

目次

水に代わる低環境負荷媒体とものづくり	1
繊維機能融合化分野 特定教授 奥林 里子	
マイクロ波加熱 ―電子レンジで化学反応?―	7
生存圏電波応用分野 准教授 三谷 友彦	
樹木の個性 ―抽出成分―	13
森林代謝機能化学分野 助教 鈴木 史朗	

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、従来の溶媒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

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： 繊度の異なる 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）

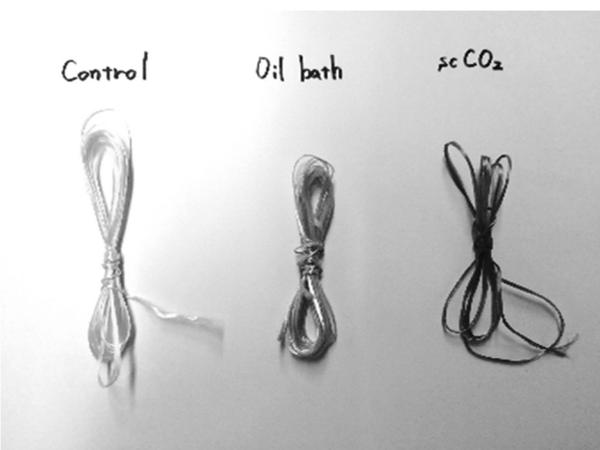


図 2： PAR 繊維の超臨界二酸化炭素染色（染料濃度:3%owf,染色条件: 150℃, 20MPa, 5 時間）

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 UHMWPE 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。

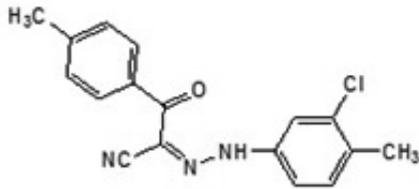


図 3 : Hydrazono propanenitrile 系染料の化学構造

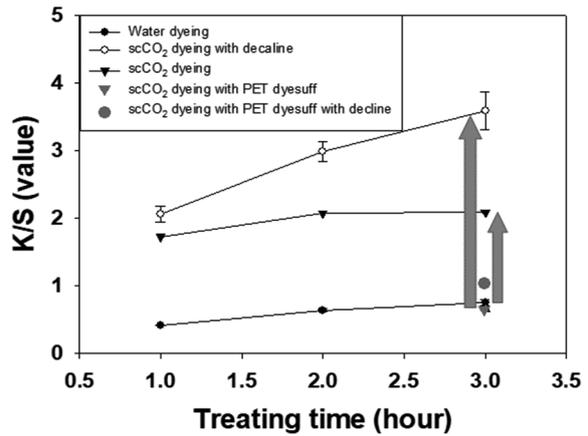
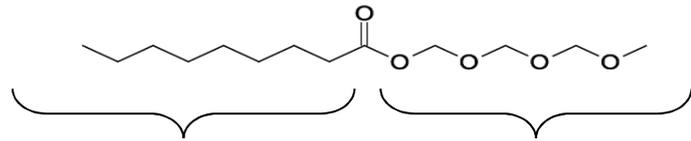


図 4 : UHMWPE の超臨界二酸化炭素染色

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 誘導体の化学構造

アルキル鎖 (C_n) 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 (C_n-PEG_m) 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 C_n-PEG_m の化学構造式を図 5 に示した。C_n-PEG_m 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

染伝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さび染みは、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こり、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染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、繊維上の錆染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

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

ッチ法)。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。

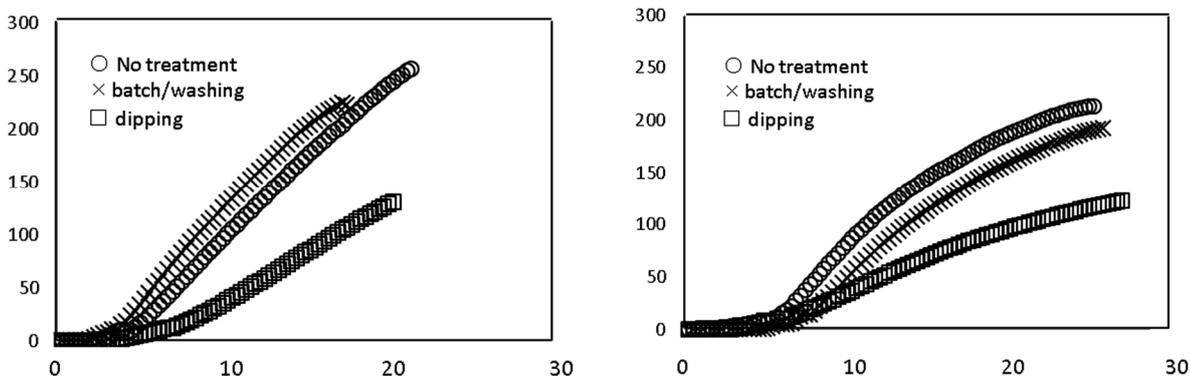


図 6：綿および絹布帛の引張強度試験

一方、下段の「バッチ／洗淨法」では処理直後の色差も小さく（白く）、すすぎ洗淨のない「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、抽出技術を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淨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350ℓ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教授が二酸化炭素染色を実演した同年の1993年、Jasper社が製作した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



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）

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压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%が超臨界二酸化炭素での染色に切り替え、今後この比率は益々上がるとTong Siang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 —電子レンジで化学反応?—

三谷 友彦^{1*}

Microwave Heating – Chemical Reaction in Microwave Oven? –

Tomohiko Mitani^{1*}

概要

本稿では、生存圏研究所で研究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とマイクロ波加熱の原理について述べる。

1. はじめに —「熱」って何?—

今年（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、著者がアメリカ・フロリダ大学に長期滞在中だったため、今夏の日本の酷暑を経験していないからである。今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今年の夏に 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ブ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、例えばオーブ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

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

の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、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

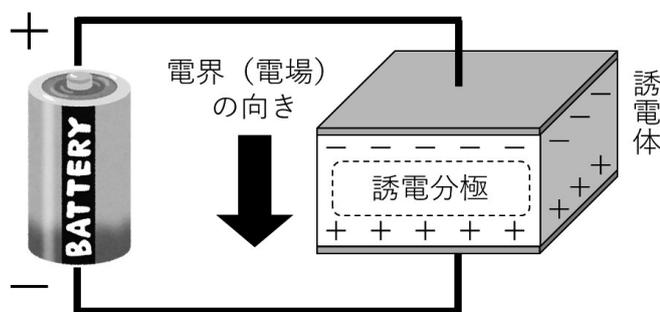


図 1：誘電体と電界（電場）と誘電分極の関係。誘電体に電界（電場）をかけると誘電体内に電氣的な偏り（誘電分極）ができる。

～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。

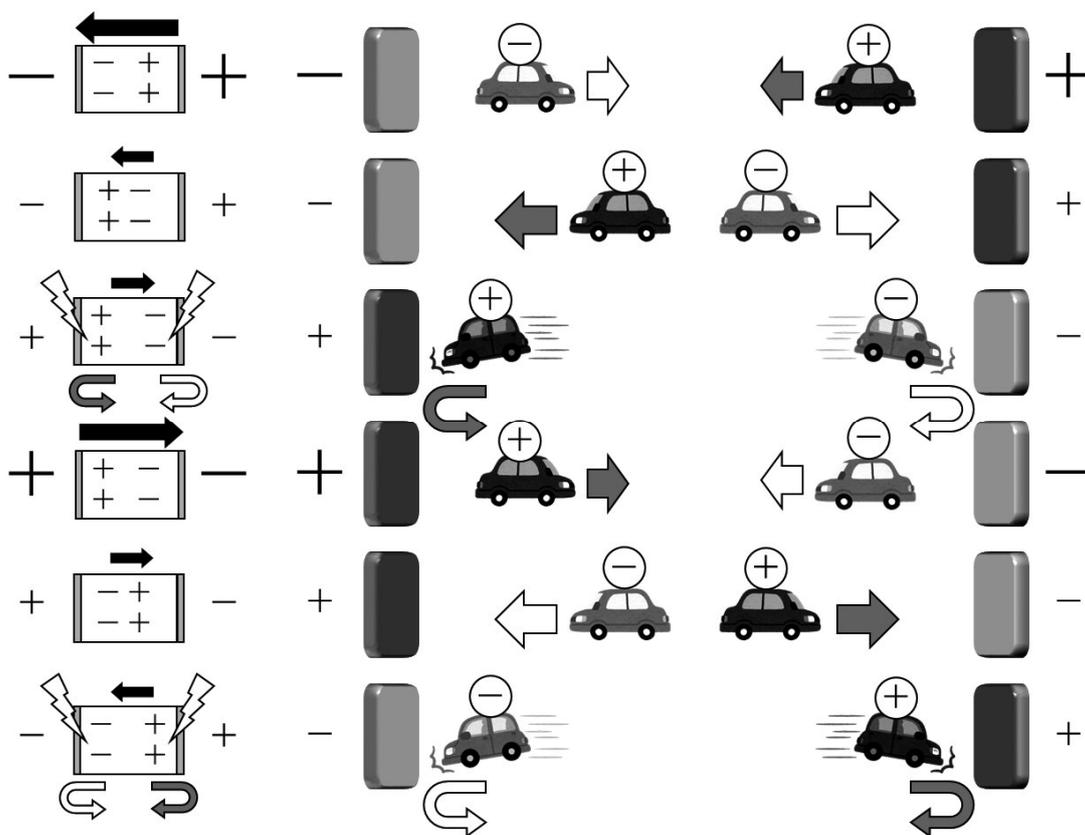


図2：電界の向きの変化と誘電分極の変化の図。誘電分極より先に電界が変化すると、誘電分極にブレーキがかかってしまう。右図は、誘電分極する+成分と-成分を自動車の動きに見立てた比喩的な図。ブレーキのエネルギーが最終的には熱に変わることによって誘電体が加熱される。

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. マイクロ波加熱を利用し

た応用研究

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（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）、牛乳を温めることに時間がかかるし、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時間が必要である。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ってしまうと火傷をする危険がある。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はなく、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多数存在する⁵⁾。

本稿では生存圏研究所で主に取り組まれている研究事例として、木材分野にあたる木質バイオマス前処理用マイクロ波加熱装置の研究、および化学分野にあたる化学反応用マイクロ波加熱装置の研究について次節以降で述べる。

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。

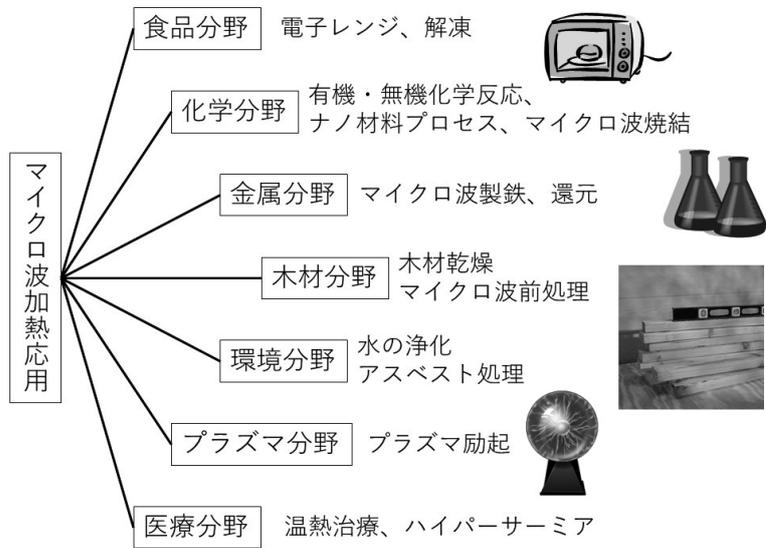


図3：マイクロ波加熱の応用分野。

図4にこれま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50 L）

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に開発した広帯域マイクロ波加熱装置の写真を示す。左の写真は容量360 mL程度の容器であり、被加熱物を

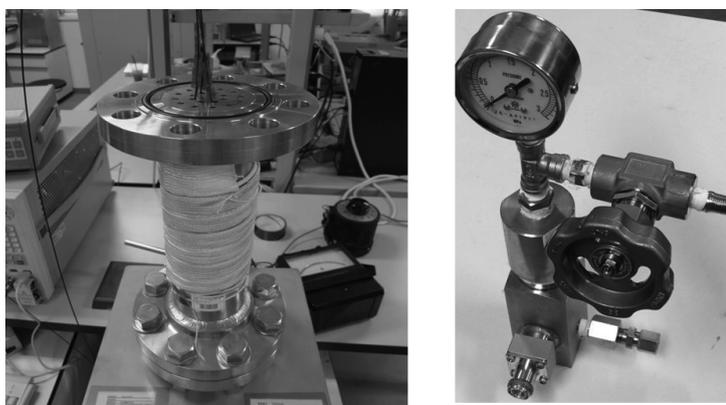


図5：広帯域マイクロ波加熱装置の写真。（左：容量360 mL程度、右：容量20 mL程度）

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。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研究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, 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., *Proceedings of the 52nd Annual International Microwave Power Symposium (IMPI 52)*, Long Beach, USA, 2018.
- 10) Mitani, T., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **61**, 113-120, 2018.

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。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、アルカロイドの一種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種であるミリカノールやミリカノンが蓄積し、薬効成分の一種となっている。このように様々な種類の樹木が和漢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

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

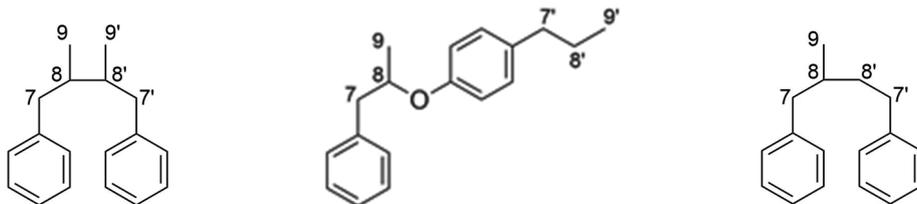


図2：(左から) リグナン、ネオリグナン、ノルリグナンの炭素骨格の例

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い少ない³⁾。

2.2 フラボノイド、スチルベノイド、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

スチルベノイドは生合成的にフラボノイドに近く、同様にケイ皮酸類と酢酸3分子から生成する。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)。

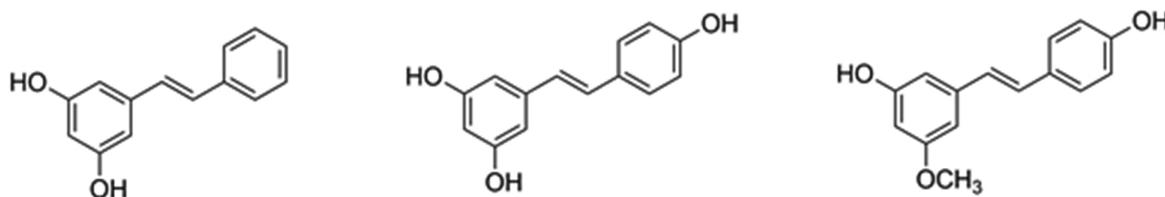


図4：ピノシルビンおよびその誘導体
(左から) ピノシルビン、レスベラトロール、ピノスチルベン

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ビネチニン型、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⁾

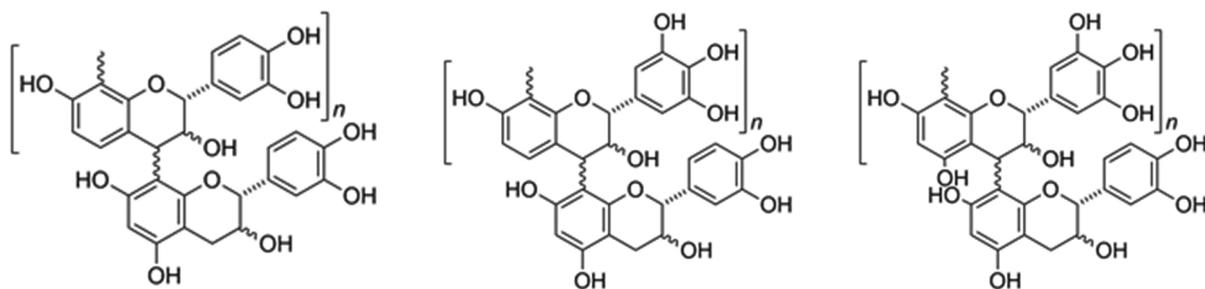


図5：縮合型タンニンの化学構造
(左から) プロフィゼチニジン型、プロロビネチニジン型、プロシアニジン型

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)。

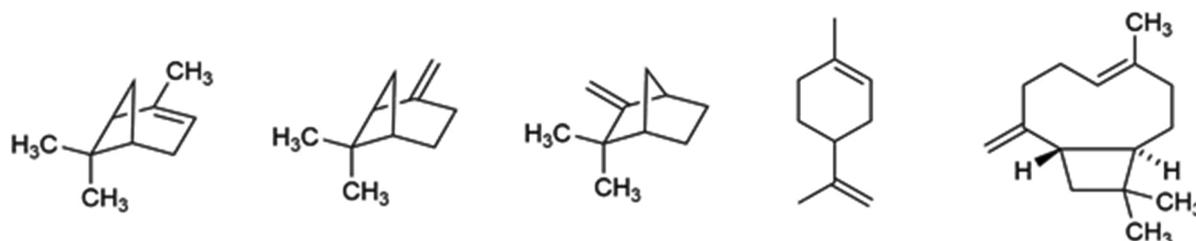


図6：モノテルペンとセスキテルペン
(左から) α -ピネン、 β -ピネン、カンフェン、リモネン、 β -カリオフィレン

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

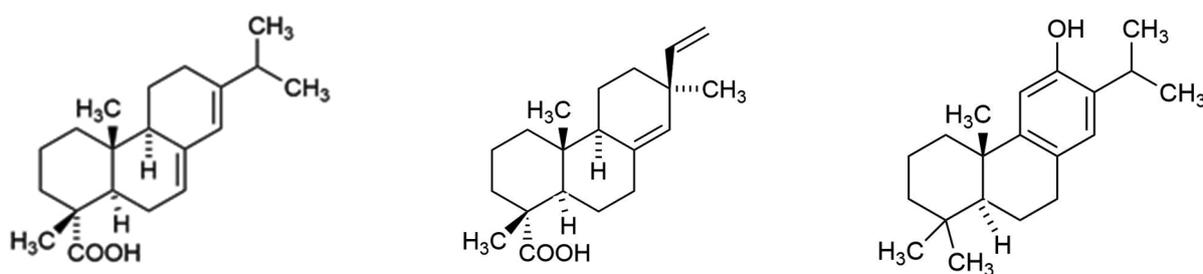


図7：(左から) アビエチン酸、ピマール酸、フェルギノール

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、古くからアロマセ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。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 *Thujaopsis dolabrata* var. *hondai* Makino. *Plant Tissue Culture Letters* 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., manuscript in preparation.
- 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 Phytologist* 211:332-344.
- 18) Cong et al. (2013) Multiplex genome engineering using CRISPR/Cas9 systems. *Science* 339: 819-823.

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。