

生存圏研究

Sustainable Humansphere

No. 21

2025年



京都大学 生存圏研究所



目 次

巻頭言	1
-----	---

論 文

1. 国際共同利用・共同研究拠点制度導入からの示唆	3
桑島 修一郎, 上田 義勝	

総 説

2. 森林圏－大気圏のガス交換フラックス計測のための分光技術	10
高橋 けんし	
3. リグニンの創薬資源化	21
岡部 由美	
4. タンザニアのミオンボ林における住民参加型森林管理の展開と課題	27
仲井 一志	
5. 人工知能時代の電離圏研究	34
劉 鵬, 横山 竜宏	
6. 侵略的外来植物由来の二次代謝産物が駆動する植物-根圏微生物間相互作用	40
中村 直人	

解 説

7. ファインバブルを巡る国際標準化	45
上田 義勝, 仲上 祐斗, 桑島 修一郎	

巻頭言

NHK で放送中の『舟を編む〜私、辞書つくります〜』（原作：三浦しをん「舟を編む」）を毎週楽しみにしている。辞書編纂という稀有な題材、池田エライザと野田洋次郎というキャスティングの妙、そして、脇を固める俳優陣の上質さに加えて、ドイツの国際映画祭で高く評価されたというニュースも入ってきたから、これは絶対に見ようと思って見始めた。物語は、出版社でファッション誌の編集に携わっていた主人公・岸辺みどり（池田）が、突然、辞書編集部へ飛ばされることから始まる。馬締光也（野田）という、温厚で生真面目だが、辞書を作ることに人生のすべてを捧げているような風変わりな上司を目の前にし、最初は戸惑う岸辺だが、馬締を中心とする辞書編集部の熱意に次第に感化され、自身もまたこだわりの辞書「大渡海」の製作に深くのめりこんでいき……。

物語の途中、「大渡海」のデジタル版のみを発売し、紙媒体は作らない、と社長が言い出したせいで、製本する紙の質感にすら強く固執するくらい紙媒体での製作しか頭になかった辞書編集部は、蜂の巣をつついたような大騒ぎになる。どうやって紙媒体の意義を社長に理解してもらうか？ 編集部が一同に会して作戦会議が始まる。そんな場面で、セレンディピティーという語彙が出てくる。「調べたい言葉があつて辞書を開くと、どうしても他の言葉が目に入って、自然と出合いの機会になる。辞書とは、分からない言葉を調べるだけではないんだ。デジタルの辞書検索では、セレンディピティーが求められてない。」これは、定年後の再雇用ながら、並々ならぬ熱意を持って辞書編集部を引っ張っている荒木公平のセリフである。

このセリフで即座に思い出したことがある。それは、私が図書室で学術論文の photocopy を取っていた時代のことである。DOI で検索すれば、ほんの数秒程度で文献が見つかる現代とはわけが違ふ。独特のインクやカビのにおいが混じった薄暗い書庫へと足を運び、整然と並べられたバックナンバーの中からお目当ての論文を見つけ出す。すると、どうだろう。その隣のページに載っている論文から後光のようなものが見えるではないか！（いや、ホントですよ、これ）。この体験を表す語彙は、まさしく、セレンディピティーだったわけだ。今にして思えば、目的の学術論文を見つけてきてわくわくしながら読むのはもちろんだが、想定外の出会いに期待が膨らむということも、わざわざ書庫へ足を運ぶ原動力になっていたような気がする。

実は、これと似たようなニュアンスのことを、二年前に発行した本誌第 19 号の巻頭言で、当時の編集委員長の飛松さんが言及されている。飛松さんの巻頭言を拝見したとき、わかるわかるー！と甚く納得したことを覚えている。飛松さんは、本稿のような駄文ではなく、デジタル媒体と冊子体の有り様について考察を深めておられる。デジタル媒体の良し悪し、冊子体の良し悪し、について私自身はうまく整理がついていない。しかし、薄暗い書庫へ足を運ぶ、たったそれだけの労力で、そこには、パソコンやスマホで目的の情報に直行するだけでは出会えないような宝物が眠っているかもしれないということを、学生には伝えるようにしている。コスパ、タイパではたどり着くことのできない広い世界があることを説くように努めている。

さて、今回の本誌「生存圏研究」第 21 号もまた、デジタル媒体のみでの発行となっている。ただし、その学術的価値そのものは、デジタルでも冊子体でも変わらないという点は明言しておきたい。

「生存圏研究」誌は、生存圏研究所で行われている研究活動の成果や情報を収録し、公表することを目的としている。公表の意義には、成果や情報の学術分野での活用のみならず、社会還元への期待も含まれている。さらに、“書き物”として遺すことは、将来、予想もしなかったところで、何か、あるいは、誰かの役に立つ、というところにつながるかもしれない。事実、我々の研究活動では、先人が残してくれた記録や情報を大いに活用している。そう、薄暗い書庫へ足を運ぶのか、電子検索で PDF をダウンロードするか、アクセスのスタイルは違えども、文献や情報に学ぶことの重要性に変わりはない。「生存圏研究」誌もまた、先人たちが残してくれた貴重な記録の積み重ねであり、この第 21 号の発行にあたり、編集幹事としてあらためて責任と喜びを感じる次第である。

令和 7 年 10 月 31 日

生存圏研究所 広報委員会

委員長 高橋 けんし

国際共同利用・共同研究拠点制度導入からの示唆

桑島 修一郎^{1*}, 上田 義勝¹,

Implication from the International Joint Usage/Research Center System

Shuichiro Kuwajima^{1*} and Yoshikatsu Ueda¹

概要

日本における国際的な研究水準低下が顕在化してきたことを受け、第3期中期目標・中期計画期間(2016-2021)に、共同利用・共同研究拠点制度において「国際共同利用・共同研究拠点」が導入された。多くの研究分野が参画する際の多様性の保持と国際的な研究水準向上の両立は難しい課題であり、第3期拠点期末評価では国際拠点は別枠とする評価体系が採用されたが、直近の第4期中間評価では国際拠点を同じ枠組みに含めた評価体系に変更され、拠点制度全体で国際的な研究水準向上を目指す方向性にシフトしたことが示唆された。しかしながら、この経緯については不明であり、したがって本稿では、国際拠点導入が検討された文科省研究環境基盤部会第8期及び第9期の会議資料にまで遡り、導入の経緯とそれにより生じる本質的な課題を再確認することにより、同制度の評価の在り方について考察を試みた。

1. はじめに

「共同利用・共同研究拠点制度」は、2004年の国立大学法人化後も日本全体の学術研究の発展を図るために、国公立大学を問わず、大学の研究ポテンシャルを活用して研究者が共同で研究を行う体制を整備することが重要であるという観点から、2008年7月から運用が開始された[1-4]。2025年4月現在では、国立大学が中核の拠点が78拠点、公私立大学が中核の拠点が27拠点登録されているが、当該制度の開始時点では7拠点から始まり、その後急拡大し現在の拠点規模となっている[5]。一期6年間の国立大学法人中期目標・中期計画期間の推移に合わせて振り返ると、第1期(2004-2009)では多様な研究分野の参画を促し拠点数を確保すること、第2期(2010-2015)では多様な研究拠点群に対しそれぞれの研究分野の特性を考慮しつつ、拠点のさらなる発展を促す評価体系を構築することであった[6]。現在、「大型設備利用型」「共同研究型」「医学・生物学系(医学系)」「医学・生物学系(生物学系)」「人文・社会科学系」「異分野融合系」の6つの類型に分類されており、それぞれの類型の中で評価が行われている[5]。

この間、国内では東日本大震災、国外では急速なグローバル化と産業構造の転換を経験し、科学技術

2025年9月7日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏未来開拓研究センター

* E-mail: kuwajima.shuichiro.3c@kyoto-u.ac.jp

政策についても大きな見直しが必要とされてきた。特に、新興国の台頭により、日本の国際的な研究水準の相対的な低下が指摘され始め、科学技術とイノベーションとの結びつきを高めるための研究基盤強化の文脈で大学改革の必要性も高まっていく。第3期（2016-2021）では、共同利用・共同研究拠点制度についても国を代表する研究基盤として国際的な研究水準の向上に貢献することが求められ、同拠点の中から国際的な研究実績を有する拠点を厳選し「国際共同利用・共同研究拠点」として認定することになる。第3期拠点期末評価から国際拠点評価が始まり、従来の6類型に加えて7つ目の“別枠”として評価されることになる。しかしながら、直近の第4期拠点中間評価（2024年10月）では従来の6類型の中に国際拠点を含む枠組みに変更され、各類型において国際的な研究水準の向上が共通の評価指標として位置づけられたと理解できる[5]。共同利用・共同研究拠点制度に関する検討は、文科省科学技術・学術審議会研究環境基盤部会で実施されており、拠点の認定・評価に関する具体的な検討は「共同利用・共同研究拠点及び国際共同利用・共同研究拠点に関する作業部会」で行われている。しかしながら、同作業部会の情報は公開されておらず、検討の経緯が報告される研究環境基盤部会の資料にもその経緯について言及されていない。国際的な研究水準の向上は分野を問わず不可避な状況とは言え、国内事象を扱う研究分野や、研究コミュニティが未熟な新興分野の育成なども重要な目的である共同利用・共同研究拠点制度において一律に国際的な研究水準を評価基準として導入するのは同制度の特徴を損なう恐れもある。本稿では、国際共同利用・共同研究拠点の導入が検討された、研究環境基盤部会第8期及び第9期の会議資料から、当時並行して開催されていた国際戦略委員会の動向とともに、共同利用・共同研究拠点制度における国際化の経緯を確認する。国の政策分析において審議会等の議事録分析は有効な手段の一つであることは知られており[7-9]、多くの研究分野が参画する際の多様性の保持と研究水準の向上との両立を実現するために、どのような検討がなされてきたのかを再確認することで、共同利用・共同研究拠点制度に求められる役割について再考を試みる。

2. 第8期研究環境基盤部会における検討

第8期は第73回（2015年3月）から第86回（2017年1月）までが該当する（図1）。2016年度からは、第3期中期目標・中期計画期間と第5期科学技術基本計画が同時に開始されることもあり、科学技術とイノベーションとの結びつき強化と、それに伴う大学改革との両方の方向性が強く要請された時期と言える。それまで全国に配置されている国立大学を機能毎に色分けするようなことを積極的に行ってこなかったが、大学の強みを活かしたミッションの再定義を求める機運が高まり、運営費交付金の配分に関しても、学長のリーダーシップを高め、各大学の特色に合わせた機能強化への配分に重心を移すことが検討された[10, 11]。第8期の検討開始時点で、共同利用・共同研究拠点は95拠点（国立29大学77拠点、公私立17大学18拠点）が認定されており、分野網羅的に拠点数が確保できるようになったことから、次には拠点制度の機能強化に政策的な興味が移っていく。第74回ではこれまでも指摘されてきた組織・人事の流動性の観点からクロスアポイントメントの積極的な導入について議論され、第75回では、これ以上の拠点数を確保することは財政的にも困難なため、新規の審査（特に国立大学）を厳格化すると同時に、認定中の拠点においても中間及び期末評価においてパフォーマンスが低い拠点は認定を取り消していく方向性が出される。大学の共同利用・共同研究拠点制度に関する検討は主にここまでとなり、その後は大学共同利用機関改革の議論が集中的に行われ、2017年2月に第8期の検討を取りまとめた「今後の共同利用・共同研究体制の在り方について（意見の整理）」が報告される。この報告における重要項目として、「1. 学術研究の動向に対応できる柔軟な研究組織の在り方」「2. 大学の研究力・教育力強化への貢献」「3. 研究の国際化の推進」「4. 産業界など社会との連携」が挙げられ、同制度の重要な特徴である研究分野の多様性を活かして、異分野融合研究などを通して新たな知やイノベーションを創出することが最優先に位置づけられる。また、国際化についても「トップレベルの頭脳循環への参画、途上国の研究人材養成への貢献、大学の特色・

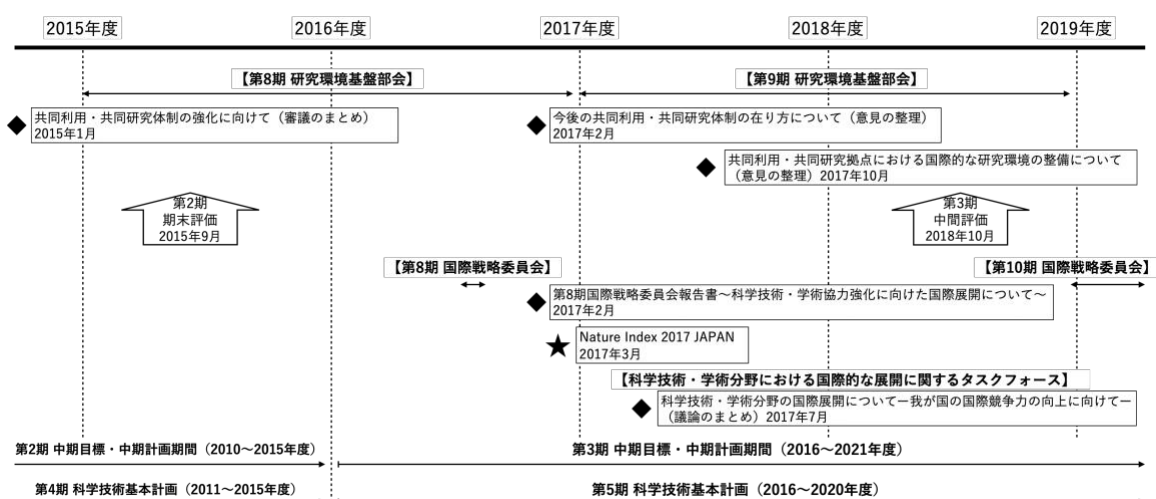


図 1. 国立大学法人中期目標・中期計画及び科学技術基本計画期間における文科省研究環境基盤部会及び国際戦略委員会の開催状況

強みを活かしての機能強化など、様々な意義、必要性、可能性があり、分野によってもその在り方は異なるので、一律かつ外形的に国際化を図るのではなく、分野の特性等に応じて推進する必要がある」として、国際化に向けた多様な観点を示された。

3. 科学技術・学術政策における国際戦略（国際戦略委員会）

文科省科学技術・学術審議会における国際化の検討は国際戦略委員会においても実施されており、同委員会は 2001 年 8 月に開始される国際化推進委員会が前身である。2005 年 3 月に国際委員会に名称変更、2013 年 7 月より現在の国際戦略委員会として検討を継続している。本稿で対象とする第 8 期研究環境基盤部会の開催以前では、第 7 期国際戦略委員会においてまとめられた「今後新たに重点的に取り組むべき事項について～激動する世界情勢下での科学技術イノベーションの国際戦略～」(2014 年 7 月) が当時の科学技術・学術政策における国際化の課題と対応の方向性を示している。第 4 期科学技術基本計画期間中でもあり、グローバル化の進行による、優れた人材の国際的な獲得競争の激化、新興国の台頭による世界の多極化と技術開発競争の激化、その一方で相対的に日本の国際的な科学技術ポテンシャルの低下が懸念されており、その対応として、国境を越えた頭脳循環、知の交流を可能とする科学技術外交が重視された。

少し間をおき、2016 年 10 月より第 8 期国際戦略委員会が開始されるが、2 回だけの開催となり、2017 年 2 月に「第 8 期国際戦略委員会報告書～科学技術・学術協力強化に向けた国際展開について～」が取りまとめられる。ところが、2017 年 3 月に、Nature Index の特集号 Nature Index 2017 Japan において日本の研究成果動向に関する分析が紹介された後に一変する。中国の科学論文の発表数が劇的に増加しているのに対し、日本では過去 10 年間で論文の発表数が停滞、米国と英国の減少は中国との比較で相対的なものである一方、日本は絶対値でも減少していることが明らかにされる [12]。日本の長期的な経済停滞により、政府の科学技術予算が、2001 年以降横ばい状態が続いていること、また、その資金の相当部分が現状の国内トップ研究大学の国際的地位向上を目的とした特定施策に振り向けられていることにも言及されている。まさに日本の研究は転換点に立たされており、今後 10 年間で研究成果を拡大し、高品質な科学を育成できなければ、日本は世界有数の研究大国としての地位を失うリスクに直面しているとされた [12]。これに反応するかのように、文科省内に「科学技術・学術分野における国際的な展開に関するタスクフォース」が設置され、情報が公開されていないため検討の経

表 1. 拠点評価の観点（共同利用・共同研究拠点及び国際共同利用・共同研究拠点の比較）

	共同利用・共同研究拠点	国際共同利用・共同研究拠点
拠点としての適格性	これまでの研究成果 競争的資金等の採択状況 卓越した研究者やリーダーの存在 共同利用・共同研究に参加する関連研究者が利用できる研究スペースや宿泊施設等の確保 共同利用・共同研究に必要な施設、設備、資料及びデータ等の整備状況等 専任職員（教員、技術職員、事務職員等）の配置	論文数、国際共著論文・TOP10%補正論文の数・割合、国際共同研究の内容と実施件数、競争的資金（海外を含む）の採択状況、国際研究プロジェクトの実施状況等 （特に人文・社会科学分野は以下を考慮） ・英語又は英語以外の外国語で書かれ、海外で刊行された単著・国際共著書、英語又は英語以外の外国語で書かれた国際会議の報告書、研究対象国の言語で書かれ、研究対象国の有力ジャーナルや研究書に掲載された論文の刊行実績 ・研究成果やデータベース等の学術資源が国際機関・外国政府・中央銀行等の政策や調査報告書、海外の研究機関の調査報告書等に利用・引用された実績 ・有力な国際会議や海外での会議・研究会への招待講演・招待発表・招待報告の実績 海外との研究者の派遣・受入れの状況、国際協定の締結状況、海外への協力・貢献の状況、国際シンポジウム等の開催状況等、他、研究活動における不正行為及び研究費の不正使用への対応に関する体制整備 研究者の在籍状況（国際学会の長、国際研究プロジェクトの長、国際的な賞の受賞等の経験や科学研究費補助金の採択状況等により卓越性が認められる研究者等）、他、女性研究者や外国人研究者など人材の多様性確保のための支援・取組 研究環境、施設、設備、資料、データベース等の整備・利用状況や技術的・事務的な支援体制 共同利用・共同研究に必要な施設、設備、資料及びデータ等の整備状況等 ・国際的な水準に照らして、質の高いもの ・利用状況（特に、海外研究者の利用状況） 専任職員（教員、技術職員、事務職員等）の配置 ・英語による職務遂行が可能な職員の配置
拠点としての活動状況	情報提供（課題の公募要領、施設の利用要領・利用資格等、利用可能な施設、設備、資料及びデータ等の状況、拠点における研究成果等） 関連研究分野（特に公私立大学研究者）への働きかけや大型プロジェクトの企画運営等 外部からの視点の反映 共同利用・共同研究の実績（設備の利用状況、データベースへのアクセス数、共同研究の件数、研究会やシンポジウムの開催数、共同研究者数等） 募集方法や採択方法の適切性	情報提供（課題の公募要領、施設の利用要領・利用資格等、利用可能な施設、設備、資料及びデータ等の状況、拠点における研究成果等） ・海外の研究動向や国際共同研究に関する国内関連研究者向け情報提供 関連研究分野（特に公私立大学研究者）への働きかけや大型プロジェクトの企画運営等 外部からの視点の反映 ・海外研究者のアドバイザーや外部評価委員、運営委員会等への参画 共同利用・共同研究の実績（設備の利用状況、データベースへのアクセス数、共同研究の件数、研究会やシンポジウムの開催数、共同研究者数等） ・特に海外研究者による実績 将来の国際的な研究ネットワークの核となる若手研究者の育成 ・若手研究者の自立支援や登用 ・国際的な研究ネットワークの核となる若手研究者の育成 ・国内外大学院生の教育への関与 ・持続的支援の見込み（予算・人員の配分等） 募集方法や採択方法の適切性
拠点における研究活動の成果	目的・目標の達成状況 ・ネットワーク型拠点の場合、異分野融合による新分野創成や各拠点の研究分野の発展等、拠点機能強化への効果 共同利用・共同研究を活用して発表された論文数、高インパクトファクター雑誌等への掲載、プロジェクト研究につながった事例、他、共同利用・共同研究機能特有の研究成果（異分野融合による新分野の創成等） 地域社会や国際社会に対する貢献（公開講座や公開講演会の実施状況等）	目的・目標の達成状況 ・ネットワーク型拠点の場合、異分野融合による新分野創成や各拠点の研究分野の発展等、拠点機能強化への効果 共同利用・共同研究を活用して発表された論文数、高インパクトファクター雑誌等への掲載、プロジェクト研究につながった事例、他、共同利用・共同研究機能特有の研究成果（異分野融合による新分野の創成等） 地域社会や国際社会に対する貢献（公開講座や公開講演会の実施状況等）
関連研究分野及び関連研究者コミュニティの発展への貢献	関連研究分野や関連研究者コミュニティへの貢献	関連研究分野や関連研究者コミュニティへの貢献
評価結果又は認定に伴う留意事項のフォローアップ状況	拠点認定又は中間・期末評価における改善点等への対応状況	拠点認定又は中間・期末評価における改善点等への対応状況
各国立大学の強み・特色としての機能強化への貢献	国際化への貢献（国際化へ向けた体制の強化や国際公募の状況等） 若手・女性・海外研究者の人材育成及び博士課程学生の教育への貢献 企業との連携等によるイノベーション創出への貢献 地域の中核拠点として社会・地域の活性化等への貢献 年俸制やクロスアポイントメント制度の導入等により人材流動化への貢献	国際化への貢献（国際化へ向けた体制の強化や国際公募の状況等） 若手・女性・海外研究者の人材育成及び博士課程学生の教育への貢献 企業との連携等によるイノベーション創出への貢献 地域の中核拠点として社会・地域の活性化等への貢献 年俸制やクロスアポイントメント制度の導入等により人材流動化への貢献
拠点としての今後の方向性	国立大学改革を踏まえた、当該国立大学の機能強化への貢献	国立大学改革を踏まえた、当該国立大学の機能強化への貢献
組織再編に伴う拠点活動の状況	拠点の組織整備を実施した際の成果	拠点の組織整備を実施した際の成果
研究活動の不正行為並びに研究費の不正使用等に係る事前防止、事後処理及び再発防止への対応状況	研究活動の不正行為及び研究費の不正使用等への対応及び体制整備	研究活動の不正行為及び研究費の不正使用等への対応及び体制整備

緯は不明であるが、2017年7月に「科学技術・学術分野の国際展開について―我が国の国際競争力の向上に向けて―（議論のまとめ）」が報告される。前期の第7期国際戦略委員会報告書では、急速なグローバル化における日本の経済や外交面における国際的地位の低下に視点が置かれていたのに対して、第8期以降は明確に日本の科学技術ポテンシャルの低下に焦点を向けられる。このようなタスクフォースが設置されることから分かるように、国際的な研究水準向上を促す具体的な施策の一刻も早い投入が求められていたことが伺える。

4. 第9期研究環境基盤部会における検討（国際共同利用・共同研究拠点の提案）

第9期は第87回（2017年3月）から第101回（2018年11月）までが該当する（図1）。第88回（2017年5月）では、元来、個々の大学・機関の枠を越えて質の高い研究資源を提供し共同研究を行うシステムである共同利用・共同研究制度において、国際的にも高い研究業績を有し、国際的な連携・協力の窓口となり得る拠点も少なくないことから、同制度においても率先して国際共同研究を牽引する機能を強化する提案がなされる。第89回では候補となり得るいくつかの拠点から現状における国際化への取り組み事例が紹介され、第91回では早くも翌年度の概算要求に国際共同利用・共同研究拠点事業（2億円×6拠点程度）を新規提案することが報告される。合計5回（第87回～第91回）の検討で、2017年10月に「共同利用・共同研究拠点における国際的な研究環境の整備について（意見の整理）」が出される。この後、第92回からはこれまでの「共同利用・共同研究拠点に関する作業部会」を「共同利用・共同研究拠点及び国際共同利用・共同研究拠点に関する作業部会」に改名して、具体的な認定・評価基準などについて検討を開始する。表1は現在導入されている拠点認定・評価の観点を通常の拠点と国際拠点とで比較したものである。拠点評価の共通項目として、「拠点としての適格性」「拠点としての活動状況」「拠点における研究活動の成果」「関連研究分野及び関連研究者コミュニティの発展への貢献」「中間評価結果又は認定に伴う留意事項のフォローアップ状況」「各国立大学の強み・特色としての機能強化への貢献」「拠点としての今後の方向性」「組織再編に伴う拠点活動の状況」「研究活動の不正行為並びに研究費の不正使用等に係る事前防止、事後処理及び再発防止への対応状況」が設定されているが、国際拠点の方は、国際共著論文・TOP10%補正論文の数や割合、国際的な競争的資金やプロジェクトの採択状況など、具体的かつ高い基準が設けられている。特に人文・社会科学系に対しては、英語等の外国語による研究成果及び情報発信を強く意識した基準となっている。同作業部会における検討内容は非公開であるため詳細は不明であるが、第101回研究環境基盤部会における作業部会からの報告において、2018年5月から公募を開始し、同年10月に最初の国際共同利用・共同研究拠点である6拠点（東北大学金属材料研究所、東京大学宇宙線研究所、東京大学医科学研究所、京都大学化学研究所、京都大学数理解析研究所、大阪大学核物理研究センター）が推薦され決定する。一方、予算面においては初年度の概算要求（12億円）に対して4億円に留まる結果であった。想像ではあるが、2007年から実施されている「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）」事業では「世界最高水準の研究」「融合領域の創出」「国際的な研究環境の実現」「組織の改革」及び、これらを高度化した「次代を先導する価値創造」の5つミッションを掲げており、国際拠点が目指す方向性とかなりの重複が見られることも無関係ではないように思われる。

5. 考察（多様な研究分野が参画する研究基盤における機能強化の在り方）

第9期部会における各回の検討内容を詳細に見ていくと、国際共同利用・共同研究拠点導入の意図として、特定の研究分野において国際的にトップレベルに位置する、またさらに高い位置を狙える拠点を別枠として重点的に支援していくと同時に、他の拠点に対しても国際的な研究水準の向上を促すことで拠点全体の研究水準向上を期待していたことが読み取れる。しかしながら、検討の過程でいくつかの本質的な懸念も示される。第88回において、ある委員から出されたコメントが非常に示唆的であ

る。

「大学の場合は、特色はダイバーシティだと思うのです。いろいろな新しい芽が、次々いろいろな学部からこういう研究機関からも出てくると。これを大切にしないといけないのですが、今のようにトップの研究者を引き上げるという観点だけの要素だけで全てを見てしまっているの难道うか。（中略）そういうことだけやっていると、新しいトレンド、新しい社会の変化に対して、大学の中から、多様性の非常に豊かな大学からそういう研究センターのような小さなものができる、研究者が上がっていくというプロセスを、初めから芽を摘んでしまわないかという危惧を持っています。」

国際戦略委員会の動向に象徴されるように、日本の学術研究におけるトップレベル層の弱体化に対して早急な対応が求められる中、共同利用・共同研究拠点制度においても国際拠点を整備していくことは妥当な判断だと言える。一方で、第8期ではそれまでの拠点評価を見直し、評価結果次第では認定取り消しを可能としながら拠点間の競争を増進する方向性が示されている状況において国際拠点を検討することは、同制度の本来の目的であった、多様な研究分野の裾野を広げ、研究分野や組織の枠を越えて強靱な研究基盤を構築する意義が矮小化される可能性があったことは否めない。その意味で、第88回部会で示された指摘は、同制度の在り方を再認識する上で大変重要であったと言える。結果的に当初の国際拠点評価は、6つの類型の別枠とされ、すべての拠点到国際化を課すのではなく、拠点の多様性を尊重した評価体系であった。

一方、第4期拠点中間評価において6つの類型に国際拠点を含めたことは、拠点全体に国際的な研究水準向上を促すことを意味し、各拠点是国際化以外の観点で自身の評価を高めることがこれまで以上に難しくなることも容易に想像される。拠点評価の観点の比較を見ると（表1）、国際化の観点では研究水準を客観的に数値化しやすい指標が用いられているのに対して、共同利用・共同研究拠点制度の重要な機能の一つである「異分野融合による新分野創成」には、特に具体的な指標は示されていない。異分野融合を含む学際性の議論は長い歴史を持つ[13]。学際性の多義性についても様々な議論があり、それらの目的や研究のアウトプットも多様である。さらには、学術分野以外のステークホルダーを含めた課題設定やその解決への貢献まで対象とされる。確かに、学際研究において研究分野間または研究者間のコミュニケーションが本質的に難しく、研究成果に結びつけるまでの困難さやその評価において過小評価を受けてしまうことはよく知られているが[14, 15]、苦勞して生み出された学際研究の成果は国際的な高いインパクトにつながることも示されている[16]。また、学際研究に積極的な研究者は、近年注目されるスタートアップ創出を含む産学連携に柔軟な適応能力を発揮することが知られており[17]、社会課題に直接対峙するアプローチによる新分野創成も有効な評価項目となり得る。さらに、学際共同研究に対する女性研究者の関与の高さも知られている[18]。しかしながら、前述の学際研究に対する過小評価は、女性研究者のみならず若手研究者の参画までも難しくすることが予想され、学際研究の多岐にわたる特性を考慮した解像度の高い評価が可能となることで、若手または女性研究者の一層の参画を容易にすると思われる。そのためには、各拠点が持つ学際性を体系的に整理し、異分野融合のボトルネックをどのように克服し、国際的に高いインパクトの成果をどのように実現し得たのかについて、それらのプロセスを可視化し拠点間で共有化されることで、共同利用・共同研究拠点制度全体の国際的な意義も向上していくのではないかと期待される。

5. まとめ

第2期中期目標・中期計画期間までに、多様な研究分野が参画し100拠点規模まで拡大した共同利用・共同研究拠点制度において、規模拡大は歓迎すべき成果であった一方で、予算の制約がある中でこのような大規模な研究基盤を全体としてどのように機能強化を図っていくのかは難しい課題であった。第2期までに設定された課題（「学術研究の動向に対応できる柔軟な研究組織の在り方」「大学の研究力・教育力強化への貢献」「研究の国際化の推進」「産業界など社会との連携」）は、第3期に入り

顕在化した日本の国際的な研究水準低下に急ぎ対応するため、国際化を軸に「国際共同利用・共同研究拠点」が導入された。国際的な卓越性を実現するためには、トップレベル層の強化だけでなく、多様性を重視した新たな研究の芽の育成が重要であり、拠点評価の観点においても、各拠点が有する学際性の解像度を高めることが望まれる。

参考文献

- 1) 金子研太, 国立大学における研究特化型組織の変遷－附置研究所に焦点をあてて－, 九州大学教育経営学研究紀要, 15, 25-32 (2012).
- 2) 金子研太, 附置研究所政策の検証－法人化期に焦点をあてて－, 高等教育研究, 17, 153-170 (2014).
- 3) 金子研太, 附置研究所・研究施設の研究活動の可視化：共同利用・共同研究拠点の中間評価と研究課題の分析から, 九州大学教育経営学研究紀要, 17, 5-12 (2015).
- 4) 金子研太, 共同利用・共同研究拠点の研究活動の定量分析：共同研究採択課題に焦点をあてて, 九州大学教育経営学研究紀要, 18, 41-48 (2016).
- 5) 文科省研究振興局大学研究基盤整備課 (https://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/).
- 6) 桑島修一郎, 佐藤啓明, 「共同利用・共同研究拠点」政策の変遷から見る特徴と課題, 研究・技術計画学会第38回年次学術大会講演要旨集, 865-869 (2023).
- 7) 小柴等, 森川想, 議事録を用いた我が国における議会・行政の関係性分析手法, 人工知能学会論文誌, 34 巻5号E, 1-10 (2019).
- 8) 岩見麻子, 大野智彦, 木村道德, 井手慎司, 公共事業計画策定過程の議事録分析による意見の協調・対立関係把握のための分析手法の開発, 土木学会論文集G (環境), Vol.70, No.6 (環境システム研究論文集 第42巻), II_249-II_256 (2014).
- 9) 佐藤啓明, 桑島修一郎, 宇宙基本計画改訂にみる日本の宇宙イノベーション政策動向, 研究・技術計画学会第38回年次学術大会講演要旨集, 870-873 (2023).
- 10) 文科省高等教育局国立大学法人支援課「国立大学改革プラン」(2013年11月).
- 11) 文科省科学技術・学術審議会総合政策特別委員会「我が国の中長기를展望した科学技術イノベーション政策について～ポスト第4期科学技術基本計画に向けて～(最終取りまとめ)」(2015年9月).
- 12) Nicky Phillips, Striving for a Research Renaissance, Nature Index 2017 Japan, S7 (2017).
- 13) Interdisciplinarity: Problems of Teaching and Research in Universities. OECD, Paris (1972).
- 14) F. Darbellay, Rethinking inter- and transdisciplinarity: Undisciplined knowledge and the emergence of a new thought style, Futures, 65, 163-174 (2015).
- 15) 桑島修一郎, 宮野公樹, 「学際研究」認識調査の検証と総合知についての考察, 研究・技術計画学会第37回年次学術大会講演要旨集, 458-461 (2022).
- 16) E. Leahey, C.M. Beckman, and T.L. Stanko, Prominent but less productive: The impact of interdisciplinarity on scientists' research, Administrative Science Quarterly, 62(1), 105-139 (2017).
- 17) P. D'Este, O. Llopis, F. Rentocchini, and A. Yegros, The relationship between interdisciplinarity and distinct modes of university-industry interaction, Research Policy, 48, 103799 (2019).
- 18) F. J. van Rijnsoever, and L. K. Hessels, Factors associated with disciplinary and interdisciplinary research collaboration, Research Policy, 40, 463-472 (2011).

森林圏—大気圏のガス交換フラックス計測のための分光技術

高橋 けんし^{1*}

Spectroscopic techniques for measuring trace gas flux between the forest-sphere and atmosphere

Kenshi Takahashi^{1*}

概要

森林圏を含む陸上生態系と大気圏との間の運動量、エネルギーおよび物質の交換速度（フラックス）に関する研究は、グローバルな炭素循環に陸域生態系が果たすの役割と機能を解明するという観点から非常に重要であり、世界的に推進されている。ガスフラックス計測のためには、研究対象とするガスの濃度を高精度かつ迅速に計測できる分析装置が必要となる。本稿では、分光技術を用いた大気微量成分の高感度検出法の基礎原理を紹介する。特に、近年に発展してきた、共振器（光学キャビティ）を利用する新しい分光法のいくつかを取り上げる。また、筆者らが分光計測技術を応用して行っている、温室効果気体や大気汚染物質のフラックス計測の実例についても紹介する。

1. はじめに

森林圏を含む陸上生態系と大気圏は、互いの「圏」を行き来する熱や水蒸気、大気微量成分の交換を通じて、密接に関わり合っている。大気微量成分には、温室効果気体（CO₂, CH₄, N₂O, H₂O など）や揮発性有機化合物（イソプレン、モノテルペンなど）が含まれる。これらの微量成分は、文字通り概して微量ではあるものの、種類は非常に多く、温室効果気体、大気化学反応の担い手、雲の凝結核など、直接あるいは間接的に地球環境変動に影響するような重要な機能を持つ物質が含まれている。本稿では、陸上生態系と大気間の物質交換量とその速度を計測する手法、とりわけ、光学的な手法について取り上げ、その原理について解説するとともに、いくつかの具体的な応用例について紹介する。

2. 森林圏—大気圏のガス交換フラックス

熱や水蒸気、大気微量成分が、陸上生態系と大気圏の圏間を跨ぐように上下に輸送されるのは、地表面近くの大気の流れが乱流を形成していることによる。大気の乱流は、地表面との摩擦や温度の変化などに起因している。乱流は、風向や風速に時間的に不規則な変化をもたらす、地表面近くの大気が上下に移動する原因となる。ある単位面積を通して単位時間に輸送される熱や物質の量をフラックス(flux)という。物理量 s のフラックス F_s は、風速の鉛直成分を w とすると、

2025 年 8 月 25 日受理.

¹〒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: takahashi.kenshi.2v@kyoto-u.ac.jp

$$F_s = \overline{w's'} \quad (1)$$

と書ける。ここで右辺のバー記号は、ある時間（例えば 30 分間）の平均値、プライム記号は s および w の各々の平均値からのずれを意味する。厳密には、フラックス密度(flux density)が「単位時間当たり単位面積を通過する物質のモル数、またはエネルギーのジュール数」を表す正式な用語である¹⁾。フラックスは、生態系と大気の相互作用を研究するために必要不可欠な情報である。温室効果気体や揮発性有機化合物の地表面フラックスは、地表の植生や土壌による放出と吸収、そして、それらの物質が大気境界層と呼ばれる地表面近傍の最下層の大気へと混合されていく過程に関連づけられる。そのため、フラックスの情報は、植生と土壌圏が関わる物質収支や生態系の生理機能が気候変動や大気汚染に対してどのような応答を示すかという、生態系の機能や健全性に関する指標としても有用である。

微量気体およびエネルギーのフラックスを制御するプロセスは、マルチスケールで階層的であり、複数の非線形フィードバックで構成されているため、複雑である。ガスフラックスを制御する生物物理学的プロセスは、細胞、器官、個体、群落、そして生態系スケールに至るまで、15 桁にも及ぶほどの実に幅広い時空間スケールにまたがっている²⁾。例えば、植生と土壌圏を循環する二酸化炭素(CO_2)や水(H_2O)は、微生物、葉緑体、ミトコンドリアといった小さな生き物や植物体内の小器官によって生産・消費される。葉面におけるガス交換は、主として葉面境界層と気孔という二つの障壁を介して行われる。葉面境界層は、葉の表面の直上に存在し、空気の粘性抵抗を強く受けている層である。生態系スケールでは、個葉がどのように集まって群葉を形成し、植物がどのように集合して群落を形成しているか、さらに、生態系からバイオーム（生物群）スケールでのガスフラックスは、気候や地形によって左右される。ガスフラックスの時間的変動は、光化学反応が支配するミリ秒の領域から、日内、季節を経て、数十年、数百年（個体の誕生と死、攪乱）に及ぶ。

残念ながら、広範な時空間スケールにわたって、生態系と大気のフラックスを測定できる単一または完全な方法は存在しない。上記のように、森林の生態系は様々な空間スケールの要素から構成されているため、スケールの大きさによってフラックスの測定法も異なってくる。生態系と大気との間の物質・エネルギー交換を研究するために、過去およそ 60 年間に数多くの直接的・間接的な手法が開発され、採用されてきた¹⁾。その中でも、渦相関法は、陸域生態系と大気との間の物質・エネルギーの交換速度を連続で測定する標準的な方法となっている。渦相関法では、森林や草地などに観測用のタワーを設け、鉛直風速、気温、水蒸気密度、 CO_2 密度などを連続で計測し、式(1)にしたがって、熱（顕熱）、水蒸気（潜熱）、 CO_2 のフラックスを得る（図 1）。計測機器を設置する高さは、観測する場所の環境にも依るが、おおむね群落から数～20 m 程度であることが多い。群落上の一つの高度で測定した場合、観測点に対して風上側に位置する数百 m^2 ～数 ha 程度のエリアの平均値を得ることができる。観測の技術的な困難さとして、風向・風速の三次元成分と水蒸気密度、 CO_2 密度を、10 Hz 程度の高速で正確に計測できるセンサーが必要となる。風の計測技術の開発は、京都大学で教鞭をとっておられた光田寧先生のご業績が世界的に有名であり³⁾、詳しい情報には読者各自で触れていただきたい。他方、 CO_2 や水蒸気をはじめとする物質濃度の計測には、光学技術が応用されることが多く、



図 1：京都大学桐生水文試験地にあるフラックス観測用のタワー。地表から上空を見上げる方向の写真（筆者写真）

現在でも、検出感度や計測精度の向上や応答速度の改善といった高性能化が進められている。次章では、大気微量成分の光学計測の先進技術として半導体レーザーや発光ダイオードを用いた手法について、筆者らの研究の具体的事例を交えて紹介する。

3. 光学技術による分子の高感度検出

原子や分子の構造や反応性を調べる用途で幅広く使われてきた方法の一つが吸収分光法である。文字通り、原子や分子が光を吸収する性質を利用する方法で、その基礎原理は大学の基礎化学の教科書には必ず書かれている Beer-Lambert の法則である。気体や液体の試料に強度 I_0 の光を照射し、試料から透過してきた光の強度 I を光検出器により測定する。このとき、強度 I_0 および I は、試料の厚み（光路長） d の関数として次式のように関係づけられる。

$$I(\lambda) = I_0 \exp\{-\alpha d\} \quad (2)$$

ここで α は吸収係数と呼ばれ、波長 λ における分子の光吸収断面積 $\sigma(\lambda)$ と吸収媒質の数密度 N との積として与えられる。式（2）から、 d が既知の条件で、波長 λ での出射光強度 $I(\lambda)$ と I_0 を正確に計測できれば、吸収媒質の濃度が得られることがわかる。

Beer-Lambert の法則に基づく直接吸収法では、光源の強度がふらつくことによって検出感度や計測精度に影響が生じる。つまり、光源の強度と、試料を透過した光の強度の差分をいかに精密に計測できるかが Beer-Lambert の法則の適用において肝要である。一般的には検出可能な最小の光強度変化は入射強度の約 0.001 程度であるが、これが物質検出用途としての直接吸収法の限界と捉えることもできる。そこで、検出感度を向上させ、吸収係数の検出限界をできるだけ下げたための様々な技術開発が、特に連続波(continuous-wave: CW)半導体ダイオードレーザーの発明以降なされてきた。その戦略の一つは、測定システムにおけるノイズの影響を最小化する周波数変調技術である⁴⁾。もう一つの戦略は、多重反射型セル（マルチパス型セル）と呼ばれる光学セルを用いて入射光源の減衰を測定するもので、最大数百メートルの光路長 d を稼ぐように工夫してある⁵⁾。式（1）を見れば、 d が長くなるほど試料による光の吸収量 I が増加することがわかる。それゆえ、 d をできるだけ長くすることにより、試料の検出感度を高めることができる。とはいえ、マルチパス型セルを際限なく大きく作れば、検出感度も際限なく向上させることができるのかと言えば、そうではない。ミラーサイズ等の制約があるうえ、ミラーの反射率の限界などのため、稼げる光路長にはおのずと限界が生じるからである。マルチパス型セルを用いた計測では、検出可能な最小吸収係数はおおむね 10^{-7} cm^{-1} まで到達可能である。マルチパス型セルを用いると、ミラー表面での光ビームの部分的な重なりが不要な干渉縞を発生させ、結果的に信号雑音比の低下を招くことがある。そこで、光のパス（通り道）を工夫したいくつかのマルチパス型セルが提案されてきた。その代表的なものには、ヘリオットセルなどがある⁷⁾。

d を長くする技術として、共振器の応用もある^{4,6,8-12)}。ここで言う共振器とは、反射率の極めて高いミラーを向かい合わせて配置したもので、光学キャビティーのことを指す。レーザー光を共振器に導入し、光を共振器内に“閉じ込め”て、同じ光路を何度も往復させることで、測定に有効な光路長を長くする。ミラーの反射率を R とすると、共振器内に光を吸収する媒質が存在していなかったとしても、共振器に導入されたレーザー光の強度は、ミラーで反射を繰り返すごとに光損失で減衰していく（図2）。このとき、共振器内の光強度が入射強度比 $1/e$ になるまでの反射回数 M は、

$$R^{2M} = 1/e \quad (3)$$

と表せる。具体例として、特定の波長で $R = 0.9999$ まで高められた特殊な高反射ミラーを使ったとしよう。この場合、 $M = 5000$ となる。つまり、共振器のキャビティー長が 1 m であれば、実効的な光路

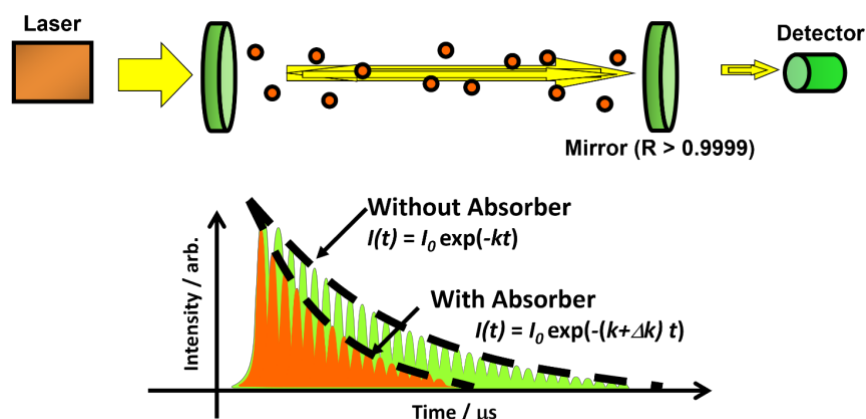


図2：レーザーキャビティーリングダウン分光法の概略図（上）と、光検出器で検出される漏れ光の時間発展の概念図（下）。

長は 10 km にも達することになる。平たく言えば、実際の光路長が 1 m 程度の共振器を実験台に設置したとしても、その 4 桁も長い有効光路長を実験台の上で確保できるという手法である。先に述べたマルチパス型セルを用いた光路よりも 100-1000 倍も長い。

共振器を応用した分光法の発展は、レーザーの高性能化だけでなく、光学ミラーの技術的な向上に依るところも大きい⁴⁾。共振器には極めて高い反射率を有するミラーを用いることが必要条件となる。そうしたミラーには、屈折率の異なる誘電体膜を多層にコーティングし、特定の波長領域で反射率を極めて高くした（反射率: $R > 99.9\%$ 以上）、誘電体多層膜ミラーと呼ばれるタイプのものを使うことが多い。実は、共振器を用いる光学技術はもともと、光学ミラーの性能評価を目的として開発が進められたという経緯がある。その後、分光法としての有用性が見いだされ、後述するような大気微量成分の計測などの超高感度分析に応用されるようになった⁵⁾。

共振器を用いる吸収分光法の開発は、近年、大きく進展した。具体的な手法として、Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS)^{7,8)}、Integrated Cavity Output Spectroscopy (ICOS)^{6,8-11)}、Cavity Attenuated Phase-Shift Spectroscopy (CAPS)¹²⁾ などがある。ここではまず、CRDS の原理から概説する。CRDS の原理を理解するにあたり、ファブリペロー型光共振器 (Fabry-Pérot Interferometer: FPI) と呼ばれる二枚の高反射ミラーを、距離 L だけ離して向かい合わせて配置した共振器を考えると分かりやすい。波長 λ のレーザー光を FPI へ導入したときの共振器の共鳴条件は、

$$L = k \lambda / 2 \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

となる^{4,10)}。これは、共振器のキャビティー長 L が半波長 ($\lambda/2$) の整数倍のときのみ、レーザー光が共振器内に蓄積されることを示す。蓄積された光はミラー間を何回も反射しながら、そのごく一部が共振器の外へ漏れ出す。漏れ出す速度は、ミラーの反射率 R によって決まる。ここで、光が共振器内に十分蓄えられた状態で入射レーザー光を瞬時に遮断した場合、共振器内の光は時間とともに指数関数的に減衰する。初期の光強度が $1/e$ にまで減衰する速度をリングダウン時定数と呼び、 τ で表すことにする。共振器内に光を吸収する媒質が存在しない場合、ミラーから漏れ出してくる光の強度の時間変化 $I(t)$ は、

$$I(t) = I_0 \exp \left\{ -\frac{c(1-R)}{L} t \right\} = I_0 \exp \left\{ -\frac{t}{\tau_0} \right\} \quad (5)$$

$$\tau_0 = \frac{L}{c(1-R)} \quad (6)$$

で与えられる⁸⁻¹⁰⁾。 c は光速であり、 τ_0 の下付きの0は、共振器内に吸収媒質が無いことを意味する。一方で、共振器内に吸収媒質がある場合は、吸収による損失が生じるので、そのぶん吸収速度は大きくなる(式(7))。

$$I(t) = I_0 \exp \left\{ -\frac{c(1-R)}{L}t - \sigma Nct \right\} \quad (7)$$

ここで、レーザー波長 λ における吸収媒質の光吸収断面積を σ 、吸収媒質の数密度を N と与えている(式(2)も参照のこと)。式(5)と式(7)を比較すると、吸収媒体の有無による吸収速度の差異が σNc で表されることから、吸収媒体の数密度 N に比例することがわかる。CRDS 法は Beer-Lambert の法則にもとづいているが、光強度の変化を直接計測する代わりに、共振器内の光の減衰速度の変化を測定することで N を求める手法である。減衰速度はレーザーの入射光強度のふらつきに左右されないという長所がある。また、実効的な光路長が極めて長いため、ごく微量な吸収媒体も定量分析できる高い感度を有する点も特長である。

現在、CW の光通信用レーザーが比較的安価に入手できることから、それらを CRDS 法に用いることで、コンパクトで比較的安価な分析装置を作ることが可能になっている。CW の半導体レーザーを CRDS 法に用いる場合、入射光の遮断には光音響素子を使用する等の手法があるが、これは連続光を擬似的にパルス光源化して用いているとみなせる。一方で、光音響素子を使うなど、分析装置の動作制御が複雑になっている側面もある。そこで、CW レーザーを擬似パルス化せずに共振器を用いた分子計測に用いる手法の一つが ICOS である。ICOS と CRDS の大きな違いは、CRDS が共振器内のレーザー光の減衰速度を計測するのに対し、ICOS では古典的な吸収分光法と同様に、吸収媒質による透過光強度の減少にもとづいて吸光度を得ることである。

CRDS でも ICOS でもキャビティ共鳴条件(式(4))が成立したときのみ分光計測が行える点に注意が必要である。CW レーザーは狭帯域発振であるため、レーザー波長が数十 kHz 程度ずれたとしても、共振器内には光が蓄積されないので、分子スペクトルを計測するための波長掃引ができないということになってしまう。そこで、光学キャビティの長さ(L)を高速で微かに変化させ、波長を掃引中であってもキャビティ共鳴条件が成立する頻度が増えるようにする手法がある⁸⁻¹⁰⁾。 L を高速で変調する(ディザリングする)には、光共振器の高反射ミラーを保持しているミラーマウントに圧電素子を取り付けて、物理的に振動させる方法がある。他方、 L を変化させずに固定したままでも、ICOS の計測は可能である。この場合は、レーザー光源を電流制御して共振器へ入射する光の波長を変調させることで共鳴条件を達成する。ただし、ミラーマウントの振動とレーザー波長の変調を組み合わせれば、共鳴条件の達成がより高効率になる。もちろん、共鳴条件が偶然に成立するのを利用するのではなく、レーザー波長と L と厳密に調整する“モードロック”法も原理的には可能である。しかし、検出波長の掃引にともなって L を高い精度で微調整する必要があるため、そうした実験は極めて難しくなる。

なお、CW レーザーをパルス化して用いる CRDS では、レーザーパルスが共鳴条件を満たしてから減衰したとして、その次のパルスが来て共鳴条件を達成するまでは、ある種の“時間遅れ”が発生することになる。そのため、一般には、CRDS が ICOS よりもデューティーサイクル(duty cycle)が小さくなる傾向にある。そのため、冒頭で説明した渦相關法を用いて物質フラックスを計測する場合、超音波風向風速計と一緒に用いる大気微量成分計測装置では、CW レーザーをパルス化せずに用いている装置が主流である。

さて、CW レーザーの代表格として半導体レーザーがあるが、半導体レーザーのようなコヒーレンスの高さはないものの、発光ダイオード (LED) も共振器を用いた光学計測に用いることができる。ここでは、LED を用いる CAPS 法を紹介する¹²⁾。CAPS 法では、CRDS 法などと同様に、共振器内で光が費やした平均時間を測定するものの、LED を光源として用いるには、その射出強度を矩形波変調 (角周波数を f とする) する。共振器内に閉じ込められた光は、高反射ミラーによって多重回反射するうちにエンドミラーから漏れ出していくため、その時間的な強度分布はもはや矩形波ではなくなり、角度 ϕ であらわされる位相シフトによって特徴づけられる。この ϕ は共振器内の光の減衰時定数 τ と関連づけられる^{8-10,12)}。

$$\tan \phi = -2\pi f\tau \quad (8)$$

共振器内に LED を吸収・反射する媒質が存在しない場合の位相シフトを ϕ_0 、媒質の存在下での位相シフトを ϕ_a とすれば、吸収媒体の吸光係数 α は

$$\cot \phi_a = \cot \phi_0 + \frac{c\alpha}{2\pi f} \quad (9)$$

により関係づけられる¹²⁾。分析装置として実際使用する上では、エンドミラーからの漏れ出し光の波形の歪みを、フォトディテクターで計測する。筆者の研究室では、波長 450 nm の LED を用いた CAPS 法を、大気中の二酸化窒素(NO_2)分子の計測に応用している。 NO_2 は、紫外から可視域にわたって光吸収帯を有するが、450 nm の吸収断面積は $5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ と比較的大きい¹³⁾。都市大気における NO_2 の典型的な濃度はせいぜい数～数十 ppb 程度と非常に低い、CAPS 法は極めて高い反射率を持つ光学ミラーを用いた共振器を使った分光法であるがゆえに、サブ ppb 程度の高い精度で大気濃度レベルの NO_2 をリアルタイムで追跡できる。

4. フィールドでの応用例

この章では、分光技術を用いた大気微量成分のガスフラックスの計測の実例を二つ紹介する。最初に陸上生態系—大気圏に跨るメタンガス交換フラックスの研究を紹介する。次に、都市スケールでの大気汚染物質のフラックス計測の研究について紹介する。

4.1 湿地性樹木からのメタン放出に関する研究

メタン(CH_4)は人間社会にとって重要なエネルギー源である一方で、 CO_2 に次ぐ放射強制力を持つ温室効果気体である。2021 年 11 月に開催された国連気候変動枠組み条約第 26 回締約国会議 (COP26) では、日本を含む 100 か国以上が、2030 年までに CH_4 排出量を、2020 年比で少なくとも 30% 削減することに合意している。大気中の CH_4 濃度の収支を定量的に理解することは、自然科学のみならず社会的にも重要な課題となっている。大気中の CH_4 の発生源は、人為起源と自然起源がある。湿地生態系は、自然の CH_4 発生源としてはもっとも大きな寄与率を有している。湿地生態系における CH_4 発生は、土壌中の嫌気性細菌であるメタン生成菌に由来しており、それゆえ嫌気的環境にある土壌からの CH_4 発生プロセスの研究は非常に多い^{14,15)}。一方で、近年、湿地に自生する樹木からメタンが放出されていることが発見され、大きな注目を集めている^{15,16)}。しかしながら、樹木からの CH_4 発生の有無を規定する生育環境や樹種の依存性、発生量を制御する植物生理生態学的なメカニズムなど、解明されるべき問題は極めて多い。

我々の研究グループでは、湿地性樹木の一つであるハンノキ (*Alnus japonica*) を研究対象に選び、野外観測と室内実験の両面からのアプローチにより、その幹表面からの CH_4 放出量の精密計測とメカニ

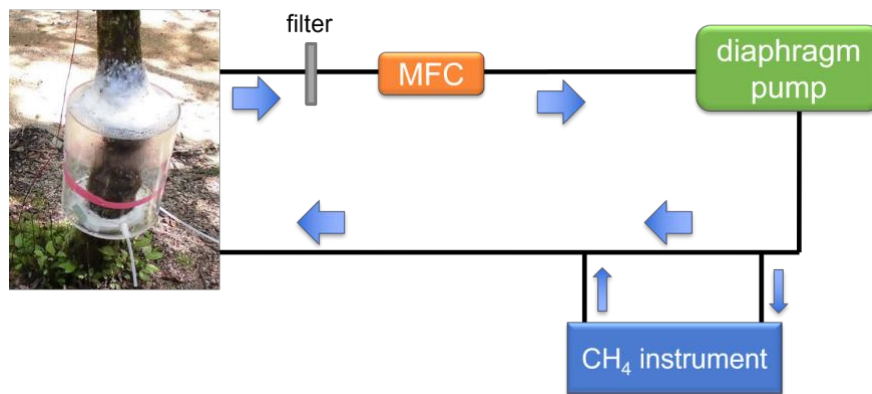


図3：ハンノキの樹幹から発生するメタンガスフラックスを計測する閉鎖循環方式のチャンバーシステム。矢印は、テフロンチューブ（黒い実線）内を試料ガスが流れる状況を示す。filter: 粒子除去フィルター、MFC: 質量流量制御器、CH₄ instrument: メタン分析計、diaphragm pump: ダイアフラムポンプ。

ズム解明に取り組んでいる。ハンノキは日本国内では北海道から九州まで、国外では東アジア地域に分布する落葉広葉樹である。水気を多く含む湿地のような環境でも自生できるという特徴をもつ。水辺でも自生できる理由の一つは、樹皮の皮目を介して空気中の酸素を根へと送り届ける機能が備わっているからだと考えられている。一方で、酸素の拡散輸送のための通り道を伝って、土壤中でメタン生成菌が作りだしたメタンガスが、根から幹へ、幹から空气中へと運ばれているという説が提唱されてきた¹⁶⁾。この仮説を検証するという観点からもハンノキに着目した。

我々の研究の野外調査地は、滋賀県大津市の国有林内にある京都大学桐生水文試験地 (34.96°N, 135.99°E) である。なお、図1に観測サイトのフラックス観測用タワーの写真を掲載している。試験地内にある溪畔湿地にハンノキが自生している。溪畔湿地の土壤表面および植生（幹）に閉鎖循環方式のチャンバーを設置し(図3左写真)、波長 1.65μm の近赤外半導体レーザーを用いた ICOS 法による CH₄ 分析計と組み合わせて、CH₄ 放出量を自動計測するシステムを開発した¹⁷⁻²⁰⁾。このシステムは、式(1)で示した渦相関法によるフラックスを測定するものではなく、チャンバー内の CH₄ 濃度の時間変化を 1 Hz 程度のリアルタイムで追跡し、

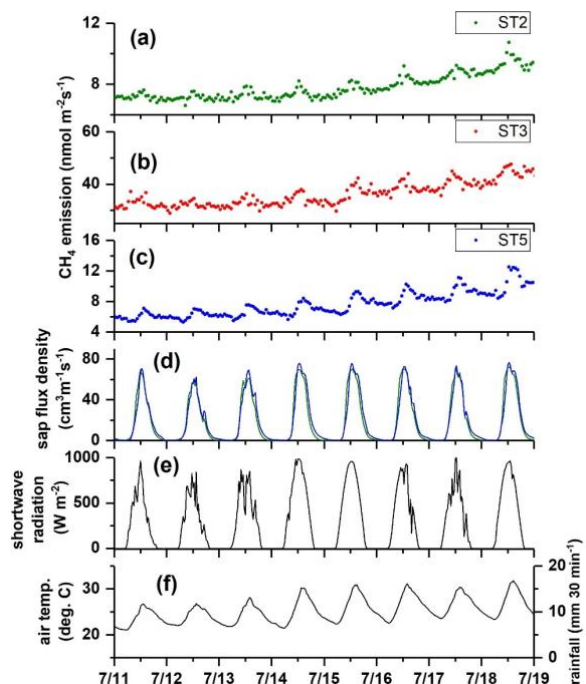


図4：ハンノキの樹幹から発生するメタンガスフラックスの日変化を捉えた例（2018年7月）。3つの個体 ST2, ST3, ST5 のフラックスの結果(a-c)と、樹液流束(d)、下向き短波放射(e)、気温および30分降水量のデータ(f)を併せてプロットしてある。

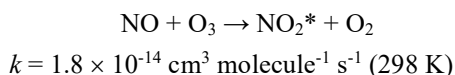
その上昇あるいは減少の速度からフラックスを算定するシステムである。我々のシステムを用いることで、従来観測に使用されてきたガスクロマトグラフィーでは不可能であった野外環境での高精度計測が、リアルタイムかつ無人で可能である。連続計測の利点を活かし、CH₄ 発生量の季節変動から日変動までをおよそ 30 分の時間分解能で精密に計測することに成功している^{19,20)}。

我々の研究の結果、研究サイト内にある複数のハンノキ個体の幹から CH₄ が放出されていることが分かった。また、ハンノキの樹幹からの CH₄ 放出は年間を通して起こっており、その放出量は夏に多く、冬に少ないという季節変動を示すことが明らかとなった¹⁹⁾。さらに詳しい解析を行ったところ、春から秋にかけての着葉期に限って、CH₄ 放出量が昼に多く、夜に少なくなるという、明瞭な日変化パターンが出現することを発見した²⁰⁾ (図 4)。既往の研究では、樹幹からの CH₄ 放出の日周変動特性について詳しい考察を行っているものがなかった。本研究では、CH₄ フラックスの日周変動の位相が樹液流束のそれと同期していることを見出した。つまり、蒸散が活発な日中に樹幹からの CH₄ 放出が増強されていることが分かった。

4.2 都市からの窒素酸化物排出量の直接測定

人間活動に伴って大気へと排出される物質は多岐にわたるが、CH₄ や CO₂ などのように反応性の低い (安定した) 物質と、窒素酸化物(NO_x)や揮発性有機化合物(VOC) などのように大気中での寿命が数時間から数日と短い反応性の高い (不安定な) 物質がある¹³⁾。反応性の高い物質は、大気中の化学反応等により大気から除去されるため、その定常濃度が高くなることは多くない。一方で、化学反応により二次的に大気中で生成された物質が地球環境に負荷を与える場合がある。その典型的な例がオゾンである。成層圏オゾン(O₃)は地球表面に到達する紫外線量に影響するためその減少が問題となっているが、対流圏のオゾンは増加トレンドが問題である。オゾンはヒトや植生への毒性が高く、かつ、強い温室効果気体であるからである。対流圏オゾンは、主として NO₂(二酸化窒素)の光化学反応によって生成されることが知られている¹³⁾。NO₂ が太陽紫外線を受けて光解離し NO(一酸化窒素)に戻る際に放出される酸素原子 O と酸素分子 O₂ との反応によって生成される (図 5)。NO_x は化石燃料の燃焼などによって大気中に NO として放出され、その後 O₃ や過酸化ラジカル(RO₂)により NO₂ となる。NO から NO₂ 及び NO₂ から NO への変換は数分の時間スケールで起こっていることから NO と NO₂ を加えたものを NO_x として表現している。

このように NO_x は対流圏化学で重要な役割を担っている。O₃ のみならず、NO₂ 自体もヒトの呼吸器への刺激が強く、健康に悪影響を与えるため、わが国では環境基本法によって「1 時間値の 1 日平均値が 0.04 ppm から 0.06 ppm までのゾーン内又はそれ以下」という環境基準が定められている。現在、国内の都市部を中心に NO_x 濃度のモニタリング計測が行われており、化学発光法が公定法として用いられている。化学発光法では試料大気に人工的に作った過剰な O₃ を添加し、



によって生成する励起状態の NO₂*からの化学発光を光電子増倍管で検出する^{5,13)}。なお、NO₂ の上付きのアス

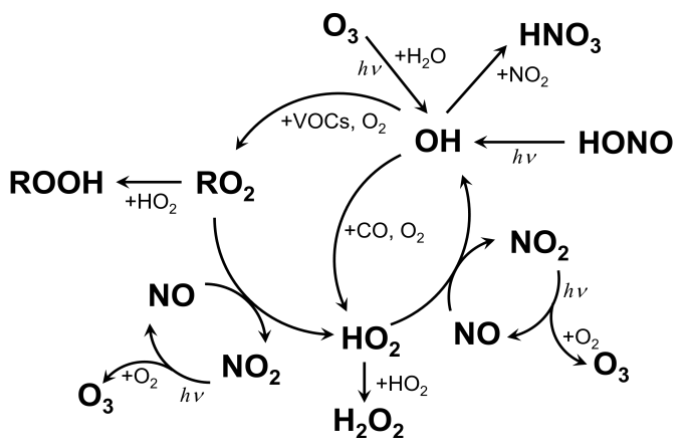


図 5：対流圏における窒素酸化物に関わる主要な大気化学反応の概略図

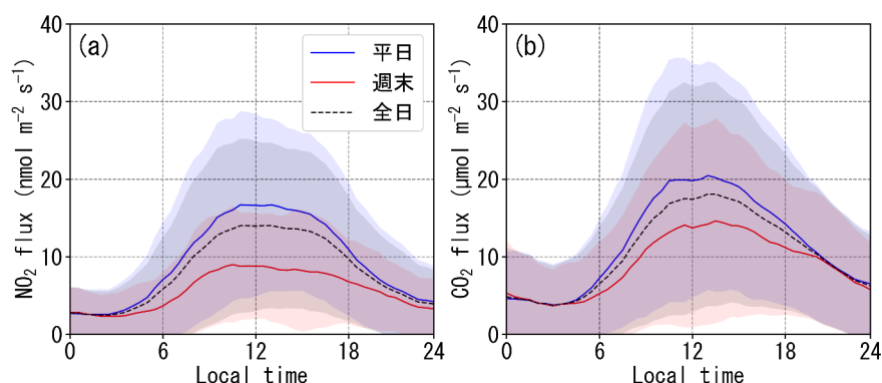


図6：大阪府堺市役所庁舎の屋上（地上112m）で観測されたNO₂およびCO₂フラックスの平日、週末、全日の変動特性

タリスクは、簡便的に励起状態を意味する。化学発光の強度はNO濃度に比例するため、試料大気中のNO濃度が定量できる。一方、NO₂濃度は、試料大気中のNO₂を金属触媒や紫外光照射によっていったんNOへ変換してからオゾンを追加することにより、NO₂*からの化学発光強度を計測して定量する。しかし、HNO₃やRONO₂（硝酸塩）も金属触媒や紫外光照射によってNOを生成するため、化学発光法によるNO_x測定の定量性に疑義が呈される一因になっている²¹⁻²³）。

筆者らは、都市大気汚染の動態探査を目的とした連続観測を、大阪公立大学との共同で実施している。CAPS法を用いたNO₂センサーと超音波風向風速計を大阪府堺市庁舎（34°34'N, 135°29'E）の屋上に設置し、渦相関法によるNO₂フラックスを計測している²⁴）。すなわち、人間活動に伴って排出されるNO₂濃度を直接計測しようという試みである。その結果、庁舎から見て北西側および南西側に位置する主要幹線道路の交通が、NO₂の重要な排出源になっていることが分かってきた。なお、車両から直接排出される窒素酸化物の化学形態はほとんどNOであり、大気中でO₃と反応してNO₂となることに注意が必要である。我々が観測したNO₂フラックスには日変化から季節変化まで多彩な変化が出現するが、2021-2023年における平均的なNO₂フラックスを見積もったところ、 $13.3 \pm 11.9 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となった²⁴）。この結果は、インスブルックで観測されたデータ $18\text{--}38 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と比較的近い²⁵）。こうした定量化は、領域モデルを用いた逆推定などに頼らない直接的な情報であり、都市域の大気汚染の動態を理解するのに重要である。さらに、我々の研究の結果、NO₂フラックスの日内変動を詳しく解析することも可能となり、CO₂フラックスの日内変動と類似することが分かった（図6）。また、NO_xとCO₂の排出割合が、週末と平日で異なっていた。これは、NO_x/CO₂排出比の異なる小型ガソリン車とディーゼル車の交通量が、週末と平日で異なっていることを反映しているためであると考えられる。

5. おわりに

本稿では、森林圏－大気圏の相互作用を理解するうえで不可欠な、熱や微量物質のフラックスを測定するために、分光学的な分析技術が用いられるようになっていることを紹介した。新しいレーザー光源や分光法の開発は日進月歩であり、より高い精度の定量や、より定常濃度の低い分子を超高感度で検出する手法など、今後も新しい発展が期待される。そうした技術を取り入れることによって、本稿で紹介した森林圏と大気圏を跨ぐガス交換プロセスや都市域大気汚染の実態の理解が深まっていくと考えられる。本稿でご紹介しきれなかった技術や、そのフィールド観測への応用例は多数あるので、興味を持たれた方はご自身で文献検索などをしていただきたい。

謝辞

野外でのメタン計測は、京都大学農学研究科・小杉緑子先生と同・坂部綾香先生、神戸大学農学研究科・東若菜先生との共同研究として実施されています。NO₂計測は、大阪公立大学・植山雅仁先生との共同研究として実施されています。また、株式会社汀線科学研究所の下野氏と疋田氏からの技術的サポートを賜りました。観測場所を提供してくださっている大阪府堺市のご理解とご協力にお礼を申し上げます。本稿でご紹介した研究の一部は、JSPS 科研費 (21H03576, 19K22909)、公益財団法人・市村清新技術財団、公益財団法人・岩谷直治記念財団、および、生存圏研究所ミッション推進研究費の補助を受けて実施されました。

参考文献

- 1) Monson, R. and Baldocchi, D., "Terrestrial Biosphere-Atmosphere Fluxes", Cambridge University Press, 2014.
- 2) Jarvis, P. G., Scaling processes and problems. *Plant Cell and Environment*, **18**, 1079–1089, 1995.
- 3) 光田寧, 超音波風速温度計とその大気境界層研究への応用, 天気, 第18巻 1-19, 1971.
- 4) Demtröder, W., "Laser Spectroscopy – Basic Concepts and Instrumentation", 3rd Edition, Springer, 2002.
- 5) Heard, D. E., "Analytical Techniques for Atmospheric Measurement", Blackwell, 2006.
- 6) O’Keefe, A., Scherer, J. J., Paul, J. B., cw Integrated cavity output spectroscopy, *Chem. Phys. Lett.*, **307**, 343-349, 1999.
- 7) Tanaka, K., Kojima, R., Takahashi, K., and Tonokura, K., Continuous measurements of stable carbon isotopes in CO₂ with a near-IR laser absorption spectrometer, *Infrared Phys. Technol.*, **60**, 281-287, 2013.
- 8) Mazurenka, M., Orr-Ewing, A. J., Peverall, R. and Ritchie, G. A. D., Cavity ring-down and cavity enhanced spectroscopy using diode lasers, *Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C: Phys. Chem.*, **101**, 100-142, 2005.
- 9) Berden, G. and Engeln, R., "Cavity Ring-Down Spectroscopy – Techniques and Applications", John-Wiley and Sons, 2009.
- 10) Gagliardi, G. and Loock, H.-P., "Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing", 2014, Springer.
- 11) He, Q., Zheng, C., Zheng, K., Tittel, F. K., Off-axis integrated cavity output spectroscopy for real-time methane measurements with an integrated wavelength-tunable light source, *Infrared Physics and Technology*, **115**, 103705, 2021.
- 12) Kebabian, P. L., Herndon, S. C., and Freeman, A., Detection of nitrogen dioxide by cavity attenuated phase shift spectroscopy, *Anal. Chem.*, **77**, 724-728, 2005.
- 13) Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N., Jr., "Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications", Academic Press, 1999.
- 14) Itoh, M., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., Hayamizu, K., and Tani, M. Hydrologic effects on methane dynamics in riparian wetlands in a temperate forest catchment, *J. Geophys. Res.: Biogeosciences* **112**, G01019, 2007.
- 15) 坂部綾香、森林生態系におけるメタンフラックス観測の発展、生存圏研究、第12号、39-47、2016.
- 16) Covey, K. R., Megonigal, J. P., Methane production and emissions in trees and forests. *New Phytologist* **222**, 35–51, 2019.
- 17) 高橋けんし、レーザーで森林のメタンをはかる、森林科学、第66巻、47-48、2012.
- 18) Takahashi, K., Sakabe, A., Kanazawa, A., and Kosugi, Y., Vertical profiles of methane concentration above and within canopy in a temperate Japanese cypress forest, *Atmos. Environ.: X*, **12**, 100143. 2021.
- 19) Sakabe, A., Takahashi, K., Azuma, W., Itoh, M., Tateishi, M., and Kosugi, Y., Controlling factors of stem methane emissions from *Alnus japonica* in a riparian wetland of a temperate forest, *J. Geophys. Res.: Biogeosciences*, **126**, e2021JG006326, 2021.
- 20) Takahashi, K., Sakabe, A., Azuma, W. A., Itoh, M., Imai, T., Matsumura, Y., Tateishi, M., and Kosugi, Y., Insights into the mechanism of diurnal variations in methane emission from the stem surfaces of *Alnus japonica*, *New*

- Phytologist*, **235**, 1757–1766, 2022.
- 21) Dunlea, E. J., Herndon, S. C., Nelson, D. D., Volkamer, R. M., San Martini, F., Sheehy, P. M., Zahniser, M. S., Shorter, J. H., Wormhoudt, J. C., Lamb, B. K., Allwine, E. J., Gaffney, J. S., Marley, N. A., Grutter, M., Marquez, C., Blanco, S., Cardenas, B., Retama, A., Ramos Villegas, C. R., Kolb, C. E., Molina, L. T., and Molina, M. J., Evaluation of nitrogen dioxide chemiluminescence monitors in a polluted urban environment, *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 2691–2704, 2007.
 - 22) Suzuki, H., Miyao, Y., Nakayama, T., Pearce, J.-K., Matsumi, Y., Takahashi, K., Kita, K., and Tonokura, K., Comparison of laser-induced fluorescence and chemiluminescence measurements of NO₂ at an urban site, *Atmos. Environ.* **45**, 6233–6240, 2011.
 - 23) Alam, M. S., Crilley, L. R., Lee, J. D., Kramer, L. J., Pfrang, C., Vázquez-Moreno, M., Ródenas, M., Muñoz, A., and Bloss, W. J., Interference from alkenes in chemiluminescent NO_x measurements *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 5977–5991, 2020.
 - 24) S. Okamura, M. Ueyama, and K. Takahashi, Temporal and spatial variations in NO₂ fluxes by the eddy covariance measurements over a dense urban center in Sakai, Japan, *Atmos. Environ.*, **339**, 120870, 2024.
 - 25) Karl, T., Graus, M., Striednig, M., Lamprecht, C., Hammerle, A., Wohlfahrt, G., Held, A., von der Heyden, L., Deventer, M.J., Krismer, A., Haun, C., Feichter, R., Lee, J., Urban eddy covariance measurements reveal significant missing NO_x emissions in Central Europe. *Sci. Rep.* **7**, 2536, 2017.

リグニンの創薬資源化

岡部 由美^{1*}

Utilization of lignin for drug discovery

Yumi Okabe^{1*}

概要

我々の生活を支えている燃料、プラスチック、化成品、医薬品等には、芳香環を持つ化合物が数多く存在する。そのため、物質生産における天然の芳香環骨格の供給源として、植物細胞壁成分の1つであるリグニンが注目されている。その利用法の研究開発は目覚ましい進歩を遂げている一方で、医薬品のような化合物構造と作用機序の解明が重要となる利用法に向けた研究は、未だ拡大・発展の余地が多く残されている。将来的な医薬品用途利用を目指し、リグニン・リグノセルロース由来の生理活性物質の創出および探索を目指したこれまでの研究は主に、二つに大別できると考えられる：①分解したバイオマスから有機合成のパーツとなる小規模分子であるビルディングブロックや、合成の出発物質となるリグニン由来プラットフォームケミカルを単離し、より大きく複雑な化合物へと合成・修飾していくアプローチ、②バイオマス中のリグニンを処理・分解して得た混合物（画分）としてのリグニンを評価するアプローチ、の二つである。本稿では、著者が進めてきた木質バイオマスからの生理活性物質創出を目指したこれまでの研究成果を含む、世界で行われているリグニン由来の生理活性物質創出・創薬に向けた研究を紹介し、リグニンの創薬資源化についての現状の整理を試みる。

1. はじめに

植物細胞壁の主要構成成分であるリグノセルロース（セルロース、ヘミセルロース、リグニン）は、従来化石資源から創り出してきたものをバイオマスから創り出すスキームである「バイオリファイナリー」における重要な資源である¹⁻⁴⁾。リグノセルロース利用の大きな利点の1つは、食糧と競合しないことである。加えて、どの維管束植物にも普遍的に存在する成分であることから、特定の植物種に依存することなく、現状の自然界・農業環境を柔軟に活用できる点も重要だと考えられる。

初期のバイオリファイナリーにおいては、多糖であるセルロース利用が中心であった。その発展の中で、芳香族ポリマーであるリグニンからの物質生産の必要性・可能性が再確認されてきた^{1,2)}。元来、リグニン利用に関しては、製紙の過程で産出される黒液として、その大部分が燃焼利用され、2%未満が分散剤や接着剤、界面活性剤として使われてきた歴史を持つ¹⁾。この利用効率の低さは、リグニンの複雑な構造に起因している。複数の芳香核単位（H核、G核、S核）が、多様な結合様式（例： β -O-4結合、 β -5結合）でラジカル重合した構造であるため、リグニン分解（解重合）による均一な化合物の高収量獲得および分解産物の構造解析には、必然的に大きな困難が伴う。しかしながら、我々の生活を支えている燃料やプラスチック、化成品、医薬品等には、芳香環を持つ化合物が数多く存在するた

2025年9月4日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 バイオマス変換分野.

* E-mail: okabe.yumi.z61@kyoto-u.jp

め、リグニンには物質生産における天然の芳香環骨格の供給源として注目され、バイオリファイナリーの発展を目指す数多くの研究がされるに至った。アプリケーション開発の黎明期は、熱分解を中心とした燃料、BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）等の芳香族系化学品の創出が行われ、現在では、プラスチック類を代表とする様々なアプリケーションが開発されている（図1）^{1-3,5)}。さらに、多様なバイオマス変換およびリグニン抽出方法が見出されており、触媒や、イオン液体、深共晶溶媒（deep eutectic solvent, DES）、弱酸、微生物等を用いた、低エネルギー消費・低環境負荷・低コストを目指す研究が数多く報告されている⁶⁻¹²⁾。

2. リグニン由来生理活性物質の創出について

このような目覚ましい進歩を遂げるリグニン研究においても、医薬品のような化合物構造と作用機序の解明が重要となる利用法に向けた研究は、未だ拡大・発展の余地が多く残されているトピックである。これまでのリグニン・リグノセロース由来の生理活性物質（注：本稿では「生理活性物質」という単語を広義で使い、「生物活性物質」と区別しない）創出を目指した研究は主に、①分解したバイオマスから有機合成のパーツとなる小規模分子であるビルディングブロックや、合成の出発物質となるリグニン由来プラットフォームケミカルを単離し、より大きく複雑な化合物へと合成・修飾していくアプローチ^{13,14)}、②バイオマス中のリグニンを処理・分解して得た混合物（画分）としてのリグニンを評価するアプローチに大別できると考えている。前者のビルディングブロックやプラットフォームケミカルと呼ばれる化合物をベースとした開発は、化合物の構造が明確であることに大きな強みを持つ。特に、芳香環および反応性の高い側鎖構造を持つリグニン由来化合物を有機合成的手法で変えていくアプローチは、必要な構造を有機合成に供給する「材料」としてのリグニンの価値を訴求していると考えられる。後者の方法は、生理活性に寄与する化合物の探索・同定、および作用機序解明が大変に困難という大きな課題がある一方で、リグニンが持つ構造や他の細胞壁成分との関係が維持される場合もあり、「植物細胞壁構成成分のリグニンだから」という価値の訴求に繋がる可能性が高い方法であると考えられる。

本稿では、リグニン由来生理活性物質・医薬品創出を目指して行われている研究について、上記の視点に留意しながら、著者がこれまで取り組んできた内容を含む、世界で行われている研究を紹介する。

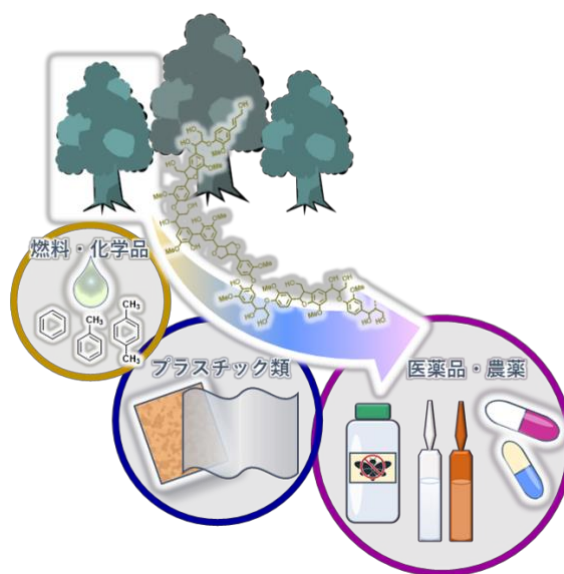


図 1: バイオリファイナリーの概要

3. リグニン由来プラットフォームケミカルを利用した報告

Barta のチームは、触媒反応や有機合成を駆使し、バイオリファイナリーを牽引する様々な研究を報告している。かねてからリグニン由来プラットフォームケミカルに着目しており、近年では、リグニンを分解して創出したプラットフォームケミカルから、神経伝達物質としても有名なドーパミンの合成を報告している^{6,14)}。この報告では、ドーパミンだけでなく、複数の生理活性化合物（テトラヒドロイソキノリン、キナゾリノン、3-アリールインドール、テトラヒドロパペペロリン）の合成も達

成している。既存の化合物合成だけでなく、プラットフォームケミカルを基にした窒素やハロゲンを導入した化合物ライブラリを開発し、抗微生物（細菌、ウイルス）活性、抗炎症活性、抗腫瘍活性という多様な生理活性を網羅的に評価している⁶⁾。有機合成のアプローチによって構造が既知の化合物を創出するだけでなく、化合物ライブラリ開発による新たな可能性の創出にも挑戦している研究であり、リグニンの創薬資源化を牽引する注目度の高い、かつ重要な報告である。

Sels のチームは、トウヒ（Spruce wood）からリグニン由来抗酸化物質の創出を報告している⁷⁾。この報告では、不均一系還元触媒を用いた Reductive catalytic fractionation (RCF) によってモノマーが豊富に含まれる低分子リグニン画分を獲得し、Cu-SiO₂ 触媒下でアミノ化（-NH₂ の導入）することで、末端基の-OH が選択的にアミノ化された化合物を得ている。創出したリグニン由来化合物については、抗酸化活性の評価結果が報告されている⁷⁾。リグニン由来モノマーやダイマーがプラットフォームケミカルに相当し、それらを触媒反応によるアミノ基導入によって新しい化合物へと変換するアプローチであると位置づけられる。

4. リグニンユニット間結合に着目した報告

Xie らは、人工リグニンオリゴマー（dehydrogenation polymer, DHPs）を合成し、DHPs を分画したフラクションの抗腫瘍活性を報告している¹⁵⁾。活性が見られた画分から、最終的に複数の化合物を単離している。その中で、 β -5 結合を持つ2種類のダイマー（GG dimer である β -5 G-type dimer, および GS dimer である β -5 GS-type dimer）の抗腫瘍活性を比較した結果から、S 核は活性を減少させると結論づけている。また、この β -5 GS-type dimer に β -O-4 結合により G 核が追加された構造である (β -O-4)(β -5) GS-type trimer の活性が、 β -5 GS-type dimer の半分以下であったことから、DHP の抗腫瘍活性に対して β -O-4 結合は寄与しないと示唆を述べている¹⁵⁾。ダイマーとトライマーの違い等に関する更なる検討は必要だと考えられるが、リグニンユニット間結合および G 核、S 核の抗腫瘍活性に与える影響を論じていることから、リグニンに特有な構造の価値を訴求している興味深い研究である。

5. バイオマスを処理・分解して得たリグニンについての報告

福島らとキリンホールディングス株式会社のチームは、大麦ハスクをセルラーゼで処理して得た cellulase-treated lignin-carbohydrate (LREL) が、免疫賦活活性を示すことを報告している¹⁶⁾。作用機序として、レセプターである Toll-like receptor 4 (TLR 4) を介した樹状細胞の活性化を報告すると共に、活性に寄与するファクターとして、LREL に含まれるリグニンおよび中性糖含有量、リグニンと多糖を繋ぐエステル結合、分子量および重合度を挙げ、可能性を論じている。

著者の所属している生存圏研究所でも、バイオマス由来生理活性物質の創出に取り組んできた実績がある。その内の数報を以下に紹介する。Li らは、ブナをマイクロ波で酸分解して得たリグニン-多糖複合体（lignin-carbohydrate complex）が脳心筋炎ウイルス（encephalomyocarditis virus, EMCV）に対して抗ウイルス活性を示すことを報告している。マイクロ波酸分解により、リグニン中のオリジナルの β -O-4 結合が相当に開裂している一方で、 β - β 結合および β -1 結合は一部維持されていると報告した。また、LCC の多糖鎖を酵素により加水分解した結果、抗ウイルス活性が低下したことから、多糖部分が EMCV に対する抗ウイルス活性に重要な役割を果たす可能性を論じている¹⁷⁾。同じく、木村らは、サトウキビバガスを硫酸含有グリセロール水溶液中でマイクロ波分解して得た、リグニン由来の抗 EMCV ウイルス活性物質を報告している¹⁸⁾。その後の研究では、複数のウイルスを用いたエンベロープ・ノンエンベロープウイルスへの抗ウイルス活性評価も行っている¹⁹⁾。創出したリグニン由来画分の物理化学的パラメータの評価を経て、木村らが創出した抗ウイルスリグニンの EMCV に対する作用機序は、リグニンがウイルスに吸着することによる、宿主細胞へのエントリー阻害であると考察している¹⁹⁾。また、リグノセルロース由来の抗ウイルス素材開発を目的とし、抗ウイルスリグニン

画分でコーティングしたコットンのネコカリシウイルス (feline calicivirus, FCV) に対する活性を報告している²⁰⁾。

著者らは、木質バイオマスを、硫酸水溶液・エチレングリコール・トルエンで構成された反応液中でマイクロ波分解して得た複数の画分を、細菌、ウイルス、または細胞を用いた生理活性評価に供した。スギ心材のマイクロ波分解産物由来の画分が、肺炎球菌のセファロスポリン・ペニシリン耐性株（薬剤耐性株）およびエリスロマイシン・ペニシリン・テトラサイクリン・耐性株（多剤耐性株、リファンピン感受性）に対し、抗薬剤・多剤耐性菌活性を示すことを見出した²¹⁾。抗新型コロナウイルス活性については、スギ心材およびユーカリのマイクロ波分解産物を供試し、ユーカリ由来の画分を選抜・解析した²²⁾。構造解析の結果、選抜したマイクロ波分解産物由来画分の主成分がリグニン由来であること、オリジナルのリグニンユニット間結合は開裂していることが明らかになった^{21,22)}。しかしながら、リグニン構造（例：官能基、立体構造）と活性の相関・作用機序は依然として不明のままであった。現在は、細胞に関する生理活性について解析を進めると同時に、リグニンモデル化合物を利用した新しい研究を展開している。リグニン構造の生理活性に対する寄与を明らかにすると同時に、有機合成のアプローチを取り入れることによる、効果的な生理活性化合物の創出・単離、および知見の蓄積を目指している。

6. おわりに

リグノセルロース・リグニン由来の創薬は、安全性や認可の観点から、社会実装まで長い道のりとなる研究テーマの 1 つである。しかしながら、異なる視点を持つ多様なアプローチによる知見の集積は、化石資源だけに依存しない新しい社会システム構築に向け、将来的に大きく貢献できると考えている。本稿の前半で紹介した研究のように、社会実装への最短距離だと考えられるリグニンからの既存化合物創出を目指すアプローチをはじめ、リグニン由来プラットフォームケミカルとなるモノマー、ダイマー等の低分子化合物を基にした新規化合物を創出する研究の展開が進んでいる。一方で、本稿後半で紹介したようなアプローチは、植物体内で合成されたリグニン構造の多様さ・複雑さに注目し、「植物を構成するリグニン」という視点を維持しつつも新しい化合物構造を探索するアプローチに繋がると考えている。著者は、リグニン構造を最大限活用した創薬は、細胞壁成分を創り出している植物体内のシステムを活用していると捉えており、リグニン構造の最大限活用を伴う「リグニン由来化合物群」という新規ケミカルスペース開発を目指している。リグニンをを用いた生理活性物質創出・創薬の研究は、バイオマスの種類・変換方法・化合物・生理活性といった複数のファクターが関与する複雑性を持つからこそ、あらゆる可能性や展開が期待できる分野であると考えている。今後は、更に「リグニンだからこそ」という新しい価値を創出できる可能性が高まるだろう。

参考文献

- 1) Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., Bajwa, S. G., A concise review of current lignin production, application, products and their environmental impact. *Industrial Crops & Product*, 139, 111526, 2019.
- 2) Ragauskas, A. J., Backham, G. T., Bidy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., Davison, B. H., Dixon, R. A., Gilna, P., Keller, M., Langan, P., Naskar, A. K., Saddler, J. N., Tschaplinski, T. J., Tuskan, G. A., Wyman, C. E., Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344, 1246843, 2014.
- 3) Azadi, P., Inderwildi, O. R., Farnood, R., King, D. A., Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 506 – 523, 2013.
- 4) Cherubini, F., The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51, 1412 – 1421, 2010.
- 5) Upton, B. M. and Kasko, A. M., Strategies for the conversion of lignin to high-value polymeric materials: review and

- perspective. *Chem. Rev.*, 116, 2275 – 2306, 2016.
- 6) Afanasenko, A. M., Wu, X., De Santi, A., Elgaher, W. A. M., Kany, A. M., Shafiei, R., Schulze, M. -S., Schulz, T. F., Hauptenthal, J., Hirsch, A. K. H., Barta, K., Clean synthetic strategies to biologically active molecules from lignin: a green path to drug discovery. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 63, e202308131, 2024.
 - 7) Ruijten, D., Narmon, T., Van Aelst, K., De Weer, H., Zweep, R., Hendrickx, T., Poleunis, C., Li, L., Van Greem, K. M., Debecker, D. P., Sels, B. F., Tertiary amines from RCF lignin mono- and dimers: catalytic N-functionalized antioxidants from wood. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 11, 4776 – 4788, 2023.
 - 8) Hossain, M. M. and Aldous, L., Ionic liquids for lignin processing: dissolution, isolation, and conversion. *Aust. J. Chem.*, 65, 1465 – 1477, 2012.
 - 9) Alvarez-Vasco, C., Ma R., Quintero, M., Guo M., Geleynse, S., Ramasamy, K. K., Wolcott, M., Zhang, X., Unique low-molecular-weight lignin with high purity extracted from wood by deep eutectic solvents (DES): a source of lignin for valorization. *Green Chem.*, 18, 5133 – 5141, 2016.
 - 10) Nishiwaki-Akine, Y., Kanazawa, S., Uneyama, T., Nitta, K., Yamamoto-Ikemoto, R., Watanaebe, T., Transparent woody film made by dissolution of finely divided Japanese beech in formic acid at room temperature. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 5, 11536 – 11542, 2017.
 - 11) Kobayashi, N., Hashizume, T., Kondo, K., Kitayama, K., Katahira, M., Watanabe, T., Reassembly of wood to plastic- and paper-like films *via* ultra-mild dissolution in formic acid. *Mater. Adv.*, 5, 5398 – 5409, 2024.
 - 12) Shikinaka, K., Otsuka, Y., Nakamura, M., Msai E., Katayama, Y., Utilization of lignocellulosic biomass via novel sustainable process. *J. Oleo Sci.*, 67 (9), 1059 – 1070, 2018.
 - 13) Sun Z., Bottari, G., Afanasenko, A., Stuart, M. C. A., Deuss, P. J. Fridrich, B., Barta, K., Complete lignocellulose conversion with integrated catalyst recycling yielding valuable aromatics and fuels. *Nature Catalysis*, 1, 82 – 92, 2018.
 - 14) Sun, Z., Fridrich, B., De Santi, A., Elangovan, S., Barta, K., Bright side of lignin depolymerization: toward new platform chemicals. *Chem. Rev.*, 118, 614 – 678, 2018.
 - 15) Xie, Y., Jiang, C., Chen, X., Wu, H., Bi, S., Preparation of oligomeric phenolic compounds (DHPs) from coniferin and syringin and characterization of their anticancer properties. *BioResources*, 15 (1), 1791 – 1809, 2020.
 - 16) Tsuji, R., Koizumi, H., Aoki, D., Watanabe, Y., Sugihara, Y., Matsushita, Y., Fukushima, K. Fujiwara, D., Lignin-rich enzyme lignin (LREL), a cellulase-treated lignin-carbohydrate derived from plants, activates myeloid dendritic cells via toll-like receptor 4 (TLR4). *Journal of Biological Chemistry*, 290 (7), 4410 – 4421, 2015.
 - 17) Li, R., Ouda, R., Kimura, C., Narita, R., Nishimura, H., Fujita, T., Watanabe, T., Conversion of beech wood into antiviral lignin-carbohydrate complexes by microwave acidolysis. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 9, 9248 – 9256, 2021.
 - 18) Kimura, C., Li, R., Ouda, R., Nishimura, H., Fujita, T., Watanabe, T., Production of antiviral substance from sugarcane bagasse by chemical alternation of its native lignin structure through microwave solvolysis. *ChemSusChem*, 13, 4519 – 4527, 2020.
 - 19) Kimura, C., Oh, S.-W., Fujita, T., Watanabe, T., Adsorptive inhibition of enveloped viruses and nonenveloped cardioviruses by antiviral lignin produced from sugarcane bagasse via microwave glycerolysis. *Biomacromolecules*, 23, 789 – 797, 2022.
 - 20) Kimura, C., Ohgitani, E., Mazda, O., Watanabe, T., Antiviral cellulose-lignin assembly entirely composed of plant cell wall components. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 197, 3856 – 3870, 2025.
 - 21) Okabe, Y., Ohgitani, E., Mazda, O., Watanabe, T., Antimultidrug-resistant bacterial activity of microwave solvolysis lignin from woody biomass. *Industrial Crops & Products*, 206, 117573, 2023.
 - 22) Okabe, Y., Ohgitani, E., Mazda, O., Watanabe, T., Anti-SARS-CoV-2 activity of microwave solvolysis lignin from woody biomass. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275, 133556, 2024.

著者プロフィール



岡部 由美 (Yumi Okabe)

＜略歴＞ 2015 年東北大学大学院農学研究科博士課程前期 2 年の課程修了／
2015 – 2019 年東芝マイクロエレクトロニクス株式会社（現：東芝デバイスソ
リューション株式会社）勤務／2024 年京都大学大学院農学研究科博士後期課
程修了（農学博士）／同年京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野研究員／
2025 年京都大学生存圏研究所ミッション専攻研究員、現在に至る。＜研究テ
ーマと抱負＞リグニン由来生理活性物質の創出。＜趣味＞読書、植物栽培、車
か電車の旅。

タンザニアのミオンボ林における住民参加型森林管理の展開と課題

仲井 一志^{1*}

Participatory Forest Management in the Miombo Woodlands of Tanzania: Developments and Challenges

Kazushi Nakai^{1*}

概要

2000 年代初頭以降に加速したタンザニアの経済成長は都市部の発展を促進し、それに伴って森林資源としての木材需要も急速に拡大した。需要の増大は森林への産業的伐採圧を高め、同国内の森林資源は減少している。持続可能な森林経営の手法として、熱帯の開発途上国を中心に住民参加型森林管理（Participatory Forest Management: PFM）が導入される中、タンザニアでも 1990 年代後半から PFM の制度整備と実装が進められてきた。しかし、経済成長に伴う人口増加と農業の拡大により、特に農村部では森林保全と生活の両立が困難になる事例も多い。本稿では、タンザニアの森林事情と PFM の制度構造、さらに換金作物を中心とする農業の拡大が森林に及ぼす影響を整理し、PFM を実効的なスキームとして機能させるための条件を考察する。特に、森林認証制度を基盤とした地域参加型森林経営の先進事例の取り組みを紹介し、地域社会・市場・制度が連携した森林保全モデルの可能性と限界を検討する。

1. タンザニアの森林劣化と森林減少

タンザニアはアフリカ東部、インド洋に面した沿岸地域に位置し、北をケニア、南をモザンビークに挟まれた国土面積約 9,450 万 ha の連合共和国である。これは日本の約 2.5 倍の広さに相当し、約 50%（約 4,800 万 ha）が森林とされている¹⁾。北部にはアフリカ最大の湖であるビクトリア湖や、キリマンジャロ山、セレンゲティ国立公園、ンゴロンゴロ自然保護区など、豊かな自然資源が存在する。

タンザニアは 1961 年にタンガニーカが独立し、1964 年にザンジバルと合邦した。独立以降は独自のアフリカ型社会主義政策を展開したが、度重なる干ばつや近隣諸国との戦争などによって長らく経済は混乱状態にあった²⁾。しかし、2000 年代初頭に世界市場での鉱物資源価格の高騰を背景に経済成長が加速し、特に都市部では急激な社会的発展が進んだ³⁾。旧首都であり現在も経済の中心であるダルエスサラームを中心に経済発展が進み、それに伴い国内の木材需要も急速に拡大した。その結果、国内の森林では大径の有用樹種の伐採が進み、森林資源の劣化が深刻化している。2015 年に国連環境計画（UNEP）がタンザニア政府と共同で実施した調査によると、2013 年から 2033 年の 20 年間にお

2025 年 9 月 5 日受理。

¹⁾ 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏未来開拓研究センター

* E-mail: nakai.kazushi.2m@kyoto-u.ac.jp

ける森林破壊の経済的損失は、累計で約 2730 億タンザニアシリング（約 1 億 7100 万 US ドル）に相当すると試算されている³⁾。

タンザニアの森林の大部分（約 4500 万 ha）は天然林であり、そのうち約 75%は Open Woodland とされる森林被覆率 10-40%の半乾燥林である⁴⁾。中でも広範囲を占めるミオンボ林(Miombo woodland)はタンザニアを代表する植生であり、マメ科の *Brachystegia* 属、*Julbernardia* 属、*Isoberlinia* 属の3つの樹種群が優占することで特徴づけられる。ミオンボ林は、タンザニア、モザンビーク、マラウイなどの半乾燥～半湿潤熱帯地域（年間降水量およそ 1000 mm 前後）に分布し、熱帯乾燥季節林 (Seasonally



図 1：製材所に集められた原木
(*P. angolensis*)

Dry Tropical Forest) として分類される⁵⁾。ゾウ、カバ、ライオンなどの大型哺乳類をはじめとした多様な生物が生息する生物多様性ホットスポットであり、アフリカ大陸全体の森林の約 10%を占めるとも言われている⁶⁾。

タンザニアのミオンボ林における代表的な有用樹種としては、*Pterocarpus angolensis*（スワヒリ語名：Mninga jangwa）（図 1）、*Azelia quanzensis*（Mkongo）、*Millettia stuhlmannii*（Mpangapanga）などが挙げられる。これらはタンザニア国内の家具材や建築内装材、構造材として広く利用されており、いずれも通直で胸高直径が大きく、重硬で木材腐朽菌やシロアリに対する生物劣化抵抗性が高い⁷⁾。これらの性質により、

地方農村部においても経験的に積極的に活用されてきたと考えられる。筆者が 2015 年にタンザニア南部のリンディ州を訪問した際には、これら有用樹種の板材や原木が都市部のみならず農村部や幹線道路沿いの個人経営の木工業者においても数多く取り扱われていた。しかし、2022 年以降、これらの樹種は市場から姿を消し、代わりに Mchenga (*Isoberlinia* spp.) や Mwenbeti (*Sterculia quinquiloba*) といった、それまでほとんど流通していなかった樹種の板材が出回るようになっている。

タンザニアにおける森林の減少には主に 2 つの要因が考えられ、それらが段階的かつ連鎖的な作用によって進行している。第一に、木材需要増加に伴う伐採圧の上昇によって森林構造が変化し天然更新が追い付かなくなっていることが挙げられる。これは、森林の生態機能が徐々に損なわれる森林劣化 (Forest Degradation) であり、農村や都市部での木材利用によって引き起こされている。第二に、農地拡大による森林の転換である。これは木材利用のためではなく農業や家畜の放牧のために引き起こされるもので、森林被覆の恒久的な喪失を伴う土地利用の変化、即ち森林減少 (Deforestation) と言える。これらは異なる目的に起因するが、実際の森林においては連関して進行すると推察される。森林管理を考える上では、これら木材利用と土地利用の双方を包括的に考慮する必要がある。

2. タンザニアにおける住民参加型森林管理の制度と実態

タンザニアでは、1998 年の国家森林政策以降、2002 年の森林法の制定を契機として、コミュニティによる住民参加型の森林管理が制度的に推進されてきた。これに伴い、森林の区分と管理体制にはいくつかの階層が設けられている（図 2）。

まず、森林は大きく分けて Forest Reserve（森林保護区）と Unreserved Forest（非保護区）に分類され、森林のうち Unreserved Forest は約 6%とされている¹⁾。Forest Reserve にはさらに 2 つの主要区分があり、タンザニア森林局 (Tanzania Forest Services: TFS) が管轄する National Forest Reserve (NFR) と、

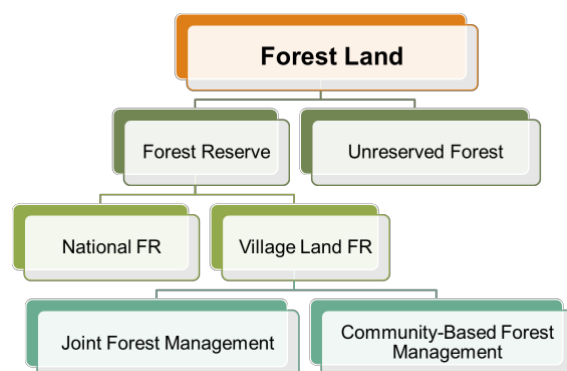


図 2：タンザニアの森林区分

地域コミュニティが管理する Village Land Forest Reserve (VLFR) が存在する。NFR と VLFR の空間的配置としては、農村の居住区から比較的近い森林域に NFR が、より奥地に VLFR が位置する傾向が見られる。いずれの場合も、最終的な伐採の許可と管理責任は TFS にあり、資源管理が適切であることを TFS が証明する必要がある。

VLFR には、地域住民が自ら所有・管理する Community-Based Forest Management (CBFM) と、政府または民間企業の所有地を地域住民と共同で管理する Joint Forest Management (JFM) の 2 形態が存在する。これらは総称して Participatory Forest Management (PFM) と呼ばれ、国から地域住民への森林管理権限の移譲を通じて持続的な資源利用を実現することを目的としている。実際の森林面積で見ると、CBFM による管理が約 230 万 ha、JFM が約 540 万 ha とされ、JFM の方が規模としては大きい^り。PFM は、持続可能な森林管理の有望な方法論の一つとして期待されており、現在、タンザニア全体の森林の約 15% が PFM の対象となっている^り。対象面積こそ限定的であるものの、PFM は自然資本・社会資本・金融資本の三側面において有効に機能したとされ、森林の回復が確認された事例も報告されている。一方で、地域によっては PFM の実質的な崩壊とみなせる事例も存在する^り。主な課題としては、森林管理計画を立案・実行するための専門知識や技術支援の不足、ならびに資金面でのドナー依存が挙げられる。PFM の継続性を担保するためには、収益性の高い「フラッグシップ木材種」の設定、木材価格の安定化、そして長期的な森林管理スキームの構築が重要な課題である。

一方、Unreserved Forest は一般的に Open Area と呼ばれる地域に属し、農村の居住区に最も近い位置に分布する。この Open Area では、地域住民が伐採の制限を受けることなく薪炭材や生活用材の採取、焼畑による農地開墾などを自由に行うことができる。実際、地方農村部では換金作物（ゴマ、カシューナッツなど）をはじめ、トマト、オクラ、米、ピーナッツ、メイズ（トウモロコシ）など多様な作物が Open Area で栽培されている。また、スクマ族などの民族による家畜飼育も広く行われている。

このように、Open Area は地域住民にとって生活の基盤となる一方で、法的な規制が弱いために違法伐採の温床にもなっている。例えば、タンザニアにおいて最も高い経済価値を持つ樹種であるアフリカン・ブラックウッド (*Dalbergia melanoxylon*、スワヒリ語名：Mpingo) はワシントン条約 (CITES) 附属書 II に掲載され⁸⁾、タンザニア国内でも厳格に管理されている。そのため、NFR や VLFR で伐採された個体には、原木と切り株の両方に伐採年や管理情報を刻印する簡易マーキングが義務づけられている (図 3)。これは、合法的かつ持続可能な森林からの産出物であることを証明し、輸出に必要なトレーサビリティの一環である。しかし、Open Area で伐採された個体にはこの刻印が施されない。法的には国内流通に限り利用可能であるが、現実には、Open Area で伐採された木材が NFR や VLFR の刻印付き原木と混在され、製材後に違法に輸出される事例がある。このような違法伐採取引は、近年特に問題視すべきである。



図 3：伐採後の切株に押される刻印
(赤矢印部)

3. 農地拡大と森林資源の競合構造

タンザニアにおける主要産業の一つである農業は、同国の森林減少を引き起こす主たる要因と考えられている。特に、小規模農業の拡大に伴う焼畑や火入れによる森林火災が森林面積の大幅な減少を招いており、現在の森林減少の約 89% が小規模農業に起因する⁹⁾。ここでいう小規模農業とは、地方農村における家族単位の生産活動を指し、企業的大規模プランテーションとは異なる。すなわち、近年進行する農村部の人口増加がその背景にある。そして、このような農地拡大は一般的に農業が行われる Open Area における森林、そして森林保護区へと広がっている。

タンザニアの主要作物の耕作面積の推移(表1)を見ると、人口増加に伴い主食であるメイズやコメの耕作面積が拡大している一方で、ゴマ、ヒマワリ、カシューナッツといった換金作物の作付面積が2005年から2020年にかけて急増している¹⁰⁾。特にゴマは2020年時点で2005年比約5倍、カシューナッツは約4倍に増加した(表1)。

筆者が調査対象としているリンディ州キルワ県においても、ゴマとカシューナッツはいずれも主要な換金作物として農家に広く受け入れられており、特にゴマは単年性で収益性が高いため、広範囲での栽培が確認されている。リンディ州における収穫時期は、ゴマが6～7月、カシューナッツが9～10月である。

タンザニアは年間約70万トンの出荷量を誇る世界有数のゴマ輸出国であり¹¹⁾、主な生産地はリンディ州とモロゴロ州である。両州では農法に違いがあり、いずれも無施肥による栽培が主であるものの、リンディ州では焼畑による移動農法、モロゴロ州では定地農法(常畑)が主流である。収量の比較では、リンディ州がモロゴロ州の約2倍の収量を記録しているとされる¹²⁾。本来、タンザニアの地方農村では多種多様な作物の少量生産を特徴とするが、近年は世界的なゴマ需要の高まりによる価格上昇や、単年で収益が得られるという利点から、ゴマ栽培に集中する傾向が一部の農村で顕著になっている。

一方、カシューナッツはリンディ州やムトワラ州の海岸部から内陸にかけて広く栽培されている代表的な換金作物である。苗木を植えてから5年ほどで結実を始め、その後は毎年収穫可能となる。カシューの木は林冠を広く展開することで収量が増加するため、広い植栽間隔と広大な土地面積が必要とされる。タンザニア国内には、カシューナッツを食用ナッツに加工する本格的な産業基盤が存在しないため、収穫物の多くはインドなどへ輸出され、加工後に再輸入される形が一般的である。2020年には、タンザニアは世界第4位のカシューナッツ輸出国となっており、年間約12.5万トンを輸出している¹⁰⁾。こうした背景から、収穫量は安定するものの、買い取り価格の変動や中間加工業者への依存のため、農家に残る収益は必ずしも高くない。

このように、ゴマやカシューナッツといった国際市場と直結する換金作物は、地方農村における貴重な収入源であり、その栽培地の多くはOpen Areaに位置している。しかし、Open Areaといえども利用可能な土地には限りがあり、人口増加により農業従事者が増えれば、農業適地の希少化は避けられない。そこに家畜放牧を生業とする遊牧系民族(例:スクマ族など)が移入してくることで、農耕民との土地利用をめぐる衝突が生じやすくなっている。実際に筆者が調査を行っているリンディ州キルワ県では、農業、放牧、森林保護区の三者間で土地利用の競合が顕在化しており、農業適地を求めてVLFRに侵

表1: 作物の耕作面積推移(2005年から2020年)¹⁰⁾

Commodity	2005 Production area (ha)	2020 Production area (ha)	Percent increase/decrease
Maize	3,109,590	4,200,000	35%
Sesame	156,250	960,000	514%
Cashew	161,380	795,572	393%
Sunflower	340,000	1,030,000	203%
Rice	701,990	1,038,343	48%
Coffee	235,700	219,857	-7%
Cotton	526,720	500,000	-5%



図4: 農村でのカシューナッツ栽培地
(リンディ州キルワ県)



図5: 開墾される直前のVLFR
(小径材を切り着火材とする)

入する動きも確認されている。人口密度が低く森林率の高かったこの地域には他地域からの人口流入が進み、Open Area だけでなく VLFR における違法伐採や農地転換が急増している（図 5）。こうした動きが土地紛争へと発展し、時には政治的圧力によって保護区側が土地の一部を明け渡さざるを得ない事例すらある。このように、地域の農地拡大を主因とした森林減少は Unreserved Forest から保護区へと波及しており、農地転換により木材資源がさらに減少するという悪循環を生んでいる。この構造的な課題に対して単なる土地利用規制や制度整備だけでは限界があり、森林と地域社会の関係性を捉え直し、地域社会と調和した森林管理の実装が求められる。

4. 森林認証を基盤とする住民参加型森林経営

森林は農業や地域住民の生活と密接に結びついており、森林保全を目的とした一方的な土地利用規制は、かえって住民の生活を圧迫し、結果として森林減少を加速させる可能性がある。実際、タンザニアでは Unreserved Forest を含む Open Area での農地拡大や人口流入が、結果として森林保護区における土地紛争を誘発するなど、制度的な保全体制に影響を及ぼしている。持続可能な森林経営を実現するには、制度の整備だけでなく地域社会と調和した実用的なスキームを構築し、それを地域産業の一部として根付かせることが不可欠である。タンザニアの事例は、その困難さと同時に、そうした地域に調和した森林保全スキームの構築というアプローチの可能性を併せて示唆していると言える。

地域に調和した森林経営スキームとは、単に適切な森林管理を行うだけでなく、森林資源のサプライチェーンを確立し、森林管理の成果が地域住民に安定的に還元される構造を含んでいなければならない。そのためには、森林に直接関与しない外部のステークホルダーが、森林の状態や管理の妥当性を第三者的に評価できる仕組みが求められる。ここで重要な役割を果たすのが、森林認証制度である。特に欧州を中心に発展してきた FSC（Forest Stewardship Council）認証は、森林の持続可能性を保証する国際的な評価基準として機能している。

タンザニアにおける先進的な事例として、Mpingo Conservation & Development Initiative（MCDI）の取り組みが挙げられる。同団体は 2004 年に設立され、クラリネットやオーボエといった木管楽器の管体材料として世界的に使用されているタンザニアの代表的木材種アフリカン・ブラックウッド（*Dalbergia melanoxylon*）を森林保全のフラッグシップ種と位置づけ、2009 年にはアフリカで初めて CBFM に対する FSC 認証（FM 認証）を取得した¹³⁾。以降、住民による森林管理と認証を組み合わせた森林経営システムを実装してきた。MCDI は森林法に基づいて村ごとに VLFR を設置し（図 6）、村の住民に森林の法的権利を与えることで、森林からの収益が村に還元される制度を確立した。同時に、住民たちで有期に構成される Village National Resource Committee（VNRC）を組織し、森林資源の管理や木材取引における交渉を担わせた。これにより、従来は村に残ることのなかった伐採収益が村に直接入るようになった。2021 年時点で 23 の農村が本プロジェクトに参画し、約 25 万 ha の森林が対象となっている。

このシステムでは、村評議会（VC）（図 7）と VNRC が伐採収益の 90%を受け取り、両方で 50%ずつを分配する。残りの 10%は MCDI や県に支払われる¹⁴⁾。MCDI



図 6：VLFR の境界部分の看板



図 7：村評議会の開催

は森林にある各樹種の価格設定を行い、2024 年時点でアフリカン・ブラックウッドの原木は 1 m³あたり約 150 USD (約 35 万 TZS) で安定的に取引されている。VC はこの収益を水資源整備、衛生設備、小学校制服の支給、保険制度など公共事業に活用しており、VNRC は森林境界の管理や違法伐採の監視等に充てている。森林の実質的な管理は、FSC 認証の基準に基づき MCDI が担っている。

この MCDI のシステムは、形式としては一般的な CBFM と大きな違いはないが、以下の点で持続可能な住民参加型森林経営の実装モデルとして機能していることが特徴である。第一に、従来は価格交渉の余地がなかった農村が、安定価格で取引できる基盤を得たことは大きい。MCDI との合意文書では「土地の所有権は住民にある」と明記され、村の意思が森林管理や取引に反映される構造が担保されている¹³⁾。第二に、伐採収益が村の社会的インフラや森林保全活動に直接還元されることで、森林保全が地域社会の発展と一体化した。これは、外部団体による寄与ではなく、住民自身が管理し自らの暮らしの改善に森林を活用するという点で意義が大きい。第三に、アフリカン・ブラックウッドという高付加価値材が、世界的な楽器市場と接続されていることにより、伐採木材の安定的な需要が見込める。このように、村による FSC 認証維持と企業による信頼ある資源確保が、持続的な資源供給を求める企業と、森林保全による収益化を求める村との間に Win-Win の関係が成立している。

MCDI による FSC 認証に基づく CBFM は、アフリカン・ブラックウッドの需要先である木管楽器市場、即ちタンザニア国外の市場を対象とした高付加価値材を軸としており、Open Area における農地拡大やタンザニア国内の木材需要とは直接的には結びつかないように見える。しかし、このシステムの意義は、森林を適切に管理することで木材収入を獲得し、その収益を地域コミュニティの福祉や森林保全に再投資するという「ビジネスとしての森林保全」を実現しつつある点にある。実際に MCDI の取り組みに参画する農村の VLFR では、地域住民による森林境界の整備や違法伐採の監視が FSC 認証の下で自主的に制度化されており、森林の秩序的な管理が可能となっている。これは結果として、Open Area からの土地転換や違法伐採による森林減少の抑制となり、国内市場向けの木材種の保全にも繋がる。

PFM はしばしば、ドナー依存型で収益化に至らず停滞する事例が少なくない。特に、地域住民の森林管理権が形式的に付与されていたとしても、収益構造や市場との接続が不十分である場合、PFM は実質的に機能しないという指摘がある¹⁵⁾¹⁶⁾。その点で、市場と連動した森林経営の構築は PFM 成功の鍵であるともいえる。ただし、MCDI の事例においても近年は FSC 認証維持に関する資金確保が難航しており、25 万 ha という広大な森林に対して継続的な資源モニタリングと審査費用が重くのしかかっている。面積を増やさなければ市場要求に応えられる収量が確保できず、伐採圧が高まれば樹木の質が低下するというジレンマも存在する。これは、PFM に制度と市場があったとしても、地域コミュニティ単体での維持には限界があることを示す代表的な制約課題である¹⁷⁾。

MCDI の事例の背景には、特定の市場価値を持つフラッグシップ種の存在と、それを制度的に収益に繋げられるサプライチェーンの存在があった。こうした条件が満たされない地域では、制度・市場構造の導入設計が求められる。住民参加型森林経営の実現には、制度・資源・市場・地域社会の 4 要素が有機的に結びつく必要がある。PFM では、制度が整っていても、市場や収益構造が不十分なまま終わっているケースが多い。単なる「参加」の枠組みを超えて、地域の意思決定、経済的還元、国際的トレーサビリティの確保といった多層的な構造が求められる。森林認証はそれらを接続する役割を果たし得るが、制度の持続には安定した資金と需要先の確保が不可欠である。特定のフラッグシップ種が国際市場で価値を持ち得る場合、その地域では PFM を成功させる土壌が形成されやすい。しかし、そのようなフラッグシップ種を有さない多くの地域においては、代替収益構造の構築や新たな認証制度の簡素化や適切な分権化も今後の検討課題であろう。タンザニアの PFM の実践例は、日本を含む他国にとっても示唆に富んでいる。制度や政策が機能するには、社会と調和した実装可能性が不可欠であることを私たちは改めて学ぶ必要がある。

参考文献

- 1) Ministry of Natural Resources and Tourism of Tanzania, National Forest Policy Implementation Strategy 2018-2028.
- 2) 伊谷樹一, 新しい生態系をつくる, “生態人類学は挑む Session 4 つくる・つかう”, 伊谷樹一編, 京都大学学術出版会, 2023, pp. 165-200.
- 3) United Nations Environment Programme (UNEP), Forestry and Beekeeping Division of the Ministry of natural Resources and Tourism of Tanzania, the Tanzania Forest Conservation Group, The Ecological and Economic Benefits of Forests in Tanzania: A Case for Investing in Natural Forest Management, Nairobi, Kenya, 2015.
- 4) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Global Forest Resources Assessment, United Republic of Tanzania.
- 5) 大仲幸作, ミオンボ林の現状と保全に向けた課題, 海外の森林と林業, 99, 9-15, 2017.
- 6) Miya, M. et al. Drivers of Deforestation and Forest Degradation in Kilwa District. Mpingo Conservation & Development Initiative, Tanzania, 1-34, 2012.
- 7) Nakai, K. et al., African Blackwood (*Dalbergia melanoxylon*) and Other Local Tanzanian Tree Species' Biological Performance against Subterranean Termites and Wood Decay Fungi, *BioResources* **15**(2), 2994-3005, 2020. DOI: 10.15376/biores.15.2.2994-3005
- 8) UNEP-WCMC, Review of Selected *Dalbergia* species and *Guiboutia demeusei*, Cambridge, UK, 2017.
- 9) Doggart, N. et al., Agriculture is the Main Driver of Deforestation in Tanzania, *Environmental Research Letters*, **15**(3), article 034028, 2020.
- 10) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- 11) Oil World, <https://www.oilworld.biz/t/statistics/commodities>.
- 12) Japan International Cooperation Agency, Kaihatsu Management Consulting, Inc., NTC International Co., Ltd., Data Collection Survey on Food Value Chain Development for Food Security and Nutrition Improvement in Sub-Saharan Africa: Final Report, 2020.
- 13) Ball, S. and Makala, J., Making REDD+ Work for Communities and Forests: Three Shared Lessons for Project Designers, International Institute for Environment and Development (IIED) and Mpingo Conservation & Development Initiative (MCDI).
- 14) ヤマハ, 国際協力機構, タンザニア国FSC認証森林からの持続可能な木材調達事業準備調査 (BOPビジネス連携促進) 最終報告書, 2019.
- 15) Blomley, T. et al., Seeing the Wood for the Trees: An Assessment of the Impact of Participatory Forest Management on Forest Condition in Tanzania, *Oryx*, **42**(3), 380-391, 2008. DOI: 10.1017/S0030605308071433
- 16) Lund, J. E. and Treue, T., Are We Getting There? Evidence of Decentralized Forest Management from the Tanzanian Miombo Woodlands, *World Development*, **36**(12), 2780-2800, 2008. DOI: 10.1016/j.worlddev.2008.01.014
- 17) Cerutti, P. O. et al., Social Impacts of the Forest Stewardship Council Certification: An Assessment in the Congo Basin, *CIFOR Occasional Paper* 103.

著者プロフィール



仲井 一志 (Kazushi Nakai)

<略歴> 2007 年九州大学農学部卒業／2009 年京都大学大学院農学研究科博士前期課程修了／同年ヤマハ株式会社入社／2020 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了 博士(農学)／2023 年京都大学生存圏研究所生存圏未来開拓研究センター特定准教授(クロスアポイントメント)、現在に至る。<主な研究テーマ> タンザニアのミオンボ林に自生する希少木材種の生存戦略、住民参加型森林経営モデルの構築と実証、木質材料の開発、など。

人工知能時代の電離圏研究

劉 鵬^{1*}, 横山 竜宏¹

Ionosphere Researches in Artificial Intelligence Era

Peng Liu^{1*} and Tatsuhiko Yokoyama¹

概要

地球電離圏は太陽光によって高層大気の一部が電子とイオンに電離した生存圏の一つの領域であり、太陽地球系結合の影響により様々な宇宙天気現象を生じる。これらの電離圏時空間異常変化が生存圏の電磁気環境に影響し、通信信号の途絶や衛星測位の劣化などの要因となるため、近年益々研究者の注目を引いている。しかし、全世界で数十年間の膨大な観測データを統括的に解析し、さらに予測できる自動システムの開発は現在まで十分とは言えない。一方で 2010 年代初頭からの機械学習技術の発展は目覚ましく、幅広い研究分野に適用され人間社会に大きな影響を与えており、まさに人工知能 (AI) 時代を迎えていると言える。最新の AI 技術を用いて前述の電離圏分野の問題も解決できることが期待される。本総説を通じて、まず電離圏のリモートセンシング手法と機械学習など AI モデルの特徴の二つの視点から概説し、現状のまとめと将来の展望の両面から機械学習技術に基づいた電離圏変動の検出と予測および既存の電離圏モデルの性能向上への応用について紹介する。

1. はじめに

1.1 電離圏のリモートセンシング

地球電離圏は高度によって大気の組成構造が異なるため、電子密度の分布も高度によって大きく変化する領域である。電離圏は高度の低い方から D (60-90 km)、E (90-150 km)、F1 (150-200 km) と F2 (200 km 以上) の四つの領域に分けられる¹⁾。領域ごとに生じる電離圏異常現象を表 1 にそれぞれ示している。ロケットや衛星に搭載した電磁場計²⁾などによる直接観測手法は可能であるが、低層大気で用いられるような定常的な観測は難しく、これらの現象を把握できる電離圏リモートセンシング観測は古くから重要視されている。

表 1 電離圏異常現象の情報

異常現象	発生位置	時間	生存圏影響
突発性電離圏擾乱	D 領域 (60-90 km)	昼間	短波吸収して通信途絶
スプラディック E 層	E 領域 (90-150 km)	夜間	VHF 帯のラジオ混信
赤道プラズマバブル	F 領域 (>150 km)	夜間	電波の異常伝搬
スプレッド F	(同上)	夜間	GPS の誤差
伝搬性電離圏擾乱	(同上)	全日	衛星信号の揺らぎ

既存のリモートセンシング手法は地上観測、衛星観測と地上一衛星組合せ観測の三つ種類に大別で

2025 年 10 月 5 日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 レーダー大気圏科学分野.

* E-mail: liu.peng.7s@kyoto-u.ac.jp

き、観測可能な空間領域も、一次元、二次元、三次元の三種類に分けられる。図1に示しているよく使われる電離圏リモートセンシングの手法について、利用され始めた年とその概要を以下に挙げる：

- 地上観測：イオノゾンデ（1926, 一次元, 短波帯電波の周波数を掃引させながら鉛直方向に送受信する）³⁾、大気光イメージャ（1997, 二次元, 特定波長の大气光を記録する）⁴⁾、後方散乱レーダー（1963, 二次元, 一定の波長を送信し、電子からの非干渉の後方散乱を同じアンテナで受信する）⁵⁾、前方散乱レーダー（2024, 二次元, 電離圏の非干渉の前方散乱をレーダーと離れたアンテナにより受信する）⁶⁾。
- 衛星観測：合成開口レーダー（1999, 三次元, 同じ地表面の二度の観測データの差分から、電離圏の全電子数を求める、レーダーが移動しつつ観測するため三次元のトモグラフィーも可能）⁷⁾、衛星電波掩蔽（1994, 一次元, 低軌道測位衛星による掩蔽観測から電子密度分布を導き出す）⁸⁾。
- 地上一衛星組合せ観測：衛星ビーコン（1957, 一次元, Sputnik I 衛星との通信が初めてである）⁹⁾、GPS 全電子数マップ（1998, 二次元, 測位衛星一地上受信機網の間の伝搬路上の電子数を積分して一定高度に射影する）¹⁰⁾、GPS トモグラフィー（1988, 三次元, 全電子数をセル毎の電子密度として再構成する）¹¹⁾。

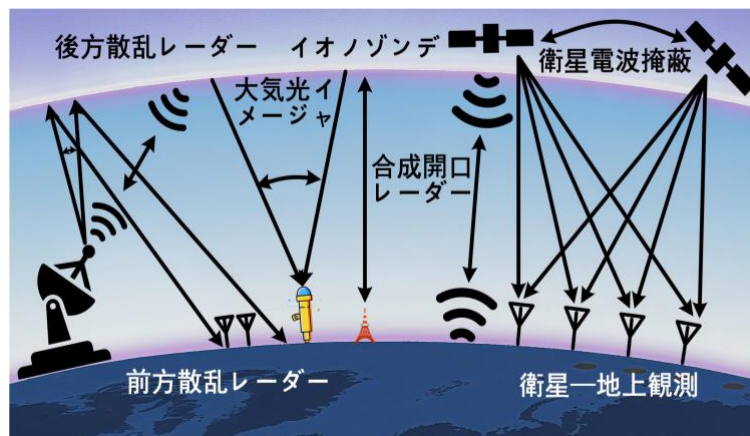


図1：電離圏リモートセンシングの概念図

1.2 人工知能（AI）技術の特徴

前述の電離圏リモートセンシング手法によって全世界で数十年間にわたって蓄積されてきた観測データは、観測地点と時期によってデータ形式は全く異なっており、人が手動で全ての観測データを一つずつ解析することは難しい。観測データ解析が不十分であることによって、電離圏の予報や電離圏モデルの性能向上が妨げられる可能性がある。従って、異なる電離圏観測結果を統一的かつ自動的に解析できる手法の開発が急務である。近年、AI技術の進化がほぼ全ての科学分野に大きな変革をもたらしているが、現時点における電離圏研究分野のAI利用は未だ初期萌芽段階である。AIとは、人間の知能を模倣するシステムの総称である。機械学習はAIを実現するための技術の一つであり、データから抽象的な知識を学習して人間のように意思決定を行うソフトウェアである。今までの電離圏AIモデルは一般に機械学習モデルであり、これらのモデルの主な特徴は下記の通りである：

- ◆ データ駆動性：教師あり学習モデルのトレーニングのためには真値と見なされるデータが存在することが前提である、教師なし学習モデルでもノイズが少ない大量の観測データが必要である。つまり、高品質かつ多様な電離圏観測データが多数利用可能であることが望まれる。
- ◆ ブラックボックス性：従来の電離圏物理モデルと異なり、入力と出力の間に介在する物理過程を解釈することが困難である。
- ◆ 専門特化性：通常のAIモデルは特定のタスクとデータに特化しており、同種の多地点のデータを利用する場合でも転移学習による再訓練を必要とする。

2. 人工知能による電離圏現象の検出

1.1 節に挙げた電離圏リモートセンシング手法について、観測データの次元数は手法の次元数より大きいまたは等しくなる、つまり一次元観測手法は数値系列データ又は画像データ、二次元観測手法は画像データを出力する。例として、一次元の観測手法である衛星ビーコンとイオノゾンデのデータ

をそれぞれ図 2 に示す。前者は視線方向に積分された一次元の全電子数データであり、後者は送信周波数と反射高度の二次元で表現されたデータである。二次元の観測手法、例えば GPS 全電子数マップの出力データは経度と緯度の二次元全電子数の位置画像である¹²⁾。

電離圏観測データを人工知能モデルで解析するとき、色々な AI モデルからデータの次元数と出力内容に基づいて適当な技術を選ぶことが大切である。一般的には、観測データに対する二値の分類判定のみならず、位置や強度の情報も読み取りたい。これを実現するために、系列データに対してはトランスデューサ、画像データに対してはセグメンテーションという AI モデルが使われる¹³⁾。モデルの構造はそれぞれ図 2 の黄色と青色の部分に示している。特徴抽出ネットワークと目標領域提案ネットワークがモデル間で共通の部分である。

1.2 節に挙げたように人工知能はデータ科学であるため、教師あり学習の一つである検出 AI モデルの訓練には手動でラベル付けを行った真値データ（教師データ）が不可欠である。系列と画像データの中身にそれぞれのすべての変化傾向と図形的な特徴を目視で判断し、ラベルを付けることで教師データを準備する。数千対の教師データセットで訓練した AI モデルを参照することで、新たなデータに対して人間と同様の結論を出すことが可能となる。図 2 に、上からそれぞれイオノグラムの異なる電離圏エコーの識別、全電子数差分マップの中規模伝搬性電離圏擾乱の位置検出と一次元データの変動パターンの同定の概念図を示した¹⁰⁾。

一般に画像データの AI の検出結果は同じサイズの画像データであるため、画像座標系から実際の地球座標系へ変換し、電離圏特性値の導出が必要となる場合もある。図 2 に示すように、我々の最近の研究成果であるイオノグラムの自動検出技術を用いることで、東・東南アジアでの電離圏パラメータの読取と日本上空の電離圏伝搬性擾乱の特性値の計算が、大量のデータに対して適用することが可能となる¹⁾。

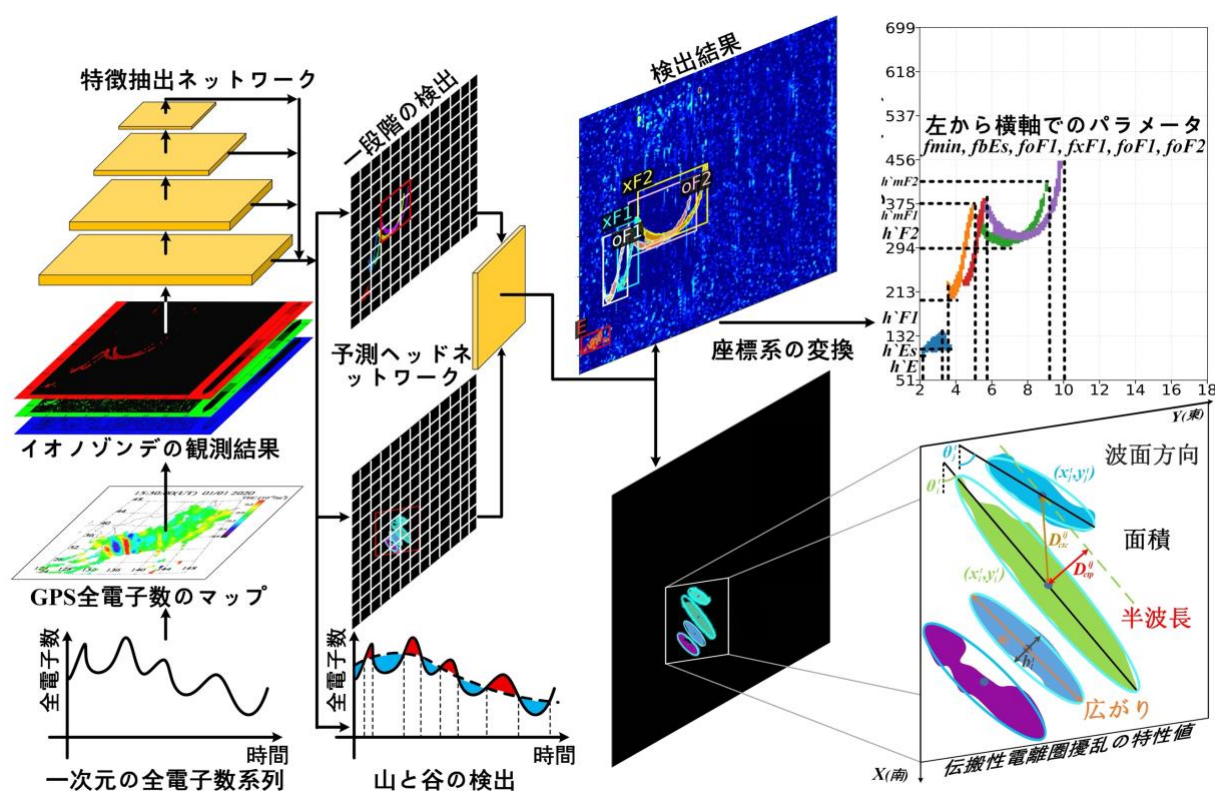


図 2：人工知能で電離圏信号の検出の流れ

3. 人工知能による電離圏現象の予測

人工知能による予測は検出と違い、検出タスクでは必ず手動でラベル付けをした真値の教師データが必要だが、予測タスクでは一般に観測データを真値とする教師なし学習であり、過去のデータに隠された規則を探り出し将来の観測データを短時間で予測することを目的とする。AIモデルの入力と出力のデータのサイズは事前に設定した上で、観測データの特定の時刻を基準点とし、それ以前と以降の一定の時間帯をそれぞれ過去既知の入力と将来予測の出力の系列データとして学習する。基準とする時刻を移動することで大量の訓練データセットが利用可能となる。人工知能での電離圏予測の精度と時間・空間分解能の上限は、観測データ、つまり訓練用のデータセットに依存して決まる。

人工知能予測モデルについて、一次元の数値観測データと二次元の画像観測データを予測するモデルは、それぞれ時間系列予測モデルと時空間系列予測モデルと呼ばれる。時空間系列予測モデルは時間系列予測モデルのように時間ステップ間の関係を見つけ出すのみならず、同じ時間ステップでの空間情報も学習できるため、二次元の画像データの予測タスクにおいてより高い精度が見込まれる。既存の系列予測モデルは主に再帰型ニューラルネットワーク (RNN)、畳み込みニューラルネットワーク (CNN)、トランスフォーマーの三種類¹⁰⁾又は複数種類の組合せである。三種類の AI ネットワークの概念図はそれぞれ図 3a、3b と 3c に示している。初めの時間系列予測モデルは過去の出力を次の時間ステップに再び入力とするフィードバックの仕様がある RNN の一つ、長短期記憶ネットワーク (LSTM) である。その後 LSTM に畳み込み演算を取り入れた畳み込み LSTM モデルが時空間系列予測の研究分野を切り開いた。我々の最近の論文¹⁴⁾において、これまでに提案された様々な予測モデルによる電離圏全電子数の予測性能を調査した。全電子数の観測データに加えて、時間、位置、太陽と地磁気活動指数を併せて入力パラメータとして与えた場合、予測誤差を最大 15% 抑圧することが可能であり、将来の四日間の平均絶対値誤差は一番低い場合には 0.94~2.63 全電子数ユニットの範囲であった。CNN は局所的な畳み込み窓の移動によりデータの特徴を抽出して予測をする。一方、トランスフォーマーモデルは新しい注意機構を経由して全体のデータを学習するため、より高い精度で予測が可能となる。

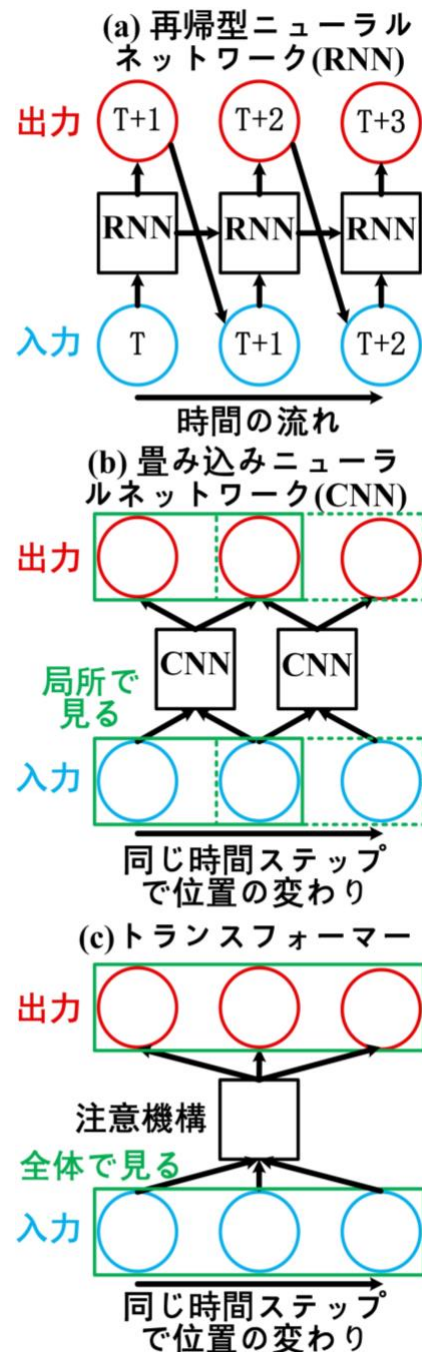


図 3 : AI モデルの概念図

4. 人工知能による電離圏モデルの性能向上

電離圏を把握するための手法として、実世界でのリモートセンシング観測のほかに、仮想環境における数値モデルが挙げられる。電離圏モデルは物理モデルと経験モデルの二種類に大別できる。物理的なモデルは、電磁場、中性大気とプラズマの運動量保存、エネルギー、流体力学の方方程式を解いて各流体の三次元分布を計算する¹⁵⁾。1.2 節で述べた AI モデルでは、ブラックボックス性があるため現状では物理方程式を用いた問題解決過程の学習は不可能である。しかし、近年提案された物理法則に

基づくニューラルネットワーク(PINN)は微分方程式で表される物理法則を AI モデルの損失関数に加えることで、物理規則に従った解を導出できるモデルである¹⁶⁾、このような解釈性の高いモデルを電離圏分野へ応用することが期待されている。

代表的な電離圏経験モデルである国際参照電離圏モデル (IRI) は、観測された電離圏プロファイルを元に経験的な関数曲線を近似する¹⁷⁾。しかし、全世界の電離圏観測設備の拠点の数とデータ量が増えている背景を考えると、経験モデルはデータの同化と記憶の機能がないためデータを効率的に利用できていない。併せて、電離圏に多岐な宇宙天気の影響現象が起きるため、経験モデルの限られたパラメータで複雑な現実の電離圏を表現させることは難しい。一方、AI モデルでは人間が認識できないデータのパターンに対しても反応し、過去の記憶能力に基づいて推論できることが知られている。技術の発展に伴い、AI モデルの学習調整できるパラメータの数は急激に増加している。例えば、最近の大規模 AI 言語トランスフォーマーモデル ChatGPT のパラメータの数は 1.7 兆 ($\times 10^{12}$) である¹⁸⁾。このような大量のパラメータは言語モデル等の性能向上にとっては有益であるが、電離圏などの自然科学分野への応用においては、どの程度のパラメータ数が適切であるかは未知数であるため、さらなる精度と時空間分解能の向上に必要なパラメータ数についての定量的な議論が今後望まれるところである。

5. おわりに

本稿では、まず第一節で研究分野の背景である地球電離圏のリモートセンシング手法と AI の技術の特徴を簡潔に紹介した。第二節と第三節で異なるリモートセンシング手法の観測データに適用できる人工知能の検出性能と予測技術の現状を論じた。第四節で電離圏分野ではこれまで利用されてこなかった複合的なモデルの発展方向性の展望を述べた。以上のように、AI 技術と電離圏科学の結合は生存圏の電磁気環境と衛星通信測位の高品質化などの実世界における工学的応用の新しい時代を切り拓ける可能性を秘めていると言える。

参考文献

- 1) Liu, Peng. Development of Automatic Detection and Prediction Models for Ionospheric Spatiotemporal Variation Based on Deep Learning, 京都大学, 博士(情報学), 甲第26146号, <https://doi.org/10.14989/doctor.k26146>, 2025.
- 2) Lühr, H., S. Maus, M. Rother, and D. Cooke, First in-situ observation of night-time F region currents with the CHAMP satellite, *Geophysical Research Letter*, 29(10), <https://doi.org/10.1029/2001GL013845>, 2002.
- 3) Breit, G., & Tuve, M. A., A test of the existence of the conducting layer. *Physical Review*, 28(3), 554–575. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.554>, 1926.
- 4) Mendillo, M., Baumgardner, J., Nottingham, D., Aarons, J., Reinisch, B., Scali, J., & Kelley, M., Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300-Å images from the Arecibo observatory. *Journal of Geophysical Research*, 102(A4), 7331–7343. <https://doi.org/10.1029/96JA02786>, 1997.
- 5) Kato, S., T. Ogawa, T. Tsuda, T. Sato, I. Kimura, and S. Fukao, The Middle and Upper Atmosphere Radar: First Results Using a Partial System, *Radio Science*, 19, 1475–1484, <https://doi.org/10.1029/RS019i006p01475>, 1984.
- 6) Yue, X., Ning, B., Jin, L., Ding, F., Ke, C., Wang, J., et al., The Sanya incoherent scatter radar tristatic system and initial experiments. *Space Weather*, 22, e2024SW003963. <https://doi.org/10.1029/2024SW003963>, 2024.
- 7) Ishimaru, A., Y. Kuga, J. Liu, Y. Kim, and A. Freeman (1999), Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz, *Radio Science*, 34, 257–268, <https://doi.org/10.1029/1998RS900021>, 1999.
- 8) E. R. Kursinski et al., Initial Results of Radio Occultation Observations of Earth's Atmosphere Using the Global Positioning System, *Science*, 271, 1107–1110, <https://doi.org/10.1126/science.271.5252.1107>, 1996.
- 9) Jacobson, A. R., Carlos, R. C., Massey, R. S., & Wu, G., Observations of traveling ionospheric disturbances with a satellite-beacon radio interferometer: Seasonal and local time behavior. *Journal of Geophysical Research*, 100(A2), 1653–1665. <https://doi.org/10.1029/94JA02663>, 1995.

- 10) Liu, P., Yokoyama, T., Fu, W., & Yamamoto, M., Statistical analysis of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Japan based on deep learning instance segmentation. *Space Weather*, 20, e2022SW003151, <https://doi.org/10.1029/2022SW003151>, 2022.
- 11) Austen, J. R., S. J. Franke, and C. H. Liu, Ionospheric imaging using computerized tomography, *Radio Science*, 23, 299–307, <https://doi.org/10.1029/RS023i003p00299>, 1988.
- 12) Fu, W., Yokoyama, T., Ssessanga, N. et al. On using a double-thin-shell approach and TEC perturbation component to sound night-time mid-latitude E–F coupling. *Earth Planets Space*, 74, 83, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01639-w>, 2022.
- 13) K. He, G. Gkioxari, P. Dollár and R. Girshick, Mask R-CNN, *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 2980–2988, <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.322>, 2017.
- 14) Liu, P., Yokoyama, T., Sori, T., & Yamamoto, M., Channel mixer layer: Multimodal fusion toward machine reasoning for spatiotemporal predictive learning of ionospheric total electron content. *Space Weather*, 22, e2024SW004121, <https://doi.org/10.1029/2024SW004121>, 2024
- 15) Yokoyama, T., D. L. Hysell, Y. Otsuka, and M. Yamamoto, Three-dimensional simulation of the coupled Perkins and Es-layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 114, A03308, <https://doi.org/10.1029/2008JA013789>, 2009.
- 16) M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis, Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, Volume 378, Pages 686–707, ISSN 0021-9991, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>, 2019.
- 17) Bilitza, D., Pezzopane, M., Truhlik, V., Altadill, D., Reinisch, B. W., & Pignalberi, A., The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark. *Reviews of Geophysics*, 60, e2022RG000792. <https://doi.org/10.1029/2022RG000792>, 2022.
- 18) Radford, A., & Narasimhan, K., Improving language understanding by generative pre-training. *OpenAI Research*, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:49313245>, 2018.

著者プロフィール



劉 鵬 (Peng Liu)

＜略歴＞ 2019 年中国の西安交通大学工学部機械工学学科卒業／2022 年京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻修士課程修了／2025 年京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻博士後期課程修了(博士(情報学))／同年京都大学生存圏研究所ミッション専攻研究員、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞電離圏分野の多岐の宇宙天気現象に応用できる高精度で幅広く知能的な自動処理システムの開発。＜趣味＞バスケットボール、サッカー、テニス、卓球とバドミントン。



横山 竜宏 (Tatsuhiko Yokoyama)

＜略歴＞ 1999 年京都大学工学部電気電子工学科卒業／2004 年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了(博士(情報学))／京都大学生存圏研究所、名古屋大学太陽地球環境研究所、米国コーネル大学、NASA ゴダード宇宙飛行センター、情報通信研究機構において研究に従事／2018 年京都大学生存圏研究所准教授、現在に至る。＜研究テーマ＞電離圏擾乱現象の観測とシミュレーション。＜趣味など＞将棋、麻雀、国内旅行。

侵略的外来植物由来の二次代謝産物が駆動する植物-根圏微生物間 相互作用

中村 直人^{1*}

Chemical communication by invasive alien plants and rhizosphere microbiome

Naoto Nakamura^{1*}

概要

外来植物は、根から滲出する特化二次代謝産物 (plant specialized metabolites : PSMs) を介して根圏微生物群集を改変し、特定微生物の集積や排除を行うことで、自身の侵略に有利な植物-土壌フィードバックを形成している可能性がある。農作物やモデル植物では二次代謝産物が根圏群集の構造と機能を方向づけることが多くの研究で示されてきたが、侵略生態学における根圏二次代謝産物の役割に着目した研究は少ない。本総説では、外来植物であるマンリョウ (*Ardisia crenata*) の事例を中心に、外来植物由来の二次代謝産物が根圏微生物組成を変化させるメカニズムやその生態学的影響波及効果について概説する。

1. はじめに

侵略的外来植物は被侵略地の生態系サービスを低下させるだけでなく、農業生産、人間の健康、にまで深刻な影響を与える。実際、侵略種による損失やその管理にかかる費用は膨大であり、全世界で年間 268 億ドルに達すると推定されている¹⁾。この問題は今後の国際貿易の拡大や気候変動に伴う種移動の加速とともに一層顕在化すると予測されている²⁾。外来植物とは人為的な移動によって本来の分布域を離れ新たな環境に定着した植物種を指す。世界では 13,000 種以上の植物が帰化しており³⁾、その大半は問題を引き起こさないものの、一部は侵略的 (invasive) となって高密度な個体群を形成する⁴⁾。侵略生態学における中心的な課題の一つは、なぜ一部の外来種だけが侵略に成功するのかを明らかにすることにある。この問題は、「同じ種が異なる土地で、なぜ異なる個体群動態を示すのか」という問いに帰着する。いまだ十分に解明されていないが、こうした問いに取り組むことは、侵略生態学を超えて種分布の変化や将来的な気候変動下での植物の動態予測など、より広い生態学的知見につながると期待されている⁵⁾。

植物が侵略に成功するメカニズムについては、いくつかの主要な仮説が提案されている。近年では、次世代シーケンサーと解析技術の発展により、土壌や空気中に存在する微生物が植物の生育や個体群動態に与える影響が広く認識されるようになってきている。こうした背景から、外来植物の侵略成功メカニズムを植物-微生物相互作用の観点から捉え直す考え方も広がっている⁶⁾。例えば天敵となり得る病原菌から逃れることや、侵略地で新たな共生菌と関係を構築することは、外来植物の定着や拡大を促進する重要なプロセスとみなされている。すなわち、外来植物がどのような微生物と相互作用を築き、その関係が原産地と侵略地でどのように異なるのかを理解することは、侵略過程を理解するうえで一つの重要な手がかりとなる。さらに、このような共生菌・病原菌だけでな

2025 年 10 月 10 日受理。

¹ 〒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: nakamura.naoto.i66@kyoto-u.jp

く、土壌微生物群集を選択的制御することで、自身の成長や競争力を間接的に高めている可能性がある⁷⁾。植物-微生物間相互作用を捉える視点のひとつとして、根圏での化学的コミュニケーションに注目が集まっている。植物は根から多様な化合物を滲出しており、それらが土壌微生物との相互作用を媒介している。特に、二次代謝産物 (plant specialized metabolites : PSMs) の根圏への滲出は、微生物群集の選択的制御に関与することが明らかになりつつある⁸⁹⁾。その結果として、植物自身の成長や生存に跳ね返るという生態系内フィードバックが形成される¹⁰⁾。こうしたプロセスは、数十年単位の短い時間スケールにおいても、進化的に変化する可能性が指摘されている。たとえば、侵略的外来植物は、侵略地での選択圧のもと、生産する二次代謝産物の量や質を変化させることがある¹¹⁾。この現象は原生地と侵略地間における捕食者の違いに対する適応進化という点からも説明されるが、根圏ケミカルコミュニケーションの視点から見れば、単なる捕食者に対応した防御の質・量の変化ではなく、微生物との関係そのものを再編成し、植物-土壌フィードバックをも左右するプロセスであるとも考えられる。本総説では、外来植物由来の根圏 PSMs が微生物群集に与える影響とその研究展望について概説する。

2. 植物が産生する二次代謝産物による根圏微生物叢への影響

植物は、根を介して土壌中の微生物と絶えず相互作用しながら生活している。根と土壌が接する空間を指す「根圏」では、植物由来の多様な化合物 (一次代謝産物や二次代謝産物) を介した植物-微生物間の相互作用が生じる。根圏の微生物は、宿主である植物に害を及ぼす病原菌から生育を促進する共生菌まで機能的に多様であり、根圏微生物群集の形成機構を理解することは植物生理学および生態学において極めて重要である。このような植物-微生物間の根圏ケミカルコミュニケーションは、病害抑制や生育促進など、植物の成長と健康に多面的な影響を与える¹²⁻¹⁴⁾。そのメカニズムとして、植物が根から滲出する二次代謝産物 (plant specialized metabolites : PSMs) は、根圏微生物群集の組成を変える重要な因子であることが知られている¹⁵⁾。フラボノイド、サポニン、テルペノイド、アルカロイドなどは代表的な PSMs であり、根圏において微生物の誘引や忌避、共生誘導といった機能を持つことが明らかになっている (図 1)。

例えばトマトの根滲出物に含まれるトマチンは、根圏で *Sphingomonas* 属の細菌の集積を促し、集積した菌がトマチンを分解・無毒化する¹⁶⁾。また、Huang et al. (2019)はシロイヌナズナ由来のトリテルペンが根圏微生物群集組成を制御していることを示している¹⁷⁾。このような PSMs の作用は一方向的なものではなく、植物-微生物間、さらには微生物間の多対多のネットワーク的相互作用を形成している。ある一つの化合物が複数の菌種に作用することもあれば、ある微生物によって分解された化合物がさらに他の微生物と相互作用する場合もある¹⁸⁾。たとえば、Comamonadaceae 科の細菌は複数種のフラボノイドに対して高い代謝活性を示し、*Phenylobacterium* 属の細菌や *Sphingobium* 属の細菌は多様なサポニンに共通して応答することが報告されている¹⁹⁾。さらに、植物-微生物間のケミカルコミュニケーションは、微生物群集構造の変化を介して、植物自身の成長にも影響することが近年の研究により分かってきた^{10,20,21)}。

3. 外来植物による二次代謝産物滲出

農作物やモデル植物では根圏における PSMs の役割に関する知見が蓄積してきた一方、侵略生態学で根圏の PSMs に焦点を当てた実証は限られている。しかしながら外来植物においては、PSMs が土壌微生物群集を改変し、その結果として生態系サービスに影響が及び得る。さらに、その影響は植物-土壌フィードバックを介して定着性や範囲拡大へ波及し得る。したがって、外来植物における根圏 PSMs の滲出の有無・量・組成を把握することが、侵略植物が生態系サービスに与える影響の評価や、その個体群動態を予測する上で必要となる。外来植物の根圏から滲出する PSMs は多様であり、たとえばオオブタクサ (*Ambrosia trifida*) のセスキテルペン²²⁾、*Centaurea*

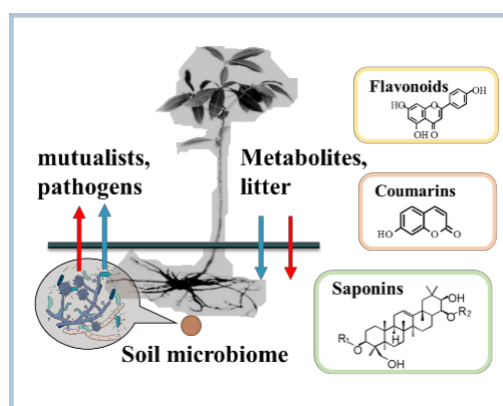


図 1 根圏 PSMs を介した植物-微生物間相互作用

maculosa (ヤマヤグルマギク)の(-)-カテキンなどが報告されている²³⁾。また、日本原産であり北米で侵略的外来種であるマンリョウ (*Ardisia crenata*) を対象とした中村らの研究では、トリテルペノイドサポニンである *ardisiacrispin A* と *ardisiacrispin B* が、マンリョウの生育ステージに依存して根圏に滲出していることが示された²⁴⁾ (図2)。さらに、外来植物では、原産地と侵略地の個体群間で生産される PSMs の組成や濃度が異なるとの報告がある²⁵⁾。すなわち、根圏 PSMs の量や組成は植物種による差に加え、時空間的にも変動し得る。今後は、生育段階を考慮しつつ、多地域・多個体群で根圏 PSMs の滲出を比較することが求められる。

4. 外来植物由来の PSMs が根圏微生物群集に

与える影響

外来植物は、根から滲出される特化代謝産物 (PSMs) を介して根圏微生物群集を化学的に選抜する。この選抜には、特定微生物の富化と排除の双方が含まれる。たとえば、北米で侵略的となるガーリックマスタード (*Alliaria petiolata*) では、根滲出由来のグルコシノレートとその分解産物がアーバスキュラー菌根菌を抑制することが報告されている²⁶⁾。一方、中国原産で各地で侵略的となるナンキンハゼ (*Triadica sebifera*) では、侵略地個体群で根滲出のフラボノイド濃度が高く、それがアーバスキュラー菌根菌の誘引・定着の増大と結びつくことが示されている^{27,28)}。これらは、外来植物の PSMs が根圏で微生物群集の構成を方向づけ得ることを示す対照例である。ただし、「根圏における PSMs の蓄積」と「特定微生物の富化あるいは抑制」の因果関係を野外実験のみから推測することはしばしば困難である。中村らは、純品の標品を土壌に加え、対照区と比較する標品添加試験 (代謝産物添加試験) を用い、外来植物であるマンリョウ (*Ardisia crenata*) 由来のトリテルペノイドサポニン (*ardisiacrispin A/B*) が特定の細菌属を富化させることを示した (図3)。

さらに、中村らは野外調査と代謝産物添加試験を組み合わせ、野外で観察される生育段階の変化に伴う根圏微生物群集の変化の方向 (特定属の富化/減少) が、サポニン (*ardisiacrispin A/B*) 添加試験で得られる群集応答の方向と一致することを示した。この結果は、自然生態系においてもサポニン滲出が土壌の微生物組成を選択的に変化させ得ることを示唆する。ダイズ・トマト・タバコに関する既往研究では、PSM により富化された土壌微生物に着目することで、PSMs 分解の経路や関連遺伝子が同定されている^{16,29,30)}。同様に、外来植物由来の PSMs によって集積された微生物も、PSMs の分解・資化に関与している可能性がある。今後の研究として、PSMs により富化された微生物が周囲の微生物群集や宿主植物の生長にいかに関与するかを明らかにすることは、外来植物-微

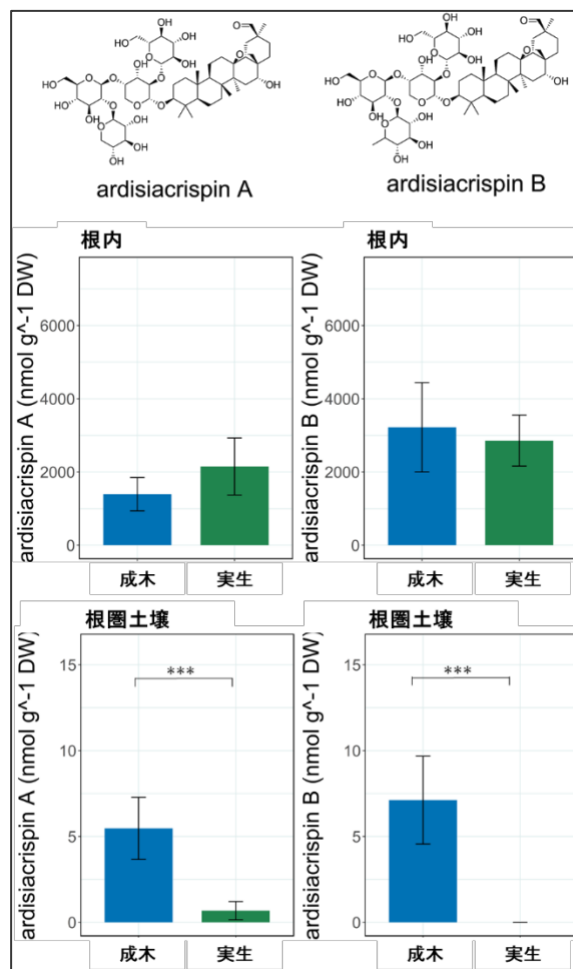


図2 マンリョウ根圏のサポニン2種の構造と、根圏及び根内におけるそれぞれのサポニン濃度

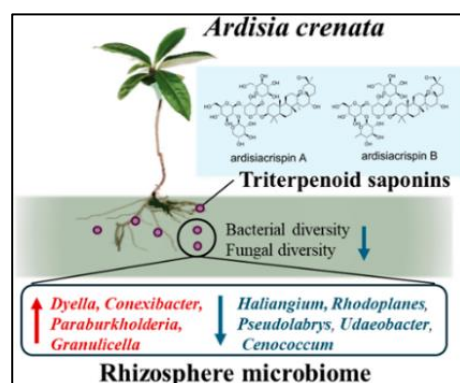


図3 マンリョウ根圏のサポニンによる微生物群集変化

生物相互作用を制御するフィードバック機構の解明に資するだろう³¹⁾。

5. おわりに

外来種は根圏から二次代謝産物を滲出することにより、相互作用する微生物群集組成を制御していることが明らかになってきた。二次代謝産物滲出の形質が原生地-侵略地個体群間で変化することを考慮すると、自然選択により根圏ケミカルコミュニケーションがどのように変化していくかを明らかにすることは、侵略を駆動するような植物-土壌フィードバックの機構を解明するための重要なステップである。また、特定の二次代謝産物によって富化される微生物に焦点を当てることにより、根圏二次代謝産物の代謝が植物-微生物間相互作用に影響を与える具体的なメカニズムを明らかにできる可能性がある。

参考文献

- 1) Diagne, C. *et al.* High and rising economic costs of biological invasions worldwide. *Nature* **592**, 571–576 (2021).
- 2) Early, R. *et al.* Global threats from invasive alien species in the twenty-first century and national response capacities. *Nat. Commun.* **7**, (2016).
- 3) Van Kleunen, M., Bossdorf, O. & Dawson, W. The ecology and evolution of alien plants. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **49**, 25–47 (2018).
- 4) Bacher, S. *et al.* A proposed unified framework for biological invasions. **26**, 333–339 (2011).
- 5) Ramirez, K. S. *et al.* Range-expansion effects on the belowground plant microbiome. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 604–611 (2019).
- 6) Dawson, W. & Schrama, M. Identifying the role of soil microbes in plant invasions. *J. Ecol.* **104**, 1211–1218 (2016).
- 7) Nakamura, N., Toju, H. & Kitajima, K. Leaf, root, and soil microbiomes of an invasive plant, *Ardisia crenata*, differ between its native and exotic ranges. *Front. Microbiol.* **14**, 1–13 (2023).
- 8) Massalha, H., Korenblum, E., Tholl, D. & Aharoni, A. Small molecules below-ground: the role of specialized metabolites in the rhizosphere. *Plant J.* **90**, 788–807 (2017).
- 9) Pang, Z. *et al.* Linking Plant Secondary Metabolites and Plant Microbiomes: A Review. *Front. Plant Sci.* **12**, (2021).
- 10) Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T. & Singh, B. K. Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nat. Rev. Microbiol.* **18**, (2020).
- 11) Callaway, R. M., Lucero, J. E., Hierro, J. L. & Lortie, C. J. The EICA is dead? Long live the EICA! *Ecol. Lett.* 2289–2302 (2022). doi:10.1111/ele.14088
- 12) Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J. & Bakker, P. A. H. M. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends Plant Sci.* **17**, 478–486 (2012).
- 13) Hacquard, S. *et al.* Survival trade-offs in plant roots during colonization by closely related beneficial and pathogenic fungi. *Nat. Commun.* **7**, (2016).
- 14) Finkel, O. M., Castrillo, G., Herrera Paredes, S., Salas González, I. & Dangl, J. L. Understanding and exploiting plant beneficial microbes. *Curr. Opin. Plant Biol.* **38**, 155–163 (2017).
- 15) Sugiyama, A. Application of plant specialized metabolites to modulate soil microbiota. *Plant Biotechnol.* **40**, 123–133 (2023).
- 16) Nakayasu, M. *et al.* Tomato root-associated *Sphingobium* harbors genes for catabolizing toxic steroidal glycoalkaloids. *MBio* **14**, e0059923 (2023).
- 17) Huang, A. C. *et al.* A specialized metabolic network selectively modulates *Arabidopsis* root microbiota. *Science (80-.)*. **364**, (2019).
- 18) Wang, C. M., Li, T. C., Jhan, Y. L., Weng, J. H. & Chou, C. H. The Impact of microbial biotransformation of catechin in enhancing the allelopathic effects of *Rhododendron formosanum*. *PLoS One* **8**, 1–14 (2013).
- 19) Nakayasu, M., Yamazaki, S., Aoki, Y., Yazaki, K. & Sugiyama, A. Triterpenoid and steroidal saponins differentially influence soil bacterial genera. *Plants* **10**, 1–13 (2021).
- 20) Poppeliers, S. W., Sánchez-Gil, J. J. & de Jonge, R. Microbes to support plant health: understanding bioinoculant success in complex conditions. *Curr. Opin. Microbiol.* **73**, 102286 (2023).
- 21) Gfeller, V. *et al.* Plant secondary metabolite-dependent plant-soil feedbacks can improve crop yield in the field. *Elife* **12**, 1–20 (2023).

- 22) Li, H., Kang, Z., Hua, J., Feng, Y. & Luo, S. Root exudate sesquiterpenoids from the invasive weed *Ambrosia trifida* regulate rhizospheric Proteobacteria. *Sci. Total Environ.* **834**, 155263 (2022).
- 23) Callaway, R. M. & Ridenour, W. M. Novel weapons: Invasive success and the evolution of increased competitive ability. *Front. Ecol. Environ.* **2**, 436–443 (2004).
- 24) Nakamura, N. & Sugiyama, A. Developmental stage-specific triterpenoid saponin accumulations in *Ardisia crenata* rhizosphere and its influence on rhizosphere microbial communities. *Plant Biotechnol. advpub*, (2025).
- 25) Macel, M., Vos, R. C. H. De, Jansen, J. J., Putten, W. H. Van Der & Dam, N. M. Van. Novel chemistry of invasive plants : exotic species have more unique metabolomic profiles than native congeners. 2777–2786 (2014). doi:10.1002/ece3.1132
- 26) Roche, M. D. *et al.* Invasion-mediated mutualism disruption is evident across heterogeneous environmental conditions and varying invasion intensities. *Ecography (Cop.)*. **2023**, 1–11 (2023).
- 27) Tian, B. *et al.* Gene expression controlling signalling molecules within mutualistic associations of an invasive plant: An evolutionary perspective. *J. Ecol.* **112**, 1818–1831 (2024).
- 28) Tian, J. *et al.* Soil bacteria with distinct diversity and functions mediates the soil nutrients after introducing leguminous shrub in desert ecosystems. *Glob. Ecol. Conserv.* **31**, e01841 (2021).
- 29) Aoki, N. *et al.* An isoflavone catabolism gene cluster underlying interkingdom interactions in the soybean rhizosphere. *ISME Commun.* **4**, (2024).
- 30) Shimasaki, T. *et al.* Tobacco Root Endophytic *Arthrobacter* Harbors Genomic Features Enabling the Catabolism of Host-Specific Plant Specialized Metabolites. *MBio* **12**, 10.1128/mbio.00846-21 (2021).
- 31) Foster, K. R., Schluter, J., Coyte, K. Z. & Rakoff-Nahoum, S. The evolution of the host microbiome as an ecosystem on a leash. *Nature* **548**, 43–51 (2017).

ファインバブルを巡る国際標準化

上田 義勝^{1*}, 仲上 祐斗¹,

桑島 修一郎¹

International Standards and Fine Bubbles

Yoshikatsu Ueda^{1*}, Yuto Nakagami¹, Shuichiro Kuwajima¹

概要

小さな泡（ファインバブル等）に関する研究について、昨年度に生存圏研究所オンライン公開講座として開催した。このセミナーでは一般的な内容紹介とともに、小さな泡の効果に懐疑的な見方がある点も紹介した。現在、ファインバブルとして定義した正確な情報公開のため、ISO（国際標準化機構）の技術委員会 TC281 において国際標準化の議論が進められている。この委員会ではファインバブルの正確な生成方法や計測手法の規格化が検討されており、世界中の研究者・技術者が連携して科学的エビデンスに基づく標準を設定することで、その信頼性を高めている。本稿では、小さな泡が正しく用いられるための指標としての標準化について、わかりやすく紹介・解説する。

1. 標準化とは（国際標準化）

標準化とは、一般的には国際標準化と言われており、国や組織の枠を超えて広く採用される共通の規格や基準を定めている。日常気にせず使っている単位系（kg, m など）から、ネジなどの大きさの単位まで、標準化され規格として定められているものは意外に多い。また、単位だけではなく、その測定方法や性能評価の手順などについても国際的な合意を形成し文書化しており、異なる国や分野の間で統一的に利用できる点で非常に重要となる。この国際標準を策定し、維持することで、製品や技術の互換性・信頼性が確保され、貿易や技術協力が行いやすくなる利点がある。また、科学技術分野では研究者間で共通の尺度を持てるため、知見の比較や統合が容易になる。

代表的な国際標準化団体として ISO（International Standardization Organization 国際標準化機構 1,2)) がある。ISO は政府間ではなく各国の標準化団体の参加による非政府組織であるが、その規格は世界中で広く参照されている。例えば品質管理の ISO 9001 や環境管理の ISO 14001 など産業全般の標準も ISO が策定している基準である。ファインバブル技術委員会（ISO/TC 2813)) は ISO の枠組みの一つとして設立された。ISO では加盟各国から専門家が集まり、合意に基づいて規格を作成している。ファインバブル分野の ISO/TC 281 は 2013 年に日本の提案で設立され、現在、幹事国を日本（経済産業省所管の JISC）が務めて主導的役割を果たしている。このように ISO は製造業から先端技術まで幅広

2025 年 9 月 19 日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏未来開拓研究センター

* E-mail: yueda@rishi.kyoto-u.ac.jp

い領域で国際標準を策定する中心的な存在となっている。

他の標準化機関の例として、URSI（国際電波科学連合）のように学術団体が中心となって国際的な取り決めや基準作りに関与するケースもある。URSI は無線通信や電磁波科学の分野で各国の研究者を結集した国際学術連合であり、電波や電子工学に関する世界共通の指針策定やガイドライン作成にも貢献している。例えば、電磁波の計測法や電波天文での周波数割当など、学術研究と実用の双方に関わる標準づくりに学術コミュニティとして関与している。このような団体は、正式な標準規格そのものを発行するわけではないが、各国の研究を調整し共通のモデルや手法を推奨することで事実上の国際標準形成に寄与している。さらに、IEEE（米国電気電子学会）も国際標準化で重要な役割を担う組織である。IEEE は世界最大級の技術者団体であり、その下部組織 IEEE Standards Association (IEEE-SA) を通じて通信や IT 分野を中心に多数の標準規格を制定している。IEEE の制定する規格は各国政府が公式に承認した「国際規格」ではないものの、例えば無線 LAN の IEEE 802.11 シリーズ（Wi-Fi 規格）や浮動小数点演算の IEEE 754 規格などは事実上の世界標準として広く利用されている。IEEE 標準策定には世界中の技術専門家が参加しており、そのプロセスは公開かつコンセンサス重視で進められている。このように ISO による標準だけでなく、IEEE のような民間主導の「事実上の国際標準」も実社会では大きな影響力を持っている。

以上のように、国際標準の決定方法には様々な形態があるが、共通するのは国境を越えて通用する信頼性の高い基準という点である。国際標準によって、世界の人々が共通の言語（例えば単位や用語）や物差し（試験法や性能基準）を手にするることになり、それが技術の普及や研究の発展を下支えしている。

2. 国際標準の活用

2.1 産業界における国際標準活用



図 1. 学術的役割としての生存圏標準化戦略ユニット概念図

今日では、グローバルな市場で製品やサービスを提供する企業にとって、国際標準への適合はほぼ必須である。例えば、自動車産業では各国の安全基準や環境規制が国際規格に基づくことが多く、対応していなければ市場参入ができない。また電機・ICT 産業でも、通信プロトコルやデータフォーマットが標準化されていれば異なるメーカーの製品同士が問題なく連携できる。つまり、製品の互換性・市場適合性を確保する場面では国際標準が不可欠となっている。特に中小企業にとって、自社技術が国際標準に適合していることは海外展開時の信用となり、市場参入のハードルを下げる効果がある。実際、日本のファインバブル技術市場は中堅・中小企業の優れたものづくり技術に支えられているが、彼らが規格化に関与することでその応用効果を国際市場への展開や産業の発展に繋がれると期待されている。

2.2 学術界における国際標準活用

学術研究においても国際標準は重要な意味を持つ。例えば、新しい現象の測定手法やデータ表現形式が標準化されていれば、世界中の研究者が同じ前提で議論できる。気体・液体・固体など、混相流の研究などでは、気泡径や数密度の測定方法が統一されていなければ結果の比較が困難となる。標準

化された計測法や用語を使うことで、異なる研究グループの成果を直接比較・再現でき、学術知見の蓄積が加速される。また論文執筆の際にも、国際標準に準拠した方法で得られた結果であれば、読者の信頼が高まる。さらに、研究段階の技術であっても標準化を見据えることで、将来的な社会実装や産業応用への展開を視野に入れた研究計画が立てやすくなる。例えば材料開発分野では、試験方法や評価指標を標準化しておけば、大学発の新素材を企業が評価・採用しやすくなる。京都大学生存圏研究所・生存圏未来開拓研究センター・生存圏標準化戦略ユニットでは、このような学術研究分野での標準化を円滑に進めることも目標としており、現在はファインバブルに関する国際標準化を中心に研究を進めているが、将来的には生存圏科学全体を見据えた形での標準化の協力体制を構築していく(図1)。

2.3 国際標準化への関与と協力体制

国際標準は各国の産官学の協力によって成り立っている。標準を活用・策定・規格作成すべき人々として、まず産業界の技術者・経営者が挙げられる。自社技術を世界に広めたい企業は、国際標準化会議に専門家を送り込み、自社のノウハウを織り込んだ規格作成を行う。一方、学術界の研究者も専門知識を提供する立場として重要である。標準化に科学的裏付けを与えたり、新規技術の妥当性を検証したりする役割も、大学や研究機関の専門家に期待される。さらに各国政府の標準化担当部門（日本では経済産業省や総務省など）は、自国の提案が国際規格となるよう戦略的に支援する。日本では標準化戦略として「日本型標準加速化モデル4)」を掲げ、新産業分野での標準策定を政策的に後押ししている。ファインバブル分野も経済産業省が主導して ISO 提案を進めた事例であり、官民学の連携体制が有効に機能している。このような産官学協力の枠組みにより、標準化は単なる技術合意作りにとどまらず、国家戦略・産業戦略の一環として位置付けられている。

国際標準を活用すべき具体的場面の例:

- ・ 製品開発と市場参入: 海外規格への適合設計 (例: 家電の電圧規格、安全規格への適合)
- ・ 異分野との連携研究: 共通プロトコルやデータ形式の採用による円滑な共同研究 (例: 環境モニタリングでのデータ標準共有)
- ・ 行政・規制: 製品や環境に関する法律で国際標準を引用し国内規制の整合性を確保 (例: 水質検査法で ISO 法を採用)
- ・ 教育・人材育成: エンジニア教育で国際標準に準拠した設計手法を教え、グローバルに通用する技能を習得

このように、国際標準は産業界・学術界・行政など多様な立場の人々に関わり、技術と社会をつなぐ共通基盤として活用される場面が数多く存在する。

3. ファインバブルを取り巻く標準化の現状

本章では、本稿のテーマであるファインバブル技術に焦点を当てて、その国際標準化と産業展開の現状を紹介する。ファインバブルは極めて微細な泡の総称で、ISO 20480-1 規格および対応する JIS B 8741-1 規格において明確に定義された用語である。直径が 100 マイクロメートル未満の泡をファインバブルと呼び、そのうち 1 マイクロメートル以上のものをマイクロバブル、1 マイクロメートル未満のものをウルトラファインバブルと分類する(図2 参照)。2017 年 6 月に発行された ISO 国際規格第 1 号 (ISO 20480-1) でこれらの定義が定められ、ようやく世界で共通の言葉と基準が確立した。

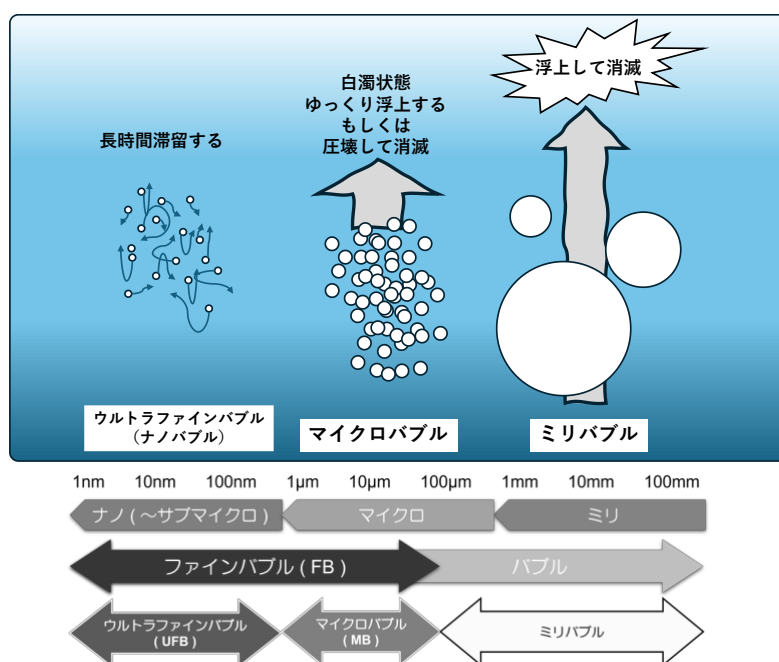


図2. ファインバブルの定義

ファインバブル技術は日本発祥の革新的技術と言われ、水と空気というありふれた材料から作れる泡であることが特徴である。身近な例では、水中に極小の泡を発生させて洗浄力を高めるマイクロバブル入浴装置や、農業で灌漑水にウルトラファインバブルを混入して作物の成長を促進する技術などが登場している（5-7）。実際、ファインバブル水は洗浄・美容・農業など日常生活から産業まで広く利用が進みつつある。例えば農業分野では、トマトやイチゴの栽培にウルトラファインバブル水を用いることで生育が促進されることが確認され、既に実用化が始まっている（7）。工業分野でも、金属加工の研削液にウルトラファインバブルを含ませて加工精度や効率を高める試みが成功している（9）。環境分野では、上下水処理で微細気泡を用いて汚濁物質の分解除去や水質改善に役立てる研究が進んでいる（10）。このようにファインバブル技術の応用範囲は環境、工業、農水産、食品、医療、日常生活まで非常に広範であり、「目に見えない小さな泡」がもたらす多彩な効果に世界的な関心が集まっているといえる。学術論文も多数報告され、環境工学分野に限っても、2000年頃には年間十数件程度だった報告が2010年代に急増し、2000～2020年の累計では1,000件を超える論文が確認されている（10）。このようにファインバブル研究の議論が深まってきているものの、論文タイトルなどで気泡の名称がいくつも混在し（ナノバブル、マイクロバブル、マイクロナノバブルなど）、報告される学会も多岐にわたるため、体系的な情報収集や整理は容易ではなかった。また別の観点からみると、かつては「水に見えない泡を混ぜると良いことが起きる」といった半ばオカルト的な宣伝も商業的にみられることもあり、懐疑的な見方も存在している。

そこで、産業としての先行技術活用と学術的成果をまとめ、真に有用な技術として定着させるため、日本では早くから国際標準化の取り組みが始まっている。2012年には産官学の有志により「一般社団法人ファインバブル産業会（FBIA）」が発足し、科学的検証に基づく標準化と認証制度の構築、および応用技術の開発を一体的に進めるプラットフォームが作られた。その主目的は、ファインバブルに関する名称や定義・測定法を迅速に国際標準化し、市場に混乱を招いていた様々な用語や解釈を統一することにある。FBIAは経済産業省の支援を受けてISOへの働きかけを行い、2013年6月にISO/TC 281 (Fine Bubble Technology) が設立されるに至った。日本が幹事国を務めたことで、このTC281では日本提案の規格が次々と検討され、2017年の定義標準を皮切りに計測法や安全性、応用分野の手引きなど多数の国際規格を策定してきた。例えば2018年にはウルトラファインバブルの保管・輸送方法に

関する規格（ISO 21255）やサンプリング手順の規格（ISO 20298-1）が発行され、2020年にはマイクロバブルの粒径分布測定法（ISO 21910-1）が制定されている。直近ではファインバブル水中の気泡が時間とともに消える現象（消泡）の評価方法や、ファインバブル技術がSDGsにどう貢献できるかを示す技術報告書なども標準化され、発行された。このような一連の標準化によって、研究者や企業は共通のルールに則ってファインバブルを生成・計測・活用できるようになり、「怪しげな水」から科学的裏付けのある技術へと姿を変えつつある。

現在、ファインバブル産業界では認証制度の構築も進んでいる。FBIAと製品評価技術機構（NITE）の協力により2017年からファインバブル製品の認証プログラムが開始され、規格に適合した発生装置や利用製品には認証マークが付与される仕組みが整った。これはユーザーにとってその製品が標準に則って性能評価された信頼できるものであることを示すものである。実際、近年では家庭用の美容シャワーヘッドや洗濯機など企業から一般向け（Business to Consumer, BtoC）の商品にもファインバブル技術が搭載されるようになり、市場には認証マーク付きの商品が登場している。こうした動きは、適切に標準化・認証された技術が社会に受け入れられ、普及する好循環を生み出しつつあることを示している。

国際的な協力も活発である。ISO/TC 281には当初、日本・イギリス・中国など数か国が参加していたが、その後、ロシアや韓国、東南アジア諸国、さらに米国や欧州からも専門家が加わり、参加国は年々増加している。2025年現在、アジア・欧米含め十数か国が議論に加わり、年に1～2回の国際会議で規格案の審議や情報交換を行っている（図3）。ファインバブル技術への海外の関心も高く、インドネシアやベトナムなどの新興国市場でも製品需要が高まりつつあると報告されている。こうした中、日本とFBIAは2025年の大阪・関西万博という国際舞台を活用し、さらなる発信と協調を示し、ISO/TC 281とFBIAが共同で「ファインバブル技術／2025年万博宣言」を発表した（図4）。万博宣言と同時に、2025年7月に万博会場で国際シンポジウムを開催し、各国の代表者（ISO会長やFBIA会長）が出席する中でファインバブル技術の意義と今後の方向性を示す宣言を行った。この宣言はISOでの標準化活動を通じてファインバブル技術の産業化を促進し、Sustainable Development Goals (SDGs) 達成や地球規模課題の解決に貢献することを謳う内容になっている。このように万博という世界的な場での宣言は、ファインバブル技術への信頼と期待をさらに高め、国際協力の輪を広げる契機となった。

以上のように、ファインバブルを取り巻く現状は、国内では産学官連携による標準化と認証の枠組みが整備されつつあり、国際的にも多くの国・機関が参加して標準策定や普及活動が活発化している。かつて黎明期には懐疑もあった技術が、いまや科学と産業の両面から支えられた新産業として飛躍しようとしている局面と言える。



図3. ISO/TC281 委員会にて（2024年韓国、LIU Shu 教授と撮影）

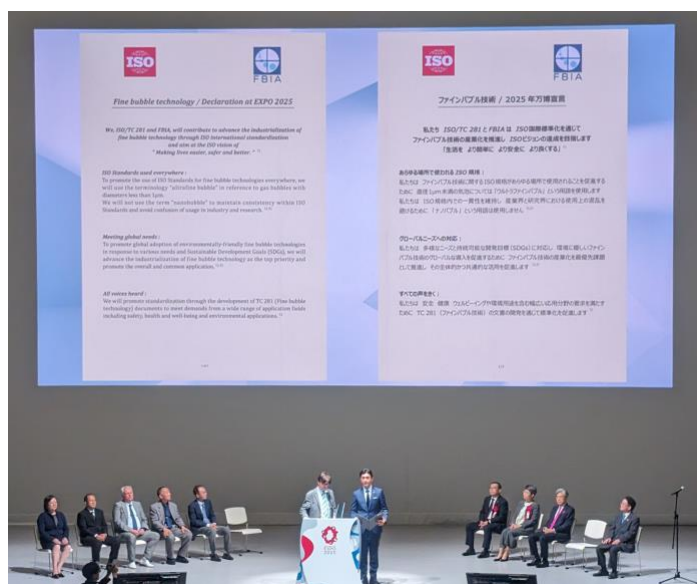


図4. ファインバブル技術／2025年万博宣言（2025.7.17）

4. 今後の学術的展望と標準化の可能性

標準化の一例として挙げたファインバブル技術の今後の発展について本章にて考察する。前節で述べたように、ファインバブルには未解明の現象やメカニズムが依然数多く残されている。例えば、ウルトラファインバブルが水中で長時間安定して存在できる作用機序仮説や、ファインバブルが化学反応や生物に与える影響の詳細など、基礎科学的な疑問は尽きない。これらを解明するため、流体力学（混相流体の挙動解析）、化学工学（気液界面の反応や物質移動）、環境工学（水処理や土壌浄化への応用評価）など様々な分野の専門知識を結集した学際的研究が求められている。現在、生存圏標準化戦略ユニットを中心として、国内外の研究者が多数ファインバブル研究に参画しており、互いに協力しながら基礎から応用まで研究開発を進めている。学術界としては、独自の研究成果を論文発表するだけでなく、積極的に標準化の場にも知見を還元していくことが重要である。具体的には、新たな計測手法や性能評価法を開発した場合には ISO などの委員会で提案し規格化を目指すことで、その手法を世界中で共有できるようになる。実際に、日本の大学研究者が解明した種子発芽メカニズムに関する知見が ISO 規格に反映され発行された例もある。このような「学術論文から国際標準へ」という流れは、研究成果の社会実装を加速する有効なルートとなりうる。今後も各専門分野の知見を結集し、標準化を通じて成果を普及させる取り組みを強化すべきである。

また、企業との連携も引き続き鍵となる。企業は市場ニーズや実用上の課題に精通しているため、学術研究と組み合わせることで初めて有用性の高い技術開発が可能となる。例えば、ファインバブル発生装置の改良や新規用途の開拓は、メーカーの技術者と大学研究者が共同で試行錯誤することにより実現できている。最近ではオープンイノベーションの一環として企業が大学に研究資金を提供し、標準化目標を共有したプロジェクトを進めるケースも増えている。産学連携によって生まれた技術は、双方の名前で標準化提案すれば国際会議でも説得力が増し、規格化の可能性が高まる。ファインバブル分野でも、FBIA の内部組織として学術委員会やアカデミーが設置されており、企業と研究者が定期的に交流・協議する場が作られている。このような枠組みを通じ、標準化活動自体がオープンな研究開発の場となり、相互啓発を図っている。

学術的には、ファインバブル技術をより定量的かつ再現性高く扱える科学へ高めていくことが挙げられる。例えば、気泡の粒径分布や数濃度をリアルタイムにモニタリングする高度計測法の研究、ファインバブルによる効果（洗浄力向上や発芽促進等）を統計的に評価する手法の確立などがある。これらは一見地味ではあるが、標準化に直結する重要課題である。また、SDGs や環境規制への対応と関連付けた研究も推進すべきであり、将来の持続可能社会への貢献が期待される。ISO ではファインバブル技術と SDGs 達成との関係をまとめた技術報告書（Technical Review, TR）が提案・審議され、こうした地球規模課題への寄与を定量化・可視化する研究は、そのまま社会へのアピールとなり、標準化を通じて国際的な支持を得ることにつながるだろう。

最後に、ファインバブル技術に限らず新興技術全般に言えることではあるが、標準化と学術研究のサイクルを上手に回していくことが肝要である。基礎研究で新知見が得られたら標準化提案し、標準化で定まった課題を次の研究テーマにフィードバックする、という双方向の循環は重要である。ファインバブル産業会は「規格創成」「認証実施」「市場信頼度向上」「ニーズ拡大」という認証サイクルをグローバルに確立していく方針を示している。同様に学術界も「発見・証明」「論文化」「標準化」「社会実装」という流れを意識し、多くの専門家が連携してイノベーションを形にしていく必要がある。生存圏科学や混相流体工学、化学工学、環境科学といった幅広い領域の知恵を結集し、ファインバブル技術をさらに発展させると共に、その成果を国際標準という形にして地球規模で共有していくことが望まれる。

5. まとめ

小さな泡に秘められた可能性を大きな社会価値へと繋げるためには、標準化という共通基盤作りと、それを支える学術的エビデンスの創出が車の両輪である。ファインバブルを例に見てきたように、標準化は技術の信頼性向上と普及に不可欠であり、産業界・学術界・行政が協力して進めることで初めて実現する。世界へ向けた発信と連携が強化されている現状を好機として、「国際標準化と泡」という新しい組み合わせから生まれる新たな波及効果に期待しつつ、引き続きエビデンスに基づく議論と協調を深めていきたい。その歩みが、生存圏科学における標準化推進のモデルケースとなり、ひいては持続可能で豊かな社会の実現に寄与することであろう。

参考文献

- 1) ISO in brief <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/en/pub100288.pdf>
- 2) International Classification for Standards
https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/en/international_classification_for_standards.pdf
- 3) ISO/TC281 <https://www.iso.org/committee/4856666.html>
- 4) 日本型標準加速化モデル <https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun-kijun/jisho/seisaku2025.html>
- 5) Ueda Y., Izumi Y., Hirooka Y., Watanabe Y. and Iijima M., Fine soil particle aggregation in ultra-fine bubble irrigated paddy fields, *Water Supply*, Vol. 22(11), 7972–7981, 2022.
- 6) Iijima M., Yamashita K., Hirooka Y., Ueda Y., Yamane K. and Kamimura C., Ultrafine bubbles alleviated osmotic stress in soybean seedlings, *Plant Production Science*, Vol. 25(2), 218–223, 2022.
- 7) Iijima M., Yamashita K., Hirooka Y., Ueda Y., Yamane K. and Kamimura C., Promotive or suppressive effects of ultrafine bubbles on crop growth depended on bubble concentration and crop species, *Plant Production Science*, Vol. 25(1), 78–83, 2022.
- 8) Mochizuki Yuya, Zhao Tiejun, Kanematsu Wataru, Kawasaki Takashi, Saito Takeshi, Ohyama Akio, Nakano Akimasa and Higashide Tadahisa, Application of a Growth Model to Validate the Effects of an Ultrafine-bubble Nutrient Solution on Dry Matter Production and Elongation of Tomato Seedlings, *The Horticulture Journal*, Vol. 88(3), 380–386, 2019.
- 9) Hatayama Yousuke, Okoshi Hiromu, Mori Terumi, Yoshida Futoshi, Kuriyagawa Tsunemoto and Mizutani Masayoshi, Development of high-concentration ultrafine bubble generator system for grinding process, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol. 67(12), 657–663, 2023.
- 10) Jia M., Farid M. U., Kharraz J. A., Kumar N. M., Chopra S. S., Jang A., Chew J., Khanal S. K., Chen G. and An A. K., Nanobubbles in water and wastewater treatment systems: Small bubbles making big difference, *Water Res*, Vol. 245, 120613, 2023.
- 11) Movahed S. M. A. and Sarmah A. K., Global trends and characteristics of nano- and micro-bubbles research in environmental engineering over the past two decades: A scientometric analysis, *Sci Total Environ*, Vol. 785, 147362, 2021.