

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360405  
 研究課題名（和文） 宇宙環境シミュレータによる次世代イオンエンジン搭載宇宙機の  
 プラズマ干渉解析・評価  
 研究課題名（英文） Numerical analysis of plasma interference of spacecraft equipped  
 with advanced ion engine by using space environment simulator  
 研究代表者  
 臼井 英之 (USUI HIDEYUKI)  
 京都大学・生存圏研究所・准教授  
 研究者番号：10243081

## 研究成果の概要：

プラズマ粒子シミュレーションをベースとした宇宙環境シミュレータを応用し、イオンエンジンプラズマ干渉解析用数値シミュレータ開発を行った。また、それを用いて、イオンエンジン近傍のイオンビームの中和電子ダイナミクスとそのパラメータ依存およびイオンビームと電子の相互作用に関する計算機シミュレーション解析を行い、次世代イオンエンジン搭載宇宙機のプラズマ干渉に関する基礎的な知見を得ることが出来た。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	3,400,000	0	3,400,000
2007 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	9,000,000	1,680,000	10,680,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、航空宇宙工学

キーワード：イオンエンジン、プラズマ干渉、プラズマシミュレーション、宇宙機、宇宙環境

## 1. 研究開始当初の背景

小惑星探査機「はやぶさ」搭載のイオンエンジン実用化に伴い、将来の外惑星探査や大型実用衛星においてイオンエンジンの利用が大いに期待されている。イオンエンジンからのプラズマ噴射は、宇宙機電位を変動させ、自ら放出プラズマの入射を受けるといったダイナミックな干渉現象を引き起す可能性がある。また、衛星帯電や表面のイオンスパッタリング、また電磁干渉なども誘発する可能性がある。しかし、現状では、次世代の大型イオンスラスタ利用においては、これらのプラズマ干渉が衛星システムやその制御に対してどのような影響を及ぼすかについては、まだ定量的な解析、評価はなされていない。

い。大規模システムにおけるイオンエンジン利用においてプラズマ干渉の定量評価は急務である。

一方、数値シミュレーションによる仮想実験が従来の実験・理論に並ぶ重要な研究手法として着目されている。我々は、プラズマシミュレーションを、人類の宇宙進出、宇宙開発に役立つプラズマシミュレーションへと拡張する試みをすでに開始し、「宇宙環境シミュレータ」という宇宙工学用数値プラズマチェンバーの開発を進めてきている。

本研究課題では、上に述べた2つの観点のひとつに融合させる。具体的には、現在開発を進めている数値チェンバー「宇宙環境シミュレータ」を応用し「イオンエンジンプラズマ

干渉解析数値シミュレータ」を開発し、これを用いた大規模粒子モデルシミュレーションにより、これまで地上試験では困難であった大規模イオンスラスタ利用時のプラズマブルーム干渉の定量解析・評価を行う。

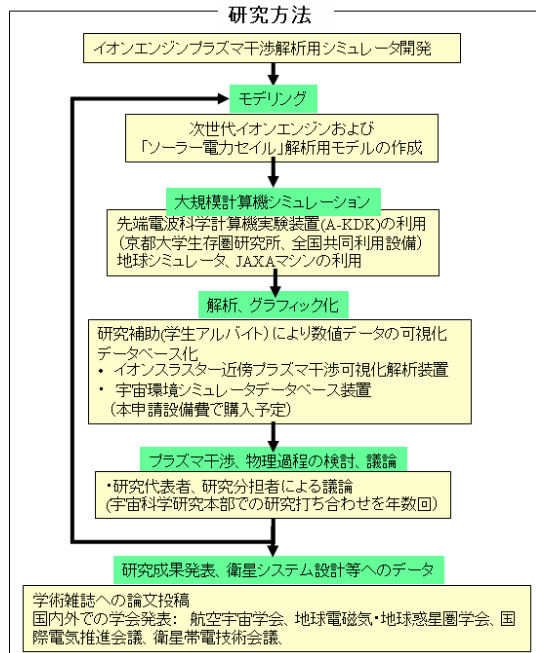
## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地上実験では不可能な大規模イオンスラスタブルーム干渉をプラズマプロセスにも着目しながら大規模数値シミュレーションにより定量解析、評価を行うものであり、以下の目標を達成することを目指す。

- (1) イオンエンジンプラズマ干渉解析用の数値シミュレータ開発
- (2) 次世代イオンエンジンを例としたプラズマ干渉の定量的検証
- (3) プラズマ干渉を最小限に抑えるための技術的提言

## 3. 研究の方法

宇宙環境シミュレータは粒子モデル(Particle-In-Cell 法)を用いたプラズマシミュレーションエンジンであり、これを応用し、イオンスラスタを含む衛星表面形状、材質、光電子、2次電子放出、スラスタ近傍での中性粒子分布と衝突による電荷交換効果などをモデル内に取り込む。このような現実的なモデルを用いて、イオンエンジンから放出されるイオンビームと中和電子のプラズマ相互作用(ビームプラズマ不安定性など)を精確に再現しつつ、衛星システムへの具体的な影響を評価できるイオンエンジンプラズ



マ干渉解析用の数値シミュレータを開発する。これを用いて様々な側面から次世代イオンエンジンを例としたプラズマ干渉の定量的検証を行う。

本研究の進め方を右図に示す。新しく開発されるイオンエンジンプラズマ干渉解析用数値シミュレータを用いて、モデリング、シミュレーション、可視化、解析、検討を一つのループとしてとらえ、それを繰り返すことにより各研究項目の遂行を行う。本研究では膨大な主記憶容量を必要とする3次元のPICシミュレーションを行うため、京都大学生存圏研究所の全国共同利用施設である先端電波科学計算機実験装置(AKDK)を主に利用する。

## 4. 研究成果

3次元プラズマモデル内に、イオンスラスタからのイオンビーム、中和電子放出、イオンスラスタを含む衛星形状、表面素材特性(誘電体特性や光電子)、を数値的に扱えるように工夫を加え、数値チェンバー内でイオンエンジン利用に起因するプラズマ干渉の解析がバーチャルに行えるようにした。

シミュレータの高性能化に関しては、イオン噴射口の高密度プラズマ領域をモデル化する検討を行った。背景プラズマに比べて桁違いに高い密度となるイオンビーム領域では、そのデバイ長が非常に短い。粒子シミュレーションでは、空間グリッド幅をデバイ長程度に取る必要があり、高密度ビーム領域を含めた空間に取り入れるには、膨大な空間格子数が必要となる。これを回避するために、局所的に空間格子を小さくできる非一様格子システムを粒子法に導入する必要があることがわかった。

シミュレーション解析としては以下の2点を主として行った。

### (1) イオンビーム中和電子の温度分布解析

JAXAにおいてイオンエンジン内のイオン加速グリッド損耗の解析ツールを開発中であるが、イオンビームを中和する電子には温度一定を仮定したモデルを用いている。電子モデルはイオンビーム領域の電位分布に影響を与えるため、それによって加速されるグリッド損耗イオンやCEXイオンなどのダイナミクスも影響を受ける可能性がある。結果としてグリッド寿命評価にも影響を与えかねない。地上実験では中和電子パラメータの計測は非常に困難であるため、本研究では、電子を粒子として扱い、イオンビーム中和における電子分布や温度分布についてシミュ

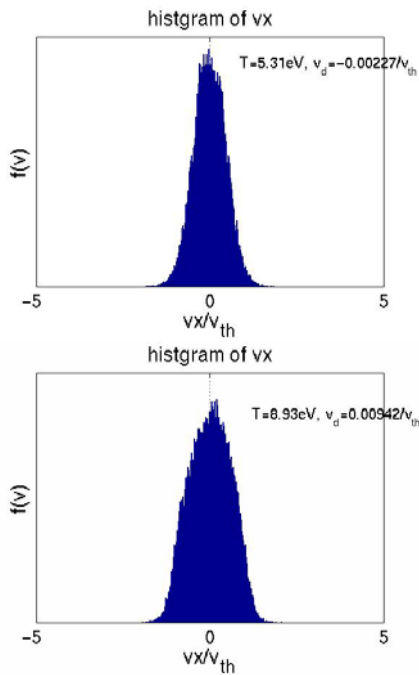


図1：イオンビーム中心（上図）及びビーム外周領域（下図）での電子分布関数

レーション解析を行い、温度一定の電子モデルとの違いについて検討を行った。イオンビームについては定常的な分布モデルを用い、それによって得られる電位分布中に中和電子を放出しその定常解を求めることにより電子分布を得た。その結果、図1に示すように、各イオンビームレットの境界領域においてその内部よりも電子温度が若干高めであることがわかった。境界領域において電位空間変動が大きいため電子の加熱が局所的に生じている可能性を示唆するものである。

(2) 中和電子ダイナミクスに関するプラズマ粒子シミュレーション

次に、イオンスラスタから噴射されるイオンビームとそれを電荷中和させるために放出される熱電子との相互作用に着目したプラズマ粒子シミュレーションを行った。シミュレーション空間の一方にスラスタを仮定し、そこからイオンビームと中和電子をシミュレーションモデル空間に注入し、それぞれの時間空間発展を解析した。プラズマパラメータは、現実モデルを参考にし、イオンビーム速度に対して電子熱速度が十分に大きい場合について着目した。図2にシミュレーション例を示す。得られた知見のひとつとして、数キロボルトで加速される冷たいイオンビームの先頭付近で電位の壁が生じ、それによって中和用電子が跳ね返され、結果として

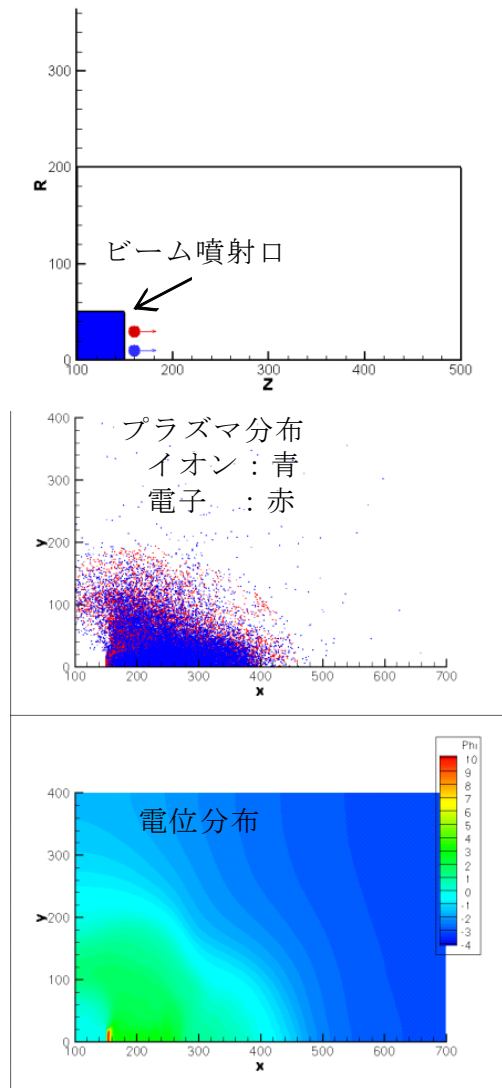


図2：ビーム噴射口から放出されたプラズマ分布（上図）および電位分布（下図）

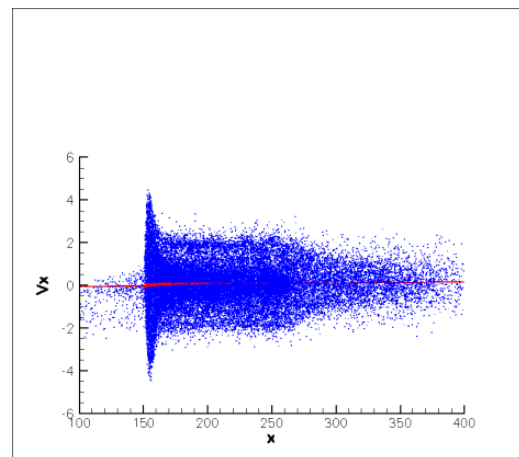


図3：ビーム方向の速度位相図。ビーム放出口近傍で電子加熱が見られる。

イオンビーム領域全域において電子の熱化が顕著であることが分かった。図3にその様子を示す。また、イオンビーム先頭付近では、静電的な擾乱も確認された。従来のスラスタ噴射イオンビーム解析においては、放出された中和電子の温度が空間的にも時間的にも一定という仮定をおいたが、今回のプラズマ粒子シミュレーションによって電子温度が初期の温度より高くなる可能性があることを明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① T. Muranaka, S. Hosoda, J. Kim, S. Hatta, K. Ikeda, T. Hamanaga, M. Cho, H. Usui, H. O. Ueda, K. Koga and T. Goka, Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT), IEEE transactions on plasma science, 36, 2336-2349, (2008), 査読有
- ② 臼井英之, 杉崎由典, 富田清司, 大村善治, 三宅洋平, 青木正樹, プラズマ粒子シミュレーション電流計算の OpenMP 並列化手法, 情報処理学会 ACS 論文誌, 1, 250-260, (2008), 査読有
- ③ Y. Miyake and H. Usui, Analysis of Photoelectron Effect on the Antenna Impedance via Particle-In-Cell Simulation, Radio Science, 43, RS4006-1-RS4006-2, (2008), 査読有
- ④ Y. Miyake, H. Usui, H. Kojima, Y. Omura, and H. Matsumoto, Electromagnetic Particle-In-Cell Simulation on the Impedance of a Dipole Antenna Surrounded by an Ion Sheath, Radio Science, 43, RS3004-1-RS3004-14 (2008), 査読有
- ⑤ H. Usui, Y. Miyake, M. Okada, Y. Omura, T. Sugiyama, K. T. Murata, D. Matsuoka, H. O. Ueda, Development and Application of Geospace Environment Simulator for the Analysis of Spacecraft-Plasma Interactions, IEEE Transactions on plasma science, Volume 34, Issue 5, 2094- 2102, (2006), 査読有
- ⑥ I. Funaki, H. Usui, Y. Nakayama, and H. Kuninaka, Experimental simulation of spacecraft charging by artificial ion-beam emission, IEEE Transactions on plasma science, Volume

34, Issue 5, 2031- 2037, (2006), 査読有

[学会発表] (計 25 件)

- ① 臼井英之, 宇宙機とプラズマの相互作用 (Spacecraft-Plasma Interactions), 第3回プラズマ科学シンポジウム (PSS2009/SPP-26), 2009年2月2日, 名古屋大学 豊田講堂・シンポジオン
- ② J. Wang, H. Usui, C.Chang, Ion Beam Neutralization: Theory and Fully Kinetic Simulations, 第5回宇宙環境シンポジウム, つくば国際会議場, 平成20年12月18日.
- ③ 臼井英之, 篠原 育, 山川 宏, 船木 一幸, 中村 雅夫, 梶村 好宏, 沼波 政倫, 秋田 大輔, 上田 裕子, 惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会, 2008年10月11日, 仙台市戦災復興記念館
- ④ H. USUI, Y. KAJIMURA, M. NUNAMI, I. FUNAKI, I. SHINOHARA, H. YAMAKAWA, M. NAKAMURA, D. AKITA and H. O. UEDA, Multi-Scale Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System, 14th International Congress on Plasma Physics, Hakata, Japan, September 11, (2008)
- ⑤ Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and Y. Omura, Analysis of Receiving Antenna Characteristics in Space Plasma Environment via Particle-In-Cell Simulation, XXIXth URSI General Assembly, Chicago, August, 2008.
- ⑥ H. Usui, K. Imasato, Y. Omura and H. Kuninaka, Three-Dimensional Particle-In-Cell Simulations on Active Mitigation of Spacecraft Charging in the Earth's Polar Region, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics symposium, July 25, 2008, Kyoto University Clock Tower Centennial Hall, (2008).
- ⑦ H. Usui, K. Imasato, and H. Kuninaka, Particle-In-Cell simulations on spacecraft charging mitigation by plasma injection, COSPAR 2008, Montreal, Canada, July 15, (2008).
- ⑧ H. Usui, K. Imasato, Y. Omura, H. Kuninaka, Numerical study on spacecraft charging mitigation by plasma injection, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, Japan June 3, (2008).

- ⑨ Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and Y. Omura, Particle-In-Cell Simulation on the Effective Length of a Receiving Antenna in Space Plasma Environment, AOGS 2008, Busan, June, 2008.
- ⑩ H. Usui, K. Imasato, Y. Omura, H. Kuninaka, Particle-In-Cell simulations on active mitigation of spacecraft charging in the Earth's polar region, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議, 2008 年 5 月 30 日, (2008).
- ⑪ Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and Y. Omura, Numerical Analysis on Electric Field Antennas in Space Plasma Environment via Electromagnetic Particle-In-Cell Simulation, American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec., 2007.
- ⑫ 村中崇信、上田裕子、臼井英之、篠原育、宇宙機環境プラズマ解析コードの開発、第 51 回宇宙科学技術連合講演会、札幌コンベンションセンター (SORA)、札幌、平成 19 年 10 月 29-31 日
- ⑬ 今里康二郎、臼井英之、大村善治、國中均、3 次元プラズマ粒子シミュレーションによる極軌道衛星の帯電解析とその緩和手法の検討、第 51 回宇宙科学技術連合講演会、札幌コンベンションセンター (SORA)、札幌、平成 19 年 10 月 29-31 日
- ⑭ H. Usui and K. Imasato, PIC Simulations on Charge Mitigation by Plasma Release, IEPC-2007-104, 30th International electric propulsion conference (IEPC), Florence, Italy, September 17-20, (2007).
- ⑮ Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, Y. Omura, and H. Matsumoto, Effect of Photoelectrons on the Impedance of Electric Field Antenna onboard Spacecraft, 3B3-3, 2007 International Symposium on Antennas and Propagation, Niigata, Japan, Aug 20-24., (2007).
- ⑯ Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, Y. Omura, and H. Matsumoto, Effect of Photoelectrons on the Impedance of the Electric Field Antennas onboard Spacecraft: EM-PIC Simulation Analysis, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, Jul., 2007.
- ⑰ Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and Y. Omura, EM-PIC Simulation Analysis on the Characteristics of Satellite-Onboard Antenna in Space Plasma, International CAWSES Symposium, Kyoto, October, 2007.
- ⑱ Miyake, Y., H. Usui, H. Kojima, and Y. Omura, EM-PIC Simulation Analysis on the Characteristics of Satellite-Onboard Antenna in Space Plasma, International CAWSES Symposium, Kyoto, Japan, Oct., 2007.
- ⑲ H. Usui, Y. Miyake, H. Kojima, Y. Omura, H. Matsumoto, "Effect of Photoelectrons on Electric Field Antenna in Space" (Invited), North American Radio Science Meeting URSI 2007, Ottawa, Canada, July 22-26, 2007.
- ⑳ H. Usui, Y. Miyake, K. Imasato, Y. Omura, H. O. Ueda, I. Shinohara, M. Okada, and H. Matsumoto, Application of PIC simulations to the analysis of spacecraft-plasma interactions (Invited), 8th International School / Symposium for Space Simulations, Kauai, Hawaii, USA, February 24-March 3, 2007.
- 21 Y. Miyake, H. Usui, H. Kojima, Y. Omura, H. Matsumoto, Effect of Photoelectrons on the Impedance of an Electric Field Antenna in the Spacecraft Environment, 8th International School / Symposium for Space Simulations, Kauai, Hawaii, USA, February 24-March 3, 2007.
- 22 Kojiro Imasato, H. Usui and Y. Omura, Basic analysis of the spacecraft charging with three-dimensional electrostatic plasma simulation, 8th International School / Symposium for Space Simulations, Kauai, Hawaii, USA, February 24-March 3, 2007.
- 23 Hiroko O. Ueda, Masaki Okada, Hideyuki Usui, Koujiro Imasato, Spacecraft charging simulation with full-particle ES code modeling of the REIMEI satellite observation, 8th International School / Symposium for Space Simulations, Kauai, Hawaii, USA, February 24-March 3, 2007.
- 24 臼井英之、今里康二郎、上田裕子、岡田雅樹、レイメイ衛星搭載のラングミュアプローブ特性に関する PIC シミュレーション - 進捗報告 -, 第 3 回宇宙環境シンポジウム、JAXA つくば宇宙センター、12/8/2006.
- 25 臼井英之、篠原育、上田裕子、岡田雅樹、衛星環境プラズマ数値シミュレータ開発、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、相模原市産業会館・けやき会館、11 月 4-7 日, 2006.

〔図書〕(計 1 件)

H. Usui and Y. Omura (Edit), *Advanced Methods for Space Simulations*, TerraPub, 360 ページ (総数), (2007)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

臼井 英之 (USUI HIDEYUKI)  
京都大学・生存圏研究所・准教授  
研究者番号：10243081

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

國中 均 (KUNINAKA HITOSHI)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・  
教授  
研究者番号：60234465

大村 善治 (OMURA YOSHIHARU)  
京都大学・生存圏研究所・教授  
研究者番号：50177002