

仮想小惑星の太陽風環境下における帯電状態に関する数値解析

金正浩¹⁾・八田真児¹⁾

¹⁾MUSCAT Space Engineering Co., Ltd.

Numerical Analysis for Charging of Asteroid under Solar Wind Circumstance

Jeongho KIM¹⁾ and Shinji Hatta¹⁾

Abstract

The charging of an 80-meter-diameter asteroid under solar wind circumstance was calculated numerically using MUSCAT tool. We modified the surface capacitance of the asteroid in order to reduce the calculation time without any change of other parameters. This can only lead the surface potential to change faster, but affect no other results. The results show that the electrostatic surface potential of the ram, the dayside, is positive and the wake, the nightside, is negative. Since the most thermally energetic electrons can make it deep into the wake, the deep wake shows the most negative potential. The surface potential of the ram reached to 7 V, and the wake reached to -17 V. The potential of the wake could reach to the value of a little more negative. We hope that these results could be a reference applied to the analysis of any spacecraft planning to land on the small asteroid.

Key Words: Charging, Solar Wind, Asteroid, MUSCAT

1 はじめに

はやぶさによる小惑星のイトカワの探査の成功、キュリオシティによる火星探査など様々な惑星探査が実施され、あるいは、計画されている。小惑星は太陽系に属しており、太陽風の影響下に置かれている。太陽風によって小惑星と探査用宇宙機（以下、宇宙機）は双方が帯電しており、着陸時に宇宙機と小惑星の間の相互作用による放電が懸念される。小惑星や宇宙機の帯電の理論は過去に多く研究されており、定性的な検討は小惑星探査の計画段階でなされる。しかし、万が一の事態による宇宙機の不具合の発生を防ぐためには、定量的な解析による不安要因の除去が必要である。本稿では定量解析の一環として、MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool) を用いて小惑星表面の帯電状況のシミュレーションをおこなう。

小惑星と宇宙機の間での電荷交換が不十分な場合には、小惑星と宇宙機の間で電位差が生じる。この場合、小惑星表面と宇宙機が接触する時点で放電が生じる。大きな電位差が生じている場合、接触の状況によっては急激な電荷の移動、すなわち大電流が生じ、電気回路の不良動作、あるいは宇宙機材料の劣化や電気回路の破壊に至る。放電後には電位差は解消され、小惑星と宇宙機は等しい電位に至ると考えられる。小惑星と宇宙機の間で十分な電荷交換が維持されるようであれば、等しい電位は維持できるが、不十分であれば小惑

星表面からの離着陸を繰り返すたびに、全体としては帯電と放電のサイクルを繰り返すことになる[2]。本稿では小惑星に着陸する探査機、あるいは探査ローバーなどと小惑星との相互作用による帯電・放電現象を調べる前段階として、小惑星の帯電の様子を数値シミュレーションによって解析することを目的とする。

2 MUSCATの数値解析手法

数値解析のツールは宇宙機の帯電解析ツールであるMUSCATを用いた。MUSCATは宇宙プラズマ環境下での宇宙機の帯電解析を行うツールであるが、本稿では小惑星規模の物体にも適用範囲を広げて帯電解析を行った。MUSCATについて記述した文献は既にあるが¹⁾²⁾³⁾、簡単に紹介する。MUSCATの解析アルゴリズムは表面への流入電荷を積算する部分と、宇宙機電位を含む、空間電位構造を算出する部分に大きく分けられる。

流入電荷の積算は粒子軌道追跡法 (Particle Tracking、以下、PT法) によっておこなわれている。粒子軌道追跡法では、現実の粒子の集団から代表する粒子 (超粒子) を選び、与えられた電界分布の下で運動方程式を解いて超粒子の運動を追跡する。背景プラズマ由来の荷電粒子 (外部電子、外部イオン) は外部境界から流入する。背景プラズマの流入境界条件としては Drifted Maxwellian を用いる。外部電子および外部イオンの追跡の後に衛星表面に到達したことが判明すればこれを

帯電に寄与したものとみなして衛星表面の電荷量に反映させる。また、表面へ到達した際の2次電子放出と太陽光による光電子放出も考慮し、放出があれば放出した表面要素について電荷の変化に寄与したとみなした上で、これについても超粒子として取り扱って追跡をおこなう。

空間電位構造の算出には、Particle In Cell法(以下、PIC法)を用いて空間電荷の存在を考慮する。計算体系は等間隔直交格子系を採用している。これは高速フーリエ変換(FFT)を用いて高速にPoisson方程式を解くためである。PIC法では宇宙機電位の変化の時定数とプラズマの応答の時定数の関係を考慮し、イオンプラズマ周期程度の時間間隔であれば、プラズマは十分衛星電位の変化に追従しているといえる⁴⁾。そこでMUSCATでは上記のPT法を用いる流入電荷計算の反復計算の1計算ステップにおいては、イオンプラズマ周期程度の時間だけPIC法による反復計算を組み込むことによって周辺プラズマの空間構造を模擬できるものとして解析モデルを構築している。

次に、MUSCATの小惑星の帯電解析への適用について検討する。MUSCATでは図1の左図に示すように、衛星をバスに連結する衛星構体と、表面誘電体に分離して解析する。衛星構体は宇宙空間に対して孤立導体の静電容量を保有し、同時に表面誘電体は衛星構体に対して静電容量を保有するためである。これを小惑星の帯電解析にそのまま当てはめると、全表面を誘電体に覆われた導体の小惑星からなる解析モデルとなる。当然、中実な誘電体の固まりである小惑星とは異なる。しかし、表面の飽和電位は流入する正負それぞれの電荷の流束のバランスで一意に決定されるため、飽和状態の表面電位には影響を与えない。したがって、本稿では飽和状態での仮想小惑星の表面電位を求め、考察することを目的とする。

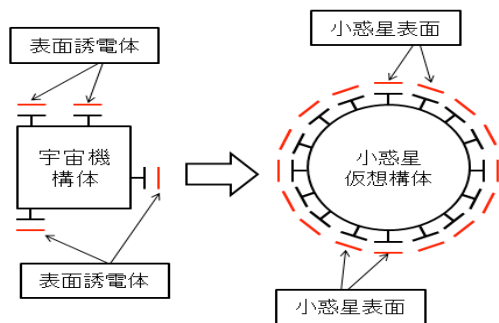


図1 衛星解析と小惑星解析のアナロジー

3 太陽風環境条件と数値解析モデル

図2に数値解析に用いた小惑星の3Dモデルを示す。また図3に太陽風環境と仮想小惑星を含む解析条件の概略図を示す。計算対象は表面がSiO₂からなる直径80

mの球体の仮想小惑星を仮定した。仮想小惑星の材料物性は表1に示した。表1において、E_{max}は2次電子放出係数の最大値を与える1次電子入射エネルギー、 δ_{emax} はエネルギーE_{max}の1次電子が垂直入射した場合の2次電子放出係数である。計算パラメータとして光電子の平均放出エネルギーは1.5 eV、2次電子の平均放出エネルギーは2.0 eVに設定した。

なお、図2には物体の表面上に数値を付けた印が見えるが、これは電流・電位の時間履歴を取得する測定点である。測定点では1計算ステップ毎に表面電位、電子電流・イオン電流、光電子電流・2次電子電流の値を取得する。

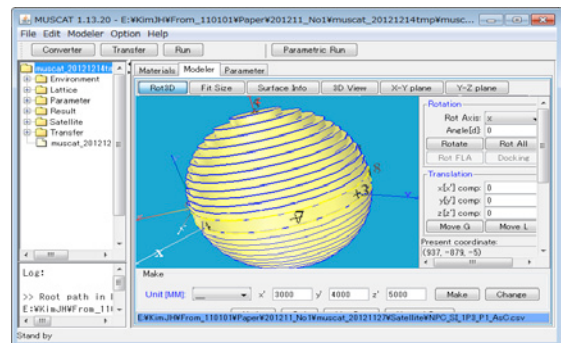


図2. 数値解析に用いた計算対象の形状モデリング。

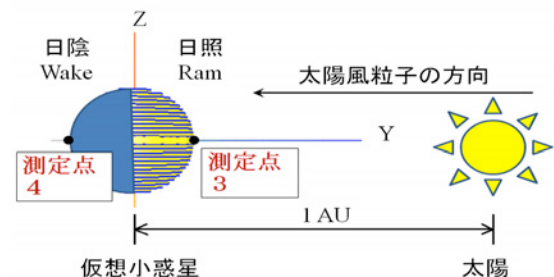


図3. 計算対象と太陽風環境の概略図。

表1. 計算対象の材料パラメータ。

材料名	光電子放出係数 [10 μA/m ²]	E _{max} [eV]	δ_{emax}	比誘電率
SiO ₂	2	400	2.4	4

表2 1 AUでの太陽風の平均的な性質。

プロトン密度	6.6 x 10 ⁶ [m ⁻³]
電子密度	7.1 x 10 ⁶ [m ⁻³]
流速(ほぼ動径方向)	450 [km/s]
プロトン温度	1.2 x 10 ³ [K]
(プロトン熱速度)	50 [km/s]
電子温度	1.4 x 10 ³ [K]
(電子熱速度)	2.3x10 ³ [km/s]
デバイ長	≒10 [m]
磁場強度	7 x 10 ⁻⁹ [T]

太陽風は陽子と電子を主成分とする超音速磁化プラズマ流で、太陽の自転により定常的に吹いているものは共回転太陽風と呼ばれる。共回転太陽風は太陽の高緯度から吹き出される高速風と太陽赤道から吹き出される低速風に分けられる⁵⁾。その構成の割合は太陽の自転周期、及び太陽活動周期によって変化し、太陽から1 AU (1.5x10¹¹ m) 離れている地点では表2に示したような平均値を持っている。

MUSCATによる計算における背景プラズマが、太陽風に相当するため、これを表2の各パラメータを解析条件に用いた。イオンのドリフト速度が非常に速いためPICの時間刻みを短く設定しなければならない。しかしながら、本稿の計算で求めるのはプラズマの過渡応答ではなく、小惑星表面電位の定常解、すなわち飽和電位である。そのため、小惑星表面が飽和電位に至るまでにプラズマが定常状態に到れば同等の結果が得られるとの判断でPICの時間間隔および計算ステップを決めた。

以下に、その検討の手法を記述する。

プラズマ中の宇宙機の表面電位の時間変化は以下の式で表される⁶⁾。

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = -\frac{1}{C_s} (j_e - j_{es})A_s - j_{ph} A_{il} \quad (1)$$

ここで Φ_s は宇宙機の電位、 C_s は宇宙機の宇宙空間に対する静電容量である。 A_s は露出した導体表面の面積、 A_{il} はそのうち太陽光に照らされている部分の面積である。また、 j_e は外部電子電流密度、 j_{es} は電子衝撃二次電子電流密度である。

表2に示したような太陽風環境下においては、直径80mの小惑星はその代表長がデバイ長より十分大きく、薄いシースとして取り扱うためにPIC計算を取り入れる必要がある。また、宇宙プラズマに対する静電容量、約4500 pF に比べて、表面積が半径の2乗に比例して増加するため1計算ステップの時間を10⁻⁶秒オーダーに短く設定しなければならない。従って、飽和に至るまでの計算ステップが長くなる。

人工衛星と同様に小惑星は宇宙プラズマ環境下に置かれると、正負それぞれの荷電粒子による流入電流が均衡し、飽和した時点で表面の静電ポテンシャルが決まる。今回の計算では小惑星の帯電に寄与する成分として4つの電流源を用いて計算を行った：太陽風の電子により外部から流入する電流、太陽風のイオンにより外部から流入する電流、光電子放出により表面から放出される電流、2次電子放出により表面から放出される電流がその成分である。これらの電流成分そのものは、荷電粒子の温度、密度、および、物体の表面物性に固有の物性値（光電子放出係数、2次電子放出係数など）によって決定される⁷⁾。

太陽風による外部電子電流密度は以下の式で求められる。

$$j_e = \frac{I}{4} \frac{1}{c} n_e \quad (2)$$

ここで、式(2)の $\frac{1}{c}$ は $\sqrt{kT_e/2\pi m_e}$ であり、計算すると約 3x10⁻⁸ [A/m²]の値になる。惑星間空間に比較的近いと考えられるGEO (Geostationary Orbit) 環境下において、表面電位が定常値に至るまでの時定数は次式で求められる⁸⁾。

$$\tau_r \approx \frac{C}{A} \frac{kT_e}{e} \frac{1}{j_a} \quad (3)$$

式(3)のCは静電容量、Aは表面積である。それぞれ導体と誘電体の場合の時定数を表す。今回の計算に用いた物性パラメータと環境パラメータの値を適用すると、電子の熱速度パラメータのみ考慮した場合、 j_a は式(2)の j_e になり、小惑星の誘電体表面電位が飽和に至るまでの時定数は、およそ10秒オーダーになると思われる。

表3には数値計算のパラメータを示している。物体は直径80mの球形を空間刻み幅10mで切った矩形グリッドを用いて計算を行った。時間刻み幅は小惑星表面全体を導体と見なした時の帯電の時定数を考慮して、10⁻⁶秒に設定している。計算の時間刻み幅が短いので10秒程度の表面誘電体の帯電時定数を考慮すると表面電位の定常解を得るには計算ステップ数が非常に長くなる。それで、表面電位の進展を促進させる工夫として小惑星表面の仮想のキャパシタンスを調整した。

表3. 計算パラメータ.

計算領域	(グリッド)	64x64x64
グリッド数	(物体)	990
物体の直径	(m)	80
空間刻み幅 (=Dx)	(m)	10.0
時間刻み幅	(x10 ⁻⁶ sec)	1.0

表4には調整したキャパシタンスを用いて、100ステップ計算した結果を示している。1計算ステップの時間は10⁻⁷秒に設定している。表の中に示したRamは日照の中心点、Wakeは日陰の中心点であり、図3の測定点3と4である。計算結果はそれぞれ図2に示した測定点3と4の時間履歴の結果から取り出した値である。相当時間(Equivalent Time)は1計算ステップに3.16x10⁴を掛けた時間であり、実際の物理的意味は無いが、計算上の物理的意味はあると考えられる。

同一の太陽風環境下では、流入電流量は一定であるので、表面のキャパシタンスが1/2になると、式(1)により、単位時間あたりの表面電位の変化量が2倍にな

るので、計算時間を1/2にする効果が得られる。しかし、キャパシタンスを短くしすぎると、1計算ステップ毎の表面電位の変化量が大きすぎて正しい電位を得られなくなるので注意が必要である。表4の第1行目はキャパシタンスの調整をしていない基準データである。

乖離電位は表面電位から物体を導体と見なした時の構体電位を差し引いた電位で、物体表面の誘電体による帯電を表す電位である。乖離電位は基準キャパシタンスを 10^4 倍にした $2.8E-11$ [F/m²] までは線型的に変化しているのがわかる。キャパシタンスを 3.16×10^{-5} 倍にした $8.8E-12$ [F/m²] の場合の乖離電位は、線型から傾きが少し変化し乖離電位の予想値に対して、Ram側は約 80%、Wake側は約 90%の値になっている。しかし、RamとWake側の入射電流はほとんど変化がないので飽和時間には多少誤差が生じて、帯電電位の定常解には誤差がないと考えられる。それで、プラズマは表面電位の変化に十分追従していると考えられる。したがって、計算ステップをもっと縮ませるために1計算ステップを 1×10^{-6} 秒に設定した。今後の計算結果のグラフは全て1計算ステップを 10^{-6} 秒に設定したものを表示する。

表4. 表面キャパシタンス調整による計算結果 (1計算ステップ 10^{-7} 秒).

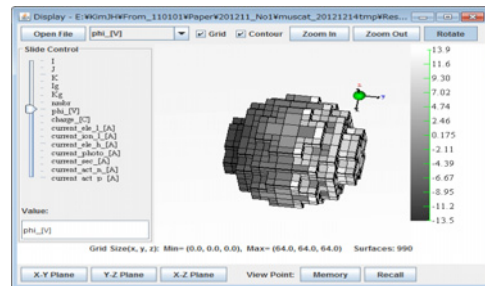
静電容量 [F/m ²]	相当時間 [sec]	乖離電位 [V]		電子電流 [A]		イオン電流 [A]	
		Ram	Wake	Ram	Wake	Ram	Wake
2.8E-07	1.0E-5	1.4E-4	-3.1E-5	-1.6E-4	-7.4E-5	5.5E-5	0
2.8E-09	1.0E-3	1.4E-2	-3.0E-3	-1.5E-4	-7.4E-5	5.5E-5	0
2.8E-11	1.0E-1	1.3E+0	-3.0E-1	-1.6E-4	-7.5E-5	5.5E-5	0
8.8E-12	3.2E-1	3.1E+0	-8.8E-1	-1.7E-4	-7.5E-5	5.5E-5	0
2.8E-12	1.0E+0	7.0E+0	-2.5E+0	-1.7E-4	-6.3E-5	5.5E-5	0
2.8E-13	1.0E+1	2.4E+1	-6.5E+0	-2.0E-4	-4.0E-5	5.5E-5	0

4 数値解析の結果

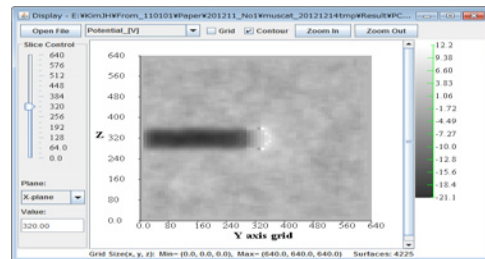
以下、「相当時間」は3章で説明したとおりである。図4には相当時間 16 秒後の表面電位の結果と相当時間63 秒[2000ステップ]での空間電位分布を示している。相当時間 16 秒後[500ステップ]の表面電位はRam側ではプラス、Wake側ではマイナスになり、Ram側の最大値は 13.9 V、Wake側の最大値は -13.5 Vの値を示している。高い熱エネルギーを持つ電子はWakeの奥深くの表面に入射することができ、表面電位を更に負に沈ませる⁹⁾。図3(a)の表面電位分布はWakeの奥深い部分で表面電位がより一層、負に沈むことを示している。Wakeの表面に2次電子放出を考慮しない場合の表面電位は次式から求められる⁸⁾。

$$V_s \approx -2.5 \frac{kTe}{e} \quad (4)$$

式(4)は2次電子放出がない場合、表面電位は電子のエネルギーに比例することを表している。2次電子放出を考慮した場合、荷電粒子の入射角 $\theta = 90^\circ$ で2次電子放出が最大になり、 $\theta = 0^\circ$ で2次電子放出はゼロに落ちる⁸⁾。図3(a)の明暗境界線は $\theta = 90^\circ$ なので、近傍のWake側には2次電子放出電流が大きくなる。その結果、明暗境界線近傍のWake側の表面電位は深いWakeに比べ相対的に正の値になる。図3(b)の相当時間 63 秒での空間電位分布は小惑星周辺の電位が均等に分布する中で、Ram側の表面周囲が正、Wakeの裏の空間が負に帯電している状態を表す。

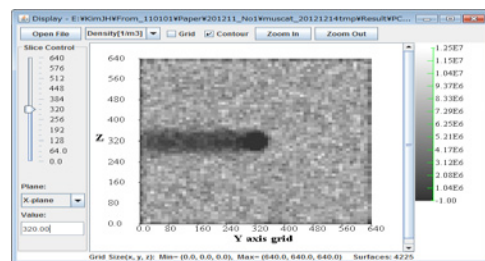


(a) 相当時間16 秒[500ステップ]での表面電位分布.

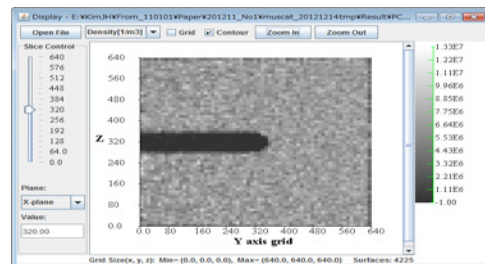


(b) 相当時間63秒[2000ステップ]での空間電位分布.

図4. 表面電位分布と空間電位分布の結果.



(a) 電子の密度.



(b) イオンの密度.

図5. 相当時間63 秒での荷電粒子の密度.

図5には相当時間 63 秒[2000ステップ]の計算ステップでの電子及びイオンの密度を示す。電子とイオンともに最大値は約 1.3×10^7 [m⁻³] であり、表1に示した密度の値とよく一致している。電子はWakeの裏側で軌道を曲げて表面に回り込む様子を示しているが、イオンの場合はWakeの表面に回り込む粒子数は全く見られない。Wake側に入り込む電子密度は計算初期に比べるとかなり減っているのが確認されるが、これはWakeが負に帯電すると、帯電電位より小さいエネルギーの電子を跳ね返すからだと考えられる。

図6にはRamとWakeの表面電位と物体を導体と見なした時の表面の構体電位の時間履歴を表す。図に表示されたRamとWakeはそれぞれ図2の測定点3と4に該当する。すなわち、Ram表面に入射する太陽風粒子の入射角 $\theta = 0^\circ$ 、Wake表面での入射角 $\theta = 180^\circ$ である。キャパシタンスは 8.8×10^{-12} [F/m²] を用い、計算の総ステップ数は 2000ステップである。図からRam側の表面電位は約 7 V、表面の構体電位は 0 V に飽和しているのがわかる。しかし、Wakeの場合は相当時間が約 16 秒[500ステップ]辺りで -15 V になり、時間が経つにつれ微細に減少し相当時間 70 秒[2200ステップ]では -17 Vまでに帯電する。図5の相当時間 16 秒[500ステップ]になるまでの電位の振幅が大きく変化するのは、計算時間短縮のためPIC粒子の計算ステップを短く設定したことによる影響と考えられる。すなわち、空間電荷による影響が十分反映されてない結果であり、その電位値は大きな意味がないと判断できる。ただし、16 秒以後[500ステップ]には電位変化の振幅がほぼ消えているので、PICの空間電荷が十分安定していると判断できる。従って、この電位は飽和電位として有意な値だと考えられる。

Ramの光電子放出は入射電子電流よりかなり大きい値である。そのため、Ramの表面電位は周辺プラズマより正になり入射電子電流を増加させるように働く。その時の表面電位は放出される光電子の平均エネルギー程度で決まる⁸⁾。一般的に日照の表面電位はおよそ +2~+5 V 程度であり、図5の結果と少しの差はあるが、良い一致を示している。一方、Wakeの奥深くの表面にたどり着く荷電粒子は高いエネルギーの熱速度を持つ電子のみであり、密度も減少する[5]。また、日陰なので光電子放出による電流の寄与が全くない。Wakeが負に帯電すると、帯電した表面電位より低いエネルギーを持つ電子は表面から跳ね返されてしまう。全体的に電子密度が減少する上で、12.3 eV の入射電子の平均エネルギー以上の電子密度分布は更に減少するので、負に帯電していく速度は鈍くなっていると考えられる。

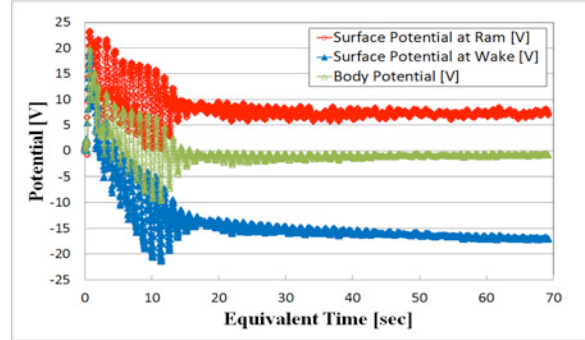


図6. Ram、Wakeの表面電位と構体電位の時間履歴。

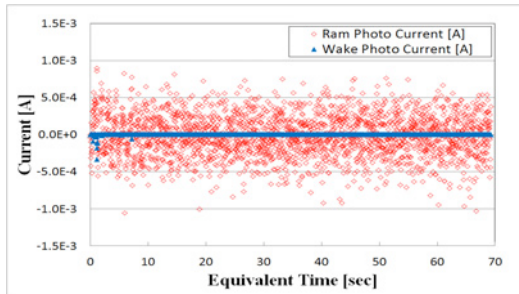
図7にRamとWake側の各電流成分の計算結果を示している。この電流成分はPTによるもので、空間電荷の振動による影響は限られている。図7(a) からわかるように光電子放出による電流成分は計算の初期にRam側から放出された電子がWake側に少し回り込むことがあるが、相当時間が 10 秒[300ステップ]になるとWakeに入ってくる光電子放出電流はゼロになる。これはWakeの表面の電位が -10 V 以下の帯電電位になるので放出された光電子には反発力が働き、平均エネルギーの小さい光電子は表面から追い出されるからである。

一方、図7(a) のRam側の場合は相当時間 10 秒[300ステップ]までは少し電子の放出（電流はプラス値になる）が大きいが全体的には放出と吸収の電流値がほぼ同じになっている。これは光電子放出係数によって放出された電子は、放出に伴って生じるRam表面電位の増加により再び表面に引き寄せられるのが原因である。ちなみに、光電子放出による電流成分は図6の(b)と(c)示した他の電流成分よりかなり大きい値を持っている。

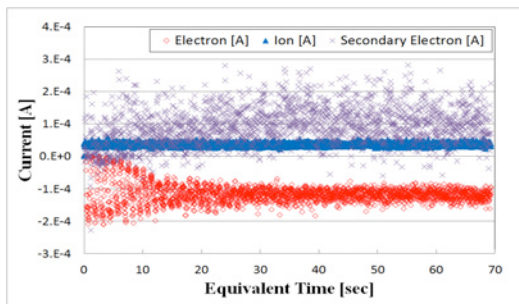
図7(b) にはRam側に入射する電子・イオン電流、および2次電子放出電流を示しているが、荷電粒子の入射と2次電子の放出との均等が取れている。2次電子放出の平均エネルギーは光電子より少し大きい値に設定しているので表面に引き寄せられる電子は少ない。図7(c) にはWake側の入射電子・イオン電流、および2次電子放出電流を示している。Wake表面に入射するイオン電流はゼロで、入射電子電流は高いエネルギーの熱速度を持つ電子なので、図7(b) の電子より電流の値が小さくなっている。

Wake側の帯電に寄与する電流成分は入射電子電流と2次電子放出電流の成分しかなく、その差はおよそ 3×10^{-6} [A] オーダである。計算に用いたグリッド1個分の面積は100 m² なので、電流密度は 3×10^{-8} [A/m²] になる。この値を式(3) に代入して表面帯電の時定数を計算すると約 100 秒オーダの値を得られる。また、式(4) によって、2次電子放出を考慮しない場合は約 -30

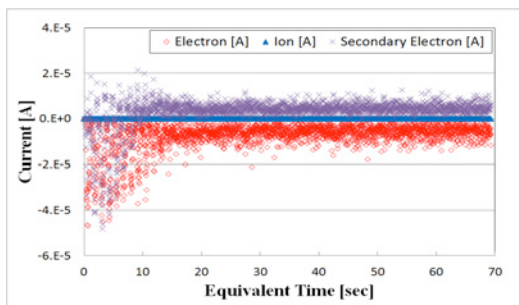
V まで帯電することが出来る。しかし、二次電子放出を考慮すると、負の帯電は緩和していくので、-30 V の値は表面電位の下限値に設定することが出来る。従って、2次電子放出と帯電電位の時定数を考慮し、100 秒の相当時間までの計算が行われた場合、約 -15 V ~ -20 V 程度までには帯電すると考えられる。



(a) Ram、Wakeの光電子放出電流。



(b) Ramの電子・イオン入射電流と2次電子放出電流。



(c) Wakeの電子・イオン入射電流と2次電子放出電流。

図7. Ram、Wakeの電流成分(1計算ステップ 10^{-6} 秒)。

5 結論

衛星帯電解析ツールであるMUSCATを用いて、仮想小惑星表面の帯電状態の数値計算を実施した。計算対象は太陽から1 AUの距離に位置する直径80mのSiO₂の球体を仮定した。仮想小惑星は長さがDebye長より大きく、宇宙空間に対する静電容量に比べ表面誘電体のキャパシタンスが大きいため、表面電位が飽和に至るまでの計算ステップが非常に長くなる。そのため飽和時の表面電位に影響を与えず計算ステップを短くする工夫としてキャパシタンスを 3.16×10^{-4} 倍にした値を用いて計算を行った。その結果は次のようにまとめ

られる。

小惑星表面は太陽風が正面から降り注ぐRam側では正に帯電し、日陰のWake側では負に帯電する。また、プロトンはWakeには回り込まず、電子のみが回り込む。Wakeの奥深くになるほど高い熱エネルギーを持つ電子が回り込むので、明暗境界線近傍のWakeよりはWakeの奥深くの方が更に大きく負に帯電する。Ramの中心点とWakeの中心点の時間履歴から得られた表面電位はRam側で約7V、Wake側で約-17Vである。最終的には、Wake側の表面電位は約-15V ~ -20V程度で飽和すると考えられる。

MUSCATのソルバーは注意深く利用し、あるいは改造することによって、衛星帯電以外の諸問題にも適用可能である。

参考文献

- 1) Muranaka, T. et al., "Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol.36, October, 2008, pp. 2336-2349.
- 2) 八田真児, 金正浩, “小特集 帯電事故防止のための宇宙環境・衛星帯電数値シミュレーション, 3.2 汎用宇宙機帯電解析ツール (MUSCAT) の概要”, J. Plasma Fusion Res. Vol.88, No.2, 2012, pp. 92-95.
- 3) Kim, J. et al., “Final Development Status of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)”, AIAA-2007-494, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA, 8-11 January 2007.
- 4) Cho, M. and Hastings, D. E., “Dielectric Charging Processes and Arcing Rates of High Voltage Solar Arrays,” J. Spacecraft and Rockets, Vol. 28, No.6, pp.698-706, 1991.
- 5) 小島正宜, “小特集 宇宙天気予報, 4. 太陽風プラズマ”, J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.11, 2006, pp. 751-755.
- 6) 趙孟佑, 藤井治久「高電圧太陽電池アレイの帯電現象と将来課題」、日本航空宇宙学会誌、第51巻、第592号、pp. 139-145.
- 7) 村中崇信, “小特集 帯電事故防止のための宇宙環境・衛星帯電数値シミュレーション, 3.1 宇宙機帯電の原理と数値解析モデリング”, J. Plasma Fusion Res. Vol.88, No.2, 2012, pp. 87-91.
- 8) Hastings, D.E. and Garrett, H., “Spacecraft Environmental Interactions,” Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1996, pp.148 ~ 175.
- 9) Stubbs, T. J., J. S. Halekas, W. M. Farrell, and R. R. Vondrak, “Lunar surface charging: A global perspective using Lunar Prospector data,” in Proceedings of Dust in Planetary Systems 2005, Eur. Space Agency Spec. Publ., edited by H. Kruger, and A. Graps, in press, 2007.

(2013年1月17日受付, 2013年1月25日受理)