

## 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25年 6月 3日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656092

 研究課題名（和文） 衛星ビーコンとGPS-TECによる  
電離圏3次元トモグラフィの研究開発

 研究課題名（英文） Development of 3-dimensional tomography of ionosphere  
by using satellite beacon and GPS-TEC

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

研究成果の概要（和文）：

わが国では全国1000点以上の観測網が国土地理院によって整備されており、30秒毎の電離圏全電子数（Total Electron Content; TEC）が得られる。本研究では、このGPS-TECを用いた3次元トモグラフィ解析の開発に取り組み、さらに低輝度衛星から地上までの2州はビーコン観測によるTEC値の融合を目指した。GPS-TECの3次元トモグラフィには拘束条件付き最小二乗法による手法の開発に成功し、解の安定性と計算速度が飛躍的に向上した。ただし衛星ビーコンを併用した3次元トモグラフィについては、本研究の期間内には完了できなかった。一方でJAXAが実施する観測ロケットから地上までの2周波ビーコン観測にも参加した。

研究成果の概要（英文）：

In Japan there is GEONET, a vast network of about 1200 GPS-receivers. Based on the total electron content (TEC) from GEONET, we developed 3-dimensional tomography by using the least-squares fitting method with restrained condition. We also tried to combine TEC data from dual-band beacon (DBB) signal from LEO-satellites to the ground, but the development was not completed during the project term. On the other hand, we successfully conducted dual-band beacon (DBB) experiment from JAXA sounding rocket S-520-26 to the ground.

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 | 0       | 1,500,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2012年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 総計     | 3,100,000 | 480,000 | 3,580,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電機電子工学・計測工学

キーワード：衛星ビーコン観測・電離圏・GPS・計算機トモグラフィ・電子航法

## 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。特にGPS測位を利用した次世代の航空機管制システムにおいては、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。

わが国には国土交通省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。我々はGEONETから日本上空の電離圏TECを30秒毎に計測するシ

システムを開発し、GPS-TEC 観測をリードしてきた。電離圏の水平構造についてはリアルタイム計測が可能となっている。GPS-TEC を用いたトモグラフィ解析による電子密度の3次元分布推定が研究されている。拘束条件付き最小二乗法を用いた手法が有力視されるが、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。また GPS-TEC データだけでは空間分解能にも限界があった。

電離圏 TEC のもう一つの観測として、高度数百 km の低高度衛星から地上に発射される 2 周波ビーコン電波（通常 150MHz と 400MHz）の位相差から計測する方法がある。研究代表者らは、衛星ビーコン用デジタル受信機の開発に成功し、専用アナログ受信機より高い計測精度が低コストで実現できることを示した。これを GPS-TEC のトモグラフィに加えることで、空間分解能の向上が可能と期待された。

## 2. 研究の目的

本研究は、GPS-TEC と衛星ビーコン観測と上記の GPS-TEC を組合せた複合トモグラフィの開発をめざし、電離圏電子密度の3次元分布の常時モニタシステムを構築することを目的とする。更に最終目標として、航空管制への支援システムの提案を掲げた。また観測期間中に実施予定の観測ロケット実験を用いたロケットから地上までのビーコン観測にも参加した。

## 3. 研究の方法

使用するデータのうち GPS-TEC については、GEONET 観測網からのデータを利用した。一方、衛星ビーコン観測については、本研究によってサロベツ、弘前、仙台、調布にデジタルビーコン受信機を設置することでデータ収集を進めた。また JAXA 宇宙科学研究所の観測ロケット S-520-26 号機ロケットに2周波ビーコン送信機を搭載して地上で受信する観測を実施した。ただし当初は 2010 年夏季とされた打上げ予定が大幅に遅れ、実施は 2012 年 1 月であった。

## 4. 研究成果

### (1) GPS-TEC を用いた 3 次元トモグラフィ解析の開発

GEONET 観測網からの GPS-TEC データを利用する電離圏の 3 次元トモグラフィ解析の開発を進めた。

研究期間の初めにおいては、衛星ビーコン観測のみに基づく電離圏の 2 次元トモグラフィを開発し、潮岬-信楽-福井の 3 点観測から電離圏電子密度の子午面分布を調べたところ、夏の夜間には高緯度側の電子密度

が低緯度よりも大きくなるという通常とは逆の分布 (Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly (MSNA) と名付けられた) を示すことを明らかにした。(図 1) (論文②⑥⑦⑧)

引き続き GPS-TEC に基づく 3 次元トモグラフィの開発を行った。従来の電離圏トモグラフィでは、初期条件として電離圏電子密度のモデル値を与えてから計算を開始するものがほとんど(上記の 2 次元トモグラフィでも同様の手法を用いた)であるが、本研究では、拘束条件付きの最小二乗法を用いることで初期値を不要としている点がユニークである。さらに低軌道衛星を用いた衛星=地上のビーコン観測から得られる TEC を併用することで、GPS 観測網のみによる以上の解析精度の実現を目指した。ただし拘束条件の選び方や、収束判定の手法を定めることが

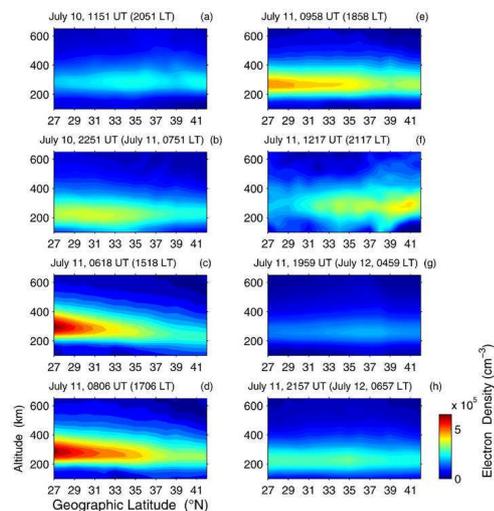


図 1 衛星ビーコン観測から得られた 2 次元トモグラフィの解析例。夜間には高緯度側の電子密度が卓越する MSNA が発生している。(論文⑦)

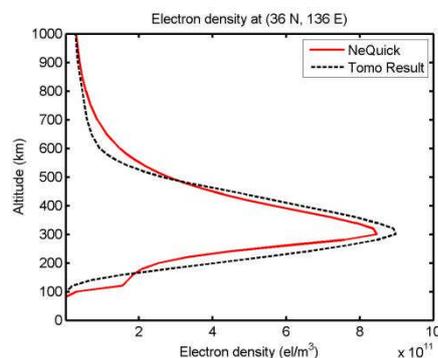


図 2 NeQuick モデルから得た電子密度の高度分布 (赤線) と、それを元を実施した GPS-TEC トモグラフィの解析結果 (点線)。良い一致が得られている。

難しく、開発には長期間を要した。

3次元トモグラフィー解析について、連携研究者の斎藤昭則博士が開発してきた初期版をもとに開発を開始したが、解の安定性が非常に悪く、細部にわたる変更が必要であることが判明した。特に観測データをもとにした開発が困難であったため、本研究の初期においては電離圏電子密度のモデル値を用いた模擬データを作成し、それにトモグラフィー解析を施すことで解析プログラムの問題点を洗い出していた。次第に解の安定性が向上し、同時に計算効率が向上していった。

(図2)

斎藤博士の元学生で現在は台湾の成功大学に所属する Chen 博士が、同様の研究開発を行っていたため交流を深め、共同してプログラムの改良を進めた。本解析手法では、異なる拘束条件を与えた複数のトモグラフィー解析を試行することで複数の解の候補を算出し、その中から妥当な結果を自動的に選び出す。その目的で「ハイパーパラメタ」と呼ばれる変数を設定するが、これの設定方法と解の選び方が結果の安定性を左右することが明らかになった。最終的には、Chen 博士を京都大学に招へいして「開発合宿」を行うことで、開発を加速した。結果として解の安定性を大幅に向上する手法を見出すことができ、観測データに対しても妥当な結果が得られる水準に至った。(図3)

本研究項目の達成度は以下の通りである。

○ 拘束条件付き最小二乗法を用いた電離

圏電子密度のトモグラフィー解析について、研究開発を進め、効率の良い計算プログラムを完成し、安定性の良い収束条件を見出した。

- 開発したトモグラフィー解析プログラムを GEONET 観測データに適用することで、ほぼリアルタイムの電離圏電子密度の3次元分布推定が可能となった。
- 低軌道衛星からのビーコン観測データを GPS 観測に組み込んでトモグラフィー解析の精度を向上する点については、本研究期間中では未完成に終わった。

なお2011年3月11日に発生した東日本大震災においては、地表の地震波及び海上の津波に伴って強い大気波動が励起され、電離圏 TEC に大きな変動が現れた。地震の影響が電離圏を水平伝搬する状況について、GEONET データを用いた解析を行って公表した。(論文③)

(2) デジタル受信機を用いた観測ロケットから地上までの2周波ビーコン観測

本研究項目では、JAXA 宇宙科学研究所が実施する観測ロケット S-520-26 号機に2波のビーコン (Dual-Band Beacon; DBB) 送信機を搭載し、地上の受信機で2波の伝搬遅延の差を測定することによって、ロケットと地上の間の TEC の観測を目指した。

ロケットからのビーコン観測の場合、衛星＝地上間と違って発射時の TEC 値がゼロであ

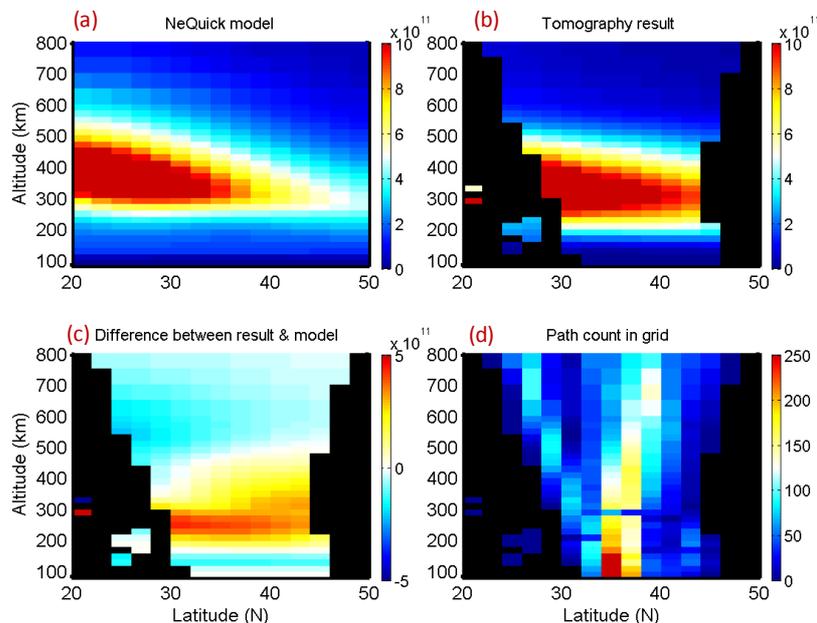


図3 GPS-TEC の3次元トモグラフィーの解析例。(a) NuQuick モデル (参考値)、(b) 観測 (2012年5月23日 03:30UT) に基づき推定された電子密度の緯度高度分布、(c) モデル値とトモグラフィー推定値の差、(d) トモグラフィー解析に用いられた GPS-TEC 推定パスの分布。

るため、TEC の絶対値の推定が容易という特徴がある。ロケット上昇時・下降時の TEC の時間微分値から電子密度の高度プロファイルが推定できる。またロケットの水平移動とともに TID に伴う電子密度の変動が観測される。更にトモグラフィ解析を施すことによって、ロケット軌道を含む鉛直断面内の電子密度の 2 次元分布の推定が期待できる。

ロケット搭載機器は送信機・フィルタ・分配器・アンテナから構成される。送信機からは、周波数 150 MHz と 400 MHz の 2 波の無変調波（各出力 1 W）が発射される。送信アンテナは 150 MHz 用に 2 本、400 MHz 用に 4 本がロケット外壁に取り付けられ、150MHz では直線偏波、400MHz では右回り円偏波の電波を送信する。一方、ビーコン受信機は、ロケット飛行方向に沿って一直線上に 3 局（内之浦、垂水、薩摩川内）を配置した。さらに高知と奄美大島に臨時的観測点を設置した。常設の観測点である信楽を含めると、受信点の総数は 7 局に達する。全ての受信点にデジタル受信機を配置するとともに、内之浦・垂水・川内の 3 点にはアナログ受信機を設置してロケット打上げに備えた。観測ロケット S-520-26 号機は 2012 年 1 月 12 日 5 時 51 分（日本標準時）に打上げられ、搭載機器は全て順調に動作した。ビーコン波は、全ての地上受信点において受信された。

2 周波ビーコン観測では、400MHz と 150MHz の 2 つの信号の位相差からロケットから地上までの経路上にある TEC 値が計測される。図 4 に内之浦に設置された GRBR からのデータ解析結果を示す。上図は 2 つの信号の位相差である。位相差が時間と共に大きくなっていくが、その原因はロケット姿勢を安定させるためのスピンである。実際、TEC 値の負の傾きは打ち上げ後のスピン増速と共に増して行き、約 60 秒ごろにスピン周波数が一定となって安定する。電離圏 TEC はこの上に重畳して現れる。図 4 下図に、TEC 値の時間微分値の変動を描くが、毎秒約  $-0.07\text{TECu}$ （1 TECu は電子数  $10^{16}$  個/ $\text{m}^2$  に相当）を中心として上下に変動する。時間微分値をロケット飛行データとあわせて高度微分値に直すことによって求めた、電子密度の高度分布を図 5 の上図に示す。いずれもロケット上昇時の分布と下降時の分布を重ねて表示している。下図にはロケットに搭載計器で直接測定された電子密度分布を示す。ビーコン実験による電子密度の推定ができる電子密度の下限は、およそ電子密度  $3 \times 10^9$  個/ $\text{m}^3$  であった。ビーコン実験とロケット搭載機器による電子密度の直接測定結果はほぼ一致した。高度 200km 以上における電子密度の高まり、高度 150~180km のピーク、高度 100km 付近の小さなピークは両者に現れている。これらより、今回のロケットビーコン観測は成功したと言え

る。ただしビーコン実験による電子密度が大きめである点については、更に注意を払う必要がある。

### (3) 電離圏 TEC が航空航法に与える影響

2010~2011 年には、電離圏電子密度の水平分布によって生じる電離圏遅延の空間変動が GNSS 利用の航空航法に与える影響について調査を行った（論文④⑤）。ION GNSS 2011 における調査において、米国では様々な宇宙天気情報を航空機の運航に役立てる試みが進んでいることが分かった。また電子航法研究所（調布市）に衛星ビーコン観測点を設置し観測を開始した。さらに 2012 年度には TEC

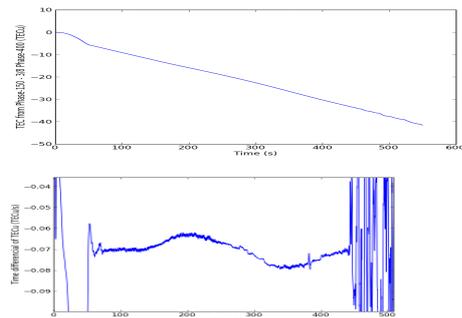


図 4 ロケットビーコン観測結果。2 波の位相差（上図）とその時間変動（下図）。位相差の下向きトレンドはロケットスピンによって現れた。

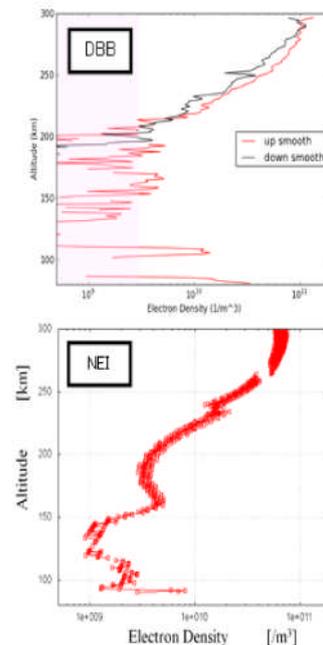


図 5 ロケットビーコン観測結果。2 波の位相差（上図）とその時間変動（下図）。位相差の下向きトレンドはロケットスピンによって現れた。

の空間変動が非常に大きい低緯度域の状況を調べるために、京都大学生存圏研究所の赤道大気レーダー周辺にGPS受信機を設置した観測データの取得を開始した。

#### 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 8 件)

- ① Smitha V. Thampi, and M. Yamamoto, Evolution of plasma bubbles over Vietnam region observed using the CERTO beacon on 1 board C/NOFS satellite, *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 査読有, 41, 233-239, <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/14047>, 2012.
  - ② Thampi, S. V., N. Balan, C.-H. Lin, H. Liu, and M. Yamamoto, Mid-latitude Summer Night time Anomaly (MSNA) Observations and Model Simulations, *Ann. Geophys.*, 査読有, 29, 157-165, doi:10.5194/angeo-29-157-2011, 2011.
  - ③ Saito, A., T. Tsugawa, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Iyemori, M. Matsumura, S. Saito, C. H. Chen, Y. Goi, and N. Choosakul, Acoustic resonance and plasma depletion 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, 863-867, doi:10.5047/eps.2011.06.034, 2011.
  - ④ 齋藤 享, 藤井 直樹, SBAS 信号を使用する GBAS の開発について, 電子情報通信学会論文誌. B, 査読有, 93, 947-954, [http://search.ieice.org/bin/pdf\\_link.php?category=B&lang=J&year=2010&fname=j93-b\\_7\\_947&abst=](http://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=B&lang=J&year=2010&fname=j93-b_7_947&abst=), 2010.
  - ⑤ 吉原 貴之, 齋藤 享, 藤井 直樹, 日本における GPS 衛星電波の局所的な電離圏遅延勾配の背景場の評価, 日本航海学会論文集, 査読有, 123, 135-142, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110007880676>, 2010.
  - ⑥ Thampi, S. V., M. Yamamoto, C. Lin, and H. Liu, Comparison of FORMOSAT3/COSMIC radio occultation measurements with radio tomography, *Radio Science*, 査読有, 46, RS3001, doi:10.1029/2010RS004431, 2011.
  - ⑦ Thampi, S. V., and M. Yamamoto, First results from the ionospheric tomography experiment using beacon TEC data obtained using a network along 136E longitude over Japan, *Earth Planets and Space*, 査読有, 62, 359-364, doi:10.5047/eps.2009.10.003, 2010.
  - ⑧ S. V. Thampi, M. Yamamoto, H. Liu, S. Saito, Y. Otsuka, and A. K. Patra, Nighttime-like quasi solar eclipse echoes induced by a partial solar eclipse, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 37, L09107, doi: 10.1029/2010GL042855, 2010.
- [学会発表] (計 32 件)
- ① Gopi Seemala, 山本衛, 齋藤昭則, Koichi Chen, 3-Dimensional ionospheric GPS tomography over Japan: simulation and data analysis results, 第 27 回大気圏シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原, 2013 年 02 月 28 日-03 月 01 日.
  - ② Gopi Seemala, M. Yamamoto, A. Saito, Chia-Hung Chen, Susumu Saito, Tomography of ionosphere by combining GPS-TEC and radio beacon TEC data, 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌コンベンションセンター, 札幌, 2012 年 10 月 20-23 日.
  - ③ 齋藤 享, 藤田征吾, 吉原貴之, 大塚雄一, 山本衛, Study of spatial gradient in TEC, 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌コンベンションセンター, 札幌, 2012 年 10 月 20-23 日.
  - ④ 山本衛, P. Bernhardt, M. Wilkens, 横山竜宏, 観測ロケット S-520-26 号機から地上までのビーコン実験結果速報, 第 26 回大気圏シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原, 2012 年 3 月 1~2 日.
  - ⑤ S. Saito, P. Louve, and T. Sakai, Simulation study of low latitude ionospheric effects on SBAS with a three-dimensional ionospheric delay model, ION GNSS 2011, Portland, USA, September 20-23, 2011.
  - ⑥ S. Saito, Ionospheric effects on GBAS and mitigation techniques, Workshop on ionospheric data collection, analysis, and sharing, ICAO Asia Pacific Regional Office, (招待講演), Bangkok, Thailand, May 5-6, 2011.
  - ⑦ S. Saito, Ionospheric effects on Global Navigation Satellite Systems and the application to aviation, SEALION International Symposium, (招待講演), Bangkok, Thailand, January 18, 2011.
  - ⑧ M. Yamamoto and S. V. Thampi, Digital satellite beacon receiver; system and application, 2010 Taiwan-Japan Space Instrument Workshop (招待講演), National Cheng Kung University, Taiwan, September 10, 2010.
  - ⑨ M. Yamamoto, S. V. Thampi, H. Liu and C. Lin, Multi-instrument observations of midlatitude summer nighttime anomaly from satellite and ground, 38th Scientific

Assembly of COSPAR, Bremen, Germany,  
July 19, 2010.

- ⑩ M. Yamamoto and S. V. Thampi, GNU  
Radio beacon receiver --- System and  
application ---, International Beacon  
Satellite Symposium, Barcelona, Barcelona,  
Spain, June 7-11, 2010.

[その他]

ホームページ等

本課題 HP

[www.rish.kyoto-u.ac.jp/~yamamoto/CH10](http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~yamamoto/CH10)

デジタルビーコン受信機 HP

[www.rish.kyoto-u.ac.jp/digitalbeacon/](http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/digitalbeacon/)

## 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

齋藤 享 (SAITO SUSUMU)

(独) 電子航法研究所・航法システム領  
域・主幹研究員

研究者番号：40392716

### (3) 連携研究者

齊藤 昭則 (SAITO AKINORI)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10311739

佐藤 亨 (SATO TORU)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：60162450

研究協力者

Gopi Seemala

(独) 情報通信研究機構・国際交流プログ  
ラム研究員 (2012～2013 年)

Chia-Hung Chen

成功大学 (台湾)・ポスドク研究員

Smitha V. Thampi

日本学術振興会・外国人特別研究員

(2008～2010 年)