

縦孔・地下空洞周辺の月面帯電に関する プラズマ粒子シミュレーション

○三宅洋平（神戸大学計算科学教育センター）、西野真木（名古屋大学太陽地球環境研究所）

Particle Simulations on Electrostatic Plasma Environment near Lunar Vertical Holes
Yohei Miyake (Kobe University) and Masaki N Nishino (Nagoya University)

Abstract

Japanese lunar explorer “Kaguya” has discovered vertical holes on the Moon surface. The diameter and depth of the holes are both in a range of 50 through 100 m, which produces a higher depth-to-diameter ratio than typical impact craters. The holes are thus expected to create characteristic plasma and dust environment around it. It is of practical importance to assess such a distinctive environment, reminding that a future landing mission plans to explore the lunar holes and caverns associating to the holes. In the present study, we apply our original particle-in-cell simulator EMSES to assessment of day-side plasma environment around lunar vertical holes. We have a three-dimensional computational domain including a simplified lunar hole structure and introduce a solar wind plasma downflow to the lunar surface. We also simulate the photoelectron emission from the lunar surface by taking into account the presence or absence of sunlight illumination, and its incident angle. We will show simulation results on the properties of lunar surface charging near the hole and its dependence on changing solar wind plasma conditions.

1. 背景と目的

「かぐや」衛星による地形カメラ観測により、月面に特徴的な縦孔構造が発見されている¹⁾。縦孔のサイズは直径、深さともに、50~100 m に及び、通常のクレーターに比べ大きな深さ/直径比を持つため、その周辺では特異なプラズマ静電環境が形成されていると予想される。このような縦孔構造や地下空洞を直接探査する UZUME 計画が立案されている中、将来の着陸探査への影響を知る上でも縦孔周辺プラズマおよび帯電ダスト環境を事前評価することは重要である。本研究では、ミクロスケールのプラズマ現象解析に幅広く用いられている Particle-In-Cell (PIC) シミュレーション技術を応用し、月面昼側にある月縦孔周辺プラズマ環境の定量評価を行う。

2. 計算手法とモデル

本研究では、宇宙プラズマ現象解析に用いられてきた 3 次元 PIC シミュレーション手法に、月面などの非プラズマ境界の数値的取り扱いを追加した EMSES シミュレーションコード²⁾を用いる。本手法では、計算空間上で任意の位置座標をとり得る多数のプラズマ荷電粒子と、空間中で離散的に定義された静電場を、相互に解き進めることによって、プラズマの挙動と静電環境の時間発展を自己無動着に解き進める。EMSES において月面は、プラズマ粒子を

捕捉する内部境界として扱われる。また太陽光照射の有無や角度に応じて、月面からの光電子放出を再現できるようになっている。計算には多数のマクロ荷電粒子を用いるため、スーパーコンピュータの効率的な利用が欠かせない。この目的のために EMSES には動的負荷分散アルゴリズム OhHelp³⁾が適用されている。

本計算では、Marius の丘に発見されている縦孔のデータ¹⁾を参考に、そのサイズを直径 50 m、深さ 45 m と定め、その上空も含めて、おおよそ 200 m×200 m×1 km の空間を計算領域とする。太陽風プラズマ、および光電子のパラメータについては、それぞれ密度 5 /cc、温度 8.6 eV、流速 450 km/s、光電子電流 4.5 μA/m²、光電子温度 2.2 eV⁴⁾と標準的な値を用いて、太陽風と太陽光の入射角度θを可変パラメータとして、解析を行った。

3. シミュレーション結果

一般的にプラズマに固体表面が接している状態では、プラズマ荷電粒子が表面に捕捉されることにより、帯電が生じる。これは月においても同様であり、平らな昼側の月面の場合には、光電子放出により負電荷が失われるため、月面は数 V 程度正に帯電することが知られている⁵⁾。図 1 に太陽風（太陽光）入射

角度 $\theta=30^\circ$ のケースにおける月縦孔を含めた表面電位分布を示す。図から明らかなように、縦孔内部では、場所によって帯電値が大きく異なり、大きな電位差（40 V 程度）が生じている。これは、日照面では先述した光電子放出により、正に帯電するのに対し、日陰面からは光電子は放出されず、周辺を浮遊する電子の一部が表面に付着することで負に帯電するためである。この電位差により、日照-日陰境界付近には大きな電場が生じていることが示唆され、着陸探査においては留意すべき点であるといえる。

また、その他の特徴として、日照条件同士の比較において、縦孔底面の電位は外部に比べて高いことや、日照-日陰境界付近に電位のオーバーシュートが見られることが挙げられる。太陽風プラズマや光電子のダイナミクスの詳細解析により、前者は縦孔内部に侵入可能な太陽風電子量の減少、後者は日照-日陰境界を横切る光電子の輸送現象、によって説明できることが確認された。以上は、縦孔内部の静電環境の特異性を定量的に示す世界初の結果であり、縦孔探査立案における基礎資料となりうる知見である⁶⁾。今後は、縦孔の内壁に溶岩チューブに相当する地下空洞（横孔）が続いていることを仮定したシミュレーション解析を実施し、単純な縦孔構造の場合との差異を調査する予定である。

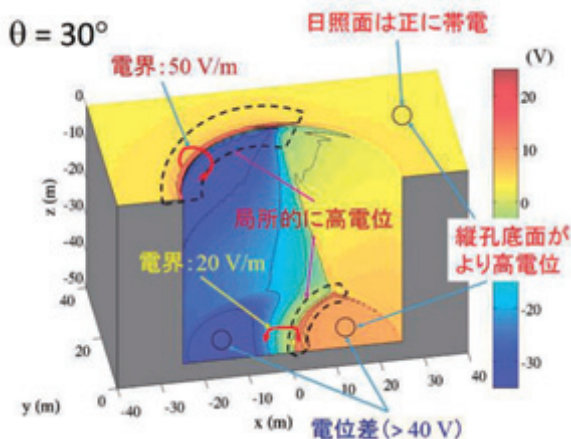


図 1 月縦孔の表面電位分布

4. まとめと今後の課題

「かぐや」衛星によって発見された月縦孔のプラズマ静電環境を明らかにするため、PIC法に基づくプラズマ粒子シミュレーションを実施し、縦孔周辺月面帯電の特異性を明らかにした。具体的には、①太陽光照射の有無に依存して生じる大きな電位差、②日照条件において、縦孔外部より高い電位、③日照-日陰境界付近に見られる電位オーバーシュート、

を見出し、それらをプラズマ動力学の観点から説明することに成功した。これらの電位構造は、月面上に投入された人工構造物（着陸機やプローブなど）がさらされる静電気環境に直接反映されるため、プラズマ科学の観点のみならず、探査計画の工学的観点からも重要な結果である。

今後の課題としては、月縦孔周辺の帯電ダスト（微粒子）の挙動・分布解析が挙げられる。直径が nm \sim μ m 程度のダストがプラズマ荷電粒子との衝突によって帯電し、月面上を浮遊していることはよく知られている⁷⁾。縦孔周辺では特に特異な電位構造が形成されているため、ダストの分布は月平面上のそれとは大きく異なり、また一部のダストは静電気力により加速され、高速度で移動することも予想される。これらのダストが着陸機に付着した場合、電気系統に悪影響を及ぼすことも想定されており、その分布を定量的に予測することが重要である。本研究で得られた結果を入力とした、帯電ダストのテスト粒子解析を実施することにより、現実の静電環境を反映したダスト挙動解析が可能になると期待される。

参考文献

- 1) Haruyama, J., Morota, T., Kobayashi, S., Sawai, S., Lucey, P. G., Motomaro, S. and Nishino, M. N.: Lunar Holes and Lava Tubes as Resources for Lunar Science and Exploration, *Moon, Perspective Energy and Material Resources*, Springer, Berlin, 2012, pp.139-163.
- 2) Miyake, Y. and Usui, H.: New Electromagnetic Particle Simulation Code for the Analysis of Spacecraft-Plasma Interactions, *Phys. Plasmas*, **16** (2009), p.062904.
- 3) Miyake, Y. and Nakashima, H.: Low-Cost Load Balancing for Parallel PIC Simulations with Thick Overlapping Layers, *Proc. ISPA*, 2013, pp.1107-1114.
- 4) Feuerbacher, B., Anderegg, M., Fitton, B., Laude, L. D., Willis, R. F. Gard, R. J. L.: Photoemission from Lunar Surface Fines and the Lunar Photoelectron Sheath, *Proc. 3rd Lunar Science Conference*, **3**(1972), pp.2655-2663.
- 5) Poppe, A. and Horányi, M.: Simulations of the Photoelectron Sheath and Dust Levitation on the Lunar Surface, *J. Geophys. Res.*, **115**(2010), p.A08106.
- 6) Miyake, Y. and Nishino, M. N.: Electrostatic Environment near Lunar Vertical Hole: 3D Plasma Particle Simulations, *Icarus*, accepted for publication.
- 7) Grün, E., Horányi, M. and Sternovsky, Z.: The Lunar Dust Environment, *Planet. Space Sci.*, **59**(2011), 1672-1680.