., Hutchison WD. and Venezuela REC, Cambridge University Press, pp. 1-13, 2009.
- 2) 福原敏彦, 昆虫病理学 増補版, 学会出版センター, 1991.

- 3) Culliney, C.W. and J.K. Grace, Prospects for the biological control of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae), with reference to *Coptotermes formosanus*, Bull. Entomol. Res., **90**, 9-21, 2000.
- 4) Rath, A.C., The use of entomopathogenic fungi for control of termites. Biocontrol Sci. Technol., **10**, 563-581, 2000.
- 5) Sun, J., J.R. Fuxa, A. Richter and D. Ring, Interactions of *Metarhizium anisopliae* and tree-based mulches in repellence and mycoses against *Coptotermes formosanus* (Isoptera: Rhinotermitidae). Environ. Entomol., **37**, 755-763, 2008.
- 6) Verma, M., S. Sharma and R. Prasad, Biological alternatives for termite control: A review. Int. Biodeterior. Biodegrad., **63**, 959-972 2009.
- 7) Chouvenc, T., N.-Y. Su and K. Grace, Fifty years of attempted biological control of termites-Analysis of a failure, BioControl, **59**, 69-82, 2011.
- 8) 第15回「大学と科学」公開シンポジウム委員会, 昆虫から学ぶ生きる知恵, グバプロ, 174pp, 2001.
- 9) Chouvenc, T. and N.-Y. Su, When subterranean termites challenge the rules of fungal epizootics, PlosOne, **7**, e34484, 2012.
- 10) Yanagawa, A. and S. Shimizu, Resistance of the termite, *Coptotermes formosanus* Shiraki to *Metarhizium anisopliae* due to grooming. Biocontrol, **52**, 75-85, 2007.

IUGONET データ解析システムを用いた地球大気環境の長期変動に関する研究

-地磁気日変化振幅に見られる電離圏・熱圏の長期変動-*

新堀 淳樹**

A study on the long-term variation of the earth's atmospheric environment using the IUGONET data analysis system

-Long-term variation in the ionosphere and thermosphere as seen in the amplitude of geomagnetic solar quiet (Sq) daily variation-*

Atsuki Shinbori**

概要

地球大気圏の中でも高度 100 km 以上の領域は、超高層大気と呼ばれ、そこで観測される様々な大気擾乱現象は、太陽活動と下層大気を起源とする大気波動による両者の影響を受けながら、複雑な物理過程を経て発生する。そのため、超高層大気の長期変動を解明するためには、全球規模の地上観測ネットワークから長期的に得られた様々な観測データを組み合わせた総合解析を行うことが必要不可欠である。このような分野横断型研究を促進する研究基盤を構築するために、2009年5月から大学間連携プロジェクト「Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET」が開始された。本プロジェクトでは、様々な地上観測データからメタデータを抽出してインターネット上で広く共有するシステムを構築し、種々の地上観測データを相互参照できるようにした。また、異種の観測データを可視化、相関解析を行う解析ソフトウェアを開発した。本研究では、IUGONET データ解析システムを活用して、長期の太陽活動度と地磁気の日変化振幅のデータ解析を行うことで、地磁気日変化振幅に見られる超高層大気の長期変動特性を調べた。その結果、全ての観測点での地磁気日変化振幅は、顕著な 11 年太陽活動周期性を示すとともに、太陽活動 23/24 サイクル極小期において約 60 年間の中で地磁気日変化振幅が最も小さくなっていた。一方、太陽活動成分を除去した地磁気日変化振幅は、約 75% の観測点にて負のトレンドを示し、その傾向がヨーロッパ、北米東部などで強いことがわかった。本総説では、IUGONET プロダクトの概要と地磁気日変化振幅の長期変動特性について解説する。

1. はじめに

地球大気圏は、一般に温度構造によって下層から対流圏、成層圏、中間圏、及び熱圏に区分され、

* 2015年7月21日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。 E-mail: shinbori@rish.kyoto-u.ac.jp

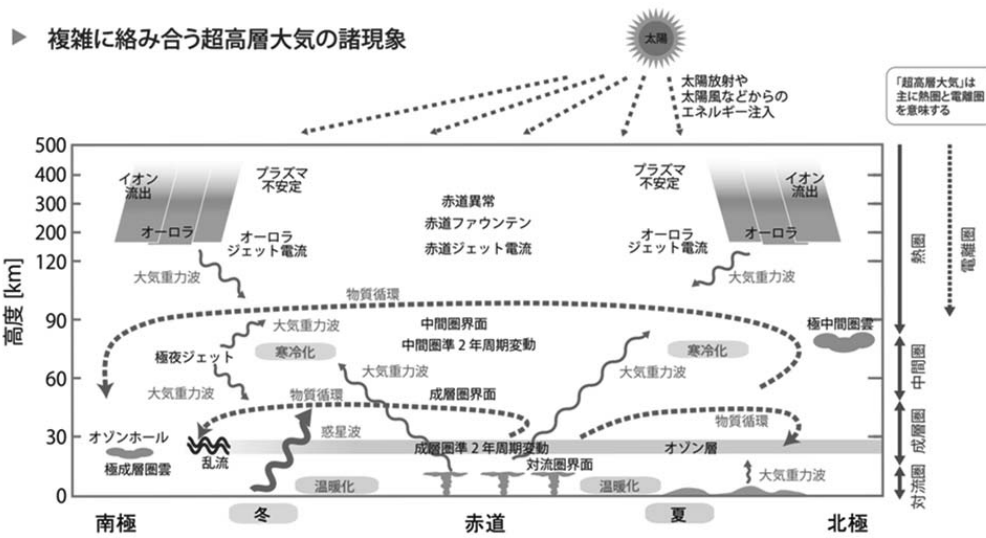


図 1： 高度 500km にまでの地球大気中で観測される諸現象と各大気層の位置関係。横軸は緯度、縦軸は高度を示す。

太陽紫外線などによって中間圏・熱圏の一部の大気が電離し、電離圏を構成している。とりわけ、高度 100km 以上の大気圏を超高層大気と呼ばれている。図 1 に示すように高度 500km までの地球大気中で観測される電離圏擾乱、オーロラ、夜間大気光、夜光雲、成層圏突然昇温といった様々な地球大気の諸現象は、太陽から地球に向かって絶えず降り注ぐ太陽放射や太陽風のエネルギーを駆動源としている。

地球が受け取る太陽放射エネルギーは、極域で最小、赤道域で最大となるため、約 20km 以下の赤道大気では、その太陽放射エネルギー源とする活発な積雲対流現象が発生している。この大気擾乱を起源とする大気重力波は、上層大気へ運動量を輸送し、力学的摩擦効果によって中層大気(10-100 km)における大気大循環に重要な役割を果たしていることがこれまでの研究から明らかにされている¹⁾。一方、太陽風-磁気圏相互作用によって生み出された電磁エネルギーや荷電粒子の降下が極域の超高層大気に集中する。このように地球大気に入射する太陽エネルギーは、地球をとりまく空間(大気圏・電離圏・磁気圏)の中をその形態を変えながら伝搬し、多様な物理現象を引き起こす。また、地球大気は、異なる大気層間の結合が強いグローバルな複合系をなしており、そこで生じる変動現象の物理過程を解き明かすためにはこれらの大気層の間の物質輸送や運動量輸送などの相互作用の実体を調査する必要がある。したがって、太陽活動や地球温暖化などに伴う超高層大気の長期変動とその物理機構を理解するためには、全球規模の地上観測ネットワークから長期的に得られた様々な観測データ(電離・中性大気、大気組成、オーロラ、地磁気、太陽風、太陽紫外線等)を組み合わせた分野間にまたがる総合解析を行うことが必要不可欠である。

しかしながら、このような分野をまたがるデータの総合解析を行う上で必要な観測データベースが観測を実施した各研究機関で独自に管理され分散していたため、専門分野外の観測データの検索・取得・解析に多大な労力が必要であった。また、観測データの多くは特定の機関や分野での利用に留まり、一部は未公開のまま有効に活用されないケースもあった。そのため、多様な観測データを必要とする学際的研究が困難であり、研究遂行上の障壁となっていた。

そこで、2009 年度から開始された大学間連携プロジェクト「Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork: IUGONET」²⁾では、上記の問題を解決するために、図 2 に示すように観測デー

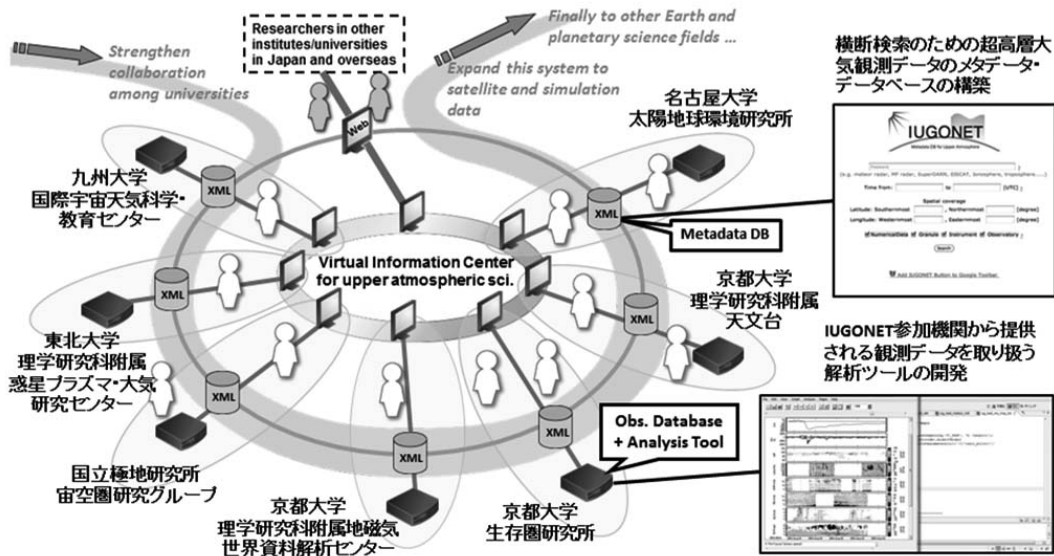


図2： IUGONET プロジェクトの概念図。IUGONETでは、横断検索のための超高層大気観測データのメタデータデータベースを構築し、それをインターネット上に共有することで各観測データの相互参照を可能にしている。

タからメタデータを抽出してインターネット上で広く共有するシステムを構築し、各機関が国際地球観測年（1957-1958年）以来蓄積してきた種々の地上観測データを相互参照できるようにした。さらに、それらを含めた観測データを一元的に取り扱うことが可能な解析ソフトウェアを開発し、容易に多種多様の観測データの描画や相関解析ができるようになった。

2. IUGONET データ解析システムの概要

本章では、IUGONET プロジェクトで開発されたメタデータ・データベースとデータ解析ソフトウェアの概要について説明する。

2.1 横断検索のためのメタデータ・データベースとその利用法

前述のように IUGONET では、観測データからメタデータを抽出してデータベース化し、インターネット上で共有するシステム（=IUGONET メタデータ・データベース）を構築している³⁾。IUGONET メタデータは、観測データそのもの（実データ）ではなく、そのデータに付帯した情報を記述した、いわばデータのカatalogに相当する。太陽地球大気観測データのメタデータに含まれる項目としては、観測日時、観測地点、装置の種類、観測データの所在などが挙げられる。各機関が所有する個々の観測データからメタデータを抽出し、データベース化するためには、共通のフォーマットを策定する必要がある。そこで IUGONET では、欧米の太陽地球系物理学の研究者らによる国際コンソーシアムである SPASE (Space Physics Archive Search and Extract)によって作成されたデータモデルに超高層大気や太陽の地上観測データの特徴に沿うように修正を加え、これを IUGONET メタデータ基本フォーマットとした。また、IUGONET メタデータは、1つのデータセットを記述するメタデータの他に、観測装置、観測サイト、人的リソース、実データのデータベースなどの情報のカテゴリー毎に独立している。これらのカテゴリー分けされたメタデータは個別の XML ファイルとして記述され、相互参照できる

構造を持っている。一方、個々のデータファイルに付随したメタデータ (Granule) も定義されており、データファイル毎のメタデータをアーカイブすることで、データファイル単位の検索も可能である。IUGONET メタデータを介して各機関が所有する観測データにたどり着くためにはまず、



図 3 : IUGONET メタデータ検索ページのトップ画面。検索に必要な入力事項や活用方法などの説明が吹き出しの中に書かれている。

IUGONET メタデータ検索ページ(<http://search.iugonet.org/iugonet/>)にアクセスする。アクセスに成功すれば、図 3 のような検索ページがブラウザの画面に現れる。ここにアクセスするにあたり、特に、ユーザー登録などは不要で、誰でも自由にアクセスし、メタデータ検索を行うことができる。検索したいメタデータに合わせて、キーワード、日時、地球や太陽面上の緯度・経度、データタイプなどの条件を入力し、検索(Search)ボタンをクリックする。すると、入力した条件を満たすメタデータのリストが現れるので、該当するメタデータに記載された実データの所在地 (URL など) から観測データに容易にアクセスすることができる。このメタデータ検索システムを利用する利点として、IUGONET 参加機関と協力機関が所有する観測データに関するメタデータを、1 度の問い合わせで横断的に検索できる点である。

2.2 データ解析ソフトウェア - UDAS

IUGONET Data Analysis Software (UDAS)は、Interactive Data Language (IDL)で書かれた太陽地球環境データ解析ソフトウェア (Space Physics Environment Data Analysis Software : SPEDAS)のプラグインソフトウェアで、IUGONET参加機関が提供する様々な地上観測データのロード関数、および高度なスペクトル解析ツールや統計検証パッケージから構成されている。これにより、IUGONET地上観測データの表示や解析を行うことができる。実際の操作では、コマンドラインだけでなく、Graphical User Interface (GUI)ツールも利用することができ、未経験者にとっても直感的に操作しやすい仕様になって

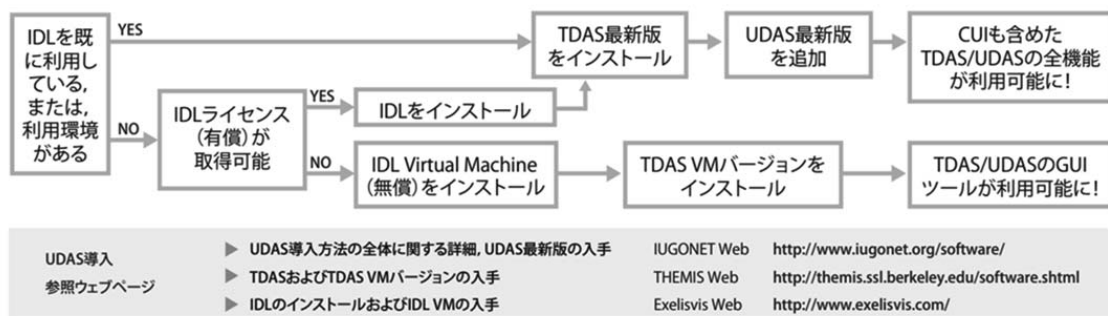


図 4 : UDAS を各個人のパソコンにインストールするまでの手順。インストールすべき各ソフトウェアの入手先 URL が記載されている。

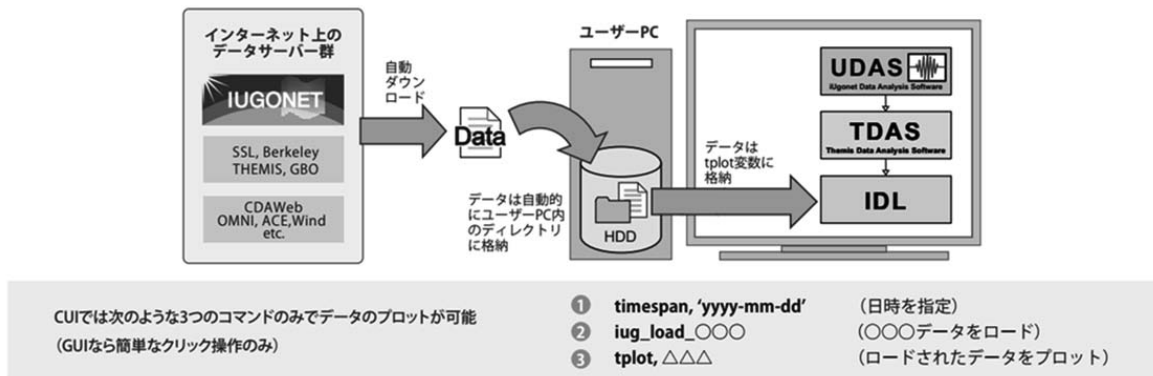


図 5： UDAS を用いた観測データのロードのイメージ。

いる。以下の手順に従って UDAS を各個人の PC へ導入することができる(図 4)。現在、SPEDAS VM バージョンが <http://themis.ssl.berkeley.edu/software.shtml> から入手可能となっており、IDL VM をインストールしなくても動作する仕様となっている。

UDASの最大の特徴は、ユーザーがデータの所在地やデータファイルのフォーマットを気にすることなくデータの自動的にダウンロード、表示や解析することができる点である。図5には、UDASを用いた観測データのロードのイメージ図を示している。この図が示すようにユーザーは、たった3つのコマンドを打つことにより、データをダウンロードし、時系列プロットに表示することができる。これにより、SPEDASでロードできる衛星データも含めた異種データの並列プロットを容易に作成でき、各データ間の相関を一目でみることができる。現在、IUGONETのホームページから公開されている UDAS v3.00.3 (TDAS v8.00対応版) で提供しているUDASロード関数は25種目に及んでいる。詳しくは、IUGONETホームページ(<http://www.iugonet.org/software.html>)、及び学術論文⁴⁾を参照されたい。

3. 地磁気静穏日変化に見られる超高層大気の長期変動特性

3.1 地磁気静穏日変化に関連した過去の研究と本研究の目的

地磁気日変化(Geomagnetic solar quiet (Sq) daily variation)は、中性大気と電離大気との相互作用を通じた電離圏ダイナモ作用を基に生じた電場が作る電離圏電流によって引き起こされる。このSq電流は、



図 6： 地磁気日変化のグローバルな電離圏電流⁹⁾。電流の流れる方向を矢印で示している。

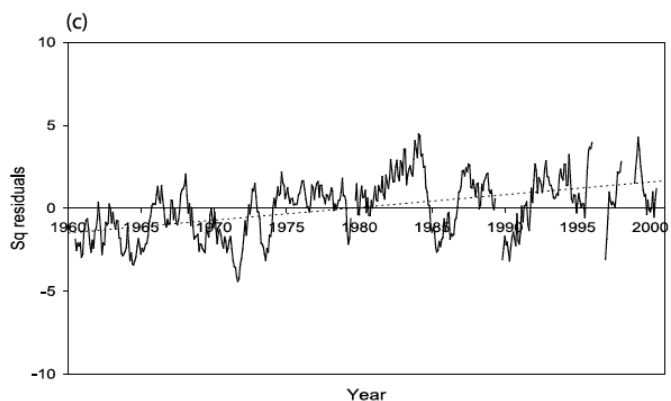


図 7： 太陽活動成分を除去した Hermanus における地磁気日変化振幅の長期変動¹¹⁾。図中の点線は、線形フィッティング線を表している。

高度90-140 kmの電離圏E領域を流れており、図6に示すように、北半球では反時計まわり方向に、南半球では時計まわりの方向に流れている。そのため、Sq電流による水平南北成分の磁場変化は、赤道と低緯度では正の変化、中緯度では負の変化となる。Sq磁場振幅を決める要素は、オームの法則から電離圏電気伝導度、ダイナモ電場、太陽潮汐波による風速変化、並びに電離圏電子密度である。したがって、Sq磁場振幅の長期変化を調べることによって、高度90-140 kmにおける超高層大気の長期変動のシグナル(太陽活動、地球温暖化)を捉えることができる。

これまで、Sq磁場振幅の長期変動は、地球の主磁場の永年変化による赤道ジェット電流の移動や太陽活動に関連していることが明らかにされてきた^{6,7,8,9,10,11,12}。Sellekは、赤道、および低緯度の地磁気観測点(Huancayo, Hermanus, San Juan)で観測されたSq磁場振幅に顕著なトレンドがあることを見出し、それが地球主磁場の永年変化によって引き起こされることを理論計算によってはじめて確かめた⁶。Schlappらは、Sellekよりも8点多い11の地磁気観測点から得られた地磁気データを解析し、地球主磁場の永年変化によってSq磁場振幅の長期変化がもたらされていることを示した⁷。近年になって、Eliasらは、低緯度に分布する3つの地磁気観測点(Apia, Fredericksburg, Hermanus)から得られた約40年にわたる長期の地磁気データを解析し、図7に示すように太陽活動を除去したSq磁場振幅には正のトレンドが存在することを見出した。さらに、彼女らは、電離圏電気伝導度モデル値との比較から、そのSq磁場振幅のトレンドの約90%が地球主磁場の永年変化によるものであり、残りの10%が地球温暖化による電離圏E領域における電子密度の増加によるものであることを示した。

Cnossenらは、磁気圏-電離圏-熱圏結合モデル(CMIT)を用いて定量的にグローバルなSq磁場振幅変化に対する地球主磁場の役割について最初に解析を行った¹²。その結果、地球磁場強度の増加に対してSq磁場振幅が減少する傾向を示し、これまで理論的に説明されていた事実と矛盾のない結果を得ている。さらに、De Haro Barbasらは、このCMITモデルから算出された1958年と2008年におけるグローバルなSq磁場振幅の差分を計算し、50年間にわたるSq磁場振幅の変化分のグローバルな分布を示した¹³。この研究結果によれば、図8に示すように最も振幅の変動の大きな領域は、南米からアフリカにかけての赤道に沿って分布し、南米東部から大西洋においてその変動が顕著である。その最大変動量は、赤道の北側で25nT、南側で-25nTであった。また、北磁極に近い北米から北大西洋にかけての領域においてもSq磁場振幅の変動が比較的大きくなっており、磁極周辺でその変動幅が20nTに達している。

しかしながら、これまでのSqに関する地磁気データの長期解析研究にはいくつかの問題点がある。第1点目は、Sq磁場振幅に含まれている太陽活動成分を取り除く際に、太陽活動度指数とSq磁場振幅の関係について線形性が仮定されており、非線形効果が含まれているとすれば、これは長期トレンド解析の誤差の原因となる。また、太陽活動指数に太陽黒点数が用いられており、その指数は、Sqの振幅変化をもたらす電離圏形成過程との物理的関係が全くない。第2点目は、Sqの長期変動の原因について電離圏電気伝導度の変化に重点が置かれており、電離圏電流の源となる起電力($U \times B$)の寄与について議論がなされていない。第3点目は、解析に用いている地磁気観測点が3-11点と少なく、赤道域から両半球にまたがる中緯度領域にかけての観測事実に基づいた、Sq磁場振幅の長期変動の全球的な描像は明らかとなっていない。これらの問題点を解決するために、本研究では、IUGONETプロジェクトによってアーカイブされた全球にわたる長期の地磁気データ、中間圏・下部熱圏における風速データ、及び太陽活動度指数を用いて、Sq

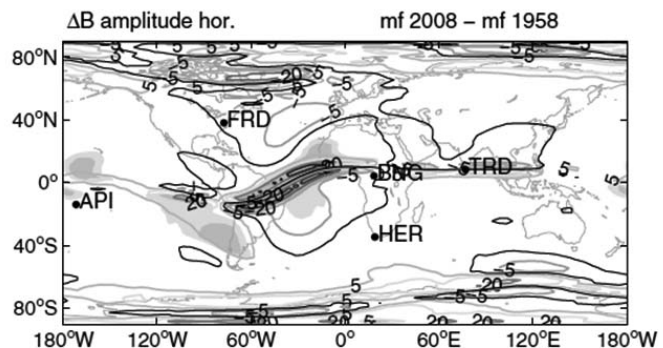


図8 : CMITモデルから算出された1958年と2008年におけるSq振幅の差分についての全球分布¹²。

の磁場振幅の長期変動特性を明らかにする。また、このSq磁場振幅の長期変動から電離圏・熱圏高度領域における超高層大気の長期変動のシグナルを捉え、その物理機構を解明する。

3.2 観測データと解析手法

本研究では、京大地磁気センターが整備している1890年から現在に至る長期の地磁気1時間値を使用した。使用可能な地磁気観測点は、各年代によって異なるが、1950年以降では概ね200点程度存在する。また、地磁気静穏日を選定するために、地磁気指数としてKp指数を用いた。Kp指数は京大地磁気センターから提供されたものを使用した。また、太陽活動とSq磁場振幅との関連性を調べるために、NGDC/NOAAから提供されたF10.7指数(1947年-2014年)を使用した。

一方、解析手法として地磁気静穏日を、各1日を通じてKp指数の最大値が4未満である日として定義し、その日の地磁気水平成分の最大と最小値の差をSqの振幅とした。また、太陽活動に依存する成分を除去したSq磁場振幅の長期的な変動成分を調べるために、Kp指数の閾値から同定された地磁気静穏日に該当するF10.7指数の1ヶ月平均値とSq磁場振幅の相関関係から線形、および2次回帰曲線を決定した。この2次回帰曲線からのずれ(残差)をresidual Sq (res-Sq)と定義して、その長期トレンドを解析した。

3.3 Sq磁場振幅の長期変動特性

図9は、低緯度に分布する4つの地磁気観測点から得られたSq磁場振幅と太陽活動度指数F10.7の1ヶ月平均値の時系列プロットである。縦の点線は、各太陽活動サイクルにおいてF10.7の最小値から決定した太陽活動極小時期を表す。この図から見て取れるように、全ての観測点におけるSq磁場振幅は、F10.7指数が示すように太陽活動極大期に増加し、極小期に減少するという約11年の太陽活動周期性を示している。特に、太陽活動サイクル23/24の極小期において、このデータ解析期間(約60年)の中でSq磁場振幅が最も小さくなっている。これは、Sq磁場振幅を決める要素の一つである電離圏電子密度がこの時期に最も小さくなったことを意味している。近年の太陽紫外線の衛星観測によれば、この太陽活動極小期(2008-2009)における太陽紫外線強度が前の極小期に比べて約15-20%も減少していることが示されている¹³⁾。したがって、超高層大気の電離に關係する太陽紫外線強度が極端に減少したことによって、通常よりもSq電流が流れる電離圏E領域の電子密度が減少したことが、Sq磁場振幅の減少をもたらしたと考えることができる。

さらに、太陽活動成分を除去したres-Sq磁場振幅の長期トレンド解析を行った結果、赤道域から中緯度に分布する69地磁気観測点のうち40点が顕著な長期トレンドを示した。その中でも、負のトレンドを示した観測点は、約75%占めていた。特に、カナダ北東部、ヨーロッパ、インド、及びニュージーランドにおいてres-Sq磁場振幅の減少量が大きく、地域性が存在することがわかった。また、全球的に見ると、res-Sq磁場振幅のトレンドは必ずしも正の

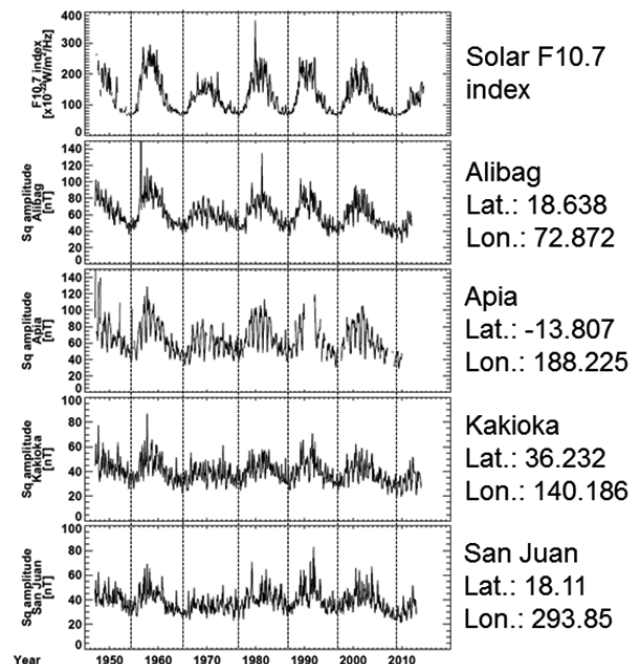


図 9： 低緯度に分布する 4 つの地磁気観測点から得られた Sq 磁場振幅と太陽活動度指数 F10.7 の 1 ヶ月平均値の時系列プロット。縦の点線は、各太陽活動サイクルにおいて F10.7 の最小値から決定した太陽活動極小時期を示す。

トレンドを示すとは限らず、本研究では、先行研究によって得られた結果は、全ての観測点に当てはまらないことを示した。

3.4 今後の方針

これまでの解析では、太陽活動成分を取り除いたres-Sq磁場振幅の長期トレンドの全球分布には各観測点の位置によって異なるという地域性が見出された。今後は、この要因を定量的に明らかにするため、IUGONETプロジェクトの活動の一環として開発された電離圏電気伝導度モデル計算ツール¹⁴⁾を用いて、電離圏電気伝導度の変化による成分を分離し、電離圏ダイナモ電場の長期変動特性を調べていく予定である。さらに、中間圏・下部熱圏風変動との関連性についても調査する予定である。

4. まとめ

超高層大気において観測される様々な大気擾乱現象は、太陽活動と下層大気を起源とする大気波動による両者の影響を受けながら、複雑な物理過程を経て発生する。そのため、超高層大気の長期変動を解明するには、全球規模の地上観測ネットワークから長期的に得られた様々な観測データを組み合わせた総合解析を行うことが必要不可欠である。このような分野横断型研究を促進する研究基盤を構築するために、2009年5月から大学間連携プロジェクト「IUGONET」が開始された。本プロジェクトでは、様々な地上観測データからメタデータを抽出してインターネット上で広く共有するシステムを構築し、種々の地上観測データを相互参照できるようにした。また、異種の観測データを可視化、相関解析を行う解析ソフトウェアを開発した。本研究では、IUGONETデータ解析システムを活用することによって、長期の太陽活動度と地磁気のデータ解析を行い、Sq磁場振幅に見られる超高層大気の長期変動特性を調べた。その結果、全ての観測点におけるSq磁場振幅は、顕著な11年太陽活動周期性を示すとともに、太陽活動23/24サイクル極小期において約60年間の中でSq磁場振幅が最小であった。一方、太陽活動成分を除去したSq磁場振幅は、約75%の観測点において負のトレンドを示し、その傾向がヨーロッパ、北米東部などで強いことがわかった。

参考文献

- 1) Fritts, D. C., and M. J. Alexander, Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Rev. Geophys.*, **41**, doi:10.1029/2001RG000106, 2003.
- 2) Hayashi, H., Y. Koyama, T. Hori, Y. Tanaka, S. Abe, A. Shinbori, M. Kagitani, T. Kouno, D. Yoshida, S. UeNo, N. Kaneda, M. Yoneda, N. Umemura, H. Tadokoro, T. Motoba, and IUGONET project team, Inter-university Upper Atmosphere Global Observation NETwork (IUGONET), *Data Sci. J.*, **12**, WDS179—WDS184, 2013.
- 3) Abe, S., N. Umemura, Y. Koyama, Y. Tanaka, M. Yagi, A. Yatagai, A. Shinbori, S. UeNo, Y. Sato, and N. Kaneda, Progress of the IUGONET system - metadata database for upper atmosphere ground-based observation data, *Earth, Planets and Space*, **66**, doi:10.1186/1880-5981-66-133, 2014.
- 4) Tanaka, Y., A. Shinbori, T. Hori, Y. Koyama, S. Abe, N. Umemura, Y. Sato, M. Yagi, S. Ueno, A. Yatagai, Y. Ogawa, and Y. Miyoshi, Analysis software for upper atmospheric data developed by the IUGONET project and its application to polar science, *Adv. Polar Sci.*, **24**, 231-240, doi:10.3724/SP.J.1085.2013.00231, 2013.
- 5) Richmond, A. D., and J. P. Thayer, Ionospheric electro-dynamics: A Tutorial, in *Magnetospheric Current Systems*, S.-I. Ohtani et al., Eds. AGU, Washington, DC, 131-155, 2000.
- 6) Sellek, R., Secular trends in daily geomagnetic variations, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **42**, 689–695, 1980.
- 7) Schlapp, D. M., R. Sellek, and E. C. Butcher, Studies of worldwide secular trends in the solar daily geomagnetic variation, *Geophys. J. Int.*, **100**, 469–475, 1990.
- 8) Macmillan, S., and A. Droujinina, Long-term trends in geomagnetic daily variation, *Earth Planets Space*, **59**, 391–395, 2007.

- 9) Torta, J. M., L. R. Gaya-Pique, J. J. Curto, and D. Altadill, An inspection of the long-term behaviour of the range of the daily geomagnetic field variation from comprehensive modelling, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **71**, 1497–1510, 2009.
- 10) Elias, A. G., M. Zossi de Artigas, and B. F. de Haro Barbas, Trends in the solar quiet geomagnetic field variation linked to the Earth's magnetic field secular variation and increasing concentrations of greenhouse gases, *J. Geophys. Res.*, **115**, A08316, doi:10.1029/2009JA015136, 2010.
- 11) Cnossen, I., A. D. Richmond, and M. Wiltberger, The dependence of the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere system on the Earth's magnetic dipole moment, *J. Geophys. Res.*, **117**, A05302, doi:10.1029/2012JA017555, 2012.
- 12) De Haro Barbas, B. F., A. G. Elias, I. Cnossen, and M. Z. de Artigas, Long-term changes in solar quiet (Sq) geomagnetic variations related to Earth's magnetic field secular variation, *J. Geophys. Res.*, **118**, 3712–3718, doi:10.1002/jgra.50352, 2013.
- 13) Solomon, S. C., T. N. Woods, L. V. Didkovsky, J. T. Emmert, and L. Qian, Anomalously low solar extreme - ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L16103, doi:10.1029/2010GL044468, 2010.

温冷感に視覚情報が与える影響*

高橋 良香**

The effect of visual sense on thermal properties*

Yoshika Takahashi**

概要

温冷感に関する研究では、視覚の影響がない状態で実験が行われることが多い。視覚によって得られる情報量は、その他の感覚によって得られる情報量と比べてはるかに多いため、視覚で得られた情報は、視覚以外の感覚にも影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、本年度、物理的特性上は小さな違いしかないにもかかわらず、人の温冷感的には、若干冷たい～若干温かいまで知覚の違いを生じさせる各種木材の温冷感に着目し、視覚情報が与える影響について検討を行う。ここでは、温冷感に関する研究を行うにあたり、先行研究について調査した結果を紹介する。

1. はじめに

物質に触った時に感じる温冷感の主観的なものとはいえ、熱伝導率などの物理量からある程度、推測することが可能である¹⁾。ただ、この種の実験では、視覚の影響を受けないようにするため、遮蔽して材料を見ないで行う方法²⁾や、目隠しをする方法³⁾が採用されることが多い。視覚情報があることによる影響は、昨年度、筆者が行った実験からも示された。筆者は、スギ材を見たり、触ったり、見て触った時の各種生理量を計測し、血圧の結果から、視覚と触覚を複合させると、触覚による反応よりも、視覚による反応に近い結果が得られた(図1)⁴⁾。これは、人間が五感を通じて外部情報を知覚する割合⁵⁾が、視覚83.0%、聴覚11.0%、臭覚3.5%、触覚1.5%、味覚1.0%とされていることから、視覚からの情報が大きな影響力をもち、他の感覚で得られた知覚に影響を及ぼしたためだと考えられる。同様の例としては、味覚の判定能力に、視覚や嗅覚が影響を与えることが報告されている⁶⁾。

視覚の影響の有無について検討した研究では、材料を見ることで、温感触、冷感触がともに若干強調されるが、視覚の影響は大差ないと報告されている(図2)⁷⁾。しかし、この実験では、フォームポリスチレンから、アルミニウムまで温冷感の感じ方の幅が広い材料を使用しており、"温冷を感じない"付近では、視覚入力があることで、冷たい側の温冷感を持つ材料(-0.5 付近)が温冷を感じない(0 付近)に温冷感が変化しており、単純に温冷感が強調されるとは言い切れない。そこで、今年度は、若干温かい(例えば、キリ材)から、若干冷たい(例えば、オーク材)と感じる材料を用いることで、視覚からの情報が温冷感に及ぼす影響を分析する実験を行う。視覚からの情報としては、材料を見る効果のほか、照明の照度や壁面の色・明るさなどが考えられる。本報告では、視覚情報が材料を触った時の温冷感に与える影響について研究を行うにあたり、温冷感に関する過去の研究を紹介する。

* 2015年8月3日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。 E-mail: yoshika_takahashi@rish.kyoto-u.ac.jp

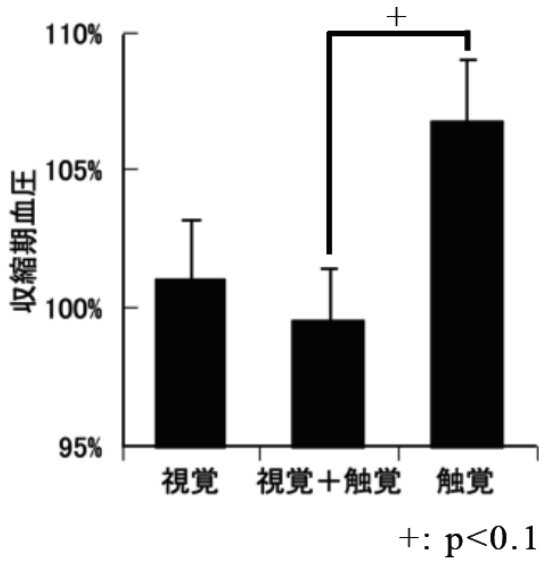


図1: スギ材に接した時の血圧変化⁴⁾

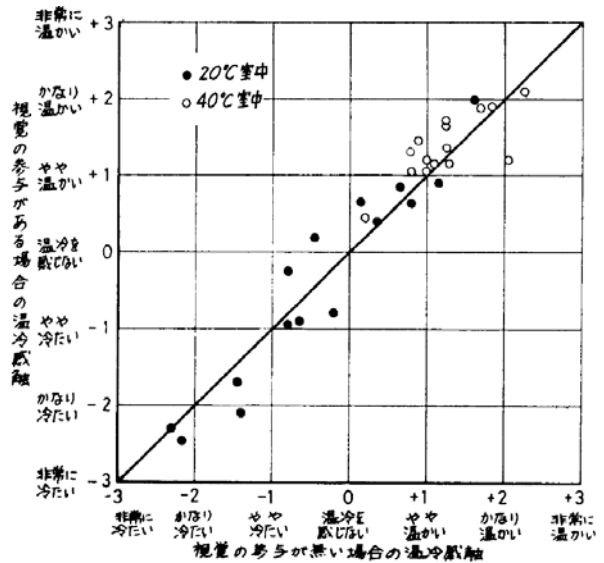


図2: 視覚入力の有無と温冷感の関係⁷⁾

2. 温冷感に影響を与える指標 (熱伝導率、厚み、室温、木材の断面)

2.1 熱伝導率

吉田は、50種類 of 材料を集め、材料を見て、触ることによって得た印象を20種類の形容詞対に対して7段階評点で評価した。実験は室温35°C、湿度80%の環境で行い、被験者は女子大学生25名だった。その結果を図3に示す。温冷感に関する形容詞対のみに着目すると、材料の熱伝導率と相関が高い ($r=0.96$) ことが報告されている。図3では、熱伝導率の値を得ることができなかった材料は図示されていない¹⁾。

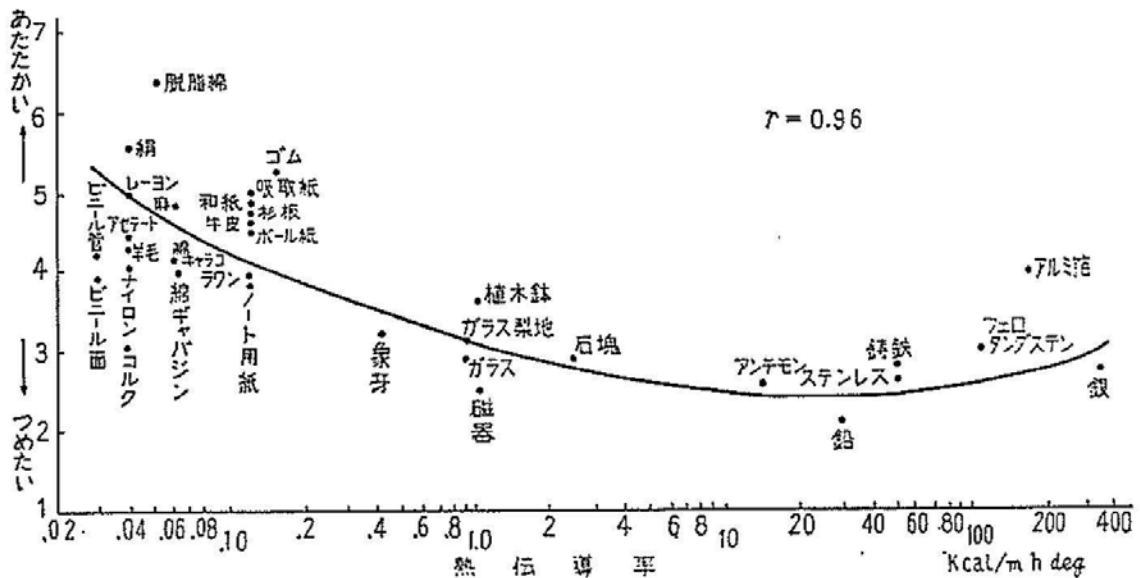


図3: 各種材料の熱伝導率と温冷感¹⁾

2.2 厚み

岡島らは、250 mm × 250 mm の平板で、厚みが 10.5 mm (A)、1 mm (B)、0.2 mm (C) の3種類のアルミニウムの温冷感の違いを、一対比較法によって評価した。3種類のアルミニウムは、厚みのみ違い、比重量、比熱、熱伝導率は全く同じである。実験は室温 21℃、相対湿度 55%の環境で行い、被験者は男子大学生 5名、女子大学生 5名の計 10名だった。また、視覚の影響が判断に影響を及ぼさないようにするため、一對の材料を開口部の空いたスクリーンの向こう

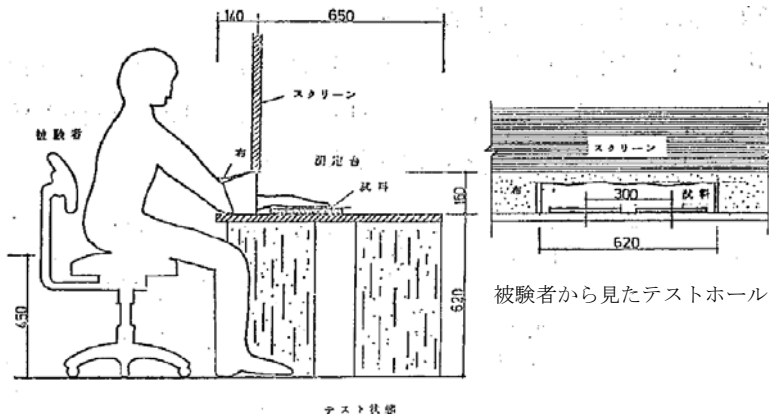


図4：一対比較法による材料の温冷感の実験風景²⁾

表1：材料の物理特性と温冷感²⁾

| 材料 | 熱伝導率 (kcal/mhc) | 寸法 (mm) | 温冷感 (偏差量 Zj) |
|----------|-----------------|--------------|--------------|
| アルミニウム A | 175 | 250×250×10.5 | -0.925 |
| アルミニウム B | 175 | 250×250×1 | -0.463 |
| アルミニウム C | 175 | 250×250×0.2 | 1.390 |

側に設置し、触覚のみで材料の温冷感を一対比較法により判断させた(図4)。その結果、厚みの違うアルミニウムは、温冷感に明らかな差を生じさせていた。表1に、実験に用いたアルミニウムの物理特性と一対比較法によって得られた温冷感の心理量(偏差率 Zj)を示す。偏差量 Zj は、プラス側にあるものほど、より温かいと感じ、マイナス側にあるものほど、より冷たいと感じることを表している。このことから、熱伝導率のみでは温冷感を評価することはできなく、材料の厚みの違いによる影響を考慮する必要があることがわかった²⁾。

松井&笠井は、アルミニウム、鉄、ガラスについて各種材料の厚みが温冷感に与える影響について検討をした。検討対象の材料は、300 mm×300 mmの平板で、厚みは、アルミニウムが 0.25 mm、5 mm、20 mm、鉄が 0.6 mm、1.6 mm、5.3 mm、ガラスが 2 mm、5 mm、10 mm だった。材料の温冷感は、厚みが異なる同一材料3種類、その他の材料3種類の計6種類の材料を一対比較法により評価した。実験は、室温 20℃の恒温

室で行い、被験者は 20～23 歳の男子大学生 20名だった。また、視覚の影響が判断に影響を及ぼさないようにするため、スクリーンを設け、被験者に材料を見せないようにした。その結果、アルミニウムと鉄は薄くなるほど、温かく感じ、厚みの違いが温冷感に影響を与えていた。ガラスは、厚みが 2、5、10 mm と変化しても、ほぼ同程

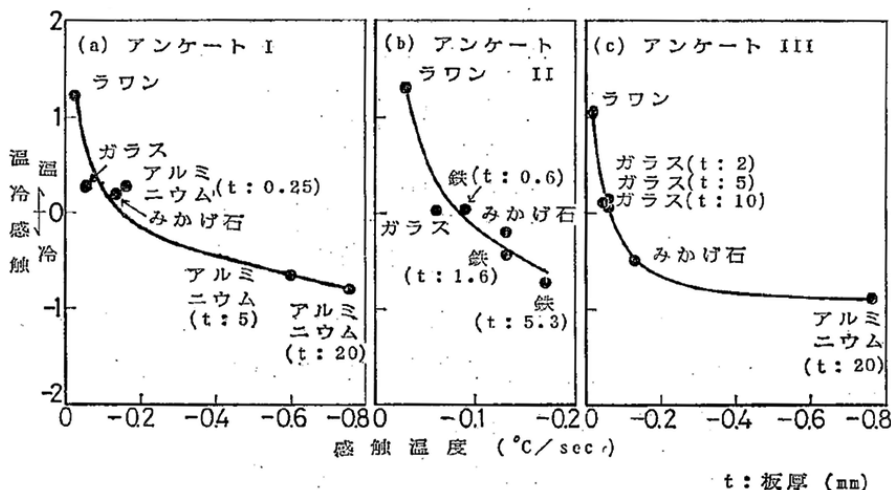


図5：材料の厚みを変えた場合の感触温度と温冷感の関係⁸⁾

度の温冷感を示し、厚みの違いは温冷感に影響を及ぼさなかった(図5)。以上より、材料の厚みが温

冷感に及ぼす影響は、アルミニウムや鉄のように温度伝導率（＝熱伝導率／（比熱×密度））が大きい材料においては顕著であるが、ガラス程度の温度伝導率の材料ではその影響はほとんどないと考えられる⁸⁾。

しかし、16種類の木材と4種類のその他の材料の温冷感について調べた原田らは、これらの材料の温冷感を測定するにあたり、裏面まで熱の影響が及ばないようにするため、予備実験を行い、その結果、材料の厚みを30 mm以上に行っている。原田らの本実験では、200 mm×150 mm×30～40 mmの材料を用意し、約10秒の接触による一対比較法により温冷感を評価させている。その際、視覚の影響を避けるため、目隠しをさせている³⁾。原田らの実験で、最も熱伝導率 λ が高いセメントモルタル（ $\lambda = 3.389 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$ ）は、松井&笠井⁸⁾で、厚みが温冷感に及ぼす影響がほとんどないと言われているガラス（ $\lambda = 2.50 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$ ）の熱伝導率とほとんど同じことから、原田らの実験においても、材料の厚みは温冷感にほとんど影響を与えないと考えられる。しかし、30 mm以上の厚みが必要と考えたのは、松井&笠井⁸⁾とは材料のサイズが違い、また、材料の裏面まで熱が及ばないという視点により、材料の厚みについて検討を行ったためだと考えられる。そのため、今年度行う実験では、使用する材料のサイズや接触時間を決めた上で、原田らと同様に材料の裏面まで熱の影響が及ばないなどの視点により、材料の厚みを検討する必要があると考えられる。

2.3 室温

松井&笠井は、15種類の材料を使い、室温が変えた時の温冷感について評価を行っている⁷⁾。材料の寸法は、300 mm×300 mmとした。実験は、室温が10、20、36、40、50°Cの環境で行い、被験者は19～22歳の男子大学生20名だった。また、視覚の影響が判断に影響を及ぼさないようにするため、スクリーンを設けて、被験者に材料を見せないようにした。その結果を図6に示す。室温が10、20°Cのように、手のひらの温度が材料の温度より高い場合、材料の温度伝導率（＝熱伝導率／（比熱×密度））が大きいほど冷たく感じる。室温が40、50°Cのように、手のひらの温度が材料の温度より低い場合、材料の温度伝導率が大きいほど温かく感じる。温度伝導率 k が $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ （石材類程度）以上になると、温冷感の評価結果はそれほど大きく変化しない。室温が36°Cの場合、材料の温度伝導率の大小に関係なく、温冷感はやや温かい（+1）と温冷を感じない（0）のほぼ中間（+0.5）を示している。これは手のひらと材料との温度がほぼ等しく、両者の間で熱の移動が殆どないことから、材料が手のひらの放熱を

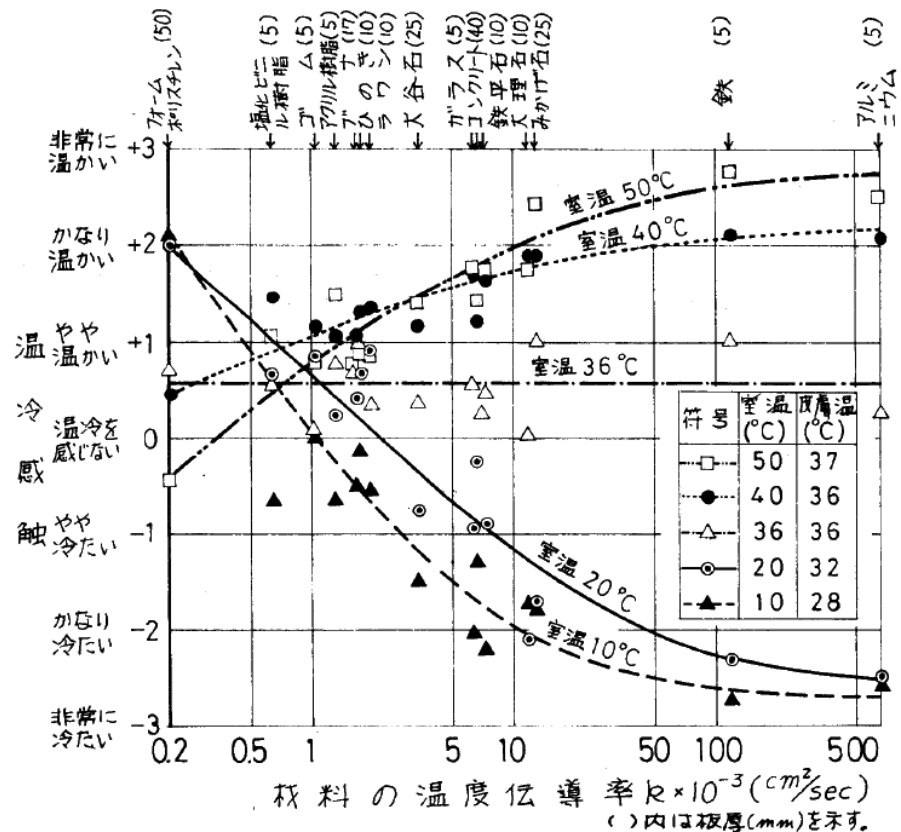


図6：室温変化時の各種材料の温度伝導率と温冷感⁷⁾

妨げ、わずかに温かく感じるためだと考えられる。

木材やプラスチックのように温度伝導率 k が小さい材料 ($k = 0.0013 \sim 0.002 \text{ cm}^2/\text{sec}$) は、室温が 10°C から 50°C と変化しても、温冷感は -0.5 から $+1$ とそれほど変化しない。同様の室温変化で、無機・鉱物質 ($k = 0.0033 \sim 0.013 \text{ cm}^2/\text{sec}$) は、温冷感が -2 から $+2$ 、鉄やアルミニウム ($k = 0.119 \sim 0.660 \text{ cm}^2/\text{sec}$) は、温冷感が -2.5 から $+2.5$ と大きく変化する。一般に温冷感は、材料の温度が手のひらの温度より高い場合 (暑い部屋の場合) 温かく感じ、低い場合 (体温より低い部屋の場合) 冷たく感じる。しかし、フォームポリスチレン (=発泡スチロール) ($k = 0.0002 \text{ cm}^2/\text{sec}$) のように温度伝導率が非常に小さい材料は、暑い部屋の場合、"温冷を感じない"程度になり、体温より低い部屋の場合、温かく感じる。これは暑い部屋においては、手が外部より受熱していた状態がフォームポリスチレンに触れることによって受熱量が急に少なくなるため、冷ために感じる。また、体温より低い部屋においては、手で触れると、手のひらから放熱している熱がフォームポリスチレンと手のひらの間に蓄熱され、手のひらの温度が高くなるため、温かく感じると考えられる。

2.4 木の断面

原田らは、比較的温かいと感じられる材料である木材に着目し、その材面の現われ方が温冷感と各種熱特性に影響を与えるかを調べている。材料としては、木材 16 種類、木材以外 4 種類が用いられたが、ここでは、同一樹種で縦断面と木口面の材料が揃えられた 6 樹種、12 種類の材料の結果を比較する。実験に用いた 6 樹種は、カラマツ、セラヤ、ヤチダモ、カポール、イタヤカエデ、シラカシである。実験は、室温 20°C 、相対湿度 60% の環境で行い、被験者は 20~25 歳の学生で、男女各 10 名の計 20 名だった。また、視覚の影響を避けるため、目隠しをし、両手のひらで同時に両材料を触れさせ、約 10 秒後にどちらの材料が冷たいか、もしくは同じ位に感じるかを判断させた。その結果、同一樹種では、縦断面に比べて、木口面の方が冷たく感じられることがわかった (図 7)。縦断面と木口面の熱伝導率の比は 6 樹種で 1.47~2.16 倍で、平均 1.72 倍だった。縦断面と木口面の温冷感の差は、6 樹種で 1.11~1.40 で、平均 1.28 だった³⁾。ここでは、熱伝導率と温冷感の結果が対応していた。

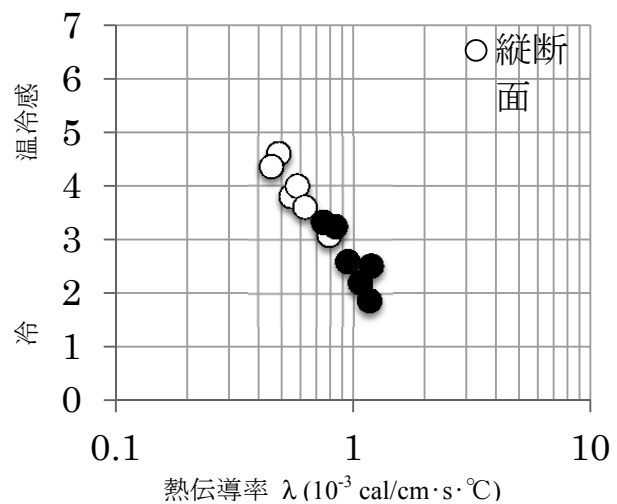


図 7: 各種木材の熱伝導率と温冷感の関係³⁾

3. 今年度行う研究について

温冷感に関する過去の研究より、温冷感に物理的特性 (熱伝導率¹⁾、厚み^{2) 3) 8)}、木の断面³⁾、および環境要因 (室温⁷⁾) が影響を与えることがわかった。これらの研究結果を踏まえ、今年度実験を行う際の条件設定に生かしたい。また、触覚や温冷感に関する研究では、視覚入力の有無に注意が払われており、視覚入力は温冷感を若干強調させる働きがあることが報告されている⁷⁾。ただ、視覚入力の影響は、材料を見ることによる効果のみが検討されているため、今年度行う研究では照明の照度や、壁の色、明るさなど、材料を見ること以外の効果についても検討する予定である。材料としては、若干温かい~若干冷たいと感じる材料を使い、視覚入力が温冷感に及ぼす影響が、微小なものであっても検出できるようにする。計測項目としては、温冷感、皮膚温、脳波、心電図、心拍数を予定している。

参考文献

- 1) 吉田正昭、触覚の系統、日本女子大学紀要、13、47-68、1963.
- 2) 岡島達雄、棚橋勇、安田保、武田雄二、建築仕上げ材料の感覚的評価に関する研究（その1）-触覚による温冷感の定量化-、日本建築学会論文報告集、245、1-7、1976.
- 3) 原田康裕、中戸莞二、佐道健、木材表面の熱特性と接触温冷感、木材学会誌、29・3、205-212、1983.
- 4) 高橋良香、スギ材が人の心理及び生理面に及ぼす作用、第192回定例オープンセミナー配付資料、2015.
- 5) 教育機器編集委員会編、産業教育機器システム便覧、日科技連出版社、386ページ、1972.
- 6) 伊藤輝子、桂きよみ、飯野久栄、視覚・嗅覚・聴覚の味覚判定能力に及ぼす影響、日本味と匂学会誌、4・3、511-514、1997.
- 7) 松井勇、笠井芳夫、仕上材の感触に関する研究 その1：温冷感触、日本建築学会論文報告集、263、21-32、1978.
- 8) 松井勇、笠井芳夫、仕上材の感触に関する研究 温冷感触：その2、日本建築学会論文報告集、294、1-12、1980.

植物バイオマス由来抗ウイルス活性物質の探索*

成田 亮**·***, 李 瑞波****

Antiviral compounds from plant biomass*

Ryo Narita**·*** and Ruibo Li****

概要

地球温暖化などによる環境変動や、グローバル化による人・動物・物の移動が増加したことから、近年ウイルスをはじめとした感染症のリスクが高まっている。本稿では、再生可能な持続資源として注目を集めている木質バイオマスの中で、木竹酢液の生理活性に着目した研究成果を紹介する。木竹酢液は、木竹炭を製造する際に副次的に得られ、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの熱分解生成物などから構成される。木竹酢液は古くから消毒、殺菌などに使用されており、様々な生理活性を有するバイオマスであるが、ウイルスなどの病原体に対する活性についての検討は十分ではない。そこで、未利用バイオマスから薬効成分・生理活性物質を生産し、人の健康や安全な生活に貢献するという新しい研究領域を開拓することを目的として著者らが最近行っている、木酢液、竹酢液の抗ウイルス活性についての成果も併せて紹介する。とりわけ、2010年に宮崎県で発生した家畜伝染病、口蹄疫の原因ウイルスである口蹄疫ウイルスなどに対する消毒薬への応用を視野に入れ、木竹酢液に含まれる抗ウイルス活性物質の探索を行った結果について詳述する。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を用いて木竹酢液の抗ウイルス活性の検討を行い、木竹酢液は酸性条件下で強い抗ウイルス活性を示すことが明らかになっている。また、木竹酢液に含まれる phenol と酢酸が相乗的に抗ウイルス活性を示すことを示した。われわれの実験結果では、ヒノキ由来の木酢液原液が中性条件下においても抗ウイルス活性を示したことから、この画分に含まれる抗ウイルス活性物質の探索を行った。成分分画と抗ウイルス活性の検討により、精製したフラクションに抗ウイルス活性物質が含まれることを示した。本稿では、研究課題に関連する今後の展望についても簡単に言及する。

1. はじめに

全世界の人口が 70 億人を超えた現在では、限りある化石燃料などの枯渇性資源依存型社会から、再生可能エネルギー依存型社会へ遷移し、環境に配慮した生産活動を営むすべを開発、発展させることは、人類のみならず地球上のあらゆる生物種の存続にきわめて重要である。近年、植物資源、特に木質バイオマスが再生可能な持続資源として注目されている。木酢液、竹酢液はバイオマスの熱分解物であり、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一部認められているが科学的な検証は十分ではない。本稿では、木竹酢液とその生理活性について解説し、著者らが行っている木竹酢液の抗ウイルス活性(図 1)についての結果を紹介する。

* 2015年7月31日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。

*** 〒606-8507 京都市左京区聖護院川原町 53 京都大学ウイルス研究所分子遺伝学研究分野

E-mail: rnarita@virus.kyoto-u.ac.jp.

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

2. 木竹酢液とその生理活性

2.1 木竹酢液とは

木竹酢液の基となる粗木竹酢液は、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・凝縮後 90 日以上静置し、三層に分離した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の液体である(図 2; 日本木酢液協会 HP より引用)。これには、木竹材を構成する主要三成分であるセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの熱分解生成物が溶け込んでおり、酢酸を主とする有機酸類、アルコール類、エーテル類、アルデヒド類、ケトン類、フェノール類、アミン類、スルホン類ならびにその他の中性成分等、200 種類以上が含まれる^{1,2)}。

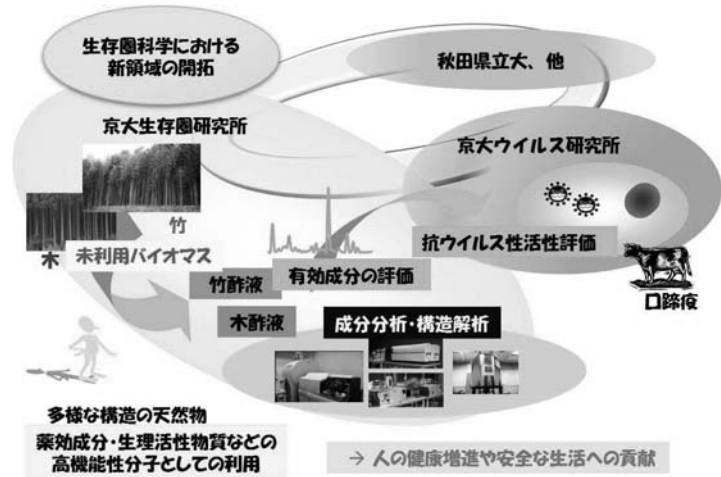


図 1: 本研究の概要図

2.2 木竹酢液の生理活性

木炭を作る過程で出てくる木酢液については古くから研究されており、農業や医薬部外品など多方面で利用されてきた。木竹酢液の生理活性としては、抗菌性、抗酸化性などが報告されている。フタバナヒルギ由来木酢液はカンジダアルピカンスに対する強い抗菌性を示し、コナラやアカマツ由来木酢液は中性条件下においても子囊菌類のオフィオストマポロニクムの増殖を抑制することが示されている^{3,4)}。チョウセンゴミシ由来木酢液のジクロロメタン抽出液は、抗酸化剤として用いられているジブチルヒドロキシトルエンよりも強い抗酸化作用を示す⁵⁾。クルミ由来木酢液においては、含有 phenol 量が多いほど抗酸化作用が強くなることが報告されている⁶⁾。また、殺虫剤や殺蟻剤としても用いられており、コナラやアカマツ由来木酢液がヤマトシロアリに有効であることが知られている⁷⁾。中でも、*o*-cresol や 2-methoxy-4-ethylphenol などのフェノール類が強い殺蟻活性を示すことが報告されている。木竹酢液は、その持つ独特の燻香のため消臭剤としても優れており、トイレ、畜舎等の悪臭駆除に使用されている。また、木竹酢液が免疫応答において機能していることも明らかとなっており、孟宗竹由来竹酢液に含まれる *cresol* が、活性酸素の産生とプロテインキナーゼ C- α/δ の活性化を抑制することでインフラマソームの活性化を阻害し、抗炎症作用を示すことが報告されている⁸⁾。さらに、クヌギ由来木酢液は、signal transducer and activator of transcription 3 のリン酸化を抑制することにより抗炎症作用を示し、皮膚炎に効果があることが明らかとなっている⁹⁾。木酢液は I 型アレルギーに効果があることも知られている¹⁰⁾。

このように、木竹酢液の確かな効能は認められてきたものの、品質の不安定性、燃料革命による炭需要の減少、農業や化学肥料の出現により木竹酢液はあまり注目されなかった。しかしながら、環境に配慮した生産活動が求められる現在、バイオマス資源より生産される木竹酢液の有効性は再認識されるべきであろう。そこで本研究では、木竹酢液の有する抗ウイルス活性ならびに動物の免疫反応における効果に着目し、木竹酢液がウイルス感染症予防に活用できるのではないかと考え、研究を実施した¹¹⁾。

3. 木竹酢液の抗ウイルス活性

3.1 口蹄疫ウイルスのモデルウイルスとしての脳心筋炎ウイルス

ピコルナウイルスは小さい(pico)、RNA (rna)型のウイルス(virus)という意味であり、形態的に最も小さい部類のウイルス群である。そのウイルスゲノムはプラス鎖の1本鎖RNAで、長さは約7.1-8.9kbである。構造的にはほぼ球形の正20面体対称で、精製されたウイルス粒子の直径は約30nmである。ウイルスカプシドは構造タンパク質であるVP1, VP2, VP3, VP4によって構成されている。ピコルナウイルス科はエンテロウイルス属、ライノウイルス属、アフトウイルス属、カルジオウイルス属などから構成され、ポリオの原因ウイルスであるポリオウイルスや、風邪の原因ウイルスの一つであるヒトライノウイルスなどが存在する¹²⁾。

2010年、家畜伝染病である口蹄疫が宮崎県で発生し、29万頭の牛や豚が殺処分された。口蹄疫は、ピコルナウイルス科アフトウイルス属の口蹄疫ウイルス (foot-and-mouth disease virus; FMDV) による感染症である。FMDV感染による致死率は低いものの、その高い伝播性や罹った動物の生産性減少のため、患畜は全て速やかに殺処分される¹³⁾。したがって、FMDV感染においては予防対策が重要であることに疑いの余地はない。しかし現時点で、環境および家畜に害を及ぼさないFMDV予防対策は確立されていない。木竹酢液は環境への悪影響は少ないと考えられ、さらに、その人畜等に対する安全性も評価されている。FMDVはpH7以下において不安定であるため、酸性の木竹酢液処理によりウイルスは感染力を喪失することが容易に予想できる。したがって、木竹酢液はFMDV消毒薬の候補となりうるが、木竹酢液の酸以外の複合的な成分が直接ウイルスに作用、または細胞に作用することで抗ウイルス効果を発揮する可能性も十分に考えられる。しかしながら、上述したように、FMDVはpH高感受性であるため、酸以外の抗ウイルス化合物探索には適さない。一方、脳心筋炎ウイルス (Encephalomyocarditis virus; EMCV)はFMDVと同じピコルナウイルス科でありながらpH3~9にて安定であり、マウス細胞やヒト細胞だけでなく、マウス個体を用いた感染実験にも使用できる。すなわち、EMCVを用いることで、木竹酢液の酸以外の抗ウイルス効果の機能性スクリーニングも可能となるだけでなく、広汎なリソースである植物成分の新たな抗ウイルス因子のスクリーニングと、それらの分子レベルでの機能解析が可能となる。そこで本研究では、EMCVをFMDVのモデルウイルスとして使用し、表1に示す木竹酢液のもつ潜在的な抗ウイルス作用を検討した。

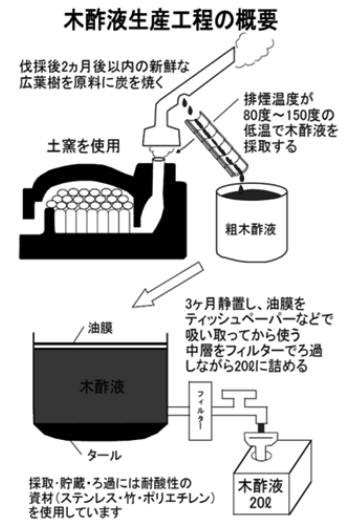


図2: 木酢液生産工程の概要

表 1: 本研究に使用した木竹酢液

| No. | 試料名 | 種別 | 樹種 | 産地 | pH |
|-----|-----------|-------|-------|-----|-----|
| A | 白炭木酢液 | 常緑広葉樹 | ウバメガシ | 和歌山 | 2.3 |
| Ad | 蒸留白炭木酢液 | 常緑広葉樹 | ウバメガシ | 和歌山 | 2.1 |
| B | 黒炭木酢液 | 落葉広葉樹 | ミズナラ | 岩手 | 2.9 |
| Bd | 蒸留黒炭木酢液 | 落葉広葉樹 | ミズナラ | 岩手 | 2.7 |
| C | 竹酢液 | 竹 | 孟宗竹 | 山梨 | 3.5 |
| Cd | 蒸留竹酢液 | 竹 | 孟宗竹 | 山梨 | 2.5 |
| D | アカマツ木酢液 | 針葉樹 | アカマツ | 秋田 | 3.7 |
| Dd | 蒸留アカマツ木酢液 | 針葉樹 | アカマツ | 秋田 | 2.7 |
| E | ヒノキ木酢液 | 針葉樹 | ヒノキ | 岐阜 | 2.8 |
| F | カラマツ木酢液 | 針葉樹 | カラマツ | 北海道 | 3.5 |

3.2 木酢液の抗ウイルス活性

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(表 1)。木竹酢液と混合して 1 時間反応させた EMCV の感染性が低下するか否かを検討したところ、6 種の木竹酢液原液 (A、Ad、B、Bd、C、Cd) は EMCV に対して抗ウイルス活性を有しており、それらは特に酸性条件下で有効であることを明らかにしてきた。蒸留竹酢液 Cd に関して詳細な抗ウイルス活性について検討したところ、抗ウイルス活性物質の一つとして phenol が大きく関与していることを見出した。また、phenol 単独の抗ウイルス活性が、活性粗分画部の活性より低い活性を示したことから、phenol とその他の物質が混合することにより、相乗的に抗ウイルス活性を高めていることを示した。また、活性粗分画部、非活性粗分画部および phenol にそれ単独では影響のない濃度の酢酸 (2.7% 終濃度) を添加することで抗ウイルス活性が大きく高まった¹⁴⁾。

さらに、ヒノキならびにカラマツ由来の木酢液(E および F)は、孟宗竹由来の竹酢液とは異なる活性物質を含有する可能性を示してきた。そこで、ヒノキ木酢液 E のウイルス不活化物質を探索するため、図 3 に示すようにヒノキ木酢液 E の成分分画を行い、分画部 E-Fr.1-1~3、E-Fr.1-2~3 および E-Fr.1-3-1~3 をそれぞれ得た。これら分画部のウイルス不活化活性について検討した結果を図 5 に示す。E-Fr.1-1-1、E-Fr.1-2-1、E-Fr.1-2-2 および E-Fr.1-3-1 は EMCV の感染性を 1/10 以下に低下させたが、E-Fr.1-1-2 にはウイルス不活化活性が確認できなかった。このうち、最も強い抗ウイルス活性を示した E-Fr.1-1-1 の成分分画を行い、E-Fr.1-1-1-4 を得た。これら分画部の抗ウイルス活性を同様に測定したところ、E-Fr.1-1-1-3 で強い抗ウイルス活性を示すことが明らかとなった(図 6)。そこで EMCV に対する抗ウイルス活性の確認できた分画に含まれる化合物を GC-MS によって解析し、抗ウイルス活性物質の候補となる化合物を数種得た。現在これら化合物の抗ウイルス活性を検討しているところである。

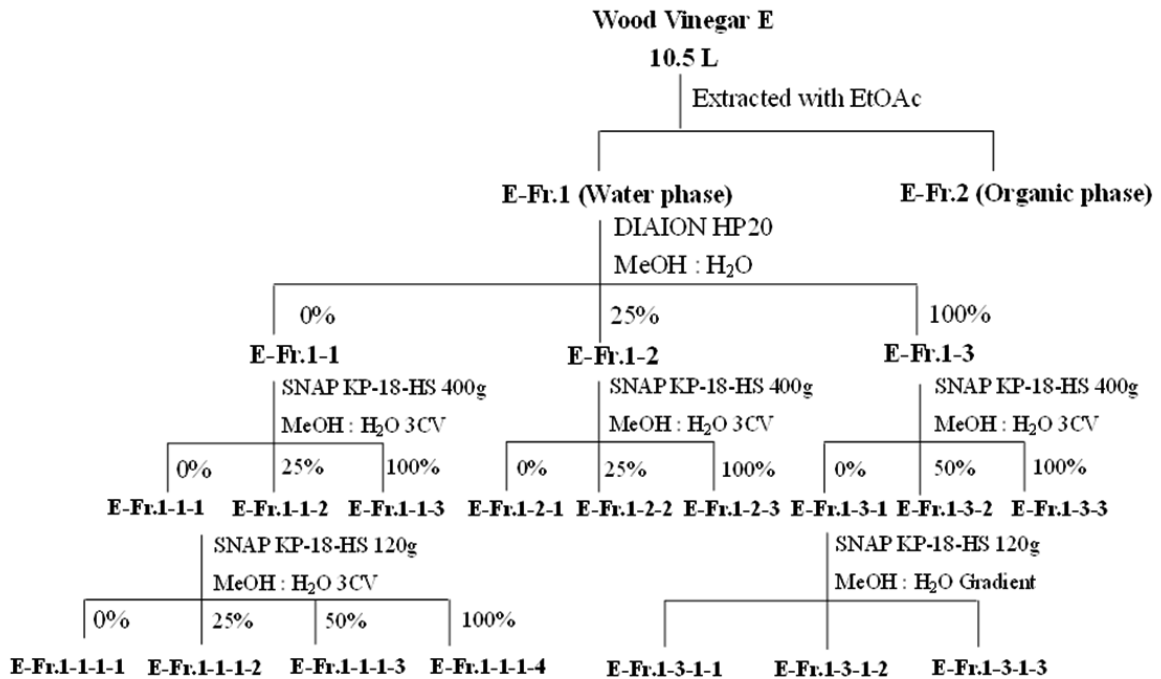


図 3: ヒノキ木酢液 E の成分分画

4. まとめと今後の展望

これまでに、蒸留竹酢液Cdの詳細な抗ウイルス活性を検討し、抗ウイルス活性物質の一つとしてphenolが大きく関与していることを見出すとともに、phenolは酢酸と相乗効果を示し、強い抗ウイルス活性を示した¹⁰⁾。Phenolと酢酸がどのようにして強い抗ウイルス活性を示しているかは明らかとなっていないが、EMCVのウイルス粒子の構造を変化させることにより不活化活性を示している可能性が示唆されている。

本研究では、ヒノキ由来の木酢液原液 (E) はEMCVに対して抗ウイルス活性を有し、中性条件下でも活性を保持することから、この画分に含まれる活性物質の探索を行った。成分分画と抗ウイルス活性の検討により、精製したフラクションに抗ウイルス活性物質が含まれることを示した。現在これら化合物の抗ウイルス活性の検討を行っている。また、木竹酢液の成分分析を行ったところ、phenolだけでなく、その類似体も多く含まれていることが明らかとなった。そこで今後はこれら木竹酢液に含まれるphenol類似体の抗ウイルス活性を検討していく予定である。さらに、インフルエンザウイルス(オルトミクソウイルス科)や、FMDVと同程度のpH感受性を示すヒトライノウイルス(ピコルナウイルス科)などのウイルスを用い、木竹酢液に含まれる抗ウイルス活性物質の同定を進める予定である。

木竹酢液は様々な生理活性を示すことが明らかとなっているが、200種類以上の成分から構成されること、産地や製法によってその組成が異なることなどから、木竹酢液に含まれるどの成分が生理活性を示すのか、あまり解析は進ん

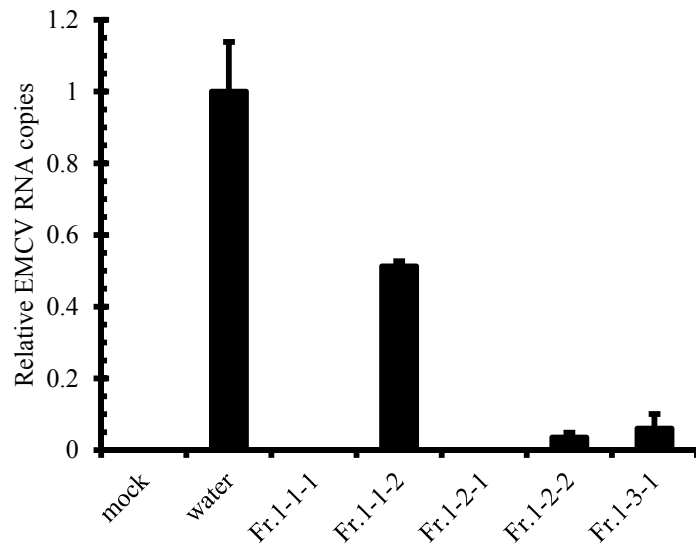


図 4: E-Fr.1-1-1~2, 1-2-1~2, 1-3-1 の抗ウイルス活性

EMCV をそれぞれのヒノキ由来木酢液 E 分画部と混合し、氷上で1時間反応後、L929細胞に感染させた。感染後6時間で細胞からRNAを回収し、逆転写後、EMCV特異的プライマーならびにSYBR Greenを用いた定量的RT-PCRにより細胞中の相対的ウイルスRNA量を算出した。

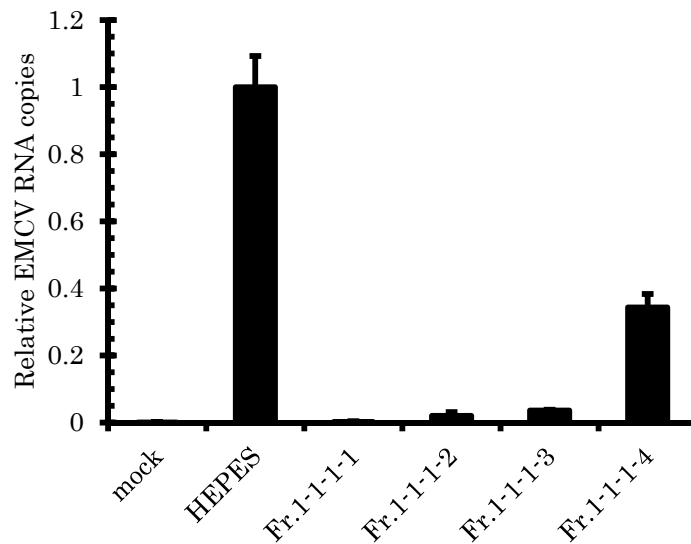


図 5: E-Fr.1-1-1-1~4 の抗ウイルス活性

上記ヒノキ由来木酢液 E 分画部を用い、前述の方法と同様にEMCV不活化実験を行った。

でない。今後、木竹酢液に含まれる生理活性物質の同定が進むことにより、抗ウイルス薬や炎症性疾患の治療薬として応用されることが期待される。

参考文献

- 1) 谷田貝光克, 雲林院源治, 大平辰朗, 炭化副産物に関する研究(第4報)木酢液の成分, 木材学会誌, 34, 184-188, 1988.
- 2) Mathew S, Zakaria ZA., Appl. Microbiol. Biotechnol., 99 (2), 611-622, 2015.
- 3) Darah I, Jain K, Lim SH and Wendy R., J. App. Pharm. Sci., 3 (07), 007-013, 2013.
- 4) Velmurugan N, Han SS, Lee YS., Int. J. Environ. Res., 3, 167-176, 2009.
- 5) Ma C, Li W, Zu Y, Yang L, Li J., Molecules, 19 (12), 20821-20838, 2014.
- 6) Wei Q, Ma X, Zhao Z, Zhang S, Liu S., J. Anal. Appl. Pyrolysis, 88, 149-154, 2010.
- 7) Yatagai M, Nishimoto M, Hori K, Ohira T, Shibata A., J. Wood Sci., 48:338-342, 2002.
- 8) Ho CL, Lin CY, Ka SM, Chen A, Tasi YL, Liu ML, Chiu YC, Hua KF., PLoS One, 8 (10), e75738, 2013.
- 9) Lee CS, Yi EH, Kim HR, Huh SR, Sung SH, Chung MH, Ye SK., J. Ethnopharmacol., 135 (3), 747-753, 2011.
- 10) Imamura E, Watanabe Y., U.S. Patent, 0136133A1, 2005.
- 11) 山元誠司, 丸本真輔, 西村裕志, 尾野本浩司, 谷田貝光克, 藤田尚志, 矢崎一史, 渡辺隆司, 木竹酢液のウイルス不活性化物質の探索, 生存圏研究, 8, 49-54, 2012.
- 12) 小池智, ピコルナウイルスの感染初期過程, ウイルス, 61, 183-192, 2011.
- 13) 村上洋介, 口蹄疫ウイルスと口蹄疫の病性について(総説)
<http://www.naro.affrc.go.jp/niah/fmd/explanation/018087.html>
- 14) Marumoto S, Yamamoto SP, Nishimura H, Onomoto K, Yatagai M, Yazaki K, Fujita T, Watanabe T., J. Agric. Food Chem., 60, 9106-11, 2012.

日本におけるナガシクイムシ科昆虫による住宅被害*

The cases of Bostrichidae infestation in Japan*

Bong, Lee-Jin**

概要

日本におけるナガシクイムシ科昆虫による住宅の被害調査を全国の害虫駆除会社に対して実施した。その結果、1980年～2014年の34年間で52件の被害例が寄せられた。件数の多くは中部地区および近畿地区からのものであり、ナガシクイムシ科昆虫による被害が日本の北部では少ないことが明らかとなった。52件の内65%はヒラタキクイムシ属種によるものであり、ヒラタキクイムシ (*Lyctus brunneus*) が最も多く23件、次いでアフリカヒラタキクイムシ (*Lyctus africanus*) が11件であった。日本において定着が確認されている他のナガシクイムシ科昆虫、オオナガシクイ (*Heterobostrichus hamatipennis*)、チビタケナガシクイ (*Dinoderus minutus*)、ケプトヒラタキクイムシ (*Minthea rugicollis*)、ケヤキヒラタキクイムシ (*L. sinensis*) およびナラヒラタキクイムシ (*L. linearis*) については、被害例は少なかった。

(本稿の原文は英語で記述されておりますので、欧文誌 Sustainable Humanosphere, No.11 をぜひご参照下さい。)

* 2015年8月2日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。 E-mail: bong_leejin@rish.kyoto-u.ac.jp

グローバル電磁流体シミュレーションと THEMIS 衛星観測を 組み合わせたサブストームの研究*

Substorm: view from THEMIS observation and global MHD simulation*

YAO, Yao**

概要

ジオスペースではサブストームと呼ばれる擾乱現象が発生し、地球を周回する人工衛星の被ばくや表面耐電、宇宙飛行士の被ばく、地上電力網の損傷など生存圏に大きな影響を与えることが知られている。サブストームの物理を理解することは、予測手段の確立による宇宙災害の低減と地球近傍の宇宙空間を系統的に理解する上で重要である。サブストームのオンセットの開始機構はサブストーム研究の重要問題の一つであるが、多くのモデルが提唱されてきたにもかかわらず決着がついていない。本稿では、グローバル電磁流体シミュレーションと多衛星による観測結果を比較することで問題点をまず整理し、Tanaka ほか(2010)が提唱した磁気圏プラズマ圧力の発展の観点でサブストーム開始機構を再考する。

(本稿の原文は英語で記述されておりますので、欧文誌
Sustainable Humanosphere, No. 11 をぜひご参照下さい。)

* 2015年8月3日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター。 E-mail:
yao@rish.kyoto-u.ac.jp

大気エアロゾルの「老化」のメカニズムを探る*

江波 進一**

Photochemical aging of atmospheric aerosols*

Shinichi Enami**

概要

大気エアロゾルは、大気中においてオゾンやヒドロキシルラジカル(OH ラジカル)などによって酸化され、常に変質し続けている。この「エイジング」過程の解明は、大気においてエアロゾルが果たしている役割を正しく理解する上で特に重要である。しかし、従来の室内実験では現象論的な研究にとどまり、エイジング機構の本質的な理解はほとんど進んでこなかった。これは、空気—大気エアロゾルの境界相で起こる不均一反応を直接に“その場”測定できる手法がなかったのが一因である。本総説では質量分析法を応用した新しい実験手法を用いた大気エアロゾルの不均一酸化過程の研究について紹介する。

1. はじめに

地球の大気に浮遊する雲や海塩粒子などの大気エアロゾルは、地球の気候変動を理解する上で鍵となる重要な物質である。代表的な大気汚染物質である PM2.5 も大気エアロゾルの一種である。このような大気エアロゾルは気体のオゾンや OH ラジカルなどと不均一反応を起こし、常に変質し続けている¹⁾。気体のオゾンは大気エアロゾル中に含まれる C=C 二重結合を持つ有機化合物や鉄イオン(Fe²⁺)などの遷移金属イオンと反応する^{2,3)}。また OH ラジカルは大気エアロゾルに含まれる飽和炭化水素を持つ長鎖のカルボン酸などの安定な化学種を酸化する^{4,6)}。このような「エイジング (老化)」によって大気エアロゾルは組成や粒径などが変化し、その結果、放射強制力や毒性なども同時に変化している。例えば植物から放出されるテルペン類は大気エアロゾルに取り込まれた後、オゾンによって酸などに変換される^{7,9)}。これらの生成した酸は大気エアロゾルのサイズの成長につながる。また C=C 二重結合を持つ有機化合物の一部はオゾンとの不均一反応によってオゾニドと呼ばれる人体や農作物に有害な化合物に変換される^{2,10)}。オゾニドを含む大気エアロゾル、特にサイズの小さい PM2.5 を吸引することで肺に深刻なダメージが起きることが予想されている。また有機物によってコーティングされたエアロゾルは気体の OH ラジカルと不均一反応を起こすことで親水性が増加し、より多くの水分子を取り込むようになる¹¹⁾。このようなエイジング機構の解明は大気エアロゾルが地球の気候変動と人類の健康に与える影響を理解する上で重要である (図 1)。このような不均一反応が起こる「場」は空気—大気エアロゾルの気液境界相である。気液境界相はその他の媒体とは本質的に異質な媒体である。例えば、気液境界相では特定のイオンが濃縮されて存在し、そこでの反応速度は液中と比較して 10³ 倍以上促進される例も報告されている^{3,12)}。大気エアロゾルの表面積をグローバルで換算すると地表の総面積の 100 倍以上にもなり¹³⁾、その膨大かつ未知の反応場への理解は重要である。

* 2015 年 7 月 12 日作成

** 〒606-8301 京都市左京区吉田牛ノ宮町 京都大学白眉センター(京都大学生存圏研究所 連携教員).
E-mail: enami.shinichi.3r@kyoto-u.ac.jp

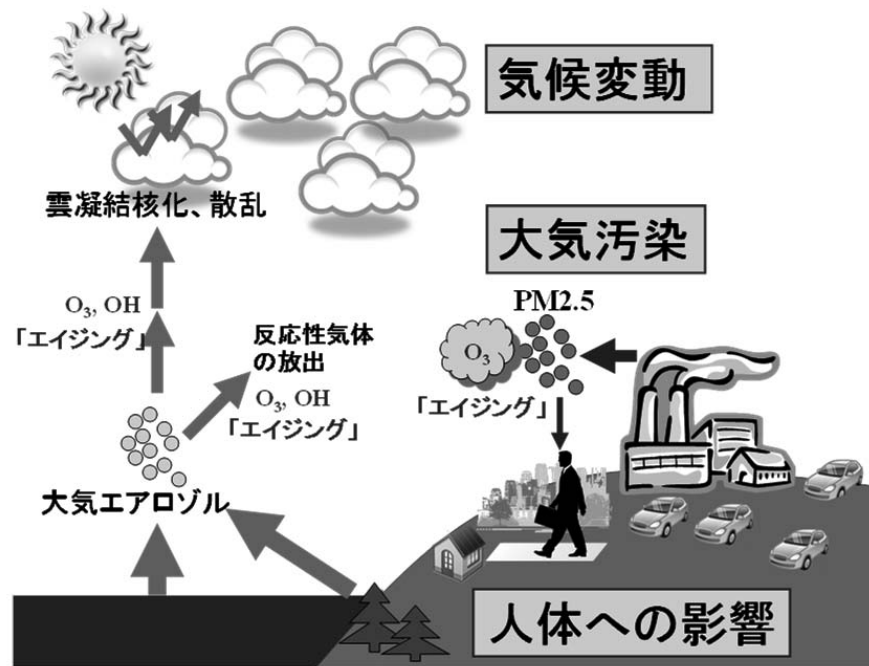


図 1：大気エアロゾルのエイジング（老化）は地球の気候変動と大気汚染問題に密接に関連する

2. 気相と液相の境界で起こる「不均一」な酸化反応を直接測定する手法

従来の室内実験研究は、連続液滴法や濡れ壁反応管法などを用いた取り込み係数の導出にとどまり、不均一反応機構そのものの理解はあまり進んでこなかった¹⁴⁾。これは、空気—大気エアロゾルの境界相(界面)で起こる不均一反応を直接的に“その場”測定できる実験手法がなかったのが一因である。特にラジカルを含む不均一反応はその測定が難しく、その反応機構はほとんどわかっていない。著者らは液滴の分解過程と質量分析法を応用した、厚さ約 1 nm の水の界面で起こる反応をその場測定することができる新規実験手法を考案した(図2)^{5,15)}。ネブライザーによって測定したいサンプル(溶液)のマイクロジェット(噴流)を作り、その垂直方向から反応性ガスを放射する。空気/マイクロジェットの気液界面で反応が起きた後、マイクロジェットは約 10 マイクロ秒後にネブライザーガスによって分解し、マイクロメートル以下のサイズの微小液滴となり、最終的に気相にイオンを放出する。この気相のイオンを質量分析法で検出する。この結果、初期マイクロジェットの気液界面に存在する反応物・生成物のイオンが質量分析法で検出される。本手法は水のマイクロジェットの気液界面(厚さ約 1 nm)で起こるダイナミックな組成変化を常温・大気圧で直接調べることができる¹⁶⁾。

この研究手法には以下の特徴がある。

- (I) 界面選択性
- (II) 常温常圧測定
- (III) その場検出
- (IV) 短時間
- (V) 高感度
- (VI) 高い同定能力

これらの特徴は従来の手法にはない画期的なものであり、気液界面で瞬時に起こる化学反応を直接追跡できる。この手法は海塩エアロゾルとオゾンの不均一反応の研究や水滴の表面の酸性度/塩基性度に関する研究などに応用されてきた¹⁶⁾。

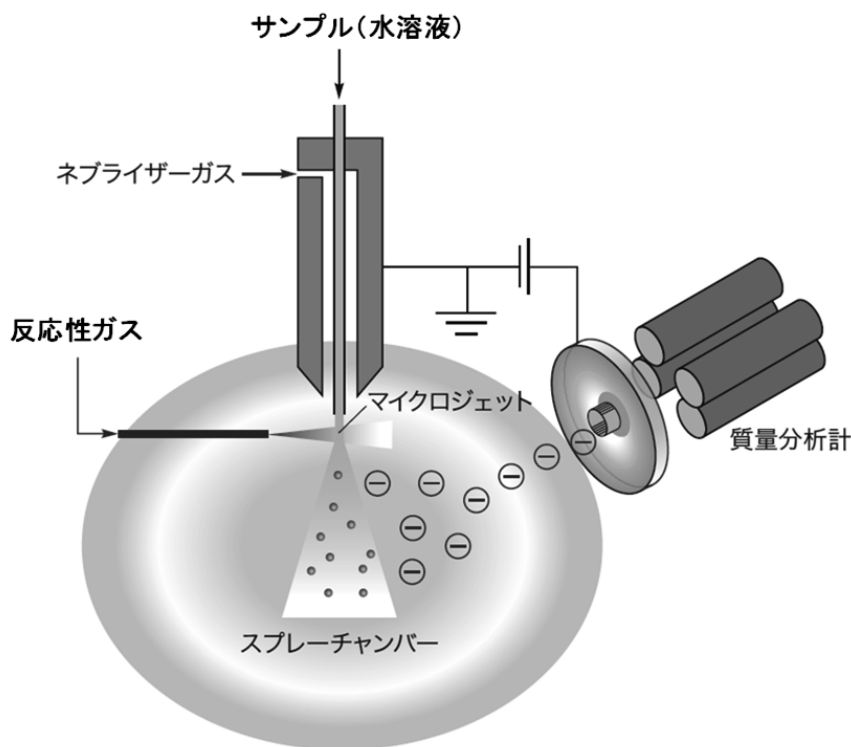


図2：気相と液相の境界で起こる不均一な反応を直接測定する手法

3. 大気エアロゾルのエイジング過程を分子レベルで解明する

3.1 鉄イオンを含む大気エアロゾルのエイジング過程

大気中の雲を構成する微小な水滴に含まれている二価の鉄イオン Fe(II) はフェントン反応 $[\text{Fe(II)}+\text{H}_2\text{O}_2]$ とフェントン様反応 $[\text{Fe(II)}+\text{O}_3]$ によって反応性の高い化学種となることで、水滴中の有機化合物などを酸化し、酸などに変換する働きをしている¹⁷⁾。つまりフェントン反応が雲の酸化能力を決定する一因となっている。フェントン反応は大気化学だけではなく、生化学、水質改善技術など様々な分野で重要な役割を果たしている。ヒドロキシルラジカル(OHラジカル)ができるという従来の反応経路に対して、近年、不安定な四価の鉄である Fe(IV)=O (オキソフェリル中間体)ができるという新しい反応経路が提案されており、研究者の間で論争が起こっていた¹⁸⁾。OHラジカルは反応性が非常に高く、酸化力が最も高いラジカルの一つであり、ほぼあらゆる化合物と反応する。 Fe(IV)=O はOHラジカルとは異なる独自の反応性を持つため、どちらが起こっているのかが問題となる。大気中の空気-雲の水滴界面や生体内での細胞膜-水界面など、我々の身の回りに多く存在している水の界面で起こっている「界面フェントン反応」は特に重要であるが、その反応機構はこれまで全くわかっていなかった。

我々はネブライザーによって塩化鉄(II)(FeCl_2)を含む水のマイクロジェットを作り、その垂直方向から過酸化水素ガス(H_2O_2)もしくはオゾンガス(O_3)を吹き付け、 Fe^{2+} とこれらの反応性ガスの反応によって気液界面に生成する中間体・生成物を瞬時に質量分析法で検出した。その結果、気液界面で起こるフェントン反応とフェントン様反応はバルク中に比べて千倍以上速く進行し、 Fe(IV)=O が支配的に生成することを見出した³⁾。またOHラジカルの捕捉剤である*tert*-ブチルアルコールを大過剰加えても反応物・生成物の質量スペクトルが変化しないことから、液中の反応機構とは異なり、気液界面では

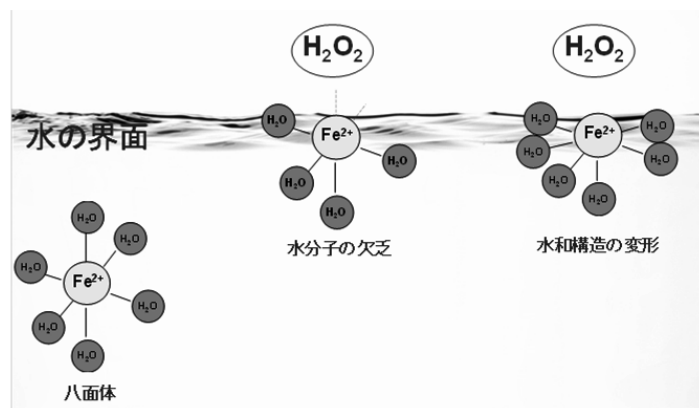


図3：水の界面で起こるフェントン反応のメカニズム

OHラジカルは生成せず、二電子酸化（O原子移動）反応が主として起こることが明らかになった。二価の鉄イオンは水中では6つの水分子による水和によって安定に存在しているが、水の界面では水分子そのものが不足しているか、もしくは水和構造が歪んでいるために、過酸化水素やオゾンが鉄（II）イオンの中心部に入りやすくなるためと考えられる（図3）。フェントン反応は大気における雲の酸化能力を決定し、生体内ではガン化や老化の主因とされ、さらに水質改善技術にも広く用いられているため、本結果が与えるインパクトは大きい^{19,20}。大気中の雲の水滴界面では過酸化水素と鉄イオンが予想よりも速く反応しFe(IV)=Oを生成するため、これまでのOHラジカルの生成のみを仮定してきた大気モデルの再構築が必要になると考えられる。

3.2 ジカルボン酸を含む大気エアロゾルのエイジング過程

ジカルボン酸は大気エアロゾル中に最も多く含まれている酸の一つであり、その不均一反応による変質プロセスの理解は大気エアロゾルのエイジング機構を解明する上で特に重要である²¹。例えば、近年の観測結果によると人為的影響の少ない海洋上のエアロゾル中にシュウ酸などの分子量の小さいジカルボン酸が予想外に多く含まれていることが明らかになった²²。これらの分子量の小さいジカルボン酸はOHラジカルによる長鎖のジカルボン酸の不均一反応によって生成している可能性がある。これまで大気エアロゾルに含まれるジカルボン酸は大気に放出された揮発性有機化合物(VOC)の最終生成物であると考えられてきた。上述の手法に光分解用レーザーを組み合わせた界面光ラジカル反応のその場計測手法を用いて、大気エアロゾルの主成分である各種ジカルボン酸と気相のOHラジカルの不均一反応研究を行った^{4,5}。その結果、気液界面においてペロキシラジカル(ROO•)中間体を直接検出し、気液界面特有の酸化機構を解明することに成功した。ROO•は非常に速い($k > 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$)自己反応によってアルコールとカルボニル、過酸化物、そして炭素鎖が一つ短くなった新たなジカルボン酸を生成することを見出した（図4）。また、シュウ酸やマロン酸などの分子量の小さいジカルボン酸は親水性であり、その反応性も低いことから気相のOHラジカルによる酸化を受けにくいことがわかった。この新しく得られた知見によって、分子量の小さいジカルボン酸が大気エアロゾルに蓄積されていく現象が説明できるようになった。大気エアロゾルの主成分であるジカルボン酸の不均一反応による酸化・分解プロセスが明らかになり、地球の気候変動に影響を与えている大気エアロゾルのエイジング過程の本質的理解に近づいた。今後、大気化学におけるフィールド観測データの解釈や新しい大気モデルの構築につながることを期待される。

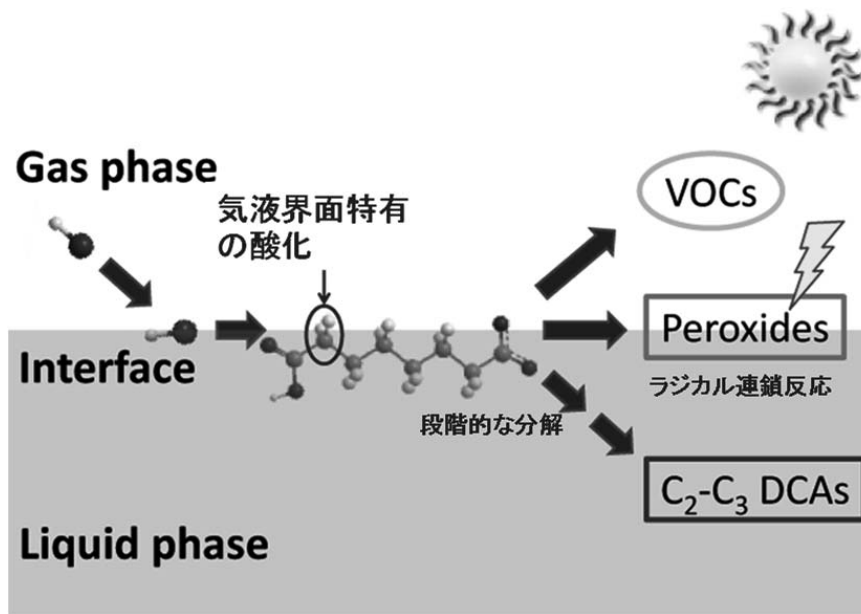


図 4: 大気エアロゾルの主成分ジカルボン酸の気体 OH ラジカルによる酸化メカニズム

4. おわりに

大気エアロゾルのエイジング機構の解明は地球の気候変動やPM2.5の人体への影響を理解する上で重要である。これまでの実験は現象論的な研究にとどまっていたが、新しい実験手法の確立により、その機構が分子レベルで明らかになりつつある。今回紹介したように大気エアロゾルに含まれる鉄イオンは水の界面では水中とは異なる反応性・酸化反応機構を示し、また大気エアロゾルの主成分である有機物も気液界面特有の酸化過程を経て分解していく。大気化学の総括的な理解には気相や液相といった均一な系だけではなく、気液界面のような不均一な場で起こる複雑な化学・物理現象の解明が必須である。複雑な系であればあるほど、素反応に立ち返った基礎研究がますます重要になってくると考える。

参考文献

- 1) Ravishankara, A. R. Heterogeneous and multiphase chemistry in the troposphere. *Science* **1997**, 276, 1058-1065.
- 2) Enami, S.; Hoffmann, M. R.; Colussi, A. J. Acidity enhances the formation of a persistent ozonide at aqueous ascorbate/ozone gas interfaces. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2008**, 105, 7365-7369.
- 3) Enami, S.; Sakamoto, Y.; Colussi, A. J. Fenton chemistry at aqueous interfaces. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2014**, 111, 623-628.
- 4) Enami, S.; Hoffmann, M. R.; Colussi, A. J. Stepwise Oxidation of Aqueous Dicarboxylic Acids by Gas-Phase OH Radicals. *J. Phys. Chem. Lett.* **2015**, 527-534.
- 5) Enami, S.; Hoffmann, M. R.; Colussi, A. J. In Situ Mass Spectrometric Detection of Interfacial Intermediates in the Oxidation of RCOOH(aq) by Gas-Phase OH-Radicals. *J. Phys. Chem. A* **2014**, 118, 4130-4137.
- 6) George, I. J.; Abbatt, J. P. D. Heterogeneous oxidation of atmospheric aerosol particles by gas-phase radicals. *Nat. Chem.* **2010**, 2, 713-722.

- 7) Enami, S.; Mishra, H.; Hoffmann, M. R.; Colussi, A. J. Protonation and oligomerization of gaseous isoprene on mildly acidic surfaces: Implications for Atmospheric Chemistry. *J. Phys. Chem. A* **2012**, *116*, 6027-6032.
- 8) Enami, S.; Hoffmann, M. R.; Colussi, A. J. Dry Deposition of Biogenic Terpenes via Cationic Oligomerization on Environmental Aqueous Surfaces. *J. Phys. Chem. Lett.* **2012**, *3*, 3102-3108.
- 9) Enami, S.; Hoffmann, M. R.; Colussi, A. J. Prompt formation of organic acids in pulse ozonation of terpenes on aqueous surfaces. *J. Phys. Chem. Lett.* **2010**, *1*, 2374-2379.
- 10) Enami, S.; Hoffmann, M. R.; Colussi, A. J. How phenol and alpha-tocopherol react with ambient ozone at gas/liquid interfaces. *J. Phys. Chem. A* **2009**, *113*, 7002-7010.
- 11) George, I. J.; Abbatt, J. P. D. Chemical evolution of secondary organic aerosol from OH-initiated heterogeneous oxidation. *Atmos. Chem. Phys.* **2010**, *10*, 5551-5563.
- 12) Knipping, E. M.; Lakin, M. J.; Foster, K. L.; Jungwirth, P.; Tobias, D. J.; Gerber, R. B.; Dabdub, D.; Finlayson-Pitts, B. J. Experiments and simulations of ion-enhanced interfacial chemistry on aqueous NaCl aerosols. *Science* **2000**, *288*, 301.
- 13) Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*; 2nd ed.; Wiley: Hoboken, N.J., 2006.
- 14) Davidovits, P.; Kolb, C. E.; Williams, L. R.; Jayne, J. T.; Worsnop, D. R. Update 1 of: Mass Accommodation and Chemical Reactions at Gas-Liquid Interfaces. *Chem. Rev.* **2011**, *111*, PR76-PR109.
- 15) Enami, S.; Colussi, A. J. Long-range specific ion-ion interactions in hydrogen-bonded liquid films. *J. Chem. Phys.* **2013**, *138*, 184706.
- 16) Laskin, J.; Laskin, A.; Nizkorodov, S. A. New mass spectrometry techniques for studying physical chemistry of atmospheric heterogeneous processes. *Int. Rev. Phys. Chem.* **2013**, *32*, 128-170.
- 17) Deguillaume, L.; Leriche, M.; Chaurnerliac, N. Impact of radical versus non-radical pathway in the Fenton chemistry on the iron redox cycle in clouds. *Chemosphere* **2005**, *60*, 718-724.
- 18) Groves, J. T. High-valent iron in chemical and biological oxidations. *J. Inorg. Biochem.* **2006**, *100*, 434-447.
- 19) 江波進一 解説: 水界面で起こるフェントン反応のメカニズム-直接測定を可能にした独創的手法とは-. *化学* **2014**, *69*, 44-48.
- 20) 「京大、120 年来の謎だった水の界面で起こる「フェントン反応」の機構を解明」. *マイナビニュース* **2014/1/10**.
- 21) Fu, P.; Kawamura, K.; Usukura, K.; Miura, K. Dicarboxylic acids, ketocarboxylic acids and glyoxal in the marine aerosols collected during a round-the-world cruise. *Marine Chem.* **2013**, *148*, 22-32.
- 22) Bikkina, S.; Kawamura, K.; Miyazaki, Y.; Fu, P. Q. High abundances of oxalic, azelaic, and glyoxylic acids and methylglyoxal in the open ocean with high biological activity: Implication for secondary OA formation from isoprene. *Geophys. Res. Lett.* **2014**, *41*, 3649-3657.

地形や地表環境が接地層内におけるオゾン消失に与える影響 —自動車を利用したトラバース計測の試み—*

高橋 けんし**，矢吹 正教***

Effects of topographic features and air quality environment on the ozone destruction processes in the surface boundary layer as studied by traverse observations*

Kenshi Takahashi** and Masanori Yabuki***

概要

比較的急峻な地形を利用して、夜間の境界層におけるオゾン濃度の鉛直分布と消滅プロセスに関する情報を抽出することを目指した。特に、複数の測定器を多点に設置するのではなく、一台の測定器のみを自動車に搭載し、可能な限り緩やかな速度で走行しながらの測定を複数回繰り返すことにより、走行経路上の地表オゾン濃度の時間変化を捉えるというアプローチを考案した。測定データを詳しく解析した結果、夜間の境界層に特徴的なオゾンの鉛直分布と消滅速度が得られた。接地層内におけるオゾン濃度の時間変化は、単純化された境界層モデルで比較的よく近似できることが分かった。観測した走行経路上のうち、2つの地点を選んで乾性沈着速度を求めたところ、人為起源の一酸化窒素による影響が顕著に現れるところと、そうでないところに区別できた。一酸化窒素による化学的消失が無視できると考えられる場所では、先行研究で報告されている代表的な植生や農地上における乾性沈着速度と矛盾しない値が得られた。

1. はじめに

対流圏オゾンは強力な温室効果気体であるとともに、農作物の減収や樹木の成長阻害をもたらすなどの有害性を持っている¹⁾。また、ヒトに対しては、呼吸疾患等の健康被害をもたらすことが懸念されている。近年、対流圏オゾンの平均濃度は、世界的に上昇傾向にあることが報告されており^{2,3)}、日本も例外ではない。日本では、東アジアの新興国からの越境汚染も無視できないと考えられており、環境基準を超えるようなイベントをもたらすこともある。以上のような背景から、オゾンの動態を解明することは極めて重要な課題となっている。

対流圏オゾンは、窒素酸化物(NO_x)や揮発性有機化合物(VOC)が太陽光の存在下で光化学反応を起こすことによって生成されるため、その生成速度は大気環境に強く依存する¹⁾。また、生成したオゾンは、地表面への乾性沈着による消滅や、自由対流圏の比較的高い高度領域でおこる成層圏—対流圏の物質輸送により、鉛直方向にも不均一な分布を示す。特に森林圏や人間生活圏を含む地表付近のオゾ

* 2015年6月22日作成、2015年7月14日掲載受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏環境情報分野 E-mail:

tkenshi@rish.kyoto-u.ac.jp ***同・大気圏精測診断分野 E-mail: yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp

ン濃度変動に着目すると、接地境界層(SBL)の形成・消滅といった微気象学的プロセスも影響していると予想される。

本研究では、自動車にオゾン計を搭載し、山地地形を含む一定の経路を複数回往復しながらオゾン濃度を計測することにより、特に高度方向に着目しつつオゾン濃度の時空間変動を探る方法を開発することを旨とした。とりわけ、安定な逆転層が形成されやすい夜間に注目し、自動車を用いた移動観測によって、オゾンの濃度分布とその乾性沈着の空間的特性を抽出することを試みた。

2. 観測方法と気象条件

一般に、微量成分や気象要素を空間的に多点で計測するためには、多数の機器を必要とする。しかしながら、観測機器の導入費用や維持管理等を勘案すると、そうしたアプローチには必ずと限界があることも事実である。本研究では、自動車にオゾン計と二酸化炭素(CO₂)計を搭載して、一定の経路を移動しながら観測を行う“トラバース観測”を行った。図1に、移動経路図と標高を示す。標高は、GPSセンサー(i-gotU GT120, MobileAction)を用いて計測した。トラバース観測の経路は、滋賀県甲賀市にある京都大学生存圏研究所・信楽MU観測所(標高:390 m, 北緯 34.9°, 東経 136.1°)から三重県伊賀市までの、林道と国道422号線を通る片道約15 kmの行程で行い、所要時間は片道約30分であった。伊賀市到着後は、時間を置かずUターンして同じ道を通り、往路と同様に観測をしながら信楽MU観測所に戻った。道中は、標高150–400 mの起伏がある峠道で、伊賀市内を除いて信号待ちによる停車はなく、一部区間を除き大型車の通行は制限されている。信楽町～伊賀市間は県道で迂回できる広い道路が他にあるため、観測に使用した道路は伊賀市内を除くと夜間交通量は少ない。また、信楽MUから国道422号線に至る林道は、全体経路の中にあっては比較的急な道路勾配を有しており、後述するように、この急勾配のおかげで、鉛直方向の物質分布を探索するのにユニークな場を提供している。

機器を車載する場合、動作に必要な電源の確保が大きな障害となる。本研究では、1500VAの無停電電源装置を車載して、オゾン計やCO₂計の電源として利用した。当初、窒素酸化物計も車載することを考えたが、無停電電源では電力が不足してしまうため断念した。トラバースを一度行くと、無停電電源の使用可能時間が短くなるため、無停電電源は二台用意しておき、一台を観測に使っている間、残りの一台は車載せずにMU観測所で充電を行うという方式を採り、二台をスイッチしながら車載利用した。

使用したオゾン計(Dylec, model 1150)は紫外吸収分光法方式であり、測定精度は測定レンジのフルスケール(0.2 ppm)の0.5%、すなわち±1 ppbである。オゾン計のデータ出力はRS-232Cを経由してパソコンに取り込んだ。測定分解能は12秒であることから、測定に用いた自動車の典型的な移動速度を時速30 kmとすると、実質的な空間分解能は100 m程度と見積もられる。なるべく自動車の速度を落

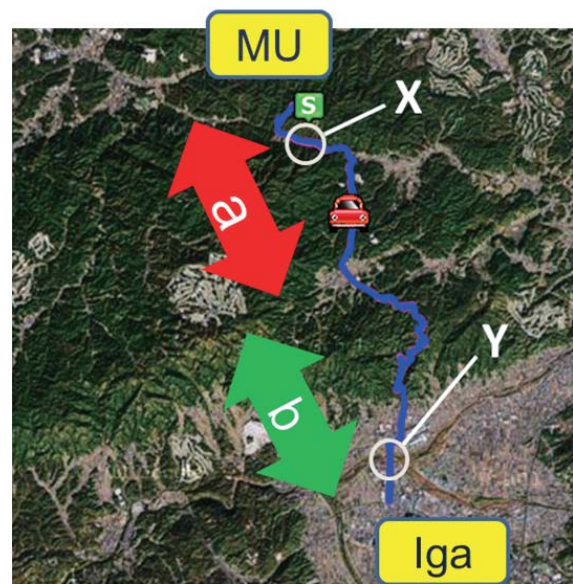


図1: トラバース観測経路図。MU観測所を起点として、三重県伊賀市内まで移動し、再びMUへ同じ道を使って戻った。移動速度などの詳細は、本文を参照のこと。経路aおよびbは境界層高度の見積もりをするために二つの経路に分けたもの。地点XおよびYは乾性沈着速度を見積もったエリア(本文参照のこと)。

として走行することが空間分解能を高めるには有利であるが、実際には、道路走行に伴う安全上の理由のため 30 km 以上の速度が出ていた経路もある。

二酸化炭素(CO₂)は、非分散型赤外分光計(LiCor, LI-840)により測定した。LI-840 はポンプを内蔵していないため、大気試料を連続的にフローさせるシステムを別途設ける必要があるが、車載した UPS の動作時間をなるべく延ばすためには、ダイヤフラムポンプ等の使用は避けたかった。そこで、オゾン計の排気量が 1 L/min であることを利用して、オゾン計の排気を LI-840 のガス取り込み口に付けて測定をおこなった。この流量は、LI-840 の設計上は正常動作できる範囲にある。LI-840 の出力は、アナログロガー(Graphtec, GL220)へ取り込んだ。なお、試料空気は、対向車や測定に使用した自動車の排気の影響を抑えるため、自動車の左側前方より吸引し、テフロンチューブ(OD 6.35 mm×ID 4.35 mm)を介して各計測器に分配した。

トラバース観測は、2011 年 4 月 21 日の夜から 4 月 22 日の朝にかけて実施した。当該時間帯における近畿地方は移動性高気圧に覆われたため、気象庁の観測データ⁴⁾では降水は観測されておらず、また、夜間を通じて風が弱く、静穏と記録されている時間帯が多かった。実際、MU 観測所の地上風速データでも 1m/s 以下の記録であった。観測中は、簡易な温湿度センサーロガー(エンペックス, weathecom EX-501)を用いて車外の気温と相対湿度を計測した。温度の保証精度は± 0.5°C であり、相対湿度の保証精度は± 3%である。

3. 結果と考察

図 2 に、トラバース観測の結果を示す。信楽 MU 観測所を起点とし、そこからの移動距離に対して地表オゾン濃度の測定値をプロットした。GPS センサーで計測した標高とオゾン濃度を比較すると、4 回の測定とも海拔が高いほどオゾン濃度が高い傾向にあることが分かる。また、ほぼすべての測定

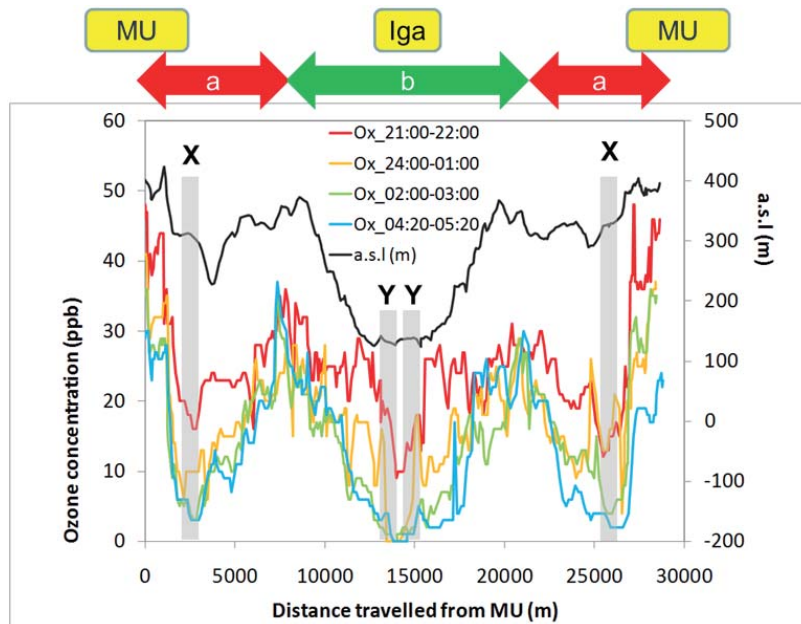
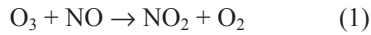


図 2 : 2011 年 4 月 20-21 日にかけて実施した地表オゾン濃度の観測結果 (赤、橙、緑、青の各色) と標高 (黒)。信楽 MU 観測所を起点として、三重県伊賀市まで移動しながら観測を行い、約 1 時間で MU へ戻ってきた。MU からの距離約 7500 m までを経路 a とし、7500 m から 14500 m までを経路 b とし、境界層高度の解析を行った (本文参照のこと)。影を付けた X と Y のエリアは図 1 に示した場所に対応する。

地点において、測定時間が深夜に至るほどオゾン濃度が低下していることが分かる。

対流圏のオゾンは、第1章でも記述したように、主として昼間にNO_xとVOCsの光化学反応によって生成される。しかしながら夜間になると、オゾンの光化学的生成が停止するため、自由対流圏(FT)からSBLを含む境界層への移流や化学反応による消失が主となる。化学的消失として最も重要な過程は、一酸化窒素(NO)との気相反応である¹⁾。



また、VOCsとO₃との気相反応も夜間のオゾン消失過程として重要である。VOCsの発生源としては、自然起源および人為起源がある。よって、図2において測定時間が深夜に至るほど、オゾン濃度が低下したのは地表付近の化学反応や乾性沈着の影響であると考えられる。そこで我々は、オゾン濃度の時間変化を定量的に考察することを試みた。

FTからSBLへの移流を無視すると仮定した場合、よく混合されたSBLに取り残されているオゾンの消失速度は、1次の速度式で与えられる⁵⁻⁷⁾。具体的には、SBLの上端高度を $z = h$ (一定)、時刻 t におけるSBL内部のオゾン濃度を C とすると、地表面フラックス F_0 は式(2)で与えられる。

$$-\int_0^h \frac{dC}{dt} dz = F_0 \quad (2)$$

ここで、SBL内部におけるオゾン濃度の鉛直プロファイルとして、 $z = 0$ から $z = h$ まで線形近似できる場合、時刻 t での $z = h$ におけるオゾン濃度を $C_h(t)$ 、 $z = 0$ におけるオゾン濃度を $C_0(t)$ として、

$$C(z, t) = \{C_h(t) - C_0(t)\} \frac{z}{h} + C_0(t) \quad (3)$$

と書き表せる(図3)。 $z = h$ において $C_h(t) = C_h(0)$ 、すなわち、SBLの生成直後から崩壊までSBL上端におけるオゾン濃度が変わらないと仮定すると、式(2)を解いて

$$C_0(t) = C_h(0) e^{-\frac{2V_d t}{h}} \quad (4)$$

を得る⁵⁻⁷⁾。ここで、 V_d は

$$F_0 = V_d C_0(t) \quad (5)$$

で与えられる乾性沈着速度である。式(4)は、SBLに閉じ込められたオゾンの地表面濃度が、時定数 $2V_d/h$ で減衰していくことを意味している。それゆえ、地表面におけるオゾン濃度の分解速度とSBLの高度が分かれば、オゾンの V_d を求めることができる。

まず、オゾンの分解速度を算出する。図4は、図2に示した測定結果のうち、測定地点X、Yにおけるオゾン濃度を観測時間に対してプロットしたものである。片対数プロット

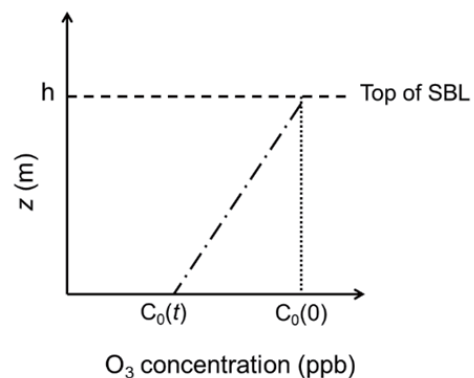


図3: 境界層モデルの概念図。破線は接地境界層(SBL)の上端、点線はSBLの形成時におけるオゾン濃度のプロファイル(高さ方向に $C_0(0)$ で一定)、一点鎖線は時刻 t におけるSBL内のオゾンプロファイルを、それぞれ意味する。

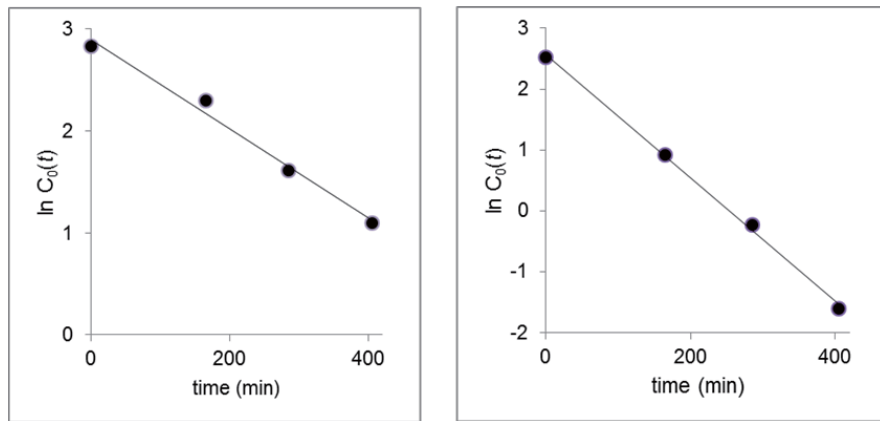


図4： 2つの観測地点X（左図）およびY（右図）におけるオゾン濃度の時間変化。時間（横軸）は、一回目のトラバースを実施した21:00-22:00を基準（ $t=0$ ）としている。

のデータ点が比較的コンパクトに直線近似できることから、一次の消失速度を求めた。その結果を表1に示した。

次に、SBLの推定を行う。SBLをなるべく正確に決めるためには、気象ゾンデなどを用いて上空の気象要素を直接測定する方法が最も優れていると考えられる。しかしながら本研究では、気象ゾンデを使わずに、おおまかにSBLを見積もる方法を検討した。図5は、信楽MU観測所から林道を経由して国道422号線を桜峠まで走行したとき（経路a）と、桜峠から伊賀市内までを走行したとき（経路b）に測定したオゾン、CO₂、温位の標高に対する分布を比較したものである。ただし、温位の算出に必要な気圧は測定していなかったため、GPS高度から気圧を推計した。また、標高ごとの平均値と標準偏差の算出には、往復（つまり1時間分）のデータを用いた。本研究で実施したトラバース観測は、比較的短時間で数百m程度の標高差を昇降しながら走行したため、図5に示したような鉛直分布を得ることができたという特徴がある。図5に示した温位の鉛直分布から、経路aでは標高350m付近、経路bでは標高280m付近をそれぞれ境にして、勾配が変化する様子が読み取れる。温位の鉛直分布に見られる勾配の変化は、オゾンおよびCO₂のデータでも確認できる。こうした鉛直構造はSBLに関連していると考えられる。本研究で測定をした経路のうち、特に経路aについては、標高約200m付近を走る国道422号線を谷部とし、比較的複雑な地形の領域を観測したため、経路aに沿ったSBLもまた複雑な構造を有している可能性があるが、経路aでは平均的なSBLとして150m（図5から予測されるSBLの標高と、経路上の最下点の標高の差）と見積もった。ゆえに、地点X（標高約310m）においては見かけのSBL高度は40mとなる。同様に、経路bでは観測の端点に位置する伊賀市内の標高が約170mであったことから、経路bにおける平均的なSBLを110mと見積もった。よって、地点Y（標高約170m）における見かけのSBL高度もまた110mとなる。

以上から算出した、XおよびY地点における V_d を表1に示した。地点Xにおける V_d がYにおける V_d よりも小さい。微気象学的手法を用いた先行研究からは、典型的な農地や植生上において $V_d = 0.12 - 0.3 \text{ cm s}^{-1}$ である(Lin et al. 2010 references cited therein)ことが報告されており、地点Xにおける V_d は、過去の報告値と近い。本研究では、温位、オゾン、CO₂のプロファイルを利用して h を推定したため、 h の推定に係る不確定性を数十パーセント程度と見積もると、 V_d もまた同程度の不確定性を持つことに注意が必要であるが、先行研究の報告値と比較的よく一致した結果が得られたことは興味深い。また、本研究においては舗装道路を走行したが、過去に報告された V_d の値と近い結果になったことは、舗装路面ではなく道路近傍の植生が V_d を支配していたことが伺える。一方、地点Yにおける V_d は、地点Xにおける V_d に比べて6倍ほど大きく（表1）、先行研究⁶⁾で報告されている典型的な農地や植生上における V_d よりも明らかに大きい。この理由としては、乾性沈着のみならず気相反応(1)

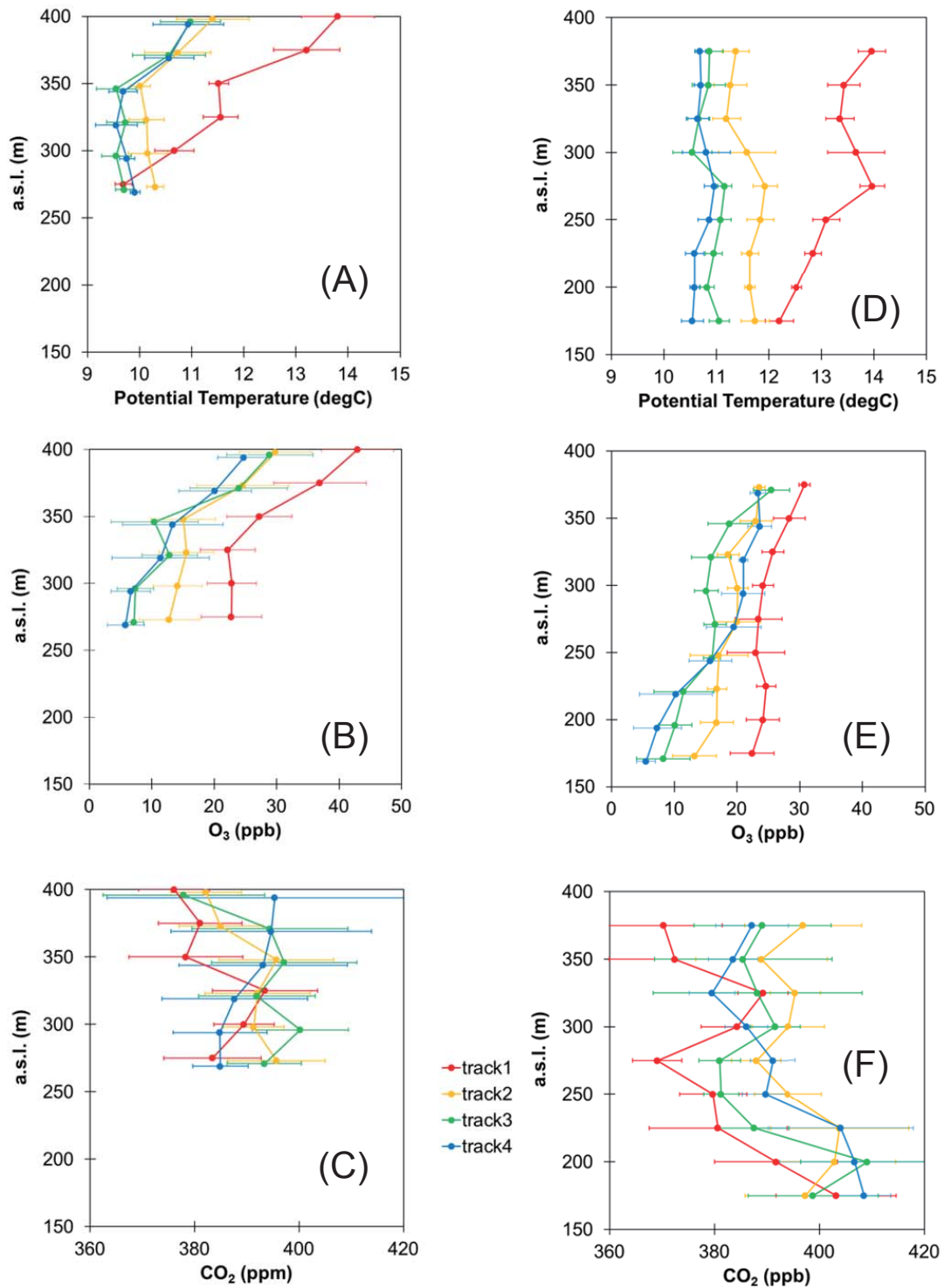


図 5：経路 a および b において、標高差を利用して求めた温位およびオゾン、CO₂ の各濃度。経路 a のデータは(A)-(C)に示しており、経路 b のデータは(D)-(F)に示している。また、track 1-4 の表示は、図 2 に示した観測時間帯と対応している。

表1：2つ地点 X および Y (図1参照)における、オゾン消失速度、見かけの境界層高度(h)、および乾性沈着速度(V_d)

| 観測地点 | 消失速度(s^{-1}) | h (m) | V_d ($cm\ s^{-1}$) |
|------|----------------------|-------|------------------------|
| X | 7.3×10^{-5} | 40 | 0.14 |
| Y | 1.7×10^{-4} | 110 | 0.93 |

が効率的に進行していた可能性が考えられる。気相反応(1)がオゾンの消失に明瞭な影響を及ぼすことは、Güsten et al (1998)や Lin et al (2010)でも報告されている。本研究における Y 地点は三重県伊賀市の市街地に該当し、トラバース観測中にも自動車の往来が確認できた他、経路として選んだ道路近くには工場が点在することが認められたため、人為的に放出された NO によってオゾンの分解速度が大きくなったと考えられる。

最後に、第二章において述べたように、本研究では窒素酸化物計の車載をあきらめざるを得なかった。これは、通常の窒素酸化物計が、モリブデン触媒を使った化学発光法に基づいて測定を行うため、モリブデン触媒を高温に保つために、大きな消費電力を必要とするからである。トラバース観測によって、オゾンの乾性沈着過程をより精密に議論するためには、窒素酸化物の測定についても検討する必要がある。

4. 結論

本研究では、自動車にオゾン計を車載して実施したトラバース観測により、走行経路上のオゾン濃度の時間変化を測定するとともに、オゾンの乾性沈着速度を決定する方法を考案した。境界層モデルを用いて乾性沈着速度を決定する場合、h を正確に決める必要があるが、本研究ではある程度の標高差をトラバース観測したことによって、温位・オゾン・CO₂ の鉛直プロファイルを求め、そこから h を推計した。h の推計値には数十パーセント程度の不確実性があるため、 V_d にも同程度の不確実性が反映されるが、本研究で求めた V_d は、特に人為起源の NO_x 排出源からの影響が小さいと考えられる場所での結果に関しては、過去に報告された典型的な農地や植生上における V_d の報告値とよい一致を示した。複雑地形では、微気象学的手法を用いて V_d を決めることが難しいが、今回考案したトラバース観測は、むしろ複雑(かつ可能な限り急峻)な地形を利用することによって、温位および物質(オゾン、CO₂)濃度を鉛直方向に立体的に観測したかのような情報を抽出するというアプローチをとっている点で、非常にユニークな手法であると考えている。

5. 謝辞

この研究は京都大学生存圏研究所の新領域開拓研究の一環として実施されました。

6. 参考文献

- 1) Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Ed., Wiley-Interscience.
- 2) Cooper, O. R. *et al.* (19 authors) (2010) Increasing springtime ozone mixing ratios in the free troposphere over western North America, *Nature*, 463, 344-348.
- 3) Pfister, G. G., Walters, S., Lamarque, J.-F., Fast, J., Barth, M. C., Wong, J., Done, J., Holland, G., Bruyère, C. L. (2014) Projections of future summertime ozone over the U.S., *J. Geophys. Res.-Atmosphere*, doi: 10.1002/2013JD020932.
- 4) 気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
- 5) Garland, J. A. and Penlett, S. A. (1976) Absorption of peroxy acetyl nitrate and ozone by natural surfaces, *Atmos. Environ.*, 10, 1127-1131.
- 6) Güsten, H., Heirich, G. and Sprung, D. (1998) Nocturnal depletion of ozone in the upper rhine valley, *Atmos. Environ.*, 32, 1195-1202.
- 7) Lin, C.-H., Lai, C.-H., Wu Y.-L., and Chen, M.-J. (2010) Simple model for estimating dry deposition velocity of ozone and its destruction in a polluted nocturnal boundary layer, *Atmos. Environ.*, 44, 4346-4371. (references cited therein)

安政江戸台風(1856)の被害と当時の気象場推定*

坂崎 貴俊**, 加納 靖之***, 大邑 潤三****, 服部 健太郎*****

On the Severe Typhoon Attacking Edo Region in 1856*

Takatoshi Sakazaki**, Yasuyuki Kano***, Junzo Ohmura****, and Kentaro Hattori*****

概要

1856年09月23日(旧暦安政3年08月25日)に江戸を直撃した台風について調べた。主として安政風聞集に基づき被害状況を報告すると共に、各地の日記記録などを併せて台風の進路を含む当時の気象場を推定した。その結果、台風は太平洋上を猛スピードで北上し相模に上陸、江戸の西側を通過して北へ抜けたと推定される。猛烈な風による吹き寄せ効果により急激な高潮が生じたことが、人的・物的被害を拡大させた最大の要因と考えられる。

1. はじめに

近年地球温暖化等の気候変動に伴い、極端気象現象の増加が懸念されている。今後の発生傾向や災害への適応策を考えるにあたっては、「気象災害の歴史に学ぶ」ことが不可欠であろう。中でも甚大な被害をもたらす現象の代表格が台風であり、古記録を基に統計的手法を用いることで発生数や経路の長期変化を明らかにする取り組みが進んでいる(Grossman and Zaiki, 2009)¹⁾。特定の台風の事例解析としては、小西(2010)²⁾が1828年9月17~18日に九州を急襲した「シーボルト台風」について、町田(2014)³⁾が1742年7月27日~8月1日に関東で大雨をもたらした台風について、それぞれ各地の被害記録・天候記録等を元に台風の経路を推定している。

江戸時代に来襲した台風として他に有名なものに、1856年09月23日(旧暦安政3年08月25日)に江戸を直撃したものがある(以下、「安政江戸台風」と呼ぶ)。以下で述べるように、大雨・洪水(出水)・暴風・高潮の被害により、江戸を中心とする広域で多くの人的・物的被害を出した。江戸における被害概要は北原(2004)による紹介がある⁴⁾。一方、当台風の経路について宮澤(1996)⁵⁾は「各地の被害から推定すると、猛烈な台風が伊豆半島付近に上陸し、江戸のすぐ西を通り、関東北部を経て東北地方に進んだものと思われる」と述べているが、具体的な出典はなく台風経路を含めた当時の気象場について再検討する価値は高い。

本研究では、安政江戸台風に伴う当時の天気・被害記録を気象学的見地から読み解くことで台風の経路を推定すると同時に、被害状況を紹介することで防災の視点から首都圏を直撃する台風災害について留意すべき点を明らかにすることを目的とする。

* 2015年7月24日作成、2015年8月17日掲載受理

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 E-mail: takatoshi_sakazaki@rish.kyoto-u.ac.jp

*** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 E-mail: kano@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

**** 〒603-8301 京都市北区紫野北花ノ坊町96 佛教大学大学院文学研究科 E-mail: ohmura1204@yahoo.co.jp

***** 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学大学院理学研究科 E-mail:

hattori@kueps.kyoto-u.ac.jp

2. 安政風聞集

本論文では主として『安政風聞集』の記述を基に台風被害の全体像を俯瞰する。なお、補足情報として『日本高潮史料』(荒川, 1961)⁶⁾、および、各地の日記等を使用した。以下、特に断らない限りは安政風聞集の記述による。

『安政風聞集(仮名垣魯文 著)』は、東海道の沿った台風災害を大衆向けの版本(上・中・下の三巻)にまとめたものである¹⁾。太平洋沿岸に位置する東海道の被害記録は台風の上陸地点を知る上でも貴重な情報である。この本には例えば、「伊豆は三島の一ト宿より濱手へ懸て、みつ、戸田、大田子、いろざき、何れも大風大雨の上に俄かに汐のおし上り来り其難義いふ斗りなく...」といったように、場所ごとに災害の詳細が綴られている。なお、被害記録の記述は「..東海道は遠掛川より日坂金屋大井川まで然までには非ずといえども...」と始まっており、東海道沿いの大規模被害の西限は静岡県中部あたりと考えられる。静岡県東部で特に被害が大きかったことは、静岡県(1996)⁷⁾でも指摘されている。本研究では、Google Fusion Tables を用いてこれらの災害記録をデータベース化した²⁾。当ツールは地震災害記録のデータベース化で先駆的に用いられているものであり(中谷ほか, 2013; 大邑, 2015)⁸⁾⁹⁾、災害の質的・量的情報を地図上に落とし込むことができる。図1に『安政風聞集』に基づく全地点のデータベース化の例を示す。



図1: Google Fusion Tables を用いた『安政風聞集』の被害記録マッピングの例。赤点は情報が付記された地点を示す。(左)全地点、および、(右)高潮の記述があった地点のみ。(右)には台風の推定経路も重ねて示す(4.1 節参照)。

3. 安政江戸台風とその被害

3.1 安政江戸台風の概要

台風直撃に伴う江戸の天気変化と被害状況について、『安政風聞集』の記述を抜粋する：「(1856 年

¹⁾ 本研究では早稲田大学古典籍総合データベース(<http://www.wul.waseda.ac.jp/kotenseki/>)のものを使用した。

²⁾ データベースは以下の URL で公開している(https://www.google.com/fusiontables/DataSource?docid=1o_7ihpENPqZ13F0bI2ahPWKMmGgEqCcxjrbeFQk#rows:id=1) (2015 年 08 月 13 日現在; なお、内容は随時更新中であるので注意されたい。)

09月23日) 早旦そうたんより液雨もうもう濛々として地をひたすが、黄昏に至り風翼たつみに変わり蕭然しょうぜんとして吹募ふきつり、其夜戌下刻(注:21時頃)より弥益いよいよ烈敷げしく、強雨車軸を流すが如く。亥刻(注:22時頃)過るころほひに至り、風雨いとおびたしく夥敷おびたしく黒雲中に舞くだり黒白も分ぬ其中より電光四方へほどばしり、奔雷ほんらい殷々いんいんと鳴はためき、樹木を飛し砂石を巻あげ、倉庫屋室さかなみは逆浪にゆらめく孤舟の如く…家根は飛ちゅうで宙ちゅうにひらめき…土塀崩れて堀を埋め…人々おそれおのき戰おそれおのき兢おそれおのきて更に生たる心地もなし」。

4.1節(表1)でも示す通り、二三日前から江戸域では雨天が続いていたが、当日の夕刻から急激に風が強まり夜半にかけて暴風雨に見舞われた。3.2以下では被害を拡大させた主要因である暴風・高潮被害について概観・考察する。なお『安政風聞集』の記録は東海道沿い(駿河～江戸)がメインだが、武蔵(秩父・川越)、信濃(高崎・臼井峠)、下野(宇都宮・日光)、下総(流山)でも大雨・洪水・暴風に見舞われた(『日本高潮史料』⁶⁾)ことを付記しておきたい。

3.2 暴風

駿河～江戸にかけて猛烈な風が吹き荒れた。多くの場所で大木が倒れ、江戸においては多くの屋敷・家屋が損壊した。中でも築地本願寺では本堂が潰れるほどの被害が出て当時の人々を驚かせた。

建物の被害から風速を推定する手段として「ビューフォート風力階級」がある。これは「陸上における状態(被害など)」と「地上10mにおける風速」を対応付けるものであり、例えば風力10(24.5-28.4 m/s)では樹木が根こそぎ倒れて人家に大損害が起り、風力11(28.5-32.6 m/s)では広範囲に破壊を伴うとされる。安政風聞集の被害記録を元に推定すれば、台風に伴う最大瞬間風速は、少なく見積もっても25 m/sを超えていたであろう。ただし風力階級の上限は12(32.7 m/s以上)であり、暴風時の風速推定はこの手法だけでは難しい。

一方、小西(2010)²⁾はシーボルト台風について、建物の損壊率から最大風速を推定した。シーボルト台風に伴う佐賀藩での全壊率(全半壊率)は50%(75%)であり、近代の台風被害との比較から最大風速は55 m/s程度であったと推定している。安政江戸台風については、例えば「水道橋内は大久保・廣瀬・曾根・萩原・荒井・渡辺其外、小家旗本衆過半に大破に及ぶなり」との記述がある。つまり全壊率が50%程度を超えていた場所もあったと考えられ、シーボルト台風と同程度(50 m/s⁻¹程度)の最大風速を伴っていたとしてもおかしくない。ただしこの点については、より広範な範囲で倒壊率を見積もるなど今後更なる検証が必要である。

3.3 高潮

安政江戸台風が甚大な被害を引き起こした最大の要因は高潮にある。図1(右)は『安政風聞集』のデータベース化(2.1節)に伴い高潮被害(と思われる)記述があった地点のみを示したものである。伊豆半島の西側、三浦半島東側～東京湾の西側(芝・品川・本所・深川など)にかけての広い範囲で、最大で床上三尺(約1m)程度の高潮に見舞われた。高潮は暴風と相まって沿岸域の建物倒壊を引き起こし、多くの船が街道沿いに打ち揚げられた。例えば永代橋(隅田川)は流された大船によって打ち砕かれたとの記述がある。また人的被害も多く、溺死人も多く出たようだ(『日本高潮史料』)。なお江戸南東の本所深川付近では「出水」との記述もあり、高潮と洪水(隅田川)との複合効果によって浸水被害が増長された可能性もある。

また、伊豆半島の西側(戸田・大田子・石廊崎)で「俄かに汐のおし上り」と記述もあるように、潮位の上昇が急激に生じたことが推測される。台風の進行速度が速かったこと、および、猛烈な風に

より吹き寄せ効果が強かったと考えられる。

図2は9月23-24日の天文潮を、海上保安庁HPが提供する潮汐推算(http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/tide_pred/index.htm)によって計算したものである。地点は芝浦（東京湾西岸）、横須賀（三浦半島東岸）、伊東（伊豆半島東岸）、宇久州（伊豆半島西岸）である。台風が関東地方に接近した23日夕刻～夜半は満潮時刻と重なっており、また23日深夜の月齢は24日で大潮にも比較的近い。これらの要因も高潮被害を増長させたと考えられる。

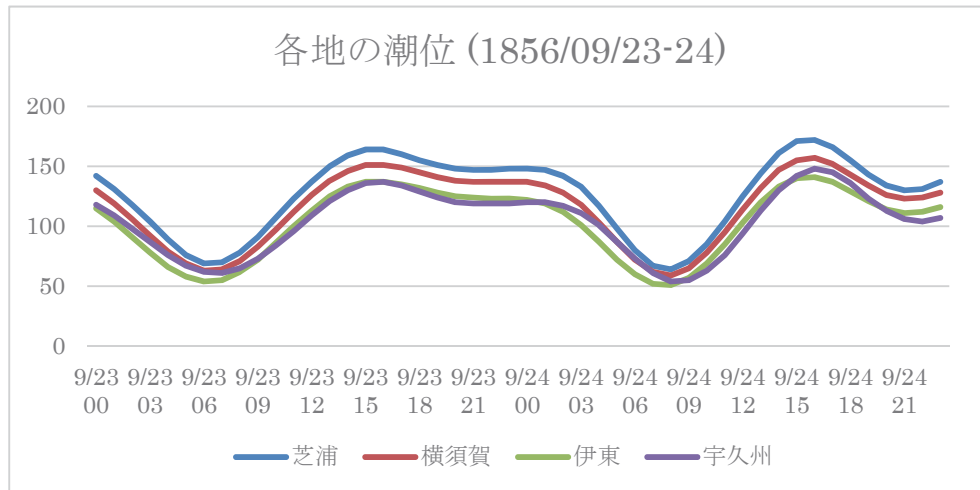


図2: 芝浦（東京湾西岸）、横須賀（三浦半島東岸）、伊東（伊豆半島東岸）、宇久州（伊豆半島西岸）の天文潮位（単位: cm）の時系列（1856年9月23日-24日）。

3.4 前年の地震の影響

最後に、前年に江戸直下を震源として発生した「安政江戸地震 (M7.0-7.2)」の影響も無視できない。この地震によって多くの家屋が被害を受け、安政台風が来襲した翌年には復興が不十分な家屋や仮屋が多くあった。「地震の後手入さへ届かぬ家の多ければ、夫等は皆々倒れしなり」との記述が見られるように、これらの家々が台風によって多大な被害を蒙った。

なお、この地震に伴う地殻変動は東京湾では最大数 cm 程度とされており（相田, 1996）¹⁰、高潮被害の多寡への影響は小さいと考えられる。

4. 台風の経路と当時の気象場推定

4.1 台風の進路推定

台風の進路推定にあたって重要な情報は風向である。一般的に、台風の接近・通過に伴って、進行方向の右側の地点では風向が北-東-南へ時計回りに（順転）、左側の地点では風向が北-西-南へ反時計回り（逆転）に時間変化する。また台風最接近時には進行方向の右（左）側で東-南寄り（北-西寄り）の風が強くなる。

まず上陸地点の推定にあたっては高潮被害の分布を見てみよう。3.3 で指摘したとおり、高潮被害の明確な記述が見られるのは伊豆半島の西側および三浦半島の南～東側である。高潮は気圧の低下に伴う「吸い上げ効果」、および、風による「吹き寄せ効果」によって生じるが、上記の明瞭な地理的依存性は「吹き寄せ効果」によって生じたと考えられる。つまり、伊豆半島では西風、三浦半島では東風が強かったことが推測され、台風は両半島の間を縫うように相模国に上陸したのであろう。傍証として、伊豆半島の東側（外浦、川名など）では「風破の家少なし」との記述がある。つまり、台風が伊豆半島の東側を通過したため、半島の山々によって台風吹き込む西寄りの風がブロックされた

考えれば上記の経路推定と整合的であろう。今後は静岡県内の資料から風向の直接的記述を見つけるなどして、上記の仮説を検証したい。

江戸周辺では、風聞集の記録にもある通り（3.1 節）「巽風」（南東風）が強かった。生麦村（現神奈川県鶴見区）の農民の日記である『関口日記』¹¹⁾には「東風より巽風二廻り」という、風向の順転を示す記録があり、台風は横浜－江戸の西側を通過したと推定される。

江戸通過後の進路については鹿島神宮の記録¹²⁾が参考になる。「廿五日昼より雨降、初更[注：19-21時]の頃より巽風強く吹出し三更[注：23-01時]の頃甚しく南風になり、又西風も戻り鹿島山内の松杉百二十本折る。」とある。ここでも風向きが時計回りに変化（順転）しており、西風が戻ったとの記述から、台風は鹿島神宮の西側～北側を通過したと考えられる。以上から図 1（右）のとおり、台風は相模国に上陸し、北東方向の進路をとって関東方向を縦断したと考えられる。

なお、多くの資料から風雨や高潮が短時間で強まったことがわかる。台風が非常に速いスピードで接近・上陸したことが示唆される。

4.2 気象場の推定

では台風通過前後の総観場はどうであったか。表 1 は台風前後一週間程度の天気記録をまとめたものである。これによれば、台風襲来前から晴天・雨天を繰り返し、特に三日前からは江戸および京で雨が降り続けている。秋季には日本付近に停滞する秋雨前線に台風が接近し、台風からの水蒸気供給などによって前線が活発化することがしばしば起こる（例えば、小倉，2015）¹³⁾。安政江戸台風に伴う表 1 の天気変化はこうした総観場で生じたと考えられる。

近年、気象解析に用いられる全球大気再解析データ³⁾の一つである Twentieth Century Reanalysis (20CR) (Compo et al., 2011)¹⁴⁾が、江戸時代後期(1851 年)にまで遡ってデータを公開している(ver.2c)。同化手法としてアンサンブルカルマンフィルターを用いており、全 56 アンサンブルメンバーの解析値が提供されている。本研究でも安政江戸台風の日時を対象として 20CR (ver.2c)の地上気圧データを解析したが、メンバー間のばらつきが非常に大きく、台風の江戸直撃を再現するメンバーも見られなかった(図なし)。20CR に同化する観測データが日本域に皆無であることが一番の問題であろう。

表 1：台風来襲(9/23 夜)前後の各地の天候記録（「|」は「時々」、「/」は「のち」を示す）

| | 9/16 | 9/17 | 9/18 | 9/19 | 9/20 | 9/21 | 9/22 | 9/23 | 9/24 |
|--|--------|------|--------|------|------|------|------|----------|--------|
| 武江年表 ⁶⁾ (江戸) | | | | | | 微雨 | 微雨 | 微雨 / 大風雨 | 晴 |
| 斉藤月岑日記 ¹⁵⁾ (江戸) | 晴、冷氣あり | 曇 雨 | 雨、冷氣あり | 晴 | 晴 | 雨/曇 | 雨 | 小雨 / 大風雨 | 晴天、風なし |
| 関口日記 ¹¹⁾ (神奈川県鶴見区) ²⁾ | 晴 | 曇 雨 | 曇 | 晴 | 晴 | 晴 | 雨 | 曇/大嵐 | 晴 |
| 二條家内々御番所日記 ¹⁶⁾ (京) | 晴、冷氣 | 雨 | 曇 雨 | 晴 | 晴 | 曇 | 曇 | 曇/雨 | 曇/晴 |
| 速水家日記 ¹⁷⁾ (京) | 晴 | 雨 | 雨 | 晴 | 晴 | 雨 | 雨 | 雨, | 晴 |

³⁾ 過去の観測データを最新の数値シミュレーションに取り込む（データ同化）ことで、当時の大気場を再現したもの。20CR では観測データとして、地上気圧のみを同化している。

そこで上記の考察を元に、近年の台風データベースから類似事例を探索した。秋季に太平洋を北上し関東地方に上陸したものとして2002年の台風21号がある。当時の天気図(2002年9月29日-10月2日)を図3に示す。この台風は猛スピードで関東へ接近・上陸(上陸地点:神奈川県川崎市付近)し、東北地方に進んだ。当台風に伴う暴風の被害で、住家全壊14棟、半壊61棟、一部損壊3441棟などの被害が出ている。また台風の接近に伴って日本付近に停滞する秋雨前線が活発化し、台風上陸以前から各地に悪天をもたらしていることがわかる。安政江戸台風接近時も類似した総観場が形成されていたと想像される。

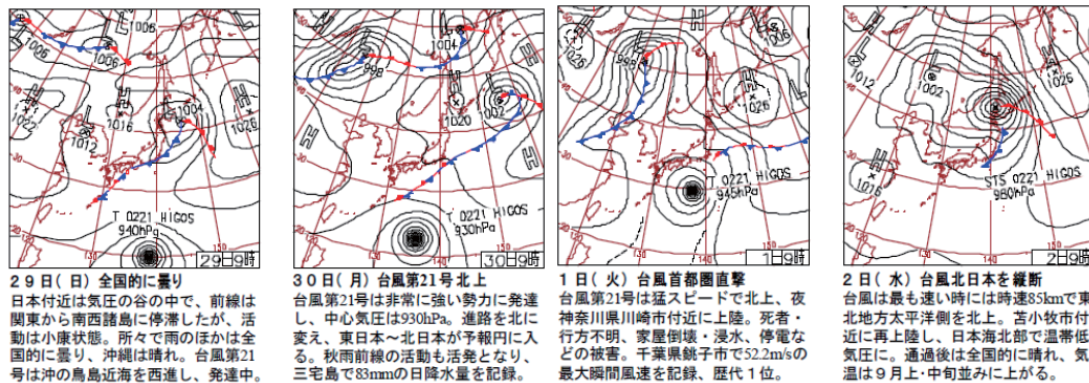


図3: 2002年台風21号接近時の天気図(2002年9月29日-10月2日)。気象庁HP「日々の天気図」より(<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/>)。

5. まとめと今後の課題

安政江戸台風は猛スピードで太平洋を北上し相模付近に上陸、北東方向の進路を取って江戸の西側を通過したと考えられる。この台風は主として暴風・高潮(+洪水)により、江戸を中心とする広範な範囲に甚大な人的・物的被害をもたらした。近代では1917年、東京湾において台風に伴う高潮被害により1300名を越す死者が出ている(千葉県, 2000)¹⁸⁾。また、場所は違うが近代において暴風・高潮で甚大な被害をもたらした台風として「伊勢湾台風(1959年9月26日, 死者: 約5000人)」が想起される。地球温暖化に伴って巨大な台風が増加傾向にあることも指摘されており(Webster et al., 2005)¹⁹⁾、安政江戸台風と同様の被害が再び首都圏でも生じうることは肝に銘じておくべきであろう。

今後は日本各地の文書記録を紐解き、安政江戸台風襲来当時の気象場推定の更なる精度向上を図りたい。また、推定された台風進行経路・強度がどの程度の確率で生ずるのか、近年の台風データベースを統計的に解析することにより明らかにしたい。大気再解析データについても、台風そのものの再現性は低いことはわかったが、台風の進路等を決めたであろう大気の循環場はさらに詳しく調べる価値があると思う。

最後に余談となるが、一連の古記録を眺める中で江戸時代の人々の自然観も想像される。刻々と変化する風向きや天気を具に観察し書き留めていた当時の人々の観察眼に、感服の念を禁じえない。また、『安政風聞集』には災害記録の客観的記述のみならず、様々な奇談・教訓話や浮世絵も挿入されており、読み物としても大変面白い。「高潮のあとに跳ね回っている魚を取って刺身にした」という挿話からも、当時の人々が甚大な被害に見舞われながらもどこか明るく振舞い、自然現象と上手く付き合っていたことが想像される。

謝辞

『安政風聞集(上・中・下)』は、早稲田大学の古典籍総合データベース

謝辞

『安政風聞集（上・中・下）』は、早稲田大学の古典籍総合データベース (<http://www.wul.waseda.ac.jp/kotenseki/>)のものを使用しました。財城真寿美博士には貴重な情報・コメントをいただきました。安政風聞集の翻刻は、京都大学古地震研究会の皆様と共に行ったものです。御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Grossman, M., and M. Zaiki, Reconstructing typhoons in Japan in the 1880s from documentary records, *Weather*, **64**, 315—322, 2009.
- 2) 小西達男：1928年シーボルト台風（子年の大風）と高潮，*天気*, 57(6), pp. 383—398, 2010.
- 3) 町田尚久：寛保2年災害をもたらした台風の進路と天候の復元，*地学雑誌*, 123, pp. 363-377, 2014.
- 4) 北原糸子：台風襲来—安政三年秋の江戸，*Front*, 16, pp. 30-33, 2004.
- 5) 宮澤清治：安政3年(1856)江戸の大風災の惨状，*予防時報*, 186, pp. 2-3, 1996.
- 6) 荒川秀俊, 石田祐一, 伊藤忠士：日本高潮史料，*気象研究所*, 272 pp., 1961.
- 7) 静岡県：静岡県 別編2 自然災害誌, pp. 203-205, 1996.
- 8) 中谷友樹, 瀬戸寿一, 長尾諭, 板谷（牛谷）直子：東日本大震災における文化財被災の地理的分布(II)—インターネット・マッピング・システムを活用した情報配信—，*歴史都市防災研究*, 2, pp. 81-86, 2013.
- 9) 大邑潤三：ウェブ・マッピング・システムを用いた歴史地震記録の整理と公開方法の検討，*歴史都市防災論文集*, 9, pp. 237-244, 2015.
- 10) 相田勇：1855年安政江戸地震が津波を伴った可能性，*地震*, 第2輯, 49, 55-63, 1996.
- 11) 横浜市文化財研究調査会：関口日記 第13巻，*横浜市教育委員会*, pp. 208-210, 1979.
- 12) 安部修：桜齋随筆 第4巻，*本の友社*, pp. 285-286, 2000.
- 13) 小倉義光：日本の天気，*東京大学出版会*, 403pp., 2015.
- 14) Compo et al., The Twentieth Century Reanalysis Project, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 1-28, 2011.
- 15) 東京大学史料編纂所：大日本古記録（斉藤月月峯日記 六），*岩波書店*, pp. 131-134, 1997.
- 16) 白石克, 田口靖子：江戸・明治京都の天気表：二條家内々御番所日次記 3，*慶應義塾大学三田メディアセンター慶應義塾図書館貴重書室*, pp. 93, 2000.
- 17) 速水家日記，*京都府立総合資料館蔵*
- 18) 千葉県：防災誌 風水害との闘い，*千葉県総務部消防地震防災課*, pp. 16-23, 2010.
- 19) Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang, Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, 309, 1844-1846, 2015.

特定網室におけるポプラ経年育成の環境設定*

馬場 啓一**

Required conditions of special screened green house to grow poplar for several years*

Kei'ichi Baba**

概要

特定網室において複数のポプラ同一個体を数年間育成して、個々の個体にできるだけ多く木部形成させることを目的として、その育成環境の設定を行なった。特定網室のもつ補光・保温機能を活用して長日環境下・冬期保温で育成した場合、落葉・休眠を遅らせる効果はあったものの、越冬後の休眠打破に問題が生じ、次年度も生存していた個体数は越冬させた個体の半分以下となった。最終的に特定網室で生存状態を維持したまま越冬させるには、冬期は凍結しない程度に低温に置き補光しないこと、灌水は鉢を水盤に入れっぱなしにせず、鉢上部から水をかけ流すことが重要であった。また、鉢土を交換することによって、幹の年間直径増加量を増やすことができた。

1. はじめに

遺伝子組換え体植物を用いた研究においては、その育成に閉鎖系温室や特定網室を使用することがある。組換え作物の実用化に向けて、隔離圃場試験を経て品種登録するための段階的な拡散防止策の一環としても用いる¹⁾が、研究段階で留まる組換え植物であっても、育成や開花・結実に太陽の強光が必要な場合であったり、育成する植物体の大きさが室内培養棚では足りない場合などに用いられる。

現在、筆者は遺伝子組換え体ポプラの木部物性を野生株と比較することを目的として、DASH 植物育成サブシステム特定網室内において育成し、物性測定に必要な大きさの木部を得ようとしている。物性測定を満足に行える量の木部を得るには、単年度の育成では不可能で、同一個体を数年継続して育成し、木部を厚く堆積させる必要がある。

木本植物の組換え体を閉鎖系温室や特定網室で育成した報告例はあるが²⁻³⁾、同一個体を何年も育成し続けることを目的としておらず、そういう目的のために良好な育成条件は記載されていない。組換え体の育成条件を検討した例では、開花に必要な低温処理はあるが⁴⁾、この報告においても同一個体の継続的な育成に関しての記述はない。そこで、冷暖房や補光を備えた特定網室においてポプラを継続的に鉢栽培で木部をより多く形成させるための環境設定について試験した。

2. 材料と方法

* 2015年7月9日作成、2015年7月27日掲載受理

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

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

2.1 植物試料

ポプラ (*Populus tremula* x *alba* L.) の野生株とポリガラクチュロナーゼを CMV 35S プロモーターでドライブした組換え体を用いた。植栽した鉢のサイズは、内法で上径 15 cm、下径 13 cm、高さ 17 cm であった。鉢底に日向土の大粒を 1~2 層敷いて用土は (株)タンキョウ製グリーンソイルをそのまま用いた。育成条件を毎年変更して、その越冬生存数および幹の直径増加を調べた。今回の試験では野生株・組換え体の結果に大きな差異が認められなかったため区別せずに取り扱った。直径は、毎年同じ位置を同じ方向に計測できるように地際 10 cm 前後の位置に油性マーカーで印をつけ、ノギスを用いて印の位置を計測した。樹高は取扱いの便宜上、支柱の高さ (約 140 cm 程度) で剪定した。側枝も伸び過ぎた場合は適宜剪定した。

2.2 補光と温度管理

ポプラの育成は、京大大学生存圏研究所・京大大学生態学研究センターの持続可能生存圏開拓診断 (DASH) システムの植物育成サブシステム C1 室で行った。育成環境の設定は 1 年度ごとに変更した。

補光について、2011 年度は、明期 14.5 時間・暗期 9.5 時間となるよう、朝は 4 時 45 分から日の出時刻の 15 分後まで、夕方は日の入り時刻の 15 分前から 19 時 15 分まで点灯させた。次年度以降は、補光は施さなかった。

室温管理について、冬期は 2011 年度のみ室温が 15~30°C 内に収まるよう、天窓 15°C 以下で閉鎖・側窓 30°C 以下で閉鎖、換気扇 27°C 以上で運転する条件を基本とし、暖房温度を適宜変更しつつ管理し、概ね目標の 15~30°C を維持した。次年度以降は、室温が 5°C を下回らないよう、かつできるだけ外気に近い温度となるよう、暖房は施さず、天窓 10°C 以下で閉鎖、側窓 10°C 以下で閉鎖、換気扇 27°C 以上で運転を基本とし、温度変化を観察して適宜設定温度を変更しつつ、5°C を下回らないで維持した。

夏期は、いずれの年度も室温が 35°C を上回らないことを念頭に、天窓 5°C 以下で閉鎖・側窓 25°C 以上で閉鎖、冷房 25°C 設定を基本とし、気温変化を見て適宜変更を加え、概ね 35°C 以下を維持した。

室温は、電子式の最高最低温度計で確認するほか、サーモレコーダー (Thermo recorder mini wireless RTW-30-S, エスペック・ミック (株)) を網室中央付近につり下げて記録し、季節のかわり目や高温・低温の目立った日の付近など適宜温度変化をグラフとして書き出して点検した。

使用した特定網室は基本的にガラス温室で室温が上がりやすく、これを防ぐ目的で、常時遮光カーテンを閉めて天井と西側ガラス面を覆うようにした。およそ 30% 程度の光量減となった。

2.3 灌水方法

冬期以外の灌水について、2011・2012 年度は鉢の下にトレイを置き、常に水深 2~5 cm 程度の水がある状態で腰水栽培した。2013・2014 年度については、出張時や週末、夏期休暇など数日連続の不在時のみ腰水とし、それ以外は、鉢の下にトレイを置かず、2~3 日に 1 回、鉢の上から水をかけ流した (間欠灌水)。冬期はいずれの年度も週に 1 回程度の間欠灌水とした。

2.1 鉢土の交換

鉢の土の交換について、2011~2013 年度は、ポプラ自体を鉢から脱離させることなく、鉢の開口部から削り取れる土を除いて入れ替える程度であったが、2014 年度では、年度初頭に鉢からポプラを取り出し、根鉢の下 1/2~1/3 程度を切除し、根に付着した土を可能な限り除去して、新しい用土に入れ替えて栽培した。鉢は前年と同じサイズの物を用いた。

3. 結果

最近 4 年間、ポプラを特定網室でより太く肥大成長させるための環境設定を行ってきた。その結果を表 1、図 1 に示した。表 1 では、冬期に補光・保温を施したか否か、また灌水方法の違いによる越冬生存個体数の関係をまとめた。今回用いた特定網室には、室温で開閉制御できる側窓と天窓、冷

暖房の空調、補光などが備えられている。まずはこれらを活用して冬期も継続的に木部形成をさせようと試みた。これまで建物内の培養室でポプラをほぼ一定環境下で育成した際、四季を問わず明確な休眠をすることなく生育していたため、これと同様の育成を仮定した。しかしながら、補光・保温を施した結果、落葉を1～1.5ヶ月ほど遅れさせた程度で、全ての個体が最終的には落葉し、休眠状態となった。そして越冬38個体中、春に休眠打破した個体数は14個体と著しく少なかった。休眠打破しなかった個体も灌水を継続してしばらく様子を見たが、初夏に内樹皮が緑色をしていないこと、樹幹を引っ張った際に簡単に土から抜け、細根が無いことなどから枯死を確認した。これらの結果から、翌2012年度からは補光と冬期保温を施さず、できるだけ天窗・側窓を開放して室温を低めに保つようにした。但し、鉢土が凍らないよう、10℃以下では窓を閉めた。その結果、越冬27個体中25個体が休眠を打破し翌年度も生存していた。ここで枯死した個体を処分する際、鉢土から腐敗臭がしたため、翌年度以降は灌水方法を変更して試験した。不在時以外は、水を入れたトレイに鉢を置きっぱなしにする腰水栽培をやめて、週に1～3回、鉢土の上部から水遣りするようにしたところ、2013年度以降は越冬時に休眠打破できずに枯死していく個体が皆無となった。

2014年度以降は、鉢土の交換も試験した。鉢から植物体を脱却させ、できる限りそれまでの鉢土を除いて根の下1/2～1/3を切除して、新しい土に入れ替えた。その結果、それまで年間の肥大生長量がおおよそ0.5mm程度であったものが、1.0mmを超えて成長した(図1)。計測や記録を残していないが、鉢土を交換した2014年度は、葉の色つやが良く、ハダニの被害も少ない傾向にあった。2015年度も同様に2014年度と同様の条件で育成を続けている。

4. 考察

培養室では、明期14時間・暗期10時間、空調26℃設定で室温23～30℃前後の環境となり、その室内で腰水栽培していると、明確な休眠状態になることなく、四季を通じて植物の育成が可能であった。それとは異なり、特定網室では、補光・保温を施してもポプラの休眠を止めることはできなかった。理由としてひとつ考えられるのは、灌水に水道水をそのまま使用したため、冬期は水温がかなり低かったことである。

今回の実験結果から、特定網室での経年育成では野外に近い環境設定で休眠導入さ

表1： 越冬生存株数と育成環境

| 年度 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|--------|------|------|------|------|
| 越冬株数 | 38 | 27 | 20 | 20 |
| 休眠打破株数 | 14 | 25 | 20 | 20 |
| 補光・保温 | ○ | × | × | × |
| 灌水 | 腰水 | 腰水 | 間欠 | 間欠 |
| 鉢土交換 | × | × | × | ○ |

越冬株数：越冬させた個体数。休眠打破株数：越冬後に休眠打破して次年度も生存した個体数。

補光・保温および鉢土交換：○は施した年を表し、×は施さなかった年を表す。

灌水：腰水は冬期以外腰水栽培したもので、間欠は、不在時以外は水受けトレイを置かず、2～3日間隔で鉢の上部からかけ流して灌水したことを示す。

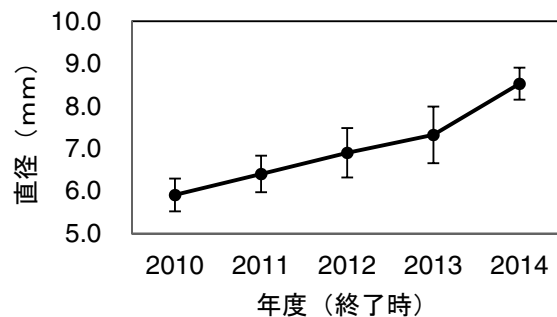


図1：特定網室で育成したポプラの幹直径の推移 (n = 8, bar = S.E.)

せて、短日・低温環境に置き休眠打破させることが重要であることがわかった。一旦、落葉して冬休眠期に入ると、種によって固有の低温に曝されなければ気温がいくら上昇しても休眠が解除されない⁵⁻⁶⁾。今回、補光・保温して休眠に入ってしまった 2011 年度も、休眠した時点で、補光・保温を中止して、短日・低温環境に置いたならば、もう少し多くの個体を救済できたかも知れない。

灌水方法の違いについて、継続的に鉢底を水に浸して腰水栽培をした際には、水分過剰であることと鉢土が嫌氣的環境に維持されたことが、腐敗しやすい状態を招いてしまったものと考えられる。また、鉢土を交換する際、使用済みの鉢土には、使用前の鉢土には明らかに含まれていない濃色の微細な粒状物が増えていた。これらは土中細菌の増加や細菌叢の変化を示していると考えられ、鉢土における栄養分の枯渇や根詰まりによる酸素不足と共に、これら細菌叢の状態も生育に抑制的な因子として働いた可能性が考えられる。特定網室は、組換え体の拡散防止のために、用いた水や土が外へ出て行かないよう、床が防水加工されており、排水も循環濾過されている。従って直接地面に植栽することができない。継続的に健康な状態で同一個体を生育させ続けるために、鉢土の定期的な交換も重要な環境設定のひとつと言って良い。これらの試験結果から、2015 年度も年度初頭に全個体の鉢土を入れ替え、2014 年度と同様の設定環境でポプラの越年育成を継続中である。

5. 謝辞

本研究は、京都大学生存圏研究所・京都大学生態学研究センター持続可能生存圏開拓診断(DASH)システムで行なわれた。

参考文献

- 1) 川口健太郎: 環境安全性の評価と審査., 「林木の育種 森を取り戻すために②」 林 隆久 編, 海青社, pp119-136, 2010.
- 2) 菊池 彰, 川岡明義, 島崎孝嘉, 于 翔, 海老沼宏安, 渡邊和男: 耐塩性ユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. codA 12-5B, 12-5C, 20-C) の形質安定性と環境影響評価試験., *育種学研究*, 8, 17-26, 2006.
- 3) Taniguchi, T., Ohmiya, Y., Kurita, M., Tsubomura M., Kondo, T., Park, Y. W., Baba, K., Hayashi, T.: Biosafety assessment of transgenic poplars overexpressing xyloglucanase (AaXEG2) prior to field trials., *J. Wood Sci.*, 54, 408-413, 2008.
- 4) Srinivasan, C., Dardick, C., Callahan, A., Scorza, R.: Plum (*Prunus domestica*) trees transformed with poplar *FTI* result in altered architecture, dormancy requirement, and continuous flowering., *PLoS ONE*, 7 (7), e40715, 1-11, 2012.
- 5) 永田 洋: 樹木の季節適応., 「樹木環境生理学 現代の林学13」永田 洋・佐々木恵彦 編, 文永堂出版, pp1-45, 2002.
- 6) 本條 均: 気候温暖化が落葉果樹の休眠、開花現象に及ぼす影響., *園学研.*, 6 (1), 1-5, 2007.

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—

新領域開拓共同研究

1. 「バイオマスの生理活性」
 - 1) 木竹酢液の抗ウイルス性物質の探索
渡辺 隆司 (京都大学生存圏研究所)
 - 2) 植物機能性低分子の代謝輸送
高梨 功次郎 (京都大学生存圏研究所)
 - 3) 革新的なバイオマス構造解析技術を基盤とした新領域の創成
西村 裕志 (京都大学生存圏研究所)

2. 「木質住環境と健康」

～空気質特性の解明とヒトへの影響解析～
仲村 匡司 (京都大学農学研究科)

3. 「大気質の安心・安全」

～人間生活圏を取り巻く大気の微量物質の動態把握～
高橋 けんし (京都大学生存圏研究所)

4. 「電磁場の生体影響」

～細胞研究用共鳴結合無線電力伝送システムによる遺伝毒性評価ならびに
中間周波帯電磁界による細胞の遊走能および貪食能への影響～
宮越 順二 (京都大学生存圏研究所)

5. 「千年居住圏」
 - 1) アジア地域に建つ木造建築物のモニタリングによる長期構造性能評価
五十田 博 (京都大学生存圏研究所)
 - 2) アジア地域の植物バイオマスを活用した循環型材料の開発
～クエン酸添加がタンニン・スクロース接着剤へ及ぼす影響～
梅村 研二 (京都大学生存圏研究所)
 - 3) 東アジアの木の文化と科学
杉山 淳司 (京都大学生存圏研究所)
小林 加代子 (京都大学生存圏研究所)
堀川 祥生 (京都大学生存圏研究所)
遠藤 利恵 (京都大学生存圏研究所)

圏間共同研究

- 1) 「微細気泡水効果の原理解明と環境・材料・農業分野への応用」
上田 義勝 (京都大学生存圏研究所)
- 2) 「低炭素居住圏の確立に資する植物由来脂溶性生理活性成分の
耐虫・耐朽性評価と大量生産デザイン」
矢崎 一史 (京都大学生存圏研究所)
- 3) 「ヒトと動物に対するリグニンの生理機能の解明と利用」
梅澤 俊明 (京都大学生存圏研究所)
- 4) 「樹木年輪と歴史・古環境」
渡邊 裕美子 (京都大学理学研究科)
杉山 淳司 (京都大学生存圏研究所)

新研究醸成支援プログラム

- 1) 所外共同研究 1 :
「光合成微生物を用いた太陽エネルギーによるイソプレレン生産技術の
開発」
矢崎 一史 (京都大学生存圏研究所)
- 2) 所外共同研究 2 :
「植物揮発性物質が駆動する植物・植食生昆虫・捕食性昆虫の共進化」
高林 純示 (京都大学生態学研究センター)
- 3) 所外共同研究 3 :
「化石資源の代替としての植物根共生微生物群および竹笹類のイソプ
レン放出」
奥村 智憲 (京都大学農学研究科)
- 4) 所外共同研究 4 :
「根端分裂組織における細胞膜の弾性率測定とエキソサイトーシス機
構との関係」

木村 俊作 (京都大学工学研究科)

5) 海外研究者招聘 (国際共同研究) :

「エステル型リグニン糖複合体の酵素分解反応の解析」

西村 裕志 (京都大学生存圏研究所)

新領域開拓共同研究

1. 「バイオマスの生理活性」

1) 木竹酢液の抗ウイルス性物質の探索

渡辺 隆司 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：渡辺 隆司 (京都大学・生存圏研究所)

共同研究者：李 瑞波 (京都大学・生存圏研究所)

成田 亮 (京都大学・ウイルス研究所)

丸本 真輔 (近畿大学・共同利用センター)

西村 裕志 (京都大学・生存圏研究所)

谷田貝 光克 (東京大学名誉教授)

矢崎 一史 (京都大学・生存圏研究所)

藤田 尚志 (京都大学・ウイルス研究所)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

バイオマスの生理活性

3. 研究概要

地球温暖化や輸送手段の広域・高速化により、人畜に有害な病原体が広汎かつ迅速に伝播していることは大きな社会問題の一つとなっている。本研究では、再生産可能な木質・森林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、木竹酢液の抗ウイルス活性について検討を進めている。木竹酢液は、木竹炭を製造する際に副次的に得られ、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの熱分解生成物などを含有する。木竹酢液は殺菌をはじめとする様々な生理活性を有することが報告されており、ウイルスなどの病原体の駆除にも有用なバイオマスである可能性が考えられるが、木竹酢液の抗ウイルス活性については十分な科学的根拠が示されているとは言い難い。本研究では、日本や韓国をはじめとして各国で猛威をふるってきた口蹄疫ウイルスなどに対する消毒薬を木竹酢液から生産することを視野に入れて、木竹酢液の抗ウイルス活性試験を行い、木竹酢液の消毒薬への応用の可能性と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。これまでに、竹酢液に含まれるフェノールが脳心筋炎ウイルス (encephalomyocarditis virus: EMCV) に対するウイルス不活化活性をもち、酢酸の共存によりその活性が増強されることを示した 1)。平成 26 年度は、ヒノキ木酢液の部分精製物お

よび構成成分の EMCV に対する抗ウイルス活性の評価を行った。また、ヒノキ木酢液に含まれる 2 成分の口蹄疫ウイルスに対する不活化活性評価を行うとともに、ヒノキの水溶性画分に含まれる抗ウイルス活性をもつ候補物質を有機合成した。さらに、口蹄疫ウイルスと同じく pH 感受性の高いピコルナウイルスであるライノウイルスに対するヒノキ木酢液とその分画物の抗ウイルス活性を試験した。この他、カラマツ木酢液の分画を行い、中性条件で抗ウイルス活性をもつ水溶性物質を含むことを明らかにした。

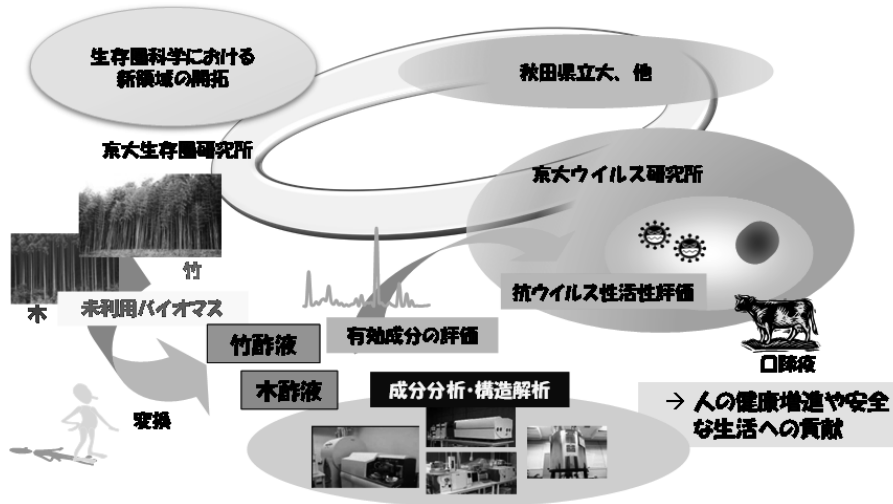


図1 木竹酢液の抗ウイルス活性の評価と原因物質の探索研究

2) 植物機能性低分子の代謝輸送

高梨 功次郎 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：高梨 功次郎 (京都大学・生存圏研究所)

共同研究者：矢崎 一史 (京都大学・生存圏研究所)

佐藤 文彦 (京都大学・大学院生命科学研究科)

山田 泰之 (京都大学・大学院生命科学研究科)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

生理活性、植物二次代謝産物

ミッション1：環境計測・地球再生

3. 研究概要

植物が生産する多種多様な生理活性物質の効率的な高蓄積および大量生産を目指して、植物が有する生理活性物質の輸送・蓄積機構の解明を試みている。今年度は、抗ウイルス活性などの生理活性を有するベルベリンの植物細胞内における蓄積機構を解明するために、前年度に引き続きベルベリン生産植物であるオウレン (*Coptis japonica*) の MATE 型輸送体 CjMATE1 の研究を行った。前年度までに CjMATE1 が酵母発現系においてベルベリン輸送能を有することが確認されたので、今年度はタバコ培養細胞発現系およびアフリカツメガエル卵母細胞発現系におけるベルベリン輸送能の測定を試みた。しかしながら、両発現系において明確なベルベリン輸送活性は確認されなかった。H27 年度は卵母細胞による輸送能の測定を再度試みると共に、本研究内容を論文にまとめる予定である。

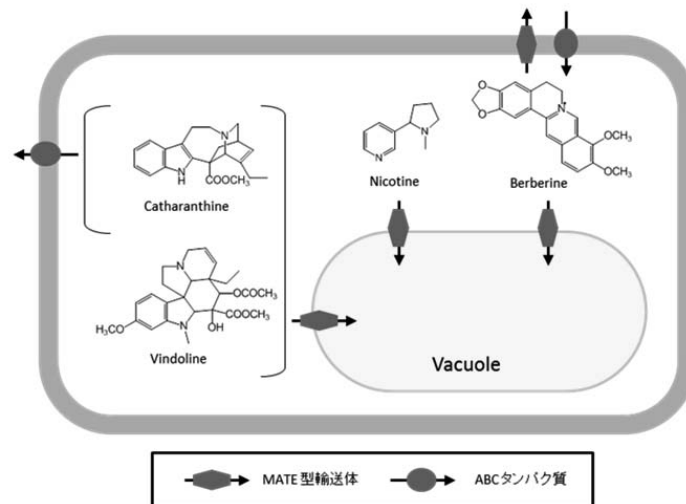


図 1. アルカロイド輸送への関与が推測される膜輸送体
これらの輸送体を利用して輸送工学を行う。

3) 革新的なバイオマス構造解析技術を基盤とした新領域の創成

西村 裕志 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：西村 裕志 (京都大学・生存圏研究所)

共同研究者：渡辺 隆司 (京都大学・生存圏研究所)

片平 正人 (京都大学・エネルギー理工学研究所)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

生理活性 先端分析化学

ミッション2：太陽エネルギー変換・利用

ミッション4：循環型資源・材料開発

3. 研究概要

木質バイオマスの生分解過程を包括的に理解するためには、その構造を精密かつ定量的に捉えるとともに、分解過程の変化を分子レベルでモニタリングすることが重要である。これまでに、バイオマス試料を可能な限りインタクトな状態で丸ごと溶液 NMR 法に供し、二次元 NMR 測定 (^1H - ^{13}C HSQC) により木材細胞壁内部の分子構造を原子レベルで観測することに成功している。本研究では、複雑で多様な分子を含むバイオマス試料において、二次元 NMR 法を用いて高分解能に各成分を識別しつつ、定量的に見積もることを達成するため、各成分の緩和過程とスピン結合状態の相違に由来するシグナル積分値のばらつきをなくし、定量分析を達成する方法論の開発を行った。また、木質生分解時に生じる二次代謝物を安定同位体標識し、NMR 試料セル内で直接観測する手法と質量分析法を組み合わせ、生分解過程における菌体外代謝物の動的な変化と細胞壁成分の構造変化を分析した。

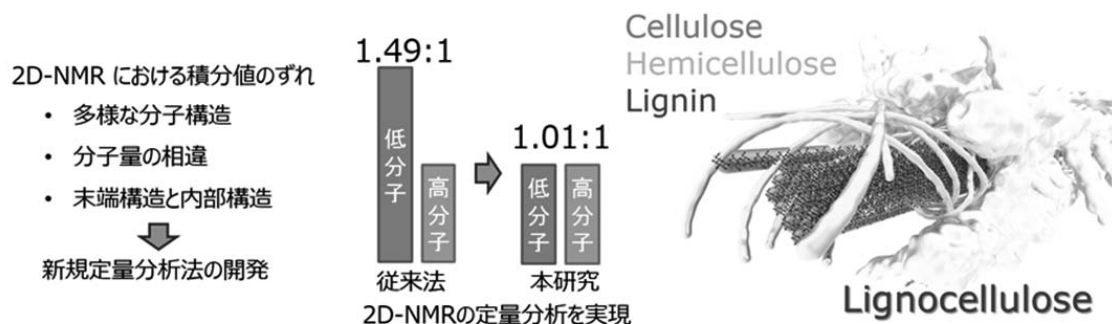


図1 分子量の大きく異なる分子の混在系における定量 2D-NMR 法

2. 「木質住環境と健康」

～空気質特性の解明とヒトへの影響解析～

仲村 匡司 (京都大学・農学研究科)

1. 研究組織

| | | |
|-------------|--------------------|----------|
| 代表者氏名：仲村 匡司 | (京都大学・農学研究科) | |
| 矢崎 一史 | (京都大学・生存圏研究所) | |
| 共同研究者：木村 彰孝 | (長崎大学・教育学部) | 課題 1, 2 |
| 仲村 匡司 | (京都大学・農学研究科) | 課題 2 |
| 高橋 良香 | (京都大学・生存圏研究所) | 課題 2 |
| 高橋 けんし | (京都大学・生存圏研究所) | 課題 3 |
| 矢吹 正教 | (京都大学・生存圏研究所) | 課題 3 |
| 光永 徹 | (岐阜大学・応用生物科学部) | 課題 4 |
| 松原 恵理 | (森林総合研究所) | 課題 4 |
| 小川 愛 | (岐阜大学・応用生物科学研究科) | 課題 4 |
| 坂本 祥子 | (岐阜大学・応用生物科学研究科) | 課題 4 |
| 服部 浩之 | (岐阜大学・応用生物科学研究科) | 課題 4 |
| 東 賢一 | (近畿大学・医学部) | 課題 5 |
| 萬羽 郁子 | (近畿大学・医学部) | 課題 5 |
| 宮越 順二 | (京都大学・生存圏研究所) | 課題 6 |
| 小山 眞 | (京都大学・生存圏研究所) | 課題 6 |
| 成田 英二郎 | (京都大学・生存圏研究所) | 課題 6 |
| 古田 裕三 | (京都府立大学・生命環境科学研究科) | 課題 7 |
| 三好 由華 | (京都府立大学・生命環境科学研究科) | 課題 7 |
| 田井 駿一 | (京都府立大学・生命環境科学研究科) | 課題 7 |
| 石原 麻由子 | (京都府立大学・生命環境学部) | 課題 7 |
| 川井 秀一 | (京都大学・思修館) | 課題 1 - 7 |
| 藤田 佐枝子 | (有限会社ホームアイ) | 課題 1 - 6 |
| 辻野 喜夫 | (元・大阪府環境農林水産総合研究所) | 課題 1 |
| 中山 雅文 | (中山倉庫株式会社) | 課題 1 |
| 中村 宜弘 | (中山倉庫株式会社) | 課題 1 |

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

木質住環境と健康

ミッション1：環境計測・地球再生

ミッション4：循環型資源・材料開発

3. 研究概要

木材（とくにスギ材）には優れた空気浄化機能があり、また木材内装仕上げによって抑うつや不眠などの症状改善が観察されている。そこで本研究では、木質住環境における空気質特性の解明およびヒトへの影響解析により、居住者の健康改善・増進に寄与するデータの蓄積を目的としている。最終的には、木材を有効活用する技術開発を開拓、推進することを目標とする。

昨年度までに以下の7課題で進めてきたが、本年度は課題3を除く6つの研究課題を設定して遂行した。

課題1 木材による調湿および空気汚染物質除去に関する研究

課題2 木質住環境の見えおよび触り心地が生理・心理・認知反応に及ぼす影響

課題3 木質住環境内の空気質計測（平成26年度は未実施）

課題4 木材の香りの生理・心理応答と有効成分の探索

課題5 実空間における木材パネルの設置が居住者の生理・心理反応に及ぼす影響

課題6 スギ材抽出成分のヒト細胞への生理応答

課題7 スギ木ロスリット材の吸放湿機能の向上に関する技術開発

3. 「大気質の安心・安全」

～人間生活圏を取り巻く大気の微量物質の動態把握～

高橋 けんし（京都大学・生存圏研究所）

1. 研究組織

代表者氏名：高橋 けんし（京都大学・生存圏研究所）

矢吹 正教（京都大学・生存圏研究所）

津田 敏隆（京都大学・生存圏研究所）

共同研究者：松田 和秀（東京農工大学・農学部附属広域都市圏フィールド
サイエンス教育研究センター）

小杉 緑子（京都大学・農学研究科）

三浦 和彦（東京理科大学・理学部）

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

大気質変動、エアロゾル、微量気体、森林－大気相互作用、接地境界層

ミッション1：環境計測・地球再生

3. 研究概要

本プロジェクトでは、人間生活圏および森林圏に近い大気の化学的動態の変動に着目し、大気微量成分（ガスおよび粒子状物質）の時空間分布を精細に描写する新しい大気計測手法を開拓することを目指している。平成26年度は、東京都八王子市にある東京農工大フィールドサイエンス多摩丘陵（ $35^{\circ}38 \cdot N$, $139^{\circ}23 \cdot E$ ）の森林小流域において、30 mの微気象観測用タワーをプラットフォームとして活用することにより、微量気体成分ならびにエアロゾル粒子の個数濃度と粒径分布の鉛直立体分布を観測することに挑戦した。走査型粒径分布測定器および光学式粒子計数器を、独自に開発したスイッチング電磁弁制御システムと組み合わせることにより、ナノ粒子から粗大粒子までの粒径分布を、樹冠内外の鉛直方向で観測する方法を考案した。また、リモートセンシングによる大気計測手の開拓では、その一環として進めてきたエアロゾル粒径分布を推定する新発想のライダー手法の検証観測実験を行った。夏期には、孤立峰である富士山の中腹に位置する太郎坊基地（ $35^{\circ}19 \cdot N$, $138^{\circ}47 \cdot E$ ）にアイセーフライダーを設置して、山岳大気の物質変動を高時間分解能で捉える試みも行った。さらに我々は、短寿命気候汚染分子の一つとして注目の集まっているメタンを対象とし、その森林環境における動態を詳しく把握するために、滋賀県大津市にある桐生水文試験地（ $34^{\circ}58 \cdot N$, $136^{\circ}00 \cdot E$ ）において観測研究を行った。具体的には、観測サイトのヒノキ林内にある29 mの微気象観測タワーを利用した緩和渦集積法や閉鎖循環型チャンバー法と、超高感度な半導

体レーザー吸収分光法とを組み合わせたフラックス測定法の開発を行った。本報告書では、これらの成果についてまとめる。

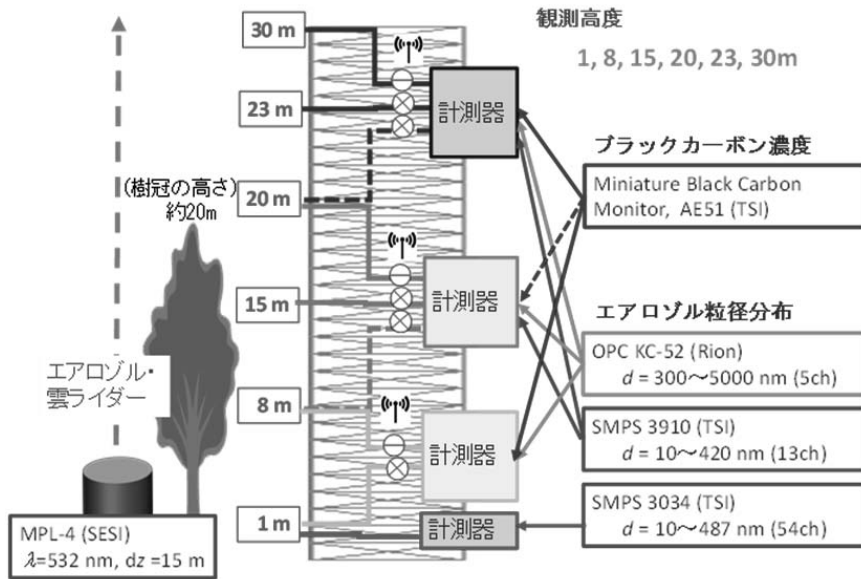


図1 気象観測用タワーを用いて、エアロゾルの粒子濃度およびその粒径分布の高度プロファイルを計測するシステムを独自に開発した。

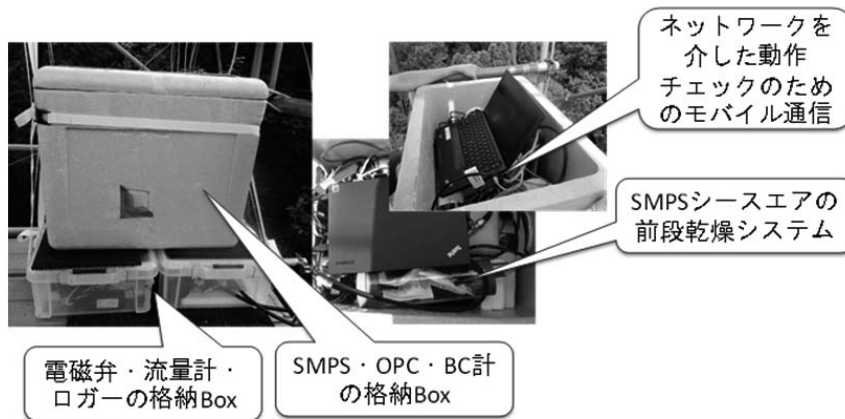


図2 本プロジェクトで開発した、タワーの各観測高度に設置した計測器格納ボックスの外観。

4. 「電磁場の生体影響」

～細胞研究用共鳴結合無線電力伝送システムによる 遺伝毒性評価ならびに中間周波帯電磁界による 細胞の遊走能および貪食能への影響～

宮越 順二（京都大学・生存圏研究所）

1. 研究組織

| | |
|-------------|---------------|
| 代表者氏名：宮越 順二 | （京都大学・生存圏研究所） |
| 三谷 友彦 | （京都大学・生存圏研究所） |
| 共同研究者：水野 公平 | （京都大学・生存圏研究所） |
| 小山 眞 | （京都大学・生存圏研究所） |
| 成田 英二郎 | （京都大学・生存圏研究所） |
| 清水 陽子 | （京都大学・生存圏研究所） |
| 篠原 真毅 | （京都大学・生存圏研究所） |

2. 関連領域

新領域開拓：電磁場の生体影響

関連ミッション2：太陽エネルギー変換・利用

3. 研究概要・目的

細胞研究用共鳴結合無線電力伝送システムによる遺伝毒性評価

現代社会は、生活環境で目には見えない電磁波があふれている。身の回りの電磁波の発生源としては、高圧送電線、家電製品、携帯電話とその基地局、医療の電磁波機器など様々である。このような電磁波の健康影響の可能性についてはこれまでから人々の関心を集め、多くの研究が実施されてきた。

近年、新しい無線電力伝送技術として、共鳴結合無線電力伝送方式が注目を集めている。この方式は、従来から実用化されているコイル対による電磁誘導方式を拡張したもので、送電側コイルと受電側コイルの共振周波数を一致させることで、伝送効率を飛躍的に向上させることが可能であり、今後、身近な生活環境での実用化が期待されている。また、それに伴い、共鳴結合無線電力伝送下というこれまでにない特殊な環境下における生体影響の可能性について関心が集まっている。

このような状況を踏まえ、我々の研究室では、これまでに様々な電磁波を対象に細胞実験により健康影響の可能性を評価してきた経験、ノウハウを活かし、新たに開発した細胞研究

用共鳴結合無線電力伝送システムを用いて、細胞の遺伝毒性を指標とした細胞実験に取り組んだので、その結果を報告する。

中間周波帯電磁界による細胞の遊走能および貪食能への影響

IH クッキングヒーターからの中間周波帯電磁界 (Intermediate frequency: IF) による生体影響を調べるため、ヒト免疫システムの初期レスポンスを担う好中球における遊走能と貪食能への影響を検索した。

5. 「千年居住圏」

1) アジア地域に建つ木造建築物のモニタリングによる 長期構造性能評価

五十田 博（京都大学・生存圏研究所）

1. 研究組織

代表者氏名：五十田 博（京都大学・生存圏研究所）

共同研究者：森 拓郎（京都大学生存圏研究所）

北守 顕久（京都大学生存圏研究所）

楠 浩一（東京大学地震研究所）

中川 貴文（国土交通省国土技術政策総合研究所）

河合 直人（工学院大学建築学部）

松田 昌洋（信州大学工学部）

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

千年居住圏

ミッション1：環境計測・地球再生

ミッション4：循環型資源・材料開発

3. 研究概要

長期にわたり安心して安全な建物を維持するためには、外乱に対する状態を常時監視し、必要に応じ適切な対処を実施することが重要となる。本研究は、資源循環型材料の代表である木材を用いた建物を対象に加速度計による長期振動計測を利用して、構造性能を評価するヘルスマニタリングシステムを構築し、その実証実験をおこなうものである。本年度は、共用期間中に地震動という外乱を受けたい際の建物の被害を想定するために、実大振動台実験においてセンサーを取り付け、測定を実施した結果や、長期計測を開始した建物や、今後の測定計画、損傷検知のための演算の試行について示す。

2) アジア地域の植物バイオマスを活用した循環型材料の開発 ～クエン酸添加がタンニン・スクロース接着剤へ及ぼす影響～

梅村 研二（京都大学・生存圏研究所）

1. 研究組織

代表者氏名：梅村 研二（京都大学・生存圏研究所）

共同研究者：金山 公三（京都大学・生存圏研究所）

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

千年居住圏

ミッション4：循環型資源・材料開発

3. 研究概要

これまでアカシア木粉をエレメントとし、タンニンとスクロースから成る接着剤を用いた木質成形体の物性について検討してきた。昨年度は、クエン酸の少量添加が熱圧温度の低下や熱圧時間の短縮に有効であることを示した。本年度は、クエン酸の少量添加が接着剤の硬化挙動に及ぼす影響について検討した。加熱硬化物の沸騰水による不溶化率測定の結果、クエン酸を添加しない場合に比べて短い加熱時間で高い不溶化率を示し、特に加熱温度が180℃の場合に著しい効果が認められた。DSCやTGAの昇温測定の結果、クエン酸添加の有無に関わらず、200℃付近で変化を示したが、ピーク温度はクエン酸の添加によって若干低下し、また重量減少率の低下も認められた。これらの結果から、クエン酸はタンニン・スクロース接着剤に対して硬化促進作用があると考えられた。

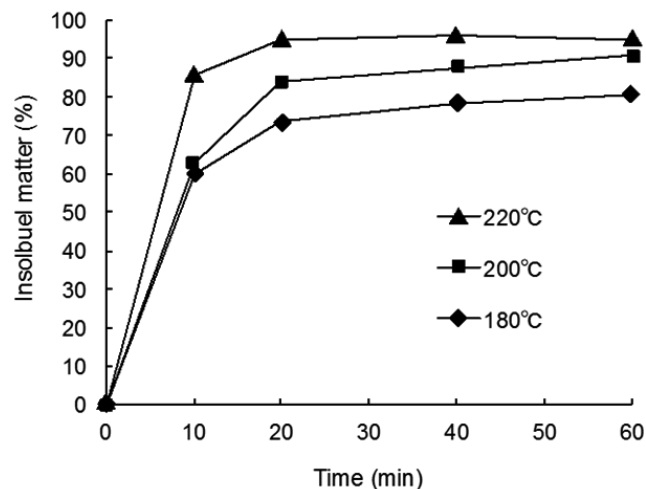


図1. クエン酸を添加したタンニン・スクロース接着剤の加熱硬化物の不溶化率変化

3) 東アジアの木の文化と科学

杉山 淳司、小林 加代子、堀川 祥生、遠藤 利恵
(京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：杉山 淳司（京都大学・生存圏研究所）
共同研究者：田鶴 寿弥子（京都大学・生存圏研究所）
遠藤 利恵（京都大学・生存圏研究所）
小林 加代子（京都大学・生存圏研究所）
堀川 祥生（京都大学・生存圏研究所）
高妻 洋成（奈良文化財研究所）
翟 勝丞（南京林業大学）
金 南勲（韓国・江原大学）
李 元熙（韓国・慶北大学）

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

千年居住圏

3. 研究概要

過去の木材利用における用材選択の変遷をみることにより、植生史、交流史、道具史、歴史などさまざまな木にかかわる文化を知ることが第一の目的とする。そのための手段としての樹種識別は、ツールとしてきわめて重要な手法であるが、サンプリングに破壊を伴うため文化財の調査には不向きである。そこで、様々な非破壊樹種検査法について木材学の立場から検討し、その文化財への応用を図ることを第二の目的とする。また、出土する文化財の保存も特に東アジアの発展途上国においては重要な課題となっているので、国際共同研究として熱帯有用材の保存技術の開発に取り組む。

圏間共同研究

1) 微細気泡水効果の原理解明と環境・材料・農業分野への応用

上田 義勝 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：上田 義勝 (京都大学・生存圏研究所)

共同研究者：杉山 暁史 (京都大学・生存圏研究所)

徳田 陽明 (京都大学・化学研究所)

伊藤 嘉昭 (京都大学・化学研究所)

二瓶 直登 (東京大学・大学院農学生命科学研究科)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

震災復興連携支援研究、圏間共同研究

ミッション1：環境計測・地球再生

3. 研究概要

本研究では新たな可能性を持つ微細気泡水について、圏間を融合した大きな研究分野として確立する事を大目標とする。具体的には、分野横断型の多角的な応用研究として3つの個別テーマ（1：基礎特性、2：無機化学合成への応用、3：農業分野への応用）を設定し、微細気泡水が本来持つ特性について多角的な視点から捉え、その基礎原理を正確に解明する。

2) 低炭素居住圏の確立に資する植物由来脂溶性生理活性成分の耐虫・耐朽性評価と大量生産デザイン

矢崎 一史 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：矢崎 一史 (京都大学・生存圏研究所)

共同研究者：吉村 剛 (京都大学・生存圏研究所)

高梨 功次郎 (京都大学・生存圏研究所)

小野 和子 (京都大学・生存圏研究所)

豊岡 公德 (理化学研究所)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

生理活性、環境未来千年居住圏

ミッション1：環境計測・地球再生

3. 研究概要

本研究では、住宅居や文化財の原料である木材の耐虫・耐朽性を担う物質を、石油資源によらない脂溶性の植物生理活性成分に求め、その活性の定量評価と応用に向けた大量生産を目指している。材料としてナフトキノ系脂溶性生理活性物質（シコニン類）を生産するムラサキ科ムラサキ (*Lithospermum erythrorhizon*) の培養細胞に着目し、昨年度はムラサキ抽出物のイエシロアリ (*Coptotermes formosanus*) に対する耐虫性、および2種の木材腐朽菌 (*Trametes versicolor* および *Tyromyces palustris*) に対する耐朽性の評価を行った。また、前年度から H26 年度にかけては大量生産デザインに資する基盤情報の取得を目的として、当初の計画であった次世代シーケンサーによる RNA-Seq を行い、その詳細な解析を行った。



図1 石油資源によらない木材の長寿命化

3) ヒトと動物に対するリグニンの生理機能の解明と利用

梅澤 俊明 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：梅澤 俊明 (京都大学・生存圏研究所)

共同研究者：吉村 剛 (京都大学・生存圏研究所)

河田 照雄 (京都大学・大学院農学研究科)

奥西 智哉 (農研機構・食品総合研究所)

柴田 大輔 (かずさDNA研究所、京都大学・大学院農学研究科)

山村 正臣 (京都大学・生存圏研究所)

鈴木 史朗 (京都大学・生存圏研究所)

青柳 秀紀 (筑波大学・大学院生命農学研究科)

坂本 正弘 (京都大学・大学院農学研究科)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

バイオマスの生理活性、リグニン、食品機能、未利用芳香族資源、シロアリ、木材保存、
圏間共同研究

ミッション1：環境計測・地球再生

ミッション2：太陽エネルギー変換・利用

ミッション4：循環型資源・材料開発

3. 研究概要

リグニンは地球上のバイオマスの2～3割を占めるにも関わらず、かつてはパルプ化、酵素糖化、あるいは飼料消化における阻害的成分として、負の印象を以て語られることが多かった。しかし近年では、その芳香族バイオマスとしての重要性が再認識され、有効活用が社会的に強く求められるに至り、研究代表者らも代謝工学による有用リグニンの増加を図る研究を進めている。一方リグニンの機能として従来ほとんど看過されてきたのが、ヒトを始めとする動物に対する生理機能である。そこで、本研究では、食物繊維リグニンの食品生理機能の解明とリグニンがマウスおよびシロアリに及ぼす生理機能の解明を目指し、本年度は、まず食品中のリグニンの評価系構築と食物繊維高含有食品のリグニン解析を行った。

4) 樹木年輪と歴史・古環境

渡邊 裕美子 (京都大学・理学研究科)
杉山 淳司 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：杉山 淳司 (京都大学・生存圏研究所)
共同研究者：津田 敏隆 (京都大学・生存圏研究所)
田鶴 寿弥子 (京都大学・生存圏研究所)
反町 始 (京都大学・生存圏研究所)
田上 高広 (京都大学・理学研究科)
渡邊 裕美子 (京都大学・理学研究科)
大山 幹成 (東北大学・学術資源研究公開センター植物園)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

圏間共同研究、千年居住圏
ミッション1：環境計測・地球再生

3. 研究概要

テーマ A: 材鑑調査室の歴史的な古材を活用した樹木年輪データベースの構築と応用

京都大学生存圏研究所材鑑調査室には貴重な古材試料が数多く所蔵されているだけでなく、現在も収集が続けられている。主に目録の記録にのみ頼って分類されている古材試料に多義的な価値を持たせ、様々な研究分野で活用するために、科学的手法に基づいた正確な暦年代をつける必要がある。そのために、古材年輪の測定、標準年輪曲線の構築、標準年輪曲線延長と補強、古気候復元の精度向上を進めているので報告する。

テーマ B: アジア赤道域における季節スケールの気候・環境変遷の復元

本プロジェクトでは、インドネシアの樹木年輪の構成要素を複数分析し、気象観測データと高精度で対比することにより、「アジア赤道域における季節スケールの気候・環境変遷の復元」を目指している。前年度までに、インドネシア産 熱帯樹 (スンカイ 1 個体; SungkaiNAN7) のマルチ樹木年輪データと気象観測データの系統的な比較から、古気候指標としての信頼度を評価した【Watanabe et al., 2013】。本年度は、異なる個体 (スンカイ; SungkaiNAN8) にも上記の指標評価を実施し、個体間相関等を検証した【Harada et al., in press】。さらに、前年度に収集した インドネシア産のチーク試料 4 個体についても、過去約 70 年間にわたる炭素・酸素同位体比を分析し、個体間相関や降水量との相関を検討することにより、チークの古気候指標としての評価を行った。

新研究醸成支援プログラム

1) 所外共同研究 1

光合成微生物を用いた太陽エネルギーによる イソプレン生産技術の開発

矢崎 一史 (京都大学・生存圏研究所)

1. 研究組織

代表者氏名：矢崎 一史 (京都大学・生存圏研究所)

共同研究者：杉山 暁史 (京都大学・生存圏研究所)

福澤 秀哉 (京都大学・生命科学研究科)

梶川 昌孝 (京都大学・生命科学研究科)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

バイオエネルギー、循環型材料

ミッション1：環境計測・地球再生

ミッション2：太陽エネルギー変換・利用

ミッション4：循環型資源・材料開発

3. 研究概要

イソプレンは工業原料として、世界的に100万トンレベルで利用されている揮発性の炭化水素である。特に、合成ゴムはイソプレンを原料とする代表的な製品であり、車のタイヤや緩衝材などとして世界中で利用されている。その原料は、全て化石資源に依存しているため、原油価格の高騰は直接合成ゴムなどの製造業にとって大きな打撃になっている。しかしながらイソプレンはマルチパーパスの化学原料として、石油の枯渇に向けて早急に供給を考えねばならない重要化合物の内の1つである。本研究では、光合成微生物を使ってイソプレンを生産させ、培養器のヘッドスペースからイソプレンを効率よく回収する生産系を構築することを目的とする。

本研究は研究所が推進する生存圏の科学において、生命科学と大気化学の融合研究で行った植物からのイソプレン放出研究を、さらに一步問題解決型の研究の方向に発展させるものであり、研究所の現ミッションの発展型を目指すものとして位置づけられる。新領域開拓研究においては、光合成微生物による化学原料の生産技術開発に取り組むものであり、脱石油資源社会における人間生活のQOLの維持向上を、有用化学資源の供給面から下支えする研究としてのポテンシャルを有する。

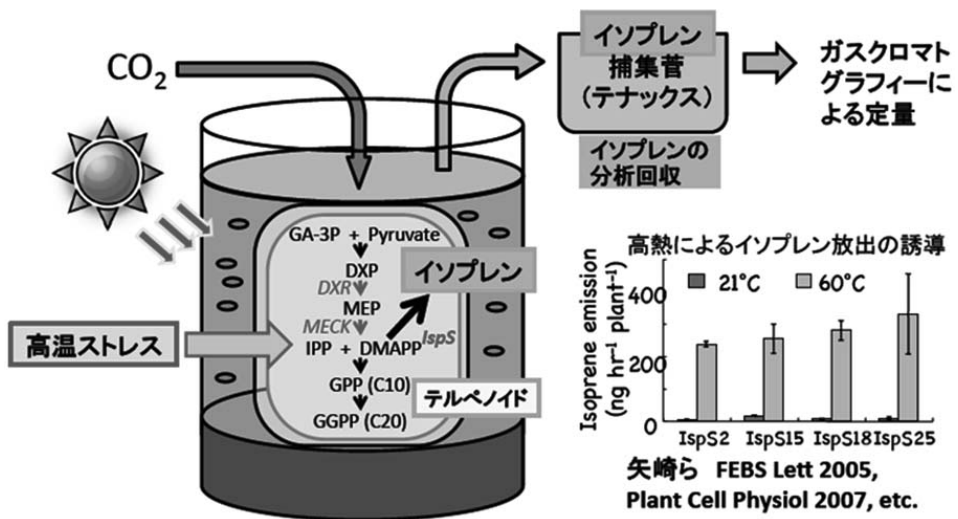


図1. 緑藻をつかったイソプレン生産のスキーム

IspS, イソプレン合成酵素: DMAPP, ジメチルアリルジリン酸

2) 所外共同研究 2

植物揮発性物質が駆動する植物・植食生昆虫・捕食性昆虫の 共進化

高林 純示（京都大学・生態学研究センター）

1. 研究組織

代表者氏名：高林 純示（京都大学・生態学研究センター）

共同研究者：矢崎 一史（京都大学・生存圏研究所）

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

ミッション1：環境計測・地球再生

3. 目的と具体的な内容

植物は植食性節足動物（植食者）の食害に応答して、植食者誘導性植物揮発性物質（Herbivore-Induced Plant Volatiles: HIPVs）と呼ばれる揮発性物質群の生産を開始する。HIPVsは植食者の捕食者・捕食寄生者（天敵）を誘引する機能があることが実証されている。これは、植物と天敵との共生的な相互作用と行うことができる。かかる共生関係は、どのように進化してきたのか、に関してHIPVsの中でも緑のかおりと呼ばれる一連の化合物に焦点を当て研究を行った。

緑のかおりは組織が障害を受けた際に生じるリノール酸、リノレン酸を基質としてフィトオキシリピン経路を経て速やかに作られる。最初に生産される青葉アルデヒド（(E)-2-hexenal）は・・・不飽和アルデヒドと呼ばれ、反応性が高く障害を受けた部分での微生物に対する直接防衛機能を有すると考えられる。青葉アルデヒドは毒性が高いため、植物組織において自家中毒を起こすと考えられ、過剰分は直ちに周辺組織で毒性のない青葉アルコール、青葉アセテートに変換された後、大気中へ放出される。本研究では、青葉アルデヒド、青葉アルコール、青葉アセテートに対して誘引される天敵の反応性から、「障害→直接防衛→解毒→系外放出」プロセスが植物-天敵間の共生関係を媒介する化学情報に利用される進化過程を考察する。

3) 所外共同研究 3

化石資源の代替としての植物根共生微生物群および竹笹類の イソプレン放出

奥村 智憲 (京都大学・農学研究科)

1. 研究組織

代表者氏名：奥村 智憲 (京都大学・農学研究科)

共同研究者：矢崎 一史 (京都大学・生存圏研究所)

鶴田 健二 (京都大学・農学研究科)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

大気質、植物二時代謝産物

ミッション1：環境計測・地球再生

3. 研究概要

本研究では世界的に100万トンレベルで利用されている揮発性の炭化水素であり、合成ゴムの原料であるイソプレンの化石資源以外からの獲得をめざし、微生物および竹笹類のイソプレン生成能について調査する。微生物や植物の中にはイソプレンを大量に生産し放出する種が存在し、たとえば植物の全球での総放出量は人間活動由来揮発性有機ガスの総放出量よりも多いことが知られている¹⁾。本研究では矢崎研と共同して、多くが高いイソプレン放出能をもつ竹笹類および培養毛状根に共生させた様々な微生物のイソプレン放出量の有無を計測することで、高イソプレン放出種の同定とそれらの放出能について明らかにする。

4) 所外共同研究 4

根端分裂組織における細胞膜の弾性率測定と エキソサイトーシス機構との関係

木村 俊作（京都大学・大学院工学研究科）

1. 研究組織

代表者氏名：木村 俊作（京都大学・大学院工学研究科）

共同研究者：矢崎 一史（京都大学・生存圏研究所）

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

植物二次代謝産物、植物微生物相互作用、生存圏QOL

ミッション1：環境計測・地球再生

3. 研究概要

植物の作る生理活性物質の中には、自らの根組織を土壤中の病原性微生物や食植昆虫から守るため、根表面に化学バリアーを形成する、あるいは土壤中に生理活性物質を分泌することが知られる。これらの代謝産物は土壤中の微生物との軍備競争に関与するものも多いと考えられるが、土壤中における植物と微生物との相互作用は、根粒菌や菌根菌等の共生研究を除き、その具体的な実体は大部分が未知である。本研究では、植物の根組織の作る生理活性物質の分泌機構に焦点を置き、細胞膜の物理的特性を明らかにすること、さらにそこに関わる分子の生理機能を解明する方法論の確立を目指す。

5) 海外研究者招聘（国際共同研究）

エステル型リグニン糖複合体の酵素分解反応の解析

西村 裕志（京都大学・生存圏研究所）

1. 研究組織

代表者氏名：西村 裕志（京都大学生存圏研究所）

共同研究者：渡辺 隆司（京都大学生存圏研究所）

片平 正人（京都大学エネルギー理工学研究所）

Gunnar Westman (Chalmers 工科大学)

Lisbeth Olsson (Chalmers 工科大学)

Filip Nylander (Chalmers 工科大学)

Hampus Sunner (Chalmers 工科大学)

2. 新領域開拓のキーワードと関連ミッション

先端分析化学

ミッション2：太陽エネルギー変換・利用

ミッション4：循環型資源・材料開発

3. 研究概要

樹木に代表される植物バイオマスは未利用かつ豊富なバイオマス資源として注目されている。植物細胞壁は、主にセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンによって構成されており、互いに多様な結合で三次元の高分子を形成している。この高分子ネットワークで特にリグニンと糖の結合構造は、その存在量は少ないもののバイオマスの高分子ネットワークを“ほどく”ための鍵となる構造であり、バイオマスの成分分離、変換反応を開発する上で重要である。植物細胞壁中で、リグニンはヘミセルロースと共有結合して Lignin Carbohydrate Complex (LCC) を形成しており、細胞壁の強度や分解性に大きな影響を与えている。バイオマス変換において、このリグニン・糖間結合の切断を高効率で行えれば、主要3成分の分離効率は大きく上昇すると期待される。本研究では、リグニン・糖間結合を直接切断する酵素に着目して、エステル型 LCC モデル化合物の合成と酵素による分解反応を行い、LCC の分析と構造解析、酵素の反応特性と分解反応を詳細に解析するとともに、実際の植物細胞壁成分と反応させて起こる構造変換への応用を目指す。本国際共同研究ではリグニンと糖の結合構造のモデル化合物の合成グループ(スウェーデン・チェルマース工科大 Gunnar 教授ら)、微生物由来の糖の結合構造分解酵素研究グループ(スウェーデン・チェルマース工科大 Olsson 教授ら)、分解反応・構造解析グループ(京都大生存研、エネ研)が連携して糖リグニン複合体分

解反応を解析する。本研究は、植物バイオマス中で、糖リグニン複合体の分子構造に関する基礎知見を与えるとともに、特異的な酵素によるバイオマス成分分解反応を解析する新しい試みである。

研究業績

当研究所の研究業績は、京都大学教育研究活動データベースにまとめられており、平成 26 年度の研究業績についても本データベース <http://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/view/>を参照されたい。

生存圏研究 第11号

| | |
|--------|-------------------------------|
| 発行日 | 平成27年11月10日 |
| 編集兼発行者 | 京都大学 生存圏研究所 京都府宇治市五ヶ庄 |
| 印刷所 | 株式会社 田中プリント 京都市下京区松原通藪屋町東入 |

