

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：30115  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2015～2017  
課題番号：15K05303  
研究課題名(和文) 大気プラズマ結合過程の研究 -日米共同実験-  
  
研究課題名(英文) Coupling between neutral atmosphere and plasma  
  
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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ロケット実験で得られた大気プラズマ結合過程の新たな発見は高度100km付近における～100m/sの大気の流れである。この高速風は90kmから130kmの領域に存在し高度100km付近に存在するダイナモ領域を含んでいる。さらに、この高速風に小さなスケールの風速変動が混在していた。高度100km付近に存在している大気重力波を直接観測したのと考えている。これらの発見と知見を基に地球惑星大気プラズマモデルを開発した。地球惑星大気プラズマモデルは電磁流体力学方程式を用いた物理モデル、経験モデル、人工知能(AI)モデルとして構築した。

研究成果の概要(英文)：A new discovery of atmospheric plasma coupling process obtained by sounding rocket experiments is a high speed wind flow of neutral atmosphere of ~ 100 m/s around 100 km altitude. The high-speed wind occurs in the dynamo region from 90 km to 130 km. The winds include small scale wind fluctuations. We believe that we directly observed atmospheric gravity waves existing around 100 km altitude. Based on the findings and knowledge, we have developed the Earth and planetary atmosphere-plasma models. The atmospheric plasma model was constructed as a physical model using magneto hydrodynamic equation, empirical model, and artificial intelligence (AI) model.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：地球惑星大気プラズマ 電離圏 熱圏 プラズマ圏 大気プラズマモデリング 大気プラズマ結合

## 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 ~100m/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。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。

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 100km~300km の中性大気風と密度を測定した (Uemoto et al., 2010; Habu et al., 2011)。その後、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。2012 年 1 月に明け方の中間圏熱圏大気観測のロケット実験を ISAS 内之浦で実施した。2013 年 5 月と 2013 年 7 月に NASA・クレムソン大学と共同でプラズマバブル発生直前の赤道域熱圏大気とプラズマ、昼間熱圏大気とプラズマの観測を実施した。2013 年 7 月に ISAS 内之浦で月光を用いた世界で初めての夜間観測を実施した。2014 年 9 月にストロンチウム原子放出と共鳴散乱光測定を地上実験で達成した。ストロンチウム原子と時定数 ~30 秒で光電離したストロンチウムイオンは可視領域で共に共鳴散乱線を有している。

## 2. 研究の目的

サウンディングロケットにリチウム原子放出機器を搭載し熱圏下部の大気・プラズマ変動を可視化する。「ダイナモ電流」の可視化である。地上 2 か所以上にリチウム雲から放出される太陽共鳴散乱光を測定する狭帯域フィルターを備えた高感度カメラとビデオを設置する。リチウム雲の運動を可視化した画像から大気密度と風速を推定する。

一方、ストロンチウム原子は、~30 秒の時定数で光電離する。ストロンチウム原子は 461nm、ストロンチウムイオンは 408nm に共鳴散乱線を有している。ストロンチウムを高度 90km~200km にトレイル状に放出し、太陽光を共鳴散乱するストロンチウム原子とイオンの雲を地上から同時に測定することにより、可視化された中性ガスとイオンの運動を得ることができる。高感度 CCD カメラを用いたストロンチウム原子とイオンの同時観測を実施するための機器開発と機器整備を行うことで、大気とイオンの同時可視化実験と大気プラズマ結合過程の解明に向けた道筋を確定する。

## 3. 研究の方法

リチウム原子とストロンチウム原子を大気とプラズマの相互作用の大きさが急激に変化する中間圏から熱圏下部にサウンディングロケットから放出することで、中性風シアと電場の高度分布を同時可視化する。さらに、ストロンチウム原子と光電離したストロンチウムイオンのシミュレーションモデルを開発し、中性大気風の高度分布と時間変化、ストロンチウム雲の拡散係数と中性大気密度の高度分布と時間変化、イオン雲からの電場分布、衝突周波数の高度分布を求めるプログラムを開発する。

## 4. 研究成果

日米共同のロケット実験を計画し準備を進めるとともに、新たな解析手法を使って高度 100km 付近の中性大気風を推定した。観測の 1 例を図 1 に示す。ロケットからトレイル上に放出したリチウム雲は時間とともにリング状に変化した。これは、高度 100km 付近

に中性風のシアが存在していたことを示している。下図に示すモデリングとの比較から風速シアには小さな変動があり、大気重力波の存在を示している。

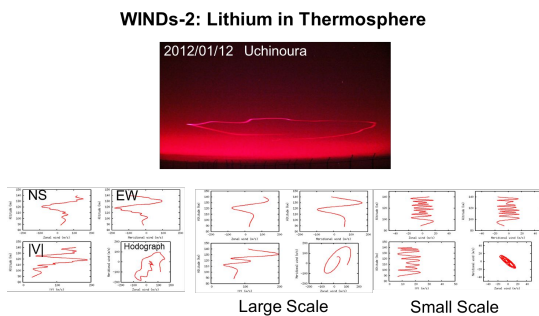


図 1 . 実験結果 1

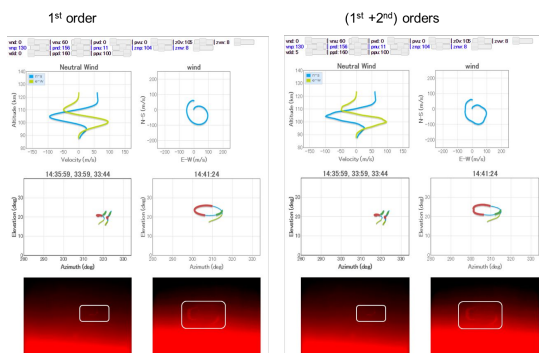


図 2 . 実験結果 2

図 2 は、日米共同実験で実施した結果の 1 例である。日中に実施した世界初の実験である。図 1 と同様に大気重力波が混在している。詳細な報告については以下の HP で公開している。

[http://archive.ists.or.jp/upload\\_pdf/2017-m-13.pdf](http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2017-m-13.pdf)

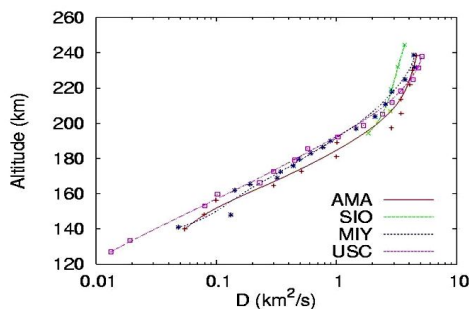


図 3 . リチウム雲の広がりから推定した拡散係数

図 3 はリチウム雲の広がりから推定した拡散係数である。中性大気密度が高度とともに減少しているため、拡散係数が指数的に大きくなっている。リチウム雲の拡散は大気密度に比例するので、このデータから図 4 に示すように大気密度を推定することができる。高

度 200km で大気密度分布が変化しているのは、大気成分が N2 から O に変化したからである。緑線は MSIS 大気モデルである。低高度ではモデルと一致しているが高高度では違いが見られる。

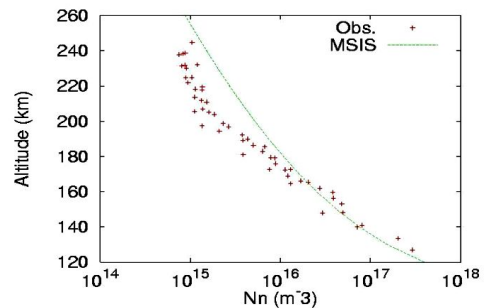


図 4 . リチウム雲の拡散から推定した大気密度分布

### 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 3 件 )

1. S. Watanabe, T. Abe, H. Habu, Y. Kakinami, M-Y. Yamamoto, Neutral Wind Measurements by Sounding Rockets, ISTS-2017-m-13
2. Takumi Abe, Shigeto Watanabe, Mamoru Yamamoto, Masa-Yuki Yamamoto, Recent Activity of Japanese Sounding Rocket Experiments for the Thermospheric and Ionospheric Study, ISTS-2017-m-11
3. Shigeto Watanabe, T. Abe, H. Habu, M-Y. Yamamoto, Y. Kakinami, M. Yamamoto, WINDs Team, WINDs Campaign - Ion-Neutral Coupling in the Thermosphere -, ISTS-2015-m-20

[ 学会発表 ] ( 計 4 件 )

1. Plasma package for constellation of micro-satellite, Tsutomu Nagatsuma, Yukihiro Takahashi, Tetsuro Ishida, Junichi Kurihara, Mitsuteru Sato, Shigeto Watanabe, JpGU, 2016
2. Watanabe, Shigeto, Coupling of Neutral Atmosphere with Plasma in the Upper Atmosphere, Proceedings of the 30th Atmospheric Science Symposium, JAXA, SA6000062001, 2016-12
3. S. Watanabe, Structure and Dynamic of Thermosphere, MIT Symposium, NICT, 2015
4. 渡部重十、プラズマ圏のモデリング、ワークショップ「プラズマ圏の観測と予測モデルの構築」、大阪電気通信大学、2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

[http://archive.ists.or.jp/upload\\_pdf/2017-m-13.pdf](http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2017-m-13.pdf)

#### 6. 研究組織

##### (1) 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

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

( )