

# 昼間下部熱圏風の日米共同観測ロケット実験

山本衛(京大生存圏研)

羽生宏人・阿部琢美(JAXA 宇宙研)

山本真行(高知工大)

渡部重十(北大理)

Miguel F. Larsen (クレムソン大)

横山竜宏・Robert F. Pfaff (NASA/GSFC)

## 概 要

米国 NASA は 2011 年夏季にワロップス実験場から観測ロケット 2 機を打上げ、昼間の下部熱圏（高度約 90-120 km）の大気風速を観測する実験を実施する。観測手法はロケットからのリチウム蒸気の放出と地上（2 か所以上）からの発光雲の連続撮像である。観測ロケット搭載用のリチウムガス噴射装置（以後、LES と略記）の現行品は、現時点では、JAXA 宇宙科学研究所（以下では ISAS/JAXA）と日本カーリット株式会社が開発した装置が世界唯一であるため、日米の協力により、日本製の LES を米国 NASA の観測ロケットに搭載することとなった。ISAS/JAXA の国際共同ミッション推進経費を得て LES の製作・試験を進めてきたが、2010 年 12 月時点で予定通り完成しており、早急に米国へ発送される。本研究によって、リチウム放出による超高層大気の中性風速測定技術が飛躍的に向上することが期待される。同時に、本研究は ISAS/JAXA 独自のロケット観測技術の国際的認知を高める非常に良い機会であって、将来の発展に資することが大きい。

## 1. 研究目的と内容

本研究の目的は、昼間の高度 100~120 km の電離圏 E 領域に発生するスポラディック E 層の生成機構の解明である。本研究は、NASA ゴダード宇宙飛行センターの Robert Pfaff 博士がワロップス実験場から打上げる観測ロケット実験として提唱したもので、プロジェクト承認番号 36.266 として承認され、2011 年 6~7 月の実施が決定している（参考文献：NASA 観測提案書）。この観測実験の主要部分は昼間に観測ロケットからリチウム蒸気を放出し、地上から撮像することで行う風観測であって、クレムソン大学の Miguel Larsen 教授が実施責任者である。前述の通り、現行品といえる LES は ISAS/JAXA が開発した装置のみであるため、日米研究協力によって実施することとなった。LES を用いた昼間の超高層風速の観測は、ISAS/JAXA にとっても今後の課題であるため、本観測に参加することで昼間の LES 観測の経験を積む事ができ、将来に向けた準備を進めることができる。このように本提案の実施には、日本側にとっても重要なメリットがある。

リチウム蒸気の発光は、波長 671 nm の単色の共鳴散乱光であること、散乱能率が非常に高いという特徴がある。これらから、狭帯域フィルタを通して撮像することで昼間でも観測可能である。LES 実験は、しかしながら 1970 年代を最後にほぼ途絶えていた手法であった。渡部重十教授（北大）を中心として電離大気と中性大気の相互作用のロケット観測が提唱されたことから、2007 年 9 月実施の S-520-23 号機において復活された。図 1 に同観測で上空に生成されたりチウム発光雲の地上撮像結果を示す。更に地上 3~4 地点からの連続撮像結果を用いて、高度 400 km までの中性大気風速の推定に成功している。なお観測された光量から、ISAS/JAXA の LES によるリチウムガスの生成効率が過去の成功例の約 2 倍と見積もられることが明らかとなっている。

NASA が予定している実験では、ワロップス実験場から観測ロケットを打上げ、搭載機器による電離圏プラズマの直接観測とリチウム放出による風速観測を同時実施する。風速観測高度は 90~130 km であって、一回の放出実験当り 1970 年代の観測例（成功例）においては 1.5 kg の金属リチウムを利用して観測を行っている。ISAS/JAXA が開発した LES ではリチウムガスの生成効率が約 2 倍であることを考慮し、1 台の LES に装てんされる金属リチウム量が 130 g であることから、1 機当り 6 台、全体では 12 台の LES を NASA 観測ロケットに搭載する。

## 2. 進捗状況

1990 年代半ばから現在まで、ISAS/JAXA が実施してきた化学物質放出による中性風速観測を表 1 に示す。これまで、高度約 150 km 以下に対しては TMA (トリメチルアルミニウム) の自発光による観測、それ以上の高度の風速観測については、LES 実験を行っている。表 1 に示すとおり、TMA 観測は常に Larsen 教授（クレムソン大）との日米共同で実施されてきたものである。以上のように、本研究にかかわる米国側研究者と日本側の交流は深く長い。本研究は、表 2 に示すように、数年間にわたる着実な準備の末に提案されたものである。

平成 22 年度には、ISAS/JAXA の国際共同ミッション推進研究経費を得て、LES の製作が進められ、12 月に完成した。一方、日中の強い背景光のもとでリチウム散乱光を撮像するためには特別の光学装置を必要とするが、日米共同で仕様を策定した上で日本と米国の専門メーカーを競わせ、良い提案をした日本のメーカーに共同で発注した。撮像装置は 2011 年 3 月には完成する予定である。また ISAS/JAXA と NASA の LOA は 2010 年 11 月に調印済みである。このように本研究の準備は順調に進んでいる。また 2011 年 3 月には NASA を訪問してロケット観測の確認会議に参加し、さらに地上観測点の現地調査にも参加することを予定している。本観測に用いられるロケットは全部で 4 機であり、うち 2 機が電離圏の直接観測を実施し、別の 2 機（具体的には Terrier-Orion MK70）に LES が搭載される。今後は 4 月頃から NASA ワロップス射場にて観測ロケットの組み立て作業が開始される。ロケットの

打上げ期間は、夏至の付近 2 週間程度を予定している。

### 3. 本研究の波及効果

表 3 に ISAS/JAXA が開発した LES を利用するロケット観測計画を示す。2007 年に初観測を日没直後の時間帯に成功させた後、2011 年夏季には S-520-26 号機による 2 回目の観測が日出前後に実施予定である。さらに 2012 年柿には夜間観測（月明を利用した観測）が提案中であり、2013 年以降には低緯度地域における昼間観測が計画之中である。本提案の実施から ISAS/JAXA が得る直接の効果は LES 観測技術の向上であるが、それは、LES 利用を希望する一連のロケット観測計画の着実な遂行へ向けて、波及効果が極めて大きい。

ISAS/JAXA と NASA の研究協力が多方面において展開されている事は言うまでもない。観測ロケット実験においても、表 1 に示すとおり、TMA 放出による中性風速観測は、過去 3 回とも米国研究者との共同で成功裏に実施されている。またロケットからの電界観測についても、米国機器を用いた観測が過去 2 回成功している。これらは NASA との協定を明示的に締結して実施されたものではないが、利用技術は、明確に NASA ロケット実験によって培われたものである。これに対して、今回我々は日本が独自開発したユニークな LES を NASA のロケット観測に役立てようとしている。LOA においては、ISAS/JAXA が LES を提供すること、ISAS/JAXA が米国側と共同して地上からの LES 発光撮像に参加すること、NASA と ISAS/JAXA の間で実験データを交換すること等、対等な協力内容が取り決められている。本提案は、LES 実験についての我が国の優位を確保し続ける上で必要不可欠であるのみならず、ISAS/JAXA が有するロケット実験技術の水準についての国際的認知を高めるために有用である。

#### 参考文献

##### NASA 観測提案書

Pfaff, R. F., Neutral-Ion Coupling and Wind Shear Effects In the Daytime Lower Ionosphere, Project No. 36.266, July 18, 2008.

表1 JAXA 宇宙科学研究機構が実施してきた化学物質放出による  
中性大気風速の観測

手法	観測ロケット (時期)	特徴
TMA 放出による 中性風観測	S-310-26 号機(1996 年 8 月) S-310-32 号機(2002 年 8 月) S-310-39 号機(2009 年 1 月)	TMA の自発光(白色)による観測であり、高度 150km 以下で有効である。左記の観測は全てクレムソン大 Larsen 教授との共同で実施された。
リチウム蒸気の 放出による中性 風観測	S-520-23 号機(2007 年 9 月)	太陽光による共鳴散乱(波長 671 nm)を用いる。150km を越える高度が観測可能な手法であり、また昼間の観測が可能である。ロケット搭載のリチウム放出装置は、羽生博士ら宇宙科学研究本部と日本カーリット株式会社によって開発された「世界唯一の現行品」である。

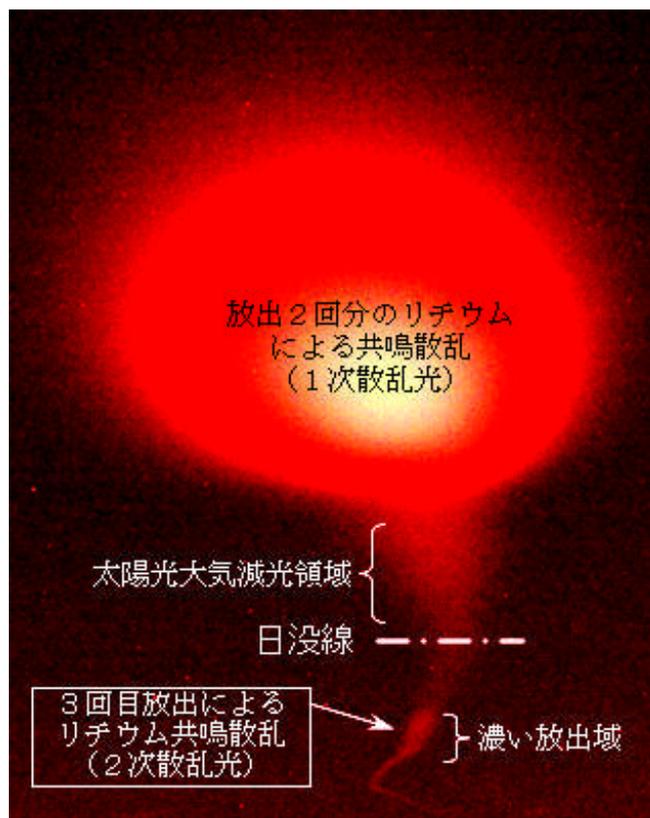


図1 S-520-23 号機観測によって生成されたりチウム発光雲の撮像例。高度 100km 以下から約 300km まで広がっている。日没線より上の部分は直接の太陽光によるリチウムの共鳴散乱光だが、下の部分には、この発光によって照らされたと見られる弱い 2 次散乱光が見られる(2007 年 9 月)。

表2 本研究の進捗状況

2007年9月

S-520-23号機によるLES観測に成功。

2008年7月ごろ

Pfaff博士がNASAに本研究を申請。このころ、Larsen教授からISAS/JAXAのLES観測についての問合せが電子メールであった。

2008年11月

Larsen教授とNASAワロップス射場のロケット実験責任者が宇宙科学研究本部を訪問し、関係者と基礎的な議論を行った。(直接交渉1回目)

2009年6月ごろ

Pfaff博士の提案がNASAで承認される。Larsen教授からの問合せが再び入り、電子メールによる協議を続けた。

2009年9月

山本衛が米国に出張し、Larsen教授に面会し議論した。(直接交渉2回目)

2009年12月

AGU秋季大会期間中にPfaff博士と面会して協議した。(直接交渉3回目)

2010年2月22～25日

平成21年度国際共同ミッション推進研究経費を得て、Larsen教授とクレムソン大の技官をISAS/JAXAに招き、日米研究協力について協議し計画の精度を高めた(直接交渉4回目)。ISAS/JAXAとNASA間のLOAの協議を始めた。

2010年3月

ISAS/JAXA高橋教授のNASA訪問時に、本件にかかる研究協力についても議論をしていただいた。Pfaff博士は米国側で必要な協議を行った。

2010年4月上旬

ISAS/JAXAの羽生助教とロケット観測担当者がLESメーカーの技術者と共にNASAワロップス実験場を訪問して技術上の問題点を議論した。

2010年4月～12月

平成22年度国際共同ミッション推進研究経費を得て、LES製作が開始され完成している。また日米共同で地上からの撮像装置の仕様を策定した。

2010年11月

本研究に関するISAS/JAXAとNASA間のLOAが締結された。

2011年1～3月(予定)

完成したLESの米国への輸送、米国におけるロケット観測の確認会議、地上観測場所のサーベイが予定されている。

2011年4～6月(予定)

NASAによる観測ロケットの組み立て・試験が行われる。ロケット打上期間としては、夏至を中心とする2週間が予定されている。

表3 ISAS/JAXA が開発した LES を利用するロケット観測

時期	提案者 (ロケット打上げ場所)	観測の目的と手法
2007 年	渡部重十教授(北大) (内之浦・S-520-23 号機)	ISAS/JAXA が開発した LES を用いた初の観測 (日没直後の観測) を成功裏に実施した。(表 1・ 図 1 参照)
2011 年 夏季	渡部重十教授(北大) (内之浦・S-520-26 号機)	電離圏 F 領域の電離大気・中性大気相互作用の研究を目的とする。ロケット打上げは日出直前の時間帯を予定している。将来の昼間観測への準備を兼ねて実施、薄明中にて高度 200 km までのリチウム撮像の S/N を定量調査し昼間観測の最適条件を探る。
2011 年 夏季	Dr. R. Pfaff (NASA) (米国ワロップス射場) (本研究)	電離圏 E 領域に発生するスプラディック E 層の解明を目指して NASA ワロップス射場から打ち上げる。ロケット機数は 4 であり、リチウム観測による昼間の中性風速観測と電離圏プラズマの直接計測を実施する。ISAS/JAXA 開発の LES を利用することを決定し、計画を進めている。
2012 年 夏季	山本衛(京大) (内之浦または 米国ワロップス射場) (提案中)	中緯度の電離圏 E 領域・F 領域に発生する波動現象の生成機構の解明を目的とする観測であり、宇宙科学研究本部への提案中である。夜間・F 領域高度の中性風速観測が必要であるため、月明を利用したリチウム観測を予定している。同時に TMA による E 領域高度の風速観測、電離圏プラズマの直接計測、地上のロケット他からの同時観測を行う。
2013 年 以降	渡部重十教授(北大) (インド等の磁気赤道付近) (計画中)	渡部重十教授が提案された LES 観測のひとつの最終目的は、磁気赤道付近における昼間の熱圏風観測である。インドとの共同観測により地球のスーパーローテーションの解明を目指し準備している。