

帯電緩和ビーム搭載科学衛星近傍の静電環境に関する 粒子シミュレーション

岡崎 ほのか^{1*}, 三宅 洋平², 臼井 英之¹

1. 神戸大学大学院システム情報学研究科, 2. 神戸大学計算科学教育センター

*188x204x@stu.kobe-u.ac.jp

1. 研究背景

地球周辺の宇宙空間には、通信衛星、放送衛星、科学衛星など数多くの人工衛星が打ち上げられ、現代社会に必要不可欠な情報を得るために重要な役割を担っている。そのため、衛星障害が発生すると、社会に大きな損害を与えることになってしまう。衛星障害の原因としては、衛星帯電現象が深く関係している[1]。

人工衛星は宇宙環境に置かれると、衛星に流入するプラズマの電子・イオン、太陽光の入射面から放出される光電子、そしてプラズマ電子が衛星の表面に衝突することで発生する二次電子や後方散乱粒子によって、表面に電位が生じる。これを衛星帯電という[2]。実際に衛星帯電が原因で起こった事故の一例として、2003年10月に起こった環境観測技術衛星「みどりII」の全損事故が報告されている[3]。また、衛星帯電により生じた電場が、搭載されている宇宙観測機器に影響を及ぼし、物理量を正確に測定することが困難になる。衛星帯電を緩和させることは衛星障害のリスクを下げることに繋がるだけでなく、宇宙観測の面でも重要である。実際に現象を緩和させる方法として帯電緩和ビームが挙げられる。帯

電緩和ビームは、帯電した衛星と同符号の荷電粒子に塊をビームとして衛星から放出する仕組みとなっており、これにより帯電の要因となっている衛星内の荷電粒子を取り除き、衛星の電位を下げる事が可能である[4]。実際に、2015年3月に打ち上げられた磁気圏観測衛星 MMS (Magnetospheric Multiscale) [5]に、上述の原理に基づく衛星帯電緩和装置 ASPOC (Active Spacecraft Potential Control) [6]が搭載され、運用されている。

衛星帯電緩和ビームが放出されると、周辺の逆符号電荷を持った粒子が引き寄せられ、ビーム電荷が中和される現象が起きる。それに伴い、空間内の密度分布が変化し、新たな電場が発生する原因となる。生じた電場は衛星の粒子観測や電場観測の結果に誤差を生むといった影響を及ぼす可能性が考えられる。

本研究では、衛星帯電緩和ビームが衛星電位や周辺の静電環境に与える影響をシミュレーション解析により明らかにする。

まず、衛星環境シミュレータ「EMSES」[7]を用いてプラズマ環境下におけるシミュレーションを行い、周辺電位の非対称性とそれに起因する電場の空間構造を調べる。次に、太陽光の入射角度を変更してシミュ

レーションを行い、電位もしくは電場構造がどのように依存性を示すかを解析する。

2. シミュレーション手法

本研究のシミュレーションでは、EMSES (Electro-Magnetic Spacecraft Environment Simulator)[7]を用いる。EMSESでは、シミュレーション空間内で衛星を模した導体物体と周辺のプラズマとの相互作用過程を自己整合的に解析することが可能である。計算アルゴリズムとしては、1step 毎に粒子の速度・位置更新、電流密度・電荷密度、電磁場の更新が行われる。そして、空間上で任意の位置座標を取り得る粒子の速度位置情報と、格子点上に離散的に定義された電磁界情報を関連付けるため、Particle-in-Cell法[8]が用いられる。これにより、電磁界と粒子の相互作用を時間空間的に矛盾なく解き進めることが可能である。また、EMSESは、MPI(Message Passing Interface)を用いた分散メモリ並列に対応しており、スーパーコンピュータを利用してプラズマ粒子の運動と空間中の電磁場との相互作用を効率的に解き進めることができる。

3. シミュレーションモデル

本研究では、科学衛星をMMSをモデルにした上で、半径が2m、高さ2mの円柱の形を成した導体とし、計算空間内では静止しているものとする。

シミュレーション空間及び衛星に関する構成をFig. 1に示す。シミュレーション空間は、xy方向に各々256m、z方向に128mだけ伸びた直方体型の空間で、衛星を空間

内の中心に配置し、+z方向の背景磁場を空間中に一様に与える。

空間をxy平面に関して断面図を取るとFig. 2のようになる。太陽光の照射方向はx軸とのなす角度を θ とし、 $0^\circ \sim 360^\circ$ の可変なパラメータとする。また、衛星からxy方向に4本のブームと呼ばれるワイヤーが伸びており、その先端には電場観測用の球プローブがつけられている。今回のシミュレーションにプローブに相当する金属体は設置していないが、プローブ位置での電位解析のため、図のようにラベル付けを行っている。

ビームの放出角度に関しては、ビームは衛星側面から放出されると仮定し、放出口の中心から左右対称にビームを放出する角度を θ_1 、放出口の開き具合を表す角度を衛星底面の中心から左右対称に見て θ_2 とする。その図解をFig. 3に示す。今回は $\theta_1 = 30^\circ$ 、 $\theta_2 = 15^\circ$ としている。

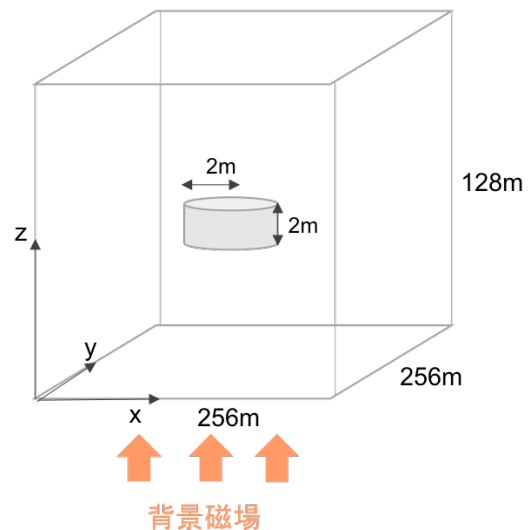


Fig. 1 シミュレーションモデル

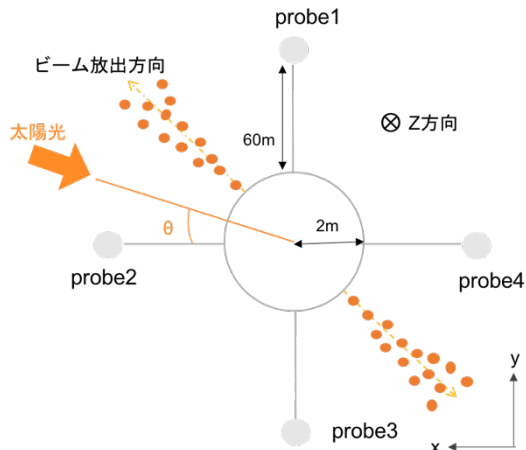


Fig. 2 ビーム及び太陽光照射モデル

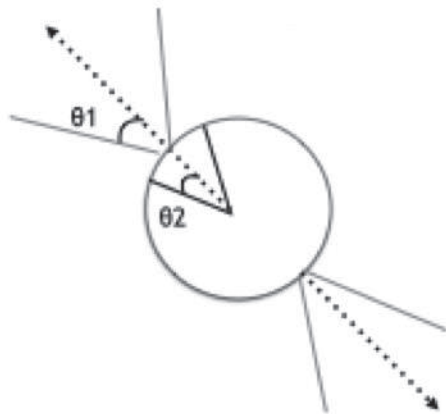


Fig. 3 ビーム放出方向

また、ブーム部分は非常に小さい径を有しているが、このような微細な構造を記述可能な空間解像度をプラズマシミュレーションに課すと、膨大なメモリ空間と計算コストが必要となり、現実的ではない。これを改善するために、本研究では、Fig. 4 に示すように、実際のブーム導体と同軸に仮想的に大きな径を持つ円筒境界を考える。実際のブーム電位から適切な減衰率で減じた電位を、この仮想境界に与えることにより、等価的に非常に細いブームの作る電位分布を再現することにする。このモデリング技

法の実現を容易にするため、ブーム電位を浮遊ではなく、固定とした計算を実施した。なおブームは衛星本体と等電位になっている。具体的には、Table 1 に示すような値で実際のブーム電位と仮想ブーム電位の関係を規定することにした。

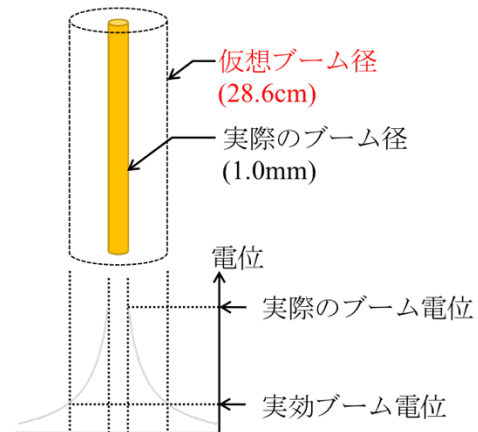


Fig. 4 細いブームのモデリング手法

Table 1 ブーム電位の固定値

	実際の電位	実効電位
ビーム放出なし	10.5V	5V
ビーム放出あり	7.5V	3V

Table 2 パラメータ

背景プラズマ粒子密度 [/cc]	0.5
背景電子温度 [eV]	1
背景イオン温度 [eV]	1
磁場 [nT]	20
ビーム粒子	Indium
ビームエネルギー [eV]	6
ビーム電流 [μ A]	10+10=20
光電子温度 [eV]	2
光電子電流密度 [μ A/m ²]	30

次に、本研究で用いるパラメータを Table 2 に示す。背景プラズマに関する数値は地球プラズマ圏の典型パラメータ [9] を使用し、ビームの電流値、エネルギー値は MMS に搭載された ASPOC と同様の値を用い [6]、ビーム粒子種はインジウムを想定して、質量とビーム速度を決定した。

4. 衛星帯電緩和ビームシミュレーション

4.1 衛星周辺の電位分布

まず、帯電緩和ビームを放出しない場合、放出する場合の各々においてシミュレーションを行う。まず太陽光照射角度 $\theta = 0^\circ$ における両ケースの衛星周辺の電位分布を確認する。その結果を Fig. 5 に示す。

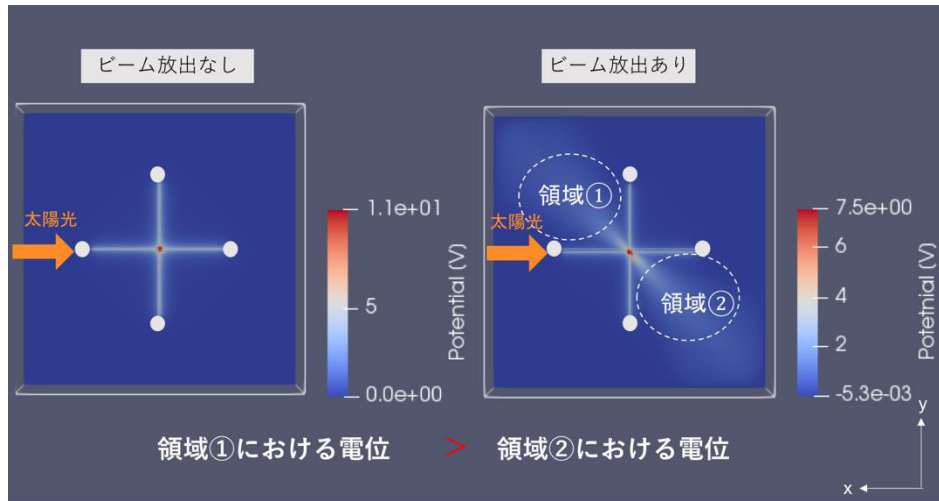


Fig. 5 帯電緩和ビーム放出もしくは非放出時における電位分布

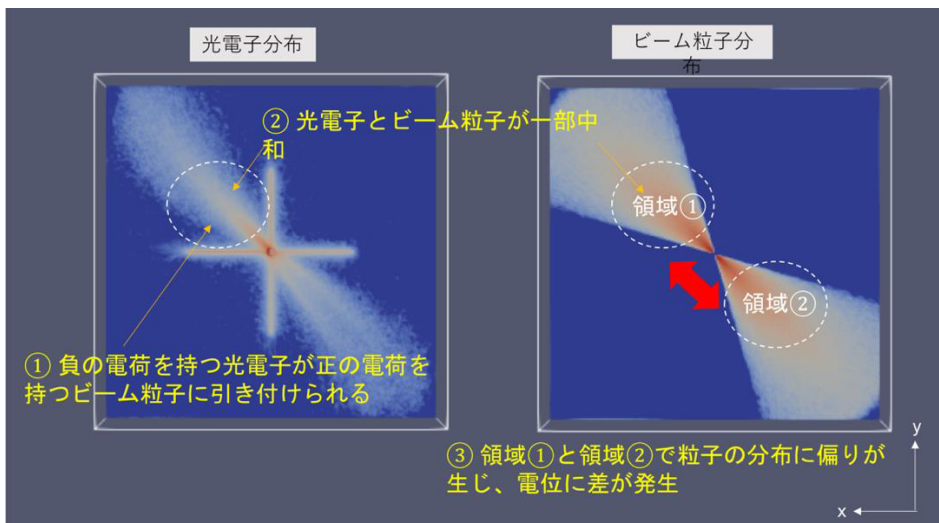


Fig. 6 ビーム放出時の衛星周辺の光電子およびビーム粒子分布

ビーム非放出時は、空間内の電位分布に大きな偏りは発生していないが、ビーム放出を行うと、ビーム粒子が密集する領域①、②での電位分布に差が生じていることが分かった。これは、Fig. 6 で示すように、まず、負の電荷を持つ光電子と正の電荷を持つビーム粒子が空間内で引き合う。次に、引き合った粒子の一部が中和する。この中和された粒子の量が領域①と領域②で差が生じる。この現象が原因で、電位差に偏りが生じたと考えられる。

4.2 太陽光照射角度における電場変動

ビームの放出によって非対称な電位分布が生じることにより、プローブ観測に影響し得る電場が発生すると予想される。そこで次に、太陽光照射角度 θ の値を変更していき、プローブ間で計測される電場がどのように変動するかを調べた。その結果を Fig. 7 に示す。

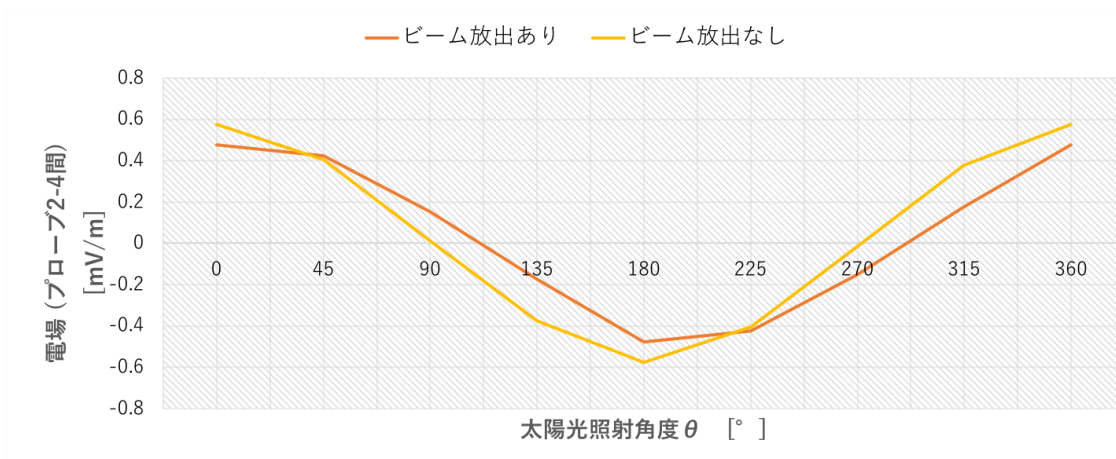


Fig. 7 プローブで計測される電場の太陽光照射角度依存性

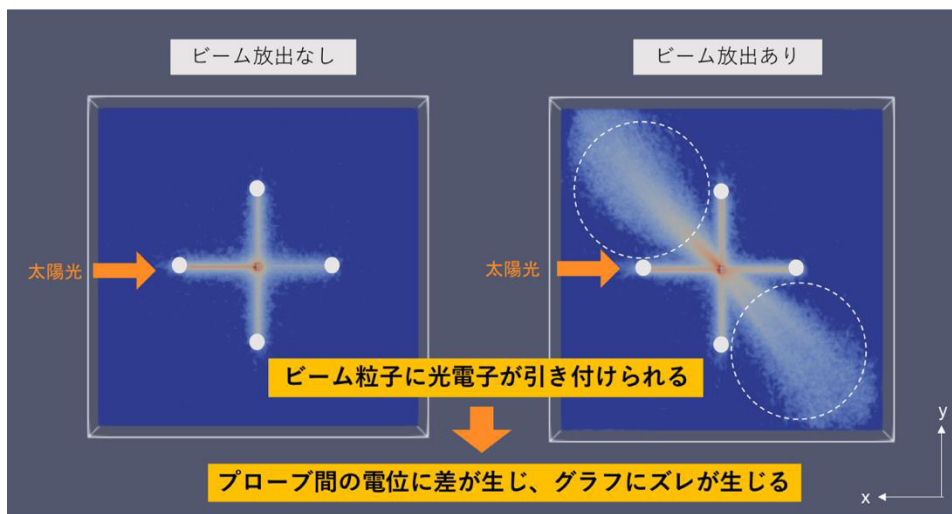


Fig. 8 帯電緩和ビーム非放出もしくは放出時における光電子分布 ($\theta = 0^\circ$ の場合)

ここでは「ダブルプローブ法」を用いた電場計測を想定する[10]。この手法は、プローブ間の電位差をその距離で割った値を電場とする。

Fig. 7 から、プローブ間の電場はビーム非放出、放出時共に θ に依存することが分かる。特に、ビームの放出がない場合では、 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ でグラフが対称になっているが、ビームを放出すると、グラフがやや右にずれていることが分かる。このズレが発生する原因は、ビーム放出の帯電緩和ビーム非放出もしくは放出時における光電子分布を用いて Fig. 8 に示す。

ビームを放出しない場合、太陽光が照射されている側のブーム上に光電子は密集しているが、ビームを放出すると、光電子がビーム粒子に引き付けられ、光電子の分布が x 軸に対して非対称となっている。その結果、プローブ間の電位差が変わってしまうこととなる。これが原因で、グラフが非対称になったと考えられる。

5. まとめと今後の課題

これまでの解析の結果、衛星帯電緩和ビームを放出することで空間内の光電子、ビーム粒子分布に偏りが生じ、それゆえにプローブ間で電位差が生じる。この電位差はプローブ観測においては不要な電場として計測されることが分かった。さらに、その電場は太陽光の照射方向とビーム放出方向の間の角度に依存して変動する。この電場は、今回の結果から、最大 0.6 mV/m となっている。電場の値が 0.1 mV/m を超えると衛星や衛星に搭載されている観測機器に影響を及ぼす可能性が出てくるため、今回

の結果は衛星などに影響を及ぼすと考えられる。

今後の課題としては、本研究で判明した不要な電場を緩和するための解決策を考えるために、さらなるシミュレーションの解析が必要である。また、今回のシミュレーションには背景電場を設定していないため、背景電場を導入した場合のフローや生じるウェイクによって空間内の粒子分布や電場がどのように変動するかについても調べていく必要があると考えている。

参考文献

- [1] C. Koons, J.E. Mazur, R.S. Selesnick, J.B. Blake, J.F. Fennell, J.L. Roeder and P.C. Anderson, “The Impact of the Space Environment on Space Systems”, Proc. 6th SCTC, Air Force Research Laboratory, pp. 7-11 (1998).
- [2] D. Hastings, and H. Garrett, *Spacecraft-Environment Interactions*, Cambridge University Press, pp. 143-152 (1996).
- [3] 宇宙開発委員会調査部会, “環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどり」の運用異常に係る原因究明及び今後の対策について”, 宇宙開発委員会報告書 (2004).
- [4] Torkar, K., et al. (2014), Active spacecraft potential control investigation, *Space Sci. Rev.*, doi:10.1007/s11214-014-0049-3.
- [6] 北村成寿, “MMS (Magnetospheric Multiscale mission)衛星群の観測”, 平成 27 年度名古屋大学 ISEE 研究集会「サブストー

ム研究会」, pp.30-31 (2016).

[7] Y. Miyake and H. Usui, “New electromagnetic particle simulation code for the analysis of spacecraft-plasma interactions”, *Physics of Plasmas*, Vol.16, No.6 (2009).

[8] C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-

Hill, New York (1985).

[9] 小原隆博, “通信総合研究所季報”, Vol.48, No.3, pp.60-61 (2002).

[10] 三宅洋平, 白井英之, 小嶋浩嗣, “衛星帯電環境下におけるダブルプローブ電場観測に関するプラズマ粒子シミュレーション”, 第8回宇宙環境シンポジウム講演論文集 (2012).