

第16回生存圏研究所公開講演会

講演要旨集

日時：2019年10月20日(日) 13:30～15:20

会場：京都大学宇治おうばくプラザきはだホール

目次

樹皮ウォッチングのすすめ	1
バイオマス形態情報分野 教授 杉山 淳司	
オーロラで探る宇宙生存圏の現在・過去・未来	7
生存科学計算機実験分野 准教授 海老原 祐輔	
地球と宇宙の境界を診る	13
レーダー大気圏科学分野 准教授 横山 竜宏	

樹皮ウォッチングのすすめ

杉山 淳司^{1*}

An encouragement of bark watching

Junji Sugiyama^{1*}

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的な例である。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。左上から右下の順に、アラカシ、アカマツ、ハルニレ、イチイガシ、イチョウ、イヌマキ、イロハモミジ、カリン、ケヤキ、コメツガ、クロガネモチ、クロマツ、クスノキ、モミ、サクラ、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に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。

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



図1：樹皮の色々。樹種は本文参照。

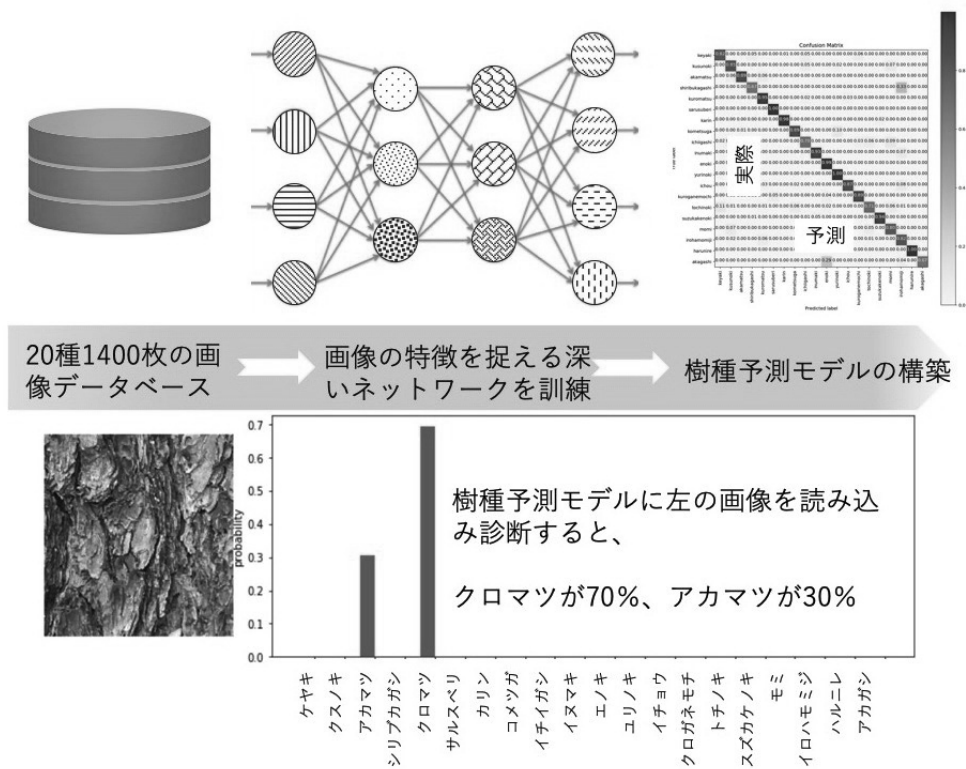


図2：AIを利用した樹皮画像による樹種識別のフロー。深層学習のモデルはVGG16¹⁾。

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。

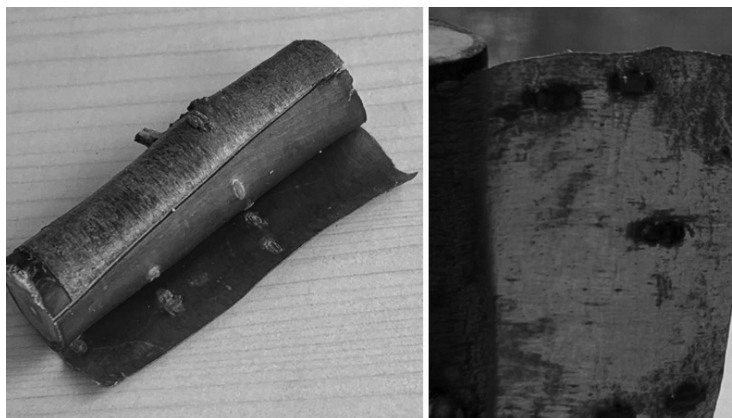


図3：宇治構内植栽のソメイヨシノの若い枝。梅雨時期に採取して、コルク形成層の外側にある外樹皮を剥離したところ（左図）とその樹皮の光透過性（右図）

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。

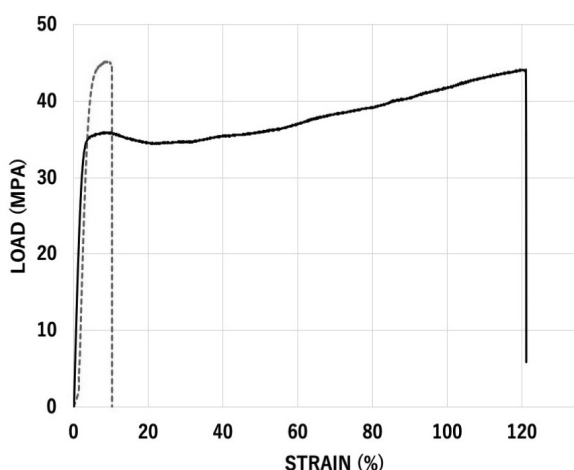


図4：サクラ樹皮の応力ひずみ曲線。実線は気乾状態のもの、点線はオーブンドライ後のもの。

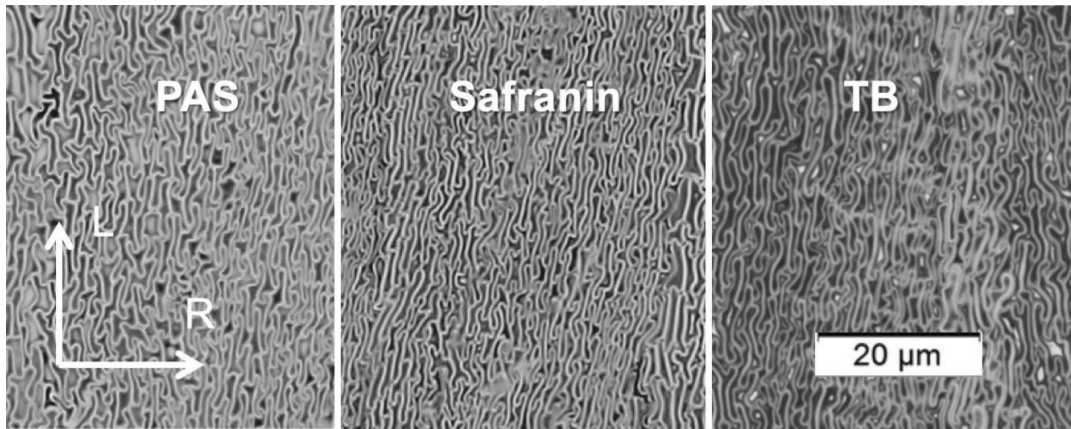


図5：樹皮の放射断面（柁目に相当）。左より、PAS染色法、サフラニン染色法、トルイジンブルー染色法による。

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。

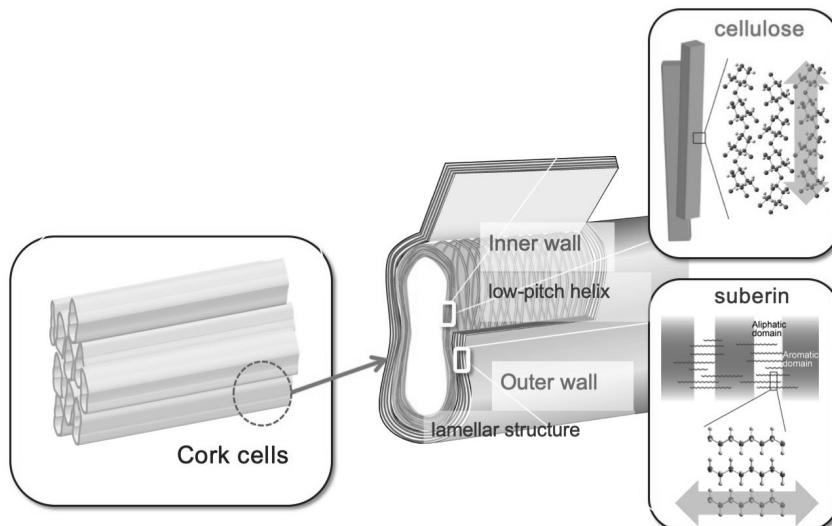


図6：サクラ樹皮の層階状構造。木化層とスベリン層の二層からなる細胞壁を形成し、内層では水平方向にバネのようにセルロースマイクロフィブリルが螺旋を巻き、外層では細胞表面に垂直方向にスベリンの脂肪族鎖が並ぶ、という立体構造が明らかとなった。

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間掛け部分には、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。

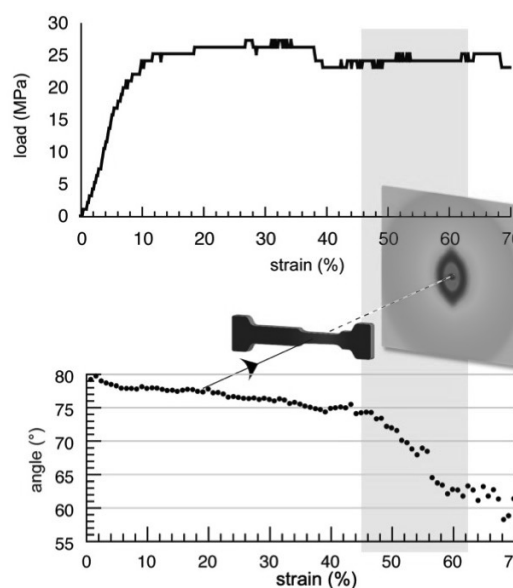


図7：放射光X線を用いた引張り試験時における微細構造変化の実時間解析。上図は応力-ひずみ曲線、下図はマイクロフィブリル傾角（細胞長軸とフィブリルの配向方向とのなす角度）-ひずみ曲線。

3. おわりに

以上述べてきたサクラ樹皮の驚異的な伸び（韌性：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、現在に至る。<研究テーマと抱負>木材組織の多様性。複雑さの中から何が引き出せるか、最新の情報学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大気の発光現象で、その原因は宇宙から降り注ぐ粒子にある。粒子には様々な情報が含まれており、オーロラを知ることは宇宙空間で起きていることを知ることにつながる。最近ではスーパーコンピュータによってオーロラの発達を再現することができるようになり、宇宙空間の状態とオーロラの関係について理解が飛躍的に深まった。また、古文獻の中にはオーロラと思われる記述が多くあり、過去には驚くべき事が宇宙空間で起きていたこともわかってきた。一方、地球の磁場は絶えず変化しており、オーロラの姿は今とは大きく変わることが予想されている。将来、私たちの生存圏の一部である宇宙空間で何がおこるのだろうか。最新の知見を手がかりに考えてみたい。

1. はじめに

古代バビロニアの粘土板にオーロラとみられる記述 (図 1) があるように、オーロラは太古の昔から人々を魅了してきたようである。オーロラの原因として遠くで起きている火事、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考えられていた。オーロラに対する科学的考察がはじまったのは 17 世紀で、ガリレオ、デカルト、ハレーなど多くの科学者がオーロラ発生の謎に挑んでいる。20 世紀初頭、ノルウェーの研究者ステルマーはオーロラを多地点で同時に撮影し、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。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る。気圧は地上の数百万分の一、温度は数千度と大変過酷な環境である。熱圏の外側には太陽系へと続く宇宙空間が広がっている。オーロラは地球大気と宇宙の境でおこる現象なのである。現在、オーロラは宇宙空間から降り込む粒子によってエネルギーをもらった大気が放つ光の集合だと理解されている。オーロラは大気が自ら光を放つ発光現象で、その意味において雷に似ている。一方、虹は



Fig. 1 A copy of #1, -651 Col. iv 20', by Yasuyuki Mitsuma

図 1 : 紀元前 563 年に発生したオーロラを描写していると思われる楔 (くさび) 文字 (早川ほか 2016)

太陽の光を反射することで見える現象で、オーロラとは発生の仕組みが全く異なる。本講演では、オーロラについての最新の知見を紹介し、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なかで予想される将来のオーロラと宇宙環境について俯瞰する。

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@rishi.kyoto-u.ac.jp

2. 現在のオーロラ

オーロラには虹のように様々な色があると思われるかもしれない。しかし、虹とは異なり現れる色は限られている。オーロラの代表的な色は緑で、赤、紫が続くだろう。オーロラの色は光を放つ原子や分子が決めている。例えば、酸素原子は緑や赤の光を、窒素分子イオンは青や紫の光を中心に放出する。オーロラが激しく舞うときにはオーロラのカーテンの裾がピンク色に見えることもある。窒素分子が放つ赤と青の光が混ざるためである。

上のほうが赤く、下のほうが緑のオーロラをよく見ることができる。どちらの色も酸素原子が放つ色である。なぜ二色に分かれているのだろうか。その鍵は光が出るまでの時間差にある。酸素原子がエネルギーを得てから緑の光を放出するまでの時間差は約 0.7 秒あるが、赤の光は約 110 秒もある。酸素原子がエネルギーを得て光を放出するためには、それまでほかの粒子と衝突することなく、エネルギーを維持しておくことが必要である。大気の密度が高いほどほかの粒子と衝突しやすくなるので、密度が高い下のほうでは赤いオーロラは光りにくい。そのため、下の方では緑のオーロラが卓越するのである。宇宙からやってくる粒子は大気との衝突によってエネルギーを失いながら降りてくる。もし、降り込んでくる粒子に十分なエネルギーがなければ途中でエネルギーを失い、先に進めなくなる。緑のオーロラが見えるということは、比較的エネルギーが高い粒子が深くまで降り込んでいることを意味する。一方、窒素分子が放つピンク色のオーロラはエネルギーを得てから百万分の一秒程度の早さで放つ光なので、比較的大気が濃いカーテンの裾でも光を出すことができる。

私たちがよく見る緑のオーロラは酸素原子が放つ光である。それは地球の大気に酸素が豊富に含まれていることの証でもある。酸素は地球誕生当初から豊富にあったわけではなく、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を作り出した結果だと考えられている。そうした酸素が上空に昇り、紫外線によって原子状の酸素となり、やがて宇宙からやってくる粒子と衝突することで緑のオーロラが光るのだ。酸素濃度が今より低かった太古の地球では現在とは全く違う色のオーロラが現れていたに違いない。

オーロラと言えばカーテン状のオーロラを思い浮かべる方が多いかもしれない。しかし、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に分けられる。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。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が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、そのしくみはまだ解明されていない。

カーテン状のオーロラは遠くからみると一枚に見えるが、よくみると幾重もの複雑な構造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い。マッグスとディビス (1968) の報告によると 70 メートルの厚さしかないそうだ。ボロフスキー (1997) 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。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ものもある。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。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 回という目にも留まらぬ速さで明滅していることが分かった (福田ほか 2017)。

以上のように明瞭な形を持つオーロラはディスクリート・オーロラと呼ばれている。ディスクリート・オーロラの原因は地球向きに加速された電子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似ている。ブラウン管は電子銃から蛍光物質が塗られた面に向かって電子を照射して像を写す。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と考えられてい

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。

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形がはっきりしない。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し、地球大気に落ちた結果であると考えられている。散乱の原因として電磁波が有力視されている。人工衛星の観測によると脈動オーロラの「オン」・「オフ」と電磁波の「オン」・「オフ」がよく対応していることがわかっている。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、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。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と様々な形がある。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。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。

図2のように宇宙から地球を見ると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、決して消えることはない。そのため、オーロラは地球上のどこかで常に光っている。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、太陽方向に沿って広がる筋状のオーロラ「太陽沿いオーロラ」や、ギリシャ文字の「 θ 」に見える「シータオーロラ」、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」などが知られている。一方、オーロラ・オーバルの外側では縮れ雲のようなパッチ状のオーロラや、枝分かれ状の奇妙な形を持つオーロラが現れる。

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（図2）。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ーロラ現象のハイライトと言える。しかし、オーロラ・ブレイクアップの継続時間は数10分程度ときわめて短く、見逃す可能性が大いにある。オーロラ・ブレイクアップが起こると宇宙空間では大変動がおこ



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。

り、1000 億ワットものエネルギーがオーロラ付近で一気に消費される。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）、オーロラ・ブレイクアップの理解が格段に進んでいる。

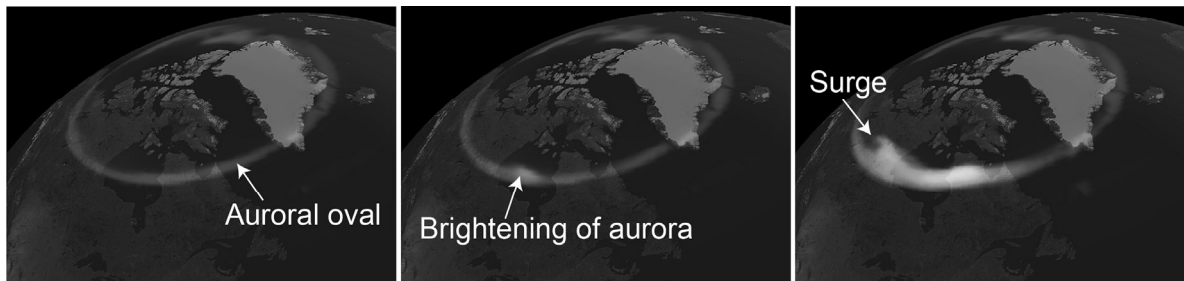


図 3：シミュレーションによって再現したオーロラ・ブレイクアップの発達。

オーロラを理解するためには地球周囲の宇宙空間を理解する必要がある。地球磁場が占める宇宙空間を磁気圏と呼び、その外側には太陽の磁場が支配する太陽圏が広がる。地球近傍の宇宙空間の構造とエネルギーの流れを図 4 に示す。太陽由来のエネルギーが地球の磁場が支配する磁気圏にとりこまれ、地球に向かって流れていく。地球にエネルギーを流すためには電流が必要で、電流を流すためには電離した気体であるプラズマの流れが必要である。数値シミュレーションを用いると、人工衛星によるその場観測では得がたい複雑な磁気圏の 3 次元構造や太陽から来たエネルギーの流れがたちどころにわかる。詳細については割愛するが、講演では数値シミュレーションによって明らかになったオーロラ・ブレイクアップの発生メカニズムについて分かりやすく説明したい。

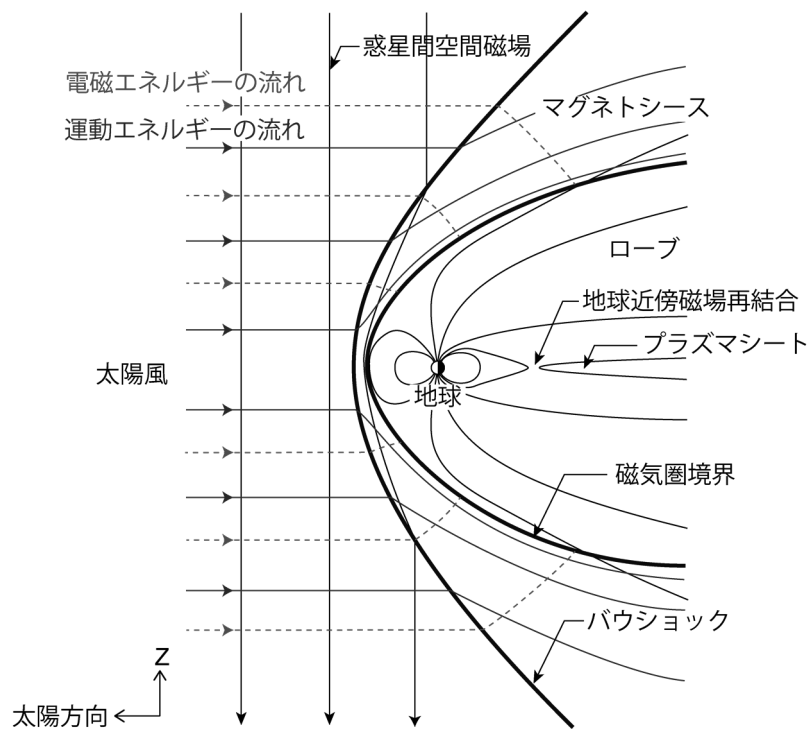


図 4：磁気圏の構造とエネルギーの流れ

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全く異なる。普段は高緯度にあるオーロラ・オーバルが磁気嵐の発生に伴って拡大し、低緯度でもオーロラを見ることができるようになると理解されている。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うと、上のほうで光る赤のオーロラのみが見えるようになる。これが北の空が赤く染まる理由とされている。大きな磁気嵐は巨大太陽フレアによって発生する。1990年頃や2001年頃に北海道を中心に日本各地でオーロラが報告されたが、この頃は11年周期と言われる太陽活動の極大期にあたり、巨大フレアが頻発していたのである。しかし、2012年頃の太陽活動極大期では北海道でオーロラが見えたという事例はわずかであった。これは太陽活動が次第に低調になっており、巨大太陽フレアが発生しにくくなっていることが原因と考えられている。

過去はどうであっただろうか。たとえば古事記や明月記、あるいは寺社などに伝わる古文書のなかにはオーロラを思わせる記述が見つかることがある。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することが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、そして中国大陸の各地でも赤気が記録されていることからオーロラであることはほぼ間違いない。早川ほか(2017)の調査によるとこのときのオーロラは手許の文字が読めるくらい明るかったようである。ここ数十年の間に日本で見たオーロラは肉眼で見えるか見えないか程度の明るさだったことと比べるとその異常さがわかる。

海老原ほか(2017)はオーロラ発光計算を行い、1770年9月に日本各地で目撃されたオーロラの再現を試みた。当時、背の高い赤いオーロラが多く目撃されている。この背の高い赤いオーロラを説明しようとする下で緑のオーロラが現れてしまう。しかし緑のオーロラは記録されていない。一方、緑のオーロラを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。

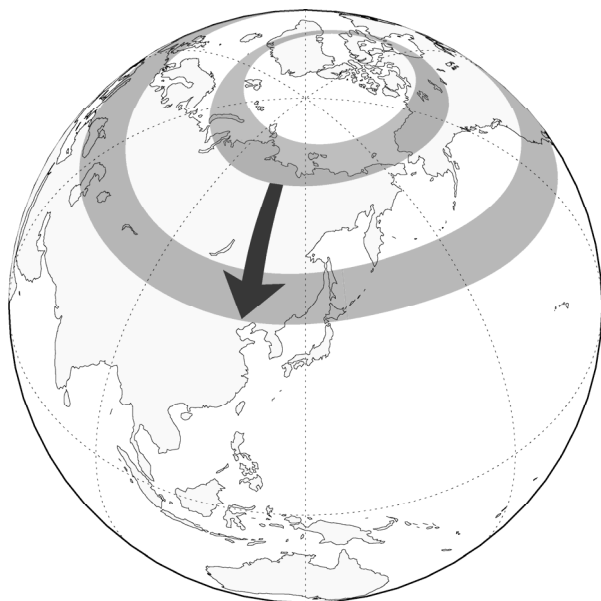


図5：計算によって再現した1770年9月当時のオーロラ・オーバルの位置。

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。また、オーロラの光によって文字が読めたという記述があることから、オーロラの明るさも異常であったことがうかがえる。計算によると、これまで人工衛星が観測した降り込み電子の最大値を10倍以上も上回る量の電子が当時降っていたようである。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5に示す。北海道がオーロラ・オーバルに完全に覆われている。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と調和的である。

オーロラは美しく人々を魅了するが、やっかいな副作用がある。地面に誘導電流を流し、停電を誘発するのである。実際にカナダやスウェーデンで磁気嵐に伴う大規模な停電が起きている。このような宇宙由来の災害はなるべくならば減らしたい。その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。しかし近代的な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。オーロラ・オーバルの位置と磁気嵐の規模がよい関係にあるという経験則に基づき、過去のオーロラの記録を調べることで巨大な磁気嵐の発生頻度が推定できる。古文獻を調べると、少なくとも 1582 年、1730 年、1770 年、1859 年、1872 年、1909 年、1921 年には同程度の規模の磁気嵐が起きていたようである。つまり、巨大磁気嵐は極めてまれではなく、むしろ過去 100 年間は異常に発生頻度が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）はオーロラの発生に大きな役割を果たしている。しかし地磁気は変わるため、いつまでも同じようなオーロラが現れるとは限らない。地球の磁場を 1 本の棒磁石に見立てたとき、その軸が地表と交わる点を地磁気極と言う。地磁気極は現在グリーンランド北方の北極海にある。日本から見ると地理的な北極点の向こう側にあるので、日本の磁気緯度は地理緯度より約 10 度低い。つまり、日本は地理緯度の割にはオーロラ・オーバルから離れており、オーロラを見る上で損をしていることになる。しかし、地磁気極は地球の歴史と比べると非常に速い時間スケールで移動しており、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ずれたところにあったようである。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、この頃の中国ではオーロラの報告が多く見つかっている（早川ほか 2015）。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。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だろう。

棒磁石の向きだけでなく強さも変わり続けている。地球の磁場を棒磁石に見立てたとき、棒磁石の強さはこの 2000 年間減り続けている。過去 100 年間については約 5.5% も減っており、その減り方は 1970 年代ごろから加速している。このままの割合で減り続けると地球の棒磁石は約 1000 年でなくなるという指摘もある。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。シミュレーションによるとオーロラ・オーバルは消失し、今とは大きく形が変わるようである。地球磁場の構造が大きく変わるので、異質なオーロラが現れるかもしれない。地球の磁場は宇宙線など生物に有害な粒子が大気に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、生物の絶滅や進化をもたらし、気候変動にも影響を及ぼすかもしれない。オーロラが変わるとということは地球上の生物を守るバリアーが変わることを意味する。オーロラが変わったとき、人類は生存できるだろうか。地球は私たちの生存圏の中心である。激しく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。

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

Tatsuhiko 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、日常生活から頻り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

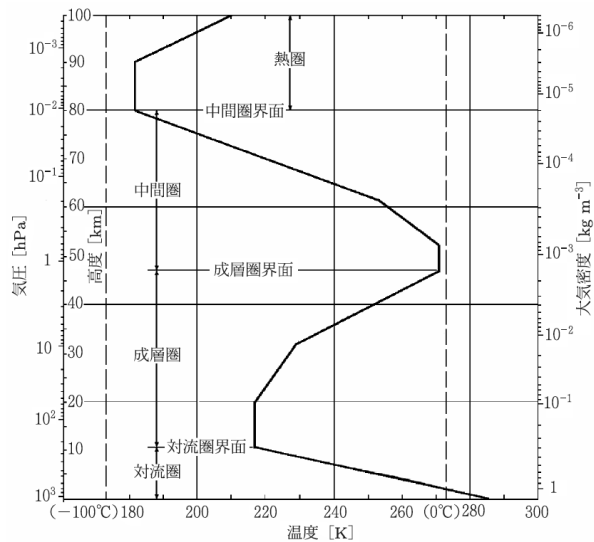


図 1: 大気の鉛直構造¹⁾

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

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、地球の重力に大気分子が引き止められている高度の限界とも言うことができる。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。

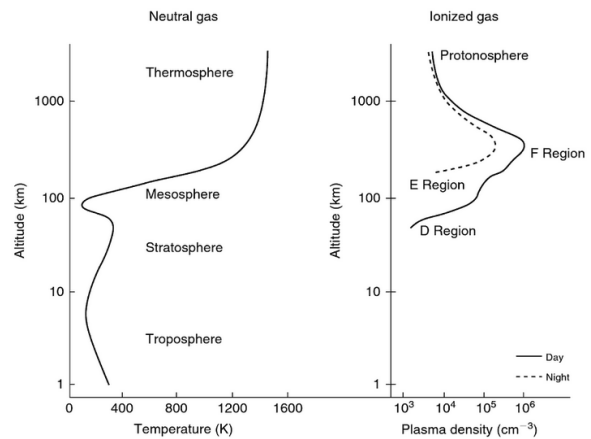


図 2: 超高層大気の温度構造と電子密度分布²⁾

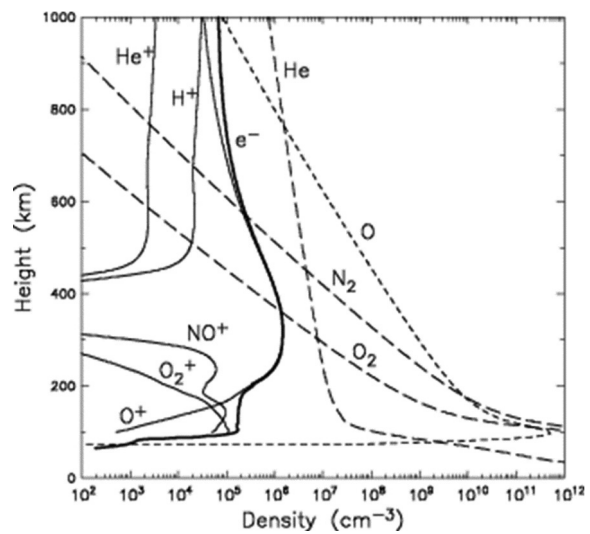


図 3: 超高層大気の組成分布

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地理院より報告されている。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。

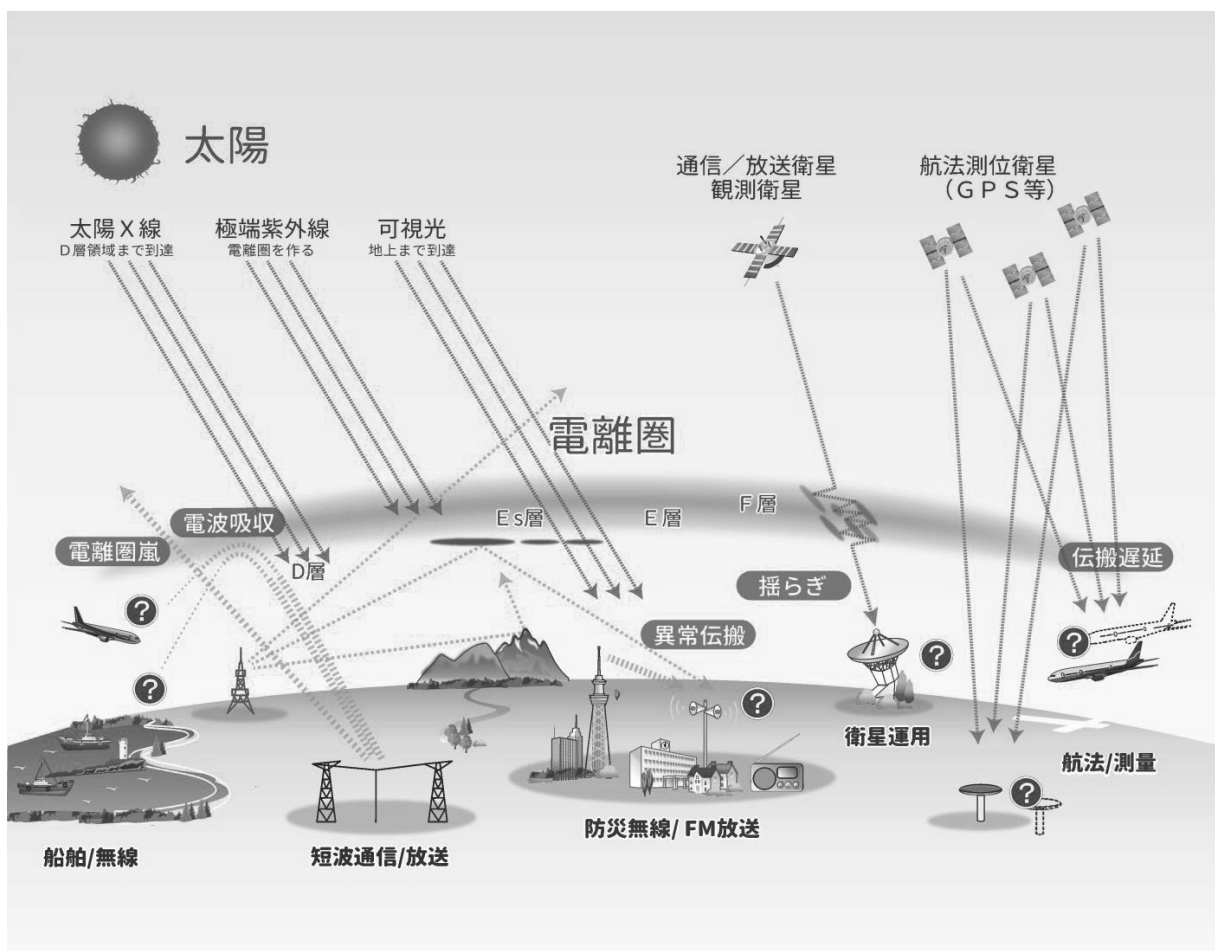


図4: 電離圏と電波伝搬 (宇宙天気予報センターウェブサイトより <http://swc.nict.go.jp/>)

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

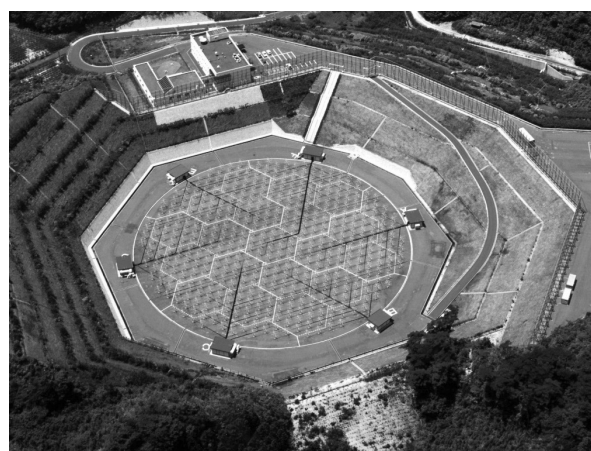


図6: MU レーダーの外観

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、水平方向の分布については情報を得ることができない。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用して計算されている。

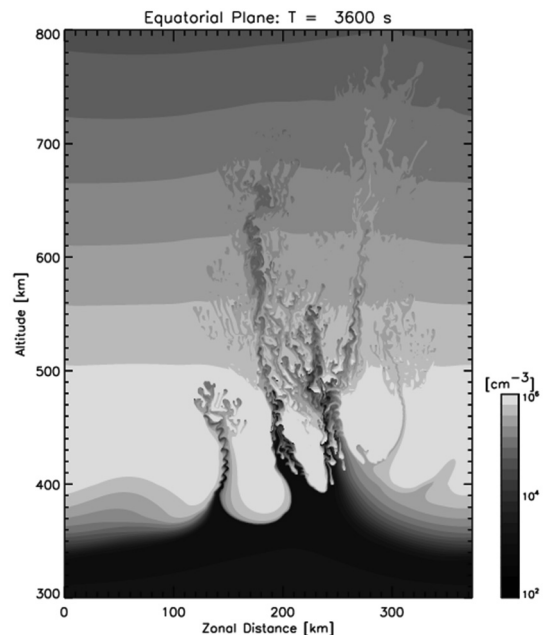


図7: プラズマバブルを再現した数値シミュレーション結果³⁾

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、大気が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) 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。

