

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340120

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Study of generation mechanism of middle-latitude ionospheric wave by rocket and ground-based observations

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) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はロケット観測と地上観測の連携によって中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID)の発生機構を解明することを目的として実施された。2013年7月20日にJAXA内之浦宇宙空間観測所から観測ロケットS-520-27号機、S-310-42号機を打上げ、航空機観測、地上観測を同時に実施した。MSTIDに伴う電子密度と電場の大きな変動が観測され、同時にスプラディックE層が存在した。中性風速の振舞いを含めて、事前に予想されたモデルにほぼ近い状況の実証に成功した。世界初の試みとして、ほぼ満月の真夜中の条件でS-520-27号機からリチウム蒸気を噴射し、航空機と地上の両方から共鳴散乱光の撮像に成功した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to elucidate the generation mechanism of medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTID) by coordinated sounding rockets and ground-based observations. On July 20, 2013, sounding rockets S-520-27 and S-310-42 were successfully launched from JAXA Uchinoura Space Center (USC). We simultaneously carried out observations from aircraft and ground sites. In association to MSTID, large horizontal variation in electron density and electric field were observed. Sporadic E layer was present at the same time. Including the behavior of the neutral wind, we successfully demonstrated that MSTID is generated in the situation expected from the model that was proposed before the experiment. Also at the same time, we successfully photographed resonance scattering from the Lithium cloud under the full-moon and midnight condition from the aircraft and the ground, which was the world first Li-release experiment by using the moonlight.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：地球惑星電離圏 地球惑星上層大気 ロケット観測 地上観測 中規模伝搬性電離圏擾乱

### 1. 研究開始当初の背景

我々はこれまで、種々のレーダー観測、地上の多数の GPS 受信機網、大気光イメージャやファブリ・ペロー干渉計(FPI)、ライダー、衛星観測、計算機シミュレーション等の手法を用いて、電離圏 E 領域および F 領域の構造と沿磁力線イレギュラリティ(Field-Aligned Irregularity; FAI)の研究を推進してきた。1996年と2002年に実施された観測ロケットと地上装置による統合観測 SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu)では、E 領域で中性大気の擾乱が電子密度と電界の擾乱を引き起こしている事が明らかにされ、MU レーダー観測から発見されていた E 領域 FAI の準周期 (Quasi-Periodic; QP) エコーの本質を明らかにするという、重要な成果を挙げることに成功した(参考文献)。一方 F 領域においては、水平波長 100 ~ 200km の中規模伝搬性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance; MSTID) が夏季の夜間を中心に卓越し、MU レーダーでは関連する F 領域 FAI が観測される。具体的には、図 1 に示すように日本全国の GPS 観測網によって測定された電離圏全電子数 (Total Electron Content; TEC) が北西 - 南東方向の帯として現れ、南西方向に伝搬する。MSTID は Perkins 不安定によって生成するとされるが、理論的な成長率が観測事実に比べて小さすぎるという問題が未解決であった。これに対して、これまでの地上遠隔観測と数値シミュレーションからの知見をもとに、地球磁力線を通じた F - E 領域相互作用が重要な役割を果たすという理論仮説が提唱された(後述)。本研究課題は、MSTID の振舞いを明らかにし、その発生機構仮説を検証しようとするもので、観測ロケットを中心とする大規模な観測を実施する計画を立てた。本研究によって、中緯度電離圏の複雑な相互作用を明らかにし、MSTID の発生機構が解明できると期待された。

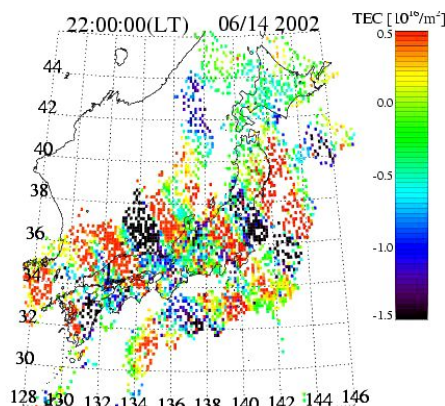


図1 GEONET(国土地理院によるGPS観測網)で観測された電離圏TEC変動に見られるMSTID。北西-南東方向の波面が南西方向に伝搬する。

中緯度の夜間に発生するMSTIDは、GPSを用いたTEC観測あるいは全天大気光イメージャによる酸素原子発光層(波長630nm)によって明らかにされてきた。北西-南東方向の波面構造を持ち、波長100-200kmで南西方向に伝搬する(図1)。Perkins不安定と呼ばれるプラズマ不安定が有力な生成機構と考えられ、大気光イメージャのMSTID観測と衛星による電界観測から肯定的な結果が得られている。しかしながらPerkins不安定には理論的に予想される成長率が低すぎるという本質的かつ未解決な問題点が存在した。一方、電離圏E領域に出現する準周期エコーとMSTIDは出現時期、伝搬方向等において多くの類似点が見られる。両者は導電率の高い地球磁力線により結合されており、共通の電場が作用すると考えられるため、電磁力学的に両者を結合させた観点からの研究が行われてきた(参考文献)。これらの研究成果から、以下のようなMSTID生成シナリオが考えられた。

- A) MSTIDは振幅が小さいうちはE領域の分極電界によって急速に成長し、
- B) 振幅が増大するとPerkins不安定の成長率に沿って成長する。
- C) MSTIDが北西-南東の波面を持つことはEs層の不安定機構に依存して決まり、
- D) 南西方向への伝搬はEs層付近に吹く中性風速の南向き風成分による。

### 2. 研究の目的

本研究の目的はMSTIDの振舞いと生成機構の解明である。これに対して、1)観測ロケットを中心とする大規模実験と2)その他の観測手段の2つの方向から研究計画を立てた。

#### 1) 観測ロケット実験

JAXA宇宙科学研究所が実施する観測ロケット実験に参加した。具体的には、S-310-42号機とS-520-27号機を連続して打上げ、地球磁力線で結ばれた電離圏F領域とE領域の電離大気及び中性大気を同時に直接観測した。地上に展開したGPS受信機網によってロケット打上げタイミングを定めるとともに、ロケットから散布されたリチウムおよびTMAの発光を航空機から撮像した。

#### 2) GPS-TEC等による研究

従来より実施してきたGPS観測や大気光観測をもとに、他地域におけるMSTIDの振舞いの研究等を推進した。

### 3. 研究の方法

本課題で実施された観測ロケット実験の概念図を図2に示す。中緯度電離圏のMSTID生成機構を解明するため、「観測ロケットからの直接観測を中心とする電離圏電子密度や電界の測定」「電離圏F領域からE

領域までの中性風測定」「地上観測を中心とする MSTID の観測」を同時観測することとし、S-520 ロケットによる F 領域観測、S-310 ロケットによる E 領域観測を連続して実施した。ロケットからの直接観測項目は電子密度、温度、電界、磁界等であり、化学物質放出によって中性風速を観測する。またビーコン送信機を搭載し地上で受信することによって、ロケットから地上までの全電子数観測を行う。MSTID は F 領域高度の夜間の現象であるため、その発生領域の中性風速測定は困難であるが、本観測では世界初となる月明を利用した風速測定を目指した。図3にロケットの飛翔方向、地上観測装置の配置と航空機の飛行経路を示す。

- 観測ロケット S-520-27 号機  
電界計測(ダブルプローブ)、電子密度変動(固定バイアスプローブ)、電子密度(新型 NEI インピーダンス・プローブ)、高感度磁場計測(高感度磁力計 MGF)、ビーコン観測(DBB 送信機)、撮像姿勢計(IAF)、月センサー姿勢計、リチウム風観測
- 観測ロケット S-310-42 号機  
TMA 風速観測、ビーコン観測
- 航空機観測  
JAXA ジェット飛行実験機「飛翔」  
左舷側：TMA 撮影用カメラ  
右舷側：リチウム撮影用カメラ
- 地上・航空機観測  
MU レーダー、GPS 受信機網(GPS-TEC モニタ)、イオノゾンデ観測網、大気光イメージャ等、リチウム・TMA 撮像観測(航空機及び地上3地点)、ビーコン受信機網(地上5地点及び海上ポート)

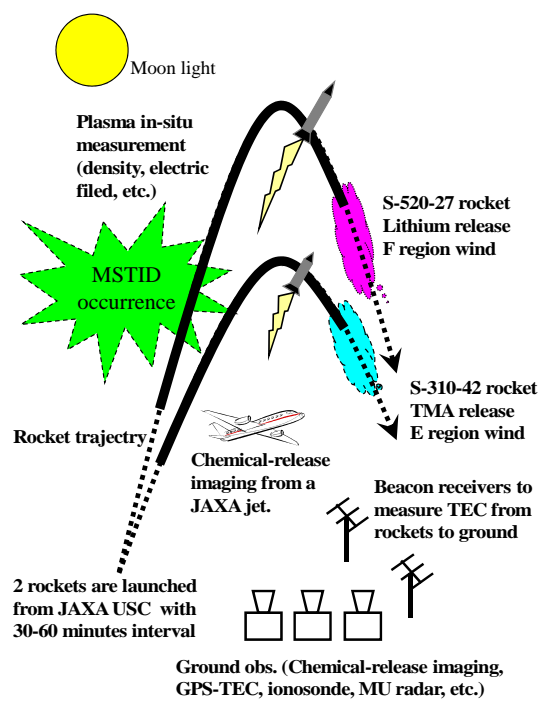


図2 観測ロケット実験の概念図

当初の計画では、2012 年夏季にロケットを打上げ、地上観測からはレーダーによる E 領域 FAI 観測を行うこととしていた。しかしながらロケット搭載機器の準備状況から打上げが 2013 年夏季に延期されたため、観測全体の有効性についてさらに検討を加えた。結果として月明によるリチウム観測から期待される発光強度が小さく地上からの撮像が困難と判明したため、航空機を用いて高度 10 km 以上からの撮像を目指した。この変更に対応して、本課題ではレーダー観測を中止し高感度の撮像機器を航空機に搭載するための治具を開発した。さらにリチウム放出機構にも様々な改良を加えて実験に臨んだ。図3に示すように、1機の航空機から2機のロケットによる TMA 観測とリチウム観測を効率よく行うため、初めに S-310-42 号機を打上げて航空機の左舷側から TMA 発光の撮像を行い、引き続いて S-520-27 号機を打上げて航空機の右舷側からリチウム発光を撮像する計画とした。TMA 発光の撮像時間と航空機の経路・速度を勘案して、ロケット打上げ間隔は約 1 時間とした。

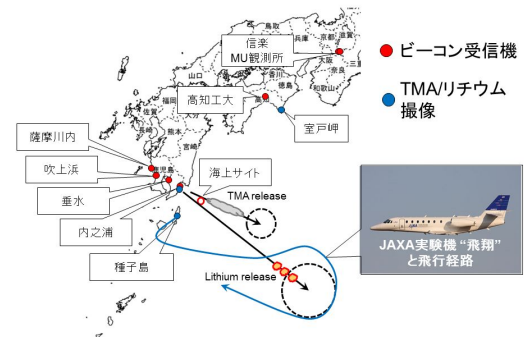


図3 実験セットアップの平面図(ロケットの飛翔方向、航空機の飛行経路(概略図)、地上観測点の分布)

4. 研究成果  
1) 観測ロケット実験  
本観測では、ロケット打上げタイミングを定めるために、MSTID の発生状況を実時間監視する必要があった。国土地理院は全国 1200 点に及び GPS 受信機網 GEONET を運営しており、1 秒値のリアルタイム配信も可能となっている。そこで本観測のために、電子航法研究所と情報通信研究機構が協力して、GPS-TEC リアルタイム・モニタリングシステムを構築した。ロケット打上げまでに、電子航法研究所が GEONET のうち約 200 地点からリアルタイム受信する GPS データを用いて、日本上空の TEC 値の水平分布図を 5 分毎に web サービスとして配信することが可能となり、観測から web 上にデータ提供するまでの時間遅れが約 3 分のシステムが完成した。本観測では、この web サービスを用い

て MSTID の実時間監視を行った。図 4 にロケットが打上げられた 2013 年 7 月 20 日の 22 時、23 時、24 時における TEC 変動の水平分布を示す。この日は MSTID の強度が強くなかったが、ロケット打上げ予定時刻の約 1 時間前（22 時）ごろには、九州上空に MSTID の発生が確認されたため、打上げスケジュールを進めた。その後、JAXA 航空機「飛翔」が種子島空港から離陸し撮像予定位置へのスタンバイしたあと、23:00JST と 23:57JST に、それぞれ S-310-42 号機と S-520-27 号機を打上げた。打上げられた観測ロケットの飛翔および動作は良好であって、搭載機器はすべて予定通りに動作した。S-520-27 号機に搭載されたリチウム放出機構も、設計通りにリチウムを放出することに成功した。また当日は快晴であったため、地上からの撮像条件も良好であった（図 5）。地上からの撮像では、特に内之浦と種子島から良好な画像が得られた。

S-520-27 号機から観測された電離圏の基本パラメータの分布を示す。図 6 は電子密度の高度分布である。右図はロケットに搭載されたインピーダンスプローブによる直接観測結果であり、左図にはロケットから地上までの 2 周波ビーコン観測からの結果を示す。2 つの違った測定手法によって、ほぼ同一の結果が得られた。高度 100km 付近に 2 層構造をもったスプラディック E 層が現れている。高度 250km より上層には F 領域下部の電子密度分布が現れている。注目すべきは、どちらの測定においても、ロケットの下降時の電子密度が最大で 7 倍程度上昇している点である。図 7 には、S-520-27 号機搭載のダブルプローブによる自然電場の解析結果を示す。この解析のためにはロケットの位置・速度に加えてロケット姿勢の情報が必要であるため、星センサーと磁場センサーからのロケット姿勢情報を利用している。推定された自然電場の値は 5 mV/m 程度の変動値を取り、南西向きから西向きへと変化する電場を持ち、周期約 100 秒の波状構造が見出された。また強度は時間とともに減少している。電場ベクトルを、電子密度の測定から推定された Pedersen 導電率が最大になる高度 280km に磁力線に沿って投射した。このようにして得られた電場ベクトルの水平分布を図 8 に示す。背景に示す TEC 値と比較すると、電子密度が低いところで電場が強く、電子密度の増大とともに電場が減少していた。

以上をまとめると、今回の観測では、MSTID 出現中のロケット観測から、電子密度に大きな空間変動（ロケット飛翔の後半（下降時）の増大）が検出された。電子密度の減少・増大と電界強度の増大・減少の間にそれぞれ対応関係があり電界ベクトルは北東～東向きで Perkins 不安定に類似している。また高度 100km 付近にスプラディック E 層があった。これらは、事前に予想された MSTID 発生機構に対して整合的であった。

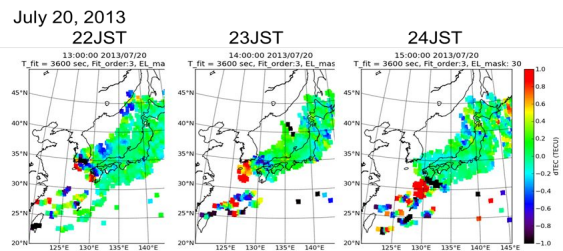


図 4 観測ロケット打上げ前後の GPS-TEC リアルタイムモニタの出力。ロケット飛翔方向に変動があることを確認してから打上げた。

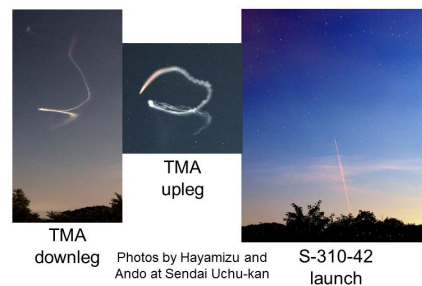


図 5 薩摩川内市から撮影されたロケットの打上げ状況（右図）並びに、ロケット上昇時（中央図）と下降時（左図）の TMA 発光雲の形状。

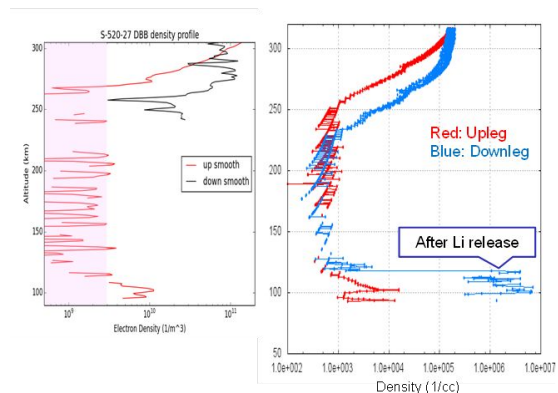


図 6 S-520-27 号機から直接測定された電子密度の高度分布（右図）とビーコン観測から求められた電子密度の高度分布（左図）

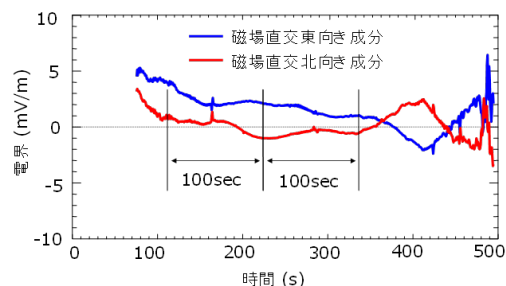


図 7 S-520-27 号機搭載のダブルプローブによって測定された電場ベクトルの時間変動。

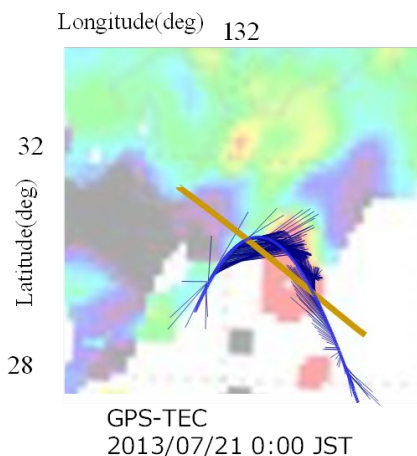


図8 S-520-27号機搭載のダブルプローブによって測定された電場ベクトルを磁力線に沿って高度280kmに投影して得られた水平分布。背景に全電子数の水平分布を示す。

## 2) GPS-TEC 等による研究

ヨーロッパのGPS観測網(800点)よりTEC変動を求めMSTIDの振舞いを調べた。日中のMSTIDは大気波動の影響により生成され、夜間のMSTIDにはプラズマ不安定の影響が大きい。また、与那国島の大気光イメージャから中緯度・低緯度の遷移領域におけるMSTIDについて統計的研究を実施した。MSTIDは低緯度域に伝搬しつつ消滅する傾向があるが、太陽活動度が低い時期には伝搬しやすい。日本のGOENETからのTECデータに3次元トモグラフィ解析を行い、電子密度の3次元分布を推定する手法の開発に成功した。これは将来のMSTIDの研究につながる成果である。

### まとめ

本課題は、以下に列挙する多くの成果を得て成功裡に終了することができた。

#### 成果1：観測ロケットによるMSTID観測

2013年7月20日に観測ロケットS-520-27号機、S-310-42号機と航空機観測、地上観測を組み合わせたMSTID生成機構に関する観測を実施した。観測の規模は、現在わが国で実施し得るほぼ最大のものとなった。MSTIDに伴う電子密度と電場の大きな変動が観測され、同時にスポラディックE層が存在した。中性風速の振舞いを含めて、事前に予想されたモデルにほぼ近い状況の実証に成功した。

#### 成果2：月明下のリチウム放出実験

世界初の試みとして、ほぼ満月の真夜中の条件でS-520-27号機からリチウム蒸気を噴射し、航空機と地上の両方から共鳴散乱光の撮像に成功した。風速の推定は現在解析途中である。改良型のリチウム放出機構については、設計通りの動作が確認され、技術課題の克服に成功した。

#### 成果3：他地域におけるMSTIDの振舞い

ヨーロッパ地域のGPS観測網を活用してMSTIDの振舞いを明らかにした。また日本の最西南端である与那国島からの大気光イメージャ観測から、MSTIDが低緯度域に伝搬したのちの振舞いを明らかにした。

#### 成果4：電離圏リアルタイムモニタの開発

MSTID発生を確認して観測ロケットを打上げる目的で、日本上空のGPS-TECの変動を実時間で表示するシステムを開発した。観測から表示までの遅れ時刻はわずか数分である。一方、GPS-TECを基礎とする3次元トモグラフィ解析の開発にも成功した。平成26年度より、別課題(挑戦的萌芽研究)によって、両者を組合せた電離圏リアルタイム・モニタリングシステムの開発を進めている。

#### <参考文献>

- Yamamoto, M., S. Fukao, R. T. Tsunoda, et al., *Ann. Geophys.*, 23, 2295-2305, 2005.  
 Yokoyama, S., Y. Otsuka, T. Ogawa, M. Yamamoto, et al., *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03101, doi:10.1029/2007GL032496, 2008.  
 Yokoyama, T., D. L. Hysell, Y. Otsuka, and M. Yamamoto, *J. Geophys. Res.*, 114, A03308, doi:10.1029/2008JA013789, 2009.

#### 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)

- 山本衛, 電離圏F領域E領域相互作用に関する観測ロケット・地上・航空機からの総合観測, 査読無, 平成25年度第1次観測ロケットS-310-42号機・S-520-27号機飛翔実験報告書, SES-TD-14-004, p147-152, 2015.  
山本衛, 中性大気の流れ・波動観測(TMA), 査読無, 平成25年度第1次観測ロケットS-310-42号機・S-520-27号機飛翔実験報告書, SES-TD-14-004, p153-156, 2015.  
阿部琢美, 固定バイアスプローブ(FBP), 査読無, 平成25年度第1次観測ロケットS-310-42号機・S-520-27号機飛翔実験報告書, SES-TD-14-004, p181-183, 2015.  
山本衛, ロケットビーコン観測(DBB), 査読無, 平成25年度第1次観測ロケットS-310-42号機・S-520-27号機飛翔実験報告書, SES-TD-14-004, p203-208, 2015.  
山本真行, 地上・航空機観測, 査読無, 平成25年度第1次観測ロケットS-310-42号機・S-520-27号機飛翔実験報告書, SES-TD-14-004, p209-218, 2015.  
 Narayanan, V. L., K. Shiokawa, Y. Otsuka, and S. Saito, Airglow observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from Yonaguni:

Statistical characteristics and low-latitude limit, 査読有, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 9268-9282, 2014, doi:10.1002/2014JA020368.

Gopi K. Seemala, M. Yamamoto, A. Saito, and C.-H. Chen, Three-dimensional GPS ionospheric tomography over Japan using constrained least squares, 査読有, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 3044-3052, 2014.

doi: 10.1002/2013JA019582.

Y. Otsuka, K. Suzuki, S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shiokawa, and T. Tsugawa, GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe, 査読有, Ann. Geophys., 31, 163-172, 2013.

doi:10.5194/angeo-31-163-2013

[学会発表](計33件)

山本衛, 加藤寛大, 石坂圭吾, 横山竜宏, 岩上直幹, 高橋隆男, 田中真, 遠藤研, 熊本篤志, 渡部重十, 山本真行, 阿部琢美, 羽生宏人, 齋藤享, 津川卓也, 西岡未知, Paul Bernhardt, Miguel Larsen, 観測ロケット実験による電離圏E-F領域相互作用の解明, 第28回大気圏シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原, 2014年12月8-9日.

齋藤享, 吉原貴之, 山本衛, GEONETリアルタイムデータを用いた電離圏擾乱のリアルタイムモニタリング, 第28回大気圏シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原, 2014年12月8-9日.

山本衛, Gopi Seemala, Paul Bernhardt, 観測ロケットS-520-27/S-310-42号機によるロケット=地上ビーコン観測実験, 第28回大気圏シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原, 2014年12月8-9日.

渡部重十, 山本真行, 柿並義宏, 阿部琢美, 羽生宏人, 山本衛, サウンディングロケットによる熱圏・中間圏大気の観測, 第28回大気圏シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原, 2014年12月8-9日.

石坂圭吾, 山本衛, 熊本篤志, 阿部琢美, S-520-27号機による電離圏中のULF/VLF帯波動の観測, 第28回大気圏シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原, 2014年12月8-9日.

[図書](計2件)

平成25年度第1次観測ロケットS-310-42号機・S-520-27号機飛翔実験報告書, SES-TD-14-004, pp.223, JAXA宇宙科学研究所, 相模原, 2015年1月.

平成25年度第1次観測ロケットS-310-42号機・S-520-27号機飛翔実験計画書, SES-TD-13-002, pp.184, JAXA宇宙科学研究所, 相模原, 2014年7月.

[その他]

ホームページ等

[http://www.jaxa.jp/press/2013/07/20130721\\_s-310-42\\_s-520-27\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2013/07/20130721_s-310-42_s-520-27_j.html) (観測ロケットS-310-42号機/S-520-27号機打上げ結果について)

[http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2013/0521\\_s-310-42.shtml](http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2013/0521_s-310-42.shtml) (2013年度第一次観測ロケット実験の実施について)

[http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent\\_mstid.html](http://www.enri.go.jp/cnspub/susaito/rocket/recent_mstid.html) (リアルタイム電離圏擾乱モニタリング)

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

大塚雄一 (OOTSUKA YUICHI)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 40314025

山本真行 (YAMAMOTO MASA-YUKI)  
高知工科大学・工学部・教授  
研究者番号: 30368857

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

阿部琢美 (ABE TAKUMI)  
(独)宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授  
研究者番号: 40255229

(3)連携研究者

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

渡部重十 (WATANABE SHIGETO)  
北海道情報大学・経営情報学部・教授  
研究者番号: 90271577

津川卓也 (TSUGAWA TAKUYA)

(独)情報通信研究機構・電磁波計測研究所・主任研究員  
研究者番号: 20377782

(4)研究協力者

横山竜宏 (YOKOYAMA TATSUHIRO)  
(独)情報通信研究機構・電磁波計測研究所・主任研究員  
研究者番号: 30397525