

能動的プラズマ放出による 極域衛星帯電緩和に関する PIC シミュレーション

白井 英之、今里 康二郎（京都大学 生存圏研究所）、國中均（JAXA/ISAS）

E-mail: usui@rish.kyoto-u.ac.jp

1. まえがき

我々は、プラズマ粒子シミュレーション¹⁾を応用して、衛星表面の金属-誘電体間に生じる部分帯電の解析、及びその緩和手法の検討を行っている。特に、極軌道衛星に着目しており、オーロラ電流による KeV オーダーの帯電²⁾や、太陽パネル表面のガラス部と衛星金属筐体の間に生じる部分帯電³⁾の緩和プロセスを調べる。帯電緩和の手法はさまざまな方法⁴⁾が提案されているが、今回は、衛星から人工的にプラズマを放出するプラズマコンタクタ⁵⁾の利用を想定している。部分帯電では、誘電体に電荷が貯まることにより、金属-誘電体間に電位差が生じる。このため、部分帯電を緩和するには誘電体上の蓄積電荷量を制御する必要がある。衛星表面放電で一番問題となるのは衛星本体より誘電体の電位が高い、いわゆる逆電位勾配と呼ばれる状態では、通常 400V 程度の電位差で放電が起こる。ちなみにその逆の状態である順電位勾配では数 kV 程度までは放電しない。これは、逆電位勾配の時、太陽パネルの構造によりトリブ

ルジャンクションが生じるためである。この部分帯電を緩和するために、衛星の金属部分にプラズマ放出口を設け、人工プラズマを放出する。本研究では、この人工プラズマ放出により太陽パネル上の部分帯電緩和の様子を詳細に解析する。本研究によって得られる結果は、地球観測衛星に代表されるような極軌道衛星搭載用のプラズマコンタクタに必要とされる性能や設置場所、個数を検討する上での基礎資料となる。

2. シミュレーションモデル

極軌道（PEO: Polar Earth Orbit）においてオーロラ電流が存在し、衛星本体が約-50Vまで帯電した場合について、衛星に取り付けたプラズマコンタクタからプラズマ放出を行い衛星の部分帯電の緩和現象について調べた。人工衛星モデルは図1に示すように衛星の本体となる直方体と太陽パネルである薄い直方体の羽が1枚あり、それらが電氣的に繋がっているモデルを用いた。等温プラズマである電離層プラズマの中を衛星が進んでいる状況を想定した。シミュレーションでは衛星から見た系を考え、モデル空間の中心に衛星があり、宇宙プラズマがシミュレーション空間中を移動しているものとした。今回は、計算機資源の節約のため、全体が数十センチの非常に小さな衛星モデルを採用した。図1において、赤が金属部分、青が太陽パネルの誘電体部分を示している。誘電体面はプラズマフローのラム側にあり、プラズマコンタクタは衛星本体の側面、緑で示される部分に取り付けてあり、ここから人工プラズマを放出する。また、オーロラ電流は水色で示される通りプラズマフローとも誘電体面とも直交する向きで衛

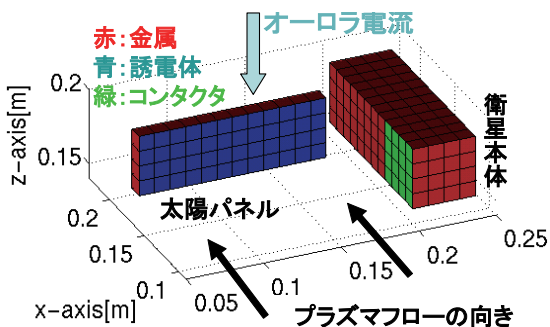


図1 シミュレーションモデル

星方向に流れている。その密度は背景プラズマ密度 $2.5 \times 10^{10} \text{m}^{-3}$ の 1/10 倍とし、温度、ドリフトエネルギーがそれぞれ 20eV、100eV となるように設定した。放出する電子は、背景プラズマと同じ温度 0.5eV を持ち、背景プラズマ密度の 10 倍の密度となるように設定した。また、放出プラズマは衛星内部のプラズマ生成室で生成されているものとした。このモデルを用いて衛星帯電緩和に関するシミュレーションを行った。3-1 節では電子のみを放出する場合を考え、3-2 節では、電子と共にイオン放出も行う場合を検討した。

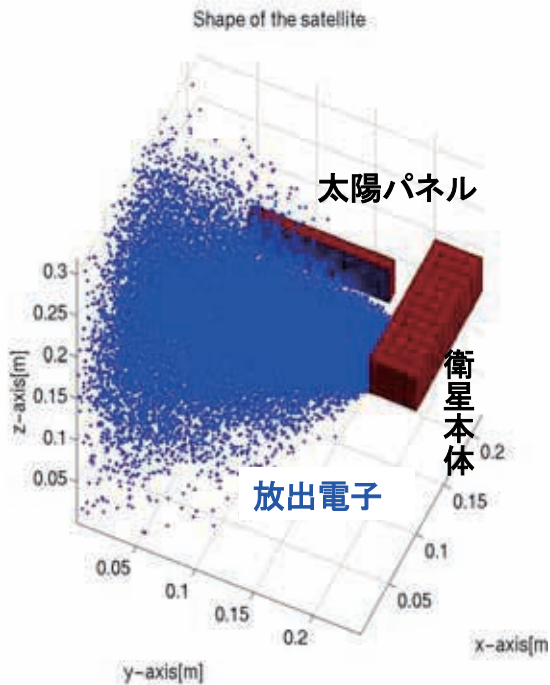


図 2：コンタクタからの放出された電子の様子

3. 部分帯電緩和現象の解析

3-1. プラズマコンタクタからの熱電子放出

上述のモデルを用い、プラズマコンタクタから熱電子が放出される場合について衛星帯電の変化を観測した。本実験では、衛星が浮遊電位に落ち着いている状態（時刻 0）から電子放出を開始し、その後の衛星電位および衛星流入電流の時間変化を調べた。図 2 は、コンタクタから放出される電子の様子を示したものである。

図 3 に衛星電位、衛星の金属部および誘電体部における各プラズマ電流成分の時間変化を示す。図 3-(a)の縦軸の電位は宇宙プラズマの空間電位を基準に 0V とし、赤が金属部の電位、青が太陽パネル上の誘電体部の電位を示している。図 3-(b),(c)にはそれぞれ衛星金属筐体部および太陽パネルの誘電体部に流入する電流量の時間変化を粒子種毎に示す。図 3-(a)からわかるよ

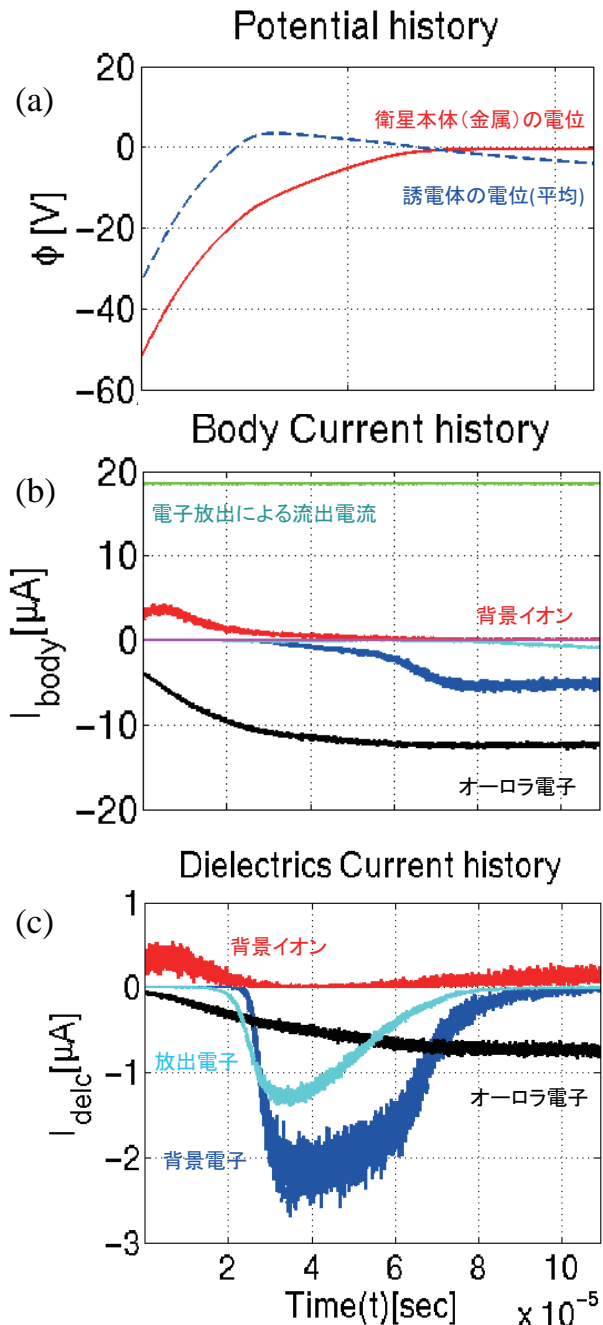


図 3：(a) 衛星電位、(b) 衛星の金属部および(c) 誘電体部における各プラズマ電流成分の時間変化

うに、最初、衛星本体および太陽パネルの誘電体面はそれぞれ-50V、-30V程度に帯電している。まず衛星筐体金属部の電位変化（図 3-(a)の赤線）に着目する。コンタクタからの電子放出（図 3-(b)の緑色の線）により衛星電位が上昇する。この電位上昇に伴い、図 3-(b)に示すように衛星筐体への背景イオン流入（赤線）が減少し、オーロラ電子による電流（黒色）および背景電子（青色）の流入が増大する。最終的には、電子放出による電流量と流入電子による電流量が釣り合って安定電位にむかう。この場合、背景イオン電流の寄与は少ない。

次に、太陽パネル上の誘電体部の電位変化について図 3-(c)の電流図と関連付けて述べる。2 × 10⁻⁵(s)の時間までは、衛星本体に引きずられ誘電体部の電位も上昇するが、一旦、プラズマ電位より上になると、それを緩和するために放出電子、背景電子、オーロラ電子の流入により誘電体電位は再び下がり始める。電位降下によりこれらの電流量は時間と共に減少していき、図では示されていないが、最終的には、誘電体表面での背景イオン、オーロラ電子の釣り合いによって電位が安定する。すなわち、シミュレーション開始時の電位になる。

まとめると、電子放出によって衛星筐体の電位緩和は可能であるが、部分帯電の原因である誘電体部電位の緩和には寄与できないことがわかった。ただし、本実験では、2次電子放出を考慮していないため誘電体面では負の電位にな

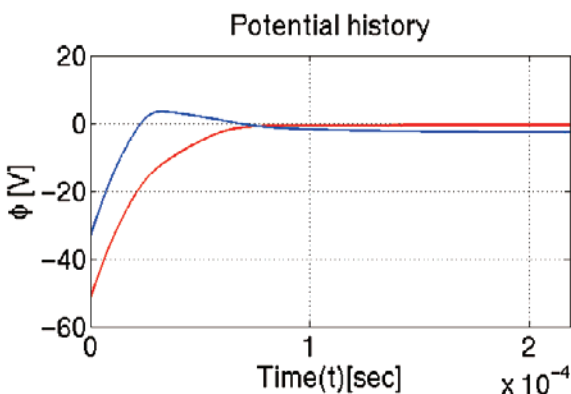


図 4: プラズマ放出時の衛星電位の時間変化。金属部、誘電体部の電位はそれぞれ赤色、青色。

るが、2次電子放出を考慮すると電位の上昇が考えられる。この点については今後の課題とする。

3-2. プラズマコンタクタからのプラズマ放出

プラズマコンタクタでのホローカソードプラズマ生成を仮定し、電子のみならずイオンの熱温度放出も同時に行った。図 4 に衛星筐体金属部および太陽パネル誘電体部の電位の時間変化図をそれぞれ赤色、青色の線で示す。図に示すように、6 × 10⁻⁵(s)の時間までは衛星電位がプラズマ電位より低いため、放出イオンは衛星外部には出ない。そのため、衛星電位変化は、図 3 で示した電子のみ放出の場合とほぼ同じである。しかし、一旦金属部がプラズマ電位に緩和され、誘電体部が元の負電位に戻ろうとする際には、放出イオンのフラックスが誘電体に流入し、図 4 に示されたように、結果としてその電位はプラズマ電位とほぼ同じになる。背景イオンに加え放出イオンがあるために表面電位を決定する電流バランス条件が変化したためである。図 5 は 1 × 10⁻⁴(s)における放出イオンの密度分布を表している。密度は背景プラズマの平均密度 N_0 で規格化されている。図からわかるとおり、放出イオンは太陽パネルの誘電体部に流入しており、これにより誘電体部の電位の低下を回避している。すなわち、本ケースでは部分帯電緩和が実現されている。

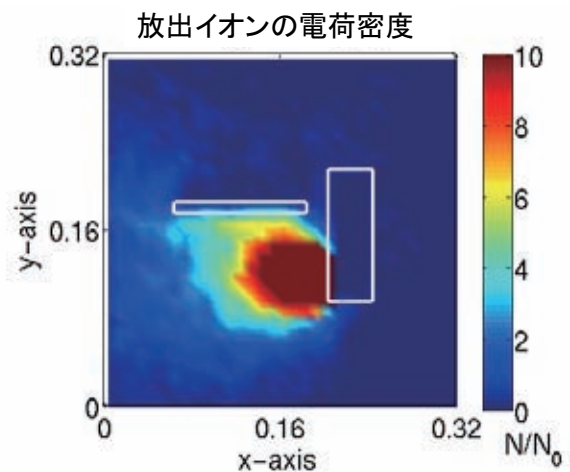


図 5: 太陽パネル上の誘電体部に流れる放出イオン

3-3. 放出プラズマダイナミクスと衛星環境への影響

図2に示したが、負に帯電している衛星本体から電子を放出すると、衛星近傍に形成されたシース内における強い電界により電子は衛星本体から外向きに加速を受ける。この電子加速は衛星の浮遊電位エネルギー程度であり、加速された電子は地球磁場の影響でサイクロトロン運動する。本ケースではそのジャイロ半径が数メートルであり、衛星の大きさよりも大きいため、加速電子が衛星に戻ってくる可能性は低いが、実際の数メートルオーダーの衛星であれば、放出電子が地球磁場の影響により衛星に戻ってくる可能性がある。ただし、電子の加速方向と地球磁場の方向が垂直でない場合は磁場方向に電子が拡散するため、直接衛星に戻ってくる可能性は少ないと考える。ただし、この場合、磁力線に沿った高速電子流がパルス的に流れるため、それによるビームプラズマ不安定性の可能性があり、それによる衛星近傍での電界擾乱やそれによる2次的な電子加熱などが生じる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、極軌道においてオーロラ電流によって人工衛星の電位が大きく下がる状況をシミュレーション空間内に再現し、プラズマコンタクタによる衛星の絶対・部分帯電の緩和現象を調べた。

まず、絶対帯電緩和については、電子放出が有効であることを示した。放出された電子は、衛星近傍のシース領域の電界で加速され衛星からは電子ビームとして離れる。今回示さなかったが、放出電子量が多い場合、帯電緩和はすばやく緩和されることも確認した。

また、太陽電池パネル上の誘電体と衛星筐体との間で生じる部分帯電の緩和については、電子放出による絶対帯電緩和が行われる状況のもとでイオン放出による誘電体表面の電荷緩和が有効であることを示した。衛星筐体と違って、

誘電体面の電荷は局所的に蓄積されるため、誘電体近傍においてイオン放出を行い、この局所的な電荷の緩和を行う必要がある。

帯電緩和のために放出される電子は、衛星近傍のシース電界によってパルス的に加速を受ける。また、加速電子は地球磁場の影響を受け、サイクロトロン運動のため衛星に戻ってくる可能性がある。また、磁場方向に加速を受けたパルスビームはプラズマ不安定性の原因になる可能性もある。これらの放出プラズマダイナミクスと衛星環境への影響については、今後大規模な計算機シミュレーションにより詳細解析を行う必要がある。

参考文献

- [1] H. Matsumoto, and Y. Omura, Computer Space Plasma Physics: Simulation Techniques and Software, Terra Scientific Publishing Co., 1993, chap.2.
- [2] Rabin, A.G., Spacecraft charging in the supra-auroral region, Nuclear Science, IEEE Transactions on, Volume 36, Issue 6, Dec 1989 p2015 - 2020
- [3] Whipple, E. C., Potential of surfaces in space, Rep. Prog. Phys., 44, p1197-1250, 1981
- [4] Lai, Shu T., A Critical Overview on Spacecraft Charging Mitigation Methods, Plasma Science, IEEE Transactions on, Dec. 2003 Volume: 31, Issue: 6, Part 1, p1118- 1124
- [5] 竹ヶ原 春貴, 小境 正也, 山極 芳樹, 大西 健夫, 田原 弘一, プラズマコンタクタ, 日本航空宇宙学会誌, 52(602), pp.79-85, 2004