

レーダーを使って大気を測る

信楽とインドネシアからの研究紹介

山本 衛^{1*}

Radar Measurement of Atmosphere

Introduction of studies from Shigaraki and Indonesia

Mamoru Yamamoto^{1*}

概要

レーダーを使って大気が観測できる。気象予報で紹介されるような降雨レーダーではなく、雲も雨もない大気を測る。レーダーは、電波を使って標的からの「こだま」を測る装置である。強い電波を大気に発射するとごく一部が散乱して戻ってくる。これを使って大気の揺らぎや動き（風速）を測る。1984年に開発されたMUレーダーは、電子制御で電波の向きを変えられるアンテナを特徴とするが、世界初の優れた開発であったとして、国際学会であるIEEEからマイルストーン認定を受けた。さらに我々は、インドネシアにも赤道大気レーダーを設置して興味深い赤道域の大気を研究している。ここでは、これらのレーダーを使った大気研究を紹介する。

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¹⁾。本稿では、大気を観測するレーダーについてご紹介する。

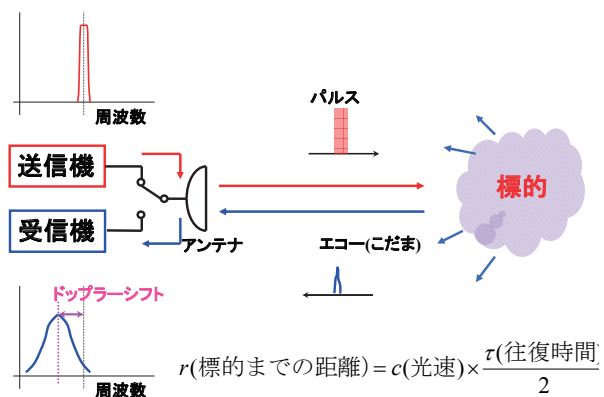


図1: レーダー原理図

2017年7月19日受理。

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

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

2. 大気の種類

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。その上部は再び温度が

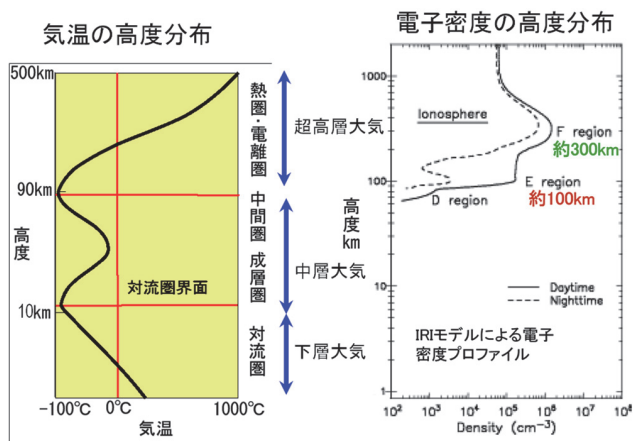


図 2： 大気の温度分布と電子密度分布

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

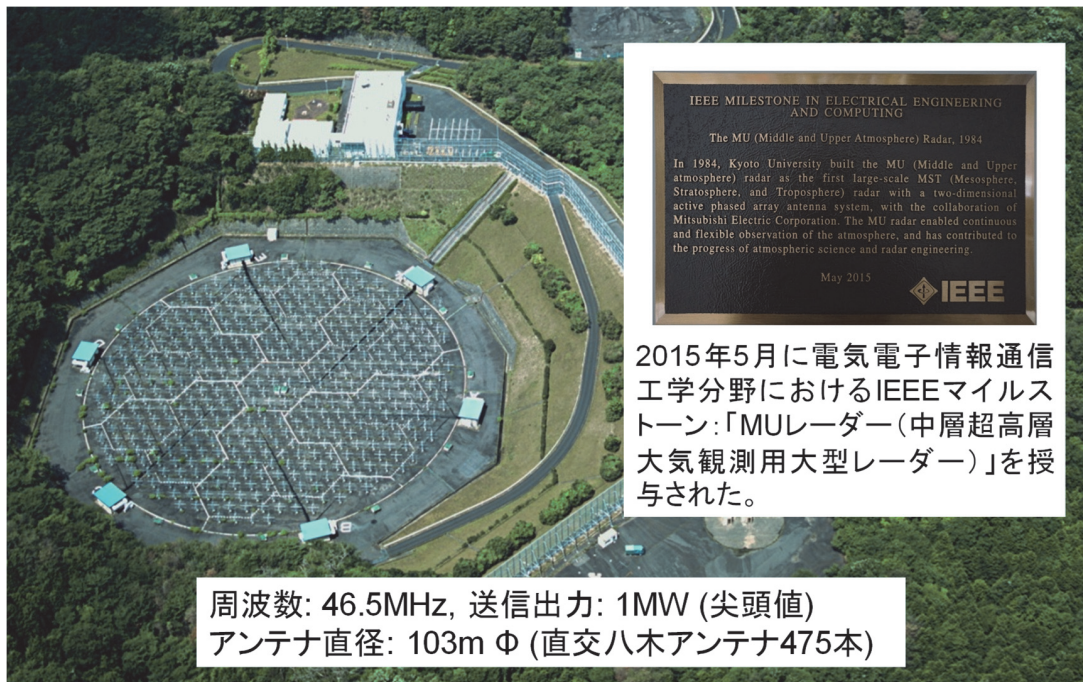
周波数 50 MHz 付近から数 GHz の電波を利用するレーダーとしてウィンドプロファイラーや ST（成層圏・対流圏）レーダー、MST（中間圏・成層圏・対流圏）レーダーなどと呼ばれるグループがある。これらは大気中の密度変動や水蒸気分布などからのエコーを利用して風速を観測する点に特徴がある。観測高度範囲は、小型のものでは高度数 km、ST レーダーと呼ばれるタイプで高度 10~20 km まで、大型の MST レーダーではこれらに加えて高度 60~80 km の中間圏も観測可能である。これらのレーダーはまとめて「大気レーダー」と名づけられる。京大大学生存圏研究所では、大気レーダーを中心として多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

3. 大気からのエコー

大気レーダーの標的は、大気乱流や密度成層などから生じる屈折率変動であり、雲粒・雨粒などが大気中になくてもエコーが得られる。大気中にはいたるところに乱流が発生しており、それにとまって密度変動が存在し電波や光の屈折率が変動する（図 3）。例えば星の光が大気を通過する際に屈折することで、またたきが生じる。これは、大気密度の変化によって光や電波が影



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。

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¹⁾。すなわち、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。

4. 大気レーダーの実際

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

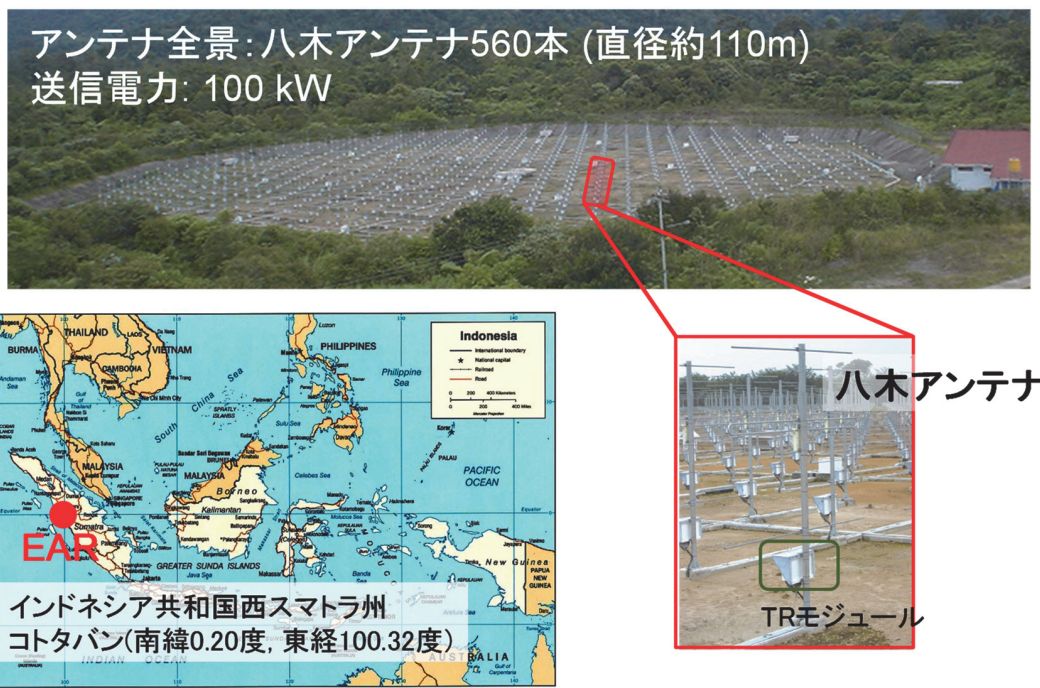


図 5: 赤道大気レーダーの全景 (上)、アンテナ・TR モジュール (下右)、レーダーの位置 (下左)。

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トタバムにもう一台ある³⁾。赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) と呼ばれるこのレーダーの全景とアンテナ部を図 5 に示す。周波数 47 MHz で直径約 110 m のアンテナを備えており、アンテナと直下の送受信モジュールの総数は 560 に達する。MU レーダーと同様にアクティブ・フェーズド・アレイ構成であり、全体の送信出力が 100 kW と MU レーダーの 10 分の 1 である以外は、ほぼ同様の機能を備えている。超高層大気に関しては上記の(2)の観測ができるが、(1)と(3)には感度が不足している。EAR の運営は、インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との密接な協力の下で進められている。設置場所の特徴を活かして、赤道大気に特有の波動現象や、低緯度・赤道域の電離圏に特徴的なプラズマバブルという現象の研究を精力的に実施している。

5. 観測例と実用化

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)に分解して研究を進めた。図 7 には台風 9426 号の観測か

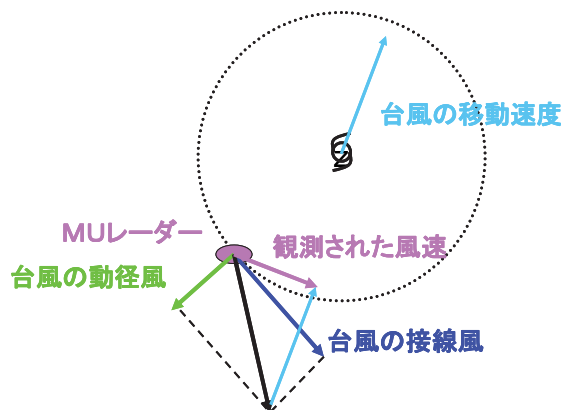


図 6: 台風観測の原理図

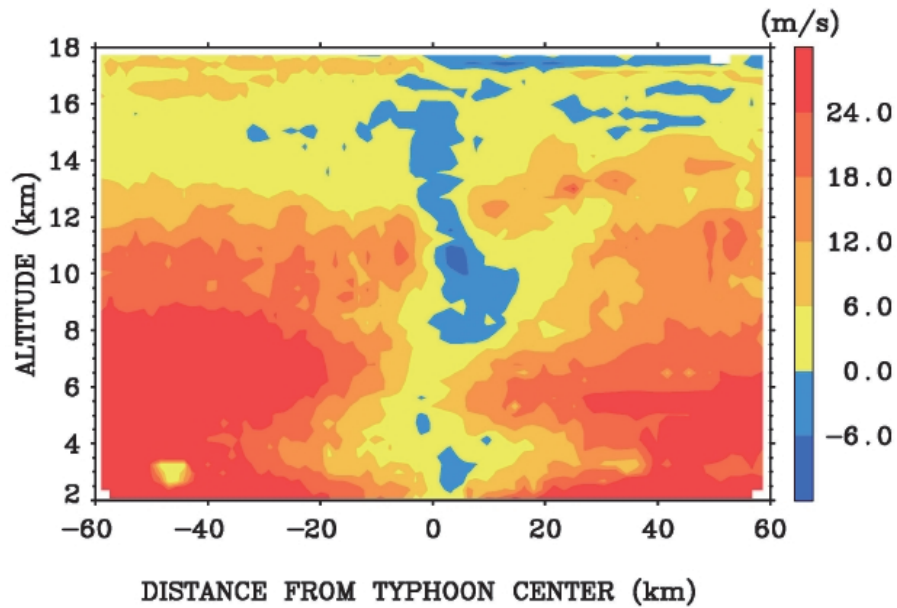


図 7： 台風 9426 号の接線風速の分布図

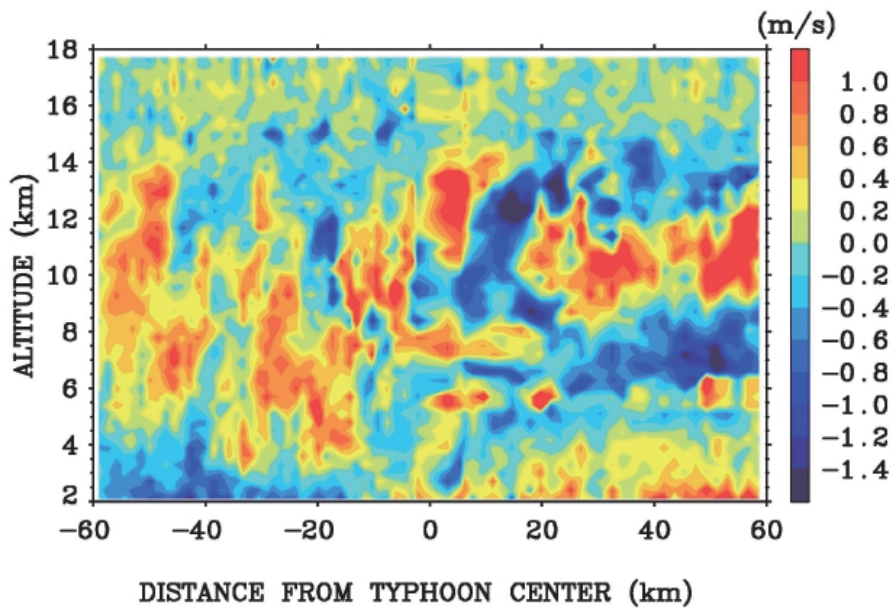


図 8： 台風 9426 号の鉛直風の分布図

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。台風が MU レーダーを通過したため、水平距離ゼロまで観測を行うことができた。台風の接線風はほぼ全域にわたって反時計回りであり、高度 10 km より下側で強い風が吹いている。台風中心付近に時計回りの成分(負の値)が見られるが、上陸後の台風の構造が完全な軸対称からずれたことによるものと考えられる。図 8 には同時に観測された鉛直風の分布を示すが、1 m/s を超える上昇流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。

大気運動の駆動源は太陽からのエネルギーである。太陽光は赤道域を中心に降り注ぎ、赤道大気には活発な積雲対流が生じる。赤道インドネシアは地球規模の大気循環のいわばエンジンの役割を果たしており、EAR はそこに建設された。図9にEARが2001年11月に観測した東西風とスペクトル幅の時間高度分布を示す。×印は気球観測で求められた対流圏界面高度を示し、対流圏(下層)と成層圏(上層)の境目である。周期約10日で下向きの位相速度をもった大気波動が東西風に現れるが、これは赤道ケルビン波とよばれる赤道域に特徴的な波動現象である。波動が対流圏界面にあたる(上図の丸印の部分)に対応してスペクトル幅の増大(下図の丸印の部分)が現れ、大気の変動が強まったことが読み取れる。図10に概念的な説明図を示す。対流圏と成層圏の大気交換の実態は未解明の部分が多いが、この研究では、成層圏を伝搬する赤道ケルビン波が対流圏界面付近で砕けるとき(砕波)、大気乱流が増大して対流圏と成層圏の大気の交換が行われることを初めて明らかにした。インドネシア赤道域の研究については、

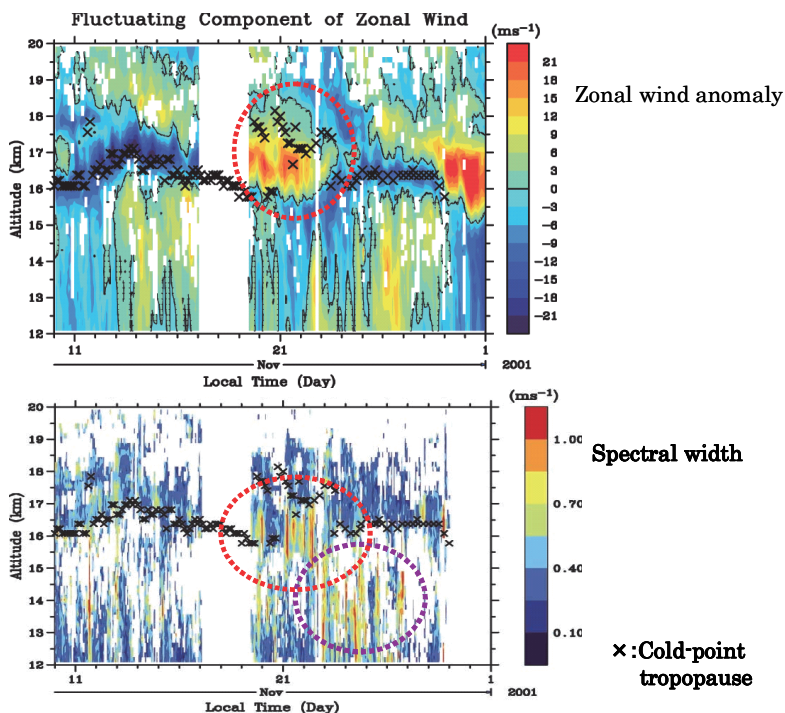


図9：赤道大気レーダーによる赤道ケルビン波の観測例

科研費(特定領域研究)「赤道大気上下結合」(2001~2006年)や、科学技術戦略推進費「インドネシア宇宙天気研究の推進と体制構築」(2010~2012年)をはじめとする多くのプロジェクトが実施され、赤道域の地表近くから電離圏にいたる全高度域にわたる研究が進められ、波動を通じて大気が上下方向に力学的結合している様子が明らかになってきた。

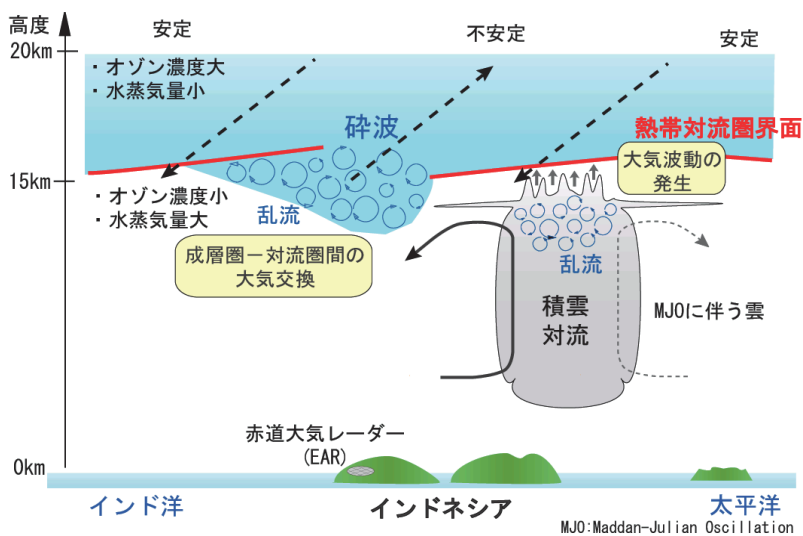


図10：赤道ケルビン波による対流圏・成層圏の大気交換の模式図

我々は、MUレーダーをずっと小型にしたウィンドプロファイラーと呼ばれるレーダーを開発して

きた。小型レーダーは可搬性に優れ、またネットワーク化にも向く装置である。気象庁は我々が開発した下部対流圏レーダー（Lower Troposphere Radar; LTR）に目をつけ、2000～2001年に、全国25(現在33)ヶ所に設置してウインドプロファイラーネットワーク WINDAS を構築した(図 11)。従来の気球による風速や気温の測定に加えて、LTRによる風速の10分平均値が気象庁に即座に集められている。図 12 が WINDAS データの有無による気象予報精度の検討結果である。上図は中国地方に起こった降雨の観測データだが、これを3時間前または6時間前の時点から予報したとき、WINDAS のデータを加えることによって精度が良くなった様子がわかる。このように WINDAS は集中豪雨などの局地的な気象現象の予報精度の向上に役立つことが確かめられており、現在では、そのデータが常に気象予報に実用されている。



図 11: 気象庁のレーダーネットワーク WINDAS

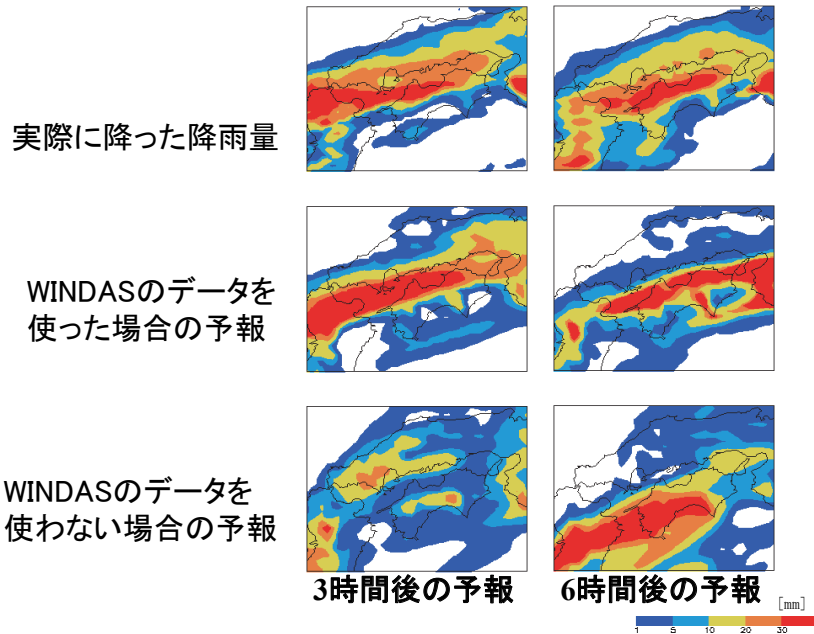
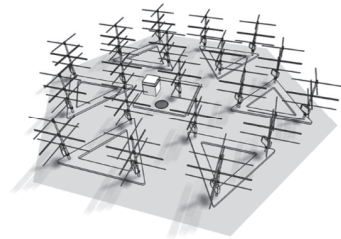
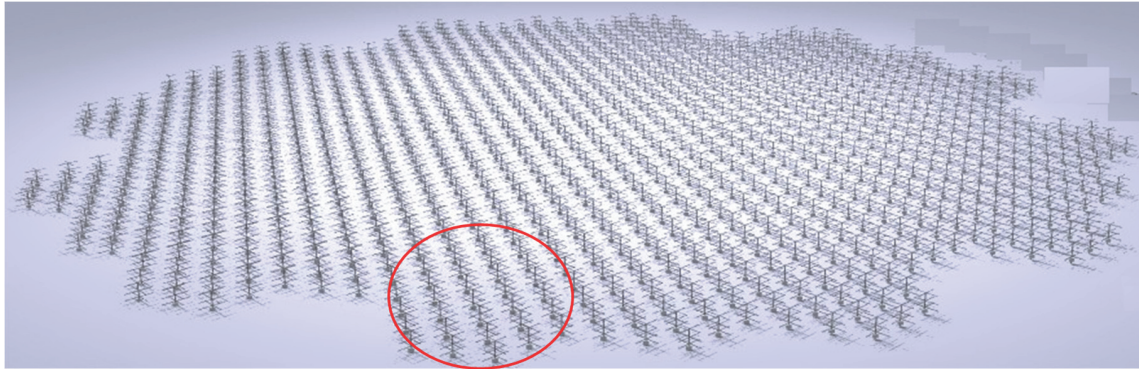


図 12: 気象庁の天気予報結果に対する WINDAS の効果



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 13: 計画中の「赤道 MU レーダー (EMU レーダー)」の概要

6. まとめと大気レーダーの今後

以上に述べたように、レーダーは大気の観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を中心として、観測の原理や観測成果についてまとめた。大気レーダーは大気中の波動現象などの研究に大きな貢献を果たしているのみならず、レーダーネットワークからの観測データが気象予報に実用されている。

MU レーダーや赤道大気レーダーの観測データは、標準観測の場合はすぐに、特別観測では1年後に生存圏データベースに登録し、研究者コミュニティに公開している。さらに、東北大・名古屋大・京都大・九州大と国立極地研が参加する IUGONET プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」によって、データベースのカタログに相当するメタデータを整備し、データの相互参照を容易にする取組みに参加している⁴⁾。2016年3月には、MU レーダーと EAR のデータベースの重要性が認められ、生存圏研究所は ICSU (国際科学会議) の WDS (世界科学データシステム) に、正メンバーとして参加することになった。

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⁵⁾。図 13 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 (および 2017) に提案し、27 (28) 件の重点大型研究計画の一つとして採択された⁶⁾。

さらに文部科学省のロードマップ 2014 にも 11 件の新規課題の一つに選定された。EMU レーダーは実現の一手手前まで来ている。

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) IUGONET 「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」 : <http://www.iugonet.org/>
- 5) 赤道MUレーダー (EMU) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/emu>
- 6) 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/masterplan2017/>

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、レーダー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)

植物と人を支える細胞壁の科学

飛松 裕基^{1*}

Plant Cell wall: a crucial supporter of plant and human life

Yuki Tobimatsu^{1*}

概要

植物が進化の過程で多様化・複雑化させてきた細胞壁は陸上植物の進化の道筋や環境適応の仕組みを理解する上で重要な研究対象である。一方、細胞壁は、その固まりである木材に代表されるように、人の暮らしに欠くことのできない再生可能資源（木質バイオマス）でもある。すなわち、複雑かつ多様な細胞壁の構造と機能、植物がそれを作り出す仕組みを理解することは、脱化石資源社会の実現に資する新たなテクノロジーの創出にも寄与する。本稿では、特に二次細胞壁の主要成分であるリグニンに着目して、天然における細胞壁の多様性と可変性、バイオマス利用への応用も視野に入れた遺伝子工学による細胞壁リグニンの改質研究などについて紹介する。

1. はじめに

植物の細胞は厚く硬い細胞壁で覆われている。植物は進化の過程で水を効率的に体内に輸送するための通水細胞と体を支えるための支持細胞を発達させた。前者は乾燥した環境での生命維持を、後者は重力に逆行した植物体の大型化を可能とし、約4億7千万年前に達成されたとされる植物の陸上進出とその後現在まで続く生活圏の拡大と繁栄を成功に導く決定打となったと考えられている。これら陸上植物に必須の細胞がその機能を発揮する際に中心的な役割を果たしているのが細胞壁（特に二次細胞壁）である。また細胞壁は、紫外線防御、微生物や動物による病害・傷害への耐性と防御応答など、過酷な陸上環境で植物が生き延びるために欠くことのできない様々な役割を担っている。複雑で多様な細胞壁の構造と機能、そして植物がそれを作り出す機構を明らかにすることは、陸上植物の進化の道筋や環境適応の仕組みを解明する重要なヒントとなる。

また視点を変えれば、細胞壁には人の暮らしに欠くことのできないバイオマス資源という側面もある。植物が生産する木質バイオマスは地球上の再生可能資源の中でも最も蓄積量が多く、その大半は森林の木材や農作物の非食用部などに蓄積された細胞壁に由来する。木材やそれに由来する紙パルプ、天然繊維など、人は古来、細胞壁を様々な生活用途に利用してきた。深刻化する環境問題やエネルギー問題を背景に、石油由来製品を代替する燃料や化学製品を細胞壁から作り出す循環型の資源利用システム（バイオリファイナリー）の構築が強く求められている。すなわち、人の暮らしを豊かにする新たなテクノロジーの創出という応用的側面からも細胞壁の研究が注目されている。

本稿では、特に陸上高等植物の細胞壁の主要構成成分であるリグニンに着目して、天然における細胞壁の多様性と可変性、バイオリファイナリーへの応用も視野に入れた遺伝子工学による細胞壁リグニンの改変について、著者がこれまでに関わった研究を中心に紹介する。

2017年7月5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: ytobimatsu@rishi.kyoto-u.ac.jp

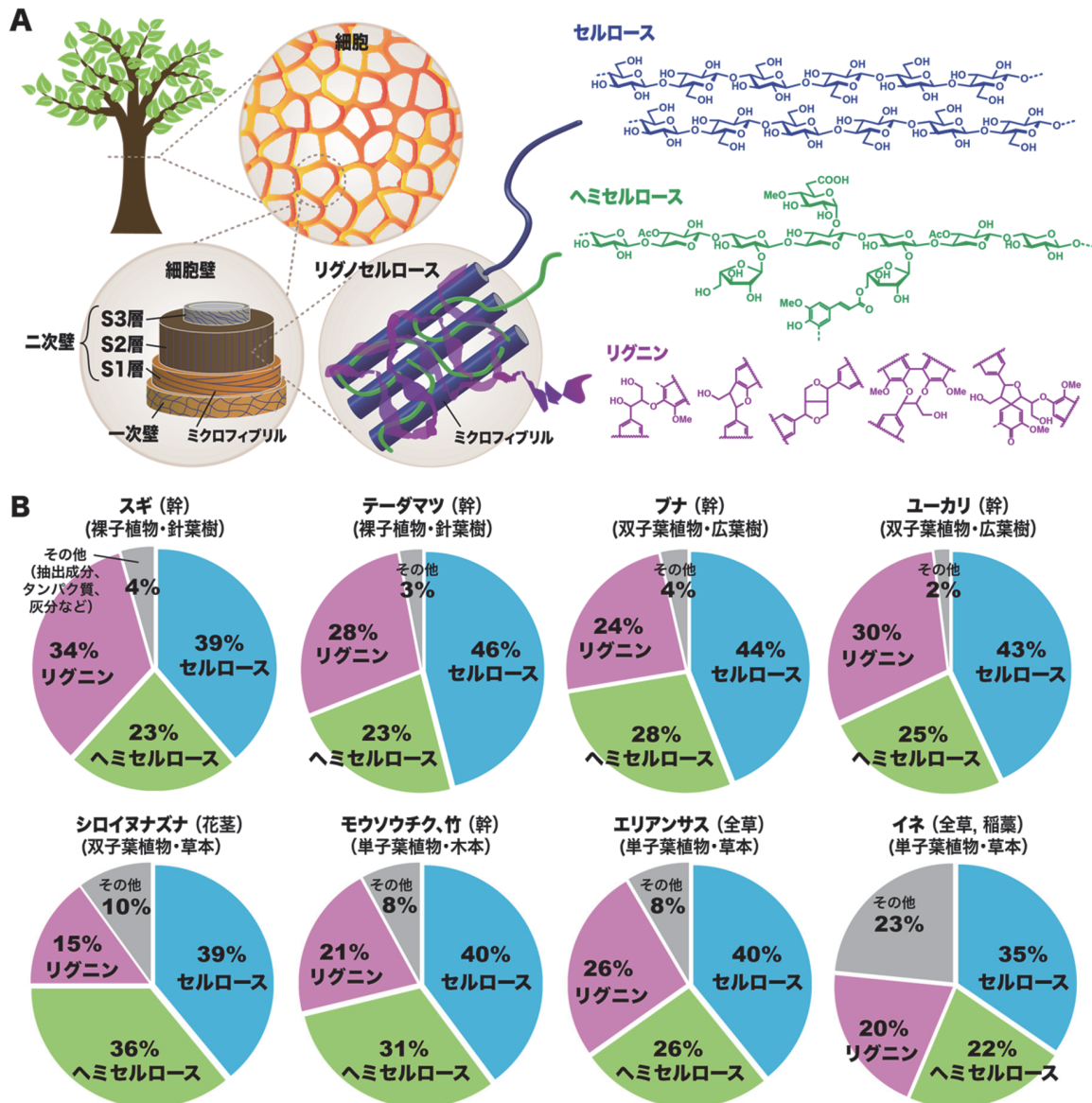


図1：細胞壁およびそれを構成するリグノセルロースの基本構造 (A) と様々な乾燥植物試料 (主に二次細胞壁のリグノセルロースに由来) の化学成分組成 (B)。Bのグラフは文献³⁻⁵⁾のデータに基づき作成。

2. 細胞壁の基本構造

2.1 一次細胞壁と二次細胞壁^{1,2)}

一般に、植物の細胞壁は一次細胞壁と二次細胞壁に分類される (図1A)。一次細胞壁は、細胞分裂時に細胞膜の周囲に形成される薄い細胞壁であり、全ての植物細胞に見られる。一次細胞壁は、強靱ではありながら柔軟性を持ち、細胞の成長過程で拡大・伸長し、細胞の形態形成を様々な機構で制御している。一方、二次細胞壁は、一次細胞壁の内側に形成されるより厚く強固な細胞壁であり、維管束植物の水分輸送や構造支持を担う特定の細胞 (通水細胞と支持細胞) においてのみ形成される。二次細胞壁の形成は、細胞の成長が停止した後、プログラム細胞死と連動して進行する。すなわち、二

次細胞壁の形成を完了した細胞は原形質を失い空洞化した筒状の死細胞である。通水細胞（裸子植物では仮道管、被子植物では道管細胞）は水道管のように空洞化した細胞の内側に水を通すことで効率的にその機能を発現する。またこのような空洞化した構造は、高い強度を保持しつつ、軽量性と断熱性を有する支持細胞（繊維細胞）の機能発現にも大きく寄与している。

前に述べたように、一次細胞壁が植物細胞全般で形成されるのに対し、二次細胞壁は主に通水細胞や支持細胞など特定の細胞においてのみ形成される。とはいえ、植物がその生涯を通して蓄積する量としては、細胞の数は少なくとも厚みで大きく上回る二次細胞壁の方が一次細胞壁よりも圧倒的に量が多い。すなわち、我々が資源として扱う細胞壁（木質バイオマス）の大半は二次細胞壁に由来する。

2.2 リグノセルロース -二次細胞壁を構成する高分子複合体-^{1,2)}

木質バイオマスの実体である二次細胞壁の主要構成成分は、多糖であるセルロースとヘミセルロース、加えて、芳香族高分子であるリグニンであり、総じてリグノセルロースと呼ばれる（図 1A）。各成分の構成比は植物種、組織・細胞の種類、成長段階などにより変動するが、セルロースが 40-50%、ヘミセルロースとリグニンがそれぞれ 15-35%程度である（図 1B）³⁻⁵⁾。

セルロースはグルコースが直線状につながった高分子である。各セルロース分子鎖は互いに水素結合により集まった（結晶化した）マイクロフィブリルと呼ばれる強靱な束を形成し、隣接するマイクロフィブリルは同じ方向を向いて一定の間隔を空けて並ぶ。セルロースの化学構造は植物種によってほぼ違いはないが、分子の集まり方（結晶型）やマイクロフィブリルの大きさや形には違いがある。

ヘミセルロースは様々な糖（キシロース、マンノース、グルコース、アラビノースなど）が一定の分岐をもってつながった多糖分子の総称である。ヘミセルロースは、セルロースのように結晶化はせず、マイクロフィブリルの束を部分的に覆い、架橋するように存在すると考えられている。本稿では以下、主にリグニンを中心とした話をするが、二次細胞壁や一次細胞壁を構成するヘミセルロースの構造や機能も植物種によって大きく異なり、植物の進化とも密接に関わっていると考えられている。^{1,2)}

リグニンは主に *p*-ヒドロキシケイ皮アルコール類からなる前駆体が酸化酵素（ペルオキシダーゼやラッカーゼ）の作用により脱水素重合し、複雑多様な結合様式でつながった芳香族高分子である。後で詳しく述べるように、リグニンの化学構造は植物種や組織、成長段階により大きく異なる。リグニンはセルロースマイクロフィブリルとヘミセルロースの隙間を充填し、細胞壁内のセルロースマイクロフィブリルを強固に結着すると共に隣接する細胞同士の結着にも寄与している。リグニンは、多糖と比較すると疎水的であるため、湿潤状態における細胞壁の物理強度の保持と水分通導の効率化を大きく促進する。さらに複雑多様で難分解性のリグニンにより被覆されることで、細胞壁には微生物や昆虫に対する強い抵抗性が付与される。

なお、一次細胞壁は二次細胞壁と同様にセルロースとヘミセルロースが主要成分であるが、それらの隙間を埋める役割は、リグニンではなく、多糖であるペクチンや構造タンパク質が担う¹⁾。

3. 細胞壁とリグニンの起源

細胞壁の構造とリグニンの存在は陸上植物の進化と密接に関連している（図 2）。

最初に陸上進出を果たした植物は、淡水に生息する車軸藻類（緑藻類）から進化し、現在のコケ植物あるいはシダ植物に近かったと考えられている（図 2）。車軸藻の一次細胞壁ではすでに陸上植物の二次細胞壁でよく見られる結晶構造（I_β型）を持つセルロースからなる強靱なマイクロフィブリルが合成されることが示されている⁶⁾。コケ植物は、葉や茎の中心に“ハイドロイド”と呼ばれる通水組織を形成することが知られている。ハイドロイドはリグニンを沈着しない一次細胞壁のみからなるが、リグニンの沈着した二次細胞壁からなる維管束植物の通水細胞（仮道管と道管）と同様に、原形質を失い空洞化した筒状の死細胞により構成されている。最近、ヒメツリガネゴケ（*Physcomitrella patens*）

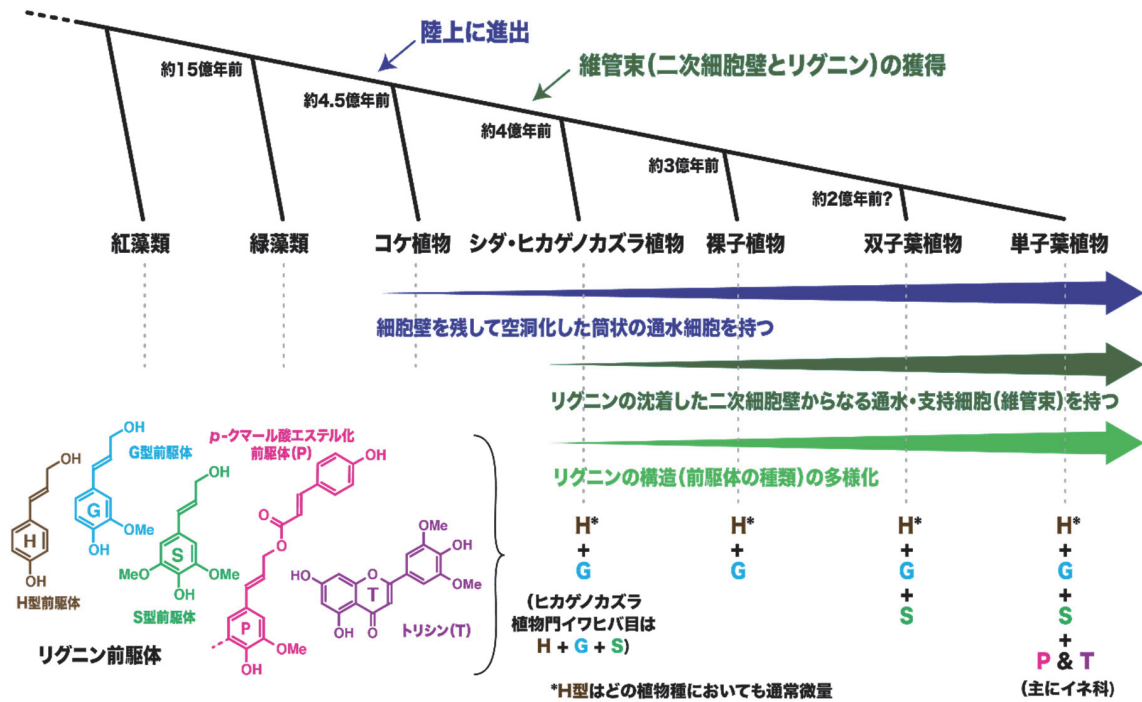


図2：細胞壁リグニンの形成と植物の系統・進化の関係

が持つハイドロイドの形成をコントロールする遺伝子が、被子植物が持つ通水細胞（道管細胞）の形成をコントロールする遺伝子と同じ機構で働くよく似た遺伝子（VNS 転写因子）であることが示されている。このことは、自ら細胞を死なせて筒状の通水細胞を作る共通の仕組みが、維管束植物が誕生する以前の陸上植物ですでに確立されていたことを示し、この仕組みの獲得による水分輸送の効率化が植物の陸上進出の鍵となった可能性を示唆している⁷⁾。

リグニンの起源については諸説あるが、確実かつ量的にリグニンが確認されるのはシダ植物以降の維管束植物である（図2）^{2,8)}。約3億8,500万年前に存在したとされる高さ約8mの最古の木本性植物（厳密には樹木ではない）は現在のシダ類の仲間であったと考えられている⁹⁾。また石炭紀（約3億年前）には高さ30mを超えるシダ植物の大森林が形成したとされている。恐らく、リグニンを充填した二次細胞壁の獲得により大幅に増強された水分輸送機能と構造支持機能がこれら原始維管束植物の巨大化をはじめて可能としたのだろう⁸⁾。

4. 細胞壁リグニンの多様性と可変性

4.1 維管束植物におけるリグニンの多様性と進化

一口にリグニンと言っても、維管束植物の二次細胞壁で形成されるリグニンの化学構造は多様であり、またリグニンの化学構造と植物系統との間には強い相関が見られる（図2）。これは、維管束植物が進化の過程で、何らかの目的（諸説あるが不明）で、リグニンの化学構造を変化させて細胞壁の改良を行ってきたことを示唆している。

シダ植物や裸子植物（針葉樹）の二次細胞壁では、一部の例外を除き、ほぼグアイアシル（G）型前駆体のみが重合したG型リグニンが合成される。一方、被子植物の中で双子葉類（広葉樹が含まれ

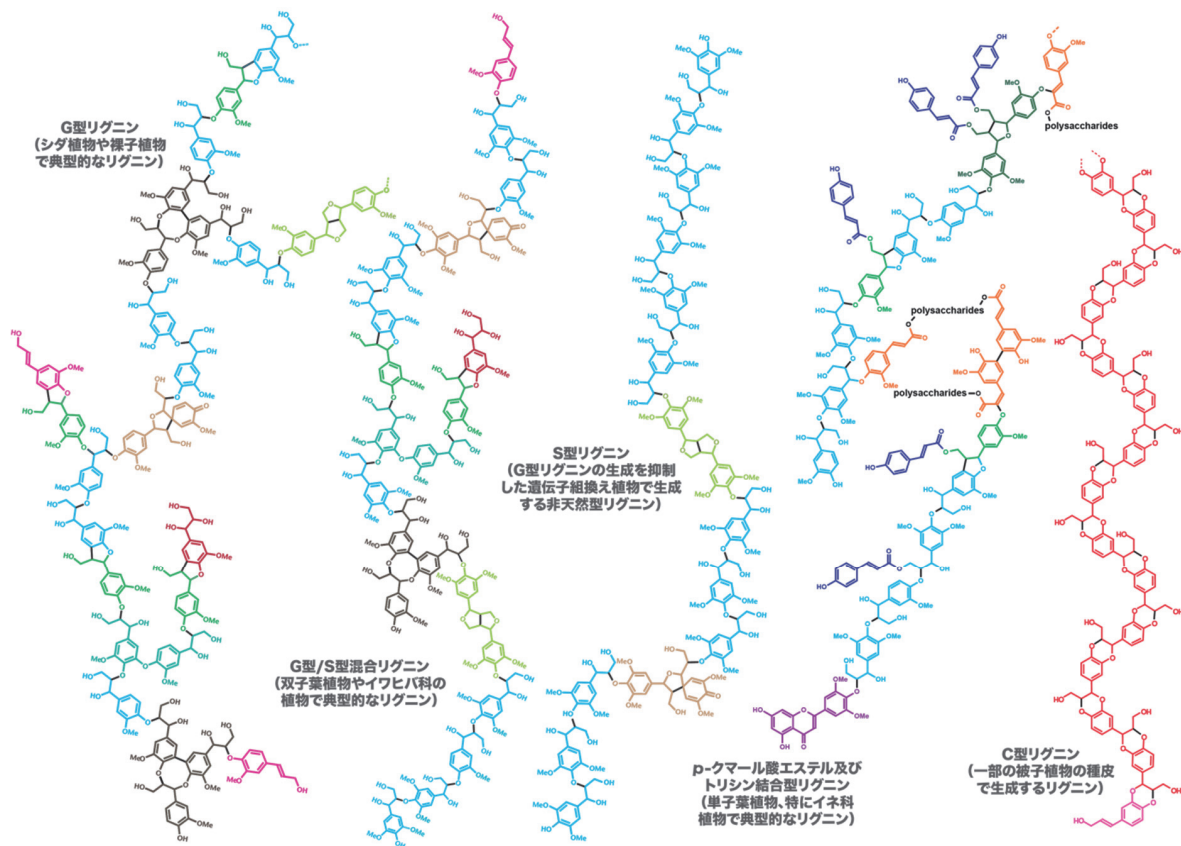


図3：様々なリグニンの分子モデル図

る)では、G型前駆体に加えてシリングル(S)型前駆体が共重合したG/S型リグニンが合成される¹²⁾。さらに、単子葉類特にイネ科植物などでは、G型前駆体とS型前駆体に加えて、それらがp-クマール酸エステル化された前駆体(P)も重合に寄与する¹⁰⁾。また比較的最近になって、イネ科植物を中心とする単子葉類全般と一部の双子葉類の二次細胞壁においては、フラボノイドの1種であるトリシジン(T)も他のリグニン前駆体と共に共重合して高分子リグニンに取り込まれることが明らかになった¹¹⁾。なお全ての植物種において、微量のp-ヒドロキシフェニル(H)型前駆体の重合で生成するH型リグニンも検出される(図2)。

リグニン前駆体の構造は、トリシジン(T)を除けば、芳香核や側鎖についたメトキシ基(-OMe)などの置換基が異なるだけで、かなり類似しているように見える(図2)。しかし、それらの重合で生成するリグニンの化学構造は大きく異なり、分子の形や反応性にも相当な違いが生じる(図3)。これはリグニンの重合反応(脱水素重合反応)における様々な結合の生成パターンが前駆体の置換基の違いに大きく影響を受けるためである¹²⁾。リグニンの化学構造は複雑多様で解析が容易ではなく、未だ完全には解明されていないものの、最新の核磁気共鳴(NMR)法や化学分析法を用いた解析でその詳細が明らかになりつつある(図3)。

4.2 植物個体内におけるリグニンの多様性

リグニンの構造は、植物種のみならず、一植物個体内においても、組織、細胞、細胞壁層、成長段階などによっても変化する。このことは植物が自らリグニン前駆体の合成(すなわちそれに関わる遺伝子の発現)を調節して異なる化学構造を持つリグニンを作り分ける能力を持つことを示している。

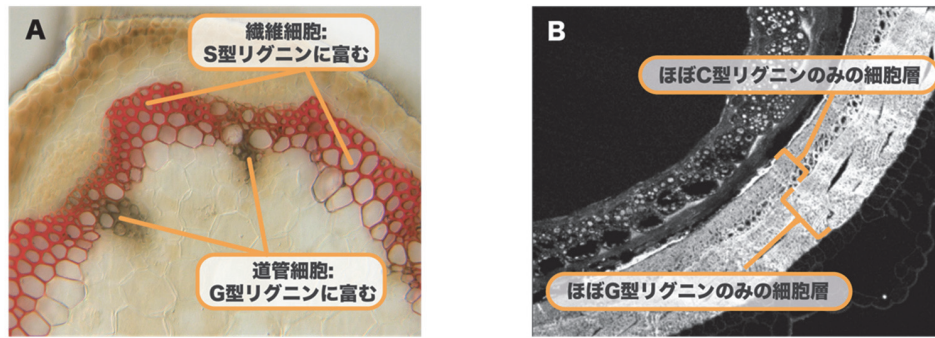


図4: (A) シロイヌナズナの花茎切片の光学顕微鏡写真。モイレ染色法により G 型リグニンに富む通水細胞 (道管) の細胞壁を褐色に、S 型リグニンに富む支持細胞 (繊維) の細胞壁を赤色に染めている¹⁴⁾。(B) クレオメの種皮切片の共焦点レーザー顕微鏡画像。細胞壁中のリグニンが発する自家蛍光を検出している¹⁷⁾。

例えば、双子葉植物においては、通水細胞として機能する道管の二次細胞壁では G 型リグニンに富み、支持細胞として機能する木部繊維の二次細胞壁では S 型リグニンに富むこと¹³⁾が古くから知られている (図 4A)¹⁴⁾。前述のように、G 型リグニンと S 型リグニンの化学構造は似て異なるものであるが (図 3)、このようなリグニンの化学構造の違いが通水細胞 (G 型リッチ) と支持細胞 (S 型リッチ) の機能にどのように関係しているのかは未だよく分かっていない。

また最近の研究において、双子葉植物のクレオメ科、トウダイグサ科、サボテン科、単子葉植物ラン科のバニラなどの種皮において、茎、葉、根などの維管束組織には全く見られないカテコール核を持つ特異なリグニン (C 型リグニン, 図 3) が合成されることが分かった¹⁵⁻¹⁷⁾。クレオメの種皮を構成する細胞壁では G 型リグニンと C 型リグニンの両方が合成されるが、受粉してから種子が成熟していく過程を顕微鏡や化学分析などにより追跡したところ、受粉後 12 日目までは種皮となる部分に G 型リグニンのみからなる細胞壁層が形成され、14 日目以降において、G 型リグニンの細胞壁層の内側に C 型リグニンのみからなる別の細胞壁層が新たに形成される様子が観察された (図 4B)。リグニン前駆体の合成に関わる酵素の活性や遺伝子発現の解析から、受粉後 12 日前後で、まるでスイッチを入れたかのように、G 型前駆体の合成から C 型前駆体の合成へと代謝の流れが急変することが確認されている¹⁷⁾。植物がなぜこのようなことをしているのかは不明だが、異なる化学構造を持つリグニンの形成が組織や成長段階に応じて緻密に制御されていることを示す際たる例といえる。

4.3 リグニンの可変性 -リグニンを改変した遺伝子組換え植物-

以上のように、植物はリグニン前駆体の合成を制御することで化学構造の異なる様々なリグニンを作り出している。この仕組みを利用して、遺伝子工学によってリグニンの化学構造を人為的に改変した様々な遺伝子組換え植物が作られている。

例えば、G 型と S 型が混じった G/S 型リグニンを作る被子植物では、G 型前駆体から S 型前駆体を合成する際に働く *Cald5H* 遺伝子の発現を強く抑制すると、裸子植物やシダ植物のようにほぼ G 型リグニンのみの細胞壁からなる植物が得られる^{18,19)}。逆に、裸子植物であるマツでこの遺伝子を強制的に過剰発現させた植物は、被子植物のように G 型リグニンに加えて S 型リグニンも細胞壁で合成できるようになる²⁰⁾。最近、著者らのグループでは、単子葉類イネ科におけるリグニン生合成経路の解析をすすめており、イネ科植物特有の T 型リグニン (図 2) の合成に関与するフラボン合成酵素 *FNSII* 遺伝子を同定し、T 型リグニンを欠失したイネ変異体の単離にも成功している²¹⁾。この他にも、リグニン前駆体の合成に関与する種々の遺伝子の発現を制御することで、天然では通常ごく微量あるいは全く検出されない H 型リグニン^{22,23)} や C 型リグニン²⁴⁾、アルデヒド基^{18,25)} やアセタール構造²⁶⁾ を導

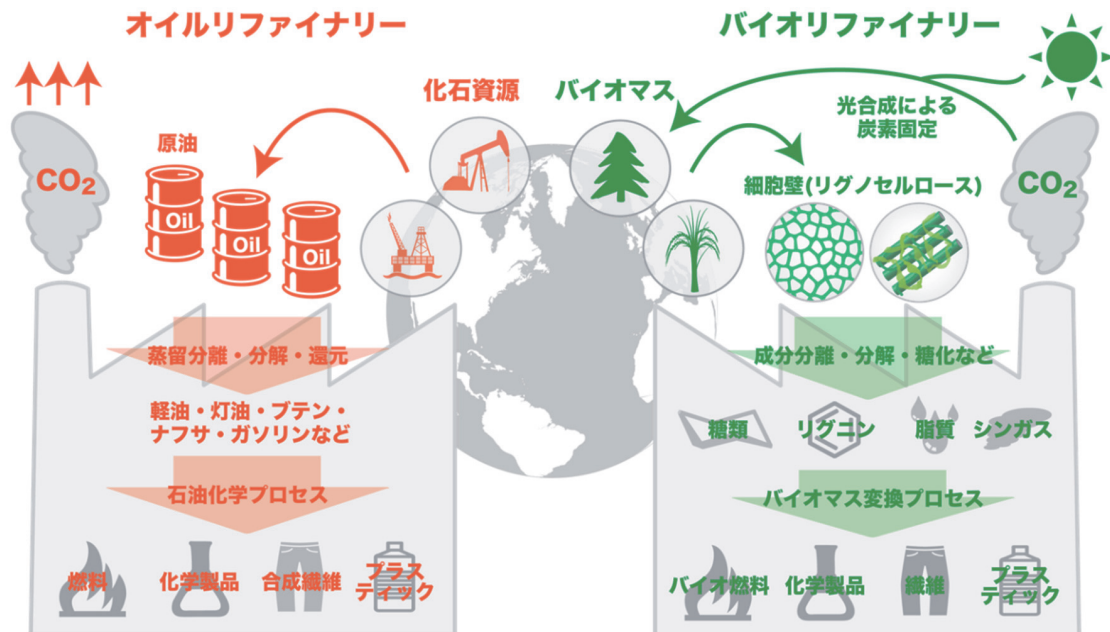


図5：オイルリファイナリーとバイオリファイナリーの概念図

入したリグニンなど、様々な改変リグニンを合成する植物が得られている。興味深いことに、植物全体のリグニンが全く別のタイプのリグニンにほぼ完全に置き換わったような組換え植物においても、少なくとも管理された実験生育条件では、植物の成長や細胞壁構造に目立った異常が現れない事例が幾つか報告されている。このことは、植物が細胞壁におけるリグニンの構造変化をかなりの度合いで許容できることを示している。次項で述べるように、このような「リグニンの可変性」が木質バイオマスの資源利用という観点から大きく注目されている。

5. バイオリファイナリーに向けた細胞壁リグニンの改質

化石資源の大量消費が招いた環境汚染やエネルギー問題などを受けて、石油資源をもとに様々な工業製品を作り出す現況の生産システム「オイルリファイナリー」から、再生産可能な細胞壁（バイオマス）資源をもとにバイオ燃料や様々な化成品を生産するカーボンニュートラルな次世代の生産システム「バイオリファイナリー」へと移行することが重要な課題となっている（図5）^{27,28)}。

細胞壁成分を余すことなく利用して、経済性の優れたバイオリファイナリーを構築するための鍵（言い換えれば厄介者）となるのはリグニンと言われている。例えば、細胞壁中の多糖から酵素糖化と発酵によりバイオエタノールを製造する試みが多くなされているが、このとき予め多糖を被覆・保護するリグニンを化学的あるいは物理的に引き剥がす前処理を行わなければならない、実用化に向けたコスト削減の重い足枷となっている^{27,28)}。一方、リグニンは安定的かつ大量に芳香族系有機物を供給できる唯一の再生可能資源であるとされるにも関わらず、現在実用化されているあるいは実用化に近いと言われている木質バイオマスの工業利用プロセス（パルプ・糖化発酵原料製造など）は専ら多糖利用に主眼をおいたものばかりである。しかも、これらの工業的プロセスで副産物として生成するリグニンの利用は、専ら熱エネルギーを回収するための燃料に限定されている。これはリグニンの構造が複雑多様で利用価値の高い製品へと効率よく変換することが困難であるためである^{27,28)}。

このように植物が進化の過程で獲得したリグニンの特異な多様性と可変性は、まさにリグニン利用

を妨げる阻害要因として敬遠されてきたきらいがこれまでであるが、それを逆手に取り、これまでとは違った新しい木質バイオマスの利用プロセスを組み立てることができるかもしれない。前項で述べたように、(遺伝子組換え技術に頼らない) 育種交配技術や最新の遺伝子工学によって、人為的にリグニンの構造を改変し、バイオマスとしての利用性を向上させた細胞壁を“デザイン”することが可能となりつつある。従来の多糖利用を主眼とした木質バイオマス利用プロセスでは、リグニンは専らただ除くべき阻害成分として捉えられてきたため、リグニン量を低減した、あるいは分解しやすい改変リグニン構造を持つバイオマス生産植物の育種開発がこれまで集中的に検討されてきた。一方、経済性に優れたバイオリファイナリーの構築に向けて、多糖のみならずリグニンからも燃料製品や付加価値を持つ芳香族系化学製品を作り出すことが以前にも増して重要視されてきている。これを受けて、従来の方向性とは逆に、リグニン量の増大²⁹⁾ やポリマー材料や低分子芳香族ケミカルの供給源として最適化した改変リグニンの作出も昨今注目され始めている。詳しくは関連の総説・解説^{30,31)} を参照いただきたいが、我々のグループも含め、世界中の研究者達がリグニンの特異な多様性と可変性に着目したバイオマス生産植物の分子育種を進めている。

参考文献

- 1) 西谷和彦, 梅澤俊明 編著, 植物細胞壁, 講談社, 2014.
- 2) 福島和彦, 船田良, 杉山淳司, 高部圭司, 梅澤俊明, 山本浩之 編集, 木質の形成, 2011.
- 3) Rabemanolontsoa, H. and Saka, S., *RSC Adv.*, **12**, 3946-3956, 2013.
- 4) Ragauskas, A.J., Beckham, G.T., Biddy, M.J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M.F., Davison, B.H., Dixon, R.A., Gilna, P., Keller, M., Langan, P., et al., *Science*, **344**, 1246843, 2014.
- 5) Acker R.V., Vanholme, R., Storme, V., Mortimer, J.C., Dupree, P., Boerjan, W., *Biotechnol. Biofuels*, **6**:46, 2013.
- 6) 和田昌久, 杉山淳司, 岡野健, 木材学会誌, **41**, 186-192, 1995.
- 7) Xu, B., Ohtani, M., Yamaguchi, M., Toyooka, K., Wakazaki, M., Sato, M., Kubo, M., Nakano, Y., Sano, R., Hiwatashi, Y., Murata, T., Kurata, T., Yoneda, A., Kato, K., Hasebe, M., Demura, T., *Science*, **343**, 1505-1508, 2014.
- 8) アーネスト・ギフォード, エイドリアン・フォスター, 維管束植物の形態と進化, 文一総合出版, 2002.
- 9) Stein, W.E., Mannolini, F., Hernick, L.V.A., Landling, E., Berry, C.M., *Nature* **446**, 904-907, 2007.
- 10) Withers, S., Lu, F., Kim, H., Zhu, Y., Ralph, J., Wilkerson, C.G., *J. Biol. Chem.*, **287**, 8347-8355, 2012.
- 11) Lan, W., Lu, F., Regner, M., Zhu, Y., Rencoret, J., Ralph, S.A., Zakai, U.I., Moreel, K., Boerjan, W., Ralph, J., *Plant Physiol.*, **167**, 1284-1295, 2015.
- 12) Ralph, J., Lundquist, K., Brunow, G., Lu, F., Kim, H., Schatz, O.F., Marita, J.M., Hatfield, R.D., Ralph, S.A., Christensen, J.H., Boerjan W., *Phytochem. Rev.*, 2004, **3**, 29-60, 2004.
- 13) Saka, S., Thomas, R.J., Gratzl, J.S., *Tappi*, **61**, 73-76, 1978.
- 14) Tobimatsu, Y., Wagner, A., Donaldson, L., Mitra, P., Niculaes, C., Dima, O., Kim, J.I., Anderson, N., Loque, D., Boerjan, W., Chapple, C., Ralph J., *Plant J*, **76**, 357-366, 2013.
- 15) Chen, F., Tobimatsu, Y., Havkin-Frenkel, D., Dixon, R.A., Ralph, J., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **109**, 1772-1777, 2012.
- 16) Chen, F., Tobimatsu, Y., Jackson, L., Nakashima, J., Ralph, J., Dixon, R.A., *Plant J*, **73**, 201-211, 2012.
- 17) Tobimatsu, Y., Chen, F., Nakashima, J., Escamilla-Treviño, L. L., Jackson, L., Dixon, R.A., Ralph, J., *Plant Cell*, **25**, 2587-2600, 2013.
- 18) Anderson, N.A., Tobimatsu, Y., Ciesielski, P.N., Ximenes, E., Ralph, J., Donohoe, B.S., Ladisch, M.,

- Chapple, C. *Plant Cell*, **27**, 2195-2209, 2015.
- 19) Takeda Y, Koshiha T, Tobimatsu Y, Suzuki S, Murakami S, Yamamura M, Rahman Md M, Takano T, Hattori T, Sakamoto M, Umezawa T., *Planta*, **246**, 337-349, 2017.
 - 20) Wagner, A., Tobimatsu, Y., Phillips, L., Flint, H., Geddes, B., Lu, F., Ralph, J., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **112**: 6218-6223, 2015.
 - 21) Lam, P.Y., Tobimatsu, Y., Takeda, Y., Suzuki, S., Yamamura, M., Umezawa, T., Lo, C., *Plant Physiol.* **174**, 972-985, 2017.
 - 22) Bonawitz, N.D., Kim, J.I., Tobimatsu, Y., Ciesielski, P.N., Anderson, N.A., Ximenes, E., Maeda, J., Ralph, J., Donohoe, B.S., Ladisch, M., Chapple, C., *Nature*, **509**, 376-380, 2014.
 - 23) 武田ゆり, 小柴太一, 飛松裕基, Steven Karlen, 山村正臣, 服部武文, 坂本正弘, John Ralph, 鈴木史朗, 梅澤俊明, 第34回日本植物細胞分子生物学会講演要旨集, 3Aa-02, 2016.
 - 24) Wagner, A., Tobimatsu, Y., Phillips, L., Flint, H., Torr, K., Donaldson, L., Pears, L., Ralph, J., *Plant J.*, **67**, 119-129, 2012.
 - 25) Zhao, Q., Tobimatsu, Y., Zhou, R., Pattathil, S., Gallego-Giraldo, L., Fu, C., Shadle, G.L., Jackson, L.A., Hahn, M.G., Kim, H., Ralph, J., Chen, F., Dixon, R.A., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 13660-13665, 2013.
 - 26) Wagner, A., Tobimatsu, Y., Goeminne, G., Phillips, L., Flint, H., Steward, D., Torr, K., Donaldson, L., Boerjan, W., Ralph, J., *Plant Mol. Biol.*, **81**, 105, 2013.
 - 27) 渡辺隆司, 生存圏研究, **7**, 23-28, 2012.
 - 28) 梅澤俊明, 生存圏研究, **8**, 25-32, 2012.
 - 29) Koshiha, T., Yamamoto, N., Tobimatsu, Y., Yamamura, M., Suzuki, S., Hattori, T., Mukai, M., Noda, S., Shibata, D., Sakamoto, M., Umezawa, T., *Plant Biotechnol.* **34**, 7-15, 2017.
 - 30) Rinaldi R., Jastrzebski R., Clough M.T., Ralph J., Kennema M., Bruijninx P.C.A., Weckhuysen B.M., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**: 8164-8215, 2016.
 - 31) 梅澤俊明, 日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす, **96**: 336-343, 2017.

著者プロフィール



飛松 裕基 (Yuki Tobimatsu)

<略歴> 2004年京都大学農学部生物機能科学科卒業／2009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)／同年ウィスコンシン大学生化学部門ポスドク研究員／2012年同大学同部門アシスタントサイエンティストならびに米国エネルギー省バイオエネルギー研究センター (GLBRC) サイエンティストを兼任／2014年京都大学大学院農学研究科助教／2015年同大学生存圏研究所准教授、現在に至る。<受賞>2012年アメリカ植物科学会 Robert Rabson Award／2015年日本木材学会奨励賞<趣味>散歩とコーヒー。

地震被害にみる木造住宅を長持ちさせる技術

森 拓郎^{1*}

Technique for long term use of wooden houses learned from earthquake damage

Takuro Mori^{1*}

概要

2016年4月に発生した熊本地震の被害報告を兼ねて、耐震性能、生物劣化と地震被害について紹介する。耐震性能については、現行の建築基準法の担保しているものは人命を損なわないことであり、耐力に余裕のある設計をすることが建物を長持ちさせ、財産を維持するために重要であること、リフォームなどの機能改修をする際に耐震補強を検討することの必要性も示した。地震被害建物に散見されるシロアリや腐朽による被害と、それらの箇所が地震被害時に露わになっている様子を示した。さらに、最近の研究事例として腐朽菌による生物劣化を受けることによって、壁の耐力が2割ほど失われることを示した。ただし、早期に発見し、対応することによってその影響をほぼ回復できることも示した。これらより、木造住宅を長持ちさせる方法として、耐震補強とメンテナンスが重要であることを紹介した。

1. はじめに

2016年4月14日21時26分、熊本県熊本地方を震央とする布田川・日奈久断層において、震源の深さ11km、気象庁マグニチュードMj6.5の地震（前震）が発生し、熊本県益城町で震度7を観測した¹⁻³⁾。その後4月16日1時25分に、同じく熊本県熊本地方を震央とする、震源の深さ12km、Mj7.3の地震（本震）が発生し、熊本県西原村と益城町で再び震度7を観測した¹⁻³⁾。本地震では、熊本県から大分県に渡る余震の広範囲性に加え、震度5強以上を記録した比較的大きな余震も多数発生していることが特徴的であった。また、本地震は建物や塀の倒壊などによる圧死や、関連死を含めると80名を越える多くの方々が亡くなる大惨事となった。家屋の被害も大きく、全半壊建物数は合計28,000棟以上²⁾に上り、阿蘇神社（写真1左）や熊本城の被害（写真1右）は多くのメディアで取り上げられた。また、山崩れや土砂崩れなども多数見られ、南阿蘇村へ通じる阿蘇大橋が崩落したのが衝撃的であった。

さて、近年の日本では、これ以外にも多くの地震による木造住宅の被害が報告されており、耐震補強の重要性などが指摘されている。そこで、本報では、熊本地震による木造住宅の被害について建築基準法の変遷に関わる年代ごとに区分して紹介する。また、これらの調査の際に併せて実施した生物劣化による被害調査の結果についても紹介する。加えて、生物劣化を受けた木造住宅の残存している性能について評価をおこなっている研究事例についても併せて紹介する。

2017年7月10日受理。

¹〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1 広島大学大学院工学研究科建築学専攻

* E-mail: moritaku@hiroshima-u.ac.jp

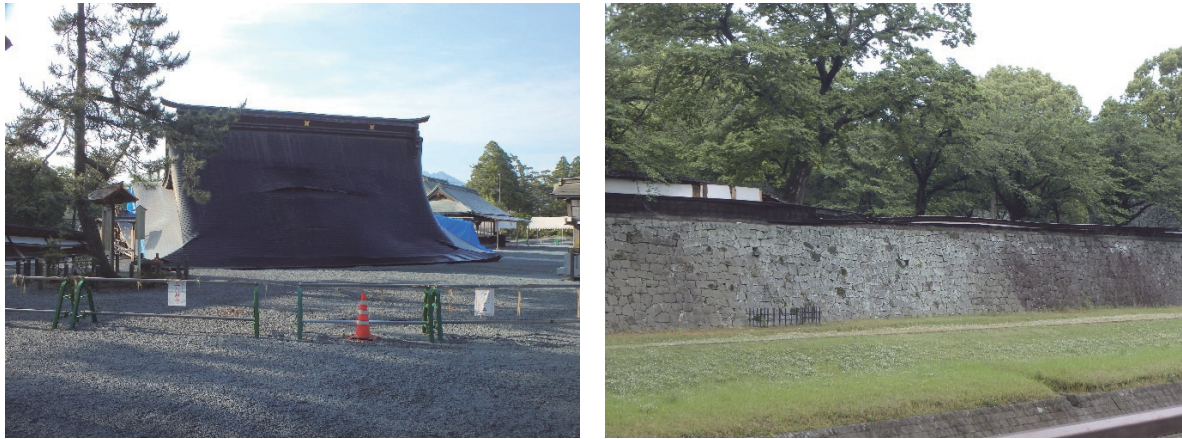


写真1：阿蘇神社（左）および熊本城の堀塀（右）の被害の様子

2. 耐震性能、生物劣化と地震被害

2.1 耐震性能と地震被害

まず、耐震性能を述べる上で重要となる建築基準法施行令の変遷について紹介する。

「旧耐震（1981年5月以前）」1981年5月に建築基準法施行令が改正され、木造住宅に必要とされている性能が大幅に引き上げられた。そのため、これ以前の旧耐震木造住宅においては、その性能が現行基準のものとは比べて大きく下回っていることが明確である。

「新耐震（1981年6月以降-2000年5月以前）」2000年5月にも改正があり、壁のつり合い（南側と北側、東側と西側の壁の量）の確認や、耐力壁や柱直下の引き抜き抵抗用の金物の義務化などが明記された。そのため、2000年5月の改正以前の耐震木造住宅では壁を北側に集中させているものや筋かいの根元が釘で留まっているだけというものが散見され、大地震時に南側の窓など開口が大きいために南側が大きく揺すられたり、筋かいが外れたりするような被害が多く見られる。

「2000年以降（2000年6月以降）」上記のように、壁の配置の明確化や耐力壁と呼ばれる、地震時に建物の揺れに抵抗する壁など主要な耐震要素がきちんと留め付けられているために、高い耐震性能を示している。

なお、建築基準法の定めるところは、極大地震が起こった際に倒壊を防ぎ、人命を損なわないような建物を設計することとしている。建築基準法の定める性能のぎりぎりの建物を設計すると大きな損傷を受け

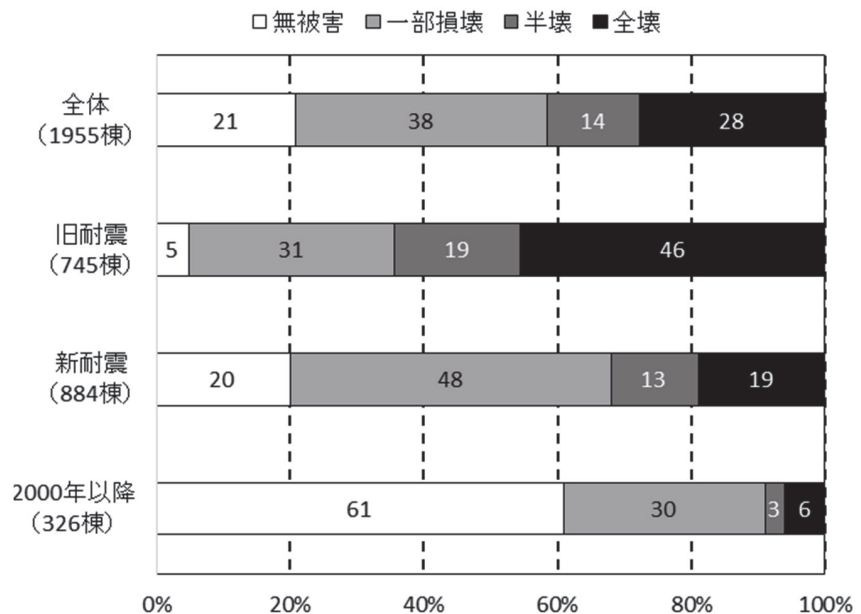


図1：木造住宅における建築年代別の被害レベルの割合

る可能性があることを明記しておく。

以下に、熊本地震の被害をもとに、耐震性能の話を紹介する。まず、熊本県上益城郡益城町における日本建築学会九州支部が実施した悉皆調査（全棟調査）の結果で示された木造住宅における建築年代別の被害レベルの割合を図1に示す⁴⁾。なお、図1は参考文献4)をもとに製作している。

「旧耐震」の木造住宅について、写真2-4に示すように、大きな被害を受けているものが多く見られた。特に、南側などに大きな窓などの開口が集中しているものも多く、ねじれるように倒壊していたり、大きな変形の後にかろうじて倒壊を間逃れていたりするものが見られた。図1の日本建築学会九州支部の調査報告によると、全壊に値する被害を受けた木造住宅の比率は46%となっており、その比率が高いことから耐震性能が劣っていることがうかがえる。



写真2：旧耐震の木造住宅の倒壊の様子1



写真3：旧耐震の木造住宅の倒壊の様子2



写真4：旧耐震の木造住宅の倒壊の様子3

次に、「新耐震」の被害について、写真5-6に示すように大きな被害を受けているものが見られた。同様に、図1では、全壊に値する被害を受けたものが19%となっており、その比率は「旧耐震」と比較すると半分以下と大きく下がっていることがわかる。ただし、現行法では必要とされている金物が、写真7のように適切に施工されていない様子なども見られた。



写真 5 : 新耐震の木造住宅の倒壊の様子 1



写真 6 : 新耐震の木造住宅の倒壊の様子 2



写真 7 : 金物が片側しか付いていない様子 (上金物あり、下金物なし)

最後に、「2000年以降」であるが、写真8のように必要な壁の量の倍近い壁を入れているためにほぼ無被害のものから、写真9のように軽微ですんだもの（壁柱の下部、上部にせん断による横割れが入っている）、写真10-11のように大きな被害を受けたものまで様々見られた。



写真 8 : 2000年以降の健全な木造住宅



写真 9 : 2000年以降の軽微な損傷の木造住宅



写真 10：2000 年以降の木造住宅の倒壊の様子 1



写真 11：2000 年以降の木造住宅の倒壊の様子 2

「2000 年以降」について上記の日本建築学会の報告では、全壊に値する被害を受けたものが 6% になっており、被害がずいぶん少ないことがわかる。ただし、全壊に値する被害は 0% ではなく、ここに示しているように数棟が倒壊した現状がある。現行法のままで壁配置の規則などの仕様の規定をより厳しく明記するのか、建築基準法施行令のさらなる改定を考えるのかなどについて議論するために、倒壊した木造住宅の原因の究明がされており、何らかの不良があったために倒壊しているものがほとんどであったと報告されている⁹⁾。また、写真 12 に示すように金物は付いているが釘の太さが足りていないもの（施工上の問題）や、写真 13 のように現行法では地震力に抵抗できる壁として数えることができる壁であるが、上階の床がないという配置の配慮がないために構造耐力上うまく機能しない場合などがあつた。



写真 12：釘の寸法が異なっている様子



写真 13：下屋部分に耐力壁がついている様子

2.2 生物劣化と地震被害

次に、地震被害調査の際に発見された生物劣化の事例を紹介する。ここで述べる生物劣化とは、腐朽菌による腐れとシロアリによる食害である。

生物劣化がもっとも多く見られる個所は、土台近傍である。写真 14 に示すように土台が腐朽もしくはシロアリの食害を受けると柱の踏み外しなどが起こり、木造住宅を大きく傾けることになる。同様に、写真 15 に示すように土台近傍ではあるが、筋かいなど耐力を発現しなければならない箇所で生物劣化が起これば肝心の耐力要素、この場合は筋かいが効かないという事態に陥る。



写真 14：柱と土台の生物劣化による踏み外しによる大きな変形



写真 15：筋かい付近のシロアリの食害による筋かいの脱落

生物劣化の進行によってモルタルの外壁が脱落し、生物劣化の様子が明らかとなる様子が散見された。写真 15 では、モルタルの外壁がすべて脱落していた。加えて、西面のほぼすべての筋かいの端部がシロアリによって食害されており、耐力要素としての必要性能を有しているとは思えない状態となっていた。また、大きな地震被害を受けた木造の住宅や集合住宅には、リフォームによって外観は新しくきれいになっているものの、柱などに生物劣化による損傷を受けているものも見られた。リフォームの際に防腐防蟻処理と耐震補強を併せて実施することによって、被害を低減できたのではないかと推察された。今回、筆者が被害の調査をおこなった範囲では、2000 年以降の比較的新しい木造住宅に生物劣化による被害は発見されず、防腐防蟻の処理が適切に施されていることが確認できた。また、兵庫県南部地震の際の生物劣化と木造建物の損傷に関する調査報告では、図 2 に示すように倒壊した木造建物の多くに蟻害や腐朽の害があったと記されている⁶⁾。この結果からも、生物劣化は地震被害を大きくしている一因と考えられ、生物劣化を防ぐためのメンテナンスの重要性が示唆された。



写真 16：リフォームされているが倒壊した集合住宅

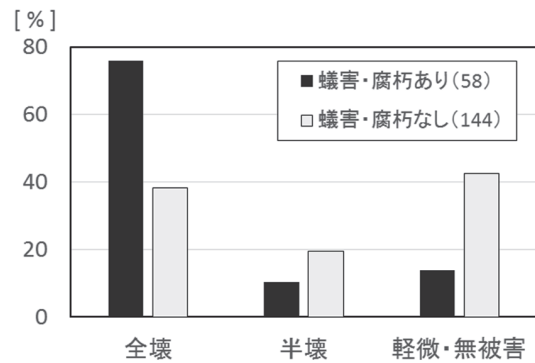


図 2：兵庫県南部地震時の北淡町調査地域における生物劣化と倒壊率の関係⁶⁾

3. 耐力要素が生物劣化を受けた場合の検討

地震被害と耐震性能が密接に関係していることは当然であるが、図 2 より生物劣化を受けることによって耐震性能が低下し、地震被害を大きくしている可能性が示唆された。そこで、実際に生物劣化を受けた際に木造住宅の性能はどれほど低下するのかを確認・評価するために、一連の研究を実施しているが、ここでその一例について紹介したい⁷⁾。また、これらに類する研究は、近年多数実施され

てきており、例えば参考文献 8) -11) などが挙げられる。

ここで紹介する研究は、地震時に建物に作用する地震力に抵抗するために備えられている壁（耐力壁）の腐朽菌（褐色腐朽菌）の被害による耐力低下について検討したものである。実際に用いられているものと同様の壁を作成し、その壁に腐朽菌を約 20 週間摂取し、腐朽した状態を再現し、その後評価実験に供し、健全なものと比較することで耐力性能低下の度合いを調査したものである。

本実験では、実際に多く用いられている筋かいと合板の耐力壁を用いて評価した。腐朽させた柱脚部の状態を写真 17-18 に示す。わかり難いが柱（縦材）と土台（横材）の接合している辺りのモヤモヤしたものが腐朽菌とその害によって変色などを生じている個所である。実際の建物で見られた腐朽状態や写真 15 で示したようなシロアリの食害と比較するとまだ軽微な劣化といえる。

耐力性能を評価するための壁実験を実施した結果、耐力壁の耐力性能の指標である壁倍率で示すと、2 割ほど低下していることが確認された。また、土台の被害が軽微なうちに、耐力要素である筋かいや合板を交換した場合は、土台がある程度健全であれば、ほぼ元通りに回復できることが確認された。

本実験では、約 20 週という短期の劣化期間であったが、実際の木造住宅では、自分自身で外観調査やメンテナンスなどをしていない、または業者による調査を含むメンテナンスを実施していない場合には、生物劣化が 5 年や 10 年など長期にわたり放置されることが考えられる。先述したように、生物劣化を早期に発見できればほぼ元通りの性能に回復させることができるため、ぜひメンテナンスを重視してもらいたい。例えば、腐朽であれば、屋根からの雨漏りやベランダからの雨水の侵入、窓の結露などが原因となっているので、そのあたりを重点的に調査すれば、不具合を発見できるのではないかと考える。実際に雨漏りなどによる天井からの浸み出しなどが見られる場合には、業者に調査を頼むのが無難かもしれない。また、シロアリの被害であれば、床下からの侵入が最も多いため床下の調査が効率的である。ただし、床下調査は手間がかかるため、代替として犬走や外の立基礎の土を払うだけでも被害を防ぐまたは軽減する助けとなり、羽アリが飛ぶ季節の 5 月、6 月に我が家のような様子がないかを確認するのも一つの方法と考える。簡単な調査や補修など、我が家を振り返ることから長持ちへの努力を始めてみてはどうだろうか。

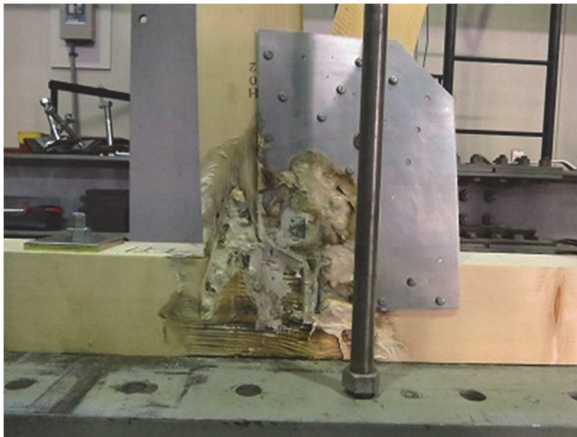


写真 17：筋かい耐力壁の脚部が腐朽した状態

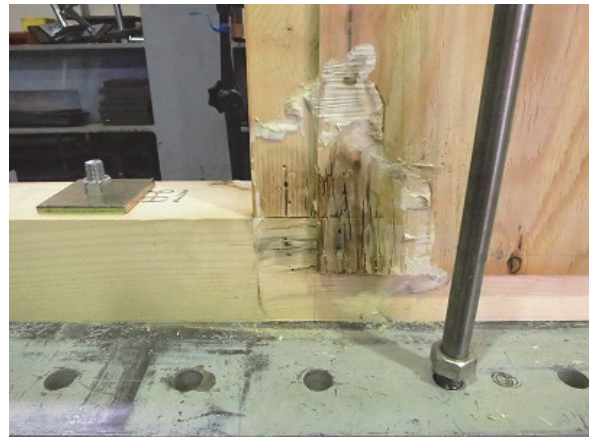


写真 18：合板耐力壁の脚部が腐朽した状態

4. まとめ

2016年4月に発生した熊本地震の建物被害報告を兼ねて、耐震性能や生物劣化と地震被害との関係について述べた。耐震性能については、現行の建築基準法が担保しているものは建物の損傷を防ぐことではなくて人命を損なわないこと、財産維持のためにも耐力に余裕のある設計をすることなどが長持ちさせるために重要であること、機能改修をするリフォームは、同時に耐震補強を施す良い機会で

あることなどを述べた。また、多くの建物でシロアリや腐朽などの生物劣化による被害があること、それらの箇所は地震時に損傷を受けているために性能が低下しており、被害箇所が露わになり易いことなどを述べた。そして、実験的な研究事例として、腐朽による生物劣化を20週ほど受けた耐力壁が、約2割も耐力を失うことを紹介した。ただし、早期に発見して耐力に大きく寄与する面材料や筋かいを交換することでその損傷をほぼ回復できることも示した。これらのことより、耐震補強を施して余力を持たせることと、メンテナンスが木造住宅を長持ちさせるために重要であることを示した。本報が、我が家を少しでも長持ちさせる手助けになれば幸いである。

最後となりましたが、今回は熊本における地震被害を参考として紹介しました。被害にあわれた方々に心からお見舞い申し上げるとともに、一日も早い復興を祈念しております。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ <http://www.seisvol.kishou.go.jp>
- 2) 気象庁ホームページ 2016年5月地震活動の評価 <http://www.jma.go.jp/jma/press/1606/10a/201606101000.html> (2016/6/11)
- 3) 気象庁ホームページ 「平成28年(2016年)熊本地震」について(第39報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/1606/10a/201606101000.html> (2016/6/11)
- 4) 2016年熊本地震災害調査報告会(8月), 日本建築学会災害委員会, P88, 2016.
- 5) 2016年熊本地震による木造建築物の被害調査報告会, 一般社団法人日本建築学会構造委員会木質構造運営委員会, 2017.
- 6) 宮野道雄, 土井 正, 兵庫県南部地震による木造家屋被害に対する蟻害・腐朽の影響, *家屋害虫*, **17**, No.1, 70-78, 1995.
- 7) 芝尾真紀, 西野 進, 毛利悠平, 森 拓郎, 他6名, 強制腐朽処理を壁脚部に施した耐力壁の残存耐力性能その1 腐朽個所の違いが残存耐力に及ぼす影響, *日本建築学会学術講演梗概集構造III*, 593-594, 2016.
- 8) 森 拓郎, 田中 圭, 毛利悠平, 築瀬佳之, 井上正文, 五十田博, シロアリ食害を受けた木材に打ち込まれた木ねじ接合部の残存耐力に関する研究, *日本建築学会構造系論文集*, **81**, No.725, 1113-1120, 2016.
- 9) 森 拓郎, 野田康信, 東 智則, 森 満範, 戸田正彦, 強制腐朽処理を施した木ねじ接合部の一面せん断性能評価, *構造工学論文集*, **60B**, 371-375, 2014.
- 10) 森 拓郎, 築瀬佳之, 田中 圭, 河野孝太郎, 野田康信, 森 満範, 栗崎 宏, 小松幸平, 生物劣化を受けた木材の曲げ及び圧縮強度特性とその劣化評価, *材料*, **62**, No.4, 280-285, 2013.
- 11) 澤田 圭, 腐朽が木質構造機械的接合部の接合性能に与える影響, *木材保存*, **41**, No.1, 2-7, 2015.

著者プロフィール



森 拓郎 (Takuro Mori)

<略歴> 1996年信州大学工学部社会開発工学科建築コース卒業/1998年信州大学大学院工学系研究科社会開発工学専攻修了/2001年信州大学大学院工学系研究科システム開発工学専攻修了(博士(工学))/2001年京都大学木質科学研究所助手/2004年同大学生存圏研究所助教(統合改組による)/2017年広島大学大学院工学研究科建築学専攻准教授(現在に至る)<研究テーマ>住宅から中大規模まで様々な木質構造における安心安全のための科学と木材の有効利用への貢献<趣味>楽しくお酒を飲むこととスポーツ観戦

衝撃波対応コードを用いた 磁気リコネクションの磁気流体シミュレーション研究

銭谷 誠司^{1*}

Magnetohydrodynamic (MHD) simulations of magnetic reconnection with a high-resolution shock-capturing code

Seiji Zenitani^{1*}

概要

太陽フレアや地球磁気圏現象に関わる磁気リコネクションは、長年にわたって、磁気流体理論や数値シミュレーションを用いて研究が進められている。最近のシミュレーション技法の進展で、プラズマ中の不連続構造を扱うことが容易になり、磁気リコネクションのプラズマジェットが生成する衝撃波構造を議論することができるようになってきた。本稿では、我々の最近のシミュレーション研究の成果とその意義を簡単に紹介する。

1. はじめに

宇宙空間のさまざまな場所では、プラズマ中で磁力線がつながり変わる「磁気リコネクション」現象が起きていると考えられている。太陽フレアはその一例で、太陽表面の彩層・コロナ領域に現れたアーケード状の磁力線がつながり変わってエネルギーを放出し、激しく増光することが知られている。また、地球近傍の宇宙空間では、地球の極域から夜側に伸びた磁力線が稀に磁気リコネクションを引き起こし、プラズマ粒子を高エネルギーに加速して、地球の極域大気上層部に降り込んだ電子がオーロラの発光源となる原子や分子にエネルギーを与えている。

磁気リコネクションの基本的な性質は、磁気流体力学 (MHD) の理論と数値シミュレーションによって、20 世紀半ばから研究が続けられている。中でも世界最初の MHD シミュレーションが、日本の鶴飼・津田¹によって行われたことは特筆に値するだろう。リコネクション点からは高速のプラズマジェットが吹き出して周囲のプラズマにぶつかっていくが、こうしたジェットの速度はアルヴェン速度というプラズマ中の特徴速度程度であることがわかっている。

ところで、太陽コロナのように、磁気リコネクションが起きると考えられているプラズマ環境では、プラズマ β (プラズマのガス圧と磁場の持つ磁気圧の比率) の値が $\beta < 1$ となることがわかっている。そして、このような $\beta < 1$ の領域では、アルヴェン速度が音速 (正確には遅進磁気音波の速度) よりも速くなる。言い換えると、リコネクションジェットが超音速の速度で吹き出すことになる。

このような超音速のリコネクションジェットと周辺プラズマとの相互作用は、過去の MHD シミュレーション研究ではよくわかっていなかった。理由の1つは、コードの性能が不十分だったことであ

2017年8月18日受理。

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

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

る。流体シミュレーションは一般に、衝撃波などの不連続構造を扱うのが苦手である。こうした不連続面では、非物理的な振動が起きて計算が異常終了することが多い。旧来の数値解法では人工的な粘性を使って数値振動を抑えていたが、副作用で構造が滑らかになり、細かな構造が見えなくなってしまっていた。

我々の最近の研究^{2,3)}では、HLLD法という比較的新しい数値解法を使ったMHDシミュレーションコードを用いて、超音速のリコネクションジェットと周辺プラズマとの相互作用の問題を詳しく解析した。HLLD法は、2005年に三好・草野⁴⁾が提案したMHD方程式の数値解法で、適度な計算負荷で衝撃波や不連続面を解くことができる。HLLDコードによるシミュレーションの結果、過去のシミュレーションでは分解できなかった細かな構造が明らかになり、背景の物理をより良く議論できるようになった。以降の章では、我々のシミュレーション研究の要点を解説するとともに、その結果の意義と今後の展望を述べる。

2. 磁気流体シミュレーション

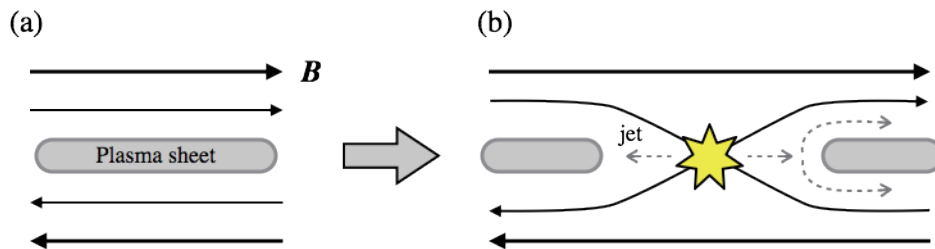


図1：(a) 磁力線の初期設定とプラズマシート。(b) リコネクション発生後のプラズマ流の構造。

本研究では、図1のようなリコネクション系を想定する。初期設定では、図1(a)のように、反平行に向かい合った磁場を考え、中央にプラズマ密度の濃い「プラズマシート」領域を設定する。これは、中央では磁場の圧力(磁気圧)がなくなるため、プラズマのガス圧で構造を支える必要があるからである。そして、シミュレーションコードを使って、磁気流体方程式の時間発展を解き進めていく。その際、中心付近に擾乱を与え、電気抵抗パラメータを調整することで、中央部分で磁気リコネクションを起こす。実際には、系の対称性を利用して、図1(b)の右上象限のみを計算して計算量を節約している。そして、前述のように $\beta < 1$ のプラズマ環境を想定して、上流の磁場領域のプラズマ β を $\beta = 0.2$ あるいは $\beta = 0.1$ とした。

図2は、 $\beta = 0.2$ のシミュレーション結果で、リコネクションがよく発達した段階($t=250$)のプラズマの右向き速度成分(V_x)を表したものである。見やすくするために、右上象限を右下に折り返して、図1(b)の右半分に対応する部分を表している。白いコンターは磁力線を表していて、上半分と下半分で逆を向いた磁場が、XY座標の原点でつなぎ変わっている。リコネクション点からは高速のジェット(色が濃い領域)が吹き出していて、その先端にプラズマが吐き集まって大きな磁気島(プラズモイド)を形成している。速度の1.0は先に述べたアルヴェン速度に相当する。磁気島の右半部ではプラズマ流は上下2つに分かれているが、これは、シミュレーションの初期設定で中央部に高密度のプラズマシートを置いたために、プラズマ流が上下に分かれるからである(図1(b)右側)。これらのジェット・磁気島の内部・周辺には、さまざまな箇所に微細な構造が見えている。

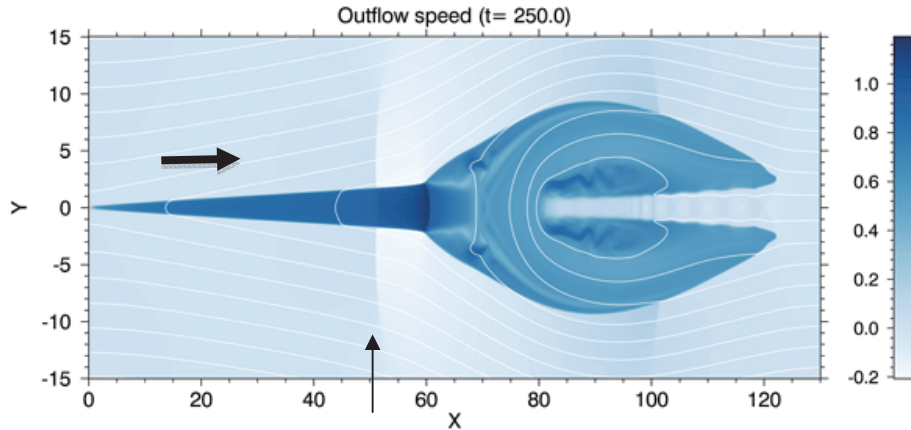
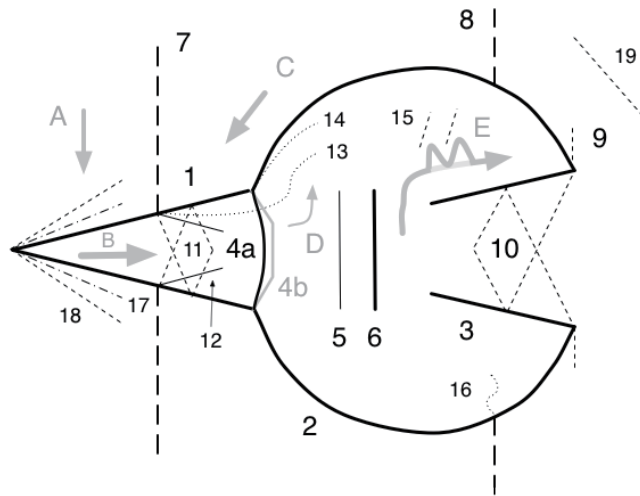


図 2 : 磁気流体シミュレーションの結果。系がよく発達した段階 ($t=250$) におけるプラズマのアウトフロー (V_x) 成分を示す。白いコンターは磁力線。

我々の 2011 年の研究論文²⁾ (Zenitani & Miyoshi 2011、以降 ZM11 と略記) では、こうした構造の性質と成因を詳しく議論した。図 3 は、ZM11 の結果をもとに、その後のアップデート³⁾ を反映させた、まとめ図である。図 1(a) のような簡単な状態からはじまった系の中に、このような多彩な構造が出来るのは驚くべきことである。

2016



- | | |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Petschek slow shock (Petschek 1964) | 17.rotational discontinuity (Petschek & Thorne 1967) [in guide-field reconnection] |
| 2. outer shell = slow shock (Ugai 1995) | 18.conduction front (Yokoyama & Shibata 1997) [with heat conduction] |
| 3. intermediate shock (Abe & Hoshino 2001) or slow shock (Saito et al. 1995) | 19.forward fast shock (Nitta et al. 2016) [in asymmetric reconnection] |
| 4a fast shock (Forbes & Priest 1983) | A. reconnection inflow |
| 4b oblique shock & Mach disk (Takasao et al. 2015) | B. outflow jet |
| 5. looptop front (Ugai 1987) | C. post-plasmoid reverse flow |
| 6. tangential discontinuity | D. internal flow |
| 7. post-plasmoid vertical slow shock (Zenitani et al. 2010) | E. flapping jet (KH instability) |
| 8. outer vertical slow shock (Zenitani & Miyoshi 2011) | |
| 9. fast-mode wave front (Saito et al. 1995) | |
| 10.overexpanded shock-diamonds (Zenitani et al. 2010) | |
| 11.underexpanded shock-diamonds (Zenitani 2015) | |
| 12.slow expansion wavefront (Zenitani 2015) | |
| 13.contact discontinuity (Zenitani & Miyoshi 2011, 2015) | |
| 14.contact discontinuity (Zenitani 2015) | |
| 15.vortex-driven shocklets (Miura 1992, 1995) | |
| 16.contact discontinuity (Zenitani 2015) | |

図 3 : 磁気島周辺構造のまとめ図。ZM11²⁾ をもとに最近の研究結果を反映させたもの。

例えば、図2の $x=50$ 付近の矢印で示す領域(図3の #7)には、シャープな境界面が描かれている。これは、右側を上流とする衝撃波(正確には遅進衝撃波)である。この衝撃波は、音速程度の速度で磁気島が動くときに後ろ側に現れる。航空機の世界では、巡航速度が音速の0.8倍を超えたあたり(遷音速という)から、翼の上面に縦衝撃波が現れることが知られている⁵⁾。図4は、その際の翼の断面の模式図であるが、翼面上側を速く回り込む気流が一時的に音速を超えると、亜音速に戻るときに衝撃波ができるわけである。図2,3の磁気島を翼面に見立てると、 $x=50$ 付近の衝撃波は図4の縦衝撃波に相当することがわかる。

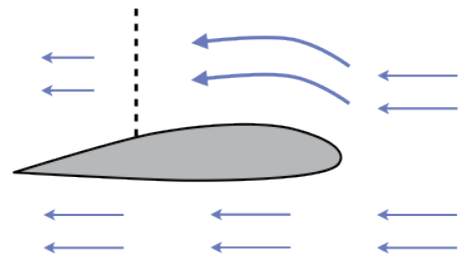


図4：飛行機の翼面の縦衝撃波。

また、磁気島の先頭(図3の #10)にも興味深い構造が現れている。図5は、 $\beta=0.1$ の計算で、プラズマの上下方向の速度(V_y)をプロットしたものであるが、磁気島先頭の $80 < x < 110$ 付近に周期振動が見えている。これは「ショックダイヤモンド」という構造に対応している。

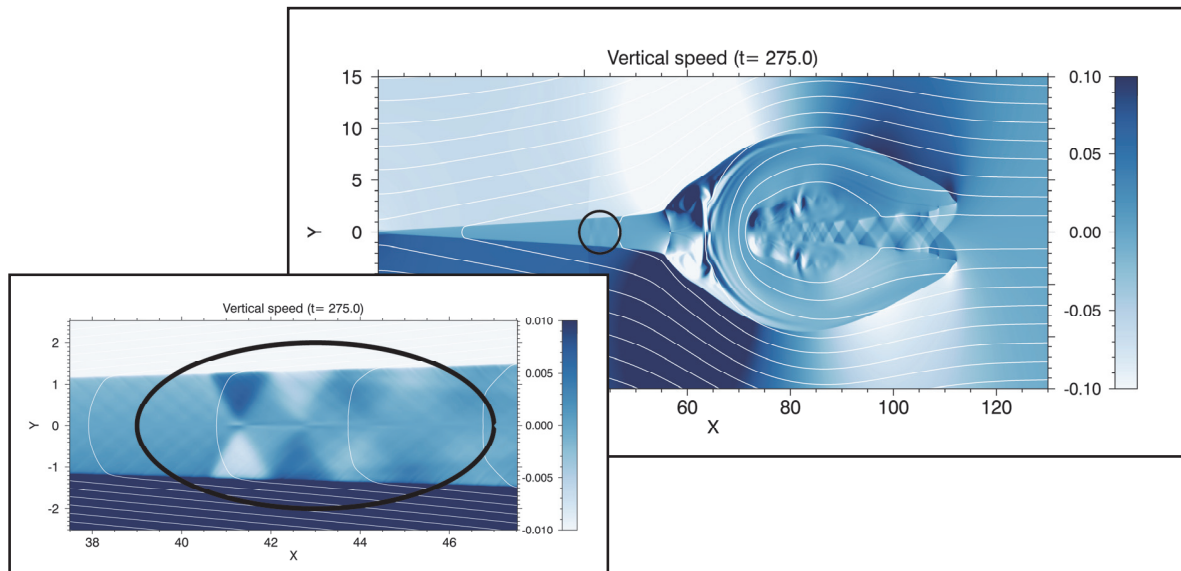


図5： $\beta=0.1, t=275$ でのプラズマ速度の上下成分(V_y)。左下は中央部分の拡大図。

ショックダイヤモンドは航空・ロケット分野で知られている超音速流特有の構造である。図6のようにジェットエンジン(灰色部分)から高温・高速のガスが後方に吹き出す状況を考える。ジェット内の圧力を P_{jet} 、外気の圧力を $P_{ambient}$ とする。ジェットが排出口から外に出ると、周囲からジェットを押しこむ外力が急に $P_{ambient}$ に変化する。しかし、ジェットの排出速度がジェット内の音速より速い場合は、この圧力差をすぐに調整することができない。そこで、 $P_{jet} < P_{ambient}$ の場合(過膨張と呼ぶ)は衝撃波が、 $P_{jet} > P_{ambient}$ の場合(不足膨張と呼ぶ)は膨張波(希薄波)がジェット内を斜めに伝わっていく。ジェットと外気との境界は自由境界であるから、反対側に到達した衝撃波は膨張波、膨張波は圧縮波(衝撃波)となって反射し、このサイクルを繰り返すことで、ダイヤモンドの形の境界領域を作っていくわけである。

ショックダイヤモンドの実例を1つ紹介しよう。米ソ冷戦時代、アメリカ空軍はマッハ 3.2 で飛ぶ超音速偵察機 SR-71⁶⁾ を運用していた。この SR-71 の姿を、イギリス BBC の特集番組でも見ることができる^{7,8)}。映像の 2:50 あたりで、エンジン後方から吹き出す排気ジェットの中に見える、綺麗な周期構造に注目していただきたい。超音速機の排気ジェットはガス内の音速よりも速い速度で吹き出す

ため、内部にショックダイヤモンドが出来、このうち高圧・高密度の部分が光って見えるわけである。

図 5 の $80 < x < 110$ 付近には、プラズマシートが存在していて、左側から高速のプラズマ流が吹き付けていた (図 1(b))。これは、磁気島に対して細いプラズマシートが右側から高速でぶつかっていることと等価である。図 6 を左右反転させると、図 5 の $80 < x < 110$ の振動構造は、図 6(a) の過膨張タイプの超音速ジェットに対応することがわかる。

このようなショックダイヤモンドは、超音速ジェットが境界を横切るときに現れる普遍的な構造である。図 5 の左の図は、黒丸で示した領域 (図 3 の #11) を拡大したものである。この領域では、リコネクション点から吹き出す高速のジェットが、先ほど述べた縦衝撃波と交差している。そして、交差点を横切る速度が音速を超えると、ショックダイヤモンドが生成される条件が揃う。カラーバーを調整して図 5 左を注意深く観ると、図 6(b) の不足膨張タイプのショックダイヤモンドが形成されていることがわかる³⁾。

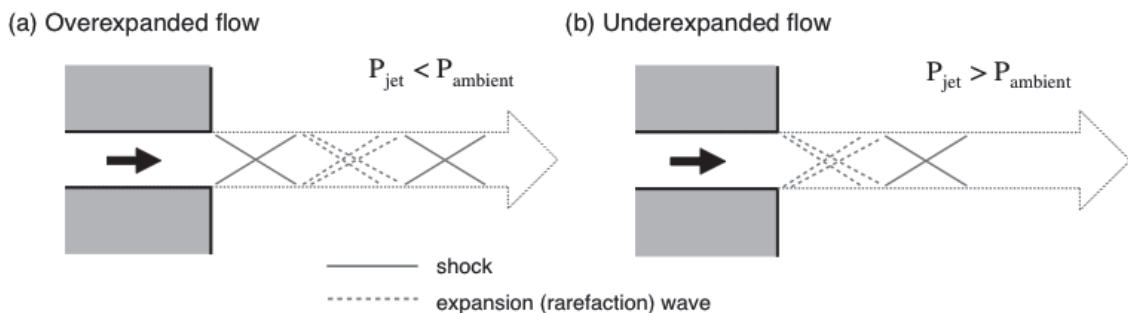


図 6 : ショックダイヤモンドの生成原理。ジェットの圧力 (P_{jet}) と大気圧 ($P_{ambient}$) の違いによって (a) 過膨張流と (b) 不足膨張流に分類することができる。

3. 公開シミュレーションコード “OpenMHD”

本研究では、並列計算に対応したシミュレーションコードを Fortran 90 言語で開発した。このコードを IDL および Python3 の可視化ルーチンとあわせてパッケージ化し、“OpenMHD” という名で公開している⁹⁾。そして、公開開始後もハイブリッド並列化や並列 I/O 対応などの改良を取り入れて、コードを更新し続けている。コンパイラと MPI 並列環境さえ揃えば、PC でもスーパーコンピュータでも同じコードを走らせることができるので、興味のある方は、ぜひお試しください。コードの配布・解説サイト (図 7) の URL は参考文献¹⁰⁾ を参照してほしい。

2016 年には、OpenMHD の利用者によるシミュレーション研究論文が初めて出版された¹¹⁾。また、生存圏研究所の KDK スーパーコンピュータを使って磁気リコネクション問題に取り組む愛媛大学グループが、ここ数年、OpenMHD を使って研究を進めている。

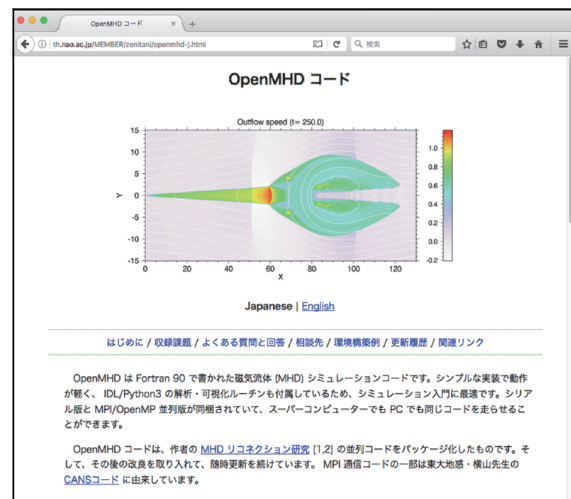


図 7 : OpenMHD コードの配布サイト¹⁰⁾

4. まとめと展望

今回の研究で、 $\beta < 1$ のプラズマ環境における磁気リコネクションのアウトフロージェットやプラズマモイドの運動に伴って、周辺にさまざまな衝撃波・不連続構造が形成されることがわかった。このような構造を解くにあたっては、高性能の HLLD 数値解法が威力を発揮した。シミュレーション系で見えた構造の背景には、航空・ロケットや宇宙ジェットと同様の高速流の物理が作用していた。

こうした衝撃波・不連続構造は、太陽コロナや磁気圏プラズマ環境でも実際に形成されているのだろうか。航空の世界で実在するショックダイヤモンド相当の構造は、条件が揃えば形成されるはずである。一方、太陽コロナ環境ではイオン・電子の温度差や熱伝導効果、地球磁気圏では運動論効果が不連続構造をぼかしてしまうだろう。これらの効果は、磁気流体近似で無視した詳細物理の結果であるから、本研究で議論した磁気流体近似の結果は議論の出発点になるはずである。

また、本研究を含めた最近の MHD リコネクション研究からは、プラズマの圧縮性流体効果というキーワードが浮かび上がってくる。磁気リコネクションの MHD 理論は、非圧縮性を仮定した簡単な系で議論されることが多かった。しかし、議論の限界が見えてきたため、プラズマの圧縮性を考慮した理論モデルの議論が始まったところである^{12,13)}。また、リコネクションジェットが音速を超えた場合に、超音速流特有の断熱加速が起きることも報告されている^{14,15)}。そして、本研究を契機として、超音速のリコネクションジェットが生成する衝撃波構造がわかってきた^{2,3,11)}。これら3つの話題は、流体力学では、圧縮性流体力学あるいは高速流体力学⁵⁾の枠組みで議論されるものである。圧縮性流体の知識は、MHD リコネクションの物理を理解するために有用である。

さらに最近では、宇宙の高エネルギー天体周辺の相対論的プラズマ環境で起きる磁気リコネクションにも注目が集まっている¹⁶⁾。相対論プラズマでは、音速が $c/\sqrt{3}$ (c は光速) を超えることができないため、さまざまな速度が超音速になりやすく、圧縮性流体効果が強く効くことがわかっている。非相対論リコネクション研究でプラズマの圧縮性流体効果を理解しておくことは、その先の相対論リコネクションの性質を理解するためにも重要である。

最後に、本研究で生まれた OpenMHD コードを公開した結果、利用者による研究成果が少しずつ出てきている。これからも OpenMHD が多くの方々の研究をアシストできれば幸いである。

5. 謝辞

著者を圧縮性流体力学・高速流体力学の世界に引き合わせて下さった筑波技術大学の新田伸也氏に感謝する。

参考文献

- 1) Ugai, M. and Tsuda, T., Magnetic field-line reconnection by localized enhancement of resistivity. I - Evolution in a compressible MHD fluid, *J. Plasma Phys.*, **17**, 337, 1977.
- 2) Zenitani, S. and Miyoshi, T., Magnetohydrodynamic structure of a plasmoid in fast reconnection in low-beta plasmas, *Physics of Plasmas*, **18**, 022105, 2011
- 3) Zenitani, S., Magnetohydrodynamic structure of a plasmoid in fast reconnection in low-beta plasmas: Shock-shock interactions, *Physics of Plasmas*, **22**, 032114, 2015
- 4) Miyoshi, T. and Kusano, K., A multi-state HLL approximate Riemann solver for ideal magnetohydrodynamics, *J. Comput. Phys.*, **208**, 315, 2005
- 5) 松尾一泰、圧縮性流体力学—内部流れの理論と解析、オーム社、2013.
- 6) https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_SR-71_Blackbird, 2017年8月17日閲覧
- 7) <http://www.bbc.com/future/story/20130701-flying-the-worlds-fastest-plane>, 2017年8月17日閲覧

- 8) <https://www.youtube.com/watch?v=-k6WVdqzY2g>, 2017年8月17日閲覧
- 9) Zenitani, S., *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1604.001, 2016.
- 10) <http://th.nao.ac.jp/MEMBER/zenitani/openmhd-j.html>, 2017年8月17日閲覧
- 11) Nitta, S., Wada, T., Fuchida, T., and Kondoh, K., Critical Differences of Asymmetric Magnetic Reconnection from Standard Models, *Astrophys. J.*, **828**, 63, 2016
- 12) Hesse, M., Birn, J., and Zenitani, S., Magnetic reconnection in a compressible MHD plasma, *Phys. Plasmas*, **18**, 042104, 2011.
- 13) Birn, J., Hesse, M., and Zenitani, S., Reconnection in compressible plasmas: Extended conversion region, *Phys. Plasmas*, **18**, 111202, 2011.
- 14) Shimizu, T and Ugai, M., Adiabatic expansion acceleration mechanism of superfast jets in the spontaneous fast magnetic reconnection model, *Phys. Plasmas*, **7**, 2747, 2000
- 15) Shimizu, T and Ugai, M., Magnetohydrodynamic study of adiabatic supersonic and subsonic expansion accelerations in spontaneous fast magnetic reconnection, *Phys. Plasmas*, **10**, 921, 2003
- 16) Zenitani, S., Hesse, M., and Klimas, A., Resistive Magnetohydrodynamic Simulations of Relativistic Magnetic Reconnection, *Astrophys. J.*, **716**, L214, 2010

植物バイオマス由来抗ウイルス活性物質の探索

應田 涼太^{1*}, Ruibo Li², 成田 亮^{2,3,4}, 渡辺 隆司²

Antiviral compounds from plant biomass

Ryota Ouda^{1*}, Ruibo Li², Ryo Narita^{2,3,4}, Takashi Watanabe²

概要

本稿は、植物バイオマスと抗ウイルス活性の関連を科学的に解明する研究をまとめたものである。ウイルス感染の影響を最小限にすることにより、食の安全、畜産業の保護、人の健康維持につながり、脱石油社会における持続的な生存圏の創成に深く関与する。植物が産生する多彩な有機化合物資源のみならず、バイオマスそのものを人為的に構造変換したのから生理活性物質を見出す領域は未だ十分に確立されておらず、本研究により抗ウイルス活性が見出されれば、抗ウイルス活性物質にとどまらず、広範な生理活性物質を生み出す研究が創成、発展すると期待され、石油資源によらない生存圏の人間生活の質 (quality of life) を支えることに資する。

1. はじめに

木材は、これまで建材や紙パルプへの利用が中心で、微量な抽出成分を分離して機能解析をする研究は活発に行われてきたが、木材そのものを人為的に分解して、生理活性物質を合理的に作り出す研究はほとんど行われていない。これまで、我々は学外研究機関と連携して木質バイオマスの熱分解産物、木竹炭を製造する際に副次的に得られる木竹酢液の抗ウイルス性物質の探索研究を行い、ウイルスに対する強い不活化活性をもつ多数のフェノールやカテコール誘導体を見出すとともに、原料樹種や製造条件により、木竹酢液の抗ウイルス活性が大きく変わることなどを明らかにしてきた。本稿では、これまで得られた知見について概説したい。

2. 木竹酢液に含まれるフェノール誘導体の抗ウイルス活性

2.1 背景

世界人口は約 70 億人 (2011 年 11 月現在) を超え、今世紀末までには 100 億人を突破すると言われている。化石資源に過度に依存した社会構造から、地球温暖化が進み、人や動植物などの移動が活発

2017 年 8 月 4 日受理。

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

² 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野

³ 〒606-8507 京都市左京区聖護院川原町 53 京都大学ウイルス・再生医科学研究所ウイルス感染研究部門分子遺伝学

⁴ Center for Structural Biology, Department of Molecular Biology and Genetics Aarhus University, Gustav Wieds Vej 10c, DK-8000 Aarhus C, Denmark

* E-mail: ouda.ryota.6w@kyoto-u.ac.jp

化するにつれて、病原性ウイルスによる感染症の蔓延が深刻化している。このため、病原性ウイルスによる感染症の蔓延を予防する消毒薬や薬効成分を、再生可能資源から生産することの意義は大きい。

2.2 木竹酢液

木竹酢液の基となる粗木竹酢液は、広葉樹や針葉樹、タケ類などの木竹材を炭化炉や乾溜炉により炭化する際に生じる排煙を冷却・凝縮させることで得られる液体である。粗木竹酢液を90日以上静置すると三層に分離し、その上層の軽質油ならびに下層の沈降タールを除いた中間層が木竹酢液と呼ばれるpH 1.5~3.7の液体である(図1)^{1),2)}。これには、木竹材を構成する主要三成分であるセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの熱分解生成物が溶け込んでおり、酢酸を主とする有機酸類、アルコール類、エーテル類、アルデヒド類、ケトン類、フェノール類、アミン類、スルホン類ならびにその他の中性成分等、200種類以上が含まれる³⁻⁶⁾。木竹酢液は主に消毒殺菌剤、食品添加剤として使われ、またレタスなどの発芽、成長促進剤としても幅広く使用されている^{7),8)}。発芽、成長促進剤として活性のある木竹酢液は250℃までの温度で回収されたものであり、250℃~400℃の条件で得られた木竹酢液には成長を抑制させる作用があることが知られている^{8),9)}。

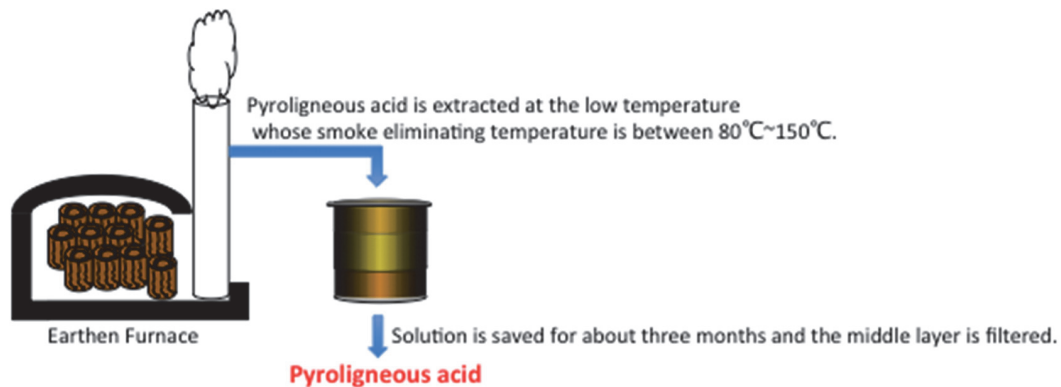


図1：木竹酢液製造法の概要

2.3 木竹酢液による免疫応答反応

ウイルス感染に対する生体防御は、自然免疫と獲得免疫が重要な役割を果たしている。このうち自然免疫応答は感染直後の速やかなものであり、様々なウイルス感染に対する強力な防御壁となっている。ウイルスは細胞内で複製・増殖し、それに伴って大量のウイルス由来RNAが細胞内に蓄積する。そこで細胞質内に存在する RIG-I-like receptors (RLRs)、Toll-like receptors (TLRs)、Nod-like receptors (NLRs) がこのウイルスRNAを非自己として認識し、下流にシグナルを伝達することによってI型インターフェロン (IFN) や炎症性サイトカインが産生されウイルス増殖抑制を引き起こすと同時に、抗原提示細胞の活性化を促して獲得免疫応答を誘導する¹⁰⁾⁻¹²⁾。一方、過剰なIFN、炎症性サイトカインの産生は有害であり自己免疫疾患の原因となることが知られている¹³⁾。これまで、木竹酢液に含まれる成分が様々な免疫応答を引き起こすことが知られている。孟宗竹から得られる竹酢液は、活性酸素の生成とタンパク質キナーゼC- α/δ の活性を阻害することによって炎症反応を抑制することが知られている¹⁴⁾。また、柗から得られる木酢液はシグナル伝達兼転写活性化因子3 (STAT3)のリン酸化を阻害することが報告された¹⁵⁾。STAT3は種々の炎症性サイトカインを誘導するメディエーターであることから、柗から得られる木酢液によって炎症反応が抑制される。これらのことから、木竹酢液に含まれる成分は生体の免疫応答を制御する働きがあると考えられ、今後、自己免疫疾患に対する新たな治療薬としての応用が期待される。

2.4 木竹酢液における抗ウイルス活性探索の意義

2010年、家畜伝染病である口蹄疫が宮崎県で発生し、29万頭の牛や豚が殺処分された。口蹄疫は、ピコルナウイルス科の口蹄疫ウイルス (foot-and-mouth disease virus; FMDV) による感染症である。FMDV 感染による致死率は低いものの、その高い伝播性や罹患した動物の生産性減少のため、患者は全て速やかに殺処分される。したがって、FMDV 感染においては予防対策が重要である。しかし現時点で、環境および家畜に害を及ぼさない FMDV 予防対策は確立されていない。木竹酢液は環境への悪影響は少ないと考えられ、さらに、その人畜等に対する安全性も評価されている。

2.5 木竹酢液に含まれるフェノール類の同定

木竹酢液は材料、産地および製造法の違いによりその含有成分や生理活性が異なると予想されるが、科学的検証は十分されてこなかった。そこで我々は、6種の異なる木竹酢液 (表1) の成分解析をガスクロマトグラフィー質量分析 (GC-MS) 法によって行い、27種類のフェノール誘導体を同定した (図2)。また、それぞれの木竹酢液に含まれるフェノール類の含有量を調べた結果、竹酢液が最も高く、次いで白炭木酢液であった (図3)。フェノール、2-メトキシフェノール、2-メトキシ-4-メチルフェノール、4-エチル-2-メトキシフェノールが木竹酢液に含まれる主なフェノール類であったが、フェノールと2,6-ジメトキシフェノールの含有量が竹酢液で最も高かった (図4)。また、1,2-ベンゼンジオールは針葉樹であるヒノキ木酢液とカラマツ木酢液で高かった (図4)。このように、木竹酢液に含まれるフェノール類の含有量は産地、樹種によって異なっていることが明らかとなった。

表1: 本研究で用いた木竹酢液

No.	試料名	種別	樹種	入手元・業者	産地	pH
A	白炭木酢液	常緑広葉樹	ウバメガシ	三前商店	和歌山	2.3
B	黒炭木酢液	落葉広葉樹	ミズナラ	北部産業	岩手	2.9
C	竹酢液	竹	孟宗竹	身延竹炭企業組合	山梨	3.5
D	アカマツ木酢液	針葉樹	アカマツ	秋田木高研	秋田	3.7
E	ヒノキ木酢液	針葉樹	ヒノキ	岐阜県小坂森林組合	岐阜	2.8
F	カラマツ木酢液	針葉樹	カラマツ	北海道下川町森林組合	北海道	3.5

Phenol and Derivatives in Wood and Bamboo Pyrolysis Acid

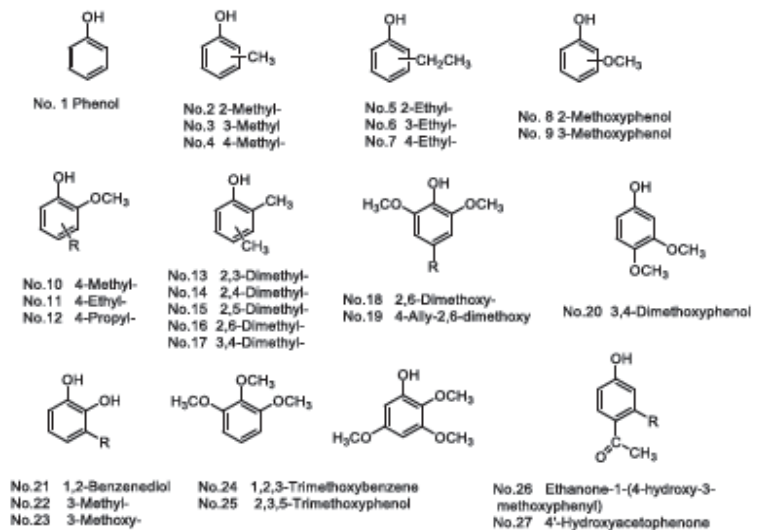


図2: 同定された木竹酢液に含まれるフェノール類

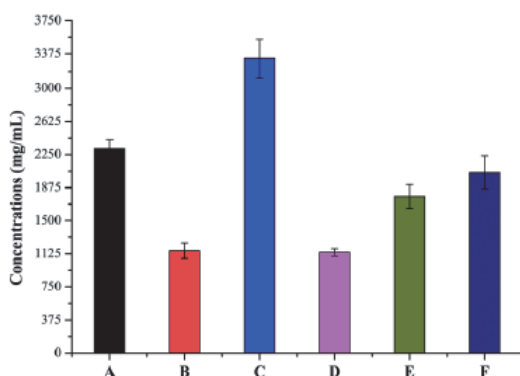


図3: 木竹酢液 A-F 中のフェノール類の総量

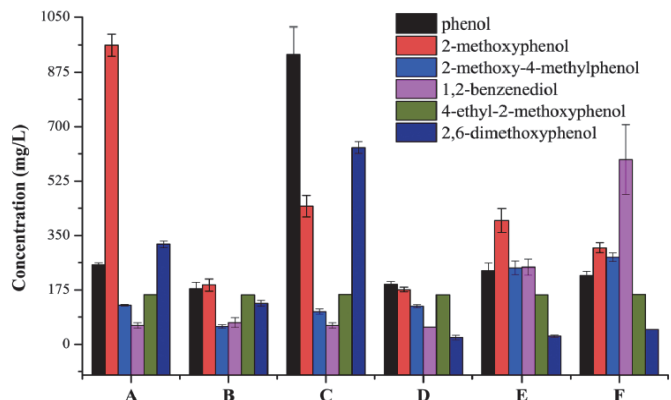


図4: 木竹酢液 A-F に含まれる主要フェノール類の濃度

2.6 木竹酢液に含まれるフェノール類の抗ウイルス活性

これまで、木竹酢液に含まれるフェノール類を同定した。そこで、次にこれらの抗ウイルス活性を FMDV と同じピコルナウイルス科の脳心筋炎ウイルス (encephalomyocarditis virus; EMCV) を用いて評価した。その結果、No.1-7, 9-10, 15, 17-23, 27-29 のフェノール類 (図 2) が EMCV に対して強い抗ウイルス作用を示した (図 5)。しかし、No.11-12, 25, 30 のフェノール類 (図 2) は抗ウイルス作用を示さなかった (図 5)。

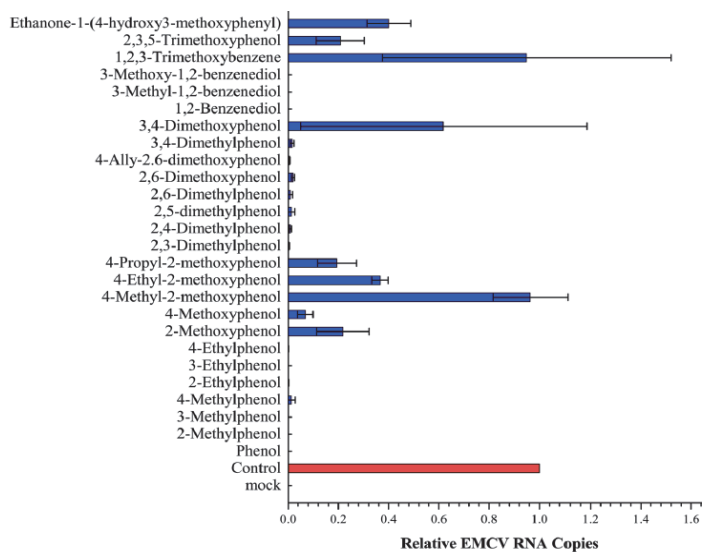


図 5：木竹酢液に含まれるフェノール類の抗ウイルス活性

2.7 フェノール・カテコール誘導体の構造と抗ウイルス活性の相関性

これまで得られた結果より、①ベンゼン環に付与するヒドロキシ基の数が抗ウイルス活性の強さに影響を与える、②フェノールのメチル基、エチル基置換によって抗ウイルス活性は増減しない、③ 2-メトキシフェノールは木竹酢液の主要な成分であるが、そのメチル基、エチル基置換は抗ウイルス活性の減弱を引き起こす、④ 2-メトキシフェノールにおける長鎖炭素鎖の付与は抗ウイルス活性の増加をもたらす、⑤フェノールへのメチル基の付与はメトキシ基の付与に比べて抗ウイルス活性促進の効果が高いが、メチル基の数をさらに増加しても抗ウイルス活性は増加しない、⑥カルボキシル基の付与によって抗ウイルス活性が増加する、⑦電子吸引性基による置換によって抗ウイルス活性が減弱すること、が明らかとなった。

3. おわりに

これまで、成屋蘭 (*Arundina graminifolia*) から単離されたフェノール誘導体がヒト免疫不全ウイルス (HIV) やタバコモザイクウイルスに対して抗ウイルス活性があること、また常緑樹のユージェニア (*Eugenia Hyemalis*) に含まれるフェノール配糖体が HIV の RNase を阻害する作用があることが報告されている^{16,17)}。このように天然から得られるフェノール誘導体の抗ウイルス活性の探索が近年活発に行われている。本研究において、木竹酢液に含まれるフェノール誘導体の EMCV に対する抗ウイルス活性が明らかとなった。フェノール誘導体の構造と抗ウイルス活性の相関に関する知見は、合成有機化学を用いた更なる効果的な抗ウイルス化合物の開発に繋がる事が期待される。また、脱化石社会の構築に向け、林地残材や廃材など未利用木質資源から石油由来製品を代替する有効な新規生理活性成分を得ることの意義は大きい。

参考文献

- 1) Mohan D, Pittman C.U, Steele P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy Fuels*, **20**, 848-889. 2006.
- 2) Mukarakate C, Evans R.J, Deutch S, Evans T, Starace A.K, Dam J, Watson M.J, Magrini K. Reforming biomass

- derived pyrolysis bio-oil aqueous phase to fuels. *Energy Fuels*, **31**, 1600-1607. 2017
- 3) Fagernäs L, Kuoppala E, Tiilikkala K, Oasmaa A. Chemical composition of birch wood slow pyrolysis products. *Energy Fuels*, **26**, 1275-1283. 2012
 - 4) Zhou S, Xue Y, Sharma A, Bai X. Lignin valorization through thermochemical conversion: Comparison of hardwood, softwood and herbaceous lignin. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **4**, 6608-6617. 2016
 - 5) Fagernäs L, Kuoppala E, Arpiainen V. Composition, utilization and economic assessment of torrefaction condensates. *Energy Fuels*, **29**, 3134-3142. 2015
 - 6) Zhang J, Choi Y.S, Shanks B.H. Tailoring the composition of bio-oil by vapor-phase removal of organic acids. *ChemSusChem*, **8**, 4256-4265. 2015
 - 7) Mu J, Uehara T, Furuno T. Effect of bamboo vinegar on regulation of germination and radicle growth of seed plants. *J Wood Sci.*, **49**, 262-270. 2003
 - 8) Mu J, Uehara T, Furuno T. Effect of bamboo vinegar on regulation of germination and radicle growth of seed plants II: composition of moso bamboo vinegar at different collection temperature and its effects. *J Wood Sci.*, **50**, 470-476. 2004
 - 9) Wu Q, Zhang S, Hou B, Zheng H, Deng W, Liu D, Tang W. Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process. *Bioresour Technol.*, **179**, 98-103. 2015
 - 10) Takeuchi O and Akira S. Pattern recognition receptors and inflammation. *Cell*, **140**, 805-820, 2010
 - 11) Alexopoulou L, Holt AC, Medzhitov R, Flavell RA. Recognition of double-stranded RNA and activation of NF-kappaB by Toll-like receptor 3. *Nature*, **413**, 732-738, 2001
 - 12) Heil F, Hemmi H, Hochrein H, Ampenberger F, Kirschning C, Akira S, Lipford G, Wagner H, Bauer S. Species-specific recognition of single-stranded RNA via toll-like receptor 7 and 8. *Science*, **303**, 1526-1529, 2004
 - 13) Funabiki M, Kato H, Miyachi Y, Toki H, Motegi H, Inoue M, Minowa O, Yoshida A, Deguchi K, Sato H, Ito S, Shiroishi T, Takeyasu K, Noda T, Fujita T. Autoimmune disorders associated with gain of function of the intracellular sensor MDA5. *Immunity*, **40**, 199-212. 2014
 - 14) Ho C.L, Lin C.Y, Ka S.M, Chen A, Tasi Y.L, Liu M.L, Chiu Y.C, Hua K.F. Bamboo vinegar decreases inflammatory mediator expression and NLRP3 inflammasome activation by inhibiting reactive oxygen species generation and protein kinase C-alpha/delta activation. *PLoS One*, **8**, e75738. 2013
 - 15) Lee C.S, Yi E.H, Kim H.R, Huh S.R, Sung S.H, Chung M.H, Ye S.K. Anti-dermatitis effects of oak wood vinegar on the DNCB-induced contact hypersensitivity via STAT3 suppression. *J. Ethnopharmacol.*, **135**, 747-753. 2011
 - 16) Hu Q.F, Zhou B, Huang J.M, Gao X.M, Shu L.D, Yang G.Y, Che C.T. Antiviral phenolic compounds from *Arundina graminifolia*. *J. Nat. Prod.*, **76**, 292-296. 2013
 - 17) Bokesch H.R, Wamiru A, Grice S.F.J.L, Beutler J.A, McKee T.C, McMahon J.B. HIV-ribonuclease H inhibitory phenolic glycosides from *Eugenia hyemalis*. *J. Nat. Prod.*, **71**, 1634-1636. 2008

著者プロフィール



應田 涼太 (Ryota Ouda)

＜略歴＞ 2013年 京都大学 大学院 生命科学研究科 博士課程 修了 (生命科学博士) / 2012年~2013年 日本学術振興会特別研究員 (DC2) / 2013年~2014年 日本学術振興会特別研究員 (PD) / 2014年~2017年 アメリカ国立衛生研究所 ポスドク / 2015~2016年 日本学術振興会海外特別研究員 (NIH) / 2017年 京都大学 生存圏研究所 ミッション専攻研究員、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞植物バイオマスと抗ウイルス活性の関連性の解明 ＜趣味など＞サッカー、チェス

おコメの夏バテ遺伝子

草野 博彰^{1*}

Genes involved in heat fatigue in rice

Hiroaki Kusano^{1*}

概要

イネの高温登熟障害は登熟期に異常な高気温に見舞われたイネが白未熟粒を实らせる現象であり、近年の気候変動に伴って我が国のコメ生産現場で頻発している。このため、高温登熟障害も我々人類の生存圏の維持に必要な食糧生産上の重要な問題のひとつと考えられるようになってきた。この白未熟粒はコメが実る仕組みに関わる遺伝子を知るために古くから利用されており、高温登熟障害についても研究成果が蓄積している。本稿ではイネ高温登熟障害に関わる分子の機構について解説する。

1. はじめに

食糧生産は我々人類の生存を支える重要な活動であり、気候変動に適応できる頑健な食糧生産体制を構築することは生存圏研究の重要な課題のひとつである。我が国でも夏の異常な高気温による影響は水稻における白未熟粒の発生、ブドウやリンゴの日焼け果の発生、トマトの着果実不良、乳用牛の繁殖成績の低下などに現れている（平成 27 年地球温暖化影響調査レポート、農林水産省 HP より）。イネでは植え付け時期を工夫して登熟期を高温期からずらすことや、水管理、施肥の調節などでの対策が採られているが、高温下での登熟に強いイネ品種の開発・普及は特に重要な課題として位置づけられている。イネは元来、熱帯原産で真夏に登熟する作物であるが、我が国では東北地方や北海道など寒冷地域での生産に適した育種が長年続けられてきた。また、地域ブランドとしての良食味品種の作出を目的として現在の主要品種のほとんどがコシヒカリを遺伝的背景としている。

白未熟粒とは白く濁った乳白部を含む米粒のことである。白未熟粒の乳白部では胚乳のデンプン顆粒間に空隙が生じており透過光を乱反射する

（図 1）。完全粒では胚乳組織を埋め尽くすまでにデンプン顆粒が発達するため透き通った外観となる。山田錦などの品種で見られる芯白も乳白部であるが、こちらは酒造好適米の重要な特徴のひとつである。このように白未熟は単に収量を低下させる問題としてだけでなく、食味に関わる品種特性と考えることもできるため、次世代の品種育成、コメの品質を支配する遺伝子の同定などにもつながる魅力的な研究対象である。



図 1: 白未熟粒の外観

(A) 完全粒 と (B) 白未熟粒を透過光を使用して撮影した。白未熟粒では乳白部が影として観察される。

2017 年 5 月 29 日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林園遺伝子統御分野

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

2. 白未熟を呈する突然変異体を利用した遺伝子の同定

デンプン顆粒間の間隙はデンプン顆粒の発達が不十分となることで発生するため、遺伝的な突然変異で白未熟を呈する変異体イネはデンプン顆粒の発達に関わる遺伝子を同定するヒントとなる。佐藤ら (1981) はイネ栽培品種「金南風」と「台中 65 号」を変異原処理することで、白未熟の形質を持ったイネの変異体群を作出し、これらの中から "*floury endosperm*" と名付けられた変異体群を 5 種類 (*flo1-flo5*) に分類した¹⁾。このうち *flo5* 変異の原因遺伝子がデンプン合成酵素をコードする *SSIIIa* 遺伝子であることが明らかにされた²⁻³⁾。このことは種子でのデンプン生合成の異常が白未熟の発生につながることを示唆している。また *flo4* 変異の原因遺伝子は細胞質型 PPK (CyPPDK) をコードすることが明らかにされた⁴⁾。PPDK というのは C4 光合成を行う植物の葉で総可溶タンパク質の 10% を占め、C4 炭素固定の基質であるホスホエノールピルビン酸を葉緑体で合成する葉緑体型 PPK が知られている。細胞質型 PPK はこの葉緑体型 PPK の原型であり古細菌から高等生物まで普遍的に存在するが、C4 光合成を行わない植物での細胞質型 PPK の役割は明らかにされていない⁵⁾。高温登熟障害を起こす環境では、イネの種子に含まれる細胞質型 PPK の量が減少していることも報告された⁶⁾。このため PPK はイネの胚乳で何らかの生理的役割を演じていると考えられる。一方で、筆者らは *flo2* 変異の原因遺伝子をマップベースクローニングにより同定した⁷⁾。この *flo2* 変異の原因遺伝子は機能未同定の遺伝子であった。そこで生理的役割を明らかにするため高温登熟障害が起きる環境での栽培を行ったところ、*flo2* 変異により高温登熟障害が発生しやすくなることが明らかになった⁷⁾。また、*floury* 変異体群の母本となった「金南風」が高温登熟障害を発生させにくい系統であることも明らかとなった。*PPDK* や *FLO2* 遺伝子が具体的にどのように高温登熟障害と関わるのかはいまだ明らかでないが、これらの知見はいずれもコメの品質を決める未知の仕組みが存在することを示唆している。

3. 高温登熟障害に関する生理学的知見

イネの高温登熟障害は登熟初期 (開花後 5~15 日目) の穂だけを高温に曝した実験でも発生することが報告されている⁸⁻⁹⁾。また、温暖化に伴うイネの収量減少は夜間の高気温と相関することも報告されている¹⁰⁾。これらのことから高温登熟障害における機能不全は葉や根ではなく、デンプンの合成・蓄積が起こる種子で起こっていると考えられる。この高温登熟障害を起こす環境下の種子に対するトランスクリプトーム解析とメタボローム解析では、 α -アミラーゼ (α -Amy) などのデンプン分解系と一次代謝系が亢進し、デンプン生合成とミトコンドリア呼吸鎖が抑制されていることが示唆されている¹¹⁻¹²⁾。この α -アミラーゼ遺伝子を遺伝的改変により抑制した実験では高温登熟障害を緩和できることが明らかにされた¹³⁾。このことから、高温登熟障害で白未熟粒が生じる原因のひとつは一旦合成されたデンプンが分解されてしまうためだと考えられる。これら一連の解析で観察された生理応答はエネルギー飢餓状態の解消を目指しているように見えるが、ミトコンドリア呼吸鎖が抑制されている点は不自然である。筆者らは登熟初期のイネ種子における ATP 含量を調査したところ、高温登熟障害に脆弱な栽培種「日本晴」では大きく低下していた一方で、高温登熟障害を発生させにくい「金南風」では有意な差異は認められなかった¹⁴⁾。このことからイネの種子で観察された生理応答はエネルギー飢餓状態の解消には至っていない可能性が考えられた。筆者らは一次代謝系の亢進に合わせてミトコンドリア呼吸鎖の機能を補うことで高温登熟障害を緩和できる可能性について検討するため、高温登熟障害が発生する環境でも影響を受けずに発現するグルテリン B4 遺伝子のプロモーターに F 型 ATP 合成酵素複合体 β サブユニット遺伝子 (*GluB4::F1-ATPaseB*) をつないで「日本晴」に導入した。この系統では高温環境下でも *GluB4::F1-ATPaseB* を導入していない「日本晴」より白未熟が発生しにくいことがわかった¹⁵⁾。筆者らは高温登熟障害に関わる遺伝的要因を探るため、多様な栽培品種について高温登熟障害実験を行ったところ、解析に供した品種中で最も古い「神力」が白未熟粒・ATP 含量ともに差が小さかった一方で、「日本晴」と「コシヒカリ」の祖先にあたる「農林 22 号」は高温登熟障

害の影響が大きかった。その他の品種は多様な反応を示したため、高温登熟障害に脆弱な形質は単一の遺伝子の欠損によるものではなく、多様な遺伝的要因が絡み合った複雑な現象であると考えられた¹⁶⁾。また、高温登熟障害の程度が異なる品種を利用したプロテオーム解析から、高温登熟障害が起こりにくい「トドロキワセ」ではマンガン型スーパーオキシドディスムターゼ (Mn-SOD) が高温に应答して蓄積することが見出され、これをコードする遺伝子の導入で「日本晴」の高温登熟障害を緩和できることが明らかにされた¹⁷⁾。このように高温登熟障害に対する抵抗性には多様な遺伝的要因が関わっていると考えられる。

3. おわりに

これまでの研究からイネ高温登熟障害で白未熟粒が生じる仕組みが少しずつ明らかにされてきた。以上の知見をまとめると、登熟初期の種子が高気温に曝されると何らかの必要のために ATP が消費され、これを補償するために一次代謝経路がデンプン合成・蓄積とは逆方向へ転換していると考えられる。しかし、高温登熟障害に脆弱な栽培種では呼吸鎖がこの転換に同調しないため ATP 濃度の回復に至らず、余ったエネルギーがラジカルとして蓄積する現象が生じていることが考えられる (図2)。この過程に関わる遺伝子の導入・抑制実験ではこの転換を抑制したり、呼吸鎖の異常を補償することで白未熟の発生を緩和することに成功しているため、高温登熟障害に対する脆弱性は単純な機能欠損ではなく多数の遺伝子が相乗的に関わる複雑な現象であるのかもしれない。高温登熟障害に強い品種はどのように気候変動に適応しているのか、また呼吸鎖のシグナル伝達異常が寒冷地への適応や食味の向上を目指す育種に伴って生じたものであるのかは、気候変動に適応する品種を育成する上で重要な問題である。幸いなことにイネのように重点的な育種対象とされてきた実用植物は進化の系譜が明らかで利用できる遺伝資源も豊富である。これらの遺伝資源はお米の夏バテ遺伝子を同定するための重要なヒントになるのかもしれない。

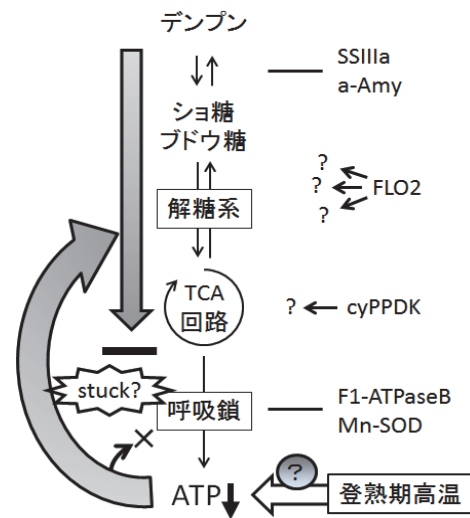


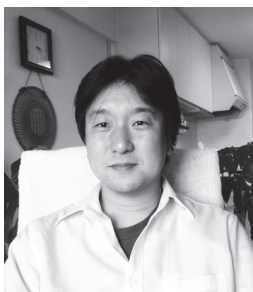
図2: これまでの知見から推定されるイネ高温登熟障害と白未熟粒の発生に関わる一次代謝系の応答

参考文献

- 1) Satoh, H., Omura, T., New endosperm mutations induced by chemical mutagenesis in rice, *Oryza sativa* L., *Jpn. J. Breed.*, **31**, 316-326, 1981.
- 2) Fujita, N., Yoshida, M., Kondo T., Saito K., Utsumi, Y., Tokunaga, T., Nishi, A., Satoh, H., Park, J.H., Jane, J.L., Miyao, A., Hirochika, H., Nakamura, Y. Characterization of SSIIIa-deficiency mutants of rice: The function of SSIIIa and pleiotropic effects by SSIIIa deficiency in the rice endosperm, *Plant Physiol.*, **144**, 2009-2023, 2007.
- 3) Ryoo, N., Yu, C., Park, C.S., Baik, M.Y., Park, I.M., Cho, M.H., Bhoo, S.H., An, G., Hahn, T.R., Jeon, J.S. Knockout of a starch synthase gene *OsSSIIIa/Flo5* causes white-core floury endosperm in rice (*Oryza sativa* L.), *Plant Cell Rep.*, **26**, 1083-1095, 2007.
- 4) Kang, H.G., Park, S., Matsuoka, M., An, G., White-core endosperm floury endosperm-4 in rice is generated by knockout mutations in the C-type pyruvate orthophosphate dikinase gene (*OsPPDKB*), *Plant J.*, **42**, 901-911, 2005.
- 5) Chastain, C.J., Falling, C.J., Manandhar, L., Zimmerman, M.A., Lakner, M.M., Nguyen T.H.T., Functional evolution of C4 pyruvate orthophosphate dikinase, *J. Exp. Bot.*, **62**, 3083-3091, 2011.

- 6) Wang, Z.M., Li, H.X., Liu, X.F., He, Y., Zeng, H.L., Reduction of pyruvate orthophosphate dikinase activity is associated with high temperature-induced chalkiness in rice grains, *Plant Physiol. Biochem.*, **89**, 76-84, 2015.
- 7) She, K.C., Kusano, H., Koizumi, K., Yamakawa, H., Hakata, M., Imamura, T., Fukuda, M., Naito, N., Tsurumaki, Y., Yaeshima, M., Tsuge, T., Matsumoto, K., Kudoh, M., Itoh, E., Kikuchi, S., Kishimoto, N., Yazaki, J., Ando, T., Yano, M., Aoyama, T., Sasaki, T., Satoh, H., Shimada H., *Plant Cell*, **22**, 3280-3294, 2010.
- 8) Tashiro, T., Wardlaw, I.F., The effect of high temperature on kernel dimensions and the type and occurrence of kernel damage in rice *Aust. J. Agric. Res.*, **42**, 485-496, 1991.
- 9) Morita, S., Shiratsuchi, H., Takanashi, J., Fujita, K., Effect of high temperature on grain ripening in rice plants: Analysis of the effects of high night and high day temperature applied to the panicle and other parts of the plant, *Jpn. J. Crop Sci.*, **73**, 77-83, 2004.
- 10) Peng, S., Huang, J., Sheehy, J.E., Laza, R.C., Visperas, R.M., Zhong, X., Centeno, G.S., Khush, G.S., Cassman, K.G., Rice yields decline with higher night temperature from global warming, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **101**, 9971-9975
- 11) Yamakawa, H., Hirose, T., Kuroda, M., Yamaguchi, T., Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray, *Plant Physiol.*, **144**, 258-277, 2007.
- 12) Yamakawa, H., Hakata, M., Atlas of rice grain filling-related metabolism under high temperature: Joint analysis of metabolome and transcriptome demonstrated inhibition of starch accumulation and induction of amino acid accumulation, *Plant Cell Physiol.*, **51**, 795-809, 2010.
- 13) Hakata, M., Kuroda, M., Miyashita, T., Yamaguchi, T., Kojima, M., Sakakibara, H., Mitsui, T., Yamakawa, H., Suppression of α -amylase genes improves quality of rice grain ripened under high temperature, *Plant Biotechnol. J.*, **10**, 1110-1117, 2012.
- 14) She, K.C., Kusano, H., Yaeshima, M., Sasaki, T., Satoh, H., Shimada, H., Reduced rice grain production under high-temperature stress closely correlates with ATP shortage during seed development, *Plant Biotechnol.*, **27**, 67-73, 2010.
- 15) Kusano, H., Arisu, H., Nakajima, J., Yaeshima, M., She, K.C., Shimada, H., Implications of the gene for F1-ATPase B subunit (*AtpB*) for the grain quality of rice matured in a high-temperature environment, *Plant Biotechnol.*, **33**, 169-175, 2016.
- 16) She, K.C., Yaeshima, M., Koumoto, T., Ohnuma, M., Hiromasa, T., Hirai, M., Matsunaga, T., Tashiro, R., Sasaki, T., Kusano, H., Shimada, H., High-temperature stress susceptibility of representative japonica rice cultivars derived from Norin-22: Inadequate ATP supply during seed development may lead to severe damage, *Plant Biotechnol.*, **29**, 465-471, 2012.
- 17) Shiraya, T., Mori, T., Maruyama, T., Sasaki, M., Takamatsu, T., Oikawa, K., Itoh, K., Kaneko, K., Ichikawa, H., Mitsui T., Golgi/plastid-type manganese superoxide dismutase involved in heat-stress tolerance during grain filling of rice, *Plant Biotechnol. J.*, **13**, 1251-1263, 2015.

著者プロフィール



草野 博彰 (Hiroaki Kusano)

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

植物由来の高強度ナノファイバー 「セルロースナノファイバー」の製造

阿部 賢太郎^{1*}

Preparation of Cellulose Nanofibers

Kentaro Abe^{1*}

概要

セルロースは天然で最も豊富に存在する高分子であり、紙や衣服など古来より様々な分野で活用されてきた。ところが、近年になってその利用に関する革新的な発見があった。1995年にナノサイズのセルロースを用いた高強度材料の研究について報告されて以来、その製造法や性質および応用について多くの研究がなされている。本稿では主に植物原料からセルロースナノファイバーを単離する手法について幅広く解説する。

1. はじめに

セルロースナノファイバーの話をする前に一つ説明しておく。ひとことにナノファイバーといっても一般にそれは二種類に分けられる。すなわち、“ナノ構造ファイバー”と“ナノサイズファイバー”である。ナノ構造ファイバーとは、繊維の内部や表面にナノレベルの精緻な構造を作製することによって新たな機能を付与した繊維を指す。つまり、直径がマイクロメートルサイズであっても、内部や表面にナノ加工が施されている繊維はナノ構造ファイバーと呼ばれる。

ナノサイズファイバーは、文字通り直径がナノメートルサイズの繊維のことであるが、基本的には直径 100 nm 以下かつ縦横比（アスペクト比）100 以上の繊維を指す。ナノ構造ファイバーのようにナノオーダーでの構造制御による機能付与とは異なり、ナノサイズファイバーは極小の大きさそのものによって機能が発現する。直径 10 μm と 10 nm の繊維を同じ重量分で比較したとき、10 nm のナノサイズファイバーは 1000 倍大きな表面積をもつことになる。よって、フィルターや複合体の補強繊維として用いる際に、より効果的な機能を発揮すると考えられる。また、ナノサイズファイバーから作られるフィルターはより小さな空隙を持つ。これから紹介するセルロースナノファイバーは全てこのナノサイズファイバーを意味する。また、セルロースナノファイバーはしばしばセルロースナノフィブリル (cellulose nanofibril) やナノフィブリル化セルロース (nanofibrillated cellulose) などとも呼ばれるが、ここでは全てセルロースナノファイバーまたは単にナノファイバーとして記した。

セルロースは、グルコースと呼ばれる単糖が直線状に結合（-1,4 グリコシド結合）した繊維状高分子である。セルロース分子鎖は、分子内・分子間水素結合によって水に不溶であり、植物細胞の原形質膜上で合成されたと同時に結晶化する。高等植物の場合、30-40 本の分子鎖が重合され束となり幅

2017年7月7日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生物機能材料分野

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

3-4 nm の結晶性ナノファイバーを形成し、植物細胞壁に組み込まれる。植物学的にはこれを「セルロースマイクロフィブリル」と呼ぶ。植物だけでなく、天然に存在するセルロースは全てマイクロフィブリルの形をとる。高度に結晶化したセルロースマイクロフィブリルは繊維方向に優れた力学特性を示し、すべての植物細胞壁において骨格の役割を担っている。また、植物以外に、唯一セルロースを合成する動物がホヤ類である。

セルロースマイクロフィブリルの存在は古くから確認されており、エックス線応力測定の結果からも高い物理的強度を有するであろうことは知られていたが、30年前にはマイクロフィブリルをナノ材料として利用する動きはなかった。1995年にホヤから単離したナノサイズのセルロース（セルロースナノクリスタル、後述）を単離し、補強材として混ぜることでゴムの物性を飛躍的に向上させることが世界で初めて報告された^{2,3)}。それ以来、天然由来の高強度ナノファイバー材料としてマイクロフィブリルに注目が集まるようになった。実際、植物から単離されたセルロースナノファイバーの力学性能は非常に高い。木材から単離したセルロースナノファイバーの繊維方向強度をキャピテーション法と統計的手法によって解析したところ、1.3-3 GPa の引張破断強度を持つことが示されている⁴⁾。つまり、セルロースナノファイバーは鋼鉄の1/5の軽さ（密度: 1.5-1.6 g/cm³）でありながら、ステンレス鋼（500MPa程度）の6倍程度の強度を有する繊維なのである。

2. セルロースナノファイバーの製造法

これから紹介するセルロースナノファイバーは概ね上記で紹介したセルロースマイクロフィブリルに基づいている。つまり、セルロースナノファイバーは新しく合成されるものではなく、元々ナノファイバーとして植物細胞壁中に存在するセルロースを単離することによって得られるものである。例外として、溶解したセルロースおよびセルロース誘導体からエレクトロスピンニング等の紡糸によってナノファイバーを製造する方法があるが、ここではその紹介は紙面の都合により省略する。

最初、ナノメートルサイズのセルロースは硫酸を用いてセルロースの非結晶領域を加水分解することによって単離された。1950年頃、2.5 Nの硫酸によってラミーやコットンを煮沸することにより、微結晶セルロース（MCC: microcrystalline cellulose）が製造された^{5,6)}。植物細胞壁中のマイクロフィブリルの繊維方向に存在する非晶領域が酸加水分解によって切断されることで、幅10-20 nmの剛直な高結晶性セルロースが得られる。これはセルロースナノクリスタルなどと呼ばれ、セルロースナノファイバーと同様に現在、その利用に関する研究が進められている。セルロースウィスカー（ナノウィスカー）とも呼ばれる。微結晶セルロースはセルロースナノクリスタルの乾燥凝集物である。セルロースナノクリスタルは非晶領域の酸加水分解により、セルロースナノファイバーに比べて高い結晶性を示すが、長さが200 nm程度と一般的なナノファイバーに比べて短い。

2.1 機械的解繊

上記で紹介した酸加水分解法ではなく、植物細胞壁中に存在するマイクロフィブリルをそのまま単離するために一般的に用いられる手法が機械的解繊法である。植物資源から非セルロース成分（ヘミセルロースやリグニン等）を化学的に除去した後、様々な機械装置を用いて植物細胞壁をバラバラにほぐす（解繊）ことによってセルロースナノファイバーが得られる。1974年、ホモジナイザーによって繊維が分子レベルにまで解繊されることが報告されている⁷⁾。機械的解繊には様々な装置が用いられるが、最も一般的なものは高圧ホモジナイザーによる解繊である。高圧ホモジナイザーとは、試料懸濁液を細いノズルから高圧下で押し出し、その際に生ずる高い剪断力によって液中の試料を粉碎する装置である。1983年にこの高圧ホモジナイザーを用いて木材パルプの解繊が行われた^{8,9)}。この時の処理後パルプを観察すると、外側からリボン状の薄片が剥がれ、さらにその薄片がマイクロフィブリルへとほぐれており、これはマイクロフィブリル化セルロース（MFC: microfibrillated cellulose）と呼ばれ

ている。マイクロフィブリル化セルロースはパルプ表面が部分的にナノファイバー化したものであり、十分にナノファイバー化されたとは言えないため、セルロースナノファイバーとは区別して用いられるのが一般的である。現在では、技術が進み、高圧ホモジナイザー処理だけで均質なナノファイバーを製造することも可能である。

その他の機械的解繊法に、グラインダー（磨砕機）^{10, 11}や超音波装置^{12, 13}を用いた手法やカウンターコリジョン（対向衝突）法¹⁴がある。グラインダーとは、高速で回転する2枚の砥石の微細な間隙を試料懸濁液が通過することにより試料を粉砕する装置である。超音波処理は酸加水分解処理と組み合わせればしばしば用いられるが、繊維長が短くなりやすく、ナノクリスタル状のものが得られることが多い。しかし、竹や絹糸のような多種類の原料から幅25-120 nmかつアスペクト比の高いナノファイバーを作製している例もある¹³。カウンターコリジョン法は、高圧ホモジナイザーの一種であるが天然セルロース繊維の水懸濁液を二つのチャンバーから同時に高速で噴射し衝突させることによりセルロースナノファイバーを調製する手法である。

上記の機械的解繊法では、基本的に繰り返し処理を必要とする。繰り返し処理が必要な理由の一つは、植物細胞壁の構造に由来する。先ほど植物細胞壁はセルロースマイクロフィブリルと呼ばれるナノファイバーを骨格としていること述べたが、植物細胞壁は多層構造（一次壁および二次壁）をとっており、これらの壁層はさらに薄い層の重なりから成っている。そのため、繰り返される機械的解繊によって木材パルプが外側から少しずつほぐれて、最終的に均質なナノファイバーを得ている¹⁵。しかし、ここで一つ問題が生じる。機械的解繊の処理回数が増えるにしたがって、セルロースナノファイバーの結晶性や重合度が低下することである。ナノファイバーの劣化は、当然その利用にも大きな影響を及ぼす。つまり、解繊に要する機械的なエネルギーがセルロースナノファイバー自身にも大きく損傷を与えており、当然機械的解繊の処理回数はできるだけ少ないことが望ましい。

2.2 Hornification

セルロースナノファイバーの単離を困難にするもう一つの理由として、マイクロフィブリル間に生ずる水素結合がある。セルロース分子は多数の水酸基を有するため、セルロースナノファイバーは乾燥下で水素結合により強固に凝集する。木材パルプ同士が強固に接着し、紙として形成されるのも水素結合によるものである。木材を構成する成分のうち、セルロースは約5割であり、残りの5割はリグニンやヘミセルロースといった非セルロース成分が占める。これらの成分はセルロースマイクロフィブリルの間隙を充填する形で存在している。植物原料からセルロースナノファイバーを単離する際、これらの非セルロース成分は必要ないため、乾燥した化学パルプのような精製原料がナノファイバーの単離には広く使われている。しかしながら、非セルロース成分を除去し乾燥することによって、隣り合うマイクロフィブリル同士が固く凝集し、結果としてナノファイバーの単離を妨げる。

上記二つの要因のうち、植物細胞壁の多層構造は避けることができないが、水素結合による繊維凝集は抑えることができる。本来セルロースマイクロフィブリルはリグニンやヘミセルロースによって分断され、細胞壁中に独立して存在しているからである。そのため、植物原料からリグニンおよびヘミセルロースを除去した後で試料を乾燥しなければ、マイクロフィブリル間の新たな水素結合の形成は起こらず機械的解繊が促進される。例えば、グラインダーによって解繊を行う場合、乾燥パルプでは10回以上の処理でナノファイバーが得られるが、未乾燥パルプではわずか1回の処理で幅約15 nmのセルロースナノファイバーを得ることができる¹⁶（図1）。この手法は木材以外の原料にも適用が可能であり、図3に示すように様々な植物原料からグラインダー処理1回でナノファイバーが単離できる。このことから、乾燥時に起こる繊維凝集がセルロースナノファイバー製造に大きく影響することが示され、同時に試料の精製方法の重要性が示唆される。このような乾燥時のマイクロフィブリルの凝集は、紙・パルプ研究の間では角質化（Hornification）と呼ばれて広く研究が行われている¹⁷。この角質化は、パルプ中のヘミセルロース量が関与しているとされており¹⁸⁻²¹、ヘミセルロース量が少ないほ

ど乾燥中の凝集が起こる。このことはナノファイバーの単離においても当てはまる。ヘミセルロース量の異なる精製木粉を乾燥した後でグラインダー処理を行ったところ、ヘミセルロース量が少ない試料では均一な解繊がなされず、マイクロメートルサイズの繊維が残った²²⁾。すなわち、マイクロフィブリル表面上のヘミセルロースが乾燥時の繊維凝集を防ぎ、水中での機械的解繊を促進するといえる。ただし、残存するヘミセルロースは熱に弱く、後にナノファイバーを利用する際に悪影響を及ぼす可能性があるため注意が必要である。

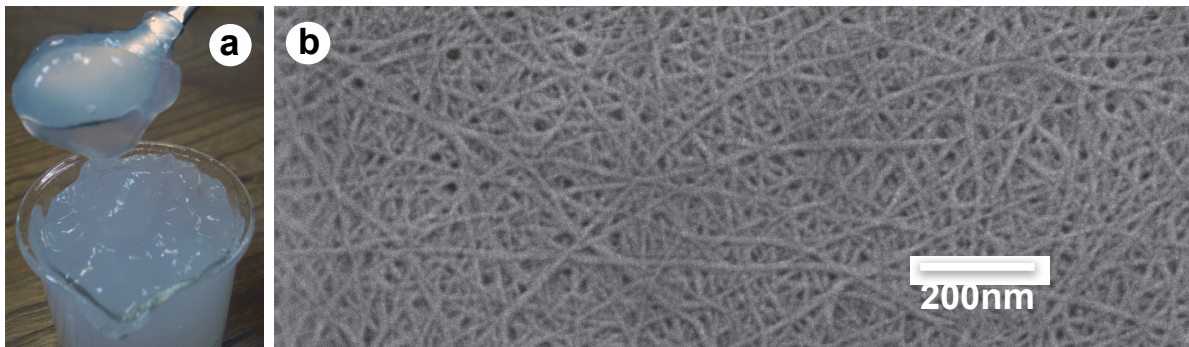


図1：未乾燥パルプから製造したセルロースナノファイバー水懸濁液 (a) と電子顕微鏡写真 (b)

上記の通り、ナノファイバー原料としては未乾燥パルプを使用するのが望ましい。しかし、依然として乾燥パルプが最も安価で入手しやすい原料であることに変わりはない。乾燥パルプ中のナノファイバーは強固な水素結合を緩めることができれば、解繊が促進されると考えられる。そのための手法としてアルカリ処理が提案されている。水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液にセルロース試料を浸漬すると、ナトリウムイオンと水分子の侵入により試料は膨潤する。膨潤の度合いは NaOH の濃度に依存し、12wt% を超えるとセルロースの結晶ですら膨潤し、最終的にはその結晶形をセルロース I 型から II 型へと変換してしまう。しかし、8wt% の NaOH 水溶液で処理すると、結晶は膨潤しないが、マイクロフィブリル間の水素結合だけが緩和される。そこで、8wt% の NaOH 水溶液中で機械的解繊することによって、乾燥パルプから均質なナノファイバーを得ることができていることが分かっている²³⁾。この時使用された装置は比較的軽微な処理装置であるビーズミルだが、均質なナノファイバーが容易に得られることからアルカリ処理が乾燥パルプのナノ解繊を促進することがよく分かる。

2.3 化学的前処理

繰り返し処理を行っても行わなくても、機械的解繊に要する多大なエネルギー消費は、今でもセルロースナノファイバー製造における大きな課題である。そのため、機械的解繊時のエネルギーを軽減するためパルプに化学的な前処理を施すことがある。最も代表的な手法は、TEMPO 酸化法と呼ばれる。この手法は、パルプ中のマイクロフィブリル表面にカルボキシル基を導入することによってナノファイバーの単離を促進する^{24,25)}。2,2,6,6-テトラメチルピペリジン-1-オキシラジカル (TEMPO) による触媒酸化によって様々なセルロース原料のマイクロフィブリル表面の C6 位 1 級水酸基をカルボキシル基に変換することで、負の電荷を帯びたマイクロフィブリル間に静電的な反発力が生まれ、ブレンダーを用いた水中での簡単な機械的処理によって均質なナノファイバー懸濁液が得られる。パルプおよびコットンから得られたナノファイバーは 3-5 nm の非常に細い繊維径をもち、細胞壁中に存在するマイクロフィブリルが凝集なく独立して単離された状態である。

その他、過ヨウ素酸塩と塩素酸塩を用いた酸化によりセルロースの 2 級水酸基にカルボキシル基を導入する手法²⁶⁾や、スルホン基²⁷⁾やカルボキシメチル基²⁸⁾を導入する方法も用いられている。これらの化学修飾はいずれもセルロース結晶に影響を及ぼさないようにマイクロフィブリル表面にのみ行われ

るのが望ましい。

また、酵素によりセルロースの非結晶領域を分解し、解繊を促進する前処理法もある。酸加水分解法よりも軽度な分解であるため、得られるセルロースは高いアスペクト比をもつ^{29, 30)}。

3. セルロースナノファイバーの原料

セルロースマイクロフィブリルはすべての植物細胞壁の骨格成分であるため、原理的にはあらゆる植物がセルロースナノファイバーの原料になりうる。セルロースは植物を構成する主成分の一つであり、地球上で最も豊富に存在する天然のポリマーと言われる。よって、原理的には全ての植物をセルロースナノファイバーの原料として利用可能である。植物以外にも、微生物が生産するバクテリアセルロースや、脊索動物のホヤ類が生産するセルロースも原料として用いられる。現在ナノファイバー原料として使われているものについて以下に簡単にまとめる。

3.1 植物セルロース

ナノファイバー製造における植物系原料には、木材、農業副産物などが挙げられる。当然、木材は最も豊富に存在する植物系原料であり、また一般にパルプという形で我々の身近にあるため、ナノファイバー製造において多くの研究が進められている。間伐材や樹木伐採時に生じる枝、葉、根等の残渣を考えれば、今後さらなる利用が期待される。農業副産物とは、農業生産の過程で生まれる廃棄物や、農作物から食品を製造する際に生じる副産物のことで、例えば稲わら、バガス（サトウキビの搾りかす）、ポテトパルプ（ジャガイモからデンプンを製造した後の搾りかす）等が挙げられる。地域に適した数多くの農作物があることから、世界中で幅広い植物原料からのナノファイバー製造が行われている。列挙すると、ポテトパルプ³¹⁾、シュガービートパルプ（シュガービート・甜菜の搾りかす）³²⁾、稲わら³³⁾、麦わら³⁴⁾、バガス³⁵⁾、大豆の豆皮や豆殻³⁶⁾、バナナの花軸や偽茎³⁷⁾、またその他の植物原料として大麻や亜麻等の靱皮繊維³⁸⁾が利用されている。

3.2 バクテリアセルロース

酢の醸造にも用いられる酢酸菌の一種が菌体外に生産するバクテリアセルロースは、ほぼ純粋なセルロースから成り、50-100nmの幅を持つナノファイバーである。非常に緻密な網目構造を有するバクテリアセルロースは物理的性質に優れており、プラスチックの補強材やスピーカ用コーン等の音響材として利用されている。また、その高い保水性から最近では医療用材料としても期待されている。ただし、初めからネットワークを形成しゲル状態で存在するため、独立したナノファイバー懸濁液が必要な場合、強力な解繊処理を要する。

3.3 ホヤセルロース

ホヤ類が生産するセルロースは結晶性が高く、酸加水分解により得られるナノウィスカーとしての利用が大半を占めている。原子間力顕微鏡を用いてホヤ由来のセルロースナノファイバーの繊維方向弾性率を測定したところ、145 GPaと非常に高い値を示すことが明らかになっている³⁹⁾。

3.4 原料の違い

様々な植物原料から単離されるセルロースナノファイバーであるが、それぞれの植物原料が有するセルロースマイクロフィブリルが同じ性質を持っているとは限らない。例えば、原料によってそれ構成する組織は異なる。針葉樹はそのほとんどが仮道管から成るが、ポテトパルプやシュガービートパルプは大部分を柔細胞が占め、それらの細胞壁構造も大きく異なる。ナノファイバーを補強繊維として

用いる場合、得られるナノファイバーの物理的性質が大きく問われる。先に紹介した未乾燥状態でのグラインダー処理によって針葉樹木粉、稲わらおよびポテトパルプからセルロースナノファイバーを単離し、その特性が比較されている。いずれの原料もグラインダー処理は1度しか行っていないため、機械的解繊によるナノファイバーの劣化は等しく少ないと考えられる。1回のグラインダー処理によりいずれの原料からも高粘度のセルロースナノファイバー懸濁液が得られた。詳細に観察したところ、木粉、稲わらおよびポテトパルプから得られたナノファイバーの平均繊維径は原料により少し異なるが、セルロース結晶性においては、原料間に大きな差は無かった³³⁾。また、ナノファイバーから作製した乾燥シートを引張試験に供したところ、シートのヤング率および引張強度は全ての原料において同様の値が得られた。引張試験の結果はナノファイバー自身の物理的性質のみを反映しているとはいえないが、これらの結果は異なる原料から単離されたセルロースナノファイバーの物理的性質に大きな違いはないことを示唆する。このことから出発原料によってナノファイバーの用途が制限されることはないと期待される。

4. まとめ

セルロースナノファイバーの特徴は、結晶性を保持しながらの均質性にある。樹脂の中に均一に分散しながら高い補強効果を発揮する。しかし、セルロースナノファイバーだけが特別なのではない。紙も綿も、天然で存在するセルロースは全てマイクロフィブリルからできているので、それらもまたナノ構造ファイバーである。本質的にはどれも同じ性質を持つが、構造によって異なる機能を示す。セルロースナノファイバーには無い性質を紙が発揮し、紙にはない性質をセルロースナノファイバーが発揮する。紙の製造に長い歴史があるように、セルロースナノファイバーの製造の歴史が少しずつ進んでいる。製造の発展が幅広い応用につながり、幅広い利用が製造のさらなる発展につながることを望む。

参考文献

- 1) 本宮達也、ナノファイバーテクノロジーを用いた高度産業発掘戦略、シーエムシー出版、2004.
- 2) Favier, V., Chanzy, H., Cavaille, J.Y., Polymer nanocomposites reinforced by cellulose whiskers, *Macromolecules*, **28**, 6365-6367, 1995.
- 3) Favier, V., Canova, G. R., Cavailé, J. Y., Chanzy, H., Dufresne, A., Gauthier, C., Nanocomposite materials from latex and cellulose whiskers, *Polymer. Adv. Tech.*, **6**, 351-355, 1995.
- 4) Saito, T., Kuramae, R., Wohlert, J., Berglund, Lars A., Isogai, A., An Ultrastrong nanofibrillar biomaterial: The strength of single cellulose nanofibrils revealed via sonication-induced fragmentation, *Biomacromolecules*, **14**, 248-253, 2013.
- 5) Nickerson, R. F., Habrie, J. A., Cellulose intercrystalline structure, *Ind. Eng. Chem.*, **39**, 1507-1512, 1947.
- 6) Mukherjee, S. M., Woods, H. J., X-ray and electron microscope studies of the degradation of cellulose by sulphuric acid, *Biochim. Biophys. Acta*, **10**, 499, 1953.
- 7) Fengel, D., 10 Å fibrillen in cellulose, *Naturwissenschaften*, **61**, 31-32, 1974.
- 8) Turbak et al., Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential, *J. Appl. Polym. Sci. Symp.*, **37**, 815-827, 1983.
- 9) Herrick F.W., Casebier R.L., Hamilton J.K., Sandberg K.R., *J. Appl. Polym. Sci. Symp.*, **37**, 797-813, 1983.
- 10) Taniguchi, T., Okamura, K., New films produced from microfibrillated natural fibres, *Polym. Int.*, **47**, 291-294, 1998.
- 11) Iwamoto, S., Nakagaito, A. N., Yano, H., Nogi, M., Optically transparent composites reinforced with plant fiber-based nanofibers, *Appl. Phys. A*, **81**, 1109-1112, 2005.
- 12) de Souza Lima M. Miriam., Borsall, R., Static and dynamic light scattering from polyelectrolyte microcrystal cellulose, *Langmuir*, **18**, 992-996, 2002.

- 13) 近藤哲男, セルローステクノロジー 水中対向衝突による天然セルロース繊維のナノ微細化, *Cellulose Commun.*, **12**, 189-192, 2005.
- 14) Zhao, H. P., Feng, X. Q., Gao, H., Ultrasonic technique for extracting nanofibers from nature materials, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 073112, 2007.
- 15) Nakagaito, A. N., Yano, H., The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites, *Appl. Phys. A*, **78**, 547-552, 2004.
- 16) Abe, K., Iwamoto, S., Yano, H., Obtaining cellulose nanofibers with a uniform width of 15 nm from wood, *Biomacromolecules*, **8**, 3276-3278, 2007.
- 17) Fernandes Diniz, J. M. B., Gil, M. H., Castro, J. A. A. M., Hornification-its origin and interpretation in wood pulps, *Wood Sci. Technol.*, **37**, 489-494, 2004.
- 18) Oksanen, T., Buchert, J., Viikari, L., The role of hemicelluloses in the hornification of bleached kraft pulps, *Holzforschung*, **51**, 355-360, 1997.
- 19) Duchesne, I., Hult, E.-L., Molin, U., Daniel, G., Iversen, T., Lennholm, H., The influence of hemicellulose on fibril aggregation of kraft pulp fibres as revealed by FE-SEM and CP/MAS 13C-NMR, *Cellulose*, **8**, 103-111, 2001.
- 20) Hult E.-L., Iversen, T., Sugiyama, J., Characterization of the supermolecular structure of cellulose in wood pulp fibres, *Cellulose*, **10**, 103-110, 2003.
- 21) Rebuzzi, F., Evtuguin, D. V., Effect of glucuronoxylan on the hornification of eucalyptus globulus bleached pulps, *Macromol. Symp.*, **232**, 121-128, 2006.
- 22) Iwamoto, S., Abe, K., Yano, H., The effect of hemicelluloses on wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics, *Biomacromolecules*, **9**, 1022-1026, 2008.
- 23) Abe, K., Nanofibrillation of dried pulp in NaOH solutions using bead milling, *Cellulose*, **23**, 1257-1261, 2016.
- 24) Saito, T., Nishiyama, Y., Putaux, J. L., Vignon, M., Isogai, A., Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose, *Biomacromolecules*, **7**, 1687-1691, 2006.
- 25) Saito, T., Kimura, S., Nishiyama, Y., Isogai, A., Cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation of native cellulose, *Biomacromolecules*, **8**, 2485-2491, 2007.
- 26) Liimatainen, H., Ezekiel, N., Sliz, R., Ohenoja, K., Sirviö, J. A., Beuglund, L. A., High-strength nanocellulose-Talc hybrid barrier films, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 13412-13418, 2013.
- 27) Liimatainen, H., Visanko, M., Sirviö, J., Hormi, O., Niinimäki, J., Sulfonated cellulose nanofibrils obtained from wood pulp through regioselective oxidative bisulfite pre-treatment, *Cellulose*, **20**, 741-749, 2013.
- 28) Eyholzer, Ch., Bordeanu, N., Lopez-Suevos, F., Rentsch, D., Zimmermann, T., Oksman, K., Preparation and characterization of water-redispersible nanofibrillated cellulose in powder form, *Cellulose*, **17**, 19-30, 2010.
- 29) Pääkkö, M., Ankerfors, M., Kosonen, H., Nykänen, A., Ahola, S., Österberg, M., Rukolainen, J., Laine, J., Larsson, P. T., Ikkala, O., Lindström, T., Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels, *Biomacromolecules*, **8**, 1934-1941, 2007.
- 30) Henriksson, M., Henriksson, G., Berglund, L. A., Lindström, T., An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers, *Eur. Polym. J.*, **43**, 3434-3441, 2007.
- 31) Dufresne, A., Vignon, M. R., Improvement of starch film performances using cellulose microfibrils, *Macromolecules*, **31**, 2693-2696, 1998., 他
- 32) Leitner, J., Hinterstoisser B., Wastym, M., Keckes, J., Gindl, W., Sugar beet cellulose nanofibril-reinforced composites, *Cellulose*, **14**, 419-425, 2007., 他
- 33) Abe, K., Yano, H., Comparison of the characteristics of cellulose microfibril aggregates of wood, rice straw and potato tuber, *Cellulose*, **16**, 1017-1023, 2009., 他
- 34) Alemdar, A., Sain, M., Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues: wheat straw and soy hulls, *Bioresour. Technol.*, **99**, 1664-1671, 2008., 他
- 35) Bhattacharya, D., Germinario, L. T., Winter, W. T., Isolation, preparation and characterization of cellulose microfibrils

- obtained from bagasse, *Carbohydr. Polym.*, **73**, 371-377, 2008., 他
- 36) Wang, B., Sain, M., Dispersion of soybean stock-based nanofiber in a plastic matrix, *Polym. Int.*, **56**, 538-546, 2007., 他
- 37) Zuluaga, R., Putaux, J. -L., Restrepo, A., Mondragon, I., Ganan, P., Cellulose microfibrils from banana farming residues: isolation and characterization, *Cellulose*, **14**, 585-592, 2007., 他
- 38) Bhatnagar, A., Sain, M., Processing of cellulose nanofiber-reinforced composites, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **24**, 1259-1268, 2005., 他
- 39) Iwamoto, S., Kai, W., Isogai, A., Iwata, T., Elastic modulus of single cellulose microfibrils from tunicate measured by atomic force microscopy, *Biomacromolecules*, **10**, 2571-2576, 2009.

著者プロフィール

阿部 賢太郎 (Kentaro Abe)

<略歴> 2000年名古屋大学農学部応用生命科学科卒業／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(博士(農学))／同年京大大学生存圏研究所ポスドク／2011年同大大学生存圏研究所助教／2013年同大大学生存圏研究所准教授、現在に至る。<研究テーマと抱負>樹木の樹体支持機構の解明。セルロース／キチンナノファイバーの材料開発や食品利用など。<趣味など>生活全般

木材の流動成形における化学処理の微視的制御

田中 聡一^{1*}

Microscopic control of chemical treatment for wood flow forming

Soichi Tanaka^{1*}

概要

木材の流動成形は、塊状の木材に自由に形状付与できる加工技術であり、木材の工業的利用のための新しい手法として注目されている。同技術では、成形体の形状を保持するために成形前の木材に化学処理物質を導入する必要がある。しかし化学処理木材から作った成形体は、苛酷な環境下では、変色、表面荒れ、および寸法変化を生じる。これは、木材中に処理された細胞と未処理の細胞（巨視的処理ムラ）が存在するだけでなく、細胞壁中でも処理されて安定化された箇所と未処理の不安定な箇所（微視的処理ムラ）が存在するためである。著者は、特に微視的処理ムラの解消を図る手法として、物質溶液含浸木材の養生工程（溶媒を蒸発させる工程）における細胞壁への物質拡散現象に着目した。具体的には、溶媒蒸発に直接的に関わる相対湿度（RH）と温度を操作して、細胞壁中の不安定箇所への物質拡散を促すことで、微視的処理ムラを解消できると考えた。本稿では、養生工程における RH・温度が物質拡散に及ぼす影響の解明を目的として、物質にポリエチレングリコール（PEG）を用いて行った研究についてまとめた。

1. はじめに

1.1 木材の流動成形の特徴と課題

近年、塊状の木材を流動させて自由に形状付与をすることができる「流動成形技術」¹⁾が注目されている。同技術では、木材に熱を加えて細胞と細胞の間を柔らかくしたうえで、細胞を外力により移動させて最初に隣接していた細胞とは別の細胞と再結合させる。従って流動成形技術では、1つ1つの木材細胞の破壊を抑えつつも自由度の高い木材の加工ができ、優れた機械的性質を有する細胞構造（細胞1本の引張強度が0.4-1.4 GPa²⁾）を生かした材料設計が可能である。例えば流動成形体は、高い曲げ強度（180 MPa以上とポリカーボネートを凌駕）や、高い寸法安定性（合成樹脂より1桁低い線膨張率）を示すことが知られており³⁾、工業材料として通用する可能性が見出されつつある。

流動成形技術で安定した成形体を得るには、成形前の木材に化学物質を導入する必要がある。それは、木材の細胞壁の中にある不安定構造が水分を収脱着したり、分解の起点となったりするのを防ぎ、成形体の変形、劣化、および分解を抑制するためである。しかし現状では、化学処理した木材で作った成形体にも、高温高湿などの苛酷な環境下では変色する、寸法が不安定である、強度がばらつくという問題が生じている。これは、成形前の木材中に処理された細胞と未処理の細胞（巨視的処理ムラ）が存在するだけでなく、細胞壁中にも処理されて安定化された箇所と未処理の不安定な箇所（微視的処理ムラ）が存在するためである。これらのムラの解消は、流動成形はもちろんのこと、バルク木材や他の全ての木質系材料においても求められている。

2017年7月10日受理。

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

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

1.2 木材の化学処理方法と微視的処理ムラ解消の可能性

化学処理には処理物質を液相や気相で作用させる方法があり、より一般的なのは液相法である。液相法のプロセスには、処理物質の溶液を木材に注入する「含浸過程」とその後大気下で溶媒（水の場合が多い）を蒸発させる「養生過程」がある。近年、特に養生過程において、溶媒蒸発に伴い処理物質が細胞壁中の不安定領域へ拡散すること、およびその拡散量は含浸過程後に細胞壁中の不安定領域に存在する物質量よりも多い場合があることなどがわかってきた⁴⁾。また、拡散量には養生雰囲気相の相対湿度（RH）や温度が影響することも明らかになってきた^{5,6)}。従って、養生過程の操作により細胞壁への物質拡散を促すことで、微視的処理ムラを解消できる可能性がある。

1.3 本稿の内容

本稿では、溶液含浸木材の養生過程における細胞壁への物質拡散制御のための戦略を示したうえで、拡散に及ぼすRHの影響とその機構を述べ、それに基づき温度の影響に関する機構解明のための戦略と結果の一部を示す。また、拡散を促進するための今後の課題や展望について、木材試験片の含水率と膨潤の関係や、RH・温度のスケジューリング方法の観点から述べる。

2. 養生過程における細胞壁への物質拡散制御のための戦略

2.1 背景と目的

含浸過程で仮に処理溶液が全ての細胞内腔と細胞壁に行き渡ったとして、細胞壁中の不安定な非結晶構造周辺（図 1i）は、まだ多くの溶媒（水）を含有するため不安定なままである。養生過程において木材から水が蒸発するとき（図 1ii）、細胞壁よりも細胞内腔からの蒸発が多いため、溶質である処理物質の濃度は細胞内腔が細胞壁よりも高くなり、処理物質はこの濃度差を駆動力として細胞壁へ拡散し⁷⁾、非結晶構造周辺の水を置換すると考えられる。

この処理物質の拡散と水の置換が十分に起こらなければ非結晶領域の多くが不安定なままとなり微視的ムラが生じるが、それらが促されれば非結晶領域全体は安定化され、ムラは生じにくくなるはずである。また、拡散を生じさせるのは水分蒸発であり、水分蒸発に直接的に影響するのは周辺のRHと温度である。従って、RHや温度を操作すれば（図 1ii）、細胞壁への処理物質（溶質）の拡散、すなわち処理物質による水の置換を制御でき、非結晶領域の安定化の促進が十分に期待できる。

このような背景から著者らは、溶液含浸木材の養生過程のRHや温度が細胞壁への処理物質（溶質）の拡散に及ぼす影響を明らかにすることを目的として研究を行った。

2.2 実験方法

木材にはヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）の木口試験片〔25mm（R方向）×25mm（T方向）×5mm（L方向）〕を用いた。ヒノキ材を用いたのは、同材が国産の代表的樹種であり、かつその早晚材の密度差が小さく材全体で均等な変化が起こりやすいと考えられるためである。また、木口試験片を用いたのは、物質拡散の駆動力となる細胞内腔と細胞壁からの水分蒸発速度の差を生じやすくするためである。一方、処理物質にはポリエチレングリコール（PEG1540、以下PEGと称する）を用いた。同物質を用いたのは、試験片の外部寸法から細胞壁中の物質量を算出するためである⁸⁾。

試験片は、PEG水溶液の含浸に先んじて、試験片の質量と寸法が一定となるまで蒸留水中に含浸した。その後、試験片は温度20℃、相対湿度55～75%の雰囲気下で恒量になるまで放置し、続けて105℃乾燥器中で恒量になるまで放置して全乾状態とした。

含浸過程（図 1i）では、密閉容器に全乾の試験片を入れて減圧したあと、20 mass%のPEG水溶液を注入して試験片を浸漬状態としてから密閉容器を大気に開放して、水溶液の試験片への浸透を促した。その後、試験片は水溶液中で寸法と質量が一定となるまで放置した。

養生過程（図 1ii）では、試験片の質量・寸法をモニターした。RHと温度の条件は各節で示す。

減圧乾燥過程では、養生後の試験片を五酸化二リン (P₂O₅) 上で恒量になるまで減圧乾燥して質量と寸法を測定した。

蒸留水含浸後、PEG 含浸前全乾状態、および含浸・養生・減圧乾燥の各過程における質量と寸法を用いて、試験片の含水率と比膨潤率をそれぞれ計算した。

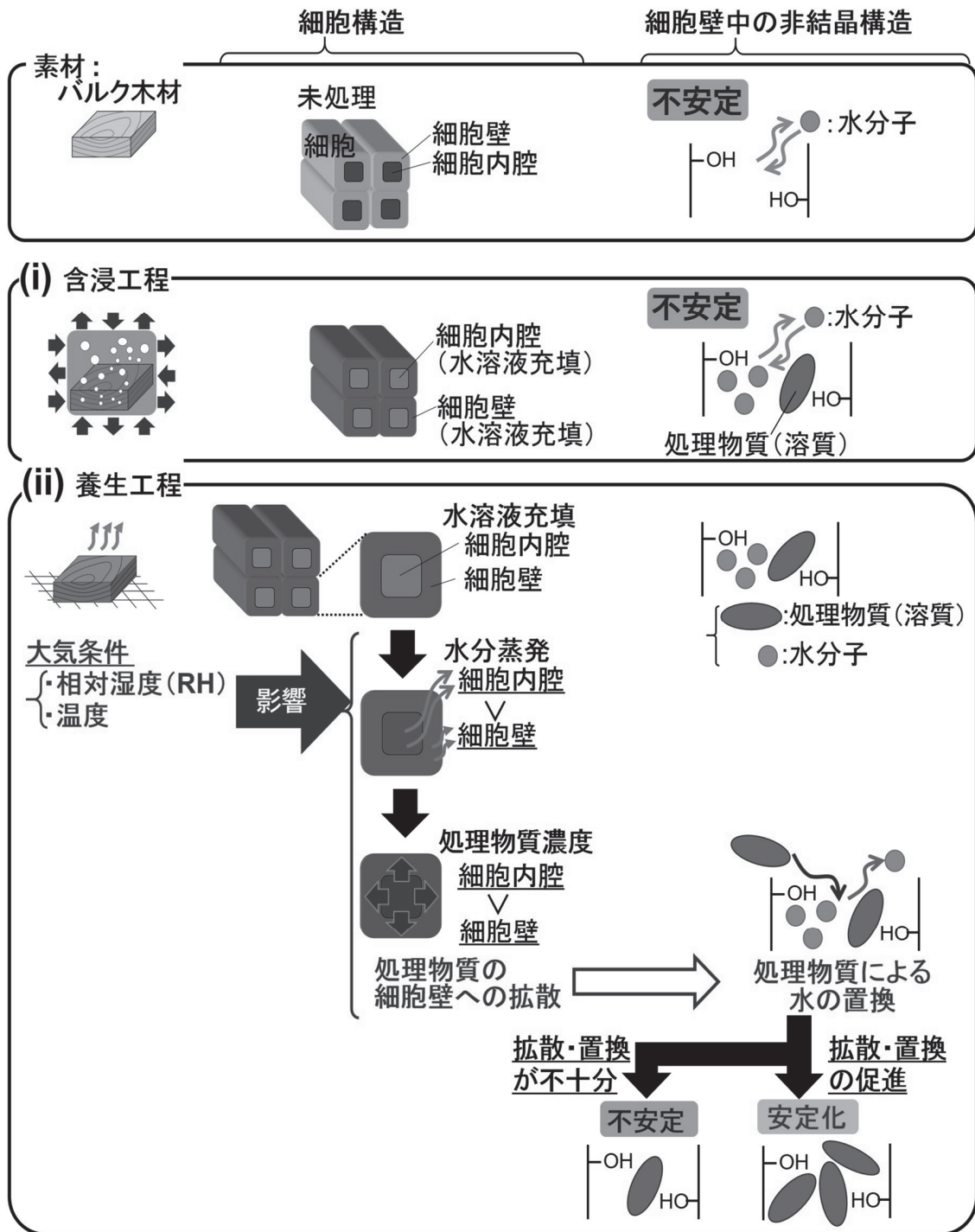


図1：木材の化学処理の微視的制御のための戦略

3. 養生 RH が細胞壁への PEG 拡散に及ぼす影響⁵⁾

3.1 養生方法と PEG 拡散

養生過程では、40℃の環境下で各種塩により11%、32%、53%、75%、または91%のRHに調湿した空气中で試験片を 2.17×10^3 h 放置した。なお、各RHについて3回ずつ試験を行った。

図2に全過程後の試験片の比膨潤率と養生のRHの関係を示す。このときの試験片は減圧乾燥過程を経ており、試験片の細胞壁中にはPEGだけが存在していると考えられるので、縦軸の比膨潤率は細胞壁中のPEG量と解釈できる⁸⁾。さらに、減圧乾燥過程は細胞壁中PEG量とRHの関係に影響を及ぼさないため⁹⁾、図2は養生中のPEG拡散とRHの関係と解釈できる。従って図2より、PEG拡散はRHの増加に伴い55%までは増加し、より高いRHでは減少したといえる。これは、RHがPEG拡散に影響することと、PEG拡散を極大化するRHが存在することを示している。

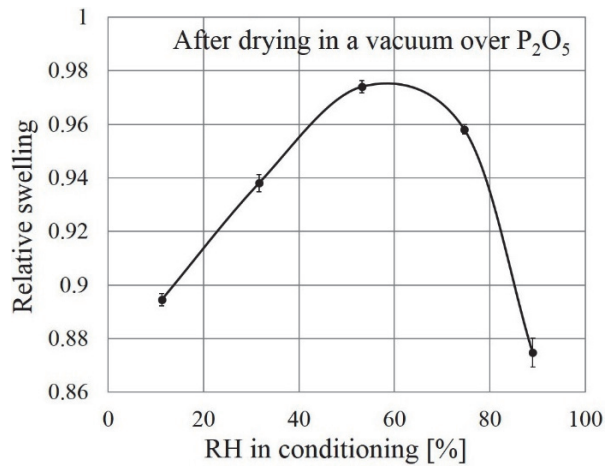


図2: 全過程後の試験片の比膨潤率と養生のRHの関係。エラーバーは標準偏差

3.2 RH が PEG 拡散に及ぼす影響の解釈

PEG拡散に直接的に影響する因子の1つは、図1iiより細胞内腔-細胞壁間でのPEGの濃度差である。もう1つの直接的因子は、細胞壁へのPEGの拡散性(拡散のしやすさ)であると考えられる。

PEGの拡散性および濃度差はそれぞれ養生中の試験片の含水率およびその減少と関係付けることができる。これは、細胞壁の水分量が増加すればPEGが動きやすくなることと、濃度差が水分蒸発(含水率減少)により生じることによる(図1ii)。PEGの拡散性はまた、養生中の細胞壁の膨潤量、すなわち比膨潤率と関係付けることができる。これは、細胞壁が膨潤するほどPEGが拡散できる潜在的な空間が増大するためである。

そこで養生中の試験片の含水率・比膨潤率の時間変化に注目した(図3)。含水率は(図3a)、いずれのRHにおいても最初の100hでほぼ恒量に達し、養生過程の大半は平衡状態にあったことから、平衡含水率がPEG拡散性に寄与すると考えられる。また、初期含水率と平衡含水率の差がPEG濃度差に寄与すると考えられる。一方、比膨潤率も、いずれのRHにおいても最初の500hでほぼ平衡に達し、養生の大半は平衡状態にあったことから、平衡比膨潤率がPEG拡散性に寄与すると考えられる。

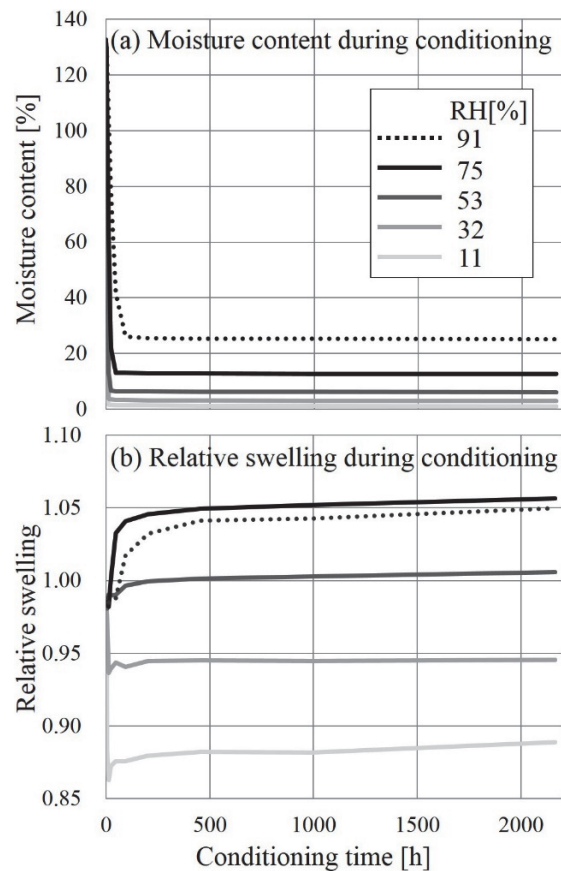


図3: 各RHで養生中の試験片の (a)含水率と(b)比膨潤率の時間変化

PEG 濃度差に寄与する含水率減少と PEG 拡散性に寄与する平衡含水率・平衡比膨潤率を図 4 に示す。含水率減少は RH の増加に伴い減少した。これは、RH が増加すると細胞内腔-細胞壁間の PEG 濃度差が生じにくくなることを示唆している。一方、平衡含水率は RH の増加に伴い増加し、平衡比膨潤率は RH の増加に伴い RH 75% までは増加してそこから僅かに減少した。これらの結果は、RH が増加すると PEG 拡散性は増大する傾向にあることを示唆している。

PEG 拡散と RH の関係 (図 2) に立ち返ると、PEG 拡散の RH 増加に伴う増加は PEG 拡散性の増加 (図 4b) によるものであり、PEG 拡散の RH 増加に伴う減少は細胞内腔-細胞壁間の PEG 濃度差の減少 (図 4a) によるものと解釈できる。

以上を踏まえて、RH が PEG 拡散に及ぼす影響に関する解釈を図 5 に要約した。

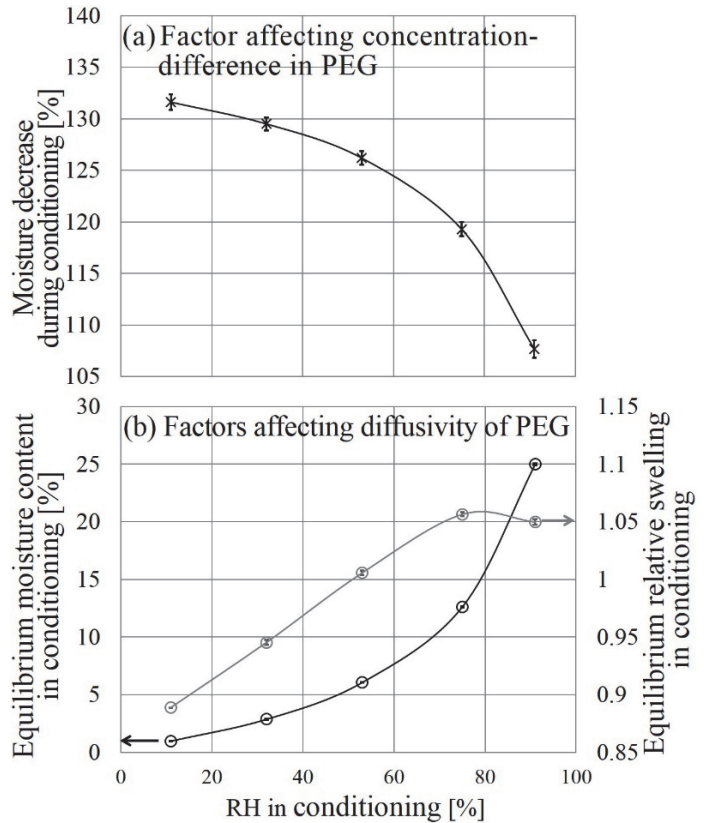


図 4: (a) PEG 濃度差・(b) PEG 拡散性に影響する因子と RH の関係。エラーバーは標準偏差

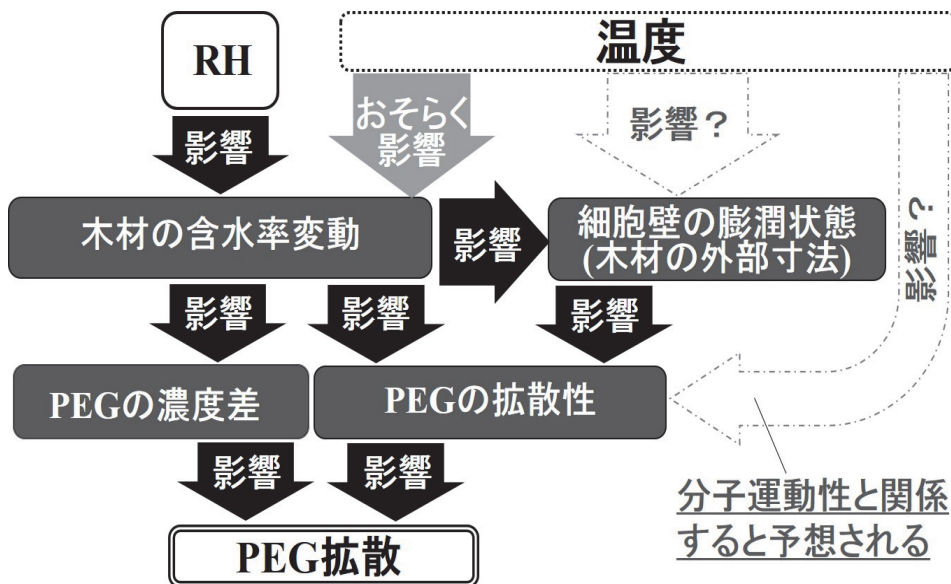


図 5: PEG 拡散に及ぼす養生 RH の影響に関する解釈および養生温度の影響に関する予想

4. 養生温度が細胞壁への PEG 拡散に及ぼす影響⁶⁾

4.1 戦略

細胞壁への PEG 拡散に及ぼす温度の影響も、基本的には図 5 で説明できると予想される。しかし、その影響は RH の影響と比べると複雑である。それは RH (図 5) が直接的には含水率の時間変化 (以下、含水率変動と称す) にしか影響しないのに対し、温度は含水率変動はもちろんのこと試験片の膨潤挙動や PEG 拡散性 (分子運動性に関係) にも直接的に影響すると予想されるためである。

そこで、少なくとも温度が含水率変動に及ぼす影響を統一することによって PEG 濃度差の寄与 (図 5) を除外すれば、PEG 拡散に及ぼす温度の影響を単純化できるという考えに至った。

4.2 含水率変動を揃えた養生方法

含水率変動は主に平衡含水率と水分蒸発速度に分けられる。例えば調湿塩を用いて異なる温度で試験片を養生すれば (図 6a)、平衡含水率も水分蒸発速度も温度によって異なる^{10,11)}。

そこで予備実験により、1 つの養生 RH について温度ごとに調湿塩を別々に選定し、試験片である PEG 含浸木材の平衡含水率が揃うようにした (図 6b)。

水分蒸発速度は、試験片と調湿塩の間に穴の開いた仕切りを設けた上で、穴の直径の大きさによる制御を試みた。しかしながら、予備実験で水分蒸発速度を厳密に揃えるのが困難だった。そこで、穴の直径、つまり水分蒸発速度を 3 水準設けて (図 6c)、各温度について PEG 拡散と水分蒸発速度の関係を求め、同一の水分蒸発速度について、温度が PEG 拡散に及ぼす影響を調べた。

温度は 20 °C、35 °C、50 °C とし、RH はそれぞれに対応させて 70%、72%、74% として試験片を 2.03 × 10³ h 養生し、平衡含水率を統一した。PEG 拡散は、3.1 節と同様、全過程後の試験片の比膨潤率を指標とした。

4.3 PEG 拡散に及ぼす温度の影響とその解釈

各温度について PEG 拡散は水分蒸発速度の増加に伴い増加した。また、どの水分蒸発速度についても PEG 拡散は 35 °C、50 °C、20 °C の順に多かった。この傾向からは PEG 濃度差の PEG 拡散への寄与 (図 5) が除外されているので、PEG 拡散性はこの順に高かったといえる。

PEG 拡散性が 35 °C、50 °C、20 °C の順に高かったことは、分子運動の観点のみからは説明ができない。なぜなら温度が高いほど分子運動は活発であるため、PEG 拡散性は温度の増加に伴い増加するはずだからである。そこで、もう一つの観点である養生の平衡膨潤率と PEG 拡散の関係を

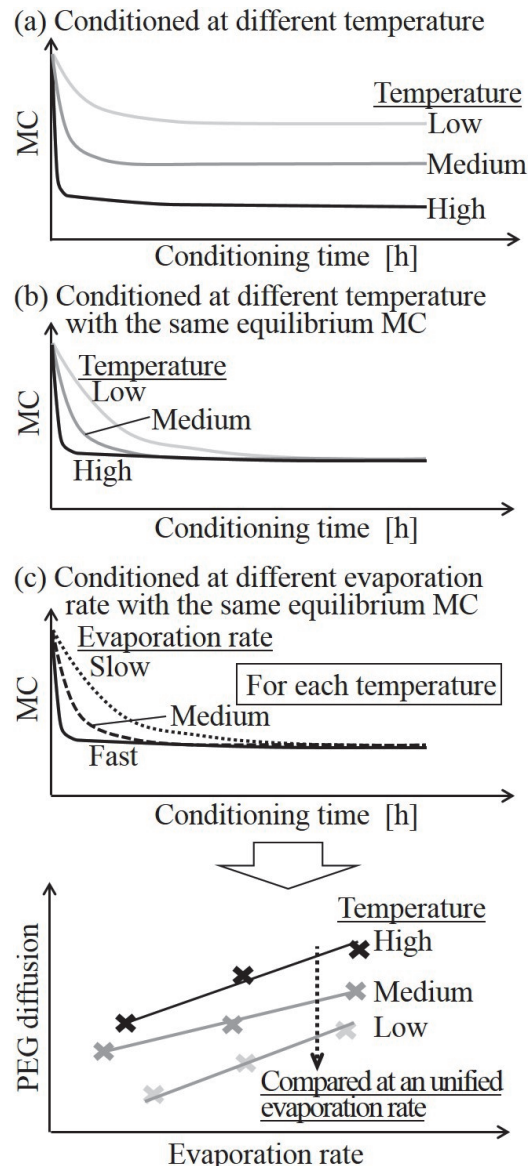


図 6 : 養生温度が PEG 拡散に及ぼす影響に関する機構解明のための戦略。MC は含水率

調べたところ、良好な正の相関がみられた ($R^2 = 0.946$)。これより、図 5 において特に温度が養生過程における試験片の膨潤に及ぼす影響が重要であることが明らかとなった。詳しくは文献⁹⁾を参照されたい。

5. 細胞壁への物質拡散促進のための課題と展望

5.1 試験片の含水率と膨潤の関係

RH (3.2 節) や温度 (4.3 節) が細胞壁への PEG 拡散に及ぼす影響の解釈より、拡散を促すには養生中の試験片の含水率と膨潤の制御が重要である。そのためにはまず、試験片の含水率と膨潤の関係を解明する必要がある。

養生過程で RH を 75% で 2.18×10^3 h、66% で 1.00×10^2 h、53% で 3.34×10^2 h、32% で 4.82×10^2 h、11% で 3.61×10^2 h と逐次変化させた後 (40°C)、 P_2O_5 上で減圧乾燥したときの試験片⁹⁾の比膨潤率と水のモル分率 (含水率に相当) の関係を図 7a に黒色曲線で示す。なお、水のモル分率が 1 のときの比膨潤率を 1 としたのは比膨潤率の定義に従った。水のモル分率と比膨潤率の関係は上に凸の曲線であり、最大値を有した。同傾向は、希薄な PEG 水溶液を含浸した木材を段階的に濃度の高い PEG 水溶液に置き換える溶液置換法で得られた関係¹²⁾と類似していた。

図 7a は、混合液体による木材の膨潤挙動の混合液各成分の活量を用いた説明¹³⁾で解釈できる。活量は成分間の全相互作用の影響を含む濃度の意味合いを持つ。同説明では、混合によって純粋液体より各成分どうしの分子間相互作用が弱まる時には活量は理想溶液挙動から正の逸脱を示して膨潤挙動は上に凸の曲線となり、相互作用が強まる時には負の逸脱を示して膨潤挙動は下に凸の曲線になる。

水-PEG の混合系では、特に PEG が高分子であることに注意する必要がある。本研究で用いた PEG1540 の平均分子量は約 1500 で、構造式は $HO[CH_2CH_2O]_{33.7}H$ と表せる。図 7b および図 7a の黒色曲線はそれぞれ PEG1540 全体を 1 分子として求めた活量曲線と比膨潤率を示している。なお、活量曲線 (図 7b) は様々な RH の雰囲気下 (20°C) で PEG に吸着した水分から求めた。このとき活量は理想溶液挙動 (図 7b 点線) から負の逸脱を示し、上述の説明と合わなかった。これは、PEG が高い分子屈曲

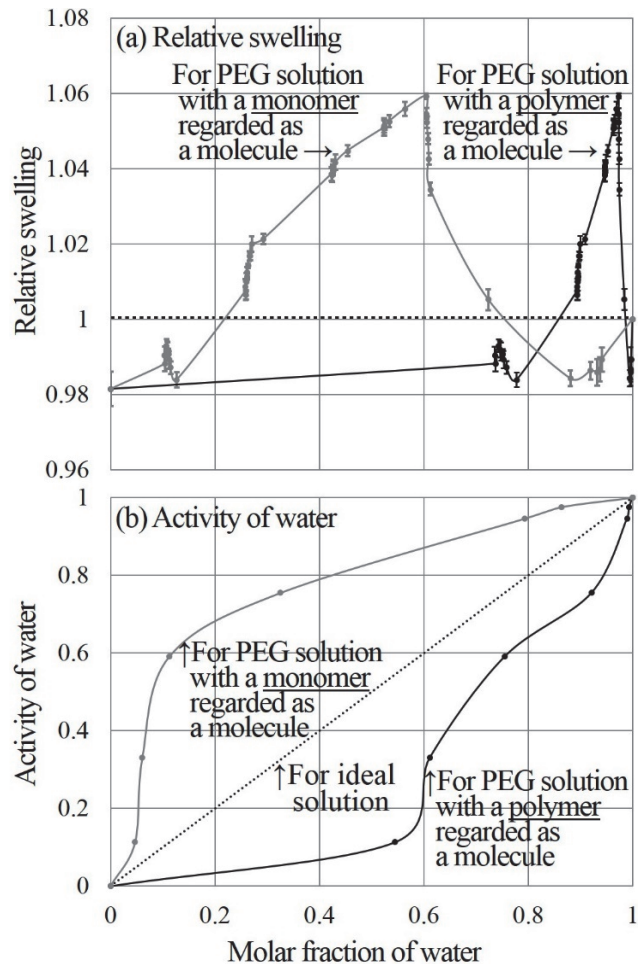


図 7: PEG 水溶液含浸木材の養生過程での(a)木材の比膨潤率・(b)水の活量と水のモル分率の関係。エラーバーは標準偏差

性を持ち、各セグメントが比較的自由に動けることによると思われた。そこで極端な場合として、PEGの1量体(HOCH₂CH₂OH)を1分子として求めた活量曲線と比膨潤率を図7bおよび図7aに灰色曲線で示す。このとき活量は正の逸脱を示し、上述の説明と合致した。実際には各セグメントは運動に制限を受けるため、より正確には灰色と黒色の曲線の中間的な挙動を示すと思われる。今後、同曲線に及ぼす温度・PEG分子量の影響、および養生法と溶液置換法による相違についてより詳細な検討が必要である。

5.2 RHと温度のスケジューリング方法

3節や4節に示した検討では、養生のRHや温度は試験片に変化が起こらなくなるまで一定としたが、拡散をより短時間でより促進するためには、これらのスケジューリングを最適化する必要がある。RHについては、ある特定の条件下で最適なスケジューリングが明らかになっており^{9,14,15)}、5.1節で述べた試験片の含水率と膨潤の関係を正確に理解する必要があるとわかったが、ここでは紙面の都合上割愛する。

6. おわりに

本稿では、木材の流動成形で問題となる微視的処理ムラについて、溶液含浸木材の養生過程における細胞壁への物質拡散現象の制御による解消方法を紹介し、これまでに得られた知見をまとめた。具体的には、拡散現象の制御にはRHと温度が重要な因子となること、および養生中の木材の含水率と膨潤の関係を正確に理解する必要があることを示した。

参考文献

- 1) 三木恒久, 木質系材料の新規塑性加工技術(細胞界面のすべり現象による大変形を利用した賦形技術), *木材工業*, **67**, 553-556, 2012.
- 2) Groom, L., Mott, L., Shaler, S., Mechanical properties of individual Southern Pine fibers. Part I. Determination and variability of stress-strain curves with respect to tree height and juvenility, *Wood Fiber Sci.*, **34**, 14-27, 2002
- 3) 金山公三, 木材の微細構造制御と高機能化, *日本材料学会木質材料部門委員会第288回定例研究会講演要旨集*, 1-7, 2015.
- 4) Tanaka, S., Seki, M., Miki, T., Shigematsu, I., Kanayama, K., Solute diffusion into cell walls in solution-impregnated wood under conditioning process II: effect of solution concentration on solute diffusion, *J. Wood Sci.*, **62**, 146-155, 2016.
- 5) Tanaka, S., Seki, M., Miki, T., Shigematsu, I., Kanayama, K., Solute diffusion into cell walls in solution-impregnated wood under conditioning process I: effect of relative humidity on solute diffusivity, *J. Wood Sci.*, **61**, 543-551, 2015.
- 6) Tanaka, S., Seki, M., Miki, T., Umemura, K., Kanayama, K., Solute diffusion into cell walls in solution-impregnated wood under conditioning process IV: effect of temperature on solute diffusivity, *J. Wood Sci.*, Under revision.
- 7) Stamm, A.J., Dimensional stabilization of wood with carbonwaxes, *Forest Prod. J.*, **6**, 201-204, 1956.
- 8) 石丸優, PEGと木材のはなし, *木材保存*, **19**, 204-218, 1993.
- 9) Tanaka, S., Seki, M., Miki, T., Umemura, K., Kanayama, K., Solute diffusion into cell walls in solution-impregnated wood under conditioning process III: effect of relative-humidity schedule on solute diffusion into shrinking cell walls, *J. Wood Sci.*, **63**, 263-270, 2017.
- 10) Greenspan, L., Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions, *J. Res. Natl. Bur. Stand., Sec. A: Physics and Chemistry*, **81A**, 89-96, 1977.
- 11) Kollman, F. "32. Feuchtigkeit, Sorption, Quellung und Kapillarkondensation von Holz" In: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Springer-Verlag, Bd. 1, Aufl. 2, pp.387, 1951.

- 12) Sadoh, T., Hashihira, M., A note on the swelling of wood with polyethylene glycols (in Japanese), *Bull Kyoto Univ Forests*, **45**, 227-237, 1973.
- 13) 石丸優, 酒井温子, 混合液体による木材の膨潤(第1報) 水・エタノール, 水・アセトン系について, *木材学会誌*, **34**, 889-895, 1988.
- 14) 田中聡一, 三木恒久, 関雅子, 重松一典, 金山公三, 溶液含浸木材の養生過程における細胞壁への溶質拡散機構の検証:相対湿度がポリエチレングリコール水溶液含浸木材の膨潤・収縮挙動に及ぼす影響, *材料*, **64**, 369-374, 2015.
- 15) 田中聡一, 関雅子, 三木恒久, 重松一典, 梅村研二, 金山公三, 溶液含浸木材の養生過程における細胞壁への溶質拡散に及ぼす溶媒蒸発速度の影響, *材料*, **65**, 359-364, 2016.

著者プロフィール



田中 聡一 (Soichi Tanaka)

＜略歴＞ 2007年京都大学工学部工業化学科卒業／2013年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了（博士（農学））／同年産業技術総合研究所特別研究員／2015年京都大学生存圏研究所特定研究員／2016年同研究所ミッション専攻研究員、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞木質系材料の工業利用のために基礎研究で貢献したい。＜趣味＞ハンマー投・野球・カラオケ（モットーはお腹で投げる・打つ・歌う）、器楽演奏、音楽鑑賞（バロック音楽～昭和歌謡まで）。

ドップラーライダーと高分解能気象モデルによる 都市の極端気象予測

古本 淳一^{1*}

Forecasting of extreme weather using Doppler Lidar and high resolution numerical model in metropolitan area

Jun-ichi Furumoto^{1*}

概要

本研究ではコヒーレントドップラーライダーを高度 200 m の超高層ビルの屋上に設置し、100 m 分解能で東京都心における水平風観測を実施するとともに、非静力学気象予報モデルにドップラーライダーの視線風速をデータ同化することで、都市部における局所的に強い降水に対する精度向上を実現した。

1. はじめに

局地的豪雨のような極端気象現象が発生すると、土砂崩れや河川の氾濫、家屋の浸水といったように、社会的に大きな被害をもたらすだけでなく、時には人命を脅かす大きな災害となることもある。このような自然災害による被害を軽減するには防災情報の正確かつ迅速な発信が必要である。こうした極端気象現象に対する現状の予報精度は高くなく、早急な改善が望まれる¹⁾。

気象庁気候監視変動レポート（2015年）によると、非常に強い雨である1時間降水量 50 mm 以上の年間発生回数は年々増加傾向にある。また都市においては人工排熱やビルの蓄熱効果の影響によりヒートアイランド現象が顕在化している。東京における気温変化率は1931~2014年において3.2 °C/100年と非都市域の2倍の増加量となっており、積極的なヒートアイランド対策なしには今後も上昇すると考えられる²⁾。

局地的豪雨をより早く捉え予測するには、下層の高相当温位の気塊の流入や潜在不安定な成層状態、鉛直シアなどが重要であることはよく知られている^{3,4)}。しかしこの大気下層における風況は地表面の影響を強く受けるため、地表面状態が複雑な都市では上空の風況も複雑で積乱雲の形成に重要な風の下層収束の場所や時間を正確に予測することは困難である。そのため都市域での水平風の動態を捉え強い下層収束をいち早く見つけることが、局地的豪雨の予測向上に寄与すると考えられる。

ドップラーライダーは、風向・風速といった風に関する情報を得ることができるリモートセンシング技術である。この技術は大気観測の有効な手段として注目されており、航空機や衛星に備え付けられ観測が試みられている。このドップラーライダーを実際に都心の真ん中に設置し観測を行うことが一番大きな効果を発揮すると考えられる。

2017年7月18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精測診断分野

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

2. ドップラーライダーによる都市の風況観測

LIDAR (Light Detection and Ranging) は光を用いたリモートセンシング技術の1つで、パルス状に発光するレーザー照射に対する散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離やその対象の性質を分析するものである。RADAR (Radio Detection and Ranging) に類似したリモートセンシング技術であり、レーダーでは主にマイクロ波の電波が用いられるのに対し、ライダーではより波長の短いレーザー光が用いられる。すなわちライダーとレーダーの大きな違いは波長である。レーダーの散乱体が大気乱流や降水粒子など比較的大きな散乱体であるのに対し、ライダーはより小さなエアロゾルや大気分子に感度がある。ライダーでは大気中に浮遊するエアロゾルによるミー散乱や空気分子によるレイリー散乱を観測することが出来る。また、大気の散乱と大気分子の吸収を組み合わせた差分吸収法やラマン散乱法を用いてガス状物質の濃度分布を測定することも可能である。散乱光のドップラーシフトを利用して散乱体の移動速度から風向風速を測定することも出来る。

これらの光の散乱過程には弾性散乱と非弾性散乱が存在しており、弾性散乱は入射光と散乱光の波長が等しいものであり、非弾性散乱は散乱波長が変化するものである。大気浮遊粒子の大きさや形状、構成される物質の散乱吸収特性によりどちらの散乱過程が卓越するかが異なる。

2.1 ドップラーライダーの原理

自然界において一般的に大気中にはエアロゾルが存在する。ドップラーライダーは、レーザー光を発射して大気中に存在するこの無数のエアロゾルによる後方散乱光を受信する。この時、エアロゾルが風に乗って移動しているならば、散乱光の周波数はドップラー効果によってシフトされている。このドップラー周波数を解析することにより、観測点から離れた位置における視線方向の風速を測定することが可能となる。

コヒーレントドップラーライダーは十分にコヒーレント性があるレーザー光と望遠鏡を用いてエアロゾルが移動している様子をコヒーレントに検出する。望遠鏡によって集光された散乱光は、光ミキサー上で種光源からの連続光と重ね合わされる。このように受信信号は送信に用いたものと同一の局部発振器からの放射と混合され周波数差を計測することにより、移動する粒子から後方散乱された光の周波数のドップラー偏移を高精度に検出することが可能である。一方、インコヒーレントドップラーライダーも開発が進められている。これは紫外域のレーザーを用いてレイリー散乱光を受光する高分解能の分光器を用い、ドップラーシフトを検出するものであるが遠距離での観測は難しい。

2.2 基本構成

コヒーレントドップラーライダーは、1980年代に波長 10 μm で発振する CO_2 ガスレーザーが広く研究された。1990年代以降になると 1.5 μm より長い波長で発振する、レーザーダイオード励起固体レーザーが使われるようになり、近年はより安価なファイバーレーザーが使われるようになった⁵⁾。

観測に使用したドップラーライダーの構成を図1に示す。使用した望遠鏡はカセグレン式望遠鏡を用いた。シードレーザーから発信された赤外連続光を、光変調器でコントロールしパルスレーザーへ成形した後、光アンプで増幅させ、望遠鏡で大気中に射出する。大気中のエアロゾルの動きに応じてドップラーシフトを受けた反射光を同一の望遠鏡で受光する。その後、光ミキサーに入れて数 10 MHz 程度のうなりを作る。受光した信号成分のうち低周波のビート信号を A/D 変換し、デジタル信号として取得する。A/D 変換によりデジタル化された受信信号にフーリエ変換を施して得られる受信光強度とドップラー周波数偏移から、大気浮遊粒子の距離と風速を求めることが可能となる。例えば波長 2 μm では周波数の偏移 1 MHz が風の視線方向成分で 1 m/s の大きさに対応する。

本研究で使用した装置は仏国 Leosphere 社の「WINDCUBE 200S」である。この機器は小型ポータブルなドップラーライダーで、最大観測距離は公称値で 6 km の性能を有している。

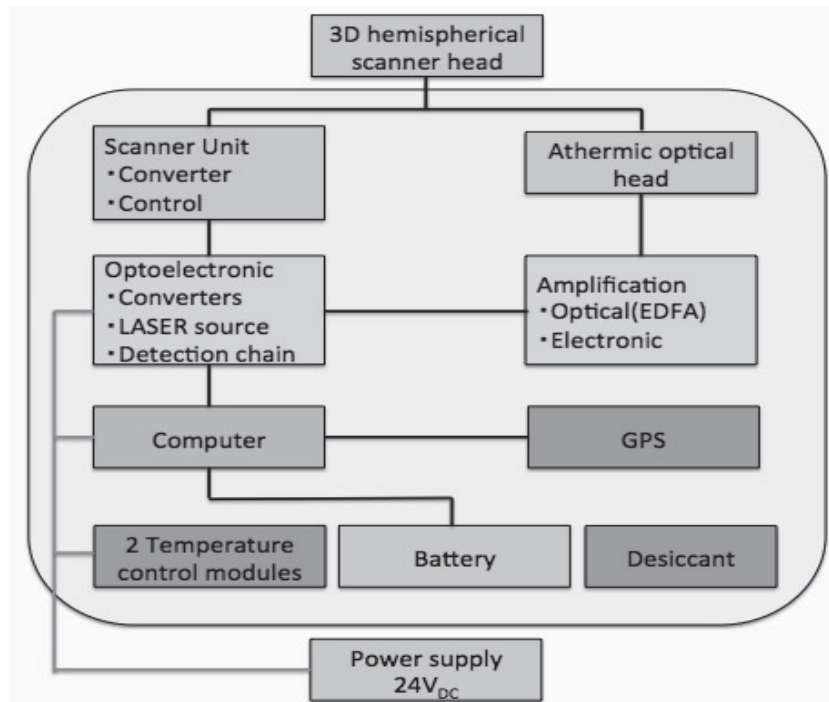


図1：WIND CUBE 200S のシステム構成図

この観測機器には大きく分けて、ライダープロセッサ、スキャンヘッドプロセッサ、コンピュータ、望遠鏡、レーザーアンプが搭載されている。ライダープロセッサとコンピュータでレーザーの送受信の制御を行い、アンプでシードレーザーを増幅し送信を行う。大気で散乱された光を望遠鏡で受光しライダープロセッサで検波を行う。スキャンヘッドプロセッサはレーザー本体上部に設置されているレンズを、方位角 0~360 度、仰角 -10 度~90 度の範囲で動くように制御している。WINDCUBE 200S の性能とハードウェア環境を表 1 に示す。WINDCUBE 200S は、レンジ分解能を 25 m, 50 m, 75 m, 100 m の 4 種類選択できる。その分解能に応じて計測範囲が変わる。例えばレンジ分解能を一番高い 25 m に設定した時の計測範囲は 50 m ~ 2500 m となり、100 m の時は 200 m ~ 6000 m となる。観測できる最小距離は設定したレンジ分解能の 2 倍の距離となる。

出力されるレーザー光は最大出力 5 mW、パルス幅 400 ns、200 ns、100 ns (選択)、中心波長 1543 nm であり、レーザー安全レベルでクラス 1 M のアイセーフ性 (目に対するレーザー光の安全性) をもつ。

表 1 : WINDCUBE 200S の性能とハードウェア環境

WINDCUBE 200S	性能
測定方式	自動連続観測
レンジ分解能	25m,50m,75m,100m
最大計測範囲	50m~6km
方位角	0~360度
角度分解能	0.1度
回転速度	0.5~4度/s
スキャン位置リフレッシュレート	2Hz
計測可能風速	-30~30m/s
仰角	-10~90度
計測モード	PPI,RHI,DBS,LOS
重量	232kg
防塵防滴性能	IP65
耐熱性	-25度~45度
耐湿性	10%~100%
耐塩性	ISO 9227
外気設計条件	平均風速 50m/s、最大瞬間風速 75m/s
電源供給	110-240V(AC) / 50-60Hz
電力消費	500W~1600W

3. 非静力学気象予報モデル

本研究では、東京都市域で観測された局地的豪雨の再現と、ドップラーライダー観測データの気象予報モデルへのデータ同化を行うために、WRF (Weather Research and Forecasting Model) モデル - ARW (Advanced Research WRF) バージョン 3.4.1 を用いた。

局地的豪雨の発生、発達過程を明らかにするため個々の積乱雲が解像可能な計算領域を設定し、親ドメインは関東平野全域の領域であり水平分解能 1 km、子ドメインはドップラーライダーが設置してある日本橋三井タワーを中心とした東京都心の領域で 200 m に設定した (図 2)。対象とした事例は関東周辺に前線が存在し、降水強度が 5 mm/10 min を上回った 2015 年 9 月 6 日と 10 月 2 日の事例である。計算時間は 2015 年 9 月 6 日の 18:00~24:00JST、2015 年 10 月 2 日の 09:00~15:00JST の 6 時間積分を行った。表 1 に示すように初期値・境界値は気象庁メソ予報モデル (MSM) の予報値を用い、不足する地表面温度の情報は NCEP の FNL (Final Analysis) を用いた。鉛直層は領域 1 および領域 2 で共通の 50 層とし、地表面付近ほど分解能を高く、上空に行くほど分解能が粗くなるような可変グリッドを用いている。積乱雲の発生・発達過程を再現するため、グリッドの最下層の高度分解能は約 100 m で、最上層は約 2000 m と設定した。また最上層の気圧は約 100 hPa であり高度は 16 km に相当する。タイムステップは領域 1 では CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件を考慮し 6 秒に、領域 2 では 1 秒で設定した。今回の事例ではこれ以上の時間に設定してしまうと計算不安定を起こしてしまい破綻する。

SST (Sea Surface Temperature) データは NASA が提供する水平分解能 1 km の GISST (Global 1-km Sea Surface Temperature) を用いた。大気境界層のパラメタリゼーションは領域 1、2 まで改良 Mellor-Yamada Level 2.5 乱流クロージャーモデル (MYNN level2.5) を採用した。土地利用条件における植生データは環境省が提供している 100 m メッシュ植生データを用い、地形データは国土地理院が提供している 10 m メッシュデータを用いた。

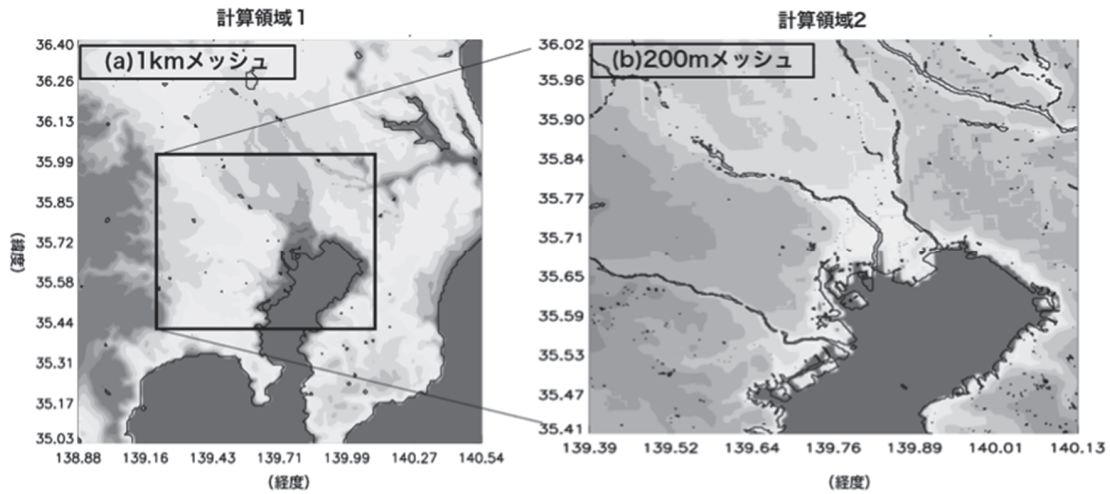


図 2: (a):領域 1 の計算領域 (関東平野全域)
(b):領域 2 の計算領域 (東京都心部周辺)

WRF には初期設定として、地形データや土地利用条件などの情報が含まれている。しかし本研究ではそれを入手可能な限り細かい情報に置き換えた。その理由として、本研究で捉えようとしている局地的豪雨の空間・時間的スケールは非常に小さく、現在においても予報は困難であることがあげられる。その要因として挙げられるのが、モデルの分解能が捉えたい現象のスケールに対して粗過ぎることや、環境設定のデータが粗いことによりモデル内で正確に現象が反映されないことなどである。これらの問題を解決するために、モデルの高分解能化と詳細な環境設定のデータを導入した。気象庁が現業で用いている MSM が 5 km 分解能であるのに対して、本研究のモデルでは分解能を 200 m と 25 倍に上げた。また各種の環境設定は表 2 のものを採用することで、より詳細な結果が得られることが期待される。

表 2: 数値シミュレーションで用いた計算設定

Using Model Type	WRF-ARW Version3.4.1
計算領域と 格子数・解像度	151 × 151 grids 1 格子 1km (領域 1) 331 × 331 grids 1 格子 200m (領域 2)
鉛直総数	50 層 (モデル最下層の層厚は約 100m)
タイムステップ	6 秒 (領域 1)、1 秒 (領域 2)
大気境界層・パラメタリゼーション	MYNN Level2.5
初期値・境界値	JMA-MSM・NCEP-FNL
SST	NASA JPL 1km G1SST
土地利用条件	環境省 100m メッシュ植生データ
地形データ	国土地理院 10m メッシュデータ

3.1 ドップラーライダー観測データの同化

都市域における局地的豪雨の発生、発達過程の予測精度向上に向けて、コントロールランの分解能向上だけでなくドップラーライダー観測で得られた風のデータを気象予報モデルに同化しそのインパクトを調べ、都市におけるドップラーライダー観測データの最適な同化方法について検討を行った。

データ同化とは、観測データから得られた情報を元に数値モデルに入力するデータを最適化し組み合わせる事で、出来る限り現実に近い解析値を得ることをいう。データ同化には様々な種類が存在しており、一番シンプルなものとして数値モデルの予報値を観測値に置き換える直接挿入法や、観測データで予報値を補正するナッジングという手法がある。また上述したものより複雑で時間もかかるがより精度向上が期待される3次元変分法や4次元変分法がある。予測精度を考えると4次元変分法の方が良い結果が得られる見込みが高いのだが、その分計算時間を大幅に必要とする。今回のような局地的な集中豪雨の現象を予測するに時間がかかりすぎるのは、より高い精度で予報できると言っても実用性の観点から現実的ではない。一方、直接挿入法やナッジングでは計算は比較的すぐに終了するのだが、同化結果のインパクトは弱いと考えられる。そのため本論文では、比較的高い精度を維持しつつ、なおかつ現象の予測に大幅な計算時間を必要としない、3次元変分法を数値モデルの予報結果と観測データの同化に用いた。

3.2 WRF データ同化システムによるデータ同化手法

ドップラーライダーで観測したデータをWRFに同化するために、WRFとともに開発が行われてきたWRFDA (Weather Research and Forecasting model Data Assimilation system) を用いた。本研究ではWRFDAに組み込まれているドップラーライダーの視線風データを同化するシステムをドップラーライダーのデータ同化に応用する。WRFでは視線風のデータ同化を行うためのデータフォーマットが指定されており、ドップラーライダーの観測データフォーマットからのフォーマット変換プログラムを作成した。オリジナルのドップラーライダー観測のデータはレンジ分解能が100 m、時間分解能が1度/1 sで特にレンジ分解能が計算領域2の水平分解能より小さいので、計算不安定を起こさないように500 m分解能までデータの間隔を粗にしている。またドップラーライダーの観測地点から3 km以遠のデータは欠測やノイズが多く、計算不安定を起こす要因となるのでデータ同化には用いないこととした。データ同化用の初期値の作成にはコントロールラン(標準実験)用に予め用意した計算領域2の初期値を、フォーマット変換を行ったドップラーライダー観測のデータより修正が行われ、観測データが欠測している部分はWRFDAシステムにより推定が行われデータセットが作成される。

4. 観測結果

4.1 都市におけるドップラーライダー観測

都市の地表面付近の風況を明らかにするためにドップラーライダーを日本橋三井タワー屋上(高さ約200 m(図3))に設置し、連続観測を開始した(図4)。観測パラメータの設定は表3の通りで可能な限り細かな大気構造を見るためにレンジ分解能は100 m、角度分解能6分/1周とした。東京都市部では航空機の離発着規制により高層ビルの高さが約250 m以下であり、高さ200 m級のビル屋上に設置することで人工構造物によるレーザー光の遮蔽をできるだけ抑制でき、地表面付近の大気を広い範囲で水平スキャンすることが可能となる。



図 3： 高層ビル屋上に設置したドップラーライダー（Wind Cube 200S）



図 4： 日本橋三井タワー

表 3：ドップラーライダーの設定

Coherent Doppler Lidar	Windcube 200S
計測範囲	100m～4km
レンジ分解能	100m
時間分解能	1周6分
計測精度	±0.5～30m/s
走査方位角	0～360度
仰角	0度

4.2 豪雨発生事例の抽出

豪雨と呼ばれるような強い降水が確認される時には、積乱雲の発達に伴う大気下層の風の収束や、前線の通過等による風向の変化が見られることが多い。本研究ではそのような豪雨の事例を抽出するために、2015年6月から11月までの半年間において、東京の千代田区北の丸公園の東京管区気象台に設置してある地上アメダス観測所で降水が観測された全事例について検証すべき事例を絞り込んだ。これはドップラーライダーが設置してある日本橋三井タワーから一番近い位置に存在する地上アメダス観測所で、西北西に約2 km離れたところに設置してある。上記の半年間で、気象庁が降水と定義する1 mm以上の降水が東京の地上アメダスで観測されたのは68事例あった。その68事例を1時間降水量10 mm以上の条件で絞り込むと15事例となり、これらの事例をさらに10分降水量5 mm以上の降水があった事例に絞り込むと10事例となった。ここでの10分降水量5 mm以上とは、気象庁が定義する1時間降水量30 mm以上の激しい雨に該当する。この時、山崩れや崖崩れがおきやすくなり、危険地帯では避難の準備が必要とされ、都市では下水管から雨水があふれるような状況となる。

5. 豪雨発生時の事例解析

5.1 孤立積乱雲型

ドップラーライダー観測期間中の2015年6月23日に関東地方で成層不安定場における積乱雲の発生・発達により、東京都市域周辺で局地的な大雨となった。本研究では個々の積乱雲が次に形成されたこの日を孤立積乱雲型による大雨とした。図5は2015年6月23日の0900JST(日本標準時)の地上天気図である。

日本の南岸に前線が停滞しており日本付近は日本海に中心をもつ高気圧に覆われており、天気図スケールからは局地的な大雨をもたらすような様子は見られない。一方、地上天気図では現れないが、この日の上空に寒気が流入しており、東北から近畿地方にかけて不安定な成層状態になっていた。この時のレーダーで観測された降水を図6に示す。

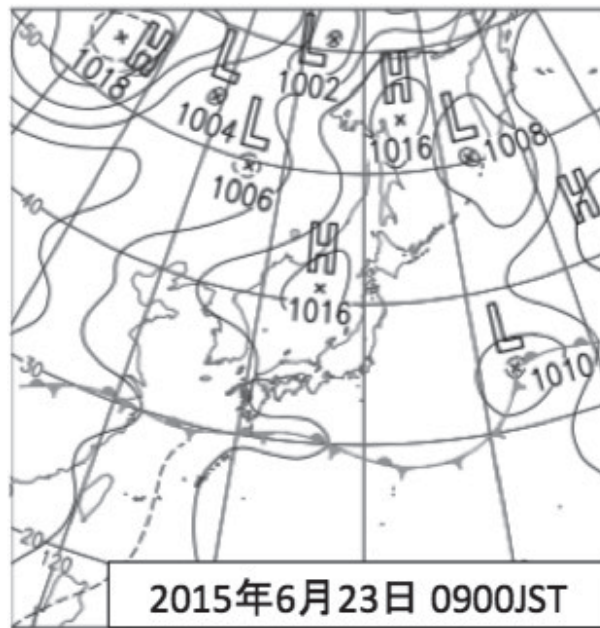


図 5 : 6 月 23 日 0900JST の地上天気図

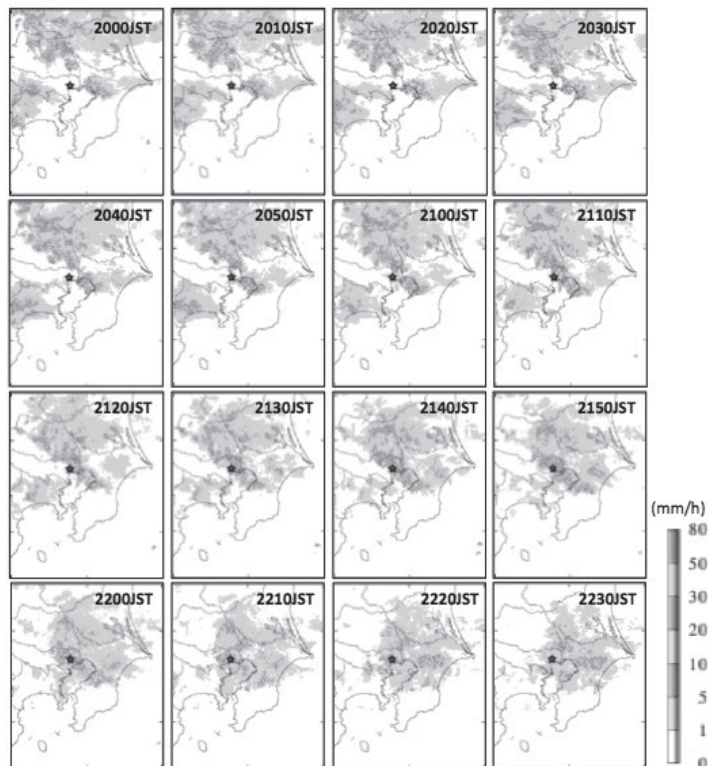


図 6 : 気象庁レーダーによる 2000JST~2230JST の降水強度分布 (6 月 23 日)
図中の星印はドップラーライダー観測点を示す。

2000JSTにはドップラーライダー観測を行っている東京都心部（図6中の星印）では降水は見られなかったが、北関東では降水強度が30 mm/hを上回る積乱雲が発生・発達した。2000JST以降、これらの積乱雲は1~2時間スケールで成長・衰弱を繰り返しながら全体的に北から南へ移動していく様子が見られた。ドップラーライダー観測域周辺では21時40分頃に強い降水が観測されており、アメダス練馬では21時40分からの10分で16.5 mmの降水が観測された。また千葉市では20時10分から10分で12 mmの降水があった。

一方モデルで予測された降水予測を図7に示す。コントロールラン（解析値から得られた初期値に人工的な誤差を与えないで計算した数値予報）では2000JST~2300JSTにかけて北関東から降水システムが時間とともに南下していく様子が再現されている。レーダーで観測された東京都市域周辺の個々の積乱雲の発生・発達過程は見られなかったが、千葉市周辺で発生した積乱雲についてモデル内でシミュレートすることができた。

2000JSTでは東京湾から北関東にかけて南~南南西風の流入があったが、2100JSTには北関東から千葉にかけて風向が西~北西の風に変化した様子が見られる。この時刻に東京湾からの南西風と北西風との収束域で積乱雲が形成した。2200JSTには北関東からの北西風は2100JSTより増大し、千葉市付近での風の収束が顕著になるとともに積乱雲が発達していった。2300JSTには東京湾で卓越していた南西風も西~北西風に変化するとともに個々の積乱雲の発生・発達も見られなくなった。総観場の天気図では前線の通過や低気圧の通過は見られなかったが、メソスケールの前線が関東地方を通過し、そのタイミングにおいて都市部周辺で個々の積乱雲が発生・発達し、局地的な大雨をもたらしたと考えられる。

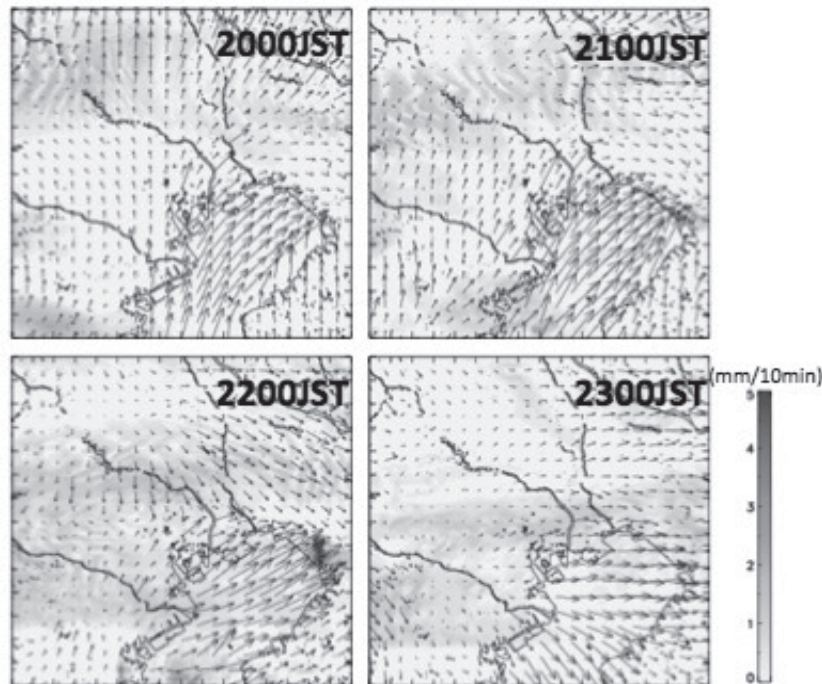


図7: 数値予報モデルによりシミュレートされた6月23日2000JST~2300JSTの10分間降水量分布と地上風向風速分布（シェードは降水量を、ベクトルは風向風速分布を示す）コントロールラン

次に同じ2015年6月23日の事例について1800JSTにドップラーライダーの観測データを同化して、コントロールランと同じ領域、計算時間でシミュレーションを行った。図8はデータ同化により予測された降水量分布からコントロールランで予測された降水量の差分を示す。

図 7 のコントロールランと比較すると、2200JST の東京湾北東部で降水を予報している箇所がより強い降水強度を示すようになり、またその降水の発生箇所も南下したため現実のものに近づいた。

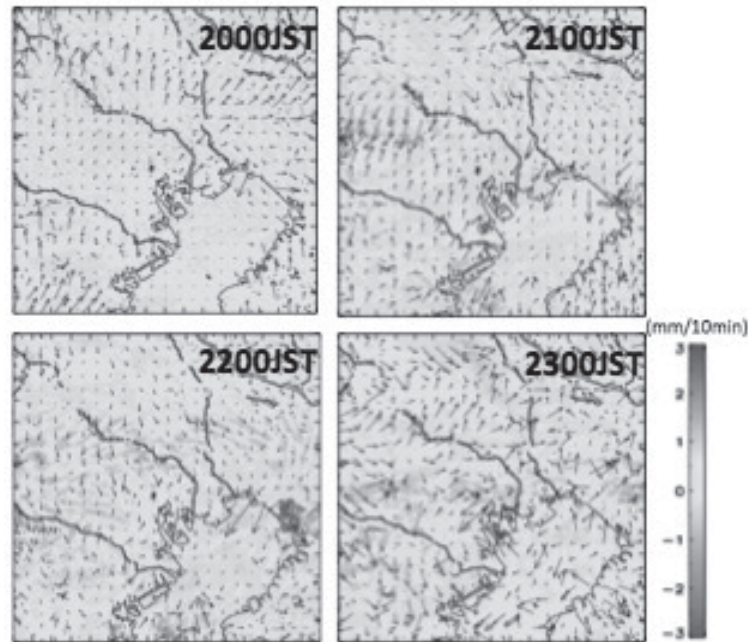


図 8: 6 月 23 日における 3 次元変分法によりシミュレートされた降水量分布
地上風向風速からコントロールランとの差分(寒色系は 3 次元変分法によりシミュレートされた降水量が多い時の差分を、暖色系はコントロールランの方が多量時の差分を示す)

全期間を通じてコントロールランよりデータ同化を行った方が北関東から北風がより強く表現されている。今回のデータ同化では観測場所の西側はビルの影響で欠測が多いため、観測点の東側の風向風速成分をデータ同化に使用した。そのためその影響は風下側である千葉方面に現れたものと見られる。

上記の関東平野全域でのモデルの結果を比較する。図 9 に 2100JST におけるコントロールランと 3 次元変分法によりシミュレートされたものの降水強度を示す。この図で比較したところ北関東の降水においては発生場所、降水強度共に大きな差は見受けられない。千葉市で発生した降水はデータ同化後の方が位置も降水強度も改善されたのに対し、こちらの現象には大きな変化が見られない理由として考えられるのは、データ同化した領域は東京都心部における日本橋三井タワーを中心に半径 3 km のエリアのみである。またデータの欠測が多い西側の領域は使っていない。観測サイトから地理的距離の近い千葉市での降水は、観測データによる風の効果がデータ同化時に強く反映されているため、より現実のものに近づいたのだと思われる。ドップラーライダー観測の風下側であり、有効なデータとして採用した東側であることから、千葉市に流入する風の流れをより精度よく捉えることができ、これによりモデルの予報精度が向上したものと考えられる。一方、北関東で発生した孤立型の積乱雲に対しては、観測サイトからの距離が遠すぎるため、また風上側であったためにデータ同化を行っても大きな影響を及ぼさなかったものと考えられる。

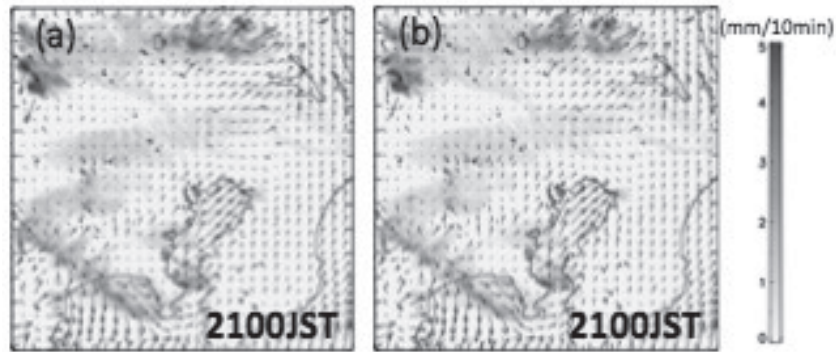


図9:(a):コントロールランでシミュレートされた降水量分布
(b):3次元変分法によりシミュレートされた降水量分布

5.2 停滞前線型

2015年9月6日は停滞前線に湿った気流が流れ込み、東京都心部や関東周辺で局地的な大雨となり竜巻等の気象災害が発生した事例である。この事例では関東周辺で4件もの竜巻が発生した。

図10は2015年9月6日0900JSTの地上天気図である。東シナ海に998 hPaの低気圧が存在し、そこから伸びる停滞前線が日本の太平洋沿岸にかかっている。また日本の東海上には高気圧があり、関東地方は高気圧の周辺をまわる南風となっていた。日本のはるか南には熱帯低気圧が存在し、総観場では関東地方は温湿気流が流入しやすい条件が整っていた。

2000JSTにはドップラーライダー観測点から南西方向に大きな雨域が存在し、その中に強い降水帯が神奈川県付近に存在した。降水強度30 mm/h以上の強雨域は時間の経過とともに北東に伸びるとともに線上に分布し、2050JSTにはドップラーライダー観測点付近に達した。2100JST～2140JSTにかけて観測サイトを強い降水帯が通過し、この時間にアメダス東京では34 mm/hの降水が観測された。2140JST以降東京都市域では強雨域は見られなくなり、茨城県方面に強雨域は移動した(図11)。

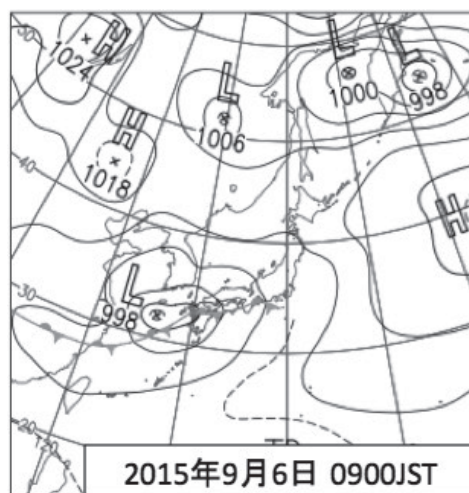


図10:2015年9月6日0900JSTの地上天気図

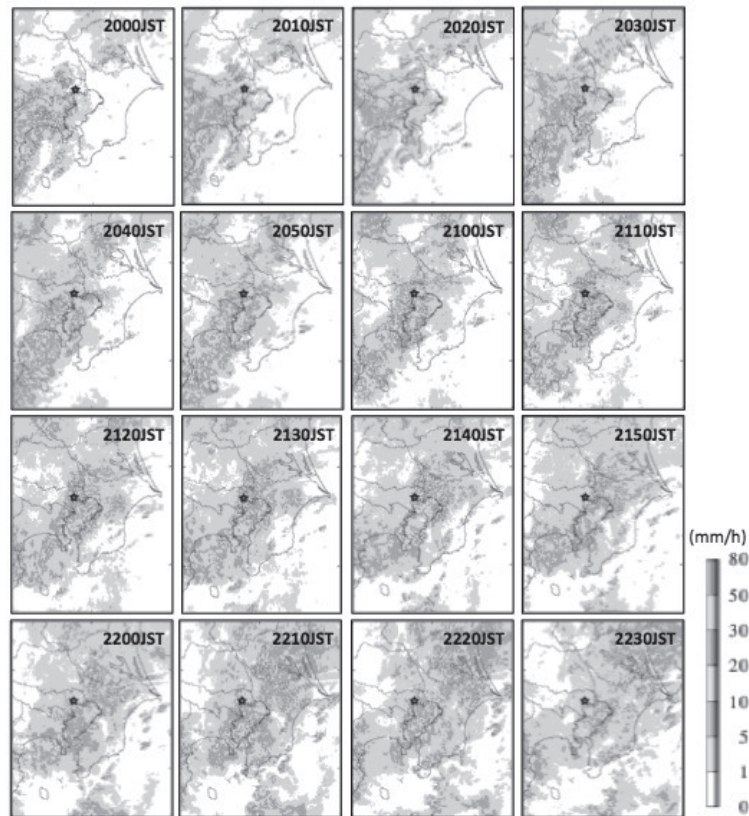


図 11：気象レーダーによる 2000JST～2230JST の降水強度分布（9月6日）

図 12 はコントロールランにおける 2000JST～2300JST の 1 時間ごとの降水分布と地上風向風速分布を示す。モデルでの結果は、東京湾を抜ける風との収束を捉えており、東京湾内で発生している強い降水の再現に成功したことを示す。2000JST に東京都内で見られる降水帯は東京湾を通過する南東風の先端付近の収束域で形成されており、降水帯の北西側領域では相対的に風が弱くなった。2100JST には 2000JST と比べて降水帯が線状に広がり、東進している様子が見られた。降水帯東側では南東風が流入し、北東から南西に伸びる収束帯が維持された。2200JST では降水帯は 2100JST とほぼ同じ位置に停滞しており、同時間帯に東京都市域で強雨をもたらした。一方、2300JST にはこれまでの時間に見られた南東風の流入が弱まり、さらに降水帯は南東方向に移動し、東京都市域では降水が現れなくなった。東京都市域で観測されたこの事例にドップラーライダーのデータを同化した結果を次に示す。今回のデータの同化は、同化の開始時間を 1800JST からの 6 時間積分のものと 1500JST からの 9 時間積分の二つ用意した。1800JST での観測データには風向や標準誤差の値には大きな変化はなく、一方 1500JST の方では風向や標準偏差の値が大きかった時間のものである。

(a)の事例では、3次元変分法の降水領域の方が少し北側に出ていることが確認出来る。データ同化することで降水領域が東京に少し近づいている。しかし現象そのものが停滞前線による天気図スケールのもだったため、3次元変分法によるデータ同化では6月23日の小さなスケールでの事例と比較すると、非常に効果が薄くただ同化するだけで大きな精度の改善には至らないと考えられる。一方、(b)の事例では降水帯の位置がより東京に近づいており、降水位置が大幅に改善された。また東京湾から吹き込む風の流れが強化されたことも確認出来る。(b)の線状降水帯の北の部分で北西に広がるような降水帯も発生しており、レーダー画像と比較しても、その降水の場所の精度が改善されていることが分かる。今回の結果で示されたことは、(a)の事例の様に一様な風場を同化してもある程度の効果を得られるが、風向が変わったタイミングや標準誤差の大きくなった時の細かな風のゆらぎなどの

挙動を、ドップラーライダー観測なら高分解能で捉えることが可能であるため、そのタイミングの同化をすることでモデルの結果に大きな影響を与えることが出来る。当初、9時間積分は6時間積分よりも現象の発生までに時間が長いので予報精度も落ちると考えていたのだが、時間が長くなるという一概に予報精度が落ちる訳ではないことが判明した。今回の事例の結果より、ただデータを同化するだけではなくそのデータの同化のタイミングを適切に選択することで、降水予報の精度をより向上させることが可能になると考えられた。

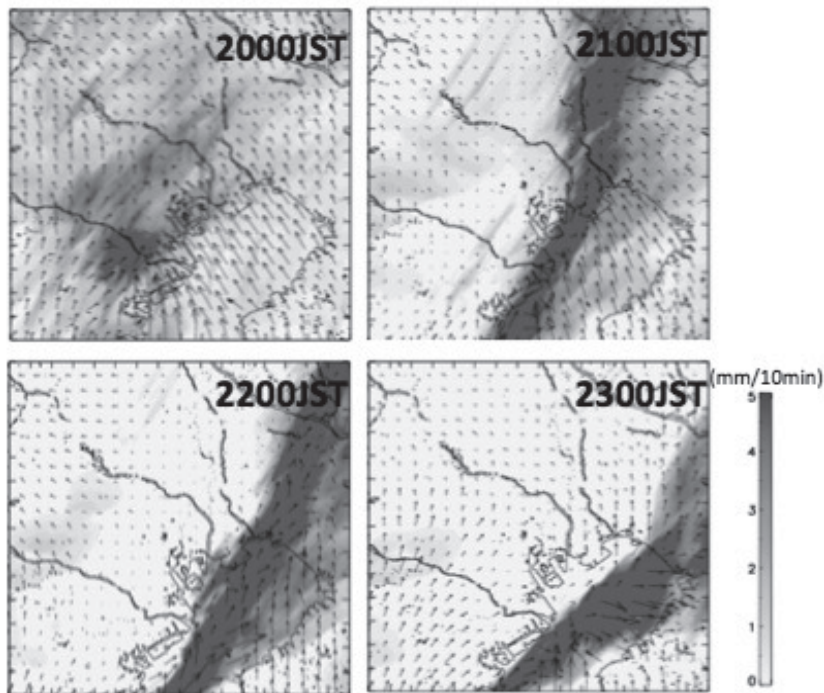


図 12： 数値予報モデルによりシミュレートされた 9 月 6 日 2000JST～2300JST の 10 分間降水量分布と地上風向風速分布（シェードは降水量をベクトルは風向風速分布を示す）コントロールラン

5.3 台風通過型

図 13 に 2015 年 9 月 9 日 0900JST の地上天気図を示す。東海付近には中心気圧が 990 hPa の台風 18 号が存在し、日本の東海上には中心気圧が 970 hPa の台風 17 号が存在している。関東付近は台風 18 号の前面の南風場と台風 17 号の北西側の東風場が流入する領域に位置していた。また、北海道の北に存在する 1028 hPa の高気圧から北東風が卓越する場となっており、台風 17 号の縁辺流との間に停滞前線が形成され、その西端が関東地方に伸びていた。

図 14 は観測サイト周辺で強い降水があった 1430JST～1700JST の 10 分毎の気象レーダーデータを示す。1430JST には観測サイトの西に総観場の風の収束に伴うと見られる収束域に対応する線状降水帯が南北に存在している様子が見られる。観測サイトの北側には複数の積乱雲で形成されている降水域が見られるが、観測サイトでは降水域は見られなかった。1430JST から 1520JST にかけて観測サイト西側に存在している線状降水帯が東進し、1520JST から観測サイト周辺でも強雨域が到達した。その後、線状降水帯は個々の積乱雲の衰弱、発生を繰り返しながらほとんど停滞していた。

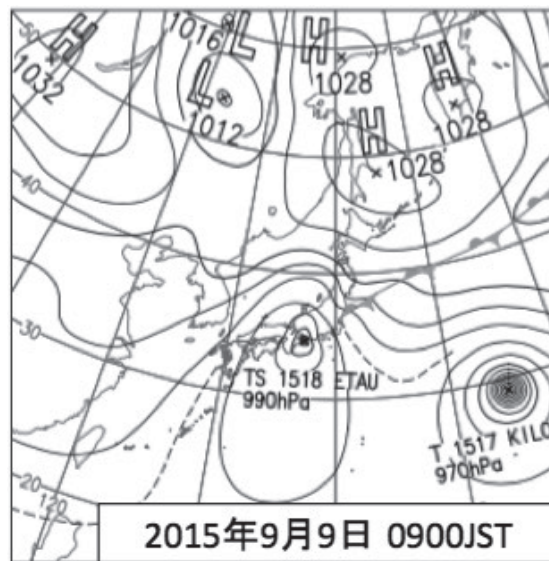


図 13 : 2015 年 9 月 9 日 0900JST の地上天気図

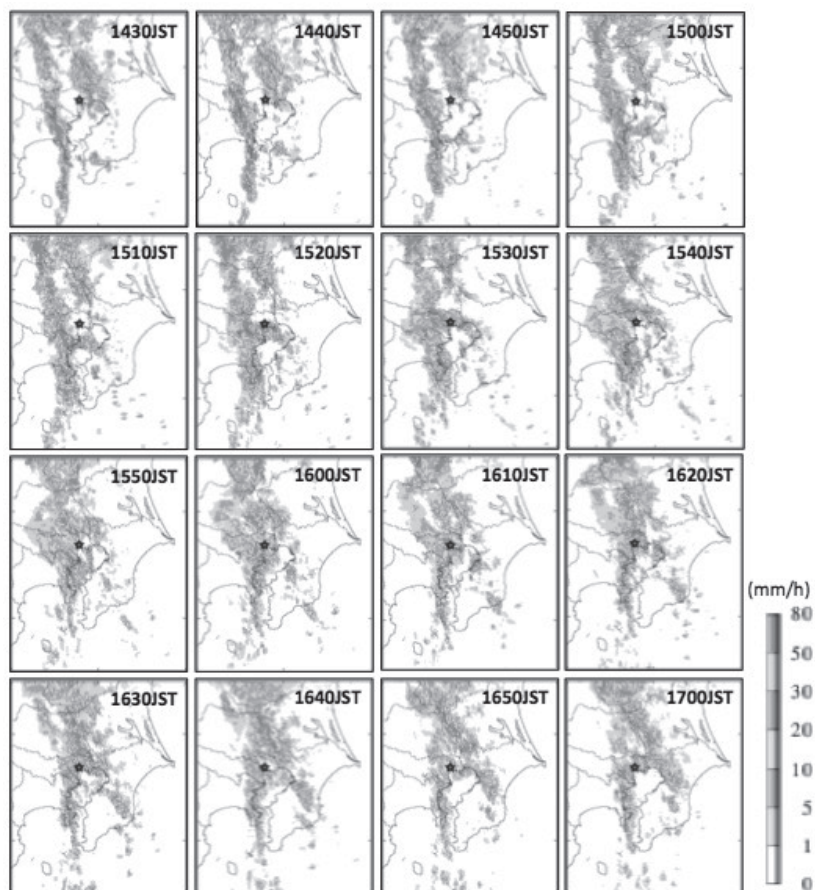


図 14 : 気象レーダーによる 2000JST～2230JST の降水強度分布 (9 月 9 日)

数値予報モデルによるコントロールランで線状の降水帯が予測されている（図 15）。1400JST では現実より位置が東へずれているが南北に数 100 km のスケールを持つ線状降水帯が再現されており、この線状降水帯は降水帯東側の南東風と西側の南南東風の境界付近で形成されている。1500JST には降水帯は前時間に比べて幅が広がり、ほぼ同じ位置に停滞した。レーダーデータからも線状降水帯の幅が時間とともに広がる様子が見られるが、数値予報モデルでは降水帯東側の南東風と西側の南から南南東風の収束が顕著であることが見られ、この幅の広がりは総観場の風の収束強化によるものと考えられる。この収束域は少なくとも 1600JST、1700JST にかけて維持されており、ほぼ同じ位置に停滞する原因の1つであると見られる。台風 18 号と台風 17 号の縁辺流の流入に伴う風の収束の様子を、現実大気と同様にモデル内でも再現することができた。降水の位置に関して MSM とモデルであまり大きな差が見られないのは、今回の事例が台風同士の風の収束による大規模スケールのもののため、5 km 分解能の MSM でも比較的精度よく再現できているためである。

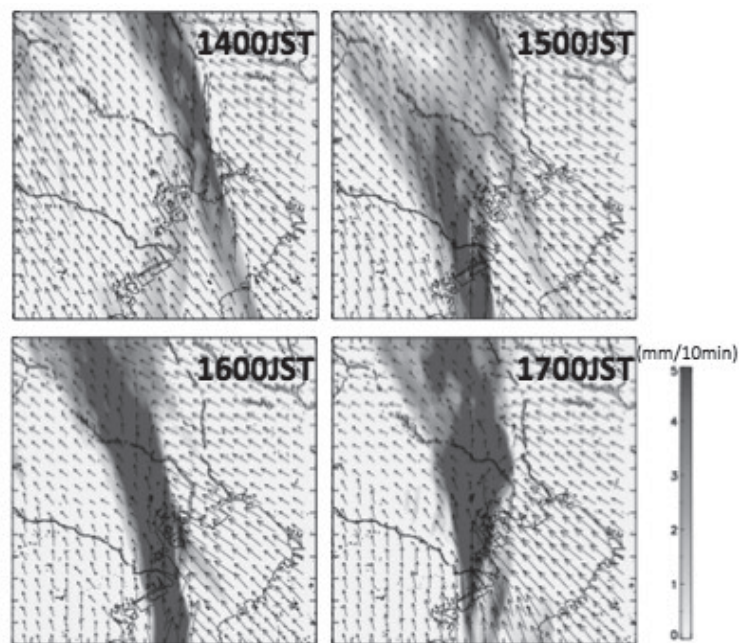


図 15 : 2015 年 9 月 9 日の数値予報モデルで再現された 1400JST から 1700JST の降水量分布と地上風向風速分布（シェードは降水量、ベクトルは風向風速を示す。）

ドップラーライダーで得られた観測データを数値予報モデルに同化した結果を図 16 に、3 次元変分法からコントロールランを引いた差分を図 17 に示す。図 17 における 3 次元変分法とコントロールランの差分を見ると、全体的には両者に大きな差は見受けられなかった。この原因として考えられるのは、この事例は台風通過型という大規模スケールな気象場のため、ドップラーライダー観測のデータ同化領域では小さすぎたため、モデルの計算途中で背景風にほとんど平均化されて、影響がほとんど見られなくなってしまったものと考えられる。6 月 23 日のような孤立型積乱雲による降水の予報には 3 次元変分法でも十分な効果が見られたが、9 月 9 日のような大規模スケールの気象場に対して今の 4 km 四方の観測データでは空間スケールが圧倒的に異なるため、大規模スケールの風場が支配的である時はコントロールランのみで十分に精度が出るものと考えられる。

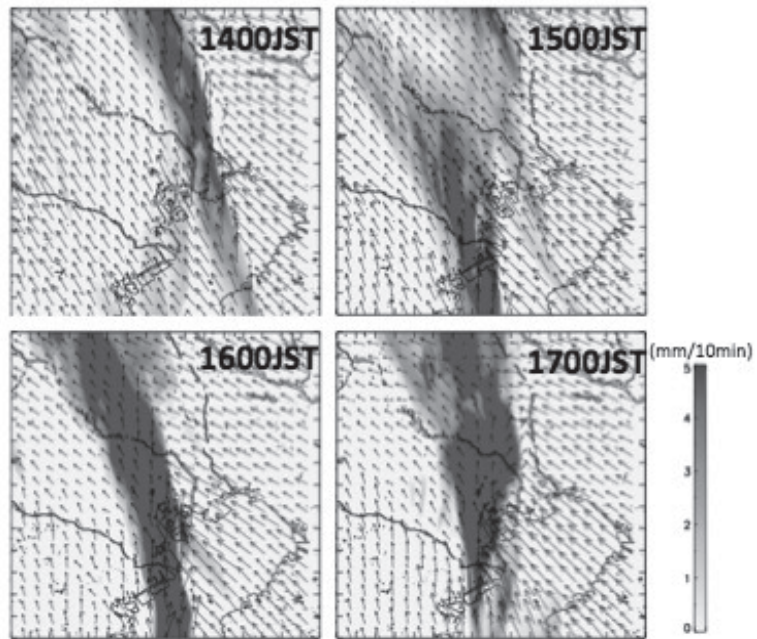


図 16 : 3次元データ同化を行った 1400JST から 1700JST の 1 時間毎の降水量予測分布

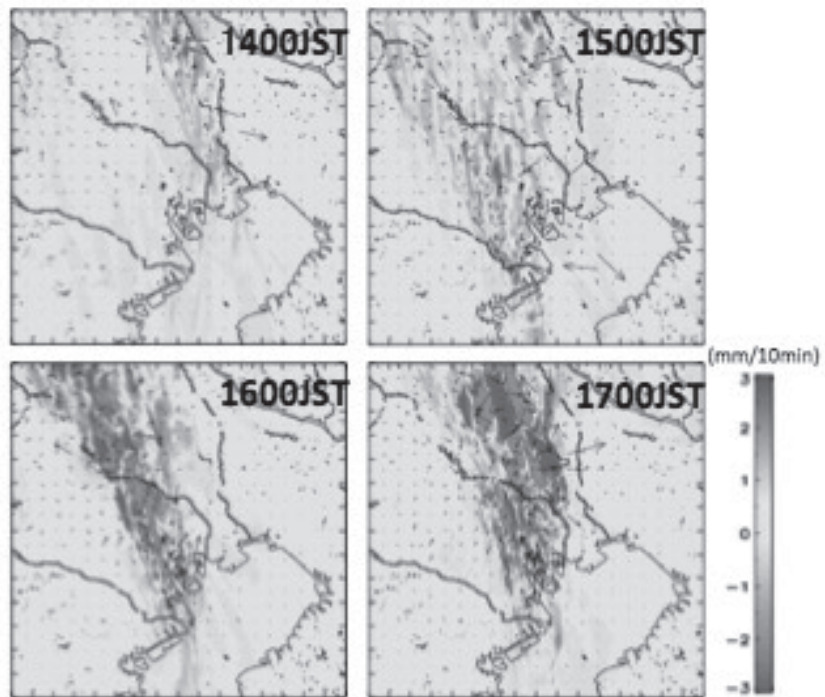


図 17 : 9 月 9 日における 3次元変分法とコントロールランの降水量と風向風速データの差分

6. 議論

モデルのコントロールランと気象庁 MSM との比較では、200 m 分解能まで上げたシミュレーションの方が、MSM よりも細かいスケールの現象を捉えることができた。またそのシミュレーションにドップラーライダー観測のデータを同化することで、よりその予報精度が向上することが前節まででわかった。しかし3次元変分法によるデータ同化をしたから必ず予報結果がよくなるわけではなく、大規模スケールにおける気象場に関するシミュレーションでは、精度の改善があまり見られなかった。理由としては空間スケールの大きな現象に対して、ドップラーライダー観測で得られた高分解能のデータを同化しても、その空間スケールがあまりにも小さすぎることが1つの要因として考えられる。例えば9月9日の事例のように、スケールの大きなものに対しては5 km 分解能の気象庁 MSM でもある程度の予報ができています。しかし6月23日の事例に代表される、短時間のうちに発生・発達した積乱雲による時間的・空間的に小さなスケールの現象に対しては、5 km 分解能の気象庁 MSM ではうまく予報はできていない。前線などの大きな場ではなく、個々の積乱雲による局地的な降水に関する予報は、現在用いられている気象予報モデルでは十分な予報精度は得られない。本研究で対象としているスケールの小さな現象に対しては、ドップラーライダーの高分解能のデータを数値予報モデルに同化することが有効であると考えられる。

またデータ同化の結果に、観測場所からの距離がモデルの結果に影響を及ぼすことが考えられる。6月23日の事例では、データ同化の結果が観測場所から比較的近い千葉市での降水は位置や降水強度がデータ同化をした結果改善されたが、観測サイトから離れている北関東で見られた降水に関しては大きな変化が見られなかった。これは千葉県方面が観測サイトの風下側であったためデータ同化の効果が大きく影響したと考えられる。現在は半径3km かつデータ取得率の高い西側のほぼ半分の範囲での観測データを同化しているが、風下側へはよりその同化の影響が及ぶと見られる。しかし半径3 km というのは観測範囲としては小さく、観測範囲が例えば10倍の30 km に拡大したもののデータを同化することができれば現在より飛躍的な精度の向上が期待される。

一方、降水予測には大気変動の大きい情報を持つデータを同化することが予報精度の向上に影響を与えることが考えられる。9月6日の事例では、6時間積分に比べて9時間積分でのデータ同化結果の方が現実に近い予報値が得られた。6時間前のデータを同化しても、その時の風が水平一様なものを同化するのではあまり効果が得られなかった。一方、9時間前のデータ同化であっても、その時の風況が大きく変動して細かな風の変動が観測されている時のデータ同化では6時間積分の結果と比べて風下側に効果があることが明らかになった。初期値からの計算時間が長くなると予報精度の劣化が予想されたが、それに反しドップラーライダー観測から得られる高分解能データは、特に風の場に変化が起こったタイミングで大きな効果を果たした。風向や標準誤差が大きく変化しているタイミングをデータ同化することで、モデルの結果に好影響を与える可能性が考えられた。

現在はドップラーライダー1台のみの観測であるが、2台以上設置することができればデュアル観測ができ、2方向のベクトルを得ることができるためより正確な風の情報を手に入れることができる。また変分法のデータ同化手法として本研究では3次元変分法を採用したが、時間的に連続な観測データを同化することが可能になる4次元変分法を行えば、さらなる予報精度の向上が見込まれる。

7. 結論

分解能数値モデルとドップラーライダー観測による都市における極端気象メカニズム解明を行った。またモデルにドップラーライダー観測で得られたデータを同化する手法を用いて、モデルの精度をより向上させた。先行研究による近年頻発している豪雨の特徴と、本研究の対象となる都市における局地的豪雨の早期予報の重要性や社会的要望を述べ、観測に使用したドップラーライダーについて詳細

に述べた。ドップラーライダー観測は、東京都心部の日本橋三井タワービルの屋上に設置することで、都市における大気下層の細かな風の挙動を得ることを主目的として実施した。

東京都内の地上アメダス観測所で10分間に5mm以上の強い降水が確認された事例に絞り、モデルを走らせ豪雨のメカニズム解明を行った。計算資源は京都大学が所有するA-KDKを用いた。A-KDK内に気象庁とNCEPが配信する客観解析データを導入し、WRFモデルに初期値・境界値としてデータを導入した。2015年6月1日から11月30日までの半年間における、東京都内で1mm/h以上の降水が発生した68事例から、10分降水量5mm以上の強い降水が存在した事例の10事例に絞り、その中でも特に降水強度が強かったタイプの異なる3事例に関してシミュレーションを行った。モデル内では計算領域をネスティングすることにより、分解能を1km、200mと高分解能化した。ドップラーライダー観測で得られたデータを3次元変分法のデータ同化手法に用いることで、現実の大気現象に近づけることに成功した。また風向の変化したタイミングや標準誤差の大きな情報を持つ観測データの同化もモデルの結果に改善が見られる。しかしどんな事例でもデータ同化すれば結果がよくなる訳ではなく、大規模スケールの風の場合が卓越している事例に関しては3次元変分法によるデータ同化では大きな改善は見られず、コントロールランのみで十分に精度のよい予報ができていた。以上より、ドップラーライダーで得られる観測データは非常に高分解能のため、気象庁MSMでは予報が困難な時間的・空間的に小さなスケールの場、または風の変動の大きな観測データの情報を同化する際には有用であると考えられる。一方、大規模スケールの場ではコントロールランのみでも十分であるとされる。

現在のドップラーライダーの観測は1台のみで実施しているが、今後は高性能のドップラーライダーを東京都心部に複数台設置し稠密観測を進めることで、より広範囲にかつ正確で細かな風の動態を得ることができ、新たな知見が得られることが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたりまして、京大生存圏研究所の大型計算機共同利用にてA-KDKを使用させて頂きました。ここに心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Murray, V. and Ebi, K. L., IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX), *J. Epidemiol. Community Health*, **66**, 759-760, 2012.
- 2) 気象庁, ヒートアイランド監視報告2014.
- 3) Seko, H., Miyoshi, T., Shoji, Y. and Saito, K., Data assimilation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system: intense rainfall event over Japan 28 July 2008, *Tellus A*, **63**, 402-414, 2011.
- 4) Seko, H., Hayashi, S. and Saito, K., Processes generating convection cells near Sumatra Island in the monsoon season, *Pap. Meteorol. Geophys.*, **63**, 57-67, 2012.
- 5) Kameyama, S., Ando, T., Asaka, K., Hirano, Y. and Wadaka, S., Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing. *Appl. Opt.*, **46**, 1953-1962, 2007.

著者プロフィール



古本 淳一 (Jun-ichi Furumoto)

<略歴> 1997年京都大学工学部電気電子工学科卒業/2002年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了 博士(情報学) / 同年日本学術振興会米国DC1/2009年京大生存圏研究所助教、現在に至る。<研究テーマと抱負> リモートセンシング技術開発 境界層における物質エネルギー輸送・循環過程の解明 気象災害の低減に向けた地域コミュニティの構築<趣味など> 研究成果の社会実装・ベンチャー起業