

1.3 激甚宇宙天気災害

石井 守 (情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研究室)

(2020年3月19日受付、2021年5月31日公開)

本章は、「太陽地球圏環境予測」宇宙天気災害に向けた科学提言のためのハザードマップ」から転載・一部改訂したものである。詳細な議論については[1]を参照されたい。

1.3.1 宇宙天気災害の規模と頻度

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[2]

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[3]。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他、衛星障害事例が多数確認されている。その他、2000年7月のバスター・ユイイベント(X5クラスの太陽フレアに伴いCMEが発生しDst指数 $=-301\text{nT}$)や、2003年10-11月のハロウィーンイベントに続く一連の磁気嵐(10月28日のX17フレアによりDst $=-353\text{nT}$ 。10月29日のX10フレアによりDst $=-383\text{nT}$ 。11月4日X28フレアによる磁気嵐なし。11月18日MクラスフレアによりDst $=-472\text{nT}$)と続く。NASAの調査によるとこの期間全体で科学衛星・宇宙機の約59%が影響を受け、機器の遮断などによる安全策を取ったミッションが約24%に至る[4]など、多数の衛星障害事例が報告されている。

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[5]。

さらに過去にさかのぼって宇宙天気現象を知る手段として、屋久杉の年輪中の炭素同位体 ^{14}C の測定法がある。これは宇宙線により生成された ^{14}C が $^{14}\text{CO}_2$ となり屋久杉に取り込まれたものを測ることで、宇宙線の強度の増大イベントを知ることができる。西暦774年~775年、993年~994年に対応

する屋久杉の年輪では、急激に ^{14}C 濃度が上昇していたことから、これらの年代に宇宙放射線の増加があったと考えられ、太陽光エネルギー粒子 SEP の増加を引き起こすような大規模な太陽嵐が発生したと考えられている。その太陽嵐の規模はキャリントンイベントの 10 倍から数 10 倍規模と推定されている [6]。

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、発生しう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、2003 年の事例からもわかるようにそれぞれの最大規模のイベントが 1 対 1 対応するわけではなく、その因果関係は自明ではない。

発生頻度と現象規模の定義を現象毎に表 1～表 3 に示す。

サブストームについては、西向きに流れるオーロラジェット電流の大きさを評価する。

オーロラ帯の直下に位置するいくつかの地点で観測した地磁気水平成分の変動を重ね合わせ、上側の包絡線を AU 指数、下側の包絡線を AL 指数と呼ぶ。AL 指数は西向きに流れるオーロラジェット電流の大きさを表す。地磁気活動度が高まるとオーロラ帯は低緯度に移動するため、ある特定の磁気緯度で観測した地磁気データを用いると AL 指数は見かけ上低く見積もられる。この問題を克服するため、多数の地点で観測した地磁気水平成分の変動を用いてオーロラジェット電流の大きさを求めたものが SuperMAG Electrojet (SME) 指数である [98]。この指数も、上側の包絡線を SMU 指数、下側の包絡線を SML 指数と呼び、特に SML 指数は AL 指数に代わり広く用いられるようになっていく。ここでは、これまで広く使われてきている AL 指数と、AL 指数に代わり広く用いられるようになっていく SML 指数を、サブストームの現象規模を示す指数とする。

表 1. 宇宙天気現象の発生頻度と現象規模サマリ¹⁾

擾乱現象	規模を示すパラメータ	日常～ 複数回/年	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
太陽フレア	X-ray peak flux (1-8Å)	M1 - X1	X7.6	X12	X44	X101
	エネルギー [erg] ²⁾	2.7×10^{28} - 2.0×10^{30}	1.0×10^{31}	1.0×10^{32}	1.0×10^{33}	1.0×10^{34}
CME	速度 [km/s] ³⁾	250-450	2000	3000	3800-4500	4700-6600
	運動エネルギー [erg] ⁴⁾				4.4×10^{33}	9.8×10^{33}
太陽高エネルギー粒子	流量 [10^{10} p/cm] (>10MeV) ⁵⁾		~0.1 ^{※1)}	~1.0 ^{※1)}	~2.4-5.1	~3.8-14
	流量 (>30MeV) ⁵⁾		~0.02 ^{※1)}	~0.3 ^{※1)}	~0.6-1.6	~1.0-5.1
太陽電波バースト [sfu] ⁶⁾	超短波 (VHF) (30-300MHz)				2.8×10^9	
	極超短波 (UHF) (300-3,000MHz)				1.2×10^7	
	GPS (1,176-1,602MHz)				1.2×10^7	
	F10.7 (4,800MHz)				1.3×10^7	
	マイクロ波 (4,000-20,000MHz)				3.7×10^7	
放射線帯	放射線電子フルエンス [10^{10} cm ⁻² sr ⁻¹]	~0.1	~0.6	~3.0	~10 ⁷⁾	~26 ⁷⁾
磁気嵐	Dst [nT] ⁸⁾		~220 ^{※2)}	~450±30	~650±110	~930 [-320, -1520] ^{※3)}
サブストーム	AL [nT] ⁹⁾		~3700	~4100	~4100	~4200
	SML [nT]	-460	-3000	-4000	-5000	-5900

1) 1回/1000年の数値は Weibull 関数の外挿のため注意を要する。

2) $[1]N[\text{year}^{-1}] = 10^{31} \times E[\text{erg}]^{-1}$ とした。

3) [7]による。表記以上の速度の CME が発生する頻度。

4) [7]による。

5) [7]による。※1は図 1-27 から目視で読み取った値。

6) [8]による。

7) 極値統計解析により推定したものであり、注意を要する。

8) [9]による。

9) [10]による。

表2. 電離圏擾乱規模の発生頻度と現象規模サマリ

規模を示すパラメータ		1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
全電子数 (TEC)	東京[TECU] ¹⁾	≧85 ^{※1}	≧110 ^{※2}	≧170 ^{※2}	
	鹿児島[TECU] ²⁾	≧102	≧132	≧204	
	北海道[TECU] ²⁾	≧68	≧88	≧136	
デリンジャー 現象	吸収量(長距離) [dB] ³⁾	~71	~83	~93	~100
	継続時間 ⁴⁾	0.6-1.3時間	1.2-3.2時間	1.8-6.8時間	2.6-13時間
スプラディック E層	1,000km伝播する周 波数 ⁵⁾	100MHz	110MHz	130MHz以上	
	2,000km伝播する周 波数 ⁵⁾	130MHz	180MHz以上	180MHz以上	
	foEs>13.3MHzでの 継続時間	約3時間	約5時間		
	foEs>18MHzでの継 続時間	約1-2時間	約3時間		
プラズマバブ ル	継続時間	4-5時間	6時間		

1) ※1は22年間のTECデータに基づく。※2は66年間のfoF2データに基づく

2) 鹿児島は東京の1.2倍、北海道は東京の0.8倍で計算

3) 長距離短波回線に基づく(実効太陽天頂角0度6MHzの場合)

4) イオノゾンデ観測に基づく(1-30MHz、'B'およびdfmin≧2.5MHzの場合)

5) 値は上限周波数の下限を示している。

表3. 極冠吸収の発生頻度と現象規模

規模を示すパラメータ	日常～ 複数回/年	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
10 MeV 以上のプロトンフラックス [pfu] ¹⁾	10 ¹⁻²	10 ³	10 ⁴	4x10 ⁵	10 ⁶
Kp 指数 ²⁾	4 (7)	7 (8)	8 (9)	9	9
磁気緯度 (日中) @6MHz 10dB ³⁾	65° (60)	57° (55)	53° (52)	51°	50°
磁気緯度 (夜間) @6MHz 10dB ³⁾	65° (60)	60° (58)	56° (55)	53°	53°
最短継続時間 ⁴⁾	22 時間	46 時間	71 時間	83 時間	89 時間

1) 見積り設定。[11][12]による。1pfu=1/cm²/sec/sr

2) 見積り設定。磁気嵐とは必ずしも一致しない。括弧内の数値は NOAA-Scale を表す。

3) 極冠吸収が広がる緯度。[13][12]による。

4) SEP イベントで、10 MeV 以上の粒子フラックスが>10 pfu となる継続時間。[13]による。

1.3.2 宇宙天気災害に対する各国および国際機関の対応

1.3.2.1 各国の対応

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 [14]。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 [15] および Space Weather Action Plan [16] 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 [17] 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 [18] 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）[19]、Space Weather Preparedness Strategy（2015 年）[20] が相次いで発表された。

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

1.3.2.2 国際機関の動向

国際機関としては、1962 年より国連国際科学会議（International Council of Science Union: ICSU）のもとで国際宇宙環境サービス（International Space Environment Service: ISES）が活動している。これは定常的に宇宙天気情報を発信している機関の連合体であり、2020 年 1 月現在 20 か国および ESA が加盟している [21]。

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 [22]。2015 年には定常組織として IPT-SWeISS（Inter-Programme Team on Space Weather Information, Systems and Services）が設立され現在に至る [23]。

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、衛星測位およ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 Transportation Association: IATA) から ICAO に検討要望の書簡が発出され、議論が開始された。議論の結果、運用コンセプト (Concept of Operation: ConOps) および、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 ICAO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 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日に航空運用のための宇宙天気情報の提供が開始された [24]。

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、各国が宇宙天気監視・予報を行うことを推進する検討が進められている。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、各国の宇宙天気監視・予報に対する取り組みの調査およびその結果をもとにした勧告の作成が進められている。[25]

1.3.3 宇宙天気現象の社会影響

宇宙天気現象は、その規模に応じて様々な社会的影響を与え、時に災害と呼べる被害を起こしうる。宇宙天気現象が与える社会被害の模式図を図1に、比較的影響の大きいインフラ分野を中心に、宇宙天気現象が与える影響と被害、障害を起こし得る宇宙天気現象をまとめたものを表4に示す。

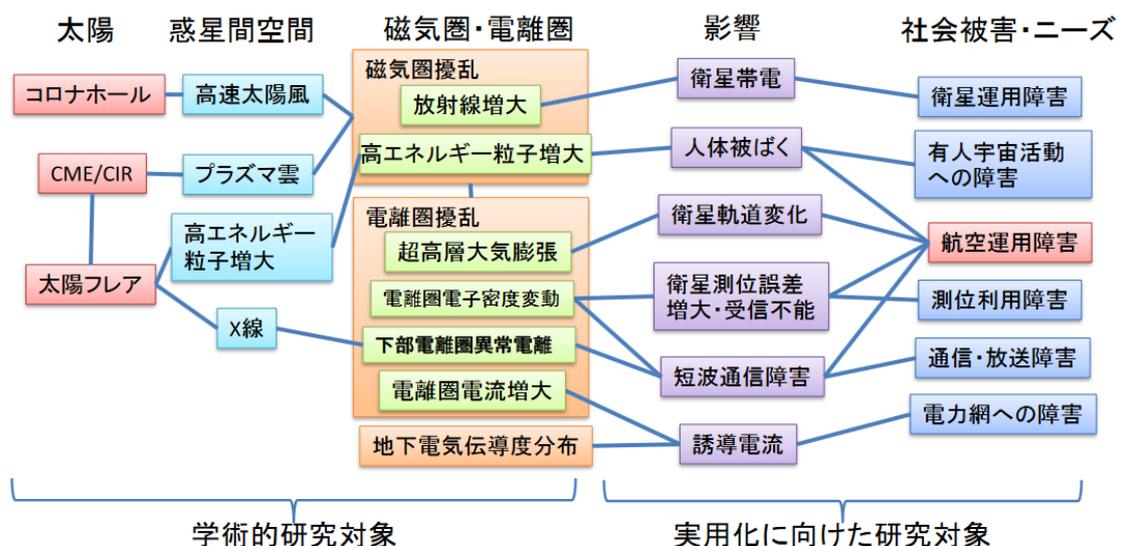


図1. 宇宙天気現象と社会への影響 [26]

ハザードマップ[1]では、巨大宇宙天気現象が発生した際に、どれほどの社会的影響を与えうるか、分野毎に検討を行った。その中で、1.3.1 における発生頻度と現象規模の議論と同様、10 年に 1 回、100 年に 1 回等の宇宙天気現象が起きた際に日本社会のインフラにどれほどの影響があるかを表 5 「宇宙天気の影響マトリクス」としてまとめている。

表 4. 宇宙天気災害により影響を受ける分野とその影響

分野	影響と被害	障害を起し得る宇宙天気現象
電力	停電（送電線への過電流）	地磁気誘導電流（GIC）
衛星運用	衛星帯電（表面帯電、深部帯電）（誤動作等の不具合、最悪の場合衛星損失）	放射線帯電子、サブストーム高温電子
	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	
	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
通信・放送	短波（HF）通信の障害	デリンジャー現象 電離圏負相嵐、極冠吸収（PCA） スポラディック E 層 プラズマバブル
	超短波（VHF）通信の障害	スポラディック E 層
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
	二周波測位（全般）精度の劣化	電離圏シンチレーション
	二周波測位（位相）精度の劣化	中規模伝搬性電離圏擾乱（MSTID）
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 スポラディック E 層
	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
	乗務員の被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	電子機器のソフトエラー	
	レーダ障害	太陽からの強いマイクロ波
有人宇宙活動	宇宙飛行士被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）
地上生活	地上での被ばく	太陽高エネルギー粒子（SEP）
	電子機器のソフトエラー	
	信号機器の誤動作	地磁気誘導電流（GIC）

表 5. 宇宙天気の影響マトリクス全体版

分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象	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
電力	停電（送電線への過電流）	地磁気誘導電流（GIC）	なし	なし	なし	なし	不明
衛星運用	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）	サブストーム高温電子	なし	あり	あり （太陽活動下降期に増加傾向）	未評価	未評価
	人工衛星（深部帯電・放電等）（誤動作等の不具合、最悪の場合衛星損失）	放射線帯電子	（低い）可能性あり	可能性あり	あり	未評価	未評価
通信・放送	短波（HF）通信・放送の障害	電離圏嵐負相嵐					
		デリンジャー現象					
		極冠吸収（PCA）					
		プラズマバブル					
	超短波（VHF）通信・放送の障害	スポラディック E 層					
測位利用	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					

表 5. 宇宙天気の影響マトリクス全体版 (続き)

分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象	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
航空運用	通信障害 (地上航法援助用放送を含む)	デリンジャー現象					
		極冠吸収 (PCA)					
		プラズマバブル					
		スポラディック E 層					
	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					
航空乗務員の被ばく	太陽高エネルギー粒子 (SEP)	なし	なし	航空機航路変更	航空機航路変更	航空機運休	
有人宇宙活動	宇宙飛行士被ばく	太陽高エネルギー粒子 (SEP)	なし	なし	安全区域への退避	安全区域への退避または地球帰還	地球帰還
地上生活	地上での被ばく	太陽高エネルギー粒子 (SEP)	なし	なし	なし	なし	なし

カラースケール

影響が無視できる範囲	バックアップの準備などの適切な対応を要する範囲	運用の継続が困難になる範囲
------------	-------------------------	---------------

参考文献

- [1] PSTEP A01 班, 宇宙天気災害に向けた科学提言のためのハザードマップ, 科学研究費補助金: 新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」, 2020.
- [2] B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, G. S. Lakhina and S. Alex, The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859, vol. 108, 2003.
- [3] C. Cid, J. Palacios, E. Saiz, A. Guerrero and Y. Cerrato, "On extreme geomagnetic storms," *J. Space Weather Space Clim*, vol. 4, no. A28, p. 10, 2014.
- [4] 五家建夫, 宇宙環境リスク辞典, 丸善, 2006, p. 179.
- [5] D. N. Baker, X. Li, A. Pulkkinen, C. M. Ngwira, M. L. Mays, A. B. Galvin and K. D. C. Simunac, "A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios," *Space Weather*, vol. 11, no. 10, pp. 585-591, 2013.
- [6] 三宅美沙、増田公明, "屋久杉に刻まれた宇宙現象: 西暦 774-775 年、993-994 年の宇宙線強度異常 (最近の研究から)," *日本物理学会誌*, vol. 69, no. 2, pp. 93-97, 2014.
- [7] N. Gopalswamy, "Extreme Solar Eruptions and their Space Weather Consequences," in *Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences*, Elsevier Inc., 2018, pp. 37-63.
- [8] Space Weather Operations, Research, and Mitigation Subcommittee Committee on Homeland and National Security of the NATIONAL SCIENCE & TECHNOLOGY COUNCIL, SPACE WEATHER PHASE 1 BENCHMARKS, 2018.
- [9] K. Tsubouchi and Y. Omura, "Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events," *Space Weather*, vol. 5, no. S12003, 2007.
- [10] M. Nakamura, A. Yoneda, M. Oda and K. Tsubouchi, "Statistical analysis of extreme auroral electrojet indices," *Earth, Planets and Space*, vol. 67, no. 153, 2015.
- [11] V. Kurt, H. Mavromichalaki and M. Gerontidou, "Statistical analysis of solar proton events," *Annales Geophysicae*, vol. 22, p. 2255–2271, 2004.
- [12] P. Jiggins, D. Heynderickx, I. Sandberg, P. Truscott, O. Raukunen and R. Vainio, "Updated Model of the Solar Energetic Proton Environment in Space," *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 8, p. 22, 2018.
- [13] H. Sauer and D. Wilkinson, "Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons," *Space Weather*, vol. 6, no. 12, 2008.
- [14] Swiss Re., "Space Weather Impacts a Risk to Society?," [Online]. Available: <http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u33/NOAA-MASTER.pdf>.
- [15] National Science & Technology Council, US Government, "National Space Weather Strategy," October 2015. [Online]. Available: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final_nationalspaceweatherstrategy_20151028.pdf. [Accessed 6 3 2020].
- [16] National Science & Technology Council, US Government, "National Space Weather Strategy and Action Plan 2019," [オンライン]. Available: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>.
- [17] National Science & Technology Council, US Government, "Space Weather Phase 1 Benchmarks," June 2018. [オンライン]. Available: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/06/Space-Weather-Phase-1-Benchmarks-Report.pdf>.
- [18] Royal Academy of Engineering, Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure, 3 Carlton House Terrace, London SW1Y 5DC: Royal Academy of Engineering, 2013.
- [19] Cabinet Office, UK., "National Risk Register of Civil Emergencies," 2015. [オンライン]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/419549/20150331_2015-NRR-WA_Final.pdf.
- [20] Cabinet Office, UK, "Space Weather Preparedness Strategy," 2015. [オンライン]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/449593/BIS-15-457-space-weather-preparedness-strategy.pdf.
- [21] ISES, "International Space Environment Service: ISES," [オンライン]. Available: <http://www.spaceweather.org/>.
- [22] WMO, "Interprogramme Coordination Team on Space Weather," [オンライン]. Available: http://www.wmo.int/pages/prog/sat/spaceweather-ictsw_en.php.
- [23] WMO, "IPT-SWeiSS," [オンライン]. Available: <https://community.wmo.int/activity-areas/wmo-space-programme-wsp/ipt-sweiss>.
- [24] NICT, "国際民間航空機関 (ICAO) に対して宇宙天気情報の提供を開始," [オンライン]. Available: <https://www.nict.go.jp/press/2019/11/07-2.html>.
- [25] United Nation, "COPUOS," [オンライン]. Available: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/index.html>.
- [26] 石井守, "2019 年の宇宙天気 - 第 14 回宇宙天気ユーザーズフォーラム," 2019.