

5 定常業務

5 Operational Activities

5-1 宇宙天気予報業務

5-1 Space Weather Forecasting Service

大辻賢一 久保勇樹

OTSUJI Kenichi and KUBO Yûki

宇宙天気予報業務は現代社会に不可欠な存在である。電力・通信・衛星測位・航空・宇宙利用といった我々の生活を支える科学技術は、宇宙天気すなわち太陽・地球圏環境のじょう乱に対して脆弱で、ひとたび大規模な宇宙天気じょう乱が発生すると現代社会に深刻な障害を引き起こすことがある。これらの被害を未然に防ぐ、あるいは軽減する目的で行われるのが「宇宙天気予報業務」である。本稿では、情報通信研究機構が日々行う宇宙天気予報業務の内容について概説する。

Space weather forecasting service is an essential part of modern society. Technology that support our lives, such as electric power, communication, satellite positioning, aviation, and space utilization, are vulnerable to the disturbance of the solar-terrestrial environment called “space weather”. Once a large space weather disturbance occurs, it can cause serious obstacles to modern society. To prevent or mitigate these damages, “Space weather forecasting service” is carried out. In this paper, we present an overview of the daily space weather forecasting service performed by the National Institute of Information and Communications Technology.

1 はじめに

科学技術の発展とともに、人類の活動域は拡大を続けている。気球の発明により、すでに大空を行き交う術を得ていた人類は、物質だけではなく情報をやり取りする手段として空間を利用することを考えた。狼煙や矢文といった情報伝達手段は古来より用いられていたが、情報量や伝達距離、所要時間の面で限界があった。人類が情報伝達の新たな方法を手に入れたのは1895年[1]、イタリアのマルコーニによる無線通信の実験が成功したときである。以来、地球を取り巻く空間に無線通信による情報が飛び交うようになった。

無線通信の発明に遅れること8年、1903年にライト兄弟により飛行機が発明され、人類はその活動域を更に広げることとなった。以後、スプートニク1号が1957年に打ち上げられ、人類はついに宇宙空間を利用するに至った。21世紀の現在、人工衛星による通信・測位技術が発展し、国際宇宙ステーションに代表される有人宇宙活動も、民間宇宙飛行会社の台頭によってその裾野を広げつつある。また航空機による人や物の流れは、世界経済を動かす原動力の一つとなっており、

今この瞬間にも多数の航空機が大気圏を行き交っている。一方で視線を上空から地面に移すと、世界のグローバル化に伴い、石油パイプラインや送電線など、国境をまたぐ長大な建造物が網の目のように地表を覆っていることがわかる。これらは全て科学技術の発展とともに築き上げてきた現代社会の基盤となっており、一つでも欠けると我々の生活に多大な影響を及ぼし得る。事実、気象災害や戦争、テロまたは不幸な事故といった諸々の脅威が、社会基盤であるこれらの科学技術にダメージを与え、我々の生活を脅かした例は枚挙にいとまがない。そんな中で近年警戒されているのが、太陽起因の現象によって我々の社会が影響を受けるという事例である。例として、太陽表面での爆発現象によって放射された高エネルギー粒子による宇宙飛行士の被ばくや、太陽から噴出する高密度のガスによって地球の磁気圏及び電離圏が乱されることによる、通信や測位の障害等が挙げられる[2]。時々刻々と変化する太陽・地球間の環境を「宇宙天気(図1)」と呼び、その変動を予測することを「宇宙天気予報」と呼ぶ。情報通信研究機構(以下、NICT)は、日本で唯一の宇宙天気予報を「業務」として行っている公的機関である。

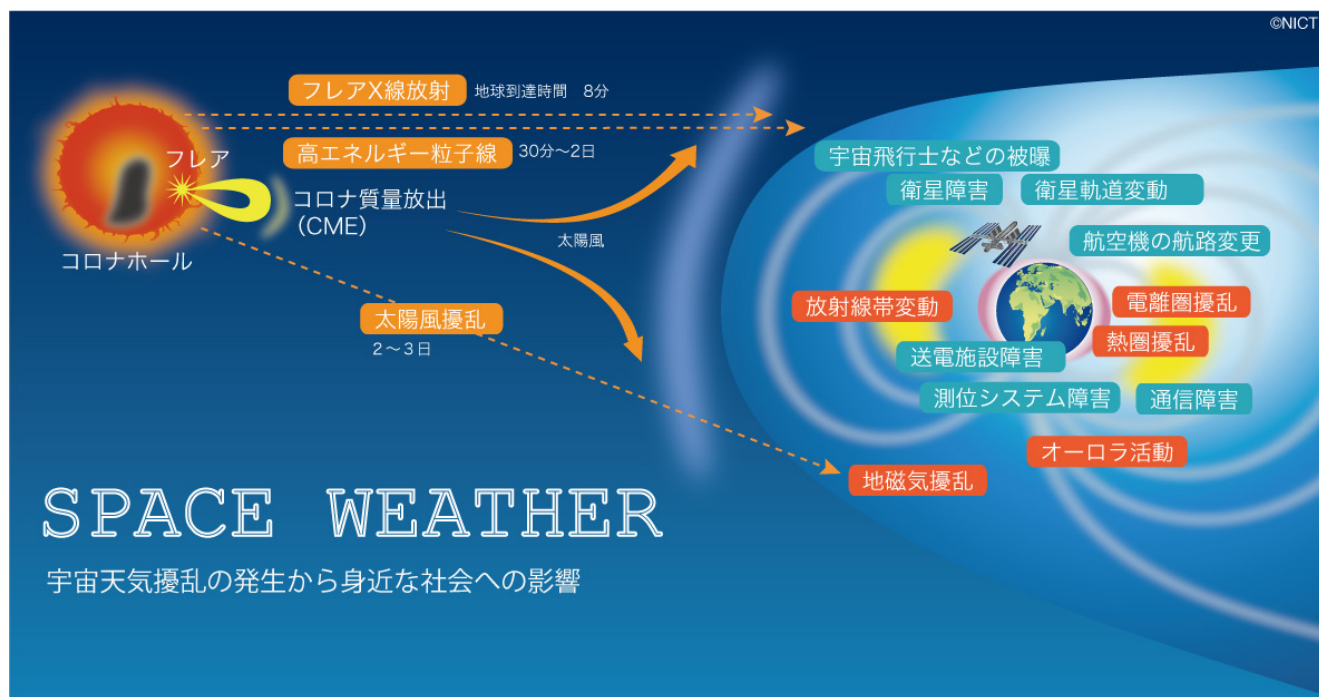


図1 太陽と地球を結びつける「宇宙天気」

「業務」とはすなわち、定常的に財やサービスを顧客に提供する事業であり、NICTは宇宙天気予報業務を通じ、多種多様な利用者に「宇宙天気予報」を提供している。この点こそが、国内の他の宇宙天気研究を行っている大学や研究機関との大きな違いである。

本稿では、NICTとその前身である郵政省電波研究所時代から行われてきた予報業務体制の変遷について紹介するとともに、宇宙天気予報業務の今後の展望について紹介する。なお、NICTとその前身におけるより詳細な歴史については、本特集号5-5を参照されたい[3]。

2 宇宙天気予報業務体制の変遷

2.1 電波研究所時代

NICTは1952年に発足した郵政省電波研究所に源流を持つ。この時代にはすでに電離圏の異常により短波通信が障害を受けることがわかっており、電離圏じょう乱を前もって予測・通報する「電波警報業務(図2)」が1948年から開始されていた[4]。電波警報業務は、国内外から集積される太陽面現象・地磁気活動度・電離圏観測データ及び国内外から送信されている短波電波の受信状況を基に平磯電波観測所(現茨城県ひたちなか市)で実施された。

1949年からは国分寺において、電波伝搬状況をモールス符号の“W”(激しい通信嵐が予想)、“U”(不安定な状態)、“N”(平穏な状態)としてJJY標準電波にのせて報知するというのが行われた。この電波警報業務は2001年3月31日に短波JJYが廃止されるまで継続さ

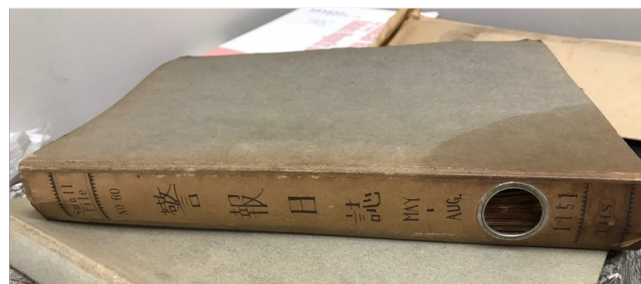


図2 電波警報業務の記録(1951年)

れた[5]。また、現況及び直近の予報のみならず、週間電波予報として今後1週間の電波伝搬状況の予報を行い、利用者へはがきで予報を送付していた[6]。

平磯電波観測所では、太陽表面における爆発現象である太陽フレアの発生を予測するため、シーロスタットを用いた太陽黒点のスケッチが行われていた(図3)。このほかにも太陽から放射される電波を観測する太陽電波望遠鏡を設置し、電波バーストの検出を行うことで地磁気じょう乱の予知に威力を発揮して平磯電波観測所における警報発令で重要な役割を果たした[5]。しかし1970年代に入ると、国際間の長距離通信には海底に敷設された通信ケーブルが利用されるようになり、電離圏を利用する短波通信の役割が相対的に低下してきた[5]。また、このころになると人工衛星の利用が進み、太陽起源の高エネルギー粒子(主にMeV〜GeV帯の陽子すなわちプロトン)が増加する「太陽プロトン現象」が人工衛星の機器に不具合を引き起こす原因として注目されていた。また、当初は比較的低い周波数を使用して

いたため、地磁気じょう乱に伴う電離圏のシンチレーションが人工衛星との通信障害を発生させることがあった。そのため、太陽プロトン現象や地磁気じょう乱を引き起こす可能性のある太陽フレアの発生報告、地磁気じょう乱の予報及び発生報告を含む「太陽地球環

境予報」を提供することが決定された[5]。当時の業務内容では、1週間交代で1人の研究者が予報官となって予報内容を作成したうえで、研究者全員による予報会議で最終的に発令内容が決定された[7]。

1987年から、日本最初の気象衛星「ひまわり」の高エネルギー粒子(プロトン・アルファ粒子・電子)の計測データがファクシミリで日々平磯電波観測所に通知されるようになった。さらに同年、太陽フレアと地磁気じょう乱の発生の履歴を一目で確認する手段として、太陽の自転ごとに太陽活動領域の成長、減衰、太陽フレアの発生状況をまとめたチャート(Solar Activity Chart^{*1} 図4)の作成が開始された。このSolar Activity Chartは計算機処理により現在でも継続されている[5]。

1986年4月、12時間先までの電波伝搬状態を予報する短期電波じょう乱予報と、これまではがきにて通知していた週間電波じょう乱予報をまとめ、さらに予報の根拠となる太陽活動と地磁気活動の概況を合わせて

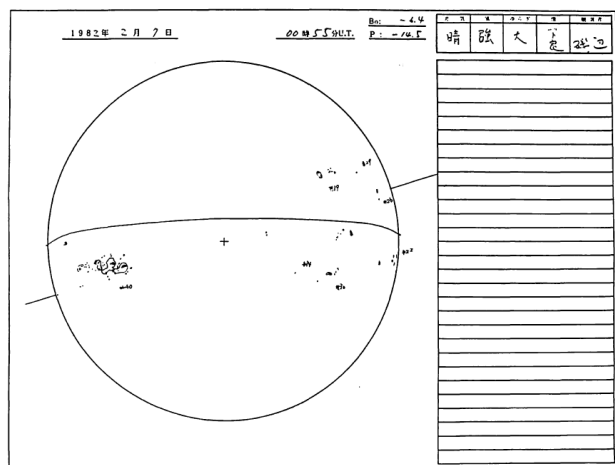


図3 1982年2月7日に平磯電波観測所で観測された白色光による太陽黒点スケッチ図[8]

*1 <https://wdc.nict.go.jp/hsv/> にて公開中[9]

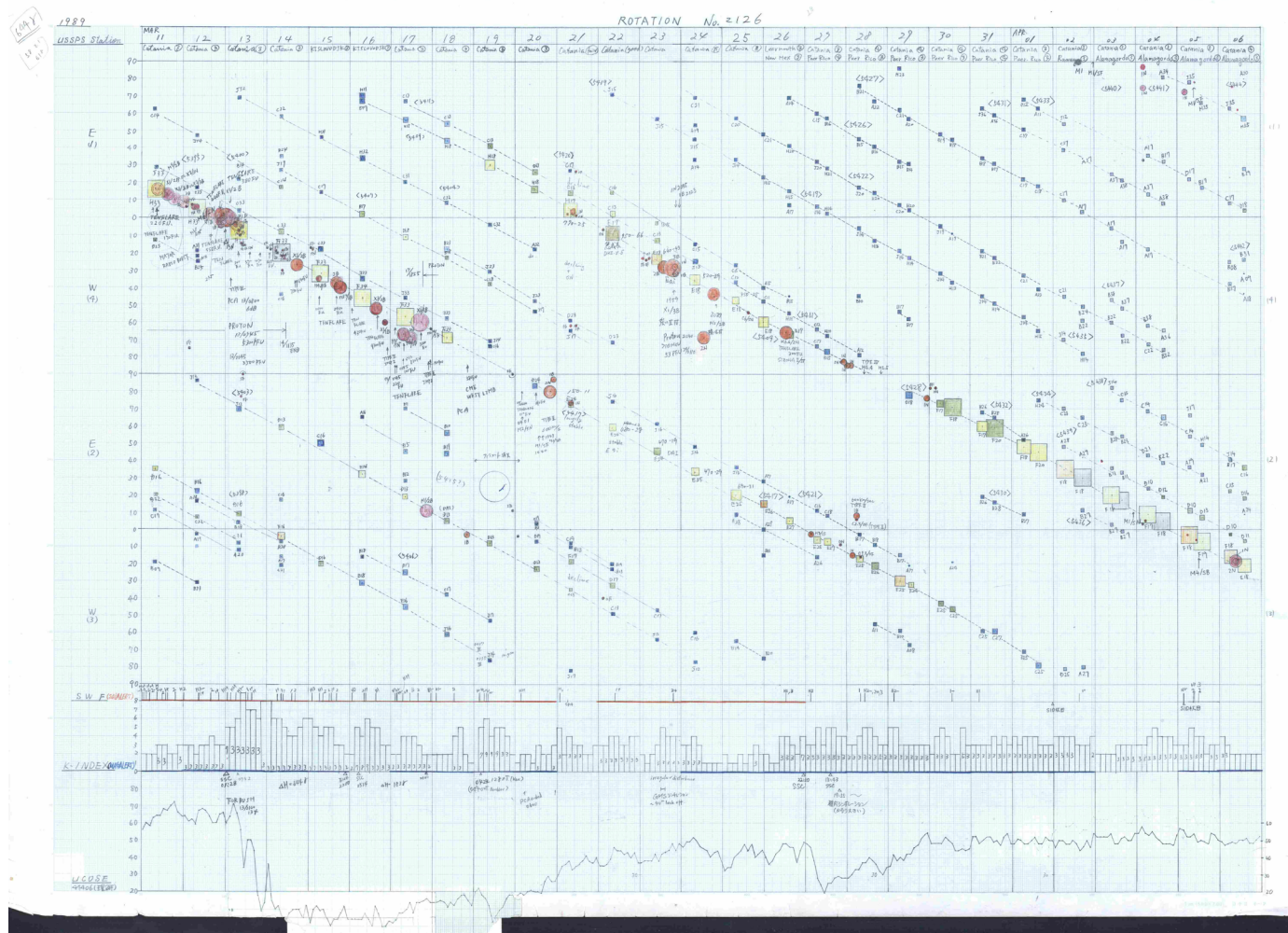


図4 太陽活動域チャート (Solar Activity Chart) 史上1、2を争う1989年3月の地磁気じょう乱に関する記録

自動応答電話サービスにて提供する「テレホンサービス」が開始された[10]。テレホンサービスはインターネットや電子メールによる情報発信に置き換わる形で2013年に終了した。

2.2 通信総合研究所時代

1988年に電波研究所は通信総合研究所に名称変更された[11]。この年「宇宙天気予報システムの研究開発」の15か年計画プロジェクトが開始され、「宇宙天気予報」の語句を商標登録するなど、徐々に宇宙天気予報が世間に広まっていく流れとなった。このプロジェクトの中で、太陽磁場望遠鏡の開発や世界に先駆けてL5ミッションすなわち地球から見て東側(地球の公転方向の逆方向)の太陽と地球の重力がつりあう点(ラグランジュポイント)で太陽や太陽風などの観測を行う探査機の検討を行った。また、太陽活動が宇宙天気の源ということから、平磯電波観測所にて太陽電波動スペクトル計を用いた太陽電波バーストの観測が行われ、地磁気じょう乱の予報的中率の向上につながった。

当初はファクシミリで受信していた気象衛星「ひまわり」の高エネルギー粒子データはその後、電話回線による通信を用いて1991年からデジタルデータが受信できるようになった[12]。その後、1995年からは「ひまわり」からのデータを平磯に設置されたアンテナにより直接受信した。また、電波のみならず可視光のH α 線による太陽観測を行うべく、高精細H α 太陽望遠鏡を用いた太陽表面の黒点形成やフィラメント噴出の観測を1994年から定常的に実施し、太陽活動予報に供された[13](図5)。一方で地上のみならず衛星観測で得られる太陽X線強度や高エネルギー粒子、太陽風データのデータベース化を行った。これら多岐にわたるデータはSolar Activity Chartやその他図表の形でウェブサーバを用いて外部からインターネット経由で常時参照可能となり、ここに現在の宇宙天気予報提供の原型が確立した[4]。



図5 高精細H α 望遠鏡

2001年4月に通信総合研究所が独立行政法人化するとともに宇宙天気予報の体制の見直しが行われ、予報センターを東京都小金井の本部に移行することとなった。新予報センターでは、膨大な宇宙天気概況データを一度に表示できる140インチの大型ディスプレイを整備し、2001年には平磯と小金井がTV会議を通じて合同で予報会議を行う体制を構築した。

2.3 情報通信研究機構時代

2004年に通信総合研究所は情報通信研究機構(NICT)へと改組された。2006年4月、宇宙天気予報業務の拠点をNICT本部(小金井)に移し、平磯宇宙環境センターは宇宙天気予報業務の拠点としての役割を終え、2009年に無人化された。その後、宇宙天気予報センターは設備向上を経て、現在では多面ディスプレイを複数備え、宇宙天気予報に必要な多数の情報を一度に表示し、現象発生を監視することが可能となっている(図6)。

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巻き起こした。この時、GPS(Global Positioning System)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^{*2}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ることになった。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た。

日本の宇宙天気予報業務はNICT本部で行われているが、何らかの災害等によりNICT本部の機能がマヒ

*2 国土交通省国土地理院「9月6日に発生した太陽フレアのGPS測位への影響(速報)」<https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi40001.html>



図6 現在の宇宙天気予報センター

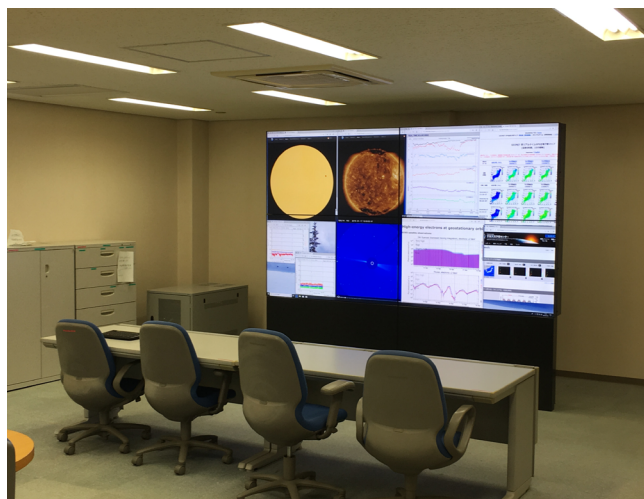


図7 予報センター神戸副局

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)に開設した(図7)。現状は無人での運用であるが、NICT本部の災害の際に副局で予報業務を行うことができるように宇宙天気予報業務システムやイベント自動通報システム(後述)が、宇宙天気予報センター主局と神戸副局の間で冗長化されて設置されている。これらのシステムは、NICTの研究系ネットワークがダウンした際にも情報収集、配信ができるように、NICTのネットワークとは切り離された独立のネットワークで構成されている。災害の際の副局での宇宙天気予報業務に実施のために、年に何度か副局での予報業務を実践している。

2017年9月の大規模宇宙天気現象時に、メディアをはじめとして一般の方々も含む様々な方々から昼夜を問わず問合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た。これに伴い、これまでワーキングアワーのみであった宇宙天気現象発生の監視を24時間365日実施することができるようになり、大規模現象発生時の迅速な情報発信等が可能になった。また、これまで一日一回であった定期的な宇宙天気情報日報を一日2回(朝10時頃と夜10時頃)に増やすなど、情報発信も充実している。また、宇宙天気予報センター公式のウェブサイト(swc.nict.go.jp)も全面リニューアルし、わかりやすい情報発信を進めている。

また、GPSの測位精度がかなり悪くなるなどの宇宙天気災害の発生が、国家レベルでの宇宙天気予報業務の重要性の認識につながり、2019年6月から宇宙天気予報業務は総務省委託業務としてNICTが請け負う形となり、実質的に総務省の業務として行われることになった。

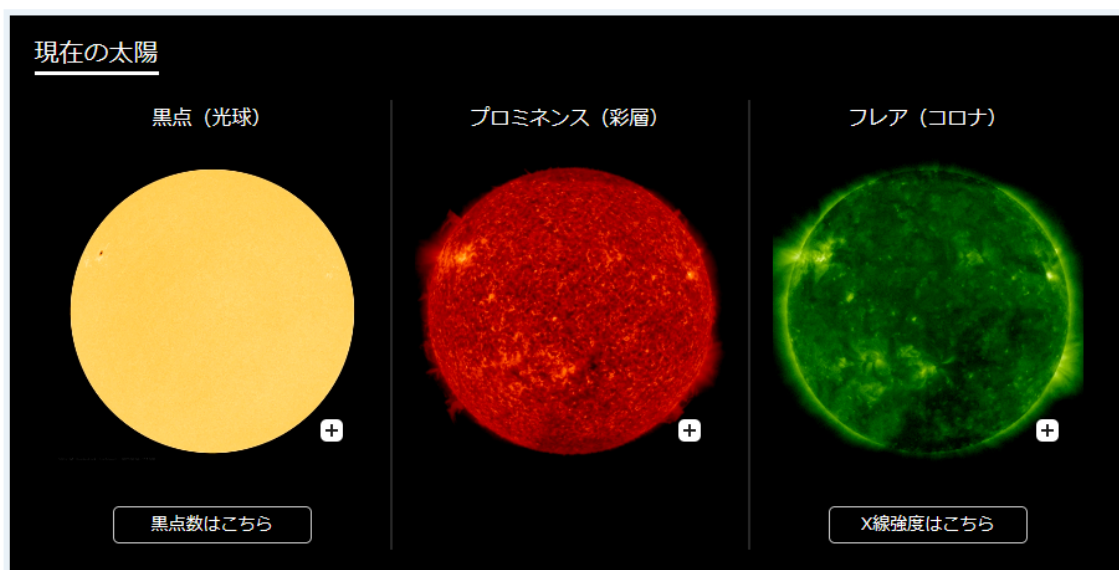
一方で、国際活動に目を転じると、2019年11月7日、国際連合の専門機関である国際民間航空機関(ICAO)において、民間航空機の運航に際し宇宙天気情報の利用が開始された。ICAOでは、主に次の三つの観点から民間航空機の運航における宇宙天気情報の重要性を認識している。第1に航空機と地上管制との短波通信障害、衛星通信障害の回避のため、第2に電子航法に関連した航空機位置の測定誤差増大の影響を防ぐため、第3に航空機乗務員の宇宙放射線被ばくの低減のためである。宇宙天気情報を発信する機関(ICAO宇宙天気センターと呼ぶ)には、2018年1～3月に国際連合の専門機関である世界気象機関(WMO)によって行われた査察を経て、米国(SWPC)、欧州連合(PECCASUS)、日豪仏加連合(ACFJ)、中露連合(CRC)の4つの組織がICAOから指名されている。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日に航空機運航に特化した宇宙天気情報サービスを開始した。NICT宇宙天気予報に関する国際活動については本特集号5-3 宇宙天気の国際動向[14]を参照されたい。

3 情報通信研究機構における宇宙天気予報業務の詳細

現在のNICTにおける宇宙天気予報業務は、予報・警報の範囲をさらに広げ、短波通信障害や衛星測位の誤差増大の原因となり得る太陽活動、地磁気じょう乱、電離圏じょう乱などの情報以外に、人工衛星障害を引き起こす放射線帯電子の量や、宇宙飛行士や航空機の乗員乗客の被ばくの原因となり得るプロトン現象など、多岐にわたる情報を発信している[15](図8)。2021年現在、NICTが実施している宇宙天気予報業務を大別すると、1. 宇宙天気予報の判断材料となる観測データや数値計算結果のHP上での提供、2. NICTの研究者及び予報官の合議によって決定される宇宙天気予報の配信・公開、3. 突発的な宇宙天気現象が発生した際に自動配信されるイベント通報サービス、これら三つが挙げられる。

3.1 観測データや数値計算結果の公開

宇宙天気予報を行う上で、太陽・地球間の環境のリアルタイム観測データは宇宙天気の現況を把握する上で非常に重要である。NICTでは、自ら所有する施設・観測装置におけるデータ取得のみならず、世界各地や人工衛星による観測結果を常時取得し、現状把握を行っている。表1及び表2に宇宙天気予報センターで予報のために扱っているデータの一覧を示す。多岐にわたる観測・数値計算データを用いている。また、衛



SDO | Solar Dynamics Observatory



図8 情報通信研究機構宇宙天気予報センターウェブサイト (https://swc.nict.go.jp)

表 1 予報に用いる観測データの一覧^{*3}

領域	観測量	観測方法・入手先	公開データ	目的
太陽	黒点相対数	SILSO (ベルギー王立天文台)	黒点相対数プロット	太陽活動度
	可視光	SDO 衛星 (NASA)	太陽白色光画像 太陽彩層画像	太陽活動度
	磁場	SDO 衛星 (NASA)	太陽光球面磁場画像	太陽光球面磁場
	X 線強度	GOES 衛星 (NOAA)	太陽 X 線プロット	太陽フレア
	極端紫外線	SDO 衛星 (NASA) STEREO 衛星 (NASA)	太陽極端紫外線画像	太陽フレア コロナホール フィラメント噴出現象
	高エネルギープロトン	GOES 衛星 (NOAA) ひまわり衛星 (気象庁)	高エネルギープロトン粒子 フラックスプロット	プロトン現象
太陽風	白色光	SOHO 衛星 (ESA/NASA) STEREO 衛星 (NASA)	コロナグラフ	CME (コロナ質量放出現象)
	電波	太陽電波望遠鏡 (山川)	太陽電波スペクトログラフ	CME 電波バースト
	磁場, 速度, 密度, 温度	DSCOVR 衛星 (NOAA) STEREO 衛星 (NASA)	太陽風プロット	太陽風変動 (高速太陽風, CME)
磁気圏	高エネルギー電子	GOES 衛星 (NOAA) ひまわり衛星 (気象庁) あらせ衛星 (JAXA)	高エネルギー電子フラックス ス/フルエンスプロット	放射線帯電子
	磁場	GOES 衛星 (NOAA)	静止軌道磁場プロット	放射線帯電子 地磁気じょう乱
	地磁気	柿岡地磁気観測所 (気象庁)	地磁気 K 指数プロット 地磁気プロット	地磁気じょう乱
電離圏	電離圏電子数	イオノゾンデ (各地方観測所)	イオノグラム foF2 プロット	Es, 電離圏じょう乱
		GPS 衛星 (国土地理院)	全電子数プロット 全電子数マップ	電離圏じょう乱
	X 線強度	GOES 衛星 (NOAA)	デリンジャー現象マップ	デリンジャー現象

表 2 予報に用いる数値計算データの一覧^{*4}

領域	モデルの名称	計算手法	公開データ	目的
太陽	Deep Flare Net[16]	深層学習	太陽フレア発生確率 ^{*5}	太陽フレア予測
太陽風	SUSANOO[17] (NICT), REPPU[18] (NICT), ENLIL[19] (NASA, NOAA)	数値シミュレーション	太陽風変動など太陽風シミュレーションの結果 ^{*6}	地磁気じょう乱予測
磁気圏	放射線帯予測ウェブ	多変量自己回帰モデル及びカルマンフィルター	電子フルエンスの予報 ^{*7}	放射線帯電子予測
電離圏	GAIA[20]	全地球大気モデルと電離圏モデルを結合した数値シミュレーション	大気・電離圏全球シミュレーションの結果 ^{*8}	電離圏予測

*3 SILSO : Sunspot Index and Long-term Solar Observations, SDO : Solar Dynamics Observatory, GOES : Geostationary Operational Environmental Satellite, NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (アメリカ海洋大気庁), STEREO : Solar TErrestrial RElations Observatory, SOHO : Solar and Heliospheric Observatory, ESA : European Space Agency (欧州宇宙機関), DSCOVR : Deep Space Climate Observatory, foF2 : 電離圏 F2 層臨界周波数, Es : スポラディック E 層

*4 SUSANOO : Space-weather-forecast-Usable System Anchored by Numerical Operations and Observations, REPPU : REProduce Plasma Universe, GAIA : Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy

*5 <https://defn.nict.go.jp>

*6 <https://swc.nict.go.jp/forecast/magnetosphere.html>

*7 <https://radi.nict.go.jp>

*8 <https://gaia-web.nict.go.jp/index.html>

星観測によるデータ取得及び数値計算による宇宙天気予測が大きなウェイトを占めている。

3.2 宇宙天気予報の配信・公開

発令される予報の判断は、収集された多岐にわたるデータを分析することによってなされる。予報は、図9に示されるように、太陽・太陽風・磁気圏・電離圏の領域ごとにレベル分けがなされ、各領域が静穏か活発か一目で判別できるようになっている^{*9}。また1日2回、日報という形で宇宙天気情報を配信及び公開しており、毎週1回の週報配信、イベント発生時に配信される臨時情報、海外の宇宙天気予報を行う機関とのUGEOAコード(符丁化された宇宙天気予報情報[21])の送受信による情報交換と併せて、宇宙天気予報業務の根幹をなしている。以下に、各領域においてどのような判断基準で予報が行われるかについて述べる。

3.2.1 太陽領域—太陽フレア

太陽フレアは太陽表面における大規模な爆発現象であり、デリンジャー現象やCME(コロナ質量放出現象と呼ばれる大規模な噴出現象)の原因となるため、宇宙天気予報においては予報判断の最上流に位置する現象である。太陽フレアは、放射されるX線強度(波長1-8Å)の最大値をもって規模が小さい順にA, B, C, M, Xとクラス分けがなされており(表3)、予報時点から24時間後までにCクラス以上の太陽フレアが発生しないと予測される場合は「静穏」、Cクラス、Mクラス、Xクラスの太陽フレアが発生すると予測される場合はそれぞれ「やや活発」、「活発」、「非常に活発」と予報される。太陽フレアの発生予測には主に太陽表面の磁場データや極端紫外線データが用いられる。NASAの太陽観測衛星であるSDOは、太陽活動領域と呼ばれる磁場が強く活動的な領域の3次元磁場データを取得しており、磁力線に蓄えられたエネルギーの見積もりから、発生する太陽フレアのクラスを推定することができる。極端紫外における活動領域の増光現象は、フレア発生の前兆として用いることができ、また衛星観測による昼夜や天候に左右されない連続観測、さらには地球からは観測不能な太陽の裏側の観測データにより、新たに出現する活動領域をいち早くとらえることができる。さらにここ数年、深層学習による太陽フレア発生予測[16]が行われ、太陽フレアの発生確率を定量的に求めることが可能となり、予報の裏付けとして用いられている。

Xとクラス分けがなされており(表3)、予報時点から24時間後までにCクラス以上の太陽フレアが発生しないと予測される場合は「静穏」、Cクラス、Mクラス、Xクラスの太陽フレアが発生すると予測される場合はそれぞれ「やや活発」、「活発」、「非常に活発」と予報される。太陽フレアの発生予測には主に太陽表面の磁場データや極端紫外線データが用いられる。NASAの太陽観測衛星であるSDOは、太陽活動領域と呼ばれる磁場が強く活動的な領域の3次元磁場データを取得しており、磁力線に蓄えられたエネルギーの見積もりから、発生する太陽フレアのクラスを推定することができる。極端紫外における活動領域の増光現象は、フレア発生の前兆として用いることができ、また衛星観測による昼夜や天候に左右されない連続観測、さらには地球からは観測不能な太陽の裏側の観測データにより、新たに出現する活動領域をいち早くとらえることができる。さらにここ数年、深層学習による太陽フレア発生予測[16]が行われ、太陽フレアの発生確率を定量的に求めることが可能となり、予報の裏付けとして用いられている。

3.2.2 太陽領域—プロトン現象

プロトン現象、いわゆる太陽高エネルギー現象とは、太陽フレア発生に伴って数十keV-数百MeVの高エネルギープロトンが生成され、30分~数時間で地球に到来して静止軌道で高エネルギープロトン粒子フラックスの増加が観測される現象である。プロトン現象で観測される高エネルギープロトンは太陽フレアやCMEの衝撃波面によって加速される。プロトン現象は人工衛星の電子機器に誤作動を生じさせ、宇宙飛行士や高高度を飛行中の航空機の被ばくの要因となる。また、極域に飛び込んだ高エネルギー粒子は電離圏を

表3 太陽フレアのクラスと予報レベル

予測されるX線強度最大値(波長1-8Å)(Watts/m ²)	太陽フレアのクラス	太陽フレア予報レベル
10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁷	A	1: 静穏
10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶	B	
10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵	C	2: やや活発
10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴	M	3: 活発
10 ⁻⁴	X	4: 非常に活発

*9 <https://swc.nict.go.jp>



図9 予報センターウェブサイトにて公開される予報インジケータ

電離させて極冠電波吸収と呼ばれる短波通信障害を引き起こす。プロトン現象は太陽フレアに伴って発生するため、太陽フレアが発生すると予測される際にはプロトン現象の発生予測も検討される。太陽フレアの発生を予測したうえで、さらにプロトン現象を生じさせるかどうかの判断をするため、現状では精度の高い予測が困難な現象であり、予報スキームの改良が求められている。表4にプロトン現象の規模と予報レベルの対応を示す。

3.2.3 磁気圏領域—地磁気じょう乱

地磁気じょう乱現象は太陽風の変動と密接に関連しているため、太陽風の時間発展をいかに精度よく予測するかが予報精度向上の鍵となる。太陽風の速度・密度・温度や磁場強度・方向の観測データが存在しなかった時代は、太陽の自転運動により太陽風のパターンに27日周期の再現性がみられることから、太陽風速度の周期性を仮定して地磁気じょう乱の予報を行っていた。また、太陽の可視光及び電波観測によるフレアや電波バーストの検出からも地磁気じょう乱の発生を予測していた。その後ACE衛星(1997年打ち上げ)やDSCOVR衛星(2015年打ち上げ)によるその場観測が行われるようになり、太陽風のデータを常時取得できるようになると、高速太陽風やCMEの到来をデータ上で確認することが可能となり、地磁気じょう乱の予報精度向上につながった。また、太陽観測衛星によるコロナグラフや極端紫外線画像により、CMEの発生や高速太陽風の源であるコロナホールが観測されるようになり、STEREO衛星による惑星間空間の多角的な観測が実現するに至り、予報精度の更なる改善がなされた。このように判断材料となるデータが多岐にわたり、ジグソーパズルのピースを組み合わせるように予報内容を作り上げていくため、一筋縄ではいかないが、その分やりがいのある予報領域である。近年では数値計算による太陽風予測[17][18]が大きな役割を担っており、観測と数値計算の両輪をもって精度の高い予報を行う地磁気じょう乱予報は、宇宙天気予報の花形とも言える。予報基準としては気象庁地磁気観測所柿岡(茨城県石岡市柿岡)が発令する地磁気K指数を用い、

表4 プロトン現象の規模と予報レベル

予測されるプロトン現象の規模	プロトン現象 予報レベル
10 MeV 以上のプロトン粒子フラックスが 10 PFU 未満	1：静穏
10 MeV 以上のプロトン粒子フラックスは上昇する	2：警戒
10 MeV 以上のプロトン粒子の最大フラックスは 10 PFU 以上で推移	3：継続

表5のように5段階での予報が行われている。

3.2.4 磁気圏領域—放射線帯電子

放射線帯電子は、地球を取り囲む放射線帯の高エネルギー電子を指し、衛星帯電による機能障害の原因となる。放射線帯電子のレベルの基準として用いられるのは、米国の気象衛星 GOES で観測される静止軌道での 2 MeV 以上の電子フラックスデータである。衛星帯電は電子フラックスの値そのものに左右されるというよりは、フラックス値を時間積分した電子フルエンスの量に影響を受けるため、予報基準は、2 MeV 以上のエネルギーを持つ放射線帯電子の 24 時間フルエンス値が用いられる(表6)。放射線帯電子の予報を行う上で参考とするのは太陽風の予測であり、高速太陽風が継続すると放射線帯電子が増加し、地磁気じょう乱で放射線帯電子が消失することから電子フルエンスの増減を予測している。このため、放射線帯電子予報においても太陽風の時間発展を精度良く予測することが必要とされる。

3.2.5 電離圏領域—電離圏嵐

電離圏嵐(電離圏じょう乱)の予報はNICTが電波研究所であった時の電波警報をルーツに持ち、宇宙天気予報業務の中核を担う業務である。電離圏嵐に関する予報は、通信、放送、衛星測位業界のみならず、アマチュア無線家などからもよく利用されている[15]。電離圏嵐とは、電離圏の中で電子が最も多いF領域において、通常より顕著に電子密度が減少、或いは増加する現象のことを指す。電子密度が減少する場合は「負相嵐」、電子密度が増加する場合は「正相嵐」と呼ばれる。負相嵐の発生時には、F領域の臨界周波数が小さ

表5 地磁気じょう乱予報レベル

予測される地磁気 K 指数の最大値	地磁気じょう 乱予報レベル
3 以下	1：静穏
4	2：やや活発
5	3：活発
6	4：非常に活発
7 以上	5：猛烈に活発

表6 放射線帯電子予報レベル

予測される 24 時間電子フルエンス値 (個/cm ² /sr)	放射線帯電子 予報レベル
3.8×10^7 未満	1：静穏
3.8×10^7 - 3.8×10^8	2：やや高い
3.8×10^8 - 3.8×10^9	3：高い
3.8×10^9 以上	4：非常に高い

くなるため、通常電離圏で反射される電波が周波数によっては反射されなくなり、正相嵐の発生時には、電離圏を通過する電波の電離圏での遅延量が増大するため、衛星測位の誤差が増大する可能性がある。電離圏のじょう乱は、地磁気じょう乱だけでなく、大気変動の影響も受けるが、現状では、地磁気が大きく乱れると予想される場合に、電離圏嵐が発達すると予報している。太陽・地球を結ぶ宇宙天気の因果関係の最下流であり、上流側のプロセスの予報精度を一つひとつ確実に向上させることが、より精度の高い電離圏嵐の予報を実現するために求められる。NICT では I-scale[22] という指標を考案し、電離圏の全電子数(TEC)及び電離圏 F 層臨界周波数(foF2)の変動を規格化して予報基準として用いている。詳しい解説は宇宙天気予報センター HP^{*10} に譲る。表 7 に I-scale を用いた電離圏嵐の予報基準を示す。

3.2.6 電離圏領域—デリンジャー現象

デリンジャー現象は大規模な太陽フレアに伴って発生する短波帯電波による通信の途絶であり、太陽フレアで放射された X 線によって電離圏最下部の D 層(高度 60-90 km 程度)で電離が大幅に進行し、短波帯電波を吸収してしまうことで発生する。デリンジャー現象の予報は太陽フレア予報と関連しており、M クラス以上のフレア発生を予測した場合、デリンジャー現象の発生を考慮して予報を行う。

3.2.7 電離圏領域—スプラディック E 層

スプラディック E 層は、高度約 100 km に局所的かつ突発的に電子密度の高い E 層が形成される現象で、日本付近では春から夏にかけて昼や夕方に発生する傾向にある。スプラディック E 層の発生には、高度 100 km 付近における大気の流れのパターンが重要な役割を担っていることから、厳密には宇宙天気の枠組みには収まらないが、アマチュア無線家やラジオ放送愛好家からは、通常不可能な遠距離通信や放送受信を可能とってくれる現象として歓迎される存在でもある。スプラディック E 層は現在、現況ベースでの予報を行っており、日本各地(稚内、国分寺、山川、大宜見)のイオノゾンデ観測施設における Es 層臨界周波数(foEs)の最大値が 8 MHz を超えた場合、スプラディック E 層が発生すると予報している。

3.3 イベント通報サービス

イベント通報サービスは、定められた基準値を上回る宇宙天気現象が発生した場合に、自動メール配信システムを通じて即時に現象発生を通知する業務サービスである。現在自動通報される現象は、太陽フレア開始速報、太陽フレア速報、プロトン現象速報及び放射線帯電子速報の 4 種類である(表 10)。

表 7 電離圏嵐予報レベル

予測される I-scale	電離圏嵐予報レベル
2 時間以上継続して I_p2 以上または I_N2 以下の乖離とならない	1: 静穏
I_p2 または I_N2 が 2 時間以上継続	2: 活発
I_p3 または I_N3 が 2 時間以上継続	3: 非常に活発

表 8 デリンジャー現象予報レベル

予測されるデリンジャー現象の発生確率	デリンジャー現象予報レベル
30 % 未満	1: 静穏
30 % 以上 50 % 未満	2: やや高い
50 % 以上	3: 高い

表 9 スプラディック E 層予報レベル

予測される foEs 国内最大値	スプラディック E 層予報レベル
8 MHz 未満	1: 静穏
8 MHz 以上	3: 非常に活発

表 10 イベント通報サービス一覧

イベント	イベント検出条件	速報の内容
太陽フレア開始速報	X 線強度レベルが M クラス(活発)以上に達した場合	開始時刻
太陽フレア速報	M クラス(活発)以上のフレアが終了した場合	開始・最大・終了時刻
最大強度		
プロトン現象速報	10 MeV のプロトン粒子フラックスが 10 PFU 以上に達した場合	開始・最大・終了時刻
最大フラックス		
放射線帯電子速報	2 MeV 以上の電子の 24 時間フルエンスが高いレベル以上及び非常に高いレベル以上に達した場合	開始・終了時刻

4 宇宙天気予報業務の今後の展望

これまで紹介してきたように、NICT における宇宙

*10 <https://swc.nict.go.jp/knowledge/i-scale.html>

天気予報業務は、最先端の宇宙天気研究を踏まえ絶えずアップデートされており、人類社会の宇宙進出に向けて、より精度の高い宇宙天気予報業務を実現するべく発展を続けている。深層学習を用いた太陽フレア発生予報 [16] がより進展することで、デリンジャー現象やプロトン現象といったリードタイムが短い宇宙天気現象に対しても予報を行うことが可能になると期待される。また、太陽表面でのフィラメント噴出現象の予測手法 [23] を宇宙天気予報業務に取り込むことで、フレアを伴わない噴出現象については CME の発生予測につなげることができる。

太陽風予測に関しては、数値シミュレーション [17] にアンサンブル予測を組み入れることで、高速太陽風や CME の到来を確率的に予報することが可能となる。また、宇宙天気予報を観光資源に結び付ける手法として、磁気圏 MHD シミュレーション [24] 及び経験モデルを用いたオーロラ予報 [25] が注目される。さらに、将来的に重要性がさらに高まるとみられるのが、航空機への宇宙線被ばく線量率を推定し警報を発信するシステム「WASAVIES[26]」である。新世代の超音速旅客機が就役する近い将来、このシステムによって空の安全が担保されるようになると期待される。また、予報全般に関して、現在の活動レベルの予報から確率予報への移行も検討されている [15]。より業務に近い部分に関して取り上げると、本部（小金井）のバックアップ機能をもつ神戸副局を更に拡充させ、より高いレジリエンス（耐障害性・障害回復力）を備えた宇宙天気予報業務システムを構築することが求められている。NICT における宇宙天気予報業務はいまだ発展途上にあり、国際的な協力の下、持続可能な開発目標（SDGs）を踏まえて更なる飛躍を期したい。

謝辞

本業務は、総務省委託業務「0155-0099 電波伝搬の観測・分析等の推進」によって行われたものである。

【参考文献】

- 1 井上信雄, “情報通信技術はどのように発達してきたのか,” ベレ出版, 2016.
- 2 石井 守, “地上 ICT に役立つ「宇宙天気予報」〈1〉,” 電波技術協会報, 2020.
- 3 滝澤 修, “我が国における宇宙天気予報の前史～電離層観測の黎明期を中心に～,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 5-5, 2021.
- 4 滝澤 修, “平磯無線 100 年の前半史, 平磯の 100 年～その歩みと回想集～,” 2015.
- 5 丸橋克英, “平磯無線 100 年の後半史, 平磯の 100 年～その歩みと回想集～,” 2015.
- 6 大林辰蔵, “電波警報について,” 電波研究所季報 第 1 巻 第 1 号, 1954.
- 7 長妻 努, 大山きよ子, 岡野朱美, 秋岡眞樹, “宇宙環境予報業務,” 通信総合研究所季報, vol.43, no.2, 1997.

- 8 木所 常一, 森 弘隆, “電波警報業務の概要,” 電波研究所季報, 第 32 巻, 第 162 号, 1986.
- 9 塩田大幸, 坂口歌織, “過去の宇宙天気資料電子化プロジェクト,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 5-4, 2021.
- 10 川崎和義, “テレホンサービスシステムのこれまでの運用,” 通信総合研究所季報, vol.48, no.4, 2002.
- 11 久保勇樹, “解説 宇宙天気予報,” 電気学会誌, 140 巻, 2 号 pp. 96-99, 2020.
- 12 徳丸宗利, 川崎和義, “宇宙天気予報のための宇宙環境モニターデータ伝送システムの開発,” 通信総合研究所季報, vol.39, no.2, 1993.
- 13 秋岡眞樹, 近藤哲朗, 佐川永一, 久保勇樹, 岩井宏徳, “宇宙天気予報のための可視光と電波による太陽観測,” 通信総合研究所季報, vol.48, no.4, 2002.
- 14 石井 守, 田 光江, 長妻 努, “宇宙天気の国際動向,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 5-3, 2021.
- 15 久保勇樹, “地上 ICT に役立つ「宇宙天気予報」〈2〉,” 電波技術協会報, 2020.
- 16 西塚直人, “太陽フレア発生予測,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 4-3, 2021.
- 17 塩田大幸, “太陽嵐到来予測システム,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 4-1, 2021.
- 18 田 光江, “高速太陽風予測のための数値シミュレーション,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 4-2, 2021.
- 19 D. Odstrcil, “Modeling 3-D solar wind structure,” Adv. Space Res., vol.32, no.4, pp.497-506, 2003.
- 20 陣 英克, “全球大気圏 - 電離圏シミュレーション,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 2-3, 2021.
- 21 濱田一輝, “詳解 ウルシグラム・コード,” CQ 出版, Nov., 1984.
- 22 M. Nishioka, T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii, “A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics,” Space Weather, vol.15, no.1, pp. 228-239, 2017.
- 23 D. Seki, K. Otsuji, H. Isobe, T. T. Ishii, K. Ichimoto, and K. Shibata, “Small-scale motions in solar filaments as the precursors of eruptions,” PASJ, vol.71, no.3, 2019.
- 24 中溝 葵, “磁気圏 MHD シミュレーションの研究開発,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 3-1, 2021.
- 25 坂口歌織, “オーロラ予報「オーロラ・アラート」,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 3-4, 2021.
- 26 久保勇樹, 佐藤達彦, 片岡龍峰, 塩田大幸, 石井 守, 保田浩志, 三宅 晶子, 三好由純, “太陽放射線被ばく警報システム WASAVIES の開発,” 情報通信研究機構研究報告, vol.67, no.1, 本特集号, 4-4, 2021.



大辻賢一（おおつじ けんいち）

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
研究員
博士（理学）
太陽物理学



久保勇樹（くぼ ゆうき）

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
研究マネージャー／
宇宙天気予報グループ
グループリーダー
博士（学術）
太陽物理学、予報評価技術