科学研究費補助金:新学術領域研究「太陽地球圈環境予測」

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

版数	発行日	変更内容
第1版	2020年10月7日	初版発行

目次

はし	じめに		1
1.	宇宙天気	現象	2
1	1. 宇宙	天気とは	2
1	.2. 宇宙	環境と宇宙天気現象	
	1.2.1.	太陽風	
	1.2.2.	太陽嵐	
	1.2.2.1.	太陽フレア	5
	1.2.2.2.	コロナ質量放出(Coronal Mass Ejection: CME)	6
	1.2.2.3.	太陽高エネルギー粒子(Solar energetic particle: SEP)	6
	<i>1.2.3.</i>	太陽電波バースト	
	1.2.4.	太陽活動周期	
	1.2.5.	地球磁気圏・電離圏環境	
	1.2.5.1.	電離圈(電離層)	
	1.2.5.2.	地球磁気圈	14
	1.2.6.	磁気圏じょう乱(磁気嵐とサブストーム)	
	1.2.7.	電離圏じょう乱	
1		天気予報と予報に向けた取り組み	
	1.3.1.	国内の取り組み	
	1.3.2.	海外の動向	
	1.3.3.	国際機関の動向	
2.	宇宙天気	現象の規模の推定	30
2	2.1. 太陽	フレア	
	2.1.1.	発生頻度と現象規模の関係	
	2.1.2.	今後発生しうる最大規模の現象の見積もり	
2	2.2. CM	Ε	
	2.2.1.	CME の特徴量と他の現象との関係	
	2.2.2.	現象規模の定義	
2	2.3. 太陽	高エネルギー粒子	
	2.3.1.	太陽高エネルギー粒子(SEP)現象について	
	2.3.2.	発生頻度と現象規模の関係	

	2.3.3.	現象規模の定義	47
2	2.4. 太陽	書電波バースト	
	2.4.1.	発生頻度と現象規模の関係	48
	2.4.2.	現象規模の定義	49
2	2.5. 放身	†線帯	50
	2.5.1.	発生頻度と現象規模の関係	51
	2.5.2.	現象規模の定義	54
2	2.6. 磁多		55
	2.6.1.	発生頻度と現象規模の関係	55
	2.6.2.	現象規模の定義	59
2	2.7. サフ	ブストーム	61
	2.7.1.	発生頻度と現象規模の関係	61
	2.7.2.	現象規模の定義	62
2	2.8. 電离	推圏じょう乱	63
	2.8.1.	発生頻度と現象規模の関係	63
	2.8.1.1	. 全電子数(TEC)最大值	63
	2.8.1.2	2. デリンジャー現象	67
	2.8.1.3	3. 極冠吸収	
	2.8.1.4	Ⅰ. スポラディック E 層	73
	2.8.1.5	5. プラズマバブル	
	2.8.1.6	. 中規模伝播性電離圏じょう乱(MSTID)	
	2.8.2.	現象規模の定義	80
3.	宇宙天気	〔現象の社会影響	82
4.	電力分野	予における宇宙天気現象の社会影響	86
4	1.1. 停電	〔(送電線への過電流)	
	4.1.1.	送電網へ影響を与えるメカニズム	
	4.1.2.	日本で発生しうる地磁気誘導電流(GIC)の規模と発生頻度の試算	
	4.1.3.	地磁気誘導電流(GIC)に関する宇宙天気の影響マトリクス	
	4.1.4.	今後の課題	
	4.1.5.	地磁気誘導電流(GIC)による電力障害の事例	
	4.1.6.	日本の電力網への影響	
4	4.2. 経済	各影響	101
5.	衛星運用]における宇宙天気現象の影響	107
Ę	5.1. 衛星		108
-	5.1.1.	表面帯電	108

5.1.1.1.	. 表面帯電のメカニズム	108
5.1.1.2.	. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算	109
5.1.1.3.	. 表面帯電に関する宇宙天気の影響マトリクス	111
5.1.1.4.	. 今後の課題	111
5.1.1.5.	 表面帯電による衛星障害の事例 	112
5.1.1.6.	. 事業者との議論	113
5.1.2.	深部帯電	114
5.1.2.1.	. 深部帯電のメカニズム	114
5.1.2.2.	. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算	114
5.1.2.3.	. 深部帯電に関する宇宙天気の影響マトリクス	114
5.1.2.4.	. 今後の課題	115
5.1.2.5.	 深部帯電による衛星障害の事例 	116
5.2. シン	·グルイベントアップセット	. 117
5.3. 太陽	島電池の劣化	. 121
5.4. 軌道	・ 姿勢じょう乱	. 122
5.4.1.	衛星姿勢制御(磁気トルカ)異常	. 122
5.4.2.	衛星大気ドラッグ	. 122
5.4.2.1.	. 大気ドラッグの概要	122
5.4.2.2.	. 大気ドラッグ規模の試算	123
5.4.2.3.	. 大気ドラッグによる衛星軌道への影響の検討	126
5.4.2.4.	. 宇宙天気の影響マトリックス	128
5.4.2.5.	. 今後の課題	128
5.4.2.6.	. 大気ドラッグによる衛星障害の事例	129
5.5. 衛星	通信への影響	. 133
6. 通信・放	x送における宇宙天気現象の社会影響	.134
6.1. 短波	ぞ(HF)通信・放送の障害	. 135
6.1.1.	短波(HF)通信・放送障害の概要	. 135
6.1.2.	起こり得る現象規模と発生頻度の試算	. 137
6.1.3.	短波(HF)通信・放送に関する宇宙天気の影響マトリクス	. 138
6.1.4.	今後の課題	. 139
6.1.5.	短波(HF)通信・放送障害に関する事例	. 139
6.2. 超短	該(VHF)通信・放送の障害	. 141
6.2.1.	超短波(VHF)通信・放送障害の概要	. 141
6.2.2.	起こり得る現象規模と発生頻度の試算	. 142
6.2.3.	超短波(VHF)通信に関する宇宙天気の影響マトリクス	. 142
6.2.4.	今後の課題	. 143

7. 測位利	用における宇宙天気現象の社会影響	144
7.1. 1J	周波測位精度の劣化	
7.1.1.	1 周波測位精度の劣化の概要	
7.1.2.	起こり得る現象規模と発生頻度の試算	
7.1.3.	1 周波測位精度の劣化に関する宇宙天気の影響マトリクス	
7.1.4.	今後の課題	
7.1.5.	測位利用障害の事例	
7.2. 2J	周波測位(全般)精度の劣化	
7.3. 2J	周波測位(位相)精度の劣化	
8. 航空運	用における宇宙天気現象の社会影響	150
8.1. 通	信障害	
8.1.1.	通信障害の概要	
8.1.2.	起こり得る現象規模と発生頻度の試算	
8.1.3.	通信に関する宇宙天気の影響マトリクス	
8.1.4.	今後の課題	
8.1.5.	通信障害の事例	
8.2. 測	位精度の劣化	
8.2.1.	測位精度への影響	158
8.2.2.	起こり得る現象規模と発生頻度の試算	
8.2.3.	測位に関する宇宙天気の影響マトリクス	163
8.2.4.	今後の課題	
8.3. 乗	務員の被ばく	
8.3.1.	被ばくの概要	
8.3.2.	航空機高度での被ばく線量の試算	
8.3.3.	被ばくに関する宇宙天気の影響マトリクス	
8.3.4.	今後の課題	
8.3.5.	航空搭乗員被ばくによる影響事例	
8.3.6.	事業者との議論	
8.4. 電	子機器のソフトエラー	
8.5. レ	ーダ障害	
8.6. 経	済影響	
9. 有人宇	宙活動における宇宙天気現象の社会影響	178
9.1. 宇	宙飛行士被ばく	
9.1.1.	宇宙飛行士被ばくの概要	
9.1.2.	宇宙機内(磁気圏外)での被ばく線量の試算	

9.1.3.	被ばくに関する宇宙天気の影響マトリクス	181
9.1.4.	今後の課題	
9.1.5.	宇宙飛行士被ばくを避けるために警告等が発せられた事例	
10. 地上	生活における宇宙天気現象の社会影響	
10.1.	地上での被ばく	
10.1.1	. 地上での被ばくの概要	
10.1.2	2. 地上での被ばく線量の試算	
10.1.3	. 被ばくに関する宇宙天気の影響マトリクス	
10.2.	電子機器のソフトエラー	
10.3.	信号機器の誤動作	
11. 残さ	れた課題	
11.1.	社会影響をより正確に推定するための課題	
12. まと	Ø	
文献目録		190
執筆者・編	集協力者一覧	206

はじめに

本報告は、科学研究費補助金:新学術領域研究「太陽地球圏環境予測」(2015-2019)(略称: PSTEP)の活動のもとにまとめられたものである。

宇宙天気とは、主に太陽活動が源となって発生する、地球近傍宇宙の諸現象のことで あり、我々の社会活動に与える影響が重要なファクターとなっている。しかしながら、 従来の研究では宇宙環境の変動メカニズムおよびその予報までは対象としていたものの、 その社会への定量的な影響についての議論は進められていなかった。このため、たとえ 宇宙天気予報の警報を発信したとしても、そのための備えをどのようにしたら良いかに ついての指針がなく、その結果ユーザーの過剰な心配あるいは無関心に陥っていたのが 現状である。

本報告は、宇宙天気現象の社会への影響について、現在得られている知見を駆使し検 討を行ったものである。加えて、我が国において今後どの程度の宇宙天気現象・災害が 発生しうるか、その際にどのようなことが発生しうるかについて可能な限り検討を重ね た結果を示してある。

我が国は中緯度に位置する島国と言うこともあり、例えば誘導電流による電力網への 影響などは従来無視されてきた。しかしながら PSTEP の研究の中でその認識を再検討 するべき結果も示されてきている。

本稿をもとに今後宇宙天気情報のユーザーとのコミュニケーションを諮り、ユーザー サイドの具体的な対応策の検討まで進めることで、最先端の研究成果を社会活動に取り 入れる好例としたい。

また、本検討を進めている中で、現在の知見では十分な答えが得られない点も露わに なってきた。これらを今後の課題として示し、将来の研究テーマとして検討を進めるこ とで本稿を随時改訂していきたい。

令和2年2月14日

情報通信研究機構 石井 守(PSTEP A01 班代表)

1. 宇宙天気現象

1.1. 宇宙天気とは

近年、我々の生活は通信衛星、放送衛星、気象衛星、GPS 衛星など宇宙空間を利用し た社会インフラシステムに依存するようになってきている。電離圏による反射を利用し た長距離無線通信や GPS の精密測位においても、宇宙環境の影響を電離圏のじょう乱 を通して受ける。また、国際宇宙ステーションや民間会社による宇宙旅行計画など人類 が宇宙空間を訪れる機会も徐々に増えつつある。

図 1-1 は、太陽から到来する現象と地球周辺の宇宙空間の構造をまとめるとともに、 そのじょう乱が社会影響に至る過程を示している。太陽からは「太陽風」という常に吹 き出されるガス(プラズマ)流があり、地球に到来する太陽風は絶えず変化している。 さらに太陽の大気「コロナ」では、時折「太陽フレア」と呼ばれる大規模な爆発現象が 発生し、X線・紫外線をはじめとした広範囲の波長帯の「電磁波」が増加するとともに、 太陽放射線(宇宙線)と呼ばれる「太陽高エネルギー粒子(SEP)」が放出される。さら にはコロナガス(プラズマ)が大規模に放出される「コロナ質量放出(CME)」現象が発 生し、惑星間空間を流れる太陽風の中を膨張しながら太陽から外に向かって伝播する。 このように電磁波・放射線・プラズマ流(太陽風・CME)の3種類の現象として太陽か らの影響が地球に到来する。一方で地球では通常は地球の磁場や大気がこれらの影響に 対するバリアの役割を果たしている。地球の磁場によって太陽風プラズマの侵入が妨げ られている空間を「磁気圏」という。また高層大気による吸収によって X 線・紫外線や 高エネルギー粒子の地表への到達を防いでいる。紫外線の吸収などの効果で一部の粒子 が電離された状態で存在する層があり、これを「電離圏(電離層)」という。磁気圏には 「放射線帯」という、高エネルギーの粒子(静止軌道付近の組成は主に電子)が地球の 磁場に捉われて存在する領域がある。

太陽から地球に到来するじょう乱の強度や太陽風中の磁場の向きなど諸条件によって は地磁気のバリア機能が低下し、地球周辺の宇宙環境にじょう乱が引き起こされる。例 えば、ある一定の値よりも高いエネルギーをもつ太陽放射線粒子は、磁気圏に侵入し、 宇宙飛行士の被ばく、衛星の半導体機器の誤動作や太陽電池劣化を引き起こす(図 1-1)。 放射線帯の高エネルギー電子が増加すると静止衛星の帯放電頻度が上昇し衛星の不具合 につながるリスクが上昇する。さらに、影響は宇宙空間のみに留まらず、じょう乱は磁 気圏から電離圏へ伝わり、航空機の運航や通信・放送インフラなどにも影響する。極め て強い磁気嵐に伴う誘導電流は地上の送電設備に障害を与えることがある。



図 1-1 宇宙環境じょう乱の発生と障害 [1]

この様な、人類の健康や社会インフラに影響を与える宇宙放射線や磁気嵐などの宇宙 環境変動を「宇宙天気」と呼ぶ。近年では、通信や測位、搭乗員の被ばくといった宇宙 天気の影響を受ける航空運用において、宇宙天気情報の利用が義務化される動きがあり、 2019年11月7日から宇宙天気情報が航空運用に不可欠な情報として国際民間航空機関 (ICAO) へ提供され始めた。また、2018年11月1日にサービスを開始した準天頂衛 星によって、高精度衛星測位によるさまざまなサービスが期待される一方で、測位精度 に影響を及ぼす電離圏データのニーズはますます高まっていくと考えられる。

この章では、宇宙天気として重要な、背景の宇宙環境とその変動現象を解説するとともに、宇宙天気予報の現状について紹介する。

1.2. 宇宙環境と宇宙天気現象

宇宙天気現象に重要な宇宙環境変動として、太陽風、太陽嵐、放射線帯じょう乱、磁 気圏じょう乱、及び電離圏じょう乱について、以下に記す。

1.2.1. 太陽風

太陽の外層大気「コロナ」は 100 万度を超える高温の電気を帯びたガス (プラズマ) で構成されている。コロナの一部のプラズマが太陽から外に向かって絶えず吹き出して おり、このガスの流れを「太陽風」と呼ぶ。太陽風の組成は、太陽と同様にそのほとん どが水素イオン (水素原子核・陽子・プロトン) と電子である。太陽風は、音速を超え る速度まで加速されて吹き出され、地球の近くでは、速度は 250~800 km/s になる。こ の速度の違う太陽風の起源についてはまだ解明されていない部分があるが、太陽風は、 太陽コロナの密度が低く暗く見える領域「コロナホール」から放出していることが知ら れており、高速の太陽風は特に大きなコロナホールから放出されていることが知ら れており、高速の太陽風は特に大きなコロナホールから放出されていることが知られて いる。太陽コロナの形状・コロナホールの分布によって、高速太陽風が流れている領域 と低速太陽風が流れている領域が混在していて、太陽が自転することにより、地球に到 来する太陽風が次々と入れ替わっていく。太陽風は、コロナホールから放出されて地球 に到来するまでに 2~5 日かかる。その間に太陽が自転することでコロナホールの経度 は西に動いていく。一方で太陽風が太陽から運び出す磁力線は、太陽風の流出元のコロ ナホールにつながっているので、惑星間空間を太陽の北側から見たときに、太陽から太 陽風をつなぐ磁力線は渦巻き状になっている [2]。

現在、太陽と地球の間の重力が釣り合う第1ラグランジュ点(L1点)付近に、米国海 洋大気庁(NOAA)の Deep Space Climate Observatory(DSCOVR)衛星が滞在し、 太陽風の速度・磁場・温度・密度などの太陽風データのその場(in situ)観測を行って いる。この太陽風の変動が、多くの宇宙天気じょう乱を引き起こす。

特に大きなじょう乱を引き起こすのは低速太陽風の後ろから高速太陽風がやってくる 構造で、境界面ではガスが衝突して圧縮された特徴的な領域を形成して外に向かって流 れていく。この領域を共回転相互作用領域(Corotational interaction region: CIR)とい う。

1.2.2. 太陽嵐

太陽において突発的に発生する爆発現象は、総称して<u>「太陽嵐」</u>と呼ばれ、宇宙天気 現象を引き起こす主たる要因になりうる。太陽嵐は、太陽コロナに蓄積された磁気のエ ネルギーが急激に解放されることで発生する。解放されたエネルギーによってガス(プ ラズマ)が加熱された結果として、電磁波の強度が増す現象を「太陽フレア」と呼ぶ。 コロナのガス(プラズマ)とコロナの磁束が一体となって太陽から外に向かって放出さ れる現象を「コロナ質量放出(Coronal mass ejection: CME)」と呼ぶ。また、太陽フレ ア・CME が発生する中で、コロナガス(プラズマ)の一部の粒子がエネルギーを得るこ とで高い速度まで加速され、放射線となる。この加速された太陽放射線粒子を、「太陽高 エネルギー粒子(Solar energetic particle: SEP)」と呼ぶ。太陽フレア時のX線の増大 や CME や SEP が地球への到来すると、後述するように通信・測位、衛星運用、電力シ ステム等、さまざまなインフラ設備や生活に大きな影響を及ぼす [3]。

1.2.2.1. 太陽フレア

太陽フレアは、太陽の黒点上空の太陽コロナで発生する爆発現象で、電波から X 線、 γ線などの、あらゆる波長の電磁波が、数分から数時間にわたって強度を増す。図 1-2 左は、極端紫外線で観測された太陽フレアの例を示す。1 回の太陽フレアで放出される エネルギーは、10²⁹~10³⁴ [erg (エルグ)](=10²²~10²⁵ [J (ジュール)])で、広島に投下 された原爆の約1億から1000億倍もの莫大な大きさである。このようなエネルギーは、 太陽大気中で磁気エネルギーが、磁気リコネクションにより解放されて生じると考えら れている。

太陽フレアは、静止軌道にある米国 NOAA の Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) 衛星に搭載された X 線モニタによって監視されて いる。X 線モニタのピーク時の強度 (flux) により太陽フレアの規模が定義されていて、 波長が 0.1 から 0.8 nm の X 線の強度が 10 倍大きくなるごとに小さい方から順番に A、 B、C、M、X クラスに分類される。



図 1-2 Halloween Event 時に観測された太陽フレア(左)と CME(右) [4]

1.2.2.2. コロナ質量放出(Coronal Mass Ejection: CME)

太陽フレアに伴って、太陽コロナのガスが大規模に噴出する現象が発生することがあ り、これをコロナ質量放出(CME)と呼ぶ。放出された物質の噴出速度は、極端に速い ものでは秒速 4,000 km 近くにもなる。前面を流れる太陽風の流速よりも CME の速度 が十分に速い場合、その前面には衝撃波が形成される。

図 1-2 右は遮光版で太陽を意図的に隠し人工的に日食を起こすことで太陽の周りの コロナを観測した画像(コロナグラフ)である。中心に見える白い丸が太陽の縁に当た る。コロナグラフでは、コロナや太陽風のガスが濃いほど明るく見える。太陽の南側に 非常に明るいガスが放出しているのに加えて、太陽から全方向に外側よりも少し明るく なる構造が伸びている物が見える。この構造が地球に飛来する恐れがあるガスのかたま り(CME)であり、コロナグラフは CME を投影して見ている。

CME の中心には太陽から放出された磁束がねじれた磁束管(flux rope)として存在 すると考えられている。CME が地球方向に発生すると、太陽風の乱れが1日から5日 程度かけて地球に到来する。その一部の磁場が南向きの成分を持っているとき、地球に 磁気嵐やサブストームなどの宇宙天気現象を引き起こす。そのため、CME の監視は宇宙 天気予報にとって非常に重要なものとなっている[5]。

1.2.2.3. 太陽高エネルギー粒子(Solar energetic particle: SEP)

太陽フレアや CME によって太陽コロナ粒子の一部が、10 keV~10 GeV の範囲のエネ ルギーを待つまで加速されたものを、太陽高エネルギー粒子(SEP)と呼ぶ。SEP の組 成は、太陽と同様でそのほとんどが水素イオン(水素原子核、プロトン)と電子である。 1 MeV 前後よりも高いエネルギーを持つプロトンは磁気圏の中に侵入することができる。 図 1-2 右のコロナグラフ画像全体にランダムな白い筋や点は、SEP が衛星搭載の CCD 検出器に到来したため生じたノイズである(2.2 節)。実際にこの CME イベントに伴い、 高エネルギー粒子が地球に降り注ぎ、軌道上と地上の双方で多大な被害を及ぼした(詳 細は後述)。

静止軌道にある米国 NOAA の GOES 衛星は、高エネルギープロトンの強度(flux)をモ ニタ観測している (図 1·3)。静穏時は銀河宇宙線(Galactic cosmic ray: GCR)によ るプロトンを検出しているが、GOES 衛星が観測する高エネルギープロトンがある基 準 (10 個/cm²/sr/s)を超えて増加する現象のことを<u>プロトン現象(プロトンイベン</u> <u>ト)</u>と呼ぶ。なお、この現象の呼称は紛らわしいものが多数あるので注意を要する。同 じ現象もしくはその一部の別名称としては、solar cosmic ray、solar proton event(SPE)、solar particle event(SPE)、SEP event(SEPE)、energetic SPE(ESPE)、 energetic storm particle(ESP)などがある。



図 1-3 2003 年 10 月 28 日から 31 日までの 4 日間の GOES 衛星で観測されたプロトン 強度の時間化。NOAA の公開データより作成。

SEP には、フレア発生直後から上昇してピークが来る成分と、CME とともに到来す る低エネルギー側の粒子だけが増加する成分がある。図 1-3 には図 1-2 の太陽フレア 後の SEP 強度の時間変化を示している。フレア発生の直後 28 日 12 時 UT

(Universal Time 世界時)前に太陽近傍で加速された SEP が地球に到来したため、プロトン強度が急激に上昇している。29日6時 UT ごろに衝撃波が到来し、その時刻に低エネルギーのプロトンフラックスがピークを迎えている。

SEP のうち 500 MeV 以上の範囲の粒子が十分に多い時、それらの粒子は地球の磁力 線に巻きついて旋回運動をしながら磁力線に沿って高緯度域の大気圏に降下する。大気 と衝突したのち空気シャワー反応を起こして二次粒子を形成して大気に降り注ぐ。これ が、航空機高度や地表に降り注ぐことで被ばくを引き起こす原因となる(8.3 節参照)。 地表に設置された中性子モニタで二次粒子によるカウントの増加が発生した時、そのイ ベントを「Ground Level Enhancement (GLE)」という。

SEP が地球に到来し地球の磁気圏内に侵入することによってプロトン現象が引き起こされる。SEP は人工衛星に搭載されている半導体素子などに誤動作を起こさせたり、太陽電池パネルを劣化させたりする。また、船外活動中の宇宙飛行士を被ばくさせることもあり、警戒が必要である。

(1) シングルイベントアップセット (Single Event Upset: SEU)

プロトン現象や銀河宇宙線による高エネルギーの陽子(プロトン)や重イオンなどの 荷電粒子が衛星を直撃すると、ビットエラーを引き起こし、メモリエラーなどに繋がる 事例が複数報告されている。このような半導体論理回路の誤動作、または故障を「シン グルイベントアップセット(SEU)」と呼ぶ。

(2) 極冠吸収 (Polar Cap Absorption: PCA)

地球に飛来した SEP は磁気圏磁力線に沿って極域に侵入する。エネルギーの高い陽子 が極域に侵入すると、電離圏 D 領域(高度約 80 km、1.2.5.1 節参照)における電離を急 激に引き起こすことで、電波の吸収が増加し、短波による通信ができなくなることがあ る。このような現象を「極冠吸収(PCA)」と呼ぶ。これらについては 2.8.1.3 節で詳し く述べる。

(3) Ground Level Enhancement: GLE

前述した通り地球に飛来した 500 MeV 以上の高エネルギーの SEP が大気に降下する ことにより生成した二次粒子(中性子等)の影響で、地表面で放射線量が短期間に上昇 する現象を GLE と呼ぶ。観測史上で最大の GLE は 1956 年 2 月 23 日に発生したとさ れる [6]。GLE の発生により、航空機高度での被ばくが、銀河宇宙線による被ばくに比 べて 10 倍以上も上昇する場合があるため、その影響は無視できない。

イベントごとに SEP のエネルギー分布が大きく異なるため、SEP 現象の規模と GLE の大きさは必ずしも相関がない。これらについては 2.3.1 節で詳しく述べる。

1.2.3. 太陽電波バースト

太陽フレアや CME が発生すると、同時に「太陽電波バースト」と呼ばれる強い電波 放射が引き起こされることがある。非常に強い太陽電波バーストは、GPS 衛星からの測 位信号を受信する際のノイズとなり、GPS 衛星を使った測位に影響を与えることがある。 一方で、太陽電波バーストは、CME の発生や、太陽近傍での衝撃波の形成、それらの伝 播速度などを知る手がかりにもなり、宇宙天気予報のための重要な観測データのひとつ となっている。太陽電波バーストは、ダイナミックスペクトル上で以下の5つの型に分 類することができる(図 1-4) [7]。

▶ I型

VHF(30-300MHz:超短波、メートル波帯)において継続時間1秒以下で帯域幅が数 MHz のバーストが群となって出現する現象。出現帯域幅は200MHz を中心とした 100MHz 幅程度に限られた現象で数時間から数日間続くことがある。活動的な黒点が太陽面にあることを示す良い指標となる。



A typical dynamic spectrum that might be produced by a large flare (importance 2B or larger). source: Solar-Geophysical Data, July, 1987

図 1-4 太陽電波バーストのダイナミックスペクトルと分類 [7]

▶ II型

太陽フレア発生後数分から 10 分後に始まり VHF から HF (3-30MHz: 短波、デカ メートル波帯)にかけてゆっくりと高い周波数から低い周波数へ下がっていく電波 放射で、数分から数 10 分間程出現する現象。太陽フレアに伴う衝撃波近傍で発生す るプラズマ波が発生原因と考えられている。衝撃波が太陽大気上方に伝播すると、 周囲のコロナの電子密度が下がっていくため、時間とともに周波数がゆっくりと下 がっていく負の周波数ドリフトとして観測される。HF よりもさらに低い周波数ま で下がりながら数日間続くことがある。周波数の下がる割合(周波数ドリフト率) は通常 1 MHz/s 以下である。コロナ中の電子密度分布を仮定することで、衝撃波の 速さを見積ることができる。II 型が発生しさらに後述の IV 型が発生すると、数日 後に磁気嵐が発生する確率が高くなるが、太陽地球間の距離をこの衝撃波の速さで 割ることにより、地磁気への影響が始まる概算時間を予測することができる。

▶ III型

太陽フレア発生直後に VHF から HF にかけて出現する大きな負の周波数ドリフト (~100MHz/s)を示すバースト。太陽フレアに伴う電波バーストとしてはもっとも 頻繁に現れ、群として出現することもある。

▶ IV型

マイクロ波(3-30GHz:センチメートル波帯)からHF(3-30MHz)までの広い範囲で発生し、II型とともに磁気嵐との関わりでは重要な指標となるバースト。II型に引き続いて発生した場合は、太陽フレアに伴ってプラズマの塊が太陽から放出さ

れたことを示しており、磁気嵐が数日後に発生する確率が高くなる。

▶ V型

VHF から HF にかけて III 型に引き続いて発生する広帯域放射現象で、継続時間は数分程度。

1.2.4. 太陽活動周期

白色光で太陽を観測した時、黒い"ほくろ"の様に見えるところを黒点と呼ぶ。図 1-5 左の中央上方や東西の端に黒点群が発生しているのがわかる。黒点が黒く見えるのは、 黒点の温度が周りに比べて低くなっているためで、これは黒点の強すぎる磁場が、太陽 内部から表面へのエネルギーの流れを妨げているためである。黒点の寿命は、1 日から 数日程度の短命なものから、数か月を超えるものまで様々である。

黒点は磁場が強い場所で、太陽フレアが発生するなど活動が活発な場所である。その ため、太陽黒点数は太陽活動度を示す重要な指標となる。太陽黒点数は約11年の周期で 増減を繰り返しており(図1-5右)、この約11年の変動を「太陽周期活動」という。活 動の最も活発な時期を極大期、活動の最も穏やかな時期を極小期という。極大期には、 太陽黒点が同時に多く太陽表面に存在し太陽フレアが頻繁に発生して、地球周辺の宇宙 環境も大きく乱れる。一方で極小期には太陽黒点はほとんど現れなくなり、太陽フレア もほとんど発生しなくなる。極小期から極大期を経て極小期に至るまでの約11年を「太 陽活動周期(solar cycle)」という。1755年以降の太陽活動周期には1から順番に番号が つけられており、2009年から始まった第24周期は2014年に極大を迎え、ここ100年 の中でも特に弱い太陽活動の周期として記録された。

一方で、太陽風の分布も太陽活動周期によって変動する。極小期には太陽の大局的な 磁場は南北方向の双極子磁場が卓越するため、太陽の南北両極域に単一極性の磁場が存 在する領域がひろがる。その領域はコロナホールとなっていて、南北両極域の巨大なコ ロナホールから高速太陽風が流出し、低緯度には低速太陽風が流れる分布が形成される。 黒点の数が増え始めるとそれによって太陽の大局的な磁場の構造が徐々に変化していく。 それに伴い極域のコロナホールは徐々に縮小され極大期前後には極域からコロナホール がなくなる。そのかわりにコロナホールは様々な緯度に形成されては消えていくことを 繰り返す。黒点数が減少するにつれて極域コロナホールは再び形成され始める。黒点数 が減る減衰期には、低緯度に比較的大きなコロナホールが形成される傾向があり、その コロナホールを起源とする高速太陽風が、太陽の自転とともに回帰的に地球に到来する ことで、27日周期の宇宙天気の変動がしばしば観測される。

太陽の活動度を示す観測量として、F10.7 指数がある。F10.7 指数は、特定の時刻(観測地点での太陽の南中時刻の前後)の太陽全体から放射される固定周波数 2.8GHz (波長 10.7 cm)の電波の強度である [8]。太陽フレアや電波バーストが発生していない静穏時の F10.7 は、太陽面の活動領域の磁束量と良い相関があることが知られている。歴史

的には、情報通信研究機構平磯太陽観測施設を含め、世界の各観測所で測定されてきた が、現在はカナダのドミニオン電波天文台で測定される値が公式な値として採用されて いる [9] (観測時刻は南中時刻 UT20 時とその前後)。次節で解説する超高層大気の加熱 および電離に重要となる太陽紫外線フラックスの指標として、F10.7 指数がよく参照さ れる(例: 5.4.2.3、5.4.2.4 節)。



図 1-5 太陽黒点(左) [10]と第 24 太陽活動周期の黒点数変化(右) [11]



1.2.5. 地球磁気圈·電離圏環境

地球は、前述した太陽から到来する影響に直接さらされるのではなく、2 重のバリア によって保護されている。

1.2.5.1. 電離圏(電離層)

まず一つ目のバリアは、地球表面に存在する大気、これが非常に分厚いバリアとなっている。人体に有害な波長の短い電磁波(y線、X線、紫外線)は高層の大気で吸収されるために、地表にはほとんど届くことがない。紫外線の吸収などによって、高層の大気は一部電離してプラスとマイナスの電荷を帯びた粒子であるプラズマとして存在する。 高度 60km より上空の電離した大気の層を「<u>電離圏</u>」と呼ぶ。歴史的には電離層と呼ばれてきたが、近年では電離圏と呼ばれることが多くなっている。

図 1-6 に示すように、電離圏は高度および組成の違いからいくつかの領域に分けて名 前がつけられていて、低い方から、D 領域、E 領域、F 領域(D、E、F 層)と呼ばれて いる。プラズマ密度は高度 300~400 km 付近で最も高くなっている。電離圏における電 子密度は太陽からの電磁波を受けて増加するため、夜明けから増加し昼間に極大になっ たのちに夜にかけて減少するという日周期の変化をしている。これは太陽からの電磁波 放射が太陽天頂角に依存するためである。また太陽天頂角が小さくなる低緯度地域の電 子密度が高くなる傾向があるが、実際には、磁気赤道を挟んだ緯度帯(磁気緯度±15度 程度)に電離圏電子密度が高い領域である赤道異常が形成される(図 1-7)。さらに、D 領域、E 領域については、基本的に南中時の太陽天頂角が小さくなる夏に電子密度が相 対的に大きくなる季節変動が見られる一方、F 領域については、日中の電子密度が春と 秋に極大となる半年変化が見られ、さらに日中の電子密度が夏季よりも冬季に高くなる 季節異常が中・高緯度で見られる [13]。



図 1-7 電離圏全電子数の分布 [14]



図 1-8 電離圏のイオノゾンデ観測 とイオノグラムの電離圏パラメータ [15]

電離圏の監視は図 1-8 左に示すイオノゾンデと呼ばれる観測装置を用いて行われてき た。電離圏は電子密度に応じた周波数の電波を反射する性質がある。この性質を利用し、 地上から周波数の異なる電波を発射し、電離圏から反射エコーが返ってくる時間差を計 測することで、電子密度高度分布を知ることができる。観測された反射エコーを周波数 と高度の関数として示したプロットは、イオノグラムと呼ばれる(図 1-8 右)。イオノゾ ンデで観測される反射エコーは、右回り偏波である正常波(O モード)と左回り偏波で ある異常波(X モード)で周波数の振る舞いが異なり、それぞれから読み取られるパラ メータを図 1-8 右に示すように定義している。fo、fx で始まる記号は、それぞれあとに 続く層の臨界周波数(その層の一番高い所)を示し、h'はそれぞれの領域の見掛けの高さ を表す。イオノグラムに正常波・異常波の両方が常に現れるわけではないので注意が必 要である。

電離圏プラズマ密度のピーク高度における大気電離率は10⁻³程度であり、中性大気が 電離圏プラズマよりはるかに多く存在する(図 1-6)。そのため、電離圏変動において、中 性大気の振舞いも重要である。

中性大気について、大気温度構造の特徴による領域区分がよく参照される。地表から 高度 10km までは、高度とともに温度・密度が減少し、対流圏と呼ばれる。その上層の 高度約 10km~50km は逆に高度とともに温度が上昇する成層圏、高度約 50km~80km に は再び温度が減少する中間圏と呼ばれる領域が存在する。高度 80km よりも上空は、再 び高度とともに温度が上昇し、熱圏と呼ばれる。この熱圏大気の温度上昇に、太陽紫外 線による加熱効果が大きく寄与している。



図 1-9 左:磁気圏のモデル図 [16]。右:「あけぼの」衛星によって観測された 2.5MeV 以上の電子の空間分布 [17]。

1.2.5.2. 地球磁気圏

地球は磁場を持つ惑星で、その磁力線は、周りに何も無ければ棒磁石が作る双極子磁 場と同じような形になる。ところが実際は、太陽風によって吹き流されて地球磁場の勢 力範囲は"ほうき星"のような形になっており、この領域を「磁気圏」と呼ぶ(図 1-9 左)。電荷をもったエネルギーの低い粒子(太陽風のプラズマ粒子や、エネルギーの低い SEP など)は磁気圏磁場を横切ることができないため、跳ね返されたり、磁力線に沿っ た方向の運動のみに制限された結果高緯度地域に降下したりというように、侵入が一部 妨げられている。これが二つ目のバリアである。

磁気圏内のプラズマ粒子はお互いに衝突しないため、エネルギー(状態)の異なる粒 子が同じ空間に同時に複数存在する。リングカレント(環電流)、放射線帯(ヴァン・ア レン帯)と呼ばれる構造がそれにあたる。リングカレントと放射線帯はともに地球の固 有磁場に捉われた粒子が磁力線に沿って往復しながら、地球を取り囲むように旋回する ことで形成されている(図 1-9右)。リングカレントは、2~7地球半径の領域で10-200keV のイオンや電子で、地球を取り巻く西向きに流れる電流を形成している。物理的には磁 気嵐の発生はリングカレントの増大として解釈されている。一方、放射線帯は1~7地球 半径の領域に存在する非常にエネルギーの高い(MeV 以上の)粒子で構成されている。 放射線帯には内帯と外帯の2つの領域があり、内帯には主に高エネルギーの陽子が、外 帯には高エネルギーの電子が存在する。リングカレントや放射線帯は、太陽風と地球磁 気圏の相互作用によって大きく変化する。

また、ブラジル上空付近では地磁気が弱いため、放射線帯が地上 250 km 付近の低い ところにまで広がっており、大気へ降り込む高エネルギー粒子量も多い。この領域は南 大西洋異常帯(South Atlantic Anomaly, SAA)と呼ばれている。 太陽風と地球磁気圏の相互作用によって発生する複雑な電流の変化が磁気圏内のじょう乱現象を発生させる。磁気圏と電離圏の間を磁力線に沿った電流が流れ、極域電離 圏を水平に流れる電流が発生するとき、オーロラが観測される。じょう乱現象時の電流 変動の影響は、地上の地磁気の変動として観測される。それらは、世界各所に配置され た磁力計によって時系列データが測定・記録されている。観測所ごとに1日を3時間ご との8区分に分けて、地磁気活動が静かな日の日変化曲線からのずれの大きさを示す量 をK指数という。

全世界的な地磁気のじょう乱を示す Kp 指数は、サブオーロラ帯にある 13 ヶ所の観測 所の K 指数をもとに作られている [18]。リングカレントの発達に伴って生じる中低緯度 域での地磁気の軸に平行な向きのじょう乱を表現する Dst 指数は、磁気赤道に近い位置 に存在する 4 箇所の地磁気変動から求めている。主にオーロラ頻出現域を流れる電流に 起因する地磁気じょう乱を表現する AE 指数は、北半球の高緯度帯にある 12 の観測所 のデータから求められている [19]。これらの地点で観測した地磁気水平成分の変動を重 ね合わせた、上側の包絡線を AU 指数、下側の包絡線を AL 指数と呼ぶ。AU 指数は東 向きに流れるオーロラジェット電流、AL 指数は西向きに流れるオーロラジェット電流 の大きさを表し、AE=AU-AL で算出される。

1.2.6. 磁気圏じょう乱(磁気嵐とサブストーム)

太陽風が南向きの磁場を伴っている時に、太陽風のエネルギーが磁気圏内部に注入さ れじょう乱現象をおこす。サブストームは磁気圏構造の変形を伴うじょう乱現象で、磁 気嵐はサブストームに伴うエネルギー注入と磁気圏変形が一定時間継続することで発生 する大規模なじょう乱現象である。(2.7節参照)

地球を通過する南向き磁場が1時間前後継続すると、サブストームが発生することが 知られている。図 1-10 に示されるように、太陽風の持つエネルギーが磁気圏に徐々に 蓄積され、爆発的に解放されてその後元の磁気圏構造に緩和する現象と理解することが できる。エネルギーが解放されるときに磁力線に沿って高エネルギーの電子が高緯度地 域に降り注ぐためオーロラ活動が活発になる。

地球の南北極域でオーロラが発生している領域であるオーロラオーバルは、プラズマ シート(図 1-10の灰色の領域)につながる磁力線の電離圏への投影に対応する。サブス トームの成長相(成長期)において、オーラオーバルは低緯度側に広がり、拡大相(拡 大期)で高緯度に戻っていく[20]。これは、成長相で引き延ばされた地球の磁力線が、 拡大相でもとに戻っていくことに対応する。サブストームが 1~数時間程度の現象であ るのに対し、次節で説明する磁気嵐は日単位の現象であり、時定数が異なる。



図 1-10 サブストームの発達過程 [21]



図 1-11 磁気嵐概要 [22]

強い南向き磁場を持つ太陽風が数時間程度継続して到来すると、磁気嵐が発生するこ とが知られている。磁気嵐が起こると、中低緯度の地磁気の南北成分が半日から数日間 にわたって減少する。この地磁気の変動は、磁気赤道のリングカレントが増大すること により生じる(図 1-11)。このリングカレントの強度を示す観測量が前述した Dst 指数 である [23]。

磁気嵐の原因となる現象は、大きく分けると2種類ある。1つは、コロナ質量放出(CME) である。もう1つは、太陽コロナ中の密度が低いコロナホールから流出する周辺よりも 速い太陽風である。CME および高速太陽風が強い南向き磁場を伴って地球に到来する と、リングカレントが発達して磁気嵐が発生し、地球の磁場が大きく乱される(2.6節参 照)。 磁気嵐・サブストームに伴って、電離圏や放射線帯も大きく変動するため、通信障害 や人工衛星の故障などが生じることがある。

(1) 地磁気誘導電流(Geomagnetically Induced Current: GIC)

地磁気変動により地殻あるいは地下に電場が誘導されると、地磁気誘導電流と呼ばれ る電流が発生する(4.1節参照)。これが長距離を結ぶ人工的な導電体設備である送電線 やパイプに流れると、システムの障害を起こしたり、金属パイプの腐食を促進したりす る。

電力網において、発電所や変電所の変圧器の中性点は安全のため、通常、地面に接地 されている。このため、地磁気変動によって中性点の間に電位差が生じると、中性点を 通して GIC が流れることになる。中性点にゆっくりと変動する電流が流れると変圧器の 動作点がずれ、変圧器でのロスにより変圧器が過熱されたり、高調波が発生して保護用 リレーが誤動作を起こしたりすることが知られている。

(2) 超高層大気の加熱

太陽紫外線の増加や磁気嵐に伴うエネルギー流入によって超高層大気が加熱されると、 大気が膨張し、衛星に対する大気摩擦が増加する。低軌道の地球周回衛星の場合は、超 高層大気による摩擦が衛星を減速させ軌道を低下させてしまうため、軌道を維持するた めの燃料の消費を早めることとなり、結果として衛星の寿命を短くする(5.4.2節参照)。

(3) オーロラ粒子降り込み

オーロラが発生しているということは即ち磁気圏から極域へ高エネルギー粒子が降り 込んでいることを示している。オーロラの源となる粒子の増加によって、その粒子の降 り込み領域を通過した衛星に障害が引き起こされることがある(5.1.1 節参照)。また、 オーロラがよく見られる高緯度では、測位衛星からの電波が散乱されるシンチレーショ ンの発生頻度も高い(7.1 節参照)。

一般的にカナダや北欧など高緯度地域で観測されるオーロラだが、磁気嵐・サブスト ームの規模により低緯度の地域でも観測される。1989年に発生した巨大太陽フレア発生 時には、日本の稚内、北見、新潟、福島などでもオーロラが観測された。

(4) 放射線帯変動

高速太陽風、CMEの到来後に放射線帯電子が数桁増加する現象が発生する(2.5節参照)。この現象により静止軌道の衛星の帯放電リスクが高まる(5.1.2節参照)



図 1-12 電離圏じょう乱の社会への影響。

1.2.7. 電離圏じょう乱

1.2.5.1 節で述べたとおり、高度約 60 km 以上では、地球大気の一部は太陽からの紫 外線等によって電離し、プラスとマイナスの電荷を帯びた粒子であるプラズマの状態に なっている。この領域を電離圏と呼ぶ。プラズマ密度は高度 400 km 付近で最も高くな っている。電離圏における電子密度は昼間に増加し、夜になると減少するという日周期 の変化をしている。ところが、この周期的な変化のほかに、さまざまなじょう乱が見ら れ、社会に影響を与える(図 1-12)。

(1) 磁気嵐による電離圏じょう乱

磁気嵐が起きると、電子密度の日周期変化にじょう乱がみられる。これを電離圏嵐と 呼ぶ。電離圏嵐には電子密度が大きく増える電離圏正相嵐(ポジティブストーム)と電 子密度が大きく減る電離圏負相嵐(ネガティブストーム)とがある。電離圏正相嵐では、 磁気嵐によって加熱された極域大気から流れ出す中性大気の風の増大や磁気嵐に伴い赤 道域に侵入する東向き電場によって、電離圏のプラズマが高高度に押し上げられること でイオンや電子が消滅する効果が小さくなり結果的にプラズマ密度が増加すると考えら れている。電離圏負相嵐では、極域の大気加熱による大気組成の変化が全球的に広がり、 化学反応を通してプラズマ密度が減少すると考えられている。

磁気嵐時にオーロラ帯での大気加熱により励起された波長数 1000 km 規模の大規模 な波動が赤道方向に伝播する大規模伝播性電離圏じょう乱(Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbance: LSTID)も見られる。

また、磁気赤道を挟んだ緯度帯(磁気緯度±15度程度)における電離圏電子密度が高い領域は、赤道異常と呼ばれる(図 1-7)。磁気嵐があると、この赤道異常構造の極端な 発達や消滅、大きな南北非対称性が出ることがある。

電離圏嵐等による電子密度の増減の変化は、いずれも数時間から数日間の短期的な現 象だが、短波帯の電波伝播を途絶したり、衛星電波の遅延量などが大きく変動したりす る。電離圏負相嵐では、電子密度が減少することで、短波帯の電波を使った通信に影響 を与える。



(2) デリンジャー現象

太陽フレアによる X 線や紫外線の急増が原因で昼間側の電離圏 D 領域・F 領域の電子 密度が急増し、特に VLF-HF 帯の電波伝播に各種のじょう乱(電離圏突然じょう乱 Sudden Ionospheric Disturbance, SID)が発生する。そのうちの、短波帯が吸収される 現象を、短波の突然消失(Short Wave Fadeout)、もしくは、発見者の名前にちなんで 「デリンジャー現象」という。

短波は主に電離圏の F 領域で反射されて長距離伝播するが、電離圏の最下部にある D 領域は、周囲の中性大気との衝突のため電波を吸収する。吸収量は D 領域の電子密度が 高いほど大きく、低い周波数ほど影響される。D 領域の電子密度は太陽の紫外線や X 線 による電離反応で生成され、日没とともに殆ど消滅する。大きな太陽フレアが発生する と、太陽の X 線強度は著しく変動し、通常時の 100 倍から 1000 倍にも達する。この時、 D 領域では異常に電離が進み、短波電波の吸収が起こる。短波通信において、伝播経路 で受ける吸収の総量が発信強度よりも大きくなるとき、通信途絶(ブラックアウト)に つながる。 1.2.5.1 節で説明した電離圏を観測するイオノゾンデによって、デリンジャー現象が観 測される。図 1-13 左は、沖縄で観測された通常時のイオノグラムの一例で、電離圏電子 密度の高度分布を反映した電離圏エコーがみられる。図 1-13 右は、その 15 分後の M6.7 クラスの太陽フレア発生時のイオノグラムを示す。通常時には観測されていた電離圏エ コーが、デリンジャー現象の発生によって消滅していることがわかる。

デリンジャー現象は、汎地球的に発生する。静止軌道上にある GOES 衛星による太陽 X線観測をもとにした、2014年10月22日に発生した M クラス太陽フレアに伴うデリ ンジャー現象のグローバルマップを図 1-14 に示す。太陽活動が活発で太陽フレアが頻 繁に起こる極大期には、このデリンジャー現象が頻繁に発生し、継続時間は、数分から 数時間に亘るものまである。



図 1-14 デリンジャー現象のグローバルマップ [25]

(3) スポラティック E 層

高さ100km付近の電離圏 E 領域では、電子密度の高い層が突然生成される事がある。 この層をスポラディック E 層(Es 層)と呼ぶ。スポラディックというのは、突発的・散 発的なという意味である。日本付近では、夏の昼や夕方に多く発生する。スポラディッ ク E 層が非常に発達すると、通常は電離圏で反射されないテレビ放送や FM ラジオ放送 など超短波帯の電波が反射されて異常伝播し、遠くの放送が混信することがある。

スポラディック E 層が発達した時のイオノグラムを見ると、E 層エコーの最大周波数 である臨界周波数 (foEs) が通常に比べて大きく上昇していることが分かる (図 1-15)。



図 1-15 スポラディック E 層発生前後のイオノグラム [24]

(4) プラズマバブル

赤道域や低緯度の電離圏では、プラズマバブルと呼ばれる、局所的に電子密度が低い 泡のような現象が日没後にしばしば発生する。プラズマバブルは、磁力線に沿った構造 を持ち、高緯度および東向きに伝播する。太陽活動が活発な時や、磁気嵐が発生した時 には大きく成長し、日本上空まで及ぶこともある。プラズマバブルの中や周辺では、電 子密度の変化が大きいため、そこを通過する衛星電波が乱され、衛星通信障害や GPS 測 位精度低下の原因となる。さらにじょう乱が大きい時には、衛星電波を受信できなくな る場合(ロック損失)もある(7.1節参照)。

東南アジアから日本にかけての観測ネットワークを整備し、プラズマバブルの監視や 発生の予測、発生メカニズムの解明を目指した研究が国内外で進められている。



図 1-16 プラズマバブル [26]

(5) 電離圏シンチレーション

F 層の電子密度不規則性によっておこる電離圏の不規則構造により、衛星からの電波 が乱されて、強度および振幅が変動する現象をシンチレーションと呼ぶ [27]。シンチレ ーションは、主に超短波帯や極超短波帯の電波を使った衛星通信に影響を与えるが、強 い磁気嵐に伴う異常な電場変動によりマイクロ波帯にまで及ぶ強いシンチレーションが 起こることが報告されている。

また、電離圏の不規則構造によるシンチレーションのために、GPS 衛星からの電波が 受信できなくなって測位が行えないという報告もある。現在、米国などで GPS を使った 航空機の離着陸システムの導入が検討されているが、測位誤差をいかに小さくし信頼性 のあるシステムにするかということが大きな課題となっている。

(6) 中規模伝播性電離圈擾乱

中規模伝播性電離圏じょう乱(Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances, MSTID)とは、一般に極域から低緯度方向に伝播する電離圏・熱圏大気の波状じょう乱の一種であり、地磁気活動に関わらず観測される。夜間の MSTID は夏季と冬季によく見られ、波長数 100km の北西・南東方向の波面が南西方向に伝播する。日中の MSTID は冬季によく見られ、波長数 100km の帯状に長くなった波面が南・南西方向へ伝播する。振幅は背景に対して数%程度と小さいが、搬送波位相を用いる相対測位に影響を与えうる。

ここで、電離圏の指標について概説する。電離圏電子密度の高度積算値である全電子数(Total Electron Content: TEC)は、全球測位衛星システムGNSS等による2周波信号解析から導出される、重要な電離圏観測量である。TEC Unit (TECU、=10¹⁶ m⁻²)がTECの単位として使われる。1.2.5.1節で紹介したイオノゾンデ観測から、電離圏反射波の最低周波数fmin、最大周波数 foF2、E層エコーの最大周波数foEs、等が得られる。foF2は電離圏密度の最大値を反映する。スポラディックE層の規模の判定においてfoEsが参照される。シンチレーションと関連する電子密度じょう乱の指標として、ROTI (rate of TEC index)やS4がある。ROTIは、TECの時間微分であるROT (rate of TEC)の、5分間の標準偏差である。S4はシンチレーションの強さを表す指標で、一般に約0.7以上で強いシンチレーションとされる。S4はROTIから近似的に算出することができる。

1.3. 宇宙天気予報と予報に向けた取り組み

1.3.1. 国内の取り組み

太陽活動や地磁気の状態から、人工衛星や地上の通信・放送インフラなどへの影響を 予報(=「宇宙天気予報」)するための研究開発が、国内外の大学および研究機関で進め られている。電気通信省電気通信研究所(後の郵政省電波研究所、現 国立研究開発法人 情報通信研究機構:NICT)では、電波の伝わり方に影響する太陽面活動・地磁気変動・ 電離圏変動を監視し、通信の乱れが予測されるときに周知を行う電波警報業務を1949年 より開始した。1988年に開始された宇宙天気予報業務は、以来 30年以上にわたって毎 日継続されており、現在NICT宇宙天気予報センターとして電子メールおよびインター ネットで情報を発信している [28]。

宇宙天気予報のための太陽および地球周辺環境の観測は、大きく分けて、地上での観 測と宇宙での観測に分けられる。地上での観測では、光学・電波望遠鏡を用いた太陽表 面・コロナの観測、世界各地に設置された磁力計を用いた地磁気の観測や、イオノゾン デや HF レーダ等のレーダを利用した電離圏の観測などが行われている。一方、宇宙で の観測としては、複数の場所の観測が人工衛星によって行われている。主なものとして、 太陽地球間の L1 点に米国 NOAA が運用する DSCOVR 衛星、米国航空宇宙局(NASA) が運用する Advanced Composition Explorer (ACE)衛星、NASA と欧州宇宙機関(ESA) が運用する SOlar and Heliospheric Observatory (SOHO)衛星があり、静止軌道には NOAA の GOES 衛星、NASA の SDO (Solar Dynamics Observatory)衛星、そして地 球の公転軌道上の地球から東側に NASA と ESA の STEREO (Solar TErrestrial RElations Observatory)衛星がある。

地球の前方 150 万 km の L1 点では、DSCOVR、ACE、SOHO 衛星によって、地球に 到来する直前の高エネルギー粒子・太陽風の時間変動が「その場」で測定されている。 図 1-17 には、太陽から地球へ影響が伝播するまでの所要時間をまとめてある。X 線等 の電磁波は最も早く地球に到来する。電磁波以外の高エネルギー粒子、プラズマの流れ

(太陽風・CME)については電磁波と伝播所要時間が異なるため、その時間差を利用し、 電磁波から得られた情報に基づいて地球に到来する前に「予測」が可能になる。L1 点か ら地球の間はその距離が太陽一地球間の 100 分の 1 と相対的に短いため、L1 点での観 測は現況把握に利用されている。

GOES衛星はX線および高エネルギー粒子の強度のモニタ観測やコロナの撮像観測を 行なっている。同じく静止軌道にある SDO 衛星は、彩層〜コロナを極端紫外線で撮像観 測するとともに、光球および光球磁場を可視光で観測する望遠鏡を搭載していて、光球 からコロナまでの様子を観測してほぼリアルタイムで全世界に向けて公開している。



図 1-17 宇宙天気の影響が地球へ伝播するまでの所要時間 [29]

STEREO 衛星は、現在地球の公転軌道上で地球から東側に位置しているため、太陽と 地球を真横から観測している。極端紫外線でのコロナの撮像観測、およびコロナグラフ による CME の監視を行うとともに、太陽風のその場観測も行っている。コロナの観測 は、太陽の自転によって今後地球側に現れる活動領域の監視に利用されている。コロナ グラフは、CME が地球に向かっているかどうかの監視に利用されている。もし太陽風の 状態が変化していない状態で太陽が自転すると STEREO 観測と同じパターンの太陽風 が数日後に地球方向に到来する。実際には STEREO と地球が位置する緯度が異なり、 太陽風の構造が時間とともに変化するため、全く同じではなく類似した太陽風が地球に 到来する。このことを利用して数日先の地球位置の太陽風の予測に役立てられている。

地上では、電波を利用した太陽および電離圏の監視が茨城県のNICT 平磯太陽観測施 設で古くから行われきた。図 1-18 が平磯太陽観測施設で 1988 年から 2016 年まで太陽 の監視を行っていた太陽電波望遠鏡で、1.2.3 節に示した太陽電波バーストの監視を行っ てきた。この望遠鏡の老朽化のため、2014 年に鹿児島県のNICT 山川電波観測施設に新 しい太陽電波望遠鏡を建設した(図 1-19)。また、1994 年から 2008 年頃まで平磯太陽観 測施設において、高精細 Hα太陽望遠鏡による太陽光学観測も実施されていた。

CME については、SOHO 衛星に搭載のコロナグラフ LASCO によって観測されており、STEREO のコロナグラフと合わせることで、CME の伝播の向きや速度から、地球への到達の有無やタイミングを推定できる。

NICT 小金井本部では、国際協力の一環として、DSCOVR (ACE)および STEREO から観測直後に送られてくる太陽風のリアルタイムデータを受信している(図 1-20)。また、 気象衛星ひまわり 8,9 号に搭載された高エネルギー電子・陽子計測装置 SEDA のデータ を収集し、日本上空の静止軌道における高エネルギー粒子環境をモニタしている。

図 1-17 に示した通り、太陽風・CME が太陽から放出されてから地球に到達するまで には 1~3 日を要する。太陽コロナの現況監視とその観測を基に宇宙環境を予測するため には、モデル・シミュレーションが重要な役割を担っている。名古屋大学および NICT では SUSANOO というシミュレーションが開発されており [30]、CME の到来予測だ けではなく、CME 内部の磁場の予測を目指している。太陽フレアが発生した後に、いつ ガスの塊が飛来し、地球磁気圏や電離圏・大気圏へ影響が及ぶかの予測については、今 後の予測技術の向上が望まれる。また人工知能を利用して太陽フレアの発生を事前に予 測するモデルの開発が進められている [31]。放射線帯電子変動に関しては、太陽風を入 力としたカルマンフィルタと多変量自己回帰モデルを組み合わせた予測モデルを導入し ている [32]。これらの予測モデル・技術について、検証を進めながら今後の実用化が期 待される。



図 1-18 NICT 平磯太陽観測施設にあった太陽電波望遠鏡 [33]



図 1-19 NICT 山川電波観測施設太陽電波望遠鏡。左:レドーム外観。右:レドーム内 電波望遠鏡。 [33]



図 1-20 NICT 小金井本部にある 11mパラボラアンテナおよびイオノゾンデアンテナ [28]。



図 1-21 左: 気象庁地磁気観測所の位置 [34]。右: NICT の電離圏観測施設 [35]

地球の電離圏・磁気圏の状態の監視についても地上観測によって進められている。地 磁気の時間変動について気象庁では 100 年以上の長期にわたって観測が継続されている。 1912 年に茨城県の気象庁地磁気観測所柿岡での観測が開始され、その後 1946 年に北海 道女満別、1949 年鹿児島県鹿屋、において地磁気観測が開始されている(図 1-21 左)。 また、NICT でも、沖縄県与那において地磁気観測が行われている。

電離圏については、NICT のイオノゾンデによる観測が、国内では現在4箇所(1993 年までは5箇所)および南極昭和基地において行われている(図 1-21 右)。イオノゾン デについては、1.2.5.1節で示した通り、観測所の上空の電離圏の高度分布を詳しく知る ことができる一方、その観測所上空の鉛直方向の情報のみに限られる。これを補完する 観測として、国土地理院のGPS受信機網(GEONET) [36]のデータを利用し、京都大 学および名古屋大学の協力のもとにNICT での準リアルタイム計算によって、電離圏の 全電子数(TEC)マップが得られている(図 1-22)。TEC に加えて TEC 変動成分、電 離圏電子密度じょう乱指数(ROTI)のパラメータの分布図も表示している。

1.2.5.1 節で述べた通り、電離圏の状態は、局所性・日変動・季節変動が大きいため、 一律に基準を決めにくいという特徴がある。その乱れ具合を、電離圏パラメータの緯度 帯・地方時・季節毎の変動分布の分散を参照して評価する電離圏嵐指標「I-scale (アイ・ スケール)」が開発された [33] [37]。この指標を用いて、電離圏嵐を定量的に判定するこ とができている(図 1-23)。

磁気圏のグローバルシミュレーション REPPU (Reproduce Plasma Universe) [38] を 用いた磁気圏変動のリアルタイム予測や、対流圏から電離圏までの地球全大気領域を同 ーのシミュレーションで扱えるモデル GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)を用いた電離圏じょう乱予報も開発が進められている [39]。



図 1-22 GEONET GPS による全電子数(TEC)分布図 [40] 左:電離圏静穏時。右:電 離圏嵐発生時。



図 1-23 TEC の時系列データと電離圏嵐指標「I-scale (アイ・スケール)」 (2017 年9月5~10日) [33]

日本の宇宙天気予報体制は、2017 年 9 月に発生した大規模フレア [41]の後に大きく 変化した。9月6日、日本時間 20:53 に発生した X9.3 フレアは、同規模の X クラスの フレアとしては 11 年ぶりに発生したものであった。1975 年以降 27 番目の大きさとさ ほど大規模なものではなかったが、第 24 太陽活動サイクルが全体的に低活動であった こともあり、このサイクル期間としては最大のものであった。

この現象は日本の多くのメディアに取り上げられ、宇宙天気現象が多くの国民の目に 触れることとなった。政府でもこの件が重く取り上げられ、その後国内観測体制の強化 が始められた。2019年3月に宇宙天気予報センター副局がNICT未来ICT研究所(神 戸市)に開設された。さらに電波法の改正により、電波利用料の使途の一つとして宇宙 天気予報が追加され、2019年12月には宇宙環境の24時間監視体制が開始されるなど、 予報体制の強化が進められた。

1.3.2. 海外の動向

歴史に記録されている最大の宇宙天気現象であるキャリントン・イベント(2章参照) と同じクラスのイベントが発生した場合の経済損失についてスイスの保険会社"SWISS-Re"が試算を行っている。その結果によると、欧米など高緯度地域を中心に、3000億ド ルほどの被害が想定され、東日本大震災の経済損失(1000 - 2500億ドル)を上回る[42]。

これらの状況より、米国は宇宙天気を地震や津波などの災害と並べ、米国戦略的国家 危機評価 (US Strategic National Risk Assessment)の一つとして位置付けている。2015 年には米国内の 20 を超える機関、50 人を超える専門家によって作成された National Space Weather Strategy および Space Weather Action Plan が発表された [43](2019 に改訂 [44])。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、電離圏じょう乱、太陽電波バースト、大気膨張についてのベンチマー クテストを示している [45]。

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 [46]。その後 Cabinet office による National Risk Register (2015 年 [47]), Space Weather Preparedness Strategy (2015 年 [48])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。
1.3.3. 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 [49])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。

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[50]、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-SWeISS (Inter-Programme Team on Space Weather Information, Systems and Services)が設立され[51]、現在に至る。

また、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization: ICAO [52])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、極域航路が増大する中で宇宙天気現象による短波通信、衛星測位および被 ばくのリスクを回避することを目的としている。2011 年 11 月に航空機運航に必要とさ れる宇宙天気情報に関して国際航空運送協会 (International Air Transportation Association: IATA [53])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 [54]。

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 [55])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。

2. 宇宙天気現象の規模の推定

歴史上記録が残っている中で最も大きな規模な影響を引き起こした現象は 1859 年の 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、太陽フレア発生後から 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 [56] (Dst 指数の推定値についての詳細は 1.2.5.2 節および 2.6 節を参照)。

観測データの充実が始まった 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=-589nT)が発生し た [57]。カナダでは地磁気誘導電流によりハイドロ・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 月のバスティーユイベント(X5 クラスの太陽フレア。CME 発生。Dst 指数= -301nT)、2003 年 10-11 月のハロウィンイベントに続く一連の磁気嵐(10 月 28 日 X17 フレア+Dst=-353。10 月 29 日 X10 フレア+Dst=-383。11 月 4 日 X28 クラスフレ ア+磁気嵐なし。11 月 18 日 M クラフフレア+Dst=-472)。多数の衛星障害事例(NASA の調査によると科学衛星・宇宙機の約 59%が影響を受け、約 24%のミッションが機器の 遮断などによる安全策を取った [58]) などの影響が報告されている。

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 [59]。

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 ¹⁴C の測定法がある。宇宙線によって生成される ¹⁴C は、¹⁴CO₂ となり屋久杉に取 り込まれる。屋久杉の年輪ごとに含まれる ¹⁴C 濃度を測定することで、年ごとの宇宙線 の強度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 ¹⁴C 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、太陽高エネルギー粒子 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 [60] [61]。

以上のように、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。本書では、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検討することを目的として おり、そのためには発生しうるじょう乱規模の想定が必要である。本章では、太陽フレ ア、CME、SEP、太陽電波バースト、磁気圏じょう乱、電離圏じょう乱、それぞれにつ いて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ことに加え、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。本章では、発生頻度と現象規模の定義を現象ごとに独立 に見積もった結果を示す。さらには、今後発生する現象の最大規模について、可能な限 り見積もりも加えている。各項でまとめた現象規模のサマリを表 2-1~表 2-10に示す。

規模を示すパラメー	日常~複	1回 /1	1回 /10	1回	1回/1000年
タ	数回/年	年	年	/100 年	
GOES peak flux	$M1 \sim X1$	X7.6	X12	X44	X101?
(0.1- 0.8nm) ¹⁾					
エネルギー[erg] ²⁾	$2.7\! imes\!10^{28}$	1.0×10^{31}	$1.0 \times$	$1.0 \times$	$1.0 imes 10^{34}$
	~		10^{32}	10^{33}	
	$2.0\! imes\!10^{30}$				

表 2-1 太陽フレア現象規模の定義

1) 図 2-2 による。表記以上の規模のフレア発生頻度。1 回/100 年以上の数値は外挿のため注意を要する。

2) 図 2-3 より N[year⁻¹] = 10³¹ x E[erg]⁻¹ とした。

表 2-2 CME 現象規模の定義

規模を示すパラメー	日常~複数	1回/1	1回/10	1回/100	1回/1000
R	回/年	年	年	年	年
速度 [km/s] 1)	250 - 450	2000	3000	~4000	~ 5500
運動エネルギー[erg] 2)				4.4×10^{33}	$9.8 imes 10^{33}$

1) [62]による。表記以上の速度の CME が発生する頻度 2) [62]による。

表 2-3 プロトン現象規模の定義

規模を示すパラメータ	日常~複	1回/1年	1 回/10	1回/100	1回/1000
	数回/年		年	年	年
流量(>10MeV)[10 ¹⁰ p		$\sim 0.1^{*1}$	$\sim 1.0^{\% 1}$	~2.4-5.1	~3.8-14
cm ⁻²]					

※1 図 2-11 から読み取った値を記入

表 2-4 GLE 現象規模の定義

規模を示すパラメータ	日常~複	1回/1年	1回/10	1回/100	1回/1000
	数回/年		年	年	年
EII [% · h]		-	~190	~6,600	~223,000

規模を示すパラメータ	日常~複数	1回/	1回	1回/100年	1回
	回/年	1年	/10 年		/1000年
超短波(VHF)(30-300MHz)				$< 2.8 \times 10^{9}$ ²⁾	
極超短波(UHF)				$< 1.2 \times 10^{7}$ 2)	
(300-3,000MHz)					
GPS (1,176-1,602MHz)				$< 1.2 \times 10^{7}$ 2)	
F10.7 (2,800MHz)				$< 1.3 \times 10^{7 2}$	
マイクロ波				$< 3.7 \times 10^{7}$ 2)	
(4,000-20,000MHz)					
	-> F .				

表 2-5 太陽電波バーストの現象規模の定義 [sfu] 1)

1) $1sfu=10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$

2) [45]による。

表 2-6 放射線帯現象規模の定義

規模を示すパラメータ	日常~複数	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回
	回/年				/1000 年
放射線電子フルエンス	~0.1	~0.6	~3.0	~10 1)	~26 1)
$[10^{10} { m cm}^{-2} { m sr}^{-1}]$					

1) 現在可能な極値統計解析により推定したものであり、注意を要する。

表 2-7 磁気嵐規模の定義

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
Dst [nT]	$\sim -220^{1)}$	$\sim -450\pm$	${\sim}{-}650{\pm}110$	~-930
		30		$[-320, -1520]^{2}$

1) 図 2-22 中の実測値(黒丸)から目視で読み取った値

2) []内は図 2-22 中の 95%信頼区間(破線)から目視で読み取った値

表 2-8 サブストーム現象規模の定義

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
AL 1) [nT]		~-3700	~-4100	~-4100	~-4200
SML [nT]	-460	-3000	-4000	-5000	-5900

1) [63]による。

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	東京[TECU] 1)	\geq 90 *1	≥ 130 ^{**} 2	$\geq 190 \ ^{st_2}$	
(TEC)	鹿児島[TECU] 2)	≧110	≥ 160	≥ 230	
	北海道[TECU] 2)	≥ 70	≥ 105	≥ 150	
デリンジ	吸収量(長距離)[dB] 3)	71	83	93	~100
ャー現象	継続時間 4) [時間]	0.63-1.6	1.8-3.6	4.0-6.8	7.4-11.9
スポラデ	1,000km 伝播する周波数	100MHz	110MHz	>130MHz ⁵⁾	
イック E 屋	2,000km 伝播する周波数	130MHz	>180MHz ⁵⁾	>180MHz ⁵⁾	
	foEs >18MHz での継続時間	約 1-2 時間	約3時間		
	foEs >13.3MHz での継続時間	約3時間	約5時間		
プラズマ	継続時間	4-5時間	6 時間		
バブル					

表 2-9 電離圏じょう乱規模の定義

1) ※1 は 22 年間の TEC データに基づく。※2 は 62 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 6.6 MHzの場合)

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

 5) 30MHz 以下のイオノゾンデ観測に基づくため、大圏距離 1,000km を伝播する 130MHz 以上の伝 播、および大圏距離 2,000km を伝播する 180MHz 以上の伝播については推定不可能。

相構たニナパランク	日常~	1回/1年	1回/10年	1回/100	1回/1000
尻候を小り ハノメータ	複数回/年	1 凹/1 平	1回/10平	年	年
10 MeV 以上のプロトン flux [pfu] ¹⁾	10^{1-2}	103	104	$4x10^{5}$	10^{6}
Kp 指数 ²⁾	4 (7)	7 (8)	8 (9)	9	9
磁気緯度(日中)@6.6MHz 10dB ³⁾	65° (60)	57° (55)	53° (52)	51°	50°
磁気緯度(夜間)@6.6MHz 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

表 2-10 極冠吸収の現象規模の定義

1) 見積り設定。 [64] [65]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。 [65] [66]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。 [66]による。

2.1. 太陽フレア

2.1.1. 発生頻度と現象規模の関係

太陽フレアについては、現象規模が大きくなるにつれて発生頻度が低くなり、これま でに観測されたフレア規模の範囲ではべき乗分布を持つことが知られている(e.g. [67])。 太陽フレアの発生数、その発生頻度の分布は太陽黒点数(太陽活動度)に応じて変動 する(図 2-1)。1985 年から 2016 年の間の、各年の、黒点相対数(緑)、X クラスフレア の発生数(赤)、M クラスフレアの発生数を 7 で割ったもの(青)、C クラスフレアの発生数 を 25 で割ったもの(黄)を、図 2-1 に示す。上記 32 年間に発生したフレアの数は、X10 以上のフレアが 16 回、X クラスフレア(X10 未満)が 313 回、M クラスフレアが 4176 回、 C クラスフレアが 33260 回であった。発生頻度としては、X10 以上のフレアが 0.5 回/ 年、X クラスフレア(X10 未満)が 9.8 回/年、M クラスフレアが 130.5 回/年、C クラスフ レアが 1039.4 回/年となる。



図 2-1 フレア発生数と黒点相対数の年変化。NOAA 公開のデータ [68]から作成(京都大学 石井貴子)。



図 2-2 GOES ピーク X 線強度に対するフレア累積発生数 [62]

図 2-2 に GOES ピーク X 線強度(flux)に対するフレア累積発生数を示す。図 2-2 から、1 年に1回の現象は X7.6 クラス以上、10 年に1回の現象は X12 クラス以上、100 年に1回の現象は X101 以上のフレアであることがわかる。これまで観測された最大規模のフレアのピーク X 線強度は、2003 年 11 月 4 日の X28 クラスフレアであり、それよりも大きな規模の分布については外挿であるため、注意が必要である。

一方で、太陽ではない太陽型(G型)の恒星では、太陽で観測される最大級のフレア よりも2桁以上大きい規模のフレア「スーパーフレア」が発生していることが観測され ている。ケプラー宇宙望遠鏡による銀河系内の太陽型星の測光観測ではスーパーフレア が多数検出されていて、それらの発生数から、エネルギーが10³⁴ erg 以上のフレアの発 生は、800年~5000年に1度という頻度に換算されることが報告された[69][70]。



図 2-3 スーパーフレアの発生頻度 (Notsu et al. 2019 [71]を改変)

図 2·3 にはケプラー望遠鏡で観測されたスーパーフレアの発生頻度とエネルギーの関係を太陽フレアと合わせて示してある。自転周期も太陽によく似た星でも、これまで太陽で観測された最大のフレアの 100 倍の規模をもつスーパーフレアが 2000~3000 年に 1回の頻度で発生することがわかる(図 2·3 中、赤い四角)。

また、それらの太陽型星の分光観測により、恒星表面には巨大黒点が形成されていて、 そのエネルギー解放によりスーパーフレアが発生する可能性が明らかになった。しかし、 現在の太陽においてそのような巨大黒点が本当に形成されるかどうかについては、専門 家の中でも意見が分かれており、スーパーフレアが太陽で発生する可能性についても結 論が出ていない。

太陽型星でのスーパーフレアの分布は、フレアの規模が 10 倍大きくなると、頻度が 10 分の 1 になるというべき分布によく従う。GOES X 線強度のピーク値とフレアのエ ネルギーの関係については、M2~X2 の範囲で比例関係が成り立つが、より大きな規模 のフレアでは、GOES クラスが 10 倍大きくなると、頻度は 100 分の 1 に下がる [72]。 これは、X10 を超えるような規模の大きなフレアでは継続時間が長くなり、時間積分し たフレアの総エネルギーに対して GOES X 線強度のピーク値が比例関係よりも小さく なることによると考えられる。

以上より導かれる太陽フレア現象規模の定義を表 2-1 に示す。

規模を示すパラメータ	日常~複数	1回	1回	1回	1回
	回/年	/1 年	/10 年	/100 年	/1000 年
GOES peak flux (0.1-	$M1 \sim X1$	X7.6	X12	X44	X101?
0.8nm) ¹⁾					
エネルギー[erg] ²⁾	$2.7\!\times\!10^{28}\sim$	1.0~ imes	1.0~ imes	1.0~ imes	1.0 $ imes$
	$2.0 imes10^{30}$	10^{31}	10^{32}	10^{33}	10^{34}

表 2-1 太陽フレア現象規模の定義 (再掲)

図 2-2 による。表記以上の規模のフレア発生頻度。1 回/100 年以上の数値は外挿のため注意を要する。

2) 図 2-3 より N[year⁻¹] = 10³¹ x E[erg]⁻¹ とした。

2.1.2. 今後発生しうる最大規模の現象の見積もり

太陽フレアのエネルギー規模を見積もるための一つの手段として、活動領域に蓄えら れた磁気エネルギーからの見積もりがある。これは、太陽フレア・CME・SEP はともに 活動領域に蓄えられた磁気エネルギーを源としていて、全磁気エネルギーの一部分が太 陽フレア・CME・SEP として解放されるためである。

例えば SDO 衛星が打ち上げられた 2010 年以降の SDO 衛星の観測から、太陽活動領 域の磁束と自由エネルギー量、及び自由エネルギー量とフレアレベル(GOES フラック ス)の関係から、第 24 太陽周期で発生した最大活動領域が十分に自由エネルギーを蓄積 し、それを最大効率でフレアとして解放した場合のフレア規模を推定し、X75 フレアが 発生する可能性があることが指摘されている [73]。

第 24 太陽周期の最大の活動領域 NOAA AR12192 の面積は 2,740 MSH (1MSH=太 陽表面積の 100 万分の 1=6.087x10⁶ km²=6.087x10¹⁶ cm²) である。一方で、これまで の記録された中で最大面積の活動領域は、6,132 MSH の RGO AR 14886 (1947/4/8) で ある。この領域で同様に蓄積された時期エネルギーが最大効率で太陽フレアとして解放 されたと仮定すると、蓄積される自由エネルギーは黒点面積の 3/2 乗に比例するため、 単純計算で X75×(6132 / 2740)^{3/2} ~X250 となる。このことから少なくとも X100 を超 えるフレアはこれまで観測されている大型黒点で発生可能であると推定できる。

これらのことから、表 2-1 で推定した 1 回/1000 年規模の現象は、十分に発生しうる 規模であると言える。

2.2. CME

2.2.1. CME の特徴量と他の現象との関係

CME は 1.2.2 節でも説明したとおり、太陽フレアと同様に太陽コロナの磁場に蓄えら れた磁気のエネルギーが解放される現象である。太陽から外に向かって膨張しながら伝 播していく泡状のコロナガスの塊がコロナグラフで観測される。CME の中には、ゆっく りと上昇し徐々に加速されていくものや、短時間で加速される高速なものがある。CME の持つエネルギーの中で最も支配的なものは運動エネルギーであるため、大規模な CME =速い CME として考えることができる。

黒点上空などのコロナに蓄積された磁気エネルギーが大きいほど高速で猛烈な CME が発生する。そのため、CME の発生率はフレアと同様に太陽黒点数の推移とともに増減 する(図 2-4)。その一方で、個々のイベントごとにフレアの規模と CME の規模の関係 はばらつきがあるが、平均的には大規模なフレアに大規模な CME が伴うことが知られ ている。また多くの場合 CME は太陽フレアに伴って発生するが、フレアを伴わない CME も一定の割合で存在し、その関係性については現在も研究対象である。

一般に CME は太陽風の中を伝播する間に加速・減速を受ける。CME が背景の太陽風 よりも速い場合、太陽風からの抵抗を受けて減速を受け、また CME が太陽風よりも低 速の場合は後ろからの太陽風に押されることで加速を受ける。コロナグラフの視野の中

(LASCO C3 の場合は太陽から2千万 km)で測定可能な太陽近傍での「放出速度」に 対して、放出されてから地球に到達するまでに要した伝播時間を比較すると(図 2-5)、放 出速度が速ければ伝播時間が短くなる傾向は見られるものの、そのばらつき範囲は大き く、惑星間空間の伝播中に受ける加速・減速の影響が大きい。そのため太陽近傍での観 測のみからの CME 到来時刻の予測が難しいことを示している。



図 2-4 1996~2008年の太陽黒点数(影)とCME発生率の推移(実線) [74]



図 2-5 CME の放出速度と地球への到達時間の分布(米国カトリック大学八代誠司氏)

地球への宇宙天気影響の評価においては、CME の一部が地球に到来するかどうかが 重要な点になる。一般に CME は太陽から放出後は膨張しながら動径方向に伝播するた め、CME 発生領域から一定の範囲の立体角方向に影響を及ぼす。そのため CME 発生領 域が太陽面の中央に近いほど、地球に到来する確率は高くなる。実際に、図 2-6(左) は、1996 年から 2016 年にかけて、大規模な磁気嵐(Dst <= -100 nT)を引き起こし た CME の太陽発生場所を示す。最も大規模な磁気嵐は太陽面中央に近い領域から生じ た CME に関連しており、Dst $\leq -300 \text{ nT}$ のイベントはすべて緯度 20 度以内を発生源と している。逆に太陽面中心の CME が全て宇宙天気じょう乱を引き起こすとは限らない。 CME が到来した際に磁気嵐を引き起こすかどうかは、地球を通過する CME の磁場の向 きが南向きの成分を持つかどうかに依存する。高速な CME にともなって強い南向き磁 場が長時間継続するほど、磁気嵐の規模が大きくなる。

CME が十分速い速度で伝播をすると CME 前面に衝撃波を形成する。衝撃波でコロナ ガスの一部が加速されることで太陽高エネルギー粒子(SEP)が生じると考えられてい る。そのため、CME が高速になるほど前面の衝撃波が強くなり、その結果加速効率が上 昇することで、よりエネルギーの高い粒子がより多く発生すると考えられている。実際 に、Gopalswamy, 2018 [62]によれば、LASCO で観測された CME の平均速度は 450km/s なのに対し、SEP が観測された CME だけの平均速度は 1557km/s となり、CME の速 度が大きいことが SEP 生成にとって重要な要素と示唆される。

衝撃波で加速された粒子はその後衝撃波から外に向かって惑星間空間を伝播する。惑 星間空間には太陽からつながる磁場が存在する。惑星間空間磁場は太陽風によって太陽 から引っ張り出されるが、太陽はその間も自転するため、太陽から外に向かって渦を巻 く磁力線構造を持つ。この磁力線構造をパーカースパイラルという。北側を上にすると、 地球から見て太陽は左から右に向かって自転をする。よって、地球を通る惑星間空間磁 場は太陽の右側(西側)の領域につながる磁力線構造を持つ。 図 2-6 (右) は 1996 年から 2016 年にかけて、巨大な SEP イベント (>10 MeV 以上 での強度>10 pfu) を引き起こした CME の太陽発生場所を示す。この分布をみると、地 球の周辺を通る惑星間空間磁場につながる磁力線の根元がある太陽の西側に多く分布し ていることがわかる。図 2-7 はさらに 1996 年から 2015 年の期間で対応関係を同定で きた 240 イベントのフレアと CME と SEP の規模の関係を示している。ばらつきが大 きいが、CME の速度が大きいほど平均的にフレアの規模が大きくなり、SEP の流量が 大きくなる傾向が見られる。

上記の性質については、単発の CME についての性質である。巨大で活発な活動領域 (黒点群)は、大規模な太陽フレア・CME が複数回、間欠的に発生することが多い。そ れぞれのフレアに CME が伴うとき、CME が連続して惑星間空間を伝播する。あとの時 刻に発生した CME が、先行する CME よりも高速な場合、これらは伝播中に衝突し相 互作用をすることがわかっている。その他、SEP がさらに効率的に加速される場合や、 先行 CME が衝撃波で圧縮されることで、より強い南向き磁場をもって到来する場合が ある。このように CME 同士の相互作用は、宇宙天気じょう乱規模を大きくする傾向を 持つため、これらの過程を含めた研究が盛んに行われており、CME 相互作用を含めた予 報の確立が将来的に必要になると期待される。



図 2-6 1996~2016年の期間、強力な磁気嵐 (Dst <= −100 nT) を引き起こした CMEs の太陽発生場所(左)と巨大な SEP イベント (>10 MeV 以上での強度>10 pfu) を引き起こした CMEs の太陽発生場所(右) [62]



図 2-7 CME 速度、フレアの規模、SEP(>10MeV)流量の関係。横軸は CME 速度を 1000km/s で割って対数にしたもの、縦軸が対応するフレアの X 線ピーク強度とピーク に至る時間をかけたフレアの指数。シンボルが SEP(>10MeV)流量を表す [75]。

2.2.2. 現象規模の定義

前述した通り、速度が大きい CME ほど大規模な CME であると言えるため、図 2-8 に、1996~2016 年に発生した CME の速度別の累積発生数分布を示す [62]。図中の赤 色は冪関数によるフィッティングを表し、青色は Weibull 関数によるフィッティングを 表している。Gopalswamy, 2018 [62]によると、この期間の中で最も大きかった CME の 速度は、2004 年 11 月 10 日 02:26UT に発生した CME の 3387km/s であった。また彼 らは CME の運動エネルギーに対しても同様の解析を行い、最大の運動エネルギーは、 2005 年 9 月 9 日 19:48UT に発生多 CME の 4.2×10³³ erg であった。



図 2-8 1996~2016 年の期間における CME 放出速度の累積分布 [62]

図 2-8 より導かれる CME 現象規模の定義を表 2-2 に示す。100 年に1回から現象規 模についは、図 2-8 に示した2通りの外挿結果の平均値とした。運動エネルギーについ ても同様の解析の結果、1000 年に一度の値 9.8×10³³ erg と推定される。これらの値は 前述した観測された最大規模の値 4.2×10³³ erg の 2-3 倍程度に過ぎない。最大規模の現 象の議論はまだ検討が必要であり、今後の課題とする。

規模を示すパラメー	日常~複数	1回/1	1回/10	1回/100	1回/1000
タ	回/年	年	年	年	年
速度 [km/s] 1)	250-450	2000	3000	~4000	~ 5500
運動エネルギー[erg] ²⁾				4.4×10^{33}	$9.8 imes 10^{33}$

表 2-2 CME 現象規模の定義 (再掲)

1) [62]による。表記以上の速度の CME が発生する頻度 2) [62]による。

2.3. 太陽高エネルギー粒子

2.3.1. 太陽高エネルギー粒子(SEP) 現象について

太陽高エネルギー粒子(SEP)現象は、太陽フレアや CME に伴って、MeV~GeV の エネルギー粒子の強度が急激に増加する現象である。SEP 現象の規模は、一般的に GOES 衛星で観測された 10MeV 以上の最大粒子強度(flux、フラックス)、もしくは、 現象期間全体の粒子強度を足し合わせた(時間積分した)流量(fluence、フルエンス)¹の 大小によって決められる。

一方、航空機被ばくなどを引き起こす GLE 現象は、地球大気中に入り込んできた SEP が大気中の原子、分子と衝突して核反応を起こして作られる中性子が地上に降り注ぎ、 その結果、地上の中性子モニタで観測される中性子量が急激に増加する現象である。一 般に、規模が大きい SEP 現象は全て GLE 現象になると考えられがちであるが、実は必 ずしもそのようにはなっていない。図 2-9 にその例を示す。



図 2-9 ごく小さい GLE を伴う SEP 現象(2005/1/17: GLE68)、大規模 GLE を伴 う SEP 現象(2005/1/20: GLE69)、GLE を伴わない SEP 現象(2002/4/21)の例。

[76]

¹ 厳密には、粒子強度は単位立体角当たりの量であるので、流量は、強度を立体角で積分したフラックスを時間積分したものとして定義される。



図 2-10 2005/1/17 と 2005/1/20 の SEP の陽子流量のエネルギースペクトル([77]より抜粋)

2005/1/17 の SEP 現象は GLE 現象と認められてはいるが、地上の中性子モニタでの 中性子量の増加は極めてわずかであった。一方で、2005/1/17 の SEP 現象と同一の太陽 活動領域で発生した 2005/1/20 の SEP 現象は、10MeV 以上の最大粒子強度で比べた場 合は 2005/1/17 の SEP 現象よりも小さいにもかかわらず、第 23 太陽活動周期で最大規 模の GLE 現象を引き起こした。さらに、2002/4/21 の SEP 現象に至っては、10MeV 以 上の最大 SEP 強度は 2005/1/20 の SEP 現象よりも大きいにもかかわらず、GLE 現象は 発生していない。この違いは一体どこから来るのだろうか?

図 2-10 に 2005/1/17 と 2005/1/20 の SEP 現象のエネルギースペクトルを示す。エネ ルギースペクトルとは、横軸にエネルギー、縦軸に各エネルギーを持つ粒子の流量(も しくは強度)を取ってプロットしたものである。この 2 つの図を比べてみると、2 つの SEP 現象の違いが良くわかる。10MeV 以上のエネルギー帯に注目してみると、そのエ ネルギースペクトルの傾きが 2005/1/20 の SEP 現象の方が、2005/1/17 の SEP 現象よ りも緩やかになっている。これは、10MeV 付近の粒子流量に対する 500MeV 付近の粒 子流量の割合が、2005/1/20 の SEP 現象の方が 2005/1/17 の SEP 現象よりも大きいこ とを意味している。実際、10MeV 付近の粒子流量は、2 つの現象ともおおよそ 10 の 7 乗程度とほぼ同じ流量になっている一方で、500MeV 付近の粒子流量は、2005/1/20 の SEP 現象の方が 2005/1/17 の SEP 現象に比べて 200 倍以上大きくなっている。つまり、 10MeV 以上の最大粒子強度で見た場合には大規模であっても、粒子のエネルギースペク トルの傾きが急である場合には、GLE 現象にはなりにくいということがわかる。このこ とから、SEP 現象の規模と GLE 現象の規模は必ずしも一致しない。以上のことを踏ま えると、SEP 現象の規模と GLE 現象の規模されぞれを取り扱うのが妥当であると考え られる。

2.3.2. 発生頻度と現象規模の関係

本章では、宇宙空間での人工衛星などのシングルイベントや太陽電池パネルの劣化、 地球の極域での極冠吸収の原因となり得る 10MeV 程度以上の SEP 現象と、航空機被ば くの原因となり得る GLE 現象の発生頻度と現象規模の関係についてそれぞれ述べる。



図 2-11 10MeV 以上のエネルギーを持つ SEP 粒子の流量の累積頻度分布 [62]。

まず、10MeV 程度以上の SEP 現象の発生頻度について考察する。SEP 現象の規模 は、前述の様に、一般的には現象期間中に GOES 衛星で観測された 10MeV 以上の最大 粒子強度、もしくは、現象発生時間全体の粒子強度を時間積分した、流量の大小によっ てきめられるが、ここでは、流量によって定義することとする。図 2-11 は 1987 年 11 月 から 2016 年 1 月までに観測された 216 個の SEP 現象を用いて作成した、10MeV 以上 のエネルギーを持つ SEP 粒子の流量の累積頻度分布を表したものである。右側の軸には 累積頻度分布を現象発生頻度に変換した値を書いてある。図中の黒丸が観測データを示 しており、その観測データを複数の関数(図中の赤い直線や青い点線)でフィッティン グしている。これらの関数を用いて、今までに観測されていない様な大規模現象にまで 外挿することで、極端現象の発生頻度を推定することが出来る。この方法によって見積 もられた、100 年に 1 回及び 1,000 年に 1 回の発生頻度の SEP 現象の規模は、それぞ れ、おおよそ 2.4~5.1×10¹⁰ (個/cm²)及び 3.8~14×10¹⁰ (個/cm²)となる [62]。

次に、GLE 現象の発生頻度について考察する。GLE の規模は一般的には中性子モニ タの観測データから決められる。GLE の規模は、現象が発生していない時間帯での中性 子モニタの観測量(バックグラウンド)からの、現象発生時の中性子モニタの観測量の 増加率(単位は%)で定義される。増加率を用いるのは、バックグラウンドが長期的には 大きく変動してしまうため、観測量の絶対値を用いると、長期間のデータを直接比較す るのが難しくなってしまうことが理由の一つである。通常、GLEの規模には増加率の最 大値を用いることが多いが、ここでは、引用する論文 Asvestari et al. 2017 [78]の定義 にしたがって、SEP 現象の流量に相当する、現象発生時間全体の増加率を時間積分した 値 event-integrated intensity (EII) を用いることにする。

表 2-11 EII > 3(%・h)のGLE 現象の一覧。3列目のI(%・h)がGLEの規模 EIIを 表している[78]。

GLE	Date	I (%*h)	F_{30}/F_{200}	Ν
5	23-Feb-1956	5202 ± 104	11.0 ± 2.1	2
8	04-May-1960	58 ± 14	8.6 ± 1.9	9
10	12-Nov-1960	677 ± 25	44.7 ± 8.4	14
11	15-Nov-1960	552 ± 106	51.0 ± 10.0	15
13	18-Jul-1961	51 ± 5	42.9 ± 12.5	13
16	28-Jan-1967	110 ± 3	18.1 ± 5.5	19
19	18-Nov-1968	6 ± 1	79.3 ± 22.3	15
21	30-Mar-1969	81 ± 7	18.6 ± 6.2	18
22	24-Jan-1971	25 ± 2	91.9 ± 23.1	20
23	01-Sep-1971	88 ± 6	17.8 ± 4.7	18
24	04-Aug-1972	35 ± 2	488.1 ± 118.2	16
25	07-Aug-1972	20 ± 2	87.8 ± 24.6	17
26	29-Apr-1973	6 ± 1	30.9 ± 10.2	12
27	30-Apr-1976	6 ± 1	36.0 ± 7.3	13
28	19-Sep-1977	4 ± 1	63.0 ± 13.2	9
29	24-Sep-1977	52 ± 8	17.1 ± 4.2	11
30	22-Nov-1977	37 ± 3	29.3 ± 6.7	12
31	07-May-1978	28 ± 7	31.4 ± 5.9	12
32	23-Sep-1978	24 ± 1	166.3 ± 51.6	13
36	12-Oct-1981	63 ± 4	130.9 ± 24.2	11
37	26-Nov-1982	16 ± 2	40.5 ± 8.4	11
38	08-Dec-1982	44 ± 3	48.6 ± 12.1	12
39	16-Feb-1984	16 ± 4	23.4 ± 4.4	13
41	16-Aug-1989	57 ± 3	54.6 ± 12.8	12
42	29-Sep-1989	1189 ± 60	41.5 ± 3.2	15
43	19-Oct-1989	411 ± 15	42.1 ± 4.2	13
44	22-Oct-1989	72 ± 5	61.8 ± 16.3	13
45	24-Oct-1989	576 ± 27	22.9 ± 6.0	13
46	15-Nov-1989	3 ± 0	15.5 ± 3.2	5
47	21-May-1990	33 ± 2	28.3 ± 8.0	14
48	24-May-1990	56 ± 4	18.9 ± 5.1	14
49	26-May-1990	27 ± 2	12.1 ± 2.7	13
52	15-Jun-1991	49 ± 4	44.1 ± 11.4	11
53	25-Jun-1992	5 ± 1	62.8 ± 12.9	10
55	06-Nov-1997	48 ± 2	40.0 ± 11.3	9
56	02-May-1998	4 ± 1	26.7 ± 5.7	4
59	14-Jul-2000	92 ± 5	79.5 ± 9.2	11
60	15-Apr-2001	170 ± 15	17.6 ± 4.2	13
61	18-Apr-2001	26 ± 4	32.0 ± 7.4	13
62	04-Nov-2001	14 ± 1	186.6 ± 7.9	11
63	26-Dec-2001	7+2	51.7 ± 11.0	- 11
64	24-Aug-2002	8 ± 1	56.6 ± 13.0	11
65	28-Oct-2003	110 + 7	125.6 ± 11.7	14
66	29-Oct-2003	36 + 4	49.3 ± 3.3	14
67	02-Nov-2003	13 ± 3	100.6 ± 20.9	11
69	20-Ian-2005	385 ± 55	14.1 ± 2.0	14
70	13-Dec-2006	62 ± 4	261 ± 6.8	15
71	17-May-2012	10 ± 1	20.1 ± 0.0 22.8 ± 5.5	11

GLE が初めて観測された 1942 年以降、2019 年までの 77 年間に、全部で 72 個の GLE が観測されているが、そのうちの EII > 3(%・h) の GLE 現象 48 個が表 2-11 に挙げられている。



図 2-12 表 2-11 のデータを用いて作成した GLE 現象の累積頻度分布。

表 2-11 のデータを用いて作成された累積頻度分布を冪関数でのフィッティング(図 2-12)した結果から、10年、100年、1,000年に1回の発生頻度の現象はそれぞれ、おおよそ EII > 190(%・h)、6,600(%・h)、223,000(%・h)の GLE 現象であると推定される。

2.3.3. 現象規模の定義

2.3.2 節より導かれる太陽高エネルギー粒子現象規模の定義、GLE 現象規模を、それ ぞれ表 2-3 および表 2-4 に示す。

規模を示すパラメータ	日常~複	1回/1年	1回/10	1回/100	1回/1000			
	数回/年		年	年	年			
流量(>10MeV)[10 ¹⁰ p		$\sim 0.1^{*1}$	$\sim 1.0^{*1}$	~2.4-5.1	~3.8-14			
cm ⁻²]								

表 2-3 プロトン現象規模の定義(再掲)

※1 図 2-11 から読み取った値を記入

規模を示すパラメータ	日常~複	1回/1年	1回/10	1回/100	1 回/1000
	数回/年		年	年	年
EII [% · h]		-	~190	~6,600	~223,000

表 2-4 GLE 現象規模の定義(再掲)

2.4. 太陽電波バースト

2.4.1. 発生頻度と現象規模の関係

米国がまとめた Space Weather Phase 1 Benchmarks Report [45]では、100年に1回規模 の太陽電波バーストの現象規模について分析され ている。分析対象となる太陽電波バーストの影響を 受ける周波数帯として、利用者の多い超短波

(VHF)帯、極超短波(UHF)帯、マイクロ波を
 挙げており、加えて広く利用されている GPS 周波
 数と F10.7 指数を挙げている。

太陽電波バーストの 100 年に 1 回規模の現象規 模分析結果を表 2-12 に示す。この現象規模の推定 には Nita et al., 2002 [79]の結果が利用されてお り、累積頻度分布に対して power-law フィッティ ングを行い、外挿することで算出されている。



図 2-13 太陽活動極大期における、2GHz 以上の太陽電波バーストの、1日当たりの発 生数の累積頻度分布 [79]

Frequency Band Name	Frequency Band (MHz)	1-in-100-Year Benchmark (sfu)ª	Error Bars (sfu) ^a	Theoretical Maximum
Very High Frequency (VHF)	30-300	2.8×10^{9}	[-2.5 × 10 ⁹ , +0]	Phase 2
Ultra High Frequency (UHF)	300-3,000	1.2×10^{7}	[-1 × 10 ⁷ , +0]	Phase 2
Global Positioning System (GPS)	1,176-1,602	1.2×10^{7}	[-1 × 10 ⁷ , +0]	Phase 2
F _{10.7}	2,800	1.3×10^{7}	[-1 × 10 ⁷ , +0]	Phase 2
Microwave	4,000–20,000	3.7 × 10 ⁷	[-2.5 × 10 ⁹ , +0]	Phase 2

表 2-12 太陽電波バーストの 100 年に1回規模の現象規模 [45]

^a Solar flux is measured in watts (W) per square meter (m²) per hertz (Hz), with 1 solar flux unit (sfu) equal to 10⁻²² W m⁻² Hz¹.

Nita et al., 2002 [79]や野辺山太陽電波観測所のデータを分析した Song et al., 2012 [80]にて、実際の太陽電波バーストの頻度は、フラックスが上がれば上がるほど powerlaw フィッティングの外挿によって示される値よりも低いことが示されていることから (図 2-13)、表 2-12 の 100 年に 1 回規模の現象規模は少なくとも一桁は過大評価して いると考察している。

また、理論上の上限値に関しては、これまで分析されたことがないため、今後取り組 むべきテーマとして識別されている。

2.4.2. 現象規模の定義

2.4.1節より導かれる太陽電波バーストの現象規模の定義を表 2-5に示す。

規模を示すパラメータ	日常~複数	1回/	1回	1回/100年	1回
	回/年	1年	/10 年		/1000年
超短波(VHF)(30-300MHz)				$< 2.8 \times 10^{9}$ ²⁾	
極超短波(UHF)				$< 1.2 \times 10^{7}$ 2)	
(300-3,000MHz)					
GPS (1,176-1,602MHz)				$< 1.2 \times 10^{7}$ ²⁾	
F10.7 (2,800MHz)				$< 1.3 \times 10^{7}$ ²⁾	
マイクロ波				$< 3.7 \times 10^{7}$ 2)	
(4,000-20,000MHz)					
(0) 1, (1) -10-22 W/ 2 II -1	0)[4	F117 - 7			

表 2-5 太陽電波バーストの現象規模の定義 [sfu] 1) (再掲)

2) $1sfu=10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$

2) [45]による。

2.5. 放射線帯

1.2.5.2 節に示したように地球の内部磁気圏には、磁場に高エネルギー電子が捕捉された放射線外帯が存在している。

放射線外帯の電子フラックスの変動は高速太陽風と良い相関があることが知られてい る。図 2-14に1996年1月~4月の放射線帯電子と太陽風速度の変動を示す。日単位の 変動は、太陽風によって昼側の磁気圏が圧縮され、夜側が反太陽方向に引き伸ばされて いることにより、放射線帯の形状が昼夜非対称であるために生じる。それに加えて、高 速の太陽風が到来したのちに放射線帯電子が増加し高い値をしばらく継続していること がわかる。一方で速い太陽風が到来した場合に放射線帯電子が常に増大するわけではな く、太陽風の密度や磁場の向きなどにも依存する [74]。

さらに放射線帯電子は、磁気嵐やその起源となる太陽風現象とも関連して変化するこ とが知られている。磁気嵐を引き起こす現象として、CIR と CME がある。CIR によっ て引き起こされた磁気嵐、CME によって引き起こされた磁気嵐の大きいものと小さい ものに分類して複数のイベントを平均した、放射線帯電子フラックスと磁気嵐の指標と なる Dst 指数の変動を図 2-15 に示す。磁気嵐のピーク(Dst 指数が最小)になるタイ ミングで電子フラックスが最小となりその後に増加する点が共通している一方で、磁気 嵐後の電子フラックスの値が、CME 起源の磁気嵐では磁気嵐前からの増加はわずかで あるのに対し、CIR 起源の磁気嵐では、磁気嵐前よりも大きく増加することがわかる。



図 2-14 放射線帯電子フラックスと太陽風速度。1996 年 1-4 月に GOES 衛星で観測 した E>2MeV の電子フラックスと Wind 衛星で観測された太陽風速度。 [74]



図 2-15 時間重畳法(Superposed epoch analysis)を用いた、起源となる太陽風変動 (CIR, CME)の違いによる放射線帯電子(GOES 電子フラックス)と磁気嵐(Dst 指 数)の対応関係。CIR によって引き起こされた磁気嵐(実線)、CME によって引き起 こされた大規模磁気嵐(破線)と小規模磁気嵐(点線)別に、平均値を示す。 [74]

[81]

2.5.1. 発生頻度と現象規模の関係

GPS 衛星や気象衛星のような中軌道(MEO)、静止軌道(GEO)にある宇宙インフラ は、まさに放射線外帯の中で運用されており、放射線帯に存在する MeV 以上の高エネル ギー電子が衛星の帯電や障害発生の重大な脅威である。

Meredith et al., 2015 [82]は、1995 年 1 月 1 日から 2014 年 6 月 30 日までの 19 年半 のアメリカの気象衛星 GOES による電子フラックス (E>2MeV)の日平均データをもと に極値統計解析を行い、放射線帯電子フラックスの現象規模と発生頻度の関係を分析し ている (図 2-16 、表 2-13)。GOES West (西経 75 度の静止軌道)によって観測され た電子フラックスは、GOES East (西経 135 度の静止軌道)の約 2.5 倍となっているが、 これは GOES West が GOES East より低い磁気緯度とL値に位置していたためとして いる。また、解析期間中、最大の電子フラックスは GOES West と GOES East とも 2004 年 7 月 29 日に観測されたもので、それぞれ 4.92×10⁵ [cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹]、1.93×10⁵ [cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹]であった。このイベントは、50 年に1回規模の現象であったとしている。



図 2-16 放射線帯電子フラックス (E>2MeV) の累積分布 [82]

	GOES West	GOES East	Koons [2001]
Event	$(cm^{-2} s^{-1} sr^{-1})$	$(cm^{-2} s^{-1} sr^{-1})$	(cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹)
1 in 10 years	$1.84 imes 10^{5}$	6.53×10^{4}	$6.78 imes 10^4$
1 in 20 years	2.83×10^{5}	1.04×10^{5}	$7.98 imes 10^{4}$
1 in 50 years	5.00×10^{5}	$1.98 imes 10^{5}$	$9.57 imes 10^{4}$
1 in 100 years	7.68×10^{5}	3.25×10^{5}	1.08×10^{5}
1 in 150 years	9.86×10^{5}	4.35×10^{5}	1.15×10^{5}

表 2-13 放射線帯電子フラックス (E>2MeV) の頻度と現象規模 [82]

Meredith et al., 2015 [82]が放射線帯電子フラックスによる分析を実施していたのに対し、本項では放射線帯電子フルエンスによる分析を実施する。

1998年から 2019年の GOES10, 11, 15の放射線帯電子(E>2 MeV)のフルエンスの データから確率密度関数を導出した(図 2-17)。



図 2-17 放射線帯電子フルエンスの確率密度分布

このフルエンスデータの分布より、各年におけるフルエンス最大値を導出した。この 年間最大フルエンスの値に対して、極値統計解析を行うことにより、フルエンスの現象 規模と発生頻度に関する解析を行った。

解析の手順は以下である。

 年間最大フルエンスデータに対して、以下の一般化極値分布(GEV: Genelarized Extreme Value distribution)をあてはめて推定を行った。

$$G(z) = exp\left(-1\left[1 + \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right]\right)$$

ここで、 ξ は分布の形状を表し、正の場合に Frechet 分布、負の場合に Weibull 分 布、0 のときに Gumbel 分布を示す確率分布となる。フルエンスデータに GEV のあ てはめを行った結果、 $\xi = 0.3$ となり Frechet 分布を示すことがわかった。

2) あてはめを行った結果をもとに、次の再現期間(1/p)に対する確率フルエンス (Zp)の式を用いて、発生頻度に対する現象規模の推定を行った。

$$Zp = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \left\{ -\log(1-p) \right\}^{-\xi} \right]$$

以上の方法で求めた放射線電子フルエンスの回帰周期を図 2-18 に示す。



図 2-18 放射線電子フルエンスの回帰周期(年単位)。黒丸は各年における最大値、黒 線はフィッティング結果、青線は 95%信頼区間。

2.5.2. 現象規模の定義

2.5.1 節より導かれる放射線帯現象規模の定義を表 2-6 に示す。

本結果は約20年間のデータに基づくものであり、100年に1回、1000年に1回規模 の現象規模は、現在可能な極値統計解析により推定したものであり、注意を要する。今 後、物理的に十分にあり得る値かどうかの検討が必要である。

表 2-6 放射線帯現象規模の定義(再掲)

規模を示すパラメータ	日常~複数	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回
	回/年				/1000 年
放射線電子フルエンス	~0.1	~0.6	~3.0	~10 1)	~26 1)
$[10^{10}{ m cm}^{-2}{ m sr}^{-1}]$					

1) 現在可能な極値統計解析により推定したものであり、注意を要する。

2.6. 磁気嵐

2.6.1. 発生頻度と現象規模の関係

(1) 過去の巨大磁気嵐

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1859年9月1日に太陽フレアの発生が記録さ れたのち、1859年9月1-2日にかけて世界中でオーロラの出現が観測された。磁気緯度 23度のハワイや磁気緯度-22度のサンチアゴでのオーロラの観測も報告されている。 歴史文献のなかにはオーロラの仰角が記載されているものもある。オーロラの上端の高 さを仮定するとオーロラ帯の低緯度境界を求めることができ、キャリントンイベント時 には不変磁気緯度28.5度または30.8度まで広がったと考えられている[83]。キャリン トンイベントにおける中低緯度における地磁気変動の最小値はボンベイ(インド)での -1600nTの記録が残っている[56](図2-19)。Dst指数に換算すると -1760nTとい う主張もあるが[56]、Dst指数のサンプリング周期は1時間値であることを考慮すると Dstの最小値は -850nTになるという指摘もある[84]。

時刻、場所、仰角の情報が揃ったオーロラの記録から Dst 指数を推定すると、19世紀 後半から 20世紀前半にかけてキャリントンイベントに匹敵する磁気嵐が幾つか発生し ていたようである。表 2-14は1859年8月、1859年9月、1872年2月、1909年9月、 1921年5月、1989年3月に発生した磁気嵐について、オーロラ帯の赤道側境界の不変 磁気緯度と Dst 推定値を示している。1872年の磁気嵐ではオーロラ帯の赤道側境界が 不変磁気緯度 24.2度まで、1921年の磁気嵐では27.1度まで下がったと考えられ、いず れもキャリントンイベント時を凌いでいる。もっとも、オーロラは常に記録されていた わけではなく、観測値の天候や地方時に大きく依存する。そのため、更に低緯度境界が 下がっていた可能性は排除できない。

歴史文献から推定したオーロラの帯の低緯度境界は曖昧さが少なからずあることや、 オーロラ帯の低緯度境界とDst 指数は完全には対応しないという不確定性はあるが、キ ャリントンイベントに匹敵する磁気嵐が 1859 年から 1921 年までの約 60 年の間に 3 回 発生していた可能性がある。太陽活動のより長い周期変動が関わっていると思われ、磁 気嵐の発生頻度を議論する上で注意が必要かもしれない。

1921年に発生した磁気嵐のデータを図 2・20に示す。Hapgood, 2019 [85]は、世界中の科学論文やデータベース、柿岡での観測データに加え、新聞報道や歴史家と天文学者による報告をもとに、1921年のイベントの時系列を整理している。地磁気の減少が促進している期間を「主相(main phase)」、減少が回復している期間を「回復相(recovery phase)」と呼ぶが、1921年イベントでは、5月15日2:00付近から主相が始まり、5:30には減少幅が900nTに達した。その後、数時間以上に渡る回復相と続く。

				[00]		
発生日			オーロラ可視地	オーロラ帯の赤道	Dst 指数 [nT]	出
			点の赤道側境界	側境界		典
年	月	日	(磁気緯度)	(不変磁気緯度)		
1859	8	28/29	20.2	36.5	$\geq -484^{*1}$	[83]
1859	9	1/2	20.5/21.8	28.5/30.8	≈-900 (+50, -150)	[83]
					× 1	[84]
1872	2	4	10.0/18.7	24.2	<-830 ^{**1}	[83]
1909	9	25	10.0/23.1	31.6	-595	[87]
						[88]
1921	5	14/15	16.2	27.1	-907 ± 132	[86]
						[89]
1989	3	13/14	$\overline{29}$	35/40.1	-589	[90]

表 2-14 キャリントンイベントおよびキャリントンイベントに匹敵する巨大磁気嵐 [86]

※1 オーロラ帯低緯度境界から推定した値



図 2-19 キャリントンイベント時のボンベイでの地磁気変動 [56]

キャリントンイベントと 1921 年イベントとを比較すると、地磁気が減少してから回 復するまでの継続時間が大きく異なることが分かる。キャリントンイベント(図 2-19) は、主相と回復相を合わせて3時間程度であるのに対し、1921 年イベント(図 2-20) は12時間以上の時間を要しており、ゆっくりとした変動でも巨大イベントに発達する 事例である。実は、一般的な磁気嵐の時間変化は、1921 年イベントの変化に近く、キャ リントンイベントが特殊なケースである。キャリントンイベントを引き起こした起源に ついて未だに議論があり、それそのものが研究対象となっている所以である。巨大宇宙 天気イベント発生時の影響評価として、キャリントンイベントを想定することが多いが、 1921 年イベント等を想定するほうが適しているケースがあるかもしれない。



図 2-20 1921 年イベントにおけるサモア島アピアと柿岡で観測された地磁気変動 [85]

(2) 磁気嵐の規模とオーロラ低緯度境界

巨大磁気嵐が発生すると、表 2·14 で示したようにオーロラ帯が低緯度に広がる。図 2·21 では Dst 指数の最小値とそのイベントで発生したオーロラ帯の低緯度境界の関係 を示している [91]。この図からわかる通り、イベントごとに多少の誤差はあるものの、 Dst 指数のピーク値が小さくなるにしたがってオーロラ帯の低緯度境界は低緯度側に拡 大する関係にある。オーロラ帯は数 keV の温度を持つ電子が散乱や磁力線方向への加速 を受けて電離圏に降下した結果であり、そのような電子が多く蓄積されているプラズマ シートの電離圏への投影だとおおよそ考えることができる。すなわち、オーロラ帯の低 緯度方向への広がりはプラズマシートの地球方向への拡大に対応する。一方、プラズマ シートには数 keV の温度を持つイオンも含まれている。これらのイオンが地球近くに侵 入すると断熱的に加速し、強い電流を作るようになる。この電流は赤道環電流と呼ばれ、 磁気嵐を特徴づける地磁気 (Dst 指数)の減少の原因となる。オーロラ帯の拡大と Dst 指数の減少の間によい対応があることは、プラズマシートの地球方向への拡大という共 通の機構が中心的な役割を果たしていることを強く裏付けている。



図 2-21 Dst 指数とオーロラ低緯度境界の関係 [91]

(3) 磁気嵐の発生頻度と現象規模の関係

磁気嵐の発生頻度と現象規模の関係については、1957 年~2001 年の Dst 指数の解析 から、回帰周期が求められており(図 2-22)、そこから読み取ることができる。Tsubouchi and Omura, 2007 [92]は、極値統計理論(extreme value statistics)を活用し、現象規 模の大きい(Dst<-100nT)イベントについて、ある期間(T年)内で発生するであろ う最大強度(Sr)を求めている。この結果は、10年以下では実際の値よりも過剰に評価 されているのに対して、10年以上の期間では実測に合っており、S10=450.8±26.7, S100=645.3±109.2と求めている。また、Tsubouchi and Omura, 2007 [92]より、1000 年に1回規模のDst 指数は-934nTと計算でき、95%信頼区間は[-320, -1520]nTと 読み取れる(図 2-22 中の95%信頼区間(破線)から目視で読み取った値)。



図 2-22 -Dst 指数(絶対値)の回帰周期 [92]。破線は 95%信頼区間、黒丸は現象規 模の大きいイベント(Dst<-100nT)の実測値。

別のアプローチとして、Love et al., 2015 [88]は、1957 年~2012 年の Dst 指数のデ ータに対して、最尤推定と加重最小二乗法の 2 つの方法で統計解析を実施しており、ほ とんどのデータは最尤推定でよく再現できるが、現象規模の大きいイベントは加重最小 二乗法の方が適しているとの結論を出している。また、将来の発生頻度と現象規模につ いては、最尤法の方が加重最小二乗法よりもより狭い信頼区間を算出することができる としている。その値は 10 年に 1 回規模の現象は-447nT、95%信頼区間が[-389, -515]nT、100 年に 1 回規模は-880nT、95%信頼区間が[-697, -1146]nT と計算され ている。1000 年に 1 回規模については検討されていない。

その後、Love et al., 2019 [89]によって、100 年に1回規模のDst 指数が再計算され ている。283nT を閾値として極値統計分析を行い、100 年に1回規模は-542nT、68% 信頼区間が[-466, -583] nT と算出した。これは、Love et al., 2015 [88]の-880nT よ り磁気嵐の規模が小さくなっているが、閾値の設定の仕方によっても結果が左右される ことを示している。

2.6.2. 現象規模の定義

2.6.1 節より導かれる磁気嵐現象規模の定義を表 2-7 に示す。

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
Dst [nT]	$\sim -220^{1)}$	$\sim -450 \pm$	$\sim -650 \pm 110$	~-930
		30		$[-320, -1520]^{2}$

表 2-7 磁気嵐規模の定義(再掲)

1) 図 2-22 中の実測値(黒丸)から目視で読み取った値

2) []内は図 2-22 中の 95% 信頼区間(破線)から目視で読み取った値

Dst 指数の理論的な下限値について、Vasyliunas, 2011 [93]は、磁気圏内圧には上限 があるという仮定の下、動圧補正された Dst 指数と赤道環電流粒子のエネルギー総量の 関係式、Dessler-Parker-Scopkeの関係式を用いて、Dst 指数の下限値を-2,500nT と見 積もっている。また、Dst = -2,500nT の規模の磁気嵐を発生させるまでの時間スケー ルを、過去に観測された太陽風パラメータを使用して 2~6 時間程度と見積もっている [94]。よって、1000 年に 1 度の規模で発生する現象規模として導出した Dst=-934nT の規模は十分にあり得る値であると言える。

ここで巨大な磁気嵐の発生確率について議論している論文を紹介する。

Riley, 2012 [95]は、宇宙天気現象の頻度が規模の逆べきに比例することを示し、かつ、 この関係性がより大きい強度でも成り立つと仮定し、未来の任意の期間内に発生する現 象の発生確率を見積もっている。べき乗の 確率解析方法を適用し、直近 45 年間の Dst 指数をもとにして算出した結果、キャリントンイベント級(Dst < -850 nT)の現象が 再び発生する可能性は次の10年間で~12%であると結論付けている。

Moriña et al., 2019 [96]では、1957 年~2017 年の Dst 指数のデータを用いて、Weibull 分布を用いた解析を実施しており、その結果、次の 10 年における、キャリントンイベン ト(Dst < -850 nT)以上の現象の発生確率を 0.46 -1.88%と見積もっている。

Kataoka, 2013 [97]では、太陽活動周期 24 における巨大磁気嵐の発生する可能性を見 積もっている。89 年間に渡る柿岡地磁気観測所の磁気嵐データを用いて、巨大磁気嵐が 発生する可能性はその太陽活動周期の最大黒点数の関数でモデリングできるとしている。 その結果、次の 10 年におけるキャリントンイベントの発生確率を 4-6%と見積もってい る。

このように、磁気嵐の発生確率の推定にはその手法によって差が生じており、より正 確な計算にはさらなる研究が必要である。

2.7. サブストーム

2.7.1. 発生頻度と現象規模の関係

サブストームの大きさを、西向きに流れるオー ロラジェット電流の大きさで評価する。

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。Nakamura et al.,
2015 は AL 指数の回帰周期を求めた [63] (図 2-23)。

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



Return period (years)

-AL

図 2-23 -AL 指数の回帰周期 [63]。

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る。1980 年から 2018 年までに観測されたサブストームにつ いて、SML 指数を用いて求めた発生頻度分布を(図 2-24)に示す。

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 るようになっている SML 指数を、サブストームの現象規模を示す指数とする。



図 2-24 x以下の最小 SML 値を持つサブストームが発生する頻度(京都大学 海老原 裕輔作成)。

2.7.2. 現象規模の定義

2.7.1節より導かれるサブストーム現象規模の定義を表 2-8に示す。

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			
AL ¹⁾ [nT]		~-3700	~-4100	~-4100	~-4200			
SML [nT]	-460	-3000	-4000	-5000	-5900			

表 2-8 サブストーム現象規模の定義(再掲)

1) [63]による。

AL 指数、SML 指数ともに、現象規模の算出に用いている観測データの期間は限られ ている。いずれの場合も数十年以上の発生頻度については外挿により導出しており、必 ずしも現実を反映しているとは限らない。また、太陽風エネルギーがサブストームの源 であり、サブストームの規模(AL 指数や SML 指数の下限値)は有限であるはずだが、 どれほどの規模になり得るか分かっておらず、今後の研究テーマである。

また、サブストームと磁気嵐の関係性についても、未だ解明されていない。オーロラ オーバルは、1時間程度の突発現象であるサブストームの成長相で低緯度に広がり、拡 大相で高緯度に戻っていく[20]。これは、成長相で引き伸ばされた地球の磁力線が、 拡大相でもとに戻っていくことに対応し、磁気嵐とは時定数が異なる。領域的には、サ ブストームによって少なくとも L~2.5 まで粒子が注入された事例が報告されているが [99]、サブストームは本質的に磁気嵐とは独立した事象である [100]。サブストームの 発生がなくとも磁気嵐が発達する事例 [101]が報告されており、磁気嵐の発達に対する サブストームの役割はよく分かっていない。

2.8. 電離圏じょう乱

電離圏では、1.2.7節で示したように、太陽に限らずさまざまな影響を受けてじょう乱 が発生し、その頻度や継続時間は現象によって異なる。以下では、電離圏でのじょう乱 現象別に、発生頻度と規模の関係について統計解析等を行った結果を示す。

2.8.1. 発生頻度と現象規模の関係

2.8.1.1. 全電子数(TEC) 最大值

電離圏内の電子は衛星測位誤差の主要因である電波の遅延をもたらす。受信機と衛星 を結ぶ視線に沿って積分した単位面積当たりの電子数を全電子数(Total Electron Content: TEC)と呼び、一般的に TEC Unit(TECU、=10¹⁶ m⁻²)が単位として使われ る。1.2.5.1 節および 1.2.7 節で示したように、電離圏は日変動および季節変動がある上 に、様々なじょう乱現象が発生することで、電子密度の分布が変動する。ここではそれ らの変動の原因については区別しないで全電子数の規模と頻度の関係を推定する。ここ では全電子数の最大値に着目し、主に電離圏正相嵐の規模に対応する。

1997年から2018年にかけての22年分の東京におけるTECデータから導出した1日 の最大値の累積発生頻度を図2-25に示す。太陽活動周期の極大期と極小期では、定常 的な紫外線放射強度が大きく異なるため、電離圏の振る舞いも大きく異なる。その影響 を考慮するために、直前27日間の平均太陽黒点数が50よりも大きい日を、太陽活動度 が高い日(暖色系)とし、50を下回る日を太陽活動度の低い日(寒色系)として、それ ぞれ別々に頻度分布を計算した。また磁気圏じょう乱に伴うTECの増大について分け て解析するために、前日と当日のそれぞれのDst指数の日平均値のうち、小さい方の値 が-50nTを下回る日を磁気圏活動度の高い日として濃い色で表示した。図2-25より、 1年に1回程度の頻度で85TECUが観測され、10年に1回程度の頻度で100TECUを 超えることが分かった。また、70TECU以上となるのは太陽活動度が高い時または磁気 圏活動が活発な時であるとの特徴も見られる。



図 2-25 東京における全電子数(TEC)最大値の累積発生頻度。縦軸の日数は、100 年あたりの日数に規格化。[102]【掲載論文現在投稿中】

一方、本結果は22年間のデータに基づく解析のため、100年間スケールのTEC変動 を議論するには不十分である。そこで、1957年以降の観測データのあるイオノゾンデ観 測を用いて、イオノゾンデとTEC観測の両者を比較し、100年スケールのTEC変動を 検討した。

まず、1957 年から 2018 年までの 62 年間のイオノゾンデの観測データから求めた電 離圏の F₂ 領域の臨界周波数(foF2)から、F₂ 領域の最大電子密度(NmF₂)を求めた。 東京上空の 22 年間の TEC と同期間の NmF₂の相関を調べた(図 2-26)。ここで、NmF₂ は、以下の式で求めた。

$NmF_2[m^{-3}] = 1.24 \times 10^{10} \times foF2[MHz]^2$

TEC と NmF₂はほぼ相関関係にあり、その比率 TEC/NmF₂は、密度が NmF₂で全電 子数が TEC となる仮想的な層の厚さとして「slab thickness」と呼ばれる。図 2-26 よ り、東京における 22 年間の平均的な slab thickness は約 250km と求まった。

slab thickness は、季節、太陽活動、地磁気活動等に依存する。この slab thickness を どのように想定するかで NmF₂から推定する TEC が変わる。今回、3 パターン(月平 均、10 年に1度の頻度、100 年に1度の頻度)の slab thickness を想定した。22 年間 の東京における slab thickness を月別に統計解析した結果を図 2-27 に示す。それぞれ の頻度の slab thickness を 62 年間の NmF₂データにかけあわせて推定した TEC の累積 密度分布を図 2-28 に示す。これより、10 年に1度の頻度(0.03%)で130TECU 以上、 100 年に1度の頻度(0.003%)で190TECU 以上が観測され得ることが分かった。


図 2-26 東京における TEC と NmF2の相関図[102] 【掲載論文現在投稿中】



図 2-27 東京における slab thickness の月平均等 [102] 【掲載論文現在投稿中】

黒色:月平均

青色:月平均+3×標準偏差(10年に1度の頻度に相当)

赤色:月平均+4.2×標準偏差(100年に1度の頻度に相当)



図 2-28 東京の NmF₂より推定される TEC の累積密度分布 [102] 【掲載論文現在投稿 中】

黒色:slab thicknessの月平均から求めたTEC

青色: slab thicknessの月平均+3×標準偏差(10年に1度の頻度に相当)から求めたTEC 赤色: slab thicknessの月平均+4.2×標準偏差(100年に1度の頻度に相当)から求めたTEC



図 2-29 地域間の TEC 値の比較。左:東京と山川(鹿児島)、右:東京と稚内(北海道) [102]【掲載論文現在投稿中】

また、TEC 値の日本の南北地域差を見るために、1997 年から 2018 年までの 22 年分 の国分寺の TEC 値を北海道と鹿児島での TEC 値と比較した(図 2-29)。鹿児島と北海 道の TEC 値はそれぞれ、平均的に東京の TEC 値の 1.2 倍、0.8 倍であることがわかる。

以上より、全電子数(TEC)の発生頻度と現象規模は表 2-15に示す通り推定される。

地域	1回/1年	1回/10年	1回/100年					
東京	90TECU以上*1	130TECU 以上*2	190TECU以上*2					
鹿児島	110TECU以上*3	160TECU 以上*3	230TECU以上*3					
北海道	70TECU以上*4	105TECU 以上*4	150TECU 以上*4					

表 2-15 全電子数 (TEC) 規模の定義

*1:22 年間の TEC データに基づく

*2:62年間のfoF2データに基づく

*3:東京の1.2倍で計算

*4:東京の0.8倍で計算

2.8.1.2. デリンジャー現象

デリンジャー現象の現象規模としては、電波吸収量と継続時間を指標とする。

電波吸収量については、長距離(10000 km 前後)の短波回線観測より提案された経験 式[前田&大木, 1972]を参照する。この経験式は、1970 年に 3 つの短波回線で観測され た、11 例のデリンジャー現象に伴う電波吸収量に基づく [103]。前田&大木, 1972 [103] では、同一のデリンジャー現象に対する指標(マグニチュードと呼ばれている)の相違 が最小になるように、マグニチュードの周波数および実効太陽天頂角(電離圏第一種吸 収点における太陽天頂角の最小値)の依存性の関係式を得た。同報告で示されている指 標と太陽フレアとの関係式と、太陽フレア強度の異なる波長間の相関から、電波吸収量 E[dB]を太陽フレア強度の関数として、以下の関係式が得られる。

 $E = 23.914 \times \log F_{flare} + 82.431 - 43.319 \times \log f + 33.856 \times \cos \chi - 3.037$

ただし、 F_{flare} は太陽フレアのX線強度(0.1-0.8nm) $[mW/m^2]$ 、fは周波数 [MHz]、X は 実効太陽天頂角[deg]である。

民間航空で利用される周波数 6.6MHz の電波について、フレア X 線強度と実効太陽天 頂角の関数として電波吸収量の大きさ(単位 dB)を示したものが図 2-30 である。フレ ア X 線強度が大きくなるほど、太陽天頂角が小さいほど吸収量が大きい。また、吸収量 の周波数依存性を図 2-31 に示す。低い周波数の電波ほどより大きな吸収を受ける。



図 2-30 長距離短波回線の吸収量の太陽フレア X 線強度と太陽天頂角依存性 破線は、太陽フレアの1・10・100・1000 年に一度の発生頻度に該当する規模 [104]



図 2-31 長距離短波回線の吸収量の周波数依存性 [104]

デリンジャー現象の継続時間については、イオノゾンデによる観測から導出した。図 2-31 に示したように低い周波数の電波ほどより大きな吸収を受ける。そのため、太陽フ レアのX線強度が上がるにつれて、低い周波数の電波の反射波が地上に到達できなくな るため、イオノグラムでは、低い周波数側のエコーから消えていく。ここで、イオノゾ ンデで地上に到達できた電波の最低周波数を fmin という (図 1-8)。観測時の fmin とその直前の 27 日間の fmin 中央値との差分を dfmin とする。デリンジャー現象が発生する と、fmin が大きくなるため、dfmin は正の値になる。

1981~2016年の国分寺における 15 分間隔の NICT イオノゾンデ手動読み取りデータ を用いて求めた、デリンジャー現象の継続時間の発生頻度を図 2-32 に示す。日本が昼 間(5-19時 JST)、かつ、C クラス以上のフレアを伴う現象、かつ、下記 3 ケースを判 定した。

1) dfmin が 2.5MHz 以上のケース

2) dfmin が 3.5MHz 以上のケース

3) "B" (吸収によって fmin 測定が不可能になった) と判定されたケース



図 2-32 デリンジャー現象の継続時間の累積発生頻度分布[104]

図 2·32 は、継続時間の累積発生頻度分布(横軸に示す継続時間よりも長いイベント 数の総和)を示す。1),2),3)の順にデリンジャー現象として規模が大きいことになり、継 続時間は短くなる。得られた分布の近似関数を実線で示す。これらの近似関数から得ら れた 1・10・100・1000 年に一回の頻度に相当する継続時間を、図の右上に示す。3)の 場合について、それぞれ、38 分、1.8 時間、4.0 時間、7.4 時間であった。また、1000 年 に 1 回の頻度について 1)は 11.9 時間、2)は 11.5 時間と見積もられた。

イオノゾンデ観測で検出されるデリンジャー現象の電波吸収量を見積もった。電波強度を導出可能なイオノゾンデ観測期間中に観測された、2016 年 7 月 23 日 14 時のデリンジャー現象について評価した。この現象は、太陽フレア M7.6 に伴い、国分寺(太陽天頂角 20 度)で5 MHz の信号強度が 15dB 程度減少した。これは、上述の短波回線観測に基づく経験式に入力して求まる電波吸収強度 54 dB と比べて、約 1/3 程度となる。

ここで、長距離(10000 km 前後) 短波回線では信号が複数回電離圏を斜めに通過したものであり、太陽天頂角の最小値の地点のみが主に吸収に寄与したとすると、鉛直伝播信号に比べて吸収量に3倍程度の違いが出ることになることが見積もられ、この違いは妥当なものと解釈される。逆に、経験式がよい近似であることを支持する。

デリンジャー現象の1・10・100・1000年に一度の発生頻度の規模について、吸収量 と継続時間についてのまとめは、表 2-16になる。

	1 回/1 年	1 回/10 年	1回/100年	1回/1000	
	1 []/1]	1 []/10	1 []/100	年	
					長距離短波回線に基づく
吸収量	~71 dB	~83 dB	~93 dB	~100 dB	(実効太陽天頂角0度
					6.6MHz の場合)
继续中华	0.62-1.6 時	19.96 時		7 4-11 0 時	イオノゾンデ観測に基づく
祁丕的心叶	0.65-1.6 时	1.8~3.0 时	4.0-6.8 時間	1.4-11.9 时	(1-30MHz、'B'および
間	削	间		间	dfmin≥2.5 MHz の場合)

表 2-16 デリンジャー現象の発生頻度と現象規模

36年分の観測から外挿したものであるため、極端イベントについて発生根拠を述べる。 デリンジャー現象は、太陽フレアに依存する。太陽フレアの極端イベントの発生は、2.1 節で議論されている。超高層大気の電離率は10⁻⁶程度であり、10⁻¹⁰⁰倍程度(::1/10年 X12, 1/1000年 X101)の太陽フラックス増大時も、おおよそ同様に電離圏電離が起こる 範囲である。吸収量は外挿可能と考えられる。

継続時間は、太陽フレアの継続時間に対応する。X クラス規模の大きな太陽フレアの 継続時間は、フレアリボン領域とのよい相関が知られている。Reep & Knizhnik, 2019 [105]において、2000 年 4 月から 2006 年 4 月までに観測された 2956 個のフレアとの対 応関係 [105]を参考に、リボン幅がリボン長の 1/10 程度として、リボン長は太陽半径ま で最大発達しうるとすると、継続時間は約 1.2 日となる。ここで想定したリボン領域は、 過去に観測された最大規模の黒点領域の大きさ(AR 14886 1947 年 4 月, 2.1.2 節参照) と同程度のオーダーのものである。見積もられた継続時間 1.2 日は、今回デリンジャー 現象の観測から求めた 12 時間程度より十分に長い。他方、デリンジャー現象は太陽光の あたる地球昼面のみなので、継続時間は発生のタイミングにも依り、日本では、最大で も 12 時間程度である。

2.8.1.3. 極冠吸収

極冠吸収の現象規模は、その発生する範囲と継続時間で表すことができる。以下の方 法で発生する範囲と継続時間を見積もった。

極冠吸収の規模について、SEP エネルギースペクトル [65]と、侵入可能な緯度のエネ ルギー依存性および吸収の大きさの評価法 [66]を参照して、民間航空機で利用される 6.6 MHz 周波数帯が 10 dB 減衰する領域の広がる緯度を導出した [65] [66]。また、過 去の高エネルギー粒子イベントの継続時間の経験則 [66]を参照して、極端イベントに対 する継続時間を導出した。求められた極冠吸収の発生頻度と現象規模を表 2-17に示す。

田樹たニナパラノーク	日常~	1回	1回	1回	1回		
規模を示すハクメータ	複数回/年	/1 年	/10 年	/100 年	/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)@6.6MHz 10dB ³⁾	658 (60)	57°	53°	F 10	F 00		
	69 (60)	(55)	(52)	51	50		
磁気緯度(夜間)@6.6MHz 10dB ³⁾	CE8 (CO)	60°	56°	F 20	F 20		
	69- (60)	(58)	(55)		93-		
最短継続時間 4)	22 時間	46 時間	71 時間	83 時間	89 時間		

表 2-17 極冠吸収の現象規模の定義

1) 見積り設定。 [64] [65]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。 [65] [66]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。 [66]による。

表 2-17 は、6.6 MHz での見積もりであるが、周波数依存性 [66]は図 2-33 のように なる。周波数が小さいほど吸収量が大きい。そのため、同じ吸収量の場合の継続時間は、 周波数が低いほど長くなる傾向にある。

また、極冠吸収の空間分布について、2006 年 12 月 6 日に発生した SEP イベント時の極冠吸収は図 2-34 のようになる。この現象は、約1年に一度の発生規模に相当する。



図 2-33 実測に基づく関係式 [66] から導出された、電波吸収量の周波数依存性。



図 2-34 2006 年 12 月 6 日に発生した SEP イベントによる極冠吸収。27.8 MHz 帯の 信号の吸収量を示す [66]

2.8.1.4. スポラディック E層

スポラディック E 層が非常に発達すると、通常は電離圏で反射されない超短波テレビ 放送や FM ラジオ放送など超短波帯の電波が反射されて異常伝播し、遠くの放送が混信 することがある。また、航空通信では、本来の通信地上局以外から発せられた超短波通 信がスポラディック E 層によって反射して航空機に届き、電波干渉を引き起こす可能性 がある(図 6-4)。スポラディック E 層の規模を示す指標として、反射可能な臨界周波数 (foEs: 図 1-8)と継続時間がある。スポラディック E 層が発達した時のイオノグラム を見ると、foEs が通常に比べて大きく上昇することが分かる(図 1-15)。

1957 年から 2018 年までの 62 年間のイオノゾンデの観測データ(手動読み取り値) を用いて、東京における日最大の foEs の累積頻度分布が得られる。東京にスポラディッ ク E 層が発生しているとき、東京から距離 500km 離れた地点から発信された超短波通 信がそのスポラディック E 層によって斜めに反射されてその反対方向距離 500km 離れ た地点に到達する場合、大圏距離 1,000km 離れた地点の伝播が可能な状況であると考え ることができる。foEs が大きいとき、斜め反射可能な超短波通信周波数も大きくなる。 同様に東京から距離 1000km 離れた地点を考えると大圏距離 2,000km の伝播について も考察することが可能になる。

このような仮定および東京における日最大 foEs の累積頻度分布に基づいて、大圏距離 1,000km および 2,000km を伝播可能な上限周波数の累積確率密度分布を導出した。結 果を図 2-35 に示す。

なお、イオノゾンデの観測で使用される周波数の上限は 30MHz でありこれは、大圏 距離 1,000km の場合は 130.5MHz、大圏距離 2,000km の場合は 180MHz に対応す る。そのため、foEs が 30MHz を超えていた時の観測はできないことに注意が必要であ り、図 2-35 のハッチをかけた領域に対応する。図 2-35 から読み取った発生頻度と現 象規模の関係を表 2-18 に示す。

また、この確率は、1 点から1 点への伝播確率を示しており、実際には、ある1 点の 受信点について考える場合全ての方向にある送信所の数や、反射体となるスポラディッ ク E 層の大きさを考慮する必要がある。

	1回/1年	1回/10年	1回/100年
1,000km 伝播する上限周波数	100MHz	110MHz	> 130 MHz ¹⁾
2,000km 伝播する上限周波数	130MHz	$> 180 MHz \ ^{1)}$	> 180 MHz ¹⁾

表 2-18 スポラディック E 層の発生頻度と伝播周波数

 30MHz 以下のイオノゾンデ観測に基づくため、大圏距離 1,000km を伝播する 130MHz 以上の伝播、および大圏距離 2,000km を伝播する 180MHz 以上の伝播については推定 不可能。





垂直伝播と斜め伝播の変換には、修正正割法則 ($f_o=kf_v$ sec 【 φ_o 】) を用いている。修正係数 k の値は、大圏距離 1,000km に対しては k=4.35、大圏距離 2,000km に対しては、k=6.00 を採用した(例えば Davis, Ionospheric Radio, Fig 6.12)。 第1縦軸の目数は、100 年あたりの頻度に規格化した。

図 2-36 は、東京での 62 年間のイオノゾンデ観測における foEs>18MHz (80MHz が 1,000km 以上伝播する目安) および foEs>13.3MHz (80MHz が 2,000km 以上伝播する 目安) の継続時間を示している。80MHz が大圏距離 1,000km 以上伝播するのは長くて も 3 時間、2,000km 以上伝播するのは長くて 5 時間程度である。これらをまとめると表 2-19 のようになる。

しかし、実際の異常伝播観測では、より高い周波数での異常伝播がより頻度高く観測されており [106]、今後の検討が必要である。

規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年
foEs>18MHz	約 1-2 時間	約3時間
foEs>13.3MHz	約3時間	約5時間

表 2-19 スポラディック E 層の発生頻度と継続時間



図 2-36 62 年間における foEs>13.3MHz (80MHz が 2,000km 以上伝播する目安) お よび foEs>18MHz (80MHz が 1,000km 以上伝播する目安) の継続時間

2.8.1.5. プラズマバブル

赤道域や低緯度の電離圏において発生するプラズマバブルは、局所的に電子密度が低 く、プラズマバブルの中や周辺では、電子密度の変化が大きいため、そこを通過する衛 星電波が乱され、衛星通信障害や測位精度低下の原因となる。プラズマバブルの規模を 示す指標として、プラズマバブルの継続時間に関する統計解析を行った。

沖縄および鹿児島上空でのプラズマバブルの月別出現頻度を図 2-37 に示す。使用デ ータは、GEONET の TEC より計算した ROTI (Rate of TEC change Index; TEC の時 間変化の 5 分間での標準偏差)であり、ROTI が閾値を超えていて、伝播性電離圏じょ う乱 (Traveling Ionospheric Disturbances: TID) と区別するために東京上空の ROTI が閾値を超えていない場合をプラズマバブル発生とした。プラズマバブルは磁気赤道で 発生するため、日本では沖縄での発生頻度が高く、その確率は 40%を超えることもある。

1997年から2018年までの春(3月)および秋(9月)の沖縄におけるプラズマバブ ルの発生頻度をヒストグラムにしたのが図2-38である。黒線は各月の月平均太陽黒点 数を示しており、プラズマバブルの発生頻度は太陽活動度と強い相関があることがわかる。



図 2-37 (左)沖縄および(右)鹿児島における 2002 年のプラズマバブルの発生頻 度。縦軸は、1ヶ月のうち何日プラズマバブルが発生したかを割合にしたものである。



図 2-38 GEONET の TEC 観測に基づいた沖縄におけるプラズマバブル発生の経年 変化

1997 年から 2018 年の 22 年間に沖縄で出現したプラズマバブルについて、その出現 継続時間を調べた結果が図 2-39 である。統計解析の結果、継続時間の最大は 6 時間(期間中 3 イベント)、継続時間が 5 時間以上のイベントが 6 回、4 時間以上のイベントが 30 回であった。 このことから、1年に1回程度の規模のプラズマバブルでは、その継続時間は4~5時 間、10年に1回程度の規模では継続時間は6時間程度といえる(表 2-20)。



図 2-39 沖縄におけるプラズマバブルの継続時間と発生頻度の関係

規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年
プラズマバブル継続時間	4-5時間	6 時間

表 2-20 プラズマバブルの頻度と継続時間

2.8.1.6. 中規模伝播性電離圏じょう乱(MSTID)

一般的に MSTID は、1TECU (=10¹⁶ m⁻²) 程度の電離圏電子密度じょう乱を引き起こ
 すことが知られている。

Tsugawa et al., 2007 [107]では、日本上空に発生した夜間の MSTID と日中の MSTID について、GPS 受信機ネットワーク(GEONET)から得られる TEC データを解析している。GEONET は日本各地におおよそ 25km 間隔で設置された 1,200 個の常設 GPS 受信機で構成されており、このシステムを用いることで空間的時間的に高解像度の TEC データを取得することができる。GEONET より得られた夜間の MSTID と日中の MSTID 発生時の日本上空の TEC の 1 時間以下の変動成分空間分布を図 2-40 に示す。また、MSTID の物理的特徴を表 2-21 に示す。



図 2-40 夜間の MSTID (左)と 日中の MSTID(右)発生時の TEC 変動成分の空間分布 [107]

	Nighttime MSTID	Daytime MSTID
Wavelength	150–500 km	100–350 km
Velocity	50–150 m/s	100–200 m/s
Direction	Southwestward	South-southeastward
Activity ($\Delta TEC/TEC_0$)	1–5%	1–2%
Seasonal dependence	Summer (1st max), winter (2nd max)	Winter
Geomagnetic activity dependence	No	_
Solar activity dependence	Negative	Not clear
Remarks	Electrodynamic forces play important role in their generation	Atmospheric gravity waves would be responsible for their generation

表 2-21 MSTID の物理的特徴 [107]

夜間の MSTID は夏季と冬季によく見られ、波長 150~500km の北西・南東方向の波 面が南西方向に秒速 50~150m で伝播する。日中の MSTID は冬季によく見られ、波長 100~350km の帯状に長くなった波面が南・南西方向へ秒速 100~200m で伝播する。

図 2-41 に、東京における MSTID 活動度の 1994 年から 2001 年の季節・地方時依存 性を示す。この期間は太陽活動が活発となっていく時期であり、2001 年頃に極大期を迎 えた。すべての画像において、3 時から 6 時に発生している TEC じょう乱は日出に伴い 発生したものであり、MSTID によるものではない。夜間(21~3 時)の MSTID は、夏 季(5~10 月)に毎年発達している。太陽活動が増大するにつれて、夏季に発生する夜 間の MSTID は弱くなる。夜間の MSTID は、1995 年を除き 1994 年から 1998 年まで、 冬季(11~2 月)にも発達している。これらから、夜間の MSTID の活動度は太陽活動と 逆比例の関係を持っていることが示唆される。一方で、日中(9~15 時)の MSTID は 冬季のみ発達するが、太陽活動との関係は不明瞭である。 MSTID の発生と伝播方法、また、発生頻度と現象規模をさらに理解するためには、長期間の観測データからの統計解析が必要である。



2.8.2. 現象規模の定義

2.8.1 節で求めた電離圏じょう乱の現象規模の定義を表 2-9 及び表 2-10 にまとめて示す。

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	東京[TECU] 1)	\geq 90 *1	\geq 130 *2	\geq 190 *2	
(TEC)	鹿児島[TECU] 2)	≧110	≧160	≥ 230	
	北海道[TECU] 2)	\geq 70	≥ 105	≥ 150	
デリンジ	吸収量(長距離)[dB] 3)	71	83	93	~100
ャー現象	継続時間 4) [時間]	0.63-1.6	1.8-3.6	4.0-6.8	7.4-11.9
スポラデ	1,000km 伝播する周波数	100MHz	110MHz	>130MHz ⁵⁾	
イック E	2,000km 伝播する周波数	130MHz	>180MHz ⁵⁾	>180MHz ⁵⁾	
	foEs >18MHz での継続時間	約 1-2 時間	約3時間		
	foEs >13.3MHz での継続時間	約3時間	約5時間		
プラズマ	継続時間	4-5 時間	6 時間		
バブル					

表 2-9 電離圏じょう乱規模の定義(再掲)

1) ※1 は 22 年間の TEC データに基づく。※2 は 62 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 6.6 MHz の場合)

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

 30MHz 以下のイオノゾンデ観測に基づくため、大圏距離 1,000km を伝播する 130MHz 以上の伝 播、および大圏距離 2,000km を伝播する 180MHz 以上の伝播については推定不可能。

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		
				-	I		
10 MeV 以上のプロトン flux [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)@6.6MHz 10dB ³⁾	65° (60)	57° (55)	53° (52)	51°	50°		
磁気緯度(夜間)@6.6MHz 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		

表 2-10 極冠吸収の現象規模の定義(再掲)

1) 見積り設定。 [64] [65]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。 [65] [66]による。

4) 10 MeV 以上の粒子フラックスが>10 pfu となる SEP 継続時間。 [66]による。

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 3-1 に示す。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 3-1 に示す。



図 3-1 宇宙天気現象と社会への影響 [108]

本文書では、巨大宇宙天気現象が発生した際にどれほどの社会影響を与えうるか、事 業者が事業分野に関連する影響を網羅して検討できるよう、分野毎に検討を行った。そ の中で、2章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どれほどの影響があるかを「宇宙天気の影響マトリクス」 としてまとめている。表 3-2には、4章以降でまとめている宇宙天気の影響マトリクス を統合した宇宙天気の影響マトリクス全体版を示す。

分野	影響と被害	障害を起こ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	サブストーム高温電子、放射線帯電子
	作等の不具合、最悪の場合衛星損失)	
	シングルイベントアップセット(誤動	太陽高エネルギー粒子(SEP)
	作等の不具合、最悪の場合衛星損失)	
	太陽電池の劣化	
	軌道・姿勢じょう乱(衛星姿勢制御(磁	超高層大気の加熱
	気トルカ)異常、衛星大気ドラッグ)	
	(最悪の場合衛星損失)	
	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・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
	超短波(VHF)通信・放送の障害	プラズマバブル
		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
		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
航空運用	通信障害	デリンジャー現象
	(地上航法援助用放送を含む)	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 3-1 宇宙天気災害により影響を受ける分野とその影響

八服	影響と被害	陪宝を起こし得る空宝王気明色	発生頻度と影響				
		障害を起こし何る于田人丸現象	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	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
運用	人工衛星(深部帯電·放電等)		(低いが)可能	可能性あり	あり		
	(誤動作等の不具合、最悪の	放射線帯電子	性あり			未評価	未評価
	場合衛星損失)						
		電離圈嵐負相嵐					
	「伝波 (HE) 通信, お光の陪宅	デリンジャー現象					
通信・	超彼 (ΠΓ) 通信・放送の障害	極冠吸収(PCA)					
放送		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					
3回 /上		電離圈正相嵐					
測 位	測位精度の劣化	プラズマバブル					
利用 		電離圏シンチレーション					

表 3-2 宇宙天気の影響マトリクス全体版

八服	見(郷) しか字	陪宅なおちし復て安安工を現在	2		発生頻度と影響				
刀到	分野 影響と彼吉	障害を起こし待る于田人私焼家	日常~複数回/年	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年		
	又 合 陸 中	デリンジャー現象							
	連信障害	極冠吸収 (PCA)							
	(地工机伝援助用放送を召	プラズマバブル							
航空		スポラディック E 層							
運用		電離圈正相嵐							
	測位精度の劣化	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					史会区域。の進	安全区域への退			
宇宙	育 宇宙飛行士被ばく	太陽高エネルギー粒子(SEP)	なし	なし	女主区域、100座	避または地球帰	地球帰還		
活動					<u>,ur</u>	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		

表 3-2 宇宙天気の影響マトリクス全体版(続き)

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
------------	-------------------------	---------------

4. 電力分野における宇宙天気現象の社会影響

地磁気誘導電流(GIC)によって、送電線に過電流が流れる等の影響が引き起こされることが知られている。電力システムに対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響を表 4-1 に示す。

表 4-1 電力システムに対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響

分野	影響と被害	障害を起こ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)

4.1. 停電(送電線への過電流)

4.1.1. 送電網へ影響を与えるメカニズム

磁気圏じょう乱により、発電所や変電所の変圧器の中性点間の電位差を解消しようと、 中性点を通して地磁気誘導電流(GIC)が流れる。中性点にゆっくりと変動する電流が 流れると変圧器の動作点がずれ、変圧器でのロスにより変圧器が過熱したり、高調波が 発生して、保護用リレーの誤動作を起こしたりすることが知られている。GIC による影 響には以下のようなものがある [29]。

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

1989 年 3 月、カナダのケベック州周辺では、大規模な磁気嵐による GIC の影響によ り、保護リレーの不要動作による送電システムの障害が発生し、約 9 時間の停電及び約 600 万人に影響が出たことは有名である。図 4-1 に障害の流れを示す。このときの Dst 指数は-589nT であった [57]。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が焼損するという影響を受けている。



図 4-1 ケベック州周辺で発生した GIC の影響による送電システム障害の流れ [109] [110]

日本でも実際に GIC が観測されている。

2001 年 11 月 6 日に発生した磁気嵐では駿遠変電所で最大 42 A の GIC が報告されて いる [111]。2003 年 10 月 31 日のハロウィンイベント時に発生した磁気嵐ではさらに強 い GIC が観測されている。GIC ピーク値は 129.09A であり、50A を超える GIC は 9 分 間、75A を超える GIC は 5 分間、100A を超える GIC は 2 分間継続した(図 4-2)。こ の GIC による変圧器の異常は特に確認されなかったとのことである [110]。



図 4-2 日本の駿遠変電所において観測された GIC 測定波形(2013 年 10 月 31 日:24 時間) [110]

また、北海道での GIC 測定 (2005/12~2008/12) において、2006/12/14 に最大 3.85A の GIC が確認されている [29]。このときの Dst 指数は-162nT (2006/12/15 7:00) で あった。図 4-3 に北海道で観測された GIC 例として、2006/12/14 の結果を示す。



4.1.2. 日本で発生しうる地磁気誘導電流(GIC)の規模と発生頻度の試算

地磁気誘導電流(GIC)は、オーロラ爆発に伴い電離圏を流れるオーロラジェット電 流や磁気赤道上空の内部磁気圏領域を西向きに流れる赤道環電流(リングカレント)、 磁気圏境界電流などを電流源として生じる。一般的に高緯度地域のオーロラ帯ではオー ロラジェット電流の影響を強く受け、中低緯度では赤道環電流や磁気圏境界電流の影響 を受けると考えられる。磁気嵐が発生すると(Dst 指数が小さくなると)オーロラ帯が 低緯度側に広がる。近代的な観測に基づくオーロラ帯の低緯度境界は 1989 年 3 月に発 生した磁気嵐時に記録された磁気緯度 40 度がもっとも低い [90]。この磁気嵐の最小 Dst 値は-589 nT で、100 年に1 回発生する規模(Dst=-645.3nT)である。

巨大磁気嵐が発生すると、オーロラ帯が低緯度に広がる(2.6.1節参照)。磁気緯度 20~35度に位置する日本ではオーロラジェット電流の影響を受ける可能性があるが、 その影響は限定的かもしれない。オーロラジェット電流が流れるためには、高度110 km付近のホール電気伝導度が増大する必要がある。日射のない夜間にホール電気伝導 度が増大するためには、数keV以上のエネルギーを持つ電子が降り込む必要がある。 オーロラの色から降り込み電子のエネルギーを推定することは可能である。もし緑色あ るいは裾野がピンク色に光るオーロラが現れるならばエネルギーが高い電子が降り込 み、ホール電気伝導度が増大している可能性がある。しかし、日本でこれまでに見られ ているオーロラは一般に赤色が卓越しており、日本上空での降り込み電子のエネルギー は低く高度 110 km 付近でホール電気伝導度が増大したとは考えにくい。日本の地磁気 変動からも、直上をジェット電流が流れたという痕跡は無い。しかし、オーロラジェッ ト電流が直上を流れていなくても、オーロラジェット電流に接続する沿磁力線電流の影 響は無視できず、日本で強い GIC が流れる可能性はある。

Nakamura et al., 2018 [113]は、日本の複雑な地形や地下構造を考慮して、高圧送電網に発生する GIC を計算している。その結果、日本における GIC 現象の特徴として、 1. 東北三陸海岸など、海岸付近で電場が強まる(海岸効果)(図 4-4)、2. 北海道石狩 湾から北海道北西部にかけての領域や、東京湾から相模湾にかけての領域など、湾に電 気の蓄積が見られ、地下構造による電場の歪みが生じる(図 4-4)、3. 海の深さが電場 の強度に大きく影響を与える(図 4-5)、と挙げている。





図 4-5 東シナ海(プロット左側の地理経度<130 度) ~鹿児島付近(中央の 130.5 度
 付近) ~太平洋(右側>131 度)の線上における電荷密度(上段)、東向き電場強度
 (中段)、海抜(下段) [113]

また、地磁気誘導電場の向きを東向きから南向きまで変化させそれぞれの状況下での GIC を算出した結果(図 4-6)、1. 海岸線付近で GIC が強まる傾向がある、2. 送電網 の端点では電流が集中して GIC が強まる、3. 送電線が密集する地域で電流が集中し GIC が強まる、との特徴が挙げられている。



図 4-6 GIC の発生規模。円の大きさは GIC 強度を示し、青丸が GIC の流入、赤丸が GIC の流出を表す。左上矢印にて誘導電場の向きを表す。 [113]

以上より、日本における GIC は、複雑な地形と地下構造に起因して、磁気嵐の状況 (電流の方向)によって誘導電場の強さが大きく異なるため、より正確な GIC の影響 を見積もるには、Nakamura et al., 2018 [113]のモデルのインプットとなる電離圏・磁 気圏電流の高精度な情報が必要となる。

そこで本項では、宇宙天気現象の頻度とGIC規模の関係性をこれまでの知見から検 討する。Kappenman, 2004 は、中部電力で測定されたGICを分析し、GIC規模とDst 規模には線形の関係性があるとした(図 4-7)。さらに、巨大宇宙天気現象に対しても 線形性が外挿できると仮定すれば、1859年のキャリントンイベントの推定値の中の最 大規模の値Dst~-1700nT(2.6.1節)に対応するGICは、1989年3月の磁気嵐時の 3倍の強度になると見積もることができるとしている[114]。2.6節にて議論した磁気 嵐規模の定義をもとに、図 4-7からGIC規模を読み取ると、100年に1回、1000年に 1回規模のDstで生じるGICは、それぞれ約95A,約135Aとなる。宇宙天気現象の 頻度とGIC規模を表 4-2に示す。



GIC vs Dst in Central/Southern Japan

図 4-7 Dst 指数の絶対値と中部電力で測定された GIC の関係 [114]

	日常~複	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
	数回/年				
Dst [nT] 1)		$\sim -220^{*1}$	$\sim -450 \pm 30$	$\sim -650 \pm 110$	~-930
					[-320, -1520]
GIC [A] 2)		~30	$\sim\!\!65\!\pm\!5$	$\sim \! 95 \pm 15$	~135
					[45, 225]

表 4-2 宇宙天気現象の頻度と GIC 規模

1) 2.6 節参照

2) 図 4-7 から目視で読み取った値

Tsubouchi and Omura によると、図 4-7 にて GIC 規模が約 100A となる Dst = -700 nT 以下の磁気嵐の回帰周期は約 170 年であり、すなわち 100 A を超える GIC の回 帰周期は約 170 年となることを意味する [92]。しかし、例えば図 4-2 にあるように、数 分の時間スケールで GIC が急増し、100 A を超えることもある。本項では、Dst 指数を ベースにした議論をまとめたが、このような数分の時間スケールで変動する現象を 1 時 間の平均値である Dst 指数では評価することができない点は注意が必要である。

4.1.3. 地磁気誘導電流(GIC)に関する宇宙天気の影響マトリクス

4.1.2節からまとめた宇宙天気の影響マトリクスを表 4-3に示す。

		発生頻度と影響				
宇宙天気現象	被害	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

表 4-3 宇宙天気の影響マトリクス

4.1.4. 今後の課題

- 電離圏・磁気圏電流の高精度な入力をもとにした GIC の計算
- 各変電所(変圧器)の耐性を考慮した影響評価
- 変圧器そのものの影響だけではなく、ドミノ倒しのトリガーとなる可能性の検討(北海道胆振東部地震に伴う大停電等)

日本国内における、停電が発生する主な原因として、地震や台風、暴風雪などが挙げ られる。近年の大規模停電発生例としては、2018年の北海道胆振東部地震に伴う北海道 全域停電や、2019年の台風 15号による千葉県大規模停電が挙げられる。実際に発生し たこれらの停電から、GICによる停電の規模や影響、復旧までの段取りと期間などを推 論することができる。2018年の北海道胆振東部地震では、地震に伴う発電所の停止や送 電線事故に伴う停電、需給バランスの崩れによる周波数の低下等の複合要因により、北 海道全域に亘る大停電が発生したとされる。地震発生後には最大約 295 万戸が停電して いたが、そのうちの約 99%が発生後約 2 日以内に停電から復旧した [115]。

4.1.5. 地磁気誘導電流(GIC)による電力障害の事例

過去の GIC による電力システムを中心とした地表インフラへの被害事例を表 4-4 に 示す。表 4-4 には、発生日と影響事象概要のほか、発生時の Kp 指数を併せて示してい る。また、電力システムへの被害事例は 1859 年のキャリントンイベントから多数報告 されており、事例と比較できるよう、1800 年以降の太陽活動推移と代表的な宇宙天気現 象の発生タイミングを図 4-8 に示す。



図 4-8 過去の太陽活動(黒点数)推移と代表的な宇宙天気現象 [116]

発生日	影響事象概要	Kp 指数
1859/8/28	・世界的な電信障害や電信局での火災が報告され	No data
(Carrington	た [117]。	
Event)		
1872/2/4	・ヨーロッパ全域で電信障害発生 [118]。	No data
1882/11/17-18	・アメリカ北東部・中西部、イギリスで電信障害発	No data
(The Transit	生 [117]。	
of Venus	・シカゴ証券取引所が終日閉鎖 [117]。	
Storm)		
1903/10/31-11/1	・全世界で電信障害発生、大西洋ケーブルで障害	No data
	発生 [117] [118] [119]。	
	・スイスで停電が発生し、路面電車が運行停止	
	[117] _°	

表 4-4 GIC による電力システム等の地表インフラへの被害事例

発生日	影響事象概要	Kp 指数
1909/9/25-9/26	・日本で地磁気誘導電流(GIC)の影響により、国	No data
	内外の長距離電信に障害発生 [120]。	
1921/5/13~15	・ニューヨークの信号タワーで火災発生。信号シ	No data
(The New	ステムに障害発生 [117]。	
York Railroad	・The Central New England 駅で火災発生	
storm)	$[117]_{\circ}$	
	・スウェーデンの電話局で火災発生。電話交換機	
	に深刻なダメージ [46] [118]。 100km~200km の	
	電話線に 10V/km (1000V 以上)の電圧が印加	
	されたことが原因。	
	・テキサス州でオーロラが観測され、ニューヨー	
	クではオーロラアークも観測された	
	・ニューヨークからのラジオは 5800km 先の仏ボ	
	ルドーまで届いた一方で、ニュージーランドのラ	
	ジオは強度が不規則となった。 [85]	
1940/3/24-25	・米国ミネアポリスの電力網で保護リレーの不要	Kp9
(The Easter	動作 [110]。	(3/24 12:00-18:00)
Sunday	・スコットランドとニューファンドランド間の大	
Storm)	西洋海底ケーブルに 2600V の電圧発生 [121]。	
	・ニューイングランド、ニューヨーク、ペンシルベ	
	ニア、ミネソタ、ケベック、オンタリオで停電発	
	生 [121]。	
	・アメリカとノルウェーで電信障害発生 [118]。	
	・アメリカで電話線に障害が発生し、多くのオフ	
	ィスで修復作業を要した [117]。	
1946/3/28	・オンタリオの Port Arthur と Crow River で変	Kp8
	圧器がトリップ2 [118]。	$(3/28\ 3:00-15:00)$
1946/9/22	・オンタリオの Port Aethur で変圧器がトリップ	Kp9
	[118] _°	(9/22 9:00-12:00)
1957/1/21	・大西洋ケーブルの電力供給回路に障害発生	Kp8
	[118]。	$(1/21 \ 18:00-24:00)$

表 4·4 GIC による電力システム等の地表インフラへの被害事例

² 異常を検知した際に、遮断器が作動し、変圧・送電等の動作を停止させること。機器の故障を防 ぎ、早く復旧させるための機能。

発生日	影響事象概要	Kp 指数	
1957/9/22	・アメリカ北部で変電器が飽和し、230kV ブレー	Kp8	
	カがトリップ [118]。	(9/22 9:00-24:00)	
1958/2/9-2/11	・Western Union 社の北大西洋海底ケーブルに障	Kp9	
	害発生 [121]。	(2/821:00-24:00)	
	・カナダのトロントで停電発生 [110] [118]。		
	・北米、カナダの電力網で保護リレーの不要動作		
	$[110] \ [118]_{\circ}$		
1960/11/13	・大西洋ケーブルの電力供給回路に障害発生	Kp9	
	[118] _°	(11/13 3:00-9:00)	
	・スウェーデンで 30 回線のブレーカがトリップ		
	[118]。		
1972/8/2	・サウスダコタの電線にて異常電圧発生。同様の	Kp9	
	事象がウィスコンシンでも発生 [121]。	(8/4 21:00-24:00)	
	・カナダの Manitoba Hydro 社で電力の急激な降		
	下(164MW から 44MW へ)を確認 [121]。		
1972/8/4	・北米、カナダの電力網で保護リレーの不要動作	Kp9	
	[110]。	(8/4 21:00-24:00)	
1979/8/4	・アイオワ州などで、AT&T の長距離ラインに障	Kp4	
	害発生 [120]。	(8/4 18:00-21:00)	
1982/7/13,14	・スウェーデンで4つの変圧器と15のラインがト	Kp9	
	リップ [118]。	$(7/14\ 18:00-24:00)$	
	・スウェーデンで鉄道信号が誤作動 [118] [122]。		
1989/3/13-3/14	・下記ケベックストームの実例を参照。	Kp9	
(Quebec		(3/13 18:00-24:00)	
Storm)			
1989/3/13・3/14(ケベックストーム)の実例			

表 4-4 GIC による電力システム等の地表インフラへの被害事例

・カナダのケベック、モントリオール周辺で地磁気誘導電流(GIC)の影響による送電システムの障害(保護リレー不要動作)で約9時間の停電。約600万人に影響(3/13 9:44) [58]
[110] [117] [118] [123]。

・イギリスで GIC 発生 [46]。

・太平洋、大西洋の海底ケーブルで大きな電圧変動があった [46] [58]。

・米国ニュージャージー州で発電所のトランスの焼損 [110]。

・スウェーデンで5つの130kV ラインがトリップ [118]。

発生日	影響事象概要	Kp 指数
1989/9/19	・Public Service Electric & Gas system にて変圧	Kp8
	器障害発生 [118]。	(9/19 0:00-3:00)
1989/10/20	・進相コンデンサ(SC)の障害発生 [118]。	Kp8
		(10/20 15:00-18:00)
1989/11/17-18	・進相コンデンサ(SC)の障害発生 [118]。	Kp8
		$(11/17\ 15:00-18:00)$
1990/3/30	・進相コンデンサ(SC)の障害発生 [118]。	Kp8
		(3/30 0:00-6:00)
1991/3/24	・スウェーデンの9つの220kVラインと1つの変	Kp8
	圧器がトリップ [118]。	(3/24 0:00-24:00)
1991/4/28	・アメリカの Allegheny Power Systems で進相コ	Kp6
	ンデンサ(SC)の障害発生 [118]。	(4/28 21:00-24:00)
1991/5/16	・アメリカの Allegheny Power Systems で	Kp6
	Capacitor neutral harmonic alarm が発生	(5/16 21:00-24:00)
	[118] _°	
1991/5/28	・ケベック―ニューイングランド間の直流リンク	Kp5
	の避雷器で障害発生 [118]。	(5/28 18:00-24:00)
1991/6/4-5	・BC Hydro 138kV ラインがトリップ [118]。	Kp5
		(6/5 3:00-15:00)
1991/6/10	・アメリカで変圧器や様々な進相コンデンサに障	Kp7
	害発生 [118]。	(6/10 3:00-24:00)
1991/10/28	・New England DC ラインがトリップし、サー	Kp8
	ビス停止 [118]。	(3/24 0:00-24:00)
	・New Mexico の高電圧直流がトリップ [118]。	
1991/11/8	・アメリカの電力システムにマイナーな影響	Kp8
	[118]。	11/8 18:00-24:00)
1992/9/10	・アメリカの Central Hudson Gas & Electric の	Kp7
	115kV 電力ラインで進相コンデンサがトリップ	(9/10 12:00-15:00)
	[118]。	
1992/11/11	・アメリカの Central Hudson Gas & Electric の	Kp4
	115kV 電力ラインで進相コンデンサトリップ	(11/11 0:00-3:00)
	[118]。	

表 4:4 GIC による電力システム等の地表インフラへの被害事例

発生日	影響事象概要	Kp 指数
1998/5/2-5/6	・New England 電力会社は警戒のためカナダへの	Kp8
	電力配分を削減した(5/2-5/4) [117]。	(5/3 18:00-5/4 3:00)
2000/7/15,16	・太平洋、大西洋の海底ケーブルで電圧変動があ	Kp9
(Bastille	った [46]。	$(7/15\ 15:00-24:00)$
event)		
2001/11/6	・ニュージーランドの South Island Power	Kp8
	Network で保護リレーの不要動作 [110] [124]。	$(11/5\ 21:00-03:00)$
2003年10月末	・スウェーデンのマルメで地磁気誘導電流(GIC)	Kp9
から 11 月初旬	の影響で保護リレーの不要動作が発生し、約1時	(10/30 15:00-21:00)
(ハロウィンイ	間の停電:約5万人に影響、被害額50万米	
ベント)	(10/30) [110] [120] [125] [126].	
	・南アフリカで電力トランス焼損 [110] [120]。	
	・ウィスコンシンとニューヨーク間の電力ライン	
	で高電流レベルを検出。 [125]	

表 4-4 GIC による電力システム等の地表インフラへの被害事例

表 4-4 を基に、GIC による電力システムへの被害事例を Kp 指数ごとにまとめた(図 4-9、No data は除く)。GIC による電力システムへの被害事例は、全体における割合は 73% (30 例中 22 例) で Kp 指数が 8 もしくは 9 のときに発生しており、電力システム への被害事例は Kp8 以上の時に多発すると言える。



図 4-9 Kp 指数ごとに分類した GIC による電力システムへの被害事例数

4.1.6. 日本の電力網への影響

(1) 過去の宇宙天気現象に対する耐性

2003 年 10 月 31 日のハロウィンイベント時に発生した磁気嵐に伴う GIC では、特に 変圧器の異常は見られなかったとの報告がある [110] (図 4・2)。電力事業者に確認した ところ、こうした過去に経験のある GIC の規模であれば日本の電力網は十分耐性がある といえるが、それ以上の GIC に対する耐性は不明であるという見解であった。

(2) 変圧器の GIC 耐性に関する調査実験

これまで GIC を想定した準直流成分に対する変圧器の耐性に関する研究として、東京 電力と変圧器メーカーによる共同研究が実施されている [127]。その研究では、変圧器 の小型モデル、実機モデルを製作し、GIC の影響として、変圧器鉄心周辺構造体の温度 上昇に着目して評価された。

その結果、直流偏磁⁽³⁾時には鉄心周辺構造体(鉄心当て板や鉄心支え)の温度が最も高 くなるが、鉄心の磁界の強さが 8×10⁴ A/m の規模(鉄心飽和領域に至ると考えられるレ ベル)においても、鉄心周辺構造体の温度上昇は 110℃程度であり、GIC の影響は無視 できると考えられる、との結論に至っている。

(3) 保護リレーへの影響

GICによる電力網への影響として、変圧器磁気飽和に起因する高調波発生による保護 リレーへの影響が懸念される。平成26年度経産省調査[110]においても保護リレーへの 影響について調査されており、デジタル保護リレーのフィルタにより、高調波成分や直 流成分は除去されることから、ハイドロ・ケベック社の事例のような保護リレーの不要 動作によるコンデンサ設備の停止はないと考えられる、と結論づけられている。

これについて事業者に確認したところ、「主要な送電網については、現在の保護リレー はほぼ全てデジタル型である」との回答が得られた。このことから、平成26年度経産省 調査[110]の結論に変わりはないと考えられる。

このように過去に日本で観測された GIC 規模であれば、日本の電力網は十分な耐性を 有すると言えるが、未知の規模については現象規模の推定と実験を行い、その影響評価 を行うことが肝要である。本件については、経済産業省産業構造審議会保安・消費生活 用製品安全分科会電気設備自然災害等対策ワーキンググループでも議論されており、中 間報告書(平成 26 年 6 月)では事業者からの評価及び今後の対応として以下の通り報 告されている [128]。

中間報告書 4.4 太陽フレアに伴う磁気嵐に対する変電設備等の耐性評価(1)

日本においては、そもそも太陽フレアに伴う磁気嵐による影響が限定的であり、

³ 変圧器鉄心が偏った一方向に磁化される現象

仮に影響を受けるとしても、設備の部分的かつ一時的な影響の可能性に止まり、著 しい(広範囲かつ長期間)供給支障発生の可能性が極めて低い。

中間報告書 4.5 今後の対応(4)

<巨大太陽フレアに伴う磁気嵐に対するリスク評価等及び対策の充実化>

事業者は、上記調査研究等により、送変電設備に重大な影響を与えるような新た な知見が得られた場合には、リスク評価等を改めて行い、必要に応じ、対策の充実 化等の検討を図ることが重要である。
4.2. 経済影響

巨大磁気嵐が発生した場合、地磁気誘導電流(GIC)が流れることにより、送電網が損 傷する恐れがある。その結果、電力供給が滞り電力を利用する各業種の生産高が低下す る。地磁気誘導電流(GIC)による停電の経済影響を試算した先行研究として、アメリカ 合衆国を対象とした研究結果がある[129]。

磁気嵐の規模により、停電が起こる地域(サブオーロラ帯:オーロラが通常出現する 地域より少し低緯度側で、磁気緯度 50 度前後の地域)が異なる。磁気嵐の規模によっ て、州ごとに電力損害を求め、産業ごとの経済影響を足し合わせて影響が試算され、最 悪の場合、下記の図 4-10 の通り 485 億ドル/日の損失が発生する恐れがあるとされてい る。また、図 4-11 及び図 4-12 に示す通り、各産業や海外へのサプライチェーンに対し ても影響を及ぼす。



図 4-10 アメリカ合衆国における地磁気誘導電流(GIC)に起因する停電による損失 額。停電発生地域の設定(S1~S4、右図)ごとに示す [129]



S1/S2 Impact by Industrial Sector

図 4-11 アメリカ国内における各産業への影響 [129]

S1/S2 Impact by International Supply Chain



日本において地磁気誘導電流(GIC)により停電が発生した場合の経済影響を、経済 産業省による地域間産業連関表を用いて試算する。産業連関表とは下記の図 4·13 に示 す通り各地域・各サービス及び製品がそれぞれどの程度生産され、何に投入されたか示 されたものであり、地域間・産業間の影響度合いの指標となっている。

日本で発生しうる GIC について 4.1.3 節で考察を行なったが、変電施設等への具体的 な影響を試算することは現時点では困難であった。そこで、極端現象による GIC が局所 的に強く流れた結果、1 つの地域に停電が発生する場合の経済影響を試算する。 Nakamura et al [113]の計算結果によると、関東地方のある特定の変電施設に最も大き い GIC が流れやすい傾向が見られた。そのことから、極端現象では関東地方の変電施設 に障害が発生する可能性が高く、その結果関東地域の発送電が停止した場合をここでは 想定する。磁気嵐の規模に応じて停電の継続期間が長くなると想定されるが、継続期間 の不確定要素が大きいため、1 日あたりの損害額を試算する。

経済産業省が公表している平成 17 年(2005 年)の地域間産業連関表を参照すると、 電力事業の関東地域内生産額は1年あたり4兆9852億3600万円である。この生産額 には、関東地域電力産業に対する原材料の投入額(上流側)である、1年あたり2兆7697 億5900万円が含まれている。関東地域の発送電が1日停止した場合に、136億4900万 円/日の投入額直接損失が発生することとなる。

また、地域間産業連関表には逆行列係数表が含まれている。「逆行列係数」とは、ある 地域・産業に対して新たな最終需要が1単位発生した場合に、当該地域・産業の生産の ために必要とされる(中間投入される)財・サービスの需要を通して、各地域・産業の 生産がどれだけ発生するか、直接・間接の生産波及の大きさを示す係数である。各地域・ 産業の投入額と逆行列係数の積が間接的生産波及に対する影響額を示している。

	産出		産業Δ	密 業Β	産業の	最新	冬需要	帝 田 今 卦	
投入			座未A	度未D	座未0	国内需要	純輸出	度山口可	
産業	A		10	25	2	1) -3	44	[
産業	В		12	240	56	18	1 50	539	誰に販売したフ
産業	С		5	77	100	17	0 11	363	
(賃金		4	120	160			284	
17] 刀[1][[1][[1][[1][[1][[1][[1][[1][[1][[1]	利潤		13	42	45			100	
原材料	輸入		0	35	0			35	
投入台	計		44	539	363	36	1 58		
何を投入したか(何を使って生産したか) 投入金額と産出金額は等価でなければならない					ならない				

図 4-13 産業連関表の見方の例

逆行列係数を用いて、地磁気誘導電流(GIC)により関東地域の発送電が停止し、電 力産業における需要が消滅した場合の原材料の生産(上流側)に対する経済影響を計算 する。地域間産業連関表を用いて関東地域の電力産業に関する上流側の他地域・産業に 波及する影響を計算した結果の一覧表を図 4-14 に示す。また、上流側波及効果の計算 のフローチャートを図 4-15 に示す。経済産業省が公開している最新の地域間産業連関 業のデータが平成17年(2005年)と古いものの、図4-16に示す通り電気事業連合会 が公表しているエネルギー需要量の推移をみると 2005 年をピークに、それ以降増加し ていないため損失額の妥当性に影響しないと考えられる [130]。

これらのデータを用いれば、関東地域 電力産業の年間の中間投入需要額に対して 2465億7500万円の生産波及が発生する計算となっており、関東地域の発送電が1日 停止した場合に約6億7500万円/日の投入額間接的損失が発生すると試算される。



図 4-14 関東地域の電力産業に関する間接的経済影響

0.00001699 0.00001722 0.00000091 0.00000344

0.0003561 3.44447E



関東地域 電力産業の波及効果フローチャート

図 4-15 関東地域の電力産業の上流波及効果フローチャート



図 4-16 国内エネルギー需要の推移

また、電力生産が停止した場合、原材料投入側(上流側)だけでなく、産出された電力を使用する下流側にも影響を及ぼす。地域間作業連関表によると、関東地域電力に対する各地域・産業(内生部門合計)の年間需要額は約3兆4800億円である。関東地域の発送電が24時間停止した場合に下流側産業の95億3200万円の直接損失が発生することとなる。下流側の各地域・産業毎の経済影響額を図4-17に示す。



図 4-17 関東地域の電力が 24 時間停止した場合の各産業に対する経済影響

以上を合計した 238 億円/日が一般的な産業連関分析の結果得られた試算結果である。 一方、先行研究 [129]で用いられた異なる産業連関分析手法を用いた試算結果につい ても記述する。関東地域の発送電が1日停止した場合、136億4900万円/日の投入額直 接損失が生じる点は共通であるが、上流へ波及効果は34億2000万円/日、下流へ波及効 果は25億9000万円/日、さらにその間接的な波及効果が2億円/日との結果が得られた。 これらを合計すると約198億円/日の損失と試算される。

これらを総合すると関東地域の発送電が1日停止することで、約198~238億円の損失 が発生する可能性が考えられる。

今回は関東地域の電力が24時間停止した前提で試算したが、GICのシミュレーション結果等の数値との整合性を考慮し、経済影響の試算の精度を向上させることが今後の 課題である。

5. 衛星運用における宇宙天気現象の影響

太陽高エネルギー粒子(SEP)、放射線帯電子(~数 MeV)、サブストームと呼ばれる 磁気圏じょう乱による地球方向へのプラズマ注入やオーロラの源となるサブストーム高 温電子(数 keV~数+ keV)によって、衛星に複数の種類の障害が引き起こされることがあ る。衛星運用に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響・被害を表 5-1 に示す。

表 5-1 衛星運用に対する障害の要因となる宇宙天気現象とその影響

分野	影響と被害	障害の要因となる宇宙天気現象
衛星運用	衛星帯電(表面帯電、深部帯電)(誤動作等	サブストーム高温電子、放射線
	の不具合、最悪の場合衛星損失)	带電子
	シングルイベントアップセット(誤動作等	太陽高エネルギー粒子(SEP)
	の不具合、最悪の場合衛星損失)	
	太陽電池の劣化	
	軌道・姿勢じょう乱(衛星姿勢制御(磁気	超高層大気の加熱
	トルカ) 異常、衛星大気ドラッグ) (最悪の	
	場合衛星損失)	
	衛星通信への影響	電離圏シンチレーション

我が国の衛星で実際に宇宙天気現象が原因となって損失に至ったと推定されている事 例について、2000年のX線天文衛星「あすか」(ASTRO-D)および2003年の環境観 測技術衛星「みどり2号」(ADEOS-II)の2件が報告されている。詳細については後述 するが、「あすか」は超高層大気の加熱による姿勢異常、「みどり2号」はサブストーム 高温電子による帯放電の結果、大部分の電源を喪失したと推定されている。本章では多 岐にわたる衛星運用への宇宙天気現象の影響評価を行う。

5.1. 衛星帯電

統計調査によると、宇宙環境に起因する衛星障害の 1/4 から半数以上が帯電・放電に よる障害である [131]。衛星帯電には表面帯電と深部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もある。

帯電による故障を防ぐために、宇宙天気予報を基に姿勢変更などのクリティカルな運 用の回避や、不具合発生時の対応体制の準備、状況により衛星各機器の電源の遮断、な どの措置が一般に取られている。

5.1.1. 表面帯電

5.1.1.1. 表面帯電のメカニズム

表面帯電は、衛星表面部材および構造体に流入する衛星周辺の電子とイオン、及び衛 星から放出される二次電子、後方散乱電子、光電子などの時間総和の結果、蓄積された 電荷によって生じる(図 5-1)。

周辺の宇宙プラズマに対して帯電することを絶対帯電(absolute charging)と呼び、 その電位は平衡電位とも呼ばれる浮遊電位(floating potential)で、単に衛星電位 (charging potential)と呼ばれることが多い。



図 5-1 衛星への流出入電流 [132]

衛星表面部材間および衛星構造体との電位差を乖離電位(differential charging potential)と呼び、その帯電を局所帯電(differential charging)と呼ぶ。乖離電位が、 放電電位に達すると放電が起こり、衛星表面の太陽電池パネル損傷や衛星の誤動作など、 衛星不具合を引き起こす。 静止軌道付近では、サブストーム時に軌道上でサブストーム高温電子が増えることで、 外部からの電子電流が増加するため衛星が深く負に帯電し、乖離電位が大きくなると、 放電現象につながる。磁気圏尾部から静止軌道近傍の真夜中側に侵入したサブストーム 電子は、その後、朝側にドリフトする。そのため、サブストーム電子フラックスは、真 夜中側から朝側にかけて高く、過去の表面帯電による障害も、その領域で多く起こって いる(図 5-2)。

また、障害を起こす表面帯電に主に関係するのは数 keV~数+ keV の電子である。こ れは、電子温度が数 keV 以下の場合、2 次電子や光電子放出により、帯電電位が深く負 に発達しないこと、また百 keV 程度以上のエネルギーを持つ電子は、表面部材を突き抜 けてしまうため、表面帯電の主要な電流成分にならないためである。電子温度が、数 keV ~数+ keV の範囲では、衛星の負電位は温度にほぼ比例する形で大きくなる。

別の要素として、地球の蝕(影)に入った日陰の場合、光電子が出なくなるため、衛 星電位が日照の場合と比べて、深く負に帯電する。乖離電位も大きくなる傾向にあり、 放電のリスクが高まる。また、過去の不具合事例から、日陰から日照に出る領域では、 放電による障害が起きやすいことが知られている。これには、光電子放出が始まること による表面電位の発達の違いによる乖離電位の変化や、太陽電池の発電開始の影響など が考えられる。

極軌道衛星では、磁気圏からオーロラ帯へ降り込む数 keV~数+ keV の電子が衛星帯 電を引き起こす。そのため、極軌道衛星でも、そのような電子の降り込みが発生するサ ブストーム時に、衛星がオーロラ帯上空を通過している時に発生しやすい。

5.1.1.2. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算

衛星電位は、乖離電位が放電電位に達すると放電が起こり、衛星全体の帯電が緩和されることから、表面帯電を発達させるサブストーム高温電子のフラックスが増加しても、 放電電位以上に乖離電位が増大することは無いが、帯電から放電への繰り返しの頻度が 増加することで、衛星障害のリスクが高まると考えられる。

これまでの研究により、静止軌道における衛星表面電位は 10~50keV の電子フラック スの増大によって、大きく発達することが知られている [133]。このようなプラズマ環 境はサブストームの際に発生しやすい傾向にあり、3 月や 9 月、地磁気地方時の真夜中 付近から朝側にかけて、そして太陽活動の下降期に多く発生する傾向がみられている(図 5-2)。衛星障害の発生傾向とも対応している [134]。

一方、サブストーム自体は太陽活動極大期にも多く発生しているが、表面帯電に伴う 衛星障害の発生数はあまり対応していない。このことは、宇宙環境じょう乱の大きさと 表面帯電に起因する衛星障害との関係が複雑であることを示している。また、衛星の表 面帯電自体も、衛星の構造体や表面部材の材質等によって大きく変化するため、問題を 更に複雑にしている。このように、表面帯電の発達とそれに起因する周囲の宇宙環境変 動の関係は未解明の部分も多く、今後の研究課題である。



磁気圏じょう乱指数 Kp 依存性 [133]

5.1.1.3. 表面帯電に関する宇宙天気の影響マトリクス

上記の通り、データ解析が実施された期間においては、サブストームに伴う磁気圏の 活動度の増加に伴い、人工衛星周辺のプラズマ環境における表面帯電・放電のリスクが 高まっていた。また、同リスクは太陽活動下降期に増加する可能性が高いと考えられる。

しかしながら、静止軌道・極軌道衛星の表面帯電・放電リスクは、磁気圏の活動度の 増加と単純に相関しておらず、①衛星がサブストーム高温電子の増大領域に位置してい たか、②増大したサブストーム高温電子のエネルギースペクトル(10~50keVの電子の 増加度合)、③衛星の形状・材質およびその時の姿勢および日照・日陰状態、によって帯 電値や乖離電位の状態が異なるため、一律の評価は困難である。また、100年や1000年 スパンについても、その頻度と影響を議論するには前述のように条件が複雑であること、 及び衛星障害のデータが乏しいことから困難である。しかし、衛星利用が始まって以来 「みどり2号」の損失につながった事例が少なくとも1件発生していることから、100 年に1回の現象規模では運用の継続が困難になる深刻な影響を及ぼすものと推察される。 衛星の設計基準も改良が続いていることを加味しても、詳細の検討については今後の課 題とする。

以上をまとめた宇宙天気の影響マトリクスを表 5-2 に示す。

		発生頻度と影響					
宇宙天気現象	被害	日常~複 数回/年 1回/1年	1 回/10	1 回/100	1回		
			1四/1平	年	年	/1000 年	
	人工衛星(表面	なし		ちり (十			
サブフトーム	帯電・放電等)		なし		のり(入		
サノストーム 高温電子	(誤動作等の不			あり	阪田に曲	未評価	未評価
	具合、最悪の場						
	合衛星損失)			/川東門/			

表 5-2 宇宙天気の影響マトリクス

5.1.1.4. 今後の課題

静止軌道の表面帯電は、衛星の位置とサブストームのタイミング(サブストームに伴 う高温電子増大領域の位置関係)、サブストーム高温電子のエネルギースペクトル、さら に個々の衛星の形状・材質、その時の姿勢により決まる。また、リスク評価には、衛星 固有の放電閾値、放電回数の見積もり、日照か日陰か、など考慮すべき要素が多い。 衛星周辺の宇宙環境と衛星表面帯電環境の観測データと解析が不足している。

111

5.1.1.5. 表面帯電による衛星障害の事例

表面帯電による衛星障害の事例を表 5-3 に示す。

発生日	影響事象概要	宇宙天気情報
2003/10/23-11/6	・日本のみどり2号衛星が帯電の影響によ	太陽フレア規模:
(ハロウィンイ	る障害で観測不能に(10/24 16:12UTC か	X1 (10/26 18:19)
ベント)	ら発生電力低下) [120] [135]。	X17 (10/28 11:10)
	・ISS のロボットアームとワークステーシ	X28 (11/04 19:29)
	ョンを地上コマンドで停止(10/28-10/30)	
	[58]。	陽子フラックス:
	・GALEX の紫外線帯電装置の検出器が高	466pfu (10/26 22:35)
	電圧に帯電したため、電源 OFF とした	29500pfu (10/29 06:15)
	(10/29) [58].	1570pfu(11/03 08:15)
	・X-ray Timing Explorer で放射線比例計	353pfu (11/05 06:00)
	数管 (PCA) が高電圧を検知した。全天ス	
	カイモニタ装置は自動的にシャットダウ	
	ンした (10/29) [58]。	
2010/4/5	・米国の Galaxy15 衛星がオーロラ活動に	2565nT
	伴う帯電の影響によりコマンドを受け付	(4/5 9:29)
	けない状態に。約9ヶ月後に復旧 [120]。	

表 5-3 表面帯電による衛星障害の事例

みどり 2 号について、宇宙開発委員会からの報告書 [135]に詳細な推定シナリオが報告されている。みどり 2 号(ADEOS-II)は、2002 年 12 月に打ち上げられた環境観測技術衛星である。2003 年 10 月 24 日 16:12UT ごろから急激な電力低下が発生した。この原因としては以下の 2 段階のシナリオで発生したと推定されている。

まず、10月24日以前の長期にわたり太陽電池の電力送電線(ハーネス)が長期間の熱 サイクルを受けて損傷。次に接地されていない太陽電池パドルハーネス表面の多層断熱 材がオーロラ帯通過時や日陰時に帯電、ハーネスとの間で単発放電が繰り返し発生する。 これにより損傷したハーネス間に炭化導電路が形成・成長する。10月24日15:50UTご ろにみどり2号がオーロラ帯を通過。このときサブストーム電子の流量が通常よりも2 桁高かったため、通常よりも多く帯電し、炭化導電路を通じて発熱を伴う短絡(持続放 電)に発展した。隣接するハーネス(プラス側とマイナス側)間の持続放電の発熱によ り、隣接するハーネスに次々と熱損傷が発生し放電が波及。この事象がハーネス東全体 に至り、大電力ハーネス束が解放または短絡した。この事象は地上試験により再現済み である。

5.1.1.6. 事業者との議論

静止軌道衛星における表面帯電を起こしうる深刻なプラズマ環境の国際標準として、 ISO-19923 "Space environment (natural and artificial) – Spacecraft potential estimation in worst case environment"が制定されている。ISO-19923 では、複数の宇 宙環境モデルを用いて帯電解析を行い、推定された電位差を比較・検討した結果、 SCATHA 衛星の観測結果を使用した SCATHA-Mullen1 の宇宙環境モデルが適用され ている。

衛星事業者は、JAXA 帯電・放電設計標準や、その他の宇宙環境モデルを組み合わせ て帯電解析を行うことで、ISO-19923の定めるプラズマ環境下の表面帯電が許容できる ように衛星を設計している。

人工衛星の帯電・放電に伴う影響事例の1つとして、次のような報告がある。2018年 6月2日、準天頂衛星みちびき3号機(静止軌道衛星)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という異常動作が発生し、スイッチが動作しなくなるという事 象が発生した[136]。その後、試験信号の送信を一時停止し、専門家の意見も聞きながら 原因究明と今後の運用方針の検討が行われ、2018年9月7日に試験信号の再開に至っ ている[137]。検討の結果、衛星上の放電現象によるスイッチ駆動装置の誤動作が原因 であるとされている[137]。

また、衛星帯放電によるノイズ重畳のメカニズムに関する研究報告がある。同報告で は衛星構体を模擬したアルミ板に静電気放電ガンを用いて放電ノイズを発生させ、アル ミ板各点における電位の変動を計測した結果、高周波の放電ノイズはパネル間を伝播す ることと、パネル上に引き回されているハーネスに放電ノイズが重畳することが確認さ れている。放電ノイズの電位の大きさは、放電位置と電位観測点との距離、または放電 箇所とハーネス位置との距離とは関係性がなく、放電位置から遠い地点でも高いノイズ 電位を観測している。この実験から、放電が起こることで、離れたパネル上に搭載され た機器に放電ノイズが伝播し誤作動を引き起こす可能性があるとしている [138]。

このように、現在の人工衛星は、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、表面帯電の発達とそれに起因する周囲の宇宙 環境変動の関係は未解明の部分も多く想定外の帯放電現象が発生する可能性があるとと もに、国際標準の定める宇宙環境を超える状況が発生した際にどのような影響が生じる かは不明であるのが実情である。

113

5.1.2. 深部帯電

5.1.2.1. 深部帯電のメカニズム

放射線帯電子が、衛星の深部まで侵入して帯電を起こす現象を深部帯電と呼ぶ。深部 帯電は、表面帯電に比べて帯電を解消するのが難しい他、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、部品の高性能化、高度化に伴い深部帯電による被害は顕 著になっている [139]。

5.1.2.2. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算

衛星の深部帯電は、放射線帯電子により生じるため、放射線帯電子増加の規模に基づき議論する必要がある。放射線帯電子の環境から、発生を予測する簡単な手法が、NASAから提案されている[140]。まず、放射線帯電子のエネルギースペクトルから、衛星構体や対象となる材料の厚みを考慮して、対象となる材料に流入する電流量を求め、その電流量が0.1pA/cm²以下であれば、追加のシールド等は必要無いとされている。より詳細な内部帯電モデルとしては、衛星の構造体を含んだ放射線の輸送コードによるシミュレーションがある。

深部帯電については、定性的には外部の放射線帯電子のフラックスが増えるほどリス クが増えると言えるが、実際には個々の衛星のシールド厚、放電閾値及び高い電子フラ ックスの継続時間等により発生の頻度が異なるため、一般的な発生頻度を見積もるのは 難しい。上記の簡易的な手法か輸送コードによるシミュレーションで個別の衛星ごとに 深部帯電の発生確率を評価する必要がある。

5.1.2.3. 深部帯電に関する宇宙天気の影響マトリクス

5.1.2.2 節の通り、深部帯電については、定性的には外部の放射線帯電子のフラックス が増えるほどリスクが増えると言えるが、個々の衛星の設計によるところが大きく、一 般的な発生頻度を算出するのが困難である。

表面帯電と同様、100年や1000年スパンについても、その頻度と影響を議論するには データが少ないため困難である。一方で、過去の衛星障害とその統計結果を踏まえると、 年1回程度の影響は考慮する必要があると考える。以上をまとめた宇宙天気の影響マト リクスを表 5-4に示す。

空中工厂				発生頻度と影	影響	
十田人风 - 田白	被害	日常~複	1回	1回/10	1回/100	1回
5%家		数回/年	/1 年	年	年	/1000 年
放射線帯 電子	衛星帯電(深部帯電・ 放電等)(誤動作等の不 具合、最悪の場合衛星 損失)	(低い が)可能 性あり	可能 性あ り	あり	未評価	未評価

表 5-4 宇宙天気の影響マトリクス

5.1.2.4. 今後の課題

軌道上で衛星障害発生時の宇宙環境の状態から深部帯電起因と思われる現象が生じた としても、事前に対象となるデバイスの放電閾値等を取得している事が少ないため、再 現試験やシミュレーションが難しい。今後は、少なくとも深部帯電が懸念される部材に ついては設計段階において、試験やシミュレーションで深部帯電・放電の可能性につい て予め検証しておくことが望ましい。加えて、衛星障害情報と宇宙環境データを用いた 深部帯電・放電の解析による事後解析の実現が必要である。

5.1.2.5. 深部帯電による衛星障害の事例

深部帯電による衛星障害の事例を表 5-5 に示す。

発生日	影響事象概要	AE 指数
1989/3/7-	・10 以上の衛星で帯電・放電を確認 [139]。	1503nT
21		(3/8 12:43)
1994/1/20	・Intelsat-K で障害 [46] [58]。	780nT
	・ANIK E1、ANIK E2 で深部帯電による障害。E1 は数時間後	(1/20 10:04)
	に復帰したが、E2 は復帰に数か月以上を要した [46] [58]	
	$[126]_{\circ}$	
1994/2/22	・静止放送衛星3号aが深部帯電を起こし、リレハンメルオリ	1544nT
	ンピックの中継が1時間中断した [58] [141] [139]。	(2/20 13:33)
1996/3/26	・ANIK E1 で深部帯電による障害 [139]。	594nT
		(3/26 3:44)
1997/1/11	・AT&T の Telstar401 で帯電障害、永久故障となった [58]	792nT
	$[120]_{\circ}$	(1/1 11:44)
2003/10/23	・NOAA17 でマイクロ波観測装置のスキャナが永久故障した	4056nT
-	(10/27) [58].	(10/29 6:16)
11/6	・GOES8のX線センサがOFFになり復帰しなかった。(10/27)	
(ハロウィ	$[58]_{\circ}$	
ンイベン	・DMSP F16 の改良型マイクロ波観測装置(AMSU)の主系発	
F)	信機が永久故障(10/28) [139]。	
	・GOESの電子計測値が飽和(10/28-10/30)。	

表 5-5 深部帯電による衛星障害の事例

5.2. シングルイベントアップセット

太陽フレアに伴う陽子(プロトン)や重イオンなどの高エネルギーの荷電粒子による 半導体論理回路の誤動作、または故障をシングルイベントアップセット(SEU)と呼び、 これにより衛星の姿勢を制御するための地球センサなどに異常が起こると衛星の姿勢が 乱れることがある。シングルイベントアップセットによる衛星障害の事例を表 5-6 に示 す。

発生日	影響事象概要	太陽	陽子 flux
		フレア規模	(>10MeV)
1989/3/12	・7 つの商用静止通信衛星の姿勢制御が困	X15/3B	3500pfu
-3/13	難となり、計 177 回のマニュアル制御を	(3/6 14:05)	(3/13 06:45)
	実行 [58]。		
1989/9/29-	・13の静止通信衛星 (TDRS-1、GOES-5、	X9.4	4500pfu
30	GOES-6 等)で SEU 多発 [58]。	(9/30 11:31)	(9/30 2:10)
	・NOAA-10 でコマンドなしのテレメトリ		
	変化やスターセンサの不具合 [58]。		
1989/10/19	• TDRS-1、TDRS-2、TDRS-3、GOES5、	X13	40000pfu
	GOES-6 で SEU 発生。	(10/19 12:58)	(10/20 16:00)
	・INSAT-1B の姿勢制御喪失 [58]。		
1991/3/24	・CRESS で SEU 率の上昇を確認、翌週	X9.4	43000pfu
	まで続いた。 [142]	(3/22 22:41)	(3/22 03:50)
2001/11/6	・MAP で SEU 障害 [46]。	X1	31700pfu
		(11/5 16:20)	(11/6 02:15)
2000/7/14	・EXOS-D (あけぼの) で SEU 発生 (7/16	X5	24000pfu
-7/17	8:10-7/17 3:20) [143] _o	(7/14 10:24)	(7/15 12:30)
(バスティ	・多くの静止通信衛星で姿勢喪失が生じ、		
ーユイベン	地上からのマニュアルコマンドで復帰		
F)	した(太陽センサの飽和現象、恒星セン		
	サの upset のため) [143]。		
	・ACE は太陽風速度測定器が一時的に出		
	力を停止した [143]。		
	・SOHO, YOHKO, TRACE の太陽撮像画		
	像に多くのノイズ (フラッシュ、スパー		

表 5-6 シングルイベントアップセットによる衛星障害の事例

発生日	影響事象概要	太陽	陽子 flux
		フレア規模	(>10MeV)
	ク)が観測された [143]。		
	・GOES-8 と-10 の両衛星の宇宙環境モニ		
	タ(SEM)の電子線計測(>2MeV)が		
	太陽フレア開始から丸 1 日間出力が停		
	止した(陽子の影響で飽和) [143]。		
	・WIND は太陽センサと恒星センサが止		
	まったが 7/16 に復帰 [143]。		
2002/4/21	・日本の火星探査機 Planet-B (のぞみ) の	X1	2520pfu
	通信系と電源系のシステムに不具合が	(4/21 04:21)	(4/21 23:20)
	生じた [144]。		
2003/10/23-	・GENESIS 衛星がセーフモード移行	X1	466pfu
11/6	$(10/23)$ $[139]_{\circ}$	(10/26 18:19)	(10/26 22:35)
(ハロウィ	・STARDUST でリードエラーに伴うセー	X17	29500pfu
ンイベン	フモード移行(10/24) [58]。	(10/28 11:10)	(10/29 06:15)
ト)	・INTEGRAL がセーフモード移行		1570pfu
	[139] _°	X28	(11/03 08:15)
	・SOHO コロナ観測がセーフモード移行	(11/04 19:29)	353pfu
	[139] _°		(11/05 06:00)
	・GOES9、GOES10 で SEU 発生増加、		
	ビット反転(10/24) [139]。		
	・CHANDRA が観測停止 (10/24		
	13:34UT、10/26、11/2) $[139]_{\circ}$		
	・RESSI で搭載コンピュータが自然に停		
	止(10/25、10/28) [139]。		
	・SMART-1 でイオンエンジンが遠地点で		
	8回に渡って予定外の自動停止(10/26)。		
	発生電力の低下も発生 [139]。		
	・米国の火星探査機 Mars Odyssey で太陽		
	高エネルギー粒子による障害(10/28)		
	$[120]_{\circ}$		
	・MARS ODYSSEY の放射線観測装置に		
	障害、放射線観測装置 MARIE で温度異		
	常(10/28) [139]。		

表 5-6 シングルイベントアップセットによる衛星障害の事例

発生日	影響事象概要	太陽	陽子 flux
		フレア規模	(>10MeV)
	 ・日本のこだま(Kodama)衛星が太陽高 		
	エネルギー粒子の影響により地球セン		
	サに異常発生(10/28 15:30) [120] [139]。		
	・ICESat の GPS をリセットした [58]。		
	・TRMM で軌道上メンテナンスが増えた		
	(10/28) [58].		
	・Microwave Anisotropy Probe でスター		
	トラッカがリセットされ冗長系に切替		
	わった(10/28) [58]。		
	・CHIPS の搭載コンピュータがオフライ		
	ンになり 18 時間、衛星とコンタクトが		
	とれなくなった(10/29) [58]。		
	・FedSat のデータが取れなくなった		
	(10/30) [58] _o		
	・ACE と WIND のプラズマ計測が停止		
	$(10/28 \cdot 10/30)$ $[139]_{\circ}$		
	・CLUSTER 衛星 4 基のうち、いくつかで		
	搭載プロセッサがリセットされた		
	$(10/28 \cdot 10/30)$ $[139]_{\circ}$		
	・Polarのデスパン機構で3回ロックはず		
	れが発生。自然復旧 [58]。		
	・ICEsat で GPS リセット(10/28-30)		
	[58] _°		
	・NASA 地球科学ミッションオフィスは、		
	レベル5の磁気嵐予想に基づきAQUA、		
	Landsat、TERRA、TOMS、TRMM \mathcal{O}		
	5 衛星に対し、衛星を OFF するかセー		
	フモードにするよう指示を出した		
	(10/28) [58].		
	・これを受け JAXA は AQUA の AMSR-		
	E をセーフモードに移行(10/29) [58]。		
	・FedSat が多くの SEU を観測した		
	$(10/31)$ $[58]_{\circ}$		

表 5-6 シングルイベントアップセットによる衛星障害の事例

発生日	影響事象概要	太陽	陽子 flux
		フレア規模	(>10MeV)
	・ μ LabSat-1 で SEU 発生頻度が通常の 4		
	~6 倍となった [58]。		
	・PolarのTIDE 装置がリセットし、高電		
	圧供給ができなくなった。24 時間以内		
	に復旧した(11/6) [58]。		
2012/3/7-	・ESA の Venus Express で、太陽高エネ	X5	6530pfu
3/13	ルギー粒子の影響によりスタートラッ	(3/7 00:24)	(3/08 11:15)
	カが一時的に利用不能に(3/7) [120]。	M7	469pfu
	・Spaceway3 で SEU 障害(3/13) [46]。	(3/13 17:41)	(3/13 20:45)
2014/1/8	・米国で太陽高エネルギー粒子増加のた	X1.2	-
	め、国際宇宙ステーションへの補給船の	(1/7 18:32)	
	打上げを延期 [120]。		

表 5-6 シングルイベントアップセットによる衛星障害の事例

シングルイベントは高エネルギー粒子の流入が多い南大西洋異常帯(SAA)上空での発 生頻度が高く、全体のイベントの内、75%が SAA 上空で発生している [139]。



図 5-3 シングルイベント発生地域分布図(UoSAT-3の観測事例) [145]

5.3. 太陽電池の劣化

太陽高エネルギー粒子のうち比較的エネルギーが低い粒子は、太陽電池の材質を変性 させることで発生電流と電圧の減少を加速し、太陽電池を劣化させることで衛星の寿命 を縮める。太陽電池の劣化による衛星障害の事例を表 5-7 に示す。

発生日	影響事象概要	太陽	陽子フラックス
		フレア規模	(>10MeV)
1989/3/12-3/13	 GOES7 の太陽電池セルの半数 	X15/3B	3500pfu
	で機能損失。衛星寿命が半分に	(3/6 14:05)	(3/13 6:45)
	短縮(3/13) [146]。		
1989/9/29-30	・GOES-5、6、7 で太陽電池の出	X9.4	4500pfu
	力電流が約 0.1A 減少した [58]。	(9/30 11:31)	(9/30 2:10)
1989/10/19	・GOES-5、GOES-6、GOES-7 で	X13	40000pfu
	太陽電池の出力が 0.6A 減少し、	(10/19 12:58)	(10/20 16:00)
	スターセンサが停止 [58]。		
	・13 の商用衛星の太陽電池出力		
	が 0.3~0.7A 減少、平均して 6%		
	の電力ロス [58]。		
	・惑星探査機マジェランの太陽電		
	池出力が 6%減少 [58]。		
	・ひまわり3号機の太陽電池が静		
	穏時の3年分劣化 (9/29, 10/14)		
	$[58] [139]_{\circ}$		
2000/7/14-7/17	・GMS-5 は太陽電池出力が	X5	24000pfu
(バスティー	6W/300W劣化(2-3年分に相当)	(7/14 10:24)	(7/15 12:30)
ユイベント)	した [58]。		
2012/1/23 \sim	・日本の金星探査機「あかつき」	M8	6310pfu
1/28	で太陽高エネルギー粒子の影響	$(1/23 \ 3.59)$	(1/24 15:30)
	により太陽電池の出力減少	X1	796pfu
	$(1/23)$ $[120]_{\circ}$	(1/27 18:37)	$(1/28\ 2.05)$

表 5-7 太陽電池の劣化による衛星障害の事例

5.4. 軌道・姿勢じょう乱

5.4.1. 衛星姿勢制御(磁気トルカ)異常

磁気トルカは地球磁場との作用による磁気モーメントを利用することで人工衛星の姿 勢を制御する装置であるが、地磁気が乱れていると正常に作用させることができない。 磁気トルカ異常による衛星障害の事例を表 5-8 に示す。

発生日	影響事象概要	宇宙天気情報
1989/3/13-3/14	・NOAAの極軌道衛星3つと軍用気象衛星	AE 指数:2934nT
(ケベックスト	が磁気嵐の時、磁気トルカによるアンロー	$(3/14\ 7.52)$
ーム)	ディングにトラブルを生じた [58]。	Dst 指数(1h 値):-589nT
		(3/14 1:00)
2003/10/23-11/6	・GOES12 で磁気トルカが運用不可	太陽フレア規模:
(ハロウィンイ	$(10/24)$ $[139]_{\circ}$	X1 (10/26 18:19)
ベント)		X17 (10/28 11:10)
		X28 (11/04 19:29)
		陽子フラックス:
		466pfu (10/26 22:35)
		29500pfu (10/29 06:15)
		1570pfu(11/03 08:15)
		353pfu(11/05 06:00)

表 5-8 磁気トルカ異常による衛星障害の事例

5.4.2. 衛星大気ドラッグ

5.4.2.1. 大気ドラッグの概要

超高層大気は、低軌道の地球周回衛星に摩擦として作用することで、衛星を減速させ 軌道を低下させたり、姿勢を変動させたりするなど、衛星運用へ影響を及ぼす。

この大気ドラッグは、大気密度と衛星の断面積によってその大きさが定まる。大気密度が変動する要因としては、磁気嵐時に磁気圏から極域電離圏へ入る電場・電流によるジュール加熱で引き起こされる大気膨張による過程が主なメカニズムであると考えられている。太陽フレア時の EUV/UV による加熱やオーロラ粒子による加熱は無視できないが、磁気嵐のジュール加熱に比べると小さい(10%程度以下)と考えられている。

衛星に働くトルクは、軌道高度 400km 以下では大気抵抗トルクが支配的であり、高度 600km~700km(LEO 軌道)では大気抵抗トルクは重力傾度トルクと比べ1桁程度、 地磁気トルクと比べファクターで小さい [147] (図 5-4)。

また、昨今、その監視と対策が重要視されているスペースデブリ(宇宙ゴミ)の軌道 には大気ドラッグが大きな影響を及ぼすため、それらを正確に追尾するためには、大気 ドラッグによる影響を正確に見積もる必要がある。



図 5-4 環境外乱トルクの計算例 [147]

5.4.2.2. 大気ドラッグ規模の試算

大気圏モデルと電離圏モデルを結合し、全地球大気のシミュレーションモデルとして、 NICT と九州大学、成蹊大学にて GAIA(Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)の開発が進められている [39]。このモデルは、観測に基づ くデータを入力・融合し、現実の超高層大気変動の再現を目指すものである。

大規模な大気ドラッグの増加をもたらす駆動源と考えられるのは、太陽フレアによる X 線・紫外線の放射強度の増加や、磁気嵐に伴うオーロラ粒子降込みと極域電場・電流 系の発達である。それらが熱圏大気の加熱を引き起こし、大気密度を増加させる結果、

大気ドラッグの増加が生じる(図 5-5)。GAIA を用いて実際に発生しうる大気ドラッグ の規模を試算するため、まず GAIA の入力パラメータを規定する経験モデル(太陽放射 スペクトルモデル、オーロラ粒子フラックスモデル、極域ポテンシャル)が扱える太陽・ 磁気圏じょう乱の規模を議論する。



図 5-5 太陽フレア・磁気嵐の発生から大気ドラッグの増加に至る過程

- GAIA に入力値を与える経験モデル(太陽放射スペクトルモデル、極域ポテンシャルモデル、オーロラ粒子降込みモデル)の概要を表 5-9 に示す。各経験モデルは入力値と出力値の関係をつなぐ関数を定め、関数の係数を観測データでフィッティングしている。よって、入力値に対応する観測データが少ないところでは、 関数の選択やその係数の精度が下がり、経験モデルの信頼度は低くなる。
- 太陽放射スペクトルモデル FISM については、39 個のフレアイベントを基に構築 されており、そのうち X10 以上は5イベント(最大は X17.4)とサンプル数は少 ない [148]。そして、入力となる X 線強度(波長 0.1-0.8nm)に対して各 EUV ス ペクトル強度は指数関数でフィッティングされているため、これより大きな極端 イベントではモデルの誤差は非常に大きくなると考えられる。
- 極域ポテンシャルモデル(Weimer-2005 model)とオーロラ粒子降込みモデル [149]については、経験モデルの構築において、Kp=9の観測(或いは Kp=9 を引 き起こした太陽風データ)を用いている。しかし、図 5-6 のヒストグラムで示さ れるように、Kp=9 或いは Dst<-300nT に相当する観測データは数イベントし かモデルに取り込まれておらず、経験モデルの信頼性について注意が必要である。

現在これらの経験モデルとパラメータの GAIA への導入が進められている。これらの 計算を実施することにより、熱圏大気密度が実際にどの程度増加するか調査できる。調 査結果については別途報告される予定である。

	太陽放射スペクトルモデル	極域ポテンシャルモデル	オーロラ粒子降込みモデル
モデル名(ソース)	FISM(flare component) (Chamberlin et al., 2008)	Weimer (2005)	Zhang and Paxton [2008]
入力	GOES衛星で測定するX線強度 (波長0.1-0.8nm)をプロキシと して入力	太陽風の各パラメータ(磁場、 速度、密度)	Kp指数
出力	波長0.1-190nm(波長分解能 1nm)の太陽放射スペクトル	極域の静電ポテンシャル分布	降込み電子のエネルギーフ ラックス分布
モデル構築に用いてい る観測等データ(*)	2002-2005年間に発生したMク ラス以上の全39個の太陽フレ アにおける太陽放射スペクト ルの観測データ。および同期 間におけるGOES衛星X線観測 データ。	1981/8-1983/3の期間におけ る極軌道衛星DE2の電場観測 データ。およびIMP8とISEE3衛 星による太陽風観測データ。	2002-2005年間にTIMED衛星 搭載GUVIによって観測された 紫外領域の大気光画像データ。 および同期間のKp指数データ。
*に含まれる最大の太 陽・地磁気擾乱	太陽フレア ~X17.4(2003/11/4)	Kp=9(1982/7/13) Dst=-325(1982/7/14)	Kp=9(2003/10/29-30)

表 5-9 GAIA へ入力値を与える各経験モデルの概要



 図 5-6 経験モデル構築に使用した観測データの期間における地磁気じょう乱指数 (Kp、Dst)のヒストグラム(上段:極域ポテンシャルモデルの場合(1981/8-1983/3)、下段:オーロラ粒子降込みモデルの場合(2002/2-2005/3))

5.4.2.3. 大気ドラッグによる衛星軌道への影響の検討

大気ドラッグによる衛星軌道への影響を検討するため、F10.7 指数(1.2.4 節参照)を 変動させた際の軌道の遷移を算出し、簡易的に見積もった。具体的には、軌道予測通り にアンテナ捕捉ができなくなるほどの大気ドラッグがあれば、衛星運用への影響がある と言えることから、低軌道衛星が地球を1周回する間に、地上局アンテナから見て、ア ンテナビーム幅を超えるような軌道のずれが生じるものなのか、F10.7 の違いによる影 響を検討した。なお、計算にはAGI社STK (Systems Tool Kit)を用いた。主な設定値 と計算条件を表 5-10 に示す。

	SLATS		
衛星	質量	383 kg ¹⁾	
	単位質量当たりの有効断面積	$0.00587467 \text{ m}^2/\text{kg}^{2)}$	
		2018年5月1日(高度400km付近)	
	軌道エポック日	2019年5月1日(高度300km付近)	
		2019年10月1日(高度160km付近)	
地上局位置	北緯78度(KSAT Svalbardの位置を想定)		
地上局 アンテナ ³⁾	アンテナ仰角最小値	5度	
	アンテナ開口	10m	
	X-Band	8 GHz (波長: 0.0375 m)	
	ビーム半値幅	0.2625度	
	衛星補足可能最低仰角	5度	
STK	F10.7	$65 \sim 275$	
	Кр	3	
	大気密度モデル	NRLMSISE2000 ⁴⁾	

表 5-10 設定値と計算条件

1) JAXA 第一宇宙技術部門ホームページ [http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/]

2) 衛星進行方向に対する断面積を、衛星の形状から2.5m×0.9mとした。

[JAXA 第一宇宙技術部門ホームページ http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/]

3) ビーム半値幅等は周波数から計算したものであり、実際のアンテナとは異なる。

4) 解析対象の低軌道を計算できるモデルとして選択した。

解析方法は以下の通りである。結果を表 5-11に記す。

- i. F10.7 = 65の条件下で、連続する2パスの可視開始時刻(AOS)/可視終了時刻 (LOS)の時刻を算出する。
- ii. 1回目のLOS直後にF10.7が上昇し、LOS期間中はその値を維持したとする。
 F10.7は、65、80、110、140、170、200、230、260、275の値とした。
 F10.7 = 65の条件下での2回目のAOS時刻における、F10.7が上昇したとする
 条件下での衛星アンテナの仰角・方位角を算出する。
- iii. F10.7 = 65の条件下での2回目のAOS期間中の最大仰角時における、F10.7が 上昇したとする条件下での衛星アンテナの方位角・仰角を算出する。
- iv. 各F10.7値におけるアンテナ仰角・方位角と、F10.7=65での値との差分を求める。



図 5-7 F10.7 を変化させたときの SLATS 衛星と地上局の位置関係

高度	タイミング	方位角 [度]	仰角 [度]
400km	AOS時	0.003	0.002
	最大仰角時	0.063	0.003
300km	AOS時	0.004	0.004
	最大仰角時	0.48	0.02
160km	AOS時	0.055	0.01
	最大仰角時	3.974	0.418

表 5-11 F10.7=65と275でのSLATS 衛星の可視方向の差

アンテナ開口10m、ビーム半値幅が0.26度と仮定すると、F10.7が65から275に突発的 に跳ね上がった場合でも、高度300kmより高高度であるならば、大気ドラッグの影響で 衛星軌道がアンテナビーム幅より大きく逸れることはない、すなわちアンテナで衛星電 波を受信できると見積もられた。一方、高度160kmの超低軌道であるならば、衛星がア ンテナビーム幅を逸脱する可能性が示唆された。しかし、高度160kmは地球周回衛星と しては高度が低すぎるため、周回軌道を維持することは困難である。

今回の計算は簡易に見積もったものであり、F10.7 はシステムの制約から 10.7=275 を 上限として計算した。今後、GAIA により、より精密な大気密度計算ができるようにな れば、大規模な宇宙天気現象による大気ドラッグの影響を見積もることができるように なると考える。なお、Kp 指数を変動させた際の計算も簡易的に実施したが、F10.7 を変 動させた際の結果と大きくは変わらなかった。

5.4.2.4. 宇宙天気の影響マトリックス

5.4.2.2 節で述べたように、現状は GAIA モデルにて大気ドラッグ規模を試算するまで には至っていない。また、5.4.2.3 節で述べたように、少なくとも F10.7=65~275 の範 囲での紫外線強度の変動に対しては、LEO 軌道での衛星軌道への短期的な影響は少ない と言える。しかし、大気密度の増加に伴い、大気ドラッグによる軌道低下は大きくなり、 長期的に見れば、軌道制御に使用する燃料の消費が増えることで寿命が短縮するなどの 影響は考えられる。

事業者からは、過去に発生した規模での宇宙天気現象が日々の衛星運用に影響を与え ることは考えづらいとの意見もあるが、一方で、より高精度な大気モデルの導入により 軌道解析回数の削減、運用効率化に寄与するとの意見もある。また、昨今では、スペー スデブリ(宇宙ゴミ)の監視と対策が重要視されており、スペースデブリの軌道をより 正確に予測するためには、大気ドラッグのより正確な見積もりは重要である。

5.4.2.5. 今後の課題

今後のモデル開発では、太陽からの紫外線の量や磁気嵐の規模による地球高層大気の 加熱量と、それに伴う人工衛星の軌道と姿勢への影響を定量的に評価できるようにして いく必要がある。この改良により、衛星の軌道と姿勢の予測が精密に実施できるように なり、X線天文衛星「あすか」のような事故を減らすことが可能になると期待できる。

5.4.2.6. 大気ドラッグによる衛星障害の事例

大気ドラッグによる衛星障害の事例を表 5-12 に示す。

発生日	影響事象概要	AE 指数	Dst 指数	Kp 指数
1989/3/13-	・アメリカの SMM 衛星の	2934nT	$-589 \mathrm{nT}$	Kp9
3/14	高度が一気に約 4.8km 降	(3/14 7:52)	(3/14 1:00)	(3/13
(ケベックス	下した [58]。			18:00-
トーム)				24:00)
2000/7/15	・日本のあすか(Astro-D)	3330nT	-301nT	Kp9
	衛星は大気ドラッグによ	$(7/15 \ 18:15)$	(7/16 1:00)	(7/15
	る姿勢制御異常が発生し			15:00-
	た。7/15 19:04 にセーフモ			18:00)
	ード。翌年、地球大気へ再			
	突入 [46] [126] [150]。			
2003年10月	・ISS の高度低下量が 1.5 倍	2454nT	-353nT	Kp9
末から 11 月	に 増 加 (95m/day →	(10/30 1:52)	(10/30 0:00)	(10/30
初旬	150 m/day) (10/30) [139].			15:00-
(ハロウィ	・神舟 5 号の高度が著しく	3209nT	-383nT	21:00)
ンイベン	低下(10/30) [58]。	(10/30 17:56)	(10/30 22:00)	
F)		3282nT		
		(10/30 19:56)		

表 5-12 大気ドラッグによる衛星障害の事例

X 線天文衛星「あすか」は、2000 年 7 月 15 日の大磁気嵐が原因で姿勢制御異常が発生した。この時の大気密度は突如数倍に増加したとの報告がある [151]。その後、姿勢が乱れたために、太陽電池への日射量が減少し、結果的にバッテリーが枯渇して制御不能に陥った。結局、「あすか」は寿命を早め、2001 年 3 月 2 日、日本の南方の赤道付近で大気圏に突入し消滅した。

2000 年7月15日前後の各種データから、宇宙環境と「あすか」に何が起こったのか、改めて時系列で整理し、影響の大きさを検討した(図 5-8)。



- 図 5-8にて使用しているデータは以下の通りである。
 - a. 太陽 X 線放射強度: GOES 衛星による観測。波長 0.1-0.8nm。NOAA National Centers for Environmental Information サイトよりデータ入手。 <u>https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html</u>
 - b. 太陽風速度:ACE 衛星による観測。NASA Goddard Space Flight Center が運営する OMNIWeb Plus サイトからデータ入手。 https://omniweb.gsfc.nasa.gov/
 - c. 太陽風磁場:同上
 - d. Dst 指数: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto のサイトからデータ 入手。

http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html

- e. AE 指数:同上
- f. あすか衛星軌道に沿った平均大気質量密度:あすか衛星の軌道要素の変化から 大気質量密度を Picone et al., 2005 [152]の手法を用いて計算したもの。軌道要 素は米国空軍のプロジェクトである Space-Track.org が提供している TLE (Two-Line Element) データを使用。

https://www.space-track.org/auth/login

- g. あすか衛星の軌道長半径:(f) で使用したあすかの TLE に対して SGP4 アルゴ リズム (Hoots and Roehrich, 1980 [153]) を適用し、軌道伝播計算を行ったも の。
- h. あすか衛星の高度:同上の手法により衛星位置を計算し、地理座標に変換した もの。
- まず X6.1 クラスの太陽フレアが 7/14 10 時 UT 頃に発生した後に(図 5-8(a)の縦線(i))、太陽から放出された CME が地球近傍に到達した(7/15 14 時 30 分頃。図 5-8(b)の縦線(ii))。そして、太陽風磁場が大きく南に振れ(図 5-8(c)、縦線(iii))、その直後に磁気嵐が始まり、Dst のピークが-300nT まで発達した(図 5-8(d))。
- この磁気嵐やその前から起きている太陽風じょう乱の影響により、7/15 から 16 に かけ極域に強いオーロラ電流が流れた(図 5-8(e))。
- オーロラ電流が極域の熱圏大気を加熱した結果、大気が膨張し、あすか衛星高度 (450-490km、図 5-8(h))の大気質量密度も増加したと考えられる。図 5-8(f)で 見られるようにあすかの軌道に沿った大気質量密度が 7/15 から 7/17 にかけて増加 した。そのピークは 7/17 0 時 UT 前後に通常の 2 倍程度と推定される。ただし、 この大気質量密度は、数点/日の観測しかない 2 行軌道要素 TLE(Two-Line Element)を用いて計算され、軌道上に平均化された低時間・空間分解能の値であ る。

- Hanada et al., 2012 でも 本イベントにおけるあすか軌道の大気質量密度の変化を 扱っているが、Neural Net 手法を用いて同程度(2倍程度)増加の結果が得られ ている。[154]
- 図 5-8(g)のあすか衛星の軌道長半径については、小さな変化なので分りにくいが、大気抵抗が大きくなった 7/17 0 時 UT 付近で衛星軌道の縮退度合いが少し大きくなっている。
- 一方、JAXAのWebページ [155]等の情報によると、あすか衛星は「大気による 摩擦を受けてスピン状態に陥り、観測が不能となった」とされる。また、別文献 (「太陽と地球のふしぎな関係」、上出洋介、2011年 [139])によると、7/15 22
 時 30分UT頃(図 5-8の縦線(iv))に衛星の角運動量の急激な減少が起きたと紹 介されている。図 5-8に照らすと、この時刻は太陽風磁場が南を向いて磁気嵐が 開始した直後であり、AEも増大しているタイミングである。TLEから求めた大気 密度推定(図 5-8(f))では、同時刻付近に衛星軌道上に平均 30-40%程度の増加が 見られるが、(この分解能では捉えきれない)瞬間的・局所的な密度変動や密度勾 配などが発生して衛星の姿勢に影響した可能性もある。

5.5. 衛星通信への影響

電離圏の不規則構造により衛星からの電波が乱されて、その強度が変動する現象を「シ ンチレーション」と呼ぶ。シンチレーションは、主に超短波帯や極超短波帯の電波を使 った衛星との通信に影響を与えるが、低緯度で発生するプラズマバブルや強い磁気嵐に 伴う異常な電場変動によりマイクロ波帯にまで及ぶ強いシンチレーションが起こること が報告されている [126] [156]。

衛星運用では、予め地上局からの衛星の可視時間を計算し、使用する地上局と通信時 間を計画している。シンチレーションにより通信ができなくなると、予定していたデー タ通信や位置・速度データの取得ができなくなるなど計画通りの運用ができなくなり、 他の衛星も含めた運用計画の見直しを強いられるなど、大きな影響が懸念される。実際 に、1989年3月のケベックストームと呼ばれる大きな磁気嵐が発生した際には、1,300 以上の衛星の位置に一時的に予測とズレが生じたとされる[157]。図 5-9 にその際の磁 気嵐指数(Ap Index)と追尾が途切れた衛星数の時間変化を示す。磁気嵐指数が跳ね上 がった直後、追尾が途切れた衛星数が急増しているのが見て取れる。そして、すべての 衛星を再捕捉し軌道要素をアップデートするまでにほぼ1週間を要している。

衛星通信の影響としては、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)の障害により、米軍側の人的被 害につながっているが、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 [158]。



6. 通信・放送における宇宙天気現象の社会影響

電離圏は、太陽や下層大気に起因するじょう乱等の影響を受けて常に変動しており、 短波放送や船舶・航空通信で使用される短波(HF)通信、防災・消防無線や航空管制で 使用される超短波(VHF)通信等に障害を与える。本章ではこれらの影響とその規模に ついて述べる。

電波の発信地から受信地までの伝わり方は、その周波数によって、導波管伝播、電離 圏伝播、見通し内伝播と異なる。そして、この電波伝播方法と電離圏じょう乱による影響が関係している。図 6-1 に電波の波長に対する主な用途と伝播経路を、通信・放送に 対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響を表 6-1 に示す。なお、本章では、主な通 信として、短波(HF)と超短波(VHF)通信を対象とする。



図 6-1 周波数ごとの用途と電波伝播経路 [159]

分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象
通信・放送	短波 (HF) 通信の障害	デリンジャー現象
		電離圈負相嵐
		プラズマバブル
		極冠吸収
	超短波(VHF)通信の障害	プラズマバブル
		スポラディック E 層

表 6-1 通信・放送に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響

6.1. 短波(HF)通信・放送の障害

6.1.1. 短波(HF)通信・放送障害の概要

通信衛星や海底ケーブルが発達した現在において、短波通信が占める役割は限定的で あるものの、航空無線や船舶無線、国際ラジオ放送など遠距離通信に用いられている。 短波(HF)通信が影響を受ける宇宙天気現象として、デリンジャー現象、電離圏負相嵐、 プラズマバブル、極冠吸収が挙げられる。

デリンジャー現象では、太陽フレアが発生した時に急激にX線強度が増大することで、 そのX線を吸収した電離圏D領域の電子密度が急増し、短波が吸収される。吸収量が出 力を上回ると、通常電離圏F領域で反射し受信地に届く短波が受信できず、通信障害が 発生する。M5クラス以上のフレアが発生するとデリンジャー現象が発生する傾向がみ られる[159]。図 6-2 にデリンジャー現象発生時の模式図を示す。ある大気が受ける太 陽からの電磁波強度は、太陽天頂角に依存し、太陽天頂角が小さい(太陽直下点に近い)ほ ど電磁波強度が大きくなる。そのため、同じ太陽フレア現象でもローカルタイムが正午 に近く、より低緯度の地域でデリンジャー現象が発生する確率は高くなる。デリンジャ ー現象の発生継続時間は、太陽フレアの継続時間に依存し、数分から数時間程度である (2.8.1.2 章)。



図 6-2 デリンジャー現象発生時の模式図 [159]

電離圏負相嵐では、磁気嵐などが原因で電離圏 F 領域の電子密度が減少することで、 短波帯の電波が反射されずに通過してしまうため、短波通信が困難になることがある [24]。図 6-3 に電離圏負相嵐が発生した時の Dst 指数、TEC、イオノゾンデによる foF2 の時間変化と、短波通信障害の模式図を示す。短波通信に影響を及ぼす点はデリンジャ ー現象と共通だが、デリンジャー現象に比べて時間スケールが数時間〜数日と長い。ま たデリンジャー現象が太陽フレア起因であるのに対し、電離圏負相嵐は磁気嵐が起因と いう点も異なる。



図 6-3 電離圏負相嵐による通信障害の模式図 [159]
プラズマバブルは、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 電子密度が低い領域が「泡」のように発生する現象である(図 1-16)。プラズマバブル は、磁力線に沿って南北方向に広がりながら東向きに移動する。太陽活動が活発な時や、 磁気嵐が発生した時には大きく成長し、日本が位置する中緯度域まで発達することもあ る。プラズマバブルの内部や周辺では、電子密度の空間的な変化が大きく、短波帯~極 超短波帯の電波伝播に影響がある。短波帯においては、プラズマバブルの下部構造によ る電波伝播方向の変化やプラズマバブル構造に沿った異常伝播等が考えられるが、短波 通信・放送における障害という点では影響は少ない。

極冠吸収(PCA)は地球に飛来した太陽高エネルギー粒子によって、電離圏D領域の 電離が急激に進むことで、電波の吸収が増加し、短波による通信ができなくなる現象で ある。デリンジャー現象が昼のみに観測されるのに対し、PCAは極域で昼夜を問わず発 生するため、極域を飛行する航空無線などに影響が出る。

6.1.2. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算

2.8 節にて定義した電離圏じょう乱の発生頻度と現象規模のうち、短波(HF)通信に関連する現象を表 6-2 及び表 6-3 に再掲する。

規模を示すパラメータ		1回	1回	1回	1回
		/1 年	/10 年	/100 年	/1000年
デリンジ	吸収量(長距離)[dB] 3)	71	83	93	~100
ャー現象	継続時間 [時間]	0.63-1.6	1.8-3.6	4.0-6.85	7.4-11.9
プラズマ バブル	継続時間 [時間]	4-5	6		

表 6-2 電離圏じょう乱規模の定義

例えば、デリンジャー現象による短波通信への影響を考えるとき、送信強度や受信機器の性能、送受信位置関係によっても変わってくるが、10年に1回程度の頻度で、83dB程度の吸収が発生し、短波通信ができない状況が発生し、その継続時間は1.8~3.6時間の可能性がある、ということになる。

137

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 flux [pfu]	101-2	10^{3}	104	4x10 ⁵	10^{6}
Kp 指数)	4 (7)	7 (8)	8 (9)	9	9
磁気緯度(日中) @6.6MHz 10dB	65° (60)	57° (55)	53° (52)	51°	50°
磁気緯度(夜間) @6.6MHz 10dB	65° (60)	60° (58)	56° (55)	53°	53°
最短継続時間	22 時間	46 時間	71 時間	83 時間	89 時間

表 6-3 極冠吸収の現象規模の定義

極冠吸収は、その規模によって、短波通信に影響の出るエリアが拡大する。例えば表 6-3 は、民間航空機で利用される 6.6 MHz 周波数帯が 10dB 減衰する領域の広がる緯度 を示しており、1 年に1回程度の現象規模では地球の昼間側で磁気緯度 57 度程度まで 短波通信に影響の出るエリアが広がり、46 時間その影響が継続するが、10 年に1回程 度の規模になると、その範囲は緯度 53 度まで広がり、継続時間は 71 時間となる、と 言える。

6.1.3. 短波(HF)通信・放送に関する宇宙天気の影響マトリクス

デリンジャー現象は太陽フレアによって発生するX線・紫外線が原因となって発生し、 PCAは高エネルギー粒子によって発生する。電離圏嵐はCMEが原因となることが多い。 以上のことから、これらの現象は11年変動の太陽活動に大きく依存する。一方、プラズ マバブルは太陽活動が低い時期にも発生するが、統計的には太陽活動が高い時期の方が 発生頻度は高いことが知られている(図2-38)。

		発生頻度と影響				
宇宙天気現象	被害	日常~複数回	1回(1左	1回/10	1回/100	1回
		/年	1回/1平	年	年	/1000 年
家姚图片 (4	短波	太陽活動が低	太陽活動が低			
电解固風(貝	(HF)	い時には影響	い時には影響	あり	あり	あり
	通信障害	は小さい	は小さい			
	短波	太陽活動が低	太陽活動が低			
アリンシャー	(HF)	い時には影響	い時には影響	あり	あり	あり
」 · 况家	通信障害	は小さい	は小さい			
据写吸收	短波	太陽活動が低	太陽活動が低			
極 型 吸 収	(HF)	い時には影響	い時には影響	あり	あり	あり
(PCA)	通信障害	は小さい	は小さい			
プラズマバブ	短波	太陽活動が低	太陽活動が低			
12	(HF)	い時には影響	い時には影響	あり	あり	あり
	通信障害	の頻度は減る	は小さい			

表 6-4 宇宙天気の影響マトリクス

6.1.4. 今後の課題

PCA は主にポーラーキャップ内での電離圏による電波吸収であり、我が国への影響については十分検証されていない。

プラズマバブルの短波通信への影響は赤道越え電波伝播(Trans-Equatorial Propagation; TEP)などが従来知られているが、実用上の影響はあまり議論されてこなかった。しかしながら、近年の電波伝播シミュレータを用いた検討ではプラズマバブルの形状で地上の受信状態に干渉等の不具合が発生する可能性があり、今後の検討が必要とされている。

6.1.5. 短波(HF)通信・放送障害に関する事例

表 6-5 の発生事例の内、太陽フレア規模の判明しているものをみると、X クラスフレ アでの発生数が6件と多いが、M クラスフレアでの事例も4件(そのうち M5.0 未満の フレアが2件)あることに着目したい。即ち短波通信に影響を与えるデリンジャー現象 はX線強度が比較的低い M5 クラス未満のフレアに伴っても起こる可能性がある。

発生日	影響事象概要	太陽フレア規模
1948/5/6-5/8	・国内及び国外短波通信への障害 [120]。	データなし
1958/1/22	・国外短波通信への障害 [120]。	データなし
1958/2/11-2/12	・世界の大部分の短波通信に障害 [160]。	データなし
1959/2/5-2/6	・国外短波通信への障害 [120]。	データなし
1960/3/29	・国外短波通信への影響 [120]。	データなし
1966/9/4	・国外短波通信への影響 [120]。	データなし
1967/5/26	・国外短波通信への影響 [120] [161]。	データなし
1972/8/2	・国内短波放送への影響。全国規模で1時間継続。	データなし
	国外通信はケーブル通信に切り替えて通信障害	
	回避 [120] [162]。	
1989/3/6, 13	・世界的な短波通信障害。ロランを使った海上ナ	X15
(ケベックスト	ビゲーションで多数の問題が起きたが、その警	(3/6 14:05)
ーム)	報を伝える短波回線が通信障害中で使えなかっ	
	た [58] [146]。	
2012/3/7	・日本で短波放送の受信状態が悪化 [120] [163]。	X5.4
		(3/7 00:21)
2012/5/17	・日本で短波放送の受信状態に影響 [120]。	M5.0
		(3/17 01:45)
2012/10/23	・日本で短波放送の受信状態に影響 [120]。	X1.7
		(10/23 03:17)
2013/5/13-5/15	・日本で短波放送の受信状態に影響 [120] [164]。	X1.7 (5/13 02:14)
		X2.9 (5/13 16:05)
		X3.1 (5/14 01:10)
		X1.2 (5/15 01:46)
2013/6/21	・日本で短波放送の受信状態に影響 [120]。	M2.8
		(6/21 03:20)
2014/9/9	・日本で短波放送の受信状態に影響 [120]。	M4.4
		(9/9 00:20)
2014/10/22	・日本で短波放送の受信状態に影響 [120]。	M8.8
		$(10/22 \ 01.58)$

表 6-5 デリンジャー現象による短波通信への影響

6.2. 超短波(VHF)通信・放送の障害

6.2.1. 超短波(VHF)通信・放送障害の概要

高度 100km 程度に突発的に且つ局所的に発生する電子密度の濃い層であるスポラディック E 層(Es 層)が発達すると、通常は電離圏で反射されない超短波(VHF)テレビ放送や FM ラジオ放送など超短波(VHF)帯の電波が反射されて異常伝播し、遠くの放送局が混信することがある。スポラディック E 層が発生した時のイオノグラムとスポラディック E 層発生時の短波伝播の模式図は図 1-15 に示している。

日本国内のテレビ放送においては、現在は地上デジタルテレビ放送に切り替わり、極 超短波(UHF)帯が使用されているため、スポラディック E 層によるテレビ放送の混信 は解消されている。

しかし、航空通信・航法においては現在もスポラディック E 層による超短波 (VHF) 利用システムへの影響がみられる。スポラディック E 層は、通常は鉛直に伝播する中波

(MF) ~短波(HF)の幅広い波長帯の電波を反射するが、伝播する方向が斜めになり、 仰角が小さくなるに従って反射可能な周波数が上がる。仰角が極めて小さくなると、本 来は電離圏の反射を受けないと想定されている超短波(VHF)の電波が反射されるよう になる。

図 6-4 に航空通信に関わるスポラディック E 層による影響の模式図を示す。スポラディック E 層によって、本来の地上局以外の地上局から発せられた超短波(VHF)電波(108~137?MHz)が航空機に届き、干渉や混信を引き起こす。広島県呉市にて行われている超短波(VHF)帯航空航法伝播のモニタリング観測では、多数の遠方の送信点からの電波を受信している。2014 年 5 月には台湾 Haulien 空港からと考えられる非常に強い電波を受信した例がある。[165]



図 6-4 スポラディック E 層に伴う航空用 VHF 帯電波の長距離異常伝播によって起こ りうる通信の干渉の模式図 [165]

6.2.2. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算

2.8 節にて定義した電離圏じょう乱の発生頻度と現象規模のうち、超短波(VHF)通信に関連するスポラディック E 層を表 6-6 に再掲する。

電離圈現象	規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年	1回/100年
	1,000km 伝播可能な	100	110	>130 1)
	周波数の上限 [MHz]	100	110	
	2,000km 伝播可能な	190	> 1 00 1)	>180 1)
F a 屋	周波数の上限 [MHz]	150	×100 ¹ /	
	foEs >13.3MHz	~ .9		
	における継続時間 ² [h]			
	foEs >18MHz	1.0	- 0	
	における継続時間 ³⁾ [h]	1-2		

表 6-6 電離圏じょう乱規模の定義(表 1.2.4. Es 層の発生頻度と規模)

¹⁾ 不等号はイオノゾンデで観測可能な臨界周波数が 30MHz までであることによる。

²⁾80MHzの電波が水平距離 2000km 以上伝播する目安

³⁾80MHzの電波が水平距離1000km以上伝播する目安

スポラディック E 層による影響では、1 年に 1 回程度の頻度で 1,000km 伝播する周 波数が 100MHz、2,000km 伝播する周波数が 130MHz との結果になっており、すなわ ち航空機用無線標識 VOR で使用される超短波(108~118MHz)の電波で見ると、スポ ラディック E 層によって 2,000km の伝播は 1 年に 1 回以上の頻度で発生し、1,000km の伝播は 10 年に 1 回程度発生するということになる。2.8.1.4 節の伝播可能周波数の累 積確率密度分布を見ると、超短波(108~118MHz)では、2,000km の伝播は年間 10 回 程度発生する結果となっている。なお、航空機用無線標識 VOR のスポラディック E 層 反射の発生確率は、スポラディック E 層がよく発生する夏季で 25 パーセント程度であ るという結果もある [106]。

そして、その継続時間は約3時間の影響が発生しうるということになる。

6.2.3. 超短波(VHF)通信に関する宇宙天気の影響マトリクス

スポラディック E 層については、太陽活動との関連は小さく、我が国では春~夏に頻 度が高くなるなどの季節依存性が高い。また非常に局所的・間欠的に発生するため、発 生場所や時間を予測することは非常に難しい。50MHz 付近のアマチュア無線などの低 い周波数は影響を受けやすいが、118MHz 以上の航空通信は受けにくいなど、利用する 周波数によって影響の度合いが異なる。航空通信・航法など重要な無線に対する影響に ついては、8.1 節に記述するとおり現在調査中である。

		発生頻度と影響				
宇宙天気現象	被害	日常~ 複数回/ 年	1 回/1 年	1 回/10 年	1 回/100 年	1回 /1000年
スポラディッ ク E 層	超短波 (VHF) 通 信への影響	あり 1)	あり 1)	あり 1)	あり 1)	あり 1)
	foEs >13.3MHz で	約3時	約5時			
	の継続時間	間	間			
	foEs >18MHz で	約 1-2	約3時			
	の継続時間	時間	間			

表 6-7 宇宙天気の影響マトリクス

¹⁾使用周波数により影響の度合いが異なる。

6.2.4. 今後の課題

スポラディック E 層の研究は近年、GEONET 等を用いた解析が進められており新た な知見が得られつつある。その発生メカニズムや形状等の研究が進めば、更に効果的な 対処法を見つけることが可能かもしれない。

利用について、我が国では春~夏にはほぼ毎日発生することから、VHFを用いたシス テムについて、スポラディック E層は存在するものとして検討するべきであろう。

7. 測位利用における宇宙天気現象の社会影響

太陽や下層大気の活動により変動する電離圏が引き起こす障害は6章で述べた通信・ 放送分野以外に、測位利用分野も含まれる。本章ではこれらの発生原因とその影響につ いて述べる。測位利用に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響・被害を表 7-1 に 示す。

•		
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象
測位利用	一周波測位精度の劣化	電離圈正相嵐
		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

表 7-1 測位利用に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響

7.1.1 周波測位精度の劣化

7.1.1.1 周波測位精度の劣化の概要

普段、私たちが利用している GPS 衛星などを利用した測位(全地球測位システム、 Global Navigation Satellite System: GNSS という)は、複数の衛星から到来する電波 を使って位置が決められている。GPS 衛星からはL1 帯とL2 帯の2周波の電波が発信 されており、L1 帯の1周波のみの利用する1周波測位と、両方の電波を利用する2周 波測位とがある。2周波測位は電離圏による誤差を解消できるメリットがある一方で、 機器が高価であるため、通常、多くの測位は1周波測位で行われているのが現状である。

さらに、測位の方法は大きく単独測位、相対測位、高精度単独測位(PPP)に分けら れ、求める測位精度や信頼性によって方法が選択される。単独測位が1台の受信機によ って測位を行う方法であるのに対し、相対測位は複数の受信機で同時に測位を行い、相 対的な位置関係を計測することで高精度な測位を実現している。相対測位は、さらに、 到来する搬送波の到来時間の差から衛星との距離を求め(擬似距離)位置を決めるコー ド測位と、電波の位相を利用する位相測位(搬送波測位、キネマティック測位ともいう) に分けられるなど、測位精度を向上するためにさまざまな工夫がされ、方法も多岐にわたっている。単独測位においても、コードを主に用いる測位と搬送波位相を主に用いる 測位があり、PPP などの搬送波測位においては、様々な補正情報を用いたセンチメート ル級の精度も可能である。

例えば、みちびきを利用したセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)は、国土交通 省国土地理院が全国に整備している電子基準点のデータを利用して生成した補正情報を 用いて、センチメートル級の測位精度を実現するものである。



図 7-1 左:測位誤差の要因 [166]、右:誤差要因の割合 [167]

測位誤差の要因としては、軌道予報誤差(測位衛星の位置精度)、時刻誤差(搭載時計の同期精度)、電離圏誤差(電離圏通過時の遅延)、対流圏誤差(対流圏通過時の遅延)、 マルチパス誤差(建物等での反射による遅延)、受信機測距誤差(測位受信機の処理誤差)、 測位衛星の配置による精度劣化などがある。これら誤差要因の中で影響が大きいのは電 離圏による電波の遅延の影響である(図 7-1)。電離圏における電波の屈折率は、その周 波数と電子密度によって変わるので、電離圏中の電波の進む速さが真空中とは異なり、 GNSSによる測位を行う際にはこれらを適切に補正する必要がある。

1 周波 GNSS における電離圏遅延の補正には経験モデルに基づいた補正モデルが用いられることが多いが、電離圏正相嵐などによって電離圏の電子密度が通常と異なった状態では、正しく補正を行うことが難しくなり、測位の誤差が大きくなる。

電離圏の電子密度構造に急峻な空間勾配がある場合、相対測位の大きな誤差要因とな る。プラズマバブルの中では電子密度が周辺に比べて低くなっており、電波の伝わり方 がモデルによる予想より早くなること、電離圏遅延が急激に変化することから相対測位 の補正誤差が増大することから、測位誤差の原因となる。これは、コード測位、位相測 位の両方において、その補正方法は異なるものの、影響としては原理的に同じことであ る。

また、電離圏の強い不規則構造がある場合には、衛星からの電波強度や位相に強い揺 らぎが発生する。これを電離圏シンチレーションと呼ぶ。(1.2.7 節(4))。シンチレーショ ンが強い場合は信号が受信機に届かないロック損失と呼ばれる現象が起こることがあり、 シンチレーションを受けた衛星が使用できなくなる。このような状況を引き起こす現象 として知られるものに、プラズマバブル(主に強度シンチレーション)やオーロラ現象 (主に位相シンチレーション)がある。



図 7-2 プラズマバブルによる測位精度低下のイメージと、ロック損失事例 [26]

電離圏じょう乱のほかに測位に影響する現象として太陽電波バーストがある。GNSS に利用されるLバンドの周波数帯において強い太陽電波バーストが発生すると、測位信 号の背景雑音が増大し、信号雑音比が低下し、測距精度の劣化や信号のロックオフが発 生しうる。太陽電波バーストは、地球の昼間側全域で背景雑音を増大させるため、非常 に広い範囲で同時に影響が生じうる。ただし、信号雑音比低下の影響は、受信機の設計 に依存する面が大きく、一般的な議論が難しい。7.1.5 節に記述してある、2006 年 12 月 6 日に発生した太陽電波バーストが、障害の事例として知られている。このイベントで は米国・カナダの広範囲において GPS に障害が発生した [168]。なお、このイベントで は精密測位用受信機等には影響が出たが、航空用受信機において航空航法の障害となっ た事例は報告されていない。

7.1.2. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算

(1) 電離圏正相嵐による影響

7.1.1 に述べたように、電離圏正相嵐で電離圏遅延量(全電子数に相当)が増大すると、 モデルによる補正誤差が増大するほか、相対測位システムによっては補正可能な最大値 を超えてしまい補正誤差が増大する。表 7-2 は、過去に日本で観測された全電子数から、 その規模と発生頻度を推定したものである。1 年に1回程度の電離圏正相嵐では、その 最大値は 70~110TECU (GPS L1 周波数の遅延量として 11~18m、以下同じ)、10 年 に1回程度の電離圏正相嵐では 105~160TECU (17~26m)、100 年に1回程度の電離 圏正相嵐では 150~230TECU (24~37m)程度と言える。電離圏密度は赤道異常帯で最 大となるので、日本では南方ほど最大全電子数が大きい。

地域	1回/1年	1回/10年	1回/100年			
北海道	70TECU 以上*4	105TECU 以上*4	150TECU以上*4			
東京	90TECU以上*1	130TECU 以上*2	190TECU以上*2			
鹿児島	110TECU以上*3	160TECU 以上*3	230TECU以上*3			

表 7-2 全電子数 (TEC) 規模の定義

(2) プラズマバブルによる影響

2.8.1.5 節に示した通り、1年に1回程度の規模のプラズマバブルでは、その継続時間 は4~5時間、10年に1回程度の規模では継続時間は6時間程度といえる。これは沖縄 で観測されたデータをもとに算出した継続時間であるが、プラズマバブルは磁気赤道で 発生するため、日本では沖縄での発生頻度が高い。

プラズマバブルには、電離圏遅延量空間変化と電離圏シンチレーションの2つの効果 がある。測位精度がどれほど劣化するかは測位システムによるため一概には言えないが、 プラズマバブルが発生している時間帯は測位精度が劣化する可能性があると言える。

7.1.3.1 周波測位精度の劣化に関する宇宙天気の影響マトリクス

太陽紫外線強度が大きいほど電離圏全電子数は大きく、11 年変動の太陽活動に大きく依存する(図 2-25)。プラズマバブルは太陽活動が低い時期にも発生するが、統計的には太陽活動が高い時期の方が発生頻度は高いことが知られている(図 2-38)。

		発生頻度と影響				
宇宙天気現象	被害	日常~複 数回/年	1回/1年	1 回/10 年	1回 /100年	1回 /1000 年
電離圈正相嵐	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

表 7-3 宇宙天気の影響マトリクス

7.1.4. 今後の課題

プラズマバブルの位置を電離圏トモグラフィ解析手法により3次元的に把握する技術 を用いて、該当する領域を通過してきた衛星測位信号を使用しないことで高精度測位が 得られる可能性があることから、そのシステム開発が急がれる。更に、その研究を進め て、劣化した衛星測位信号を補完する技術開発を行うことでプラズマバブルの影響を完 全に排除することが可能になると期待される。

太陽電波バーストについては 2.4 節に詳細が記述されているが、発生頻度についての 解析が不十分であるとともに、GNSS 受信機の特性等を考慮した影響の定量的評価が今 後の課題として残されている。

7.1.5. 測位利用障害の事例

発生日	影響事象概要	太陽フレア規模			
2003/10/28-30	・高緯度での GPS 受信障害 [125]。	X17 (10/28 11:10)			
2006/12/06	・米国で太陽フレアに伴う強い電波バースト	X8.7 (12/5 10:33)			
	により GPS 受信機に混信障害が発生 [168]	X6.5 (12/6 18:46)			
	$[120]_{\circ}$				
2017/09/08	 ・9月8日の日中(日本時間10~15時頃)に、 	X9.3 (9/6 11:53)			
	GPSの誤差が最大で 7m (南北)、3m (東西)、				
	15m(上下)程度に増加 [169]				

表 7-4 GPS 受信障害事例

7.2.2 周波測位(全般)精度の劣化

電離圏による電波の速度遅延は、電波の周波数によって異なる。この性質を利用する と、1 つの GPS 衛星から発せられる 2 種類の周波数の電波を同時に受信して計算するこ とで、電離圏での遅延による誤差を推定でき、ほぼ解消できる。GPS 衛星やみちびきの 場合には、L1 信号と組み合わせて L2 信号や L5 信号を利用することにより、電離圏誤 差が改善される。

しかし、プラズマバブルや電離圏シンチレーションによる電離圏電子密度の不規則構 造によって信号のロック損失が発生すると、測位に使用可能な衛星数が減ることで測位 精度の低下につながる。2周波測位では、2つの周波数の信号が共に利用可能であること が必要であるので、GPSのL2P(Y)信号のように、L1C/A信号よりも信号追尾性能が弱 い信号を第2の周波数として用いる場合は、1周波測位に比べて測位精度が劣化する場 合もあり得る。

7.3.2 周波測位(位相)精度の劣化

2 周波の位相測位(搬送波測位)により、搬送波位相に含まれる電離圏による遅延を補 正し、かつ精密な測位が実現できる。

実際の測位においては、高精度な測位のために必要な位相観測値に含まれる初期位相 の決定にかかる時間(初期収束時間)の短縮が課題とされている。この時間短縮のため には電離圏の寄与分を正しく除去する必要があるが、経験モデルや観測による電離圏遅 延量モデルがしばしば使用される。しかし、局所的な電離圏遅延量の変動により、これ らの補正に誤差が生じ、測位精度の劣化や初期収束時間の増大に繋がる。

8. 航空運用における宇宙天気現象の社会影響

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)など によって、航空運用に必要な通信、測位に障害が引き起こされ、また、搭乗員の被ばく 線量が増えることがある。この章で説明する航空運用に対して障害を起こし得る宇宙天 気現象と影響を表 8-1 に示す。

分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象
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	電離圈正相嵐
		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

表 8-1 航空運用に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響

現在、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 が国際民間航空機関(ICAO)によって定められている。2019年からは民間航空機の運 航に際して宇宙天気情報の利用が開始され、現在、世界のICAO宇宙天気センターから、 宇宙天気情報の配信が開始されている。表 8-2に示すレベルの宇宙天気現象が発生した 際に、宇宙天気センターから、"Moderate"もしくは"Severe"の宇宙天気情報が発信 されることになっている。日本では、NICTがアジアで唯一ICAOグローバル宇宙天気 センターの一員として認証され、2019年11月にサービスの提供を開始した。

		Moderate	Severe
GNSS	Amplitude Scintillation (S4 ^{*1})	0.5	0.8
	(dimensionless)		
	Phase Scintillation (σ_{ϕ}^{*1})	0.4	0.7
	(dimensionless)		
	Vertical TEC (TEC Units)	125	175
RADIATION	Effective Dose (micro-Sieverts/hour)	30^{*2}	80^{*2}
HF	Auroral Absorption (Kp)	8	9
	PCA (dB from 30MHz Riometer data)	2	5
	Solar X-rays (0.1 – 0.8 nm)(W-m ⁻²)	1×10 ⁻⁴ (X1)	1×10 ⁻³ (X10)
	Post-Storm Depression (MUF) *3	30%	50%

表 8-2 宇宙天気現象の閾値 [170]

*1 電離圏シンチレーションの強度を示す指数

8.1. 通信障害

8.1.1. 通信障害の概要

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、国内線で は短距離の超短波(VHF)帯通信を使用している。超短波帯の電波が届かない洋上管制 では短波通信が行われている。宇宙天気現象により影響事象の発生頻度が高いのが短波 通信への影響である。日本の航空会社によると、一部の通信異常の現象についてプラズ マバブル等の電離圏じょう乱の影響も排除できない事象があることがわかった。以下に 電離圏じょう乱が通信へ及ぼす影響について記述する。

デリンジャー現象が発生すると、通常、電離圏 D 領域で反射される短波が反射されず に吸収され、通信障害が発生する。短波通信の行われるローカルタイムが正午に近いエ リアでその影響は大きいため、短波通信を行う洋上管制のタイミングと合うと、しばら く短波通信ができない時間帯が発生する。

極冠吸収(PCA)が発生すると、デリンジャー現象と同様にD領域で短波帯電波吸収 が増大するため、長距離通信が不能となってしまい、航路変更などの措置が必要となる。

^{*2} Moderate は航空機高度 25,000ft-46,000ft の間で 30µSv/h を超えた場合、Severe は 25,000ft-60,000ft の間で 80µSv/h を超えた場合。

^{*3} 磁気嵐発生後に見られる電離圏じょう乱。最高使用可能周波数(MUF)の過去 30 日平均からの減少率。

特に極域においては、地上に超短波(VHF)帯の通信局がなく、赤道上空の静止軌道に 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 なくなる影響は他の領域に比べて大きい。図 8-1 は航空機の極域ルートを示しており、 中央の黄色い円内(緯度 82 度以上の地域)では衛星通信が使えず、短波通信に頼らざる を得ない。従って PCA などが発生している間は通信不良のために、航路の変更を余儀な くされることがある。

さらに、極域の電離圏は、オーロラ現象による周波数シンチレーションを受ける。また、磁気嵐発生後の電離圏じょう乱によって、通信において利用可能な電波の周波数 (MUF)が下がる。

ICAO 宇宙天気センターから配信される宇宙天気情報では、極域の短波通信の指標と してオーロラの活動度 Kp や PCA および MUF、主に低緯度のデリンジャー現象による 短波通信障害の指標として太陽 X 線強度について、表 8-2 に示すように moderate と severe の基準を定めている。具体的には、PCA については、緯度経度 30 度ずつに区切 られたエリアごとに、2dB を超える場合に Moderate、5dB を超える場合に Severe が発 令される。



図 8-1 航空機の極域ルート例 [123]

プラズマバブルの中や周辺では、電子密度の変化が大きいため、そこを通過する電波 の散乱やプラズマバブルに沿った異常伝播により、航空機用の短波通信に影響が出るお それがある。



図 8-2 日本および周辺の VOR 送信局の分布(黒点)と、受信点(左図が調布,右図 が呉)を中心とする VHF 受信可能範囲(白)と不感帯(グレー)。600km 以遠がスポ ラディック E 層による伝播が可能な範囲。[165]

スポラディック E 層は、通常は鉛直に伝播する中波(MF) ~短波(HF)の幅広い波 長帯の電波を反射するが、伝播する方向が斜めになり、仰角が小さくなるに従って反射 可能な周波数が上がる。仰角が極めて小さくなると、本来は電離層の反射を受けないと 想定されている超短波(VHF)の電波が反射され、通常では届かない遠方まで到達する ようになる。

図 6-4 に航空通信に関わるスポラディック E 層による影響の模式図を示す。スポラ ディック E 層によって、本来の通信地上局以外の地上局から発せられた超短波(VHF) 通信(108~118MHz)が航空機に届き、電波干渉を引き起こす可能性がある。VHF 帯 の電波では、見通し外で一定以上の距離が離れると、Es 層反射による伝播が可能となる 領域が現れる。図 8-2 に、直達波と Es 層 1 回反射を仮定した VHF 電波の電波可能範 囲と、VHF 電波を用いた航空用地上航法援助装置の一つである航空機において方位測定 を可能とする VOR (VHF omni-directional range)局の分布を示す。航空用 VHF 電波の 周波数割り当ては見通し内伝播の範囲内で干渉が起きないように行われることが基本で あるが、Es 層反射により遠方の VHF 航空無線局の電波が到達すると、電波干渉が発生 するおそれがある。図 8-2 から、Es 層反射による電波伝播が可能な範囲に非常に多くの VOR 局が存在することがわかる。実際、広島県呉市にて行われている VHF 帯航空航法 電波のモニタリング観測では、2014 年 5 月に台湾 Haulien 空港からではないかと考え られる非常に強い電波伝播を受信しており、超短波(VHF)のスポラディック E 層によ る最大到達距離は約 2,500km であると見積もられている [165]。

8.1.2. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算

表 8-2 で示されている、ICAO から示される宇宙天気現象の閾値と、2 節で議論した宇宙天気現象の規模の推定を併せると、起こりうる発生頻度の試算が可能である(表 8-3)。 Auroral Absorption の指標として使われている Kp 指数の頻度については表 2-17 から引用した。また太陽 X 線強度については表 2-1 から引用した。

MUF については、foF2 と線形関係があることから、ICAO では両者を同等として扱っているため、foF2 の発生頻度について検討する [37]。では 1997 年から 2014 年の 18 年間の foF2 観測データについて統計を取り、その分布を求めている(図 8-3)。これによると、Moderate (30%減) および Severe (50%減) となる割合としては、春分夜間でそれぞれ 30 回および 2 回、夏至夜間でそれぞれ 50 回および 0 回となり、これから推定すると Moderate が複数回/年、Severe が 10 年に 1 度程度となる。



図 8-3 沖縄で 1997-2014 年夜間に観測された foF2 変動率 P_{60F2}の発生分布。 [37]

		Moderate	Severe
HF	Auroral Absorption (Kp)	8 (1回/10	9 (1回/100
		年)	年)
	PCA (dB from 30MHz Riometer data)	2	5
	Solar X-rays (0.1 – 0.8 nm)(W-m ⁻²)	X1(複数回/	X10 (1回
		年)	/10 年)
	Post-Storm Depression (MUF)	30%(複数	50% (1回
		回/年)	/10 年)

表 8-3 ICAO 宇宙天気スケールの発生頻度	(PCA については未解決)
--------------------------	----------------

2.8 節にて定義した電離圏じょう乱の発生頻度と現象規模のうち、超短波(VHF)通信に関連するスポラディック E 層を表 8-4 に再掲する。

スポラディック E 層による影響では、1 年に 1 回程度の頻度で 1,000km 伝播する周 波数が 100MHz、2,000km 伝播する周波数が 130MHz との結果になっており、すなわ ち航空機用無線標識 VOR で使用される超短波(108~118MHz)の電波で見ると、スポ ラディック E 層によって 2,000km の伝播は 1 年に 1 回以上の頻度で発生し、1,000km の伝播は 10 年に 1 回程度発生するということになる。2.8.1.4 節の伝播可能周波数の累 積確率密度分布(図 2-35)を見ると、超短波(108~118MHz)では、2,000km の伝播は 年間 10 回程度発生する結果となっている。なお、航空機用無線標識 VOR のスポラディ ック E 層反射の発生確率は、スポラディック E 層のよく発生する夏季で 25 パーセント 程度であるという結果もある [106]。そして、その継続時間が約 3 時間程度の現象が発 生しうるということになる。

ただし、障害が発生するためには十分な電界強度で伝播する必要がある。日常的に発 生するレベルのものは観測上電界強度が小さく、実際に航空運用上バックアップが必要 なほどの影響が頻繁に出ているという報告は今のところない。他方で、機材の性能要件 上障害が起きてもおかしくない強度の電波伝播の観測例はあるため、どの程度運用に影 響が出るかについては現在調査が進められている。

	規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年	1回/100年
スポラ	1,000km 伝播する周波数	100MHz	110MHz	130MHz 以上
ディックア屋	2,000km 伝播する周波数	130MHz	180MHz 以上	180MHz以上
クロ層	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	

表 8-4 電離圏じょう乱規模の定義(スポラディック E 層関連)

8.1.3. 通信に関する宇宙天気の影響マトリクス

		発生頻度と影響						
宇宙天気現象	被害	日常~	1回	1回 /10	1回	1 回/1000		
		複数回/年	/1 年	年	/100 年	年		
デリンジャー	短波通信への	721	航空機航	航空機運				
現象	影響		路変更	休				
極冠吸収	短波通信への							
(PCA)	影響							
プラズマバブ	短波通信への							
12	影響							
スポラディック E	超短波通信へ	低いが可	低いが可	低いが可	低いが可	低いが可		
層	の影響	能性あり	能性あり	能性あり	能性あり	能性あり		

表 8-5 宇宙天気の影響マトリクス

8.1.4. 今後の課題

- 利用者との検討による、定量的なニーズ・シーズマッチングの検討。実際の障害の状況の把握とその原因の検討。
- 全球観測データによる電離圏全球マップのリアルタイム作成。
- 全球電離圏モデルによる 24 時間先の予測の精度の向上
- 利用者との検討による、航路変更・運休に至るプロトコルの作成

8.1.5. 通信障害の事例

X 00 / / シン 化 死家 座阪巡伯 (ジル音単)/					
発生日	影響事象概要	太陽フレア規模			
2001/4/3	・2001年4月3日6:30(UT)頃から約2	X17.1 (4/2 21:51)			
	時間にわたり、成田空港と飛行中の国際				
	線の航空機との通信状況が数分ずつ、断				
	続的に悪くなった [141]。				

表 8-6 デリンジャー現象 短波通信への影響事例

発生日	影響事象概要	太陽	陽子フラックス
		フレア規模	(>10MeV)
2003/10/23-	・極航路の航空機でHF/超短波	X1	466pfu
11/6	通信の悪化により航路変更	(10/26 18:19)	$(10/26\ 22:35)$
(ハロウィンイ	$(10/24)$ $[125]_{\circ}$	X17	29500pfu
ベント)		(10/28 11:10)	$(10/29\ 06.15)$
			1570pfu
		X28	$(11/03\ 08.15)$
		(11/04 19:29)	353pfu
			$(11/05\ 06:00)$
2005/1/15-19	・United Airlines の 26 の便で	X2	5040pfu
	PCAによる通信障害リスク回	$(1/15\ 23.02)$	$(1/17 \ 17.50)$
	避のため、航路変更 [123]。		
$2012/1/23\sim$	・デルタ航空:アジア行8便	M8	6310pfu
1/28	・エアーカナダ:東京便、上海	$(1/23\ 03.59)$	$(1/24 \ 15:30)$
	便、香港便	X1	796pfu
	・カンタス航空:シドニー-ブエ	$(1/27 \ 18:37)$	$(1/28\ 02.05)$
	ノスアイレス便がそれぞれ極		
	域航路を低緯度の航路に変		
	更。 [120] [171]。		
2012/3/7-3/13	・デルタ航空が極域航路便で	X5	6530pfu
	航路を低緯度に変更 (3/8-3/9)	(3/07 00:24)	(3/08 11:15)
	$[120]_{\circ}$	M7	469pfu
		(3/13 17:41)	(3/13 20:45)

表 8-7 極冠吸収 (PCA) 短波通信への影響事例

8.2. 測位精度の劣化

8.2.1. 測位精度への影響

現在、航空機の運航においては GNSS の利用が進んでいる。GNSS を含めた電波を利 用する広域航法 RNAV では、従来航法による経路と比較して RNAV 航法により経路短 縮が可能であるため、RNAV 航法の導入が進められており、その利用も拡大している。 RNAV では RNAV1 や RNAV5 が定義されており、それぞれ末尾の数字が航法精度[単位: NM (海里)]として規定されている。航法精度は GPS により実現されており、例えばあ る航空機会社のオペレーションマニュアルには各機種・航法ごとに必要となる、宇宙空 間において稼働状態にある GPS 衛星基数が定義されており、典型的には 23 基もしくは 24 基以上が使用可能な状態である必要がある。なお、2020 年 2 月 20 日現在、GPS 衛 星は予備を含めて計 31 基の衛星が運用されている。飛行実施計画段階において、航空会 社の地上運航従事者が利用可能な GPS 衛星の個数を確認し、NOTAM Summary により 機長および運航管理者へ情報を共有する。GPS を利用する RNAV 経路と、地上にある 航空機用無線標識の VOR/DME を使用した経路の比較を図 8-4 に示す。RNAV 航法と 比較して VOR/DME 経路は経路長が長距離となる。

航空航法では1周波測位のコード測位(疑似距離を用いた測位)が用いられる[172]。

GNSS を民間航空で利用するためには、極めて高い信頼性と精度を満足しつつ、実用 に耐える利用可能性がなければならないが、GNSS 単独ではこれを満足することができ ない。そのため、次の4つの要素について GNSS を補強するためのシステムが必要とな る [173]。

- インテグリティ(完全性:提供される情報の正確性)
- 精度
- サービスの継続性
- アベイラビリティ(利用可能性:航法情報を安全に利用できる確率)

1周波測位においては電離圏遅延の影響が大きく、7章で述べたように、電離圏正相嵐 やプラズマバブルといった電離圏じょう乱により、測距誤差が増大し測位精度が劣化す る。また、電離圏シンチレーションによって使用可能衛星数が減少し、測位精度が劣化 する。補強システムは、これらの精度劣化を補正しつつ、ごく稀に発生するようなワー ストケースについても安全性を担保するためのインテグリティ情報含んだ補強情報を提 供する。その補強システムとして、以下が挙げられる。

- SBAS (Satellite-based Augmentation System): 衛星、広域
- GBAS (Ground-based Augmentation System):狭域、地上
- ABAS (Aircraft-based Augmentation System): 航空機単独



図 8-4 羽田·新千歳航路における RNAV 経路と VOR/DME 経路の比較 [173]

SBAS は広範囲のユーザーに GNSS 補強情報を衛星から放送するシステムで、電離圏 遅延量情報は、地理経緯度の5度四方の格子点(Ionospheric Grid Point: IGP)の値と して放送される [174]。そのため、赤道異常やプラズマバブル、SED 等といった5度グ リッドより小さい範囲で急激に変化する現象は表現しきれない [172]。そのため、表現 しきれない部分について安全性を担保するために保守性を高めたインテグリティ情報が 提供されており、より精度・信頼性の高い航法においてアベイラビリティの制限となっ ている。なお、日本ではこれまで国土交通省の運輸多目的衛星 (MTSAT)を用いた SBAS である MSAS (MTSAT Satellite-Based Augmentation System)が運用されているが、 2020 年 4 月からは MSAS (Michibiki Satellite-Based Augmentation System)としてみ ちびき衛星が放送を担うことになっている。

GBAS は1周波のコード相対測位方式を基礎として、空港周辺約40kmの範囲におけ る利用を想定した着陸誘導システムである。空港内に設置された GPS 基準局のデータ から電離圏遅延等の補正情報をVHF帯(108~118MHz)の電波で航空機側に放送する (VHF Data Broadcast: VDB) [174]。GBAS 基準局と航空機の間で電離圏遅延量が 同一であると前提しているため、電離圏遅延量に局所的な空間変動が存在すると誤差の 要因となる。そのため、電離圏遅延量の空間変動による誤差を保護するためにインテグ リティ情報が提供されている。他方、これらのために精度・信頼性の高い航法において のアベイラビリティが制限されたり、アベイラビリティを高めるための機器の付加など が必要とされている。

このように SBAS や GBAS では局所的な電離圏遅延量の勾配が誤差の要因となる。 誤差を含んだままの運用はインテグリティの低下を招き、逆に過剰な対策をとることは アベイラビリティの低下を招く。局所的な電離圏遅延量の勾配を確実にタイムリーに検 出できれば、航空航法においてより高度な測位利用が可能となると考える。

8.2.2. 起こり得る現象規模と発生頻度の試算

2.8 節にて定義した電離圏じょう乱の発生頻度と現象規模のうち、衛星測位に影響を及ぼす電離圏じょう乱についてまとめた表 2-9 を再掲する。

衣 25 电融固 しょう 乱 尻 侯 り 足 我 (円 均)							
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)	\geq 90 *1	$\geq 130 \ ^{*2}$	\geq 190 *2			
	鹿児島[TECU] ²⁾	≧110	≧160	≥ 230			
	北海道[TECU] 2)	≥ 70	≥ 105	≧150			
デリンジャー現	吸収量(長距離)[dB] 3)	71	83	93	100		
象	継続時間 4)	0.63-1.6 時	1.8-3.6 時	4.0-6.8 時間	7.4-11.9 時		
		間	間		間		
スポラディック	1,000km 伝播する周波数 ⁵⁾	100MHz	110MHz	130MHz 以			
E 層				느			
	2,000km 伝播する周波数 ⁵⁾	130MHz	180MHz	180MHz以			
			以上	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				

表 2-9 電離圏じょう乱規模の定義(再掲)

1) ※1 は 22 年間の TEC データに基づく。※2 は 62 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 6.6 MHz の場合)

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

5) 値は上限周波数の下限を示している。

表 8-2 から測位に関する項目を抜き出し、表 2-9 と併せて検討することで、測位に関し て起こりうる発生頻度を試算すると以下のようになる。

		Moderate	Severe
GNSS	Amplitude Scintillation (S4 ^{*1})	0.5(10 年に	0.8(100 年に
	(dimensionless)	一度)1)	一度)1)
	Phase Scintillation (σ_{ϕ} *1)	0.4	0.7
	(dimensionless)		
	Vertical TEC (TEC Units)	125(数 10	175(100年
		年に1回)	に1回)

表 8-8

1) [175]による

Akala, 2012 [175] は、ボゴタ(コロンビア)で観測された GPS の振幅シンチレーション S4 についての統計的な分布の検討を行っている。図 8-5 はその相補累積分布関数を示しており、ここから、S4 が 0.5 及び 0.8 を超える値を取る頻度を計算できる。



図 8-5 Bogota における S4 の積算分布 (a:太陽活動高、b:太陽活動中、c:太陽活動 低)、各線は季節変化を表す [175]。

表 8-9 宇宙天気の影響マトリクス						
		発生頻度と影響				
宇宙天気現象	被害	日常~ 複数回/ 年	1 回/1 年	1 回/10 年	1 回/100 年	1回 /1000年
電離圈正相嵐	測位精度への影響	なし	なし	航空機 航路変 更	航空機 運休	
プラズマバブ ル	測位精度への影響	なし	なし	航空機 航路変 更	航空機 航路変 更	航空機 航路変 更
電離圏シンチ レーション	測位精度への影響	なし	なし	航空機 航路変 更	航空機 航路変 更	航空機 航路変 更

8.2.3. 測位に関する宇宙天気の影響マトリクス

8.2.4. 今後の課題

ICAO で定められた航空運用における宇宙天気のじょう乱の正当性の評価:実際に航 空運用で用いられる機器に、どの程度の宇宙天気現象が影響を及ぼしているかの定量的 な検討は未だに十分でなく、今後の課題として残されている。

8.3. 乗務員の被ばく

8.3.1. 被ばくの概要

宇宙放射線(太陽系外から定常的に地球に飛来する銀河宇宙線や、突発的に太陽から 飛来する太陽高エネルギー粒子(SEP))が地球大気圏に降下すると、大気を構成する様々 な原子、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。銀河宇宙線量は、約11年周期で変動する太陽活動に連動して変化す るため、数日という短い時間スケールではほとんど変化しないが、太陽放射線は、大規 模太陽フレアに伴って突発的に増加し、極端な場合には銀河宇宙線量の1000倍にも達 することもある。

被ばく線量は高度や緯度に依存する。大気中に入射した宇宙線は大気と相互作用を繰り返してエネルギーを失いながら進むため、高い高度では被ばく線量が高く、低い高度では被ばく線量が低くなる。平時での宇宙線の線量率は高度 12,000m では約 5µSv/時、高度 8,000m では約 3µSv/時程度である。また、極域では地球の磁力線に沿って宇宙線が流入しやすいため、赤道付近に比べると被ばく線量が 3 倍程度高くなるとされている

(図 8-7 参照)。

Lantos and Fuller, 2003 [176]によれば、地上中性子モニタ観測を開始した 1951 年以降に起きた太陽フレアで最大の被ばく線量をもたらしたものは 1956 年 2 月に発生したイベントで、その時のパリーサンフランシスコ間 1 フライトの間の最大被ばく線量は4.5mSvと推定されている。ただし、この値は SEP のエネルギーを高めに見積もっている可能性があり、航路や高度の違いによっても変化する。

日本では2005年12月に文部科学省の審議会により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というガイドラインが示された。日本の事業者の就業規定に よる最大乗務時間数は年間900時間程度であるのに対し、5mSvは航空機に年間1,000 時間乗務した場合の被ばく線量に相当するとしている。

一部の日本の航空会社において、放射線医学総合研究所が公開している航路線量計算 システム JISCARD-EX を使用し [177](図 8-6)、路上の線量計算を行っている。過去に、 日本の航空会社が運航する航路上において、日本の航路上の上限値 5mSv/year を超えた 経験はないとのことである [178]。



図 8-6 JISCARD-EX による試算例 [177]

8.3.2. 航空機高度での被ばく線量の試算

航空機高度での被ばく線量を、太陽放射線被ばく警報システム(WASAVIES)を用いて過去最大規模の太陽高エネルギー粒子(SEP)のイベントから試算した。

WASAVIES は、太陽フレアに伴う放射線被ばく線量の増加をリアルタイムに推定で き、また地表から高度 100km までの任意の地点の被ばく線量の推定ができるシステム である(図 8-7)。2019年11月に公開され、航空機乗務員等の放射線被ばく管理活用の ために ICAO へ情報を提供している。被ばく線量が高い航路を避けたり、運航高度を下 げたりするなど、世界中の民間航空機の運航に必須の情報として利用されることが期待 される [179]。



図 8-7 WASAVIES により推定された過去の大規模太陽フレア時の航空機高度における 被ばく線量分布 [176]

Mekhaldi et al., 2015 [180]によれば、AD774/5 と AD993/4 に発生した過去最大規模 の SEP イベント時のプロトン流量(30MeV 以上)は、2005 年 1 月 20 日に発生した GLE69 時のプロトン流量のそれぞれ 119~141 倍と 51~68 倍であるとしている。そこ で、WASAVIES (WArnig System for AVlation Exposure to Solar energetic particles) により GLE69 相当の SEP イベントが発生した際の被ばく線量を求め、ワーストケース での被ばく線量を見積もるために、その値を 141 倍することで過去最大規模イベント発 生時の最悪推定値とした。計算された GLE69 相当の被ばく線量と過去最大規模イベン ト発生時の最悪推定値を表 8-10 に示す。尚、これらの値は、各 GLE イベント期間中の 被ばく線量を時間積分した値である。

GLE69 相当の被ばく線量を WASAVIES により算出する際は、地表面から航空機高度 までの線量においては Sato et al., 2018 [181]を参照し、宇宙機内の線量においては Sato et al., 2019 [182]を使用した。Sato et al., 2019 [182]では、WASAVIES の拡張版である WASAVIES-EO を開発し、GLE イベント期間中の電離圏磁気圏任意の場所についての 銀河宇宙線と SEP フラックスの予報を可能にした。また、WASAVIES-EO は ISS 滞在 の宇宙飛行士の臓器線量をも見積もることができるとしている [182]。

	GLE69 相当のイベント	過去最大規模イベント
場所	発生時の被ばく線量	発生時の最悪推定値
	[µSv]	[µSv]
地表面	$7.9 imes 10^{-2}$	11
高山(標高 3000m)	1.6	$2.3 imes10^2$
航空機高度(高度 12km)	$2.6 imes10^2$	$3.7\! imes\!10^4$
宇宙機内(磁気圏外)	$8.0 imes 10^{3}$ 1)	$1.1 imes 10^{6}$

表 8-10 GLE69 相当のイベント発生時の被ばく線量最大値と過去最大規模イベント

発生時の最悪推定値

1)[182]による。

表 8-10 に示す通り、GLE69 相当の SEP イベントが発生した際の航空機高度(高度 12km)での被ばく線量は 260µSv であり、過去最大規模のイベントが発生した場合の被 ばく線量は 37mSv と推定される。航空機乗務員に対する年間被ばく量上限は 5mSv と 定められており、航空機飛行中に過去最大規模イベントが発生した場合、その上限値を 1 フライト中に簡単に上回ると予想される。また、ICAO 宇宙天気センターから配信され る宇宙天気情報は、緯度 30 度で区切られた 6 つのエリアごとに、高度 25,000ft-46,000ft の間で 30µSv/h の被ばく線量率を超える場合に Moderate、高度 25,000ft-60,000ft の間 で 80µSv/h を超える場合に Severe が発令されることになっている。GLE イベント全体 の時間積分値と単位時間当たりの値とを即座に比較することはできないが、GLE イベン トの継続時間が数時間単位であることを考慮すれば、最悪推定値の約 37mSv のイベン トが発生した際は Severe の条件をも大きく上回る線量値となることが容易に予測できる。よって、過去最大規模のイベント発生時には、航空機が運休せざるを得ない影響が 出てくると考えられる。

8.3.3. 被ばくに関する宇宙天気の影響マトリクス

			発	生頻度と影	響	
宇宙天気現象	被害	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

表 8-11 宇宙天気の影響マトリクス

GLE の発生頻度はそれほど高くなく、約 70 年間の中性子モニタによる観測で 72 回 発生している(2.3節参照)。しかし、そのほとんどの GLE の規模は、被ばく線量低減 のために特段の対策を行う必要はないレベルである[183]。GLE の規模は、中性子モニ タ計数上昇率の積分値(Event-integrated intensity, EII)でスケーリングすることが可 能で、例えば GLE69 の EII 値は 385 [%^{*}h]である [78]。

航空機の航路変更を必要とする GLE の規模(EII) がどの程度かはまだ議論の余地が あるが、8.3.2 節の議論より GLE69 相当の SEP イベントが発生した際の航空機高度 12km での被ばく線量が 260µSv と航路変更を検討し得る規模であることから、「GLE69 よりも大きい規模(EII)の GLE が発生した際は航路変更を要する」と仮定すると、そ の数は 7 回となる [78]。約 70 年間の観測のうちの 7 回であるため、おおよそ 10 年に 1 回の頻度と言える。

また、過去最大の GLE の規模は、1956 年 2 月に発生した GLE5 の 5202 [%*h]で、そ のときの最大被ばく線量は前述のように 4.5mSv と推定されているが [176]、この値は 航空機の飛行高度を下げることにより 1mSv 以下に抑えられ、航空機運休までは必要な いと考えられる。ただし、どのレベルの積算線量もしくは線量率になれば航路変更や運 休などの対策を取るべきかは明確に定まっておらず、現状は、各航空会社の判断に委ね られている。今後、具体的対応方法の国際基準の策定が望まれる。よって、これらの仮 定に基づけば、航空機運休が必要となるのは、前述した AD774/5 に発生した過去最大規 模の SEP イベント時のみと考えられ、その頻度はおおよそ 1000 年に 1 回と考えられ る。

167

以上の議論を宇宙天気の影響マトリクスに整理したものを表 8-11 に示す。

8.3.4. 今後の課題

今後、より精密に乗務員の被ばく線量と頻度の関係を見積もり、さらに航空運航に活 かしていくために、以下の課題が挙げられる。

- 被ばく線量低減対策のプロトコル(どれくらいの被ばく線量率まで許容するか など)の策定
- GLEの規模(EII)や他の指標と被ばく線量・線量率の相関の調査
- 航空機実験による被ばく線量の測定とモデル精度の検証

8.3.5. 航空搭乗員被ばくによる影響事例

発生日	影響事象概要	太陽フレア規模	陽子フラック
			ス
			(>10MeV)
2003/10/23-11/6	・FAA (アメリカ連邦航空局) は	X1	466pfu
(ハロウィンイ	25000 フィート (7620m) 以上	$(10/26 \ 18:19)$	$(10/26\ 22:35)$
ベント)	の飛行に対しアラートを発表	X17	29500pfu
	$(10/28-30)$ $[125]_{\circ}$	(10/28 11:10)	$(10/29\ 06.15)$
	・放射線量の増加が予想された		1570pfu
	ことから、高緯度域 (北緯 57°	X28	$(11/3 \ 08:15)$
	以上)の航空路が一時閉鎖され	(11/04 19:29)	353pfu
	た(10/30) [125]。		$(11/5\ 06:00)$
2012/1/23~1/28	・デルタ航空:アジア行8便、	M8	6310pfu
	エアーカナダ:東京便、上海便、	$(1/23\ 03.59)$	(1/24 15:30)
	香港便、カンタス航空:シドニ	X1	796pfu
	ー・ブエノスアイレス便がそれ	$(1/27 \ 18:37)$	$(1/28\ 02.05)$
	ぞれ極域航路を低緯度の航路		
	にルート変更 [120] [171]。		
2012/3/7-3/13	・デルタ航空が極域航路の航空	X5	6530pfu
	便で航路を低緯度に変更(3/8-	$(3/07\ 00.24)$	(3/8 11:15)
	$3/9)$ $[120]_{\circ}$	$\mathbf{M7}$	469pfu
		(3/13 17:41)	(3/13 20:45)

表 8-12 航空搭乗員被ばくを避けるために航路変更が行われた事例

8.3.6. 事業者との議論

特に極域を通るルートでは地球磁場に沿って高エネルギー陽子が流入しやすいため、 通信・測位障害や搭乗員被ばくなど影響が大きく、航路変更などを要する場合がある。 2012 年 1 月の宇宙天気現象が起きた際には極域を飛行する 8 機のデルタ航空機で経路 変更が行われた。下記の図 8-8 に示す通りデトロイト・香港便でも極域を回避する経路変 更が行われ、結果的に\$4,507 の追加コストが発生した [184]。



図 8-8 航空機の極域ルート例 [180]

8.4. 電子機器のソフトエラー

宇宙放射線による電子機器の誤動作(ソフトエラー)が発生することが知られている。 ソフトエラーとは、半導体デバイス内のデータの1または複数ビットが反転する現象で [185]、半導体デバイスの高集積化と低電力化に伴いソフトエラーが増えるため、電子機 器の誤動作を引き起こす原因の一つとして注目されている。

ソフトエラーは半導体そのものの故障ではなく、非破壊のエラーであるため、異常が 発生しても原因調査に時間を要し、またその特定が困難である。このような背景から、 2015年にはソフトエラー対策に関する設計から評価、品質基準を定めた国際標準が制定 された。これにより、開発段階でソフトエラーの影響評価を行うことができるようにな り、品質の向上につながると期待される。

航空機高度では、地上と比べてソフトエラーの確率も高くなる。航空用電子機器・部 品は MIL 規格の下で管理されたものを調達することがベースとなっていたが、技術の進 歩などに伴い、信頼性の高い部品の調達、管理が問題となっている。航空機高度でのソフトエラー率は航空用電子機器・部品を購入する際の基準にもなっている [186]。

8.5. レーダ障害

航空機管制では、レーダとして航空路監視レーダ (Air Route Surveillance Radar: ARSR、1200-1350MHz)、空港監視レーダ (Airport Surveillance Radar: ASR, 2700-2900MHz) などの各種レーダを運用管制に用いている [187]。

これらのレーダは極超短波(UHF)帯の電波を使用しており、太陽フレアに伴い強い マイクロ波が発せられるとレーダ障害を起こすことがある。

表 8-13 太陽からの強いマイクロ波 レーダ障害事例

発生日	影響事象概要	太陽フレア規模
2015/11/4	スウェーデンの空港でレーダ障害。14:30UT	M2.8
	頃からレーダ上に航空機が表示されなくな	(11/4 13:45)
	り、航空機の離発着を中止した [188]。	

レーダ障害に関して、発生事例は少ないものの、レーダ管制が使えなくなると、空港 で一度に着陸を処理できる機体数が大幅に減るため、他空港への着陸、または出発見合 わせの影響が出るなど社会的影響は大きい。

8.6. 経済影響

GLE69のSEPイベントに基づき、SEPイベント時における被ばく回避の観点から航空機乗員・乗客の安全を保つための飛行経路変更による経済的損失を評価する。

まず、「安全な飛行経路」のための条件(飛行高度及び緯度の制限)を検討する。下記、 図 8-9 及び図 8-10 に示す通り日本発着便で、高緯度地域を飛行する北米路線、欧州路 線の実際の航跡を参照経路として選択する。

北米路線



- 欧州路線
 - 成田 (NRT) \rightarrow London Heathrow (LHR)
 - London Heathrow (LHR) \rightarrow 成田 (NRT)

欧州路線は飛行方向による違いが大きくないため、両方向1便ずつ選定 NRT-LHR



被ばく回避検討についての前提を以下の通りとする。

- 安全性が第一であり、不確実性については保守的な選択を行う。
- SEP イベントの継続時間が不確実である場合は、飛行中常に被ばく環境に曝され たとしても、被ばく線量が許容範囲内であるように検討する。
- ICAO Space Weather Information の閾値:
 - Severe: 80 µSv/hr
 - Moderate: 30 μSv/hr
 1回の飛行時間を 10 時間とすると、ICRP(国際放射線防護委員会)が勧告 する、一般の人々に対する被ばくの線量限度基準の 1mSv を下回るためには 線量率が 100μSv/hr 以下である必要がある。Severe の閾値となっている 80μSv/hr では余裕が少ないので、Moderate の閾値の 30μSv/hr を一つの指 標とする。
- 通常時の被ばく線量率
 通常時の被ばく線量率は数 μSv/hr 以下であるので、通常時と同じレベルの被ばく量に抑える場合として、10μSv/hr をもう一つの指標とする。
- GLE69 (ピーク日時:2005年1月20日06:55UT) は図 8-7 WASAVIES により 推定された過去の大規模太陽フレア時の航空機高度における被ばく線量分布に示 す通り、南北半球で非対称に影響が生じた。日本発着便に対するワーストケースを 想定するため、軸反転を行い、軸反転ありと軸反転なしの両方のケースを検討す る。
- 飛行経路の制限
 - 計算の簡単化のため、飛行経路全体を通して、飛行高度、または飛行高度と 飛行緯度の両方にそれぞれ一つの制限値を設定する。これは、被ばく線量率 が上記 10 及び 30 µSv/hr となる最低高度、または制限緯度内における最低 高度から決める。

これらの前提をもとに 30µSv/hr 及び 10µSv/hr を上回らない航路を検討した結果、以下に 8 つのシナリオを作成した。

<u>北米路線 JFK-NRT(JL003, 20 Jan 2019)</u>

下記、図 8-11 に 2019 年 1 月 20 日の日本航空 JL003 便(JFK-NRT)の飛行航路に 基づく、GLE69 に相当するイベントが発生した場合の線量率を示す。南北軸反転がない 場合において最大約 120µSv/hr、南北軸反転がある場合において最大約 150µSv/hr を示 している。


図 8-11 JFK-NRT 航路と線量率 [189] 【掲載論文現在投稿中】

次に、同飛行経路において被ばく線量率が 30µSv/hr 及び 10µSv/hr を下回る飛行高度 を検討する。緯度については、同飛行経路から変更しない。図 8-12 に同便の飛行高度 と、GLE69 に相当するイベントが発生した際の線量率(10µSv/hr 及び 30µSv/hr)を示 す。ワーストケースである南北軸反転ありの場合、線量率を 10µSv/hr 以下に抑える場合 は高度 FL140 以下、30µSv/hr 以下に抑える場合は高度 FL200 以下で飛行する必要があ る。



図 8-12 JFK-NRT 飛行高度と線量率 [189] 【掲載論文現在投稿中】

次に、同飛行経路において被ばく線量率が 30µSv/hr 及び 10µSv/hr を下回る飛行高度 及び緯度を検討する。図 8-13 に南北軸反転を行った場合の同便の飛行経路における線 量率と飛行高度・緯度を示す。線量率を 10µSv/hr 以下に抑える場合は高度 FL250 以下 且つ北緯 42°以南、30μSv/hr 以下に抑える場合は高度 FL300 以下且つ北緯 44°以南 を飛行する必要がある。



図 8-13 JFK-NRT 線量率と飛行高度・緯度 [189] 【掲載論文現在投稿中】

<u>欧州路線 NRT-LHR (BA006, 03 Nov 2019)</u>

下記、図 8-14 に 2019 年 11 月 3 日のブリティッシュ・エアウェイズ BA006 便 (NRT-HRT) の飛行航路に基づく、GLE69 に相当するイベントが発生した場合の線量率を示 す。南北軸反転がない場合において最大約 400μSv/hr、南北軸反転がある場合において 最大約 190μSv/hr を示している。



図 8-14 NRT-LHR 航路と線量率 [189] 【掲載論文現在投稿中】

次に、同飛行経路において被ばく線量率が 30µSv/hr 及び 10µSv/hr を下回る飛行高度 を検討する。緯度については、同飛行経路から変更しない。図 8-15 にブリティッシュ・ エアウェイズ BA006 便及び全日空 NH202 便の飛行高度と、GLE69 に相当するイベン トが発生した際の線量率(10µSv/hr 及び 30µSv/hr)を示す。ワーストケースである南 北軸反転無しの場合、線量率を 10µSv/hr 以下に抑える場合は高度 FL160 以下、30µSv/hr 以下に抑える場合は高度 FL220 以下を飛行する必要がある。



図 8-15 NRT-LHR 飛行高度と線量率 [189] 【掲載論文現在投稿中】

次に、BA006 便の飛行経路において被ばく線量率が 30µSv/hr 及び 10µSv/hr を下回 る飛行高度及び緯度を検討する。図 8-16 に南北軸反転を行った場合の同便の飛行経路 における線量率と飛行高度・緯度を示す。線量率を 10µSv/hr 以下に抑える場合は高度 FL170 以下且つ北緯 55°以南、30µSv/hr 以下に抑える場合は高度 FL230 以下且つ北 緯 55°以南を飛行する必要がある。



図 8-16 NRT-LHR 線量率と飛行高度・緯度 [189] 【掲載論文現在投稿中】

被ばく線量率を緩和するための飛行経路の制限案まとめ

下記表 8-14にGLE69相当のSEPイベントが発生した場合JFK-NRT経路及びNRT-LHR 経路の飛行経路制限案をまとめる。

表 8-14 飛行経路に対する制限シナリオー覧

	飛行高度のみを制限			飛行高度と緯度を制限			Į
	30µSv/hr	10µSv/hr		30µSv	v/hr	$10 \mu Sv$	/hr
LEIZ NID/	RT FL200以下	FL140	以	FL300 以	下	FL250 以	下
JFK-NRT		下		北緯 44°	以南	北緯 42°	以南
NRT-LHR	FL220以下	FL160	以	FL230 以	人下	FL170 以	下
		下		北緯 55°	以南	北緯 55°	以南

被ばく線量を緩和するための飛行経路変更に伴う経済的な影響を見積もるために、表 8-14 に示す飛行経路に対するシナリオのうち、JFK-NRT 便について、最大線量率を 30μSv/hrとする場合(飛行高度のみを制限、飛行高度と緯度を制限)について、飛行時 間と燃料消費量への影響を試算し、通常経路を飛行した場合と比較した。

飛行時間と燃料消費量については、EUROCONTROL によって開発された BADA (Base of Aircraft Data) Family 3 機体性能モデルを用いた。通常経路としては、2019 年 1月31日の経路を用い、気象条件は当日の気象庁による全球数値予報(GPV)モデルを用 いた。航空機の機種は Boeing B777-300ER とし、飛行経路を制限する場合は通常経路 を基本としつつ、飛行高度と緯度が制限に当たる場合に飛行経路を変更する。変更する 飛行経路は、飛行高度と緯度の制限の範囲内での最適経路を探索して用いた。また、航 空機速度は通常経路とマッハ数が同じとなるように設定した。

シナリオ 通常経路		30µSv/hr 以下	30µSv/hr 以下	
		飛行高度のみを制	飛行高度と緯度を	
		限(FL200以下)	制限(FL300以下、	
			北緯 44°以南)	
飛行距離 [km]	11,334.6	11,334.6	12798.2	
飛行距離変化 [km]	_	0.0	+1,463.6	
飛行時間 [秒]	49,380	46,813	59,357	
飛行時間変化 [秒]	-	-2,567	+9,977	
燃料消費量 [kg]	118,230	157,540	149,770	
燃料消費量変化 [kg]	_	+44,310	+36,540	

表 8-15 飛行経路に制限を加えた場合の飛行距離、飛行時間、燃料消費量の変化

表 8-15 に計算結果を示す。飛行高度のみを制限する場合、飛行距離は変化せず、燃料 消費量が 44,310kg 増加する。この場合、飛行時間は 2,567 秒短縮されているが、これは 低高度の音速が速く同じマッハ数に対して対地速度が速くなること、ジェット気流によ る向かい風の影響を受けにくくなることが理由と考えられる。飛行高度の制限を緩和し、 緯度に制限を加える場合、飛行時間が 9,977 秒(約 2 時間 46 分)増加するとともに、燃 料消費量が 36,540kg 増加する。この場合、飛行時間が増加する代わり、より効率の良い 高度を飛行することができるため、飛行高度のみに制限を加えた場合に比べ燃料消費量 の増加は抑えられる。

2020年2月において、航空燃料(ジェット燃料)の価格は1バレル(159 リットル) あたり約9000円である。これは1kgあたり約72.6円となる。従って、JFK-NRT便に おいて、ここで用いた仮定の元で被ばく線量を緩和するための飛行経路変更に伴う燃料 消費量の増加による経済インパクトは、1フライトあたり267~326万円となる。ここ では、飛行時間全体において被ばく線量率の最大値が継続すると仮定し、飛行経路上の 全ての場所において被ばく線量率が一定以下となるように設定している。SEPイベント の進行の現況把握・予報が可能となれば、飛行中に制限を緩和し、より効率の良い航路 に戻すことも可能である。このとき、宇宙天気予報情報の活用により、燃料消費量の増 加が抑えられることになる。

今回の試算では、飛行高度、または飛行高度と飛行緯度にそれぞれ一つの制限値を与 えるという単純化した条件のもとで計算を行った。従って、ここで得られた経済インパ クトはワーストケースにおける上限値と考えるべきである。より現実的な燃料消費量、 飛行時間への影響の評価には、被ばく線量の3次元分布とその時間変化を考慮した最適 飛行経路探索が必要である。

9. 有人宇宙活動における宇宙天気現象の社会影響

9.1. 宇宙飛行士被ばく

有人宇宙活動に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響を表 9-1に示す。

表 9-1 有人宇宙活動に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響

分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象
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)

9.1.1. 宇宙飛行士被ばくの概要

地上で我々が日常生活を送る中での放射線による被ばく線量は、1 年間で約 2.4mSv と言われている。一方、軌道上で活動する宇宙飛行士は宇宙から飛来する放射線(宇宙 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/日とされ、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。

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)により定められており、その値を上回ることのないよう被ばく管理されている (例:30歳で初飛行を行った男性飛行士の場合、0.65Sv)。ISS では、船内の放射線環 境リアルタイムモニタが行われている他、小型の線量計を宇宙飛行士に携帯させること によって、個人の被ばく管理を行っている [190]。

図 9-1 に ISS 軌道における宇宙線環境を示す。宇宙線は一次宇宙線(ヴァン・アレン 帯の放射線、太陽放射線、銀河宇宙線など)及び二次宇宙線(一次宇宙線が宇宙機の壁 や大気原子の原子核と相互作用して、新たに生成する中性子並びに荷電粒子)からなり、 それぞれに対して対策が必要である。例えば南大西洋異常帯 SAA 領域の中心部を通過 する際は船外活動を行わないなどの対策が取られている。



図 9-1 ISS 軌道における宇宙線環境 [191]

宇宙飛行士の被ばく問題に関して、宇宙天気が主に対象とするのは太陽放射線である。 太陽フレア等による被ばくが予想される場合には船外活動をしている宇宙飛行士は船内 に戻り、船内の最も遮蔽の厚いところや、水や食料で囲まれたところ、または中性子遮 蔽用の発泡ポリエチレンで囲まれた場所(ISS ではロシアモジュールや米国実験棟内の 仮眠室)に避難して被ばくを最小限に抑えなければならない[192]。ISS 参加各宇宙機 関の調整において、宇宙環境異常時の対処が定義されており、JAXA 内のフライトルー ル(ISS 飛行時の運用手順書)に盛り込まれている(図 9-2)[191][193]。

異常時の レベル	定義	対処
警戒(Alert)	 NOAAがSPE(太陽粒子イベント (静止軌道上で10MeVを超える陽 子数が10個/cm2・s・ster以上)) の予報(警報)を出した場合 SPEが発生した場合 地磁気嵐(Kp≥7)の場合 	 ISS内の放射線量の確認 ・地上側で放射線量のモニタリングを継続 ISS内放射線計測機器 (TEPC)の動作状況確認
非常事態 (Contingency)	 ESPE(高エネルギー太陽粒 子イベント(静止軌道上で100MeV を超える陽子数が1個/cm2・s・ ster))が発生した場合 	 ・ISS内の放射線量を確認し、 必要に応じ介入措置を実施 (遮蔽の薄い箇所への立入制限等) ・100MeV 陽子が100PFUを超過した場合は、遮蔽の厚い場所への滞在を勧告

図 9-2 フライトルール上の宇宙環境異常時の定義と対処 [191]

また、2019年現在、人類の活動領域は地球低軌道に限られているが、近い将来月軌道 における滞在や、月・火星でのミッションなどが行われる際は、地球の磁気圏という強 力なバリアから離れることになり、宇宙飛行士の被ばくはより一層大きな問題となる。 Zeitlin et al., 2013 [194]は、NASA の火星探査機マーズ・サイエンス・ラボラトリーが 測定した放射線量を基に、火星への往復で 0.66 ± 0.12 Sv の被ばく量になると推定して いる。また、Semkova, et al., 2018 [195]は、火星周回探査機 Trace Gas Orbiter (TGO) のデータから、太陽活動下降期に火星へ往復した場合、少なくとも生涯実効線量制限値 の 60%の被ばく量になると推定している。これらに火星滞在中の被ばく量が加算される ため、火星往復及び火星の地表でのミッションを遂行した場合の合計被ばく量は、生涯 実効線量制限値と比べても相当量になると考えられる。

9.1.2. 宇宙機内(磁気圏外)での被ばく線量の試算

8.3 節にて、航空機高度での被ばく線量を、太陽放射線被ばく警報システム (WASAVIES)を用いて過去最大規模の太陽高エネルギー粒子(SEP)のイベントから 試算した。その中で、WASAVIESの拡張版である WASAVIES-EO [182]により宇宙機内

(磁気圏外、ISS と同等の遮蔽あり)の被ばく線量も試算した。その結果、GLE69 相当の SEP イベントが発生した際の被ばく線量は 8mSv、そこから推定する過去最大規模イベント発生時の被ばく線量は約 1.1Sv と試算された。なお、この値は、GLE イベント期間中の被ばく線量を時間積分した値である。

これは、JAXAの定める ISS 搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値 1.0Sv(男性が 46 歳以上で初めて宇宙飛行を行った場合)を超える値であり、過去最大規模のイベントが 一度発生しただけで制限値を超えてしまうことになる。よって、宇宙天気予報にて事前 にこのような大規模イベントを予測することが非常に重要であり、遮蔽の厚い場所への 確実な退避や、最悪の場合、地球への緊急帰還の迅速な決断が必要となると考えられる。

なお、上記被ばく線量は、宇宙機が磁気圏内にある場合は、大幅に低減される(最大 で2桁程度)。例えば、GLE69時に ISS 内に滞在した宇宙飛行士の SEP による被ばく 線量は約 80 µ Sv と推定されている [182]。一方、船外活動中や遮蔽の薄い宇宙機内に滞 在している場合は、1 桁以上高くなる可能性もあり、宇宙飛行士の被ばく線量はイベン ト発生時の状況に大きく依存することに注意する必要がある。

9.1.3. 被ばくに関する宇宙天気の影響マトリクス

これまで太陽フレア発生により安全区域への退避がされた例は1989年と2003年の2 例ある(9.1.5節)。それぞれ、第22、第23太陽周期のピーク付近の出来事であった。 太陽活動度が低かった第24太陽周期では退避の事例は発生していないが、11年に1回 の太陽活動周期中におよそ1回は退避の事例が発生すると考えられる。9.1.2節で議論し た通り、1000年に1回規模のイベントが発生すると、最悪の場合、地球への緊急帰還が 想定される。この間の100年に1回規模のイベントでは、明確な分析はなされていない ものの、10年に1回規模と同様に安全区域への退避か、または地球への緊急帰還も想定 される。

以上を宇宙天気の影響マトリクスに整理したものを表 9-2 に示す。

			発	生頻度と影	響	
宇宙天気現象	被害	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 一粒子(SEP)	宇宙飛行士被ばく	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

表 9-2 宇宙天気の影響マトリクス

9.1.4. 今後の課題

- 宇宙機内の陽子フラックスをリアルタイムで測定する検出器の開発
- 上記検出器応答から宇宙飛行士の被ばく線量を推定するモデルの開発
- GLEの規模(EII) や他の指標と被ばく線量の相関の調査

9.1.5. 宇宙飛行士被ばくを避けるために警告等が発せられた事例

☆ 牛 口	影郷古舟畑西	上四フレフ担告	陽子フラックス
光生口 影響争家概要		太陽ノレノ 規模	(>100MeV)
1989/10/19	・ロシアの宇宙ステーション・	X13	40000pfu
	ミールに搭乗していた宇宙飛	(10/19 12:58)	(10/20 16:00)
	行士が、太陽フレア発生の連		
	絡を受け、放射線シールドの		
	厚い所に避難 [139]。		
2000/11/8、9	・ISS クルーに radiation	M7	14800pfu
	contingency が通告 [58]。	(11/8 23:28)	(11/9 16:00)
2001/11/6	・ISS クルーに radiation	X1	31700pfu
	contingency が通告 [58]。	(11/5 16:20)	$(11/6\ 02.15)$
2003/10/23-11/6	・ISS クルーに radiation	X1	466pfu
(ハロウィン	contingency が通告。放射線	(10/26 18:19)	$(10/26\ 22:35)$
イベント)	防護のためサービスモジュー	X17	29500pfu
	ルに退避(10/28) [139]。	(10/28 11:10)	$(10/29\ 06.15)$
			1570pfu
		X28	$(11/03\ 08:15)$
		(11/04 19:29)	353pfu
			$(11/05\ 06:00)$
2005/1/17	・ISS クルーに radiation	X4.2	14000pfu
	contingency が通告。就寝中	$(1/17 \ 18:59)$	(1/17 18:00)
	に予想外に放射線レベルが増		
	加するおそれがあったため、		
	予防策として、遮蔽の厚い場		
	所で眠ることがクルーに指示		
	された。 [196]		

表	9-3	宇宙飛行士被ばく	を避ける	ために警告等が発せられた事例
1	00		、と思いる	

10. 地上生活における宇宙天気現象の社会影響

太陽高エネルギー粒子(SEP)や地磁気誘導電流(GIC)によって、地上生活に障害が 引き起こされることがある。この章で説明する地上生活に対して影響を与え得る宇宙天 気現象と影響を表 10-1 に示す。

~					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象			
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 10-1 衛星運用に対して障害を起こし得る宇宙天気現象と影響

10.1. 地上での被ばく

10.1.1. 地上での被ばくの概要

放射線被ばくによる人体への影響として、ある一定レベル以上の放射線にさらされた 場合に比較的短時間で発症する「確定的影響」(表 10-2)と線量に応じて長期の潜伏期 を経て確率的に発症する「確率的影響」の2つがある。

しきい線量	症状
200mSv以下	臨床症状は確認されない
500mSv	末梢血中のリンパ球の減少
1000mSv	悪心、嘔吐(10%の人)
7000mSv 以上	100%死亡

表 10-2 確定的影響 [197]

医療による放射線被ばくや、近年では原子力発電所事故による被ばくが注目を浴びる ことが多いが、地磁気や大気による減衰効果が小さい高緯度、高高度を飛行する航空機 搭乗員や、宇宙空間に長期滞在する宇宙飛行士は宇宙天気起因による放射線増加に伴い、 被ばくする頻度・程度が高い。

また、放射線による発がんの影響に関する研究例として、「短時間で一度に被ばくした 場合の方が、長期間少しずつ被ばくした場合に比べて発がんリスクが高い」という研究 結果も出ている [198]。高高度や宇宙空間で活動する以上、日常的な被ばく量の増加か らは免れないが、宇宙天気予報により放射線の状況を前もって知ることで、突発的な被 ばくについては適切な防護策をとることが可能である。

10.1.2. 地上での被ばく線量の試算

8.3 章にて、過去最大規模の太陽高エネルギー粒子(SEP)のイベント発生時の航空機 高度での被ばく線量を、太陽放射線被ばく警報システム(WASAVIES)を用いて試算し た。その中で、地上での被ばく線量も試算した結果、GLE69相当のSEPイベントが発 生した際の被ばく線量は0.079µSv、そこから推定する過去最大規模イベント発生時の被 ばく線量は約11µSvと試算された。なお、この値は、GLEイベント期間中の被ばく線 量を時間積分した値である。

ICRP(国際放射線防護委員会)が勧告する、一般の人々に対する公衆被ばくの線量限 度基準は、環境省によると年間1mSv(追加被ばく線量年間1ミリシーベルト、医療被 ばくを除く)とされている。また、自然放射線による年間線量は2.1mSv(日本平均)、 胸部CT検査(1回)で2.4~12.9mSvなどとされている[199]。よって、過去最大規模 イベント発生時でも年間線量基準より2桁程度低い被ばく線量であり、地表面において は憂慮する必要はないと言える。

10.1.3. 被ばくに関する宇宙天気の影響マトリクス

10.1.2節の議論を宇宙天気の影響マトリクスに整理したものを表 10-3に示す。

		発生頻度と影響				
宇宙天気現象	被害	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)	地上での被ばく	なし	なし	なし	なし	なし

表 10-3 宇宙天気の影響マトリクス

10.2. 電子機器のソフトエラー

1989 年 8 月にカナダ トロント証券取引所の集積回路が損傷し、3 時間取引が停止す るという事故が起こった。当時、X20 クラスの極めて強いフレアが発生しており、高エ ネルギー陽子の流入による地上でのシングルイベントだとする報告もあるが [200] [201]、原因は定かではない。

8.4節で述べたように、地上でも宇宙放射線を原因とする電子機器の誤動作(ソフトエラー)が発生することが知られており、通信断などが発生した際の影響は大きい。ソフトエラー対策に関する設計から評価、品質基準を定めた国際標準が制定されるなど、国際的な品質向上に向けた動きもある。ただし、現在の標準化等の議論は銀河宇宙線によるソフトエラーを想定しており、SEP は要因として識別されているが、あまり議論はされていない。

10.3. 信号機器の誤動作

宇宙天気現象による鉄道への影響は、電子機器などシステムへの直接的な影響と、電力や通信、GPS を介した間接的な影響が考えられ、鉄道分野においても宇宙天気現象の 影響を評価する必要がある [202]。

北欧の国ではすでに、宇宙天気現象による鉄道ネットワークへの不具合があったとの 記事もある [203]。地磁気活動によって鉄道システムが不具合を起こす原因として、GIC が考えられている [202]。

Eroshenko et al., 2010 [204]によれば、高緯度(北緯~58-64 度)を走るロシア鉄道で、 2000 年から 2005 年に発生した 17 の巨大な磁気嵐と、1989 年 3 月の極大磁気嵐の期間 に、Signalization, Centralization and Blockage (SCB)のシステム運用において、鉄道 信号機が故障し、不具合が発生したとされる。故障した信号機は、Dst 指数と Kp 指数が 高くなる磁気嵐の主相では正確に表示されていたが、不具合が発生した期間は、各磁気 嵐イベント中の地磁気じょう乱が最も激しい期間と重なっている。地磁気活動が非常に 活発となる期間に発生した地磁気誘導電流(GIC)が、このような不具合の明らかな原 因であるとしている [204]。

11. 残された課題

11.1. 社会影響をより正確に推定するための課題

3章以降、宇宙天気現象が影響を与えうる分野毎に、その影響の内容と規模について 議論してきた。まとめる中で、今後、さらに社会影響を定量的に評価していくための課 題も識別されてきた。それらの課題を表 11-1 にまとめる。

分野	影響	課題
電力	停電	● 電離圏・磁気圏電流の高精度な入力をもとにした GIC の
		計算
		● 各変電所(変圧器)の耐性を考慮した影響評価
		● 変圧器そのものの影響だけではなく、ドミノ倒しのトリガ
		ーとなる可能性の検討(北海道胆振東部地震に伴う停電
		等)
	経済影響	● GIC のシミュレーション結果等の数値との整合性を考慮
		した、経済影響の試算の精度の向上
衛星運用	表面带電	● 表面帯電の発達とそれに起因する周囲の宇宙環境変動の
		関係の解明
		● 衛星の位置とサブストームのタイミング (サブストームに
		伴う高温電子増大領域の位置関係)、サブストーム高温電
		子のエネルギースペクトル、個々の衛星の形状・材質、そ
		の時の姿勢、衛星固有の放電閾値、放電回数の見積もり、
		日照か日陰か等、様々な条件を考慮したリスク評価
		● 衛星周辺の宇宙環境と衛星表面帯電環境の観測データと
		解析の充実
	深部帯電	● 設計段階における、試験やシミュレーションによる深部帯
		電・放電の可能性についての検証
	大気ドラッ	● 太陽からの紫外線の量や磁気嵐の規模による地球高層大
	グ	気の加熱量と、それに伴う人工衛星の軌道と姿勢への影響
		を定量的に評価できるモデル開発

表 11-1 社会影響をより明らかにしていくための課題

分野	影響	課題
通	短波(HF) 通信・	● 定量的なニーズ・シーズマッチングの検討。
信·	放送の障害	● 定量的な障害状況の把握とその原因の検討
放送		● 観測データによる電離圏全球マップのリアルタイム作成
	超短波(VHF)通	● 同上
	信・放送の障害	
測位		● 同上
利用		● GNSS 受信機の特性等を考慮した電離圏シンチレーショ
		ン・太陽電波バーストの影響の定量的評価
航空	通信障害	● 利用者との検討による、航路変更・運休に至るプロトコル
運用		の作成
	測位精度の劣化	● ICAO で定められた基準の評価
		● 上記に必要な、宇宙天気現象の航空機器への影響の定量的
		な調査
	乗務員の被ばく	● 被ばく線量低減対策のプロトコル(どれくらいの被ばく線
		量率まで許容するかなど)の策定
		● GLEの規模(EII)や他の指標と被ばく線量・線量率の相
		関の調査
		● 航空機実験による被ばく線量の測定とモデル精度の検証
	電子機器のソフ	● 銀河宇宙線に加えて、SEP もソフトエラーの要因とした議
	トエラー	論の実施
	経済影響	● 宇宙天気情報の採用の可否判断の基となる予報精度と損
		失計算の評価
有人	宇宙飛行士被ば	● 宇宙機内の陽子フラックスをリアルタイムで測定する検
宇宙	<	出器の開発
活動		● 上記検出器応答から宇宙飛行士の被ばく線量を推定する
		モデルの開発
		● GLEの規模(EII)や他の指標と被ばく線量の相関の調査
地上	地上での被ばく	特になし
生活	電子機器のソフ	● 銀河宇宙線に加えて、SEP もソフトエラーの要因とした議
	トエラー	論の実施
	信号機器の誤動	特になし
	作	

表 11-1 社会影響をより明らかにしていくための課題(続き)

また、宇宙天気災害が社会に与える影響の全体に係る課題として、以下の点について今後も検討が必要である。

- 因果関係のある現象の間に必ずしも線形的な関係が成立していない点。つまり、 太陽フレアとそれに伴うコロナ質量放出(CME)は定性的には因果関係がある が、定量的には大きな太陽フレアが必ずしも大規模な CME を発生させてはいな い。その逆に、C クラスの太陽フレアによる大規模な社会影響が発生した例も存 在する(例: 2015 年 3 月の St. Patrick day イベント)
- 宇宙天気現象は単独で発生するとは限らず、太陽活動が活発な時期には短い期間に複数の現象が発生することがある。この場合には、一つ一つの現象が小規模でも、社会生活に与える影響は相乗効果により大きくなることがある。また、直前に発生した現象により太陽地球間の環境が変化する履歴の効果により、同じ規模の宇宙天気現象が異なる影響を及ぼす可能性がある。
- 宇宙天気現象の社会への影響の発生時刻の推定精度が未だ十分ではない。CME 速度をはじめ、宇宙天気現象の高精度の計測および予測モデルが求められる。
- 社会影響を検討するうえで、事業者側の影響を定量的に調査する必要がある。本研究期間中に多くの事業者との交流が積み重ねられ、その信頼関係のうちにこれまで明らかにされてこなかった情報も開示されつつある。しかしながらその道のりはまだ半ばであり、今後も継続した交流が必須である。

12. まとめ

本文書は「将来必ず発生する激甚宇宙天気災害にも対応可能な社会基盤の形成を推進していく」ための手引きとしてまとめたものである。

本文書では、最新の研究成果から解釈できる宇宙天気現象規模と社会インフラへの影響をまとめてきた(図 12-1)。各現象や分野に区切った形で分析・議論してきたが、本来 は太陽活動から磁気圏、電離圏、地上への影響が複雑に絡み合った現象であり、それら を組み合わせて解析して数値シミュレーション等で再現できれば、より詳細な影響評価 が実現できる。今後、前述の課題を解決しながら、より精度を上げた影響解析と、事業 者との連携による社会影響評価を継続して実施していく必要がある。



図 12-1 太陽から放出される巨大なコロナ質量放出の衛星観測像とその結果として地 球において現れる太陽地球圏環境変動の様々な社会影響 [205]

文献目録

- [1] 石井守, "宇宙天気の社会影響について," ITU ジャーナル, vol. 44, no. 9, 2014.
- [2] NICT, "NICT channel 太陽から吹き出す超音速の風-太陽風," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=q7RJ7e8C-uE.
- [3] NICT, "NICT channel 太陽面の爆発現象-太陽フレア," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=_MIOxxVM6MQ.
- [4] NASA, "Tuesday/Wednesday Solar Punch," National Aeronautics and Space Administration, [Online].
 Available: https://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/10.28Flare.html.
- [5] NICT, "NICT channel コロナガスの大規模噴出現象 CME," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=Uaa9cCLqdbc.
- [6] 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所, "航路線量計 算システム(JISCARD) -太陽フレアの影響について," [Online].
 Available: http://www.jiscard.jp/information/02.shtml.
- [7] NICT, "太陽・地磁気活動及び電波擾乱現象の解説," [Online]. Available: https://hirweb.nict.go.jp/telephone/chap3.html.
- [8] K. F. Tapping, "The 10.7 cm solar radio flux (F_10.7)," Space Weather, vol. 11, pp. 394-406, 2013.
- [9] Natural Resources Canada, "Solar radio flux," [Online].
 Available: https://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-en.php.
- [10] NICT, "NICT channel 太陽黒点," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=2sccIMLzvrQ.
- [11] NOAA, "Solar Cycle Progression," [Online].
 Available: http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression.
- [12] NICT, "NICT 宇宙天気予報センター ユーザーガイド 「電離圏」," [Online].
 Available: https://swc.nict.go.jp/knowledge/ionosphere.html.
- [13] 国立天文台 編, 理科年表, 2019.
- [14] NICT, ""宇宙への玄関" 電離圏の観測," [Online].
 Available: http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/leaflet/ NICT_RPP_leaflet2008.pdf.

- [15] NICT, "イオノゾンデ・イオノグラムについて," [Online].
 Available: http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionogram.html.
- [16] 名古屋大学, "放射線帯 50 のなぜ," [Online]. Available: http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/50naze/housha/.
- [17] 三好由純, "ジオスペース最高エネルギー粒子誕生の謎を追う 放射線帯の研究," [Online]. Available: http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.302/front_line.html.
- [18] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University, "Kp 指数," [Online]. Available: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/kpexp-j.html.
- [19] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University, "List of AE (12) Stations," [Online].
 Available: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/AETABLE1.html.
- [20] S. Milan, J. Hutchinson, P. Boakers and B. Hubert, "Influences on the radius of the auroral oval," *Annales Geophysicae*, 27, pp. 2913–2924 2009.
- [21] 国立極地研究所 編, 南極の科学2 オーロラと超高層大気, 古今書院, 1983.
- [22] NICT, "NICT channel 地球磁気圏で最も大規模な変動現象-磁気嵐," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=_kC8r2vtf-4.
- [23] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University, "Dst 指数," [Online]. Available: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html.
- [24] 津川卓也, "[電離圈編] NICT 宇宙天気講座," 2016.
- [25] NICT, "デリンジャー現象現況地図," [Online]. Available: http://wdc.nict.go.jp/x-ray/.
- [26] NICT, "NICT channel 日没後に発生する電離圏の泡ープラズマバブル," [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=FDhZF9-ixv8.
- [27] 松永圭左, "GPS における電離層シンチレーションの観測," 電子航法研究所研究
 発表会講演概要 平成 13 年度, 2001.
- [28] NICT, "宇宙天気予報センター," [Online]. Available: https://swc.nict.go.jp/.
- [29] 亘慎一, "宇宙天気の電力網の影響と北海道での地磁気誘導電流(GIC)の測定に ついて," *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, no. 1-14, 2015.
- [30] D. Shiota, R. Kataoaka, "Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME))," Space Weather, vol. 14, pp. 56-75, 2016.
- [31] NICT, "宇宙天気予報の精度を上げる技術の開発," 2017 年 1 月 26 日. [Online]. Available: https://www.nict.go.jp/press/2017/01/26-1.html.

- [32] K. Sakaguchi, et al., "Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model," Space Weather, vol. 11, pp. 79-89, 2013.
- [33] NICT, "電磁波研究所 宇宙環境研究室," [Online]. Available: http://seg-www.nict.go.jp/.
- [34] 気象庁, "地磁気観測所," [Online]. Available: https://www.kakioka-jma.go.jp/.
- [35] NICT, "電離圏ワーキンググループ," [Online]. Available: http://wdc.nict.go.jp/IONO/.
- [36] 国土地理院, "GEONET GNSS 連続観測システム," [Online]. Available: https://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi41012.html.
- [37] M. Nishioka et al., "A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics," Space Weather, vol. 15, pp. 228-239, 2017.
- [38] T. Tanaka et al., "Substorm convection and current system deduced from the global simulation," *Journal of Geophysical Research*, 115, p. A05220, 2010.
- [39] NICT, "GAIA(Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy)," [Online]. Available: https://gaia-web.nict.go.jp/.
- [40] NICT, "GEONET GPS 全電子数マップ," [Online]. Available: https://aer-nc-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/.
- [41] NICT, "通常の 1000 倍の大型太陽フレアを観測," [Online]. Available: https://www.nict.go.jp/press/2017/09/07-1.html.
- [42] Swiss Re, "Space Weather Impacts a Risk to Society ?," [Online]. Available: https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u33/NOAA-MASTER.pdf.
- [43] National Science and Technology Council, "National Space Weather Strategy," White house, October 2015. [Online]. Available: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final_nationalsp aceweatherstrategy_20151028.pdf.
- [44] National Science & Technology Council, US Goverment, "National Space Weather Strategy and Action Plan 2019," [Online].
 Available: https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf.
- [45] National Science and Technology Council, "Space Weather Phase 1 Benchmarks," White house, June 2018. [Online].
 Available:https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/06/Space-

Weather-Phase-1-Benchmarks-Report.pdf.

- [46] 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.
- [47] Cabinet Office, UK, "National Risk Register of Civil Emergencies," 2015.
 [Online]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/a ttachment_data/file/419549/20150331_2015-NRR-WA_Final.pdf.
- [48] Cabinet Office, UK, "Space Weather Preparedness Strategy," 2015. [Online]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/ system/uploads/attachment_data/file/449593/BIS-15-457-space-weatherpreparedness-strategy.pdf.
- [49] ISES, "International Space Environment Service: ISES," [Online]. Available: http://www.spaceweather.org/.
- [50] WMO, "Interprogramme Coordination Team on Space Weather," [Online]. Available: http://www.wmo.int/pages/prog/sat/spaceweather-ictsw_en.php.
- [51] WMO, "IPT-SWeiSS," [Online]. Available: https://community.wmo.int/ activity-areas/wmo-space-programme-wsp/ipt-sweiss.
- [52] ICAO, "International Civil Aviation Organization: ICAO," [Online]. Available: https://www.icao.int.
- [53] IATA, "International Air Transport Association: IATA," [Online]. Available: https://www.iata.org/.
- [54] NICT, "国際民間航空機関(ICAO)に対して宇宙天気情報の提供を開始," [Online]. Available: https://www.nict.go.jp/press/2019/11/07-2.html.
- [55] UN, "COPUOS," [Online].Available: https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/index.html.
- [56] B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, G. S. Lakhina and S. Alex, The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859, *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, 2003.
- [57] 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.
- [58] 五家建夫, 宇宙環境リスク辞典, 丸善, 2006, p. 179.
- [59] 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.

- [60] 三宅芙沙、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.
- [61] 三宅芙沙, "地球の宇宙線起源同位体に記録された過去の極端太陽イベント," 天 文月親, 113, 第 4, pp. 208, 2020.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] V. Kurt, H. Mavromichalaki and M. Gerontidou, "Statistical analysis of solar proton events," *Annales Geophysicae*, vol. 22, pp. 2255–2271, 2004.
- [65] P. Jiggens, 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.
- [66] 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.
- [67] M. J. Aschwanden, "Time Variability of the "Quiet" Sun Observed with TRACE II. Physical Parameters," *The Astrophysical Journal*, 535, pp. 1047-1065, 2000.
- [68] NOAA, "Nationa Center for Environmental Information: Space Weather," [Online]. Available: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/spaceweather.html.
- [69] H. Maehara, T. Shibayama, S. Notsu, T. Nagao, S. Kusaba, S. Honda, D. Nogami, K. Shibata, "Superflares on solar-type stars," *Nature*, no. 485, pp. 478-481, 2012.
- [70] T. Shibayama, H. Maehara, S. Notsu, Y. Notsu, T. Nagao, S. Honda, T. T. Ishii,
 D. Nogami and K. Shibata, "Superflares on Solar-type Stars Observed with Kepler. I. Statistical Properties of Superflares," *ApJ Supp*, vol. 209, 5, 2013.
- [71] Y. Notsu, "Do Kepler Superflare Really Include Slowly Rotating Sun-like Star?
 -Results Using APO 3.5m Telescope Spectroscopic Observations and Gaia-DR2 Data," *The Astrophysical Journal*, vol. 876, 58, 2019.

- [72] K. Namekata, "Statistical Studies of Solar White-light Flares and Comparisons with Superflares on Solar-type Stars," *The Astrophysical Journal*, vol.851, 91, 2017.
- [73] F. Miyake, I. Usoskin and S. Poluianov, Extreme Solar Particle Storms: The Hostile Sun, Institute of Physics Publishing, 2019, p. Sec. 2.
- [74] 柴田一成、上出洋介, 総説 宇宙天気, 京都大学学術出版会, 2011.
- [75] A. V. Belov, "Flares, Ejections, Proton Events," *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 57, 6, pp. 727, 2017.
- [76] NOAA, "Space Weather Prediction Center," [Online]. Available: ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/.
- [77] R. A. Mewaldt, M. D. Looper, S. M. S. Cohen, D. K. Haggerty, A. W. Labrador, R. A. Leske, G. M. Mason, J. E. Mazur and T. T. v. Rosenvinge, "Energy Spectra, Composition, and Other Properties of Ground-Level Events During Solar Cycle 23," *Space Science Reviews*, vol. 171, p. 97–120, 2012.
- [78] E. Asvestari, T. Willamo, A. Gil, I. G. Usoskin, G. A. Kovaltsov, V. V. Mikhailov and A. Mayorov, "Analysis of Ground Level Enhancements (GLE): Extreme solar energetic particle events have hard spectra," *Advances in Space Research*, vol. 60, no. 4, pp. 781-787, 2017.
- [79] G. M. Nita, D. E. Gary, L. J. Lanzerotti and D. J. Thomson, "The Peak Flux Distribution of Solar Radio Bursts," *The Astrophysical Journal*, vol. 570, pp. 423-438, 2002.
- [80] Q. Song, G. Huang and B. Tan, "Frequency Dependence of the Power-Law Index of Solar Radio Bursts," *The Astrophysical Journal*, vol. 750, no. 2, pp. 160-163, 2012.
- [81] Y. Miyoshi , R. Kataoka, "Flux enhancement of the outer radiation belt electrons after the arrival of stream interaction regions," *Journal of Geophysical Research*, vol.113, p. A03S09, 2008.
- [82] N. P. Meredith, R. B. Horne, J. D. Isles and J. V. Rodriguez, "Extreme relativistic electron fluxes at geosynchronous orbit: Analysis of GOES E > 2 MeV electrons," *Space Weather*, vol. 13, no. 3, p. 170–184, 2015.
- [83] H. Hayakawa, Y. Ebihara, P. D. Hand, S. Hayakawa, S. Kumar, S. Mukherjee and B. Veenadhari, "Low - latitude aurorae during the extreme space weather events in 1859.," *The Astrophysical Journal*, vol. 869, no. 1, p. 57, 2018.
- [84] G. Siscoe, U. N. Crooker and R. C. Clauer, "Dst of the Carrington storm of

1859.," Advances in Space Research, vol. 38, no. 2, pp. 173-179, 2006.

- [85] M. Hapgood, "The Great Storm of May 1921: An Exemplar of a Dangerous Space Weather Event," Space Weather, vol. 17, no. 7, pp. 950-975, 2019.
- [86] H. Hayakawa, Y. Ebihara, M. D. Willis, S. Toriumi, T. Iju, K. Hattori, M. N. Wild, D. M. Oliveira, D. M. Oliveira, I. Ermolli, J. R. Ribeiro, A. P. Correia, A. I. Ribeiro and D. J. Knipp, "Temporal and Spatial Evolutions of a Large Sunspot Group and Great Auroral Storms Around the Carrington Event in 1859," Space Wether, vol. 17, no. 11, pp. 1553-1569, 2019.
- [87] H. Hayakawa, Y. Ebihara, W. E. Cliver, K. Hattori, S. Toriumi, J. J. Love, N. Umemura, K. Namekata, T. Sakaue, T. Takahashi and K. Shibata, "The extreme space weather event in September 1909.," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 484, no. 3, pp. 4083-4099, 2019.
- [88] J. J. Love, H. Hayakawa and W. E. Cliver, "On the intensity of the magnetic superstorm of September 1909," *Space Weather*, vol. 17, no. 1, pp. 37-45, 2015.
- [89] J. J. Love, H. Hayakawa and E. W. Cliver, "Intensity and Impact of the New York Railroad Superstorm of May 1921," *Space Weather*, vol. 17, no. 8, pp. 1281-1292, 2019.
- [90] F. J. Rich and W. F. Denig, "The major magnetic storm of March 13–14, 1989 and associated ionosphere effects," *Canadian Journal of Physics*, vol. 70, no. 7, pp. 510-525, 1992.
- [91] N. Yokoyama, Y. Kamide and H. Miyaoka, "Ths size of the auroral belt during magnetic storms," *Annales Geophysicae*, vol. 16, pp. 566-573, 1998.
- [92] K. Tsubouchi and Y. Omura, "Long term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events," *Space Weather*, vol. 5, no. S12003, 2007.
- [93] V. Vasyliunas, "The largest imaginable magnetic storm," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 73, no. 11-12, pp. 1444-1446, 2011.
- [94] V. Vasyliunas, "Time scale of the largest imaginable magnetic storm," Nonlinear Processes in Geophysics, 2013.
- [95] P. Riley, "On the probability of occurrence of extreme space weather events," Space Weather, vol. 10, no. S02012, 2012.
- [96] D. Moriña, I. Serra, P. Puig and Á. Corral, "Probability estimation of a Carrington-like geomagnetic storm," *Scientific Reports*, vol. 9, 2019.
- [97] R. Kataoka, "Probability of occurrence of extreme magnetic storms," Space

Weather, vol. 11, no. 5, 2013.

- [98] P. T. Newell and J. W. Gjerloev, "Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices," *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, no. A12232, 2011.
- [99] D. Turner, S. Claudepierre, J. Fennell, T. O'Brien, J. Blake, C. Lemon, M. Gkioulidou, K. Takahashi, G. Reeves, S. Thaller, A. Breneman, J. Wygant, W. Li, A. Runov and V. Angelopoulos, "Energetic electron injections deep into the inner magnetosphere associated with substorm activity," *Geophysical Research Letters*, vol. 42, pp. 2079-2087, 2015.
- [100] Y. Kamide, "Is Substorm Occurrence a Necessary Condition for a Magnetic Storm?," *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, vol. 44, no. 2, pp. 109-117, 1992.
- [101] R. McPherron, "The Role of Substorms in the Generation of Magnetic Storms," Magnetic Storms, 1997.
- [102] M. Nishioka et al., "Statistical analysis of ionospheric total electron content (TEC): Estimation of extreme TEC in long term in Japan," *Earth, Planets and Space*, submitted, 2020.
- [103] 前田力男 and 犬木久夫, "デリンジャー現象のマグニチュード," *電波研究所季報,* vol. 18, no. 99.
- [104] C. Tao et al., "Statistical analysis of short-wave fadeout for extreme event estimation," *Earth, Planets and Space,* in press, 2020.
- [105] J. Reep and K. Knizhnik, "What determines the X-ray intensity and duration of a solar flare?," *The Astrophysical Journal*, vol. 874, no. 2, 2019.
- [106] J. Sakai, K. Hosokawa, I. Tomizawa and S. Saito, "A Statistical Study of Anomalous VHF Propagation Due to the Sporadic - E Layer in the Air -Navigation Band," *Radio Scienece*, vol. 54, no. 5, pp. 426-439, 2019.
- [107] T. Tsugawa, Y. Otsuka, A. Coster and A. Saito, "Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America," *Geophysical Research Letters*, vol. 34, no. 22, 2007.
- [108] 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.
- [109] H. Kirkham, Y. Makarov, J. Dagle, J. DeSteese, M. Elizando and R. Diao, "Geomagnetic Storms and Long-Term Impacts on Power Systems.," PNNL-21033, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA., 2011.
- [110] 一般財団法人エネルギー総合工学研究所, "平成 26 年度電気設備技術基準関連規

格等調查役務請負報告書," 2015.

- [111] 田端康人 and 小川重明, "地磁気誘導電流の実測と予測," *平成 15 年電気学会全 国大会*, 2003.
- [112] 亘慎一、國武学、北村健太郎、堀智昭、菊池崇、西谷望、片岡龍峰、上出洋介、 渡辺祐司, "地磁気誘導電流(GIC)が電力網に与える影響," *情報通信研究機構季* 親, vol. 55, 2009.
- [113] S. Nakamura, Y. Ebihara, S. Fujita, T. Goto, N. Yamada, S. Watari and Y. Omura, "Time Domain Simulation of Geomagnetically Induced Current (GIC) Flowing in 500-kV Power Grid in Japan Including a Three-Dimensional Ground Inhomogeneity," Space Weather, vol. 16, no. 12, pp. 1946-1959, 2018.
- [114] J. G. Kappenman, "Space Weather and the Vulnerability of Electric Power Grids," in *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, 2004, pp. 257-286.
- [115] "平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会 中間報告," 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会, 2018.
- [116] Royal Observatory of Belgium, "Sunspot Index and Long-term Solar Observations," [Online]. Available: http://sidc.oma.be/silso/datafiles.
- [117] Electric Infrastructure Security Council, "SEVERE SPACE WEATHER GEOMAGNETIC STORMS," [Online]. Available:http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/01/ Geomagnetic-Storms-Information-Sheet.pdf.
- [118] D. H. Boteler, R. J. Pirjola and H. Nevanlinna, "The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface," *Advances in Space Research*, vol. 22, no. 1, pp. 17-27, 1998.
- [119] P. Ribeiro et al., "The First Documented Space Weather Event That Perturbed the Communication Networks in Iberia," Space Weather, vol. 14, pp. 464-468, 2016.
- [120] NICT, "宇宙天気による社会システムへの影響例," [Online]. Available: http://www2.nict.go.jp/spe/swx/swcenter/hazards.html.
- [121] S. Odenwald, "Solar Storms: The Silent Menace," [Online]. Available: http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/workbook/storms.html.
- [122] M. Wiki, R. Pirjola, H. Lundstedt, A. Viljanen, P. Winoft and A. Pukkinen, "Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects," *Annales Geophysicae*, vol. 27, pp.1775–1787, 2009.

- [123] Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events, Severe Space Weather Events – Understanding Societal and Economic Impacts, National Research Council, 2009.
- [124] J. Kappenman, "Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid," 2010.
- [125] D. F. Webb and J. H. Allen, "Spacecraft and Ground Anomalies Related to the October – November 2003 Solar Activity," *Space Weather*, vol. 2, no. 3, 2004.
- [126] 亘慎一, "宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報," Journal of Plasma and Fusion Research, vol. 82, no. 11, pp. 739-744, 2006.
- [127] 高須伸夫,宮脇文彦,斎藤達 and 藤原康夫,"地磁気誘導電流による変圧器の直流偏磁現象の検討," *電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌)*, vol. 113, no.
 4, pp. 435-444, 1993.
- [128] 経済産業省 産業構造審議会 保安分科会 電力安全小委員会 電気設備自然災害等 対策ワーキンググループ, "中間報告書," 2014.
- [129] E. Oughton, A. Skelton, R. Horne, A. Thomson and C. Gaunt, "Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure," *Space Weather*, vol. 15, no. 1, pp. 65-83, 2017.
- [130] 電気事業連合会, "日本の電力消費," [Online]. Available: https://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyou/japan/.
- [131] J. E. Mazur, J. F. Fennell, J. L. Roeder, P. T. O'Brien, T. B. Build and J. J. Likar, "The Timescale of Surface-Charging Events," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 2, pp. 237-245, 2012.
- [132] 宇宙航空研究開発機構, "帯電・放電設計標準," 2012.
- [133] J.-C. Mateo-Velez, A. Sicard, D. Payan, N. Ganushkina, N. Meredith and I. Silanpaa, "Spacecraft surface charging induced by severe environments at geosynchronous orbit," *Space Weather*, vol. 16, no. 1, pp. 89-106, 2018.
- [134] H.-S. Choi, J. Lee, K.-S. Cho, Y.-S. Kwak, I.-H. Cho, Y.-D. Park, Y.-H. Kim, N. N. Baker, G. D. Reeves and D.-K. Lee, "Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships," *Space Weather*, vol. 9, no. 6, 2011.
- [135] 宇宙開発委員会, "環境観測技術衛星(ADEOS-II) 「みどり II」の 運用異常に係 る原因究明及び今後の対策について," 2004 年 7 月 28 日. [Online]. Available: https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/uchuu/reports/04080901.pdf.
- [136] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局, "準天頂衛星の軌道上における異常動作について," 2018 年 6 月 5 日. [Online].

Available: https://qzss.go.jp/overview/information/qzss_180605.html.

 [137] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局, "準天頂衛星の試験運用の再開について," 2018 年9月7日. [Online].

Available: https://qzss.go.jp/overview/information/qzss_180907.html.

 [138] 木之田博, 二木康徳, 佐々木雄一, 中本藤之, 趙孟佑 and 豊田和弘, "帯放電に 伴うノイズ伝搬とその影響," 2019年1月31日. [Online].

Available: https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/908331.

- [139] 上出洋介,太陽と地球のふしぎな関係 絶対君主と無力なしもべ、講談社,講談 社,2011.
- [140] NASA, Mitigating In-Space Charging Effects-A Guideline, 2011. [Online]. Available: https://standards.nasa.gov/standard/oce/nasa-hdbk-4002
- [141] 名古屋大学 太陽地球環境研究所, "特集:太陽-地球系の気候と天気," STEL Newsletter, vol. 28, 2002.
- [142] VANDERBILT UNIVERSITY, "The 24 March 1991 CRRES Event," [Online]. Available: https://creme.isde.vanderbilt.edu/CREME-MC/help/the-24-march-1991-crres-event.
- [143] P. Brekke, "Space Weather Effects," ESTEC, 2004. [Online]. Available: https:// swe.ssa.esa.int/TECEES/spweather/workshops/esww/proc/brekke_stoa5.pdf
- [144] JAXA, "火星探査機「のぞみ」の火星周回軌道への投入断念について," [Online]. Available: http://www.jaxa.jp/press/2003/12/20031210_nozomi_j.html.
- [145] ESA, "Radiation effects," [Online]. Available: http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/ Space_Environment/Radiation_effects.
- [146] J. H. Allen, "Solar and geomagnetic activity during March 1989 and later months and their consequences at Earth and in Near-Earth space," 1989.[Online].
- [147] 姿勢制御研究委員会,人工衛星の力学と制御ハンドブック,培風館,2007.
- [148] P. Chamberlin, T. Woods and F. Eparvier, "Flare Irradiance Spectral Model (FISM): Flare component algorithms and results," *Space Weather*, vol. 6, no. 5, 2008.
- [149] Y. Zhang and L. Paxton, "An empirical Kp-dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 70, no. 8-9, pp. 1231-1242.
- [150] 名古屋大学 太陽地球環境研究所編, "STEL Newsletter No28 特集:太陽·地球系

の気候と天気,"2002.

- [151] JAXA 宇宙科学研究本部 高エネルギー天文学研究系, "磁気嵐の影響で姿勢を崩 す," 2000 年 7 月 15 日. [Online]. Available: http://www.astro.isas.jaxa.jp/asca/news/article/2000/0715/index.html.ja.
- [152] J. M. Picone et al., "Thermospheric densities derived from spacecraft orbits: Accurate processing of two-line element sets," *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, A03301, 2005.
- [153] F. R. Hoots, "SPACETRACK REPORT NO. 3," 1980. [Online]. Available: https://www.celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf.
- [154] T. Hanada, Y. Ariyoshi, M. Uetsuhara, M. Tagawa, H. Chen, Y. Tsutsumi, A. Doi, S. Kawamoto, T. Yanagisawa, K. Hashimoto, A. Kawabe and Y. Kitazawa, "Orbital Debris Modeling and Applications at Kyushu University," *The Journal of Space Technology and Science*, vol. 26, no. 2, pp. 28-47, 2012.
- [155] JAXA, "ASCA," [Online]. Available: http://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/asca.html.
- [156] T. Tanaka, "An Important Role of Electric Field Reversals for the Initiation of Gigaherts Scintillations at Midlatitude during Geomagnetic Storms," J. Geomag. Geoelectr, vol. 39, pp. 659-676, 1987.
- [157] "Space Environment," 2003 年 7 月 23 日. [Online]. Available: https://www.globalsecurity.org/space/library/report/2003/space_environment.pdf.
- [158] M. A. Kelly, J. M. Comberiate, E. S. Miller, and L. J. Paxton, "Progress toward forecasting of space weather effects on UHF SATCOM after Operation Anaconda," *Space Weather*, vol. 12, p. 601-611, 2014.
- [159] 西岡未知, "宇宙天気ミニ講座・電離圏編," [Online]. Available: http://sw-forum.nict.go.jp/forum/2019/pdf/kouza_3.pdf.
- [160] "1958年2月12日の記事「最大のオーロラゆうべ関東でも見える」". 読売新聞.
- [161] "1967年5月29日の記事「デリンジャーと磁気あらし」". 読売新聞.
- [162] "1972 年 8 月 3 日の記事「通信、放送さんざん 太陽黒点 デリンジャー現象」". 読売新聞.
- [163] 石井守, "NICT の宇宙天気 2012 年度宇宙天気ユーザーズフォーラム," 2013.
 [Online]. Available: http://sw-forum.nict.go.jp/past_forum/2012/PDF/swForum2012_lec1.pdf.
- [164] "通信障害・GPS 誤差増大の可能性も!? 今後 2 週間の太陽活動にご注意を,"
 2013 年 5 月 13 日. [Online].

Available: https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1305/16/news103.html.

[165] 細川敬祐, 冨澤一郎, 坂井純 and 斎藤亨, "スポラディック E 層が VHF 航空通 信・航法に与える影響の評価," [Online].

Available: https://www.enri.go.jp/report/hapichi/pdf2017/h29_14.pdf.

[166] NICT, "衛星電波シンチレーション観測," [Online].

Available: http://iono-syowa.nict.go.jp/iono/scintillation.html.

- [167] 日本航海学会 GPS 研究会訳, 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, 2001.
- [168] A. P. Cerruti et al., "Effect of intense December 2006 solar radio bursts on GPS receivers," Space Weather, vol. 6, S10D07, 2008.
- [169] 国土交通省国土地理院, "9 月 6 日に発生した太陽フレアの GPS 測位への影響 (速報)," 2017. [Online].
 Available: https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi40001.html.
- [170] ICAO, "Manual of Space Weather Information in Support of Air Navigation," 2018. [Online].
 Available:https://www.icao.int/airnavigation/METP/Panel%20Documents/Doc. 10100.Space%20Weather%20Manual%20FINAL%20DRAFT%20Version.pdf.
- [171] Fox News, "Delta reroutes planes following massive solar eruption," [Online]. Available: http://www.foxnews.com/tech/2012/01/23/strongest-radiation-stormin-7-years.html.
- [172] 斎藤亨, 坂井丈泰, 松永圭左 and 吉原貴之, "航空航法における衛星航法の利用 と 電離圏の影響," 21 12 2009. [Online]. Available: http://sw-forum.nict.go.jp/past_forum/2009/material/SW09-ENRI_Saito.pdf.
- [173] 国土交通省, "RNAV 運航方式," [Online]. Available: http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000379.html.
- [174] 坂井丈泰, 松永圭左, 吉原貴之 and 斎藤享, "航空航法における衛星航法の利用 と電離圏の影響," *情報通信研究機構季報*, vol. 55, pp. 203-213, 2009.
- [175] A.O. Akala and P.H. Doherty "Statistical distribution of GPS amplitude scintillations," J. Atmos. solar-Terr. Phys., vol. 74, pp. 199-211, Jan. 2012.
- [176] P. Lantos and N. Fuller, "History of the solar particle event radiation doses onboard aeroplanes using a semi-empirical model and Concorde measurements," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 104, no. 3, p. 199–210, 2003.
- [177] H. Yasuda, T. Sato, H. Yonehara, T. Kosako, K. Fujitaka and Y. Sasaki, "Management of cosmic radiation exposure for aircraft crew in Japan,"

Radiation Protection Dosimetry, vol. 146, no. 1-3, p. 123-125, 2011.

[178] 保田浩志, Isotope News, no. 7月, pp. 8-12, 2009.

- [179] "太陽放射線被ばく警報システム(WASAVIES)の開発に成功," 2019 年 11 月 9
 日. [Online]. Available: https://www.nict.go.jp/press/2019/11/07-3.html.
- [180] F. Mekhaldi, R. Muscheler, F. Adolphi, A. Aldahan, B. Ju¨rg, J. Mcconnel, G. Possnert, M. Sigl, A. Svensson, H.-A. Synal, K. Welten and T. Woodruff, "Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4," *Nauture Communications*, vol. 6, 2015.
- [181] T. Sato, R. Kataoka, D. Shiota, Y. Kubo, M. Ishii, H. Yasuda, S. Miyake, I. C. Park and Y. Miyoshi, "Real Time and Automatic Analysis Program for WASAVIES:Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles," *Space Weather*, vol. 16, pp. 917-923, 2018.
- [182] T. Sato, R. Kataoka, D. Shiota, Y. Kubo, M. Ishii, H. Yasuda, S. Miyake, Y. Miyoshi, H. Ueno and A. Nagamatsu, "Nowcast and forecast of galactic cosmic ray (GCR) and solar energetic particle (SEP) fluxes in magnetosphere and ionosphere Extension of WASAVIES to Earth orbit," *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 9, p. 11, 2019.
- [183] 原子力規制委員会, "航空飛行時の宇宙放射線からの防護," 2018.
- [184] 烈. 阿久津, "航空機での宇宙天気の利用について," 2014 年 3 月 20 日. [Online]. Available: http://sw-forum.nict.go.jp/pdf/forum_2_140320.pdf.
- [185] 情報通信技術委員会, "JT-K124 通信装置の粒子放射線影響の概要," 2018 年 11
 月 15 日. [Online]. Available:
 https://www.ttc.or.jp/application/files/2515/5427/4957/JT-K124v1.pdf.
- [186] "IEC/TC107 航空用電子部品プロセスマネジメント国際会議(2015 年 10 月於プラハ)に出席して," 2015. [Online].
 - Available: https://www.sjac.or.jp/common/pdf/std/tc107/20151212.pdf.
- [187] 国土交通省, "航空路監視レーダー(ARSR)等の概要," [Online]. Available: http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000404.html.
- [188] C. Marqué, K. L. Klein, C. Monstein, H. Opgenoorth, A. Pulkkinen, S. Buchert, S. Krucker, R. V. Hoof and P. Thulesen, "Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation," *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 8, A42, 2018.
- [189] S. Saito et al., "Estimate of economic impact of solar energetic particle events on aircraft operatoins," *Earth, Planets and Space*, submitted, 2020.

[190] JAXA, "放射線被ばく管理," [Online].

Available: http://iss.jaxa.jp/med/research/radiation/.

- [191] 佐藤勝, "宇宙飛行士の放射線被ばく管理と宇宙天気予報," 2014.
- [192] 地球電磁気・地球惑星圏学会 学校教育ワーキング・グループ,太陽地球系科学, 京都大学学術出版会, 2010.
- [193] 矢部志津, "国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士の放射線被ばく管理について," 2004.
- [194] C. Zeitlin, D. M. Hassler, F. A. Cucinotta, B. Ehresmann, R. F. Wimmer-Schweingruber, D. E. Brinza, S. Kang, G. Weigle, S. Böttcher, E. Böhm, S. Burmeister, J. Guo, J. Köhler, C. Martin, A. Posner, S. Rafkin and G. Reithz, "Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory," *Science*, vol. 340, no. 6136, pp. 1080-1084, 2013.
- [195] J. Semkova, R. Koleva, V. Benghin, T. Dachev, Y. Matviichuk, B. Tomov, K. Krastev, S. Maltchev, P. Dimitrov, I. Mitrofanov, A. Malahov, D. Golovin, M. Mokrousov, A. Sanin, M. Litvak, A. Kozyrev, V. Tretyakov, S. Nikiforov, A. Vostrukhin, F. Fedosov, N. Grebennikova, L. Zelenyi, V. Shurshakov and S. Drobishev, "Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FREND instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit," *Icarus*, vol. 303, pp. 53-66, 2018.
- [196] 矢部志津, "太陽フレアと宇宙天気予報 ~宇宙飛行士の放射線被曝管理~," 30 5
 2005. [Online]. Available: https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/006/shiryo/05061801/003.pdf.
- [197] 酒井一夫, "放射線の人体への影響," 2010.
- [198] 柿沼志津子, "「じわじわ」被ばくの発がん影響を動物実験で明らかに," [Online]. Available: http://www.qst.go.jp/information/itemid034-001353.html.
- [199] 環境省, "自然・人工放射線からの被ばく線量," [Online]. Available: https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-02-05-01.html.
- [200] EDN NETWORK, "Solar flare impacts microchips, August 16, 1989," [Online]. Available: http://www.edn.com/electronics-blogs/edn-moments/4394205/Solarflare-impacts-microchips--August-16--1989.
- [201] New Scientist, "Solar storms halt stock market as computers crash," [Online]. Available: https://www.newscientist.com/article/mg12316812.400-solarstorms-halt-stock-market-as-computers-crash/.
- [202] E. Krausmann, E. Andersson, T. Russel and W. Murtagh, "Space Weather and

Rail: Findings and Outlook," 2015.

- [203] Schienece alert, "Europe Is Preparing Its Railways For Extreme Space Weather," 2015年12月22日. [Online]. Available: https://www.sciencealert.com/ europe-s-preparing-its-railways-for-extreme-space-weather.
- [204] E. Eroshenko, A. Belov, D. Broteler and S. Gaidash, "Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia," *Advances in Space Research*, vol. 46, no. 9, pp. 1102-1110, 2007.
- [205] 太陽地球圏環境予測, "本領域の目的と研究戦略," [Online]. Available: http://www.pstep.jp/research/outline.

本書中の過去の被害事例に併記の宇宙天気現象の指数等は以下の通り参照した。

- X線強度、陽子フラックス、電子フラックス
 - GOES アーカイブデータ (NOAA)
 http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html
 - プロトンイベントのフラックスのピーク時刻
 http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

執筆者・編集協力者一覧

執筆編集委員 (敬称略)

- 石井守 (情報通信研究機構)
- · 塩田大幸 (情報通信研究機構)
- · 石井貴子 (京都大学)
- 一本潔 (京都大学)
- · 海老原祐輔(京都大学)
- 片岡龍峰 (国立極地研究所)
- · 草野完也 (名古屋大学)
- · 久保勇樹 (情報通信研究機構)
- 古賀清一 (宇宙航空研究開発機構)
- 齋藤享 (電子航法研究所)
- 佐藤達彦 (日本原子力研究開発機構)
- 陣英克 (情報通信研究機構)
- 編集補助
- · 宇宙技術開発株式会社

執筆協力者(敬称略)

- 齊藤慎司 (情報通信研究機構)
- · 品川裕之 (情報通信研究機構)
- 堂谷忠靖 (宇宙航空研究開発機構)
- · 中嶌一憲 (兵庫県立大学)
- · 中村紗都子(名古屋大学)
- ・ 野津湧太 (米国コロラド大学)
- · 早川尚志 (大阪大学(現 名古屋大学))
- ・ 八代誠司 (米国カトリック大学)
- · 横松宗太 (京都大学)
- · 渡邉恭子 (防衛大学校)
- Navinda K. Wickramasinghe (電子航法研究所)

 ・ 垰千尋 (情報通信研究機構) 津川卓也 (情報通信研究機構) • 長妻努 (情報通信研究機構) • 中溝葵 (情報通信研究機構) • 中村雅夫 (大阪府立大学) • 西岡未知 (情報通信研究機構) • 藤原均 (成蹊大学) 三好由純 (名古屋大学) • 余田成男 (京都大学)