

# 月面中ダストのプラズマ中帯電・挙動の数値モデリング

○三宅洋平 (神戸大学), 船木裕司 (神戸大学), 西野真木 (名古屋大学)

Simulations on Dust Charging and Levitation near Lunar Surfaces

Y. Miyake (Kobe University), Y. Funaki (Kobe University), and Masaki N Nishino (Nogaya University)

Key Words: Moon, Vertical Hole, Subsurface Cavern, Solar Wind, Photoelectron, Dust, Charging

## Abstract

This paper addresses particle simulation analysis on electric environment around lunar vertical holes and their associated subsurface caverns. The analysis is based on the kinetic (particle-in-cell) descriptions of solar wind plasma dynamics, lunar surface charging, and near-surface plasma sheath formation. The obtained electrostatic environment around the distinctive landscape is provided for numerical model predictions of dynamics and charging processes of micron/submicron-sized dust grains. The paper mainly reports the following two results: 1. enhanced potential deviation between sunlit lunar surfaces inside and outside the holes, detected when assuming the presence of a subsurface cavern, and 2. continual transport of dust grains sustained by their stochastic charge attainment/lost from surrounding plasma.

## 1. 目的および背景

「かぐや」衛星により、月面に縦孔が発見され、注目を集めている<sup>1)</sup>。これらの縦孔は例えば溶岩チューブといった火成活動が起源と考えられる地下空洞に開いたものである可能性が高いとされる。典型的な縦穴の直径は50~100 mに及び、太陽風プラズマのデバイ長スケールと同程度かそれより大きい場合、その周辺では特異なプラズマ静電環境が形成される。将来の着陸探査に先駆けて、縦孔・地下空洞周辺の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適した粒子シミュレーション技術を応用し、月縦孔・地下空洞周辺電気環境の定量評価を行う。本年度は特に、昨年度の報告に地下空洞の存在と帯電ダスト挙動の物理モデルを新たに追加することで、より現実性の高い予測を目指す。

## 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 Particle-in-Cell 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<sup>2)</sup>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。

本計算では、Marius の丘に発見されている縦孔のデータ<sup>1)</sup>を参考に、そのサイズを直径 50 m、深さ 45 m と定める。また縦孔の下部が地下空洞につながっている状況を想定した解析を実施した。地下空洞の天井の高さは 30 m とし、空洞の影響を明確にするためその奥行きは太陽風デバイ長スケール (~10 m) より十分大きいとした。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  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ 、光電子温度 2.2 eV と標準的な値を用いることとした。

## 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。縦孔内部では、日向と日陰で帯電値が大きく異なり、数 10 V の電位差が生じる<sup>3)</sup>。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、代わりに周囲に分布する電子の高エネルギー成分が付着することで負に帯電するためである。

また縦孔特有の現象として、縦孔底面の日向部分が、縦孔外部に比べて高電位になることが判明している<sup>3)</sup>。これは太陽風プラズマ電子の縦孔内部への侵入が著しく制限されるためであるが、一方で太陽光照射により発生する光電子が縦孔の横壁を伝って底

部に流入することで、縦孔内外の電位差をある程度緩和している。しかし今回、地下空洞を想定すると縦孔の横壁が途中で途切れるため、光電子による緩和効果がうまく働かず、縦孔内外（および日向・日陰部分）の電位差が増大することが判明した(図1)。実際に太陽光照射角度  $30^\circ$ 、空洞天井の高さが 30 m の条件では、空洞のない状態（10 V、前年度報告を参照）に比べて電位差が 20 V 程度増大することが確認された。この値は照射角度や天井高さ、プラズマ条件に依存するため、今後より詳しい解析を要する。

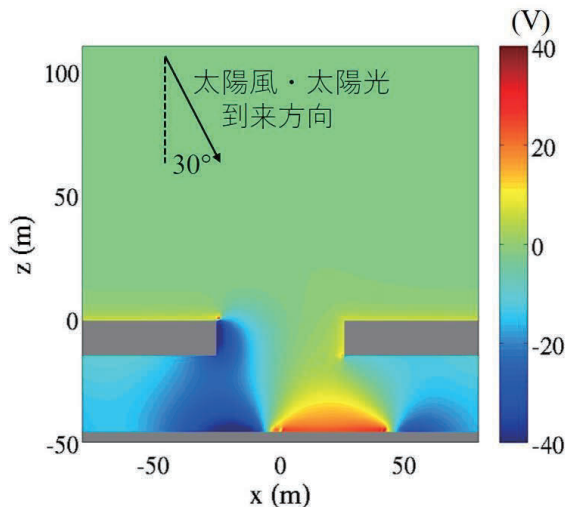


図1 月縦孔・地下空洞周辺の電位分布。縦孔内日向領域の平均電位はおおよそ+30 V 程度。

上述のようなプロセスにより月表面のレゴリス層が帯電し、その一部は月面周辺の特異な電気環境のもとで浮遊し、特徴的なダイナミクスを示すことが知られている。これらの浮遊ダストが月面探査機に付着することにより、機器の故障などの障害を引き起こす恐れがある。そこでダストの挙動を明らかにすることを目的に、テスト粒子解析を実施した。

図2に縦孔周辺でのダスト分布のスナップショットを示す。初期状態ではダストは月面上に堆積しているという仮定の下での計算であるが、静電気力の作用により、ダストが浮遊していることが図から確認できる。ダストの持つ電荷は日向では正、日陰では負であるが、一方で日向および日陰の月面からはそれぞれ上向きおよび下向きの電場が発生しているため、ダストが浮かび上がる向きに静電気力が作用する。また縦孔内部では、日向側のダストは、負に帯電した日陰側に、日陰側のダストはその逆の方向へと、それぞれ引き付けられるため、日向-日陰境界を交差するような運動が見られる。日向から日陰に移動した「正に帯電したダスト」はある一定時間後には確率的に負のプラズマ電荷を獲得し、「負に

帯電したダスト」に変化すると考えられるため、上記のプロセスは日向-日陰部分が存在する限り永続的に継続すると予想される。このプロセスも含めた数値解析は今後の課題である。

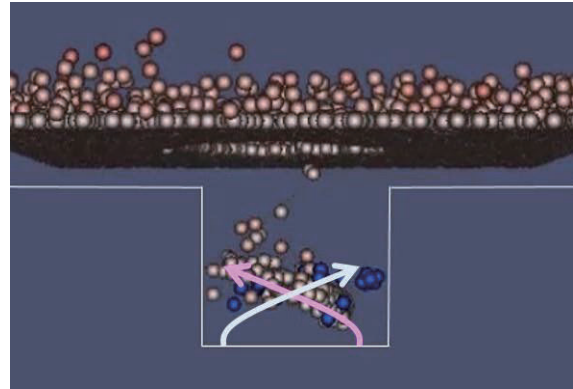


図2 月縦孔近傍の帯電ダスト挙動。

#### 4. まとめと今後の課題

月縦孔およびその内部に存在が強く示唆される地下空洞周辺の電気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、地下空洞の有無による電位構造の差を明らかにした。この数値解析によれば、空洞が存在する場合は、縦孔底面の日照部分がさらに高電位になると予想されている。これは縦孔内部での日向-日陰間の電位差が増大することにもつながるため、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、パラメータサーベイも含めたより詳細な解析が必要である。またこれと並行して、得られた電場環境中での帯電ダスト挙動の数値シミュレーション解析を開始している。特に縦孔内部では、日向-日陰境界に生じる強電場により、ダストの運動が活発化することを示唆する計算結果を得ている。今後は、ダストサイズ分布なども考慮したより現実的な条件下で解析を行う予定である。

#### 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 Nishino, M. N.: Electrostatic Environment near Lunar Vertical Hole: 3D Plasma Particle Simulations, *Icarus*, accepted for publication.