

電離圏 E 領域の 3 次元空間構造の解明 —S-310-38 号機ロケット実験速報—

石坂 圭吾(富山県大), 栗原 純一(名大 STE 研), 岩上 直幹(東大理),
阿部 琢美(ISAS/JAXA), S-310-38 号機 PI 班

1. はじめに

本研究では、これまで分からなかった電離圏 E 領域プラズマの 3 次元的な空間構造を明らかにすることを目的として、E 領域における電子密度の高度分布観測および E 領域に存在するマグネシウムイオン(Mg^+)からの共鳴散乱光を S-310-38 号機観測ロケットに搭載したイメージャによって観測する。本ロケット実験は 2008 年 2 月 6 日 18:40:40 (JST)に内之浦宇宙空間観測所にて実施された。ロケットは打ち上げ後、最高高度 157 km に達した。また、搭載機器はすべて正常動作し、有益な観測が行われた。本報告では、S-310-38 号機搭載の科学観測装置による初期観測結果について述べる。

2. S-310-38 号機観測ロケット実験概要

本ロケット実験では電離圏 E 領域でのイメージャ観測を行うため、ロケット打ち上げ場所は日陰状態であるが、E 領域は日照である条件が必要である。これは、太陽紫外光の 대기によるレーリー散乱光を避けるためである。具体的には、高度 80 km 日陰、電離圏 E 領域(高度 100 km 以上)が日照を満たす時間帯、太陽の天頂角では 95.5~97 度の約 7 分間の間に打ち上げる。時刻は季節にもよるが日没から約 30 分後とする。地上一電離圏間の電波伝搬特性を観測するため、電波透過性のノーズコーンを用い、地上から電波受信を実施する。ロケット下降時には、E 領域での中性風の風速・風向を調査するために、高

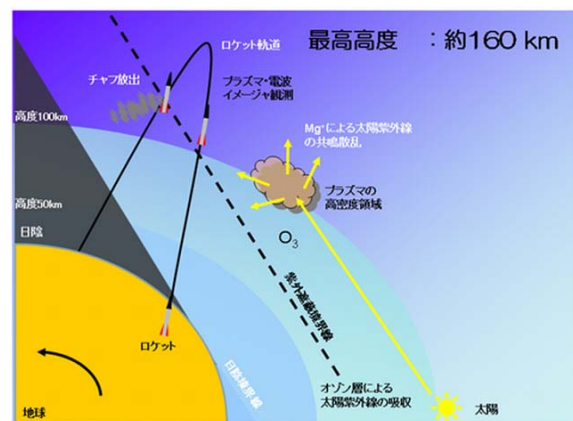


図 1 : S-310-38 号機観測ロケット実験概要

度 110 km 付近でチャフを放出する。これらをまとめた本ロケット実験計画の模式図を図 1 に示す。なおロケットの高度に関しては、高度 90 km~150 km に存在する電離圏 E 領域および高度 90 km~120 km に突発的に発生するスプラディック E 層を観測するため、最高高度は 150 km 程度とし、ロケット打ち上げ角は、80 度程度とする。また、本ロケット実験では Es 層の観測を行うため、山川 MF レーダーによるイオノグラムをモニタし、Es 層の出現を確認してからロケットを打ち上げる。さらに地上観測として、Na ライダー観測も実施する。

図 2 は S-310-38 号機に搭載された科学観測機器の外観であり、表 1 は科学観測装置一覧である。S-310-38 号機には 8 種類の科学観測装置が搭載されている。中波・長波帯電波受信機は地上から発信されている中波帯放送波 873 kHz (NHK 熊本第 2 放送, 500 kW)および電波時計用電波 60 kHz (JJY, 50 kW)をロケット軌道上で受信し、得られた電波伝搬特性から電離圏中の電子密度プロファイルを推定することができる。特に本ロケット実験では電波時計用の電波を初めて受信するが、60 kHz 電波は電離圏に侵入すると伝搬モードの変換が生じ、完全反射高度以上の領域においてもホイスラモード伝搬する。これにより、Es 層の電子密度プロファイルの

表 1 科学観測装置一覧

搭載機器名	測定項目
中波・長波帯電波受信機	中波・長波帯電波伝搬特性
Mg ⁺ 共鳴散乱光イメージャ	Mg ⁺ の共鳴散乱光
水晶摩擦真空計	中性大気密度測定
ラングミュアプローブ	電子温度・密度
チャフ放出機構	風向・風速
インピーダンスプローブ	電子密度
星撮像姿勢計	ロケット姿勢
磁場計測器	磁場



図 2 S-310-38 号機搭載科学観測装置外観

微細構造の推定が可能となる。また、地上から電波を受信することができるようループアンテナを電波透過性のノーズコーン内に展開している。これにより地上一電離圏間の電波伝搬特性が得られ、ラングミュアプローブなどが直接観測することのできない電離圏下部領域の電子密度プロファイルが推定可能である。次に電子密度プロファイルを観測するものとしてラングミュアプローブおよびインピーダンスプローブが搭載されている。ラングミュアプローブはロケットに搭載されたガラス封じ円筒型ラングミュアプローブを用いて電子温度と電子密度の測定を行う。一方、インピーダンスプローブはロケットに搭載された長さ 1.2 m のリボンアンテナ(Be-Cu)をプローブとする標準型インピーダンスプローブによって、電離圏プラズマ中の 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得ることができる。本ロケット実験では、これらの電子密度観測結果を相互比較し、クロスチェック観測が可能である。

Mg⁺共鳴散乱光イメージャは、干渉フィルター、紫外用レンズ、検出器からなる。観測時にはイメージャの視野を下方に向け、ロケットのスピンの利用して E 領域の 2 次元撮像を行い、Mg⁺共鳴散乱光の空間分布を測定する。これにより、E 領域に多量に存在し、Es 層を形成する Mg⁺の水平構造が観測できる。次にチャフによる中性風測定は、両面にアルミを蒸着した短冊状のプラスチック箔(チャフ)を数千～数万枚ロケットから放出して電波反射体とし、これを地上のレーダーで追尾し、大気の運動を精密に観測するものである。ここで、チャフはロケット下降時の高度 100km 付近で約 20,000 枚放出される。チャフ観測により、中間圏・下部熱圏での風系を高精度で直接測定し、Es 層の形成に有力な Wind shear 理論のもととなる東西風シアの観測や、電離大気にも変動を及ぼすと考えられる中性大気の不安定現象の観測を行なう。Mg⁺イメージャとチャフとの同時観測によって、Mg⁺の分布に水平方向に縞々のような構造が見えた場合、例えば KH 不安定性などとの関係があるかどうかを確認することが可能である。

本ロケットには、今回新開発されたデジタル方式フラックスゲート磁力計および水晶摩擦真空計が搭載されている。磁力計として従来のフラックスゲート磁力計の回路部の一部を改良したデジタル方式磁力計が新開発された。これにより、機器の小型軽量化、省電力化が達成でき、同時にデジタル民生部品を利用することにより安価で低雑音磁力計を実現可能である。デジタル回路部は外来ノイズや温度変化の影響を受けないため、微小な磁場変化を測定する必要のあるミッションへの応用が大いに期待される。水晶摩擦真空計は、水晶振動子のインピーダンスが気体の圧力によって変化することを利用した真空計で、10⁵Pa(地表)から 10⁻²Pa(高度 110km)までの圧力を連続的に測定が可能である。これにより、プラズマ密度の擾乱に大きな影響を持つ中性大気密度を測定することができる。これらの新開発の機器搭載は将来のプラズマ物理現象探査ミッション、惑星ミッションのための実証実験としても極めて重要である。

3. S-310-38 号機観測結果

S-310-38 号機観測ロケットは、山川イオノグラム観測によって Es 層の発生していることを確認したのち、2008 年 2 月 6 日 18:40:40 (JST)に内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられた。ロケットは、打ち上げ後 196 秒で最高高度 157 km に達した。S-310-38 号機観測実験により得られた初期観測結果を記す。

図 3 はロケット上昇時に得られたラングミュアプローブ(FLP)、インピーダンスプローブ(NEI)、中波・長波帯電波観測装置(873 kHz, 60 kHz)の観測結果である。これらのパネルの縦軸は高度[km]である。横軸はそれぞれの観測機器の出力に応じた単位になっている。なお、FLP, NEI の観測はノーズコーン開頭後(ロケット打ち上げ後 60 秒, 高度約 71 km)に行われた。873 kHz および 60 kHz 電波観測結果において、高度 84 km において 60 kHz 電波が、高度 94 km において 873 kHz の電波強度が急激に減少している。これはこれらの電波の反射高度を表している。このときの電子密度は、高度 84 km で $4.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 高度 94 km で $9.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ と推定される。ここで、FLP, NEI の観測結果から、Es 層のメインピークが高度 99 km 近傍にあり、高度方向の幅として約 8 km あり、電子密度は $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ と観測されている(図 3 中の赤の水平線)。このとき 873 kHz 電波は完全反射しておりノイズレベルとなっている、しかし、60 kHz 電波をみると電波強度に変化が見られる。これは、60 kHz 電波が電離圏に侵入した際、伝搬モードが変換し、完全反射高度である 84 km 以上の高度にも伝搬している様子を表している。また、高度 105 km および 130 km 近傍に電子密度のサブピークが見られる。このときの電子密度は $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 以下と推定される。

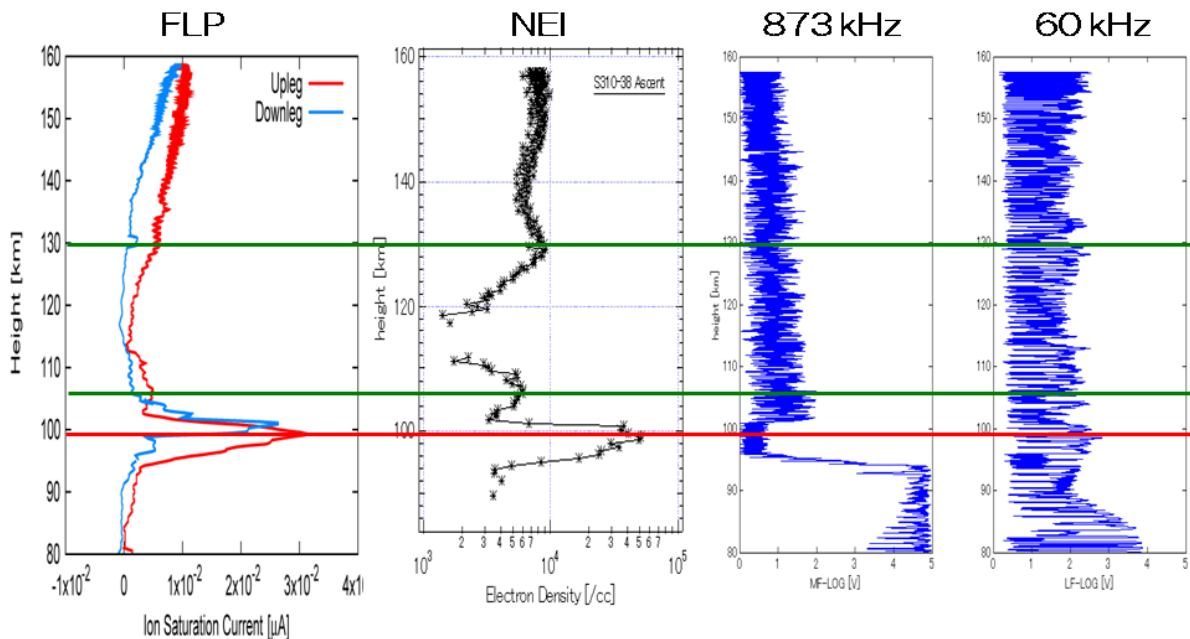


図 3 ラングミュアプローブ、インピーダンスプローブ、中波・長波帯電波観測装置の観測結果

次に、 Mg^+ イメージャによって得られた観測例を図 4 に示す。これはロケット打ち上げ後 171.5~172.9 秒、高度 154 km 付近において観測された Mg^+ 共鳴散乱光(λ 280 nm)である。これはロケットの 1 スピン周期の観測結果であるため、太陽側を向いているときは飽和しているが、イメージャの視野が反対方向を向いたときに微小な変動が見られる。反対側の変動成分をプロットしたものが右の図である。水平構造のようにも見えるが、ロケットの姿勢情報を用いてマッピングを行った上での検討が必要である。

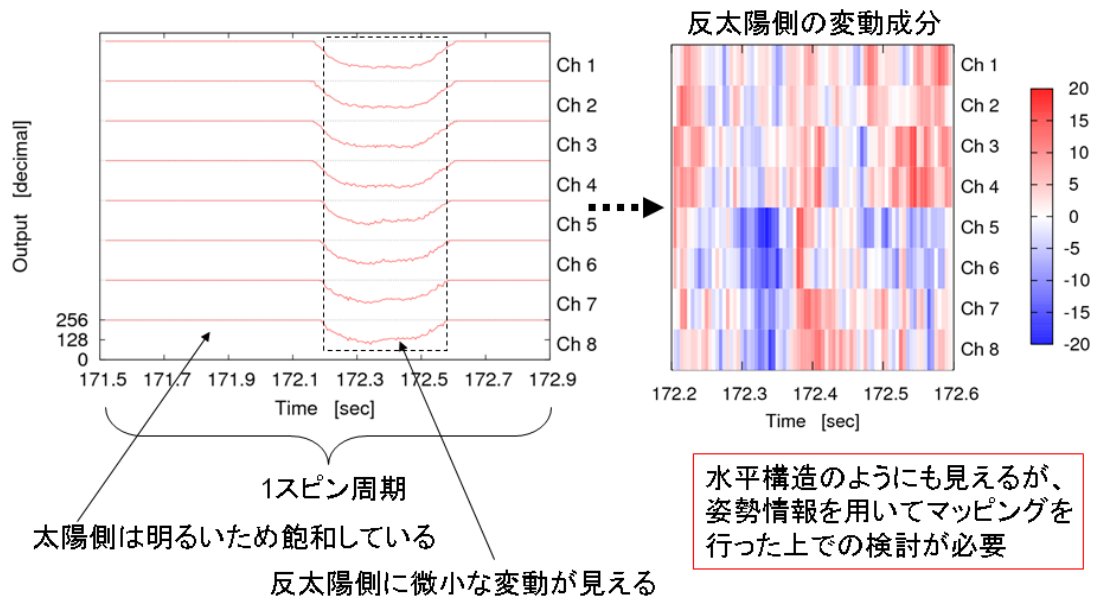


図4 Mg^+ イメージャによる観測例 (打上げ後 171.5~172.9 秒, 高度 154 km 付近)

次にチャフによる中性風の観測結果を図5に示す. チャフはロケットの下降時の高度約 109 km で放出され, 地上レーダーでの追尾を行った. なお, 放出されたチャフは 15,000 枚である. また, レーダーでの追尾は, チャフが放出されて(ロケット打ち上げ後 298 秒)から, 18:24:53.7 までの約 5 分間行われた. チャフの軌跡から風向き・風速が算出される. 図5は, チャフの軌跡より高度分解能 800 m で導出されたものである. これより, 東西風に比べて南北風が卓越していることが分かる. また, 落下速度のプロファイルから高度 93 km 付近で下向きの鉛直風が存在している可能性が示唆される.

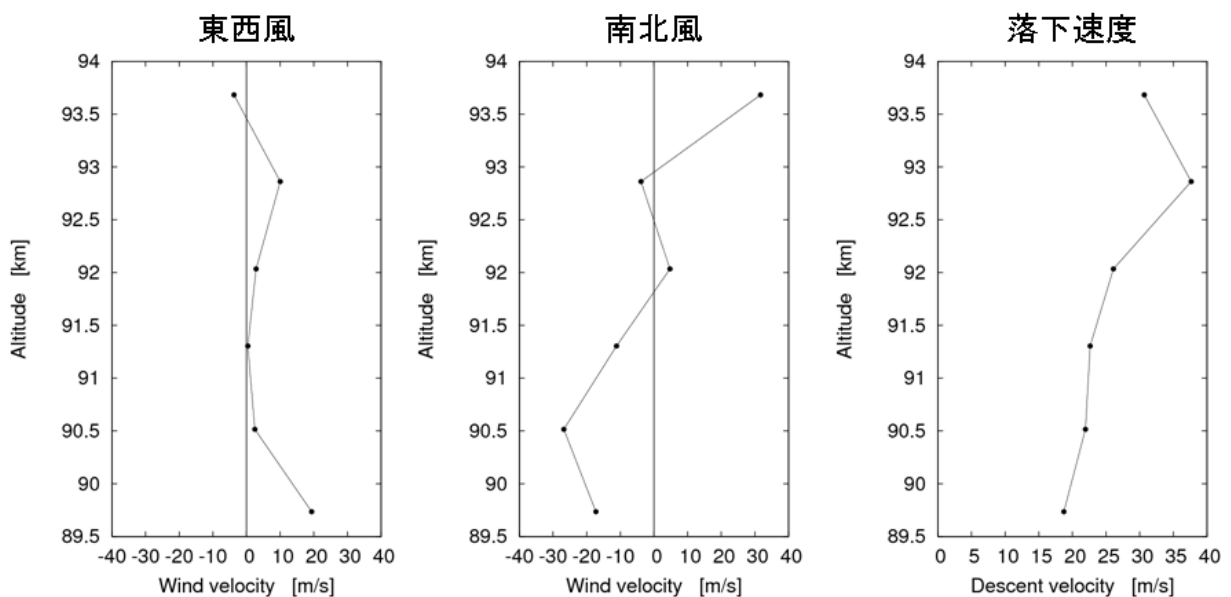


図5 チャフによる中性風の観測結果

図 6 はデジタル方式フラックスゲート磁力計の観測結果である。図 6 左図を見るとロケットのスピンの周期はノーズコーンが開頭されてから、ほぼ 1.5 Hz で一定になっている。また、図 6 右図の磁場成分をみるとゆっくりとした変動が見られているが、それほどロケットの姿勢は乱れていないと推測される。以上のことから本ロケット実験において初めて搭載されたデジタル方式フラックスゲート磁力計は正常に動作しており、宇宙空間での動作が実証された。

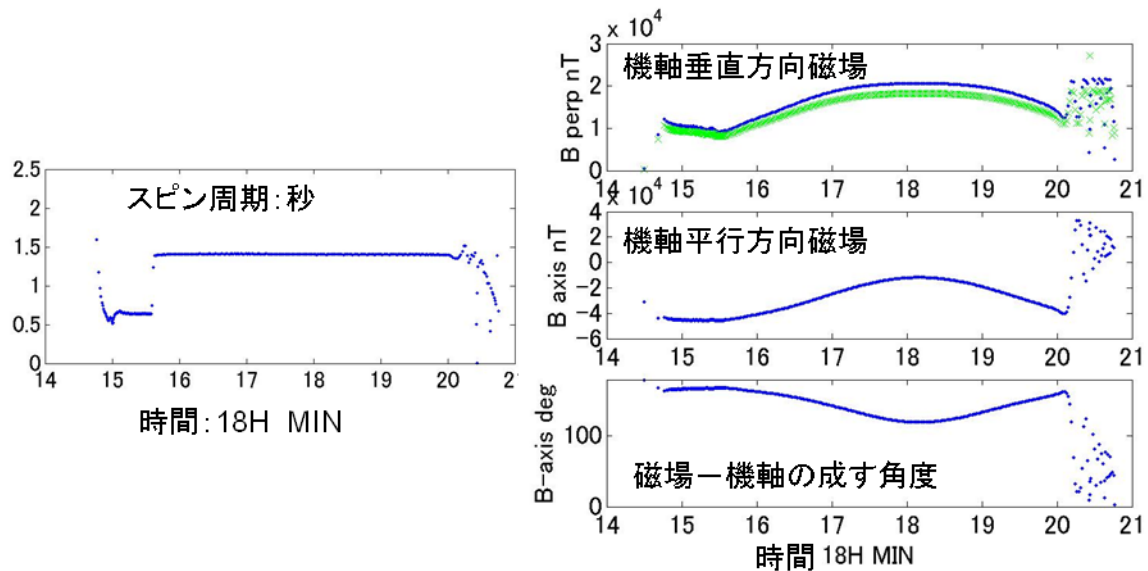


図 6 デジタル方式フラックスゲート磁力計による観測結果。(左：スピン周期，右：磁場成分)

4. まとめ

本報告では 2008 年 2 月に打ち上げられた S-310-38 号機観測ロケットに搭載された科学観測装置の初期観測結果について述べた。搭載機器はロケット飛翔中、正常動作し、電離圏 D 領域および Es 層中の有益な観測が実施できた。電離圏中の電子密度プロファイルを計測するために搭載されたラングミュアプローブ、インピーダンスプローブ、中波・長波帯電波観測装置によって得られた結果から、高度 99 km 付近に電子密度が急激に増加している領域が見られる。これは Es 層を観測したものと推測される。なお、観測された Es 層の高度方向の幅としては約 8 km あり、電子密度は $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ と観測された。また、高度 105 km および 130 km 近傍に電子密度のサブピークが観測された。このときの電子密度は $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 以下であると推定された。本ロケット実験で初めて Mg^+ のイメージャ観測が行われ、高度 150 km 以上の領域で Es 層に存在している Mg^+ の共鳴散乱光が観測された。さらにチャフによる中性風観測も実施され、ロケット下降時の高度約 109 km から観測開始した。その結果、東西風に比べて南北風が卓越していることが得られた。また、チャフの落下速度のプロファイルから高度 93 km 付近で下向き鉛直風の存在が示唆された。本ロケット実験において新開発されたデジタル方式フラックスゲート磁力計は、ロケット軌道上において正常動作し、宇宙空間での動作が実証された。

本ロケット実験は、世界で初めて電離圏 Es 層を直接観測、電波、イメージャを用いて、総合的に観測した。今後、各観測装置によって得られた観測結果を総合し、Es 層の精密な電子密度構造の調査を行い、Es 層内の電子密度の 3 次元的な空間構造を調査する。また、電離圏 E 領域プラズマの 3 次元的な空間構造を明らかにすることにより、近年盛んに研究が行われている FAI の発生メカニズムの解明に寄与できると期待できる。