

## [研究成果]

### イオ関連デカメートル電波発生源の準定常構造に関する計算機実験

松田和也<sup>1</sup>、三澤浩昭<sup>1</sup>、寺田直樹<sup>2</sup>、加藤雄人<sup>2</sup>

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: 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

独自に開発した static Vlasov code を用いて、木星の衛星イオに関連して放射されるデカメートル電波 (Io-DAM) 発生源の定常構造をシミュレートし、Io-DAM 観測特性の成因を探った。その結果、発生源の定常構造は、木星とイオの同一の電磁環境において複数存在し、2層の加速層を有する構造において、電流や各加速層の電圧は、加速層の高度や木星とイオの電磁環境に依存することが判明した。また、異なる電波源に観られる Io-DAM の上限周波数の傾向は、電離圏密度の差異に起因する可能性が示唆された。

## 1. はじめに

木星デカメートル電波 (DAM) は 1955 年に初めて発見された[1]。木星の衛星イオとその大気は、木星の自転とほぼ同期して回転している周囲のプラズマと相互作用しており、DAM の内、この相互作用の結果放射されている電波を Io-DAM と呼ぶ。Io-DAM は、異なる 2 種類の時間スケールのバースト現象に分類される。長時間継続する L-burst は、その継続時間の長さと発生源と目される沿磁力線加速領域の時間的安定性との類似性から、イオの下流側に形成される準定常的な加速領域内部でサイクロトロンメーザー不安定 (CMI) と呼ばれるプラズマ不安定を介して励起されていると考えられている[2]が、その成因の詳細は未解明である。放射される電波の性質は発生源のプラズマと磁場の状態によって決定される。ゆえに、加速領域の性質と、その木星とイオというプラズマ供給源の電磁環境への依存性を調べることで、イオの火山活動や太陽紫外線量の変動などに対する電波の性質の応答を予測することができる。この予測に基づき、未解明である Io-DAM の観測特性の起源を究明することを目的とし、static Vlasov code と呼ばれる、定常状態における Vlasov 方程式の解を導出するコードを開発し、数値実験を行った。

## 2. 計算手法の概要

シミュレーションは沿磁力線方向の 1 次元空間において、木星電離圏の exobase から自転赤道に位置し自身の火山活動に起因する濃いプラズマを纏うイオまでを扱う。以下、このシミュレーション空間を系と呼ぶ。電離圏、イオ近傍磁気圏の両境界において、各種プラズマの系への入射方向の速度分布を定義する。速度分布は bi-Maxwellian とし、Voyager 探査機の観測に基づき、密度、温度、温度異方性を設定する。本稿で使用したパラメータを表 1 に示す。系の内部では無衝突プラズマを仮定し、プラズマは Liouville の定理に従うものとする。境界

間電位差は、イオ関連電子加速現象に起因するオーロラの観測[3]から示唆されている 30kV に固定する。沿磁力線空間には 64 点の格子点を等間隔に配置した後、電離圏から 1~2 格子間に 15 点を等間隔に配置する。なお、空間格子点は電離圏境界から数えることとする。また、速度空間には磁力線に平行な速度方向に 30 点、垂直な速度方向に 60 点の格子点数を用意する。

表 1 境界条件に用いた速度分布のパラメータ。括弧内の記号 M は磁気圏の種、記号 I は電離圏の種を表す。磁気圏の種は[4]、電離圏の種は[5], [6]を参照した。

species	N [cm <sup>-3</sup> ]	T <sub>⊥</sub> [eV]	T <sub>⊥</sub> /T <sub>  </sub>
cold e <sup>-</sup> (M)	2498	5	1
hot e <sup>-</sup> (M)	2	200	1
e <sup>-</sup> (I)	30000	0.1	1
H <sup>+</sup> (M)	58	8.6	1
H <sup>+</sup> (I)	30000	0.1	1
O <sup>+</sup> (M)	1163	50	1
S <sup>+</sup> (M)	291	50	1
S <sup>2+</sup> (M)	494	50	1

定常状態におけるプラズマは準中性条件を満たす。すなわち、空間の電荷密度は無視できるほど小さい。static Vlasov codeにおいて、空間は有限個の空間格子点で分割されるため、準中性条件は、

$$\rho_i = 0 \quad (i = 1 \sim 79)$$

と表される。ここで、 $\rho$  は電荷密度、添え字  $i$  は格子点番号を表す。電荷密度は各空間格子点の電位に非線形に依存するため、準中性条件は各空間格子点の電位を変数とした連立非線形方程式である。この準中性条件を満たす解、つまり各格子点の電位を、Newton 法により探査する。すなわち、初期条件として電位プロファイルを指定した後、

(1) 各種プラズマの位相空間密度を速度空間について積分し電荷密度を算出する

(2)  $\phi_i^{n+1} = \phi_i^n - (\partial \rho_i / \partial \phi_i)^{-1} \rho_i^n$  により電荷密度が 0 に近づく方向へ電位を修正する

というプロセスを、(1)で算出される電荷密度が閾値以下になるまで繰り返し行う。ここで、 $\phi$  は電位、添え字  $n$ ,  $n+1$  は繰り返し回数を表す。位相空間密度を速度空間について積分する際に、境界から入射された位相空間素片について、全エネルギーと磁気モーメントの保存以外に、accessibility と loss を考慮する。ここで、accessibility とは、ある素片が供給された境界から計算格子点まで位相空間上で連続した軌跡を描いて到達しているかどうかを意味する。素片は、供給された境界の対岸の境界まで到達し対岸の境界において系外に流出するもの、系内で反射し供給された境界まで戻るもの、の 2 通りに分類される。loss とは、到達している素片が対岸の境界から流出するかどうかを意味する。解として沿磁力線電位プロファイルが得られれば、準中性条件を満たす各種プラズマの位相空間密度も得られる。

### 3. 結果と考察

先行研究[2]では“準中性条件を満たす定常解は、同一の境界条件下において複数存在すること”が可能性として言及されてはいた。しかし、本研究ではこのことが具体的に示された。木星ーイオの電磁環境では、解は1層、あるいは複数層の加速層を有する電位分布に収束する。ここで、加速層とは連続した2格子点間に大きな電位の飛びが存在する構造を指す。2層の加速層を有する解の典型例を図1に示す。加速層は準中性条件を満たすことが可能な範囲にのみ存在が可能である。その存在可能範囲は、他の加速層の高度や境界条件に依存する。以下、高度は電離圏境界から沿磁力線方向に測られた距離を意味する。CMIにより電波を励起するには、加速層以下の高度において、電離圏電子より磁気圏電子の密度が大きいことが必要である[7]。加速層が1層のみの解では、この条件を満たすことができないため、Io-DAMの発生源は2層の加速層の間の領域であると考えられる。そのため、2層の加速層を有する解の性質と、その木星とイオの電磁環境の変動に対する応答に関する研究を進め、以下の知見を得た。

各加速層の電圧と系を流れる電流は系における各加速層の高度に依存することが判明した。低高度加速層の高度が高い場合、低高度加速層の電圧、電離圏プロトンによる電流が小さくなる。この例として、図2に一定の高高度加速層高度における、電圧、電流の低高度加速層高度依存性を示す。一方、高高度加速層の高度が高い場合、高高度加速層の電圧、磁気圏電子による電流が大きくなる。この例として、図3に一定の低高度加速層高度における、電圧、電流の高高度加速層高度依存性を示す。本研究では境界間電位差は固定されているので、ある加速層の電圧が大きくなると、他方の加速層の電圧は小さくなる。また、電流は電離圏境界での電流密度である。これらの結果は以下のように考えることで理解できる。

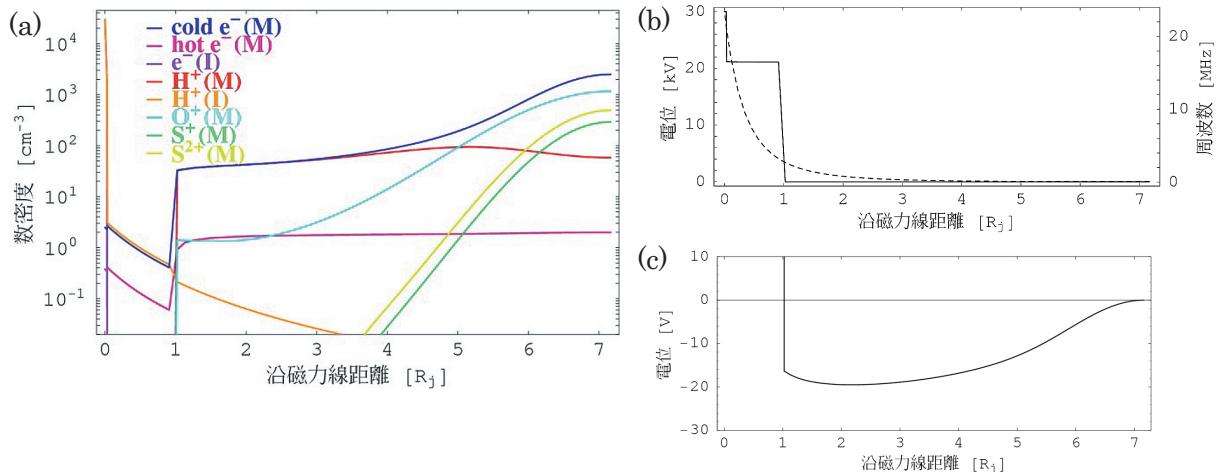


図1 2層の加速層を有する解の典型例。低高度加速層は格子点5~6、高高度加速層は格子点24~25に存在する。横軸は電離圏境界からの沿磁力線距離を表す。(a) 各種プラズマの数密度。(b) 電位(実線)と電子サイクロトロン周波数(点線)。(c) 電位の0V近傍の拡大図。

位相空間素片の異なる 2 点での密度への寄与の比は

$$\frac{dn(v_{\parallel}, v_{\perp})}{dn_0(v_{0\parallel}, v_{0\perp})} = \frac{B}{B_0} \left| \frac{v_{0\parallel}}{v_{\parallel}} \right|$$

のように表される。ここで、 $n$  は数密度、 $v_{\parallel}$  ( $v_{\perp}$ ) は素片の磁場に対して平行 (垂直) 方向の速度、 $B$  は磁場強度である。添え字 0 の付された変数は添え字なしの変数と異なる空間点での値であることを示す。この式から、2 点の間に十分強い加速があり、 $v_{\parallel}$  が大きくなると、基本的に  $n$  は減少することがわかる。低高度加速層の高度が高い場合、低高度加速層直下の電離圏プロトン密度が小さくなるため、発生源での準中性条件を満たすために、低高度加速層の電圧が小さく、加速層でのプロトン密度減少を抑えた解に収束する。このとき、低高度加速層まで到達できるプロトンが減少し、その結果、磁気圏側境界まで到達し正味の電流に寄与する素片

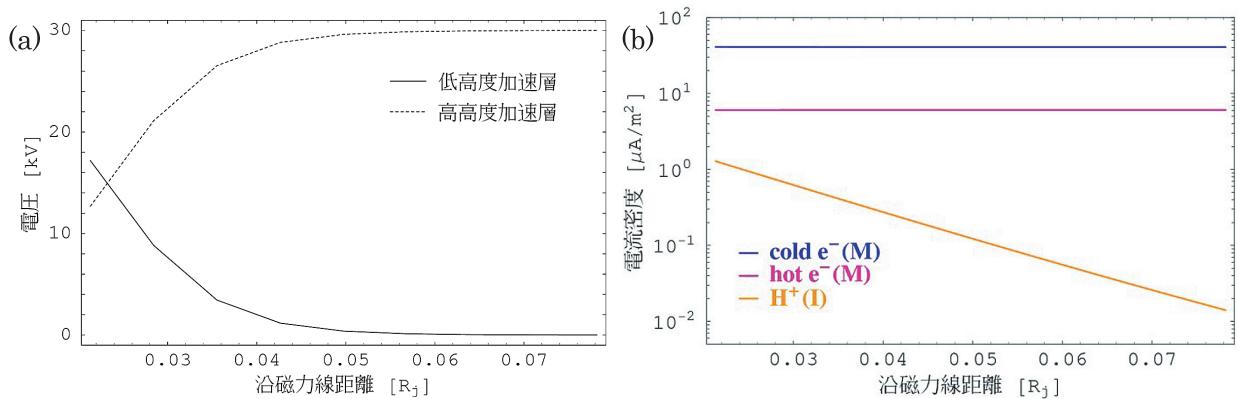


図 2 高高度加速層が格子点 24~25 に存在する場合の系の性質の低高度加速層高度依存性。横軸は電離圏境界から低高度加速層までの沿磁力線距離を表す。(a) 低高度 (実線)、高高度 (点線) 加速層の電圧。(b) 電離圏境界での電流密度。

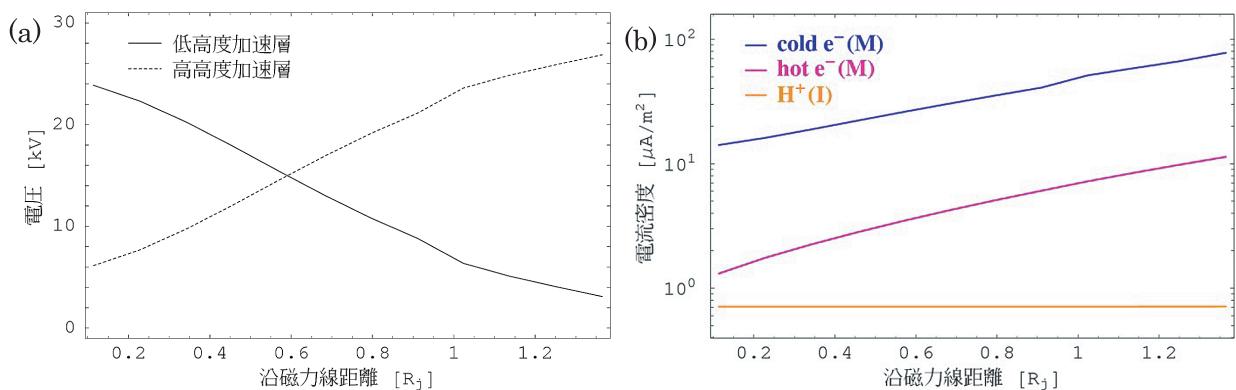


図 3 低高度加速層が格子点 5~6 に存在する場合の系の性質の高高度加速層高度依存性。横軸は電離圏境界から高高度加速層までの沿磁力線距離を表す。(a) 低高度 (実線)、高高度 (点線) 加速層の電圧。(b) 電離圏境界での電流密度。

も少なくなる。他方、高高度加速層高度の上昇による各加速層の電圧の変動は、主に高高度加速層直下の電離圏プロトン密度の低下に起因している。磁気圏電子による電流、すなわち電離圏側境界まで到達可能な素片の量も、概して高高度加速層まで到達できる素片の量で決まるため、その高度に影響される。

系の性質は境界条件にも依存する。磁気圏の各種プラズマの密度、温度が小さい場合、概して高高度加速層の電圧、磁気圏電子による電流が小さくなり、高高度加速層の形成可能高度範囲は高くなる。一方、電離圏の密度、温度が小さい場合、概して低高度加速層の電圧、電離圏プロトンによる電流が小さくなり、低高度加速層の形成可能高度範囲は低くなる。

**Io-DAM** の特性は、発生源であると考えられる 2 層の加速層の間の領域の電磁環境によって決定される。前述の系の性質は、次のように **Io-DAM** の特性に影響を与えると考えられる。CMI により励起されるのはおよそ電子サイクロトロン周波数の波であり、この周波数は高度の減少とともに単調に増加する。低高度加速層以下の高度では電離圏電子の密度が磁気圏電子の密度を上回るため、CMI は bump-in-tail 不安定と呼ばれるプラズマ不安定と競合するとともに、電離圏電子の加熱に波のエネルギーが消費され、十分な強度の波動を励起できなくなる [7]。ゆえに低高度加速層の高度が低い場合、励起可能な上限周波数が高くなる。一方、高高度加速層の電圧や発生源の密度は、波のエネルギー源である電子の運動エネルギーの量に影響するため、**Io-DAM** の強度と関係していると考えられる。

**Io-DAM** には、**Io-A**、**Io-B** と呼ばれる、電波強度が特に強い電波源が存在する。両者はほぼ同じ磁力線を発生源とするが、地上から観た場合、その発生源はそれぞれ夕側と朝側に存在する。今まで **Io-DAM** のローカルタイム (LT) への依存性は明確には示されてこなかったが、本研究の結果に基づくと、LT から予想される電離圏密度の差異は **Io-A** と **Io-B** の観測特性の非対称性として現れてもよいはずである。電離圏の性質上、朝側に発生源のある **Io-B** の方が電離圏密度は小さいことが期待される。境界間電位差がイオ（磁気圏）側の要請で決まる [8] とすると、**Io-B** では **Io-A** に比べ、低高度加速層の形成可能高度範囲は低いため、低高度加速層の高度は低く、なおかつ電離圏プロトンによる電流は小さくなる傾向があると考えられる。シミュレーションの結果では、これら全ての条件を満たす **Io-B** の発生源は、**Io-A** に比べ、励起可能な上限周波数が高く、高高度加速層の電圧が大きいことになる。この上限周波数の予想は、観測されている **Io-A** と **Io-B** の差異の傾向と一致している [9]。ゆえに、**Io-DAM** に觀られる上限周波数の非対称性の原因として、太陽紫外線による電離圏密度の差異が関係していることが示唆される。一方、電波強度については、**Io-B** の強度は 30MHz 程度の比較的高周波数において **Io-A** より強い傾向が観測されている [10]。この観測結果と電離圏密度との関連性は、今後の研究課題の 1 つである。

#### 4. まとめ

独自に開発した static Vlasov code を用いて、**Io-DAM** 発生源の定常構造と、関連する **Io-DAM** の特性に関して研究を進め、以下の知見を得た。

発生源の一般的な特徴として、準中性条件を満たす定常解は、同一の境界条件下において複

数存在することを見出した。各加速層の電圧と系を流れる電流に関して、低高度加速層の高度が高い場合は低高度加速層の電圧と電離圏プロトンによる電流は小さくなること、高高度加速層の高度が高い場合は高高度加速層の電圧と磁気圏電子による電流が大きくなることを示した。また、解の性質の境界条件への依存性に関して、磁気圏の各種プラズマの密度、温度が小さい場合は、概して高高度加速層の電圧と磁気圏電子による電流は小さく、高高度加速層の形成可能高度範囲は高くなること、電離圏の密度、温度が小さい場合は、概して低高度加速層の電圧と電離圏プロトンによる電流は小さく、低高度加速層の形成可能高度範囲は低くなることを明らかにした。

以上の結果に基づき、異なるローカルタイムに存在する発生源の Io-DAM に観られる特性の差異について解釈を行った。Io-B では Io-A に対し、電離圏密度が小さいことが予想されるが、このとき Io-B では、低高度加速層の高度は低く、その結果上限周波数は高くなる傾向が期待された。この予想は観測されている Io-A と Io-B の上限周波数の傾向と一致しており、Io-DAM の上限周波数は、太陽紫外線に起因する電離圏密度の差異による影響を受けている可能性が示唆された。

## 謝辞

本研究の実験結果の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムを利用して得られたものです。関係する全ての皆様にここに深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] Burke, B. F., and K. L. Franklin (1955), Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter, *J. Geophys. Res.*, 60, 213–217.
- [2] Su, Y.-J., R. E. Ergun, F. Bagenal, and P. A. Delamere (2003), Io-related Jovian auroral arcs: Modeling parallel electric fields, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JA009247.
- [3] Gérard, J.-C., J. Gustin, D. Grodent, P. Delamere, and J. T. Clarke (2002), Excitation of the FUV Io tail on Jupiter: Characterization of the electron precipitation, *J. Geophys. Res.*, 107, doi:10.1029/2002JA009410.
- [4] Bagenal, F. (1994), Empirical model of the Io plasma torus: Voyager measurements, *J. Geophys. Res.*, 99, 11043–11062.
- [5] Eshleman, V. R., G. L. Tyler, G. E. Wood, G. F. Lindal, J. D. Anderson, G. S. Levy, and T. A. Croft (1979a), Radio science with Voyager 1 at Jupiter - Preliminary profiles of the atmosphere and ionosphere, *Science*, 204, 976–978.

- [6] Eshleman, V. R., G. L. Tyler, G. E. Wood, G. F. Lindal, J. D. Anderson, G. S. Levy, and T. A. Croft (1979b), Radio science with Voyager at Jupiter - Initial Voyager 2 results and a Voyager 1 measure of the Io torus, *Science*, 206, 959– 962.
- [7] Winglee, R. M., and P. L. Pritchett (1986), The generation of low-frequency electrostatic waves in association with auroral kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*, 91, 13,531– 13,541.
- [8] Delamere, P. A., F. Bagenal, R. E. Ergun, Y.-J. Su (2003), Momentum transfer between the Io plasma wake and Jupiter's ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JA009530.
- [9] Wilson, R. G. (1968), Fifth Source of Jupiter Decametric Radiation, *Nature*, 220, 1215– 1218.
- [10] Smith A. G., G. R. Lebo, N. F. Six, Jr., T. D. Carr, H. Bollhagen, J. May, and J. Levy (1965), *Astrophys. J.*, 141, 457–477.