

# S-520-23 号ロケット放出リチウム共鳴散乱光による熱圏風測定

山本 真行 (高知工科大)、横山 雄生(高知工科大)、渡部 重十 (北大・理)、  
阿部 琢美 (ISAS/JAXA)、羽生 宏人 (JAXA)、大塚 雄一 (名大・STE 研)、  
齊藤 昭則 (京大・理)、山本 衛 (京大・生存圏研)、小野 高幸 (東北大・理)

## 1. はじめに

中性大気と電離大気が共存する熱圏において、両者の相互作用が惑星規模の現象や局所的な擾乱現象に与える影響を調査するため、2007年9月2日夕方に内之浦にてS-520-23号ロケット実験を実施、ロケット下降時の250km、200km、150km付近において同ロケット搭載リチウム放出器LESからリチウム蒸気を3回放出し、熱圏の広い高度範囲における国内初の中性大気風速測定実験を実施した。夕空に放出されたリチウム蒸気は太陽光を受けて共鳴散乱光を返し、地上光学観測により三角測量を実施して熱圏中性大気の風速を精密に測定する。同時に、電子密度、イオン、電場、磁場、波動の各計測器、ビーコン波送信機等を搭載し、電離大気についての情報を得る実験が行われた。中規模伝搬性電離層擾乱(MSTID)の発生メカニズムの解明も本実験の目的であり、同現象が起こる条件下での実験実施に成功した。本稿ではリチウム放出による中性風測定実験の詳細と初期解析結果を紹介する。

## 2. 搭載および地上観測機器

本実験では観測ロケットからリチウムレーザーを放出する技術の確立が大きな目的であった。リチウムの放出実験は、これまでに米国アラスカ大学やインドでの実験例の報告があるものの、国内ではリチウムの放出経験はなく、インドの例を参考としつつも1からの自主開発となった。搭載機器LES(Lithium Ejection System)の開発は羽生宏人(JAXA)が中心となり、日本カーリット株式会社が製作を担当した。搭載機器の詳細は別稿に譲るが、中央部に金属リチウムを封入、その周囲に収納された酸化鉄とアルミの粉末がテルミット反応の反応熱を出し、それによって中央部のリチウムを沸点である1317°Cまで加熱して気化放出させる構造が採用された。放出タイミングの制御としては、着火タイミングが搭載タイマーにより制御され、着火後放出までの時間は地上燃焼試験による実験値(約10秒)を念頭にスケジュールが組まれた。打上げ時の実際の着火タイミングは、19:26:03(X+363秒)、19:26:43(X+403秒)、19:27:24(X+444秒)、それぞれの着火10秒後の通過予定高度は、ノミナル予測軌道において247 km、204 km、146 kmであった。

地上光学観測としては、複数の観測点からの同時撮影が必要であり、天候等による不確定要素を勘案して4地点を設定し、専用光学系を4セット準備した。撮像には赤外カットフィルターを外したCanon製デジタルカメラEOS Kiss Digital Nを使用し、上空で急激に拡散すると予測されるリチウム共鳴散乱による波長670.8 nmの赤色光を高いS/N比で観測可能とするため、帯域20 nmのバンドパスフィルターと広い視野(FOV $\sim$ 110°)、明るいF値(F=3.5)を兼ね備えた、テレセントリック光学系をフォトコーディング社とともに開発した。観測前に予測される発光強度の範囲が広がったため、撮影途中でも臨機応変に最適露出条件に切り替えられるように、ノー

トPCから撮影条件を変更しつつ、電子リリースによりマニュアル撮影を実施する体制とした。撮影データは、RAW 画像および高画質 JPG 画像ファイルを同時記録し、内臓フラッシュメモリとともにノートPCにもデータ転送した。

### 3. 地上観測

実験時には、高知工科大学、北海道大学を中心に、名古屋大学、京都大学、東北大学の協力を得て、潮岬、高知、五島、奄美の各地点に観測チームを派遣した。共鳴散乱光の観測のため、打上げ時刻は当初の打上げ予定日 8 月 30 日において 19:23:00 JST であり、これは 3 回目のリチウム放出位置（高度約 150km）における日照条件が放出後数分間継続できることを基準とした。この時刻は、秋季の日没時刻に同期して約 1 分ずつ遅くなる。

光学観測の成功が条件となる本実験では、実際の打上げ判断には天候が大きな要素となった。光学観測点 4 箇所のうち 3 箇所以上の晴天が見込める条件を待ち、最終的な打上げ実施日時は 9 月 2 日 19:20:00 JST となった。同日の気象条件の予測により地上観測点も変更し、最終的に潮岬、宮崎、内之浦、奄美の 4 地点に再配置した（図 1）。各光学観測点における機器配置は表 1 の通りであり、高知、五島、川内の各観測点においても補助的な観測を実施した。

打上げ前後の光学観測の統括は、複数回線の同時通話が可能な電話会議システムを利用し、内之浦観測点から各観測点にリアルタイムの指示を与えた。実際の発光の様子を視認しながら詳細な指示を出すことができ確実なオペレーションに繋がった。実際、専用光学系による観測可能な時間は当初の予測を遥かに超えたため、当初のタイムスケジュール以降の撮影指示は電話回線に

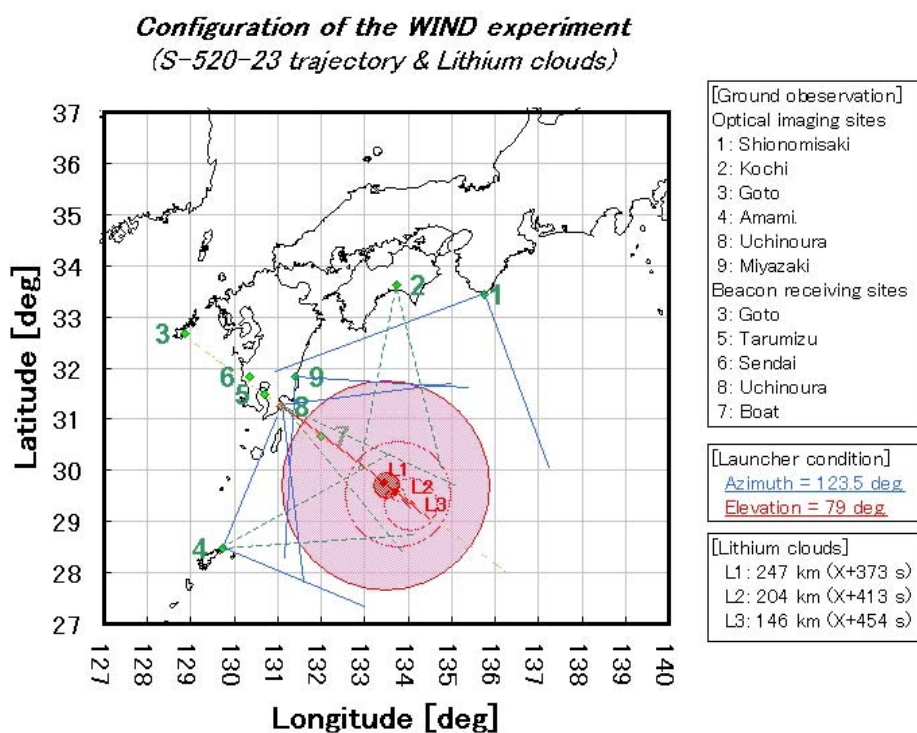


図 1 S-520-23 号機 地上観測班配置図。1, 2, 3, 4 が当初観測予定地。最終的に、1, 9, 8, 4 が光学観測点となった。軌道の延長線上に並ぶ 3, 6, 5, 8, 7 の各地点はビーコン波受信機の地上（および海上）観測点を示す。

表1 各地上観測点の地理座標と配置観測機材

- ・潮 岬 33.45 N, 135.75 E (京都大学防災研究所 潮岬風力実験所)  
メインカメラ×1、サブカメラ×2
- ・宮 崎 31.83 N, 131.42 E (宮崎大学工学部)  
メインカメラ×1
- ・内之浦 31.25 N, 131.08 E (JAXA 内之浦宇宙空間観測所 PI センター)  
メインカメラ×1、サブカメラ×3、台湾観測班光学観測装置、ネット中継機材、  
分光カメラ1、スキャニングフォトメータ、米国観測班光学観測装置
- ・奄 美 28.47 N, 129.72 E (須野ダム管理事務所)  
メインカメラ×1、サブカメラ×1、台湾観測班光学観測装置
- ・高 知 33.62 N, 133.72 E (高知工科大学)  
サブカメラ×2、台湾観測班光学観測装置、ネット中継機材
- ・五 島 32.66 N, 128.85 E (五島市鬼岳天文台)  
サブカメラ×1
- ・川 内 31.83 N, 130.34 E (薩摩川内市せんだい宇宙館)  
米国観測班光学観測装置

表2 メインカメラ撮影条件

撮影番号	露出開始時刻(JST)	感度設定	露出時間
05~17	19:26:13~19:27:58	ISO 800	4 秒
18~23	19:28:14~19:29:54	ISO 800	15 秒
24~52	19:31:30~19:40:50	ISO 1600	15 秒
53~85	19:41:40~20:15:45	ISO 1600	30 秒

撮影番号 01~04 は動作チェックと背景発光強度測定のため着火タイミング以前に実施

より各観測者に音声で伝え、メモリ容量が Full となるまで観測を継続した。各観測期間における撮影条件は表2の通りである。最初の撮影条件はリチウム発光強度の事前予測に基づいて予め決定され、撮影中に概ね良好な結果を確認したため、以降の撮影においても発光強度の減衰を考慮し露出条件を段階的に変更した。なお本観測で採用した電話回線を通じ音声信号音により撮影タイミングの同期を取るマニュアル撮影方式において、事前練習により十分訓練された観測者による撮影時刻精度は0.2秒以内であり、最短の露出時間4秒に比べて十分な同期精度がある。

メインカメラ4台とともに、データ補完および発光強度が十分な場合の高時間分解能観測のためサブカメラ(主に Watec 製 Neptune-100)による高感度ビデオ観測を、また発光波長確認のためイメージインテンシファイヤと透過型回折格子を用いた分光観測、スキャニングフォトメータ

(名大・STE研)を用いた分光観測を試みた。ビデオ観測では発光の前半においては発光強度の変化が観測でき補助的なデータを得た。分光観測では、ロケット飛翔軌道が予定よりシフトした関係で当初予定の視野内を通過しなかったため、発光強度が減衰する前に視野内に導入することができず、残念ながら有用なデータは得られなかった。本実験は国際共同で実施され、台湾の Y.H. Chu 氏を中心とする観測班による TMA トレイル観測用機材や、米国の P. Bernhardt 氏を中心とする観測班による分光観測機材等による観測も実施された。また打上げ条件判断等のため JGN2 ネットワークを用いたネット中継も実施した。

#### 4. 観測結果

2007年9月2日、ロケット打上げ1時間前の天候確認では奄美観測点における天候状況が判然としないままタイムスケジュールを続行したが、40分前の定時報告の時点で条件が改善、7分前の連絡でほぼ快晴となったため、5分前の天候条件としては4観測点のすべてにおいてGOの判断となった。以降、ロケット側、地上観測側のオペレーションは順調に行われ、打上げから373秒が経過した19:26:13の最初の撮影タイミングにおいて明瞭な赤い発光が各観測点から視認され、メインカメラによる観測データとしても秒単位で同期した撮影記録がその後20:16:15まで得られた。撮影結果の概略を図2に示す。

1回目のリチウム発光は、予定通り着火から10秒間を仮定した発光開始時刻にほぼ一致して現れた。その後この発光は肉眼でも十分に色が確認できる赤色を伴って、ロケットの下降と共に細長く伸びるように数分間視認された。図2の撮影結果でも同様に確認できる。これは当初予定のBlob状の放出よりも、やや継続的なTrail状の放出に近い状態であったためと考えられる。なお1回目と2回目の発光の間には増光が確認されており、テルミット反応によるリチウム蒸気放出に何らかのムラが生じたものと解釈される。2回目のリチウム放出は、打上げから413秒後の19:26:53に、1回目放出のリチウム発光部分に繋がるように撮影された。実際の発光開始はこの予定時刻より4秒程度早く、着火から5秒程度で放出された模様で、上述の増光とともに隣接キャニスタの温度上昇に伴う影響で気化が早まったと考えうる。

一方、3回目の発光予定時刻19:27:34には4観測点のすべてで肉眼での発光確認ができなかった。1, 2回目放出のリチウム発光は継続して確認されたため、以降の撮影スケジュールも続行した。撮影画像上での発光確認は放出40分後にも認められたため、当初のスケジュールを延長してカメラ搭載のフラッシュメモリーカードがFullになるまで継続、約50分後の20:16に観測を終了した。3回目の放出は、図2では明瞭ではないが、撮影画像の輝度を画像処理により調整することで確認され、LESによる3回の放出は成功裏に実施されたことが確認できた。3回目放出が暗かった理由として、ロケット飛翔が予定されたノミナル軌道位置に比べやや南かつ遠方になった結果、3回目放出位置での日照条件をぎりぎり満たさなかったためと結論された。今回、高S/Nを得るために限界まで打上げ時刻を遅らせたが、今後の実験ではノミナル軌道からのずれを考慮した打上げ時刻の決定に注意が必要である。しかしながら3回目放出がバンドパスフィルターを備えたメインカメラによる撮影で確認できたことから、何らかの共鳴散乱光は発生していたと考えられる。この発光には地球のリム方向からの太陽光の散乱光あるいは上空で発光している第1回目放出のリチウム共鳴散乱光の2次散乱光を得たものと解釈される。

WINDロケット実験 地上光学観測結果概略					
No.	撮影時刻/条件	潮岬観測点	宮崎観測点	内之浦観測点	奄美観測点
5	19:26:13 JST ISO 800, 4秒				
9	19:26:53 JST ISO 800, 4秒				
14	19:27:34 JST ISO 800, 4秒				
18	19:28:14 JST ISO 800, 15秒				
24	19:31:30 JST ISO 1600, 15秒				
39	19:36:30 JST ISO 1600, 15秒				
53	19:41:40 JST ISO 1600, 30秒				
63	19:51:45 JST ISO 1600, 30秒				

図2 S-520-23号機 地上光学観測概略。メインカメラによる撮影シーケンスから8コマ分を抜粋。3回目までのリチウム放出時刻付近および以降の拡散・移動の様子を示す。撮影条件および抜粋間隔は一定ではないので注意。

なお、図2の潮岬観測点および宮崎観測点の観測の最終部分には雲による影響が見られS/Nの低下を招いている。打上げ条件判断の際に、薄雲等の影響に関する判断が各観測点のPIを悩ませたが、図2で確認できるような観測に影響を与える雲は薄雲ではなく明瞭な雲であり、夕刻にぎりぎり視認される程度の薄雲や靄では影響はさほど大きくないことも確認された。

## 5. 初期解析結果

これまでの解析から、リチウム発光の強度、拡散の様子、およびいくつかの高度での風速についての初期結果が得られている。以下に概略を示す。今後の詳細な解析により数値等は若干の改訂が予期されるので本稿に示す値については参考値としていただきたい。

### 1) 発光強度

実験前の理論的な発光強度予測としては、今回放出した約 130 g のリチウムを Blob 状に一気に放出したと仮定して最大値で 1 M レイリー程度であった。これは過去文献による放出リチウムからの蒸気生成効率と推察される発光効率 10 % を勘案したものであった。今回得られた結果では、1 回目放出の中央部にて 1 M レイリーをやや超える程度の値が得られており、今回の放出がやや Trail 状になったことを考えると、過去の海外（アラスカ大などによる）での実験に比べ放出リチウムが蒸気となる効率がよかったものと推察される。

### 2) 拡散

リチウムの拡散に関しては、渡部他によるシミュレーション結果等をもとにおよその拡散範囲を事前予測し、その最大拡散幅が得られた場合にも観測可能なように安全側に観測視野を設定し、広視野（FOV=110 度）の光学系を準備した。しかし観測された拡散は予測よりも小さく、高高度での中性大気による衝突が予測より大きかったことを示している。観測当日の太陽活動度の指数である F10.7 の値はシミュレーションで仮定された数値よりも大きく、その意味では予測結果と大きく異なることを意味する訳ではない。実測された初期拡散速度は 1 回目放出高度にて 3.2 km/s 程度であり以降急激に減速する状況が観測された。初期拡散速度は熱速度 3.67 km/s に近い値が得られ、減速の様子から、放出されたリチウム蒸気が周辺大気と馴染む時間を可視化することができたと考える。今後、詳細な解析によって理論との比較が行われ、渡部他により温度・密度等の推定が行われる予定である。

### 3) 風速

風速測定には三次元解析によって各発光の空間位置（経緯度・高度）を正確に算出し、別時刻による測定結果との差から風速ベクトルを得る。その初期解析として、各観測点の画像から 2 次元的に画像上の左右方向（視線方向の法線ベクトル方向）の移動量について調査し、4 地点からの情報を統合して 4 つの高度での風速を概算した。この結果を整理すると、内之浦観測点以外の観測結果において、放出後 100 秒ないし 150 秒までは移動量の値が大きく変化する傾向が見られた。これは放出された蒸気自体に 1 km/s 以上で飛翔するロケット速度ベクトルが初速として重畳され、高高度の衝突が少ない条件下で維持されたためと考えられ、1 回目放出の高度 240 km 付近では 150 秒以上の発光を継続観測する必要があると結論された。これらを勘案し、150 秒以降のデータを用いてリチウム発光の移動から風速を概算した結果、高度 250km で南東に 80 m/s、高度 200km で南南西に 100 m/s、高度 150km で南南西に 120 m/s、高度 120km で北北東に 60 m/s を得た。高度 130km 付近で大きく風速ベクトルが変化しており大きな速度シアが存在する。

高度 250km での風速は、滋賀県甲賀市信楽町に位置する京都大学の MU レーダーによる同時帯の南北方向成分の中性大気風速推定結果とよく一致していた（大塚他による）。本実験の主目的の 1 つであった MSTID（Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances：中規模伝搬性電離層擾乱）については、当日の GPS-TEC（全電子数）観測により 19:25 JST には MSTID が

発生しつつある状況が、1時間経過後の 20:25 JST には明瞭な MSTID が確認されており（齊藤他による）、暫定結果ながら MSTID 発生時の熱圏大気で理論的に同擾乱を成長させると期待される Perkins 不安定の励起条件を満たす中性大気風の方向に一致することが確認された。なお GPS-TEC の観測には洋上となるロケット軌道位置での観測値がないこと、MU レーダーによる観測位置とロケット放りチウムの位置には概ね 600 km 程度の違いがあり、イオンドリフト観測による南北面の中性風推定では 3 時間の時間幅での移動平均および高度 220 km~450 km での平均値として得られていることに比較上の注意が必要である。

## 6. まとめ

今回、国内初となるロケット放りチウムの共鳴散乱光による熱圏大気風速計測実験を実施した。専用光学系による観測の結果、当初目的のほとんどを達成するデータが得られた。LES からの 3 回のリチウム放出は予定通り実施されたが、各放出は Blob 状と Trail 状の中間的な状況で実現されたと推察される。ロケット放りチウム蒸気による共鳴散乱光は、地上 4 観測点のすべてにおいて発光開始直後から同 50 分経過まで成功裏に観測され、本稿では熱圏の 250km、200km、150km、120km の 4 つの高度域における風速の暫定値を算出した。

ロケット飛行時には地上 GPS 観測網による TEC 観測結果から MSTID が成長過程にあったと推察され、その条件下での実験に成功した。結果として 250km 高度での熱圏中性大気風速は南東方向の成分を有しており、暫定結果ながら MSTID を維持する Perkins 不安定の成長に必要な理論予測方向と一致する結果を得た。中性大気と電離大気の相互作用の理解という主目的においては、広い高度範囲においてリチウム発光の拡散の様子が詳細に観測できたことから、三次元解析に基づく詳細な解析を実施して、理論研究やシミュレーション結果と比較することにより今後の研究に繋がる貴重なデータが得られた。本実験の主目的である熱圏大気の高高度 250km までの中性大気風速測定技術の獲得に成功したので、今後は本測定技術を生かし、今回の成果を踏まえた比較実験を継続的に実施していくことが肝要である。

**謝辞** 本地上観測に関して、多くの方々に観測地点の提供ならびに観測への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。京都大学防災研究所潮岬風力実験所、五島市役所商業観光課、同市鬼岳天文台、奄美市役所笠利総合支所産業振興課、薩摩川内市せんだい宇宙館、宮崎大学工学部 山内誠氏、前田幸治氏、および研究室の皆様、高知工科大学工学部 植田和憲氏、高崎敬雄氏、同大総合研究所 菊池豊氏、JGN II ネットワーク関係者の皆様、国立極地研究所 田口真氏、日本カーリット株式会社の皆様、フォトコーディング池田優二氏、S-520-23 号観測ロケット実験班の皆様、同 LES 班・MSI 班の皆様および地上観測者の方々（北海道大学、東北大学、名古屋大学、京都大学、高知工科大学、および台湾国立中央大学、米国 NRL）。また Web 等を通じた一般への情報提供に基づき、撮影結果を御提供くださった一般の方々および SSH コンソーシアム参加の高校生諸氏に感謝します。

## 参考文献

- Bernhardt, P.A., Probing the magnetosphere using chemical releases from the CRRES satellite, *Phys. Fluids B*, **4**, 2249-2256, 1992.
- Ledley, B.G., Cheung, C.Y., and Manring, E., A measurement of the efficiency of lithium vapor production in high altitude releases, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **47**, 319-326, 1985.