

R005-16

A 会場 : 11/27 AM1 (9:15-10:45)

10:15~10:30:00

観測ロケット搭載用イオンドリフト速度測定器によるスποラディック E 層の観測

#加藤 千晶¹⁾, 阿部 琢美²⁾, 齊藤 昭則³⁾, 小嶋 浩嗣³⁾, 栗田 怜³⁾

(¹⁾ 京大院工, (²⁾ 宇宙航空研究開発機構, (³⁾ 京都大学

Observation of Sporadic E Layers Using a Rocket-Borne Ion Drift Velocity Analyzer

#Chiaki Kato¹⁾, Takumi Abe²⁾, Akinori Saito³⁾, Hirotsugu Kojima³⁾, Satoshi Kurita³⁾

(¹Graduate School of Engineering, Kyoto University, (²Japan Aerospace Exploration Agency, (³Kyoto university

The upper atmosphere of the Earth contains ions and electrons, along with neutral particles, which are produced by photoionization of atmospheric nitrogen and oxygen molecules by solar ultraviolet radiation. This region, known as the ionosphere, is stratified into multiple layers depending on plasma density. These layers have the property of reflecting radio waves, and communications, broadcasting, navigation, and air traffic control using shortwave and very high frequency (VHF) bands rely on this ionospheric reflection. In the ionosphere, where collisions between ions and neutral particles dominate, electric currents and polarization electric fields arise, leading to characteristic phenomena that differ from those observed in a neutral atmosphere.

One representative phenomenon is the sporadic E (Es) layer, which appears intermittently at altitudes of approximately 90 – 130 km with high probability from spring to summer and consists mainly of metallic ions such as Fe^+ and Mg^+ . The Es layer is known to strongly reflect VHF radio waves, causing anomalous propagation that can affect communication, broadcasting, and air traffic control.

In the Es layer formation region, ions are strongly affected by frictional forces due to collisions with neutral particles. As a result, ions tend to move at velocities close to the neutral wind and act as a mediator for transferring neutral atmospheric motion into the ionosphere. Furthermore, ions serve as the main medium for momentum and energy exchange between neutral particles and plasma, and accurate knowledge of their behavior is essential for understanding the interactions between plasma and neutral atmosphere during Es layer formation. Therefore, direct measurements of detailed physical quantities such as ion velocity, temperature, and density are critically important for elucidating the formation processes of the Es layer.

In this study, we have been developing an ion drift velocity analyzer capable of estimating ion drift velocity and density in the lower ionosphere. Since ground-based performance evaluation tests produced the expected results, the analyzer was installed on a sounding rocket during the summer of 2025, and an experiment was conducted to investigate the Es layer formation process. In this experiment, direct measurements of neutral and plasma particles, as well as electric and magnetic fields, were performed in the Es layer region.

The ion drift velocity analyzer consists of a Retarding Potential Analyzer (RPA) and a collector electrode. The RPA selects particles according to their energy by applying a retarding voltage as they pass through. Ions that pass through the RPA reach the collector electrode and are detected as ion currents. The collector electrode is circular, composed of 36 segmented fan-shaped electrodes. The distribution of currents from these segments is used to determine the arrival direction of ions, which, when combined with the velocity component normal to the RPA plane, yields the three-dimensional ion drift velocity.

The rocket reached an altitude of approximately 104 km, which was lower than predicted, and did not reach the altitude of maximum electron density in the Es layer. Moreover, the rocket maintained a significantly inclined attitude during flight. Consequently, the measured ion currents obtained by the analyzer were lower than expected. The instrument had been mounted so that ions would enter nearly perpendicularly when the rocket flew along its principal axis; however, due to the inclined flight attitude, ions likely had difficulty reaching the collector electrodes effectively.

In this presentation, we report on the bulk energy, temperature, and density of ions estimated from the data acquired by the analyzer.

地球の大気上層部は、太陽紫外線による大気中の窒素分子や酸素分子の光電離により、中性粒子とともにイオンや電子が重要な構成粒子となる。この領域は電離圏と呼ばれ、プラズマ密度に応じて高度ごとに複数の層として区別される。これらの層は電波を反射する性質をもち、短波帯や超短波帯の電波を用いた通信放送・測位・航空機管制などは、電離層での電波の反射を利用して行われる。イオンと中性粒子の衝突が卓越するこの領域では、電流や分極電場が発生し、中性大気のみの場合とは異なる特徴的な現象が多く存在する。

その代表的な現象の一つは、スποラディック E 層 (Es 層) である。春から夏にかけては高い確率で高度 90~130 km に散発的に発生する高電子密度の薄い層で、主に Fe^+ 、 Mg^+ などの金属イオンからなる。特に超短波帯の電波をよく反射し、通信や放送、航空機管制に使われる電波の異常伝搬を引き起こすことで知られている。

Es 層形成領域では、イオンは中性粒子との衝突による摩擦力の影響を強く受ける。このため、イオンは中性風とほぼ同じ速度で運動する傾向が強く、中性大気の運動を電離圏に伝える媒介として機能する。さらに、イオンは中性粒子とプラズマ間における運動量・エネルギー交換の主要な媒体であり、その挙動を正確に把握することは、Es 層形成過程におけるプラズマと中性大気の相互作用を理解する上で不可欠である。したがって、Es 層の形成過程解明には、イオン速度、

温度、密度といった詳細な物理量を直接計測することが極めて重要である。

これまで本研究では、電離圏下部においてイオンドリフト速度および密度を推定可能なイオンドリフト速度測定器の開発を進めてきた。地上での性能評価試験において期待される結果が得られたことから、2025 年夏期に本測定器を観測ロケットに搭載し、Es 層形成過程の解明を目的とした実験を実施した。本実験では、Es 層を形成する中性粒子およびプラズマ粒子に加え、磁場および電場の直接測定が行われた。

イオンドリフト速度測定器は、Retarding Potential Analyzer(RPA) とコレクタ電極から構成される。RPA では、粒子が通過する際にリターディング電圧を設定することにより、粒子のエネルギーを選別する。RPA を通過したイオンはコレクタ電極に到達し、イオン電流として検出される。コレクタ電極は 36 枚の扇形単電極が円型をなすように貼り付けられている。これらのコレクタ電流から生成される分布からイオンの到来方向を検出し、RPA より推定される法線方向の速度と組み合わせて 3 次元的なイオンドリフト速度を得る。

ロケットは予測よりも低い約 104 km の高度に到達したが、Es 層における最大電子密度の高度には達しなかったと考えられる。さらに、ロケットは大きく傾斜した姿勢を保ちながら飛行した。このため、本測定器で得られた電流値は予想よりも低い値となった。ロケット速度が機軸方向に近い角度で飛翔する場合にイオンが測定器に対してほぼ垂直に入射するよう測定器は取り付けられたが、今回は飛翔姿勢が斜めであったため、イオンがコレクタ電極に到達しにくかったと考えられる。

本発表では、本測定器による観測データから推定したイオンのバルクエネルギー、イオン温度、イオン密度について報告する。