

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月20日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740326

研究課題名（和文） GPS受信機網を利用した電離圏擾乱のスケール間結合と衛星測位への影響に関する研究

研究課題名（英文） A study of multi-scale ionospheric disturbances and their effects on GNSS using GPS receiver networks

研究代表者

津川 卓也（TSUGAWA TAKUYA）

独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所宇宙環境インフォマティクス研究室・主任研究員

研究者番号：20377782

研究成果の概要（和文）：国内外のGPS受信機網データから、電離圏全電子数や電離圏擾乱指数、GPSロック損失率等の2次元マップを作成し、データベース化した。これらのデータを用い、伝搬性電離圏擾乱やプラズマバブル等の電離圏擾乱の統計的性質を明らかにすると共に、衛星測位への影響について調べた。日本上空については、全電子数リアルタイム2次元観測を開始し、東北地方太平洋沖地震後に津波波源から波紋状に広がる電離圏変動の詳細を世界で始めて捉えた。

研究成果の概要（英文）：Two-dimensional maps of ionospheric total electron content (TEC), rate of TEC change index (ROTI), loss-of-lock on GPS signals were derived using GPS receiver networks in Japan and the world. Using these data, ionospheric disturbances such as TIDs and plasma bubbles and their effects on GNSS were statistically studied. We have started realtime two-dimensional GPS-TEC observation in Japan and detected clear concentric ionospheric waves after the 2011 Tohoku earthquake.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：電離圏・GPS・全電子数

1. 研究開始当初の背景

(1) GPS等の衛星測位で利用される電波は、地球の電離圏を通過する際に周波数に依存して遅延が生じる。この性質を利用

すると、GPS受信機の疑似距離及び位相の遅延量情報から電離圏プラズマの量（全電子数）を測定することができる。申請者らは、国内外の密なGPS受信機網

データから高時間・高空間分解能の2次元全電子数(TEC)マップを作成し、数100~数1,000 kmの空間スケールを持つ伝搬性電離圏擾乱(TID)やプラズマバブル等の電離圏擾乱現象の観測的研究を行なってきた。

- (2) 近年、TECの時間微分の標準偏差(Rate of TEC Change Index: ROTI)が数10 kmスケールの電離圏擾乱指数として利用され、数100kmスケールの中規模TIDとROTIに良い相関があることが明らかにされた。また、プラズマバブル(経度幅数100km、緯度幅数1000km)が観測された領域内でROTIが増大し、さらにROTIが大きくなっている領域で、GPS信号ロック損失が起こっていることが明らかにされた。GPS信号ロック損失は、数100 mスケールの電離圏擾乱のフレネル散乱による、GPSシンチレーションにより起こると考えられる。このことは、大きなプラズマバブルの構造(経度幅数100km)の中に、数10kmスケール(ROTI増大)と数100mスケール(ロック損失)の電離圏擾乱が存在していることを示している。
- (3) このように、これまでGPS全電子数2次元マップで明らかにされてきた数100~数1,000kmの空間スケールを持つTIDやプラズマバブルの空間構造内に、さらに小さな空間スケールの電離圏擾乱が存在することがわかってきた。しかし、これらの現象の異なる空間スケール間の関連性やそれらのGPS測位への影響を統計的に調べた例は無い。

2. 研究の目的

- (1) 国内外のGPS受信機網データの疑似距離、位相、ロック損失情報を利用して、数100mから数1,000kmのマルチスケールによる電離圏擾乱現象の2次元観測を行い、電離圏擾乱現象のスケール間結合とGPS精密測位へ与える影響を統計的かつ定量的に明らかにすることを目的とする。
- (2) 特に、日本や東南アジア域などの中・低緯度域で頻繁に観測される伝搬性電離圏擾乱(TID)と、GPS測位に与える影響が大きいプラズマバブルに着目する。

3. 研究の方法

- (1) 国内外で一般に公開されているGPS受信機データを収集し、全電子数の絶対値及びその変動成分、ROTI、GPSロック損失率の2次元マップを作成し、2000年から現在までのGPS受信機網データについて作成した上記の2次元データをデータベース化する。

- (2) このデータベースを利用して、中・低緯度電離圏で観測される中規模TID及びプラズマバブルについて、異なる空間スケール間の関連やGPS測位に与える影響を統計的に明らかにする。また、これらの現象の太陽活動度、季節、地方時、経度依存性などを統計的に明らかにする。
- (3) 本研究で作成された各種2次元マップやデータベースは、WEBで一般に公開し、共同研究を促進する。

4. 研究成果

(1) 国内外のGPS受信機データ収集、及び全電子数データベースの構築

国内外で一般に公開されているGPSデータサーバーから、GPSデータ(RINEXファイル)を取得し、全電子数(TEC)データベースを構築した(図1)。日本上空においては、2000年から現在までのTEC絶対値、TEC変動成分、電離圏擾乱指数(ROTI)、ロック損失率の2次元マップを算出し、データベース化を行った。また、準リアルタイムGPSデータを利用し、数時間の遅延で上記のデータを閲覧できるシステムを開発した(図2)。これらのデータベースは、インターネットを用いて一般に公開し、共同研究を推進した。

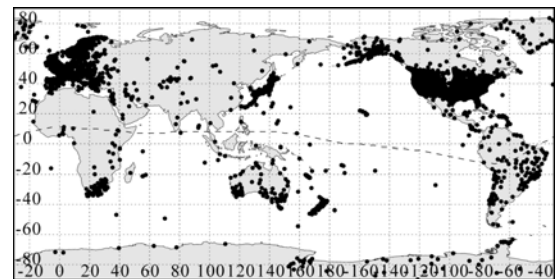
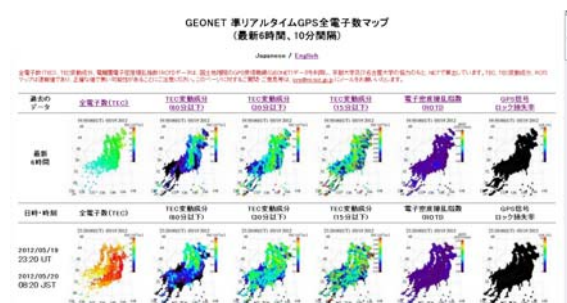


図1 オンラインでデータを収集しているGPS受信機分布(2012年1月現在、6,000点以上)。



http://seg-web.nict.go.jp/GPS/QR_GEONET/

図2 GEONET準リアルタイムGPS全電子数マップウェブサイト。

(2) 伝搬性電離圏擾乱の統計的特徴と GPS 測位への影響に関する研究

日本及び欧州上空の TEC マップデータを利用し、数 100 km の波長を持つ中規模 TID の出現率及び伝搬方向の季節依存性、緯度・経度依存性について統計的に調べた。中規模 TID は、昼間に現れ南方向へ伝搬するものと、夜間に現れ南西方向へ伝搬ものの 2 種類に分けられることがわかった。昼間のものは、日本・欧州とも冬季に出現率が高い傾向があった。一方、夜間のものは、日本では出現率が夏季に最大、冬季に第二極大となるが、欧州では出現率が冬季のみ高くなる傾向が見られ、出現率に経度依存性があることがわかった。また、欧州における中規模 TID の緯度依存性を調べたところ、昼間のものは緯度依存性がほとんど見られなかったが、夜間のものは緯度 55° 以北でほとんど観測されなかった。モデル計算との比較から、昼間 TID は大気重力波起源、夜間 TID は振動性電場起源であると考えられることがわかった。

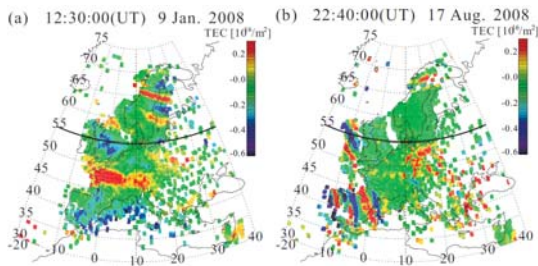


図 3 欧州上空の TEC 観測で捉えられた昼間（左）と夜間（右）の中規模 TID の例。

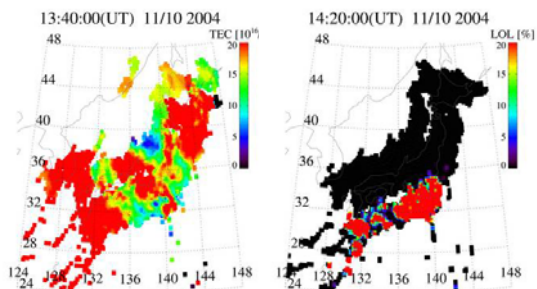


図 4 2004 年 11 月 10 日の日本上空において夜間中規模 TID が観測された時の TEC 絶対値マップ（左）とロック損失率（右）。

このような中規模 TID の振幅は、通常背景に対して 10% 程度であり、しばしば ROTI の増大を伴うが、GPS ロック損失 (LOL) は発生しない。しかしながら、

2004 年 11 月 10 日の磁気嵐時に観測された夜間中規模 TID の振幅は背景に対して 50% 以上と非常に大きく、TID 構造内の広い範囲で LOL 率が增大していた (図 4)。これは、磁気嵐に伴う強い東向き電場により赤道異常帯が中緯度まで発達し、中緯度域で背景電子密度が増大した結果、通常の TID の振幅が異常に増大したものと考えられる。図 5 に、国分寺における 2004 年 11 月 9-11 日の 3 日間の 2 周波 GPS 受信機による Kinematic GPS 測位の誤差を示す。この TID が観測された 11 月 10 日夜間 (赤枠内) で、測位誤差が水平方向で 3m、高さ方向で 7m 程度まで増大している。この誤差の増大は、頻繁に発生したロック損失が原因と考えられる。

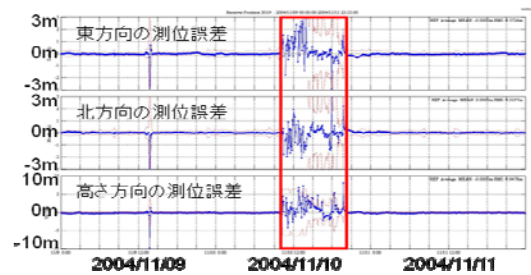


図 5 2004 年 11 月 9-11 日の 3 日間の 2 周波 GPS 受信機による Kinematic GPS 測位の誤差。

(3) プラズマバブルの統計的特徴と GPS 測位への影響に関する研究

沖縄 (0100 局) の 14 年分のデータを利用して GPS ロック損失率 (LOL) の統計解析を行った。その結果、5 分当りの LOL 率は、春と秋の夜間に大きくなることがわかった (図 6)。ROTI との比較から、この LOL 率増大は、中緯度域まで発達した東西方向に数 100km、南北方向に数 1000km の空間スケールを持つプラズマバブルが、数 100m スケールの電離圏擾乱を内包していた結果と考えられる。太陽活動度が高い 2000-2002 年は特に LOL 率が大きく、2001 年秋と 2002 年春では、

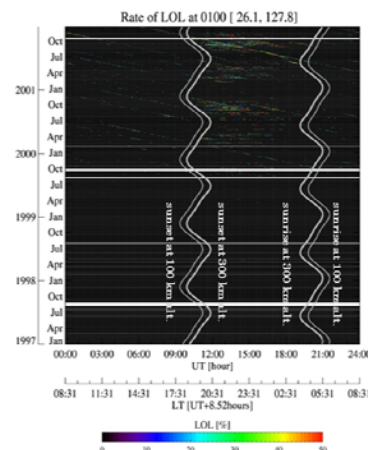


図 6 1997-2001 年の沖縄における LOL 率。

3日に1日の割合で、LOL率が30%以上になることがわかった。

TEC、ROTI、GPS ロック損失 (LOL) 率、及び大気光データを利用し、プラズマバブルの大規模な構造と、ROTI 及び LOL 率の関係について統計的に調べた (図 7)。その結果、LOL 率の増大は、大気光減光と ROTI 増大領域と

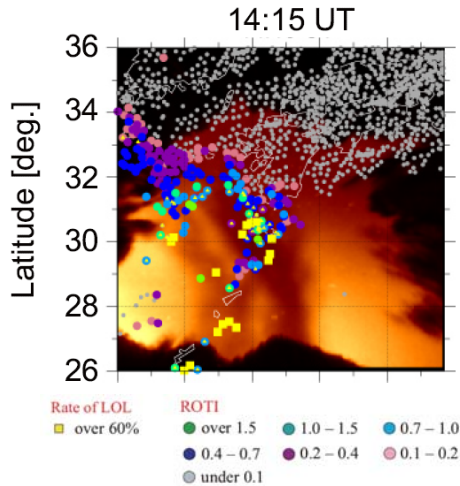


図 8 プラズマバブル発生時の 630nm 大気光と ROTI 及び LOL 率の分布図。

一致していた。LOL 発生の閾値は、ROTI が 1.0 TECU/min であることがわかった。

- (4) リアルタイム 2 次元 TEC 観測により捉えられた地震後の電離圏擾乱現象
リアルタイム 2 次元 TEC 観測により、2011 年東北地震後の約 7 分後から津波波源を中心とした同心円状の TEC 変動を世界で初めて捉えた (図 8)。第一波は水

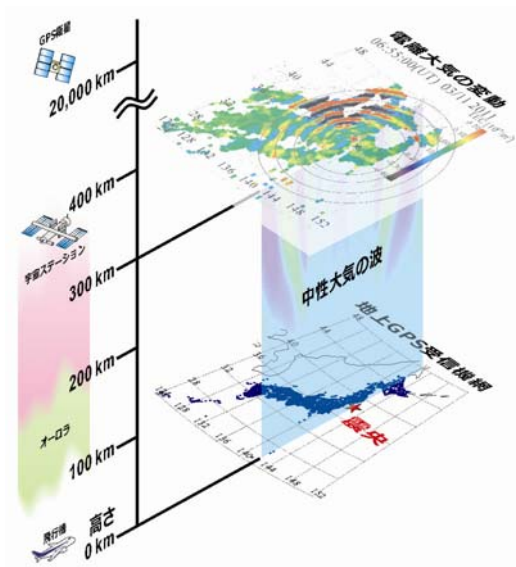


図 8 地震後に高度 300km の電離圏まで大気波動が到達したことを示す現象の概要図。

平波長 1,000km 以上、3.5km/s で伝搬し、その後次第に波長が短く伝搬速度が遅い波が現れた。一方で、特徴的な ROTI や LOL 率の増大は観測されなかった。非静水圧中性大気モデルによるシミュレーションとの比較から、この TEC 変動は音波及び大気重力波によるものであることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Tsugawa, T., A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagatsuma, and K. T. Murata, Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth, Planets and Space, 査読有, 63, 2011, 875-879, DOI:10.5047/eps.2011.06.035
- ② Otsuka, Y., N. Kotake, K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Tsugawa, and A. Saito, Statistical Study of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Observed with a GPS Receiver Network in Japan, IAGA Special Sopron Book Series, 2011, 査読有, 2, 2011, 291-299, DOI:10.1007/978-94-007-0326-1_21

[学会発表] (計 14 件)

- ① 津川 卓也 他, GPS 全電子数観測により捉えられた東北地方太平洋沖地震後の電離圏変動, 第 130 回 SGEPS 総会および講演会 (招待講演), 2011 年 11 月 6 日, 神戸大学 (兵庫県)
- ② T. Tsugawa et al., Current status of NICT's ionospheric observations in the Southeast Asia by SEALION and GPS-TEC, International Workshop on Space Weather in Indonesia (招待講演), 2011 年 9 月 21 日, LAPAN、バンドン (インドネシア)
- ③ Tsugawa, T. et al., A statistical study of GPS loss of lock caused by ionospheric disturbances, AGU 2010 fall meeting, 2010 年 12 月 16 日, Moscone Convention Center (San Francisco, USA)

- ④ Tsugawa, T. et al., High-resolution total electron content observations of severe ionospheric disturbances using dense GPS receiver networks, 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010年7月20日, Congress Center Bremen (Bremen, Germany)

[その他]

ホームページ等

GEONET GPS 全電子数マップ

<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津川 卓也 (TSUGAWA TAKUYA)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究所宇宙環境インフォマティクス研究室・主任研究員

研究者番号：20377782

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

齋藤 昭則 (SAITO AKINORI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10311739

大塚 雄一 (OTSUKA YUICHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：40314025

西岡 未知 (NISHIOKA MICHI)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究所宇宙環境インフォマティクス研究室・専攻研究員

研究者番号：20582589

中田 裕之 (NAKATA HIROYUKI)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30345011

齋藤 享 (SAITO SUSUMU)

(独) 電子航法研究所・通信航法監視領域・主任研究員

研究者番号：40392716