

リチウム放出と航空機観測による夜間および昼間の中性大気風速の測定

山本真行、柿並義宏、木原大城(高知工科大)、渡部重十(北海道情報大)、
羽生宏人、阿部琢美(ISAS/JAXA)、山本衛(京大生存圏研)、M.F. Larsen(Clemson Univ.)

1. 概要と目的

2013 年 7 月 4 日および 20 日に、観測ロケットからのリチウム(Li)放出実験を、米国バージニア州の NASA Wallops 実験場および JAXA 内之浦宇宙空間観測所(USC)にて、それぞれ実施した。米国の実験は昼間、国内では夜間に、熱圏中性大気風速を計測することが本研究の目的である。ロケット放出 Li は、放出後しばらくの間は中性の状態を保ち、太陽を光源とする共鳴散乱光 671 nm にて発光して上空の風を可視化するトレーサーとなるため、中性大気風速の検出に用いられる。我々は「宇宙花火」実験として、2007 年の S-520-23 号機以降、夕方や明け方の条件にて複数回のリチウム放出実験を国内外で実施してきた。夕方や明け方は、太陽光が熱圏を照らしつつ地上は夜間に近い状況となるため、Li 発光と背景光の S/N 比が十分に確保され、上空 400 km 程度まで 40 分以上の観測を可能とすることが判明しているが、昼間および夜間の観測では S/N 比の確保が問題となる。本稿では、昼間・夜間の Li 放出による風速観測法の開発・実験成果を報告する。S/N 確保には背景光を減らす必要があり、両実験では NASA・JAXA の実験用航空機による観測に挑戦した。航空機観測からの風速解析は初期的な状況であり、本稿ではその概略のみを記す。

2. 実験と経緯

2013 年 7 月 4 日に実施された米国の実験では、リチウム放出器(LES)が 6 台搭載された観測ロケットを 10:31:40 LT に打ち上げ、ロケット上昇時に各 2 台ずつの LES をタイマ動作させ昼間条件の高度 82~124 km の領域に計 3 回 Li を放出した。光学観測は米国 Clemson 大学が主導し、日本からの共同観測チームも人員と専用機材を提供した。電離層ダイナモ電流と熱圏中性大気風との関係性解明を目的とした NASA の Daytime Dynamo 実験の一環である本実験は、2011 年 7 月に実施した Li 放出が観測不良に陥ったため、その原因究明・改善の成果を試すリベンジの機会となった。このため NASA は 2013 年 1 月に LES のみを搭載した試験専用ロケットを Wallops にて打ち上げ、我々は夕方条件下で航空機観測の事前検証を実施した。機上からの背景光条件や LES 動作を検証し、発光強度を JAXA および国立極地研究所の積分球装置にて絶対値較正するなど、入念な準備を整えた。本実験では航空機 1 機と地上 1 地点(Wallops)から光学観測し、波長範囲を 2 nm に抑えた専用光学系を備えたカメラによる連続撮影を実施し、航空機による昼間 Li 観測に成功した。地上観測点では雲に阻まれ、今回の Li 発光の検出可否は確認できなかった。

2013 年 7 月 20 日に実施された国内の実験は、E, F 領域の電離圏上下結合と電離圏擾乱現象 MSTID の生成メカニズム解明を主目的とするロケット地上同時観測であり、S-520 型と S-310 型観測ロケットを 1 機ずつ用いる国内としては最大規模のロケット実験となった。まず 23:00 LT 打ち上げの S-310-42 号機では上昇時および下降時それぞれ高度 80~140 km の領域に TMA(トリメチルア

ルミニウム)トレーサーを放出し風速測定を実施し、約 1 時間後(23:57 LT)打ち上げの S-520-27 号機に搭載した 3 台の LES は下降時 125 km, 115 km, 105 km に計 3 回 Li(リチウム)トレーサーを放出し、夜間の Li 観測に初挑戦した。夜間は太陽という光源が存在せず原理的に共鳴散乱光は観測不可能に近いが、今回の実験では満月近い月齢の月明の利用を提案した。過去複数回の実験、特に 2012 年 1 月実施の S-520-26 号機による明け方 Li 放出実験の結果を精密測定した成果から、月明による共鳴散乱を想定した S/N 比の事前見積りを精密に行い、周到な準備の上で航空機1機および地上 3 地点から光学観測し、世界初となる夜間 Li 発光の検出に成功した。特に、従来手法の TMA で測定困難な高度 150 km 以上における夜間熱圏の中性大気風速測定手法の確立には Li の活用が必要であり、この実現に向けた定量的情報収集が今回の主目的となり、Li 発光の航空機および地上光学観測に成功し、次回以降の実験に繋がる重要な役割を果たした。

3. 発光強度・S/N 比と実験計画

本観測では、昼間における強烈な背景光によるノイズの増大、および深夜月明条件下における微弱な Li 共鳴散乱光の問題から、それぞれの事前予測に基づく S/N 評価は非常に厳しい数字であった。昼間 Li 観測は 1960~70 年代に朝方の時間帯の実験事例として主に航空機観測による観測報告があるが、当時のフィルム観測からの発光強度の定量情報はなかった。S-520-26 号機搭載 LES 放出の Li 観測では、我々は日の出前の徐々に背景光が明るくなる条件における Li および背景光の観測を専用デジタルカメラで実施し、その結果を用い S/N 算出を慎重に実施した。結論として、航空機を用い高度 11 km 以上まで上昇することで観測位置上空の大気による光学的厚さを1桁程度改善すれば、背景光ノイズ成分となるレイリー散乱光を抑えることが確認され、実験計画を立案した。航空機観測が主体となったため、その飛行経路や共鳴散乱の光源となる太陽や月との位置関係に実験計画や実施条件が左右されることとなった。図 1 に両実験の実施状況を示す。

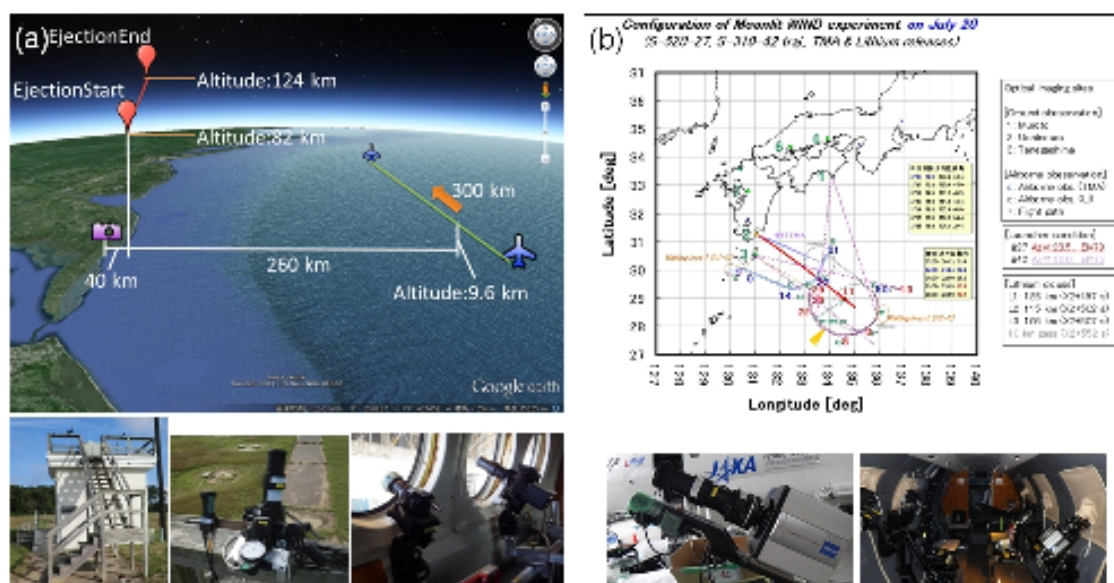


図 1 昼間(a)および夜間(b)の Li 放出実験における配置、航空機飛行経路と実験機材

打上げ当日の条件判断のスキームは、ロケット側の条件、電離層観測の条件、光学観測の条件がすべて整ってGO判断となるが、航空機からは衛星携帯電話で状況報告し、地上観測点は電話およびネット回線による定時天候連絡を実施した。これらは日米共同観測の経験値アップに伴い、両実験ともスムーズに進行した。デジタルカメラ制御ソフトウェア Solar Eclipse Maestro と専用スクリプトファイルの作成により予定時刻に自動的にインターバル撮影をするシステムが使われた。航空機観測では、図 2 に示すように多くの機材に対して僅かな人員かつ限られたスペース内での運用が求められる苛酷な環境であり、自動化できるビデオ機材や一部の静止画機材は連続撮影モードにて最大限の自動運用を実施し、予め作成した離陸後の各機器運用手順書に従いつつ、臨機応変な運用が求められる高感度機材のみ慎重なマニュアル運用を実施した。

4. 観測状況

昼間 Li 観測の解析は、放出直後の連続撮影を用い、ロケット軌道情報ならびにタイマによる放出動作時刻を元に高度情報を得る方法で実施した。1 回目放出の低高度側の Li は風速決定ができるほどの S/N を維持できていないため、2, 3 回目放出の Li のみを用い実施した。用いた撮影画像を図 3 に示す。結果として、2 つの Li トレーサー間空隙部分を除く高度 87 km~114 km の範囲にて風速の算出ができた。低高度側は高度 93 km 付近での風速シアを検出し、この高度以下では概ね北向き成分を、この高度以上では概ね南向き成分を示した。高高度側の Li では北向き成分のみを観測した。これらの結果は、HWM 大気風速場モデルに対して一致する傾向を示した。これ

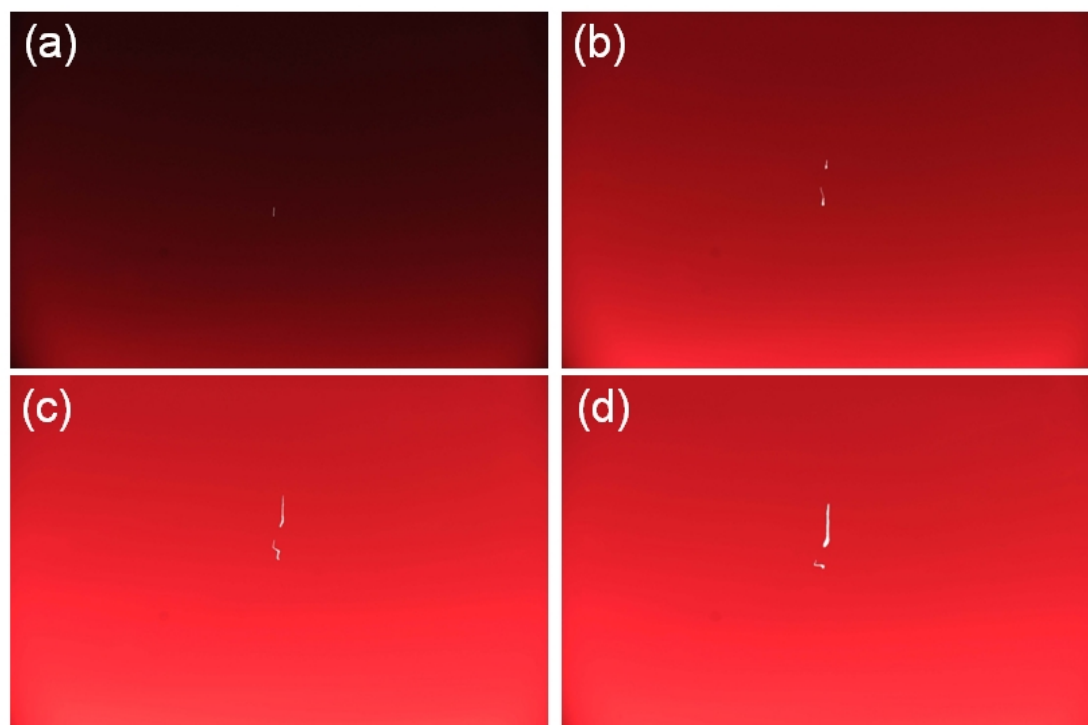


図 3 航空機観測による昼間 Li 撮影画像
(a)10:33:14 LT, (b)10:33:29 LT, (c)10:33:44 LT, (d)10:33:59 LT

らの結果を踏まえ、地上での地磁気観測の面的データやレーダーによる電離層データ等との比較を今後 Daytime Dynamo 実験参画者により進めていく。なお昼間 Li 発光は約 25 分間観測できた。

一方、夜間 Li 観測では、室戸観測点のみ天候状況が悪く雲間の TMA が観測された以外の成果はなかったが、内之浦および種子島観測点の天候はほぼ快晴で、両地点で TMA の長時間連続観測に成功し、僅か 2 枚ではあるが月明 Li 発光の地上観測にも成功した。航空機は予定通り順調な飛行を達成し、それぞれ複数台のカメラにより TMA の動画および連続撮影と、その後 Li の動画および連続撮影に成功した。ただし Li の発光継続時間は 2 分以内と短いものであった。昼間観測と異なる点として、月明による Li 共鳴散乱光では太陽に対し光源の強度比が 40 万分の 1 程度となり、Li 発光と背景光はともに観測機器の検出ノイズフロアに近い状況で観測したため、数分間の Li 拡散による影響後には S/N 確保が困難なレベルに至ったと考えられる。

各観測点では専用撮像機材により秒単位で同期した撮影記録がなされ、上昇時、下降時の TMA は天候条件を満たす全観測点で撮影された。1 回目から 3 回目までの Li 放出による筋状の発光は航空機によって高い時間分解能で確認されたが、3 回目放出の Li は 10 数秒の時間しか発光が継続しなかった。この結果、1 回目と 2 回目の発光は地上からの長時間露光撮影でも確認されたが、3 回目放出の Li は航空機のみでの観測となった。3 回目放出の Li は燃焼速度の遅いタイプの LES を搭載したため、一定距離の放出密度が小さく短時間で消滅したと考えられる。

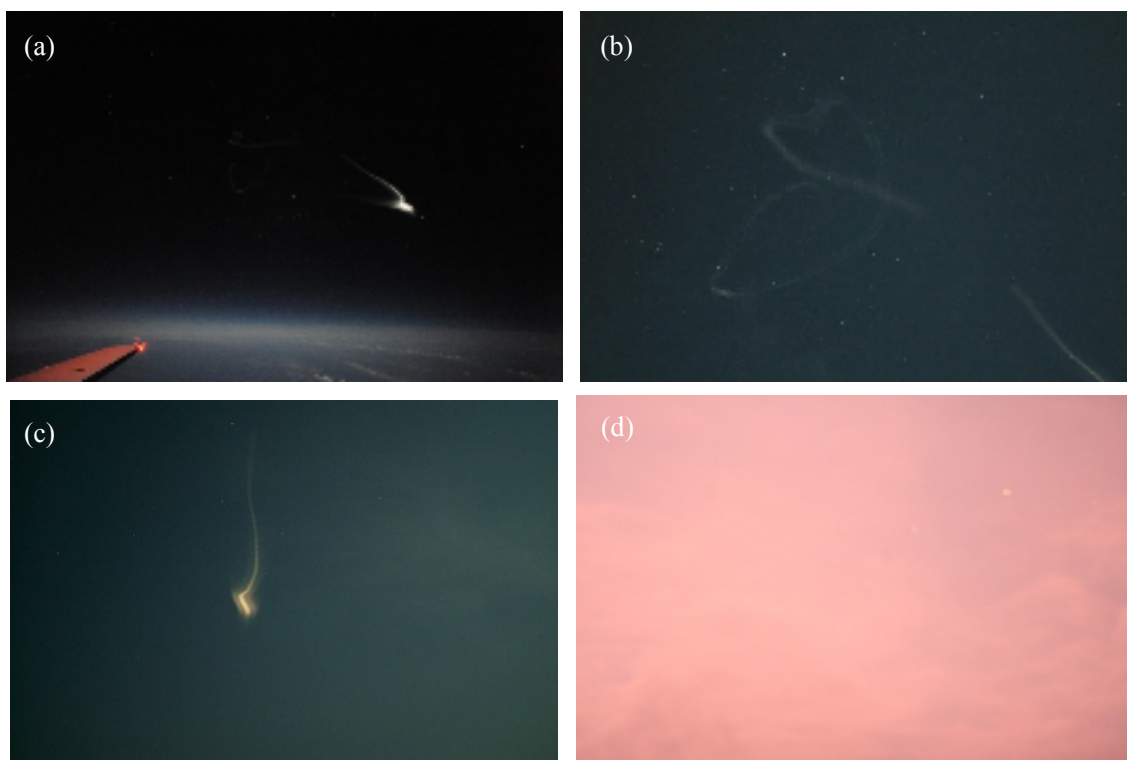


図 4 航空機・地上観測による TMA 撮影画像

- (a) 23:04:55 JST (航空機: Nikon D700、14 mm lens、露出時間 1 s、ISO 感度 12800)、
- (b) 23:04:53 JST (種子島: FUJIFILM S3 Pro、23 mm lens、露出時間 4 s、ISO 感度 1600)、
- (c) 23:04:52 JST (USC: FUJIFILM S3 Pro、28 mm lens、露出時間 4 s、ISO 感度 1600)、
- (d) 23:04:54 JST (室戸: Canon N、100 mm lens、露出時間 1 s、ISO 感度 1600)

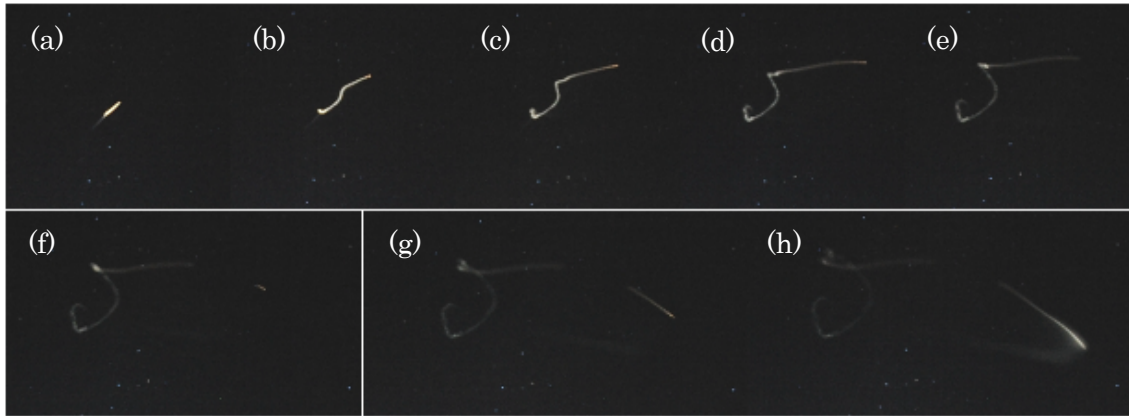


図 5 航空機観測による TMA 撮影画像 (Nikon D700 撮影画像からトリミング)

(航空機: Nikon D700、14 mm lens、露出時間 1 s、ISO 感度 12800)

(a) 23:01:35 JST、(b) 23:02:00 JST、(c) 23:02:25 JST、(d) 23:02:50 JST、(e) 23:03:15 JST、
(f) 23:03:40 JST、(g) 23:04:05 JST、(h) 23:04:30 JST

TMA 放出は、ロケット上昇時は高度約 80 km～137 km に、下降時はノミナル軌道に比べやや低高度側の同 134 km～62 km に周期1秒で電磁バルブにより間歇的に放出された。TMA は、地上 3 地点と航空機の 4 地点からの同時観測に成功したが、室戸観測点では上空全体が薄雲に覆われており TMA を明瞭に確認することは難しい。航空機と地上 3 地点で観測された画像を図 4 に示す。観測画像から、放出直後 TMA はロケット軌道に沿って発光し、中間圏・下部熱圏の強い風速シアにより複雑に広がる様子を確認した。航空機からの連続画像を図 5 に示す。

TMA 観測終了後の 23:57:00 JST に LES 搭載 S-520-27 号ロケットが打上げられ、下降時の打ち上げ 497 秒後 00:05:17 JST に、ノミナル軌道に比べ幾分低い高度約 120 km から約 20 秒後の高度約 81 km まで 3 回の Li ガス放出が確認された。地上 3 観測地点のうち種子島 1 地点のみおよび航空機から約 90 秒間の Li 同時観測に成功した。航空機からの撮影画像を図 6～図 8 に、種子島での地上観測結果を図 9、図 10 に示す。放出された Li はロケットの軌道に沿ってトレイル状に形成されたが、約 90 秒後には Li ガスの共鳴散乱光をほぼ確認できなくなった。

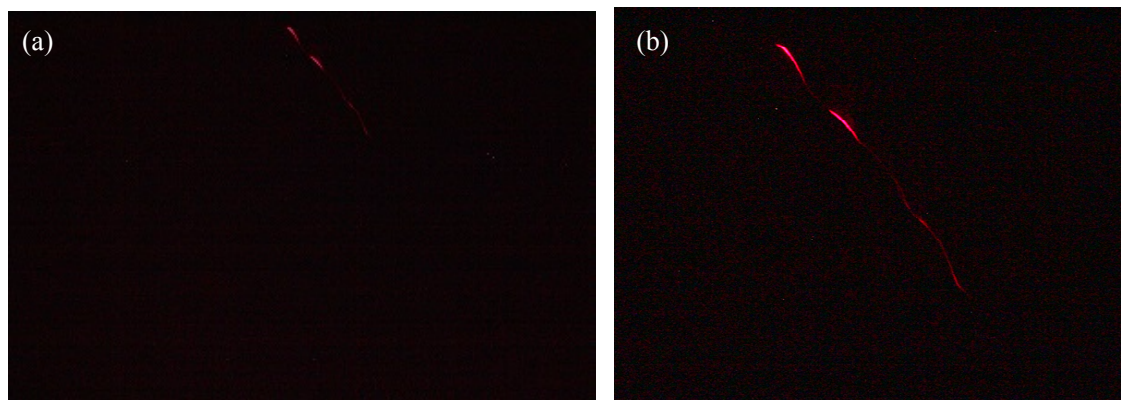


図 6 航空機観測による Li 撮影画像 (長時間露光)

(航空機: Astro 60D、2 nm BPF、Telecentric lens、露出時間 60 s、ISO 感度 12800)

(a) 00:05:00 JST、(b) 同 Li ガス部分のみ拡大

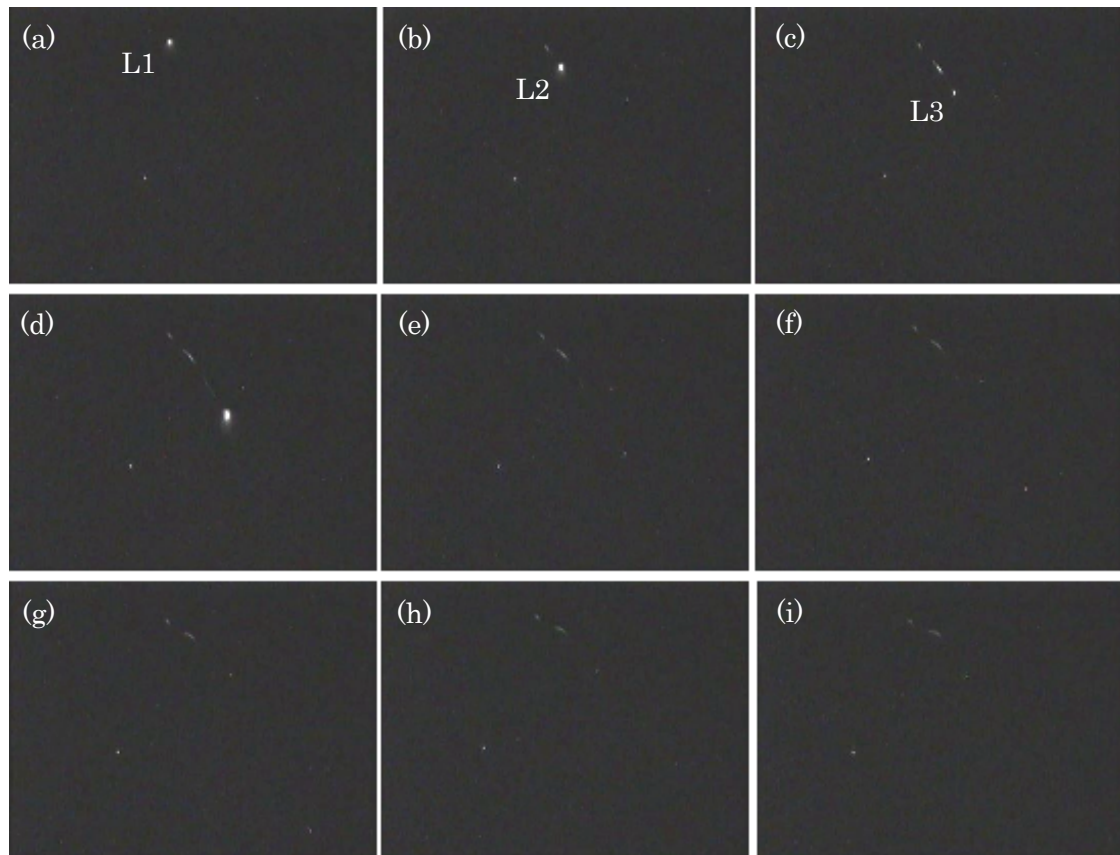


図 7 航空機観測による Li 撮影画像（高感度 CCD ビデオカメラ）

（航空機：Watec Neptune-100N による動画から切り出し）

(a) 00:05:17 JST、(b) 00:05:22 JST、(c) 00:05:27 JST、
(d) 00:05:32 JST、(e) 00:05:37 JST、(f) 00:05:42 JST、
(g) 00:05:47 JST、(h) 00:05:52 JST、(i) 00:05:57 JST

5. 初期解析結果

1) 発光強度

昼間の観測に対する事前予測では、Li 発光が 23 MR(レイリー)程度に対し 2 nm フィルタの帯域を通した背景光が 17 MR 程度で、S/N 比は 2.4 と見積もられた。実際の Li 発光強度も 21 MR 程度の値が得られたが、背景光は高仰角側の 11 MR に比べ低仰角側は大きくなり 1 回目放出の低高度側 Li に対し S/N 低下を招いた。これは低仰角での撮影では視線方向に積分した光学的厚みが大きくなった結果であり 1 回目放出の Li について風速導出が困難となった。夜間実験では、実験前の発光強度予測として上空 11 km における夜間満月条件下の背景光 200 R 程度の予測に対し、今回放出した約 125 g の Li を 5 秒程度で Trail 状に放出したと仮定して最大値で 58 R 程度の微弱光となり S/N は僅か 1.3 であった。撮影結果では 1, 2 回目放出の最大発光強度にて 60 R 程度の値が得られ、これに対し背景光は高仰角を保てたことも幸いし最小 30 R から最大 200 R 程度であったため、最大値として S/N=2 が得られ航空機観測の優位性が示された。地上では限界ギ

リギリの S/N であったが、種子島の高感度カメラの長時間露光にて検出に成功した。今後の夜間月明下における高高度への Li 放出実験に対する指針となる定量データが得られた。

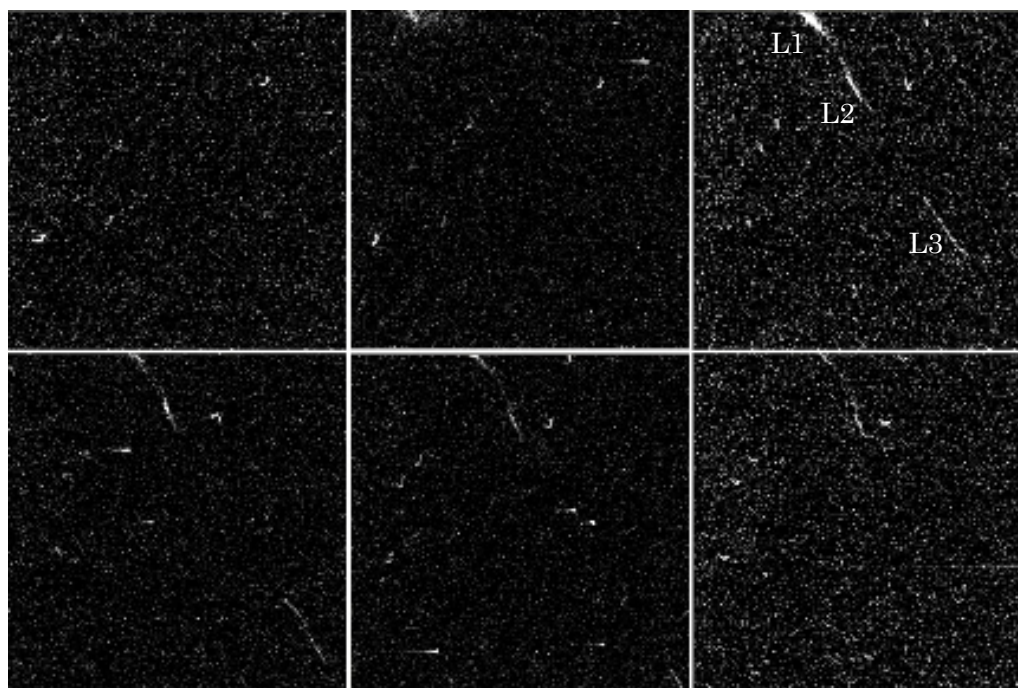


図 8 航空機観測による Li 撮影画像（超高感度冷却 CCD カメラ）
（航空機：BQ-87EM、2 nm BPF、Telecentric lens、露出時間 4 s）
(a) 00:05:13 JST、(b) 00:05:17 JST、(c) 00:05:37 JST、
(d) 00:05:41 JST、(e) 00:05:45 JST、(f) 00:05:49 JST



図 9 地上観測による Li 撮影画像（長時間露光）
（種子島：FUJIFILM S3 Pro、23 mm lens、露出時間 30 s、ISO 感度 1600）
(a) 15:05:38 UTC、(b) 同 Li ガス部分のみ拡大

2) 風速

従来の風速測定では地上多地点観測から 3 次元解析によって発光の空間位置（経緯度・高度）を正確に算出し、時刻差から風速ベクトルを得た。航空機観測では移動する 1 観測点からの情報と飛行機の位置・姿勢情報のみから風を算出する新たな手法の開発が必要となる。昼間実験では

更に背景の星が写らず解析が困難となる。初期解析では、画面上の移動ベクトルを得つつ、昼間は航空機の飛行・姿勢情報からの推定で夜間は背景の星の移動情報を減算することで航空機の移動・姿勢変化に起因する成分を除去し、航空機進行方向への風速成分を得た。昼間実験では1, 2回目放出 Li の初期解析から、高度 104~120 km で、上層の西向き成分から下層の東向き成分に遷移するシア構造を得た。TMA 解析からは高度 80~137 km における風速プロファイルが得られ、1 時間後放出の Li 解析結果と重なる高度範囲での傾向には概ね良い一致が見られた。

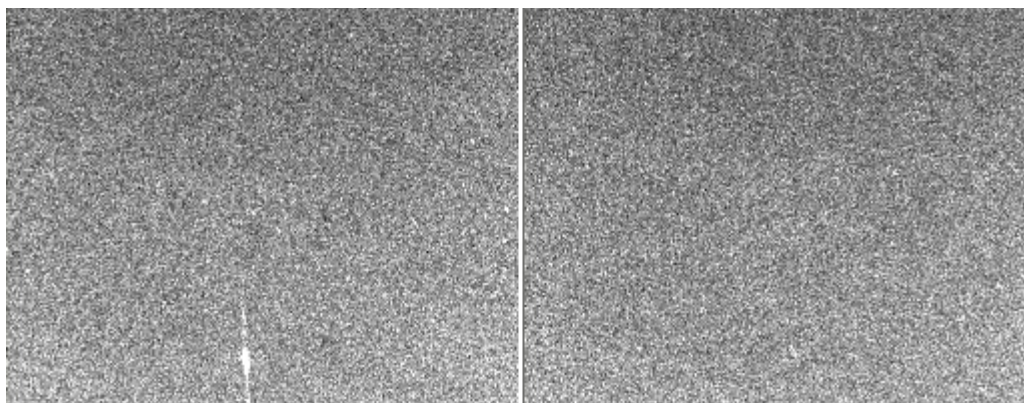


図 10 地上観測による Li 撮影画像（超高感度冷却 CCD カメラ）
（種子島：BQ-87EM、2 nm BPF、Telecentric lens、露出時間 10 s）
(a) 00:05:21.6 JST、(b) 00:06:20.4 JST

6. 結論

2013 年 7 月に米国 Wallops 実験場と、国内 USC にて Li 放出実験を実施し、ともに航空機観測を導入することで、昼間および夜間条件下の Li 共鳴散乱光をトレーサーとする熱圏下部における中性大気風速の計測に成功した。夕方および明け方条件に比べ S/N 条件の非常に厳しい両者の実験に成功したことで、我々は日米協力によるロケット実験の成果としてすべての時間帯における熱圏大気風速の測定手段を確立した。従来の TMA 放出による手法によって夜間の観測成果は蓄積されているが、昼間の観測は今後の進展が期待される。

また夜間 Li 発光は、困難とされた月明を光源とする観測に世界で初めて挑戦し、その定量的観測成果を得ることができたが、工学的要求から今回は 130 km 以上の高度での放出は見送られた。従来法の TMA 放出では背景酸素密度の不足から 150 km 以上の高度では TMA 発光の観測が難しい為、今後の実験では高度 160 km 以上の領域での LES 複数同時稼動による 2~3 倍の放出量確保などの手法で夜間熱圏の F 領域までの風速測定に道を拓きたい。

謝辞 本地上観測に関して、多くの方々に御協力を頂きました。以下に列記する団体・個人をはじめとする本観測にご協力くださったすべての皆様方に深く感謝申し上げます。国土交通省 航空局、同 航空交通管理センター、種子島空港管理事務所、JAXA 航空本部 飛行技術研究センター、同 名古屋空港飛行研究拠点 及び JAXA 実験用航空機「飛翔」運用関係者の皆様、JAXA 増田宇宙通信所、国立室戸青少年自然の家、国立極地研究所 門倉昭氏、京都大学生存圏研究所 山本衛氏、JAXA 宇宙科学研究所 羽生宏人氏、日本カーリット株式会社、薩摩川内市せんだい宇宙館、貴重な撮影結果を提供くださった天文家の皆様。