

RIDE キャンペーンにおける中性大気質量分析器 NMS の観測結果

#米田 匡宏¹⁾, 齋藤 昭則¹⁾, 齋藤 義文²⁾, 川島 桜也^{2,3)}, 笠原 慧⁴⁾, 横田 勝一郎⁵⁾

(¹⁾ 京都大学, (²) JAXA 宇宙科学研究所, (³) メリーランド大学, (⁴) 東京大学, (⁵) 大阪大学

Initial Results of a Neutral Mass Spectrometer for Ionospheric Observation under the RIDE Campaign

#Masahiro YONEDA¹⁾, Akinori SAITO¹⁾, Yoshifumi SAITO²⁾, Oya KAWASHIMA^{2,3)}, Satoshi KASAHARA⁴⁾, Shoichiro YOKOTA⁵⁾

(¹) Kyoto University, (²) ISAS/JAXA, (³) University of Maryland, (⁴) The University of Tokyo, (⁵) The University of Osaka

The neutral atmospheric composition is a crucial parameter for calculating plasma motion in the ionosphere, as it governs the collision frequency between neutrals and plasma. While direct in-situ measurements were common until the 1980s, they have become scarce with the rise of empirical atmospheric models. However, simultaneous observations of neutral composition alongside plasma parameters remain vital, offering higher spatio-temporal resolution and fidelity than model-based approaches.

To address this need, we have developed a compact time-of-flight (TOF) Neutral Mass Spectrometer (NMS) for the S-310 sounding rocket. In this instrument, neutral particles are introduced through an antechamber and are ionized by electron impact at the ion source. The ions are then accelerated by a 1000 Hz pulsed voltage, fly a certain distance, and reach a detector. Because the time of flight from acceleration to detection depends on the particle's mass-to-charge ratio, the mass-to-charge ratio can be calculated from the recorded time of flight. A unique feature of this instrument is its triple-reflection design during the ion flight path, which achieves a high mass resolution of approximately 200 within a compact size suitable for the 310 mm diameter structure of the S-310 rocket. This resolution is sufficient to resolve major neutral species in the ionosphere, such as N₂ and O₂. However, atomic oxygen (O) is expected to be difficult to measure directly, as it recombines into O₂ on the wall of the antechamber.

The NMS was launched aboard the S-310-46 sounding rocket from the Uchinoura Space Center at noon on July 15, 2025. This flight was conducted as part of the RIDE campaign, which aims to elucidate the formation process of sporadic E layers that appear at mid-latitudes during summer daytime. The NMS was mounted on the underside of the rocket's payload section and designed to take in neutral particles once per rocket spin during the downleg portion of the flight after the separation of the motor section. Because the ion source filament and high-voltage systems cannot operate under high atmospheric pressure, they were scheduled to be activated after launch by a timer control.

During the flight, the instrument operated successfully for approximately 48 seconds (from 180 to 228 s after launch), after which an electrical discharge terminated the measurements. Although the ion acceleration pulse was approximately 50V higher than the planned value of 560V, other high-voltage systems performed nominally. A mass spectrum of the ambient neutral atmosphere was obtained, though the in-flight mass resolution was approximately 120, lower than that achieved during ground calibrations. The data also revealed periodic variations in the count rates of several species on timescales of ten to twenty seconds. This presentation will report on the detailed mass spectrum obtained during the flight and discuss the observed temporal variations in neutral species.

電離圏における中性大気組成は中性大気とプラズマの衝突周波数に影響するため、プラズマの運動を計算する際に必要な物理量の 1 つである。中性大気組成の直接観測は観測ロケットや衛星に質量分析器を搭載することにより、1980 年代まで盛んに行われていたが、MSIS モデルなどの経験モデルの発達により近年ではほとんど実施されていない。しかし、他の電離圏プラズマに関連するパラメータと中性大気組成を同時観測することは、経験モデルと比較してより高い時空間分解能データを取得でき、現実に応じた詳細な解析が可能になるという点で依然として重要である。

そこで、我々は小型の観測ロケット S-310 への搭載を目指して、電離圏中性大気組成のその場観測を目的とした飛行時間型中性質量分析器 Neutral Mass Spectrometer (以下、NMS) の開発を行ってきた。本機器ではまず、前室部と呼ばれる粒子取り込み口から中性大気を取り込み、イオン源に導入する。イオン源にて電子衝突法によってイオン化された粒子は 1000Hz のパルス高圧により加速され、ある一定の距離を飛行した後検出器 MCP により検出される。この加速から検出までの飛行時間は粒子の質量電荷比に依存するため、飛行時間を記録することで個々の粒子の質量電荷比を求めることができる。本装置の特色は、飛行経路を 3 回反射させることにより、装置の大きさを抑えたままより高い質量分解能を実現している点にある。実際に装置は S-310 の直径 310mm のステージに収まる大きさで質量分解能は約 200 を達成しており、電離圏において主要な粒子種である O、N₂、O₂ を十分に分解できる。ただし、原子状酸素 O は反応性が高く、前室部の内壁において O₂ へと変化してしまい、直接測定することは困難と考えられる。

NMS は観測ロケット S-310-46 号機に搭載され、2025 年 7 月 15 日 12 時 00 分、鹿児島県内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。当観測ロケットは、中緯度で夏季の昼間に現れるスボラディック E 層の形成過程の解明を目的とした RIDE キャンペーンの下で、電離圏 E 領域を直接観測する役割を担った。NMS は観測ロケット頭胴部の下面に取り付けられ、頭胴部とモーター部が切り離された後、ロケット下降時にロケット 1 スピン毎に 1 回、粒子を取り込んで観測を

行う。イオン源で用いるフィラメントと各部で用いる高圧は高圧力下では起動できないため、動作可能な圧力となる高度に到達する時間にタイマー制御により起動される。

実際の打ち上げでは当初の予定通り、打ち上げ 108 秒後にイオン源が、157 秒後に各種高圧が起動された。その後、高圧の昇圧が完了した 180 秒後から、放電が生じた 228 秒後まで、約 48 秒間測定が実施された。各種高圧のうち、イオンを加速させるパルス高圧のモニター値が設定値 501V に対して約 560V となっていることが確認されたが、他のモニター値は正常な値を示していた。結果、質量分解能は約 120 と地上試験時と比較して低下しているものの、装置周辺の中性大気が成分毎に分離されたと思われる質量スペクトルが得られた。また、一部の成分のカウントレートには十数秒程度の周期的な変動が確認されている。本発表では質量スペクトルと時間変動について詳細な報告を行う。