

## 18. 衛星航法のための電離圏リアルタイム監視

航法システム領域 ※齋藤 享  
 京都大学生存圏研究所 山本 衛  
 京都大学理学研究科 齊藤 昭則

### 1 まえがき

GPS に代表される衛星航法において、信号の伝播遅延を引き起こし測距誤差の原因となる電離圏の影響を回避することは、測位性能の向上のために重要である。電離圏の影響は2つの周波数の信号を用いることで消去可能であるが、航空航法においては L1 周波数(1.57542 GHz)の信号のみが使用可能であるため、2 周波を用いた電離圏の影響の回避は不可能である。また、2 周波受信機は、システムが複雑となるほか 2 周波の結合による雑音の増加などの悪影響がある。

1 周波測位において電離圏の影響を取り除くためには、位置が既知の基準局の観測データを用いたディファレンシャル測位が有効であるが、電離圏に空間変動が存在する場合は測位性能が劣化する恐れがある。従って、電離圏の状態をできる限り詳細にリアルタイム監視することは、衛星航法の性能向上のために重要である。

電離圏の状態の観測には様々な手法が存在する。国土地理院が日本全土に展開する電子基準点網(GEONET)のデータを用いた電離圏変動を事後解析により 2 次元的に可視化する手法 [1] は広く用いられているが、リアルタイムで電離圏変動を詳細に監視する方法はこれまでになかった。特に電離圏密度を 3 次元的に把握することは、非リアルタイムであっても非常に難しい。

本研究では、GEONET のデータを用い、電離圏変動及び電離圏 3 次元密度分布リアルタイムで導出することを目的とする。

電子航法研究所では、様々な衛星航法関連研究に用いるため、1200 点以上の GEONET 観測点のうち 200 点のデータをリアルタイムで受信している(図 1)。本研究では、この 200 の GEONET 観測点のリアルタイムデータを用い、

#### (1) 電離圏変動のリアルタイム監視

#### (2) 電離圏 3 次元密度分布のリアルタイム導出

を可能とするシステムを構築することを目的とする。

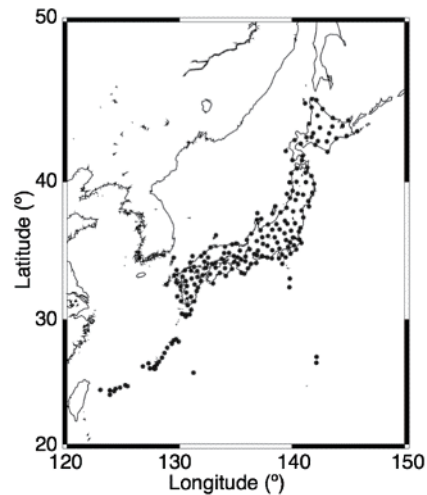


図 1. 電子航法研究所がリアルタイムデータを受信する 200 点の GEONET 観測点。

## 2 電離圏変動のリアルタイム監視

### 2.1 電離圏変動検出

本研究では、電離圏の変動を電離圏遅延量の変動として検出する。変動成分に注目することにより、衛星・受信機双方の周波数間バイアスを除去することが可能であり、計算を簡略化することができる。電離圏遅延量の変動成分の導出は、衛星・受信機の組み合わせごとに導出される電離圏遅延量の時間変化にハイパスフィルターを適用することにより行うことが一般的である。

事後解析による電離圏遅延量変動の可視化 [1]においては、注目する時刻(t)の前後 30 分の電離圏遅延量の平均値を求め、時刻 t に観測された電離圏遅延量との差を変動成分とする(図 2)。しかしこの手法では、時刻 t から 30 分経過するまで平均値が求められないため、リアルタイム解析には適さない。そのため本研究で

は、時刻  $t$  から過去一定時間の電離圏遅延量データに対して多項式近似を行い、多項式による予測値と観測値の差を変動成分とすることとした(図 2)。本研究では、多項式の次数を 3 次とし、時定数は 60 分とした。

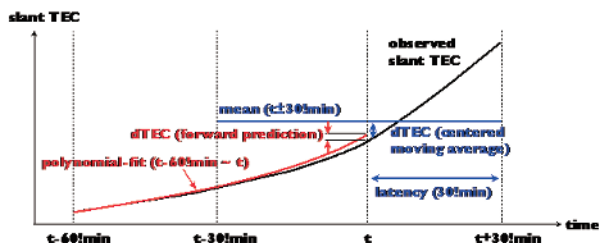


図 2. 電離圏変動成分の導出方法。青：移動平均法，赤：多項式近似法。

## 2.2 電離圏変動のリアルタイム解析・表示

2.1 節に記述した電離圏変動解析を，電子航法研究所においてリアルタイムでデータ受信を行っている GEONET の 200 観測点について適用することにより，日本上空の電離圏変動の可視化を，2013 年 7 月から毎時 0 分から 5 分ごとに行っている。1 解析にかかる時間は約 2 分である。電離圏変動は，日本上空の 2 次元マップとして可視化され，web インターフェースを通じて配信されるほか，過去に遡って検索することが可能である(図 3)。

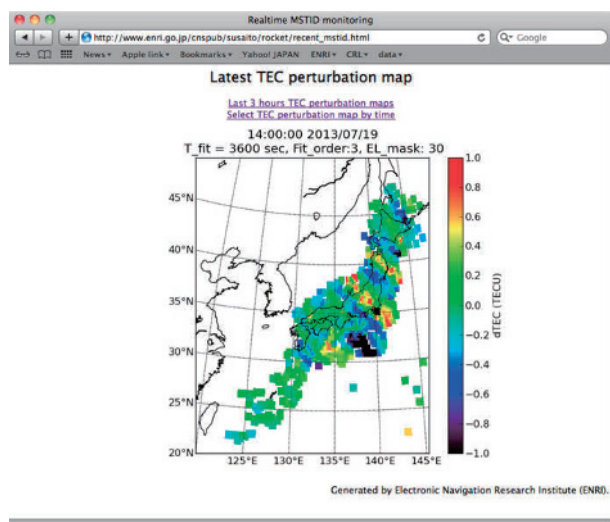


図 3. 電離圏遅延量変動のリアルタイム表示 ([http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent\\_mstid.html](http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent_mstid.html))。

この電離圏変動のリアルタイム監視は，2013 年 7 月に京都大学，JAXA 等が参加して行われた電離圏擾乱現象のロケット観測キャンペーンにおいて，対象とする電離圏擾乱の発生中に観測ロケットを打ち上げるため，ロケット打ち上げタイミングを決定するために活用された [2]。また，衛星航法の障害時の電離圏現況把握，衛星測位の性能予測などの活用方法が期待できる。

## 3 電離圏 3 次元密度リアルタイム監視

電離圏変動だけでなく，電離圏密度の絶対値を 3 次元的に求めることは，衛星航法における電離圏遅延補正を観測に基づいて行うことができることだけでなく，様々な電離圏現象の物理過程の解明にも有効である。しかしながら，単一の観測装置で電離圏 3 次元密度分布を広域にわたって導出できる手段はなかった。

これに対し，広域 GNSS ネットワークを用いたトモグラフィー手法(図 4)による電離圏 3 次元密度分布の導出が，いくつかの方法で試みられてきた。本研究では，新たに開発した拘束付き最小 2 乗法に基づく電離圏 3 次元トモグラフィー解析手法 [3,4]を用い，さらに改良を加えた上でリアルタイムデータを用いて電離圏 3 次元密度のリアルタイム監視システムを開発した [5,6]。

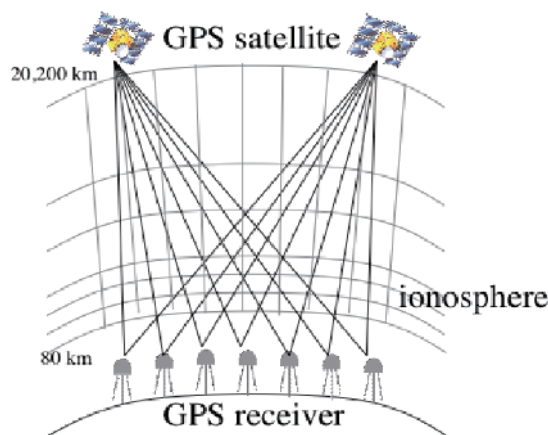


図 4. 電離圏トモグラフィーの概念 [4]

### 3.1 電離圏 3 次元トモグラフィー

電離圏 3 次元トモグラフィーでは，地上に配置した多数の GNSS 受信機による，衛星・受信機間の電離圏全電子数（衛星・受信機間の伝

播路に沿って電子密度を積分したもので、電離圏遅延量と比例関係にある）観測値を元に、逆問題として電離圏密度分布を推定するものである。推定法にはいくつかの方法が存在するが、本研究では拘束付き最小2乗法を用い、電離圏密度の初期推定値によらない手法を開発した。手法の詳細はここでは述べないが、参考文献 [5,6] に詳しく記述されているので、そちらを参照されたい。

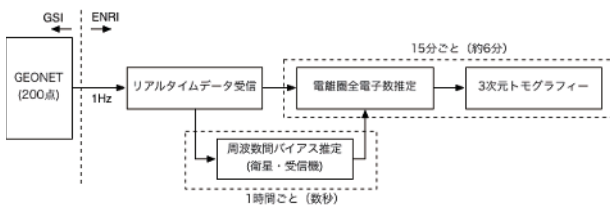


図 5. 電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィーシステムの機能構成

### 3.2 電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィーシステム

本研究で開発した電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィーシステムは大きく分けて 3 つのブロックからなる(図 5)。

まず、取得した GEONET リアルタイムデータから電離圏全電子数を導出する。これには通常、衛星及び受信機のハードウェアに起因するバイアス誤差（周波数間バイアス）が含まれている相対値であり、トモグラフィー解析を行う前にこのバイアス誤差を補正する必要がある。

周波数間バイアスの変動は電離圏変動に比べて非常にゆっくりとしていることが知られているので、過去 24 時間の観測データを用いて参考文献 [7] の手法により 1 時間ごとに推定を行う。

得られた電離圏全電子数相対値及び周波数間バイアスを用いて電離圏全電子数の絶対値を求め、これに 3.1 節で述べた拘束付き最小 2 乗法を適用して電離圏 3 次元密度分布を推定する。

### 3.3 電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィー解析

電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィー解析を行う範囲及びグリッド間隔を図 6 に示す。解析範囲の中心部の東経 129~140°、北緯 33~39° で

は緯度、経度それぞれ 1° の間隔で、その外側東経 125~150°、北緯 25~50° では緯度、経度それぞれ 2° 間隔である。高度方向には、80~25000 km の範囲を対象とし、電離圏中心部の 80~600 km の範囲では 20 km のグリッド間隔で解析を行う。

トモグラフィー解析は、Intel 3.5 GHz Xeon CPU（論理コア数 8）、メモリ 32GB のワークステーションで実行されており、1 解析あたりの所要時間は約 6 分である。これは日本付近の電離圏変動の速度を考えると、ほぼリアルタイム解析と言って良い [6]。これを毎時 0 分から 15 分ごとに行う。

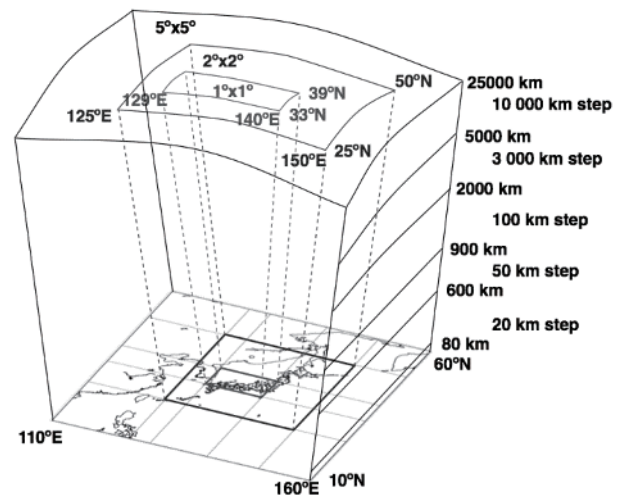


図 6. 電離圏 3 次元トモグラフィーの解析範囲及び解析グリッド間隔

### 3.4 電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィー結果・表示

図 7 に電離圏リアルタイム解析結果の例を示す。電離圏密度の南北断面では赤道異常による電離圏密度上昇が南方で見られることがよくわかる。それだけでなく、東西断面では西方で電離圏高度が上昇し、それに伴って電離圏ピーク密度が増大していることが見て取れる。電離圏高度の上昇と電離圏密度の増大は、イオン再結合率が、高度が上がるほど低下することで説明できるものであり、物理的に整合性がある。なお本稿では示さないが、本研究で得られた電離圏 3 次元トモグラフィー結果は、他の電離圏観測結果とよく一致することが確認されている [5,6]。



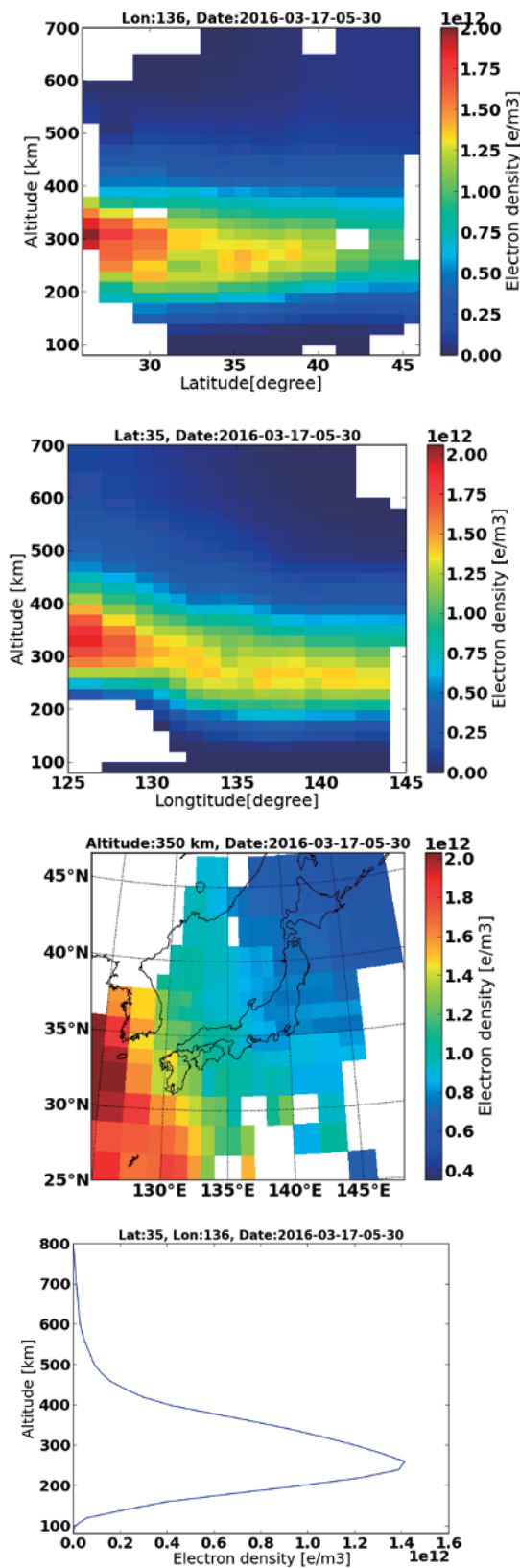


図 7. 2016 年 3 月 17 日 05:30 UT の電離圏 3 次元密度分布。上から順に、東経 136° の南北断面、北緯 35° の東西断面、高度 350 km の水平断面、北緯 35°、東経 136° の垂直プロファイル。

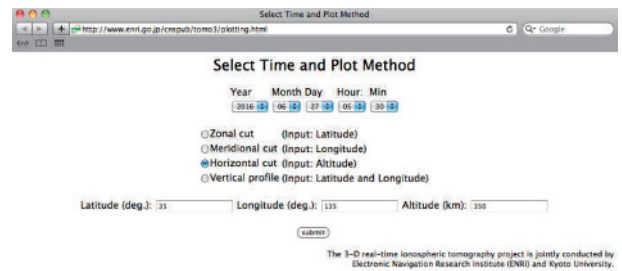


図 8. 電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィの web インターフェース (<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/index.html>)。

電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィ結果は web インターフェースを用いて可視化されており、毎時 0, 15, 30, 45 分の解析結果に対し、任意の場所の東西断面、南北断面、水平断面及び垂直プロファイルを表示することが可能である(図 8)。

### 3.5 電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィによる測位補正

電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィの衛星測位への応用例として、1 周波単独測位における電離圏補正を考える。

電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィにより電離圏の 3 次元電子密度分布が得られるので、任意の衛星・受信機間の電離圏遅延量を求めることができる。ここでは、電子航法研究所に設置された、GEONET に属さない観測点をユーザー局受信機とし、これに電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィによる電離圏補正を適用することにより得られる測位解の精度を検討した。

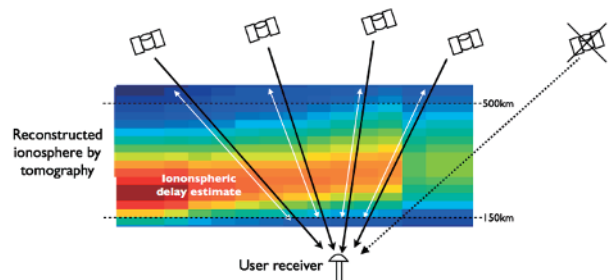


図 9. 電離圏補正値の計算方法の概念

本検討においては、衛星・受信機間の伝搬路が、電離圏密度が集中している高度 150～500 km においてトモグラフィー解析領域にある衛星のみについて、電離圏リアルタイム 3 次元トモグラフィーによる電離圏補正を適用し、それ以外の衛星は測位に用いないこととした(図 9)。さらに、図 10 に示すように、ある時刻のユーザーの観測値に対し、トモグラフィー解析の時間遅れ(6 分)を考慮したうえで利用可能な直近のトモグラフィー結果を、時間的な外挿なく一定値として用いることとした。すなわち、適用される電離圏補正值は、6～21 分前の推定値である。

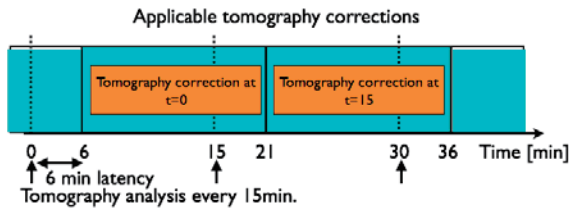


図 10. ユーザー受信機の観測値に適用される電離圏補正值の推定時刻。

図 11 は、地磁気擾乱 (Kp 指数最大値 6+) が発生していた 2017 年 10 月 25 日 00～06 UT に、電子航法研究所に設置された IGS (International GNSS Service) に属する MTKA 観測点 (35.7°N, 139.6°E) が観測した GNSS データを用いて、(1) 1 周波単独測位 (SF), (2) 2 周波単独測位 (DF), (3) 1 周波・トモグラフィー補正単独測位 (ST) の 3 つの手法で測位を行った結果の誤差分布である。各手法による垂直誤差の平均値及び RMS 値を表 1 に示す。

表 1. 2017 年 10 月 25 日 00～06 UT の測位誤差

|    | 平均垂直誤差(m) | RMS 垂直誤差 (m) |
|----|-----------|--------------|
| SF | 4.6       | 2.1          |
| DF | 0.46      | 3.2          |
| ST | 0.05      | 1.8          |

ST 測位においては、SF 測位に見られる大きな平均垂直誤差が解消されていることがわかる。また RMS 垂直誤差においては、DF 測位に見

られる 2 周波電離圏フリー結合による誤差の増大がなく、SF 測位と同等の値が得られている。この磁気嵐時には、特に南方で通常時に比べて電離圏密度増大を伴う電離圏擾乱が見られていたが、トモグラフィー解析結果を用いた電離圏補正を行うことで、平均、RMS とともに誤差を小さく抑えることができた。

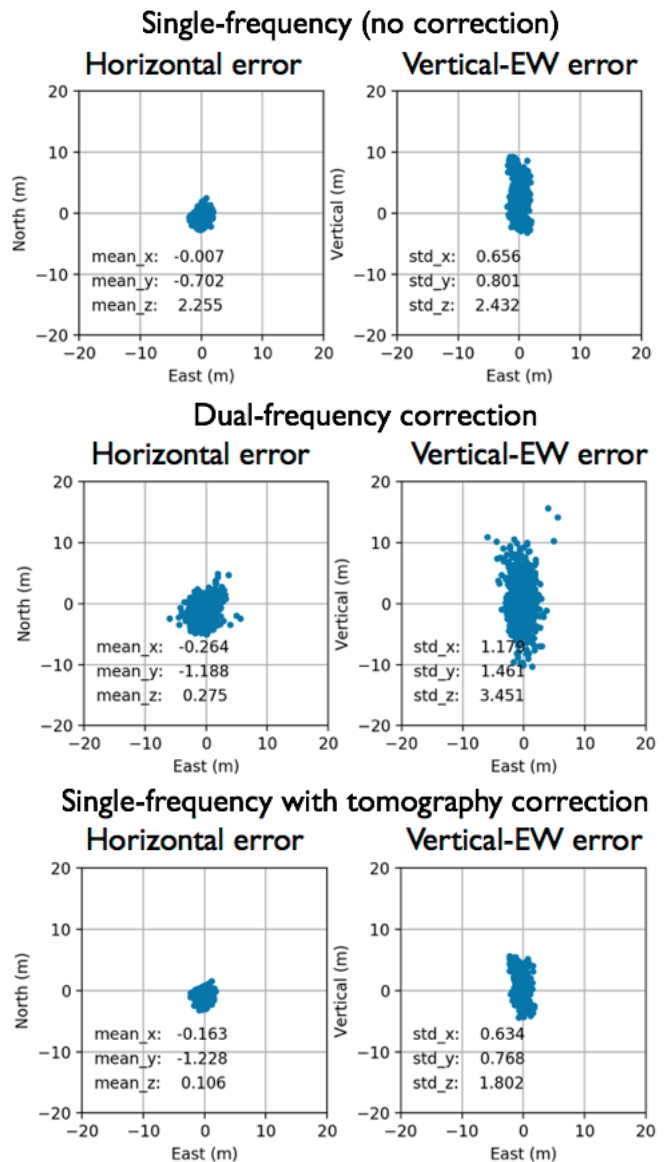


図 11. 測位誤差の分布。上、中、下行はそれぞれ SF, DF, ST 測位による誤差を示す。左列は水平誤差分布、右列は垂直-東西誤差分布。

しかしながら、今回評価に用いた MTKA 観測点はトモグラフィー解析領域の中心部に近く、

電離圏密度推定精度が良いと考えられるので、その他の地域の観測データを用いたさらなる評価が必要である。また、他の測位方式への適用についても検討する必要がある。

#### 4 まとめ

電子航法研究所では、衛星航法に影響を与える電離圏の状態について、GEONETのリアルタイムデータを用いた監視と結果の公開を行っている。

電離圏変動成分については、5分ごとに約2分の時間遅れで日本上空の電離圏遅延量変動の2次元マップが利用可能である。

電離圏密度絶対値については、電離圏3次元トモグラフィーにより、15分ごとに約6分の時間遅れで、最も詳細な部分で緯度1°、経度1°、高度20kmの刻みで3次元密度分布が利用可能である。電離圏3次元密度分布のリアルタイム値を用いた補正による単独測位で得られた測位解は、平均位置では2周波測位と同等の誤差であり、誤差の分散においては2周波測位よりも優れていた。

電離圏リアルタイム監視は、衛星航法の様々な利用に対して有効であると考えられるので、監視手法の改良と、応用の拡大を検討していく予定である。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)20340120「ロケット・地上連携観測による中緯度電離圏波動の生成機構の解明」及び科学研究費補助金挑戦的萌芽研究26630182「電離圏リアルタイム3次元トモグラフィーへの挑戦」のもとで行われた。

#### 参考文献

[1] A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, “High resolution mapping of TEC perturbations with

the GSI GPS network over Japan,” *Geophys. Res. Lett.*, 25, pp.3079-3082, 1998.

[2] S. Saito, T. Yoshihara, and M. Yamamoto, “Real time ionospheric disturbance analysis and monitoring with GEONET real time data,” *Proc. ION ITM 2014*, pp.720-724, 2014.

[3] G. K. Seemala, M. Yamamoto, A. Saito, and C.-H. Chen, “Three-dimensional GPS ionospheric tomography over Japan using constrained least squares,” *J. Geophys. Res.*, 119, pp.3044-3052, doi:10.1002/2013JA019582, 2014.

[4] C.-H. Chen, A. Saito, M. Yamamoto, S. Suzuki, and G. K. Seemala, “Medium-scale traveling ionospheric disturbances by three-dimensional ionospheric GPS tomography,” *Earth Planets and Space*, 68:32, doi i0.1186/s40623-016-0412-6, 2016.

[5] S. Saito, S. Suzuki, M. Yamamoto, C.-H. Chen, and A. Saito, “Real-time ionosphere monitoring by three-dimensional tomography over Japan,” *Proc. ION GNSS+ 2016*, pp.706-713, 2016.

[6] S. Saito, S. Suzuki, M. Yamamoto, C.-H. Chen, and A. Saito, “Real-time ionosphere monitoring by three-dimensional tomography over Japan,” *Journal of Institute of Navigation*, pp.495-504, 2017.

[7] G. Ma, and T. Maruyama, “Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan,” *Annales Geophysicae*, 21, pp.2083-2093, 2003.

[8] S. Saito, M. Yamamoto, C.-H. Chen, and A. Saito, “Ionosphere Monitoring and GNSS Correction by a Real-time Ionospheric Tomography System in Japan,” *Proc. ION GNSS+ 2017*, pp.3434-3440, 2017.