

## The Surface Charging Processes of Airless Planetary Bodies

### —地表形状に起因する月面の異常帯電—

三宅洋平\*, 中園仁, 白井英之

神戸大学・計算科学教育センター／工学部情報知能工学科／大学院システム情報学研究科.

Contact: \*y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp

月はグローバルな固有磁場や濃い大気を持たないため、その固体表面は直接太陽風プラズマに曝されており、電気力学的な相互作用が生起する。こうした相互作用の結果、月の表面が帯電していることは良く知られている。月面電位の平衡状態は、荷電粒子種間の電流バランスが満たされるように決定される。月昼側の表面帯電の一般的な描像は、光電子の流出による正電荷の蓄積が支配的となることにより、光電子の運動エネルギーに相当する数 V 程度の正電位を持つというものである。一方で月地表の形状、特に凹凸の効果を帯電機構の観点から考察すると、様々な「異常帯電」のモードが提起される。本研究ではその一例として、日照中の光電子放出条件下であるにも関わらず、正イオン電流が重要な役割を担う表面帯電の発生原理とその特性について理解を深める。当該現象は太陽風のようにイオン熱速度 < フロー速度 < 電子熱速度の関係を有するプラズマが、一定の深さを持った孔と接することによって生じる。本講演では当該現象について帯電物理機構の考察と数値シミュレーションによる実証に基づき論じた後に、このような異常帯電が月表層の電気力学過程に重要な役割を果たしている可能性を議論する。

# The Surface Charging Processes of Airless Planetary Bodies

～地表形状に起因する月面の異常帯電～

三宅洋平、中園仁、白井英之

神戸大学・計算科学教育センター／大学院システム情報学研究科

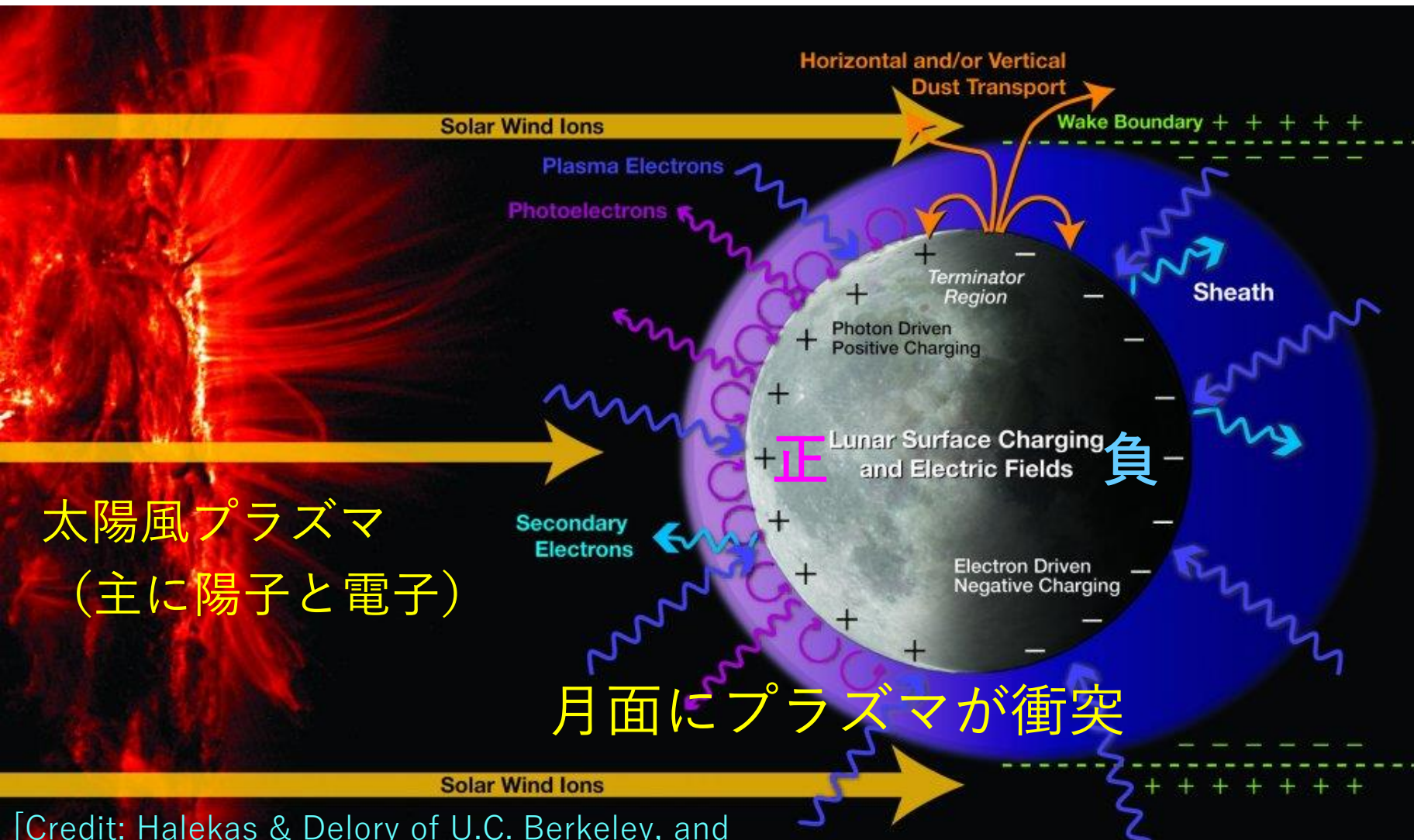
[y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp](mailto:y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp)

第22回惑星圏研究会: 2021/2/17-19



# 月の荷電粒子・電磁気環境と表面帯電

昼夜（日照/日陰、H<sup>+</sup>照射の有無）、地形等による違い



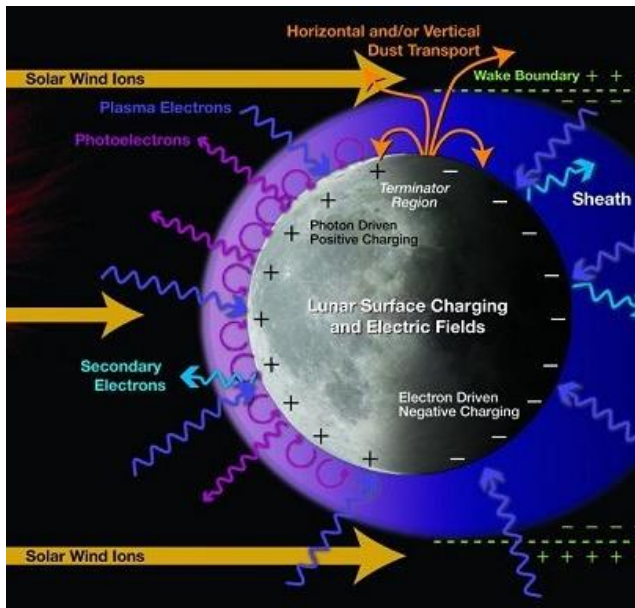
太陽風プラズマ  
(主に陽子と電子)

月面にプラズマが衝突

[Credit: Halekas & Delory of U.C. Berkeley, and Farrell & Stubbs of the Goddard Space Flight Center]

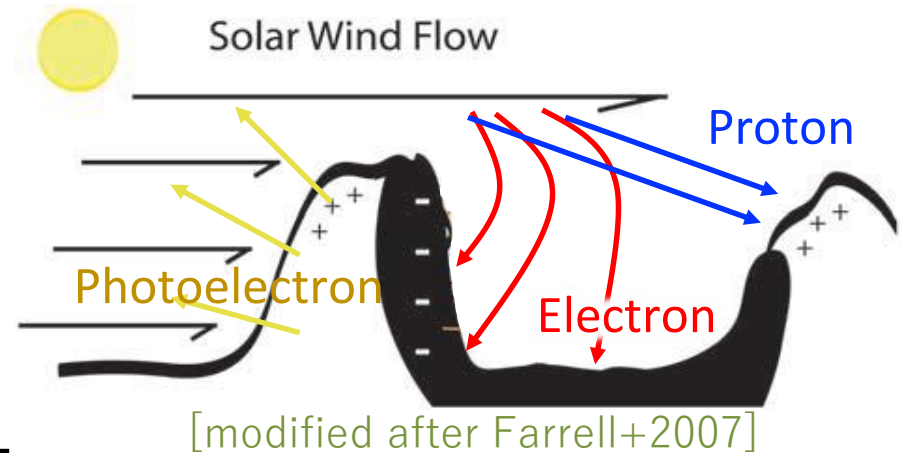
# 地表形状と表面帯電

全球スケール



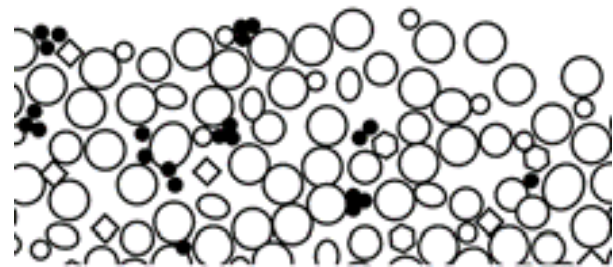
の帯電

地形スケール



[modified after Farrell+2007]

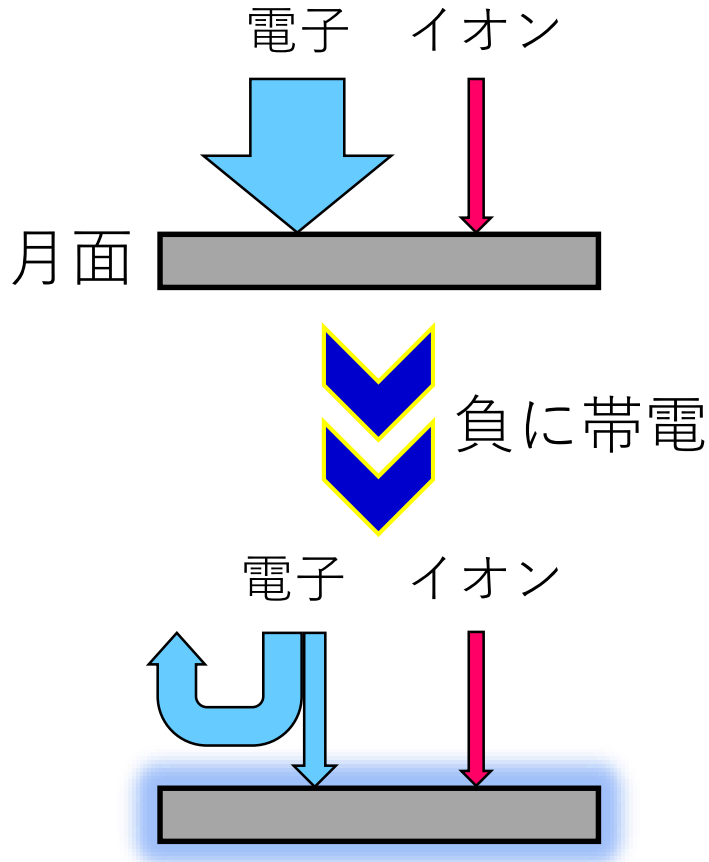
岩・レゴリススケール



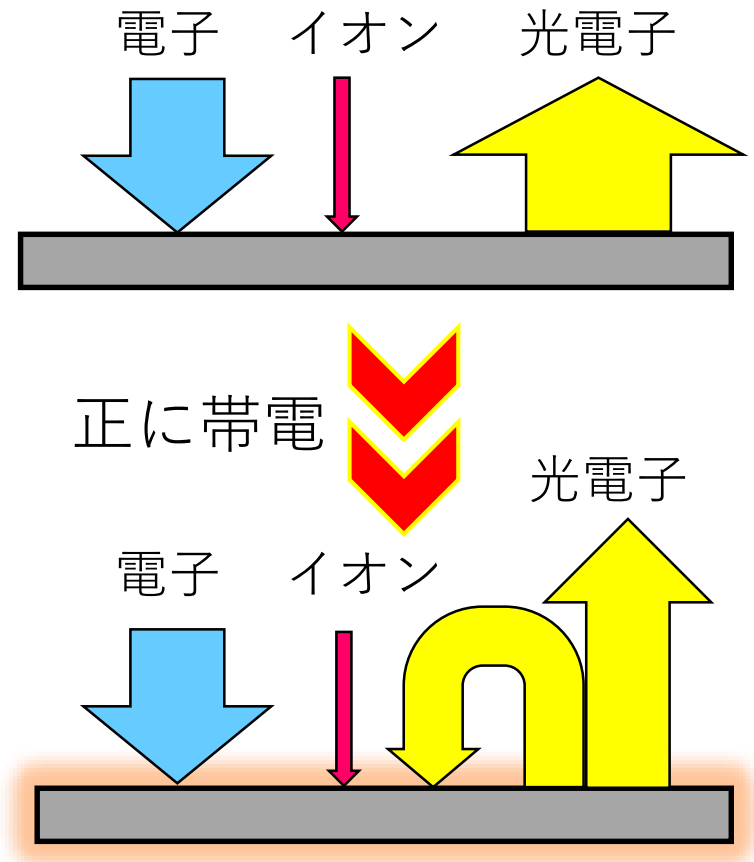
の帯電

# 「正常」な帯電 [e.g., Whipple, 1981]

## 1. 日陰



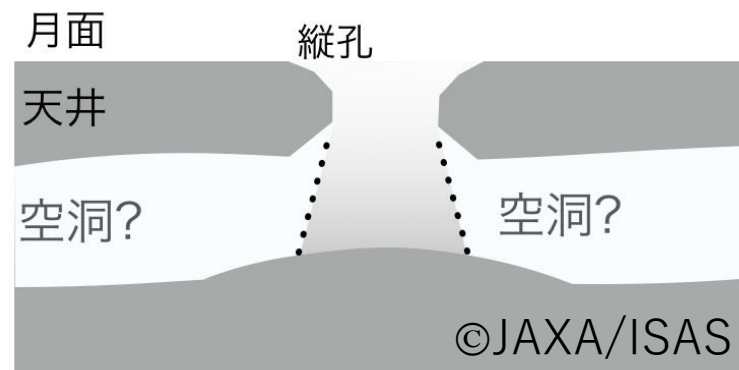
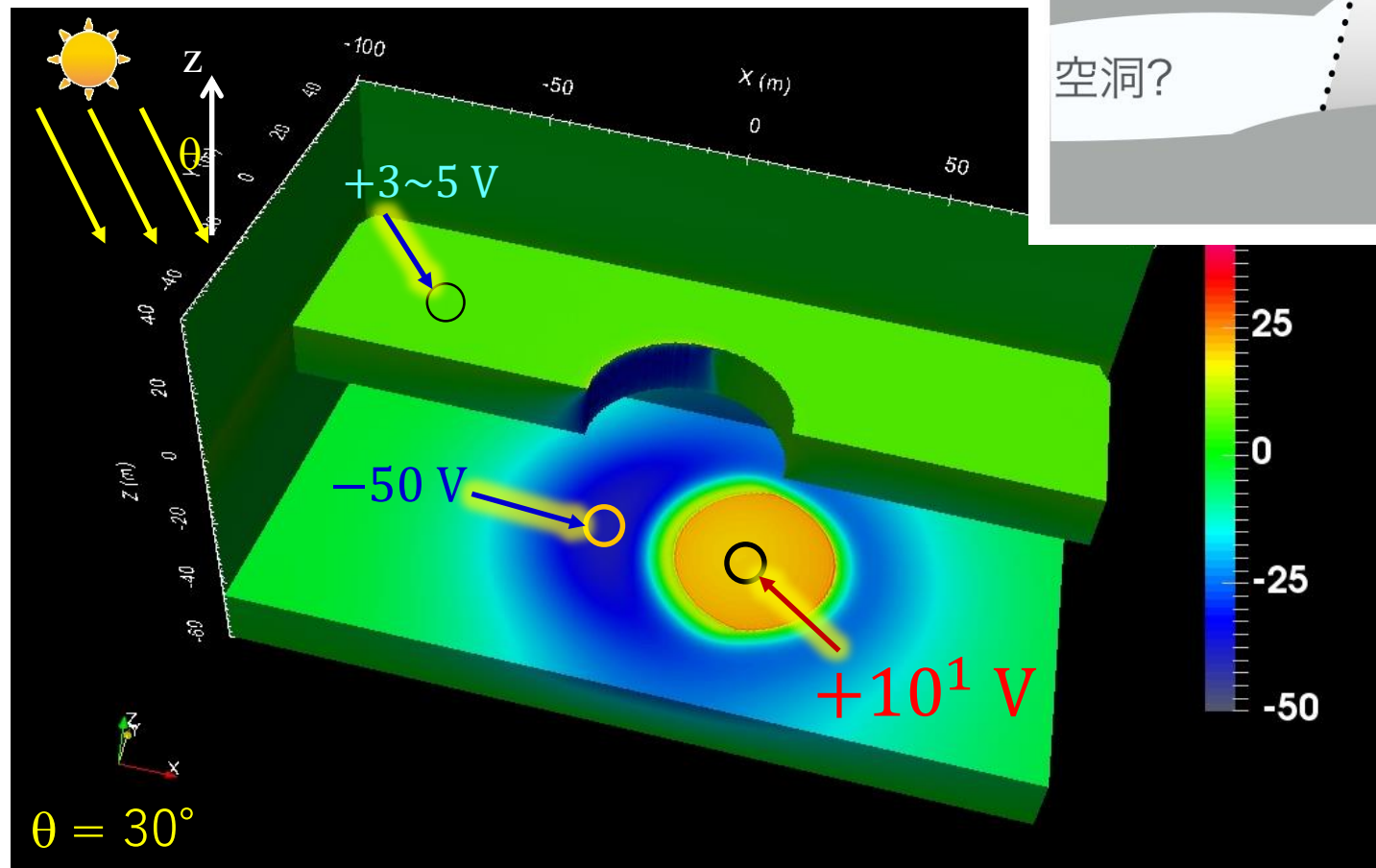
## 2. 日向



いずれのケースも「電子電流  $\gg$  イオン電流」成立  
⇒ この条件が逆転する(=異常な)状況はあり得るか？

# 過去の数値研究[e.g., Miyake+, 2015]の再点検

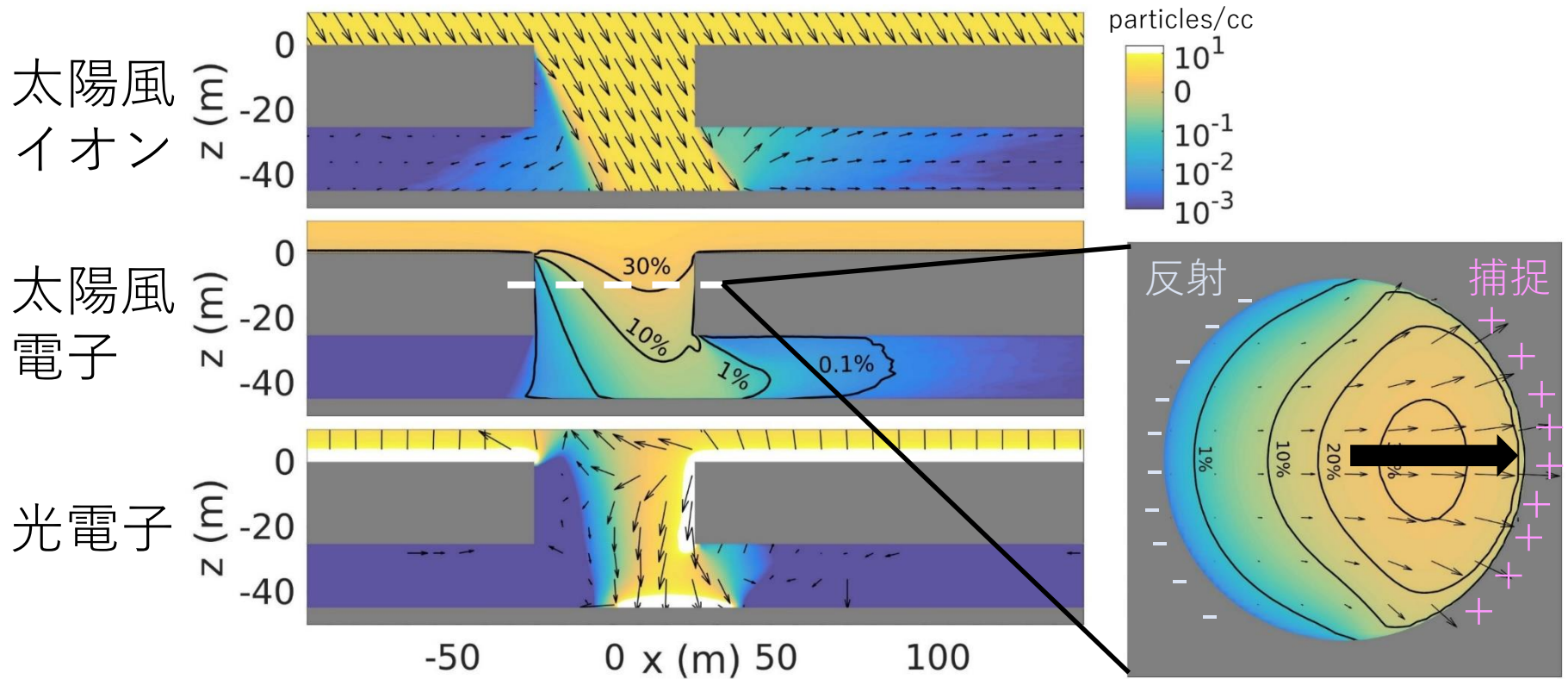
## ➤ 月の「縦孔」の帯電計算



孔底の日向は光電子による帯電(+10<sup>1</sup> V)と思われたが…



# 孔内部への荷電粒子侵入可能性



必要な条件： $V_{thi} \ll V_{flow} < V_{the}$

$V_{flow}$ : 太陽風流速  
 $V_{thi,e}$ : イオン/電子熱速度

太陽風では電子よりイオンの直進性が高い  
 孔底日向では「イオン電流 ≫ 電子電流」成立

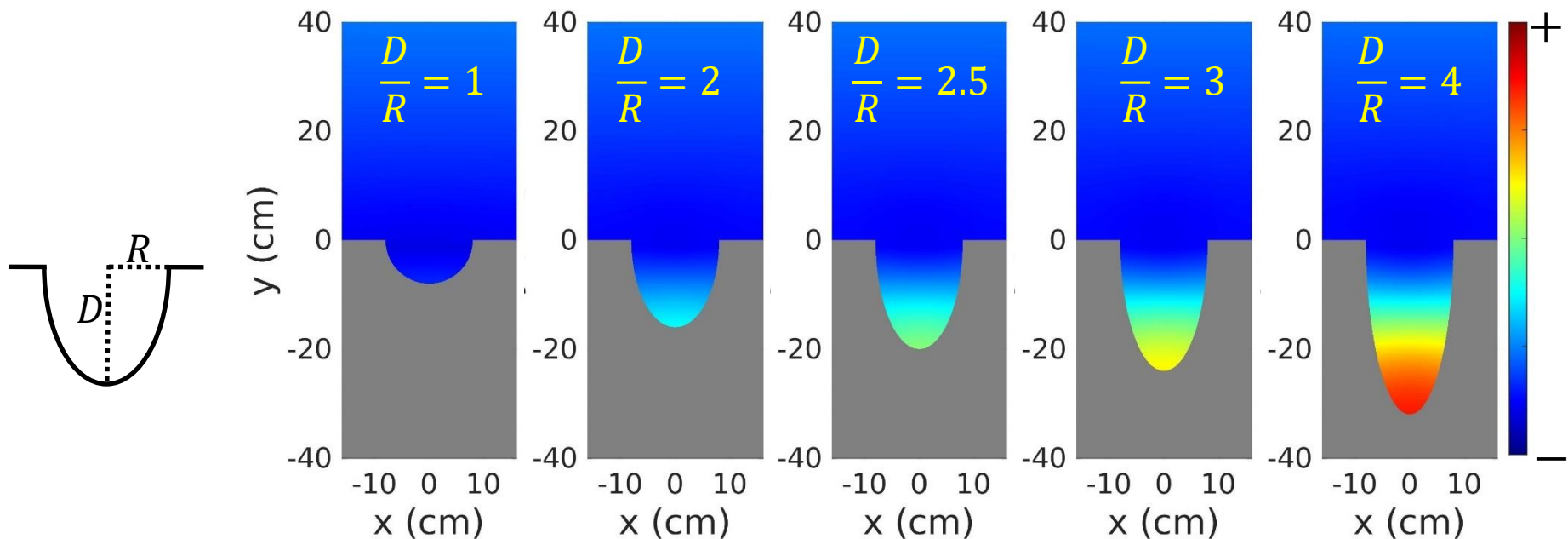
# 「イオン電流 ≧ 電子電流」の帯電現象

提起した帯電機構の検証のため

1. 光電子放出を伴わない
2. 孔のサイズが10 cmオーダー

のシミュレーション

小さな孔であれば月面で  
「より普遍的である」  
(目標はmm未満)

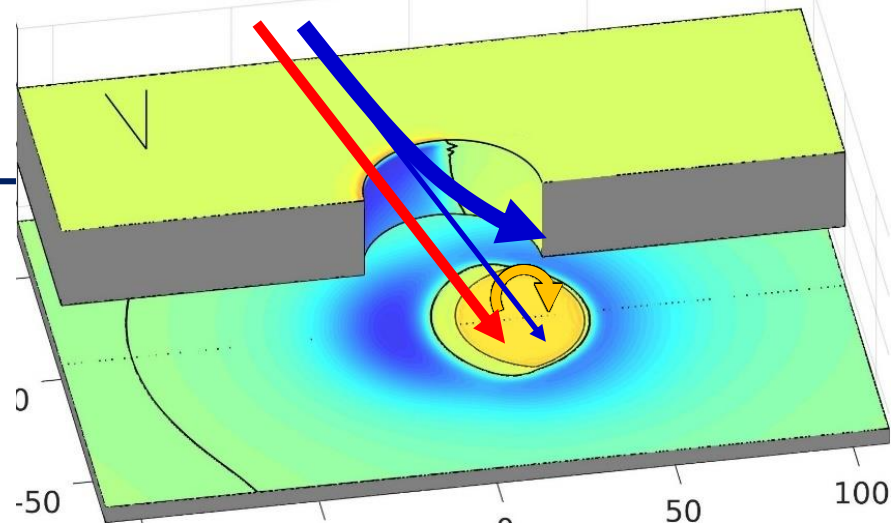


$D/R > 2.5$  (と  $v_{\text{thi}} \ll v_{\text{flow}} < v_{\text{the}}$  条件成立) で孔底に正電位の発達  
光電子放出がなくても正電位に帯電する！



# 要点整理

(??)は予測される(未確認の)事項



- ✓ 太陽風イオン電流が主電流  
⇒ 太陽風(イオン)パラメータへの強依存
- ✓ 縦孔底の光電子放出は電流平衡に寄与できない
- ✓ 余剰分のイオン電流と釣り合う負電流が必要
  1. 他の場所から供給される光電子流入電流
  2. 極端な正帯電( $\sim kV$ )によりイオン電流自体を抑制
- ✓ 孔構造の「深さ／径」に起因して起こる現象  
⇒ (??)岩石、砂れき、レゴリススケールでも成立

# 月ダスト環境の問題

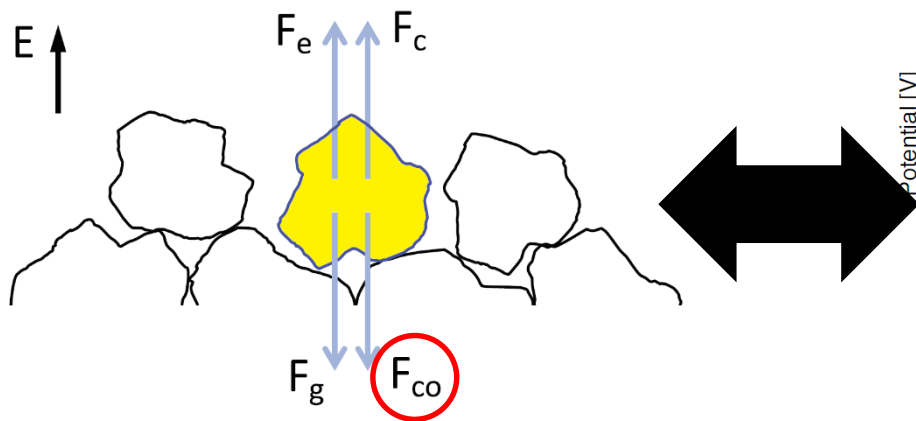
---



❖ 持続的な月面活動にはダスト環境の理解が欠かせない

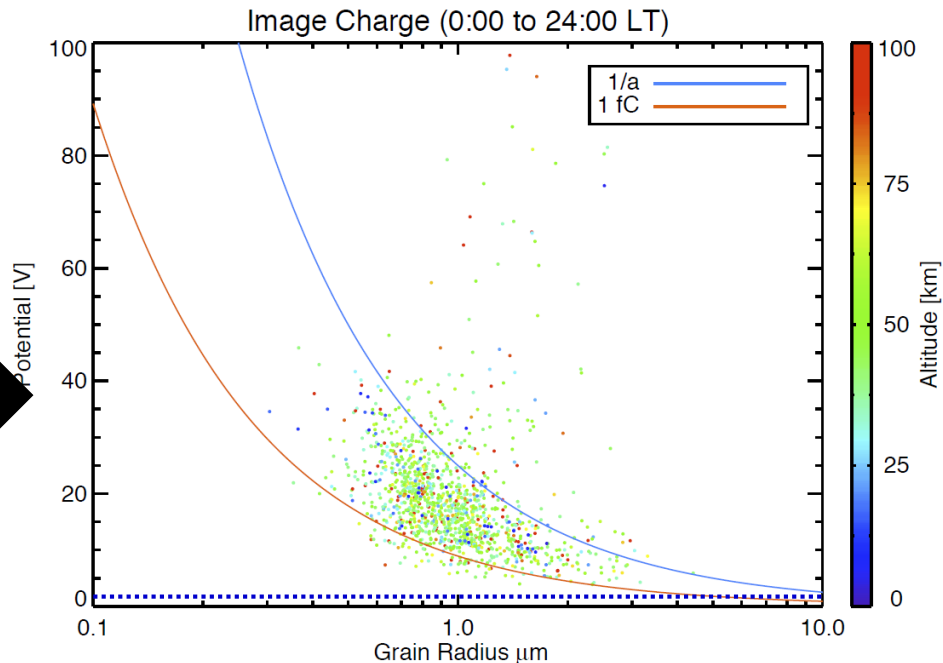
# 静電気力で月ダストは浮遊するか？

Plasma  
Sheath



強い付着力がダスト浮遊を妨げる

LADEE衛星軌道上でのダスト観測  
[Horanyi+, 2015]

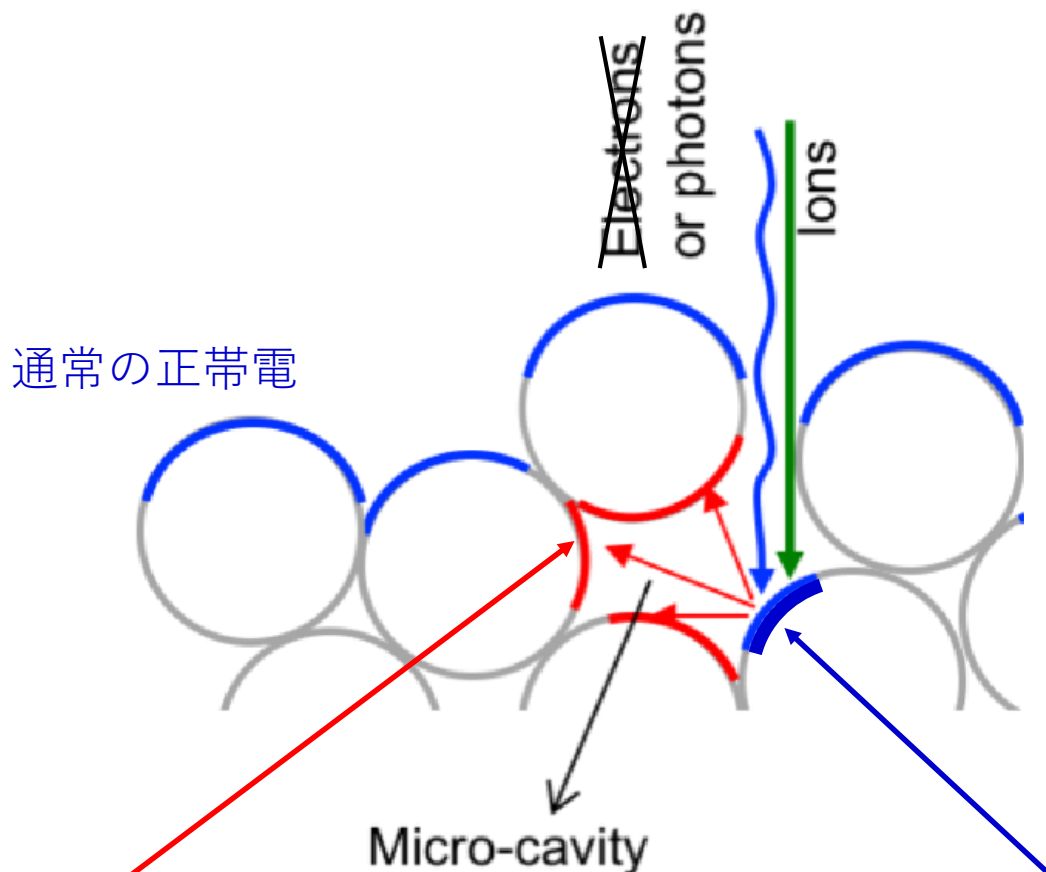


月面上で大きく正に帯電していたかもしれないダストを検出

通常予想されるより強い静電気力が必要

局所的

# 異常に大きな帯電がレゴリスを動かす？



Patched charging  
(負の大きな帯電)  
[Wang+, 2016: Fig.1]

イオンが駆動する帯電  
(正に大きな帯電?)  
⇒ 今日紹介したのはこちら



# 調べないといけない事

---

静電的機構による月レゴリス浮遊には、  
月面の平均電位ではなく、  
そこからのずれ(極端な正/負帯電)が重要である  
可能性が高い

数値研究の方向性：

1. 多様な月面トポロジー上の表面電位の平均と  
**分散**を特徴づける形状特徴量の同定
2. 機械学習等のデータ科学的アプローチにより、  
月レゴリスの実際的な帯電状態を推定

比較対象：月軌道上観測、室内実験、月面実験、  
その他には？



# 本講演のまとめ

- 従来の月面帯電の共通認識：昼側は正、夜側は負  
⇒ 地表形状によるばらつきを平均化した描像
- いくつかの**地表形状を調べるだけで、異常な帯電を提起可能**  
⇒ レゴリス移動や物質輸送に重要なのはこちらかも
- 形状パターンは無数にある  
⇒ 統計的解析(例えば「帯電分布関数」?)の必要性

