



大規模宇宙天気現象の社会影響と各国の取り組み

国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター

いしい まもる
石井 守



1. 宇宙天気の社会基盤への影響

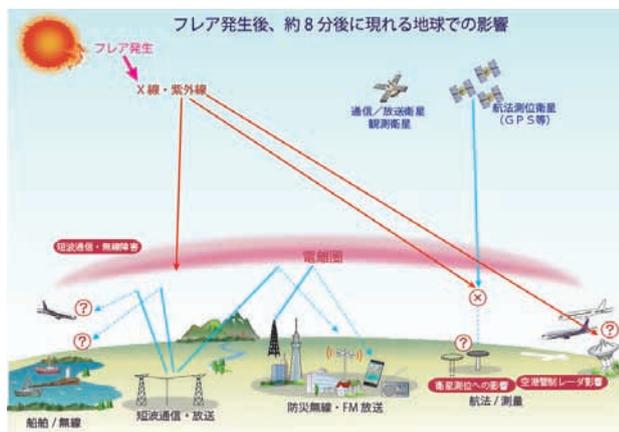
1.1 宇宙天気の概要

宇宙天気とは、主に太陽の活動を源とする地球近傍宇宙及び大気への影響を指し、特に我々の生活に影響を与える諸現象を指すことが多い。太陽は生命の活動・維持に必要な熱や光を供給する一方、生命にとって危険なX線・紫外線などの電磁波、高エネルギー粒子、あるいは太陽風と呼ばれる高速のプラズマ流を噴出する。

電磁波は地球の大気と光化学反応を起こし、大気上部が電離し電離圏を形成する。これにより、波長が短く生命に悪影響を及ぼす電磁波のほとんどは地上までは届かない。また、太陽風は地球磁場及び電離圏と相互作用することで複雑な様相を示す。太陽風中の太陽由来の磁場が北向きの時には、地球磁場は防護壁として働き、地球近傍への影響は限定的である。一方、南向きの時には太陽由来の磁場と地球磁気圏の間で磁気再結合が生じて太陽風のエネルギーが地球近傍まで到達する。特に、太陽フレア及びそれに伴う高エネルギー粒子やコロナ質量放出 (Coronal Mass Election: CME)、コロナホールから放出される高速の太陽風及びフィラメント放出に伴う太陽風などによる地球及び生活に与える影響が大きいことが知られている。

太陽フレアに伴う電磁波、高エネルギー粒子及びCMEの伝搬速度はそれぞれ異なることから、地球及び社会への影響は時間差をもって現れる。

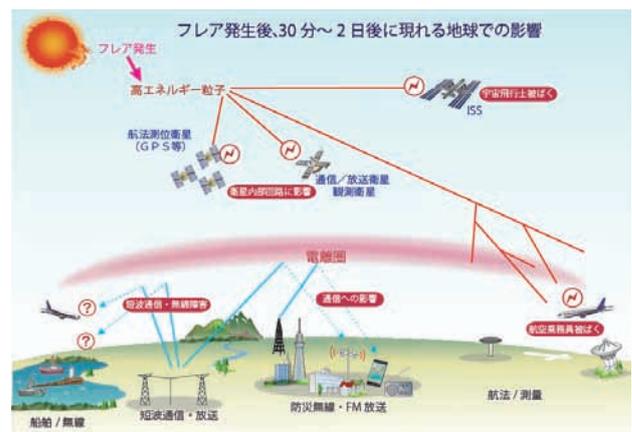
太陽フレアの影響の第一波はフレア発生約8分後に、光速



■図1. 太陽フレア発生後8分後に発生する影響

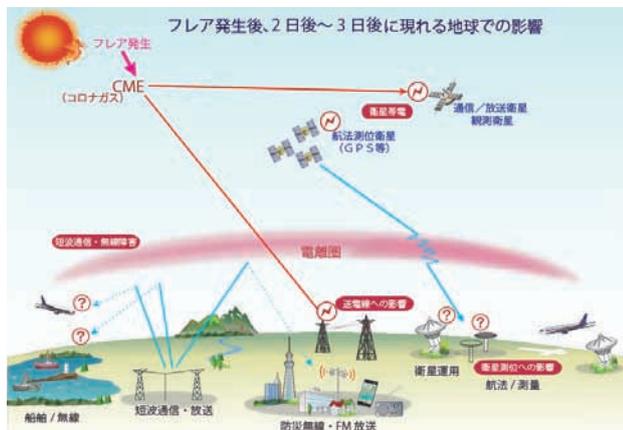
で地球に到達する電磁波によりもたらされる。電磁波による影響を図1に示す。X線や紫外線は電離圏の比較的低高度にあるD領域の電子密度を増加させる。この領域は中性大気密度が高いため、中波・短波等を吸収し伝搬を妨げる。これにより、これらの周波数を使った通信・放送の利用を著しく妨げる (Dellinger現象、あるいはRadio Black out)。また、太陽からの電磁波は非常に広帯域に及ぶため、衛星測位信号及び航空管制レーダの使用が困難になる事例も報告されている。これらの現象は、太陽が見えている範囲、つまり昼側で発生することが特徴である。

続いて、高エネルギー粒子による影響が、フレア発生30分から2日後にかけて発生する (図2)。高エネルギー粒子は宇宙空間での有人活動時には人体被ばくを引き起こす可能性があり、また、人工衛星等飛翔体の電子回路上の信号エラーを起こすことで誤作動の原因になると考えられている。大気圏内でも、国際線の航空機高度では地上に比べて被ばくの危険性が高まることが知られている。また、極域を中心に電離圏D領域の電子密度増加を引き起こし、短波帯を中心に通信・放送の利用が制限される (極冠域吸収 Polar Cap Absorption: PCA)。

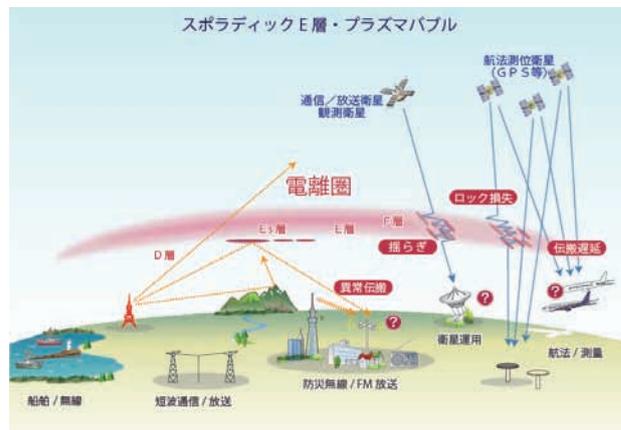


■図2. 太陽フレア発生後30分～2日後に発生する影響

その後、第三波としてCMEの影響が2～3日後に発生する (図3)。CMEの影響により人工衛星に帯電現象が発生し、衛星の機能低下あるいは運用の停止が発生する可能性がある。また、極域の磁力線に沿って磁気圏・電離圏間に電



■図3. 太陽フレア発生後2~3日後に発生する影響



■図4. 太陽フレアに関係しない宇宙天気現象による影響

流が生じ大規模なオーロラが発生するとともに、地磁気誘導電流 (Geomagnetically Induced Current:GIC) が発生、送電網及び給電システムに影響を与える。オーロラは中性大気を加熱・膨張させ低高度衛星の軌道に影響を与えるほか、電離圏嵐を発生させることがある。電離圏嵐は、主に磁気嵐が原因で、電離圏の厚さなどが通常に比べて大きく増減する現象であり、増加する現象を正相嵐、減少する現象を負相嵐と呼ぶ。電離圏の乱れによる衛星・地上間あるいは電離圏を利用した通信・放送の利用低下などが発生する。特に電離圏遅延の変化による衛星測位精度の劣化や、シンチレーションによるロック損失発生での利用制限等も発生する可能性がある。

電離圏は地表に近いことから、太陽活動等の影響のほか、台風や前線等の気象や地震等の影響を受けて変動している。これら気象現象が原因となる電離圏擾乱は、太陽フレアの発生には関連せず発生する。代表例としては、プラズマバブルとスプラディックE層 (Es層) が挙げられる。これらの例を図4に示す。

プラズマバブルは、磁気赤道を中心に日の入り後に南北に対称に発生する電子密度の低い領域である。プラズマバブル内を通過する衛星測位信号は、想定される電子密度モデルとの差が大きくなり測位精度の劣化を引き起こす。また、プラズマバブルの境界付近では、電子密度の空間変化が非常に大きいため電波のシンチレーションが発生し、地上において安定した受信ができないために衛星測位の利用が制限されることがある。

Es層は、高度100km付近の電離圏電子密度が局地的に増加する現象を指す。Es層はD領域とは反対に短波及び超短波の反射を高め、想定以上に伝搬距離を延ばすことが知られている。このために、遠隔地で同じ周波数帯を用いているシステムに干渉し、利用の不具合を発生させることが知られている。

1.2 無線通信・放送・衛星測位への影響

無線通信・放送に対する宇宙天気の影響は、主に前節で述べた電離圏の乱れが要因となる。表に、電離圏の主な乱

■表. 電離圏の主な乱れの種類と影響を受ける電波の周波数帯

	HF	VHF	UHF (<L帯)
Dellinger現象 (Radio Black out)	昼間側電離圏での吸収を強く受ける	伝搬の過程である程度の影響を受けることがある	
極冠域吸収 (Polar Cap Absorption : PCA)	極域電離圏での吸収を強く受ける	伝搬の過程である程度の影響を受けることがある	
電離圏正相嵐	シンチレーションの影響を受け通信が不安定になる		伝搬遅延による測位誤差が増大する
電離圏負相嵐	伝搬可能周波数が小さくなる		
プラズマバブル	伝搬経路が変化する		シンチレーションによるロック損失が発生する
スプラディックE層		異常伝搬による干渉が発生する	



れの種類と影響を受ける周波数帯をまとめる。

1.3 衛星運用への影響

宇宙天気の影響は以下のように分類できる。

- a) プラズマの帯放電による衛星本体及び機器の異常
- b) シングルイベント効果によるデータのビット反転が発生し異常動作を引き起こす
- c) 放射線による材料の劣化・部品の損傷
- d) 大気膨張による衛星軌道の変化

これらのほかに、前節で紹介した通信・放送の不具合が電離圏の乱れによって衛星・地上間で生じる可能性がある。

1.4 電力網への影響

宇宙天気による電力網への影響は、CMEによる磁気嵐が地球の表面及び地下に電場を形成し、その電場と平行に位置する送電網に電流が流れ込むことによって変圧器の損傷、無効電力の増加及び保護リレーの不要動作を引き起こすことで生じる。特に高緯度地方でその影響が顕著であり、米国・カナダ・北欧・南アフリカ及びニュージーランド等でGICによる電力インフラへの影響が報告されている。

2. 「宇宙天気災害」に対する国内外の備え

歴史上記録が残っている中で最も大きな規模を引き起こした現象は、キャリントンイベントである。キャリントンイベントでは、太陽フレア発生から17時間後にオーロラの観測が記録されているため、高速で大規模なCMEが17時間で地球に到達し、猛烈な磁気嵐を発生させたと考えられている。一般的に磁気嵐の規模は、磁気嵐発生時に生成されるリングカレントの強度を表す指数（Dst指数）で表されるが、キャリントンイベント発生時のDst指数は、ピーク値が -1760nT もしくは -850nT と推定されている。

観測が充実された1957～1958年の国際地球観測年（IGY）以降で最も規模が大きかった現象は、1989年3月のX4クラスの太陽フレアに端を発したCMEによるものであり、ケベックストームと呼ばれる深刻な磁気嵐（Dst指数 $=-589\text{nT}$ ）が発生した。地磁気誘導電流により、カナダではハイドロ・ケベック電力公社の電力網が影響を受け、約10時間の停電が発生したほか、衛星障害事例が多数確認されている。

一方で地球への影響はなかったものの、2012年7月23日には、キャリントンイベント級のCMEが太陽の地球から見て反対側で発生した。もしこの発生日時が1週間ずれてい

た場合は地球に直撃していた可能性があり、その場合の磁気嵐のDst指数は -1182nT 程度だったと見積もられている。

このように、電力網や衛星など、社会インフラに影響を及ぼす（及ぼしうる）規模の宇宙天気現象は、10年ないし100年に1度の発生確率であると言える。宇宙天気現象が、どれほどの社会影響をどれほどの頻度で与えるかを検討するためには、発生し得る擾乱規模の想定が必要である。しかし、太陽フレア、高エネルギー粒子、CME、磁気嵐等の現象の規模と発生頻度の関係は、それぞれの現象ごとに異なる。さらに、2012年の事例からも分かるように、それぞれの現象が大きくても社会影響が小さい場合、また逆に小さなイベントが大きな規模の影響を与えることもあり、予報を困難にしている。

現在の情報化社会においてキャリントン級のイベントが発生した場合の経済損失について、スイスの保険会社SWISS-REが試算している。その結果によると、欧米など高緯度地域を中心に、3000億ドルほどの被害が想定され、東日本大震災の経済損失（1000～2500億ドル）を上回る。これらの状況より、米国は宇宙天気を地震や津波などの災害と並べ、米国戦略的国家危機評価（US Strategic National Risk Assessment）の一つとして位置付けている。2015年には、米国内の20を超える機関、50人を超える専門家によって作成されたNational Space Weather Strategy及びSpace Weather Action Planが発表された。2016年以降、このAction Planを受けて米国国務省が極端現象に関する国際協力の枠組みの構築のための研究会を他国と連携して行うなど、活発な活動が展開されている。2018年には、Space Weather Phase 1 Benchmarksが刊行され、誘導地電流、電磁放射、電離圏擾乱、太陽電波バースト、大気膨張についてのベンチマークテストを示している。

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

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

国際機関としては、1962年より国際宇宙環境サービス（International Space Environment Service : ISES）が活動している。これは定期的に宇宙天気情報を発信している



機関の連合体であり、2020年1月現在、20か国及びESAが加盟している。

近年、世界気象機関（World Meteorology Organization: WMO）が宇宙天気を気象の一環として取り扱うことに意欲を見せている。2010年には、暫定的な組織としてICTSW（Interprogramme Coordination Team on Space Weather）を立ち上げ、WMO情報システム（WMO Information System: WIS）での宇宙天気情報の流通等を中心に検討を進めてきた。2015年には定常組織としてIPT-SW eISS（Inter-Programme Team on Space Weather Information, Systems and Services）が設立された。その後、WMO内の改組に伴いしばらく活動を停止していたが、2022年よりET-SWX（Expert team on Space Weather）として活動を開始する見込みである。

また、国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization: ICAO）は、航空運用に用いられる気象情報として宇宙天気情報を取り入れることを検討してきた。

これは主に、宇宙天気現象による短波通信、衛星測位及び被ばくのリスクを回避することを目的としている。2011年11月に、航空機運航に必要とされる宇宙天気情報に関して国際航空運送協会（International Air Transport Association: IATA）からICAOに検討要望の書簡が発出され、議論が開始された。議論の結果、運用コンセプト（Concept of Operation: ConOps）及び航空運用に使用される気象情報を規定している第3付託書（Annex3）が改定された。これと並行して、情報を提供する組織の選定が進められてきた。2017年6月に、ICAOから加盟国に対して情報提供についての関心の有無を問うステートレターが発信され、22か国がこれに関心を表明した。書面審査、対面審査を経て、2018年11月に、3つの組織がICAO Space Weather Global Centerとして承認を受けた（米国、PECASUS（フィンランド、オーストリア、ベルギー、キプロス、ドイツ、イタリア、オランダ、ポーランド、英国）、ACFJ（オーストラリア、カナダ、フランス、日本））。その後、調整会議を1年間重ね、2019年11月7日にサービスが開始された。2022年1月

からはCRC（中国、ロシア）が追加され、現在4センターが2週間交代でその業務を遂行している。

またITUにおいては、ITU-R WRC-19において、「現状の無線通信業務に追加の制約を設けることなく、無線規制における適切な認識と保護を設けることを視野に入れ、宇宙天気センサの技術的及び運用上の特性、周波数要件及び適切な無線業務の指定に関する研究結果を検討する」との決議がなされた（決議657（WRC19改））。これを受けて、宇宙天気センサに関するWRC-23議題9.1aが設定され、同WRCに向けての検討が行われている。

宇宙天気観測に用いられるセンサのうち受動観測を行うものは、その対象が太陽電波や銀河電波など微弱なものが多く、周辺の人工雑音等に大きく影響を受ける。このため、受動観測装置については特段の注意を払う必要がある。国連本体においては、宇宙空間平和利用委員会（Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: COPUOS）において、宇宙天気についての議論が進められている。特に2018年には、COPUOSの前身であるUNISPACE設立50周年の節目に宇宙天気が重点領域の一つとして選ばれ、その具体的な内容について現在検討が進められている。

3. おわりに

宇宙天気災害の発生は極めて稀であるが、ひとたび発生した場合は社会活動に重大な影響を及ぼす可能性がある。宇宙天気による社会的な影響については、国内及び国際的な組織で議論されており、いくつかの国で報告書が作成されている。我が国においても、2022年1月より総務省主催で「宇宙天気予報の高度化に関する検討会」が開催され、6月に報告書が発表された。この議論においては、これまで行われてきた現象を中心とした予警報に加えて、社会影響を踏まえた情報発信を行うことが提言されている。今後、情報通信研究機構ではこの報告書に示された提案を基に、より使いやすい宇宙天気情報の発信を行うことで、将来の高度ICT社会を支えていく基盤としたい。

（2022年4月13日 ITU-R研究会より）