

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540525

研究課題名(和文) ロケット放リチウムを用いた昼間熱圏における中性大気風速の精密計測

研究課題名(英文) Precise measurement of neutral wind in daytime thermosphere by rocket-released Lithium vapor

研究代表者

山本 真行 (Yamamoto, Masa-yuki)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：30368857

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化等グローバルな地球大気理解に重要な熱圏大気の精密測定は難しい。希薄大気中では太陽紫外線等により1%未満が電離しプラズマ大気としてレーダー等で計測できる一方、99%以上を占める中性大気計測は非常に困難で熱圏理解を阻んできた。観測ロケット放出TMA(トリメチルアルミニウム)による人工発光雲の光学的追跡から夜間の高度160 km付近までの中性風計測手法が確立されたが、昼間の観測手段は未確立であった。我々はロケット放リチウム(Li)の太陽共鳴散乱光を用い昼間熱圏中性大気風の測定技術確立のため日米共同ロケット実験を2013年7月に実施し20分間の発光雲観測に成功、同測定技術を得た。

研究成果の概要(英文)：To study the thermosphere is important for understanding global atmosphere (e.g. global warming), however, observation of thermosphere is difficult. Less than 1% of the rarefied atmosphere is ionized by solar ultra-violet, thus it can be observed by radars, whereas, more than 99% of the neutral atmosphere is too difficult to observe, preventing from our understanding. Due to optical tracking of artificially illuminating clouds by rocket-released TMA (Tri-Methyl-Aluminum), it has been established neutral wind measurement in nighttime thermosphere below about 160 km, however, the measurement in daytime has never been established before. We use rocket-released Lithium and its resonance-scattering by sunlight in order to establish the neutral wind measurement in daytime. In July 2013, Japan-U.S. collaborating rocket experiment was carried out and the rocket-released Lithium was successfully observed for 20 minutes, resulting on establishment of the difficult measurement.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：リチウム放出 三次元計測 三角測量 中性大気風 日米共同ロケット実験 昼間 熱圏大気 観測ロケット

1. 研究開始当初の背景

2007年に国内にてJAXAのS-520型観測ロケットを用いたロケット-地上同時観測に成功したロケット放出リチウムによる熱圏中性大気風速の計測は、ロケット搭載リチウム放出装置LESの第1歩であった。リチウムは太陽光を受けると波長670.8nmの赤色を共鳴散乱するため、地上が暗い夕方や明け方に上空に放出すると、夜空に光り輝く人工発光雲を形成し、その発光時間内に地上の複数地点から発光雲を連続撮影することにより熱圏高度の風速が計測できる。2007年のWIND-1実験では、150km~400kmという広大な高度範囲における連続的な観測に成功したが、一部に原因究明すべき事象が生じたこともあり国内ではLESの改良に重点を置きつつ、米国との共同で昼間熱圏でのリチウム放出を狙った実験を企図する段階にあった。

2. 研究の目的

宇宙と地球超高層大気の境界部にある熱圏大気の運動については、宇宙時代の現在においても未解明の部分が多い。地球温暖化等のグローバルな現象の理解において、その知見を深めることは重要であるが、昼間熱圏における中性大気風速の計測方法は確立されていない。2007年に宇宙での実験に初成功した国産技術のリチウム放出装置LESを用い、米国の観測ロケットの打上機会を得ることで、国際共同でこの手法を確立すること、ならびに風速計測による熱圏大気の理解が目的である。

3. 研究の方法

熱圏大気中に、観測ロケット搭載LESより上空で沸点まで加熱されたガス状のリチウム原子を放出し、その太陽共鳴散乱光を特殊な光学系を用いた撮像機器により観測し風速を計測する。ただし昼間条件における観測には、青空の背景光の発光強度が暗夜の100万倍以上という過酷な条件であり、2007年に夕方条件下で計測したリチウム発光を精密較正した発光強度情報を元に、事前計算がなされた。その結果、日米の研究者の議論で特殊フィルタを用いた光学系による地上観測が可能との結論に至り、本研究では市販一眼レフカメラの改造加工と、別経費で賄われた光学系との組合せにより実験機材を準備した。国内開発されたこれらの技術は、米国側研究者にも提供された。

2011年7月にNASAの観測ロケットを用いた米国東海岸バージニア州のWallops実験場にて2回の実験が予定されており、研究代表者は6月下旬より研究者と大学院生の計6名からなる日本側観測班を率いて参加した。米国の地上3箇所に米国側観測班とともに布陣し、地上同時観測を狙い良好な天候条件を得るため待機し、同7月10日に1回目を実施されたが、昼間条件下のリチウム発光が確認できなかった。このため急遽、NASAにて会合

を開き原因究明と対策を話し合い、日本側で2012年初頭に明け方条件での実施予定が決まっていた観測ロケットの成果を吟味した後に昼間条件下の実験を行うべく、対策が練られた。

2012年1月に明け方条件下のリチウム放出実験をJAXAのS-520型観測ロケットを用いて実施し、LES装置の一部に問題を残したものの、高度76kmから127kmまでの中性大気風速の精密測定に成功した。この際に、薄明から昼間条件に至る背景光の条件に対する、放出開始後40分間までのリチウム発光の発光強度比(S/N比)が精密に測定され、国立極地研究所およびJAXAの保有する積分球較正装置を用いた精密較正によって、昼間条件下のリチウム共鳴散乱光計測に関する数値的な確証を得た。

これによると、昼間の背景光レベルに対して現状でロケット搭載可能なLESからのリチウム放出量では、S/N比が厳しい条件であり、地上付近の水蒸気等による微妙な気象条件により観測の成否が左右されかねない条件であることが明らかとなった。このため、2011年の実験直後から検討が開始された航空機を利用した観測の必要性が認識され、2013年夏の再実施が決定された。また、同じく2013年夏には日本側では満月期の月明を利用したリチウム共鳴散乱光を用いた夜間の中性大気風速測定をターゲットとする条件の非常に厳しい実験にも挑む準備を続けていたが、こちらでも航空機観測の導入が決定された。

2013年1月29日、NASAの観測ロケットを用いた米国製LESの実験が実施され、S/N条件の最適な夕方条件下において、NASA観測用航空機を用いた上空7500mからの観測を実施した。ここではJAXAの羽生宏人博士により日本製LESにおける製造技術を元とした指導が行われ、リチウム放出に成功し航空機観測の経験を積み、問題点等を確認した。

以上の経緯により、2013年7月4日に米国Wallops実験場にて昼間条件下の厳しい背景光に浮かぶりチウム発光の航空機・地上同時観測を、また同7月20日に鹿児島県内之浦にて、夜間・月明条件下の微弱なりチウム発光の航空機・地上同時観測を実施した。

また、2013年5月には、南西太平洋のマーシャル諸島クワジラン環礁にある米軍施設内及び周辺の環礁にて、夕方条件下のリチウム共鳴散乱光の観測を実施した際にも、日本側観測班が参加し成果を得た。

なお、経緯の説明上、全実験経過を記したが、以上すべての実験に関わる研究費は基盤研究(C)の予算範囲では賄いきれないため、米国側・日本側ともに研究チーム内外からの協力を得て実施されたものである。従って、本報告に記す全体が本基金によってのみ実施されたものではない点を付加しておきたい。

4. 研究成果

2013年1月の航空機を用いた試験観測にてリチウム発光雲の観測と発光強度の定量に成功し、積分球較正実験により精確な測定値を得ることができた。この較正值を用いた事前検討により詳細なS/N推定が実施できた結果、昼間及び夜間月明条件下のリチウム共鳴散乱光の観測を成功に導いた。

2013年7月4日のDaytime Dynamo ロケット実験では、NASA 航空機から約20分間のリチウム発光雲の観測に成功した(図1)。高度82 km ~ 124 kmの領域における昼間中性大気風速を推定可能な情報を取得でき、現在までの初期解析により風速の暫定値を導出できた。

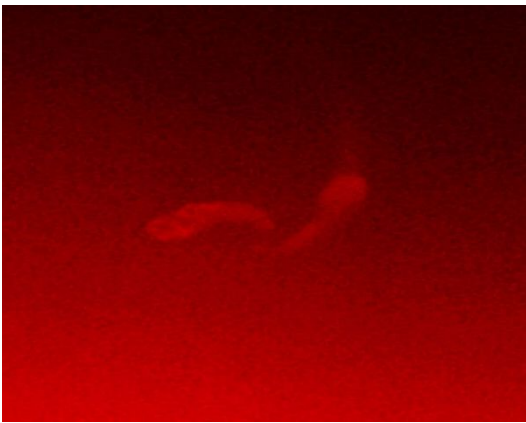


図1 米国 Walllops 上空で観測された昼間条件下リチウム共鳴散乱光の観測画像

2013年7月20日のS-520-27号ロケット実験では、太陽光の光源が存在しない深夜の条件下では世界初となるリチウム放出実験を実施し、JAXA 実験用航空機「飛翔」からの観測を実施し、月齢12の満月に近い月明を光源とするリチウム発光の観測に世界で初めて成功した。さらに地上の複数地点でも放出直後のリチウム発光の観測に成功した。

初期解析の後、現在は精密な解析手法の開発に着手しており、背景に座標基準とする星が存在しない昼間条件下の画像、ならびに飛翔に伴う微小な姿勢変動を受ける条件下となる航空機観測による画像からの風速導出の精密化に取り組んでおり、並行して最新成果の国際論文誌への投稿作業を進めている。

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 4件)

H. Habu, M.-Y. Yamamoto, S. Watanabe, and M. F. Larsen, Rocket-borne Lithium ejection system for neutral wind measurement, An Introduction to Space Instrumentation, 査読有, pp. 53-62, 2013.

ISBN No.: 978-4-88704-160-8

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), ISTS, 査読無, 2013-m-22, 2013.

http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2013-m-22.pdf

Masa-yuki Yamamoto, Shigeto Watanabe, Mamoru Yamamoto, Takumi Abe, Hiroto Habu, Development of a measurement method of upper atmospheric wind by using Lithium releases, ISTS, 査読無, 2013-m-17, 2013.

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 -, ISTS, 査読無, 2013-m-20, 2013.

http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2013-m-20.pdf

羽生 宏人, 荒川 聡, 阿部 琢美, 吉田 裕二, 山本 真行, 渡部 重十, 山本 衛, リチウムガス噴射装置(LES)の研究開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 査読無, Vol.10, No.11, pp. 1-19, 2011.

[学会発表](計22件)

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, 高知, 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, 高知, 11月, 2013.

山本 衛, 齋藤 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, 高知, 11月, 2013.

木原 大城, 柿並 義宏, Miguel F. Larsen, Lucas Hurd, 羽生 宏人, 山本 真行, 日米共同ロケット実験による昼

間下部熱圏リチウム共鳴散乱光の観測,
第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会,
高知, 11 月, 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, MTL meeting, Tokyo, Sep.,
2013. 招待

Masa-yuki Yamamoto, Shigeto Watanabe,
Mamoru Yamamoto, Takumi Abe, 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,
June, 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,
June, 2013.

Mamoru Yamamoto, Akinori Saito,
Yuichi Otsuka, Tatsuhiko 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,
June, 2013.

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, 千葉, 5 月, 2013.
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, 千葉, 5 月, 2013.
Yuuki Furuta, Shigeto Watanabe, Takumi
Abe, Hiroto Habu, Yoshihiro Kakinami,
Masa-yuki Yamamoto, Observation of
atmospheric gravity waves by lithium
release from sounding rocket, 地球電
磁気・地球惑星圏学会 第 132 回講演会,
札幌, 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, 地球電磁気・地球惑星圏学
会 第 132 回講演会, 札幌, 10 月, 2012.
Shigeto Watanabe, Takumi Abe, Hiroto

Habu, Yoshihiro Kakinami, Masa-yuki
Yamamoto, Lithium Release Experiments
in the Thermosphere, AOGS 2012,
Singapore, Aug., 2012. 招待

Mamoru Yamamoto, Akinori Saito,
Tatsuhiko Yokoyama, Yuichi Otsuka,
Masa-yuki Yamamoto, Takumi Abe,
Shigeto Watanabe, Keigo Ishisaka,
Miguel Larsen, Robert Pfaff, Paul
Bernhardt, Sounding
rocket/ground-based observation
campaign to study Medium-Scale
Traveling Ionospheric Disturbances
(MSTID), COSPAR 2012, India, July,
2012. 招待

Masa-yuki Yamamoto, Shigeto Watanabe,
Hiroto Habu, Takumi Abe, Miguel F.
Larsen, Mamoru Yamamoto, Tatsuhiko
Yokoyama, Yoshihiro Kakinami, Lithium
release rocket experiments in evening,
dawn, and daytime thermosphere, JpGU
2012, Chiba, May, 2012.

Shigeto Watanabe, Takumi Abe, Yuuki
Furuta, Hiroto Habu, Yoshihiro
Kakinami, Masa-yuki Yamamoto, Lithium
WINDs Campaign -Lithium Releases from
Sounding Rockets in the Thermosphere-
JpGU 2012, Chiba, May, 2012. 招待

Mamoru Yamamoto, Akinori Saito,
Tatsuhiko Yokoyama, Yuichi Otsuka,
Masa-yuki Yamamoto, Takumi Abe,
Shigeto Watanabe, Keigo Ishisaka,
Miguel F. Larsen, Robert F. Pfaff,
Paul Bernhardt, Sounding
rocket/ground-based observation
campaign to study Medium-Scale
Traveling Ionospheric Disturbances
(MSTID), JpGU 2012, Chiba, May, 2012.
山本 真行, 渡部 重十, 阿部 琢美, 山
本 衛, Miguel F. Larsen, 羽生 宏人,
ロケット放出リチウムによる中性大気
風プロファイル計測と問題点, 地球電
磁気・地球惑星圏学会 第 130 回講演会,
神戸, 11 月, 2011.

谷 直道, 山本 真行, WIND-2 リチウム
放出実験の条件設定と明け方熱圏中性
大気風の初期解析, 地球電磁気・地球惑
星圏学会 第 130 回講演会, 神戸, 11 月,
2011.

村上 睦彦, 山本 真行, 渡部 重十, 柿
並 義宏, 堺 正太郎, Miguel F. Larsen,
日米共同ロケット実験による昼間下部
熱圏リチウム共鳴散乱光観測の挑戦と
WIND-2 実験による定量的検証, 地球電
磁気・地球惑星圏学会 第 130 回講演会,
神戸, 11 月, 2011.

②1 山本 衛, 阿部 琢美, 渡部 重十, 齊藤
昭則, 大塚 雄一, 横山 竜宏, 山本 真
行, Paul A. Bernhardt, Miguel F.
Larsen, Robert F. Pfaff, ロケットと

地上からの複合観測による中緯度電離圏の観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会第130回講演会, 神戸, 11月, 2011.

- ② 山本 衛, 齊藤 昭則, 大塚 雄一, 横山 竜宏, 山本 真行, 阿部 琢美, 羽生 宏 人, 渡部 重十, R. F. Pfaff, M. F. Larsen, ロケット・地上複合観測による中緯度電離圏波動の生成機構の研究, JpGU 2011, Chiba, May, 2011.

〔その他〕

ホームページ等

冬の夜空に輝く「宇宙花火」を見てみよう! ~ WIND - 2 ロケット実験 ~

http://www.kochi-tech.ac.jp/kut_J/event/wind-2/

2011年度第2次観測ロケット実験の実施について

http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2011/1109_rocket.shtml

観測ロケット S-520-26 号機 打上げ終了
http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2012/0112_s520-26.shtml

宇宙花火を見てみよう! ~ JAXA S-310-42/S-520-27 ロケット実験 ~

<http://www.ele.kochi-tech.ac.jp/rocket2013/>

2013年度第一次観測ロケット実験の実施について

http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2013/0521_s-310-42.shtml

観測ロケット S-310-42 号機 / S-520-27 号機 打上げ終了

http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2013/0720_s-310-42.shtml

2013.7.20 ~ 宇宙花火出現!? S-310-42 号ロケット実験を観察しよう

<http://sendaiuchukan.jp/event/news/2013-7.html>

NASA's Independence Day Fireworks from Wallops Investigates Earth's Global Daytime Dynamo Current

<http://www.universetoday.com/103286/nasas-independence-day-fireworks-from-wallops-investigate-earths-global-daytime-dynamo-current/>

NASA Wallops Rocket Mission January 29 Prepping for Future Projects

<http://www.nasa.gov/centers/wallops/news/west129.html>

NASA Launches Rocket from Wallops Flight Facility in Virginia

<http://www.nasa.gov/centers/wallops/news/westpost.html>

NASA Sounding Rocket Daytime Dynamo Launch Postponed

http://www.nasa.gov/mission_pages/sounding-rockets/news/electrical-dynamo.html

NASA's Daytime Dynamo Experiment

Deploys Lithium to Study Global Ionospheric Communications Disruptions

<http://www.universetoday.com/103087/nasas-daytime-dynamo-experiment-deploys-lithium-to-study-global-ionospheric-communications-disruptions/>

Two Rockets Successfully Launched From Wallops

<http://www.nasa.gov/content/two-rockets-successfully-launched-from-wallops/>

2013/07/24, 高知新聞, 「熱圏」夜間観測も成功 (高知工科大学や宇宙航空研究機構チーム)

<http://www.ele.kochi-tech.ac.jp/news/2013.html#0724>

2013/07/23, 徳島新聞, 海陽で「宇宙花火」丸岡さん撮影成功

http://www.topics.or.jp/localNews/news/2013/07/2013_13744702802715.html

2012/01/12, アストロアーツ, 宇宙花火も観測! 延期していた観測ロケットの打ち上げに成功

<http://www.astroarts.co.jp/news/2012/01/12fireworks/index-j.shtml>

2012/01/12, 共同通信, 風の流れ調べるロケット打ち上げ 空に輪状の「宇宙花火」

<http://www.47news.jp/CN/201201/CN2012011201001107.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 真行 (YAMAMOTO, Masa-yuki)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号: 30368857

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: