

GBASのための磁気低緯度電離圏モデル

通信・航法・監視領域

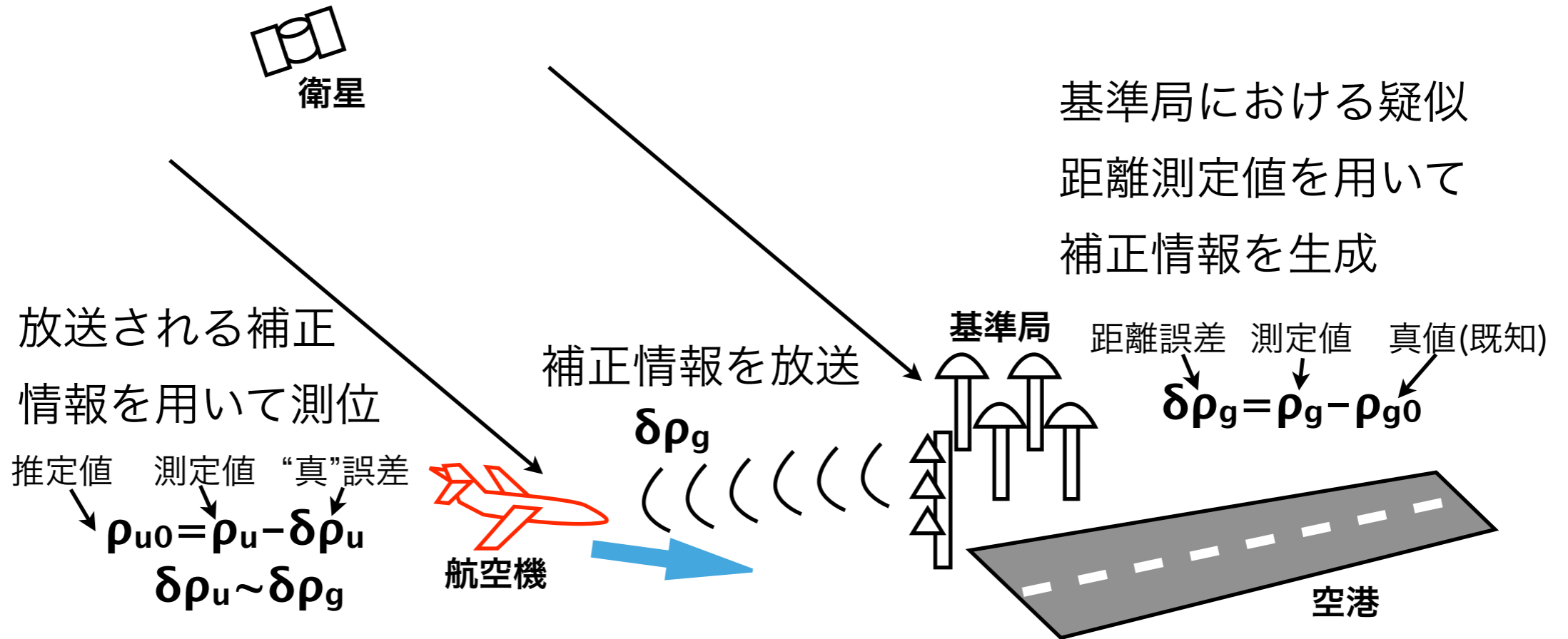
*齋藤 享、吉原 貴之、藤井 直樹、星野尾 一明、
工藤 正博、福島 荘之介、齋藤 真二

目的：GBASに対する磁気低緯度特有の電離圏現象の影響を
評価するためのモデルを開発する



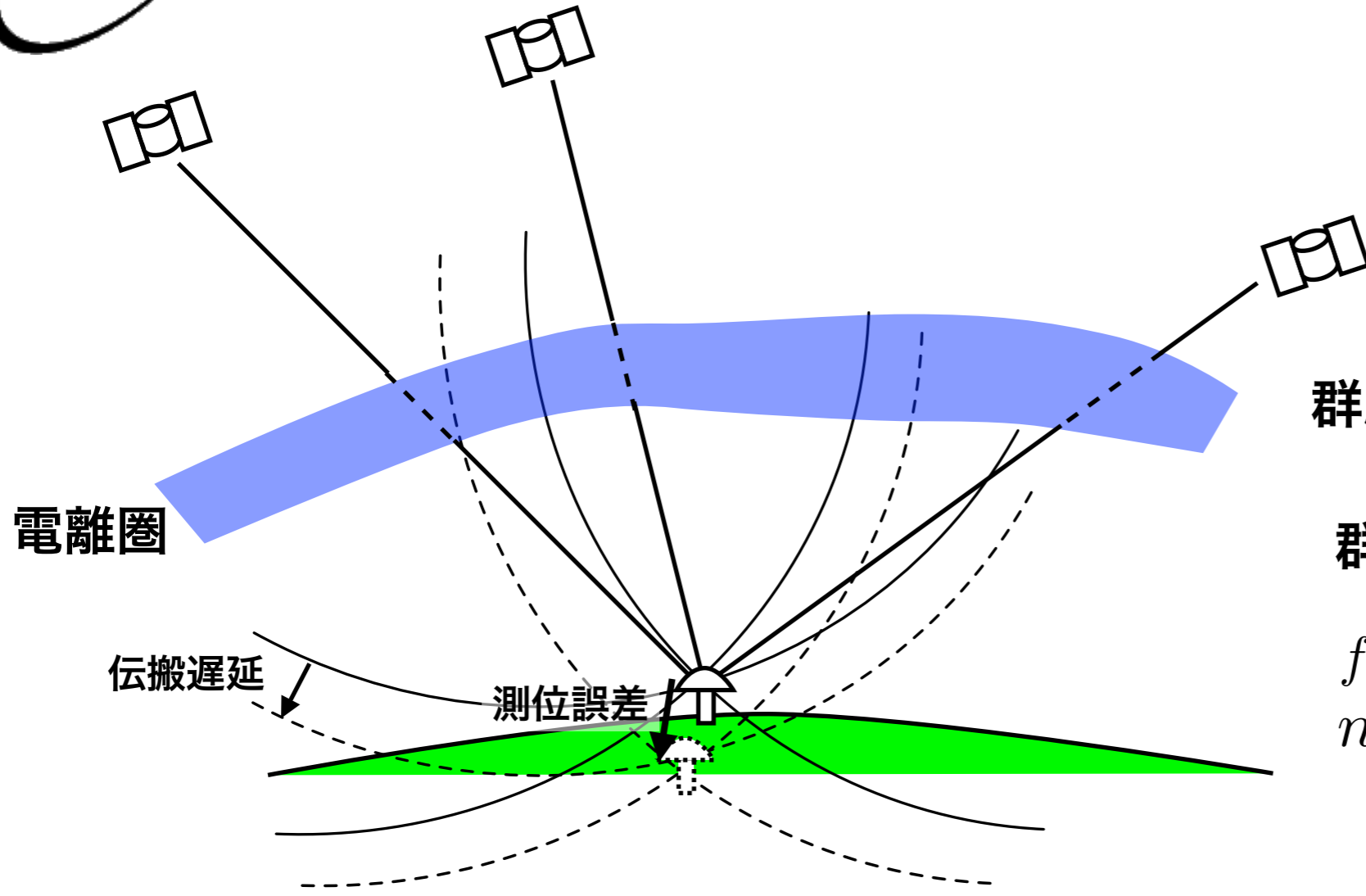
地上型衛星航法補強システム

Ground Based Augmentation System (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正情報を航空機に対して放送し、衛星航法による航空機の精密誘導を行う
- 空港周辺のみをサービスの対象とする

衛星測位と電離圏



群屈折率 $\mu' = 1 + \frac{40.3}{f^2} n_e$

群遅延 $I_\rho = \frac{40.3}{f^2} \int_{sat}^{rec} n_e(l) dl$

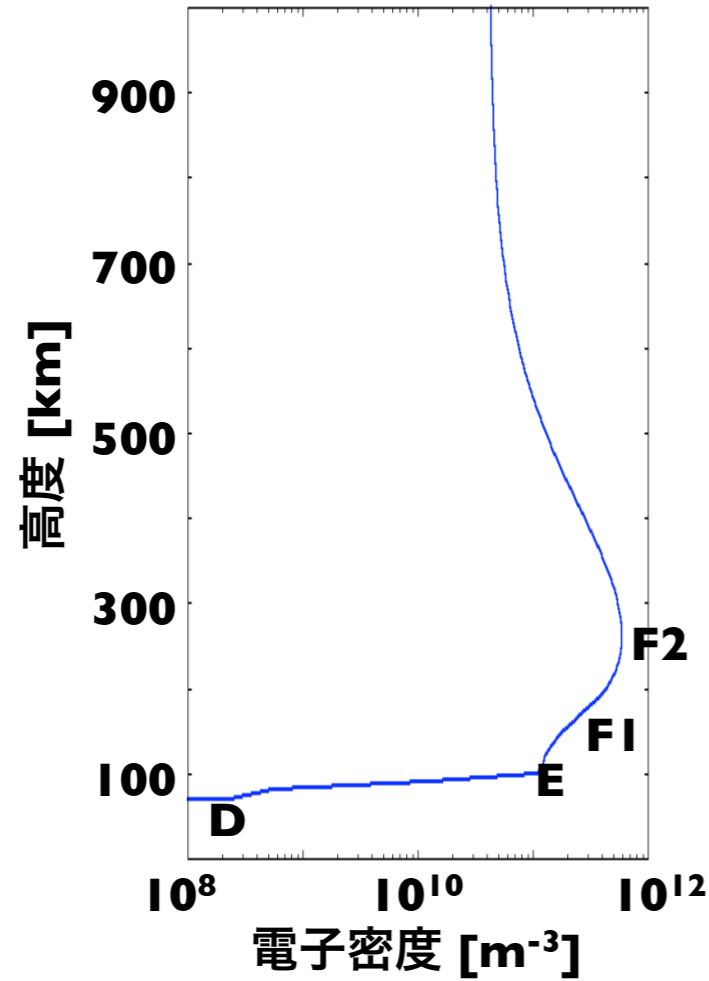
f : 周波数 [Hz] 衛星-受信機間の

n_e : 電子密度 [m^{-3}] 全電子数に比例

- 電離圏プラズマの存在により屈折率が変化し疑似距離に遅延が生じる
- GPS L1周波数(1.57542 GHz)で、通常1~20 m程度の遅延 (場所、昼夜、季節、太陽活動等により変動)

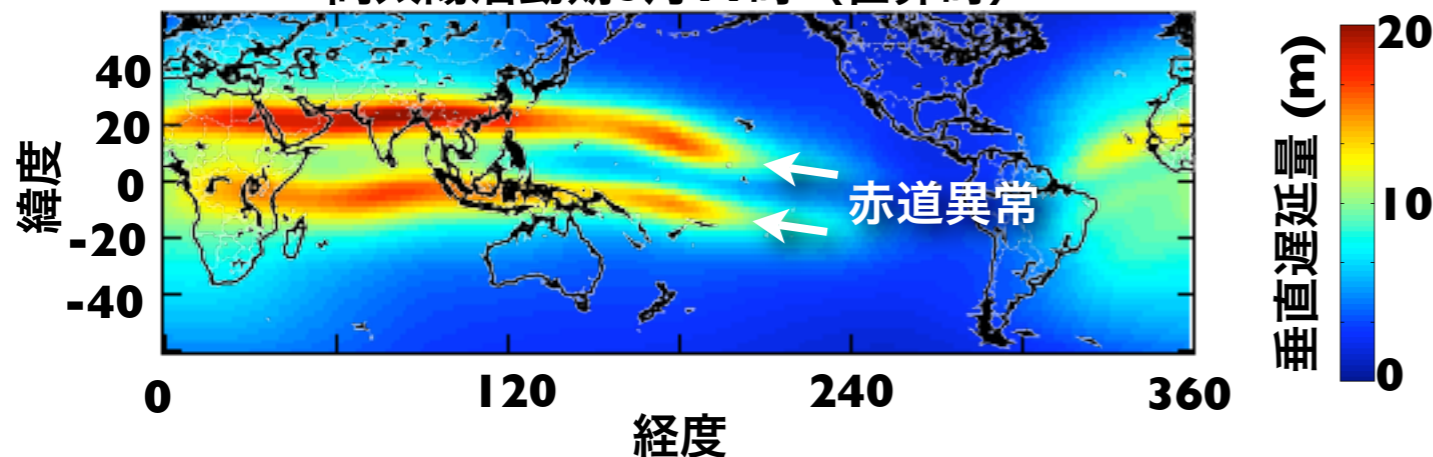
電離圏

太陽活動極小期, 東京, 秋分, 12時

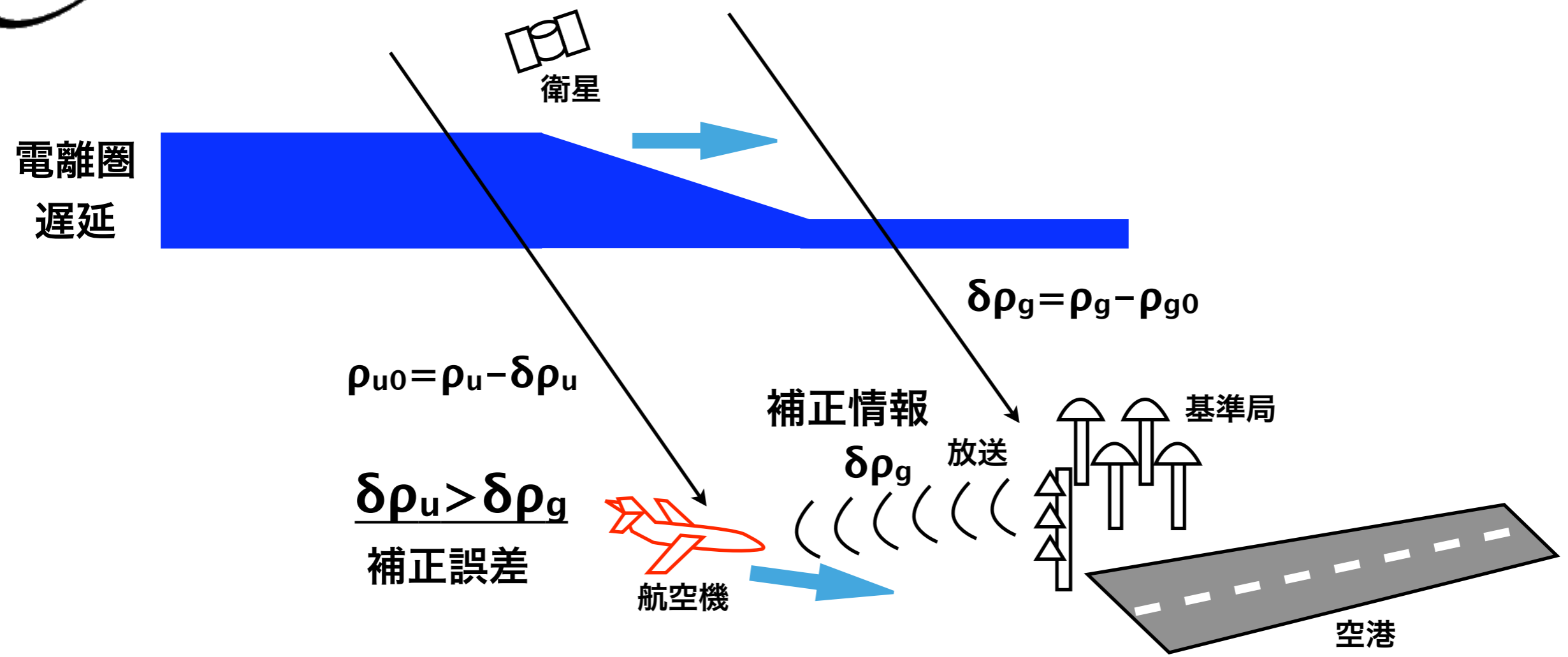


- 高度70~1000 km以上にわたる電離大気 (プラズマ)
- 高度300 km付近にプラズマ密度のピークを持つ
- プラズマ密度分布は太陽活動度、季節、時刻、場所によって大きく変動する
- 磁気緯度 ± 15 度付近にプラズマ密度のピークが存在 (赤道異常)

高太陽活動期3月11時 (世界時)



電離圏空間不均一性による誤差

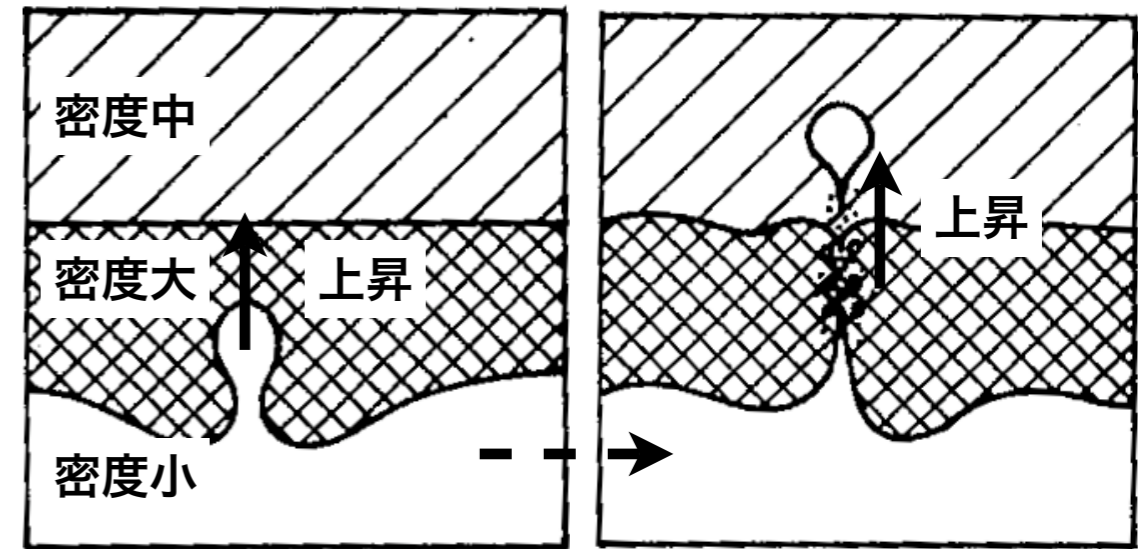


- 電離圏遅延量の空間不均一性 → GBAS補正誤差
- 大きな空間不均一性を伴う電離圏現象：SED、プラズマバブル等
 - SED：磁気嵐に伴う電離圏遅延量の急増
 - プラズマバブル：電離圏遅延量の急減少、磁気低緯度特有

プラズマバブルとは

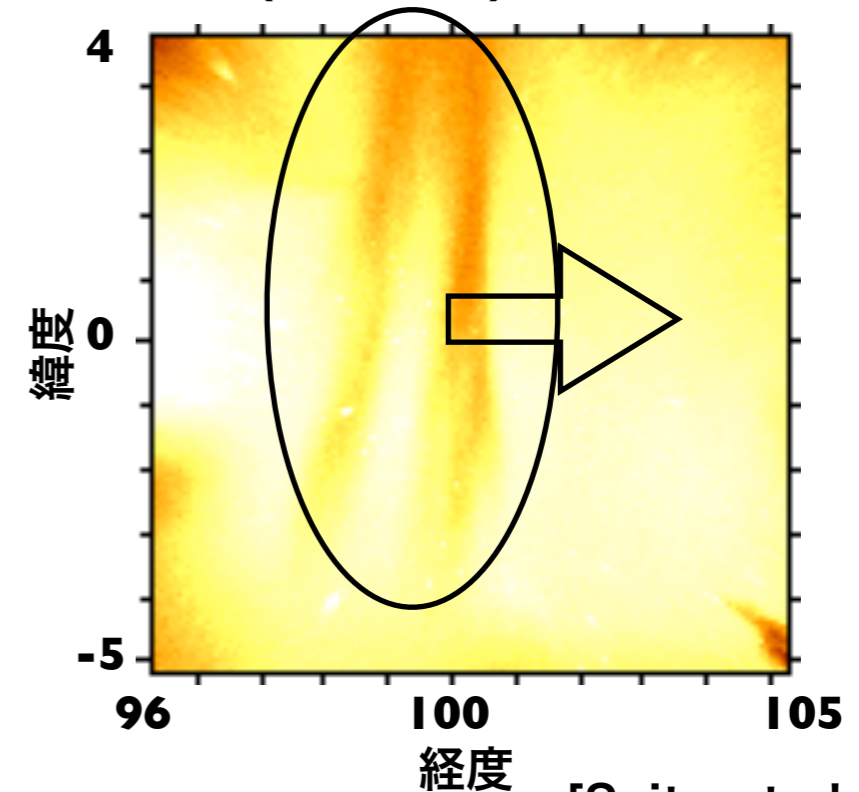
- 日没後（夜間）に電離圏下部の電子密度の低い領域が「泡」のように電離圏上部へ上昇する現象
- 磁気赤道で発生し低緯度域へ拡大しつつ主に東進
- 南北に細長く東西の壁は極めて急峻
- 磁気嵐時には本州へ達する場合も
- 数100 km間隔で複数発生することも多い
- 太陽活動、季節、経度、地磁気活動、下層大気活動等の影響を大きく受ける

プラズマバブルの模式図



[Woodman and LaHoz, 1976]より

酸素原子大気光 (630.0 nm) に現れるプラズマバブル



[Saito et al., 2008]

プラズマバブル電離圏モデル

- プラズマバブルに伴う電離圏勾配を観測だけで全て押さえることは難しい→モデルによるGBASへの影響評価が有効
- モデルの構成：
 - 背景電離圏×プラズマバブルによる密度減少（3次元）
- 背景電離圏：
 - 経験モデル（NeQuickモデル [Giovannini and Radicella, 1990; Radicella and Zhang, 1995]）を用いる
- プラズマバブル：
 - 背景プラズマ密度に対する減少率で定義する
 - 磁気赤道面内の断面で与え、同一磁力線上では同一減少率とする←磁力線に沿って一様な構造を持つため
- 磁場: 傾いた磁気双極子

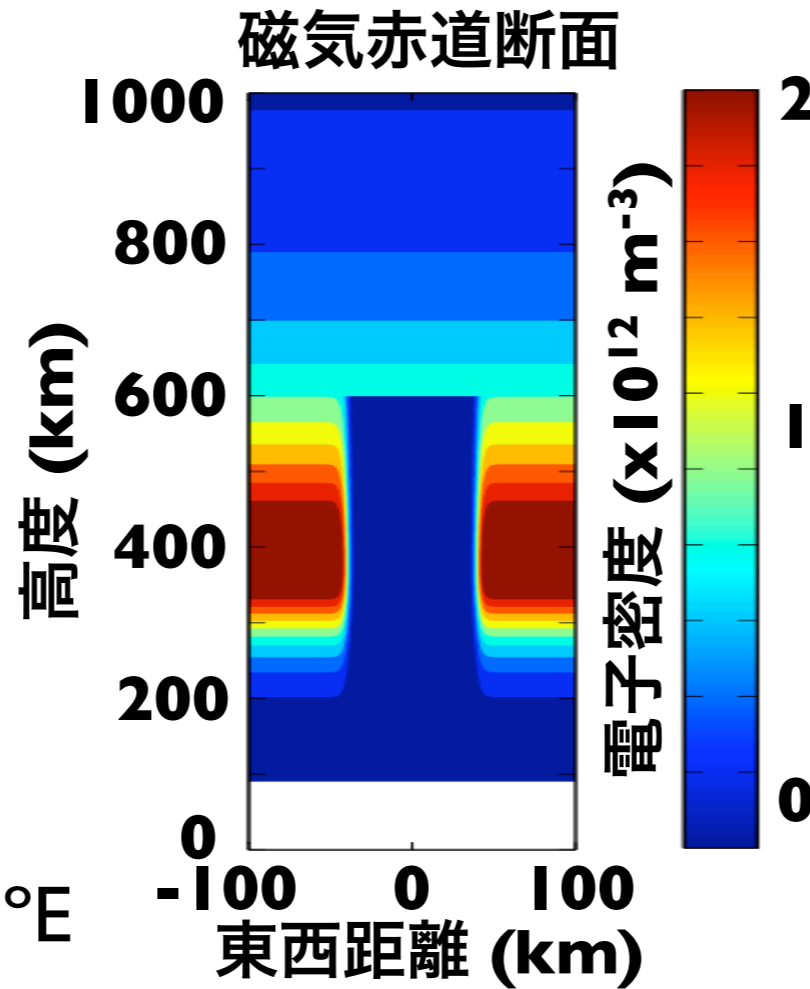
プラズマバブル存在時の垂直遅延量分布

- 背景電離圏

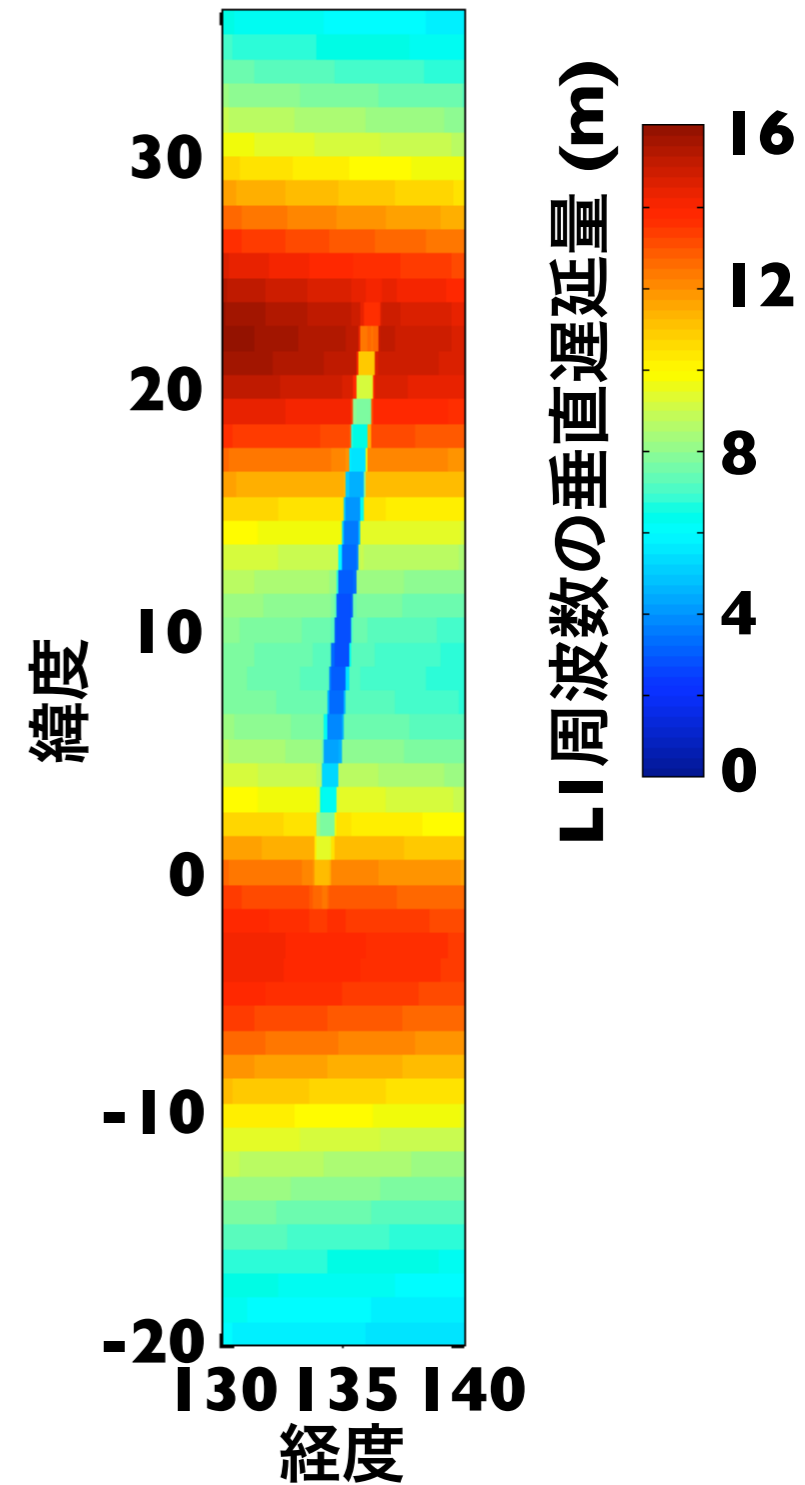
- 太陽活動度：高
- 3月11 UT

- プラズマバブル

- 磁気赤道上経度: 135°E
- 幅: 100 km
- 磁気赤道上最大到達高度: 600 km
- 内部電子密度減少率: 100 %
- 境界のスケール長: 20 km
- 断面の形状：長方形

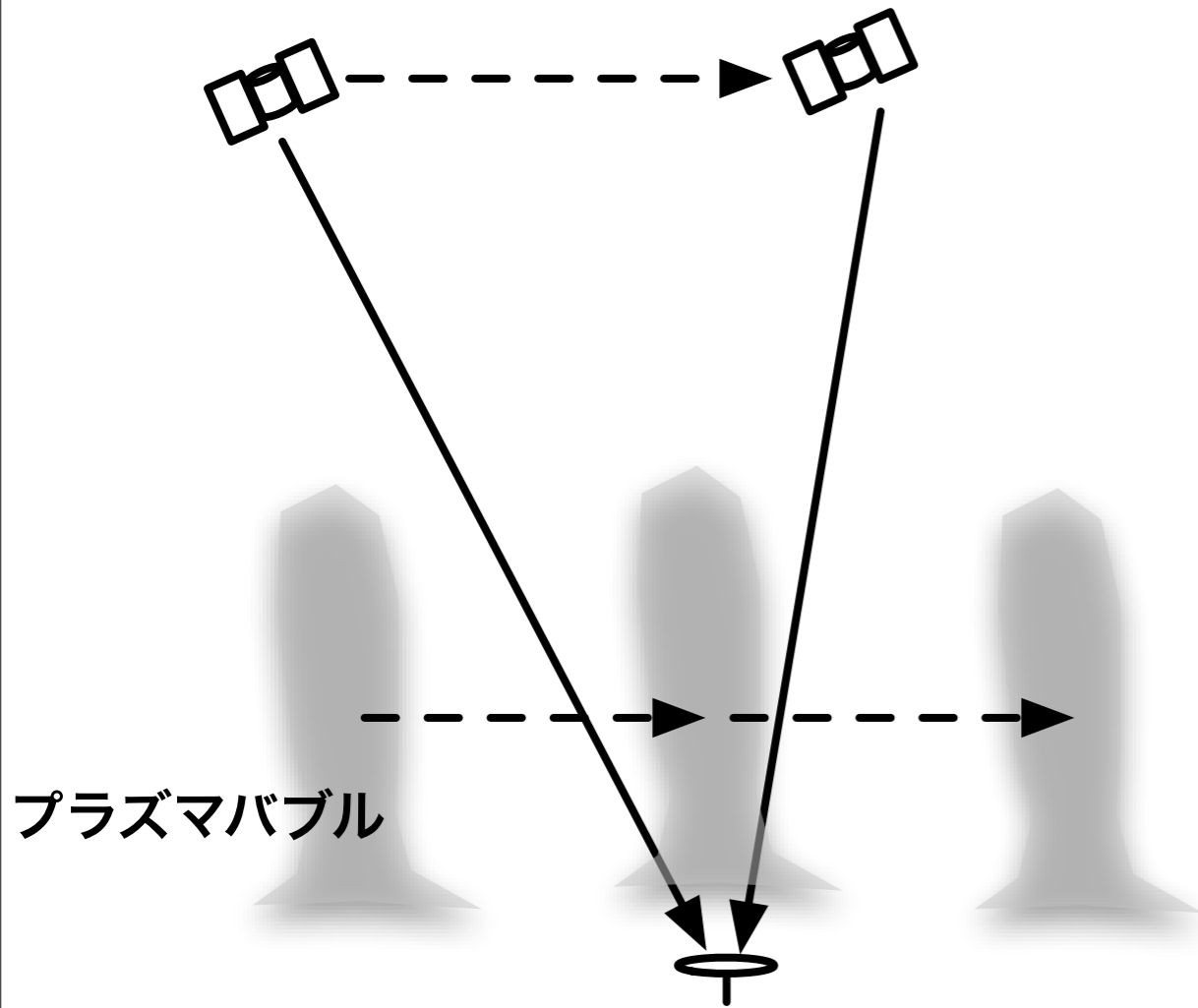


2 高太陽活動期3月20時 (地方時)





ENRI プラズマバブル存在時の視線方向遅延量変動

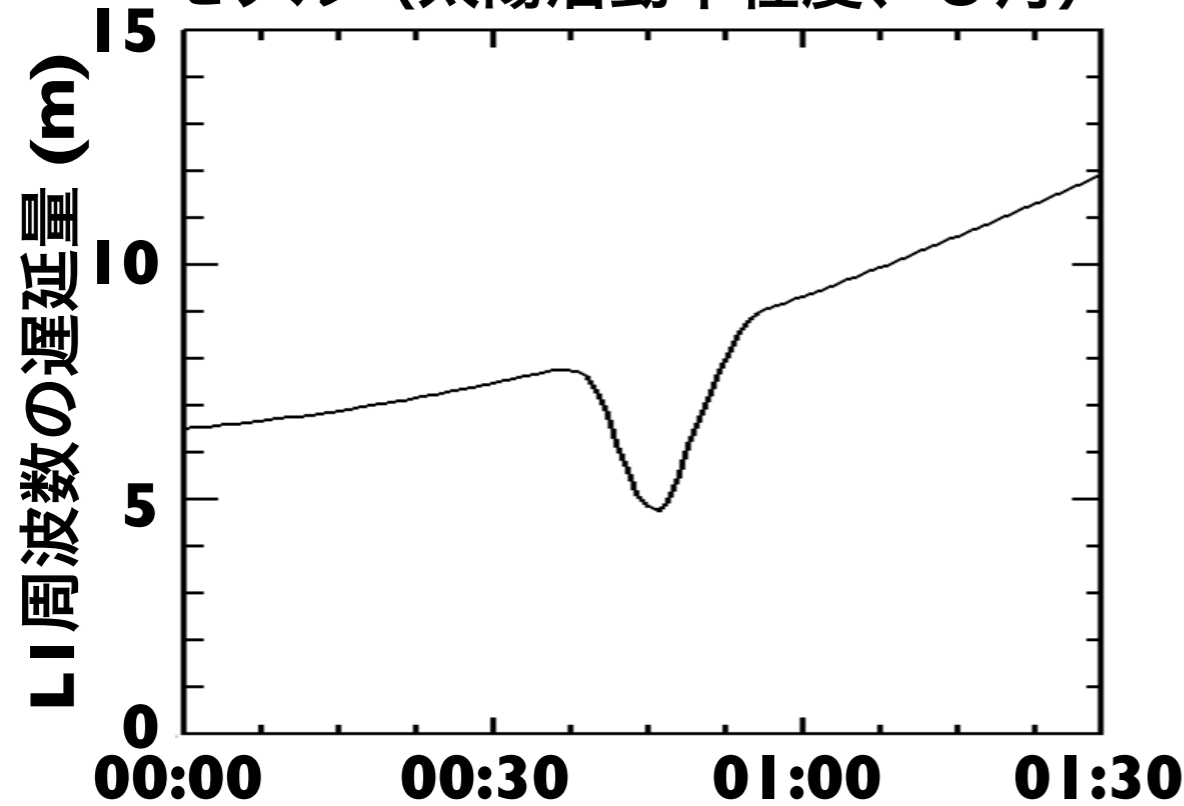


- 地上局をプラズマバブルが通過
 - 135°E, 25°N
- プラズマバブル
 - 個数: 1
 - 磁気赤道上初期経度: 129°E
 - 幅: 100 km
 - 磁気赤道上最大到達高度: 700 km
 - 内部電子密度減少率: 100 %
 - 境界のスケール長: 20 km
 - 断面の形状: 長方形
 - 移動速度: 東向き 130 m/s
- 測位衛星
 - 標準24衛星系

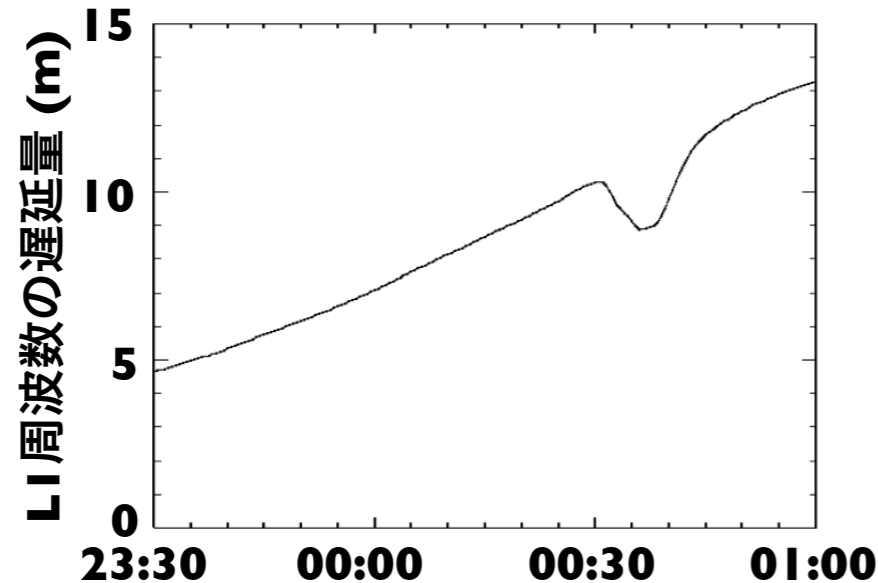


モデル：プラズマバブルに伴う遅延量変動

モデル（太陽活動中程度、3月）

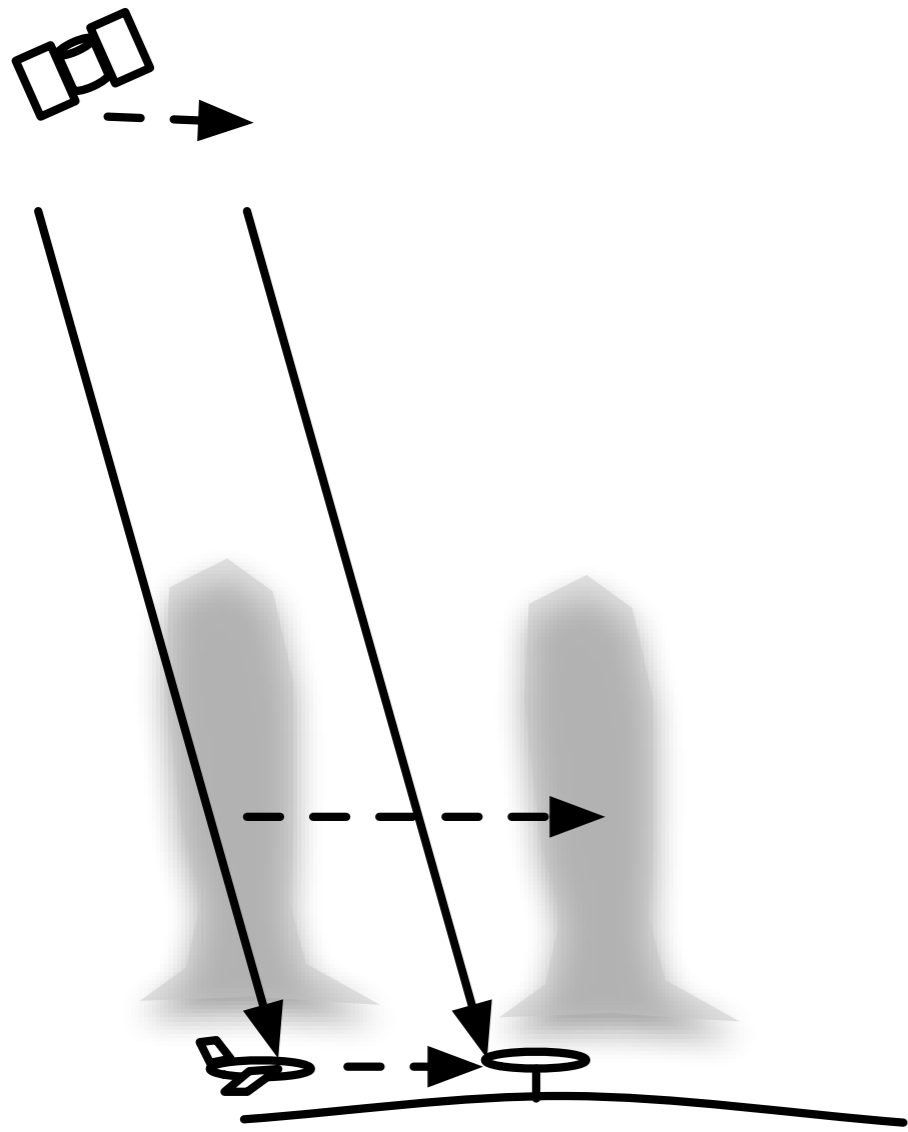


参考（2004年3月24日沖縄の観測値）



- 地上局（135°E, 25°N）における衛星受信機間遅延量を算出
- プラズマバブルに伴う電離圏遅延量の落ち込みを再現
- 算出された遅延量変動は、実際に観測される電離圏遅延量変動の特徴を捉えている
- 本モデルを用いて、GBASに対するプラズマバブルの影響を評価することが可能

ENRIプラズマバブル存在時のGBAS測位シミュレーション

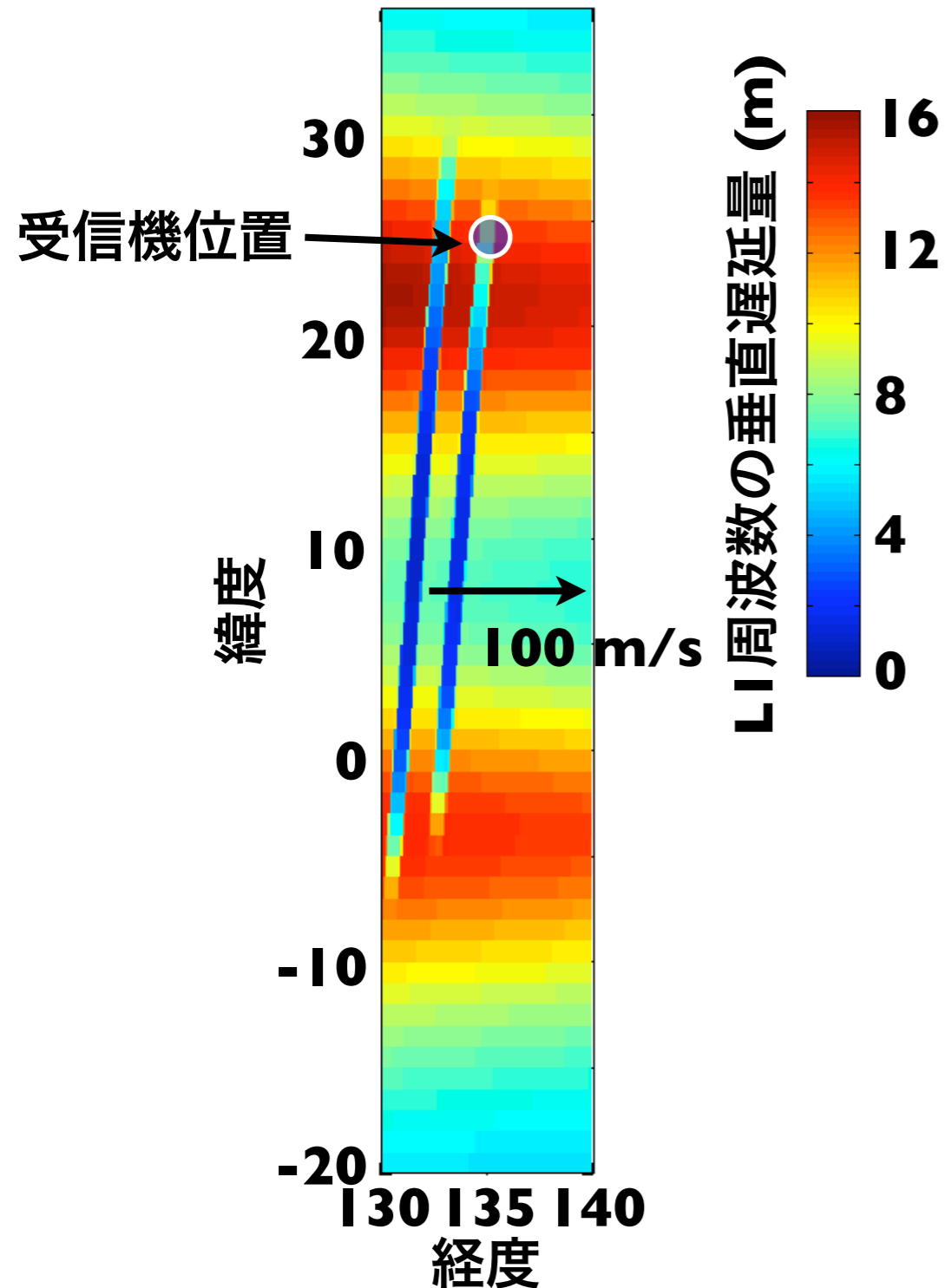


- 地上局に向かって移動局（航空機）が移動：アプローチを想定
- 上空をプラズマバブルが通過
- 電離圏遅延量モデルを用いてGBASのシミュレーションを行う
- 搬送波位相によるスムージングあり
 - 疑似距離-位相乖離の効果を考慮
- 地上局位置：135°E, 25°N
- 移動局初期位置：134.6°E, 25°N
- 移動局速度：80 m/s



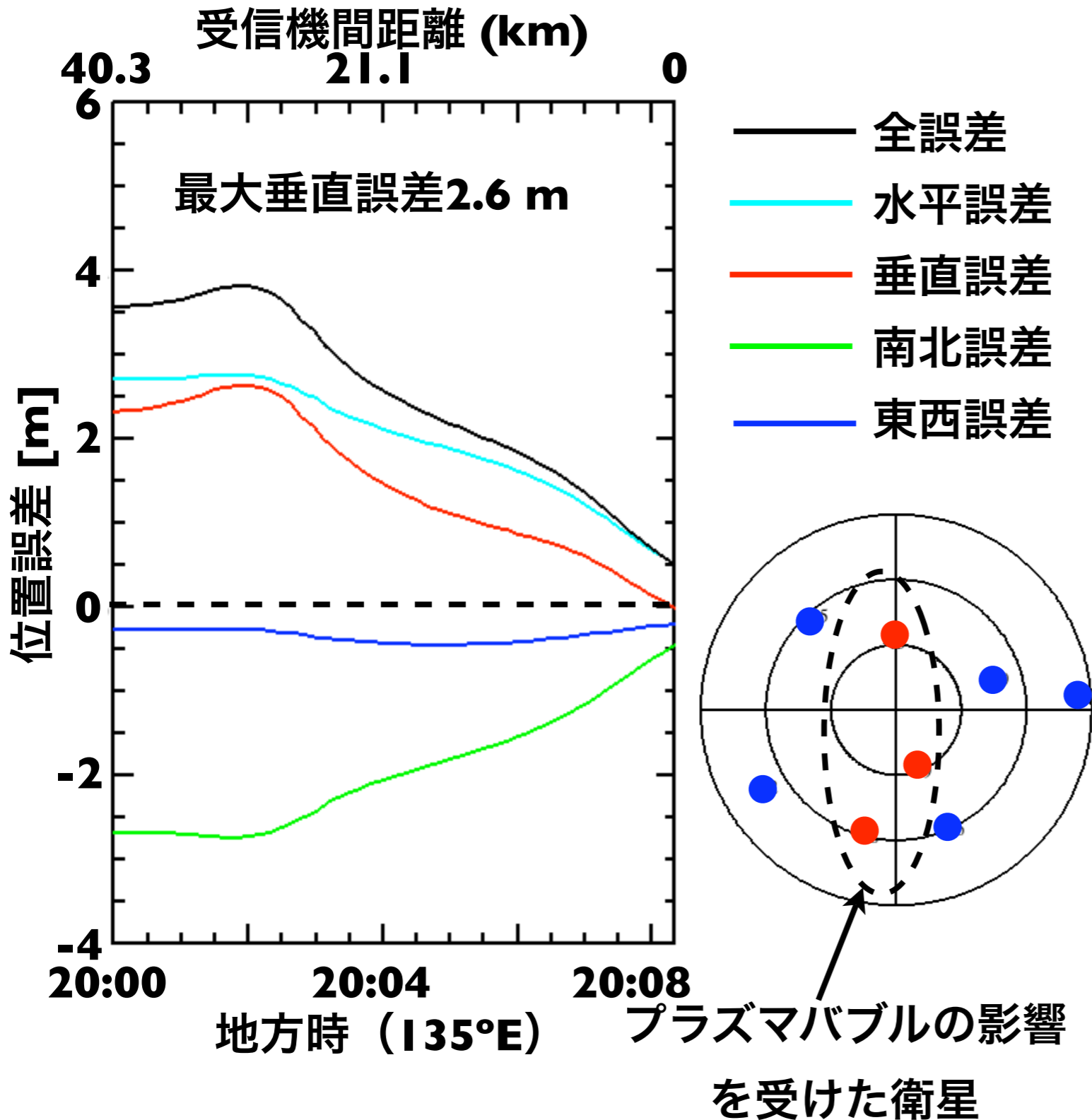
GBAS測位シミュレーション：電離圏遅延モデル

高太陽活動期3月20時（地方時）



- 背景電離圏
 - F10.7 = 170
 - 3月11 UT
- プラズマバブル
 - 個数：2
 - 磁気赤道上初期経度: 131.7, 133.7°E
 - 幅: 100 km
 - 磁気赤道上最大到達高度: 1000, 800 km
 - 内部電子密度減少率: 100 %
 - 境界のスケール長: 20 km
 - 断面の形状：長方形
 - 移動速度：東向き 100 m/s

GBAS測位シミュレーション：測位誤差



- 最大垂直誤差2.6 m (真位置が測位位置よりも低い)
- 距離0でも誤差が残る：搬送波位相スムージングによる誤差の蓄積
- シミュレーション条件はそれほど極端ではない→衛星配置、バブル位置によっては、さらに悪化し得る

まとめ

- プラズマバブルの3次元構造を考慮した電離圏遅延量モデルを開発した
 - モデルにより算出された電離圏遅延量変動は、観測される遅延量変動の特徴を良く捉えている
- 本電離圏遅延量モデルを用いてGBASシミュレーションを行うソフトウェアを開発した
 - 磁気低緯度（日本を含む）に特徴的なプラズマバブルのGBASに対する影響の評価において有効なモデル・シミュレーションツールを開発できた
 - 特に極端ではない条件下であっても、プラズマバブルの存在に伴い2.5 mを越える垂直位置誤差が生じる

今後の発展

- モデルの改良
 - GBAS地上局のインテグリティモニタ機能のシミュレーションへの取り込み→モニタアルゴリズムの検証
 - プラズマバブルに伴うプラズマ不規則構造によるシンチレーションの影響の取り込み
- モデルの応用
 - 各種パラメータ（プラズマバブル、背景電離圏、受信機位置、衛星配置等）を変えたシミュレーションによる最悪ケースの探索、アベイラビリティの計算
 - 任意の条件を作り出せることを利用したGBAS電離層モニタアルゴリズムの開発・検証

参考文献

- Di Giovanni, G. and S.R. Radicella, An analytical model of the electron density profile in the ionosphere, *Adv. Space Res.*, 10, 27-30, 1990.
- Radicella, S. M. and M. L. Zhang, The improved DGR analytical model of electron density height profile and total electron content in the ionosphere, *Annali di Geofisica*, 38, 35-41, 1995.
- Saito, S., S. Fukao, M. Yamamoto, Y. Otsuka, and T. Maruyama, Decay of 3-m-scale ionospheric irregularities associated with a plasma bubble observed with the Equatorial Atmosphere Radar, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2008JA013118, 2008.
- Saito, S., T. Yoshihara, and N. Fujii, Development of an ionospheric delay model with plasma bubbles for GBAS, proceedings of ION ITM 2009, 947-953, 2009.
- Woodman, R. F., and C. LaHoz, Radar observations of F-region equatorial irregularities, *J. Geophys. Res.*, 81, 5447-5466, 1976.