

# 第17回生存圏研究所公開講演会

## 講演要旨集

日時：2021年10月17日(日) 13:30～15:20

ウェブ配信(zoom)



# 目次

地球大気を電波リモートセンシングで探る .....	1
レーダー大気圏科学分野 教授 山本 衛	
地球で一番大きな生物を支える「セルロース」について .....	9
生物機能材料分野 准教授 阿部 賢太郎	
植物成分を微生物に作ってもらう .....	15
森林圏遺伝子統御分野 助教 棟方 涼介	



# 地球大気を電波リモートセンシングで探る

山本 衛<sup>1\*</sup>

## Explore the Earth's atmosphere with radio remote sensing

Mamoru Yamamoto<sup>1\*</sup>

### 概要

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

### 1. はじめに

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

### 2. レーダーによる大気観測

大気は重力によって地球表面に捉えられた気体であり、密度と圧力は地表面が最大で高度と共に指数関数的に減少する。図2に標準的な大気温度の高度分布を示す。気温は地表面から高度10 kmを過ぎるあたりまでは1 km当り約6.5度の割合で高度と共に低下する。ここを対流圏と呼ぶ。雨・雲などの気象現象は対流圏内の現象である。高度約11 kmに対流圏界面と呼ばれる気温の極小層があり、その上部の高度約50 kmまでは高度と共に温度が上昇していく成層圏である。その上

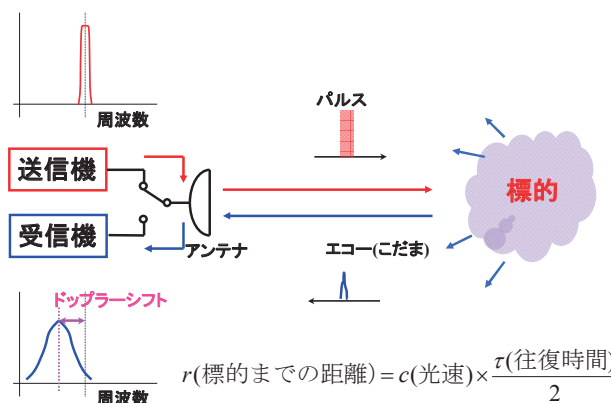


図1 レーダー原理図

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

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

部は再び温度が下がる中間圏、高度 90km 以上は温度が飛躍的に高くなっていく熱圏が広がっている。熱圏は、例えば高度 100 km では大気圧は  $2 \times 10^{-7}$  気圧程度しかない（地表は 1 気圧）。高度 300 km 以上は希薄で人工衛星が飛翔しうる領域である。更に上部は太陽系空間に徐々につながって行く。宇宙空間から地球に飛び込んでくる微小な塵は高度 70~110 km において燃えて流星となる。また熱圏では大気を構成する原子や分子が太陽光線に含まれる紫外線や X 線によって電離して、電離圏を形作っている。電離圏は高度 100~120 km に広がる E 層、高度 200~400 km を中心とする F 層と呼ばれる層構造を成している。

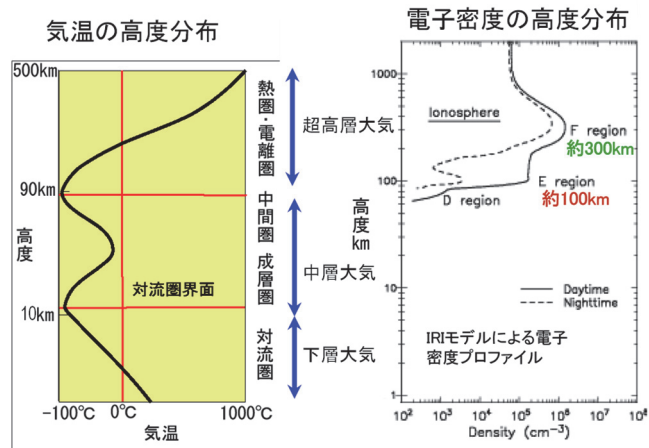


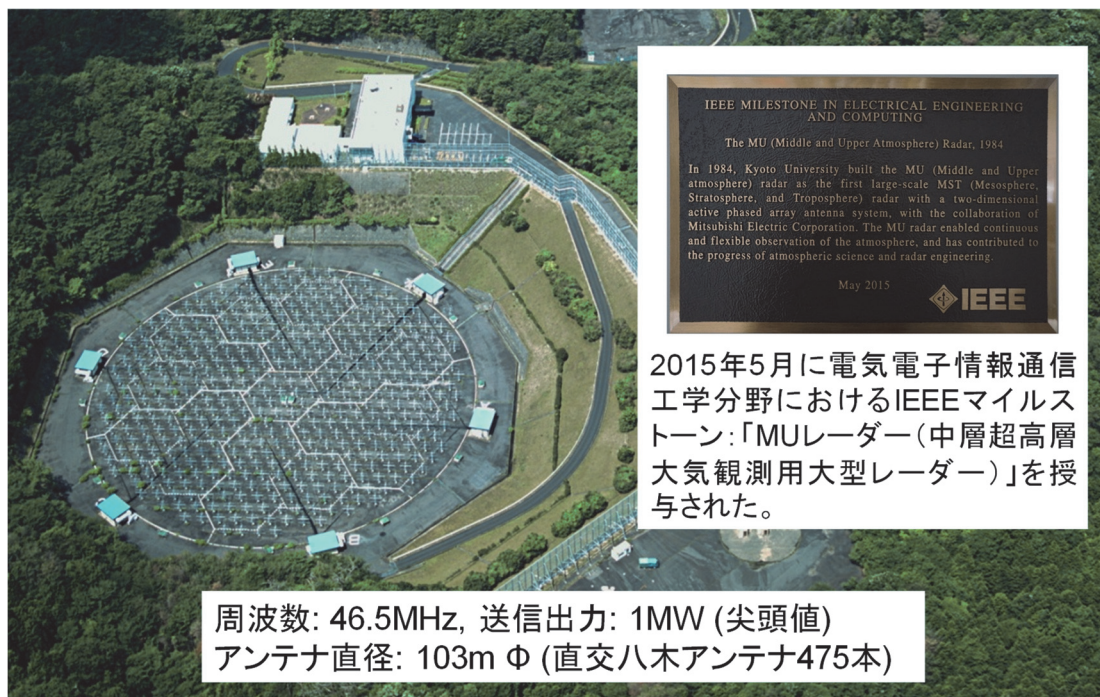
図2 大気温度分布と電子密度分布

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

大気レーダーの標的は、大気乱流や密度成層などから生じる屈折率変動であり、雲粒・雨粒などが大気中になくてもエコーが得られる。大気中にはいたるところに乱流が発生しており、それにともなって密度変動が存在し電波や光の屈折率が変動する(図3)。例えば星の光が大気を通過する際に屈折することで、またたきが生じる。これは、大気密度の変化によって光や電波が影響を受けるひとつの例である。レーダービームを覆いつくす多くの散乱体からの寄与の合成を考えると、電波が同位相で足しあわされる条件(ブラッグ条件)が満たされるとき散乱波は最大となる<sup>1)</sup>。これから、大気レーダーは乱流などによる屈折率変動のうち、レーダー波の半波長スケールの成分を主として観測することになる。



図3 大気エコーの仕組み(左図)と大気の揺らぎの例(右図)



周波数: 46.5MHz, 送信出力: 1MW (尖頭値)  
 アンテナ直径: 103m Φ (直交八木アンテナ475本)

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

### 3. 大気レーダーの実際

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

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

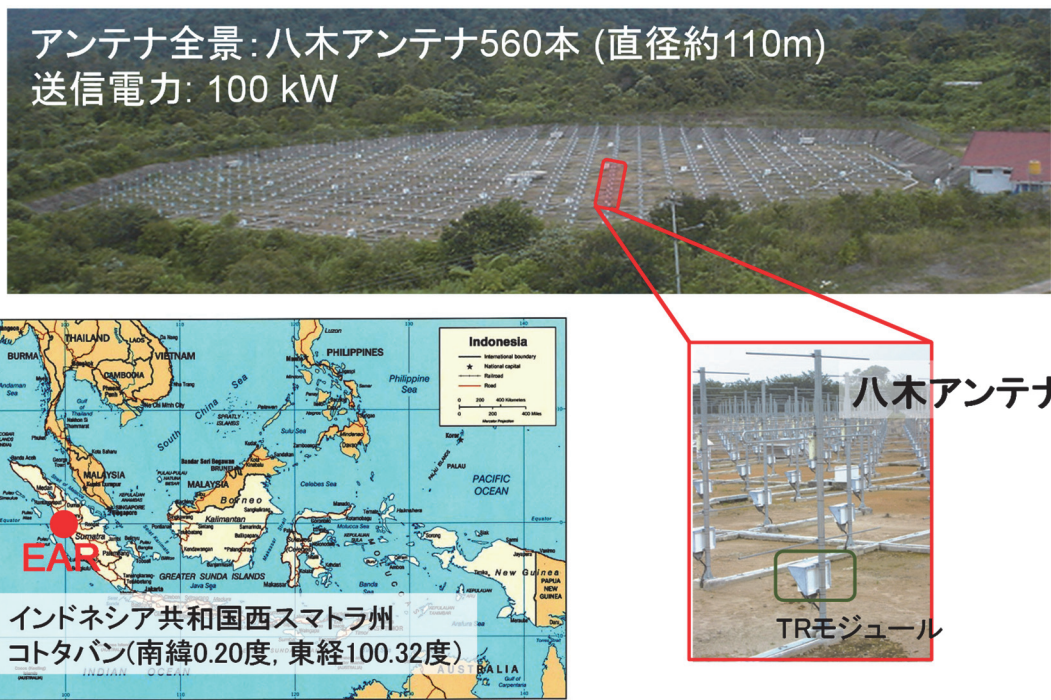


図5 赤道大気レーダーの全景(上図)、アンテナ・TRモジュール(下右図)、レーダーの位置(下左図)。

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

#### 4. レーダー観測の例

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

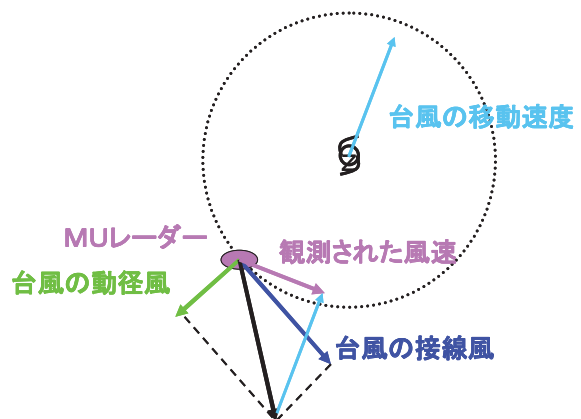


図6 台風観測の原理図



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

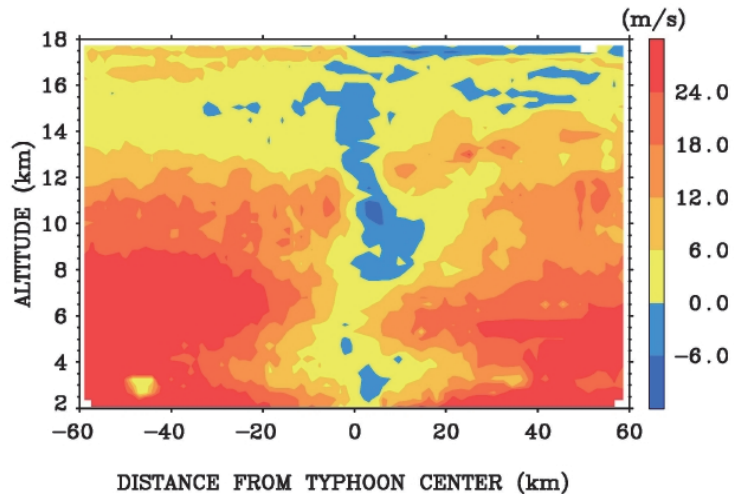


図7 台風9426号の接線風速の分布図

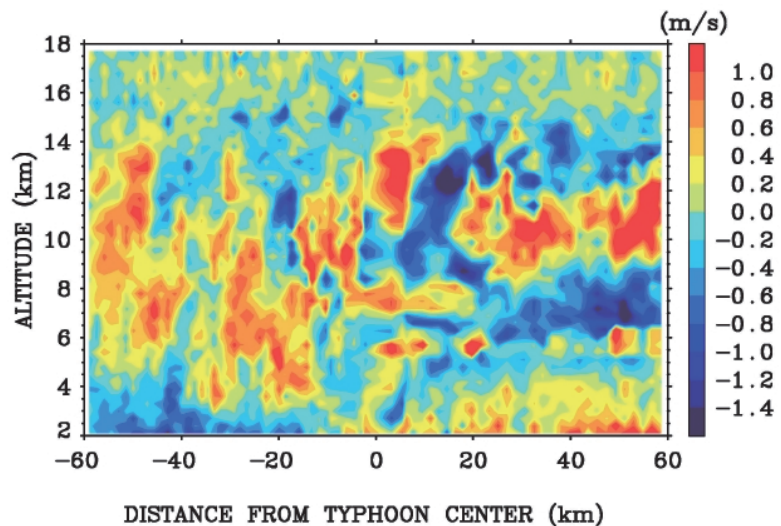


図8 台風9426号の鉛直風の分布図

## 5. GPSを使った大気観測

GPS (Global Positioning System) は衛星を使った測位

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

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

からの GPS-TEC データを用いた電離圏電子密度の水平分布の研究が広く行われている。

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

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

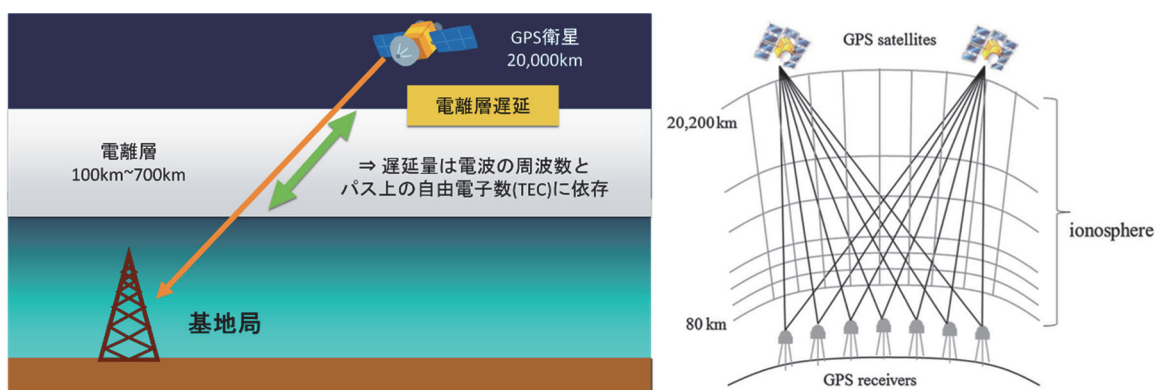


図 9 (左図) GPS 衛星から地上への 2 周波電波伝搬による全電子数推定  
(右図) GPS-TEC 観測に基づく電離圏電子密度トモグラフィーの概念図

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

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

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

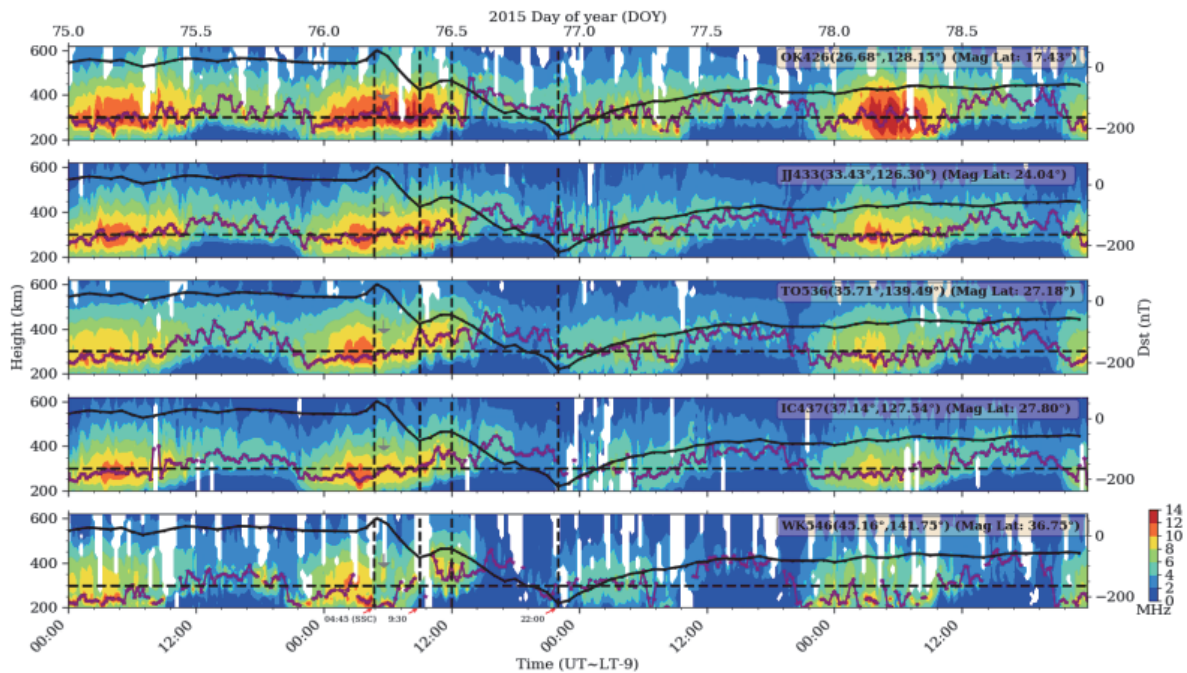


図 10 2015 年 3 月 17 日に発生した巨大な磁気嵐前後の電離圏トモグラフィー解析結果<sup>5)</sup>

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

## 6. まとめと大気レーダーの今後

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

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

## 参考文献

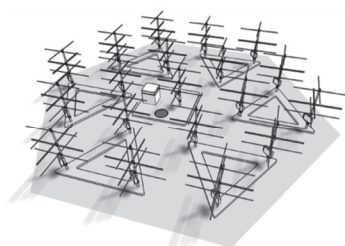
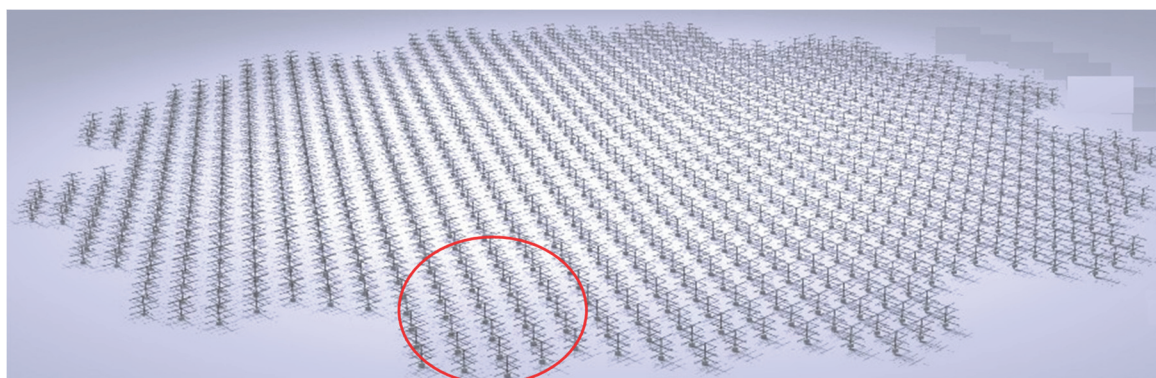
- 1) 深尾昌一郎, 浜津享助, “気象と大気のレーダーリモートセンシング”, 京都大学学術出版会, 2005, pp. 491.
- 2) MUレーダー : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu>
- 3) 赤道大気レーダー (EAR) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear>
- 4) リアルタイム電離圏トモグラフィー解析 : <http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/>
- 5) Ssessanga et al., Assessing the performance of a Northeast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

## 著者プロフィール



山本 衛 (Mamoru Yamamoto)

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



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

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

図1-1 計画中の「赤道 MU レーダー (EMU レーダー)」の概要

# 地球で一番大きな生物を支える「セルロース」について

阿部 賢太郎<sup>1\*</sup>

## “Cellulose”

~nanofibers supporting the biggest organism on earth~

Kentaro Abe<sup>1\*</sup>

### 概要

私たちが生活しているこの地球は大体 46 億年前に誕生したと言われていています。その長い歴史の中で、もっとも大きな生物は何でしょうか？ときに 100 m を超えるその巨大生物の体は、幅 4 nm (1 nm は 1 mm の 1,000,000 分の 1 です) 程度の、とても細くてとても強い繊維によって支えられています。意外にもその繊維は、私たちの周りに豊富に存在しており、皆さんもよく食べています。そして、今、その細くて強い繊維が、さまざまな形で私たちの暮らしをも支えようとしています。そういうことを話そうと思います。

### 1. はじめに

大きいものはカッコいい。大きいものは強いからカッコいい。だから、恐竜はカッコいい。最も巨大な恐竜はアルゼンチノサウルスとされ、1 億年くらい前に生きていたようです。その体長は 45 m で、体重は 90 t とも言われている。しかし、その恐竜よりも大きな生物がいることを皆さんはよく知っているはずで、それは「樹木」です。京都・峰定寺の御神木である花背の三本杉は 62.3 m もあり (図 1)、すでにアルゼンチノサウルスを見下ろせます。さらに、世界には 100 m を超える樹木があります。アメリカにいるハイペリオンを名付けられたその木の高さは 115 m もあります。他にも、シャーマン将軍と呼ばれる木もあります。彼の高さは 84 m だが、重さは 1000 t を軽く超えます。世界で最も重い生き物です。そのようにカッコいい樹木は、古くから人々に崇拜され、畏れられてきました。

大きいということは、重いということです。樹木が巨大な体を支えるためには、想像を絶する強さが必要となります。さらに言えば、「軽くて」「強く」なければならない。植物が陸地上陸してから約 5 億年。その間に、少しずつ構造 (形) を進化させ、ついには 100 m に達しています。一体、樹木はどのような構造をしているのでしょうか。



図 1 : 峰定寺の三本杉

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

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

## 2. 樹木の構造

図 2 に樹木内部の写真を示します。意外かもしれませんが、樹木の中身はスカスカで、ストローを束ねたような構造をしています。といっても、本当は空ではなく、生きている樹木では中に水が詰まっています。文字通り、ストローのように地上から 100 m 上まで水を吸い上げています。同時にこのストローの束が、樹木の巨大な体を支えています。このストロー1本1本は細胞です。正確には、元細胞です。樹木の細胞は成長中に死んでしまい、中身（細胞質）が消失します。消失して、一体何が残っているのか。それが、「細胞壁」です。我々動物の細胞と、植物の細胞の違いは色々ありますが、その一つが細胞壁で、動物の細胞には細胞壁がありません。細胞壁は植物細胞の外側にあり、細胞が死に中身が消失した後も、細胞壁だけが残り樹木内部に蓄積されます。つまり、樹木の大きな体は死んだ細胞の集まりによって支えられています。

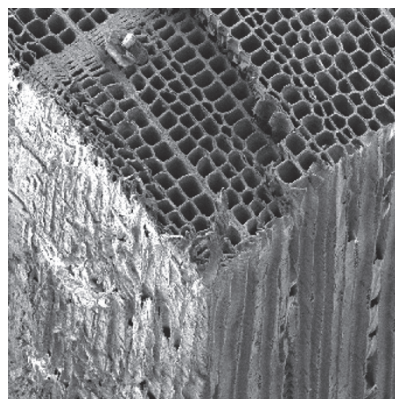


図 2：樹木内部の構造

とはいえ、残された細胞壁自身が強くなければ、その巨体を支えることはできません。ここからは樹木細胞壁の構造について説明します。樹木の細胞壁は図 3 のように、何層か重なった構造をしています。各層の違いは为什么呢。図 3 をよく見ると細い線の向きがそれぞれ違っているのがわかります。この線は、「セルロース」と呼ばれる繊維状の物質を表しており、樹木の細胞壁の約半分はセルロースでできています。セルロースはブドウ糖（グルコース）がつながってできています。ご存知のとおり、植物は光合成によってグルコースを作り、それをエネルギー源としています。それと同時に、自分を支える壁をも作っています。セルロースはグルコースが直線状につながった鎖のようなもの（高分子）ですが、さらにその鎖が何十本も束になって、「結晶化」しています。その幅は約 4 nm（ナノメートル）です。皆さんの髪の毛の幅は 50-100  $\mu\text{m}$ （マイクロメートル）ですが、1  $\mu\text{m}$  は 1 mm（ミリメートル）の 1000 分の 1 です。そして、1 nm は 1  $\mu\text{m}$  の 1000 分の 1 で、なんだかよくわかりませんが、とても細い繊維です。そして、結晶と聞くと何かとても堅そうなイメージがありますが、その直感は正しく、セルロースの結晶もとても強いです。ざっくり言うと、その1本1本が鋼鉄の 5 倍くらい強いと言われています。めちゃくちゃ強い。それにもかかわらず、その重さは鋼鉄の 1/5 と非常に軽いです。「軽くて」「強い」セルロースが壁になって、巨大な樹木の支えになっています。

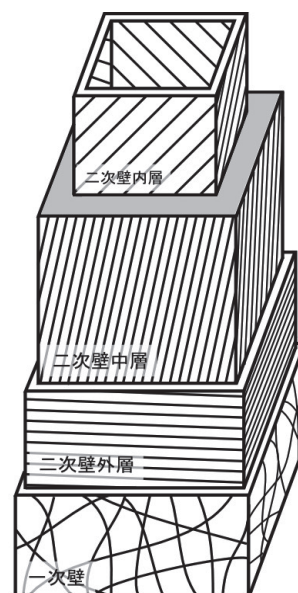


図 3：樹木細胞壁の構造

しかし、セルロースがいくら強くても、それだけで樹木の巨体を支えることはできません。セルロースでできた細胞壁の各層は、言ってみればハンカチのようなものです。木綿のハンカチは実際にセルロースからできています。ハンカチを手を持ってみればわかりますが、ハンカチは、引っ張った時はとても強く、簡単には引きちぎれないと思います。それは、セルロースの強さです。しかし、ハンカチは簡単にクシャクシャになってしまい、重いものを上にのせて支えることはできません。そこで、樹木はセルロースでできた細胞壁に、「リグニン」と呼ばれる接着成分を染み込ませました。ちょうど、ハンカチに接着ボンドを染み込ませて、固めたようなものです。ガチガチに固まったハンカチはしっかりした壁となり、重いものを支えられるようになります。リグニンはセルロースより弱い物質ですが、強いセルロースによって強化されます。さらに、セルロース繊維の隙間にリグニンが浸透し、リ

グニンがセルロース同士を強固に接着することによって、壁自身の強さが格段に向上します。そのように強靱な壁からできたストローを束にすることで、「軽くて」「強い」構造ができ、巨大な樹木は自身の体を支えることができます（体を支える理由は、他にもあります）。

前に樹木の細胞は成長とともに死に、残った細胞壁だけが蓄積すると書きました。リグニンは、細胞の死と同時に細胞壁に徐々に染み込みます。細胞壁にリグニンが堆積し、強固な構造になることを「木化」といいます。この木化は、樹木（と竹や稲）における現象であり、天高く成長するために長い進化の過程で習得したものです。

### 3. 繊維強化複合体

樹木細胞壁の構造を単純に言うと、比較的柔らかな「リグニン」の中に、細くて強靱な「セルロース」が多数分散した構造ということになります。このような構造を「繊維強化複合構造」と呼びます。お互いの弱点を補い、お互いの長所を伸ばすこの構造は、軽さと強さを発揮するための優れた構造の一つと言えます。

実のところ、自然界ではこの繊維強化複合構造が数多く利用されています。例えば、蟹の甲羅です。蟹の甲羅は細くて強い「キチン」と呼ばれる繊維と、その隙間を埋める「炭酸カルシウム」からできています。キチンは、植物のセルロースと非常によく似た構造をしています。セルロースと同様に強靱です。そして、炭酸カルシウムは非常に脆い物質ですが、キチンによって強靱となり、結果として軽くて強い甲羅となります。もう一つ、昆虫の殻や羽も似たような構造を持っており、蟹の甲羅と同じキチンからできています（図 4）。樹木、蟹、昆虫・と、一見共通点がなさそうな生物達ですが、いずれも生きるために、似たような「軽くて」「強い」構造を獲得しています。

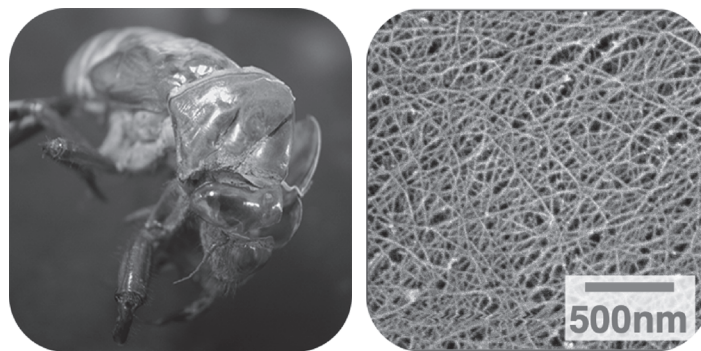


図 4：セミの抜け殻に豊富に含まれるキチン

そして、この繊維強化複合構造は私たちの生活でも広く活用されています。古代エジプトでは、泥にワラを混ぜて乾燥させることで、強いレンガを作っていました。日本においても、土壁にはワラ等が混ぜられてきました。そして現在、この構造は、繊維強化プラスチック (FRP, Fiber-Reinforced Plastics) として生活の様々な場所で活用されています。これは文字通り、プラスチックに繊維素材を混ぜることでその強度を向上させたものです。使用される繊維は、ガラス繊維や炭素繊維など様々です。プラスチックは軽くて加工もしやすいですが比較的柔らかいため、繊維を混ぜることで、軽くて強い材料を作ることができます。そして、最も軽くて強い素材が求められるものの一つが飛行機です。現在、飛行機の機体は 50%程度の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が使われているものもあります。これにより、機体の重量は大幅に減少します。機体が軽くなれば、その分、人や荷物を多く運ぶことができます。逆に、運ぶ人や荷物の量が同じであれば、その分、使う燃料の量や排出する CO<sub>2</sub> の量を減ら

すことができます。軽くて強い昆虫の羽と同じ工夫が飛行機にも使われています。

#### 4. セルロースナノファイバー

話は、植物に含まれるセルロースに戻ります。私たちは昔からセルロースを広く利用してきました。衣服等に用いられる綿はほぼ100%セルロースです。また、紙もセルロースからできています。図2を思い出してください。樹木はストローを束ねたような構造をしています。樹木からリグニンを除くと、このストローが1本1本バラバラになります。それを漉き上げて乾燥させたものが紙です。紙の繊維の幅は数十 $\mu\text{m}$ ですが(図5左)、その繊維をさらに拡大してみると、さらに細い繊維が観察されます(図5右)。これが「セルロース」の正体です。これまで、私たちは図5左のような太い繊維を衣服や紙として利用してきました。しかし、最近では図5右のような非常に細いセルロース繊維を利用するための研究が進められています。上でも少し書きましたが、図5右のようなセルロース繊維の幅は4-20 nmです。そのため、「セルロースナノファイバー」や「ナノセルロース」と呼ばれています。

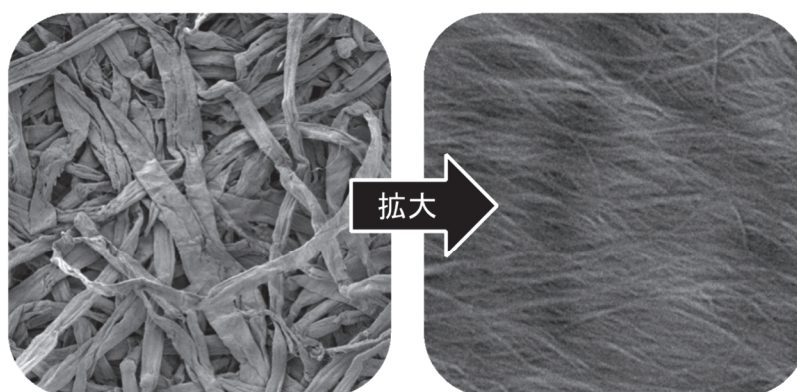


図5：樹木から作った紙の拡大図(左)と紙の繊維をさらに拡大して観察されるセルロース(右)  
左図は100倍、右図は30,000倍で観察。

##### 4.1 セルロースナノファイバーの作り方

セルロースナノファイバーを得るためには、まず植物原料からリグニンやその他の成分を除去して、セルロース成分だけにする必要があります。いわゆる、紙のような状態です。このままでは図5左のようにまだ太い繊維のままなので、セルロースナノファイバー1本1本バラバラにする必要があります。バラバラにする装置は様々ですが、例えば石臼のようなもので試料と水をすりつぶすとセルロースナノファイバーが得られます。それが図6になります。このドロドロの液体の中にはセルロースナノファイバーは1%しか入っておらず、あとは水です。紙をすりつぶすだけで、こんな風になってしまう。セルロースナノファイバーは非常に細く、水をよく吸う性質があるので、このようにドロドロになります。



図6：樹木から取り出したセルロースナノファイバー

普通の紙は主に樹木から作りますが、セルロースナノファイバーは全ての植物からとりだすことができます。そのため、樹木以外にも、ジュースの搾りかすや、ジャガイモデンプンの搾りかすなど、利用価値の低い原料から作ることも可能です。樹木とジャガイモに含まれるセルロースナノファイバーの性質はおなじでしょうか。調べたところ、少なくとも高等植物から取り出したセルロースナノファイバーの強さはほぼ同等であるという



報告があります。つまり、原料がセルロースナノファイバーの用途を制限しないということになります。余談ですが、1 cm 四方の紙 (0.01 g) をバラバラにして、4 nm のセルロースナノファイバーを作り、一直線に並べると地球から月に届く距離になるはずですが、セルロースナノファイバーはそれくらい小さいものだという事です (逆に分かりづらかったです)。

#### 4.2 セルロースナノファイバーの利用

このように植物から取り出したセルロースナノファイバーをどのように利用するのでしょうか。最も期待されている用途の一つが、樹脂 (プラスチック) の補強です。つまり、先ほど述べた繊維強化プラスチックです。従来のガラス繊維などに比べると、植物から作られるセルロースナノファイバーは、環境に優しいバイオマス素材だと言えます。現在、この分野の研究は非常に進んでおり、京都大学・矢野教授はセルロースナノファイバーを使った自動車のボディや部品の開発を行っています。これにより、自動車の重量は 10% 程度軽くなります。その結果、燃費は向上し、CO<sub>2</sub> の排出は削減されます。どんな車が作られているのかを知りたい方は、環境省の HP や動画をご覧ください。他にも、ランニングシューズの靴底のソールやボールペンのインクに、セルロースナノファイバーが混ぜられ、これらの製品はすでに商品化されています。太い繊維を使うよりも細いナノファイバーを使用する利点は色々あります。例えば、同じ量をプラスチックに混ぜたとき、細い繊維のほうがより少ない添加量で均一に分散し、全体的に強化されます。図 6 もナノファイバーが水に均一に分散した結果ドロドロになっています。普通の紙の太い繊維ではこうはなりません。面白い利用としては、食品に混ぜることです。すでに商品化されているものもあります。ご自身で調べてみてください。図 6 で示したように、セルロースナノファイバーが水をよく吸収します。そのため、食品に混ぜるとふんわりしたりもちりしたりします。全ての植物は細胞壁を持っており、その細胞壁にはセルロース (ナノファイバー) が豊富に含まれています。ですので、野菜を食べている皆さんは普段からセルロースを摂取していることになります。私たちは、セルロースを食べても分解することはできませんが、代わりに食物繊維として作用します。セルロースナノファイバーの利点の一つはこの安全性にあるといえます。

もう一つ、細いナノファイバーならではの特性があります。それは透明な樹脂を使って、上記の樹脂補強を行った時に起こります。例えば、セルロースナノファイバーの分散液を、普通に紙を作るときの要領で漉き上げて乾燥させます。すると、セルロースナノファイバーからなる紙ができます。このときできた紙は、通常の紙と同様、白っぽい色をしています。しかし、この紙に透明な樹脂を染み込ませると、非常に透明になります (図 7)。詳しい理由は少し難しくなるので避けませんが、非常に細い繊維を使った場合、光がそのまま透過してしまいます。図 7 の複合材料の内 60% がセルロースナノファイバーで、残りの 40% が樹脂です。強靱なセルロースナノファイバーが豊富に入っているため、このフィルムも非常に強いです。また、樹脂は熱に弱い性質がありますが、このフィルムはセルロースのおかげで、熱による変形にも強いです。熱に強く透明な物質で思いつくのはガラスですが、ガラスはこんなにしなやかには曲がりません。

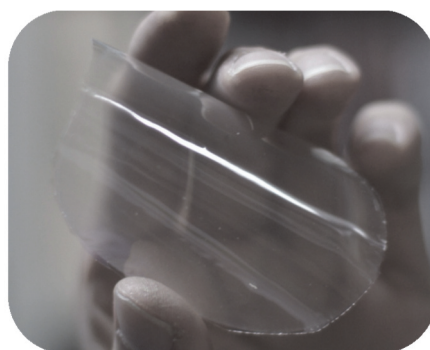


図7：セルロースナノファイバー60%を含む透明複合フィルム

ここからは少し余談になりますが、先ほど蟹の甲羅について述べました。蟹の甲羅の構造は、植物細胞壁と似ていて、セルロースの代わりにキチンナノファイバーを豊富に含んでいます。そして、キチンナノファイバーの間には炭酸カルシウムがあり、非常に強い構造を持っています。ここで仮に、蟹の甲羅から炭酸カルシウムを除去したとします。すると、キチンナノファイバーだけが残ります。このとき、蟹の甲羅は真っ白です。この状況は、先ほどのセルロースナノファイバーでできた紙と似

ています。そこで、この真っ白な蟹の甲羅に透明な樹脂を染み込ませるとどうなるでしょうか。みなさんの想像通り、蟹の甲羅も透明になります（図8）。蟹の甲羅が細いナノファイバーでできている証拠であるともいえます。

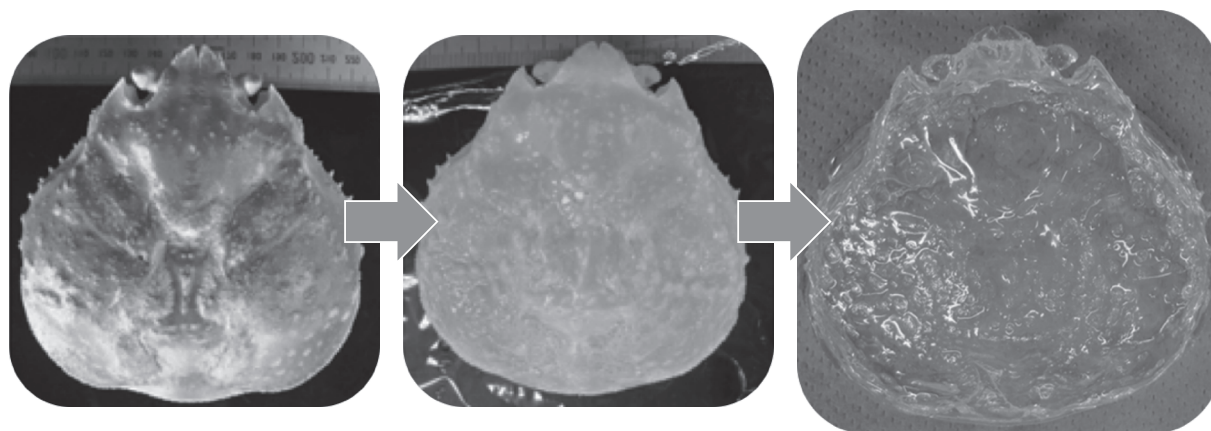


図8：透明になる蟹の甲羅

## 5. さいごに

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

### 著者プロフィール



阿部 賢太郎 (Kentaro Abe)

<略歴> 2005年名古屋大学大学院 生命農学研究科 博士後期課程修了（農学博士）／2013年京都大学 生存圏研究所 准教授、現在に至る。

<研究テーマ> 樹木、蟹、昆虫などの強さの秘密を調べ、それを参考にして軽くて強い材料を作る。

# 植物成分を微生物に作ってもらう

棟方 涼介<sup>1\*</sup>

## Microbes are new producers of phytochemicals

Ryosuke MUNAKATA<sup>1\*</sup>

### 概要

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

### 1. はじめに ～人の生活を彩る植物成分～

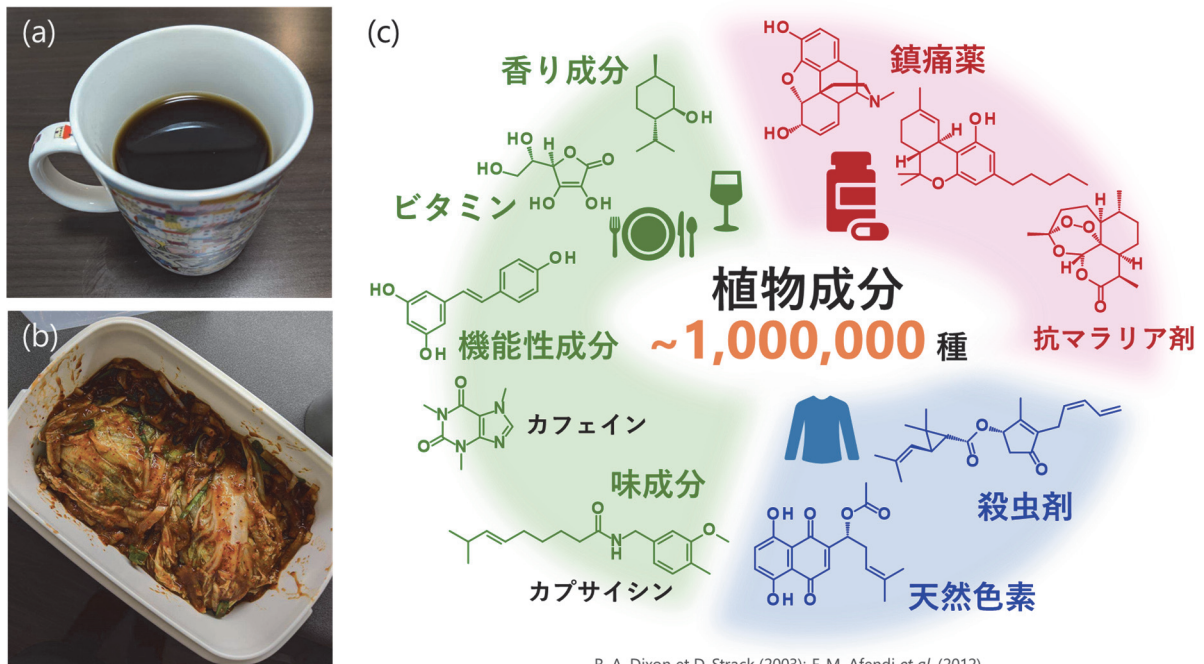
コーヒーを片手にこの要旨を読み始めた方、その中には、カフェインによる覚醒作用を期待している方もおられるのではないだろうか(図1)。カフェインは身近な植物成分の代表ともいえる化合物である。他にも、調理の際には辛み付けに唐辛子を加えるが、この辛さの素となる成分はカプサイシンである(図1)。薬効本体として植物成分やその誘導体が含まれる薬も多種存在する。さらには、香り成分や天然色素、ビタミン、また機能性成分として植物成分が活用されている。このように植物成分は我々の生活を様々な面で彩っている(図1)<sup>3)</sup>。近年、化石資源依存からの脱却が世界的に進められており、植物成分は未来の持続可能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

### 2. 植物成分の利用に向けた課題と新潮流

植物成分の利用拡大にはまだ多くの課題が残されている。その1つとして、目的成分について産業利用するだけの量をどのようにして手に入れるかが挙げられる。植物成分を取得しようとする際に用いられる手段の1つが、目的成分を含有する植物からの抽出である。しかしながら、植物成分の中には植物体に微量しか含まれない場合もしばしばである。例えば、抗がん剤として用いられているパクリタキセルはイチイ属植物の樹皮から抽出されるが、その含量は樹皮乾燥重あたりわずか0.01%程度

<sup>1</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学 生存圏研究所 森林圏遺伝子統御分野.

\* E-mail: ryosuke\_munakata@rish.kyoto-u.ac.jp



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

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

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

化学合成によって目的成分を製造するのも常用手段である。ただし、この手法はしばしば、高温、高圧下、また重金属存在下など環境負荷の高い反応条件が必要となる。さらに、複雑な化学構造を持つ植物成分を合成する際にも障壁が出てくる。

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

### 3. 植物成分の微生物による生産法の特徴と利点

#### 3.1 酵素のチカラ

”有用成分を作る能力”の主役が「酵素」である。例外もあるが、酵素を簡単に説明すると、「化合物を別の化合物に高効率で変えてくれるタンパク質」である。ここで変換される元の化合物を基質、基質が変換されて作られる化合物を生成物と称する。酵素の種類によって基質となる化合物の化学構造(形)、また同じ基質からでも酵素変換されてできてくる生成物が異なり、これらはそれぞれ基質特異性、生成物特異性(反応特異性)という重要な酵素化学的な特徴である(図 3a)<sup>8)</sup>。

主に酵素は生きた細胞の中で働いているため、酵素反応が進行する条件は常温・常圧など穏やかで、



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

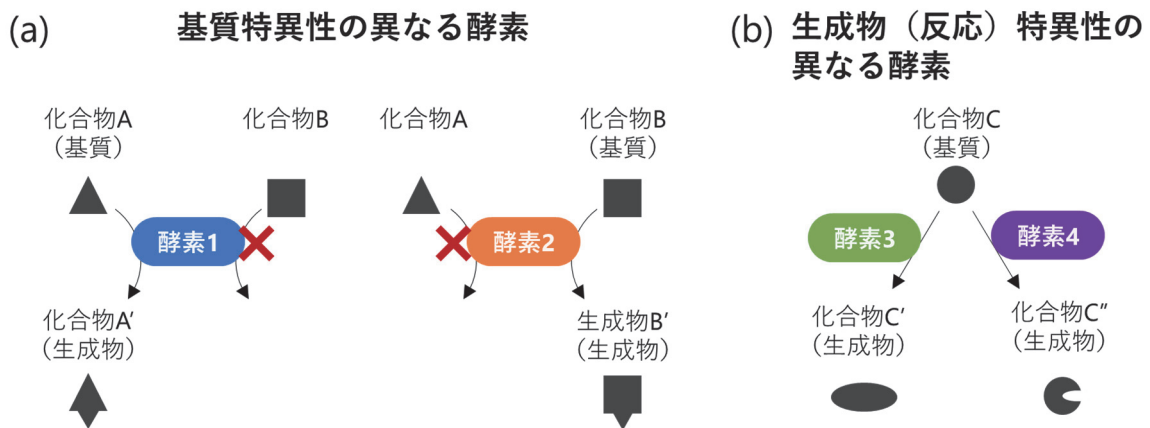


図3: 植物成分を多様化させる酵素の性質。(a) 基質特異性。酵素1と酵素2は基質として認識する化合物の構造(形)が異なる。(b) 生成物(反応)特異性。酵素3と酵素4は同じ化合物を基質とするが、行う反応が異なるため、生成物となる化合物の構造が互いに異なる。

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

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

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

### 3.2. 微生物のチカラ

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

設計図が導入された微生物は糖やアミノ酸といった基礎的な培地（培養液）成から目的成分を生産する。この点に関しては、緑藻や珪藻といった光合成可能な微生物種を用いることで、光合成で得たエネルギーから植物成分を生産させる研究も進められている<sup>11,12)</sup>。

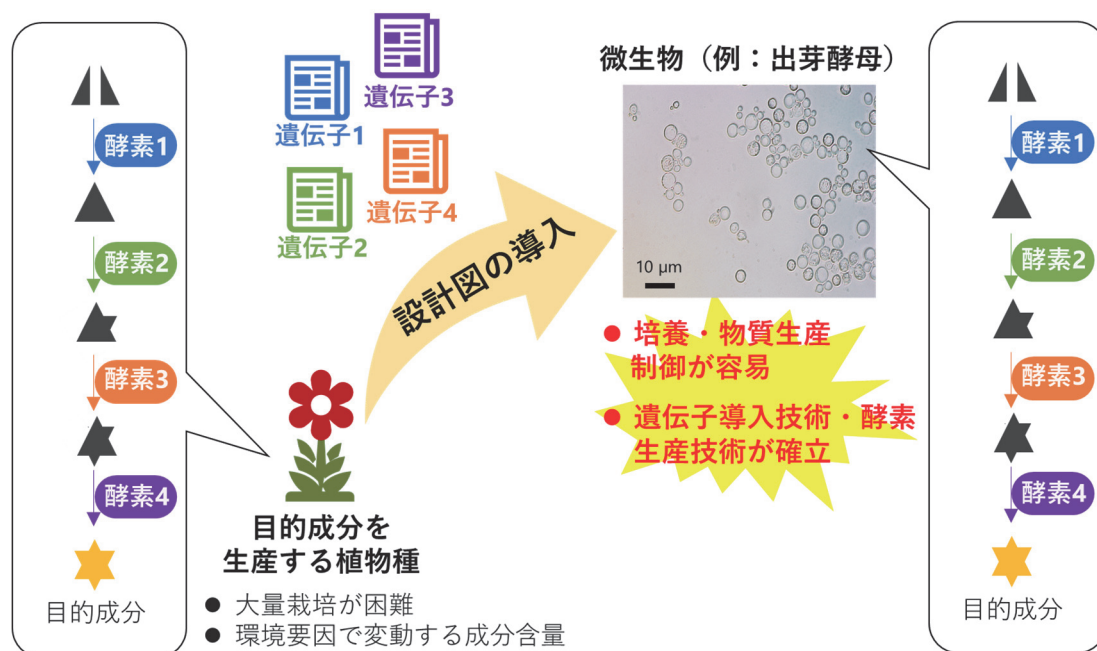


図4：植物の酵素を利用した植物成分の微生物生産法の概念図。目的成分を含有する植物種から、その生産に必要な酵素1-4の設計図となる遺伝子1-4を取得し、微生物に導入する。導入された微生物は目的成分の生産能を獲得する。

#### 4. 植物成分の微生物による生産の例

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

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

#### 5. おわりに

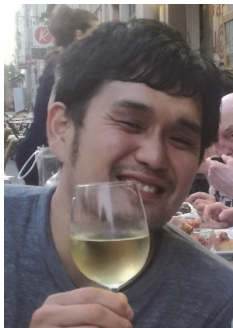
本総説で紹介した植物成分の微生物による生産法は、従来の手法の欠点を補う特徴があることから、近年急速に研究が進んでいる。しかしながらこの手法もいまだ乗り越えなければならない課題が多い。というのも、単に植物の設計図を微生物に入れても、目的成分の生産量がほんの僅かという結果に留まることが多く、産業利用可能なレベルまで生産性が高められたケースは現状ごくわずかである。この原因として例えば、植物の遺伝子を微生物という全く異なる生物種に導入することになるため、微生物が植物の設計図から酵素を正確に作るができず目的成分の生産が認められない、また微生物内で生産された目的成分が微生物自身に毒性を示すといった現象が報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

#### 参考文献

- 1) Dixon, R.A. et Strack D., Phytochemistry meets genome analysis, and beyond, *Phytochemistry*, **62**, pp. 815-816, 2003.
- 2) Afendi F.M. et al., KNAPSAcK family databases: integrated metabolite-plant species databases for multifaceted plant research, *Plant Cell Physiol.*, **53**, p. e1, 2012.
- 3) 飯島陽子、田口悟朗、食品成分・薬用成分・毒、“基礎から学ぶ植物代謝性化学”, 水谷正治 編、羊土社、2018、pp. 283-300
- 4) [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/2020/mext\\_00488.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/2020/mext_00488.html)
- 5) Vidensek N. et al., Taxol content in bark, wood, root, leaf, twig, and seedling from several *Taxus* species, *J. Nat. Prod.*, **33**, pp. 1609-1610, 1990
- 6) 矢崎一史、ムラサキ科植物におけるシコニン生合成研究の新潮流, *ファルマシア*, **57**, pp. 705-709, 2021
- 7) 棟方涼介、ミクロ・ビオな植物成分の生産, *バイオメディア*, ”生物工学会誌”, **99**, p. 83, 2021
- 8) 水谷正治、大西利幸、合成概論、“基礎から学ぶ植物代謝性化学”, 水谷正治 編、羊土社、2018、pp. 145-172
- 9) 小埜栄一郎 他、進化、“基礎から学ぶ植物代謝性化学”, 水谷正治 編、羊土社、2018、pp.270-282
- 10) Pyne M. E, et al., Engineering plant secondary metabolism in microbial systems, *Plant Physiol.*, **179**, pp. 844-861, 2019

- 11) Vavitsas K. et al., The synthetic biology toolkit for photosynthetic microorganisms, *Plant Physiol.*, 181, pp. 14-27, 2019
- 12) Kajikawa M., Production of ricinoleic acid-containing monoestolide triacylglycerides in an oleaginous diatom, *Chaetoceros gracilis*, *Sci. Rep.*, 6, Article No., 36809, 2016
- 13) Paddon, C. J. et al. High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin, *Nature*, **496**, 528–532, 2013
- 14) Ajikumar P. K. et al., Isoprenoid pathway optimization for taxol precursor overproduction in *Escherichia coli*, *Science*, **330**, pp. 70-74, 2010
- 15) Galanie et al., Complete biosynthesis of opioids in yeast, *Science*, **349**, pp. 1095-1100, 2015
- 16) Munakata R. et al., Isolation of *Artemisia capillaris* membrane-bound di-prenyltransferase for phenylpropanoids and redesign of artemillin C in yeast, *Commun. Biol.*, **2**, Article No., 384, 2019

### 著者プロフィール



棟方 涼介 (Ryosuke MUNAKATA)

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





