

# 観測ロケット S-520-26 号機による熱圏中性大気とプラズマの結合過程解明

渡部 重十(北海道情報大)、阿部 琢美(JAXA)、山本 真行(高知工科大)、  
羽生 宏人(JAXA)、Yau Andrew(カルガリー大)、山本 衛(京大)、  
石坂 圭吾(富山県大)、熊本 篤志(東北大)、Paul Bernhardt (NRL)、  
高橋 隆男(東海大)、田中 真(東海大)

## 1. 実験の背景と目的

高度 100~300km の熱圏下部においては中性大気と電離大気（プラズマ）が共存し、相互に運動量の交換が行われている。中性粒子は電磁氣的な力を受けずに運動するのに対し、イオンは磁力線を横切る方向に移動し難いために基本的な運動方向は異なるが、両者の衝突により粒子は複雑な運動を行う。このような粒子間の衝突や電場を介した運動量の交換（輸送）は理論的には古くから研究がなされてきたのに対して、実験的検証が不十分であった。中性大気－電離大気間の運動量交換は電離圏ダイナモ、プラズマバブル、伝搬性電離圏擾乱など熱圏下部における特徴的な現象を解明する上で重要であるにもかかわらず、キーとなるパラメータが同時にかつ直接的に観測された例がほとんど無いため、実証データが極めて乏しい。

本ロケット実験は熱圏下部（地表からの高度約 80~300km）領域でのプラズマ密度とその変動、電場、磁場、イオンドリフト、中性風の観測を実施し、上記議論の展開に必要な中性大気－電離大気間の運動量輸送の素過程を理解するとともに、伝搬性電離圏擾乱等の熱圏下部に特徴的な現象の発生および発展における輸送過程の役割を解明することを目的とした。

本実験は WIND-2 (Wind measurement for Ionized and Neutral atmospheric Dynamics Study-2)キャンペーンと名付けられた。これは 2007 年夏期に S-520-23 号機により行ったロケットからのリチウム放出による中性風観測を中心とした WIND キャンペーンの第 2 弾であること意味している。

## 2. 実験の条件

本実験の観測対象は熱圏下部の中性大気と電離大気であるが、両者間の運動量輸送が顕著に観測されるよう、超高層大気中に擾乱が発生している条件のもとで実験を行うこととした。擾乱の存在の有無は地上での電波観測データを使用して確認することとした。

また、本実験では中性風推定のためにロケットから放出するリチウムの太陽散乱光を地上のカメラにより撮像を行う。中性風の 3 次元ベクトルを推定するためには最低でも 3 つの観測地点において画像を取得する必要があることから、これらの観測点の上空に撮像の障害になる雲が無いことが条件となる。さらに、リチウムの散乱光は微弱であるため背景が暗くなければ十分な S/N が得られない。このため、放出されたリチウムには太陽光が入射するが、地上（カメラ設置位置）には太陽光が届かない、すなわち日没直後か日の出直前が打上げ時刻に対する制約となる。まとめると、ロケットの打上げ条件は次の通りであった。

- 熱圏下部にプラズマ密度の擾乱（密度の粗密）が存在すること
- ロケットから放出するリチウム散乱光を地上からカメラで撮影するため、観測地点において視野方向に雲がないこと。なお、観測点は内之浦、足摺半島（室戸）、奄美大島に設ける
- リチウム散乱光観測のため、日の出前かつロケット高度が日照。また、カメラの視野方向に月が無いこと。

### 3. 観測機器と観測計画

中性風観測のためにロケットから放出されたリチウムは、測定器によるプラズマ観測に影響を与えることが予想される。このため、本実験ではリチウム放出はロケット下降時の高度約 200 km 付近通過以降に行い、プラズマ、電場と磁場のその場観測をロケット上昇時および下降時の高度 200 km 以上で行なうこととした。このような観測のためにロケットに搭載された観測機器、観測項目、担当機関を表 1 にまとめた。

表 1. S-520-26 号機の搭載観測機器と担当機関

搭載機器名	得られる物理量	主担当機関
リチウム放出器	中性大気の流れ	JAXA、北海道大学、高知工科大
熱的イオン質量エネルギー分析器	イオンドリフト速度	カルガリー大学（カナダ）
電場計測器	電場の DC・AC 成分	富山県立大学
インピーダンスプローブ	電子密度	東北大学
ラングミュアプローブ	電子温度、電子密度	JAXA
ビーコン送信機	電子密度	京都大学、NRL（米国）
磁場計測器	磁場ベクトル	東海大学
太陽センサ	ロケット姿勢	東海大学

熱的イオン質量エネルギー分析器、インピーダンスプローブ、ラングミュアプローブによるプラズマと電磁場の計測はロケットの上昇時下降時を通じて行う。ビーコン送信機は常に 2 周波の電波を送信し、地上で受信してロケットー地上間の全電子数を求める。ロケットが頂点高度を通過した後の下降中にロケットからリチウムを蒸気化して放出し、670 nm 輝線発光雲の形状の時間的変化を地上から撮像することで、中性風の速度ベクトルを得ることとした。ロケット搭載計測器により直接得られる電子密度、電子温度、電場、磁場、イオンドリフト観測データと合わせて解析することで熱圏下部(高度 100km)から電離圏 F 領域(高度 300km)に至る領域での中性大気とプラズマの相互作用を研究するためのデータを取得する。

なお、リチウム散乱光観測のために地上に設置するイメージャは北海道大学と高知工科大学が担当した。この他に、名古屋大学、情報通信研究機構の協力のもとで、イメージャによる熱圏下部の大気光観測データ、イオノゾンデによる電離圏電子密度のデータのモニターが行われた。

当初のロケット打上げ予定日は 2011 年 12 月 22 日であったが、地上観測点の天候条件が満たされなかったため、延期を重ねた。最終的には翌 2012 年 1 月 12 日に 3 つの観測地点の天候条件が満たさ

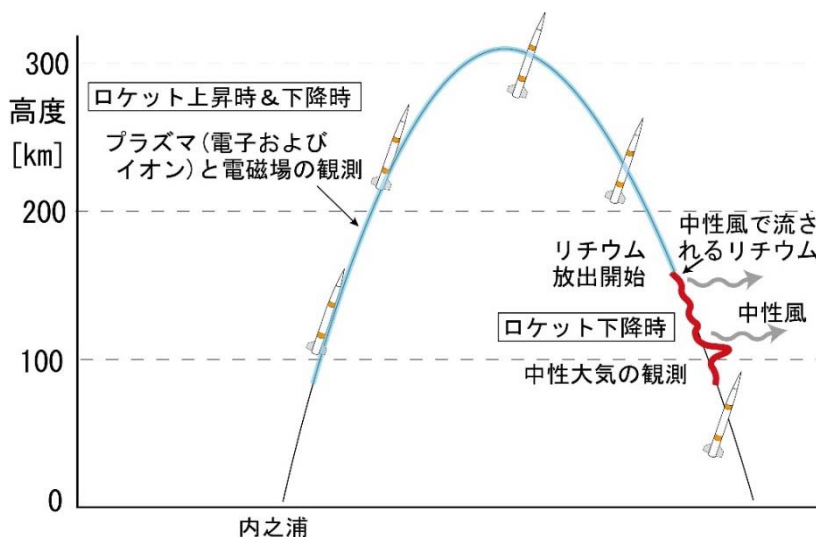


図 1. S-520-26 号機実験の概要図

れ、午前 5 時 51 分に観測ロケット S-520-26 号機は打ち上げられた。

#### 4. 実験結果

##### (1) LES (リチウムガス噴射装置) の実験結果

LES は装置に充填したテルミット剤に火工品を用いて点火し、テルミット反応によって得られる高温熱源を使って固体リチウムをその場でガス化し、外部に噴射するような設計になっている。本実験ではロケット飛翔中の頂点高度通過後の下降中に 3 回 (高度 200 km、140 km、110 km 付近) の噴射が行われるよう同じ構造の 3 台の装置をロケット頭胴部の計器板上に搭載した。しかしながら、地上に設置されたカメラによる散乱光の観測は、計画よりも遅いタイミング (低い高度) でリチウムが放出されたことを示した。

この現象について、装置に取り付けられていた温度センサデータの履歴等を参考に解析を行なった結果、最初の 2 台については CTG による点火は行なわれたが、リチウムガスはほとんど噴射されなかっただろうという解釈がなされた。噴射が行なわれなかった原因については様々な検討の結果として、SAD(Safety Arm Device)の動作不良に起因する LES 装置の不具合であるとの結論に至っている。3 台目については、予定時刻よりも約 2 秒遅れてリチウムの噴射が開始され、噴射の継続時間は当初予想よりも若干長めであった。

図 2 は地上の 3 つの観測地点で撮影されたリチウム散乱光の画像で、日本標準時の 6 時 5 分から 6 時 8 分までの撮像データを 1 分毎に示した。これらの画像データに対して数値解析的手法を適用することによって、中性風に関する情報を推定できる。次のような結果が得られた。

- a) 潮汐波によると思われる強い速度シアが熱圏下部高度 110km 付近に存在していた
- b) 潮汐波には重力波によると思われる微小スケールの擾乱成分が含まれている可能性がある
- c) 推定された中性風は中間圏・下部熱圏で用いられる HWM モデルの値とは大きく異なる

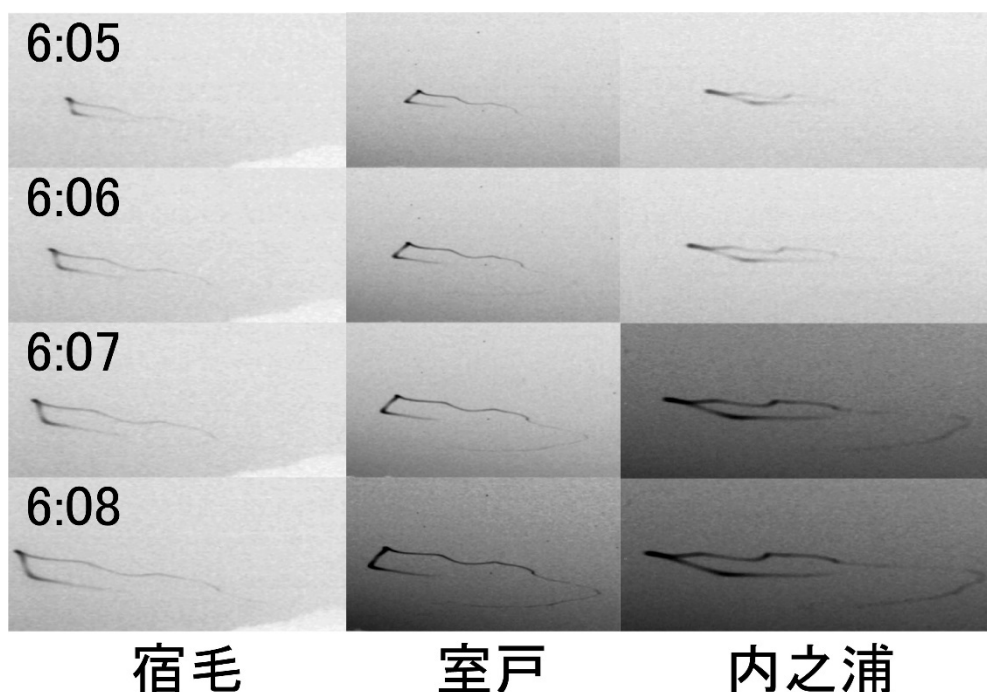


図 2. 3 つの観測地点で得られたリチウム発光画像

##### (2) NEI,DBB,FLP による電子密度と電子温度の観測

NEI (インピーダンスプローブ) は1.2 cm 径、長さ 1.2 m のリボンアンテナ(BeCu)をプローブとし、インピーダンスプローブの原理に基づいて UHR 周波数を検出し、ロケットの軌道に沿った電子密度プロファイルを高精度で推定できる。図 3 (a)と(b)は NEI の観測から導出されたロケット上昇時・下降時の電子密度プロファイルである。ロケット上昇時は高度 91.7km, 159.3 km において、ロケット下降時には高度 151.6km において周囲に比べて電子密度の高い層が確認された。高度 91.7km 付近の E 層の電子密度の最大値は  $8 \times 10^3$  /cc, 最高到達高度付近の F 層の電子密度は  $7 \times 10^4$  /cc であった。下降時の高度 143km 以下の計測データは、Lithium 放出の影響を受けている。

DBB (Dual-Band Beacon) では、観測ロケットに 2 周波 (150MHz と 400MHz) のビーコン送信機を搭載し、地上の受信機で 2 波の伝搬遅延の差を測定することによって、ロケットと地上の間の全電

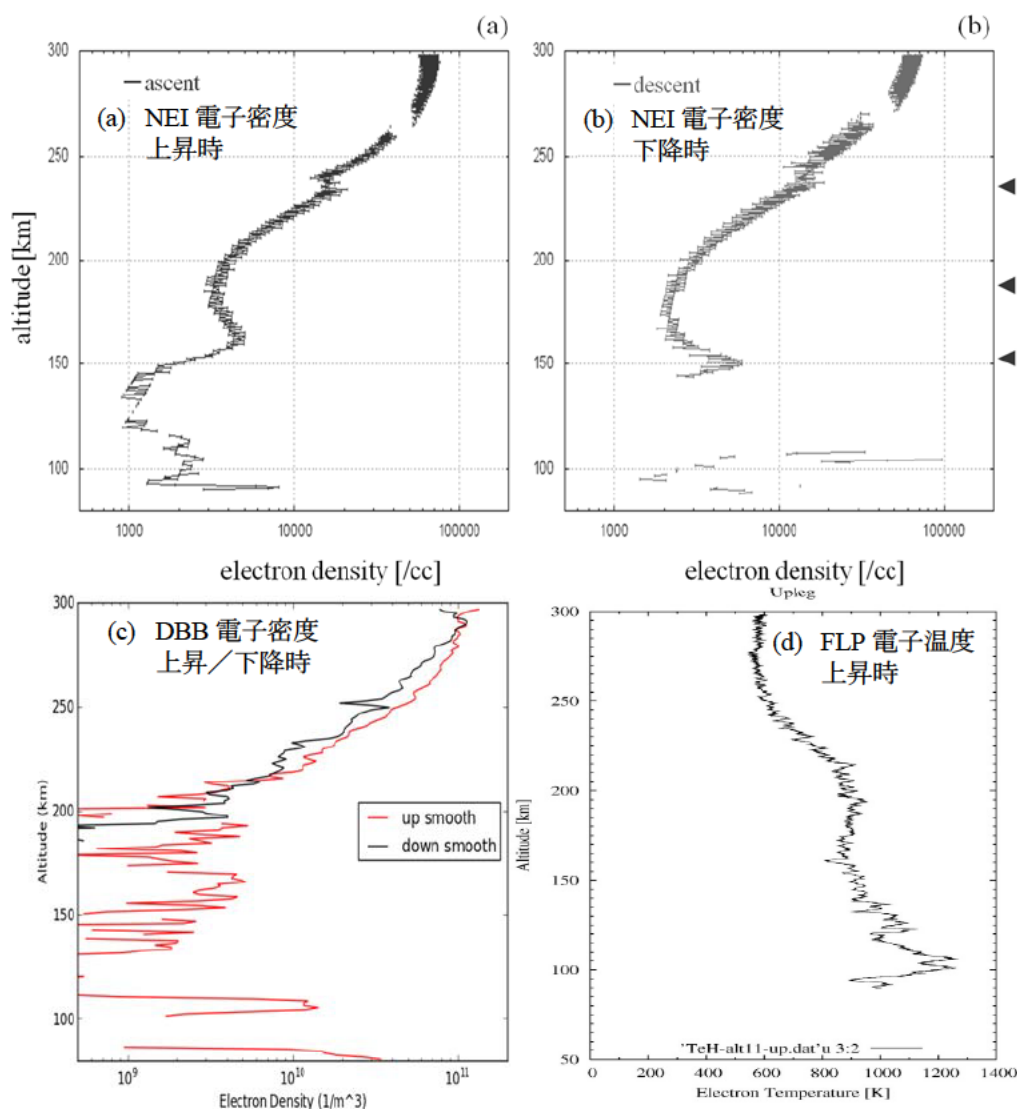


図 3. NEI, DBB, FLP 観測から推定された電子密度と電子温度の高度分布

子数(Total Electron Content; TEC)を推定する。地上の 6 ヶ所の観測点 (内之浦、垂水、薩摩川内、奄美大島、高知、信楽) に、アナログ受信機 3 台とデジタル受信機 6 台を設置した。いずれの地点においてもビーコン電波の信号受信に成功した。奄美大島、高知、信楽ではロケットの飛翔に伴うドップラー周波数の変化も観測されている。最も遠い信楽においても信号は捉えられた。図 3 (c)は DBB 観測から推定した電子密度分布である。NEI の結果と比較すると全般的な傾向については良く一致して

おり、高度 105 km、159 km 付近の局所的な増加はいずれのデータにおいても確認できる。NEI はロケット位置での局所的な電子密度を観測するのに対し、DBB ではロケットー地上間の全電子数の変化から高度プロファイルを推定しており、観測領域の違いから、このような差が生じる可能性が高い。

FLP(Fast Langmuir Probe)では直径 3 mm、長さ 200 mm のステンレス製円筒プローブを用い、標準的なラングミュアプローブの原理に基づき、得られる電流ー電圧特性から電子温度、電子密度を推定する。プローブに印加する三角波電圧の周波数は 5 Hz のため、1 秒間に計 10 セットの電流ー電圧特性が取得される。ロケットの飛行中に得られたデータへのフィッティングにより得られた電子温度の高度分布を図 3 (d)に示す。高速で飛行するロケット上の測定ではウエークの影響を受けるがここでは得られた全てのデータに対して 1 1 個の移動平均値を計算し表示することで、比較的大規模な空間構造を表現するようにした。図に示されるように、日の出直前に打ち上げられたロケットによる観測データとして、高度とともに減少する電子温度プロファイルが得られた。これは夜間に電子温度が減少し明け方に極小をむかえた後、徐々に電離圏高度に太陽光が入射するようになって、E 層へのエネルギー入力が行なわれた結果と考えている。

### (3) EFD (電場計測器) の観測結果

EFD では、ダブルプローブの原理に基づきロケット位置での電場を計測する。S-520-26 号機実験では打ち上げから 58 秒後に EFD-RA (リボンアンテナ)、66 秒後に EFD-ITA (インフレータブルアンテナ) を伸展し、観測を開始した。図 4 は電場の X 成分および Y 成分 (座標系はロケット上で定義され、いずれもスピン平面内) であり、それぞれ EFD-ITA、EFD-RA によって観測された成分である。縦軸はメインエレクトロニクスからの出力電圧[V]、横軸はロケット打ち上げからの時間[sec]を示している。この図から EFD-ITA および EFD-RA とともに正常に伸展したと思われるが、アンテナ伸展直後、アンテナの挙動が不安定になったために観測データが正常に得られなかった時間帯がある。しかし、打ち上げ後 130 秒後からはロケットが地球磁場を横切るときに生じる誘導電場が観測されていることから、正常に電場を測定していることが分かった。なお、打ち上げ後 280 秒にみられる出力電圧の増加は CAL 信号の印加によるものである。

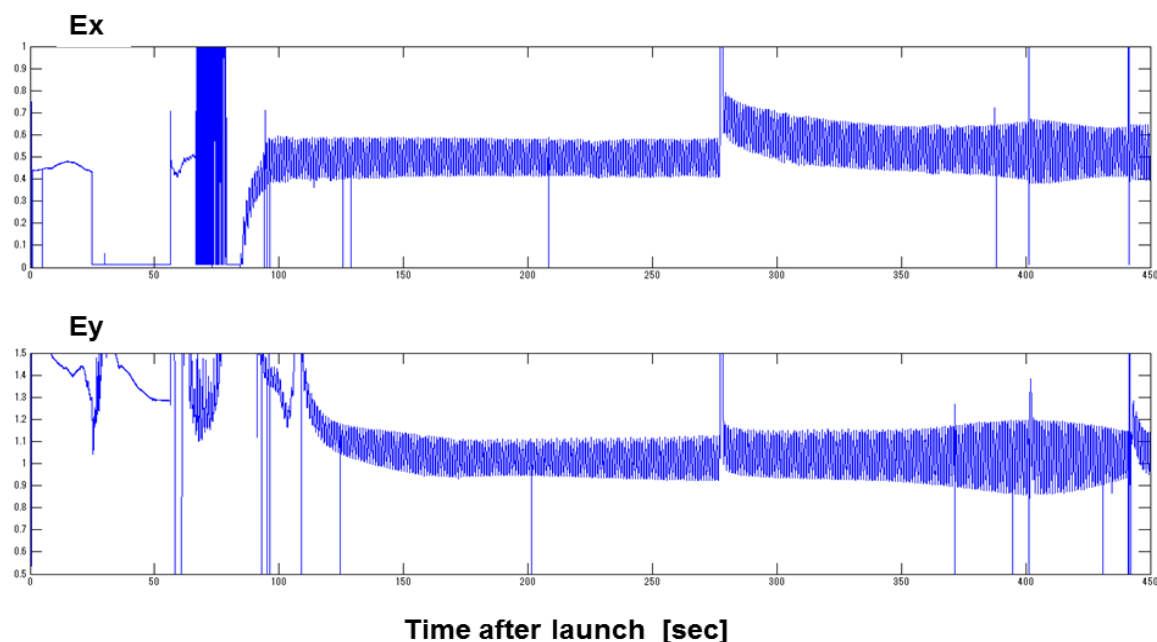


図 4. EFD が観測した電場 2 成分 (上: X 成分, 下: Y 成分)

このように EFD は飛行中正常に動作し、電場および標準電波の観測に成功した。電場観測については電離圏中の直流電場観測と 200Hz までの交流電場観測があるが、直流電場観測ではロケットが移



動することで生じる誘導電場の除去を行い、自然電場を算出することができる。交流電場観測では、太陽光が照射されたタイミングにおいて、ロケット表面から放出された光電子によるものと思われる影響が見られるため、光電子の影響が及ぶ領域の推定、低周波成分にみられた強度増加の原因についての検討が行なわれている。

#### (4) IRM(イオン質量エネルギー分析器)の不具合

IRM は電離圏中の熱的イオンの質量分析・エネルギー分析が可能な測定器である。S-520-26 号機実験にあたって、カルガリー大学（カナダ）に協力を求め、提供してもらうこととなった。本実験では中性大気－電離大気間の運動量輸送の理解に焦点をあてているが、IRM はイオンの運動（ドリフト）に関する情報を提供する重要な測定器である。ロケット打ち上げ時の IRM の動作は次の通りで期待通りの観測は行なわれなかった。

- a) 打上げ 95 秒後にトリガ信号を受け高圧オンの立ち上げシーケンスに入ったが、95.31 秒に Watch Dog Timer が異常を検出しリセット動作に入る。その後、継続的にゼロデータがテレメータに送信され、約 17 秒後にデータ取得を再開したが、高圧電源は復帰せず、質量・エネルギー分析機能を含む機器本来の大半の機能が失われた。
- b) この状態が打上げ後 238 秒まで継続、その直後に再びリセット動作に入り同様に再起動が行なわれたが、正常機能は回復せず。イオン密度に比例するスキncレントデータ以外のデータはフライトを通して取得出来なかった。

#### 推定される不具合原因

リセット動作に陥った原因として、1) 高圧サブシステム内部での異常、2) センサ内の MCP 付近での放電、の 2 つが考えられる。例えば、高圧部の小規模な放電が過渡現象を引き起こした可能性は考えられ、フリップフロップのリセットラインをトリガした等で、HV をオフにした可能性は否定できない。

高圧オンは高度 140 km にて行なわれたが、そこでの大気圧は約  $5.9 \times 10^{-6}$  Torr であり、安全な真空度と考えられた。vent hole から大気が抜け出すのに必要な時間を考慮しても支障無いレベルとみなされている。ただし、アウトガスにより真空度が十分でなかった可能性は否定できない。

### 5. まとめ

#### (1) 観測結果のまとめ

ロケット搭載の観測機器を用いて中性大気と電離大気の運動を同時に観測し、両者の結合過程を研究するための実験が 2012 年 1 月 12 日の明け方に S-520-26 号機を用いて行われた。リチウム放出器とイオン質量エネルギー分析器以外の搭載測定器は所定の観測を実施し、各々のデータを取得することに成功した。リチウムリチウム放出器は 3 台のうち点火時刻の早い 1, 2 台目において放出がなされなかったが、3 台目からは放出が行なわれ、低高度に存在する速度シアアを含む貴重なデータを取得した。イオン質量エネルギー分析器では高圧電源部の不具合のため、期待された速度データが得られなかったが、イオン密度に関する情報が得られた。表 2 は観測のまとめを示している。

これまでに得られた観測成果をまとめると次のようになる。

- a) ロケットから放出したリチウム散乱光の観測から日の出直前の中性風の観測に成功。高度 110 km 付近の速度シアアの存在を明らかにするとともに、背景が明るくなる状況下でリチウム散乱光を用いた中性風推定の限界を決定した。
- b) イオン質量エネルギー分析器の不具合により、プラズマと中性大気間の運動量輸送についての定量的議論は出来なかったが、中性風、電子密度・温度、電磁場の観測データを取得し、熱圏下部の構造についての議論を行った。
- c) プラズマ波動観測器の観測データからロケットのウエークで発生する波動についての定量的な

議論を行い、観測データを説明する十分な成長率となることを報告（査読論文として出版済）。

表 2. S-520-26 号機搭載測定器の観測結果一覧

搭載機器名	測定項目	測定結果
リチウム放出器	中性大気の風	△（3 台目のみリチウム噴射成功、開始時刻にずれあり）
イオン質量エネルギー分析器	イオン速度	×（高圧電源の不具合）
	イオン密度	○
電場計測器	電場ベクトル	○
インピーダンスプローブ・プラズマ波動測定器	電子密度	○
ラングミュアプローブ	電子温度・密度	○
ビーコン送信機	電子密度分布	○
磁場計測器/太陽センサ	ロケット姿勢	○

## (2) 開発された技術の発展性と波及効果

観測ロケット S-520-26 号機実験は科学的な成果を生み出しただけでなく、実験のために開発された技術がその後の実験に発展したり、取得したデータがその後の実験の基盤となるなど、将来につながる波及的要素を合わせ持っていた。その主なものは次の通りである。

- 中性風推定に必要なリチウム発光と背景光の比率を算出し、その後のリチウム放出実験のために重要なデータを取得した
- 本実験で生じた不具合の原因を究明し必要な改修を実行したことで、リチウム放出器の信頼性が向上し、米国のロケット実験に計 3 回使用されるなど国際的に機器搭載機会が増加した（表 3 参照）
- 電場計測用の超軽量インフレータブル方式アンテナの伸展に成功。今後、観測ロケットへの搭載が可能な事を実証。

表 3. リチウム放出器が搭載された観測ロケット一覧

実験名	時期	打上時刻	打上地
S-520-23 号機(WIND)	Sept 2007	19:20 LT	内之浦、日本
Daytime Dynamo	July 2011	10:00 LT	Wallops, 米国
S-520-26 号機(WIND-2)	Jan 2012	06:00 LT	内之浦、日本
Evex	May 2013	19:39 LT	Kwajalein, 米国
Daytime Dynamo	July 2013	14:30 LT	Wallops, 米国
S-520-27 号機	July 2013	00:00 LT	内之浦、日本