

宇宙天気ミニ講座 (宇宙システム編)

国立研究開発法人情報通信研究機構
電磁波研究所電磁波伝搬研究センター宇宙環境研究室

坂口 歌織



宇宙システムに影響する主な宇宙天気現象

- 宇宙システムに影響する主な宇宙天気現象は、「太陽プロトン」、「放射線帯電子」、「地磁気擾乱」。その他、衛星通信には「プラズマバブル」、リモートセンシングには「伝搬性電離圏擾乱」等も影響する。
- その他、銀河宇宙線(GCR: Galactic cosmic ray)、南大西洋異常帯(SAA: South Atlantic Anomaly)等も宇宙システムに影響を及ぼすが日々変動のような短期的な変化は少ない。

太陽プロトン

- シングルイベント効果による誤動作、故障確率の増加
- トータルドーズ効果による太陽電池パネル、半導体素子等の材質劣化

GCR・SAAの高エネルギー粒子も同様の影響を及ぼす

放射線帯電子

- 深部帯電(ESD)の発生による誤動作、故障確率の増加
- トータルドーズ効果による太陽電池パネル、半導体素子等の材質劣化

地磁気擾乱

- 表面帯電(ESD)による誤作動、故障確率の増加
- 大気抵抗増加による衛星の姿勢、軌道の変化

プラズマバブル

- VHF、UHF帯(L帯、S帯)衛星通信:シンチレーションによる通信電波の減衰、品質劣化等

伝搬性電離圏擾乱

- SAR衛星*:ファラデー回転により偏波面が回転し位相がずれるため、干渉計による高さ推定に影響

* SAR(合成開口レーダ)は、人工衛星や航空機に搭載レーダーにより地表面の形状や性質を2D観測

宇宙システムに影響する宇宙天気現象の発生タイミング

- 宇宙システムに影響する現象の発生タイミングと継続時間について、以下の表にまとめる。
- 太陽フレアと関係する現象については太陽フレアの発生を起点として大きく以下の3つに分けられる。
 - ① (フレア発生と同時に)電磁波の到達、
 - ② (フレア発生から約30分後以降)高エネルギー粒子の到達
 - ③ (フレア発生から約1日後以降)コロナガスの到達
- 太陽フレアと関係なく発生する現象もある。

	現象が発生するタイミング	継続時間
太陽プロトン	太陽フレア発生から約30分以降②	数時間～数日
地磁気擾乱	太陽フレア発生から約1日後以降③	数時間～数日
放射線帯電子	(太陽フレアと関係無し)高速太陽風到来から24時間後以降 太陽活動下降期に発生頻度が高い	数日～数週間
プラズマバブル	(太陽フレアと関係無し)日没～真夜中の時間帯に発生 日本では春・秋の発生頻度が高い	最大数時間
伝搬性電離圏擾乱	(太陽フレアと関係無し)日本では夏・冬の夜間、冬の昼間の発生頻度が多い	最大数時間

宇宙システム分野のSAFIR(宇宙天気イベント通報)基準

- 宇宙システム分野において影響が生じる現象の基準については、総務省主催「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」の宇宙天気の警報基準に関するWG(衛星運用分野)提言(令和4年6月)を踏まえ、NICTにおいて社会的影響を考慮した新しい宇宙天気予警報の基準を策定し、令和7年6月から宇宙天気イベント通報「SAFIR: Space weather Alert For social Impacts and Risks」の配信を開始。
- 現象毎に、原則として平常(Lv1)、注意(Lv2)、警報(Lv3)の3段階で警戒情報を示す。

	(Lv1) 平常	(Lv2) 注意	(Lv3) 警報	定義
太陽プロトン	<1,000	1,000	10,000	静止軌道でエネルギー10 MeV以上のプロトンフラックス (/cm ² /st/s)
放射線帯電子(低軌道)	<3.8 x 10 ⁹	3.8 x 10 ⁹	-	静止軌道でエネルギー2 MeV以上の電子の24時間フルエンス (/cm ² /st)
放射線帯電子(中軌道・静止軌道)	<3.8 x 10 ⁸	3.8 x 10 ⁸	3.8 x 10 ⁹	静止軌道でエネルギー2 MeV以上の電子の24時間フルエンス (/cm ² /st)

2026年1月19日
37000PFUを観測
(観測史上3番目)

想定される対策と対応例

- 宇宙システム分野に影響が生じる可能性のある宇宙天気現象発生に対する、想定される事前の対策と発生時の対応策の例を以下にまとめる。

宇宙天気情報利用ガイドラインによる。<https://swc.nict.go.jp/safir/assets/pdf/宇宙天気情報利用ガイドライン.pdf>

	影響	対策	対応
太陽プロトン	シングルイベント効果 トータルドーズ効果	宇宙天気を考慮した設計等	クリティカルな運用の中止、電源の一時的な遮断等
放射線帯電子	深部帯電(ESD)	宇宙天気を考慮した設計等	クリティカルな運用の中止、電源の一時的な遮断等
地磁気擾乱	表面帯電(ESD) 大気抵抗増加	宇宙天気を考慮した設計、打ち上げ 時期・高度の決定	クリティカルな運用の中止、電源の一時的な遮断等
プラズマバブル	VHF・UHF(L帯, S帯)通信品質劣化	代替手段の確保	待機、代替手段の利用等
伝搬性電離圏擾乱	SAR観測劣化	-	-

軌道による影響度の違い

- 各宇宙天気現象の影響度は、宇宙システムが運用される軌道によって異なる。
- 例えば、太陽プロトンは低軌道から静止軌道、さらに月・惑星などの非地球周回軌道に対して全て影響するのに対し、放射線帯電子や地磁気擾乱の影響は高度により異なる(以下の表、参照)。

	太陽プロトン トータルドーズ効果 シングルイベント効果	放射線帯電子 トータルドーズ効果 深部帯電(ESD)	地磁気擾乱 表面帯電(ESD)	地磁気擾乱 大気抵抗増加
非地球周回軌道 (月・惑星探査等)	○	—	—	—
地球静止軌道 (高度36,000km)	○	○	○	—
地球中軌道	○	○	△	—
地球低軌道 (高度2,000km以下)	○※1	△※2	○※3	○

(※1) 極域で増大するため、極軌道衛星への影響が大きい

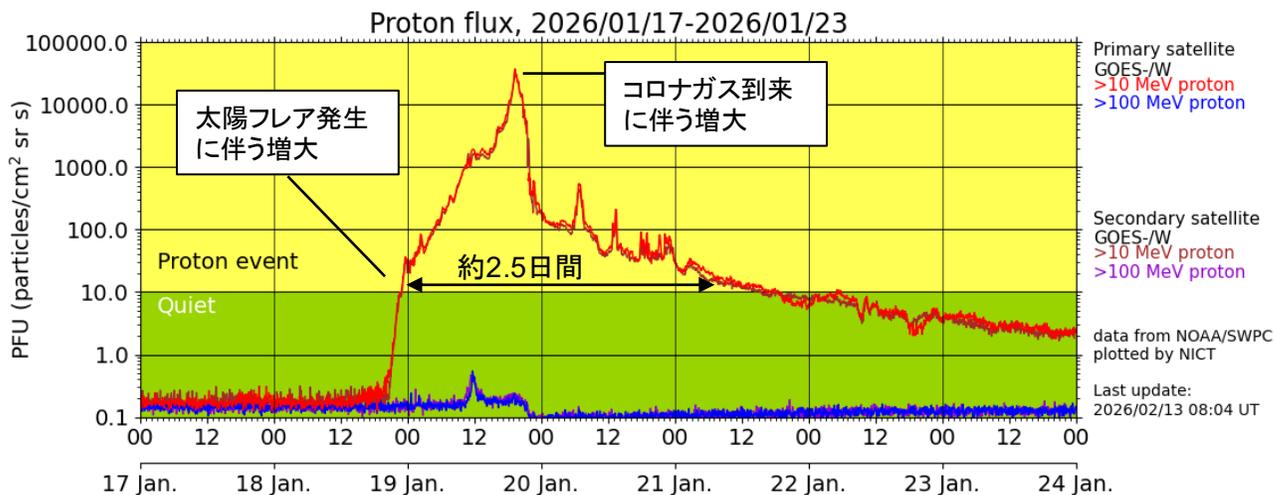
(※2) ただし、SSA上空は、放射線帯内帯粒子の影響が甚大

(※3) オーロラ帯で増大するため、軌道傾斜角の大きい衛星への影響が大きい

太陽プロトン(太陽高エネルギー粒子)について

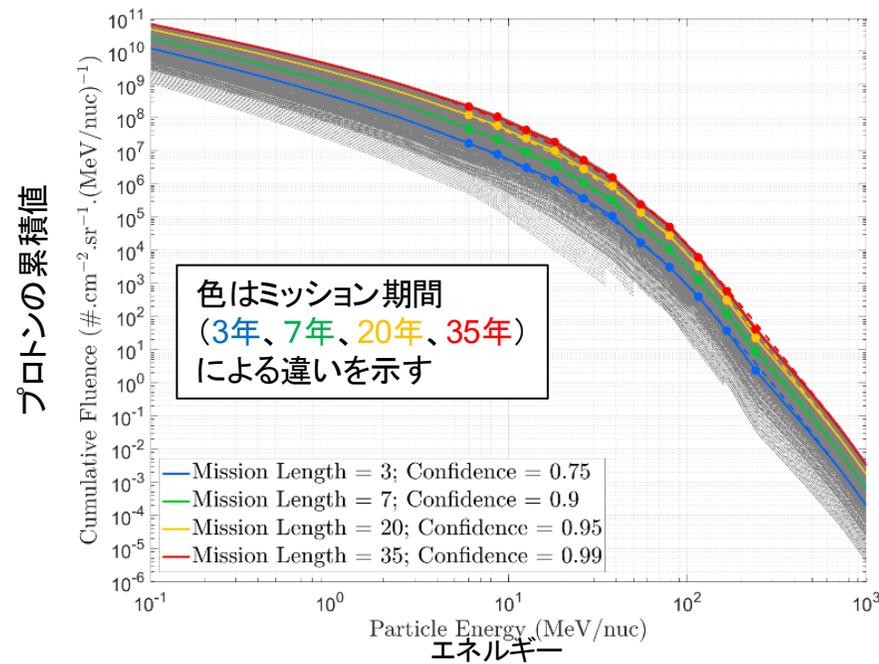
- 太陽プロトンに代表される太陽高エネルギー粒子(SEP: Solar Energetic Particles)は、シングルイベント効果による誤動作・故障確率の増加や、トータルドーズ効果による太陽電池パネル・半導体素子等の材質劣化の加速の原因となる。
- 太陽フレアの発生やコロナガス(CME)の地球到来に伴い増大することがあり、特に静止軌道におけるプロトンの観測量が10pfuを超えるイベントは「プロトン現象」と呼ばれる。
- プロトンに加え、電子やヘリウムや鉄、酸素などの重い元素が含まれることもある。
- エネルギーが高いため、宇宙空間では地球磁気圏の内外、月・惑星等の至るところに到来する。ただし、大気で減速するため地表へは到達しない。

太陽プロトン観測値の推移



ミッション期間毎の太陽プロトンの累積値の推定

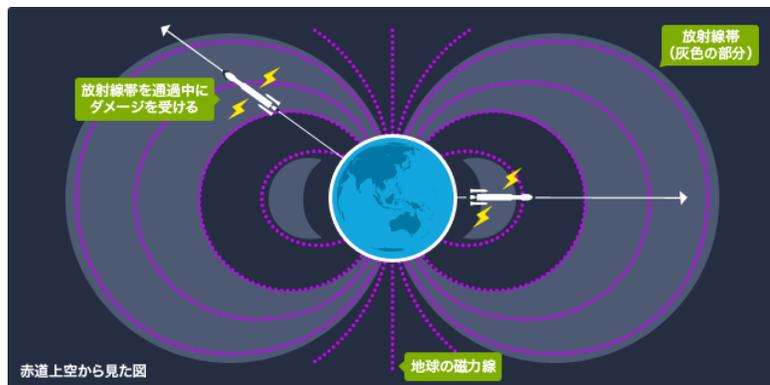
(SAPPHIREモデルによる) [Jiggins+, 2018]



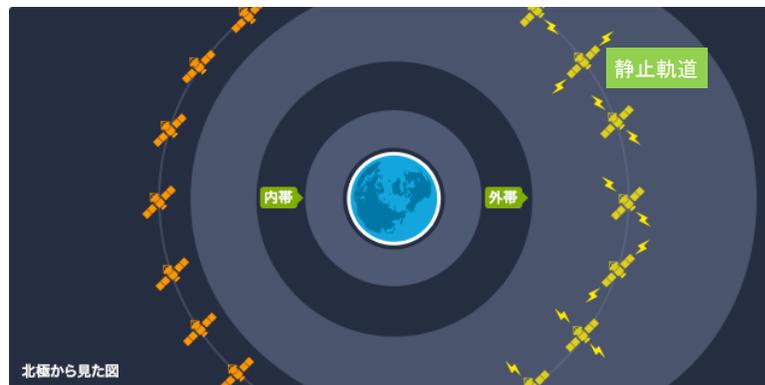
放射線帯電子(バンアレン帯粒子)について

- 地球周囲の宇宙空間には、エネルギーの高い電子やイオンが地球の磁場に捕捉された放射線帯(バンアレン帯)とされている領域があり、赤道上空約3000kmを中心として分布する内帯(主に、陽子・イオン)と約20,000kmを中心として分布する外帯(主に電子)の2重構造が形成されている(外帯は人工衛星が多数運用されている静止軌道まで広がっている)。
- 特に、放射線帯外帯電子の分布は安定しておらず、太陽風の影響で数桁単位で大きく増大する。その際、深部帯電・放電(ESD)の発生率増加による誤動作・故障リスクが上がる。また、トータルドーズ効果により、太陽電池パネル・半導体素子等の材質劣化が加速する。
- 低軌道においても、磁力線を介して放射線帯と接続する緯度や磁場が弱い南大西洋異常領域(SAA)には放射線帯粒子が存在するため、注意が必要である。

赤道上空から見た放射線帯の分布

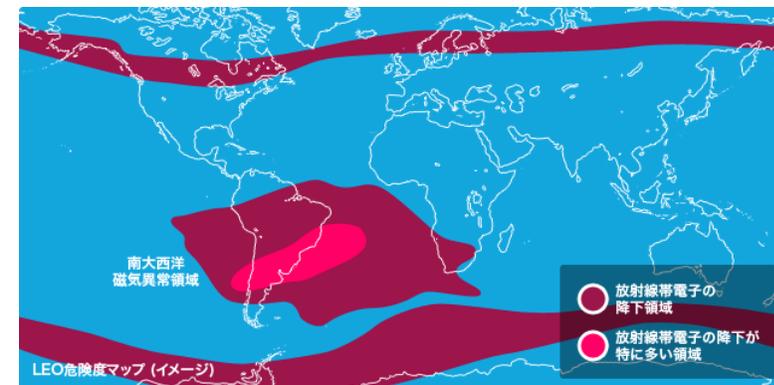


北極上空から見た放射線帯の分布



地球を取り囲む放射線帯のイメージ
(灰色の部分が内帯と外帯)

放射線帯粒子によるLEO危険度マップ



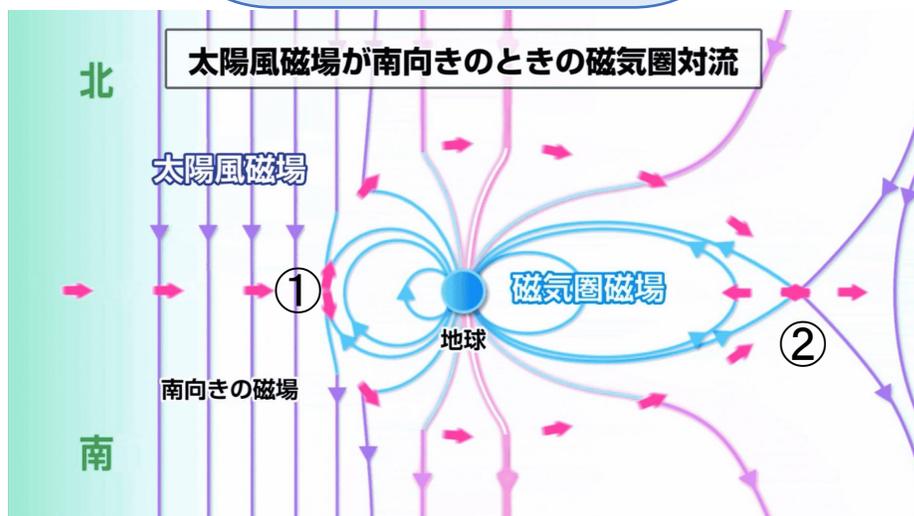
低軌道における放射線帯粒子の降下領域

- オーロラ帯の少し低緯度側は電子が多い
- SAAはプロトンが多い

地磁気擾乱について①高温プラズマの増大

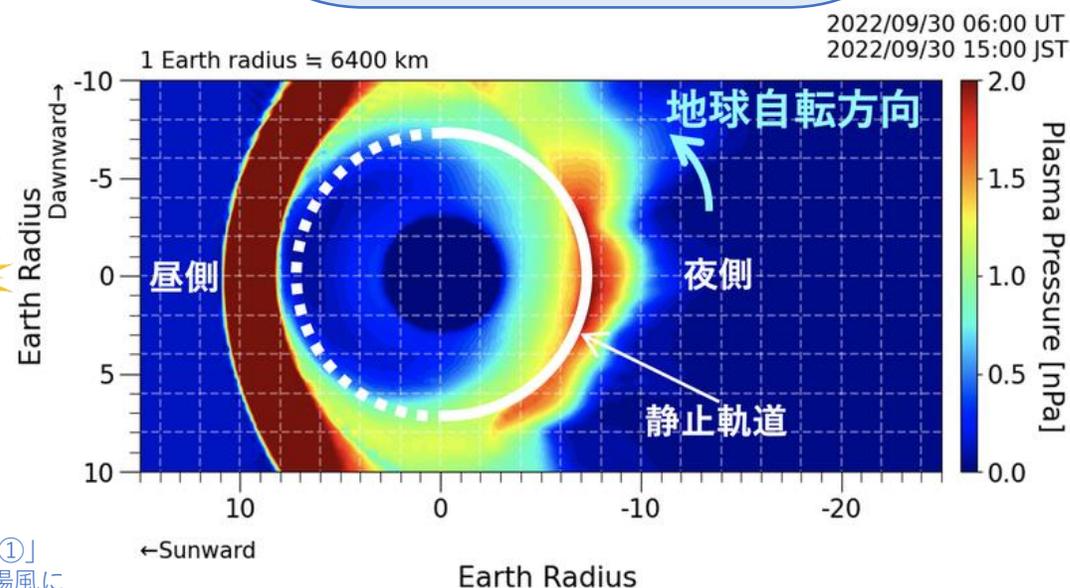
- 地磁気擾乱の発生時は、地上ではオーロラが活発になる(オーロラ粒子の降下量が増大する)一方、宇宙空間では磁気圏尾部から地球方向に向かう高温なプラズマの流入が観測される。
- オーロラ粒子や高温プラズマは、衛星表面帯電・帯電(ESD)による誤作動・故障のリスクを増大させる。
- 地磁気擾乱は、南向き磁場を含む高速太陽風が地球磁気圏に到来した際に、大量の太陽風エネルギーが地球磁気圏に流入することで活発化する。

太陽風エネルギー流入の概念図



太陽風磁場が南向きの場合、地球磁場と反平行となり、磁力線の繋ぎ替わり「磁気リコネクション①」が起こる。結果、一方の端を地球に置きながら、もう一方の端は太陽風と繋がった磁力線が、太陽風に引っ張られて尾部に運ばれる。尾部では、運ばれてきた南北両半球の磁力線が次第に近づき、そこでまた、反平行の磁力線が近づくことで、磁気リコネクション②が起こる。その結果、地球方向とその反対側へ磁力線が移動し、その磁力線の移動とともに高温プラズマが地球方向に流入する。

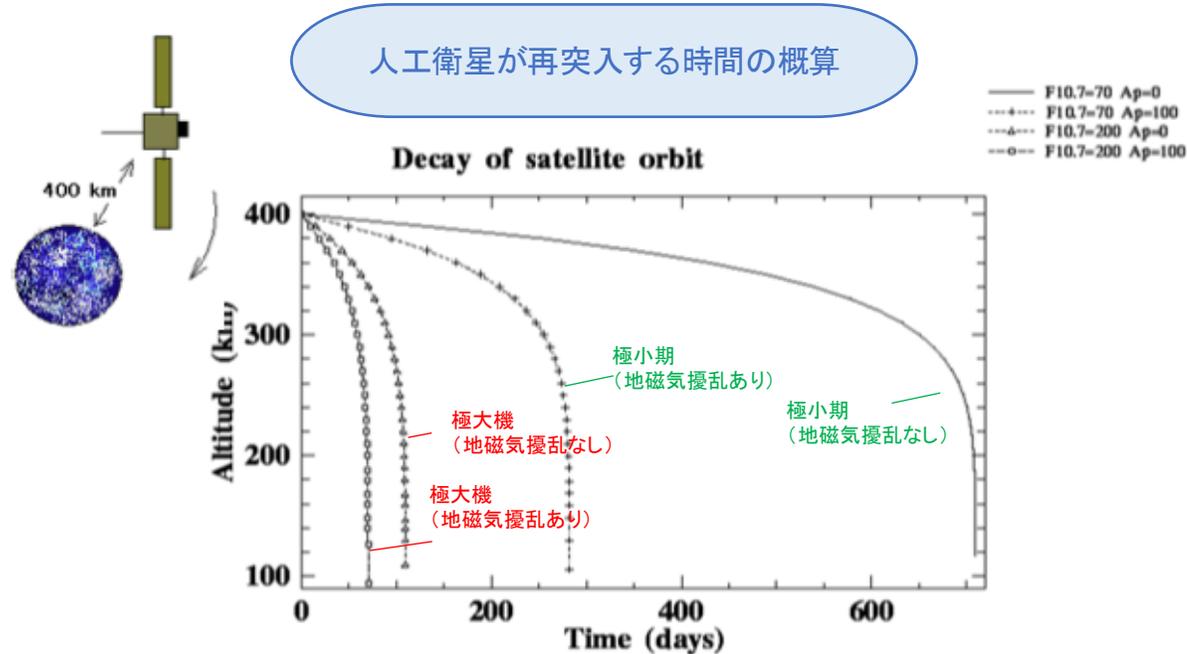
シミュレーションによる危険領域推定 (SECURES)



※赤色が表面帯電(ESD)に注意が必要な領域を示す

地磁気擾乱について②大気抵抗の増加

- 太陽活動の極大期は地磁気擾乱の発生によって大気密度が通常の状態より増大する。地球低軌道では、大気密度が大きくなると、大気抵抗による衛星高度低下率が上がる。
- 大気モデルは日々変動を再現できないため、高度低下率を正確に見積もることが出来ない場合がある。
- 2022年2月には、小規模な地磁気擾乱中にスペースX社が打ち上げた49機のスターリンク衛星のうち、38基が大気圏へ再突入(損失)したことが発表された。

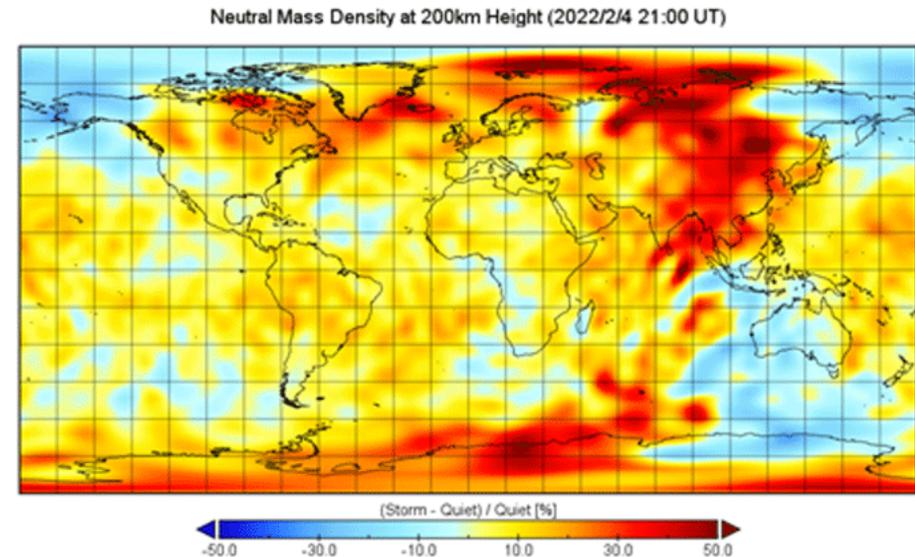


高度400kmの人工衛星が再突入するまでに要する時間(大気モデルを利用)

- 太陽活動極小期、地磁気静穏時は約700日。
- 太陽活動極大期、地磁気擾乱時は約72日。

(2013年度宇宙天気ユーザーズフォーラム、藤原先生ご講演資料より)

磁気嵐時の大気密度分布
STARLINK衛星損失イベント



まとめ

- 本資料では、宇宙システム分野における宇宙天気の影響の基礎的な内容をまとめた。
- 個々のシステムへの影響については、個別の対策・対応が必要となる場合がある。
- 警報基準については、今後、最新の社会状況と影響を踏まえた見直しが行われる可能性がある。

(留意事項と現状の宇宙天気の限界について)

- 太陽フレア、太陽プロトン、コロナガス噴出のそれぞれの規模には明確な比例関係がない点にご留意いただきたい(大規模な太陽フレアが発生しても太陽プロトンやコロナガスが小規模であったり逆の場合もある)。
- 大規模な地磁気擾乱は、高速なコロナガスによってもたらされるが、コロナガスの速度の計測方法が限られているため、地球への到来時刻の誤差は12時間程度と非常に大きいのが現状である。
- また、高速なコロナガスが到来しても、コロナガス内の磁場の向きによっては地球に影響しないこともある(南向き成分が大きいほど影響する)。コロナガスの磁場の向きが計測できるのは地球から太陽方向に150万kmの距離のラグランジュ点に位置する探査機のみであり、この地点で計測された磁場が地球に到達するまでの時間は約1時間である。つまり、正確な地球への影響は1時間前まで分からない。