

生存圈研究

Sustainable Humanosphere

No. 18

2022年



京都大学 生存圈研究所



目 次

巻頭言	1
	所長 山本 衛
目 次	
総 説・Mini Review	
地球大気を電波リモートセンシングで探る	2
	山本 衛
地球で一番大きな生物を支える「セルロース」について	10
	阿部 賢太郎
植物成分を微生物に作ってもらう	16
	棟方 涼介
「万能アンテナ」の開発	23
	氏原 秀樹
Evolution of electron zebra stripes in the Earth's inner magnetosphere	31
	Megha Pandya
解 説・資 料	
生存圏ミッション研究のキーワード統計解析	35
	上田 義勝, 梅澤 俊明
生存圏研究所の研究ミッションのとりまとめに関する一考察	46
	梅澤 俊明, 上田 義勝
欧米に散逸した神像群をめぐる 木材解剖学×美術史学の国際的な学際研究	56
	田鶴 寿弥子

巻頭言

本誌「生存圏研究」は2006年に第1号が、その後、毎年度1冊ずつ発刊され、今回第18号の発刊となりました。生存圏研究所の理念を発信する重要な出版物として継続的に発刊されている雑誌ですが、昨年度に、研究所の英文誌である“Sustainable Humanosphere”と統合し、日本語・英語どちらでも寄稿していただけるようにしました。

生存圏研究所は、2004年の発足以来18年にわたり研究活動を続けてきました。本研究所が推進する生存圏科学は、人間が生きていく上で必須の空間を「生存圏」として捉え、その現状を正確に診断して評価し、生起する様々な問題に対して包括的な視点に立った解決策の提示を目指します。我々は持続発展可能な社会の構築に向け、分野横断的な新しい学問領域の開拓に取り組んでいます。また文部科学省から「生存圏科学の共同利用・共同研究拠点」の認定を受けており、多くの研究設備、観測データや貴重な木材標本から構成される生存圏データベースを共同利用に供し、国内外との共同研究を推進してきました。

研究所が発足した当時、「生存圏」は目新しい言葉でした。特に英語名称である“Sustainable Humanosphere”は造語です。環境やエネルギーや資源をひっくるめ、社会全体の持続的な発展が必要であると考え、それを端的に表す名前を生み出しました。国連による「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals; 略称 SDGs）」の制定は2015年ですから、我々は、約10年先んじて走り始めていたこととなります。

我々の研究成果は、最近では科学研究費の全ての研究分野区分に分布するほど広がってきました。しかし生存圏科学にふさわしい新分野開拓への期待はさらに高まっています。そのため今年度から「生存圏未来開拓研究センター」を発足させました。新しい研究センターでは、内部に複数の研究ユニットを設けて研究に専念させることで、新興領域・融合領域の研究、学際領域の開拓を狙っていきます。

生存圏研究所では、これからも持続発展可能な社会の構築に向けて取り組んでいきます。その一助として本誌「生存圏研究（Sustainable Humanosphere）」が広く講読され、研究者のみならず一般の方々にも手に取っていただけるようになることを期待して、巻頭言とさせていただきます。

令和4年10月10日

生存圏研究所

所長 山本 衛

地球大気を電波リモートセンシングで探る

山本 衛^{1*}

Explore the Earth's atmosphere with radio remote sensing

Mamoru Yamamoto^{1*}

概要

電波とは何だろうか？テレビや携帯電話などの通信機器は、電波を使って情報を伝えるが、別の利用方法として遠隔観測（リモートセンシング）がある。アンテナから放射された電波は、大気の密度や温度の変化、雨滴や雲粒などの影響をうけて、反射・散乱・屈折を受けながら飛び回る。当研究所はMUレーダー（滋賀県・信楽）や赤道大気レーダー（インドネシア）を使って、大気の動きや構造を研究している。一方、GPSに代表される衛星測位は、大気中での電波の屈折を計測することができ、研究に応用されている。電波を使った大気環境のセンシング技術と研究成果の例を紹介する。

1. はじめに

通信ではない電波利用としてリモートセンシングがあるが、それは観測対象が発する電波（あるいは光）を受信して相手の性質を測る受動的なリモートセンシングと、観測装置が電波や光を観測対象にあてて観測をする能動的なリモートセンシングに分かれる。レーダーは電波パルスを観測対象にあてて跳ね返ってくるエコーを調べる装置であり、能動的なリモートセンシング装置である。図1にレーダーの原理図を示す。送信機と受信機がひとつのアンテナを共用している。送受切替えスイッチを送信側に設定してパルス変調波を標的に向かって短時間送信する。その後、スイッチを受信側に切り替えて反射波の到来を待つ。送信からエコー受信までの時間差から、レーダーから標的までの距離が分かる。標的が動いていれば、エコー波の周波数がドップラーシフトを示すため、速度が分かる。飛行機や船だけではなく、大気中のさまざまな現象を標的とするレーダーが実用されている¹⁾。

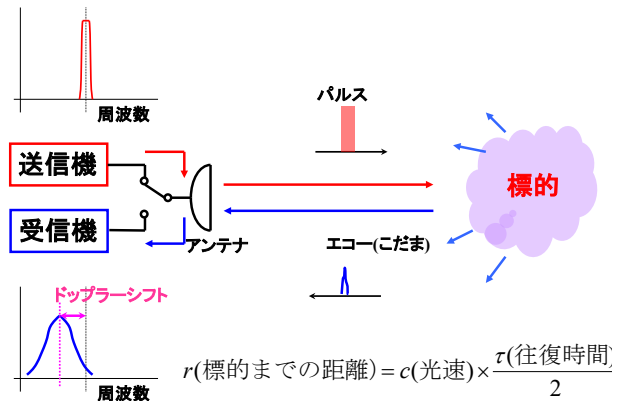


図1 レーダー原理図

2. レーダーによる大気観測

大気は重力によって地球表面に捉えられた気体であり、密度と圧力は地表面が最大で高度と共に指

2022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レーダー大気圏科学分野

* E-mail: yamamoto@rish.kyoto-u.ac.jp

数関数的に減少する。図 2 に標準的な大気温度の高度分布を示す。気温は地表面から高度 10 km を過ぎるあたりまでは 1 km 当り約 6.5 度の割合で高度と共に低下する。ここを対流圏と呼ぶ。雨・雲などの気象現象は対流圏内の現象である。高度約 11 km に対流圏界面と呼ばれる気温の極小層があり、その上部の高度約 50 km までは高度と共に温度が上昇していく成層圏である。その上部は再び温度が下がる中間圏、高度 90km 以上は温度が飛躍的に高くなっていく熱圏が広がっている。熱圏は、例えば高度 100 km では大気圧は 2×10^{-7} 気圧程度しかない（地表は 1 気圧）。高度 300 km 以上は希薄で人工衛星が飛翔しうる領域である。更に上部は太陽系空間に徐々に繋がって行く。宇宙空間から地球に飛び込んでくる微小な塵は高度 70~110 km において燃えて流星となる。また熱圏では大気を構成する原子や分子が太陽光線に含まれる紫外線や X 線によって電離して、電離圏を形作っている。電離圏は高度 100~120 km に広がる E 層、高度 200~400 km を中心とする F 層と呼ばれる層構造を成している。

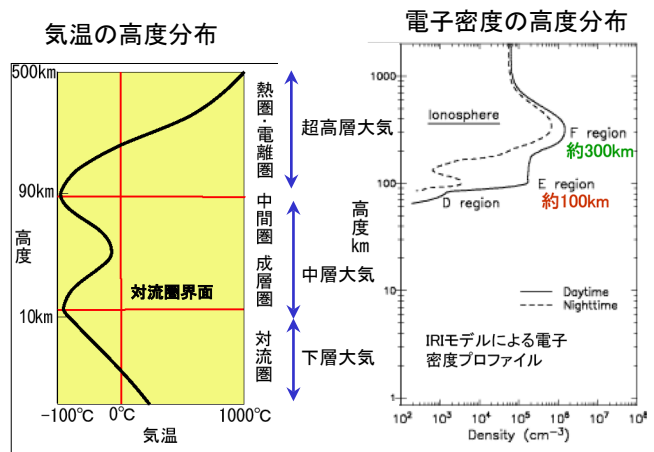


図 2 大気の温度分布と電子密度分布

周波数 50 MHz 付近から数 GHz の電波を利用するレーダーとしてウィンドプロファイラーや ST (成層圏・対流圏)レーダー、MST (中間圏・成層圏・対流圏)レーダーなどと呼ばれるグループがある。これらは大気中の密度変動や水蒸気分布などからのエコーを利用して風速を観測する点に特徴がある。観測高度範囲は、小型のものでは高度数 km、ST レーダーと呼ばれるタイプで高度 10~20 km まで、大型の MST レーダーではこれらに加えて高度 60~80 km の中間圏も観測可能である。これらのレーダーはまとめて「大気レーダー」と名づけられる。京都大学生存圏研究所では、大気レーダーを中心として多様な装置を開発し、大気研究に利用してきた。

大気レーダーの標的は、大気乱流や密度成層などから生じる屈折率変動であり、雲粒・雨粒などが大気中になくてもエコーが得られる。大気中にはいたるところに乱流が発生しており、それにとまって密度変動が存在し電波や光の屈折率が変動する (図 3)。

例えば星の光が大気を通過する際に屈折することで、またたきが生じる。これは、大気密度の変化によって光や電波が影響を受けるひとつの例である。レーダービームを覆いつくす多くの散乱体からの寄与の合成を考えると、電波が同位相で足しあわされる条件(ブラッグ条件)が満たされるとき散乱波は最大となる。これから、大気レーダーは乱流などによる屈折率変動のうち、レーダー波の半波長スケールの成分を主として観測することになる。



図 3 大気エコーの仕組み (左図) と大気の揺らぎの例 (右図)

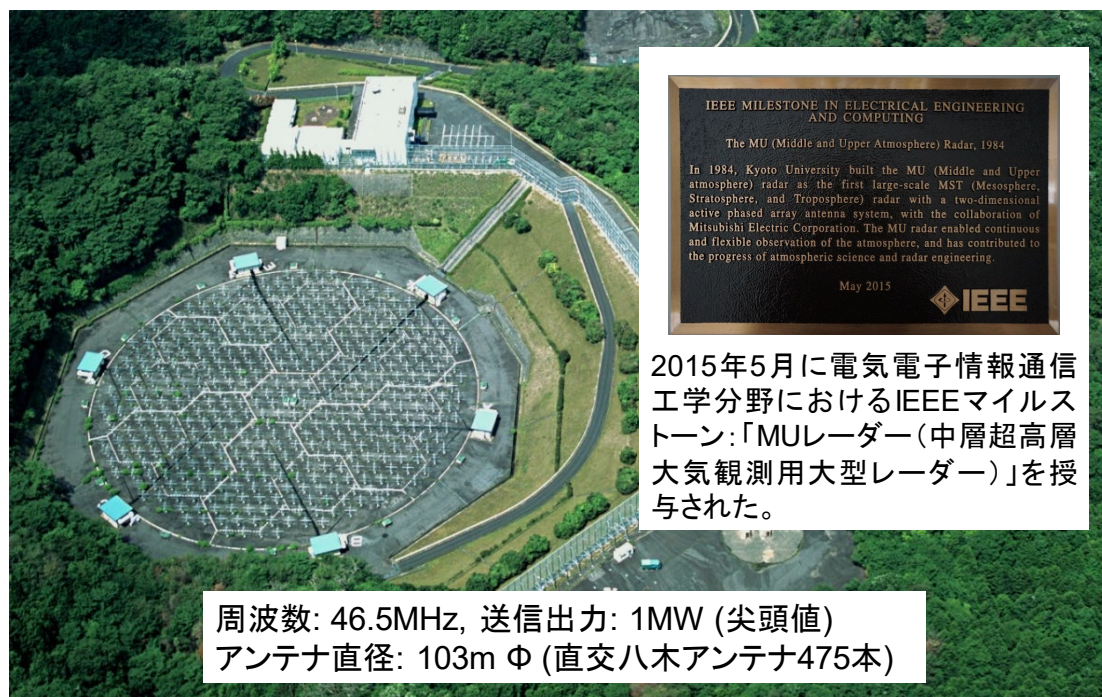


図4 滋賀県甲賀市信楽町にあるMUレーダー全景写真。IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)は、米国に本部を持つ電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である。

3. 大気レーダーの実際

生存圏研究所は、1984年に大型の大気観測用レーダーであるMUレーダーを滋賀県甲賀市信楽町の信楽MU観測所に完成し、現在まで様々な研究を行ってきた²⁾。図4にMUレーダーの全景写真を示す。丸く見えるのはアンテナシステムであり、直径100mの円形の敷地内に475本の八木アンテナ(詳しくは、3素子のクロス八木アンテナ)が整然と並んでいる。アンテナ面の回りには6棟の小屋が並んでいるが、この中には各々のアンテナについて1台ずつ対応する半導体の送受信機が収容されている。MUレーダーは多くの送受信機とアンテナから構成されるが、電子制御によってそれらを一体のものとして運用する。即ち、全体を中心周波数46.5MHz、送信時の最大電力が全体で1MWに及ぶ巨大なレーダーとして使用する。MUレーダーのアンテナの働きは、同じ大きさの開口をもつパラボラアンテナと同等であり、更に送受信の電波の位相を制御することによって、電波の発射方向を電子的に振ることができる。このような構成のアンテナは、アクティブ・フェーズド・アレイと呼ばれる。MUレーダーは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会であるIEEEによって2015年に、「世界初のアクティブ・フェーズド・アレイ方式の大気レーダー」としてマイルストーンに認定された。

MUレーダーの観測領域は、地表面近くから高度約1000kmまでの地球大気全域に及ぶが、超高層大気に関しては、(1)電離圏の電子1個1個からの超微弱な散乱電波を捉える「非干渉性散乱エコー」と、(2)電離圏プラズマの不安定現象に関連して生じる電子密度の不規則構造に伴う「電離圏イレギュラリティエコー」の観測が主となる。また、(3)役目を終えた人工衛星やその破片などからなるいわゆるスペースデブリの観測も実施されている。

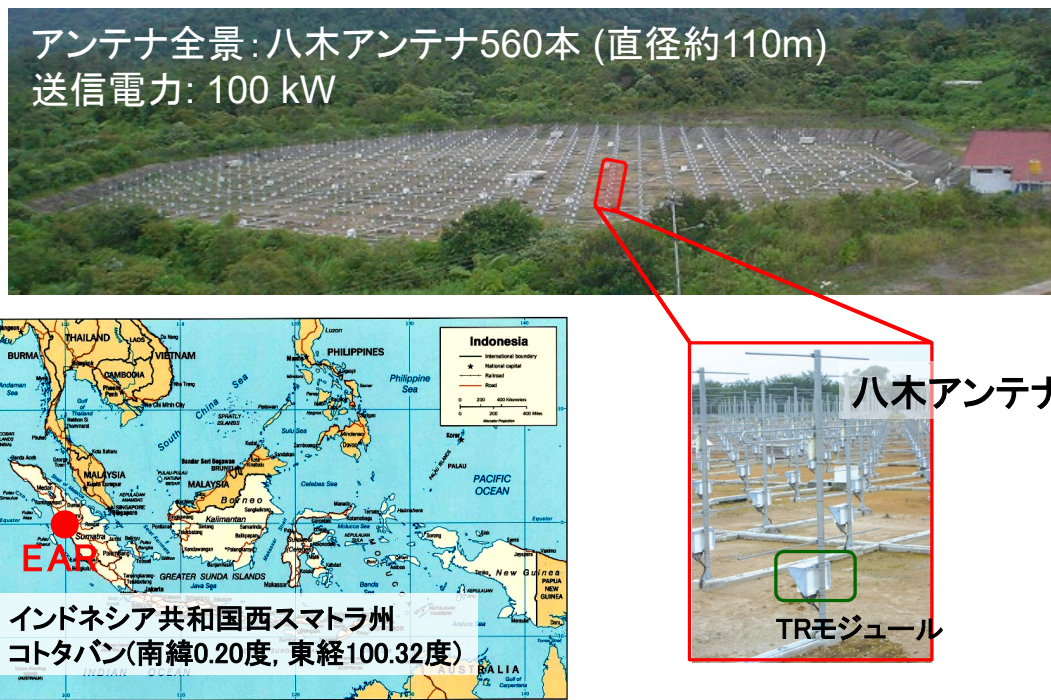


図5 赤道大気レーダーの全景（上図）、アンテナ・TR（Transmitter-Receiver; 送受信）モジュール（下右図）、レーダーの位置（下左図）。

生存圏研究所には、MU レーダーによく似た大型のレーダーがインドネシア共和国西スマトラ州コタババンにある³⁾。赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar; EAR）と呼ばれるこのレーダーの全景とアンテナ部を図5に示す。周波数 47 MHz で直径約 110 m のアンテナを備えており、アンテナと直下の送受信モジュールの総数は 560 に達する。MU レーダーと同様にアクティブ・フェーズド・アレイ構成であり、全体の送信出力が 100 kW と MU レーダーの 10 分の 1 である以外は、ほぼ同様の機能を備えている。超高層大気に関しては上記の(2)の観測ができるが、(1)と(3)には感度が不足している。EAR の運営は、インドネシア航空宇宙庁（LAPAN）との密接な協力の下で進められている。設置場所の特徴を活かして、赤道大気に特有の波動現象や、低緯度・赤道域の電離圏に特徴的なプラズマバブルという現象の研究を精力的に実施している。

4. レーダー観測の例

大気レーダーによる観測例を示す。1994 年の台風 9426 号は、紀伊半島を縦断しながら北進し、9 月 29 日に MU レーダーの上空を通過した。このため、台風を完全に輪切りにする観測に成功した。台風は中心の周りに大気が反時計回りにまわる巨大な渦巻き構造を持つ。図6に示すように、MU レーダーで観測された風速から台風の移動速度を引き去ることで台風と共に動く系からみた風速を求め、さらにこれを回転成分（接線風）と半径方向の成分（動径風）に

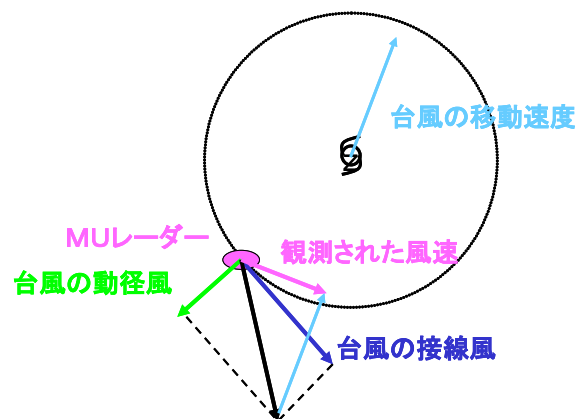


図6 台風観測の原理図

分解して研究を進めた。図7には台風9426号の観測から得た接線風の水平距離・高度分布を示す。ここで水平距離は、元は時間変化として捉えた風速を、そのときのMUレーダーと台風中心との水平距離に置きなおしたものである。台風中心がMUレーダーを通過したため、水平距離ゼロまで観測を行うことができた。台風の接線風はほぼ全域にわたって反時計回りであり、高度10 kmより下側で強い風が吹いている。台風中心付近に時計回りの成分(負の値)が見られるが、上陸後の台風の構造が完全な軸対称からずれたことによるものと考えられる。図8には同時に観測された鉛直風の分布を示すが、1 m/sを超える上昇流(正の値)と下降流が複雑に分布する様子が捉えられた。このように高分解能で台風内部の3次元風速の分布を明らかにできたのは、MUレーダーならではの成果である。

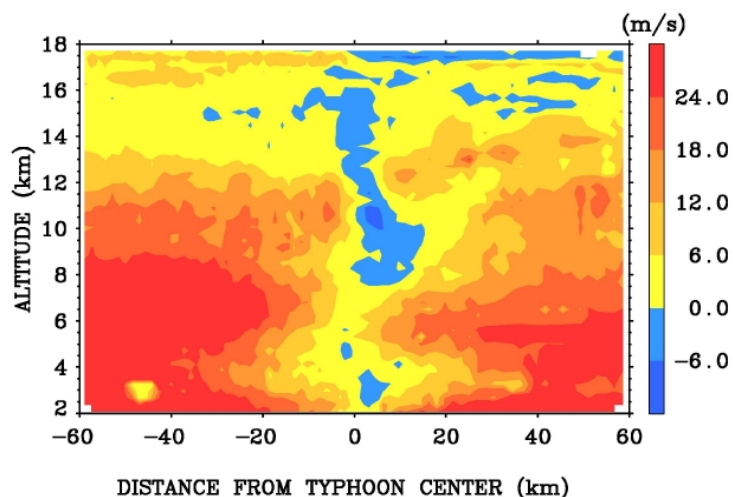


図7 台風9426号の接線風速の分布図
(反時計回りを正とする)

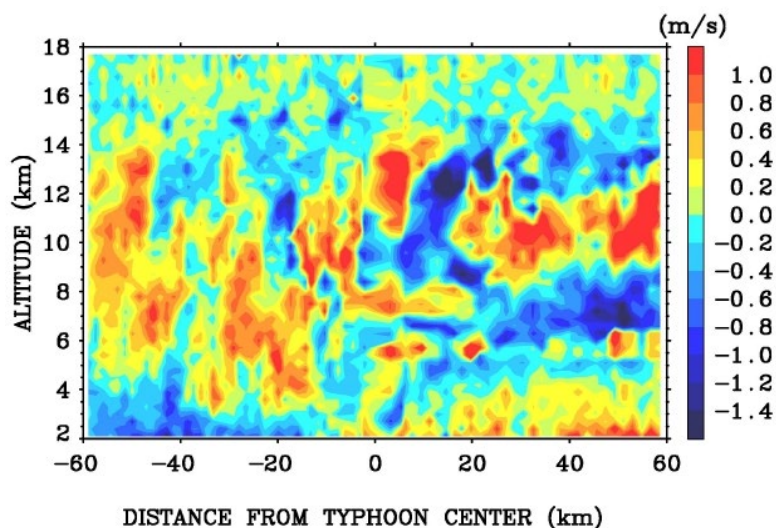


図8 台風9426号の鉛直風の分布図
(上昇流を正とする)

5. GPSを使った大気観測

GPS (Global Positioning System) は衛星を使った測位システムの代表例であり、カーナビゲーションやスマートホンの地図アプリなどに広く利用されている。衛星測位の原理は衛星からの電波到来時刻の精密測定であって、4個以上の衛星からの電波を用いて受信機の3次元位置を測定する。測位には誤差があるが、その主な原因は、1) 衛星から受信機までの電波が直達しない(受信機周辺の建物などによる反射波の影響、マルチパスと呼ばれる)問題、2) 地球大気や電離圏のプラズマによる伝搬遅延の問題、3) 衛星や受信機自体の特性に起因する問題、である。これらの誤差を低減する努力と共に、逆に利用する試みも多く行われている。つまり、受信機の位置が分かっているとすれば、誤差の量や振る舞いを調べることによって、その原因(例えば上の2)から地球大気や電離圏などの環境)の情報を引き出すことが可能である。

衛星測位は2つの周波数の電波を利用するが、その位相差を測定する事によって、電波の伝搬経路に沿った電離圏内の全電子数(Total Electron Content; TEC)が測定できる(図9の左図)。そのデータが電離圏研究にも活用されている。こうやって求める電離圏TEC値を、ここではGPS-TECと呼ぶ。日本ではGEONETと呼ばれる千点以上の衛星測位受信機の観測網が国土地理院によって運営されて

おり、測定の基準や地震・火山活動・地殻変動のモニタリングに利用されている。さらに、GEONETからのGPS-TECデータを用いた電離圏電子密度の水平分布の研究が広く行われている。

GPS-TECデータの高度な利用としてトモグラフィー解析がある。図9の右図に示すように、複数のGPS衛星と地上の多数のGPS受信機を結ぶ多方向のGPS-TECデータを用いて、電子密度分布の3次元分布を再現しようとする解析技術である。トモグラフィー解析の最も顕著な成功例としては、医療分野のCTスキャンやMRI（核磁気共鳴撮像）がある。「CT」はComputed Tomographyの略語であり、正にトモグラフィー解析を意味している。一方、電離圏電子密度のトモグラフィー解析は困難である。問題は、図9（右図）に示す通り、電離圏に対して得られる電波伝搬の方向が限定的である点にあり、安定した解が得られにくい。我々は、GEONETからの日本全国をカバーする豊富なGPS-TECデータに対して拘束条件付き最小二乗法を用いることによって、電離圏電子密度の3次元トモグラフィー解析を安定的に行うことに成功し、さらにリアルタイム解析に成功してきた。これは世界初のことと自負している⁴⁾。

我々が開発してきた拘束付き最小二乗法は、観測モデルに従って数学的に合理的な解を求めるだけではなく、電子密度の空間分布が「なめらかに」なるような考慮を加えると言う解析手法である。

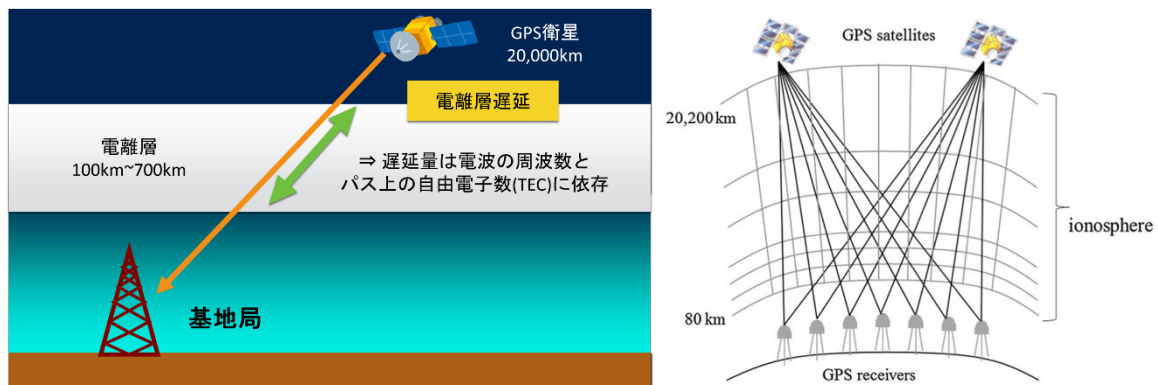


図9 (左図) GPS衛星から地上への2周波電波伝搬による全電子数推定
(右図) GPS-TEC観測に基づく電離圏電子密度トモグラフィーの概念図

数学的な合理性のみに従うことで電子密度の空間分布が不安定になることを防ぎながら、より確からしい結果を得ることに成功した。更にデータ解析システムの整備を行って、2016年から15分毎のリアルタイム・トモグラフィー解析と結果の公表を開始している。解析結果を他の観測結果と比較したところ、比較的良好な成果を得られることが分かったが、次のような問題点が存在していた。

- 電子密度が最大となる高度が270kmよりも低くなるようなケースにおいて、トモグラフィー解析による電子密度ピークが実際よりも高い。
- 電子密度が負の値になってしまうという、物理的にあり得ない解が現れる場合がある。

上記のような問題点を解決するため、ここ数年の間、GPS-TECにイオノゾンデ観測による電離圏電子密度とその高度のデータを加えた、解析手法の改良を進めてきた。イオノゾンデとは、数MHzから数十MHz帯の電波を上空に発射し、電離圏からの反射波を用いて電子密度を求める観測手法である。電離圏電子密度の標準的な観測方法であって、観測サイトは全世界に分布している。日本においても情報通信研究機構(NICT)が全国4か所において常時観測を行っている。イオノゾンデからのパラメータNmF2(最大電子密度)とhmF2(電子密度が最大となる高度)を用いてGPS-TECトモグラフィー解析の改良を試みた。

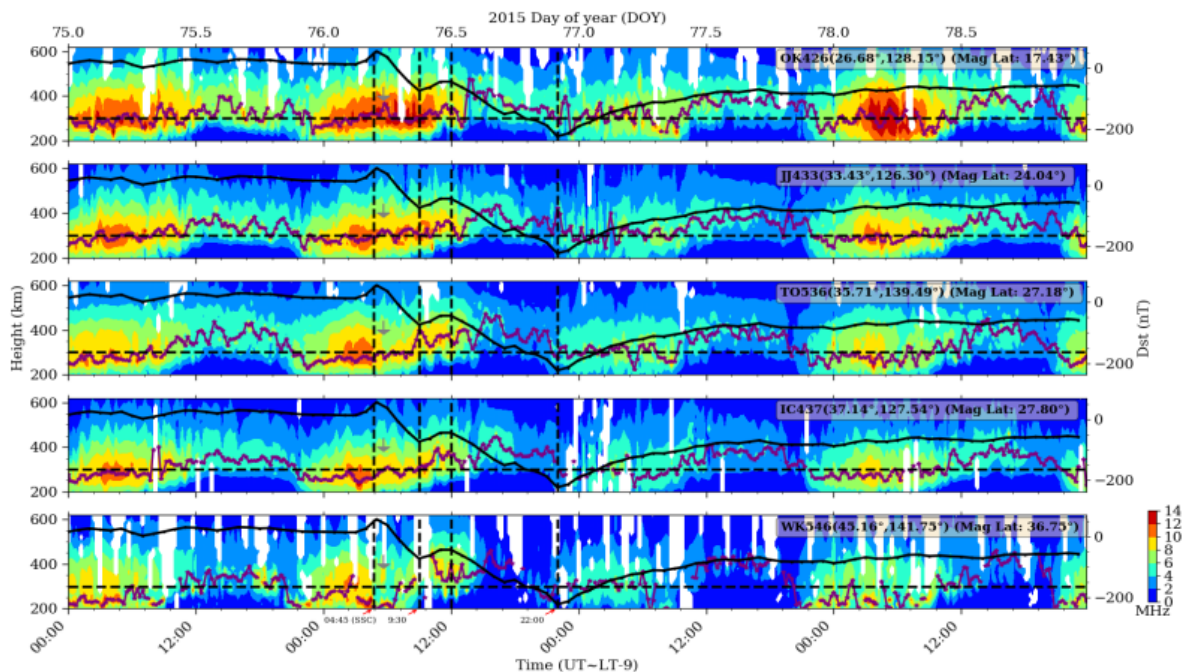


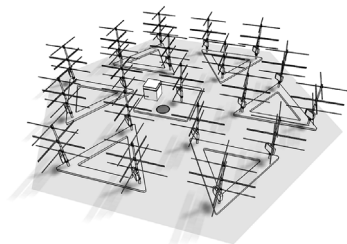
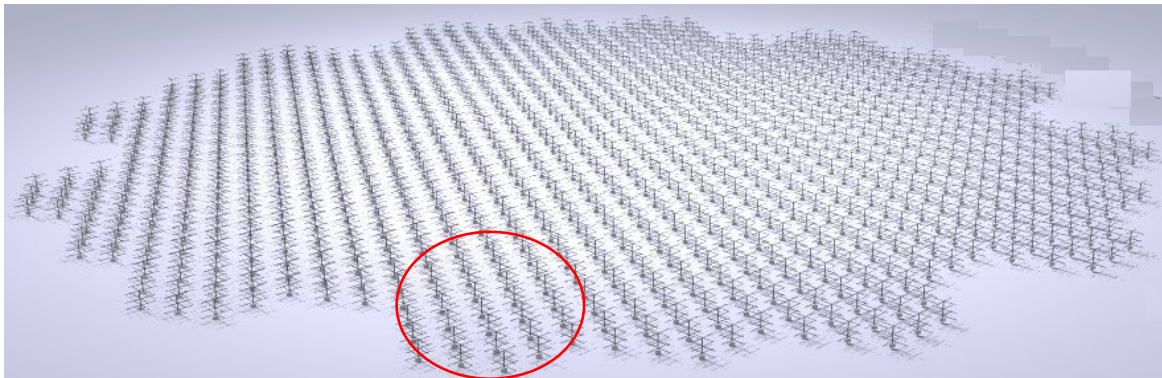
図10 2015年3月17日に発生した巨大な磁気嵐前後の電離圏トモグラフィー解析結果⁵⁾

改良されたトモグラフィー解析の結果は目覚ましいものであった。図10に結果の例を示す⁵⁾。2015年3月17日に発生した巨大な磁気嵐（太陽面の爆発に起因する磁気圏・電離圏の全地球的な変動現象）は St Patrick's Day イベントと呼ばれており、多くの研究の対象となってきた。図10の複数のパネルは、沖縄（最上部）から稚内（最下部）まで、異なる緯度における電子密度の変動を示している。図中には太実線で Dst インデックスと呼ばれる磁気嵐の指標が示され、中央付近の時間帯で値が下方に振れていく。これが磁気嵐の発生を示している。電離圏の電子密度の時間・高度変化は、磁気嵐が始まる前まで2日間にわたって通常の日変化を示すが、Dst インデックスの低下と共に電子密度が減少し、電離圏の高度が上下に激しく変動する。その後の Dst インデックスの回復と共に、徐々に回復していく。この解析結果は他の観測と非常に良い一致性を示しており、改良型のトモグラフィー解析の威力を示す結果となっている。

6. まとめと大気レーダーの今後

以上に述べたように、電波は環境計測に広く用いられている。本稿では、大気乱流を標的とし風速測定を主とする大気レーダーと、衛星から地上までの電波伝搬を利用した GPS-TEC 観測とそのトモグラフィー解析を紹介した。

インドネシアにある EAR は、MU レーダーに比べて感度が 1/10 と不足している。また受信チャンネルが 1 個であってイメージング観測ができないなど、機能面でも劣っている。そこで現在、MU レーダーと同等以上の高感度かつ高機能なものにしようと、「赤道 MU レーダー (Equatorial MU radar; EMU レーダー)」の新設を計画している⁶⁾。図11に EMU レーダーの概要を示す。大気レーダーの感度は送信出力とアンテナ面積の積に比例する。MU レーダーと比較すると、EMU レーダーは送信出力は 1/2 だが、アンテナ面積を 2 倍以上にすることで同等の感度を達成する。我々は、EMU レーダーを主要設備の一つとする大型研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」を日本学術会議のマスタープラン 2014/2017/2020 に提案し、全てにおいて重点大型研究計画の一つとして採択された⁷⁾。EMU レーダー実現に向けて、さらに努力を続けていきたいと考えている。



1群(アンテナ本数19本)
アンテナは55群構成
(19本×55群=1045本)

- ◆システム構成
- 周波数47MHz
- アレイアンテナ(直径約163m、八木アンテナ1045本)
- 送受信モジュール(出力500W PEP)
(八木アンテナ基部に取付)
- 多チャンネル変復調・データ処理装置
(変復調装置、データ処理装置、屋外分配装置・コネク
タパネル・屋内分配装置・電源装置等からなる)

図11 計画中の「赤道 MU レーダー (EMU レーダー)」の概要

参考文献

- 1) 深尾昌一郎, 浜津享助, “気象と大気のレーダーリモートセンシング”, 京都大学学術出版会, 2005, pp. 491.
- 2) MUレーダー : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu>
- 3) 赤道大気レーダー (EAR) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear>
- 4) リアルタイム電離圏トモグラフィ解析 : <http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/>
- 5) Ssessanga et al., Assessing the performance of a Northeast Asia Japan-centered 3-D ionosphere specification technique during the 2015 St. Patrick's day geomagnetic storm, *EPS*, **73** (124), 2021, doi: 10.1186/s40623-021-01447-8
- 6) 赤道MUレーダー (EMU) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/emu>
- 7) 大型研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤構築」 : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/masterplan2020/>

著者プロフィール



山本 衛 (Mamoru Yamamoto)

<略歴> 1983年 京都大学工学部電子工学科卒業/1988年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了(京都大学工学博士)/1988年 京都大学超高層電波研究センター助手/1996年 京都大学超高層電波研究センター助教授/2007年 京都大学生存圏研究所教授、現在に至る。<研究テーマ>大気レーダー開発、電波伝搬による大気観測手法の研究、電離圏イレギュラリティの研究(レーダー、観測ロケット、衛星=地上ビーコン観測など)

地球で一番大きな生物を支える「セルロース」について

阿部 賢太郎^{1*}

“Cellulose”

~Nanofibers supporting the biggest organism on earth~

Kentaro Abe^{1*}

概要

我々が生活しているこの地球は大体 46 億年前に誕生したと言われている。その長い歴史の中で、もっとも大きな生物は何だろうか？ときに 100 m を超え、1000 t を超えるその巨大生物の体は、幅 4 nm (1 nm は 1 mm の 1,000,000 分の 1) 程度の、とても細くてとても強い繊維によって支えられている。その繊維は、我々の周りに豊富に存在しており、我々もよく食べている。そして、今、その細くて強い繊維が、さまざまな形で我々の暮らしをも支えようとしている。この総説では、その巨大生物が自分の体を支える秘密について紹介しつつ、その秘密に関係する細くて強い繊維「セルロース」について紹介する。

1. はじめに

約 46 億歳の地球に住んでいる生物で最も巨大なものは何だろうか。恐竜が思い浮かぶだろうか。もっとも大きな恐竜の 1 種はアルゼンチノサウルスとされ、1 億年くらい前に生きていたようである。その体長は 45 m で、体重は 90 t とも言われている。しかし、その恐竜よりも大きな生物がいることを我々はよく知っているはずである。それは「樹木」である。樹木ももちろん生きている。京都・峰定寺の御神木である花背の三本杉は 62.3 m もあり (図 1)、すでにアルゼンチノサウルスを見下ろしている。さらに、世界には 100 m を超える樹木がいる。アメリカにいるハイペリオンを名付けられたその木の高さは 115 m もある。他にも、シャーマン将軍と呼ばれる木もある。その高さは 84 m で、重さは 1000 t を軽く超え、世界で最も重い生き物である。そのように巨大で逞しい樹木は、古くから人々に崇拜され、畏れられてきた。

大きくなれば当然重くなる。樹木が巨大な体を支えるためには、想像を絶する強さが必要となる。さらに、樹木は天に向かって成長するため、自重だけでなく、横風等による曲げ



図 1 : 峰定寺の三本杉

2022 年 3 月 30 日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生物機能材料分野。

* E-mail: abe.kentaro.3a@kyoto-u.ac.jp

にも耐えなくてはならない。そのため、樹木はなるべく「軽くて」「強く」なければならない。植物が陸地上陸してから約5億年。その間に、少しずつ構造（形）を進化させ、ついには100mに達している。一体、樹木はどのような構造をしているのだろうか。

2. 樹木の構造

図2に樹木内部の写真を示す。樹木の中身はスカスカで、ストローを束ねたような構造をしている。といっても、本当は空ではなく、生きている樹木では中に水が詰まっている。文字通り、ストローのように地上から100m上まで水を吸い上げている。同時に、このストローの束が、樹木の巨大な体を支えている。このストロー1本1本が樹木の細胞である。正確には、細胞だったものである。樹木の細胞は成長後に死に、中身（細胞質）が消失する。消失して、一体何が残っているのか。それが、「細胞壁」である。我々動物の細胞と、植物の細胞の違いは色々あるが、その一つが細胞壁で、動物の細胞には細胞壁が無い。細胞壁は植物細胞の外側にあり、細胞が死に中身が消失した後も、細胞壁だけが残り樹木内部に蓄積される。我々は死んでしまうと、その体は消失してしまうが、樹木は切り倒された後も強度を保ったまま残っており、我々の暮らしを支えている。法隆寺は創建されて1400年は経っている。

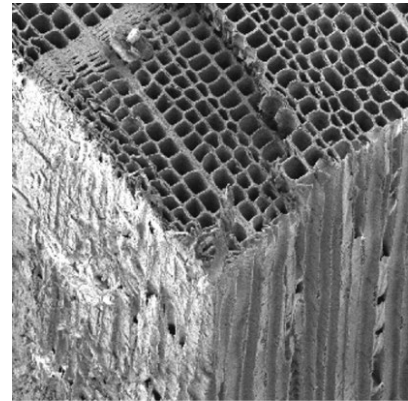


図2：樹木内部の構造

とはいえ、残された細胞壁自身が強くなければ、その巨体を支えることはできない。ここからは樹木細胞壁の構造について説明する。樹木の細胞壁は図3のように、何層か重なった構造をしている。各層の違いは何であろうか。図3をよく見ると細い線の向きがそれぞれ違っているのが分かる。この線は、「セルロース」と呼ばれる繊維状の物質を表しており、樹木の細胞壁の約半分はセルロースでできている。セルロースはブドウ糖（グルコース）がつながってできている。ご承知のとおり、植物は光合成によってグルコースを作り、それをエネルギー源としている。それと同時に、自分を支える壁をも作っている。セルロースはグルコースが直線状につながった鎖のようなもの（高分子）だが、さらにその鎖が何十本も束になって、「結晶化」している。その幅は約4nmである。我々の髪の毛の幅は50-100μmだが、1μmは1mmの1000分の1である。そして、1nmは1μmの1000分の1であるから、それがとても細い繊維であると分かる。また、結晶と聞くと何かとても堅そうなイメージがあるが、その直感は正しく、セルロースの結晶もとても強い。その1本1本が鋼鉄の5倍くらい強いと言われている。それにもかかわらず、その重さ（密度）は鋼鉄の1/5と非常に軽い。「軽くて」「強い」セルロースが壁になって、巨大な樹木の支えになっている。

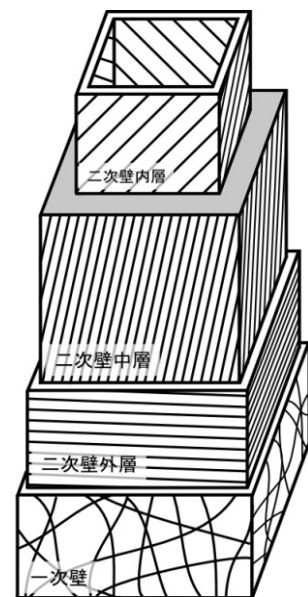


図3：樹木細胞壁の構造

全ての植物の細胞壁は、このセルロースを豊富に含んでいる。しかし、草本と樹木の細胞壁の成分には大きな違いがある。セルロースがいくら強くても、それだけで樹木の巨体を支えることはできない。セルロースのような一次元の繊維状物質は、基本的に引張の力に対して強さを発揮するが、それ以外の力に対しては弱い。セルロースで編まれた植物細胞壁の各層は、言ってみればハンカチのようなものである。木綿のハンカチは実際にセルロースからできている。実際に手に持ってみれば分かるが、ハンカチは、引っ張った時はとても強く、簡単には引きちぎれない。それは、セルロースの強さ

でもある。しかし、ハンカチは簡単にクシャクシャになってしまい、それを基にストローのような構造を作っても、重いものを上にのせて支えることはできない。そこで、樹木はセルロース等のできた細胞壁の隙間に、「リグニン」と呼ばれる接着成分を染み込ませた（樹木が意識的に行動したように書いているがこれは比喩である）。ちょうど、ハンカチに接着ボンドを染み込ませて、固めたようなものである。ガチガチに固まったハンカチはクシャクシャにはならず、しっかりした壁となって重いものを支えられるようになる。そのように強靱な壁からできたストローを束にすることで、ハニカム構造のように「軽くて」「強い」構造ができ、巨大な樹木は自身の体を支えることができる（体を支える理由は、他にもある）。

前に樹木の細胞は成長とともに死に、残った細胞壁だけが蓄積すると書いた。リグニンは、細胞の死と共に細胞壁に徐々に染み込む。細胞壁にリグニンが堆積し、強固な構造になることを「木化」と呼ぶ。この木化は、樹木（と竹や稲）における現象であり、天高く成長するために長い進化の過程で習得されたものである。

3. 繊維強化複合体

樹木細胞壁の構造をととても単純に言う、比較的柔らかな「リグニン」の中に、細くて強靱な「セルロース」が無数に分散した構造ということになる。このような構造を「繊維強化複合構造」と呼ぶ。リグニンはセルロースに比べて柔らかく、「繊維強化」などと聞くと、強いセルロースが柔らかいリグニンを補強し支えているように聞こえる。しかし、実際には柔らかいリグニンもまた強いセルロースを支えている。リグニンがセルロース繊維間を接着することで、細胞壁中のセルロースに均一に力がかかるようになっている。お互いの弱点を補い、お互いの長所を伸ばすこの繊維強化複合構造は、軽さと強さを発揮するための優れた構造の一つと言える。

実のところ、自然界ではこの繊維強化複合構造が数多く利用されている。例えば、蟹の甲羅である。蟹の甲羅は細くて強い「キチン」と呼ばれる繊維と、その隙間を埋める「炭酸カルシウム」からできている。キチンは、植物のセルロースと非常によく似た構造をしているが、セルロースと同様に強靱である。そして、炭酸カルシウムは非常に脆い物質だが、キチンによって強靱となり、結果として軽くて強い甲羅となる。もう一つ、昆虫の殻や羽も似たような構造を持っており、蟹の甲羅と同じキチン繊維の隙間にタンパク質が充填されている（図4）。樹木、蟹、昆虫…と、一見共通点がなさそうな生物達だが、いずれも生きるために、似たような「軽くて」「強い」構造を獲得している。そして、これらの構造は生物が死んだ後もその形が残っている。

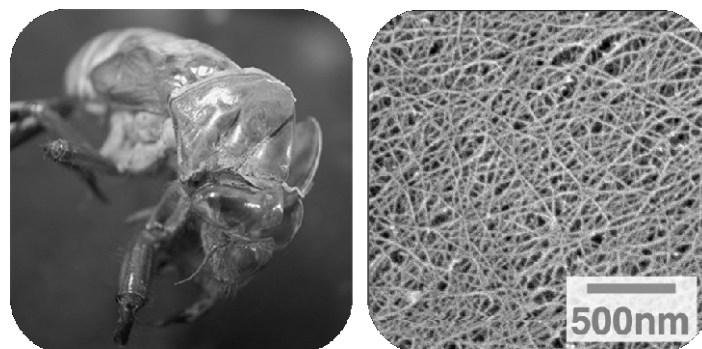


図4：セミの抜け殻に豊富に含まれるキチン

そして、この繊維強化複合構造は我々の生活でも広く活用されている。古代エジプトでは、泥にワ

ラを混ぜて乾燥させることで、強いレンガを作っていた。日本においても、土壁にはワラ等が混ぜられてきた。そして現在、この構造は、繊維強化プラスチック（FRP, Fiber-Reinforced Plastics）として生活の様々な場所で活用されている。これは文字通り、プラスチックに繊維素材を混ぜることでその強度を向上させたものである。使用される繊維は、ガラス繊維や炭素繊維など様々である。プラスチックは軽くて加工もしやすいが比較的柔らかいため、繊維を混ぜることで、軽くて強い材料を作ることができる。そして、最も軽くて強い素材が求められるものの一つが飛行機である。現在、飛行機の機体は50%程度の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が使われているものもある。これにより、機体の重量は大幅に減少する。機体が軽くなれば、その分、人や荷物を多く運ぶことができる。逆に、運ぶ人や荷物の量が同じであれば、その分、使う燃料の量や排出するCO₂の量を減らすことができる。軽くて強い昆虫の羽と同じ工夫が飛行機にも使われている。

4. セルロースナノファイバー

話を、植物に含まれるセルロースに戻す。我々は昔からセルロースを広く利用してきた。衣服等に使われる綿はほぼ100%セルロースである。また、紙もセルロースからできている。図2を思い出してほしい。樹木はストローを束ねたような構造をしている。樹木からリグニンを除くと、このストローが1本1本バラバラになる。それを漉き上げて乾燥させたものが紙である。紙の繊維の幅は数十 μm だが（図5左）、その繊維をさらに拡大してみると、さらに細い繊維が観察される（図5右）。これが「セルロース」の正体である。これまで、我々は図5左のような太い繊維を衣服や紙として利用してきた。しかし、最近では図5右のような非常に細いセルロース繊維を利用するための研究が進められている。上でも少し書いたが、図5右のようなセルロース繊維の結晶性で幅は4-20 nmである。そのため、「セルロースナノファイバー」や「ナノセルロース」と呼ばれている。

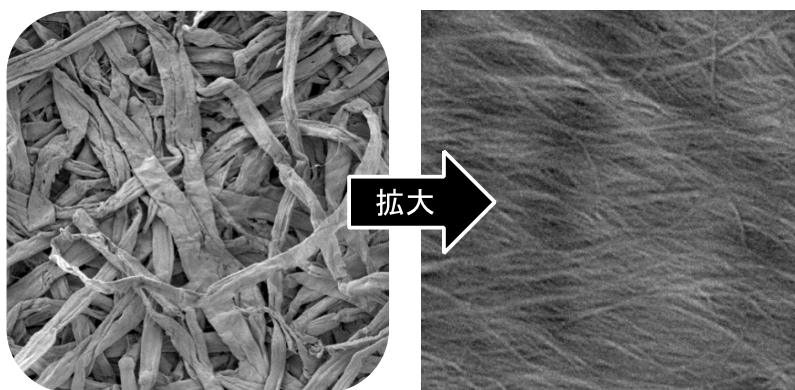


図5：樹木から作った紙の拡大図（左）と紙の繊維をさらに拡大して観察されるセルロース（右）
左図は100倍、右図は30,000倍で観察。

4.1 セルロースナノファイバーの製造

セルロースナノファイバーを得るためには、まず植物原料からリグニンやその他の成分を除去して、セルロース成分だけにする必要があります。いわゆる、紙のような状態である。このままでは図5左のようにまだ太い繊維のままなので、セルロースナノファイバー1本1本バラバラにする必要がある。バラバラにする装置は様々だが、例えば石臼のようなもので試料と水をすりつぶすと、パルプ繊維が次第にバラバラになり（解繊とよばれる）、最終的に図6のようなセルロースナノファイバーの水懸濁液が得られる。このドロドロの液体の中にはセルロースナノファイバーは1%しか入っておらず、あとは水である。紙をすりつぶしただけで、こんな風になってしまう。セルロースは本来水をよく吸収する性質を持つが、解繊によって比表面積が飛躍的に増大し、さらに吸水し、このような状態となる。最近ではセルロースナノファイバーの周りを化学的によりすることで、解繊が促進され、以前より簡便に製造できるようになっており、今では数社から販売されている。



図6：樹木から取り出したセルロースナノファイバー

セルロースは全ての植物細胞壁の骨格物質であるため、セルロースナノファイバーは全ての植物からとりだすことができる。そのため、樹木以外にも、稲わらや、ジュースの搾りかす、ジャガイモデンプンの搾りかすなど、利用価値の低い原料から作ることも可能である。ところで、樹木とジャガイモに含まれるセルロースナノファイバーの性質は同じのだろうか。調べたところ、少なくとも高等植物から取り出したセルロースナノファイバーの強さはほぼ同等であるという報告がある。つまり、原料がセルロースナノファイバーの用途を制限しないということになる。と同時に、巨大な樹木だけが特別に強いセルロースを持っているわけではなく、その構造が巨体を支えていることが分かる。

4.2 セルロースナノファイバーの利用

このように植物から取り出したセルロースナノファイバーをどのように利用するのだろうか。最も期待されている用途の一つが、樹脂（プラスチック）の補強である。つまり、先ほど述べた繊維強化プラスチックである。従来のガラス繊維などに比べると、植物から作られるセルロースナノファイバーは、環境に優しいバイオマス素材だと言える。現在、この分野の研究は非常に進んでおり、京都大学・矢野教授はセルロースナノファイバーを使った自動車のボディや部品の開発を行っている。これにより、自動車の重量は10%程度軽くなる。その結果、燃費は向上し、CO₂の排出は削減される。どんな車が作られているのかを知りたい方は、環境省のHPや動画をご覧ください。他にも、ランニングシューズの靴底のソールやボールペンのインクに、セルロースナノファイバーが混ぜられ、これらの製品はすでに商品化されている。太い繊維を使うよりも細いナノファイバーを使用する利点は色々ある。例えば、同じ量をプラスチックに混ぜたとき、細い繊維のほうがより少ない添加量で均一に分散し、全体的に強化される。図6もナノファイバーが水に均一に分散した結果ドロドロになっている。普通の紙の太い繊維ではこうはならない。面白い利用としては、食品に混ぜることである。すでに商品化されているものもある。ご自身で調べてみてほしい。図6で示したように、セルロースナノファイバーが水をよく吸収する。そのため、食品に混ぜるとふんわりしたりもっちりしたりする。全ての植物は細胞壁を持っており、その細胞壁にはセルロース（ナノファイバー）が豊富に含まれている。つまり、野菜を食べている我々は普段からセルロースを摂取していることになる。我々は、セルロースを食べても分解することはできないが、代わりに食物繊維として作用する。セルロースナノファイバーの利点の一つはこの安全性にあるといえる。

もう一つ、細いナノファイバーならではの特性がある。それは透明な樹脂を使って、上記の樹脂補強を行った時に起こる。例えば、セルロースナノファイバーの分散液を、普通に紙を作るときの要領でメンブレンフィルターを使って漉き上げ、乾燥させる。すると、セルロースナノファイバーからなる紙ができる。この紙に透明な樹脂を染み込ませると、非常に透明になる（図7）。これは、可視光波長に比べて十分に小さい繊維が分散している場合、光が散乱せずそのまま透過してしまうためである。図7の複合材料の内60%がセルロースナノファイバーで、残りの40%が樹脂である。強靱なセルロースナノファイバーが豊富に入っているため、このフィルムも非常に強い。また、樹脂は熱に弱い性質があるが、このフィルムはセルロースのおかげで、熱による変形にも強い。熱に強く透明な物質で思いつくのはガラスだが、ガラスはこんなにしなやかには曲がらない。

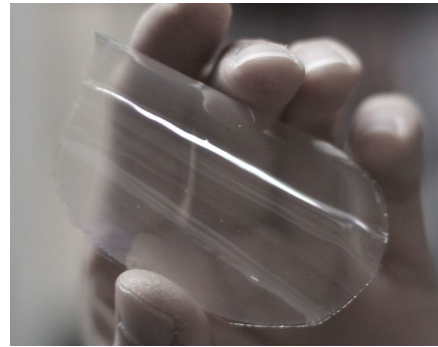


図7：セルロースナノファイバー60%を含む透明複合フィルム

ここからは少し余談になるが、先ほど蟹の甲羅について述べた。蟹の甲羅の構造は、植物細胞壁と似ていて、セルロースの代わりにキチンナノファイバーを豊富に含んでいる。そして、キチンナノファイバーの間には炭酸カルシウムがあり、非常に強い構造を持っている。ここで、蟹の甲羅から炭酸カルシウムを除去してみる。すると、キチンナノファイバーだけが残る。このとき、蟹の甲羅は真っ白である。キチンナノファイバーの間には含まれる空気によって光が産卵するためである。この状況は、先ほどのセルロースナノファイバーでできた紙と似ている。そこで、この真っ白な蟹の甲羅に透明な樹脂を染み込ませると、やはり蟹の甲羅も透明になる（図8）。蟹の甲羅が細いナノファイバーでできたナノ複合体である証拠であるといえる。

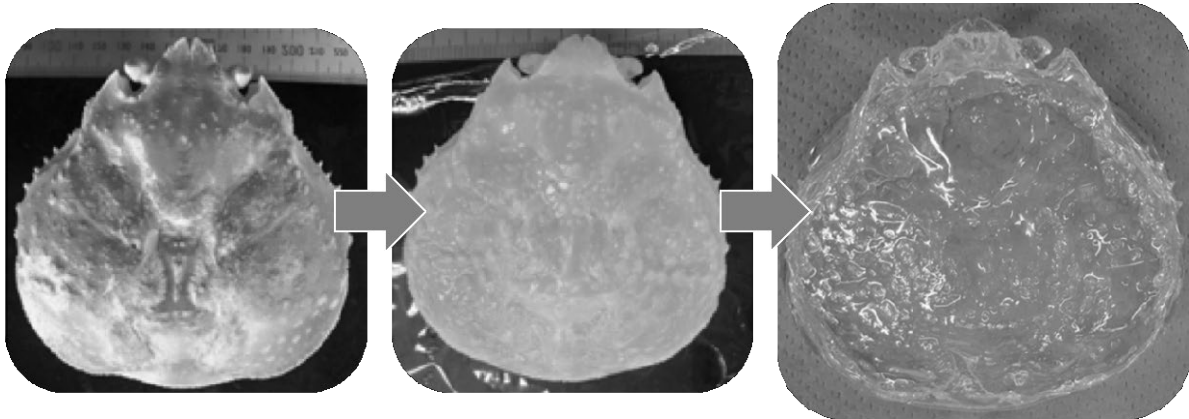


図8：透明になる蟹の甲羅

5. さいごに

我々は古くから植物を、セルロースを、いろいろな形で利用してきた。綿や紙と並んで、セルロースナノファイバーもその形の一つであるといえる。今はまだ製造コストなども問題でそれほど広くは使われていないが、今後人々が気づかないうちに、車や家電や食品にセルロースナノファイバーが使われているかもしれない。また、生物における繊維強化複合構造のように、自然の知恵が我々の生活に活用されている例が、周りにはあふれている。そして、まだまだ知らない自然の知恵が、今も明らかにしようとしている。その恩恵を受けて、我々の暮らしも少しだけ豊かになる。その繰り返しがいつまでも続けばと思う。

植物成分を微生物に作ってもらう

棟方 涼介^{1*}

Microbes are new producers of phytochemicals

Ryosuke MUNAKATA^{1*}

概要

お茶やコーヒーの覚醒成分カフェインや、バラの放つ香り成分、薬用植物が貯める薬効成分など、植物が作る化合物は私たちの生活の至る所で活躍している。植物成分は100万種にも及ぶとされ^{1,2)}、持続型社会を支える天然資源として活用拡大が期待されている。しかしながら、植物の有用成分の中には特定の植物種に微量にしか含まれない、また原料植物の大規模育成が困難である場合も多いなど、植物成分の大量生産に向けて植物ならではの課題が残っているのが現状である。この解決に向けて、植物成分を植物ではなく微生物に作らせるという手法が近年注目を浴びている。本原稿ではこの新しい生産方法の持つポテンシャルについて紹介する。

1. はじめに ～人の生活を彩る植物成分～

コーヒーを片手にこの要旨を読み始めた方、その中には、カフェインによる覚醒作用を期待している方もおられるのではないだろうか(図1)。カフェインは身近な植物成分の代表ともいえる化合物である。他にも、調理の際には辛み付けに唐辛子を加えるが、この辛さの素となる成分はカプサイシンである(図1)。薬効本体として植物成分やその誘導体が含まれる薬も多種存在する。さらには、香り成分や天然色素、ビタミン、また機能性成分として植物成分が活用されている。このように植物成分は我々の生活を様々な面で彩っている(図1)³⁾。近年、化石資源依存からの脱却が世界的に進められており、植物成分は未来の持続可能型社会の構築に貢献しうる天然資源として注目を浴びている⁴⁾。しかしながら、植物成分の種類は100万種とも推定されているものの、いまだその多くが未利用なのが現状である。

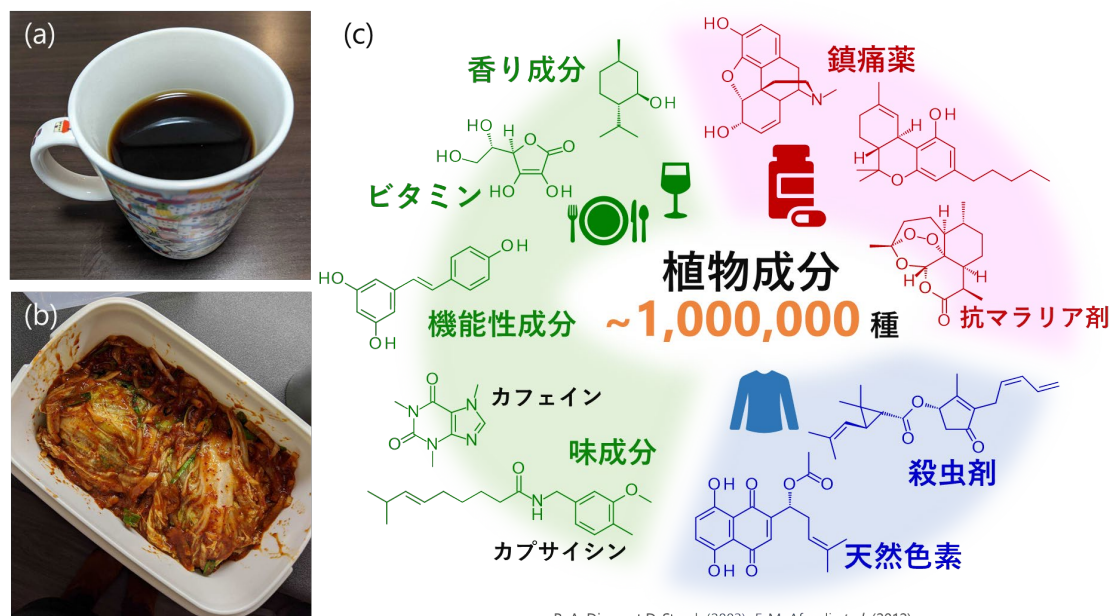
2. 植物成分の利用に向けた課題と新潮流

植物成分の利用拡大にはまだ多くの課題が残されている。その1つとして、目的成分について産業利用するだけの量をどのようにして手に入れるかが挙げられる。植物成分を取得しようとする際に用いられる手段の1つが、目的成分を含有する植物からの抽出である。この場合、原料となる植物の栽培が簡単で、収穫量が多く、またダイズ種子に含まれるタンパク質のように目的成分が豊富に含まれていることが好ましく、植物成分が安価で多く取得可能となる。しかしながら、植物成分の中には植物体に微量しか含まれない場合もしばしばである。例えば、抗がん剤として用いられているパクリタ

2022年1月21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: ryosuke_munakata@rish.kyoto-u.ac.jp



R. A. Dixon et D. Strack (2003); F. M. Afendi et al. (2012)

図 1：生活に身近な植物成分。(a) 覚醒成分カフェインが含まれるコーヒー。(b) 辛み成分カプサイシンが含まれるキムチ。(c) 植物成分の化学構造と機能・用途の例

キセルはイチイ属植物の樹皮から抽出されるが、その含量は樹皮乾燥重あたりわずか 0.01%程度である (図 2a) ⁵⁾。また、イネやダイズなど農業利用が定着している種とは異なり、大量栽培が困難な植物種も多い。その例がムラサキ科の薬用植物ムラサキである (図 2b)。ムラサキの根を乾燥させたものは紫根と呼ばれ、この生薬の薬効成分はシコニン類である ^{3,6)}。しかしムラサキはウイルスに弱く、実用可能な個体まで栽培するのが極めて困難である上に、自生する個体数が激減して現在は絶滅危惧種に指定されている。その他、天気などの環境要因によって目的成分の含量が大きく変動してしまうのも植物に広くみられる現象である。

化学合成も私たちの社会を支える重要な技術で、自動車の部品や合成洗剤、家電など、非常に多様なものを作るのに用いられているが、植物成分の合成も可能である。このメリットとして、植物の成分を作るといっても人工的に作るのも、植物に依存しないという点がある。つまり、環境要因に対して生産性が安定的である。さらに、植物から取り出す際には、目的成分以外の成分を除去する工程がとて煩雑であるが、化学合成の場合はその点、精製が一般的に簡単とされている。ただし、この手法はしばしば、高温、高圧下、極端な pH、また重金属存在下など環境負荷の高い反応条件が必要となる。さらに、複雑な化学構造を持つ植物成分を合成する際にも障壁が出てくる。

これらの従来の生産法の課題を解決する新たな方法が近年脚光を浴びている。植物が持つ”有用成分を作る能力”を、微生物に付与することで、微生物に植物成分を作ってもらえるものである ⁷⁾。これは新たな能力を持つ生物を創る・デザインするという観点から、合成生物学的な生産法とも呼ばれている。

3. 植物成分の微生物による生産法の特徴と利点

3.1 酵素のチカラ

”有用成分を作る能力”の主役が「酵素」である。一般的に酵素はタンパク質に分類される。タンパ

ク質と聞くとお肉や卵などから摂取できる成分と思われるかもしれないが、タンパク質には栄養源以外の働きもあり、その一つが酵素である。酵素はすべての生物、私たち人間も持っている。例えば、食事の際には食べた野菜やお肉、お米を胃や腸で消化・分解して吸収を助けるのも酵素の役割である。本論文では、分解から成分を変換する（変える）というように解釈を広げて、（あいまいな表現ではあるが）「酵素は化合物を別の化合物に高効率で変えてくれるタンパク質」と認識していただきたい。ここで変換される元の化合物を基質、基質が変換されて作られる化合物を生成物と称する。酵素の種類によって基質となる化合物の化学構造（形）、また同じ基質からでも酵素変換されてできてくる生成物が異なり、これらはそれぞれ基質特異性、生成物特異性（反応特異性）という重要な酵素化学的な特徴である（図 3a）⁸⁾。



図 2: 生理活性成分を持つ植物。(a) 抗がん剤パクリタキセルを持つイチイ属植物（京都大学・生存圏研究所 草野博彰博士より提供）(b) 抗炎症成分シコニンを持つムラサキの地上部と根（京都大学生存圏研究所 矢崎一史教授及び李豪氏より提供）。根表皮がシコニンの蓄積部位。

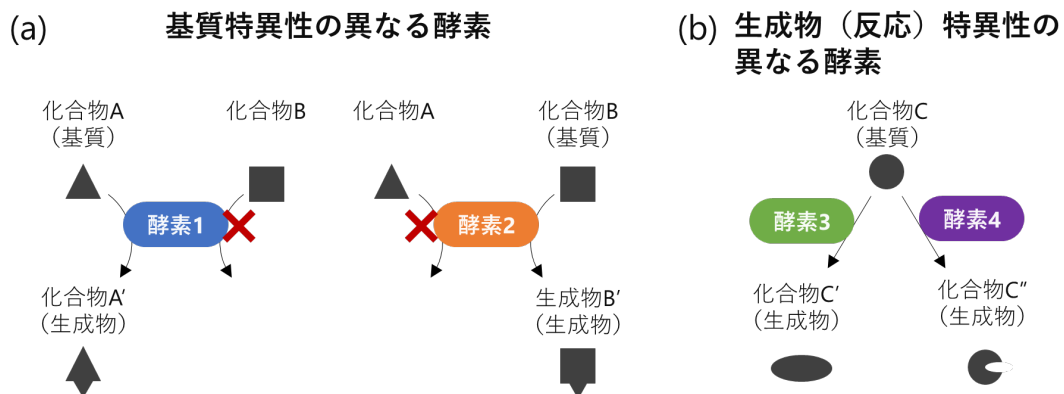


図 3: 植物成分を多様化させる酵素の性質。(a) 基質特異性。酵素 1 と酵素 2 は基質として認識する化合物の構造（形）が異なる。(b) 生成物（反応）特異性。酵素 3 と酵素 4 は同じ化合物を基質とするが、行う反応が異なるため、生成物となる化合物の構造が互いに異なる。

環境負荷が小さいとされる。また、酵素は高い基質特異性・生成物特異性を示すものが多く、概して複雑な化学構造をもつ化合物でも正確に作ることが得意である。酵素のこれらの利点は、前述した化学合成としばしば対比される。

これまでの研究で、植物は様々な酵素を獲得することで、100万種にも及ぶとされる成分の多様性を生み出していることがわかってきた⁹⁾。多様な酵素が存在すると、様々な化合物が基質として酵素反応に用いられ、またその変換のされ方も多様になるため生成物の種類が多くなる。加えて、生成物が別の酵素の基質としてさらに変換されていく。このように様々な酵素反応に支えられて植物成分の多様性が高まってゆく。

ここで興味深いのは、植物種ごとに酵素のバリエーションが異なるということである。この差異により、成分にも種ごとの個性が生まれてくる。冒頭の例を用いると、カフェインだけではなくカフェインを作るための酵素(群)もコーヒーノキ(コーヒー豆の原料となる植物名)に特有なものである。

3.2. 微生物のチカラ

植物由来の酵素を利用して微生物に植物成分を作ってもらう際には、酵素そのものではなく、酵素の設計図である遺伝子を微生物に導入する。すると微生物が培養されている間に設計図を基に転写・翻訳といった過程を通じて体内で酵素を生産し、その酵素が目的成分を作る(図4)。そのため、植物が必要となるのは、設計図となる遺伝子を探索する段階だけで、場合によっては冷凍保存しておいた葉っぱ1枚あれば目的の遺伝子が取得できてしまう。また、この生産法では、培養や化合物生産制御が容易、また遺伝子導入法が確立されている、酵素生産技術が充実しているといった、扱いが簡便な微生物種を用いることが多い¹⁰⁾。大量生産をこのような微生物種に任せることは、栽培困難な植物種が有する成分や、植物における含量が変動しやすい成分をターゲットとする際に大きな利点となると考えられる。

出芽酵母や大腸菌が植物成分の生産に最もよく用いられているが、他種の例も報告されている。日本人に縁のあるものとしては、日本食に欠かせない麹菌が、酵素生産が得意な種として近年注目されている。また、緑藻や珪藻といった光合成可能な微生物種を用いることで、光合成で得たエネルギー、炭素源から植物成分を生産させる研究も進められている^{11,12)}。

4. 植物成分の微生物による生産の例(図5)

最も有名な成功例の1つが、キク科クソニンジンが持つ抗マラリア剤アルテミシニンの前駆体成分を出芽酵母に生産させた研究である¹³⁾。クソニンジン由来の複数の酵素遺伝子の導入、及び出芽酵母が元々有する酵素反応の強化などを通じて、出芽酵母に培地の基礎成分からアルテミシニン前駆体を生産させることに成功している。その生産性は培地1リットル当たり25グラムである。これは2013年の例だが、2021年現在の他の植物成分の微生物生産の報告例と比較しても非常に優れたものである。医薬品原料としては、イチイ属植物が持つ抗がん剤パクリタキセルの前駆体の大腸菌及び出芽酵母による生産例¹⁴⁾も報告されている。さらに、モルヒネに代表されるケシの鎮痛剤オピエート類も出芽酵母で生産することが可能となった¹⁵⁾。この研究では、植物の酵素と共に細菌由来酵素を同時に出芽酵母で働かせるという工夫を加えることで、より高付加価値の化合物を作り出すことにも成功している。

微生物により生産可能となった化合物は医薬品原料だけではない。柑橘の香りリモネンやバラの香りゲラニオールといった香気成分、ブドウなどに含まれるポリフェノール的一种レスベラトロールや、キク科植物に含まれる抗肥満作用を示すアルテピリンCといった機能性成分など、多様な用途の植物成分について微生物生産例が報告されている^{10,16)}。

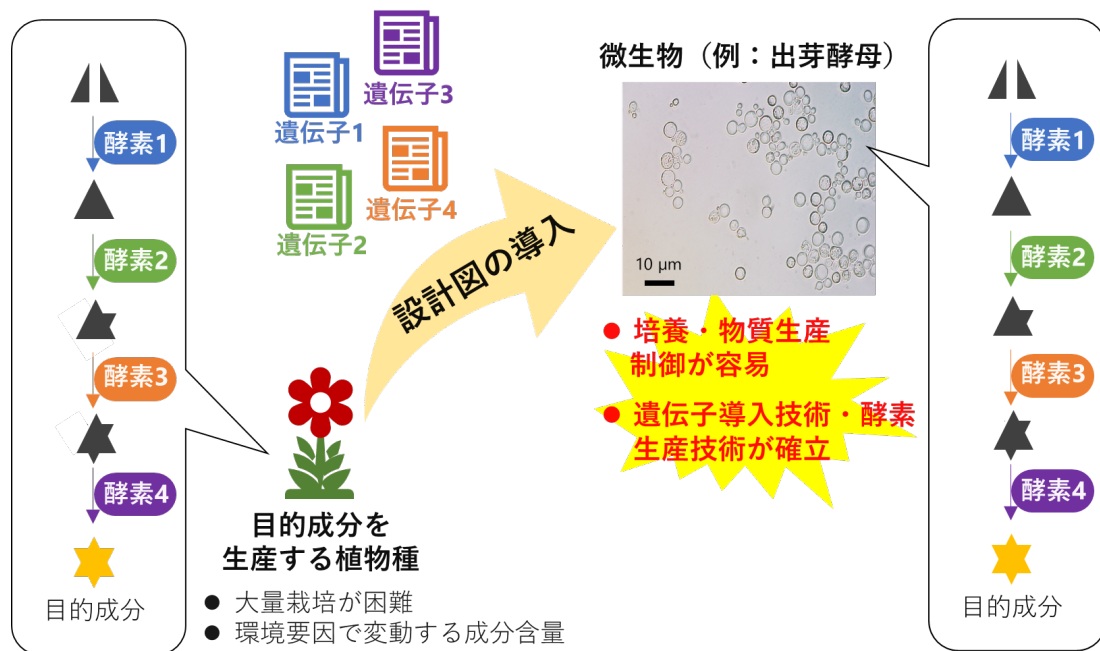


図 4：植物の酵素を利用した植物成分の微生物生産法の概念図。目的成分を含有する植物種から、その生産に必要な酵素 1-4 の設計図となる遺伝子 1-4 を取得し、微生物に導入する。導入された微生物は目的成分の生産能を獲得する。

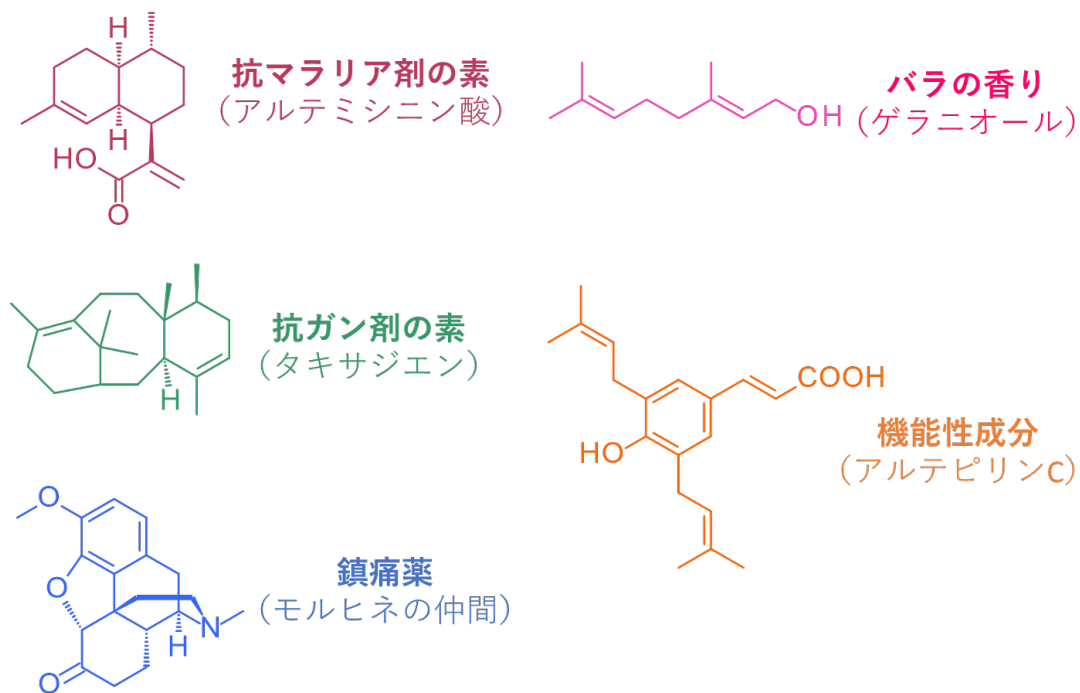


図 5：微生物によって生産された植物成分の例。化学構造式と用途、また化合物名を記載。

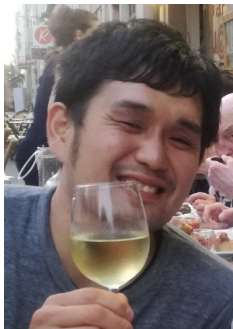
5. おわりに

本総説で紹介した植物成分の微生物による生産法は、従来の手法の欠点を補う特徴があることから、近年急速に研究が進んでいる。しかしながらこの手法もいまだ乗り越えなければならない課題が多い。というのも、単に植物の設計図を微生物に入れても、目的成分の生産量がほんの僅かという結果に留まることが多く、産業利用可能なレベルまで生産性が高められたケースは現状ごくわずかである。この原因として例えば、植物の遺伝子を微生物という全く異なる生物種に導入することになるため、微生物が植物の設計図から酵素を正確に作ることができず目的成分の生産が認められない、また微生物内で生産された目的成分が微生物自身に毒性を示すといった現象が報告されている。今後、酵素を改変する、最適な微生物種を発見する・デザインするなど、様々な観点で改良を重ねることで、将来微生物が植物成分の新たな供給源として社会に浸透していくと期待される。

参考文献

- 1) Dixon, R.A. et Strack D., Phytochemistry meets genome analysis, and beyond, *Phytochemistry*, **62**, pp. 815-816, 2003.
- 2) Afendi F.M. et al., KNAPSAcK family databases: integrated metabolite-plant species databases for multifaceted plant research, *Plant Cell Physiol.*, **53**, p. e1, 2012.
- 3) 飯島陽子、田口悟朗、食品成分・薬用成分・毒、“基礎から学ぶ植物代謝性化学”，水谷正治 編、羊土社、2018、pp. 283-300
- 4) https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/2020/mext_00488.html
- 5) Vidensek N. et al., Taxol content in bark, wood, root, leaf, twig, and seedling from several *Taxus* species, *J. Nat. Prod.*, **33**, pp. 1609-1610, 1990
- 6) 矢崎一史、ムラサキ科植物におけるシコニン生合成研究の新潮流、*ファルマシア*, **57**, pp. 705-709, 2021
- 7) 棟方涼介、マイクロ・ビオな植物成分の生産、*バイオメディア*,”*生物工学会誌*”, **99**, p. 83, 2021
- 8) 水谷正治、大西利幸、生合成概論、“基礎から学ぶ植物代謝性化学”，水谷正治 編、羊土社、2018、pp. 145-172
- 9) 小埜栄一郎 他、進化、“基礎から学ぶ植物代謝性化学”，水谷正治 編、羊土社、2018、pp.270-282
- 10) Pyne M. E, et al., Engineering plant secondary metabolism in microbial systems, *Plant Physiol.*, **179**, pp. 844-861, 2019
- 11) Vavitsas K. et al., The synthetic biology toolkit for photosynthetic microorganisms, *Plant Physiol.*, **181**, pp. 14-27, 2019
- 12) Kajikawa M., Production of ricinoleic acid-containing monoestolide triacylglycerides in an oleaginous diatom, *Chaetoceros gracilis*, *Sci. Rep.*, **6**, Article No., 36809, 2016
- 13) Paddon, C. J. et al. High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin, *Nature*, **496**, 528–532, 2013
- 14) Ajikumar P. K. et al., Isoprenoid pathway optimization for taxol precursor overproduction in *Escherichia coli*, *Science*, **330**, pp. 70-74, 2010
- 15) Galanie et al., Complete biosynthesis of opioids in yeast, *Science*, **349**, pp. 1095-1100, 2015
- 16) Munakata R. et al., Isolation of *Artemisia capillaris* membrane-bound di-prenyltransferase for phenylpropanoids and redesign of artemillin C in yeast, *Commun. Biol.*, **2**, Article No., 384, 2019

著者プロフィール



棟方 涼介 (Ryosuke MUNAKATA)

<略歴> 2011 年京都大学農学部応用生命科学科卒業／2016 年京都大学大学院農学研究科応用生命科学専攻博士後期課程修了（農学博士）／京都大学生存圏研究所、フランス・ロレーヌ大学にて研究に従事し、現在に至る。<研究テーマと抱負>代謝の研究を通じて植物に詳しくなる。<趣味など>サッカー、スキー、野球などスポーツ（観戦）と読書（主に漫画）。

「万能アンテナ」の開発

氏原 秀樹^{1*}

Development of Universal Antenna

Hideki UJIHARA^{1*}

概要

周波数や用途の異なる様々なアンテナの兼用を目指して広帯域アンテナを開発している。周波数帯域だけでなくビーム幅の選択肢も広いため、新たなフィードを設置するゆとりがない古い電波望遠鏡や大型カセグレンアンテナのアップグレード、探査衛星の小型化・多機能化など様々なアンテナ光学系のフィードアンテナに適応可能である。本稿ではこれらの広帯域フィードを利用した大気中の水蒸気分布の精密観測を目指した次世代ラジオメータ、その機能に加えて VLBI 観測のできる広帯域受信機、旧来の大型アンテナのアップグレードを目指した広帯域フィードの開発、低周波側の RFI(Radio Frequency Interference)による混変調雑音を急峻な遮断特性で抑圧する OMT(直交モード変換器)の開発と将来構想について述べる。

1. はじめに

リモートセンシングや宇宙測地、電波天文をはじめとする科学観測や通信、無線送電などアンテナの用途は多岐に渡る。その目的ごとに周波数を定めアンテナを設計するので、例えば電波望遠鏡に観測バンドを追加する場合、新たなフィードアンテナ(焦点面に置くアンテナ)を搭載できる場所があるかどうか問題になる。人工衛星ではそもそも容積や重量に限りがあるので設計時に観測バンドを厳選するし、打ち上げ後の改修は無理である。このような制約を解消すべく小型・軽量でビーム幅の設計自由度が高い広帯域フィードの開発を行っている。

科学観測では感度が重要なので、主鏡面を満遍なく照らして高い開口能率が得られ、さらに交差偏波やサイドローブが低く軸対称性が良いビームが得られるフィードが望ましい。この点でコルゲートホーンが好まれている(図 1)。その名の通りホーンの内壁に動径方向に彫った多数の溝を持つため、その加工コストと、低周波では溝に応じた壁の厚みによる重量、高周波では加工精度が問題となる。

コルゲートホーンの基本モード(HE11)に似たビームは、例えば円錐ホーンの開き角を喉元から段階的に変化させて適切な位相差と振幅比の高次モードを発生させ、開口面で基本モード(TE11)に合成することでも実現できる。これはマルチモードホーン¹⁾と呼ばれ、複モードや 3 モードホーンあたりまでは目にすることがある。コルゲートホーンのような内壁の多数の溝がないので薄肉軽量に作れる。しかしモードごとに位相速度が異なるため広帯域化が難しく、コルゲートホーンより帯域は狭かった。他方、開口面コルゲートホーンやクワッドリッジホーンは比較的帯域が広いがビーム幅も広い。そのためパラボラアンテナの主焦点には使えても、カセグレンアンテナでは焦点面のフィードから見た副鏡の視直径が小さい(=焦点距離 f /口径 D が大きい)ので適さない。

2022 年 8 月 24 日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所

* E-mail: ujihara.hideki.2t@kyoto-u.ac.jp

帯域もビーム幅の設計自由度も広いフィードを作るため、設計原理を考えてみる。アンテナのビーム形状は開口面の電磁界分布を方位角でフーリエ変換すれば求まり、そのビーム幅(=角度分解能)はおおよそ波長 λ /口径 D となる。フィードや副鏡、主鏡の物理的な寸法は固定値だが、高次モードをうまく合成すればフィード開口面での電磁界の分布範囲を等価的に波長に比例するようにでき、広い帯域にわたってビーム形状や幅の変動を抑えられるはずである...と書くと簡単そうだが、実現は難しい。

マルチモードホーンでは基本モードに対する所望の振幅比と位相差をもつ高次モードを管内の開き角の変化部で発生させるが、その適切な角度と位置は解析的に綺麗には解けない。なので数値計算で設計するのだがモード数が増えれば検討すべき形状パラメータも増え、その組み合わせの数が膨大になる。しかもそもそもフィードの開口径は使用する最大波長に比例し、軸長もおおよそ比例するのに、計算に必要なメッシュの解像度は最小波長で決まる。よって仮に最大最小周波数 10 を目指すなら、通常のフィード(周波数比 1.2 程度)に比して 10^3 のメモリが要る。計算時間はメッシュ要素数の 3 乗に比例するので、ビームの狭い(=開口径の大きな)広帯域フィードアンテナの設計は非常に難しくなる。

というわけで 3 モード目までは市販の設計ソフトに指定方向の交差偏波極小条件を加えて望ましい形状の探索を自動化し、フィードの構造は高次モード発生部とビーム幅の調整部分を分けて考え、4 モード目以降はおおよそその規則性をもとに人間が最適化することにして組み合わせの探索範囲を大幅に狭めることにした。得られた設計を始祖として段階的に帯域を広げ、ビームが崩れると逐次モードを増やして修正していき、前職の NICT 鹿島において日本とイタリアの間で光格子時計を精密に比較する VLBI 実験「Gala-V」で使う鹿島 34m アンテナ用の広帯域フィード(6.5-16GHz)をマルチモードホーンで実現した。しかしそれ以上の帯域幅(3.2-16GHz)ではフィードの長さや構造が難点だった。

そこで前述のマルチモードホーンの考え方と、加工が容易で軸長が短い反面、ビームが広い開口面コルゲートホーン、レンズによるビーム形状の補正を組み合わせることにした。このように問題を適度に分割して見通しをよくしたことで、カセグレンアンテナ用の狭いビーム幅のフィードもパラボラ用の広いビーム幅のフィードも設計できる柔軟性が得られた。その過程で、工作精度にゆとりを持たせた設計としたことが実は重要である。アンテナの空間分解能が同じなら、周波数が高い方が口径は小さくて済む。しかし工作精度や組み立て精度には限界があるので、原設計が簡素な構造であるほど、部品点数が少ないほど高周波化しやすい。

この隠れた(?)利点を活かして本研究では、課題 1：大気中の水蒸気観測と同時に VLBI 観測ができる広帯域アンテナ(16-64GHz：図 1 に初回試作のフィードを示す)、課題 2：大型電波望遠鏡用の非常に狭いビーム幅(副鏡視直径 15 度程度)の広帯域フィード(1.5-15.5GHz)の開発を目指すこととした。

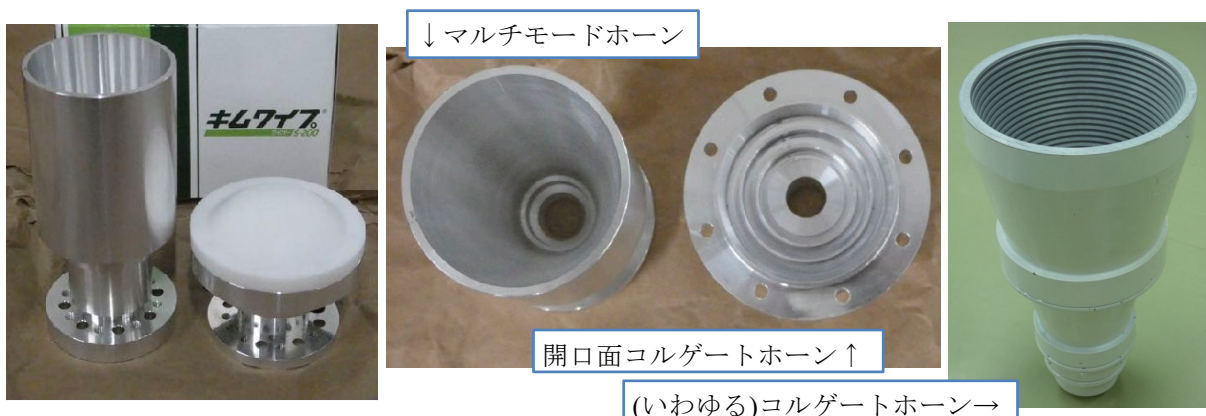


図 1.課題 1 用の広帯域フィードホーン試作品 2 種(左図、中図)と通常のコルゲートホーン(右図)

2. 広帯域アンテナの開発

VLBI(超長基線干渉計)では原子時計を位相基準として遠く離れた複数のアンテナで同じ電波源からの電波を受信し、その相関処理により各アンテナ位置の精密測定や天体の高解像度観測を行う。測地 VLBI では分解できずに点源に見えるほど遠方の活動銀河核を用いる。従来は S/X(2.2GHz 帯/8GHz 帯)の 2 バンドを用い、その受信帯域も数 10-数 100MHz 程度であった。各アンテナで受信した白色雑音的な放射の遅延時間差からアンテナ位置を求める観測なので、受信帯域が広いほど感度が向上する。そこで次世代測地 VLBI の VLBI2010/VGOS²⁾では当時開発されていたビーム幅の広い広帯域フィード(1-14GHz)を搭載したアンテナを新設し、数 GHz 帯域幅による宇宙測地の高精度化を計画した。電波天文では高感度・多波長観測を目指し、かつ多数のアンテナを合わせて合計 1 平方 km の大集光力を目指す SKA(Square Kilometre Array)計画³⁾がある。これも既存のビームの広い広帯域フィードに合わせた光学系のアンテナを新設する。ゆえに Gala-V で開発したビーム幅の狭い広帯域フィード⁴⁾は従来のカセグレンアンテナ用として世界初で、しかも交換前の 5GHz 帯コルゲートホーンより小さく作れた。

VGOS や SKA アンテナでは焦点面に置けるフィードは 1 個だけであり、複数のフィードを置いて同時に多点観測することは想定されていないが、大型電波望遠鏡で一般的なカセグレン光学系は良像範囲が広くて焦点面に多数のフィードを並べられる利点がある。コンパクトな広帯域フィードがあれば多波長同時観測の実現だけでなく掃天観測などの効率も向上できる。

2.1 広帯域 VLBI 観測兼用次世代マイクロ波ラジオメータの開発

大気中の水蒸気観測に使う市販のラジオメータの受信機は、通常は常温である。KUMODeS⁵⁾では 22GHz 帯の水蒸気と 50GHz 帯の酸素の放射をそれぞれのフィードに前置した周波数選択膜で分けて受信するが、22GHz 帯は初段 LNA(低雑音アンプ)を冷却して受信機雑音を下げて高感度化を図った。

これらを課題 1 では 1 本の 16-64GHz の広帯域フィードにまとめたことで周波数選択膜に起因する視差調整が不要になった。冷却容器も小型化できるだけでなく 30GHz 帯の雲中の水滴も観測でき、他の周波数では電波天文観測や人工衛星の軌道決定、通信なども行える。

ただし現時点では全帯域を 1 個で受信できる冷却可能な LNA がないため、広帯域フィードに繋いだ広帯域 OMT(直交偏波分離器)で直交する直線 2 偏波をわけ、矩形導波管で低域側 LNA(公称仕様 16-28GHz あるいは 19-32GHz)に、1.85mm コネクタで高域側 LNA(26-62GHz)に輸入している(図 2, 3)。

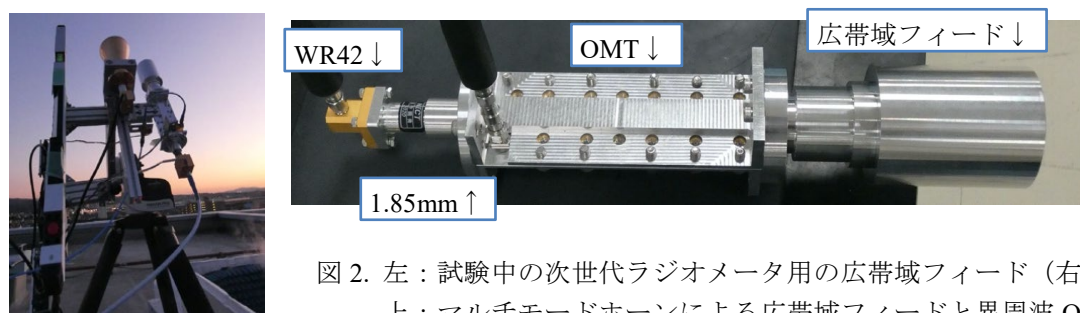


図 2. 左：試験中の次世代ラジオメータ用の広帯域フィード（右側）
上：マルチモードホーンによる広帯域フィードと異周波 OMT

この OMT の高域側ポートは将来の冷却広帯域 LNA を期待して同軸接続で設計したため、導波管内部のプリント基板アンテナから grounded coplanar 線路を介して当該偏波を取り出している。当初は性能が不安定だったが NICT ミリ波棟のネットワークアナライザで 67GHz までの伝送特性の測定を行い、LNA の固定金具を作成して改善を図った(図 4)。この OMT をつけた広帯域フィードのビームパターンは軸対称に近く、管内のプリント基板のパターンの非対称による変形は小さい(図 5)。

ここに用いた grounded coplanar 線路はアンプを直接実装できて量産しやすい反面、導波管に比べれば伝送損失が大きいため、線路脇のビア径とピッチを極力小さくした改良版を設計中である。しかしクワッドリッジ導波管型 OMT も製作の目処が立ったため、同時に設計中である(2.3 節)。

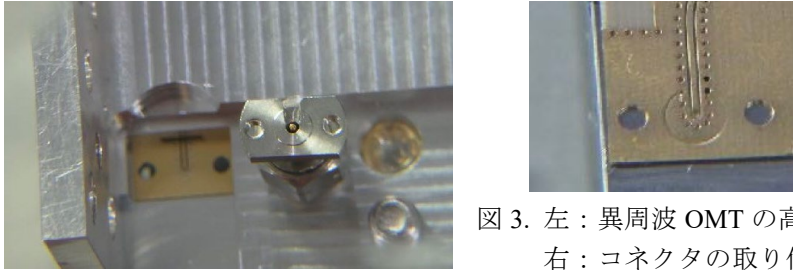


図 3. 左：異周波 OMT の高周波ポートと 1.85mm コネクタ
右：コネクタの取り付け跡

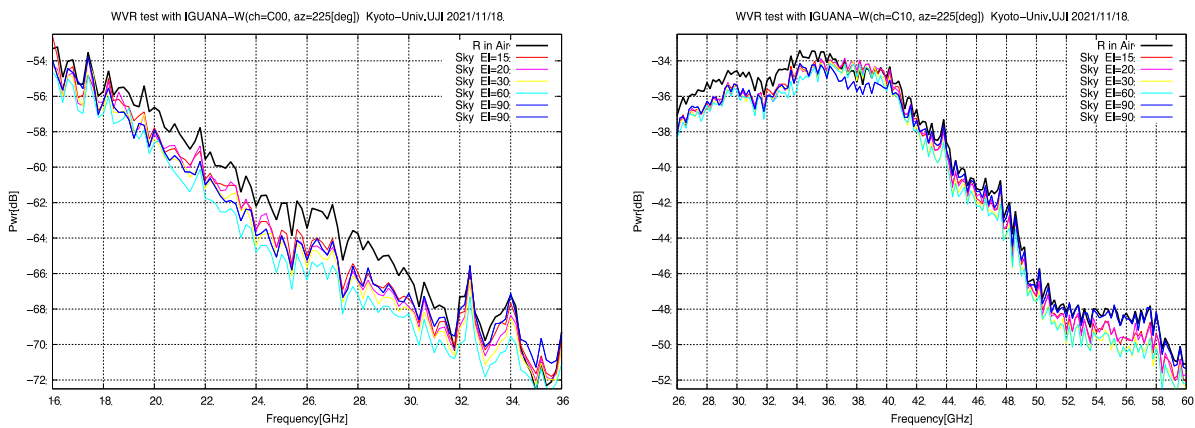


図 4. それぞれのポートで測定した電波吸収体(黒：常温)や様々な仰角での大気放射からの受信電力
ここから電波吸収体の熱放射を基準に、大気放射の強度、水蒸気の密度を求めていく

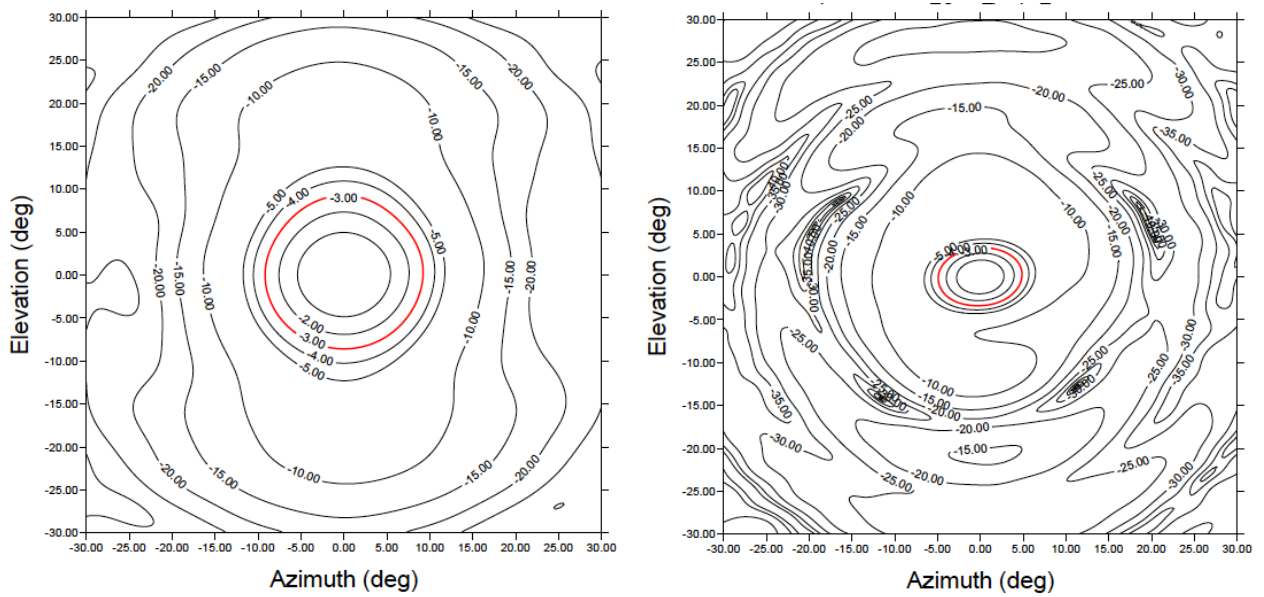
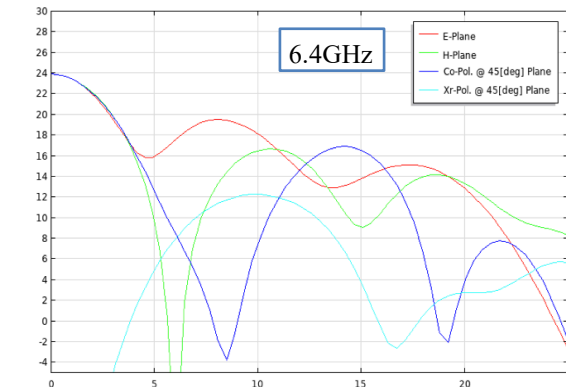
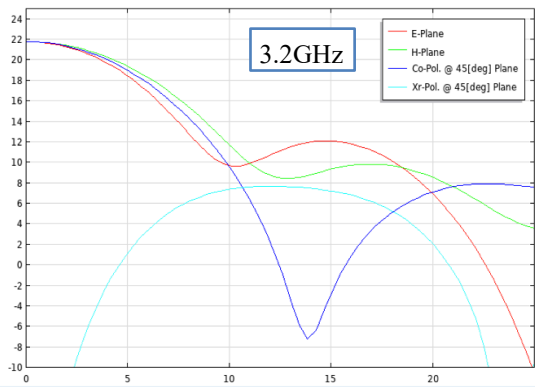


図 5. METLAB で測定した広帯域フィードの高周波側ポート側のビームパターン(左:22GHz,右:43GHz)

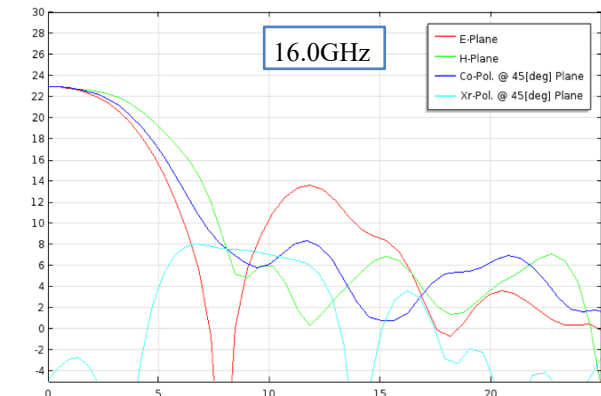
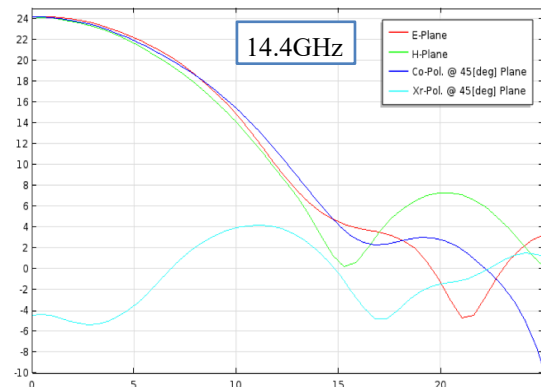
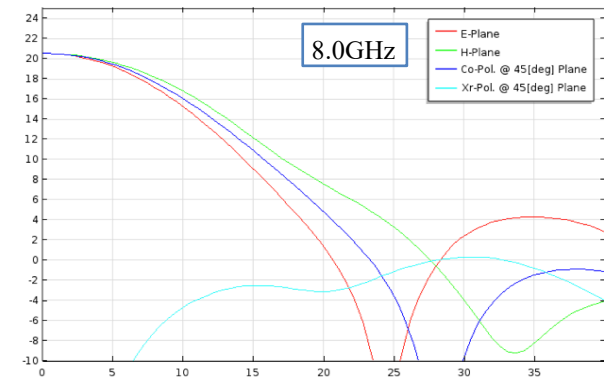
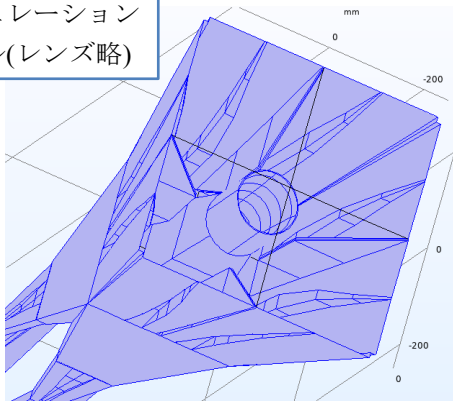
2.2 大型カセグレンアンテナ用広帯域フィード

課題 2 は副鏡の視直径が 15 度程度のアンテナ光学系に搭載し、最大最小周波数比 10 を目指しているため前人未踏である。様々な構造を試したが、ビーム幅が細いため鹿島 34m 用広帯域フィードの初期案を発展させた。外側ホーンの形状が複雑な反面、例えば 6.5GHz を境に上下の周波数帯で最適な LNA を選べる利点がある同軸ホーンとなっている。構造の複雑さと周波数範囲の広さから当時のメモリ量や計算速度では検討不能だったが、現在の計算機（メモリは 8 倍の 1TB、CPU は 8 倍速い）で再検討したところサイドローブが低減し、メインローブのビーム形状も改善でき、実現の見通しが得られている(図 6)。外側ホーンの各偏波で 2 個使う導波管ポートの波面が内部でうまく合成できるよう、ホーン内部のリッジで制御できたためと考えている。



外側ホーンで作るビームの計算例

シミュレーション
モデル(レンズ略)



内側ホーンで作るビームの計算例

図 6. 最大最小周波数比=10 を目指した広帯域フィードとシミュレーション結果

2.3 遮断特性の急峻な OMT(直交モード変換器)の開発

前述(2.1 節)のとおり OMT は、受信であればフィードから入ってきた直交 2 偏波を分離し、それぞれの初段アンプに伝送する。円偏波と直線偏波を変換するのに必要な 90 度の位相差あるいは 1/4 波長の遅延を広い周波数にわたって低損失で正確に実現するのがアナログ回路では困難なので、直線 2 偏波受信としている。円偏波での観測が必要な場合は A/D 変換後に計算機内で合成する。

受信アンテナの感度には初段アンプの内部雑音や初段アンプの前の損失が大きく影響するので、初段アンプに前置される OMT も低損失である方が好ましい。Gala-V ではクワッドリッジ導波管による OMT で直線 2 偏波受信とし、同軸端子(SMA)で初段アンプを接続していた。OMT 内部は主にワイヤ放電加工機で加工したが、課題 1 での検討の結果 1.85mm の端子と最小径のワイヤを使えば上限 64GHz 程度でも製作できる目処が立った。導波管入力 LNA を直接つなぐことはできないが、前述の grounded coplanar 線路を利用した OMT より高周波での伝送損失を大幅に減らせる。

広帯域アンテナ周辺の RFI(Radio Frequency Interference)は、飽和に至らない強さでも初段アンプの混変調雑音を招くので、広帯域アンテナの設置場所によっては対策が必要である。そこで内部構造による急峻なハイパスフィルタ特性を持つ OMT を設計しているが、リッジの角や端子との接続部の不整合、ホーン部分での反射を組み合わせるとノッチフィルタ特性を持たせることもできる。例えば NICT 小金井本部の 2.4m アンテナでは、3.5GHz 以下の周辺の通信波に加えて近傍の衛星双方向実験用アンテナの通信波(14GHz 付近)を抑圧できるかもしれない(図 7)。課題 1 の広帯域観測用 OMT では搭載アンテナの受信機の局部発信器(16.8GHz)から漏れ込みを遮断したい。2 つのポートで特性が揃う必要はないが、可能なら 24GHz 帯のミリ波レーダや 28GHz の 5G 通信の抑圧もできるかもしれない(図 8)。

Gala-V 実験⁹⁾の当初は 3.2GHz 以下だけを切れば十分と思っていたが、システム雑音を測定したところ想定よりも高かった。電波環境は時代とともに変化していくので、課題 1 の実証実験に並行して OMT による混変調雑音の低下を目指している。

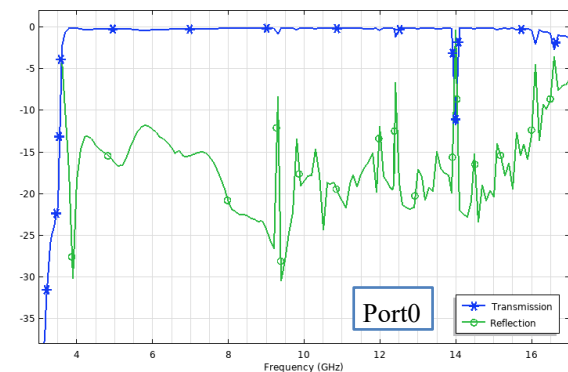
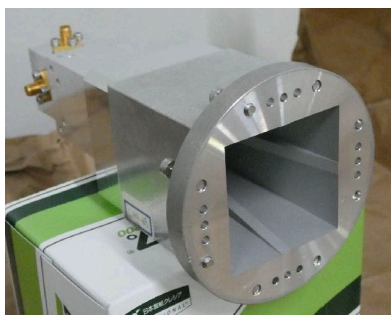


図 7. 左 : Gala-V 用クワッドリッジ導波管型 OMT(3.2-16GHz)

右 : RFI 抑圧のためのシミュレーション例(4-16GHz, 青:伝送損失[dB], 緑:反射損失[dB])

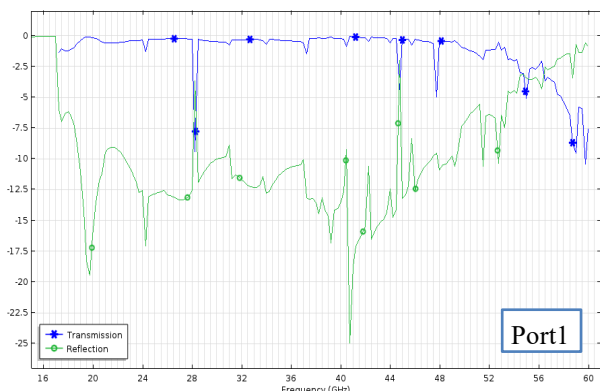
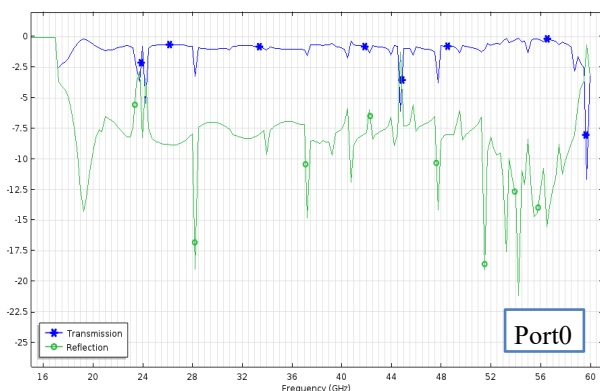


図 8. 課題 1 用 OMT のシミュレーション例(16-60GHz, 青:伝送損失[dB], 緑:反射損失[dB])

3. まとめと今後

様々な用途に使える広帯域アンテナと、それと組み合わせて使う急峻な遮断特性を持つ OMT の開発について述べた。紙面の都合でビーム整形用のレンズ形状と、パラボラ主焦点や SKA を目指したビーム幅の広いフィード、アンテナ光学系の話は割愛した。

課題 1 の広帯域フィードは軽量な 90cm カセグレンアンテナに搭載し、高空間分解能の可搬局として実証実験を行う予定である。VLBI 観測方向と同一視線上の水蒸気の精密測定による VLBI 観測の誤差低減が目標だが、まずは従来のマイクロ波放射計では不可能な地平線ギリギリの低仰角までの観測を NICT 鹿島で行う。臨海工業地帯のそばなので海と陸、工場の煙突の煙の水蒸気分布の観測実験を行う。水蒸気ラジオメータとしては大気モデルへの貢献⁷⁾や火山の水蒸気噴出量の測定などへの応用も考えている。GNSS を利用した観測と違い、見たい方向のデータが得られる。課題 2 の超広帯域フィードは実際の設置場所の状況に応じて形状を最適化していきたい。

これらは電波天文でよく使われるコルゲートホーンと違って動径方向に多数の溝がなく、OMT も曲線加工を極力排した単純な構造なので高周波化しやすい。特にマルチモードホーンは ASTRO-G/VSOP2 衛星 43GHz 帯ホーンを GFRP で試作した例があるが、CNF(セルロース・ナノ・ファイバ)による複合材を使えば環境に優しく、さらに軽量にできるだろう。CFRP ほどの鏡面精度は出ないかもしれないが、50-100GHz あたりくらいまでなら実現できそうに思う。CNF(図 9)は CFRP と異なり電波を透過するので、まずは主鏡を遮る副鏡の支持構造に使ってみる予定である。

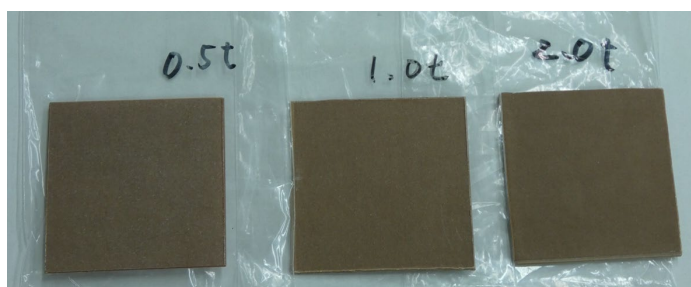


図 9. 誘電率・誘電損失測定用 CNF 薄板サンプル

本項では受信アンテナとしての開発を述べた。もちろん送信にも使えるが、まだニーズがない。そもそも現状の通信に使うバンド幅を遥かに凌駕しているし、アンテナ自体が広帯域なので技適に合格するためには入念な高調波対策が必要と思われる(地球と通信しなければ条件を緩められるかもしれないが)。ただし広帯域化のために使うリッジの間に電場が集中するので、大電力の送信には向かないと思われる。

というわけで、将来的にはリモセン衛星や外惑星の衛星を探索する小型衛星間の送受信・送受信アンテナへの応用、例えば親機へのデータ送信時に親機から必要な電力をもらうとか、永久影のなかの探索など電力事情が厳しい科学観測に提案したいと考えている。このような広帯域アンテナをソフトウェア無線機と組み合わせれば、衛星の打ち上げ後でも観測・送受信バンドを幅広く変えられるのは今までにないメリットだろう。SETI みたいに相手の送信周波数の決めようがない観測を静かな月の裏側で黙々と行うにはコストパフォーマンスが良いはずである。

謝辞

本研究は科研費 18H03828(代表：市川隆一)および 21H04524(代表：氏原秀樹)の支援および Max Planck 電波天文学研究所から計算機の借用を受け、測定は生存圏研究所 METLAB および NICT 先端 ICT デバイスラボの計測設備を利用した。

参考文献

- 1) 電子情報通信学会「知識の森」, https://ieice-hbkb.org/portal/doc_index.html
第4群(通信工学)-2編(アンテナ・伝搬)-6章, https://www.ieice-hbkb.org/files/04/04gun_02hen_06.pdf#page=3
- 2) IVS Technology VGOS System Development, <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-general.html>
- 3) Square Kilometre Array, <https://www.skatelescope.org>
- 4) Ujihara H., Takefuji K., Sekido M., Ichikawa R. (2018), “Development of Wideband Antennas.”, In: Freymueller J., Sánchez L. (eds), International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World, International Association of Geodesy Symposia, vol 149, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/1345_2018_41
- 5) Nagasaki T., Araki K., Ishimoto H. *et al.*, “Monitoring System for Atmospheric Water Vapor with a Ground-Based Multi-Band Radiometer”, Meteorological Application of Radio Astronomy Technologies. *J Low Temp Phys* 184, 674–679 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10909-015-1412-9>
- 6) Pizzocaro M., Sekido M., Takefuji K. Ujihara H. et al., Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry, *Nature Physics*, October 2020, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-020-01038-6>
- 7) 京都大学防災研究所年報第30号B-1昭62. 4, ” 大気境界層の気温高度分布の測定のためのマイクロ波放射計について”, 堀口光章・光田寧

著者プロフィール



氏原 秀樹 (Hideki UJIHARA)

<略歴> 1994 年京都大学理学部卒業／2001 年総合研究大学院大学数物科学研究科博士後期課程修了(博士(学術))／同年国立天文台ポスドク／2009 年情報通信研究機構ポスドク／2021 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>ブレイクスルー的な観測機器開発。

<趣味など>映画と音楽、写真とネコとダンスと SF。

Evolution of electron zebra stripes in the Earth's inner magnetosphere

Megha Pandya

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji, Japan.

1. Abstract

We focus on the charged particle in space that exhibits a complex interaction under the influence of the Earth's magnetic field. For certain conditions, these charged particles may get trapped into the Earth's magnetosphere and execute distinct periodic motion unless an external perturbation acts on it. The external perturbation affects the trajectory of the charged particles and leads to the redistribution of their configuration in the space. The energetic particles with energies ranging from 100 keV to a few MeV are trapped in about 1-7 R_E forming a doughnut-like two-belt structure namely: (i) the inner radiation belt which is located at about $\sim 1-2.5 R_E$ and (ii) the outer radiation belt which is located at about 3-7 R_E . The inner belt mainly consists of protons and is relatively stable, while the outer belt is highly dynamic with relativistic electrons. The region between the inner and outer belt is generally devoid of energetic charged particles and is named as slot region. The outer belt electrons continuously decay and reform with each reformed belt may have different physical properties and intensities. The energy versus L-value spectrum of electrons in the inner belt was previously expected to be monotonic and smooth. Later, multi-peaked structures of electron intensities are observed in the energy spectra at $L < 3$. The peak-to-valley ratio of the intensities was observed to reach 10 times or more. Currently, we are testing plausible global mechanisms for the formation of such structures and their variation that could be responsible to alter the magnetic field configuration in the inner magnetosphere down to $L = 1.1$.

2. Introduction

The charged particles emanating from the Sun exhibits a complex interaction under the influence of the Earth's magnetic field and get trapped in the Earth's magnetosphere when certain conditions are satisfied. The energetic particles with about 100's of keV to a few MeV energies get trapped in the Earth's magnetic field in about 1-7 R_E regions known as radiation belts. The schematic diagram of a typical two-belt structure of radiation belts is shown in figure 1. It consists of two distinct regions of energetic particles' population; (i) inner belt, which mainly consists of energetic protons that extend from $\sim 1-2.5 R_E$, and (ii) outer belt, which is mainly composed of energetic electrons and has its inner edge around 3 R_E . The outer belt is highly dynamic with its outer edge usually just beyond geosynchronous orbit. The region between the inner and outer belt is generally devoid of energetic charged particles and is known as the slot region.

Explorer I and III spacecraft recorded very critical measurements of the energetic charged particles in space. These were discovered by James Van Allen in 1958 and were named as Van Allen Radiation belts in his memory. The radiation belt particles are very harmful to human life and electronic circuits of sensitive instruments in space. Moreover, the radiation belt electrons and ions showed interesting characteristics like non-monotonic distribution during the disturbed intervals under the influence of electric fields, flux variation by an order of one or more, interaction with the variety of frequencies of waves leading to the acceleration or loss

Accepted June 6th 2022.

Laboratory of Computer Simulation for Humanospheric Sciences, RISH, Kyoto University.
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011 Japan

* E-mail: pandya.meghamahendra.3j@kyoto-u.ac.jp

processes in the magnetosphere. This made a study of radiation belts a very interesting topic especially using newer sophisticated instruments that are specially designed to survive the severe energetic particle bombardment.

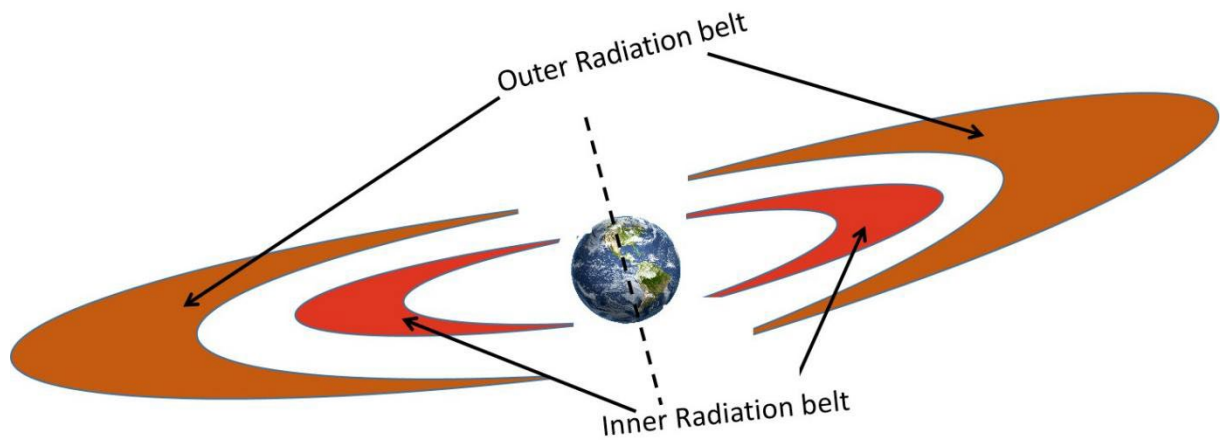


Figure 1: Schematic diagram of the two-belt structure of the Earth's radiation belts.

Our studies focus on the dynamic electron radiation belts that continuously undergo the decay process and again refill irregularly with different physical properties like shape, position, and intensity of fluxes. This newly formed radiation belt may be completely different from the previous one. In the early 1960's it was believed that the distribution of the 100's of keV to a few MeV electrons is monotonous and well-ordered. Later, Imhof et al.,¹⁾ first showed the presence of some sharp peaks in the electron flux intensities after a geomagnetic storm. They observed a single peak in the energy spectrum at 1.5 MeV using low altitude-satellites. A new era to study such distinct features in the Earth's radiation belt emerged with this observation. Several researchers observed similar fine structures at $L < 2$ and multiple peaks with high intensities were studied to explain the global mechanism for its occurrence.

Since the beginning of the space era, the behavior or energetic charged particle population with 100's of keV to a few MeV energies has always puzzled the scientific community. The unusual characteristics of charged particle population and its extent of flux intensities have led to a major loss of some of the previous satellite missions in the 1990s. At low L-values where the fluxes of energetic protons are high, the older satellite missions, like DEMETER spacecraft, could not distinguish the contamination of protons while measuring electron fluxes. In 2012, the newly-launched Van Allen Probes mission re-opened another era to re-examine and improve the understanding of radiation belt ions and electrons.

3. Data Selection

To understand the behaviour of the charged particles, we employ the data obtained from Van Allen Probes. The Van Allen Probes launched into orbit on 30 August 2012, comprises twin identical spacecraft Probe-A and Probe-B. The two spacecraft have nearly identical orbits with an orbital period of ~ 9 hr, a perigee of ~ 600 km, and apogee of $\sim 5.8 R_E$ and 10° inclination³⁾. Such orbits allow spacecraft to cover the most hazardous region of the Earth's magnetosphere. We use level-3 unidirectional differential flux data obtained from the RBSPICE⁴⁾ instrument onboard Van Allen Probes-A. It consists of 20–940 keV electrons having 64 bins of energy channels. The unidirectional data are binned into 17 pitch angle bins with 10° width, having the first and last pitch angle bin width of 15° . The high-resolution data binned into 64 energy channels serve as a great opportunity for studying various features in the energy spectrum of the electron radiation belt.

4. Observation and Results

Figure 2 presents the electron spectrogram taken by Van Allen Probes A at $L < 3.5$ during the interval ranging from 01:35 UT to 06:07 UT on 27 January 2017. The colorbar represents the electron fluxes measured at 90° pitch angle. Several stripes are seen in the spectrogram, which is different from a monochromatically peaked structure as previously observed.¹⁾ The stripes that appear in the energy vs. L spectrogram are called "zebra stripes"⁵⁾. Formation of such structures of electron flux distributions are not likely to be the consequence of the diffusion, in which particles in the denser region move to the tenuous region in the phase space. We are currently investigating the plausible sources that can give rise to the distribution of energetic electrons in the inner belt, in particular, the zebra stripes.

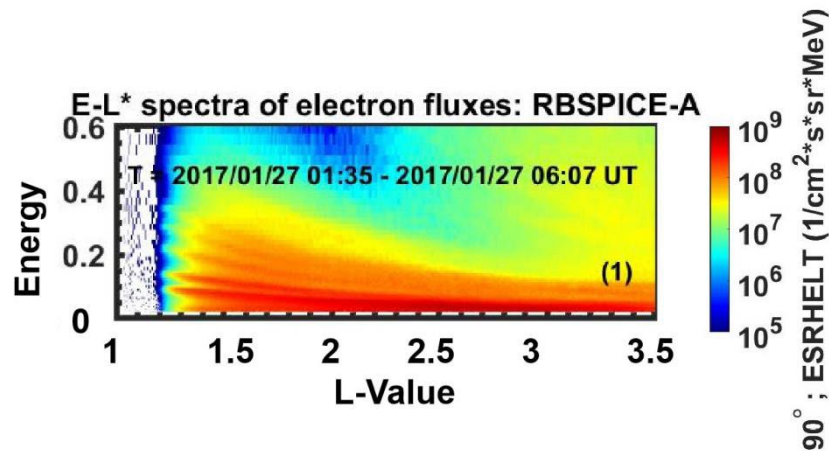


Figure 2: Electron "zebra stripes" observed on the energy versus L-value spectrogram is shown. They were recorded by RBSPICE-A on board the Van Allen Probe A on 27 January 2017.

Similar structures have been previously recorded by various satellites^{5,6)}. These patterns are suggested as an outcome of the interaction between the electrons and the induction electric field associated with Earth's rotation⁵⁾, and resonant interaction of energetic electrons with ultralow frequency (ULF) waves in Earth's magnetic field¹⁾. Apart from these, the electric field generated due to the interaction of the fast solar wind with the Earth's magnetosphere is also suggested to play an important role in the dynamics of radiation belt electron¹⁾. Using numerical simulations Elkington et al.⁷⁾ have shown that this electric field could also have an important and interesting effect on drift resonances of electrons with toroidal and poloidal ULF waves.

5. Discussion

We are studying the formation mechanism of the "zebra stripes" measured by the RBSPICE instrument onboard twin Van Allen Probes, which consist of 100's of keV electrons distributing over the entire inner radiation belt ($< 3 R_E$). Based on the observed regular patterns automatically identified, we are currently investigating various physical processes that are responsible for the formation of stripes. Some global mechanisms could be likely to alter the electron drift in the longitudinal direction. As a first step, we are trying to identify the source location of the electrons with energy ranging from 0.02 to 0.6 MeV at $L < 3$. One of the major plausible global mechanisms for the redistribution of energetic electrons is the complex interactions between the solar wind and Earth's magnetic field. We make a comprehensive analysis to understand the instability of the magnetic field lines up to $L = 1.1$.

Our studies on identifying the behavior of 100's keV electrons are believed to advance our understanding of space environments and their interactions with the human living environment-sphere. Human civilization has started to notice the destructive power of energetic particles after the advent of the space era. Hence, we aim to deepen our understanding of the variability of the radiation belts for the benefit of society and maximum use of a sustainable space environment, namely space humansphere. The precipitating electrons, cause northern and southern lights. The magnetospheric and ionospheric current system results in huge electrical currents that can disrupt communication and power grids. The radiation belts contain intensely charged particle particles that are potentially hazardous to astronauts and sensitive electronics on spacecraft. Our studies on energetic trapped charged particles in the near-Earth environment may contribute to forecasting and preventing adverse conditions in the space environment that can cause a variety of socioeconomic losses.

6. References

- [1] Imhof, W. L., & Smith, R. V. "Observation of nearly monoenergetic high-energy electrons in the inner radiation belt." *Physical Review Letters*, vol. 14(22), pp. 885, 1966.
- [2] S. G. Claudepierre, T. P. O'Brien, J. F. Fennell, J. B. Blake, J. H. Clemmons, M. D. Looper, J. E. Mazur, J. L. Roeder, D. L. Turner, G. D. Reeves, H. E. Spence . "The hidden dynamics of relativistic electrons (0.7–1.5 MeV) in the inner zone and slot region." *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122(3), pp. 3127-3144, 2017.
- [3] Mauk, B. H., Fox, N. J., Kanekal, S. G., Kessel, R. L., Sibeck, D. G., & Ukhorskiy, A. A. "Science Objectives and Rationale for the Radiation Belt Storm Probes Mission." *Space Sci Rev* vol. 179, pp. 3–27 , 2013.
- [4] Mitchell, D. G., L. J. Lanzerotti, C. K. Kim, M. Stokes, G. Ho, S. Cooper, A. Ukhorskiy et al. "Radiation belt storm probes ion composition experiment (RBSPICE)." In *The van Allen probes mission*, Springer, Boston, MA, pp. 263-308. 2013.
- [5] Ukhorskiy, A. Y., M. I. Sitnov, D. G. Mitchell, K. Takahashi, L. J. Lanzerotti, and B. H. Mauk, "Rotationally driven 'zebra stripes' in Earth's inner radiation belt," *Nature*, vol. 507, pp. 338–340, 2014.
- [6] Sauvaud, J. A., Walt, M., Delcourt, D., Benoist, C., Penou, E., Chen, Y., & Russell, C. T. "Inner radiation belt particle acceleration and energy structuring by drift resonance with ULF waves during geomagnetic storms." *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 118, pp. 1–14, 2013.
- [7] Elkington S R, Hudson M K, Chan A A., "Resonant acceleration and diffusion of outer zone electrons in an asymmetric geomagnetic field." *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 108: pp. 1116–1126, 2003.

Profile



Megha Pandya

Graduated from the Department of Physics, Saurashtra University, in 2014 / Completed the doctoral course at the Indian Institute of Geomagnetism, Navi Mumbai and the degree is awarded by University of Mumbai (Ph.D. in Physics) in 2020 / Mission Research Fellow, RISH in 2021 (to present). At RISH, we study the Earth's radiation belt dynamics and its complex interactions with the solar wind.

生存圏ミッション研究のキーワード統計解析

上田 義勝^{1*}, 梅澤 俊明²

Statistical Keyword Analysis of Humanosphere Mission Research

Yoshikatsu Ueda^{1*} and Toshiaki Umezawa²

概要

生存圏ミッション研究は、生存圏研究所の中心となる重要な研究テーマである。研究所発足当初から継続されている重要な研究テーマから、新たに融合研究として生まれつつある研究テーマまで、幅広いミッションが存在している。本報告においては、このミッション研究の報告書の文章をキーワード解析する事で、研究の広がりについて解析を行った。この解析は生存圏研究所ミッション推進委員会として行ったものであるが、解析結果を資料として残す意味からも重要であると考え、まとめている。実際に解析を行ったのは平成 28 年度から令和 3 年度までの研究報告書を用いた。また、解析には R 言語を用いて行っている。

1. はじめに

生存圏研究所では、重要な研究ミッションとして 4 つのミッションを掲げている。これらは「環境診断・循環機能制御」、「太陽エネルギー変換・高度利用」、「宇宙生存環境」、「循環材料・環境共生システム」からなり、また 5 つ目の発展型ミッションとして「高品位生存圏」を定義し、研究成果の実相を含めた社会貢献を目指している。特にミッション 5 については、平成 28 年から新設されたミッションであり、社会とのつながりや国際化、物質・エネルギーの循環を、これまでよりも重視している。これらのミッション研究を平成 28 年から令和 3 年まで続けてきているが、その研究の広がりを確認する事で、これまでの研究所活動を見直し、今後研究所をより発展させるためのデータとして活用する事は非常に重要であると考えられる。

各ミッションの詳細な内容については生存圏研究所概要などに記載されているので割愛するが、それぞれのミッションでキーワードとなる文言が存在する。例えばミッション 1 では「環境」や「大気」、ミッション 2 では「バイオマス」や「マイクロ波」、ミッション 3 では「宇宙」や「プラズマ」、ミッション 4 では「木質材料」や「構造」など、それぞれのミッション研究を言い表す単語がある。我々はこのキーワードに着目し、年度ごとにその傾向がどう変化するか確認する事で、生存圏研究所の研究の広がりを表す事を試してみた。また、同様の研究の広がりとして、各ミッション研究の個別のテーマについてアンケートを取り、持続可能な開発目標 (SDGs, Sustainable Development Goals) と、社会的共通資本 (SCC, Social Common Capital) にどの程度当てはまるのかについても、調査を行った。この調査についてはミッション研究だけでなく、外部資金や国際共同研究/フラッグシップ研究についての調査し、その研究の広がりについて確認した。

2022 年 7 月 13 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
先端計測技術開発ユニット

²〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 森林代謝機能化学分野

* E-mail: ueda.yoshikatsu.4e@kyoto-u.ac.jp

2. 解析手法について

本章においては、解析に用いた R 言語¹⁾について紹介し、用いたプログラムについて解説する。R 言語はオープンソース・フリーソフトウェアの統計解析向けのプログラミング言語及びその開発実行環境であり、ベクトル処理による柔軟な処理を簡便に行なう事が可能である²⁾。

2.1 R 言語を用いたキーワード解析手法

我々はこの R 言語を用い、各ミッション研究の報告書内に含まれるキーワードを統計解析し、その解析結果を可視化する事で、年度ごとの傾向を確認する事を目的とした。R 言語のインストールは Windows 環境にて行い、機能提供ツールとして R tools³⁾、プログラムエディタとして R studio⁴⁾、また日本語分析のためのライブラリとして、MeCab⁵⁾もインストールした。また、解析終了後の可視化には、R 言語プログラムの wordcloud2⁶⁾パッケージを用いている。

プログラムの一例を図 1 に示す。日本語解析のための RMeCab ライブラリ、分析のためのパッケージとして tidyverse ライブラリを読み込む。また可視化のための wordcloud2 ライブラリと、可視化した後に画像として保存するための webshot、htmlwidgets ライブラリを読み込んだ後、テキスト化した文章をプログラムに沿って解析していく形となる。

```
library("RMeCab")
library("tidyverse")
library("wordcloud2")
library("webshot")
library("htmlwidgets")

sample <- RMeCabFreq("D:/2021/2021mission1.txt")

result <- sample %>%
  as_tibble %>%
  filter(Info1=="名詞") %>%
  filter(Freq>=2) %>%
  mutate(noun_str_match((Term), '[A0-90-9]+')) %>%
  filter(str_length(noun[,1])>=2) %>%
  select(5, 4) %>%
  arrange(desc(Freq)) %>%
  filter(!noun[,1] %in% c("こと", "たち", "皆さん", "ため", "京都", "ミッション", "生存", "研究", "研究所", "京都大学", "大学", "京都大", "of", "、", "、", "top", "課題", "共同", "in", "and"))

my_graph <- result %>% wordcloud2(fontFamily='HG丸ゴシックPRO', minRotation=0, maxRotation=0, size=0.8, shape='circle')
saveWidget(my_graph, "tmp.html", selfContained = F)
webshot("tmp.html", "R1_mission1.png", delay = 5, vwidth = 1024, vheight = 1024)

write.csv(result, "R1_mission1.csv")
```

図 1 : wordcloud2 による解析プログラム例

プログラム中で追加的な処理としては、例えば「京都大学」や「ミッション」など、解析では不要だが、カウントが多くなる一般的な単語を削除している。同様に個人名についても出来るだけ削除し、研究としてのキーワードの広がりやすくなる様に解析している。その他、可視化の際の可視化の形状 (circle) や解像度なども調整し、画像保存している。解析結果自体は可視化の他、csv ファイルとしてデータ保存も行った。

2.2 SDGs と SCC とのつながりについて

同じく R 言語を用いることで、各ミッションで設定されている個別の研究テーマが、社会的なテーマとどのようにつながるかについてテーマごとにアンケートをとり、そのつながりをミッション毎に確認している。また、大型外部資金や国際共同研究/フラッグシップ研究などについても同様にアンケートを取り、調査を行っている。こちらは統計解析ではなく、繋がりを可視化するために R 言語を用

いた。具体的には stars 関数を用いることで、ミッション毎の広がりを見える半円のグラフとして表記した。

3. キーワード解析による生存圏ミッション研究の変遷

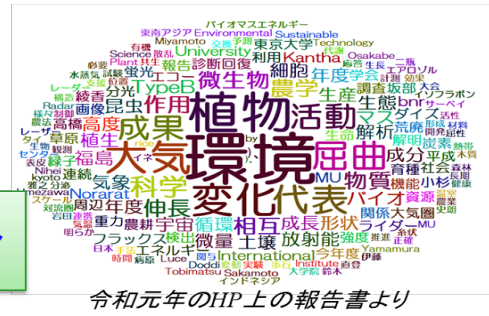
3.1 R 言語を用いたキーワード解析（平成 28 年度と令和元年度の比較）

図 2-5 に、各ミッションのキーワード解析結果（平成 28 年と令和元年）の変化について示す。文字の大きさは規格化していないため、各図同士の対応は取れていないが、文章中に含まれるキーワードの分布がそれぞれ変化している事がわかる。ミッション 1 においては、平成 28 年においては元々が大気やレーダー、木材といった本来の研究テーマの単語が多かったが、令和元年においては、環境という大きなキーワードを中心としたミッションに発展している事がわかる。ミッション 2 では、バイオマスに関連した研究が平成 28 年に多かったが、令和元年までにマイクロ波を利用した融合研究として発展をしてきたことが良く分かる結果となった。一方でミッション 3 においては、宇宙という大きなキーワードが中心ではあるが、その周辺となるキーワードが、プラズマ波動だけでなく、エネルギー利用などに向けた分野横断的な研究が進みつつある事が示唆された。ミッション 4 でも同様に木材という大きなキーワードを中心とするが、他のキーワードが数多くみられることで、同じく研究に広がりが見えている事が良く分かった。図 4 と 5 では、ミッション 5 の各サブミッション（ミッション 5-1 人の健康・環境調和（生理活性物質、電磁波、大気質）、ミッション 5-2 脱化石資源社会の構築（植物、バイオマス、エネルギー、材料）、ミッション 5-3 日常生活における宇宙・大気・地上間の連関性、ミッション 5-4 木づかいの科学による社会貢献（木造建築、木質住環境、木質資源・データベース、木づかいの変遷）におけるキーワードの変遷を示している。ミッション 5 は新設時の時点で幅広い研究テーマ設定が行われている事から、キーワードとして抽出される単語は多いが、それでも同様に研究の広がりが見える結果となった。

ミッション1



環境に着目した
幅広いミッション
として発展



ミッション2



マイクロ波とバイ
オマスの融合が
促進

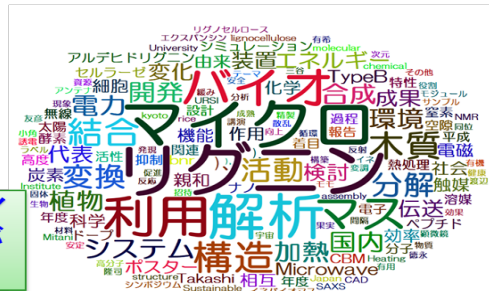
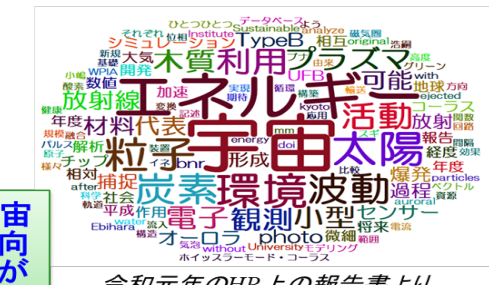


図2：平成28年と令和元年の比較（ミッション1と2）

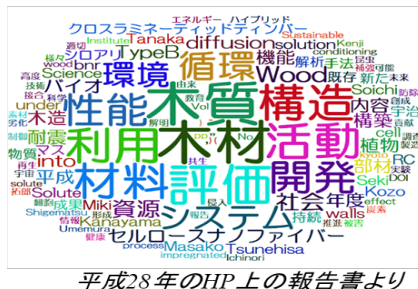
ミッション3



木質炭素の宇宙
圏での利用に向
けた融合研究が
促進



ミッション4



木材を中心とした
より幅広い融合
研究が促進

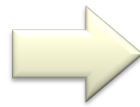


図3：平成28年と令和元年の比較（ミッション3と4）

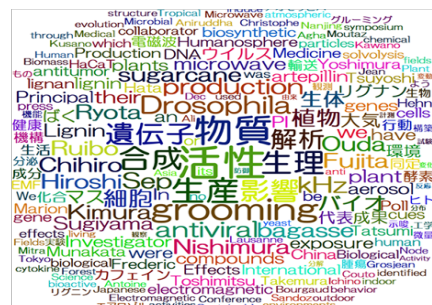
ミッション5-1



平成28年のHP上の報告書より



生理活性成分
に対する活発な
研究



令和元年のHP上の報告書より

ミッション5-2



平成28年のHP上の報告書より



バイオマス関連の
研究環境が発展



令和元年のHP上の報告書より

図4：平成28年と令和元年の比較（ミッション5-2と5-1）

ミッション5-3



平成28年のHP上の報告書より



宇宙圏から大
気圏までの幅
広い領域に展
開している

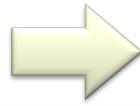


令和元年のHP上の報告書より

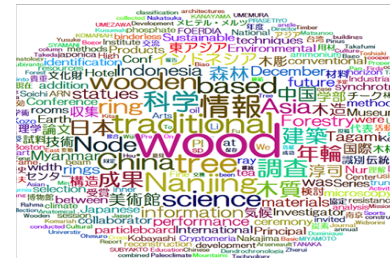
ミッション5-4



平成28年のHP上の報告書より



アジア圏での木質
科学研究が発展し
ている



令和元年のHP上の報告書より

図5：平成28年と令和元年の比較（ミッション5-3と5-4）

3.2 R 言語を用いたキーワード解析（平成 28 年度と令和 3 年度の比較）

図 6-9 では、さらに年度が経過した際の比較として、令和 3 年度と平成 28 年度の比較を行った。3.1 で述べた状況と同じものもある（ミッション 1 と 2）が、特にコロナ対策などでミッション 1 ではオンライン会議を積極的に利用した傾向も見て取れる。ミッション 2 においては、令和元年と比較すると今度は利用と解析が中心となりつつあることから、成熟した研究テーマも増えているとも予想される結果となった。ミッション 3 においては図 3 と比較すると、キーワードがエネルギーから環境にシフトしつつある事から、宇宙圏の環境を見据えた研究テーマも増えてきている傾向がみられ。ミッション 4 では令和元年で非常に数多くの単語を使って解説されていた研究が、徐々に集約されて（「残留」や「圧延」、「応力」など）、テーマが選別されてきている様子も良く分かる結果となった。

図 8,9 のミッション 5 の研究では、図 4,5 の結果と比較すると、図 3 のミッション 4 と同様に、非常に増えていた単語数が集約され、ミッション 5-1 では「活性物質」、ミッション 5-2 では「バイオマス」、ミッション 5-3 では「観測」、ミッション 5-4 では「建築」や「調査」など、広い範囲として設定していた研究テーマが徐々に集約し、文理融合など重要な研究テーマに集約されつつある様子が見て取れる。ミッション 1 から 4 までの研究テーマと、ミッション 5 とがお互いに関係し、それぞれの研究分野を広げたり集約したりする様子がこのキーワード解析で見取れることは非常に興味深く、今後解析を続けることは興味深いと考える。

ミッション 1



環境に着目した
幅広いミッシ
ョンとして発展



令和 3 年

ミッション 2



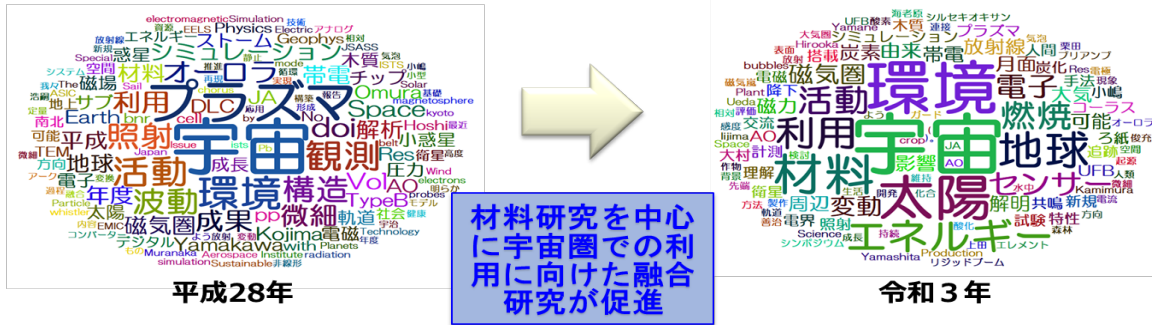
マイクロ波とバ
イオマスの融合
が促進



令和 3 年

図 6：平成 28 年と令和 3 年の比較（ミッション 1 と 2）

ミッション3



ミッション4

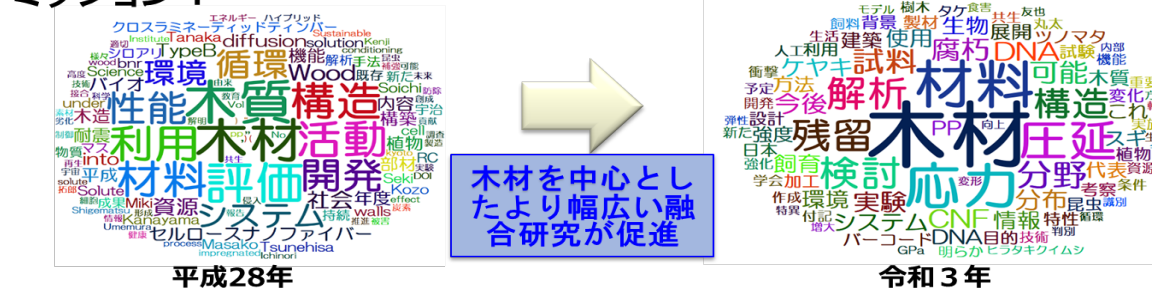
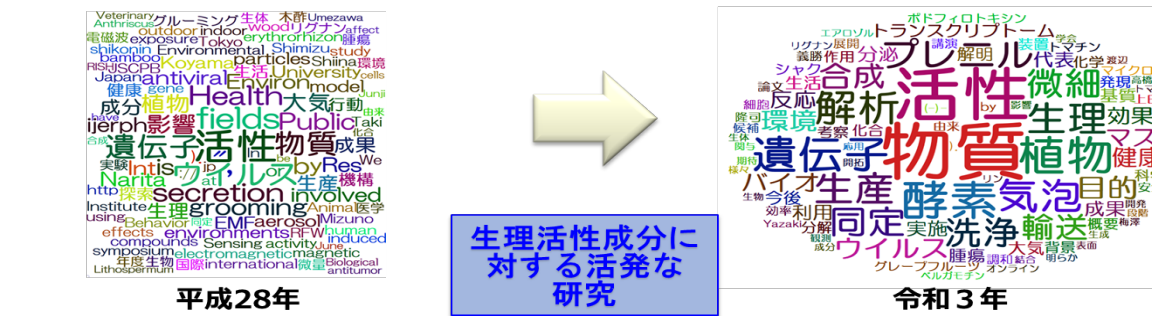


図7：平成28年と令和3年の比較（ミッション3と4）

ミッション5-1



ミッション5-2

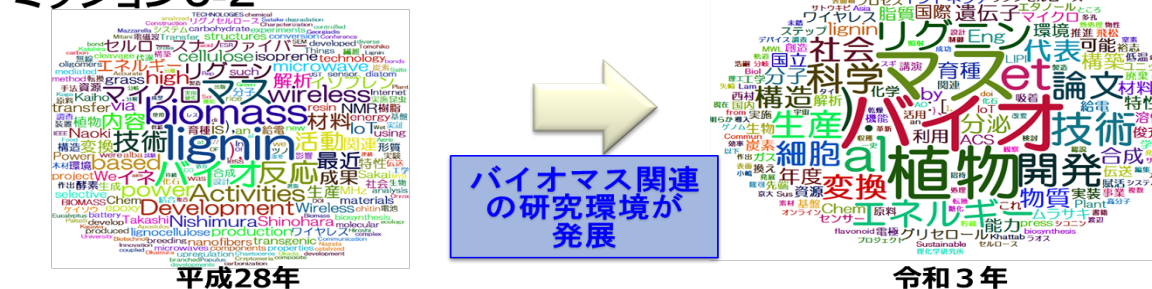


図8：平成28年と令和3年の比較（ミッション5-1と5-2）

ミッション5-3



平成28年



宇宙圏から大気圏までの幅広い領域に展開している



令和3年

ミッション5-4



平成28年



文理融合や調査研究が発展している



令和3年

図9：平成28年と令和3年の比較（ミッション5-3と5-4）

3-4 平成28年から令和3年までの解析結果からみるキーワードの変遷について

3-1,3-2においては、視覚的にキーワードがどう変化したかを確認したが、文字の大きさは全体で規格化出来ているわけではないので、数値としても本節にて評価を行う。具体的な数値指標として、R言語の解析結果においてFrequency値 (Freq) を用いた。各ミッションにおける代表的なキーワードを選び、令和3年 (R3)、令和元年 (R1)、平成28年 (H28) における数値変化を表1に示す。

ミッション1に関しては、「大気」、「MU」や「レーダー」のキーワードについては、一部減少はあるが、ほぼ毎年同程度の数値であった。一方、新しく抽出されてきているキーワードとして「福島」や「樹木」などがある。「福島」については、東日本大震災での支援研究が継続して研究が進んでいると考えられる。また、「樹木」については、「木材」がH28において頻度が高い一方で、R1以降数値が0になっていることから、研究分野が細分化しつつあることがわかる。ミッション2に関しては、「リグニン」や「マイクロ」「Microwave」などのこれまでの研究が継続して活発に行なわれている事がわかる。一方で「バイオマス」の数値が若干減りつつあるが、「構造」に関する研究や「セルロース」などのキーワードがR3にて再度増加しているため、ミッション1と同様、研究が広く細分化しつつあるのでは無いかと考えている。ミッション3では、これまでの継続研究として「宇宙」が継続して残っているが、特にR3にかけては、「太陽」「センサー」「大気」など、新しいキーワードが出てきている。その一方で「Plasma」というキーワードが若干減りつつあるが、これは分野の広がりというよりは、より大きな研究プロジェクトが進んでいるためでは無いかとも考えている。ミッション4においては、「木材」研究が中心である事が良く分かる傾向となっているが、新たなキーワードとして、「応力」や「材料」「構造」「CNF」など、具体的な研究課題が設定されつつあることが分かる。

ミッション5-1から5-4については、ミッション1から4をより社会的に広げ、国際的な研究として進めているため、より具体的なキーワードがいくつか出てきている。ミッション5-1においては、「洗浄」や「微細」など、環境工学できな研究発展がみられる。また、生存圏研究所の興味深い特色としては、「ウイルス」に関してはCOVID-19の影響もあり増加しているが、それと関係なく、過去か

ら着実に微生物研究をすすめてきている事も良くわかる。ミッション 5-2 については、ミッション 2 と同じ傾向だが、特に「社会」や「エネルギー」のキーワードが増加しており、ミッション 5 としての特徴を良く表している。ミッション 5-3 についてもミッション 3 と同傾向であるが、「観測」を中心とした研究が広く行われ、また「データ」からも大規模データを用いた研究が進んでいる事もわかる。ミッション 5-4 については、文理融合としての「木彫」「文化財」「伝統」などが上昇傾向にあり、生存圏研究所の幅広い研究の広がりを良く表している。

表 1：各ミッションの代表的なキーワードの Freq 値の変化

Mission 1				Mission 2				Mission 3				Mission 4			
	R3	R1	H28		R3	R1	H28		R3	R1	H28		R3	R1	H28
レーダー	10	2	14	リグニン	12	15	14	宇宙	15	12	11	木材 (wood)	29	37	21
大気	8	8	8	マイクロ	12	14	7	太陽	11	2	3	応力	21	0	0
MU	7	8	14	Microwave	12	17	8	センサー	6	0	0	材料	21	4	7
福島	6	6	3	構造	10	9	0	大気	4	0	0	構造	13	3	10
樹木	5	0	0	バイオマス	6	10	14	Plasma	3	7	10	CNF	9	10	0
微生物	5	5	3	セルロース	4	0	4	Space	2	14	12	Cellulose	0	10	4
木部	3	0	2					UFB	2	2	2				
木材	0	0	8												
Mission 5-1				Mission 5-2				Mission 5-3				Mission 5-4			
	R3	R1	H28		R3	R1	H28		R3	R1	H28		R3	R1	H28
物質	29	16	9	バイオマス	21	20	13	観測	25	19	16	建築	16	8	6
活性	27	18	12	植物	19	17	5	大気	13	16	8	木材 (wood)	12	18	17
遺伝子	18	12	9	リグニン	11	14	8	地磁気	9	2	0	木彫	12	0	0
洗浄	15	0	0	エネルギー	10	11	6	電離	9	4	4	文化財	9	4	0
微細	15	0	0	社会	9	0	4	データ	8	6	6	伝統	8	4	6
ウイルス	11	7	9	細胞	9	9	0	衛星	7	5	2	構造	6	5	7
				マイクロ	4	11	9								

3-4 SDGs と SCC とのつながりについて(令和 3 年度)

令和 3 年度の個別研究テーマについて、持続可能な開発目標 (SDGs) と、社会的共通資本 (SCC) の分類を Stars として図 10 と図 11 に示す。これらは SDGs と SCC の項目毎に、ミッション研究と関連したものかどうかを扇状に示したものである。ミッション 1 から 4 の傾向とミッション 5-1 から 5-3 の傾向については、おおよそ同じような傾向となった。水関連 (微細気泡) や文理融合など、一部発展して新しい項目が増えている部分もあるが、大きく目標や項目が増えた研究テーマはあまりはっきり見られなかった。その一方で、大型外部式や国際共同研究/フラッグシップ研究については、ミッション研究を補う部分も多いからか、項目の系統がミッション研究とは違っており、双方が補い合う事で、生存圏研究所の幅広さが見える結果となった。

SDGs目標とミッション系統に対する関係

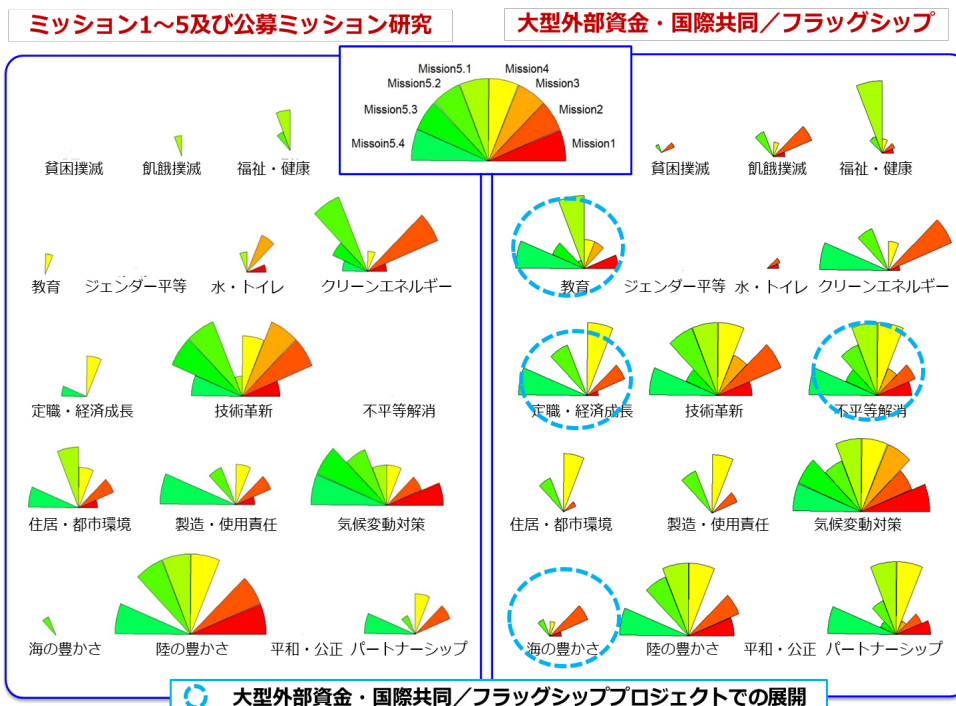


図 10：令和 3 年度におけるミッション研究の広がり（SDGs）（点線で囲んだ部分は新たに広がりを持った箇所）

SCC項目とミッション系統に対する関係

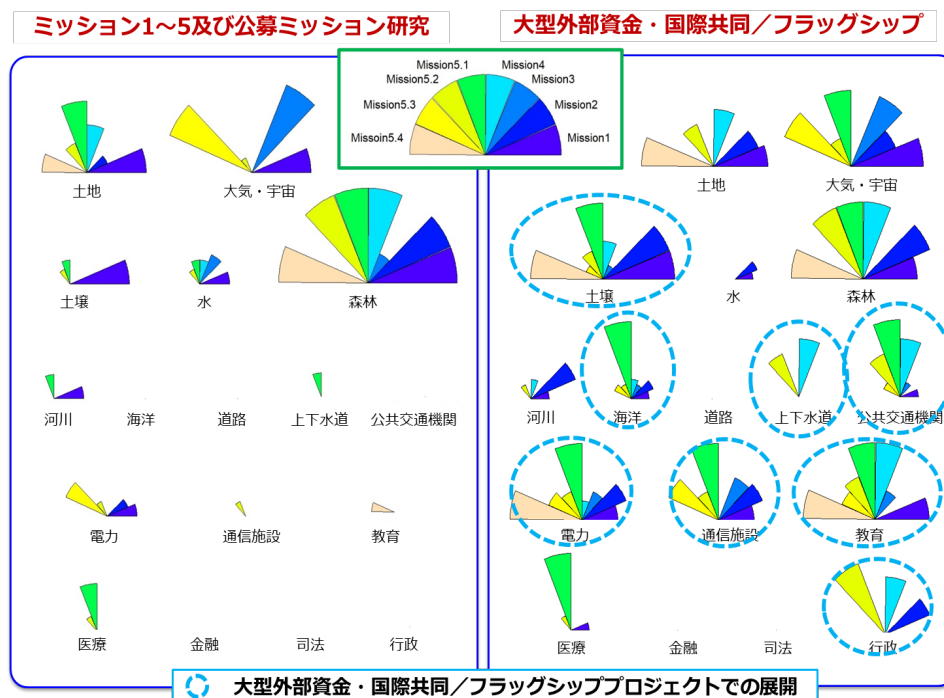


図 11：令和 3 年度におけるミッション研究の広がり（SCC）（点線で囲んだ部分は新たに広がりを持った箇所）

4. まとめ

生存圏研究所のミッション研究の発展の経緯を、キーワード解析を行う事で示し、継続されてきた研究の重要性と、その研究のひろがりを示すことが出来た。平成 28 年度から令和 3 年にかけて、各ミッションで中心となるキーワードを中心に、新しい単語として融合研究や新研究テーマが発生している事が良く分かった。また SDGs や SCC との関係性においては、ミッション研究単体での広がりは 1 年では示しきれなかったが、外部資金や国際共同研究などで補完的に広く研究を行っている事が分かり、生存圏研究所の深いポテンシャルを示すことが出来ている。尚、この解析は生存圏研究所ミッション推進委員会として行ってきたものであるが、今後の委員会への引継ぎも含め、手法として生存圏科学の発展に役立てば幸いである。また、プログラムについては研究所内の共有サーバに保存し、今後使用していただける様にしたい。

参考文献

- 1) R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- 2) Widemann, B.T.y., Bolz, C.F., and Grellck, C., The Functional Programming Language R and the Paradigm of Dynamic Scientific Programming. In: *Trends in Functional Programming* (Loidi, H.W. and Peña, R. eds.), vol. 7829, 2013, pp. 182-197, Springer Berlin, Heidelberg.
- 3) R Tools (ver4.2) <https://cran.r-project.org/bin/windows/Rtools/>
- 4) R Studio <https://www.rstudio.com/>
- 5) 形態素解析システム MeCab <https://www.mlab.im.dendai.ac.jp/~yamada/ir/MorphologicalAnalyzer/MeCab.html>
- 6) wordcloud2 package <https://cran.r-project.org/web/packages/wordcloud2/>

著者プロフィール



上田 義勝 (Yoshikatsu Ueda)

<略歴> 2002 年京都大学情報学研究科単位取得退学 / 2004 年京都大学博士 (情報学) 取得 / 2002 年京都大学宙空電波科学研究センター 助手 / 2004 年京都大学生存圏研究所 助手 / 2007 年同助教より現在に至る

<研究テーマと抱負> 水中の微細気泡の特性計測とその応用利用。また福島県における支援研究など。<趣味など> 合気道 (五段位)、犬の散歩



梅澤 俊明 (Toshiaki Umezawa)

<略歴> 1980 年京都大学農学部林産工学科卒業 / 1982 年京都大学大学院農学研究科修士課程修了 (農学博士) / 同年京都大学木材研究所 (現生存圏研究所) 助手 / 1993 年同助教授 / 2005 年同教授現在に至る。<研究テーマと抱負> 環境保全と調和した持続的社会の基盤となる植物バイオテクノロジー研究。<趣味など> 散歩と乱読、IPA をたまに飲むことなど。

生存圏研究所の研究ミッションのとりまとめに関する一考察

梅澤 俊明^{1*}, 上田 義勝²

An Integrative Overview of Humanosphere Mission Research

Toshiaki Umezawa^{1*} and Yoshikatsu Ueda²

概要

生存圏研究所の研究ミッションは、生存圏研究所の基盤となる重要な研究の方向性・目標である。研究所発足当初から継続されている重要な研究から、新たに融合研究として生まれつつある研究まで、多岐にわたった多数の研究を包含している。本報告においては、研究ミッション傘下の網羅的な研究に関しいくつかの角度から解析し、多様性の中の統一に関して考察した。

1. はじめに

生存圏研究所では、平成16年の発足以来、研究活動の中心に研究ミッションを据えてきた。“mission-oriented research”に対し「明確な使命を果たすための研究」との訳が与えられているが、同時に、日本語に「訳さないほうがいい」、とのコメントが付されている¹⁾。生存圏研究所でも、missionに対し和訳を使用せずカタカナ表記としているが、いずれにしても生存圏研究所の研究ミッションとは、社会の要請に呼応する地球規模課題の研究の方向性と考えて差し支えない。当初、研究ミッションに対し、「ミッション1：環境計測・地球再生」、「ミッション2：太陽エネルギー変換・利用」、「ミッション3：宇宙環境・利用」、「ミッション4：循環型資源・材料開発」の4つのミッションが設定され、所員それぞれの研究テーマの多くをこのミッションのいずれかに擦り合わせて研究活動を鋭意進めてきた。その後、第二期中期計画期間中に新領域研究ロングライフイノベーションを発足させ、新たな研究展開を図ってきた。さらに、第三期中期計画期間の開始に伴い、旧来の4つのミッションをそれぞれ「ミッション1：環境診断・循環機能制御」、「ミッション2：太陽エネルギー変換・高度利用」、「ミッション3：宇宙生存環境」、「ミッション4：循環材料・環境共生システム」に改編し、さらに新領域研究を5つ目の発展型ミッションとしての「ミッション5：高品位生存圏」に再編した。令和2～3年度は、第三期中期計画期間の終了時期にあたり、各ミッションの下で実施されている多様かつ網羅的な研究全体について、多様性の中の統一という視点から総括的な取りまとめを行う必要性が強く指摘された。なお、研究ミッションの詳細は引用に記載の通りである²⁾。

以上に鑑み、令和2～3年度生存圏研究所ミッション推進委員会が以上のとりまとめを行い、解析結果を生存圏研究に資料として提示する。

2022年9月14日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 森林代謝機能化学分野、²〒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 先端計測技術開発ユニット

* E-mail: tumezawa@rish.kyoto-u.ac.jp

2. 共通性及び多様性の解析

2.1 調査手法

生存圏研究所の研究ミッションの下で推進されている研究課題は多岐に亘っており、個々の課題の方向性の明確化或いは大目標としての持続的生存基盤確立に向けた位置づけの明確化の必要性が従来から繰り返し指摘されてきた。そこで、今回は、所内主体の研究活動としての生存圏研究所研究ミッションが所掌する研究課題に加え、所外との連携研究としての学際萌芽研究センター所掌の公募研究（萌芽研究及びミッション研究）、及び国際共同研究も含めたさらに広範囲の連携研究としての外部資金研究課題を対象として、合計 78 課題における共通性、多様性の抽出を試みた。解析対象課題数の詳細は以下のとおりである。なお、これらの研究課題を所掌する生存圏研究所の組織構成（令和 3 年度）は図 1 に示すとおりである。

解析対象：

1) 令和 3 年度生存圏研究所研究ミッション所掌の研究課題（合計 41 課題）²⁾

- ミッション 1： 5 課題
- ミッション 2： 4 課題
- ミッション 3： 4 課題
- ミッション 4： 5 課題
- ミッション 5-1： 7 課題
- ミッション 5-2： 8 課題
- ミッション 5-3： 4 課題
- ミッション 5-4： 4 課題

2) 令和 3 年度生存圏研究所学際萌芽研究センター所掌の公募研究（合計 19 課題）³⁾

- 萌芽研究： 2 課題
- ミッション研究： 17 課題

3) 令和 3 年度生存圏研究所所員が代表等主要な役割を果たした外部資金研究（国際共同研究を含む）（合計 18 課題）

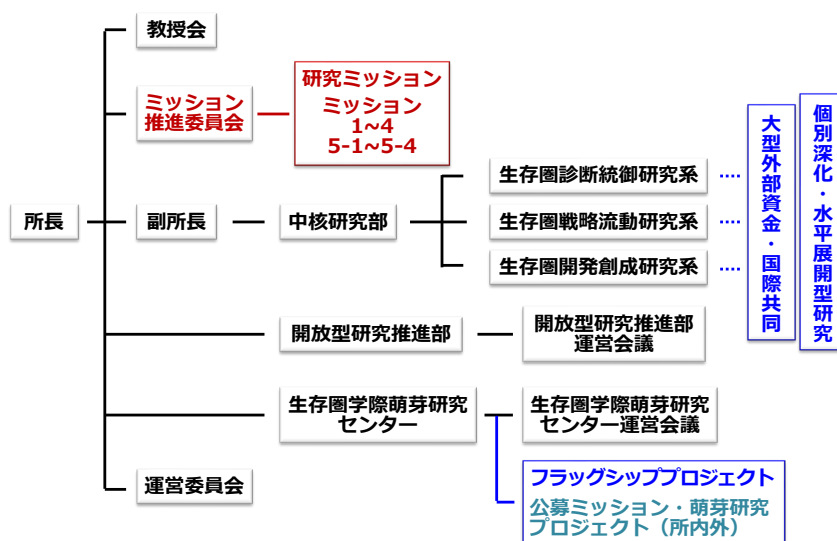


図 1 生存圏研究所の組織構成と研究ミッション関連研究課題の関係

ここで、共通性及び多様性に関する解析に対し、以下の2種の指標を用いた。即ち、今後の持続的生存基盤構築に向けて必須の目標を網羅的に設定している持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, SDGs）の17目標⁴⁾と生存基盤の構築に向けて必須の、市場経済原理に任せないで社会的に管理される財・サービスである社会的共通資本の17項目⁵⁾である。持続可能な開発目標の詳細は表1⁶⁾の通りである。また、社会的共通資本（Social Common Capital, SCC）は、宇沢によって提唱され、「一つの国ないし特定の地域に住むすべての人々が、豊かな経済生活を営み、優れた文化を展開し、人間的に魅力ある社会を持続的、安定的に維持することを可能にするような社会的装置を意味する」⁴⁾とされており、表2に示す17項目が挙げられている。

なお、上記の2) 学際萌芽研究センター所掌の公募研究と3) 外部資金研究（国際共同研究を含む）も、1) 研究ミッション傘下のミッション1~5のいずれか或いは複数に関連しており、その関連性解析は別途報告⁷⁾した通りであるが、ここでは、1) のミッション1~5の研究課題とは区別して解析した。

調査方法：

- 1) 研究課題毎に、それぞれ代表者（代表者の所属が所外の場合は、所内担当者）に、SDGsの17目標及びSCCの17項目への適合性の自己申告を依頼した。具体的には、行方向に各研究課題名及び代表者を、列方向にSDGsの17目標及びSCCの17項目を記入したエクセル表を用意し、これを関係者に送付し、適合する目標/項目に“1”を記入後、返送するよう依頼した。
- 2) 得られた適合性に関する情報を集計し、記入された“1”を用いてSDGs17目標及びSCC17項目毎に頻度を計上した。
- 3) 得られた頻度値を、図1（SDGs）及び図2（SCC）に表示した。

表1 持続可能な開発目標（SDGs）の詳細^{4,6)}

目標1 [貧困]	あらゆる場所あらゆる形態の貧困を終わらせる
目標2 [飢餓]	飢餓を終わらせ、食料安全保障及び栄養の改善を実現し、持続可能な農業を促進する
目標3 [保健]	あらゆる年齢のすべての人々の健康的な生活を確保し、福祉を促進する
目標4 [教育]	すべての人に包摂的かつ公正な質の高い教育を確保し、生涯学習の機会を促進する
目標5 [ジェンダー]	ジェンダー平等を達成し、すべての女性及び女児のエンパワーメントを行う
目標6 [水・衛生]	すべての人々の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理を確保する
目標7 [エネルギー]	すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的なエネルギーへのアクセスを確保する
目標8 [経済成長と雇用]	包摂的かつ持続可能な経済成長及びすべての人々の完全かつ生産的な雇用と働きがいのある人間らしい雇用（ディーセント・ワーク）を促進する
目標9 [インフラ、産業化、イノベーション]	強靱（レジリエント）なインフラ構築、包摂的かつ持続可能な産業化の促進及びイノベーションの推進を図る
目標10 [不平等]	国内及び各国家間の不平等を是正する
目標11 [持続可能な都市]	包摂的で安全かつ強靱（レジリエント）で持続可能な都市及び人間居住を実現する
目標12 [持続可能な消費と生産]	持続可能な消費生産形態を確保する
目標13 [気候変動]	気候変動及びその影響を軽減するための緊急対策を講じる
目標14 [海洋資源]	持続可能な開発のために、海洋・海洋資源を保全し、持続可能な形で利用する
目標15 [陸上資源]	陸域生態系の保護、回復、持続可能な利用の推進、持続可能な森林の経営、砂漠化への対処ならびに土地の劣化の阻止・回復及び生物多様性の損失を阻止する
目標16 [平和]	持続可能な開発のための平和で包摂的な社会を促進し、すべての人々に司法へのアクセスを提供し、あらゆるレベルにおいて効果的で説明責任のある包摂的な制度を構築する
目標17 [実施手段]	持続可能な開発のための実施手段を強化し、グローバル・パートナーシップを活性化する

2.2 調査結果

生存圏研究所の研究ミッション傘下のミッション 1～5 が所掌する研究課題及び学際萌芽研究センター所掌の公募研究合計 60 課題に関する SDGs 17 目標毎の適合頻度を図 1 に、外部資金研究 18 課題に対する SDGs 17 目標毎の適合頻度を図 2 に示す。同様にミッション 1～5 が所掌する研究課題及び学際萌芽研究センター所掌の公募研究合計 60 課題に関する SCC 17 項目毎の適合頻度を図 3 に、外部資金研究 18 課題に対する SCC 17 項目毎の適合頻度を図 4 に示す。

表 2 社会的共通資本（SCC）の 17 項目⁵⁾

区分	項目	区分	項目	区分	項目
自然環境 (自然資本)	土地	制度資本	教育	社会資本 (社会的インフラ ストラクチャー)	道路
	大気 ^注		医療		上下水道
	土壌		金融		公共交通機関
	水		司法		電力
	森林		行政		通信施設
	河川				
	海洋				

注：生存圏研究所の研究内容に鑑み、本調査では「大気・宇宙」として各研究課題の適合性について調査した

2.3 考察

文部科学省のミッションの再定義 [研究水準、教育成果、産学連携等の客観的データに基づく、各大学の強み・特色・社会的役割（ミッション）の整理]⁸⁾における生存圏研究所関連の記載として、『人類の生存を支える場である「生存圏」の正確な理解と問題解決により、人類の持続的発展と福祉に貢献することを目的とする生存圏研究所が設置された』が認められる。そこで、具体的には、生存圏研究所の大目標として持続的生存基盤確立を設定することができる。

一方、生存圏研究所に所属する教員の専門分野は、それぞれ理学、工学、農学、情報学に属している。そして教員がそれぞれの専門領域から、持続的生存基盤の確立という大目標達成に向けて個々の研究目標を設定し、それぞれの研究対象に於いて研究活動を進めていることになる。本考察では、これらの個々の研究目標に、SDGs の 17 目標が概ね適合し、さらに、個々の研究対象として SCC の 17 項目が概ね適合すると見做して調査を行った。

生存圏研究所の研究ミッション傘下のミッション 1～5 が所掌する研究課題（以後、研究ミッション所掌研究課題と略記）と学際萌芽研究センター所掌の公募研究（以後、公募研究課題と略記）について、SDGs 17 目標毎の適合性頻度分布（図 2）及び、SCC の 17 項目毎の適合性頻度分布（図 4）を見ると、主に所内の研究である研究ミッション所掌研究課題と所外研究者が多く参画している公募研究課題で、SDGs 目標と SCC 項目に関する適合性が概ね同様の分布傾向を示していることが見て取れる。性急な結論は避けなければならないが、生存圏研究所で実施される研究領域の拡大には、学際萌芽研究センターの公募研究の実施はあまり貢献していないことが示唆される。一方、大型の外部資金研究課題に対する SDGs 17 目標毎の適合性頻度分布（図 3）と SCC 17 項目毎の適合性頻度分布（図 5）は、研究ミッション所掌研究課題や公募研究課題（図 2、4）よりも広範囲に亘っており、大型外部資金による研究において異分野連携が進んでいることが示唆される。

なお、SDGs 17 目標及び SCC 17 項目それぞれに適合するミッションの区分（1～4、5-1～5-4）とその頻度については、別途報告している⁷⁾。

研究ミッション所掌研究課題★・公募研究★の
生物圏、社会、経済におけるマッピング*



* SDGsの階層性に関するWedding Cake概念 (Source: Azote Images for Stockholm Resilience Centre, <https://www.stockholmresilience.org/images/18.36c25848153d54bdba33ec9b/1465905797608/sdgs-food-azote.jpg>) に基づき作図

図2 持続可能な開発目標に対する研究ミッション所掌研究課題、公募研究課題の位置づけ

大型外部資金・国際共同研究/フラッグシップ研究★の
生物圏、社会、経済におけるマッピング*



* SDGsの階層性に関するWedding Cake概念 (Source: Azote Images for Stockholm Resilience Centre, <https://www.stockholmresilience.org/images/18.36c25848153d54bdba33ec9b/1465905797608/sdgs-food-azote.jpg>) に基づき作図

図3 持続可能な開発目標に対する大型外部資金・国際共同研究/フラッグシップ研究の位置づけ

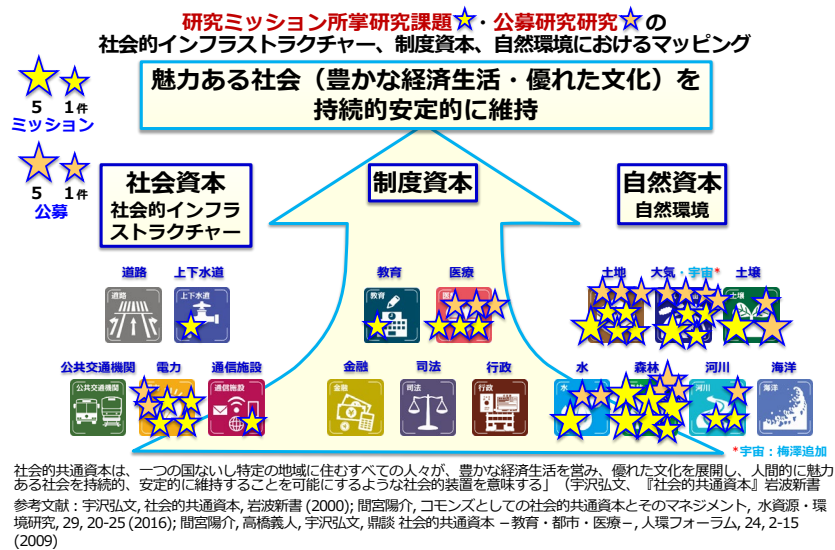


図4 社会的共通資本に対する研究ミッション所掌研究課題、公募研究課題の位置づけ

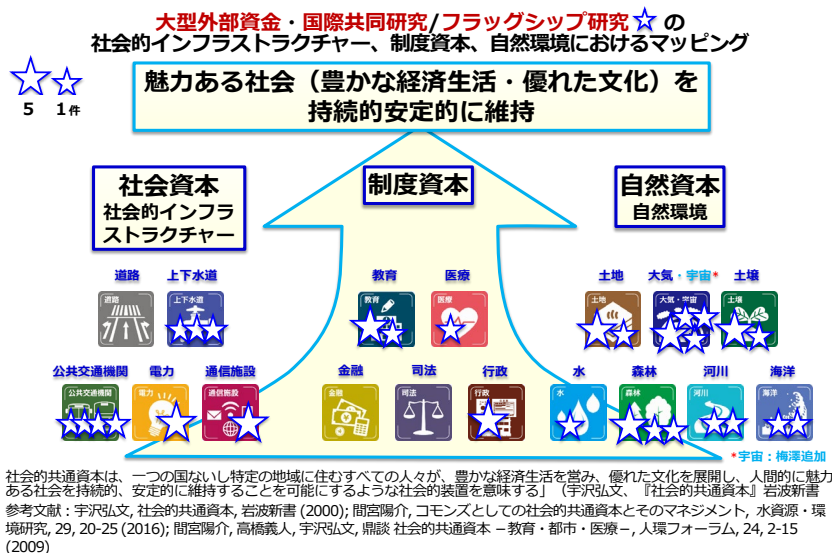


図5 社会的共通資本に対する大型外部資金・国際共同研究/フラッグシップ研究の位置づけ

3. 生存圏研究ミッション活動における多様性の中の統一

そもそも、生存圏研究所が、その発足当時、木（木質科学研究所）に竹ならぬ空（そら）或いは宙（そら）（宙空電波科学研究センター）を接いだと揶揄されたのは、生存圏研究所において個々の研究が多様な方向性を示す中で、全体の統一性を示すことは難しいであろうとの外部の見立てであったと思われる。しかし、生存圏研究所発足以来、所員は様々な関わり方で、持続的生存基盤の確立に向けてそれぞれ努力してきた。そして、この過程で、異分野がいかに異なる考え方を採るかについて各所員が身に染みて理解し、それを超えて新たな方向性を探ってきた。

本考察では、生存圏研究所で行われている研究を以下の1)～3)の3階層に分類する(図6)。

1) 個別深化・水平展開型

中核研究部に於いて進められている、各所員が科研費等により深化・水平展開を図る、それぞれの専門領域の研究。

2) 課題解決(個別)型

課題解決志向の研究であるが、異分野との連携には至っていない研究であり、中核研究部の研究や、生存圏研究所研究ミッション(ミッション1～5、特に1～4)に於いて進められている研究。

3) 課題解決(連携・協働)型

課題解決志向の研究であり、異分野との連携・協働を進めている研究。ミッション5或いは大型外部資金(国際共同研究を含む)の下で進められている研究。生存圏研究所フラッグシップ研究はこの区分に相当する。

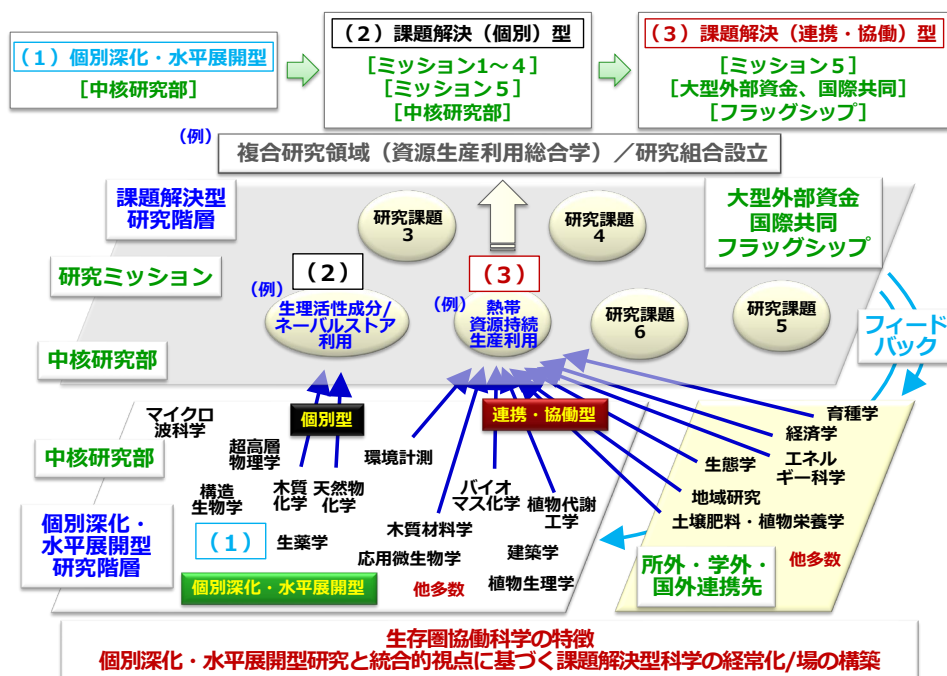


図6 生存圏研究所における研究課題の区分

ここで、2) 及び3) の課題解決型研究の課題が研究ミッションとして位置づけられる。1) の個別深化・水平展開型研究は、総合研究プロジェクトとしての研究ミッションの前段階に位置し、研究ミッションに対する基盤を提供する研究群として位置づけられる。もちろん、広い意味で研究ミッションの下での研究としても位置付けることができるが、本考察ではあえて区別建てを提示し、より基盤的な研究活動として1) に分類している。

生存圏研究所の研究ミッションで実施されてきた研究内容²⁾を精査すると、これらの研究内容或いは個々の研究課題は、各研究ミッションの大目標としての持続的生存基盤の確立に向けて、いくつかの群に分類することが可能である。即ち、再生可能資源・エネルギーの生産、変換、利用の三項目を軸としての分類である。さらに、これらの項目は、図7に於いて矢印でつないで示したように、全体の方向性の中の項目として取りまとめることができる。

研究ミッション傘下のミッション1における研究内容は、概ね、再生可能資源の生産、資源生産の場（圏）の理解に係るものであり、場の計測・利用、資源の改質、生産、利用などがキーワードとして挙げられる。これらは、ほぼ再生可能資源・エネルギー生産の項目に相当する。ミッション2における研究内容は、概ね、再生可能資源とエネルギーの変換及び輸送技術開発にまとめることができる。ここで、物理変換・化学変換・生化学変換と輸送がキーワードとなる。一方、ミッション4は、概ね、再生可能資源の利用技術開発と社会実装に向かっているとすることができる。そして、以上のミッション1, 2, 4の方向性を「生存基盤の構築」とすることができる。一方、圏間の相互作用の解析或いはそれぞれの圏の環境利用開発を進める研究も生存圏研究所の研究ミッションとして重要であり、この内容は概ねミッション3に相当する。この研究の方向性は「生存基盤の拡大」とすることができる。さらに、ミッション5 (5-1～5-4) 傘下の研究はミッション1～4の研究から派生し、ミッション1～4間の連携を図る研究、あるいはより纏まった成果が得られつつある研究、より社会実装に近い研究として位置づけられる。加えて、大型外部資金（国際共同研究を含む）による研究や生存圏研究所フラッグシップ研

持続的生存基盤の確立

再生可能資源エネルギーの持続的生産・変換・利用・生存基盤の拡大と構築 + 統合的視点
Sustainable Humanosphere Goals (SHGs)

1. 再生可能資源・エネルギーの持続的生産システム開発
2. 再生可能資源・エネルギーの変換システム開発
3. 再生可能資源・エネルギーの持続的利用システム開発
4. 持続的生存基盤の拡大と構築
5. 統合的視点に基づく協働科学の構築

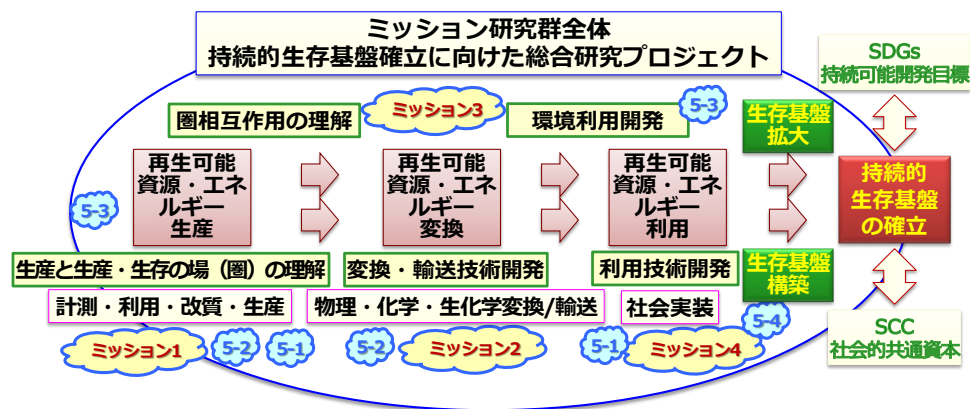


図7 持続的生存基盤の確立

究も、ミッション1~5のいずれか或いは複数に関係づけられる。これらの研究全体は、「生存基盤の構築」と「生存基盤の拡大」を中目標とし、大目標としての「持続的生存基盤の確立」を目指すもの、即ち、生存圏研究所の研究ミッションとして位置づけることができる。ここで、相当多様で一見まとまりに欠けるように見える個々の研究課題の総体は、持続的生存基盤の確立に向けた総合研究プロジェクトとして統一的に位置づけることができる。

以上を取りまとめると、生存圏研究所の研究ミッションは、以下の様に区分して記載することができる。

生存圏研究所の研究ミッション：持続的生存基盤確立に向けた総合研究プロジェクト

大目標

持続的生存基盤の確立

中目標

生存基盤の構築

生存基盤の拡大

小目標

再生可能資源・エネルギーの持続的生産システム開発

再生可能資源・エネルギーの変換システム開発

再生可能資源・エネルギーの持続的利用システム開発

持続的生存基盤の拡大と構築

統合的視点に基づく協働科学の構築

また、これらの小目標は、持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, SDGs）の嚮に倣い、持続的生存基盤の確立に向けた目標（Sustainable Humanosphere Goals, SHGs）と呼ぶことも可能であろう。なお、生存圏研究所の研究ミッションにおいては、全体の方向性の中で各研究課題の位置づけを考えると共に、統合的視点に基づく協働科学の構築を推奨している点が重要である。今後は、必然性に基づいた協働的研究の進展が期待される。

なお、一般に物事の取り纏めにおける過度の簡潔さや分かりやすさは往々にして精確性に欠け、実態を十分反映しないきらいがある。上記取り纏めに於いても、これに必ずしも適合しない個々の研究もある。このような全体の方向性の取り纏めに必ずしも適合しない部分があること、そして、それらを許容或いは積極的に支援し培養することが、組織の強靱さの発揮や健全性の維持に於いて極めて重要であると考えている。

以上の解析は令和 2~3 年度生存圏研究所ミッション推進委員会の活動として行ってきたものであるが、今後研究ミッションに関する議論に際しての、一つの原案となれば幸いである。

4. まとめ

生存圏研究所の研究ミッション活動に関し、SDGs の 17 目標及び SCC の 17 項目を指標に、研究の方向性について解析した。また、生存圏研究所の研究ミッション活動について、内容を精査することによりいくつかの群に分類し、それぞれの相互の関係について考察した。これに基づき、生存圏研究所の研究ミッションを、「生存基盤の構築」と「生存基盤の拡大」を中目標とし、大目標としての「持続的生存基盤の確立」を目指すものとして位置づけた。また、各研究課題は、全体として、持続的生存基盤の確立に向けた総合研究プロジェクトとして統一的に位置づけた。

謝辞

本稿のとりまとめに必要な基礎データ収集に大変ご尽力いただいた生存圏研究所拠点支援室日下部利佳特定職員に謝意を表す。

参考文献

1. 金澤一郎, 私と科研費, No.22 (2010), https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/29_essay/no22.html, accessed on June 23, 2022.
2. 生存圏研究所／研究ミッション, <https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mission/>, accessed on June 24, 2022
3. 生存圏研究所／旧学際萌芽研究センター, https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/exploratory_center/, accessed on June 24, 2022
4. SDGs とは, 外務省ウェブサイト, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>, accessed on June 24, 2022.
5. 宇沢弘文, 社会的共通資本, 岩波新書 (2000)
6. 持続可能な開発のための 2030 アジェンダ(PDF), <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/000270935.pdf>, accessed on June 24, 2022
7. 上田義勝, 梅澤俊明, 生存圏ミッション研究のキーワード統計解析, 生存圏研究,18, 35-45 (2022)
8. 文部科学省／ミッションの再定義, https://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/houjin/1418118.htm, accessed on June 24, 2022

著者プロフィール



梅澤 俊明 (Toshiaki Umezawa)

<略歴> 1980 年京都大学農学部林産工学科卒業／1982 年京都大学大学院農学研究科修士課程修了／同年京都大学木材研究所（現生存圏研究所）助手／1987 年京都大学農学博士／1993 年京都大学木材研究所助教授／2005 年同教授現在に至る。<研究テーマと抱負>環境保全と調和した持続的社会の基盤となる植物バイオテクノロジー・植物有機化学研究。<趣味など>散歩と乱読、IPAをたまに飲むことなど。



上田 義勝 (Yoshikatsu Ueda)

<略歴> 2002 年京都大学情報学研究科単位取得退学／2004 年京都大学博士（情報学）取得／2002 年京都大学宙空電波科学研究センター 助手／2004 年京都大学生存圏研究所 助手／2007 年同助教より現在に至る
<研究テーマと抱負>水中の微細気泡の特性計測とその応用利用。また福島県における支援研究など。<趣味など>合気道（五段位）、犬の散歩

欧米に散逸した神像群をめぐる 木材解剖学×美術史学の国際的な学際研究

田鶴 寿弥子^{1*}

An Interdisciplinary Study on the Wood Species of Heian Period Deity Statues Scattered in Europe and the United States

Suyako Tazuru-Mizuno^{1*}

概要

かつて出雲地方の某神社からアメリカ、イギリス、カナダなど世界中の様々な美術館や博物館へと散逸したとされる日本の神像彫刻群について、国際的な学際研究の一環として光学顕微鏡や放射光 X 線マイクロ CT による樹種調査を適用した結果、モクレン属（ホオノキか）が多用されていることを明らかとした。さらに複数について放射性炭素年代測定を適用した結果、製作時期を 10-12 世紀に絞り込むことができた。古代の木彫像調査は様々行われているが、平安後期においてこのようにホオノキが多用された事例は、ほとんど認められておらず、神像・仏像彫刻の展開や美術史研究に新たな視座を付与するものとして注目される。これを契機に特に日本海沿岸地域における神像の調査を進めてきているが、古代、ホオノキによる木彫像制作が積極的に行われた時期あるいは地域が存在した可能性が示唆されつつあり、これまで見えていなかった木彫像の用材観ならびに文化的側面の解明に寄与するものとして期待される。本論文は、2022 年 3 月に公開された筆者らの研究論文¹⁾を総括した上で、現時点での私見を加えたものである。

1. はじめに

自然に対して畏敬の念を込めてカミとして崇拝していた日本に、6 世紀、大きな変化がもたらされた。大陸からもたらされたきらびやかな仏像に影響をうけ、それまで自然を崇拝してきた神道側において神像が製作されたと考えられている。おおよそ 8-9 世紀ころに神像の制作が開始され、9-10 世紀には各地に普及したと推察されている。史料上の初見は、『多度神宮寺伽藍縁起資財帳』（801 年）であり、奈良県の薬師寺の鎮守・休岡八幡宮の神像や京都府の松尾大社の神像などが、最古の木彫神像の類だとされている。初期の神像には、仏教の影響が見られることから造像を主導したのは仏像制作に携わっていた者とも考えられるが、詳しいことはまだまだわかっていない²⁾。神像が製作されるようになった背景を考えるにあたり、仏像彫刻との類似点や相違点を洗い出すことが重要であるが、

2022 年 7 月 21 日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所マテリアルバイオロジー分野

* E-mail: tazurusuyako@rish.kyoto-u.ac.jp

そもそも仏像と神像ではその形態的特徴に大きな差異が見られる。たとえば、仏像と異なり神像には女性像がある、造作がシンプルである、記銘が少ないなどの点が挙げられる。

仏像については樹種識別研究が体系的に行われてきており³⁻⁵⁾、これにより、8-9世紀頃の仏像彫刻（一木造り）の多くがカヤによる造像であることが科学的に解明され、美術史や宗教史に重要な知見がもたらされた。一方、神像の樹種調査は遅れ気味であったが、近年その科学的側面の研究が注目されつつあり、坐像スタイルの神像に仏像と同様にカヤやヒノキが多用されていることをつきとめており^{2,6-8)}、材料選択の点では仏像彫刻に倣った可能性もでてきている。

ところで、2017年に筆者らがアメリカフィラデルフィア美術館で調査を行った日本の男神像に、古代の木彫像の用材としては稀なモクレン属（ホオノキか）が使用されていることを突き止めたことをきっかけに、その神像も含まれる神像群（現時点では18体を数える）の学際研究を進めることとなった。神像群のうち2体については、神像神器図録（1930年刊）において聖徳太子像および聖徳太子妃像との名で掲載されており、その中では朴（あるいは古代樟か）と材料が推測されている。これらの神像群は、美術史の専門家らにより長年注目されてきたものであり、彫刻様式など形態的特徴による検討が断片的に行われていたが、これほど多くの数量で神像群が存在すること自体が非常に稀有であり、謎が多いとされてきた。そこで、筆者らのグループでは、用材と年代について科学的に調査し、それにより得られた新たな情報を美術史と共有し、共に深みのある知見の獲得を目指すべく、木材解剖学、美術史、民俗学の専門家らによる国際的な学際研究を進めることとした。

2. 試料と方法

アメリカフィラデルフィア美術館で調査をおこなった男神像と、美術史的見地から同一グループに属すると考えられる神像約18体が、世界各地の美術館・博物館などに保管されていることが判明した。すなわちアメリカのホノルル美術館・クリーブランド美術館・メトロポリタン美術館・フィラデルフィア美術館・シカゴ美術館・プリンストン大学美術館、カナダのロイヤルオンタリオ博物館、イギリスのセインズベリーセンター、個人所有者などに保管されていることをつきとめ、各機関の学芸員・研究者・コンサーバーらと協力体制を構築し、遊離試料片を中心とした試料を対象に樹種・年代についての科学的調査を進めた。光学顕微鏡やSPRING-8での放射光マイクロX線CT⁶⁾による樹種調査、そして放射性炭素年代測定を実施した。図1は、クリーブランド美術館所蔵の神像の一例であるが、18体の神像はいずれも像高100cm程度であり、立像スタイルであること、さらには像の厚みが薄いという共通した特徴がみられた。また形態的特徴から、Major Deities・Minor Deities・Attendantsの3グループに分けられた。

3. 結果

18体の神像のうち、現時点で所在・所有者が不明なもの、あるいは所在が判明していても調査が許されない神像もあったが、許可が得られた9体の神像について筆者らが樹種調査を行った結果、8体がモクレン属（解剖学的特徴よりモクレン属の中でもホオノキの可能性が高いか）、1体がクリと判明した¹⁾。また2体については放射性炭素年代測定により10世紀から12世紀の作と明らかにすることができた。筆者らが調査した神像とは異なる3体についても、海外の研究機関による調査が過去に行われており、2体がモクレン属、1体がスモモ属であること、うち2体については10世紀から12世紀の作と判明している¹⁾。つまり、18体の神像のうち、12体が科学的に樹種同定され10体がモクレン属であったことになる。年輪解析により、一個体の木材から切り出された可能性についても推測されている¹⁾。またクリとスモモ属が使用された2体については、今後、更なる考察に課す予定である。

4. 考察

樹種調査や放射性炭素年代測定により、出雲の某神社から世界に散逸した 10-12 世紀の 18 体の多くにモクレン属（ホオノキか）が使用されていたことが判明したが、実のところ平安時代に遡るホオノキによる木彫像の事例は、現在まであまり知られていない。筆者らも国立博物館の修理所である美術院などと古代の木彫像の樹種調査などを行ってきたが、ホオノキが使用された事例はほとんど認められなかった。それにも拘わらず、これだけ多くの神像にホオノキが使用されたということには、ホオノキに何らかの意味を込めていた可能性が示唆される。

そこで筆者がホオノキについて人文学的見地から研究を進めた結果、極めて興味深い伝承が出雲地方に残っていることに気づいた。島根県口碑伝説集（1927 年）には「朴木下駄を忌む」という話が掲載されている。

以下抜粋

邑智郡祖式村、祖式川に近い町通りを横町と云ふ。昔し此邊に横町と云う家があった。或日その家の主人が、川邊で木像の御神体を発見し、祠を建てて祀った。（現今では八幡宮に合祀）その木は朴の木で作ってあったので、此村の住民は神罰を畏れて、朴木下駄は決して穿かない。

かつての日本では、ホオノキで作られた下駄が使われた時期があるが祖式村では川辺でみつけたホオノキのご神体を祀るため、ホオノキの下駄ははかないという内容が記載されている。さらに興味深いことに山陰地方ではこの伝承以外にもホオノキと神像についての伝承が複数伝わっていることをつきとめた。また小原二郎氏により、山陰地方のとある十一面観音がホオノキであることが判明しているなど⁹⁾、山陰地方においてはホオノキと木彫像との間に、なんらかの関係性が隠されているのではないかと考えられた。そこで山陰地方の神像彫刻の樹種調査を進めているが（投稿準備中）、複数の神像に仏像と同様カヤやヒノキが多用される一方で、平安後期と思しき神像にモクレン属（ホオノキか）が使用されている事例を複数見いだすことに成功しており、古代の山陰地方の木彫像用材を改めて考える上で貴重な知見となると思われる。

ところで、なぜ神像にホオノキが使用されたのか。以下は私見でしかないが、出雲地方の蛇信仰や箒神習俗が根底で関連している可能性をまずは考えている。出雲では、古来蛇信仰が強く、生と死をつかさどるものとしての蛇にその形態が類似したホオノキをはじめとした樹種が神木としてあがめられた可能性が示唆されている^{10, 11)}。また同じく生と死に関わる民俗である箒神習俗でも、ホオノキをたてかけるとい文化が残っている^{10, 11)}。生死・蛇・箒神・ホオノキとの間に見られる何らかの関係性が神像の用材に影響を与えた可能性もあろう。



図1: 神像群 18 体のうちの一体でクリーブランド美術館に所蔵されている一体。Deity, 1100s. Japan, Heian period (794 - 1185). Wood with traces of color; overall: 100 cm (39 3/8 in.). The Cleveland Museum of Art, John L. Severance Fund 1954.373

さらに調べてみると、例えば東北¹²⁾、北陸*、関西*の天台宗の古刹において、複数の観音像などにホオノキが使用されている事例が認められていることを見出した（上記*を付したのものについては、筆者の近年の樹種調査により判明したものであるが、報告前のため具体的な寺社名は掲載しない）。天台宗や密教とホオノキによる造像にも、何らかの関連があるかもしれない。

今回の18体の神像群の中には、上記のとおり聖徳太子とその妃と推察される像が含まれているとされるが、平安時代、聖徳太子は天台宗の生みの親智顛の師匠慧思の生まれ変わりであると信じられていたことも知られており（諸説あり）、そのような視点からも、天台宗とホオノキによる造像には、何らかの関連性が秘められている可能性が考えられる。なぜ平安後期にホオノキが用いられたのか。以上は書籍や民俗学的知見をもとに推測した私見でしかなく、ホオノキが使用された理由の解明にはより慎重な研究と考察が必要である。

本研究においては、微細な試料片の樹種調査に、プレパラートを製作して光学顕微鏡で観察し樹種を同定するという基本的な方法に加えて、SPring-8での放射光マイクロX線CT^{6,7)}による手法を用いた。多くの場合、試料片は脆く数mm程度以下のことも多いため、一旦プレパラートへ封入するとそれ以上の科学分析に供することが困難なケースが多い。一方、非破壊である放射光マイクロX線CTを適用する場合、マイクロX線を照射したのちの試料片はそのまま残すことができるため、続いて放射性炭素年代測定に供することも可能である。今後も継続して文化財調査に活用していきたい。

神像をはじめとした木製文化財から得られたわずかな剥落片を顕微鏡や機器を駆使して分析し、その樹種や年代を明らかにすること、人文科学の研究者とともに未知の歴史や文化を紐解くこと、このような学際研究は、指数関数的な速度でテクノロジーが発展しつづける社会にあって、人が木と共生する長い歴史の中で獲得してきた「物事の本質を捉える能力」を改めて考究し、未来構築に必要な温故知新型の知見を深めるのに役立つと考えている。

樹種調査とは材料を明らかにするだけと思われがちである。しかし材料こそ当時の人々の文化交流や木材観、民俗学的視座を紐解く上で、基本的かつ重要な知見になりうる。古代の人々の適所適材の用材観には、材料の本質を見抜く力のみならず人と木の間にある精神的相互関係が込められていると考える。それらを再認識することは、これからの持続可能な世界構築においてハード面のみならずソフト面からも必ずや意味を持つだろう。

5. 謝辞

本研究を行うにあたり、アメリカハーバード大学シンシア・ボーゲル先生、和歌山県立博物館館長伊東史朗先生、フランスCRCAO (CNRS) メヒテル・メルツ博士、京都大学杉山淳司先生にお礼申し上げます。アメリカホノルル美術館・クリーブランド美術館・メトロポリタン美術館・フィラデルフィア美術館・シカゴ美術館・プリンストン大学美術館、カナダのロイヤルオンタリオ博物館、イギリスのセインズベリーセンターをはじめとした国内外の多数の美術館スタッフにお礼を申し上げます。本研究は科研費基盤B・C（田鶴）、京大生存圏研究所ミッション5-4、並びに同研究所材鑑調査室全国共同利用研究によるものである。またSPring-8のBL20XU担当の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Mertz, M., Tazuru, S., Ito, S., Bogel, C., A group of twelfth-century Japanese Kami statues and considerations of material intentionality: collaborative research among wood scientists and art historians. *J. Asian Humanities Kyushu Univ. (JAH-Q)*, 7, 127-158, 2022.

- 2) 田鶴寿弥子, 杉山淳司, 山下立, 滋賀県地域における神像彫刻の樹種調査—新旧手法の適用による—, 滋賀県立安土城考古博物館紀要21号, pp71-94, 2013.
- 3) 金子啓明, 岩佐光晴, 能城修一, 藤井智之, 日本古代における木彫像の樹種と用材観—7・8世紀を中心に—, *Museum* **555**, 3-54, 1998.
- 4) 金子啓明, 岩佐光晴, 能城修一, 藤井智之, 日本古代における木彫像の樹種と用材観2—8・9世紀を中心に—, *Museum* **583**, 5-44, 2003.
- 5) 金子啓明, 岩佐光晴, 能城修一, 藤井智之, 日本古代における木彫像の樹種と用材観3—8・9世紀を中心に— (補遺), *Museum* **625**, 61-78, 2010.
- 6) Tazuru, S., Sugiyama, J., Wood identification of Japanese Shinto deity statues in Matsunoo-taisha Shrine in Kyoto by synchrotron X-ray microtomography and conventional microscopy methods. *J. Wood Sci.*, **65**, 10, 2019.
- 7) 田鶴寿弥子, メヒテル・メルツ, 伊東隆夫, 杉山淳司, フィラデルフィア美術館蔵の日本の神像における樹種識別調査例, *SPring-8/SACLA 利用研究成果集*, **7**, 216-218, 2019.
- 8) 田鶴寿弥子, 杉山淳司, 京都府与謝野町における神像ならびに獅子・狛犬の樹種識別調査の事例紹介, *生存圏研究*, **12**, 55-61, 2016.
- 9) 小原二郎, 木の文化, 鹿島出版, 1972年.
- 10) 吉野裕子, 吉野裕子全集第五巻, 人文書院, 2007年.
- 11) 吉野裕子, 蛇 日本の蛇信仰, 講談社学術文庫, 2021年.
- 12) 岡田靖, 佐藤高史, 片岡太郎, 小林啓, 大山幹成, 星野安治, 門叶冬樹, 加藤和浩, 庵下稔, 庭月観音像の科学的調査と修復実践に関する研究, *東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要*, **1**, 3-46, 2010.

著者プロフィール



田鶴 寿弥子 (Suyako Tazuru-Mizuno)

<略歴> 2011年京都大学大学院農学研究科森林科学専攻博士課程農学博士取得/同年京大生存圏研究所博士研究員/同年同研究所ミッション専攻研究員/同年同研究所助教、現在に至る。<研究テーマと抱負>木質文化財の樹種データベース構築、年輪研究など。<特技>四つ葉のクローバーを見つけること