

2022年4月26日

宇宙天気予報の高度化の在り方
に関する検討会（第8回）

宇宙天気の警報基準に関するWG 報告：最悪シナリオ

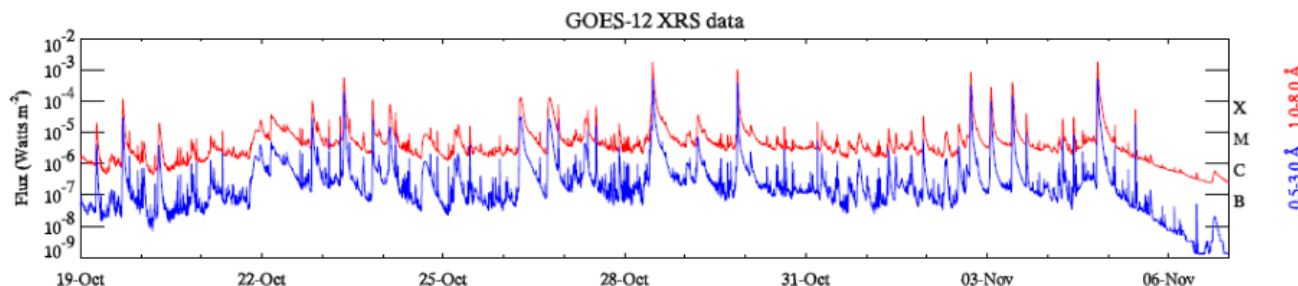
宇宙天気の警報基準に関するWG
津川 卓也（NICT）、WGメンバー

最悪シナリオの想定手法

- 100年に1回程度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。
- 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。
- 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以下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。
 - 通信・放送・レーダー
 - 衛星測位
 - 衛星運用
 - 航空運用
 - 電力分野
- 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。

想定に用いた前提条件

- ① 100年に1回程度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クラスの太陽フレアが連続して発生し、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領域の擾乱が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遅延するものとした。
- ④ 10MeV以上の高エネルギー粒子のフラックスが10,000PFU以上に達する期間が数日間継続し、これが2週間のうちに複数回発生するものとした。
- ⑤ 大規模な地磁気嵐（Kp=9相当）が2週間にわたり断続的に発生するケースを想定した。
- ⑥ キャリントン・イベントを超える現象が発生した場合を想定し、最大570A程度の自然電流が2週間にわたり断続的に電力網等に流れるものとした。



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>]

最悪シナリオ: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、**2週間にわたり全国的に断続的に使用不可**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）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公衆網のネット接続も困難になる。

最悪シナリオ:通信・放送・レーダーへの被害がもたらすもの(続き)

- UHF帯の周波数を使用する地上デジタルテレビ放送では、発生直後から、**昼間の時間帯に最大で数時間程度の受信障害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。これにより、報道番組や地方公共団体のメッセージ等を視聴することが困難になる。
- 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、洋上での孤立が発生し、**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。

最悪シナリオ: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**。

最悪シナリオ: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、他の衛星やデブリ等と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。

最悪シナリオ: 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。
- 高緯度領域での飛行に伴う乗務員等の人体被ばくを避けるため、迂回航路を選択することに伴い飛行時間が長くなり消費燃料も増加する。
- 航空管制レーダーが太陽電波バーストの影響を受けて使用困難となり、観測能力の低下が各地域で2週間にわたり断続的に発生する。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、航空機の運休や空港閉鎖が2週間にわたり発生する。

最悪シナリオ: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、広域停電が各地で発生する。
- 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各地で発生し、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性が生じた場合、多くのコストや作業日数を要する工事が必要となる。

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。

参考資料

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

通信・放送分野

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な被害を発生させた。しかし、Xクラスの太陽フレアも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>

参考資料(続き)

通信・放送分野、衛星測位分野

プラズマ・バブルは、その内部や周辺で電子密度の空間的な変化が大きく、HF～UHF帯、L帯の電波伝搬に影響がある。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

衛星運用分野

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して推定されている。

<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>

参考資料(続き)

衛星運用分野 (続き)

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60km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。

航空運用分野

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>

参考資料(続き)

電力分野

電力分野への影響について、想定される最大の地磁気嵐（地磁気変動指数 Dstの最小値が -2500 nT） [1] を想定、柿岡の地磁気変動はDstと同じと仮定し、柿岡の地磁気水平成分の変動分と柿岡の地電場の関係式[2]、柿岡の地電場と新筑波変電所のGICの関係式 [3]、新筑波変電所を流れるGICと「発電所A」を流れるGICの関係式 [4]を用いて、「発電所A」を流れるGICの最大値を見積った。「発電所A」を流れるGICの最大値は573 Aとなり、NERCの熱設計基準の225 Aを大きく上回る。なお、「発電所A」よりGICが流れやすい発電所や変電所が存在する可能性もあるため、573 Aというのは、現状推定できる設備におけるGICの最大値である。

[1] Vasylunas, V., The largest imaginable magnetic storm, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73, 1444–1446 (2011). [10.1016/j.jastp.2010.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.05.012)

[2] 磁気嵐主相における柿岡の地磁気水平成分の変動分 ΔH と柿岡の地電場 E_x , E_y には、次の関係がある。
 E_x (mV/km) = $-0.11 \times \Delta H$ (nT), E_y (mV/km) = $-0.85 \times \Delta H$ (nT)

Zhang and Ebihara (Space Weather, in press, doi: [10.1029/2021SW002893](https://doi.org/10.1029/2021SW002893)) 経済産業省委託調査報告書 (2015, <https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11280903>)

[3] 柿岡の地電場 E_x , E_y と新筑波変電所のGICには、次の関係がある。

GIC (新筑波) = $0.02 + 0.0195 \times E_x$ (mV/km) - $0.0133 \times E_y$ (mV/km) A

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). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01493-2>

[4] 新筑波変電所を流れるGICと「発電所A」を流れるGICには、次の関係がある。

GIC (発電所A) = $25 \times GIC$ (新筑波)

(経済産業省委託調査報告書 (2015, <https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11280903>) の図2.4.1と Ebihara et al. (2021, [10.1186/s40623-021-01493-2](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01493-2)) の Fig. 6eを対比)