

月面空洞における流速・熱速度比に基づく局所的な正帯電形成メカニズムの解析

#中園 仁¹⁾, 三宅 洋平²⁾, Miloch Wojciech J.³⁾

(¹ 神戸大学システム情報学研究科, ² 神戸大学, ³ オスロ大学)

Mechanisms of Ion-Driven Positive Charging in Lunar Cavities under Variable Flow-to-Thermal Speed Conditions

#Jin Nakazono¹⁾, Yohei MIYAKE²⁾, Wojciech J. Miloch³⁾

(¹ Graduate school of System Informatics, Kobe University, ² Kobe University, ³ University of Oslo)

The lunar surface, being almost entirely unshielded by an atmosphere, is directly exposed to the solar wind plasma and is therefore known to undergo significant surface charging. Previous studies have mainly discussed positive charging due to photoelectron emission under sunlight and negative charging caused by the dominant influx of electrons. However, the actual lunar surface is characterized by complex topography, including numerous craters, boulders, cracks, and deep cavities, where charging processes can differ significantly from those on flat surfaces.

In our earlier work, we reported an “ion-driven charging” mechanism, in which electrons are preferentially absorbed by the cavity sidewalls while ions readily reach the cavity floor, leading to a positive potential of several hundred volts at the bottom of deep cavities. In the present study, we aim to understand the general conditions under which such charging occurs by performing three-dimensional Particle-In-Cell (PIC) simulations, focusing on the relative magnitudes of the solar wind bulk flow velocity and the thermal velocities of ions and electrons.

Our analysis reveals that the potential at the cavity floor can be categorized into three regimes according to the flow-to-thermal speed ratio: (1) a negative potential forms when the flow velocity is lower than the ion thermal speed, due to dominant electron influx; (2) a pronounced positive potential develops when the flow velocity lies between the ion and electron thermal speeds, as electrons are lost to the sidewalls while ions penetrate to the floor; and (3) when the flow velocity exceeds the electron thermal speed, the enhanced electron supply drives the floor potential back toward near-zero values.

Furthermore, a semi-analytical free-fall model demonstrates that these charging characteristics, at spatial scales below the Debye length, can be consistently interpreted in terms of the flow-to-thermal speed ratio. Applying the results to typical solar wind conditions shows that, somewhat counterintuitively, positive charging is suppressed under fast-stream conditions and is instead more effectively induced under slow-stream conditions.

These findings provide important insights into the electrostatic environment of deep cavities and narrow gaps around landers or rocks on the lunar surface. They are also relevant to assessing charging risks for exploration hardware and predicting dust transport processes, while offering a basis for understanding surface charging on other airless bodies such as asteroids and Martian moons.

月面は大気による遮蔽をほとんど受けず、太陽風プラズマの直接的な影響を受けるため、表面帯電が顕著に生じることが知られている。従来研究では、太陽光に伴う光電子放出による正帯電や、電子流入優位による負帯電が主に議論されてきたが、実際の月面は多数のクレーターや岩塊、亀裂や深い空洞など複雑な凹地形を有しており、その内部では通常と異なる帯電現象が起こり得る。

我々はこれまでに、深い空洞内部において電子が側壁に失われやすい一方でイオンが底面に到達しやすくなるため、底面電位が数百ボルト規模で正に帯電する「イオン駆動帯電」機構を報告してきた。本研究では、この帯電がどのような条件で生じるかをより普遍的に理解するため、3次元 Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションを用いて、太陽風の流速とイオン・電子熱速度の大小関係に着目した系統的解析を行った。

解析の結果、空洞底面の帯電状態は流速と熱速度の比により三つの領域に大別されることが分かった。すなわち、(1) 流速がイオン熱速度より低い場合には電子流入が支配的となり負電位を形成し、(2) イオン熱速度と電子熱速度の中間領域では電子が側壁に吸収される一方でイオンが底面に到達するため正電位が顕著に形成し、(3) 流速が電子熱速度を超える高流速領域では電子供給が増大し、底面電位がゼロ付近に収束した。

また、自由落下モデルに基づく半解析的な評価により、太陽風プラズマのデバイ長以下のスケールでのこの帯電特性が「流速／熱速度比」という指標によって統一的に説明できることを示した。さらに、典型的な太陽風条件に基づくパラメータマッピングを行った結果では、意外にも高速ストリームでは正帯電が抑制され、むしろ低速ストリーム条件において空洞底面の顕著な正帯電が誘発されやすいことが明らかとなった。

本成果は、月面の深部空洞や探査機周囲の狭隘部における帯電環境を理解する上で重要であり、探査機の帯電リスク評価や塵輸送現象の予測に資するだけでなく、小惑星や火星衛星といった他の無大気天体における電磁環境の理解にも寄与する。