

情報通信研究機構における 定常業務の取組

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)

宇宙天気予報グループ

グループリーダー 久保勇樹

機構法第14条第1項4号

電波の伝わり方について、観測を行い、予報及び異常に関する警報を送信し、並びにその他の通報をすること → 宇宙天気予報業務

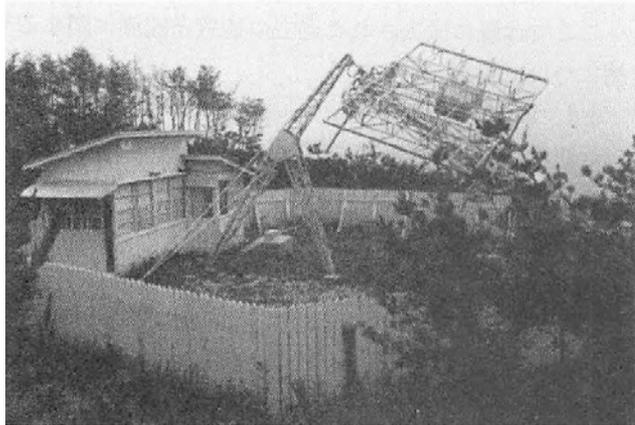
電波法第103条の2第4項6号

電波の伝わり方について、観測を行い、予報及び異常に関する警報を送信し、並びにその他の通報をする事務並びに当該事務に関連して必要な技術の調査、研究及び開発を行う事務 → 電波利用料財源

宇宙天気予報を定常業務として実施しているのは総務省（NICT）のみ

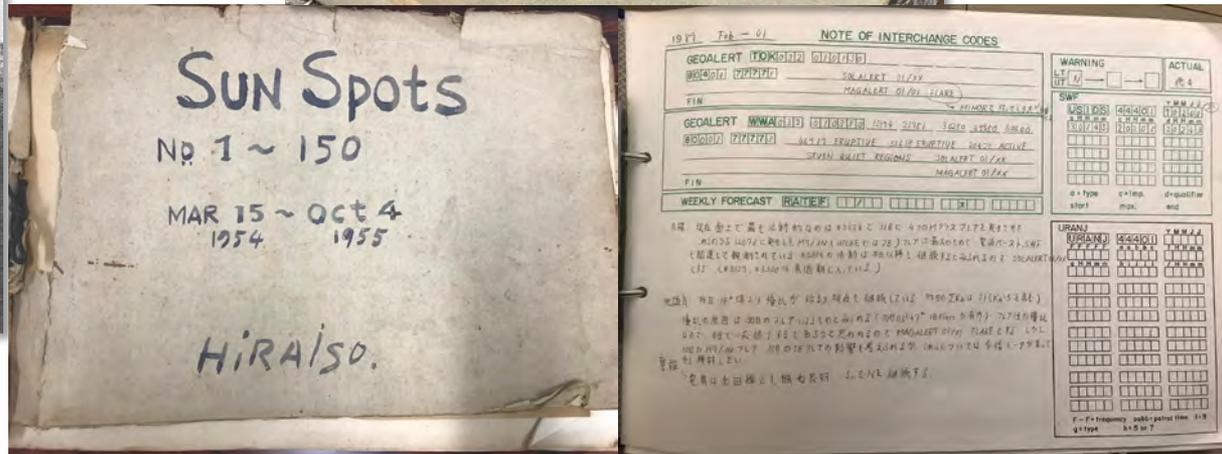
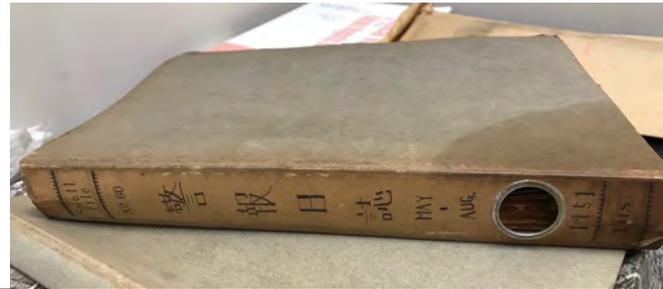
宇宙天気予報業務 (1950年代～)

- 1940年代後半から1950年代前半、郵政省電波研究所において、短波通信障害を事前に利用者に知らせるため、「電波伝搬警報」の発信を開始
 - 1932年、電離層観測開始
 - 1952年、太陽電波観測開始



平磯における200MHz太陽電波観測(1952)

Isobe & Yamashita (1994)



1950年代の短波伝搬警報の記録

宇宙天気予報業務 (1988～)

- 電波伝搬警報が宇宙天気予報に発展
- 年間365日、休まず宇宙天気予報を発信
- 予報情報は国際宇宙環境サービス(ISES)加盟各国とウルシグラムコードを用いて交換
 - ISES: 宇宙天気予報を発信している運用機関の組織

国際宇宙環境サービス(ISES)。現在、21ヶ国が加盟している

1990年頃の宇宙天気予報会議



現在の宇宙天気予報

- 日報：2回/日
- 週報：1回/週
- 臨時情報：随時
- イベント自動通報：随時



日勤夜勤の引継ぎ

運用日	365日
運用時間	24時間
日報	00:00-01:00UTC 12:00-13:00UTC
週報	12:00-13:00UTC（金曜日）
臨時情報	イベント発生時（24時間）
イベント自動通報	イベント発生時（24時間）
ウェブサイト予報更新	06:00-07:00UTC

宇宙天気予報の内容

- 以下の7種類の予報を発信

- 太陽フレア
- プロトン現象
- 地磁気擾乱
- 放射線帯電子
- 電離圏嵐
- デリンジャー現象
- スポラディックE層

swc.nict.go.jp



予報

2021/10/30 15:00 JST ~ 2021/10/31 14:59 JST

太陽フレア	プロトン現象	地磁気擾乱	放射線帯電子	電離圏嵐	アウロラ現象	※フラッシュE層
▲活発 Lv.3	▲継続 Lv.3	▲非常に活発 Lv.4	静穏 Lv.1	活発 Lv.2	%やや高い Lv.2	▲活発 Lv.3

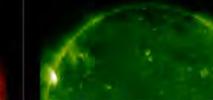
概況・予報

2021/10/30 09:00 JST 更新

太陽活動は活発でした。引き続き今後1日間、太陽活動は活発な状態が予想されます。地磁気活動は静穏でした。今後1日間、地磁気活動は非常に活発な状態が予想されます。28日19時0分UTに発令したプロトン現象の臨時警報は、現在も継続中です。

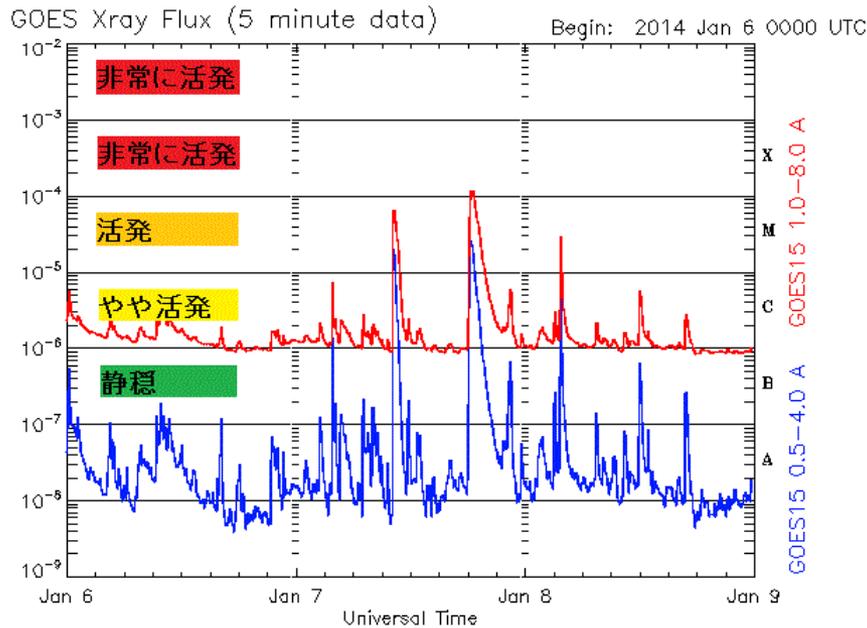
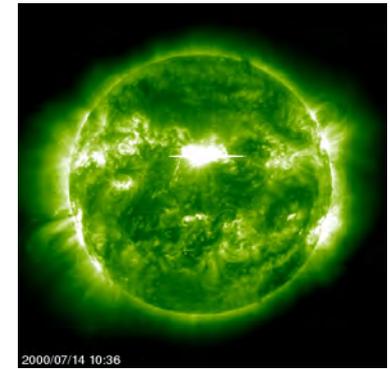
詳しくはこちら ▶

現在の太陽

黒点 (光球)	プロミネンス (彩層)	フレア (コロナ)
		

太陽フレア予報

予報	フレアの規模	最大X線量	code
静穏	A or B クラス	10^{-6} W m ⁻² 未満	0
やや活発	C クラス	$10^{-6} \sim 10^{-5}$ W m ⁻²	1
活発	M クラス	$10^{-5} \sim 10^{-4}$ W m ⁻²	2
非常に活発	X クラス	10^{-4} W m ⁻² 以上	3



Updated 2014 Jan 8 23:55:11 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

- 1) 24時間以内に発生が期待される最大フレアのクラスの予報
- 2) 4クラスの**決定論的予報**

観測 (code)	3	0	19	82	29
	2	23	379	495	43
	1	335	1554	453	11
	0	1979	419	21	2
# of days	0	1	2	3	
	予報 (code)				

2000年～2015年のデータによる評価

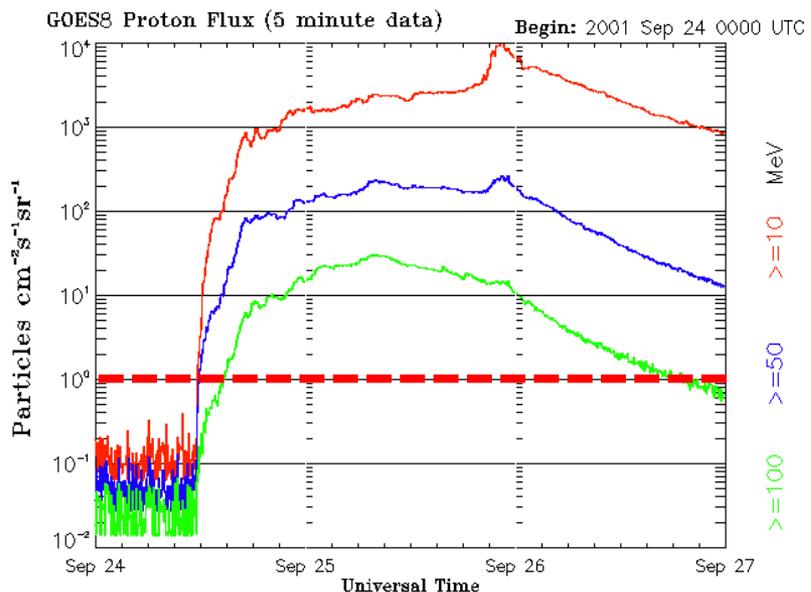
プロトン現象予報

太陽プロトン

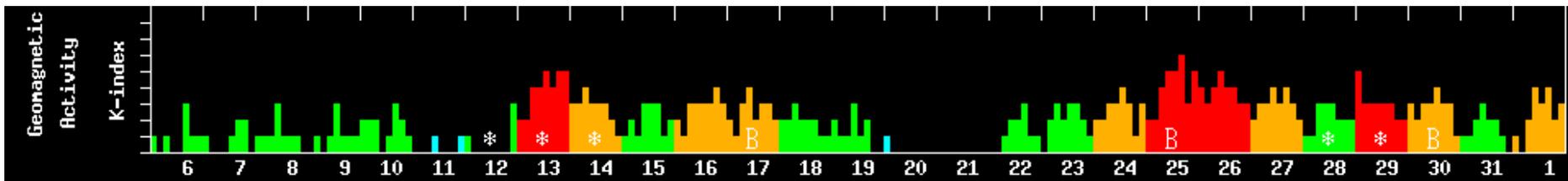
- 太陽フレア等に伴い放出される高エネルギーの粒子。
- この粒子が人工衛星にぶつかる時、**人工衛星の電子機器などのビット反転などを起こし衛星の誤動作につながる**
- 非常にエネルギーの高い粒子は、地球大気にまで到達し、**航空機などの被ばくを引き起こす**

予報	太陽プロトン粒子量
静穏	10MeV以上の粒子数が、 $10 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 未満
警戒	10MeV以上の粒子数が、上昇する
継続	10MeV以上の粒子数が、 $10 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 以上

- 1) 現況情報という意味合いが大きい
- 2) 現象の判断は10MeV以上の粒子（赤線）が閾値を超えたかどうかで決まる
- 3) これらは、米国の気象衛星GOESが観測したデータに基づいているが
- 4) 日本独自に観測があるとより良い。



地磁気擾乱予報



予報	最大K指数	code
静穏	$K \leq 3$	0
やや活発	$K = 4$	1
活発	$K = 5$	2
非常に活発	$K = 6$	3
猛烈に活発	$K \geq 7$	4

- 24時間以内に期待される最大K指数の予報
- 5クラスの**決定論的予報**
- K指数は、気象庁地磁気観測所(柿岡)の情報による(Kp指数ではない)
- 地磁気観測は気象庁の所掌であり、現況把握は気象庁のK指数を利用、**予報はNICT**が行う

観測 (code)	4	3	6	10	10	6
	3	18	33	29	11	3
	2	96	184	72	13	3
	1	424	469	85	8	0
	0	3651	666	39	4	0
# of days	0	1	2	3	4	
	予報 (code)					

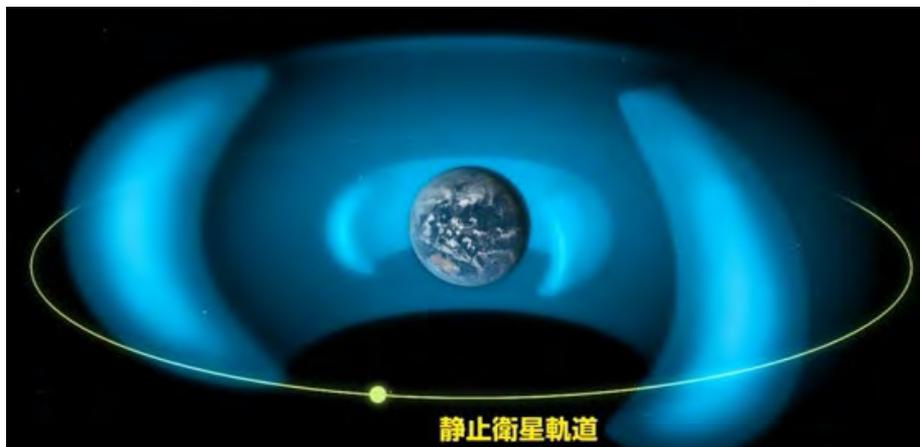
2000年～2015年のデータによる評価

放射線帯電子予報

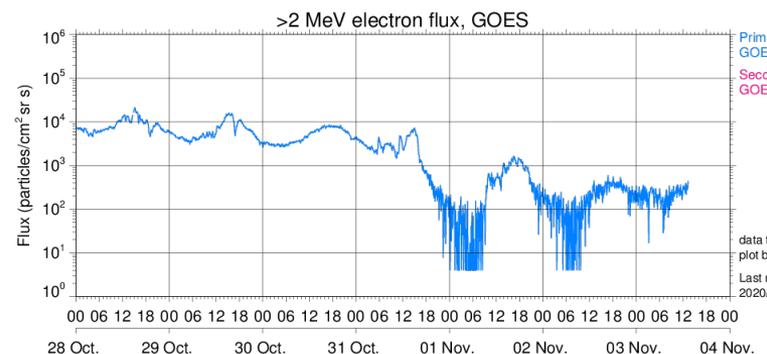
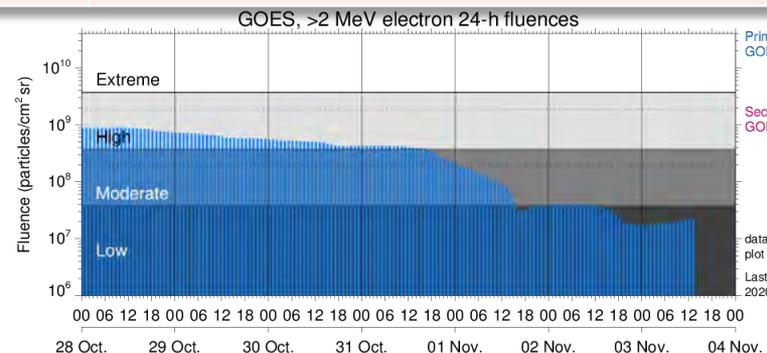
放射線帯

- 地球を取り囲んでいる高エネルギーの電子がたまっている場所
- この電子により人工衛星が帯電し、それが放電すると衛星障害につながる

予報	24時間電子フルエンス (>2MeV)
静穏	$3.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 未満
やや高い	$3.8 \times 10^7 \sim 3.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
高い	$3.8 \times 10^8 \sim 3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
非常に高い	$3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ 以上

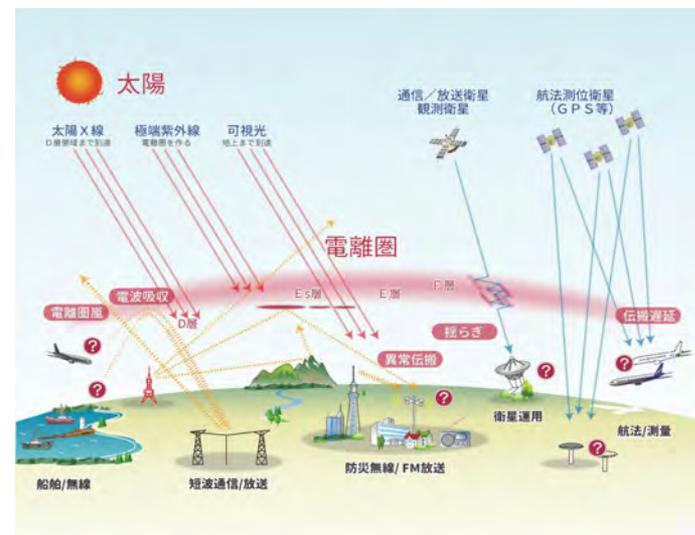
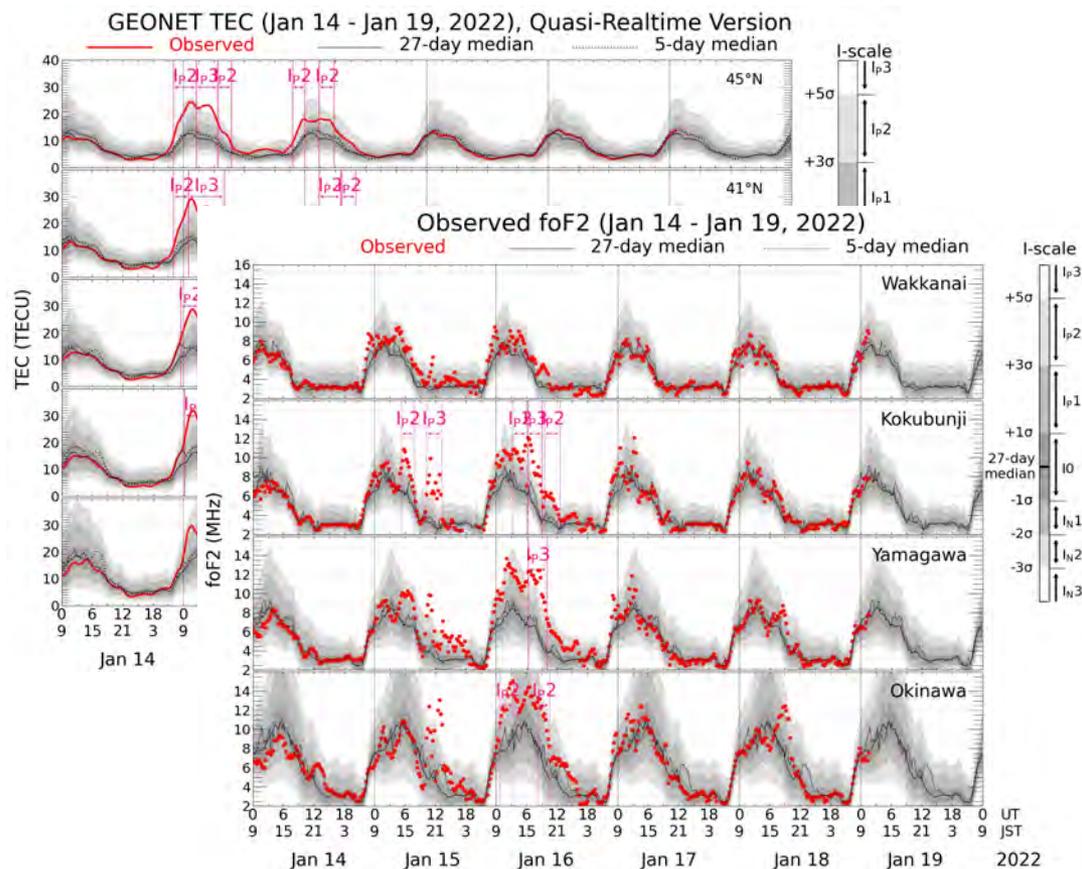


- 1) 24時間後の電子フルエンス量の予報
- 2) 4クラスの**決定論的予報**
- 3) 24時間電子フルエンスとは電子フラックスの24時間の積算量
- 4) これらは、米国の気象衛星GOESが観測したデータに基づいている
- 5) 日本独自に観測があるとより良い



● 電離圏

- 地球大気上層の、高度約60kmから1000km以上にわたって存在する電離した大気
- 電離圏が乱れると、**無線通信障害や衛星測位誤差の増大につながる**



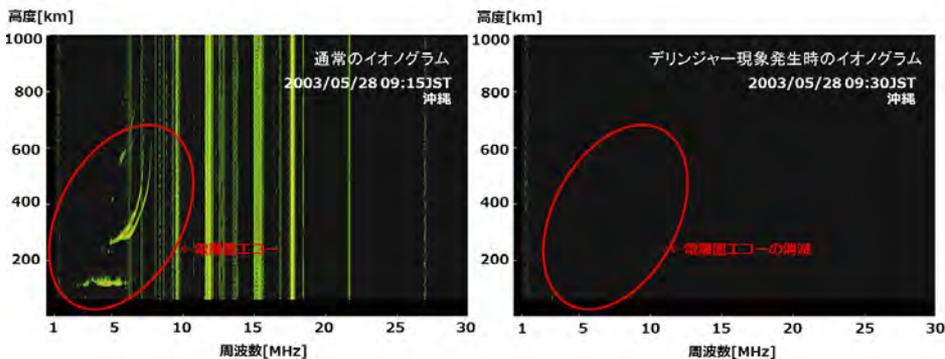
予報	I-scale
静穏	I_0, I_{p1}, I_{N1}
活発	I_{p2}, I_{N2}
非常に活発	I_{p3}, I_{N3}

- 1) 24時間以内に発生が予測される最大レベル
- 2) 3クラスの**決定論的予報**
- 3) I-scaleはNICT発の電離圏擾乱の基準

デリンジャー現象、スプラディックE層 *NICT*

● デリンジャー現象

- 太陽フレアに伴い電離圏下部が異常電離し、そこを通過する短波帯の電波が吸収されてしまう現象

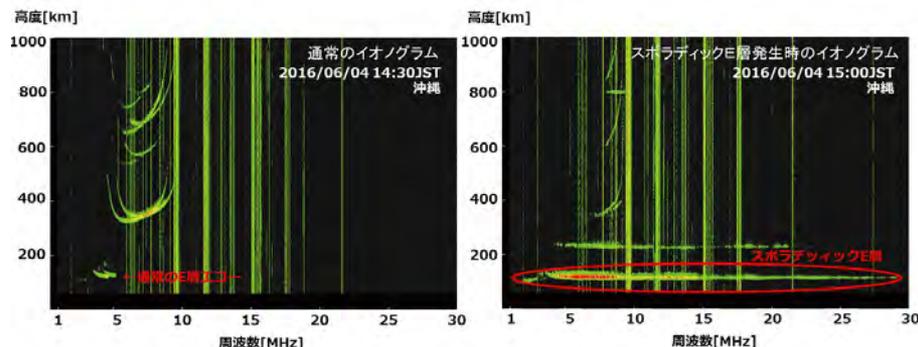


予報	確率
静穏	30%未満
やや高い	30-50%
高い	50%以上

- 1) 24時間以内に発生する確率
- 2) 3クラスの確率予報
- 3) フレア予報と連動している

● スプラディックE層

- 高度約100kmに局所的かつ突発的に発生する現象で、通常は電離圏で反射されないFM放送などのVHF帯の電波が反射されて異常伝搬し、混信が発生することがある



予報	周波数
静穏	Es層臨界周波数が8 MHz未満
活発	Es層臨界周波数が8 MHz以上

- 1) 24時間以内に発生が予測される最大周波数
- 2) 2クラスの決定論的予報
- 3) 予報というより現況情報という意味合いが強い

臨時情報(手動配信)

- 太陽フレア
 - Mクラス以上で継続時間が長いフレア発生時
 - Xクラス発生時
- CME
 - 上記フレアに伴いFull-halo CME(地球への影響が確実視される)が発生した時
- プロトン現象
 - プロトン現象発生時(10, 100, 1,000, 10,000PFU)
- 地磁気嵐
 - 地磁気嵐発生時(気象庁地磁気観測所による判断)
- 放射線帯電子
 - 高いレベル、非常に高いレベル到達時

イベント自動通報

- 太陽フレア
 - Mクラス以上発生時
- プロトン現象
 - プロトン現象発生時(10, 100, 1,000, 10,000PFU)
- 放射線帯電子
 - 高いレベル、非常に高いレベル到達時

予報精度の評価

発信した予報と実際の観測結果を基に、統計的に予報精度を評価する

2000年～2015年のデータによる評価

太陽フレア

観測 (code)	3	0	19	82	29
	2	23	379	495	43
	1	335	1554	453	11
	0	1979	419	21	2
# of days	0	1	2	3	
	予報 (code)				

GMGS～0.477 [0.451, 0.506]
 相関係数～0.717 [0.703, 0.730]
 正答率～0.694 [0.683, 0.707]

地磁気擾乱

観測 (code)	4	3	6	10	10	6
	3	18	33	29	11	3
	2	96	184	72	13	3
	1	424	469	85	8	0
	0	3651	666	39	4	0
# of days	0	1	2	3	4	
	予報 (code)					

GMGS～0.290 [0.250, 0.342]
 相関係数～0.541 [0.511, 0.569]
 正答率～0.720 [0.709, 0.732]

様々な評価指標があるが、たいていは予報提供者視点での評価

予報提供者にとって良い予報

≠

予報利用者にとって良い予報

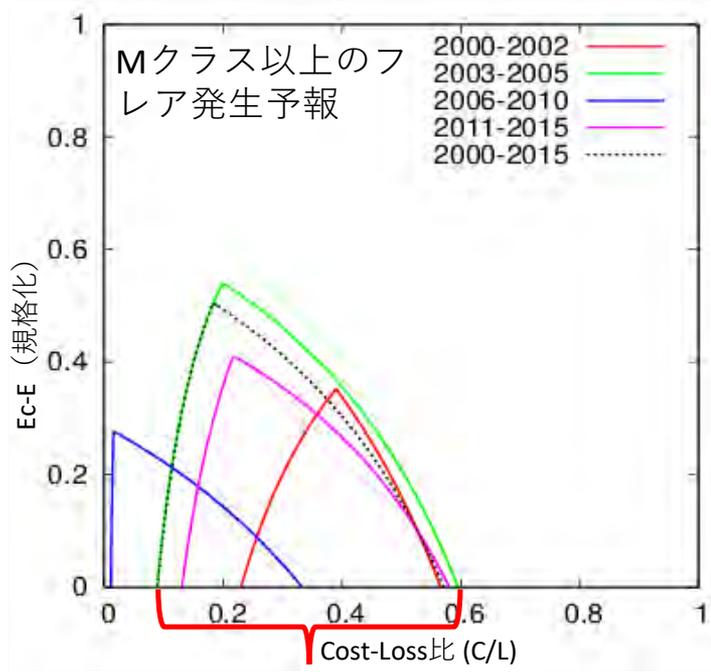
ある利用者にとって良い予報

≠

全ての利用者にとって良い予報

仮定（利用者の行動とそれにかかる経費）

- 宇宙天気現象発生が予報された場合、利用者はその現象による損失(L)を防ぐために費用(C)をかけて保護行動をとる（L, Cは予報利用者固有の情報）。
- 予報に従って行動した際の損失と費用の合計経費の期待値(E)が、予報に関係なく常に保護行動をとるもしくは常に保護行動をとらない場合の合計経費の期待値(E_c)より小さい場合($E_c - E > 0$)、その利用者にとって予報は有用であると評価する（価値がある予報）。



- Cost-Loss比が0.1~0.6くらいの利用者は、予報に従って保護行動をとると利益を得ることができる。
- それ以外のCost-Loss比を持つ利用者は予報に従って保護行動をとっても利益は得られない。

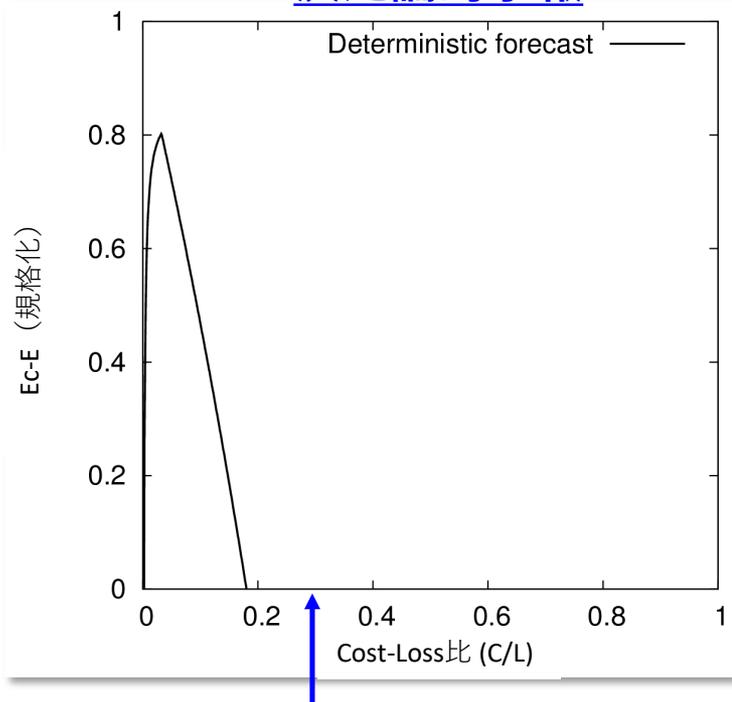
より広い範囲のCost-Loss比を持つ利用者が利益を得ることができる予報が利用者視点での良い予報。

これらの利用者は予報に従うことで利益を得ることができる

プロトン現象が発生し、シングルイベントが起これ人工衛星が故障するという状況を考える。

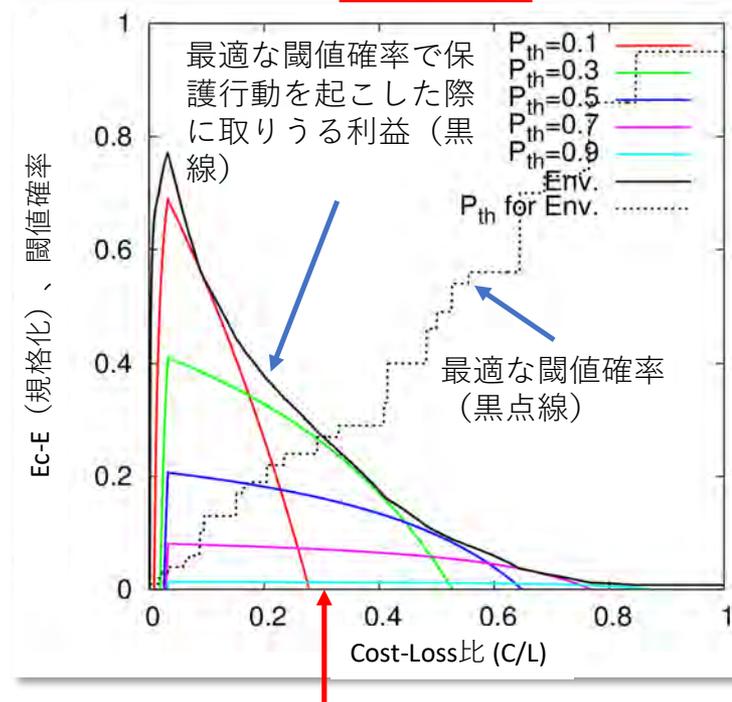
- 人工衛星が故障した際の損失： $L=100$ 億円
- 現象の発生が予想された際の保護行動を起こすための費用： $C=30$ 億円
- Cost-Loss比： $C/L=0.3$

決定論的予報



- この決定論的予報に従って保護行動をしても利益を得られない

確率予報



- 現象発生確率が10%以上で保護行動を起こしても利益を得られないが、30%以上で保護行動を起こすならば利益を得られる。最適な閾値確率は25-30%程度。
- 他のCost-Loss比の利用者も、それぞれの最適な閾値確率で保護行動を起こせば、利益を得られる。

- 決定論的予報
 - 保護行動を起こす戦略に選択の余地がない
 - 一部の利用者しか利益を享受することはできない
- 確率予報
 - 保護行動を起こす戦略（閾値確率）を自ら選ぶことができる
 - 最適な戦略を選ぶことで非常に多くの利用者が利益を享受することができる
 - 最適な戦略は予報提供者から発信できる情報

確率予報と様々なCost-Loss比を持つ利用者に対する最適な戦略の情報を同時に提供することが、利用者視点から見て価値のある予報となる

決定論的予報から確率予報への移行を進めている

- NICTは1950年代初頭から電波伝搬警報を実施し、電波利用者に情報を提供してきた。1988年頃から宇宙天気予報として電波伝搬警報を発展させ、様々なユーザーへ情報提供を続けている。
- 2019年、NICT宇宙天気予報業務は大きく変化した。神戸副局の開設、ICAO宇宙天気センター設立、24時間365日の予報業務の開始など。
- 現在の宇宙天気予報は7種の現象の予報や現況情報を提供している。
- 長期にわたって途切れることなく提供してきた予報情報について、その精度評価の活動も行っており、利用者に使いやすい予報情報の提供を模索している。
- 多くの利用者が予報から利益を享受できるように、決定論的予報から確率予報への移行を進めている。