

プラズマ波動環境下における人工衛星帯電現象の 数値モデリング

桐山 武士^{1*}、三宅 洋平²、臼井 英之¹、加藤 雄人³

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、3. 東北大学
大学院理学研究科

*176x208x@stu.kobe-u.ac.jp

1. 研究背景

現在、人工衛星システムは、重要な社会インフラであり、衛星障害がおこると社会に多大な影響を与える。従来の研究で、衛星帯電は衛星障害の大きな要因となっていることが明らかにされている。しかし、太陽活動度によってダイナミックに変動する時間変動の効果を取り入れた衛星帯電研究はあまり進められていない状況である。

衛星帯電現象に影響を及ぼす時間変動の要因の一つとして宇宙空間特有の電磁波である「プラズマ波動」の作用が考えられる。しかし、プラズマ波動が衛星電位に及ぼす影響に関しては未解明な部分が多く、ダイナミックに変動する実際の宇宙環境下の衛星電位を正確に予想するためには、プラズマ波動が帯電現象に及ぼす影響を明らかにする必要がある。本研究では、我々研究チームが独自に開発した衛星環境シミュレータ「EMSES」[1]を用いてプラズマ粒子シミュレーションを行い、プラズマ波動環境下における衛星帯電現象の詳細を明らかにする。

2. 衛星帯電の概要

衛星は宇宙プラズマ中で電氣的に浮遊しており、様々な荷電粒子が衛星に干渉する。衛星表面と外部の宇宙プラズマ間でやりとりされる荷電粒子には、衛星に流入するプラズマ電子・イオン、太陽光照射面から放出される光電子、プラズマ電子が衛

星に流入することで生じる二次電子、後方散乱粒子がある。これらの荷電粒子による電流により、宇宙空間に対して衛星表面に電位差が生じる。この電位差を衛星の浮遊電位と呼ぶ[2]。また、衛星の浮遊電位は、衛星を負に帯電させる電流と正に帯電させる電流が均衡するように決められる。よって、衛星を負に帯電させる電流を正にとると各電流の関係は以下の式で定義される。

$$\begin{aligned} I_e(\phi_{sc}) - I_i(\phi_{sc}) - I_{ph}(\phi_{sc}) \\ - I_{se}(\phi_{sc}) - I_{back}(\phi_{sc}) = 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

式(1.1)中に示される各項は衛星に出入りする電流を示しており、衛星電位 ϕ_{sc} の関数である。

3. シミュレーション手法

本研究では、衛星プラズマ環境シミュレータ「EMSES」を用いる。EMSESの大きな特徴として、シミュレーション空間内で内部境界として、衛星を模した導体を任意の形状で配置することが可能である。これにより帯電などの衛星プラズマ相互作用過程を、自己整合性を維持しつつ解析できる。

EMSESの計算アルゴリズムを説明する。EMSESでは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

[3]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。

4. シミュレーションモデル

本研究で扱うシミュレーションモデルを Fig.4.1 に示す。シミュレーション空間は一辺 128 m の立方体形状である。背景プラズマのデバイ長は 17 m である。空間の各辺の長さはデバイ長に対して 7.5 倍である。空間内は背景プラズマで満たされており、空間全体として電荷の準中性が保たれている。衛星の構造は各辺 4 m の立方体であり、シミュレーション空間の中心に位置し、静止状態であるものとする。次にシミュレーション空間について説明する。太陽光が+z 方向から入射することを想定し、光電子が衛星の+z 面から放出される。以降、この光電子放出面を P 面とする。今回想定する宇宙環境においては、衛星帯電に対する 2 次電子、後方散乱粒子の影響は他の荷電粒子種に比べて極めて小さいため、本シミュレーションでは、考慮しないものとする。背景磁場は+z 方向に計算空間に一樣に与える。

プラズマ波動現象を再現するためにシミュレーション領域に強制的に、変動電場を印加する。この変動電場ベクトル E は、xy 平面内において一定周期で回転する右旋円偏波であり、以下の式で表される。

$$E_x = E \cos \omega t \quad (4.1)$$

$$E_y = E \sin \omega t \quad (4.2)$$

E 、 ω は波動電界の振幅、角周波数である。変動電場は強制的に印加するものであり、背景プラズマには依存しない。本シミュレーションでは、波長は計算空間より十分大きいことを想定しており、変動電場は空間内で一様である。プラズマ波動により生じる磁場の変動は無視する。

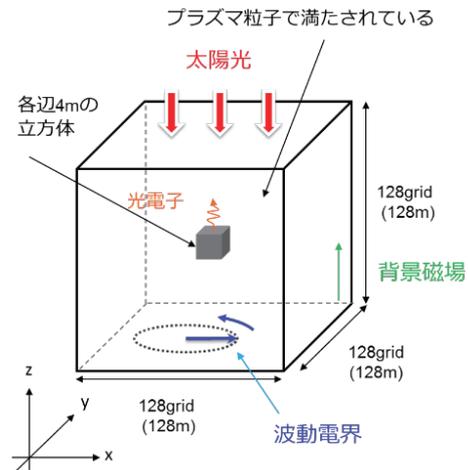


Fig. 4.1 シミュレーションモデル

次に、主要なプラズマパラメータを Table 1.1 に示す。プラズマ圏の外側の領域を想定し、パラメータを定めた。また、光電子電流密度は、人工衛星表面での典型的な値 $20 \mu\text{A}/\text{m}^2$ より大きくした。このように値を設定した理由は、プラズマ波動が衛星帯電に与える影響に関して、光電子が大きな役割を担っていることが示唆されており[4]、今回はその効果を強調するためである。その他のパラメータは実際の観測結果[4]に基づいている。

Table 1.1 プラズマパラメータ

背景プラズマ密度： n_0	20 /cc
背景電子温度： T_e	100 eV
背景イオン温度： T_i	100 eV
背景磁場強度： B_0	600 nT
光電子電流密度： J_{ph}	$160 \mu\text{A}/\text{m}^2$
光電子温度： T_{ph}	3 eV
波動電界強度： E_{wave}	100~400 mV/m
波動電界周波数： f_{wave}	7~28 kHz

5. 波動電界印加シミュレーション

5.1 衛星周りの光電子密度と空間電位構造の関係

まず、 $E_{wave}=400 \text{ mV/m}$ 、 $f_{wave}=7 \text{ kHz}$ の値にお

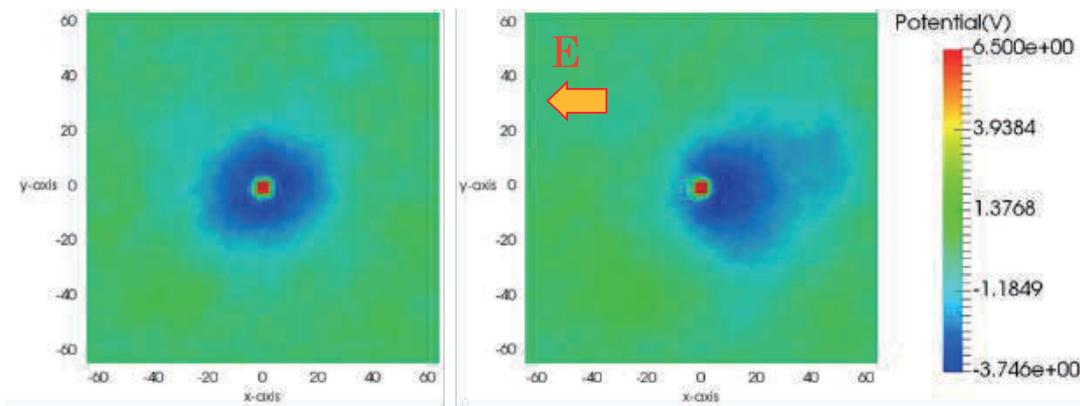
けるシミュレーションと、波動電界を印加しないシミュレーションを行い、波動電界が衛星電位に及ぼす影響を検証する。

Fig.5.1 に2つのシミュレーションのある時間のP面における空間電位、光電子数密度分布を示す。この瞬間において、波動電界の向きは-x方向である。Fig.5.1に基づきまず、(1)全般的な電位の構造について説明する。本シミュレーションでは、シミュレーション空間の境界を基準電位(0V)としている。衛星部分の電位は正であり、最も高い。衛星の外側では、衛星からの距離がおおよそ10mの場所まで電位が急激に減衰する。それより外側になると再び電位は上昇し、基準電位に漸近する。衛星が正に帯電し、衛星近傍の電位が負になるのは、常に衛星から一定量の光電子が放出されているためである。さらに、(a)では、衛星周りの電位

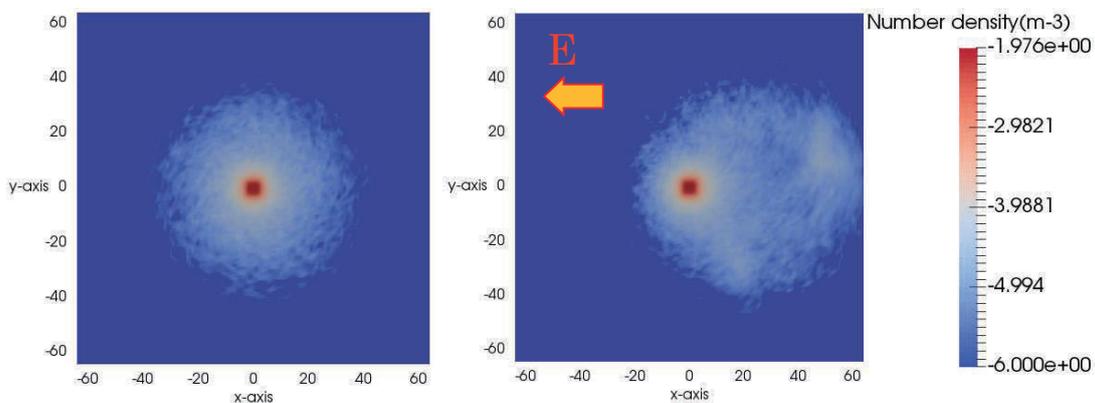
が均一に低くなっているのに対し、(b)では衛星から見て波動電界ベクトルとは逆方向で電位が低い領域が多い。また、それぞれのシミュレーションで、波動電界の約2周期相当の時間の衛星電位の平均値をとると、それぞれ6.46V、6.66Vとなり、(b)では、(a)に比べて、 ϕ_{sc} はおおよそ20%上昇することがわかる。

(2)は、光電子の数密度を背景プラズマ密度 $20/cc$ で規格化した値の、常用対数をとったものである。図において衛星の放出面が最も光電子数が多いことがわかる。衛星は正に帯電しているため、放出された光電子の一部は、衛星に引き寄せられる。しかし、背景に波動電界があると、放出された光電子は変動電場の力を受けることになる。今の場合、波動電界は図において-x方向であるので、光電子は右側に力をうける。これより衛星から右

(1)衛星周りの空間電位分布



(2)衛星周りの光電子数密度



(a) $E_{wave} = 0 \text{ mV/m}$

(b) $E_{wave} = 400 \text{ mV/m}$

Fig 5.1 衛星周りの光電子数密度と空間電位

側に離れていく光電子数が多くなり、(b)のように光電子の数密度に偏りができる。その結果、衛星に引き寄せられる光電子数が減少する。これらから、実効的な光電子電流の増加が衛星電位の上昇の要因であることが予想される。

5.2 波動電界強度、周波数に対する衛星電位と光電子電流量の依存性

衛星電位の波動電界強度、波動電界周波数に対する依存性をみると、Fig.5.2 に示す結果が得られた。このような結果の要因として考えられる光電子電流量に着目して検証する。

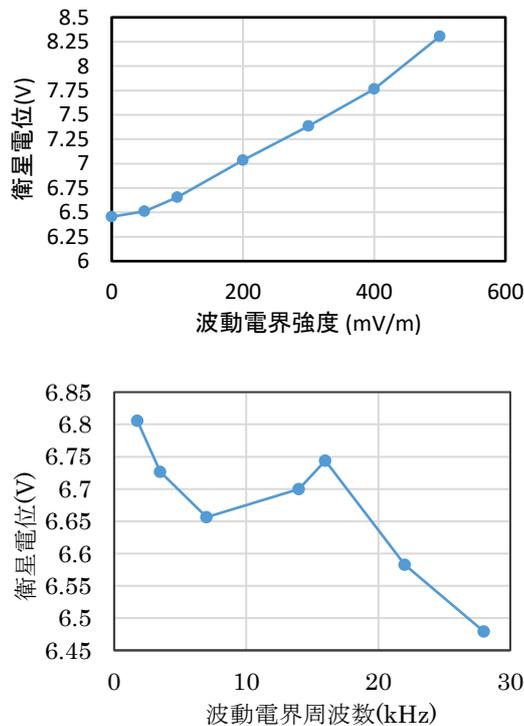


Fig 5.2 波動電界強度、周波数の衛星電位に対する依存性

波動電界強度、波動電界周波数による衛星電位の変化と正味の光電子放出量の変化との関係について検証する。この際、波動電界の影響のみを考慮するために、衛星電位を人為的に一定に固定するシミュレーションを行う。

まず、波動電界強度に対する依存性を調べる。

Fig.5.3 において、赤線が衛星から放出される正味の光電子量の時間平均値、青線が衛星に流入する背景プラズマ電子量の時間平均値の増加率である。両者を比較すると、正味の光電子放出量の方が上昇率の変化率が大きい。すなわち正味の光電子放出量の方が波動電界の影響を強く受けている。光電子の単位時間当たりの放出量は一定であるので、波動電界の強さが大きくなるにつれて、衛星への光電子の流入量が減っていることになる。これは、波動電界強度が大きくなると、電場から受ける力の影響で衛星から離れる光電子が増え、衛星に戻ってくる光電子数が少なくなること、と整合性のある結果である。

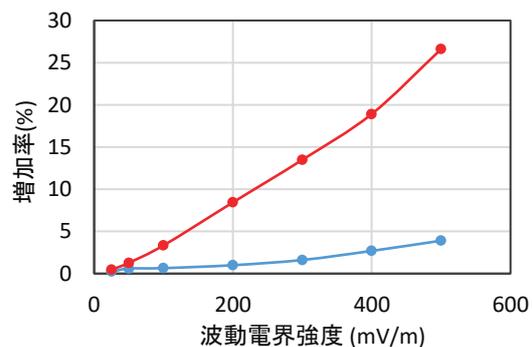


Fig 5.3 波動電界強度に対する正味の光電子放出量(赤線)背景電子流入量(青線)の依存性

続いて、波動電界周波数に対する依存性について調べる。波動電界周波数に対する正味の光電子放出量(赤線)と背景電子流入量(青線)の依存性を Fig.5.4 に示す。Fig.5.4 において、赤線と青線を比較すると、光電子量の方が上昇率の変化が大きい。また、変化率に差はあるが背景プラズマ電子流入量、正味の光電子放出量ともに 7 kHz 以下の周波数では、周波数が低いほど、増加率が大きい。7 kHz 以上の周波数では、16 kHz 付近でピークなり、それ以降増加率が 0 に漸近する。まず、低周波数になるにつれて増加率が大きくなり、高周波数になるにつれて増加率が 0% に近づく。この要因について考察する。空間の電位構造から考えると、

衛星から放出された光電子が衛星から離れるためには、衛星周辺に形成されている電位障壁を超える必要がある。光電子が放出されてから、ピークに到達するまでの時間を S_w とする。また、波動電界の回転周期を T_w とする。このとき光電子が電位障壁を乗り越えるための条件は $S_w < T_w$ でなる。低周波数では、波動電界の周波数が高くなるにつれて、 T_w は小さくなり、 T_w と S_w の差が縮まる。これにより、衛星から離れていく粒子が減り、 ϕ_{sc} は $E_{wave}=0$ の場合のそれに近づいていると推測される。次に 16 kHz 付近でピークとなる現象について考察する。このようになる要因として、背景磁場の影響が考えられる。背景磁場による光電子のサイクロトロン周波数 W_c は 16.8 kHz である。 W_c 付近に近づくにつれて ϕ_{sc} が高くなっているが、これにはサイクロトロン共鳴現象が関与している。この現象により、加熱された荷電粒子は大きく振動することになるため、光電子は波動電界から力を受けたときに衛星から離れやすくなり、 ϕ_{sc} は上昇すると考えられる。

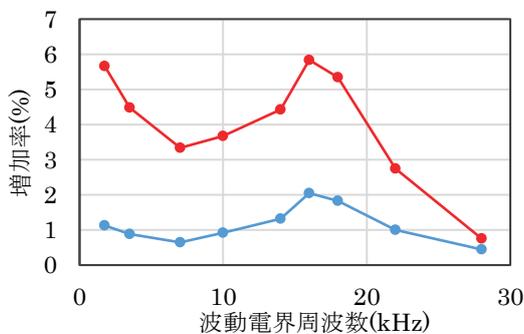


Fig 5.4 波動電界周波数に対する正味の光電子放出量(赤線)と背景電子流入量(青線)の依存性

7. まとめと今後の課題

今回のシミュレーションにより、波動電界を印加することによる衛星電位の上昇を確認した。また、波動電界による光電子の空間分布の変化による衛星周辺の空間電位の分布の変化を解明した。さらに、衛星電位の上昇の要因が正味の光電子放出量の増加であることを解明した。

今後の課題として、衛星電位の波動周波数依存性の詳細な物理機構の解明や、光電子/背景電子電流それぞれに対して波動電界が及ぼす影響に関する詳細な解析をすることがあげられる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] D. Hastings, and H. Garrett, *Spacecraft-Environment Interactions*, Cambridge University Press, pp. 143-152 (1996).
- [3] C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-Hill, New York (1985).
- [4] D. M. Malaspina, R. E. Ergun, A. Sturmer, J. R. Wygant, J. W. Bonnell, A. Breneman and K. Kersten, “Chorus waves and spacecraft potential fluctuations: Evidence for wave-enhanced photoelectron escape” *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 2, pp. 236-243 (2004).