

生存圈研究

The logo for RISH (Research Institute for Sustainable Human Societies) features a stylized 'R' composed of several parallel diagonal lines in shades of blue, green, and yellow, followed by the word 'RISH' in a bold, blue, sans-serif font.

No. 16

2020 年



京都大学 生存圏研究所



「生存圏研究」は、京都大学生存圏研究所がその活動と生存圏の研究に関する報告を行うことを目的として年一回発行する紀要です。本第16号は、令和元年度の成果を基に発行します。生存圏の研究に関心を持たれる機関や研究者に広く行き渡るよう無料で配布しています。お問い合わせは当研究所までお寄せ下さい。

〒611-0011 宇治市五ヶ庄、TEL: 0774-38-3346

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

編集委員

矢野 浩之

中川 貴文

田中 聡一

岸本 芳昌

小嶋 浩嗣

畑 俊充

反町 始

武田 麻友

高橋けんし

馬場 啓一

日下部利佳

目 次

総 説

樹皮ウォッチングのすすめ.....	1
杉山 淳司	
オーロラで探る宇宙生存圏の現在・過去・未来.....	7
海老原 祐輔	
地球と宇宙の境界を診る.....	17
横山 竜宏	
レーダーで診る大気の動き	
－信楽とインドネシアからの研究紹介－.....	23
橋口 浩之	
蛇紋岩地域の森林生態系における葉リター分解.....	31
中村 亮介	
木材細胞壁成分同士はどのように接着しているのか？	
－リグニン-多糖複合体の構造解析－.....	37
安藤 大将	

解説・資料

重要文化財願興寺本堂保存修理工事における用材調査 第二報.....	45
田鶴 寿弥子, 杉山 淳司	

研究業績.....	51
-----------	----

樹皮ウォッチングのすすめ

杉山 淳司^{1,2*}

An encouragement of bark watching

Junji Sugiyama^{1,2*}

概要

コルクガシから収穫されるワインの熟成に欠かせないボトル栓や、伝統建築の屋根材として利用される檜皮、樺細工に利用されるサクラの樹皮などは、日常見ることのできる樹皮利用の典型な例である。一方植物体においては、樹皮は強い紫外線や乾燥から樹体を守るという大切な役割をはたしている。そういう機能は共通でも、見た目は、平滑なものから、クロマツのような亀甲模様、ケヤキやアキニレのようにうろこ状に剥げ落ちるもの、その他、縦に裂けるもの、横縞状のものなど様々である。この多様性は、葉の特徴と同様に、ツリーウォッチングには欠かせないものである。そんな樹皮を楽しみながら、樹皮に潜む面白い特徴について樺細工を例に解説する。

1. 樹皮のいろいろ

さて読者の方々は見分けることができるであろうか？京都御所やその周辺に植栽された樹木の一部を図1に示す。上から一段目が、左から右の順にアラカシ、アカマツ、ハルニレ、イチイガシ、イチョウ、二段目がイヌマキ、イロハモミジ、カリン、ケヤキ、コメツガ、三段目段目がクロガネモチ、クロマツ、クスノキ、モミ、サクラ、そして最後の4段目がサルスベリ、シリブカガシ、スズカケノキ、トチノキ、ユリノキである。アカマツ、クロマツ、カリン、サルスベリ、スズカケノキなどは特徴が際立っているので、容易に区別ができるであろう。葉っぱと同様に、樹皮にも樹種特性があり、特徴や見分け方を整理しておく、山歩きや町歩き（街路樹巡り）も楽しさを増すであろう。昨今流行りの人工知能を利用して、撮影した1400枚の樹皮の画像をコンピューターに学習させて、樹種を特定するモデルを作成したのが図2である。なんと識別率は94%となった。携帯端末で樹皮の写真を撮ると樹木名の候補がでてくるようなアプリも早晚現れるだろうが、まずはその多様性を目で見て楽しめるのがいいだろう。

さて、図1に戻って観察を続けると、樹皮には様々なテクスチャーがあり、オーソドックスな縦縞模様に始まり、アカマツ（最上段左から2番目）、クロマツ（3段目左から2番目）のような亀甲状のものや、スズカケノキ（最下段左から3番目）やケヤキ（2段目左から4番目）のような鱗状のものがよく目につくであろう。一方、サクラは、3段目左から5番目に示したように横巻きである。樹皮は本来、樹木が肥大生長するにつれ水平方向に引っ張られる。最終的には、樹体より剥離して土壌に戻るようデザインされているのであろうから、縦割れや鱗状は理解できるとして、なぜ横に巻いているのか、以前から疑問に思っていた。まさに、樹幹がはち切れそうなTシャツを着ているかのごとくである。そこに、サクラ樹皮の優れた物理的な特性が隠れていたのである。

2020年6月30日受理。

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

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

* E-mail: sugiyama.junji.6m@kyoto-u.ac.jp



図1：樹皮の色々。樹種は本文参照。

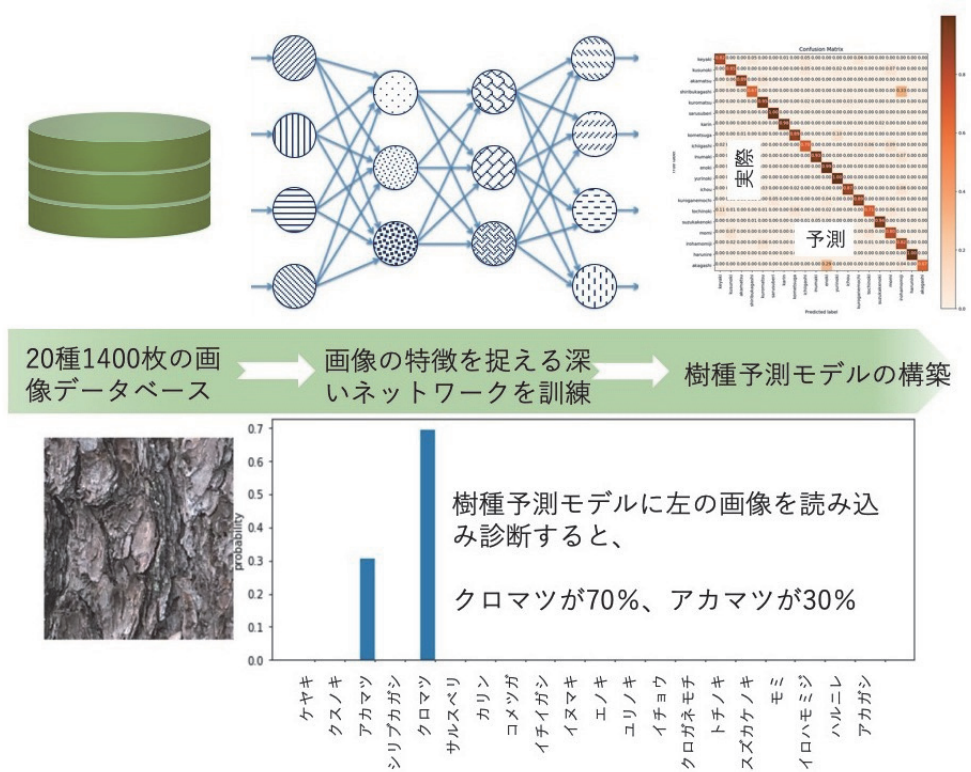


図2：AIを利用した樹皮画像による樹種識別のフロー。深層学習のモデルはVGG16¹⁾。

2. サクラの樹皮

樺細工とは日本の伝統的な木工芸品であり、秋田の角館の名産品としても知られている。カバと呼ばれる光沢のある樹皮は、実はサクラ属の樹皮である。茶筒、小箱、煙草入れの表面や、あるいは曲げわっぱの接着部を縫い綴じる紐として利用されている。サクラ属の樹皮は、図3の左図に示すように、コルク形成層が活発に活動する梅雨時期に、容易に剥ぎ取ることが可能である。薄いものはまさにフィルムと呼ぶにふさわしい、硬質で均一なもので、光源にかざすと半透明で独特のワインカラーを呈する。現在も利用されるサクラ樹皮利用の起源は少なくとも弥生時代に遡るといわれる。



図3：宇治構内植栽のソメイヨシノの若い枝。梅雨時期に採取して、コルク形成層の外側にある外樹皮を剥離したところ（左図）とその樹皮の光透過性（右図）

2.1 古代に始まる利用²⁾

サクラの樹皮は、古代人にとっても、強靱で水に強く、紐として利用価値が高いと考えられ、利用されてきた。北陸地方を代表する弥生時代の集落遺跡として、古くから知られる八日市地方（じかた）遺跡（石川県小松市日の出町）の調査では、多くの木製品が出土しており、特に農耕具、漁撈具、食事具、武器、服飾具などの生活全般に及ぶ内容をもつことに加え、未製品が多いことから、その製作工程や技術系譜を考えるうえで、全国でも特筆すべき価値があるとされる。樹皮は全て紐として利用され、特に未製品のものの調査から、サクラ樹皮の収穫は概ね直径8から20数センチの小径の幹あるいは枝材であろうと推定されている。

2.2 サクラ樹皮の引張性能と組織構造³⁾

さて、極端な応力状態にある樹皮には、どのような構造特性がみられるだろうか。試料にオオヤマザクラ（*Cerasus sargentii*）の樹皮を用い、ダンベル状の小片を押し抜いて引張試験を行った。図4がその結果である。気乾状態の試験片は、100%から300%の驚異的な伸びを示した一方で、一度絶乾したのちに試験直前までデシケータに保管した試験片は降伏ののち直に破断した。また気乾状態における含水率は約5%で、密度は1.12、ヤング率は0.9~1.6GP、破壊靱性値は50MJ³であった。特に靱性特性は、昨今盛んに研究されるナノセルロース複合体の5~10倍大きい値を示した。

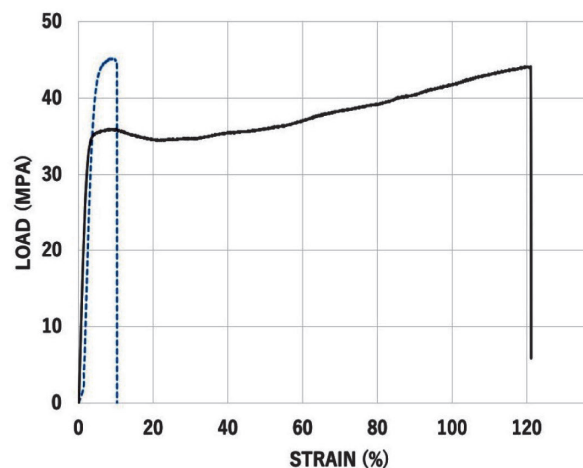


図4：サクラ樹皮の応力ひずみ曲線。実線は気乾状態のもの、点線はオーブンドライ後のもの。

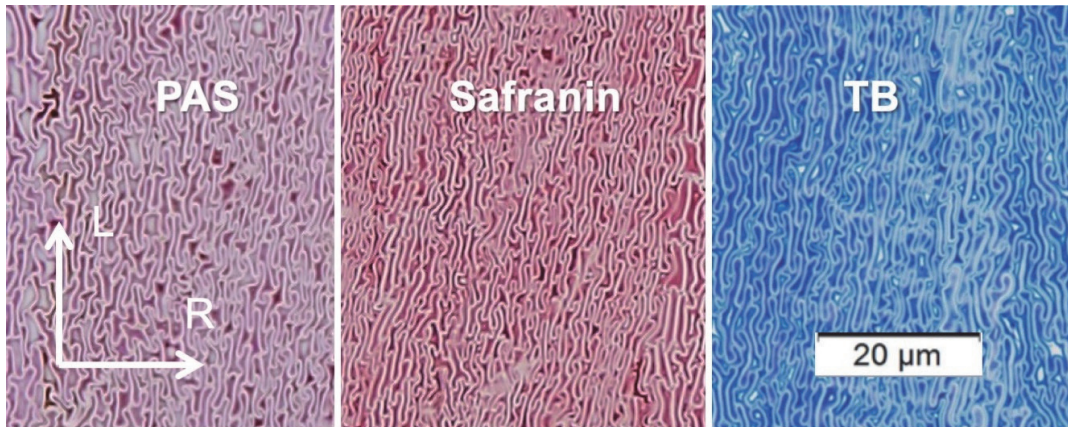


図 5：樹皮の放射断面（柁目に相当）。 左より、PAS 染色法、サフラニン染色法、トルイジンブルー染色法による。

ロバート・フックが初めて顕微鏡で観察したことでも知られる、所謂コルクガシの樹皮（ワインの栓の原料）の構成成分は、コルク細胞とよばれる比較的直方体に近い多面体である。一方、サクラの樹皮を構成するコルク細胞は、細胞の長軸が水平方向に極めて長く、放射方向に扁平なリボン状であった。また、細胞は樹木の外側ほど放射方向に圧縮され、接線方向には伸ばされたような形状となっていた。

その柁目面切片の光学顕微鏡写真が図 5 であり、観察される断面はコルク細胞の長軸に対して垂直な面である。糖質、リグニン、セルロースに選択的な染色を施しても、細胞壁は同様に二層に染め分けられた。すなわち、どの染色剤にも染められない外層とすべてに染色される内層の二つである。

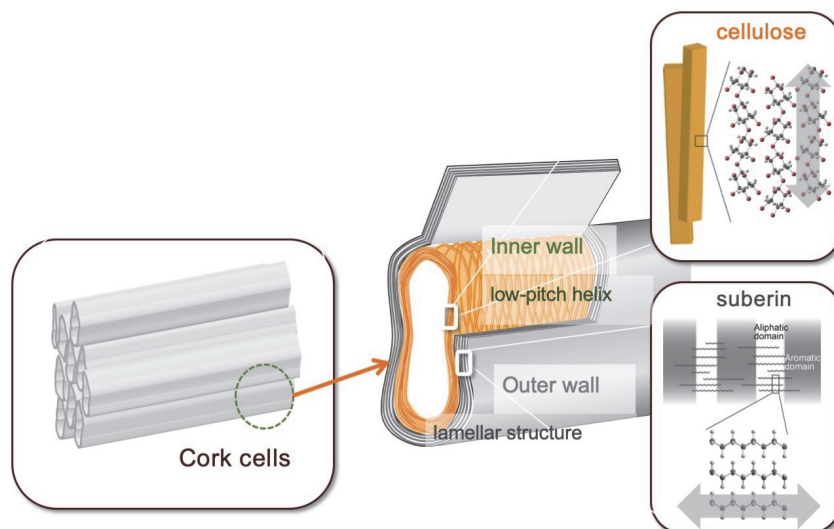


図 6：サクラ樹皮の層階状構造。木化層とスベリン層の二層からなる細胞壁を形成し、内層では水平方向にバネのようにセルロースマイクロフィブリルが螺旋を巻き、外層では細胞表面に垂直方向にスベリンの脂肪族鎖が並ぶ、という立体構造が明らかとなった。

偏光顕微鏡で観察すると、二層共に複屈折を示した。そこで鋭敏色検板を挿入して相加・相減を調べたところ、外層は屈折率楕円体の主軸方向が細胞の内側から外側に向いているのに対して、内層は層に対して平行に向いていることが明らかとなった。以上の相加・相減現象と電子顕微鏡による微細構造の観察結果を合わせると、次のように結論できた。まず、内層は通常の木材と同様にセルロースを骨格物質とする木化壁であり、外層はスベリンからなる。外層においては、スベリンの脂肪族領域と芳香族領域が交互に層状構造をなし、脂肪族領域の分子鎖が細胞壁に対して垂直に配向している。その模式図を図6に示した。

2.3 引張試験と微細構造変化の実時間測定²⁾

引張試験時には、合成高分子の冷延伸にみられるネッキング⁴⁾が観察された。それが試験片の全長に及ぶと同時に破断が生じることから、ネッキング状態における微細構造変化を調べることとした。そのために、引張試験下のサンプルをX線散乱ならびに回折実験に供して分析した。図7に示す実時間測定の網掛け部分には、図のサンプルの右端から左側に進展するネッキング領域がちょうどX線ビームに照射されたときのセルロースマイクロフィブリルの配向角度が変化を明確に示している。言い換えれば、サクラ樹皮が伸びるときに、マイクロフィブリルの螺旋が、あたかもバネが伸びるようにして解けていることが確認された。この機構は冷延伸とは大きく異なるものであり、サクラ樹皮に固有のものと考えてよいであろう。

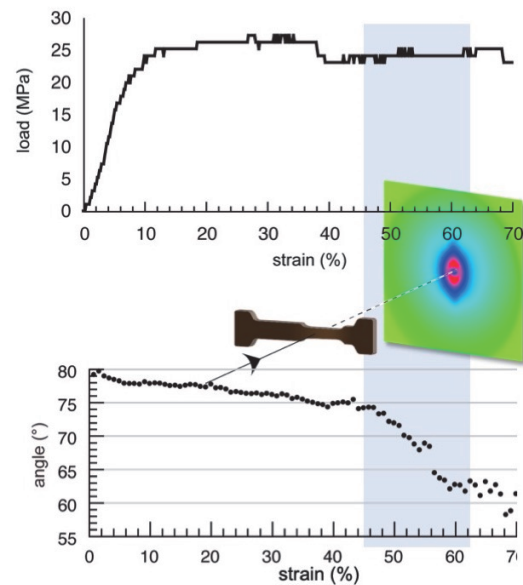


図7：放射光X線を用いた引張り試験時における微細構造変化の実時間解析。上図は応力-ひずみ曲線、下図はマイクロフィブリル傾角（細胞長軸とフィブリルの配向方向とのなす角度）-ひずみ曲線。

3. おわりに

以上述べてきたサクラ樹皮の驚異的な伸び（靱性：破壊に対する抵抗力）は、この素材を、我々が長きにわたり、紐として利用してきた理由の一つに他ならない。美しさと同時に、素晴らしい引張特性が際立つ素材と言える。さらに興味深いことは、乾燥することによって、その特性を失うことであろう。このことは死細胞の集合体である樹皮が、非生物的な環境因子、すなわち引張力と水分を利用して、「剥離して土に戻る」という物質循環を可能としたものであり、樹皮に共通の自己崩壊のメカニズムと言えるだろう。

謝辞

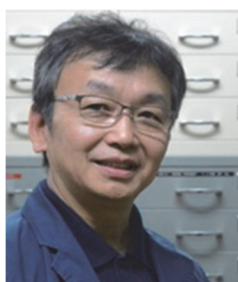
本研究は、考古学を専攻する浦蓉子氏（当時京都大学文学研究科大学院生）が持ち込んだサクラの樹皮を引っ張ったことに端を発する。実験初日は驚異的な伸びを示したのに対し、1週間後の再検証では直ちに破断した。原因を調べたところ、含水率が大いに影響していることを知り、研究として立ち上げた次第である。以降、小林加代子博士、木村聡博士に参加いただき、一つの成果としてまとめることができた。この場を借りて感謝申し上げる。

また、本研究の一部は、生存圏データベース（材鑑調査室）全国共同利用研究として支援を受けた。

参考文献

- 1) Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv:1409.1556, 2014
- 2) 浦蓉子「第XI章 樹皮製品」『八日市地方遺跡Ⅱ-小松駅東土地区画整理事業に係る埋蔵文化財発掘調査報告書, 第4部木器編』小松市教育委員会 pp.253-264, 2014
- 3) Kobayashi K, Ura Y, Kimura S, Sugiyama J. Outstanding toughness of cherry bark achieved by helical spring structure of rigid cellulose fiber combined with flexible layers of lipid polymers. *Advanced Materials*:30(6), 1705315, 2018
- 4) Ashby MF, Jones DRH, Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design. Pergamon. London, 1986

著者プロフィール



杉山 淳司 (Junji Sugiyama)

<略歴> 1983年京都大学農学部卒業／1987年東京大学農学部助手／1989 東京大学農学博士／1993年京都大学木質科学研究所助教授／2006年同大学生存圏研究所教授／2020年同大学大学院農学研究科教授、現在に至る。<研究テーマと抱負> 樹木細胞の多様性。複雑さの中から何が引き出せるか、新しい見方を学びつつ検討してみたい。

オーロラで探る宇宙生存圏の現在・過去・未来

海老原 祐輔^{1*}

Present, past, and future of space humanosphere as investigated through aurora

Yusuke Ebihara^{1*}

概要

オーロラは百～数百キロメートルの高さでおこる超高層大気の発光現象である。オーロラの直接の原因は宇宙から降り注ぐ粒子にあり、オーロラの形や色は降り込む粒子の分布や大気の組成で決まる。その究極の駆動源は太陽から吹き付ける太陽風（高速プラズマ流）と磁場にある。両者の勢いが増すと地球磁場との相互作用を通して磁気嵐やサブストームが起こり、オーロラは極めて明るく活発になる。すなわち、オーロラは太陽の影響を強く受けているのである。本稿では、最新の研究によって明らかになったオーロラの詳細な姿とその変動、古文書に残されているオーロラの記録から推定した過去の巨大磁気嵐、磁場が弱くなった将来の地球におけるオーロラの姿について俯瞰する。

1. はじめに

約 2600 年前の古代バビロニアの粘土板にはオーロラと思われる記録が刻まれている（図 1）¹⁾。世界各地でオーロラの記録は数多く残されており、オーロラは衆目を集めていたことがわかる。オーロラの原因はながらく謎であり、中世では遠くで起きている火事や刀と刀がぶつかったときの火花、天空に浮かぶろうそくなどがオーロラの原因として考えられていた²⁾。17 世紀にはオーロラに対する科学的考察がはじまり、ガリレオ、デカルト、ハレーなど多くの科学者がオーロラの謎に挑んでいる。写真技術が高まった 20 世紀初頭、ノルウェーのステルマーはオーロラを多点で同時に撮影し、三角測量の原理でオーロラは 90 キロメートル以上で光ることを割り出した。中には高さ 1100 キロメートルにも達する背の高いオーロラもあると報告している³⁾。オーロラが光る高さは熱圏と呼ばれる大気層の最上部にあたり、気圧は地上の数百万分の一、温度は数千度と過酷な環境である。今ではオーロラ



図 1：紀元前 567 年 3 月 12/13 日に発生したオーロラを記録していると考えられる（くさび）文字。VAT 4956, with the earliest datable auroral record in 12/13 March 567 BCE. (Yasuyuki Mitsuma's tracing of the photographs © Hisashi Hayakawa, taken courtesy of the Staatliche Museen, Berlin).¹⁾

は宇宙空間から地球に向かって降り注ぐ粒子からエネルギーを得た原子や分子が放つ光の集合だと理解されている。本稿では、オーロラに関する最新の知見を紹介するとともに、過去のオーロラを調べることでわかってきた宇宙の大変動、そして変わりゆく地球磁場のもと、予想される将来のオーロラと宇

2020 年 7 月 22 日受理。

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

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

宙環境について俯瞰したい。

2. 現在のオーロラの理解

オーロラは大気が自ら光を放つ発光現象であり、その意味においては雷に似ている。虹は太陽の光が反射することによっておこる現象で、オーロラとは仕組みが全く異なる。オーロラの代表的な色である緑や赤は酸素原子が放つ光で、青や紫は窒素分子イオンが放つ光である。緑や赤のオーロラが現れるのは、地球の大気に酸素が豊富に含まれているからである。酸素は地球誕生当初から豊富にあったわけではない。太古の地球に出現したシアノバクテリアなどの微生物が光合成によって酸素分子を作り出した結果だと考えられている⁴⁾。悠久の時を経て作られた酸素分子は約百キロメートルの高さに昇り、紫外線を受けて原子状の酸素となり、宇宙からやってくる粒子からエネルギーをもらい緑や赤の光を放つのである。オーロラと生物の間には間接的ながら繋がりとあると言えよう。

オーロラの形には様々な種類がある。東西方向にほぼまっすぐに伸びるアーク、やや不規則な構造を持つバンド、形をもったパッチ、空全体に広がるヴェイル、空高く上る筋状のレイなどがある。さらにバンドの一部が折りたたまれたフォールド、一部が巻き付いたカール、大規模な渦巻き構造を持つスパイラルもある⁵⁾。カーテン状のオーロラを真下から見ると一点からオーロラ広がって見えることがあり、コロナ・オーロラと呼ばれている。カーテン状のオーロラがたなびいたり次第にフォールド状に変わったりオーロラは様々に形を変えるが、そのしくみはよくわかっていない。

一枚に見えるカーテン状のオーロラは幾重ものカーテンから成っていることもある。その一枚一枚のオーロラの厚みはとても薄く、70メートル程度であるという報告もある⁶⁾。ボロフスキーはオーロラの形を作る原因として考えられている22の説を検証したが、どの説も70メートルの薄さを説明できないと結論づけている⁷⁾。オーロラの動きだけでなく、その薄さも大きな謎となっている。明るいカーテン状のオーロラの中には激しく明滅を繰り返す構造が埋め込まれていることがある。1秒間に3〜15回もの速さで明滅するものもあり、フリッカリング・オーロラと呼ばれている⁸⁾。最新の高感度カメラで撮影したところ、少なくとも1秒間に80回という速さで明滅している構造も見つかっている⁹⁾。電磁イオンサイクロトロン波と呼ばれる電磁波によって電子が変調を受けていると考えられている¹⁰⁾。

明確な形を持つオーロラはディスクリート・オーロラと呼ばれ、地球向きに加速された電子が原因だと考えられている。その仕組みは一昔前のテレビで用いられていたブラウン管に近い。ブラウン管は電子銃によって加速した電子を蛍光物質が塗られた面に照射して像を写し出す装置である。同じようにディスクリート・オーロラの上空には天然の電子銃があり、放たれた電子が大気というスクリーンに照射され、蛍光物質の面の代わりに大気が光るのである。オーロラの形は電子銃の配置で決まり、オーロラの明るさは天然の電子銃から放射される電子の総量におよそ比例する。ゆらめくオーロラはモノが動いているのではなく、電子銃がゆらゆらと動いているのである。もちろん実際の宇宙空間には電子銃のような機械仕掛けの装置はない。地表から数千キロメートルから数万キロメートルの高さで電子銃と同じような機能をもつ状態が自然に作られているのである。そのような状態はとても不安定で壊れやすいもののなのに、なぜその機能を長時間にわたって維持できるのかについてはよくわかっていない。ディスクリート・オーロラを詳しく見ると、非常に薄いオーロラで構成されていることがある。この薄い構造は慣性アルベン波と呼ばれる電磁波によって加速されているという指摘もあり¹¹⁾、複雑な構造が重なりあっている可能性を示唆している。

電子銃とは別の原因で光るオーロラもある。ディフューズ・オーロラと呼ばれ、明滅を繰り返す脈動オーロラはこれに分類される。ディフューズ・オーロラはぼんやりと広がったオーロラで、はっきりとした形がないことが多い。脈動オーロラは雲のような形をしていて1秒から30秒の周期で点滅する。ディフューズ・オーロラは宇宙空間を飛び交う電子が散乱を受け、超高層大気に落ちた結果であると考えられている¹²⁾。散乱の原因としてホイッスラーモード・コーラス波動と呼ばれる電磁波が

有力視されている。人工衛星の観測によると電磁波の「オン」・「オフ」と脈動オーロラの「オン」・「オフ」がよく対応していることがわかっている¹³⁾。なぜ電磁波が周期的に発生したり消えたりを繰り返すのか、雲のような形は何が決めているのかについて明確な答えはなく、ディフューズ・オーロラも多くの謎に包まれている。

ブラック・オーロラと名付けられた奇妙なオーロラがある¹⁴⁾。オーロラが黒く光るわけではない。ディフューズ・オーロラの一部が欠落しているために黒く見えるのである。ブラック・オーロラは通常のオーロラと同じようにアーク状だったり筋状だったり時には渦をまいたり様々な形がある。ブラック・オーロラが現れるということはオーロラがそこだけ「光らない」ことを意味する。「光らない」原因として二つの説が提唱されている。一つ目は逆向きの電子銃が電子の降り込みを阻害しているという考え方である¹⁵⁾。東北大学を中心とする研究チームは「れいめい」衛星で降り込み電子とブラック・オーロラを同時に観測することに成功し、電子の散乱が局所的に抑制されることで「光らない」領域が現れるという説を提唱している¹⁶⁾。

図2は宇宙からみたオーロラで、オーロラが冠のように極を取り囲んでいるのがわかる。この冠のことをオーロラ・オーバルと呼ぶ。オーロラ・オーバルは北半球と南半球にあり、おおまかには南北ではほぼ対称であることが分かっている。オーロラ・オーバルは広がったり縮んだりするが、消えることはなく、オーロラは地球上のどこかで常に光っているようである。オーロラ・オーバルの内側（オーロラ・オーバルの高緯度側）や外側（低緯度側）でもオーロラは現れる。内側に現れるオーロラは極冠オーロラと呼ばれ、太陽の方向に沿って広がる筋状のオーロラ「太陽沿いオーロラ」¹⁷⁾や、ギリシャ文字の θ のように見える「シータ・オーロラ」¹⁷⁾、雨のように極冠全体に電子が降り注ぐことで光る「極雨オーロラ」¹⁸⁾などが知られている。一方、オーロラ・オーバルの外側（低緯度側）では、オーロラ帯本体から切り離されたアーク状のオーロラ¹⁹⁾やパッチ状のオーロラ²⁰⁾、ほとんど動かない縮れ雲のようなオーロラ²¹⁾や枝分かれ状の奇妙な形を持つオーロラ²²⁾が見つかった。



図2：人工衛星が撮影したオーロラ・ブレイクアップの発達 (Courtesy of NASA)。

図2のようにオーロラ・オーバルの一部が突然明るく光り出し、明るいオーロラが広がるオーロラ・ブレイクアップと呼ばれる現象がある²³⁾。オーロラ・ブレイクアップがおこると明るいオーロラが激しく舞い、カーテンの裾がピンク色に染まることもある。様々なオーロラがあるなかで最も華麗でオ

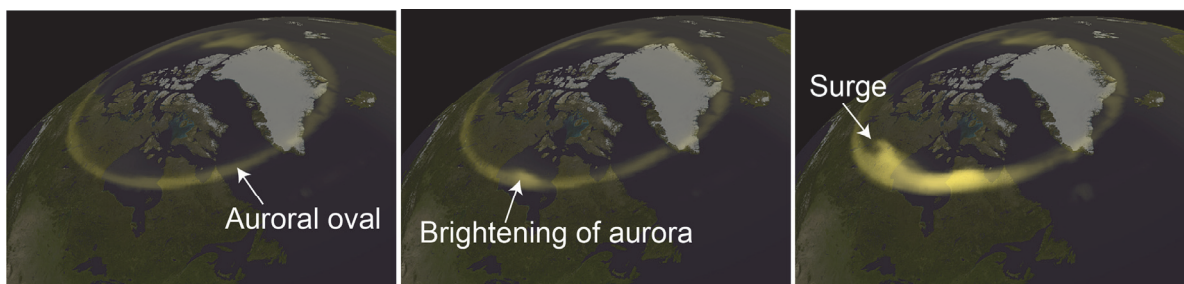


図3：シミュレーションによって再現されたオーロラ・ブレイクアップの発達。

オーロラ現象のハイライトと言えよう。オーロラ・ブレイクアップの継続時間は数 10 分程度と短く、この間に 100 万アンペアの電流が流れ 1000 億ワットものエネルギーが一気に電離圏で消費される²⁴⁾。オーロラ・ブレイクアップはオーロラ嵐ともよばれ、その発生原因について何十年も議論が続いているが、いまだ決着がついていない。最新の数値シミュレーションによってオーロラ・ブレイクアップを詳細に再現することが可能になり（図 3）、その理解が格段に進んでいる^{25,26)}。詳細については日本語のレビュー²⁷⁾を参照いただくとして、ここでは簡単にオーロラ・ブレイクアップが発生する仕組みを説明したい。

オーロラ・ブレイクアップを駆動する究極のエネルギー源は太陽にある。太陽から放出される太陽風は毎秒 400 キロメートル以上の速さを持つ荷電粒子の流れである。図 4 に示すように電磁エネルギーの流れ（破線）は磁気圏と呼ばれる地球磁場が支配する領域に向かうが、太陽風が持つエネルギー（実線）は磁気圏を避けるように流れ去ってしまうため、直接的には磁気圏に入ることはできない。ところが、惑星間空間磁場が南を向くと、太陽風が持っていた運動エネルギーは磁気圏境界付近で磁場エネルギーに効率よく変換され、磁気圏に効率的にとりこまれていく。シミュレーションによると、磁気圏にとりこまれる磁場エネルギーのうち 33-88%は太陽風が持つ運動エネルギーに由来するようである²⁸⁾。

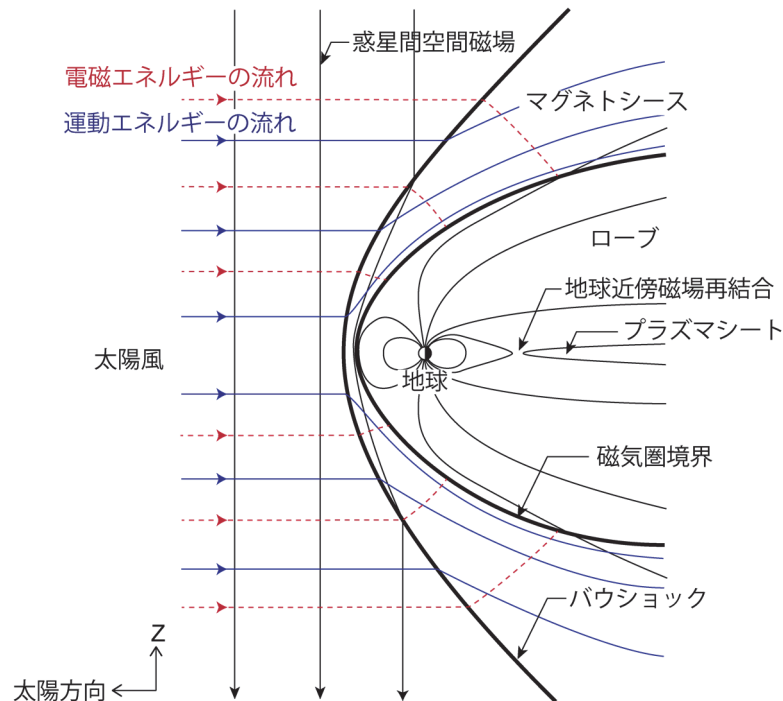


図 4：磁気圏の構造と磁気圏に至るエネルギーの流れの模式図。²⁸⁾

図 5 の白い線は磁場エネルギーの流れを示している。磁気圏にとりこまれた磁場エネルギーは大きな螺旋を描きながら地球に向かう²⁹⁾。螺旋を描くのは磁気圏対流があるためで、地球方向に向かうのは大規模な沿磁力線電流があるためである。つまり、沿磁力線電流と対流が一体となって磁場のエネルギーが磁気圏を循環し、地球に向かって進むのである。地球の夜側では磁気圏対流の一部が淀むため、磁力線が大きく引き延ばされていく³⁰⁾。図 5 左はブレイクアップ開始 15 分前（サブストーム成長相）の様子を示している。このとき磁気圏尾部では引き伸ばされた磁力線がつなぎ替わる磁気再結合はまだ起きていないが、取り込まれた磁場のエネルギーは磁気圏を循環していることが分かる。サブストーム成長相では対流が盛んになるという観測と調和的である。磁気圏尾部で磁気再結合が起こ

ると、地球近傍に向かってプラズマが動きはじめ、磁気圏の構造は大きくかわる。磁場エネルギーが運動エネルギー（あるいは熱エネルギーを経て運動エネルギー）に変わり、狭い領域で磁場エネルギーに再び変わる。このとき、強い沿磁力線電流が局所的に発生する。図5右はブレイクアップがおきた時（サブストーム拡大相開始時）の磁場エネルギーの流れを示しており、図5の左図と比べると夜側で流れ方が大きく変わっていることがわかる。白い線が青くなっている領域では磁場のエネルギーが作られており、ここでは沿磁力線電流が作られている。シミュレーションでは、この沿磁力線電流が地球に到達したときにオーロラ・ブレイクアップが始まっている^{26,31)}。

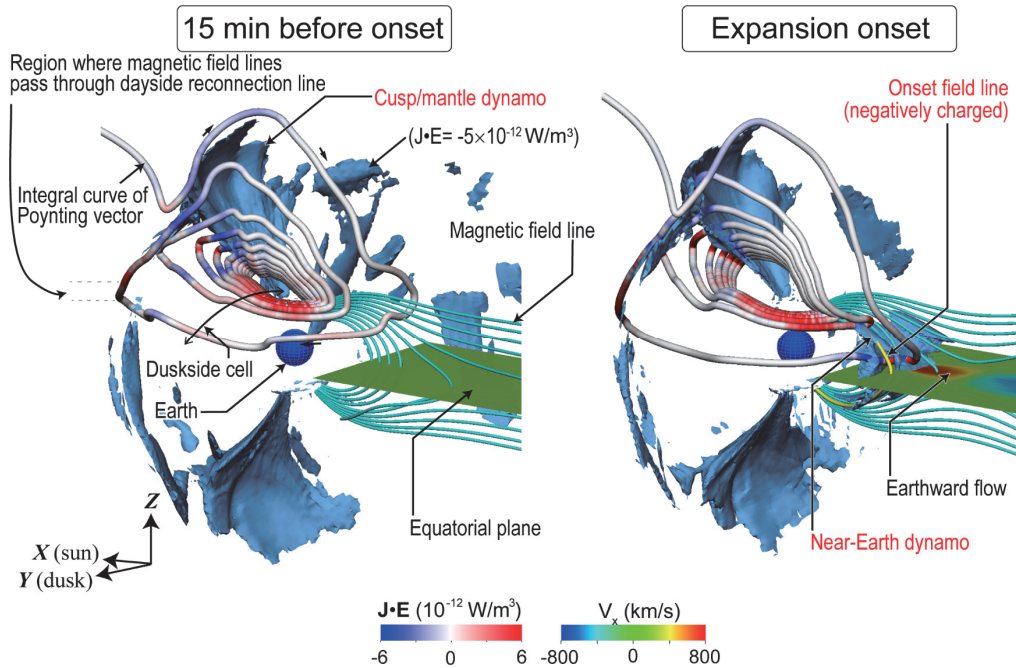


図5：シミュレーションによって描かれた磁気圏内のエネルギーの流れ。球は地球を、白い線は磁場エネルギーの流れを示す。陰のある立体的な領域は磁場のエネルギーが生成されている領域を示す。左はオーロラ・ブレイクアップの直前、右はブレイクアップ時を示す。²⁹⁾

3. 過去のオーロラ

大きな磁気嵐がおこると日本でもオーロラが見えることがある。北の空が赤く染まったという報告が多く、極地方で見られるカーテン状のオーロラとは性質が全く異なる³²⁾。通常、オーロラは上のほうでは赤く、下のほうでは緑に見える。下のほうで光る緑のオーロラが地平線より下に隠れてしまい、上のほうで光る赤のオーロラが選択的に見えるようになる。これが北の空が赤く染まる理由とされている³³⁾。1990年頃や2001年頃を中心に北海道でオーロラが観測されたが³⁴⁾、この頃は11-12年周期で変動する太陽活動の極大期にあたり、巨大フレアが頻発し、磁気嵐が多発していたのである。

過去はどうであっただろうか。たとえば日本書紀や明月記、寺社などに伝わる古文献にはオーロラを思わせる記述が多く見つかる。日本や中国では赤気という名で登場する。磁気嵐のときに低緯度地方に現れる赤くぼんやりとしたオーロラを連想させる趣のある言葉ではないか。なかには火事のような局所的な事象を記録したものもあるだろうが、多くの史料によって広い範囲でほぼ同時に目撃されていることが確認できれば地球規模の発光現象すなわちオーロラであると判断することができる。例えば、1770年9月には北は松前藩から南は薩摩藩まで、そして中国大陆の各地でも赤気が記録されていることからオーロラが低緯度まで広がっていたことはほぼ間違いない³⁵⁾。特筆すべきことは、10日

間近くほぼ連続して日本からオーロラが見え、そして手許の文字が読めるくらいオーロラが明るかったことである。（もちろん、オーロラが見えるのは夜間に限られる。）ここ数十年の間に日本で見たオーロラ³⁴⁾は肉眼で見えるか見えないか程度の明るさであり、継続時間は長くても2日間³⁴⁾だったことと比べるとその異常さがわかる。

1770年9月17日に日本各地で目撃されたオーロラを計算機シミュレーションによって再現した³⁶⁾。直近30年間に北海道で観測されたオーロラ^{33,34,37)}からの類推で、上側が赤く、下側が緑のオーロラを想定した。当時の記録どおりの背の高い赤いオーロラを説明しようとする下の方で光る緑のオーロラが観測者に見えてしまい、当時の記録と矛盾する。一方、緑のオーロラを北の地平線より下に隠そうとすると背の高いオーロラを再現することができない。多くのパターンについて計算を繰り返したところ、上から下まで全身が赤いオーロラでなければ古文書にある記述と絵画を説明できないことがわかった。このような全身が赤いオーロラはエネルギーが極端に低い電子が選択的に降り注いでいれば発生が可能である。巨大磁気嵐に人工衛星が中緯度で観測した降り込み電子のスペクトルを参考に、1770年9月17日当日の電子スペクトルを推定した。オーロラの光によって文字が読めたという記述を説明するためには、これまで人工衛星が中緯度で観測した電子を10倍以上多い量の電子が降っていないかならなければならなかった。計算によって推定した当時のオーロラ・オーバルの位置を図6に示す。青森県津軽ではオーロラがほぼ真上に見えたという記録や、京都では地平線から少なくとも約35度の高さまでオーロラが広がっていたという記録³⁵⁾と調和的である。

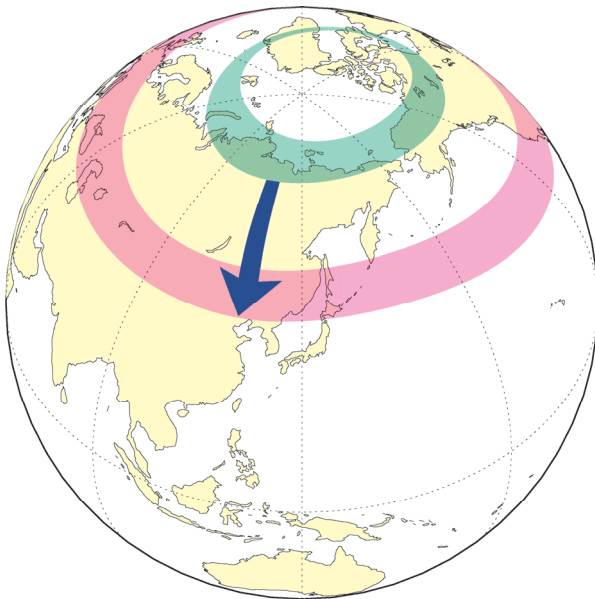


図6：1770年9月に発生した磁気嵐時のオーロラ・オーバルの推定位置。

巨大な磁気嵐がおこるとオーロラ帯は低緯度の方向に広がる。同時に磁気圏や電離圏を流れる電流量も増える。磁気圏や電離圏を流れる電流は地面に誘導電流を流し、ときには停電を誘発することがある。実際にカナダやスウェーデンでは巨大磁気嵐に伴い大規模な停電が起きている^{38,39)}。このような宇宙由来の災害を減らすためには、大規模な磁気嵐の発生頻度を把握しておく必要がある。しかし近代的地磁気の測定が始まったのは約200年前にすぎず、それ以前に発生した巨大な磁気嵐はわからない。過去のオーロラの記録を調べてオーロラ・オーバルの低緯度境界を推定し、経験則⁴⁰⁾を援用して磁気嵐の規模を推定すると、少なくとも1582年⁴¹⁾、1730年⁴²⁾、1770年³⁵⁾、1859年⁴³⁾、1872年⁴⁴⁾、1909年⁴⁵⁾、1921年⁴⁶⁾に巨大磁気嵐が起きていたようである。つまり、長期的にみると巨大磁気嵐はまれな現象ではなく、むしろ過去100年間は巨大磁気嵐の発生頻度が異常に低かった可能性がある。

4. 未来のオーロラ

地球の磁場（地磁気）はオーロラを極地方に局在化させてオーロラ・オーバルを作るとともに、多様なオーロラの遠因となっている。現在、地球磁場は双極子成分が卓越している。双極子型磁場は棒磁石が作る磁場と同じで、二つの極がある。双極子の軸が地表と交わる点を地磁気極と呼び、グリーンランド北方の北極海にある。しかし、地球の歴史と比べると非常に短い時間スケールで地磁気極は移

動しており、西暦 1000 年から 1300 年にかけては地理的な北極点から東アジアの方向にあったようである⁴⁷⁾。このとき東アジアはオーロラ・オーバルに比較的近かったようで、中国大陸ではオーロラが多く報告されている⁴⁸⁾。今後、どのように磁極が動くのかについては誰もわからない。もし再び東アジアの方に地磁気極が移動すると日本でもオーロラがよく見えるようになるかもしれない。

双極子の強さは過去 2000 年間で約 30%、150 年間で約 9% も減っている⁴⁹⁾。このまま地球磁場が弱まるとオーロラ・オーバルはどうなるのだろうか。双極子の強さが現在の約 70% になったとき、つまり今から約 800 年後のオーロラを計算機によって予測した。その結果、太陽風から磁気圏に取り込まれるエネルギーは減り、オーロラ帯は低緯度に移動することが分かった。これは地球磁場の勢力範囲が狭くなることに対応している。興味深いことに、地球磁場が弱まると電離圏の導電率が上がり、オーロラ・ジェット電流がよく流れるようになった (Ebihara and Tanaka, 投稿中)。更に双極子成分が弱まると四重極子成分が卓越するようになり、地球磁場の構造が大きく変わるという指摘がある⁵⁰⁾。そうすると現在のオーロラ・オーバルは大きく変わり、異質なオーロラが現れるかもしれない。また、地球の磁場は宇宙線など生物に有害な粒子が大気へ直接降り注ぐのを防いでいる。地球の磁場が弱まるとそのバリアーとしての役割は弱まり、大気の組成や、気候変動にも影響を及ぼすかもしれない。地球磁場が大きく減ったとき、人類は生存できるだろうか。変わりゆく地球を受け入れ、人類の持続的な発展と生存のために今から対策を練りはじめても遅すぎるということはないだろう。

参考文献

- 1) H. Hayakawa, Y. Mitsuma, Y. Ebihara, and F. Miyake, "The Earliest Candidates of Auroral Observations in Assyrian Astrological Reports: Insights on Solar Activity around 660 BCE," *The Astrophysical Journal*, vol. 884, no. 1, 2019, doi: 10.3847/2041-8213/ab42e4.
- 2) S. Odenwald, *Solar Storms: 2000 Years of Human Calamity*. USA: Createspace Independent Pub, 2015.
- 3) C. Störmer, *The Polar Aurora* (International Monographs on Radio). Oxford University Press, 1955.
- 4) H. D. Holland, "The oxygenation of the atmosphere and oceans," *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, vol. 361, no. 1470, pp. 903-15, Jun 29 2006, doi: 10.1098/rstb.2006.1838.
- 5) T. J. Hallinan, "Auroral spirals. II- Theory," *Journal of Geophysical Research*, vol. 81, no. 22, pp. 3959-3965, 1976, doi: 10.1029/JA081i022p03959.
- 6) J. E. Maggs and T. N. Davis, "Measurements of the thicknesses of auroral structures," *Planetary and Space Science*, vol. 16, no. 2, pp. 205-209, 1968, doi: 10.1016/0032-0633(68)90069-x.
- 7) J. E. Borovsky, "Auroral arc thicknesses as predicted by various theories," *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, pp. 6101-6138, 1993, doi: 10.1029/92JA02242.
- 8) R. Beach, G. R. Cresswell, T. N. Davis, T. J. Hallinan, and L. R. Sweet, "Flickering, a 10-cps fluctuation within bright auroras," *Planetary and Space Science*, vol. 16, no. 12, pp. 1525-1529, 1968, doi: 10.1016/0032-0633(68)90064-0.
- 9) Y. Fukuda *et al.*, "First evidence of patchy flickering aurora modulated by multi-ion electromagnetic ion cyclotron waves," *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 9, pp. 3963-3970, 2017, doi: 10.1002/2017GL072956.
- 10) M. Temerin, J. McFadden, M. Boehm, C. W. Carlson, and W. Lotko, "Production of flickering aurora and field-aligned electron flux by electromagnetic ion cyclotron waves," *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. A5, 1986, doi: 10.1029/JA091iA05p05769.
- 11) J. Semeter, M. Zettergren, M. Diaz, and S. Mende, "Wave dispersion and the discrete aurora: New constraints derived from high-speed imagery," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 113, no. A12, pp. n/a-n/a, 2008, doi: 10.1029/2008JA013122.
- 12) C. I. Meng, B. Mauk, and C. E. McIlwain, "Electron precipitation of evening diffuse aurora and its conjugate electron fluxes near the magnetospheric equator," *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, no. A6, 1979, doi: 10.1029/JA084iA06p02545.

- 13) Y. Nishimura *et al.*, "Identifying the driver of pulsating aurora," *Science*, vol. 330, no. 6000, pp. 81-84, 2010, doi: 10.1126/science.1193186.
- 14) T. N. Davis, "Observed microstructure of auroral forms," *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, vol. 30, no. 4, pp. 371-380, 1978, doi: 10.5636/jgg.30.371.
- 15) G. T. Marklund *et al.*, "Temporal evolution of the electric field accelerating electrons away from the auroral ionosphere," *Nature*, vol. 414, no. 6865, pp. 724-7, Dec 13 2001, doi: 10.1038/414724a.
- 16) Y. Obuchi *et al.*, "Fine-scale dynamics of black auroras obtained from simultaneous imaging and particle observations with the Reimei satellite," (in English), *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, vol. 116, pp. ---, 2011, doi: Artn a00k07 doi 10.1029/2010ja016321.
- 17) L. A. Frank, J. D. Craven, J. L. Burch, and J. D. Winningham, "Polar views of the Earth's aurora with Dynamics Explorer," *Geophysical Research Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 1001-1004, 1982, doi: 10.1029/GL009i009p01001.
- 18) Y. Zhang, L. J. Paxton, and A. T. Y. Lui, "Polar rain aurora," *Geophysical Research Letters*, vol. 34, no. 20, 2007, doi: 10.1029/2007gl031602.
- 19) C. D. Anger, M. C. Moshupi, D. D. Wallis, J. S. Murphree, L. H. Brace, and G. G. Shepherd, "Detached auroral arcs in the trough region," *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, no. A6, 1978, doi: 10.1029/JA083iA06p02683.
- 20) D. D. Wallis, J. R. Burrows, M. C. Moshupi, C. D. Anger, and J. S. Murphree, "Observations of particles precipitating into detached arcs and patches equatorward of the auroral oval," *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, no. A4, 1979, doi: 10.1029/JA084iA04p01347.
- 21) M. Kubota, "Evening co-rotating patches: A new type of aurora observed by high sensitivity all-sky cameras in Alaska," *Geophysical Research Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 12-15, 2003, doi: 10.1029/2002GL016652.
- 22) Y. Ebihara, T. Sakanoi, K. Asamura, M. Hirahara, and M. F. Thomsen, "Reimei observation of highly structured auroras caused by nonaccelerated electrons," *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, vol. 115, 2010, doi: 10.1029/2009ja015009.
- 23) S. I. Akasofu, "The development of the auroral substorm," *Planetary and Space Science*, vol. 12, no. 4, pp. 273-282, 1964, doi: 10.1016/0032-0633(64)90151-5.
- 24) Y. Kamide, J. D. Craven, L. A. Frank, B. h. Ahn, and S. I. Akasofu, "Modeling substorm current systems using conductivity distributions inferred from DE auroral images," *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. A10, pp. 11235-11235, 1986, doi: 10.1029/JA091iA10p11235.
- 25) Y. Ebihara and T. Tanaka, "Substorm simulation: Formation of westward traveling surge," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, no. 12, pp. 10,466-10,484, 2015, doi: 10.1002/2015JA021697.
- 26) T. Tanaka, "Substorm Auroral Dynamics Reproduced by Advanced Global Magnetosphere-Ionosphere (M-I) Coupling Simulation," 2015, pp. 177-190.
- 27) Y. Ebihara, "Mechanism of Auroral Breakup," *Japanese Journal of Multiphase Flow*, vol. 33, no. 3, pp. 267-274, 2019, doi: 10.3811/jjmf.2019.T012.
- 28) Y. Ebihara, T. Tanaka, and N. Kamiyoshikawa, "New Diagnosis for Energy Flow From Solar Wind to Ionosphere During Substorm: Global MHD Simulation," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 124, no. 1, pp. 360-378, 2019, doi: 10.1029/2018JA026177.
- 29) Y. Ebihara and T. Tanaka, "Energy Flow Exciting Field-Aligned Current at Substorm Expansion Onset," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122, no. 12, pp. 12288-12309, 2017, doi: 10.1002/2017JA024294.
- 30) T. Tanaka *et al.*, "Global simulation study for the time sequence of events leading to the substorm onset," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122, no. 6, pp. 6210-6239, 2017, doi: 10.1002/2017JA024102.
- 31) Y. Ebihara and T. Tanaka, "Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening," *Journal of Geophysical Research A: Space Physics*, vol. 120, no. 9, pp. 7270-7288, 2015, doi: 10.1002/2015JA021516.
- 32) H. Miyaoka, T. Hirasawa, K. Yumoto, and Y. Tanaka, "Low latitude aurorae on October 21, 1989. I," *Proceedings of the Japan Academy. Ser. B: Physical and Biological Sciences*, vol. 66, no. 3, pp. 47-51, 1990, doi: 10.2183/pjab.66.47.

- 33) K. Shiokawa, C. I. Meng, G. D. Reeves, F. J. Rich, and K. Yumoto, "A multievent study of broadband electrons observed by the DMSP satellites and their relation to red aurora observed at midlatitude stations," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 102, no. A7, pp. 14237-14253, 1997, doi: 10.1029/97JA00741.
- 34) K. Shiokawa, "Low-latitude auroras observed in Japan: 1999–2004," *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, no. A5, pp. A05202-A05202, 2005, doi: 10.1029/2004JA010706.
- 35) H. Hayakawa *et al.*, "Long-lasting Extreme Magnetic Storm Activities in 1770 Found in Historical Documents," *Astrophysical Journal Letters*, vol. 850, no. 2, 2017, doi: 10.3847/2041-8213/aa9661.
- 36) Y. Ebihara, H. Hayakawa, K. Iwahashi, H. Tamazawa, A. D. Kawamura, and H. Isobe, "Possible Cause of Extremely Bright Aurora Witnessed in East Asia on 17 September 1770," *Space Weather*, vol. 15, no. 10, pp. 1373-1382, 2017, doi: 10.1002/2017SW001693.
- 37) K. Shiokawa, K. Yumoto, Y. Tanaka, T. Oguti, and Y. Kiyama, "Low-Latitude Auroras Observed at Moshiri and Rikubetsu ($L=1.6$) during Magnetic Storms on February 26, 27, 29, and May 10, 1992," *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, vol. 46, no. 3, pp. 231-252, 1994, doi: 10.5636/jgg.46.231.
- 38) D. H. Boteler, "A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm," *Space Weather*, vol. 17, no. 10, pp. 1427-1441, 2019, doi: 10.1029/2019sw002278.
- 39) A. Pulkkinen, S. Lindahl, A. Viljanen, and R. Pirjola, "Geomagnetic storm of 29-31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system," *Space Weather*, vol. 3, no. 8, 2005, doi: 10.1029/2004SW000123.
- 40) N. Yokoyama, Y. Kamide, and H. Miyaoka, "The size of the auroral belt during magnetic storms," *Annales Geophysicae*, vol. 16, no. 5, pp. 566-566, 1998, doi: 10.1007/s005850050626.
- 41) K. Hattori, H. Hayakawa, and Y. Ebihara, "Occurrence of great magnetic storms on 6–8 March 1582," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 487, pp. 3550-3559, 2019, doi: 10.1093/mnras/stz1401.
- 42) H. Hayakawa *et al.*, "A great space weather event in February 1730," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 616, 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201832735.
- 43) H. Hayakawa *et al.*, "Temporal and Spatial Evolutions of a Large Sunspot Group and Great Auroral Storms Around the Carrington Event in 1859," *Space Weather*, vol. 17, no. 11, pp. 1553-1569, 2019, doi: 10.1029/2019sw002269.
- 44) H. Hayakawa *et al.*, "The Great Space Weather Event during 1872 February Recorded in East Asia," *The Astrophysical Journal*, vol. 862, no. 1, 2018, doi: 10.3847/1538-4357/aaca40.
- 45) H. Hayakawa *et al.*, "The extreme space weather event in September 1909," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 484, no. 3, pp. 4083-4099, 2019, doi: 10.1093/mnras/sty3196.
- 46) J. J. Love, H. Hayakawa, and E. W. Cliver, "Intensity and Impact of the New York Railroad Superstorm of May 1921," *Space Weather*, vol. 17, no. 8, pp. 1281-1292, 2019, doi: 10.1029/2019sw002250.
- 47) R. T. Merrill and M. W. McElhinny, *The Earth's magnetic field: Its history, origin and planetary perspective*. London: Academic Press, 1983.
- 48) H. Hayakawa *et al.*, "Records of sunspots and aurora candidates in the Chinese official histories of the Yuán and Míng dynasties during 1261-1644," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 69, no. 4, 2017, doi: 10.1093/pasj/psx045.
- 49) P. Olson and H. Amit, "Changes in earth's dipole," *Naturwissenschaften*, vol. 93, no. 11, pp. 519-42, Nov 2006, doi: 10.1007/s00114-006-0138-6.
- 50) J. Vogt *et al.*, "MHD simulations of quadrupolar paleomagnetospheres," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 109, no. A12, 2004, doi: 10.1029/2003JA010273.

著者プロフィール



海老原 祐輔 (Yusuke Ebihara)

＜略歴＞ 1999 年総合研究大学院大学博士後期課程修了（博士（理学））／同年スウェーデン国立スペース物理研究所研究員／2001 年国立極地研究所助手／2003-2004 年 NASA ゴダード宇宙飛行センター訪問研究員／2006 年名古屋大学高等研究員特任講師／2011 年京大生存圏研究所准教授、現在に至る。
＜研究テーマと抱負＞宇宙の嵐と生存圏。

地球と宇宙の境界を診る

横山 竜宏^{1*}

A diagnosis of the Earth-space interface

Tatsuhiro Yokoyama^{1*}

概要

地球と宇宙の境界はどこにあるのだろうか。国際航空連盟という組織は、高度 100km 以上を宇宙空間と定義し、ここを境として航空機と宇宙機を区別している。一方、地球の大気圏は高度 1000km 付近まで広がっており、非常に希薄な気体が地球の重力圏に留まっている。この大気圏でもあり宇宙空間でもある領域では、太陽からの強烈な紫外線を受けるため、地上では起こり得ない様々な現象が発生する。また、国際宇宙ステーションをはじめとする、多数の人工衛星が飛翔する領域であり、GPS 等の測位衛星や静止軌道上の気象衛星等がデータを送信する際に、電波の通り道となる領域でもある。この境界領域が我々の日常生活に及ぼす影響と、様々な観測・研究手法について紹介する。

1. 地球大気の上端

地上から標高の高い場所に行くと、気温と気圧が徐々に減少することは、日常生活から頻繁に経験するところである。富士山の頂上では地上と比べて約 22 度気温が低く、気圧が下がるため水の沸点は約 88 度にまで下がる。では、さらに高度が高い場所へ向かうと、気温と気圧はそのまま減少し続け、そのまま宇宙空間へとつながるのだろうか。気圧については、大気自身の重さと地球の重力がバランスすることで基本的な分布が決まるため、上空に向かうほど気圧は単調に減少する。しかし、気温は図 1 に示すように複雑な変化をする。高度 15km 付近からは成層圏と呼ばれる領域に入り、高度とともに気温は上昇し始める。この温度上昇は、成層圏のオゾン層が太陽紫外線を効率よく吸収することに起因する。高度約 50km から 90km の領域は中間圏と呼ばれ、気温は再び減少を始める。高度 90km 付近の中間圏界面は地球大気で最も気温が低い領域であり、夜光雲とよばれる特殊な雲が発生することもある。高度 90km 以上からは再び気温の上昇が始まり、熱圏と呼ばれる領域に入る。図 1 では高度 100km までの

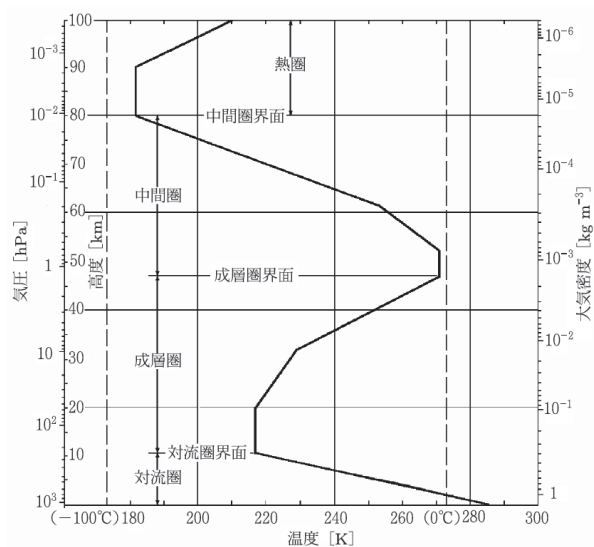


図 1：大気の鉛直構造¹⁾

2020 年 6 月 24 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: yokoyama@rish.kyoto-u.ac.jp

温度構造が示されているが、図 2 (左) には、高度 100km 以上の温度構造が分かりやすいように、縦軸と横軸のスケールを変えて示している。気温は 1000 度付近にまで急激に上昇し、熱圏は高度 1000km 付近にまで達している。この高度約 1000km が地球大気圏上端の一つの目安であり、地球の重力が大気を構成する原子・分子を引き止めている高度の限界とも言える。太陽の活動度や季節、緯度によってこの温度構造は変化するため、大気の上端高度を明確に定義することは難しい。

2. 宇宙空間の下端

それでは、宇宙はどこから始まるのであろうか。こちらは便宜上明確に定義されている。国際航空連盟という組織は、高度 100km より上空を宇宙、それより下を大気圏と定め、航空機と宇宙機を識別している。近年盛んに開発されている民間の宇宙ロケットが、高度 100km に到達することを目標に掲げているのもこうした理由からである。また、高度 100km 付近から、大気の物理的・化学的性質にも変化が見られ始める。まず、太陽からの強い X 線や紫外線の影響で、大気を構成する原子・分子の一部から電子が飛び出し、正イオンと電子に分離した状態となる。電離した大気をプラズマと呼び、電離した大気が存在するこの領域を電離圏と呼ぶ。熱圏と電離圏は、それぞれ温度と電子密度に着目した命名であり、高度範囲はほぼ一致している。図 2 (右) は、大気の一部電離することで作られるプラズマの密度を示している。このプラズマは、電波を反射させたり屈折させたりする性質があり、電離圏での反射を利用した短波による長距離通信に利用されてきた。また、電離圏は GPS 等の測位衛星からの電波の伝搬にも影響を及ぼし、無視できない誤差の要因となることが知られている。数 cm 級の精密測位を実現するためには、電離圏の影響による誤差を取り除く必要があるが、そのためには、電離圏の電子密度の正確な分布を知る必要がある。

一方、大気の組成にも変化が見られ始める。地表から高度 100km 付近までは、大気は良く混合されており、大気の組成比は窒素分子 (約 80%)、酸素分子 (約 20%) とその他の微量成分がほぼ一定の割合で存在している。しかし、高度 100km 付近を超えると、大気は混ざりにくくなり、重い成分が下方へ、軽い成分が上方へと分離を始める。大気とプラズマの組成分布を図 3 に示している。イオンの組成は、酸素原子イオン、酸素分子イオン、一酸化窒素分子イオンが主要な要素である。窒素分子イオンがほとんど存在しないのは、電離したイオンがすぐに化学反応を起こして他種のイオンへと変化するためである。電子密度が最大となる高度 300-400km 付近では、酸素原子が主要な成分となり、さらに高度が上がると水素原子やヘリウム原子が主要な成分となる。電子密度が最大となる高度であっても、電離度は 0.1% 程度であり、僅かに電離した大気が電波の伝搬に影響を及ぼしていることが分かる。また、高度 400km 付近は国際宇宙ステーション

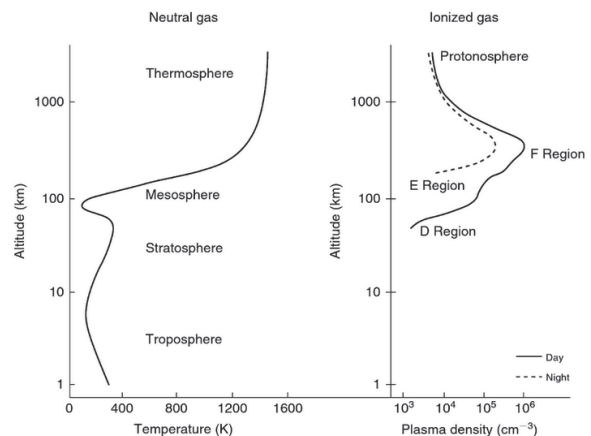


図 2：超高層大気の温度構造と電子密度分布²⁾

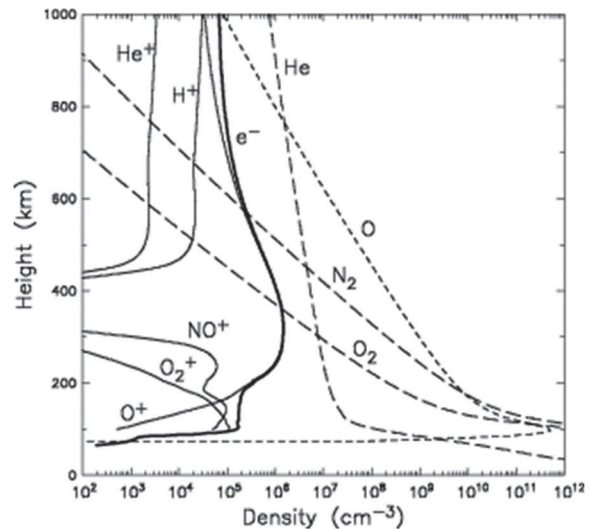


図 3：超高層大気の組成分布
(MSIS、IRI モデルによる)

ンを始めとする多数の人工衛星が周回している高度であり、将来の人類の宇宙進出を見据えた場合、衛星や宇宙飛行士の周辺環境を理解するという点においても、電離圏は重要な領域である。

3. 電離圏と電波伝搬

前節で簡単に触れたように、電離圏のプラズマは電波の伝搬に影響を及ぼす。その概略を図4に示している。電離圏は数 MHz 以下の電波を反射する性質があるため、海外との長距離通信に利用されてきた一方、海外の放送波が混信する等の望ましくない影響も発生する。近年は、GPS 等の測位衛星に対する影響が大きな問題となっている。電離圏を伝搬する電波は、電離圏のプラズマ密度に応じて伝搬遅延が生じるため、測位に誤差が生じる。特に、大規模な太陽フレアや磁気嵐が発生した場合、電離圏のプラズマ密度が大きく変動する電離圏嵐が発生し、誤差が非常に大きくなる。実際、2017 年 9 月に発生した大規模太陽フレアの場合、その 2 日後に電離圏のプラズマ密度が大幅に増加し、GPS の測位誤差が最大で 3 倍程度となったことが国土院より報告されている³⁾。また、低い高度でプラズマ密度が増加すると電波が吸収される現象が発生し、航空機や船舶との通信が途絶する恐れもある。プラズマ密度の増減だけではなく、背景の電場や磁場との相互作用により密度分布が不安定となり、微細な不規則構造を形成する場合もある。このような現象が生じた場合、電波の振幅や位相にシンチレーションと呼ばれる激しい変動が生じ、測位衛星の電波を捕捉することが不可能となる場合がある。このような現象の発生に備えて、電離圏の状況を正確に把握し現象の発生を予測することは、実用面においても非常に重要である。

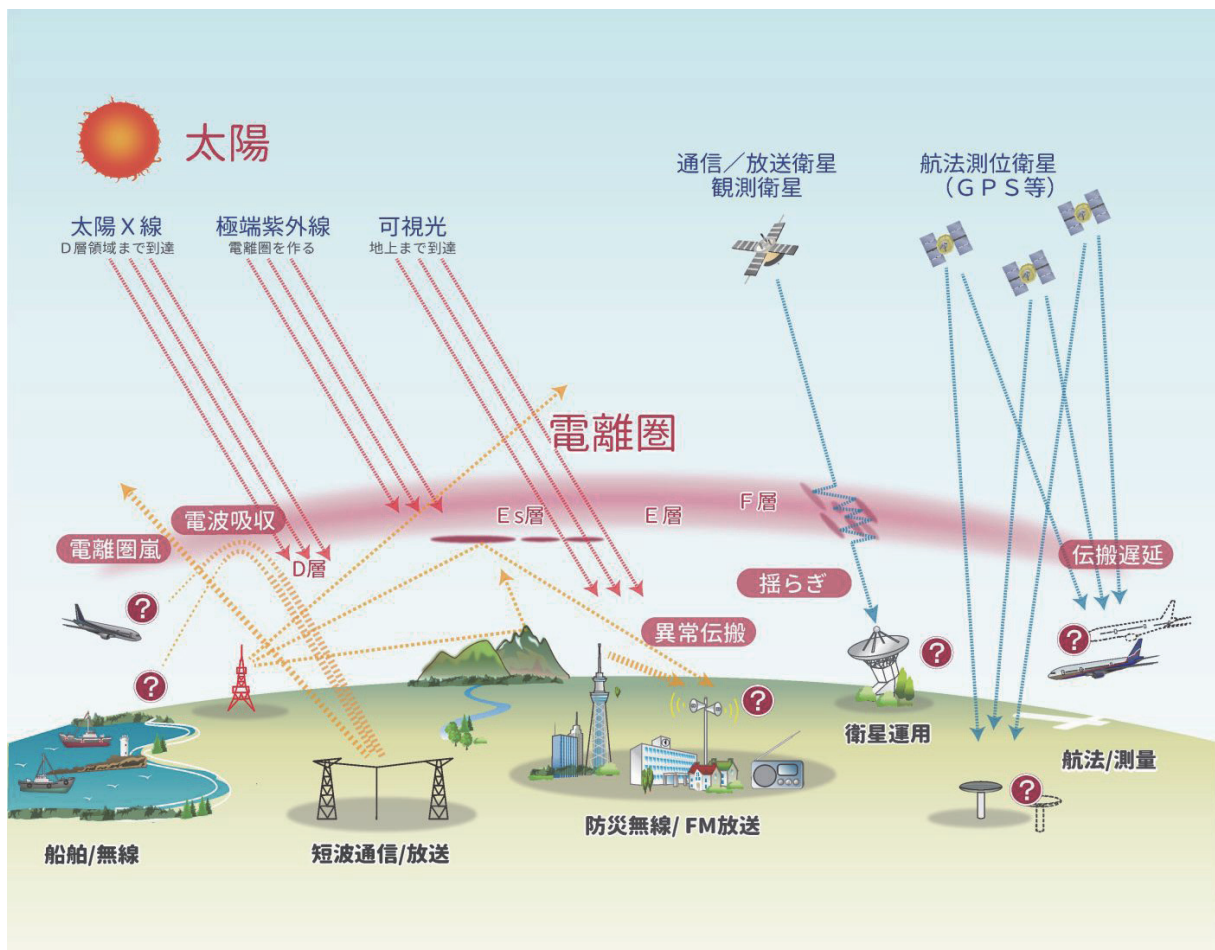


図4：電離圏と電波伝搬（宇宙天気予報センターウェブサイトより <http://swc.nict.go.jp/>）

4. 電離圏の観測手法

電離圏の状況を観測する手段として、観測装置を直接送り込む手法と、電波や光を利用して地上や宇宙空間から観測する手法（リモートセンシング）がある。直接観測では、電離圏プラズマの密度、温度、速度の他、電場、磁場、組成等の情報を得ることができるが、装置を送り込むことができる手段が限られており、コストも非常に高い。リモートセンシングでは、得られる情報は限られているが、地上からの定常観測や、宇宙空間からのグローバルな観測が可能であり、長期間・全地球規模の観測が可能となる。

4.1 電離圏の直接観測

電離圏の情報を直接観測する装置は、地上での開発・試験が行われた後、観測ロケットあるいは人工衛星に搭載される。電離圏高度に到達後、アンテナ等の観測装置が展開され、観測ロケットの場合はその軌道に沿ってデータを取得しながら地上に転送する。ロケット1機につき1度のみの観測であるが、近年は再利用可能なロケットも開発が進められている。人工衛星の場合は周回軌道に沿ってデータを取得する。通常、数年間の運用期間が設定されており、期間中は観測とデータ転送が行われる。高度300km以下では、大気抵抗が大きく人工衛星の高度がすぐに低下してしまうため、人工衛星による観測は難しく、観測ロケットが唯一の直接観測手段である。図5に宇宙航空研究開発機構が開発したS-310型観測ロケットの外観を示す。現在運用されている観測ロケットの中では最も小型のタイプであり、直径310mmで高度150kmに到達する能力を有している。主に鹿児島県肝付町の内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられるが、海外との共同研究の場合には海外の射場から打ち上げられる場合もある。



図5：観測ロケットの外観
(JAXA ウェブサイトより)

4.2 電離圏のリモートセンシング

観測ロケットや人工衛星による観測では、様々な観測データを同時に得ることができるが、コストが高く、頻繁に実施することは不可能である。そこで、電波や光を用いたリモートセンシング技術が広く利用されている。電離圏の存在が発見された経緯も、電波が反射されることによる長距離伝搬がきっかけであったことから、電波を用いた様々な観測手段が開発されてきた。最も古くから利用されてきた観測装置はイオノゾンデと呼ばれるタイプで、1MHzから30MHzまで周波数を変化させながら電波を上空に発射し、反射して地上に戻ってくるまでの時間差からその周波数の電波の反射高度を得る。電離圏のプラズマ密度に応じて反射する電波の周波数が変化するため、この手法を用いて電離圏プラズマの高度方向の構造を知ることができる。ただし、最大の密度に対応する周波数以上の電波は宇宙空間に突き抜けてしまうため、プラズマ密度最大の高度よりも上の構造を知ることができない。世界各地で観測が実施されており、日本では、情報通信研究機構が国内4ヶ所と南極昭



図6：MUレーダーの外観

和基地で定常観測を実施している。

イオノゾンデは、比較的簡単なシステムで電離圏のプラズマ密度分布を知ることができるが、温度や速度等のその他の情報についてはより高度な観測システムを用いる必要がある。図6は滋賀県甲賀市信楽町に位置するMUレーダーの外観である。MUレーダーは中層(Middle)と超高層(Upper)大気を観測するために作られた大型大気観測レーダーで、下層の対流圏も詳細に観測することができる世界最高性能かつアジア域最大の大気観測レーダーである。MUレーダーの最大の特徴は、アンテナ素子毎に取り付けた小型半導体送受信機(合計475個)を個別に制御することにより、1秒間に2500回という高速でレーダービーム方向を変えることが可能な点である。生存圏研究所が運用し、1984年の完成以来「全国共同利用装置」として国内外の研究者に利用され、超高層物理学、気象学、天文学、電気・電子工学、宇宙物理学など、広範な分野にわたる多くの成果に貢献してきた。

MUレーダーのような大型観測設備は、高度方向の構造を詳細に観測することが可能であるが、1地点のみの観測であるため、水平方向の構造については限られた情報しか得られない。電離圏の水平構造は、高感度の全天カメラや複数のGPS受信機を用いて観測することが可能である。全天カメラは、大気原子が放射する微弱な大気光を撮像することで、ある高度における電子密度の水平分布や大気中を伝搬する大気波動を観測することが可能である。GPSを用いた観測は、電離圏中の電波の伝搬遅延が周波数に依存する性質を利用して、2つの周波数の電波の遅延時間の差からGPS衛星と地上受信機間の全電子数を算出する。国内では、国土地理院が1200ヶ所以上のGPS受信機を展開しており、これらのデータを統合することで、全電子数の詳細な水平分布を得ることができる。このように、複数の観測手段を組み合わせることで、電離圏の3次元構造を推定することが可能となる。

5. 電離圏の数値シミュレーション

前節で電離圏の様々な観測手法について述べたが、観測結果を適切に活用するためには、電離圏の物理・化学過程を支配する法則に基づいて現象を理解する必要がある。特に、電離圏は観測手段が限られているため、得られる情報が時間・空間的に断片的であり、観測結果のみから全容を理解することは難しい。数値シミュレーションはそのような特徴を持つ電離圏の理解の助けとして非常に有用であり、観測との比較、現象の理解、数値予報等、様々な面で利用されている。再現したい現象に応じて様々なタイプのシミュレーションモデルがあり、地球全体の大気圏—電離圏の相互作用を対象としたモデル、ある特定の地域上空の電離圏を再現したモデル、電波障害の原因となる微細構造の再現を目指したモデル等がある。計算機性能の発展に伴ってシミュレーションの再現精度も向上しており、より高解像度で現実との差が小さい数値シミュレーションモデルの開発が進められている。図7は赤道域において電波障害の主要な原因であるプラズマバブル

と呼ばれる現象を再現した例である。密度が低い領域が、泡のように高い高度まで上昇し、その内部には微細な構造が現れている様子が見られる。この結果は人工衛星やレーダーで観測される現象をよく再現しており、現象の発生予測に活用されることが期待されている。このような数値シミュレーションは、多くの計算時間とメモリを必要とするため、各大学等が保有するスーパーコンピュータを利

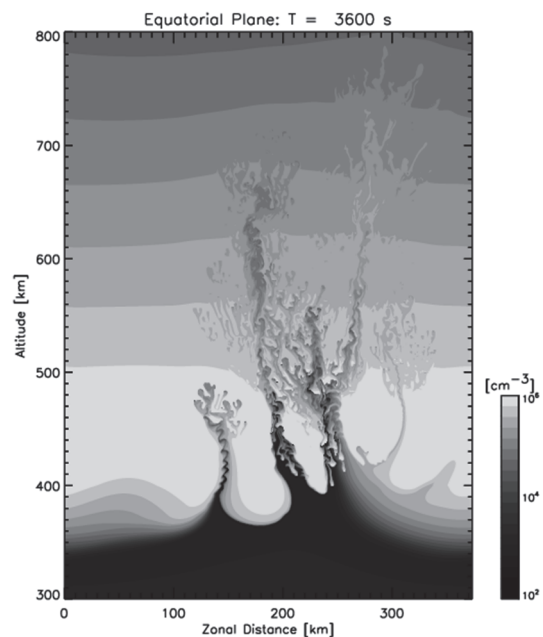


図7：プラズマバブルを再現した数値シミュレーション結果⁴⁾

用して計算されている。

6. おわりに

地球と宇宙の境界領域、つまり高度 100km から 1000km の領域は、複雑な物理・化学過程が入り混じった領域である。大気の温度構造の観点からは、気温が急激に増加する熱圏と呼ばれる領域であり、一方、大気の一部電離することで生じるプラズマの分布の観点からは電離圏と呼ばれる領域である。太陽からのエネルギーと下層大気から上方に伝搬するエネルギーの両者を受け取るため、複雑な大気・プラズマ現象が混在しており、未だ未解明の現象が多く存在している。GPS 等の測位衛星は、自動車の自動運転、農業、ドローン等、様々な分野へと応用されており、準天頂衛星「みちびき」の運用開始により、原理的には数 cm 程度の精度での測位が実現可能となっている。しかし、そのような精密測位のためには、電離圏による誤差の影響をより正確に補正する必要がある。電離圏の状況を正確に観測・診断し、そこでの物理・化学現象を理解することは、今後の宇宙利用の発展において欠かせない課題であると言える。

参考文献

- 1) 深尾, 浜津, “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) Kelley, M. C., “The Earth’s Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics”, 2nd Edition, Int. Geophys. Ser. Vol. 96, Academic Press, 2009, pp. 556.
- 3) 国土地理院 報道発表資料, <https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi40001.html>
- 4) Yokoyama, T., A review on the numerical simulation of equatorial plasma bubbles toward scintillation evaluation and forecasting, *Progress in Earth and Planetary Science*, **4**, 37, 2017.

著者プロフィール



横山 竜宏 (Tatsuhiko Yokoyama)

<略歴> 1999 年京都大学工学部電気電子工学科卒業／2004 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))／京都大学生存圏研究所、名古屋大学太陽地球環境研究所、米国コーネル大学、NASA ゴダード宇宙飛行センター、情報通信研究機構において研究に従事／2018 年京都大学生存圏研究所准教授、現在に至る。<研究テーマ>電離圏擾乱現象の観測とシミュレーション。<趣味など>将棋、麻雀、国内旅行。

レーダーで診る大気の動き

ー 信楽とインドネシアからの研究紹介 ー

橋口 浩之^{1*}

Radar measurement of atmospheric motion

- Introduction of studies from Shigaraki and Indonesia -

Hiroyuki Hashiguchi^{1*}

概要

雨も雲もない大気に電波を当てて、大気を観測することができる。それが大気レーダー(ウィンドプロファイラ)である。生存圏研究所は、MU レーダーをはじめとする多くの大気レーダーを開発し、小型の下部対流圏レーダーは気象庁のウィンドプロファイラネットワーク WINDAS に繋がり、日々の天気予報に実用化されている。また、インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に赤道大気レーダーを設置して赤道域大気の研究を推進している。本稿では、大気レーダーに関する歴史、原理、観測結果などについて紹介する。

1. はじめに

地球温暖化や異常気象の科学的理解と社会適応策が、安心・安全で快適な社会を維持しながら、人類が持続的に発展するために重要である。気象庁では、「過去 30 年の気候に対して著しい偏りを示した天候」を異常気象と定義しているが、30 年に 1 回よりもっと頻度の高い現象でも気象災害を起こしたり社会経済に大きな影響を与えたりすることがあるので、それらをまとめて「極端気象」と呼んでいる。近年、極端気象の頻度が増しており、地球温暖化がその原因の一つと言われている。長期的には地球温暖化の原因となる二酸化炭素などの排出を抑える対策が必要であるが、短期的には気象予報の精度を上げ、極端気象に備えることが重要になる。計算機の性能向上に伴い気象予報の精度は向上しているが、気象現象はカオスの性質を有しているため、時間発展系の決定論的予測が原理的に不可能であることが証明されており、気象予報モデルによる予報には限界もある¹⁾。そこで、高分解能・高精度な気象観測に基づいて、予報を行うことが重要である。

大気の動き(風)を測る最も一般的な方法は、プロペラ型の風向風速計であり、気象庁のアメダスと呼ばれる約 1300 カ所の自動地上気象観測ステーションでも使われている。上空の風を測定する手法として最も一般的なのはラジオゾンデである。水素あるいはヘリウムガスを充填した気球に気温・湿度・気圧センサーをつり下げ、約 6 m/s の速度で上昇させて、約 30 km までの観測を行うことができる。観測値は電波にのせて送られると共に GNSS で時々刻々の気球の位置を知ること、風向風速を観測できる。高高度までの観測が可能であるが、1 回の観測に 2 時間弱かかること、また手間がかか

2020 年 7 月 24 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: hasiguti@rish.kyoto-u.ac.jp

るため連続観測が困難で、気象庁においては通常半日毎にしか行われていない。特に下層大気では風向風速が時間と共に大きく変化するため、予報精度の向上には高時間分解能の連続観測が必要である。風向風速の高度分布を連続的かつ自動的に観測するために有効な手段が地上からのリモートセンシングである。ここでは、我々が研究している上空の大気の動きを高時間・高度分解能で計測可能な大気レーダーについて紹介する。

2. 大気レーダー(ウィンドプロファイラ)の歴史

レーダー(RADAR: RAdio Detection And Ranging)は、電波を用いて物体の存在や距離を検知するもので、1940年に米国で命名された。その原型は1904年にドイツで金属片の検出に成功したのが最初と言われている。1920年代には、数MHzの電波を用いて電離層で反射されたエコーを受信することに使われた。1930年代には対流圏における晴天大気中の気温逆転領域から反射されるエコーを観測しており、同時期に米国で航空機の検知実験が行われている。1930～1940年頃に日本を含む多くの国で開発が行われ、レーダーは第二次世界大戦中に大きな発展を遂げた。

気象への応用は、英国が第一次世界大戦中に航空機への落雷警報システムとして開発したことから始まる。雨滴の観測には高い周波数のレーダーが必要となるが、1930年代までは技術的に200～400MHzまでがせいぜいであり、より高い周波数は1940年代まで待たねばならなかった。世界で最初のレーダーによる降水観測は、1941年に3GHzのレーダーによって行われた²⁾。続いて米国が1943年に、また我が国でも1954年に気象研究所が気象レーダーを完成させている³⁾。1940年代に、レーダーを用いた降水観測の理論的根拠が与えられたこともあり、レーダーの気象観測への応用が急速に拡がり、1953年には英国で最初の気象パルスドップラーレーダーが開発されている。

気象レーダーは、降水からの電波散乱をターゲットとしているため降水時しか観測できないが、非降水時の晴天大気からも電波は散乱される。この晴天大気エコーを受信し利用するレーダーは大気レーダーと呼ばれ、特に風観測に特化したものはウィンドプロファイラと呼ばれる⁴⁾。1930年代後半に、対流圏からの晴天大気エコーが観測され、当初は雷による電離エコーと考えられていたが、航空機との同時観測などから、水平方向に成層した構造を持つ大気屈折率の変化に起因する分反射が原因であることが分かった。1940年代には3～10GHz程度の高い周波数での晴天エコーの観測が行われ、低周波のレーダーに比べ頻度は少なかったが風と共に移動する点状のエコーが観測された。人間の目には何も見えないところから電波が散乱されるためこのエコーは、「天使のこだま(angel echo)」と呼ばれ、この原因解明のための研究が1950年代に精力的に行われた。当初は昆虫や鳥からの反射と考えられたが、理論的検討が多くなされ、大気中の乱流による大気屈折率の空間的な揺らぎ(スケールが電波波長の1/2)が電波を散乱させ、レーダーエコーとして受信されるということが分かった⁵⁾。

降水を主な観測対象とする気象レーダーは、3GHz以上の高い周波数のレーダーへと向かっていったが、一方1960年代後半から、電離層中の自由電子の振る舞いを調べることを目的として、数十MHzの低い周波数の電波を用いる巨大レーダーの建設が開始された。最初に建設されたのがペルーのヒカマルカおよびプエルトリコのアレシボで、電子からの微弱な散乱電波を受信するため出力数MW、アンテナ直径数百mと巨大なものであった。散乱波の位相がランダムなインコヒーレント散乱(Incoherent Scattering)を利用するためISレーダーと呼ばれている。1960年代末に50MHz帯のヒカマルカレーダーで、インコヒーレント散乱が存在しないはずの高度60～70kmの中間圏で強いエコーが観測された。当初はあまり注目されなかったこの現象を解析したのがWoodman and Guillen⁶⁾で、上述した大気乱流による大気屈折率の揺らぎが強いエコーの原因であることを示した。このエコーを利用すれば中間圏や成層圏などの中性大気観測が可能になるので、次々とレーダーが建設されていくことになる。ISレーダーより小型だが中間圏(Mesosphere)、成層圏(Stratosphere)そして対流圏(Troposphere)を観測可能なレーダーがMSTレーダー、さらに小型で成層圏および対流圏を観測できるものがSTレーダーと呼ばれる。

我が国でも、4 節で詳述するように、IS レーダーと MST レーダーの中間に位置する世界最先端の MU(Middle and Upper atmosphere)レーダー⁷⁾が滋賀県信楽町(現 甲賀市)に、また赤道大気レーダーがインドネシアに(いずれも我々のグループによる)、超高層大気観測レーダーが鹿児島県山川町(現 指宿市)や北海道稚内市に(通信総合研究所(現 情報通信研究機構)による)それぞれ建設されている。大型レーダーで開発された技術がその後の気象用ウィンドプロファイラの開発へと発展していくことになる。

大型レーダーが受信する「天使のこだま」は、大気乱流による大気屈折率の揺らぎに起因する。乱流は風と共に流されるため、このエコーのドップラーシフトを測定することで風の観測が可能になる。1970 年代後半、米国は、ラジオゾンデ観測との比較から、大型レーダーによる風の観測可能性についての研究を行った。1980 年代前半までには、VHF/UHF 帯大型レーダーで風が十分観測可能であることが明らかになった。1983 年には、3 つの VHF/UHF 帯の周波数(50 MHz, 404 MHz, 915 MHz)のレーダーからなるコロラドウィンドプロファイリングネットワークが構築された。この施設を用いて観測手法や気象への応用性に関する種々の検証が行われ、その後、米国中西部に 400 MHz 帯ウィンドプロファイラ 35 台から成るネットワーク(WPDN: Wind-Profiler Demonstration Network)が 1992 年に完成した。これに続いて、世界各国で、ウィンドプロファイラの開発・改良・観測が精力的に行われ、我が国でも 1988 年に 404MHz ウィンドプロファイラが気象研究所に導入された。また、1.3GHz 帯のウィンドプロファイラが通信総合研究所と我々のグループで独立に開発された。4.3 節で述べるように、2001 年には、ウィンドプロファイラネットワークが気象庁により構築されている。

3. レーダーによる大気のリモートセンシング

上空の大気の状態を測定するには、計測機器を気球・航空機・ロケット等に搭載して対象となる大気層に持ち込んで測定する直接測定と、地上あるいは人工衛星から遠隔測定するリモートセンシングとに大別される。直接測定の代表例は、全国 18 ヶ所の気象台・測候所が定常気象観測のために用いているラジオゾンデである。気温・湿度・気圧センサーを小型気球にぶら下げて放球し、気球が上昇する間に時々刻々測定値を地上に電波伝送することで各大気パラメータの高度プロファイルを得ることができる。同時に気球の位置を GNSS で定め、気球位置の時間変化から水平風速を求めることもできる。一方、地上からのリモートセンシングの代表例がレーダーである。以下ではレーダーによる大気の観測法について述べる。

上で述べたように、中性大気の乱れ(乱流)は大気の電波屈折率変動をつくり出し、レーダー電波を散乱させエコーを返す。乱流は様々な大きさを持つ乱渦と呼ばれる渦の集まりで表現され、エネルギーは大きな渦から小さな渦に移っていき、やがて粘性のため熱となって消える。様々な大きさを持つ乱渦の中でも、レーダー電波の散乱に寄与するのは電波の波長の半分の大きさの渦だけである(Bragg 散乱)。粘性でつぶれる乱渦の最小スケールは対流圏では 1cm 程度であるが、高度と共に指数関数的に大きくなる。従って、高い高度からのエコーを受けるためにはレーダーの波長はできるだけ長い(周波数が低い)方がよい。

乱流(大気の乱れ)は背景の大気の流れつまり風に乗って移動(移流)していくので、これをトレーサーと考えてエコーのドップラーシフトから風速の視線方向(レーダービーム方向)成分を求めることができる。風のリモートセンシングには、ドップラー効果を用いる。近づいて来る救急車のサイレンは高く聞こえ、遠ざかる場合は低く聞こえるのがドップラー効果である。同様に、移動している物体に電波を当てると反射された電波の周波数は、その速度に応じて発射した周波数からずれる。この周波数のずれ(ドップラーシフト)は物体の速度に比例するため、ずれを測定することで速度を知ることができる。鉛直流を含む風速三成分は、天頂付近の異った 3 方向にアンテナビームを向けて、それぞれの視線方向速度成分から計算により求める。観測の間隔(時間分解能)は観測高度にもよるが 1~10 分程度であり、定常気象観測で用いられるラジオゾンデの放球は一日に 2 回であることに比べて、レーダー観測の時間分解能は格段に優れている。

一般に鉛直流(上昇下降流)は、水平風速に比べて 1 桁以上小さく、またラジオゾンデでは気球自体が浮力により上昇しているので、測定が困難である。ウィンドプロファイラでは鉛直上方にアンテナを向けることで、この量を直接に測定することができる。これから大気微量成分やエネルギーなどの鉛直輸送を定量的に見積もることができるなど、鉛直流を高精度に測定できることはウィンドプロファイラの最大の特長の一つである。

4. 京都大学で開発されたレーダーシステム

4.1 MU レーダー

我々のグループは、ヒカマルカレーダーによる乱流エコーの発見に前後して、大型レーダーの建設を計画し、1984 年 11 月、陶器で有名な滋賀県信楽町(現 甲賀市)の国有林内に完成させた^{8,9,10)}。このレーダーは MST レーダーとして世界最高性能を誇る他、IS レーダーとして超高層大気(Upper atmosphere)の一部も観測できるので MU(Middle and Upper atmosphere)レーダーと名付けられた。直径約 100m の円形凹地に八木アンテナ 475 基を設置しており(図 1)、送受信周波数は 46.5MHz である。

MU レーダーには当時の最先端のレーダー技術が取り入れられている。最大の特長は、従来の大型レーダーで一般に用いられてきた大電力増幅器による集中型送受信方式を採用せず、475 基の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式(アクティブ・フェーズド・アレイ・システム)を採用していることである。1 台の小型送受信機の送信電力は 2.4kW であるが、475 台の小型送受信機を同時に働かせることにより合計 1MW の送信電力を得ることができる。レーダーシステム全体がマイクロプロセッサを用いてソフトウェアにより制御される柔軟な構成となっており、その結果各アンテナについて送受信信号の自由な位相制御が可能となり、アンテナビーム方向をパルス送信毎に、最高 1 秒間に 2500 回という高速で走査できる。また、MU レーダーのアンテナは 25 個の小アンテナ群に分割することが可能であり、それぞれ独立な小型レーダーとしても動作する。この機能を使うとアンテナ全体を送信に用いて、散乱電波を複数の小アンテナ群で同時に受信するということが可能で、それぞれの小アンテナ群で受信された散乱電波のごくわずかな位相差を利用すると、乱流等の微細な構造を知ることができる。

MU レーダーは「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」(図 2)として、2015 年に IEEE マイルストーンに認定された¹¹⁾。これは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE が、IEEE の分野における歴史的偉業に対して認定する賞で、認定されるためには 25 年以上に渡って世の中で高く評価を受けてきたという実績が必要である。



図 1: MU レーダー。中央の円形の部分が 475 本の八木アンテナから構成されるフェーズド・アレイ・アンテナ(直径 103m)。

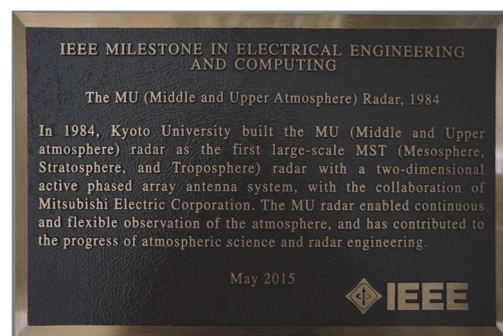


図 2: 電気電子情報通信工学分野における IEEE マイルストーン「MU レーダー(中層超高層大気観測用大型レーダー), 1984」

4.2 赤道大気レーダー (EAR)

「海洋大陸」と呼ばれるインドネシア域は、赤道域の中でも特に積雲活動が活発で、大気大循環の駆動源と言われているが、これまで中緯度域に比べて観測データが不足していた。そこで、MU レーダーの成果を背景に「赤道大気レーダー」(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)を開発し、2001年にインドネシア共和国西スマトラ州に建設した¹²⁾。赤道大気レーダーは、MU レーダーと同様に分散型送受信方式を採用しており、MU レーダーより一回り大きい直径約110 mの略円形フィールドに560基の3素子八木アンテナを配置している。図3に示すように、各八木アンテナの基部にそれぞれ半導体送受信モジュールが配置されており、電子制御によってアンテナビーム方向を高速走査できる特長を持つ。中心周波数は47 MHz、ピーク送信電力は100 kWであり、高度約1.5～20 km範囲を連続観測できる。

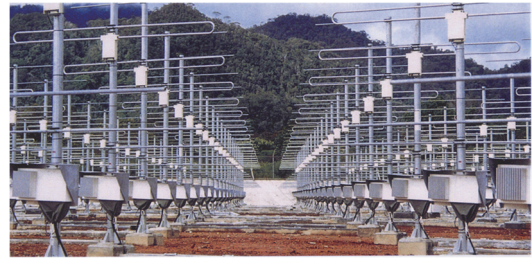


図3：赤道大気レーダーのアンテナ。

4.3 下部対流圏レーダー (LTR)

我々はMUレーダー観測の経験を活かして、1991年に高度2～3km以下の大気境界層を対象とした1357.5MHz(Lバンド)を用いた小型可搬式の境界層レーダー(Boundary Layer Radar; BLR)を開発した。翌年にはインドネシア共和国ジャカルタ近郊のスルポンに移設し、連続観測を行った¹³⁾。その後、境界層レーダーの可搬性の特長を残しつつ、より高高度の下部対流圏全域を観測可能な「下部対流圏レーダー」(Lower Troposphere Radar; LTR)を開発した¹⁴⁾。図4にLTRの外観を示す。4m×4mのフェーズド・アレイ・アンテナには、電磁結合ダイポールアンテナを採用しており、それぞれに5ビットの移相器を設けることで、ビームを±15°範囲内の任意の天頂角で天頂及び東西南北の5方向に高速に走査可能である。ピーク送信電力は2 kWで、最大8ビットのパルス圧縮も可能であるので、境界層レーダー1号機に比べて約100倍感度が向上している。その後も、船舶に搭載して観測可能とする船舶搭載型下部対流圏レーダー¹⁵⁾や、ルネベルグレンズと呼ばれる球形のアンテナを用いた下部対流圏レーダーの開発なども行っている。

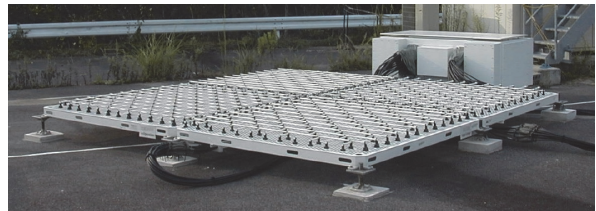


図4：下部対流圏レーダーのアンテナ。

気象庁は全国25地点に上記の下部対流圏レーダー(LTR)を設置し、これらによって構成される観測ネットワークにより高層風の観測業務を2001年4月に開始した。この観測網は「局地的気象監視システム；略称 WINDAS(Wind Profiler Network and Data Acquisition System；ウィンダス)」と名づけられ、各地点上空の高度400mから5km程度までの風を時間的にほぼ連続して測定している^{16,17)}。その後、ネットワークが拡充され、現在33地点で観測が行われている。WINDASのデータは観測間隔10分、通報間隔1時間で、中央監視局に集められ、気象予報モデルへの入力データとして利用され、日々の天気予報に貢献している。

気象庁は全国25地点に上記の下部対流圏レーダー(LTR)を設置し、これらによって構成される観測ネットワークにより高層風の観測業務を2001年4月に開始した。この観測網は「局地的気象監視システム；略称 WINDAS(Wind Profiler Network and Data Acquisition System；ウィンダス)」と名づけられ、各地点上空の高度400mから5km程度までの風を時間的にほぼ連続して測定している^{16,17)}。その後、ネットワークが拡充され、現在33地点で観測が行われている。WINDASのデータは観測間隔10分、通報間隔1時間で、中央監視局に集められ、気象予報モデルへの入力データとして利用され、日々の天気予報に貢献している。

5. 大気レーダーによる気象現象の観測例

本節では、下部対流圏レーダー(WINDAS)と赤道大気レーダーによる観測結果について、紙面の都合上、それぞれ1例ずつ取り上げて紹介する。

5.1 下部対流圏レーダーによる台風 0310 号の中心付近の観測

ウィンドプロファイラで観測される物理量は本質的に高さ方向(レーダー直上)の一次元量であるが、数分の時間間隔で観測を連続的に行える点が大きな特徴である。一方、我々は天気時々刻々移り変わっていくことを経験的に知っているが、これは様々な気象現象が西から東に向かって移動することによるものである。つまり、地上に固定されたウィンドプロファイラの上を気象現象が西から東に動いているのである。このことを利用して、地上に固定されたウィンドプロファイラで得られるのはレーダー上空の高さ・時間の二次元データであるものの、時間変化を空間構造に読み替えることで、現象の高さ・距離断面を得ることができる。

2003 年 8 月 7 日に台風 0310 号が鹿児島県名瀬市付近を発達しながら最接近し通過した。図 5 は、WINDAS 名瀬サイトの下部対流圏レーダーで捉えられた台風中心付近の鉛直流の台風中心からの距離・高度分布である。2m/s 以上の下降成分は雨滴の落下速度に対応しており、眼の壁雲と考えられるその領域では強い降水が見られたことが分かる。一方、距離 50km 以内では、降水は見られず、上昇流と下降流が激しく入れ替わっている様子が分かる。従来、台風を中心付近は下降流が支配的であると考えられていたが、本観測により、激しく上下に変動していることが初めて見出された¹⁸⁾。

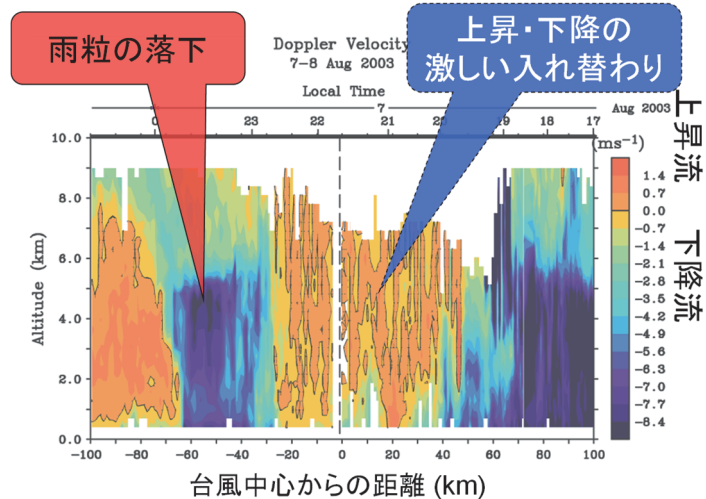


図 5: 下部対流圏レーダー(WINDAS 名瀬サイト)で観測された鉛直流の台風中心からの距離・高度分布。

5.2 赤道大気レーダーによる対流圏界面付近の観測

赤道域では地球上で最も活発な積雲対流活動により、各種の大気擾乱が励起されており、エルニーニョに代表される地球規模の気候・環境変動にも結びつく現象が発生している。特に海洋大陸と呼ばれる赤道インドネシア域で積雲対流活動は活発であるが、従来の観測データの蓄積は余りに不十分であった。そこで、我々は 2001 年に赤道大気レーダーを西スマトラ州の赤道直下に設置し、赤道大気の連続観測を行っている。

図 6 は赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化の一例である。×印はラジオゾンデ観測により得られた気温極小で定義される対流圏界面高度である。

成層圏領域において、東西風が 10 日程度の周期で変動しており、時間とともにその高度を下げる様子が見られる。東向き成分が対流圏界面に届いたところで、対流圏界面高度のジャンプが見られる。これは赤道ケルビン波と呼ばれる大気波動が、その領域で不安定(碎波)を引き起こす過程を詳細に捉え

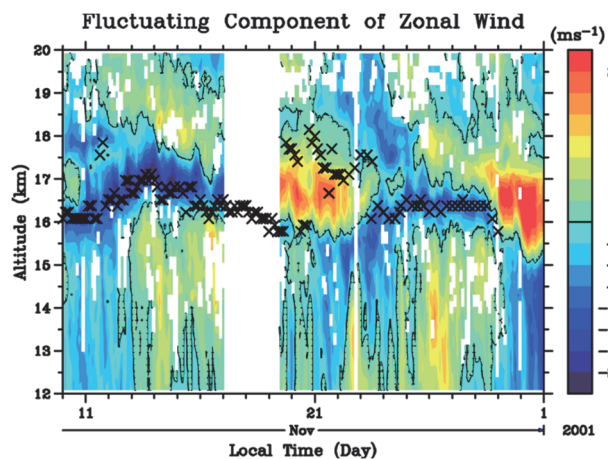


図 6: 赤道大気レーダー(EAR)で観測された東西風の時間・高度変化。

たものである。図は示さないが、赤道大気レーダーによる観測から碎波の発生と共に対流圏界面における大気乱流が増強しており、対流圏・成層圏の大気混合が発生していることが初めて明らかとなった¹⁹⁾。また、赤道大気レーダーの長期連続観測から、対流圏界面上部において風速シアによる不安定現象が準定常的に発生し、薄い大気乱流層が存在していることも明らかになっている²⁰⁾。これらは、通常は極めて交じり合いにくい対流圏と成層圏の大気塊が、大気波動現象と共に混合する様子を初めて観測的に実証したものである。

6. おわりに

本稿では、主に本研究所で開発している大気レーダー(ウィンドプロファイラ)及びそれらを用いた観測結果について述べた。赤道大気レーダー(EAR)は MU レーダーに比べて送信出力が 1/10 であり、中間圏や電離圏の IS 観測を行うには感度が不足している。また、受信チャンネルは 1 個のみであるため、空間領域のイメージング観測ができないなど、機能面でも MU レーダーに劣っている。下層大気で発生した大気波動が上方へ伝搬し、上層大気の運動を変化させる様子など、大気の構造・運動の解明をより一層進めるため、MU レーダーと同等の感度・機能を有する「赤道MUレーダー(EMU)」の新設を計画している。この EMU 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」は日本学術会議のマスタープラン 2014/2017/2020 の重点大型研究計画の一つとして採択されている。今後も大気レーダー研究の発展のため努力を続けていく。

参考文献

- 1) Lorenz, E. N., Deterministic Nonperiodic Flow, *J. Atmos. Sci.*, 20, 130-141, 1963.
- 2) Atlas, D. and C. W. Ulbrich, Early Foundations of the Measurement of Rainfall by Radar, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 86-97, 1990.
- 3) Kodaira, N. and J. Aoyagi, History of Radar Meteorology in Japan, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 69-76, 1990.
- 4) Hardy, K. R. and K. S. Gage, The history of radar studies of the clear atmosphere, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 130-142, 1990.
- 5) Tatarskii, V. I., Wave Propagation in a Turbulent Medium, *McGraw-Hill*, 285pp, 1961.
- 6) Woodman, R. F. and A. Guillen, Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, 31, 493-505, 1974.
- 7) 加藤進, 福山薫, 若杉耕一郎, 佐藤亨, 深尾昌一郎, 大型レーダーによる中層大気の観測, 「気象の遠隔測定 (I)」, *気象研究ノート*, 144, 1-55, 1982.
- 8) Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira, The MU radar with an active phased array system: 1. Antenna and power amplifiers, *Radio Sci.*, 20, 1155-1168, 1985a.
- 9) Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira, The MU radar with an active phased array system: 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, 20, 1169-1176, 1985b.
- 10) 加藤進, 橋口浩之, 津田敏隆, 山本衛, MU レーダー, *電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン B-plus*, 36, 236-242, 2016.
- 11) 橋口浩之, MU レーダーIEEE マイルストーン認定, *生存圏研究*, 12, 48-54, 2016.
- 12) Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M.K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, 38, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- 13) Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanaka, D. L. Tobing, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono, and H. Wiryosumarto, Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results, *Radio Sci.*, 30, 1043-1054, 1995.

- 14) Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama, and S. Watanabe, A lower troposphere radar: 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 915-931, 2004.
- 15) Kawano, N., H. Hashiguchi, K. Yoneyama, and S. Fukao, Lower atmosphere observations over the equatorial Indian Ocean with a shipborne lower troposphere radar during MISMO field experiment, *Radio Sci.*, 44 RS6011, doi:10.1029/2008RS003885, 2009.
- 16) 石原正仁, 気象庁がウィンドプロファイラ観測業務を開始, *気象*, 9, 17378-17384, 2001.
- 17) Ishihara, M., Y. Kato, T. Abo, K. Kobayashi, and Y. Izumikawa, Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 1085-1096, 2006.
- 18) Teshiba, M., H. Fujita, H. Hashiguchi, Y. Shigasaki, M.D. Yamanaka, and S. Fukao, Detailed structure within tropical cyclone "Eye", *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24805, doi:10.1029/2005GL023242, 2005.
- 19) Fujiwara, M., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, T. Horinouchi, and S. Fukao, Turbulence at the tropopause due to breaking Kelvin waves observed by the equatorial atmosphere radar, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1171, doi:10.1029/2002GL016278, 2003.
- 20) Yamamoto, M. K., M. Fujiwara, T. Horinouchi, H. Hashiguchi, and S. Fukao, Kelvin-Helmholtz instability around the tropical tropopause observed with the equatorial atmosphere radar, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2002GL016685, 2003.

著者プロフィール



橋口 浩之 (Hiroyuki Hashiguchi)

<略歴> 1990 年京都工芸繊維大学工芸学部電気工学科卒業／1992 年日本学術振興会 特別研究員 DC1 (京都大学超高層電波研究センター所属)／1995 年京都大学工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了 (工学博士)／同年日本学術振興会 特別研究員 PD (京都大学超高層電波研究センター所属)／1997 年京都大学超高層電波研究センター 助手／2001 年同大学宙空電波科学研究センター 助教授／2018 年同大学生存圏研究所 教授、現在に至る。

<研究テーマ> 大気観測用レーダーの開発とそれらを用いた気象観測への応用研究。

蛇紋岩地域の森林生態系における葉リター分解

中村 亮介^{1*}

Decomposition of leaf litter in serpentine ecosystems

Ryosuke Nakamura^{1*}

概要

蛇紋岩とは、かんらん岩などの超塩基性岩（SiO₂ 含量 45%以下）が熱変成を受けて生成した岩石であり、地表面積 1%以下を占めて世界に散在している。蛇紋岩が風化して生成した蛇紋岩土壌は、高濃度で重金属を含むなど、一般的な森林土壌にはみられない様々な特徴を有し、独自の生態系を育んでいる。例えば、米国カリフォルニア州における蛇紋岩土壌の面積は約 1%だが、その中には州全体の固有植物種の約 10%が存在するとされる。蛇紋岩生態系が成立するメカニズムを理解するためには、生態系内での重金属や栄養塩の循環パターンの解明が求められる。しかし、蛇紋岩生態系の元素循環を規定する有機物の分解速度と、その関連要因の知見は現在に至るまで乏しい。本総説では、日本における蛇紋岩地域の落葉広葉樹林を対象に、近年明らかになった葉リター分解過程とその関連要因、そして今後の課題・展望を解説する。

1. はじめに

森林における植物遺体（リター）の分解は、その生態系持続メカニズムに関わる重要なプロセスである。植物は成長に必要な元素を土壌から獲得・吸収するが、その元素の一部は植物の死後にリター分解を通じて土壌に還元されるという生態系元素循環を経る。リターは植物器官に応じて葉、枝、果実などに分けられ、中でも葉リターは生産量と分解速度が大きく、生態系元素循環において主要な役割を担う。

蛇紋岩生態系における葉リター分解の解明は、その貴重な生態系の保全と持続的な利用法の確立に貢献する。日本において、蛇紋岩土壌は北海道、愛知県、京都府、三重県などを含む広い地域にわたり散在的に分布している。蛇紋岩土壌はニッケルやコバルトなどの重金属を多く含み、窒素、リンなどの栄養塩類に乏しい^{1,2)} (図 1)。また排水性が高く、降雨後でもすぐに乾燥しやすい³⁾。したがって、植物や土壌微生物の生存には一般的に不利な土壌環境と考えられるが、蛇紋岩土壌に適応し、ニッケル耐性などを有する植物や微生物も報告されている^{4,5,6)}。既往研究の多くは蛇紋岩土壌に固有の植物種に焦点を当て、その重金属集積メカニズムを明らかにしてきた。中でも、葉における特定の重金属濃度が 1,000 ppm を超える植物は重金属超集積種とみなされ⁴⁾、重金属汚染土壌の改良や植



図 1: マレーシア国キナバル山の蛇紋岩土壌 (2016 年 3 月著者撮影)。

2020 年 6 月 24 日受理。

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

* E-mail: nakamura.ryosuke.7x@kyoto-u.ac.jp

物採鉱への利用に関心が高まっている^{7,8)}。このような重金属を多量に集積した植物の葉リター分解は遅くなると考えられるが、蛇紋岩生態系でリター分解を調べた研究は少ない⁹⁾。

2. 葉リター分解の定量方法

本稿では、葉リター分解を定量する方法として、一般によく用いられるリターバッグ法を概説する。蛇紋岩土壌で葉リター分解を調べた既往研究も、実験者の裁量で多少なり手順が改変されているが基本的には同じ方法を用いている^{10,11,12,13)}。以下では著者の経験に基づいた実験手順を示す。

まず、調査地で採集した葉リターを一定の重量で任意のサイズの不織布やメッシュ生地製の袋に入れ、リターバッグとよぶ分解試料を準備する(図2)。なお、網目の大きさに応じて対象とする分解者が変わるため、研究目的に沿った袋の選択に留意が必要である。市販の不織布のお茶パックは低価格かつ野外実験での耐久性にも優れており、著者は目視可能な土壌動物を排除し、細菌、真菌といった土壌微生物群集を対象とする分解実験に好んで用いている。作成したリターバッグは調査地に設置し、一定期間が経過した後に回収して残存量を測定する。

分解初期は主に易分解性基質の分解によりリター重量は速やかに減少するが、時間経過とともに難分解性基質が残存することでリター重量の減少速度は鈍化する。初期のリター重量に対する分解後のリター残存量の比、すなわちリター残存比率(Y)は時間経過とともに指数関数的に減少することが知られており、次のモデル式で近似される¹⁴⁾。

$$Y = e^{-kt}$$

ここで k は分解速度定数、 t は年単位の時間を示す。分解速度定数 k は大きいほど、リター分解が速やかに進行していることを表す(図3)。例えば、 $k = 1$ の時に1年後の残存率は37%($\approx e^{-1}$)となる。葉リター分解の評価に分解速度定数 k は非常に便利であるが、その推定には長期にわたるリター残存量の変化を記録する必要があるが、実際には任意の期間を経た後のリター残存率(%)のみを報告する場合も多い。



図2：京都府北部大江山の林床に設置されたリターバッグ。野生動物に持ち去られないように市販の園芸用ネットを被せて保護している(2016年6月著者撮影)。

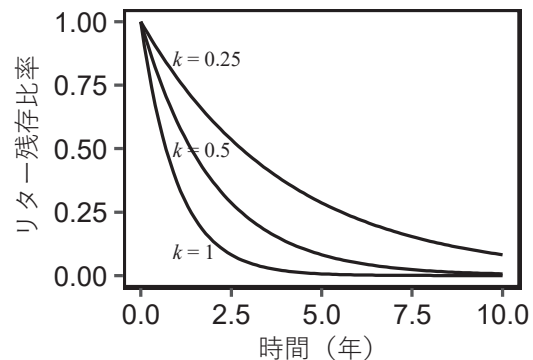


図3：上述の式($Y = e^{-kt}$)において、上側から順に $k = 0.25, 0.5, 1$ の曲線を示す(著者原図)。

3. 蛇紋岩生態系の葉リター分解とその規定要因

全球規模の葉リター分解は、気温や降水量などの気候条件に強く影響を受ける¹⁵⁾。しかし同様の気候条件下の葉リター分解は、分解基質や土壌中の分解者の違いにより強く影響される。蛇紋岩土壌は上述した特異的な理化学性から、葉リター分解においても他の生態系と異なるパターンを示しうる。以下では、近年の既往研究で明らかになってきた蛇紋岩生態系の葉リターと土壌環境の特徴から、その葉リター分解メカニズムを概説する。

3.1 葉リターの形質

葉リターの形質は、様々な物理化学的な特性において評価される。例えば、単位葉面積あたりの葉の乾燥重量 (LMA) は、値が大きいほど厚く頑丈な葉であることを示す指標である。葉リターの LMA は植物種に応じて大きく異なり、これは植物の資源利用戦略において生葉の形質間で生じるトレードオフ関係を引き継いでいる。例えば、LMA は窒素 (=タンパク質) 濃度や光合成能力といった他の形質と負の相関を示す¹⁶⁾。この種間における生葉の形質の値のばらつきは、葉が死んだ後のリター分解にも大きな影響をおよぼす。葉リターの形質の中でも、上述した LMA は分解速度定数 k と強く負に相関する¹⁷⁾。また葉リターの化学特性に関して、細胞壁を構成するリグニンは難分解性であり、リグニン-窒素比 (分解にかかるコストとベネフィットの指標) も分解速度定数 k と強く負に相関する¹⁷⁾。

蛇紋岩地域の生態系では、Boyd らによって葉リターのニッケル含量 ($> 10,000 \text{ mg Ni kg}^{-1}$) がリター分解に強い負の影響を与えることが報告されているが¹¹⁾、彼らの研究では LMA やリグニン-窒素比といった他の葉リター形質が考慮されていなかった。近年、佐藤らと中村らは京都府北部大江山の蛇紋岩地域の落葉広葉樹林でリターバッグ法を用いた実験を行い、分解に強く影響する形質が樹木種に応じて異なることを報告した^{12,13)} (図 4)。中村らが対象とした落葉広葉樹 3 種は堆積岩地域と蛇紋岩地域の両方に生育しており、それぞれの地域から採集した葉リターの残存率を評価した¹³⁾。蛇紋岩土壌に生育するリョウブ (*Clethra barbinervis*) では重金属含量 (ニッケルとコバルト) と LMA が高いことでリター残存率が大きくなった。一方、蛇紋岩土壌に生育するコナラ (*Quercus serrata*) は、葉リターの重金属含量は高くないが、リグニン-窒素比が高いことでリター残存率が大きくなった。蛇紋岩土壌に生育するホオノキ (*Magnolia obovata*) の葉リター残存率も大きくなったが、重金属含量を含めてリター分解に関係する形質に明らかな値の特徴は認められなかった。したがって、従来のニッケルなどの重金属含量の視点からだけでは蛇紋岩生態系の葉リター分解の全容解明に至らないことが明らかになり、今後は重金属含量以外の形質も考慮した研究が求められる。

ただし、中村らが調べた蛇紋岩生態系のリョウブのニッケル含量は $218.7 \text{ mg Ni kg}^{-1}$ であり、他の日本の蛇紋岩地域に生育するリョウブと比べて値が低いことから、大江山の蛇紋岩土壌は植物に吸収されうるニッケルの可給性がそもそも低いという可能性には留意しておくべきだろう¹³⁾。また、Boyd らが対象とした蛇紋岩生態系はニッケルを高濃度で集積する多年草が優占する草原である一方¹¹⁾、大江山の蛇紋岩土壌では、重金属を含まない堆積岩土壌でも見られる樹木が生育しており、世界的に見ても特異的に土壌重金属含量が低いのかかもしれない。近年の研究から、大江山ではゴビ砂漠由来の風成塵が土壌生成過程に大きく影響をおよぼす可能性が指摘されており¹⁸⁾、系外からの降下物がもたらす希釈効果を通じて、蛇紋岩由来の重金属毒性が緩和されたのかかもしれない。

Adamidis らは、ギリシャの蛇紋岩生態系において、生育する植物の優占度 (バイオマス) で重み付けした複数種を含む混合葉リターを作成し、ニッケルを高濃度で集積する種の葉リターに混合葉リタ



図 4：京都府北部大江山の風景。(a) 堆積岩地域の森林 (左側から共同研究者 岡田直紀氏、河合清定氏、斎藤悠氏)、(b) 蛇紋岩地域の森林 (左下は斎藤悠氏) (2016 年 6 月 著者撮影)。

一の分解を遅らせる効果があるかを調べた¹⁰⁾。結果は予測と反し、混合葉リター分解に対するニッケル集積種の負の効果は認められなかった。理由は定かでないが、実験に用いられた混合葉リターのニッケル含量は2,863-11,937 mg Ni kg⁻¹であり、Boydらによって提唱された分解に負の影響を及ぼす閾値(10,000 mg Ni kg⁻¹)とあまり差がなかったからなのかもしれない¹¹⁾。

3.2 土壌環境

葉リター分解は、土壌 pH を反映した微生物群集の組成の違いに強く影響を受けることが知られている。一般に土壌 pH が低い環境は、土壌 pH が高い環境と比べてリター分解速度が小さい傾向にあるが、これは土壌 pH が低い環境では真菌群集が、土壌 pH が高い環境では細菌群集がリター分解に大きく関与するためである¹⁹⁾。真菌群集は、とりわけ細胞壁構成成分の分解に重要であり、褐色不朽菌は細胞壁構成成分であるセルロースの分解に、白色不朽菌はリグニンの分解において主要な役割を担う。

大江山の蛇紋岩地域の土壌は、堆積岩地域の土壌と比較して pH が 1.5 ほど高く²⁰⁾、細菌群集が優占する環境と考えられる。したがって、蛇紋岩土壌ではリター分解が速く進行する可能性があるが、降雨時を除く恒常的な乾燥条件や高い重金属含量といった分解に対する強い負の影響を考慮すると、葉リターの分解は遅くなるとも考えられる。佐藤らと中村らは大江山の各地域の森林に上述した落葉広葉樹 3 種の葉リターを入れたリターバッグを設置し、その残存率を比較した^{12,13)}。中村らの結果によると、堆積岩土壌に比べ、蛇紋岩土壌で 456 日後の葉リター残存率が小さくなり、蛇紋岩土壌で葉リター分解がより速やかに行われていた¹³⁾。この結果は土壌 pH に基づく予測と合致しているが、残存した葉リターに付着した微生物の分解活性(単位時間あたりの呼吸速度)を最適な温湿度条件下で調べると、堆積岩土壌と蛇紋岩土壌の間で有意な違いはなく、蛇紋岩土壌における分解の速さが微生物群集の違いにどれくらい起因するのかは未だに疑問が残っている。

今後、蛇紋岩土壌におけるリター分解と微生物群集の関係解明に向けて、微生物群集組成の定量や現場における継続的な土壌呼吸測定が必要であろう。リン脂質脂肪酸分析法は、細菌と真菌群集の組成とバイオマスを調べる手法として近年多くの研究で用いられており、蛇紋岩土壌における分析でも重要な知見をもたらすと期待される。現場での継続的な土壌呼吸速度の測定は、本稿で紹介したリターバッグ法と同じく生態系におけるリター分解速度の評価に用いられるが、自然の様々な温湿度条件下での土壌微生物活性を新たに評価できる。土壌呼吸速度は、土壌孔隙内の水分が過不足でない中間的な含水率で最大の値を示す。中村らが測定した残存葉リターからの呼吸速度は最適環境条件下での瞬間的な値であり¹³⁾、継続的な土壌呼吸測定からは、例えば、排水性の高い蛇紋岩土壌の土壌呼吸速度は降雨時により急激に増加するといった傾向が明らかになるかもしれない。

4. おわりに

上述してきた大江山の蛇紋岩地域における結果をまとめると、どのように蛇紋岩生態系が維持されるのかという問いの答えに迫る、一つの自然メカニズムを概観することができる(図 5)。蛇紋岩土壌は、堆積岩土壌には見られない特異的な性質から、植物がストレスを強く受ける環境である。しかし、植物は種ごとに異なる資源利用戦略を取りながら、その厳しい環境に適応している。本稿で着目した葉リター分解に関して、蛇紋岩生態系に生育する樹木は難分解性の葉リターを生成することがわかってきた。驚くべき点は、対象としたどの植物も難分解性の葉リターを生成するが、その難分解性に寄与する物理化学的特徴が種ごとに大きく異なっていることであろう。例えば、蛇紋岩生態

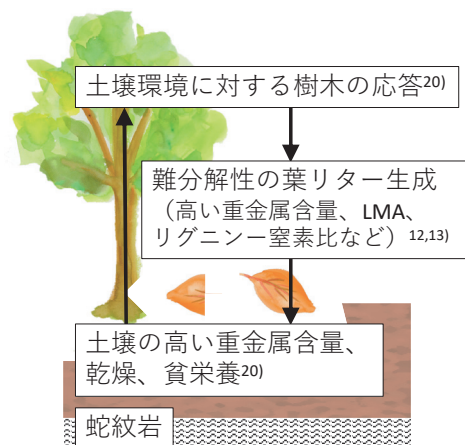


図 5：京都府北部大江山の蛇紋岩生態系における葉リター分解の概要(著者原図)。

系に生育するリュウブは、重金属を高濃度で集積し、かつ力学的強度を上げる分厚い葉を生成することが葉リターの難分解性に関係する。一方で蛇紋岩生態系に生育するコナラは、葉の窒素濃度が低い（リグニン-窒素比が大きい）ことが葉リターの難分解性に大きく関係する。世界における蛇紋岩生態系の既往研究では植物の重金属濃度から葉リターの質が評価されてきたが、京都府北部大江山における研究成果は、蛇紋岩生態系における葉リターの質のより多様な評価のあり方に一石を投じるものである。葉リターの質の評価が進む一方で、蛇紋岩生態系における葉リター分解速度を規定するもう一つの重要な要因である微生物群集の働きについては未だ答えられずにいる数多くの問いが存在する。例えば、蛇紋岩土壌における微生物群集を特徴づける細菌・真菌群集の組成は、堆積岩土壌と比べてどのように異なるのか？微生物群集の組成の違いはどのように土壌環境条件に影響を受け、葉リター分解に影響するのか？今後は他の生態系の研究で分析・解析技術が進む、細菌・真菌の群集組成およびバイオマスの評価を通じて、蛇紋岩生態系における難分解性リターの分解に関与する微生物群集の働きを明らかにしていくことが期待される。

参考文献

- 1) Proctor, J., Plant ecology of serpentine. III. The influence of a high magnesium/calcium ratio and high nickel and chromium levels in some British and Swedish serpentine soils. *J. Ecol.*, **59**, 827-842, 1971.
- 2) Kitayama, K., Aiba, S.I., Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo. *J. Ecol.*, **90**, 37-51, 2002.
- 3) Brooks, R.R., Serpentine and its vegetation: a multidisciplinary approach. Dioscorides Press, Portland, 1987.
- 4) Baker, A., Brooks, R., Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, **1**, 81-126, 1989.
- 5) Schlegel, H., Cosson, J.P., Baker, A., Nickel-hyperaccumulating plants provide a niche for nickel-resistant bacteria. *Botanica acta* **104**, 18-25, 1991.
- 6) Whittaker, R.H., The Ecology of Serpentine Soils. *Ecology*, **35**, 258-259, 1954.
- 7) Chaney, R.L., Angle, J.S., McIntosh, M.S., Reeves, R.D., Li, Y.M., Brewer, E.P., Chen, K.Y., Roseberg, R.J., Perner, H., Synkowski, E.C., Using hyperaccumulator plants to phytoextract soil Ni and Cd. *Z. Naturforsch. C.*, **60**, 190-198, 2005.
- 8) Chaney, R.L., Angle, J.S., Broadhurst, C.L., Peters, C.A., Tappero, R.V., Sparks, D.L., Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. *J. Environ. Qual.*, **36**, 1429-1443, 2007.
- 9) Kazakou, E., Dimitrakopoulos, P.G., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Troumbis, A.Y., Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level. *Biol. Rev.* **83**, 495-508, 2008.
- 10) Adamidis, G.C., Kazakou, E., Aloupi, M., Dimitrakopoulos, P.G., Is it worth hyperaccumulating Ni on non-serpentine soils? Decomposition dynamics of mixed-species litters containing hyperaccumulated Ni across serpentine and non-serpentine environments. *Ann. Bot.*, **117**, 1241-1248, 2016.
- 11) Boyd, R.S., Davis, M.A., Balkwill, K., Does hyperaccumulated nickel affect leaf decomposition? A field test using *Senecio coronatus* (Asteraceae) in South Africa. *Chemoecology* **18**, 1-9, 2008.
- 12) Sato, K., Nakamura, R., Kajino, H., Kawai, K., Nakai, W., Saito, H., Okada, N., Leaf decomposition in a cool-temperate broad-leaved forest established on serpentine soil on Mount Oe, Japan. *Ecol. Res.*, **34**, 678-686, 2019.
- 13) Nakamura, R., Kajino, H., Kawai, K., Nakai, W., Ohnuki, M., Okada, N., Diverse recalcitrant substrates slow down decomposition of leaf litter from trees in a serpentine ecosystem. *Plant Soil*, **442**, 247-255, 2019.
- 14) Olson, J.S., Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, **44**, 322-331, 1963.
- 15) Aerts, R., Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship.

- Oikos*, **79**, 439-449, 1997.
- 16) Wright, I.J., Reich, P.B., Westoby, M., Ackerly, D.D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J.H.C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P.K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B.B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., Midgley, J.J., Navas, M.L., Niinemets, U., Oleksyn, J., Osada, N., Poorter, H., Poot, P., Prior, L., Pyankov, V.I., Roumet, C., Thomas, S.C., Tjoelker, M.G., Veneklaas, E.J., Villar, R., The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, **428**, 821-827, 2004.
 - 17) Kurokawa, H., Nakashizuka, T., Leaf herbivory and decomposability in a Malaysian tropical rain forest. *Ecology*, **89**, 2645-2656, 2008.
 - 18) Nakao, A., Tomita, M., Wagai, R., Tanaka, R., Yanai, J., Kosaki, T., Asian dust increases radiocesium retention ability of serpentine soils in Japan. *J. Environ. Radioact.*, **204**, 86-94, 2019.
 - 19) Bardgett, R.D., Wardle, D.A., Aboveground-belowground linkages: biotic interactions, ecosystem processes, and global change. Oxford University Press, Oxford, 2010.
 - 20) Kawai, K., Saito, H., Kajino, H., Nakai, W., Nakamura, R., Sato, K., Okada, N., Leaf water relations and structural traits of four temperate woody species occurring in serpentine and non-serpentine soil. *Ecol. Res.*, **34**, 485-496, 2019.

著者プロフィール



中村 亮介 (Ryosuke Nakamura)

＜略歴＞ 2015 年岡山大学総合農業科学科卒業／2020 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了（農学博士）／同年同大学生存圏研究所学際萌芽研究センターミッション専攻研究員、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞母岩が異なる土壌からの炭素放出と微生物群集の関係。熱帯林樹木のケイ素集積多様性とその落葉を介してのケイ素フラックスとの関係。＜趣味など＞散歩、写真撮影、銭湯めぐり、料理。

木材細胞壁成分同士はどのように接着しているのか？

ー リグニン-多糖複合体の構造解析 ー

安藤 大将^{1*}

What are the bonding structures between cell wall components?

- Analysis of Lignin-Carbohydrate Complex (LCC) bonding sites -

Daisuke Ando^{1*}

概要

化石燃料への過度な依存が地球環境面に深刻な影響を及ぼしており、国連では持続可能な開発目標である SDGs が採択され、持続可能な社会の構築は直近の世界の課題となっている。そのため、近年、非可食性バイオマスの有効利用が着目され、研究が盛んである。なかでも、木質バイオマスは地球上最大の物質量を誇るため、未使用バイオマスをいかに利用していくかが今後の課題である。多量の物質量を誇っている木質バイオマスの主成分はセルロース、ヘミセルロースを主とした多糖類と芳香族高分子であるリグニンからなる。そのため、バイオマスは3種類の高分子のコンポジットであるといえる。その複雑さゆえ、化学構造に立脚した利用戦略はまだ展開の余地がある。その上で、成分間はどうなっているのかを知ることは木材の性質の解明やバイオマスの利用において重要な知見となりうる。本総説では、木材細胞壁成分のなかでも複雑な成分であるリグニンに着目し、細胞壁中の他成分とどのような結合様式で結合しているのかに焦点をあて、近年、よく用いられている NMR(Nuclear Magnetic Resonance)法を用いた木材細胞壁成分の構造解析研究を紹介する。また、それに関して筆者が関わってきた研究についても紹介する。

1. はじめに

木質バイオマスは主に細胞壁成分からなり、その主成分としてセルロース、ヘミセルロース、リグニンが挙げられる。植物細胞壁はよく鉄筋コンクリートに例えられ、セルロースは鉄筋、ヘミセルロースおよびリグニンはコンクリートのように説明される。セルロースは繊維という形態をとり、ヘミセルロースとリグニンがそれらの間隙を充填するように存在しており、未だ各成分を完全に分離することはできない。このとき、"細胞壁成分はどのように接着されているか？"という疑問が浮かぶ。分子同士の絡み合い、物理的結合など様々な要因が考えられるが、その一つの要因に細胞壁成分間の共有結合の存在が挙げられる。これらはリグニン多糖複合体 LCC (Lignin-Carbohydrate Complex) 中に存在する LC 結合(Lignin-Carbohydrate linkage)と呼ばれている。この LC 結合は木材中での存在量が少ないにも関わらず、木材の物性や化学反応性に大きな影響を与えられているため、以前から研究が行われてきた。

2020 年 9 月 4 日受理.

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

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

本総説では、近年バイオマス（特にリグニン）の化学構造解析によく用いられている Kim および Ralph らが開発した木材への NMR 適用法¹⁾を簡単に解説するとともに、2 次元 NMR 法を用いた LC 結合に関する研究をいくつか紹介する。

2. 木材細胞壁中の成分間の結合様式

2.1 NMR を用いた木材の構造解析手法

2.1.1 木材細胞壁の NMR 分析の困難さ

これまで、様々な手法を用いて木材成分の化学構造解析研究は行われてきた。なかでも、NMR 法は有機化学分野での構造決定に一般的に利用される手法であり、木材成分に対しても利用されてきた。たとえば、磨砕リグニン（Milled Wood Lignin: MWL）など、溶媒溶解性を有する試料が測定されてきた。木材細胞壁試料は複雑な高分子複合体であり、1 次元のスペクトルではオーバーラップによるピーク分離が困難であるため、詳細な情報を得ることは難しかった。そこで、近年では、2 次元 HSQC(Heteronuclear Single-Quantum Correlation spectroscopy) NMR での構造解析が盛んになっている。一方で、木材細胞壁試料は不溶性であるため、液体 NMR ではほぼスペクトルは得られず、木材中の各成分の構造情報を得ることはできなかった。

2.1.2 木材細胞壁のための gel state NMR 法

それらの問題を解消したのが、Kim と Ralph らが開発した gel state NMR 法である。この手法では木材細胞壁成分のためのサンプル調製法が鍵となっている。

サンプル調製法を次に示す。アルベン抽出後、ウィーレーミルで調製した脱脂木粉を遊星型ボールミルで粉碎し、ボールミル処理木粉を得る。これを 50 mg 程度、NMR の測定用サンプルチューブに入れ、NMR 測定用混合溶媒である DMSO-*d*₆/Pyridine-*d*₅ (v/v, 4/1) を 0.6 ml 加えて、ソニケーターを用いて膨潤させる。得られたサンプルチューブを HSQC NMR 測定に供する。そして、Kim 博士、Ralph 教授らによるデータベース¹⁾²⁾³⁾に基づいて、帰属することができる。その方法に従い、筆者が得たスペクトルと検出された成分を図 1 に示す。NMR 測定機器（500MHz 以上のクライオプローブ付きが望ましい。それ以下でも時間をかければ測定できる場合がある。）であれば、

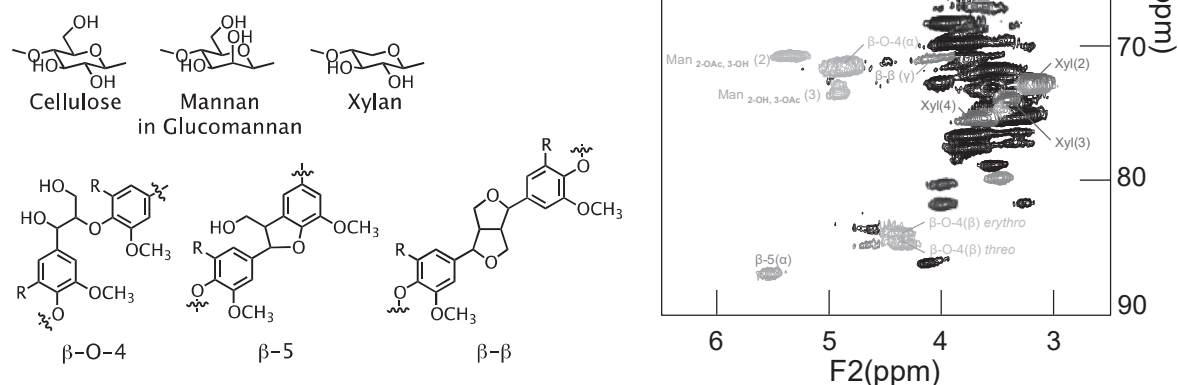


図 1：(左) スペクトル中に検出される細胞壁成分の主な化学構造 (右) HSQC スペクトル (スギ)

定性分析の場合は通常の HSQC NMR 測定パラメータを用いればよく、パラメータの詳細は Kim らの文献⁴⁾に記載されており、それほど特別なものではない。この手法により様々なリグニンおよびリグニンを含む細胞壁成分の化学構造が示され、遺伝子組換え植物の研究分野のみならずさまざまな分野で盛んに利用されている。

2.1.3 2 次元 NMR の良さ

ここで、HSQC NMR で検出しているシグナルは"C-H の結合"である。この利点であるが、まず、図 1 (上部) に示すように ^1H 軸 (F2 軸) だけ、すなわち一次元の ^1H -NMR スペクトルだけ見た時、3~5 ppm の領域に存在するピークは検出されるが、ピークはほとんど分離されず、ブロードなものとなる。これだけでは、重要な情報は得られない。しかし、 ^{13}C 軸 (F1 軸) を加え、展開することで、F1 軸方向にピークが分離され、図 1 (下部) に示すようなスペクトルが得られ、木材成分の構造情報を得ることができる。このような成分の化学構造情報を抽出された木材成分からだけではなく、木材からも得ることが大きな進歩であり、これらの情報は細胞壁成分の謎の解明や、バイオマスの利用に役立つことが期待される。具体的には、完全な成分分離技術の開発などである。

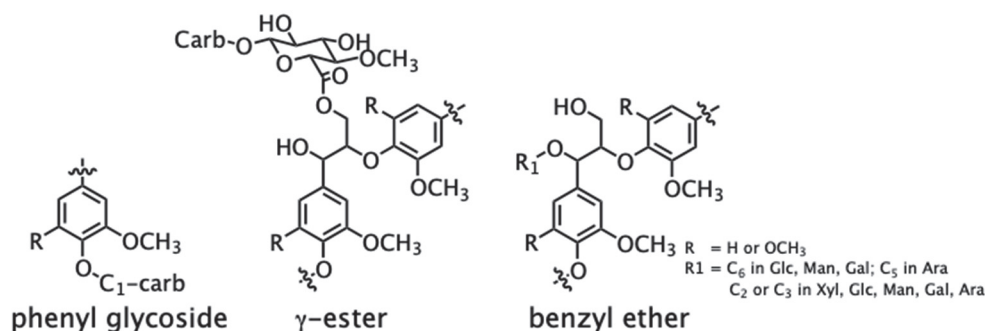


図 2：主なリグニン多糖複合体：フェニルグリコシド型、 γ エステル型、ベンジルエーテル型（左から）

2.2 リグニンと多糖類との成分間の結合

Erdman⁵⁾がその存在を提唱して以来、細胞壁におけるリグニン-多糖間の共有結合、すなわち LC 結合について、多くの研究が行われてきた。バイオマス成分を分離するための様々な分画法の研究⁶⁾⁷⁾からはじまり、開発された様々な分解法から得られた分解物のフラグメント解析^{8)~11)}に至り、近年では NMR 法を用いた構造解析^{12)~16)}へと展開されている。これらの研究の結果、リグニンと多糖類、特にヘミセルロースとの結合の可能性が示唆されてきた。リグニンの主要構造である β -O-4 構造に着目すると、結合できる箇所が 3 つ：フェノール性ヒドロキシ基、 γ 位（一級）ヒドロキシ基、 α 位（二級）ヒドロキシ基、であり、そのそれぞれに特徴的な結合が存在する。現在、LC 結合構造として、フェニルグリコシド型、エステル型、ベンジルエーテル型が存在すると考えられている（図 2）。以下、ここでは分解法を伴う解析を"破壊的アプローチ"、NMR 法を用いた解析を"非破壊的アプローチ"とする。破壊的アプローチ、非破壊的アプローチを一部紹介し、最後に筆者らが以前関わったハイブリットなアプローチについて紹介する。

2.2.1 破壊的(分解法などを用いた)アプローチ

破壊的アプローチとは、試料をアルカリ加水分解、酸加水分解、酵素処理などの方法で分解し、得られた分解物を解析することで、LC 結合構造を推定するものである。このアプローチには、色々な試料に適用できるという利点があるが、厳しい反応条件下では分析対象とする LC 結合が完全にもし

くは部分的に開裂してしまうという欠点がある。また、得られたデータは間接的である。その中でも、Watanabe らによる DDQ(2,3-dichloro-5,6-dicyano-*p*-benzoquinone)酸化反応を用いた LC 解析¹⁷⁾では、非常に詳細なデータが報告されている。ベンジルエーテル型とエステル型に対して、それぞれに合わせた分解および解析法を開発した。

ベンジルエーテル型の分析では、試料のアセチル化後、続く DDQ 酸化により、LC 結合を開裂したのち、メチル化する。これにより、多糖におけるリグニンとの結合位置がメチル基によりタグづけされる。その後、加水分解による多糖分解物の解析を行うことで、リグニンと結合している多糖類に関する知見を得た。その結果、アセチルグルコマンナンの一級ヒドロキシ基もしくはアラビノグルクロノキシランの二級ヒドロキシ基(2 位もしくは 3 位)がリグニンと結合していることを報告している。また、エステル型の分析では、ジアゾメタンメチル化後の DDQ 酸化により結合を開裂する。その後、グルクロン酸残基に存在するカルボン酸を分解物から検出することで結合の存在を明らかにした。それにより、 α 位もしくは γ 位にエステル結合が存在することを結論づけている。¹⁷⁾

2.2.2 非破壊的(NMR 法を用いた)アプローチ

非破壊的アプローチとは試料を物理的破壊以外の処理を伴わず、そのまま分析し、解析することで、LC 結合構造を推定するものである。利点として、分解反応などを伴わないため、天然に存在するままの LC 結合の化学構造を見ることができる。一方で、欠点としては LC 結合の含有量が少ないため、多段階の抽出操作を行うなどの試料調製が必要である。

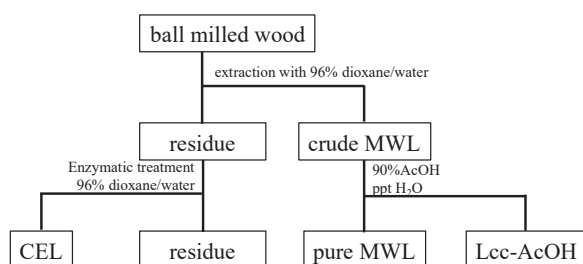


図 3：分画法

しかし、一度測定して得られた 2 次元 HSQC NMR スペクトル上では、これらの構造由来の一部のシグナルは特異な位置に現れる。フェニルグリコシド型では結合している多糖の 1 位の CH のシグナルが、エステル型では結合している γ 位の CH のシグナルが、ベンジルエーテル型では α 位の CH のシグナルが、通常とは異なる領域に検出される。2 次元 NMR での解析例については Balakshin らによる研究が広く知ら

れている^{12) 13)}。抽出リグニンである crude MWL から抽出した糖含有画分を試料として、分析を行っている。このように LC 結合の含有量が少ないため、分析するための試料調製は必須である。試料の分画法を図 3 に示す。ボールミル木粉から、96%ジオキサン・水混合溶液で crude MWL を抽出し、その後の精製により pure MWL を得て、別途 LCC-AcOH を得た。また、一方で抽出残渣に対し、酵素処理を施すことで、Cellulose Enzymatic Lignin (CEL) という試料を得た。この 4 種の試料 (crude MWL, pure MWL, LCC-AcOH, CEL) を分析に供している。MWL はリグニンリッチな、LCC-AcOH と CEL は多糖リッチな試料である。

実際にこれらの HMQC NMR 分析を行い、フェニルグリコシル型の糖の一位のシグナルが 101.4~102.6 ppm / 4.94~5.17 ppm の領域に、 γ エステル型のリグニンの γ 位のシグナルが 62~65 ppm / 4.00~4.50 ppm の領域に、ベンジルエーテル型のリグニンの α 位のシグナルが 80.0~82.5 ppm / 4.3~4.7 ppm の領域に各々存在することを示した。スペクトルは著作権の関係上載せることはできないので論文¹²⁾を参照していただきたい。その結果、フェニルグリコシド型はリグニンのフェノール性ヒドロキシ基に多糖の 1 位が、 γ エステル型はリグニンの γ 位にグルクロン酸基の 6 位カルボン酸が、ベンジルエーテル型はリグニンの α 位には多糖の 6 位の一級ヒドロキシ基もしくは 2,3 位の二級ヒドロキシ基が、結合していることを報告している。

さらに、定量 ¹³CNMR と HSQC NMR の組み合わせ、定量測定をおこなっている。その結果によると試料に依存するものの、針葉樹である Pine ではベンジルエーテル型が 2.3~5.8 (100 芳香核単位あたり)、フェニルグリコシド型が 0~7.2、 γ エステル型が 1.8~4.9、広葉樹である Birch ではベンジル

エーテル型が 0.7~2.5 (100 芳香核単位あたり)、フェニルグリコシド型が 0~7.2、 γ エステル型が 1.8~4.9 存在していることが明らかになった。すなわち、針葉樹ではベンジルエーテル型やフェニルグリコシド型の含有量が高く、一方で広葉樹では γ エステル型の含有量が高い傾向があった。また、溶媒抽出で調製する LCC-AcOH や MWL はフェニルグリコシド型や γ エステル型の LCC を、抽出残渣から調製する CEL はベンジルエーテル型の LCC をそれぞれ多く含むことも示唆された。さらに、最近 Nishimura ら¹⁴⁾は HSQC-NMR 測定だけでなく、HMBC-NMR 測定、HSQC-TOCSY-NMR 測定を用いて、C-H の結合だけでなく、それに隣接する H のつながりを追跡した。ベンジルエーテル型 LC 結合に焦点を絞り、アカマツの MWL 抽出残渣からの水抽出物を精製した LCC 試料を用いている。リグニン部分に関してはグルコマンナンの 6 位におけるリグニン α 位との相関、そしてその α 位における γ 位との相関により、リグニン部分を β -O-4 構造と確定し、糖部分は 6 位における 5 位との相関、そして、4 位における 3 位および 1 位との相関からグルコマンナンのマンノース残基であることを確定している。結果として、リグニンの β -O-4 構造の α 位とグルコマンナンのマンノース残基の 6 位の 1 級ヒドロキシ基が結合していることを報告した。また、Miyagawa ら¹⁵⁾¹⁶⁾はフェニルグリコシド型モデル化合物を合成し、NMR 解析のためのデータベースを構築した。グルコース、ガラクトース、キシロース、マンノースの 1 級ヒドロキシ基で各種モノリグノールもしくはその類似体とフェニルグリコシド結合させた 12 種のフェニルグリコシド型モデル化合物を合成しており、糖残基の 1 位の C-H シグナルをまとめたデータベースを報告した。そして、マツ、ユーカリ、アカシア、ポプラ、タケ由来の LCC-AcOH の HSQC-NMR スペクトルにおいて、G 核とのフェニルグリコシド結合に一致するピークがみられ、また、アカシア、タケについては S 核とのフェニルグリコシド結合由来のピークがみられた。それにより、フェニルグリコシド結合の存在を示し、関わっているリグニンの芳香核情報を得たことは重要である。

さらに、このグルコースとのモノリグノールフェニルグリコシドモデル化合物とコニフェリルアルコールを用いた、ペルオキシダーゼおよび β -グルコシダーゼを含むバイオメティックな環境下での脱水素重合により得た DHP 中でもフェニルグリコシドの存在を確認した。このことから、その生成機構において、グリコシドのキノンメチドへの求核付加と β グルコシダーゼによるグリコシル基の転移が関わっている可能性を示唆している。このように、2 次元 NMR が導入され、研究が進められたことで、天然に存在する LCC に関する様々な知見がより詳細に解明されてきた。しかし、木材中の LC 結合については未知な部分が存在する。そこで、筆者はリグニン分解法と NMR の解析を組み合わせることで材の主要な部位に含まれる LC 結合の構造解析を試みており、最後にこれを紹介する。

2.2.3 ハイブリッド(分解法+NMR 法)な新規アプローチ

ハイブリッドな新規アプローチとは、LC 結合を保持するリグニン分解法を試料に適用したのち、NMR 法による解析に供するものである。利点は様々なサンプルに適用できる可能性があること、すなわち、非常に希少な抽出試料だけでなく、材など多量に存在する試料にも適用できる。欠点はそのような温和なリグニン分解法が存在しなかったことである。そこで、筆者は LC 結合の解析のための温和なリグニン分解法を開発し、LC 結合の構造解析を試みてきた。図 4 に示すように、まず複雑な構造のリグニンを選択的に分解し、その後、多糖類を酵素処理により分解するというアプローチである。

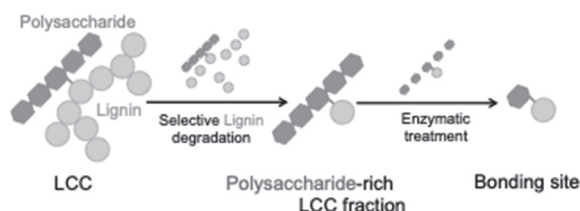


図 4: LC 結合部位単離のためのアプローチ

今回は、リグニンの選択的分解法の開発、および、それを利用した LCC 構造解析について紹介する。まず初めに、LC 結合の開裂を伴わないリグニン分解法である γ -TTSA 法を開発した (図 5)。¹⁸⁾ 従来

のリグニン分解法では、強反応条件であるため副反応として LC 結合の開裂反応が進行し、LCC の構造解析には適さなかったからである。この手法では、リグニンの主要結合である β -O-4 結合を選択的に開裂することで、リグニンを分解する。 γ 位のヒドロキシ基の反応性を利用して、スルホン基を導入し (図 5 反応 a-c)、温和な条件で結合を開裂することができるため、余分な副反応を抑制でき、 γ エステル型以外の天然の LC 結合が保持される。リグニン構造をうまく制御すれば、副反応を極力抑えたリグニン分解が可能であることを示す共に、リグニンの化学構造に立脚した戦略の重要性を示した結果である。

この γ -TTSA 法を、実際に、比較的 β -O-4 構造の比率が高いユーカリ由来のリグニン試料に適用した。¹⁹⁾ 結果、 β -O-4 結合を選択的に開裂し、リグニン分解物を得ることができた。実際に HSQC NMR 分析を用いた分解前後 (図 6①②) のスペクトル比較では、分解後のスペクトル (図 6②) において β -O-4 構造由来のシグナルがほぼ消失していることがわかる。天然に存在するアセチル基のようなエステル結合の開裂以外は、その他の構造にほとんど変化のないことが確認された。さらに、得られた分解物中のリグニン低分子分解物を各種溶媒洗浄により除去することで、多糖類リッチなリグニン分解物を得た。さらに、その解析により、多糖類ではキシランが、リグニンでは β - β 構造が多く含まれていることが明らかになった。この分解法ではキシランは分解されないため、高分子量分解物中に存在するリグニンはキシランと何らかの結合を介している可能性が非常に高いことが示された。その生成および結合様式についてはまだ明らかになっていないものの、この結果は今まで報告されておらず、非常に興味深い。 β - β 構造が LC 結合の鍵を握っている可能性がある。このアプローチはまだ初期段階ではあるが、今後の展開が期待される。

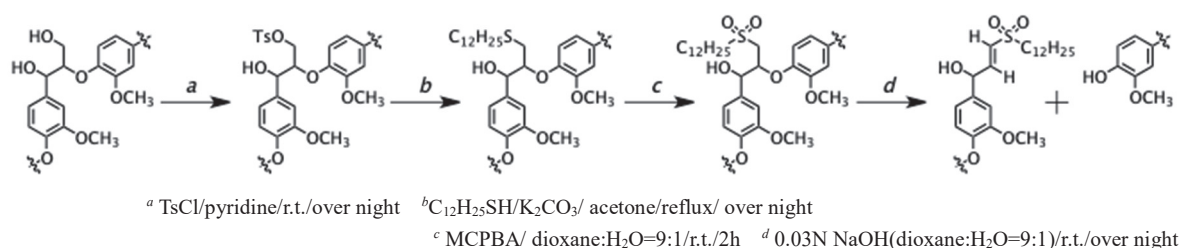


図 5 : γ -TTSA (γ -Tosylation Thioetherification Sulfonylation Alkali degradation) 法

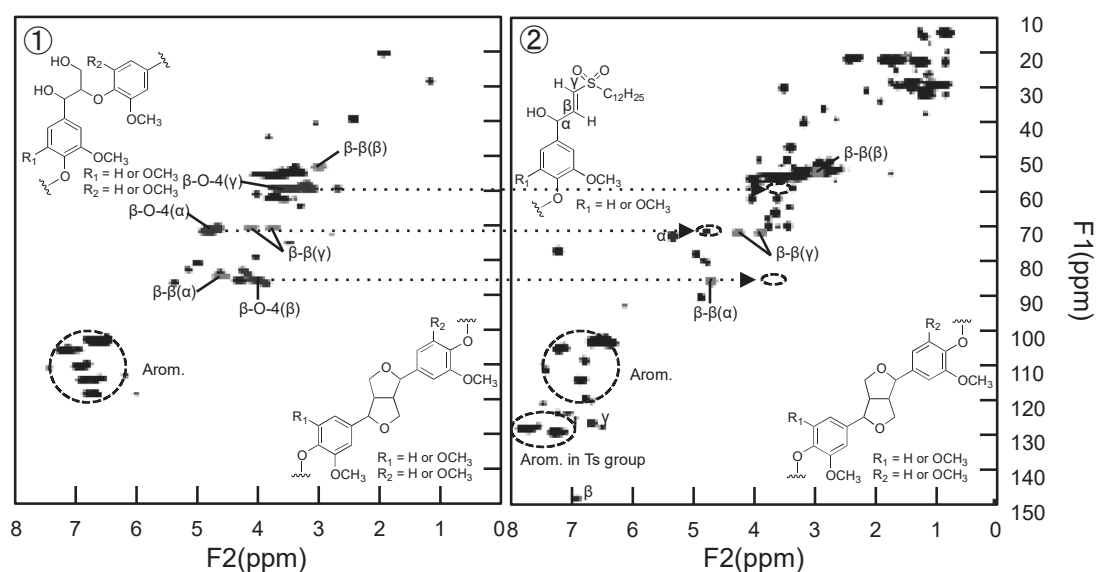


図 6 : HSQC NMR スペクトル ①分解前、②分解後

3. おわりに

木材細胞壁成分はセルロース、リグニン、ヘミセルロースと簡単には言われることが多いが、その化学構造および特性はまだ謎が潜んでいるかもしれない。実際、一例として未だ完全な成分分離技術は開発されていない。その要因として考えられる木材細胞壁間の成分構造（LC 結合）の研究例をいくつか紹介した。しかし、未知な領域があり、得られる新たな知見は細胞壁成分の生合成やバイオマス利用のためのマイルストーンになることが期待される。特に、木材中の LC 結合の存在量の少なさにも関わらず、成分分離ができないほどの大きな影響を与えていることは驚きである。これは裏を返せば、分離ができないほどに接着しているという見方もできる。そのため、成分間の構造様式の解明を含めた分離が困難な理由を明らかにすることができれば、成分分離だけでなく、ウッドミメティックな木材接着剤の創製など新たな利用展開がひらけるかもしれない。

参考文献

- 1) Kim, H., Ralph, J., Solution-state 2D NMR of ball-milled plant cell wall gels in DMSO-*d*₆/pyridine-*d*₅, *Org. Biomol. Chem.*, **8**, 576-591, 2010.
- 2) Kim, H., Ralph, J., A gel-state 2D-NMR method for plant cell wall profiling and analysis: a model study with the amorphous cellulose and xylan from ball-milled cotton linters, *RSC Adv.*, **4**, 7549-7560, 2014.
- 3) Ralph, S. A., Landucci, L. L., Ralph, J., NMR database of model compounds for Lignin and related plant cell wall components, https://www.glbc.org/databases_and_software/nmrdatabase/
- 4) Mansfield, S. D., Kim, H., Lu, F., Ralph, J., Whole cell wall characterization using 2D-NMR, *Nature Protocol*, **7**, 1579-1589, 2012.
- 5) Erdman, J., Über die Concretionen in den Birnen., *Ann. Chem. Pharm.*, **138**, 1-19, 1866.
- 6) Björkman, A., Studies on finely divided wood. Part 3. Extraction of lignin-carbohydrate complexes with neutral solvents, *Svensk Papperstidn.*, **60**, 243-251, 1957.
- 7) Lowako, M. et al., Structural differences between the lignin carbohydrate complexes in wood and in chemical pulps, *Biomacromolecules*, **6**, 3467-3474, 2005.
- 8) Eriksson, O., Lindgreen, B.O., About the linkage between lignin and hemicelluloses in wood. *Svensk Papperstidn.*, **80**, 59-63, 1977.
- 9) Eriksson, O. et al., Structural studies on the chemical bonds between lignins and carbohydrates in spruce wood, *J. Wood Sci. Technol.*, **14**, 267-279, 1980.
- 10) Takahashi, N., Koshijima, T., Ester linkages between lignin and glucuronoxylan in a lignin-carbohydrate complex from beech (*Fagus crenata*) wood., *Wood Sci. Technol.*, **22**, 231-241, 1988.
- 11) Koshijima, T., Watanabe, T., Association between Lignin and Carbohydrates in Wood and Other Plant Tissues, Springer, 2003.
- 12) Balakshin, M. et al., MWL fraction with a high concentration of lignin- carbohydrate linkages: Isolation and 2D NMR spectroscopic analysis, *Holzforschung*, **61**, 1-7, 2007.
- 13) Balakshin, M. et al., Quantification of lignin-carbohydrate linkages with high-resolution NMR spectroscopy, *Planta*, **233**, 1097-1110, 2011.
- 14) Nishimura, H. et al., Direct evidence for α ether linkage between lignin and carbohydrates in wood cell walls, *Scientific Reports*, **8**, 6538-6548, 2018.
- 15) Miyagawa, Y. et al., Synthesis and fundamental HSQC NMR data of monolignol β -glycosides, dihydromonolignol β -glycosides and *p*-hydroxybenzaldehyde derivative β -glycosides for the analysis of phenyl glycoside type lignin-carbohydrate complexes (LCCs), *Holzforschung*, **68**, 747-760, 2014.
- 16) Miyagawa, Y. et al., Possible mechanisms for the generation of phenyl glycoside- type lignin-carbohydrate linkages in lignification with monolignol glucosides, *Plant journal*, 2020, just accepted.

- 17) Watanabe, T., Structural studies on the covalent bonds between lignin and carbohydrate in lignin-carbohydrate complexes by selective oxidation of the lignin with 2,3-Dichloro-5,6-dicyano-1,4-benzoquinone, *Wood research*, **76**, 59-123, 1989.
- 18) Ando, D. et al., Multi-steps degradation method for β -O-4 linkage in lignins: γ -TTSA method. Part 1. Reaction of non-phenolic dimeric β -O-4 model compounds, *Holzforschung*, **66**, 3, 331-339, 2012.
- 19) Ando, D. et al., Elucidation of LCC bonding sites via γ -TTSA lignin degradation: Crude milled wood lignin (MWL) from *Eucalyptus globulus* for enrichment of lignin xylan linkages and their HSQC-NMR characterization, *Holzforschung*, **70**, 6, 489-494, 2016.

著者プロフィール

安藤 大将 (Daisuke Ando)

＜略歴＞ 2008 年 京都大学農学部森林科学科卒業／2014 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 京都大学生存圏研究所特定研究員／2015 年 日本学術振興会特別研究員(PD)／2018 年 日本学術振興会海外特別研究員／2020 年 京都大学生存圏研究所 生存圏学際萌芽センターミッション専攻研究員、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞リグニンの構造解析とその利用に関する研究

重要文化財願興寺本堂保存修理工事における用材調査 第二報

田鶴 寿弥子^{1*}, 杉山 淳司²

Wood identification of old wooden members in Ganko-ji temple designated as national heritage (Second report)

Suyako Tazuru^{1*} and Junji Sugiyama²

概要

今から 400 年以上前に地域の民衆により再建された願興寺本堂の修復工事に際して様々な部位の部材について樹種調査を行った結果、11 樹種にも及ぶ多種多様な樹種が使用されていることが判明し、先に第一報を「生存圏研究」にて報告した¹⁾。その調査では、特に柱材について建物の正面と背面、或は内部で樹種を何らかの規則に沿って選択している可能性が示唆された。その後の修理工事において、本堂のすべての柱材から樹種識別用試料の採取が可能となったことから、本研究では残りの柱材 27 点についても追加調査し、柱材 48 点すべての樹種調査を行うことで樹種の配置の規則性や用材観といった知見を拡充することとした。その結果、本堂正面には、ケヤキとムクノキといった広葉樹が多用される一方、背面においては、モミ、スギ、ニヨウマツ類などが多用されていることなどが判明した。日本の古建築においてケヤキやマツが主要材料として利用されはじめたのは 12 世紀と言われているが、その背景には中世の社寺造営の増加が関与しているとされている²⁾。工具の発達などもあり、近世にはヒノキの時代からケヤキ・マツによる普請がもてはやされた。特にケヤキは強度もさることながら特有の木目の意匠性が重視されたこともあり、ケヤキの化粧材としての利用は増えていったとされている。今回の調査により、16 世紀に建築された願興寺本堂においても意匠性の高いケヤキは正面に配置する点など、当時の人々が限りある予算や材料と向き合い、格の高い建造物を目指していたことを裏付ける結果を得た。

1. はじめに

本研究は、先に生存圏研究第 15 号に掲載した「重要文化財願興寺本堂保存修理工事における用材調査」¹⁾の続報である。第一報では、岐阜県可児郡御嵩町に位置する願興寺の修理工事に際して、柱、小屋梁、頭貫、丸桁、大引など様々な部位から 52 点の試料を採取し樹種識別を行った。その結果、ニヨウマツ類（アカマツ、クロマツと考えられる）(21 点)の多用が認められた。そのほかは多い順にスギ(10 点)、ムクノキ(7 点)、ケヤキ(4 点)、ゴヨウマツ類(2 点)、カエデ(道管のサイズよりイタヤカエデの可能性がある)(2 点)、カツラ(2 点)、ヤマザクラ(1 点)、ヒノキ(1 点)、モミ属(1 点)、エノキ(1 点)が並んだ。願興寺本堂は、焼失ののち地元の百姓玉置興次郎と市場左衛門太郎が人々から浄財を集めて建立した経緯もあるからか、寺社建築にはあまり用いられないムクノキやエノキを

2020 年 6 月 30 日受理。

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

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

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

はじめとした樹種や湾曲した木材も多用されていることが判明した。また、部位ごとの樹種を考えると、1 階の床組の重要な部材で根太を支える大引に、ニヨウマツ類に加え、ムクノキ、カエデ、ヤマザクラといった広葉樹が利用されている点も珍しい点であった。

中でも特に柱材に使用されている樹種について考えたところ、広葉樹針葉樹混合で8種類もの樹種が選択されていることが判明した。また、これらの樹種には、建造物の向きによって、取り合わせや使い分けがされていることも示唆された。このような木材の取り合わせは、一般的な寺社建築においては非常に珍しく、これらの樹種が、柱材として利用された経緯や選択基準、配置について解明することで、当時の大工らがどのような用材観を持っていたのかを知ることにつながると考えた。そこで、第一報の続編となる本論文では、特に本堂の柱材すべて（48 点）に注目し、第一回調査において調査済みの（21 点）を除く、残り 27 点の全柱材からも試料を採取し、樹種調査に供するとともに、樹種の配置などについて、考察することとした。

2. 試料と方法

岐阜県可児郡御嵩町に位置する願興寺の修理工事に際して、本堂の柱材 27 点についての樹種調査を行った。試料は現場担当者により、図面や番付などを確認しながら、取替え古材、および部材の傷んでいる部分や割れ目の内部など、物性に影響の無い部位から、ノミや鋸などを利用し、可能な限り最小サイズとなるように配慮して採取を行った（図1）。採取した部位については写真を撮影した。

その後京都大学生存圏研究所においてプレパートの作成および樹種識別作業を行った。合計 27 点の試料は、経年による劣化が激しいものが多く、非常にもろかったことから、水とともに電子レンジにかけて軟化させたのち、両刃カミソリを用いて慎重に三断面切片を作成した。その後エタノールとグリセリンの混合物とともにホットプレートで加熱して脱気し、ガムクロラルにて封入を行った。その後、光学顕微鏡観を用いた組織観察を行った。IAWA による針葉樹³⁾・広葉樹⁴⁾のリストに従って、属レベル（可能な場合は種まで）の識別を行った。この方法は目視による樹種推定に比べて学術的な裏付けがあり、さらに簡便であることが特徴である。



図1：柱材における樹種識別のための試料採取の様子。採取した試料はラベリングし撮影する。

3. 結果と展望

先行研究において行った 52 点の様々な部材についての樹種識別調査のうち、柱材は 21 点であり、ニヨウマツ類（アカマツ、クロマツと考えられる）、スギ、ムクノキ、ケヤキ、カエデ（道管のサイズよりイタヤカエデの可能性がある）、カツラ、ヒノキ、モミ属、エノキの 9 樹種の使用が認められた。本研究では、願興寺本堂の全 48 本のうち、残り 27 点について同様に樹種調査を行った。表1は、柱材 48 点すべてにおける樹種識別結果である。最も多く使用されている順に、ケヤキ（14 点）、ムクノキ（11 点）、スギ（7 点）、ニヨウマツ類（7 点）、モミ属（5 点）、エノキ（1 点）、カエデ（1 点）、カツ

ラ（1点）、ヒノキ（1点）であった。柱に使用されている樹種を図示したところ（図3）、特にその樹種の配置が特徴的であることが判明した。図2は、本殿に使用されている柱材の外観であるが、経年劣化や虫害も著しく、外観からの樹種判断は困難なケースが多く認められた。

図3下部が本殿の正面（南側）となるが、正面にケヤキやムクノキが多用されている一方で、北側の本殿背面については、スギやモミ、ニヨウマツ類といった針葉樹材の使用が目立っていた。寺社建築にムクノキが多用される事例はあまり認められないが、ムクノキを高級材であるケヤキの代用材あるいは同等材として選択されて使用したとも考えられる。

願興寺伝では境内の本堂東には以前塔があったとされている。現在はなくなっているが、本堂東側と西側を比較すると、東側の方に空間が開けている一方西側は狭い。おそらく、本殿東端側と正面が、人目に付きやすい部位であったと思われる。東端側の柱材の樹種と西端側のそれとを比較すると、東端側にはケヤキやケヤキの代用材とも

考えられるムクノキが多く配置されている一方で、西端側にはスギが比較的多く使用されている点からも、おそらく、東端面および南側正面を重視した樹種選択を行った可能性が推察できよう。また、特に正面から中央にかけての柱と東端側の柱にはモミ属は配置されていない。モミ属は北陸や中部地方の山間部において、古くは建築業界の人々の間で棺桶の木とよばれており、あまり格の高い樹種とは考えられていなかった。現場担当者によると、正面部位の繫梁下の彫刻の装飾性が他に比べて高い点からも、正面性を重視していたことが裏図けられよう。



図2：本殿に使用されている柱材の外観。a: ムクノキ, b: エノキ, c: カツラ, d: ニヨウマツ類

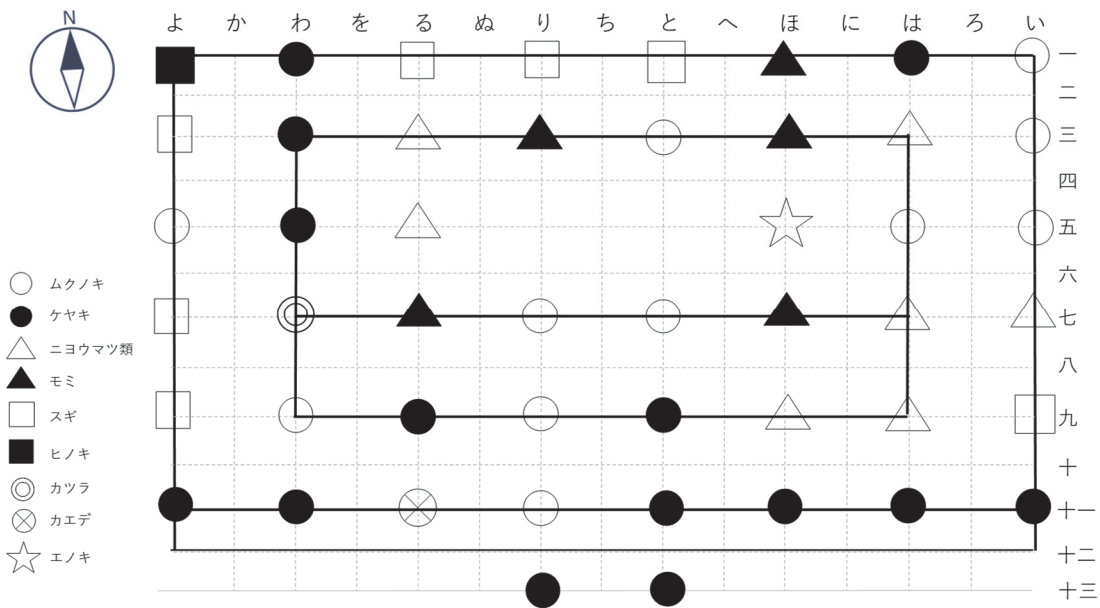


図 3： 樹種識別調査による柱材の樹種一覧。図下部が本殿正面である。

願興寺には重要文化財指定の仏像が 24 躯もある。それらを守り抜くために当時の地域の民衆たちが、一生懸命材料の調達や配置などに努力した証が、この研究で明らかになったと考えている。

限られたデータではあるが、例えば 14 世紀に建造された小萱薬師堂（岐阜県）ではヒノキやヒバが多用された一方で、1520 年の阿多由太本殿（岐阜県）では大斗に、1643 年の真禅院三重塔（岐阜県）では柱や大斗、方斗にケヤキが使用されていたとされており²⁾、今回調査を行った 16 世紀の願興寺においても意匠部位にケヤキが多用されたことが実証された。また中部地方の近隣県のデータからも、15 世紀までは比較的ヒノキ・ヒバによる普請が多い一方で、15 世紀以降はケヤキの利用が増えてきており²⁾、岐阜県を含めた中部地方においては、15 世紀頃からケヤキによる建築が徐々に増加していったことが推定されよう。

限りある予算と材料で格の高い寺院を作り上げるため、節や洞には目をつぶりながら高級なケヤキやムクノキを正面に配置し、背面については、装飾なども省略し比較的容易に手に入りうる雑木材で作り上げるという、予算が厳しいなかでの奮闘ぶりが生々しく見て取れる結果であった。

得られたデータは修復工事にフィードバックするとともに、今後も継続して植生や木材流通の解明に寄与させたいと考えている。工事に際して、文化 13 年に柱を取り換えたと言われた墨書が見つっている。どの柱に相当するのかは現段階では不明であるが、今後も継続して調査を進め柱の時代区分を明らかにできれば、新しい知見が得られると期待される。

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

4. 謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力とご理解くださった願興寺御住職ならびに公益財団法人文化財建造物保存技術協会の現場担当者をはじめとして現場での作業に御尽力くださった大工さんや現場スタッフにお礼を申し上げる。本研究は科研費若手 B（田鶴）、科研費基盤 C（田鶴）、京大生存圏研究所ミッション 5-4、並びに同研究所全国共同利用研究によるものである。この場をお借りして御礼申し上げます。

表 1：採取試料の樹種識別結果一覧

建物	部材名	番付	樹種識別結果	樹種識別結果(学名)
願興寺本堂	柱	は-一*	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		い-十一	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		と-九	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		と-十一	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		と-十三	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		は-十一	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		ほ-十一	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		り-十三	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		る-九	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		わ-一	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		わ-五	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		わ-三	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		わ-十一	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		よ-十一	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>
		と-一*	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
		い-九*	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
		よ-九*	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
		よ-七*	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
		り-一	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
		る-一	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
		よ-三	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>
		ほ-九*	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
		は-九*	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
		は-七*	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
		は-三*	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
		る-三*	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
		る-五*	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
		い-七*	ニヨウマツ類	<i>Pinus</i> subgen. <i>Diploxylon</i>
		は-五*	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		と-三*	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		り-七*	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		よ-五*	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		い-一	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		い-五	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		い-三	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		と-七	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		り-九	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		り-十一	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		わ-九	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> Planch.
		ほ-七*	モミ属	<i>Abies</i> sp.
		ほ-一	モミ属	<i>Abies</i> sp.
		ほ-三	モミ属	<i>Abies</i> sp.
		り-三	モミ属	<i>Abies</i> sp.
		る-七	モミ属	<i>Abies</i> sp.
		ほ-五*	エノキ	<i>Celtis sinensis</i> Persoon
		る-十一*	カエデ	<i>Acer</i> sp.
		わ-七*	カツラ	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>
		よ-一*	ヒノキ	<i>Chamaecyparis obtusa</i>

(備考：番付に*が付記された資料は、「生存圏研究」における第一報¹⁾にて調査・報告した分である。)

参考文献

- 1) 田鶴寿弥子, 杉山淳司, 重要文化財願興寺本堂保存修理工事における用材調査, *生存圏研究*, 15, 68-74, 2019.
- 2) 伊原恵司, 古建築に用いられた木の種類と使用位置について—中世から近世への変化を中心として—, *保存科学*, 28, 25-62, 1989.
- 3) 伊東隆夫, 藤井智之, 佐伯 浩: “広葉樹材の識別, IAWAによる光学顕微鏡的特徴リスト”, 海青社, 1998, pp1- 122.
- 4) 伊東隆夫, 藤井智之, 佐野雄三, 安部 久, 内海泰弘: “針葉樹材の識別, IAWAによる光学顕微鏡的特徴リスト”, 海青社, 2006, pp1-60.

著者プロフィール



田鶴 寿弥子 (Suyako Tazuru-Mizuno)

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

著者プロフィール



杉山 淳司 (Junji Sugiyama)

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

研究業績

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

生存圏研究 第16号

発 行 日	令和2年11月20日
編集兼発行者	京都大学 生存圏研究所 京都府宇治市五ヶ庄
印 刷 所	株式会社 北斗プリント社 京都市左京区下鴨高木町38-2

