

[共同研究成果]

木星磁気圏内でのピックアップイオンの熱化に関する計算機実験

加藤雄人¹、杉山徹²、土屋史紀¹、鍵谷将人¹、
小野高幸³、三澤浩昭¹、森岡昭¹、岡野章一¹

1：東北大学大学院 理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター

2：海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター

3：東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻

木星磁気圏中に存在する重イオンの主要な供給源は、衛星イオを起源とする中性粒子のイオ周辺及びイオ公転軌道付近での電離であることが知られている。この供給プロセスである、イオ起源のイオンの木星共回転磁場によるピックアップ過程に着目し、ピックアップイオンの速度分布の変化に関するハイブリッドシミュレーションを実施した。シミュレーション結果から、イオンサイクロトロン波の励起と、その励起過程での相互作用によりイオンが熱化される様相が再現された。

1. はじめに

ガリレオ衛星の一つであるイオは活発に活動する火山を有し、木星磁気圏中に存在する重イオンの主要な供給源となっている。特にイオの公転軌道付近では、軌道に沿ったリング状にイオ起源の重イオンが濃く分布する領域が作り出され、イオトーラスと呼ばれている。イオトーラスにはイオ起源の重イオンが絶えず供給され続けているが、イオから放出される粒子の大部分は中性粒子であり、また、イオの公転速度 V_{IO} (17 km/s) とトーラスプラズマの速度 V_{CO} (74 km/s ; 木星磁場との共回転速度) とに速度差があることから、トーラスに供給されるまでには(1)中性粒子の電離と(2)共回転速度までの加速プロセスを経る必要がある。中性粒子の電離に関しては、トーラスプラズマを構成する荷電粒子との電荷交換反応及び電子衝突電離などにより説明されている。一方、共回転速度までの加速プロセスの素過程は、イオ起源のイオンの木星共回転磁場によるイオンピックアップ過程として理解される。

木星磁場の共回転速度 V_{CO} とイオの公転速度 V_{IO} との相対速度 V_b に比較して、電離前にイオ起源の中性粒子が持っていた熱速度が十分小さいとすると、電離によって生成されたイオ起源のイオンは速度 V_b のリング分布を初期速度分布として持つことになる。その結果、イオ周辺の空間ではリング分布に起因する不安定によってイオンサイクロトロン波が励起されると共に、励起された波動との相互作用（ピッチ角散乱）によるイオ起源のイオンの熱化が生じると考えられる。この熱化による速度分布の拡散の時定数は、イオ周辺で生じている相互作用領域の空間的な広がりや密接な繋がりを持つことが予想される。イオ周辺プラズマと木星磁気圏との相互作用領域の広がりやを定量的に見積もる事は、木星表面の高緯度領域におけるイオフットプリント周辺でのオーロラ発光プロセスの理解に繋がると共に、東北大学ハレアカラ観測所を始めとして近年国内外において精力的な観測が進められている光学観測研究との比較を通じて、新たな知見を多く得る事が期待できる。しかしなが

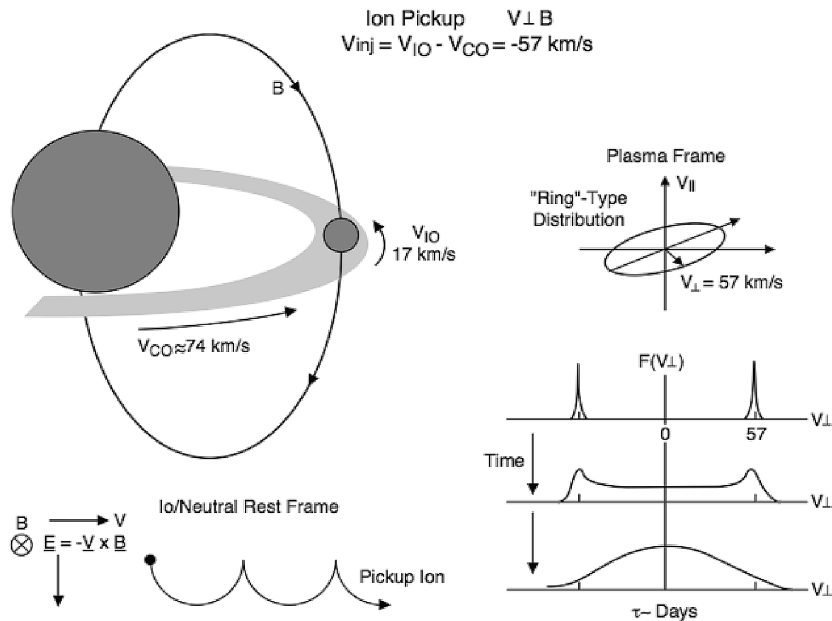


図 1: イオ周辺で生じているイオンピックアップ過程の模式図[Russell, 2005]。

(左上)イオの公転速度と、木星磁場と共回転しているトーラスプラズマとは速度差が存在する。(左下) イオに固定された系から見た、電離直後の重イオンの運動。トーラスプラズマの磁場を横切る運動によって生じる $V \times B$ 電場により、重イオンはドリフト運動することとなる。(右) 重イオンが木星磁場によりピックアップされた後の、トーラスプラズマに固定された系から見た速度分布の時間変化。電離直後は相対速度を持つためリング状の分布であるが、相互作用を経て熱化され、速度 0 を中心とした分布となる (トーラスプラズマへの同化)。

ら、イオ周辺の物理に関する従来のシミュレーション研究は、イオン及び電子を流体近似して扱う MHD (Magneto-Hydro Dynamics; 電磁流体力学) コードを用いて行われた例がほとんどであり、イオ周辺の相互作用の物理を理解する上で本質的に重要となるイオンの粒子運動効果は、近年注目されつつある段階に過ぎない[e.g., Cowee *et al.*, 2006]。本研究では、1次元のハイブリッドコードを用いて、イオ周辺で生じているイオ起源のイオンと木星磁気圏及びイオトーラスプラズマとの相互作用に関する計算機実験を実施する。シミュレーション空間中を速度 $V_b = V_{CO} - V_{IO}$ で流れる S^{2+} プラズマ中にイオ起源のイオンを配し、その速度差に起因する不安定によるプラズマ波動の励起と、ピックアップイオンの運動の変化に着目する。

2. シミュレーションモデルの概要

ハイブリッドコードとは、イオンを粒子として扱ってその運動を解き、電子は無質量の流体として扱うシミュレーションコードである。イオンの運動は PIC 法 (Particle in Cell) で解き、磁場の時間発展は Predictor-corrector 法[e.g., Winske *et al.*, 2003]で解き進める。規格化した後の方程式は以下の通りである。

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{q_i}{m_i} (E + v_i \times B)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E$$

$$E = -V_e \times B$$

$$V_e = \frac{1}{N_e} \left(\sum N_i q_i v_i - \nabla \times B \right)$$

$$N_e = \sum N_i q_i$$

ここで添え字 i, e はそれぞれイオン及び電子の物理量であることを示し、 q は電荷、 m は質量、 N は数密度を示す。 E, B は電場及び磁場ベクトルを示し、それぞれ XYZ 各 3 成分を解く。衛星イオに静止した座標系を用い、電子温度は 0 としている。1 grid あたり 160 個の超粒子を用いてイオンを代表させ、個々の運動を運動方程式に従って解くと共に、イオンの数密度分布から求められる電場の空間分布から、各グリッドでの磁場ベクトルの時間発展を解き進める。

イオ起源のイオンの組成は様々であるが、主成分としては S^+ で代表される。それに対して、トーラスに同化した S^+ イオンは木星磁場と共回転する過程で電離が進むことから、トーラスを構成するプラズマには S^{2+} が多く含まれる。この点を考慮して、シミュレーションでの背景プラズマを S^{2+} 、イオ起源のイオンを S^+ とした。シミュレーション空間は 1 次元であり、4096 grid を背景磁場に沿った X 軸上にとる。背景の S^{2+} プラズマには、背景磁場に垂直な Y 軸方向への初速を与え、その大きさを $V_b = V_{co} \cdot V_{Io} = 57 \text{ km/s}$ とする。イオ近傍における観測結果を考慮して、 S^{2+} の数密度は 3500/cc、背景磁場強度は 1800 nT とする。これらのパラメータを用いると、アルフベン速度 V_A は 117 km/s となり、 V_b は $0.48 V_A$ に相当する。この系に、イオ起源の中性粒子の電離により生成された S^+ イオンを、初期速度 0、背景の S^{2+} との数密度比 1.5×10^{-3} で分布させる。この状況を初期状態としてシミュレーションを実施、 S^{2+} と S^+ との速度差に起因するプラズマ不安定の発展と、 S^+ イオンの速度分布の変化を解析した。

グリッド幅 Δx	0.05 $V_A / \Omega S^+$
タイムステップ幅 Δt	$8 \times 10^{-4} \Omega^{-1} S^+$
グリッド数 L_x	4096
S^+ のサイクロトロン周期 $2\pi \Omega^{-1} S^+$	1.17 sec
シミュレーション時間	$1600 \Omega^{-1} S^+$

表 1 : シミュレーションで用いる初期パラメータと物理量

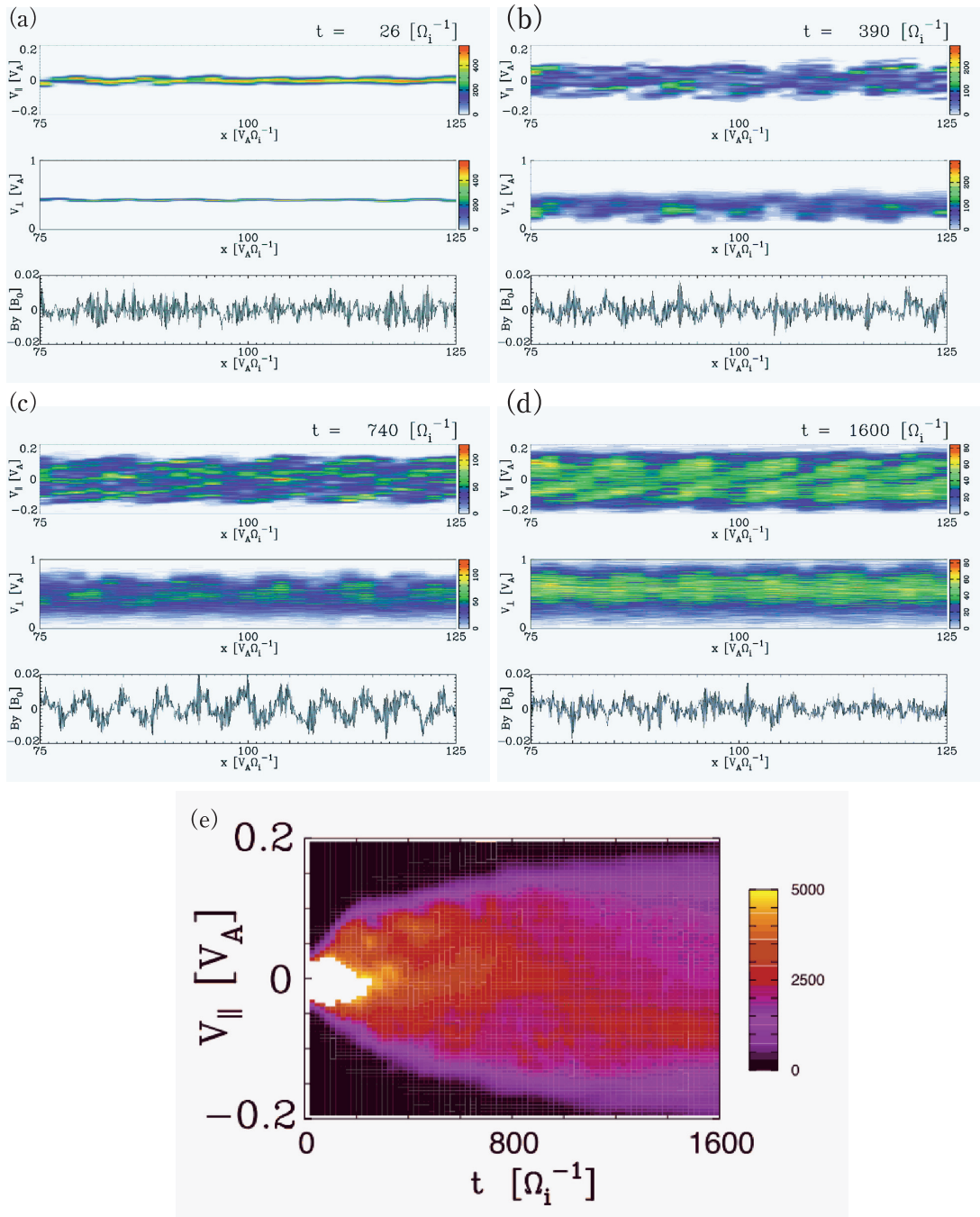


図 2 : シミュレーション中の S^+ と磁場波形の空間分布の時間変化。
 $X=75 \sim 125 V_A / \Omega_{S^+}$ の領域を拡大している。(a)~(d) いずれも上段から順に S^+ の $V_{\parallel} - X$ 、 $V_{\perp} - X$ 空間分布と B_y 波形を示す。(e) $X=75 \sim 125 V_A / \Omega_{S^+}$ の領域での、 V_{\parallel} 成分の速度分布の時間変化。

3. 結果と考察

図2にシミュレーション中での S^+ の分布と磁場成分の時間変化を示す。初期状態では、 S^+ は背景磁場に平行な速度成分 (V_{\parallel}) は持たず、垂直成分 (V_{\perp}) のみを持って運動している。時間の経過と共に S^+ の速度分布に拡散が生じ、それと共に磁場の B_y 成分に明確な波形が現れ始めていることが示される。ここで、励起された波動に対して周波数解析を実施した。図3に $T=400\Omega^{-1}S^+$ の時間帯におけるシミュレーション空間中での B_y 波形から得られた周波数スペクトルを示す。得られた結果から、励起している波動は S^+ のジャイロ周波数に近い周波数を持つイオンサイクロトロン波であり、図2で見られた S^+ イオンの速度分布の拡散は、イオンサイクロトロン波との相互作用の結果であることが示された。

特に図2b、2cでの S^+ の V_{\parallel} - X 分布には、 B_y 波形の波長スケールに対応した特徴的な渦構造が見て取れる。このような V_{\parallel} - X 空間での渦は、狭帯域でコヒーレントな波動による共鳴粒子の捕捉という、非線形の波動粒子相互作用の効果が現れている際に見られる特徴的な分布である。非線形効果の大きさは trapping velocity V_T で評価されることが知られている。 V_{\parallel} 方向への非線形効果の大きさは、狭帯域な波動と粒子との共鳴速度 V_R を中心にして、 $\pm V_T$ の幅で現れる。今回のシミュレーションの初期条件の下では、 S^+ とイオンサイクロトロン波との共鳴速度はほぼ0であ

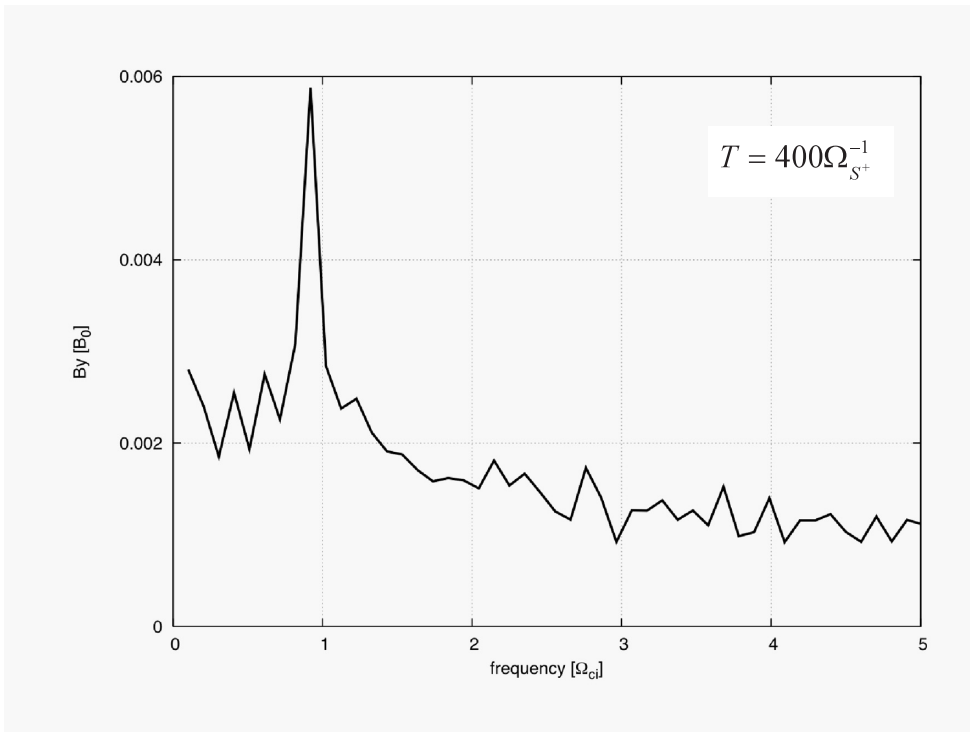


図3： $T=400\Omega^{-1}S^+$ の時間帯における B_y 波形から得られた周波数スペクトル。横軸は S^+ のジャイロ周波数で規格化した周波数で、縦軸はその強度を示している。

るため、 V_{\parallel} - X 空間での渦のスケールは 0 を中心に $\pm V_T$ の幅を持つことが期待される。ここで $V_T = 2\sqrt{v_{\perp}\Omega_w/k}$ であり、 $\Omega_w = qB_w/m$ 、 B_w は波動の振幅、 k は波数である。それぞれシミュレーション中で得られた値 ($v_{\perp} = 0.48V_A$ 、 $B_w = 0.02B_0$ 、

$k = 0.2V_A^{-1}\Omega_{S^+}$) を用いると、 $V_T = 0.087V_A$ と評価される。この結果と図 2e に示

される V_{\parallel} 方向の速度分布の変化とを比較すると、シミュレーション前半での速度分布の発展を説明し得る。このことから、シミュレーション中で生じているイオンサイクロトロン波と S^+ イオンとの相互作用では、強い非線形性が現れていることが明らかとなった。さらにシミュレーション後半での時間発展に着目すると、速度分布の広がり方は緩やかになるものの、 $\pm V_T$ の幅を超えてさらに拡散していく様相が示されている。この点については更なる解析が必要であるが、シミュレーション中では沿磁力線方向の電場の変動も現れており、この電場がイオンの運動に影響を及ぼしている可能性が指摘される。

上記のような相互作用の過程を経て、時間の経過と共に S^+ の速度分布はさらに拡散して行く。図 2d 中段の V_{\perp} - X 空間分布に見られるように、最終的には背景プラズマの平均速度である $0.48V_A$ を中心とした速度分布に収束することが示された。

4. まとめ

イオを起源とする S^+ イオンのイオンピックアップ過程に対し、1次元のハイブリッドシミュレーションを実施して、その素過程について議論した。シミュレーション結果では、電離によって生成された S^+ イオンとトーラスプラズマとの速度差に起因する不安定により、イオンサイクロトロン波が励起することが示された。また、励起されたイオンサイクロトロン波との非線形相互作用を経て、 S^+ イオンの速度分布が拡散し、背景のトーラスプラズマの平均速度を中心とした速度分布に収束していく過程が明らかとなった。

以上の結果は、イオ周辺の木星磁気圏で生じているイオンピックアップ過程を理解する上でピックアップイオンの粒子性を考慮することと、非線形性を取り入れることの重要性を示している。また、今回のシミュレーション結果では、イオ起源のイオンがトーラスプラズマへ同化するまでに要する時間が、イオンジャイロ周期の 1600 倍程度と評価された。このようなトーラスプラズマへの同化に至るまでの時間の評価は、イオ起源のイオンの熱化の時定数を与える意味で重要である。光学観測等による観測結果との比較には、イオ周辺でのピックアップイオンの空間分布や電離生成率などを考慮した、より現実に近い初期条件・境界条件での計算が必要となる。今回のシミュレーションはイオンピックアップの基礎過程を理解することを目的としている為、直接比較には至っていないが、今後 S^+ イオンの生成過程を取り入れることやプラズマの組成の考慮、並びに多次元シミュレーションの実施を計画しており、より現実に近い熱化の時定数と、ピックアップイオンが獲得する熱速度の定量評価が期待される。

謝辞

本研究は東北大学情報シナジーセンターとの平成18年度共同研究課題「電磁波との共鳴による電子加速についての計算機シミュレーション」を進める中で得られた成果であり、シミュレーションコードの開発にあたっては同センターとの共同研究として進められた。共同研究を通じて有益な助言と多くの協力をいただき、本シミュレーションコードのSX-7での演算性能の向上、特に並列化効率の向上とライブラリ使用による初期化ルーチン的高速化に大きな効果を得ることができた。

参考文献

- [1] Russell, C. T., Interaction of the Galilean Moons with their plasma environments, *Planet. Space Sci.*, **53**, 473-485, 2005.
- [2] Cowee, M. M. *et al.*, One-dimensional hybrid simulations of planetary ion pickup: Techniques and verification, *J. Geophys. Res.*, **111**, A12213, doi:10.1029/2006JA011996, 2006.
- [3] Winske, D. *et al.*, Hybrid simulation codes: Past, present and future – A tutorial, in *Space Plasma Simulations*, edited by J. Buchner, C. Dum and M. Scholer, Lecture Notes in Physics, **615**, 93-108, 2003.