

(観測ロケット実験提案)

電離圏擾乱時における電離圏鉛直構造の空間観測実験

—機器内製化と打ち上げオペレーションを通じた実践的な宇宙人材教育—

芦原 佑樹 (奈良高専)、山本 衛 (京大)、石坂 圭吾 (富山県大)

熊本 篤志 (東北大)、白澤 秀剛 (東海大)

概要

これまで電離圏観測を目的した観測ロケット実験が種々行われている。観測ロケット実験における電子密度測定手法としては、ラングミュアプローブやインピーダンスプローブを用いたプローブ法を用いることが多い。プローブ法は精密な観測ができるが、その場観測であるために観測ロケット周辺の電子密度空間構造はわからない。一方で、中緯度電離圏における沿磁力線不規則構造(Field-Aligned Irregularity: FAI) や中規模伝搬性電離圏擾乱(Middle-Scale Traveling Ionospheric Disturbance: MSTID)等の電離圏擾乱現象を把握するためには、電子密度の空間構造観測が必要となる。そこで、我々は新規開発するロケット GPS-TEC 観測(TEC)に加えて、2周波数ビーコン観測(DBB)、中波帯電波観測(MFR)、インピーダンスプローブ(NEI)、太陽・地平線センサ(SAS・HOS)を用いて電離圏鉛直構造の空間観測実験を行う。複数PI機器観測結果の比較から、新規開発するロケットGPS-TEC観測(TEC)で電子密度の空間構造観測ができることを実証する。

また、宇宙利用が拡大する新たな時代となり、研究開発から実用に至るあらゆる場面で、宇宙開発や宇宙利用に対して積極的に取り組むことが社会的要請となっている。しかしながら、大学等の教育現場では、人工衛星・探査機等のビッグプロジェクトで得られた2次データを用いて卒業研究をまとめる機会が増え、学生がハードウェアに触れる機会が減少している。宇宙産業に必要な人工衛星、探査機のプロジェクトマネージャーや観測機器責任者を育成する観点からも、プロジェクト全体を見渡す総合力とものづくりの実践力を持った人材育成が必要である。本実験では、学生が担当するPI機器について極力メーカー支援を受けずに内製化に取り組むことにより、ものづくり力を身につける。また、各種噛み合せ試験を通してシステムインテグレーションの方法、トラブルシューティングのやり方、プロジェクトの運営方法を学習する。さらに、内之浦での最終確認作業や打ち上げオペレーションを通して、宇宙人材に必要な実践力と経験値を習得する。このように観測ロケット実験を『実践的な宇宙人材育成の場』として最大限活用し、宇宙人材の育成を図る。

(1) 研究の背景、実験目的

[1] 研究の背景

太陽フレアや磁気嵐など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。

電離圏の電子密度は、一般的に水平方向にほぼ均一で、高度方向には密度変化を伴っており、高度帯に応じて電離圏 D 領域、E 領域、F 領域と呼ばれる。一般には水平方向に均一とみなされる一方で、電離圏擾乱発生時には水平方向にも粗密構造を持つ。例えば、中緯度電離圏における沿磁力線不規則構造(Field-Aligned Irregularity: FAI) [1]は、E 領域や F 領域の電子密度の不均一が原因で発生することが示唆されている[2]。電離層中の電子の運動は、磁力線に垂直な面内では磁力線に束縛されるが、沿磁力線方向には比較的自由に動くことができる。そのため、仮に E 領域内で電子密度が水平方向に不均一であった場合、電子は沿磁力線方向に移動できるため、E 領域の不規則構造が沿磁力線に引き伸ばされると考えられる。また、沿磁力線によって引き伸ばされた E 領域の不規則構造が F 領域に伝搬し、中規模伝搬性電離圏擾乱(Middle-Scale Traveling Ionospheric Disturbance: MSTID)を発生させる[3]。FAI や MSTID は、水平に均一な構造を想定したイオノグラムやその場観測などの従来手法ではなく、レーダなどを用いた空間構造観測によって発見された現象といえる。

電離圏電子密度測定は、これまで種々の観測ロケット実験で行われている。この中で最も多く行われているのは、ラングミュアプローブ法やインピーダンスプローブ法など、プローブを用いたその場観測である。一般にプローブ用いたその場観測は、精密な観測結果を得られるのが利点とされる。しかしながら、その場観測であるために、FAI や MSTID などの空間構造観測には不向きである。一方、近年の電離圏研究は空間構造にも注目が集まっているため、観測ロケットでも空間構造観測の試みが行われている。栗原らは S-310-38, S-520-29 号機でマグネシウムイオンイメージャー(Magnesium Ion Imager: MII) による撮像観測を行い、Es 層の水平構造観測に成功している[4]。また、山本らは S-520-26 号機で 2 周波数ビーコン(Dual-Band Beacon: DBB)を用いたロケット飛行軌道面(鉛直方向)の空間分布観測を行っている。DBB 実験では、観測ロケットに位相の揃った 2 周波数のビーコン送信機を搭載し、ロケット飛行軌道面を通る場所に複数の地上観測点を設置する。地上観測点で得られた 2 周波のビーコン電波の位相偏位からロケット-地上間の全電子密度を求め、複数観測点のデータにトモグラフィ解析を施すことで、ロケット軌道面の電子密度空間分布を得ることができる。

[2] 実験目的

① 科学的重要性・学術的意義

研究背景で述べたように、FAI や MSTID などのプラズマ輸送過程の解明には、電離圏空間構造を観測することが必要となる。電離圏空間構造を観測することを目的として、ロケット GPS-TEC(TEC)を新規開発し、本実験にて測定手法を実証する。実証を行うために、2 周波数ビーコン(DBB)、長波・中波帯電波受信機(LMR)、インピーダンスプローブ(NEI)の複数機器による電子密度測定を比較し、ロケット GPS-TEC の電離圏観測データを検証する。

新規開発するロケット GPS-TEC(TEC)は、GPS 衛星から送信される電波を利用するため、自前の送信局を設置する必要が無い。観測ロケットに2周波対応 GPS 受信機とアンテナを搭載するだけでよく、シンプルな構成で観測できるのが利点である。また、地上に設置した GPS 受信機を用いた電離圏観測は広く行われているが、観測ロケット機上ではこれまで実施されていない。ロケット GPS-TEC では、地上からは難しい下部電離圏の空間構造観測が期待できる。ロケット GPS-TEC を新手法として確立することによって、超高層大気研究の発展に貢献する。

② 人材育成

科学的な実験目的に加えて、観測ロケット実験が持つ『実践的な宇宙人材育成の場』としての役割についてもより強力で推進する。これまでの多くの観測ロケット実験では、FM の詳細設計・製造工程をメーカーに発注し、短期間で信頼性の高い観測機器を入手するやり方をとっている。これは、研究推進の観点から見ると合理的である。一方で、大学・高専が担う教育機関としての役割からすると、各 PI 機器を担当する学生が FM 品の性能・環境試験やデータ解析だけでなく、FM 設計や製造を含めて担当することができれば、極めて質の高い実践的な教育効果が期待できる。近年は、小型の3DプリンタやCNCフライス盤を使ったテクノロジー系DIY環境が目まぐるしく進歩している。3Dプリンタでの造作物を観測ロケットに直ちに搭載できるわけではないが、小ロット製造の環境は従来よりも格段に整いつつある。本実験に搭載するPI機器は、極力メーカー支援を受けずに大学・高専での内製化を図る。これにより、学生のものづくり実践力を養成する。また、各種噛み合せ試験を通してシステムインテグレーションの方法、トラブルシューティングのやり方、プロジェクトの運営方法を学習する。さらに、内之浦での最終確認作業や打ち上げオペレーションを通して、宇宙人材に必要な実践力と経験値を習得する。このように観測ロケット実験を『実践的な宇宙人材育成の場』として最大限活用し、人材育成を図る。

(2) 実験方法

搭載予定の観測機器を表1に示す。

表1. 搭載する観測機器

観測機器 (略称)	担当者 (所属)
ロケット GPS-TEC 観測 (TEC)	芦原 佑樹 (奈良高専)
2周波数ビーコン観測 (DBB)	山本 衛 (京大)
長中波帯電波観測 (LMR)	石坂 圭吾 (富山県大)
インピーダンスプローブ (NEI)	熊本 篤志 (東北大)
太陽・地平センサ (SAS・HOS)	白澤 秀剛 (東海大)

ロケット GPS-TEC 観測

GPS 衛星からは、L1 (1.57542 GHz) と L2 (1.22760 GHz) の2つの周波数の電波が送信されている。電離圏プラズマは分散性媒質であるため、屈折率が周波数に依存する。そのため、2つの電波の伝搬経路に差異ができ、地上の GPS 受信機への到達時間に差が生じる。この時間差を逆算することで、電波伝搬経路上 (1次元) の総電子数を求める手法を GPS-TEC 法という。一方、トモグラフィ法とは、直線経路 (1次元) の電波透過量や吸収量を多方向から測定し、得

られたデータをマトリックス演算することで、2次元像を構築する手法である。

ロケット GPS-TEC トモグラフィの模式図を図1に示す。この図では、ロケット軌道鉛直面上空に GPS 衛星が 9 機あると仮定している。ロケット飛行中に各 GPS 衛星-観測ロケット間の全電子数 (TEC) を連続観測する。観測ロケットは放物線を描いて飛行するが、上昇時と下降時が同一直線状になる 2 地点での TEC データを差分することで、ロケット軌道より下側の TEC を求めることができる。

機器の開発状況としては、観測ロケットの回転による電波隠蔽の影響を確認するため、S-520 を模したロケット構体モデルを作成し、隠蔽試験を行った。GPS 測位周波数を 20Hz、ロケット回転を 1Hz の条件下で、GPS 受信信号のロック損失が殆ど無いこと、またロック損失後に早期に再捕捉できることを確認している。また、ロケット GPS-TEC 観測で期待される TEC 観測値を用いて作成した電離圏空間構造画像を図2に示す。図2左は、計算で使用するために仮定した電離圏モデルで、電離圏擾乱を想定して電離層パッチを配置している。放物線は S-520 の飛行軌道を想定しており、飛行軌道より下の濃淡は電子密度を表す。この電離圏モデルに対して、ロケットから 9 機の GPS 衛星が見えていると仮定して、ロケット飛行中に得られる TEC 値を計算する。そして、得られた TEC 値からトモグラフィ解析により得られた空間構造画像を図3右に示す。再構成されたトモグラフィ画像からは、電離層パッチを捉えていることがわかる。

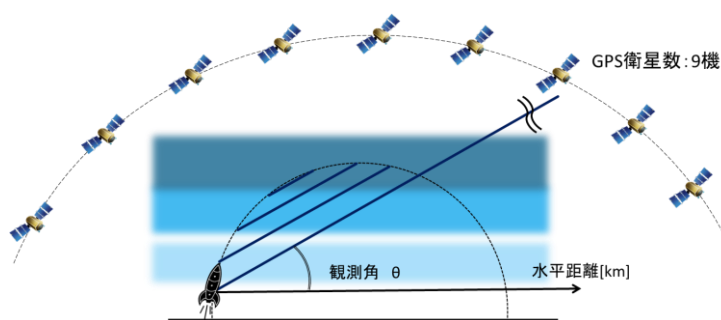


図1. ロケット GPS-TEC トモグラフィの模式図,
(GPS 衛星 9 機から TEC 観測できると仮定)

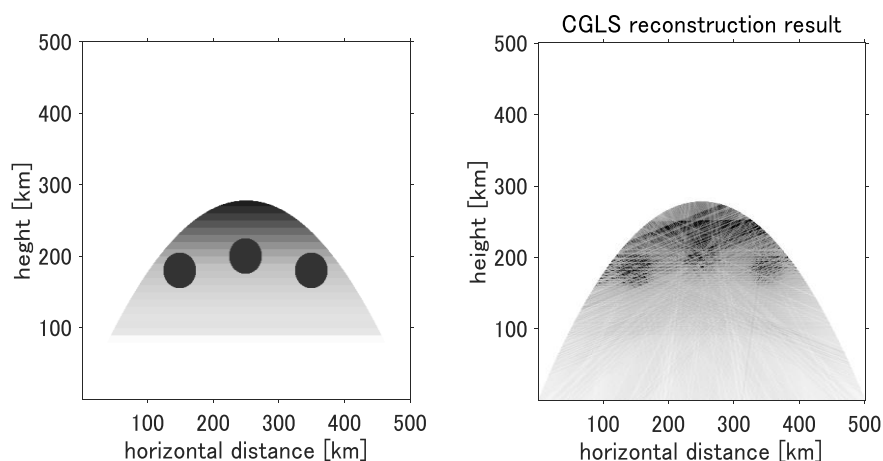


図2. ロケット GPS-TEC トモグラフィ法で期待される電離圏空間構造画像[5]
(左: 電離圏モデル、右: 期待される GPS-TEC データを用いたトモグラフィ画像)

2周波数ビーコン観測 (DBB : Dual-Band Beacon)

ロケット搭載のビーコン送信機から2周波数(150MHzと400MHz)の電波(出力1W)を送信し、複数拠点に設置する地上受信機で2周波数間の位相差を測定する。信号間の位相差の解析から伝搬経路上の全電子数を測定する。

中波帯電波観測 (MFR : Medium Frequency Receiver)

中波帯の地上放送波をロケット上で測定する。ロケットによるドップラーシフトとロケットスピンを利用することで、地上放送波をプラズマ中の特性波としてモード分離観測する。特性波の周波数偏位情報から電離圏電子密度を測定する。

インピーダンスプローブ (NEI : Number density of Electrons by using Impedance probe)

プラズマ中に展開した1.2cm径、1.2mリボンアンテナ(Be-Cu)のインピーダンスの周波数特性を計測することによって、高域混成共鳴(UHR)周波数を決定し、ロケットの軌道に沿った電子密度プロファイルを高精度で導出する。

医療用のX線CTのように全周測定データがそろったトモグラフィでは問題とならないが、ロケットGPS-TECトモグラフィのように投影角度が制限される場合には解析領域の端点(ロケット軌道)の電子密度を計測することで、トモグラフィ解析精度の向上が期待できる。

太陽・地平センサ (SAS・HOS : Sun Attitude Sensor ・ Horizon Sensor)

全天球センサを用いて、太陽角度と地平線角度を測定する。これにより、観測ロケットの絶対姿勢を測定する。

参考文献

- [1] Yamamoto, M., S. Fukao, R. F. Woodman, T. Ogawa, T. Tsuda, and S. Kato (1991), Mid-latitude E region field-aligned irregularities observed with the MU radar, J. Geophys. Res., 96(A9), 15943–15949, doi:10.1029/91JA01321.
- [2] Yokoyama, T., M. Yamamoto, and S. Fukao (2003), Computer simulation of polarization electric fields as a source of midlatitude field-aligned irregularities, J. Geophys. Res., 108, 1054, doi:10.1029/2002JA009513, A2.
- [3] Yokoyama, T., and D. L. Hysell (2010), A new midlatitude ionosphere electrodynamic coupling model (MIECO): Latitudinal dependence and propagation of medium-scale traveling ionospheric disturbances, Geophys. Res. Lett., 37, L08105, doi:10.1029/2010GL042598.
- [4] Kurihara, J., et al. (2010), Horizontal structure of sporadic E layer observed with a rocket-borne magnesium ion imager, J. Geophys. Res., 115, A12318, doi:10.1029/2009JA014926.
- [5] 池端 祐太朗, 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
- [6] Wakabayashi, M., T. Suzuki, J. Uemoto, A. Kumamoto, and T. Ono, Impedance probe

technique to detect the absolute number density of electrons on-board spacecraft, in An Introduction to Space Instrumentation, Edited by K. Oyama and C. Z. Cheng, 107-123, 2013.