1 緒言 宇宙天気研究の現状と展望

1 Introduction: The Status and Future Aspect of NICT Space Weather Research and Operation

石井 守

ISHII Mamoru

前回、宇宙天気予報特集号を発行した 2010 年以降、様々な要因により宇宙天気の社会的な必要性が急激に増大してきた。この期間における宇宙天気研究及び宇宙天気予報業務をめぐる国内外の動向及び NICT 宇宙環境研究室が行ってきた研究活動について概観する。

The necessity of space weather research and operation has been steeply increased since 2010 with various factors. This paper shows domestic and international stream related to space weather research and operation, and the related activities of space environment laboratory, NICT.

1 宇宙天気とは

近年、我々の生活は通信衛星、放送衛星、気象衛星、GPS衛星など宇宙空間を利用した社会インフラシステムに依存するようになってきている。GPS衛星による精密測位や電離圏による反射を利用した長距離無線通信においても、宇宙環境の影響を電離圏のじょう乱を通して受ける。また、国際宇宙ステーションや民間会社による宇宙旅行計画など人類が宇宙空間を訪れる機会も徐々に増えつつある。

図1は、太陽から到来する現象と地球周辺の宇宙空 間の構造をまとめるとともに、そのじょう乱が社会影 響に至る過程を示している。太陽からは「太陽風」とい う常に吹き出されるガス(プラズマ)流があり、地球に 到来する太陽風は絶えず変化している。さらに太陽の 大気「コロナ」では、時折「太陽フレア」と呼ばれる大規 模な爆発現象が発生し、X線・紫外線をはじめとした 広範囲の波長帯の「電磁波」が増加するとともに、太陽 放射線(宇宙線)と呼ばれる「太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particle: SEP)」が放出される。さら にはコロナガス (プラズマ) が大規模に放出される「コ ロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection: CME) 」現象が 発生し、惑星間空間を流れる太陽風の中を膨張しなが ら太陽から外に向かって伝播する。このように電磁 波・放射線・プラズマ流(太陽風・CME)の3種類の 現象として太陽からの影響が地球に到来する。一方で 地球では通常は地球の磁場や大気がこれらの影響に対 するバリアの役割を果たしている。地球の磁場によっ て太陽風プラズマの侵入が妨げられている空間を「磁

気圏」という。また高層大気による吸収によって X 線・紫外線や高エネルギー粒子の地表への到達を防いでいる。紫外線の吸収などの効果で一部の粒子が電離された状態で存在する層があり、これを「電離圏 (電離層)」という。磁気圏には「放射線帯」という、高エネルギーの粒子 (静止軌道付近の組成は主に電子)が地球の磁場に捉われて存在する領域がある。

太陽から地球に到来するじょう乱の強度や太陽風中の磁場の向きなど諸条件によっては地磁気のバリア機能が低下し、地球周辺の宇宙環境にじょう乱が引き起こされる。例えば、ある一定の値よりも高いエネルギーをもつ太陽放射線粒子は、磁気圏に侵入し、宇宙飛行士の被ばく、衛星の半導体機器の誤動作や太陽電池劣化を引き起こす(図1)。放射線帯の高エネルギー電子が増加すると静止衛星の帯放電頻度が上昇し衛星

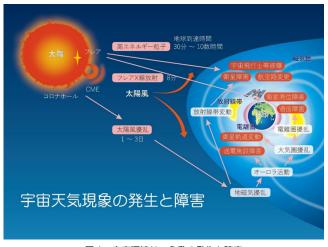


図1 宇宙環境じょう乱の発生と障害

1

の不具合につながるリスクが上昇する。さらに、影響は宇宙空間のみにとどまらず、じょう乱は磁気圏から 電離圏へ伝わり、航空機の運航や通信・放送インフラ などにも影響する。極めて強い磁気嵐に伴う誘導電流 は地上の送電設備に障害を与えることがある。

「宇宙天気」は太陽から地球に至る電磁環境を含む状況を指す。この中には人類の健康や社会インフラに影響を与える宇宙放射線や地磁気嵐などの宇宙環境変動を含む。

宇宙天気研究における過去 10 年間の 2 国内外の動向

2010年以降、宇宙天気研究をめぐる国内外の動向は非常に激しく変動し、その影響は我々の研究活動にも大きなものとなった。

2011年3月11日に発生した東日本大震災は我が国 の社会に甚大な被害を及ぼすと同時に、想定外の自然 災害に対する再検討の必要性が強く求められた。経済 産業省は電気設備自然災害等対策ワーキンググループ の中間報告書(2014年6月)において、現在の電気設備 及び電力システムの体制を評価し、自然災害に強い電 気設備及び電力システムの在り方等の検討を行った。 この中で、太陽フレアの発生による電気設備への影響 に至るメカニズムを把握するとともに、現行の保安水 準の調査を行う必要があるとされた。これを受ける形 で、2015年2月に「太陽フレアによる地磁気誘導電流 に関する調査検討委員会」が設置され、太陽地球環境 研究の専門家と電力工学の専門家による議論がなされ た。宇宙天気分野での現業機関との検討は当時非常に 珍しく、その後の議論の先駆け的な位置づけとなった [1]。

総務省では、2016年に「宇宙×ICTに関する懇談会」が発足し、ICTを活用した宇宙利用のイノベーションがもたらす新たな社会像やその実現方策を検討し、我が国における戦略的な宇宙利用分野のイノベーションの創出を目指すこととした。この中で宇宙環境計測分野は、宇宙通信や時空計測、リモートセンシングと共に測位や通信、保険業界との検討が進められた[2]。

2015年には科学研究費補助金・新学術領域研究の枠組みで「太陽地球圏環境予測:我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成」(略称: PSTEP)が採択され、100名を超える国内外の研究者が参画するプロジェクトとなった。PSTEPは総括班と4つの活動班(予報システム班、太陽嵐班、地球電磁気班、周期活動班)から形成され、予報システム班はNICTの宇宙天気予報業務を軸として、他の班で得られた最先端の研究成果を業務に展開する懸け橋として

の役割を担った。この活動の中で、航空機被ばく推定システム (WASAVIES) や電波伝搬シミュレータ (HF-START)、衛星帯電推定モデル (SECURES) など多くのアプリケーションの開発がなされると同時に、ユーザーとの双方向コミュニケーションの場として「宇宙天気ユーザー協議会」の設立等が進められ、太陽地球環境研究において基礎研究から社会実装までが一貫して検討される体制が形成された [3]。

2017年9月に発生した一連の大規模太陽フレアは過去11年ぶりの規模ということもあり、社会影響も懸念されたことから NICT からプレスリリースを行った。これに対する社会の関心は非常に高く、報道各社からの取材が非常に多かったため共同記者会見を開催することとなった。このイベントによる実際の社会活動に対する影響は小さかったものの、我が国として太陽活動に対する備えを充実させる必要性が検討され、宇宙天気監視の 24 時間運用などその後の宇宙天気監視体制の強化につながった。

また国際的には2004年頃から国連の専門機関である国際民間航空機関(ICAO)での宇宙天気情報の航空への利用の検討が進められてきた。具体的には、短波通信・衛星測位及び人体被ばくについて太陽活動による懸念がある領域について現況及び最大24時間後までの予報情報を航空運用事業者に提供し注意を促すサービスを行うものであり、これに関係する運用方法や体制を検討してきた。その結果、2019年11月7日から宇宙天気情報が航空運用に必要な情報として航空関係各機関への提供が開始された(国際動向については別章に詳細を記述)[4]。

2018年11月1日にサービスを開始した準天頂衛星システムによって、高精度衛星測位による様々なサービスが期待される一方で、測位精度に対して電離圏じょう乱が影響を与えることが知られつつあり、電離圏のリアルタイム監視の必要性が高まっている。

NICT における過去 10 年間の 宇宙天気研究方針と成果

図2は、2012年に第3期中長期計画の中で宇宙環境インフォマティクス研究室が示した研究コンセプトを表す。研究における共通の最終目標として「宇宙天気予報精度向上」を設定し、そこに向けて、当時研究室内で最も対外競争力の強かったモデル・シミュレーションコード開発をコア技術として位置づけ、観測については開発要素のあるものも含めてモデルへの入力及び検証を目的とするものと位置付けた。モデルについては経験モデルと数値モデルを並列で開発し、未知のプロセスを有する宇宙天気予報を行うため経験モデ

宇宙環境ロードマップのコンセプト

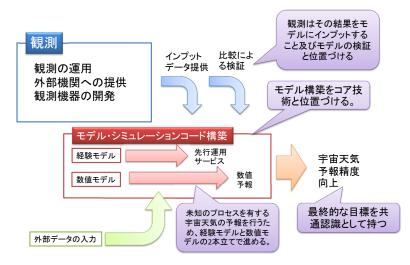


図 2 第 3 期中長期計画における宇宙環境インフォマティクス研究室の研究コンセプト

表 1 宇宙環境研究室がこれまで開発してきた、宇宙環境に関する各領域のモデル及びアプリケーション

	太陽・太陽風	磁気圏	電離圏
観測	太陽電波観測	沖縄磁力計	国内定常電離圏観測
	(SDO·SOHO·野辺山)	(気象庁磁力計・GOES)	SEALION (GEONET)
数値モデル	REPPU-SUN	REPPU-MAGNETOSPHERE	GAIA
	SUSANOO		
AI・経験モデル	DeFN	放射線帯モデル	電離圏予測モデル
アプリケーション	WASAVIES	SECURES	HF-START

ルを先行させ、数値モデルによる数値予報を、時間を かけて開発する戦略とした。

このコンセプトはその後、人工知能(AI)の研究が活発になるにつれて経験モデルの位置づけがより強化されたこと及び開発された技術を宇宙天気予報業務及びユーザーの利用につなげるためのアプリケーション開発が追加されたことなどの改訂を経つつ、第4期中長期計画にも引継がれた。本特集号で紹介される各研究課題と成果は、ほぼこのコンセプトに沿ったものとなっている。主な成果について、太陽・太陽風、磁気圏、電離圏の各領域で開発された項目を表1に示す。

NICT における今後の宇宙天気研究の 展望

2021年に第5期中長期計画が開始されるにあたり、 宇宙環境研究室が検討したコンセプトを図3に示す。

太陽・太陽風、磁気圏、電離圏それぞれにおいて観測・予測及び情報提供に至るまでの研究を遂行するコ

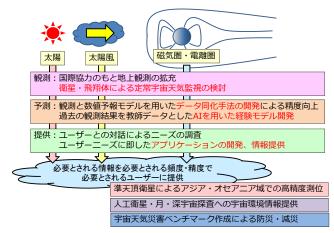


図3 第5期中長期計画における宇宙環境研究室の研究コンセプト

ンセプトはこれまでの形を踏襲している。この中で特に重点的に取り組む手法として、(1) 衛星・飛翔体による定常宇宙天気監視、(2) データ同化手法によるリアルタイム宇宙天気予報、(3) AI を用いた予測モデル開発の3本柱を設定している。また、これらのアウトカム

1 緒言 宇宙天気研究の現状と展望

として、(1) 準天頂衛星システムによるアジア・オセアニア域での高精度測位について電離圏じょう乱の影響を軽減する技術開発によるビジネス化の展開、(2) これまで行ってきた地球近傍の宇宙天気環境のみならず、月・深宇宙探査に向けての情報提供を可能とする技術開発及び(3) 宇宙天気災害に対するベンチマークの精緻化を進めることで社会活動の安定に寄与することを挙げている。

【参考文献】

- 1 "平成 26 年度電気設備技術基準関連規格等調査役務請負報告書,"一般財団法人エネルギー総合工学研究所, 2015.
- 2 宇宙×ICTに関する懇談会,総務省, https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/space-times-ICT/index.html
- 3 太陽地球圏環境予測一我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成,名古屋大学宇宙地球環境研究所,https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/pstep/index.html
- 4 国際民間航空機関 (ICAO) に対して宇宙天気情報の提供を開始, NICT 報道発表, https://www.nict.go.jp/press/2019/11/07-2.html



石井 守 (いしい まもる) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 研究センター長 博士(理学) 超高層物理学、大気光学・電波観測