

NICT NEWS

国立研究開発法人
情報通信研究機構

No.1

2020

通巻 479

FEATURE

社会基盤を支える宇宙天気予報技術

Interview

宇宙嵐からSociety 5.0の社会インフラを守る！

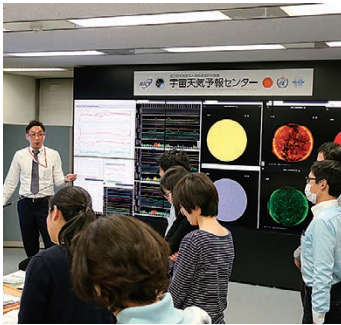
宇宙天気のメカニズムと予報技術の最先端研究



1 2020年 年頭のご挨拶 理事長 徳田 英幸

FEATURE

社会基盤を支える宇宙天気予報技術



Interview

2 宇宙嵐からSociety 5.0の社会インフラを守る!
宇宙天気のメカニズムと予報技術の最先端研究

平和昌／石井 守

4 新たな宇宙利用時代を支える電波伝播利用のために
一番身近な宇宙、「電離圏」の研究
津川 卓也

6 人工衛星を守るための宇宙天気
放射線帯（ヴァンアレン帯）予報
坂口 歌織

8 太陽嵐の影響を到来前に予測する
塩田 大幸

10 宇宙天気予報業務
パブリックサービスとしての情報発信
久保 勇樹

TOPICS

12 AI宇宙天気予報 西塚 直人

13 NICTのチャレンジャー File 8 埜 千尋
宇宙天気予報システムの構築に向けて
～大気圏・電離圏モデルからのアプローチ～

INFORMATION

14 nano tech 2020 開催のお知らせ

14 第24回「震災対策技術展」横浜 開催のお知らせ

表紙写真：

地球から太陽方向に約150万キロ離れた場所（L1点）で常に太陽風を観測しているDSCOVR及びACE探査機が送る観測データを受信しているNICT本部の直径11.3mのパラボラアンテナ。世界4か国の協力により、地球に吹き付ける太陽風を24時間監視している。

左上写真：

宇宙天気予報センターでは、平日の14時30分から宇宙天気予報会議が行われている。この会議で、予報担当者と研究者が議論を行い、毎日の宇宙天気予報が決定され配信される。



国立研究開発法人情報通信研究機構
理事長 徳田 英幸

明けましておめでとうございます。

昨年令和元年台風第15号、台風第19号や各地の災害により、お亡くなりになられた方々に哀悼の意を表し、被災された多くの皆様には、心からお見舞い申し上げますとともに、被災地の一日も早い復興を心からお祈り申し上げます。

昨年は、東京2020オリンピック・パラリンピックを目前に控え、激増するIoT機器に対するサイバー攻撃へのセキュリティ対策の一層の強化として、総務省及びNICTは、インターネットプロバイダと連携し、サイバー攻撃に悪用されるおそれのあるIoT機器の調査及び当該機器の利用者への注意喚起を行う取組「NOTICE」を2月に開始しました。また、IoT・ビッグデータ・AI、自動運転、5Gなど情報通信分野の先端技術について、異分野間の共創による発展が進むとともに、Society5.0を実現する未来社会基本理念として、「人間中心」、「持続可能性」、「多様性」の重要性が一層強く認識された一年となりました。

NICTは、情報通信分野における我が国で唯一の国立研究開発法人として、ICTの高度化による社会課題の解決や新たな価値の創造を使命とし、その実現のために、日々、世界最先端技術の研究開発へのチャレンジと、社会展開・実装のためのコラボレーション／オープンイノベーション推進の取組を一体的に進めております。

研究開発においては、センシング基盤分野・統合ICT基盤分野・データ利活用基盤分野・サイバーセキュリティ分野・フロンティア研究分野の5分野を着実に推進しております。特に、新型マルチコア光ファイバによる大容量通信、Beyond 5G、脳情報処理・通信、耐量子計算機暗号、プライバシー保護技術、バイオICTなどにおいて世界初となる成果も出ているほか、量子暗号通信分野では量子鍵配送関連で初の標準化勧告がITU-TのSG13で承認されました。また、昨年11月にICAO宇宙天気情報サービスを開始し、12月より宇宙天気予報業務を24時間体制で運用しています。コラボレーション／オープンイノベーション推進の取組としては、ナショナルサイバートレーニングセンターにおいて、東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会開催時を想定した模擬環境下で行う実践的なサイバー演習（サイバーコロッセオ）の内容を充実するなどセキュリティ人材育成を加速しています。データ利活用分野でのコラボレーションでは、言葉の壁をなくすグローバルコミュニケーション計画に沿って多言語音声翻訳技術が交通、観光、防災、医療、ショッピングといった分野での社会実装が加速されました。さらに、2017年9月から総務省と共同で「翻訳バンク」を運営し、様々な分野の質の高い翻訳データの集積・活用を進め、みんなで育てながら利用する翻訳エコシステムの確立を目指しています。

昨年は、自動車業界との連携により自動車法規の翻訳における実用度向上が得られるなど自動翻訳システムの高精度化を推進しました。また、国内外において、研究機関・企業・大学・地方自治体等と共同研究・実証プロジェクトを進めるとともに、NICTが発した様々な先端技術を企業等に活用いただく活動やNICT Seeds集の広報、ITU・IEEE・IETF等での国際標準化活動も推進しています。

運営方針として掲げている、コラボレーション、オープンマインド・オープンイノベーション、チャレンジャー精神の3点について、これらを有機的に連動させ実体化させる取組として、外部の有識者と少人数形式で密なディスカッションを行うNICTオープンサミットを開催し、昨年は「量子計算×AI（機械学習）」をテーマに議論しました。また、アイデアソン／ハッカソンの取組を引き続き推進し、仙台と北陸で開催しております。今後も、皆様のアイデアを集結しICTによる地域社会の課題解決に向けての一層の貢献を目指します。海外機関との連携に関しても、欧米、ASEAN諸国との連携を強化していきます。また、今後重点的に取り組むべき研究開発課題等について、皆様からの意見募集を継続し機構の運営に活かすとともに、NICTで創出された研究成果データについては、可能な限りのオープン化を進め、データ利活用環境を整備してまいります。

NICTの第4期中長期計画の最終年である本年は、計画達成に向けて、あらゆるリソースを集中して研究開発の推進及び研究開発成果の最大化にしっかり取り組んでまいります。それと同時に、次期中長期計画の策定に向けて準備を行い、NICTの更なる業務効率化を図るとともに、研究成果を社会の要請に的確に対応させ、国立研究開発法人としての社会的責務を効果的に果たしてまいります。

NICTでは、幅広く国民の皆様からのご意見も頂き、関係者の皆様と協力・切磋琢磨させていただきながら産学官連携活動を推進し、引き続きICT分野の更なる発展のために邁進してまいります。今後とも変わらぬご支援、ご協力を頂きますようお願い申し上げます。

最後になりましたが、本年が皆様にとって素晴らしい年になりますよう祈念いたしまして、年頭のご挨拶とさせていただきます。



宇宙空間は非常に過酷なところだ。太陽表面の爆発によって高エネルギーの粒子や電磁波が飛んでくる。これらのバリアとなっているのが、地球周辺の磁気圏と大気である。しかし、太陽活動が活発な時は、これらの粒子がバリアを破って地表まで降ってくる。これが、電子機器・電力網・GPS測位などの社会インフラに大きな影響を与えることがある。

このような現象を引き起こす、宇宙空間の「嵐」を前もって予測しようというのがNICTの宇宙天気予報だ。いったいどのようにして予報が行われているのか。研究開発と予報技術の最先端を、電磁波研究所 平和昌研究所長と宇宙環境研究室 石井守室長に話を聞いた。

■社会を守り科学の新しい価値を導く

——電磁波研究所はICTによって実社会を「観る」研究をしていると聞いていますが、その中で「宇宙天気予報」とはどのようなミッションなのでしょう。

平 NICTは、ICTを活用して人類の新たな価値を創造することを目標にしています。そのためには、様々な現象をセンシングしてデータ化し、それをサイバー空間に取り込むことが必要です。電磁波研究所では、電波を使って実社会の環境を計測するための技術を開発しています。目標は2つあります。1つは社会を守るための技術開発、もう1つは科学の新たな価値を導く研究です。

太陽活動によって、宇宙空間の環境が

激しく変化し、それが電波の伝搬、GPS測位、航空機の運航や人工衛星の運用、電力網などに不具合を起こし、その影響が我々の社会に広く及んでいきます。宇宙天気を把握することは、社会を守るという目標に直結するといえます。

もう1つの「科学の新たな価値を導く」という目標に対しては、宇宙天気にはいまだ解明されていない現象が数多くあります。例えば、突然、高度100 km付近の電子密度が高くなって異常な電波伝搬を引き起こす「スプラディックE層」の現象は、まだ正確なメカニズムが分かっていないので、その発生を予想するのが難しいのです。そのような現象の解明にもチャレンジし、科学の新しい価値の創造に結び付けていこうとしています。

石井 地球環境に最も大きな影響を与えるもののひとつが、太陽表面の爆発現象である太陽フレアです。しかし、これもどのようにして起こるかはまだよく分かっていません。

また、太陽風磁場や地球周辺磁場の変動については、メカニズムはほぼ分かっているのですが、予報を行うにはまだ難しいものがあります。

■宇宙天気予報とは

——宇宙天気予報とはどのようなものなのでしょうか。

石井 宇宙天気とは地球を取り巻く宇宙空間の状態のことです。太陽表面で爆発が起こると、有害な粒子や電磁波が飛ん

できます。地球は、これらに対して2つのバリアを持っています。

ひとつは地球の大気です。大気はX線や紫外線をブロックしてくれます。もう1つは地球の磁場です。これは、太陽からやってくる電気を帯びたコロナガスをはじき飛ばしてくれます。ただ、太陽嵐と呼ばれる、強い勢いを持つ太陽活動が発生するとその状態によっては磁場のバリアをすり抜けその影響が地球の近くまで達することがあります。これが、社会インフラに悪影響を与えるのです。

大規模な太陽嵐はまれな現象ですが、ひとたび起こると経済的損失が大きく、最近では各国とも宇宙天気に関する備えを進めています。

これから民間の宇宙旅行もできるようになります。また、GPSの精密測位を利用したドローンによる宅配ビジネスも普及していきます。宇宙天気予報はそのような時代に不可欠なものになっていくと思います。

NICTでは、平日の毎日14時30分から宇宙天気予報会議を開き、太陽、磁気圏、電離圏等の観測データを検討して宇宙天気予報を発表しています。

——宇宙天気予報に関連する研究開発にはどのようなものがありますか。

石井 宇宙天気予報の精度向上が最大の目的です。研究範囲が広いので、太陽物理、地球磁場、電離圏、大気構造などの専門家が手分けして研究を行っています。

平 また、地球上の観測地点は陸地に限られているので、海の上空の電離圏の状態を把握することはできません。ですから、宇宙天気のシミュレーションにも力を入れており、電離圏全体のシミュレーターも開発しています。

■外部との連携

——外部との連携にはどのようなものがありますか。

石井 国内では名古屋大学の宇宙地球環境研究所（ISEE^{*1}）と共に研究を行っています。海外連携では宇宙天気予報を実施している国とアライアンスを組み、国際宇宙環境サービス（ISES^{*2}）という組織を作っています。ここには18か国が加盟しています。また、国際気象機構（WMO^{*3}）やアメリカ海洋大気庁（NOAA^{*4}）とも連携して研究を進めています。アジア・オセアニア地域でも宇宙天気予報が盛んになってきており、アジア・オセアニア宇宙天気連合（AOSW^{*5}）という組織も立ち上げています。

■新しいサービスの精度を守る

——最新の取組については。

平 NICTは、終戦直後から約70年にわたって電離圏の観測データを蓄積しています。毎日15分ごとに観測したこれらのデータは非常に貴重なもので、人類全体の財産と言っても過言ではないと思います。このようなデータを様々な分野で活用できる取組を行っていきたいと考えています。

石井 これからは、より高精度なGPS測位が、自動運転・ドローンなど各方面で使われていきます。また、航空機においては北極圏ルートの飛行が増えています。極地域は宇宙天気の影響を受けやすい場所です。国際民間航空機関（ICAO^{*6}）は2019年11月から航空会社に対して宇宙天気の警報を出し始めました。NICTはアジアからは唯一のICAO

ローバルセンターの一員として、情報提供を行っています。NICTの研究が役立つ一例と言えます。

このように、これから本格的に普及していく新しいサービスにおいて必要な精度を守っていく技術開発が必要になります。

■今後の展望

——今後の予定についてお聞かせください。

石井 これまで30年間、宇宙天気予報を行ってきましたが、今後はよりニーズに沿った形で、各利用者に合わせた情報提供ができるようにしていきたいと考えています。

例えば、測位を使うユーザーには、測位に特化したもの。さらにもう一步踏み込んで、システム回りのコンサルティングが必要になってくると思います。これにより、新たなビジネス創出にもつながっていくと思います。

平 私たちは国立の研究機関として、民間の活動を支える立場でもあります。NICTには観測データと技術の蓄積がありますから、それらを生かしていきたい。私たちは、これまで各時代のニーズに応えてきたという自負があります。今後も「社会を守る」という目標に向かって、社会インフラを支えるニーズに応えていきたいと思っています。

*1 ISEE: Institute for Space–Earth Environmental Research

*2 ISES: International Space Environmental Service

*3 WMO: World Meteorological Organization

*4 NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

*5 AOSWA: Asia Oceania Space Weather Alliance

*6 ICAO: International Civil Aviation Organization

新たな宇宙利用時代を支える電波伝播利用のために

一番身近な宇宙、「電離圏」の研究



津川 卓也

(つがわたくや)

電磁波研究所
宇宙環境研究室
研究マネージャー

大学院修了後、日本学術振興会特別研究員（名古屋大学、マサチューセッツ工科大学）等を経て、2007年NICT入所。宇宙天気、特に電波伝播に障害を与える電離圏擾乱現象の監視・予測・補正に関する研究に従事。博士（理学）。

日 常生活に欠かせないGPS（Global Positioning System：全地球測位システム）や通信・放送衛星、古くから見通し範囲を超える通信手段として利用されている短波通信など、電波伝播を利用したシステムは、一番身近な宇宙である「電離圏」の乱れにより、障害が発生することがあります。高度な衛星測位技術や民間航空における宇宙天気情報利用が進みつつある新たな宇宙利用時代に向けて、電離圏の現況把握・予測技術の高度化と電波伝播ユーザーのニーズに応える情報提供を進めています。

■背景

航空機の飛行高度やオゾン層よりも更に上層にある超高層大気は、太陽紫外線やX線の吸収などにより、その一部がイオンと電子に分かれた（電離した）状態（プラズマ）になっています。電離圏と呼ばれるこの領域は、宇宙ステーショ

ンの軌道高度である300～400 km付近でプラズマの密度が最も高く、地球から見て一番身近にある宇宙と言える空間です。ここではプラズマの濃さや構造に応じて、中波・短波帯の電波が反射されたり、人工衛星から地上に送られる電波が遅れたりします（図1）。

電離圏は宇宙天気としての上流にあたる太陽や磁気圏など、より高い領域の活動や、下層大気の活動の影響を受けて常に変動しており、しばしば、短波を利用した通信・放送、GPSなどの衛星測位など、電波伝播を利用したシステムに障害を与えることがあります。例えば、大規模な太陽フレアが発生すると、強いX線放射により、電離圏下部（高度60～90 km）が極端に電離して短波帯の電波が吸収され、短波通信ができない状態（ブラックアウト、またはデリンジャー現象）が発生します。また、太陽フレア発生後の2～3日後に太陽風の乱れが地球近傍に到達すると、電離圏のプラズマ密度が通常よりも極端に増大あるいは減少する現象である「電離圏嵐」が発生し、電離圏遅延モデルの補正により測位精度を維持する衛星測位手法の誤差増大などにつながります。このような電波伝播を利用した社会インフラは利用者が多いため、宇宙天気の最も重要な領域のひとつとして電離圏の監視や予報が行われてきました。

■新たな宇宙利用時代の電波伝播利用のために

日本版GPS衛星「みちびき」など全地球航法衛星システム（Global Navigation Satellite System：GNSS）を利用した測位の高精度化や、本格運用が開始された

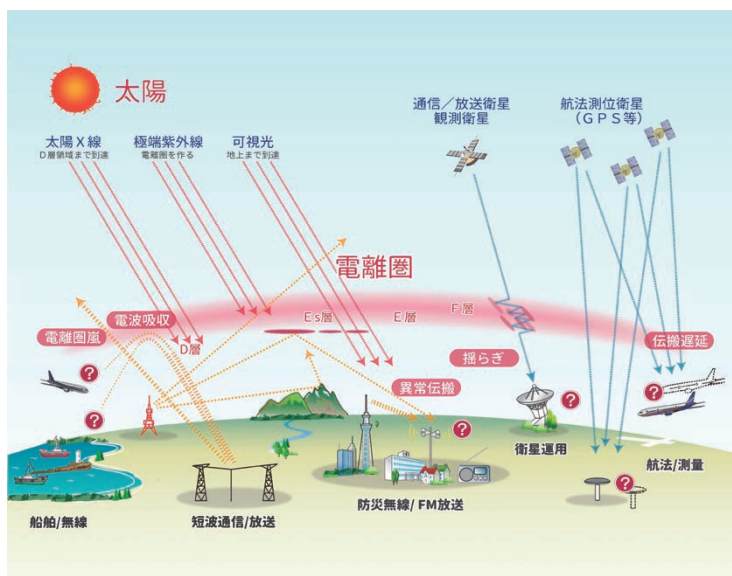


図1 電波伝播における電離圏効果

民間航空運用における宇宙天気情報の利用など、新しい宇宙利用時代が進みつつある社会においては、より高精度かつ低遅延での電離圏観測技術、より信頼度の高い予測技術、そして通信・測位障害の指数予報などユーザーニーズに沿うデータ提供が求められています。ここでは、電離圏の監視、電離圏の予測、データ提供について最近の研究開発について紹介します。

【電離圏の監視】

NICTでは、約70年にわたりイオノゾンデ（短波帯の電波を、周波数を変えながら上空に発射し、電離圏電子密度に応じて反射されるエコーを観測する装置）を利用して、電離圏の濃さや高さ構造を監視しています。国内4拠点（サロベツ、国分寺、山川、大宜味）のイオノゾンデ観測システムは、2017年度から8chの受信アンテナアレイを持つVIPIR2型に更新されました（図2左）。これにより、観測データ（イオノグラム）に現れる電離圏エコーのO-Xモード分離が可能となり（図2右）、電離圏F領域の臨界周波数の自動抽出率が80%から99.8%、手動読取值との誤差が0.26 MHzから

0.12 MHzになるなど、より精度の良い観測データが得られるようになりました。また、今後観測所要時間を圧縮し、観測サイクルを現状の15分から5分とすることで、よりリアルタイム性のある電離圏情報を提供したいと考えています。

【電離圏の予測】

電離圏変動の予測は、太陽風の乱れを源とする地磁気擾乱^{じょうらん}の予測と電離圏の現況に基づき、統計的結果を踏まえて立てられているのが現状です。しかしながら、電離圏は下層大気からの影響も受けるため、太陽や磁気圏など「上流」の影響が小さくても変動が大きい場合があります。より信頼度の高い予測をするためには、大気圏・電離圏結合モデルによる数値シミュレーションと観測を統合することが重要です。電離圏プラズマと熱圏中性大気との相互作用を考慮し、地上から超高層大気領域までをカバーする初めての全大気圏-電離圏結合モデル（GAIA）と、それをベースとしたデータ同化モデル（図3）の開発を進めています。

【データ提供】

精度の良い観測や信頼できる予測であっても、ユーザーが容易には理解でき

ない、または使いづらいデータでは、社会的な電離圏データの高度利用が進みません。そのため、多様な電波伝播利用ユーザーのニーズに沿うデータやツールの提供が必要となります。このようなニーズのひとつに、電離圏嵐の指標があります。太陽フレアや磁気嵐と異なり、電離圏嵐については、これまで明確な基準がなく、どの程度の乱れであるかの判断が難しい状態でした。そこで、イオノゾンデ及びGPS全電子数観測の長期データを利用して新しい電離圏嵐基準「I-scale」を策定し、宇宙天気予報における電離圏嵐の指標として利用することにしました。

■今後の展望

今後の電波伝播ユーザーの多様なニーズに対応するため、基礎体力と言える観測の高精度化・低遅延化、予測結果の信頼性向上を着実に進める一方、個々のニーズに応えることができるデータやアプリケーションの提供をしていきたいと思えます。例えば、様々な電離圏の状況下における電波伝播の可視化は高いニーズがあります。このようなニーズに応えるため、様々なモデルや観測結果を電離圏環境の入力とすることが可能な電波伝播シミュレータ（HF-START）の開発を進めています（図4）。今後は、ウェブアプリケーションとして、ユーザーが任意の地点から任意の周波数（現在は短波のみ対応）で送信した電波伝播の様子が可視化できるようにしていく予定です。

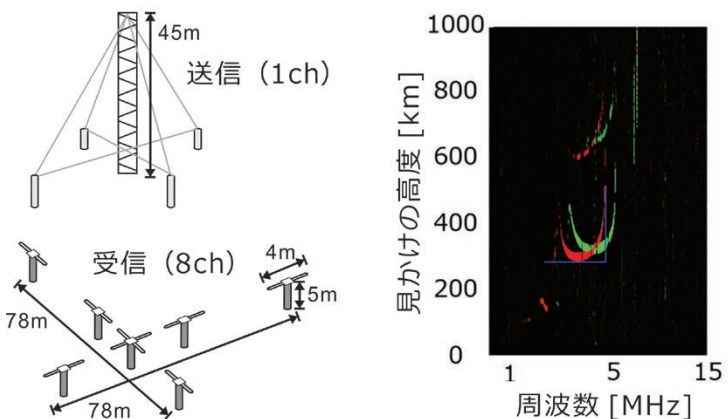


図2 VIPIR 2型イオノゾンデシステム（左）と得られる観測データ（イオノグラム：右）

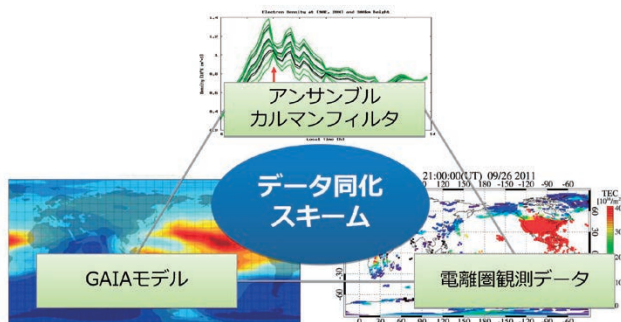


図3 GAIAモデルをベースとしたデータ同化モデルの開発

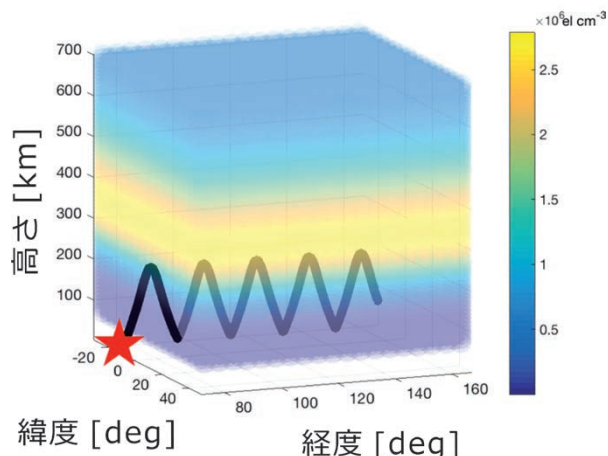


図4 短波電波伝播シミュレータ（HF-START）の開発

人工衛星を守るための宇宙天気

放射線帯(ヴァンアレン帯)予報



坂口 歌織

(さかくち かおり)

電磁波研究所
宇宙環境研究室
主任研究員

大学院博士後期課程修了後、日本学術振興会特別研究員を経て2010年NICT入所。オーロラ予報・放射線帯予報などジオスペース領域の宇宙天気に関する研究に従事。博士(理学)。

宇 宙環境の変化は人工衛星に不具合を発生させることがあります。地球周囲には放射線帯(ヴァンアレン帯)と呼ばれる高エネルギー電子が地球磁場に捕捉されている領域もあり、通過する人工衛星に不具合をもたらす原因となっています。人工衛星と宇宙環境の関係について、また、宇宙天気の重要課題のひとつである放射線帯予報に向けた取組について紹介します。

■人工衛星と宇宙環境

通信・放送や測位など、手元のスマートフォンから得られる位置情報のように生活に欠かせない様々な情報やサービスが、人工衛星等の宇宙インフラにより支えられる時代になりました。国連の統計によると2019年現在、地球近傍宇宙で運用中の人工衛星の数は5,200機以上に達しています。かつては科学的な観測や探査がメインでしたが、今では商用サービスに利用される衛星数の方が多くなっています。最近では、SpaceX社やAmazon等、数千機以上の小型衛星コン

ステーションを利用したビジネス展開に関するニュースも頻繁に耳にするようになり、これらが実現すれば、今後、我々の生活はさらに宇宙インフラに依存していくことが考えられます。しかしながら、人工衛星も人工物であり、システムの不具合、通信障害、太陽電池パネルの劣化など様々な不具合が発生することが少なからずあります。人工衛星に異常が発生する原因は、製造過程や設計上の欠陥や運用ミス等、人的要因によることもありますが、宇宙嵐の発生など宇宙環境の変化に耐えられなかった場合に発生することが多くあります。特に、太陽フレアや地磁気嵐などの発生に伴う地球近傍宇宙の放射線・プラズマの増大は、衛星帯電や材料劣化の深刻な原因となります。こういった衛星障害のリスクを軽減するために、事前に環境変動を予報することが宇宙天気研究の重要課題となっています。

■地球近傍の宇宙放射線

図1は、地球近傍に存在する放射線源の分布をイラストで示しています。地上



図1 地球近傍に存在する様々な放射線源とその影響

の放射線は人体に影響を及ぼすことはよく知られていますが、宇宙では人工衛星の不具合の原因となります*。宇宙の放射線源は主に、(1) 遠方から飛来してくる銀河宇宙線、(2) 太陽から放射される太陽放射線、そして(3) 地球の放射線帯(別名、ヴァンアレン帯)の3タイプに分けられます。これらを総称して宇宙放射線と呼びます。銀河宇宙線については11年周期で量が数十%程度増減し、極端な変化はほぼありません。しかし残りの2つ、太陽放射線については太陽フレアの発生により、放射線帯の高エネルギー電子については地磁気嵐の発生により、数日のうちに桁単位で増大することがしばしば観測されます。過去には、宇宙放射線の増大に伴って実際に重度の衛星障害が発生したことも報告されています。軌道中の多くの人工衛星は宇宙放射線から逃れることはできません。しかしながら宇宙放射線の増加を事前を知ることができれば、運用により致命的な故障を避けるための対策を実施することが可能となります。

■放射線帯予報

放射線帯は地球の磁力線に沿って地球を取り囲むように存在しているため、人工衛星の多くは周回中に放射線帯を通過せざるを得ません。特に、測位・通信のサービスのために利用価値の高い静止軌道(GEO)や中軌道(MEO)衛星は、

放射線帯と軌道が重なっているため、長時間、放射線帯電子による帯電・被曝にさらされます。過去20年間に放射線帯電子が人工衛星にとって危険なレベルにまで増大した日数の推移を図2に示します。放射線帯は11年周期の太陽活動の下降期に増大することが知られており、グラフからも2003~2008年、2015年から現在にかけて「高い」レベルを超えた日が多くなっていることが分かります。特にここ数年は、前サイクルよりも「非常に高い」レベルを超える日が多く発生し、放射線帯増大中に準天頂衛星「みちびき」に不具合が発生したことも報告されています。

私たちは宇宙環境変動により人工衛星に不具合が発生するリスクを軽減する目的で、放射線帯の電子量を予測するためのモデル開発を行っています。放射線帯電子の変動については、詳細な物理過程が未解明な点も多く、数値シミュレーションにより定量的に予測することはまだ困難な現状です。そのため現在は、過去のデータを学習させ直近の観測値を入力して未来を予測する経験モデルを開発し、計算結果を公開しています[Sakaguchi et al., 2013]。図3は、放射線帯予報ウェブサイト(<http://seg-web.nict.go.jp/radi/>)のスクリーンショットです。このウェブサイトでは、静止軌道衛星が地球を一周したときにさらされる電子の積算量の予測値を数日先まで危険度と共に公開しています。2015年

に打ち上げられた気象衛星ひまわり8号に搭載された宇宙環境データ取得装置(SEDA)による、日本上空経度の静止軌道のリアルタイム監視データもウェブサイトから公開されています。2017年にはJAXA等により内部磁気圏探査衛星「あらせ」が打ち上げられ、中軌道のリアルタイム監視も可能となりました。私たちは、これらの最新のデータを入力して、ひまわり衛星軌道の1時間ごとの予測値の提供や中軌道の予測の試みも始めています。

■今後の展望

ここでは放射線帯予報に関する取組について紹介しましたが、人工衛星で発生する不具合は先述したような太陽宇宙線や銀河宇宙線、また宇宙プラズマや地球大気密度の変動など様々な宇宙環境変動が原因で発生します。また、同じ環境中を軌道していても、衛星の形状や材質、運用年数など衛星固有の性質によって影響が異なります。私たちは、様々な宇宙環境変動を予測するための研究開発を学習型モデル・物理モデルの両面から進めるとともに、個々の人工衛星に対して宇宙環境変動に対するリスク評価するためのプロジェクトにも着手し始めています。

* 宇宙放射線は、地球の磁場や大気によって侵入を妨げられるため地上で生活している限りは大きな影響を受けることはありませんが、極域航路を通過する航空機や国際宇宙ステーション高度で作業を行う宇宙飛行士は警戒が必要です。これらの影響評価も宇宙天気重要課題として取り組まれています。

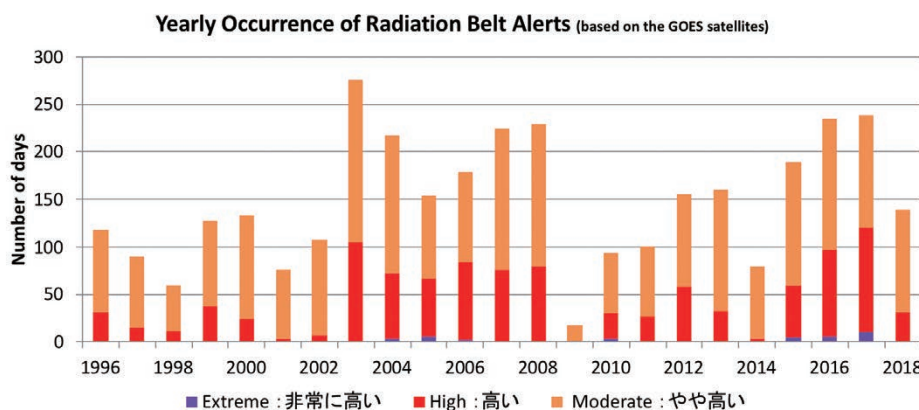


図2 放射線帯に関するアラート発生頻度の年変化



図3 放射線帯予報ウェブサイト

太陽嵐の影響を到来前に予測する



塩田 大幸

(しおた だいこう)

電磁波研究所
宇宙環境研究室
研究員

大学院博士課程修了後、国立天文台、海洋研究開発機構、理化学研究所、名古屋大学などを経て2017年NICT入所。現職。名古屋大学宇宙地球環境研究所客員准教授兼任。太陽嵐の研究と太陽嵐の予測のための数値シミュレーション開発に従事。博士（理学）。

無 線通信をはじめとした宇宙を利用する様々な技術は宇宙天気の影響を受け、時には利用できなくなるなどの深刻な事態に陥ることもあります。宇宙天気の中で最も影響度の大きい太陽嵐について、発生後から地球に到来前にその影響度を予測することが重要です。私たちはリアルタイムの太陽観測データの解析結果に基づいて、太陽から放出されたコロナガスと磁場が惑星間空間を伝搬する過程の数値シミュレーションを行い、地球への到来を予測するシステムの開発を進めています。

■宇宙天気と太陽嵐

宇宙天気とは、電離圏から上空の地球周辺の宇宙空間の環境変動です。宇宙天気のじょう乱が非常に大きくなる時には、宇宙空間にいる宇宙飛行士の被ばくや人工衛星に影響が及ぶのみならず、地上の無線通信やGPSなどの測位が乱れ、さらに、まれに航空機高度での被ばくや地上の送電網に影響が及ぶことがあります。このように宇宙を利用する様々な技

術は、宇宙天気の影響を受けます。近年宇宙開発が飛躍的に進歩し社会インフラに宇宙利用技術が浸透しています。このような背景から社会の宇宙天気に対する脆弱性は増大する傾向にあります。

宇宙天気のじょう乱を引き起こす要因のひとつに、太陽コロナから惑星間空間に向かって流出するガスの流れである「太陽嵐」があります。太陽の磁場の構造に応じて、秒速800 kmまでの速い風が吹く領域と秒速300~400 kmの遅い太陽嵐が吹き出す領域が混在しており、太陽の自転によって、地球に到来する太陽嵐が刻々と変動することで宇宙天気のじょう乱が引き起こされます。

さらに、大きなじょう乱につながる現象が、太陽で発生する爆発現象「太陽嵐」です。太陽嵐は、コロナガスが加熱されて増光する「太陽フレア」（図1左・中）とコロナガスの塊が太陽から外に向かって高速で惑星間空間に放出される「CME（コロナガス放出）」（図1右）を引き起こします。記憶に新しい事例では、2017年9月6日に巨大な太陽嵐が発生し、8日に通信の乱れやGPSの測位誤

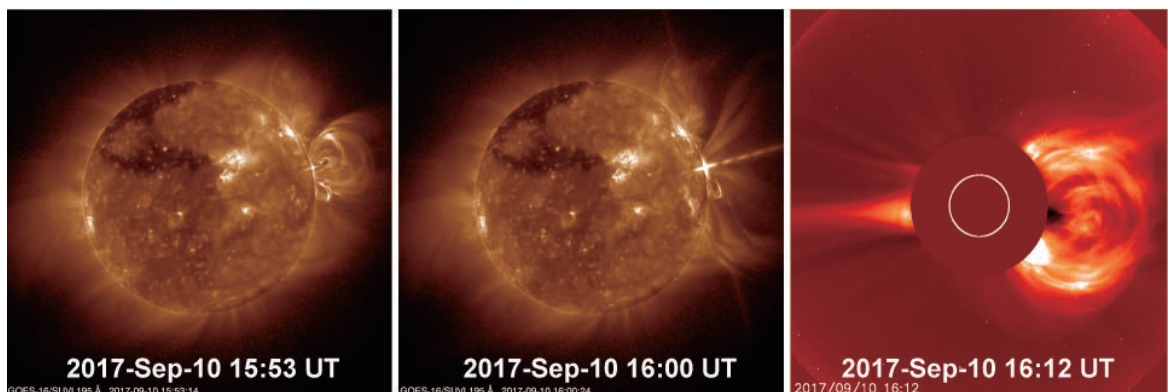


図1 2017年9月10日の太陽嵐。米国観測衛星SDO極端紫外線で観測された太陽コロナ(左：発生直前、中：直後)。右：米国観測衛星SOHOコロナグラフで観測されたCME。中央の白丸が太陽の位置。

差の増大が日本でも観測され、社会的に注目を集めました。同年9月10日にも大規模な太陽嵐(図1)が発生し、極域の航空機高度で人体に影響が及ばない程度の僅かな被ばく線量上昇が発生したと推定されています。

■太陽風・太陽嵐伝搬数値シミュレーション

CMEは、太陽コロナで発生してから約1億5千万 kmの距離を伝搬して地球に到来するまで1~5日の時間がかかります。つまり太陽フレアを電磁波(地球に到来するまで約500秒)で観測した直後にその情報を用いてCME到来の有無や到来時刻、その影響度の予測をすることができれば、事前に対策を取ることが可能になります。

CMEの影響度を左右する最も重要な要因のひとつが、地球を通過するコロナガスに含まれている磁場です。地球に到来する磁場が北向きの成分を持つ場合は、地球の磁場である「地磁気」がバリアの役割を果たし、太陽風が地球の周囲へ侵入することを妨げています。しかし、地球に到来する磁場が南向きの成分を持つ場合は、このバリア機能が弱まるため、太陽風が持っているエネルギーが磁気圏に流入して大きなじょう乱を引き起こし

ます。このようにコロナガスが持つエネルギーの大きさとともに、磁場の予測が重要になってきます。

そこで私たちは、太陽表面の磁場やコロナグラフ等の観測データに基づいて、現実的な分布の太陽風が流れる3次元の惑星間空間を再現し、その中に磁場を内包したCMEが伝搬する過程を計算するシミュレーション(SUSANOO-CME)を開発しました。このシミュレーションでは、太陽フレアが発生したコロナの領域から動径方向にガス・磁場が放出されたと仮定してその伝搬過程を計算します。2003年10月下旬~11月上旬の22の太陽嵐を入力して、2003年10月28~30日の今世紀最大規模太陽嵐のときに、地球に到来するプラズマの速度と南向き磁場を再現することに成功しました(図2)。

■太陽嵐の影響のリアルタイム予測に向けて

宇宙環境研究室では毎日、太陽・磁気圏・電離圏の監視と予測を行い、「宇宙天気予報」を社会に向けて発信しています。太陽嵐の影響度の予測については、過去の統計データに基づいたものであり、天気予報で行われているような数値シミュレーションに基づく形式での予測例はこれまでありません。

私たちは、この数値シミュレーションに基づく太陽嵐の影響度の予測の実現に向けて、リアルタイムの太陽観測データからシミュレーションを実行して予測を行うシステムの開発を進めています(図3)。このシステムでは米国の観測衛星GOES、SDO、SOHO、STEREOによって観測されたデータを自動で収集・解析し、CMEの伝搬速度測定など自動解析が難しい作業を予報担当者がブラウザ上で行います。また観測データから推定することができないパラメータがあるため、その数値が異なる複数ケースのシミュレーションを実行し、全てのケースの結果を総合的に評価して、その日から1週間先までに到来するガスと磁場の変動を予測します。

現在は、プロトタイプの実験運用を行っています。複数実行したシミュレーション結果のうちどれかが実際に地球に到来するガス・磁場をうまく再現することを目指していますが、現状ではまだ難しい状態です。今後の改良によって、実際の地球に到来するガス・磁場の変動を再現するためのパラメータの組合せの条件を見つけ、さらに複数ケースの結果のうちどれが起こりやすいかという確率の情報として予報を導出する手法を開発していく予定です。

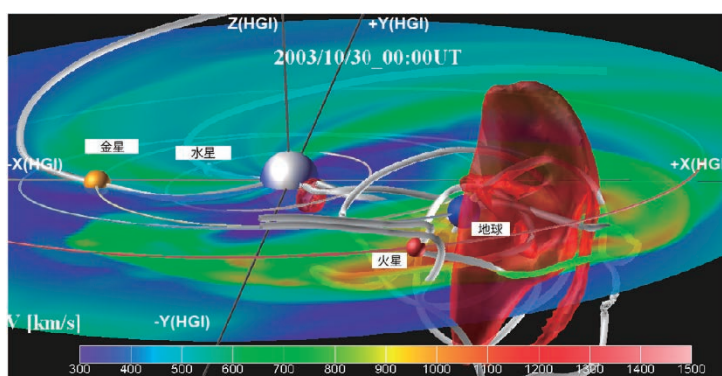


図2 CMEが地球を通過している時のコロナガスの流れと磁力線。背景のカラーはその場のコロナガスの速度。CME前面の高速なコロナガス(秒速1,200 km、赤い等値面)とその内部の磁力線。

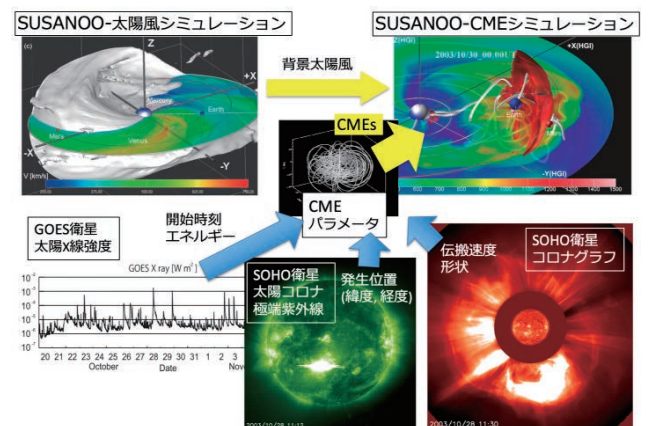


図3 SUSANOOを用いた太陽嵐影響予測システムの概要

宇宙天気予報業務

パブリックサービスとしての情報発信



久保 勇樹

(くぼ ゆうき)

電磁波研究所
宇宙環境研究室
研究マネージャー

大学院修士課程修了後、1998年、郵政省通信総合研究所（現NICT）入所。太陽電波観測や宇宙放射線等の宇宙天気予報研究に従事するとともに、宇宙天気予報業務の取りまとめを行う。博士（学術）。

*「宇宙天気予報」は、郵政省通信総合研究所により1988年6月9日に日本国特許庁に商標登録出願され、1991年11月29日に商標登録されています。

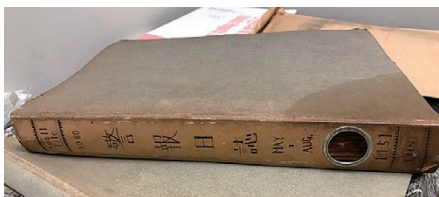


図1 1951年当時の電波警報業務の記録

今、宇宙天気が熱い！現在の宇宙天気を取り囲む状況を一言で表せば、そんな言葉がぴたりと当てはまるかもしれません。宇宙天気、耳慣れない言葉かもしれませんが、今、予報・警報を含む宇宙天気情報の需要が急速に高まりつつあります。民間航空機の運航に際して、宇宙天気情報の利用が開始されたのをはじめ、無線通信や衛星測位など様々な分野で宇宙天気情報の利用に向けた活発な議論が進んでいます。

■宇宙天気予報業務の歩み

情報通信研究機構（NICT）では、その前身である郵政省電波研究所が発足した1950年代初めごろから、短波通信障害を事前に察知して利用者に伝える電波警報業務を行ってきました（図1）。この業務は、郵政省通信総合研究所に名称変更された1988年、宇宙天気予報業務と名前を変えて、短波通信障害を引き起こす原因となる太陽活動や地磁気じょう乱にまで予報・警報の範囲を広げていきました。同時に、宇宙天気予報*という言葉も世界に広がっていきました。

現在、NICTの宇宙天気予報業務は予報・警報の範囲を更に広げ、短波通信障害とその原因となり得る太陽活動、地磁気じょう乱、デリンジャー現象などの情報以外に、人工衛星障害の原因となり得る放射線帯電子や、宇宙飛行士や航空機乗務員の宇宙放射線被ばくによる健康影響の原因となり得る太陽高エネルギー粒子、衛星測位の誤差増大の原因となり得る電離圏じょう乱など、様々な情報を発信しています。これらの情報は、毎日決まった時間に電子メールやウェブサイト

などの媒体を通してユーザーに配信されています。また、毎年宇宙天気ユーザーズフォーラムや宇宙天気協議会を開催して、宇宙天気情報の利用の促進やユーザーとの意見交換を行っています。

■宇宙天気予報業務の発展

2017年9月初旬、約11年ぶりに大規模な太陽フレア（太陽表面での爆発現象）が発生し世間に大きな混乱を引き起こしました。この時、GPSの測位精度がかなり悪くなる時間帯があったという報告が、国土交通省国土地理院から発表されたこともあり、宇宙天気災害が実際に社会活動に影響を与えることが世間に強く認識されました。

この宇宙天気による実災害の発生を受けて、宇宙天気予報の必要性、重要性がクローズアップされることになり、日本の宇宙天気予報業務を取り囲む状況が一変しました。まず、日本の宇宙天気予報業務はNICT本部（小金井市）で行われていますが、何らかの災害等によりNICT本部の機能がマヒした際にも、宇宙天気予報業務が継続できることが必要であると認識され、2019年3月、宇宙天気予報センター副局をNICT未来ICT研究所（神戸市）に開設しました（図2）。現状は無人での運用となっていますが、NICT本部の有事の際に副局で予報業務を行うことができるようにシステムが配置されています。また、この2017年9月の宇宙天気災害時に、メディアをはじめとして一般の方々も含む様々な方面から昼夜を問わず問い合わせ等があったことを受けて、宇宙天気予報業務の24時間運用の必要性が改めて認識され、

2019年12月から宇宙天気予報業務の24時間運用が開始されました。

■国際民間航空機関への情報提供

近年、国際民間航空機関（ICAO）は、航空機と地上管制との短波通信障害、衛星通信障害、電子航法に関連した航空機位置の測定誤差の増大及び航空機乗務員の宇宙放射線被ばくという3つの観点から、民間航空機の運航への宇宙天気現象の影響を懸念しています。NICTは、ICAO宇宙天気センターとして、短波通信や衛星測位の情報はもちろんのこと、太陽放射線被ばく警報システムWASAVIES（図3）を開発し、宇宙放射線に関する情報の提供も行っています

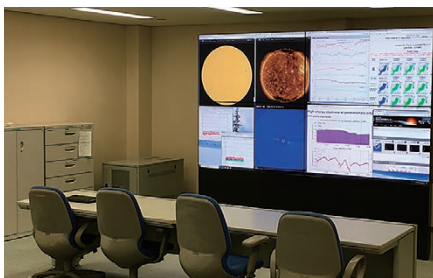


図2 宇宙天気予報センター神戸副局

（ICAO宇宙天気センターについての詳細は下段囲み記事参照）。

■宇宙天気予報業務の今後

以上のように、宇宙天気予報業務はNICTのパブリックサービスとして広く認知され、ますます重要になってきています。一方で、国立の研究機関として宇宙天気予報の精度向上を目指して研究・開発を進めていくことも、NICTの重要

な任務です。研究・開発で得られた結果を宇宙天気予報業務の運用に応用し、逆に宇宙天気予報業務の運用において発見された課題を研究・開発にフィードバックしていく、R2O2R（Research to Operation / Operation to Research）により、科学研究と予報運用の間の“死の谷”の架け橋となることで、NICTの宇宙天気予報業務を更に発展させ、より良いパブリックサービスに進化していくことが重要だと思っています。

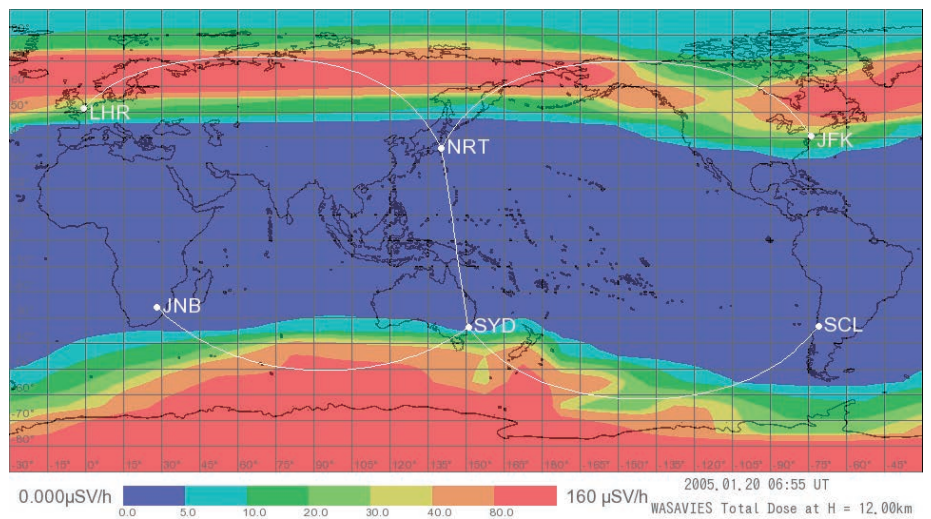


図3 WASAVIESにより推定された太陽放射線被ばく線量率分布の一例

ICAO宇宙天気情報サービスを開始

2019年11月7日、国際連合の専門機関である国際民間航空機関（ICAO）において、民間航空機の運航に際し宇宙天気情報の利用が開始されました。ICAOでは、主に次の3つの観点から民間航空機の運航における宇宙天気情報の重要性が認識されています。第1に航空機と地上管制との短波通信障害、衛星通信障害の回避のため、第2に電子航法に関連した航空機位置の測定誤差の増大防止のため、第3に航空機乗務員の宇宙放射線被ばくの低減のためです。宇宙天気情報を発信するICAO宇宙天気センターには、2018年1～3月に国際連合の専門機関である世界気象機関（WMO）によって行われた査察を経て、米国（SWPC）、

欧州連合（PECASUS）、日豪仏加連合（ACFJ）の3つの組織が現在ICAOから指名されており、NICTはACFJの一員としてICAO宇宙天気センターの一翼を担っており、2019年11月7日にICAO宇宙天気センター開設セレモニーを行い、サービスを開始しました。

ICAO宇宙天気センターから発信される短波通信、衛星通信、衛星測位、宇宙放射線に関する情報は、Advisoryと呼ばれる決まった形式で気象情報のネットワークを介して航空関係各機関に提供されます。ACFJから発信される最終的なAdvisoryは、オーストラリア気象庁が短波通信、フランス気象庁が衛星測位と宇宙放射線Advisoryを配信することになっ



ICAO宇宙天気センター開設セレモニーの様子

ており（注：衛星通信 Advisoryは現状、配信されていません）、NICTは最終的なAdvisoryを作成するための様々な観測データやモデル計算の結果などの情報提供を行います。NICTは、もともと電波警報業務から宇宙天気予報業務に発展してきた歴史的経緯から、短波通信や衛星測位はもちろんのこと、近年は宇宙放射線に関する情報もその範ちゅうに含み宇宙放射線の情報提供も可能であることから、ICAOが重要視する3つ全ての観点から情報を提供しています。（久保勇樹）

AI宇宙天気予報

電磁波研究所 宇宙環境研究室 テニューアトラック研究員 西塚 直人

宇宙利用とICT化の進む現代社会において、太陽面爆発フレアがもたらすX線や高エネルギー粒子、宇宙嵐といった現象は、しばしば社会にも影響します。2017年9月には、11年ぶりに巨大フレアが発生してニュースになりました。

太陽フレアの観測は今まで100年以上の歴史があり、近年は科学衛星「ひので」や太陽観測衛星「ソーラー・ダイナミクス・オブザーバトリー (SDO)」によって、常時高分解されたコロナや磁場の状態を知ることができます。これらを基に、太陽フレアの予測や宇宙天気の予報を精度良く行うことが私たちの課題です。

従来のフレアの予測では、黒点形状の分類を基に人手による経験的な予測が行われてきましたが、その精度は約3〜5割にとどまります。そこで私たちは、近年注目されている深層学習手法を太陽フレア予測に応用することで、予測精度の向上に挑戦しました。深層学習を適用することで、今まで人手で処理できていなかった大量データをリアルタイムで解析し、予報に活かすことができます。

私たちの開発した予測モデル「Deep Flare Net」は、黒点ごとに24時間以内に発生する太陽フレアを確率予測できます (図1)。太陽画像から検出した黒点の特徴を解析し、過去のフレア発生時と似た特徴を有する黒点が現れたときに、危険と予報します。約30万枚のSDO衛星画像を用い、予報

業務と太陽研究の経験を活かして79個の物理的な特徴を抽出し、学習させました。その結果、8割を超える予報精度の達成に成功しました*1,2。

今年4月には、Deep Flare Netの予報ウェブページ (図2)の運用を開始し、一般ユーザーに見やすいように、太陽フレアの発生確率に応じて、晴れ・曇・雨マークのように、「警告」「注意」「静穏」のアラートマークでお知らせしています。また、黒点ごとのフレア発生確率も、フレアの規模ごとにグラフで示しています。今後一般ユーザーの方 (ご覧いただいた方々) のご意見を参考に、より良く親しみやすいものに改良していきたいと思えます。

太陽フレアによるX線・紫外線が地球に当たると、通信異常や衛星測位の誤差増大の原因となることが知られています。また、太陽フレアが引き起こす大気膨張によって、人工衛星の軌道 (寿命) に影響を与えることもあります。

今後は太陽フレアのAI予報運用を行いつつ、私たちの生活により身近な通信・測位などへの影響を予測し、さらに衛星・航空運用の効率化につながるよう、宇宙とICT技術を使った技術革命を先導して、New Space (新しい宇宙産業) 時代の社会に貢献していきたいと思えます。

参考文献

- *1 Nishizuka et al. 2018 Astrophys. J. 858, 113
- *2 西塚直人, 天文月報, 第112巻, 第6号

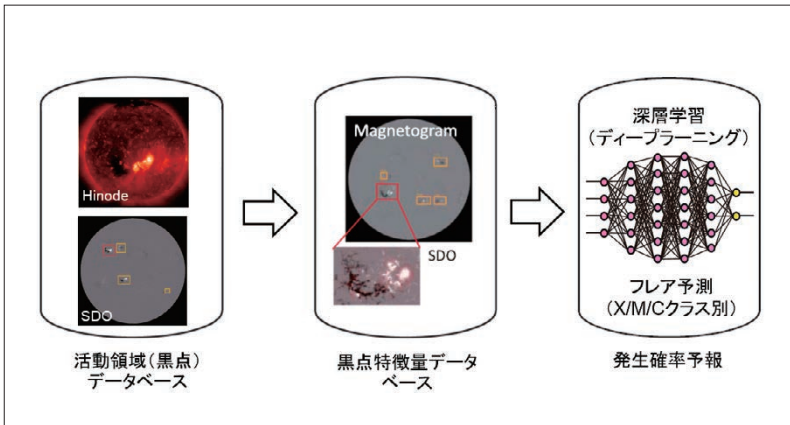


図1 Deep Flare Net モデルの概要

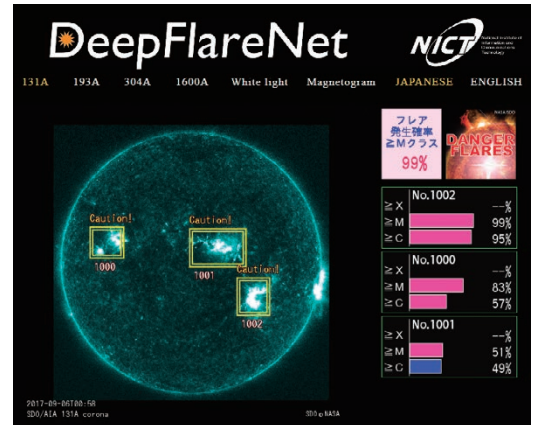


図2 太陽フレアAI予報 (Deep Flare Net) のウェブ配信画面 (<https://defn.nict.go.jp>)

西塚 直人 (にしづか なおと)

大学院終了後、JAXA、国立天文台、ロンドン大学マラード宇宙科学研究所を経て、2014年NICT入所。機械学習を用いた太陽フレアの予測モデル開発に従事。博士 (理学)。



宇宙天気予報システムの構築に向けて ～大気圏・電離圏モデルからのアプローチ～



埜 千尋

(たお ちひろ)

電磁波研究所
宇宙環境研究室
テニユアトラック研究員
博士（理学）

●経歴

- 2004年 東北大学理学部地球物理学科卒業
- 2009年 東北大学大学院博士課程修了
宇宙航空研究開発機構プロジェクト研究員、日本学術振興会海外特別研究員（仏IRAP）などを経て
- 2015年 NICT入所
- 2017年 現職

●受賞歴等

- 2019年 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞受賞

一問一答

Q 研究者になってよかったことは？

A 手を動かして知識を深めるのが楽しいです。わずかでも、人類の知見蓄積に貢献できること、それを通して誰かの役に立てること、です。

Q 最近はまっていること

A 娘の離乳食作りです。歯ごたえある蓮根をすりおろすとねばりが出るという食材の違う側面に驚いたり、娘の反応を楽しんだりしています。

Q 研究者志望の学生さんにひとこと

A 興味あることに没頭しつつも視野を広く刺激を受け、また楽観的に進められるタフさを備えて、邁進してください。

通 信・測位情報は、スマートフォンの地図アプリから航空運用に至るまで広く活用され、自動運転や自動宅配などの近未来技術でも利用が見込まれます。また、多角化しつつある小型衛星を含めた地球周辺の衛星運用や、衛星に被害をもたらす宇宙デブリの軌道把握において、背景となる大気情報が欠かせません。超高層大気の変動は、通信・測位や衛星運用に障害となりうる、実用的にも重要な宇宙環境です。

超高層大気領域は、下層大気からの擾乱の伝搬と、中性大気（大気圏）と電離大気（電離圏）の相互作用、さらに上空に広がる地球周辺の磁気圏からのエネルギー流入による多領域間結合の結果として、複雑な変動が生み出されます。

この超高層大気領域の変動を再現し予測する有力なツールが、全球大気圏・電離圏モデルGAIA（Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy）です。GAIAは、地上か

ら超高層領域までを境界なくつなぎ、中性大気と電離大気の相互作用を扱うことを世界で初めて達成した物理モデルです。私はNICT入所前の惑星環境を対象とした研究経験を活かし、地球周辺の磁気圏や太陽を起因とする擾乱がGAIAに入るように改良を行ってきました。

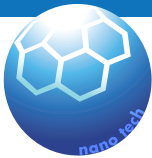
現在、宇宙天気予報への利用に向けて、数日後までの予測を含むリアルタイム計算を試験運用しています。モデルに入力する観測情報が十分にそろっていな

いという制約の下で、精度を出していくことが課題です。また、物理モデルであるGAIAからの出力は密度や速度などの物理パラメータですが、実際の通信や測位への影響評価ができるよう、指標づくりや他のモデルへの入力テストもグループで進めています。

天気予報において不可欠な気象モデルのような役割を宇宙天気予報にて果たせるよう、開発を進めています。



GAIA計算を行っているNICTのスパコン



International Nanotechnology Exhibition & Conference
nano tech 2020

◇ 超スマート社会を実現するナノテクノロジー ◇

国際ナノテクノロジー 総合展・技術会議

未来ICT研究所では、未来の情報通信の基盤技術についてデバイス技術やバイオテクノロジー、超高周波技術など幅広いアプローチから研究開発を進めています。その最新の研究内容を展示します。また、29日午後には同会場会議棟においてバイオ材料や「自然知」に関わる研究についてのシンポジウムを開催します。

nano tech 2019での様子



開催日	会場
2020年 1月29日(水) - 31日(金) 10:00 - 17:00	東京ビッグサイト 西・南ホール全館 NICTブース:西1・2ホール



「未来 ICT シンポジウム 2020」～バイオ新奇材料が拓く新たな ICT の可能性～
 開催日時：2020年1月29日（水）13：30～16：30
 会場：東京ビッグサイト 会議棟6階605会議室
 主催：NICT 未来ICT研究所
 参加費：無料

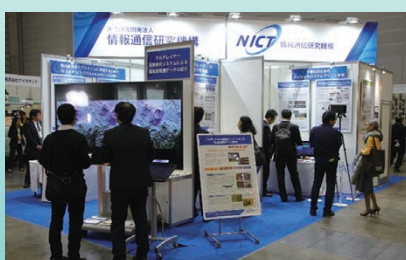
未来ICTシンポジウム2018の様子



<https://www.nanotechexpo.jp/main/>

第24回 「震災対策技術展」 横浜
 自然災害対策技術展

衛星を用いた災害時通信技術や耐災害ネットワーク技術、被災状況をリアルタイム把握するためのAIシステム、気象災害の予報精度向上のための新たなシステムなどに関して、デモ展示や最新の研究成果を紹介します。



第23回「震災対策技術展」横浜でのNICTブースの様子

開催日 2020年2月6日(木)・7日(金)
 各日10:00～17:00

会場 パシフィコ横浜

入場方法 当日登録制 (受付にて、アンケートに記入後、入場証と交換。2日間有効)
<https://www.shinsaieexpo.com/yokohama/about/>

同時開催

災害・危機管理ICTシンポジウム2020

<http://ictfss.nict.go.jp/yokohama2020/>

上記 Web サイトにて事前登録をしてください



災害・危機管理 ICT シンポジウム 2019 での講演の様子

開催日：2020年2月7日(金)
 主催：次世代安心・安全ICTフォーラム
 国立研究開発法人情報通信研究機構
 会場：パシフィコ横浜 アネックスホール
 参加費：無料

