



宇天－6－1

宇宙天気と航空機運航： 影響を与えるメカニズムと障害の内容

海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所

齋藤 享

- * 航空通信・航法・監視に与える影響
- * 高エネルギー宇宙線による被ばく回避

* 通信・航法・監視 (Communication, Navigation, and Surveillance: CNS)は航空航法の基本システム

* 通信

- 空地通信、地上間通信、衛星通信

* 航法

- 航空機位置、速度の決定、時刻同期
- 計画した経路に沿った誘導
- ✓ 衛星航法が今後の主流となる

* 監視

- 空域内の航空機の位置、動態を把握

* 航空CNSシステムは無線通信を主に利用

➔ 電波伝播環境が性能に大きな影響を与える

航空CNSに用いられる電波の周波数

	Communication	Navigation	Surveillance
HF	Voice/Data Link (2 - 30 MHz)		
VHF	Voice/Data Link (117.975 - 137 MHz)	ILS-LOC/VOR/GBAS VDB (108 - 117.975 MHz)	
UHF	Voice (1.5/1.6 GHz)	DME/TACAN/SSR (960 - 1215 MHz) GNSS LI (1563.4 - 1578.4 MHz)	SSR/ADS-B (960 - 1215 MHz) ARSR (1215 - 1400 MHz)

- ILS-LOC: Instrument Landing System-Localizer
- VOR: VHF Omnidirectional Range
- GBAS VDB: Ground-based Augmentation System VHF Data Broadcast
- DME: Distance Measurement System

- TACAN: Tactical Air Navigation System
- SSR: Secondary Surveillance Radar
- ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
- ARSR: Air Route Surveillance Radar

- * 国際民間航空機関（ICAO）が定める標準を満たしたものののみ使用可能
- * 現在利用されているものは、GPS, GLONASSのL1信号のコード擬似距離測定値を用いるもののみ
 - **1周波、コード擬似距離測位**
- * Galileo, Beidou及びL5周波数帯信号については標準が発効、機器開発が進められているところ
 - ➔ 新機器の導入には時間がかかるため、当面は1周波GPSに基づいた航法システムが使用され続ける
- * 航空航法では**安全性が最優先**であり、補強システムが必要
 - SBAS (Satellite-based Augmentation System) : 静止衛星、広域**ディファレンシャル**補強
 - GBAS (Ground-based Augmentation System) : 地上、狭域**ディファレンシャル**補強
 - ABAS (Aircraft-based Augmentation System) : 航空機単独

サービス	非精密進入	精密進入 (カテゴリーI)	En-route飛行
典型的なシステム	SBAS	GBAS	ABAS
精度 (水平/垂直)	220m/基準なし(垂直ガイダンスなし)	16m/6.0-4.0m	0.74-3.7 km/基準なし(垂直ガイダンスなし)
完全性 (Integrity)	1-10 ⁻⁷ per hour	1-2x10 ⁻⁷ in any approach	1-10 ⁻⁷ per hour
継続性 (Continuity)	1-10 ⁻⁴ -1-10 ⁻⁸ per hour	1-8x10 ⁻⁸ per 15 sec	1-10 ⁻⁴ -1-10 ⁻⁸ per hour
警報時間	10 sec	6 sec	15 sec-5 min
可用性 (Availability)	0.99-0.999999	0.99-0.999999	0.99-0.999999

*Integrity (完全性) : システムに誤りがないことを保証し、使用すべきではない場合に迅速に警報が発せられること

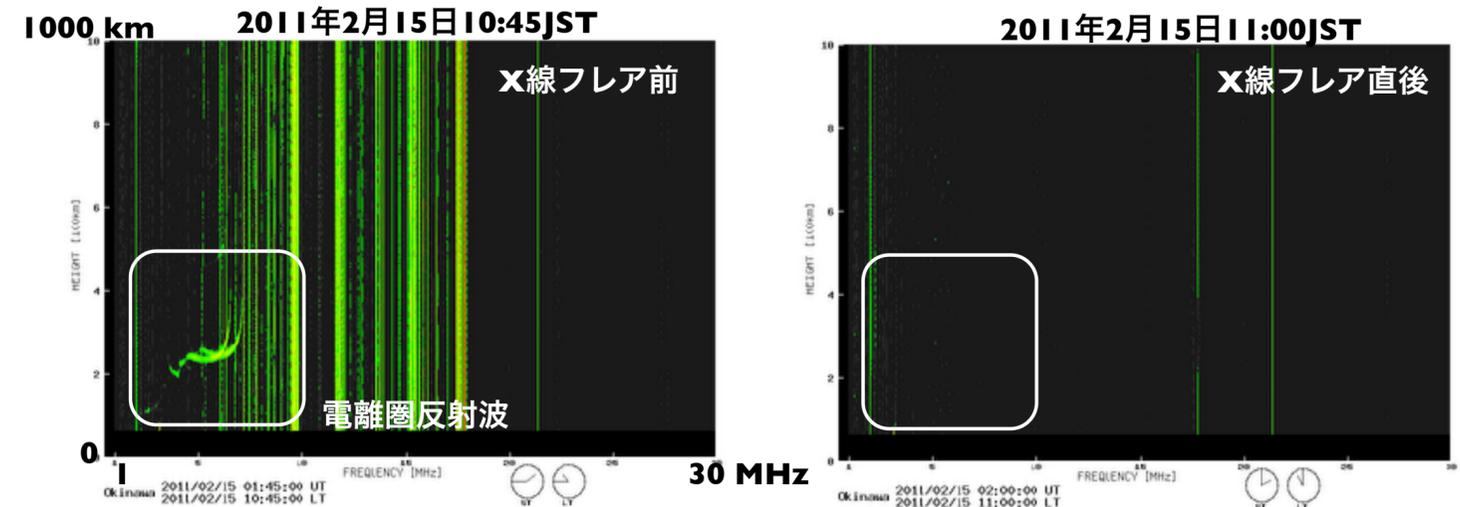
Continuity (継続性) : 予告なく運用が中断されないこと

Availability (可用性) : システムが一定以上の割合で運用できること

- * 安全性に関する要件が極めて高い一方で、精度要件は測量などに比べればそこまで高くない

デリンジャー現象

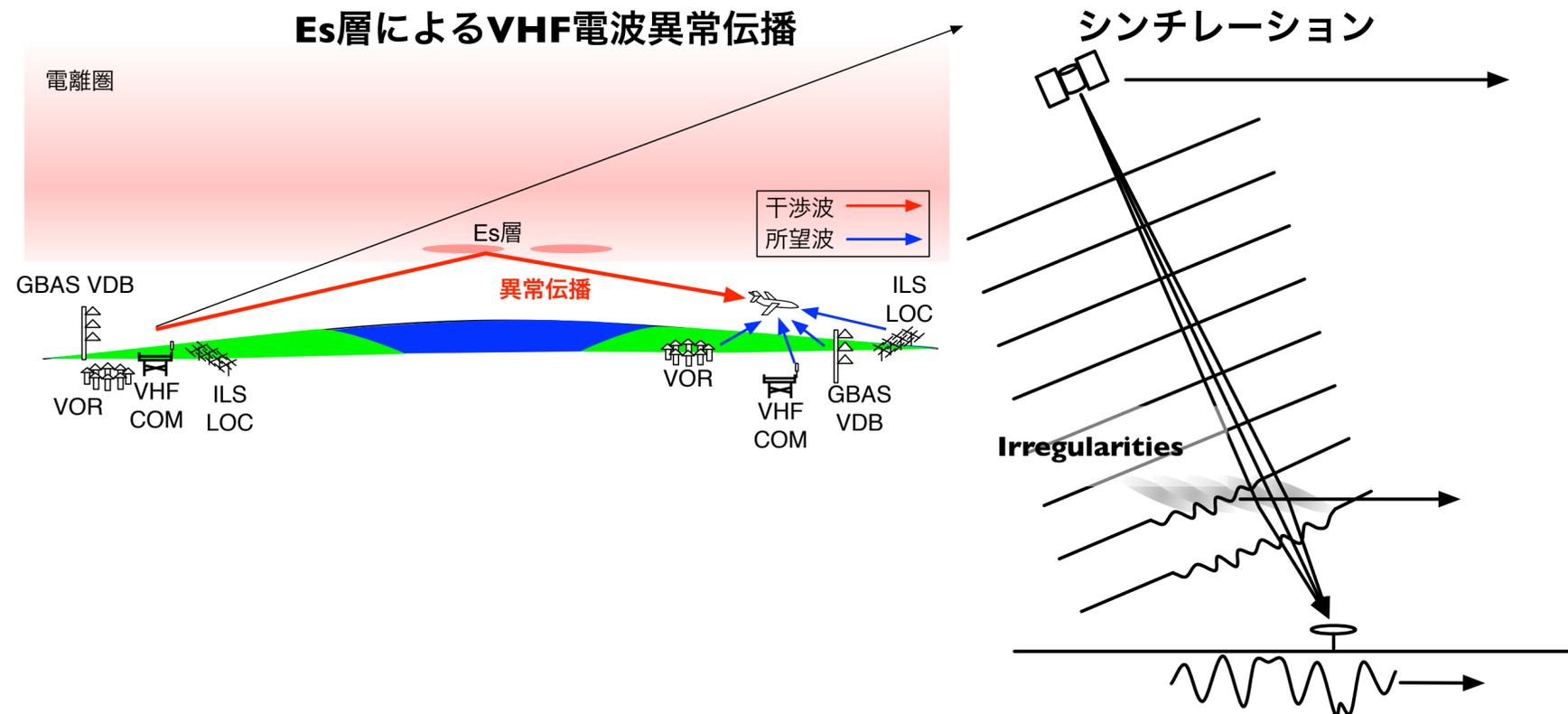
NICTによるイオノゾンデ観測(鹿児島・山川)



- * HF
 - X線フレア(デリンジャー現象)、太陽高エネルギー粒子イベント(極冠域電波吸収)
 - ➔ HF長距離通信品質劣化・途絶

- * VHF
 - スポラディックE (Es)層
 - ➔ 想定以上の長距離伝播による電波干渉

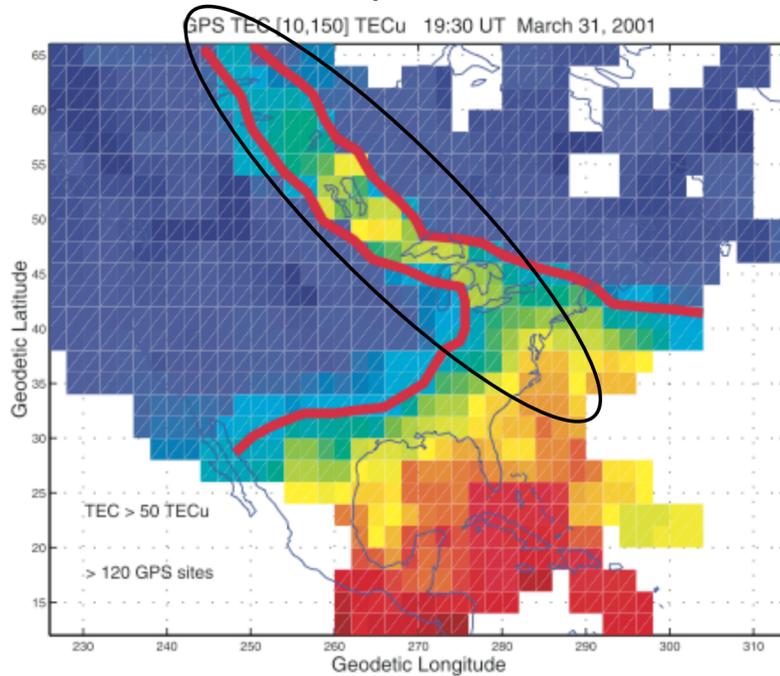
- * UHF (Lバンド)
 - プラズマバブル、オーロラ関連減少に伴う電離圏不規則構造
 - ➔ 電波の揺らぎ(シンチレーション)、衛星通信品質劣化・途絶



- * VHF既存航法
 - スポラディックE (Es)層
 - ➡ 想定以上の長距離伝播による電波干渉
- * 衛星航法
 - I周波コード擬似距離ディファレンシャル測位方式に影響を与えるもの
(電離圏遅延空間勾配、電離圏不規則構造)
 - ➡ ディファレンシャル補正誤差増大
 - ➡ 使用可能衛星数の減少による誤差増大
- * 航空航法では、安全性のため、このような電離圏異常が常に存在すると仮定して安全性設計を行っている
 - ➡ 電離圏異常が想定範囲 (脅威モデル) を超えない限り安全である一方で、可用性を確保するために様々な工夫が必要 (コスト高)

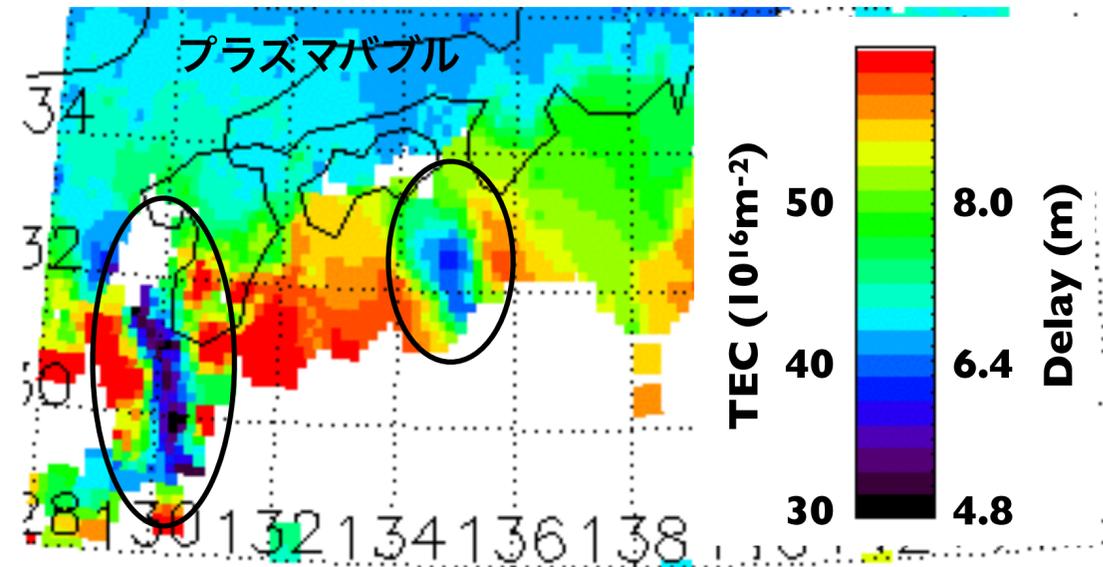
電離圏遅延空間変動

SID/SIPS

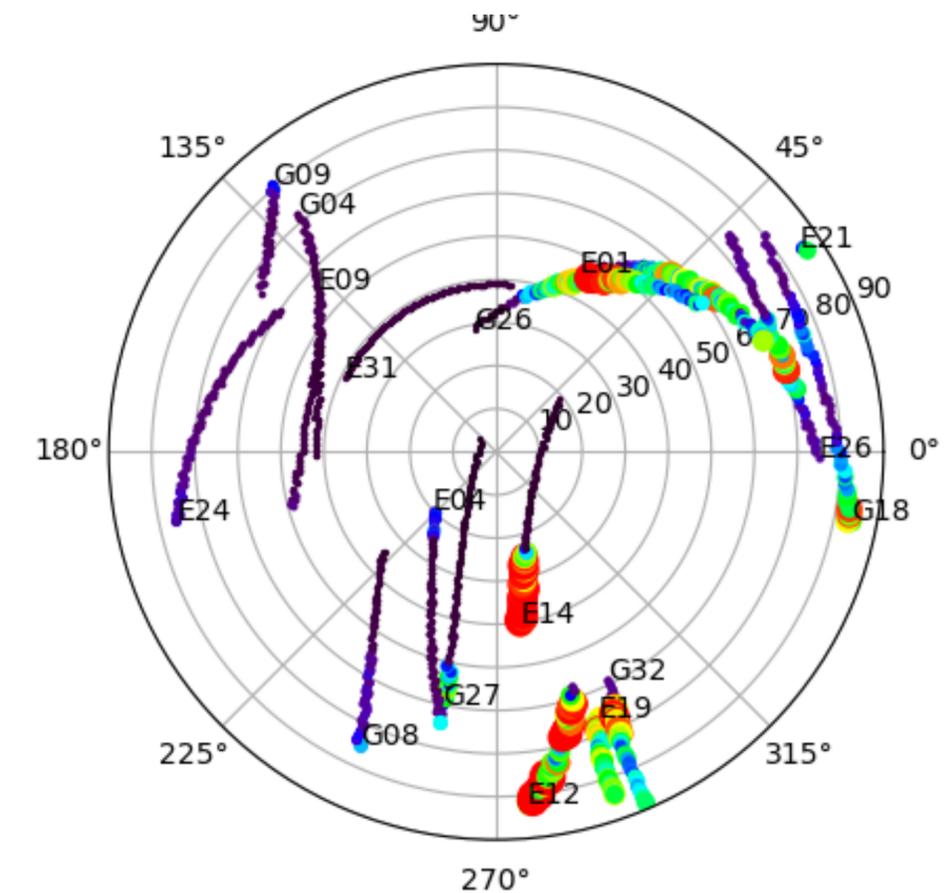


[Foster et al., 2002]

プラズマバブル



プラズマバブルに伴うシンチレーション



- * 磁気嵐に伴い、電離圏密度増大領域が低緯度から極域に向かって伸びる

- * 磁気赤道付近で発生した電離圏密度減少領域が極方向に伸びる

* 有効な情報

- 想定範囲を超える電離圏遅延空間変動、シンチレーションの有無
- 電離圏異常が一定範囲に存在しないこと (定量的確度付き)

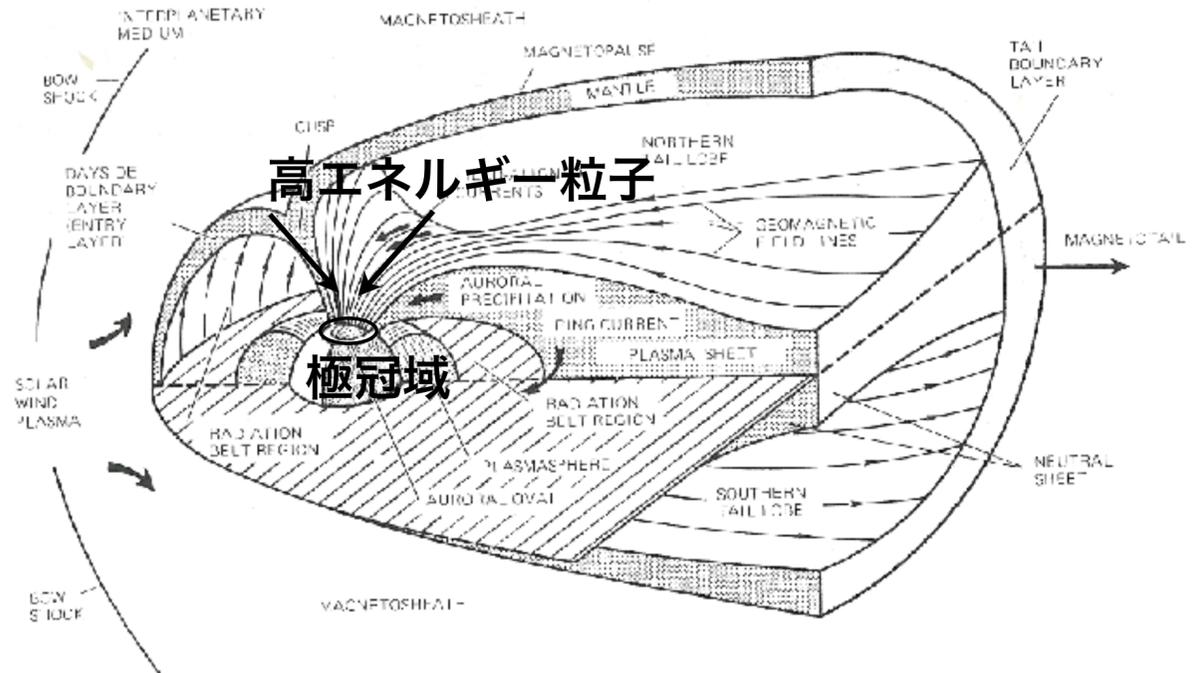
- * 航空機の位置・動態の監視は、レーダーによる監視に加え、航空機からの定期送信による受動監視(ADS-B)が広く使われつつある
- * ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
 - 航空機が自己のID、位置、速度等を放送
 - 位置情報のソースは自己の航法システム(衛星航法)
 - ➡ 衛星航法の精度が監視の精度に直結する
 - ➡ 宇宙天気現象は航空機監視にも影響を与えうる



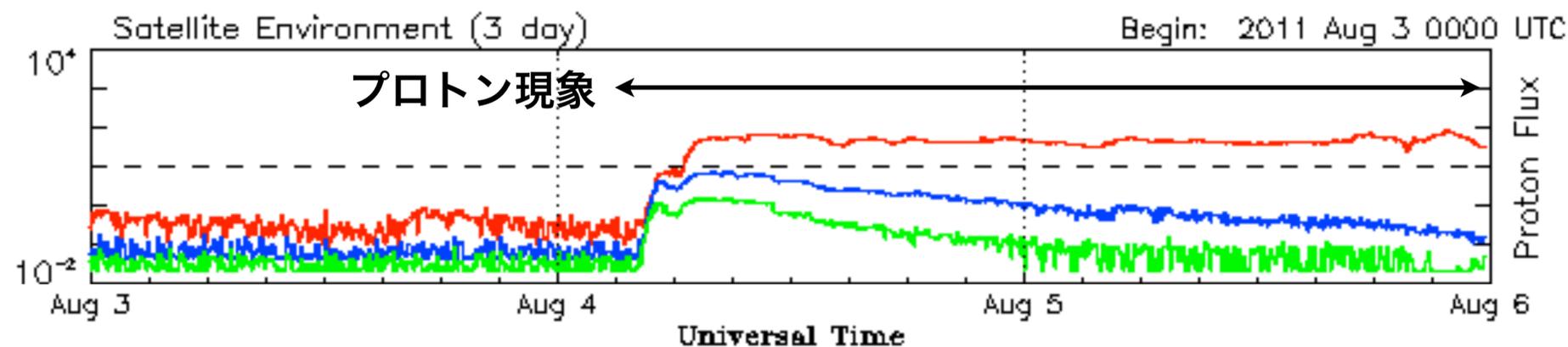
ADS-Bによる航空機位置 (Flightradar24)

- * 太陽から高エネルギー陽子が放出されるプロトン現象に伴い、高エネルギー陽子が、磁力線が開いている極冠域に降り込む
- * 二次高エネルギー粒子が航空機高度から地上に降り注ぎ、被ばくの原因となる
- * ICAO宇宙天気情報サービスにおける警報基準
 - Severe: 80 $\mu\text{Sv/hr}$
 - Moderate: 30 $\mu\text{Sv/hr}$

地球の磁場



[Kelley, 1989]



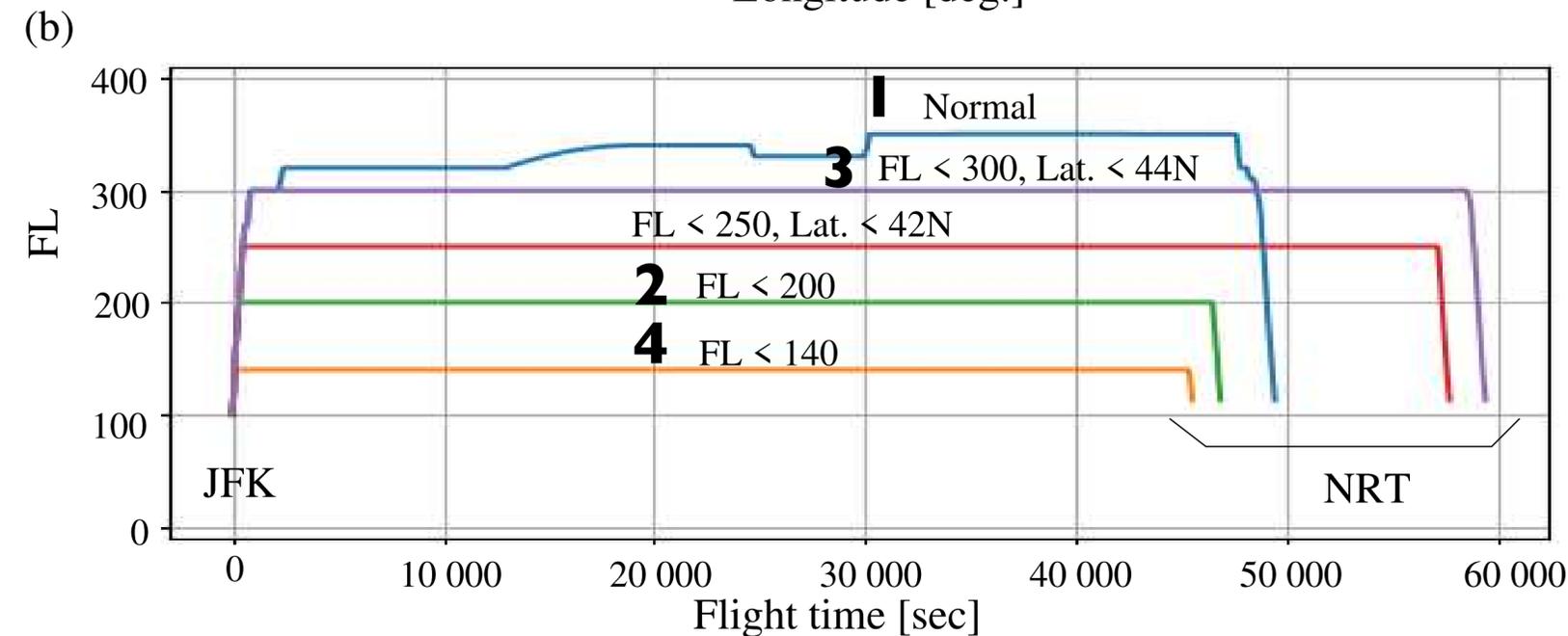
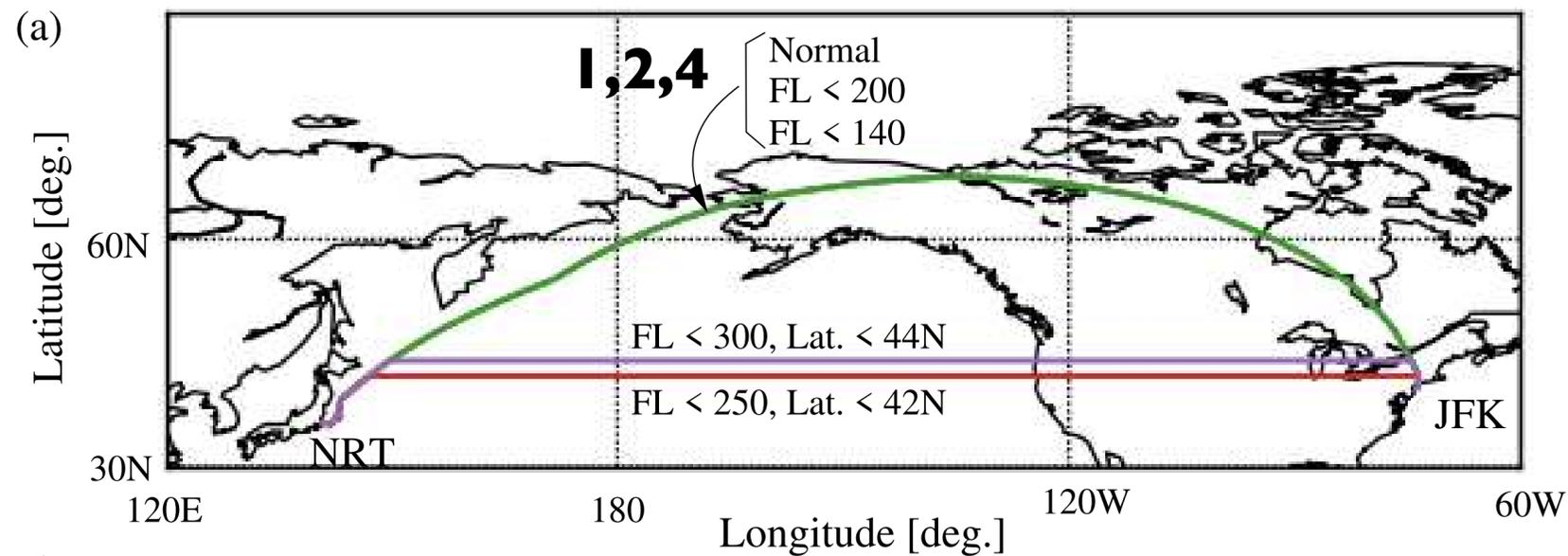
[米国海洋大気局GOES衛星による観測]

Updated 2011 Aug 5 23:56:03 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

被ばく回避時の経済的影響の試算

- * 2005年1月20日のSEP現象(GLE69)(南北反転)
- * 機材：ワイドボディ・双発ジェット機、離陸重量320,915 kg



経路#	1	2	3	4	5
経路長 [km]	11,335	0	+1,464	0	+1,557
飛行時間 [sec]	49,380	-2,567	+9,977	-3,906	+8,275
燃料消費量 [kg]	118,230	+44,310	+36,540	+68,950	+48,420

*2-5は1に対する差分を示す

[Saito et al., Earth Planets and Space, 2021]

- * 飛行経路の変更
 - 飛行高度、飛行緯度に制限
 - ➔ 最適経路を飛行できず、飛行経路長、飛行時間、燃料消費が増大
- * 宇宙天気情報を利用して、SEPイベント終了後に最適経路に戻すなどで低減可能
 - ✓ 航空機運航は管制を受けており、単独で自由に経路変更ができるわけではない
 - 経路全体での最適化、航空交通管理(ATM)上の制限を考慮した経路設計に有効な情報提供が望まれる