

木星-イオ系におけるプラズマ分布と分散性 Alfvén 波の波動特性の空間変化

齋藤幸碩¹、加藤雄人¹、木村智樹²、川面洋平^{3,1}、北原理弘¹、熊本篤志¹

1: 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

2: 東京理科大学理学部第一部物理学科

3: 東北大学学際科学フロンティア研究所

木星探査機 Juno による観測から、木星磁気圏におけるオーロラ電子加速過程において分散性 Alfvén 波 (Dispersive Alfvén wave: DAW)の働きが非常に重要であることが示唆された[e.g., Saur et al., 2018; Szalay et al., 2018]. DAW の分散関係は、Alfvén 速度や、プラズマ圧と磁気圧の比であるプラズマベータ値により決定される。DAW による電子加速過程を理解する上で、磁気圏プラズマの数密度や圧力の空間分布を与えるモデルが必要不可欠である。

背景プラズマの空間分布に関する過去の研究では、Static Vlasov Code (SVC)と呼ばれる理論モデル[Ergun et al., 2000; Su et al., 2003; Matsuda et al., 2010]が提案されてきた。SVC は、粒子軌道上で速度分布関数が保存されるという Vlasov 方程式に従い、プラズマの速度空間上の accessibility[e.g., Persson, 1966]を考慮して、速度分布関数から磁力線沿いの数密度分布を求める理論モデルである。我々は、SVC において不明瞭だった理論の詳細を検討して、Plasma Distribution Solver (PDS)と呼ばれる理論モデルを構築した。さらに、PDS で得られる速度分布関数の空間分布から圧力を計算した。

本発表では、PDS を木星-イオ系に適用して得られた結果について報告した。今回、境界条件として南北の木星電離圏とイオ(磁気赤道)からプラズマが放出されるとした。ここで、イオから放出されるイオンを温度等方で与えた Case 1 と温度異方($T_{\perp} = 2T_{\parallel}$)で与えた Case 2 の 2 つの場合を紹介し、結果を比較した。さらに、境界条件として木星-イオ間の電位差を 30 kV と与えて、木星-イオ間で potential drop を 63.9° と 60.6° の 2 点に設定した。

PDS を木星-イオ系に適用することによって判明したこととして、以下の 3 点を報告する。

- ① 数密度分布において、高緯度に到達できるイオから放出されるイオンは Case 2 の方が Case 1 よりも少ない。また、potential drop の間に生まれる auroral cavity において、イオから放出される電子の数密度は最小となり、Case 1 では 0.424 cm^{-3} 、Case 2 では 0.274 cm^{-3} となった。木星探査機 Juno の観測から、高緯度領域で電子数密度が 1 cm^{-3} 程度になることが報告されており[Elliott et al., 2021]、PDS で得られる結果は観測結果に近いものである。
- ② 磁気緯度が低中緯度である領域では、プラズマ圧分布の変化は数密度分布の変化が似ている。速度分布関数を bi-Maxwellian と考えると、低中緯度帯では温度がおおよそ一定である。
- ③ DAW は、背景プラズマの電子とイオンの質量比とプラズマベータ値によって inertial Alfvén wave (IAW) と kinetic Alfvén wave (KAW) の 2 種類に分類される。IAW と KAW の領域の境界は、Case 1 では 25.6° 、Case 2 では 20.3° に位置することがわかった。これは、Case 2 でイオでのイオンの温度に異方性を与えることで、酸素イオンが高緯度に到達できず、電子とイオンの質量比が大きくなりやすく、IAW と KAW の領域の境界がより低緯度に移動したためである。

PDS はその適用条件の範囲で、地球や外惑星、系外惑星を含めた磁化惑星、月や火星の残留磁場におけるプラズマ分布を求めることができる可能性がある。PDS の結果であるプラズマ分布から Alfvén 速度や電流密度、プラズマベータ値などの物理量が求められる。また、PDS では速度分布関数を求めることができることから、観測から得られる微分フラックスと比較することが出来る。これらのことから、オーロラ電子加速過程や磁気圏-電離圏結合などの問題の解明に PDS を活かすことが可能であり、そして惑星大気の加熱過程や系外を含む惑星一般のプラズマ分布の理解へつながるものであると期待する。



木星-Iオ系におけるプラズマ分布と分散性Alfvén波の波動特性の空間変化



*齋藤 幸碩¹、加藤 雄人¹、木村 智樹²、川面 洋平^{3,1}、北原理弘¹、熊本 篤志¹

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2. 東京理科大学理学部第一部物理学科、3. 東北大学学際科学フロンティア研究所

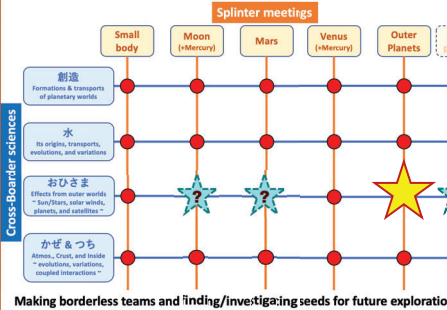
連絡先: koseki.saito@stpp.gp.tohoku.ac.jp

概要

- 磁化惑星の磁力線に沿ったプラズマ分布を求める理論モデル「Plasma Distribution Solver (PDS)」の開発
- 木星-Iオ系のプラズマの数密度とプラズマ圧の算出
- 分散性Alfvén波(DAW)の特性の空間変化の解析

Focus of the Symposium 2023

Multiple Column x Low approach for Science requirement & Mission strategy



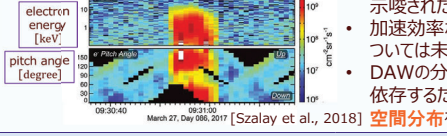
波及効果

地球や外惑星、系外惑星を含めた磁化惑星、月や火星の残留磁場におけるプラズマ分布を算出できる可能性がある。

プラズマ分布から様々な物理量が求められる、磁気圏のプラズマ現象に対してより定量的な評価が可能になる。

- 例えば、
- オーロラ電子加速過程 → 惑星大気の加熱
 - 磁気圏-電離圏結合 → 惑星一般のプラズマ分布の理解につながる。

序論



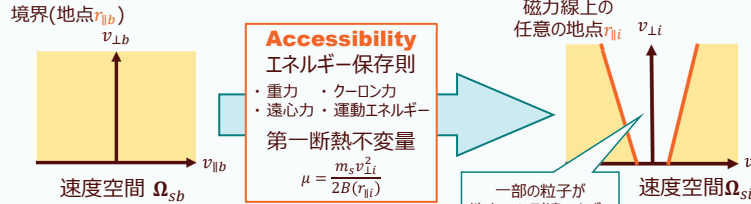
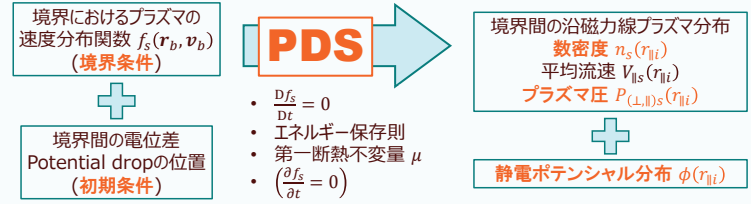
- 木星磁気圏、木星-Iオ系のオーロラ電子加速過程において、DAWの働きが非常に重要であることが示唆された。[e.g., Saur et al., 2018; Szalay et al., 2018]
- 加速効率などのDAWによる電子加速過程の詳細については未解決の問題が残されている。
- DAWの分散関係は、Alfvén速度やプラズマ圧に依存するため、背景プラズマの数密度や圧力の空間分布を求める必要がある。

目的

- 磁化惑星の磁力線に沿った背景プラズマの数密度と圧力の空間分布を求める理論モデル「Plasma Distribution Solver (PDS)」を開発する。
- 境界条件の変化に伴う木星-Iオ系のプラズマの空間分布の変化の特徴を考察する。
- 分散性Alfvén波(DAW)の特性の空間分布を求める。

モデル概要

先行研究: Static Vlasov Code [Ergun et al., 2000; Su et al., 2003; Matsuda et al., 2010] 更新点: 先行研究の理論の再検討、プラズマ圧の分布 $P_{(L, \parallel)}$ ($r_{\parallel i}$) の算出



• 数密度 $n_s(r_{\parallel i}) = \iiint_{\Omega_{sb}} f_s(r_b, v_b) d^3v_i$

• 平均流速 $V_{is}(r_{\parallel i}) = \frac{1}{n_s(r_{\parallel i})} \iiint_{\Omega_{sb}} v_{\parallel i} f_s(r_b, v_b) d^3v_i$

• プラズマ圧 $P_{\perp s}(r_{\parallel i}) = \frac{1}{2} m_s \iiint_{\Omega_{sb}} v_{\perp i}^2 f_s(r_b, v_b) d^3v_i$

$P_{\parallel s}(r_{\parallel i}) = m_s \iiint_{\Omega_{sb}} (v_{\parallel i} - V_{is}(r_{\parallel i}))^2 f_s(r_b, v_b) d^3v_i$

• 平均流速 $V_{is}(r_{\parallel i}) = \frac{1}{n_s(r_{\parallel i})} \iiint_{\Omega_{si}} v_{\parallel i} f_s(r_b, v_b) d^3v_i$

• プラズマ圧 $P_{\perp s}(r_{\parallel i}) = \frac{1}{2} m_s \iiint_{\Omega_{si}} v_{\perp i}^2 f_s(r_b, v_b) d^3v_i$

$P_{\parallel s}(r_{\parallel i}) = \frac{2P_{\perp s}(r_{\parallel i}) + P_{\parallel s}(r_{\parallel i})}{3}$

電荷密度が2つの方法から求められる。

- $\rho_d(r_{\parallel i}) = \sum_s q_s n_s(r_{\parallel i})$
- $\rho_p(r_{\parallel i}) = -\epsilon_0 \Delta \phi(r_{\parallel i})$ (Poisson方程式)

ρ_d と ρ_p の値の差が小さくなるように、静電ポテンシャル $\phi(r_{\parallel i})$ をNewton法でiterationする。

初期/境界条件

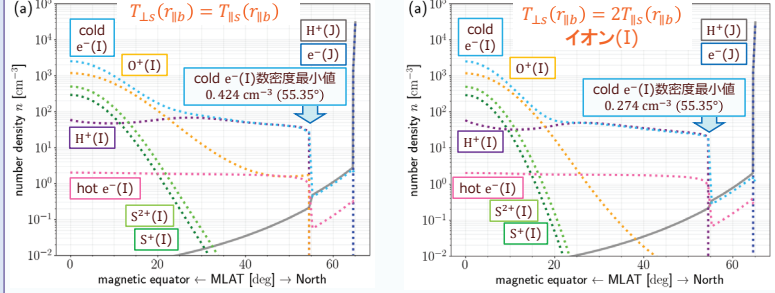
初期静電ポテンシャル分布 $\phi^0(r_{\parallel i})$ potential drop地点:

30 kV ~ 26 kV: MLAT ±63.90° ~ ±63.98°
26 kV ~ 0 V: MLAT ±60.23° ~ ±61.05°

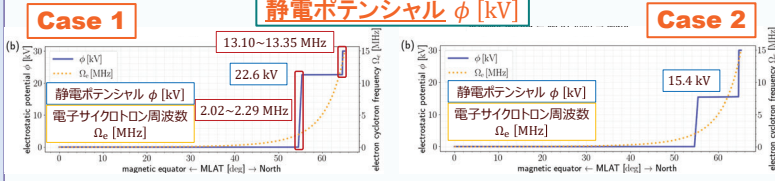
境界	s	$n_s(r_{\parallel b})$ [cm ⁻³]	$T_s(r_{\parallel b})$ [eV] (Case 1)	$T_{\perp s}(r_{\parallel b})$ [eV] (Case 2)	$T_{\parallel s}(r_{\parallel b})$ [eV] (Case 2)
電離圏境界 (I) 高度: 2500 km	H ⁺				
	e ⁻	30000	0.1	0.1	
	O ⁺	1163			
	S ⁺	291	50	60	30
	S ²⁺	494			
磁気赤道 (I)	H ⁺	58	8.6	10.32	5.16
	cold e ⁻	2498	5		
	hot e ⁻	2	200		

Case 1の境界条件は、先行研究であるMatsuda et al. (2010)を引用。

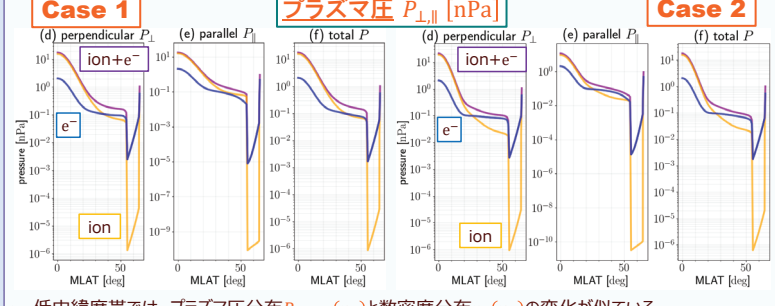
結果



- Case 2では、高緯度に到達できるイオン(I)がCase 1よりも少ない。
- H⁺(I)のみはcold e⁻と電気的中性になるため、potential dropまで到達できる。
- Potential dropの間の領域では、H⁺(I)とe⁻(I)のみが存在できる。
- Cold e⁻(I)の数密度最小値は、イオ側のpotential drop (55.35°)に位置し、Case 1の方がCase 2より大きい。
- 木星探査機Junoの観測で、高緯度領域で $n_{e^-} \approx 1 \text{ cm}^{-3}$ であることが示された。[Elliott et al., 2021] ⇒ PDSで得られる数密度分布は、観測結果に近いものである。

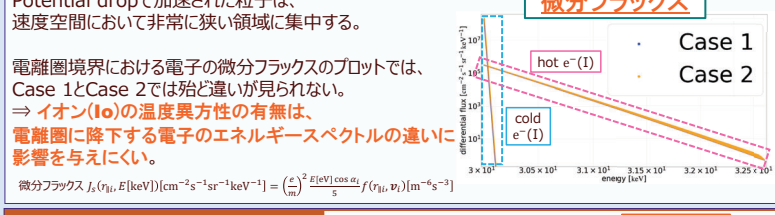


- Case 1とCase 2で、phiの階段構造の中段(potential dropの間の)値が異なる。
- Potential dropの位置は初期条件の設定から変わらない。
- Potential dropで生じるサイクロトロンメーザー不安定性によって放出されるIo-DAMIは40 MHz以下。[e.g., Saur et al., 2004] ⇒ 観測で得られる高周波数のDAMIに対応する位置にpotential dropを与えるには、電離圏境界をより低高度(高度2,500 km以下)に設定する必要がある。

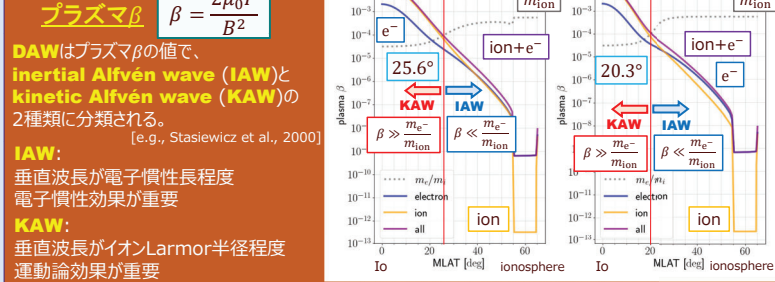


- 低中緯度帯では、プラズマ圧分布 $P_{(L, \parallel)}$ ($r_{\parallel i}$) と数密度分布 $n_s(r_{\parallel i})$ の変化が似ている。⇒ 速度分布関数 $f(r_i, v_i)$ がbi-Maxwellianとすると、低中緯度帯で温度がおおよそ一定である。
- Potential dropの間で、プラズマ圧が非常に小さくなる。← 速度空間においてプラズマが非常に狭い空間に集中し、静圧が小さくなる。一方で、平均流速はpotential dropで加速されるため大きくなり、動圧が大きくなる。

電離圏境界における電子エネルギー



DAWの特性



参考文献

- Elliott et al. (2021), *J. Geophys. Res. Space Phys.*, doi:10.1029/2021JA029195
- Ergun et al. (2000), *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2000GL003819
- Matsuda et al. (2010), *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JA015844
- Saur et al. (2004), in *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, pages 530-560.
- Saur et al. (2018), *J. Geophys. Res. Space Phys.*, doi:10.1029/2018JA025948
- Su et al. (2003), *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2002JA009247
- Szalay et al. (2018), *J. Geophys. Res. Planets*, doi:10.1029/2018JE005752