

2013年2月26日

NICT 2012年度 宇宙天気ユーザーズフォーラム

講演 3 14:55-15:25

航空航法と宇宙天気

斎藤 亨(電子航法研/NICT特別研究員)



航空航法と宇宙天気

齋藤 享

電子航法研究所航法システム領域

衛星航法

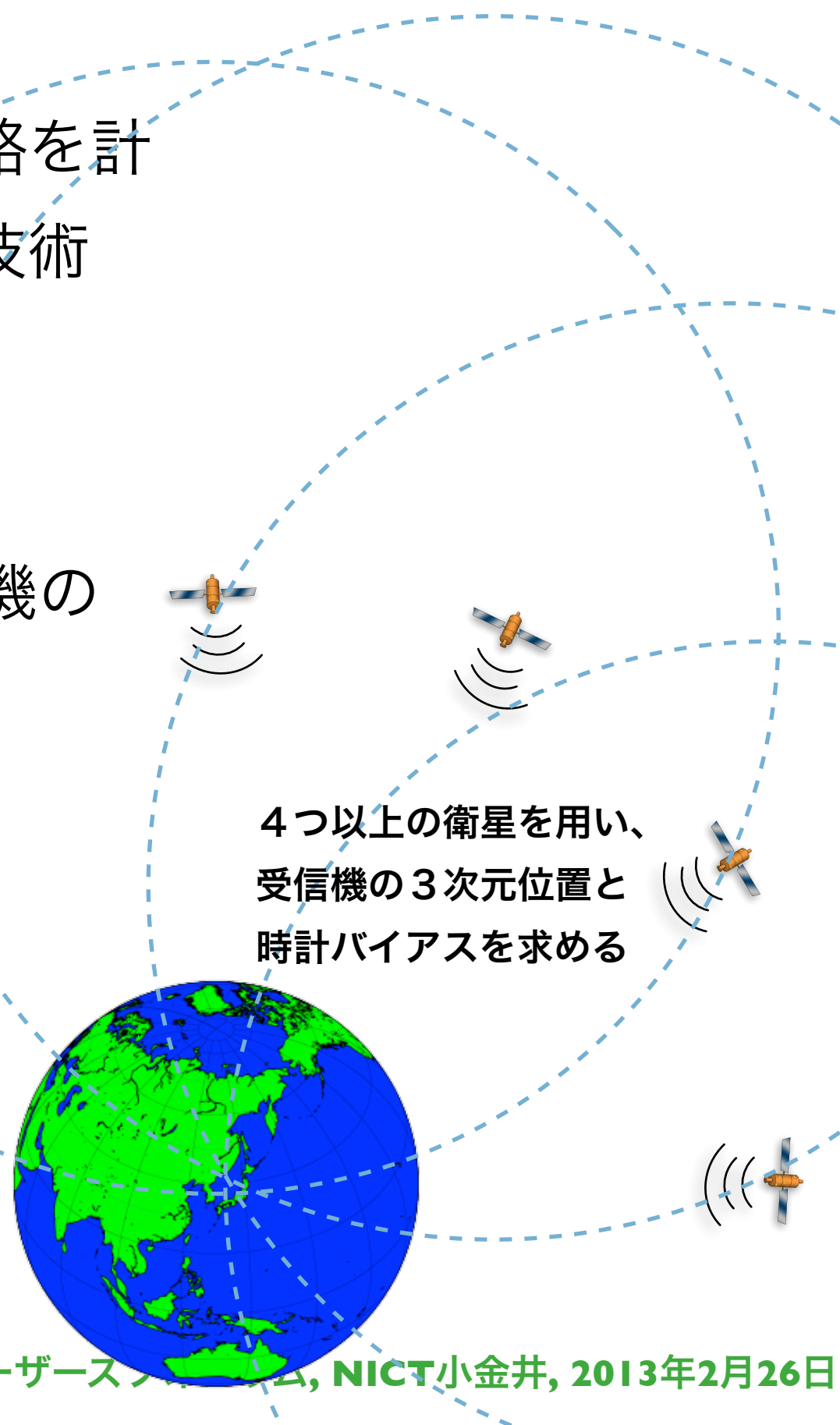
* 航法：ある地点からある地点までの航路を計画し、その航路を維持するための科学技術

* 衛星航法

- 無線航法の一つ
- 衛星と受信機の距離を測定し、受信機の正確な位置を求める

* 全世界的衛星航法システム (Global Navigation Satellite System; GNSS)

- GPS (アメリカ)
- GLONASS (ロシア)
- GALILEO (欧州)
- COMPASS/BEIDOU (中国)



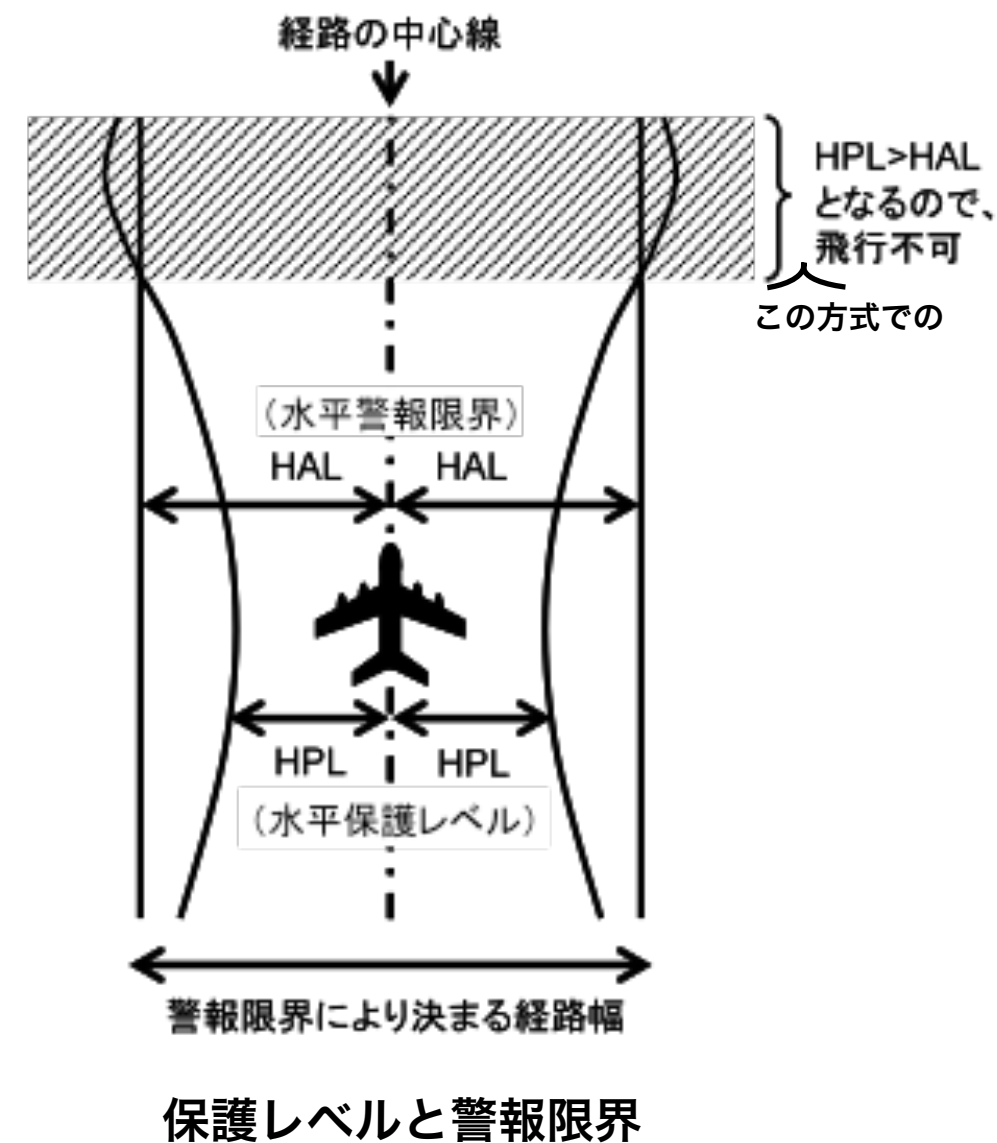


衛星航法の航空利用

- * 精度だけでなく安全性（インテグリティ）を重視
 - インテグリティ：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を発すること
- * 国際民間航空機関（ICAO）において国際標準を策定
- * GPS単独では所要のインテグリティを満足できないため、補強システムが必要
 - SBAS (Satellite-based Augmentation System)：衛星、広域
 - GBAS (Ground-based Augmentation System)：狭域、地上
 - ABAS (Aircraft-based Augmentation System)：航空機単独

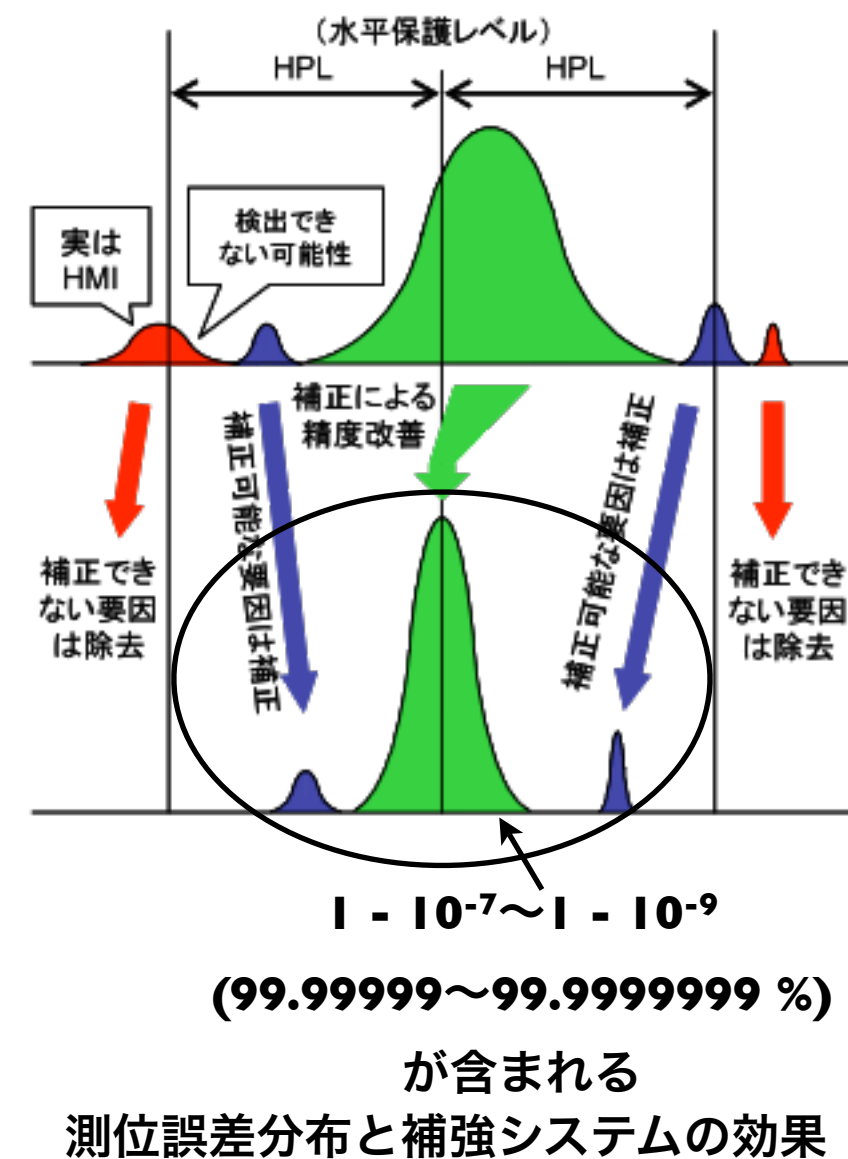
航空航法とインテグリティ

- * インテグリティが確保される範囲を保護レベル（Protection Level; PL）という
- * 保護レベルは、実際の誤差がそれ以上になる確率が $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 以下となるように保証
- * 飛行フェーズごとに設定されている 警報限界（Alert Limit; AL）を 保護レベルが超えない場合に利用可能

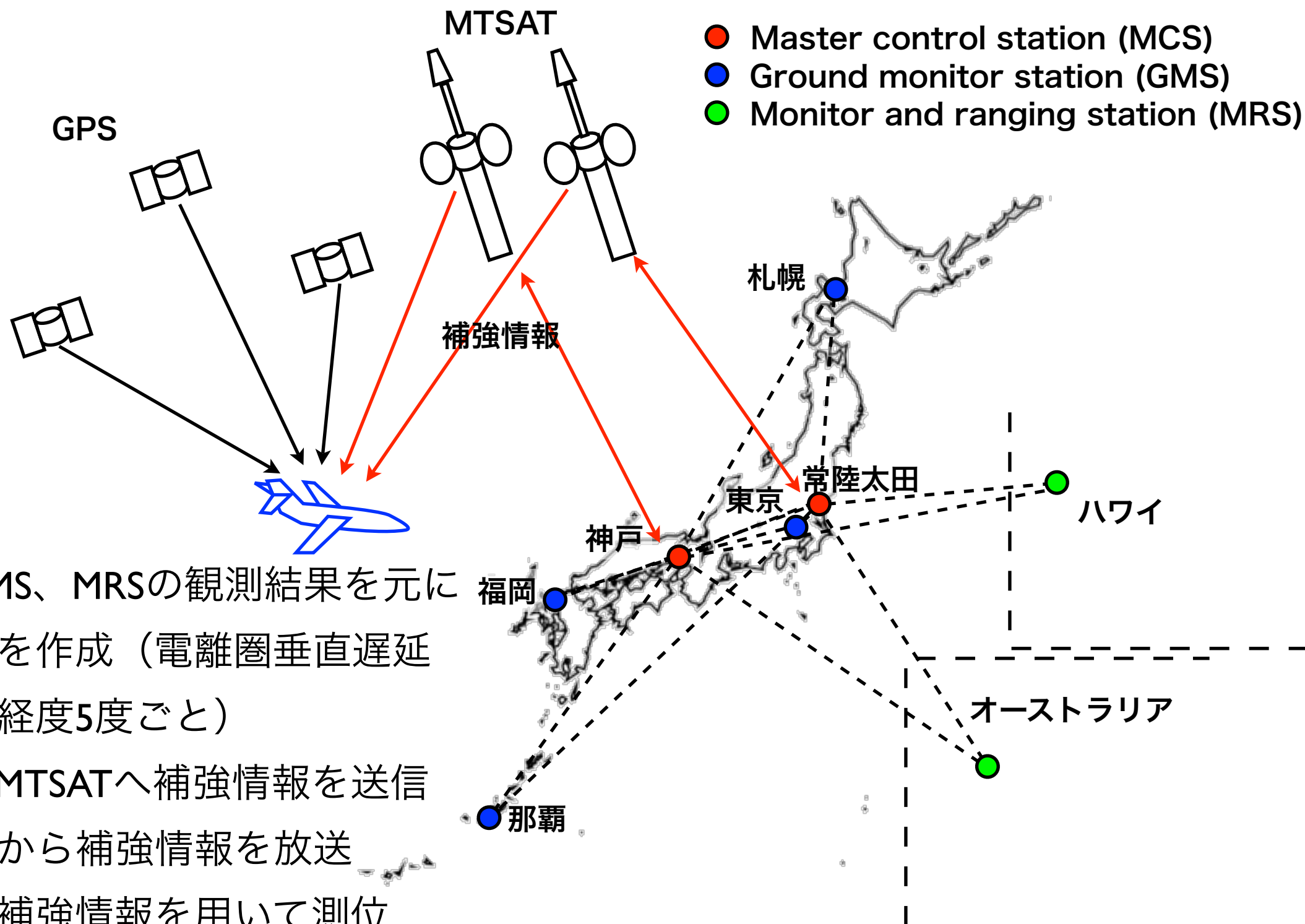


インテグリティに対する脅威と対策

- * 計算された保護レベルが警報限界を超えないのに、実際の誤差が警報限界を超えることを Hazardous Misleading Information (HMI) という
- * HMIとなり得る脅威をモニタ等により確実に排除（インテグリティの確保）
- * 補正により保護レベルを縮小→ $PL > AL$ となり利用できない場合を減らす（可用性（アベイラビリティ）の向上）
- * 実用システムとして成立するためには、安全性（インテグリティ）と可用性（アベイラビリティ）の両立が必要

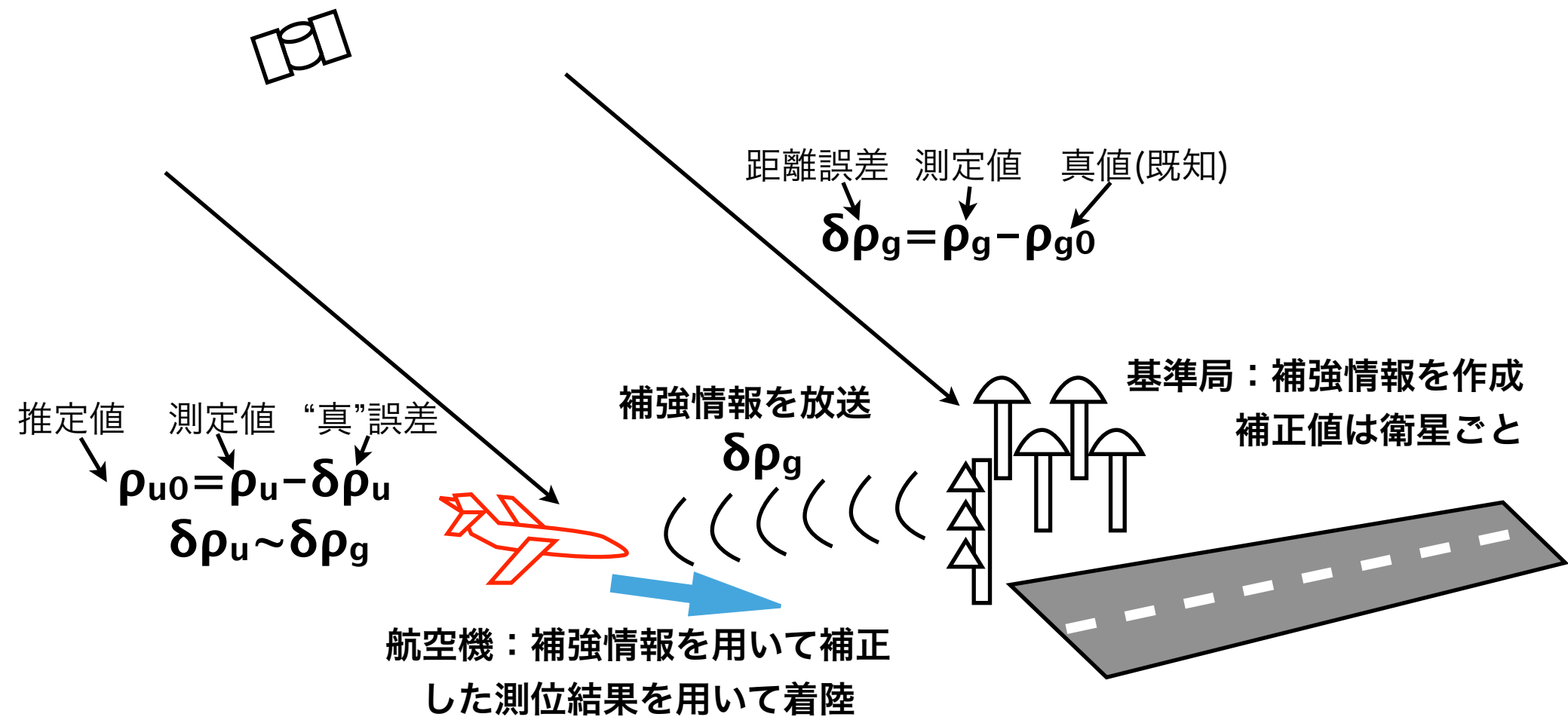


実例：SBAS (MSAS)



- * MCS、GMS、MRSの観測結果を元に補強情報を作成（電離圏垂直遅延量は緯度経度5度ごと）
- * MCSからMTSATへ補強情報を送信しMTSATから補強情報を放送
- * 航空機は補強情報を用いて測位
- * 1 システムで広域をカバー

実例：GBAS



- * 空港に設けた基準局の測定結果を用いて、各衛星ごとの遅延量補強情報を各空港から放送
- * 航空機は補強情報を用いて測位
- * 空港周辺約40 kmの範囲を対象



衛星航法に対する電離圏の影響

* 電離圏遅延量勾配

- 補正誤差の原因
 - 基準局で未検出→ 安全性（インテグリティ）の脅威
→未検出でも安全となるような対策が必要
 - 対策の結果として可用性（アベリラビリティ）が低下
する場合がある

* 電離圏小規模不規則構造

- シンチレーション、衛星信号ロック外れの原因
 - インテグリティの脅威とはなりにくいがアベリラビリティの低下の原因となる

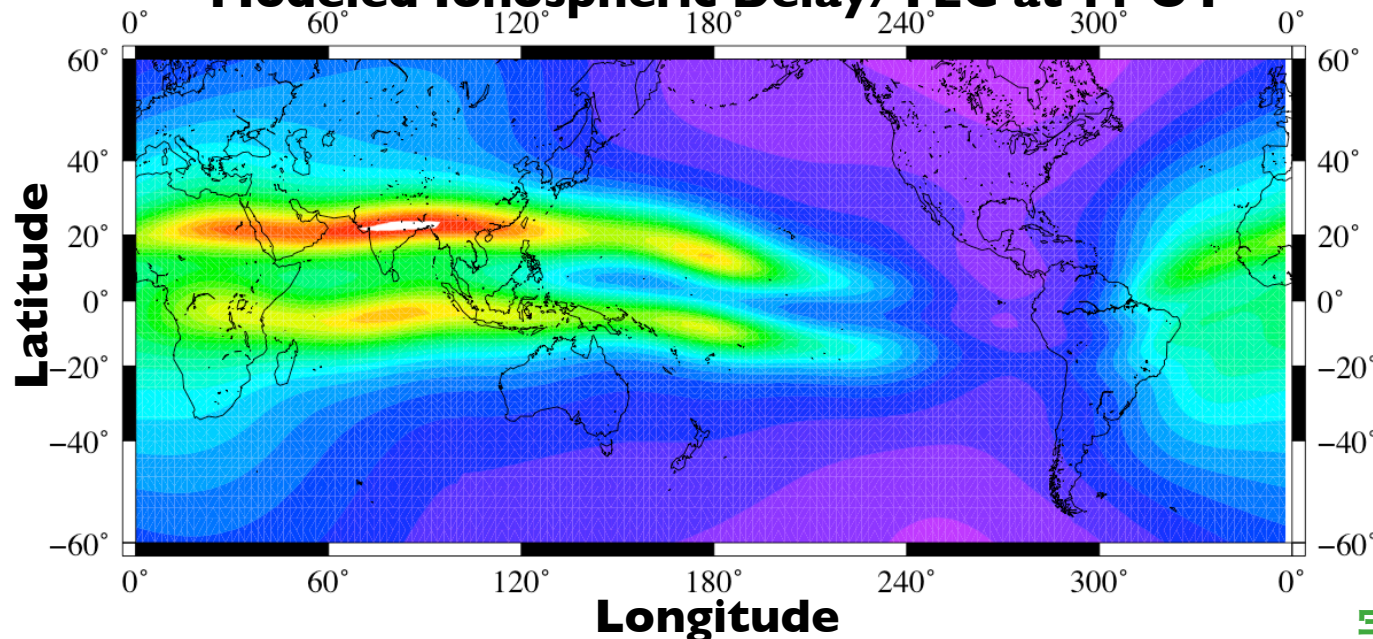
電離圏遅延

- * 電離圏プラズマによる屈折率変化のため、電波が電離圏を通過する際遅延を受ける
- * 遅延の総量は衛星-受信機間の単位面積あたりの全電子数(total electron content:TEC)に比例
- * GPS L1周波数(1.57542 GHz)においては1 TECU (10^{16}m^{-2})あたり16 cmの遅延

$$I_{\rho} = \frac{e^2}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \int_S^R n_e(l) dl$$

$$= \frac{40.3}{f^2} \int_S^R n_e(l) dl$$

Modeled Ionospheric Delay/TEC at 11 UT

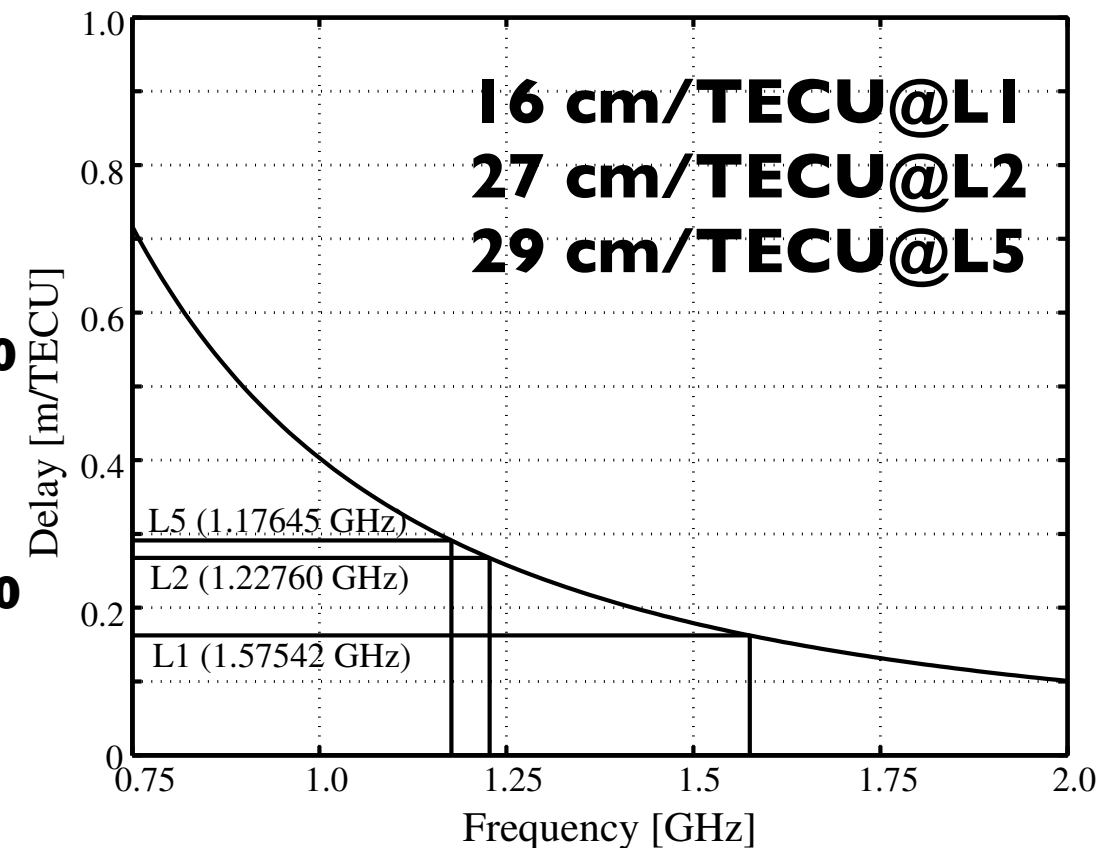


Vertical delay (m)

20

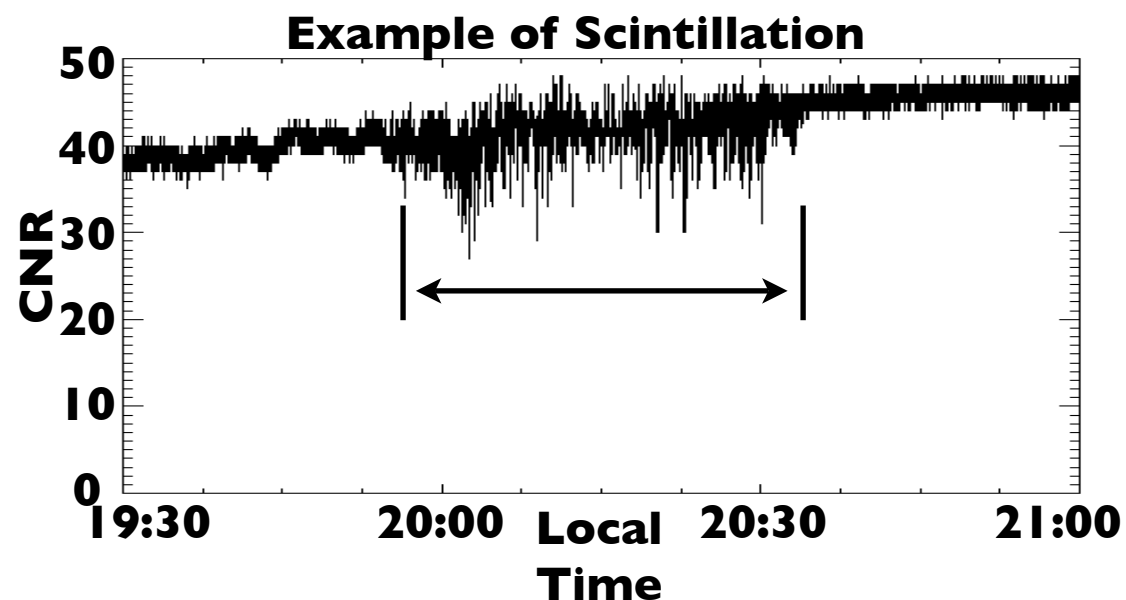
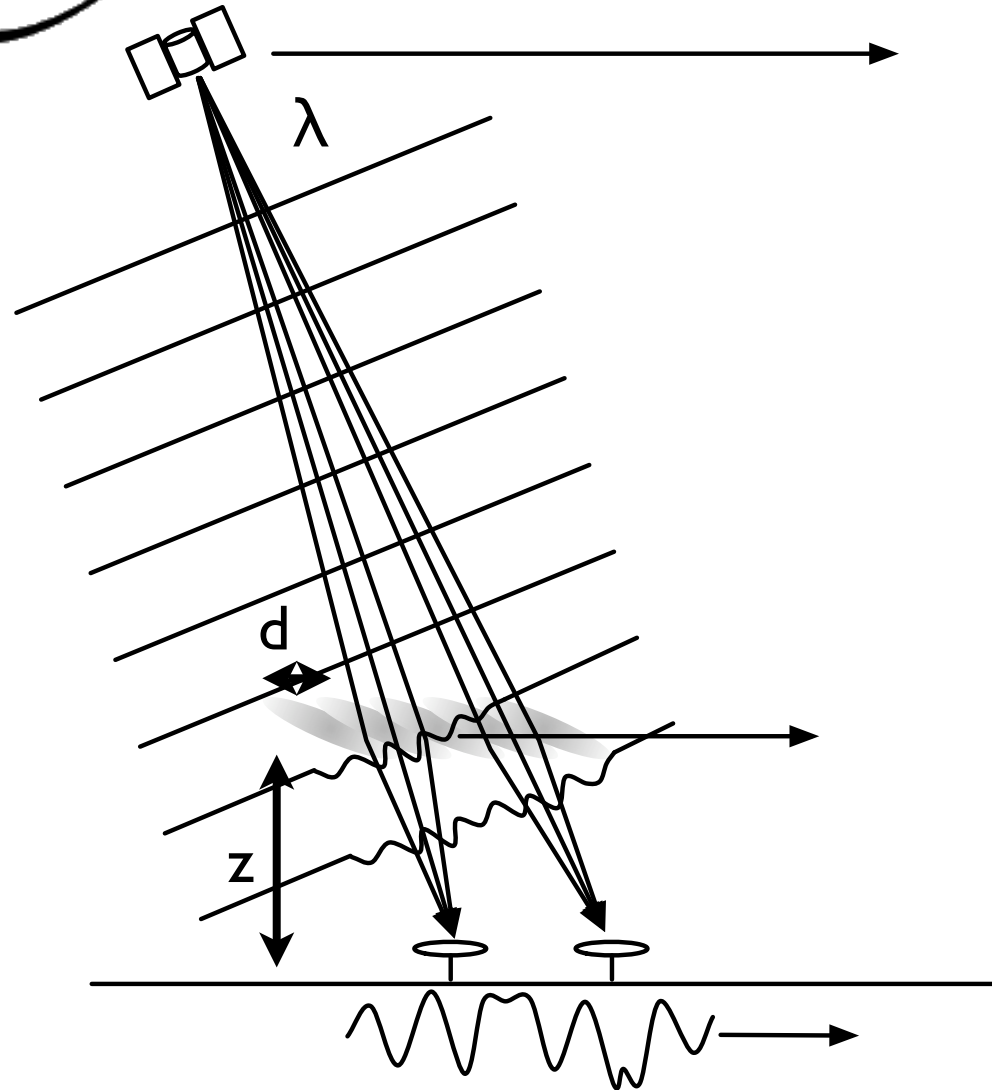
10

0





電離圏シンチレーション



- * 電離圏不規則構造(数100 m規模)によりGNSS電波の強度、位相が不規則に変動
- * シンチレーションにより測定精度が劣化
 - 測距誤差の増大
- * 衛星追尾の途切れ
 - 使用可能衛星数が減少することによる測位誤差の増大

電離圏擾乱

* 赤道異常

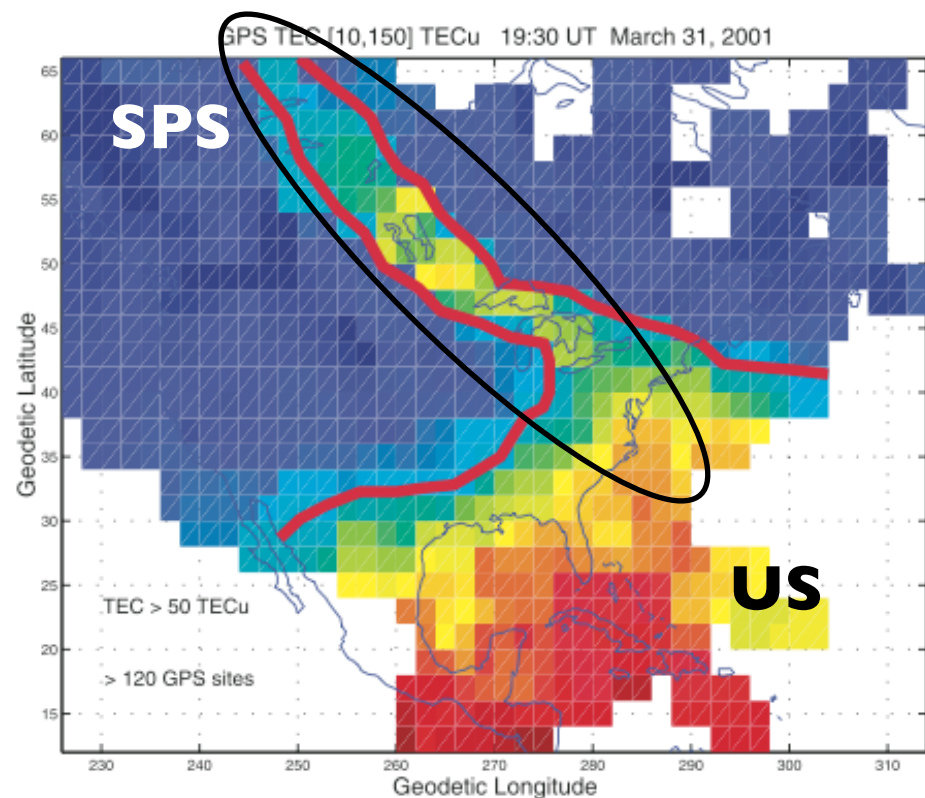
- 磁気緯度 $\pm 15^\circ$ 付近に常に存在する電離圏密度増大領域

* プラズマバブル

- 電離圏密度の急減
- 磁気嵐に関わらず発生

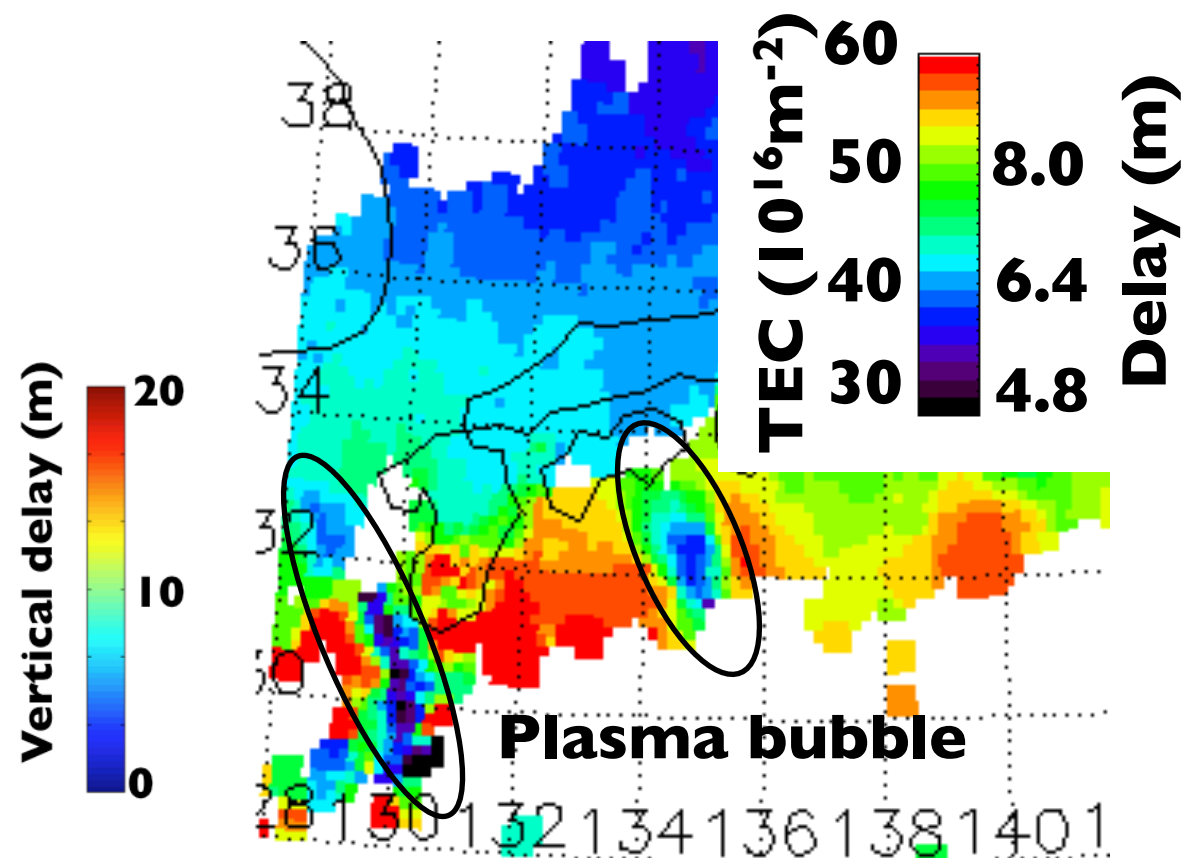
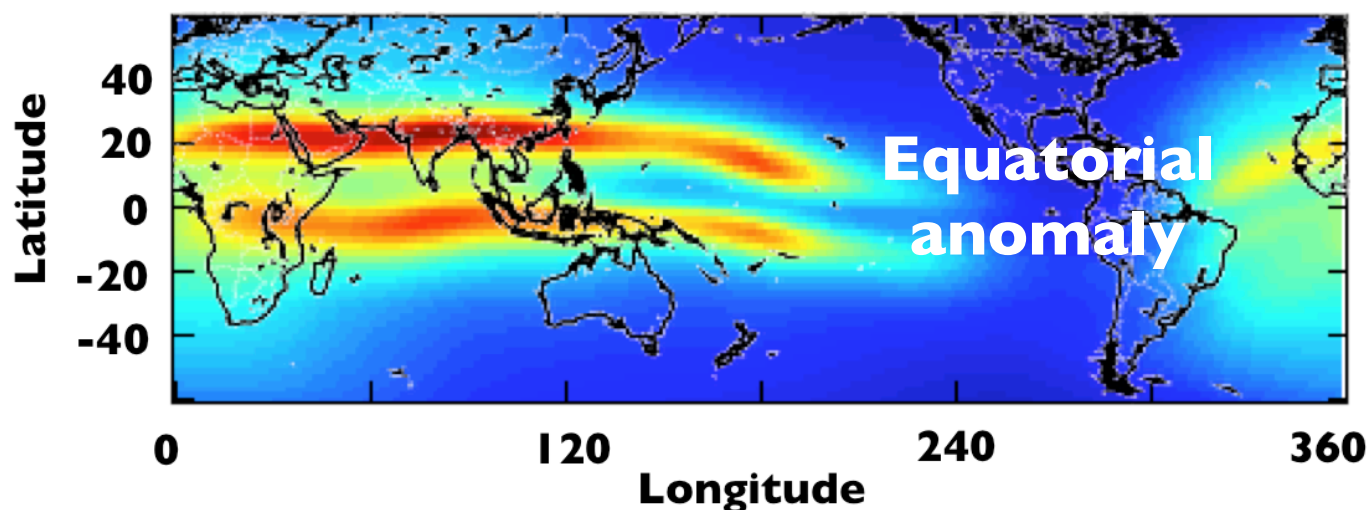
* Storm induced plasma stream (SPS)

- 強い磁気嵐に伴う電離圏密度の急増

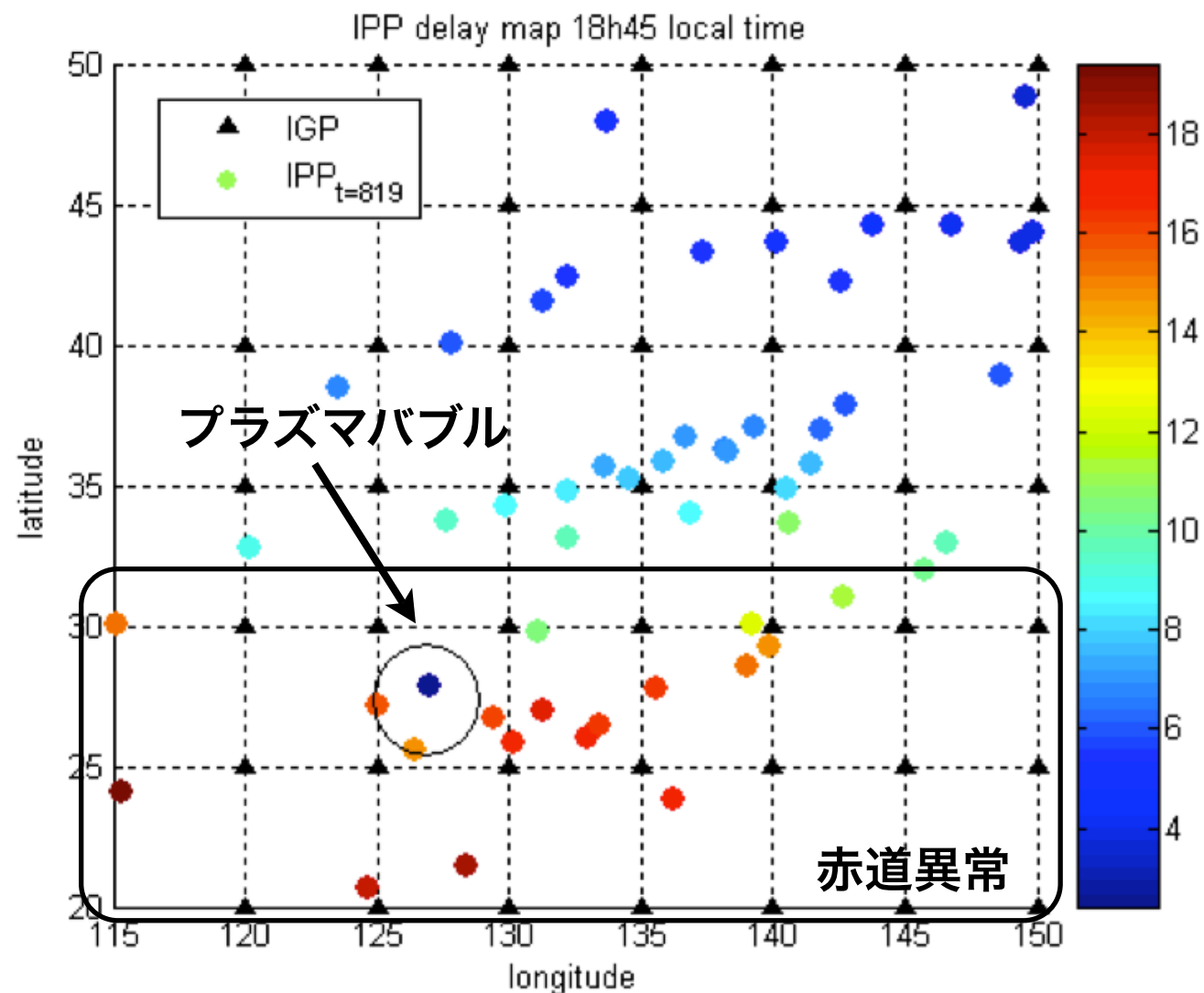


[Foster et al., 2002]

Solar max., March, 11 UT



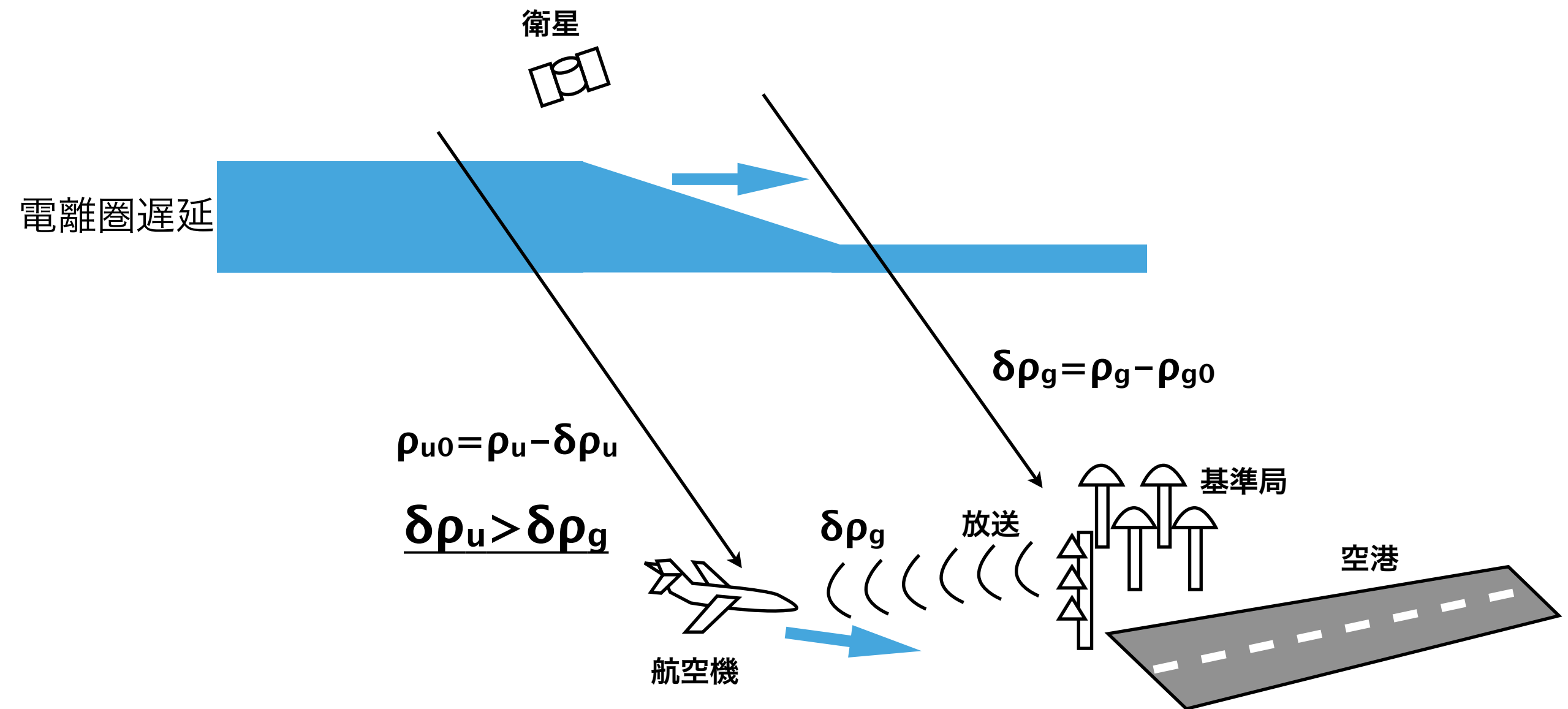
SBASに対する電離圏の影響



電離圏モデルを用いたMSAS観測シミュレーション

- * 観測密度で決まる空間スケール以下の構造は検出が難しい
- * $5^\circ \times 5^\circ$ グリッドより小さな構造は正確に表現できず、あり得る誤差範囲を大きく取ることに対応せざるを得ない
 - プラズマバブル、赤道異常等に伴う電離圏勾配が問題となりうる

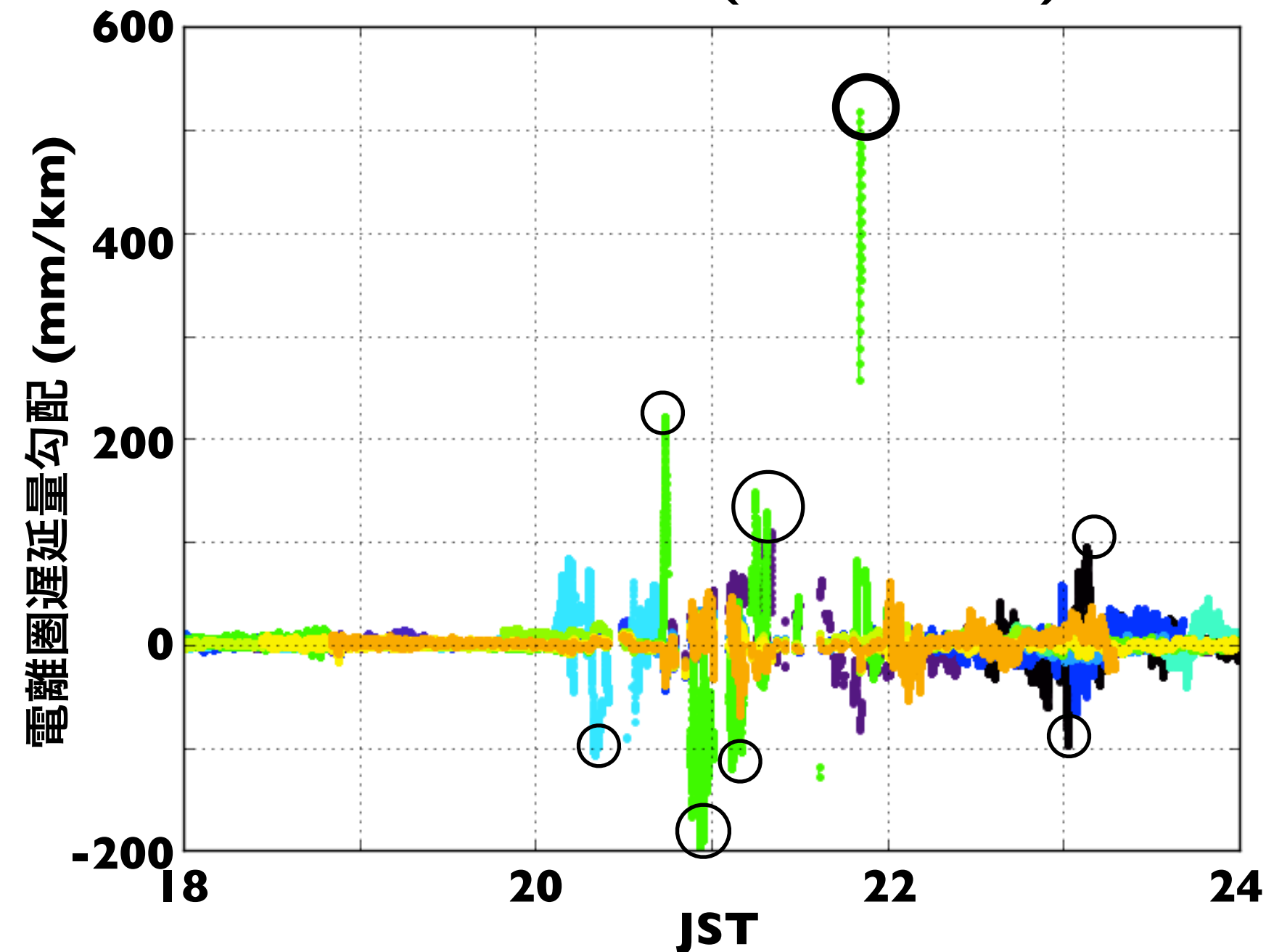
GBASに対する電離圏の影響



- * 基準局と航空機で電離圏遅延量が異なるときに誤差が増大
- ➡ 電離圏遅延量の局所勾配の検出が重要

プラズマバブルに伴う電離圏勾配

東西電離圏勾配 (2008年4月3日)



- * 石垣島で観測されたプラズマバブルに伴う電離圏遅延量勾配
- * 100~200 mm/kmの電離圏勾配は頻繁に発生
- * 最大500 mm/kmを越える電離圏勾配を検出
- * GBAS設計の前提となる電離圏変動の想定範囲を越える可能性があり検討中



衛星航法の航空利用と電離圏対策

- * 電離圏不均一構造の存在は衛星航法の航空利用において解決すべき重要な問題
- * これまでの対策
 - 誤差の補正に加え、観測データを様々な形で監視し補正しきれないものを排除
 - 監視の未検出確率を考慮して安全マージンを取る
 - ➡ 高度な利用に対する障害
- * 高度利用への方策
 - GNSSの利用方法に即した電離圏異常の定量的な評価による電離圏異常検出精度・信頼度の性能向上
 - 宇宙天気情報を利用した電離圏監視による電離圏異常検出
 - インテグリティの担保、監視のリアルタイム性が重要

宇宙天気ユーザーズフォーラム, NICT小金井, 2013年2月26日

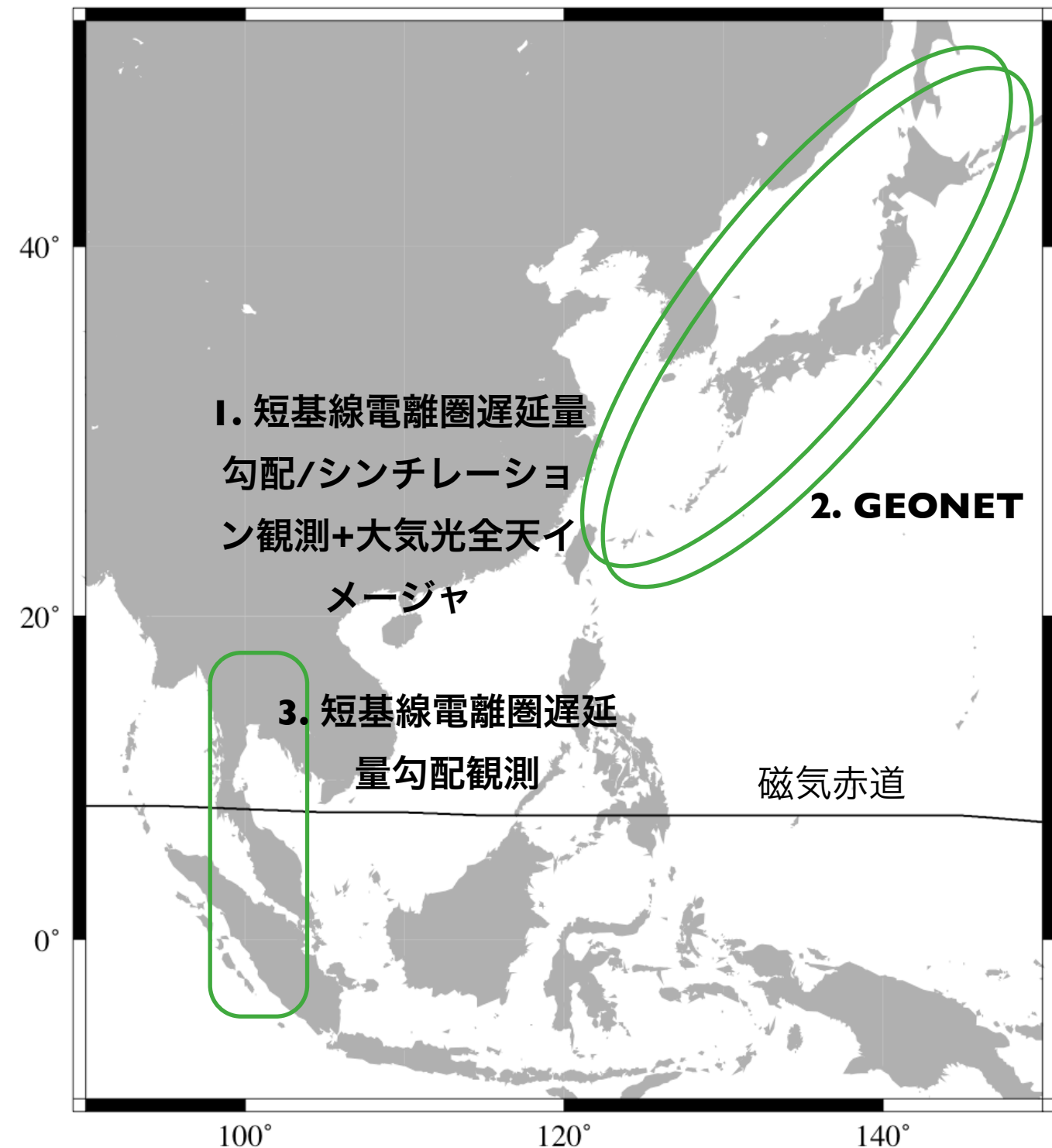


電子航法研究所における取り組み

- * 国内外観測によるGNSS利用の形態に即した電離圏異常の特性解析
 - TEC・シンチレーションの稠密観測、大気光イメージャ、GEONET 1秒値のリアルタイム収集
- * プラズマバブルの広域監視法の研究開発
- * ICAOにおける国際標準策定に対する貢献
 - 高カテゴリGBASにおける電離圏脅威モデルに関する国際標準策定への参加
 - アジア太平洋域のGNSSの航空利用に必要な電離圏特性を知るためのデータ収集・共有の推進

ENRI 電離圏異常の特性解析のための国内外観測活動

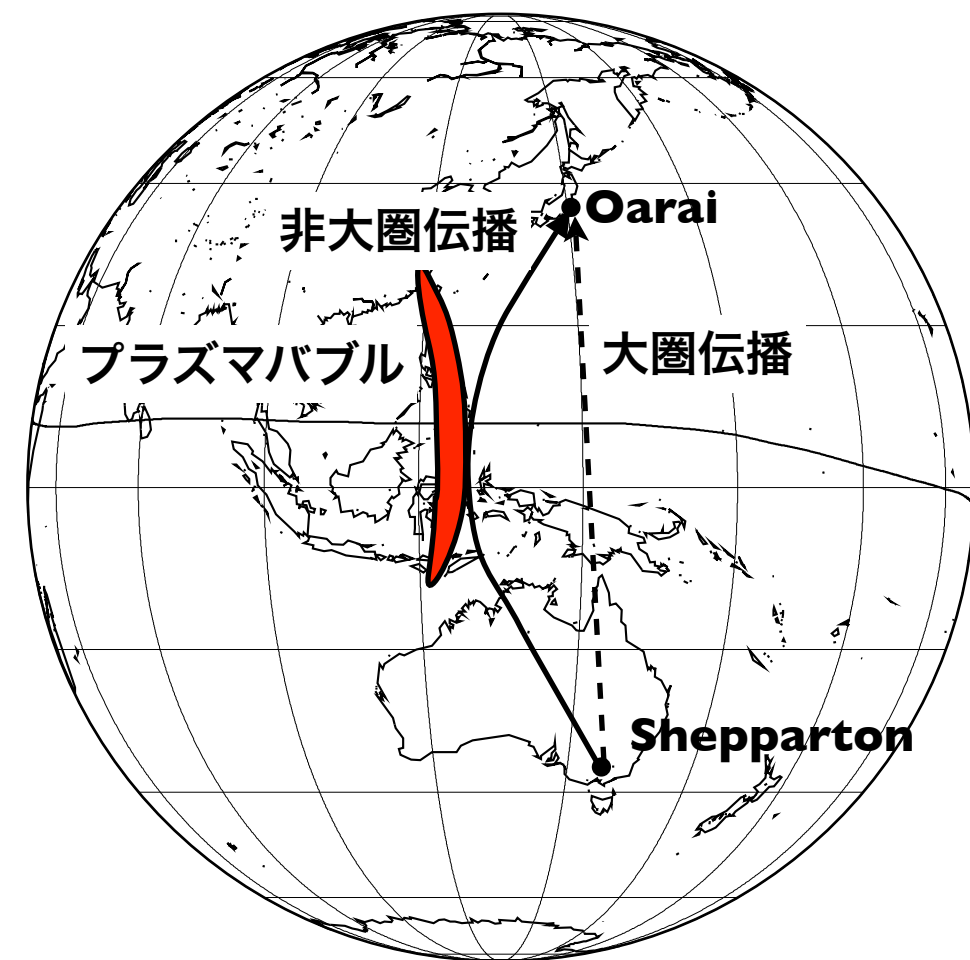
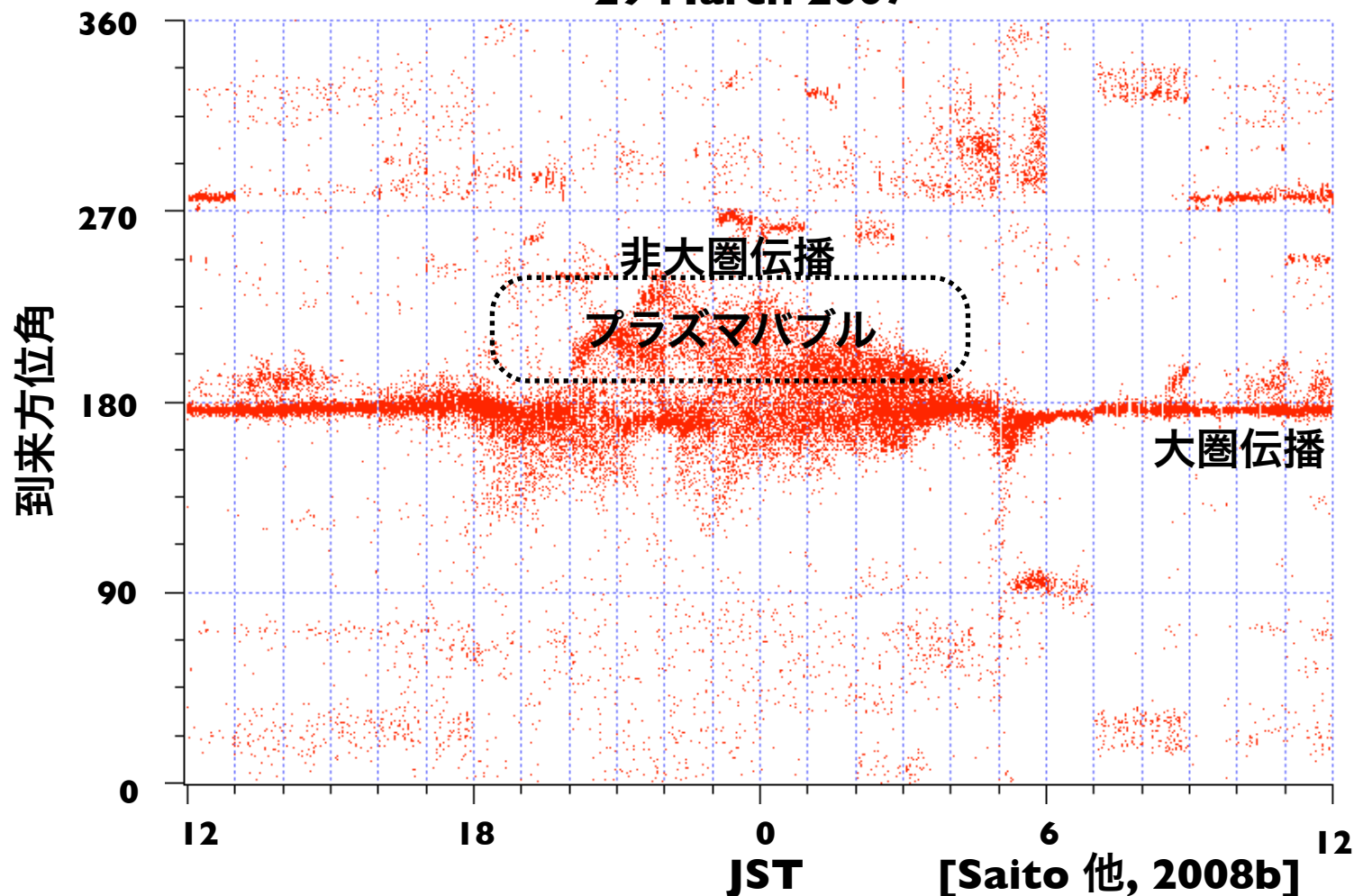
1. 国内観測点における電離圏遅延量勾配/シンチレーション観測
 - 電離圏局所変動解析
2. GEONET I Hzデータのリアルタイム収集
 - 背景電離圏変動解析
3. タイ・インドネシアにおける短基線電離圏遅延量勾配観測
 - 電離圏局所変動解析
 - 他の電離圏観測装置と協力した局所変動と大規模構造の対応付け



電離圏異常広域監視法の開発

短波赤道横断伝播によるプラズマバブル監視

HF放送波 (Radio Australia)の到来方向
29 March 2007



[Maruyama and Kawamura, 2006]

- * 短波赤道横断伝播の到来方向から、プラズマバブルに伴う電離圏大規模構造を検出
- * 位置精度は高くないが、プラズマバブルの有無の広域監視に有効
- * 伝播路長の測定により位置推定精度の向上（科研費H21～23）

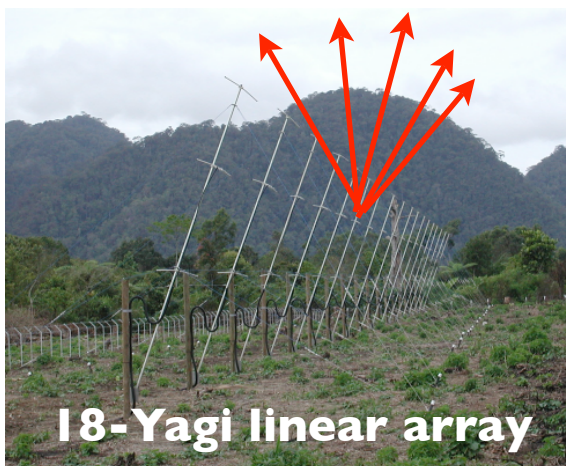


電離圏異常広域監視法の開発 VHFレーダーによるプラズマバブル監視

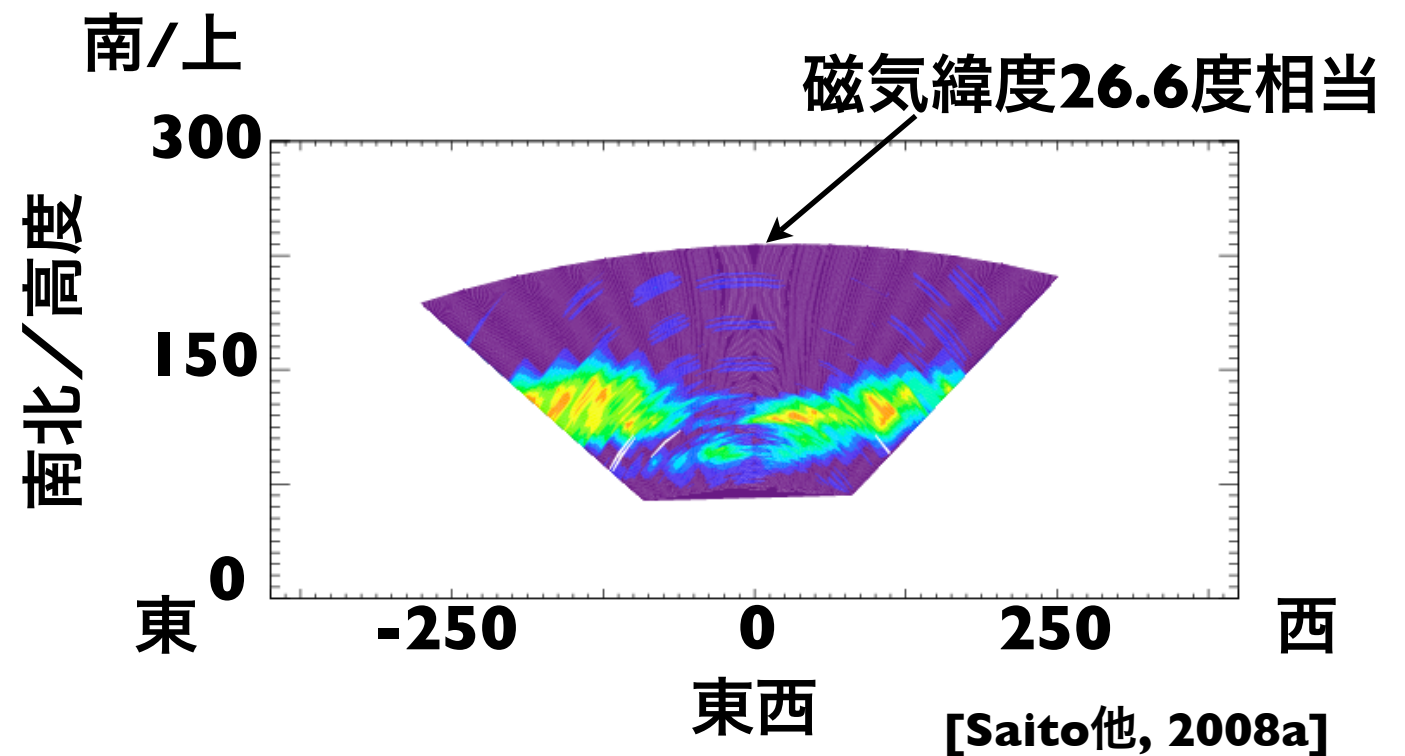
京大赤道大気レーダー (47 MHz, インドネシア)



名大VHF radar (30.8 MHz, インドネシア)



プラズマバブルの2次元断面



- * プラズマバブルに伴うプラズマ不規則構造による、VHF帯電波の後方散乱（磁力線直交方向のブラッグ散乱）を利用
- * レーダービームの電子走査により、プラズマバブルの2次元断面を広範囲で監視可能
- * 京大・名大・インドネシア航空宇宙庁と協力して実験中

宇宙天気ユーザーズフォーラム, NICT小金井, 2013年2月26日



ICAOにおける電離圏問題に対する取り組み

- * ICAO (国際民間航空機関)では、航空航法を衛星航法ベースに切り替えていくことを大きな方針としている。
- * 衛星航法導入において、電離圏の影響を克服すべき課題として認識。
- * ICAOアジア太平洋地域では2009年以降、低緯度電離圏の衛星航法に対する影響についての検討を開始。
- * 2011年7月に、衛星航法の航空利用における低緯度電離圏の影響評価を行うIonospheric Studies Task Force (ISTF)を設立。
 - 第1回ISTF会議：2012年2月、東京
 - 第2回ISTF会議：2012年10月、バンコク
- * 宇宙天気の航空機の運航への利用方法を検討中



Ionospheric Studies Task Force

* ICAOアジア太平洋地域の通信・航法・監視及び気象作業部会以下に2011年7月設立

* 目的

- アジア太平洋地域における衛星航法(SBAS, GBAS)導入のために必要な電離圏の影響評価を行う
- 加盟各国が必要な電離圏観測データ(TEC/シンチレーション)を持ち寄って共有し、解析を行い、結果をアジア太平洋地域の共通情報として共有する。

* これまでの成果

- 協調した電離圏データ収集・共有の進め方について合意
- 参加各国から500ヶ所以上のデータソースが提示
- データ共有のためのフォーマットを決定
- 間もなくデータ収集・解析が実際に始まる見込み

宇宙天気ユーザーズフォーラム, NICT小金井, 2013年2月26日



宇宙天気の航空利用に対する動向

- * 宇宙天気を航空機の運航に利用する際の運用コンセプト (Space Weather ConOps)が策定中
 - 通信・航法への障害、宇宙線被曝の増加の回避などに宇宙天気情報を利用することを提案
- * ICAO 12th Air Navigation Conferenceにおいて宇宙天気利用に関する勧告が採択
 - GNSSの世界的な利用のため、Space Weatherの最適な利用方法を検討していくこと
 - 加盟各国間で協調して効率的に電離圏問題に取り組むこと



まとめ

- * GNSSは次世代の航空航法を担うものとして期待される
- * GNSSにおいては、高い安全性と可用性の両立が必要
- * 電離圏に起因する障害（電離圏遅延量勾配、シンチレーション）はGNSSの航空利用において最も大きな問題
 - 実用面においては、GNSSの利用方法に即した電離圏異常の定量的な評価が重要
 - 宇宙天気利用のためには、信頼性の定量的な担保が重要
- * 電子航法研究所では国内外で電離圏異常の定量的な評価を観測に基づいて実施
- * ICAOにおいても電離圏問題の解決を重要視
 - GNSSの利用方法に即した電離圏異常の定量的な評価を開始
 - 宇宙天気情報の利用に向けた運用コンセプトを検討中

宇宙天気ユーザーズフォーラム, NICT小金井, 2013年2月26日