

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820189

研究課題名(和文)高い高度分解能を持つロケットGPSトモグラフィ技術

研究課題名(英文)Study of Rocket GPS ionospheric tomography for high resolution

## 研究代表者

芦原 佑樹 (Ashihara, Yuki)

奈良工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：50511557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：太陽フレアや磁気嵐により引き起される電離圏擾乱は、衛星通信や衛星放送に影響を与え、衛星を利用したGPS測位技術の誤差原因となっている。電離圏擾乱のような特異な問題を解明するためには、電場、中性粒子の運動量に加え、プラズマ物理の基本パラメータである電子密度の観測が不可欠である。鉛直方向に電離層を面的観測する手法として、ロケットGPS-TECトモグラフィ法を提案する。本研究では、提案手法を計測技術として確立することを目的とし、(ア)観測ロケット搭載用GPS-TEC観測装置の開発と性能検証、(イ)ロケットGPS-TECトモグラフィ法に適したトモグラフィ解析手法の検討、を行う。

研究成果の概要(英文)：Ionospheric disturbances, which are caused by solar flares and magnetic storms, have an effect on satellite-based communication, broadcasting and GPS positioning accuracy. In order to elucidate an anomalous phenomena such as ionospheric disturbance, it is indispensable to observe the special distribution of electron density, which is the basic parameter of plasma physics. We propose "Rocket GPS-TEC tomography method" as a method to observe the vertical plane profiling of electron density in an ionosphere. In this research, we aim to establish the proposed method as a new measurement technique, and the following two issues. (a) Development and performance verification of GPS-TEC observation equipment, (b) Verification of tomography algorithm suitable for rocket GPS-TEC tomography method.

研究分野：宇宙電波科学，電波工学，計測工学

キーワード：超高層大気 電離層 GPS TEC トモグラフィ 観測ロケット

### 1. 研究開始当初の背景

太陽フレアや磁気嵐により引き起こされる電離圏擾乱は、衛星通信や衛星放送に影響を与え、衛星を利用した GPS 測位技術の誤差原因となっている。通信、放送、測位など宇宙利用が社会基盤として拡大するにつれ、電離圏が社会に与える影響度が大きくなっている。電離圏擾乱に代表される特異な問題を解明するためには、電場、中性粒子の運動量に加え、プラズマ物理の基本パラメータである電子密度の観測が不可欠である。

地球表面から高度 60~100km の領域は下部電離圏と呼ばれ、航空機や気球では高すぎ、人工衛星では低すぎるため、飛翔体での長期直接観測が困難な空間である。この領域にはプラズマ（電離大気）と中性大気が混在し、宇宙空間の中では特異な領域といえる。電離大気は電磁場に拘束される一方、中性大気は電磁場に依存しない運動をする。これにより引き起こされる熱圏 - 電離圏の結合過程問題、電離層で突如発生する電子密度の変動や局所高温プラズマ現象は、下部電離圏のプラズマ輸送過程の解明に残された重要課題である。

これまで下部電離層の電子密度観測は、主に観測ロケットに搭載した電流プローブでのその場観測法が使用されてきた。これらは電離層の微細構造を調べることができる反面、観測結果が一次元であることが大きな弱点である。

前述のように、下部電離圏は電磁気に拘束されたプラズマと、拘束されない運動量を持つ中性大気が複雑に絡み合う。この領域において更に高度方向の二次元面観測ができれば、超高層物理研究の発展に大きなインパクトを与えることが期待できる。

### 2. 研究の目的

鉛直方向に電離層を面的観測する手法として、本研究ではロケット GPS-TEC トモグラフィ法を提案する。この提案手法では、GPS 衛星から発せられる電波をロケットに搭載した GPS 受信機で受信し、得られた電離圏 TEC データを基にトモグラフィ解析を行うことで、電離圏内部の電子密度の断面画像を得る。

本研究では、「ロケット GPS-TEC トモグラフィ法」を計測技術として確立することを目的とし、主に次にあげる 2 項目に取り組む。

- (ア) 観測ロケット搭載用 GPS-TEC 観測装置の開発と性能検証
- (イ) ロケット GPS-TEC トモグラフィ法に適したトモグラフィ解析手法の検討

### 3. 研究の方法

- (1) 観測ロケットの回転に対応したアンテナシステムの検証

観測ロケットは飛行姿勢を安定させるために 0.7~2.0Hz で回転しながら飛翔する。このためロケット側面にアンテナを設置し

た場合、ロケットスピンによって GPS 衛星側から見てアンテナ位置が影側になると、GPS アンテナは機体の陰になるため、受信信号が遮断される。そして再び信号を補足するまでの間、GPS 信号が受信できなくなると予想される。このためロケットスピンによる信号の遮蔽を補完するアンテナシステムを採用し、ロケットモデルを用いて検証する必要がある。

- (2) 観測ロケット搭載用 GPS 受信機の性能評価とシステム開発

ロケット GPS-TEC トモグラフィを行うためには、観測ロケットに搭載できる GPS 受信機が必要となる。GPS-TEC を行うためには、民生用のカーナビゲーションシステムやスマートホンに内蔵されている 1 周波受信器では不十分である。GPS 衛星から送信される L1 波 (1.57542GHz) と L2 波 (1.22760GHz) の 2 周波を受信できること、ロケットの高速 (最大 1500~2000m/s) や打ち上げ時の高加速度 (最大 8G) 環境下でも GPS 信号を捕捉し続ける性能が必要であり、これらの性能評価を行う。また、観測データは観測ロケットに備えられたテレメータ装置を介してリアルタイムで地上に伝送する。そのため、GPS 受信機の観測データをテレメータ装置に渡すためのインタフェース装置の開発と地上側で受信データをデコードするソフトウェアの開発を行う。

- (3) ロケット GPS-TEC トモグラフィ法に適したトモグラフィ解析手法の検討

GPS-TEC 法によって得られる TEC 値は、GPS 電波伝搬経路上の全電子数、すなわち一次元情報である。したがって、単一の一次元情報からのみでは、電子密度の空間分布を求めることはできない。

トモグラフィ技術は、超音波地盤探査や医用 MRI 技術、X 線 CT 技術など人体や地殻の非破壊測定技術として知られ、広く実用化されている解析技術である。体内画像診断に用いる X 線 CT 検査を例に挙げると、身体の 180°または 360°方向から X 線照射により X 線の透過量 (減衰量) を走査し、この透過量をトモグラフィ解析することで、精度の高い体内断面像を得ることができる。一方、GPS-TEC 地上観測による電離圏トモグラフィは、GPS 衛星と受信機の位置関係から走査パスが鉛直斜め方向に限定される。そのため、GPS-TEC 地上観測データから、下部電離層のような限られた領域を高分解能でトモグラフィ解析することは難しいとされる。

観測ロケットは、約 10 分間で放物線軌道を飛翔する。提案するロケット GPS トモグラフィ法では、ロケット上昇時と下降時における TEC データの差分を取ることで下部電離層の差分 TEC データを取得する (図 1)。このように差分を取ることで、GPS 地上観測では難しい水平斜め方向の TEC データを得ることが

できる。得られる複数方向からの TEC データをトモグラフィ解析することで、下部電離圏の二次元面観測を実現できると考える。

トモグラフィ解析手法の検討方法としては、まず計算機上に電離圏擾乱時の電離圏モデルを構築する。そして、過去の観測ロケット実験での標準的なロケット軌道を用いて、上昇時-下降時の差分から得られる差分 TEC データを生成する。この差分 TEC データを用いて、提案手法に適したトモグラフィ解析手法を検討する。

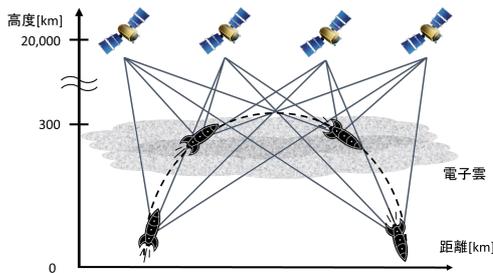


図 1 ロケット GPS-TEC トモグラフィ法の概念図

#### 4. 研究成果

##### (1) 観測ロケットの回転に対応したアンテナシステムの検証

ロケットスピンによって、GPS 受信アンテナが機体の陰になる影響を極力なくするため、2つの GPS アンテナを機体の対角方向に配置し、合波器で RF 信号を合成するアンテナシステムを採用する。性能検証のために回転可能な模擬ロケット構体を製作し、上空が開けた校舎屋上で受信実験を行った(図 2)。模擬



図 2 RF 信号合成アンテナシステム検証実験の様子

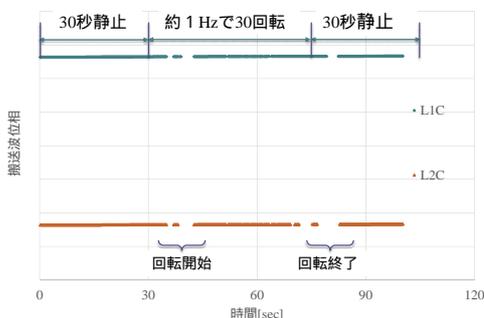


図 3 模擬構体回転時の搬送波位相受信状態

構体の回転静止状態で GPS 信号を捕捉できていることを確認した上で、手動にて約 1Hz の速度で回転する。回転開始時と終了時にそれぞれ受信できない時間があったが、その他の回転中は安定して受信することができた(図 3)。

##### (2) 観測ロケット搭載用 GPS 受信機の性能評価とシステム開発

GPS 受信ボードに Novatel 社 OEM628 を使用して地上観測を行い、観測データから TEC 計算を行った。実験結果を国土院が運営する近隣の電子基準点の観測データと比較したところ、TEC を正しく観測できていることを確認した。

次に、GPS 受信機が観測ロケットの運動ダイナミクスに追従できることを、GPS シミュレータを用いて検証した。ロケットの速度(最大 1500~2000m/s)の検証は、所有する GPS シミュレータの制限から行えなかったが、ロケット打ち上げ時の高加速度には追従して GPS-TEC 観測を行えることがわかった。

また、観測システムを構成するインタフェース装置のブレッドボードモデルと観測ソフトウェアを開発し、動作確認を行った。インタフェース装置は GPS 受信機から出力される観測データを、通信方式の異なる観測ロケットテレメータ(遠隔測定装置)へ仲介する装置である(図 3)。また、観測ソフトウェアは観測ロケットのテレメータから地上へ送られたデータを受け取り、解析・表示・保存するためのソフトウェアである(図 4)。

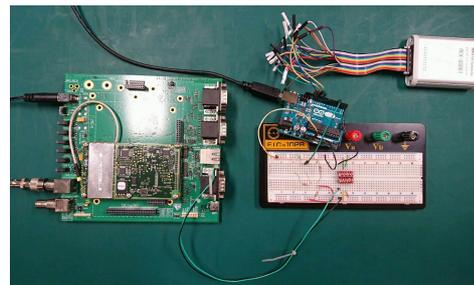


図 3 インタフェース装置のブレッドボードモデル

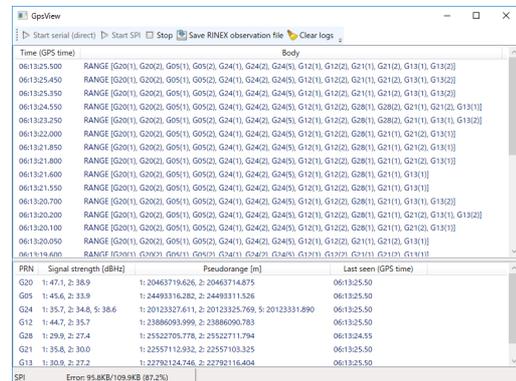


図 4 GPS データ観測ソフト

(3) ロケット GPS-TEC トモグラフィ法に適したトモグラフィ解析手法の検討

シミュレーション実験に用いる観測条件として、S-520 型ロケットの飛翔軌道を用い、可視 GPS 衛星数を 9 機に設定する。次に、この条件において観測ロケットで観測される差分 TEC データを算出する。そして、基本的なトモグラフィ解析手法であるフィルター逆投影法 (Filtered Back Projection: FBP) を用いてトモグラフィ解析を行ったところ、元の電離層モデル (図 5) と大きく異なる結果となった。この原因としては、FBP 法ではトモグラフィ解析を行う際に、欠損データに対する補間が行われないことがあげられる。ロケット GPS-TEC トモグラフィのように、投影角が制限される欠損データでは、FBP 法による再構成が難しいといえる。

そのため、欠損データを補間できるトモグラフィ解析アルゴリズムの検討を行った。欠損投影データに適したトモグラフィ解析アルゴリズムである逐次近似代入法 (Simultaneous Image Reconstruction Technique: SIRT)、最小二乗共役勾配法 (Conjugate Gradient Least Squares: CGLS) を用いたトモグラフィ解析結果を図 6、図 7 にそれぞれ示す。特に CGLS 法の再構築結果では、高度 200km にあるパッチ状の高電子密度領域を捉えていることがわかる。

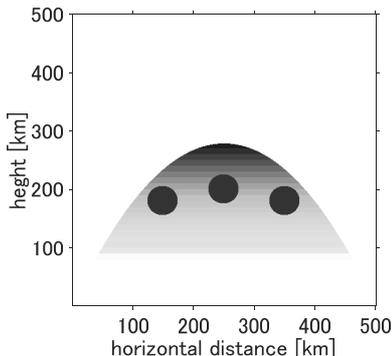


図 5 シミュレーションに用いた電離層モデル

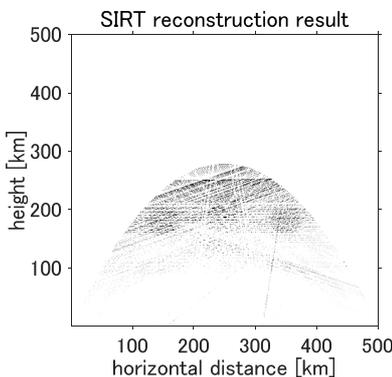


図 6 SIRT 法による再構築結果

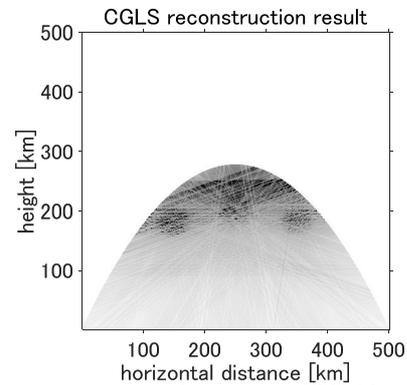


図 7 CGLS 法による再構築結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

池端 祐太郎, 芦原 佑樹, 石坂 圭吾, ロケット GPS-TEC トモグラフィ法の高度分解能評価, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 140 回講演会, R005-P24, 九州大学伊予キャンパス, 2016 年 11 月 21 日

池端祐太郎, 芦原佑樹, 高い高度分解能を持つロケット GPS-TEC トモグラフィ法の検証, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, PEM16-P18, 幕張メッセ, 2016 年 5 月 24 日

池端祐太郎, 芦原佑樹, シミュレーションによるロケット GPS トモグラフィ法の実証実験, 電子情報通信学会関西支部第 14 回学生研究発表講演会, 兵庫県立大学, 2016 年 3 月 1 日

芦原佑樹, 小松和暉, 2 周波ソフトウェア受信機を用いた GPS-TEC 観測, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, PEM36-P23, パシフィコ横浜, 2014 年 4 月 28 日

小松和暉, 芦原佑樹, ソフトウェア GPS 受信機を用いた GPS-TEC 観測, 電気学会関西支部平成 25 年度高専卒業研究発表会, 2014 年 3 月 1 日。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

該当無し

〔その他〕

該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芦原 佑樹 (ASHIHARA, Yuki)

奈良工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号: 50511557

(2) 研究分担者

該当無し

(3)連携研究者

該当無し

(4)研究協力者

小松 和暉 (KOMATSU, Kazuki)

池端 祐太郎 (IKEHATA, Yutaro)

山田 翔太郎 (YAMADA, Shotaro)