

S-310-38 号機ロケット実験における

Mg⁺共鳴散乱光を用いた電離圏の 3 次元構造観測<速報>

○栗原純一、栗原宜子（名大 STE 研）、岩上直幹（東大理）、
石坂圭吾（富山県大）、阿部琢美（ISAS/JAXA）

1. はじめに

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 領域に存在するマグネシウムイオン (Mg⁺) からの共鳴散乱光を観測ロケット S-310-38 号機に搭載したマグネシウムイオンイメージャ (Magnesium Ion Imager: MII) によって観測した。

紫外域に 279.6nm と 280.3nm の二つの輝線を持つ Mg⁺ の共鳴散乱光は、成層圏のオゾン層による紫外光吸収を受けるので地上からの観測は不可能である。一方、宇宙空間から衛星によって Mg⁺ 共鳴散乱光を観測して Mg⁺ の全球的な分布を調べる研究[1]や、観測ロケットによって Mg⁺ の高度分布を求める実験[2]などの 1 次元の観測は古くから行われている。1978 年には高度 42km 付近まで到達した気球に搭載した広角カメラによって、Mg⁺ 共鳴散乱光の 2 次元分布画像が試験的に初めて撮影された[3]が、Mg⁺ の水平構造の解明には至っていない。

一方、地球大気の高さ 100~120km 付近の電離圏 E 領域に、スプラディック E (Es) 層と呼ばれる電子密度の非常に高い層が突発的に発生する現象がある。Es 層は電波障害の原因としてもよく知られている。最近、この Es 層と沿磁力線イレギュラリティ

(Field-Aligned Irregularity; FAI) との間に密接な関係があることが分かってきた[4]。ロケットやレーダー観測の結果などから、Es 層が水平方向に数十 km スケールの不均一な構造を持つと仮定すれば、それに伴う分極電界によって FAI が発生するという説が提唱されている[5][6][7]。しかしながら、これまでそれを実証できるような E 領域プラズマの 3 次元構造を観測する手段が存在しなかった。

Es 層の生成には、電子との再結合反応の遅い金属イオンが集積することが必要とされる。実際に、ロケット観測によって金属イオン (Fe⁺, Mg⁺ 等) が Es 層内で多量に検出され、イオン組成を支配していることがわかっている[8]。これらの金属イオン中でも特に Mg⁺ の密度は電子密度に非常によく比例するので、もし Mg⁺ の 3 次元的な分布を知ることができれば、Es 層内の電子密度の 3 次元構造がわかることになる。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とって、E 領域プラズマの 3 次元的な空間構造が明らかになることは極めて重要である。

そこで本研究では、観測ロケット S-310-38 号機に Mg⁺ 共鳴散乱光を測定するイメージャを搭載して Es 層を上方から撮像する実験を試みた。

2. Mg⁺共鳴散乱光観測の原理

図1にMg⁺共鳴散乱光観測の模式図を示す。日出前・日没後の薄明時には、太陽光は一旦地球大気をかすめて上空の電離層を照らす。この時、太陽光の紫外線は、電離層のMg⁺に到達するまでに成層圏のオゾン層を通過する距離 (l_1) がMg⁺の存在する高度によって異なり、紫外遮蔽境界線以下の高度では完全に遮蔽されて到達できない。共鳴散乱光を発するのは紫外遮蔽境界線より高い高度 (l_2) に存在するMg⁺である。観測される共鳴散乱光の強度 $4\pi I[\text{Mg}^+]$ は、

$$4\pi I[\text{Mg}^+] = \int F_\lambda \exp\left(-\sigma[\text{O}_3] \int n[\text{O}_3] dl_1\right) \cdot \sigma[\text{Mg}^+] n[\text{Mg}^+] dl_2 \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、 F_λ は大気外における太陽紫外線の強度、 $\sigma[\text{O}_3]$ はオゾンの吸収断面積、 $\sigma[\text{Mg}^+]$ はMg⁺の共鳴散乱断面積、 $n[\text{O}_3]$ 、 $n[\text{Mg}^+]$ はそれぞれオゾンとMg⁺

の密度である。ところで、紫外域では中性大気分子によるレーリー散乱の効果が強くなる。レーリー散乱光の強度 $4\pi I[\text{Air}]$ は、同様にして、

$$4\pi I[\text{Air}] = \int F_\lambda \exp\left(-\sigma[\text{O}_3] \int n[\text{O}_3] dl_1\right) \cdot \sigma[\text{Air}] n[\text{Air}] dl_2 \quad (2)$$

と表される。 $\sigma[\text{Air}]$ と $n[\text{Air}]$ は中性大気分子のレーリー散乱断面積と密度である。

太陽光の入射角度（太陽天頂角）の変化とともに紫外遮蔽境界線の高度も変化するので、視線方向のMg⁺共鳴散乱光の強度は時々刻々と変化する。その強度の時間差分を取れば、Mg⁺密度の視線方向における高度分布を測定することができる。さらに、イメージャを用いて2次元的にMg⁺共鳴散乱光の画像を取得すれば、Mg⁺密度の3次元構造がわかる。

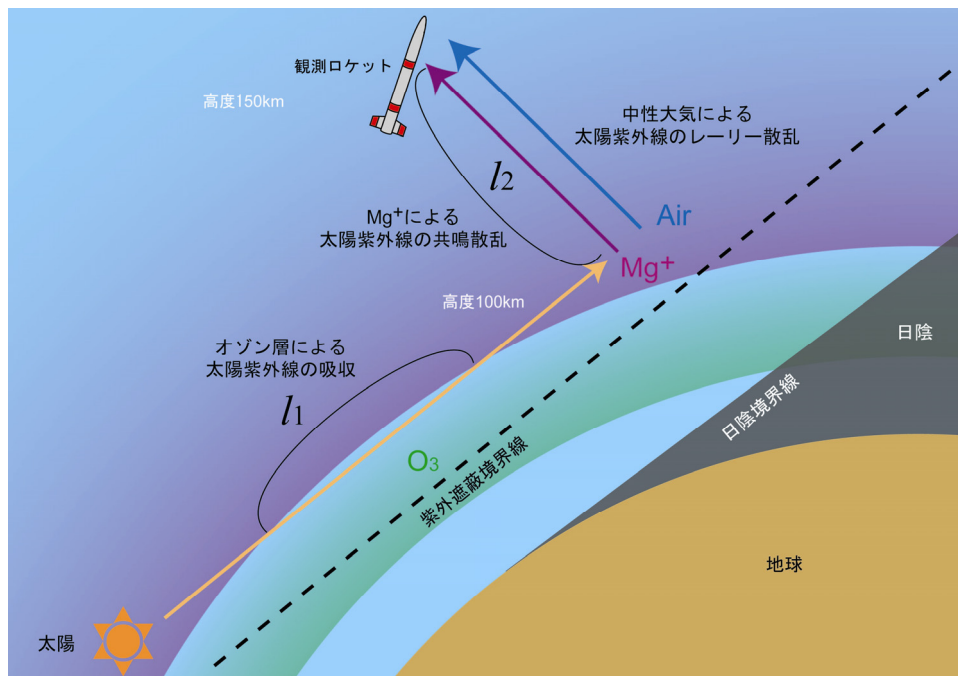


図1. 観測ロケットによるMg⁺共鳴散乱光観測の模式図

3. 観測されるMg⁺共鳴散乱光強度のシミュレーション

Mg⁺は主に高度 100km付近に密度のピークを持つのにに対して、中性大気密度は高度が下がるとともに指数関数的に増加する。そのため、太陽天頂角が小さく紫外遮蔽境界線が低い場合には、Mg⁺共鳴散乱光よりもレーリー散乱光が相対的に強くなり、観測が困難になる。

そこで、Mg⁺、オゾンおよび中性大気の密度の高度分布のモデルを用いて、式(1)(2)から観測されるMg⁺共鳴散乱光とレーリー散乱光の強度のシミュレーションを行った。

図2は太陽天頂角が 94~97 度の場合に、Mg⁺共鳴散乱光とレーリー散乱光の強度の高度分布を計算した結果である。レーリー散乱光は観測器の干渉フィルタの中心波長を 280nm、半値幅を 15nmとして計算した。この図からわかるように、太陽天頂角 95 度以下では紫外遮蔽境界線が高度 80km以下にあるため、レーリー散乱光が相対的に強い。また、太陽天頂角が 97 度以上になると紫外境界線が高度 100km以上になるので、Mg⁺共鳴散乱光自体が弱くなってしまう。したがって、太陽天頂角 96 度前後が観測に最適であると予想される。

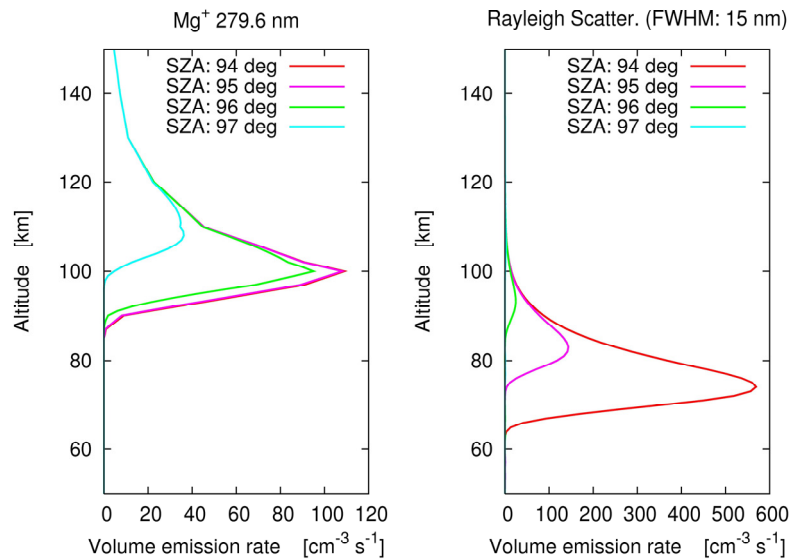


図2. Mg⁺共鳴散乱光（左）とレーリー散乱光（右）の強度のシミュレーション

4. Mg⁺共鳴散乱光イメージャ (MII)

MII は干渉フィルタ、石英対物レンズ、1次元マルチアノード光電子増倍管および信号処理回路で構成される。MII の仕様と構造図をそれぞれ表1と図3に示す。

MIIの光軸方向を観測ロケットのスピ

軸から 150 度（下方斜め 30 度方向）に設置した（図4）。1次元センサであるため、瞬時視野は1度×10度だが、周期約1秒のスピン運動により、半径30度・幅10度のドーナツ状の視野を持つことになる（図5）。観測ロケットの高度がMg⁺発光層より高い

場合には、 Mg^+ 共鳴散乱光の水平構造をスピン周期でドーナツ状に走査し、さらにロケットの移動に伴って南東方向に 100km 程度走査する。それに加えて日没による太

陽天頂角の変化に伴って紫外線の遮蔽高度が変化するため、高度方向の情報も加えた 3 次元的な空間構造を調べることができる。

表 1．MII の仕様

視野		$1^{\circ} \times 10^{\circ}$
サンプリングレート		5 ms
分解能		8 bit
フルスケール		112 kR
干渉フィルタ	中心波長	278.4 nm
	半値幅	16.3 nm
	中心透過率	22.6 %
石英対物レンズ	焦点距離	50 mm
	有効径	28 mm
1 次元マルチアノード 光電子増倍管	型番	R5900U-03-L16
	使用素子数	8 ch (全 16 ch)
	素子サイズ	$0.8 \times 16 \text{ mm}$
	波長範囲	185 - 650 nm
	感度ピーク波長	420 nm

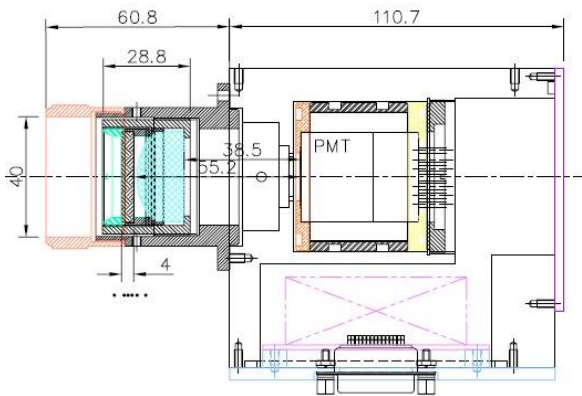


図 3．MII の構造図

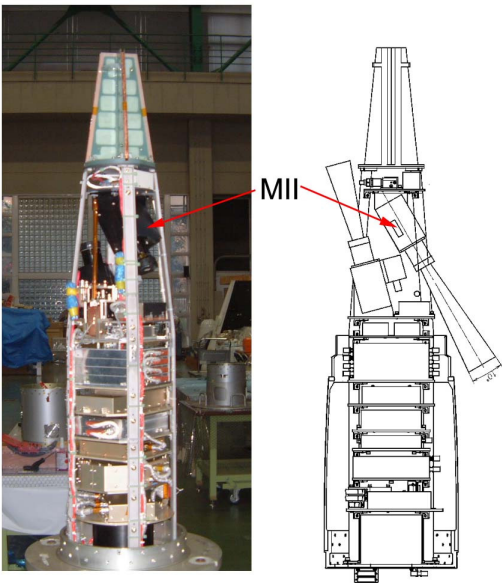


図 4．観測ロケット S-310-38 号機の頭胴部と MII の搭載位置

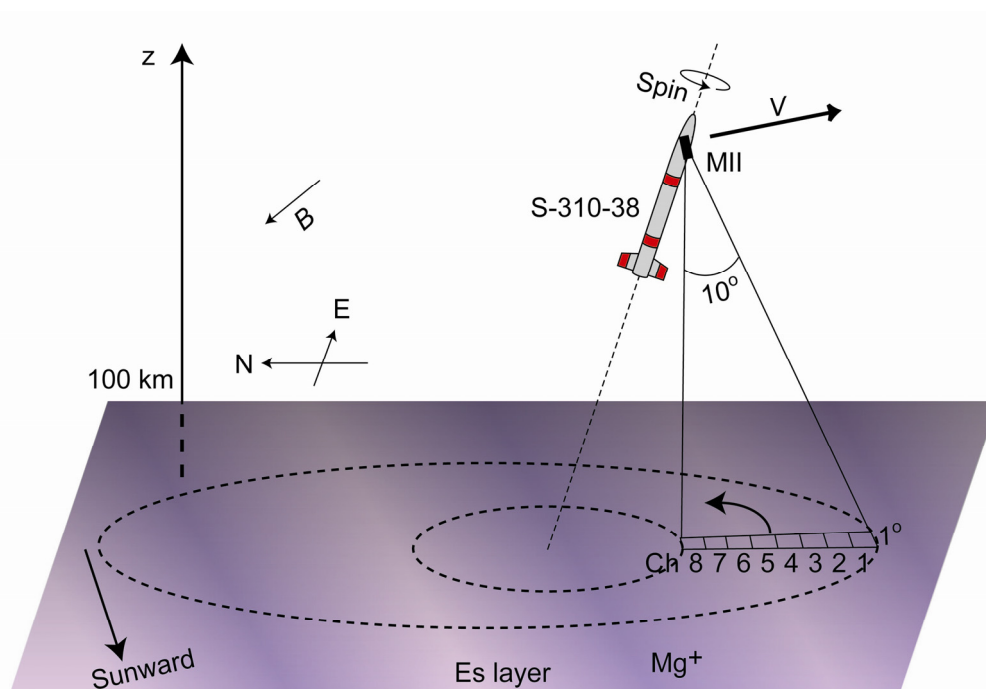


図 5. S-310-38 号機搭載 MII による観測の模式図

5. S-310-38 号機実験の初期結果

MIIを搭載した観測ロケットS-310-38号機は2008年2月6日18時14分40秒(JST)に鹿児島県の内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられ、 Mg^+ 共鳴散乱光の観測に成功した。山川にあるアイオノゾンデによってEs層の出現を確認したうえで、軌道上の最高高度付近で太陽天頂角が96度になるように太陽天頂角95度の時刻に打ち上げを行った。

現時点では観測ロケットの姿勢データの詳細が判明していないため、初期解析の結果に限られるが、MIIによる観測の一例を示す。図6は打上げ後171.5～172.9秒の高度154km付近の1スピン(スピン周期は約1.4秒)分の各チャンネルのデータを並べたものである。観測ロケットから見て太陽側に対応する171.5～172.2秒および172.6～172.9秒はレーリー散乱光が明るいために

出力が飽和しているが、反太陽側は比較的に暗く、データに微小な変動が確認される。また、チャンネル間で変動成分の大きさが異なっていることがわかる。

図6の反太陽側のデータについてバンドパスフィルタをかけて変動成分を抽出し、画像化したものが図7である。変動成分にはチャンネルにまたがる構造が確認される。変動の大きさは明るさにして10kR程度である。この構造は固定ではなく、時間の経過と共に移動していく様子も捉えられており、 Mg^+ 共鳴散乱光の空間的な変動の可能性が高い。しかしながら、観測ロケットの正確な姿勢が判明し、MIIの視野方向が確定するまで真偽は定かではない。今後、他の測定器による観測結果とも照合して詳細な解析を行うことにより、Es層の空間構造が明らかになることが期待される。

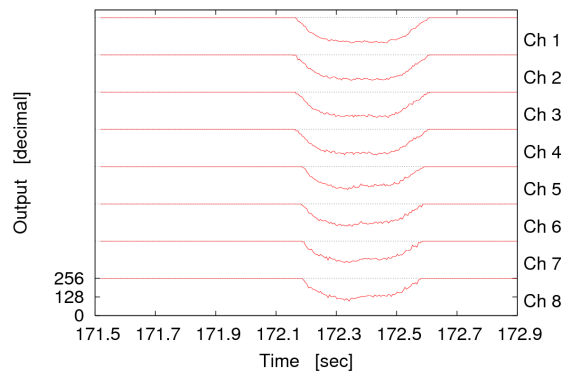


図 6 . MII の観測結果の一例

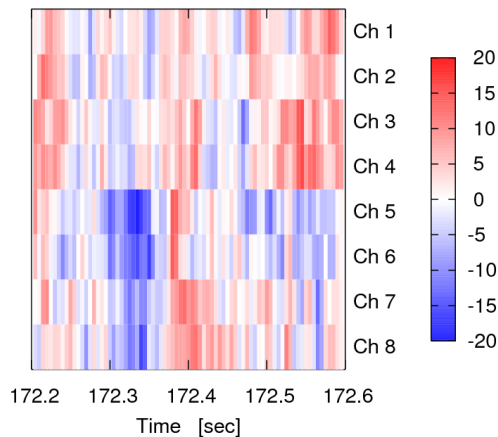


図 7 . 図 6 の反太陽側の変動
成分を抽出し画像化した図

参考文献

- [1] Joiner, J., and A. C. Aikin, Temporal and spatial variations in upper atmospheric Mg^+ , J. Geophys. Res., 101, 5239-5249, 1996.
- [2] Anderson, J. G., and C. A. Birth, Rocket investigation of the Mg I and Mg II dayglow, J. Geophys. Res., 76, 3723-3732, 1971.
- [3] Valenzuela, A., O. Bauer, and G. Haerendel, Balloon observations of ionospheric magnesium ions, J. Atmos.

Terr. Phys., 43, 785-788, 1981.

- [4] Ogawa, T., O. Takahashi, Y. Otsuka, K. Nozaki, M. Yamamoto, and K. Kita, Simultaneous middle and upper atmosphere radar and ionospheric sounder observations of midlatitude E region irregularities and sporadic E layer, J. Geophys. Res., 107, doi:10.1029/2001JA900176, 2002.

- [5] Haldoupis, C., K. Schlegel, and D. T. Farley, An explanation for type 1 radar echoes from the mid-latitude E-region ionosphere, Geophys. Res. Lett., 23, 97-100, 1996.

- [6] Tsunoda, R. T., On polarized frontal structures, type-1 and quasiperiodic echoes in mid-latitude sporadic-E, Geophys. Res. Lett., 25, 2641-2644, 1998.

- [7] Maruyama, T., S. Fukao, and M. Yamamoto, A possible mechanism for echo striation generation of radar backscatter from mid-latitude sporadic E, Radio. Sci., 35, 1155-1164, 2000.

- [8] Roddy, P. A., G. D. Earle, C. M. Swenson, C. G. Carlson, and T. W. Bullett, Relative concentrations of molecular and metallic ions in midlatitude intermediate and sporadic-E layers, Geophys. Res. Lett., 31, doi:10.1029/2004GL020604, 2004.