

生存圈研究

Sustainable Humanosphere

No. 17

2021 年



京都大学 生存圈研究所



「生存圏研究」は、京都大学生存圏研究所がその活動と生存圏の研究に関する報告を行うことを目的として年一回発行する紀要です。本第17号は、令和2年度の成果を基に発行します。生存圏の研究に関心を持たれる機関や研究者に広く行き渡るよう無料で配布しています。お問い合わせは当研究所までお寄せ下さい。

〒611-0011 宇治市五ヶ庄、TEL: 0774-38-3346

E-mail: edit-j-journal@rish.kyoto-u.ac.jp

編集委員

矢野 浩之

高橋けんし

馬場 啓一

日下部利佳

小嶋 浩嗣

中川 貴文

田中 聡一

岸本 芳昌

今井 友也

畑 俊充

反町 始

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17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和文誌ですが、研究所全般の広報活動を見直す一環として、今般、雑誌の性格を少し変更させていただくことになりました。これまで研究所の英文誌としては“Sustainable Humanosphere”という雑誌がありましたが、生存圏科学に関わる研究成果を残してゆく場として、和文誌・欧文誌というカテゴリーを超えて「生存圏研究」に一本化し、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。

生存圏研究所は平成16年(2004)に旧・木質科学研究所と旧・宙空電波科学研究センターを結合再編して設立された研究所です。現在の地球社会には人類の生存を脅かすさまざまな事象が発生しており、ある専門分野における学問の深化のみでは解決できない複合的な性格を持っています。その解決にあたっては、学際的な視点を持ちながらさまざまな分野の専門的な知識を統合してゆく必要があるとの認識から設立された研究所です。平成17年(2005)大学附置全国共同利用研究所として活動を開始し、活動が次第に本格化してきた2006年に本誌「生存圏研究」の第1号が発行されました。

この「生存圏研究」には前身があつて、「木材研究・資料」(Wood research and technical notes)が旧木質科学研究所時代から(さらには木材研究所時代から)発刊されており、ほぼ年1冊のペースで刊行されてきました。その最終号は39号(2003)で、生存圏研究所の発足直前まで発刊されており、その流れを受けて和文誌である「生存圏研究」が刊行されました。先に述べましたように、研究所の刊行物についていくつかの見直しがおこなわれましたが、私たちはこの歴史の重さを踏まえて「生存圏研究」を継続して刊行することとしています。

生存圏研究所では、これからもわれわれが直面するさまざまな問題に対して包括的な視点に立った解決策を提示することを目指し、研究成果が私たち人類の生活する生存圏の持続性に寄与すること、すなわち持続発展可能な社会の構築に向けて、わたしたちが向かうべき方向性を指し示すことができるように取り組んでいきたいと考えています。その一助として本誌「生存圏研究」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3年9月3日

生存圏研究所
所長 塩谷雅人

目 次

総 説

東日本大震災から10年を迎えて（福島県における支援研究）……………	1
上田 義勝, 杉山 暁史, 徳田 陽明, 二瓶 直登, 谷垣 実	
電子レンジから宇宙太陽光発電まで……………	16
楊 波	
電磁環境と健康の国際動向 ～WHOの評価より～……………	22
宮越 順二	
植物の合成生物学……………	34
草野 博彰	
ナノセルロースヴィークル（NCV）プロジェクトの成果について……………	42
臼杵 有光	

資 料

文化財修理時における木彫像の樹種調査 ～楽浪文化財修理所の事例～……………	51
田鶴 寿弥子, 杉山 淳司	

Note

Wood selection for Chinese wood statues preserved in the several museums in the USA……………	57
Suyako Tazuru-Mizuno	

研究業績……………	60
-----------	----

東日本大震災から 10 年を迎えて（福島県における支援研究）

上田 義勝^{1*}, 杉山 暁史¹, 徳田 陽明², 二瓶 直登³, 谷垣 実⁴

Ten years of the collaborative research in Fukushima prefecture since the Great East Japan Earthquake

Yoshikatsu Ueda^{1*}, Akifumi Sugiyama¹, Yomei Tokuda², Naoto Nihei³, Minoru Tanigaki⁴

概要

2011年3月11日に発生した東日本大震災から、10年の月日がすでに経過しつつある。我々は震災直後から福島県に赴き、現地での復興支援研究に携わってきた。現在も連携支援を模索しながら、研究活動、および研究成果を議論するシンポジウムを定期的開催している。特に震災直後には、放射性セシウムの除去のため、いち早く微細気泡技術に着目し、除染実証事業として現地での実証実験を行った。また、その後の福島県との新しい共同研究として、観葉植物の延命などの微細気泡技術の農業利用や、長期間にわたる環境放射能のリアルタイムモニタリングなど、10年を経過しつつある現在でも国際的・学際融合的研究を幅広く続けてきている。

本稿では、我々の福島県での研究に関する成果、および公開シンポジウムについてのこれまでの活動をまとめ、今後の連携支援研究にもつながる形として、ここに報告するものである。

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災による原発事故の影響は大きく、福島県内の放射性物質による土壌・水質汚染は10年を経過しつつある現在でも、まだ解決の道筋を模索している地域が存在する。原発事故により、主に放射性セシウムが環境中に飛散されたこともあり、事故直後の除染技術として、生活圏における放射性セシウムの除染や環境モニタリングを目的とした実証研究が行われてきた。我々は震災直後から福島県での連携支援研究を活発に行い、その研究成果を一般に広く公開しながら、福島県にて活動する研究者との議論を精力的に行なってきた。特に、毎年開催の生存圏シンポジウムとして、2011年度から2020年度まで都合10回のシンポジウムを継続して開催してきた事は特筆に値する。このシンポジウムで得られた知見や、参加頂いた皆様との議論を通じた共同研究の広がりや、被災された方々への支援につなぐための活動の継続につながるとともに、我々にとって貴重な経験・財産となっている。

我々の研究の一例としては、除染技術としてマイクロメートル以下のサイズである微細気泡（ウルトラファインバブル、ナノバブルなど）に着目した事である。空気と水という一般に広く存在する材料を用いた微細気泡水による除染効果についてその効果を実証し、成果報告を行った¹⁾。具体的な実

2021年4月26日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 宇宙圏電磁環境探査分野。

²〒520-0862 滋賀県大津市平津 2-5-1 滋賀大学教育学部。

³〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地 福島大学食農学類。

⁴〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2-1010 京都大学複合原子力科学研究所。

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

験としては、福島県下の砂礫ならびにコンクリート、アスファルトからのセシウム除染係数の評価である。その結果、微細気泡水の除染係数が水と比較して20%程度高いことを見いだした。特に市販の高圧洗浄機と微細気泡水を組み合わせた場合、約80%という除染係数を示している。この結果は、既存の技術との組み合わせにより、洗浄効率が飛躍的に向上することを示唆している。しかし、微細気泡水によるセシウム除染の効果には不明な点が多く、また、どんな対象であっても有効であるかは未だわかっていない部分も多い。また、年数が経過するごとに風雨などの天候で自然除染が進むと、それ以上の除染は難しくなることがわかってきている。

シンポジウム開催や微細気泡技術をきっかけとして、様々な国際的・学際融合的な研究も活発に進めてきつつある。微細気泡技術に関しては、その利用の簡便さから、福島県農業総合センターにおいて、花き類の延命試験に利用され、長期保存効果が明らかになった²⁾。国際的な活動としては、タイ王国や中国との微細気泡技術による共同研究も行ってきたが、福島県との支援研究から離れる研究課題であるため、詳細は割愛する。その他、複合原子力科学研究所が開発したGPS連動型放射線自動計測システムKURAMA-II(クラマ, Kyoto University RAdiation MApping system)^{3,4)}を用いる事で、福島県下における農耕地やその周辺の環境放射能をリアルタイム計測し、長期的な経時変化について計測を行った。特にKURAMA-IIを用いた計測では毎年の計測による経時変化を毎年行う事で、実測としての土壌サンプリング回数を減らしつつ、より広い範囲の計測結果を簡単に調査する事が出来る。2018年ごろからはNPO法人ふくしま再生の会とも協力して、主に飯舘村周辺の環境放射能の調査を行いつつある。

本稿においては、生存圏シンポジウムを中心とした我々の研究成果公開について紹介した後、そこからつながりを得て発展してきた研究活動について、特に微細気泡技術とKURAMA-IIによるモニタリングを中心に紹介していく。

2. 生存圏シンポジウム「東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて」

2011年度から、生存圏シンポジウム「東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて」を毎年開催し、2020年度までに10回開催している(図1)。福島県における研究を開始した発端は、もともとは個人的な友人としてのつながりがきっかけであった。その後、予算的には京都大学総長裁量経費の他、日本原子力研究開発機構の除染実証事業と発展し、それらの研究成果を一般向けにも公開する事を目的として、第1回目となる第191回生存圏シンポジウムを開催するに至っている。10回の生存圏シンポジウム開催の中では、国立大学協会との共催、京都府の後援などの支援を頂きつつ、延べ人数としては542人の参加があった。開催地としては、京都府、福島県、東京都での開催を行い、また第327回生存圏シンポ(第6回)では、海外の研究者を招へいして、浜通り地域における開催と現地見学も行う事で、国際シンポジウムとして非常に充実した研究集会も行う事が出来た。第390回生存圏シンポ(第8回)以降は、複合原子力科学研究所との共同開催を行う事で、これまで農業関係の研究テーマが比較的多かったシンポジウムから、環境モニタリングや情報通信分野など、さらに広い分野からの参加を募って開催してきており、さらに連携分野の幅が広がりつつある。2020年度は、COVID-19の影響もあり、オンラインと京都と福島のリモート会場による分散3元シンポジウムとして開催したが、オンライン参加の強みもあり、海外からの発表も含め、これまで通り多くの参加者による活発な議論を行う事が出来た。

生存圏シンポジウム以外の活動としては、福島県農業総合センターとの連携研究も2011年に開始したほか、生存圏研究所における新領域開拓・融合に向けた取り組みとして採択され、融合研究として関連研究者との会合を福島県・京都府において行ってきた。

その他、後方的な活動としては、京都府教育委員会が行っている子どもの好奇心をくすぐる体験授

業「出前・受入授業」がある。我々は2012年よりこの出前授業において、毎年福島県での活動を紹介しており、これまでに13の京都府内の小中高校において、出前授業を開催し、活動を紹介してきている。また、京都府以外においても、和歌山県や東京都での授業開催の他、福島県現地の見学会も随時開催してきている（東京理科大学、筑波大学附属駒場中・高等学校 灘中・高等学校など）。

<p>2011年度(平成23年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 京都大学総長裁量経費による活動 ・ 日本原子力研究開発機構 平成23年度除染技術実証試験事業 ・ 国立大学協会 震災復興・日本再生支援事業(H23-H25) ・ 第191回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2012.1.6 ・ 福島県農業総合センターとの連携研究
<p>2012年度(平成24年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第215回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2012.11.30 ・ 生存圏科学の新領域開拓に向けた取り組み(福島県との連携研究) 2013. 2. 21
<p>2013年度(平成25年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第240回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2013.12.20 ・ (第2回)生存圏科学の新領域開拓・融合研究に向けた取り組み 2014.3.4 ・ 第2回新化学技術研究奨励賞(特別課題) 東日本大震災関連
<p>2014年度(平成26年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第271回生存圏シンポジウム(福島県にて開催) 2014.12.7 ・ (第3回)生存圏科学の新領域開拓・融合研究に向けた取り組み 2014.12.7 ・ (第4回)生存圏科学の新領域開拓・融合研究に向けた取り組み 一福島県及び大学間連携融合研究に向けたパネルディスカッション 2015.3.9
<p>2015年度(平成27年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第293回生存圏シンポジウム(京都府にて開催) 2015.9.8
<p>2016年度(平成28年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第327回生存圏シンポジウム(福島県にて開催) 2016.10.26
<p>2017年度(平成29年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第357回生存圏シンポジウム(福島県にて開催) 2017.11.27-28
<p>2018年度(平成30年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第390回生存圏シンポジウム(福島県にて開催) 2018.12.11-12 ・ 複合原子力科学研究所との共同開催
<p>2019年度(令和元年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第416回生存圏シンポジウム(東京都にて開催) 2019.12.11-12 ・ 複合原子力科学研究所との共同開催
<p>2020年度(令和2年度)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 第440回生存圏シンポジウム(オンライン、福島、京都での3元開催) 2020.11.30-12.1 ・ 複合原子力科学研究所との共同開催

図1：これまでの生存圏シンポジウムと関連する事業などについて

3. 微細気泡を用いた除染実証事業⁵⁾

本章では、福島県での支援研究のきっかけとなった微細気泡を用いた除染実証事業について紹介する。微細気泡を生成する方式としては、細孔を持つパイプへ気体を圧入する細孔式、液体に超音波を照射する超音波式、過飽和状態の気体を析出させる加圧溶解式、気液二相流体を遠心分離して剪断する気液混合剪断方式などが知られている。本研究では、ウルトラファインバブル発生装置 BUVITAS HYK-32-D (Ligaric 製)を用いて、気液混合剪断方式による微細気泡の生成を行った(図2)⁶⁾。

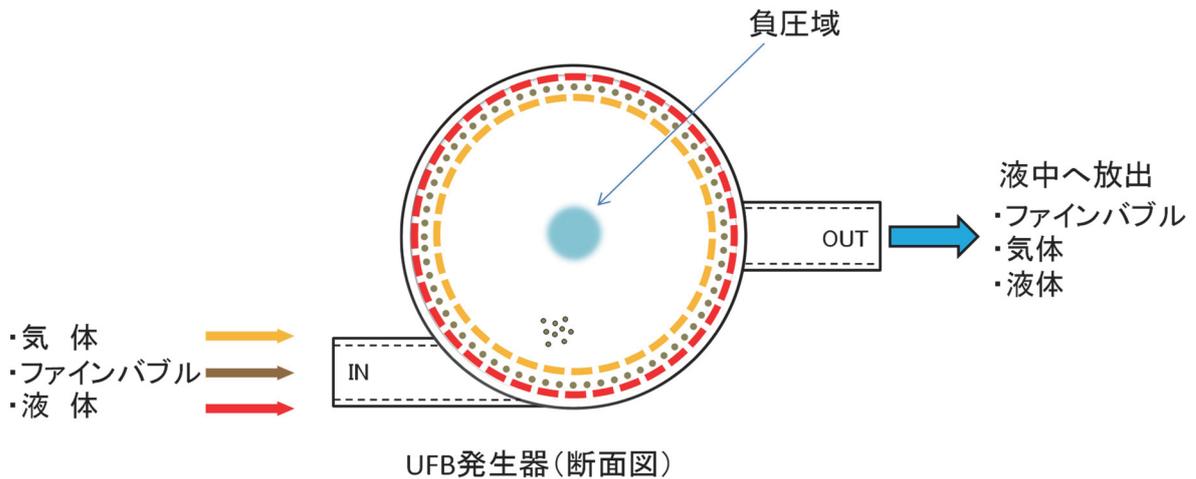


図2：気液混合せん断方式によるウルトラファインバブル (UFB) の生成。IN 側から気体と液体、それらを混合させ発生させたファインバブルを、ポンプ圧力で UFB 発生器に送る遠心力により、ファインバブルがせん断され UFB が発生する。

また、気泡径の評価は、NanoSight LM10 (Malvern Panalytical 社製)により行った⁷⁾。BUVITAS により生成した微細気泡水は図3に示したように、気泡の最頻直径は約 100 nm であることがわかり、ウルトラファインバブルであることが確認できた。また、7日経過後にも微細気泡が水中に存在することがわかった⁷⁾。

微細気泡の安定性に関する検討と、その影響についてナノサイズのバブルの粒度と電気伝導度に関する調査を行った。電気伝導度測定には、導電率測定計(S230、METTLER TOLEDO)を用いた。一般大気を用いて微細気泡を生成した際の生成器稼働時間と濃度・電気伝導度の関係を図4に示す。比較対象として、純水を大気中に曝露した際の電気伝導度の変化も示した。大気

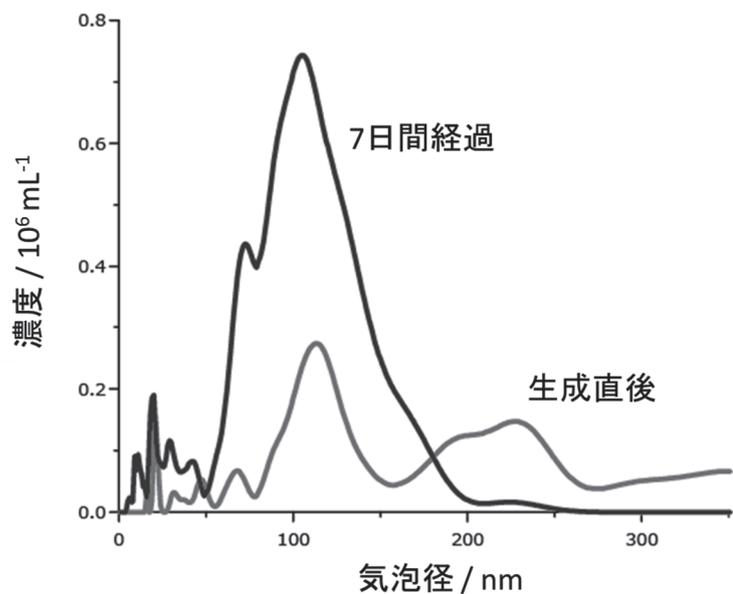


図3：気泡の直径と濃度の関係（生成直後と、7日間経過後の比較）

曝露した純水の場合、おそらく二酸化炭素などの溶解度の高い気体により伝導度が緩やかに飽和するのに対し、微細気泡水の場合には気泡濃度の上昇に伴った電気伝導度の低下が見られ、気泡近傍での拡散電気二重層の変化を示唆するものである。

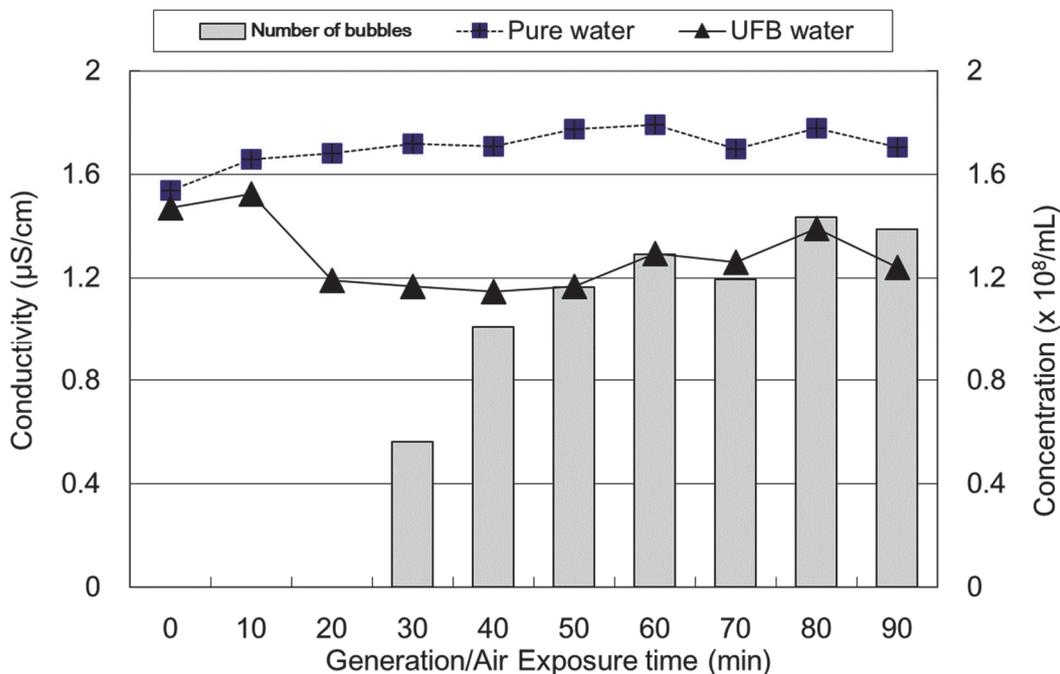


図4：装置稼働時間に対する気泡濃度（右）と電気伝導度（左）の変化。■は純水、▲はUFB水の値を表す。

また、生成時に使用する気体による電気伝導度の違いについても測定を行った。気体の違いをより精度よく見るため、純水の初期抵抗と、各種気体（酸素及び窒素）により生成した微細気泡（使用量10L、気体流量700ml/min、15分稼働）について、生成直後から1分毎の電気伝導度（μS/cm）の変位について測定を行った。初期条件を同一とするため、伝導度測定前に対象となる水を各種気体により1時間曝気し、温度変化についても初期温度40℃（生成終了時の平均温度）と設定し、外気温22℃一定として測定を行った。外気による影響もできる限り減らすため、出来るだけ表面積の小さな管瓶を用いた。測定誤差についての検討も行うため、測定回数を3回行った結果を示す（図5）。

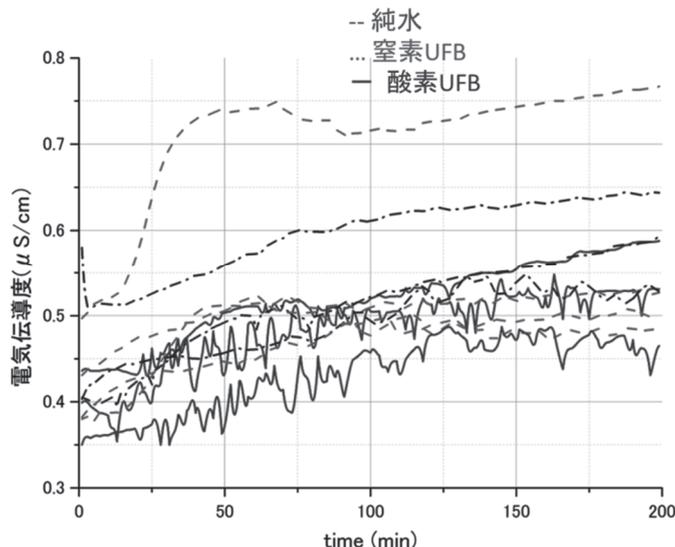


図5：純水（---）、窒素UFB水（...）、酸素UFB水（—）の電気伝導度の変化

生成直後の電気伝導度の平均値は、純水が 0.47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、窒素が 0.42 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、酸素が 0.38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ となり、優位な差違がみられている。この事は液中に存在する微細気泡が電気伝導度に影響を与えている可能性を示唆するものである。

3.1 砂礫の洗浄^{1,8)}

土壤除染の一例として、微細気泡を用いた洗浄効果について紹介する。洗浄サンプルの砂礫は、福島県農業総合センター（福島県郡山市）で採取し、表面の粘土を除去するために水を用いて前洗浄を行った。洗浄後の砂礫 100g を種々の水 500ml 中にそれぞれ静置し、静置前後の乾燥状態での放射線強度を比較した。用いた水は、精製水、微細気泡水、市販の中性洗剤を 0.15wt% 添加した水（以下、石けん水）である。

図 6 に示すように、微細気泡発生装置の稼働時間とともに、気泡の最頻濃度（1ml 中の個数）が増え、¹³⁷Cs の除去率が増加することがわかった。また、精製水、石けん水との比較を行った結果を図 7 に示す。砂利の浸漬洗浄試験（12 時間及び 3 時間の静置）では、除染係数が 50-60% であり、原水と比較して 20% 以上高くなることがわかった。また、中性洗剤を原水、微細気泡水を比較すると、中性洗剤の添加効果はほとんどなく、原水と微細気泡水単体での試験結果と同様となった（図 7）。この試験においては振とうを加えていないため、この結果は微細気泡水そのものの除染作用を示しており、中性洗剤と同程度以上の洗浄効果を示したことは特筆に値する。さらに、生成後 2 週間経過した微細気泡水を用いて砂利の浸漬洗浄試験（静置）を行った結果でも同様の傾向を示しており（図 8）、原水と比較して 20% 以上の除染係数を示すことが明らかとなった。この結果は、微細気泡水が洗浄液として使用可能な保存時間が非常に長いことを示している。

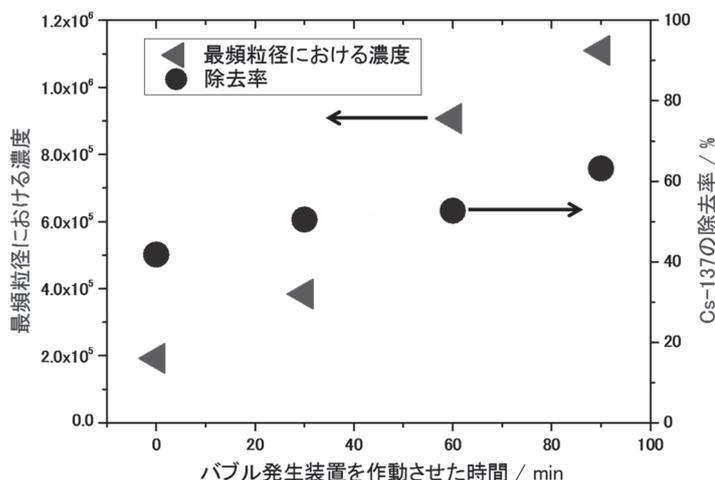


図 6：UFB 発生装置の稼働時間と、最頻粒径濃度（1ml 中の個数, ▲）、砂礫からの Cs-137 の除去率の関係（●）

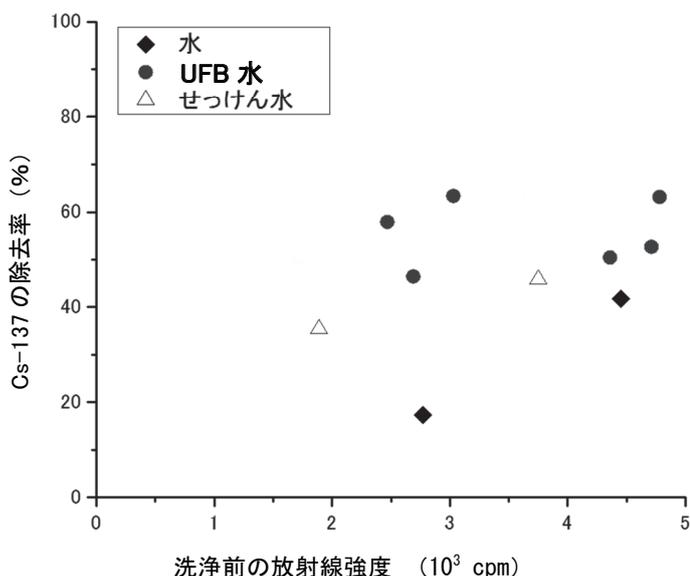


図 7：洗浄前の放射線強度（cpm）と Cs-137 除去率との関係。◆水、△せっけん水、●UFB 水。UFB 水は他の水よりも洗浄効果に優れる。

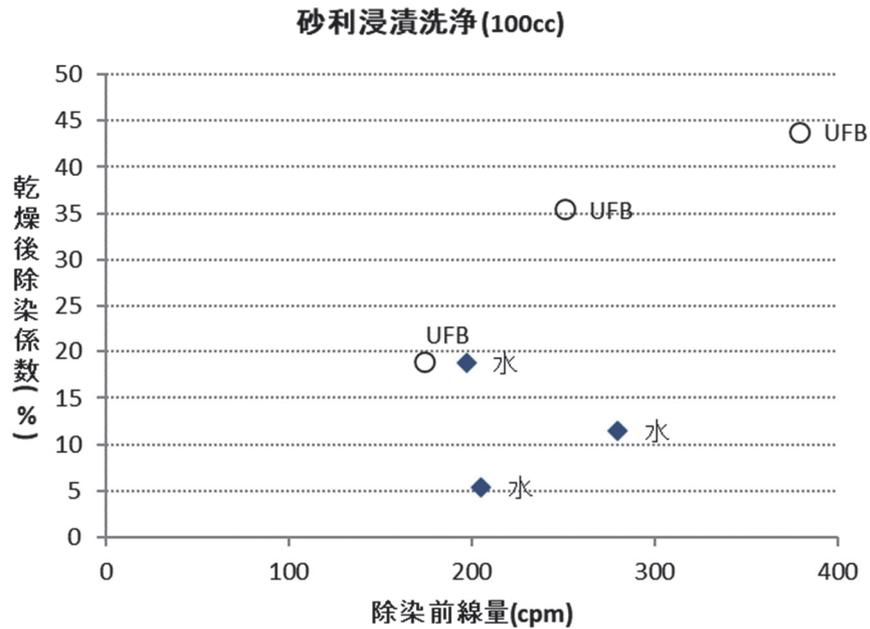


図8：砂利(100cc)の浸漬（静置）による洗浄の除染係数（乾燥後）◆は水、○はUFB水（生成15日後）を用いて行った結果である。生成15日後も洗浄効果を保持している事がわかる。

3.2 高圧洗浄との併用⁸⁾

除染対象から所定の高さ(2cm、5cm)から、7.5MPaの水圧で試験水を吐出し(2cm: 20秒、5cm: 1分)、洗浄試験を実施した。放射線密度の測定は洗浄前、洗浄面乾燥後に実施した。アスファルト舗装面、コンクリート舗装面、歩行者用タイル（多孔質面）、樹木（ポプラ）の除染試験結果を図9～13に示した。

図9～11にアスファルト舗装面とコンクリート舗装面に対して高圧洗浄の結果を示した。これより微細気泡水を用いると原水よりも除染係数が最大20%（約5-20%）向上することがわかった。また、生成後6日間経過した微細気泡水を用いた場合でも、アスファルト舗装面を除染することができた(図10)。一方で歩行者用タイルの高圧洗浄の場合（図12）、微細気泡水と原水の双方で10～40%であり、アスファルトやコンクリートと比較すると、除染効果が低いことがわかった。透水性のタイル表面の放射性セシウム（それを吸着した土等）が単に内部で移動したためではないかと考えた。以上の結果より、アスファルト舗装面ならびにコンクリート舗装面の高圧洗浄に微細気泡水を併用することにより洗浄効果が高まることが明らかとなった。

樹木（ポプラ）表皮の高圧洗浄を行った結果を図13に示す。なお、除染は樹皮表面に苔や粉塵等の付着が無い状態で行った。微細気泡水による除染係数は25%であったが、原水よりも20%以上も高いことがわかった。また、樹木の洗浄後の状態も良好であることを確認した。森林の除染方法は一般的に難しいとされているが、微細気泡水を用いた高圧洗浄は、森林汚染の低減に有効な技術だといえる。その他の応用としては、有機物を含んだ汚染物に対する洗浄にも効果があると想定される。

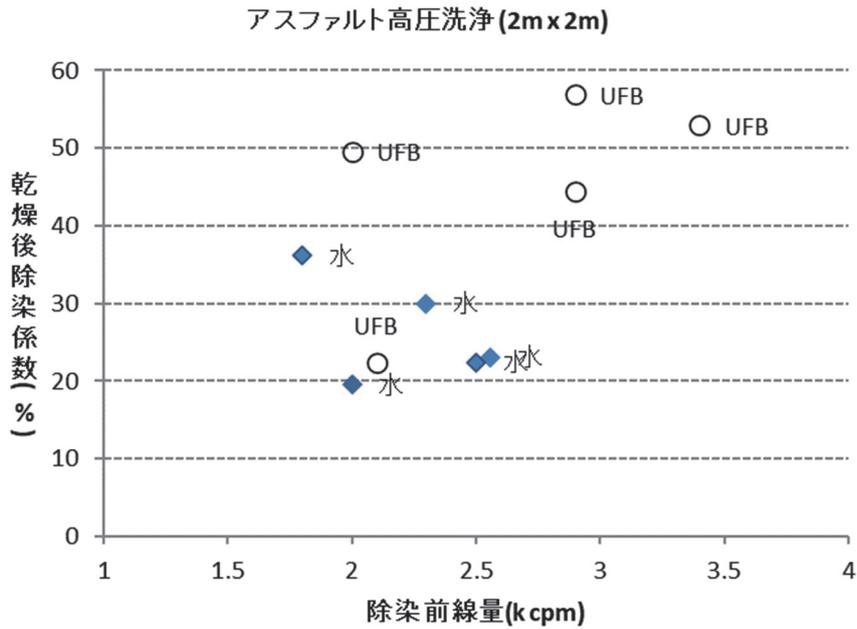


図9： 高圧洗浄機によるアスファルト(2m x 2m)の除染係数(乾燥後)。◆は水，○は微細気泡水(UFB, 生成直後)を用いて除染を行った結果を表す。微細気泡水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

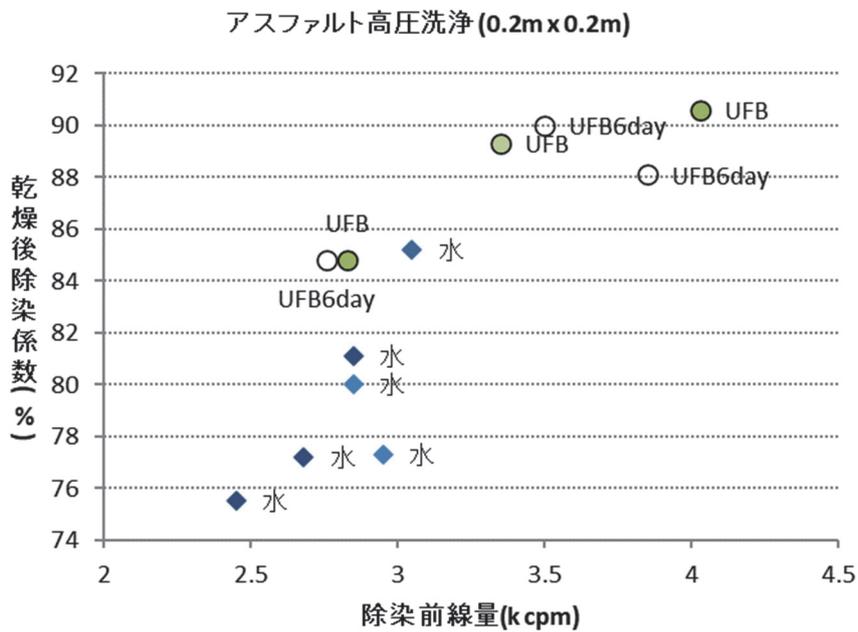


図10： 高圧洗浄機によるアスファルト(0.2m x 0.2m)の除染係数(乾燥後)。◆は水，○，●は微細気泡水(UFB (生成6日後)，UFB7day(生成直後))を用いて除染を行った結果である。水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

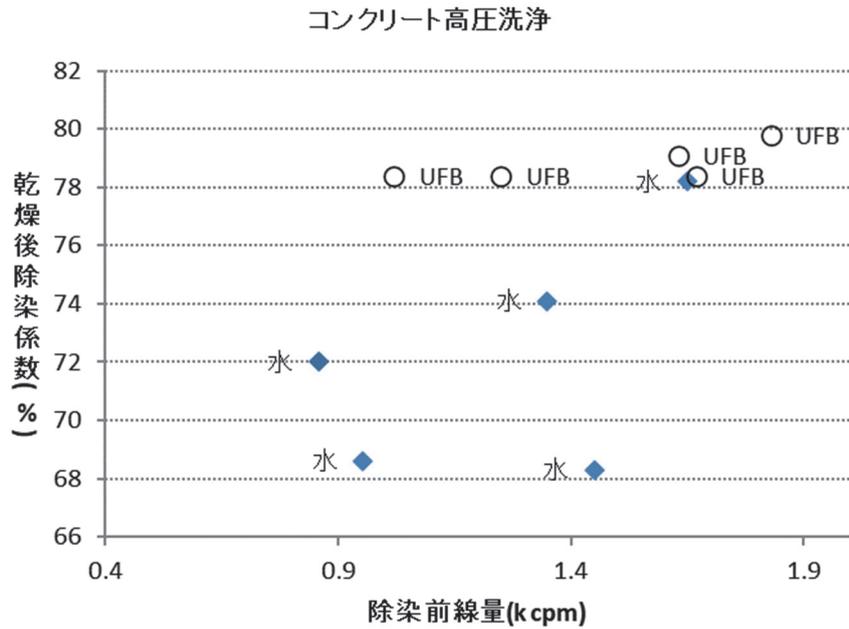


図 11 : 高圧洗浄機によるコンクリートの除染係数(乾燥後)。◆は水, ○は微細気泡水(UFB(生成直後))を用いて除染を行った結果である。微細気泡水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

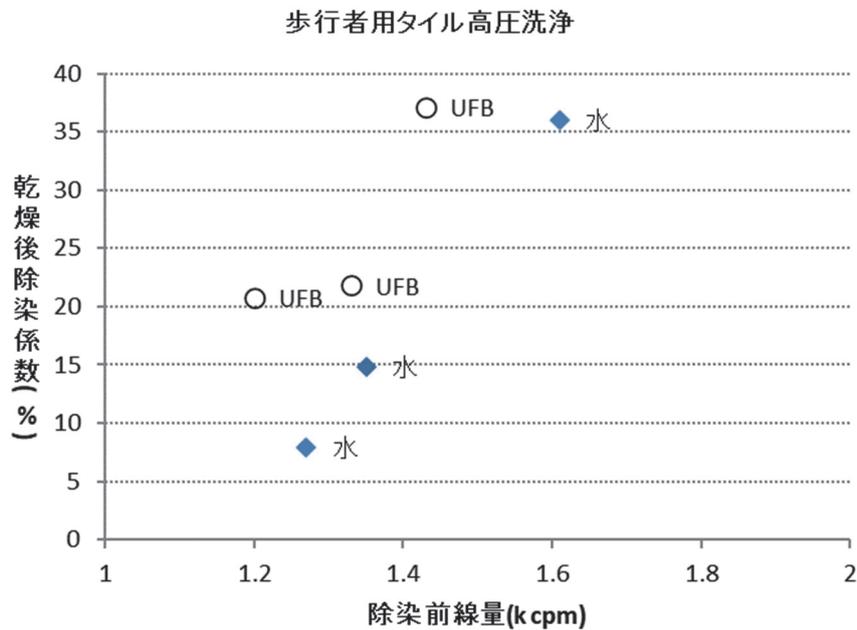


図 12 : 高圧洗浄機による歩行者用タイルの除染係数(乾燥後)。◆は水, ○は微細気泡水(UFB(生成直後))を用いて除染を行った結果である。微細気泡水による顕著な効果は認められない。

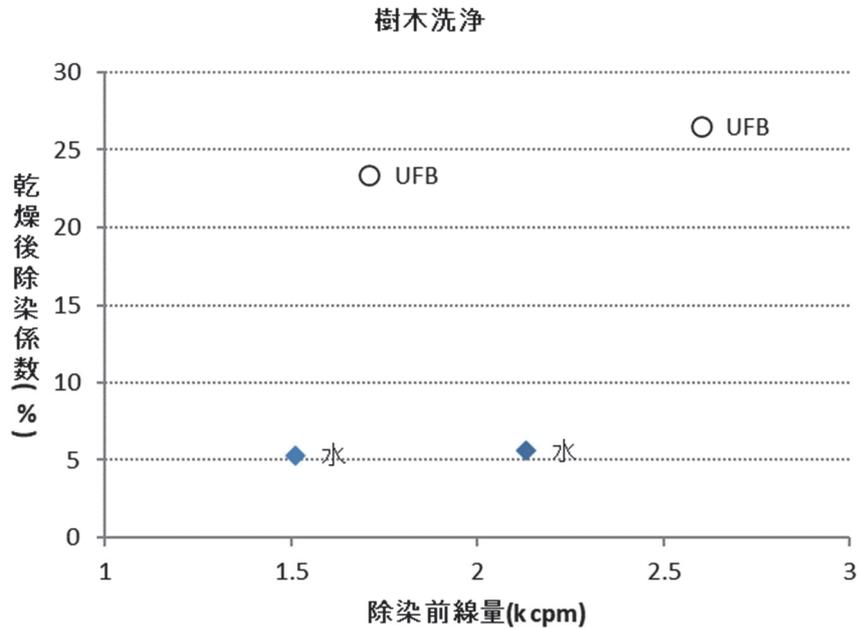


図 13 : 高圧洗浄機による樹木の除染係数(乾燥後)。◆は水、○は微細気泡水(UFB(生成 6 日後))を用いて除染を行った結果である。微細水は原水よりも高い除染係数を示すことがわかる。

3.3 洗浄のメカニズムについて

なぜ微細気泡を含む水が洗浄に有効であるかの要因として、表面吸着や表面電荷による影響、気泡が研磨剤として働く可能性、気泡の持ち上げ効果、表面張力の低下による浸み込みなどが考えられる。しかしながら現時点では、いずれの要因によるものかについての科学的説明は定かではない。ただし、微細気泡水により洗浄を行った洗浄液の方が、そうでないものと比べて濁っているため、砂礫の表面に付着した粘土質とともにセシウムが除去されたと推察される。

3.4 微細気泡水を用いる利点について

原発事故から 10 年が経過した 2021 年においては、長期間の風雨に晒された環境では、放射性セシウムなどの環境放射能はある程度移動し、土壤に含まれる雲母類等の鉱物と化学吸着する事で、除去が非常に難しくなっている部分もある。また一方で、Cesium Ball と呼ばれる状態として、微粒子状態の鉱物と一緒に、局所的に非常に高いセシウム濃度の物質が植物に付着している状況も発見されている。微細気泡水を用いた除染については、汚染された砂粒、塵を微細気泡水が洗浄面から除去したためではないかと考えている。今回の手法では水と空気のみからなる除染であるため、新たに除染効率を上げるというよりは、通常の洗浄に対して洗浄効果を高めることで、微粒子状に固着した環境放射能の除去に有効であると考えている。

4. GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA-II を用いた環境放射能モニタリング

福島県飯舘村にある農作物試験地とその周辺の河川、道路について環境放射能モニタリングを行った事例について紹介する。尚、計測は徒歩で行い、農作地、周辺畦畔と灌漑水路を歩行する事で、除染後の農作地に新たに流入する放射性セシウムや、水路のセシウム移動状況について調査した。環境

放射能の可視化に用いた KURAMA-II については、福島大学所有のものを用いた。本 KURAMA-II は地上歩行サーベイ型であり、Na-I シンチレーションサーベイメータ（浜松ホトニクス C12137-01 製）が2台搭載され、うち1台を厚さ1cmの鉛板コリメータで覆うことで、指向性を持たせて同時計測・校正する。2台の測定結果を用いる事で空間線量と地表線量を評価する事が可能である。また、KURAMA-II には DGPS(Differential GPS)が搭載されており、精度誤差1m以下で計測が可能である。さらに、測定結果と常にネットワーク回線を通してクラウドデータとして保存する事で、測定結果を常時どこからでも確認する事が出来る。

KURAMA-II による地図上での環境放射能可視化と同時に、除染が行われていない水田畦畔の汚染状況を把握するため、水田地帯の汚染マップ作製、畦畔の放射性セシウム濃度分布、水田地帯を流れる灌漑水中の放射性セシウム濃度も調査した。水田を取り囲んでいる畦畔の平坦部と灌漑水側の傾斜地下部（平坦部との高低差約1m）で放射性セシウム濃度を調べている。土壌採取は深さ15cmまで行い、5cm毎に分けて深さ別に測定した。

4.1 KURAMA-II による計測結果と傾向

環境放射能計測を行った場所としては、福島県飯館村にある農作物試験地とその周辺の河川、道路について計測している。また、NPO 法人ふくしま再生の会と協力して、飯館村牧場周辺の除染後の環境放射能の時間的な変化についても定期的に計測を行った。計測は徒歩で行い、農作地、周辺畦畔と灌漑水路を歩行する事で、除染後の農作地に新たに流入する放射性セシウムや、水路のセシウム移動状況について調査した。

環境放射能の可視化に用いた KURAMA-II については、福島大学所有のものを用いた。KURAMA-II は地上歩行サーベイ型であり、Na-I シンチレーションサーベイメータ（浜松ホトニクス C12137-01 製）が2台搭載され、うち1台を厚さ1cmの鉛板コリメータで覆うことで、指向性を持たせて同時計測・校正する。2台の測定結果を用いる事で空間線量と地表線量を評価する事が可能である。また、KURAMA-II には DGPS(Differential GPS)が搭載されており、精度誤差1m以下で計測が可能である。さらに、測定結果と常にネットワーク回線を通してクラウドデータとして保存する事で、測定結果を常時どこからでも確認する事が出来る。

KURAMA-II による地図上での環境放射能可視化と同時に、除染が行われていない水田畦畔の汚染状況を把握するため、水田地帯の汚染マップ作製、畦畔の放射性セシウム濃度分布、水田地帯を流れる灌漑水中の放射性セシウム濃度も調査した。水田を取り囲んでいる畦畔の平坦部と灌漑水側の傾斜地下部（平坦部との高低差約1m）で放射性セシウム濃度を調べた。土壌採取は深さ15cmまで行い、5cm毎に分けて深さ別に測定した。

KURAMA-II による計測結果を図15,16に示す。図15においては特に高低差のある畦道と灌漑水のそれぞれを土壌サンプリングし、汚染密度(Bq/kg)を計測したものを比較している。大まかな傾向としては、KURAMA-II にて高い汚染密度を計測した点(B, E, F)では、低い位置にある灌漑水側の土壌の汚染密度が高い傾向がみられた。また、また、A, C地点においてはKURAMA-II との相関がはっきり見えていないが、これら2地点は別系統から灌漑水に水が流れ込む地点でもあるため、場所による汚染密度の変化が大きいことが考えられた。KURAMA-II での測定により、誤差精度が良いため、灌漑水路内部での計測と、すぐ両側のあぜ道部分や農耕地内の測定との差がよく見て取れる事がわかる。特に灌漑水路底部に残留している¹³⁷Csや、あぜ道に拡散していく様子などが、今後の継続した計測により明らかに出来る可能性がある。図16はふくしま再生の会と共同で計測結果であるが、除染後の牧場が除染されていることが分かった一方で、山林から移行してくる環境放射能が存在する可能性もあるため、定期的な計測を今後も行っていく予定である。

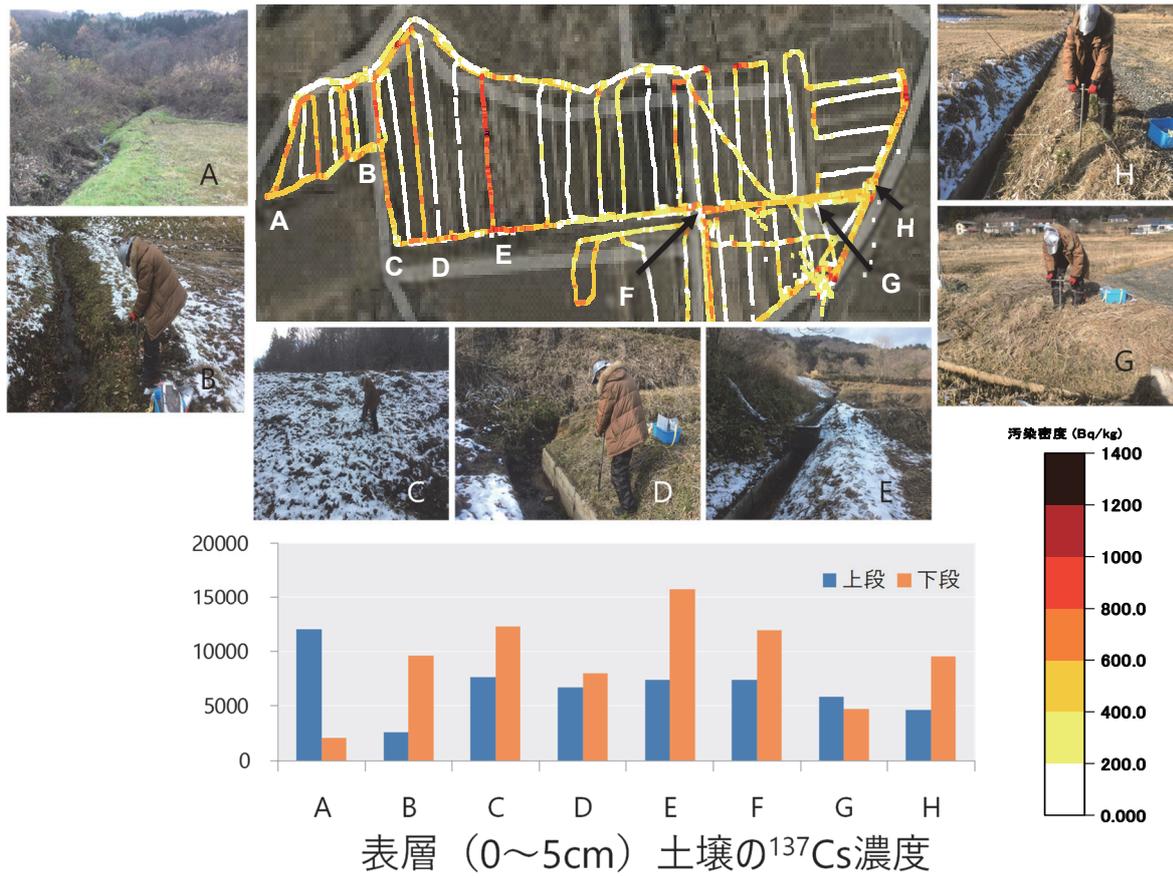


図 14 : KURAMA-II による歩行サーベイ (上部コンターマッピング) と、土壌サンプリングによる土壌中の放射性セシウム濃度との比較 (下部棒グラフの縦軸は Bq/kg)

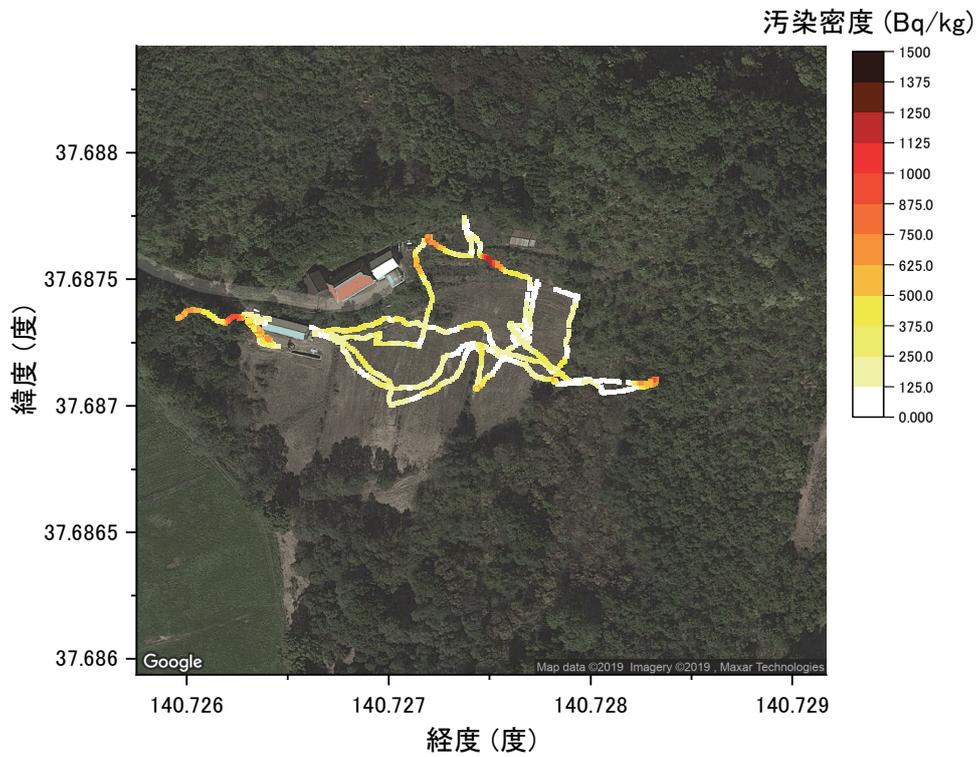


図15 : KURAMA-IIによる歩行サーベイの結果 (除染後の牧場の計測)

4.2 計測のまとめと今後の課題

東京電力福島第一原発の事故に伴い、広範囲にわたる地域が放射性セシウムにより汚染された。土壌中の放射性セシウム濃度が特に高い農地では表層約 5cm を剥ぎ取る除染が実施されている。一方、このような除染作業が行われるのは圃場の内部のみで、水田周囲の畦畔は除染作業が行われていない。原発事故から 10 年が経過し、避難指示が解除された地域でも、これから水稻の作付が徐々に行われる。本研究での計測のまとめは以下の通りとなる。

- ① 水田地帯の汚染マップの作製：調査地は福島県飯舘村の数十枚の水田から形成される水田地帯（約 500m×200m）とした。歩行型放射能測定システム（KURAMA-II）を用いて、調査対象水田地帯の放射性セシウム汚染マップを作製した。表土剥ぎなど除染を実施した圃場内に比べ、除染が行われていない圃場や畦畔で高い傾向を確認した。
- ② 畦畔の放射性セシウム分布：畦畔の平坦部より傾斜地下部で放射性セシウム濃度は高い傾向を示し、平坦部から傾斜地下部へ放射性セシウムの移動が示唆された。なお、深さ別の放射性セシウム濃度は、各地点ともおおよそ表層 5cm に存在していた。
- ③ 水田地帯を流れる灌漑水中の放射性セシウム濃度：容量（L）当たりの放射性セシウムは採取地点の差はなかったが、重量（kg）当たりの放射性セシウム濃度は上流より下流で高かった。灌漑水をろ過したフィルターのオートラジオグラフィを取得したところ、ろ紙は全体に放射性セシウムが分布しているのではなく、粒子状の点が局在していた。水田地帯を灌漑水が通過する際に、粒状の放射性セシウムが供給されていることが示唆された。

5. まとめ

2011 年から継続している福島県における支援研究として、生存圏シンポジウムの活動の紹介と、支援研究に関わる研究成果として微細気泡研究、またリアルタイム環境放射能計測の現状についてまとめた。生存圏シンポジウムの活動をまとめた資料としては、第 293 回生存圏シンポの冊子に詳細にまとめている部分もあるため、割愛した部分も多いが、京都大学としての活動についてもいくつか報告をまとめた資料となっているため図 16 に表紙として紹介させて頂く⁹⁾。

微細気泡に関しては基礎研究や応用利用研究として個別に発展した研究活動になっており、発展研究として現在も様々な研究機関と協力して活動を続けている。また、KURAMA-II による環境放射能計測については、国際共同研究に繋がる活動として、タイ王国の Rajamangala University of Technology Lanna の Rattanaporn 助教と共同で計測も行っており（図 17）、今後の国際共同研究の発展にもつながる研究として期待されるものである。

2021 年の現在も様々な自然災害が数多く発生し、また災害に伴う事故なども発生している。我々は 2011 年の震災を体験し、その被害の大きさ、また環境中に放出された放射能に対する知識不足を経験した。生存圏研究所の理念として掲げられていた「社会的な要請を背景にして人類の生存と繁栄を脅かす諸問題の解決に取り組む事」は、まさにこの震災対応に対して、我々が一致団結して解決に取り組むべき最重要課題であった。そのため、大学・企業などの垣根を超えた関係として、様々な方々からご教授頂き、活発な議論を進めて今日までの研究活動として継続してきている。今後もまだ連携研究活動を続け、特に福島県だけでなく、他地域、また世界の生存圏繁栄のため、研究活動に邁進したい。



図 16：第 293 回生存圏シンポジウム表紙



図 17 : Rattanaorn 助教、二瓶准教授（撮影当時は東大に所属）との共同での KURAMA-II による計測

参考文献

- 1) Y. Ueda, Y. Tokuda, S. Fujimura, N. Nihei and T. Oka, Removal of Radioactive Cs from Gravel Conglomerate using, Water Containing Air Bubbles, *Water Science & Technology*, 67.5, 996-999, 2013
- 2) 上田 義勝, 徳田 陽明, 二瓶 直登, 矢島 豊, 矢吹 隆夫, 微細気泡水を用いた切り花の鮮度保持効果について, 日本混相流学会, 28, 3, 340-344, 2014
- 3) M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya, N. Sato, H. Yoshino, H. Yamana, Development of a car-borne γ -ray survey system, KURAMA-II, *Nucl. Instr. Meth. A* 726 162-168, 2013.
- 4) M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya, N. Sato, H. Yoshino, H. Yoshinaga, Y. Kobayashi, A. Uehara, H. Yamana, Development of KURAMA-II and its Operation in Fukushima *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 781 57-64 2015.
- 5) 上田 義勝, 徳田 陽明, 福島県農業総合センターとの連携研究（除染及び農業分野への応用利用）－微細気泡生成技術－, *東京大学アイソトープ総合センターニュース*, Vol. 43, No. 3, 2-10, 2012/12
- 6) Miyamoto M., Ueyama T., Washing method and washing apparatus, Japanese Patent (Kokai) 2007-083142, 2007
- 7) Gallego-Urrea, J.A.; Tuoriniemi, J.; Hassellöv, M. Applications of particle-tracking analysis to the determination of size distributions and concentrations of nanoparticles in environmental, biological and food samples. *Trends Analyt. Chem.* 30, 473-483, 2011.
- 8) 上田義勝, 日本原子力機構「2011年度除染モデル実証事業」
<http://www.jaea.go.jp/fukushima/decon04/ps11.pdf>
- 9) 第5回東日本大震災以降の福島県の現状及び支援の取り組みについて, 第293回生存圏シンポジウム

著者プロフィール



上田 義勝 (Yoshikatsu Ueda)

＜略歴＞ 2003 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



杉山 暁史 (Akifumi Sugiyama)

＜略歴＞ 2008 年京都大学大学院農学研究科博士課程修了／2008 年博士（農学）／2008 年京都大学生存圏研究所研究員／2009 年コロラド州立大学客員研究員／2010 年京都大学生存圏研究所助教／2016 年 同准教授、現在に至る

＜研究テーマと抱負＞根圏領域における植物微生物相互作用と作物生産への応用。本グループではダイズセシウム吸収に関する研究。＜趣味など＞旅行、スポーツ観戦、ピザ作り



徳田 陽明 (Yomei Tokuda)

＜略歴＞ 2001 年京都大学大学院工学研究科 分子工学専攻博士後期課程 研究指導認定／2001 年京都大学博士（工学）／2001 年 日本学術振興会 研究員／2003 年 科学技術振興事業団 研究員／2003 年 京都大学化学研究所 助手・助教／2011 年 京都大学化学研究所 准教授／2016 年 滋賀大学教育学部 准教授／2018 年 滋賀大学教育学部 教授より現在に至る＜研究テーマと抱負＞化学と物理や数学との境界領域の研究。ガラスの物性が何で決まるかを探究したい。＜趣味など＞ロードバイク、盆踊り、囲碁、漫才を見ること等



二瓶 直登 (Naoto Nihei)

＜略歴＞1998 年東北大学農学研究科博士課程前期修了／2009 年東京大学 博士（農学）／1998 年福島県農業試験場勤務/2013 年東京大学大学院農学生命科学研究科准教授／2020 年福島大学食農学類准教授

＜研究テーマ＞農業環境中における放射性セシウムの挙動。作物-土壌-微生物間の相互作用解明を通じた環境保全型農業の技術開発など。

＜趣味など＞合気道（二段）



谷垣 実 (Minoru Tanigaki)

＜略歴＞ 1996 年大阪大学理学研究科単位取得退学／1999 年大阪大学博士（理学）取得／1996 年東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター 講師（研究機関研究員）／1999 年京都大学原子炉実験所 助手／2007 年同助教／2018 年京都大学複合原子力科学研究所 助教より現在に至る

＜研究テーマと抱負＞原子核物理とその関連分野、加速器及び物理計測機器制御技術。＜趣味など＞航空機や鉄道での旅行・日本酒

総 説

電子レンジから宇宙太陽光発電まで

楊 波^{1*}

From Microwave Oven to Space Solar Power Station

Bo Yang^{1*}

概要

電子レンジは日常生活でよく使用されているマイクロ波機器である。その中にあるマイクロ波発生器であるマグネトロンは電子レンジ以外に、工業マイクロ波加熱やレーダーなど業界にも多く応用されている。今年にマグネトロンが発明された 100 周年で、本文でマグネトロンの新しい応用マイクロ波無線電力伝送技術及びこの技術に関わる宇宙太陽光発電構想を解説する。

1. はじめに

我々が毎日のように使用している電子レンジの発明に関して、1945 年にアメリカの Raytheon 社で働いていたレーダーエンジニアである P.L.Spencer によって発明された¹⁾。ネット上には彼がレーダー前に立って、ポケット中のチョコレートが溶けたことによって偶然に発見されたという伝説がある²⁾。1947 年に Raytheon 社は初の電子レンジ Radar Range を販売し、その時の電子レンジは高さ 1.8 メートル、重さ 340 キログラムとかなり膨大な設備であった³⁾。その後、電子レンジは改良により商業用設備から家庭用製品に発展し、今では各家庭にまで普及してきた。2005 年に、Sharp 社だけで電子レンジが 1 億台生産された⁴⁾。電子レンジは図 1 の示すように、調理室、制御回路、電源回路とマグネトロンなどで構成されている。電源回路はマグネトロンに 4000 V 程度の高電圧を供給し、マグネトロンが励振しマイクロ波を調理室に出力する。食品を調理室のターンテーブルに置き、回転しながら様々な角度でマイクロ波から照射することにより均一加熱される。食品の中の水分子や様々な極性分子はマイクロ波の交流電磁界の作用で振動して加熱に至るといふ電子レンジの動作仕組みである。電子レンジの出力電力は 500 W~700 W 仕様が一般家庭用製品で、コンビニである業務用が 1500 W 仕様もある。電子レンジで使用するマグ

ネトロンの周波数帯は 2.45 GHz であるが、工業用 915 MHz 帯、5.8 GHz 帯製品もある。マグネトロンの直流からマイクロ波の変換効率は 915 MHz 帯で 90%、2.45 GHz 帯で 80%、5.8 GHz 帯で 70% までである。最近半導体の増幅器の高効率研究もあるが、数百 W レベルのマイクロ波出力にはこの効率にまでは至っていない。2.45 GHz 帯マグネトロンコストは約 1000 円/kW で、



図 1：家庭用電子レンジの構図

2021 年 6 月 9 日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏学際萌芽研究センター。

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

他のマイクロ波変換器では長期間でも達成できないレベル価格である。マグネトロンは全てのマイクロ波変換器の中で効率が最も高く、しかもコストは低く抑えることができる。しかし、マグネトロンの寿命は数千時間で、発振周波数が不安定などの課題もある。

今年はマグネトロンの発明から 100 周年を迎え、1921 年に Hull A. W によって *Physical Review* に最初の論文が記録されていた⁵⁾。1927 年、東北大学の岡部金治郎先生は分割陽極マグネトロンを開発したことで、実用的なマイクロ波を発振できた⁶⁾。第二次世界大戦時に、イギリスはマグネトロンを用いるマイクロ波レーダーを開発した。その後、マグネトロンが前文で述べた電子レンジに広く応用された。1975 年、Raytheon 社の W.C Brown が数年に渡って、マイクロ波無線電力伝送実験を行った。2.45GHz 帯マグネトロンを用いて、2 メートルの送電距離で、495W 直流電力が受電できた⁷⁾。この実験の DC-RF-RF-DC の伝送効率は今でも世界一の記録(54±1%)である。2000 年ごろ、京都大学松本教授らがマグネトロンの陽極電流制御法を開発し、低ノイズの位相制御マグネトロンができた⁸⁾。また、マグネトロン・フェーズドアレーの SPORTS システムを用いてマイクロ波送電実験を行った⁹⁾。

最近の研究は電力と位相共に制御できるマグネトロンを実現、マイクロ波無線電力伝送実験用マグネトロン・フェーズドアレーも構築できた。また、マグネトロンの無線電力伝送技術と通信技術を加え、ワイヤス給電テレビの発明もある。本稿ではこれらのシステムとマイクロ波無線電力伝送技術に関わる宇宙太陽光発電構想を紹介する。

2. マグネトロンを用いるマイクロ波無線電力伝送

2.1 電力と位相制御マグネトロン

マグネトロンノイズ問題の解決に向けては、発振周波数の安定化と位相ロックというアプローチを取っている。前者は注入同期法を採用し、後者については陽極電流による位相制御法を開発したことで、2.45 GHz 帯マグネトロンで位相制御が実現できた⁸⁾。2.45 GHz 帯マグネトロンでの位相制御法は陽極電流(I)と発振周波数(f)の関係性($I-f$)特性を求め、陽極電流で位相を制御するものである。しかし、5.8 GHz 帯マグネトロンの $I-f$ 特性は 2.45 GHz 帯とは全く異なっており、従来の位相制御法は使えない。新位相制御法は移相器を追加して、5.8 GHz マグネトロンの位相制御を試みた。図 2 に示すように、注入同期信号が移相器、サーキュレータを介してマグネトロンに注入される。位相比較器として Double Balanced Mixer (DBM) と、位相制御のための移相器を利用し、注入同期信号と方結からの出力信号の位相比較結果から位相制御するフィードバック回路を構築した。制御モデルの動作により、マグネトロンの位相が制御されることを確認した。新規アプローチの位相制御法でマグネトロンの $I-f$ 特性に依存しない、任意特性マグネトロンでも位相制御が可能となる。これにより、マグネトロンのノイズレベルを -50 dB 以下に抑制でき、位相制御時間が 100 μ s 以内に短縮され、位相制御精度 $\pm 1^\circ$ 以内を実現した¹⁰⁾。また、陽極電流によりマグネトロンの出力電力の制御も可能になる。

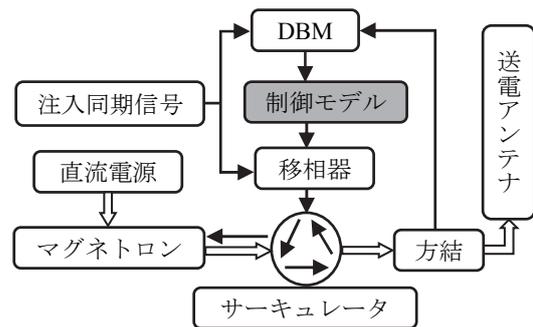


図 2：新規の位相制御マグネトロン系統図

2.2 マグネトロン・フェーズドアレー

前節で紹介した電力と位相制御できるマグネトロンを 2×2 の形で配列し、マグネトロン・フェーズドアレーシステムが構築できた。フェーズドアレーの出力アンテナは、導波管スロットアレーアンテナが設計され、位相制御マグネトロンの出力に接続された。スロットアンテナの放射角度は 22.5° 、ゲインは 24.9 dBi で、メインローブの半帯域幅は 10° となる¹¹⁾。マグネトロン・フェーズドアレーシステムに基づくマイクロ波ビームフォーミングと無線電力伝送実験により、マグネトロンの出力位相

を調整し、水平方向と垂直方向の両方で $\pm 3^\circ$ のビーム走査範囲が得られた。図3のようにLabVIEWプログラムを使用することにより、マグネトロン・フェーズドアレーの位相がタイミングサイクル切り替えを実現させ、4つの送電方向へ順番に切り替えた。

また、5.8 GHz レクテナアレーシステム (IHI Aero Space) を利用して、図4に示すようなマイクロ波無線電力伝送システムを構築できた。マグネトロン・フェーズドアレーの出力位相と電力が調整可能であることを確認できた。マグネトロン・フェーズドアレーは最大61.0%のDC \Rightarrow RF変換効率で、最大出力1870 Wを測定した。マグネトロン・フェーズドアレーの出力マイクロ波電力が1304 Wの場合に、5 mの距離でレクテナアレーシステムのDC出力電力は142 Wに至った¹¹⁾。

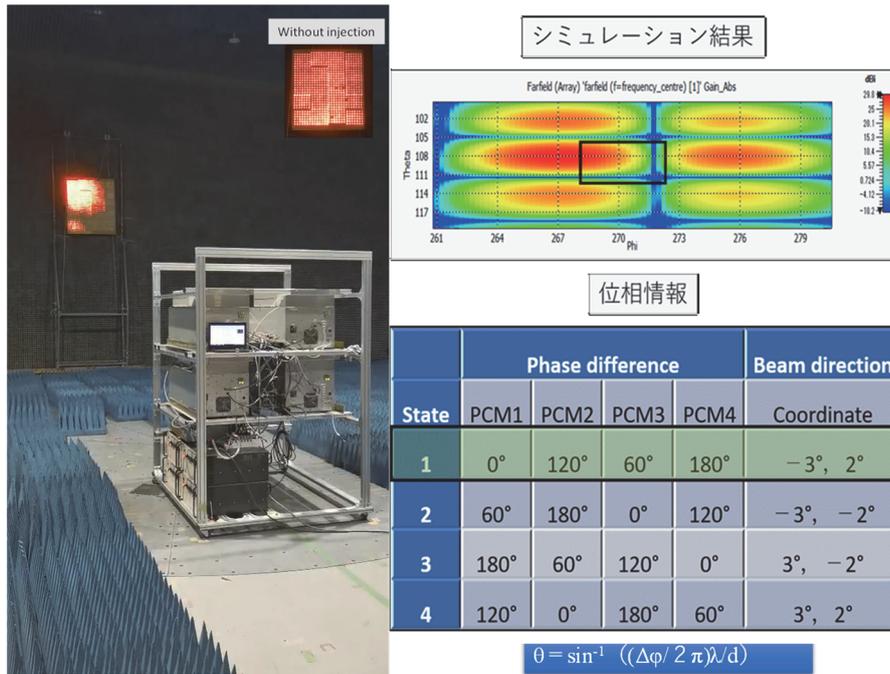


図3：マグネトロン・フェーズドアレーのビームフォーミング実験¹¹⁾

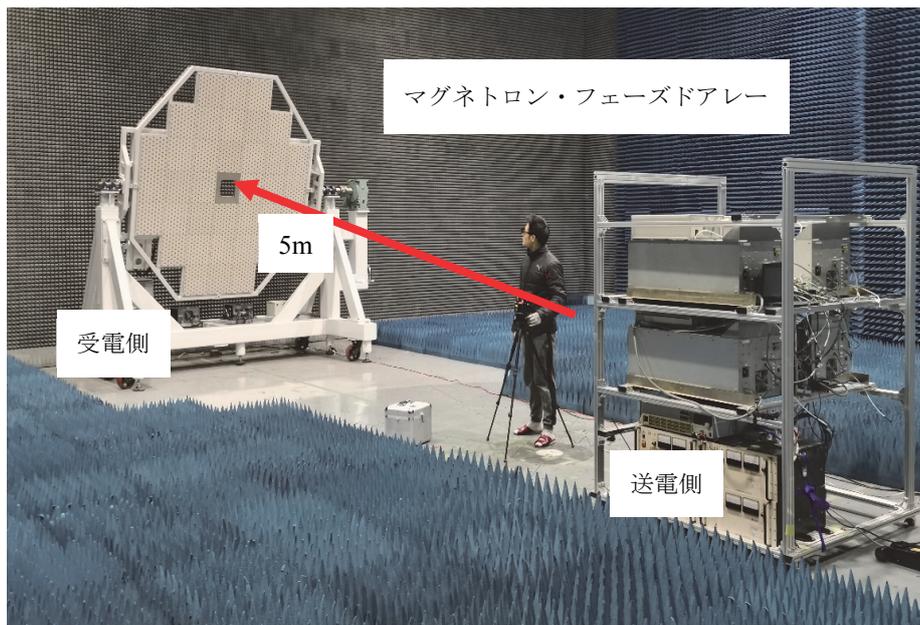


図4：マグネトロン・フェーズドアレーの無線電力伝送実験¹¹⁾

2.3 ワイヤレステレビ

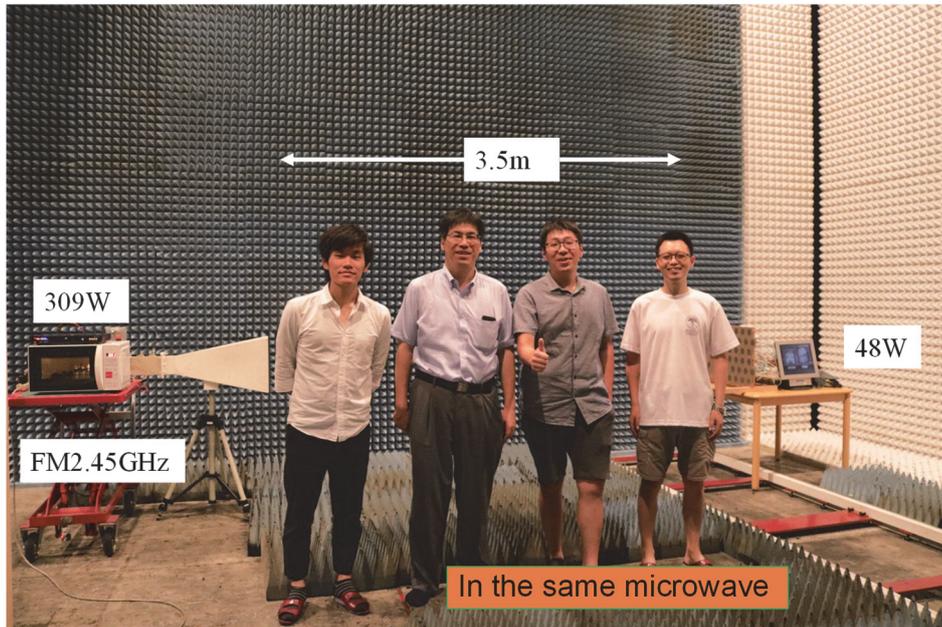


図5：改良版電子レンジを用いたワイヤレステレビ¹⁴⁾

2.1節の電力と位相制御マグネトロンの研究により、マグネトロンが低ノイズで出力できた。マグネトロンは増幅器の機能として高速的な通信も実現できた。従来の技術ではマグネトロンが低い伝送速度の通信について研究されていたが、この研究の結果は伝送速度を向上し、10 Mb/sの通信速度を実現できた¹²⁾。さらに、電子レンジの電源回路を改良することにより、リップル率が4.16%まで改善できた¹³⁾。マイクロ波無線電力伝送技術に加え、図3に示すように改良した電子レンジを用いるワイヤレステレビの開発の成功をみた。伝送距離約3.5mであり、電源ケーブルやビデオケーブルを使用せず、マイクロ波無線電力と情報伝送システム—ワイヤレステレビのデモ装置が実現できた¹⁴⁾。

2.4 宇宙太陽光発電

1968年にP.E Glaser博士は宇宙太陽光発電所（Space Power Station, SPS）構想を提案した¹⁵⁾。図6に示すように、SPSが静止軌道上に設置され、ソーラーパネルによって生成されたエネルギーがマイクロ波またはレーザーの形で地上受電システムに送電されると想定した。SPSは昼夜も悪天候などの影響を受けず、24時間連続発電を維持できる。地球の資源やエネルギーがますます枯渇し、人間の再生可能エネルギーの需要が高まるため、宇宙環境の宇宙発電所は世界中から注目を集めている。米国、日本、ロシア、ヨーロッパ、中国、韓国、インドなどの国々がSPSの研究開発計画を立てた。現在、米国海軍研究所などが3つの宇宙発電所の軌道上検証プロジェクトを進めており、そのうちARACHNEプロジェクトは2023年に宇宙から

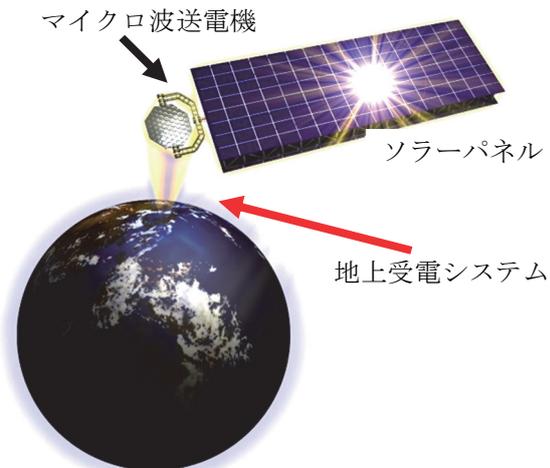


図6：宇宙太陽光発電構想図[出典：生存圏研究所 生存圏電波応用分野のホームページより]

地上に送電検証実験を実施する予定であり、これは人間による宇宙から地上へエネルギー伝送の最初の試みとなる¹⁶⁾。

JAXA の作業報告書によると、宇宙太陽光発電所建設の技術的課題は機器の小型化と軽量化、高効率のマイクロ波変換技術、高精度のビーム方向制御などにある¹⁷⁾。現在、ロケットの打ち上げ能力の制限で、SPS の設計はシステムの重量と体積を最小限に抑えることを注目する。軽量で小型化された宇宙輸送要件の追求の観点から、SPS のマイクロ波伝送は必然的に高い電力密度を要求する。SPS のマイクロ波送電機として、大型のフェーズアレーの素子は軽量、高電力密度、位相制御可能の特徴を求め。ここで、効率面とコスト面も考慮すると、マグネトロンは最適なマイクロ波デバイスである。

ここではマグネトロンを用いる SPS の応用に向け大型のフェーズアレーのシステムを提案できる。図 7 に示すように、直径 1~2 メートルのサブアレーから構成され、各サブアレーはレトロ信号を受信し送電方向を推定する。このシステムは膨大なアレー要素が用意されており、各素子の位相を個別に制御することで高精度な方向制御が可能となっている。また、GW レベルの宇宙太陽光発電所に対しては、宇宙発電所のサイドローブの電力は、衛星の通信電力を簡単に上回る。提案するフェーズアレーシステムにおいて、中央領域素子は高出力マグネトロンを採用し、周囲領域は低出力半導体デバイスで構築する方式である。中心領域素子と周囲領域素子の電力比が 100 倍を超えると、フェーズドアレーアンテナのサイドローブが約-70dB に達することができる。ローサイドローブを実現するには、各要素の電力を個別に制御する必要がある。従って、フェーズドアレーの各素子の位相と電力を独立して制御することが、SPS に向け大型フェーズドアレーを実現するための鍵となる。

サブフェーズドアレーは地上で組み立てから、ロケットによって所定の軌道に打ち上げ、ロボットによって組み立てる。各サブフェーズドアレー間の位相は無線通信を介して同期される。各サブアレー間の接続を容易して組み立ての難しさが解決できる。同時に、ビーム走査中のグレーティングローブの発生を回避するために、アレー素子は三角分布形式を採用し、素子間の距離 (dx, dy) は 1 波長内に設置される。マグネトロンの位相制御と電力制御を 1 波長内の小サイズでフェーズドアレーシステムを完成させることはひとつの課題である。また、マグネトロンの寿命は SPS の応用に向け解決しなければならない課題である。

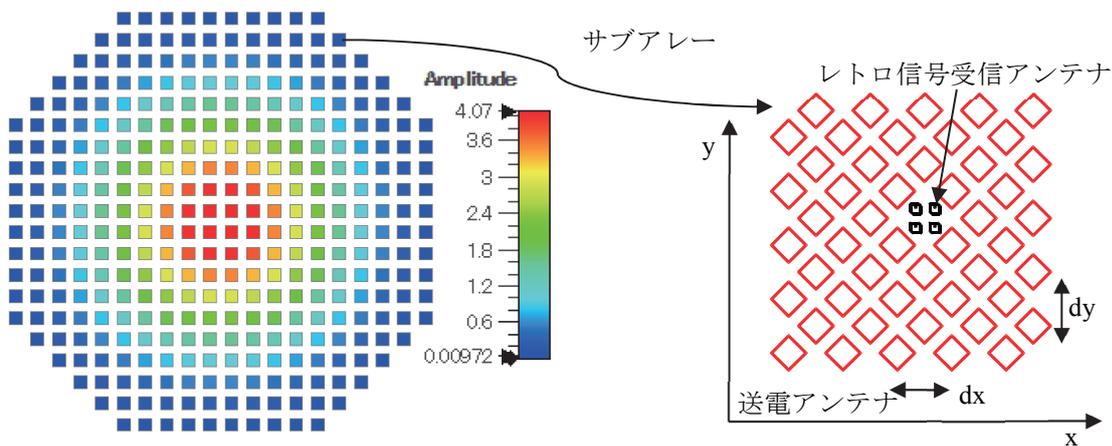


図 7：宇宙太陽光発電所向けに提案する大型フェーズドアレーシステム

3. おわりに

以上述べた電子レンジから、電力と位相制御マグネトロン・フェーズドアレーが発展され、大電力、高効率、遠距離、低価格のマイクロ波無線電力伝送システムが可能になる。この技術は大電力伝送が必要な EV 自動車の無線充電、離島電力供給などに応用可能である。マグネトロン長寿命などの課題

を解決すれば、宇宙太陽光発電の構想に向け、超大電力のマイクロ波無線電力伝送システムを構築することを期待ができる。

参考文献

- 1) Percy L Spencer, Means for treating foodstuffs, US patent, US2605383A, 1945
- 2) Wikipedia, 電子レンジ、[Online]. Available:
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B8>
[Accessed:25- May- 2021]
- 3) ビー・ウィルソン『キッチン of 歴史：料理道具が変えた人類の食文化』真田真由子訳 河出書房新社 2014 年 ISBN 9784309022604 pp.140-145.
- 4) シャープ ニュースリリース, 2005 年 4 月度 (「世界初 電子レンジ世界累計生産 1 億台を達成」, 2005.4.20)
- 5) Albert W. Hull, "The effect of a uniform magnetic field on the motion of electrons between coaxial cylinders," *Physical Review*, vol. 18, no. 1, pages 31-57,1921.
- 6) 電子情報通信人名録, 電子情報通信学会知識ベース 3 編, pp. 15, 2012 年 10 月
- 7) W. C. Brown, "The History of Power Transmission by Radio Waves," *IEEE Trans. MTT*, vol.32, Issue: 9, pp.1230-1242.Sep 1984, doi: 10.1109/TMTT.1984.1132833
- 8) N.Shinohara, J. Fujiwara, and H. Matsumoto. "Development of active phased array with phase-controlled magnetrons." Proceedings of The International Symposium on antennas and Propagation JAPAN, Vol. 2. 2000.
- 9) H. Matsumoto, *et al.* "Experimental equipments for microwave power transmission in Kyoto University." Proc. 4th International Conference on Solar Power from Space (SPS'04), Spain. 2004.
- 10) B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, "Experimental Study on a 5.8 GHz Power-Variable Phase-Controlled Magnetron", *IEICE Trans. Electron*, Vol.E100-C, No.10, pp.901-907, Oct. 2017.
- 11) B. Yang, X. Chen, J. Chu, T. Mitani, and N. Shinohara, "A 5.8 GHz Phased Array System Using Power-Variable Phase-Controlled Magnetrons for Wireless Power Transfer". *IEEE Trans. MTT*, vol.68, no.11, 2020.
- 12) B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, "Evaluation of the Modulation Performance of Injection-Locked Continuous-Wave Magnetrons". *IEEE Trans. ED*, vol.66, no.1, pp.709-715, 2019.
- 13) 楊 波、三谷 友彦、篠原 真毅、単相全波倍圧整流回路を用いる位相制御マグネトロンの研究、*信学技報*, vol. 117, no. 267, pp. 23-26, 2017 年 10 月
- 14) B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, "Injection-Locked CW Magnetron for a wirelessly-powered TV", 20 th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Busan, 2019.4.30-5.1
- 15) Glaser, Peter E. "Satellite solar power station." *Solar Energy*, vol.12 No.3, pp. 353-361. 1969.
- 16) C. T. Rodenbeck *et al.*, "Microwave and Millimeter Wave Power Beaming," in *IEEE J. Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 229-259, winter 2021.
- 17) JAXA, マイクロ波無線エネルギー伝送技術の研究、[Online]. Available:
<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-mssps.html> [Accessed:25- May- 2021]

著者プロフィール



楊 波 (Bo Yang)

<略歴> 2008 年中国石油大学工学部電子学科卒業/同年ダイヘン青島支社に入社し高周波電源の開発、2015 年退社/2018 年京都大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了/2020 年京都大学工学研究科電気工学専攻卒業 (工学博士) /同年学術振興会特別研究員ポスドク/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>宇宙太陽光発電に向け大電力マイクロ波無線電力技術とこの技術の実用化を目指す。<趣味など>ものづくり、登山、釣りなど。

総 説

電磁環境と健康の国際動向 ～WHO の評価より～

宮越順二^{1*}

International Trends in Electromagnetic Environment and Health

～ Overview of WHO evaluation ～

Junji Miyakoshi^{1*}

概要

我々の生活環境には種々の電磁波が飛び交っている。特に、世界中で携帯電話や無線 LAN の利用、携帯電話基地局の新設などが急速に進展したことが主な要因となっている。さらに近未来社会では、多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどるであろう。電磁環境は目に見えないこともあり、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多い。ここでは、高周波の電磁環境について世界保健機関(WHO)や国際がん研究機関(IARC)をはじめとした国際機関によるこれまでの人の健康への評価を紹介する。

1. はじめに

現代社会は急速な科学の発展により、生活環境には、我々の生存に関わる種々雑多の事象が潜んでいる。生存圏科学は、将来を見据えて、人類の持続的な発展を可能とするような研究を目指している。その1つにミッション研究がある。このミッション研究の1つに「高品位生存圏」として、人の健康・環境調和に関して研究を進展させている。電磁環境と健康の問題は、このミッション研究の1つとして行われてきた。

現代社会の生活環境には、静磁場、極低周波、中間周波、高周波、さらにミリ波やテラヘルツ波など、種々の電磁波が飛び交っている。ちなみに、静磁場は、医療のMRI や将来のリニアモーターカーを代表とした強磁場、極低周波は、家電製品や高圧送電線の商用周波 (50 Hz、60 Hz)、中間周波は、IH調理器や将来のワイヤレス給電技術に使用される数 10 kHz 帯、高周波は、本稿で紹介する携帯電話や基地局などからの数 GHz 帯 (将来的には数 10 GHz 帯も予想される)、ミリ波は、空港の検査機器や衝突防止電波の 70 GHz 帯、さらにテラヘルツ波は、将来の無線通信や先進医療の応用が期待されている 100～300 GHz 帯であり、それぞれの周波数帯で特徴がある。高周波に関しては、特に、世界中で携帯電話の 5G への移行や急激な WiFi の汎用化、5G に伴う携帯電話基地局の新設が急速に進展している。さらに中間周波電波に関しては、ワイヤレス給電技術の急速な普及などが近い将来に予想される。近未来社会では、人が生活する上で、多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどるであろう。

電磁環境は目に見えないこともあり、電離放射線と同様に、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。高周波の健康影響については、本格的な研究の歴史は放射線に比

2021年6月16日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏電波応用分野.

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

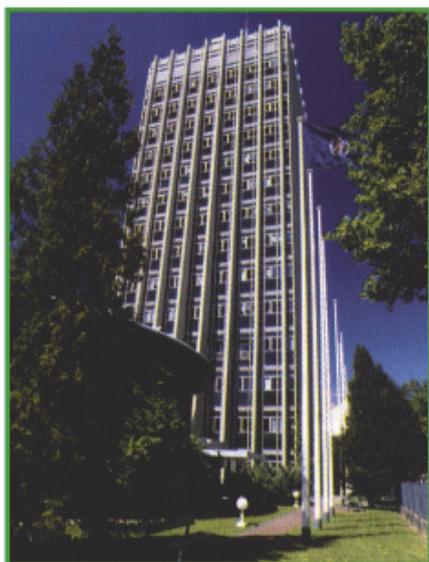
べれば非常に浅い。ここでは、歴史的背景ならびに世界保健機関(WHO)や国際がん研究機関(IARC)をはじめとした国際機関の健康への評価をまとめる。例えば、1990年後半からこれまでの間に、世界中の国々で携帯電話は急速に普及した。当初から、携帯電話は人の脳に近付けて使用するものであり、高周波の影響として、脳腫瘍をはじめ、脳への影響として不安視されるようになっていた。さらに、熱以外の、いわゆる「非熱作用」の有無について議論が高まり、特に子供への影響が問題視されてきた。なお、電磁波の生体影響に関する詳細は、すでに刊行されている資料を参照されたい¹⁻⁵⁾。電磁波の発生源として、我々が現在から将来にかけて生活環境の中で曝される可能性が高いのは、医療、通信、家電、運輸など、幅広い周波数領域に渡っている。ここでは、これまでの高周波電磁波と健康に関する評価研究についての国際動向を WHO の役割と活動を中心に紹介する。

2. WHO（世界保健機関）の役割

1990年以降、国際的に電磁波の健康影響に関する議論が高まる中、WHOは、1996年に国際電磁波プロジェクト(International EMF Project)を立ち上げた⁶⁾。国際電磁波プロジェクトは、WHOの組織として、電離放射線の健康影響を担当する部署に所属している。また、このプロジェクトはシンポジウムやワークショップなどの開催をはじめとして、その時々における生体影響評価の現状報告や取り組むべき課題の提案などを行ってきた。IARCはWHO内の1組織として、がんに特化した健康影響を評価している。図1にWHOとIARCの役割を簡単に示す。



図1: 電磁環境と健康に関する世界保健機関(WHO)の役割



<WHO-IARC本部 (リヨン、フランス)>

～Working group 4の編集作業風景～
(Room: Sasakawa Hall B)



左から、Sounders教授(イギリス)、宮越(日本)、Juutilainen教授(フィンランド) Blackman教授(アメリカ)、Anderson教授(アメリカ)

図2: 国際がん研究機関 (IARC)における極低周波 (ELF)発がん性評価会議

筆者は、IARC の発がん性評価ワーキングメンバーとして、これまでに極低周波（主として商用周波）および高周波（主として携帯電話に使用してきた周波数）を評価対象として、2 回の評価会議に参加してきた。ワーキングメンバーの就任については 2 段階の手続きがあり、まず、WHO から会議の半年ほど前に本学総長宛に招請依頼があり、次に総長からの問い合わせで、本人の承諾後、利益相反がないことなどをチェックされて就任する。メンバーは欧米を中心として、世界各国から、恐らく、研究実績を基に、20～30 名程度選ばれている。ほとんどのメンバーはそれまでの国際学会や会議で同席していた人たちが招請されていた。図 2 は、フランスのリヨンにある IARC 本部と筆者が参加した編集作業の風景である。それぞれのメンバーが各々専門分野の 150 編ほどの論文を事前に渡され、会議の 10 日間ほどで一人 30～40 ページ（総ページ 600～800 ページ）にまとめ、モノグラフを作成する。会議の最終日には、IARC の規定に沿って、メンバー全員による投票で、発がん性の程度を評価する。このような手順を経て、投票による発がん性グループ分類の結果は、直ちに IARC からプレスリリースとして世界各国へ通達が行われる。

IARC の発がん性評価が終了すると、数年後に WHO による、がんを含むヒトの健康全般に関して、Environmental Health Criteria (EHC：環境保健クライテリア)の作成会議が開催される。筆者は、極低周波の EHC 作成会議のタスクグループメンバーとして招請され、参加した。図 3 は、スイス、ジュネーブの WHO 本部ビルと筆者が担当したタスク第 4 グループのメンバーである。WHO で開催されたタスク会議は IARC での進め方とほぼ同様で、WHO の本部で 10 日間ほどかけて、20 数名のタスクグループメンバー全員で千編以上の論文を参考に討論し、600～800 ページにまとめた EHC を作成し、WHO が出版する。

しかし、携帯電話の電磁環境影響評価の場合、2011 年に IARC の発がん性評価を実施したが、10 年経過した現在も WHO でのタスクグループによる EHC 作成会議は開催されていない。全く WHO としては、異例の動きとなっている。これまで何度となく EHC 作成に関するやりとりがあり、EHC ドラフトの作成までこぎつけ、WHO は、2014 年 9 月 30 日に、EHC のドラフト⁷⁾を公開し、同年 12 月 15 日まで、パブリックコメントを求めた。これには、700 件以上のコメントがあった。EHC は全 14 章からなっているが、ドラフトは第 2 章から第 12 章までが公開された。EHC については、第 1 章（要約や推奨研究）、第 13 章（健康リスク評価）および第 14 章（防護対策）が重要である。しかしながら、パブリックコメントを受け取った後、作業は停止している。この主な理由としていくつかあるが、その点については後述する。



図 3：WHO での ELF 環境保健クライテリア(EHC)の策定会議

なお、WHO と IARC がヒトの発がんやその他の健康に関して評価すると、この結果を受けて、電磁波に関する国際機関、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)や米国電気電子学会(IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers) の国際電磁安全委員会 (ICES : International Committee on Electromagnetic Safety) がガイドラインや規格を作成し、世界各国に発信する。わが国も、このガイドラインや規格に沿って、高周波であれば、総務省が防護指針を策定し、電波法に反映させている。

3. 電磁環境影響評価の研究手法

電磁環境の生体影響を研究する主な手法としては、(1) ヒトの疫学研究やヒトのボランティア研究、(2) 動物実験研究、および (3) 細胞実験研究がある。表 1 に、細胞レベル、動物レベルからヒト個体を対象として、これまで研究が行われてきている電磁波生体影響の主な評価指標をまとめた。研究内容の多くは、電磁波による遺伝毒性への影響を主体とした発がん性への影響評価に主眼がおかれている。疫学研究では、発がん以外のアルツハイマー症などの神経変異症も対象とし、評価指標が広がりつつある。近年、細胞研究では免疫応答やストレス応答、細胞損傷が生体に影響を及ぼさないように自滅することを示すアポトーシス、遺伝子の働きに関与する生理・機能的側面からの研究も注目されている。実験動物研究では、ほとんどが発がん性の有無に焦点が当てられている。一部、免疫機能や行動、記憶への影響なども報告されている。

4. 高周波電磁環境に対する IARC の評価

携帯電話を主たる対象とした高周波 (IARC は RF(Radiofrequency)と表記) については、2011 年 5 月に、IARC で発がん性評価会議が開催された。評価会議には筆者を含め、15 カ国 30 名のワーキンググ

表 1: 電磁波生体影響を評価する主な研究内容

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

ループメンバーが参加した。携帯電話を対象とした高周波に関する疫学研究は、1990年代後半から、国際的に活発に行われてきた。大がかりな研究として、IARCがとりまとめる形で、日本、イギリス、スウェーデンなど13カ国（ただし米国は不参加）が参加して「The INTERPHONE Study」として行われた。種々の脳腫瘍を疾患対象として、症例-対照研究(case-control study)で実施された。IARCでは参加国全ての研究をとりまとめ、この国際共同研究の最終結論の概要を2010年5月にプレスリリースの形で発表した^{8,9)}。結果をまとめると、(1) 定常的携帯電話の使用者の神経膠腫と髄膜腫でオッズ比(OR)がやや低下した。(2) 10年以上長期使用者についての、ORの上昇は観察されていない。(3) 1640時間以上の累積長時間通話者で、神経膠腫のORが1.40(95%信頼区間:1.03~1.89)とわずかな増加を示した。ここでのオッズ比とは、脳腫瘍発症患者で、携帯電話使用者の確率を携帯電話非使用者の確率で除した統計量の比を表す。結論として「10年以上の長期使用者に対する携帯電話使用による脳腫瘍(神経膠腫と髄膜腫)の上昇はないと考えられる。観察されたORの低下や、累積長時間通話者のORの上昇、その他、携帯使用側頭葉での神経膠腫の上昇など、因果関係の正確な解釈は難しい。」と述べている。その他、多くの疫学研究で、発がん増加を示す証拠は見つかっていない。しかし、スウェーデンでの疫学プール分析に見られるように、2000時間を超える通話者は、神経膠腫が3倍になるという報告¹⁰⁾や、我が国の疫学研究で、1日20分以上の通話を超える場合に、聴神経鞘腫^{しやうしゅう}の増加を示唆する報告¹¹⁾がある。これらの概要を簡単に表2にまとめた。

疫学研究の評価に加えて、動物実験研究、細胞実験研究の評価を以下にまとめる。(1) 疫学研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、上述した一部の“陽性結果”を判断材料の基礎として、ワーキンググループは、「限定的証拠(Limited evidence in humans)」と評価した。(2) 実験動物研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、陰性の結果が多いものの、上述した一部の複合的発がん研究の“陽性結果”は発がんの証拠として認められ、ワーキンググループは、「限定的証拠(Limited evidence in experimental animals)」と評価した。(3) 細胞実験研究の評価：一部の論文で“陽性”を示す結果があるものの、ワーキンググループの総合的判断として、「発がんメカニズムについては、弱い証拠(Weak mechanistic evidence)」として評価した。(4) 総合評価：ヒトの疫学研究および実験動物の発がん

表2：IARCでの疫学研究の評価

I. 携帯電話使用と神経膠腫(Glioma)	
インターホン国際共同研究 (The INTERPHONE study)	・症例-対照研究での通話時間 最長群(>1640時間)において、OR(オッズ比)は1.40(95%CI: 1.03-1.89)(CI: 信頼区間)
スウェーデン研究のプール分析	・症例-対照研究での使用時間 最長群(>2000時間)において、ORは3.2(95%CI: 2.0-5.1)
II. 携帯電話使用と聴神経鞘腫(acoustic neuroma)	
インターホン研究 (The INTERPHONE study)	・グリオーマの結果とほぼ同様の傾向(通話期間が最大5年に渡り、通話時間最長群(>1640時間)においてのみ、聴神経鞘腫の有意な増加)を示している
スウェーデン研究のプール分析	・グリオーマの結果とほぼ同じ 長期携帯電話使用者の聴神経鞘腫が増加している
日本の疫学研究	・携帯電話使用と同側において、 聴神経鞘腫の増加を示している

◎これらの結果は、バイアス*の可能性を完全には排除できないが、RFばく露と神経膠腫の因果関係を示唆している (*バイアス：電波以外の影響による効果)

ん研究について、それぞれ「限定的証拠」と評価した。細胞研究などの「メカニズムとしての弱い証拠」も含めて、ワーキンググループの高周波発がん性総合評価は、「グループ 2 B(Possibly carcinogenic to humans)」（発がん性があるかもしれない）と決定した。

今回の高周波に関する「2B」の評価は、あくまで、携帯電話からの電磁波と脳腫瘍との関係を「限定的な証拠」として認めたものである。この結果は評価速報として、その概要が報告されている¹²⁾。詳細は、モノグラフ 102 巻として、2013 年に出版された¹³⁾。なお、モノグラフ 102 巻が発刊されたとほぼ同時に、この評価委員の座長や IARC 関係者らが、携帯電話の発がん評価に関する独自のコメントを発表した¹⁴⁾。今後も十分な情報を継続して社会へ発信することが重要であると述べている。IARC がこれまでに発がん性を評価してきた、化学物質、電磁波、嗜好品、飲食（料）物、薬、大気環境など、生活や労働環境での 1017 項目に達している¹⁵⁾。（2020 年 2 月 18 日現在）発がん性を評価・分類された各分類グループにおける該当総数とそれらの代表例を表 3 に示す。

IARC の発がん性評価が 2011 年に実施されたにもかかわらず、WHO の EHC 作成会議が進んでいない 1 つの理由として、国際電磁波プロジェクトは、2018 年 6 月 21-22 日に国際諮問委員会をスロベニアで開催し、WHO 技術文書と EHC の 2 つの文書作成を決めた。前者は、主に文献レビューが主体となる。これで EHC に関しては、多くの専門家によるシステムティックレビューがさらに必要なため、現時点で EHC の発刊はさらに遅れる見込みである。

表 3 : IARC による発がん性の分類とその主な例

発がん性の分類及び分類基準	既存分類結果 [1017例]
グループ 1 : 発がん性がある (Carcinogenic to humans)	電離放射線、紫外線(100~400nm)、アスベスト、カドミウムおよびカドミウム化合物、ホルムアルデヒド、太陽光曝露、喫煙、アルコール飲料、コールタール、ディーゼルエンジンの排気ガス、受動喫煙、ベンゾピレン、紫外線を用いた日焼け用ランプ、加工肉、粒子状物質 など [他を含む120例]
グループ 2 A : おそらく発がん性がある (Probably carcinogenic to humans)	アクリルアミド、熱いマテ茶、概日リズムを乱す交代制勤務、メタンスルホン酸メチル、ポリ塩化フェノール、木材などのバイオマス燃料の室内燃焼、赤肉（牛、豚、羊、などの肉）シスプラチン など [他を含む83例]
グループ 2 B : 発がん性があるかもしれない (Possibly Carcinogenic to humans)	極低周波(ELF)磁界 、 高周波(RF)電磁波 、アセトアルデヒド、AF-2、プレオマイシン、クロロホルム、ダウノマイシン、鉛、メルファラン、メチル水銀化合物、マイトマイシンC、フェノバルビタール、漬物、ガソリン、ベンズアントラセン など [他を含む314例]
グループ 3 : 発がん性を分類できない (Unclassifiable as to carcinogenicity to humans)	静磁界 、 静電界 、 極低周波電界 、コーヒー、茶、アクチノマイシンD、原油、軽油、カフェイン、ベンゾ(e)ピレン、コレステロール、ジアゼパム、蛍光灯、エチレン、水銀、塩化メチル、フェノール、トルエン、キシレン、カプロラクタム(ナイロンの原料) など [他を含む500例]

(2020年2月18日現在)

5. 高周波電磁環境評価に関する欧州機関の報告書

欧州委員会から要請された、Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk (SCENIHR：新興および新規に同定される健康リスクに関する委員会)が2015年1月に、電磁波ばく露の健康影響の可能性に関する科学的意見、Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)、を公表した¹⁶⁾。SCENIHRのRF電磁波に関する健康影響のまとめを要約すると、以下の通りである。

- ・疫学研究結果については、脳腫瘍のリスク上昇について、十分なエビデンスを示していない。頭頸部の他のがんや小児がんを含む他の悪性疾患のリスク上昇を示していない。
- ・初期の研究結果は、携帯電話のヘビーユーザーにおいて、神経膠腫および聴神経鞘腫のリスク増加の問題を提起した。IARC評価以後に発表されたコホート研究（ここでは携帯電話の使用頻度と脳腫瘍の発症率について、長期にわたる数十年単位で調査する前向き疫学手法）および発症率の時間に依存した研究によると、神経膠腫のリスク上昇の証拠は弱まっている。聴神経鞘腫とRFばく露の関連の可能性については未解決である。
- ・RFばく露がヒトの認知機能に影響を及ぼすという証拠はない。
- ・現行のばく露限度値を下回るRFばく露レベルによる生殖および発達への有害な影響はない、と結論した先のSCENIHR意見書内容は、最近の研究データを含めても、この評価結果に変更はない。

6. 米国国立衛生研究所で実施された携帯電話からの電波と発がんに関する大規模な動物実験研究

2016年6月に米国から大規模な動物実験研究の中間報告¹⁷⁾が、BioEM2016(ケント、ベルギー)の学会中に行われた。それは、National Institute of Health (NIH、米国国立衛生研究所)のNational Toxicological Program (NTP)研究の一つとして実施されていた。この動物実験研究には約28億円の研究費が費やされていた。中間報告の研究結果概要は以下の通りであった。(1)寿命：電波ばく露群の方が、コントロール群より、寿命が延びる傾向がある。(2)脳腫瘍：電波ばく露によりオスのラットで増加しているGSM(第2世代(2G)規格の通信方式の1つ)ではすべてのばく露で、CDMA(第3世代(3G)規格の通信方式の1つ)ではSAR(specific absorption rate; 比吸収率; 電波により生体の単位重量あたりに吸収されるエネルギーをW/kgで示したもの)が6W/kgのみで増加している。(3)心臓シュワンノーマ(心臓原発性の神経鞘腫、シュワン細胞の腫瘍)：SAR依存的(～6W/kg)に、オスのラットにおいて、GSM、CDMAともに増加している。(4)メスのラットについて：すべてのばく露による、脳、心臓への影響は認められていない。(5)細胞の遺伝毒性について：脳細胞のコメットアッセイ(DNA鎖切断評価法の1つ)試験では、SAR依存的に増加している。しかし、赤血球細胞の小核形成(細胞核フラグメントの分離)試験では、影響なしであった¹⁸⁾。表4にNTP研究の材料と方法、ならびにNTPファクトシートによる研究成果概要を簡単に示す。2018年3月26-28日に、本研究の査読会議(Peer Review of the Draft NTP Technical Reports on Cell Phone Radiofrequency Radiation)が実施された¹⁹⁾。マウスのデータでは、メスの悪性リンパ腫がばく露群で有意に高かった。当初の判定では、発がん性に関して、何らかの(some)、曖昧な(equivocal)証拠という判断だったが、このレビュー結果から、someは、明確な(clear)証拠へ、equivocalは、someへと格上げされる勧告があった。その理由としては、線量-反応関係が成り立っていることが挙げられた。この動物実験は、米国における国際的に最も権威の高いNIHの主導する研究成果であり、今後の、携帯電話からの電波による発がん性評価について、新たな、そして極めて大きな議論を投げかけた形になっている。

表4：米国 NTP Study 動物実験研究の方法と成果概要

動動物実験研究の方法	電波ばく露	CDMA, GSM, 1900MHz (マウス), 900MHz (ラット)
	ばく露方法	全身ばく露, 1, 1.5, 3, 6W/kg, 10分 ON/OFF (~9時間), 毎日, 107週間
	動物	ラット, マウス (実験ポイント1群, 各90匹)
成果概要	電波ばく露による雄ラット	心臓腫瘍の発症については明確な (clear) 証拠がある
	電波ばく露による雌ラット	脳および副腎の腫瘍発症については”何らかの (some) 証拠があった
	電波ばく露による雌ラットならびに雌雄マウス	がんとの関連については、曖昧な (equivocal) 証拠であった

そこで、2019年の秋に、WHOがこのNTP Studyの科学的評価について、それぞれの研究内容に沿った専門家による会合を開催するための準備を始めた。ところが2020年に入ってから、ほぼ全世界各国への新型コロナウイルスのパンデミックにより、WHOでは、新型コロナの国際的な感染状況や有効なワクチンの生産状況などに関して総力を挙げることになり、WHOのNTP Study科学的評価会合に関しては、計画よりかなり遅れている。恐らく、この会合が開催され、WHOの評価が固まれば、少なくともIARCの発がん性再評価へと進む可能性も考えられる。さらに、関連した話題として、日本の総務省が主体となって、令和元年度から5年間の計画で、日韓共同プロジェクトによるNTP Studyの再現実験がスタートした。NTP Studyに関しては、高く評価する一方、各国の専門家からいくつかの疑問点などが示されている。筆者も欧米の研究者と共に、このことに関して、疑問となる点をまとめて論文発表した²⁰⁾。以下にNTP研究の国際的な影響と問題点をまとめた。

- 1) NIH (米国国立衛生研究所) の研究であり、権威が高く、国際的な影響は極めて大きい。
- 2) なぜ、ラットのオスだけが発がん陽性になっているか、科学的説明が薄い。
- 3) 陽性効果となっている脳腫瘍、シュワンノーマについて、コントロール (シャム) の発生数が90匹中で“ゼロ“である。1群当たりのラットの数90匹では少ないことによる影響も否定できない。
- 4) 他の器官の神経 (手足、腕、耳、腰など) の神経鞘腫のデータがなく、より多くの比較ができない。
- 5) 細胞遺伝毒性評価において、コメットアッセイで陽性、小核試験で陰性について、やや疑問を感じる。コメットアッセイの実験手法過程におけるアーチファクトの可能性も考えられる。
- 6) 上述の疑問点などがあり、日本 - 韓国の共同プロジェクトでNTP研究の再現実験が実施されている。

以上の米国国立衛生研究所による電波と発がんに関する大規模な動物実験研究は、WHOも重く受け止めており、IARC発がん性評価会議終了以来、WHOでのEHCタスク会議開催が10年以上遅れている理由の1つとなっている。

7. WHO の 5G ネットワークと健康に関する Q&A

携帯電話の高周波領域における健康影響評価研究で、どうしても足かせとなっているのは、使用する周波数帯や変調方式が、携帯電話のモデルチェンジとともに変わることである。第〇世代と表して、2012 年ころから現在までの主体は第 4 世代 (4G) である。1980 年代の 1G はアナログであった。前述の NIH の動物実験で使用した電波ばく露は 2G から 3G を使用している。そして今年あたりから、高速通信の 5G へ移ってゆく。5G 等の先進的無線システムで用いられる機器では、現在の携帯電話等の無線通信よりも高い周波数帯 (超高周波) を利用する。従って、生体影響研究もその周波数帯での研究が少なく、新たに、極めて高額なばく露装置を作製して、引き続き生命科学でのエビデンスの収集が必要となってくる。さらに、生物研究用電波ばく露装置は、もちろん汎用ではない。細胞研究や動物研究では、周波数が変わると、それぞれ新規にばく露装置を作製しなければならないので、医工 (または生物-工学) 融合が無くして成り立たない。この研究分野の問題点 (困難な点) は、ここらあたりにありそうである。WHO が 2020 年 2 月 27 日に HP で、5G ネットワークと健康に関する Q&A 公開したので、表 5 にその内容をまとめた²¹⁾。5G ネットワークはこれまでの周波数よりさらに高くなり、生体へのエネルギー吸収は体表面に限定される。そのため、皮膚や目への影響評価が注目されている。

表 5 : WHO の 5G ネットワークと健康に関する Q & A

Q	A
5G とは何ですか？	5G、つまり第 5 世代は、2019 年に導入された、最新のワイヤレス携帯電話テクノロジーである。 5G は、遠隔医療、遠隔監視、遠隔手術を含む、幅広い新しいアプリケーションの向上が期待されている。
5G とそれ以前の世代との主な違いは何ですか？	5G は、電気通信規格の進化を表している。5G は 3.5GHz 付近から数十 GHz までのより高い周波数が利用されている。 5G はさらに、現在の基地局アンテナのように信号を広い方向に拡散させるのではなく、使用中のデバイスに向けて信号をより効率的に集束させている。
ばく露レベル	5G テクノロジーは現在展開の初期段階にあることを考えると、無線周波電磁波へのばく露のレベル変化の程度はまだ調査中である。
5G による潜在的な健康リスクは何ですか？	これまでの携帯電波に使用された周波数帯で行われた研究成果はあるが、5G で使用される周波数で行われた研究はごくわずかである。従って、リスクはまだよく分からない。 ただ、周波数が高くなると、エネルギーの吸収が体の表面 (皮膚と目) に限定される。全体的なばく露が国際的なガイドラインを下回っていれば、公衆衛生への影響は小さいと考えられる。
国際ばく露ガイドラインとは何ですか？	2 つの国際機関 (ICNIRP (国際非電離放射線委員会) と IEEE (米国電気・電子工学会)) が、電波に関するばく露ガイドラインを作成している。現在、多くの国が推奨ガイドラインを順守している。5G の周波数もカバーしている。
WHO は何をしていますか？	WHO は、2022 年までに 5G を含む無線周波数範囲全体をカバーする、無線周波数へのばく露による健康リスク評価を実施してゆく。 WHO は、より多くの公衆衛生関連データが集積されるにつれて、5G のばく露による潜在的な健康リスクに関連する科学的証拠をレビューする。 WHO は、移動体通信に関して、長期的に健康に及ぼす可能性のある影響についてさらに調査することを提唱し、広報資料を作成し、科学者、政府、一般市民の間の対話を促進して、健康と通信に関する理解を深める。

8. 発がん性や電磁過敏症とリスクコミュニケーション

上述のように、現代社会はいたるところで電気をエネルギーとして動いており、さらに情報通信をはじめ、生活環境における多種多様な電磁波利用の役割は極めて大きく、この流れは、将来にかけてますます加速してゆくものと考えられる。利便性が高くなる一方で、電磁波に対する健康への危惧を抱く人々が多いことも事実である。ここで取り上げた高周波は、そのエネルギーとして電離能力もなく、一般的に「放射線」といわれている電離能力のあるエックス線やガンマ線とは異なる電磁波である。エネルギー面からいえば、細胞の DNA を直接傷つけることはないと考えられるが、一般社会における「電磁波」ということばは、「放射線」と同じように受け止められているようにも思われる。特に、携帯電話が汎用化されて以来、発がんへの影響に加えて、「電磁過敏症」と称される人々がヨーロッパを中心に現れてきた。皮膚反応や頭痛、不眠などの症状を訴えている。ただ、これまでのところこれらの症状に対する科学的証明はない。WHO も電磁過敏症について、一時大きく取り上げていたが、科学的証明のないことでファクトシートの発刊にとどめている²²⁾。発がんや神経変性疾患、さらに電磁過敏のような症状に関しては、先端生命科学を用いて、生体影響研究をさらに進めつつ、それらの科学的な成果を基にした、電磁波と健康を理解するための、リスクコミュニケーションの必要性を強く感じる。このことは、WiFi や 5G、6G への汎用化に向けてさらに重要な役割を果たすものと考えられる。

9. おわりに

電磁波生命科学は、その主たる目標の一つとしては、科学的に信頼のおける研究成果から、電磁波の生体影響を正当に評価することにある。その一方、環境レベルをはるかに超えた磁束密度での生体、細胞や高分子重合体などの電磁波応答研究の成果も本分野の将来への発展につながる重要なものである。これらの成果は、電磁波の線量-効果関係（現在のところ、高周波の場合、線量を電波のエネルギー比吸収率としており、さらにばく露時間も因子として加えている）に基づいたしきい値の推定を可能とする。これからの生体影響研究を評価方法の観点から考えた場合、現代は多種多様な電波環境利用の社会となっており、電波影響に関するヒトを対象とした疫学研究は重要であるが、新しい周波数帯の評価は、過去のばく露実績を資料として解析する疫学研究には、実施の限界ではないかと考えられる。従って、生命科学において、ヒトゲノム解析が急速に進展し、さらに電波工学的には、ばく露評価も高精度で行えることから、今後の細胞・遺伝子レベルでの研究推進が、より精度の高い評価を可能とするであろう。

高周波の健康への影響評価と近い将来の推奨研究を以下に簡単にまとめた。

- 1) これまでの国際的評価を総合すると、携帯電話や基地局からの電波で人の健康に重篤な影響を及ぼしているとは考えにくい。
- 2) IARC の発がん性評価で、限定的と結論付けたポジティブ研究については、再現実験の必要性もあるが、作成が遅れている WHO の RF-EHC の研究推奨が大きな参考となる。また、WHO が米国の動物実験研究の結果をどのように評価するかによって、発がん性の重さも変更されるだろう。
- 3) 5G（さらには将来の 6G）での使用周波数領域に対する生体影響研究の推進は急務である。
- 4) 新しく利用される 5G を含む周波数帯の評価は、疫学研究としては、実施の限界と考えられる。従って、生命科学において、先端的な細胞・遺伝子レベルでの研究推進が、より高い精度の評価を可能とするであろう。
- 5) 評価研究や解析の遅い、神経変性疾患、電磁過敏症（自覚的）については、これまでのところ科学的証明はないが、重篤な人については、分子生命科学の中でも、感受性遺伝子の検索研究も 1 つの方法であると考えられる。

携帯電話をはじめとして、無線エネルギー伝送など、社会生活の中の電波利用に関する工学的技術の進歩は目を見張るものがある。その一方、電磁波は新しい環境因子として、人の健康と関連して社会的に注目されることも考えておかなければならない。このように増加の一途をたどる将来の電磁環境を考えると、電磁波の安全性を科学的なデータから判断・評価するため、未解明な部分については、生命科学の先端技術を駆使して、研究を推進してゆく必要があると考える。

参考文献

- 1) 宮越順二(編者), 電磁場生命科学, 京都大学学術出版会, 2005.
- 2) J.C. Lin (Ed.), *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems*, Vol. 5, pp.1-33, *Springer*, New York, 2009.
- 3) J. Miyakoshi, *Proceedings of the IEEE*. 101, 1494-1502, June, 2013.
- 4) J. Miyakoshi, *Recent Wireless Power Transfer Technologies via Radio Waves*, N. Shinohara (Ed.) pp.257-276, *River Publisher*, Denmark, 2018.
- 5) 宮越順二, 電磁波の生体影響 「空間伝送型ワイヤレス給電技術の最前線」, (監修: 篠原真毅), シーエムシー出版, 2021, pp.255-267.
- 6) <http://www.who.int/peh-emf/project/en/>
- 7) http://www.who.int/peh-emf/research/rf_ehc_page/en/
- 8) INTERPHONESTUDY ([http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf#search='IARCWHO Press Release No. 200'](http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf#search='IARCWHO%20Press%20Release%20No.%20200')) .
- 9) E. Cardis *et al.*, *Occup Env, Med*, published online June 9. DOI:10.1136/oemed-2011-100155, 2011.
- 10) L. Hardell *et al.*, *Int. J. Oncol.*, 38, 1465-1474, 2011.
- 11) Y. Sato *et al.*, *Bioelectromagnetics*, 32, 85-93, 2011.
- 12) News: Carcinogenicity of Radiofrequency electromagnetic fields, *The Lancet Oncology* (online June 22, 2011) *Lancet Oncology*. Volume 12, Issue 7, 624-626, 2011.
- 13) IARC Working Group: Non-Ionizing Radiation, Part 2, Radiofrequency Electromagnetic Fields. Vol. 102, IARC Monographs on The Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013.
- 14) J.M. Samet *et al.*, *Epidemiology*, 25, 23-27 (2014).
- 15) <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>
- 16) http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/opinions/index_en.htm
- 17) <http://dx.doi.org/10.1101/055699>
- 18) Falcioni, L *et al.*, *Environ Res.*, 165, 496-503, 2018.
- 19) https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/about_ntp/trpanel/2018/march/roster_20180328_508.pdf#search='NTP+Peer+Review+March+2628%2C+2018'
- 20) Vijayalaxmi, K. R. Foster, J. Miyakoshi, L. Verschaeve, *Environ. Mol. Mutagen*, 291-293, Feb., 2020. DOI: 10.1002/em.22353
- 21) <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/radiation-5g-mobile-networks-and-health>
- 22) WHO Fact Sheet No 296, Electromagnetic Fields and Public Health -Electromagnetic Hypersensitivity - 2005: https://www.who.int/pehemf/publications/facts/EHS_Factsheet_296_English.pdf

著者プロフィール



宮越 順二 (Junji Miyakoshi)

<略歴> 1981年大阪市立大学大学院医学研究科修了／1987年アルバータ大学附属がんセンター（カナダ）特別研究員／1989年京都大学医学部講師／1996年京都大学大学院医学研究科助教授／2002年弘前大学医学部教授／2010年京大大学生存圏研究所特定教授／2016年京大大学生存圏研究所特任教授、現在に至る／世界保健機関（WHO）評価委員／国際がん研究機関（IARC）評価委員 <研究テーマと抱負> 21世紀に入り携帯電話をはじめ、多種多様な生活環境の電磁波は、さらに増加の一途をたどることが予想され、電磁環境と人の健康について、先端生命科学により評価・究明したい。

<趣味> 地方の市場巡り、写真、鴨川散策

植物の合成生物学

草野 博彰^{1*}

Synthetic Biology in Plant

Hiroaki Kusano^{1*}

概要

合成生物学は、生命システムを人工的に構築するアプローチでその仕組みを理解しようとする若い学問分野である。未だ代表的な学術団体や権威ある学術雑誌も無く、その理想的な姿を体現するような研究報告例も僅かだが、昨今の人工知能技術や次世代シーケンサー技術、またそれらを組み込んで自動的に生命システムを構築する技術の発達により、そのアプローチは徐々に現実的になりつつある。植物に関する合成生物学研究の中には、有用で希少な植物の機能を大規模に実用化した例もある。また、医薬品の生産や循環型資源システムの創造を目指すものなどは「生存圏の科学」との関わりも深い。本稿では、植物の合成生物学のこれまでの成果や技術的な課題、および著者や生存圏研究所における取り組みについて紹介する。

1. はじめに

西暦 2000 年代の初頭、人工合成 DNA によるマイコプラズマゲノムの置換実験や、植物由来の抗マラリア薬アルテミシニンの半合成法が発表され、合成生物学(Synthetic Biology)という言葉が世に知られるようになった¹。合成生物学とは生命現象を理解・証明するために生命システムを人工的に構築する学問分野であり、応用科学的な側面もその学術的發展を理解する上では欠かせない。微生物発酵によるアルテミシニンの半合成技術は、植物二次代謝物の生合成システムの理解につながる意外な知見を与えただけでなく、感染症の急拡大にも対応できる抗マラリア薬の安定した供給を可能にした。一方、植物の合成生物学には微生物とは異なる産業的なメリットがある。植物は無菌操作などの高度な技術や特殊な設備、電力などの近代的インフラがない地域での生産も可能であり、実際に、前述のアルテミシニンについては微生物発酵での生産供給が可能になった現在でもアフリカなどの国での大規模な畑作が主な供給源となっている。このほかにも石油代替資源の創造など、大規模な光合成ができることを活かした炭素循環型の社会の構築に貢献することが期待できる。

2. 合成生物学とは

伝統的な分子生物学では、遺伝子や酵素などの生命システムの構成要素を個別にミクロな視点から解明することで生命システムの姿を推測してきた。この学理が分解的・還元的なアプローチであることに対して、合成生物学では合成的・構築的なアプローチで生命システムの姿を証明しようとする。具体的には、天然の生命システムを人工的に再構築し、その構成要素を削除・追加・改変した場合の

2021 年 6 月 23 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: kusano@rish.kyoto-u.ac.jp

変化を観察する。これにより、生命システムの動作に必要な構成要素の最低セットを解明したり、個々の構成要素の役割を探ったり、生命システム全体の挙動を記述しようとする。

2.1 生命システムを構築するための方法論

生命の仕組みには未だ人智の及ばない部分が多く、生命システムを人工的に再構築することも容易ではない。植物由来の抗マラリア薬であるアルテミシニンの生合成系の一部を酵母で再構成した研究は、人間の理解を超えた生命システムの構築を可能にする概念的な原理を実現した例である²⁾。この研究では Design-Build-Test-Learn (DBTL) サイクルとよばれる方法で、産業的に実用可能な水準の合成生物を誕生させている。この研究手法では生命システムの設計と評価を繰り返すことで生命システムをチューニングしていく(図1)。具体的には、前のサイクルで選抜された設計に対して追加要素をランダムとする実装を無数に構築し、その測定結果を評価することで次のサイクルに渡すデザインを弾き出す。これを繰り返すことで遺伝子と形質の関係性データを蓄積し、複雑な生命システムの仕組みを人工知能で理解しようとする。

アルテミシニンの合成生物学研究では、微生物における化合物の生産効率を高めるためにメバロン酸経路が DBTL サイクルによってチューニングされた。メバロン酸経路は広く生物界に普遍的な生合成経路で、多くの二次代謝物の生合成に関わる生命システムである。このメバロン酸経路に含まれる遺伝子群は、大腸菌内で同時に発現できるようにベクター上で直列に配置された。この各遺伝子の発現量の比は、各遺伝子の間に挟まれた塩基配列によって調節することができる。DBTL サイクルではこの遺伝子間の塩基配列について、その立体構造、配置、組み合わせ、突然変異などをランダムとする無数のデザインが試され、結果的に7倍の効率でメバロン酸を生産できるデザインが生まれた。これらのデザインと機能の関係について蓄積された膨大なデータは、実に驚くべきことに、重要な酵素の発現を強化するのではなく逆に抑制することで多量のメバロン酸が生成することを示唆していた。また、中間産物の蓄積が主な阻害要因であることも示唆されている³⁾。このような遺伝子の発現量をチューニングするタイプの DBTL サイクルについては、機械化により Build を含む全プロセスの自動化が試みられている⁴⁾。例えば柑橘などの代表的な香り成分であるリモネンを生産する試みでは、メバロン酸経路を最適化するときと同様に酵素の発現効率がターゲットとされ、機械学習の活用により開発期間の短期化や Build や Test の規模の削減に成功している⁵⁾。DBTL サイクルのようなマンパワーに依存しない原理に基づく合成生物学研究の例は、次世代シーケンサーや人工知能技術の発達に伴って今後増加していくだろう。

一方、これまでの合成生物学研究では、既存の分子生物学の知見を元に人間が構想し、遺伝子を組み合わせで生命システムを構築することが主に行われてきた。DBTL サイクルにおいてはそのような生命システムを「最初のデザイン」として利用することも考えられる。マサチューセッツ工科大学で毎年開催されているアイジェム(iGEM, international genetically engineered machine competition)では、人間がデザインする生命システムの構築を支援するために、各個の遺伝子資源を共通の形式で収集・整備する試みが行われている。iGEM は生命システムの設計アイデアを競う、主に学生を中心とするチ

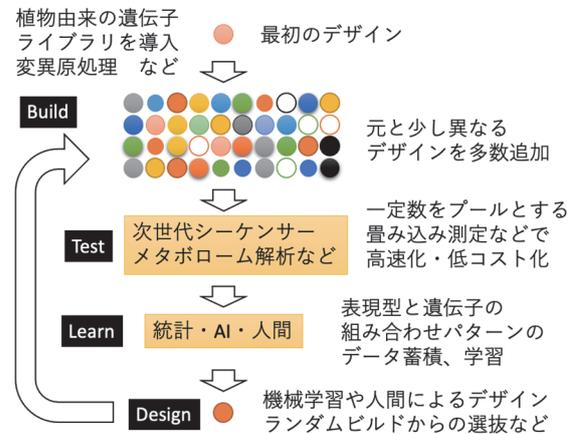


図1：DBTL サイクル

無数の生命システムをランダムに構築し、その機能をオミックス解析で測定してデザインと機能の関係性を示すデータを得る。これをコンピューターで解析し、次のサイクルの元にするデザインを決定する。これを繰り返すことで生命システムのデザインを強化・創造すると共に、蓄積された膨大なデータを元に生命システムを理解しようとする。

ームによる合成生物学の大会である。この iGEM では合成生物を構築するために大会で使用するパーツとしての遺伝子群を組み合わせ可能な形で整備しており、新たに発表されたものを毎年追加更新して BioBrick として参加団体に配布している。

2.2 持続的な人類生存圏の構築を目指す植物の合成生物学研究

ワクチンや抗体のような医療用タンパク質や植物二次代謝物の製造のほか、食糧や繊維を生産するための農作物の育種、燃料・プラスチック・繊維などの石油に代わる循環型資源の創造など、人類生存圏の構築を目指す多様な取り組みにも植物の合成生物学の技術を応用した研究が進められている。

特に石油資源に代わる炭素循環型資源の技術は、持続的な人類生存圏の確立に欠かせない。バイオプラスチックは植物由来の糖などから微生物発酵などで製造できるプラスチックであり、石油由来のプラスチックに代わる循環型資源のひとつである。このうち生分解性を有するものは未だ高価だが、廃棄時の環境汚染を小さいことが注目されている。短鎖長ポリヒドロキシアルカン酸(PHA)はこの生分解性プラスチックのひとつである(図2)。PHAは側鎖長(図中で x で表される部分)の異なるモノマーからなり、各モノマーがそれぞれどの程度の比率で含まれるかで物性が異なる。このため、この比率を調整することで用途に合わせた物性のプラスチックを創生することができる⁶⁾。これまでに、PHAの生合成に必要な酵素を植物に導入した研究から、PHAを植物で生産することは可能であると示されている⁷⁾。これを最初のデザインとして、DBTLサイクルのような手法でチューニングを進めていくことで、実用水準の生産性や物性を達成する研究が期待される。

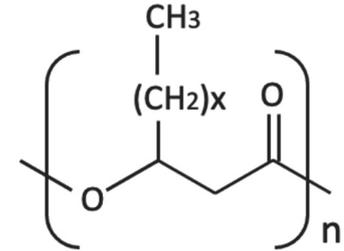


図2: ポリヒドロキシアルカン酸(PHA)の構造。鎖長 n のほか、側鎖長 x およびそのポリマー内での存在比により物性が異なる。このほか天然には側鎖に芳香環を含むものなど多様な構造のPHAが存在する。ララストニア・ユートロファなど、これを貯蔵物質として蓄積し栄養飢餓時に分解して養分とする微生物が天然に存在するため生分解性を有する。

3. 植物の合成生物学研究の課題と展望

3.1 DBTLサイクルによる生命システムの構築に加え得る新たな材料

アルテミシニンの半合成システムの開発でDBTLサイクルによりチューニングされたのは主に酵素遺伝子の発現量であった。DBTLサイクルのBuildのステップでランダムに与える要素には遺伝子発現の調節領域の他にも遺伝子そのものなど多様なものが考えられる。天然の生合成経路の構成要素には酵素遺伝子のほかにも、生合成系一連の酵素をつなぎとめる基板、調節因子、膜トランスポーターなど多様な制御因子をコードする遺伝子が含まれる。また、まったく未知の構成要素が存在する可能性もある。Buildのステップでこれらを与えることで、現状の人間の予想を超えた生命システムの姿の理解につながる可能性がある。例えばアルテミシニンの生産システムについての未解決な課題の中には、酵母が中間体を細胞外に排出してしまう点があり、最終産物であるアルテミシニンを得るためには化学合成のプロセスが必要である。このことは化合物の空間的な調節は、生合成系についての合成生物学研究の重要なテーマとなることを示唆している。天然の生命システムについての分子生物学研究からも、ニチニチソウのピンカアルカロイドの生合成系が膜トランスポーターを介していくつかの区画に分けられて進行することが最近報告された⁸⁾。

3.2 DBTLサイクルによる合成植物のデザインにつながる要素技術

植物を使ってDBTLサイクルを回す研究例はまだない。植物は微生物に比べて世代時間が長いので、

植物科学の一般的な技術では **Build** のステップに数ヶ月以上もの時間が必要である。ウイルスベクター技術では、生育中の植物にウイルスを感染させることで遺伝子を発現させることができるので世代時間が問題にならず、一般的な安定形質転換体植物を作成する技術と比べて **Build** のステップにかかる時間コストを飛躍的に圧縮できる。このため、微生物の培養を伴う場合と同等の早さで DBTL サイクルを回すことが可能になる。

ウイルスベクター系を **Build** のステップに利用するにはいくつかの課題がある。ウイルスベクターは植物への病原性を持つものから開発されている例が多いので、ウイルス感染そのものによる影響が現れてしまう可能性がある。また、供試個体数に対して少なくとも数十%程度の確率の感染力を持つ必要があるため、宿主ごとに適切なウイルスを選択する必要がある。さらに、多くのウイルスベクター系は挿入できる塩基配列の長さが数百塩基程度と短いため、任意の遺伝子を発現させるコンセプトでの利用は難しい。ウイルス誘導性ジーンサイレンシングは短鎖な塩基配列の導入でも遺伝子発現を調節することができるため DBTL サイクルでの利用が期待でき、遺伝子ライブラリーを構築する研究も進められている⁹⁾。また、ワクチンの製造への応用などを想定して、全長タンパク質の発現が可能なウイルスを使った植物での遺伝子発現の研究も進められている¹⁰⁾。

一方、アグロバクテリウムを植物体に接種することで外来遺伝子の発現を実現する技術（アグロインフィルトレーション法）についても合成生物学研究への応用が期待できる¹¹⁾。アグロバクテリウムは植物細胞に長鎖の DNA 断片を注入することができるため、ウイルスベクターと異なり遺伝子のサイズに関係なく任意の遺伝子を発現させることができる。アグロバクテリウムには接種部位から植物全体に移動する性質がないため遺伝子発現は接種部位に限られるが、隣接した個体への伝染性がない点は優れた特徴である。この技術については接種作業を機械化する産業技術がワクチンの製造などで使われており、マンパワーの限界を超えた規模での接種も現実的である。

3.3 人工ゲノムによる生命の設計

生命を成立させる最小の遺伝子セット（ミニマムゲノム）をゼロから人工的にデザインすることも試みられている。ミニマムゲノムを持った人工的な生命体をベースとして、二次代謝系などの研究対象となる生命現象を構築することにより、天然の基本システムの持つ不確定要素にとらわれずに生命システムを解析することができる。微生物を使った研究で、人工的に合成した超長鎖 DNA がゲノムとして機能し得ることが初めて証明されたのは 2010 年のことである¹²⁾。また酵母のゲノムの一部をトランスポゾンなどの不安定な要素を取り除いたもので置換した研究が報告されているなど、大腸菌や酵母のゲノム合成に向けて大規模な研究プロジェクトが進行している¹³⁾。

しかしながら、合成生物のベースとなるべき最小の遺伝子セットを機能既知の遺伝子のみで機能させた例は、植物はもちろん微生物についてもまだ報告例は無い。2016 年の報告では、マイコプラズマの合成ゲノム 0.5 メガ塩基に含まれる 473 個の遺伝子のうち、149 個が機能未知遺伝子である¹⁴⁾。このマイコプラズマの元のゲノムサイズは 1.1 メガ塩基、大腸菌のゲノムサイズが 4.6 メガ塩基であるのに対して、最小クラスのゲノムサイズを持つ植物シロイヌナズナのゲノムは 125 メガ塩基、遺伝子数は 2.6 万個と 2 桁ほど大きい。ゼロから設計された合成植物を基本システムとする合成生物学が可能になるのは、まだしばらく先の話かもしれない。

4. 著者と生存圏研究所における植物の合成生物学に関する取り組み

著者らは、および生存圏研究所は植物の合成生物学に関する多様な取り組みを実施している。以前本誌でも解説したが¹⁵⁾、著者も参加したイネ高温登熟障害に関する研究は、安定した食糧生産の実現を目指して複雑な生命現象の解明に挑んだ合成生物学研究である。イネ高温登熟障害とは、日本の栽培種が夏場の高気温に曝されたとき、胚乳での物質貯蔵が不十分となり穀粒の外観品質の低下や収量

の減少を引き起こす現象である。この生命現象についてのオミックス解析では主に一次代謝系に関連する多様な異常が認められた。このうちミトコンドリア型アデノシン三リン酸合成酵素の不足、デンブ分解酵素の高発現、活性酸素種の異常生成などについては、これを改善する生命システムのデザインが考案され、そのいずれもが成功している。このことは、高温環境での稲作には多様なチューニングが可能であったことを示唆している。

4.1 遺伝子機能の量的・空間的制御に関する研究

植物に導入した外来の遺伝子が機能するまでには、転写・翻訳・輸送などいくつかのステップが期待通りに動作する必要がある。植物で任意の遺伝子を機能させようとする研究では、タンパク質発現量が不足する問題がしばしば生じる。この問題について著者は、イネの **Mac** 遺伝子ファミリーに含まれる 5'UTR 部分に注目した。このうち **OsMac3** 遺伝子の 5'UTR 部分に含まれる 161 塩基の塩基配列 (**dMac3**) は、タンパク質コード領域の上流に配置することで下流タンパク質の翻訳効率を高める性質があることがわかった¹⁶⁾。このような強化因子を使って遺伝子ライブラリーのベースとなる発現ベクターを強化できれば、より高い確率で有効なクローンを含む遺伝子ライブラリーの構築が可能となり、より効率のよいスクリーニングの実現が期待できる。

化合物の生合成システムの細胞内での空間的な制御については、著者らは植物におけるコエンザイム Q (CoQ) の生合成をモデルとして研究してきた¹⁷⁾。CoQ には生物種によって鎖長の異なる (ポリ) プレニル基が付加されている。そこで著者は、9 単位のポリプレニル側鎖を持つイネに対して、10 単位のポリプレニル側鎖を供給できる微生物由来の酵素 **DdsA**¹⁸⁾ を導入する実験を行った。この側鎖の長さを測定することでイネの生命システムにおける **DdsA** の挙動をモニターすることができる。この **DdsA** にミトコンドリア局在型とゴルジ体局在型のシグナルペプチドをそれぞれ付加したところ、ミトコンドリア型では **CoQ10** が合成されたが、ゴルジ体型ではイネの生育が阻害され、シグナルペプチドのない型では **CoQ9** が合成された。このことは、植物の CoQ の生合成ではポリプレニル側鎖の合成酵素はミトコンドリア局在型でないと機能しないことを示唆している¹⁷⁾。このようなものを最初のデザインとして DBTL サイクルのような研究を実施することで、予想もしなかったような生命システムの理解につながる可能性がある。

4.2 合成生物学研究技術の開発に関する研究

植物の合成生物学では遺伝子の導入操作や社会実装に向けた植物品種の作出にかかる年単位の時間コストは重要なボトルネックである。著者は薬用植物ムラサキにおけるシコニンの生合成系を合成生物学的アプローチで理解するための要素技術として、ウイルスベクター技術の適用を検討した¹⁹⁾。著者の研究事例では、3 種類のウイルスベクター系をムラサキに適用したところ、このうちのひとつリンゴ小球形潜在ウイルス (ALSV) が供試個体の約 30% を罹患させる感染力を持ち、かつシコニンの生合成には目立った影響が現れないことがわかった¹⁹⁾。この ALSV は多くの宿主植物で病原性を示さないことや、個体間で伝染しないことから理想的なウイルスベクターとして期待されており²⁰⁾、ムラサキを使った合成生物学研究の要素技術としても優れていると考えられる。

合成生物学研究などから得られた知見を作物育種に応用し社会に役立てるための技術としてゲノム編集技術がある。著者は前述の **dMac3** をゲノム編集技術の強化に応用できるか試すため、ジャガイモの **granule bound starch synthase (GBSS)** 遺伝子をモデルとした実験を行った²¹⁾。ジャガイモは 4 倍体ゲノムを持つ植物であるため、遺伝子の機能欠損変異体を作成するためには 4 個の相同遺伝子すべてに機能欠損変異を付与する必要がある。ジャガイモのゲノム上に 4 つある **GBSS** 遺伝子のうち 1 個または 2 個の遺伝子に標的変異を生じさせた従来法の **CRISPR/Cas9** ベクター系に **dMac3** を適用したところ、4 遺伝子のすべてに変異を持つ個体が出現するようになった。また、1 個以上の遺伝子に変異を持つ個体が出現する割合も約 30% から約 80% まで改善した。また、従来法でも強力な活性を持つ

CRISPR/Cas9 ベクター系に dMac3 を適用した場合でも、4 遺伝子のすべてに変異を持つ個体の割合は約 5%から約 30%にまで改善した。これにより一度のゲノム編集操作でジャガイモの欠損変異体を作出することができるようになった。GBSS 遺伝子の欠損変異体はモチ米などでよく知られるアミロースフリーのデンプンを蓄積するため、食感や酵素消化性が異なる他、アミロペクチンを利用する製紙原料など工業用デンプンの原料としても利用が期待される。

4.3 合成生物の材料としての植物遺伝子の探索

著者らおよび生存圏研究所では、植物の形質に関わる遺伝子を探索するために遺伝子の進化に注目した研究が行われている。合成生物学では多様な生物種に由来する遺伝子を組み合わせる新たな生命システムを人工的に創造しようとするが、実は自然界でも異種生物由来の遺伝子で生命システムが構成されていることはそれほど珍しくない。生存圏研究所では、リゾビウム属細菌に由来するサントパイン生合成酵素がタバコ本来の成分であるニコチンと共に根圏における特定の細菌叢を形成することが明らかにされた²²⁾。合成生物学研究の過程で人工的に構築される生命システムは、実は未だ発見されていないだけで既に天然に存在していることも十分に考えられる。このように一般的な系統進化とは異なる進化を辿った遺伝子は塩基配列の解析などで見出すことができる。また、二次代謝など狭い範囲の系統に限定された機能に関わる遺伝子が独得の様式の進化をしてきたことなどが明らかにされている。これらのことは生命システムの構築に利用すべき植物遺伝子の探索にヒントを与える。

ムラサキのシコニン生合成系に含まれる PGT 遺伝子は、前述の CoQ にポリプレニル側鎖を付加する酵素 PPT から発達進化したと考えられている。著者らの研究では、ムラサキのゲノムには PGT に似た遺伝子が多数含まれており、また、これまでに酵素活性が同定された PGT 遺伝子にはイントロンが無いという特徴があることがわかった²³⁾。同様に、天然の抗がん薬として利用されているパクリタキセルの生合成についても5つの重要な既知遺伝子を含むアシル転移酵素遺伝子族のひとつに多コピー化が認められた。このことはひとつの多重遺伝子族から誕生する遺伝子の数はひとつとは限らず、未解析な近縁遺伝子の中にも重要な機能を持つものが存在する可能性を示唆している。これらのことは遺伝子の系統進化から未知の構成要素を抽出できる可能性、さらには既知のステップについても生命システムのチューニングに有用な遺伝資源が天然に眠っている可能性を示唆している。

グレープフルーツは高コレステロール血症治療薬と同時に摂取してはならないことなどで知られているが、この原因である O-プレニル型クマリンは前述の PGT 遺伝子から派生した酵素 O-PT をその生合成経路に持っている。この O-プレニル型クマリンは進化的に遠く離れたセリ科とミカン科の植物から見つかっていたが、これらふたつの科の O-PT はそれぞれ進化的に独立して発達したものであることが明らかにされた²⁴⁾。このことは、ひとつの代謝系を構築しようとするとき、まったく独立して誕生した複数の天然の生命システムが構成要素の材料となりえることを示唆している。また、この遺伝子ファミリーからみつかったカラヨモギの AcPT 遺伝子を利用することで、健康補助食品プロポリスの主成分のひとつアルテピリン C の生合成系を酵母で再構成することにも成功している²⁵⁾。

5. おわりに

合成生物学においては生物の世界で成立し得る生命システムを理解するため、その姿を具現化するアプローチを取る。その産業的価値や新しいアプローチへの期待から大規模な投資も行われているが、2021 年現在でもまだ代表的と言える学術団体や権威ある学術雑誌は無いのが現状である。植物の合成生物学には持続可能な産業社会の創造につながる可能性があり、学術と社会の接点から合成生物学という学問分野の発展を牽引する大切な役割がある。すでに基礎・応用の両面で多様な研究例が報告されており、特に食糧生産や医薬品の製造、石油代替資源などに関する研究は合成生物学の社会的価値を示す上で重要な役割を演じている。ウイルスベクターなど技術開発によるボトルネックの解消や、

人工知能やロボティクスを活用した自動化は、分子生物学と人間によるデザインに依存した現在の植物の合成生物学に新しい時代をもたらすだろう。

参考文献

- 1) Cameron, D.E., Bashor, C.J. and Collins, J.J., A brief history of synthetic biology, *Nat. Rev. Microbiol.* **12**, 381-390, 2014.
- 2) Paddon, C.J. and Keasling, J.D., Semi-synthetic artemisinin: a model for the use of synthetic biology in pharmaceutical development, *Nat. Rev. Microbiol.*, **12**, 355-367, 2014.
- 3) Pflieger, B.F., Pitera, D.J., Smolke, C.D. and Keasling, J.D., Combinatorial engineering of intergenic regions in operons tunes expression of multiple genes, *Nat. Biotechnol.*, **24**, 1027-1032, 2006.
- 4) Carbonell, P., Le Feuvre, R., Takano, E. and Scrutton, N.S., *In silico* design and automated learning to boost next-generation smart biomanufacturing, *Synth. Biol. (Oxf)*, **5**, ysaa020, 2020.
- 5) Jervis, A.J., Carbonell, P., Vinaixa, M., Dunstan, M.S., Hollywood, K.A., Robinson, C.J., Rattray, N.J.W., Yan, C., Swainston, N., Currin, A., Sung, R., Toogood, H., Taylor, S., Faulon, J.L., Breitling, R., Takano, E. and Scrutton, N.S., Machine learning of designed translational control allows predictive pathway optimization in *Escherichia coli*, *ACS Synth. Biol.*, **8**, 127-136, 2019.
- 6) 田口精一, 多種多芸の微生物バイオポリマー: 透明で硬軟多様で接着性も, *日本接着学会誌*, **52**, 44-49, 2016.
- 7) Matsumoto, K., Murata, T., Nagao, R., Nomura, C.T., Arai, S., Arai, Y., Takase, K., Nakashita, H., Taguchi, S. and Shimada, H., Production of short-chain-length/medium-chain-length polyhydroxyalkanoate (PHA) copolymer in the plastid of *Arabidopsis thaliana* using an engineered 3-ketoacyl-acyl carrier protein synthase III., *Biomacromolecules*, **10**, 686-690, 2009.
- 8) Payne, R.M., Xu, D., Foureau, E., Teto Carqueijeiro, M.I., Oudin, A., Bernonville, T.D., Novak, V., Burow, M., Olsen, C.E., Jones, D.M., Tatsis, E.C., Pendle, A., Ann Halkier, B., Geu-Flores, F., Courdavault, V., Nour-Eldin, H.H. and O'Connor, S.E., An NPF transporter exports a central monoterpene indole alkaloid intermediate from the vacuole, *Nat. Plants*, **3**, 16208, 2017.
- 9) Liu, E., and Page, J.E., Optimized cDNA libraries for virus-induced gene silencing (VIGS) using tobacco rattle virus., *Plant Methods*, **4**, 5, 2008.
- 10) Bamogo, P.K.A., Brugidou, C., Sérémé, D., Tiendrébéogo, F., Djigma, F.W., Simpore, J. and Lacombe, S., Virus-based pharmaceutical production in plants: an opportunity to reduce health problems in Africa, *Virol J.*, **16**, 167, 2019.
- 11) Sainsbury, F., Innovation in plant-based transient protein expression for infectious disease prevention and preparedness, *Curr Opin Biotechnol.*, **61**, 110-115, 2020.
- 12) Gibson, D.G., Glass, J.I., Lartigue, C., Noskov, V.N., Chuang, R.Y., Algire, M.A., Benders, G.A., Montague, M.G., Ma, L., Moodie, M.M., Merryman, C., Vashee, S., Krishnakumar, R., Assad-Garcia, N., Andrews-Pfannkoch, C., Denisova, E.A., Young, L., Qi, Z.Q., Segall-Shapiro, T.H., Calvey, C.H., Parmar, P.P., Hutchison, C.A. 3rd, Smith, H.O. and Venter, J.C., Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome, *Science*, **329**, 52-56, 2010.
- 13) Dymond, J.S., Richardson, S.M., Coombes, C.E., Babatz, T., Muller, H., Annaluru, N., Blake, W.J., Schwerzmann, J.W., Dai, J., Lindstrom, D.L., Boeke, A.C., Gottschling, D.E., Chandrasegaran, S., Bader, J.S. and Boeke, J.D., Synthetic chromosome arms function in yeast and generate phenotypic diversity by design, *Nature*, **477**, 471-476, 2011.
- 14) Hutchison, C.A. 3rd, Chuang, R.Y., Noskov, V.N., Assad-Garcia, N., Deerinck, T.J., Ellisman, M.H., Gill, J., Kannan, K., Karas, B.J., Ma, L., Pelletier, J.F., Qi, Z.Q., Richter, R.A., Strychalski, E.A., Sun, L., Suzuki, Y., Tsvetanova, B., Wise, K.S., Smith, H.O., Glass, J.I., Merryman, C., Gibson, D.G. and Venter, J.C., Design and synthesis of a minimal bacterial genome, *Science*, **351**, 1414 (aad6253), 2016.
- 15) 草野博彰, おコメの夏バテ遺伝子, *生存圏研究*, **13**, 39-42, 2017
- 16) Aoki, H., Teramura, H., Schepetilnikov, M., Ryabova, L.A., Kusano, H. and Shimada, H., Enhanced translation of the

- downstream ORF attributed to a long 5' untranslated region in the *OsMac1* gene family members, *OsMac2* and *OsMac3*, *Plant Biotechnol. (Tokyo)*, **31**, 221-228, 2014.
- 17) Takahashi, S., Ogiyama, Y., Kusano, H., Shimada, H., Kawamukai, M. and Kadowaki, K., Metabolic engineering of coenzyme Q by modification of isoprenoid side chain in plant, *FEBS Lett.*, **580**, 955-959, 2006.
 - 18) Okada, K., Kainou, T., Tanaka, K., Nakagawa, T., Matsuda, H. and Kawamukai, M., Molecular cloning and mutational analysis of the *ddsA* gene encoding decaprenyl diphosphate synthase from *Gluconobacter suboxydans*, *Eur J Biochem.*, **255**, 52-59, 1998.
 - 19) Izuishi, Y., Isaka, N., Li, H., Nakanishi, K., Kageyama, J., Ishikawa, K., Shimada, T., Masuta, C., Yoshikawa, N., Kusano, H. and Yazaki, K., Apple latent spherical virus (ALSV)-induced gene silencing in a medicinal plant, *Lithospermum erythrorhizon*, *Sci. Rep.*, **10**, 13555, 2020.
 - 20) Igarashi, A., Yamagata, K., Sugai, T., Takahashi, Y., Sugawara, E., Tamura, A., Yaegashi, H., Yamagishi, N., Takahashi, T., Isogai, M., Takahashi, H. and Yoshikawa, N., *Apple latent spherical virus* vectors for reliable and effective virus-induced gene silencing among a broad range of plants including tobacco, tomato, *Arabidopsis thaliana*, cucurbits, and legumes, *Virology*, **386**, 407-416, 2009.
 - 21) Kusano, H., Ohnuma, M., Mutsuro-Aoki, H., Asahi, T., Ichinosawa, D., Onodera, H., Asano, K., Noda, T., Horie, T., Fukumoto, K., Kihira, M., Teramura, H., Yazaki, K., Umamoto, N., Muranaka, T. and Shimada, H., Establishment of a modified CRISPR/Cas9 system with increased mutagenesis frequency using the translational enhancer dMac3 and multiple guide RNAs in potato, *Sci Rep.* **8**, 13753, 2018.
 - 22) Shimasaki, T., Masuda, S., Garrido-Oter, R., Kawasaki, T., Aoki, Y., Shibata, A., Suda, W., Shirasu, K., Yazaki, K., Nakano, R.T. and Sugiyama, A., Species-specific assembly of root-associated bacterial microbiota mediated by a combination of plant specialized metabolites, *mBio*, **12**, e00846-21
 - 23) Kusano, H., Li, H., Minami, H., Kato, Y., Tabata, H. and Yazaki, K., Evolutionary developments in plant specialized metabolism, exemplified by two transferase families, *Front Plant Sci.*, **10**, 794, 2019.
 - 24) Munakata, R., Kitajima, S., Nuttens, A., Tatsumi, K., Takemura, T., Ichino, T., Galati, G., Vautrin, S., Bergès, H., Grosjean, J., Bourgaud, F., Sugiyama, A., Hehn, A. and Yazaki, K., Convergent evolution of the UbiA prenyltransferase family underlies the independent acquisition of furanocoumarins in plants, *New Phytol.* **225**, 2166-2182, 2020.
 - 25) Munakata, R., Takemura, T., Tatsumi, K., Moriyoshi, E., Yanagihara, K., Sugiyama, A., Suzuki, H., Seki, H., Muranaka, T., Kawano, N., Yoshimatsu, K., Kawahara, N., Yamaura, T., Grosjean, J., Bourgaud, F., Hehn, A. and Yazaki, K., Isolation of *Artemisia capillaris* membrane-bound di-prenyltransferase for phenylpropanoids and redesign of artemillin C in yeast, *Commun Biol.* **2**, 384, 2019.

著者プロフィール



草野 博彰 (Hiroaki Kusano)

<略歴> 2000年東京理科大学基礎工学部生物工学科卒業／2005年東京理科大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)／同年京都大学化学研究所講師(研究機関研究員)／2008年東京理科大学基礎工学部ポスドク／2010年理化学研究所基礎科学特別研究員／2012年東京理科大学基礎工学部助教／2016年京都大学生存圏研究所特任助教、現在に至る<研究テーマと抱負>実用植物の特性に関わる遺伝子の研究<趣味など>サイクリング、料理

総 説

ナノセルロースヴィークル(NCV)プロジェクトの成果について

臼杵有光^{1*}

Results of the Nano Cellulose Vehicle Project

Arimitsu Usuki^{1*}

概要

セルロースナノファイバー (CNF) は、高強度、低熱膨張、低密度などの特徴を持つバイオ材料であり、植物などの様々なセルロース源から製造される。CNF はカーボンニュートラルで再生可能な素材であり、それを樹脂中に分散させることにより、樹脂が補強される。その技術を主に利用することにより 2016 年 10 月からナノセルロースヴィークル (NCV) プロジェクトを実施した。ここでは自動車の軽量化により、排出される二酸化炭素 (CO₂) の削減につながり、地球温暖化対策への貢献を目的とした。国内の大学や研究機関、自動車メーカーなど 22 の機関が協力して実施した。東京モーターショー2019 では、CNF を使用した 13 個の CNF 部品を搭載したコンセプトカーを展示し、国内外にそのポテンシャルを発信した。その評価結果では、CNF ベースの材料を使用することで、自動車部品の軽量化に有利であることが実証できた。

1. はじめに

セルロースナノファイバー (以下「CNF」という。) は、木材等の植物を原料とし、軽量でありながら高い強度や弾性率を持つ素材として、様々な基盤素材へ活用するために精力的な開発が進められている。特に高強度材料である自動車部品や家電製品の筐体用素材、高機能材料である住宅建材用素材などが期待されている。これらは軽量化や断熱性能の向上によるエネルギー消費の削減に繋がることから、地球温暖化対策への多大なる貢献が期待されている。将来自動車用素材として利用され、CNF の適用範囲が拡大していく段階には多様な樹脂との組合せによる複合化、樹脂アロイへの適用、樹脂 CNF 複合材料の成形加工性の最適化、他の素材との接着・接合性、素材供給量の確保、品質の安定性、耐衝撃性の向上、長期耐久性等の様々な課題が発生することが想定される。そのため、そうした課題を洗い出し、社会実装に向けた課題解決のため、環境省が実施する「セルロースナノファイバー性能評価事業委託業務」の中において平成 28 年度より 4 年間で「社会実装に向けた CNF 材料の導入実証・評価・検証～自動車分野～」のプロジェクトを実施した。本事業は京都大学が事業代表者になり、エネルギー起源 CO₂ 削減が期待できる自動車軽量化に重点を置き実施した。これは産官学連携のコンソーシアム形式を採っており、NCV (Nano Cellulose Vehicle) プロジェクトと名付けられた。ここでは CNF 複合材料などの提供を受け、CNF 軽量部品・部材としての強度、信頼性等の性能評価を実施するとともに、将来ニーズを加味した CNF を用いた自動車の車両構想を明確にし、CNF を用いた活用製品の性能評価や活用時の CO₂ 削減効果の評価・検証を実施した。その内容について紹介する。最初に CNF の特徴、複合材料の製造方法などに触れ、次に NCV プロジェクトで実施した内容についてまと

2021 年 6 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: usuki@rish.kyoto-u.ac.jp

めた。

2. CNF の特徴

CNF は以下のような様々な特徴を有する。

2.1 軽量かつ高強度である

植物の細胞壁はセルロース、ヘミセルロースとリグニンから構成されており、セルロースの集合体であるパルプを細分化してできる繊維が CNF である。径は数十 nm 以下であり、長さは数 μm のものである。最小単位の繊維は 4nm であり、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて実際にその機械的特性が測定されている¹⁾。それによると平均の弾性率は 140GPa である。それは X 線を用いて測定された結晶の理論弾性率 (134GPa)²⁾ とほぼ一致している。比重は 1.5 であり、ガラス繊維やタルクの比重 2.5 と比べて軽量である。

2.2 有機繊維である

セルロース分子はグルコース分子がつながった重合体であるため、表面には水酸基 (—OH 基) が多数存在している。この水酸基は酸などを使用することによって反応が起こり、様々な変性が可能になる。例えば無水酢酸を使用すれば表面にアセチル基の導入ができ、親水的な性質から疎水的な性質に変えることができる。分子構造が明確であるため、混練したい樹脂に合わせて分散できるように CNF 表面の極性制御ができる。このようにして変性した CNF と樹脂を混練することによって、軽量・高強度な複合材料を作製している³⁾。図 1 にはアセチル化した CNF とナイロン 6 の複合化の一例を示す。CNF の分子骨格内の水酸基 (3 個) を一部置換して使用する (置換度 (DS) と呼び 3 個のうち何個の水酸基を置換しているかを表す数字) ことにより CNF の分散性などを制御することが可能である。

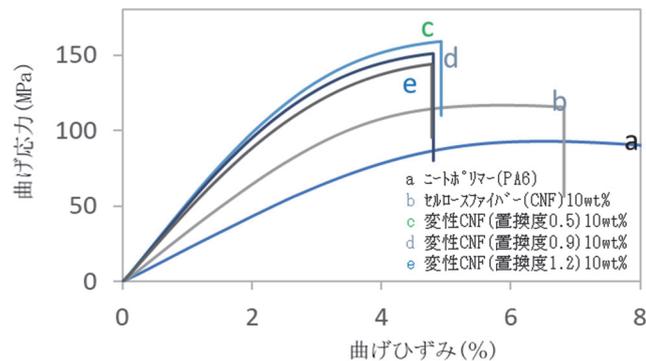


図 1: アセチル化 CNF 複合化ナイロン 6 の力学的特性

2.3 リサイクル時に繊維自体の破断の影響が小さい

CNF が樹脂中にナノメートルサイズのフィラーとして存在しているため、射出成形などで成形した材料を再度粉砕して成形を行っても CNF の破断がほとんど無いため、機械的特性は低下しない。ガラス繊維強化プラスチックではリサイクル時にガラス繊維の破断が起こるためリサイクルにはふさわしくない。一方、CNF はリサイクルには適したフィラーであると考えられる。プラスチック材料を今後使用していく上において、この特徴は大変重要である。

2.4 植物由来であるためカーボンニュートラルである

木材資源は日本に豊富にあり、人工林などで多くのセルロースが蓄積をしている。そのため生産・流通システムの改善等により低コスト化が期待できる。また木材だけではなく、稲わら、キャッサバ、サツマイモなど CNF の原料も豊富にある。有機繊維であるために燃焼させることができ、発生した二酸化炭素を植物が光合成で吸収すればカーボンニュートラルである。

2.5 線膨張係数が小さい (寸法安定性が高い)

樹脂は一般的に 100ppm/°C 程度の比較的大きい線膨張係数を持つが、CNF は 0.1 ppm/°C と小さい。これは樹脂中に分散した際にも大きく貢献し、CNF を 10wt% 添加したナイロン 6 で 30-40 ppm/°C に低

下する。つまり成形品において寸法安定性に寄与できる。これは異種材料（特に金属材料）との接着・接合の際に都合が良い。

このような特徴をうまく利用して複合化することにより、自然由来で再生可能な資源を原料とする軽量化素材が生まれており、これを使用してクルマへの適用を検討した。

3. NCV プロジェクト

3.1 全体構成

環境省からの委託を受けて、参画機関がコンソーシアム形式で参加した。京都大学(代表事業者)をはじめとした大学、研究機関、企業等、計 22 機関で構成されるサプライチェーンの一气通貫体制で構成した。組織マネジメント上の特徴は、材料評価、部品試作、試作車の作製や LCA 評価といった幅広い領域をカバーすると同時にプロジェクトマネジメントの効率化と進捗に合わせた組織の柔軟性を図るため、コンソーシアム方式を採用したこと、グループリーダーを交点とするマトリックス的な要素を盛り込み、プロジェクトを支えるマネジメントチームを有する組織体制としたことである。参画機関：京都大学、サステナブル経営推進機構、京都市産業技術研究所、宇部興産(株)、金沢工業大学、名古屋工業大学、秋田県立大学、(株)昭和丸筒、昭和プロダクツ(株)、利昌工業(株)、(株)イノアックコーポレーション、キョーラク(株)、三和化工(株)、ダイキョーニシカワ(株)、マクセル(株)、(株)デンソー、トヨタ紡織(株)、トヨタカスタマイジング&ディベロップメント(株)、アイシン精機(株)、トヨタ自動車東日本(株)、東京大学、産業技術総合研究所。

3.2 各グループの役割と主な成果

(1) 材料評価・提供グループ

京都大学と京都市産業技術研究所が NEDO 事業で以前に開発した「京都プロセス」技術をベースとして、ナイロン 6 (PA6)、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE) などに CNF を分散した樹脂複合材料のサンプルワークを行った。また、樹脂複合材料以外にも多種多様な CNF ベース素材のサンプルワークが行なわれており、京都大学ではそれらの樹脂複合材料や CNF ベース素材を入手し、機械的特性や長期耐久性などの評価を実施し、用途に応じた各参画機関への材料の供給や、参画機関からのフィードバックを受けて、更なる素材の改良指針の作成などを行なった。また、京都大学では PA6-CNF 樹脂複合材料について 3D 成形材料としての適用性の検証を目的とし、タイヤホイールフィン(図 2) やフロントバンパーサイド(図 3) の試作・評価を行った。このような格子状の構造をもつ成形体は他の成形方法では製造できないため有用であった。また宇部興産では自動車用 PA6-CNF 複合材料の大量生産や量産に向けた検討を行った。



図 2：タイヤホイールフィン

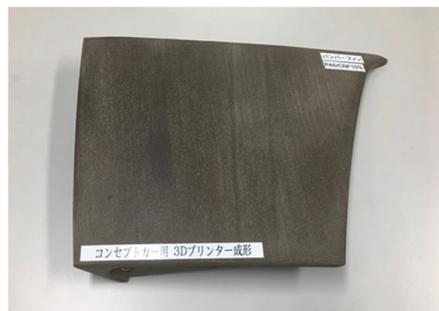


図 3：フロントバンパーサイド

(2) 成形加工評価グループ

京都大学と京都市産業技術研究所では CNF 樹脂複合材料について加工性、発泡成形性などを検討した。自動車の軽量化において射出発泡成形は重要なアイテムであるため、このグループで評価を実

施した。イノアックは PP-CNF 材料を用いて発泡成形を実施し、内装部品などへの適用性を検討した（図4）。ダイキョーニシカワは PP-CNF や PA6-CNF を用いて発泡成形を行ない、内外装含めて射出部品への適用性を検討した。

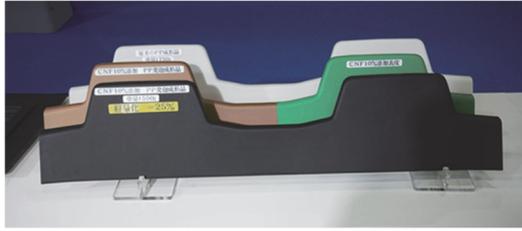


図4：パケトレフロントカバー



図5：トランクリッド ロアー

これまでに、市販車であるトヨタ86のトランクリッドの垂直部分（図5）、インストルメントパネル等を試作・評価した。三和化工は PP-CNF や PE-CNF のプレス発泡成形を行ない、30倍程度の発泡化に成功している。キョーラクは PP-CNF や PA6-CNF のブロー成形を実施し、デッキボードをモデルとした軽量の板材（図6）、リアスポイラー（図7）を試作した。CNF 添加した複合材料は熔融時の粘性が増大するため、ブロー成形には適していることが分かった。マクセルは意匠部品用のために樹脂メッキ技術を保有し、CNF を添加することによりメッキの接着性が優れることを見出し、ドアハンドルやミニチュアグリル等の試作を行った（図8）。

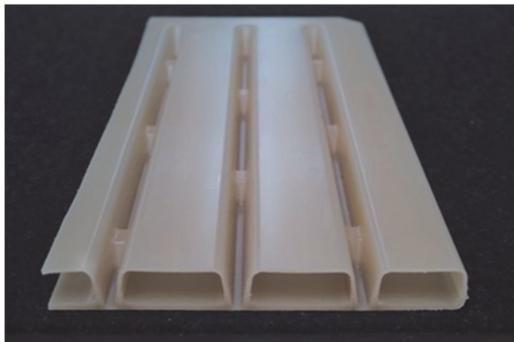


図6：デッキボード



図7：リアスポイラー



図8：ミニチュアグリル（左）とドアハンドル

（3）部材成形評価グループ

アイシン精機は PA6-CNF 複合材料を射出成形することにより、軽量のインテークマニホールドを試作した（図9）。現行品はガラス繊維を30%使用しているが、CNF を15%複合化した材料で検討を行い、10%以上の軽量化効果の可能性を見出した。現行品と同等の形状は出せたが、更なる改良に向けた検討を行っている。デンソーは PP-CNF 複合材料を射出成形することにより、軽量のエアコンケースを試作した（図10）。複雑形状の実成形が可能であることは確認できたが、物性を満足するためには更なる工夫が必要である。トヨタ紡織は PP-CNF 複合材料を射出成形することにより、軽量のドアトリムを試作した（図11）。また最終試作車ではドアアウターの試作も行った。剛性は満足できるが、今後の課題として耐衝撃性などの改良が必要であることが分かった。さらに内装材では VOC

(Volatile Organic Compounds ; 揮発性有機物質) が課題としてあることも分かってきた。このように射出成形性はいずれも確認できたが、新しい課題が見つかったため今後も引き続き、製品化に向け課題の洗い出しと検出された課題を解決するための検討を継続していく必要がある。



図 9 : インテークマニホールド

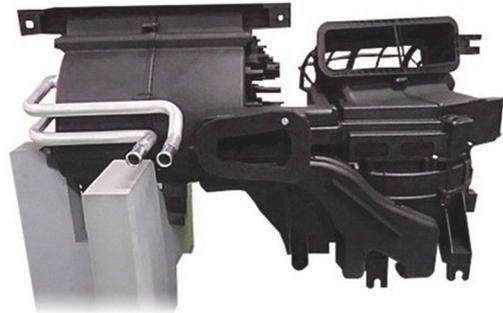


図 10 : エアコンケース



図 11 : ドアトリム

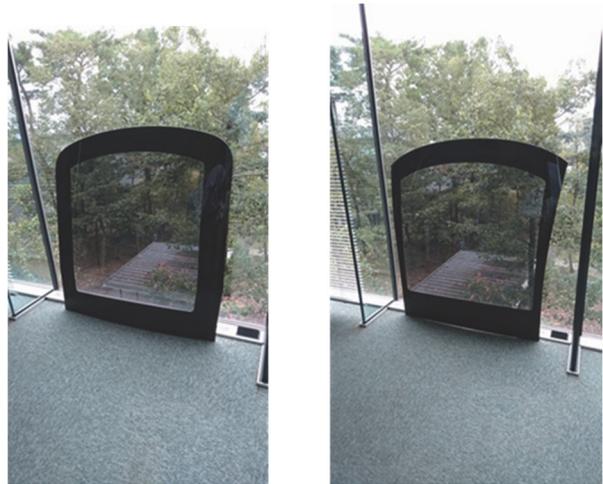


図 12 : ルーフパネル (左) とバックウィンドウ (右)

トヨタ自動車東日本では PC-CNF 複合材料を射出プレス成形することにより、透明な補強樹脂ガラスの試作を行った。無機ガラスに比べ 50%以上の軽量化が確認でき、最終試作車にルーフパネルとバックウィンドウ (図 12) を搭載した。

(4) 大物部材評価グループ

金沢工業大学とトヨタカスタマイジング&ディベロップメントではエンジンフード (ボンネット) を RTM (Resin Transfer Molding) 手法で成形する方法を検討した。CNF の基材にエポキシ樹脂を流し込んで固めることにより、大物の成形体ができることを実物で確認した。本技術はまだ成形時間などに課題はあるものの、将来の自動車大物部材を製造する上において必須の技術となりうると考えている。トヨタ 86 のエンジンフードを樹脂-CNF 複合材料で置換する検討を行なった (図 13)。従来の金属製などに比べて 10-50%程度の軽量化が確認できた。さらに最終試作車では、大型のフロア部材を試作し、搭載した。



図 13 : エンジンフード (ボンネット)

(5) 接着・接合、構造要素モデル評価グループ

名古屋工業大学では CNF 複合材料に適した構造要素（シート、パイプ、ハニカムなど）の開発とそれらを接着、接合するための接着手法の最適化を実施した。たとえば昭和丸筒と昭和プロダクツは CNF のシートを使用して紙管の強度を向上させる手法を見出した（図 14）。



図 14：紙管+CNF シート

これは自動車のビームなどの補強に使用できることが分かった。この技術は最終試作車のルーフサイドレールとして使用した。利昌工業は CNF のみからなる CNF 板材を作製し、それとハニカムを接着した CNF ハニカムシートを試作した。軽量かつ高強度な板材としてトヨタ 86 のトランクリッドの水平部分（図 15）と最終試作車のエンジンフード（図 16）等に適用した。これらの基本の構造設計や評価は秋田県立大学と共同で実施した。



図 15：トランクリッド アッパー



図 16：エンジンフード

(6) 車両構想評価グループ

トヨタカスタマイジング&ディベロップメント、京都大学およびすべての参画機関で協力し、NCV プロジェクトとして、現時点で CNF をできるだけ使用しかつ走行可能な最終試作車を作り（図 17）、2019 年の東京モーターショー（令和元年 10 月 23 日-11 月 4 日で開催）に出展した（図 18）。試作車用部材一覧を表 1 に示した。ドア、樹脂ガラス、エンジンフード、リアスポイラー、パケトレフロントカバー、ホイールフィン、ルーフサイドレール、フロア部材など 13 品目に適用した（トヨタ車体のバッテリーキャリアは参考出展）。最終試作車のデザインは塗装も含めて、日本の重要な資源でかつ CNF の原材料となる木及び日本発の意味も込めて和のテイストで統一した。特に外装のデザインに関しては矢野浩之教授からの“円空の木彫りの仏像をイメージする”との概念を反映している。また、東京モーターショー2019 では、最終試作車搭載の部品に加えて、インテークマニホールド、エアコンケース、インストルメントパネル、バックドア、内装用表皮、シートサンプルなど、最終試作車には搭載していない試作品も展示した。

塗装に関しては日本ペイント・オートモーティブコーティングス(株)に協力をお願いした。外観や付着性低下の懸念があったが、溶剤ウレタン系塗料を選択しプライマーを比較的厚めに塗布することで、鋼板ボディ同等の外観を保有することができた。また、樹脂による部分補強や塗装条件の検討から、耐吸湿性を向上させ、保護機能を付与することができた。一方、カラーデザインイメージには当

初から「日本らしさ」「自然」「サステナブル」という環境に寄り添うキーワードがあり、これらのキーワードを軸に、シャープなボディデザインを生かせる陰影感、和テイストの内装にもマッチするようなカラーを必要とした。最終的には日本の四季を代表する「桜」がカラーモチーフと決まった。



図 17：最終試作車（コンセプトカー）



図 18：最終試作車（コンセプトカー）
東京モーターショーでの展示

表 1：出展部材一覧

部材名	主要樹脂	CNF複合比率 (代表値)	成形加工法	担当機関
ドアトリム	PP(ポリプロピレン)	10%	射出成形	トヨタ紡織
ドア OUTER パネル	PP	10%	射出成形	トヨタ紡織
ルーフパネル	PC(ポリカーボネート)	15%	射出圧縮成形	トヨタ自動車東日本
バックウィンドウ	PC	15%	射出圧縮成形	トヨタ自動車東日本
エンジンフード	CNF	100%	加熱加圧成形+真空バッグ成形	利昌工業
リアスポイラー	PP	10%	ブロー成形	キョーラク
フロントアンダーカバー	PP	10%	ブロー成形	キョーラク
パケトレフロントカバー	PP	10%	発泡射出成形	イノアックコーポレーション
フロントバンパーサイド	PA6(ポリアミド6)	10%	積層造形(3Dプリンター)	京都大学
ホイールフィン	PA6	10%	積層造形(3Dプリンター)	京都大学
ルーフサイドレール	CNF	100%	CNFシート巻き付け	昭和丸筒/昭和プロダクツ
フロア部材	EP(エポキシ樹脂)	30-50%	RTM(Resin Transfer Molding)	金沢工業大学/トヨタカスタマイジング&ディベロップメント
バッテリーキャリア	PP	20%	射出成形	トヨタ車体(PJ外からの提供)

しかし、一言で桜と言っても、初々しいフレッシュ感、ワクワクする期待感、散ってゆく名残惜しさのように様々な表情があるが、最終的に「花筏」のようにうつろいや循環を感じさせる世界観がカラーコンセプトとなった。

繊細ながらもキラキラと輝かせるために大粒径と中粒径アルミを併用し、ほのかな赤みで色づかせるために、2色性効果が高いシリカフレークを配合した。淡色はわずかな材料差で印象が変わってし

まうため、材料選択と量を巧みに調整しながら、和やかな桜の魅力を表現したカラーを創りあげることができた。これは自然と共存し、時を紡いでいくという願いを込め、参画メンバー全員の投票により「環桜（わざくら）」と命名された。

(7) CO₂ 評価グループ

サステナブル経営推進機構、東京大学、産業技術総合研究所において、自動車の軽量化による CO₂ の低減効果の検証を実施した。第一に、既存部品の物性値や CO₂ 排出原単位等 CO₂ 削減効果の評価に関する文献を収集し、選定した自動車の一部部品について製造段階、走行段階、廃棄リサイクル段階の CO₂ 排出量の削減効果の評価した。第二に、CNF 製造プロセスの量産時の CO₂ 排出量の試算方法の検討、必要となるデータ収集項目の抽出を行い、CNF 部品の実機搭載における CO₂ 削減効果の評価方法と CNF 軽量部品の導入による CO₂ 削減効果のシミュレーション技術の検討を行った。図 19 に代表的な算定例として、自動車用ドアトリムの結果を示す。CNF 製造時の CO₂ 排出量を 2 水準（ケース 1 とケース 2）で評価を行ったところ、部材 1 個当たりの LCCO₂ 削減効果は約 5 kg-CO₂ と見積もられた。第三に、CO₂ 削減効果の観点から CNF 自動車の普及シナリオの策定方法、普及シナリオに基づく CO₂ 排出量削減効果および社会全体に対する波及効果の評価の枠組みを設定し評価を進めた。

(8) プロジェクト推進に関する情報管理グループ

プロジェクトでは 2 か月に一度の全体会議と参画機関全員で情報の共有と議論を実施した。最初は材料側（シーズ側）と自動車部品側（ニーズ側）で意見が合わなかったり、各分野での専門用語の違いがあったり苦労したが、最終的には相互の連携がうまくできるようになった。

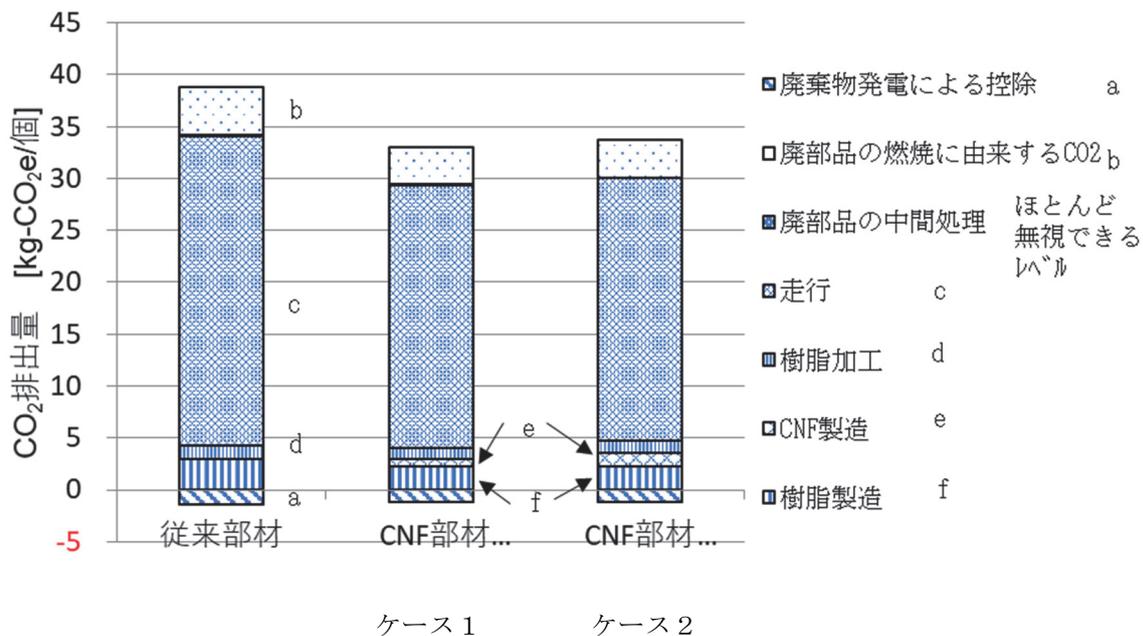


図 19：自動車用ドアトリムの LCCO₂ 削減効果の策定例

今後は各種の評価検討結果を踏まえ、CNF の製品の品質向上と社会実装に向けたステップを明確化し、市場投入計画に織り込んでいきたいと考えている。

4. 今後の展望

CNF を将来の自動車用材料に使用するためには、バリューチェーン分析とともに枠を超えた幅広いサプライチェーンの構築が必要となると考えられる。NCV プロジェクトでは材料、成形加工、

部材試作、自動車への搭載検討といった一連の流れの中で実施してきたが、今後は素材メーカーも含めた連携が必要であり、新たな連携も模索していきたいと考えている。将来は低コスト、低エネルギー生産、環境負荷が小さい素材として様々な産業分野に貢献できる素材だと考えており、多くの方の参入を期待している。

謝 辞

本稿で紹介した内容の一部は、令和2年度3月末で終了した環境省セルロースナノファイバー性能評価事業委託業務により実施したものであり、共同実施者各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) S. Iwamoto, W. Kai, A. Isogai, T. Iwata, *Biomacromolecules*, 10, 2571-2576, 2009.
- 2) 桜田一郎、伊藤泰輔, *高分子化学*, 19, 300-306, 1962.
- 3) Y. Igarashi, A. Sato, H. Okumura, F. Nakatsubo, H. Yano, *Chem. Eng. J.*, 354, 563-568, 2018.

著者プロフィール



臼杵 有光 (Arimitsu Usuki)

<略歴> 1978年名古屋大学工学部応用化学科卒業/1980年同学科博士前期課程修了/同年(株)豊田中央研究所入社/1997年名古屋大学博士(工学)/2016年京都大学生存圏研究所特任教授兼務/2019年(株)豊田中央研究所退職、現在に至る。<研究テーマと抱負>CNF複合高分子材料の社会実装。<趣味など>活字を書く、読む。

文化財修理時における木彫像の樹種調査 ～楽浪文化財修理所の事例～

田鶴 寿弥子^{1*}, 杉山 淳司²

Wood identification of old wooden statues in the repair of cultural properties ~ Case study of the Sasanami Bunkazai Syūrisyo~

Suyako Tazuru-Mizuno^{1*} and Junji Sugiyama²

概要

6世紀半ばに仏教が日本に伝来して以降、国内では仏像をはじめとした多くの木彫像が造像されてきた。木彫像の調査は、従来形態的特徴の比較などから編年や分類が行われてきたが、近年その科学的調査がより注目されてきている。中でも顕微鏡観察による樹種調査では、基礎的ではあるものの、文化財の本質、材料、産地などを知ることもつながることから重要視されている。樹種調査では、文化財の背部や見えない部分などから、わずかとはいえ木片を採取する必要がある、そのことが文化財調査の障壁となってきたケースも多かった。文化財は、数十年数百年のサイクルで適切な修理が行われる必要がある、その修理の機会には、腐れや傷んだ部分を取り去り、新材に交換することも多い。このような文化財修理は、樹種識別のために必要な剥離片が得やすい絶好の機会ともいえ、文化財修理所との共同研究を行うことで、樹種データベースの獲得、樹種情報のフィードバックが可能となる。また修理における新材選択にも、有益な情報を付与できることから、非常に重要な機会であるといえる。本研究では、滋賀県大津市に位置する楽浪文化財修理所より送付された、木彫像修理中に得られた木片を樹種調査に供した。その識別結果より行った若干の考察と展望を示したい。

1. はじめに

文化庁によると日本では、建造物、絵画、彫刻、工芸品、書跡、典籍、古文書、考古資料、歴史資料などの有形の文化的所産で、我が国にとって歴史上、芸術上、学術上価値の高いものを総称して有形文化財と呼んでおり、このうち建造物以外のものが総称して美術工芸品とよばれている。これらの1万点近い美術工芸品の中で彫刻は約3割弱を占めており、中でも木彫像はその9割を占めていることから、木と日本人との強い関係が見て取れよう。

このように木の文化を誇る日本では、古くより建造物や木彫像などをはじめとした文化財におびただしい数の木材が使用されてきているが、それらの文化財は、一切手を加えられずに今に伝わっているものは少なく、劣化部位を幾度も修理されて今に伝わっている。特に、仏像をはじめとした木彫像について、造立時の形・姿のまま残っているものは少ない。多くの人々の手により修復が繰り返され

2021年4月2日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 バイオマス形態情報分野。

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

²〒606-8224 京都市左京区北白川追分町 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻 樹木細胞学分野。

てきたことで、今我々がその姿をみることができるのである。

さて日本では、平安時代以降の仏像の樹種識別研究が体系的に行われてきた¹⁻³⁾。これにより、8-10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、神道における彫刻である神像の樹種調査はその彫刻の特異性によりこれまで後回しにされるきらいがあったが、近年美術史の研究者らとの共同研究により徐々に進めることができつつある⁴⁻⁷⁾。その結果、仏像彫刻との材料比較や、樹種調査により世界に散逸した神像群のグループ化を行うなど（未発表）、美術史における重要な知見が得られつつある。

周知のとおり日本の仏像彫刻は、インドから東アジア各国を経由して伝わったものであり、そのルーツである東アジア各国における木彫像の樹種には、日本における仏像彫刻の歴史的側面を知る上で重要なヒントが隠されている可能性が考えられる。そこで、近年東アジアの木彫像が多く保管されている欧米の美術館と共同で、中国を中心とした地域の仏像の樹種を調査してきた^{6,7)}。その結果、現在までに、各国でユニークな樹種選択が行われている知見が得られてきており、日本との相違を知るためにも現在データの拡充を進めているところである。このように木彫像における樹種調査は、単に修復のために樹種を知るといった目的達成のためだけではなく、木彫像の歴史的側面の解明にも役立ってきているのである。但し、これまでの調査は主に国宝・重要文化財に指定されているような著名な文化財が比較的多く、各地方で大事に守られてきている数多くの木彫像については、今後の調査が課題となってきた。

ところで、樹種を知るためには、文化財の背部や見えない部分などから、わずかながら木片を採取し、薄片を作成して顕微鏡で観察する必要があることから、そのことが文化財調査の障壁となる事例が多々あった。もちろん、木材解剖学者も、識別手法の開拓などを進めてきてはいるが^{5, 8-10)}、例えば放射光 X 線を用いた μ CT 法では施設利用は申請ベースであるなど、現在のところ顕微鏡観察が最も多く利用されやすい手法である。そのための試料を入手できる絶好の機会となるのが文化財修理時である。修理時に文化財を傷つけることなく得られる僅かな木片は、樹種を知るための試料として、非常に有益なのである。本研究では、地方で大事に守られてきている文化財の修理にも携わっている楽浪文化財修理所より依頼をうけ、木彫像の樹種調査をすすめた。木彫像について樹種識別することで、文化財の素性解明、修理への知見フィードバック、そして日本における木彫像樹種データベース拡充に役立てることとした。

2. 試料と方法

今回調査に用いた試料は、楽浪文化財修理所で修理が行われた石川県、神奈川県、福井県、大阪府、京都府、滋賀県、徳島県、広島県、岡山県、山口県、兵庫県計 46 体の木彫像（仏像や狛犬など）から修理時に得られた木片である。本論文は、地域・年代における木彫像に使用された樹種について、考察したものであるため、個々の木彫像名や寺社名についてはあえて明記しない。これらの木彫像は、その種類、構造（一木・寄木）や年代（平安時代から江戸時代）も多種多様であった。合計 46 点の試料は、楽浪文化財修理所の担当者により、修理の際に採取された。試料は生存圏研究所にて、水で軟化させたのち、両刃および片刃カミソリを用いて三断面切片を作成した。その後エタノール：グリセリン＝1：1 とともにホットプレートで加熱して薄片内の気泡を除去し、ガムクロラルで封入を行った。完成したプレパラートを用いて木材組織の光学顕微鏡観察（オリンパス BX51 使用）を行った。観察される解剖学的特徴により、木材の属レベル（時には種まで）の識別が可能である。

3. 結果と展望

調査を行った計 46 体の木彫像（仏像や狛犬など）には、多い順にヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)、アスナロ属 (*Thuja sp.*)、サクラ属 (*Cerasus sp.*)、カヤ (*Torreya nucifera*)、ツガ属 (*Tsuga sp.*)、

ケヤキ(*Zelkova serrata*)、クスノキ(*Cinnamomum camphora*) (ただし、ヒノキかアスナロ属かに絞れなかったものも2点あり)が使用されていたことが判明した(表1)。都道府県単位で木彫像に使用された樹種とその数量を3D mapsにて表示したものが図1である。我々グループはこれまでも国内の様々な木彫像に使用されている樹種を調査してきており、ヒノキ、カヤ、ケヤキ、サクラ、クスノキといった樹種は比較的木彫像でおなじみの樹種と言えるが、今回の調査での最も興味深い点は、図1のように北陸(福井県・石川県)や滋賀県においてアスナロ属による造像例が多いことであった。

実際に、我々がこれまで北陸地域の様々な歴史的建造物に使用されている部材の樹種調査をしてきた中で、例えば福井県嶺北地方では丸岡城¹¹⁾や瑞源寺¹²⁾などをはじめとした寺社仏閣、嶺南地方では国宝にも指定されている明通寺¹³⁾、また石川県の総持寺¹⁴⁾や金沢市の町屋群(未発表)などで、アスナロ属の多用を明らかとしてきた。寺社仏閣などの建造物にアスナロ属が多く使用されていたことから、木彫像についてもアスナロ属が多用されている可能性もあるかもしれないと推察していたが、今回の木彫像の樹種調査から、アスナロ属が北陸地方で重要な彫刻材の一つとして認識されていた可能性が示唆された。特に、表2に示すように、時代ごとの樹種の変遷を見ると、平安時代から江戸時代まで継続してアスナロ属が使用されていることから、北陸において古くから継続してアスナロ属が重視されていたことが推察される。また、平安時代にサクラ属による造像が複数例みられるが、平安期におけるサクラ属をはじめとした樹種による造像の流れについても今後まとめていきたいと考えている。

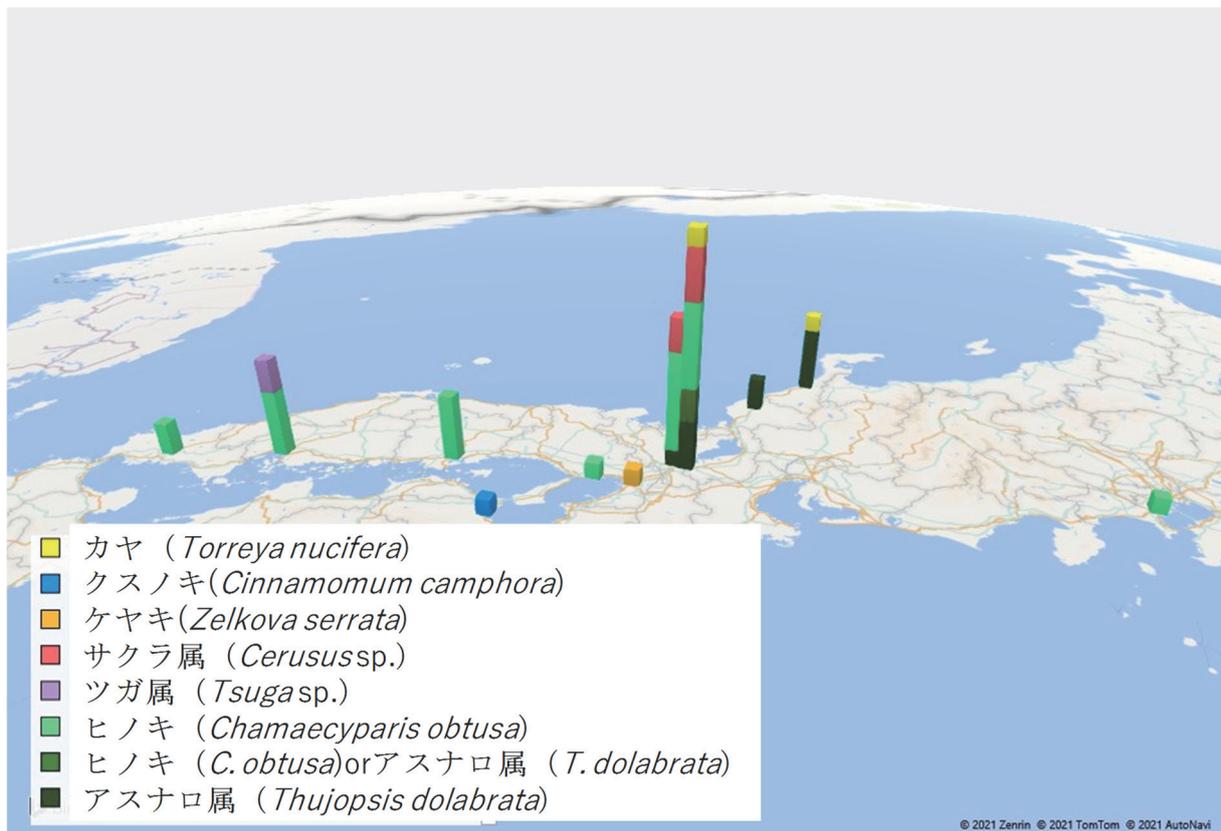


図1: 調査地(都道府県単位)で木彫像に使用された樹種とその数量を3D mapsにて表示したもの。(株式会社ゼンリンの承諾を得て掲載)

我々生存圏研究所のグループは、公益財団法人美術院国宝修理所と修理時における文化財の調査協力を交わしており、これまでに国宝や重要文化財を中心に、延べ計 300 点を超える木彫像調査を進めてきた¹⁵⁾。その中で、アスナロ属と識別されたものは3点のみであり、それらは北陸以外の地域のものであった。調査済みの計 300 点はその多くが関西地域に集中しており、北陸地方の調査事例は数点（福井県の事例でヒノキ）のみであった。もちろん、本研究結果は、楽浪文化財修理所から依頼を受けた 46 体の調査結果をまとめたにすぎないが、アスナロ属の木彫像が北陸地域を中心に 10 体確認できたことは、当該地域における木彫像の用材観を知る上で重要な知見である。今後、科学的な年代測定なども視野に入れることで、樹種の地域差、時代的変遷などを追っていきたいと考えている。

表 1：楽浪文化財修理から依頼を受けた木彫像 46 体における、都道府県と使用樹種のまとめ

都道府県/樹種	<i>Thujopsis dolabrata</i>	<i>T. dolabrata</i> or <i>C. obtusa</i>	<i>Torreya nucifera</i>	<i>Cinnamomum camphora</i>	<i>Zelkova serrata</i>	<i>Cerasus</i> sp.	<i>Tsuga</i> sp.	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	総計
神奈川県								1	1
石川県	4		1						5
福井県	2								2
滋賀県	3	2	1			3		5	14
京都府	1					2		6	9
大阪府					1				1
兵庫県								1	1
徳島県					1				1
岡山県								4	4
広島県							2	4	6
山口県								2	2
総計	10	2	2	1	1	5	2	23	46

表 2：楽浪文化財修理から依頼を受けた木彫像 46 体における、使用樹種の時代的変遷

時代/樹種	<i>T. dolabrata</i> or <i>C. obtusa</i>	<i>Torreya nucifera</i>	<i>Cinnamomum camphora</i>	<i>Zelkova serrata</i>	<i>Cerasus</i> sp.	<i>Tsuga</i> sp.	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	<i>T. dolabrata</i> or <i>C. obtusa</i>	総計
平安時代	3	1			5	2	14	2	27
鎌倉時代	1			1			3		5
室町時代	2								2
安土桃山時代							1		1
江戸時代	2	1	1				5		9
不明	2								2
総計	10	2	1	1	5	2	23	2	46

4. 謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力とご理解くださった楽浪文化財研究所高橋利明様ならびに、文化財所有者の皆様にお礼を申し上げる。本研究は科研費基盤 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。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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3—8・9世紀を中心に— (補遺), *Museum* 625, 61-78, 2010.
- 4) 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.
- 5) Suyako Tazuru, Junji Sugiyama, 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, 2019.
- 6) 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*, Vol. 7, No.2, 216-218, 2019.
- 7) 田鶴寿弥子, メヒテル・メルツ, 伊東隆夫, 杉山淳司, ボストン美術館所蔵日本の木彫像における樹種識別調査事例, *SPring-8/SACLA 利用研究成果集*, Vol. 8, No.3, 2020.
- 8) 喜多祐介, 田鶴寿弥子, 竹下弘展, 杉山淳司, 近赤外分光法と多変量解析を用いた建築用材の識別とその汎化性能向上, *木材学会誌*, 66, 3, 171-182, 2020.
- 9) Yusuke Kita, Suyako Tazuru, Junji Sugiyama, Two-dimensional microfibril angle mapping via polarization microscopy for wood classification, *IOP Conf. Series: Earth Environ.Sci.*, 012028, 415, 2020.
- 10) Kayoko Kobayashi, Sung-Wook Hwang, Junji Sugiyama, Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data, *J. Cult. Herit.*, 38, 88-93, 2019.
- 11) 田鶴(水野)寿弥子, 杉山淳司, 重要文化財丸岡城天守の古材に関する樹種識別調査, *建築史学*, 55, 63-71, 2010.
- 12) 田鶴(水野)寿弥子, 杉山淳司, 第V章本堂・書院の使用木材の樹種・土壁, 福井県指定有形文化財 瑞源寺本堂・書院修理工事報告書, 2011.
- 13) 田鶴(水野)寿弥子, 杉山淳司, 国宝明通寺三重塔古材の樹種識別調査, *建築史学*, 57, 109-117, 2011.
- 14) 田鶴寿弥子, 杉山淳司, 第四節 白山殿等 年代調査 総持寺祖院白山殿放射性炭素年代調査報告, 国登録有形文化財(建造物) 大本山總持寺祖院震災復興事業第一期保存修理工事報告書(文化財工学研究所 編), 198-199, 2014.
- 15) 例えば, 杉山淳司, 田鶴寿弥子, 反町始, 平成三十年度修理文化財(木造)材質調査報告平成三十年度奈良国立博物館文化財保存修理所修理報告書第二号, 二, 103-104, 2020.

著者プロフィール



田鶴（水野）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。＜趣味＞手芸と雑貨屋巡り



杉山 淳司（Junji Sugiyama）

＜略歴＞ 1983年京都大学農学部卒/同大学院博士課程中退/1989年東京大学農学博士/東京大学農学部助手/京都大学木質科学研究所助教授、2006年より教授。2020年より京都大学農学研究科にて教授、現在に至る。日本学会議連携会員。＜研究テーマと抱負＞人工知能を利用した樹木細胞学 ＜趣味＞鴨川散歩にサイクリング

NOTE

Wood selection for Chinese wood statues preserved in the several museums in the USA

Suyako Tazuru-Mizuno^{1*}

Abstract

The author's approach is focusing on wood selection for Chinese statues preserved in several museums, especially in the USA, where many East Asian sculptures are preserved, to get a deeper understanding of the historical background of Buddhist sculptures in East Asia. In general, *Torreya nucifera*, *Chamaecyparis obtusa*, *Cerasus* sp., *Zelkova serrata* were often used for Japanese wooden statues. Our research showed however, that the species selected for wood statues in China were completely different from those in Japan. Of the 62 Chinese wooden statues preserved in several US museums, the following wood species were identified by microscope: *Paulownia* sp. (17 statues), *Tilia* sp. (16 statues), *Salix* sp. (15 statues), *Populus* sp. (3 statues), *Juniperus* sp. (3 statues), *Santalum album* (3 statues), others (5 statues). Continued research will be necessary to understand the cultural exchange and logistics in East Asia.

1. Introduction

Wood species for East Asian wooden statues is now in the spotlight. In Japan, wood anatomist, Jirô Kohara, and art historian, Takeshi Kuno, performed wood identifications on over 600 Japanese Buddhist sculptures in the 1950s [1]. Further scientific wood identification of wooden statues from the 8th century in Japan has been systematically conducted by several researchers [2-4]. A hypothesis was proposed that the selection of *Torreya nucifera* for the 8th century statues, is referring to the commentary of a Sutra, that recommends the use of the so-called hakuboku, as a substitute for *Santalum album*, or sandalwood. Compared to that Japanese situation, wood identification of Chinese and Korean wood statues has not been done systematically so far.

The author's approach is focusing on wood selection for Chinese and Korean statues preserved in several museums, especially in the USA, where many East Asian sculptures are preserved, to get a deeper understanding of the historical background of Buddhist sculptures in East Asia. For the wood identification, the conventional microscopic method, and synchrotron X-ray micro-tomography (SRX-ray μ CT) [5] were applied. As an interim report, this paper summarizes the wood identification results of Chinese wooden statues in the USA, conducted in cooperation with Drs. Mechthild Mertz (CRCAO-CNRS, France), Takao Itoh (Nara National Research Institute for Cultural Properties), and Junji Sugiyama (Kyoto University).

2. Materials and Methods

For wood identification, either optical microscopy, and synchrotron X-ray micro-tomography (SRX-ray μ CT) was applied. Small samples were collected by curators or conservators of the museums. The samples were taken

Accepted May 7, 2021.

¹Laboratory of Biomass Morphogenesis and Information, RISH, Kyoto University.
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011 Japan

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

from the underside of the sculptures and from cracks, without harming the integrity of the sculptures. For the preparation of the microscopic slides, the samples were first soaked in water for softening, and then, thin sections were taken by hand, in cross, radial and tangential directions (20µm to 30µm thick). The sections were heated on a hot plate for removing the air-bubbles inside, and enclosed by the slide-mounting medium Gum-chloral. The slides were studied under the optical microscope (Olympus BX51). Some samples were too fragile and tiny for making preparations, so that SRX-ray µCT at BeamLine20XU in SPring-8 located in Hyogo Prefecture, Japan, was applied. This method provides high resolution (0.472 µm/pixel) 3-D image of the anatomical micro-structure enough to identify the wood species.

3. Results

Of the 62 Chinese wooden statues preserved in several US museums, the following wood species were identified by microscope: *Paulownia* sp. (17 statues), *Tilia* sp. (16 statues), *Salix* sp. (15 statues), *Populus* sp. (3 statues), *Juniperus* sp. (3 statues), *Santalum album* (3 statues), others (5 statues).

The results of the wood identifications of 28 statues were extracted from published data [6].

Figure 1 shows the results of the wood selection trend in the 62 Chinese wooden statues studied so far.

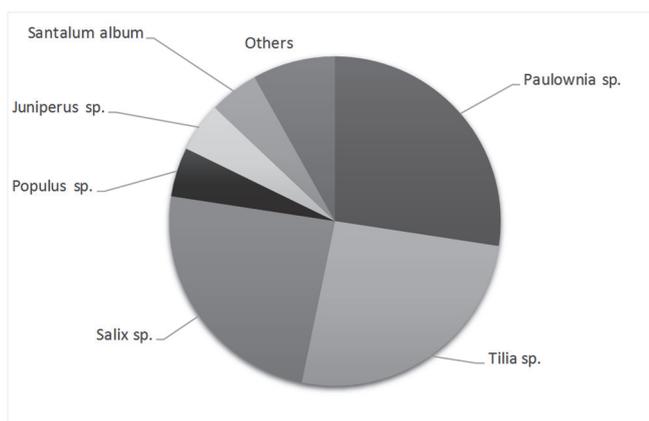


Figure 1. Wood species used for 62 Chinese wooden statues.

4. Discussion

In Japan, the following wood species, *Torreya nucifera*, *Chamaecyparis obtusa*, *Cerasus* sp., *Zelkova serrata* were traditionally used for wooden statues. Our research showed however, that the species selected for wood statues in China were completely different from those in Japan. Since this paper only summarizes the results of a limited cases for identifications conducted at several museums in the USA so far, it does not lead to any general trends or conclusions, it is an interesting result because it may show geographic differences on wood usage and also to understand the cultural exchange and logistics in East Asia. Continued research will be carried out.

* This research was partly presented in the SPring-8/SACLA research report Vol. 7, No.2 (2019).

5. Acknowledgements

This study was conducted together with Drs. Mechtild Mertz (CRCAO-CNRS, France), Takao Itoh (Nara National Research Institute for Cultural Properties), and Junji Sugiyama (Kyoto University). We are indebted to several museums in the USA for providing us with the precious wood samples, and for their kind cooperation and suggestions. The synchrotron radiation experiments were performed at Beam Line 20XU in SPring-8 (Japan), with the approval of the Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI) (Proposal No. 2017B1761). This work was also supported by the Grants-in-Aid for scientific research from JSPS (16K18730 and 19K01124),

obtained by Suyako Tazuru, and by the mission-linked research (Mission 5-4) from RISH, Kyoto University (#2019-5-4-1 and #2020-5-4-1).

References

- [1] Kohara J, “Nihon chōkoku yōzai chōsa shiryō” (Collection of the Japanese wood statues). *Bijutsu kenkyū* 229, 1964 (in Japanese).
- [2] Kaneko H, Iwasa M, Noshiro S, Fujii T, “Wood Types and Material Selection for Japanese Wooden Statues of the Ancient Period Particularly the 7th–8th Century”, *MUSEUM* The Bimonthly Magazine of the Tokyo National Museum 555:3–54, 1998 (in Japanese with English summary).
- [3] Kaneko H, Iwasa M, Noshiro S, Fujii T, “Wood Types and Material Selection for Japanese Wooden Statues of the Ancient Period (Particularly of the 8th–9th Centuries)”, *MUSEUM* The Bimonthly Magazine of the Tokyo National Museum 583:5-44, 2003 (in Japanese with English summary).
- [4] Kaneko H, Iwasa M, Noshiro S, Fujii T, “Wood Types and Material Selection for Japanese Wooden Statues of the Ancient Period, III: Further Thoughts on 8th and 9th Century Sculptures”, *MUSEUM* The Bimonthly Magazine of the Tokyo National Museum 625:61-78, 2010 (in Japanese with English summary).
- [5] 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, 2019 (open access). <https://link.springer.com/article/10.1186/s10086-019-1840-2>
- [6] Mertz M, Itoh T, “Analysis of Wood Species in the Collection”, *Wisdom Embodied – Chinese Buddhist and Daoist Sculpture in The Metropolitan Museum of Art*, Denise Patry Leidy and Donna Strahan (editors), Yale University Press, pp. 216-225, 2010 (open access). https://www.metmuseum.org/art/metpublications/Wisdom_Embodied_Chinese_Buddhist_and_Daoist_Sculpture_in_The_Metropolitan_Museum_of_Art

Profile



Suyako Tazuru-Mizuno

<Biography> Graduated from the Graduate school of Agriculture, Kyoto University in 2007 / Completed the doctoral course at the Graduate School of Agriculture, Kyoto University (Ph.D. in Agriculture) in 2011 / Postdoctoral at RISH in the same year / Assistant Professor at the RISH in the same year (to present) <Research theme> Interdisciplinary research aimed at understanding the diversity of East Asian wood cultures, based on scientific investigations of cultural heritage materials employing both traditional and novel techniques <Hobbies> handicraft.

研究業績

当研究所の研究業績は、京都大学教育研究活動データベースにまとめられており、令和2年度の研究業績についても本データベース <https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/view/> を参照されたい。

生存圏研究 Sustainable Humanosphere
第17号

発行日	令和3年11月19日
編集兼発行者	京都大学 生存圏研究所 京都府宇治市五ヶ庄
印刷所	株式会社 北斗プリント社 京都市左京区下鴨高木町38-2

