

# バリウム・リチウム発光雲を使った ダイナモ領域大気プラズマ結合過程の可視化実験

柿並義宏、渡部重十（北海道情報大）、阿部琢美（JAXA）  
羽生宏人（JAXA）、白澤秀剛（東海大）、石坂圭吾（富山県立大）、  
山本衛（京都大）、斎藤享（海上・港湾・航空技術研究所）  
津川卓也（情報通信研究機構）、吉川顕正（九州大）、山本真行（高知工大）

## Rocket experiment Visualization of Atmosphere-Plasma Coupling Process in Dynamo Region by using of Chemical Release of Barium and Lithium

Yoshihiro Kakinami, Shigeto Watanabe (Hokkaido Information University)  
Takumi Abe, Hiroto Habu (JAXA), Hidetaka Shirasawa (Tokai University)  
Keigo Ishisaka (Toyama Prefectural University)  
Mamoru Yamamoto (Kyoto University)  
Susumu Saito (National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology)  
Takuya Tsugawa (National Institute of Information and Communications Technology)  
Akimasa Yoshikawa (Kyushu University)  
Masa-yuki Yamamoto (Kochi University of Technology)

### 1. 研究の背景

電離圏の電離度は 1 %にも満たないため、電離大気の力学・熱力学に対する中性大気の影響は非常に大きい。特に、中低緯度電離圏においては、高緯度や磁気赤道域のように磁気圏からの直接の電場侵入が有効に働かないため、電離大気のダイナミクスは、中性大気による外力とそれに対する電離大気の応答が支配的であると考えられる。この中性大気と電離大気の結合過程の結果として、電離圏ダイナモが時空間的に大きなスケールの現象として知られている。一方、小さな時空間スケールの様々な現象においても両者の結合過程が重要な役割を担っていることが明らかになりつつある。プラズマバブルや伝搬性電離圏擾乱などの現象では、大気重力波によって作られる電離大気の擾乱が種となって大気変動構造が生成されると考えられているが、中性大気と電離大気の直接

的な観測による検証はない。また、大気重力波が種になる電離大気の変動は、電磁気的な不安定性によって成長し、中性大気風に起因する電流の寄与は不安定性の成長に対して大きいとされているが、未だ解明されていない。

磁力線が地面に対し垂直でない中低緯度域では、電離大気は中性大気によって磁力線方向に動かされ磁力線に沿ったプラズマの流れが作られる。逆に中性大気からみると、磁力線方向の運動はイオンから受ける抗力は小さく、磁力線を横切る方向の運動はイオンから大きな抗力を受ける。また、このイオン抗力はプラズマ密度にも比例するため、電子密度が大きい赤道異常帯では磁力線方向のイオン抗力も重要になると考えられている。電離大気の密度変動によってイオン抗力の強弱が発生し、中性大気の数値構造に反映されていると予想される。大きなイオン抗力を受けることになる磁力線を横切る中性大気の流れは電流を作り、その電流による分極電場が形成され、イオン抗力を軽減する方向に電離大気を動かすことも理論的には考えられている。中性大気から電離大気への一方向の影響だけではなく、衝突と電場を介してお互いに相互作用をしているが、理論的な予測に対して観測的な検証は不十分である。また、中性大気・電離大気間の運動量交換は赤道域においてスーパーローテーションを起こす駆動力になり、全球的な熱圏大気の循環にも影響している。しかし、素過程自体が解明されていないため、不確定な部分が多く、熱圏大気・プラズマ大循環モデルでも相互作用の詳細な物理過程は再現されていない。

DE 衛星や CHAMP 衛星は昼間熱圏大気密度が磁気赤道上で小さく、磁気緯度 $\pm 30^\circ$ で最大になることを明らかにした。また、熱圏大気の東西風は磁気赤道上で最大となる。熱圏大気がなぜ地球磁力線を知っているのか？イオン抗力、光化学過程による大気加熱が原因であるという説などが提案されているが解明されていない。

このような現象を解明するには、ダイナモ領域における大気とプラズマの相互作用を理解する必要がある。しかし、高度 100km 付近の大気とプラズマの同時かつ直接観測が困難であることから、大気とプラズマの相互作用の物理過程も未だ解明されていないのが現状である。

## 2. 科学的重要性・学術的意義

中性大気風の観測手段として熱圏大気領域で広く行われているのは、大気光干渉計と IS レーダーの二つである。630 nm 帯の大気光のドップラー速度を測定する光学干渉計は、高度 200 km から 300 km 付近までの積分値と高度方向の変動がある場合はその平均値を測定している。また、IS レーダーによるプラズマドリフトからの中性大気風の推定は、子午面風のみであり、磁力線方向のプラズマ速度から子午面風に変換するに

はモデルが必要であり不確定性が大きい。従来は、粗い時間分解能の中性大気風データをもとに大気変動の物理過程を議論してきたため、不確定な部分が大きく、現象の本質的な理解には至らなかった。

一方、プラズマ運動の観測手段として広く行われているのは、ロケットや衛星ではイオンドリフトを直接測定する手法である。地上からはレーダーや大気光を用いてプラズマ運動を測定することが可能である。どちらの手法も、比較的プラズマ密度が高い領域に限られるため熱圏電離圏の異なる条件下での状況を把握することは困難である。

熱圏大気とプラズマの結合過程を解明するために、リチウム (Li) 原子放出機器を開発しロケット実験を実施してきた。最初の実験は、WIND s :Wind measurement for Ionized and Neutral atmospheric Dynamics Study キャンペーンとして2007年9月の夕方(高度100 km 以上で日照)に実施した(図1)。2012年1月に2回目の実験を明け方に実施した。2013年7月にはNASAとの共同実験として、ワロップス実験場で昼間(地方時2時)大気の運動を観測した。2013年7月には月光を用いたLi発光観測を世界で初めて実施した。高度100 km 付近に放出されたLi発光雲は、すべての観測で中性風のシア構造や大気重力波を明瞭に示した。高度90~120 km に存在する風速~100 m/s のシアはダイナモ領域やE層・Es層と同じ領域に存在することが分かった。中間圏と熱圏、大気とプラズマを結合する重要な素過程はこの領域に存在していると言える。これまでのところLi原子を用いた中性大気観測の技術を獲得したが、大気とプラズマの運動を同時に測定していないために、高度90~120 km に存在するダイナモ領域やE層・Es層の素過程を未だ十分に理解していない。これらの実験から大気とプラズマの相互作用・結合過程で重要な領域はダイナモ領域であることが強く推論された。

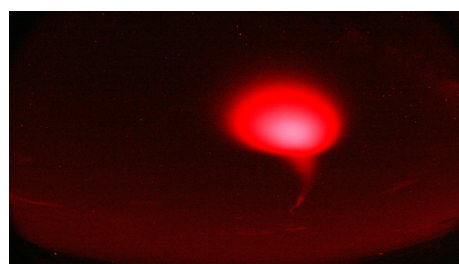


図1 内之浦から撮像したLi発光雲

プラズマ運動を計測する新たな手法としてバリウム (Ba) 原子を放出する実験がNASA主導のもと2014年11月に実施された。Baは太陽極端紫外光を受け、すぐにイオン化するため、Ba<sup>+</sup>発光雲を観測することでプラズマ運動を計測できる。代表者らの研究チームは、Cusp領域に放出されたBaがイオン化したBa<sup>+</sup>発光雲の観測し、放出後20分程度の間、プラズマドリフト速度を計測することに成功した。これまでのロケ

ット実験で確立した「リチウムガス放出による中性大気風・温度・密度測定技術」を用いて、日本でも Ba 放出機構を開発し、Li と同時放出することで、中緯度領域での中性大気風およびプラズマドリフト同時計測を実施することで、熱圏大気とプラズマの結合過程を明らかにすることができる。

中間圏・熱圏下部・電離圏内に Ba および Li ガスを夕方に放出する。Br は 1 分程度でイオン化する。Li は 671 nm, Ba<sup>+</sup>は 455 nm の波長で太陽光を共鳴散乱する。この共鳴散乱光を地上から同時に多点観測することで、高度 100 km 域の中間圏・熱圏下部大気とプラズマの運動を同時に可視化・測定する。大気とプラズマの可視化から、(1) プラズマドリフトからの電離圏電場分布、(2) 中性ガスとイオンの沿磁力線拡散から衝突周波数と沿磁力線電場強度、(3) プラズマ不安定の可視化による成長率、(4) 中性ガスとプラズマの運動の相違から分極電場等を測定することも可能である。地上観測に加え、ロケット本体にビデオカメラを搭載し、放出領域のすぐ近く、真横・上方から観測する。これにより地上観測からは検出が困難な鉛直方向のプラズマドリフト成分、大気風成分を観測し、3次元的な風系を得ることができる。

### 3. 実験方法

本ロケット実験では、S-520 ロケットに 3 台のキャニスター (Ba 用 2 台, Li 用 1 台) を搭載する。ロケット上昇時に最初の Ba 原子ガスおよび Li 原子ガスを高度 90 km に放出する (図 2)。その後 2 回目の Ba 原子ガスを 130 km に放出する。Ba のみ太陽極端紫外光を受け、すぐにイオン化する。光学フィルターを用いて Ba<sup>+</sup>:455 nm, Li:671 nm の太陽光の共鳴散乱光を分離し、地上から同時に多点観測およびロケット搭載カメラから観測することにより、中性大気風とプラズマ運動を可視化し 3 次元速度ベクトルを中性大気とプラズマに対して同時に取得する。2 回の Ba ガス放出による 10 分以上の観測から、高度 90~130 km のプラズマ運動の高度分布、1 回の Li 放出から 90 km 付近の中性大気風を取得する。この観測から分極電場を含む電離圏電場やプラズマ拡散・不安定、さらに大気・プラズマ相互作用を可視化し観測することが可能となる。特に、発光雲近くで水平もしくは上空から観測した例はない。地上からの観測のみでは鉛直方向成分を見積もることは難しいため、成功すれば世界初の成果となる。また、近い場所で観測できるため、微細な中性大気風・プラズマドリフト構造が確認できる。

背景場の基本的な情報である電場、磁場、電子密度・温度をロケット下降時に計測する。ガス放出によるこれらの計測の影響を最小限に抑えるため、頭胴部と放出装置部の分離を行う。ロケット搭載機器は表 1 にまとめる。

実験時期および実験時刻は冬季夕方、高度 90 km に太陽光が入射し地上は日陰の時

間帯に打ち上げる。

表 1 ロケット搭載機器

搭載機器名	観測項目
磁場計測器	磁場 3 成分
Ba, Li 放出機器	中性大気の風速, イオン速度
太陽センサー	太陽角
電子密度温度プローブ	電子密度・温度
電場プローブ	電場
カメラ	発光雲

本ロケット実験は地上観測との共同観測が不可欠である。電離大気の水平構造をモニターするには GNSS 受信機網による全電子数の観測が必要である。また、電離圏の鉛直構造を調べるためのイオノゾンデ網, リアルタイムでの 3 次元電離圏トモグラフィも不可欠である。電離圏ダイナモの結果として生じる地上磁場変動の観測も必要な地上観測である。地上観測から、時間的に連続な観測をすることによって、ロケット打ち上げ時の現象の背景と中間圏・熱圏・電離圏の状態を捉えることができる。また、直接観測データと地上からの

リモート観測データの比較と検証も非常に重要である。ロケット搭載計測器により直接計測される電子密度, 電子温度, 磁場・電場観測データも用いることで, ダイナモ領域における大気・プラズマの相互作用の素過程を究明する。

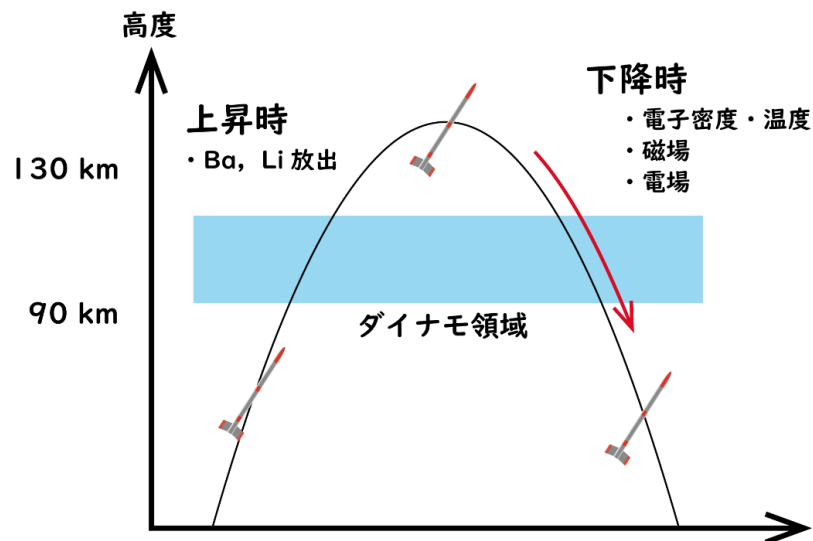


図 2 ロケット観測高度と観測する物理量

#### 4. 将来計画との関係

高度約 90 km から 300 km の中間圏・熱圏は、熱圏の力学、温度や組成構造を決める重要な領域であるが、衛星が長期間その領域に滞在せず、また、地上観測も地域的に限定されているため、十分な観測データが存在していない。鉛直方向の大気運動・密度・温度は大気構造や熱流による大気温度構造を理解する基本物理量であるが衛星では観測が困難であり、ロケットによる観測手段しかない。

近年、成層圏・対流圏への太陽活動の影響が議論されるようになり、対流圏・成層圏・中間圏・熱圏の領域間結合が注目されている。また、地震・津波・火山噴火などの地表面付近の現象により励起される超低周波音波が熱圏まで到達し、電離圏擾乱を引き起こすことが明らかになりつつある。突発的な現象のみならず、常時発生している超低周波音波が下部熱圏の重要な熱源になっている可能性も指摘され始めている。対流圏から熱圏への大気波動伝播だけでなく、中間圏・熱圏下部から成層圏への物質流入も注目されている。熱圏大気循環を考える上で、下層大気からの大気波動伝播を無視できず、大気波動や粘性は熱圏のどの領域まで影響を及ぼしているか未だ解明されていない。

熱圏には電子密度不規則構造がしばしば存在する。電子密度不規則構造の内部では、密度の変化により中性大気と電離大気間の運動量輸送量が変化していると考えられる。特に、赤道域では大規模な電子密度不規則構造（プラズマバブル）が存在し、大気波動伝播、熱圏大気大循環、熱圏スーパーローテーション、熱圏大気密度異常帯に影響を与えていると理論的に予想はされているが、観測的に確かな裏付け十分でない。

大気の密度と運動がプラズマの構造と運動の影響を受けていることを我々が明確にし、大気プラズマ結合の新たな研究が世界で始まるきっかけを作った。WINDs キャンペーンの成果に刺激され、米国でもロケット実験が活発化し日米の共同研究が進展している。日米のロケット実験の結果から、高度 100 km 付近に存在する～100 m/s の高速風とそこに存在する風速シア、ダイナモ領域への中性風の影響が熱圏大気の運動と大循環を支配している可能性が見えてきた。

本ロケット実験は、高度 100 km 付近の中間圏熱圏大気とプラズマの運動を可視化することで、大気プラズマ結合過程と中間圏・熱圏・電離圏の領域間結合を解明することを目的としている。太陽光の共鳴散乱光を用いた熱圏大気風とプラズマ運動の 3 次元速度ベクトル測定が可能となったのは、2007 年 9 月、2012 年 1 月の内之浦でのロケット実験、2013 年 7 月に実施した米国ワロップスでのロケット実験、2013 年 7 月に実施した内之浦でのロケット実験で、リチウムガス放出とその共鳴散乱光観測の技術が確立したことにある。CCD カメラの性能が近年急速に高まったことも必要条件である。この

従来にない新しい試みによって、大気プラズマ結合過程の研究さらには宇宙天気研究等の新たな展開に入ることが期待できる。また、ロケットからの発行雲観測が成功すれば、地上からの発光雲観測が難しいが、電離圏ダイナモが強い日中での観測に道筋をつけられる。

## 5. 人材の育成，教育，および社会との関わり

中間圏・熱圏下部大気の研究は、レーダー等により精力的に観測が実施されているが、直接観測を行うにはロケット実験しか方法は存在しない。学生や若手の研究者をロケット実験に積極的に参加させることで、プロジェクトの立ち上げから観測、論文としての発表までを経験させる。また、高感度カメラを用いた地上観測は誰でも可能である。前回の Li 放出実験の際には「宇宙花火」として話題となり、アマチュアカメラマンによる撮影も多く成功している。本実験を広く広報し国民の参加を促すことで、宇宙科学技術の楽しさと重要性を理解させることも視野に入れている。本ロケット実験や観測キャンペーンを通して、日本の大気プラズマ研究や観測技術を常に高いレベルで維持し若い世代に引き継ぐためにも、本ロケット実験を通して計画的な研究を遂行し将来の超低高度観測衛星への布石とする。