

(採択された実験の進捗報告)

中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID)発生時の電子密度構造観測 : S-520-32号機の準備状況

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), 頭師 孝拓 (奈良高専)

概 要

中規模伝搬性電離圏擾乱 (Middle-Scale Traveling Ionospheric Disturbance: MSTID) は、夏季夜間や冬季昼間に多く見られる電子密度の波状構造である。MSTID の波長は 200km 程度で、電離圏 F 領域で発生する。MSTID の最も有力な成因として F 領域における Perkins 不安定があげられるが、その成長率は非常に小さいため、全てを説明するには不十分であるとされる。これを補う機構として、夏季夜間においてはスボラディック E (Es) 層の不均一構造に起因する分極電場が磁力線に沿って F 領域に投影されることで、MSTID の成長率が急激に加速されることが提唱されている。また、冬季昼間においては下層大気から E 領域を通して F 領域に伝搬する大気重力波と呼ばれる中性大気の横波が原因と考えられている。このように MSTID の生成には、夏季夜間・冬季昼間のいずれの場合においても、E 領域および F 領域で同時に電子密度の鉛直・水平構造を同時に観測することが生成機構解明に重要である。

本実験では、MSTID 発生時における電離圏 E 領域と F 領域の電子密度鉛直・水平構造をそれぞれトモグラフィ解析により推定する。これにより、中緯度における MSTID の生成機構を解明することを観測目的とする。

(1) 研究の背景, 実験目的

① 研究の背景

中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) とは、電離圏 F 領域に発生する波長 200km 程度の波状構造が日本の上空において夏季夜間には南西方向に、冬季昼間には南南東方向に伝搬する現象である。夏季夜間においては、従来大気重力波による中性大気の摂動が原因とされてきたが、中緯度においては電場が重要な役割を果たすと考えられている。最も有力な成因として F 領域における Perkins 不安定があげられるが、その成長率は非常に小さいため、全てを説明するには不十分であるとされる。Perkins 不安定の成長率を補う機構として、地球磁場により結合された E 領域との相互作用が提唱されている。横山ら[1]の計算機シミュレーションからは、スボラディック E (Es) 層の不均一構造に起因する分極電場が磁力線に沿って F 領域に投影されることで、MSTID の成長率が急激に加速することがわかってきた。また、冬季昼間においては下層大気から E 領域を通して F 領域に伝搬する大気重力波と呼ばれる中性大気の横波が原因と考えられている。しかし、E 領域よりも上空では、大気重力波は粘性による消散の効果を大きく受ける。このため F 領域において MSTID の原因となる大気重力波は、下層大気から直接伝搬したものか、または伝搬過程

において消散し二次的に生成されたものであるという二つの可能性が考えられる[2]。実際にどちらの大気重力波が MSTID の成因であるかを決定するためには、E、F 両領域において大気重力波の鉛直・水平構造を明らかにする必要がある。このように MSTID の生成には、夏季夜間・冬季昼間のいずれの場合においても、E 領域および F 領域で同時に電子密度の鉛直・水平構造を同時に観測することが生成機構解明に重要である。

本実験では、中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) 発生時における電離圏 E 領域と F 領域の電子密度鉛直・水平構造をそれぞれトモグラフィ解析により推定する。これにより、中緯度における MSTID の生成機構を解明することを観測目的とする。

② 実験目的

A) 科学的重要性・学術的意義

研究背景で述べたように、MSTID 生成機構の解明には、電離圏空間構造を観測することが必要となる。そのため、新規開発する GNSS-TEC 観測器と 2 周波数ビーコンを用いて電離圏電子密度トモグラフィ観測を行うことで、電離圏空間構造を観測する。電場観測では、2 対のプロローブを展開してプラズマ運動に影響を与える電場の大きさ・方向を観測する。インピーダンスプローブでは電子密度のその場観測を行い、トモグラフィ解析領域端点の電子密度情報とする。また、太陽・地平センサは画像情報から太陽および地平線の情報を画像処理により求めることで、ロケットの姿勢を決定する。

B) 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に推進する。これまでの多くの電離圏観測実験では、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が、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 OJT で学習する。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、宇宙人材に必要となる実践力と経験値を習得する。この人材育成プログラムの実施は、文科省 宇宙航空科学技術推進委託費「観測ロケット実験を通じた宇宙機器エンジニアリングスキル養成プログラム（事業期間 2019 年 9 月～2022 年 3 月）」の支援を受けて実施を進めている。

(2) 搭載機器概要および開発状況

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)
全電子数観測 (GNSS)	芦原 佑樹 (奈良高専)
2 周波数ビーコン観測	山本 衛 (京大)
電場観測 (EFD)	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)
月・地平センサ (VAS-V, VAS-I)	白澤 秀剛 (東海大)

全電子数観測 (GNSS : Global Navigation Satellite System)

(概要)

GNSS 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 GNSS-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。

(開発状況)

観測ロケットの回転の影響を受けないアンテナシステムの開発を進め、複数のパッチアンテナを円周断面上に配置して全受信電波を合波する方式を採用することを決定した。このモックアップを製作して地上回転試験を実施し、最適となる配置をみつけることで受信性能を改善した。また、GNSS モジュールへの電源供給およびロケットテレメータとの通信機能を持つ電子回路を設計し試作を行った。試作した電子回路上に GNSS モジュールを搭載して、動作を確認した。

2 周波数ビーコン観測 (DBB : Dual-Band Beacon)

(概要)

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。

(開発状況)

150MHz と 400MHz の共用アンテナの開発を進め、電磁界シミュレータを用いて、逆 L 型のエレメント形状を有し、非接触の給電素子をもつアンテナを設計した。ロケット外壁の過酷な環境条件に耐えうる機械的形狀について、JAXA 宇宙科学研究所からの助言をもとに設計した。アンテナを試作し、性能評価を行って設計の改善を進めた。また、150MHz と 400MHz でそれぞれ 1W の出力をもつ送信機の電子回路を設計し試作した。150MHz と 400MHz の所望の信号の発生を確認し、所望の品質が得られていることを確認した。送信機ケースの設計は 3D ソフトウェアを用いて実施した。

電場観測 (EFD : Electric Field Detector)

(概要)

2 対のプローブを展開し、電離圏中の空間電場の大きさおよび向きを測定する。

(開発状況)

これまでの観測ロケット実験で得られた観測結果の検討を行い、電離圏中のプラズマ波動を 2 対のアンテナで観測することが重要であることが判明した。そのため、3.2kHz までのプラズマ波動を 2 チャンネル観測する仕様変更を行った。この仕様変更反映した電場観測装置のすべての機能を有する回路図を製作し、回路図から回路基板を製作した。

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

(概要)

プラズマ中に展開した 1.2 cm 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。

(開発状況)

単体調整・各種試験では、容量ブリッジの最終調整・較正・部品固着を完了し、宇宙科学研究所・スペースサイエンスチェンバを利用したプラズマ計測実験を実施した。また、宮城県産業技術総合センターの施設を利用して振動・衝撃試験、温度遷移試験を実施した。従来からの追加機能として、機上ソフトウェアに簡易な高域混成共鳴 (UHR) の機上検出アルゴリズムを実装し、プラズマの計測実験で、 10^4 /cc 程度のプラズマの計測において良好に UHR を検出できていることを確認した。併せて希薄なプラズマ計測 (10^2 /cc) での有効性、誤検出を判定できるような指標の検討など今後取り組むべき課題も明らかになった。

月・地平センサ (VAS-V・VAS-I : Visual Aspect Sensor - Visible・- Infrared)

(概要)

全天球センサを用いて、ロケットから見た月方向と地平線方向を測定する。このデータと地磁気姿勢系のデータの組み合わせにより、観測ロケットの絶対姿勢を測定する。可視光イメージセンサを用いる VAS-V と赤外線センサを用いる VAS-I の 2 つのセンサを持つ。

(準備状況)

VAS-V は画像から月を検出するアルゴリズムの開発を進めた。撮影画像から月を検出するアルゴリズムの開発に加え、半月や三日月であっても月中心を推定して月中心座標を求めるアルゴリズムも開発した。また、360 度カメラを用いて地上から月の画像を撮影し、アルゴリズム検証用のデータの収集作業を実施している。

VAS-I は画像から地球中心方向を検出するアルゴリズムの開発を進めた。3D-CG ソフトを用いて推定されるロケット飛翔高度から地球を撮影した場合に得られる画像をシミュレートし、それを開発したアルゴリズムで解析することで、精度の検証も実施した。加えて、連続処理における処理時間の測定や処理速度を向上させるアルゴリズムの改良なども行っている。

(3) まとめ

MSTID 発生時における電離圏 E 領域と F 領域の電子密度鉛直・水平構造観測を行う S-520-32 号機は、2022 年夏の打ち上げ予定で準備を進めている。人材育成、技術蓄積および将来のコストダウンを目的に、PI は極力内製化する方針で準備を進めている。本実験を成功させ、また今回の人材育成・内製化の取り組みを、研究と教育を好循環させるきっかけとしたい。

参考文献

- [1] T. Yokoyama and D. L. Hysell, Geophys. Res. Lett. **37**. L08105(2010)
- [2] Miyoshi, Y., Jin, H., Fujiwara, H. and Shinagawa, H, Numerical study of traveling ionospheric disturbances generated by an upward propagating gravity wave, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123, 2141–2155,
<https://doi.org/10.1002/2017JA025110> (2018)