



講座 宇宙天気研究に基づく社会インフラ防護と被害予測

2. 宇宙天気予報の動向

2. The Trend of Space Weather Forecast

石井 守

ISHII Mamoru

情報通信研究機構

(原稿受付: 2023年11月26日)

宇宙天気とは、活発な太陽活動による地球近傍の宇宙空間の変動であり、通信・放送・測位・電力・航空運用・衛星運用等、我々の社会活動に大きな影響を与えることがある。特に近年の高度 ICT 社会においては、過去にない大きな災害となるリスクが潜在する。このため、各国および国連を始めとする国際機関において、その対策が検討されている。

Keywords:

space weather, social infrastructure, ionosphere, magnetosphere, sun and solar wind, GNSS, satellite anomaly, geomagnetically induced current

2.1 背景

宇宙天気とは、活発な太陽活動を主な源としてもたらされる地球近傍の宇宙空間の変動のことである。太陽面の爆発現象である太陽フレアを例にとってみると、紫外線やX線、相対論的な速度で宇宙空間に放出される電子や陽子、コロナガスと呼ばれる高温プラズマが時間差をもって発生するため、これらが地球に与える現象は少しずつその様相を変えながら数日間にわたって私たちの生活に影響を与える(図1)。

通信や測位などで使われる電波伝搬に影響を与える宇宙天気現象は高い頻度で発生している一方、衛星運用や電力供給に影響を与える現象は発生頻度は下がる。しかしながら、後者に影響が出た場合には社会的な損失が甚大になるため、無視することはできない。

近年、我が国を含む各国および国際機関において、極

端に大きい宇宙天気現象を災害として位置付け、その対策を検討する活動が進められている。本章ではその現状と将来の方向性について報告する。

2.2 宇宙天気による社会インフラ影響および防護についての我が国の取り組み

我が国では、文部科学省新学術領域研究「太陽地球圏環境予測(PSTEP)」(2015-2019)において、情報通信研究機構(NICT)は予報システムを中心に各分野に参画し、この枠組みの中で、「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」を2020年10月にWeb公開した[1]。

更に2022年1月には、総務省に「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」(座長:草野完也 名古屋大学宇宙地球環境研究所長)が設置され、宇宙天気現象の観測・分析・予測・警報の強化の在り方、社会インフラに対する影響と対処の在り方、および政策的な在り方等について検討された。計10回の議論の検討結果を取りまとめた報告書が2022年6月に公開された[2]。本報告書は、我が国が発行するものとしては初めての宇宙天気に関する報告書であり、極端な宇宙天気現象(100年に1回またはそれ以下の頻度で発生するものを想定)がもたらす最悪シナリオや、国外でも例がない社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準の検討結果が示された。

2.3 宇宙天気現象による社会インフラの被害予測

我々の社会に影響を与える太陽活動にはいくつかの種類があるが、最も大きな影響を与えるものの一つが太陽フレアと呼ばれる太陽面での爆発現象である。太陽フレアの発生により、(1)X線や紫外線等の電磁波、(2)相対論

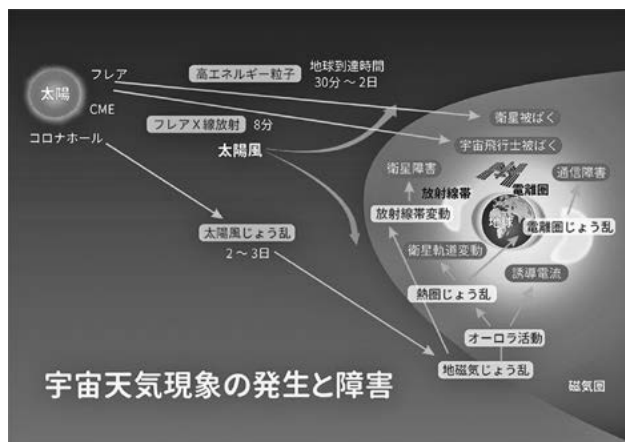


図1 宇宙天気現象の地球到来の時間差とその影響。

National Institute of Information and Communications Technology, TOKYO 184-8795, Japan

author's e-mail: mishii@nict.go.jp

的な高速で放出される高エネルギー粒子、(3)コロナガスと呼ばれる電気を帯びた(プラズマ状になった)高温のガス、が放出される。これらはそれぞれ異なる速度を持っており、地球への到達は(1)が8分程度、(2)が30分程度で到達し最大数日間継続、(3)が2~3日程度となっている(図1)。これは、一回の太陽フレアの影響が8分後から最大3日後程度まで時間差をもって現れることを意味している。

また、太陽フレア等が直接のトリガーではない電離圏の乱れとして、スプラディックE層やプラズマバブルが知られており、主に通信・放送・測位などの電波伝搬に影響を与える(図2-5)。

これらの現象により影響を受ける社会インフラは大きく分類して以下のようになる

- (a) 通信・放送・測位などの電波伝搬利用
- (b) 衛星運用
- (c) 電力網への影響
- (d) 航空運用

次に、これらについて概要および、総務省で検討された報告書に記載された最悪シナリオを抜粋して紹介する。障害の発生メカニズム等の詳細については本章に続く記事にて解説される。

2.3.1 通信・放送・測位などの電波伝搬利用への影響

通信・放送のうちHF(短波:3-30MHz)を用いたものは、

電離圏と地上の拠点を繰り返すことで比較的小さな出力で中継所等を用意することなく地球規模の長距離伝搬を行うことが可能である。電離圏とは、高度60-1,000 kmで地球全体を取り巻く領域であり、太陽放射により常に電離している。この電離により短波を反射する性質を持っているが、その状況は太陽活動に大きく影響を受け、太陽活動が活発になると大きな乱れを生じて伝搬できない状況が発生することがある。

衛星測位に使用されるマイクロ波(L帯:0.5-1.5GHz)は衛星から地上の受信機に到達する経路上で電離圏を通過するが、電離圏が乱れて通常よりも電子密度が増加すると伝搬時間に遅延が生じて見かけ上の距離を長く見積もることになり、その結果位置決定誤差が生じる。また電離圏の乱れによりシンチレーション(散乱)が生じ、地上の受信機が安定した信号の受信ができなくなる現象も発生する。

これに加えて、太陽フレア発生8分後に地球に到達する電磁波は非常に広い周波数帯に広がっているため、携帯電話を含む多くの種類の無線通信が断続的に使用困難になることが考えられる。

2.3.2 衛星運用への影響

宇宙天気の影響としての衛星運用への影響としては、主に電離圏による衛星帯電、高エネルギー粒子によるシングルイベント、中性大気の急激な膨張による姿勢・軌道の変動お

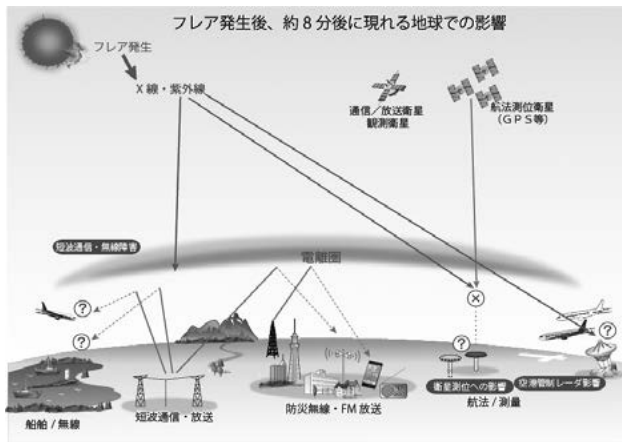


図2 太陽フレア発生後8分後の影響。

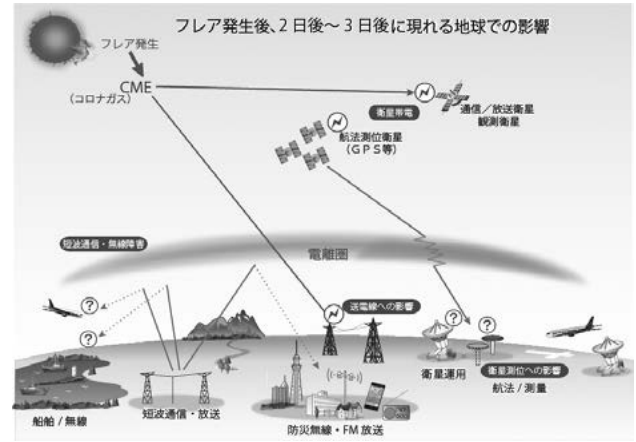


図4 太陽フレア発生後2-3日後の影響。

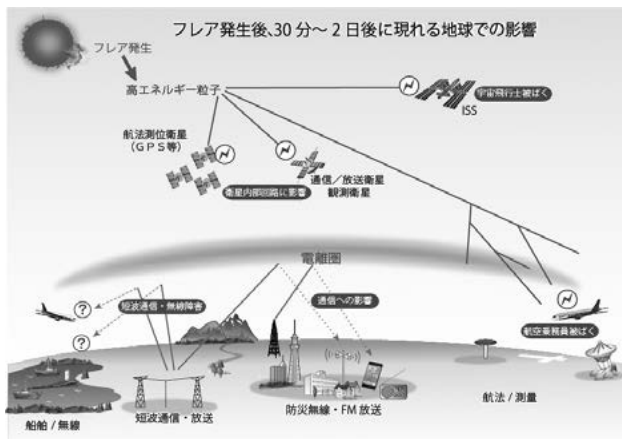


図3 太陽フレア発生後30分後の影響。

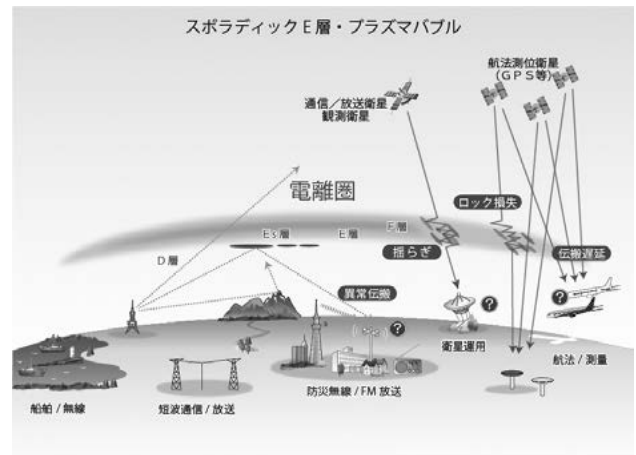


図5 太陽フレアに依存しない影響。

よび太陽放射線による材料劣化などが挙げられる。

衛星帯電は、衛星の表面に電荷が蓄積しそれが放電することにより太陽パネルの回線等に過大な負荷を与え、最悪の場合には断線を引き起こす現象である。シングルイベントは高エネルギー粒子が衛星の電子回路を通過する際に信号のビット反転を発生させる現象で、予期せぬ誤作動の原因となる。

これにより、最悪の場合には、全ての衛星について慎重な運用を強いられ、安全モードへの移行により衛星の機能が大幅に制限される。その結果、気象・通信・放送・測位衛星の利用制限により、それぞれのサービスの劣化が想定される。また観測衛星の利用制限により、リモートセンシング（農業、植生、都市計画、資源探査、海洋監視、防災、防衛等）の利用が困難になる。また衛星の太陽電池の劣化が急激に進行し、衛星の寿命が大幅に短くなる。

地磁気嵐によって密度が増した大気による抵抗を受けるため、低軌道で運用される衛星については、衛星の軌道に異常が生じて軌道の予測が困難になり、他の衛星やデブリ等と衝突するリスクが増大することが想定される。

2.3.3 電力網への影響

磁気圏じょう乱により、発電所や変電所の変圧器の中性点間の電位差を解消しようと、中性点を通して地磁気誘導電流（GIC）が流れる。中性点にゆっくりと変動する電流が流れると変圧器の動作点がずれ、変圧器でのロスにより変圧器が過熱したり、高調波が発生して、保護用リレーの誤動作を起こしたりすることが知られている。GICによる影響には以下のようなものがある [3]。

- 鉄心からの漏洩磁束による鉄心付近の加熱及び加熱による絶縁オイルの劣化
- 無効電力の増加による電圧の低下
- 波形歪による高調波の発生
- 保護リレーの不要動作

この結果、最悪の場合にはGICに対する対策を十分に取っていない電力システムにおいては停電を含むサービスの低下が想定される。

2.3.4 航空運用への影響

航空運用における宇宙天気現象の影響としては、現在国連の専門機関であるICAO（International Civil Aviation Organization: 国際民間航空機関）において、短波通信・衛星通信・衛星測位・人体被ばくが検討されてきた（詳細後述）。このうち衛星通信を除く3項目については、2019年11月よりICAOグローバル宇宙天気センターによるアドバイザー配信サービスが開始されている。

衛星測位精度が劣化した場合でも衛星測位に頼らないシステムへの切り替えにより航空機運用は可能なものの、通常レベルの運航頻度を維持することができなくなるため、全世界的に運航見合わせや減便が発生することが想定される。また高緯度領域での飛行に伴う乗務員等の人体被ばくを避けるため、迂回航路を選択することに伴い飛行時間が長くなり消費燃料も増加する。

航空管制レーダーが太陽電波バーストの影響を受けて

使用困難となり、観測能力の低下が各地域で2週間にわたり断続的に発生する可能性が高くなる。これに伴い、数時間単位での出発便の空港待機、到着便の上空待機が断続的に発生し、運行スケジュールや計画が大幅に乱れる。混乱や事故リスクを避けるため、航空機の運休や空港閉鎖が発生する可能性が高まる。

2.4 社会インフラ防護の検討

2.4.1 我が国の検討状況

[2]に示した総務省検討会の報告書においては、我が国における宇宙天気影響に対する対処を各分野について検討した。基本的な考え方としては、

- 高度な社会インフラにより我々の文明が発展し続けるなか、ひとたび大規模な宇宙天気現象が発生した場合には、「文明進化型の災害」として社会経済に多大な被害をもたらすおそれがある。
- 我が国は、国、関係企業・関係団体、学術界等が、安全・安心な社会経済の実現に向けて宇宙天気に関するリスクを理解し、効果的な対策を講じていくべきである。
- この人類として未知な宇宙現象への対処は数十年、数百年単位の地道な積み重ねと国際協力により達成できるものである。このため、時間軸及びグローバル化の観点において我々の取組が持続可能であることが重要であり、そのためにも確固とした産学官の連携体制を整えるべきである。

としている。また、社会インフラにおける今後の対策としては、

- ア. 専門組織の設置、専門人材の配置、宇宙天気現象に対する社内の理解増進
- イ. 被害発生時の事前想定、インフラの脆弱性評価、リスク評価
- ウ. 評価を踏まえた事前対策の実施、耐性の強化、代替手段の確保
- エ. 被害発生時の対応マニュアル、所管省庁への被害報告手順、復旧・回復計画等の整備、自社の事業継続計画（BCP）への反映
- オ. 定期的な訓練・演習の実施、訓練後の振り返り
- カ. 宇宙天気予報等の専門サービスの活用
- キ. リスクファイナンス（損害保険等）の活用
- ク. 分野（業界）ごとの標準ガイドラインの策定、演習方法やそのガイダンスの開発
- ケ. 社会インフラにおける現象の共同観測、共同モニタリング
- コ. 国民や消費者に対する周知啓発（インフラ被災時の二次的影響に関する情報）

が挙げられている。また、インフラの脆弱性・リスク評価、行動のための判断基準、インフラの強靱化対策、不具合発生時の対処計画、復旧計画等について、標準的なガイドラインが分野毎に共同で策定されることが望まれるとしている。

2.4.2 各国の動向

宇宙天気による災害が実際に発生するかどうか、また

発生した場合の被害想定や対策等、社会への定量的な影響について、米国や英国をはじめとする各国や国際機関では2015年頃から議論が活発化し、国家戦略や報告書等が発表されている。

歴史に記録されている最大の宇宙天気現象であるキャリアントン・イベントと同じクラスのイベントが発生した場合の経済損失についてスイスの保険会社“SWISS-Re”が試算を行っている。その結果によると、欧米など高緯度地域を中心に、3000億ドルほどの被害が想定され、東日本大震災の経済損失(1000-2500億ドル)を上回る[4]。

これらの状況より、米国は宇宙天気を地震や津波などの災害と並べ、米国戦略的国家危機評価(US Strategic National Risk Assessment)の一つとして位置付けている。2015年には米国内の20を超える機関、50人を超える専門家によって作成されたNational Space Weather StrategyおよびSpace Weather Action Planが発表された[5](2019に改訂[6])。2016年以降、このAction Planを受けて米国国務省が極端現象に関する国際協力の枠組みの構築のための研究会を他国と連携して行うなど、活発な活動が展開されている。2018年には、“Space Weather Phase 1 Benchmarks”が刊行され、誘導地電流、電磁放射線、電離圏じょう乱、太陽電波バースト、大気膨張についてのベンチマークテストを示している[7]。

欧州では特に英国が宇宙天気の社会影響についての文書を盛んに発表している。2013年にはRoyal Academy of EngineeringがExtreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructureを発表し、極端現象の社会影響について報告した[8]。その後英国Cabinet officeによるNational Risk Register(2015年[9])、Space Weather Preparedness Strategy(2015年[10])が相次いで発表された。

アジアでは韓国未来創造科学部が2013年に「宇宙電波障害」危機管理マニュアルを発表した。

2.4.3 国際機関の動向

2009年頃を境に、国連の複数の機関で宇宙天気に関する議論がほぼ同時に盛んになり、ワーキンググループの設立が相次いだ。

2.4.3.1 世界気象機関(WMO)

世界気象機関(World Meteorological Organization; WMO)は2009年に宇宙天気プログラム間調整チーム(Inter-programme Coordination Team on Space Weather; ICTSW)を設立、後述する国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization: ICAO)への情報入力の特任組織として重要な役割を果たした。また、ICTSWは2015年からの4か年計画を検討しており、その中では組織の定常化が提案されて2015年に定常組織としてIPT-SWeISS(Inter-Programme Team on Space Weather Information, Systems and Services)に発展、2022年にET-SWxに組織を替え[11]、現在に至る。

2.4.3.2 国際民間航空機関(ICAO)

ICAO[12]では、民間航空機の運航における宇宙天気情報利用の義務化を検討してきた。これは主に、極域航

路が増大する中で宇宙天気現象による短波通信、衛星測位および宇宙放射線被ばくのリスクを回避することを目的としている。2011年11月に航空機運航に必要とされる宇宙天気情報に関して国際航空運送協会(International Air Transportation Association: IATA)からICAOに検討要望の書簡が発出され、議論が開始された。議論の結果、運用コンセプトおよび、航空運用に使用される気象情報を規定している国際民間航空条約第3付属書(Annex3)が改定された。これと並行して、情報を提供する組織の選定が進められてきた。2017年6月にICAOから加盟国に対して情報提供についての関心の有無を問うステートレターが発信され、22か国がこれに関心を表明した。書面審査、対面審査を経て、2018年11月に3つの組織がICAO Space Weather Global Centerとして承認を受けた(米国、PECASUS(フィンランド、オーストリア、ベルギー、キプロス、ドイツ、イタリア、オランダ、ポーランド、英国)、ACFJ(オーストラリア、カナダ、フランス、日本))。その後調整会議を1年間重ね、2019年11月7日にサービスが開始された[13]。現在はこれに中国・ロシアのコンソーシアム(CRC)がグローバルセンターとして加盟し4センターでの運用を続けている。

2.4.3.3 宇宙平和利用委員会(UN/COPUOS)

もう一つの国連における活動としては、宇宙平和利用委員会(Committee on the Peaceful Uses of Outer Space; COPUOS)[14]が挙げられる。国連宇宙空間平和利用委員会(UN/COPUOS)は1959年の国連総会決議(1472)「宇宙空間の平和利用に関する国際協力により設立された国連総会直属の常設委員会である。会議はオーストリア・ウィーンにおいて開催され、本委員会(毎年6月頃に開催)のもとに、科学技術小委員会(毎年2月頃に開催)及び法律小委員会(毎年4月頃に開催)がおかれ、宇宙活動に関する諸問題に対し、それぞれ技術的側面及び法的側面からの検討等を行っている。2020年3月時点、日本を含む95カ国が加盟している。

2010年から「宇宙活動の長期持続可能性(LTS)」という議題の下、宇宙活動を長期的に持続可能な利用のために自主的に遵守すべき「ガイドライン」の制定をめざし、ワーキンググループが設置された。2019年6月21日、COPUOS本委員会として21のLTSガイドラインを正式に採択すると共に、科学技術小委員会の下にこれらガイドラインの実施及び新たなガイドラインの可能性等を議論するワーキンググループが設置されることが決定された。21のLTSガイドラインのうち、B.7として「宇宙天気モデル及びツールの開発並びに宇宙天気による影響の低減のための確立した実行の収集」が制定され、専門家会合によりこの活動が行われている。2020年には加盟各国および国際機関に対して現状の調査を進めた。2022年2月にはその調査結果をもとにDraft final report of the Expert Group on Space Weather: towards improved international coordination for space weather services[15]が提出されるとともに、6つの提言がなされた。この提言において、WMO、ISES、COSPARの3つの国際機

関がリーダーシップを発揮し、関係する国際機関の調整を図ることが示された。現在、この提言の実現に向けた活動が開始され、2023年11月に最初の会合(International Space Weather Coordination Forum: ISWCF)がスイス・ジュネーブのWMO本部において開催された。

2.4.3.4 国連防災機関 (UN/DRR)

国連防災機関 (UNDRR) と国際学術会議 (ISC) は2019年5月、あらゆるハザードに対するリスクや脆弱性を評価するための方法を開発し、各国が自然災害等に対する取組を強化できるようにするため、ハザードの全容を明らかにするプロジェクトをスタートさせた。その結果、専門家グループによりハザードリストが整理され、2021年10月に「HAZARD DEFINITION & CLASSIFICATION REVIEW (TECHNICAL REPORT)」 「HAZARD INFORMATION PROFILES」が成果として公表された。ハザードリストは、①気象・水文ハザード、②地球外ハザード(Extraterrestrial)、③ジオハザード、④環境ハザード、⑤化学ハザード、⑥生物ハザード、⑦技術ハザード、⑧社会的ハザードの8つのクラスターに分類され、合計302種類のハザードが詳細に定義されている。

その中で宇宙天気現象は、「地磁気嵐」、「電離圏嵐」、「太陽フレアによる電波障害」、「太陽風」の4種類が「地球外ハザード」のカテゴリ内で定義され、人命の損失、健康への影響、財産の損害、社会的・経済的混乱などを引き起こすおそれのあるものとして位置づけられている。

2.4.3.5 国際宇宙環境サービス (ISES)

また、国連とは別の組織として、先述したようにIUWDSの活動を引き継ぐ形で1962年より国連国際科学会議 (International Council for Science Union: ICSU) のもとで国際宇宙環境サービスISES[16]が活動している。これは定常的に宇宙天気情報を発信している機関の連合体であり、2023年11月現在23か国およびESAが加盟している。

2.5 今後の展開

宇宙天気の実利用が各方面で明確になってきたことを受け、宇宙天気について学術機関での検討から実業機関でのルール化に移行しているのが現在の状況と思われる。

気象情報同様、実社会で利用されることが宇宙天気の本質であることからこの流れはあるべき姿に近づいているといえるが、そのルール作りには実利用に伴い利用者との調整が不可欠であることから、情勢を正しく把握し、技術的な背景からの提案を的確に行う必要がある。

また、宇宙天気の影響は全世界的に発生するために、国際協力が必須であり、最先端の科学的な知見を活かした国際機関への我が国の貢献が期待されている。

参考文献

- [1] 科学研究費補助金：新学術領域研究「太陽地球圏環境予測 (PSTEP)」 「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」, <https://www2.nict.go.jp/spe/benchmark/>
- [2] 総務省「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」, https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/space_weather/index.html
- [3] 亙 慎一：宇宙天気の電力網の影響と北海道での地磁気誘導電流 (GIC) の測定について, Conductivity Anomaly 研究会論文集, no.1-14, 2015.
- [4] Swiss Re, “Space Weather Impacts a Risk to Society?,” [Online]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u33/NOAAMASTER.pdf>
- [5] National Science and Technology Council, “National Space Weather Strategy,” White house, October 2015. [Online]. Available: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final_national-spaceweatherstrategy_20151028.pdf
- [6] National Science & Technology Council, US Government, “National Space Weather Strategy and Action Plan 2019,” [Online]. Available: <https://www.whitehouse.gov/wpcontent/uploads/2019/03/NationalSpace-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>
- [7] National Science and Technology Council, “Space Weather Phase 1 Benchmarks,” White house, June 2018. [Online]. Available: <https://www.whitehouse.gov/wpcontent/uploads/2018/06/Space-193Weather-Phase-1-Benchmarks-Report.pdf>
- [8] Royal Academy of Engineering, Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure, 3 Carlton House Terrace, London SW1Y 5DC:Royal Academy of Engineering, 2013.
- [9] Cabinet Office, UK, “National Risk Register of Civil Emergencies,” 2015. [Online]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/419549/20150331_2015-NRR-WA_Final.pdf
- [10] Cabinet Office, UK, “Space Weather Preparedness Strategy,” 2015. [Online]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/449593/BIS-15-457-space-weatherpreparedness-strategy.pdf
- [11] WMO, “Expert Team on Space Weather (ET-SWx),” <https://community.wmo.int/en/governance/commission-membership/commission-observation-infrastructure-and-information-systems-infcom/standing-committee-data-processing-applied-earth-system-modelling-and-prediction-sc-esmp/expert-team-space-weather-et-swx>
- [12] ICAO, “International Civil Aviation Organization: ICAO,” [Online]. Available: <https://www.icao.int>.
- [13] NICT, “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,” [Online]. Available: <https://www.nict.go.jp/press/2019/11/07-2.html>
- [14] UN, “COPUOS,” [Online]. Available: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/index.html>
- [15] UN, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, Draft final report of the Expert Group on Space Weather: towards improved international coordination for space weather services, A/AC.105/C.1/L.401
- [16] ISES, “International Space Environment Service: ISES,” [Online]. Available: <http://www.spaceweather.org/>



いし い まもる
石 井 守

所属：情報通信研究機構電磁波研究所総括研究員および名古屋大学宇宙地球環境研究所融合研究戦略室特任教授。1993年京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程修了，博士（理学）。International Space Environment Services (ISES) 議長。地球電磁気・地球惑星圏学会評議員。近年の主な研究分野は宇宙天気予報の社会実装。