

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870421

研究課題名(和文)大規模粒子シミュレーションによる科学衛星・極限宇宙プラズマ環境相互作用の研究

研究課題名(英文) Large-Scale Particle Simulations on Spacecraft Interactions with Extreme Space Plasma Environment

研究代表者

三宅 洋平 (Miyake, Yohei)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・助教

研究者番号：50547396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：3次元電磁モデル大規模プラズマ粒子シミュレーションにより、太陽近傍プラズマ環境中における科学衛星プラズマ相互作用を定量的に解明した。特に、強太陽放射による大量の光電子放出にもかかわらず、空間電荷制限電流の効果により衛星は負に帯電する。太陽風プラズマ中の対流電場起因する光電子の非対称分布が衛星搭載電場プローブ位置に数100 mV/mの強い人工電場を発生させる。衛星からの光電子放出電流により最大数nT程度の局所磁場変動が起こりうる。などの結果により、これまで人類が経験したことのない極限環境における衛星プラズマ相互作用の実態を明らかにし、将来衛星計画の設計に適用可能な知見を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We study the scientific spacecraft interactions with near-Sun plasma environment via three-dimensional electromagnetic plasma particles simulations. The major results of the present study are summarized as below, and the obtained knowledge is applicable to future scientific spacecraft design. 1. Although a large flux of photoelectrons is emitted from a spacecraft, the spacecraft in near-Sun environment charges negatively due to space-charge effects associated with the emitted electrons. 2. The photoelectron distribution shows clear asymmetry near the spacecraft due to an ambient electric field associated with the plasma convection. This environmental asymmetry results in an intense spurious electric field of 100 mV/m. 3. The large flux of photoelectrons causes local magnetic perturbation around the spacecraft, which is in the order of a few nT.

研究分野：宇宙プラズマ理工学

キーワード：衛星プラズマ相互作用 宇宙プラズマ 衛星帯電 太陽コロナプラズマ プラズマ粒子シミュレーション 衛星電場計測

1. 研究開始当初の背景

近年、科学衛星を用いた宇宙プラズマ探査計画は、地球近傍の超高エネルギー粒子環境や太陽近傍、もしくは惑星圏など、その対象の拡がりを見せつつある。それに伴い、衛星システムと周辺プラズマの相互干渉もこれまでに経験しなかったような様相を見せる可能性がある。特に太陽近傍環境や地球放射線帯などの極限宇宙プラズマ環境における振る舞いは、従来の衛星・プラズマ間相互作用の先行研究で十分に明らかにされているとは言い難い。こうした動向と近年の高性能計算技術の著しい発展に鑑み、衛星・極限宇宙プラズマ環境間相互作用を大規模数値シミュレーションによりいち早く理解し、その影響を予測する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、太陽近傍や地球放射線帯の極限環境における衛星・プラズマ間相互作用を、実際の探査ミッションをできるだけ正確に再現した大規模数値シミュレーション解析により解明する。

その準備段階として、一般的に分散メモリ並列環境への高効率実装が困難とされるプラズマ粒子シミュレーション手法に、独自の動的負荷分散手法を導入することで、数 1000 プロセスオーダーの並列実行に対応したシミュレーションコードを作成する。

上述の準備を経て、極限宇宙環境における衛星プラズマ相互作用に関して、大規模並列シミュレーション解析を実施する。具体的には、太陽近傍環境における衛星プラズマ環境について、太陽探査衛星の帯電特性、衛星周辺光電子バリアおよびウェイクの 3 次元構造とプラズマパラメータ依存性、衛星搭載電磁場計測器に対する衛星周辺プラズマじょう乱の影響、を定量的に評価する。また地球放射線帯の背景環境にあたる、プラズマ圏境界外側の弱いプラズマ流れを想定し、衛星周辺プラズマ環境じょう乱がプローブ電場観測に及ぼす影響を評価する。

3. 研究の方法

本研究では、近年技術的進展の著しい大型計算機システムを最大限に活用可能な数値解析の手法として、プラズマ全粒子シミュレーションを用いる。電子とイオンの双方を粒子として扱うことで、衛星周辺プラズマ電磁気環境の再現に不可欠な荷電分離効果や電子の運動論効果を自己無動着に解き進めることができる。

特に代表者らが開発を進めてきた独自の計算コードである、衛星プラズマ環境シミュレータ EMSES を太陽近傍で生起する衛星プラズマ相互作用研究に応用する。EMSES は、系内に固体表面を内部境界として記述することで、表面帯電やシース、ウェイク、電位バリア形成等の固体プラズマ相互作用を自己無動着に解き進める。コードは分散メモリ

並列計算機向けに最適化されており、スーパーコンピュータを用いた大規模解析が可能である。また太陽近傍環境を再現するために不可欠である、光電子放出と二次電子放出の物理モデルを備えるなど、固体表面プラズマ間相互作用モデル化のための技術的蓄積も豊富である。

4. 研究成果

高効率分散メモリ並列対応コードの開発

3 次元プラズマ粒子計算では、プラズマ速度分布関数を精度よく再現するために、膨大なマクロ荷電粒子を解き進める必要があるため、分散メモリ並列が不可欠である。通常は計算空間を小領域に均等分割し、計算プロセスに割り当てる領域分割法によってこれを実現するが、個々の粒子はシミュレーション空間の任意の位置に存在し、かつ時間的に移動するため、プロセス間の粒子数不均衡が大きな問題となる。そこで、各プロセスが本来の割当領域以外に、粒子数が多い他の小領域の計算を手助けする OhHelp 法を独自に開発し、この問題を解決した。

OhHelp 法では、各プロセスの手助け先の小領域は高々 1 つと規定されているため、粒子数のみならず担当格子点数の観点からも負荷均衡が保たれる。一方で、粒子と場の相互作用計算を手助けするために、プロセス間の粒子の移送パターンが複雑になり、通信コストが増大することが懸念される。この副作用を低減するために、小領域の一部を互いにオーバーラップさせる改良 OhHelp 実装法を考案した。

OhHelp 法を実装した粒子シミュレーションでは、ある領域に粒子が極端に集中している場合であっても、数千プロセスまで良好なスケーラビリティが保たれることが、本研究課題で使用する衛星環境プラズマシミュレータ EMSES において確認された (図 1)。

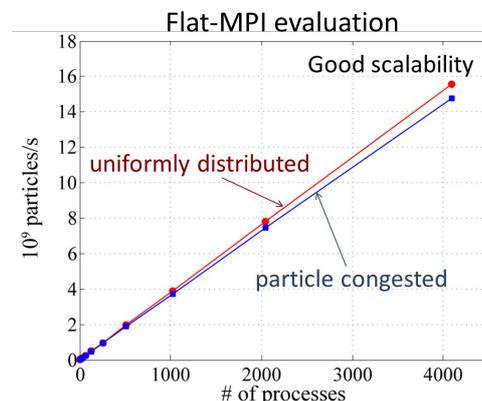


図 1. OhHelp を実装した粒子シミュレーションコードの性能。

太陽近傍極限環境における衛星プラズマ相互作用シミュレーション解析

通常、宇宙プラズマダイナミクスの空間スケールとしては電子デバイ長が最小単位と

なるが、太陽近傍で想定される高密度光電子領域では、この電子デバイススケールが極端に小さくなる（数 cm）。この衛星近傍の微細スケールを解像しつつ、背景宇宙プラズマダイナミクスを追うためには多大な計算資源を要する。で高度化された計算コードを用いることで、最大で一辺 512 グリッド、1 セル辺り 256 個程度の超粒子を組み込んだ 3 次元シミュレーションが可能となり、衛星近傍ローカルプラズマと背景プラズマ環境の相互干渉過程を実スケールで解像可能なシミュレーションが実現した。

図 2 は、EMSES によって得られた Solar Probe Plus 衛星周辺の光電子分布のシミュレーション結果である。計算結果より衛星の定常電位は -20.5 V となり、背景プラズマと比較して負に帯電していることが確認された。またシミュレーション結果の詳細解析により、衛星表面に存在する超高密度の光電子および二次電子層が負の電位バリアを形成しており、それにより衛星表面から一旦放出された大量の光電子や二次電子のほとんどが衛星表面に押し戻されてしまうことが判明した。

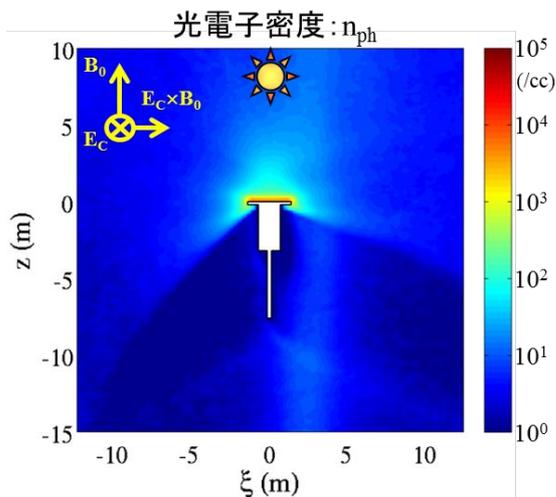


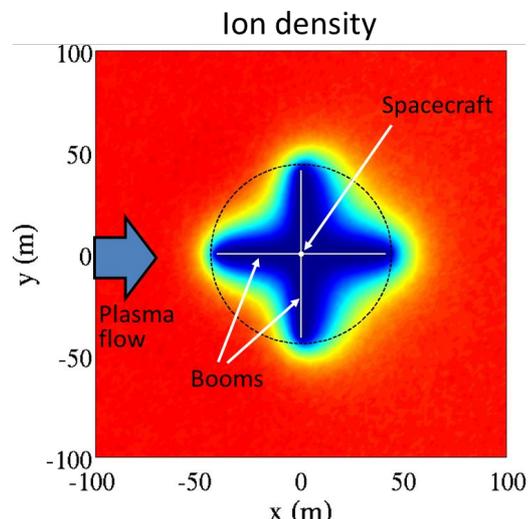
図 2 . 太陽探査衛星周辺の光電子分布

また衛星日照面から放出される高密度光電子は衛星軸 (z 軸) を中心に左右で非対称な分布をもっていることがわかる。これは背景プラズマフロー方向が背景磁場方向 (z 軸) から傾いていることに起因する対流電場が紙面垂直方向に存在するためである。光電子はこの対流電場と背景磁場による $E \times B$ ドリフトにより図中 ξ 軸正方向へと流れるため、左右で非対称な分布となる。このような非対称性は二次電子分布にも見られ、これにより数 100 mV/m のスプリアス電場が衛星周辺で発生することがわかった。また衛星表面から大量に放出される光電子・二次電子電流により衛星周辺の磁場強度も変化することが確認された。ただしこの磁場変化は数 nT のオーダーであり、背景磁場強度 (数 μ T) と比較すると十分に小さく影響は少ない。スプリア

ス電場に関しては科学衛星観測計画に相応の影響を及ぼす可能性があるため、今後はプローブ部分を含めたより現実的な数値モデルを駆使した定量解析が必要である。

低速プラズマ流中で観測される不要電場に関するシミュレーション解析

地球放射帯の背景環境に相当する、プラズマ圏外側領域の希薄プラズマ中における衛星周辺プラズマ環境じょう乱を、大規模粒子シミュレーションにより再現した。ここで用いた問題サイズは、 $280 \times 280 \times 140$ の格子点からなる 3 次元空間におよそ 2×10^9 個のマクロ荷電粒子を配置したものである。本課題で実施したシミュレーションによって得られた衛星周辺のイオン密度分布を図 3 に示す。今回想定したプラズマイオンフロー速度は 0.1 eV 程度であり、背景イオンの温度およそ 1



eV に比べて小さいため、亜音速条件となる。図 3 . 低速プラズマ流中の科学衛星周辺に形成されるイオン空乏領域 .

この条件下では、一般に流れのあるプラズマ中で衛星後方に形成されるウェイク構造は観測されないか、不明瞭であることが予想される。図 3 に示したイオン密度分布においても、正に帯電した衛星周辺にイオンの空乏領域が形成されているが、それが流れの方向に引き延ばされるウェイクの特徴的構造は見受けられない。ただし、弱いプラズマの流れにより、イオン空乏領域の中心が衛星中心よりフローの下流方向に数 m ずれていることが確認された。

この衛星からブームにより進展した電場計測プローブの電位差を、シミュレーション結果から評価したところ、0.1 V 程度となり、プローブで計測される電場の振幅に換算すると 1 mV/m を超えることが明らかになった。これは自然にプラズマ中に存在する電場ではなく、衛星周辺での密度変動の結果として生じた電場であり、科学衛星観測上はスプリアス (不要) 電場として扱われる。今回観測されたスプリアス電場は、磁場を横切るプラ

ズマ流に関連してこの領域で観測される対流電場と同程度の強度であり、衛星「その場」観測における電場計測上、留意すべき結果であると結論付けられた。

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5件)

Marchand, R., Y. Miyake, H. Usui, J. Deca, G. Lapenta, J. C. Matéo-Vélez, R. E. Ergun, A. Sturmer, V. Génot, A. Hilgers, and S. Markidis, Cross-Comparison of Spacecraft-Environment Interaction Model Predictions Applied to Solar Probe Plus near Perihelion, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol. 21, 2014, p. 062901, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4882439>.

Ashida, Y., H. Usui, I. Shinohara, M. Nakamura, I. Funaki, Y. Miyake, and H. Yamakawa, Full Kinetic Simulations of Plasma Flow Interactions with Meso- and Micro-scale Magnetic Dipoles, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol. 21, 2014, p. 122903, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904303>.

Miyake, Y., and H. Nakashima, Low-Cost Load Balancing for Parallel Particle-In-Cell Simulations with Thick Overlapping Layers, *Proc. 12th IEEE Int. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications*, 査読有, 2013, pp. 1107-1114.

Miyake, Y., C. M. Cully, H. Usui, H. Nakashima, Plasma Particle Simulations of Wake Formation Behind a Spacecraft with Thin Wire Booms, *J. Geophys. Res.*, 査読有, Vol. 118, 2013, pp. 5681-5694, doi:10.1002/jgra.50543.

Usui, H., A. Hashimoto, Y. Miyake, Electron Behavior in Ion Beam Neutralization in Electric Propulsion: Full Particle-In-Cell Simulation, *IOP J. Phys.: Conf. Series*, 査読有, Vol. 454, 2013, p. 012017, doi:10.1088/1742-6596/454/1/012017.

[学会発表](計13件)

三宅 洋平, 超並列宇宙プラズマ粒子シミュレーションの研究, Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure, 2015.1.28, つくば国際会議場(茨城県).

Miyake, Y., Photoelectron and Secondary Electron Dynamics Around the Solar Probe Plus Spacecraft, AGU Fall Meeting, 2014.12.16, San Francisco (USA).

Miyake, Y., Large-scale Particle Simulations on Space Plasma Interaction with Scientific Spacecraft, Plasma Conference, 2014.11.19, 朱鷺メッセ(新潟県).

三宅 洋平, 人工衛星・宇宙プラズマ相互作用の大規模粒子シミュレーション研究, 関西支部第448回航空懇談会, 2014.9.26, 神戸大学(兵庫県).

Miyake, Y., Electromagnetic Plasma Particle Simulations on Solar Probe Plus Spacecraft Interaction with Near-Sun Plasma Environment, 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014.8.4, Moscow (Russia).

Miyake, Y., Particle Simulations of Spacecraft-Plasma Interactions and their Effects on Electric Field Measurements, AOGS 11th Annual Meeting, 2014.7.29, ロイトン札幌(北海道).

Miyake, Y., Electromagnetic Full-Particle Simulations on Spacecraft Interactions with Near-Sun Environment, 13th Spacecraft Charging Technology Conference, 2014.6.23, Pasadena (USA).

三宅 洋平, 科学衛星近傍のプラズマ電磁擾乱に関する大規模粒子シミュレーション研究, 第248回生存圏シンポジウム, 2014.3.10, 京都大学(京都府).

三宅 洋平, 太陽コロナプラズマと科学衛星の相互作用に関する粒子シミュレーション, SGEPS2013年総会および講演会, 2013.11.4, 高知大学(高知県).

Miyake, Y., Full Particle Simulations on Space Plasma Interactions with Scientific Satellite, Asia-Pacific Radio Science Conference, 2013.9.6, Taipei (Taiwan).

Miyake, Y., Particle Simulations of Electromagnetic Environment around Scientific Spacecraft, 11th International School/Symposium for Space Simulations, 2013.7.23, Jhongli (Taiwan).

三宅 洋平, 動的負荷分散技法 OhHelp を用いた超並列プラズマ全粒子シミュレーション, 第9回計算科学ユニットセミナー

一、2013.6.19、京都大学（京都府）.

三宅 洋平、太陽探査衛星・プラズマ間相互作用に関する国際共同研究、JPGU 2013年連合大会、2013.5.24、幕張メッセ国際会議場（千葉県）.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lab.kobe-u.ac.jp/csi-usui/contents.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

三宅 洋平 (MIYAKE, Yohei)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・
助教

研究者番号：50547396

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

臼井 英之 (USUI, Hideyuki)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・
教授

研究者番号：10243081