

宇宙論的な銀河の落下現象：その発見、プラズマ物理学的な意味、および ASTRO-H 衛星を用いた検証 Effects of cosmological infall of galaxies: its discovery, plasma physical implications, and verification with ASTRO-H

牧島 一夫^{1*}
MAKISHIMA, Kazuo^{1*}

¹ 東京大学理学系研究科物理学専攻
¹Department of Physics, University of Tokyo

星々の集団である銀河は、数百個が重力的に集まり「銀河団」を構成する。それら銀河団は天体の階層構造の頂点をなす存在だが、それらは単なる銀河の集団ではなく、いずれの銀河団でも質量の約 85% は暗黒物質で、星々の質量はわずか数% に過ぎない。残る約 10% は X 線を放射するプラズマ (以下 ICM = Intra Cluster Medium) である。ICM は宇宙の既知のバリオンの最大の成分であり、密度は 10^3 m^{-3} 程度、温度は数千万度から 1 億度で、広がった強い熱的 X 線を放射する。この温度は暗黒物質の作る重力ポテンシャルの深さに対応するので、ICM は宇宙の構造形成のさい、断熱圧縮され高温になったと考えられる。ICM は高温で低密度なため、平均粒子間隔は $\sim 0.1 \text{ m}$ 、デバイ長は $\sim 10 \text{ km}$ 、電子平均自由行程は $\sim 10^{18} \text{ m}$ と、理想的な古典的プラズマである。そこには $\sim 10^{-10} \text{ T}$ の磁場が存在し、プラズマ β は 100 のオーダーとなる。実験室プラズマには無い顕著な特徴として、ICM は暗黒物質の重力により安定に閉じ込められている。

銀河団の中心部では ICM の密度が高いため、宇宙年齢の間には ICM が X 線放射で冷え、圧力低下をきたすと計算される。すると周辺から ICM が重力により落下し、中心部で ICM の密度が上がってさらに冷却が進むであろう。その結果、ICM 中には「cooling flow」と呼ばれる暴走的な冷却が生じると考えられ、実際 1980 年代から、それを支持すると考えられる X 線の観測結果が続々と報告されてきた。

我々は X 線で銀河団の観測を続け、1993 年には自ら開発製作したガス蛍光比例計数管を日本 4 機目の X 線衛星「あすか」に載せて銀河団の観測を行った。その結果、銀河団の中心に向け ICM は温度低下を示すが、決して暴走的に冷えておらず、未知の加熱源があることを発見した。それを説明するため我々は、(1) 中心の巨大楕円銀河は閉じた磁気圏と開いた磁力線領域をもち、低温プラズマは磁気圏内部に閉じ込められ、(2) 銀河団空間を飛び回る銀河たち (中心銀河を除く) は ICM から抵抗を受けて ICM 中に磁気乱流を作り出し、(3) そのエネルギーが磁気波動や磁気リコネクションで低温プラズマを加熱し、(4) 二相のプラズマは太陽コロナと同じく Rosner-Tucker-Vaiana 機構で熱的に安定化され、(5) 銀河たちはエネルギーを失いポテンシャル中心に目がけ徐々に落下するはず、というプラズマ物理学的な描像を提示した (Makishima et al., Publ. Astro. Soc. Japan 53, 401, 2001)。この描像はその後、様々な形で強化され、たとえば 2009~2012 年には (1) の確証が得られた。

さらに昨年、(5) を決定づける観測結果が得られた。すなわち近傍銀河から赤方偏移 0.9 までの 34 個の銀河団を、X 線と可視光で観測した結果、近傍銀河では X 線放射 ICM に比べて銀河が中心に集中するのに対し、遠方 (つまり若い) 銀河団では、銀河が ICM 球の周辺まで分布していることが検証できたのである (Gu et al., Astrophys. J. 767, id 157, 2013)。この「宇宙論的な銀河落下現象」の発見は、単に ICM の加熱源を説明できるだけでなく、「銀河が ICM 中を運動しても両者の間には相互作用は無い」とする従来の通説を覆すインパクトをもち、さらにこれまで認識されなかった、宇宙で最大級のエネルギーの流れを発見したことを意味する。加えて、近傍の銀河団では暗黒物質よりも銀河たちは中心に強く集中し、ICM がやや広がるという既知の事実を自然に説明でき、ICM の中に太陽組成の 1/3 ほどの重元素を含むという事実も、銀河が ICM と強く相互作用することで説明できる。さらに銀河天文学で長らく謎だった「環境効果」、つまり過去より現在ほど、また銀河団の中心にゆくほど、渦巻き銀河が減り楕円銀河が増えることも、ICM との相互作用に起源を求めることができそうである。

我々は現在、2015 年の打ち上げに向け、X 線衛星 ASTRO-H を全世界的な協力で開発中である。同衛星が軌道に乗った暁には、従来より 1 桁よいエネルギー分解能を誇る軟 X 線精密分光計で、運動する銀河が ICM を局所的にひきずるドップラー効果を検出できると期待され、我々の描像がさらに決定的になると期待される。さらに我々が開発に貢献している硬 X 線イメージャーや軟ガンマ線検出器を用いることで、銀河が失った力学的エネルギーが、プラズマ加熱だけでなく粒子加速をも引き起こす可能性を、本格的に探査できるようになり、宇宙 X 線の研究領域大きく拡大すると期待される。

キーワード: 銀河と銀河団, 銀河団プラズマ, X 線放射, 磁気プラズマ過程, ASTRO-H 衛星

Keywords: galaxies and their clusters, intra-cluster medium, X-ray emission, magnetoplasma effects, ASTRO-H satellite

磁気ノズル中のプラズマ流運動量の直接計測と電気推進機の開発 Direct measurement of the plasma momentum in a magnetic nozzle helicon plasma for electric propulsion

高橋 和貴^{1*}; Charles Christine²; Boswell Rod²; 千葉 愛貴¹; 安藤 晃¹
TAKAHASHI, Kazunori^{1*}; CHARLES, Christine²; BOSWELL, Rod²; CHIBA, Aiki¹; ANDO, Akira¹

¹ 東北大学大学院工学研究科, ² オーストラリア国立大学 SP3 Laboratory

¹Department of Electrical Engineering, Tohoku University, ²Space Plasma, Power and Propulsion Laboratory, The Australian National University

The ion and electron energy distribution functions of a low-pressure, current-free helicon plasma in a magnetic nozzle configuration are experimentally investigated by electrostatic Langmuir probes including a radiofrequency compensated probe and a retarding field energy analyzer; the ions are electrostatically accelerated by a spontaneous potential drop of a double layer and/or ambipolar electric field, and only the energetic electrons can overcome the potential structure. The results indicate that the accelerated ions are spontaneously neutralized by the energetic electrons. These findings propose that the source system is applicable to an electrodeless and neutralizer-free plasma thruster.

Momentum of the plasma flow is one of essential physical parameters dominating the particle acceleration in both laboratory and space. Especially their interaction with magnetic fields have been significant subject associated with natural plasmas (astrophysical jets, magnetospheric physics, solar dynamics, aurora dynamics, etc.) and artificial plasmas (thermonuclear fusion devices, electric propulsion systems, plasma devices for material processing, etc.). The plasma momentum is equal in magnitude and opposite in direction to a thrust imparted from a plasma thruster for the electric propulsion device. The direct measurement of the thrust imparted from a magnetic nozzle helicon plasma thruster is successfully measured by using a pendulum thrust balance immersed in vacuum, where the thrust components arising from the presence of the physical boundaries and magnetic nozzle are also independently measured by attaching each component to the thrust balance. Further a laboratory experiment of a helicon plasma thruster is established to control only a plasma cross-field diffusion in a rapidly-divergent magnetic nozzle while maintaining a constant plasma injection into a magnetic nozzle. The thrust component due to a plasma pressure force inside the source cavity is constant and that due to the magnetic nozzle increases when inhibiting the cross-field diffusion in the nozzle. The latter force is well explained by an electron-diamagnetic-induced plasma momentum derived from two-dimensional momentum equations and approaches the theoretical limit derived from a one-dimensional model assuming an ideal magnetic nozzle with no plasma loss. Further a new source system approaching the ideal magnetic nozzle and the recent progress of the thruster performance will also be shown. It is noted that the above-described phenomena are occurring in current-free source system. These insights into the plasma thruster dynamics might include a common physics relating to the plasma acceleration in a non-uniform magnetic field in both the laboratory and space.

キーワード: プラズマ運動量, 磁気ノズル, ヘリコンプラズマ, 電気推進

Keywords: plasma momentum, magnetic nozzle, helicon plasma, electric propulsion

直線型磁化プラズマ装置を用いたプラズマ波動・粒子相互作用の直接観測実験 Laboratory in-situ experiments for plasma wave-particle interaction in linear magnetized plasma machine

小木曾 舜^{1*}; 加藤 雄人²; 下山 学¹; 金子 俊郎³; 文 贊鎬³; 平原 聖文¹
KOGISO, Shun^{1*}; KATO, Yuto²; SHIMOYAMA, Manabu¹; KANEKO, Toshiro³; MOON, Chanhoo³; HIRAHARA, Masafumi¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ³ 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻
¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Tohoku University, ³Graduate School of Engineering, Tohoku University

近年、ジオスペースにおける放射線帯の高エネルギー電子の起源として、プラズマ波動と粒子の相互作用による粒子加速過程が重要な役割を担っていると考えられている。この波動・粒子相互作用の観測を目的として、電場と粒子速度の同時観測から波動・粒子間のエネルギーフラックスを算出する波動・粒子相互作用解析装置 (WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer) の開発が進められている。現在、我々はこの WPIA の観測手法を用いてプラズマの波動・粒子相互作用を室内実験にて直接観測する試みを行っている。

本研究は直線型磁化プラズマ装置である東北大学 Q_T -Upgrade Machine を用いて行った。 Q_T -Upgrade Machine は直径 0.2 m、長さ 4.5 m の真空チャンバーを用いた装置であり、チャンバー内の実験領域において ECR 放電による高電子温度プラズマ (~ 3 eV) と低温熱電子 (~ 0.2 eV) を重畳することで電子温度勾配 (ETG: electron temperature gradient) を形成することができる。電子温度勾配の制御により ETG モード (~ 0.5 MHz) が励起することを示した Moon et al. [Rev. Sci. Instrum., 2010] による実験では、ドリフト波モードの kHz 帯の低周波揺動も同時に励起されることが報告されている。本研究ではこの低周波揺動を対象に、チャンバー内の揺動の電場ベクトルと電流ベクトルを同時に計測し、それらのベクトルからエネルギー交換量の算出を行う。計測には、電場ベクトル計測用のツインプローブと電流ベクトル計測用のマッハプローブを組み合わせたコンビネーションプローブを新たに開発し使用した。プローブを真空チャンバー内で可動させる機構を設けることにより、チャンバーの軸方向および動径方向、方位角方向の三成分ベクトルを計測可能である。

現在は計測した電場ベクトルと電流ベクトルの内積演算から、相互作用におけるエネルギー交換量の定量的な評価を行うことを目指し、解析を進めている段階である。本講演では、コンビネーションプローブの性能評価に加え、観測された電場の揺動と電流の揺動の位相関係や、揺動の成長を捉えた過渡応答計測についての詳細な解析結果を報告する予定である。

大型レーザーを用いた無衝突ワイベル衝撃波の生成 Weibel instability mediated collisionless shock generation using large-scale laser systems

坂和 洋一^{1*}; 森田 太智¹; 蔵満 康浩²; 加藤 恒彦³; 森高 外征雄¹; 佐野 孝好¹; 富田 健太郎⁴; 松清 修一⁴; 大西 直文⁵; 水田 晃⁶; Woolsey N⁷; Gregori G⁸; Koenig M⁹; Spitkovsky A¹⁰; Huntington C¹¹; Kugland N L¹¹; Ross J S¹¹; Park H-S¹¹; Remington B¹¹; 高部 英明¹
SAKAWA, Youichi^{1*}; MORITA, Taichi¹; KURAMITSU, Yasuhiro²; KATO, Tsunehiko³; MORITAKA, Toseo¹; SANO, Takayoshi¹; TOMITA, Kentaro⁴; MATSUKIYO, Shuichi⁴; OHNISHI, Naofumi⁵; MIZUTA, Akira⁶; WOOLSEY, N⁷; GREGORI, G⁸; KOENIG, M⁹; SPITKOVSKY, A¹⁰; HUNTINGTON, C¹¹; KUGLAND, N L¹¹; ROSS, J S¹¹; PARK, H-S¹¹; REMINGTON, B¹¹; TAKABE, Hideaki¹

¹ 阪大レーザー研, ² 国立中央大学 台湾, ³ 広島大, ⁴ 九州大, ⁵ 東北大, ⁶ 理化学研究所, ⁷ ヨーク大 英国, ⁸ オックスフォード大 英国, ⁹ LULI フランス, ¹⁰ プリンストン大 米国, ¹¹ ローレンツリバモア研 米国
¹ ILE Osaka Univ, ² National Central University Taiwa, ³ Hiroshima Univ, ⁴ Kyushu Univ, ⁵ Tohoku Univ, ⁶ RIKEN, ⁷ York Univ UK, ⁸ Oxford Univ UK, ⁹ LULI France, ¹⁰ Princeton Univ USA, ¹¹ LLNL USA

Collisionless shocks are considered to be sources of high-energy particles or cosmic rays, and occur when a coulomb mean-free-path is longer than the shock-front thickness. In such plasmas wave-particle interactions and collective effects play an essential role in the shock formation. In addition to local observations of spaces plasmas by spacecraft and global emission measurements of astrophysical plasmas, a laboratory experiment can be an alternative approach to study the formation of collisionless shocks.

In this paper, we investigate the formation of Weibel-instability mediated collisionless shocks in counter-streaming plasmas produced by large-scale laser systems. Kato and Takabe investigated the collisionless Weibel shock in two-dimensional PIC simulation using the injection method [1]. A scaling-law derived in simulation revealed that high-density (electron density $\sim 10^{20}$ cm⁻³), high-flow velocity (~ 1000 km/s) plasmas are required to produce the collisionless Weibel shock. In order to achieve these plasma parameters, a MJ-class high-power laser system or the world largest laser, the NIF laser (LLNL, USA), is required. Before starting the NIF experiment, we conducted OMEGA laser (LLE, USA) experiment and measured plasma parameters such as electron and ion temperatures, electron density, and flow velocity of counter-streaming plasmas using collective Thomson scattering, and current filaments produced by the Weibel instability using proton-radiography.

[1] T. N. Kato and H. Takabe, *The Astrophys. J. Lett.* 681, L93 (2008).

キーワード: 無衝突衝撃波, ワイベル不安定性, 大型レーザー実験

Keywords: collisionless shock, weibel instability, large-scale laser experiment

激光 XII 号レーザーを用いた無衝突衝撃波の実験的研究 Experimental study on collisionless shocks with high-power laser system "Gekko-XII"

森田 太智^{1*}; 坂和 洋一¹; 石川 大志¹; 山浦 祐太¹; 佐野 孝好¹; 森高 外征雄¹; 富田 健太郎²; 下田 諒²; 佐藤 裕太²; 松清 修一²; 諫山 翔伍²; 原田 大輔²; 大山 達也²; 藤野 亮佑²; 蔵満 康浩³; 米田 仁紀¹⁰; 長嶺 和慶¹⁰; Koenig Michel⁴; Yurchak Roman⁴; Michaut Claire⁵; Woolsey Nigel⁶; Crowston Robert⁶; Pelka Alexander⁷; Li Yutong⁸; Yuan Dawei⁸; Yin Chuanlei⁸; Zhong Jiayong⁹; Zhang Kai⁹; 高部 英明¹
MORITA, Taichi^{1*}; SAKAWA, Youichi¹; ISHIKAWA, Taishi¹; YAMAURA, Yuta¹; SANO, Takayoshi¹; MORITAKA, Toseo¹; TOMITA, Kentaro²; SHIMODA, Ryo²; SATO, Yuta²; MATSUKIYO, Shuichi²; ISAYAMA, Shogo²; HARADA, Daisuke²; OYAMA, Tatsuya²; FUJINO, Ryosuke²; KURAMITSU, Yasuhiro³; YONEDA, Hiroki¹⁰; NAGAMINE, Kazuyoshi¹⁰; KOENIG, Michel⁴; YURCHAK, Roman⁴; MICHAUT, Claire⁵; WOOLSEY, Nigel⁶; CROWSTON, Robert⁶; PELKA, Alexander⁷; LI, Yutong⁸; YUAN, Dawei⁸; YIN, Chuanlei⁸; ZHONG, Jiayong⁹; ZHANG, Kai⁹; TAKABE, Hideaki¹

¹ 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ² 九州大学, ³ 国立中央大学, ⁴ LULI, Ecole Polytechnique, ⁵ LUTH, Observatoire de Paris, ⁶ University of York, ⁷ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, ⁸ Institute of Physics, Chinese Academy of Science, ⁹ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, ¹⁰ 電気通信大学レーザー新世代研究センター
¹ Institute of Laser Engineering, Osaka University, ² Kyushu University, ³ National Central University, ⁴ LULI, Ecole Polytechnique, ⁵ LUTH, Observatoire de Paris, ⁶ University of York, ⁷ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, ⁸ Institute of Physics, Chinese Academy of Science, ⁹ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, ¹⁰ Institute for Laser Science, University of Electro-communications

Collisionless shocks play significant roles in particle acceleration, for example, in Earth's bow shock and Supernova remnant shocks. In collisionless shocks, collisions between particles can not account for the formation mechanism and particle-field interactions are essential. Therefore, the shock thickness is much smaller than ion-ion mean free path and a large electromagnetic field exists at the vicinity of the shock. Laboratory experiments with high-power laser systems can be alternative to observations or in-situ measurements by satellites. Collisionless shocks have been produced and investigated in counter-streaming laser-produced plasmas. To investigate collisionless shocks, the measurements of an electric or magnetic field and of fundamental plasma parameters are required. Shocks have been measured by optical diagnostics such as interferometry, shadowgraphy, optical pyrometry, and Thomson scattering to obtain the fundamental plasma parameters: density, temperature, charge state, and flow velocity. We will present recent results from series of our experiments on collisionless shocks with Gekko-XII laser system.

キーワード: 無衝突衝撃波, レーザー, プラズマ, プラズマ計測
Keywords: collisionless shock, laser, plasma, diagnostics

レーザー実験を用いた無衝突衝撃波研究の現状と課題 Current status and issues of a study on collisionless shocks by using laser experiment

松清 修一^{1*}; 坂和 洋一²; 蔵満 康浩³; 富田 健太郎¹; 森田 太智²; 山崎 了⁴; 高部 英明²
MATSUKIYO, Shuichi^{1*}; SAKAWA, Youichi²; KURAMITSU, Yasuhiro³; TOMITA, Kentaro¹; MORITA, Taichi²; YAMAZAKI, Ryo⁴; TAKABE, Hideaki²

¹九州大学, ²大阪大学, ³国立中央大学, ⁴青山学院大学

¹Kyushu University, ²Osaka University, ³National Central University, ⁴Aoyama Gakuin University

Collisionless shocks are ubiquitous in various space and astrophysical environments like a termination shock of a stellar wind, planetary bow shocks, supernova remnant shocks, etc. Recently, collisionless shocks have been able to be experimentally generated by using high power laser facilities. One of the advantages in an experimental study is that both the global and the local structures of the phenomenon are simultaneously accessible in principle, which is inherently difficult in-situ or remote sensing observations in space. However, the shocks produced in the laser experiments and the method for measuring them are quite different from those in space. A majority of the shocks produced in laser experiments are unmagnetized shocks. The methodology for measuring their local quantities in the transition region has not been established.

On the other hand, basic structures and dissipation mechanisms in an unmagnetized shock have not been well understood theoretically. So far high Mach number electrostatic shocks are thought to be generated by the counter streams of two non-identical plasmas. In this study microstructures of such electrostatic shocks are studied by using a full particle-in-cell simulation. In addition, characteristics and issues of currently adopted method of measuring local quantities in shock transition region, known as Thomson scattering measurement, are also discussed.

キーワード: 無衝突衝撃波, レーザー実験, 数値実験

Keywords: collisionless shock, laser experiment, numerical simulation

無電極電気推進のための外部電極群による磁化プラズマ内への電磁場励起過程：1次元PICシミュレーション
Electromagnetic Field Excitation in Magnetized Plasmas by External Electrodes: 1D PIC Simulation Studies

大塚 史子^{1*}; 羽田 亨¹; 篠原 俊二郎²; 谷川 隆夫³
OTSUKA, Fumiko^{1*}; HADA, Tohru¹; SHINOHARA, Shunjiro²; TANIKAWA, Takao³

¹ 九大・総理工, ² 東京農工大・工, ³ 東海大・総科研
¹Interdis. Grad. Sch. Eng. Sci., Kyushu Univ., ²Inst. Eng., TUAT, ³RIST, Tokai Univ.

無電極プラズマ電気推進では、プラズマ外部に電極群を設置することで、プラズマとの接触による電極群損耗を回避できる反面、プラズマを効率良く加速するためには、外部電磁場をプラズマ内部に効率よく励起させる必要がある。本講演では、外部電極群による磁化プラズマ内への電磁場励起過程を1次元PIC計算により議論する。電磁場励起手法として、電極板を用いた静電 (electrostatic: ES) モデルと電流アンテナを用いた電磁 (Electromagnetic: EM) モデルのふたつを検討する。ここで、1次元方向に垂直な背景磁場および低域混成周波数以下の外部周波数を選び、また粒子計算コードは VORPAL(Tech-X 社) を用いる。

ES モデルでは、プラズマ境界の電極板間の電位差により、静電場が励起される。一方、EM モデルでは、プラズマ境界のアンテナ電流に駆動された電磁波動の重ね合わせとして定在波が励起される。外部周波数の関数として、両モデルによる電場浸透度の評価を行う。また、電磁場がプラズマ内部に完全浸透する場合、ES モデルでは空間一様な電場が励起される一方、EM モデルではプラズマ半径に依存して、プラズマ境界が節や腹になる電場が励起される。プラズマ半径に依存する電磁場励起過程を議論する。

キーワード: 外部電磁場, 外部電極群, 磁化プラズマ, 電気推進, 無電極電気推進

Keywords: external electromagnetic field, external electrodes, magnetized plasmas, electric thruster, electrodeless electric thruster

荷電粒子ビーム放出を用いた衛星帯電制御の数値シミュレーション Numerical simulation of satellite potential control using charged particle beam emission

星 賢人^{1*}; 村中 崇信²; 小嶋 浩嗣³; 白井 英之⁴; 篠原 育⁵; 山川 宏³

HOSHI, Kento^{1*}; MURANAKA, Takanobu²; KOJIMA, Hirotsugu³; USUI, Hideyuki⁴; SHINOHARA, Iku⁵; YAMAKAWA, Hiroshi³

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 中京大学工学部電気電子工学科, ³ 京都大学生存圏研究所, ⁴ 神戸大学大学院システム情報学研究科, ⁵ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所

¹Graduate School of Engineering Kyoto University, ²School of Engineering Chukyo University, ³Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁴Graduate school of system informatics Kobe University, ⁵Japan Aerospace Exploration Agency/Institute of Space and Astronautical Science

宇宙空間を飛行する人工衛星は、周辺のプラズマにより自然と帯電してしまうことが知られている。

衛星表面での帯電は放電を引き起こす一因となり搭載電子機器の故障につながると共に、衛星の電位自体が背景プラズマを加速してしまうことで、計測にも悪影響を及ぼす。そのため、通常は可能な限り帯電を抑制するように設計が行われるが、完全に帯電を抑えることは難しい。

そこで電子エミッタ・イオンエミッタを用いて衛星の帯電を緩和することで、計測結果への帯電の影響を抑える手法がよく用いられている。

人工衛星の帯電は周辺のプラズマ中のイオンや電子が衛星表面に衝突することで起こり、一般に衛星表面の電位は流入してくる電流と流出していく電流の平衡を与える点で定まる。イオン電流・電子電流・光電子電流・二次電子電流などの平衡から、日照時には一般に正に帯電し、日陰時には負に帯電する。エミッタ装置を用いて強制的に衛星から電流を流すことで、この平衡点を任意にずらし、衛星の電位を制御することが可能である。

本研究では、数値シミュレーションを用いて、様々なパラメータの下での衛星の帯電制御について検討を行った結果について報告し、どのような状況であれば任意の帯電制御が可能なのかを明らかにする。

キーワード: 衛星帯電, 宇宙機帯電, 荷電粒子ビーム

Keywords: satellite charging, spacecraft charging, charged particle beam