

宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会 報 告 書

「文明進化型の災害」に対応した
安全・安心な社会経済の実現に向けて

令和 4 年（2022 年）6 月 21 日

今回の検討会は、過酷な宇宙天気現象が地球全体にもたらす「災害」によって失われる財産や人命が発生することのないよう、安全・安心な社会経済の実現に向けた道程を議論し、今後の行動の在り方を報告書としてとりまとめたものである。

受け身で行動するのではなく、国、関係企業・関係団体、学术界等が団結することで積極的な取組を進める必要があり、それが本検討会に参加した各界を代表する構成員の一致した考え方である。危機管理の強化に向けて必要となる具体的方策が意気込みとともに提言されており、関係者は本報告書を熟読いただき、今後の行動と対策に結びつけていただきたい。

報告書の要約（エグゼクティブサマリー）



宇宙天気が社会経済にもたらすリスク

太陽フレア爆発等によって、通信・放送・測位、衛星運用、航空運用、電力網に異常を発生させ、社会経済に多大な被害をもたらすおそれがある。実際に国内外では、無線通信の途絶、大規模停電、人工衛星の喪失といった被害が発生している。このため、米国や英国では、国家全体が対処すべき「国家リスク」として宇宙天気を明確に位置づけている。



極端な現象がもたらす最悪シナリオと対処

100年に1回またはそれ以下の頻度で発生する極端な宇宙天気現象がもたらす「最悪シナリオ」を検討した結果、我が国の社会経済や国民生活に甚大な被害をもたらすおそれがあることが判明した。このため、国、関係企業・関係団体、学术界は、宇宙天気に関するリスクを理解し、対策を講じていくべきである。

特に、通信業界、放送業界、電力業界、航空業界、宇宙・衛星システム業界等の関係企業は、企業トップ以下がリスクを認識し、行動に着手する必要がある。

また、極端な宇宙天気現象は異常な自然災害であり、災害対策基本法に基づく対応も必要である。



観測・分析・予報・警報の強化

宇宙天気の観測センサーを増やし、分析の自動化・高精度化・知能化を目指すべきである。また、社会的影響を考慮した新しい警報基準を導入することで、社会インフラへの被害リスクを誰でも容易に理解できるようにするべきである。



学術研究、人材、コミュニティ、国際連携の強化

学術研究を強化するとともに、人材育成に力を入れるべきである。また、「宇宙天気予報士」の資格制度を創設するべきである。さらに、この地球的規模の課題にグローバルに対応するべく国際連携を強化するべき。



情報通信研究機構（NICT）に期待される役割

世界トップレベルの研究拠点形成しつつ、企業が抱える課題の解決支援を行うべき。また、宇宙天気予報オペレーションセンター（仮称）を創設するべきである。

目 次

第 1 章 国内外の動向と現状	7
（1）検討の背景	7
（2）「宇宙天気現象」とは	8
（3）国内の動向	11
（4）海外の動向	13
（5）宇宙天気の観測・分析・予報の現状	20
第 2 章 今後の観測・分析・予報の在り方	25
（1）観測体制の在り方	25
（2）分析・予報の在り方	26
第 3 章 警報に関する体制強化	30
（1）警報に関する課題	30
（2）今後の警報伝達の在り方	31
（3）社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準	33
（4）社会インフラからの情報収集の必要性	35
（5）将来の基準見直しの在り方	35
第 4 章 社会インフラへの影響と効果的な対処	37
（1）極端な宇宙天気現象がもたらす最悪シナリオ	37
（2）対処に向けた基本的な考え方	41
（3）社会インフラにおける今後の対処	44
（4）分野別の対処の方向性	48
ア 通信・放送に関する影響	48
イ 衛星測位に関する影響	50
ウ 衛星運用に関する影響	51
エ 航空運用に関する影響	53
オ 電力分野に関する影響	55
カ 人体被ばくに関する影響	57

第5章 学術研究の強化 ----- 59

- (1) 学術研究の重要性と課題 ----- 59
- (2) 今後の学術研究に期待される役割 ----- 60
- (3) 今後の研究開発の課題例 ----- 62

第6章 人材とコミュニティの強化 ----- 64

- (1) 宇宙天気に関する人材の在り方 ----- 64
- (2) 周知啓発等を担うコミュニティ形成 ----- 66
- (3) 宇宙天気に関するアウトリーチ活動の在り方 ----- 67
- (4) 「宇宙天気予報士」制度の創設 ----- 67
- (5) 宇宙天気ユーザー協議会に期待される役割 ----- 68

第7章 国際連携の強化 ----- 70

第8章 NICT に期待される役割 ----- 72

- (1) 世界トップレベルの研究拠点形成 ----- 72
- (2) 企業が抱える課題の解決支援 ----- 73
- (3) 国際連携の強化、アジア太平洋地域での研究連携 ----- 73
- (4) ハブ組織としての人材育成とコミュニティ形成の推進 ----- 75
- (5) 宇宙天気に関するデータ・プラットフォーム構築 ----- 75
- (6) 宇宙天気予報オペレーションセンター（仮称）の創設 ----- 76

【別紙1】 極端な宇宙天気現象がもたらす最悪シナリオ（詳細）

【別紙2】 社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（全分野の一覧）

【別紙3】 社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（通信・放送分野）

【別紙4】 社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（測位分野）

【別紙5】 社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（衛星運用分野）

【別紙6】 社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（電力分野）

【別紙7】 社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（航空機人体被ばく分野）

参考資料

本報告書に用いられる用語の定義

(順不同)

用 語	定 義
宇宙環境	宇宙空間における状態や様子
宇宙天気現象 (宇宙天気)	電離圏や磁気圏、太陽活動の諸現象
社会インフラ	通信システム、放送システム、測位システム、人工衛星、電力網、航空運用等の社会基盤やライフライン
リスク	宇宙天気現象によって直接的に発生する物的被害・人的被害の想定及びこれらの発生確率に関する概念。また、間接的に発生するものとして、経済活動の停止、サプライチェーンの停滞、交通渋滞等の被害も含まれる。
ハザード	宇宙天気現象による被害を引き起こす可能性のある危害要因 (例：高エネルギー粒子、フレア X 線放射、太陽風じょう乱等)
脆弱性	ハザードが発生した場合に社会インフラ等が被害を受ける程度。その社会インフラ等の対策状況、物理的な設置場所、設備の形態・構造・耐性等によって決定づけられる。
宇宙天気予報	宇宙天気現象の観測、予報、警報、通報
観測	自然科学的方法による現象の観察及び測定
予報	観測の成果に分析等を加えることで得られる現象の予想の発表
警報	重大な影響が発生するおそれのある旨を警告して行う予報
観測センサー	宇宙環境の観測に用いる機器、装置、ソフトウェア、構造物等
NICT	国立研究開発法人情報通信研究機構
PSTEP 報告書	「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」(2020 年 10 月 7 日、科学研究費補助金新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」に基づく報告書
イベント	宇宙天気に関して発生する一連の現象

第 1 章 国内外の動向と現状

(1) 検討の背景

- 太陽活動によって通信・放送・測位システム、衛星運用、航空無線、電力網などの社会インフラに異常を発生させ、我々の社会経済活動に多大な影響を与えるおそれがある。太陽活動や電離圏・磁気圏のじょう乱がもたらす宇宙天気の変動は日常的に発生しており、大規模な変動が発生した場合には無線通信の途絶、人工衛星の故障、大規模停電が発生するおそれがある。
- 英国の天文学者キャリントンが発見した 1859 年に発生した強力な太陽面爆発（キャリントン・フレア）と、それに起因した巨大磁気嵐（キャリントン・イベント）に匹敵する大規模な現象が発生した場合、高度な電波利用が普及する現代社会は前例の無い打撃を世界各地で受けるおそれがあると考えられている。
- このため、ロイズがケンブリッジ大学リスク研究センターの研究に基づき公表した「Lloyd's City Risk Index 2015-2025」によると、宇宙天気現象（Solar storm）が全世界にもたらす潜在的な経済的被害は 649.5 億ドル（約 8.1 兆円、1 ドルは 125 円で換算）の規模であり、インフラの強化や保険による保護を行うべきだと提言している。この分析によると、全世界の中で東京が最も大きな経済的被害（24.2 億ドル、約 3,000 億円）を宇宙天気現象によって被ることが予測されている。
- また最近の被害例としては、衛星コンステレーションによりグローバルなインターネット接続サービスを提供している米国 SpaceX 社は 2022 年 2 月、ケネディ宇宙センター（フロリダ州）から 49 機の Starlink 衛星を地球低軌道に打ち上げたものの、地磁気嵐によって密度が増した大気による抵抗を受けたため、そのうちの 40 機が大気圏に再突入し喪失したと発表している。
- こうした宇宙天気現象がもたらすリスクへの産業界等の認知度は低く、社会インフラに対する影響は軽視されてきた。しかし、近年の研究では、そうした認識を改め、社会インフラに生じる被害を再検討する必要があるとの研究結果が現れてきている。また、国連防災機関（UNDRR）と国際学術会議（ISC）は近年、宇宙天気を「対処すべき災害」の一つに位置づけるとともに、主要国では宇宙天気現象に関する国家戦略を相次いで発表するなど、国際社会はリスクに向き合う姿勢を強化している。
- 一方、我が国においては、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が太陽活動や電離圏・磁気圏を観測・分析し、24 時間 365 日の有人運用による「宇宙天気予報」を関係機関に提供している。宇宙天気予報は社会経済の安全・安心に直結する業務であり、社会インフラの安定運用に責任を持つ企業に不可欠なサービスとして重要性が高まりつつある。

- 以上を踏まえ、本検討会では、宇宙天気のリスクに対する国家の対処能力を高めるため、観測・分析・予測・警報の強化の在り方等を検討した。

(2)「宇宙天気現象」とは

- 宇宙天気現象とは、太陽から到来する現象や地球周辺で発生する現象であり、その変動は日常的に発生している。しかし、太陽フレア爆発等、稀に発生する現象によって宇宙空間の状態に大規模な変動が発生し、それらが地球全体に影響を及ぼすことがある。
- その結果、電波を使用する通信・放送インフラの受信障害、航空機が使用する短波通信の途絶、衛星測位の精度劣化、人工衛星の誤動作や太陽電池の劣化、誘導電流の発生による停電、宇宙飛行士や航空機乗務員等の被ばく等の被害を引き起こすおそれがある。
- 現代社会は通信・放送・測位等の社会インフラに大きく依存しており、大規模な宇宙天気現象によってそれらが被害を受けた場合、社会経済や産業活動に及ぼす影響は深刻なものとなる。このため、宇宙天気現象に対する備えを強化することは、世界的に安全・安心な社会の構築に欠かせないものとなりつつある。
- 宇宙天気現象は、複数の現象が連鎖的・複合的に発生するものである。まず、太陽が噴出するものとしては、太陽風と呼ばれる高温の電気を帯びたガス（プラズマ）、高エネルギー粒子、あらゆる波長の電磁波・放射線がある。これらの現象によって衛星の誤動作、宇宙飛行士の被ばく等が発生する。
- また、これらの現象によって地球を取り巻く磁気圏・電離圏が変動した場合、短波等の各種無線通信の障害、衛星の帯電・放電現象、地磁気誘導電流の発生による電力網への影響等が発生する。
- なお、太陽で発生した現象が地球に到達するまでの時間は、現象の種類によって異なる。まず、電磁波・放射線は光の速さで進むことから、現象が発生してから約8分間で地球に到達する。一方、高温の電気を帯びたガスは1日～5日程度かけて地球に到達する。このように地球が受ける影響は現象の種類により時間差があり、かつ、異常現象を探知すると同時に被害が発生する場合があるため、事前の準備が難しい自然現象といえる。こうした太陽活動は、おおむね11年周期で変化することが知られている。

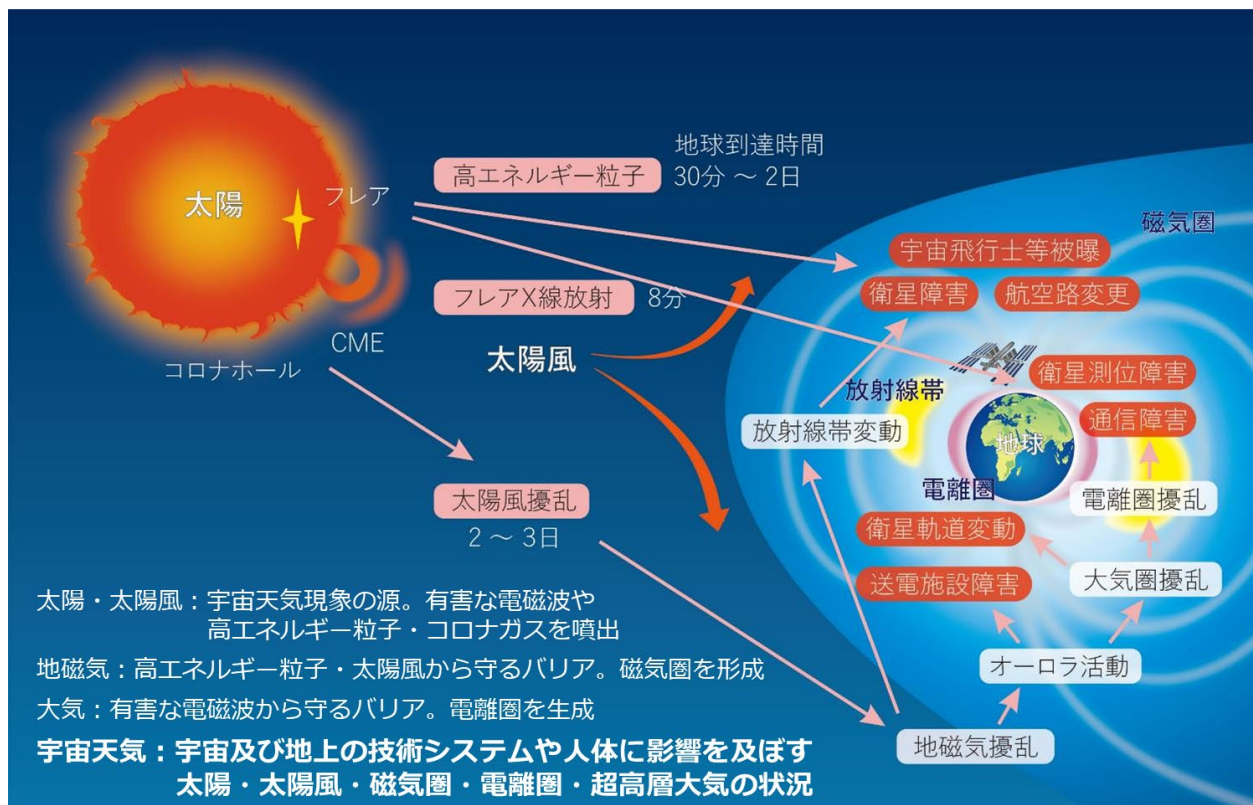
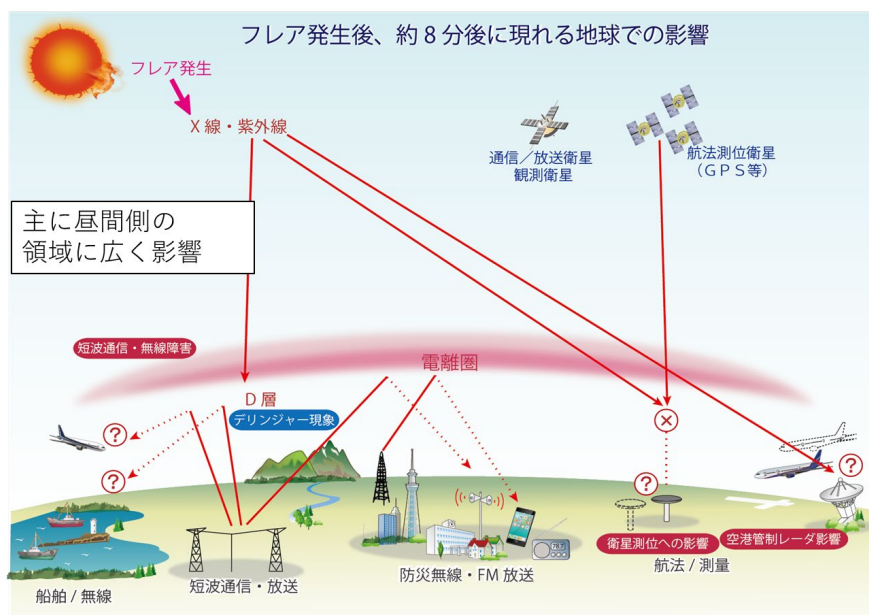
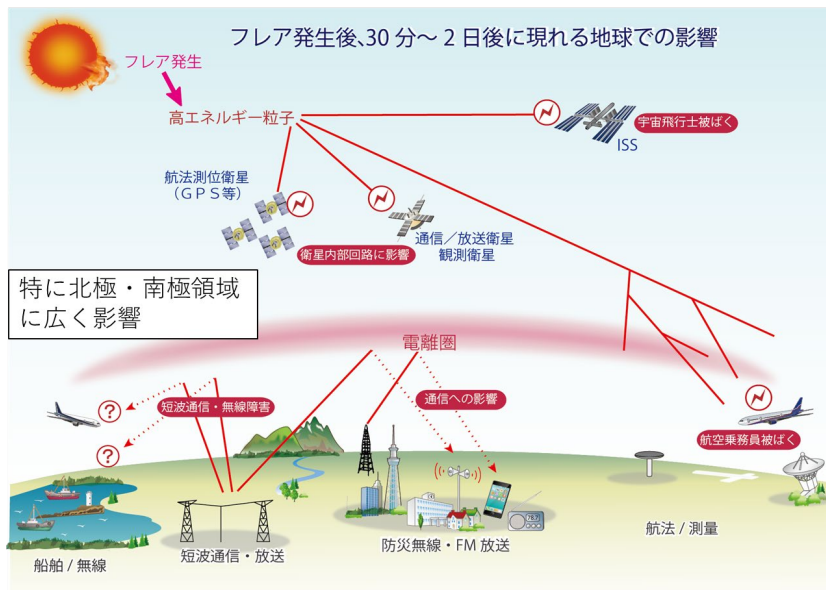


図1 宇宙天気現象の種類と発生する障害（出典：NICT）

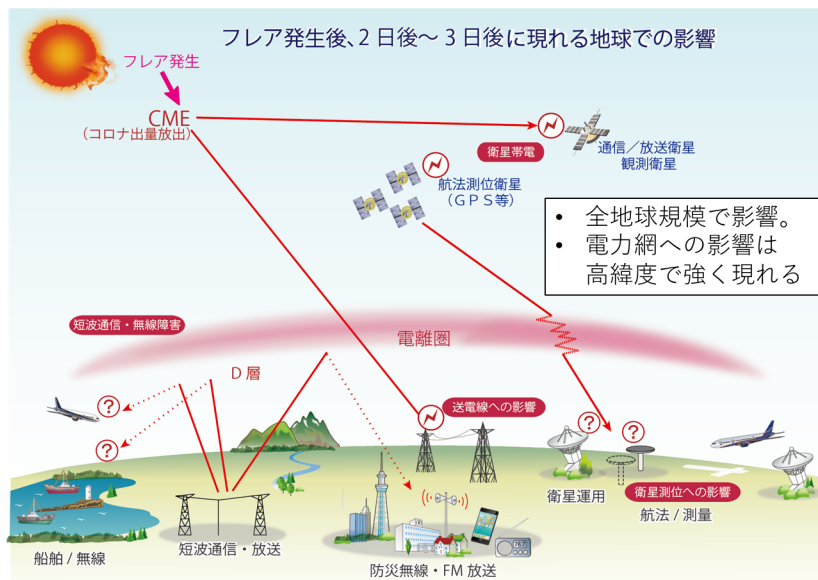


太陽フレア発生後、
約8分後の影響

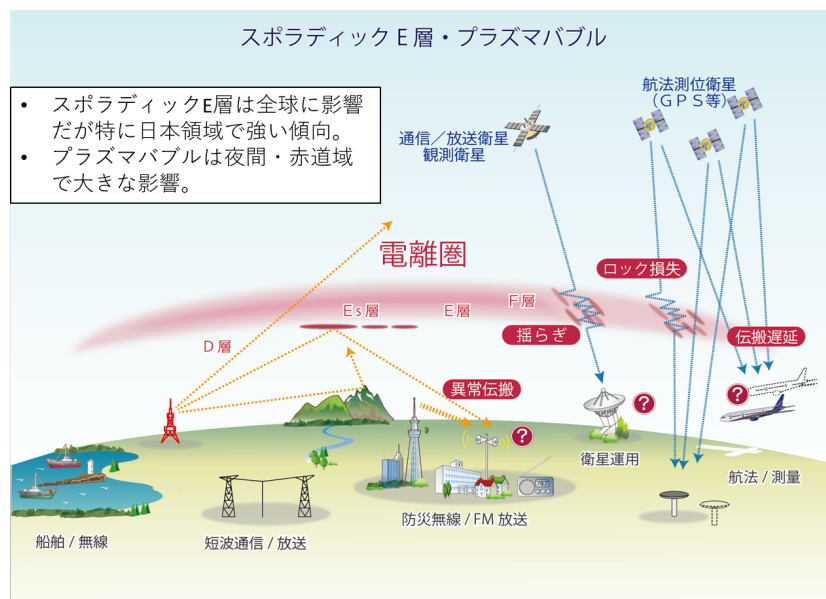
図2 宇宙天気現象がもたらす地球への影響（時系列）（出典：NICT）（次頁も同じ）



太陽フレア発生後、
30分～2日後の影響



太陽フレア発生後、
2日後～3日後の影響



スプラディック E 層・
プラズマバブルによる
影響

(3) 国内の動向

(宇宙天気に関する NICT の取組概要)

- 情報通信研究機構（NICT）は、我が国唯一の情報通信分野を専門とする公的研究機関であり、国の情報通信政策との密接な連携の下、大学や民間企業では実施できないような長期間にわたり組織的に推進すべき情報の電磁的流通及び電波の利用に関する技術の研究開発等を総合的に行う国立研究開発法人である。
- 電離圏の反射によって長距離通信を行う短波帯の電波に関しては、戦前は海軍、陸軍、逓信省電気試験所により様々な研究が行われ、その後は逓信省電気通信研究所（1948 年発足）、郵政省電波研究所（1952 年新設）、通信総合研究所（1988 年名称変更）、独立行政法人通信総合研究所（2001 年発足）と引き継がれ、現在の NICT に至っている。
- 宇宙天気分野に関しては、国立研究開発法人情報通信研究機構法の規定に基づき、電波の伝わり方について観測を行い、予報及び異常に関する警報を送信し、並びにその他の通報をすることを業務としている。NICT の宇宙天気予報を利用する主な産業分野は、通信・放送、測位利用、航空、電力、官公庁等となっている。
- NICT の中長期目標（R3 年度～R7 年度）によると、電磁波先進技術分野における重点研究開発分野のひとつとして宇宙環境計測技術が掲げられ、「通信・放送・測位・航空・人工衛星等の安定運用を実現する宇宙環境の計測技術及び計測した現況から分析・予測する技術の研究開発を実施し、宇宙環境じょう乱等の予報・警報等の高度化を目指す」こととなっている。
- また、NICT が実施すべき定常的な業務として、「短波帯通信の途絶や衛星測位の誤差増大等の影響を生じさせる太陽活動や地磁気及び電離圏の乱れ、宇宙放射線の変動に関する観測や予報・警報を行う」ことがその中長期目標に規定されている。
- 最近では、宇宙環境のモニタリングの重要性の高まりから、宇宙基本計画（令和 2 年 6 月 30 日 閣議決定）において

「宇宙状況把握や衛星の開発・運用、地上での通信・放送、衛星測位等の安定的な利用に寄与するため、電離圏や磁気圏、太陽活動を間断なく観測、分析し、24 時間 365 日の有人運用による宇宙天気予報の配信を引き続き実施する。また、宇宙環境の変動への対応力を更に高めるため、国内外の関係機関等と連携し、電離圏や太陽活動等の観測・分析システムの更なる高度化を図るとともに、観測データを用いたシミュレーション技術の研究を行い、宇宙天気予報システムの高精度化等を進める」ことが目標として示されており、NICT はこうした政府の方針に沿って業務を推進することとなっている。

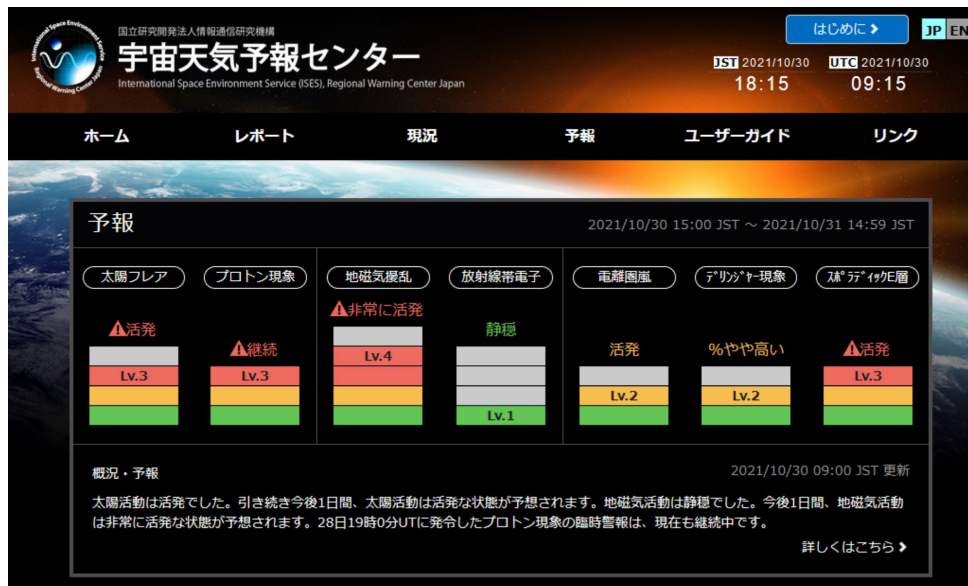


図3 NICTがホームページ上で提供している宇宙天気予報（2021年10月30日の情報）



図4 NICT研究者による予報会議の様相（出典：NICT）

（学術研究の主な動向）

- 太陽地球圏環境を正確に理解すると同時にその変動を予測することを目的としたプロジェクトとして、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「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」（2015年度～2020年度、領域代表者：草野完也名古屋大学、宇宙地球環境研究所教授）が組織され、100名を超える研究者の協力を得て実施され、成果が公表されている。

(4) 海外の動向

(国連防災機関における動き)

- 宇宙天気現象がもたらすリスクに対しては、国際社会では政策や方針を強化し、具体的な対処につなげようとする動きが見られる。
- まず、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。

表1 宇宙天気現象に関して定義された4種類のハザード

ハザード	定 義	もたらされる被害例
地磁気嵐 (Geomagnetic Storm)	太陽嵐によって引き起こされる地球磁場の乱れ。宇宙天気現象による高エネルギー粒子、太陽フレア、無線障害を含む。	地磁気誘導電流（GIC）による送電網への影響
電離圏嵐 (Ionospheric Storms)	太陽フレア等によって高度160km以上の電離圏（F領域）で発生する乱れ	通信、航行、宇宙物体のレーダー追跡などに使われる電波の伝搬に影響。短波帯通信の途絶
太陽フレアによる電波障害（Radio Blackout）	太陽フレアによる短波帯での無線通信のフェーディングまたはフェードアウト	短波帯通信に用いられる電波の途絶
太陽嵐（太陽プロトン現象） (Solar Storm)	太陽から地球近傍への大量の荷電粒子の到達	人工衛星の電子回路の損傷、生物のDNAの損傷、短波帯通信の途絶、極域の航空機運航への影響

出典：HAZARD INFORMATION PROFILES

（米国における取組）

- 米国政府は、米国の安全保障・経済活動・日常生活は人工衛星や航空機、通信ネットワーク、ナビゲーションシステム、電力網に依存しているが、これらの社会インフラは宇宙天気現象がもたらす脅威に直面していると認識し、国家戦略及び組織的対策を強化している。
- また、米国政府は、宇宙天気は地球規模の問題であり、ハリケーン等の地上の気象現象とは異なり、北米全体に影響を与えると同時に地球上のさらに広い地域に到達する可能性があるとして認識している。
- さらに、危機管理対応を行う FEMA（連邦危機管理庁）では、米国が直面するリスクや対応状況の評価を行っている。2019 年 7 月に公表した「国家の脅威とハザードの特定、リスク評価」（Threat and Hazard Identification and Risk Assessment (THIRA)）では、宇宙天気（Space Weather）をハリケーン、パンデミック、地震と並ぶ「壊滅的な国家リスク」（catastrophic national risks）の一つであると特定し、対処を促している。
- 米国政府の宇宙天気関連組織は、その役割によって①政府全体で総合調整を行う組織、②実務的な業務（観測・分析・予報等）を実施する組織、③主に研究開発を担当する組織、④その他の組織に大別でき、それぞれが宇宙天気に関する様々な役割を担っている。

表 2 米国政府における宇宙天気に関する組織

役 割	組 織
① 政府全体で総合調整を行う組織	● 宇宙天気業務・研究・被害軽減小委員会（SWORM） ● 気象学のための連邦連携事務局（OFCM）
② 実務的な業務（観測・分析・予報等）を実施する組織	● 海洋大気庁（NOAA） ● 国防総省（主に米空軍） ● 地質調査所（USGS） ● 国土安全保障省（DHS）、連邦緊急事態管理庁（FEMA）
③ 主に研究開発を担当する組織	● 海洋大気庁（NOAA）【再掲】 ● 国防総省（米空軍研究所〔AFRL〕等）【再掲】 ● 地質調査所（USGS）【再掲】 ● 航空宇宙局（NASA） ● エネルギー省 ● 国立科学財団（NSF）
④ その他の組織	● 国務省（国際連携支援） ● 運輸省（GPS 利用に関するフィードバック）

- 2016 年 10 月、国家科学技術会議（NSTC：National Science and Technology Council）内部に宇宙天気業務・研究・被害軽減小委員会（SWORM：Subcommittee on Space Weather Operations, Research, and Mitigation）が創設され、各組織が行っていた宇宙天気に関連する業務を大統領府が総合的に管轄することとなった。
- また、2015 年と 2016 年には SWORM が中心となることで、
 - ①「国家宇宙天気戦略（National Space Weather Strategy）」
 - ②「国家宇宙天気アクションプラン（NATIONAL SPACE WEATHER ACTION PLAN）」
 - ③大統領令「宇宙天気現象へ備えるための連携（Coordinating Efforts to Prepare the Nation for Space Weather Events）」
 が策定され、現在の米国政府の基本的指針となっている。

表 3 米国「国家宇宙天気戦略」、「国家宇宙天気アクションプラン」の骨子

基本認識	➤ 宇宙天気は、衛星や航空会社の運航、通信ネットワーク、ナビゲーションシステム、電力網など、米国の経済活力や国家安全保障の基盤を混乱させる可能性がある。宇宙天気に対する脆弱性を低減することが国家的な優先事項であることは明らか。 ➤ 宇宙天気現象は定期的に発生し、重要なインフラシステムに影響を与える。一つのシステムの故障が他のシステムに連鎖する可能性がある。 ➤ 宇宙天気は地球規模の問題である。地上の気象現象（例：ハリケーン）とは異なり、宇宙天気は、北米全体に影響を与えると同時に、地球上のさらに広い地域に到達する可能性がある。 ➤ 米国は宇宙天気現象の観測と予測において世界的なリーダーであるが、これらの能力は国際的な協力と協調に依存している。 ➤ 政府は、宇宙天気に関連するリスク管理能力を向上させるため、官民の専門知識や能力を活用し、目標を定めて強化する必要がある。 ➤ この戦略を完全に実行するためには、政府、機関、緊急事態管理者、学界、メディア、保険業界、非営利団体、民間企業の全国的なネットワーク活動が必要である。
6 つの戦略的目標	1. 宇宙天気現象のベンチマークの確立 2. 対応能力・復旧能力の強化 3. 保護・被害軽減のための取り組みの改善 4. 重要インフラへの影響の評価、モデリング、予測の改善 5. 理解と予測の促進による宇宙天気サービスの向上 6. 国際協力の強化

出典： <https://obamawhitehouse.archives.gov/blog/2015/10/28/enhancing-national-preparedness-space-weather-events>

表4 「6つの戦略的目標」の詳細

戦略的目標	目標のポイント
1. 宇宙天気現象のベンチマークの確立	- 宇宙天気現象に対する効果的な行動には、現象の「規模」と「頻度」の理解が必要。 - ベンチマークとは、現象を評価するための一連の特性や条件のこと。政府や産業界が重要インフラの脆弱性を評価し、行動のための「判断基準」や「しきい値」を設定し、対応策や復旧計画を強化するための参考となる。 - ベンチマークは、現在の科学的理解と過去の記録に基づいて、宇宙天気現象に関連する物理的パラメータを明確かつ一貫して記述する。様々な状況に対応するため、複数のベンチマークを作成する。
2. 対応能力・復旧能力の強化	- 宇宙天気の異常現象は、社会経済に大きな影響を与える事象であり、国家が協調して取り組む必要がある。 - 宇宙天気現象に対する政府や民間の能力について、対応・復旧の能力を強化する包括的ガイダンスを策定する。 - オールハザードの停電対応・復旧計画を完成させる。異常気象による主なリスクは、電力の長期的な損失と、それが他の重要なインフラ部門に与える連鎖的な影響である。 - 極端な宇宙天気現象に対する政府と民間の計画・管理を支援する。 - 政府および産業界の対応・復旧計画を改善・試験するため、演習を開発・実施する。
3. 保護・被害軽減のための取り組みの改善	- 宇宙天気現象に対する国家の準備を改善するには、保護と被害緩和のアプローチを強化する必要がある。「保護」とは、宇宙天気の影響から国家を守るための能力開発であり、脆弱性の軽減も含まれる。「被害軽減」とは、リスクの最小化、連鎖的な影響への対応、耐性強化に重点を置く。 - 宇宙天気の影響に対する脆弱性を軽減し、リスクを管理し、対処を支援するハザード軽減計画の策定を奨励する。宇宙天気に対する脆弱性を軽減するための行動を支援するため、官民の協力関係を強化する。
4. 重要インフラへの影響の評価、モデリング、予測の改善	- 宇宙天気現象に対する国家の備えを向上させるための重要な要素は、関連する影響を観測し、予測する能力である。重要な国家インフラに対する影響を観測、評価、モデル化し、予測する能力の向上が必要。 - リアルタイムのインフラ評価・報告機能を開発する。様々な重要インフラシステムの状態を状況に応じて把握する。 - 宇宙天気が重要インフラに及ぼす影響予測モデルを開発・改良する。インフラに与える影響に関する研究を行う。
5. 理解と予測の促進による宇宙天気サービスの向上	- 宇宙天気への理解を深め、宇宙天気の観測・予測（および関連製品・サービス）の精度・信頼性を向上させる。 - 最新技術を開発し、宇宙天気オペレーションセンターの能力を向上させる。 - 宇宙天気予報に対するユーザーニーズの理解を深め、リードタイムと精度に関する目標を設定する。
6. 国際協力の強化	- 宇宙天気に対するグローバルな関与と協調的な国際対応が必要。 - 観測インフラ、データ共有、数値モデル、科学研究に関する国際社会との連携を強化する。

出典：同

（米国における宇宙天気に関する商業サービス）

- 米国では、民間企業による宇宙天気関連サービスの提供が活発化している。2010 年には宇宙天気に関する民間団体である米国商業宇宙天気協会（ACSWA）が設立され、製品・サービスを提供する 19 社の企業で構成されている。
- 会員企業は、宇宙天気に関するコンサルティング、リスク評価サービス、数値モデリングとシミュレーション、データ解析と機械学習、各種技術サポート、エンタープライズ IT システム、観測センサー（地上・宇宙）の開発・運用、宇宙機の異常予測等の製品・サービスを提供している。

（英国における取組）

- 英国政府は、人間・経済・環境・インフラに重大な被害をもたらす可能性のある約 40 種類のリスクを評価した「国家リスク登録簿（National Risk Register）」を定期的に発表している。この中で、発生した場合には広範かつ重大な影響があることを踏まえ、「深刻な宇宙天気（Severe space weather）」が国家リスクのひとつとして 2011 年に登録されている。
- また、宇宙天気がもたらす国家リスクに備えるため、英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省は 2021 年 9 月 27 日、「深刻な宇宙天気への対処戦略」（UK Severe Space Weather Preparedness Strategy）と題する国家戦略を発表した。これは、深刻な宇宙天気現象への備えを確実にするための今後 5 年間を見通した戦略である。
- 戦略の骨子は、①深刻な宇宙天気の影響、及び引き起こされる出来事の予測能力についての理解を深める「評価」、②重要インフラやサービスの回復力を高めることに重点を置く「準備」、③障害に効果的に対応し、迅速に回復できるようにする「対処と回復」に分けられ、それぞれの提言が示されている。
- さらに、宇宙天気の監視と予測に関する英国の能力を向上させるため、英国政府は 2019 年から 4 年間で 1,990 万ポンド（約 30 億円）の宇宙天気の機器・測定・モデリング・リスク（SWIMMR）プログラムを運営することで、宇宙天気のモデル開発や計測機器開発を支援している。

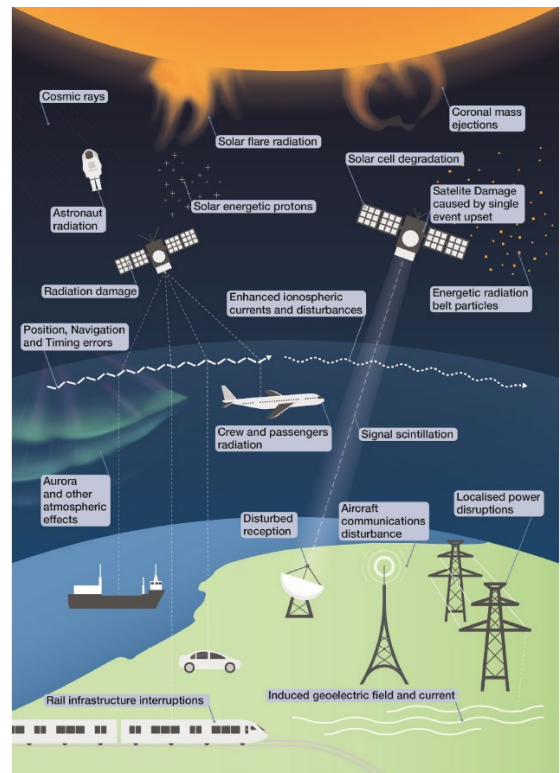


図5 宇宙天気がもたらす影響（同対処戦略より）

表 5 「深刻な宇宙天気への対処戦略」の骨子

1. 評価	● 観測能力の向上：欧州宇宙機関が打ち上げるミッション（「L5」ミッション）に対して英国として支援する。 ● 予測能力の向上：宇宙天気とその影響を予測する能力を向上させるための研究開発投資を行う。 ● 影響の理解：航空機、人工衛星、通信システム、エネルギーインフラ、鉄道・海事、人間の健康、全地球測位衛星システムなどの分野における影響を理解するための作業を行う。さらに、測位システムに依存している金融、健康、食料、水、緊急サービスなど他のセクターへの影響を理解する。
2. 準備	● 対処計画の策定とテスト：政府省庁や産業界が深刻な宇宙気象現象に対して強固な対処計画を持つ。 ● 緩和策の開発：産業界が厳しい宇宙天気への耐性を高めるための対策を策定し、定期的に演習を行う。
3. 対処と回復	● アプローチの公式化：対処計画の迅速な実施、正確な情報を産業界や一般市民に効果的に周知、復旧作業を調整するための対応体制の迅速な確立を行う。 ● 国際協力：データの相互共有を可能にするシステムを確立することで、国際的なパートナーとの協力関係を深める。主なパートナーは、欧州宇宙機関（ESA）、米国航空宇宙局（NASA）、米国海洋大気庁（NOAA）など。

（出典）英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省「深刻な宇宙天気への対処戦略」（2021年9月）に基づき作成

<https://www.gov.uk/government/publications/uk-severe-space-weather-preparedness-strategy>

（ドイツにおける取組）

- ドイツ航空宇宙センター（German Aerospace Center (DLR)）は100年以上の電磁波と電離圏との相互作用に関する研究の歴史を有している。2004年からは電離圏にフォーカスした宇宙天気の研究を開始している。
- DLRのミッションとして、宇宙天気に関する科学技術の確立、タイムリーで正確な宇宙環境観測の実施、利用者に適した宇宙天気予報・関連プロダクトの開発、脆弱性評価と宇宙天気の影響調査による社会インフラのレジリエンス向上の取り組みを進めている。
- また、DLRでは、地上に設置する観測網だけでなく、地球周回衛星（LEO）に電離圏観測のための衛星測位信号の受信装置の搭載を推進している。様々な観測情報のデータ融合を進めることにより、高い空間分解能による三次元電子密度分布の再現システムの実用化を目指している。

(多国間・国際機関の協力枠組み)

- 国際協力によって宇宙天気予報を推進する枠組みとして、国際宇宙環境業務機関 (ISES) があり、日本は副議長国 (2022 年 4 月時点) である。局所的電離圏観測や地磁気観測の地上観測網が充実している日本は、独自の宇宙天気数値予測モデル (太陽風、磁気圏、電離圏) を開発して海外に提供している。一方、米国は、太陽監視衛星、太陽風監視衛星、静止軌道衛星など多くの衛星を運用しており、外国にデータを提供している。
- また、国連・宇宙空間平和利用委員会 (UN/COPUOS) は、宇宙空間の研究に対する援助、情報の交換、宇宙空間の平和利用のための実際的方法及び法律問題の検討を行い、これらの活動の報告を国連総会に提出することを任務としている。現在の加盟国は日本を含む 100 か国 (2022 年 1 月現在) であり、宇宙天気に関しては科学技術小委員会において宇宙天気セッションが開催され、様々な課題が議論されている。
- 宇宙からの気象観測・宇宙天気観測を実施している機関で構成される気象衛星調整会議 (CGMS) では、宇宙天気調整グループ (SWCG) が設置され、人工衛星による宇宙天気観測やデータ利活用等に関する議論が行われている。
- さらに、国際電気通信連合 (ITU) では、ITU-R/SG3 (電波伝搬) および SG7 (科学業務) で宇宙天気に関する議論が行われており、電波伝搬に関する宇宙天気モデルの標準化、宇宙天気観測のための周波数保護の検討等が行われている。
- 一方、アジア・オセアニア宇宙天気アライアンス (AOSWA : The Asia-Oceania Space Weather Alliance) は、宇宙天気に関する情報共有を進める国際協力組織であり、2010 に設立され NICT が事務局を務めている。2022 年 4 月現在、13 か国から 27 の組織が参加している。
- 国際連合の専門機関である国際民間航空機関 (ICAO) では、①航空機と地上管制との短波通信障害及び衛星通信障害の回避、②電子航法に関連した航空機位置の測定誤差の増大防止、③航空機乗務員等の宇宙放射線被ばく低減の観点から、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る。このため、2019 年 11 月 7 日から、民間航空機の運航に際して必要となる宇宙天気情報の利用が開始されている。

(5) 宇宙天気観測・分析・予報の現状

(国内外の観測網の現状)

- NICT では、国内の定常観測網のほか、東南アジア諸国や南極昭和基地等の観測センサーを用いて宇宙天気現象の観測を行っている。
- 国内では、電離圏の変動を監視する NICT のイオノゾンデ観測機器が、国分寺局（東京都小金井市）、サロベツ電波観測施設（北海道天塩郡豊富町）、山川電波観測施設（鹿児島指宿市）、大宜味電波観測施設（沖縄県国頭郡大宜味村）に設置され、毎日 5 分毎の観測結果をほぼリアルタイムで公開している。
- こうした日本におけるイオノゾンデ観測は 1931 年に始まっており、世界的にも早い段階で本格的な定常観測が開始されている。また、南極昭和基地においては、NICT は昭和 32 年（1957 年）の第 1 回南極観測以来、電離圏観測を継続的に実施しており、現在では観測装置の遠隔運用を行っている。
- 東南アジア諸国においては、タイ（チュンポン、チェンマイ）、ベトナム（バクリウ）、インドネシア（コトタバン）、フィリピン（セブ）の各国の協力を得て、NICT がイオノゾンデ観測機器を設置している。これらの観測機器は「東南アジア電離圏観測網（SEALION）」と呼称し、赤道付近で発生する主要な電離圏じょう乱現象であるプラズマ・バブル現象の生成・伝搬機構の研究を目的に構築されている。
- プラズマ・バブルが発生した場合、交通、建設、農業等の分野で利用が進む準天頂衛星システム等の衛星測位の精度に影響を及ぼすおそれがある。東南アジア諸国の宇宙天気に対する関心が高まっていることを受け、各国の主要大学との共同研究の形態でイオノゾンデ以外の観測機器も含めた観測網構築が進められている。
- 一方、太陽電波観測においては、NICT は、太陽を指向して観測するシステムとして世界トップクラスの観測周波数帯域幅や時間分解能の性能を有する太陽電波観測システムを山川電波観測施設に設置している。また、国立天文台野辺山宇宙電波観測所、NASA（米国航空宇宙局）の太陽観測衛星 SDO、NASA・ESA（欧州宇宙機関）の太陽・太陽圏観測衛星 SOHO から太陽観測データを NICT は得て分析に活用している。
- また、磁気圏の観測については、気象庁地磁気観測所において地磁気に関する調査・研究・観測が行われている。NICT は、琉球大学与那フィールドに設置された磁力計のほか、気象庁地磁気観測所の観測データ、NOAA（米国海洋大気庁）の気象・地球観測衛星（GOES）の高エネルギー粒子観測データも活用している。
- さらに、2015 年に NASA が打ち上げた宇宙天気観測衛星 DSCOVR は、太陽風のリアルタイム観測を行っており、NICT では小金井本部（東京都小金井市）に設置した直径 11.3 メートルのアンテナでデータ受信を行っている。太陽と地球の引力がつりあうラグランジュ点（L1）に DSCOVR が設置されているため、その観測データの受信は必然的に昼間に行う必要がある。このため、国際協力の一環として、アジア地域が昼

間となるタイミングではNICTが米国に代わってデータ受信を行い、NASAに受信データを送信している。

- 現在、このDSCOVRの後継機として、新たな宇宙天気観測衛星SWFO-L1がNOAAによって2025年2月に打ち上げられる予定となっている。このためNICTは、24時間365日のリアルタイムデータ受信のための国際協力体制（SWFO Antenna Network）へ参加し、現在、新たな地上受信局の建設を進めている。



図6 山川太陽電波望遠鏡（左）、太陽風観測データ受信システム（DSCOVR 受信局）（右）

（出典：NICT）



図7 東南アジア電離圏観測網（SEALION）における観測体制（出典：NICT）

(NICT における分析体制)

- NICT では、宇宙天気急激な変動への対応力を高めるため、電離圏や太陽活動等の分析システムの高度化を進めている。
- 具体的には予測のためのシミュレーションコード（プログラム）の開発を長年にわたり行っており、磁気圏モデルについては、近年の改良により極端に大きな現象（極端現象）でも再現可能なコード開発を進めている。これにより、将来的には 1000 年に一度起こるかどうかの稀な極端現象の発生時の影響を正確に推定することが可能になると期待される。
- 一方、地表から高度 500 km までの大気圏・電離圏までを統一的に計算するシミュレーションコード「GAIA」の開発も進めており、実際の現象を再現することに成功している。現在、これらのモデルを用いて、実際の観測データと数値モデルを用いたデータ同化手法（シミュレーションモデルに実測データを取り入れる手法）による精度向上を推進している。
- 近年では、迅速かつ高精度な予報を実現するためには、観測データに対して AI（人工知能）を適用していくことが有効となっている。このため、NICT は、NASA の太陽観測衛星 SDO の太陽画像データセット（30 万枚）と深層学習法を用いることで太陽フレア予報モデル（DeepFlareNet）を開発し、NICT 内の宇宙天気予報の検討会議に利用している。今後は予報信頼度を向上させた AI 予報モデルの開発を進めることにより、磁気圏や電離圏への応用を進めていく予定である。

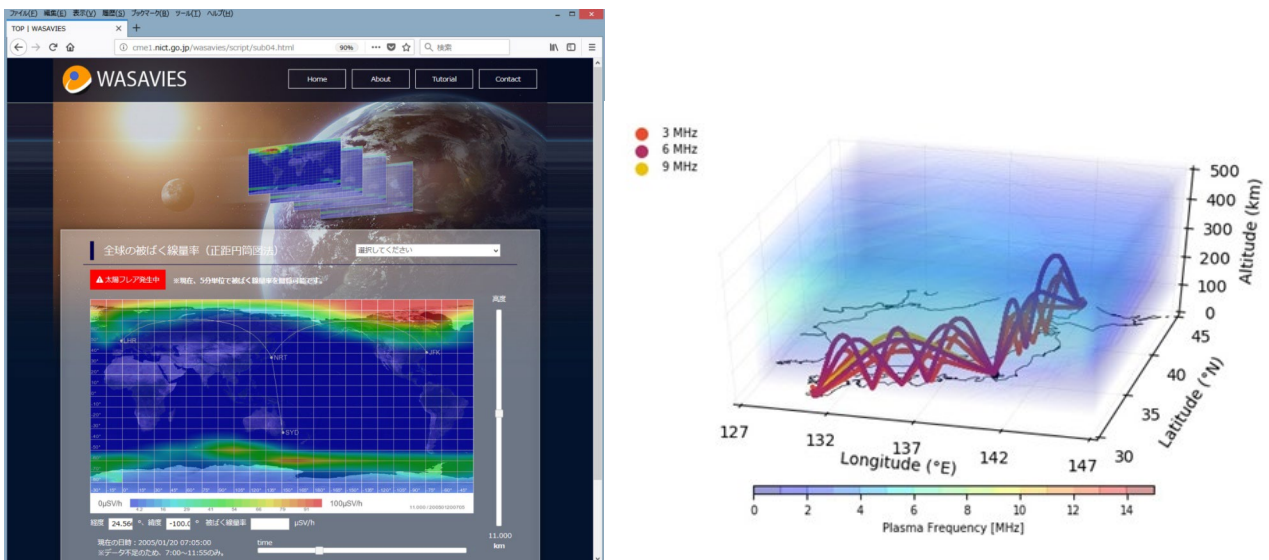


図 8 航空機被ばく推定システム(WASAVIES) (左)、電波伝搬シミュレータ(HF-START) (右)

(出典：NICT)

表 6 NICT が分析に用いるアプリケーション等

	観測方法	データベース /経験モデル	シミュレーション技術	アプリケーション
電離圏	イオノゾン デ・GNSS 受信機	国内・国外電離圏観測デ ータベース/ 電離圏じょう乱予測モデ ル	地表から電離圏を一貫 して計算可能なシミュ レーション (GAIA)	電波伝搬シミュレ ータ (HF-START)
磁気圏	地磁気・極 域 HF レー ダー	ひまわりによる磁場観測 データベース/放射線帯 予測モデル	磁気圏シミュレーショ ンコード (REPPU モデ ル)	衛星帯電評価リア ルタイム表示シス テム (SECURES)
太陽・ 太陽風	太陽電波観 測	平磯太陽観測データベ ース/太陽フレア発生予測 モデル	太陽風予測シミュレー ション (SUSANOO モデ ル)	航空機被ばく推定 システム (WASAVIES)

(宇宙天気予報の業務体制等)

- いわゆる「宇宙天気予報」については、1988 年から NICT の宇宙天気予報業務として定常業務化を図り、現在も日本で唯一の宇宙天気予報センターとして国内外にサービスを提供している（「宇宙天気予報」の語は、NICT の登録商標（1988 年商標登録）となっている。）。
- 現在、NICT の宇宙環境計測分野では約 45 名の職員（うち研究職員は 17 名）が先端研究や定常業務に従事している。研究業務及び宇宙天気予報業務は小金井本部（東京都小金井市）で行われているが、大災害や大規模事故によって小金井本部の機能が途絶した場合に備え、宇宙天気予報センター副局を NICT 未来 ICT 研究所（兵庫県神戸市）に 2019 年 3 月に開設し、予報業務を継続できる体制を整えている。
- NICT では、平日 14 時 30 分から宇宙天気予報会議を開催し、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る。現在は、①太陽フレア、②プロトン現象（太陽フレア等に伴い放出される高エネルギーの粒子）、③地磁気じょう乱、④放射線帯電子、⑤電離圏嵐、⑥デリンジャー現象（太陽フレアに伴い電離圏下部が異常電離し、そこを通過する短波帯の電波が吸収されてしまう現象）、⑦スプラディック E 層の 7 種類の現象に関する予報を発信している。
- こうした宇宙天気予報業務は、2019 年 12 月からは 24 時間運用で行われている。また、約 70 年にわたって蓄積されている過去の電離圏の観測データも活用しながら、先端的な研究業務と定常的な宇宙天気予報業務を組み合わせることにより、より精度の高い予報の実現を目指している。
- NICT の予報情報は、国際宇宙環境業務機関 (ISES) 加盟 21 カ国と交換を行っている。

(電波利用料財源を用いた電波の伝わり方の観測等)

- 様々な分野での電波利用の拡大に伴い、通信・放送システム等の安定的な運用の確保が一層重要となっていることから、宇宙天気予報を含めた電波伝搬の異常の観測・予報等に関する取組の強化が必要となっている。
- このため、平成 31 年の電波法改正により「電波の伝わり方について、観測を行い、予報及び異常に関する警報を送信し、並びにその他の通報をする事務並びに当該事務に関連して必要な技術の調査、研究及び開発を行う事務」を電波利用料の使途に追加することにより、その財源を用いることで宇宙天気予報の休日を含めた 24 時間の有人運用の実現や観測体制の強化、予報の精度向上のための研究を強化した。

(ICAO 宇宙天気情報サービスの概要)

- 前述のとおり、国際連合の専門機関である国際民間航空機関（ICAO）では、2019 年 11 月 7 日から、民間航空機の運航に際して必要となる宇宙天気情報の利用が開始されている。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）、中露連合（CRC）の 4 つの組織が ICAO から指名されている（2022 年 1 月現在）。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 宇宙天気センターの業務を開始した。

第2章 今後の観測・分析・予報の在り方

(1) 観測体制の在り方

(基本的考え方)

- 宇宙天気予報の基礎はセンサーを用いた観測活動にあることから、NICTは、宇宙天気予報の高度化を実現するため、引き続き、観測センサーの充実・強化を推進すべきである。
- その際には、学術研究サイドからの観測データの入手に取り組むとともに、学術研究との連携による観測データの交換・共有を推進すべきである。

(電離圏観測の課題と今後の取組)

- 前章のとおり、電離圏観測においては、国内の定常観測網のほか、東南アジア諸国や南極昭和基地において観測活動が行われているが、観測点はまばらであり、また海域（海上）における観測点は有していない。しかし、宇宙天気現象の数値モデルの再現性を高めるためには、実際の観測値を入力することで精度の高い予測結果を得られるようにすることが不可欠であり、このためにはより高密度な観測が必要となっている。
- このため、国際協力を通じたデータ入手も視野に入れながら、①静止衛星からの電離圏広域観測、②多数の地球低軌道衛星（LEO）によるGNSS（全球測位衛星システム）掩蔽観測と中性大気観測、③海上での電離圏観測（多点GNSSブイなど）等の実現に向けた取組を我が国は進めるべきである。
- また、NICTは、東南アジア諸国、豪州、台湾、韓国等との良好な協力関係を深化させつつ、東南アジア電離圏観測網（SEALION）の維持・拡大を図ることにより、多地点の観測データの確保を目指すべきである。

(太陽・太陽風観測の課題と今後の取組)

- 国内の太陽電波観測はNICT山川電波観測施設で行われているが、地上からの太陽電波観測は、施設周辺からの人工電波雑音が精密観測の障害になっている。一方、衛星を用いたラグランジュ点における太陽・太陽風観測は、衛星の製造・打ち上げ・運用に多額の費用を要することから、我が国としては独自の観測センサーを有しておらず海外から観測データの提供を受けている状況にある。

- 我が国が独自の観測衛星を保有することは直ちには困難であると考えられることから、良好な国際協力関係を維持することによって、引き続き海外からのデータを確保できるようにすべきである。
- そのためにも、我が国から海外に対しては、高度な観測技術の提供、衛星搭載用観測センサーの提供（機器提供、データ提供）、本邦における地上データ受信局の提供、東南アジア諸国における観測網構築等に取り組むことにより、国際協力関係を一層強化すべきである。

（磁気圏観測の課題と今後の取組）

- 太陽風-磁気圏じょう乱の電離圏への伝播を把握するためには、日本及び全地球規模で極域から中低緯度域までの地磁気変動を把握する必要がある。国内外の研究機関によって既に様々な地磁気観測ネットワークが構築されていることから、NICTは、これら研究機関との協力関係を強化・構築し、国内外からのデータ共有を図るとともに、宇宙天気予報の充実に向けリアルタイムデータの取得を推進するべきである。

（宇宙空間への観測センサーの設置）

- 現在、我が国は宇宙天気を常時監視する衛星を持たないため、米国・欧州の衛星データを使わざるを得ない状況にある。しかし、静止軌道上の高エネルギー粒子の分布は一樣ではなく、我が国上空の静止衛星付近の宇宙環境は外国上空のものとは異なることから、我が国上空の宇宙天気を正確に把握できていない実態がある。
- このためNICTは、宇宙空間への観測センサー設置に向けて研究開発等の取り組みを進めるとともに、センサーを搭載できる衛星の探索に努めるべきである。

（２）分析・予報の在り方

（NICTの分析と今後の取組）

- NICTは、引き続き、電離圏や太陽活動等の観測・分析システムの更なる高度化を推進するべきであり、宇宙天気予報の信頼性を高めるため、太陽風、磁気圏、電離圏等の各領域のリアルタイム計算について、各領域の数値モデルの高精度化やデータ同化手法の高度化等の取り組みを進めるべきである。
- また、異常現象に対する分析は短時間で完了する必要があるが、人手に頼るビッグデータ分析はもはや処理能力に限界がある。このため、NICTは、深層学習や強化学

習等を用いることで、分析の自動化・高精度化・知能化を引き続き目指していくべきである。

- さらに、宇宙天気に関する膨大な観測データから新たな知識や数理モデルが創出される可能性を秘めていることから、単に宇宙天気予報に係る分析業務の高度化を目指すだけでなく、フロンティア領域の研究によってデータからの新たな価値創出にも挑戦していくべきである。

(NICT の研究成果の展開)

- 現在、NICT においては、電離圏や太陽風等の予測モデルを開発し、計算機シミュレーションに基づく伝搬シミュレータや推定システム等のアプリケーションを外部に提供している。高度な技術と長年の研究に基づくこうした研究成果については、今後も、一定の条件の下で積極的に企業・大学等に提供していくことが望まれる。
- また、特定の産業向けや個別企業向けにアプリケーションやツールの改修作業が必要な場合は、適切な方法により、有償対応やライセンス等を通じて研究成果を積極的に展開していくことが期待される。
- さらに、NICT では技術相談制度が設けられており、製品開発の支援、測定方法に関するアドバイス、実設計に関するアドバイス等に有償契約により対応している。このため、関係企業や関係団体は、宇宙天気に関して抱える課題の解決に向け、こうした支援制度を積極的に活用することが望まれる。

(民間が行う観測・予報について)

- 宇宙天気現象の「観測」については、既に大学等において観測機材を用いた学術研究が行われているところであり、今後も自由な環境で民間が観測活動を行い、宇宙天気現象の理解向上に努めていくことは歓迎されるべきことである。
- また、大学等が観測したデータを国内外で広く共有していくことができれば、我が国及び地球全体としての観測データの充実につながり、その結果、宇宙天気の正確な理解に貢献できる可能性がある。
- 一方、宇宙天気の「予報」についても、社会インフラを運営する企業が自らの経済活動のために企業内で自製することが十分に考えられる。NICT が全ての産業・企業に対してきめ細かい予報サービスを展開することは困難であり、昨今の民間気象事業の発展や米国で普及する宇宙天気分野の商業サービスの活況に鑑みれば、切磋琢磨によって民間企業が予報能力を磨いていくことは、我が国全体の予報能力の向上につながると考えられる。

- よって、民間企業が他者に対して宇宙天気の前報を提供するサービスについては、一定の条件の下で展開することは歓迎されるべきことであり、民間によるイノベーションや商業サービスを奨励するべきである。
- もし、このような自由な観測・前報の活動環境を整えることができれば、いずれは特定の専門領域に秀でるグローバル企業が我が国から出現する可能性がある。企業が優れた分析サービスを提供できるようになる場合、NICT が自身の分析業務を補完するためにサービス調達する未来も考えられる。
- 以上のように、社会経済の安全・安心を実現していくためには、我が国全体として宇宙天気現象に対する理解を深め、官民が協力して観測・前報の能力を向上させていくことが不可欠であり、民間の能力や創造力を十分に発揮できる環境を整備していくべきである。
- 未来の理想型を考えると、宇宙天気現象に対応するサービスやソリューションを必要とする企業・行政からの需要が旺盛になり、そうした需要に応える形で起業や商品開発が活発化すると予想される。その結果、学術研究の活性化や専門人材の雇用拡大につながるという、「宇宙天気関連産業のエコシステム」の好循環が生まれるように産学官が連携して取組を進めるべきである。

(民間が行う観測・前報の品質確保)

- 気象業務法（昭和二十七年法律第百六十五号）では、気象業務における観測の技術基準を設け、また前報を行う組織に対しては許可制度の下で施設・人的要員に関する要件を課すことにより、民間が行う気象業務に一定の品質を確保させる仕組みになっている。
- 同様に、民間が宇宙天気現象の前報を行い、無償・有償を問わずそれらを他者に提供する場合には、前報の品質確保に向けた取り組みが必要になると考えられる。また、不十分な推測に基づく不正確な情報発信が SNS で散見され、そうした宇宙天気を巡るデマが拡散することによって社会的混乱を生じさせるおそれがあり、対応が必要となっている。
- このため、例えば、前報で用いる観測データの技術的要件、前報で用いる専門用語の定義・統一、判断基準の明確化、分析業務に求められる知識・技能等、観測・前報を行う民間が満たすべき要件が明確化されることが望まれる。
- よって、NICT は、複雑な宇宙天気現象の予想には高度な知識と技能が必要であることを周知啓発するとともに、組織・施設・人的要員・手続等に関して満たすべき要件を関係企業・関係団体等と共同で規格化することで、宇宙天気前報全体の統一と発展を主導していくべきである。

- また、NICT は、民間の観測・予報の品質向上に向けて、知識・技能に関する教材制作や研修員受入、講師派遣、予報精度の評価手法の標準化、自社の予報結果に関する精度の公表方法のガイドライン化等の活動を推進すべきである。

第3章 警報に関する体制強化

(1) 警報に関する課題

- NICT では、太陽、太陽風、磁気圏、電離圏のリアルタイムデータを監視して、宇宙天気予報を提供している。その際、相当な被害が生じるおそれがあると判断される大型の太陽フレア爆発等の現象を観測した場合には、臨時情報として NICT のウェブサイト上に「お知らせ」を公表するとともに、約 7,800 名が登録するメーリングリストを用いて臨時情報の配信を行っている。
- 宇宙天気予報は社会経済の安全・安心に直結する業務であり、社会インフラの安定運用に責任を持つ企業に不可欠なものとして重要性が高まりつつあり、国立研究開発法人情報通信研究機構法に基づき NICT には異常現象に対して迅速かつ的確に警報を発表することが求められている。
- しかし、2021 年 10 月 29 日に発生した太陽フレア爆発を受けて NICT が行った臨時情報の提供方法について、その後、総務省とともにレビューを行った結果、現在の警報伝達体制には課題を抱えていることが判明している。このため、これらの課題を解決するとともに、宇宙天気予報の利用者ニーズに合致する形で警報の伝達体制を強化していくことが NICT に求められる。

【警報伝達に関する現在の課題】

- ア NICT が公表する情報は、主に物理現象面の規模の大きさに着目したものであるため、社会インフラが受けるおそれのある被害の危険度を理解しにくい。また、発表される情報は専門用語を伴う学術的な内容であることから、一般企業や報道機関にとり意味を直ちに理解しにくい。
- イ 機構法に基づき NICT が行う業務は「予報及び異常に関する警報」の送信であるものの、これまでに宇宙天気予報として発表した情報には「警報」の語は用いられておらず、危険度を直感的に把握しにくい表現方法になっている。
- ウ 宇宙天気予報の発表手段は現在、ウェブサイト掲載及びメーリングリスト配信の 2 種類に限られている。また、中央省庁・関係企業・関係団体等に対しては、機関や組織を相手とした直接的な情報配信が行われていない。さらに、NICT がそのメーリングリストを確認したところ、約 7,800 名の登録者中、府省庁職員の個人的な登録者は少数であった。
- エ 臨時情報を発表すると意思決定した後、ウェブサイト掲示やメーリングリスト配信を完了すべき目標時間は、NICT 内でルール化されていない。

オ 太陽フレアイベントは約 11 年周期でピークが到来することが知られているが、NICT や総務省（宇宙通信政策課）では宇宙天気に関する危機管理マニュアルが存在していない。また、関係省庁や関係企業の頻繁な人事異動によって宇宙天気に対する危機意識や対応ノウハウが途切れてしまうおそれがある。

（２）今後の警報伝達の在り方

（確実な警報業務の推進）

- 宇宙天気現象のリスクに対して企業等が迅速かつ効果的に対策を実施できるようにするためには、引き続き、宇宙天気予報に関する長年の実績と実施体制を有する NICT が予報・警報を確実に発表していくことが必要である。
- ところで、気象業務においては、社会的な混乱を回避し、かつ災害対策の効果を高めるため、気象庁（国）からの一元的な警報の発表を行っており、気象庁以外の者の警報を禁止し（気象業務法第 23 条）、違反者に対しては 50 万円以下の罰金に処されることになっている（同法第 46 条）。
- こうしたことから、宇宙天気現象が重大なリスクをもたらすおそれがあることを警告する警報についても、きわめて公共性の高い業務として国立研究開発法人としての NICT が一元的に業務を担うことにより、社会的混乱を防止することが必要である。なお、国内では現状、実質的に NICT のみが警報の判断に必要となる観測・分析体制を整えており、NICT は今後もこれらの体制を不断に強化していくべきである。

（警報の伝達方法の強化）

- 警報の伝達手段について、NICT は、現在の方法（ウェブサイト掲示、メーリングリスト配信）に加え、伝達手段の多様化・多重化を進めるべきである。また、宇宙天気予報のユーザーは政府機関、関係企業・関係団体、学術機関、研究者、報道機関、海外研究機関と多岐にわたるため、それぞれのニーズを十分に汲み取った上で伝達方法を工夫していくことが期待される。
- また、警報に基づいて企業等が行動に結びつけることができるよう、警報の伝達項目や伝達方法、警報の見本（サンプル）等については、あらかじめ準備して外部に公表するべきである。さらに、予報・警報が意味するものは明瞭かつ誤解なく伝わるようにする必要があるため、NICT は、それらの用語、文章表現、視覚表現、色彩表現等の統一や標準化を推進するべきである。
- NICT は、海外で発表された警報の情報を収集して速やかに国内に伝えるとともに、海外に対しても積極的に情報発信するべきである。

(NICTの警報業務体制の強化)

- 現在の予報・警報は主にNICT職員の長年の慣習と経験に基づき行われているが、今後は、組織として最適な手順・ルールに沿った業務標準が確立されることが望まれる。そのため、NICTは、明文化された規定類を整備し、担当する職員がこれに基づいて予報・警報の発表を行うとともに、その結果に対しては組織として説明責任を果たしていくことが必要である。
- 具体的には、標準的な分析手法、臨時報や警報の発表の判断基準、組織としての意思決定手続（決裁手続）、広報部による迅速な発表手続、関係省庁・企業等への情報伝達ルート等については、内規としてのルール化が必要であり、それらの一部は外部に公表すべきである。また、警報を発表する判断に至った場合には、遅滞なく発表手続を進め、意思決定から30分以内には関係省庁等に情報を到達させる仕組みが求められる。
- また、大規模な宇宙天気現象が予想される場合には、我が国の危機管理や宇宙システムの保全を担う関係省庁に対して、迅速に予報・警報が送り届けられるようにする必要がある。このため、NICTは、そうした関係省庁とのコミュニケーションを平時から丁寧に行うとともに、緊急時には関係部署に確実に情報を送り届ける仕組みを確立すべきである。さらに、関係省庁からの緊急の問い合わせや技術的相談があった場合には、最優先でそれらに応えることが求められる。
- なお、警報の公表は社会経済活動に大きな影響を与えることになるため、その判断基準（NICT内規）については外部有識者や関係機関の意見を参考にしつつ、不断に見直していくことが求められる。また、誤報（空振り、見逃し）を防止するとともに、誤報発生時の担当職員に対する不当な責任追求を避けるためにも、業務の標準化や判断基準の明確化は最優先で取り組むべきである。

(我が国の安全保障への対応)

- 我が国の安全保障における宇宙空間の重要性が増大するとともに、社会の宇宙システムへの依存度がますます高まる一方、宇宙空間の持続的かつ安定的利用を妨げるリスクは深刻化しており、宇宙安全保障の確保は喫緊の課題となっている。こうしたリスクに対応するため、宇宙基本計画（令和2年6月30日閣議決定）では、宇宙状況把握能力の向上が目標として設定されている。
- また、宇宙環境をモニタリングする宇宙天気予報については、宇宙状況把握や衛星の開発・運用、地上での通信・放送、衛星測位等の安定的な利用に寄与するものであることから、同基本計画において、確実な情報配信や高精度化が求められている。
- したがって、NICTは、分析の結果、宇宙状況の異常や宇宙システム等に重大な不具合が発生するおそれがあると判断する場合は、関係省庁や関係企業に迅速に警報を

伝達していくことが強く求められる。また、関係省庁等からの宇宙天気現象に関する技術相談に応じるとともに、必要に応じて、宇宙システム等の不具合の状況を聴取しつつ、原因が他の脅威によるものかどうかの原因の切り分け支援を行うべきである。

- さらに、今後の安全保障においては、高高度で核爆発を発生させて電子機器を損傷・破壊する電磁パルス（EMP）爆弾の脅威に対処することが必要となっている。このため NICT は、こうした脅威の発生を検知し、その爆発規模や爆発位置等の特定が可能となるような分析能力を中長期的に実現するべきである。

（３）社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準

- 宇宙天気予報の目的は、ハザードを正確に把握・予測することにより、社会インフラにもたらされる宇宙天気現象のリスクを軽減することにある。このため、地震・津波における「マグニチュード」と「震度・津波警報」の関係と同様、宇宙天気の物理現象の規模に関するものだけでなく、社会インフラのリスク（被害）に着目した予報・警報も併せて行っていくことが求められる。
- また、宇宙天気現象は複数の現象が連続的に発生するものであり、その発生メカニズムは難解である。このため、現象の大きさに着目した現行の予報・警報は、そもそもその危険度を直感的に想起しにくいという欠点もあった。
- 以上を踏まえ、本検討会は「宇宙天気の警報基準に関する WG」を設置し、宇宙天気現象がもたらす社会的影響を考慮した新たな予報・警報の種類及び閾値の検討を行った。
- 検討の結果、5 分野で計 17 種類の予報・警報のカテゴリを設定し、うち 12 種類については基準の閾値を策定することができた。残りの 5 種類の閾値については、今後更なる検討が必要である。

【社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準】

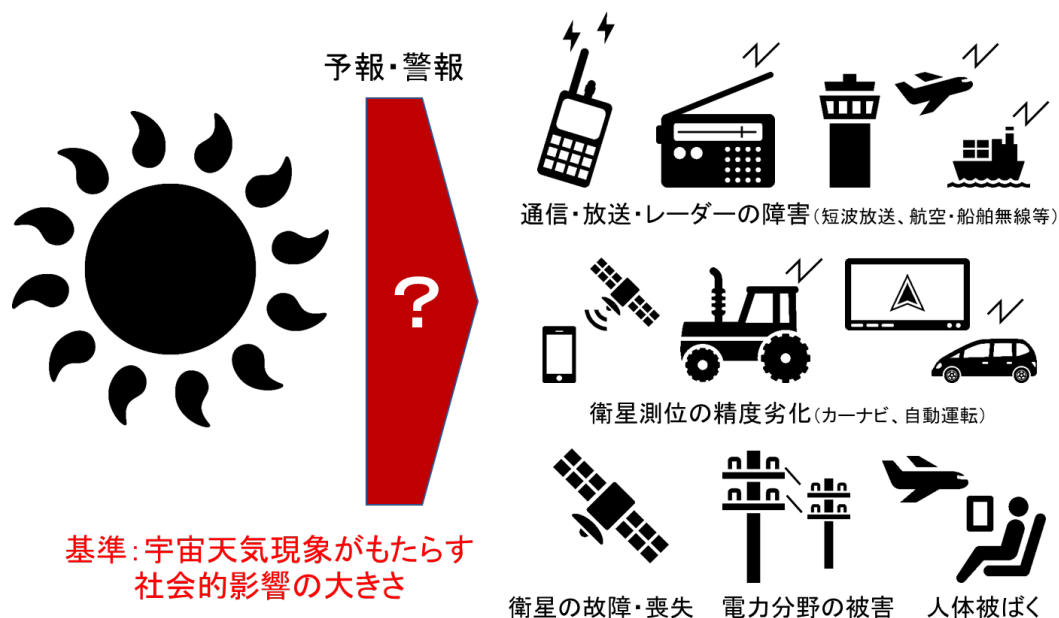
ア 全分野の一覧	別紙 2
イ 通信・放送分野	別紙 3
ウ 測位分野	別紙 4
エ 衛星運用分野	別紙 5
オ 電力分野	別紙 6
カ 航空機人体被ばく分野	別紙 7

- これらの検討結果を踏まえ、NICT は、今後の宇宙天気予報では新基準を用いることを検討するべきである。また、前述のとおり、基準を組織の内規として制定するとともに公表することで、その意味等に関する周知啓発を推進するべきである。



- 宇宙天気の物理現象面の規模の大きさに着目した基準
(例: 太陽 高エネルギー粒子の量 等)
- 社会インフラが受ける被害の危険度を直感的に理解しにくい。
- 発表される情報は専門用語を伴う学術的内容であり、一般企業や報道機関にとり直ちに意味を理解しにくい。

図9 NICTにおける宇宙天気予報の基準（現在のイメージ）



- 宇宙天気現象がもたらすハザード（危害要因）を容易に理解
- 一般企業や報道機関が警報の意味を直ちに理解

図10 社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（将来イメージ）

- なお、本検討会において基準の閾値の具体化に至らなかったカテゴリについては、今後、NICT を中心に産学官連携で検討を進め、早期に明確化を図るべきである。また、宇宙天気現象の影響を受けるおそれのある関連企業や業界団体は、基準の検討作業に積極的に参加するべきであり、その会議体や仕組みを検討すべきである。さらに、過去に行われた科学研究費補助金：新学術領域研究「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」（PSTEP）で研究対象とならなかった社会インフラについては研究の深化が必要であり、その研究体制等も検討すべきである。
- また、宇宙天気現象は自然現象であり、想定を超えて現象が発生する可能性があること、特に社会的影響の予測精度には一定の限界があることから、関係企業等は、こうした警報の不確実性については十分に理解しておくことが求められる。

（４）社会インフラからの情報収集の必要性

- 社会的影響の度合いを考慮した予報・警報の精度を向上させるためには、社会インフラ側に実際に生じた誤動作、混信、不具合、故障等の被害に関する情報を NICT が円滑に収集できるようにする必要がある。
- このため、関係省庁や関係企業は、社会インフラの被害に関する情報を NICT に積極的に提供するとともに、NICT の問い合わせにも対応することが期待される。
- 一方、NICT は、情報提供の協力相手に対しては、①より綿密な宇宙天気予報の提供、②宇宙天気現象に関する個別相談・技術相談への優先的対応、③社会インフラに生じた被害状況を聴取しつつ、原因が他の脅威によるものかどうかの原因の切り分け支援を行うといった協力活動が期待される。
- なお、NICT は、宇宙天気予報に関する社会インフラ側からのユーザーニーズの理解を不断に深め、自らの予報のリードタイムと予報精度に関する目標を設定することにより、宇宙天気予報サービスの質の向上に努めるべきである。

（５）将来の基準見直しの在り方

- 宇宙天気予報で使用される NICT の基準類は、不断に見直しを行っていくことが望まれる。また、太陽フレア爆発等の大規模な現象が発生した場合には、観測データや国内外での被害状況を踏まえて、臨機応変に基準類を見直していくことが求められるためその会議体や仕組みを検討すべきである。
- 基準類の見直しに際しては、NICT は、学术界・産業界・関係省庁等の代表者を交えながら共同で調査研究等を実施することで、より適切な基準を目指すべきである。

また、警報の発表基準を変更した場合には、NICT はその旨を報道発表することにより、変更後の基準を広く周知するべきである。

第4章 社会インフラへの影響と効果的な対処

(1) 極端な宇宙天気現象がもたらす最悪シナリオ

- 100年に1回またはそれ以下の頻度で発生する極端な宇宙天気現象（いわゆるエクストリーム・イベント）について、我が国が受ける被害の全体像（様相）を明らかにすることにより、社会インフラにおける対策の必要性を関係企業等に周知するとともに、産学官による対策の企画立案の基礎資料とすることを目的として、起こり得る最悪シナリオを検討した。
- その想定の結果、次表のとおり我が国の社会経済や国民生活に甚大な被害をもたらすことが判明した（詳細は別紙1参照）。
- なお、今回想定した最悪シナリオは、過去の大規模イベントにおける状況や最新の学術研究、海外における同種の被害想定等を踏まえたものであるが、被害に関する定性的・定量的な想定手法は未だ確立されものではなく不確定な部分もあるため、今後も引き続き検討していく必要がある。

表7 極端な宇宙天気現象がもたらす最悪シナリオ（抜粋）

分野	主な被害の様相（100年に1回またはそれ以下の頻度で発生）
ア 通信・放送・レーダーへの被害がもたらすもの	● 短波帯（HF）の通信は、発生直後から、<u>全国的に使用不可となる状況が2週間断続的に続く</u>。短波帯の電波を用いる船舶無線や航空無線、アマチュア無線の利用に多大な支障が生じる。 ● 短波帯の放送は、電離圏伝搬を伴う地域においては、<u>2週間にわたり断続的に使用不可</u>となる。 ● VHF帯・UHF帯の周波数を使用する無線システムは、発生直後から太陽フレアの大規模爆発による電波雑音（太陽電波バースト）の影響を受け、<u>昼間の時間帯に断続的に使用できなくなる期間が全国的に2週間続く</u>。このため、防災行政無線、消防無線、警察無線、タクシー無線、列車無線等の通信システムに多大な支障が生じ、これらを用いる<u>都道府県・市町村・公共機関等の公共サービスの維持が困難</u>となる。 ● 携帯電話システム（UHF帯）には、太陽電波バーストの影響を受け、<u>昼間の時間帯に最大で数時間程度のサービス停止が全国の一部エリアで2週間にわたり断続的に発生</u>する。その結果、回線のふくそうや通信の途絶が発生し、<u>緊急通報（110番、119番、118番）を含む全</u>

	<u>ての通信がつながりにくい事態</u>が各地で発生する。また、スマートフォンからの携帯電話事業者経由のネット接続も困難になる。 ● 衛星携帯電話の一部には、<u>断続的に回線を使用できなくなる期間が全国的に2週間続く</u>。このため、航空機、船舶、電力・ガス・石油などのライフライン企業、重要拠点のバックアップ、遠隔地の監視・制御、自治体の防災用途等、<u>衛星携帯電話を利用する分野は活動に著しい制約を受ける</u>。 ● 船舶無線については、短波通信と衛星携帯電話の両方が使用困難となり、洋上で孤立する船舶が発生し、<u>遭難事故時の救助要請が困難</u>になる。 ● 一部のレーダーについて、太陽電波バーストにより<u>昼間の観測能力の低下が2週間にわたり断続的に発生</u>する。気象観測用レーダー、航空管制用レーダー、防衛用監視レーダー、船舶用レーダー、沿岸監視用レーダー等の<u>社会生活を支える公共用システムに多大な支障</u>が生じる。その結果、<u>航空機や船舶の運航見合わせが発生し、安全保障分野にも影響</u>が生じる
イ 衛星測位への被害がもたらすもの	● 衛星測位システム（GPS 衛星、準天頂衛星みちびき等）は、<u>測位精度の大幅な劣化や測位の途絶が全国的に2週間にわたり断続的に発生</u>する。 ● このため、カーナビゲーションや自動運転、ドローンの位置精度が大幅に低下し、衛星測位に係る冗長系や安全対策を持たないシステムを運用した場合、<u>最大で数十メートルの誤差（ずれ）が生じ、その結果、衝突事故が発生する</u>。また、<u>安全確保のための運行見合わせが2週間にわたり断続的に発生</u>する。 ● 衛星測位を利用する農業機械、建設機械、車両（物流、旅客、バスロケーション、配車管理）、ロボット、貨物追跡システム、鉄道、船舶では、測位精度の大幅劣化や測位の途絶に伴い<u>運行抑制が2週間にわたり断続的に発生</u>し、農作業や建設作業の遅れ、交通・物流の停滞が大規模に発生する。 ● スマートフォンの位置情報の精度が劣化するため、緊急通報（110番、119番等）を発信した際、<u>緊急通報位置通知の精度が劣化し、緊急時の駆けつけが遅れる</u>。フードデリバリーの配達業務において、利用者個人や利用宅への荷物のピンポイントの配送が困難になる。
ウ 衛星運用への被害がもたらすもの	● <u>多くの衛星になんらかの障害・不具合・故障が発生し、そのうち相当数の衛星はシステム機能の一部または全体を喪失する</u>。

	● 全ての衛星について慎重な運用を強いられ、気象衛星の利用制限により、<u>天気予報の精度が劣化</u>する。通信衛星の利用制限により、<u>衛星通信の利用が困難</u>になる。放送衛星の利用制限により、<u>衛星放送の視聴が困難</u>になる。測位衛星の利用制限により、<u>衛星測位の利用が困難</u>になる。観測衛星の利用制限により、<u>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</u>になる。 ● 太陽電池の劣化が急激に進行し、<u>衛星の寿命が大幅に短くなる</u>。
エ 航空運用への被害がもたらすもの	● 衛星測位精度が劣化により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、<u>世界的に運航見合わせや減便が2週間にわたり多発</u>する。 ● 高緯度領域での飛行に伴う搭乗員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<u>飛行時間が長くなり消費燃料も増加</u>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、<u>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</u>する。これに伴い、<u>数時間単位での出発便の空港待機、到着便の上空待機が2週間にわたり断続的に発生</u>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、<u>航空機の運休が2週間にわたり発生</u>する。
オ 電力分野への被害がもたらすもの	● 電力系統においては、磁気圏じょう乱により地磁気誘導電流（GIC）が発生し、設備上・運用上の対策を措置していない電力インフラにおいては、<u>保護装置の誤作動が発生し、広域停電が発生</u>する。 ● 誤作動が起きなかった場合も、<u>一部の変圧器の加熱による損傷が発生し、電力供給に影響が出る</u>。 ● 電力供給の途絶や逼迫に伴い<u>社会経済や全産業が広範囲に影響</u>を受ける。

※ 詳細は別紙 1 を参照

- なお、我が国ではこのような全分野にわたる最悪シナリオの策定は初めての試みであり、被害に関する定性的・定量的な確固たる想定手法は確立されたものではない。このため、今後新たに発生する宇宙天気現象や最新の学術研究、社会学・経済学の立場からの調査研究等の結果を持ち寄りつつ、さらには国際間の共同研究にも取り組むことにより想定手法を確立し、最悪シナリオの不断の見直しと修正が行われるべきである。

- また、ロイズがケンブリッジ大学リスク研究センターの研究に基づき 2015 年に公表した「Lloyd's City Risk Index 2015-2025」によると、宇宙天気現象（Solar storm）が東京にもたらす潜在的な経済的被害は、全世界の主要都市の中で最も大きく、24.2 億ドル（約 3,000 億円、1 ドルは 125 円で換算）と予測している。今後は、我が国が受ける被害の全体像（様相）だけでなく、我が国の経済的被害の規模の詳細についても想定作業が必要である。

（宇宙天気リスクのランドスケープ）

- 宇宙天気現象の「発生頻度」と発生した場合の「影響の度合い」（いわゆるインパクト）の関係については、前述の最悪シナリオの検討結果を踏まえると、次図の宇宙天気リスクのランドスケープ（俯瞰図）として整理することができる。

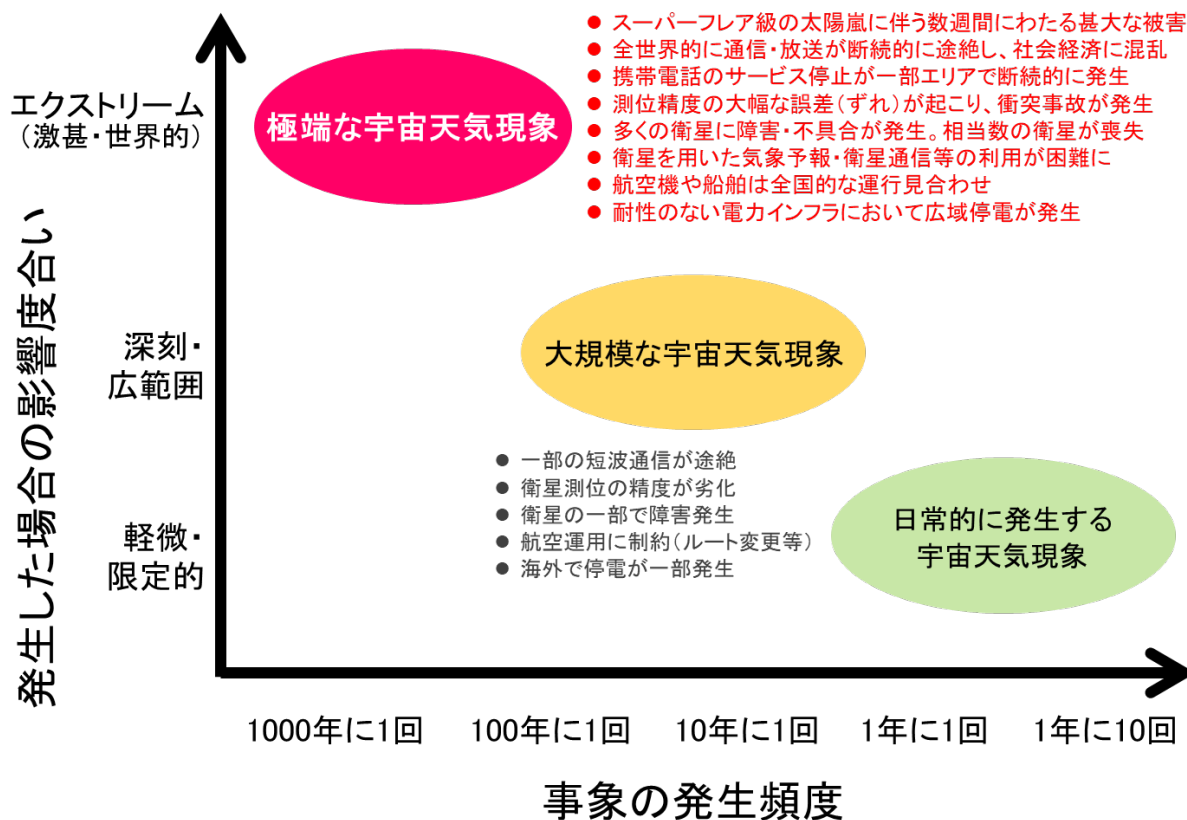


図 11 宇宙天気リスクのランドスケープ（俯瞰図）

(2) 対処に向けた基本的な考え方

(基本的な考え方)

- 太陽活動によって通信・放送・測位システム、衛星運用、航空無線、電力網などの社会インフラに異常を発生させるおそれがある。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。
- よって、我が国は、国、関係企業・関係団体、学术界等が、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。このためには、後述の宇宙天気現象への災害対策基本法の適用を含め、産学官連携による相互協力、計画的な行動、対処能力の増強の積み重ねによって、国家全体として危機管理にあたるべきである。
- また、この人類として未知な宇宙現象への対処は一朝一夕に成せるものではなく、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。

(国家レベルで危機管理を行う視点)

- 前述のとおり、国連防災機関（UNDRR）と国際学術会議（ISC）は宇宙天気を「対処すべき災害」の一つに位置づけるとともに、主要国では過去に発生した被害事例を踏まえつつ、深刻な宇宙天気に対処するための国家戦略を相次いで発表している。
- 米国や英国では、深刻な宇宙天気を国家として対処すべき「国家リスク」として政府が明確に位置づけており、関係機関や関係企業の行動に関する対処戦略を策定している。
- また最近では、多数の衛星コンステレーションにより宇宙経由のインターネット接続サービスを提供するグローバル企業において、衛星の打ち上げ時の地磁気嵐によって密度が増した大気による抵抗を受けたため、多数の衛星を一挙に喪失する大規模事故が発生している。宇宙天気現象は全地球的に被害を及ぼす現象であり、ひとたび大規模イベントが発生した場合に被る経済損失は計り知れない。
- よって、我々は、前述の「最悪シナリオ」のワーストケースも踏まえつつ、宇宙天気を目の前にある現実のリスクとして捉え、国家レベルで危機管理を行うべき対象であると認識する必要がある。
- 特に、通信業界、放送業界、無線局免許人、電力業界、航空業界、宇宙・衛星システム業界、衛星測位関連業界の関係企業は、企業トップ以下がリスクを的確に認識し、速やかに行動に着手することが必要である。

(災害対策基本法に基づく対処)

- 極端な宇宙天気現象は、宇宙環境が人類にもたらす異常な自然現象である。極端な宇宙天気現象がもたらすハザードは、地震・津波、水害・土砂災害、火山噴火等の大規模な自然災害がもたらす被害と並ぶリスクであり、我々は他の自然災害に対する備えと同じように国家的・制度的な対策を進める必要がある。
- 例えば、我が国の災害対策基本法（昭和三十六年法律第二百二十三号）は、災害を「暴風、竜巻、豪雨、豪雪、洪水、崖崩れ、土石流、高潮、地震、津波、噴火、地滑りその他の異常な自然現象」（第2条第1号）と定義しており、宇宙天気現象がもたらす被害についても同法の対象であると優に認めることができる。
- このため、今後は、同法に基づく災害対策法制の中に宇宙天気現象による災害を組み込むことにより、我が国全体として確実にリスクに対応していく必要がある。
- また、通信・放送・測位、衛星運用、航空運用、電力分野等の社会インフラの対策については、各分野の特性や状況に応じて、国、産業界、学术界が効果的に連携しつつ、それぞれの役割を確実に果たしていくことが求められる。その際には、国の防災基本計画、指定公共機関が策定する防災業務計画、民間が策定する事業継続計画（BCP）等、自然災害に対する備えとしてそれぞれが確立してきた種々の計画の枠組みの中で、宇宙天気現象に対するしかるべき対策を講じていくべきである。

(宇宙天気現象の特徴を踏まえた対処)

- 宇宙天気現象の被害は次表が示すとおり多岐にわたるものであり、それらは複雑な連鎖発生的なメカニズムで発生する（次図参照）。
- さらに、地震・津波・水害といった他の自然災害とは異なり、宇宙天気現象は人間が視覚的・体感的に捉えることが極めて困難な現象であり、社会インフラの物理的被害やサービス途絶が発生して初めて具体的に覚知できるものである。
- このため、社会インフラの関係企業・関係団体や所管省庁等は、準備や対処に際してはこのような特徴を十分に理解しておくことが必要である。

表 8 宇宙天気現象により発生する被害とその原因

分 野	発生する被害	被害を起こし得る宇宙天気現象
通信・放送	短波（HF）通信・放送の障害	デリンジャー現象、電離圏負相嵐、 プラズマバブル、極冠吸収、 太陽電波バースト
	超短波（VHF）通信・放送の障害	プラズマバブル（衛星通信に影響）、 スプラディック E 層、 太陽電波バースト
測位利用	一周波測位精度の劣化	電離圏正相嵐、プラズマバブル、 電離圏シンチレーション、 太陽電波バースト
	二周波測位（全般）精度の劣化	電離圏シンチレーション、 太陽電波バースト
	二周波測位（位相）精度の劣化	中規模伝播性電離圏（じょう乱 MSTID）、太陽電波バースト
衛星運用	衛星帯電（表面帯電、深部帯電）（誤動作等の不具合、最悪の場合は衛星損失）	サブストーム高温電子、 放射線帯電子
	シングルイベントアップセット（誤動作等の不具合、最悪の場合衛星損失）	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	太陽電池の劣化	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	軌道・姿勢じょう乱（衛星姿勢制御（磁気トルカ）異常、衛星大気ドラッグ） （最悪の場合は衛星損失）	超高層大気の加熱
	衛星通信への影響	電離圏シンチレーション（主にS帯以下の低い周波数で影響あり）
航空運用	通信障害	デリンジャー現象、極冠吸収（PCA）、 プラズマバブル、スプラディック E 層、 太陽電波バースト
	測位精度の劣化	電離圏正相嵐、プラズマバブル、 電離圏シンチレーション
	乗務員等の被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	電子機器のソフトウェアエラー	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	レーダー障害	太陽からの強いマイクロ波
電力	停電（送電線への過電流）	地磁気誘導電流（GIC）
人体被ばく	航空機人体被ばく、宇宙飛行士被ばく 地上での被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）
その他	地上での被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	電子機器のソフトウェアエラー	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	信号機器の誤動作	地磁気誘導電流（GIC）

出典：PSTEP 報告書に基づき被害と原因を整理した。

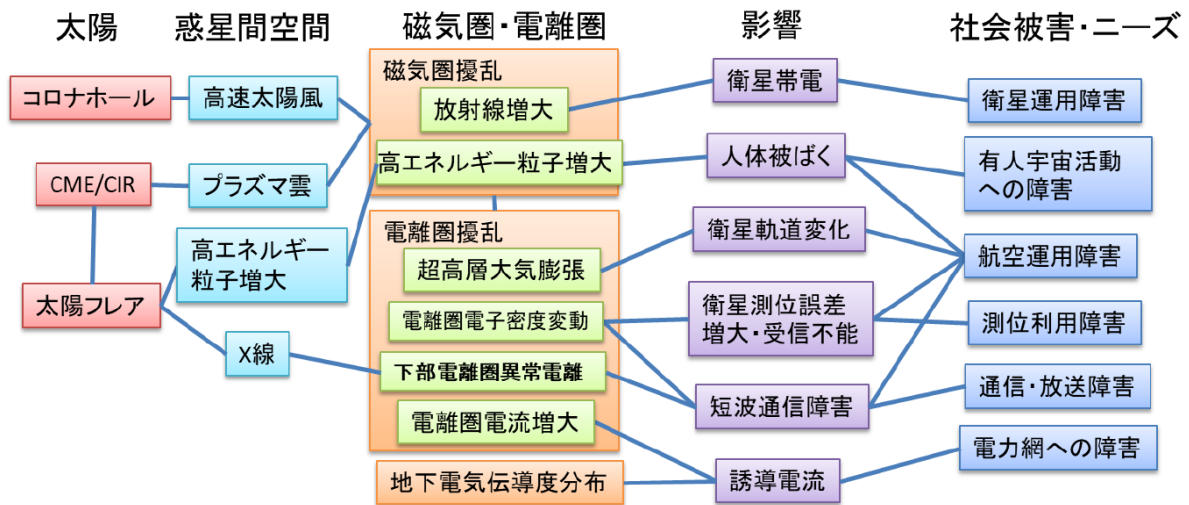


図 12 宇宙天気現象と社会影響の関係（出典：NICT）

（３）社会インフラにおける今後の対処

（社会インフラにおける共通的政策）

- 目指すべき対処の方向性としては、宇宙天気現象のハザード（＝被害を引き起こす可能性のある危害要因）そのものを低減することは困難であることから、社会インフラ側の脆弱性を低減することにより、リスク（被害）を最小化するアプローチが必要となる（次図参照）。
- また、宇宙天気現象の対策は、①被害の発生を常に事前に想定・評価するとともに、②社会インフラに被害が発生した場合にはその最小化を図りつつ、③最終的にはその迅速な回復を図ることが必要であり、関係省庁や関係企業においては、それぞれのフェーズにおける効果的な対策が検討されるべきである。
- 海外の主要国においては、宇宙天気現象は時として重要インフラシステムに影響を与えるとともに、一つのシステムの故障が他のシステムに連鎖するおそれがあるとの認識の下、インフラに係るリスク管理能力の向上を目指す取り組みが進められている。よって、我が国においても、被害の連鎖による社会経済への影響に十分留意するべきである。
- 以上を踏まえ、社会インフラに係る関係企業や無線局の免許人等が対策を行うに際して、共通的な対策として実施されるべきものは次のとおりである。

【社会インフラに関して実施されるべき共通的対策】

- 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）

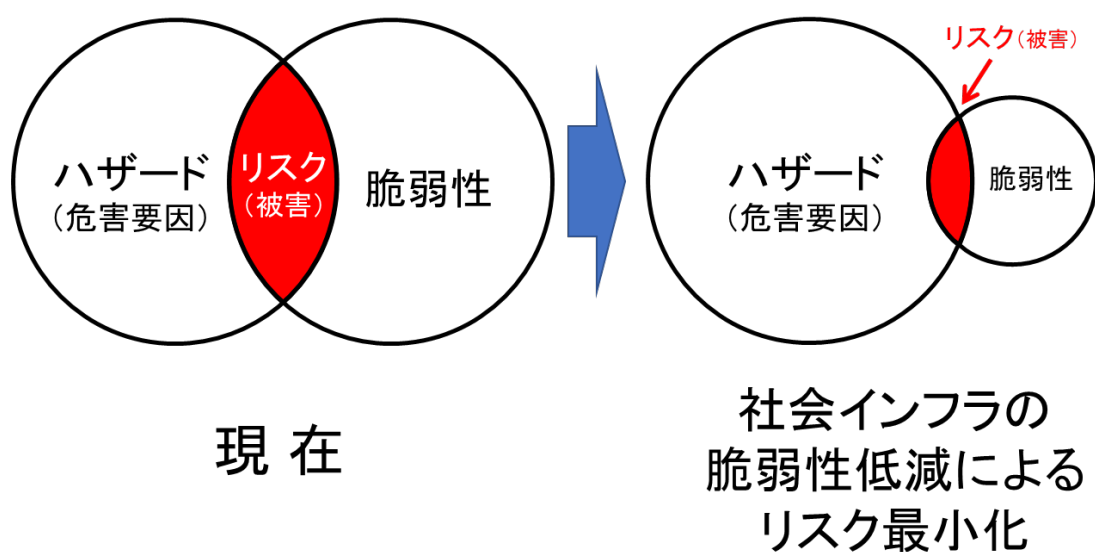


図 13 宇宙天気現象の対処において目指すべき方向性

（標準ガイドラインの策定等）

- 宇宙天気現象によって影響を受けるおそれのある社会インフラを抱える企業等は、対処方法について必ずしも専門的知見やノウハウを有しているとは限らない。このため、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。また、これらは、科学的知見及び実際の被害から得られる教訓を踏まえて、絶えず見直しが図られることが重要である。

- また、宇宙天気現象への対処は非常時に対応する企業の事業継続計画（BCP）の一部として取り扱われるべきものであり、組織内の危機管理部門も交えながら対策が検討されるべきである。
- なお、社会インフラにおける対策コストについては、リスクコントロールやリスクファイナンスを考慮しつつ、トータルコストを最小化できることが望まれる。よって、宇宙天気現象のリスクの大きさや対策の優先度等を考慮しつつ、それらの最適化に向けた調査研究も共同で行われることが望まれる。

（社会インフラにおける共同観測プロジェクト）

- 宇宙天気現象が社会インフラに与える影響に関して、その数値モデルの再現性を高めるためには、フィールド（実地）での観測データが不可欠となる。このため、企業等の協力を得て、社会インフラ側の設備・敷地・機内・衛星構体内等に観測センサーを設置し、データ解析に中長期的に取り組む共同プロジェクトが産学官連携によって組成されるべきである。
- また、そうしたデータ解析に基づき、モデリングの精度向上、リスク評価の見直し、対策方法の改善等に共同で取り組むべきである。さらに、実測データを用いたリアリティある周知啓発や被害想定を実施することにより、経営者を含め、産業界全体のリスクに対する理解を増進するべきである。

表 9 社会インフラにおける共同観測プロジェクトとして期待される例

分 野	共同観測の実現が期待される例
通信・放送に関する影響	電離圏観測点の充実 等
衛星測位に関する影響	陸上・海上・空域における GNSS の受信観測 等
衛星運用に関する影響	衛星バスへの観測センサーの設置 等
航空運用に関する影響	電離圏観測点の充実 等
電力分野に関する影響	変圧器アース線への電流プローブの設置 等
人体被ばくに関する影響	航空機や船舶（北極海航路）への線量計の設置 等

- さらに未来のリスク管理の在り方として、社会インフラ側で得られた観測データのリアルタイムモニタリングに関係機関等が協力することにより、重要な社会インフラの状況を共同で把握し、必要に応じて宇宙天気の予測精度向上にデータを役立てる体制の確立が期待される。

（国による研究開発の支援）

- 宇宙天気現象を解明して対策方法を研究する行為は、企業単独での取組は難しく、分野横断的な取組によって対策を推進する必要がある。このため、英国政府では、2019 年から 4 年間で 1,990 万ポンド（約 30 億円）の宇宙天気の機器・測定・モデリング・リスク（SWIMMR：Space Weather Instrumentation, Measurement, Modelling and Risk）プログラムを国が運営し、計測機器開発やモデル開発等を公費により支援している。
- よって、国は、学术界・産業界に対して、宇宙天気現象の観測・分析・予報に関する研究開発及び開発機器の実装等を支援する枠組みを検討すべきである。また、英国等での支援策を参考にしつつ我が国として重点化すべき課題を設定することで、効率的・効果的な支援を目指すべきである。なお、我が国の研究開発等の成果は、積極的に海外に情報発信するべきである。

【英国 SWIMMR プログラムの支援対象】

- ア 人工衛星や航空宇宙用途に使用する小型放射線モニタの製作・運用
- イ 無線通信や衛星測位に対する電離圏の影響に関するモデリング手法の改善
- ウ 宇宙天気モデリングと予報システムの確立、妥当性・信頼性検証
- エ 電力網に対する地磁気誘導電流の影響を予測するための製品・サービスの開発
- オ 太陽風の伝搬予測モデルの改善・運用、警報システムの改善
- カ コロナ磁場・コロナ密度・コロナ質量放出（CME）の三次元マップ作成
- キ 宇宙天気予報のモデルとデータセットに関して、学术界から社会インフラの運用現場への受け渡しを支援するフレームワーク開発

（リスクファイナンス（損害保険）の活用）

- 損害保険分野においては人工衛星やロケットに生じた損害を補償するため、いわゆる宇宙保険が販売されている。宇宙産業の発展のためには、多様化するリスクに対応して、発生した損失に金銭面に対応するリスクファイナンスが重要といえる。
- 損害保険会社においては現在、通常想定されている宇宙環境（宇宙天気現象等）に加えて、想定外の事象に備えたマージン等を織り込んで宇宙保険の保険料率が算出されている。しかし、宇宙天気現象を「想定外」から「想定内」のリスクとして取り扱うことができれば、予防・対処の可能性が増し、結果として衛星等の全体コストの低下と保険料率の低下を見込むことができる。

- このため、宇宙保険や社会インフラに係る他の損害保険の利用する産業分野は、インフラの脆弱性・リスク評価、強靱化対策、不具合発生時の対処計画等に積極的に取り組むことが望まれる。

(4) 分野別の対処の方向性

ア 通信・放送に関する影響

(影響の概要)

- 短波放送や船舶通信、航空通信、軍用無線等で使用される短波帯（HF、3-30MHz）は、電離圏に電波を反射させることで、地表と電離圏の反射を繰り返しながら地球上の遠方との通信が可能になる利点を有する。海底ケーブルや通信衛星が発達した現代では短波通信の利用は限定的となっているものの、引き続き航空無線や船舶無線などの重要な遠距離通信に用いられている状況にある。
- しかし、電離圏のじょう乱が発生した場合、電波の伝わり方が乱されるため通信・放送に著しい障害を発生させる。
- 例えば、2017年9月、カリブ海では超大型ハリケーンのハリケーン・イルマ等の複数のハリケーンが連続して発生し、カリブ海諸国に甚大の被害を発生させた。しかし、Xクラスの太陽フレア爆発も9月6日～10日に連続的に発生したため、赤道上空の電離圏に異常を発生させ、現地で緊急災害対応を行っていた連邦緊急事態管理庁（FEMA）等の関係者の短波通信に混乱を生じさせている。
- 具体的には、9月6日の午前中から午後にかけて短波通信の全面的な通信途絶が発生した。また9月10日夕刻には通信途絶が再び3時間程度継続して発生した。また、同時期、ブラジルとフランス領ギニアの沿岸を飛行していたフランスの民間航空機には、約90分間にわたり航空無線の連絡が途絶し、その航空機は管制官パイロット間データ通信装置（CPDLC）を搭載していない機であったため関係者間で混乱を引き起こした。
- なお、「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」（2020年10月7日、科学研究費補助金新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」に基づく報告書）（PSTEP 報告書）では、1年に1回程度の頻度で発生する宇宙天気現象によって短波通信は影響を受け、10年に1回程度の頻度で発生する大規模な現象によって短波通信は運用継続が困難となる深刻な影響を受ける可能性が指摘されている。

宇宙天気現象	被害	発生頻度と影響				
		日常～複数回 /年	1回/1年	1回/10 年	1回/100 年	1回 /1000年
電離圏嵐（負相嵐）	短波（HF） 通信障害	太陽活動が低い時には影響は小さい	太陽活動が低い時には影響は小さい	あり	あり	あり
デリンジャー現象	短波（HF） 通信障害	太陽活動が低い時には影響は小さい	太陽活動が低い時には影響は小さい	あり	あり	あり
極冠吸収（PCA）	短波（HF） 通信障害	太陽活動が低い時には影響は小さい	太陽活動が低い時には影響は小さい	あり	あり	あり
プラズマバブル	短波（HF） 通信障害	太陽活動が低い時には影響の頻度は減る	太陽活動が低い時には影響は小さい	あり	あり	あり

図 14 宇宙天気の影響マトリクス（短波通信の影響）（出典：PSTEP 報告書）

（今後の対処の方向性）

- 電離圏の影響を受ける周波数帯を使用する無線局免許人は、こうした宇宙天気現象が発生した場合には通信・放送の途絶が発生し得ることについて十分に理解し、必要に応じて代替手段を備えておくべきである。
- また、無線局免許人は、宇宙天気予報を十分に活用することにより、良好な通信・放送を確保できるようにするべきである。
- さらに、宇宙天気現象による影響を軽減する対策について検討し、関係者間で情報共有されることが望まれる。具体的には、他の通信手段（他の周波数帯の使用、衛星通信・有線通信の利用等）の利用といった対策が考えられる。
- NICT は、電離圏の変動状況等の最新の宇宙天気予報について、無線局免許人や無線従事者に対してリアルタイムで状況が伝わる仕組みを検討するべきである。また、太陽フレア爆発等の緊急時には、突如として通信・放送が途絶するおそれがあるリスクについて、平時からの周知啓発を推進するべきである。

イ 衛星測位に関する影響

(影響の概要)

- 衛星からの電波によって位置情報を計算する衛星測位システム（GPS 衛星、準天頂衛星みちびき等）は、現代社会の様々な分野で利用されている。しかし、電離圏等の変動により測位精度が劣化し、その結果、様々な利用分野に影響をもたらすおそれがある。
- PSTEP 報告書によると、1 年に 1 回程度の頻度で発生する宇宙天気現象によって測位精度の低下の影響を受け、10 年に 1 回程度の頻度で発生する大規模な現象によって測位精度の不可避な劣化が発生する可能性が指摘されている。
- 一方、衛星測位には一つの周波数帯を用いる方式や複数の周波数帯を用いる方式があり、方式によって精度劣化の程度は異なる。また、測位誤差は軌道予測誤差（測位衛星の位置精度）、マルチパス誤差（建物等での反射による遅延）等も要因となるため、宇宙天気が精度劣化の要因だと一概に断定できない側面もあることに注意を要する。

宇宙天気現象	被害	発生頻度と影響				
		日常～複数回/年	1 回/1 年	1 回/10 年	1 回/100 年	1 回/1000 年
電離圏正相嵐	測位精度の低下	低い	太陽活動が高い時にはありうる	あり	あり	あり
プラズマバブル	測位精度の低下	低い	太陽活動が高い時にはありうる	あり	あり	あり
電離圏シンチレーション	測位精度の低下	低い	太陽活動が高い時にはありうる	あり	あり	あり

図 15 宇宙天気の影響マトリクス（1 周波測位精度の劣化）（出典：PSTEP 報告書）

(今後の対処の方向性)

- カーナビゲーションやドローン等、衛星測位システムの利用分野の裾野が広がるにつれて、宇宙天気現象による測位精度の劣化が与える影響は拡大する。このた

め、宇宙天気現象がもたらす種々のシステムへの影響については、それぞれの利用分野においてリスクを評価するとともに、影響に関する周知啓発活動を推進するべきである。

- また、精度劣化に対するバックアップ等、それぞれのシステムの対策状況を調査するとともに、対策手法に関する調査研究を業界横断的に行うべきである。
- 衛星測位システムは、政府や企業だけでなく、一般消費者や農林漁業・輸送交通分野の従事者も日常的に使用するものである。このため、関係企業・関係団体等は、衛星測位システムのエンドユーザーに対する幅広い周知啓発活動を推進するとともに、深刻な宇宙天気現象が発生した場合に警報を送り届ける方策についても検討を行うべきである。
- なお、次のような対策手法の実用化等が期待される。
 - 精度劣化を回避できる可能性があることから、電離圏等の変動が発生している上空エリアを避けて衛星測位信号を受け取るシステム
 - 劣化した衛星測位信号を補完することによりプラズマバブルの影響を排除
 - 太陽電波バーストの発生頻度に関する解析や測位システムの受信機特性を考慮した影響の定量的評価
 - 電離圏の遅延量の影響を大きく受ける1周波コード相対測位については、2周波コード相対測位により、電離圏の影響を軽減する、もしくは事前に影響を予測し、代替手段による測位を利用する回避方法

ウ 衛星運用に関する影響

(影響の概要)

- 宇宙天気現象によって衛星帯電（表面帯電、深部帯電）、太陽電池の劣化、軌道・姿勢の異常が発生し、最悪の場合には衛星本体の損失が発生するおそれがある。
- 我が国においては、実際に宇宙天気現象が原因となって衛星本体の損失に至ったと推定される例が2件あり、2000年のX線天文衛星「あすか」(ASTRO-D)及び2003年の環境観測技術衛星「みどり2号」(ADEOS-II)の事例が報告されている。
- また、2018年6月2日には準天頂衛星みちびき3号機において、搭載されたL5S信号（測位技術実証サービス用信号）送信信号増幅部のA系とB系の切り替えを行うスイッチが意図せず切り替わる異常動作が発生し、スイッチが動作しなくなる事象が発生している。
- さらに、衛星コンステレーションによりグローバルなインターネット接続サービスを提供している米国SpaceX社は2022年2月、ケネディ宇宙センター（フロリ

ダ州) から 49 機の Starlink 衛星を地球低軌道に打ち上げたものの、地磁気嵐によって暖められ密度が増した大気による抵抗を受けたため、大気ドラッグと呼ばれる現象により 40 機の衛星が大気圏に再突入し喪失したと発表している。

- 過去の統計調査によると、宇宙環境に起因する衛星障害の 1/4 から半数以上が衛星の帯電・放電による障害であるとされている。衛星帯電には表面帯電（衛星表面部材や構造体の帯電）と深部帯電（集積回路等の衛星深部の帯電）の二種類があり、帯電の電位差が大きくなることによって放電が発生する確率が上昇する。放電箇所によっては衛星の全損事故を引き起こすことがある。
- 帯電による衛星の故障を防ぐため、宇宙天気予報を参考にしつつ、衛星姿勢変更・軌道変更などのクリティカルな運用の回避、不具合発生時の対応体制の準備、衛星各機器の電源の一時的な遮断等の措置が衛星運用者によって取られている。
- PSTEP 報告書によると、表面帯電については、1 年に 1 回程度または 10 年に 1 回程度の頻度で発生する宇宙天気現象によって不具合等の影響を受ける可能性が指摘されている。また、100 年に 1 回程度の頻度で発生する大規模な現象による影響は現在のところ未評価となっているものの、実際には前述のとおり既に衛星の全損事故が発生している。
- 上記の不具合や運用異常の教訓を踏まえ、衛星障害を未然に防ぐための地上での検証試験等を含めた設計標準類が整備されている。

宇宙天気現象	被害	発生頻度と影響				
		日常～複数回/年	1 回/1 年	1 回/10 年	1 回/100 年	1 回/1000 年
サブストーム 高温電子	人工衛星（表面帯電・放電等） （誤動作等の不具合、最悪の場合衛星損失）	なし	あり	あり（太陽活動下降期に増加傾向）	未評価	未評価

図 16 宇宙天気の影響マトリクス（衛星の表面帯電）（出典：PSTEP 報告書）

（今後の対処の方向性）

- 衛星の喪失はアセット（資産）の損失となるばかりか、その衛星が提供する重要な通信・放送・測位・観測のサービス機能が失われることになり、社会的影響は

無視できない。このため、衛星を開発・運用する企業等は、宇宙天気現象の影響を十分に考慮して、研究開発や衛星設計、衛星運用を行うべきである。

- また、NICT は、宇宙空間への配置を目指した観測センサーの研究開発を確実に行うとともに、衛星帯電状況をモニタリングし、リスクをリアルタイムで評価する衛星運用支援サービスを実用化するべきである。
- 現在の衛星は、国際標準の定める宇宙環境下での帯放電現象に十分耐えうる設計に基づき製造されているが、周囲の宇宙環境変動と帯電の発達の関係は未解明な部分が多く、想定外の帯放電現象が発生する可能性がある。このため、宇宙環境変動と衛星障害の関係について、過去の衛星障害情報等を参照したより本格的な調査研究やリスク評価が実施されるべきである。
- 深部帯電は、表面帯電に比べて帯電状況を解消するのが難しく、内部の集積回路に不具合をもたらすことがある。特に近年は電子部品の高性能化・高密度化が進展しており、深部帯電による影響は大きくなる傾向がある。このため今後は、シミュレーション等によって個別の衛星ごとに深部帯電の発生確率を評価できるような取り組みを進めるべきである。
- また、深部帯電が懸念される部材は、設計段階の試験やシミュレーションによって帯放電の可能性を検証しておくとともに、衛星障害情報と宇宙環境データを用いた帯放電の事後解析ができるように産学官連携の取組を進めるべきである。
- なお、経済産業省が推進している宇宙・地上の多様な産業を対象とした放射線等の試験環境の整備（「宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業」）は宇宙天気現象に対応した重要な施策であることから、今後も継続的な施策展開が期待される。

エ 航空運用に関する影響

（影響の概要）

- デリンジャー現象や電離圏嵐、プラズマバブル、太陽高エネルギー粒子（SEP）等の宇宙天気現象によって、航空運用に必要な通信や測位に障害が引き起こされるおそれがある。
- 国際民間航空機関（ICAO）では民間航空機の運用における台風や雷、大雪などの気象情報等の利用のルールが定められているが、2019 年からはさらに宇宙天気情報の利用が開始され、世界の ICAO 宇宙天気センターから宇宙天気情報の配信が行われている。日本では NICT がアジアで最初の ICAO グローバル宇宙天気センターの一員として国際的に認証され、2019 年 11 月にサービスを開始している。
- 航空機では衛星通信（SATCOM）と電離圏伝播を利用した短波（HF）帯通信が使用され、国内線では短距離の超短波帯（VHF）通信が使用されている。また、超短波

帯（VHF）の電波が届かない洋上管制では短波通信が用いられている。特に極域の北極圏においては、陸上の超短波帯（VHF）の通信局がなく、かつ赤道上空の静止軌道上にある衛星による衛星通信も利用できないため、主な通信手段となる短波通信が利用できなくなることの影響は非常に大きい。

- 過去においては、成田空港と飛行中の国際線航空機との間の通信状況が約 2 時間にわたり数分ずつ、断続的に悪くなる現象（2001 年 4 月 3 日）、短波（HF）帯通信の悪化による極航路の航空機の航路変更（2003 年 10 月、いわゆるハロウィンイベント）、極冠吸収（PCA）と呼ばれる現象による通信障害リスクを回避するための United Airlines 計 26 便の航路変更（2005 年 1 月）等の影響が発生している。
- また、現代の航空運用においては衛星測位システムの利用が進んでおり、宇宙天気現象による測位精度の劣化が航空機運用に影響を与えるおそれがある。こうした現象に備えるため、衛星測位システムを補強するシステムが用いられている。
- PSTEP 報告書では、短波（HF）帯通信への影響に着目すると、1 年に 1 回程度の頻度で発生する宇宙天気現象によって航路変更を余儀なくされるおそれがあり、10 年に 1 回程度の頻度で発生する大規模な現象によって航空機の運休措置が必要となる可能性が指摘されている。

宇宙天気現象	被害	発生頻度と影響				
		日常～ 複数回/年	1 回 /1 年	1 回 /10 年	1 回 /100 年	1 回/1000 年
デリンジャー現象	短波通信への影響	なし	航空機航路変更	航空機運休		
極冠吸収 (PCA)	短波通信への影響					
プラズマバブル	短波通信への影響					
スボラディック E 層	超短波通信への影響	低いが可能あり	低いが可能あり	低いが可能あり	低いが可能あり	低いが可能あり

図 17 宇宙天気の影響マトリクス（航空用短波通信）（出典：PSTEP 報告書）

（今後の対処の方向性）

- 航空運用は安全最優先で行われているものの、同時に、リスク回避（航路変更）に要する航空燃料消費増といった経済的コストについても考慮する必要がある。このため、関係機関及び関係業界は、宇宙天気現象がもたらす影響のリスク評価手法や航空運用現場における効果的な情報活用等の在り方について共同で検討を進めるべきである。

- また、現在のところ、NICT や ICAO から情報発信されている宇宙天気予報サービスについては、航空運用の現場で直接的には利用されていない。このため、宇宙天気に関する情報が航空会社やパイロットによって、日々の運行の中で迅速かつ容易に利用できるよう、新しい仕組みの導入やルールへの落とし込みが検討されるべきである。
- なお、航空運用においては、後述の乗務員等の被ばくに関する影響も考慮する必要がある。

オ 電力分野に関する影響

(影響の概要)

- 磁気圏じょう乱によって送電線に過電流としての地磁気誘導電流（GIC）が発生するため、変圧器の過熱と絶縁オイルの劣化、保護用リレーの誤動作、波形歪による高調波発生、無効電力の増加による電圧低下等が発生する可能性がある。
- 1989 年 3 月、カナダのケベック州では、大規模な磁気嵐による GIC 発生により保護リレーの不要動作による送電システム障害が発生し、約 9 時間にわたり約 600 万人が影響を受ける停電が発生している。また、2003 年 10 月 30 日には、南アフリカ共和国で GIC に伴う変圧器の鉄心付近の加熱により、変圧器の焼損が発生している。
- また、全米科学アカデミーが 2008 年に公表した研究報告「厳しい宇宙天気現象-社会的・掲載的影響の理解 -Severe Space Weather Events-Understanding Societal and Economic Impacts」によると、深刻な宇宙天気現象により北米の送電網に数年間にわたる長期停電をもたらすおそれがあることが報告され、その経済的コストは初年度で 1~2 兆ドルに達するとの試算が紹介されている。
- 電力分野におけるリスクについては、電力系統に生じる GIC の実測調査やシミュレーション研究等が行われており、これらの研究成果に基づくと、我が国においても変圧器焼損や停電等が発生する可能性があるとしている。もし極端な宇宙天気現象による大規模な磁気嵐が起きた場合には、相当量の地磁気誘導電流が発生し、電力系統の脆弱な箇所が被害を受けるおそれは否定できない。
- このため、電力事業者においては、電力系統に生じる GIC の発生メカニズムに対して、関連法令に基づき独自基準を設けつつ設備の監視体制を確立し、変圧器や保護リレー等に対して一定の対策を講じてきている。また、異常電流発生時に備えて、該当する変圧器の運転を一時停止するといった措置を準備している事業者もある。

- しかしながら、電力系統に生じる GIC の発生メカニズムについては未解明な部分が多く存在する。また、GIC に対する事業者ごとのインフラ設備の耐性についても不明となっており、未知な大規模現象に対する現象規模の推定やリスク評価、実験等は未解決の課題となっている。さらに、人類が電力分野で最初に認識した最大規模の宇宙天気現象は約 150 年前のキャリントン・イベント（1859 年発生）であるが、過去にはより過酷な大規模イベントが数百年～1000 年単位で発生していたことが近年の研究で判明し始めている。
- PSTEP 報告書では、1 年に 1 回程度、10 年に 1 回程度または 100 年に 1 回程度の頻度で発生する宇宙天気現象によって、我が国において停電（送電線への過電流）が発生するおそれはないと報告されているが、1000 年に 1 回程度の頻度で発生する大規模な現象による影響は、現在のところ未評価となっている。また、100 年に 1 回程度の頻度で発生する宇宙天気現象についても、事業者ごとの設備の耐性や対策状況によって被害の程度は異なることから、未評価に相当するものとして取り扱っていくことが適当である。
- なお、キャリントン・イベントでは巨大な GIC によって欧米の電信網が被害を受け、システム停止や電報用紙の発火の被害を受けたことが記録されている。このため、電力分野だけでなく、GIC による影響を受けるおそれのある社会インフラやシステムについても大規模な宇宙天気現象に注意する必要がある。

宇宙天気現象	被害	発生頻度と影響				
		日常～ 複数回/ 年	1 回/1 年	1 回/10 年	1 回/100 年	1 回 /1000 年
地磁気誘導電流 (GIC)	停電（送電線への 過電流）	なし	なし	なし	なし	不明

図 18 宇宙天気の影響マトリクス（電力分野）（出典：PSTEP 報告書）

（今後の対処の方向性）

- キャリントン・イベントを超える規模の現象の発生可能性を考慮すると、引き続き、電力分野等に関する調査研究やリスク評価の精緻化作業が必要である。
- 具体的には、次の取組が関係機関・関係企業によって推進されるべきである。

【産学官連携による取組課題】

ア 電力分野の障害を回避するための適切な警報の発表スキームの確立

- イ 電力系統に流れる GIC を実測なしで推定できる手法の確立（必要があれば観測機材を用いて GIC のモニタリングを行う。）
- ウ 警戒すべき GIC の閾値の研究及び電力分野での共通基準化
- エ 国内の三次元地下比抵抗分布モデルの確立に向けた取組
- オ 送電網に係るデータベース（線路の直流抵抗、接地抵抗等）の構築・管理
- カ キャリントン級磁気嵐の発生可能性を早期に予測・検出できる技術の確立
- キ 電力分野以外の分野における GIC の影響に関する調査研究

カ 人体被ばくに関する影響

（影響の概要）

- 宇宙放射線が地球大気圏に降下すると、大気を構成する様々な原子や分子と衝突し、空気シャワー反応を起こして二次宇宙線が発生する。これが航空機高度で降り注ぐことによって、航空機に搭乗している乗務員等の被ばく線量が増大することになる。
- このため、日本では、文部科学省科学技術・学術政策局における放射線安全規制検討会航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ「航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討について（平成 17 年 11 月 1 日）」に基づき、航空機の乗務員に対する年間の被ばく量の上限として 5mSv とするガイドラインが示されており、乗務員等の被ばくを防止するため、大規模な宇宙天気現象の発生時には航路変更が必要となる可能性がある。
- また、北極付近の航路については、航空会社内では運航乗務員が乗務する路線や路線構成について一定の配慮に基づく対応が行われている。
- 一方、軌道上で活動する宇宙飛行士は宇宙放射線に常に曝されているため、被ばく量は静穏時でも約 0.5～1mSv/日となり、国際宇宙ステーション（ISS）滞在中の 1 日当たりの放射線量は地上での数ヶ月分に相当する。
- このため、ISS に滞在する日本人宇宙飛行士の生涯実効線量制限値は宇宙航空研究開発機構（JAXA）により定められ、その値を上回ることはないよう管理されている。また、ISS では船内の放射線環境リアルタイムモニタが行われ、加えて小型線量計を宇宙飛行士に携帯させることによって被ばく管理が行われている。
- さらに、ISS 参加各宇宙機関の調整により宇宙天気現象の異常時の対処が定義されており、太陽フレアによる被ばくが予想される場合には船外活動中の宇宙飛行士は船内に戻るといった対策が行われている。

- なお、NICT が地上での日常生活における被ばくの影響を評価した結果、日常生活を送る人々の健康に対する宇宙放射線の影響は無視できるほど小さく、現在のところ心配を要しないものであることが判明している。
- PSTEP 報告書によると、航空機の航空乗務員の被ばくに関しては、1 年に 1 回程度の頻度で発生する宇宙天気現象による影響はないと報告されているが、10 年に 1 回程度の頻度で発生する大規模な現象による影響については、航空機の航路変更が必要となるおそれがある。

宇宙天気現象	被害	発生頻度と影響				
		日常～ 複数回/ 年	1 回/1 年	1 回/10 年	1 回/100 年	1 回 /1000 年
太陽高エネルギー粒子（SEP）	航空乗務員の被ばく	なし	なし	航空機 航路変 更	航空機 航路変 更	航空機 運休

図 19 宇宙天気の影響マトリクス（航空乗務員関連）（出典：PSTEP 報告書）

（今後の対処の方向性）

- 地上での日常生活における被ばくの影響は無視できるほど小さく、過度な心配は不要であることについては、関係機関による周知広報が継続的に行われるべきである。
- 現在のところ、NICT や ICAO から情報発信されている宇宙天気予報サービスについては、航空運用の現場で直接的には利用されていない。このため、航空機の乗務員等の被ばくの防止に向けて、宇宙天気情報の効果的な利用が検討されるべきである。
- アルテミス計画では月面有人活動が計画され、サブオービタル飛行での商業宇宙旅行は既に実現されつつある。このため、被ばく防止の在り方や宇宙天気現象の発生時の対処方法等について、関係機関・関係企業は検討を具体化するべきである。また、そうした有人の宇宙活動では、活動シーンや活動場所によってきめ細かい被ばくに関する基準値が必要であり、具体化に向けた検討が期待される。

第5章 学術研究の強化

(1) 学術研究の重要性と課題

(学術研究の重要性)

- 大規模な宇宙天気現象が社会経済に与える影響は大きく、現象に関する学術的理解を深めることは安全・安心な社会づくりに不可欠である。
- 太陽地球圏環境を正確に理解すると同時にその変動を正しく予測することを目的とした研究プロジェクトとして、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「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」（2015年度～2020年度、領域代表者：草野完也名古屋大学、宇宙地球環境研究所教授）が100名を超える多数の研究者の協力を得て組織され、PSTEP報告書が公表されている。
- 本研究に基づき、NICTでは、電波伝搬シミュレータ、リアルタイム衛星帯電推定モデル、我が国における地電流の電力網への影響、航空機被ばく推定システム等の実用に近い分野の研究成果を導くことができている。
- また、名古屋大学宇宙地球環境研究所における屋久杉の年輪を用いた研究によると、約1,250年前の西暦774年頃に原因不明の非常に強い高エネルギー放射線バーストが地球に襲来したことが判明している。東日本大震災による津波被害は平安時代に発生した貞観地震（869年）に匹敵する規模と指摘されるが、宇宙天気現象も人類として理解の及ばない1000年単位で発生する超巨大な自然災害が発生し得ることを究明できる可能性があることから、実態解明に向けて学術研究が果たすべき役割は大きい。

(学術研究が抱える課題)

- 一方、宇宙天気現象は太陽に起因して地球全体に発生するハザードであることから、その発生メカニズムや発生頻度、社会的影響を正確に予測できるようにするためには、大規模な科学的アプローチが必要である。また、宇宙天気は、太陽物理学、地球電磁気学、電気工学、宇宙放射線医学、気象学・気候学等の研究領域が複雑に絡み合う分野であり、未解明・未解決の科学的課題が多数存在している。さらに、太陽のプラズマ噴出が地球軌道に到達する過程を予測するためには、太陽面磁場、噴出速度場、コロナ衝撃波、太陽風じょう乱といった異なる現象を連続的につなげて予測する必要がある。
- こうした本分野の学術研究が抱える課題は、次のとおり整理することができる。

【宇宙天気に関する学術研究の課題】

- ア 宇宙天気現象に関する学術分野は範囲が広く、かつ典型的な学際的研究領域といえることから、複数の学問領域に渡る分野横断的な共同研究が必要となるケースが多い。このため、共同研究の醸成に向けて組織的・継続的なイニシアチブを発揮していく仕組みづくりが必要となっている。
- イ 宇宙天気現象は、複数の現象が複雑かつ連続的に絡み合って発生する。また、宇宙天気現象の精密な観測が学術研究の基本となることから、大規模な観測施設の設置・運営・維持に多額の費用を要する。このため、宇宙スケールで発生するその全体像を正確に把握するためには、学術研究に対する国による支援体制が不可欠となっている。
- ウ 米国アルテミス計画による月面活動や火星探査等、世界の宇宙活動は月・惑星探査に範囲が拡大している。このため、有人宇宙活動や深宇宙向け探査機のために必要となる学術研究の実現に向けたパラダイムシフトが必要となっている。
- エ 産業界からは、宇宙天気現象がもたらすハザード及びリスクの解明と評価が学術界に期待されている。このため、リスク低減に向けた調査研究、対策手法の具体化、コスト最適化方策の調査研究等の実現が期待されている。
- オ 宇宙天気現象の社会インフラに対する影響を正確に評価できるようにするためには、社会インフラを運営する事業者の協力が欠かせない。このため、学術界と産業界間の交流や信頼醸成を進めつつ、事業者側が持つデータの開示や産業界からの学術研究支援が必要となっている。

（２）今後の学術研究に期待される役割

（分野横断的・産学官連携による研究推進）

- 前述の学術研究が抱える課題に対しては、重点的な研究課題を設定しつつ分野横断的な取組を強化し、国内外の観測施設も活用しながら宇宙天気現象の全体像を解明していくイニシアチブが必要である。また、学術研究の最終ゴールは、宇宙天気現象に対する安全・安心を確保してレジリエントな社会を構築することにあるため、産学官連携によって関連研究への取組が強化されるべきである。
- なお、学術研究においてはそれぞれの研究者の独立性・自律性が尊重されるべきものであることから、国家として取り組むべき重要課題や産学官連携研究においては国や産業界からの支援策を設けることで、それらの課題への学術研究を促進するべきである。

- PSTEP については、プロジェクト内に公募研究も織り込みながら実施した分野横断的な宇宙天気の研究の成功例であり、今後もこのように組織化された研究プロジェクトが組成されるべきである。
- NICT は、電波の利用に関する技術の研究開発及び電波の伝わり方に関する観測・予報を担う国立研究開発法人であることから、本分野の学術研究の支援・振興に積極的な役割を果たしていくべきである。また、研究領域の全体及び国際動向を俯瞰しながら司令塔として研究領域をまとめ、研究課題の設定にイニシアチブを発揮していくことも期待される。
- 過去の大規模イベントに関する調査研究は今後のリスク評価に重要であり、それらの実像を正確に把握しつつ、現代の社会インフラに対する影響をシミュレーションしていくアプローチが不可欠である。そのためにも、過去の歴史的な文献調査、年輪・地層・海底湖沼堆積物・極域における氷床に関する研究、太陽以外の恒星に関する研究等、異分野も交えた学際的研究を積極的に推進するべきである。
- 以上のように学術研究を総合的に強化し、その成果を海外に情報発信することにより、世界が抱える宇宙天気のリスクに対して我が国が学術面で貢献を行っていくことが期待される。

(未知な現象に対する予測シミュレーション)

- 近代に人類が本格的に経験した大規模な宇宙天気現象は、1859 年に発生した強力な磁気嵐（キャリントン・イベント）等、わずかな事例しか判明していない。また、数十年前までは十分な精度の観測センサーが発明されていなかったため、過去の現象の発生原因や発生規模については未知な部分が多い。
- また、現在行われている宇宙天気予報は、太陽において約 8 分前に発生した直近の現象に基づく予測である。太陽フレアや太陽電波バーストの現象は光の速さで地球に到達するため、原理上、太陽近傍の観測衛星でその発生を探知したときには、既に現象が地球に到達してしまっていることになる（衛星で太陽活動を観測しても、光速以上の速さで地球にデータを送信することはできないため。）。
- こうしたことから、太陽活動の精緻な予測シミュレーション等の予測技術は重要であり、高度な予測技術によって宇宙天気予報を確実なものとしていくべきである。

(社会インフラのレジリエンスに着目した学術研究)

- 宇宙天気現象がもたらすハザードは、地震・津波、水害・土砂災害、火山噴火などの大規模な自然災害がもたらす被害と同類のものであり、社会インフラにもたらすリスクを低減するためには社会インフラの耐性や脆弱性に着目した研究が不可欠となる。

- 実際、米国や英国における宇宙天気戦略では、重要インフラへの影響の評価、モデリング・予測手法の改善、対応・復旧能力の強化に関する取り組みに力点が置かれており、学術的なアプローチも交えつつ産学連携で対処能力を強化していく方向にある。
- このため、今後の学術研究においては、各種システムに対する影響評価や耐性強化等、社会インフラのレジリエンスに着目した研究が強化されるべきである。すなわち、宇宙天気現象に負けない社会インフラを構築する技術、宇宙天気現象を予測して正体を知る技術、他の手段で代替して業務継続性を維持する技術、早期に被害状況を把握して迅速に復旧する技術等の研究が期待される。

(観測体制に関する産業界からの協力・支援)

- 大学等で得られた観測データについては、可能な範囲で他機関や産業界とのリアルタイムの共有を目指すことにより、産業界のためにも利活用されるように取り組むとともに、学術界に対する産業界からの協力・支援や連携研究に結びつけていくことが期待される。

(3) 今後の研究開発の課題例

- 宇宙天気に関する学術研究の重要性と期待される役割を踏まえ、今後の中長期的な研究の取組、先端研究の取組、基盤技術に関する研究開発の取組等に関して重点的な研究開発が必要になると考えられるものは次のとおりである。なお、研究開発の課題例については、海外における研究トレンドも踏まえつつ、関係者によって重点課題を分野横断的にマッピングする活動が期待される。

【今後の研究開発課題例】

- 太陽フレアやコロナ質量放出など、宇宙天気変動の原因となる突発現象の発生と規模・性質を最新の科学的理解に基づいて十分なリードタイムで精密に予測し、予報するため研究開発
- 太陽フレアに伴う強力な電磁波放射と宇宙放射線の社会影響をイベントの発生前に予測するための研究開発
- 磁気嵐の原因となる太陽風と惑星間空間磁場変動を地球近傍の衛星で測定する前に予測し、その社会影響を定量的に評価・予測するための研究開発
- プラズマ・バブルやスポラディック E 層など太陽フレアに起因しない電離圏変動の発生と通信・測位などへの社会影響を予測するための研究開発

- AI 等を用い、宇宙天気と社会活動に関するビッグデータを教師データとし太陽活動から社会影響までの一連の現象を学習することにより早期の警報発令に資する研究開発
- 過去数千年間に発生した宇宙天気現象の再現を通して将来起き得る大規模宇宙天気現象の規模と社会影響を可能な限り定量的に推定するための学際的研究
- 最新の数理統計学的手法を応用して、予報の精度と価値を評価する技術を開発すると共に、その結果を予測モデル等の開発にフィードバックするための研究開発
- 宇宙天気現象に対する社会インフラの耐性を定量的に評価し、必要な耐性強化を行うための研究開発
- 自然科学・工学・社会科学の連携により、宇宙天気現象が様々な社会・経済活動に与える複合的な影響を定量的に評価するための学際的研究

第6章 人材とコミュニティの強化

(1) 宇宙天気に関する人材の在り方

(高度人材・専門人材の育成と処遇)

- 複雑・難解な宇宙天気現象に挑戦するためには、学術研究で活躍する研究者・技術者等の知的人材を育成するとともに、行政や産業分野においてリスクに備えることのできる専門人材を中長期的に育成・確保していく必要がある。
- また、宇宙天気現象に関する太陽物理学、地球電磁気学、電気工学、宇宙放射線医学、気象学・気候学等の学問領域における人材育成は、学術の長期的発展のみならず、行政や産業分野への人材供給面で重要な課題となる。
- しかし、近年の若者の理科離れもあり、宇宙天気現象を取り扱う我が国の地学関係の学科の学生数は、平成23年(2011年)は3,239人であったが、令和3年(2021年)には2,629人に大幅に減少している(文部科学省学校基本調査)。
- また、研究者・技術者の就職難やポストク問題は根本解決に至っておらず、優秀な若手人材を本分野に惹きつけていくことの難しさがある。理学系の宇宙天気現象に関する研究は、学問の性質上、しかるべき学位を取得したとしても産業界での登用や処遇に直結せず、また常勤の研究職・教育職への登用も狭き門となっている。
- こうしたことから、研究者・技術者のキャリアパスや人生設計を考慮しつつ、学術界や産業界での彼らの登用や処遇を総合的に改善していく取組が必要となっている。また、若者の理科離れを防止し、子供の頃から本分野への興味・関心を醸成していく取組も必要となっている。

(全体を俯瞰し、異分野間を調整できる人材)

- 複合現象としての宇宙天気現象を取り扱うためには、高度な学術研究、観測データの分析、宇宙天気予報の運用、行政における施策実現、産業における対策実施、メディアにおける正確で分かりやすい科学報道等、それぞれの分野で行われていることの全体を俯瞰し、分野横断的に課題を解決できる人材が強く求められている。
- このため、専門分野を横断する横串型の専門家(いわゆる「T型人材」)、プロジェクトを運営管理できるマネージャー、研究者やエンジニアを調整できるコーディネーター、大規模システムの設計デザインを行うアーキテクト、社会学・経済学の分野で課題解決に取り組める人材、国際共同研究をリードできる人材については、学術界や産業界全体として有能な人材が常に求められているところであり、人材の育成が急務である。

(小中高生や一般の興味・関心の醸成)

- 小中高生、高専生、大学生、一般を対象に本分野の魅力や重要性を伝えることによって、宇宙天気に対する興味・関心を醸成し、本分野の研究人材や専門人材の供給に向けて裾野を広げていくことが必要である。
- 現状、具体的な活動は少数の研究機関・大学・民間組織等に限られており、関係組織間の協力・協働が必要である。また、小中高校生や一般向けの宇宙天気教育を実践している組織はごく限られている。こうしたことから、小中高生や一般の興味・関心の醸成に向けた国等の支援策が期待される。

(人材に関する今後の取組)

- 以上の問題認識を踏まえ、国や学术界、産業界、関係機関、関係企業等は、宇宙天気分野における人材に関して次の取り組みを進めていくべきである。

【人材に関する取組課題】

- ア 企業におけるキャリアパス確立等（求める人材像の明確化、学位取得者の積極的な登用、学業・研究実績・専門能力が人事評価や処遇に反映される仕組み導入）
- イ 若手人材に対する支援（キャリアパスに関する情報充実、キャリアパス形成支援、プロジェクトへの参画機会の付与、国際プロジェクトへの若手の抜擢等）
- ウ 全体を俯瞰して異分野間を調整できる人材の育成（必要となる人材像の明確化、大型プロジェクトへの参画機会の拡大、分野を跨がる調査研究課題の設定等）
- エ 産学官の人材が集結する「場」の形成、分野の異なる多様な若手人材のチームングとプロジェクト形成支援
- オ 人材の流動性確保（分野を超えた人材登用、若手人材の雇用の安定化）
- カ 初等・中等・高等教育・社会人教育における教育機会拡大、学校教材への反映、教育・研修や体験機会、出前講義
- キ メディアを通じたビジビリティ（可視化）の拡大（漫画や SNS 等で宇宙天気に接する機会拡大等）
- ク 社会人に対するリカレント教育機会の付与
- ケ 優れた研究成果や社会活動、教育活動に対する「宇宙天気大賞（仮称）」の創設と表彰、助成制度の創設

(2) 周知啓発等を担うコミュニティ形成

- 現在、我が国における宇宙天気に関する啓発活動は、少数の研究者や企業関係者による閉じたグループで行われているに過ぎない。しかし、太陽活動がもたらすリスクの存在を周知啓発し、企業・行政における取組を促進するためには、幅広い関係者が参画するコミュニティ形成が不可欠である。
- 特に、日常生活の様々なシーンで衛星測位が利用される現代社会においては、一般消費者の知識として、宇宙天気現象によって測位精度が劣化する可能性があり、その結果、何らかの被害が発生し得ることを周知啓発することが求められる。
- また、前述の小中高生等を対象とした教育・研修の機会を設けるためには、コミュニティ活動の一環として関係者が連携協力できるようにする必要がある。
- もし、コミュニティの場を通じて宇宙天気に関する情報、プロジェクト、人材、価値創出等をエコシステムとして好循環させることができれば、人材や企業、関係機関、起業家、投資マネーをコミュニティに呼び込むことができる可能性がある。
- こうしたことから、産学官が連携することにより、様々な役割を担うコミュニティを形成すべきである。

【周知啓発等を担うコミュニティの役割】

- 宇宙天気現象に関する一般や企業幹部、メディア等に対する周知啓発活動、各種パンフレットやWebメディア向け素材づくり
- 各種アウトリーチ活動（宇宙天気教育の実施、宇宙天気防災の普及、宇宙天気現象の原理や対策に関する研修会・講習会・セミナーの実施等）
- 産学官連携による課題解決、共同研究プロジェクトの組成、リスクに対する革新的ソリューション創出
- 産学間の人材交流促進（企業が求める人材像の明確化、教育研究機関への橋渡し（インターンシップ制度等）、社会人ドクター制度、大学におけるリカレント研修機会等）
- 若手人材が研究プロジェクトを主体的に参画できる機会の設定
- 海外調査・海外ミッションの企画、海外コミュニティとの連携

(3) 宇宙天気に関するアウトリーチ活動の在り方

(リスクコミュニケーションの在り方)

- 宇宙天気現象に関する周知啓発や宇宙天気予報を発表するに際しては、行政、産業界、有識者、報道機関等の間でリスクに関する情報のやりとりをあらかじめ行い、十分に意思疎通を図っておくことが重要となる。
- 特に、宇宙天気現象の異常事態が急迫する緊急時においては、正確な情報が迅速に公衆に周知されるようにするため、NICT は、報道機関やメディアとは平常時から円滑なコミュニケーションを確立しておくべきである。
- また、宇宙天気現象は視覚的・体感的に捉えることが難しい分野でもあり、拙速で不完全な情報によって一般の不安や恐怖心を煽ることはあってはならない。さらに、国民や企業は、宇宙天気現象がもたらす被害の種類を理解することはできても、どの程度の被害がどの程度の確率で起こり得るのかを十分に理解することは困難である。
- このため、宇宙天気現象に関する専門家は、分かりやすい言葉を使いつつ、正しい情報を適切に発信していくことが求められる。
- さらに、宇宙天気現象の被害が十分に想定される分野においては、企業等に対するリスクコミュニケーションを重点的に実施することにより、企業等の行動変容に結びつけていくべきである。

(4) 「宇宙天気予報士」制度の創設

- 宇宙天気現象がもたらすリスクへの産業界等の認知度は低く、「宇宙天気」に関する科学的リテラシーを高めていく必要がある。また今後、宇宙天気現象がもたらす被害と国民生活への影響に関するメカニズムについて、それらを他人に分かりやすく説明することが必要となる機会が増えると予想される。さらに、企業の中に宇宙天気に関する専門人材が配置され、そうした職員の能力が適切に処遇に反映される仕組みも必要である。
- このため、新たに「宇宙天気予報士」に関する民間の資格制度を創設することにより、宇宙天気に関して一定の学力や能力を持つ人材が様々な分野で活躍できる仕組みを作るべきである。
- 「宇宙天気予報士」が活躍できる場としては次の分野が予想されるため、産業界等が必要とする人材像を踏まえつつ、筆記試験や実習・実技によって学力等を第三者が検定し、「宇宙天気予報士」として認定・登録する仕組みを具体化するべきである。

【「宇宙天気予報士」の活躍が期待される分野】

- 社会インフラを取り扱う企業で活躍する人材
- マスメディアや SNS 等で活躍する人材（いわゆる「宇宙天気キャスター」）
- 企業の危機管理部門や事業継続計画（BCP）策定で活躍する人材
- 教育・講座・研修現場で活躍する人材
- 研究所や実験教室等で科学コミュニケーターとして活躍する人材
- 観光業と連携してその価値を高められる人材（オーロラ観光、宇宙旅行）
- 宇宙天気に関するデータ分析を行う人材（いわゆる「宇宙天気アナリスト」）
- 宇宙天気に関する教材・VR ソフトウェア・ゲーム開発を行う人材

（５）宇宙天気ユーザー協議会に期待される役割

- 宇宙天気情報についてそのユーザーとの双方向のコミュニケーションを形成するため、任意団体として「宇宙天気ユーザー協議会」（事務局：NICT）が 2015 年に設立されている。2021 年 11 月までに 12 回の会合が開催され、通信、測位、衛星運用、電力、航空等の分野の事業者を交えながら、宇宙天気情報に関するニーズ・シーズマッチング、関連アプリケーションのフィードバック等の活動を実施している。
- また、事業者と研究者のそれぞれからヒヤリングを行うことにより、宇宙天気予報に関するニーズとシーズの乖離状況（ギャップ）を分析する活動も実施している。最近では、課題に対してより具体的な議論を行うため、2021 年 11 月に衛星分科会、航空分科会、アウトリーチ分科会の 3 つの分科会を設置している。
- 本協議会は、宇宙天気に関する研究現場と宇宙天気情報のユーザーの連携を醸成する「場」となっており、今後も協議会活動の一層の活性化が期待される。
- 今後、協議会に期待される役割としては次の事項が期待される。

【宇宙天気ユーザー協議会に期待される今後の役割】

- 宇宙天気予報に関するユーザーニーズの把握、海外動向の情報交換
- 社会的影響を考慮した警報基準の見直し検討
- 宇宙環境情報サービスの具体化、ユースケース検討
- 人工衛星向けの宇宙環境情報サービスの実用化
- 宇宙天気関連ビジネスの機会創出に向けた取組



図 20 第 8 回宇宙天気ユーザー協議会の模様（2020 年 2 月）

第7章 国際連携の強化

(国際連携の重要性)

- 既に国連防災機関（UNDRR）と国際学術会議（ISC）によって、「地磁気嵐」、「電離圏嵐」、「太陽活動による電波障害」、「太陽風」の宇宙天気現象は、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ハザードであり、リスク軽減に向けた世界的取組が必要であることが明確化されている。
- 現在、気候変動、食料・水資源問題、感染症対策など、人類が直面する地球規模課題の解決に対しては、我が国のポテンシャルを生かした国際協力が強く求められている。同様に、宇宙天気現象も地球的規模で発生するものであり、その対処の取り組みは、国際連携を通じて挑戦すべきグローバルな課題といえる。
- このため、我が国は、宇宙天気現象の問題に関して、戦略性を持ちつつ、積極的に海外との連携・協力を進めていくべきである。また、我が国は宇宙天気現象の観測・分析・予報における世界的なリーダーの一員であり、それらは長年の観測実績と研究成果、国際的な協力・協調に立脚している。こうしたことから、今後も国際社会におけるリーダーシップを一層発揮していくべきである。
- なお、米国や英国等、宇宙天気分野で先進的取り組みを行う主要国では、国際的な連携・協力を重視する国家戦略を掲げている。我が国も、国際連携の強化を国家戦略として明確化するとともに、米国や英国等との具体的な協力分野を具体化していくべきである。同時に、パートナー国と実施している観測データの交換・共有については、今後も中長期的な視点で取組を推進するべきである。

(国際連携・国際協力の在り方)

- 高精度な宇宙天気予報を実現するためには、より高密度な観測結果をリアルタイムで収集することが必要となっている。このため、新たなパートナー国の開拓を進めることにより、我が国として必要な観測データの交換・共有体制を強化するべきである。
- また、観測データの効果的な交換を実現するため、我が国はデータ・予報業務等の国際標準化に取り組むべきである。
- なお、国際間のデータ共有による効率的な地上観測網構築に際しては、相手国によっては適切なキャパシティ・ビルディング（組織や個人の能力構築）が不可欠であることから、国際協力を通じて相手国とのパートナーシップ強化に努めるべきである。
- 国際連携の強化に向け、NICTは、近隣諸国・地域との連携はもとより、英国やブラジル等の地理的に離れた国との連携の強化に取り組むべきである。

- また、①膨大な予算を要する太陽観測衛星に関する国際共同プロジェクト、②観測センサーの国際的な冗長性確保（シングルポイント障害を回避するための国際的なバックアップ体制確立）に対しては、NICT は、強みを持つ独自技術や独自データ等を活かすことによって、役割分担による国際貢献に取り組むべきである。



図 21 NICT における二国間・多国間等の協力関係の状況（出典：NICT）

第8章 NICT に期待される役割

(1) 世界トップレベルの研究拠点形成

- 宇宙天気現象は、複数の現象が複雑に絡み合って発生するメカニズムである。このため、宇宙スケールで発生するその全体像を把握し、正確な宇宙天気予報を行うためには必然的に大規模な研究体制が必要となる。このため、NICT は、宇宙天気予報に関する定常業務に加え、高いレベルの研究者を中核とした世界トップレベルの研究拠点を形成することにより、宇宙天気分野の観測・分析・予報を強化し、国立研究開発法人としての役割を果たしていくべきである。
- また、世界トップレベルの研究拠点として学際的研究、産学官連携研究、国際共同研究を強力に推進するためには、研究者が腰を据えて研究に取り組める環境を整えつつ、学术界や産業界、国際社会との連携を維持することにより、長期的な観点で成果を創出する体制を整えるべきである。
- さらに、国内における宇宙天気研究のハブ拠点として、学術研究支援、学識者・有識者のネットワーク化、研究者の交流支援、学术界と産業界の橋渡し（マッチング）、若手研究人材の育成を推進するべきである。
- 大学・企業・研究機関との共同研究については、それらを更に強化することで、社会インフラへの影響研究や大型プロジェクトを戦略的に推進するべきである。特に、産業界との連携を深めることで、宇宙天気現象の観測センサーネットワークを社会インフラ側にも充実させていく取り組みが求められる。
- また、宇宙天気に関する共通基盤的な技術、大規模な観測施設、宇宙天気データ・プラットフォーム、計算機資源、アプリケーション等のいわゆる「知の基盤」については、自らの研究活動に用いるだけでなく、オープンサイエンスによる連携研究を進めつつ、学术界・産業界・国際連携の諸活動を支えるものとして発展させていくべきである。かつて宇宙研究のフロンティアは、宇宙を観察する新たな「目」を獲得することによって拓けてきたと言われている。今後はNICT が持つ「知の基盤」についても、我が国全体の「五感」として最大限活用していくべきである。
- なお、NICT における宇宙天気に関する研究業務及び宇宙天気予報業務は、良好な電波環境の構築・整備に係る共益費用を無線局免許人が公平に負担する電波利用料を主な財源として行われている。このため、NICT は、電波利用料制度の目的を十分に踏まえつつ、無線局免許人に対して研究成果を一層効果的に提供していくべきである。

(2) 企業等が抱える課題の解決支援

- NICT の研究成果については、個別の技術相談やアプリケーションの提供等により、企業や国が抱える課題の解決に活用できるようにするべきである。また、知的財産のライセンス活動、ベンチャー設立・起業支援、研究者の兼業、企業との共同研究・共創等を積極的に行うことにより、NICT の研究者自らがイノベーションの連続的な創出を実現するべきである。
- NICT は、その研究成果を技術シーズとすることにより、有用な製品・サービスを実現し、宇宙天気予報における新市場創出にもチャレンジしていくべきである。
- 宇宙空間へのセンサー設置を目指している宇宙環境計測装置については、その確実な開発を推進するべきである。また、計測装置から得られるデータを用いる衛星故障防止サービスの実用化を目指すべきである。

(3) 国際連携の強化、アジア太平洋地域での研究連携

- 地球規模で発生する宇宙天気現象に効果的に対処するためには、グローバルな国際連携が重要となる。このため、NICT は、引き続き、宇宙天気に関する国際的研究枠組みや海外とのリアルタイムデータ共有、データに関する国際標準化活動に積極的に参加するべきである。また、欧米の主要国間ではパートナーシップを形成する戦略が進められていることから、NICT も主要国との国際連携を強力に進めつつ国際的なリーダーシップを確立していくべきである。
- 宇宙天気現象が社会インフラに与える影響評価やそのモデリング、警報基準等については、世界的にも未発達の研究領域であることから、NICT が我が国の研究成果を積極的に情報発信することにより、国際社会への貢献を行うべきである。
- 特に、アジア太平洋地域においては、NICT がトップクラスの観測・分析能力を有していることから、地域のリーダーとして今後も積極的な関与を継続するとともに、地域全体の対処能力の強化に貢献するべきである。また、NICT は、こうした科学技術や危機管理における国際協力に取り組むことにより、もって日本に対する信頼醸成に貢献するべきである。
- NICT は、以下に掲げる取組を推進することにより、宇宙天気分野において国際的なリーダーシップを発揮していくべきである。

【NICT の国際連携の取組課題】

- ア NASA（米国航空宇宙局）、ESA（欧州宇宙機関）、NOAA（米国海洋大気庁）が打ち上げた観測衛星のデータ利用や日本におけるデータ受信において、既にNICTは相手国と良好な協力関係にあるが、今後も協力関係を一層発展させていく。
- イ 特に、米国と20年以上の協力関係にある宇宙天気観測衛星（DSCOVR等）のリアルタイムデータ受信は、地理的にNICTが昼間に米国に代わって受信する必要があるデータであり、宇宙天気分野における象徴的な国際協力案件といえる。DSCOVR後継機として、新たな宇宙天気観測衛星SWFO-L1が2025年2月に打ち上げられる予定となっており、NICTはデータ受信協力のためのアンテナ施設整備を確実に進める。
- ウ 宇宙天気現象の数値モデルの再現性を高めるためには、高密度な観測データ点が必要となっている。このため、我が国が観測データを得にくい地球上のエリア（南米大陸、赤道エリア等）の諸国と協力して観測データを入手することにより、我が国の宇宙天気予報の精度を総合的に向上させていく。
- エ アジア太平洋地域では宇宙天気に対するニーズや関心が高まっていることから、国際協力を強化することにより、リスクに対して一致団結して対応する国際協力関係を醸成する。具体的には、相手国や地域の政府・研究機関・大学との協力関係を強化することにより、東南アジア電離圏観測網（SEALION）の維持・拡大を図る。このため、相手国への観測センサーの設置、国際間のデータ交換、専門家派遣や研修機会の提供、人材育成支援等を積極的に推進する。
- オ NICT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、国際宇宙環境業務機関（ISES）に参加している。また、国際気象機構（WMO）やアメリカ海洋大気庁（NOAA）等の海外の機関と連携した研究を進めている。さらに、近年、アジア・オセアニア地域でも宇宙天気予報の研究が盛んになっており、2010年にはNICTが主導することでアジア・オセアニア宇宙天気連合（AOSWA）が設立された。NICTは、今後もこうしたマルチの国際枠組みに積極的に参加し、リーダーシップを発揮する。
- カ NICTは、2019年11月から国際民間航空機関（ICAO）のグローバル宇宙天気センターの一員として、太陽活動に伴う通信や衛星測位への影響、放射線被ばく量等に関する情報（宇宙天気情報）の提供を開始している。今後もグローバル宇宙天気センターとしての役割を確実に果たしていく。
- キ 北極海航路の開発は将来、我が国にとり商業用の流通ルートとして重要な役割を担う可能性がある。しかし、北極海航路は宇宙天気現象の影響を受けるおそれがあるため、国際連携によって必要な観測データを得られるようにする。
- ク 研究拠点として、重要な海外文献の収集・翻訳・分析を行う。

(4) ハブ組織としての人材育成とコミュニティ形成の推進

- NICT は、宇宙天気に関するハブ組織として様々なコミュニティの形成に中核的な役割を果たすべきである。また、宇宙天気ユーザー協議会や宇宙天気ユーザーズフォーラムの開催を通じて、産学官のコミュニティ形成を強力に推進すべきである。
- NICT は、これらのコミュニティにおいて、組織・組織間、人材・人材間、プロジェクト・プロジェクト間、国内・海外間の案件のコーディネーションやマッチングに積極的に取り組むことで、宇宙天気に関する国内コミュニティを強化すべきである。
- 宇宙天気に関する大規模な観測施設やビッグデータ、計算機資源等を保有する NICT は、研究人材の育成に最適な研究拠点のひとつといえる。このため、外部からの協力研究員や研修員の受入れを積極的に推進するとともに、学生のキャリア形成や就業体験の機会となるインターンシップの募集を積極的に進めることが期待される。

(5) 宇宙天気に関するデータ・プラットフォーム構築

- 宇宙天気分野では、理論形成に役立てるための観測データが研究活動の重要な資源となるが、NICT は膨大なデータを長年にわたり取得している。これらのデータは NICT 自身の先端研究や宇宙天気予報のために利用されることが基本となるが、今後は、学術研究の発展や企業との共同研究向けのオープンデータとして有効利用していくことが望まれる。
- このため NICT は、宇宙天気に関するデータ・プラットフォームを構築することにより、一定の条件の下で、様々な利用ニーズに応じたデータのオープン化を推進すべきである。また、データ・プラットフォームでは、企業・大学向けに各種アプリケーションやツール、クラウド機能を併せて提供されることで、研究者や企業がクラウド上でデータ処理や分析作業を同時に実施できるようにすることが望まれる。
- データ・プラットフォームの運営に際しては、NICT は宇宙天気に関するデータの標準化や構造化等を併せて推進することにより、産学官におけるデータの効率的な活用を促し、データの価値の最大化を目指すべきである。
- なお、こうしたプラットフォームの構築及び維持には相当なコストを要するため、利用目的（営利、非営利）や使用するデータ量、使用する機能等に応じて、受益者に対して負担を求める仕組みが検討されるべきである。
- また、NICT がこれまでに開発したアプリケーションやツールに関しては、より高度な機能の実現や個別企業向けの改修作業等に対するニーズが今後予想される。このため NICT は、プラットフォームやデータ、アプリケーション、ツール等の管理を民

間にアウトソーシングすることにより、研究資源の効率的・効果的な活用方策を検討すべきである。なお、こうした過程を通じて、知的財産のライセンス等による自己収入の確保を図るべきである。

(6) 宇宙天気予報オペレーションセンター（仮称）の創設

- NICT の電磁波研究所では、先端研究を行う研究室（宇宙環境研究室）の組織内に予報業務を実施するグループが設置されている。しかし、宇宙天気予報は国家レベルの危機管理のひとつであることから、今後は宇宙天気現象に対して迅速かつ的確に対応できる専門的な組織体制が構築されることが強く求められる。また、政府機関や企業幹部との間で責任あるやりとりを行うためには、しかるべき職位の長が対応できるようにすることが望まれる。
- このため、「宇宙天気予報オペレーションセンター（仮称）」を NICT の組織として正式に設置することにより、先端研究との相乗効果を発揮しつつ、宇宙天気予報業務を確実に実施できる体制を構築すべきである。また、研究組織とは別の組織体とすることにより、研究者が実施業務で抱える負担を軽減し、先端研究に集中して取り組むことができる体制とすることが必要である。
- 以上を踏まえ、次に掲げる業務を確実に実施できるようにするため、実施業務を担う専門職員も配置しつつ、こうした実施業務を担うオペレーションセンターを設置すべきである。

【宇宙天気予報オペレーションセンター（仮称）が担うべき実施業務】

- ア 宇宙天気予報業務の実施（24 時間 365 日運用、緊急時の即応体制）
- イ 警報の確実な伝達、情報配信サービスの提供、外部からの問い合わせ対応
- ウ 緊急時の行政機関（関係府省庁、自治体等）との連絡調整、海外との情報交換
- エ 大規模イベント時の社会インフラにおける被害状況の調査・記録
- オ 技術相談対応、企業が抱える課題解決支援（被害軽減対策の検討、対策手法のガイドライン化、BCP 策定支援等）
- カ 宇宙天気予報ユーザーとのコミュニケーション、コミュニティ形成推進
- キ 大規模なデータ・プラットフォーム構築、外部に対するオープン化推進
- ク 海外機関との連絡調整（観測データの交換、ICAO 等）
- ケ 宇宙天気予報業務に関する専門性の蓄積、業務の標準化、ガバナンスの構築
- コ 自身の宇宙天気予報の品質管理、予報結果の自己評価

極端な宇宙天気現象がもたらす最悪シナリオ（詳細）

1. 最悪シナリオの想定手法

- 100 年に 1 回またはそれ以下の頻度で発生する極端な宇宙天気現象（いわゆるエクストリーム・イベント）について、我が国が受ける被害の全体像（様相）を明らかにすることにより、社会インフラにおける対策の必要性を関係企業等に周知するとともに、産学官による対策の企画立案の基礎資料とすることを目的として起こり得る最悪シナリオを検討した。
- エクストリーム・イベントの発生時に我が国において発生し得る最悪の被害の様相を「通信・放送・レーダー」「衛星測位」「衛星運用」「航空運用」「電力分野」のそれぞれの社会インフラの分野に分けて、被害の発生直後から 2 週間後までの被害の様相をとりまとめた。
- 一部の分野においては、社会インフラが被害を受けたことで発生する社会インフラの利用者側の影響も想定した。

2. 想定に用いた前提条件

- ① 100 年に 1 回またはそれ以下の頻度で発生する極端な宇宙天気現象（いわゆるエクストリーム・イベント）がもたらす被害を想定した。
- ② 2 週間にわたり X10 クラス以上の太陽フレアが連続して発生し、そのうち最大のものはキャリントン・イベントを超えて太陽電波バースト、デリンジャー現象、電離圏嵐、プラズマバブルが継続的に発生し、電離圏 D 領域の異常電離および F 領域のじょう乱が 2 週間にわたり継続するケースを推定した。
- ③ この期間において GNSS（全球測位衛星システム）からの電波が GPS L1 周波数の遅延量（疑似距離）として最大 37m 遅延するような電離圏状態が 2 週間発生しているものとした。
- ④ 10MeV 以上の高エネルギー陽子のフラックスが 10,000PFU 以上の状態が 2 週間にわたり断続的に、または 100,000PFU 以上の状態が数日間継続的に発生するものとした。
- ⑤ この期間の太陽フレアの影響が地球を直撃し、大規模な地磁気嵐が 2 週間にわたり断続的に発生、そのうち最大のものはキャリントン・イベントを超え、最大 500A の自然電流が 2 週間にわたり断続的に電力網等に流れるものとした。

3. 最悪シナリオ

ア 通信・放送・レーダーへの被害がもたらすもの

- 短波帯（HF）の通信は、発生直後から、全国的に使用不可となる状況が2週間断続的に続く。短波帯の電波を用いる船舶無線や航空無線、アマチュア無線の利用に多大な支障が生じる。
- 短波帯の放送は、電離圏伝搬を伴う地域においては、2週間にわたり断続的に使用不可となる。
- VHF 帯・UHF 帯の周波数を使用する無線システムは、発生直後から太陽フレアの大規模爆発による電波雑音（太陽電波バースト）の影響を受け、昼間の時間帯に断続的に使用できなくなる期間が全国的に2週間続く。このため、防災行政無線、消防無線、警察無線、タクシー無線、列車無線等の通信システムに多大な支障が生じ、これらを用いる都道府県・市町村・公共機関等の公共サービスの維持が困難となる。
- UHF 帯の周波数を使用する携帯電話システムには、発生直後から太陽電波バーストの影響を受け、昼間の時間帯に最大で数時間程度のサービス停止が全国の一部エリアで2週間にわたり断続的に発生する。携帯電話システムが使用できる周波数が一時的に逼迫するため、回線のふくそうや通信の途絶が発生し、緊急通報（110番、119番、118番）を含む全ての通信がつながりにくい事態が各地で発生する。また、スマートフォンからの携帯電話事業者経由のネット接続も困難になる。
- FM 放送（VHF 帯）においては大規模な雑音が発生し、昼間の時間帯に2週間にわたり断続的に放送を聴取しにくくなる事態が発生する。
- L 帯の周波数を使用する衛星携帯電話（インマルサット、イリジウム等）においては、断続的に通信回線を使用できなくなる期間が全国的に2週間続く。このため、航空機、船舶、電力・ガス・石油などのライフライン企業、重要拠点のバックアップ、遠隔地の監視・制御、自治体の防災用途等において衛星携帯電話を利用する分野は活動に著しい制約を受ける。
- 船舶無線については、短波通信と衛星携帯電話の両方が使用困難となり、洋上で孤立する船舶が発生し、遭難事故時の救助要請が困難になる。
- 一部の周波数帯のレーダーについて、太陽電波バーストにより昼間の観測能力の低下が2週間にわたり断続的に発生する。気象観測用レーダー、航空管制用レーダー、防衛用監視レーダー、船舶用レーダー、沿岸監視用レーダー等の社会生活を支える公共用システムに多大な支障が生じる。その結果、航空機や船舶の運航見合わせが発生し、安全保障分野にも影響が生じる

イ 衛星測位への被害がもたらすもの

- 衛星からの電波を受信することによって位置情報を計算する衛星測位システム（GPS 衛星、準天頂衛星みちびき等）は幅広い分野で利用されているが、電離圏等の変動や通信障害による基準局データの補強情報の受信不能により、測位精度の大幅な劣化や測位の途絶が全国的に 2 週間にわたり断続的に発生する。
- このため、カーナビゲーションや自動運転、ドローンの位置精度が大幅に低下し、衛星測位に係る冗長系や安全対策を持たないシステムを運用した場合、最大で数十メートルの誤差（ずれ）が生じ、その結果、衝突事故が発生する。また、安全確保のための運行見合わせが 2 週間にわたり断続的に発生する。
- 同様に、衛星測位を利用する農業機械、建設機械、車両（物流、旅客、バスロケーション、配車管理）、ロボット、貨物追跡システム、鉄道、船舶では、測位精度の大幅劣化や測位の途絶に伴い運行抑制が 2 週間にわたり断続的に発生し、農作業や建設作業の遅れ、交通・物流の停滞が大規模に発生する。
- スマートフォンの位置情報の精度が劣化するため、緊急通報（110 番、119 番、118 番）を発信した際、通話が接続された緊急通報受理機関に対して発信者の位置情報を自動的に通知する緊急通報位置通知の精度が劣化し、緊急時の駆けつけが遅れる。また、目的地までのナビアプリが使用しづらくなる。さらに、フードデリバリーサービスの配達業務において、利用者個人や利用宅への荷物のピンポイントの配送が困難になる。

ウ 衛星運用への被害がもたらすもの

- 衛星の電子機器異常や急激な帯電現象により多くの衛星になんらかの障害・不具合・故障が発生し、そのうち相当数の衛星はシステム機能の一部または全体を喪失する。
- 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 2 週間にわたり大幅に制限される。
- その結果、気象衛星の利用制限により、天気予報の精度が劣化する。通信衛星の利用制限により、衛星通信の利用が困難になる。放送衛星の利用制限により、衛星放送の視聴が困難になる。測位衛星の利用制限により、衛星測位の利用が困難になる。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。
- 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、他の衛星やデブリとの衝突するリスクが増大する。また、大幅に軌道高度が低下し、相当数

の衛星は大気圏突入により損失する。軌道高度が低下した場合、軌道保持のために燃料を余分に消費するため、**衛星の残存寿命に悪影響**を与える。

- 打ち上げの見合わせにより、衛星コンステレーションによる通信サービスの**インフラ整備が遅れる**。

エ 航空運用への被害がもたらすもの

- 衛星測位精度が劣化したとして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2週間にわたり多発**する。
- 航空機被ばく線量率については被ばく後すぐに健康影響が出るようなものではないものの、放射線防護の基本原則である、被ばく線量は「合理的に達成可能な限り低く（ALARAの原則）」を勘案して、高緯度領域での飛行に伴う搭乗員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。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2週間にわたり断続的に発生**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、**航空機の運休が2週間にわたり発生**する。

オ 電力分野への被害がもたらすもの

- 電力系統においては、磁気圏じょう乱により地磁気誘導電流（GIC）が発生し、設備上・運用上の対策を措置していない電力インフラにおいては、**保護装置の誤作動が発生し、広域停電が発生**する。
- 誤作動が起きなかった場合も、**一部の変圧器の加熱による損傷が発生し、電力供給に影響が出る**。
- 電力供給の途絶や逼迫に伴い**社会経済や全産業が広範囲に影響**を受ける。
- 損傷による多数の変圧器を交換する必要が生じた場合、多くのコストや作業日数を要する工事が必要となる。

4. 主な留意点

- 今回の最悪シナリオは、過去の大規模イベントにおける状況や最新の学術研究、海外における同種の被害想定等を踏まえて策定したものである。
- 我が国では全分野にわたる最悪シナリオの策定は初めての試みであり、被害に関する定性的・定量的な想定手法は未だ確立されたものではない。
- 最悪シナリオとして示した様相は、発生し得る被害の一部であり、様相としてイメージしなかった社会インフラにおいても被害が発生し得る。
- 当然のことながら、一部の社会インフラにおいては、宇宙天気現象に対する設備の耐性強化、代替策の準備といった対策が行われており、個々の社会インフラにより発生する被害の様相や規模は異なる。
- 一方、社会インフラやその利用者の位置（緯度、高度、移動エリア等）、社会インフラの態様（電力系統における諸設備の仕様等）、日本が太陽に正対するタイミング等の条件により発生する宇宙天気現象の程度は変動する。
- このため、今後新たに発生する宇宙天気現象や最新の学術研究、社会学・経済学の立場からの調査研究等の結果を持ち寄りつつ、さらには国際間の共同研究に取り組むことにより想定手法を確立し、最悪シナリオの不断の見直しと修正が行われるべきである。
- また、経済的な被害の推定については、今後の検討課題として、被害を受ける我が国の社会インフラそのものに関する施設・設備の被害や生産・サービス活動の低下に対する被害を対象に行われるべきである。同時に、社会インフラの停止がもたらす混乱は、更にサプライチェーンへの影響、人流・物流の停止がもたらす生産活動・消費活動への影響、物流コストの増大、輸出入の減少、資金調達コストの増大、雇用環境の悪化と失業者の増加等の二次的な被害に波及するものであり、今後の検討が期待される。

5. 参考文献等

PSTEP 報告書

科学研究費補助金：新学術領域研究「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（2015-2019, 略称：PSTEP）」の活動のもとにまとめられた「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」報告書（2020年10月7日）

<https://www2.nict.go.jp/spe/benchmark/>

全米科学アカデミーが2008年に公表した研究報告「厳しい宇宙天気現象-社会的・掲載的影響の理解-Severe Space Weather Events-Understanding Societal and Economic Impacts」によると、深刻な宇宙天気現象により北米の送電網に数年間にわたる長期停電のリスクをもたらすことが示され、その経済的コストは初年度で1～2兆ドルに及ぶ可能性があるとの試算が紹介されている。

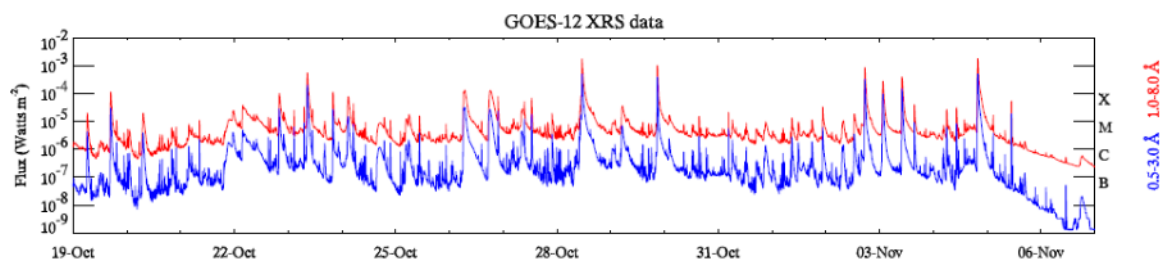
<https://www.nap.edu/catalog/12507/severe-space-weather-events-understanding-societal-and-economic-impacts-a>

ロイズがケンブリッジ大学リスク研究センターの研究に基づき公表した「Lloyd's City Risk Index 2015-2025」

宇宙天気現象 (Solar storm) が全世界にもたらす経済的被害は 649.5 億ドル (約 8.1 兆円、1 ドルは 125 円で換算) の規模であり、潜在的なリスクの特定と影響のモデル化によって、インフラの強化や保険による保護を行うべきだと提言している。この分析によると、全世界の中で東京が最も大きな経済的被害 (24.2 億ドル、約 3,000 億円) を宇宙天気現象によって被ることが予測されている。

<https://lloyds.spub7.com/>

https://lloyds.spub7.com/threats/solar_storm



2003 年 10-11 月 Halloween event において GOES 衛星が静止軌道上で観測した X 線フラックス変動。本イベントでは、X クラスフレアが 2 週間程度断続的に発生した。

Weaver, Michael, Halloween space weather storms of 2003, NOAA technical memorandum OAR SEC-88, 2004, <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/19648>

観測史上最大の太陽フレアイベントと言われる 1859 年のキャリントン・イベントについては、X 線量の記録がないが、太陽フレアによる放射線の変動と地磁気の変動の経験的な関係から X45 程度と推定されている。また、同手法を用いた複数の太陽フレアイベントの解析から、キャリントン・イベントクラスの太陽フレアの発生は、 90 ± 60 年に一度の頻度であることが推定されている。

Curto JJ, Castell J & Moral FD. Sfe: waiting for the big one. J. Space Weather Space Clim., 6, A23, 2016, DOI: 10.1051/swsc/2016018

2017 年 9 月、カリブ海では超大型ハリケーンのハリケーン・イルマ等の複数のハリケーンが連続して発生し、カリブ海諸国に甚大の被害を発生させた。しかし、X クラスの太陽フレア爆発も 9 月 6 日～10 日に連続的に発生したため、赤道上空の電離圏に異常を発生させ、現地で緊急災害対応を行っていた連邦緊急事態管理庁 (FEMA) 等の関係者の短波通信に混乱を生じさせている。具体的には、9 月 6 日の午前中から午後にかけて短波通信の全面的な通信途絶が発生した。また、9 月 10 日夕刻には通信途絶が再び 3 時間程度継続して発生した。また、同時期、ブラジルとフランス領ギニアの沿岸を飛行していたフランスの民間航空機には、約 90 分間にわたり航空無線の連絡が途絶し、航空機は管制官パイロット間データ通信装置 (CPDLC) を搭載していない機であったため混乱を引き起こした。

Redmon, R. J., Seaton, D.B., Steenburgh, R., He, J., & Rodriguez, J. V. (2018). September 2017's geoeffective space weather and impacts to Caribbean radio communications during hurricane response. Space Weather, 16. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018SW001897 2002 年 3 月アフガニスタンにおける米軍のアルカイダ掃討作戦「Anaconda 作戦」中、UHF 衛星通信 (SATCOM) の障害が発生し、米軍側の人的被害につながった。この衛星通信障害はプラズマバブルが原因であった可能性が指摘されている。 https://www.science.org/content/article/space-bubbles-may-have-led-deadly-battle-afghanistan
プラズマ・バブルは、一般的に磁気赤道を中心とした低緯度の電離圏において、日没後局所的に発生するが、太陽活動や地磁気が活発な時など、中緯度域まで発達することもある。2000 年 2 月 12 日の磁気嵐時では、プラズマ・バブルが中緯度 (30–34° N, 130–134° E) まで到達し、日本南部の広い範囲で電離圏全電子数の局所的な減少とシンチレーションによる GPS 信号のロック損失が観測された。 Ma and Maruyama, A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 33, L21103, doi:10.1029/2006GL027512, 2006
衛星の損失数について、2017 年に米国 NOAA より発行されたレポート「Social and Economic Impacts of Space Weather in the United States」において、Moderate event (Halloween event 相当) の場合、1 イベントあたり 1 機損失、100 年に 1 度クラスの Extreme event 発生時は、1 イベントあたり全世界で 10～100 機損失、運用中の衛星の 0.7～7%に相当すると推定されている。 https://www.weather.gov/media/news/SpaceWeatherEconomicImpactsReportOct-2017.pdf また、英国 Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure によれば、Halloween event の場合、最大で 10%の衛星が数時間から数日にわたる一時的な機能停止に陥る可能性がある」と推定されている。 https://www.raeng.org.uk/publications/reports/space-weather-full-report
衛星軌道の低下や大気圏突入による衛星の損失については、米国 space weather phase I benchmarks によれば、大気抵抗の増加による被害として、衛星軌道の変位、位置の不確定性の増加による衛星寿命の短縮、デブリ軌道の変位・不確定性増加による衝突リスクの増加が報告されている。100 年に 1 回の太陽活動、磁気嵐による大気抵抗の増加として、太陽活動度の極大、フレア、磁気嵐それぞれ 100 年に 1 回の規模が発生することにより、大気質量密度が 50%～5 倍以上増加する可能性がある。 https://www.sworm.gov/publications/2018/Space-Weather-Phase-1-Benchmarks-Report.pdf
増大した大気抵抗の衛星軌道への影響について、実際の衛星軌道データ (space-track.org から取得可能な 2022/3/13～4/12 の近地点高度 600km 以下の衛星) と大気の実験モデル (NRLMSIS2.0) を用いて、高い太陽活動期・磁気嵐時 (F10.7=300、Ap=300 (Kp=9 相当)、大気密度は各高度で全球平均し、緯度・経度変動無視、時間変化は無視し、この状態が 2 週間継続する場合) を最悪環境と想定し、NICT において計算した。その結果、各衛星の弾道係数を計算できた衛星数 3104 個について、特

に近地点高度 500km 以下の衛星は降下量が通常（現在の太陽活動度における地磁気静穏時）に比べ 10 倍以上（初期近地点高度 400-500km の衛星において衛星高度の降下量が通常 1.6km から 60 km へ増加）と大きく、残存寿命も相当に短くなると予想される。また、大気圏突入の衛星数も初期近地点高度 300-600km の衛星 3022 機のうち、通常 51 機から 212 機と数倍に増加することが想定される。

航空分野への影響について、2015 年 11 月 4 日、スウェーデンをはじめとするヨーロッパ各国で、二次航空管制レーダーが強く乱れる事象が発生した。この障害は、レーダーアンテナが太陽に向いているときに発生しており、1GHz 前後の比較的狭い周波数帯で、太陽フレアに伴う強い電波バーストのピークの時間と一致することが示された。

Marqué C, Klein K, Monstein C, Opgenoorth H, Pulkkinen A, et al. 2018. Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation. J. Space Weather Space Clim. 8, A42.

飛行経路生成アルゴリズムと航空機の飛行経路に沿った実効線量率を用いて、太陽高エネルギー粒子（SEP）事象に伴う大気放射線嵐（ARS）が航空機運航に与える経済的影響、すなわち飛行経路長、飛行時間、燃料消費量を試算した。大気放射線嵐（ARS）現象のピークである 2005 年 1 月 20 日の条件を使用し、ニューヨークから東京への飛行ルートについて、放射線の危険を回避するための飛行ルートの制約を加えて経済的影響を推定し、ARS の影響を排除したリファレンスケースの経済的影響と比較した。双発大型ジェット旅客機において飛行高度のみに制約を課した場合、燃料消費量は 39～69 トン（33～58%）増加することが示された。

Saito et al., Estimate of economic impact of atmospheric radiation storm associated with solar energetic particle events on aircraft operations, Earth, Planets and Space (2021) 73:57, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01377-5>

電力分野への影響について、キャリントン・イベント級の地磁気嵐（地磁気変動指数 Dst の最小値が約 -950 nT） [1] が再来したときに、「電力設備 A」を流れる GIC は 496 ± 174 A と推定される [2]。なお、理論上最大の地磁気嵐（地磁気変動指数 Dst の最小値が -2500 nT） [3] を想定した場合、「電力設備 A」を流れる GIC の最大値は 573 A となる [4]。上記を考慮し、キャリントン・イベントを超える地磁気嵐において発生する GIC は 500 A 程度を想定した。

[1] Hayakawa et al. (2022), ApJ 928 32,

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac2601>

[2] Ebihara et al. (2021) (Ebihara, Y., Watari, S. & Kumar, S., Prediction of geomagnetically induced currents (GICs) flowing in Japanese power grid for Carrington-class magnetic storms. Earth Planets Space 73, 163, 2021), 及び経済産業省委託調査報告書 (2015, <https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11280903>) に基づく。

[3] Vasyliunas, V., The largest imaginable magnetic storm, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 73, 1444-1446 (2011). 10.1016/j.jastp.2010.05.012

[4] Zhang and Ebihara (2022) (Zhang, T., & Ebihara, Y. (2022), Superposed epoch analyses of geoelectric field disturbances in Japan in response to different geomagnetic activities. Space Weather, 20, e2021SW002893.)、Ebihara et al. (2021)、及び経済産業省委託調査報告書 (2015) に基づく。

社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（全分野の一覧）

分野	影響が無視できる範囲 ■ 影響の可能性があり 適切な対応を要する範囲 ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの ※各Lvに記載の物理量は閾値	影響と被害	(領域・軌道)	Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	UHF帯（衛星通信） 電波減衰、シンチレーション	プラズマバブル			ROTI, S4等 ※検討課題	ROTI, S4等 ※検討課題
	VHF帯 回線品質劣化（電波強度減衰）	スプラディックE層			foEs ※検討課題	foEs ※検討課題
	HF帯 電波強度減衰	極冠吸収			プロトン(10MeV以上) 1000PFU以上	プロトン(10MeV以上) 10000PFU以上
	HF帯 電波強度減衰	デリンジャー現象			X1フレア発生	X10フレア発生
	HF帯 利用可能な周波数帯が縮小	電離圏風（負相）			MUF30%減	MUF50%減
	一周波コード相対測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シンチレーション（TID・プラズマバブル等）			TEC空間勾配・S4等 ※検討課題	TEC空間勾配・S4等 ※検討課題
測位	二周波精密相対測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シンチレーション（TID・プラズマバブルなど）			TEC空間勾配・S4等 ※検討課題	TEC空間勾配・S4等 ※検討課題
	二周波位相単独測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シンチレーション（TID・プラズマバブルなど）			TEC空間勾配・S4等 ※検討課題	TEC空間勾配・S4等 ※検討課題
	地磁気誘導電流（GIC）→変圧器損傷	地磁気の長時間変動（磁気嵐主相）			GIC 100A/3相 ※暫定値	GIC 225A/3相 ※暫定値
電力						
航空機人体被ばく	被ばく線量増加	太陽高エネルギー粒子			30μSv/h@150-460FL	80μSv/h@150-600FL

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩

影響が無視できる範囲		軽微な影響の可能性	影響の可能性	深刻な影響の可能性					
* 今後の研究により変わらうもの		■ システムに依存するもの	△ 障害というより「通常と異なる」もの	※ 各Lvに記載の物理量は閾値	社会的影響発生頻度と影響				
分野	影響と被害	(領域・軌道)	Lv 1	Lv 2 (注意報相当) K=5	Lv 3 (警報相当) K=6	Lv 4 (特別警報相当) K≥7			
宇宙システム 運用	深部帯電 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■	11		
	表面帯電 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■	12		
	大気ドラッグの増加 衛星姿勢・軌道変化	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■	13		
	トータルドーズ増加 衛星の半導体・材料の劣化	低軌道 中軌道 静止軌道 高度50,000 km以上	■	■	■	■	14		
	深部帯電 (ESD) 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 高度50,000 km以上	■	■	■	■	15		
	シングルイベント効果 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 非地球周回 低軌道 中軌道 静止軌道 非地球周回	■	■	■	■	16		
	トータルドーズ急増 衛星の半導体・材料の劣化	低軌道 中軌道 静止軌道 非地球周回	■	■	■	■	17		
	放射線帯電子増大 高エネルギー電子 (2MeV以上)	低軌道 中軌道 静止軌道 高度50,000 km以上	■	■	■	■			
	地磁気嵐・サブストーム サブストーム粒子	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■			
	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■			
	深部帯電 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■			
	表面帯電 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■			
	大気ドラッグの増加 衛星姿勢・軌道変化	低軌道 中軌道 静止軌道 (非地球周回)	■	■	■	■			
	トータルドーズ増加 衛星の半導体・材料の劣化	低軌道 中軌道 静止軌道 高度50,000 km以上	■	■	■	■			
	深部帯電 (ESD) 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 高度50,000 km以上	■	■	■	■			
	シングルイベント効果 衛星の誤動作・故障	低軌道 中軌道 静止軌道 非地球周回 低軌道 中軌道 静止軌道 非地球周回	■	■	■	■			
	トータルドーズ急増 衛星の半導体・材料の劣化	低軌道 中軌道 静止軌道 非地球周回	■	■	■	■			

(注意) 5 分野で計 17 種類の予報・警報のカテゴリを設定し、うち 12 種類について基準の閾値を決定した。残りの 5 種類 (①、②、⑥、⑦、⑧) の閾値については今後の検討課題となる。

社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（通信・放送分野）

背景

- PSTEP 報告書では、電離圏じょう乱現象または電波じょう乱現象で種類分け（電離圏負相嵐、デリンジャー現象、極冠吸収、プラズマバブル）がされており、これをベースとして警報の種類・閾値と社会的影響について検討した。

検討概要

- HF～VHF 帯に加え、PSTEP 報告書で記載がない UHF 帯（衛星通信）の社会的影響についても含めることとした。
- 閾値については、ICAO や米国 NOAA、英国 UKMO などによって運用されている 国際的な基準も考慮して設定。
- 5 つの予警報基準を策定し、3 つの基準について閾値を設定した。残り 2 つの基準の閾値については今後の検討課題とした。

警報種類	警報閾値に用いる観測量	社会的影響
HF帯 （電離圏嵐）	国内イオノゾンデによる MUF（又はI-scale） ←国際基準（ICAO）とする	今後検討（通信機 会の減少度合な ど）
HF帯 （デリンジャー）	GOES X線 ←他の国際機関と同様	電波の吸収量、影 響の継続時間、範 囲の統計情報
HF帯 （極冠吸収）	GOES 高エネルギー粒子 ←他の国際機関と同様	電波の吸収量、影 響の範囲、継続時 間の統計情報
VHF帯 （スプラディックE）	国内イオノゾンデによる foEs（大きさ、継続時間等。 警報の出し方は要検討）	目安となる周波数 帯の電波の伝搬距 離、減衰など
衛星通信UHF帯 （プラズマバブル）	GEONETデータに依るROTI や、S4指数などを今後検討	シンチレーション による電波減衰量

HF 帯/電離圏嵐（負相）

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲 *今後の研究により変わりうるもの ■システムに依存するもの △障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	HF帯利用可能な周波数帯が縮小	電離圏嵐（負相）			
社会的影響				国内外との通信可能な周波数帯が最大3割程度縮小。	国内外との通信可能な周波数帯が最大5-6割程度縮小となり、一部の時間帯で通信不可。
計測・予測可能な物理量				MUF30%減	MUF50%減
国外基準との関連性（米国、英国等）				ICAO-HFのmoderate（MUF30%減）と同じ、NOAA磁気嵐スケールのsevere（Kp≥8）に相当	ICAO-HFのsevere（MUF50%減）と同じ、NOAA磁気嵐スケールのextreme（Kp≥9）に相当
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）				情報提供側から現況、1時間前（MUF）、1日前の予測（K指数）が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点で1時間前、1日前の予報が可能だが精度に課題あり。今後数値モデルの精度改善とリードタイムの延伸の開発が必要	
その他				発生頻度：年5日程度	発生頻度：3年に1回程度

HF 帯/デリンジャー現象

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲 *今後の研究により変わりうるもの ■システムに依存するもの △障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	HF帯電波強度の減衰	デリンジャー現象			
社会的影響				昼間側の広い範囲で電波の吸収があり、低周波帯は使用不可となる	昼間側の広い範囲でHF帯全域で使用不可（black out）となる
計測・予測可能な物理量				X1フレア発生（静止軌道にて1-8A帯のX線フラックスが 10^{-4} W m ⁻² 以上）	X10フレア発生（静止軌道にて1-8A帯のX線フラックスが 10^{-3} W m ⁻² 以上）
国外基準との関連性（米国、英国等）				ICAO-HFのmoderate（X1）、NOAA radio blackoutスケールのstrong（X1）と同じ	ICAO-HFのsevere（X10）、NOAA radio blackoutスケールのsevere（X10）と同じ
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）				情報提供側から現況、1日前の予測が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点で1日前のフレア規模の確率予報が可能。ユーザー調査によってレベルに合わせた予測（X1, X10など）や、必要なタイミングでの予測が必要となる可能性有。社会影響や予測の項目に継続時間の情報追加も要考慮。	
その他				発生頻度：月1日程度	発生頻度：年1回程度

HF 帯/極冠吸収

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲					
*今後の研究により変わりうるもの ■システムに依存するもの △障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	HF帯電波強度減衰	極冠吸収			
社会的影響				高緯度地域（55度以上）で顕著な電波の吸収が起き、2日間程度継続する。	高緯度地域（52度以上）で顕著な電波の吸収が起き、3日間程度継続する。
計測・予測可能な物理量				静止軌道にて10MeV以上のプロトン粒子フラックスが 10^3 pfu 以上	静止軌道にて10MeV以上のプロトン粒子フラックスが 10^5 pfu 以上
国外基準との関連性（米国、英国等）				NOAA radiation stormスケールのstrong～severe（10MeVプロトン $> 10^3$ pfu）と同じ	NOAA radiation stormスケールのstrong（10MeVプロトン $> 10^5$ pfu）と同じ
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2～3日前、数日前等）				情報提供側から現況、1日前の予測が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点で1日前のフレア規模の確率予報が可能。ユーザー調査によって異なるタイミングでの予測が必要となる可能性有。ひまわり後継機の測定情報を使う場合にどのような情報が提供可能か今後要検討。	
その他				発生頻度：年1回程度	発生頻度：10年に1回程度

VHF 帯/スプラディック E 層（閾値未定）

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲					
*今後の研究により変わりうるもの ■システムに依存するもの △障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	VHF帯回線品質劣化（電波強度減衰）	スプラディックE層			
社会的影響				見通し範囲外からの電波が混信することがある。	見通し範囲外からの電波が混信することが頻繁に発生する。
計測・予測可能な物理量				国内イオノゾンデによって計測されるfoEsの発生状況から閾値を今後検討（foEs発生状況と社会影響との関連の調査、foEsの統計分析等が必要。今年度内に暫定的な閾値の導出を目標）	
国外基準との関連性（米国、英国等）				国外で公開され、運用されている基準は無い	
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2～3日前、数日前等）				情報提供側から現況、1日前の予測が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点では現況から1日後のEs発生を予測。大気モデルによる予測研究も現在進められており、今後実用化が期待できる。	
その他					

UHF 帯/プラズマバブル（閾値未定）

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲 * 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る事由 天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	UHF帯（衛星通信） 電波減衰、シンチレーション	プラズマバブル			
社会的影響				低緯度夜間帯にてL-band衛星のフェードマージンを越えるシンチレーションが発生することがある	低緯度夜間帯にてL-band衛星のフェードマージンを越えるシンチレーションが頻繁に発生し、中緯度帯でも影響を受ける場合がある。
計測・予測可能な物理量				入手可能な観測データ（GEONET受信機など）を基に検討（ROTIやS4など測定可能な指数と通信電波のフェージング強度との関連の調査や、範囲・継続時間・頻度を含めたバブル発生状況と衛星通信への影響について統計分析などが必要。年度内に暫定的な閾値の導出が目標。）	
国外基準との関連性（米国、英国等）				ICAO-振幅シンチレーション指数S4>0.5	ICAO-振幅シンチレーション指数S4>0.8
予報・警報の必要なタイミング （現況、1時間前、2～3日前、数日前等）				情報提供側から現況の情報が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				閾値は基準および測定場所を含めて要検討。	
その他					

社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（測位分野）

背景

- 測位手法は多岐にわたり、測位手法によって影響のある宇宙天気現象が異なる（PSTEP オープン・テキストブックの 1.2 章表 6 参照）。
- 国際的には航空運用で利用される ICAO 基準（鉛直 TEC 125/175 TECU 以上、S4 指数 0.5/0.8 以上で moderate/severe 等）があるものの、ユーザー側の要件から導かれた根拠はない。その他、測位に関する宇宙天気の国際基準は明確にはない。
- 測位分野の特徴として、ユーザーによってその使用方法や目的が様々であることが挙げられる。複数存在する測位手法に対し、それぞれのユーザーがどのような水準を求めているのかを知る必要がある。

検討概要

- 「宇宙天気が測位の精度等に与える影響の調査に関するアンケート」を実施。主に測位サービスを提供する事業者に対し、その測位手法や性能水準、宇宙天気に関する対策や要望を調査するため、「宇宙システム開発利用推進機構」「電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会」の他、内閣府、航空局等に回答を依頼した。
- 回答のあった 19 事業者からのアンケート結果に基づき、WG メンバー内で検討し、予警報の必要性のある分野やその閾値、予警報を発出するために必要な課題などを議論した。
- 「電離圏現象」は細分化せずに「電離圏遅延量」「電離圏遅延量空間勾配」「シンチレーション」の 3 種類に分けて検討した。
- アンケート回答は、二周波精密測位（RTK, GLAS）および一周波相対測位（SLAS, SBAS, GBAS 等の DGNSS）のサービス提供者から多く得られた。
- 全ての手法について、アンケートで得られた性能水準等を参考に、3 種類の宇宙天気の影響（「遅延量」「遅延量空間勾配」「シンチレーション」）に関する予警報の必要性について判断した（次ページの表）。二周波精密相対測位（主に RTK）にその必要性が高く、続いて二周波精密単独測位（主に GLAS）と一周波相対測位（DGNSS、SLAS、SBAS 等）にもその必要性がある。
- 二周波精密相対測位、二周波精密単独測位、一周波相対測位の 3 つについて、そのレベル分けや閾値の決め方、予警報発出の粒度や実現可能性について検討した。閾値については、定量的に決めるために必要な課題について明らかにした。
- 最悪シナリオの一つは、「誤作動により更に深刻な事例を引き起こすこと」。ただし本シナリオの可能性は、各システムの設計にも依存するため、更なる調査を要する。本シナリオが起こりえない場合、最悪シナリオは「測位が出来ない」となる。

電離圏擾乱現象と影響を受けるGNSS測位。✓の有無は一般論として電離圏の影響が出る場合の有無を示す。

電離圏の効果		電離圏全電子数					電離圏不規則構造	
		電離圏遅延		電離圏遅延空間勾配			強度シンチレーション	位相シンチレーション
電離圏現象		正相嵐	負相嵐	SED/SIPS	プラズマバブル	MSTID	プラズマバブル	オーロラ
1周波	単独	✓	✓	✓	✓		✓	✓
	相対			✓	✓		✓	✓
1周波 (精密)	相対 (位相)			✓	✓	✓	✓	✓
	単独 (PPP)			✓	✓	✓	✓	✓
2周波	単独						✓	✓
	相対					✓	✓	✓
2周波 (精密)	相対 (位相)			✓	✓	✓	✓	✓
	単独 (PPP)			✓	✓	✓	✓	✓

PSTEPオープン・テキストブック (<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/pstep/news/20210806.html>) 1.2章より

Impact Area	Parameter (Unit)	Moderate	Severe
GNSS	Amplitude scintillation S4 (dimensionless)	0.5	0.8
	Phase scintillation σ_ϕ (radians)	0.4	0.7
	Vertical TEC (TEC Unit)	125	175

ICAOのGNSSに関する指標と閾値
[<https://www.mdpi.com/2072-4292/13/18/3685>]

- Q1. 提供サービス名
- Q2. エンドユーザーの業種
- Q3. 測位手法
- Q4. 性能水準（精度要件・安全性・継続性・アベイラビリティなど）
- Q5. 宇宙天気や電離層の影響について考慮されているか、その具体例
- Q6. 宇宙天気に関するアラートが出るとした場合に、望まれる情報

「宇宙天気が測位の精度等に与える影響の調査に関するアンケート」概要

「宇宙天気が測位の精度等に与える影響の調査に関するアンケート」に基づいて検討された、
各測位手法における宇宙天気に関する予警報の必要性について

 予警報として必要
 参考情報として必要
 不要
 不明・要調査

宇宙天気の影響		遅延量	遅延量 空間勾配	シフト	測位サービス（延べ回答数）	求められる性能水準（一部抜粋）
一周波	単独	✓	✓	✓	QZSS-PNT(1)	・精度 ≤ 2.6 m、電離層パラメータ精度 ≤ 7.0 m（共に95%値）等（※サービスの要求水準）
					単独測位(7)	・車両位置精度：数m（道路幅程度）
					ABAS（1）	・水平方向0.47-3.7km等
	相対		✓	✓	SLAS(1)	精度（Zone 1）：水平1.00m以下(95%値)等（※サービスの要求水準）
					SBAS(3), MSAS(1), GBAS(2)	MSASの例：非精密進入、垂直基準なし、水平220m、インテグリティ：1-10 ⁻⁷ per hour GBASの例：カテゴリーI精密進入、垂直6.0-4.0m、水平16m、インテグリティ：1-2 × 10 ⁻⁷ in any approach 等
					DGNSS(6)	・水平：0.4m / 垂直：0.6m 車両の測位精度：サブメータ級等
一周波（精密）	相対（位相）		✓	✓	（一部のRTKユーザー）	
	単独（PPP）		✓	✓	PPP(1)	
二周波	単独			✓	QZSS-PNT(1)	要求水準としては1周波単独PNTに同じ
	相対			✓	二周波SBAS(将来的に)	
二周波（精密）	相対（位相）			✓	RTK(13), VSR-RTK(2), スタティック(4), CLARCS(1)	公共測量作業規定に準じた精度、水平2cm、上下方向3 cm
	単独（PPP）			✓	CLAS(5), PPP(2)	静止体で水平6cm以下、垂直12cm以下、移動体で水平12cm以下、垂直24cm以下（いずれも信頼水準95%値）等（業務要求水準書）

二周波精密 相対測位 (RTKなど) (閾値未定)

 影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲			
＊今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの			
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響
			Lv 1 Lv 2 Lv 3
測位（二周波精密相対）	測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シフト（TID・アラーム・アラールなど）	
社会的影響			FIX解が得られ、基準（水平2センチ、上下方向3センチ以内の誤差範囲）を満たす 精度の低下 水平2cm鉛直3cmの測位精度が出ない 測位不可能 測位解（FIX解）が得られない
計測・予測可能な物理量			電離圏遅延の空間勾配（水平方向10kmの基線におけるTEC値の差分） シフト（Rate of TEC change Indexをシフト指数の代替指標とする）
国外基準との関連性（米国、英国等）			ICAOのGNSS基準（TEC125/175TECU以上、S4指数0.5/0.8以上でmoderate/severe）は、ユーザー側の要件から導かれた根拠ではなく、改めて検討が必要であると考える。 電離圏遅延の空間勾配については基準なし。
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）			警報（ナウキャスト）に加え、数日先/1日先/半日先の予報があると好ましい。
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			予警報実現性 ：現在のTEC観測より基線10kmあたりの遅延量空間勾配を基に予警報を出すことで実現可能。シフトに関してROTI指数を基に予警報を出すことで実現可能。 閾値決定のための課題 ：電離圏遅延の空間勾配と、測位手法各システムに生じる測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。シフトの目安となるROTI指数についても同様に各システムに生じる測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。 現時点で利用可能な測位データと特定のアルゴリズムを用いた解析を実施し、今年度内に暫定値を導出することを目標とする。多様な解析アルゴリズムに対する比較・考察、統計的に不足するデータの補間の手法開発を行い、一般化できる結果を得るためには、数年の研究が必要と推測される。
その他			・地方ごとの予警報発出が望まれる。

二周波精密
単独測位
(CLASなど)
(閾値未定)

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲			*今後の研究により変わりうるもの ■システムに依存するもの △障害というより「通常と異なる」もの		
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
測位（二周波位相単独）	測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シフト（TID・プラズマ・フレージョンなど）			
社会的影響			FIX解が得られ、基準（センチメートル級の精度）を満たす	精度の低下 センチメートル級の測位精度が出ない	測位不可能 測位解が得られない
計測・予測可能な物理量			電離圏遅延の空間勾配（水平方向10kmの基線におけるTEC値の差分） シフト（Rate of TEC change Indexをシフト指数の代替指標とする）		
国外基準との関連性（米国、英国等）			ICAOのGNSS基準（TEC125/175TECU以上、S4指数0.5/0.8以上でmoderate/severe）は、ユーザー側の要件から導かれた根拠ではなく、改めて検討する必要があると考える。 電離圏遅延の空間勾配については基準なし。		
予報・警報の必要なタイミング （現況、1時間前、2～3日前、数日前等）			警報（ナウキャスト）に加え、数日先/1日先/半日先の予報があると好ましい。		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			予警報実現性： 現在のTEC観測より基線10kmあたりの遅延量空間勾配を基に予警報を出すことで実現可能。シフトに関してROTI指数を基に予警報を出すことで実現可能。 閾値決定のための課題： 電離圏遅延の空間勾配と、測位手法各システムに生じる測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。シフトの目安となるROTI指数についても同様に各システムに生じる測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。 閾値の決定には、十分なデータ蓄積が必要であり、その後1年程度あれば特定のアルゴリズムを用いた暫定値が決まる見込み。更に、多種存在する解析アルゴリズムに対する検討や不足データの補間などの手法検討が必要であり数年の研究が必要と推測される。		
その他			・現段階では、発出された予警報などの情報を測位システムに組み込むことが難しいため、予警報は参考情報としての位置付けである。 ・CLASの補正情報を提供している12エリアに対しての情報発出が望まれる。		

一周波コード
相対測位
(DGNSS
など)
(閾値未定)

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲			*今後の研究により変わりうるもの ■システムに依存するもの △障害というより「通常と異なる」もの		
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
測位（一周波コード相対）	測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シフト（TID・プラズマ・フレージョン等）			
社会的影響			問題無く測位ができる。	精度の低下 SLASユーザー：サブメートル級の測位精度が出ない SBAS・GBASユーザー：潜在し得る誤差が増大し、一部のサービスが利用不可	測位不可能 SLASユーザー：測位解が得られない SBAS・GBASユーザー：潜在し得る誤差が増大し、全てのサービスが利用不可
計測・予測可能な物理量			電離圏遅延の空間勾配（水平方向100kmの基線におけるTEC値の差分） シフト（Rate of TEC change Indexをシフト指数の代替指標とする）		
国外基準との関連性（米国、英国等）			ICAOのGNSS基準（TEC125/175TECU以上、S4指数0.5/0.8以上でmoderate/severe）は、ユーザー側の要件から導かれた根拠ではなく、改めて検討する必要があると考える。 電離圏遅延の空間勾配については基準なし。		
予報・警報の必要なタイミング （現況、1時間前、2～3日前、数日前等）			警報（ナウキャスト）に加え、数日先/1日先/半日先の予報があると好ましい。さらに1週間先/1カ月先の予測が欲しい。		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			予警報実現性： 現在のTEC観測より基線100km程度あたりの遅延量空間勾配を基に予警報を出すことで実現可能。シフトに関してROTI指数を基に予警報を出すことで実現可能。 閾値決定のための課題： 電離圏遅延の空間勾配と、測位手法各システムに生じる基準誤差の関係について明らかにする必要がある。 閾値の決定には、十分なデータ蓄積が必要であり、その後1年程度あれば特定のアルゴリズムを用いた暫定値が決まる見込み。更に、多種存在する解析アルゴリズムに対する検討や不足データの補間などの手法検討が必要であり数年の研究が必要と推測される。		
その他			・現段階では、発出された予警報などの情報を衛星測位システムに組み込むことが難しいため、予警報は参考情報としての位置付けである。 ・地方ごとの予警報発出が望まれる。 ・SBASやGBASユーザーにとっては「電離圏勾配無」「シフト無」といった「静穏である」という情報が重要である。		

社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（衛星運用分野）

背景

- PSTP 報告書におけるハザードマップの記載は「衛星帯電」のみ。
- 表面帯電・深部帯電に関する宇宙天気の影響マトリクスにおいては、発生頻度と影響については、衛星毎の設計の違いに対する依存が大きいことから、定量的な評価は未実施。
- NICT では、「放射線帯電子増大」、「プロトン現象」、「地磁気じょう乱」の3つの予報を主に衛星運用に関連するものと捉えているが、レベル毎の具体的なリスクの対応付けは行っていなかった。
- 米国・英国のスケールにおいては、R-Scale（太陽プロトン現象）、G-Scale（地磁気じょう乱）において、衛星運用のリスクに関する記載有。
- 宇宙開発・利用の状況は PSTEP 報告書策定当時とも変わりつつあり、最近の動向（超小型衛星の普及・利活用、衛星コンステレーション、地球周回外（月・火星）ミッション、等）を踏まえた見直し、検討が必要。また、予報レベルに応じたリスクの対応付けが必要。

検討概要

- 衛星運用分野における5回のWG会合と、7事業者に対するアンケート調査により検討を実施。以下のことが認識・再確認された。
 - 宇宙システム設計においては、宇宙環境の影響は考慮されているが、システム毎に考慮している宇宙環境のレベルやそれに基づく設計の考え方に違いがあり、現段階では統一的な最悪値の設定は難しい。
 - 宇宙システム運用においては、宇宙環境情報は運用や障害時の事後解析のために参照しているものの、現状では予測される宇宙環境のリスクと運用の変更・中断がもたらすリスクの対比が難しく、アラートレベルに応じて一律に運用の変更やバックアップ手段を講じる事例は無かった。
 - 従来の予報やリスク評価では静止軌道の衛星運用が主たるターゲットだったが、低軌道や月・火星等他の軌道における衛星運用への影響のニーズが高まりつつある。よって、衛星帯電のみならず、宇宙環境に起因する様々な衛星障害をターゲットとする必要がある。
- 以上のことから、衛星運用分野においては、アラートレベルごとに、一般化した各障害・軌道ごとの影響を記述したマトリクスを作成し、併せて今後の課題抽出を実施。

深部帯電の閾値

放射線帯電子 (>2 MeV)	低軌道	中軌道	静止軌道	高度 50,000 km 以上
$3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \sim$				
$3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \sim$ $3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$				
$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \sim$ $3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$				
No Event				

シングルイベント効果の閾値

太陽プロトン (>10 MeV)	低軌道	中軌道	静止軌道	地球周外
10,000 PFU以上				
1,000 – 10,000 PFU				
100 – 1,000 PFU				
No Event				

プロトン現象

影響が無視できる		衛星運用への軽微な影響の可能性		衛星運用への影響の可能性		衛星運用への深刻な影響の可能性	
* 今後の研究により変わらうもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの							
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	(領域・軌道)	社会的影響発生頻度と影響			
				Lv 1 (影響なし)	Lv 2 注意報相当	Lv 3 警報相当	Lv 4 特別警報相当
宇宙システム運用	シングルイベント効果 衛星の誤動作・故障	プロトン現象 高エネルギー陽子 (10MeV以上)	低軌道	△	■	■	■
			中軌道		■	■	■
			静止軌道		■	■	■
			非地球周回		■	■	■
宇宙システム運用	トータルドーズ急増 衛星の半導体・材料の劣化	プロトン現象 高エネルギー陽子 (10MeV以上)	低軌道		■	■	■
			中軌道		■	■	■
			静止軌道		■	■	■
			非地球周回		■	■	■
社会的影響 (各軌道の影響は、軌道傾斜角によっても異なることに注意)			低軌道の南大西洋異常(SAA)でシングルイベント効果による衛星の誤動作が発生する一定のリスクがあります。	衛星運用への影響に注意してください。 ・低軌道、中期道、静止軌道、月面で衛星の高エネルギー陽子起因のシングルイベント効果やトータルドーズ急増による、誤動作、半導体・材料劣化、故障の軽微なリスクがあります。	衛星運用への影響に警戒してください。 ・低軌道、中期道、静止軌道、月面で衛星の高エネルギー陽子起因のシングルイベント効果やトータルドーズ急増による、誤動作、半導体・材料劣化、故障の警戒レベルのリスクがあります。	衛星運用への影響に最大限警戒してください。 ・低軌道、中期道、静止軌道、月面で衛星の高エネルギー陽子起因のシングルイベント効果やトータルドーズ急増による、誤動作、半導体・材料劣化、故障の重大なリスクがあります。	
計測・予測可能な物理量			静止軌道の高エネルギー粒子	100PFU以下	100－1,000PFU	1,000-10,000PFU	10,000PFU以上
国外基準との関連性(米国、英国等) NOAA S-scaleとの関連性					S2 100PFU infrequent single-event upsets possible	S3 1,000PFU single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely.	S4 10,000PFU may experience memory device problems and noise on imaging systems; star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded.
予報・警報の必要なタイミング(現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			運用ポリシーや運用スキームの設計、物理的な制約にも依存するため、具体化するには今後事業者へのヒアリングが必要である。				
予報・警報実現性、間値情報更新への課題			・現状、現象発生の予報は困難。現象発生直後の警報が現実的。 ・現象発生後、その現象がいつまで続くのかは、100MeV以上くらいのエネルギーの粒子であればシミュレーションなどで予測できる可能性はあるが、10MeVなどの低エネルギーの粒子では難しい。				
その他			・障害を起こす粒子のエネルギーは、10MeV以上で良いのか？(被ばくなどは100MeV以上だけ見ていけば良い) ・陽子だけで良いのか？重イオンや中性子は？				

放射線帯電子

影響が無視できる		衛星運用への軽微な影響の可能性		衛星運用への影響の可能性		衛星運用への深刻な影響の可能性	
* 今後の研究により変わりうるもの		■ システムに依存するもの		△ 障害というより「通常と異なる」もの			
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響				
			(領域・軌道)	Lv 1	Lv 2 (影響は想定範囲)	Lv 3 注意報相当	Lv 4 警報相当
宇宙システム運用	トータルドーズ増加 衛星の半導体・材料の劣化	放射線帯電子増大 高エネルギー電子(2MeV以上)	低軌道				*
			中軌道				*
			静止軌道				*
			高度50,000 km以上	-	-	-	-
宇宙システム運用	深部帯電 (ESD) 衛星の誤動作・故障	放射線帯電子増大 高エネルギー電子(2MeV以上)	低軌道			*	*
			中軌道			*	*
			静止軌道			■	■
			高度50,000 km以上	-	-	-	-
社会的影響 (各軌道の影響は、軌道傾斜角によっても異なることに注意)			宇宙システムへの影響に注意してください。 ・中期道と静止軌道で高エネルギー電子起因の深部帯電 (ESD) による、誤動作、故障の 警戒レベルのリスク があります。低軌道の極域でも 注意レベルのリスク があります。				
計測・予測可能な物理量 (閾値)			静止軌道上のエネルギー2MeV以上の電子の24時間フルエンス	$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未満 (AE8MAXより少ない状態)	$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 $3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未満 (AE8MAX+50%の範囲内)	$3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 $3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未満 (AE8MAX+50%より多い状態) 0.01pA/cm ² 相当	$3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 (AE8MAX+50%の10倍より多い状態) 0.1pA/cm ² 相当 4500rads/day相当 (=190rad/hr)
発生頻度 (1996年から2016年までの統計)				60%	30%	10%	<1%
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			運用ポリシーや運用スキームの設計、物理的な制約にも依存するため、具体化するには今後事業者へのヒアリングが必要である。				
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			・静止軌道の警報についてはGOESのリアルタイム計測に基づき、閾値を超えた場合は即時に警報を出すことが可能。 ・ひまわり等の観測が実現すればGEO日本経度域の警報精度が上がる。 ・予報については現状では3日先まで算出可能。太陽風シミュレーションと結合することでさらに長いリードタイムの予報ができる可能性あり。 ・GEOとMEOは必ずしも変動が同期していないため、MEOの観測や予測があれば警報精度が上がる。あらかじめ衛星のデータ・予測が利用できるとよい。 ・GEOとLEOは必ずしも変動が同期していないため、LEOの観測があれば警報精度が上がる。POES、GOSAT/TEDAのデータが利用できるとよい。 ・高エネルギー電子によるトータルドーズは時間積分が効くため、もう少し長い月単位または年単位のフルエンスを警報基準とする方がよいかもしれない。(トータルドーズの急増はプロトン現象が原因)。				
その他			・AE8からマージンをどの程度考慮した設計としているかにより影響レベル(帯電量・ドーズレート)が異なる				

地磁気擾乱

影響が無視できる		衛星運用への軽微な影響の可能性		衛星運用への影響の可能性		衛星運用への深刻な影響の可能性	
* 今後の研究により変わりうるもの		■ システムに依存するもの		△ 障害というより「通常と異なる」もの			
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響				
			(領域・軌道)	Lv 1	Lv 2 (注意報相当)	Lv 3 (警報相当)	Lv 4 (特別警報相当)
宇宙システム運用	深部帯電 衛星の誤動作・故障	地磁気嵐・サブストーム サブストーム粒子	低軌道				■
			中軌道			*	*
			静止軌道			■	■
			(非地球周回)	-	-	-	-
宇宙システム運用	表面帯電 衛星の誤動作・故障	地磁気嵐・サブストーム サブストーム粒子	低軌道		■	■	■
			中軌道		*	*	*
			静止軌道		■	■	■
			(非地球周回)	-	-	-	-
宇宙システム運用	大気ドラッグの増加 衛星姿勢・軌道変化	地磁気嵐 大気密度増加	低軌道	(高度に依存) *	(高度に依存)	(高度に依存)	(高度に依存)
			中軌道	-	-	-	-
			静止軌道	-	-	-	-
			(非地球周回)	-	-	-	-
社会的影響 (各軌道の影響は、軌道傾斜角によっても異なることに注意)			衛星運用への影響に注意してください。 ・低軌道の極域と中軌道・静止軌道で衛星の帯電・放電による、誤動作・故障の 軽微なリスク があります。 ・低軌道で大気ドラッグ増加により衛星の姿勢変化や高度低下の 軽微なリスク があります。 衛星運用への影響に 警戒 してください。 ・低軌道の極域と中軌道・静止軌道で衛星の帯電・放電による、誤動作・故障の 重大なリスク があります。 ・低軌道で大気ドラッグ増加による衛星の姿勢変化や高度低下の 重大なリスク があります。				
計測・予測可能な物理量			地磁気変動に基づく指標 (K指数) を予測	K≤4	K=5	K=6	K≥7
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			運用ポリシーや運用スキームの設計、物理的な制約にも依存するため、具体化するには今後事業者へのヒアリングが必要である。				
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			・衛星システムに対する宇宙環境の影響については、衛星システム毎の違いが大きく、かつ実際の影響事例の情報が十分に開示されていないため、定量化が難しい。今後、衛星製造事業者や衛星運用事業者と協力して影響事例の分析を行い、エビデンスに基づくレベル設定を実現することが必要である。 ・低軌道や中軌道における影響と宇宙環境予測については、当面のターゲットとして今後取組を強化していく必要がある。月周回、月面、惑星間空間、火星周回軌道等の非地球周回の軌道・領域については、将来的な課題として検討していく必要がある。 ・地磁気しょう乱予報の基準として、現在K指数を用いているが、Kp指数、AE、Dst指数等、グローバルな指数を追加、導入の検討や、表面帯電に直結するサブストーム粒子の予測に関して、新たな予測指標の導入の可否について今後検討する必要がある。 ・現状、十分な精度で予報できるのは1時間前であるが、太陽フレア、コロナホール等上流側の状況を踏まえた早期予報・警報とその後の新たな情報（データ）に基づく予報の更新のあり方について検討する必要がある。				
その他			・衛星システム等の設計を踏まえて宇宙環境変動に伴う具体的リスク評価を行うツール整備を進める必要がある（SECURESなど）。 ・発出した予報・警報の有効利用に向け衛星製造事業者や衛星運用事業者との意見交換、情報交換を密にしていく必要がある。 ・宇宙環境データの直接提供についても今後検討が必要である。				

社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（電力分野）

背景

- 太陽活動によって電力系統に強い地磁気誘導電流 (GIC) が流れると、電力設備の誤作動や損傷につながるおそれがある。
- GIC の発生メカニズムは次のとおり。
 - 太陽面コロナ質量放出 (CME) や高速太陽風が地球に到来すると、磁気圏・電離圏を流れる電流が増強し、地磁気じょう乱（オーロラ嵐・磁気嵐）が発生。
 - 地磁気が乱れると地面に誘導電場（GIE）が生じる。
 - GIE によって地面に接地されている長い導体に電流（GIC）が流れる。
- 北米の NERC (北米電力信頼度協会) は、1989 年 3 月イベントの地磁気変動を基に GIE 推定式、および地下伝導度参照値を策定 (GMD ベンチマーク)。200kV 以上の変圧器について、GMD ベンチマークを用いて 75A/1 相以上流れる場合には熱影響評価が必要としている。

検討概要

- 日本列島は中緯度域に位置するため、通常的地磁気じょう乱では GIC も小さい。しかし巨大磁気嵐が発生すると、場所によっては大きな GIC が流れる可能性がある。巨大磁気嵐をもたらすのはフレア起源の巨大 CME にほぼ限られる。
- 長時間変動（磁気嵐主相、時間スケール数時間）により変圧器加熱が懸念されることから、影響を起こしうる事象を検討。
- 閾値検討の拠り所として NERC の熱設計基準を用い、この基準値に至る上流の現象規模(物理量)を検討。
- GIC 基準値は、NERC 基準を参考とした科学的判断により、Lv3 は NERC 基準である 225A/3 相（暫定値）、Lv2 はその約 1/2 である 100A/3 相（暫定値）を基準とする（次ページの表）。今後、電力分野の事業者からのデータ提供等主体的な協力を得つつ、産学官が連携して調査研究を進めることで精緻化を目指す。

警報 種類	事例 (地磁気擾乱)	現在						
		>0.5-1日 前	約0.5-1日 前	10~30分前		地磁気擾乱(dH)@日本	GIE ※暫定値。まずは全国一様として、柿岡地電場を目安とする。(柿岡地磁気観測所による地電場観測は2021年2月終了)	GIC ※暫定値
		活動領域 太陽磁場	フレア /CME ※発生場所も 考慮：±30度	太陽風速度 IMF		地磁気擾乱(dH)@日本	GIE ※暫定値。まずは全国一様として、柿岡地電場を目安とする。(柿岡地磁気観測所による地電場観測は2021年2月終了)	GIC ※暫定値
		フレア/CME～地磁気擾乱(dH)@日本の関係 地磁気擾乱(dH)@日本～地電場(柿岡)/GICの関係						
Lv3 [*1]	長時間変動 1859年, 1872年 1921年 (2012年地球と反対側で同等規模のCME発生) 短時間変動 1940年		右記 GIE/GICを 起こしうるフ レアクラス /CME※	右記 GIE/GICを 起こしうる太 陽風※	長時間変動：1200nT [*2] 1859年, 1921年に発生 (1872年に上記を上回る規模の事象が発生した可能性) 短時間変動：230nT [*2] 1940/03に発生	GIE～1V/km [*3]	225A/3相 [*4]	
	長時間変動 1989年 2003年 短時間変動 2003年				長時間変動：500-600nT [*2] 1989年, 2003年に発生 短時間変動：100nT [*2]	GIE～0.5V/km [*3]	上記225Aの約 1/2=100A/3相 [*4]	
							100A/3相未満	

※：検討中(参考文献：Gopalswamy2018, Kataoka2020, NICT巨 解析、等)

GIE(推定): $2.0 \pm 0.4 \text{ V/km}$ [*6]、GIC(推定): $496 \pm 174 \text{ A}$ [*6]

影響が無視できる範囲		影響の可能性があり 適切な対応を要する範囲	深刻な影響の可能性があり 運用の継続が困難になる範囲		
* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙 天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
電力	地磁気誘導電流 (GIC) → 変圧器損傷	地磁気の高時間変動 (磁気嵐主相)			
社会的影響			変圧器加熱にいたるGIC が流れる可能性。		
計測・予測可能な物理量			変圧器加熱により、変圧 器損傷にいたる可能性。		
計測・予測可能な物理量			GIC 100A/3相 ※暫定値		
計測・予測可能な物理量			GIC 225A/3相 ※暫定値		
国外基準との関連性（米国、英国等）			NERC熱設計基準=75A/1相、225A/3相		
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）			フレア/CME検出時 ※事業者と検討		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			・上記GICを流しうるGIE、地磁気変動の閾値は最新研究により推定。 ・フレア/CMEの閾値は文献等をもとに検討中だが高精度化には多分野にわたる研究が必要。 ・GICの閾値については、電力分野の事業者からのデータ提供等主体的な協力を得つつ、産学官連携して調査研究を進めることで精緻化を目指す。 ・大規模な宇宙天気現象発生時において他分野でLv2以上の予警報が出される一方、電力分野でLv1である場合は、その情報の提供が必要。		
その他			磁気嵐の状況について適宜事業者へ情報提供すべきである。		

社会的影響を考慮した新たな予報・警報基準（航空機人体被ばく分野）

背景

- ・ 国際放射線防護委員会（ICRP）が「航空機乗務における宇宙放射線による被ばくを、職業被ばくの一部に含める」ように 1990 年に勧告した。
- ・ 日本国内では、2006 年に航空機乗務による宇宙放射線被ばくの管理目標値として年間 5mSv と設定され、民間航空会社では乗務員の宇宙放射線被ばく管理を行うことが必要になっている。
- ・ 航空機乗務員等の宇宙放射線被ばく線量は、すぐに健康影響が表れる（確定的影響）ような線量ではないが、被ばく線量が増えることで発ガンなど（確率的影響）の確率が高まる可能性が指摘されている。
- ・ 放射線防護の基本的な考え方は、ALARA の原則（as low as reasonably achievable：合理的に達成可能な限り低く）
- ・ 宇宙放射線被ばくに関する警報は、ALARA の原則に基づき、被ばく線量が増加する（した）場合にアラート（アドバイザリ）を出すことが、国際民間航空機関（ICAO）で決められている。

検討概要

- ・ 実運用されている ICAO 宇宙天気センターにおける放射線被ばくアドバイザリの基準を元に検討した。
- ・ ICAO アドバイザリの基準は、被ばく線量率が $80 \mu\text{Sv/h}$ 以上で Severe、 $30 \mu\text{Sv/h}$ で Moderate である。Severe の値は、国際線 12.5 時間 1 フライトで 1mSv（一般人の人為的な年間被ばく積算量の制限値、ただし医療被ばくを除く）。

STATUS	条件
Moderate	25,000ft-46,000ftの間で $30 \mu\text{Sv/h}$
Severe	25,000ft-60,000ftの間で $80 \mu\text{Sv/h}$

ICAOの放射線被ばくアドバイザリ率基準

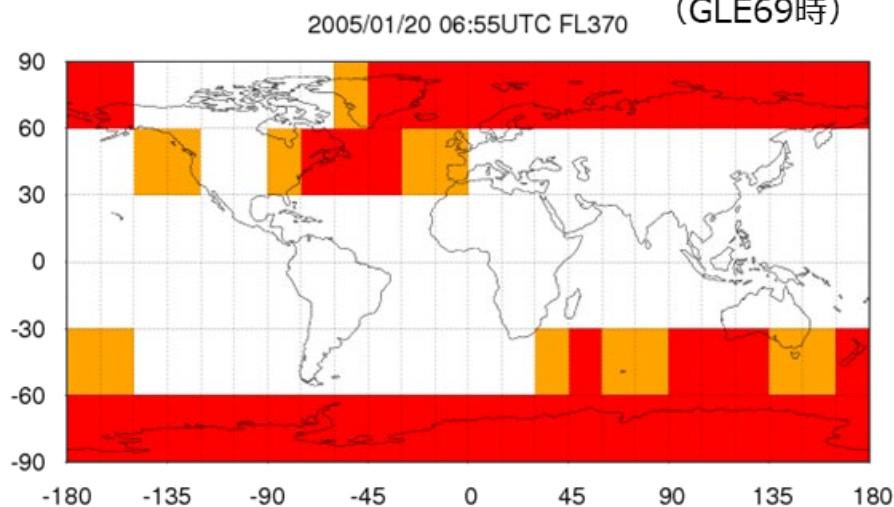
日本上空被ばく線量マップ（イメージ）

予警報情報	日本南 (25-35)	日本北 (35-45)	ICAO MNH
60000	20	35	200
53000	16	30	100
46000	12	25	70
35000	8	20	40
25000	4	15	
15000			
高度[feet]			

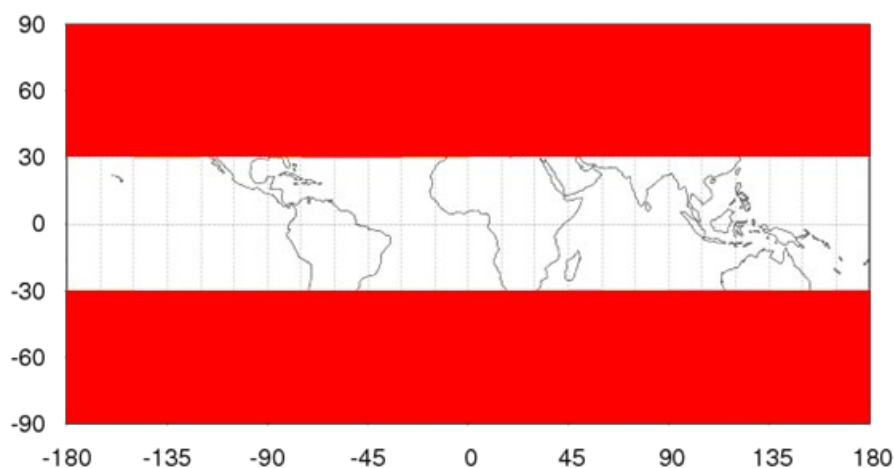
- ・ ICAO アドバイザリは、作成に利用される被ばく線量マップにおいて、地理緯度 30 度毎の 6 つ緯度帯で南北対称とし、同一緯度帯は全経度における最悪値で統一される（右図）。

- 磁気緯度の高い北米の影響で、中緯度帯の日本は上空が基準を超えていない安全な状況でも、アドバイザリが出る可能性があり、日本地域に特化した情報を発出する。
- 航空機での線量計測データが極めて少なく、線量率の検証が不十分である。航空会社との協力により、航空機に線量計を載せて線量を計測できるようにすることが必要。
- PSTEP 報告書では、屋久杉イベント(774-775)を最悪規模イベントとして、GLE69(2005. 1. 20)のWASAVIESの結果を141倍して全線量を推定した。高度12kmでの最大被ばく線量率は37mSv/hであり、1フライトで年間被ばく量上限5mSvを超える。

ICAOアドバイザリ作成に利用される被ばく線量マップ
(GLE69時)



ICAOアドバイザリの元になる被ばく線量マップ



航空機人体被ばく分野の予警報基準

影響が無視できる範囲 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲					
* 今後の研究により変わらうもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
航空機人体被ばく	被ばく線量増加	太陽高エネルギー粒子			
社会的影響				国際線12.5時間1フライトで0.4mSv程度	国際線12.5時間1フライトで1mSv
計測・予測可能な物理量 中性子モニターおよび静止軌道での太陽高エネルギー粒子の観測に基いたモデルによる被ばく線量率(μSv/h)の評価。				30μSv/h@250-460FL	80μSv/h@250-600FL
国外基準との関連性(米国、英国等)			米、英とも10MeV以上のIntensityを基準にしているが、被ばくに寄与するのは数百MeV以上のみなので、米、英の基準は妥当とは言えない。ICAOの基準に準ずる。ただし、国内線用に150-250FLでの評価も含める。		
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			航空機の運航を中止したりというアクションを起こす場合は、1~2日くらいのリードタイムが必要(要確認)。ただし、現状は本邦の民間航空機の運航規程に宇宙天気情報の利用は規定されておらず、宇宙天気情報は利用されていない。		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			現状、プロトン現象の発生予測は困難であり、モデルにより被ばく線量の増加が検出された際に警報を発信。プロトン現象発生後に、そのフラックスの時間発展の予測ができれば被ばく線量低減につながる可能性がある。		
その他			航空機乗務員の宇宙放射線被ばく線量は、すぐに健康影響が表れる(確定的影響)のような線量ではないが、被ばく線量が増えることで発ガンなど(確率的影響)の確率が高まる可能性が指摘されている。現状、被ばく線量計が搭載されている航空機はほとんどなく、そのため、被ばく線量の計測が無いためモデルの妥当性の評価が十分でない。		

【参考資料】

- 「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」開催要綱
- 「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」構成員名簿
- 「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」開催経過
- 「宇宙天気の警報基準に関するWG」の設置理由と検討課題等
- 「宇宙天気の警報基準に関するWG」メンバー名簿
- 事務局メンバー（総務省国際戦略局宇宙通信政策課）

宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会 ～社会経済活動の安心・安全の実現に向けて～ 開催要項

1. 目 的

太陽活動によって航空無線、電力網、通信・放送・測位システムなどの社会インフラに異常を発生させ、我々の社会経済活動に多大な影響を与えるおそれがある。

このため、情報通信研究機構（NICT）では、太陽活動や電離圏・磁気圏を観測・分析し、24 時間 365 日の有人運用による予警報（宇宙天気予報）を関係機関に提供している。また、宇宙基本計画（令和 2 年 6 月 30 日 閣議決定）においては、総務省の役割として、国内外の関係機関等と連携し、観測・分析システムの更なる高度化を図るとともに、観測データを用いたシミュレーション技術の研究を行い、宇宙天気予報システムの高精度化等を進めることとされている。

このように宇宙天気予報は社会経済活動の安心・安全に直結する業務であり、社会インフラの安定運用に責任を持つ企業や太陽活動がもたらすリスクを抱える産業界に不可欠なサービスとして重要性が高まりつつある。

また、我が国は中緯度に位置しており、太陽活動がもたらす誘導電流による電力網への影響などは従来軽視されてきた。しかし、太陽活動が社会に与える影響に関して行われた近年の研究では、そうした認識を改め、産業界を交えつつ社会インフラに対する影響を再検討する必要があるとの研究結果も現れてきている。

さらに国際社会においては、本年、国連防災機関は宇宙天気に対処すべき災害の一つに位置づけるとともに、英国政府は深刻な宇宙天気への備えに関する国家戦略を発表するなど、宇宙天気に対する対処計画を本格的に準備しようとする動きがある。

以上を踏まえ、宇宙天気予報に関して分野横断的な検討会を開催することにより、国家としての観測・分析能力や対処の在り方等を検討し、報告書を取りまとめる。

2. 名称 本検討会は、「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」と称する。

3. スケジュール 令和 4 年 1 月中に第 1 回を開催し、同年 6 月頃まで開催する予定

4. 検討事項

- ① NICT 等における観測・分析・予測・警報の強化の在り方
- ② 社会インフラに対する影響と対処の在り方
- ③ 上記を踏まえた政策的な対応の在り方
- ④ その他

5. 構成及び運営

- ① 本検討会の構成員は、別紙のとおりとする。

- ② 本検討会には、座長を置く。座長は、本検討会を招集し、運営する。
- ③ 座長は、必要があると認めるときは、座長代理を指名することができる。座長代理は、座長を補佐し、座長不在のときは、座長に代わって本検討会を招集し、運営する。
- ④ 座長は、必要に応じて、必要と認める者を本検討会の構成員又はオブザーバとして追加することができる。
- ⑤ 座長は、必要に応じて、構成員以外の関係者の出席を求め、その意見を聴くことができる。
- ⑥ その他、本検討会の運営に必要な事項は、座長が定めるところによる。

6. 議事・資料等の扱い

- ① 本検討会は、原則として公開する。ただし、座長が必要と認める場合については、非公開とする。
- ② 本検討会で使用した資料及び議事要旨は、原則として、総務省のウェブサイトに掲載し、公開する。ただし、公開することにより、当事者もしくは第三者の利益を害する恐れがある場合又は座長が必要と認める場合については、非公開とする。

7. その他

本検討会の庶務は、総務省国際戦略局宇宙通信政策課が行う。

「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」構成員名簿

(敬称略、五十音順)

座長代理	石井 守	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波伝搬研究センター長
	岩本 貴司	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 メカトロニクス技術部 移動体・宇宙システムグループ 主席研究員
	鶴川 康夫 (～2022 年 3 月)	東京海上日動火災保険株式会社 航空保険部エアライン宇宙保険室 課長
	佐上 雄祐 (2022 年 4 月～)	東京海上日動火災保険株式会社 航空宇宙・旅行産業部 エアライン 宇宙保険室 課長
	江口 洋	全日本空輸株式会社 オペレーションサポートセンターF0 推進部 F0 基準 チーム アシスタントマネージャ
	海老原 祐輔	京都大学 生存圏研究所 准教授
	上泉 義朗 (2022 年 1 月～)	一般社団法人スペースウェザー協会 (星槎グループ内) 運営委員
	木本 雄吾	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 研究開発部門第一研究ユニット 研究領域主幹、ISO/TC20/SC14 国際標準検討委員会環境分科会 主査
座長	草野 完也	名古屋大学 宇宙地球環境研究所 所長
	久保 勇樹	国立研究開発法人情報通信研究機構 宇宙天気予報グループリーダー
	小泉 勉	宇宙技術開発株式会社 第一事業部宇宙システム技術部利用情報システム グループ マネージャー
	五家 建夫	一般社団法人日本航空宇宙工業会 SC14 国際標準化検討委員会 委員/ SC14 国際標準検討委員会環境分科会 副主査 宇宙天気ユーザー協議会 会長
	國母 隆一	株式会社アクセルスペース エンジニアリング本部 衛星サービス自動化 グループ長
	児玉 浩明	三菱重工業株式会社 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部 技術部 電子装備設計課 主席技師
	込山 立人	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門宇宙飛行士運 用技術ユニット宇宙飛行士健康管理グループ グループ長
	斉田 季実治	一般社団法人 ABLab 宇宙天気プロジェクトマネージャ 宇宙天気ユーザー協議会 アウトリーチ分科会長
	齋藤 享	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所 上席研究員 宇宙天気ユーザー協議会 航空分科会長
	平 和昌	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所長
	千喜良 英則	東京電力パワーグリッド株式会社 系統運用部系統運用技術グループ マネージャー
	津川 卓也	国立研究開発法人情報通信研究機構 宇宙環境研究室長
	豊田 和弘	九州工業大学 大学院工学研究院 教授

内藤 淳二	定期航空協会 事務局 部長
長妻 努	国立研究開発法人情報通信研究機構 宇宙環境研究室研究マネージャ
苦瓜 智成	損害保険ジャパン株式会社 航空宇宙保険部業務課 リーダー
(～2022 年 3 月)	
黒沼 直樹	損害保険ジャパン株式会社 航空宇宙保険部業務課 課長代理
(2022 年 4 月～)	
廣江 信雄	日本電気株式会社 電波・誘導事業部衛星航法システム室 室長
本間 史也	日本航空株式会社 オペレーション本部オペレーション安全品質推進部 アシスタントマネージャー
正木 勝也	三井住友海上火災保険株式会社 海上航空保険部航空宇宙保険チーム 主任
松田 涼太	三菱電機株式会社 鎌倉製作所 担当
宮田 東	スカパーJSAT 株式会社 衛星運用部 衛星・通信技術担当主幹
宮村 俊輔	送配電網協議会 電力技術部 副部長
村瀬 瞳	株式会社ウェザーニューズ 航空気象チーム 課長
安井 元昭	国立研究開発法人情報通信研究機構 執行役 宇宙天気ユーザー協議会 衛星分科会長
山上 敬祥	伊藤忠商事株式会社 航空宇宙部航空宇宙第二課 プロジェクトマネージャー
脇村 明宏	株式会社 IHI エアロスペース 宇宙開発利用技術部
(～2022 年 4 月)	宇宙利用システムグループ 主幹
佐々木 純	株式会社 IHI エアロスペース 宇宙開発利用技術部
(2022 年 5 月～)	宇宙利用システムグループ グループ長

オブザーバー

内閣官房 国家安全保障局
 内閣官房副長官補（事態対処・危機管理担当）付
 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局
 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局 準天頂衛星システム戦略室
 文部科学省 研究開発局 宇宙開発利用課
 経済産業省 製造産業局 航空機武器宇宙産業課 宇宙産業室
 経済産業省 商務情報政策局 産業保安グループ 電力安全課
 国土交通省 航空局 総務課
 国土交通省 航空局 交通管制部 交通管制企画課
 国土交通省 気象庁 総務部 企画課
 国土交通省 気象庁 情報基盤部 気象衛星課
 防衛省 防衛政策局 戦略企画課 宇宙海洋政策室
 防衛省 航空幕僚監部 防衛部 事業計画二課 宇宙領域班

○ 「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」開催経過

	開催日時	議 事
第 1 回	令和 4 年 1 月 12 日 16:00-18:00	(1) 開催要綱案の確認等 (2) 宇宙天気予報を巡る動向 ・ 事務局からの説明 ・ 国立研究開発法人情報通信研究機構からの説明 (3) 検討課題と開催日程等について (4) 意見交換 (5) その他
第 2 回	令和 4 年 1 月 26 日 16:00-18:00	(1) 前回の議事要旨について (2) 宇宙天気現象がもたらすハザードとリスク等の関係について（事務局） (3) 国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）からの説明 ・ 宇宙天気予報研究の取組 ・ 定常業務の取組 (4) 意見交換 (5) その他
第 3 回	令和 4 年 2 月 4 日 10:00-12:00	(1) 前回の議事要旨について (2) 新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」（PSTEP）の概要報告（石井座長代理） (3) 電力分野における影響について ・ 日本の送電網に影響を与えるメカニズム（海老原構成員） ・ 我が国における取り組み（海老原構成員） ・ 太陽フレアが電力系統に及ぼす影響について（千喜良構成員） (4) 意見交換 (5) その他
第 4 回	令和 4 年 2 月 18 日 10:00-12:00	(1) 前回議事要旨について (2) 衛星打上時の地磁気の影響について ・ 最近の出来事について（地磁気嵐により Starlink が 40 機を喪失）（事務局） ・ 2022 年 2 月 3-4 日の宇宙天気の状態（石井座長代理） (3) 衛星運用分野における影響 ・ 宇宙機の帯電放電：影響と対策（豊田構成員） ・ 宇宙環境計測装置の研究技術開発（長妻構成員） ・ 衛星設計における取り組み（松田構成員） ・ NEC における宇宙天気関連の取り組み（NEC 宇宙システム事業部大島プロジェクトディレクター） ・ JAXA における研究活動と対策（木本構成員） ・ 衛星運用者における取組（小泉構成員） (4) 宇宙天気ユーザー協議会衛星分科会の取組（安井構成員） (5) 意見交換 (6) その他
第 5 回	令和 4 年 3 月 18 日 10:00-12:00	(1) 前回の議事要旨について (2) ロシア上空回避ルートにおける宇宙天気の影響（石井座長代理） (3) 通信・放送分野における影響 ・ 通信・放送分野における宇宙天気の影響（津川構成員） (4) 測位分野における影響 ・ 影響を与えるメカニズムと障害内容（斎藤構成員）

		・測位精度劣化がもたらす社会影響について（MELCO 岩本様） ・準天頂衛星システムの概要（内閣府 前田様） (5) NICTにおける観測網の現状と課題（久保構成員） (6) 意見交換 (7) その他
第6回	令和4年3月25日 10:00-12:00	(1) 航空機運用における影響 ・影響を与えるメカニズムと障害内容（斎藤構成員） ・ICAO グローバル宇宙天気センターの取組（石井座長代理） ・航空機の運航と宇宙天気（本間構成員） (2) 宇宙飛行士等の被ばくの影響 ・宇宙飛行士放射線被ばく管理運用における太陽-地球圏宇宙環境情報の利用（込山構成員） ・地上生活における被ばくの影響（久保構成員） (3) 「宇宙天気の警報基準に関するWG」の中間報告（津川構成員） (4) 「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会報告書」目次構成案について（事務局） (5) 意見交換 (6) その他
第7回	令和4年4月12日 10:00-12:00	(1) 第5回及び第6回検討会議事要旨について（事務局） (2) 放射線試験環境整備に向けた取組（経済産業省伊奈室長補佐） (3) 損害保険分野における影響（正木構成員） (4) 宇宙天気の警報基準に関するWGからの報告（津川構成員） (5) 宇宙天気予報の高度化に向けた人材のあり方について（草野座長） (6) NICTにおける国際協力の状況と展望（石井座長代理） (7) 宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会報告書（骨子案）について（事務局） (8) 意見交換 (9) その他
第8回	令和4年4月26日 13:00-15:00	(1) 前回検討会議事要旨について（事務局） (2) 宇宙天気予報の今後のアウトリーチ方策について（ABLab 齊田構成員） (3) 宇宙天気の警報基準に関するWGからの報告（最悪シナリオ関係）（NICT 津川構成員） (4) 検討会報告書（案）について（事務局） (5) 意見交換 (6) その他
第9回	令和4年5月10日 10:00-12:00	(1) 検討会報告書（案）について（事務局） (2) その他
パブリックコメント（令和4年5月13日～同年6月13日）		
第10回	令和4年6月21日 10:00-11:00	(1) 第8回及び第9回検討会議事要旨について（事務局） (2) 検討会報告書（最終案）について（事務局） (3) その他

※全て Web 会議方式で開催した。

「宇宙天気警報基準に関するWG」の設置理由と検討課題等

■設置の背景・理由（本検討会第1回資料より）

社会インフラの安定運用のため宇宙天気予報の重要性が高まり、米国等国外では、社会的影響の評価や国家戦略の発表等、宇宙天気の社会的リスクに備える動きが活発化。

我が国では、科学研究費補助金・新学術領域研究「PSTEP」（2015-2019）の活動の一つとして、宇宙天気現象の規模と我が国への社会的影響について検討・とりまとめ。

現在の予警報は現象の規模に着目した基準としているが、宇宙天気予報の利用者が具体的な対応を判断するためには社会的影響を基準とする予警報が必要である。

このため、本WGでは、宇宙天気をもたらす社会的影響の大きさも考慮した新たな警報の種類・閾値について検討する。

■検討事項

以下の分野における警報の種類と閾値

「通信・放送」「測位」「衛星運用」「電力」「航空機人体被ばく」

■会合日（2022年）

全体会合：第1回 1/24、第2回 3/17、第3回 4/6 ※メール審議を併用した。

通信・放送分野：第1回 1/31、第2回 3/4

測位分野：第1回 2/7、第2回 2/10、第3回 2/17、第4回 2/24、第5回 3/17、
第6回 3/23

衛星運用分野：第1回 2/7、第2回 3/7、第3回 3/14、第4回 4/1、第5回 4/5

電力分野：第1回 2/4、第2回 2/16

航空機人体被ばく分野：第1回 2/4、第2回 2/21

■新たな警報基準検討の基本方針

PSTEPで取りまとめられた報告書「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」では、ユーザーヒヤリングが広く実施され、宇宙天気現象の規模・頻度と各分野における社会的影響の大きさの紐づけ（宇宙天気の影響マトリクスの作成）がされた。

本報告書を踏まえ、社会的影響の大きさも基準とした予報・警報の種類・閾値の作成について、「通信・放送」「測位」「衛星運用」「電力」「航空機人体被ばく」の分野毎に会合を実施し、以下の手順で検討を進めた。

- PSTEP 報告書をベースとして、マトリクスの閾値を頻度から物理量に直して社会的影響の可能性を検討し、運用として予報・警報を発令する意味があるもの、技術的に発令が可能なものを取捨選択する。新たな閾値が必要であれば再設定する。
- ICAO 宇宙天気スケールや、米国・英国等の戦略文書等も参考に、国外との整合性も考慮する。
- 検討したスケールについて、WG・検討会・宇宙天気ユーザー協議会のメンバー等、各分野のユーザーヒヤリングを行い、その有効性や予警報の粒度・段階について検証する。予警報のタイミング等についても検討する。
- 想定される最悪シナリオについて検討する。

「宇宙天気警報基準に関するWG」メンバー名簿

氏 名	所 属	担 当
津川 卓也	情報通信研究機構電磁波研究所	リーダー
久保 勇樹	情報通信研究機構電磁波研究所	サブリーダー
石井 守	情報通信研究機構電磁波研究所	サブリーダー
陣 英克	情報通信研究機構電磁波研究所	通信・放送
齋藤 享	電子航法研究所	通信・放送／測位
前田 隼	北海道大学附属図書館	通信・放送
西岡 未知	情報通信研究機構電磁波研究所	測位
岩本 貴司	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所	測位
金田 知剛	日本電気株式会社	測位
佐藤 一敏	三菱電機株式会社	測位
前田 剛	内閣府準天頂衛星システム戦略室	測位
岸本 統久	内閣府準天頂衛星システム戦略室	測位
今給黎 哲郎	内閣府準天頂衛星システム戦略室	測位
長妻 努	情報通信研究機構電磁波研究所	衛星運用
坂口 歌織	情報通信研究機構電磁波研究所	衛星運用
木本 雄吾	宇宙航空研究開発機構	衛星運用
國母 隆一	株式会社アクセルスペース	衛星運用
玉置 晋	宇宙技術開発株式会社	衛星運用
中溝 葵	情報通信研究機構電磁波研究所	電力
海老原 祐輔	京都大学 生存圏研究所	電力
塩田 大幸	情報通信研究機構電磁波研究所	航空機人体被ばく
佐藤 達彦	日本原子力研究開発機構	航空機人体被ばく
西塚 直人	情報通信研究機構電磁波研究所	
齊田 季実治	一般社団法人 ABLab	
山口 真吾	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	
小林 伸司	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	
菅野 剛	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	

※各分野会合は分野外のメンバーの参加や、必要に応じて外部の有識者の参加も可能とした。

○ 事務局メンバー（総務省国際戦略局宇宙通信政策課）

山口 真吾	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	課長
小林 伸司	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	衛星開発推進官
菅野 剛	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	専門職
佐藤 礼奈	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	係長（～令和４年３月３１日）
夏越 隆就	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	係長
小泉 美乃里	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	係員
杉本 有加	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	非常勤職員

【本報告書に関する連絡先】

総務省国際戦略局宇宙通信政策課