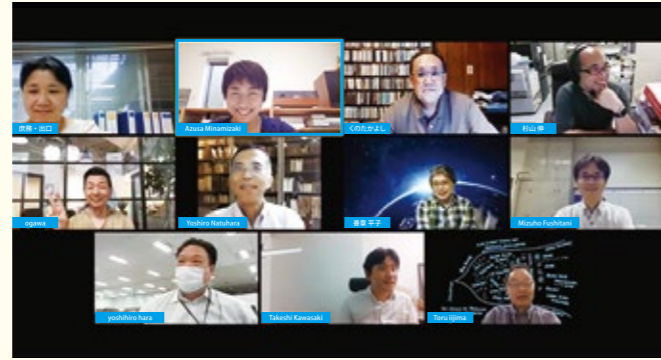


## 編集だより

新型コロナウイルスの世界的流行（パンデミック）によって、これまでに経験したことのない日常が続いている。2020年度の始まりは、講義や会議はすべてオンライン、研究も必要最小限の目的で登校する以外はリモート。それでもなお、教育、研究、運営を止めないよう、多くの構成員が奮闘していた。その状況下で、理フィロソフィア39号の編集会議も始まった。本誌の目的は、名大理学の現在の姿をさまざまな角度から光をあてて紹介し、広く社会に理解してもらうことにある。ならば、地球規模の災禍といってもよいパンデミックに対して、我々がどのように対応したのか、そのことを触れずにはおけないと考え、「名大理学部はコロナウイルスにどう対応したのか」と題する特設ページを設けた。理フィロソフィア20年の歴史の中で、大きな社会問題を取りあげた特設ページを設けるのは、東日本大震災が発生した翌年に発行した22号掲載の「東日本大震災をめぐる理学」に次いで2回目となる。編集における課題は、いかに名大理学の特徴を出せるかであったが、幸いにして、新薬開発への貢献を目指す研究や、感染データを可視化して理解する試み、工夫を凝らしたオンライン講義に関する記事などを集めることができ、

学生や事務の方々も含めた名大理学構成員の奮闘ぶりが伝わる内容になったと思っている。もちろん、これらは広報委員に届いた事例のみであって、他にもさまざまな取り組みが進んでおり、これからも続いてゆくであろう。今後もパンデミックへの対応は続き、ウィズ・コロナ、ポスト・コロナ時代に向けて、名大理学としての新しい様式の構築が課題となる。独自のアイデアや工夫によって、名大理学らしい新しい取り組みや成果を発信できることを願いたい。（飯嶋徹）



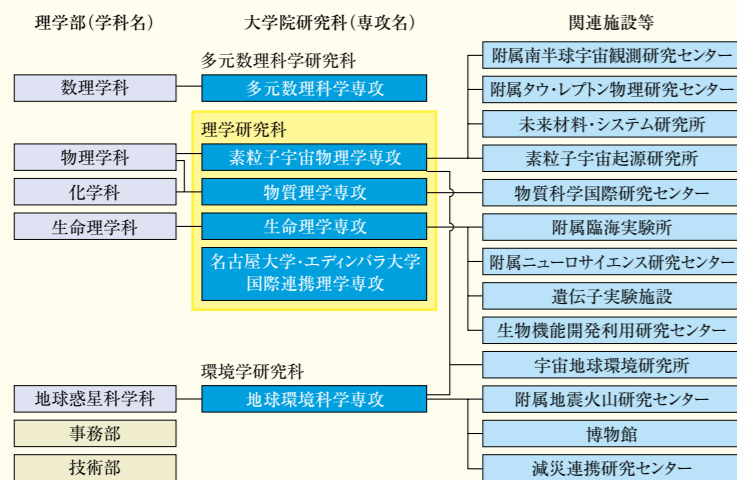
## 研究会・学会スケジュール

### WPI presents 教育関係者のための研究最前線講座

開催日：2020年11月28日(土)・12月5日(土)  
 開催場所：オンライン(無料、事前申込制)  
 主催：名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所(WPI-ITbM)  
 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)  
 大阪大学免疫学フロンティア研究センター(WPI-IFReC)  
 東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構(WPI-IRCN)  
 問い合わせ：三宅恵子 トランスフォーマティブ生命分子研究所 特任講師  
 miyake.keiko@itbm.nagoya-u.ac.jp / 052-789-4999  
 ※参加申し込み等の情報はITbMのHPにて掲載  
 http://www.itbm.nagoya-u.ac.jp/index-ja.php

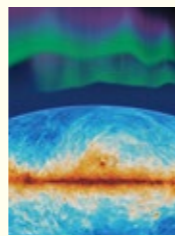
## 組織図

### 理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究科(地球環境科学専攻)



## 表紙説明

オーロラは天体の磁極近辺に見られる大気の発光現象であり、太陽風プラズマと地球磁場の相互作用により発生する。下は電波観測でとらえた天の川銀河内の磁場の地図。銀河のスケールでも磁場が存在することを示している。



理 *philosophia* — No.39  
 autumn-winter 2020  
 2020年11月25日発行

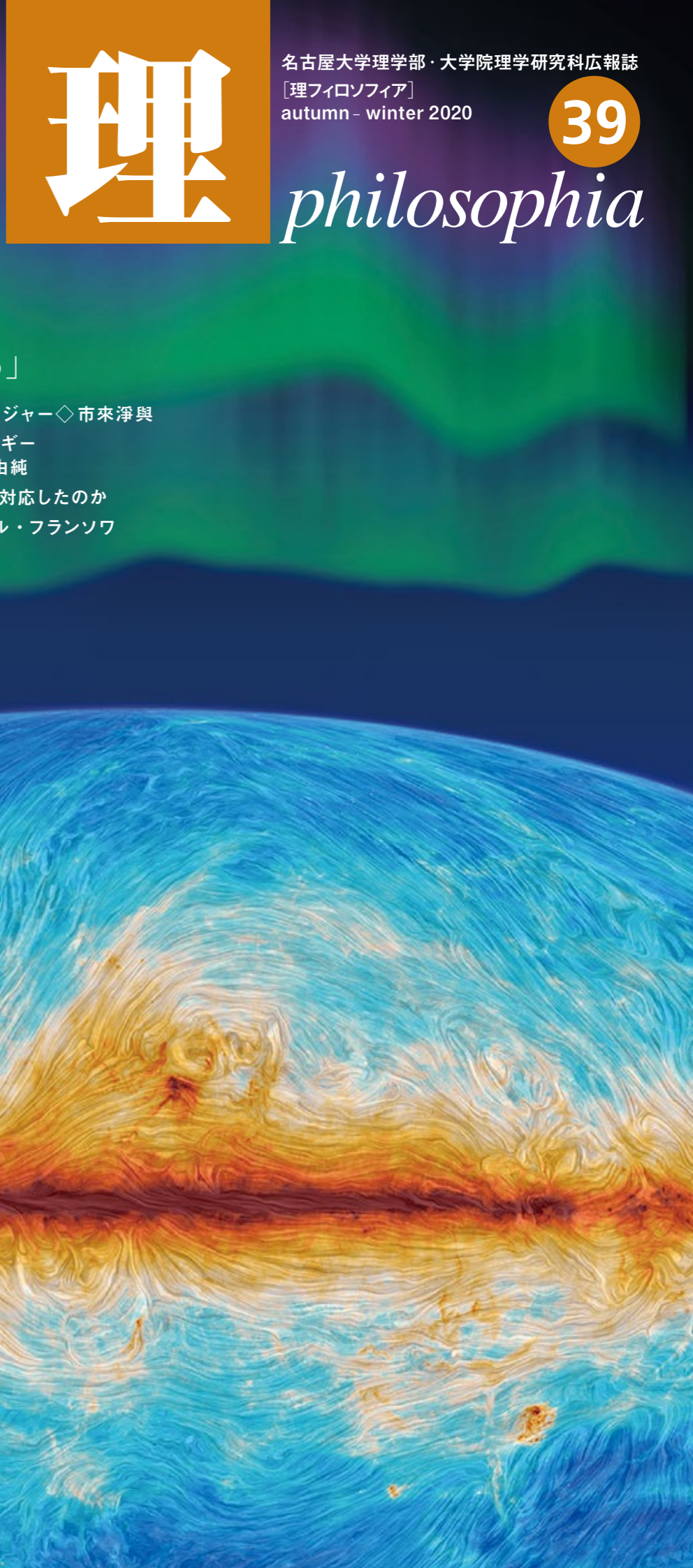
広報委員 阿波賀邦夫(研究科長)  
 寺崎一郎(副研究科長)  
 嘉村 巧(副研究科長)  
 松尾信一郎(数理学科)  
 飯嶋 徹(物理学科)※委員長  
 中澤知洋(物理学科)  
 川崎猛史(物理学科)  
 伏谷瑞穂(化学科)  
 杉山 伸(生命理学科)  
 平子善章(生命理学科)  
 夏原由博(地球惑星科学科)  
 南崎 梓(素粒子宇宙起源研究所)  
 堂前弘樹(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会  
 〒464-8602 名古屋千種区不老町  
 ご意見、ご感想をお待ちしています。  
 本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。  
 広報委員会までご連絡ください。  
 なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。

制作 株式会社電通  
 編集協力 株式会社エスケイワード  
 デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

URL <http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/>  
 E-mail [kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp](mailto:kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp)  
 FAX 052-789-2800  
 TEL 052-789-2308



# 理

名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌  
 [理フィロソフィア]  
 autumn - winter 2020

39

# philosophia

## 特集

### 「宇宙は磁場に満ちている」

- 08 — 磁場は宇宙の起源を紐解くメッセンジャー◇市来淨興
- 12 — 人工衛星でジオスペース最高エネルギー粒子が生まれる現場を見る◇三好由純
- 02 — 名大理学部はコロナウイルスにどう対応したのか
- 16 — 理の先端をいく◇藤田耕史／ルガル・フランソワ

# コロナ禍に思う

阿波賀邦夫 理学研究科長



## 理学研究科独自の判断

東京オリンピックを楽しみにスタートした2020年だが、誰も経験したことがないような日常が半年以上続いている。新型コロナウイルスの世界的な拡散により、オリンピックは延期され、我々の社会活動や価値観さえも、大きく変形させざるを得ない事態が起きている。これまで我々は、先端科学技術に裏打ちされた、ある程度成熟した現代社会に暮らしているとばかり思い込んでいたが、ウイルスや感染症に対抗する科学技術の現時点での限界を突きつけられ、また見えない不安に対する社会の脆弱性を思い知ることとなった。

新型コロナウイルスに関しては正月ごろから連日報道されるようになり、大学においても、1年半ばかりその影響が徐々に始まった。本学で開催される研究会や学会が軒並み延期や中止に追い込まれ、理学研究科においても卒業論文や修士論文の報告会などが中止された。さらに大学全体の卒業式や入学式でさえも見送られ、4月以降すべての講義は原則リモートとなった。ダイヤモンドプリンセス号のひっ迫した事態が連日報道され、感染拡大の不安が一気に膨張した2月、試験期間直後の春休みの期間中であったこともあり、理学研究科独自の措置として、学生全員に1週間の自宅待機をお願いした。性急に決定したことで、一部の指導教員や大学本部からのお叱りを受け、いささか「高い授業料」となったが、いくつかのことを「学習」した。この期間、学生がいなくなった理学の廊下を歩いてみると、少なくとも理学研究科をクラスターとする感染拡大はないという安堵の感とともに、理学の研究教育活動がほぼ完全にストップしてしまうという現実を目の当たりにした。さらに、1部局の措置が周辺部局の不安をあおるといふか、理学で何かあったのではといらぬ憶測をよんでしまうこともわかった。危機管理の鉄則かもしれないが、措置の前に、今、目の前の事実を冷静に伝えることの重要性を再認識させられた。

## 封印された従来の価値観

この半年間、実に多くの「対面」が「リモート」に切り替えられた。それまでは、多くの会議や出張をこなし、海外にも足を運んで対面することが、活力の指標であるかのような意識でいたが、その価値観を封印されたような気分がする。そしてリモートの方は、当初はネット環境の脆弱性や操作の不慣れに戸惑う場面もあったが、あつという間に改善され、理学研究科の教授会を含め、学内外の主要会議はすべてリモートとなっている。少なくとも表面上は、何の支障なく議事が進められており、恐らく多くの会議は、コロナ終後も以前の対面形式に戻ることはないだろう。また、リモート講義に関しては、パワポ+音声入力、オンライン講義、録画ビデオ講義など、実にさまざまな形態が試された。その有効性については、何回でも資料を見直せるため勉強しやすいとの学生の声もあり、多くの学生・教員がリモートも悪くはないと感じているのではないだろうか。

## リモート教育が変えたもの

今年度前期半年間に繰り広げられたリモート教育を総括すると、いくつかのことが見えてくる。まず講義形式については、どの形態が良いというよりは、適切に混ざっていることが学生を飽きさせないようだ。今後は、これまでのような対面講義オンリーではなく、「ベストミックス」により教育効果を高める工夫が求められるだろう。2点目は、優れた教育コンテンツの開発である。先日、ある先生のビデオ講義を拝見したが、ICT機材を自在に使いこなし、先生が手書きした文字や図がライブのように画面上に現れる一方、先生自身は常に画面上に現れて、熱く語りかけてくださる。このビデオを学生に見せてTAをきちんと配置すれば、十分な学習効果が得られると感じた。3点目は、実験・実習のリモート化の困難さである。当然のことながら、実際に目で

見て手を動かす実験については、安全面を考へてもある程度の人数の学生を集めて実施せざるを得ない。このような半年間の分析から、理学将来予想といふか、理学にとって望ましい将来を考へてみよう。優れた教育コンテンツの開発やそのベストミックスにより、多くの講義をまかなうことができるようになれば、誤解を恐れずいえば、毎年毎年、講義の数だけ教員をそろえる必要はもはやなくなるだろう。ここで重要なことは、教育に資する教員の専門化によって得られる余力を、研究に資する教員数や研究活動そのものの拡充にあてることで、教育と研究の分離といふか、それぞれの専門化によって、理学の研究教育活動の両面を発展させることが十分に可能と思う。

## 感染症と科学

ペスト、スペイン風邪、コレラ、結核…。人類の歴史は感染症との戦いで、100年に一度程度の頻度で世界規模の被害を受けているとのこと。東日本大震災の津波も1000年に一度ぐらいの周期で過去にも経験していたことが事後に明らかにされたが、人間の記憶は、何か禍があった直後によりみがえらされる。感染症と科学の発展という、すぐ引き合いに出されるのがペストとニュートンである。ヨーロッパにおけるペスト大流行の影響でケンブリッジ大学が閉鎖され、ニュートンは1665年から1666年にかけて、故郷のウールズソープで18カ月を過ごし、近代科学の扉を開けることになる。落ち着いた環境で自由に思考する時間が、研究の発展にいかほど重要であるかを教えてくれる。350年後の名大理学においても、コロナ禍を契機に何か一つでも次の時代を切り開く研究成果が生まれることを、切に祈っている。



## 計算機シミュレーションを 新型コロナウイルス治療薬開発に生かす

岡本祐幸 物質理学専攻教授

2020年、世界中の人々が新型コロナウイルスの感染症に大きな影響を受け、生活様式がすっかり変わってしまった。筆者は、科学者として何か貢献できないかと日々考えているが、本小文では、筆者にはこんなことができるのではないかと思うことを書きたい。筆者は物理学の分野で開発された拡張アンサンブル法と総称される強力なシミュレーション手法を生体系の分子シミュレーションの分野に導入するとともに、生体系に適した多くの拡張アンサンブル法を開発してきた（本誌38号P.8参照）。その一つにレプリカ交換傘サンプル法（REUS）がある。この手法を新型コロナウイルス治療薬の開発に使いたいというのが筆者の考えである。

薬が効くというのは、大雑把な話をすれば、病気を起こす蛋白質の結合場所に薬分子が結合し、その蛋白質が病気の原因となる「悪さ」をできなくすることである。筆者らは、薬剤候補分子と標的蛋白質の結合場所との距離を反応座標とするREUSシミュレーションを実行することによって、どの候補分子が最も結合しやすいかを計算によって示す方法を提案した。従来のシミュレーション法では、この距離はほとんど動かず、薬剤候補分子が標的蛋白質に結合するのに膨大な計算時間がかかる。一方、REUSでは、シミュレーション中に薬剤候補分子を結合場所の方向に近づけたり、遠ざけるような力を掛けることで結合に要する計算時間を大幅に短縮することができる。

2020年初めに新型コロナウイルスのまわりに突き出ているスパイクとよばれる蛋白質群の立体構造がクライオ電子顕微鏡実験によって決定された（図1）。肺の細胞の細胞膜には、アンギオテンシン変換酵素2（ACE2）とよばれる受容体があり、ウイルスのスパイク蛋白質の一番外側には、それに結合する受容体結合ドメイン（RBD）がある。RBDがACE2に結合することによって、その細胞はウイルスに感染する（図2）。よって、まず筆者が目指すのは、RBDとACE2の結合に関するREUSシミュレーションを実行して、細胞の新型コロナウイルスへの感染のメカニズムを探ることである。

さらには、新型コロナウイルス治療薬として、RBDに結合することによって、RBDがACE2に結合するのを阻害するものが考えられる。その候補分子が得られた時、どの候補分子がRBDにもっとも効率良く結合するかを、REUSシミュレーションで調べることができる。

RBDがACE2に結合する感染の第1段階に続いて、第2段階では、スパイク蛋白質がプロテアーゼという酵素によって二つに切断され、ウイルスの膜と細胞膜が融合して、ウイルスの核酸（RNA）が細胞内に入りこんで感染する。よって、創薬としては、このプロテアーゼに結合してスパイク蛋白質の切断を阻害する薬剤を開発することも考えられる。このような創薬研究にREUSシミュレーションをぜひ用いていきたい。

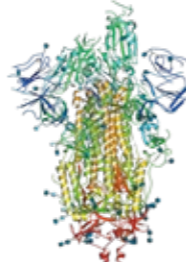


図1 クライオ電顕で決定されたスパイク蛋白質の立体構造。スパイクの上の部分に細胞膜上のACE2に結合する受容体結合ドメインRBDがある。

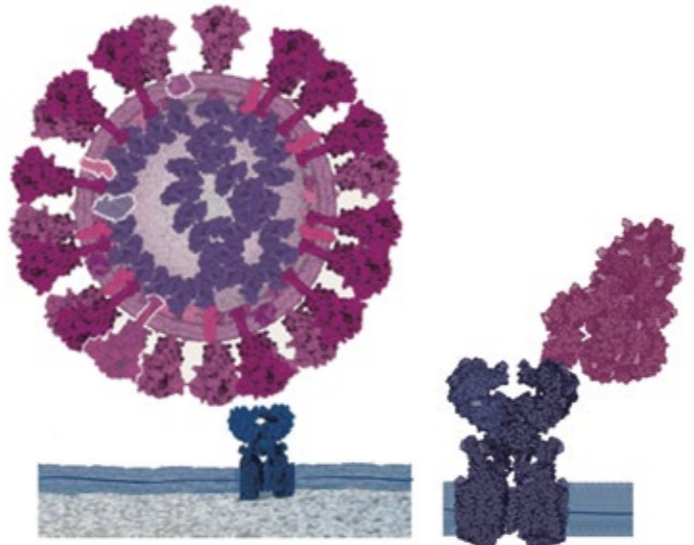


図2 新型コロナウイルス（赤紫色）が細胞膜（濃灰色）を貫通する受容体ACE2（濃紺色）に結合する模式図。右は左の拡大図であり、ウイルスのスパイク蛋白質のRBDがACE2に結合しているところ。

## オンライン授業を受けて

篠原百絵 理学部1年

私はこの春に名古屋大学に入学し、大学生活を楽しみにしていた。しかし新型コロナウイルスの影響で、授業はすべてオンラインだった。初めてのことはばかりで不安がたくさんあった。1人で家の中で毎日授業を受け、友だちもほとんどできないのは少しさみしくて、思い描いていた大学生活とは違うな、と思っていたが、オンライン授業でよかったこともあった。たとえば、オンデマンド式の授業は一時停止したり何度も見返すことができるので、理解につなげることができた。ほかにも、通学にかかる時間がなくなったり、自分の都合の良い時間に授業を受けることができるのはうれしかった。

私は4月から下宿する予定だったが、オンライン授業が決まり、春学期は他県の実家で授業を受けた。他県にしながら名古屋大学の授業を受けられるのは、多少デメリットもあるが、すごいことだと思った。このコロナの時期を機に、多様な大学生活のあり方が生まれていけばいいなと思う。

## オンライン授業におけるコミュニケーション

井原邦夫 遺伝子実験施設准教授

オンライン講義になるかもということから2020年度の春学期はスタートした。準備期間として講義開始は1週間延期されたが、具体的なオンライン講義のやり方がまったく見えてこない。名古屋大学の授業ホームページ管理システムであるNUCTに教材を置いた自主的な課題取り組みを中心とする講義か時間拘束を伴う双方向のオンライン講義にするか悩んだ。チャットアプリ上に設けられた教員間の情報交換チャンネルでも、オンライン講義についていろいろな情報が飛び交い、不安にかられ、例年の10倍以上の時間をかけ準備をした気がする。学生との唯一の接点であるNUCTでアナウンスして、ウェブアプリでアンケートを取った。その結果から、ひとまずオンライン講義でスタートして、参加者の反応を見ながら修正していこうと決めた。通常の講義では、学生の顔（反応）を見ながら、講義のメリハリをつけている。それが、オンライン講義になると、難しくなる。特に、多

人数の講義では、ビデオONを強要できず、アノニマスアイコンがならんだ画面を見ながらの講義になる。そのうち、味気ない一人芝居（講義）をやっている錯覚におちいる。質問でもあればネットの向こう側にいる学生を意識できるが、そんな学生はほとんどいない。最初の授業の後に、オンライン共有画面に匿名でコメントを流せるツールを知った。この匿名性の利点は大きく、「ATPって何ですか」といった質問が共有画面に流れ、それに解説を加えたり、こちらからの問いかけにも生の反応があり、ネットの向こう側との距離が一気に縮まった気がした。学生側の評判もすこぶる良く、オンライン講義では欠かせないものになった。オンライン環境は、実は、かなり整備されていて、使う人間側の保守性でゆっくりとしか変化できなかったのが、今回のコロナ禍によって一気に加速し、新時代の講義へとシフトしていきかけになるのかもしれない。

## 1年生へのメッセージをウェブに

藤原素子 素粒子宇宙物理学専攻博士後期課程2年

アウトリーチ活動の一環としてサイエンスカフェを企画しようとしていた矢先、コロナの影響で対面での打ち合わせすら不可能になった。「大学で理学を学び研究するものとして、いまだれに何を伝えたいか」。企画の出発点に立ち戻ったとき、学部1年生の姿が浮かんだ。キャンパスにすら気軽に足を踏み入れられな

い現状、私たちにとっての大学における本来の「日常」は、きっと1年生たちにはまだ見通せていない。すべてを伝えることは難しくても、大学とは自分だけのテーマをとことん探究できる自由な場所であること、大学の講義の大切さや、その先に待っている研究の面白さを伝えたい。物理学教室を中心に、1年生へのメッ

## 「3密」を回避した 新入生ガイダンス

堀上美里 理学部・理学研究科・多元数理科学研究科 教務学生係長

2020年の4月は、新型コロナウイルス感染症の影響により、例年とは全く違う新年度の始まりとなった。4月3日に行われた理学部新1年生を対象とする新入生ガイダンスは、ガイダンス前日に急遽、予定していた内容を大幅に変更することを余儀なくされた。

「3密」を回避するため、50人以下かつ1時間未満でガイダンスができるように、新1年生を6つのグループに分けて、内容を絞って実施することとなったのである。

急なプラン変更は非常に大変だったが、前日の連絡にもかかわらず、ほとんどの新1年生が大きな混乱もなく、参加してくれたことは大変にありがたいことだった。また、同じ内容のガイダンスを、1日に6度も行っていただいた学部長と教育委員長には、心から感謝をしている。

ガイダンス以降、遠隔授業となり、学生は原則登校を禁止されたことを思うと、短い時間ではあったが、新入生にとって貴重な登校の機会であった。早く、彼ら、彼女らにキャンパスでの大学生活を送らせてあげたい、と切に願う。

セージを募集し、のべ25人の方からあたたかく力強いエールをお寄せいただいた。メッセージをまとめたウェブページは反響も大きく、素晴らしい企画になったと自負している。

1年生の皆さん、名古屋大学理学部へようこそ。皆さんといっしょに研究できる日を心待ちにしています。

1年生へのメッセージウェブページ <https://teamkmisc.wixsite.com/home/message>

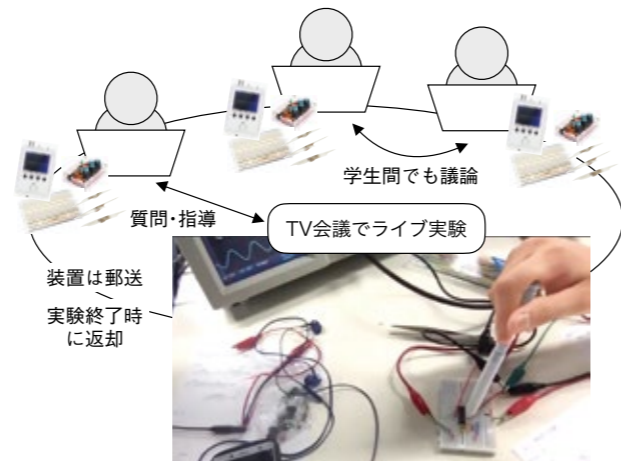
## 学生実験をリモートで実現する

北口雅暁 素粒子宇宙起源研究所准教授

「物理学実験」は物理学科3年生の必修科目であり、学生は四つの実験テーマに取り組む。基礎的な実験でも実際にやってみると理屈通りにならないことが多い。共同研究者と議論して納得いく結論を導き出すという研究者として必要なこの基礎体力を、学生は実験を通して身につける。

装置のまわりに学生が集まり、また時に激しくなる議論そのものが重要なので、実験は密な状態になりやすい。テーマによってはやむをえず、実験は行わずに過去のデータを解析させることにした。実データの取り扱い扱いは初めてなのでこれだけでも行う意味はある。筆者が担当する「回路実験」は基礎的な電子回路を作成し特性を調べるもので、唯一全員が履修する。せめてこのテーマだけでも体験させたい。最近では小型で簡易なオシロスコープや信号発生器が安価に手に入るので、全学生に順番に郵送して自宅で実験させられないか。対面指導なしでも学習できるよう事前配布資料や授業の進め方について教員間で綿密に検討を重ねた。幸い予算が措置され、TAの尽力もあって、準備は春学期に間に合った。

開講してみると、8割程度の学生が希望者向けに開設したTV会議での双方向授業に継続して参加した。映像を見ながら教員が適宜助言できたし、学生も活発に議論していた。学生同士で進捗を報告さ



せる機会を設けると理解度が向上した。これらは対面での指導と変わらない。一方、簡素な装置しか使えないことや安全性の点から実験内容は限られる。いっしょにものに触れての指導ができないので学生が装置に慣れるのにかなり時間がかかった。TV会議越しで意思の疎通が難しいという声もあった。

やはり実験は大学で対面で行うのが非常に望ましい。それでも今回、学生実験をリモートで実現できたことは、同様の事態への備えとして大きな意義があった。制約の多い中、学生も積極的に取り組んでくれた。コロナ禍の経験を糧にして、より良い大学教育を目指したい。

## オンラインでもできるセミナーがある

川村静児 素粒子宇宙物理学専攻教授

2019年度から基礎セミナーAを担当することになり、以前から興味があった『論理的対戦型ゲームを通して発想力を鍛える』授業を行った。独自に考案した簡単なゲームを題材として、まずはグループに分かれて、その必勝法を論理的に考察してもらい、次に、学生一人一人に、そこから発想を飛ばして、より魅力的なゲームを考案してもらうのである。学期の終了後、学生たちからは、「これこそが大学の授業である」などの熱いコメントをいただき、私としても大いに満足のいくものであった。

さて、2020年度は、新型コロナウイルスの影響によりオンライン授業である。まず、心配したのは12人の学生のネット環境。幸い、全員「オンライン講義で大丈夫」とのことであったのでまずは一安心。また、昨年度のように4人ずつ三つのグループに分かれて議論を行うことも、アプリケーションの機能を使えば可能であり、ゲーム自体も、「ボード」を画面共有し、そこにコメント機能を使って、マークを「コマ」として書き込むことで何とかかなりそうであった。

いよいよ最初の授業。多少のまごつきはあったが、幸いにも、やりたいことはほぼすべてできた。学生たちも、この摩訶不思議な授

オンラインセミナーでのゲームのイメージ。碁盤の上で順番に棒を動かし、自分の陣地と真ん中のマスをつなげ、最後に残る敗者を決める。図では、次に佐藤さんが✓のついた棒を動かせば、高橋さんの負けとなる。



業に若干戸惑いながらも、積極的に自分の意見を述べてくれた。その後、全国紙のコーナーで大きく取り上げていただき、何人かの学生がインタビューを受けて彼らの意見が名前とともに紹介され、そのことがより一層の授業の盛り上がりには拍車をかけた。オンラインでは、何をしても対面の3倍程度の時間がかかるのだが、学生たちは、私の教え通り、日常生活の中に心を遊ばせることにより、驚くような発想(たとえば、磁石をコマにしたり、電子殻をボードにしたり)を得て授業に参加してくれた。

コロナで行動が大きく制限されているこのような時にも、こんなにも豊かな発想力を発揮してくれた学生たちには頭が下がる。今後、一日でも早く、彼らが普通の学生生活を楽しむことができるようになってくれることを心より願うものである。

## 接触経路を可視化する

奥村 暁 宇宙地球環境研究所講師

「X県でクラスターが発生」「新たにY人の感染確認」「感染経路不明はZ人」。こんな報道を毎日見るようになって半年以上が過ぎた。感染者数の日毎のヒストグラム表示や、累積感染者数を片対数表示したグラフも、読者の多くがすでにご覧のはずだ。しかし時系列データを単に人数として眺めるだけでは、ここ愛知県で一体何が起きているかを把握するのは難しい。2020年2月から4月には高齢者施設や合唱団などでのクラスターが多数発生したものの(第1波)、毎日増える感染者数がクラスター追跡調査の賜物なのか、それとも経路不明の市中感染が広がっているのか、感染者数の推移だけでは見えてこなかった。

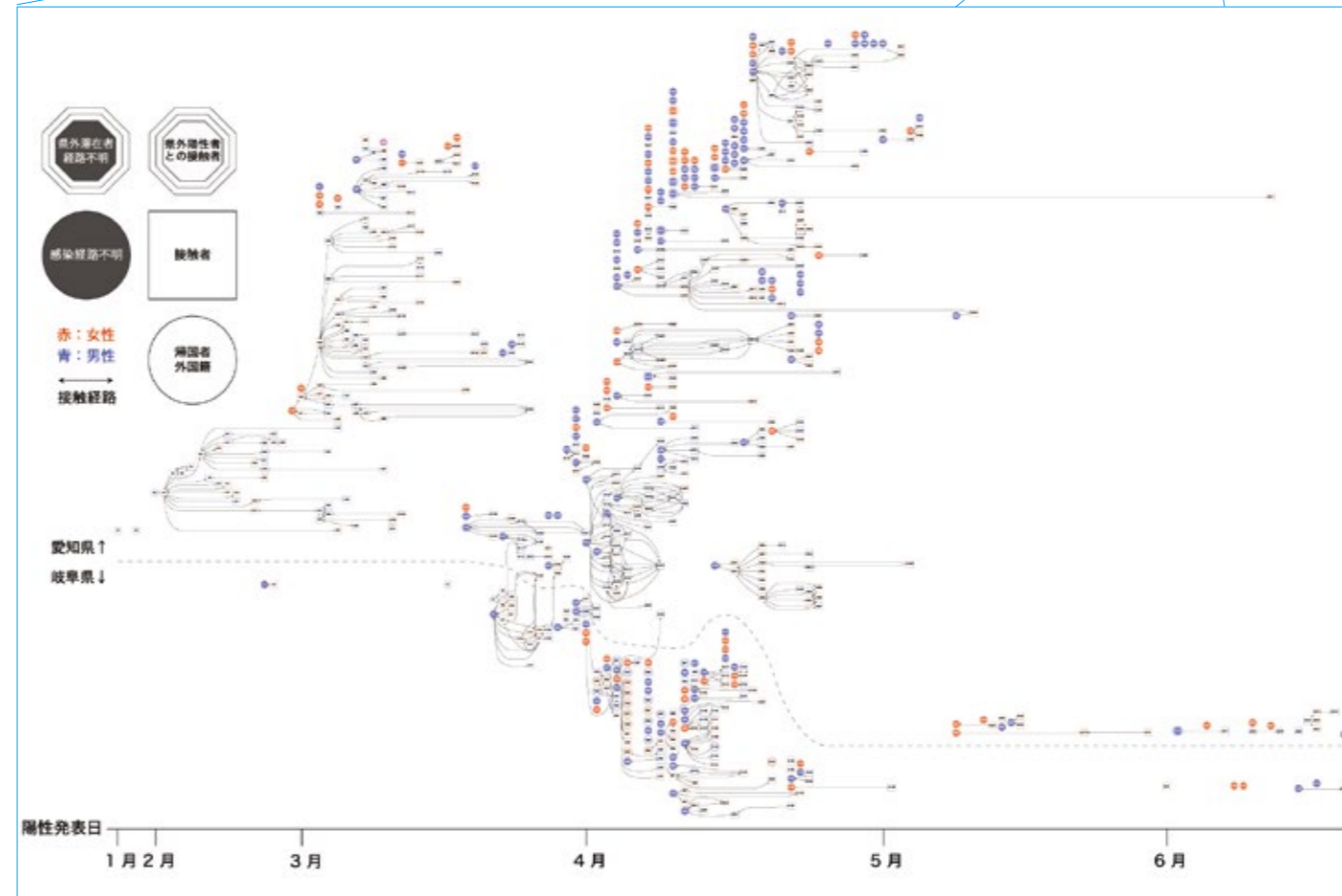
「データの見せ方を変えてみよう」と私が思い立ったのは4月3日のことだ。保健所の公開するデータをもとに、より情報をもたせて可視化できないか、愛知県や岐阜県で何が起きているかを概観する見せ方はないか、ウイルスについては全く専門外の私なりに工夫したのが、本記事の接触経路図だ。

右の図は、自治体が公表する「県内100例目の濃厚接触者」のような情報から半自動生成した、全接触経路である。10月11日現在、愛知・岐阜6185人分の接触情報を掲載している。下図に抜粋する第1波では、両県の感染者の大部分がクラスターであった。しかし第2波ではクラスターに含まれない(もしくは追えていない)経路不明の事例が半分程度を占めるようになったのが右の全体図からはわかる。また実際にどのような集団や年齢層で感染が広がるのかもわかる。

同じ測定データでも、それをどのように眺めるかによって得られる情報はがらりと変わる。実験物理学者の私にとって、これは自身の学生時代にさかのぼる研究生活で学んだことであり、今も学生に日々教えていることだ。人と違った視点をもってみるということが、理学部卒業生の多様な進路先でも生きることを願う。

愛知県、岐阜県の感染経路図。高解像度の図と元データは下記のウェブページで閲覧できる。

<https://github.com/akira-okumura/COVID-19>



磁場は、身近にありながら、その定量的な影響の評価が難しい力である。

しかし、宇宙の天体進化を考える時、磁場の存在は無視できない。

実は、少なくとも星生成の現場では磁場がそのタイムスケールを決める支配的な役割を果たしていることがわかってきた。

一方で地球磁気圏は太陽風から地球大気を守ると同時に、

その相互作用で強力な粒子加速を生み、地球の上層大気に大きな影響を与えている。

地球周辺の磁場、宇宙生成にかかわる磁場。

2つの方向から磁場の果たしてきた役割を考える。

## 磁場は宇宙の起源を紐解くメッセンジャー

市来 浄興 素粒子宇宙物理学専攻准教授



Kiyotomo Ichiki

1976年生まれ。2000年京都大学理学部卒業、2005年東京大学理学系研究科博士課程修了。博士(理学)取得。2005年日本学術振興会特別研究員(国立天文台・東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター)、2008年名古屋大学理学研究科助教、2015年名古屋大学基礎理論研究センター講師を経て、2017年より現職。専門は宇宙論、宇宙物理学。

### 磁場はいつ生成されたのか

宇宙は磁場に満ちている。コンパスを持てば地球が巨大な磁石であることを感じることができるし、オーロラなどの美しい現象をもたらしてくれる。最も身近な恒星であ

る太陽の表面活動も磁場に支配されていることが知られており、さらに大きな銀河や銀河団という非常に大きな天体スケールでも、磁場が大局的に存在することが観測的に知られている(図1)。これらの磁場

はいつ、どのように発生したものなのだろうか。とくに、銀河より大きなスケールでの磁場の起源は宇宙における未解決問題として残されている。本稿では宇宙の大スケールにおける磁場観測の現状と、宇宙

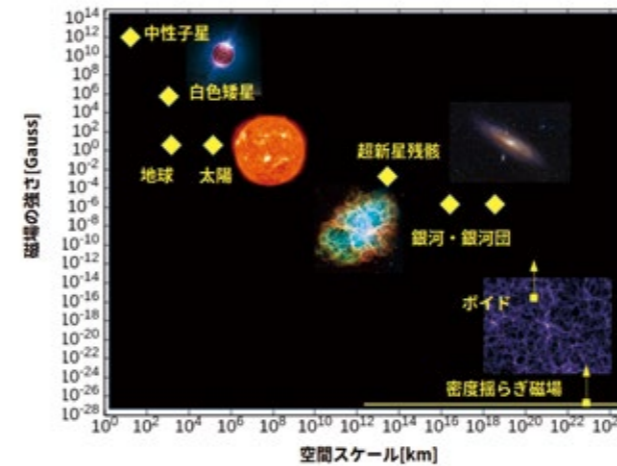


図1 天体のスケールと付随する磁場の強さの関係図  
宇宙におけるさまざまな天体のスケールとそこに付随する磁場の大きさについての関係を描いた図で、宇宙にはいたるところに磁場が存在していることを示している。ポイドについては磁場の下限が観測的に得られている。密度揺らぎ磁場は宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎなどから示唆される密度揺らぎから不可避免的に生成される磁場の大きさ。

の歴史の中で最初に生成されたと考えられる大スケールの磁場の起源についての筆者らの研究を紹介したい。

銀河系に磁場が存在することは古くから知られている。個々の星々がバラバラの磁場をもつだけでなく、銀河系全体が一つの磁石のようにみえているのである。

マイクロ波の帯域では、宇宙空間に広がるマイクロスケールのダストの粒からの熱的な黒体放射が観測されている。星間塵ともよばれるダストの粒はわずかに磁力をもっており、銀河磁場を感じてその方向が揃う。そのため、その放射はわずかに偏光することが知られており、従ってその偏光を測ることにより銀河磁場の向きを知ることができる。近年の宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測衛星PLANCKは星間塵

の熱放射の偏光を高解像度で全天観測し、銀河系全体にわたって磁場が存在していることを明らかにした(図2)。磁場の大きさは地磁気の10万分の1(マイクロガウス)ほどと見積もられている。とても小さい値のように思われるかもしれないが、実は星間空間ガスの運動エネルギーに匹敵するほどのエネルギーであり、動力学的に重要な位置を占めている。

この銀河磁場はいつ、どのように生成され、現在のような姿になったのであろうか。現在の標準的なシナリオは、まず何らかの機構で銀河磁場のもととなる種磁場が形成され、銀河のダイナモ機構によって増幅・維持されているとするものである。ダイナモは磁気流体力学的な不安定性により、ガスの回転エネルギーを磁場のエネルギー

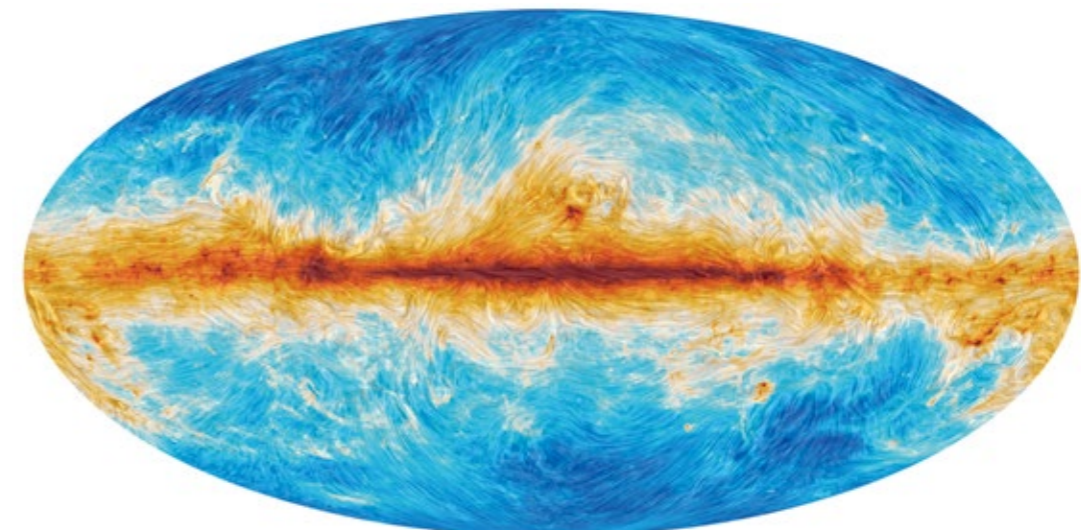


図2 PLANCK衛星が取得した銀河磁場の地図  
カラーは星間塵からの放射の強さを表し、線で表された構造は偏光の情報から読み取られた磁場の構造を表している。銀河のスケールにわたって磁場が揃って存在していることがわかる(Planck 2015 results I, A&A594, A1 (2016))。

に変換する機構である。太陽や、地球内部で働いていることが知られているが、我々の銀河系も角運動量をもつため同様の現象が起こるのであろう。オーダーを越えた評価は難しいが、大雑把に銀河系の回転のタイムスケール(数億年)で磁場の増幅が生じるとすれば、銀河系が形成されたおよそ100億年前から現在までに20桁ほど磁場を増幅できると計算される。現在の磁場の大きさが数マイクロガウス(数 $\times 10^6$  Gauss)程度なので $10^{25}$  Gaussほどの磁場が銀河の大きさ10kpc(1pcは距離の単位でおよそ3光年)という大スケールにわたって銀河系形成時に存在していればよいと考えることができる。

種磁場の起源については大きく二つに分けることができる。一つは天体物理的な起源であり、先に銀河や星が誕生し、そこから天体の活動により磁場が生まれると考えるアイデアである。もう一つは宇宙論的な起源で、銀河や星が誕生する前から磁場が存在した、というアイデアである。2010年代になり後者のアイデアに関係する面白い観測結果が発表された。宇宙大規模構造におけるポイドとよばれる空洞構造の中にも磁場が存在するというのである。

星や銀河はなくても磁場はある

ボイドとは何であろうか。宇宙論の標準モデルである冷たい暗黒物質による構造形成シナリオでは、銀河や銀河団などの天体は、フィラメントとよばれる暗黒物質の網目状の構造に沿って形成・進化すると考えられている。このような宇宙の大規模構造は、物質の密度の大きいところはさらに物質を集めるという重力の性質によって生み出されるもので、その見た目から泡宇宙ともよばれる。泡の内側の空洞部分はボイドとよばれ、10Mpc以上にわたって星・銀河などの天体がほぼ存在しない巨大な領域である。このような空間に磁場があるとすれば、それは銀河起源とは考えにくい。

このように何も無い空間に磁場が存在することがどのようにしてわかるのかについて説明したのが図3である。遠方の宇宙にはブレーザーとよばれる、10TeV (1TeVは電子を1兆ボルトで加速したときのエネルギーに相当)にも及ぶガンマ線を発する天体が存在している。このガンマ線は銀河間空間の赤外線光子と出会うと、高エネルギー電子・陽電子を対生成し、その電子・

陽電子が今度は宇宙に満ちているCMB光子を玉突きして二次的なガンマ線を放射する、という現象を起こす。この際、途中に磁場がなければ観測されるガンマ線はすべてブレーザーから真っ直ぐやってくるが、磁場が存在すると電子・陽電子対がローレンツ力によってランダムに曲げられてしまうため、一部のガンマ線がボヤッと広がってやってくることになり、また地球に到達するまでの経過時間が長くなる。このため、途中に磁場が存在するとガンマ線が予想よりも暗くなることから、磁場に制限が与えられるのである。

最初のボイド磁場検出に関する発表こそ先を越されてしまったが、筆者らはこの過程に早くから興味をもち、ガンマ線観測衛星Fermiの複数のブレーザーについてのデータを用いて、やはり $10^{20}$  Gauss以上の磁場がボイドには存在しているという結論に達した。ボイドのように近傍に天体がない空間にも磁場が存在しているとはどういうことであろうか。その問いに答えるべく筆者たちが取り組んできた研究が、宇宙論的摂動に基づいた磁場生成理論である。

宇宙論的摂動による磁場生成

宇宙には星、銀河、銀河団、大規模構造、ボイドなど、さまざまなスケールで構造が存在している。これらの多様な構造は、宇宙誕生時に発生したインフレーションとよばれる急激な加速膨張期に量子的に生成された密度揺らぎ(濃淡)がその後重力不安定性によって成長し形成したものと考えられている。この濃淡は宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎとして実際に精密に観測されており、宇宙の至るところに存在していたことがわかっているため、この濃淡から磁場が生成されていれば、やはり磁場も宇宙のいたるところに存在すると考えたのである。

そこで筆者らは、宇宙マイクロ波背景放射の計算に用いられる宇宙論的摂動論の枠組みを応用することで、理論的な曖昧さのない、我々の宇宙に存在すべき種磁場の大きさを予言するための定式化を行った。考える物理過程は以下のようなものである。宇宙の誕生後38万年後までは、すべての物質は電子・陽子に分解され、そして大量の光子が電磁相互作用をしながらプラズマとして存在している。そのなか

に密度揺らぎが存在しているということは、光子の多いところと少ないところが存在し、ちょうど高気圧から低気圧に向かって風が吹くように、光子流体の風が吹いていることになる。電子と陽子はこの光子から圧力を受けるが、電子の方が圧倒的に軽いことから運動にわずかな違いが生じ(電流)、磁場が生成される(図4)。ただし、宇宙に存在する密度揺らぎを線形近似の範囲で解釈したのでは、磁場生成の鍵を握る「渦型電流」が生じえない。磁場生成を記述するためには、理論を高次まで展開、すなわち摂動の1次式ではなく、2次式、3次式などまで取り込んだ複雑な計算が必要である。

この計算には時間がかかったが、最初のアイディアの提案から10年ほどして、当時研究室の大学院生であった嵯峨氏(現京都大学基礎物理学研究所研究員)が計算に成功し、磁場の大きさは宇宙年齢100万年の頃に10Mpcスケールで $10^{23}$  Gaussともまった(図5)。この磁場はボイドに存在する磁場を直接説明するには小さいものの、宇宙論的摂動論に基づいた、宇宙の至るところに必ず存在すべき、磁場の初期条件とよべる重要な結果である。

さまざまな磁場生成と宇宙の情報

標準宇宙論モデルの枠組みで確実に存在するはずの宇宙磁場は算出できたが、磁場生成の本質は渦型の揺らぎを初期宇宙プラズマ中に誘起させることにあるので、ほかにもさまざまな可能性が考えられる。たとえば、初期宇宙において「真空の相転移」とよばれる素粒子の場の理論に基づく現象が起きたとき、その名残として「宇宙紐」や「位相欠陥」とよばれるような構造が生まれる可能性が高く、これが存在すれば、宇宙プラズマに渦型の摂動が誘起される。したがって「真空の相転移」が起こった証として磁場が生成されているはずである。これらの渦型摂動はそれぞれ

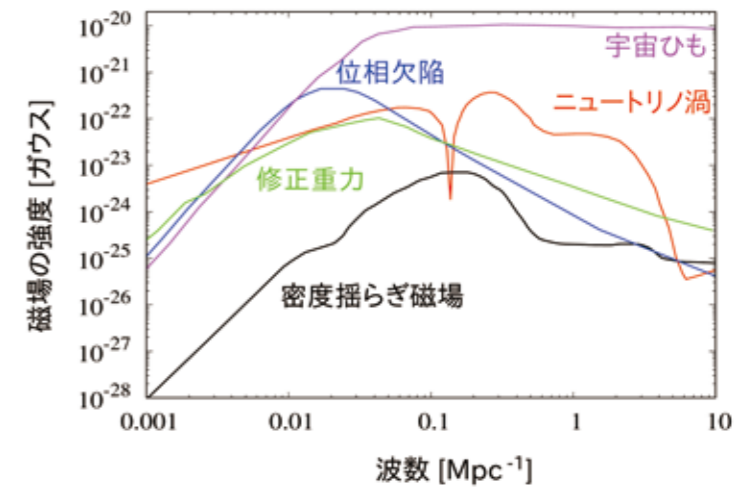


図5 化石磁場のエネルギースペクトル  
黒線は精密に観測されている密度揺らぎから不可避的に生成される磁場のスペクトルを表しており、宇宙に存在すべき最低限の磁場の強さを表す。他の色の曲線は、標準宇宙論モデルを超えたモデルから示唆される磁場のスペクトルを表している。

の起源に応じて特徴的な空間スケールをもつため、その化石である磁場の空間構造を詳細に観測できれば、逆に「真空の相転移」の謎を解き、初期宇宙の物理の有力な情報源となる(図5)。もちろん、渦型の揺らぎは磁場だけでなく宇宙マイクロ波の温度・偏光揺らぎを新たに生成するため、その観測からその大きさには制限がかかる。筆者らの解析によると初期宇宙プラズマ中の渦型揺らぎを介した磁場生成では、宇宙再結合の時期に $10^{22}$  Gaussを越えていないことが明らかになっている。

この制限は、磁場の無い宇宙から始めて、宇宙論的な渦型摂動を誘起し、そこから磁場を生成するという過程についてのみ適用できるもので、最初から磁場が存在している場合にはその限りではない。では、宇宙が誕生したとき、宇宙の密度の濃淡とともにはじめから磁場が存在していたと考えるシナリオはどうだろうか。たとえば、インフレーション期に量子揺らぎから磁場を生成するアイデアや、インフレーション後の宇宙再加熱期(いわゆるビッグバン)での磁場生成などが議論されている。このよう

なシナリオでは、観測されている宇宙の1様等方性からのずれが10万分の1程度のオーダーであることに対応して、磁場のエネルギーは宇宙の放射のエネルギーの10万分の1程度、すなわち $10^9$  Gauss程度以下の磁場の存在なら許されるということになっている。つまり $10^{22}$  Gauss以上、 $10^9$  Gauss以下の宇宙初期磁場が観測されれば、量子揺らぎや、ビッグバンそのものなどから磁場が直接生成された証拠となる。

宇宙の磁場に関する情報は今後も増えていくことが期待されている。名古屋大学も参加している次世代TeVガンマ線望遠鏡(CTA)ではさらに多くのブレーザーなど的高エネルギー天体を検出することで、ボイド磁場の普遍性や強度についての情報をもたらしてくれるだろうし、次世代大型電波干渉計計画(SKA)では銀河磁場の精密な観測と、銀河間磁場・ボイド磁場との関係についての知見が得られるだろう。観測される磁場から、宇宙誕生直後の様子についての情報が得られるかもしれない。今後10年間の時間スケールでの天文観測の進展に期待している。

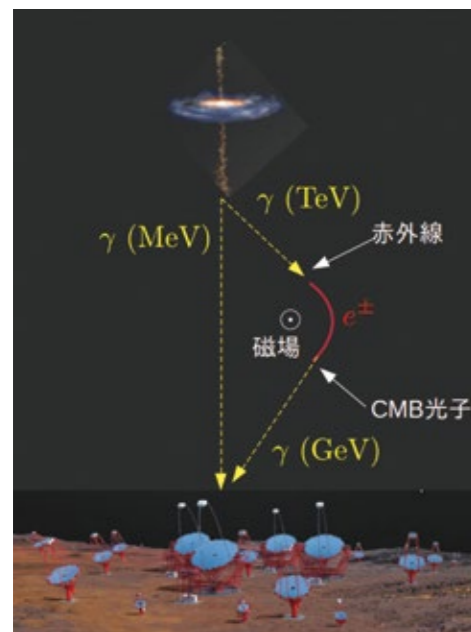


図3 ボイド磁場観測の模式図

遠方の高エネルギー天体から発せられるMeV領域のガンマ線は直接地上まで到達する。一方、TeVほどのエネルギーがあると、主に星から発せられた銀河間の赤外線と反応して電子陽電子の対生成を起こす。この過程の平均自由行程はMpc程度あるので、対生成はフィラメントから離れたボイド領域で起こると考えられる。生成された電子陽電子対は磁場によって方向を曲げられながら、周囲の宇宙マイクロ波背景放射(CMB)を逆コンプトン散乱して、二次的なGeVガンマ線を放射する。このためGeV領域では高エネルギー天体のまわりにぼんやりとしたハローが観測されるが、磁場が強いとこのハローが広がって暗くなることから磁場の情報がえられる。(https://www.cta-observatory.org/what-propagation-of-energetic-light-can-tell-us/にある図を改変。Copyright CTA)。

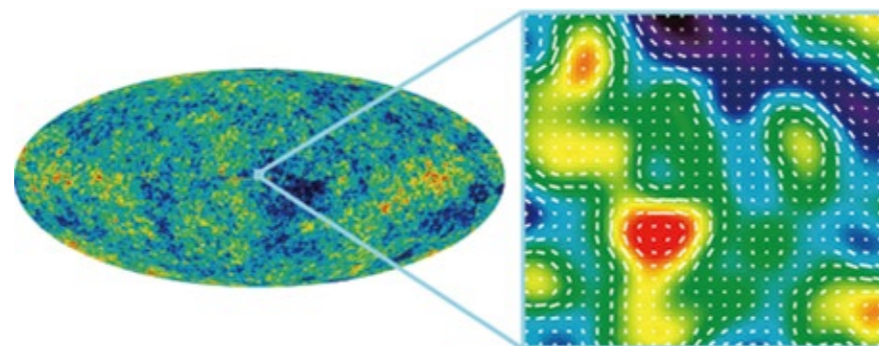


図4 宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎの地図と付随する磁場の想像図

WMAPによって得られた宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎの地図とその拡大図。赤色は光子が多いところ(高気圧)、青色は光子が少ないところ(低気圧)に対応し、そこに吹く光子の風によって磁場(図中の白線)が生成される。

# 人工衛星でジオスペース最高エネルギー粒子が生まれる現場を見る

三好由純 宇宙地球環境研究所教授

## 太陽風と地球磁場の相互作用

地球周辺の宇宙空間を、「ジオスペース (Geospace)」とよぶ。日本語では宙空 (ちゅうくう) や宙 (そら) とよばれることもある。ここは、何もないように見えても、エネルギーの高い荷電粒子が地球の磁場の中で飛びまわっている場所である。

図1に示すように、太陽からは太陽風とよばれる超音速プラズマ流が、つねに吹き出している。この太陽風と地球の磁場との相互作用によって、磁気圏とよばれる領域が作り出される。太陽面での爆発

や、高速の太陽風の地球への到来に伴って、しばしばジオスペースは「宙の嵐」(Geomagnetic Storm) とよばれる状態になり、ジオスペースの電磁環境は大きく乱れ、地球表面の磁場強度が大きく減少し、オーロラが数日間にわたって爆発的に輝く。同時に、地表で強い電流が流れて送電線ネットワークに影響が発生したり、通信障害が起きたりするなど、私たちの生活にも影響を及ぼす。ジオスペースの放射線 (高エネルギー荷電粒子) が著しく増加するのも、この「嵐」のときである。

## 宙でもっとも危ない場所

ジオスペースは、最も身近な宇宙空間であり、そしていまや生存圏ともなっている。磁気圏の中の、国際宇宙ステーションが飛行する高度から気象衛星「ひまわり」がいる静止軌道の間の空間は「内部磁気圏」とよばれ、そこには「放射線帯」が存在する。放射線帯は、ジオスペースで最高エネルギーの粒子群から構成されている。これらの高エネルギー粒子 (放射線) は、人工衛星の誤動作、故障、さらに宇宙飛行士の被ばくと



Yoshizumi Miyoshi

1973年生まれ。2001年東北大学大学院理学研究科修了。博士 (理学)。日本学術振興会特別研究員 (PD)、米国ニューハンプシャー大学客員研究員を経て、2004年より太陽地球環境研究所 (現宇宙地球環境研究所) 助手/助教、准教授を経て、2018年より現職。JAXA ERG (あらせ) 衛星計画のProject Scientist。オーロラの超高速撮像観測や、データ同化、機械学習を活用した研究にも従事。専門は、宇宙空間物理学、地球惑星磁気圏物理学。

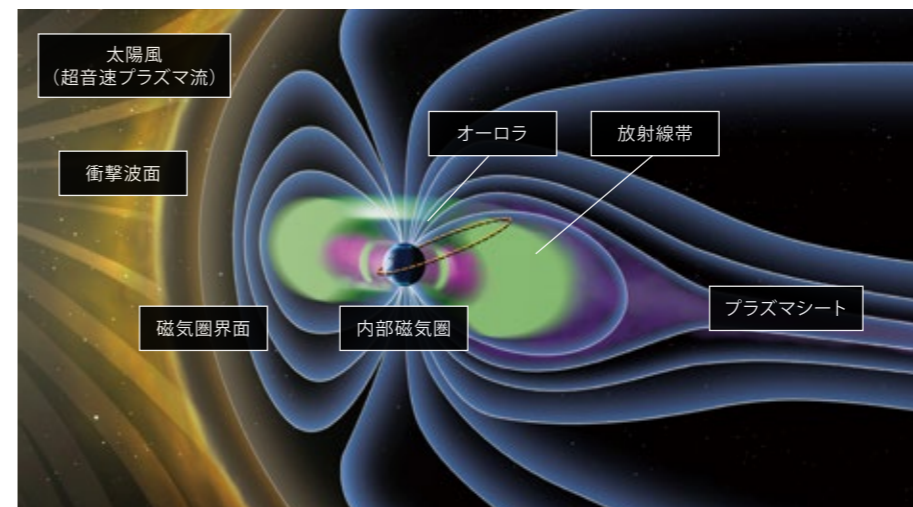


図1 ジオスペースの概念図  
図の左方向にある太陽からは超音速のプラズマ流である太陽風が吹き出している。太陽風と地球の磁場との相互作用によって、磁気圏界面という境界領域が形成され、それより地球側に地球磁気圏と呼ばれる磁場の勢力範囲が形成される (©ERGサイエンスチーム)。

いった影響を及ぼすため、宇宙での活動を行う上で最も脅威となっている。人間活動と密接にかかわる太陽地球系科学のことを「宇宙天気研究」とよぶが、放射線帯の研究は、宇宙天気研究において最重要課題とされている。また、放射線帯の高エネルギー粒子量の変化が予測できれば、宇宙で活動する際のリスクを下げることに繋がっていく。現在、放射線帯そしてジオスペース嵐の変動予測を目指した「宇宙天気予報」が世界各国で進められている。

ちなみに、放射線帯は、米国初の人工衛星「エクスポローラー」によって 1950年代末に発見され、発見者であるVan Allen博士にちなんでVan Allen帯ともよばれている。発見時の博士の「My God. Space is Radioactive! (なんてことだ、信じられない。宇宙は放射能で満ちていたのか)」という言葉は、宇宙科学の幕開けを象徴するものとして今に伝えられている。

## 無衝突プラズマの不思議な世界

「宙」の嵐が起こると、放射線帯は不思議な変化を示す。嵐の始まりとともに、それまであった放射線帯電子、すなわち高エネルギーの電子がすべて消え、その後、嵐が収まるにつれて電子が再び出現し、そし

数周期数分程度の電磁流体波動との相互作用が起こると、(1)と(2)の不変量を保存した状態で起こる加速や減速 (ベータトロン加速) が生じ、その結果として、放射線帯の電子の変化が起こると考えられてきた。このベータトロン加速は、木星や土星といった磁化惑星に存在する放射線帯についても起こる基本過程として理解されている。

一方、今世紀になって、放射線帯の電子の変化の時間スケールは、上記の電磁流体波動との相互作用よりも速い場合があることが指摘され、未知の過程が関与していることが指摘されるようになってきた。プラズマ中には、さまざまな種類の波動が存在し、特に電子に関わる波動として、ホイッスラーとよばれる、周期が数百マイクロ秒の波動が知られている。粒子と波動は相対運動をしており、高速の電子から見てドップラーシフトした波動の周波数が、電子が磁力線のまわりをまわる周波数 (サイクロトロン周波数) の整数倍となったときに、サイクロトロン共鳴とよばれる波動と粒子の相互作用によって、波動と粒子の間でエネルギー交換が起こる。

この共鳴が起こると、上記の (1)~(3) のすべての不変量が破れる状態が起こり、電子のエネルギーは大きく変化する。この過程では、エネルギー交換は双方向であり、波動が減衰して電子が加速することもあれば、逆に電子が減速して波動が成長することもある。また、図2のように、ホイッス

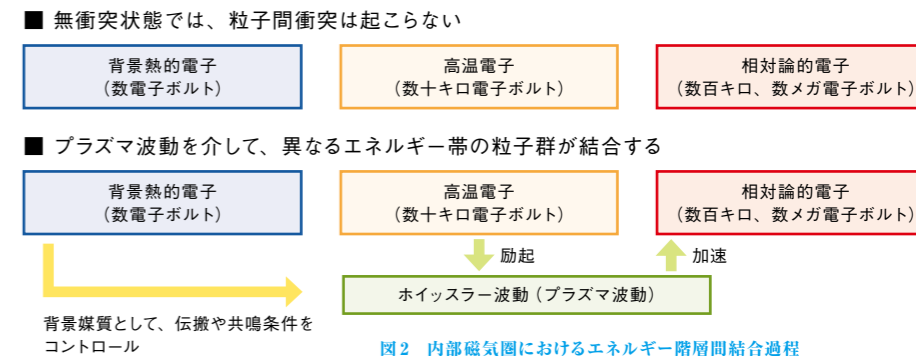


図2 内部磁気圏におけるエネルギー階層間結合過程  
異なるエネルギー階層の粒子群が、プラズマ波動を介して結合している。



図3 磁気圏で観測する「あらせ」衛星の想像図  
ホイッスラー波動（波線）と電子を磁気圏で観測し、その地球側でオーロラが輝いている様子  
を示している。地球上のピンク色の図は、オーロラの光学観測ネットワークを示す（© ERGサイ  
エンスチーム）。

ラー波動を励起するのは、比較的低エネルギーの電子であるが、励起したホイッスラー波動は、よりエネルギーが高い電子を加速する。つまり、粒子と波動の共鳴を介して、低いエネルギー階層から高いエネルギー階層の粒子群へとエネルギーの輸送が行われている。筆者らは、放射線帯変動を理解する基本的な概念として、波動と粒子の相互作用によって、異なるエネルギー階層の粒子群が相互作用する「エネルギー階層間結合」を提案した。

#### 宙の嵐へ突入する「あらせ」の挑戦

このように、放射線帯の変動には未知の加速機構が存在していることが指摘されていたが、放射線帯の中での人工衛星による科学計測は、放射線による衛星の障害や、計測する信号への雑音混入からきわめて困難であり、実現してこなかった。また、鍵となる物理メカニズムが実証されていないため、放射線帯の宇宙天気予報モデルにおいても定量的な予測に大きな困難が生じていた。

この状況を打破するために、2012年に米国 NASAは、Van Allen Probesとよばれる人工衛星を、そして2016年末に JAXA宇宙科学研究所は、「あらせ」とよばれる人工衛星（図3）をそれぞれ打ち上

げ、放射線帯、そしてジオスペースの変動現象の直接観測をスタートさせた。特に「あらせ」は、小型・軽量化と耐放射線向上という相反する困難な課題を独自の技術と工夫で解決し、放射線帯中において、数十電子ボルトから数十メガ電子ボルトにいたる広いエネルギー帯のプラズマ粒子、直流から10メガヘルツまでの広い周波数帯の電場と磁場観測に世界で初めて成功した。

#### 「あらせ」が見たものと聴いたもの

「あらせ」はまず、ホイッスラー波動による電子加速を観測した。図4に、観測された電子の速度空間分布の変化を示す。左側がホイッスラー波動出現前、右側がホイッスラー波動出現後の変化である。(C)の破線で示すように、左側の図には見られていない成分が出現している。この新たに出現した成分は、同時に観測されたホイッスラー波動の周波数特性から予想されるエネルギーに一致しており、ホイッスラー波動が電子を加速して、エネルギーが高い電子の量が増加したことを意味する。このようにホイッスラー波動によって、電子が加速されている実証的な証拠は、世界で初めて「あらせ」で得られたものである。

二つ目の例は、同じくホイッスラー波動が、電子を散乱させてオーロラを起こして

いる事例である。オーロラは、ジオスペースの電子が地球の超高層大気に降り込んで起こる発光現象である。オーロラには、いくつかのタイプがあるが、周期数秒で明滅する脈動オーロラとよばれるタイプのオーロラは、このホイッスラー波動によって、電子の向きが磁力線方向へと変調され、そのまま磁力線に沿って大気へと降り注いで発生すると考えられてきた。しかし、変調を受けるのは、ロスコーンとよばれる磁力線から数度以内ときわめて狭い角度範囲を移動する電子だけであり、従来の検出器では、そのような小さな角度を分解することができないために、実証されていなかった。「あらせ」は、これまでにない高い角度分解能をもつ電子分析器を搭載し、この電子を直接観測することに世界で初めて成功した。

図5に、「あらせ」が高度3万km付近で、観測したホイッスラー波動を示す。波動が間欠的に出現したり消えたりしていることがわかる。図5の中は磁力線方向、図5の下は磁力線方向以外の電子の分布を示す。磁力線方向の電子は、波動にあわせてその強度が変わっていることがわかる。一方、磁力線方向以外の電子は、変化が見えていない。このホイッスラー波動は、可聴帯の電波であり、音声信号に変換すると小鳥の声のように聞こえるため、コーラス

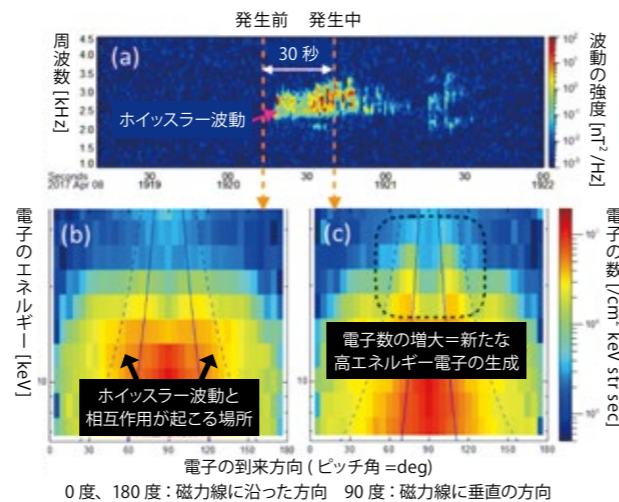


図4 「あらせ」が観測した電子が加速される瞬間の様子  
(a) ホイッスラー波動の周波数スペクトル（周波数ごとの波の強さ）の時間変化。横軸が時間、縦軸が周波数、時間と周波数に対応する波動の強さを色で表す。(b) ホイッスラー波動出現前の電子のエネルギー分布、(c) ホイッスラー波動出現中の電子のエネルギー分布。(b)と(c)はともに、横軸が磁場と粒子の到来方向のなす角度。縦軸が電子のエネルギー、電子の数を色で表す（Kurita, Miyoshi et al., Geophysical Research Letters, 2018を改変）。

波動と名付けられており、「宙のさえずり」とよばれている。このとき、「あらせ」と磁力線がつながったカナダ上空では、明滅するオーロラが観測されており、コーラス波動との共鳴によって、磁力線方向に変調された電子が脈動オーロラを起こしていることが実証された。この過程を、さらに詳しく調べるために、筆者らは、北極域にオーロラ超高速撮像ネットワークを整備してきた（図6）。「あらせ」とこれらのオーロラ高速撮像との比較研究から、数秒ごとに明滅する脈動オーロラ、その中で1秒間に数回瞬くオーロラの変調が、この「さえずり」の変化に1対1で完全に対応していることが明らかになった。

「あらせ」は、宙のさえずりがオーロラの瞬きをつくることを世界で初めて実証した。この成果に、世界の多くの研究者から「感動した」「長年、待っていた結果だった」と、多くの賞賛の声がよせられ、「あらせ」プロジェクトメンバーにとっても、大きな励みとなった。

#### ジオスペース、そして惑星磁気圏の新しい観測へ

「あらせ」は、2016年の打ち上げ以来、順調に観測を継続しており、多くの新しい成果をあげ、プラズマの波と粒子とのエネ

ルギー交換過程の直接計測にも成功するなど、ジオスペースの描像を大きく変えつつある。宇宙地球環境研究所には、「あらせ」衛星のサイエンスセンターが設置され、すべての観測データが集約され、データの標準化や付加価値のついた高次科学データの製造を行った後、世界中の研究者に公開している。

ここで紹介した散乱電子は、高度数十kmの中間圏、成層圏とよばれる領域まで降り込み、オゾン層を破壊することが指摘されており、宇宙地球環境研究所でも展開されている中層大気観測や超高層大気観測と、「あらせ」との共同研究に大きな注目が集まっている。また、2020年代には、世界で初めて磁気圏面を可視化するX線遠望鏡衛星「GEO-X」や、極域のオーロラを編隊飛行で探査する「FACTORS」衛星なども検討されており、筆者もその実現を目指して活動を行っている。さらに、2025年には、日欧による「ベビ・コロombo／みお」探査機が水星磁気圏に、2029年には日欧による「JUICE」探査機が木星系に到着し、水星や木星磁気圏における電子の加速過程の研究が進められる。水星は地球に比べて固有磁場が弱く、また電離圏や大気圏をもたない惑星である。

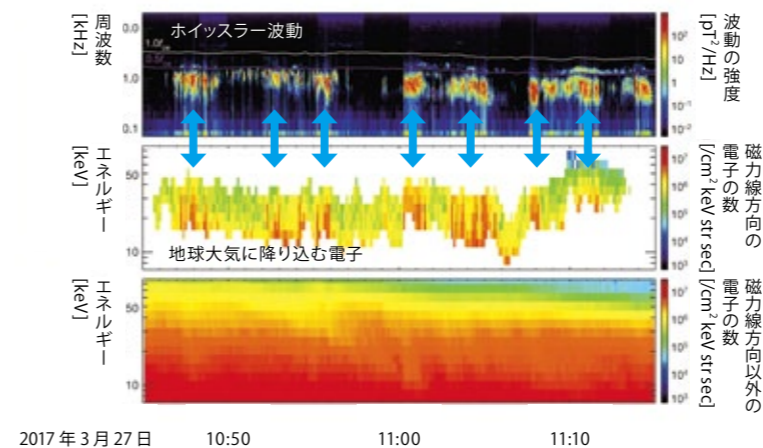


図5 「あらせ」が観測した「宙のさえずり」が電子を散乱させる瞬間の様子  
あらせ衛星が観測したホイッスラー波動（上段）、ロスコーンの中の電子（中段）、ロスコーンの中の電子（下段）。上段は時間・周波数の関係を表し、色が波動の強度を示す。中段と下段は、縦軸が電子のエネルギー、色が電子のフラックスを表す（Kasahara, Miyoshi et al., Nature, 2018を改変）。

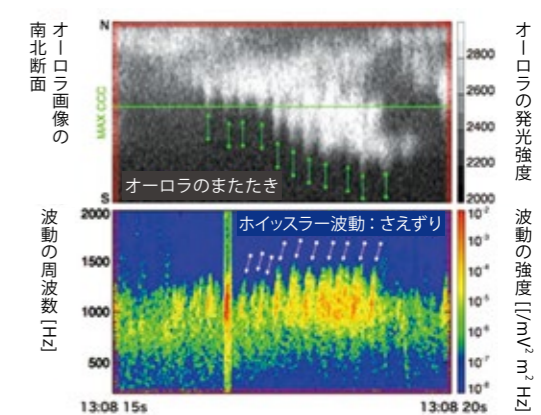


図6 「宙のさえずり」と「オーロラの瞬き」の1対1対応  
北米で観測されたオーロラの瞬き（上段）と、「あらせ」衛星が観測したホイッスラー波動（下段）。上段は、横軸が時間、縦軸がオーロラの全天カメラデータの南北断面、下段は縦軸が波動の周波数、色が波動の強度を示している（Hosokawa, Miyoshi et al., 2020, Scientific Reportsを改変）。

\*1 平均自由行程  
粒子が他の粒子に衝突してから、次の粒子に衝突するまでの距離。平均自由行程が長ければ長いほど、他の粒子との衝突確率が低い、すなわち無衝突状態として扱うことができる。

\*2 断熱不変量  
外部パラメータをもつ系において、外部パラメータが時間的にゆっくりと変化する場合に保存する量。

参照動画  
「あらせ」が観測した「オーロラ」と「コーラス」の動画・音声ファイル  
[https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41598-020-59642-8/MediaObjects/41598\\_2020\\_59642\\_MOESM3\\_ESM.mov](https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41598-020-59642-8/MediaObjects/41598_2020_59642_MOESM3_ESM.mov)

「あらせ」が観測した「宙のさえずり」の音声ファイル  
<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/outreach/sound.shtmlja>  
ERGサイエンスセンター  
(JAXA宇宙科学研究所と宇宙地球環境研究所の共同運営で、宇宙地球環境研究所に設置。「あらせ」の全科学データファイルを製造、アーカイブし、世界に公開している)  
<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/>



# 氷河変動を支配するもの

藤田 耕史 地球環境科学専攻教授

## 氷河変動の地域差

チベット高原を中心とするアジア高山域には多くの氷河が存在している。これらの氷河が現在どう変化しつつあるかを把握し、その原因を理解することは、数十億の人口を有する周辺諸国にとって、水資源管理の観点から重要であると認識されている。氷河は人の生活圏から離れているため、アジアでの現地観測例は極めて限られていたが、2010年頃から人工衛星データを利用した研究が急増し、アジアの氷河は全体としては温暖化の影響に

より縮小傾向にあるものの、その縮小速度には大きな地域差があることがわかってきた(図1a)。なかでも、カラコルムから西崑崙にかけての地域では、氷河が微増していることが複数の研究で指摘され、「カラコルムアノマリ」として認識されている。ではなぜ、カラコルムの氷河は微増しているのか。この疑問に対しては、「この地域では若干ながら寒冷化が進行しており、氷河の融解が抑制されている」と主張する研究もあれば、「降雪をもたらず冬の低気圧の頻度が増えている」との主張も

ある。しかしながら、アジア高山域の標高5000m以上では、気候変動を議論できるような長期観測データは限られており、いずれの主張も決め手に欠いている。

## 氷河の「感度」を計算する

氷河変動の地域的な違いを議論するためには、どれくらいの大きさの氷河が、どこに、どの標高にあるか、といった基本情報を含む、氷河インベントリが必要となるが、世界を網羅するデータベースが整備されたのは2012年のことで、世界中の研究



Koji Fujita

埼玉県生まれ。2000年名古屋大学理学研究科で博士(理学)取得。名古屋大学大気圏科学研究所助手、同環境学研究所准教授を経て、2018年より現職。2014年日本雪氷学会学術賞。専門は氷河学、気候学。

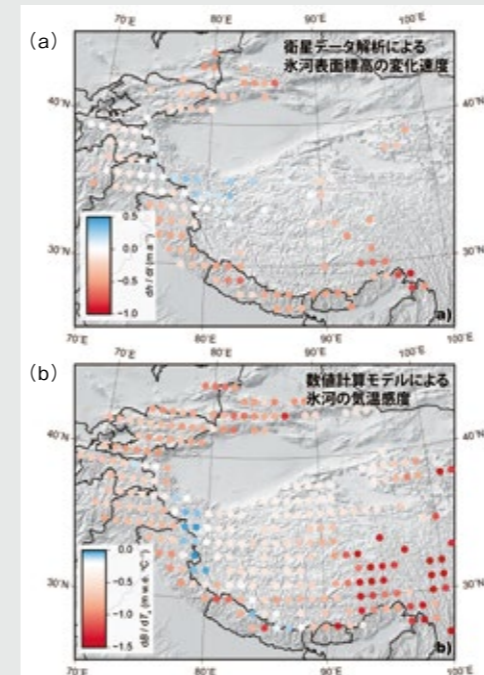


図1 アジア高山域の氷河変動と感度 (a) 人工衛星データの解析から得られた、2000~2016年にかけての氷河表面標高の変化速度。赤色が濃いほど氷河は薄くなっている一方、青色は氷河が増えていることを示している。(b) 数値計算モデルによる、気温変化に対する氷河の質量収支の応答(気温感度)。同じだけ温暖化しても、氷河の応答には地域差があることを示している。いずれも緯度経度1°毎の平均値。

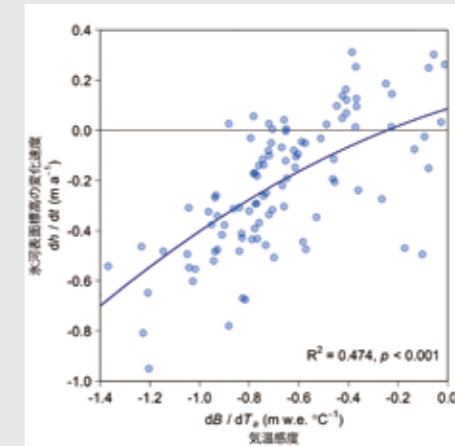


図2 氷河変動と感度の関係 図1の二つのデータを比較した図。横軸は気温変化に対する氷河の質量収支の応答(気温感度)、縦軸は氷河表面標高の変化速度。気温変化への感度が大きい氷河ほど、大きな表面低下が観測されている。

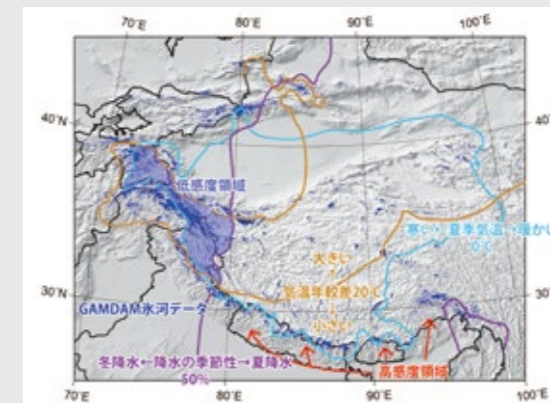


図3 氷河の気温感度に影響する三要因の分布 氷河の気温感度の地域差を決めている要因を重回帰分析によって検討した。夏季平均気温(0℃)、気温の年較差(20℃)、降水の季節性(年降水量に対する夏降水量の割合、50%)で地域分けをした。青色のハッチ領域は、すべての要素が「低い気温感度」を示す領域で、パミール~カラコルム~西崑崙に該当する。一方、すべての要素が「高い気温感度」を示す領域(赤矢印)は、ヒマラヤから横断山脈にかけての領域に該当する。

グループがそれぞれ作成した、さまざまな地域のインベントリを寄せ集めたものだった。この初期のインベントリは、季節積雪や凍った湖を氷河と誤登録するなど、多くの問題を含んでいたため、一貫した基準と手法による、アジア高山域全域を網羅するGAMDAM氷河インベントリ<sup>\*1</sup>を整備した。このGAMDAM氷河インベントリと氷河の質量収支モデル<sup>\*2</sup>を用い、「気温が1℃温暖化したときに氷河がどれだけ消耗するか」という、氷河の気温変化への応答感度(氷河の気温感度)を計算したところ、人工衛星から求めた氷河表面の低下速度とよく似た地域分布を示した(図1b)。この関係は散布図からもはっきりと見て取れ、氷河の気温感度が小さい氷河は縮小も小さいか増加していることもある、ということがわかる(図2)。このことは、仮にアジア高山域が一様に温暖化していたとしても、氷河がよく融ける地域もあれば、あまり融けない地域もあり、その

分布が人工衛星の観測結果の背後にあることを示唆している。季節パターンが氷河の振る舞いを決める では、氷河の気温感度の地域分布を決めている要因は何だろうか。これを探るために、さまざまな気候要素を説明変数として重回帰分析を行った結果、夏季平均気温、気温の年較差、降水の季節性などの要素が氷河の気温感度を支配していることがわかった。それぞれの要素の地域分布をその中央値で分割すると、三要素すべてが低感度を示す領域がカラコルムアノマリ地域と重なっていることがわかる(図3)。モンスーンの影響でヒマラヤからチベットにかけての地域は、夏季の融解期に降水がもたらされる。夏の平均気温と年較差は、この降水が雪で降るか、雨で降るか、さらには気温上昇した際にどれだけの雪が雨に変わりえるか、を決めている。雪が雨で降るようになると、氷河にとっての取

入にあたる降雪が減ることに加え、日射に対する反射率が下がることで日射をより吸収するようになり、支出にあたる融解が急増する。一方で、カラコルムに代表される、冬の降雪が大きな割合を占めている地域では、気温上昇によって融解が増えるものの、日射の吸収を増幅するメカニズムは働かないため、ヒマラヤに比べると融解の増え方が少ない。こういった条件下で降雪量が増えたことにより、カラコルムアノマリが出現したと考えられる。現在は、アジアだけでなく世界の氷河の変動とその地域差をもたらしている支配要因について解析を進めているところである。

\*1 GAMDAM氷河インベントリ GAMDAMはGlacier Area Mapping for Discharge in Asian Mountainsから。このプロジェクトのリーダー坂井亜規子氏(地球環境科学専攻准教授)は、ガンダム(初期)のファンである。

\*2 氷河の質量収支モデル 気象データを入力値として、氷河の質量の増減を計算する数値計算モデル。

# 量子アルゴリズムの仕組み

ルガル・フランソワ 多元数理科学専攻准教授



François Le Gall

1978年、フランス生まれ。2006年、東京大学大学院情報理工学系研究科博士後期課程修了。博士(情報理工学)。2006年、科学技術振興機構研究員。2009年、東京大学大学院情報理工学系研究科特任講師。2012年、同特任准教授。2016年、京都大学大学院情報学研究所特任准教授。2019年から現職。専門は理論計算機科学。近年は特に量子アルゴリズムの基礎理論の研究に従事。

## 量子計算とは

量子計算は量子力学の原理に基づく新しい計算パラダイムである。1980年代に提唱され、1990年代には量子計算の潜在的な能力が明らかになった。特に1994年には、与えられた整数の素因数分解を求める問題に対して、量子計算を用いる「ショアのアルゴリズム」という画期的な計算方法が発明された。その計算方法を使えば、現在のスーパーコンピュータよりもはるかに高速にその計算を行うことができ、現在の通信の暗号化に広く使用されている暗号の解読もできることから、量子コンピュータの実現を大きく促進する発明となった(図1)。

大規模な量子コンピュータの開発は技術的なハードルが高く、ショアのアルゴリズムのような強力な量子アルゴリズムの実装にはまだ数十年かかるとみられる。しかし、近年はIBMやGoogleなどの巨大なIT企業が小規模の量子コンピュータの開発に成功しており、IBMは自社以外の研究者も利用できるように、自社の量子コンピュータの公開もしている。また、小規模でありながら、特殊な計算においてはスーパーコンピュータの計算能力を凌駕するケースも報告されている。たとえば、スーパーコンピュータで1万年かかる計算が、Googleの量子コンピュータを用いて200秒で解けた、という論文が2019年に発表されている。

量子計算はもはやSFではなく、量子コンピュータが実現する時代に突入してきた。本稿ではその最先端の研究分野を少しご紹介したい。

$$30 = 2 \times 3 \times 5$$

$$147573952589676412927 = 193707721 \times 761838257287$$

## 図1 素因数分解

桁数が増えれば増えるほど素因数分解を求めることが難しくなる。1000桁の場合、スーパーコンピュータを用いても数年もかかり、その困難性が現在のインターネットの暗号通信の安全性を保障するが、大規模の量子コンピュータが実現すれば、数千桁の整数の素因数分解を数秒で求めることができ、現在の暗号通信は使えなくなる。

## 量子計算の仕組み

「シュレーディンガーの猫」という有名な実験がある。それは、箱に閉じこめられた猫が生きている状態と死んでいる状態が1:1で重なり合った状態をとる不気味な思考実験だが、量子計算の基本的な仕組みを实によく表している。

従来のコンピュータはすべての情報を「0」と「1」で表現し計算を行い、その情報の最小単位をビットとよぶ。たとえば20個のビットを用いて、1048576 (=2<sup>20</sup>)通りのパターンの中から一つのパターンを表すことができる。一方、量子コンピュータは「0」と「1」を同時にとることができる特有な「量子ビット」を用いて計算を行う。それは、「量子重ね合わせ」という現象で、従来の計算と量子計算の根本的な違いであり、量子計算の優位性の源となる(図2)。

たとえば、20個の量子ビットがあれば、量子コンピュータは1048576通りのパターンを同時に扱うことができ、全パターンに対して同時になんらかの計算を行うことができる。

究極の並列コンピュータと思われるが、実は量子コンピュータの情報処理能力に

は大きな制約もある。それは、同時に全パターンに対してなんらかの計算ができたにもかかわらず、そのまま計算結果を「観測」すると、一つだけのパターンに対する計算結果しか得られない。そういう情報は従来のコンピュータでも速く計算できるので、あまり役に立たない。量子コンピュータの本当の能力を発揮するためには、観測する前に、求めたい情報(たとえば特定の計算結果や全パターンの計算結果の周期など)が観測値に現れるように、操作を行う必要がある。その巧妙な操作を「量子アルゴリズム」とよんでいる(図3)。

## 量子アルゴリズムの研究

残念ながら、量子アルゴリズムを設計することは容易ではない。実は、従来の計算法より高速な量子アルゴリズムはまだ数種類しか開発されていない。また、従来のコンピュータで解けない多くの問題に対しては、量子コンピュータでも解ける見込みはない。

しかし、素因数分解のような「良い構造」をもつ特定の問題においては、量子コンピュータが従来のコンピュータの処

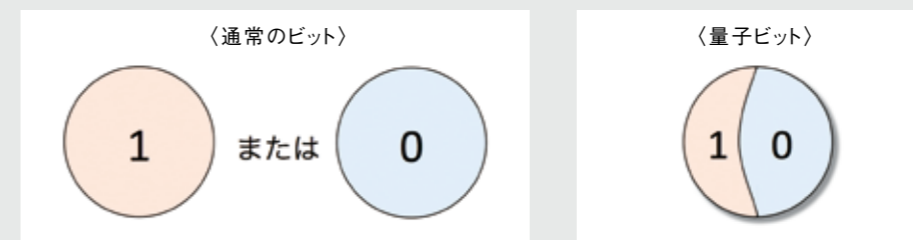


図2 通常のビットと量子ビットの違い

通常のビットは「0」または「1」のどちらかをとるのに対し、量子ビットは「0」と「1」を同時にとることができる。量子ビットは重ね合わせになれる粒子からつくることができる。主流な方式として、光方式(光子の偏光を用いる方法)、電子方式(電子のスピンを用いる方法)や超伝導方式(超伝導回路を用いる方法)などがある。

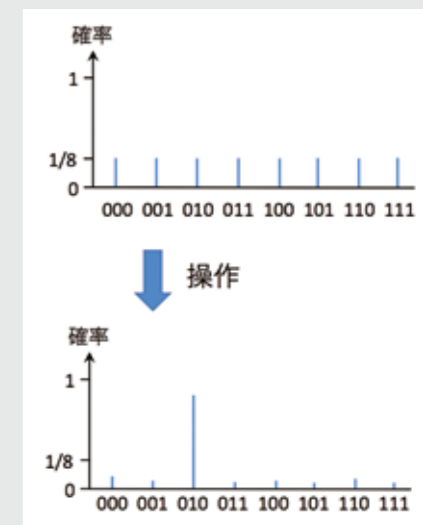


図3 量子アルゴリズムの基本的な仕組み(3個の量子ビットの場合)

(上) 何もせず観測する場合は各パターンが確率1/8で得られる。  
(下) 求めたい計算結果(この例の場合は「010」)が高確率に観測されるように操作した。

理能力を凌駕できると期待されている。私の目指すものは、そういう「良い構造」をうまく利用することにより、新しい量子アルゴリズムを構築し、量子コンピュータの新しい応用先を開拓することである。もちろん、量子コンピュータのキラーアプリケーションの発見も目指している。

量子アルゴリズムを構築するために、数理科学のさまざまな理論的な道具が用いられる。巧妙な発想に基づく「美しい」アルゴリズムも多いので、魅惑的な研究分野である。より詳しく知りたい方には、量子アルゴリズムを包括的に紹介するサイト「Quantum Algorithm Zoo(量子アルゴリズム園)\*」の観覧をすすめる。

\* Quantum Algorithm Zoo  
(量子アルゴリズム園)  
<http://quantumalgorithmzoo.org/>

ルガル・フランソワ ウェブページ <http://francoislegall.com/index-j.html>