

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：30115

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540477

研究課題名(和文) 大気プラズマ結合過程の研究 日米共同ロケット実験

研究課題名(英文) Study on the coupling process between atmosphere and ionosphere - Japan-US sounding rocket experiment -

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：2013年5月に、マーシャル諸島でNASA、クレムソン大学と共同でロケット実験を実施した。高度100kmから上方には太陽光があり地上には太陽光がない19時地方時に、2機のロケットを約1分間隔で打ち上げ、熱圏下部と上部(電離圏E層とF層)の中性大気とプラズマを同時に測定した。クレムソン大学と共同で開発したリチウム原子放出器によるリチウム原子とTMAを放出することで、熱圏大気にリチウム雲とTMA雲を形成した。これらの雲をロイ島、ロンゲラップ島、リキエップ島に配置した高感度CCDカメラとビデオで同時撮影した。高度100km付近に約100m/sの熱圏大気風速シアアを捉えた。

研究成果の概要(英文)：In May 2013, the rocket experiments were carried out in the Marshall Islands in collaboration with NASA and Clemson University.

Two rockets were launched 1 minute apart and at 19 hour local time, when sunlight was over 100 km altitudes but there was no sunlight on the ground. The rockets observed simultaneously neutral atmosphere and plasma in lower and upper thermosphere (ionospheric E and F layers).

Lithium ejection system developed in collaboration with Clemson University was used to release Lithium atoms from rocket. The generated Lithium and TMA clouds were observed with high sensitivity CCD cameras and videos from Roi, Longelap and Rikieppu islands. We found strong neutral wind shear at ~100 km altitude.

研究分野：地球惑星大気プラズマ科学

キーワード：熱圏 電離圏 サウンディングロケット プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

King-Hele [1964] は人工衛星の軌道傾斜角の変化から熱圏大気が東向きに  $\sim 100\text{m/s}$  でスーパーローテーションしていることを発見した。Rishbeth [1971] と Heelis et al. [1974] は、夕方に発生する強い電離圏電場による電離大気の運動によって中性大気が東向きに運動する結果であると主張した。Anderson and Roble [1974] は熱圏大気モデルを用いて、夕方に発生する東向き電場に伴う電離層の上昇によりイオン抗力が減少し、高速の中性風が生じることを示した。Coley and Heelis [1989] は DE-2 衛星データからスーパーローテーションは磁気赤道で最も大きいことを示した。Richmond et al. [1992] は TIE-GCM を用いて、夕方に発生する prereversal enhancement に伴う電離層上昇とイオン抗力により電離大気と中性大気が共に運動する効果が重要であることを示した。

Raghavarao et al. [1991, 1997] は DE-2 衛星観測から Equatorial Temperature Wind Anomaly (ETWA) を発見した。Fuller-Rowell et al. [1997] は熱圏・電離圏モデルを用いて ETWA における化学反応熱の重要性を指摘した。Maruyama et al. [2002] はイオン抗力、中性大気抗力を 3 次元的に取り入れた熱圏・電離圏 3 次元全球モデルを初めて開発した。そのシミュレーション結果は、赤道域でのイオン抗力の重要性、スーパーローテーション、ETWA 等の現象の物理過程を示していた。赤道付近の中性大気運動はイオン運動の影響を強く受けている。イオン抗力が熱圏大気のスーパーローテーションの原因となることを強く示唆していた。ETWA は中性大気がイオン抗力により磁気赤道域で上昇、断熱冷却し、その極側で下降、断熱圧縮した結果である。

CHAMP 衛星による熱圏大気密度と熱圏風の測定は、全球的な ETWA を見事に再現しただけでなく、太陽活動等の影響も明らかにした (Liu et al., 2006, 2007, 2009)。Watanabe and Kondo [2011] は、高速東西プラズマドリフト領域は磁気赤道域で磁力線に沿ってアーチ状の構造を示しアーチの低緯度側の磁気赤道上で熱圏大気の東西風は最大となることを発見し、熱圏大気のスーパーローテーションはアーチ近傍で顕著であることを明らかにした。熱圏大気がなぜ地球の磁力線の存在を知っているのか、電離圏プラズマとの相互作用が重要であることは考えられるが、電離度が 1% にも満たない電離圏プラズマが熱圏大気を駆動できるのはなぜか。Kondo et al. [2011] は、イオン抗力によって駆動された下部熱圏大気が粘性により上部熱圏大気を加速する結果として、磁気赤道上で東西風が最大になりスーパーローテーションを形成することを TIE-GCM を用いて明らかにした。

このような基本的な構造が今まで明らか

にならなかったのはなぜか、希薄な熱圏大気のデータが少なく研究が十分に進んでいなかったこと、電離度が 1% にも満たない電離圏プラズマが上部熱圏大気までも駆動し熱圏大気の構造を大きく変化させるとは誰も考えていなかったからである。

衛星やモデリングで明らかになってきた熱圏大気・プラズマ結合過程の本質を実験的に解明するために、渡部 (研究代表者) は WINDs キャンペーンを展開している。

2007 年に内之浦から打ち上げたロケットでプラズマと電磁場を直接測定し、同時にリチウム原子をロケットから放出し太陽光の共鳴散乱により可視化したリチウム雲を追跡することで高度  $100\text{km} \sim 300\text{km}$  の中性大気風と密度を測定した。NiCT のイオノゾンデや GPS-TEC 等の地上観測との共同研究でもある。2007 年のロケット実験の成功により (Uemoto et al., 2010; Habu et al., 2011), NASA からの依頼で 2011 年 7 月に NASA ワロップスでリチウム放出による日米共同ロケット実験を実施した。2011 年 12 月に内之浦でリチウム放出実験を再度実施した。これによりリチウム原子放出機器と地上観測機器による、夕方、明け方、昼間時における熱圏大気風と大気密度を測定する技術が完成した。風速の測定精度は  $\sim 10\text{m/s}$  である。この技術を用いて 2013 年 5 月に NASA・クレムソン大学と共同でロケット実験による赤道域の大気・プラズマ測定をクワジャリンで実施した。また、2013 年 7 月には NASA・クレムソン大学と共同で昼間時ダイナモ電流領域の熱圏大気・プラズマ観測を実施した。

本研究は、熱圏大気が重要であるにも関わらず観測が十分に実施されていない“赤道域プラズマバブル近傍での大気・プラズマ変動とダイナモ電流領域での大気・プラズマ相互作用過程を解明することを目的”とした日米共同研究である。

### 2. 研究の目的

熱圏大気とプラズマ間の運動量やエネルギーの交換過程を解明するために 2007 年 9 月にロケット実験を ISAS 内之浦で実施した。リチウム原子放出による中性大気風と大気密度、その場のプラズマ密度・温度・速度・電場・磁場の測定を行った。2011 年 7 月には NASA で実施し 2011 年 12 月に ISAS 内之浦で再度実施した。この完成した熱圏大気風と大気密度を測定する技術を用いて、2013 年 5 月に NASA・クレムソン大学と共同で赤道域熱圏大気とプラズマ、昼間熱圏大気とプラズマを測定する。本提案は一連の研究の大きな目標である“赤道域プラズマバブル近傍とダイナモ領域での大気プラズマ相互作用過程を解明することを目的”とした日米共同研究である。

### 3. 研究の方法

2013 年 5 月に NASA・クレムソン大学と共

同してクワジャリンでロケット実験を実施する。ロケットにはリチウム原子放出機器を搭載し「赤道域プラズマバブル」の種となる熱圏下部の大気・プラズマ変動を可視化する。2013年6月にNASA・クレムソン大学と共同で「ダイナモ電流」を可視化する。地上2か所にリチウム雲から放出される太陽散乱光を測定する狭帯域フィルターを備えたカメラとビデオを設置する。これらの地上観測系はすでに構築されているために、本提案では旅費を中心に申請する。

大気変動の可視化データとプラズマ・電磁場のデータを解析することで大気・プラズマ相互作用の基礎過程を解明する。したがって、地上観測とロケットによるその場観測のデータを共同で解析するための打ち合わせを実施する必要がある。本申請はこれらの旅費も含んでいる。

#### 4. 研究成果

2013年5月に、マーシャル諸島でNASA、クレムソン大学と共同でロケット実験を実施した。高度100kmから上方には太陽光があり地上には太陽光がない19時地方時に、2機のロケットを約1分間隔で打ち上げ、熱圏下部と上部（電離圏E層とF層）の中性大気とプラズマを同時に測定した。クレムソン大学と共同で開発したリチウム原子放出器によるリチウム原子とTMAを放出することで、熱圏大気にリチウム雲とTMA雲を形成した。これらの雲をロイ島、ロンゲラップ島、リキエップ島に配置した高感度CCDカメラとビデオで同時撮影した。高度100km付近に約100m/sの熱圏大気風速シアを捉えた。

#### 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9件)

H. Habu, M. Yamamoto, S. Watanabe, and M. F. Larsen, Rocket-borne Lithium ejection system for neutral wind measurement, pp53-62, An Introduction to Space Instrumentation, ISBN No.: 978-4-88704-160-8, 2013

Yoshihiro Kakinami, Masashi Kamogawa, Tatsuo Onishi, Kaori Mochizuki, Jean-Pierre Lebreton, Shigeto Watanabe, Masa-Yuki Yamamoto, Toru Mogi, Validation of electron density and temperature observed by DEMETER, Advances in Space Research, 52, 1267-1273, 2013

Mamoru Yamamoto, Akinori Saito, Yuichi Otsuka, Tatsuhiro Yokoyama, Masa-yuki Yamamoto, Takumi Abe, Shigeto Watanabe, Keigo Ishisaka, Miguel F. Larsen, Rob Pfaff, Paul Bernhardt, Sounding Rocket/Ground-based Observation Campaign for Medium-Scale Traveling

Ionospheric Disturbances (MSTID), [http://archive.ists.or.jp/upload\\_pdf/2013-m-22.pdf](http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2013-m-22.pdf)

Masa-yuki Yamamoto, Shigeto Watanabe, Mamoru Yamamoto, Takumi Abe, and Hiroto Habu, Development of a measurement method of upper atmospheric wind by using Lithium releases, [http://archive.ists.or.jp/upload\\_pdf/2013-m-17.pdf](http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2013-m-17.pdf)

S. Watanabe, T. Abe, H. Habu, Y. Kakinami, M-Y. Yamamoto, M. Yamamoto, WINDS Campaign - Ion-Neutral Coupling in the Thermosphere -, International Symposium on Space Technology and Science, 2013, [http://archive.ists.or.jp/upload\\_pdf/2013-m-20.pdf](http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2013-m-20.pdf)

Huixin Liu, Takashi Hirano, and Shigeto Watanabe, Empirical model of the thermospheric mass density based on CHAMP satellite observations, J. Geophys. Res., VOL. 118, 1-6, doi:10.1002/jgra.50144, 2013

Yoshihiro Kakinami, Masashi Kamogawa, Shigeto Watanabe, Masatsugu Odaka, Toru Mogi, Jann-Yenq Liu, Yang-Yi Sun, Takuji Yamada, Ionospheric ripples excited by superimposed wave fronts associated with Rayleigh waves in the thermosphere, J. Geophys. Res., DOI: 10.1002/jgra.50099, 2013

H. S. S. Sinha, Koh Ichiro Oyama, and S. Watanabe, Detection of long living neutral hydrated clusters in laboratory simulation of ionospheric D region plasma, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2012JA017945, 2013

Yoshihiro Kakinami, Masayuki Yamamoto, Chia-Hung Chen, Shigeto Watanabe, Charles Lin, Jenn-Yanq Liu, and Hiroto Habu, Ionospheric disturbances induced by a missile launched from North Korea on 12 December 2012, J. Geophys. Res., VOL. 118, 1 - 6, doi:10.1002/jgra.50508, 2013

[学会発表](計25件)

S. Watanabe, Ionosphere-Thermosphere Coupling, CAWSESII, Taiwan, 2013

S. Watanabe, T. Abe, Y. Furuta, H. Habu, Y. Kakinami, M-Y. Yamamoto, M. Yamamoto, M. F. Larsen, Observations of upper atmosphere by sounding rockets, NiCT, Japan, 2013

Masa-yuki Yamamoto, Shigeto Watanabe, Mamoru Yamamoto, Takumi Abe, and Hiroto Habu, Development of a measurement method of upper atmospheric wind by using Lithium releases, The 29th International Symposium on Space

Technology and Science (ISTS), Nagoya, 2013

S. Watanabe, T. Abe, H. Habu, Y. Kakinami, M-Y. Yamamoto, M. Yamamoto, WINDs Campaign - Ion-Neutral Coupling in the Thermosphere -, The 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Nagoya, 2013

Mamoru Yamamoto, Akinori Saito, Yuichi Otsuka, Tatsuhiro Yokoyama, Masa-yuki Yamamoto, Takumi Abe, Shigeto Watanabe, Keigo Ishisaka, Miguel F. Larsen, Rob Pfaff, Paul Bernhardt, Sounding Rocket/Ground-based Observation Campaign for Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTID), The 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Nagoya, 2013

Masa-yuki Yamamoto, Yoshihiro Kakinami, Shigeto Watanabe, Miguel F. Larsen, Hiroto Habu, Takumi Abe, Mamoru Yamamoto, Robert F. Pfaff, Lithium release experiments in daytime and moonlit thermosphere, COSPAR, 2014

S. Watanabe, T. Abe, H. Habu, Y. Kakinami, M-Y. Yamamoto, M. Yamamoto, M. F. Larsen, Neutral Wind Measurements by Lithium and TMA Releases from Sounding Rockets, COSPAR, Moscow, 2014

S. Watanabe, T. Abe, H. Habu, Y. Kakinami, M-Y. Yamamoto, M. Yamamoto, R. Pfaff, M. Larsen, Sounding Rocket Experiments in the Upper Atmosphere and Ionosphere, Korean Space Science Society, Korea, 2014

S. Watanabe, Refilling of Plasmasphere, JpGU, 2014

S. Watanabe, Ion-Neutral Coupling in the Thermosphere and Ionosphere, IRF, 2014

渡部重十, リチウム放出と航空機観測による夜間および昼の中性大気風速定, 大気圏シンポジウム, 2014

柿並 義宏, 渡部 重十, 山本 真行, 趙 吉光, ROCSAT 衛星で観測されたイオン密度とイオン温度の相関関係, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 11月, 2013

渡部 重十, 阿部 琢美, 古田 裕規, 羽生 宏人, 柿並 義宏, 山本 衛, 山本 真行, Larsen Miguel, サウンディングロケットによる超高層大気の観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 11月, 2013

山本 真行, 渡部 重十, 羽生 宏人, 山本 衛, 阿部 琢美, 柿並 義宏, 古田 裕規, Larsen Miguel, Lithium and TMA release experiment in midnight lower thermosphere in the full moon condition, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 11月, 2013

山本 衛, 斎藤 享, 横山 竜宏, 津川 卓也, 石坂 圭吾, 山本 真行, 羽生 宏人, 渡部

重十, 阿部 琢美, Seemala Gopi, Bernhardt Paul A., Larsen Miguel, Sounding rocket/ground-based observation campaign to study medium-scale traveling ionospheric disturbance (MSTID), 地球電磁気・地球惑星圏学会, 11月, 2013

大野 恭平, \*石坂 圭吾, 山本 衛, 高橋 隆男, 阿部 琢美, 渡部 重十, S-520-23号機による電離圏中のDC電場観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 11月, 2013

柿並 義宏, 渡部 重十, 鴨川 仁, Ionospheric perturbations related to earthquakes, 日本地球惑星科学連合 2013年大会

Shigeto Watanabe, Takumi Abe, Yuuki Furuta, Yoshihiro Kakinami, Masa-yuki Yamamoto, Lithium Release Experiments in the Thermosphere, 日本地球惑星科学連合 2013年大会

山本 真行, Miguel F. Larsen, 阿部 琢美, 羽生 宏人, 渡部 重十, 山本 衛, S/N estimation for Lithium release experiments under daytime and moonlight conditions, 日本地球惑星科学連合 2013年大会

渡部 重十, Modeling the Plasmasphere, 日本地球惑星科学連合 2013年大会

石坂 圭吾, 須田 康介, 山本 衛, 阿部 琢美, 渡部 重十, S-520-26号機による電離圏中の電場観測, 日本地球惑星科学連合 2013年大会

古田 裕規, 渡部 重十, 阿部 琢美, 羽生 宏人, 柿並 義宏, 山本 真行, Observation of atmospheric gravity waves by lithium release from sounding rocket, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌市, 10月, 2012

山田 隼也, 谷 直道, 村上 睦彦, 森永 隆稔, 山本 真行, 渡部 重十, WIND-2 リチウム放出実験による熱圏中性風の観測, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌市, 10月, 2012

須田 康介, 石坂 圭吾, 阿部 琢美, 遠藤 研, 熊本 篤志, 小野 高幸, 渡部 重十, S-520-26号機による電離圏中の電場観測, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌市, 10月, 2012

柿並 義宏, 鴨川 仁, 渡部 重十, 小高 正嗣, 茂木 透, Liu Jann-Yenq, North-south asymmetry of coseismic ionospheric disturbance related to Rayleigh wave, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌市, 10月, 2012

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡部重十 (研究の統括と実施)

研究者番号: 90271577