

2次元粒子シミュレーションによる月周辺の電場構造の解析

A 2-Dimensional full particle simulation of electric structures around the moon

木村 進矢 [1]; # 中川 朋子 [1]

Sinya Kimura[1]; # Tomoko Nakagawa[1]

[1] 東北工大・情報通信

[1] Tohoku Inst. Tech.

1. はじめに

太陽は、太陽風プラズマと呼ばれる荷電粒子の集まりを絶えず宇宙空間に放出しており、月はその太陽風の流れに逆らうように浮かんでいる。プラズマとは正の電荷を持つイオンと負の電荷を持つ電子の集まりであり、全体で電氣的に中性なものである。それが月表面にぶつくと、月は誘電体で構成されているので荷電粒子が月面に吸着され、月の下流にはウェイクと呼ばれる粒子の密度が薄い領域ができる。ウェイク中は電氣的に中性ではなく、ウェイク境界には電場ができることが様々な観測から示唆されている。月から $6.5R_L$ 下流のウェイクを通過した Wind 衛星のイオン観測によると、ウェイク境界には 0.2mV/m の電場があると推定されている。

月の近くにはもっと強い電場があるのではないかという報告もある。月の電子の帯電を考慮に入れると、月表面と太陽風中には 600V ほどの電位差が生じるとの予想がある。月表面に近い電場の観測はないので、このような強い電場の存在を示すためにはシミュレーションをしなければならない。しかし過去の月周辺のシミュレーションで電子とイオンの両方の帯電を考慮に入れた実験はなかった。

そこで本研究では全粒子法を用いて電子とイオンを粒子として扱い、月への帯電を考慮に入れて月周辺に強い電場が生じるかを見る。

2. 計算方法

プラズマの計算には全粒子法である ElectroMagnetic 2D(Birdsall and Langdon, 2005) を用いる。これはプラズマをたくさん荷電粒子でシミュレートする方法である。粒子の運動は運動方程式で計算し、電磁場は FDTD 法を用いて計算する。

空間は月の形を考慮に入れるために $20R_L \times 20R_L$ の 2次元にとる。グリッド数は 256×256 とした。計算は領域全体に太陽風の粒子を撒いてウェイクができるところから始める。太陽風は、 $X=0$ の境界から X 軸方向にプラズマが流れるように粒子を注入し、反対方向へ出た粒子を取り除くことで再現する。帯電は、月表面にぶつかった粒子の電荷をぶつかった位置で積算することで考慮に入れる。太陽風が領域内を 4 周したとき月への帯電がある程度落ち着いたので、このときを実験結果として見る。

GEOTAIL の観測によると太陽風の平均速度 V_{SW} は 500km/s 、電子の熱速度 V_e は 2650km/s であるが、時間の節約のため V_e と V_{SW} とイオンの熱速度 V_i の大小関係 $V_e > V_{SW} > V_i$ を変えないように $V_e=0.1c$, $V_{SW}=(1/4)V_e$, $V_i=(1/8)V_{SW}$ と決めた。月周辺の太陽風中のデバイ長 23m は月の半径より非常に小さいが、計算ではデバイ長を 1 グリッド以下にできないのでデバイ長を $(1/4)R_L$ とした。

3. 結果と考察

シミュレーションで得られた月周辺の電位を見ると月の下流が負の電位になっており、ウェイクができているのがわかる。月の裏面を見ると、ウェイク中よりも大きく負に落ちていた。これは電子の帯電によるものである。 V_i は V_{SW} よりも遅いのでイオンは月のすぐ裏側に入り込めないが、 V_e は V_{SW} より速いので月の裏側にも入り込むことができる。その結果、月の裏面は電子しか帯電しないので、このように負の電位構造が現れるのだと考えられる。裏面の電位の値を見ると -14kV であったが、月の帯電モデルの例の 600V に比べると非常に大きい。これは衛星の帯電モデル計算より、 V_e を大きくしたからだと説明することができる。太陽風中の帯電による衛星の電位というのは電子の温度に比例すると知られており (Fahleson, 1967)、今回は電子の熱速度を 10 倍 (温度は 100 倍) ほど高くしたため電位が 100 倍大きくなってしまったのだと考えられる。

シミュレーションで得られた月周辺の電場を見ると、ウェイク境界の電場より月の側面 (ターミネーター域) に強い電場が現れていた。この電場は今回帯電を考慮に入れた計算で初めて現れたものである。月の昼側表面は電子とイオンの両方が到達できるので電氣的におよそ中性になるが、夜側表面は負になる。これによりターミネーター域には鋭い電位の勾配が現れるため、このように強い電場が生じたのだと考えられる。ウェイク中の電場強度の空間変化を見ると、ターミネーター域の電場はウェイク境界の電場より強く、Wind 衛星が通過した $6.5R_L$ 後方のウェイク中と比べるとおよそ 25 倍強かった。

4. まとめ

月のターミネーター域には、月から $6.5R_L$ 後方のウェイク中の電場強度 12mV/m (Wind 衛星では 0.2mV/m) より、およそ 25 倍強い 300mV/m ほどの電場が現れた。