

超熱的イオン質量分析器の開発

浅村和史 (JAXA)、齋藤義文 (JAXA)、横田勝一郎(大阪大)、滑川拓 (JAXA)

1. 目的

地球上層大気・磁気圏に存在するプラズマは、数eV以下から数MeV以上の広いエネルギー範囲にわたって存在している。この中で、数eV 程度以下のイオンは、地球から20Re (Re: 地球半径) 程度離れた領域で観測されるなど、地球電離圏外にも広く分布することが分かってきた。また、磁気圏では、極域電離圏起源と考えられる重イオン (O⁺) が観測される。電離圏におけるイオンの典型的エネルギーは 0.1eV 程度であり、磁気圏へと流出するためには何らかの加速・加熱が必要である。しかし、諸説あるものの、イオン流出機構の解明には未だ至っていない。この加速・加熱過程の解明には 1eV 程度以下から100eV 程度にわたるイオンの直接観測が望まれる。ところが、数eV 程度以下のイオンをエネルギー・質量・到来方向弁別を行って観測することは簡単ではないため、観測例は限定的にしか存在しない。また、数eV程度以下のイオンを観測する場合、衛星速度の影響が無視できない。一方でプラズマ粒子の計測においては全ピッチ角をカバーした観測が重要となる。衛星速度方向と磁場方向の関係は軌道運動に伴って変化するため、効率の良い観測を行うためには観測器側に視野方向を変更できる機能が必要となる。

私たちはこれまで、観測ロケット SS520-3 搭載用の超熱的イオン質量分析器 (TSA) を開発してきた。本研究ではこの開発をさらに進め、現在ワーキンググループとして活動している FACTORS 衛星計画への搭載を念頭に、 $\sim 1\text{eV/q} \sim 100\text{eV/q}$ をカバーし、円周状の視野と視野方向変更機能 (仰角方向への変更機能)、さらに質量分析機能をもったイオン観測器を開発する。

2. 観測原理

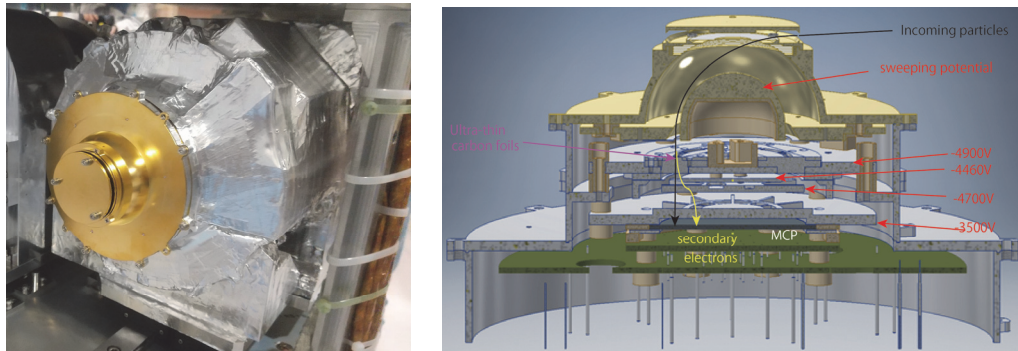


図1: (左) 観測ロケット SS520-3 に搭載されたTSA、(右) TSA センサー部断面図。

表1: TSAの仕様

	TSA
エネルギー範囲	$< 1 \sim 100\text{eV/q}$
視野範囲	330度×5度 (FWHM)
エネルギー分解能	10～30% (FWHM)
角度分解能	5度×30度 (FWHM)
質量分解能	H ⁺ , He ⁺⁺ , He ⁺ , O ⁺
感度	$1 \sim 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ sr eV/eV} / 30\text{deg}$

図1 は観測ロケット SS520-3 に搭載した超熱的イオン質量分析器 (TSA) の写真とセンサー部断面図である。エネルギー分析部にはトップハット形状を採用しており、センサー単体ではほぼ 360度の平面状の視野を確保可能な形状としている。このような視野形状の場合、観測器の搭載位置を工夫することで、人工飛翔体のスピン運動を利用して全方位 (4π str) をカバーすることが可能となる。また、質量分析には飛行時間分析 (TOF: Time-Of-Flight) 法を用いる。TSAでは入射粒子に超薄膜カーボンを通過させ、通過時にたたき出された二次電子と入射粒子自体を検出し、その検出時間差から入射粒子の速度を導出する。前段のエネルギー分析部で入射粒子のエネルギー (実際にはエネルギー/荷電数) が分かっているため、速度を計測することで 質量 (実際には質量/荷電数) を導くことができる。また、表1に TSA の仕様を示す。

3. 2021 年度の状況

3.1 SS520-3

観測ロケット SS520-3 は2021年11月4日にノルウェー・ニューオルソンから成功裏に打ち上げられた。SS520-3 に搭載された TSA もタイマー項目に従って機器伸展、高圧オンなどが行われ、超熱的イオンの観測に成功した。図2 は取得されたイオンのカウントの時系列をエネルギービン毎に示したものである。50eV/q 以上のエネルギー範囲は別の観測器 (IMS) でも計測しており、オーバーラップしている範囲の観測結果は良い一致を示していた。また、IMS の観測結果はさらに別のイオン観測器である LEP の結果ともよく一致しているとともに、カスプ領域の特徴を示すものであった。

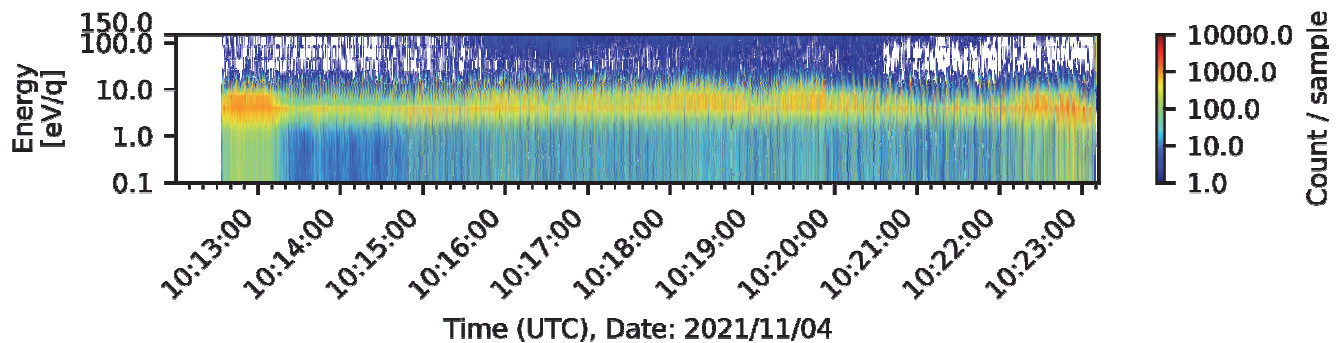


図2: 観測ロケット SS520-3 搭載 TSA によって観測された超熱的イオンのエネルギースペクトル。

3.2 電氣的視野変更・感度変更機構の設計

本年度は SS520-3 TSA の設計を基に電氣的視野 (仰角) 変更機構および感度変更機構を付加する設計を計算機シミュレーションにより行った。図3 は設計した観測器エネルギー分析部の断面図である。この形状を用い、内球電位を固定しながら視野変更電極に印加する電圧 (図3 の V_u および V_d) を変えて粒子軌道を計算した結果を図 4に示す。また、図5 は視野変更電極電圧設定を変更しながらエネルギー・入射角 (仰角) 応答特性を計算した結果である。仰角方向に -40 度から $+40$ 度の範囲を 5度程度の分解能で視野変更できることが分かる。次に同形状で感度変更性能を確認した。感度変更は感度変更電極に電位 (図3 の V_a) を与えることで行う。精密な繊維制御が必要となるが、10eV/q 程度の入射エネルギー (内球電位 -20 V) に対し 1/100~1/1000 程度の感度抑制を実現している。

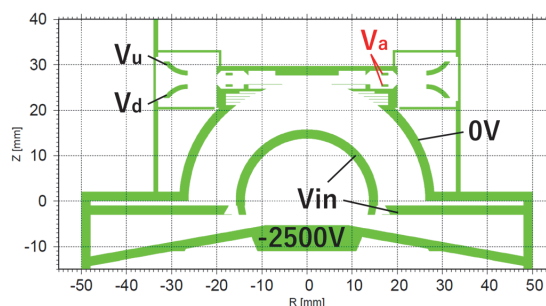


図3 設計した観測器エネルギー分析部の断面図。 V_u , V_d は視野方向変更電極、 V_a は感度変更電極を示す。

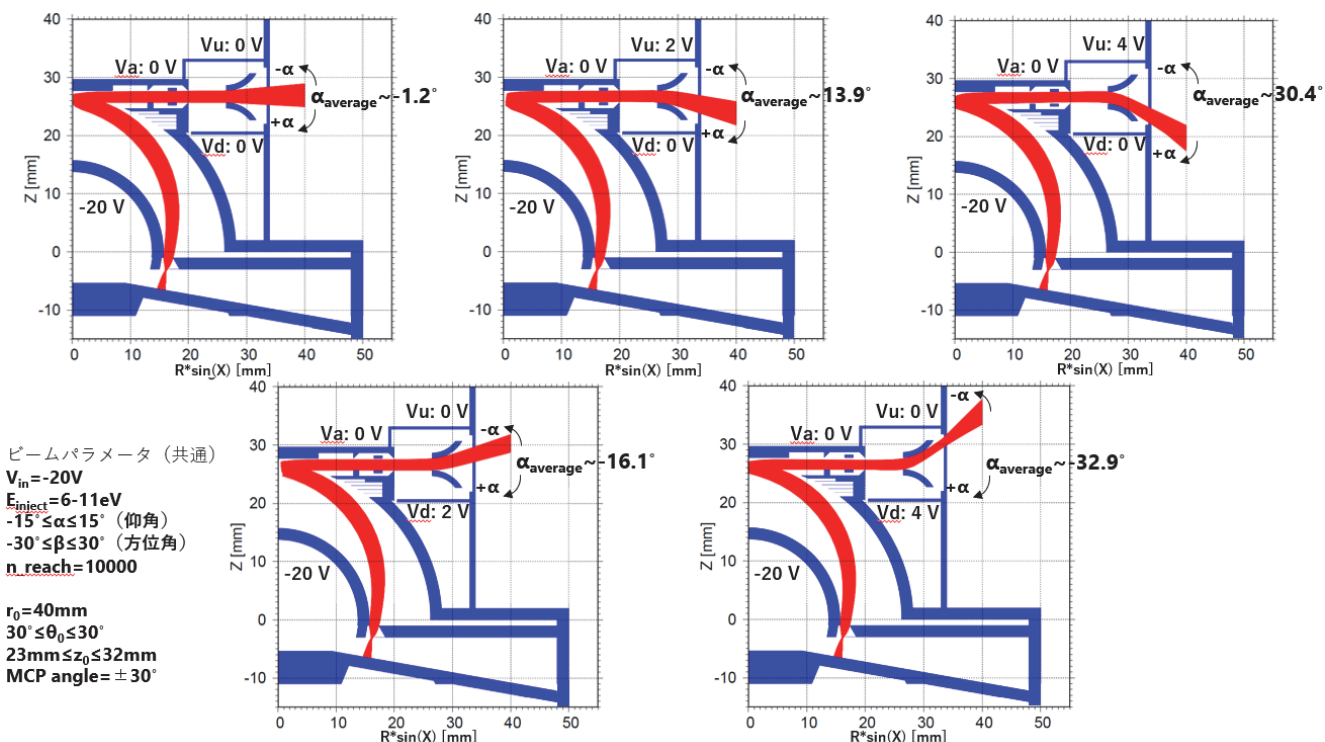


図4: 設計したエネルギー分析器形状について、内球電位を $-20V$ に固定しながら視野変更電極に印加する電圧を変えて粒子軌道を計算した結果。赤が粒子軌道、青は電極を示している。粒子軌道は軸対称座標系で計算しており、図は R (動径方向)– Z (対象軸方向) 座標系でプロットした観測器の断面図である。

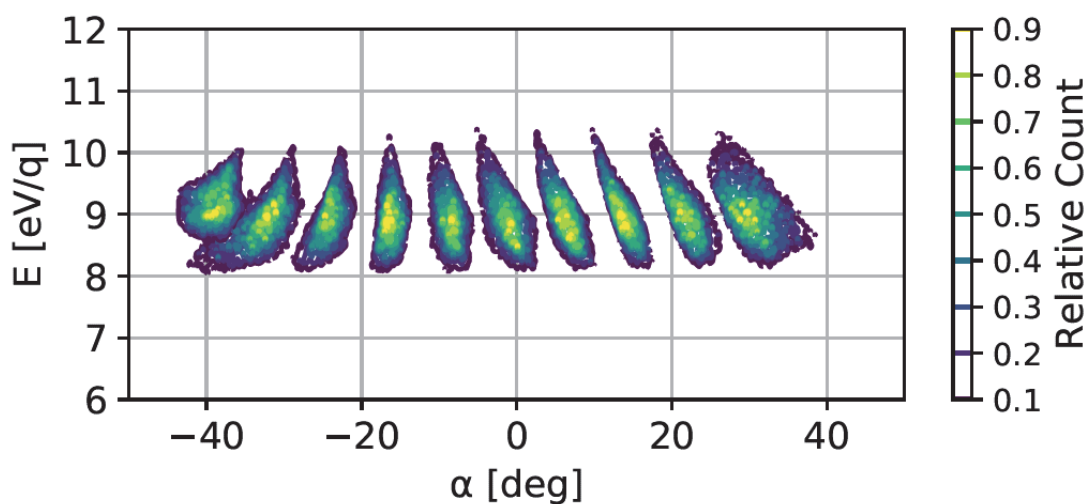


図5: 視野変更電極電圧設定を変更しながらエネルギー・入射角 (仰角) 応答特性を計算した結果。内球電位は $-20V$ を設定している。

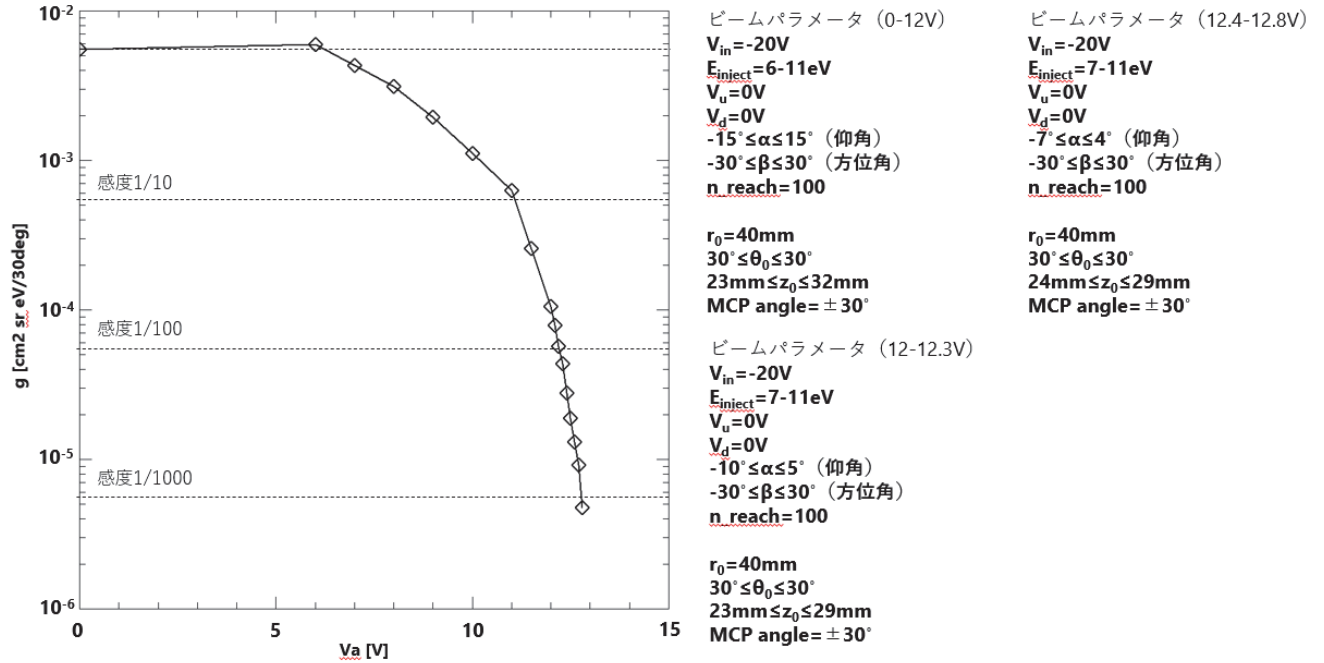


図6: 感度変更電極電位による感度変化。内球電位 -20V の場合。

4. まとめ

観測ロケットSS520-3 が 2021年11月4日にノルウェー・ニューオルソンから打ち上げられ、搭載観測機器の一つである超熱的イオンエネルギー質量分析器 (TSA) も観測に成功した。TSA は開発中の超熱的イオン質量分析器の技術実証を兼ねている。今後、FACTORS 衛星などへの搭載を念頭に、視野方向変更機能、感度変更機能を付加した観測器を開発し、イオンビーム照射試験などで性能を確認してゆく。