

2022年4月12日  
宇宙天気予報の高度化の在り方  
に関する検討会（第7回）

# 宇宙天気の警報基準に関するWG 報告

宇宙天気の警報基準に関するWG  
津川 卓也（NICT）、WGメンバー

# 宇宙天気警報基準に関するWG概要

## 設置の背景・理由（本検討会第1回資料より）

- 社会インフラの安定運用のため宇宙天気予報の重要性が高まり、米国等国外では、社会的影響の評価や国家戦略の発表等、宇宙天気の社会的リスクに備える動きが活発化。
- 我が国では、科学研究費補助金・新学術領域研究「PSTEP\*」（2015-2019）の活動の一つとして、宇宙天気現象の規模と我が国への社会的影響について検討・とりまとめ。
- 現在の予警報は現象の規模に着目した基準としているが、宇宙天気予報の利用者が具体的な対応を判断するためには社会的影響を基準とする予警報が必要である。
- このため、本WGでは、宇宙天気がもたらす社会的影響の大きさも考慮した新たな警報の種類・閾値について検討する。

\*PSTEP：太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成

## 検討事項

以下の分野における警報の種類と閾値

「通信・放送」「測位」「衛星運用」「電力」「航空機人体被ばく」

## 会合日時（2022年）

- 全体：第1回 1/24、第2回 3/17、第3回 4/6
- 通信・放送分野：第1回 1/31、第2回 3/4
- 測位分野：第1回 2/7、第2回 2/10、第3回 2/17、第4回 2/24、第5回 3/17、第6回 3/23
- 衛星運用分野：第1回 2/7、第2回 3/7、第3回 3/14、第4回 4/1、第5回 4/5
- 電力分野：第1回 2/4、第2回 2/16
- 航空機人体被ばく分野：第1回 2/4、第2回 2/21

# 宇宙天気警報基準に関するWG概要

## メンバー

氏名 (敬称略)	所属	担当
津川 卓也	情報通信研究機構電磁波研究所	リーダー
久保 勇樹	情報通信研究機構電磁波研究所	サブリーダー
石井 守	情報通信研究機構電磁波研究所	サブリーダー
陣 英克	情報通信研究機構電磁波研究所	通信・放送
齋藤 享	電子航法研究所	通信・放送/測位
前田 隼	北海道大学附属図書館	通信・放送
西岡 未知	情報通信研究機構電磁波研究所	測位
岩本 貴司	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所	測位
金田 知剛	日本電気株式会社	測位
佐藤 一敏	三菱電機株式会社	測位
前田 剛	内閣府準天頂衛星システム戦略室	測位
岸本 統久	内閣府準天頂衛星システム戦略室	測位
今給黎 哲郎	内閣府準天頂衛星システム戦略室	測位
長妻 努	情報通信研究機構電磁波研究所	衛星運用
坂口 歌織	情報通信研究機構電磁波研究所	衛星運用
木本 雄吾	宇宙航空研究開発機構	衛星運用
國母 隆一	株式会社アクセルスペース	衛星運用
玉置 晋	宇宙技術開発株式会社	衛星運用
中溝 葵	情報通信研究機構電磁波研究所	電力
海老原 祐輔	京都大学 生存圏研究所	電力
塩田 大幸	情報通信研究機構電磁波研究所	航空機人体被ばく
佐藤 達彦	日本原子力研究開発機構	航空機人体被ばく
西塚 直人	情報通信研究機構電磁波研究所	
齊田 季実治	一般社団法人ABLAb	
山口 真吾	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	
小林 伸司	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	
菅野 剛	総務省国際戦略局宇宙通信政策課	

※各分野会合は分野外のメンバーの参加や、必要に応じて外部の有識者の参加も可能とした。

# 新たな基準検討の基本方針

## 新たな基準検討の基本方針

### 【背景】

- PSTEPで取りまとめられた報告書「科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価」（以下、「PSTEP報告書」）では、ユーザーヒアリングも広く実施され、宇宙天気現象の規模・頻度と各分野における社会的影響の大きさの紐づけ（宇宙天気の影響マトリクスの作成）がされた。

### 【基本方針】

- 社会的影響の大きさも基準とした予報・警報の種類・閾値の作成について、「通信・放送」「測位」「衛星運用」「電力」「航空機人体被ばく」の各分野毎に会合を実施し、以下の手順で検討を進めた。
  - PSTEP報告書をベースとして、マトリクスの閾値を頻度から物理量に直して社会的影響の可能性を検討し、運用として予報・警報を発令する意味があるもの、技術的に発令が可能なものを取捨選択する。新たな閾値が必要であれば再設定する。
  - ICAO宇宙天気スケールや、米国・英国等の戦略文書等も参考に、国外との整合性も考慮する。
  - 検討したスケールについて、WG・検討会・宇宙天気ユーザー協議会のメンバー等、各分野のユーザーのヒアリングを行い、その有効性や予警報の粒度・段階について検証する。予警報のタイミング等についても検討する。
  - 想定される最悪シナリオについて検討する。

# 通信・放送分野の予警報基準の検討

## 背景

- PSTEP報告書では、電離圏擾乱現象または電波擾乱現象で種類分け（電離圏負相嵐、デリンジャー現象、極冠吸収、プラズマバブル）がされており、これをベースとして警報の種類・閾値と社会的影響について検討した。

## 検討概要

- HF～VHF帯に加え、PSTEP報告書で記載がないUHF帯（衛星通信）の社会的影響についても含めることとした。
- 閾値については、ICAOや米国NOAA、英国UKMOなどで運用されている国際的な基準も考慮して設定。
- 5つの予警報基準を策定し、3つの基準について閾値を設定した。残り2つの基準の閾値については今後の検討課題とした。

## PSTEP 報告書

分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象	発生頻度と影響		
			日常～ 複数回/年	1回/1年	1回/10年
通信・放送	短波（HF）通信・放送の障害	電離圏嵐（負相嵐）			
		デリンジャー現象			
		極冠吸収（PCA）			
		プラズマバブル			
	超短波（VHF）通信・放送の障害	スプラディックE層	△	△	△
		プラズマバブル			
航空運用	通信障害 （地上航法援助用放送を含む）	電離圏嵐（負相嵐）			
		デリンジャー現象			
		極冠吸収（PCA）			
		プラズマバブル			*
		スプラディックE層			*






## WG検討

警報種類	警報閾値に用いる観測量	社会的影響
HF帯 （電離圏嵐）	国内イオノゾンデによるMUF（又はI-scale） ←国際基準（ICAO）とする	今後検討（通信機会の減少度合など）
HF帯 （デリンジャー）	GOES X線 ←他の国際機関と同様	電波の吸収量、影響の継続時間、範囲の統計情報
HF帯 （極冠吸収）	GOES 高エネルギー粒子 ←他の国際機関と同様	電波の吸収量、影響の範囲、継続時間の統計情報
VHF帯 （スプラディックE）	国内イオノゾンデによるfoEs（大きさ、継続時間等） 警報の出し方は要検討	目安となる周波数帯の電波の伝搬距離、減衰など
衛星通信UHF帯 （プラズマバブル）	GEONETデータに依るROTIや、S4指数などを今後検討	シンチレーションによる電波減衰量







# 通信・放送分野の予警報基準

## HF帯/電離圏嵐（負相）

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  影響が無視できる範囲         </div> <div style="text-align: center;">  影響の可能性があり 適切な対応を要する範囲         </div> <div style="text-align: center;">  深刻な影響の可能性があり 運用の継続が困難になる範囲         </div> </div> <p>* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの</p>					
分野	影響と被害	障害を起こし得る 宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	HF帯 利用可能な周波数帯が縮小	電離圏嵐（負相）			
社会的影響				国内外との通信可能な周波数域が最大3割程度縮小。	国内外との通信可能な周波数域が最大5-6割程度縮小となり、一部の時間帯で通信不可。
計測・予測可能な物理量				MUF30%減	MUF50%減
国外基準との関連性（米国、英国等）				ICAO-HFのmoderate（MUF30%減）と同じ、NOAA磁気嵐スケールのsevere（Kp≥8）に相当	ICAO-HFのsevere（MUF50%減）と同じ、NOAA磁気嵐スケールのextreme（Kp≥9）に相当
予報・警報の必要なタイミング （現況、1時間前、2-3日前、数日前等）				情報提供側から現況、1時間前（MUF）、1日前の予測（K指数）が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点で1時間前、1日前の予報が可能だが精度に課題有り。今後数値モデルの精度改善とリードタイムの延伸の開発が必要	
その他				発生頻度：年5日程度	発生頻度：3年に1回程度

# 通信・放送分野の予警報基準

## HF帯/デリンジャー現象

		 影響が無視できる範囲	 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲	 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲	
* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	HF帯電波強度の減衰	デリンジャー現象			
社会的影響				昼間側の広い範囲で電波の吸収があり、 <b>低周波帯は使用不可</b> となる	昼間側の広い範囲で <b>HF帯全域で使用不可</b> (black out) となる
計測・予測可能な物理量				<b>X1フレア発生</b> (静止軌道にて1-8A帯のX線フラックスが $10^{-4} \text{ W m}^{-2}$ 以上)	<b>X10フレア発生</b> (静止軌道にて1-8A帯のX線フラックスが $10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ 以上)
国外基準との関連性 (米国、英国等)				ICAO-HFのmoderate (X1)、NOAA radio blackoutスケールのstrong (X1) と同じ	ICAO-HFのsevere (X10)、NOAA radio blackoutスケールのsevere (X10) と同じ
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)				情報提供側から現況、1日前の予測が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点で1日前のフレア規模の確率予報が可能。ユーザー調査によってレベルに合わせた予測 (X1, X10など) や、必要なタイミングでの予測が必要となる可能性有。社会影響や予測の項目に継続時間の情報追加も要考慮。	
その他				発生頻度：月1日程度	発生頻度：年1回程度

# 通信・放送分野の予警報基準

## HF帯/極冠吸収

			社会的影響発生頻度と影響		
分野	影響と被害	障害を起こし得る 宇宙天気現象・物理量	Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	HF帯 電波強度減衰	極冠吸収			
社会的影響				高緯度地域（55度以上） で顕著な電波の吸収が起き、 2日間程度継続する。	高緯度地域（52度以上） で顕著な電波の吸収が起き、 3日間程度継続する。
計測・予測可能な物理量				静止軌道にて10MeV以上の プロトン粒子フラックス が $10^3$ pfu 以上	静止軌道にて10MeV以上の プロトン粒子フラックス が $10^5$ pfu 以上
国外基準との関連性（米国、英国等）				NOAA radiation stormス ケールのstrong~severe （10MeVプロトン $> 10^3$ pfu）と同じ	NOAA radiation stormス ケールのstrong（10MeV プロトン $> 10^5$ pfu）と 同じ
予報・警報の必要なタイミング （現況、1時間前、2-3日前、数日前等）				情報提供側から現況、1日前の予測が提供可。ユーザー の必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点で1日前のフレア規模の確率予報が可能。ユー ザー調査によって異なるタイミングでの予測が必要と なる可能性有。 ひまわり後継機の測定情報を使う場合にどのような情 報が提供可能か今後要検討。	
その他				発生頻度：年1回程度	発生頻度：10年に1回程度



影響が無視できる範囲



影響の可能性があり  
適切な対応を要する範囲









深刻な影響の可能性があり  
運用の継続が困難になる範囲

\* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの



# 通信・放送分野の予警報基準

## VHF帯/スプラディックE層（閾値未定）

		 影響が無視できる範囲	 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲	 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲	
* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	VHF帯 回線品質劣化 (電波強度減衰)	スプラディックE層			
社会的影響				見通し範囲外からの電波が混信することがある。	見通し範囲外からの電波が混信することが頻繁に発生する。
計測・予測可能な物理量				国内イオノゾンデによって計測されるfoEsの発生状況から閾値を今後検討 (foEs発生状況と社会影響との関連の調査、foEsの統計分析等が必要。今年度内に暫定的な閾値の導出を目標)	
国外基準との関連性（米国、英国等）				国外で公開され、運用されている基準は無い	
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）				情報提供側から現況、1日前の予測が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				現時点では現況から1日後のEs発生を予測。大気モデルによる予測研究も現在進められており、今後実用化が期待できる。	
その他					

# 通信・放送分野の予警報基準

## UHF帯/プラズマバブル（閾値未定）

影響が無視できる範囲		影響の可能性があり適切な対応を要する範囲		深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲	
* 今後の研究により変わりうるもの		■ システムに依存するもの		△ 障害というより「通常と異なる」もの	
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
通信・放送	UHF帯（衛星通信） 電波減衰、シンチレーション	プラズマバブル			
社会的影響				低緯度夜間帯にてL-band衛星のフェードマージンを越えるシンチレーションが発生することがある	低緯度夜間帯にてL-band衛星のフェードマージンを越えるシンチレーションが頻繁に発生し、中緯度帯でも影響を受ける場合がある。
計測・予測可能な物理量				入手可能な観測データ（GEONET受信機など）を基に検討 （ROTIやS4など測定可能な指数と通信電波のフェージング強度との関連の調査や、範囲・継続時間・頻度を含めたバブル発生状況と衛星通信への影響について統計分析などが必要。年度内に暫定的な閾値の導出が目標。）	
国外基準との関連性（米国、英国等）				ICAO-振幅シンチレーション指数S4 > 0.5	ICAO-振幅シンチレーション指数S4 > 0.8
予報・警報の必要なタイミング （現況、1時間前、2-3日前、数日前等）				情報提供側から現況の情報が提供可。ユーザーの必要なタイミングは現時点で未調査。	
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題				閾値は基準および測定場所を含めて要検討。	
その他					

# 測位分野の予警報基準の検討

## 背景

- 測位手法は多岐にわたり、測位手法によって影響のある宇宙天気現象が異なる（PSTEPオープン・テキストブックの1.2章表6参照）。
- 国際的には航空運用で利用されるICAO基準（鉛直TEC 125/175 TECU以上、S4指数0.5/0.8以上でmoderate/severe等）があるものの、ユーザー側の要件から導かれた根拠はない。その他、測位に関する宇宙天気の国際基準は明確にはない。
- 測位分野の特徴として、ユーザーによってその使用方法や目的が様々であることが挙げられる。複数存在する測位手法に対し、それぞれのユーザーがどのような水準を求めているのかを知る必要がある。

## 検討概要

- 「宇宙天気が測位の精度等に与える影響の調査に関するアンケート」を実施。主に測位サービスを提供する事業者に対し、その測位手法や性能水準、宇宙天気に関する対策や要望を調査するため、「宇宙システム開発利用推進機構」「電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会」の他、内閣府、航空局等に回答を依頼した。

電離圏擾乱現象と影響を受けるGNSS測位。✓の有無は一般論として電離圏の影響が出る場合の有無を示す。

電離圏の効果	電離圏全電子数					電離圏不規則構造	
	電離圏遅延		電離圏遅延空間勾配			強度シンチレーション	位相シンチレーション
電離圏現象	正相嵐	負相嵐	SED/SIPS	プラズマバブル	MSTID	プラズマバブル	オーロラ
1周波	単独	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	相対			✓	✓	✓	✓
1周波(精密)	相対(位相)			✓	✓	✓	✓
	単独(PPP)			✓	✓	✓	✓
2周波	単独					✓	✓
	相対					✓	✓
2周波(精密)	相対(位相)			✓	✓	✓	✓
	単独(PPP)			✓	✓	✓	✓

PSTEPオープン・テキストブック (<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/pstep/news/20210806.html>) 1.2章より

Impact Area	Parameter (Unit)	Moderate	Severe
GNSS	Amplitude scintillation S4 (dimensionless)	0.5	0.8
	Phase scintillation $\sigma_\phi$ (radians)	0.4	0.7
	Vertical TEC (TEC Unit)	125	175

ICAOのGNSSに関する指標と閾値

[<https://www.mdpi.com/2072-4292/13/18/3685>]

- Q1. 提供サービス名
- Q2. エンドユーザーの業種
- Q3. 測位手法
- Q4. 性能水準（精度要件・安全性・継続性・アベイラビリティなど）
- Q5. 宇宙天気や電離層の影響について考慮されているか、その具体例
- Q6. 宇宙天気に関するアラートが出るとした場合に、望まれる情報

「宇宙天気が測位の精度等に与える影響の調査に関するアンケート」概要

# 測位分野の予警報基準の検討

## 検討概要（つづき）

- 回答のあった19事業者からのアンケート結果に基づき、WGメンバー内で検討し、予警報の必要性のある分野やその閾値、予警報を発出するために必要な課題などを議論した。
- 「電離圏現象」は細分化せずに「電離圏遅延量」「電離圏遅延量空間勾配」「シンチレーション」の3種類に分けて検討した。
- アンケート回答は、二周波精密測位（RTK, CLAS）および一周波相対測位（SLAS, SBAS, GBAS等のDGNSS）のサービス提供者から多く得られた。
- 全ての手法について、アンケートで得られた性能水準等を参考に、3種類の宇宙天気の影響（「遅延量」「遅延量空間勾配」「シンチレーション」）に関する予警報の必要性について判断した（次ページの表）。二周波精密相対測位（主にRTK）にその必要性が高く、続いて二周波精密単独測位（主にCLAS）と一周波相対測位（DGNSS、SLAS、SBAS等）にもその必要性がある。
- 二周波精密相対測位、二周波精密単独測位、一周波相対測位の3つについて、そのレベル分けや閾値の決め方、予警報発出の粒度や実現可能性について検討した。閾値については、定量的に決めるために必要な課題について明らかにした。
- 最悪シナリオの一つは、「誤作動により更に深刻な事例を引き起こすこと」。ただし本シナリオの可能性は、各システムの設計にも依存するため、更なる調査を要する。本シナリオが起こりえない場合、最悪シナリオは「測位が出来ない」となる。

# 測位分野の予警報基準の検討







「宇宙天気が測位の精度等に与える影響の調査に関するアンケート」に基づいて検討された、各測位手法における宇宙天気に関する予警報の必要性について

予警報として必要
  参考情報として必要
  不要
  不明・要調査

宇宙天気の影響		遅延量	遅延量 空間勾配	シフト	測位サービス (延べ回答数)	求められる性能水準 (一部抜粋)
一周波	単独	✓	✓	✓	QZSS-PNT(1)	・精度 ≤ 2.6 m、電離層パラメータ精度 ≤ 7.0 m (共に95%値) 等 (※サービスの要求水準)
					単独測位(7)	・車両位置精度：数m (道路幅程度)
					ABAS (1)	・水平方向0.47-3.7km等
	相対		✓	✓	SLAS(1)	精度 (Zone 1) : 水平1.00m以下(95%値)等 (※サービスの要求水準)
					SBAS(3), MSAS(1), GBAS(2)	MSASの例：非精密進入、垂直基準なし、水平220m、インテグリティ：1-10 <sup>-7</sup> per hour GBASの例：カテゴリ-I精密進入、垂直6.0-4.0m、水平16m、インテグリティ：1-2 × 10 <sup>-7</sup> in any approach 等
					DGNSS(6)	・水平：0.4m / 垂直：0.6m 車両の測位精度：サブメータ級等
一周波 (精密)	相対 (位相)		✓	✓	(一部のRTKユーザー)	
	単独 (PPP)		✓	✓	PPP(1)	
二周波	単独			✓	QZSS-PNT(1)	要求水準としては1周波単独PNTに同じ
	相対			✓	二周波SBAS(将来的に)	
二周波 (精密)	相対 (位相)			✓	RTK(13), VSR-RTK(2),スタティック(4),CLARCS(1)	公共測量作業規定に準じた精度、水平2cm、上下方向3cm
	単独 (PPP)			✓	CLAS(5), PPP(2)	静止体で水平6cm以下、垂直12cm以下、移動体で水平12cm以下、垂直24cm以下 (いずれも信頼水準95%値) 等 (業務要求水準書)

# 測位分野の予警報基準

## 二周波精密 相対測位 (RTKなど) (閾値未定)

		 影響が無視できる範囲	 影響の可能性があり 適切な対応を要する範囲	 深刻な影響の可能性があり 運用の継続が困難になる範囲	
		* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの			
分野	影響と被害	障害を起し得る 宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
測位 (二周波精密相対)	測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シッレーション (TID・プラズマバブルなど)			
社会的影響			FIX解が得られ、基準 (水平2センチ、上下方向3センチ以内の誤差範囲) を満たす	精度の低下 水平2cm鉛直3cmの測位精度が出ない	測位不可能 測位解 (FIX解) が得られない
計測・予測可能な物理量			電離圏遅延の空間勾配 (水平方向10kmの基線におけるTEC値の差分) シッレーション (Rate of TEC change Indexをシッレーション指数の代替指標とする)		
国外基準との関連性 (米国、英国等)			ICAOのGNSS基準 (TEC125/175TECU以上、S4指数0.5/0.8以上で moderate/severe) は、ユーザー側の要件から導かれた根拠ではなく、改めて検討する必要があると考える。 電離圏遅延の空間勾配については基準なし。		
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			警報 (ナウキャスト) に加え、数日先/1日先/半日先の予報があると好ましい。		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			<p><b>予警報実現性:</b> 現在のTEC観測より基線10kmあたりの遅延量空間勾配を基に予警報を出すことで実現可能。シッレーションについてもROTI指数を基に予警報を出すことで実現可能。</p> <p><b>閾値決定のための課題:</b> 電離圏遅延の空間勾配と、測位手法各システムに生じうる測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。シッレーションの目安となるROTI指数についても同様に各システムに生じ得る測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。</p> <p>現時点で利用可能な測位データと特定のアルゴリズムを用いた解析を実施し、今年度内に暫定値を導出することを目標とする。多種の解析アルゴリズムに対する比較・考察、統計的に不足するデータの補間の手法開発を行い、一般化できる結果を得るためには、数年の研究が必要と推測される。</p>		
その他			・ 地方ごとの予警報発出が望まれる。		

# 測位分野の予警報基準

## 二周波精密 単独測位 (CLASなど) (閾値未定)

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black;"></span> 影響が無視できる範囲         </div> <div style="text-align: center;"> <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black;"></span> 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲         </div> <div style="text-align: center;"> <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 20px; background-color: #FF4500; border: 1px solid black;"></span> 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲         </div> </div> <p style="text-align: center;">*今後の研究により変わりうるもの ■システムに依存するもの △障害というより「通常と異なる」もの</p>					
分野	影響と被害	障害を起し得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
測位（二周波位相単独）	測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シッフレション（TID・プラズマバブルなど）			
社会的影響			FIX解が得られ、基準（センチメートル級の精度）を満たす	精度の低下 センチメートル級の測位精度が出ない	測位不可能 測位解が得られない
計測・予測可能な物理量			電離圏遅延の空間勾配（水平方向10kmの基線におけるTEC値の差分）シッフレション（Rate of TEC change Indexをシッフレション指数の代替指標とする）		
国外基準との関連性（米国、英国等）			ICAOのGNSS基準（TEC125/175TECU以上、S4指数0.5/0.8以上でmoderate/severe）は、ユーザー側の要件から導かれた根拠ではなく、改めて検討する必要があると考える。 電離圏遅延の空間勾配については基準なし。		
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）			警報（ナウキャスト）に加え、数日先/1日先/半日先の予報があると好ましい。		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			<p><b>予警報実現性：</b>現在のTEC観測より基線10kmあたりの遅延量空間勾配を基に予警報を出すことで実現可能。シッフレションについてもROTI指数を基に予警報を出すことで実現可能。</p> <p><b>閾値決定のための課題：</b>電離圏遅延の空間勾配と、測位手法各システムに生じる測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。シッフレションの目安となるROTI指数についても同様に各システムに生じ得る測位誤差およびFIX失敗の関係について明らかにする必要がある。</p> <p>閾値の決定には、十分なデータ蓄積が必要であり、その後1年程度あれば特定のアルゴリズムを用いた暫定値が決まる見込み。更に、多種存在する解析アルゴリズムに対する検討や不足データの補間などの手法検討が必要であり数年の研究が必要と推測される。</p>		
その他			<ul style="list-style-type: none"> <li>・現段階では、発出された予警報などの情報を測位システムに組み込むことが難しいため、予警報は参考情報としての位置付けである。</li> <li>・CLASの補正情報を提供している12エリアに対しての情報発出が望まれる。</li> </ul>		

# 測位分野の予警報基準

## 一周波コード 相対測位 (DGNSS など) (閾値未定)

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <span style="background-color: #90EE90; border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></span>                     影響が無視できる範囲                 </div> <div style="text-align: center;"> <span style="background-color: #FFD700; border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></span>                     影響の可能性があり 適切な対応を要する範囲                 </div> <div style="text-align: center;"> <span style="background-color: #FF4500; border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></span>                     深刻な影響の可能性があり 運用の継続が困難になる範囲                 </div> </div> <p style="font-size: small; margin-top: 5px;">* 今後の研究により変わりうるもの   ■ システムに依存するもの   △ 障害というより「通常と異なる」もの</p>					
分野	影響と被害	障害を起こし得る 宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
測位（一周波コード相対）	測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シフト（TID・プラスマバブル等）			
社会的影響			問題無く測位ができる。	精度の低下 SLASユーザー：サブメートル級の測位精度が出ない SBAS・GBASユーザー：潜在し得る誤差が増大し、一部のサービスが利用不可	測位不可能 SLASユーザー：測位解が得られない SBAS・GBASユーザー：潜在し得る誤差が増大し、全てのサービスが利用不可
計測・予測可能な物理量			電離圏遅延の空間勾配（水平方向100kmの基線におけるTEC値の差分）シフト（Rate of TEC change Indexをシフト指数の代替指標とする）		
国外基準との関連性（米国、英国等）			ICAOのGNSS基準（TEC125/175TECU以上、S4指数0.5/0.8以上でmoderate/severe）は、ユーザー側の要件から導かれた根拠ではなく、改めて検討が必要があると考え。電離圏遅延の空間勾配については基準なし。		
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）			警報（ナウキャスト）に加え、数日先/1日先/半日先の予報があると好ましい。さらに1週間先/1カ月先の予測が欲しい。		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			<b>予警報実現性：</b> 現在のTEC観測より基線100km程度あたりの遅延量空間勾配を基に予警報を出すことで実現可能。シフトについてもROTI指数を基に予警報を出すことで実現可能。 <b>閾値決定のための課題：</b> 電離圏遅延の空間勾配と、測位手法各システムに生じうる基準誤差の関係について明らかにする必要がある。閾値の決定には、十分なデータ蓄積が必要であり、その後1年程度あれば特定のアルゴリズムを用いた暫定値が決まる見込み。更に、多種存在する解析アルゴリズムに対する検討や不足データの補間などの手法検討が必要であり数年の研究が必要と推測される。		
その他			・ 現段階では、発出された予警報などの情報を衛星測位システムに組み込むことが難しいため、予警報は参考情報としての位置付けである。 ・ 地方ごとの予警報発出が望まれる。 ・ SBASやGBASユーザーにとっては「電離圏勾配無」「シフト無」といった「静穏である」という情報が重要である。		



# 航空機人体被ばく分野の予警報基準の検討

## 背景

- 国際放射線防護委員会（ICRP）が「航空機乗務における宇宙放射線による被ばくを、職業被ばくの一部に含める」ように1990年に勧告した。
- 日本国内では、2006年に航空機乗務による宇宙放射線被ばくの管理目標値として年間5mSvと設定され、民間航空会社では乗務員の宇宙放射線被ばく管理を行うことが必要になっている。
- 航空機乗務員の宇宙放射線被ばく線量は、すぐに健康影響が表れる（確定的影響）ような線量ではないが、被ばく線量が増えることで発ガンなど（確率的影響）の確率が高まる可能性が指摘されている。
- 放射線防護の基本的な考え方は、ALARAの原則（as low as reasonably achievable : 合理的に達成可能な限り低く）
- 宇宙放射線被ばくに関する警報は、ALARAの原則に基づき、被ばく線量が増加する（した）場合にアラート（アドバイザリ）を出すことが、国際民間航空機関（ICAO）で決められている。

## 検討概要

- 実運用されているICAO宇宙天気センターにおける放射線被ばくアドバイザリの基準を元に検討した。
- ICAOアドバイザリの基準は、被ばく線量率が80 $\mu$ Sv/h以上で Severe、30 $\mu$ Sv/hで Moderateである。Severeの値は、国際線 12.5時間 1フライトで1mSv（一般人の人為的な年間被ばく積算量の制限値、ただし医療被ばくを除く）。

STATUS	条件
Moderate	25,000ft-46,000ftの間で30 $\mu$ Sv/h
Severe	25,000ft-60,000ftの間で80 $\mu$ Sv/h

ICAOの放射線被ばくアドバイザリ率基準

# 航空機人体被ばく分野の予警報基準の検討

## 検討概要 (つづき)

- ICAOアドバイザリは、作成に利用される被ばく線量マップにおいて、地理緯度30度毎の6つ緯度帯で南北対称とし、同一緯度帯は全経度における最悪値で統一される (右図)。
- 磁気緯度の高い北米の影響で、中緯度帯の日本は上空が基準を超えていない安全な状況でも、アドバイザリが出る可能性があり、日本地域に特化した情報を発出する。

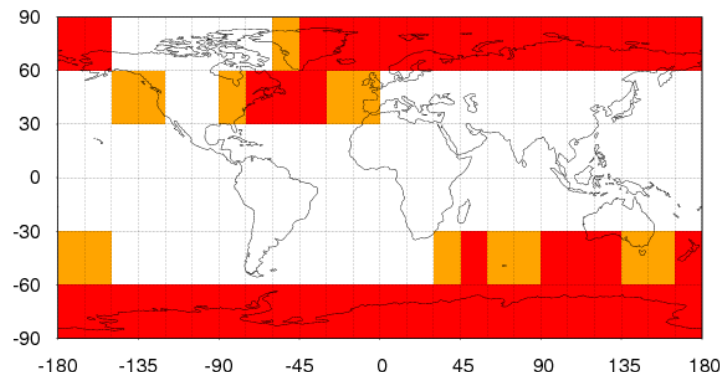
日本上空被ばく線量マップ (イメージ)

予警報情報	日本南 (25-35)	日本北 (35-45)	ICAO MNH
60000	20	35	200
53000	16	30	100
46000	12	25	70
35000	8	20	40
25000	4	15	
15000			

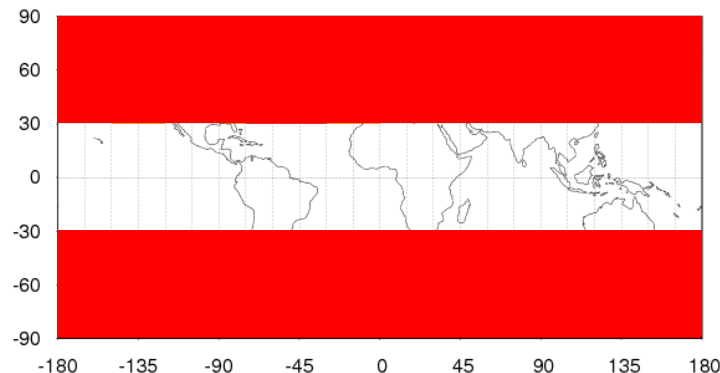
高度[feet]

- 航空機での線量計測データが極めて少なく、線量率の検証が不十分である。航空会社との協力により、航空機に線量計を載せて線量を計測できるようにすることが必要。
- PSTEP報告書では、屋久杉イベント(774-775)を最悪規模イベントとして、GLE69(2005.1.20)のWASAVIESの結果を141倍して全線量を推定した。高度12kmでの最大被ばく線量率は37mSv/hであり、1フライトで年間被ばく量上限5mSvを超える。




ICAOアドバイザリ作成に利用される被ばく線量マップ  
2005/01/20 06:55UTC FL370 (GLE69時)



ICAOアドバイザリの元になる被ばく線量マップ



# 航空機人体被ばく分野の予警報基準

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  影響が無視できる範囲         </div> <div style="text-align: center;">  影響の可能性があり適切な対応を要する範囲         </div> <div style="text-align: center;">  深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲         </div> </div>					
* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
航空機人体被ばく	被ばく線量増加	太陽高エネルギー粒子			
社会的影響				国際線12.5時間1フライトで0.4mSv程度	国際線12.5時間1フライトで1mSv
計測・予測可能な物理量 中性子モニターおよび静止軌道での太陽高エネルギー粒子の観測に基いたモデルによる被ばく線量率 (μSv/h) の評価。				30μSv/h@250-460FL	80μSv/h@250-600FL
国外基準との関連性 (米国、英国等)			米、英とも10MeV以上のIntensityを基準にしているが、被ばくに寄与するのは数百MeV以上のみなので、米、英の基準は妥当とは言えない。ICAOの基準に準ずる。ただし、国内線用に150-250FLでの評価も含める。		
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			航空機の運航を中止したりというアクションを起こす場合は、1~2日くらいのリードタイムが必要 (要確認)。ただし、現状は本邦の民間航空機の運航規程に宇宙天気情報の利用は規定されておらず、宇宙天気情報は利用されていない。		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			現状、プロトン現象の発生予測は困難であり、モデルにより被ばく線量の増加が検出された際に警報を発信。プロトン現象発生後に、そのフラックスの時間発展の予測ができれば被ばく線量低減につながる可能性がある。		
その他			航空機乗務員の宇宙放射線被ばく線量は、すぐに健康影響が表れる (確定的影響) ような線量ではないが、被ばく線量が増えることで発ガンなど (確率的影響) の確率が高まる可能性が指摘されている。現状、被ばく線量計が搭載されている航空機はほとんどなく、そのため、被ばく線量の計測が無いためモデルの妥当性の評価が十分でない。		

# 電力分野の予警報基準の検討

## 背景

- 太陽活動によって電力系統に強い地磁気誘導電流(GIC)が流れると、電力設備の誤作動や損傷につながるおそれがある。
- GICの発生メカニズムは次のとおり。
  - 太陽面コロナ質量放出(CME)や高速太陽風が地球に到来すると、磁気圏・電離圏を流れる電流が増強し、地磁気擾乱（オーロラ嵐・磁気嵐）が発生。
  - 地磁気が乱れると地面に誘導電場（GIE）が生じる。
  - GIEによって地面に接地されている長い導体に電流（GIC）が流れる。
- 北米のNERC(北米電力信頼度協会)は、1989年3月イベントの地磁気変動を基にGIE推定式、および地下伝導度参照値を策定(GMDベンチマーク)。200kV以上の変圧器について、GMDベンチマークを用いて75A/1相以上流れる場合には熱影響評価が必要としている。

## 検討概要

- 日本列島は中緯度域に位置するため、通常的地磁気擾乱ではGICも小さい。しかし巨大磁気嵐が発生すると、場所によっては大きなGICが流れる可能性がある。巨大磁気嵐をもたらすのはフレア起源の巨大CMEにほぼ限られる。
- 長時間変動（磁気嵐主相、時間スケール数時間）により変圧器加熱が懸念されることから、影響を起こしうる事象を検討。
- 閾値検討の拠り所としてNERCの熱設計基準を用い、この基準値に至る上流の現象規模(物理量)を検討。
- GIC基準値は、NERC基準を参考とした科学的判断により、Lv3はNERC基準である225A/3相（暫定値）、Lv2はその約1/2である100A/3相（暫定値）を基準とする（次ページの表）。今後、電力分野の事業者からのデータ提供等主体的な協力を得つつ、産学官が連携して調査研究を進めることで精緻化を目指す。

# 電力分野の予警報基準の検討

## 予警報発出のタイミングと閾値

警報種類	事例 (地磁気擾乱)	>0.5-1日前	約0.5-1日前	10~30分前	現在		
					活動領域 太陽磁場	フレア /CME ※発生場所も 考慮：±30度	太陽風速度 IMF
			← フレア/CME～地磁気擾乱(dH)@日本の関係		地磁気擾乱(dH)@日本～地電場(柿岡)/GICの関係 →		
	<b>長時間変動</b> 1859年, 1872年 1921年 (2012年地球と反対側で同等規模のCME発生) <b>短時間変動</b> 1940年		右記 GIE/GICを 起こしうるフ レアクラス /CME※	右記 GIE/GICを 起こしうる太 陽風※	長時間変動：1200nT [*2] 1859年, 1921年に発生 (1872年に上記を上回る規模の事象が発生した可能性) 短時間変動：230nT [*2] 1940/03に発生	GIE~1V/km[*3]	225A/3相 [*4]
	長時間変動 1989年 2003年 短時間変動 2003年				長時間変動：500-600nT [*2] 1989年, 2003年に発生 短時間変動：100nT [*2]	GIE~0.5V/km [*3]	上記225Aの約 1/2=100A/3相 [*4]
							100A/3相未満

【\*1】 Lv 3：NERC(北米電力信頼度協会)の熱設計基準を超えるGICが流れうる事象の発生時、Lv 2：要注意と考えられる事象の発生時。

【\*2】 右の閾値を超えるdHをZhang & Ebihara (Space Weather, submitted)より推定

【\*3】 右の閾値を超えるGICをある電力設備で流しうるGIE値

【\*4】 NERC熱設計基準=225A

【\*5】 Ebihara+2021

【\*6】 Ebihara+2021と経産省報告書2015を組み合わせ、ある電力設備について推定

※：検討中(参考文献：Gopalswamy2018, Kataoka2020, NICT巨 解析、等)

※参考

2003年

GIE(柿岡地磁気観測所)：0.5V/km、GIC(経産省報告書2015)：129A







1989年

GIE(柿岡地磁気観測所)：0.4V/km、GIC(推定)：75A [\*6]

1859年

GIE(推定)：2.0±0.4V/km [\*6]、GIC(推定)：496±174A [\*6]

# 電力分野の予警報基準

		 影響が無視できる範囲	 影響の可能性があり適切な対応を要する範囲	 深刻な影響の可能性があり運用の継続が困難になる範囲	
		* 今後の研究により変わりうるもの    ■ システムに依存するもの    △ 障害というより「通常と異なる」もの			
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙 天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響		
			Lv 1	Lv 2	Lv 3
電力	地磁気誘導電流 (GIC) → 変圧器損傷	地磁気の長時間変動 (磁気嵐主相)			
社会的影響				変圧器加熱にいたるGICが流れる可能性。	変圧器加熱により、変圧器損傷にいたる可能性。
計測・予測可能な物理量				GIC 100A/3相 ※暫定値	GIC 225A/3相 ※暫定値
国外基準との関連性（米国、英国等）			NERC熱設計基準=75A/1相、225A/3相		
予報・警報の必要なタイミング（現況、1時間前、2-3日前、数日前等）			フレア/CME検出時 ※事業者と検討		
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			<ul style="list-style-type: none"> <li>・上記GICを流しうるGIE、地磁気変動の閾値は最新研究により推定。</li> <li>・フレア/CMEの閾値は文献等をもとに検討中だが高精度化には多分野にわたる研究が必要。</li> <li>・GICの閾値については、電力分野の事業者からのデータ提供等主体的な協力を得つつ、産学官連携して調査研究を進めることで精緻化を目指す。</li> <li>・大規模な宇宙天気現象発生時において他分野でLv2以上の予警報が出される一方、電力分野でLv1である場合は、その情報の提供が必要。</li> </ul>		
その他			磁気嵐の状況について適宜事業者へ情報提供すべきである。		

# 衛星運用分野の予警報基準の検討

## 背景

- PSTP報告書におけるハザードマップの記載は「衛星帯電」のみ。
- 表面帯電・深部帯電に関する宇宙天気の影響マトリクスにおいては、発生頻度と影響については、衛星毎の設計の違いに対する依存が大きいことから、定量的な評価は未実施。

			発生頻度と影響				
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象	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 (送電線の過電流)	地磁気誘導電流 (GIC)	■	■	■	■	■*
衛星運用	宇宙機(表面帯電)	サブストーム高温電子	■	■	■	■*	■*
	宇宙機(内部帯電)	放射線帯電子	■	■	■	■*	■*

[PSTEP報告書]

- NICTでは、「放射線帯電子増大」、「プロトン現象」、「地磁気じょう乱」の3つの予報を主に衛星運用に関連するものと捉えているが、レベル毎の具体的なリスクの対応付けは行っていないかった。
- 米国・英国のスケールにおいては、R-Scale (太陽プロトン現象)、G-Scale (地磁気じょう乱) において、衛星運用のリスクに関する記載有。
- 宇宙開発・利用の状況はPSTEP報告書策定当時とも変わりつつあり、最近の動向(超小型衛星の普及・利活用、衛星コンステレーション、地球周回外(月・火星)ミッション、等)を踏まえた見直し、検討が必要。また、予報レベルに応じたリスクの対応付けが必要。

# 衛星運用分野の予警報基準の検討

## 検討概要

- 衛星運用分野における5回のWG会合と、7事業者に対するアンケート調査により検討を実施。以下のことが認識・再確認された。
  - 宇宙システム設計においては、宇宙環境の影響は考慮されているが、システム毎に考慮している宇宙環境のレベルやそれに基づく設計の考え方に違いがあり、現段階では統一的な最悪値の設定は難しい。
  - 宇宙システム運用においては、宇宙環境情報は運用や障害時の事後解析のために参照しているものの、現状では予測される宇宙環境のリスクと運用の変更・中断がもたらすリスクの対比が難しく、アラートレベルに応じて一律に運用の変更やバックアップ手段を講じる事例は無かった。
  - 従来の子報やリスク評価では静止軌道の衛星運用が主たるターゲットだったが、低軌道や月・火星等他の軌道における衛星運用への影響のニーズが高まりつつある。よって、衛星帯電のみならず、宇宙環境に起因する様々な衛星障害をターゲットとする必要がある。
- 以上のことから、衛星運用分野においては、アラートレベルごとに、一般化した各障害・各軌道ごとの影響を記述したマトリクスを作成し、併せて今後の課題抽出を実施。

深部帯電の閾値（案）

放射線帯電子 (>2 MeV)	低軌道	中軌道	静止軌道	高度 50,000 km 以上
$3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \sim$	黄	赤	赤	
$3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \sim$ $3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	黄	黄	黄	
$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \sim$ $3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	緑	緑	緑	
No Event	緑	緑	緑	





シングルイベント効果の閾値（案）

太陽プロトン (>10 MeV)	低軌道	中軌道	静止軌道	地球周回外
1000 PFU以上	赤	赤	赤	赤
100 – 1000 PFU	黄	黄	黄	黄
10 – 100 PFU	黄	黄	黄	黄
No Event	緑	緑	緑	緑





# 衛星運用分野の予警報基準

## プロトン現象

		 影響が無視できる	 衛星運用への軽微な影響の可能性	 衛星運用への影響の可能性	 衛星運用への深刻な影響の可能性		
		* 今後の研究により変わりうるもの ■ システムに依存するもの △ 障害というより「通常と異なる」もの					
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響				
			(領域・軌道)	Lv 1 (影響なし)	Lv 2 注意報相当	Lv 3 警報相当	Lv 4 特別警報相当
宇宙システム運用	シングルイベント効果 衛星の誤動作・故障	プロトン現象 高エネルギー陽子 (10MeV以上)	低軌道	△	■	■	■
			中軌道		■	■	■
			静止軌道		■	■	■
			非地球周回		■	■	■
宇宙システム運用	トータルドーズ急増 衛星の半導体・材料の劣化	プロトン現象 高エネルギー陽子 (10MeV以上)	低軌道		■	■	■
			中軌道		■	■	■
			静止軌道		■	■	■
			非地球周回		■	■	■
社会的影響 (各軌道の影響は、軌道傾斜角によっても異なることに注意)			低軌道の南大西洋異常(SAA)でシングルイベント効果による衛星の誤動作が発生する一定のリスクがあります。	衛星運用への影響に注意してください。 ・低軌道, 中期道, 静止軌道, 月面で衛星の高エネルギー陽子起因のシングルイベント効果やトータルドーズ急増による、誤動作, 半導体・材料劣化, 故障の軽微なリスクがあります。	衛星運用への影響に警戒してください。 ・低軌道, 中期道, 静止軌道, 月面で衛星の高エネルギー陽子起因のシングルイベント効果やトータルドーズ急増による、誤動作, 半導体・材料劣化, 故障の警戒レベルのリスクがあります。	衛星運用への影響に最大限警戒してください。 ・低軌道, 中期道, 静止軌道, 月面で衛星の高エネルギー陽子起因のシングルイベント効果やトータルドーズ急増による、誤動作, 半導体・材料劣化, 故障の重大なリスクがあります。	
計測・予測可能な物理量			静止軌道の高エネルギー粒子	100PFU以下	100 - 1,000PFU	1,000-10,000PFU	10,000PFU以上
国外基準との関連性 (米国、英国等) NOAA S-scaleとの関連性				S2 100PFU infrequent single-event upsets possible	S3 1,000PFU single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely.	S4 10,000PFU may experience memory device problems and noise on imaging systems; star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded.	
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			運用ポリシーや運用スキームの設計、物理的な制約にも依存するため、具体化するには今後事業者へのヒアリングが必要である。				
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			<ul style="list-style-type: none"> <li>・現状、現象発生の予報は困難。現象発生直後の警報が現実的。</li> <li>・現象発生後、その現象がいつまで続くのかは、100MeV以上くらいのエネルギーの粒子であればシミュレーションなどで予測できる可能性はあるが、10MeVなどの低エネルギーの粒子では難しい。</li> </ul>				
その他			<ul style="list-style-type: none"> <li>・障害を起こす粒子のエネルギーは、10MeV以上で良いのか？ (被ばくなどは100MeV以上だけ見ていけば良い)</li> <li>・陽子だけで良いのか？ 重イオンや中性子は？</li> </ul>				

# 衛星運用分野の予警報基準

## 放射線帯電子

		 影響が無視できる	 衛星運用への軽微な影響の可能性	 衛星運用への影響の可能性	 衛星運用への深刻な影響の可能性		
* 今後の研究により変わりうるもの		■ システムに依存するもの		△ 障害というより「通常と異なる」もの			
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響				
			(領域・軌道)	Lv 1	Lv 2 (影響は想定範囲)	Lv 3 注意報相当	Lv 4 警報相当
宇宙システム運用	トータルドーズ増加 衛星の半導体・材料の劣化	放射線帯電子増大 高エネルギー電子(2MeV以上)	低軌道				
			中軌道				
			静止軌道				
			高度50,000 km以上	-	-	-	-
宇宙システム運用	深部帯電 (ESD) 衛星の誤動作・故障	放射線帯電子増大 高エネルギー電子(2MeV以上)	低軌道				
			中軌道				
			静止軌道				
			高度50,000 km以上	-	-	-	-
社会的影響 (各軌道の影響は、軌道傾斜角によっても異なることに注意)					宇宙システムへの影響に注意してください。 ・中期道と静止軌道で高エネルギー電子起因の深部帯電 (ESD) による、誤動作、故障の <b>警戒レベルのリスク</b> があります。低軌道の極域でも <b>注意レベルのリスク</b> があります。	宇宙システムへの影響に警戒してください。 ・中期道と静止軌道で高エネルギー電子起因の深部帯電 (ESD) による、誤動作、故障の <b>警戒レベルのリスク</b> があります。低軌道の極域でも <b>注意レベルのリスク</b> があります。	
計測・予測可能な物理量 (閾値)			静止軌道上のエネルギー2MeV以上の電子の24時間フルエンス	$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未満 (AE8MAXより少ない状態)	$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 $3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未満 (AE8MAX+50%の範囲内)	$3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 $3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未満 (AE8MAX+50%より多い状態) 0.01pA/cm <sup>2</sup> 相当	$3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 (AE8MAX+50%の10倍より多い状態) 0.1pA/cm <sup>2</sup> 相当 4500rads/day相当 (=190rad/hr)
発生頻度 (1996年から2016年までの統計)				60%	30%	10%	<1%
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			運用ポリシーや運用スキームの設計、物理的な制約にも依存するため、具体化するには今後事業者へのヒアリングが必要である。				
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 静止軌道の警報についてはGOESのリアルタイム計測に基づき、閾値を超えた場合は即時に警報を出すことが可能。</li> <li>・ ひまわり等の観測が実現すればGEO日本経度域の警報精度が上がる。</li> <li>・ 予報については現状では3日先まで算出可能。太陽風シミュレーションと結合することでさらに長いリードタイムの予報ができる可能性あり。</li> <li>・ GEOとMEOは必ずしも変動が同期していないため、MEOの観測や予測があれば警報精度が上がる。あらせ衛星のデータ・予測が利用できるとよい。</li> <li>・ GEOとLEOは必ずしも変動が同期していないため、LEOの観測があれば警報精度が上がる。POES, GOSAT/TEDAのデータが利用できるとよい。</li> <li>・ 高エネルギー電子によるトータルドーズは時間積分が効くため、もう少し長い月単位または年単位のフルエンスを警報基準とする方がよいかもわからない。(トータルドーズの急増はプロトン現象が原因)。</li> </ul>				
その他			・ AE8からマージンをどの程度考慮した設計としているかにより影響レベル (帯電量・ドーズレート) が異なる				




# 衛星運用分野の予警報基準

## 地磁気擾乱


影響が無視できる * 今後の研究により変わりうるもの		衛星運用への軽微な影響の可能性 ■ システムに依存するもの		衛星運用への影響の可能性 △ 障害というより「通常と異なる」もの		衛星運用への深刻な影響の可能性	
分野	影響と被害	障害を起し得る宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響				
			(領域・軌道)	Lv 1	Lv 2 (注意報相当)	Lv 3 (警報相当)	Lv 4 (特別警報相当)
宇宙システム運用	深部帯電 衛星の誤動作・故障	地磁気嵐・サブストーム サブストーム粒子	低軌道				■
			中軌道			*	*
			静止軌道			■	■
			(非地球周回)	-	-	-	-
宇宙システム運用	表面帯電 衛星の誤動作・故障	地磁気嵐・サブストーム サブストーム粒子	低軌道		■	■	■
			中軌道		*	*	*
			静止軌道		■	■	■
			(非地球周回)	-	-	-	-
宇宙システム運用	大気ドラッグの増加 衛星姿勢・軌道変化	地磁気嵐 大気密度増加	低軌道	(高度に依存)*	(高度に依存)	(高度に依存)	(高度に依存)
			中軌道	-	-	-	-
			静止軌道	-	-	-	-
			(非地球周回)	-	-	-	-
社会的影響 (各軌道の影響は、軌道傾斜角によっても異なることに注意)				衛星運用への影響に注意してください。 ・低軌道の極域と中軌道・静止軌道で衛星の帯電・放電による、誤動作・故障の軽微なリスクがあります。 ・低軌道で大気ドラッグ増加による衛星の姿勢変化や高度低下の軽微なリスクがあります。	衛星運用への影響に警戒してください。低軌道の極域と中軌道・静止軌道で衛星の帯電・放電により、誤動作・故障のリスクがあります。 低軌道で大気ドラッグ増加により衛星の姿勢変化や高度低下の警戒レベルのリスクがあります。	衛星運用への影響に最大限警戒してください。 ・低軌道の極域と静止軌道で衛星の帯電・放電による、誤動作・故障の重大なリスクがあります。 ・低軌道で大気ドラッグ増加による衛星の姿勢変化や高度低下の重大なリスクがあります。	
計測・予測可能な物理量			地磁気変動に基づく指標 (K指数) を予測	K≤4	K=5	K=6	K≥7
予報・警報の必要なタイミング (現況、1時間前、2-3日前、数日前等)			運用ポリシーや運用スキームの設計、物理的な制約にも依存するため、具体化するには今後事業者へのヒアリングが必要である。				
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題			<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星システムに対する宇宙環境の影響については、衛星システム毎の違いが大きく、かつ実際の影響事例の情報が十分に開示されていないため、定量化が難しい。今後、衛星製造事業者や衛星運用事業者と協力して影響事例の分析を行い、エビデンスに基づくレベル設定を実現することが必要である。</li> <li>低軌道や中軌道における影響と宇宙環境予測については、当面のターゲットとして今後取組を強化していく必要がある。月周回、月面、惑星間空間、火星周回軌道等の非地球周回の軌道・領域については、将来的な課題として検討していく必要がある。</li> <li>地磁気じょう乱予報の基準として、現在K指数を用いているが、Kp指数、AE、Dst指数等、グローバルな指数を追加、導入の検討や、表面帯電に直結するサブストーム粒子の予測に関して、新たな予測指標の導入の可否について今後検討する必要がある。</li> <li>現状、十分な精度で予報できるのは1時間前であるが、太陽フレア、コロナホール等上流側の状況を踏まえた早期予報・警報とその後の新たな情報（データ）に基づく予警報の更新の有り方について検討する必要がある。</li> </ul>				
その他			<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星システム等の設計を踏まえて宇宙環境変動に伴う具体的リスク評価を行うツール整備を進める必要がある（SECURESなど）。</li> <li>発出した予報・警報の有効利用に向け衛星製造事業者や衛星運用事業者との意見交換、情報交換を密にしていかなければならない。</li> <li>宇宙環境データの直接提供についても今後検討が必要である。</li> </ul>				

# 各分野の予警報基準まとめ

- 5分野で17個の予警報の種類を策定し、うち12個について各基準の閾値を決定した。残りの5つの閾値については今後の検討課題とした。

		 影響が無視できる範囲	 影響の可能性があり 適切な対応を要する範囲	 深刻な影響の可能性があり 運用の継続が困難になる範囲													
		* 今後の研究により変わらうもの				■ システムに依存するもの				△ 障害というより「通常と異なる」もの				※ 各Lvに記載の物理量は閾値			
分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気 現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響														
			(領域・軌道)	Lv 1	Lv 2	Lv 3											
通信・放送	UHF帯（衛星通信） 電波減衰、シンチレーション	プラズマバブル					ROTI, S4等 ※検討課題		ROTI, S4等 ※検討課題	①							
	VHF帯 回線品質劣化（電波強度減衰）	スボラディックE層					foEs ※検討課題		foEs ※検討課題	②							
	HF帯 電波強度減衰	極冠吸収					プロトン(10MeV以上) 1000PFU以上		プロトン(10MeV以上) 10000PFU以上	③							
	HF帯 電波強度減衰	デリンジャー現象					X1フレア発生		X10フレア発生	④							
	HF帯 利用可能な周波数帯が縮小	電離圏嵐（負相）					MUF30%減		MUF50%減	⑤							
測位	一周波コード相対 測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シンチレーション（TID・プラスマバブル等）					TEC空間勾配・S4等 ※検討課題		TEC空間勾配・S4等 ※検討課題	⑥							
	二周波精密相対 測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シンチレーション（TID・プラスマバブルなど）					TEC空間勾配・S4等 ※検討課題		TEC空間勾配・S4等 ※検討課題	⑦							
	二周波位相単独 測位不可あるいは精度低下	電離圏遅延空間勾配・シンチレーション（TID・プラスマバブルなど）					TEC空間勾配・S4等 ※検討課題		TEC空間勾配・S4等 ※検討課題	⑧							
電力	地磁気誘導電流（GIC） → 変圧器損傷	地磁気の長時間変動 （磁気嵐主相）					GIC 100A/3相 ※暫定値		GIC 225A/3相 ※暫定値	⑨							
航空機人体被ばく	被ばく線量増加	太陽高エネルギー粒子					30μSv/h@150-460FL		80μSv/h@150-600FL	⑩							

# 各分野の予警報基準まとめ

		 影響が無視できる範囲	 軽微な影響の可能性	 影響の可能性	 深刻な影響の可能性				
* 今後の研究により変わりうるもの		■ システムに依存するもの		△ 障害というより「通常と異なる」もの		※各Lvに記載の物理量は閾値			
分野	影響と被害	障害を起こし得る 宇宙天気現象・物理量	社会的影響発生頻度と影響						
			(領域・軌道)	Lv 1 K≤4	Lv 2 (注意報相当) K=5	Lv 3 (警報相当) K=6	Lv 4 (特別警報相当) K≥7		
宇宙システム 運用	深部帯電 衛星の誤動作・故障	地磁気嵐・サブス トーム サブストーム粒子	低軌道				■	⑪	
			中軌道			*	*	⑪	
			静止軌道				■	■	⑪
			(非地球周回)	-	-	-	-	-	⑪
	表面帯電 衛星の誤動作・故障		低軌道		■	*	*	■	⑫
			中軌道			*	*	*	⑫
			静止軌道			■	■	■	⑫
			(非地球周回)	-	-	-	-	-	⑫
	大気ドラッグの増加 衛星姿勢・軌道変化		低軌道	(高度に依存)*	(高度に依存)	(高度に依存)	(高度に依存)	(高度に依存)	⑬
			中軌道	-	-	-	-	-	⑬
		静止軌道	-	-	-	-	-	⑬	
		(非地球周回)	-	-	-	-	-	⑬	
	トータルドーズ増加 衛星の半導体・材料の劣 化	放射線帯電子増大 高エネルギー電子 (2MeV以上)	低軌道	$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未 満	$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 $3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未 満	$3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上 $3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未 満	$3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上	⑭	
			中軌道				*	⑭	
			静止軌道				*	⑭	
			高度50,000 km以上	-	-	-	-	-	⑭
	深部帯電 (ESD) 衛星の誤動作・故障		低軌道				*	*	⑮
中軌道						*	*	⑮	
静止軌道						■	■	⑮	
高度50,000 km以上			-	-	-	-	-	⑮	
シングルイベント効果 衛星の誤動作・故障	プロトン現象 高エネルギー陽子 (10MeV以上)		低軌道	100PFU以下	100-1,000PFU	1,000-10,000PFU	10,000PFU以上	△	⑯
			中軌道		■	■	■	■	⑯
		静止軌道		■	■	■	■	⑯	
		非地球周回		■	■	■	■	⑯	
トータルドーズ急増 衛星の半導体・材料の劣 化		低軌道		■	■	■	■	⑰	
		中軌道		■	■	■	■	⑰	
		静止軌道		■	■	■	■	⑰	
		非地球周回		■	■	■	■	⑰	

# 閾値更新への課題

- 測位分野や衛星運用分野においては、影響が個々のシステムごとの違いに大きく依存し、かつ実際の影響事例の情報が十分に開示されていない、あるいは歴史が浅いために経験そのものがないこともあり、定量化が難しい。宇宙天気情報提供者と事業者・利用者が協力して影響事例や関連分野を含めたメカニズム・モデルの分析を行い、エビデンスに基づくレベル設定を実現することが必要である。
- 通信・放送分野において検討課題となっている閾値決定については、電離圏擾乱現象の発生状況と社会影響との関連の調査、統計分析等が必要である。今年度内に暫定値を導出することを目標とする。
- 測位分野において検討課題となっている閾値のうち、二周波精密相対測位（RTKなど）については、現時点で利用可能な長期間の測位データと特定のアルゴリズムを用いた解析を実施し、今年度内に暫定値を導出することを目標とする。
- 航空機乗員被ばく分野においては、線量計測データが極めて少なく、線量率の検証が不十分である。航空会社等と協力して、航空機に線量計を載せて線量を計測できるようにすることが必要である。
- 電力分野においては、電力分野の事業者からのデータ提供等主体的な協力を得つつ、産学官が連携して調査研究を進めることでGIC基準値の精緻化を目指す。また、GICを流しうるGIE、地磁気変動の閾値は最新研究により推定可能であるが、フレア/CMEの閾値は検討が必要である。

# 予警報の実装への課題

- ある1つの宇宙天気現象でも、その社会的影響は対象分野によって異なり、各分野毎に発出される予警報のレベルも異なることが想定される。各分野で予警報のレベルに応じた適切な対応ができるよう、Lv1（影響が無視できる範囲）も含めた情報提供が必要である。
- 宇宙天気の影響の予測可能なタイミングとしては、例えばCMEの影響を受けるものについては、太陽フレア観測時（2～3日前）、DSCOVR衛星観測時（1時間前）、実影響発生時（電離圏・磁気圏観測時）であるが、その精度は影響の発生間近にならないと良くならない。太陽フレア、コロナホール等上流側の状況を踏まえた早期予報・警報とその後の新たな情報（データ）に基づく予警報の更新の有り方について検討する必要がある。
- 社会的影響の大きさも考慮した予報・警報の精度向上のため、宇宙天気現象に対して実際に利用者側に生じた誤動作、混信、不具合等の情報を宇宙天気情報提供者側と共有できる仕組みが必要である。
- また、発出した予報・警報の有効利用に向け、宇宙天気情報の提供者と利用者による意見交換及び情報交換を密にしていく必要がある。
- 宇宙天気情報利用者の技術の高度化やニーズの変化等に合わせ、基準の閾値を臨機応変に見直していくべきであり、産学官連携して共同で調査研究を行いつつ改定案の検討を行う持続的な体制が必要である。

# まとめ

- 本WGでは、宇宙天気予報の利用者が具体的な対応を判断するための社会的影響の大きさも考慮した新たな予警報の種類及び閾値について、検討を行った。
- 検討する予警報の対象分野は、通信・放送、測位、衛星運用、電力、航空機人体被ばくの5分野とし、各分野毎の会合を含めて計20回の会合を実施し、PSTEP報告書や米国・英国等の国外の宇宙天気戦略文書等も参考に、検討を進めた。
- 5分野で17個の予警報基準を策定し、下記12個の予警報について閾値を決定した。
  - 通信・放送分野：HF帯（極冠吸収）、HF帯（デリンジャー現象）、HF帯（電離圏負相嵐）
  - 衛星運用分野：深部帯電（地磁気擾乱）、表面帯電（地磁気擾乱）、大気ドラッグの増加（地磁気擾乱）、トータルドーズ増加（放射線帯電子）、深部帯電（放射線帯電子）、シングルイベント効果（プロトン現象）、トータルドーズ急増（プロトン現象）
  - 電力分野：地磁気誘導電流 (GIC)（暫定値）
  - 航空機人体被ばく分野：被ばく線量増加
- 残りの5個の予警報（通信・放送分野、測位分野）の閾値決定のためには、宇宙天気現象と影響の関係について詳細な調査や解析が必要であり、今後の検討課題とした。
- 検討課題である閾値の決定や策定した閾値の将来の見直しについては、宇宙天気情報の提供者と利用者が密に連携し、共同で調査研究や検討を行う持続的な体制が必要である。
- 想定される最悪シナリオについては引き続き検討する。