

2022年3月25日

宇宙天気予報の高度化の在り方  
に関する検討会（第6回）

# 宇宙天気の警報基準に関するWG 中間報告

宇宙天気の警報基準に関するWG  
津川 卓也（NICT）、WGメンバー

# WG設置の背景・理由、検討事項、スケジュール

## 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」

## スケジュール

- 全体会合：第1回 1/24、第2回 3/17、第3回 4月第1-2週を予定
- 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
- 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

# WGメンバー

## 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
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
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	
玉置 晋	宇宙技術開発株式会社	
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。

# 新たな基準の検討方法

## 新たな基準の検討方法

- 【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。
- 【検討方法】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。

# 測位分野の検討状況

## 検討状況

- 測位手法は多岐にわたり、宇宙天気現象の影響は手法により異なる。また、ユーザーにより利用する手法や目的が様々。
- 利用手法や性能水準について、「リアルタイム測位推進協議会」等の5団体に参加する事業者へアンケート調査を実施、19社から回答。

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
測位利用	測位精度の劣化	電離圏正相嵐			
		プラズマバブル			
		オーロラ領域における電子局所構造の高速移動			
航空運用	測位精度の劣化	電離圏正相嵐	*	*	*
		プラズマバブル	*	*	*
		オーロラ領域における電子局所構造の高速移動	*	*	*

PSTEP報告書

電離圏擾乱現象と影響を受けるGNSS測位 [太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック, <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/pstep/news/20210806.html> ]

アンケート調査結果 (18社回答分)

宇宙天気の効果		電離圏全電子数				電離圏不規則構造		測位サービス (回答延べ社数)	
		電離圏遅延		電離圏遅延空間勾配		強度シフト	位相シフト		
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	
一周波	単独	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	QZSS-PNT等 1社
	相対			✓	✓	✓	✓	✓	SLAS/SBAS等 DGNSS 10社
一周波 (精密)	相対 (位相)			✓	✓	✓	✓	✓	
	単独 (PPP)			✓	✓	✓	✓	✓	PPP等 5社
二周波	単独						✓	✓	QZSS-PNT等 1社
	相対					✓	✓	✓	
二周波 (精密)	相対 (位相)			✓	✓	✓	✓	✓	RTK, スタティック等 14社
	単独 (PPP)			✓	✓	✓	✓	✓	CLAS等 7社

「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

- 提供サービス名
- エンドユーザーの業種
- 測位手法
- 性能水準 (精度要件・安全性・継続性・アベイラビリティなど)
- 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
- 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

# 測位分野の検討状況

- アンケート調査の結果、二周波の精密測位（RTK, CLAS）および一周波相対（SLAS等）手法を用いたユーザーが多いことがわかった。
- ユーザーが多い主要な手法について、性能水準や宇宙天気影響等アンケート回答に基づき、予警報必要性やその出し方、最悪シナリオについて検討中。

## 今後の見通し

- 予警報を発出する基準としては、電離圏遅延量・遅延量の空間勾配・シンチレーション指数となる見込み。
- 主要な手法について必要とされる予警報、閾値を決めるにあたり、定量的な閾値を決めるために更なる調査・解析が必要なものについては課題をまとめる。

# 通信・放送分野の検討状況

## 検討状況

- PSTEP報告書をベースとして、警報の種類・閾値と社会的影響について検討を進めた。
- 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。
- 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。

## 今後の見通し

- PSTEP報告書や国際戦略文書等も踏まえ警報閾値と社会影響について具体的な数値を決定。
- 事業者ヒアリング（アンケート）を実施。

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検討中

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

# 航空機人体被ばく分野の検討状況

## 検討状況

- 実運用されているICAO宇宙天気センターにおけるアドバイザリの基準をベースに検討。
- ICAOアドバイザリは、地理緯度30度毎の6つ緯度帯で南北対称とし、同一緯度帯はすべての経度における最悪値で統一される。
- 日本の中緯度帯は、磁気緯度の高い北米の影響で、日本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る。そのため、日本地域に特化した情報を出すことを検討。
- PSTEP報告書の過去最悪規模イベントシナリオを検証。

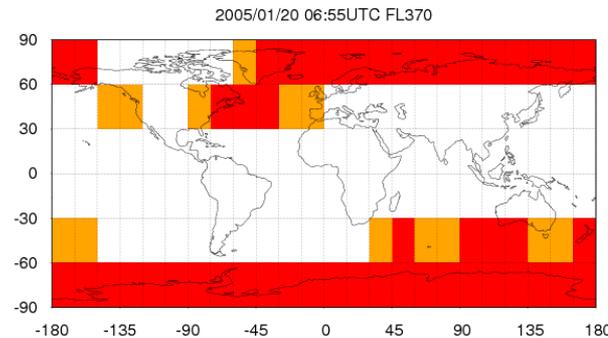
## 今後の見通し

- 最悪イベントについては、線量率のICAO基準を超える領域が低緯度のどこまで広がるかについても計算し、基準を超える高度の等高線を世界地図に示す。
- ユーザーへのヒアリングを予定。

ICAOアドバイザリ基準

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

Severe 80 $\mu$ Sv/h : 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)。Moderateはその1/3程度。



ICAOアドバイザリに利用される被ばく線量マップ

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]

# 衛星運用分野の検討状況

## 検討状況

- PSTEP報告書の衛星運用への影響は、「静止軌道」の「衛星帯電」に限定されており、かつ、影響の度合は衛星個々の設計・材質に依存すると共に、不具合（具体的な影響）に関する情報が乏しいため、統計的判断も困難。
- 上記を踏まえ、新たに警報の種類と範囲の見直しを行う。
  - 既存の予報基準に、衛星運用における具体的リスクをマッピング
  - 影響範囲を軌道で分類（LEO、MEO、GEO、月・火星）
  - 宇宙天気現象の種類とその影響範囲と不具合の種類のマトリックス作成
- 衛星製造事業者、衛星運用事業者（7機関）にヒアリングを行い、現状を把握。

宇宙天気現象の影響領域と不具合のマトリックス（案）

#青色は短期的な変動はない現象

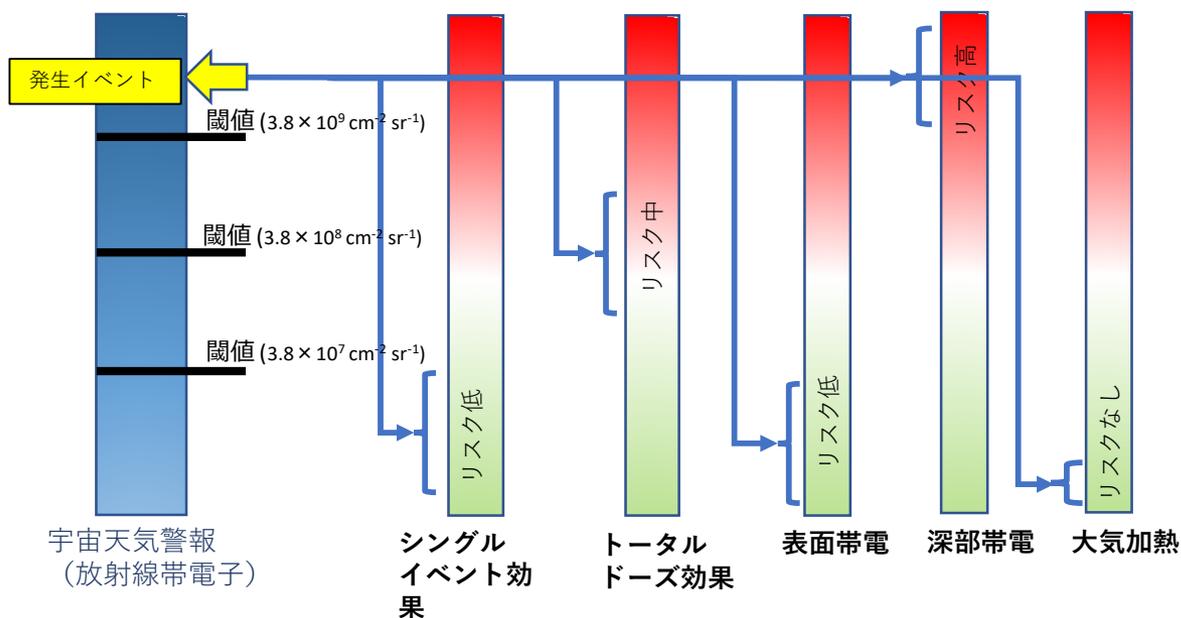
	LEO Low Earth Orbit (alt. < 数1,000 km)	MEO Medium Earth Orbit (数1,000 km < alt. < 約36,000 km)	GEO Geostationary Orbit (約 36,000 km)	月・火星 磁気圏外
シングル イベント効果	●太陽プロトン 放射線帯プロトン@SAA 銀河宇宙線	●太陽プロトン 銀河宇宙線	●太陽プロトン 銀河宇宙線	●太陽プロトン 銀河宇宙線
トータル ドーズ効果	●太陽プロトン ◆放射線帯電子 放射線帯プロトン@SAA	●太陽プロトン ◆放射線帯電子	●太陽プロトン ◆放射線帯電子	●太陽プロトン
深部帯電	(◆放射線帯電子) (▲地磁気嵐)	◆放射線帯粒子電子	◆放射線帯電子 (▲地磁気嵐)	不明 (太陽高エネルギー 電子?)
表面帯電	▲地磁気嵐	-	▲地磁気嵐	不明 (CME?)
大気加熱	▲地磁気嵐	-	-	-

# 衛星運用分野の検討状況

## 今後の見通し

- 事業者ヒアリングをとりまとめ、衛星製造事業者や衛星運用事業者の現状を整理
- 既存の予報基準をベースとした各軌道における衛星運用における具体的リスクのマッピングの現状版を作成
- 現時点で対応が難しいものについては、今後の課題として整理

放射線帯電子の影響（不具合の種類別）  
（例：GEO）



シングルイベント効果の閾値（案）

太陽プロトン (>10 MeV) GCR+SAA含む	LEO	MEO	GEO	月・火星
1000 PFU以上	Red	Red	Red	Red
100 PFU以上	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
10 PFU以上	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
No Event	Yellow	Green	Green	Green

設計想定されている **最悪条件** 相当  
運用で想定されている **警戒条件** 相当

# 電力分野の検討状況

## 検討状況

- PSTEP等国内のこれまでの取組を踏まえ、地磁気誘導電流（GIC）警報を検討。
- 国外では米国Benchmark、英国ではキャリントン級想定の取組み等あるが、磁気緯度等の違いにより警戒すべき現象規模（数値）は日本に合わせて検討。
- 上流の現象としては地磁気擾乱、それを引き起こす太陽風変動。日本で影響が出るような大規模現象を起こすのはフレアに伴うCMEと考えられ、これにターゲットを絞る。
- 長時間変動(磁気嵐主相)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。  
なお、地磁気の短時間変動(磁気嵐初相)により商用周波数の高調波の影響も懸念、今後の検討。

## PSTEP報告書の整理 + WGでの議論

\* : Tsubouchi & Omura 2007, \*\*Love+2015, \*\*\*Ebihara+2021

分野	影響と被害	障害を起こし得る宇宙天気現象	発生頻度と影響					
			日常～複数回/年	1回/1年	1回/10年～	1回/100年～	1回/1000年	
電力	トランス劣化… …停電	地磁気誘導電流 (GIC) 地磁気擾乱/磁気嵐/Dst指数 (←CME←フレア)					*	
より上流側の物理量(CME、フレア)			調査課題					
【PSTEP報告書】物理量に基づく閾値： Dst指数 [nT]			～200	220*	-450 ± 30 ** -650 ± 110** 2003/10イベント：-383 1989イベント：-589	-930 95%信頼区間[-320, -1520]* 【キャリントン級以上】 1859イベント：推定最大- 1700、ボンベイ-1600 2012イベント(裏側)：推 定-1182	K指数は最大のK=9で300nT 相当であるのでそれ以上の現 象を表現できない。	
【PSTEP報告書】物理量に基づく閾値： 地磁気誘導電流GIC [A]			3.85A (Dst- 162 2006/12 北海道)	30 2001/11：変 電所A42A (Dst-292)	65 ± 5 95 ± 15 2003/10：変電所A129A (Dst- 383) ※短時間変動で発生 1989イベント推定*** GIE(柿岡)0.38 [V/km] GIC(三地点最大)16.7A	135 95%信頼区間[45, 225]* 1859イベント推定*** GIE(柿岡)2.0 ± 0.4 [V/km] GIC(三地点最大)89 ± 30	[Kappenman, 2004]による中 部電力の計測に基づいた推定 値。但し、日本は海岸効果等 で場所により値が大きく異な る可能性有。PSTEPでは磁気 嵐初相の短時間変動は未検討。	
【PSTEP報告書】社会的影響の評価根拠			上記例で異常確 認されず。	上記例で異常 確認されず。	上記例で異常確認されず。	事業者様と検討	事業者様と検討	現在のシステムではどうか？ NERC基準(3相225A)ではどう か？

# 電力分野の検討状況

予警報発出のタイミングと閾値 (作成中)

警報種類	事例	>0.5-1日前	約0.5-1日前	10~30分前	現在1	現在2	現在3
		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	地磁気 dH@日本	地電場 ※事業者様の警戒値確認 ※まずは全国一様として柿岡地 電場を目安とする。	GIC ※事業者様の警戒値確認
		← フレア/CME～dH@日本の関係			dH@日本～地電場(柿岡)/GICの関係 →		
 	長時間変動 1859年 1872年 1921年 短時間変動 1940年 #反対側2012年		右記GIE/GIC を起こしう るフレアの クラス※	右記GIE/GIC を起こしう る太陽風※	長時間変：1200nT [*2] #1859年,1921年に発生 (#1872年に上回る規模の事象発生した 可能性) 短時間変動：230nT [*2] #1940/03に発生	GIE~1V/km [*3]	225A [*4]
	長時間変動 1989年 2003年 短時間変動 2003年				長時間変：500-600nT [*2] #1989年,2003年に発生 短時間変動：100nT [*2]	GIE~0.5V/km [*3]	(仮に100Aとする) [*4]

[\*1] 警報：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、注意報：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の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亘解析、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]

- ・ リードタイムは長い方が良いことから、基準はフレア/CME発生有無
- ・ NERC基準225A、それを起こしうるGIE、地磁気擾乱、フレア/CMEレベルの閾値を検討中。

## 今後の見通し

- ・ 電力事業者様のご意見等を伺い、予警報案の見直し。
- ・ 閾値の高精度化を進める(※多分野にまたがる研究や取組が必要)。

# WG報告書骨子(案)

## WG報告書骨子 (案)

- WG概要（目的、設置、スケジュール、メンバー、検討方法等）
- 各分野の検討概要  
（通信・放送、測位、衛星運用、電力、航空機人体被ばく）
  - 背景（検討のベース、国際関係、、）
  - 実施方法（アンケート調査、、）
  - 社会的影響指標マトリクス
- 想定される最悪シナリオ
- まとめと今後の課題
  - マトリクスまとめ
  - 新基準実装に向けた課題
  - 継続的な情報更新・共有の仕組み

# WG報告書骨子(案)

- 社会的影響指標マトリクス（案）：各分野×システム毎に1枚

		評価できず		影響が無視できる範囲		バックアップの準備等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	
		* 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 (通常)	Lv 2 注意報	Lv 3 警報				
電力	停電 (送電線の過電流)	地磁気誘導電流 (GIC)							
社会的影響									
計測・予測可能な物理量									
国外基準との関連性（米国、英国等）									
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）									
予報・警報実現性、閾値情報更新への課題									
その他									

例：電力分野