

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26630182

研究課題名(和文)電離圏リアルタイム3次元トモグラフィーへの挑戦

研究課題名(英文)Challenge to real-time 3-dimensional ionosphere tomography

研究代表者

山本 衛 (Yamamoto, Mamoru)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：20210560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：国土地理院によるGPS観測網GEONETを活用した日本上空の電離圏電子密度の3次元トモグラフィー解析の高度化を目的とする。4年間にわたる研究から、1)拘束付き最小二乗法を用いた3次元トモグラフィー解析プログラムを開発し、TEC絶対値の推定から最終結果までを自動化することに成功した。2)電子航法研究所が取得している全国200受信点からのリアルタイム値(1秒値)をもとに15分毎でレイテンシが5分間の3次元トモグラフィに基づくリアルタイムデータサービスを実現した。3)スーパーコンピュータによる大量データの解析システムを構築した。4)トモグラフィー解析結果と他の観測データの統計的な比較を実施した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to sophisticate three-dimensional tomographic analysis of ionospheric electron density over Japan using GEONET GPS information network by Geographical Survey Institute. From four years of research, 1) We developed a three-dimensional tomographic analysis program using constrained least-squares fitting method, and succeeded in automating the estimation of the TEC absolute value to the final tomography results, 2) We utilized one-second GPS-TEC data from 200 receiving stations acquired by the Electronic Navigation Research Institute, and realized real-time data service of the three-dimensional tomography at every 15 minutes with latency of 5 minutes, 3) We constructed a software system for the GEONET past data analysis, and 4) We carried out statistical comparison between tomographic analysis results and other observation data.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：電離圏電子数 3次元トモグラフィー 電離圏構造 GPS観測網 リアルタイムモニタ

1. 研究開始当初の背景

電離圏は人工衛星が飛ぶ領域であり、衛星通信にとっては電波の通過域である。高度化した衛星システムの維持管理にとって電離圏の状態計測は非常に重要であり、「宇宙天気予報」が必要とされている。GPS 測位を利用した次世代の航空航法においては、電離圏の急激な変動による測位精度の低下が致命的な問題となりうるため、その検知が必要不可欠である。電離圏は通信や交通の安全にかかわる重要性をもち、人類の生存環境としても重要である。

わが国には国土地理院が全国の約 1200 地点に展開する GPS 受信機網 GEONET がある。その規模と測定点の多さから世界一のネットワークである。我々は GEONET から日本上空の電離圏の全電子数 (Total Electron Content; 以下では TEC) を 30 秒毎に計測するシステムを開発し、GPS-TEC 観測をリードしてきた。図 1 に観測例を示す。

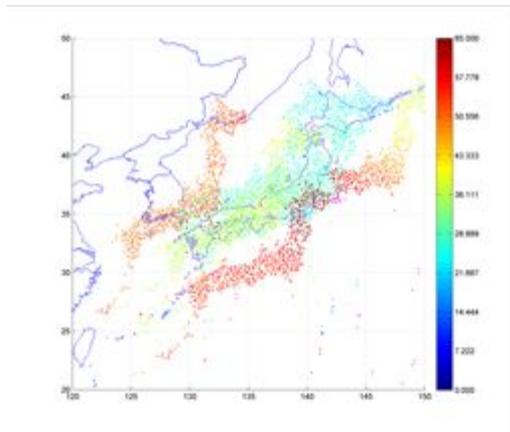


図 1 GOENET による GPS-TEC 値の水平分布の例。GPS 衛星の数だけ日本列島に近い形状のデータ分布が得られる。

我々は GEONET からの多量の GPS-TEC データを用いた 3 次元トモグラフィ手法の開発を続けてきた。従来は電離圏電子密度の平面分布を知るのみであったものが、これによって 3 次元分布を知ることができる。解析手法としては拘束条件付き最小二乗法が有力とされていたが、解の安定性が悪く、計算時間が非常に長いという問題があった。

我々は数年にわたってこの開発に取り組み続けてきたが、問題点はかなり解決されてきた。解析手法について詳しくは後述するが、問題は二つの人為的なパラメータ、即ち、拘束条件に使われる重み付け係数と、「ハイパーパラメータ」と呼ばれる最小二乗条件と拘束条件の軽重を調節して最適な結果を得るための係数の選び方である。これらは実際のデータ品質や観測データの分布に即して最適化されるべきものである。本課題の開始時点までの開発により、ある程度のめどが立っており、確率 70 - 80% で安定なトモグラフィが得られる程度に達していた。

2. 研究の目的

以上の状況のもと、本研究は GEONET からの電離圏 3 次元トモグラフィを「実用化」することを目的として発足された。具体的には、次の 3 つの課題について研究し、最終的には日本上空の電離圏のリアルタイム 3 次元モニタリングを実現させることを目指した。

課題 1 「3 次元トモグラフィ解析手法の熟成」自動トモグラフィ解析の完成度を高めると共に、解析時間の短縮を図る。

課題 2 「3 次元電離圏構造のデータベース化」1997 年から現在まで蓄積されてきた GPS-TEC データを全てトモグラフィ解析することで、約 11 年周期を示す太陽活動度に対する電離圏変動などの研究を可能にする。

課題 3 「電離圏 3 次元リアルタイム・モニタリング」最近では GEONET から GPS-TEC の 1 秒値がリアルタイムに得られる。本研究の集大成として GEONET からのデータ取得の直後に自動的にトモグラフィ解析ができるシステムを構築し、結果を公開する。

3. 研究の方法

GPS-TEC トモグラフィの概念図を図 2 に示す。地上に広がって分布する多数の GPS 受信機と高度 20000km を飛翔する GPS 衛星を結ぶ線上の TEC 値を計測する。領域内に不等間隔の格子点を設定する。各格子点における電子密度の集合がつくるベクトル \mathbf{x} 、GPS 衛星から受信機までのパスが各格子点に重なる長さを記述した行列 \mathbf{A} 、観測された TEC 値の集合がつくるベクトル \mathbf{b} の関係は、 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ となる。測定条件 \mathbf{A} と測定値 \mathbf{b} が与えられたとき、 \mathbf{x} を求めることがトモグラフィ解析である。観測データ数が多く求めるべき電子密度の個数が少ない場合には、最小二乗法を用いて最適解を求めるべきである。ところが図 2 から明らかなように、TEC が観測できる方向が上下に偏っているため、求解は簡単ではない。

従来の電離圏トモグラフィでは、GPS 衛星ではなく (地表から見て高速に移動する) 低軌道衛星を用い、衛星パスに沿って 1 次元配列された受信機からデータを求め、水平 \times 高さの 2 次元の問題に取り組んできた。解析手法としては Algebraic Reconstruction Technique (ART) 法や Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (MART) 法と呼ばれ、電離圏の経験モデルを用いて観測日時や場所・高さに応じて予想される電子密度分布を初期値として当てはめた上で、最小二乗誤差が小さくなるように反復計算を行って解に近づける。電離圏の研究には充分有用であるが、結果が初期値に大きく依存する、反復計算し過ぎると解が不安定化するなど、多くの問題をかかえていた。

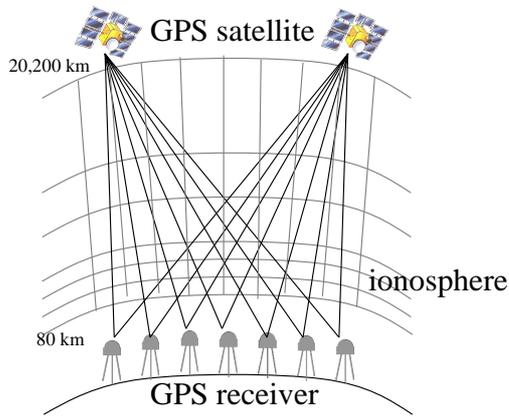


図2 GPS-TECに基づくトモグラフィー解析の模式図(実際はGPS受信機が水平面に分布している)

本課題においては、解析領域を3次元化した上で、拘束条件付き最小二乗法を用いて GEONET データからトモグラフィー解析を行っている。具体的には、この手法では、 $J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|^2 + \lambda \|\mathbf{Wx}\|^2$ で定義されるコスト関数を最小化するベクトル \mathbf{x} を求める。ここで $\|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|^2$ は最小二乗誤差の項であり、 $\|\mathbf{Wx}\|^2$ は拘束項である。また λ は本手法に特有の係数でハイパーパラメータと呼ばれる。拘束項は問題に即して選択されるが、我々は $\mathbf{Wx} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^6 C_{i,j} (x_i - x_{i,j})$ と定義した。その意味は、ある格子点と上下前後左右の隣り合う格子点(6点)の電子密度の差の合計である。つまり隣同士の電子密度の差が広がらないように拘束しようとした。 $C_{i,j}$ は重み付け係数であって、値が大きいほど拘束が強くなって電子密度の空間変動を小さく留めおく効果がある。本手法は初期値を用いない点に大きな特徴がある。

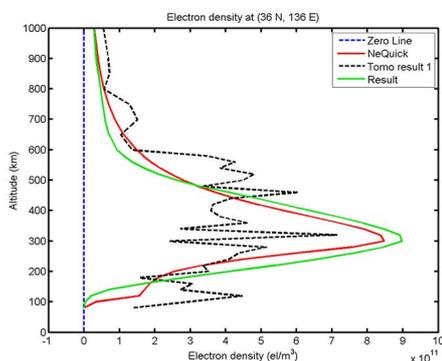


図3 トモグラフィーによる電子密度の高度分布の計算例。緑線が解析の成功例だが、パラメータの選択を間違えると、点線のような不安定な解になってしまう。

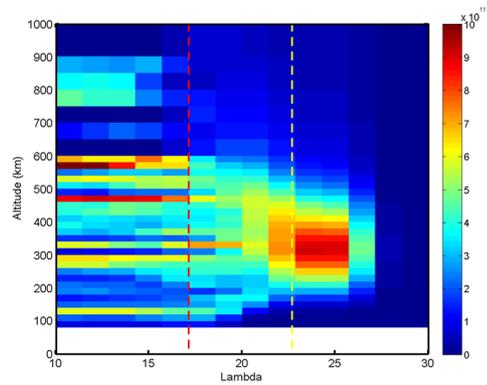


図4 ハイパーパラメタ(横軸)の変化による電子密度高度分布(縦軸)の変化を示す。ハイパーパラメタが小さすぎると不安定に、大きすぎると高度幅が異常に狭くなる傾向がわかる。

4. 研究成果

本課題の研究の進展状況を示す。

まず、初年度(平成26年度)は以下の研究を実施した。(1)まず本研究の課題1に取り組んで、解析手法の安定化・高速化を推進した。図3に示すように、トモグラフィー解析の成功・不成功は人為的なパラメータの選択に大きく左右される。図4にはハイパーパラメータの増減による、電子密度の高度分布の変化を示す。我々は、重み付け係数の選択には電離圏電子密度の経験モデル NeQuick を利用することとし、ハイパーパラメタに対してはいくつかの数値を用いて解析を繰り返すことで、安定な結果を得ることとした。これらの成果をまとめて論文として公表した。並行して、トモグラフィー解析プログラムを Python 言語に移植しつつ改良を目指した。既存プログラムの小さな問題点の改良を進め、粗行列の計算を高速化するライブラリーを利用することで、いずれの点についても成果を得た。(2)本研究が課題3として掲げる「リアルタイム・モニタリング開発」に取り組んだ。具体的には、電子航法研究所が介している GPS-TEC のリアルタイム表示システムにトモグラフィー解析を組み込む方法の検討とプログラム実装を進めた。これらの開発を促進するため、2015年1月に研究協力者である C.-H. Chen 博士を台湾から招へいして開発合宿を実施した。

第2年度(平成27年度)には以下の研究を実施した。(1)課題1について Python 言語に移植された拘束付き最小二乗法によるトモグラフィー解析プログラムの安定度の向上に取り組んだ。さらにトモグラフィー解析の前段階として必要となる、GPS衛星と受信機のバイアス推定プログラムの開発に取り組み、疎行列ルーチンを利用して従来プログラムに比して計算時間を大幅に削減することに成功した。(2)この成果をもとに課題3のリアルタイムシステムの開発に取り組んだ。電子航法研究所では、GEONETの

内の全国 200 点から 1 秒値を得ている。これを利用することとし、15 分ごとにトモグラフィー解析結果を得ることを目標とした。計算時間の削減の結果、データ取得からトモグラフィー解析までの処理時間を 10 分間以下とすることに成功し、15 分ごとに解析するという目標が達成された(図 5)。電子航法研究所に整備した専用計算機を用いて、年度末にリアルタイムサービスを開始した(国際会議の査読付プロシーディング(論文))。

第 3 年度(平成 28 年度)には以下の研究を実施した。(1) 課題 1 については平成 27 年度までに開発された解析プログラムの安定度の向上等に引き続き取り組んだ。Linux PC (Intel i7 CPU) を用い、1 回の解析時間を最短で 5 分程度まで向上した。(2) 課題 3 のリアルタイム・解析システムについて、4 月から実際のデータに基づくリアルタイム解析(15 分毎、解析時間 10 分以下)をスタートさせ、インターネット上で結果の公表を始めた(研究成果の[その他]を参照)。さらに、観測データの web 表示の開発にも取り組んだ。(3) 課題 2 の過去データの解析とデータベース化について、Python による解析プログラムを京都大学のスーパーコンピュータに移植することに成功し、性能評価を実施した。(4) これまでの研究成果について、論文発表(論文)と学会発表を積極的に行った。特にイタリア・トリエステで開催された Beacon Satellite Symposium 2017 では、リアルタイム・トモグラフィー解析が高く評価され、プレゼンテーションアワードが与えられた。

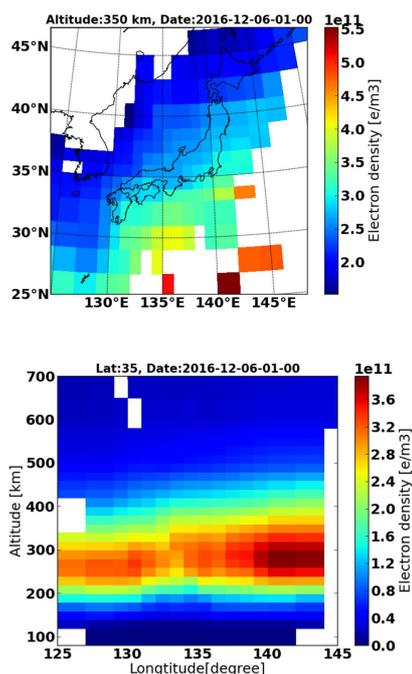


図 5 リアルタイム解析例(2016 年 12 月 6 日 01:00UT)。上下の図は、それぞれ高度 350km の水平分布と北緯 35 度の東西高度分布。

第 3 年度までの研究によってリアルタイム解析サービスを実現にこぎつけることができたが、過去の蓄積データに対する対応が遅れていた。そのため、本課題を 1 年間延長することを願い出て、認められた。第 4 年度(平成 29 年度)には以下の研究を実施した。(1) 平成 28 年度に開始したリアルタイム解析(15 分毎、解析時間 10 分以下)を継続し、インターネット上で結果の公表を続けた。(2) 京都大学のスーパーコンピュータを用いた過去の観測データの解析に取り組んだ。多並列処理を取り入れることによって、1 年間分の解析を 30 時間で実施することに成功した。(3) イオノゾンデ、COSMIC 掩蔽観測により得られた観測結果とトモグラフィーの解析結果との比較を行い、トモグラフィーによる電子密度の最大値がイオノゾンデによる foF2 とよく一致すること(図 6)、電子密度最大の高度は COSMIC 掩蔽観測のピーク高度より数十 km 高く現れる点を明らかにした。(4) 最終年度には、当初の予定を超えた研究項目にも取り組んだ。まずトモグラフィー結果の衛星航法補正利用に向けた検討を行い、測位誤差の低減に有効であることを示した(学会発表)。また韓国や台湾の研究者との交流から、観測データを糾合してさらに広域の解析を試み、GEONET のみの場合よりも解析可能な範囲が広がる点などが明らかになった。

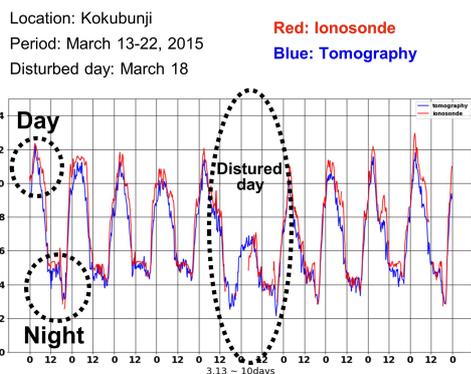


図 6 国分寺のイオノゾンデによる foF2 測定値(赤線)とトモグラフィー解析結果から求めた foF2 の比較。2015 年 3 月 13-22 日を対象とする。日夜の変動、磁気嵐に伴う変動とも非常に良い結果が得られた。

以上をまとめると、本課題は GEONET を活用した電離圏 TEC 観測データから日本上空の電離圏電子密度の 3 次元トモグラフィー解析の高度化を目的として行われた。4 年間(当初予定の 3 年間に加えて 1 年間の延長)にわたる研究の結果、1) 拘束付き最小二乗法を用いた 3 次元トモグラフィー解析プログラムを、Python 言語を使用して開発し、TEC 絶対値の推定からハイパーパラメタの選定を経て最終結果までを自動化することに成功し、2) 電子航法研究所が取得している全国 200

受信点からのリアルタイム値(1秒値)をもとに15分毎でレイテンシが5分間の3次元トモグラフィーに基づくリアルタイムデータサービスを実現し、3)スーパーコンピュータによる分散処理を用いた過去の大量データの解析システムを構築し、4)トモグラフィー解析結果と他の観測データの統計的な比較を実施した。

本課題では、当初に予定した研究内容をほぼ完全に達成することができた。さらに最終年度においては、韓国と台湾のデータを加えた解析領域の広域化にも取り組むなど、研究内容は当初の予定を超えた広がりを見せている。また、トモグラフィー結果を実利用したいとの興味も高まりつつあり、この点においても関係者との議論がスタートしている。これらの諸点を考慮すれば、本課題では、当初の予定を超えた成功を得ることができたと自己評価している。

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8件)

— S. Saito, S. Suzuki, M. Yamamoto, A. Saito, and C.-H. Chen, Real-Time Ionosphere Monitoring by Three-Dimensional Tomography over Japan, NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 64, Pages 495-504, doi:10.1002/navi.213, 2017.

Hozumi, Y., A. Saito, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, G. Murakami, K. Yoshioka, and C.-H., Chen, Global distribution of the He⁺ column density observed by Extreme Ultra Violet Imager on the International Space Station, J. Geophys. Res. Space Physics, vol. 122, Pages 7670-7682, doi:10.1002/2016JA023534, 2017.

Lin, F. F., C. Y. Wang, C. L. Su, K. Shiokawa, S. Saito, and Y. H. Chu, Coordinated observations of F region 3 m field-aligned plasma irregularities associated with medium-scale traveling ionospheric disturbances, J. Geophys. Res. Space Physics, Vol. 121, 3750-3766, doi:10.1002/2016JA022511, 2016.

S. Saito, S. Suzuki, M. Yamamoto, Chia-Hun Chen, A. Saito, Real-time Ionosphere Monitoring by Three-dimensional Tomography Over Japan, Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS+ 2016, Pages 706-713, 2016.

Hozumi, Y., A. Saito, M. K. Ejiri, Calibration of imaging parameters for space-borne airglow photography using

city light positions, Earth Planets and Space, Vol. 68, Pages. 155 (論文番号), DOI 10.1186/s40623-016-0532-z, 2016.

C.-H. Chen, A. Saito, C. H. Lin, M. Yamamoto, S. Suzuki and G. K. Seemala, Medium-scale traveling ionospheric disturbances by three-dimensional ionospheric GPS tomography, Earth Planets and Space, Vol. 68, Page 32, doi:10.1186/s40623-016-0412-6, 2016.

F. F. Lin, C. Y. Wang, C. L. Su, K. Shiokawa, S. Saito, and Y. H. Chu, Coordinated observations of F region 3-m field-aligned plasma irregularities associated with medium-scale travelling ionospheric disturbances, J. Geophys. Res. Space Phys., 121, Pages 3750-3766, doi:10.1002/2016JA022511, 2016.

G. K. Seemala, M. Yamamoto, A. Saito, C.-H. Chen, Three dimensional GPS ionospheric tomography over Japan using constrained least squares, J. Geophys. Res. Space Phys., Vol. 119, Pages 3044-3052, doi:10.1002/2013JA019582, 2014.

[学会発表](計25件)

S. Saito, M. Yamamoto, and A. Saito, Realtime Three-dimensional Ionospheric Tomography and Validation by MU Radar, 15th MST Radar Workshop, Tachikawa, Tokyo, May 27-31, 2017. (国際学会)

S. Saito, M. Yamamoto, A. Saito, and C.-H. Chen, Ionosphere Monitoring and GNSS Correction by a Real-time Ionospheric Tomography System in Japan, Proc. Institute of Navigation GNSS+ 2017, Pages 3434-3440, 2017. (国際学会)

M. Yamamoto, S. Suzuki, C.-H. Chen, and A. Saito, Realtime three-dimensional tomography of the ionosphere over Japan based on GEONET GPS-TEC, Beacon Satellite Symposium 2016, Trieste, Italy, June26-July1, 2016. (国際学会)

S. Suzuki, S. Saito, C.-H. Chen, G. Seemala, and M. Yamamoto, Development of real-time GPS-TEC monitoring system incorporating ionospheric 3D tomography over Japan, International Reference Ionosphere 2015 Workshop, Bangkok, Thailand, November 9-13, 2015. (国際学会)

M. Yamamoto, S. Suzuki, S. Saito, C.-H. Chen, G. Seemala, and A. Saito, Development of realtime 3D tomography of the ionosphere from GPS-TEC in Japan, 14th International Symposium on Equatorial Aeronomy, Bahir Dar, Ethiopia, October 19-23, 2015. (国際学会)

M. Yamamoto, G. Seemala, C.-H. Chen,
and A. Saito, Three-dimensional
tomography of ionosphere using GPS-TEC
over Japan, 31th URSI General Assenbly,
Beijing, China, August 19, 2014. (国際
学会)

〔その他〕

ホームページ「GEONETに基づく電離圏電子密
度のリアルタイム3Dトモグラフィー」
<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 衛 (YAMAMOTO MAMORU)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号：20210560

(2) 研究分担者

斎藤 享 (SAITO SUSUMU)
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研
究所・電子航法研究所・上席研究員
研究者番号：40392716

斎藤 昭則 (SAITO AKINORI)
京都大学・理学研究科・准教授
研究者番号：10311739

(3) 研究協力者

チア-フン チェン (CHIA-HUNG CHEN)
National Cheng-Kung University (台湾)・
理学部・助教

ゴピ シーマラ (GOPI SEEMALA)
Indian Institute of Geomagnetism (イン
ド)・研究員

ニコラス セサンガ (NICHOLAS SSESSANGA)
Chungnam National University (韓国)
Space Science Laboratory・研究員