

17. 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

1 はじめに

地上基準局の観測データを基に補正情報を生成するディファレンシャル衛星航法システムである地上補強型衛星航法システム (Ground-based augmentation system; GBAS) において、電離圏遅延量の空間不均一性は大きな誤差要因である。米国においては、地磁気嵐に伴って発生する Storm enhanced density (SED) と呼ばれる現象に伴って非常に大きな電離圏遅延量の勾配が観測され、GBAS における電離圏の脅威として安全性評価に取り入れられている。米国に比べて地磁気緯度の低い日本 (地磁気緯度約 $20\sim 40^\circ$) においては、低緯度電離圏特有の現象についても考慮しなければならない。特に、磁気赤道を挟んで南北 15° 付近に電離圏プラズマ密度の極大が生じる赤道異常と呼ばれる現象と、電離圏に極端にプラズマ密度が低い領域が生じるプラズマバブルと呼ばれる現象が大きな電離圏遅延量勾配を伴い、日本における GBAS の安全性を考慮する上で慎重に取り扱われる必要がある。これらの現象は、SED と異なり地磁気嵐とは関係なく発生するごく一般的な現象であり、GBAS の完全性のみならず可用性にも影響する可能性がある。

プラズマバブルは、磁気赤道において夜間に下部電離圏のプラズマ密度の低い領域が爆発的に上昇するとともに南北方向に発達しつつ多くは東進する現象で、東西方向に細く ($50\sim 100$ km)、南北方向には非常に長い (数 1000 km)。プラズマバブルの境界は非常に急峻で、 $15\sim 30$ km 程度でプラズマ密度が 1 桁以上変動する。これに伴う電離圏遅延量勾配は SED に匹敵するものであり、プラズマバブルの影響評価なしには GBAS の安全性を評価することはできない。

赤道異常、プラズマバブルに関しては長く研究が行われており、一般的な性質についてはよく知られている。例えば、太陽活動度が高いほど高い発生頻度、経度で異なる発生頻度の季節変化、磁

力線に沿った形状、日没線付近で発生し東進する、などの性質が知られている。本研究では、過去の研究の結果明らかになった赤道異常及びプラズマバブルの性質に基づいて電離圏遅延量の 3 次元モデルを構築し、GBAS に対する影響を詳細に検討することを目的とする。

2 電離圏遅延量モデル

2.1 概要

最も単純な電離圏遅延量モデルは、全ての遅延量がある一定高度に存在する無限に薄い層に集中していると仮定する 2 次元薄殻モデルである。電離圏は高度 $300\sim 400$ km にプラズマ密度の極大を持ち大半のプラズマがその極大付近に存在するため、静穏時の電離圏遅延量のモデル化には適している。しかし、プラズマバブルのように磁力線に沿い南北に極めて細長い特有の 3 次元構造が存在する場合、2 次元モデルで仮定される薄殻上の同じ点を通る伝搬路であってもプラズマバブルを横切る伝搬路とプラズマバブルに沿う伝搬路では電離圏遅延量が大きく異なり、2 次元モデルでは正しく表現することができない。このような理由から、本研究では 3 次元モデルを採用する。

本研究で用いるモデルは、プラズマバブルが存在しない静穏状態の背景電離圏にプラズマバブルに伴う電離圏プラズマ減少領域を重畳したものである。背景電離圏モデルとしては、経験モデルである NeQuick モデル (Giovannini and Radicella, 1990; Radicella and Zhang, 1995) を用いる。NeQuick モデルにより、任意の 2 地点間の電離圏遅延量を求めることができる。プラズマバブルは背景に対するプラズマ密度の減少率の形で与えられ、磁気赤道面内の 2 次元断面で定義される。プラズマバブルは磁力線に沿って発達するため、同一の磁力線上では同一の減少率 (その磁力線が磁気赤道面を横

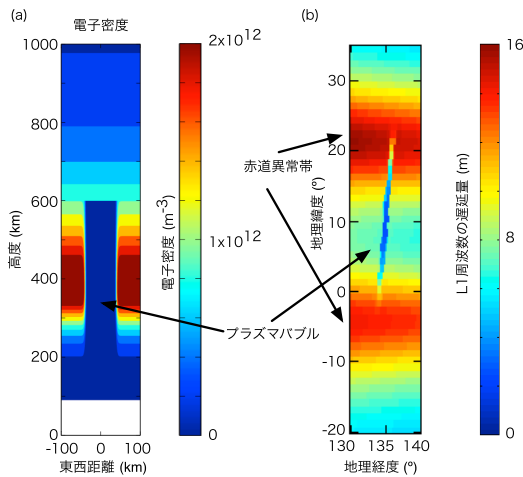


図 1: (a) プラズマバブルの磁気赤道東西断面のプラズマ（電子）密度分布。(b) L1 周波数における電離圏垂直遅延量。高太陽活動期 3 月世界時 11 時（日本時間 20 時）の条件で計算したもの。プラズマバブルのパラメータは表 1 のとおり。

切る位置で定義される減少率)を持つとする。地球磁場は傾いた双極子磁場とする。

背景電離圏モデルは以下のパラメータを可変パラメータとして持つ。

- 地理緯度, 地理経度, 高度
- 世界時における日付, 時刻
- 太陽活動度 (太陽電波指数 (F10.7) または太陽黒点数指数)

プラズマバブルを特性づけるパラメータとしては, 現在のところ以下のものが取り入れられている。括弧内の値は過去の研究から知られている典型的な値である。

- 磁気赤道上の位置 (経度) (数 100 km の間隔において発生しやすい)
- 背景に対する密度減少率 (> 90 %)
- 磁気赤道上の最高到達高度 (500~1200 km 以上)
- 東西幅 (50~200 km)
- プラズマバブル境界域の幅 (10~30 km)
- 東西移動速度 (東向き 50~150 m s⁻¹)

2.2 プラズマバブルによる電離圏遅延量変動

図 1a は, 高太陽活動期の 3 月世界時 11 時 (日本時間 20 時) の条件において表 1 に示すパラメー

表 1: 図 1 のプラズマバブルのパラメータ。

| プラズマバブル | |
|---------------|--------|
| 磁気赤道上の位置 (経度) | 135°E |
| 東西幅 | 100 km |
| 内部の密度減少率 | 100 % |
| 磁気赤道最高到達高度 | 600 km |
| プラズマバブル境界域の幅 | 20 km |

表 2: 図 2 のモデル計算に用いたパラメータ。

| 受信機 | |
|-----------------|-----------------------|
| 位置 | 20°N, 135°E |
| プラズマバブル | |
| 磁気赤道上の初期位置 (経度) | 130°E |
| 東西幅 | 100 km |
| 内部の密度減少率 | 100 % |
| 磁気赤道最高到達高度 | 600 km |
| プラズマバブル境界域の幅 | 20 km |
| 東向き移動速度 | 100 m s ⁻¹ |

タを与えたときの磁気赤道面内プラズマ密度分布である。このようなプラズマバブルが存在するときの垂直遅延量分布を示したものが図 1b である。プラズマバブルによる遅延量の減少領域が南北赤道異常帯にまたがって存在している様子が見て取れる。

次に, 移動するプラズマバブルにより, ある特定の衛星の電離圏遅延量がどのように変化するかを計算した。衛星配置は 24 衛星からなる標準配置を用いた。地上に固定された受信機で観測される電離圏遅延量はプラズマバブルの移動による電離圏遅延量の時間変化と衛星の移動による伝搬路の変化によって決まる。図 2 は, 表 2 に示すパラメータで定義される東向きに 100 m s⁻¹ で移動するプラズマバブルが, 地上の固定受信機と南向きに移動する衛星の間を横切った場合に地上で観測される電離圏遅延量の変化である。この変化パターンは図 2 に示す 2004 年 3 月 23 日に沖縄で実際に観測されたプラズマバブルに伴う電離圏遅延量の変化と良く似ており, 本研究で用いるモデルが現実のプラズマバブルの特徴を捉えていることを示すものと言える。

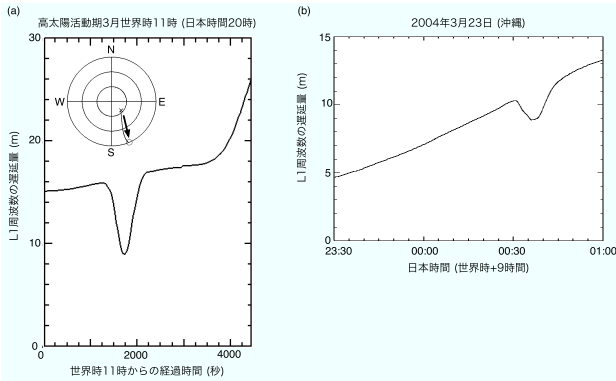


図 2: (a) 固定受信機上空をプラズマバブルが通過する場合の L1 周波数における電離圏斜め遅延量の変化。本計算に用いたパラメータは表 2 のとおり。本計算に用いた衛星の位置 (× から ○へ移動) を共に示す。(b) 2004 年 3 月 23 日に沖縄で観測された PRN 18 衛星の電離圏斜め遅延量 (周波数間バイアスを含む) の変化。

3 GBAS に対する影響の解析

GBAS に対するプラズマバブルに伴う電離圏遅延量勾配の影響を調べるために、以下では地上に固定された受信機とその固定受信機に向かって移動する受信機を考え、本モデルを用いて電離圏遅延量を計算し、疑似距離補正誤差及び測位誤差の評価を行う。移動受信機は、航空機のアプローチ速度に近い 80 m s^{-1} とした。

GBAS においては、疑似距離のふらつきを小さくするために搬送波位相を用いて平滑化するキャリアスムージングという操作を行う。プラズマ中の電波伝搬の特性により疑似距離と搬送波位相が乖離し、スムージング時定数の間誤差が蓄積し基準局-航空機間の距離が十分短くなっても誤差が残る。本研究では固定受信機、移動受信機それぞれでキャリアスムージングを行った上で比較を行う。

本研究では、モデルの性能を検証するために、平均的なパラメータをもつプラズマバブルについて解析を行う。

3.1 特定の衛星に対する影響

それぞれの衛星の疑似距離に発生する補正誤差を評価するために、表 3 に示すパラメータを用いてシミュレーションを行った。シミュレーション

表 3: 図 3 のモデル計算に用いたパラメータ。

| 受信機 | |
|-----------------|---|
| 固定受信機位置 | $20^{\circ}\text{N}, 135^{\circ}\text{E}$ |
| 移動受信機位置 | $20^{\circ}\text{N}, 134.6^{\circ}\text{E}$ |
| 移動受信機速度 | 80 m s^{-1} |
| キャリアスムージング時定数 | 100 s |
| プラズマバブル | |
| 磁気赤道上の初期位置 (経度) | 135.35°E |
| 東西幅 | 100 km |
| 内部の密度減少率 | 100 % |
| 磁気赤道最高到達高度 | 600 km |
| プラズマバブル境界域の幅 | 20 km |
| 東向き移動速度 | 100 m s^{-1} |

は高太陽活動期の 3 月世界時 11 時 (日本時間 20 時) を開始時刻とした。開始時においてプラズマバブルは固定受信機の東方約 37 km にあって東に 100 m s^{-1} で移動、移動受信機は固定受信機の西方約 42 km にあって東に 80 m s^{-1} で移動し、シミュレーション開始後 520 s で固定受信機位置に到着した。このとき、固定受信機から見て南南東方向にあり南に移動している衛星について電離圏遅延量を計算したものを図 3 に示す。このとき、移動受信機の伝搬路はプラズマバブル中を通過しているが、固定受信機の伝搬路は当初プラズマバブルの外側にあり次第にプラズマバブルにかかってきている状態である。このとき最大疑似距離補正誤差は約 2 m、キャリアスムージングの効果により移動受信機が固定受信機位置に到着しても約 1 m の遅延量差が残っている。

3.2 移動受信機のディファレンシャル測位に対する影響

図 3 のような疑似距離補正誤差が生じた場合において、測位において生じる誤差を評価するために、図 3 に用いた条件を用いて全ての可視衛星の疑似距離補正值を計算し、移動受信機のディファレンシャル測位シミュレーションを行った。図 4 は本シミュレーションで得られたディファレンシャル測位誤差を示したものであり、最大垂直誤差は 0.25 m、最大水平誤差は 0.33 m であった。シミュレーション時間内にプラズマバブルの影響を受けた衛星は 06 番の 1 個のみであり、受信機の視野内

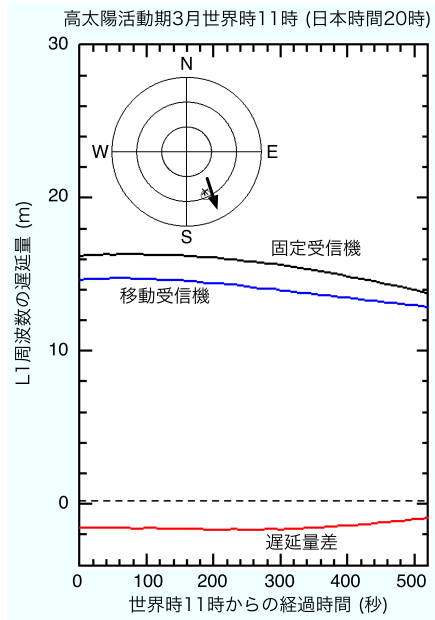


図 3: 地上固定受信機 (黒) 及び固定受信機に向かって移動する受信機 (青) の電離圏遅延量の変化。両者の差を赤線で、用いた衛星の位置 (× から ○ へ移動) を示す。本シミュレーションに用いたパラメータを表 3 のとおり。

には同図内に示すように合計 9 つの衛星があったため、測位誤差は比較的小さなものにとどまると考えられる。可視衛星数が少ない場合、衛星の幾何学的配置が良くない場合、またプラズマバブルの影響を同時に複数の衛星が受ける場合などは、より大きな測位誤差が生じると考えられる。複数のプラズマバブルが存在する場合 (実際珍しいことではない)、保守等で使用できない衛星が存在する場合などの検討を今後行う予定である。

4 まとめ

本研究では、プラズマバブルを考慮した 3 次元磁気低緯度電離圏遅延モデル及びディファレンシャル測位シミュレーションソフトウェアを開発した。本モデルを用いた疑似距離時間変動は、実際に観測されたプラズマバブルに伴う疑似距離時間変動と良く似たパターンを示し、本モデルが現実のプラズマバブルの特徴を捉えていることが確認された。本モデルを用いてプラズマバブルの GBAS に対する影響の評価を典型的なプラズマバブルのパラメータを用いた 1 例について行い、0.4 m 程度の

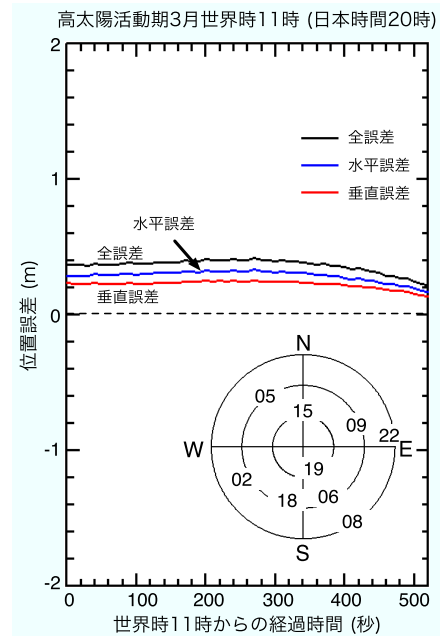


図 4: 図 3 と同じ条件における移動受信機のディファレンシャル測位誤差。本計算に用いた衛星の位置 (数字は衛星番号) を共に示す。

測位誤差を得た。本研究で用いたパラメータはごく平均的な値を用いたものであり、結果も特に極端な値ではなくごく普通にあり得る値として解釈すべきである。今後、本モデルを用いて様々な衛星配置、プラズマバブルの条件についてシミュレーションを行い、GBAS に対するプラズマバブルの影響を評価する予定である。

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., T. Yoshihara, and N. Fujii, Development of an ionospheric delay model with plasma bubbles for GBAS, *Proceedings of ION 2009 International Technical Meeting*, 2009.