

生存圈研究

The logo for RISH (Research Institute for Sustainable Human Habitation) features a stylized blue and green 'R' shape on the left, followed by the word 'RISH' in a bold, blue, sans-serif font.

No. 15

2019 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15号は、平成30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

篠原 真毅

Chin-Cheng Yang

反町 始

武田 麻友

小嶋 浩嗣

馬場 啓一

日下部利佳

中川 貴文

田鶴寿弥子

岸本 芳昌

目 次

総 説

水に代わる低環境負荷媒体とものづくり	1
奥林 里子	
マイクロ波加熱の基礎と応用	7
三谷 友彦	
樹木の個性－抽出成分－	13
鈴木 史朗	
脱炭素社会のための持続可能な農業 －作物生産と再生可能エネルギー生産の両立－	19
柴田 大輔	
宇宙の音	28
大村 善治	
「オゾン層破壊の科学アセスメント：2018」から見る 最近のオゾン層研究の動向とその保護に向けた取り組み	37
塩谷 雅人	
マイクロ波精密照射による新規癌治療法開発に向けた基礎的研究	43
浅野 麻実子	
森林土壌圏における分解呼吸の短期・長期変動	48
安宅 未央子	

解説・資料

三次元CAD情報を用いた木造住宅の耐震性能の見える化	53
中川 貴文	
マイクロ波殺虫とシロアリ	60
柳川 綾	
重要文化財願興寺本堂保存修理工事における用材調査	68
田鶴 寿弥子, 杉山 淳司	

研究業績	75
------	----

水に代わる低環境負荷媒体とものづくり

奥林 里子^{1*}

Manufacturing with green medium alternative to water

Satoko Okubayashi^{1*}

概要

紙や衣類の製造には、地中海水量の半分以上に匹敵する水が毎年使われている。これら使用された水は、多くのエネルギーを使って処理され排水されるが、一部の地域では浄化されずに川や海に流され、大切な地球が汚染されていることも事実である。さらに、途上国の人口増加や経済発展にともなう水需要の伸びにより、世界的な水不足も心配されている。そのような中、水に代わる次世代媒体として超臨界二酸化炭素が注目されている。本稿では、超臨界二酸化炭素とは何か、基礎的な性質を説明するとともに、ラボスケールでの研究例や産業界での取り組みを紹介する。

1. はじめに

物質は、温度と圧力によってその状態が固体・液体・気体と変化するなかで、液体と気体の区別がつかなくなる臨界点を有する。臨界点は物質固有のもので、この臨界点を越えた状態の物質を超臨界流体と呼ぶ。いずれの物質にも臨界点があり超臨界状態をつくりだすことは可能であるが、研究や実用化には、無害で天然に豊富に存在する水と二酸化炭素が最もよく用いられている。超臨界水はその活性の高さから、加水分解や酸化反応に用いられ材料のリサイクル等に応用される一方で、臨界条件がマイルドでリサイクルが容易な二酸化炭素は、液体よりも高い拡散性と、気体よりも高い溶解性を活用し、天然物の抽出や脱脂洗浄、微粒子製造や注入による材料加工において、従来の媒体に代わるグリーン媒体としての検討が進められている¹⁾。

我々はこれまでに、多くの合成樹脂が超臨界二酸化炭素中で可塑化されることを利用して、比較的分子量の有機化合物の注入による樹脂の機能化に取り組んできた。このようなプロセスでの超臨界二酸化炭素のメリットを以下に列挙する。

- (1) 従来の液体媒体では加工できない材料を加工できる
- (2) 従来の液体媒体での加工に比べて低い温度で短時間加工できる
- (3) 加工において副生成物が出来にくい
- (4) 製品を乾燥状態で取り出せるため乾燥工程が不要
- (5) 使用した二酸化炭素は高回収率で再利用できる
- (6) 加工に使用された薬剤の未反応分は回収・再利用が可能
- (7) 防毒設備などの付加的設備が不要
- (8) 他の超臨界流体に比べて、低エネルギーで超臨界状態を保持できる
- (9) 圧縮断熱で得られるエネルギーを加工熱として系内で利用できる

2019年5月15日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所繊維機能融合化分野.

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

本稿では、我々のこれまでの数多くの取り組みの中で、①合成高分子の中でも結晶化度が高く従来の水系では染色できない繊維の浸染と、②吸水速乾性が期待されるポリエステル繊維表面の親水化、さらには③水系処理ではダメージが危惧される天然繊維からの錆染みの除去について報告するとともに、実用機の現状について報告する。

2. ラボでの研究成果

2.1 繊維の染色

ポリプロピレン (PP)、ポリアリレート繊維 (PAR)、超高分子ポリエチレン (UHMPE) は、耐摩耗性、耐薬品性、高い力学的特質により、衣料や産業資材をはじめ、さまざまな場面で利用されているものの、その性質ゆえに後染めで着色することが難しく、通常は原着あるいは可染性繊維のブレンド等によりその欠点を補っている。我々は、合成繊維が超臨界二酸化炭素中で水中以上に膨潤する性質²⁾ を利用し、これら難染色性繊維の染色を試みた。

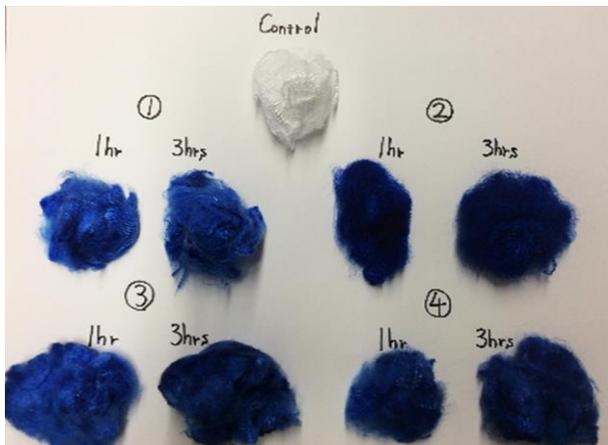


図 1：繊維の異なる PP 綿の超臨界二酸化炭素染色（染料濃度：3%owf, 染色条件：120℃, 25MPa, 1 あるいは 3 時間）

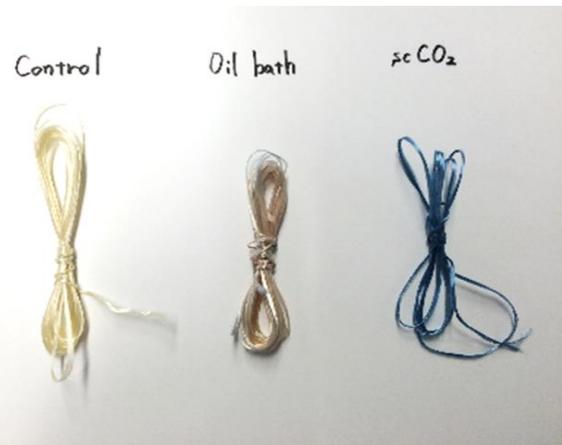


図 2：PAR 繊維の超臨界二酸化炭素染色(染料濃度：3%owf, 染色条件：150℃, 20MPa, 5 時間)

その結果、PP 繊維は分散染料を母体にオクチル基を有する C.I. OIL Blue DB-58 を用いると図 1 に示すよう濃色に染めることができたが、昇華堅牢度は 2~3 級と充分ではなかった。

PAR 繊維では、一般にポリエステル繊維に用いられる分散染料 C.I. Disperse Blue 56 を用いて超臨界二酸化炭素中でマルチフィラメントを染色したところ、図 2 の右に示すように染めることができた(中央は水系染色の結果)³⁾。しかし、染着濃度は充分と言えず、現在さらに濃色染めの条件を検討中である。

UHMPE については、PP や PAR で検討した染料に加え、図 3 に示す hydrazono propanenitrile 系染料を検討したところ、120℃、20MPa、3 時間の条件で、淡色ではありながら着色した。しかし染着濃度を上げることが困難で、さらに摩擦堅牢度も 2~3 級と低いため、UHMPE を膨潤させるデカリンを共溶媒として加えて染色を試みたところ、染色後の K/S 値は最大で 2.5 倍に改善された(図 4)。しかし、デカリンの添加により UHMPE の結晶化度は減少し、これにともない引張強度低下が低下したため⁴⁾、現在は力学特性を損なわない方法について検討中である。

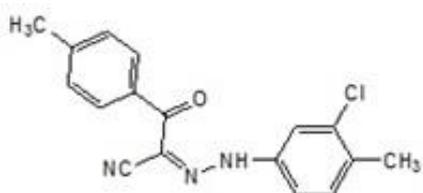


図 3 : Hydrazono propanenitrile 系染料の化学構造

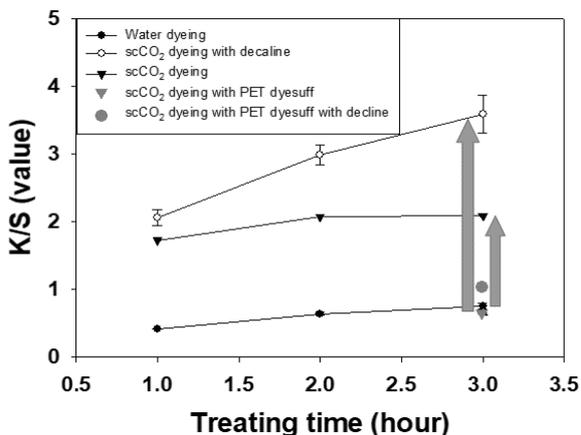
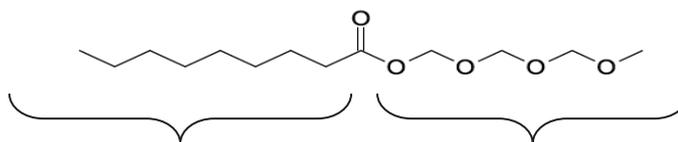


図 4 : UHMWPE の超臨界二酸化炭素染色

2.2 繊維の機能化（親水化）

ポリエチレンテレフタレート

(PET)やPPのような疎水性繊維は、通常汗のような水分を吸収することはできないが、繊維表面を水に馴染みやすくすることで吸水・速乾性を付与することができ、快適なスポーツウェアへの応用が期待される。ここでは、特に親水化の難しいPP繊維について、分子内に鎖長の異なる



炭化水素鎖 : C₁₈, C₂₂, PEG 鎖 : #1000, #2000

図 5 : PEG 誘導体 (Cn-PEGm) の化学構造

アルキル鎖(Cn)と分子量の異なるポリエチレングリコール(PEG#m)鎖をもつ PEG 誘導体 (Cn-PEGm) の、超臨界二酸化炭素を用いた PP 繊維への注入が繊維表面への水の濡れ性に及ぼす影響について検討した⁵⁾。用いた化合物 Cn-PEGm の化学構造式を図 5 に示した。Cn-PEGm の PP 繊維への注入量は、処理前後における布帛の重量増加率として算出し、親水化は水 10 μl を布帛上に滴下しその接触角を目視で観察し評価した。結果を表 1 に示す。

表 1 : PEG 誘導体の超臨界二酸化炭素を用いた PP 繊維への注入と親水性

化合物	超臨界 CO ₂ のみ	C ₁₈ -PEG#1000	C ₁₈ -PEG#2000	C ₂₂ -PEG#1000	C ₂₂ -PEG#2000
滴下 60 秒後					
注入量 (% _{owf})	-1.30	10.1	1.35	17.3	10.7

PEG#2000 より PEG#1000、C₁₈ より C₂₂ の誘導体、すなわち、分子量が小さくアルキル鎖の長い PEG 誘導体がより多く PP に注入された。これは、長いアルキル鎖ほど PP との親和性が増大し、分子量が小さいほど繊維内部に入りやすく、その結果注入量が増えたと考察した。一方、親水性については、PEG 誘導体の分子量が 1000 で、アルキル鎖の炭素数が 22 より 18 の方が PP の親水化に有効であるとわかった。これは、アルキル鎖の長いものほど疎水性が大きく、親水化を妨げてしまうためと考える。

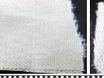
2.3 繊維の洗浄

伝統文化財として保存されてきた染織品には、赤褐色をした酸化鉄(Fe_2O_3)が染みとして付着することがある。錆じみは、展示台や装飾品といった鉄製品が酸化され鉄錆を生じ、その鉄錆と染織品が直接接触や空気中の水分が結露した水滴を介して、染織品に付着する。このように付着した錆じみは、染織品の美的価値を損なうだけでなく、鉄イオンが生成されることで染織品の劣化を招く。従来、絹や綿など親水性の繊維からの錆じみの除去には、亜ニチオン酸ナトリウム水溶液を使用していた。しかし、水溶液に親性繊維を浸漬させると膨潤が起り、繊維の劣化破損を起こす危険があった。また、除去処理で排出される廃液は環境に悪影響を及ぼす。超臨界二酸化炭素は拡散性と溶解に優れた特徴があり、これらの特徴を使った油脂性の汚れを洗浄する方法が提案されている。しかし、超臨界二酸化炭素を用いた錆じみの除去処理に関する研究はほとんど行われていない。我々は、超臨界二酸化炭素中に還元剤のチオグリコール酸を溶解させ、繊維上の錆じみを除去する方法を検討した⁶⁾。

実験では、硫酸鉄および炭酸ナトリウム処理により人工的に綿および絹の布帛上に鉄錆を形成させたモデル試料を文化財の代わりに用いた。この鉄錆付着布帛を、酸化鉄を還元するチオグリコール酸 (TGA) と、

TGA の超臨界二酸化炭素への溶解性を高めるための共溶媒であるメタノール、酸化鉄が還元されることで発生する鉄イオンをトラップする目的でラウリン酸を加え、40℃、15MPaで60分間処理した (バッチ法)。

表2：錆染み付着織布の超臨界二酸化炭素洗浄

	綿				絹			
	処理前	処理直後	処理3日後	処理10日後	処理前	処理直後	処理3日後	処理10日後
バッチ法								
ΔE	59.1	14.0	20.3	24.2	55.5	11.8	15.8	16.6
バッチ/洗浄法								
ΔE	60.2	2.9	2.8	2.8	56.6	5.4	5.2	5.2
TGA 浸漬法								
ΔE	59.7	1.3	1.2	1.3	54.7	2.3	2.4	2.3

処理後の錆染みの除去は、未処理白布との色差を計測して評価した。結果を表 2 に示す。また、先のバッチ法に続き、一般の家庭洗濯におけるすすぎに対応する処理として、メタノールを含む超臨界二酸化炭素で洗浄を行った「バッチ/洗浄法」についても併せて示した。上段の「バッチ法」では、綿布、絹布ともにバッチ処理後は見掛け上白くなり、錆染みが除去されたように見えるが、処理後 3 日、10 日と時間が経つにつれて再度茶色に着色し、再び酸化鉄が生成していることが分かる。

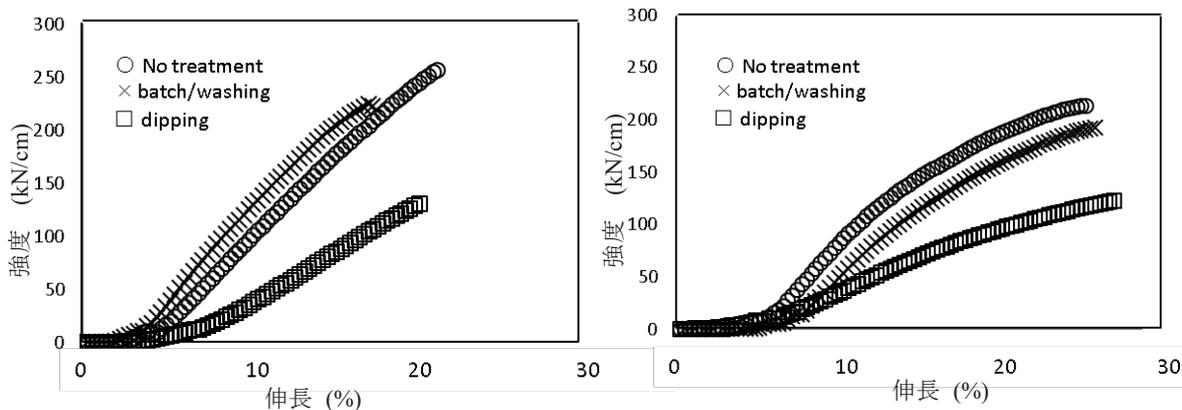


図 6：綿および絹布帛の引張強度試験

一方、下段の「バッチ／洗浄法」では処理直後の色差も小さく（白く）、すすぎ洗浄のない「バッチ法」に比べてより酸化鉄が除去されていることが確認できる。さらには、処理後に時間が経過しても色差（白さ）は変化せず、すすぎにより鉄イオンが除去され、その結果、再酸化による鉄錆の再付着が回避されたと考えた。しかし図6に示すように、試料の引張強度は、超臨界二酸化炭素を用いない(dipping)処理に比べるとその強度低下は抑えられたものの、鉄錆除去処理により低下していることは明らかであり、今後は布帛を損傷させない還元剤の検討が必要である。

3. 産業界での開発と現状

超臨界二酸化炭素を用いた脱カフェインコーヒー、ビールホップ抽出、低ニコチン煙草の製造など、抽出技術に応用した超臨界流体プロセスは実用化されているものの、これらの装置は対象物質を取り出すことに適しているが、逆に物質を入れることには適していない。すなわち、2.3で紹介した繊維の洗浄に用いることができるが、2.1や2.2で説明したプロセスに利用することはできず、新しい装置の開発が必要であった。2000年ごろには、オーストリアのNatex製の装置がデンマークの木材加工会社に導入され、超臨界二酸化炭素を用いた防腐剤の木材への注入加工が開始されたが、この装置は繊維という特殊な成形品の加工には適していなかった。

日本では、1989年に初めて超臨界二酸化炭素を用いた無水染色を実証したドイツのテキスタイル研究センター(Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West e. V.)のE. Schollmeyer教授率いるチームと情報交換を重ねた福井大学の堀らが、2007年に国の支援をうけ350€の実用染色機を完成するに至ったが、残念ながら現場への導入には至らなかった。

一方、ドイツでも同じような状況であった。Schollmeyer教授が超臨界二酸化炭素染色を実演した同じ年の1993年、Jasper社が製作した超臨界二酸化炭素染色システムを用いてAmann & Söhne社はポリエステル糸を染めている。しかし、当時は超臨界二酸化炭素の専門家がほとんどいなかったことや、初期投資が高く多くの染色工場が導入に消極的だったこと、加えて環境問題がそれほど切実でなかったのか、その後Jasper社やUhde社は装置の開発に力を注ぐことはなかった。そのような中、オランダのFeyCon社は、1998年に捺染会社および染料メーカーとともに超臨界二酸化炭素中での染色システムの開発に着手した。2008年には、それまでの知識と開発した装置、特許の全てをDyeCoo Textile Systems社に移行することで、世界初の商業用超臨界流体染色機メーカーとなった。その後、2012年2月ナイキ社が、続いてアディダス社がDyeCoo Textile Systemsと戦略的パートナーシップを締結したと発表した。この締結に最も貢献したのは、繊維メーカーであるタイのYehグループの一企業Tong Siang社である。技術が成熟しているテキスタイル産業に、新規装置や技術を取り入れる決心は並大抵ではない。

Tong Siang社では、ポリエステルやスパandexのスポーツウェアを中心に、編みから縫製まで一貫工程で製品を生産しており、取引先には先に紹介したナイキ、アディダスだけでなく、プーマ、ミズノと世界に名高いスポーツウェアブランドが名を連ね(2015年には既にナイキとの取引停止)、日本企業ではグンゼ、ワコール、セーレンなどとも取引があるという。超臨界二酸化炭素で加工された製品の商標は「DryDye」で、水を使わない無水加工法で染め上げられた製品を意味する。ミズノとアディダスのマ



図7：Tong Siang社の無水染色技術で染められたミズノ製Tシャツ（左）とアディダス製Tシャツ（右）

ラソン T シャツを図 7 に示す。左腰あたりに「DryDye」のロゴが見える。生地のお多くは従来の分散染料を用いた高圧液流染色機による染色であるが、2015 年現在で 60,000,000 ヤード/年のうちの約 10% が超臨界 CO₂での染色に切り替え、今後この比率は益々上がると Tong Siang 社の CEO は説明している。日本では、いち早くファスナーの大手企業 YKK が着手し、「ECO-DYE」で 2016 年度のグッドデザイン賞を獲得している。大手スポーツウェアアパレルのナイキ社およびアディダス社の「今後我々は水系で染色した繊維は使わない」という宣言が、世界の染色のあり方を大きく変えている⁷⁾。

4. おわりに

本稿では、低環境負荷プロセスとしてグリーン媒体の一つである超臨界二酸化炭素を利用した、難染色性繊維の染色と、繊維の親水化、錆染みの除去について紹介した。また、超臨界二酸化炭素加工の実機が市場に投入され、その装置によって染色された製品が市場に出回っていることにも触れた。この新技術には多くの解決すべき問題が残されているもの、企業と技術者によって日々解決されていることも事実であり、工場への実機の導入は、染色だけでなく精練や機能加工を含む仕上げ加工にも利用できる可能性を示唆している。この超臨界二酸化炭素加工技術は、テキスタイル産業だけでなく、今後世界が取り組むべき環境問題を解決する新規な技術開拓という点で、我が国に大きく寄与するものと信じて、今後も研究に邁進する所存である。

参考文献

- 1) 第1章 超臨界流体の特性と応用技術, “超臨界流体技術の開発と応用”, 佐古猛監修, シーエムシー出版, 2005, pp. 19-28
- 2) 田畑功, 宮川しのぶ, 堀照夫, 繊維工業研究協会誌, 12, pp42-45, 2002.
- 3) 奥林里子, 環境に優しい染色加工, 平成29年度繊維学会年次大会要旨集, 2F-07, 2017.
- 4) Jaehyuk Ma, Tarek Abou ELmaaty, Satoko Okubayashi, Effect of Supercritical Carbon Dioxide on Dyeability and Physical Properties of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber, *Autex Research Journal*, accepted.
- 5) 得田大翔, 奥林里子, 堀 照夫, ポリプロピレン繊維の無水染色加工, 繊維機械学会第67回年次大会要旨集, B-09, 2014.
- 6) 兼田諭, 鋤柄佐千子, 奥林里子, 超臨界二酸化炭素による酸性紙の脱酸処理, 繊維学会誌, 68(10), pp265-268, 2012.
- 7) 堀照夫, 奥林里子, 染色化学の発展と現状, 繊維学会誌, 70(9), ppP579-P588, 2014.

著者プロフィール



奥林 里子 (Satoko Okubayashi)

<略歴> 1996 年 福井大学大学院工学研究科博士後期課程修了(工学博士) / 同年熊本大学工学部助手 / 2001 年 ドレスデン工科大学ポスドク / 2002 年 インスブルック大学ポスドク / 2005 年 福井大学 VBL ポスドク / 2007 年 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科准教授 / 2017 年 同教授、京都大学生存圏研究所特定教授 現在に至る。<研究テーマと抱負> 低環境負荷のものづくりプロセス開発。

マイクロ波加熱の基礎と応用

三谷 友彦^{1*}

Basics and applications of microwave heating

Tomohiko Mitani^{1*}

概要

本稿では、生存圏研究所で推進しているマイクロ波加熱の応用研究事例について記す。また、その前段階として、熱に関する話題提供ならびにマイクロ波加熱の基礎としての加熱原理について述べる。

1. はじめに

昨年（2018年）の日本の夏は大層暑かったらしい。。。「らしい」と書いたのは、著者が2017年9月～2018年9月の1年間アメリカ・フロリダ大学に長期滞在中だったため、日本の酷暑を経験していないからである。昨年のフロリダの夏は最高気温が連日32℃前後で、これでも十分に暑いのだが、日本の40℃越えはさぞ厳しかったに違いない。ちなみに、アメリカ・カリフォルニア州のデスバレーでは昨夏に52℃を観測したそうである。いずれにせよ気温が体温を超えてしまえば、やる気が失せるのみならず体温の調節機能すら危ぶまれる状況である。

さて、本稿では「マイクロ波加熱」について、加熱原理や研究の応用例について述べる。マイクロ波加熱は電子レンジに代表されるように実生活の中にも広く普及している加熱方法であるが、まずその前段階として「熱」という言葉に焦点を当てたい。

「熱」という言葉からまず思い浮かぶのは、お湯、ストーブ、夏の日差しを浴びた車のボンネット等々「何かしら熱いもの（温かいもの）」である。これらの熱いものは、およそ周辺環境の温度や自分自身の体温を基準に判断することが多い。周りよりも温度が高いから「熱い」、自分の体温より温度が低いから「冷たい」ということである。また、人間の体温そのものを「熱」で表現することもある。例えば「平熱」とか「39℃の熱がある」という言葉である。これらは健康状態における体温を基準にして比較している。いずれにせよ、日常で使われる「熱」という言葉は、何か基準となる温度があって「熱い」とか「冷たい」とかを表現する。

一方で、物理用語、特に熱物理学や熱力学分野における「熱(Heat)」という言葉は少し意味合いが異なる。例えば文献¹⁾では、熱を「熱源との“熱的接触”による系へのエネルギー伝達」と定義しており、文献²⁾では熱を「2つの物体間の“温度差”に起因する一方の物体から他方の物体への“自発的な”エネルギーの流れ」と定義している。熱源とは、それ自身の温度が外部環境に左右されないエネルギーの源のようなものであり、例えば200℃に設定した巨大なオープンレンジを想像すればよい。系とは、温度が一樣な物体あるいは物体を含む環境と考えてよく、例えばオープンレンジに入れる前の20℃の牛肉と違って構わない。いずれにせよ重要なことは、2つの物体間あるいは熱源と系との間に温度差があり、それらが接触していることによって一方から他方にエネルギーが伝わる状況でのエ

2019年6月14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: mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

エネルギー伝達のことを「熱」という。すなわち、200℃のオーブンレンジに 20℃の牛肉を入れると、オーブンレンジから牛肉に「熱が伝わって」牛肉の温度が上がる。

ちなみに、熱物理学には「仕事(Work)」という用語の定義もあり、例えば文献²⁾では「系に出入りする熱以外の全てのエネルギー伝達のこと」と書かれている。例えば、紙の上に鉛筆で書いた文字を消しゴムで消すとき、何度も消しゴムをこすると消しゴムが熱くなる。これは、どこかから消しゴムに「熱が伝わった」のではなく、「紙の上で消しゴムをこすという仕事」によって消しゴムに「エネルギーが伝わり」、結果的に「消しゴムの温度が上がった」という解釈をする。

実は、我々が日常的に使っている「熱」という言葉は、熱物理学での「仕事」に相当することが多く、例えば上述した消しゴムの温度上昇も「摩擦熱」と呼ばれる。本稿で紹介するマイクロ波加熱も同様で、マイクロ波自身が高い温度を持っているのではなく、マイクロ波が物体（例えば食品）に何らかの仕事をし、マイクロ波のエネルギーが食品に伝わることによって、最終的に食品の温度が上がるという現象を「マイクロ波加熱」と呼んでいる。

2. マイクロ波加熱の原理

マイクロ波とは電磁波（電波）の一種であり、数 GHz～数十 GHz の周波数、約数十 cm～数 cm の波長をもつ。周波数とは 1 秒間あたりの波の振動数のことで、例えば関西において 100V コンセントから得られる交流の電気は 60Hz の周波数（1 秒間に 60 回の振動）をもつ。G（ギガ）は 10 億のことで、つまりマイクロ波は 1 秒間に数十億回から数百億回の振動数を持つ電磁波である。波長は 1 回の振動分に対応する波の長さのことで、真空中を伝搬する電磁波の場合は光の速さ（秒速約 30 万 km）と周波数を用いて（波長）＝（光の速さ）÷（周波数）と定義される。よって、秒速 30 万 km（＝秒速 3 億 m）を数十億回の振動数で割れば、波長は約数十 cm となる。ちなみに、電線を流れている 60Hz の交流の電気も空中を伝搬させることができれば電磁波とみなすことができ、その時の波長は約 5000km となる。また、周波数の逆数のことを周期と呼び、マイクロ波の周期は数億分の 1 秒～数十億分の 1 秒となる。

マイクロ波によって物体が加熱される現象は、「誘電加熱」という原理に基づくが、この誘電加熱についてここから詳しく説明をする。まず、ある物体に電氣的な影響を与えた時、その物体内で電氣的な偏りが発生するかどうかで物体を区別することができる。例えば、図 1 に示すように物体を金属板で挟んで、片方の金属板に電池の＋極、もう片方の金属板に電池の－極を取り付けて、電池のスイッチを on にする。このとき、電気は正と負でお互いを引き付けあい、正と正や負と負ではお互いが反発するので、金属板の＋極に物体内の－が引き寄せられ、金属板の－極に物体内の＋が引き寄せられる。したがって、図 1 のように物体内には電氣的な偏りが発生する。このような物体を「誘電体」と呼び、誘電体内部に発生する電氣的な偏りを「誘電分極」と呼ぶ。また、電池のスイッチを on にした時に金属板間に発生する電氣的な場のことを電界（電場）と呼ぶ。電界の向きは、図 1 の矢印で表すように金属板の＋極から－極に向かう方向に定義する。

さて、この誘電分極は電池のスイッチを on にした瞬間に発生するのではなく、それなりの時間経過を伴って発生する。また、電池のスイッチを off にすれば元の状態に戻るが、この際もそれなりの時間経過を伴って元に戻る。分極が発生するまでの時間は分極の種類によってマチマチであるが、

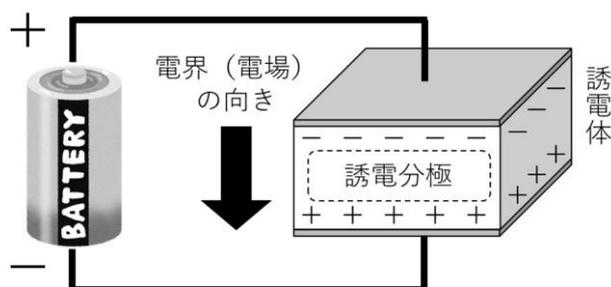


図 1：誘電体と電界（電場）と誘電分極の関係。誘電体に電界（電場）をかけると誘電体内に電氣的な偏り（誘電分極）ができる。

誘電体全体が分極するような場合に最も時間がかかる。といっても何十万分の1秒～何十億分の1秒という一瞬の出来事であるが、実はこの分極に要する時間がマイクロ波の周期に結構近いのである。

電磁波には上述した電氣的な場（電界）と磁氣的な場（磁界）の両方が存在し、電磁界の正負の向きが周期に合わせて交互に変化する。したがって、誘電体が電磁波に照射されると、電界の正負の変化に伴って誘電体内部の誘電分極の正負も変化する。このとき、電磁波の周期が誘電分極の変化時間と比べて十分に遅い場合は、電磁波の電界変化に対して誘電分極が直ぐに追いつくことができる。ところが、電磁波の周期が誘電分極の時間変化と同程度になると、電磁波の変化に対する誘電分極の発生が遅れ始めるため、誘電体内に分極が発生しようとしているにも関わらず電界の向きが先にひっくり返ってしまう。つまり、誘電分極の+側に電磁界の+側が近づき、誘電分極の-側に電磁界の-側が近づいてくるので、反発作用によって誘電体内の+と-が突然反対方向に移動させられるような状況となる。誘電体の気持ちになって考えると「+極（-極）があるからそっちに近づいたのに、いざ近くまで来てみたら-極（+極）に変わっているじゃないか！」と、急ブレーキを踏まされたあげく反対方向にUターンさせられるのである。しかも、Uターンして逆方向に向かったら、また電界の正負が反転しているので急ブレーキを踏まされて、、、ということが1秒間に何十億回と誘電体内に起きていることとなる。図2にその様子と、誘電分極する+成分と-成分を自動車の動きに見立てた比喩的な図を示す。急ブレーキをかけさせているのが電磁波の電界の役割であり、急ブレーキによって生じるエネルギー損失が電磁波から誘電体に伝わるエネルギーに相当する。これによって、電磁波から誘電体にエネルギーが伝わり、最終的に誘電体の温度が上昇する。

上述の現象は誘電体がもつ分極時間と電磁波の周期に依存するため、電磁波の電界変化の周期が遅すぎても早すぎても、この現象は起こりにくい。遅すぎる場合は電界変化に対して誘電分極が十分に間

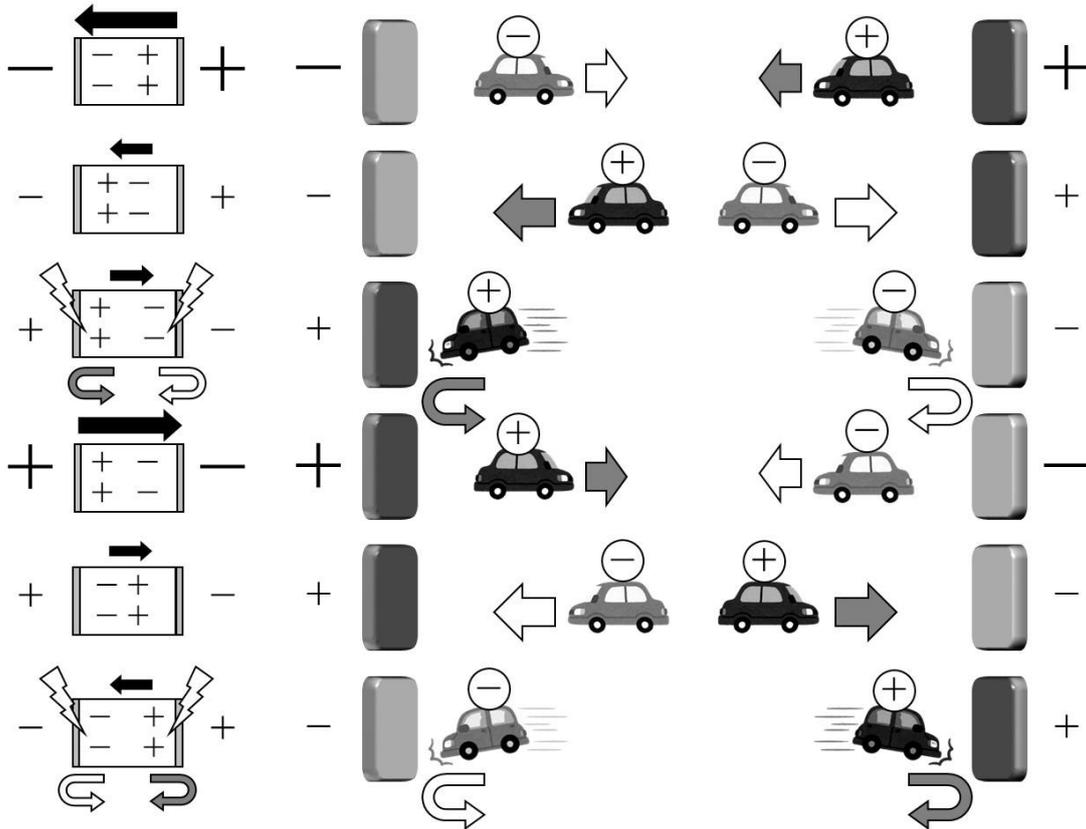


図2：電界の向きの変化と誘電分極の変化の図。誘電分極より先に電界が変化すると、誘電分極にブレーキがかかってしまう。右図は、誘電分極する+成分と-成分を自動車の動きに見立てた比喩的な図。ブレーキのエネルギーが最終的には熱に変わることによって誘電体が加熱される。

に合うので急ブレーキを踏む必要がないし、早すぎる場合は誘電分極が全く間に合わないのでアクセルもブレーキも踏めずにほぼ留まった状態となる。結局のところ、誘電分極に近い周期を持った電磁波が誘電体にエネルギーを伝える（つまり、電磁波が誘電体に仕事をすること）ことができ、その周期を持った電磁波がマイクロ波ということである。これがマイクロ波加熱の原理であり、このような加熱原理を「誘電加熱」と呼ぶ。

3. 生存圏研究所におけるマイクロ波加熱応用研究

3.1 マイクロ波加熱応用研究の概要

マイクロ波加熱の最大の応用先は電子レンジの世界的普及が示すように食品加熱であるが、食品以外にも様々な分野でマイクロ波加熱が利用されている。図3にマイクロ波加熱の応用分野を示す。特に、1980年代後半辺りからマイクロ波を化学反応に利用する研究が創出される³⁾とともに、金属粉末をマイクロ波で加熱できることが1999年に発見⁴⁾されて以降、様々な分野でのマイクロ波加熱応用研究が広まっている。また、元々は電気電子工学分野あるいは物理分野で扱われる電磁波

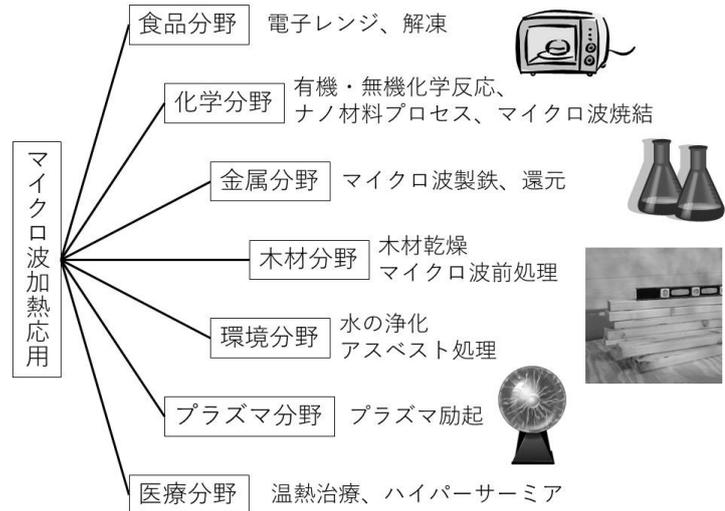


図3：マイクロ波加熱の応用分野。

(マイクロ波)が、化学分野や農学分野、医療分野等の様々な異分野で利用されていることから、最近のマイクロ波加熱応用研究は異分野が集まった学際融合研究となることが多い。

マイクロ波加熱の最大の特徴は、「加熱速度が速いこと（高速性）」と「温まりやすいもの／温まりにくいものがあること（選択性）」である。この特徴については、「陶器のマグカップに入った牛乳をオーブンレンジで温めるとどうなるか？電子レンジで温めるとどうなるか？」を想像すると分かりやすい。オーブンレンジで牛乳を温める場合（実際にそうする人はごく少数だと思われるが）、温まるまでには時間がかかるし、そもそもの準備段階としてオーブンレンジ自体の温度を上昇させる必要がある。また、いざ牛乳が温まった時はマグカップも同じ温度まで温まるので、マグカップの耳を素手で持つと火傷をする危険性がある。一方、電子レンジで温める場合は、1分もかからずに牛乳を温められるだけでなく、マグカップ自体はさほど温まらないので、マグカップの耳を素手で持つことができる。前者が加熱の高速性、後者が加熱の選択性である。特に加熱の選択性については通常の加熱方法では起こり得ないため、これまで想定できなかったような化学反応の可能性が期待されている。また高速性に関しても、通常の化学反応よりも反応時間が大幅に短縮されるような事例が数多く存在する⁵⁾。

3.2 木質バイオマス前処理用マイクロ波加熱装置の研究

木質バイオマスは再生可能エネルギーの一つとして注目されており、その利用方法の一つとしてバイオエタノール等のバイオ燃料生成が挙げられる。ただし、木質バイオマスを構成するセルロース、ヘミセルロース、リグニンのうちバイオエタノールの原料となるのはセルロースとヘミセルロースであるため、リグニンを取り除いてセルロースとヘミセルロースを効率よく糖化・発酵させるための「前処理工程」が必要となる。前処理工程で利用される手法としては、酸・アルカリを用いた化学的手法や爆砕等の物理的手法があるが、我々の研究グループではマイクロ波加熱を利用した前処理装置の開発に取り組んできた。

NEDO プロジェクト「バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発（先導技術開発）／木質バイオマスからの高効率バイオエタノール生産システムの研究開発」で開発した木質バイオマス前処理用マイクロ波加熱装置の写真を図4に示す。図4左側の写真は、研究初期の頃に開発した装置であり、金属パイプ中を流れる木質バイオマス（木粉あるいはチップを含む水溶液）の途中にマイクロ波照射装置を3ユニット（1ユニットあたりの最大マイクロ波出力1.2 kW）設置したものであり、木質バイオマスが搬入口から搬出口に達するまでマイクロ波によって連続的に前処理される⁶⁾。また、ユニット数は木質バイオマスのパイプ内の移動速度や処理量、反応時間によって可変にすることができる。図4右側の写真は、容量50Lまで装置を大型化したものであり、木質バイオマスを装置上部から搬入して下部から搬出する途中にマイクロ波照射装置を8ユニット（1ユニットあたりの最大マイクロ波出力1.5 kW）設置したものである⁷⁾。容量50Lの大型装置においては、木質バイオマスの加熱速度から算出されるマイクロ波吸収効率（照射したマイクロ波エネルギーのうち木質バイオマスに吸収されるエネルギーの割合）79%を達成した⁷⁾。



図4：木質バイオマス前処理用マイクロ波加熱装置の写真。（左：マイクロ波出力1.2 kW×3ユニット、右：マイクロ波出力1.5 kW×8ユニット、容量50L）

3.3 化学反应用マイクロ波加熱装置の研究

前節の事例は比較的大規模なマイクロ波加熱装置の研究開発であったが、マイクロ波加熱を少量の反応系で試験的に利用したい場合には大規模装置は不向きである。また、電子レンジを改造したマイクロ波加熱研究や、マイクロ波を使った化学反応研究用の市販マイクロ波照射装置も存在するが、これらの装置は2.45 GHz帯の周波数（電子レンジと同じ周波数帯）を利用していることがほとんどである。2.45 GHzの周波数帯が利用される理由は、この周波数帯がマイクロ波加熱用途として国際的に決まっているからであるが、必ずしも学術的観点から決定された周波数帯ではない。もちろん、2節で述べたようにマイクロ波は誘電加熱に適した電磁波であるが、本当にどの周波数が化学反応にとって適しているのかは自明ではない。したがって、学術的なマイクロ波加熱研究においては、広い周波数範囲で利用できるようなマイクロ波加熱装置の方が何かと有用性が高い。

以上の背景より、広い周波数範囲（「広帯域」と呼ぶ）で利用可能なマイクロ波加熱装置の研究開発を行った。

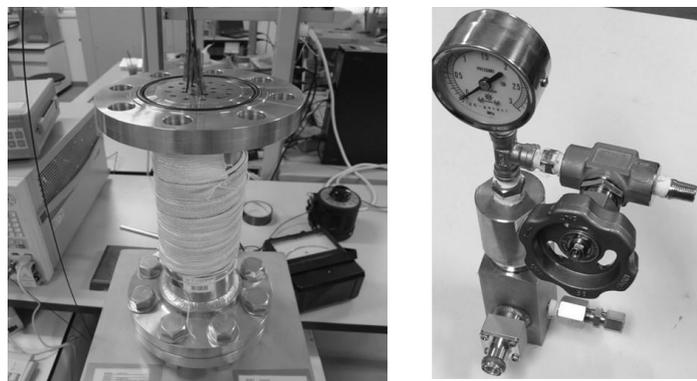


図5：広帯域マイクロ波加熱装置の写真。（左：容量360mL程度、右：容量20mL程度）

JST/CREST プロジェクト「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出／電磁波応答性触媒反応を介した植物からのリグニン系機能性ポリマーの創成」で開発した広帯域マイクロ波加熱装置の写真を図5に示す。左の写真は容量360 mL程度の容器であり、被加熱物を純水とした場合に1.1 GHz～2.7 GHzの広い周波数範囲において装置の反射電力（照射したマイクロ波電力が被加熱物に加えられずに反射される電力の割合）を10%以下に抑えている⁸⁾。右の写真は、容器容量を20 mL程度まで小型化した容器であり、被加熱物を純水とした場合に1.45 GHz～2.7 GHzの広い周波数範囲において装置での反射電力を10%以下に抑えている⁹⁾。今後は、これらの装置を使った様々なマイクロ波周波数での化学反応実験の実施が期待される。

4. おわりに

マイクロ波加熱の応用研究は今後もますます活発化することが予想される。これは近年の論文数の増加傾向を見ても明らかであり、例えばGoogle Scholarにおいて“microwave”、“biomass”というキーワードで検索すると、2012年に80報強であった論文数が2016年には250報近くまで飛躍的に増加している¹⁰⁾。マイクロ波加熱応用研究の黎明期は、電子レンジを用いた比較的原始的な研究事例が多かったが、今後は半導体発振器・増幅器を利用した制御性の高いマイクロ波加熱応用の研究成果が生まれてくるであろう¹¹⁾。生存圏研究所では全国・国際共同利用設備「先進素材開発解析システム(ADAM: Analysis and Development System for Advanced Materials)」において、高度マイクロ波加熱応用及び解析サブシステムを有しており、様々な周波数帯でのマイクロ波加熱実験が実施可能である。これらの共同利用を通じ、マイクロ波加熱応用に関する様々な学際融合研究の実施が期待される。

参考文献

- 1) Kittel, C., Kroemer, H., *Thermal Physics*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.
- 2) Schroeder, D. V., *An Introduction to Thermal Physics*, Addison Wesley Longman, San Francisco, 2000.
- 3) Estel, L., Poux, M., Benamara, N., Polaert, I., *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, **113**, 56-64, 2017.
- 4) Roy, R., Agrawal, D., Cheng, J., *Nature*, **399**, 668-670, 1999.
- 5) 堀越智、谷正彦、佐々木政子、*図解よくわかる電磁波化学*、日刊工業新聞社、2012.
- 6) Mitani, T., Oyadomari, M., Suzuki, H., Yano, K., Shinohara, N., Tsumiya, T., Sego, H., Watanabe, T., *Journal of the Japan Society of Energy*, **90**, 881-885, 2011.
- 7) Hasegawa, N., Mitani, T., Shinohara, N., Daidai, M., Katsura, Y., Sego, H., Watanabe, T., *IEICE Trans. Electron.*, **E97-C**, 986-993, 2014.
- 8) Mitani, T., Hasegawa, N., Nakajima, R., Shinohara, N., Nozaki, Y., Chikata, T., Watanabe, T., *Chem. Eng. J.*, **299**, 209-216, 2016.
- 9) Mitani, T., Nakajima, R., Shinohara, N., Nozaki, Y., Chikata, T., Watanabe, T., *Processes*, **7**, (3), 143, 2019.
- 10) Mitani, T., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **61**, 113-120, 2018.
- 11) 三谷友彦、*ケミカルエンジニアリング*、**64**, (6), 1-5, 2019.

著者プロフィール



三谷 友彦 (Tomohiko Mitani)

1999年京都大学工学部電気電子工学科卒業／2001年京都大学大学院情報学研究科修士課程修了／2006年京都大学博士(工学)／2003年京都大学宙空電波科学研究センター助手／2012年同大学生存圏研究所准教授、現在に至る。マイクロ波加熱応用、無線電力伝送などマイクロ波応用に関する研究に従事。趣味は、スポーツ（実施と観戦の両方）、居酒屋やバーに行くこと、茶道（裏千家）。

樹木の個性 —抽出成分—

鈴木 史朗^{1*}

Chemical identities of tree species –extractives–

Shiro Suzuki^{1*}

概要

樹木は、抽出成分という微量ではあるが樹種ごとに量や構造が異なる化学成分をつくり、それぞれの樹種の特徴となっている。これらの抽出成分は、ヒノキやスギの心材の色の原因となる物質や、いわゆる森林の爽やかな香りのフィトンチッドと呼ばれる香気成分、松脂など工業原料となる成分などを含んでおり、産業的や生態的にも重要である。今回は、抽出成分とは何かについて記述すると共に、抽出成分の生合成に関する研究について紹介する。

1. はじめに

抽出成分とは、樹木の材などを中性の溶媒で抽出することによって得られる多種多様な化合物の総称である¹⁾。抽出成分は、木材の細胞壁を構成するセルロース、ヘミセルロース、リグニンといった成分と比較すると微量であるが、樹種により生産される種類や量が異なり、いわば樹木の個性を表していると言える。

宇治市の黄檗山万福寺の黄檗（おうばく）とは、ミカン科樹木の一つであるキハダの異名である。その樹皮（内樹皮）は鮮やかな黄色をしており、アルカロイドの一つであるベルベリンを含み、オウバクという名前の生薬として利用される。また、常緑の街路樹として植えられるヤマモモでは、その樹皮（ヨウバイヒという生薬名が付いている）にジアリルヘプタノイドの一つであるミリカノールやミリカノンが蓄積し、薬効成分の一つとなっている。このように様々な種類の樹木が和漢薬の生薬の基原植物として認知されている。

一方、樹木は、樹木特異的に材の中心に心材と呼ばれる組織を形成し、心材には樹種ごとに異なる抽出成分（心材成分）を蓄積することが知られている。コーストレッドウッドやスギ（図1）の心材にはノルリグナンの一種であるセクイリン-Cなどが蓄積し、ヒノキの心材にはノルリグナンの一種であるトランス-ヒノキレジノールといった成分が蓄積する。これらの成分は、心材色の原因物質として知られている^{2,3)}。

心材成分は、心材の耐久性付与にも貢献している。例えば、木曽ヒノキ、秋田スギと並び、日本の三大美林として称される青森ヒバ（ヒノキアスナロ）の心材には、ヒノキチオール⁴⁾と呼ばれるテルペノイドの一種が蓄積し、心材への優れた耐朽性の付与に貢献している。この特性を生かし、有名な木橋である岩国市の錦帯橋の橋杭（橋を支えて川の水と接し得る部材）にはヒノキアスナロ材（ヒバ材）が使われている。

抽出成分は、材の寸法安定性や音響・振動特性などの材の物理的特性において重要な役割を果たしていることも明らかになってきている。例として、バイオリンの弓に使われるペルナンブーコ材の抽

2019年7月8日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 森林代謝機能化学分野.

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



図 1：コーストレッドウッド (*Sequoia sempervirens*) の林 (左図) とスギの心材と辺材 (右図)
右図は生存圏研究所・梅村研二准教授のご厚意による

出成分には、プロトサップニン B やブラジリンが含まれているが、プロトサップニン B を含まない材に、プロトサップニン B や、ブラジリンと構造が類似しているヘマトキシリンを注入すると、音響・振動特性が変化することが挙げられる⁵⁾。筆者も、当時、京都府立大学の湊教授が行っていた、南米のクワ科の樹木で材が打楽器などに使用されるムイラピランガの抽出成分を同定する研究に参加し、主な抽出成分がピラノクマリンのキサントレチンやルヴァンゲチンであることを示した。同定されたキサントレチンや、ルヴァンゲチンの代わりに構造が類似したフラノクマリンであるメトキサレンを木材に注入すると、音響・振動特性が変化することが見出されている⁶⁾。

このように、樹木の抽出成分は、細胞壁成分と比較し微量であっても、様々な面で色々な働きをしている。樹木の抽出成分に関する研究は、学術的には樹木の樹木たる所以を明らかにすることにつながるるとともに、人間社会や環境においても重要な研究であると言えるだろう。

2. 抽出成分の分類

抽出成分は、その化学的構造より、リグナン、ネオリグナン、ノルリグナン、フラボノイド、ステルベノイド、縮合型タンニン、イソプレノイド、そしてその他の成分、に大まかに分類できる。これらの成分は一般に植物二次代謝成分と呼ばれるもので、多くの場合、特定の植物種に特定の構造をした化合物が見出される。

2.1 リグナン、ネオリグナン、ノルリグナン

リグナン、ネオリグナン、ノルリグナンは、いずれもフェニルプロパノイド (ベンゼン環の 6 炭素原子と側鎖の 3 炭素原子) 2 分子に由来する低分子化合物であり、樹木の代表的な抽出成分である。リグナンは、側鎖の真ん中 (C8-C8') でフェニルプロパノイド単位が結合した二量体を指し、ネオリ

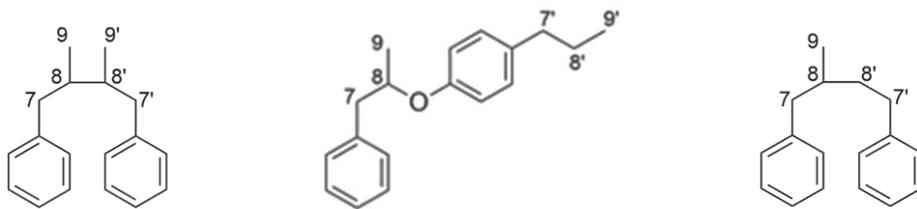


図 2：(左から) リグナン、ネオリグナン、ノルリグナンの炭素骨格の例

グナンは 8 位同士以外で結合したフェニルプロパノイド二量体を指す。ノルリグナンはフェニルプロパノイド二量体から側鎖の炭素原子が一つ失われている分子をいう (図 2)。リグナンが見出される植物の科は多く、真正双子葉類のセリ科、ゴマ科、ウコギ科、キク科、アブラナ科、キツネノマゴ科、マメ科、ミカン科などや基部被子植物のモクレン科、クスノキ科、ハスノハギリ科、マツブサ科、また、針葉樹のヒノキ科、そしてシダ植物やコケ植物からの単離例もある⁷⁾。ノルリグナンは、単子葉植物のアスパラガス科、針葉樹のヒノキ科やナンヨウスギ科、真正双子葉類のヒシ科などから単離されているが、リグナンと比べるとノルリグナンが単離されている植物種の数は少ない³⁾。

2.2 フラボノイド、ステルベノイド、縮合型タンニン

フラボノイドは、リグナン以上に多くの植物の科から見いだされており、通常その芳香環に複数の水酸基が置換するポリフェノール化合物の代表的な物質で、6,500 種類以上が知られている⁸⁾。代表的なフラボノイドはアントシアニンであり、多くの植物の花や果実の色素として見出されている。樹木の抽出成分としては、マメ科樹木のアカシア・サキサティリスより、フラバン-3,4-ジオール誘導体 (図 3) が単離されている⁹⁾。



図 3 : フラバン-3,4-ジオール類

ステルベノイドは、抽出成分としては、裸子植物のマツ科、単子葉植物のラン科、ショウブ科、ヤマノイモ科、真正双子葉類のフトモモ科、ツバキ科、クワ科、ブドウ科、さらにはコケ類などからの単離例がある¹⁰⁾。樹木の抽出成分としては、マツ科樹木の心材成分であるピノシルビンおよびその誘導体が知られている (図 4)。

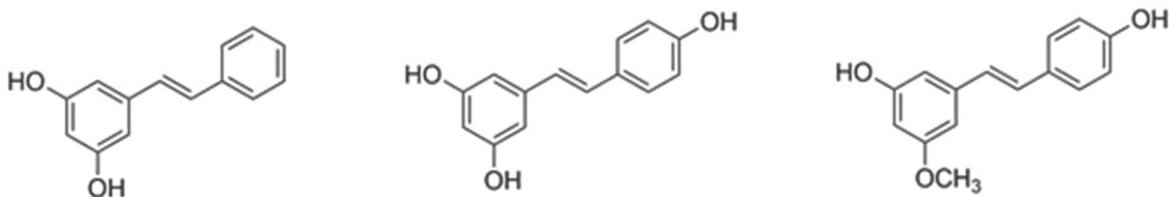


図 4 : ピノシルビンおよびその誘導体
(左から) ピノシルビン、レスベラトロール、ピノスチルベン

縮合型タンニンは、フラボノイドであるフラバン-3-オール類が多数縮合した分子量 500~3,000 のポリフェノールである。一般に樹皮や果皮に多く含まれ、塩酸と加熱するとアントシアニン色素を生ずることから、プロアントシアニンと呼ばれる。植物種によって生成される縮合型タンニンの構造は異なり、アカシア類ではプロフィゼチニン型およびプロロピネチニン型、スギ、ヒノキ、カラマツなどの針葉樹皮には主にプロアントシアニン型が多く含まれる (図 5)¹¹⁾。

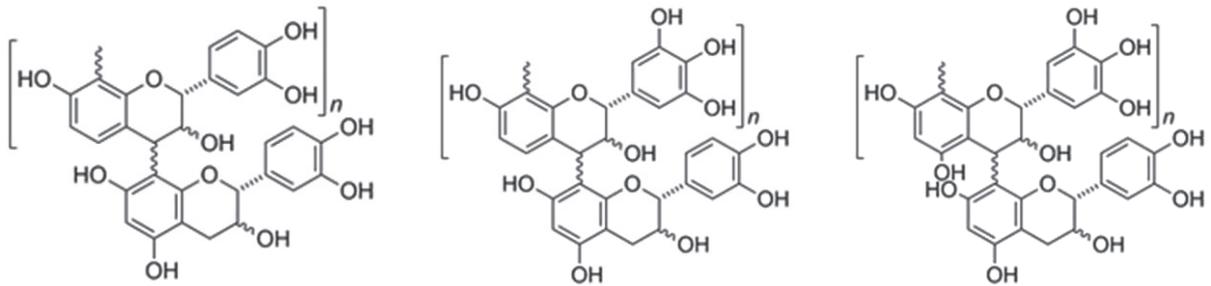


図 5：縮合型タンニンの化学構造
(左から) プロフィゼチニジン型、プロロビネチニジン型、プロシアニジン型

2.3 イソプレノイド

イソプレノイドは、イソペンテルニリン酸を経由して生成する化合物の総称である。イソペンテルニリン酸は 5 個の炭素原子からなる骨格を持つ。従ってイソプレノイドは、多くの場合、イソプレン単位が結合して生成しているように解釈できる（イソプレン則）¹²⁾。イソプレノイドのうち、イソプレンユニット 2 単位 (C10) から炭素骨格が形成されている化合物をモノテルペン、3 単位 (C15) から形成されている化合物をセスキテルペン、4 単位 (C20) から形成されるものをジテルペン、6 単位 (C30) から形成されるものをトリテルペンと呼ぶ。

モノテルペンやセスキテルペンはヨーロッパアカマツなどの針葉樹から採取した精油に多く含まれている。代表的なものにモノテルペンである α -ピネン、 β -ピネン、カンフェン、リモネン、セスキテルペンである β -カリオフィレンがある (図 6)。

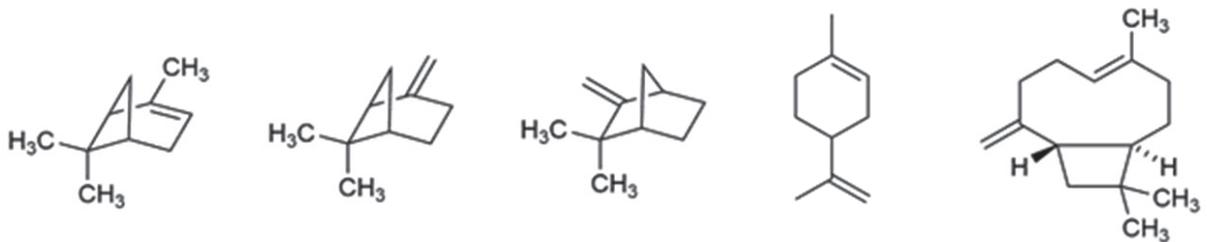


図 6：モノテルペンとセスキテルペン
(左から) α -ピネン、 β -ピネン、カンフェン、リモネン、 β -カリオフィレン

松脂には、 α -ピネン、 β -ピネンを主成分とするテレピン油のほか、三環形ジテルペンのカルボン酸である樹脂酸類が含まれている。代表的な樹脂酸は、アビエチン酸やピマール酸 (図 7) である。な

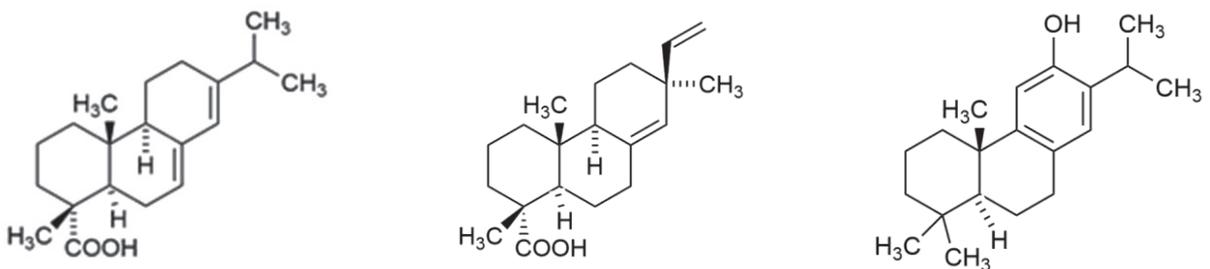


図 7：(左から) アビエチン酸、ピマール酸、フェルギノール

お、スギ心材やコーストレッドウッドの針葉には、三環形ジテルペンの一つの環が芳香核となったフェルギノールが蓄積している。

3. 抽出成分の生物活性

抽出成分は、耐朽性、耐虫性、細胞毒性などの様々な生物活性を有しており、このような生物活性が、樹木の生体防御に重要な役割を果たしていると考えられている¹³⁾。また、針葉樹等から採取される精油成分は、リラックス効果をもたらし¹⁴⁾、ヒトの健康に有用であることが経験的にも知られており、古くからアロマテラピーなどの療法にも使われている。さらにごく限られた一部の樹種（イチイの仲間）しか生産しないタキソールのように、有用な抗腫瘍活性を示す成分もある。このように、抽出成分は、病害抵抗性などを通じて森林の生態系ならびに林木生産において重要な役割を果たすと共に、ヒトの健康維持や疾病治療にも役立っている。

4. 抽出成分の生合成研究

次世代シーケンサーの登場により、この10年間で、植物二次代謝成分の生合成に関与すると推定される遺伝子配列（cDNA配列）の取得や、このような遺伝子の発現レベルでの解析が劇的に容易になった。さらに、ここ数年は、遺伝子発現レベル（RNAレベル）のみでなく、ゲノムの塩基配列が解読されたことで、ゲノムレベルでの二次代謝成分生合成に関わる遺伝子同定も盛んになりつつある。

2004年の時点で、ゲノムの塩基配列が明らかとなった樹木はポプラ（ゲノムサイズ：550Mb）のみであったが、2018年9月の時点では、広葉樹にとどまらず、ヒトのゲノムサイズ（3.1Gb）よりはるかに大きなドイツトウヒ（19.6Gb）やテーダマツ（22Gb）などの針葉樹類のゲノム塩基配列も明らかにされており、抽出成分の生合成がゲノムレベルでも理解できるようになりつつある。筆者らも、次世代シーケンサーによって、抗腫瘍性リグナンを蓄積する針葉樹であるヒノキアスナロのRNAレベルでの解析を行い、リグナン合成酵素遺伝子の探索を行っている。その結果、O-メチル基転移酵素やシトクロムP450などのタンパク質ファミリーに分類される興味深い配列を見出している¹⁵⁾。

次世代シーケンサー解析により、探索したい遺伝子の候補塩基配列が容易に入手できるようになれば、これらの配列を使ってどのように機能同定を行うか、が鍵となる。従来、入手した塩基配列を用いて組換えタンパク質を作らせる宿主として、大腸菌などの微生物が使われてきた。実験操作が容易で、成功すれば精製タンパク質を大量に得られる。しかし、活性を有するタンパク質の発現成功率は高くなく、発現の最適化に時間を要するという欠点がある。一方、近年盛んに用いられるベンタムタバコ葉を使ったアグロインフィルトレーション法^{16,17)}は、操作が簡便であり、アグロバクテリウムにより一過的に発現した酵素により代謝された成分を直接機器分析により検出できることから、入手した候補遺伝子配列の初期段階のスクリーニング法として有用である。

一方、近年ゲノムの塩基配列を直接「取り除く」あるいは「加える」などの「編集」が可能な「ゲノム編集」がCRISPR/Cas9法の発見¹⁸⁾により、安価かつ劇的に容易になってきた。植物においても、動物などにおけるゲノム編集より応用展開は遅れてはいるものの、CRISPR/Cas9法の適用により以前よりもゲノム編集がはるかに容易になっている¹⁹⁾。さらに、作出過程で用いた外来遺伝子を除去したゲノム編集植物は、従来の放射線やDNA変異試薬を用いて得られた変異体とDNAレベルで比較した場合に区別が困難であることから、遺伝子組換え植物として特別に取り扱う必要がないとの意見も出ている。つまり、ゲノム編集は、樹木に限らず、様々な有用植物の機能を容易に改変し、向上させることのできる可能性を持っている。

以上、抽出成分の生合成研究は、今後は上述のような最先端技術を取り入れ、いかに迅速に目標とする合成酵素遺伝子の機能解析を行い、有用植物の作出や抽出成分の生産を行うことができるか、がポイントになると考えられる。

参考文献

- 1) 梅澤俊明, 「抽出成分とは」, “木質の形成”, 福島和彦, 高部圭司, 船田良, 梅澤俊明, 杉山淳二, 山本浩之編, 海青社, 2011, pp. 403.
- 2) Balogh and Anderson (1965) Chemistry of the genus Sequoia-II: Isolation of sequirins, new phenolic compounds from the coast redwood (*Sequoia sempervirens*). *Phytochemistry* 4: 569-575.
- 3) Suzuki and Umezawa (2007) Biosynthesis of lignans and norlignans. *J Wood Sci* 53: 273-284.
- 4) Fujii et al. (1995) Hinokitiol production in suspension cells of *Thujopsis dolabrata* var. *hondai* Makino. *Plant Tissue Culture Lett* 12: 55-61.
- 5) Matsunaga et al. (2000) Vibrational property changes of spruce wood by impregnation with water-soluble extractives of pernambuco (*Guilandina echinata*) II: structural analysis of extractive components. *J Wood Sci* 46: 253-257.
- 6) Minato et al. (2009) Extractives of muirapiranga (*Brosimum* sp.) and its effects on the vibrational properties of wood. *J Wood Sci* 56: 41-46.
- 7) Umezawa (2003) Diversity in lignan biosynthesis. *Phytochem Rev* 2: 371-390.
- 8) 河合真吾, 「フラボノイド」, “木質の形成”, 福島和彦, 高部圭司, 船田良, 梅澤俊明, 杉山淳二, 山本浩之編, 海青社, 2011, pp. 408-411.
- 9) Fourie et al. (1974) 8-*O*-methyl and the first 3-*O*-methylflavan-3,4-diols from *Acacia saxatilis*. *Phytochemistry* 13: 2573-2581.
- 10) 河合真吾, 「スチルベノイド」, “木質の形成”, 福島和彦, 高部圭司, 船田良, 梅澤俊明, 杉山淳二, 山本浩之編, 海青社, 2011, pp. 411-413.
- 11) 光永徹, 「タンニン」, “木質の形成”, 福島和彦, 高部圭司, 船田良, 梅澤俊明, 杉山淳二, 山本浩之編, 海青社, 2011, pp. 413-417.
- 12) 伊藤和貴, 藤田弘毅, 「イソプレノイド」, “木質の形成”, 福島和彦, 高部圭司, 船田良, 梅澤俊明, 杉山淳二, 山本浩之編, 海青社, 2011, pp. 417-422.
- 13) 横田信三, 「生体防御」, “木質の形成”, 福島和彦, 高部圭司, 船田良, 梅澤俊明, 杉山淳二, 山本浩之編, 海青社, 2011, pp. 449-454.
- 14) 谷田貝光克 (1991) 木材の化学と利用技術 II, 日本木材学会編, 東京, pp. 13-20.
- 15) Suzuki et al. (2019) *De novo* transcriptome analysis of needles of *Thujopsis dolabrata* var. *hondae*. *Plant Biotechnol* 36: 113-118.
- 16) Lau and Sattely (2015) Six enzymes from mayapple that complete the biosynthetic pathway to the etoposide aglycone. *Science* 349: 1224-1228.
- 17) Munakata et al. (2016) Molecular evolution of parsnip (*Pastinaca sativa*) membrane-bound prenyltransferases for linear and/or angular furanocoumarin biosynthesis. *New Phytol* 211:332-344.
- 18) Cong et al. (2013) Multiplex genome engineering using CRISPR/Cas9 systems. *Science* 339: 819-823.
- 19) Takeda et al. (2019) Lignin characterization of rice *CONIFERALDEHYDE 5-HYDROXYLASE* loss-of-function mutants generated with the CRISPR/Cas9 system. *Plant J* 97: 543-554.

著者プロフィール



鈴木 史朗 (Shiro Suzuki)

＜略歴＞ 1997年京都大学農学部林産工学科卒業／2002年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了、博士（農）／同年木質科学研究所（現在：生存圏研究所）非常勤研究員／2004年日本学術振興会海外特別研究員（派遣先：米国ノースカロライナ州立大学 Vincent L. Chiang 研究室）／2006年生存基盤科学研究ユニット助教／2010年生存圏研究所助教、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞抽出成分生合成機構の解明とその応用、木質バイオマス形成機構の解明とその応用。オリジナリティのある「おもろい」研究をしたい。＜趣味など＞登山、植物観察、音楽鑑賞。

脱炭素社会のための持続可能な農業

－ 作物生産と再生可能エネルギー生産の両立 －

柴田 大輔^{1,2*}

Sustainable Agriculture in the Decarbonizing Society : Co-production of Food and Energy

Daisuke Shibata^{1,2*}

概要

農業は、田畑の耕運、農作物の収穫、温室や保存庫での温度管理、使用する肥料の製造過程などに化石燃料由来エネルギーを大量に消費しており、気候変動の要因である二酸化炭素を大気に放出している。さらに、農業分野は温室効果がより高いメタンなどのガスも大量に放出している。温室効果ガスが原因となり引き起こされる気候変動が人類活動に深刻な影響を与えるとの懸念から、化石燃料に依存しない社会（脱炭素社会）に向かうために、あらゆる産業で再生可能エネルギーの導入が進んでいる。本稿では、バイオエコノミー、サーキュラーエコノミー、公共投資、ESG投資、RE100、SDGsをキーワードにして農業に再生可能エネルギーを導入することの意義を述べる。近年、太陽光発電コストが急激に下がり、化石燃料発電コストよりも安くなっていることから、従来のバイオマス由来エネルギーを農業に導入する議論だけでは不十分であり、太陽光発電由来エネルギーを導入することの技術的課題を述べ、再生可能エネルギー駆動型農業（再エネ駆動農業）を提案する。最後に、再生可能エネルギーの導入は農村を中心とした地域コミュニティを活性化する可能性があり、京都大学が提唱する持続可能な農業に向けたグリーンエネルギーファーム活動を紹介する。

1. はじめに

野菜、穀物などの農作物は二酸化炭素が光合成で固定化されたものであるが、食品としてすぐに消費され二酸化炭素を放出するので、大気中の二酸化炭素の増減にはほぼ影響しない。むしろ、現代農業においては、田畑を耕運するためのトラクターや農作物を収穫するためのコンバインの運転、肥料の製造、温室や保冷库での温度管理、農産物の運搬などに化石資源由来のエネルギーを消費しており、他の産業と同様に、農業全体としては二酸化炭素を大気に放出している。さらに、二酸化炭素よりも温室効果が高いメタン、一酸化二窒素を水田・畑から大量に放出している。

産業革命以来、化石燃料の大量燃焼によって大気中の二酸化炭素濃度が上昇し、その温室効果によって、大気温度が上昇し、気候変動のリスクが高まっている。その結果、大規模な災害の発生や農作物の不作による飢餓など、人類活動への様々な悪影響が懸念されている。2015年に大気温度の上昇を

2019年7月3日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所 森林代謝機能化学分野、²同エネルギー理工学研究所 複合化学過程研究分野。

* E-mail: shibata.daisuke.h93@kyoto-u.jp

産業革命以前に比べて2°Cまでに抑えることを目標にした国際的な枠組み「パリ協定」が採択された。全ての産業において、化石燃料の代替となる再生可能エネルギーの導入に向けた取り組みが始まっており、農業も例外ではない。

農業は、先進国であれ発展途上国であれ、複雑な課題が多い産業である。単なる技術的、経済的な要因だけでなく、地域文化、環境・景観保全などの要因が関わり、食料安全保証の面では国際的、政治的な側面もあるので、単純な議論には馴染まない。最近、農業に参入あるいは興味を示す企業が多くなっているが、単に作業効率を上げるだけでは解決できない場面が多い上に、制度上の制約も多く、企業の参入は容易ではない。日本においては、少子高齢化、収益性の確保の難しさなどがあり、後継者不足により、農業維持が困難になっている地域も多々ある。中山間地などでは、農業の衰退は地域コミュニティの消滅につながっている。

農業生産プロセスに必要とされるエネルギーを再生可能エネルギーで代替できれば、二酸化炭素放出量の削減に貢献するだけでなく、農産物の栽培コストの抑制による農業収益の向上、余剰の再生可能エネルギーが得られる場合は、その売買により収益性がさらに向上する可能性がある。農業にバイオガス発電などの再生可能エネルギーを導入することが地域再生につながることを農業経済学者村田武氏（九州大学・金沢大学名誉教授）は指摘している¹⁾。

パリ協定が採択された2015年を前後して、海外では風力発電と太陽光発電のコストが化石燃料での発電コストを下回るようになり、今では再生可能エネルギーが最も安い電力源になっている。本稿では、最近の国際情勢の中で農業に再生可能エネルギーを導入することの意義を述べ、農業生産に太陽光発電を組み込む技術的可能性、および、再生可能エネルギー駆動型農業について解説する。再生可能エネルギーの導入は農村を中心とした地域コミュニティを活性化する可能性があり、持続可能な農業生産に向けて産官学と連携している京都大学グリーンエネルギーファーム活動も紹介する。

2. 脱炭素社会に向けた農業とエネルギーを取り巻く状況

世界は脱炭素社会に向かって大きく舵を切っており、農業に再生可能エネルギーを導入することは必然的に要請される。化石資源依存社会から脱炭素社会へ移行する国際情勢の中で農業とエネルギーがどのように位置付けられているのかを関連するキーワードごとに紹介する。

2.1 気候変動リスク

気候変動は食料生産に悪影響を及ぼす可能性が高い。地球の温暖化が進むと農作物の栽培適地が変わり、生産量の確保が難しくなる。世界人口は、2050年には100億人を超えるとの国連の予想があり、現在にも増して、深刻な飢餓が懸念されている。飢餓は、負の連鎖として貧困、紛争など社会の様々な不安要因を引き起こし、人類活動に大きな影響を及ぼす。

現代農業は大量の化石資源エネルギーに依存しているので、省エネと再生可能エネルギーの導入が必要であり、さらに、温室効果が高い農業由来のメタン、一酸化二窒素の放出を抑制する技術開発や今後の温暖化に適応した作物の育種なども必要である。

2.2 バイオエコノミー

2009年にOECD（経済協力開発機構）は、新たな経済の枠組みとして「バイオエコノミー」(<https://www.oecd.org/futures/long-termtechnologicalsocietalchallenges/42837897.pdf>)を提唱した。生物資源（バイオマス）やバイオテクノロジーをベースにした経済活動をバイオエコノミーとしているが、化石資源に依存した社会から脱炭素社会に移行する際の経済体系であるとの広い意味合いで使われる場合も多い²⁻⁵⁾。植物バイオマス由来の製品は使用後の燃焼で二酸化炭素を放出したとしても光合成によって植物に再吸収されるので、大気中の二酸化炭素濃度を上昇させないという炭素循環の性質（カーボンニュートラル）があることがバイオエコノミーの考え方の根底にある。

2009年以降、各国はバイオエコノミー政策を打ち出しているが、欧州では農業とエネルギー問題が

しっかりと組み込まれている場合が多い。一方、日本ではバイオエコノミーへの対応が遅れた。その背景として、2011年3月に東日本大震災による福島原発事故が起こり、エネルギー政策が混乱していたことが考えられる。この状況への危機感から、経済産業省の働きかけでバイオエコノミー調査委員会が立ち上がり、2017年にその報告書が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から公表された（https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201708/20170000000796.html）。その後、政府、産業界（産業競争力懇談会など）での議論が深まり、日本政府は2019年6月21日にバイオ戦略を閣議決定した（<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/dai5/siryosai-2.pdf>）。しかし、農業、バイオ製品製造へのエネルギー問題が言及されておらず、今後の対応を期待したい。

2.3 サークュラーエコノミー

今までの経済活動では物質循環は必ずしも十分には配慮されてこなかったが、持続可能な社会の構築には、経済活動に関わる全ての物資を循環させる必要がある。農業では、例えば、リン酸肥料は資源量が限られ、特定の地域のみで算出するリン鉱石から製造されるので、循環的に使うべきである。農産廃棄物をメタン発酵させた後に残る液体（消化液）には、リン酸、窒素、カリウムなどの肥料成分が含まれており、田畑に散布することによって循環的に再利用できる。

2.4 公共投資、ESG投資、RE100

脱炭素社会への移行は容易ではないので政策レベルや産業界の支援が必要である。アメリカ農務省（USDA）では、化石資源由来の製品とバイオ由来の製品がある場合、後者を優先する BioPreferred プログラムを定めている（<https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/>）。バイオ由来製品はコスト高であることが多いので、このような政府の後押しはその製品を作る産業を育てるために必要である。欧州でもこの仕組みが導入されている。政府が税金を使って、通常製品よりも高い価格で買い上げているので、国民の理解が必要であり、広報活動が重要である。

産業界では、環境（Environment）、社会（Society）、企業統治（Governance）を重視した企業に対する ESG 投資が広がっており、世界持続的投資連合によれば 2018 年の ESG 投資は世界で約 31 兆ドルである（日本経済新聞 2019 年 4 月 28 日）。ESG 投資では、単なる目先の収益ばかりでなく、社会に対する責任を取れる企業が将来的に生き残れるとの判断がなされており、脱炭素社会に資する企業活動への投資が活発化している。天然ガスより二酸化炭素排出量が多い石炭火力への風当たりは強く、投資撤退（ダイベストメント）まで起こっている。今後は、農業への再生可能エネルギーの導入を後押しする農業技術分野への ESG 投資も広がるだろう。

自社が企業活動で使う全てのエネルギーを再生可能エネルギーに代替することを宣言する企業活動を支援する RE100 プロジェクト（<http://there100.org/re100>）に参加する企業は、Google などの大手企業を中心として増え、2019 年 6 月の時点で 185 社が宣言している。ドイツでは「100%再生可能エネルギー地域」づくり運動が農村で行なわれている⁶⁾。

2.5 SDGs

国連は SDGs（持続可能な発展目標、Sustainable Development Goals）として、2030 年までに達成すべき 17 項目を定めている。産業革命以降、化石資源の大量消費を原動力として人類の富が増加した反面、格差、貧困、紛争などが負の側面として顕在化しており、SDGs はこれらの解消を目指していると言える。ESG 投資では SDGs を達成する姿勢を評価している場合が多い。発展目標の多くは農業問題、エネルギー問題に直接的、間接的に関係している。

3. 農業での再生可能エネルギー生産

農林水産分野での温室効果ガスの排出量は日本の総排出量の 2.8%であるが、その 9 割はメタン、一酸化二窒素であり、二酸化炭素の放出量は 0.3%である。二酸化炭素の放出の内訳は農林業と水産業が

ほぼ同じ割合である (<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-53.pdf>)。農林水産業がGDPに占める割合が1.1%であることを考えると、温室効果ガスの排出が多い産業であると言える。メタン、一酸化二窒素は慣行農法の改善などによる削減が試みられている。本稿では、農業分野への再生可能エネルギー、特に太陽光発電によるエネルギー生産に焦点を当てる。以下で述べるように、農地での太陽光発電のポテンシャルは大きく、農業以外の分野での二酸化炭素排出削減にも貢献できることの意義は大きい。

農林水産省の資料 (<http://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/attach/pdf/index-118.pdf>) によると、再生利用困難な荒廃農地 (18.3 万ヘクタール) で太陽光発電を行うと年間 1,347 億 kW 時の発電が可能になると推定している。この値は国内総電力量の 13% ぐらいに相当する。本稿で述べるように、荒廃農地以外でも農地を使つての太陽光発電は可能であるので、農地 450 万ヘクタール (国土面積 3,780 万ヘクタールの 11.9%) の一部を使つた太陽光発電のポテンシャルはかなり高い。農林水産省は、再生可能エネルギーの導入を通じて、農山漁村の活性化と農林漁業の振興を一体的に進めて行くとの方針で、実際の事例などを HP で公開している (<http://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/index.html>)。

従来の農業への再生可能エネルギー導入は、農産物であるバイオマス由来エネルギーに限られていた。しかし、太陽光発電のコストがここ数年で急激に下がっているため、土地利用の面で競合するバイオマス生産との関係性を整理する必要がある。

以下では、同じ面積の土地を使うのであれば太陽光発電の方が有利であることを示す。ただし、バイオマス発電は肥料成分の循環、地域での雇用創出などの要素があり、必ずしも二者択一ではないことも指摘する。さらに、農作物生産 (バイオマス生産) と太陽光発電の競合関係を緩和する技術である営農型太陽光発電の課題を整理し、新たな技術開発の方向性として、再生可能エネルギー駆動型農業 (再エネ駆動農業) を提案する。

3.1 バイオマス利用と太陽光発電のエネルギー比較

植物バイオマスとして蓄えられる太陽光エネルギーは地上に届く日射量の 1% 未満であることが多い。光合成の効率、植物体の呼吸量などの計算から、維管束植物のエネルギー蓄積量の理論値は 4~6% 程度と見積もられるが、理想的な栽培条件下でも 3% ぐらいが上限であり、実際にはそれよりかなり低い⁷⁾。バイオマス量が多い飼料用イネ品種の場合、栽培期間を半年として年間の乾物収量、年間の全日射量から計算すると、太陽光エネルギーの蓄積は 0.6% 程度である。バイオマス生産には耕運、施肥、収穫、搬出にエネルギーを使うので利用できる正味のエネルギー量はさらに少ない。

一方、同じ条件で太陽光発電を行った場合、メガソーラー発電 (年間 60 万 kW 時/ha) の例では、年間の全日射エネルギー (日本の平均値: 1400 万 kW 時/ha) の 4% ぐらいが電力になっている。太陽電池製造に投入したエネルギーが生産したエネルギーと同じになるペイバックタイムは独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電研究センターによると、欧州では結晶シリコンで 1.5~2.0 年とされている (https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/supplement/supplement_1.html)。太陽電池の設置、保守にもエネルギーが必要だが寿命は 20~30 年程度なので、バイオマスに比べてかなり有利である。

海外では、太陽光発電コストは急激に下がり、2013 年で石炭火力 (約 11 円/kW 時)、2015 年にはガス火力 (約 6 円/kW 時) と同等になり、現在、最も安いエネルギー (約 5 円/kW 時) となっている (米投資銀行ラザード、日本経済新聞 2019 年 7 月 6 日)。

国内では、太陽光発電はまだ高コストであるが、同じ土地面積を使つて再生可能エネルギーを導入するのであれば、バイオマスよりも太陽光発電を利用の方が効率も経済性も高い。

ただし、バイオマス利用とは農産物利用そのものであり、農産物廃棄物、食品廃棄物からバイオガス発電でエネルギーを取り出すことには意義がある。農産物生産に投入したエネルギーの回収だけでなく、バイオマスに含まれる肥料成分を消化液の形で取り出し、田畑に還元することは資源循環を保つばかりでなく、肥料の製造工程で使われるエネルギーの節約にもなっている。さらに、それらのプ

ロセスで雇用が創出されることも地域社会にとっては重要である。資源循環の観点から農業でのバイオガス発電の実情に関しては参考文献 8 が詳しい。

バイオマス由来エネルギーは固定価格買取制度での買取価格が太陽光発電に比べて高いためにバイオマス発電が増えている。以前、ドイツでは高い売電収入を期待して、バイオマス発電のためだけの家畜飼料用トウモロコシ（デントコーン）栽培が広がり、農業体系が歪む事態になったが、現在では固定価格買取制度依存であれば農産廃棄物に限定されている⁹⁾ 国内では、バイオマス発電施設を設置したが、バイオマス収集で行き詰まっている例が多い（朝日新聞 2018 年 12 月 12 日）。バイオマスのエネルギー利用では、資源循環や熱利用などを考慮し、太陽光発電なども取り入れたシステム設計、地域住民との同意形成が大切だろう。

バイオマスから液体燃料を生産する研究開発が世界的に行われてきた。しかし、風力・太陽光発電コストが下がり、液体燃料で走るエンジン車から電気自動車（EV）へのシフトが現実味を帯び、エネルギー収支が厳しいバイオ燃料の研究は下火になってきた。ただし、バイオ燃料製造に必要なエネルギーを風力・太陽光発電エネルギーで代替できれば、バイオ燃料そのものが再生可能エネルギー保持体（エネルギーキャリア）になるので、自動車の全走行距離でのバイオ燃料コストが EV に搭載するエネルギー保持体である蓄電池コストと同等程度になれば、エンジン車が EV と共存していく可能性もある。

3.2 作物栽培と両立する太陽光発電

作物栽培と太陽光発電は太陽光エネルギー摂取のために広い面積の土地を使う点において競合しているが、以下で示すように、競合を避ける、あるいは、妥協点を探ることは可能である。

3.2.1 栽培していない期間の利用

田畑を一年間を通して使っているケースは比較的少なく、水田などは冬季に使用していないケースが多い。この期間だけを利用した可動式の太陽光パネルを設置することも理論的には可能である。ただし、降雪が多い地域での設置には工夫が必要だろう。

施設園芸の場合、冬季に加温の為にエネルギーを大量に使うので、もし、冬季に栽培していない田畑が近くにある場合には、加温に太陽光発電のエネルギーを使うことも可能かもしれない。

田畑の未利用期間を再生可能エネルギー生産に使うための装置などを設置して使うには、農地利用に関する農地法の制限を理解しつつ、実際の農地運用を管理している各市町村の農業委員会などとの調整が必要だろう。

3.2.2 波長選択性太陽電池の利用

作物（植物）の光合成は地上に到達する太陽光波長の一部を使っているに過ぎないので、それ以外の波長を使った発電は可能である。筆者は、科学技術振興機構（JST）低炭素プログラム ALCA プロジェクト「コンビナトリアルバイオケミストリーによる太陽電池有機素材の開発（研究代表者：柴田大輔）」で、京都大学化学研究所若宮淳志准教授（現、教授）、村田靖次郎教授との共同研究で、光合成で主に使われる 660nm 付近の光を透過し、それ以下の波長で発電する新規な色素増感型太陽電池を開発した。この太陽電池を透過する光でモデル植物シロイヌナズナを栽培することが可能であることを実験室レベルで確認した。

京都大学附属農場では、光を透過する有機薄膜太陽電池パネル（三菱化学社製）を、トマト栽培温室の内側に配置して、トマトの収量などを検証した。この研究は環境省からの受託研究「光透



写真 1 有機薄膜太陽電池パネルを貼った温室でのトマト栽培（京都大学附属農場提供）

過型有機薄膜太陽電池を用いた施設園芸における CO₂ 排出削減技術」(平成 27～29 年度、代表者：京都大学 土井元章)として行われた(写真 1)。研究の詳細は環境省 HP (https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cpttv_funds/pdf/prod2017/p20170303.pdf) で知ることができる。

3.2.3 営農型太陽光発電(ソーラーシェアリング)

田畑に支柱を立て、3m ほどの高さに適当な隙間を開けて太陽電池パネルを配置し、その隙間から差し込む太陽光で作物を栽培する方法があり、ソーラーシェアリングと呼ばれている(写真 2)。一時的に太陽電池パネルで光が遮られて影ができて、太陽の日周運動によって影が移動するので、作物には一定量の光が当たるとの理屈である。この方法の考案者らは、植物の光合成には光飽和現象があり、光飽和点を超える太陽光を利用して発電すると主張している(http://www.maff.go.jp/j/shokusan/kankyoseisaku/s_midorimizu/pdf/h24f02.pdf)。

しかし、この主張は植物生理学の観点からは誤りである。光飽和現象は一枚の葉に光を当てた時の生理現象を観察しているに過ぎない。上位の葉を通過、反射した光は下位の葉で使われるので、植物体全体(群落)では光飽和は起こりにくい。多くの農作物は十分な日射を必要とするので、ソーラーシェアリングは植物が受け取るべき光を遮って、その分を電気エネルギーに変換しているに過ぎない。

植物が受け取る太陽光エネルギーが少なくなると収量は低下する。稲作で実験した例では、太陽電池パネルの遮光率が 20% の場合、米収量は 2 割減少するとの報告がある¹⁰⁾。この報告書では 50% の遮光率まで実験しているが、遮光率にほぼ反比例して収量が減少している。営農発電をする場合に、光を散乱するフィルムを利用してレタスの収量を上げる研究もされている¹¹⁾。日陰でよく育つ植物の場合(例えば、アシタバ、園芸用ジャノヒゲなど)では、遮光することにより、強光障害が抑えられるので、その場合は有効な方式だろう。この方式の営農発電を普及させるためには、科学的な根拠に基づいた様々な作物の生育データの集積が必要である。

ソーラーシェアリング方式の太陽電池パネルは建築基準法の適用を受けていない構造物であり、強風で太陽電池パネルが飛散する可能性がある。軟弱土壌である田畑、水田に鉄パイプを 1m ほど差し込んで支柱全体を支えており、風耐力の観点からの基準作りが必要だろう。

ソーラーシェアリング農法は農地法に抵触する可能性があったが、農林水産省は 2013 年 3 月 31 日に農林水産省農村振興局長からの各都道府県知事などへの通達(農振第 2657 号)の中で、この種の営農型農地発電を一定の条件下で許可した。通達では、農地法に従った一時転用許可が必要であること、容易に撤去可能な簡易な構造であること、収穫量が 2 割以上減少していないこと、品質が著しく低下していないこと、農業委員会が監視していること、一時転用は 3 年以内であり、農業委員会の許可により延長が可能であることなどが決められている。3 年の一時転用期間は、2018 年 5 月に 10 年以内に延長された。

営農型太陽光発電(ソーラーシェアリング)は農林水産省の資料によれば、平成 28 年度の時点で 1,269 件の農地転用許可実績がある。電力は固定価格買取制度を利用して売電していると考えられる。再生可能エネルギーに関する固定価格買取制度では申請時の売電価格が 20 年間は法律で保障されているので、太陽光パネル設置のような高額投資のリスクを下げ、再生可能エネルギー導入を促している。一方、ソーラーシェアリングは農作物栽培と再生可能エネルギー生産が両立することが前提であるが、前者よりも後者での収益性が高いので、農作物栽培への営農意欲の低下が懸念される。営農型太陽光発電の背景、制度、実施状況は参考文献 12 が詳しい。



写真 2 営農型太陽光発電による野菜栽培
(撮影：著者、2013 年)

3.2.4 農業に太陽光発電を導入する課題

太陽光発電の固定価格買取制度での買取価格が毎年下がり、2019年度では営農型太陽光発電のような小規模発電（10kW-500kW）では14円（+税）/kWhとなっている。ソーラーシェアリングでは、作物の種類にもよるが、一般的に作物の収穫量が低下するので、売電により得られる金額よりも作物販売による収益減が大きいと営農型太陽光発電をする意味がなくなる。固定価格買取制度は再生可能エネルギーを導入するための仕組みなので、導入が進んだ段階では制度そのものがなくなる。今後は、固定価格買取制度に依存せず、化石資源エネルギーに依存していた農作業を再生可能エネルギーで代替することが必要だろう。農作業には、田畑の耕運、施肥、草刈り、農薬散布、収穫、運搬、保存管理など多様な形態のエネルギー消費があり、すぐに代替される訳ではないが、技術開発、補助金制度の導入などを多面的に検討する必要がある。

3.2.5 再生可能エネルギー駆動型農業（再エネ駆動農業）の提案

営農型太陽光発電について述べたが、この農法は土地利用で競合するバイオマス生産と発電の折衷案である。日陰でよく育つような日照量の要求度が低い作物の場合はこの方法は一举両得となるが、通常の作物では光要求性が高く、太陽光パネルで遮光すると収量が低下する（前述）。

一方、化石燃料よりも太陽光発電コストが低いことを念頭において、農業収益を維持、あるいはそれ以上に増やすために、農地を栽培部分と発電部分に分け、発電したエネルギーを使って作物の生産性を増加させる技術が開発できれば、画期的である。以下の説明のために、営農型太陽光発電と区別するために”再生可能エネルギー駆動型農業（再エネ駆動農業）”と仮に命名する。

再エネ駆動農業は、農地法の農地利用に関する制約があり、現在は実際に行うことはできない。しかし、大学や研究機関が技術開発して、実際に有効であることを示せば、営農型太陽光発電の例があるように（前述）、農地法の運用を変えればよい。

作物は栽培の過程で様々な環境ストレス、例えば、強光、乾燥、加湿、病害などを受けているために収量が下がる。技術的には様々な方法でこれらのストレスを回避できることが知られているが、何らかのエネルギーが必要になる。そのエネルギーを太陽光発電で供給することは理論的には可能である。現在の植物生理学、作物栽培学の基礎研究のレベルは高く、しかも、国内の植物研究者のレベルが高いことは文部科学省科学技術・学術政策研究所（NISTEP）の「サイエンスマップ 2016—論文データベース分析（2011-2016年）による注目される研究領域の動向調査—」にも示されており、技術開発を推進すれば、再エネ駆動農業は可能になるだろう。

このような技術開発が進めば、理論的には、農地以外の土地で得られた再生可能エネルギーを農業に供給し、農業生産を上げることも可能であるが、農家がエネルギーを購入する必要があり、農業収入の向上に繋がらないことに留意すべきである。

4. 分散型再生可能エネルギーを農業に導入する意義

本稿では、脱炭素社会に向かう世界情勢の中で、農業に再生可能エネルギーを導入するケースとして、営農型太陽光発電と新たな提案として再エネ駆動農業を紹介した。今後、再生可能エネルギーが農業に使われると、余剰電力が地域に供給される可能性が高い。環境経済学者によれば、地域への再生可能エネルギー導入は地域の自立と活性化を促すとされているので^{13,14}、農業が抱える様々な問題の解決に貢献すると期待できる。

世界の農業経営の85%が2ヘクタール未満（日本では80%）の農地を耕作し、世界の食料生産の8割を支えている¹⁵。これらの家族農業は、食料生産だけでなく、地域の環境・景観保全に重要な役割を果たしており、農業を営む地域・農村が文化継承を担っている。世界の家族農業では多くの場合、貧困に直面している。一方、日本の農村では少子高齢化が進み、農地の集約化、大規模農地が増え、家族農業は減少する傾向にある¹⁶。近年、ロボット、IOT技術、ドローン技術、人工知能（AI）技術

など先端技術を使って農業の非効率性を改善する「スマート農業」(<http://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/>)を農林水産省が進めているが、この新しい農業技術は大規模農業が経済的競争力を保つためには必須ではある。しかし、地域コミュニティを支える家族農業を営む農家は収入が低く、置き去りにされている。農業での再生可能エネルギー生産が可能になれば、余剰電力からの収入によって生活が向上するだろう。また、余剰電力による新産業が地域で起これば、地域コミュニティが維持されるだろう。このようなシステムが日本で成功すれば、貧困と向き合っている世界の家族農業への技術供与にも繋がり、SDGsに貢献できる。

環境省は、第五次環境基本計画（2018年閣議決定）に含まれる「地域循環共生圏」構想に沿った政策を進めている（<https://www.env.go.jp/seisaku/list/kyoseiken/index.html>）。この構想は、地域資源を最大限活用し、自立・分散型の社会を形成しつつ、地域の活力が最大限に発揮されることを目指す考えであり、SDGsや政府が進めるSociety5.0の実現にもつながるとされている。国連は2019年から2028年を「家族農業の10年」と位置付けて、家族農業の関わる施策を進めているが、農業と再生可能エネルギー生産を両立させる考え方は「地域循環共生圏構想」、「家族農業の10年」と基本的なコンセプトで重なっている部分も多い。

京都大学附属農場は、2017年に大阪府高槻市から京都府木津川市に移設された際に、持続可能な次世代型農業のあり方として、自然エネルギー利用型農業モデルの構築を掲げており、農業生産と再生可能エネルギー生産を両立させる農業をグリーンエネルギーファームと定義し、研究や教育活動を行ってきた（<http://www.farm.kais.kyoto-u.ac.jp/research04>）。夏季集中実習「グリーンエネルギーファーム論と実習」を開校し、農業に興味を持つ学生の教育を行っている。

京都大学農学研究科はグリーンエネルギーファーム構想を社会実装するために、NTTデータ経営研究所にコンサルタント業務を委託してグリーンエネルギーファーム産学共創パートナーシップを立ち上げた（2017年10月、<https://www.nttdata-strategy.com/gef/>）。このパートナーシップでは京都大学以外の大学の研究者も参加し、民間、民間同士の共同開発などを進めている。

5. おわりに

近年、太陽光・風力発電コストが化石資源発電よりも安くなり、脱炭素社会に向けた動きが加速化している。地域分散型エネルギーである再生可能エネルギーが農業に導入され、地域の活性化に繋がるためには、農業でのエネルギー利用に関する新たな技術開発が必要である。京都大学のグリーンエネルギーファーム構想は、農学、工学、エネルギー科学、情報、環境、経済の専門家が交流するとともに、社会実装するために企業と連携しており、今後の進展を期待したい。

6. 謝辞

本稿の前半で紹介したバイオエコノミーの動向などに関しては、一般財団法人バイオインダストリー協会坂元雄二氏、藤島義之氏（現在、NEDO）、(株)三菱ケミカルリサーチ増田宏之氏らとの意見交換を踏まえて記述しており感謝いたします。後半で紹介した内容は、京都大学グリーンエネルギーファーム構想の立ち上げに際し、以下の京都大学職員（敬称と職位は省略）北島宣、中崎鉄也、土井元章、富永達、白岩立彦、松村康生、河田照雄、中野龍平、滝澤理仁、間合絵里、鍋島朋之、山本衛、篠原真毅、野平俊之、石原慶一、尾形清一、植田和弘、西嶋一欽、若宮淳志、吉川暹、松山隆司（故人）、小川正昭、松井孝之（現在、農林水産省）、喜多山篤（現在、東京大学）、橋本伸、高橋和彦の各氏、および、大阪府立大学太田大策氏、東北大学本間香貴氏・金子俊郎氏との議論の中で至ったものであり、ここに感謝いたします。また、グリーンエネルギーファーム産学共創パートナーシップに関する部分では、NTTデータ経営研究所の齊藤三希子氏（現在、EY Advisory & Consulting Co., Ltd.）らに感謝いたします。

参考文献

- 1) 村田武, "日本農業の危機と再生 地域再生の希望は食とエネルギーの直産に", かもがわ出版, 2015, pp. 37-56.
- 2) 五十嵐圭日子, バイオエコノミーによるゲームチェンジを私たちはどう受けるか: 欧州の動向に対する一考, バイオサイエンスとインダストリー誌, vol.75, pp.344-348, 2017.
- 3) 増田宏之、小林 幹, 欧州バイオエコノミー関連政策と今後, アグリバイオ誌, vol.2, pp.1164-1167, 2018.
- 4) 坂元雄二, 国連「持続可能な開発目標 (SDGs)」に貢献するバイオプラスチックの普及促進, バイオプラジャーナル誌, vol.70, pp.5-9, 2018.
- 5) 柴田大輔, バイオエコノミー社会におけるバイオマス利用の動向, バイオサイエンスとインダストリー誌, vol.77, pp.64-67, 2019.
- 6) 村田武, "ドイツ農業と「エネルギー変換」", 筑波書房, 2013, pp.1-77.
- 7) Hamlyn G. Jones, "植物と微気象", 久米篤・大政謙次監訳, 森北出版, 2017, pp. 398-401.
- 8) 河原林由基・村田武, 第1章 農協が取り組める畜産バイオガス発電, "自然エネルギーと協同組合", 村田武・河原林由基編著, 筑波書房, 2017, pp. 1-30.
- 9) 河原林由基, エネルギー作物ではなく食品残渣でバイオガス発電 (ドイツ・バイエルン州のヘーグル農場), "自然エネルギーと協同組合", 村田武・河原林由基編著, 筑波書房, 2017, 99-107.
- 10) 本間優, 土肥哲哉, 吉田好邦, 水稻栽培における営農型太陽光発電の実証とシミュレーション, エネルギー・資源, 37, 23-31, 2016.
- 11) Tani, A., Shiina, S., Nakashima, K., Hayashi, M., Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels, *Journal of Agricultural Meteorology*, 70, 139-149, 2014.
- 12) 坂内久・河原林由基, 第2章 農協が取り組める営農型太陽光発電 (ソーラーシェアリング), "自然エネルギーと協同組合", 村田武・河原林由基編著, 筑波書房, 2017, pp. 31-58.
- 13) 高橋真樹, エネルギーでまちづくり 地域と市民が担うこれからのエネルギー事業, 世界 別冊 再エネ革命 RE100 日本は変わるか?, 岩波書店, No. 907, 170-177, 2018.
- 14) 諸富徹, 地域経済循環と成熟型都市経営, "人口減少時代の都市", 中公新書, 2018, 160-178.
- 15) 河原林由基, 家族農業をSDGsの主役に-国連「家族農業の10年」を迎えるにあたって-, 農林総研 調査と情報, 第70号, pp.20-21, 2019.
- 16) 大泉一貫, "2025年 日本の農業ビジネス", 21世紀政策研究所編, 講談社現代新書, 2017, pp. 3-12.

著者プロフィール



柴田 大輔 (Daisuke Shibata)

<略歴> 1983年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(農学博士) / 1984年米国 Purdue 大生化学部門ポスドク / 1987年三井植物バイオ研究所主任研究員 / 1999年かずさ DNA 研究所主席研究員 / 以降、同部長、農工大、奈良先端大、東北大、京大、岐阜大にて客員教授、京都大学農学研究科、同エネルギー理工学研究所、同生存圏研究所にて特任教授、バイオインダストリー協会理事、現在に至る。<研究テーマと抱負> 分子生物学、バイオマス変換、太陽電池。エネルギーの視点で農業と地域の活性化に貢献したい。<趣味など> Raspberry Pi で "iBad" を自作。

宇宙の音

大村 善治^{1*}

Sound of Space

Yoshiharu Omura^{1*}

概要

宇宙空間では可聴域の周波数をもつ様々な電磁波が発生し、その一部は地上まで伝わってきます。そして、その電磁波をアンテナで受信し、オーディオアンプに通すと鳥の鳴き声のような音となって聞こえます。この電磁波によって、磁気圏に侵入する太陽風粒子の一部が相対論的なエネルギーにまで加速され、地球の周りに放射線帯が形成されていることが分かっています。宇宙の音が伝える宇宙環境の変動について紹介します。

1. はじめに

地球周辺の宇宙空間で「宇宙の音」が作られる仕組みを解説します。宇宙空間は、気体がイオンと電子に分離してできるプラズマという状態の大気で満たされています。プラズマは非常に希薄な気体なので、その振動は空気中の疎密波が耳の鼓膜に伝わるように音として伝搬することができません。しかし、電子とイオンが振動することで電流が作られて電磁波が発生します。その発生した電磁波の一部は地上にまで伝わってきてアンテナで受信することができます。この信号をオーディオアンプにいとスピーカーから音となって聞こえます。我々が聴くことの出来る音の周波数は数十ヘルツから1万数千ヘルツまでの振動数ですが、それと同じ周波数帯の電磁波が宇宙空間で生成されています。

2. ジオスペースの構造

では、地球の周りの宇宙空間であるジオスペース(geospace)について説明します。図 1 はこれから説明する太陽風、磁力線、磁気圏、プラズマ圏、放射線帯が描かれています。象徴的に描かれており、実際の大きさのスケールは正しくないのでご注意ください。

2.1 太陽風

地球の周りのプラズマ環境を支配しているのは太陽からやってくる太陽風(Solar Wind)です。太陽の中心では核融合反応が起こっており、そのエネルギーによりプラズマと磁場が作られて太陽系空間に広く流れ出ています。プラズマの中ではアルフベン波(Alfven wave)が存在していて電磁界が振動するのですが、太陽風は、その波の伝搬速度よりも大きな数百 km/s の速度で流れており、超音速の状態になっています。時折、コロナ質量放出(Coronal Mass Ejection: CME)という現象が起こり巨大なエネルギーが大きなプラズマの塊として放出され、それが地球にやってくると地球の磁場が乱れる磁気嵐(magnetic storm)という現象がおこります。

2019年7月16日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存科学計算機実験分野.

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

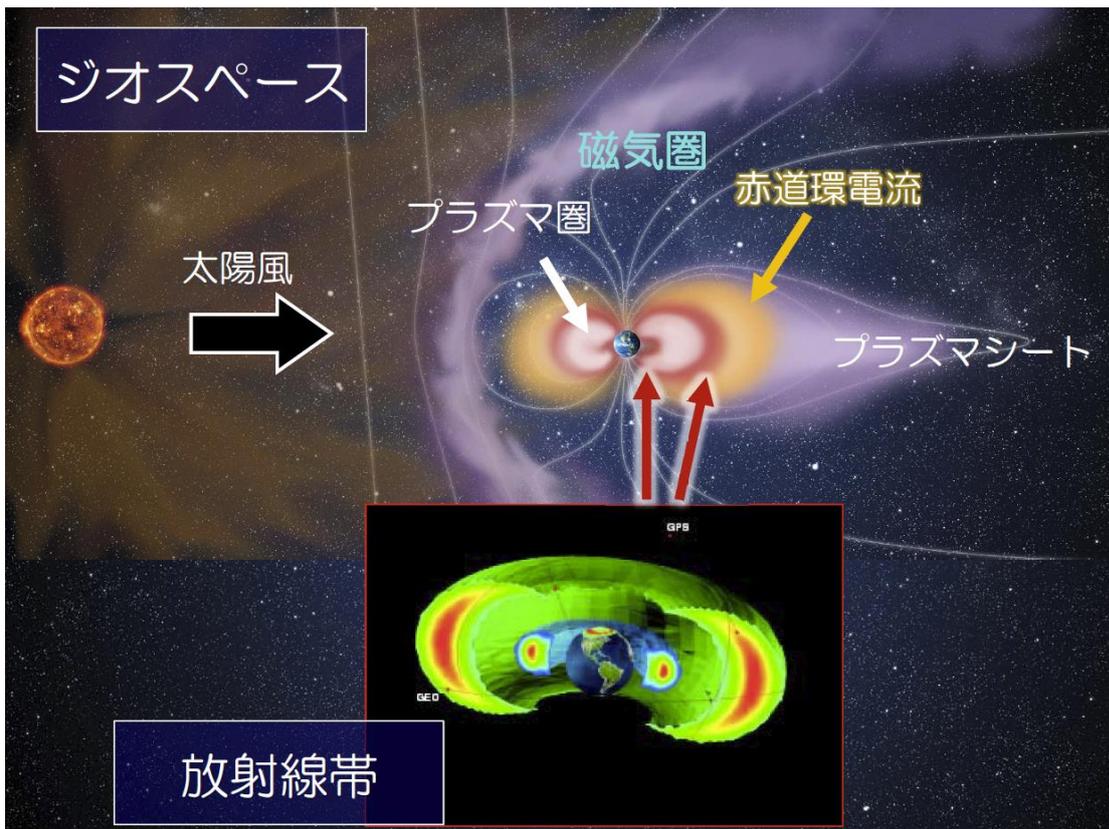


図 1 : ジオスペース

2.2 磁気圏

地球周辺の宇宙空間は、高速の太陽風が地球の固有磁場に吹き付けており磁気圏(magnetosphere)という領域ができています。これはプラズマの電子やイオンが地球磁場の磁力線を横切ることができないという性質があるためです。地球に吹き付ける太陽風はその前面で遮られて減速し、超音速が亜音速になってバウショック(bow shock)と呼ばれる衝撃波が地球磁気圏の前面に現れます。また太陽風の圧力を受けて太陽側の地球磁気圏は歪められ、反太陽側には、プラズマシート(plasmashet)と呼ばれる磁場が弱くてプラズマ密度が高くなった部分と共に磁力線が長く伸びた磁気圏尾部(magnetotail)が形成されています。

2.3 プラズマ圏

特に地球に近い領域は、地球の大気が電離してできた密度の高いプラズマが存在しており地球と一緒に自転しています。この領域をプラズマ圏(plasmasphere)と呼びます。このプラズマ圏に重なるようにして、赤道環電流 (ring current) ができており、この電流はプラズマ圏の冷たいプラズマよりも数百倍の高いエネルギーをもっています。これは太陽風の一部が磁気圏に流れ込んだものです。この高いエネルギーの粒子によって様々なプラズマ波動がつくられており、その波動によってさらに粒子の一部が加速され、またさらに数百倍の非常に高いエネルギーをもつ放射線帯が形成されています。

2.4 放射線帯(ヴァンアレン帯)

1958年に打ち上げられた 익스プローラー1号に積んだ粒子計測器によってアイオワ大学のヴァンアレン教授が発見したことから、放射線帯(radiation belts)はヴァンアレン帯(Van Allen belts)とも呼ばれています。光速に近い相対論的なエネルギーをもつ電子からなる外帯と高エネルギーのイオンからなる内帯に分けることができます。イオンは電子よりも約1800倍も重たいために、それを捕捉するには

より強い磁場が必要です。そのために地球に近い磁場の強い領域に高エネルギーのイオンが捕捉されて内帯が形成されています。

3. VLF 波動観測

ジオスペースには可聴域の周波数をもつ特徴のある電磁波が発生・伝搬しています。VLF 電波というのは 3 kHz から 30 kHz までの周波数の波のことを指します。波長が 10 km から 100km あるので、電離層で反射して地球の反対側までも伝搬するため、かつては船舶との通信やナビゲーションに使われていました。現在は衛星通信があるので使われていませんが、波長が長いので海の中までも電波が浸透するので、現在でも潜水艦に信号を送るのに使われています。

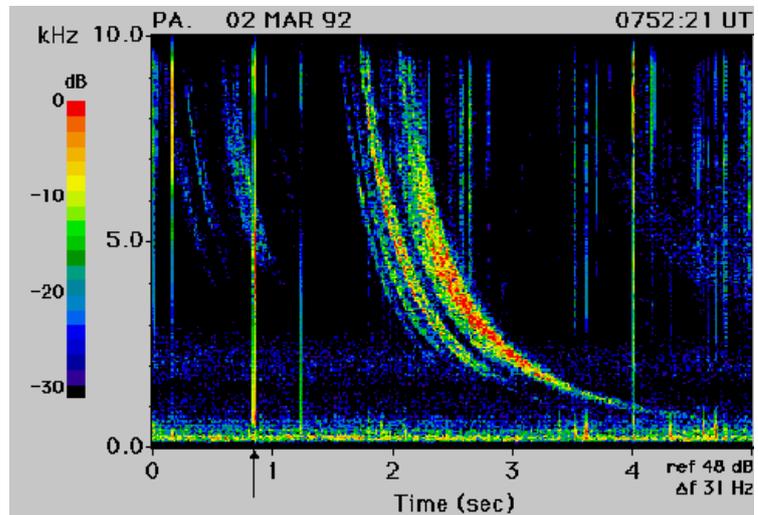


図 2：ホイッスラー (Web of Stanford Univ.)

3.1 ホイッスラー

地球の南半球で発生した雷から放射される幅広い周波数の電波の一部が地球の磁力線にガイドされて北半球へと伝搬してきたものを地上で受信することができます。この電波の周波数スペクトルの時間変化を示すのが図 2 です。ダイナミックスペクトルとも呼ばれます。宇宙空間を磁力線で伝搬する波の速度が周波数の高い部分程速く、周波数の低い部分が遅いため、反対半球では高い周波数から徐々に低い周波数へと変化する電波が受信されます。このような電波はホイッスラー(whistler)と呼ばれ、長距離で電話が使われ始めた 19 世紀の終わりごろから、通話にこのような音が混ざることから知られていましたがその原因は謎でした。また、地上 100 km の上空に電波を反射する電離層が存在していることも、1924 年のアップルトンによる実験で証明されていましたが、さらに宇宙空間にまで電離気体であるプラズマ空間が広がっていることは明確にはわかっていませんでした。宇宙空間が真空ではなくプラズマで満たされていることが検証できたのは、1957 年に人類初の人工衛星スプートニク 1 号が打ち上げられて始まる宇宙時代になってからですが、英国のストーレイ(Storey)は 1953 年の学位論文でそれを理論的に予測しています。ストーレイは宇宙空間のプラズマの存在を仮定することでホ

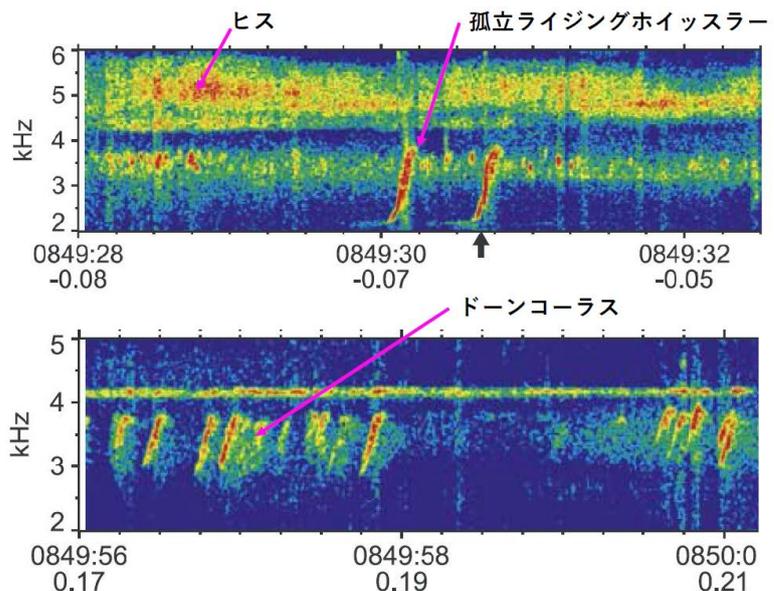


図 3：クラスター衛星で観測された VLF 電波 (Santolik et al., JGR, 2003)

イッスラーの謎がとけることを示しました。

3.2 磁気赤道域から発生する VLF 電波

ストーレイの論文の付録には、雷起源のホイッスラーとは異なる電波が受信されることが報告されています。ヒス(hiss)、孤立ライジングホイッスラー(isolated rising whistler)、ドーンコーラス(dawn chorus)等の記述がみられます。宇宙時代に入ってから、人工衛星で VLF 電波の観測が多くおこなわれてきています。図 3 に示すのは、4 つの衛星が編隊飛行しているクラスター衛星によって得られたデータです。これらの電波の信号をオーディオアンプに入れると、ヒスは連続的な特徴のないノイズのような音として聞こえ、孤立ライジングホイッスラーは雷ホイッスラーとは逆に周波数が滑らかに上昇する音、またドーンコーラスはその名の通り短いライジングホイッスラーが連続的に繰り返されてあたかも夜明けに鳴く鳥の声のように聞こえます。

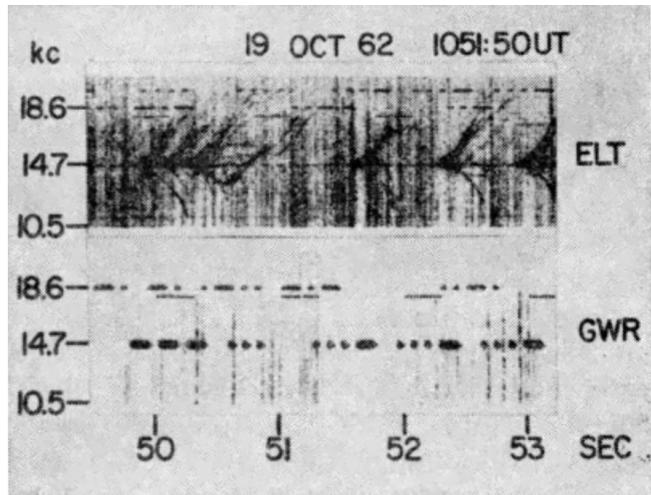


図 4：モールス信号からの VLF とリガード放射 (Helliwell, et al., JGR, 1964)

3.3 VLF トリガー放射

図 4 は、スタンフォード大学の VLF 電波の研究グループが、北半球から出されたモールス信号を南半球緯度 51 度にあった米国海軍の船上で受信した際に、モールス信号が引き金となって周波数変動を伴う新しい波が励起されることを発見したものです。この周波数変動は、ドーンコーラスの周波数変動と殆ど同じであることから、人工的に放射した電波からコーラスを励起する実験が盛んにおこなわれました。南極のサイプル(Siple)基地から VLF 電波を放射し、それを磁気共役点で受信する実験が 1970 年代から 1980 年代前半にかけて盛んにおこなわれました。周波数が上昇するライジングトーンのみならず降下するフォーリングトーン、下がって上がるブックと呼ばれるエミッションも観測されています。磁気圏に電波を入力することで、そこから性質の異なる新しい電波が出てくるというのは非線形現象の典型的な例です。

ここで励起される周波数が変動するコーラス放射は、高エネルギー電子とのサイクロトロン共鳴することによって共鳴電子からエ

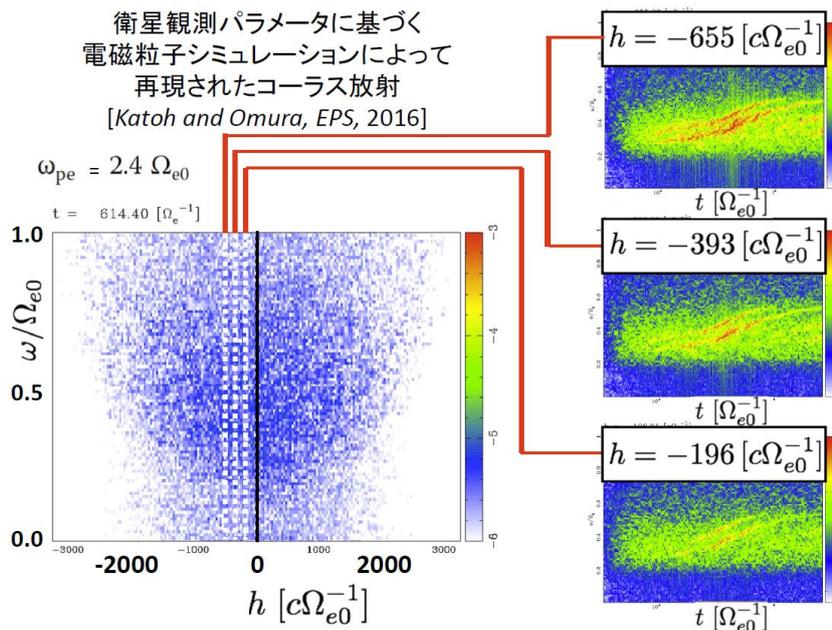


図 5：コーラス放射の計算機シミュレーション

エネルギーを受けとって成長します。このとき、高エネルギー電子の一部は磁力線に対するピッチ角が減少して磁力線にそって高緯度に向かって走り極域の大気に降り込みオーロラを発生させていることが分かってきました。また、共鳴電子の一部は、波がつくる電磁界のポテンシャルに捕捉されさらに光速に近い速度まで加速されて相対論的なエネルギーを獲得し放射線帯の電子フラックスを形成しています。

4. 宇宙のドーンコーラス

4.1 コーラス放射の計算機シミュレーション

1970年代後半にホイッスラーモード不安定性(whistler mode instability)の計算機シミュレーション研究が始まり、その後、スーパーコンピュータと数値計算手法の発展を見て、現在ではコーラス放射やホイッスラーモードトリガー放射を再現することができるようになりました。図5の計算機シミュレーションは、電磁界の基本方程式と多くの高エネルギー電子の運動方程式を解くことにより再現したものです。このようなコーラス放射を再現する計算機シミュレーションに2007年に成功し、そのデータ解析を通じて理論研究も大きく進展しました。

このシミュレーションでコーラス放射を発生させている要因は、地球の磁場モデルです。地球の内部には棒磁石に相当する磁場が作られており北極付近にS極、南極付近にN極があります。棒磁石の周りにはN極からS極に向かう磁力線が出来ており、ダイポール(双極子)磁場と呼ばれています。この磁場の強度は地球の赤道面付近で最小となり磁力線に沿って極域に移動すると次第に強くなります。特に赤道面付近では、この磁力線に沿った磁場強度の変化は二次曲線によって近似することができます。赤道付近でコーラス放射が発生し、それが南北に磁力線に沿って伝搬する様子を、縦軸を周波数、横軸を磁力線沿いの距離 h としてプロットしたのが図5です。同時に異なる周波数でコーラス放射が発生しています。黒い実線が赤道面の位置を表しており、そこから少し離れた距離にある白い点線で示した異なる3点で観測されたコーラス放射のダイナミックスペクトルを右側にプロットしています。赤道面付近で発生した波の振幅が磁力線に沿って赤道から南の方向($h < 0$)に伝搬するにつれて次第に大きくなっています。

赤道面から北側($h > 0$)に現れている波動は、コーラスとヒスが混じったようなスペクトルを示しています。コーラス放射は一つの Paket の中で周波数が連続的に変動する波動のように見えますが、その振幅は大きく変動し多数のサブパケットが集まって構成されています。一つ一つのサブパケットは、振幅が成長・飽和・減衰という変化を示し、その間、周波数が次第に上昇します。面白いのは、振幅は成長と減衰を繰り返すのに周波数は徐々に上昇してゆくということです。一つのサブパケットは、図6に示すような振幅と位相からなる単一の波形です。波形を振動の幅を表す振幅と三角関数の積で表します。三角関数は回転する位相とともに-1と1の間を滑らかに変動します。この位

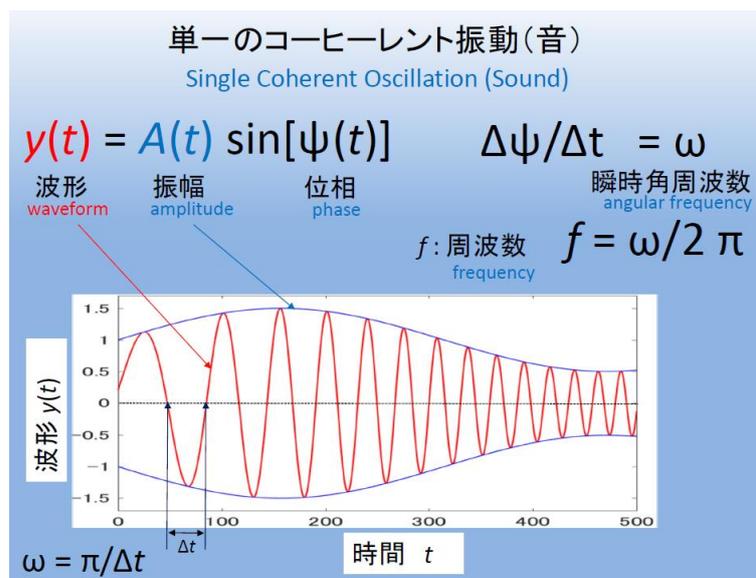


図6：単一の振幅と位相からなる波形

相が規則正しく滑らかに連続的に変動する波をコーヒーレントな波と呼びます。微小な時間 Δt で変化する位相 $\Delta \phi$ を考え、その比をとることで瞬時角周波数を求めることができます。

4.2 コーラス放射の衛星観測

コーラス放射のサブパケット構造は衛星観測で得られたコーラスの波形データを解析することで確かめることができます。図7はヴァンアレンプローブ(Van Allen Probes)という NASA の衛星で観測されたものです。波動を構成している磁界3成分の波形データを計測しており、外部磁場に垂直な波形の振動から振幅(図7a)と瞬時周波数(図7b)を計算してプロットしています。瞬時周波数の各点は波形がゼロを横切って符号が反転する時刻を表しており、そのゼロを横切る時系列データの間隔が半周期であるとみなして周波数を計算しています。また、図7cに示すように波形の時系列のデータをフーリエ変換することによりスペクトルが得られます。水平の黒線 $1/2f_{ce}$ は、電子のサイクロトロン周波数(f_{ce})の半分の周波数を示しています。コーラス放射はホイッスラーモード波と呼ばれる波動ですが、 $1/2 f_{ce}$ を境にして伝搬特性が変化します。そのため、 $1/2 f_{ce}$ の上側には別の場所から伝搬してくる波が入る場合があります。周波数の異なる2つのコーヒーレントな波が同時に存在するために瞬時周波数に揺らぎが生じています。しかし、それでも周波数は大体滑らかに上昇し、 $1/2 f_{ce}$ を越えて周波数上昇が続いています。これはコーラス放射が発生している領域に非常に近いところで衛星が波動を観測していることを示唆しています。通常、衛星は発生領域から離れたところでコーラス放射を受信する場合があります。その場合、 $1/2 f_{ce}$ における伝搬特性の変化および $1/2 f_{ce}$ 付近で波動が減衰するために周波数スペクトルにギャップが現れます。この $1/2 f_{ce}$ の周波数の上側と下側でコーラス放射を upper-band chorus、lower-band chorus と分けて呼んでいます。

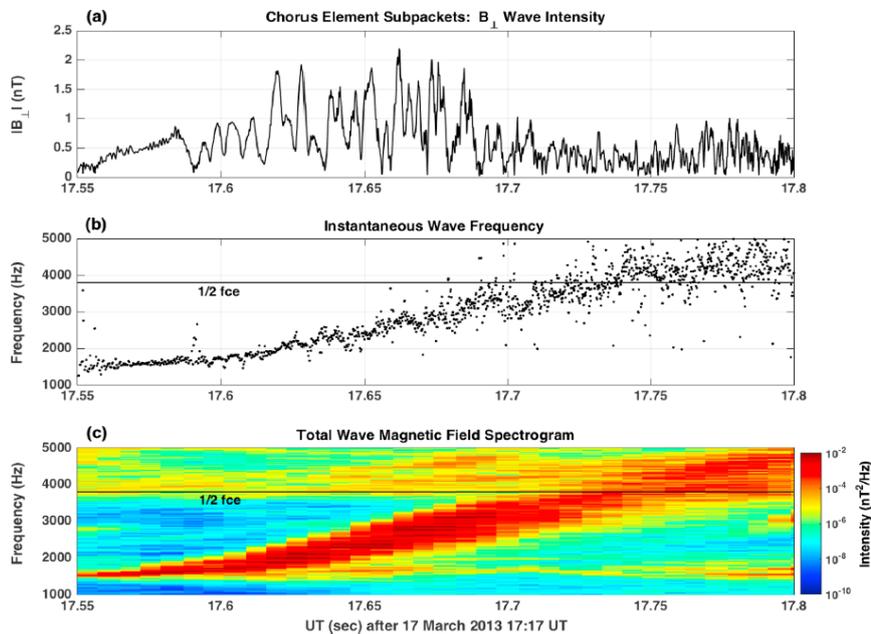


図7 : Van Allen Probe 衛星で観測されたコーラス放射のサブパケット構造 (Foster et al., JGR, 2017)

4.3 コーラス方程式

コーラス放射を構成しているサブパケットの成長過程には、コーヒーレントなコーラス放射とサイ

クロトロン共鳴する電子が、速度位相空間(velocity phase space)において、波の電磁界によって非線形な粒子軌道をとるために共鳴電子が欠乏した電子ホール(electron hole)が作られ、そのために共鳴電流が流れて周波数変動し、同時に粒子からエネルギーを受け取って振幅が成長することがシミュレーション研究で確認できています。約 10 年前に周波数変動と波動の振幅の関係式および振幅変動を表す非線形成長率の式を導くことに成功し、この 2 つの式をコーラス方程式と呼んでいます。このコーラス方程式を積分することで得られる振幅と周波数の変動が、シミュレーションで再現されたコーラス放射や磁気赤道付近で観測されたコーラスの波形と良い一致を示すことが多くの論文で検証されています。

4.4 コーラス放射の閾値振幅

コーラス方程式を解いて非線形成長が起こる条件として、波動の振幅が閾値振幅(threshold amplitude)よりも大きいことが必要です。この閾値振幅は、赤道域で発生したコーラス放射が磁力線にそって伝搬しつつ非線形成長するための条件、および磁気赤道において振幅が成長する条件から導かれます。よって、コーラスを発生させるにはこの閾値振幅より大きな振幅の波が磁気赤道域に入射することが必要です。この波をトリガー波(triggering wave)と呼びます。コーラスは、背景プラズマの熱雑音が高エネルギー電子の温度異方性による線形成長率で増幅される波がトリガー波となって発生しているものです。一方、VLF トリガード放射は、人工的に放射された波がトリガー波となってコーラスと同じ非線形成長が起こります。

4.5 コーラス放射の最適振幅

コーラス方程式を解くと波動の振幅は大きな非線形成長率のために急速に成長します。通常、閾値振幅付近では非線形成長率は線形成長率よりも大きくなります。しかし非線形成長率は振幅の関数でもあり、大きな振幅に対しては小さくなります。非線形成長率は速度位相空間における電子ホールが周波数上昇と共に最大の非線形成長率を与える形状となることを前提として導かれており、その形状が維持できる振幅を求め、それを最適振幅(optimum amplitude)と呼びます。その周波数依存性のグラフと実際に観測されているコーラス放射の振幅やシミュレーションで再現されたコーラス放射の振幅の周波数依存性のグラフが良く一致することが多くの事例で報告されています。このことから、非線形成長により形成される各サブパケットの飽和振幅値が最適振幅に対応していると考えられます。

4.6 コーラス放射の数値モデル

磁気赤道において閾値振幅より少し大きいトリガー波を初期値としてコーラス方程式を積分することにより、コーラス放射の先頭のサブパケットを成長させます。振幅が最適振幅に到達すると、非線形成長率の符号を反転させることにより成長から減衰に切り替えてコーラス方程式を解き、閾値振幅付近まで振幅を下げることで一つ一つのサブパケットを生成します。次のサブパケットも同様に形成しますが、初期周波数は一つ前のサブパケットの最終周波数を使います。この操作を繰り返すことにより、周波数が次第に上昇し $1/2 f_{ce}$ に達した時に、一つの lower band コーラス放射の生成が終了したとみなします。このようにしてコーラスの振幅

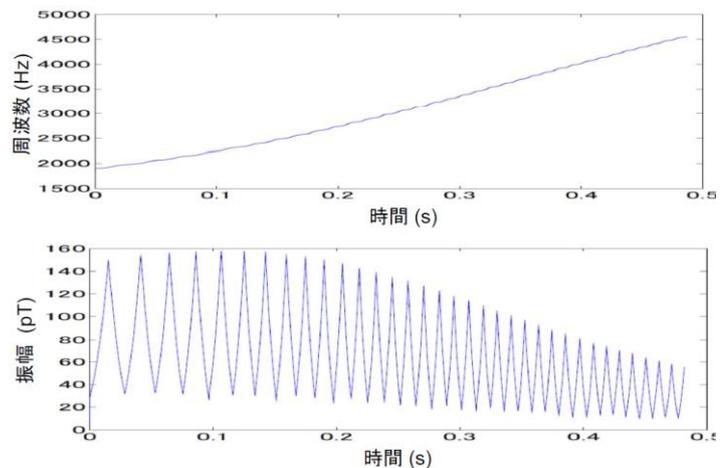


図 8 : コーラスのサブパケット構造の数値モデル

と周波数の変動を再現したものを図 8 に示します。この波形のデータを MATLAB 等の音生成関数に入力すると、コーラスのような音となって聞こえます。

5. インドネシアのドーンコーラス

私は、生存圏研究所の一員ですので、宇宙圏と人間圏との共同研究にも参加しています。宇宙の人工衛星からマイクロ波の電波を使ってインドネシアの広大な早生樹植林のバイオマス量を推定する等の研究をしています。インドネシアの森林の生物多様性を調査している東南アジア研究所の藤田素子さんと一緒に現地調査に出かけることもあります。以前、藤田さんに何を研究しているのかと尋ねたところ「ドーンコーラスです」と応えられて、「私もです」ということで意気投合しました。鳥は、日が昇る 20 分前後に最も活発に聞かれますが、これは鳥の縄張りの誇示だろうと考えられています。英語ではこの夜明け (dawn: ドーン) に聞こえる鳥の鳴き声をドーンコーラスと呼んでおり、これに因んで朝方に宇宙から伝わってくる VLF 電波の中で周波数が変動するものをドーンコーラスと名付けたわけです。

そこで実際に、インドネシアのドーンコーラスと宇宙のドーンコーラスを比べてみようと思い、藤田さんからカリマンタン島で録音した鳥のドーンコーラスのデータを頂いて解析してみました。図 9 の左側にドーンコーラスの振幅、右側に周波数スペクトルを示します。左下の図のように周波数が上昇している部分の振幅を拡大すると宇宙のコーラスと同じくサブパケット構造があることがわかります。さらにそのサブパケット構造をもった周波数上昇の成分の前には、トリガー波に相当する一定周波数の波形も存在していることもわかります。これは、鳥の声帯を通じてエネルギーを放出する機構が、宇宙のコーラスと共通する物理過程をもっている可能性を示唆しており、地上の鳥の発声機構が非線形な物理現象として記述でき、その特性を利用することで鳥の声から鳥の種類を自動認識する等の応用が考えられます。

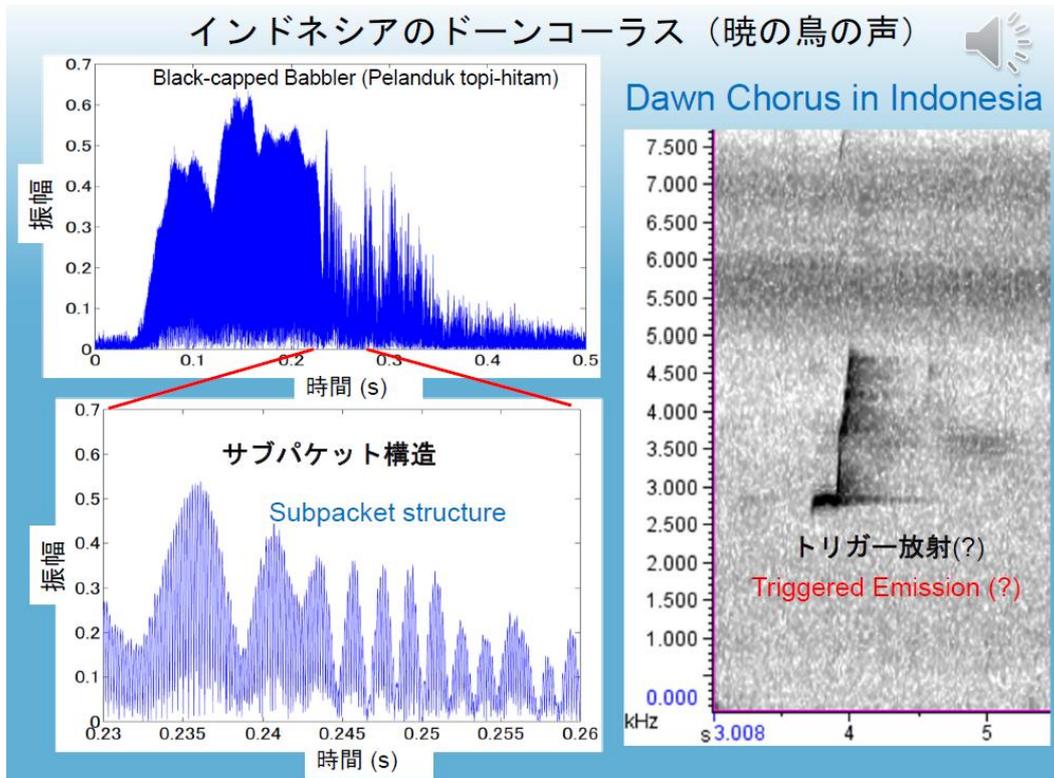


図 9：インドネシアのドーンコーラスの波形解析(左)と周波数スペクトル(右)

6. おわりに

コーラスやオーロラは磁場のある惑星で発生する現象です。実際に木星や土星には強い磁場があり磁気圏が形成されてオーロラやコーラスが観測されています。過去半世紀余りの研究で、宇宙の音に対する我々の理解は着実に進んできています。コーラスが高エネルギー電子を効率良く相対論的なエネルギーにまで加速することがわかってきており、地球を取り巻く放射線帯の変動の物理が議論されています。本稿で紹介した観測例やシミュレーションは現在進行中の研究プロジェクトの成果です。これらの研究テーマには未だわからない問題が多く残されています。

謝辞

図1の作成にあたっては中村紗都子氏に協力して頂きました。図9の鳥の音声データと周波数スペクトルは藤田素子氏から提供して頂きました。

参考文献

- 1) Helliwell, R. A., J. Katsufakis, M. Trimpi, and N. Brice, Artificially stimulated Very-Low-Frequency radiation from the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 69, 2391-2394, 1964.
- 2) Omura, Y., D. Nunn, and D. Summers, Generation processes of whistler-mode chorus emissions: Current status of nonlinear wave growth theory, *AGU Monograph "Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere"*, 10.1029/2012GM001347, 2012.
- 3) Omura, Y., D. Nunn, H. Matsumoto and M. J. Rycroft, A Review of Observational, Theoretical and Numerical Studies of VLF Triggered Emissions, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 53, pages 351-368, 1991.
- 4) Santolík, O., D. A. Gurnett, J. S. Pickett, M. Parrot, and N. Cornilleau-Wehrin, Spatio-temporal structure of storm-time chorus, *J. Geophys. Res.*, 108(A7), 1278, doi:10.1029/2002JA009791, 2003.
- 5) Storey, L. R. O., An investigation of whistling atmospherics, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A246, 113-141, 1953.

著者プロフィール



大村 善治 (Yoshiharu Omura)

<略歴> 1980年京都大学工学部電子工学科卒業／1985年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了(工学博士)／同年京都大学工学部助手／1988年京都大学大超高層電波研究センター助教授／2000年同大学宙空電波科学研究センター教授、2004年同大学生存圏研究所教授 現在に至る。<研究テーマ>宇宙プラズマ中の非線形波動粒子相互作用の研究、熱帯人工植林のリモートセンシング。<趣味など>少林寺拳法。毎日1万歩以上歩くこと。

「オゾン層破壊の科学アセスメント：2018」から見る 最近のオゾン層研究の動向とその保護に向けた取り組み

塩谷 雅人^{1*}

Recent research results and activities for the protection of ozone layer based on “Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018”

Masato Shiotani^{1*}

概要

最近、「オゾン層破壊の科学アセスメント」の最新刊(Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018)が公開された。ここでは、そのアセスメントレポートで取り上げられている主要な話題を簡単に紹介して、オゾン層研究の動向とその保護に向けた取り組みの現状について紹介する。

1. はじめに

今年(2019年)2月、世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)と国連環境計画(UNEP: United Nations Environment Programme)が中心となって、おおよそ4年に1度のペースで発刊される「オゾン層破壊の科学アセスメント」の最新刊(Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018¹⁾)が公開された。これまでに同名のアセスメントレポートとしては、2014、2010、2006、2002、1998、1994、1991、1989版が存在する。さらに遡ると、オゾン層に関するアセスメントレポートとして、Atmospheric Ozone 1985 - Assessment of our Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change²⁾がある。これらのアセスメントレポートは、オゾン層あるいはオゾン層の存在する成層圏(高度約15~50km)領域の科学に関する研究成果の集大成となっており、いわゆる政策立案者(policy maker)に対する科学的な知見の重要な源泉情報としても有効に利用されてきた。

私自身、大学院生の頃Atmospheric Ozone 1985に接する機会があつて、このレポートの中の、特に大気の輸送過程と水蒸気分布について興味を持って読んでいたことを思い出す。ただし、内容としては、そのタイトルにOzone Depletionの文字がないことからわかるように、南極オゾンホール(南極オゾンホール)の話題については明示的に述べられていない。いわゆる南極オゾンホール(南極オゾンホール)の発見論文は1985年のFarmanらによるNature誌に掲載された論文³⁾とされているが、Atmospheric Ozone 1985では(おそらく発刊ぎりぎり情報差が差し込まれたのか)、このFarman論文において最も有名な、英国ハレーベイ観測基地でのオゾン全量観測から近年顕著なオゾン減少が見られる図と、1段落(10行ちょっと)ほどの観測事実の記述のみが収録されている。一方で、オゾンホールを考える上で鍵となるオゾン破壊の張本人であるCFC(クロロフルオロカーボン)について、オゾン層を破壊しうる可能性を持った人為起源物質として多くのページが割かれ、その観測事実や数値モデル結果について記述されている。しかしながら、のちに理解されるようになったCFCに端を発するオゾン破壊をもたらすメカニズムについてはいっさいの記述がなく、

2019年7月16日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 大気圏環境情報分野.

* E-mail: shiotani.masato.8a@kyoto-u.ac.jp

今となってみるとオゾンホール研究の幕開けとなった時期のレポートとしてなんとも不思議な感じのものとなっている。

今回めぐりめぐって、2018年版のアセスメントレポートの中の「全球的なオゾン分布の過去と現在そして未来」に関する章の共著者の一人として取りまとめに参加する機会を得た。以下ではScientific Assessment of Ozone Depletion: 2018を通して見た最近のオゾン層研究の動向とその保護に向けた取り組みについて紹介したい。

2. オゾン層破壊の科学アセスメント：2018のポイント

アセスメントレポートには毎回総括要旨(Executive Summary)がつけられ、科学者のみならず政策立案者がこのレポートの概要を把握することを容易にしている。概要とはいえ各章のまとめも含めて今回のものは70ページにもおよぶが、特に冒頭部分にあるハイライトの中から、今回のレポートで特に強調されていると私自身感じるものとして以下の3点を取り上げたい。なお、この章ではそれらの点について簡単に述べたあと、章を改めて個別のポイントについて詳しく記述する。

まず、今回のレポートで初めて、オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書(1987年に採択)のもとで進められてきたオゾン破壊物質の削減が実を結び、「オゾン層の回復がはじまった(the start of the recovery of stratospheric ozone)」ことが明瞭に記述された。観測事実としては、1990年代の終わりにかけて減少傾向にあったオゾン量は、2000年あたりから明瞭な減少傾向が見られなくなり、最近では若干の増加ともとれる傾向が見られていた。しかしながら、これまでのアセスメントレポートでは回復傾向に対する記述は慎重で、たとえば一つ前の2014版アセスメントレポート⁴⁾では、「オゾン層が1980年代のレベルに回復可能となっている(enabling the return of the ozone layer toward 1980 levels)」と回復に向けた明確な記述を避けたようにも見えるものとなっていた。今回初めて明瞭な回復傾向について言及したことは、モントリオール議定書にもとづいて遂行されてきた施策が、われわれ人類に大きな成功をもたらしたことを改めて確認したものになっているといえよう。

次に重要な点は、モントリオール議定書の成功は認められるものの、オゾン破壊物質の一つであるCFC-11(トリクロロフルオロメタン: CCl_3F)の放出量が予期せず増加していることを指摘していることである。すなわち、CFC-11の大気中濃度の減少は排出制限の結果から予想される減少量に届かず鈍化しており、これは言い換えるとCFC-11の排出量が想定を上回っていることを示している。2つの独立した観測ネットワークの結果からもこの増加傾向は捉えられており、東アジアからの排出が原因であると推測されている。改めてモントリオール議定書の遵守に向けた取り組みが国際的に認識されるべき時期にきているといえる。

もう一つ、オゾン層保護と気候変動問題、特に温暖化問題との関連を象徴的に表す施策として、モントリオール議定書の改正(キガリ改正)がおこなわれ、その効果についての言及がなされていることがあげられる。モントリオール議定書によってオゾン破壊物質である特定フロン(クロロフルオロカーボン:CFC)は代替フロン(ハイドロクロロフルオロカーボン:HCFCとハイドロフルオロカーボン:HFC)に置き換えていくこととなったが、のちにHCFCもオゾン破壊物質として削減の対象となった。残るHFCについて、実は強力な温室効果気体であることがわかっており、こちらは京都議定書において削減対象となっている。このHFCを新たに議定書の規制対象とする改正提案がキガリ改正で、その効果についての科学的な検証がおこなわれている。

以下では、上記した3つのポイントについて、レポートに取り上げられている図なども交えながらももう少し詳しい記述をおこないたい。

3. オゾン層の過去と現在そして未来

図1は北半球高緯度(北緯63度から北緯90度)と南半球高緯度(南緯63度から南緯90度)でオゾンの減少

が顕著に見られる月、北半球の場合は3月、南半球の場合は10月のオゾン全量の直近までの時系列を描いている(データとしてはさまざまな衛星観測データが組み合わせて用いられている)。オゾン全量とはオゾン量の鉛直積分に比例する値で、おおよそ高度20km付近のオゾン量を代表していると考えてよく、その高度範囲は極域でのオゾン破壊が起こる高度でもある。

いわゆるオゾンホール発見は、南半球高緯度域での10月のオゾン全量が1970年代の後半から顕著に減少していることが1985年に報告されたことに端を発している。一方、北半球高緯度においても(図1を見てもわかるように)、オゾン全量自身南半球高緯度に比べて大きく、程度は小さいもののオゾンの減少傾向を見て取ることができ、南半球極域で起きていたものと同じようなメカニズムで北半球高緯度でもオゾン破壊が起こっていたことがわかっている。

南半球高緯度では(下図)1980年頃から1990年代後半にかけてオゾン量の減少傾向が見られるものの、2000年あたりからは特に明瞭な減少傾向は見られず、近年はやや増加傾向にあるようにも見受けられる。今回のレポートでは、全球で見たオゾン量の変化が2000年あたりで減少傾向は底を打ち、現在は緩やかな増加傾向にあることを統計的に明らかにした上で、2章でも述べたように初めて「オゾン層の回復がはじまった(the start of the recovery of stratospheric ozone)」というメッセージが書き込まれることになった。

ここで、モントリオール議定書以降に実施された施策の結果、いわゆる特定フロン類がこれまでにどのように削減され、それによって今後オゾン層がどのように回復してゆくと考えられているのかについて述べる。図2には(a)特定フロン類の排出量、(b)オゾン破壊に関わる塩素量、(c)全球平均・年平均したオゾン全量、(d)南極域10月のオゾン全量が描かれている。2018年頃までは実際の観測データにもとづいており、それ以降は(a)、(b)については放出シナリオ、(c)、(d)については化学気候モデル(大規模な数値モデル計算結果)にもとづくものとなっている。(c)、(d)の図の中には赤

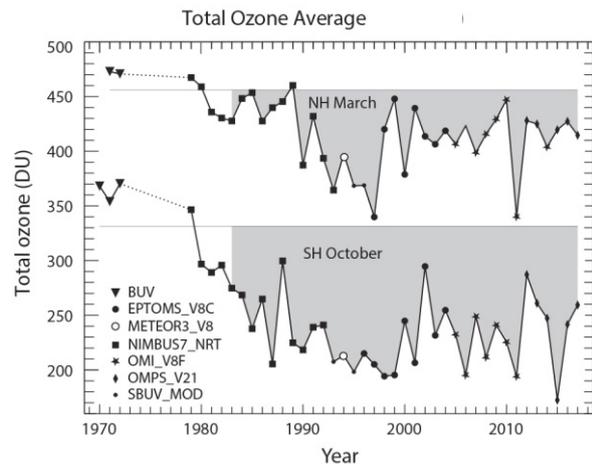


図1：北半球3月、南半球10月の高緯度域(極から63度まで)のオゾン全量の経年変化(アセスメントレポートのFigure 4-4)。

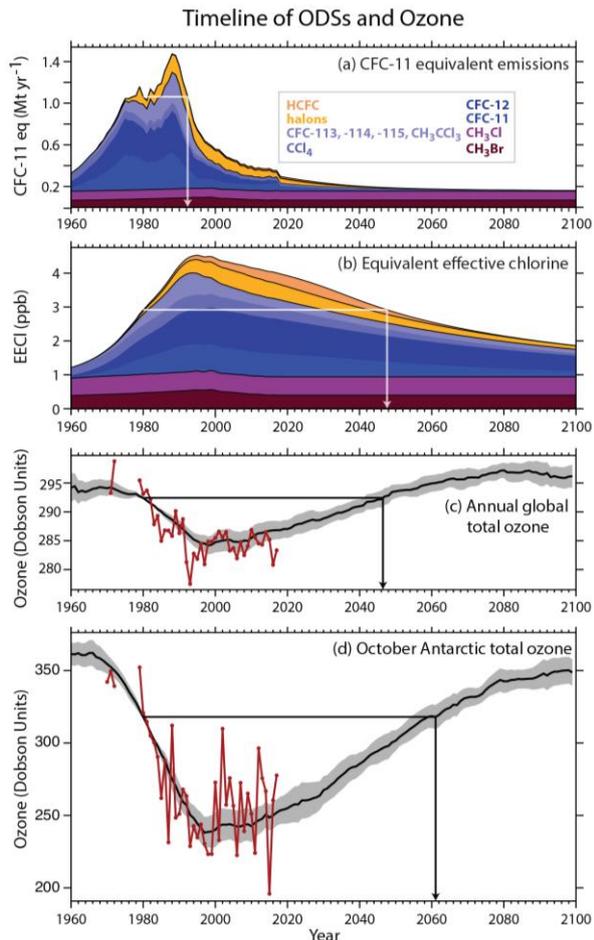


図2：(a)特定フロン類の排出量、(b)オゾン破壊に関わる塩素量、(c)全球平均・年平均したオゾン全量、(d)南極域10月のオゾン全量(アセスメントレポートのFigure ES-1)。

線で観測データにもとづく値がプロットされているが、基本的には図1と同様な時間変化傾向を見取ることができる。

モントリオール議定書は1987年に採択され、1989年に発効したものの、当初の規制はゆるかったため次第に強化され、最終的には特定フロンを中心とするオゾン破壊物質の全廃にまで規制は強化された。(a)、(b)には自然起源の物質も描かれているが、1990年あたりにピークを持つ人為起源のオゾン破壊物質の増加と減少傾向を読み取ることができる。ここで重要なことは、モントリオール議定書の国際的な約束のもとでこれらオゾン破壊物質の排出が削減されたものの(図2(a))、実際にはそれらの大気中での寿命が長いために、オゾン破壊に関わる物質としては成層圏に長時間とどまり続けることである(図2(b))。たとえば大気中に残存するオゾン破壊物質の量が1980年代のレベルに戻るのには2050年頃と予想されており、削減が10年ほどで実現できたのと比べると、その影響はずっと長期間残ることになる。オゾンの回復傾向も、ちょうどこの図2(b)を上下逆さまにしたような形で推移することが化学気候モデル計算からわかっており、オゾン量が1980年の値に戻るのには世界的に見て2050年頃(図2(c))、南極域では2060年頃(図2(d))になると予想されている。

4. 予期せず増加しているCFC-11の放出量

モントリオール議定書が果たした役割として、国際的な合意のもとでオゾン破壊物質の排出を各国が規制してきたことはもちろん最初にあげるべき重要なものであるが、同時にその効果の検証のためにオゾン破壊物質の全球的な観測ネットワークが構築されたことも重要である。排出が規制されている物質の中でも2番目に大きな排出量となっているCFC-11は、過去には冷凍機の冷媒やドライクリーニングの溶剤などとして利用されてきた。排出規制対象として、たとえば日本国内では1995年末に製造が打ち切られ、1999年からは出荷もされなくなっている。図2(a)からもわかるように(下から3つめの薄い青)全球的に見た放出量は急速に減少してきていると考えられていた。ところが近年このCFC-11が予想されるほど減少していない、言い換えると何らかの形で想定外の排出がおこなわれていることを示唆する観測事実が明らかになってきた。

Montzkaらは地上での大気サンプルにもとづく全球的な観測網のデータを用いて、2010年代の初頭あたりからCFC-11の濃度の減少量が小さくなっていること、そしてこれはおそらく想定外の排出の存在が示唆されることを明らかにした⁵⁾。特に近年では、ハワイのマウナロア観測所のデータがしばしば人為起源の大気汚染物質の濃度と高い相関を持つことから、その起源と考えられる空気塊がアジア域から到来している可能性について言及した。さらにRigbyらは、Montzkaらとは独立したデータを加えて、やはり2012年以降CFC-11の減少量が減速していることを示した⁶⁾。これらの観測データをまとめてグラフにしたものが図3である。2006年あるいは2012年からの排出量の予測値が灰色の点と破線で示されているが、観測値(赤と黒)はその上にあって、想定外の排出がおこなわれていることが推測される。ちなみに緑の線で報告されている生産量が描かれているが、こちらは2010年にはほぼゼロになっていた。

さらにRigbyらは、国際的な観測ネットワー

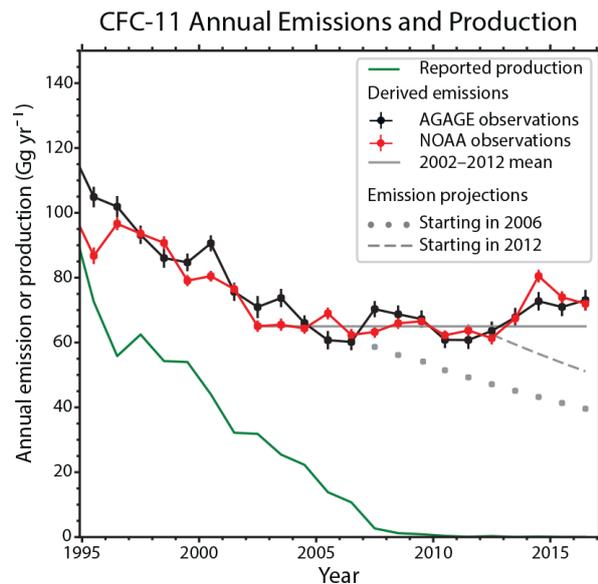


図3：CFC-11の年間放出量と生産量。独立した二つの観測データが示されている(アセスメントレポートの Figure ES-2)。

クのうち、韓国のGosanと日本のHaterumaのデータに注目して、しばしば高濃度のCFC-11が間歇的に観測されること、大気輸送モデルを使った逆計算法による放出域の推定結果によると、中国東部からの放出量が増加しているらしいことを明らかにした。Hateruma(沖縄県・波照間島)は日本の国立環境研究所が運用するモニタリングステーションであり、大陸からの大気の流れの下流域にあって、東アジアからの人為起源大気成分の対流圏内輸送過程を把握するためにも重要な位置を占めていたといえる。Rigbyらの論文には環境研の研究者も含まれており、日本語による詳しい説明が以下のWebサイトにあるので参照されたい。

<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20190521/20190521.html>

5. キガリ改正を受けて

モントリオール議定書が採択されたあと、毎年、議定書の締約国会議が開かれ、さまざまな形で規制の見直しがおこなわれてきた。当初は、CFC(クロロフルオロカーボン)が削減の対象であり、HCFC(ハイドロクロロフルオロカーボン)やハイドロフルオロカーボン(HFC)はフロン代替物質として利用された。しかしほどなく、HCFCも分子構造の中に塩素を含むことから規制の対象となっている。一方で、HFCは分子構造の中に塩素を含まずオゾン層に対する影響はないものの、強力な温室効果気体であることが知られており、2016年ルワンダ共和国の首都キガリで開催された第28回モントリオール議定書会議において、HFCも利用が削減されることとなった。いわゆるキガリ改正である。今まさに、オゾン層保護の問題と温暖化の問題は不可分な関係になってきているといえる。

今回のアセスメントレポートにはこのキガリ改正を受けた温暖化の将来予測について述べられている。図4はその論議のもととなる排出の将来シナリオ(左)とそのシナリオの結果予想される地表気温の上昇に関する将来予測(右)である。削減することなく放っておいた場合(青の範囲)とキガリ改正によって放出を制限した場合、2100年における地表温度上昇は前者で0.3~0.5度と見積もられるのに対して、キガリ改正による排出制限のもとでは0.1度以下になり、パリ協定(2015年採択された気候変動抑制に

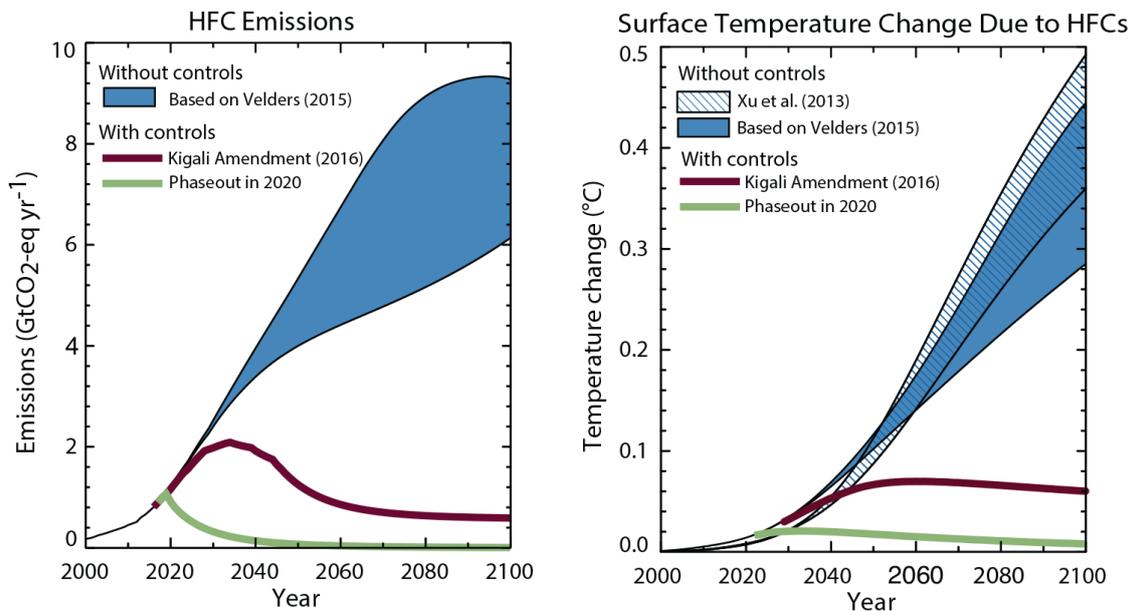


図4：(左) HFCの排出シナリオと(右)全球平均した地表気温の応答(アセスメントレポートの Figure ES-4)。

関する多国間の国際的な協定)が掲げる目標(産業革命前からの世界の平均気温上昇を「2度未満」に抑える)に対して大きな意味合いを持つことが述べられている。HFCはオゾン層破壊とは直接関係のない大気中の物質ではあるが、モントリオール議定書の元でフロン代替として利用が認められてきた物質であり、モントリオール議定書のもとで議論されるべきであるという責務を感じ取ることができる。

6. おわりに

オゾンホールが発見から30年以上の時間が流れたが、この「オゾン層破壊の科学アセスメント」の一連の成果は、科学者のオゾン層保護に向けた責務を改めて感じさせるものとなっている。当初の、定点観測ではあるが長期間の観測データが示した南極域春季のオゾン減少という問題提起のあとは、航空機観測、衛星観測、さらにはモデリング研究によって南極オゾンホールメカニズム解明が進んだ。様々な測定手段で相補的な観測をすることにより、科学者はその謎解きに終止符を打ち、オゾン破壊物質の最終的な全廃にいたる国際的な合意にまで人々の意識を高めることに成功した。またさらに、国際的な合意の成果が本当に実現されているのかを確認・検証するために、フロンに代表されるオゾン破壊物質の長期モニタリングが強化されてきた。今あらためて、オゾンホール問題の謎解きに果たした科学者の役割と、その後の国際的な協力のもとで成し遂げられたオゾン破壊物質の全廃という責任感あふれる人々の貢献が、今後もわれわれ人類が勝ち得た一つの成功体験として語り継がれることに期待したい。

参考文献

- 1) WMO (World Meteorological Organization), (2018): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 58, 588 pp., Geneva, Switzerland.
- 2) WMO (World Meteorological Organization), (1986): Atmospheric Ozone 1985 - Assessment of our Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change. WMO Report No. 16, WMO, Geneva, Switzerland.
- 3) Farman, J. C., Gardiner, B. G., & Shanklin, J. D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature*, 315(6016), 207-210. <https://doi.org/10.1038/315207a0>
- 4) WMO (World Meteorological Organization), (2014): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 55, 416 pp., Geneva, Switzerland.
- 5) Montzka, S. A., Dutton, G. S., Yu, P., Ray, E., Portmann, R. W., Daniel, J. S., et al. (2018). An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature*, 557(7705), 413-417. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0106-2>
- 6) Rigby, M., Park, S., Saito, T., Western, L. M., Redington, A. L., Fang, X., et al. (2019). Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations. *Nature*, 569(7757), 546-550. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4>

著者プロフィール



塩谷 雅人 (Masato Shiotani)

<略歴> 1982年京都大学理学部卒業／1987年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了(理学博士)／同年日本学術振興会特別研究員／同年京都大学理学部助手／1995年北海道大学大学院地球環境科学研究科助教授、1998年同教授／2001年京都大学宙空電波科学研究センター教授／2004年京都大学生存圏研究所教授(配置替え)、現在に至る。<研究テーマと抱負>観測データにもとづくグローバルな大気環境の理解。<趣味など>ちよいと一杯の美味しいお酒。

マイクロ波精密照射による 新規癌治療法開発に向けた基礎的研究

浅野 麻実子^{1*}

A fundamental research on development of novel cancer therapies by microwave irradiation

Mamiko Asano^{1*}

概要

近年、マイクロ波の特殊な加熱機構により、化学反応が通常加熱による反応温度よりも低温で制御できることがわかってきた。著者らは、本現象を生体に応用し、現行の治療温度よりも低温で癌細胞を死滅することができれば、新しいマイクロ波癌治療法として応用可能と考えた。そこで、マイクロ波を精密に照射可能な装置を開発し、癌細胞を低温にて死滅可能なマイクロ波照射条件を明らかにするとともに、死滅経路の解析を行った。本稿では、マイクロ波加熱の原理を概説するとともに、開発したマイクロ波照射装置や癌細胞の死滅メカニズムについて報告する。

1. はじめに

マイクロ波は電磁波の一種であり、熱発生効率の良さが特徴である。医療では、マイクロ波凝固焼灼療法やハイパーサーミアにおいて、腫瘍を高温にする局所癌治療のツールとして使用されてきた。その経緯から、これまでのマイクロ波癌治療は、病巣の高温化を目的として発展してきた。一方で近年、マイクロ波の特殊な加熱機構（スーパーヒーティング・内部加熱・選択加熱等）により、様々な化学反応が通常加熱の反応温度よりも低温で制御できることがわかってきた¹⁾。また臨床現場では、体温に近い低温条件下で行うマイクロ波照射により、腫瘍の酵素失活等の変化が確認されており²⁾、マイクロ波の特殊な加熱機構との関連が示唆されている。そこで著者らは、現行の治療法よりも低温でのマイクロ波照射にて癌細胞の死滅が誘導できれば、病巣周辺にダメージを与えないより緩和な癌治療法として応用でき、治療領域の拡大も期待できると考えた。その第一段階として、マイクロ波の低温照射が癌細胞に与える影響を詳細に解析する必要がある。しかし、世界的に主流のマグネトロン方式のマイクロ波発振器では、周波数や出力、温度上昇の微弱制御ができない。そのため、細胞を低温条件下で一定に保つことができず、詳細な解析が不可能であった。そこで著者らは企業との共同研究により、半導体方式発振器と温度制御可能なアプリケーションを開発し、これらの問題を克服した³⁾。本装置を用いて複数の癌細胞にマイクロ波を照射した結果、低温照射でも細胞死が誘導されることを

2019年7月30日受理。

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

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

突き止めた³⁾。更に、ヒト骨髄性白血病由来株 HL-60 細胞を用いて、マイクロ波低温照射による細胞死経路を解析した⁴⁾。本稿では、マイクロ波加熱の原理について概説するとともに、著者らのこれまでの研究について説明する。

2. 細胞用マイクロ波照射装置の開発

筆者らは、細胞用マイクロ波照射装置として、2.45GHz 半導体発振器を導入したアプリーケーターを開発した(図1)。出力の微弱制御が可能な半導体発振器とアプリーケーターにより、細胞を培養温度である 37°C 条件下で一定に保つことができる。アプリーケーター内のシャーレ設置場所の下部には赤外線温度センサーがあり、シャーレ底面の温度をモニターしている。本装置では、この温度が 37°C を維持した状態となるようマイクロ波を照射することができる。このとき、アプリーケーター内の温度を冷却することで、37°C に維持した状態でも出力を変動することができる。

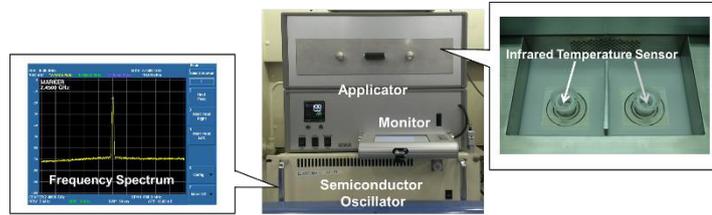


図1：マイクロ波照射装置の外観
(参考文献3の Figure 5 より抜粋)

3. マイクロ波照射における HL-60 細胞のアポトーシス経路の解析

3.1 マイクロ波低温照射による細胞死の経時的変化と細胞周期解析

本検討では、ヒト骨髄性白血病由来 HL-60 細胞を用いて、マイクロ波を 37°C 管理化で照射した際の細胞死経路について解析した。マイクロ波照射は、上記装置を用いた。アプリーケーター内を 12°C に冷却し、シャーレ底面温度が 37°C となるように HL-60 に対してマイクロ波を 1 時間照射した。また、マイクロ波を照射せずに 42.5°C にて 1 時間静置した群を比較対象とした(一般的に、細胞は 42.5°C 以上にて死滅すると言われている)。

始めに、Annexin V 及び Propidium iodide (PI) を用い、マイクロ波照射後 0~24 時間でのアポトーシスの解析を行った(図2A)。Annexin V 陽性細胞は初期のアポトーシス、PI 陽性の細胞は後期アポトーシスもしくはネクローシスと判別される。その結果、後期アポトーシスもしくはネクローシスの細胞が経時的に増加し、マイクロ波照射後 24 時間における割合は、全体の細胞数に対して 40.7%であった。一方で、初期のアポトーシス細胞は経時的に増加したが、その変化は僅かであった。これらのマイクロ波照射後 24 時間における割合は、全体の細胞数に対して 2.7%であった。これらの傾向は、42.5°C にて静置した熱処理群においても同様であり、24 時間における割合は、後期アポトーシスもしくはネクローシスの細胞で 15.5%、初期アポトーシス細胞で 4.1%で

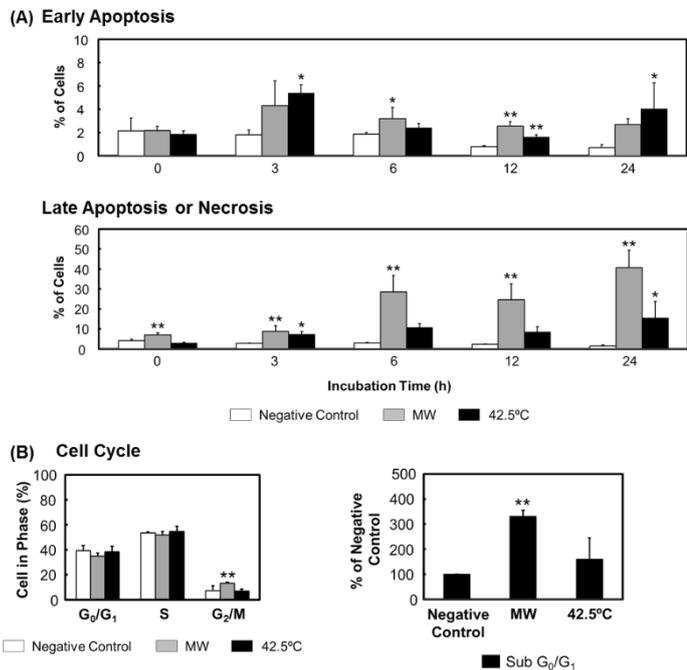


図2：Annexin V-PI による細胞死解析と細胞周期解析
(参考文献4の Figure 1 より抜粋)

全体の細胞数に対して 40.7%であった。一方で、初期のアポトーシス細胞は経時的に増加したが、その変化は僅かであった。これらのマイクロ波照射後 24 時間における割合は、全体の細胞数に対して 2.7%であった。これらの傾向は、42.5°C にて静置した熱処理群においても同様であり、24 時間における割合は、後期アポトーシスもしくはネクローシスの細胞で 15.5%、初期アポトーシス細胞で 4.1%で

あった。

更に、マイクロ波照射後 24 時間後の細胞周期を解析したところ、マイクロ波照射では SubG0/G1 の増加が確認された (図 2B)。また、G2/M の割合が有意に増加していた。以上より、マイクロ波照射された細胞では、細胞周期の G2/M 期 arrest が起こることが示唆された。

3.2 マイクロ波低温照射による熱ストレス非依存的なミトコンドリア傷害

マイクロ波照射後 3 時間におけるミトコンドリア傷害について解析した。まず、アポトーシスを抑制する Bcl-2 とアポトーシスを促進する Bax の発現について解析した (図 3A)。マイクロ波照射では、Bcl-2 の発現が減少し Bax の発現増加が確認された。更に、ミトコンドリアの膜電位差を測定したところ、マイクロ波照射のみで電位差が消失していた (図 3B)。一方でマイクロ波照射では、Heat Shock Protein 70 (HSP 70) の発現増加が見られなかったことから、マイクロ波照射により細胞が熱ストレスを受けていないことが示された (図 3C)。

3.3 ミトコンドリア傷害により誘導されるアポトーシス経路の解析

マイクロ波を照射した細胞では、ミトコンドリア膜電位差の消失に伴い、サイトゾルの Apoptosis-inducing factor (AIF) が増加し、経時的な DNA の断片化の確認された (図 4A, 4B)。照射後 24 時間後での DNA 断片化細胞の割合は、45.6%であり、Annexin V、PI による解析での死細胞の割合とほぼ一致した (図 2A)。つまり、マイクロ波照射による細胞死のほとんどは、AIF により DNA 断片化が生じた“カスパーゼ非依存的アポトーシス”であることが示唆された。更に、シトクロム C もサイトゾルで増加した。ミトコンドリアから漏出したシトクロム C は、Apoptotic protease activating factor 1 (Apaf-1) 及び Caspase 9 と結合して Apoptosome と呼ばれる複合体を形成し、Caspase 9 及び 3、7 をこの順で活性化することでアポトーシスを誘導する (カスパーゼ依存的アポトーシス) ⁴⁾。しかし、マイクロ波照射では、Apaf-1 と Caspase 9 はほとんど検出されず、Apoptosome が形成されていないことが示唆された (図 4A)。その結果、Caspase 3/7 の活性が有意に上昇せず、結果として“カスパーゼ依存的アポトーシス”は起こらなかったと考えられた (図 4C)。またマイクロ波照射では、Second mitochondria-derived activator of caspase (Smac) がサイトゾルで増加した。Smac は、X chromosome-linked inhibitor of apoptosis (XIAP) の働きを抑制することで、Apoptosome の形成を促進するが ⁴⁾、Apaf-1 と Caspase 9 の消失に伴い、機能していないことが示唆された。

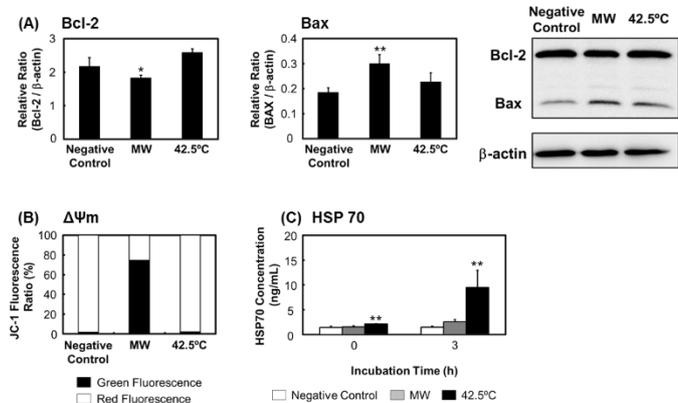


図 3 : マイクロ波誘導細胞死の熱ストレス応答を
経路しないミトコンドリア傷害
(参考文献 4 の Figure 2 より抜粋)

3.4 ミトコンドリア傷害を誘導する各種ストレスの関連

ミトコンドリア傷害は、デスレセプター刺激や小胞体ストレスにより誘導されることが知られている(4,5)。そこで、これらがマイクロ波照射によるミトコンドリア傷害の原因であるか解析した。

デスレセプターの一種である TNF-R1 刺激では、Caspase 8 が receptor interacting protein (RIP) 1

や 3 に結合した後断片化し、Caspase 3 を活性化することでアポトーシスを誘導する(4)。マイクロ波照射では、Caspase 8 は照射後9時間に有意な活性上昇が起きたものの、その後 Caspase 3 は活性化しなかった(図 5A, 4C)。更に、RIP1 と 3 の発現誘導と RIP

1 と 3 の断片化がほとんど起きなかった(図 5A)。以上

から、マイクロ波による細胞死では、デスレセプター刺激による細胞死の誘導とは異なる可能性が示された。一方で、熱処理群においては、RIP1 と 3 の発現上昇や RIP 1 と 3 の断片化、Caspase 8、3 の活性化が確認され、デスレセプター刺激と同様な細胞死の誘導と推測された。また、小胞体ストレスの有無を調べるため、C/EBP homologous protein (CHOP) 及び Activating transcription factor-4 (ATF-4) の発現量と Caspase 12 の活性を解析した(図 5B)。その結果、マイクロ波照射、熱処理では発現上昇や活性化は見られず、小胞体ストレスが起きていないことが示された。

4. 考察および将来の展望

本研究をまとめると、以下の通りである(図 6)。マイクロ波照射による細胞死のほとんどは、AIF の DNA 断片化によるカスパーゼ非依存的アポトーシスであることが示された。また HSP 70 が過剰発現しておらず、熱ストレスに応答していなかった。一方で熱処理群では、マイクロ波照射よりも生存率低下の割合が小さかった。ミトコンドリアは傷害されず、RIP1 や 3 の発現上昇や断片化、Caspase 8 及び 3 の活性化が確認されたことから、デスレセプター刺激と同様な細胞死の誘導が推測された。また、HSP 70 の過剰発現が確認された。

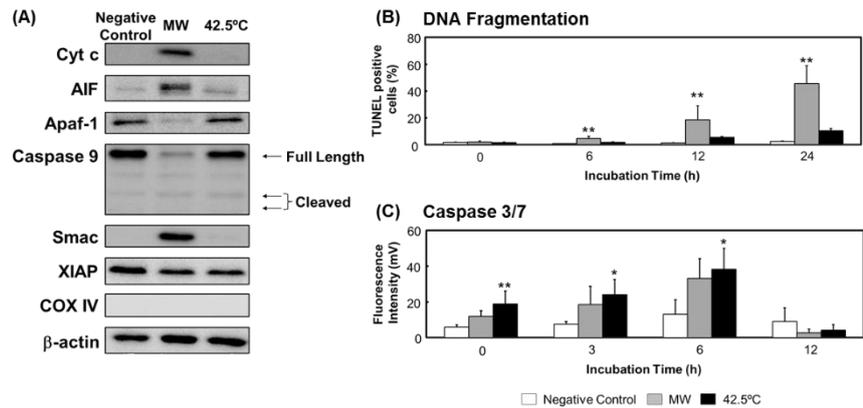


図 4：細胞の Apoptosome 活性 (参考文献 4 の Figure 3 より抜粋)

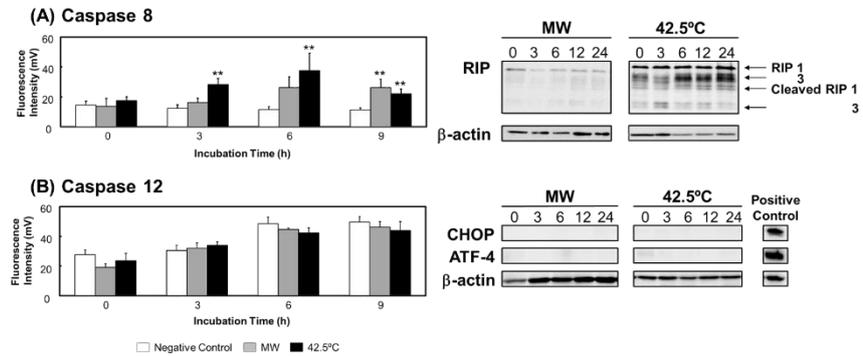


図 5：デスレセプター経路細胞死と小胞体ストレスの解析 (参考文献 4 の Figure 4 より抜粋)

以上から、マイクロ波低温照射による細胞死は、熱処理とは異なる経路で死滅することが示された。今後は新規癌治療法確立のため、本研究を生体に適用し、細胞死の挙動を確認する予定である。

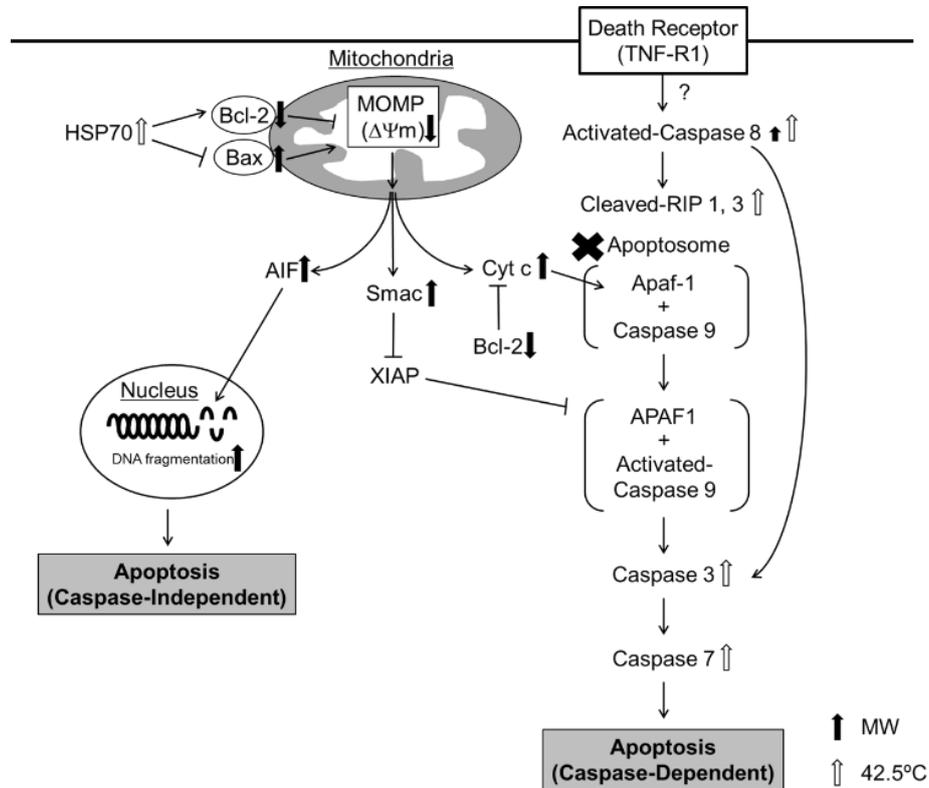


図6：マイクロ波照射による細胞死経路（参考文献4のFigure 6より抜粋）

参考文献

- 1) Sawada T. and Yamada T., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **61(2)**, 121-128, 2018.
- 2) Mori I., Ozaki T., Tabuse K., Utsunomiya H., Taniguchi E., Kakudo K., *Pathol. Int.*, **59**, 294-299, 2009.
- 3) Asano M., Sakaguchi M., Tanaka S., Kashimura K., Mitani T., Kawase M., Matsumura H., Yamaguchi T., Fujita Y., Tabuse K., Effects of normothermic conditioned microwave irradiation on cultured cells using an irradiation system with semiconductor oscillator and thermo-regulatory applicator. *Sci. Rep.*, **7**, 41244, 2017.
- 4) Asano M., Tanaka S., Sakaguchi M., Matsumura H., Yamaguchi T., Fujita Y., Tabuse K., Normothermic microwave irradiation induces death of HL-60 cells through heat-independent apoptosis., *Sci. Rep.*, **7(1)**, 11406 (2017).
- 5) Xu C., Bailly-Maitre B., Reed J.C., *J. Clin. Invest.*, **115**, 2656-2664, 2005.

著者プロフィール



浅野 麻実子 (Mamiko Asano)

<略歴> 2004年大阪薬科大学薬学部卒業／2010年大阪大学大学院薬学研究科博士後期課程修了(薬学博士)／同年国際医療福祉大学薬学部助教／2011年大阪薬科大学薬学部助手／2017年理化学研究所研究員／2018年京都大学生存圏研究所研究員現在に至る。<研究テーマと抱負>マイクロ波を用いた癌セラノスティックスの技術開発を行い、医療応用を目指している。<趣味など>犬の散歩、ハイキング。

森林土壌圏における分解呼吸の短期・長期変動

安宅 未央子^{1*}

Short-term and long-term variation in heterotrophic respiration in forest soil

Mioko Ataka^{1*}

概要

森林土壌圏における分解呼吸は多様な有機物からの CO₂ 放出の総和であるが、個々の有機物の分解呼吸特性に関するデータは限られている。環境変動にともなう分解呼吸の応答については森林炭素収支を正確に評価するためには、有機物ごとに異なる供給・分解プロセスを個別に定量し、理解することが必要である。分解呼吸は、短期的には時々刻々と変動する環境要因の影響をうけて、長期的には攪乱などによる過去の森林構造の変化の影響をうけて変動する。本総説では、主に落葉広葉樹二次林（森林総合研究所関西支所山城試験地）において観測された結果を通して、森林土壌圏における短期的・長期的な時間スケールで変動する分解呼吸について解説する。

1. はじめに

土壌圏は陸域生態系の中でもっとも大きな炭素プール（1500-2400 PgC yr⁻¹）であり、その炭素蓄積量は植物体の約 4 倍、大気中 CO₂ として存在する炭素の 2 倍以上に相当する¹⁾。土壌から放出される CO₂ 量（土壌呼吸量）は、1989 年から 2008 年にかけて毎年 0.1% ずつ増加しており、2008 年の土壌呼吸の陸域総計は約 98 PgC に達した²⁾。この総量は、人為起源の CO₂ 放出量（9.5PgC）の約 10 倍に相当する。そのため、地球温暖化に代表される環境変動の影響を受ける土壌呼吸は、その変動がわずかでも地球規模での大気 CO₂ 濃度に強く影響すると考えられる。

気候変動に対する土壌呼吸の応答評価のために、世界規模で土壌呼吸の観測は行われているものの、その「時間的・空間的なばらつき」によって、今なお統一的な見解が得られていない。その根本的な原因として、土壌呼吸は分解呼吸と根呼吸といった 2 つの異なるプロセスによって構成されていることが挙げられる³⁾。なかでも森林土壌圏における分解呼吸は、多様な有機物からの CO₂ 放出量の総量であるものの、根呼吸と対比してひとまとめに扱われることが多く、個々の分解呼吸特性に関するデータは不足している。

樹木は、光合成によって吸収した炭素をためこむ一方で、役目を終えた樹体の一部は枯死し林床面へと脱落する（図 1）。土壌表層には落葉や枯死木など、土壌中には枯死木や菌糸などといった多様な有機物が供給され、微生物による分解作用を受け CO₂ を放出（分解呼吸）する。これらの分解に供される多様な枯死有機物は、枯死・脱落するタイミングが異なるうえ、それぞれに異なる特性（化学性・物理性）を持っている。そのため、個々の有機物の分解呼吸は、時々刻々と短期的に変化する温度や

2019 年 7 月 1 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: teshimamioko@yahoo.co.jp

水分といった環境要因の影響をうけて異なる応答を示す。また、根渗出物のように速やかに分解されるものや、枯死木のように分解に数十年以上を要するものなど有機物によって分解に要する時間が異なる。そのため攪乱などによる枯死木の大量枯死が発生した場合は、過去の履歴が長期間にわたり現在の分解呼吸に影響する。分解呼吸の変動特性を理解するためには、有機物ごとに異なる短期的・長期的な時間スケールで変動する分解呼吸プロセスを個別に定量評価する必要がある。

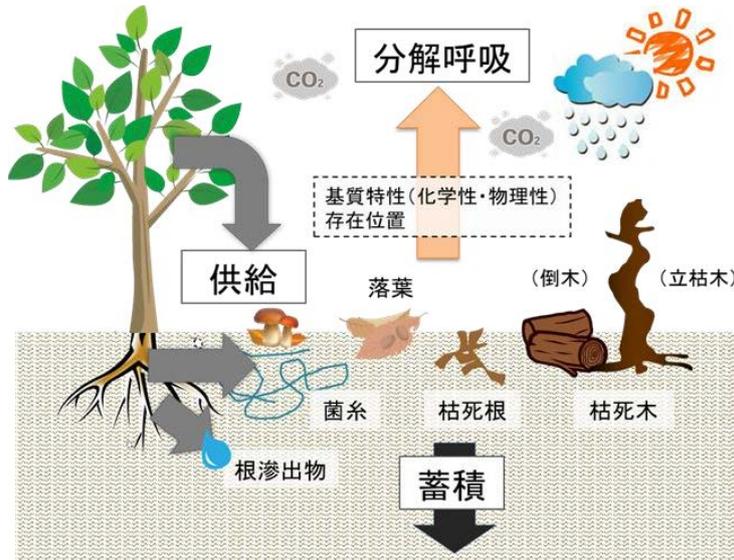


図1：森林土壌圏に供給される多様な有機物

2. 分解呼吸の規定要因である環境因子

温度や水分といった環境因子は、生物的・非生物のプロセスを介し、分解呼吸の動態に強く影響する。温度は、生物活動である呼吸に関わる様々な酵素の活性に影響する。そのため分解呼吸は、温度に対して指数関数的に増加し、最適温度をこえると減少する⁴⁾。その最適温度は土壌ごとの微生物群集によって異なり、例えば Liu, et al.⁵⁾ の報告では、25 地点の冷温帯～熱帯土壌で観測された最適温度は緯度とともに増加する（平均最適温度は 42.4 度）。

水分に対する分解呼吸の応答は、直接的には微生物の生理的プロセスによるものであるが、間接的には土壌孔隙内での酸素や基質の拡散といった物理的プロセスの影響を受ける⁶⁾。図 2-A で示すように、乾燥下において土壌孔隙内の水分が減少すると、微生物の基質へのアクセスが制限され、その結果分解呼吸は減少する⁷⁾。一方で図 2-C で示すように、湿潤下において土壌孔隙が水で満たされることでガス拡散が制限されると好気性生物の代謝活性が低下し、その結果分解呼吸は減少する⁸⁾。そのバランスが最適である場合に、分解呼吸は最大値を示す（図 2-B）。自然環境下では、土壌や枯死有機物は降雨イベントごとに湿潤・乾燥を繰り返す、それに従って分解呼吸は変動する。そのため長期間の積算分解呼吸量は、湿潤－乾燥サイクルの頻度に影響を受ける^{9,10)}。

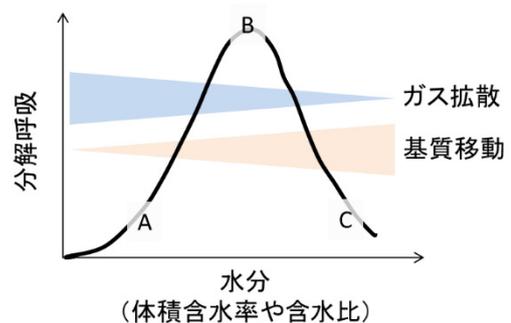


図2：物理的プロセスを介した分解呼吸の水分応答 (Moyano et al., 2013 から抜粋・改変)

3. 分解呼吸の観測とその短期的な時間スケールでの変動

これまで分解研究においては、主にリターバック法を用いた分解速度の評価が行われてきた。リターバック法は、規定量のサンプルを封入したメッシュバッグを林床面に設置し、ある一定期間（数ヶ月～年単位）の重量減少量から分解速度を算出する方法である。長期平均から算出される分解速度は、その規定要因として相対的に長い時間スケールで変化する化学組成や気候因子（年平均気温・降水量）と関連付けられる場合が多い。リターバック法の特徴としては、測定される重量減少量は、分解呼吸量の他に溶脱量や細片化による脱落量も含まれるため、分解量としては過大に評価されること、リターバック内の水分環境が自然環境と異なることなどが挙げられる。

一方で、微生物を主体とする分解呼吸は、主に温度や水分といった環境の変化に応じて刻々と変動する。近年での CO₂ 放出速度の測定では、二酸化炭素濃度を測定できる赤外線ガスアナライザーとチャンバー（測定容器）を組み合わせた観測が主流となってきた。例えば閉鎖式チャンバー法では、チャンバーに測定対象物を入れる、もしくはかぶせると、チャンバー内の CO₂ 濃度が増加する（図 3, 4-a）。その時間あたりの CO₂ 濃度の増加分から分解呼吸速度が算出される。現場観測では、観測時の環境場の影響をうけたサンプルの分解呼吸速度を観測することができる。チャンバーの開閉やガスラインの切り替えを制御できるシステムを併用すれば、分解呼吸速度を連続的に測定することも可能である（図 4-b）。環境因子の観測と併行して分解呼吸速度の日周変化・降雨応答性・季節変化を観測することで、分解呼吸の環境応答性を定量的に評価することができる。



図 3：静的閉鎖式チャンバー法による落葉の分解呼吸速度の測定風景

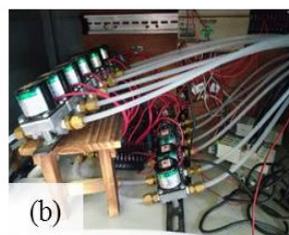


図 4：動的閉鎖式チャンバー法による分解呼吸速度の連続測定風景
(a) 土壤に設置した開閉式自動チャンバー
(b) チャンバーのガスラインを切り替えるための電磁弁

暖温帯林である山城試験地（京都府木津川市）では、森林の特徴である多様な枯死有機物に着目した分解呼吸速度の観測を行ってきた。温暖な気候下での分解呼吸速度は、個々の有機物の物理特性や存在する場所の環境場（特に水分）の影響をうけて変動する。例えば、土壤表層に位置する落葉層は、日射や降雨の影響を直接受けるので、降雨後数日で乾燥する（図 5）。その落葉層の早い湿潤－乾燥サイクルに追従して、落葉層の分解呼吸速度は降雨時にピークを示し、その後の乾燥によって数日でゼロに近い値を示す。そのため、土壤呼吸に対する落葉層の分解呼吸速度の寄与率は、乾燥時にはゼロ付近に、降雨時には 51% に達するケースもある¹⁰⁾。一方、相対的に密度の大きい枯死木の分解呼吸速度は、降雨後数日間は減少し、その後含水比の減少とともに緩やかに増加・減少するといった変動を示す¹¹⁾。そのため、自然条件下における枯死木は、長期的な無降雨日が続かない限り湿潤な水分環境が保持されるので、常に CO₂ ソースとして機能する。

分解呼吸は有機物から放出されるすべての CO₂ 放出量として定義さ

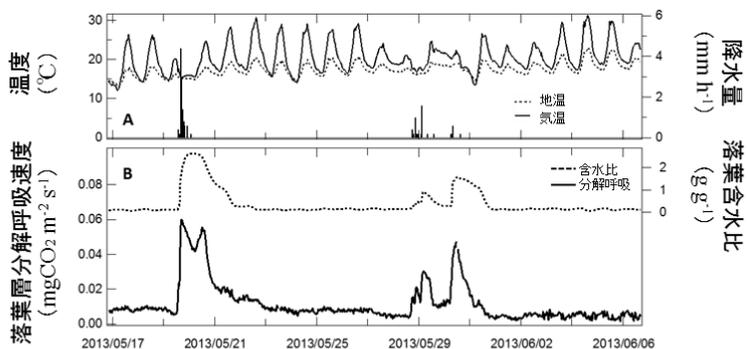


図 5：連続測定された環境因子と落葉層分解呼吸速度の時間変動

れうるが、測定手法上の制限によって、枯死木や根圏滲出物などのコンパートメントは分解呼吸量として考慮されていない場合が多い^{12,13)}。枯死木に関しては、不均一に分布し、また発生の時間分布も一様ではないことから、測定地点として除外される場合が多い。また、根圏滲出物に関しては、その量や変化を定量する手法自体が発展途上である上、プライミング効果（根圏まわりの有機物分解を促進）に関する情報も限られている。分解呼吸量の正確な推定さらには「土壌呼吸のばらつき」を正しく理解をするためには、個別の有機物の分解呼吸プロセスに特徴的なトレンドを抽出し定量的に評価する必要がある。

4. 長期的な時間スケールにおける分解呼吸の変動

森林生態系においては、これまで光合成により炭素を吸収していた樹木が枯死し、分解系にまわり炭素を放出する有機物に転化するといった現象は常に発生している。しかし、虫害や火災、台風といった攪乱影響により、一度に大量の樹木が枯死した場合、分解呼吸量は大幅に増加する。一方で、樹木の現存量は大幅に減少するため、分解呼吸と NPP（純一次生産量）の収支によっては森林の NEP（正味の CO₂ 吸収量）はマイナスになる場合もある^{13,14)}。

攪乱によって、分解期間の異なる多様な有機物が土壌へと供給され、分解される。特に数十年単位かけて分解する枯死木は長期間にわたり CO₂ 放出源となるため、現在の分解呼吸量は過去の攪乱履歴の影響を受ける。例えば、山城試験地（現在は落葉広葉樹林）では、当時アカマツが優占する森林であったが 1970 年代にマツノザイセンチュウという線虫による伝染病が原因となり、アカマツの大量枯死が発生した。この虫害による攪乱影響は 2000 年代に入っても残っており、2003 年に観測された枯死木現存量（9.3 tC ha⁻¹ yr⁻¹）のうちアカマツの枯死木現存量は 73% を占めていた¹⁵⁾。そのため 30 年以上前に枯死したアカマツの分解呼吸量（約 0.4 tC ha⁻¹ yr⁻¹）は、2003 年時点での全体の枯死木分解呼吸量の約 9 割を占めていた。現在ではコナラが優占する広葉樹林へと姿をかえたが、再びカシノナガキクイムシという甲虫による伝染病によって主に大径木の枯死が発生し、ギャップが散在している。このように一時的ではあるが有機物の供給・分解呼吸パターンに大きく影響する攪乱は、その規模や頻度によって分解呼吸量の大きさや攪乱後の分解呼吸量の時間変動に影響を与える¹³⁾。分解呼吸量ひいては森林の炭素収支を評価するためには、一時的であるが大規模なイベントである攪乱影響を含めた森林構造の変化を長期的かつ広域的に観測する必要がある。

5. おわりに

森林土壌圏の分解呼吸は、短期的・長期的な時間スケールで不均一に分布する多様な有機物の CO₂ 放出の総和である。森林炭素収支研究では、気象観測タワーでの CO₂ フラックス観測による短期的な観測をベースにした森林-大気の CO₂ 交換量（≡森林の正味の吸収量）の観測とその変動特性評価が行われている。分解系の機能に起因する CO₂ フラックスは、環境に応答し刻々と変動すると同時に、攪乱イベントなどの過去の履歴に依存し変動する。森林炭素収支における分解呼吸の寄与を解明するためには、多様な有機物の分解呼吸の環境応答性の定量評価に加え、攪乱などの大規模イベントによる森林構造の変化を含めた有機物の供給パターンを長期的かつ広域的に観測し、森林の炭素収支評価に反映させていくことが重要である。

参考文献

- 1) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press,

- Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 2) Bond-Lamberty, B. & Thomson, A. A global database of soil respiration data. *Biogeosciences* **7**, 1915-1926, doi:10.5194/bg-7-1915-2010 (2010).
 - 3) Hanson, P., Edwards, N., Garten, C. T. & Andrews, J. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry* **48**, 115-146 (2000).
 - 4) Kirschbaum, M. U. F. The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate. *Soil Biol. Biochem.* **38**, 2510-2518, doi:10.1016/j.soilbio.2006.01.030 (2006).
 - 5) Liu, Y. *et al.* The optimum temperature of soil microbial respiration: Patterns and controls. *Soil Biol. Biochem.* **121**, 35-42 (2018).
 - 6) Moyano, F. E., Manzoni, S. & Chenu, C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biol. Biochem.* **59**, 72-85, doi:10.1016/j.soilbio.2013.01.002 (2013).
 - 7) Schjønning, P., Thomsen, I. K., Moldrup, P. & Christensen, B. T. Linking soil microbial activity to water-and air-phase contents and diffusivities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **67**, 156-165 (2003).
 - 8) Bunnell, F., Tait, D., Flanagan, P. & Van Clever, K. Microbial respiration and substrate weight loss—I: A general model of the influences of abiotic variables. *Soil Biol. Biochem.* **9**, 33-40 (1977).
 - 9) Fierer, N. & Schimel, J. P. Effects of drying–rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biol. Biochem.* **34**, 777-787 (2002).
 - 10) Ataka, M. *et al.* In situ CO₂ efflux from leaf litter layer showed large temporal variation induced by rapid wetting and drying cycle. *Plos One* **9**, e108404, doi:ARTN e108404 10.1371/journal.pone.0108404 (2014).
 - 11) Jomura, M., Kominami, Y. & Ataka, M. Differences between coarse woody debris and leaf litter in the response of heterotrophic respiration to rainfall events. *J Forest Res-Jpn* **17**, 305-311, doi:10.1007/s10310-011-0320-3 (2012).
 - 12) Kuzyakov, Y. & Larionova, A. A. Root and rhizomicrobial respiration: a review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **168**, 503-520 (2005).
 - 13) Harmon, M. E., Bond-Lamberty, B., Tang, J. & Vargas, R. Heterotrophic respiration in disturbed forests: A review with examples from North America. *Journal of Geophysical Research* **116**, doi:10.1029/2010jg001495 (2011).
 - 14) Bond - Lamberty, B., Wang, C. & Gower, S. T. Net primary production and net ecosystem production of a boreal black spruce wildfire chronosequence. *Global Change Biol.* **10**, 473-487 (2004).
 - 15) Kominami, Y. *et al.* Biometric and eddy-covariance-based estimates of carbon balance for a warm-temperate mixed forest in Japan. *Agric. For. Meteorol.* **148**, 723-737, doi:10.1016/j.agrformet.2008.01.017 (2008).

著者プロフィール



安宅 未央子 (Mioko Ataka)

<略歴> 2009年神戸大学農学部植物資源学科卒業／2015年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(農学博士)／同年同大学農学研究科ポスドク／2016年森林総合研究所・日本学術振興会特別研究員／2018年京都大学特定助教／2019年京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センターミッション専攻研究員、現在に至る。<研究テーマと抱負>地上部ー地下部生態系の実態を内包した土壌圏炭素動態の解明 <趣味>家庭菜園(最近、にんにくを収穫しました。)

三次元 CAD 情報を用いた木造住宅の耐震性能の見える化

中川 貴文^{1*}

Visualization for seismic performance of wooden houses using 3D-CAD information

Takafumi Nakagawa^{1*}

概要

現在、新築されている戸建木造住宅の多くがプレカット加工（後述）を利用して生産されている。木造住宅の構造性能を評価するためには、軸組の情報や、接合部に関する設計情報が必要であるが、プレカット加工用 CAD（Computer Aided Design）データにはこれらの情報が三次元情報として作成されており、構造解析との親和性は極めて高い。現在 2 階建て木造住宅では壁量計算のみが求められているが、プレカット加工の際の三次元情報を構造設計に活かすことができれば、合理的により構造安全性の高い木造住宅の生産が可能となる。ここでは木造住宅用 CAD 情報に着目し、構造性能評価と連携する手法の検討を行った研究内容について紹介する。

1. はじめに

現在、新築されている戸建木造住宅の 85%が軸組構法であり、そのうちの 90%がプレカット（あらかじめ工場で木材を加工して、現場で短期間に組み上げることを）を利用して生産されている（図 1）。プレカット加工は三次元 CAD・CAM（Computer Aided Manufacturing）を用いた全自動機械加工が主流となっている。木造住宅の構造性能を評価するためには、軸組（柱・梁等の木材）の情報や、接合部（金物）に関する設計情報が必要であるが、プレカット加工用 CAD データには上記情報が三次元情報として作成されており、構造計算や応力解析との親和性は極めて高い。構造部材に関して、三次元 CAD による詳細な情報が我が国の大半の木造住宅の生産において作成されていることは、他の国や、他の構造種別（鉄骨造、鉄筋コンクリート造等）による建築物と比べても特殊な状況といえる。現在 2 階建て木造住宅では、新築時の構造性能確認として壁量計算のみが求められているが、住宅生産時に作成される三次元 CAD 情報を活用すれば、すぐにでも詳細な構造計算を行える状況にある。しかし、毎年数十万戸分作成されている三次元 CAD 情報は、構造性能評価に活用されることなく、プレカット工場で死蔵されているのが現状である。図 2 に木造住宅の設計・生産の標準的な流れを示したが、現状では、意匠設計の段階で確認申請が行われ、その後にプレカット加工に入り初めて軸組の架構等の構造に関する検討が行われることが一般的である。この流れを変えてプレカット加工の際の三次元情報を構造設計に活かすことができれば、合理的により構造安全性の高い木造住宅の生産が可能となる。

ここでは、木造住宅用 CAD の構造図やプレカット加工の際に作成される三次元 CAD 情報に着目

2019 年 7 月 2 日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生活圏構造機能分野.

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

し、構造性能評価と連携する手法の検討を行った研究内容について紹介する。三次元 CAD 情報として研究対象としたのは、後述するシーデクセマ (CEDXM) と呼ばれるファイルフォーマットであり、これを木造住宅用の構造解析ソフトウェア (wallstat: ウォールスタット) と連携させることを試みた。

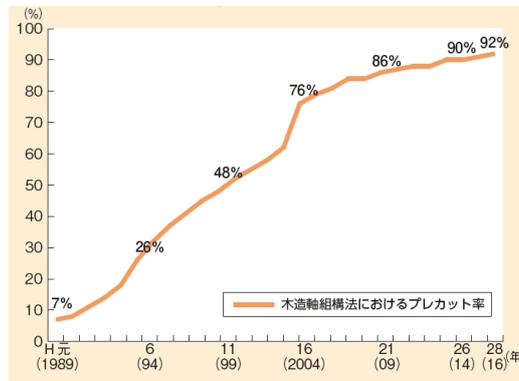


図1：プレカット材を利用した木造軸組構法住宅の割合
(資料：林業白書、全国木造住宅機械プレカット協会調べ)

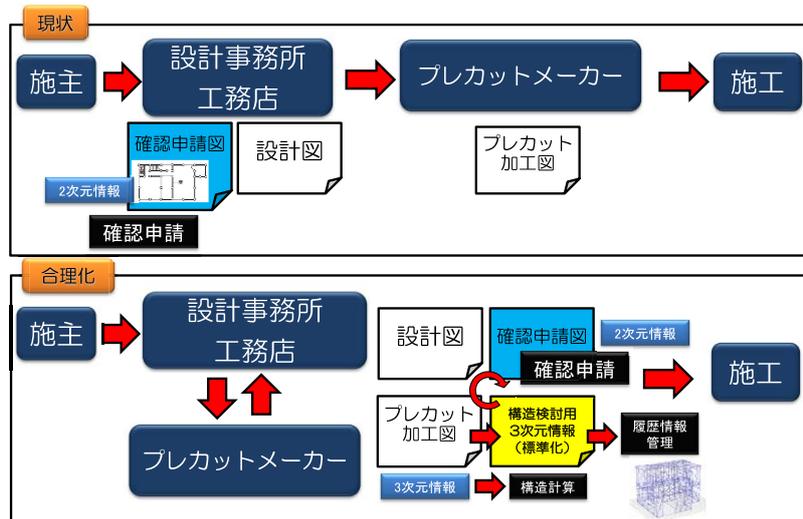


図2：木造住宅の設計・生産の現状と合理化イメージ

2. シーデクセマ (CEDXM) とは

シーデクセマ (CEDXM : Certified exchangeable CAD/CAM data extensible markup definition の略) とは、木造軸組構法住宅に関する建築意匠 CAD とプレカット生産 CAD のデータ連携を目的として構築された標準的なファイルフォーマットである。木造住宅用の CAD には、意匠図作成用の CAD、構造図作成用の CAD、プレカット加工図作成用の CAD 等があるが、三次元情報として作成されることが標準的であり、それらの CAD の情報の橋渡しをするのが CEDXM ファイルフォーマットである。三次元情報の中には、プレカット加工の際に必要な下記の情報が含まれている。

①軸組 (木材) の架構の情報

木造住宅を構成する軸組の両端部の三次元座標、寸法 (幅・高さ)、端部の加工形状など

②接合部の情報

軸組と軸組を繋ぐ継手・仕口の接合部の仕様、金物の種類、三次元座標など

③壁の情報

筋かいや合板釘打ち耐力壁や、内装材・外装材の壁の仕様、三次元座標など

④水平構面の情報

床、小屋組等の水平構面の仕様、面積、三次元座標など

これらの情報は許容応力度計算などの構造計算を行うために必要な情報であり、実際に木造住宅用 CAD ソフトウェアの中には構造図を作成するだけでなく、許容応力度計算を行う機能を持つものも多い。シーデクセマは①～④の情報をファイルとして作成する際の標準フォーマットであり、シーデクセマに従ってファイル出力を行うことで様々な CAD と連携をすることができる。NPO 法人シーデクセマ評議会では標準ファイルフォーマットとして維持管理と更新、さらなる開発及び普及などを目的として活動をしている。長期優良住宅（耐久性等の一定の要求水準を満たす住宅への補助金制度）の重要事項である「構造の安定」及び住宅履歴書の保存が求められているが、シーデクセマファイルを長期優良住宅の履歴情報の保存等に活用することも可能となる。

3. 耐震シミュレーションソフト「ウォールスタット (wallstat)」

本研究で構造性能評価手法として用いたソフトウェアは、筆者が開発した木造住宅用の倒壊解析ソフトウェア (wallstat) である。2010 年 12 月よりインターネット上で公開を開始し、下記 URL から無償でダウンロードすることができる。

ダウンロード URL : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~nakagawa/> (短縮 URL : <http://bit.ly/wallstat4>)

wallstat は木造住宅の建物全体の地震時の損傷状況や倒壊過程をシミュレートする数値解析プログラムであり、パソコン上で建物を立体骨組によりモデル化し、振動台実験のように地震動を与えて(時刻歴応答解析)、計算結果を動画で確認することが出来る(図 3)。従来の解析ソフトウェアでは建物が倒壊するまでを追跡することは困難であったが、wallstat では非連続体解析手法である「個別要素法」を基本理論とすることで木造住宅が地震時に損傷し、完全に倒壊するまでをシミュレーションすることが可能となった。多くの実大木造住宅の振動台実験との比較・検証により解析結果の精度が確認されている。メディア等で紹介されたこともあり、公開開始から現在(2019年6月)まで、ソフトウェアのダウンロード数は 30,000 回以上、YouTube の動画の再生回数は 70,000 回以上に達している。

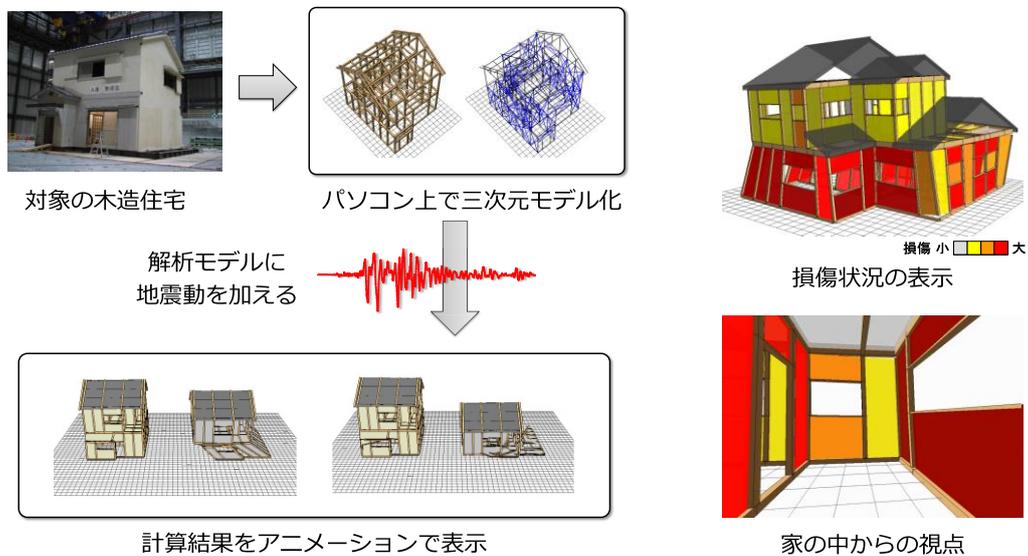


図 3 : 耐震シミュレーションソフト「ウォールスタット」の概要

wallstatは図4に示したようなwindowsのGUI(Graphical User Interface)を備えており、画面を見ながら木造住宅の解析モデルを作成し、変形の大きさ、損傷状況、倒壊の有無等の解析結果をアニメーションによって確認することができる。数値解析の専門知識が無くても実際に目で見て地震時の木造住宅の応答挙動や、耐震性能を確認できるため、大学生や構造設計者の教育用ツールとしても使われている。図5は振動台実験に用いられた実大木造住宅の解析モデルの一例であるが、一般的な木造住宅を立体骨組で表現する場合、解析モデルでは構造躯体となる骨組(木材)1本1本をモデル化し、その中に耐震要素となる壁のバネや、骨組を連結する接合部のバネをモデル化する。壁や接合部のバネの強さは実験の結果や文献のデータから決定して設定する(木造住宅のモデル化については文献参照2))。図6はwallstatによる解析結果と振動台実験の倒壊過程を比較した動画のスナップショットである。振動台実験は同じ平面・立面プランで接合部の設計方法のみが異なる試験体の性能比較のために実施された。試験体の接合部が引き抜けて破壊する過程や、1階が層崩壊する倒壊過程が精度よく再現されているのが分かる。その他、図7に示したように地震被害を受けた社寺建築の再現解析や6階建の中層木造建築物の構造検討等に活用されている。

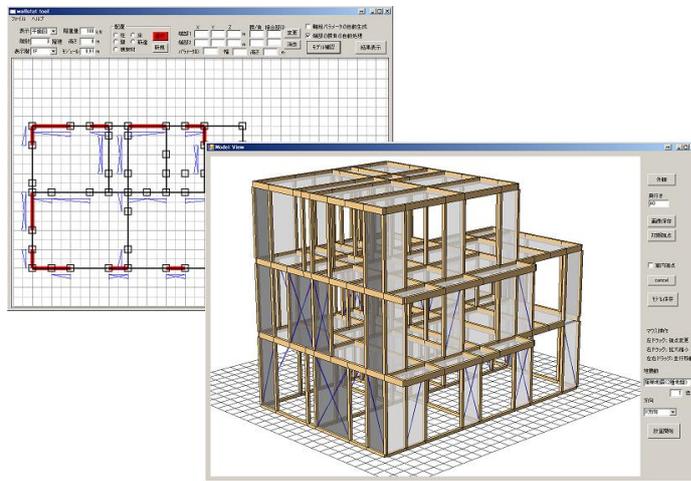
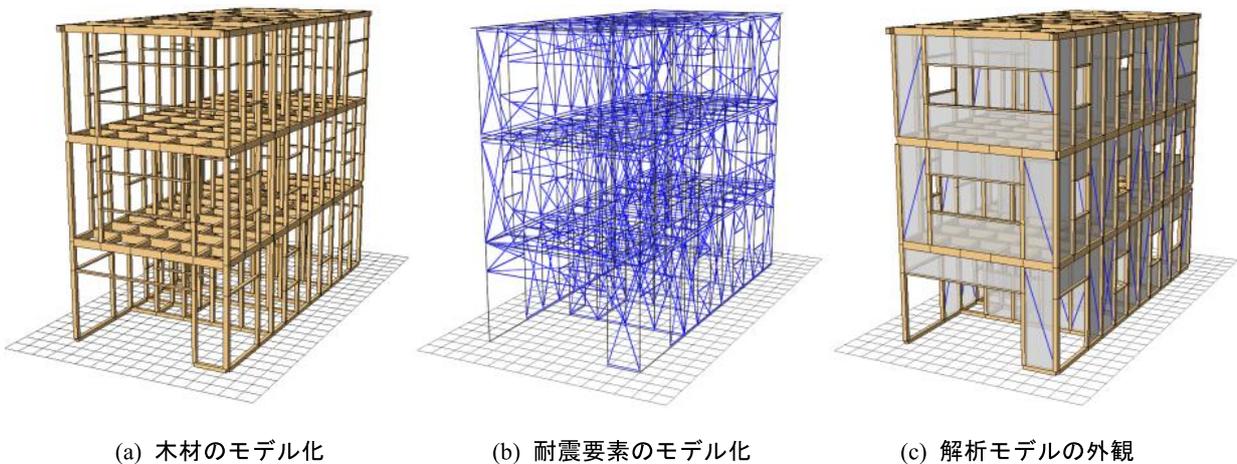


図4 : ウォールスタットの操作画面



(a) 木材のモデル化

(b) 耐震要素のモデル化

(c) 解析モデルの外観

図5 : 三次元骨組によるモデル化

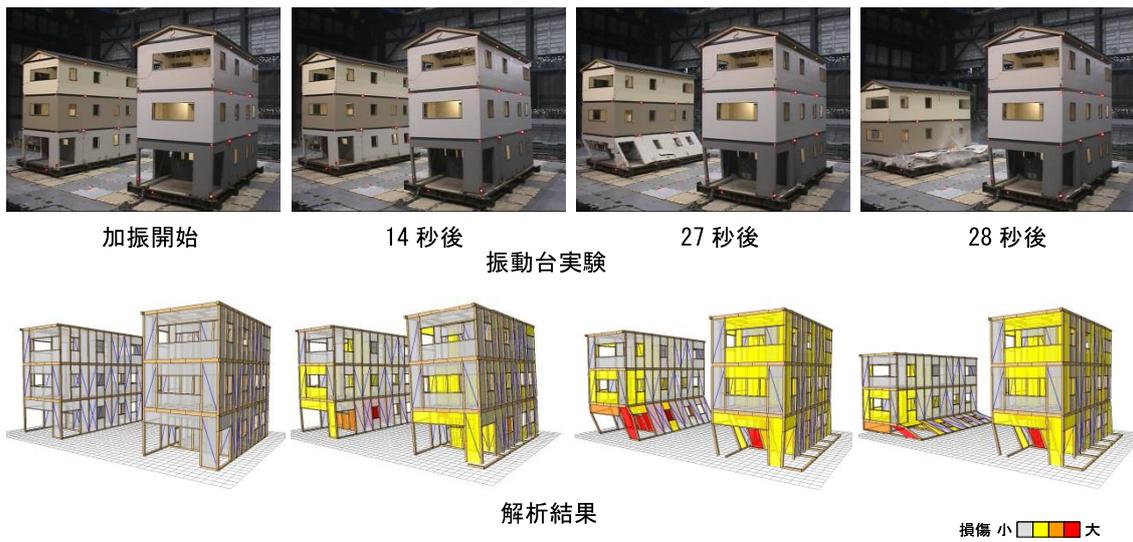
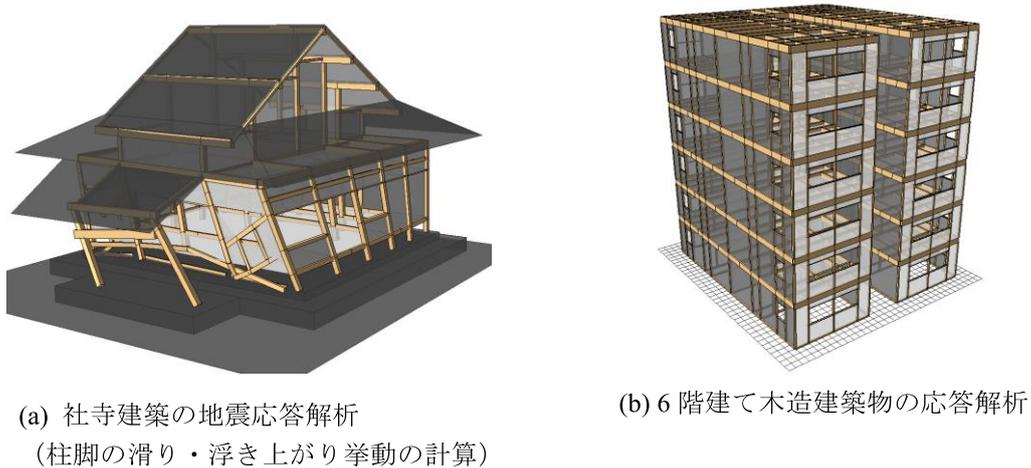


図 6 : 振動台実験の応答解析



(a) 社寺建築の地震応答解析
(柱脚の滑り・浮き上がり挙動の計算)

(b) 6階建て木造建築物の応答解析

図 7 : ウォールスタットの計算例

4. ウォールスタットとシーデクセマの連携

プレカットの際に作成される三次元 CAD 情報は、構造解析モデルとの親和性が高いということは、プレカット材を用いて生産される木造住宅全てが高度な三次元構造解析を行える状況にあることとなる。本研究ではプレカットの際の三次元情報を活用した木造住宅の耐震性能評価（構造計算）が広く普及することを目指して、CEDXM ファイルを介して wallstat で木造住宅の三次元 CAD 情報を読み込み、自動で耐震シミュレーションを行うことが出来る連携手法の検討を行った。実際の検討作業としては 2013 年度から CEDXM 評議会の開発委員会において、連携に向けた情報の整理や、ソフトウェア開発を行った。

wallstat は解析モデル作成の際に、テキスト入力で軸組や構面の端部の 3 次元座標を入力する必要があり、木造住宅 1 棟分の主要構造部材や耐震要素を全て入力すると、1 日がかりの作業となり、ユーザーの負担となっていた。CEDXM と連携して、三次元座標を自動で解析モデルに変換できれば、この負担が大きく軽減されることになる。CEDXM は XML ファイル形式が採用されており、木造住宅を構成する柱・梁等の軸組の端部の 3 次元座標、断面寸法、樹種、ヤング係数等がテキスト情報とし

て、保存されている。2000年の開発開始からバージョンアップを継続し、現在バージョン8が最新である。木造住宅用CADやプレカットCADで普及しているのはバージョン4であるが、各CADソフトによってCEDXMファイルで出力する際の軸組等の情報の精密さ(解像度)が異なるところがあり、また、wallstatで解析モデル作成の際に必要なとされる情報についても、CADソフトで異なるところがあった。そこで、表1に示した通り、情報の解像度に応じて、両者の連携により自動でモデル化される項目のレベル分けを行った。レベル1では軸組・筋かい耐力壁は自動でモデル化されるが、他の情報は解析モデルに反映することは出来ない。接合部や水平構面の情報は反映されないため変形しないものとして解析を行うこととなる。レベル2では筋かい耐力壁以外の鉛直構面もモデル化され、レベル3になると、開口部や小壁、レベル4になると、接合部や水平構面についても解析モデルに反映されることになる。連携に関する検討で分かったこととして、レベル1~2までは標準的な木造住宅用CADやプレカットCADから出力されるCEDXMファイルで連携可能であり、レベル3~4となると、出力するCADソフト側で、wallstatで必要となる情報の解像度向上が必要となる。各連携レベルに対応する建物を考えてみると、レベル1~2は新築の壁量計算を想定した木造住宅(接合部は変形しない。水平構面は剛床と仮定。)であり、レベル3~4は性能表示制度や耐震診断を想定した既存、新築木造住宅(接合部、水平構面の構造検討も必要)を対象にしているといえる。

表1: wallstat と CEDXM の連携のレベル

モデル化する項目	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4
軸組	○	○	○	○
筋かい耐力壁	○	○	○	○
筋かい以外の耐力壁	×	○	○	○
開口部 (小壁のモデル化)	×	×	○	○
接合部の変形	×	×	×	○
水平構面の変形	×	×	×	○

5. 検討結果 (連携機能の実装)

前章の連携に向けた検討結果を反映して、CEDXM ファイルを直接読み込む機能を実装した新たなバージョン wallstat ver.3 を 2015 年 6 月からインターネットで公開を開始している。その後もバージョンアップを重ね、2018 年 7 月に公開した wallstat ver.4 では水平構面や接合部の入力、開口部の入力等も自動化され、レベル 4 の連携が可能となった。様々な CAD ソフトで作成した軸組等の情報をシーデクセマを介して wallstat にインポートし、短時間で耐震シミュレーションを行うことが可能となった。今後、工務店や住宅会社、プレカットメーカー等における実務での活用が期待される。

6. おわりに

埼玉県のある住宅会社では新たに建設する全棟の木造住宅をこのデータ連携機能を用いて wallstat で応答解析をし、安全性能検証を行った結果(耐震シミュレーションの動画)を顧客にプレゼンする取り組みを行っている。顧客は動画から直感的に建設予定の建物の耐震性を知ることができる。耐震

等級や構造計算等の基準の要求する耐震性の水準に対するチェックだけでなく、過去に起きた地震や、今後起こりうる想定極大地震に対しても耐震性を目でみて確認することができる。まさに「耐震性能の見える化」といえる。このような住宅会社の取り組みは徐々に日本各地で広がりつつある。2019年1月に設立した一般社団法人耐震性能見える化協会（代表理事：中川貴文）は wallstat の適切な普及による建築物の地震被害軽減を目的として活動を開始した。組織的なサポートにより wallstat のさらなる普及が期待される。今後もユーザーや共同研究者の意見を反映させて、研究開発を続けていきたい。

参考文献

- 1) シーデクセマ評議会ホームページ <http://www.cedxm.com/>
- 2) 日本建築学会「木質構造基礎理論」第12章、第15章、2011.

著者プロフィール



中川 貴文 (Takafumi Nakagawa)

＜略歴＞1998年東京大学農学部卒業／2003年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了 博士（農学）／民間企業を経て、2005～2018年（国研）建築研究所・国土交通省国土技術政策総合研究所／2018年～現在 京都大学生存圏研究所准教授／一般社団法人耐震性能見える化協会 代表理事 ＜主な研究＞巨大地震の際の被害軽減を目的とした木造の耐震研究、耐震化推進に資する教育・普及活動

マイクロ波殺虫とシロアリ

柳川 綾^{1*}

Microwave heating on termites

Aya Yanagawa^{1*}

概要

害虫管理には、一般的には薬剤が利用されてきている。しかし、環境汚染が問題になる中で、汚染物を排出しない害虫管理法の需要は高い。シロアリに対するマイクロ波加熱駆除は、利用例は多くないが、諸外国で化学薬剤に依存しない害虫管理の一つとしてカンザイシロア리를対象にして実施されている。我が国では、カンザイシロアリ侵入が、比較的近年であることもあり、研究例はあるが実用化はされていない。また、産業面における実用的な効果が重視されてきたため、昆虫生理・生体への影響やその作用機構についてはあまり研究されていない。本稿では、シロアリ管理における木材のマイクロ波加熱処理の現状について、原理および作用機構と合わせて解説する。

1. はじめに

シロアリは、世界的な木材害虫である¹⁻³⁾。一般的に、シロアリの駆除には化学薬剤が使用されているが、薬剤耐性個体の出現が報告^{4,5)}されるようになり、近年では、化学薬剤に依存しない害虫管理が研究・開発されるようになった。こうした流れの中で、マイクロ波を利用した木材・木質材料を対象とした加熱処理によるシロアリを含めた木材害虫の駆除が試みられるようになった⁶⁾。

2. シロア리를標的害虫としたマイクロ波殺虫

マイクロ波や遠赤外線・赤外線あるいは高周波(RF: Radio Frequency)などの電磁波は、使用に際して遵守すべき法律がある。例えば、国際的なものとしては、国際非電離放射線防護委員会 (the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection : ICNIRP、1992年設立) が定める規制が存在し、さらに我が国の電波法 (1950年制定) のように各国がそれぞれに遵守している。これらの法令により外部への電波の漏洩が規制されていることや、害虫駆除に使用するにはある程度閉じられた空間での使用が効果的なことなどから、マイクロ波殺虫はIPM (統合的害虫管理) の一つとして、ポストハーベストなど閉鎖的空間での利用が研究されている⁷⁾。

2.1 一般的な現状

材木は通常加熱乾燥処理されて市場に出荷される。本来木材害虫にとって、心材部は摂食しづらいため、多くの場合この段階で、内部に潜んでいた木材害虫も駆除される。しかし、オープンや熱風などを利用した高温加熱処理ではどうしてもエネルギー消費量が多く、太い材木では、内部まで高温になりきらない、また表面変色が生じるなどの課題もある。内部まで昇温しきれなかった場合には、木

2019年6月13日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 居住圏環境共生分野.

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

造建築物や木製家具など、比較的加工処理過程の少ない木材において、木材害虫問題が発生した事例もある。こうした問題は主に海外から輸入される乾燥済みの木材製品や、第三国を経由した加工品で深刻で、これらの製品を食害する乾材害虫類、ヒラタキクイムシ類、ナガシクイ類およびシバンムシ類、ならびにカンザイシロアリ類などが、わが国では近年侵入害虫として問題となりつつある。マイクロ波加熱処理は、部分的に高温となる場所が生じるホットスポットなどの問題はあるものの、電磁波の性質上、木材内部まで加熱することが可能であり、また、短時間処理が可能であるという研究報告もあり、これまでの高温加圧処理とは違う利点を持つ⁸⁻¹⁰⁾。輸入材にはそもそも加熱処理が行われていない生丸太なども多いので、輸入木材における諸問題に関しては、楽観を許さない状況であるが、インドネシアなど、東南アジアの新興国の中には、マイクロ波加熱を含めた木材加熱処理を行う国も現れた。一方、日本もまた木材を利用して様々なものを造り上げてきた文化を持つ。大きな木材および木質材料の加熱処理にマイクロ波を利用する技術もすでに商業化されている。また、その簡便さから、木材の性質を利用した木材の曲げ加工や木工品の乾燥にマイクロ波加熱を利用するという、比較的小規模な活用法の研究やその技術を応用した商品開発が行われている¹¹⁻¹⁴⁾。一般に、害虫管理におけるマイクロ波殺虫は、害虫が潜伏する製品・材料の金属や水分含量に合わせた、適切な使用が必要であるため、多くの国で正式には特殊なケースで適用する手法の一つとして規定されていることが多い。

2.2 マイクロ波殺虫の原理と研究事例

電磁波は、物体に照射・吸収されることによって、発熱作用を引き起こすという特性を持つ。電磁場が発生すると、物質の中には、構成している荷電粒子が微視的に変位するだけで、巨視的には移動しない性質をもつものがあり、こうした性質を誘電性という。物質の中には導電性よりも誘電性が有意なものもあり、誘電性を示す物質を誘電体という。誘電体にはプラスチックやガラスなどがあり、金属など電流を通す物質は導電体と呼ばれる。電磁場を用いた誘電体への加熱では、被照射物は内部から加熱される。誘電体の電磁波による発熱のしやすさを示す係数を誘電損失係数という。通常、物体内の荷電体は互いに作用し合って自由に移動しない。このため、荷電体の移動による電流の発生はないのだが、被照射物内では分極が生じる。マイクロ波による分極は、永久双極子が電界によって回転運動を行いながら電界方向に整列する配向分極で、この双極子回転による分子摩擦によって発熱が生じる。電磁波の中でも周波数が低いマイクロ波や RF は、周波数が高い遠赤外線・赤外線に比べて物質へ浸透しやすく、浸透に伴う熱量への変換もゆっくりであることから、内部加熱と言う現象をより有効に生かした害虫駆除が可能であるといわれている^{15,16)}。このため、歴史的にはマイクロ波と RF を用いた加熱による殺虫が良く研究されている。RF による加熱は、マイクロ波に比べ、浸透深さや半減深度が長いが、マイクロ波は熱変換効率がよく、発熱量は RF より大きい¹⁷⁻²¹⁾。このため、誘電損失係数が大きく熱伝導性も悪い穀物や木材における加熱処理では、マイクロ波処理の方が向いているとされる。また、マイクロ波は、物体の誘電損失に依存した内部加熱によって被照射物そのものを発熱体とする性質を持つ。このため、加熱に必要なエネルギー消費量を条件次第では抑えることが可能となる¹⁸⁾。農産物のポストハーベスト的利用に加えて、食品へのマイクロ波殺虫および殺菌は、許可申請の不要な電子レンジレベルの処理で済むことから、産業的な利用もすでに行われている²¹⁾。

被照射物自体が発熱源となるマイクロ波加熱では、対象物と対象害虫の分子的性質を考慮することが重要となる¹⁵⁾。そのため、一般的に加熱対象物及び標的害虫ごとに、マイクロ波照射条件を検討する必要があるといわれている^{16,22)}。加えて、害虫の種類だけではなく、成長段階、温度耐性、相対湿度なども検討すべき事項として挙げられる²³⁾。シロアリでは、マイクロ波処理加熱が、木材ボードにおいて、蟻道内にいるシロアリを効率的に殺虫することが示されており²⁷⁾、こうした性質を考慮することの重要性は大きい。いずれにしても、マイクロ波加熱を含むすべての電磁波を利用した加熱殺虫機構で、殺虫に関して最も重要な要素は被照射物の温度である²⁴⁻²⁶⁾。昆虫は一般的に高温に対する耐性は低く、ほとんどの害虫が、55度以上で1時間も処理すれば死亡する。このため、マイクロ波によ

って木材内部まで短時間で適切に昇温することができれば、マイクロ波加熱は騒音や熱気、排ガスを生じないクリーンな木材加熱処理に貢献する。

2.3 木材のマイクロ波加熱

マイクロ波を含む高周波による木材加熱処理に関する研究は、接着、乾燥あるいは可塑化を目的とした木材加工の分野では比較的長い歴史を持つ⁸⁾。一方で、木材の熱処理を目的としたものは比較的新しく、ここ20年ほどで産業化へと発展を遂げた^{26, 28-34)}。とはいえ、こうした研究が、木材加工技術の中で得られた知見をもとに行われてきたことは想像に難くない。マイクロ波加熱処理に影響を与える木材の性質としては、木材が持つミネラルや精油などの分子的性質および密度や繊維方向などその物理的性質がある。バイオマス資材として有用物質の抽出などを行う場合は別途考慮する必要があるが、木材を材木として利用する限りでは、分子的特性は、照射エネルギー量の調整で克服できることが多い。一方で、物理的構造は、水分含有率や吸湿・放湿性などにも関与する。木材を製品加工するための研究では、繊維方向をはじめとする組織構造や吸湿性^{35, 36)}が重要な特性とされる。木材は誘電損失係数が大きく熱伝導性も悪いことがすでに既知の事実として知られ、マイクロ波殺虫を目的とした木材の加熱処理では、多くの場合、材木にマイクロ波を照射した際に必要な昇温時間や内部の害虫の死亡率調査などの応用的研究が多い。

分子的特性の課題について、照射エネルギー量で調節可能であると前述したが、マイクロ波加熱を行う際に重要な指標となる誘電率を決めるには、分子的特性もやはり重要である。マイクロ波は水分子の加熱に適した周波数であるので、分子的特性の中で加熱効率に影響を与えるのは、主に水分含量とその化学組成となる。以下にその理由と原理を説明する。木材に電場が作用していないとき、木材の化学組成を形成する原子全体は電氣的に安定した状態である。そこに電場が作用すると、誘電率に誘起されて、電子、原子核で分極が生じる。これが電子分極である。また、分子内では電子が対照的に分配されていないので、電場の作用によって原子分極が生じる。さらに分子構造によっては配向分極および界面分極が誘起される。マイクロ波加熱に使用される周波数2.45GHzは電子分極および原子分極の固有周波数である 10^{15}Hz や $10^{12}\sim 10^{13}\text{Hz}$ と比べるとはるかに低い。その一方で、配向分極と界面分極は 10^{12}Hz 以下で生じることが報告されている。木材の誘電率には、この二つの分極を誘起する物質が関与している。加えて、木材特有の物質として、マンナン、非結晶セルロースおよびリグニンが挙げられる³⁷⁾。木材中の永久双極子の配向分極の起こる周波数は電磁場の周波数に近い場合が多く、マイクロ波のような電磁場照射下では、永久双極子の配向は電磁場に追従できず、位相のずれを生じる。このずれから、摩擦によって交流損失が生じ、電気エネルギーの一部が熱に変換され、誘電体は発熱する³⁸⁾。このため、マイクロ波加熱による木材の乾燥・加熱処理では、木材内部の温度が表層よりも高くなることが認められている^{9, 10)}。

木材や木質材料を対象とした加熱処理は、従来、蒸気、電気ヒーター、熱風による加熱が行われてきており、木材の熱伝導性、放射や対流の効率を上げることが課題であった。処理木材のサイズや低い熱伝導率が課題解決に向けた要因となるが、マイクロ波加熱では、木材そのものが発熱体となるという利点があり、このことが木材における短時間・均一加熱を可能とする⁸⁾。また、木材害虫が死亡する $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ の温度域は、木材に乾燥や加熱によるダメージを与えることも少ない。しかし、マイクロ波加熱では昇温パターンが従来の加熱乾燥法と異なることもあり、処理後の木材の割れなどの諸問題が報告されている^{9, 39)}。過熱機構に適した処理方法の一層の改良が望まれる。

2.4 シロアリの電磁波感受性

2.2で述べたように、マイクロ波殺虫に関して最も重要な要素は被照射物の温度である。マイクロ波に照射されることによる昆虫体への影響としては、水分子の加熱による身体的な損傷および成長不全⁴⁰⁾や、生殖能力の低下¹⁹⁾が報告されている。木材の加熱処理に利用されるマイクロ波の強さは一般的に $4\text{kW}\sim 5\text{kW}$ と強く、害虫駆除においては、昇温のみならず電磁波そのものによる影響もある程度期待できる。しかし、シロアリのような寿命の長い昆虫では、生命活動に多少の影響があったとしても、

加熱以外の作用は致命的にはなり得ず、木材・木質材料を守ることに繋がらない。このため、殺虫を目的としたマイクロ波加熱の利用にあたっては、致命的な影響を与えることを目的に、害虫と被照射物間の水分含有量の違いが、一般的には考慮される^{16,41)}。とはいえ、実際には、カンザイシロアリ *Incisitermes minor*、ヤマトシロアリ *Reticulitermes speratus* およびイエシロアリ *Coptotermes formosanus* の3種のシロアリを用いた実験では、100W/m²の強いマイクロ波の直接照射であっても昆虫そのものを被照射体とした際には、致命的損傷は与えられないことが明らかになっている⁴²⁾。こうした背景から、マイクロ波がシロアリの生体に、致死に至らないレベルでは、どのような影響を与えているかという研究はほとんどない。

シロアリは、眼が退化しているため、振動や化学物質によるコミュニケーションを取りながら、暗闇で超個体と呼ばれるほど精密な集団生活を営む⁴³⁾。こうした生活様式から、位置情報として、地磁場を感じるマグネトロンと呼ばれる器官を有するといわれることもある^{44,46)}が、研究室レベルの試験ではその能力および器官の有無はいまだ明らかとは言えない。我々は以前の研究で、イエシロアリ *C. formosanus* を用いて、2.45GHzの電磁場を電場と磁場に分け、シロアリが電場あるいは磁場を感知できるか歩行試験によって調べたことがある。結果は陰性で、電場であろうと磁場であろうと、そしてその強弱に関わらず、シロアリが人為的に発生している電磁場を感じて前進をやめるということはなかった。電場や磁場を感知することなく前進を続けたシロアリは、当然ながら電磁場発生アリーナにぶつかる。この際、電場ではシロアリ体内で内部発熱が生じ、供試虫は直ちに死に至った。その際おそらく体液の水分子に起因する発熱であろうと思われる組織の膨張や破裂が認められた。一方で磁場では、磁気的になんらかの反応が体内で生じ、シロアリは磁場アリーナに接触すると直ちに歩行困難に陥ったが、内部発熱は認められず、目視では組織損傷は認められなかった。磁場を切った時点で、ふらふらしながらも再び起き上がり、その後も死亡することはなかった。磁場におけるこの現象は、マイクロ波発振器の出力が50Wでも300Wでも同様であった⁴⁷⁾。このことは、主に熱効果だけが利用されてきた電磁場照射には、実際には熱以外の生体作用も存在することを意味する。シロアリを歩行困難に陥らせた生体物質が、今日までその存在が探され続けているマグネトロン器官の存在をサポートするものであるのか、それとも単に神経や筋肉に含まれる常磁性物質に作用するものであったのか、興味深いところである。

3. おわりに

その他多くの害虫を対象とした時と同様に⁴⁸⁾、シロアリを標的としたマイクロ波殺虫技術でも、重要なのは、害虫が潜む被照射物の温度をどのように効率的に上げていくか、同時に熱から被照射物を保護できるよう調節していくか、ということがカギとなる。被照射物そのものの内部から発熱するマイクロ波加熱の仕組みは、木材内部に潜伏する木材害虫処理としては、薬剤による注入処理や表面処理あるいは燻蒸処理などよりも、熱で殺すというシンプルさから、その後の使用環境に一番影響の少ない殺虫機構と言える。前述しているが、熱風やオープンによる加熱処理よりも内部深くに潜む害虫を駆除できるという利点もある。一方で、その発熱機構が従来のもので大きく異なることから、その後木材に生じうる割れやひずみの影響では、研究は進むものの十分なデータがあるとは言えない状況で、まだ何にでも応用していきけるというわけではないのが現状である^{9, 40, 49)}。しかし木材自身が、ある程度マイクロ波加熱に向けた性質を持っているという点で、本手法が大きな可能性を秘めていることは間違いない^{24, 50, 51)}。例えば、曲げ木などですでに行われているが、大きな材木であっても、水分を十分に含ませた木材に適用すれば、時間短縮及び省エネとなる加熱殺虫を実施できる可能性は高い。加熱乾燥と同時進行で殺虫処理も行え、省エネな殺虫法となり得るであろう。ただ、水分を利用したマイクロ波加熱は、前述のマイクロ波加熱のメカニズムから、被照射物内部の分子的性質によってはホットスポットと呼ばれる一部分からの内部発熱が起こり得て^{52, 53)}、食品における加熱処理において

はその加熱不均一性が大きな問題となっている^{52, 54)}。木材は食品^{55, 56)}と比較すれば均一な組成であり、研究事例においても比較的均一な昇温が可能であることが報告されている³⁹⁾。それでもそのような性質が木材の質にどのような影響を与えるか、というのは課題の一つである。昆虫は、木材を加熱加圧乾燥処理するのに必要な温度よりずっと低温で死に至る。現在研究によって、重要木造文化財に使用された樹木の種類や性質が明らかとなっている。55度という温度は、木材にとっては高温処理には当たらず、非破壊的な処理ができることから、木製の彫刻や器など、シロアリ被害を受けている重要木質文化財に、それぞれの材の性質に適した処理を行っていけば、完全なシロアリの駆除をすることも可能だと思われる(表1)。マイクロ波加熱で一番問題となるのは、エネルギー消費量の大きいことであるが^{6, 57)}、その点でもその潜在能力は高い。またマイクロ波に限定しなくても、それぞれの標的害虫および被照射物に、熱エネルギーとして吸収されやすい電磁場域が存在する可能性もある。マイクロ波の良さは身近なところにある。マイクロ波加熱の面白いところは、被照射体の性質によって、その加熱効率が大きく変わることである。金属面に対しては反射することも、マイクロ波の利用にあたっての重要な性質である。さらに研究が進めば、こうした特徴をうまく生かした簡便で効果的な殺虫技術となり、我々の生活の質の向上に一層貢献すると期待される。

樹種	材木温度(°C)	加熱乾燥による損傷			
		割れ		ハニカム構造	
		辺材部	心材部	辺材部	心材部
ブナ	30	無し	無し	無し	無し
	40	無し	無し	無し	無し
	50	無し	無し*	-	微小
	30-50	-	無し		無し
トウヒ	30	-	無し		無し
	40	-	無し		無し
	50	-	無し*		無し
	60	-	無し*		無し
カキ	30	-	無し		無し
	40	-	無し		無し
	50	-	無し*		無し
	60	-	無し*		無し

表1：マイクロ波加熱で昇温した際に認められた木材への損傷

*は加熱過程で影響が認められたが、最終的に形状が回復したものを示す(抜粋：谷口および西尾 1992)

参考文献

- 1) Evans, T.A., Forschler, B.T., Grace, K.J. Biology of invasive termites: a worldwide review. *Annual Review of Entomology*, **58**, 455-474, 2013.
- 2) Qasim, M., Lin, Y., Fang, D., Wang, L. Termites and microbial biological control strategies. *South Asia Journal of Multidisciplinary Studies* **1**, 1-27, 2015.
- 3) Govorushko, S. Economic and ecological importance of termites: A global review. *Entomological Science*, **22**, 21-35, 2019.
- 4) Cao, G.C., Han, Z.J. Tebufenozide resistance selected in *Plutella xylostella* and its cross-resistance and fitness cost. *Pest Management Science*, **62** (8), 746-751. 2006.
- 5) Endersby, N.M., Morgan, W.C. Alternatives to Synthetic Chemical Insecticides for Use in Crucifer Crops. *Biol. Agr. Horticult.*, **8**, 33-52, 1991.
- 6) Vincent, C., Weintraub, P., Hallman, G., Lessard, F. Insect management with physical methods in pre- and post-harvest situations, "Integrated Pest Management", edited by Radcliffe, E.B., Cambridge University Press, 2008, pp309-323.
- 7) 柳川 綾・吉村剛 第6章1節 1.6.2. マイクロ波殺虫剤, 最新 マイクロ波エネルギーと応用技術, 産業技術サービスセンター, 666-670, 2014.
- 8) 井上雅文, 山本泰司, 木材工業におけるマイクロ波・高周波加熱の応用, *Technical Report of IEICE*, **16**, 35-40, 2003.
- 9) 谷口義昭, 西尾 茂, 温度制御による木材のマイクロ波加熱減圧乾燥, *材料*, **41(461)**, 176-182, 1992.
- 10) 浜野義昭, 西尾茂, 木材のマイクロ波加熱減圧乾燥-1- マイクロ波加熱と減圧との組み合わせによる新しい乾燥法について, *日本木材学会誌*, **34 (6)**, 485-490, 1988.
- 11) 飯田生穂, 則元京, マイクロ波加熱による木材の曲げ加工 —横方向のクリープ—, *日本レオロジー学会誌*, **9**, 162-168, 1981.

- 12) 飯田生穂, マイクロ波照射家庭における木材繊維直角方向の曲げクリープ特性, *京都府立大学学術報告*, **41**, 71-76, 1989.
- 13) 今村祐嗣, マイクロ波加熱を利用した曲木の組織構造, *木材学会誌*, **28(2)**, 743-749, 1982.
- 14) 今村祐嗣, 則元京, 林昭三マイクロ波加熱による曲木の細胞壁の変形, *木材研究・資料*, **17**, 268-277, 1983.
- 15) Nelson, S.O., Review and Assessment of Radio-frequency and Microwave Energy for Stored-grain Insect Control, *Transaction of the ASAE*, **39(4)**, 1475-1484, 1996.
- 16) Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A. Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R., Wang, Y., Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments, *Biosystems Engineering*, **85(2)**, 201-212, 2003.
- 17) Webber, H.H., Wagner, R.P., Pearson, A.G. High frequency electric fields as lethal agents for insects, *Econ. Entomol.*, **39**, 487-498, 1946.
- 18) Nelson, S.O. Possibilities for controlling storedgrain insects with RF energy, *J. Microwave Power*, **7**, 231- 237, 1972.
- 19) Vadivambal, R., Jayas, D.S., White, N.D.G. Wheat disinfestation using microwave energy, *J Stored Products Res.*, **43**, 508-514, 2007.
- 20) Halverson S.L., Burkholder, W.W., Bigelow, T.S., Nordheim, E.V., Misenheimer, M.E. High power microwave radiation as an alternativeinsect control method for stored products, *J. Econ. Entomol.*, **89**, 1638- 1648, 1996.
- 21) 鈴木実, 阿部重春, 宮川孝夫, 山口聡, マイクロ波を利用した食品製造技術の開発と実用化, *日本食品保蔵科学会誌*, **25, 6**, 327-337, 1999.
- 22) Guo, W., Wu, X., Zhu, X., Wang, S., Temperature-dependent dielectric properties of chestnut and chestnut weevil from 10 to 4500 MHz, *Biosystems Engineering*, **110**, 340-347, 2011.
- 23) Field, P.G., The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures, *J. Stored Prod. Res.*, **28(2)**, 89-118, 1992.
- 24) Massa, R., Migliore, M.D., Panariello, G., Pinchera, D., Schettino, F., Caprio, E., Griffio R. Wide Band Permittivity Measurements of Palm (Phoenix Canariensis) and Rhynchophorus ferrugineus (Coleoptera Curculionidae) for RF Pest Control, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **48 (3)**, 158-169. 2014.
- 25) Sadeghi, R., Moghaddam, R. M., Seyedabadi, E. Microwave Use in the Control of Ephestia kuehniella (Lepidoptera: Pyralidae) in Dried Fig and Raisin and Effects on Fruit Sensory Characteristics, *J. Econ. Entomol.*, **111(3)**, 1177-1179, 2018.
- 26) Hoyer, C., Pfützte, C., Plarre, R., Trommler, U., Steinbach, S., Klutzny, K., Holzer, F., Rabe, C., Höhlig, B., Schmidt, D., Roland, U., Chemical - Free Pest Control by Dielectric Heating with Radio Waves and Microwaves: Thermal Effects, *Chemical Engineering Technology*, **41 (1)**, 108-115. 2017.
- 27) Lewis, V.R., Haverty, M.I., Lethal effects of electrical shock treatments to the western drywood termite (isopteran: kalotermitidae) and resulting damage to wooden test boards, *Sociobiology*, **37**, 163-183, 2000.
- 28) Daian, G., Taube, A., Birnboim, A., Shramkov, S., Daian, M. Measuring the dielectric properties of wood at microwave frequencies, *Wood Science and Technology*, **39 (3)**, 2005, pp. 215-223.
- 29) Daian, G., Taube, A., Birnboim, A., Daian, M., Shramkov, S., Modeling the dielectric properties of wood, *Wood Science and Technology*, **40 (3)**, 237-246, 2006.
- 30) Torgovnikov, G. I. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer-Verlag, Carifornia, 1993, pp. 196.
- 31) Rattanadecho, P. The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: Influence of frequency and sample size, *Chemical Engineering Science*, **61 (14)**, 4798-4811, 2006.
- 32) Patrascu, M., Radoiu, M., Pruna, M. Microwave Treatment for Pest Control: Coleoptera Insects in Wooden Objects, *Studies in Conservation*, **63(3)**, 155-162.
- 33) Martínez Lluch, A., Vegas, L.-M. F. Mileto, C., Diodato, M. Microwaves as a Remedial Treatment of Wood. *Advanced Materials Research*, **778**, 620-627, 2013.
- 34) Nzokou, P., Tourtellot, S., Pascal, D.P., Kiln and microwave heat treatment of logs infested by the emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire)(Coleoptera: Buprestidae), *Forest Products Journal*, **58 7/8**, 68-72, 2008.

- 35) 飯田生穂, 則元京, 今村祐嗣, マイクロ波加熱による木材の曲げ加工 : 横方向曲げ処理材の水分・熱回復, *木材研究・資料*, **17**, 99-111, 1983.
- 36) 青木務, 則元京, マイクロ波加熱による木材の曲げ加工:繊維方向曲げ加工材の水分回復, *木材研究・資料*, **17**, 88-98, 1983.
- 37) Norimoto, M., Dielectric Properties of Wood, *WoodResearch*, **59/60**, 106-152, 1976.
- 38) 則元京, マイクロ波による木材の塑性曲げ加工, *木材研究資料*, **14**, 13-26, 1979.
- 39) 藤本登留, 森田裕資, 大内毅, 林翰謙, 大橋兼廣, 近藤和幸, マイクロ波加熱によるスギ丸太の乾燥, *材料*, **54(4)**, 371-376, 2005.
- 40) Olsen RG., Constant - dose microwave irradiation of insect pupae, *Radio Sci.*, **17-5S**, 145-148, 1982.
- 41) Jiao S., Johnson JA., Tang J., Tiwari G. and Wang S., Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments, *Biosystems Engineering*, **108**, 280-291, 2011.
- 42) Nakai, K., Mitani, T. Yoshimura, T., Shinohara, N., Tsunoda, K., Imamura, Y. Effects of Microwave Irradiation on the Drywood Termite *Incisitermes minor* (Hagen), *Jpn. J. Environ. Entomol. Zool.*, **20(4)**, 171-184, 2009.
- 43) 安部琢磨, シロアリの生態, 東京大学出版, pp140, 1989.
- 44) Maher, B.A., Magnetite biomineralization in termites. *Proceedings of the Royal Society London B*, **265**, 733-737, 1998.
- 45) Alves, O.C., Wajnberg, E., Oliverira, J.F.-de, Esquivel, D.M.S., Magnetic material arrangement in oriented termites: a magnetic resonance study, *Journal of Magnetic Resonance*, **168**, 246-251, 2004.
- 46) Oliverira, J.F.-de, Alves, O.C., Esquivel, D.M.S., Wajnberg, E. Ingested and biomineralized magnetic material in the prey *Neocapritermes opacus* termite: FMR characterization, *Journal of Magnetic Resonance*, **191**, 112-119, 2008.
- 47) Yanagawa, A., Kashimura, K., Mitani, T., Shinohara, N., Yoshimura, T., Influence of Powerful Microwaves on the Termite *Coptotermes formosanus* -Impact of Powerful Microwaves on Insects in Processing and properties of advanced ceramics and composites VI / edited by J.P. Singh (Ceramic transactions , v. 249), 2014, pp367-374.
- 48) Johnson, J.A. Wang, S., Tang, J. Thermal Death Kinetics of Fifth-instar *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae), *J. Econ. Entomol.*, **96(2)**, 519-524, 2003.
- 49) 木村志郎, 横地秀行, 竹中佐恵, くさび型刃物による圧入切削-1-切削抵抗主分力および割れにおよぼすマイクロ波加熱の影響, *木材学会誌*, **30(4)**, 301-308, 1984.
- 50) Henin, J.-M., Charron, S., Luypaert, P. J., Jourez, B., Hebert, J. Strategy to control the effectiveness of microwave treatment of wood in the framework of the implementation of ISPM 15, *Forest Products Journal*, **58**, 75-81, 2008.
- 51) Lee, S.H., Ashaari, Z., Lum, W.C., Halip, J.A., Ang, A.F., Tan, L.P., Chin, K.L., Tahir, P.M. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review, *Construction and Building Materials*, **181**, 408-419, 2018.
- 52) Ho, Y.C., Yam, K.L., Effect of meatal shielding on microwave heating uniformity of a cylindrical food model, *Journal of Food Processing and Preservation*, **16(5)**, 337-359, 1992.
- 53) Campañonea LA. and Zaritzky NE., Mathematical analysis of microwave heating process, *Journal of Food Engineering*, **69-3**, 359-368, 2005.
- 54) Vadivambal, R., Jayas, D.S., Non-uniform Temperature Distribution During Microwave Heating of Food Materials—A Review, *Food and Bioprocess Technology*, **3(2)**, 161-171, 2010.
- 55) Cheng, Y., Sakai, N., Hanzawa, T., Effects of Dielectric Properties on Temperature Distributions in Food Model during Microwave Heating, *Food Science and Technology International Tokyo*, **3(4)**, 324-328, 1997.
- 56) Lee, D.S., Shin, D.-H., Yam, K.L., Improvement of temperature uniformity in microwave - reheated rice by optimizing heat/hold cycle, *Food Service Technology*, **2(2)**, 87-93, 2002.
- 57) Fleurat-Lessard, F., Control of Insects in Post-Harvest: Radio Frequency and Microwave Heating, edited by Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F., Physical Control Methods in Plant Protection, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, pp162-173.

著者プロフィール



柳川 綾 (Yanagawa Aya)

<略歴> 2004年九州大学農学部卒業／2009年九州大学生物資源環境科学府博士後期課程修了 博士(農学)／同年京都大学生存圏研究所にて日本学術振興下位特別研究員(PD)／2012年京都大学生存圏研究所助教、現在に至る。<研究テーマと抱負>昆虫病理学・生態系との調和、自然界と人の暮らしを大切にする生存圏科学。<趣味など>読書・散歩・お茶会。

重要文化財願興寺本堂保存修理工事における用材調査

田鶴 寿弥子^{1*}, 杉山 淳司^{1,2}

Wood identification of old wooden members in Ganko-ji temple designated as national heritage

Suyako Tazuru^{1*} and Junji Sugiyama^{1,2}

概要

歴史的建造物の修理工事における樹種識別調査は近年徐々に増加してきており、様々な情報が抽出され、様々な分野で活用されつつある。本研究では今から凡そ400年以上前に、焼失により地元の百姓らが尽力して建立された願興寺の保存修理工事に際した部材の樹種調査を行うことで、修理工事に役立てるとともに、当時の植生や地域的な用材選択などについて紹介する。

1. はじめに

近年、日本では考古学や美術史をはじめとした様々な分野で、顕微鏡など科学的手法を用いた樹種識別の学術的意義がますます認められてきており、多方面で様々な成果が出てきている¹⁾。建築史の世界においても、特に建造物保存修理工事における部材の樹種調査の認知度が徐々に上がってきており、様々な建造物における樹種調査結果が、修理工事に役立てられてきている²⁾。とは言うものの、建造物を構成する部材数は膨大であり、すべての部材について顕微鏡を用いた識別を行うことは現実的ではない。筆者らはここ10年あまりの調査により、現場で実際に修理にあたる大工や現場担当者らの経験にもとづくすばらしい樹種判断力の高さをひしひしと感じてきたと同時に、約30棟の歴史的建造物の樹種調査を実際に行ってきたことで、時代を経た古材を目視で樹種推定することの困難さについても痛感してきた⁴⁾。そして古の木匠が心血注いだ建造物に込められた英知を科学的に明らかにすることの重要性を改めて痛感している。

今回調査を行った願興寺は、旧中山道御嵩宿にある天台宗の寺院であり、草創は、最澄が東国下向の際にとどまり、小堂を建立して薬師如来像を奉ったことによるといわれる。その後、長徳4年(998年)、本堂、宝塔などの伽藍造営が行われたが、天仁元年(1108年)に兵火によって消失し、その後再建された。しかし、元龜3年に再び燃失し、天正9年1581年本堂のみが再建されたという経緯がある。現在みることができる本堂はこのときのもので、近隣の百姓玉置興次郎と市場左衛門太郎が人々から浄財を集めて建立したといわれている。そのためか、意匠については正面に注力しているものの、そのほかの部分については簡略化されているほか、使用されている材料には、寺院ではあまり一般的に用いないような湾曲した柱なども各所にみられる。

本堂の建立以来、凡そ10回程度の修理が行われてきたが、これまでに解体修理が行われた記録はな

2019年6月4日受理.

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

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

² No.159 Lonpan Road, Nanjing, 210037, Jiangsu, China, Nanjing Forestry University

い。今回、願興寺では平成 29 年(2017 年)11 月より令和 8 年(2026 年)の予定で、はじめてとなる解体修理工事が行われている。解体工事を行う際、用いられている古材はできる限り再活用するほか、古材が再利用不可能な場合には同樹種で新しい木材を準備する必要があることから、部材の樹種にあたりをつける作業が必要になってくる。しかし、上記のように、古材では高い経験値をもってしても、劣化や風合い、香りの変化、物性の変化などにより、樹種推定の困難な事例が多い。筆者らは、10 年あまり前から、歴史的建造物の部材に使用されている樹種の歴史的、地域的変遷についてデータベースの構築を目指して調査を進めており、今回部材調査の結果を報告する。

2. 試料と方法

本研究では、岐阜県可児郡御嵩町に位置する願興寺の修理工事に際して、部材の樹種識別を行った。願興寺は、天正 9 年(1581 年)に再建され、桁行 7 間、梁間 5 間の構造形式である。一重寄棟造、向拝 1 間、鉄板葺であり、平面は周囲 1 間を開放的な広縁とし、中央柱間 3 間を同じ柱間寸法にするなど、他にはあまり見られない特徴がある。

調査に用いた部材数は 52 部材である。柱、小屋梁、頭貫、丸桁、大引など様々な部位から部材を採取するようにした。現場担当者らと建造物の床下などにもぐって図面や番付、実際の部材を確認しながら、取替え古材、および部材の傷んでいる部分や割れ目の内部など、目視による調査を行い、物性に影響の無い部位から、ノミや鋸などを利用し、可能な限り最小サイズとなるように配慮して採取を行った。採取した部位について写真を撮影した。その際、大工や現場担当者らから、わかるものについては目視での推定樹種の聞き取りを行った。

その後京都大学生存圏研究所においてプレパラートの作成および樹種識別作業を行った。合計 52 点の試料は、水ないし湯で軟化させたのち、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、ガムクロールで封入を行った。その後、木材組織の光学顕微鏡観察を行った。光学顕微鏡で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）の識別が可能でそのためのリストが公表されている⁵⁶⁾。この方法は目視による樹種推定に比べて学術的な裏付けがあり、さらに簡便であることが特徴である。



図 1：願興寺概観（上）および修理中の様子（左下・右下）。概観写真は公益財団法人文化財建造物保存技術協会よりいただいた。



図 2：樹種識別のための試料採取の様子（左）。採取した試料はラベリングし、撮影する（右）。

3. 結果と展望

今回調査を行った願興寺本堂は 1581 年の再建から、ゆうに 400 年を経過した建造物ということもあり、実際に床下はじめ小屋裏などに入ったが、部材の痛みは大変激しい状況であった。経年による劣化に加え、虫害や腐れによる劣化も激しいことから、木材表面がスポンジ状になっている部分も多く、目視での樹種判別は困難を極めた。現地にて現場担当者らとともに採取した 52 点の部材について樹種識別を行った結果は表 1 に示したとおりである。また、一部の樹種（モミ属、エノキ、カツラ、ムクノキ）についての光学顕微鏡写真を図 3 に掲載した。

現場の大工や現場担当者の推察どおり、ニヨウマツ類（アカマツ、クロマツと考えられる）(21 点)の多用が認められた。そのほかは多い順にスギ（10 点）、ムクノキ（7 点）、ケヤキ（4 点）、ゴヨウマツ類（2 点）、カエデ（道管のサイズよりイタヤカエデの可能性はある）(2 点)、カツラ（2 点）、ヤマザクラ（1 点）、ヒノキ（1 点）、モミ属（1 点）、エノキ（1 点）が並んだ。ニヨウマツ類のアカマツとクロマツについては、放射仮道管の水平壁にある鋸歯状突起が著しいものがアカマツ、顕著でないものがクロマツであるとされている。アカマツにおいては鋸歯状突起が $2.5 \mu\text{m}$ を超えるものが稀に存在する一方、クロマツではなめらかで突起が顕著でないという特徴や突起が有縁壁孔の周りに沿って伸びる傾向があるとされているが⁷⁾、ここではニヨウマツ類との記載にとどめたい。

また、ゴヨウマツ類については、ゴヨウマツやキタゴヨウなどが含まれるが、解剖学的特徴での分類は容易ではない。ゴヨウマツとキタゴヨウは、中部山岳の西端や南端にあたる岐阜県などで分布域が接していることから⁸⁾、岐阜県可児市の当該建造物に使われたのはキタゴヨウの可能性も考えられる。ただし判別は困難であることから、ここではゴヨウマツ類との記載にとどめた。

現場で大工や現場担当者らが行った目視での推定樹種と、今回の結果を比較すると、経年劣化により、木材表面の状態なども変化していたこともあり、ヒノキとニヨウマツ類やスギなどについて見分けにくいことが判明した。また、今回の建造物では、焼失のち地元の百姓らが人々の浄財を集めて建立した経緯もあるからか、寺社建築にはあまり用いられないムクノキやエノキをはじめとした樹種が多用されていることも判明した。当時の人々の困窮しながらも必死に木材を集める状況が目に浮かぶようであった。

また、部位ごとの樹種を考えると、1 階の床組の重要な部材で根太を支える大引に、ニヨウマツ類に加え、ムクノキ、カエデ、ヤマザクラといった広葉樹が利用されている点が興味深い。また、柱や小屋梁にムクノキが使われている例も多く、当時、寺周辺のムクノキを活用したのではないかと推測された。現在、修理工事は始まったばかりである。限られた予算や樹種の中で、当時の大工らがどのように用材選択を行っていたのかをより詳細に知るためにも、今後も継続した調査をすすめることで、修理工事のみならず、当時の植生や木材流通の解明に寄与したいと考えている。また、プレパラート

番号、顕微鏡写真等を大学内のデータベースレポジトリに公開予定であり様々な研究に応用させていきたい。

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願興寺御住職ならびに公益財団法人文化財建造物保存技術協会の現場担当者をはじめとして現場での作業に御尽力くださった大工さんや現場スタッフにお礼を申し上げます。本研究は科研費若手 B（田鶴）、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。

表1: 採取試料の樹種識別結果一覧

番号	建物	部材名	番付	現場担当者による 推定樹種	樹種識別結果	樹種識別結果(学名)
1	願興寺本堂	小屋梁	は-三~七		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
2		柱	ほ-七	ツガ	モミ属	<i>Abies</i> sp.
3		柱	ほ-九	ヒノキ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
4		柱	は-九	ヒノキ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
5		柱	は-七	ヒノキ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
6		柱	は-五	広葉樹	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
7		柱	は-三	ヒノキ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
8		柱	ほ-五	ケヤキ	エノキ	<i>Celtis sinensis</i> Persoon
9		小屋梁	は-七~九		ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
10		柱	と-三	広葉樹	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
11		頭貫	と~り-三		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
12		柱	る-三	マツ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
13		柱	る-五	マツ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
14		柱	わ-七	ネズコ	カツラ	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>
15		小屋梁	る-七~九		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
16		小屋束	棟通り中央より西に二本目		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
17		柱	り-七	広葉樹	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
18		小屋梁	と-三~七		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
19		頭貫	と~り-七		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
20		小屋束貫	棟通り中央より東に二~三本目間		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
21		頭貫	り~る-九		ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
22		桔木	る~わ-九(東より三本目)		スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
23		桔木	り~る-三(東より二本目)		スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
24		柱	よ-一	ヒノキ	ヒノキ	<i>Chamaecyparis obtusa</i>
25		柱	と-一	ヒノキ	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
26		柱	は-一	ケヤキ	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
27		柱	い-七	広葉樹	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
28		柱	い-九	ヒノキ	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
29		丸桁	と~り-十三		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
30		丸桁	り~る-十一		カツラ	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>
31		柱	る-十一	不明	カエデ	<i>Acer</i> sp.
32		茅負	る~わ-九付近		ゴヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Haploxylon</i>
33		裏甲	る~わ-九付近		スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
34		木負	る~わ-九付近		スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
35		柱	よ-九	ヒノキ	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
36		柱	よ-七	ヒノキ	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
37		柱	よ-五	広葉樹	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
38		茅負	り~る-三付近		ゴヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Haploxylon</i>
39		裏甲	り~る-三付近		スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
40		繫梁	る-九~十一		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Haploxylon</i>
41		頭貫	り~る-十一		スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
42		内法貫	と~り-十一		ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
43		繫梁	い~は-七		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
44		飛貫	は-三~五		ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
45		飛貫	り~る-三		ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
46		大引	は-七~九	広葉樹	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
47		大引	は-三~五	広葉樹	カエデ	<i>Acer</i> sp.
48		大引	る-一~三	広葉樹	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
49		大引	よ-一~三	広葉樹	ヤマザクラ	<i>Prunus s.l.</i>
50		大引	り-七~九	マツ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
51		大引	ほ-五~七	マツ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
52		足固	い~は-十一	マツ	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>

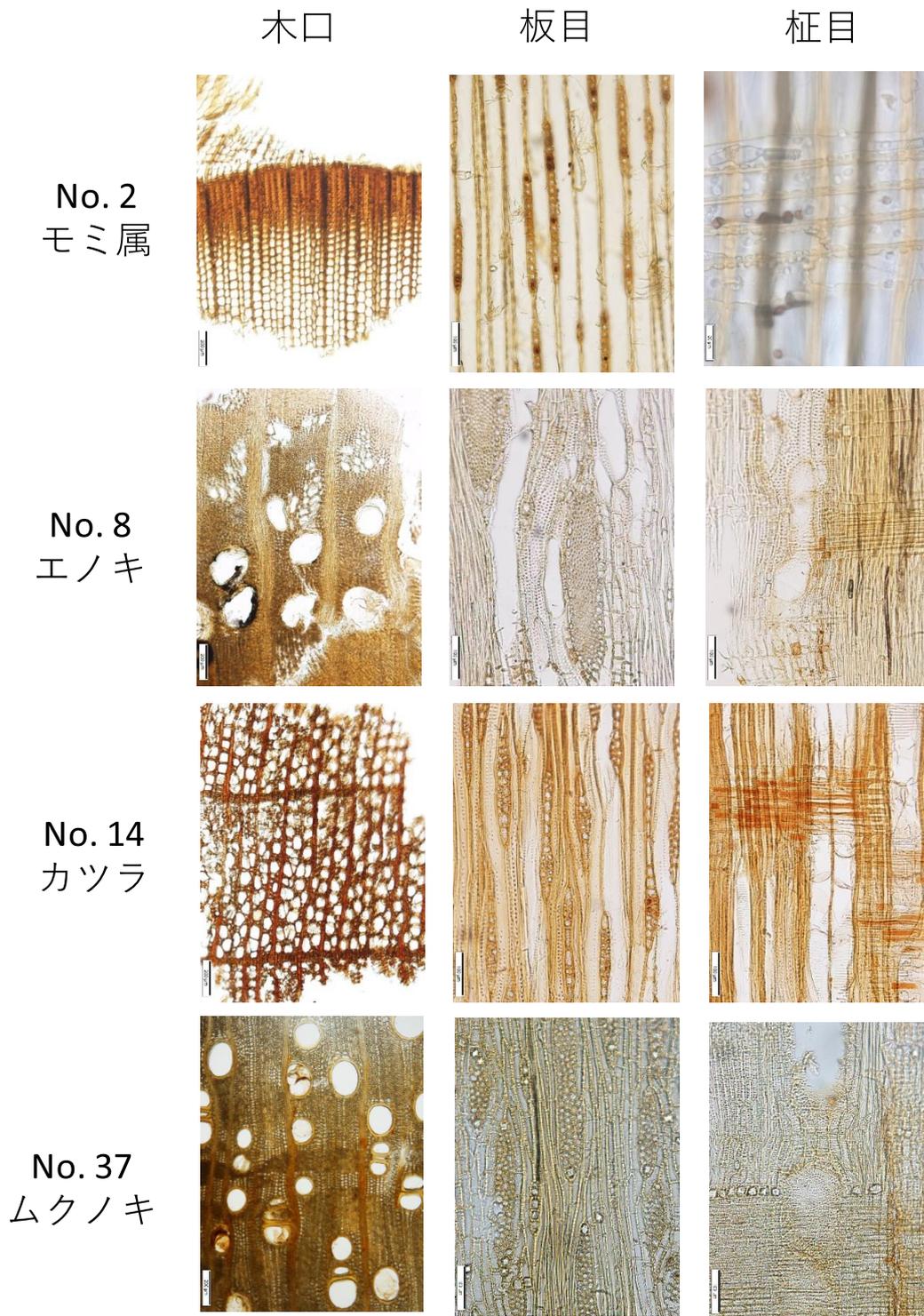


図 3: 顕微鏡写真の一部 No. 2 のモミ属、No. 8 のエノキ、No. 14 のカツラ、No. 37 のムクノキについて、それぞれ左より木口面、板目面、柁目面である。

参考文献

- 1) Kaneko, H., M. Iwasa, S. Noshiro, and T. Fujii. “Nihon kodai ni okeru mokuchōzō no jushu to yōzaikan. II, Hachi-kyū seiki o chūshin ni” [Wood types and material selection for Japanese wooden statues of the ancient period. II, Particularly the eighth–ninth century]. *Museum* 583:5-44, 2003.
- 2) Mertz M., Itoh T., “Analysis of Wood Species in the Collection “, in Leidy, Denise Patry et Strahan, Donna, *Wisdom Embodied, Chinese Buddhist and Daoist Sculpture in The Metropolitan Museum of Art*, Yale University Press, pp. 216-225, 2010.
- 3) 田鶴寿弥子, 茶室建築の樹種を科学的に知る－樹種識別法の今－, 茶の湯文化学, 27, 59-66, 2017.
- 4) 田鶴寿弥子, 建造物保存修理工事における部材の樹種調査の現状, 建築史学, 72, 34-43, 2019.
- 5) 伊東隆夫, 藤井智之, 佐伯 浩 : “広葉樹材の識別, IAWAによる光学顕微鏡的特徴リスト”, 海青社, 1998, pp1- 122.
- 6) 伊東隆夫, 藤井智之, 佐野雄三, 安部 久, 内海泰弘: “針葉樹材の識別, IAWA による光学顕微鏡的特徴リスト”, 海青社, 2006, pp1-60.
- 7) Greguss, P.: *Description of the Pinaceae by species*, “Identification of living Gymnosperms on the basis of Xylotomy”, Akademiai Kiado, Budapest, 1955, pp237-238.
- 8) 林弥栄, “日本産針葉樹の分類と分布”. 農林出版, 1960, pp1-202.

著者プロフィール



田鶴 寿弥子 (Suyako Tazuru-Mizuno)

＜略歴＞ 2011年京都大学大学院農学研究科森林科学専攻博士課程農学博士取得/同年京大生存圏研究所博士研究員/同年同研究所ミッション専攻研究員/同年同研究所助教、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞木質文化財の樹種データベース構築、年輪研究など。＜趣味＞巨樹巡りと子供服作り。



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年より現職。日本学術会議連携会員。＜研究テーマと抱負＞人工知能を利用した木材解剖学・情報学 ＜趣味＞鴨川散歩にサイクリング

研究業績

当研究所の研究業績は、京都大学教育研究活動データベースにまとめられており、平成30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 第15号

発行日	令和元年11月20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

