

月縦孔地形周辺のプラズマ・ダスト環境に関する粒子シミュレーション

三宅 洋平*1, 西野 真木*2

1. 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
2. 名古屋大学・宇宙地球環境研究所

E-address of YM: y-miyake@eagle.kobe-u.ac.jp

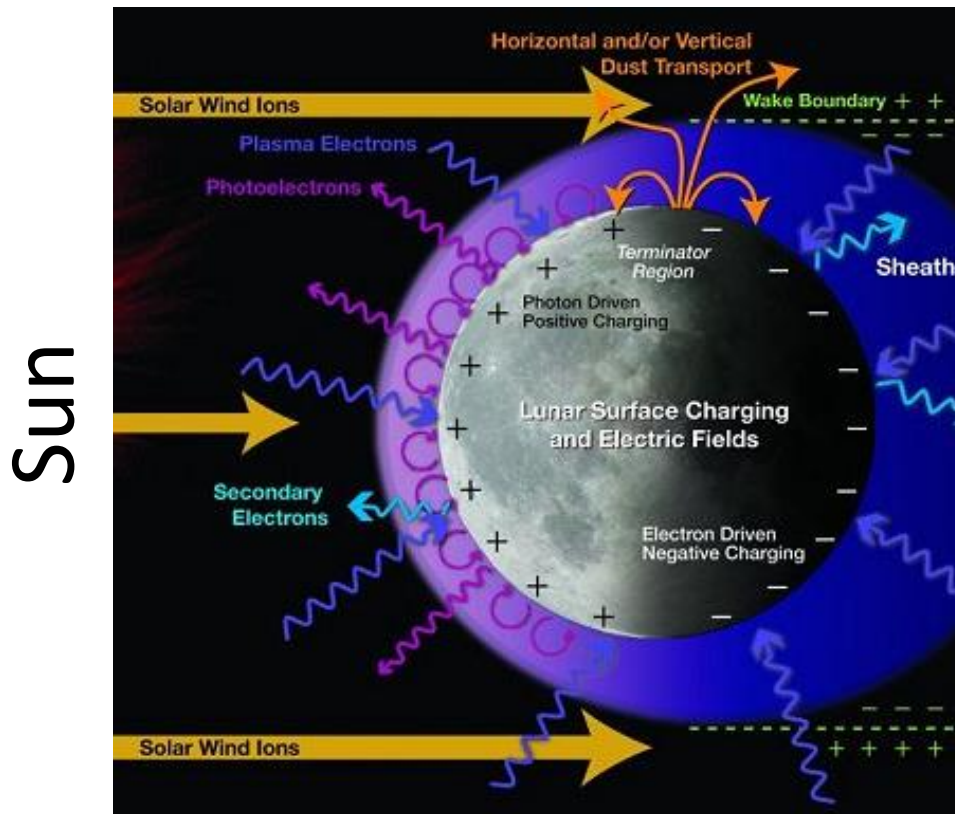
目次

- 天体固体表面と太陽風プラズマの相互作用
- 月縦孔周辺のプラズマ電気環境
- (縦孔を含む)月表層周辺の帯電ダスト挙動
- まとめと今後の展望

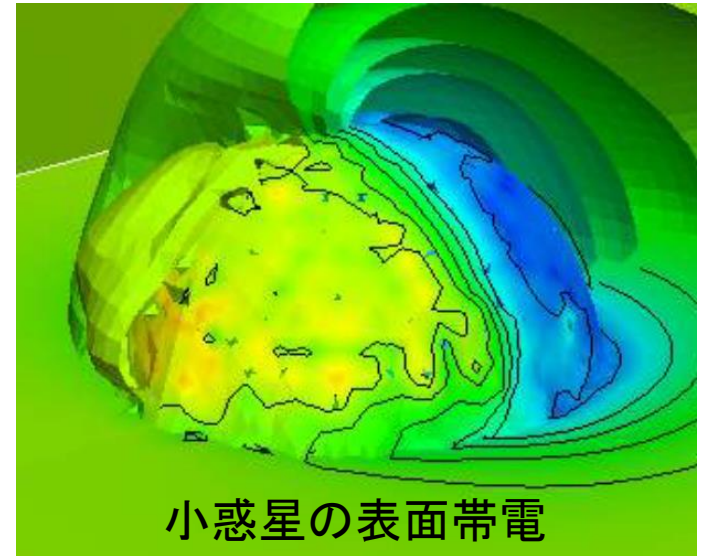
固有磁場を持たない小型天体と太陽風の相互作用

天体表面と太陽風プラズマ・光電子の間の電気力学的相互作用

Moon-plasma interactions



Asteroid-plasma interactions



小惑星の表面帯電

[Courtesy of J. Wang]

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

月面帯電

プラズマ荷電粒子の付着・放出により、月面は帯電する
(プラズマ中の固体壁帯電と同様の現象)

- 月面：絶縁性表面(プラズマ中の導電率に比べて)

- 主要なプラズマ電流項:

(正の電流項) 太陽風プロトン、光電子放出

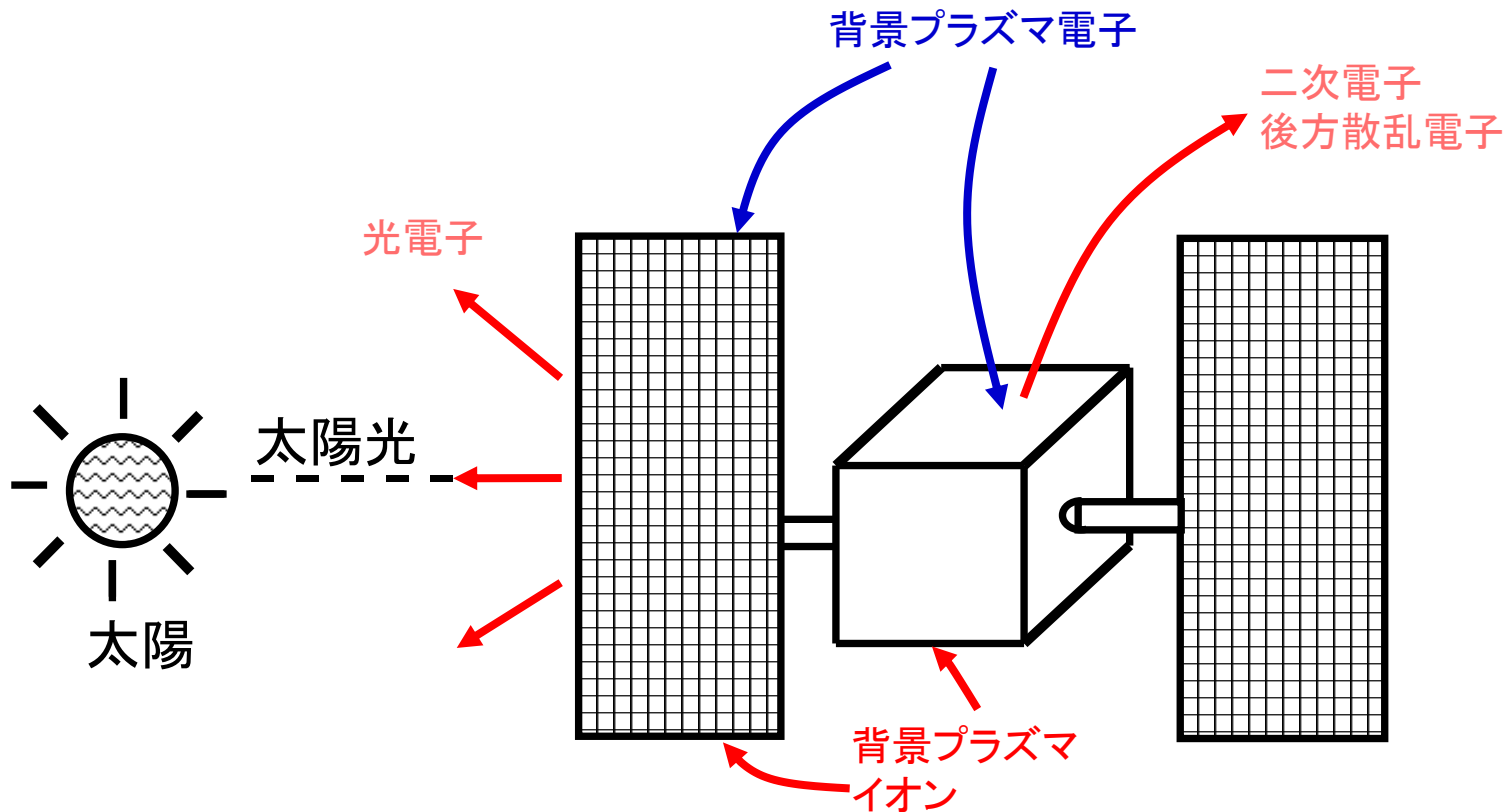
(負の電流項) 太陽風電子

- 特定の条件下では重要な電流項:

二次電子、重イオン、帯電ダスト

固体表面帯電の基礎

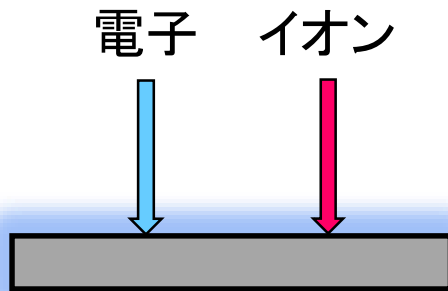
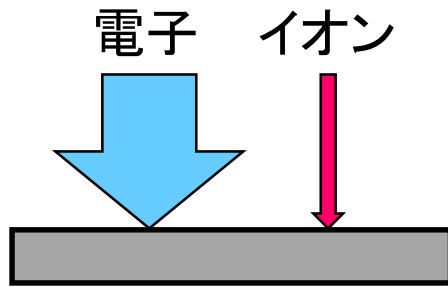
人工衛星帯電の見積もりのため、基礎理論、地上試験、数値研究手法が発達



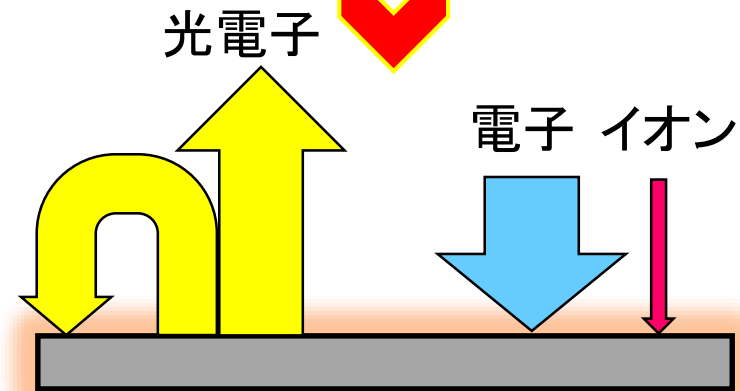
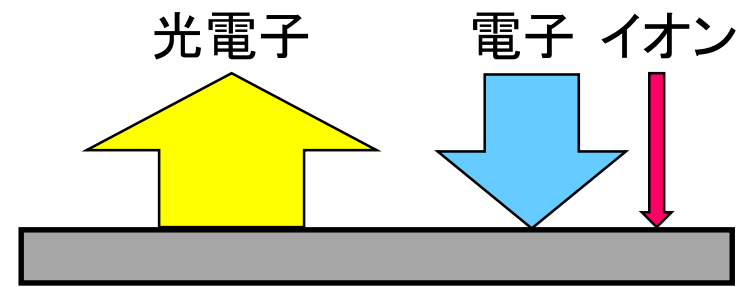
衛星構体の宇宙空間に対する電位は、外部とやりとりする
正電流と負電流が均衡するように決められる

いくつかの単純な例

Case 1. 電子とプロトンからなる高密度プラズマ環境 (e.g., 電離圏)



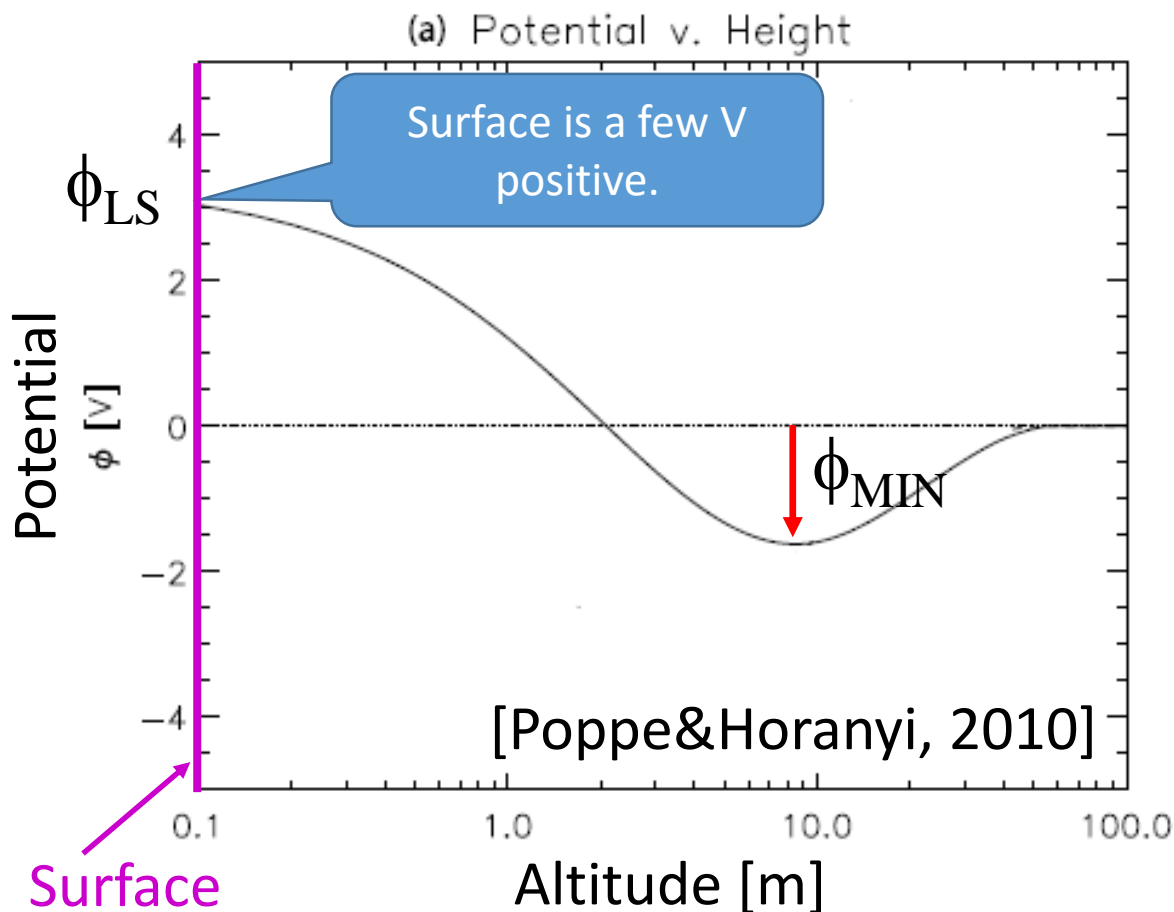
Case 2. 光電子放出が無視できない低密度プラズマ (宇宙プラズマの大部分)



電流のバランスがとれた時点で平衡状態

月面帯電の先行研究例

平らな月面が主な対象⇒1次元問題



Plasma currents:

$$J_{SWI} \sim J_{SWO}$$

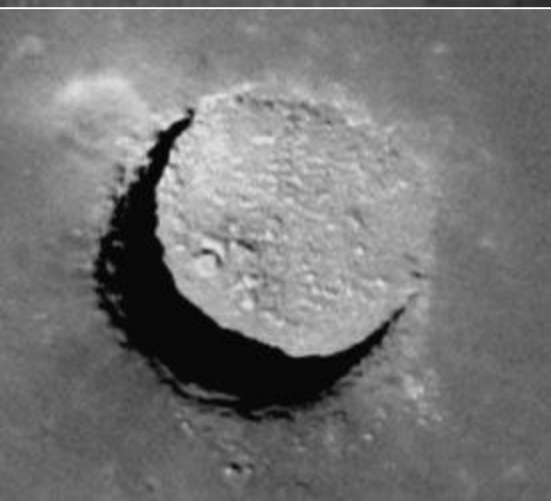
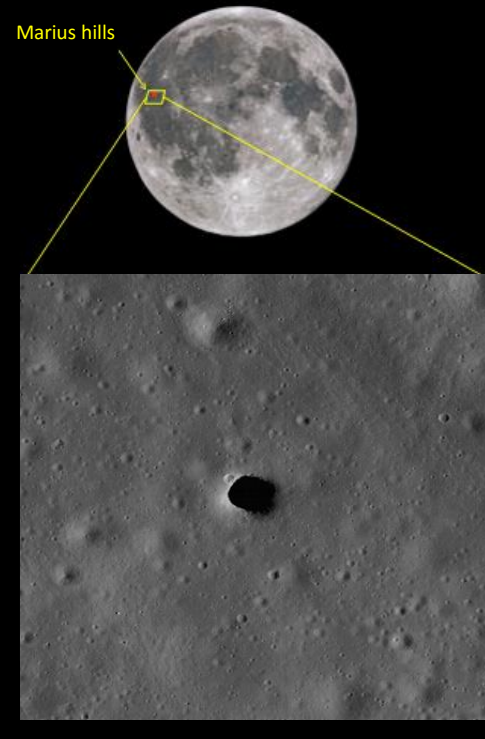
$$J_{SWE} = J_{THEO} \exp\left(\frac{\phi_{MIN}}{T_{THE}}\right)$$

$$J_{PE} = J_{PEO} \exp\left(\frac{\phi_{LS} + \phi_{MIN}}{T_{PE}}\right)$$

Combined with Poisson's eq.,
1D solution obtained
[Guernsey and Fu, 1970]

現実的には3次元的な地形の影響を考慮する必要あり

月で発見されている縦孔地形 (e.g. Marius Hills Hole)



50m



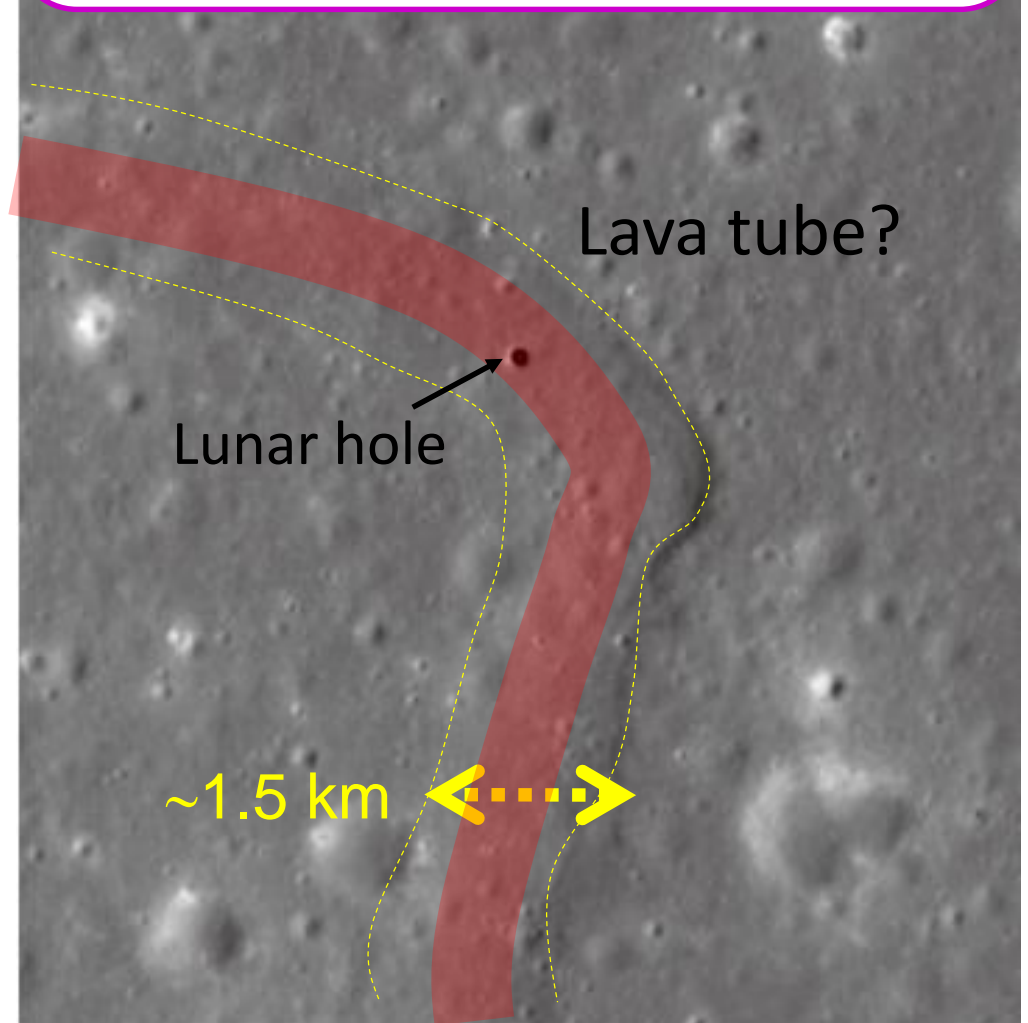
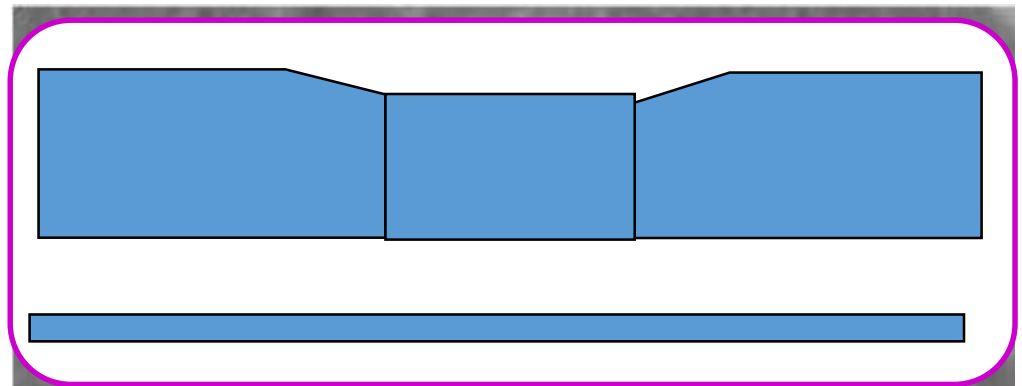
[Haruyama et al., 2012]

[Robinson et al., 2012]

“Possible lava tube” to be explored in future

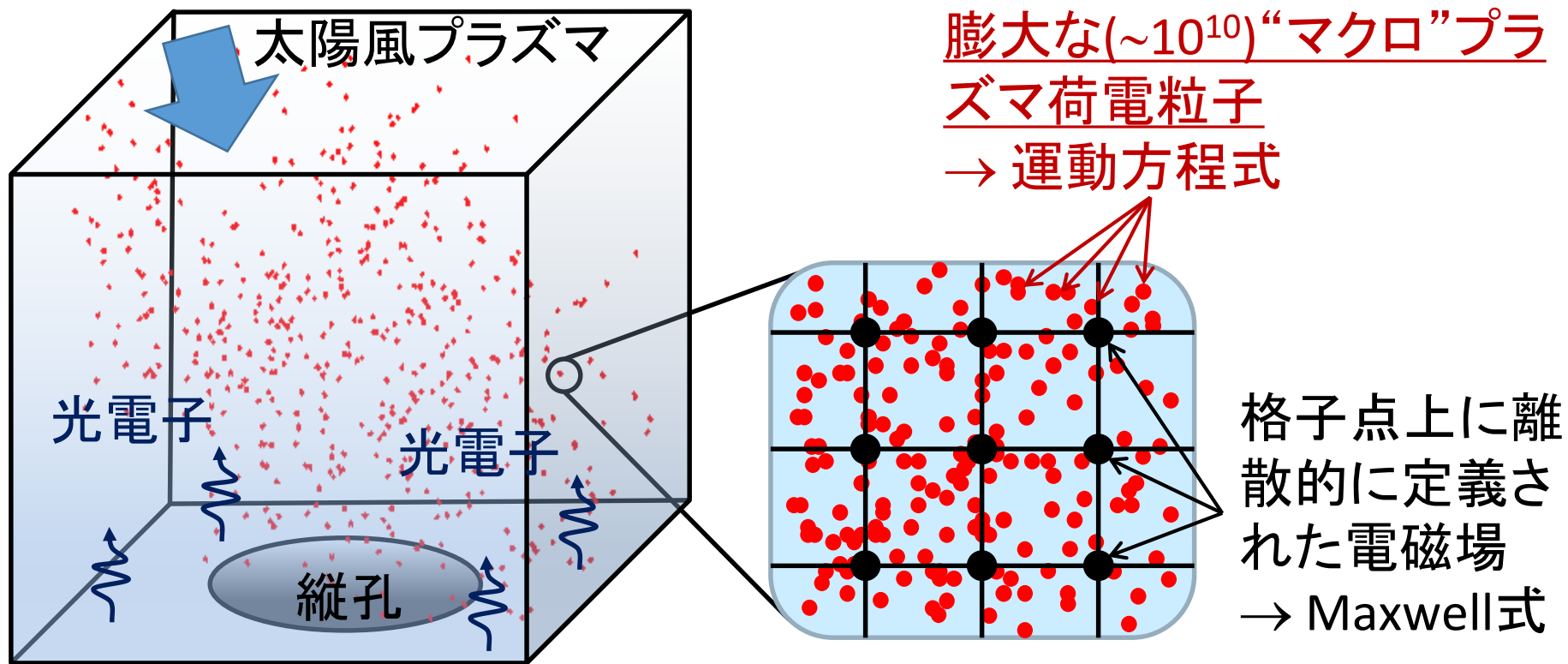
[Haruyama et al., 2009]

- Interesting topic in selenology
→ Future landing missions such as the “UZUME” project
- Possible candidate for constructing future lunar bases (Japan, USA, etc.)



3次元プラズマ粒子シミュレーション

Particle-in-Cell手法に基づく無衝突プラズマの第一原理計算手法の一種

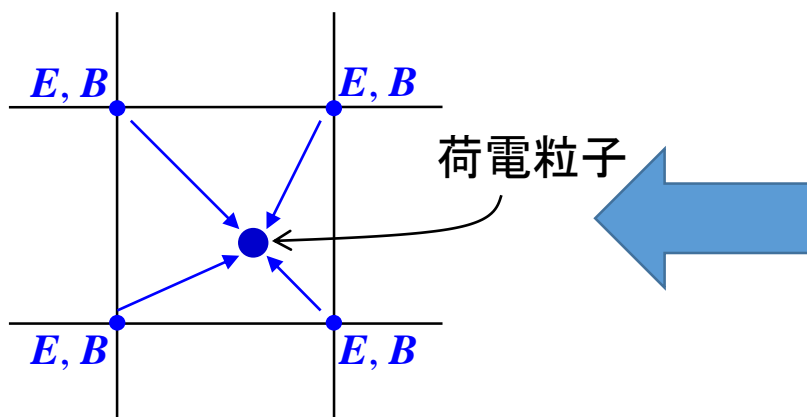


今回の計算では

1. 太陽風プラズマの降りこみ
2. (日照面からの)光電子放出
3. 月面による荷電粒子捕捉

} ...を考慮

計算手順



電磁場or静電場
(Maxwell's eqs.)

電流・電荷密度

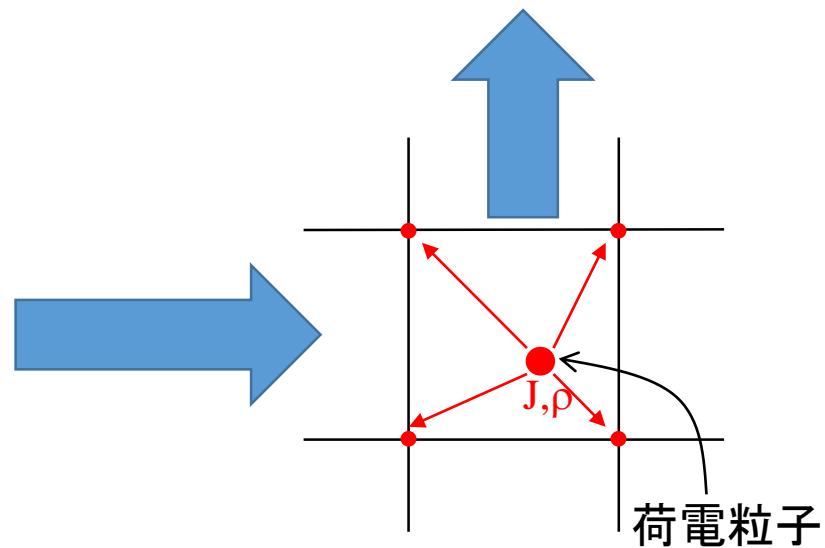
↓
電磁場



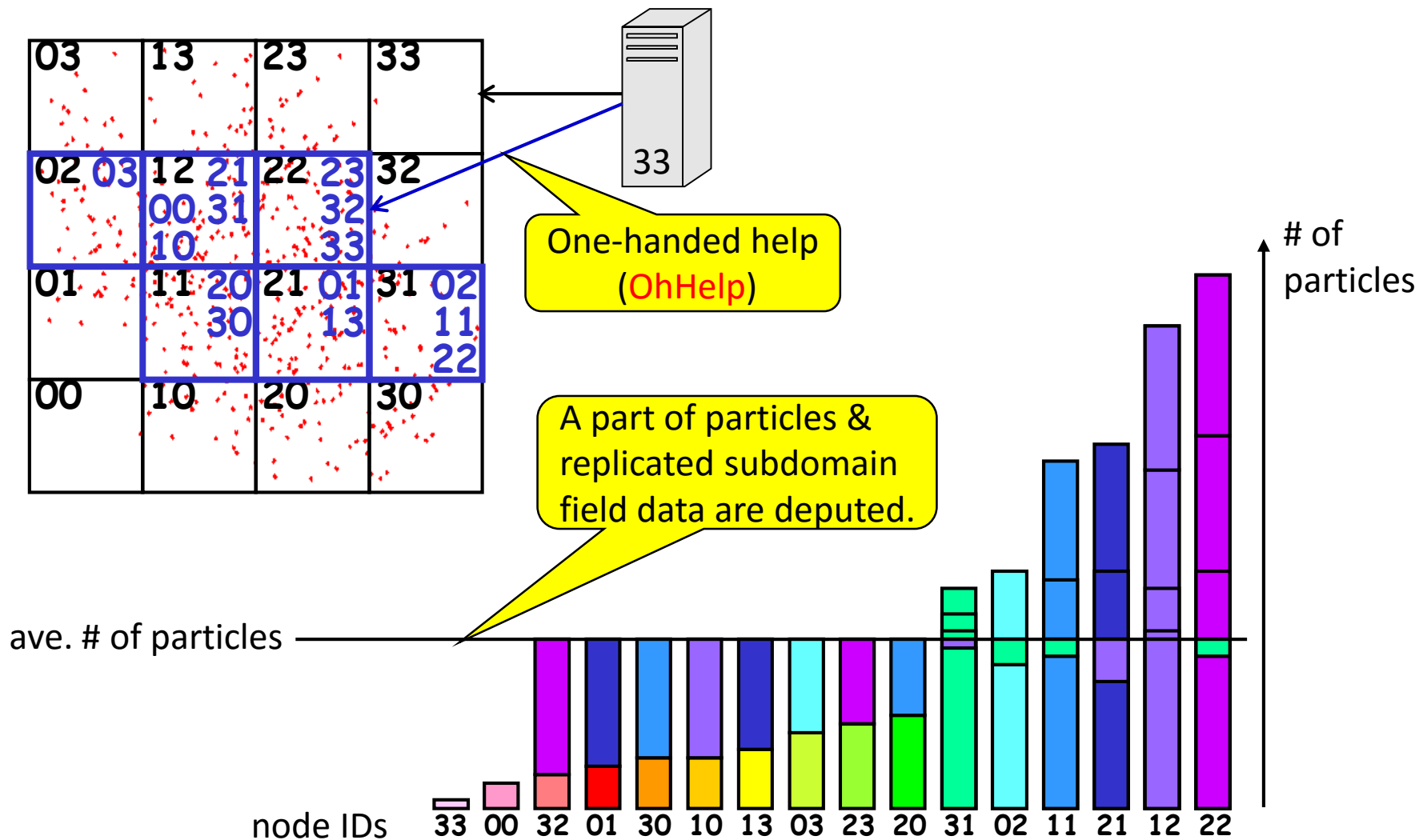
粒子運動
(Newton's eq.)

ローレンツ力

↓
各粒子の速度・位置

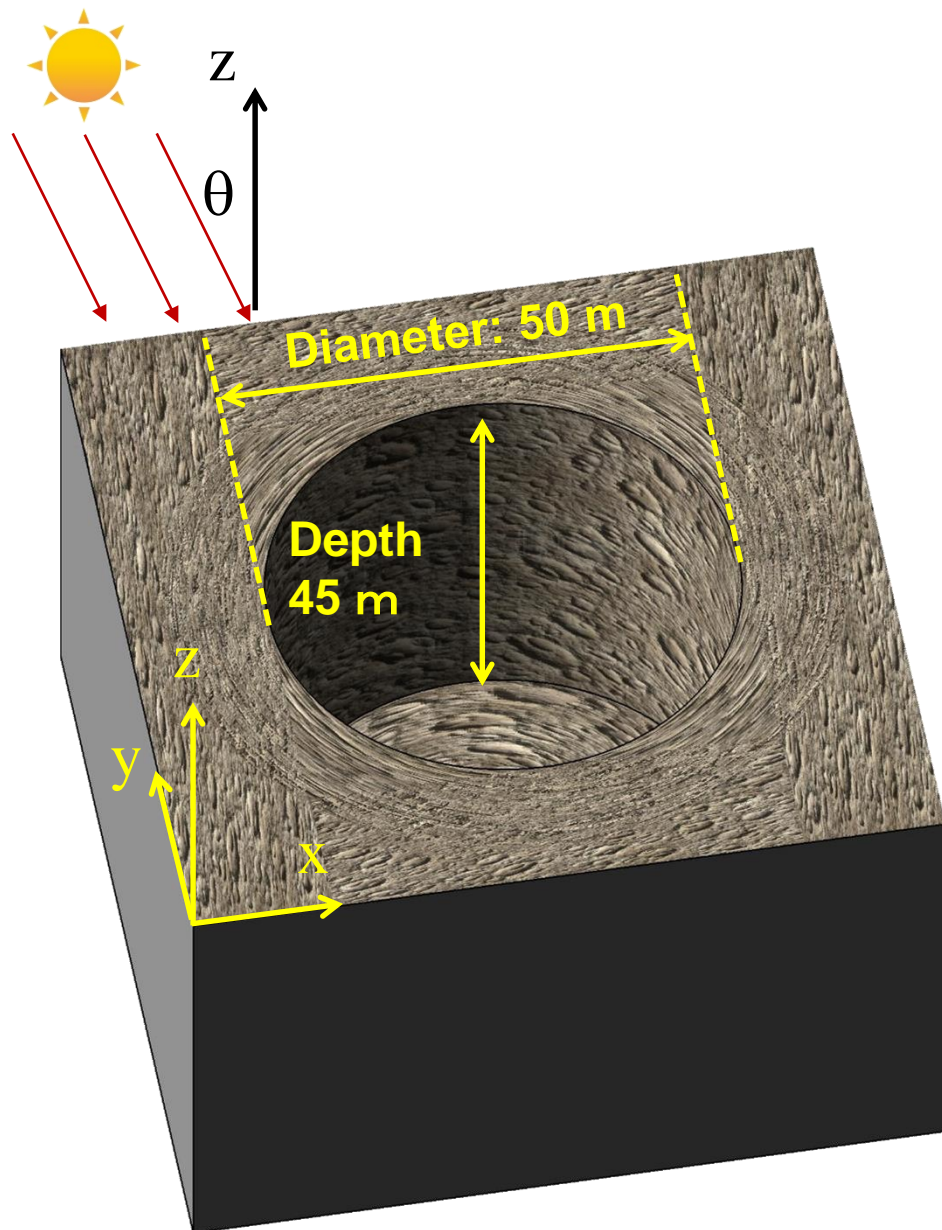


大規模並列計算への対応：動的負荷分散手法



粒子の粗密に起因する負荷バランス悪化を抑制

計算条件



典型的な太陽風・光電子条件

- 太陽風: 5 /cc, 8.6 eV, 450 km/s, 5nT
- 光電子: 4.5 $\mu\text{A}/\text{m}^2$, 2.2 eV
[Willis et al., 1973]

計算メッシュ幅: 50 cm

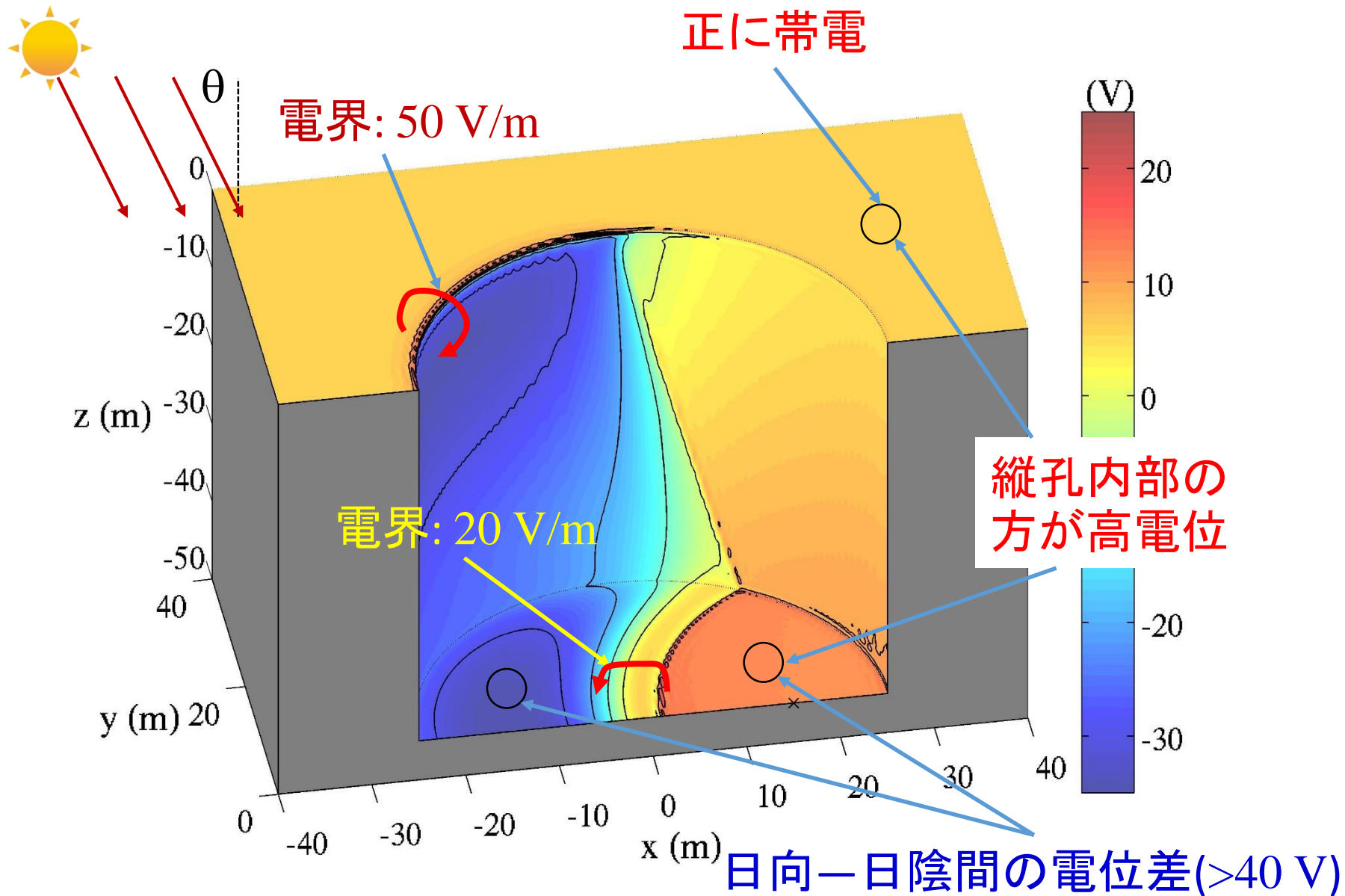
計算領域: $200 \times 200 \times 1000 \text{ m}^3$

粒子数: $\sim 10^{10}$

⇒ スーパーコンピュータの
利用、 10^3 並列度

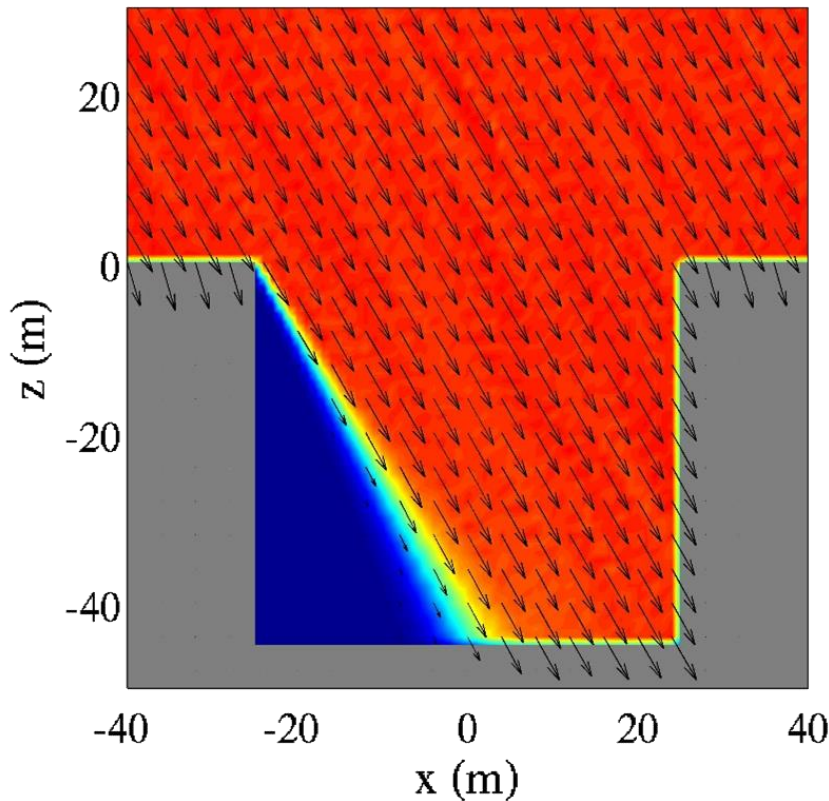


月面帯電(表面電位分布): $\theta = 30^\circ$



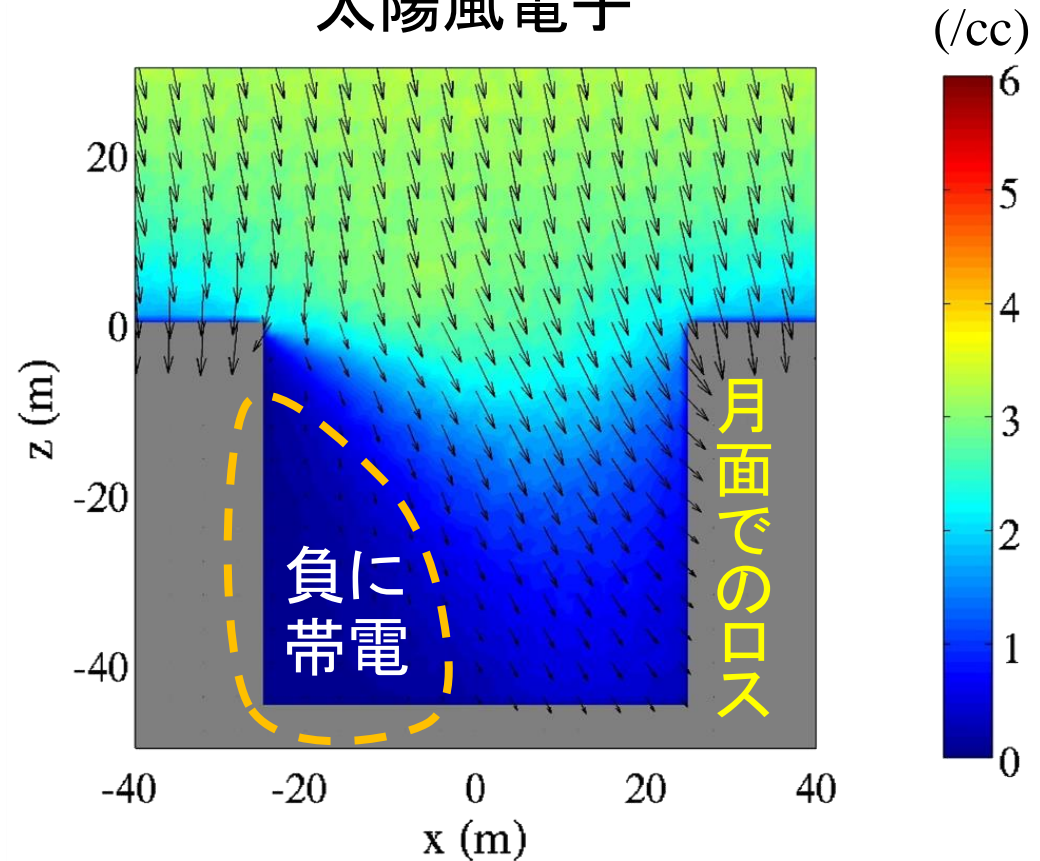
太陽風プラズマの空間分布と挙動

太陽風プロトン



Ballistic motion

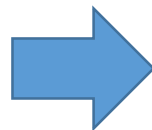
太陽風電子



Limited penetration of electrons

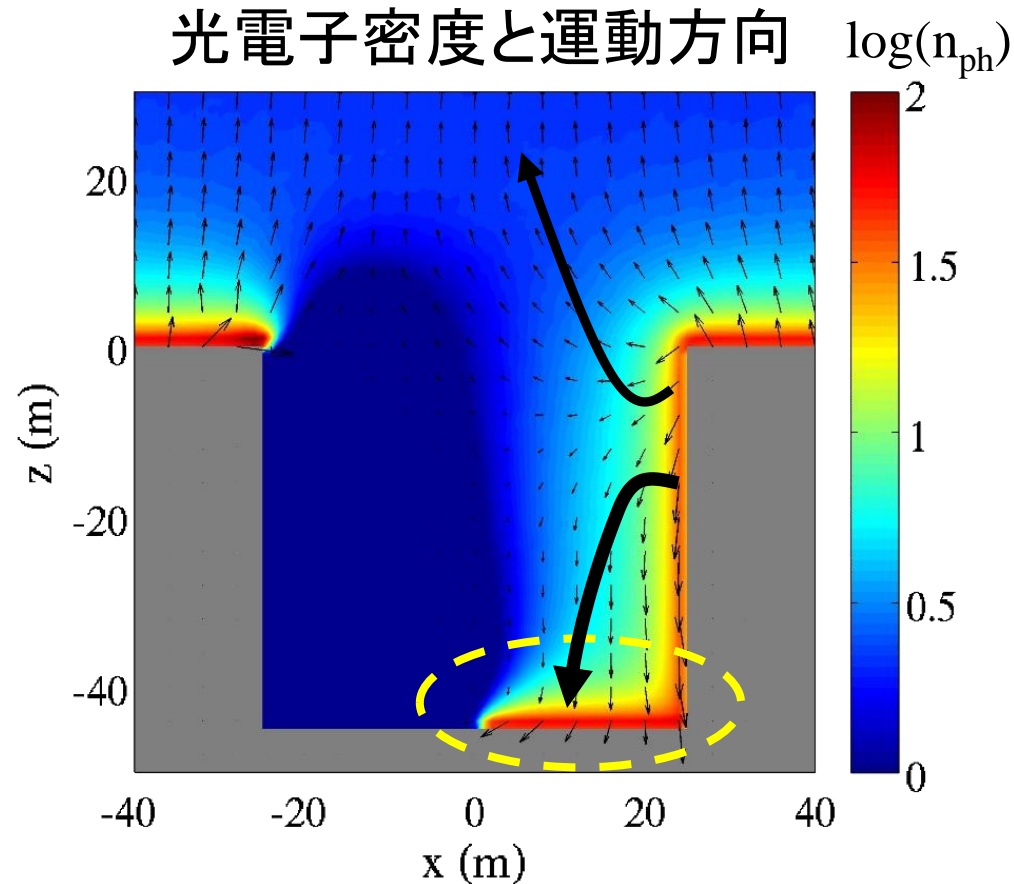
縦孔の外部: $J_i < J_e$

縦孔の内部: $J_i > J_e$



縦孔底部の方が高電位

光電子の空間分布と挙動

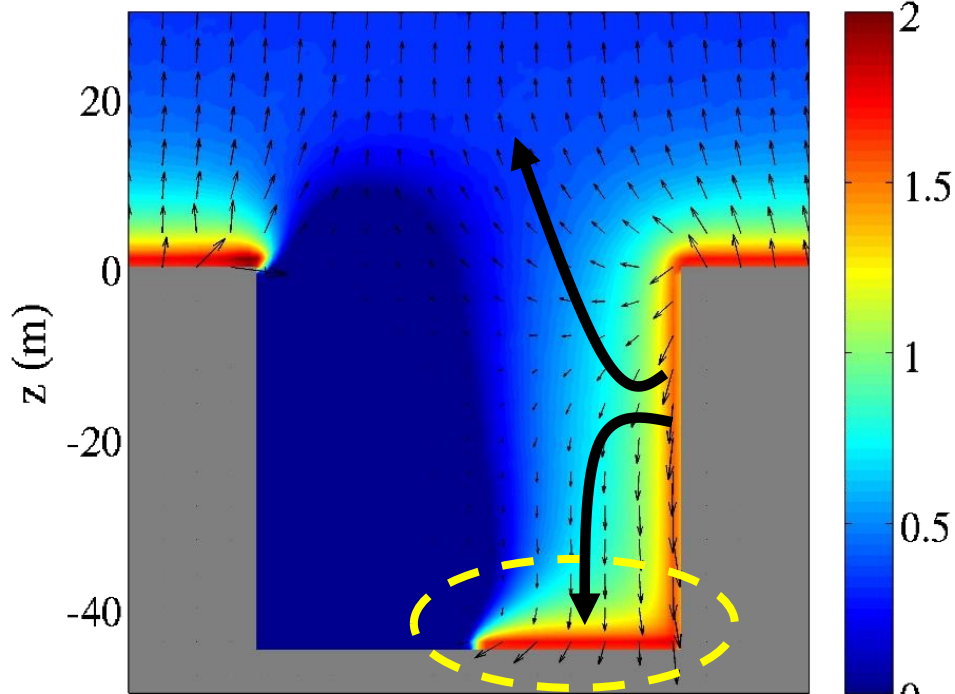


縦孔横壁から放出された光電子の一部が底部に流入
→縦孔底部の電位上昇を(ある程度)緩和

縦孔底面での電流平衡

PE density + $J_{ph} / (-e)$

$\log(n_{ph})$



PE inflow > PE outflow

正の電流項

負の電流項

月面:

$$J_{ph} + J_i = J_e$$

縦孔底面:

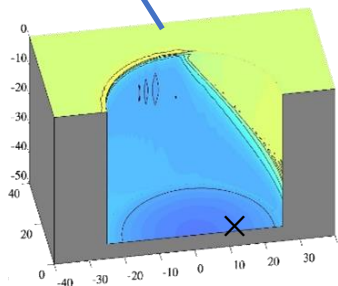
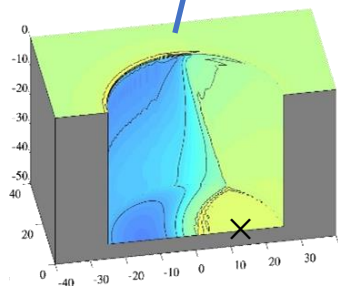
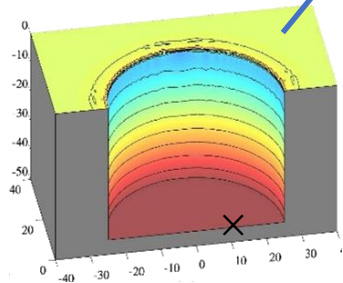
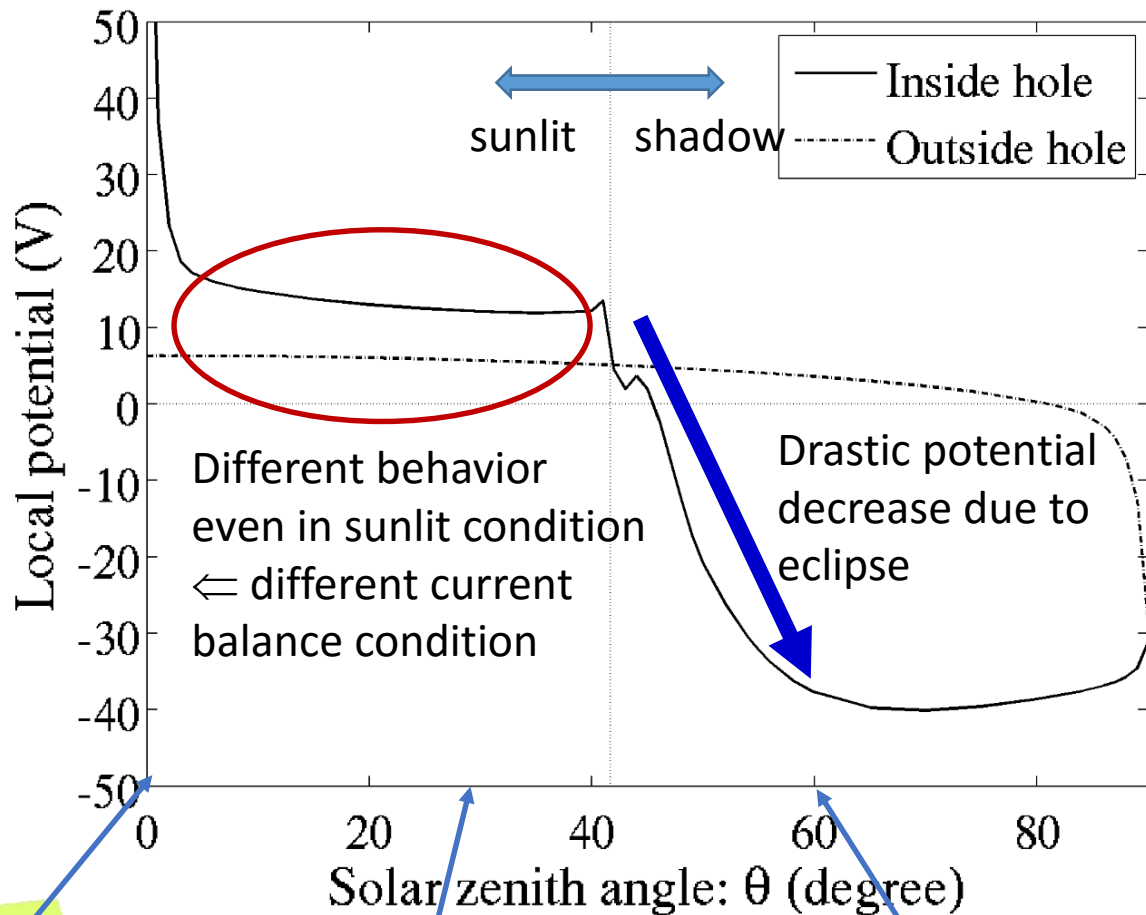
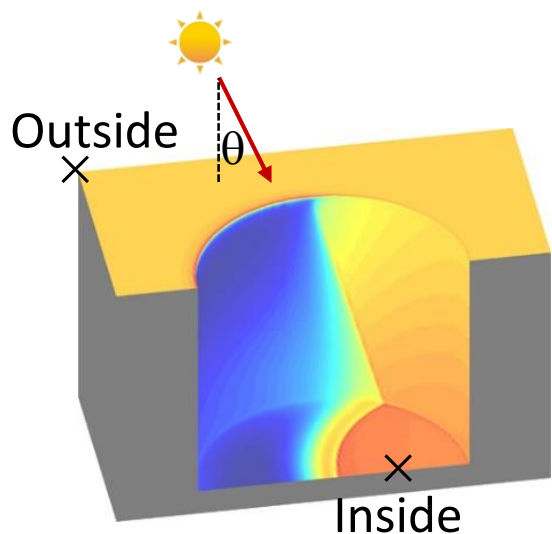
$$J_i = J_{ph} + J_e$$

電流平衡条件が全く異なる。

→ 太陽風変動に対する応答が異なる

例. 太陽風到来角度に対する依存性

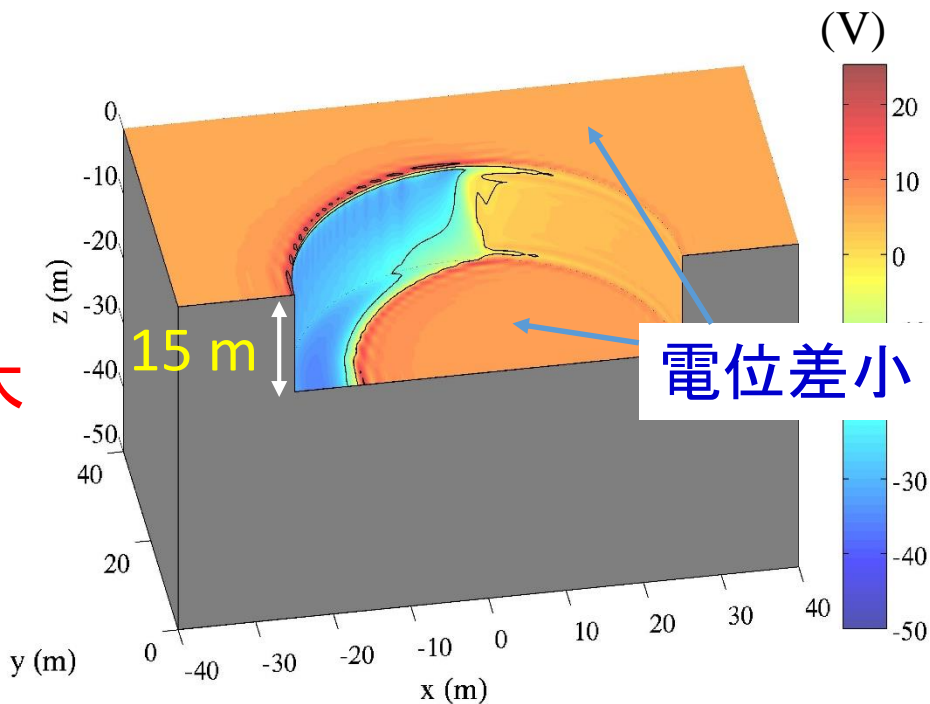
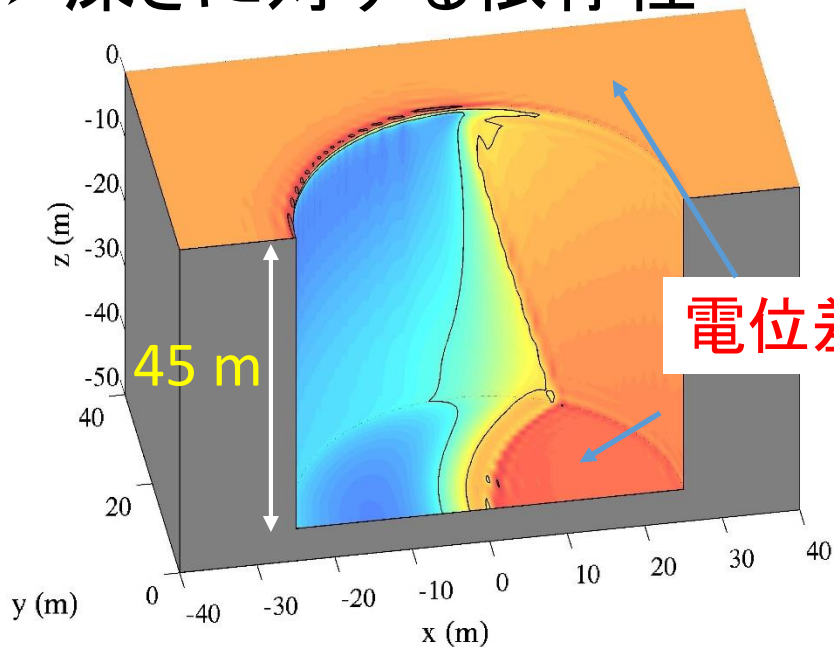
縦孔内外の2つの固定点での電位を太陽風角度を変えて計測



縦孔の構造に対する依存性

例えば

➤ 深さに対する依存性

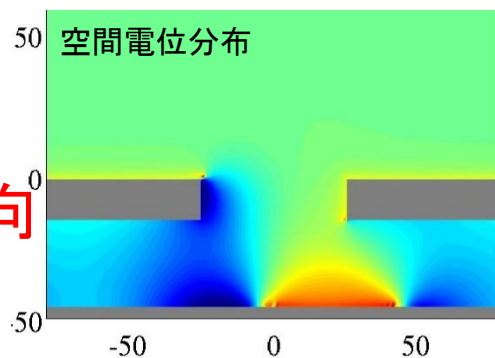


Next step:

縦孔の下部に地下空洞が存在するモデル

→ 初期結果では縦孔内外の電位差が増大する傾向

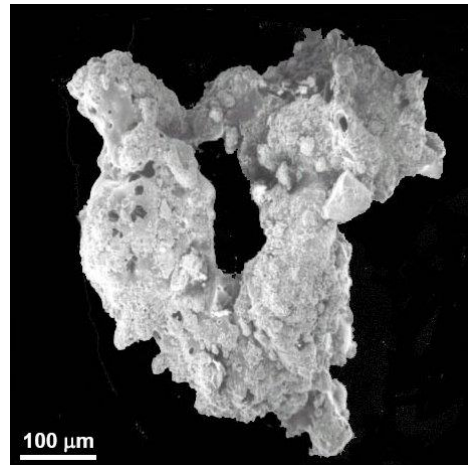
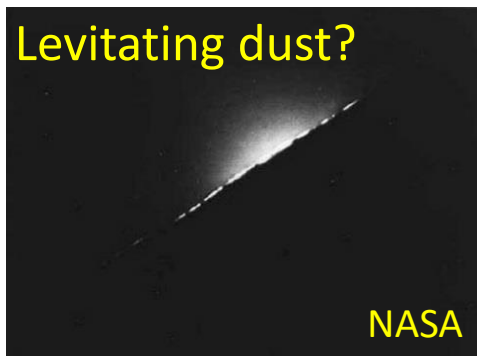
将来の縦孔探査に向け、継続的な調査が必要



月面近傍の帯電ダスト環境

月表層のレゴリスが帯電し、静電気力により浮遊？

Horizontal glow
[e.g., Criswell, 1973]



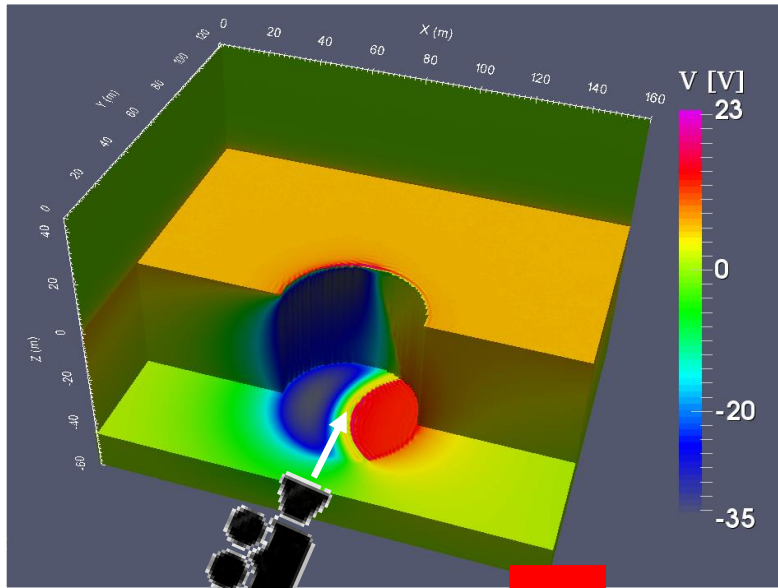
- 尖った表面
- プラズマ環境中で帯電
- 電磁気力による浮遊
- 最も小さいもので10 nmサイズの存在が示唆されている[Greenberg, 2005]

- 探査機機器類・太陽電池パネル・宇宙服性能劣化
 - 健康被害
- 月面探査、月面開発に影響

月面近傍のプラズマ・ダスト環境の予測

粒子シミュレーションによる数値予測

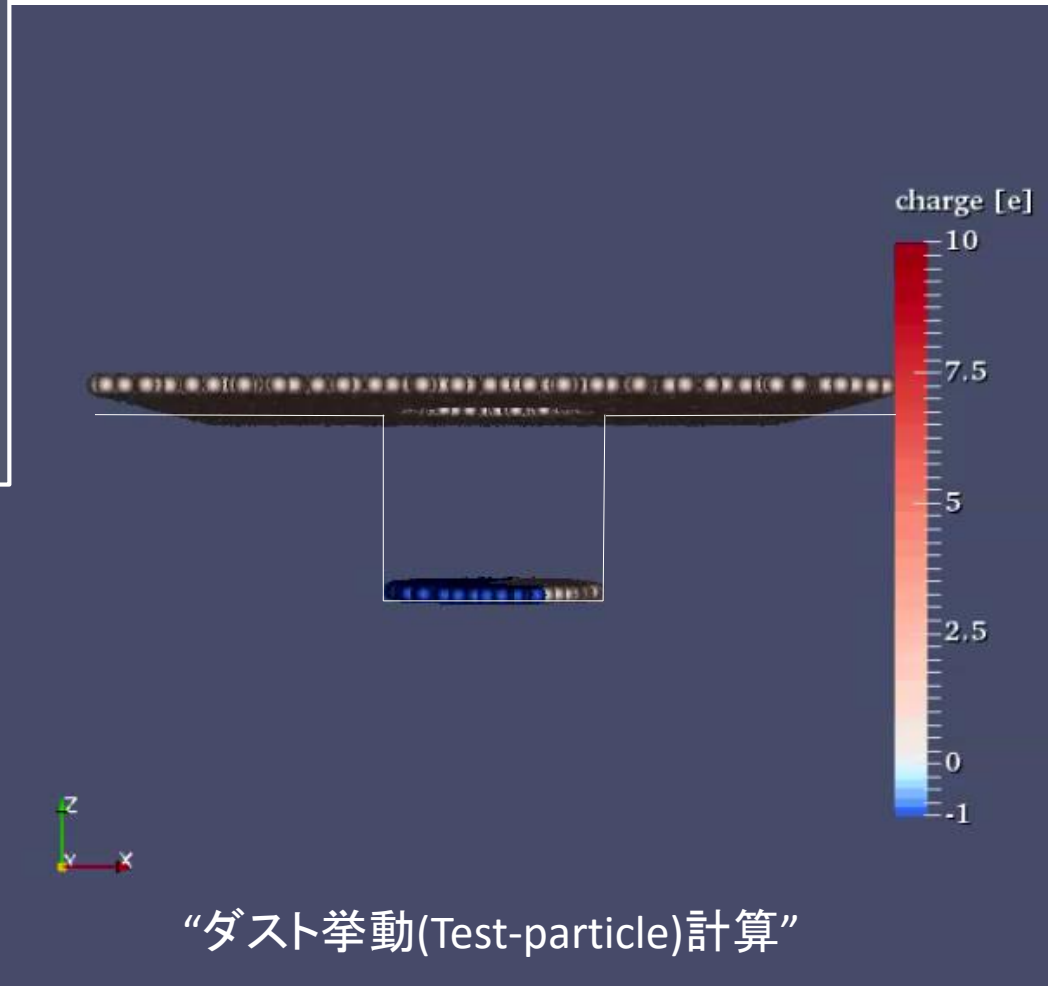
縦孔周辺の電気環境(月面電位)



“Particle-in-Cell計算”

出力データ利用

帯電ダスト(0.02 μm)の挙動予測



“ダスト挙動(Test-particle)計算”

月面近傍帯電ダストのダイナミクス

1. ダストの運動方程式 (位置 x 、速度 v に関して。電界 E と重力 g を考慮)

$$\frac{dx}{dt} = v$$

“Particle-in-Cell計算”の結果データを利用

$$\frac{dv}{dt} = \frac{q_d}{m_d} E(x) - g_{\text{moon}} \hat{z}$$

2. ダスト帯電量の時間変化

$$\frac{dq_d}{dt} = I_{\text{ph}}(\phi) - I_{\text{phc}}(\phi) - I_{\text{swe}}(\phi) + I_{\text{swi}}(\phi)$$

光電子放出 光電子流入 太陽風電子流入 太陽風イオン流入



ドミナント ⇒ 月昼側ではダストは正に帯電 (0.02 μm サイズで $\sim 10e$)
[Poppe and Horanyi, 2010; Senshu et al., 2012]

1, 2それぞれの時間スケールに対する考察が必要

ダスト流入（流出）電流のモデリング

◆ Orbital-Limited-Motion理論を基にしたモデリング

[Mott-Smith and Langmuir, 1926;
Hastings and Garrett, 1996]

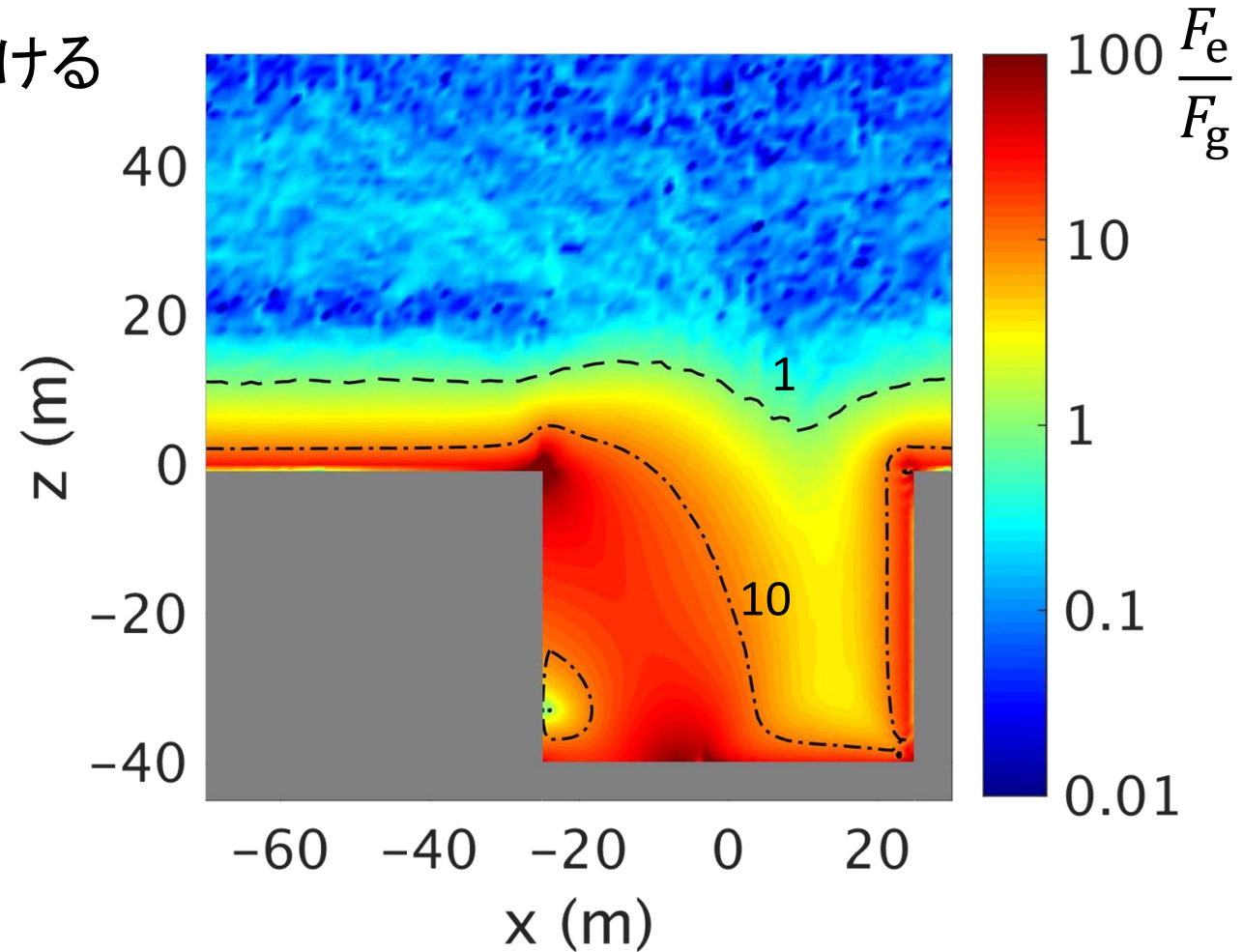
$$I_{\text{net}}(\phi_d) = I_{\text{ph}0} \exp\left(-\frac{e\phi_d}{kT_{\text{ph}}}\right) - I_{\text{ph}c0} \left(1 + \frac{e\phi_d}{kT_{\text{ph}}}\right) - I_{\text{swe}0} \left(1 + \frac{e\phi_d}{kT_{\text{swe}}}\right) + I_{\text{swi}0} \exp\left(-\frac{e\phi_d}{kT_{\text{swi}}}\right) \text{ for } \phi_d \geq 0,$$

$$\phi_d = \frac{q_d}{4\pi\epsilon_0 r_d}$$

- $\phi_d, T_{\text{ph}}, T_{\text{swe}}, T_{\text{swi}}$ はそれぞれ、ダスト電位、光電子温度、太陽風電子温度、太陽風イオン温度
- 電位0に対する電流 $I_{??0}$ はプラズマシミュレーションのデータを利用
- 「 $I_{\text{net}}(\phi_d)\Delta t$ 」は、通常たいてい1素電荷量未満⇒モンテカルロ法により(確率的に)ダスト電荷量を変化⇒数100~1000ステップに1回帯電量変化

静電気力 F_e vs 重力 F_g (1)

- 月縦孔周辺における
 $\frac{F_e}{F_g}$ の分布
($0.02 \mu\text{m}$ 、
 $q_d=10e$ を仮定)

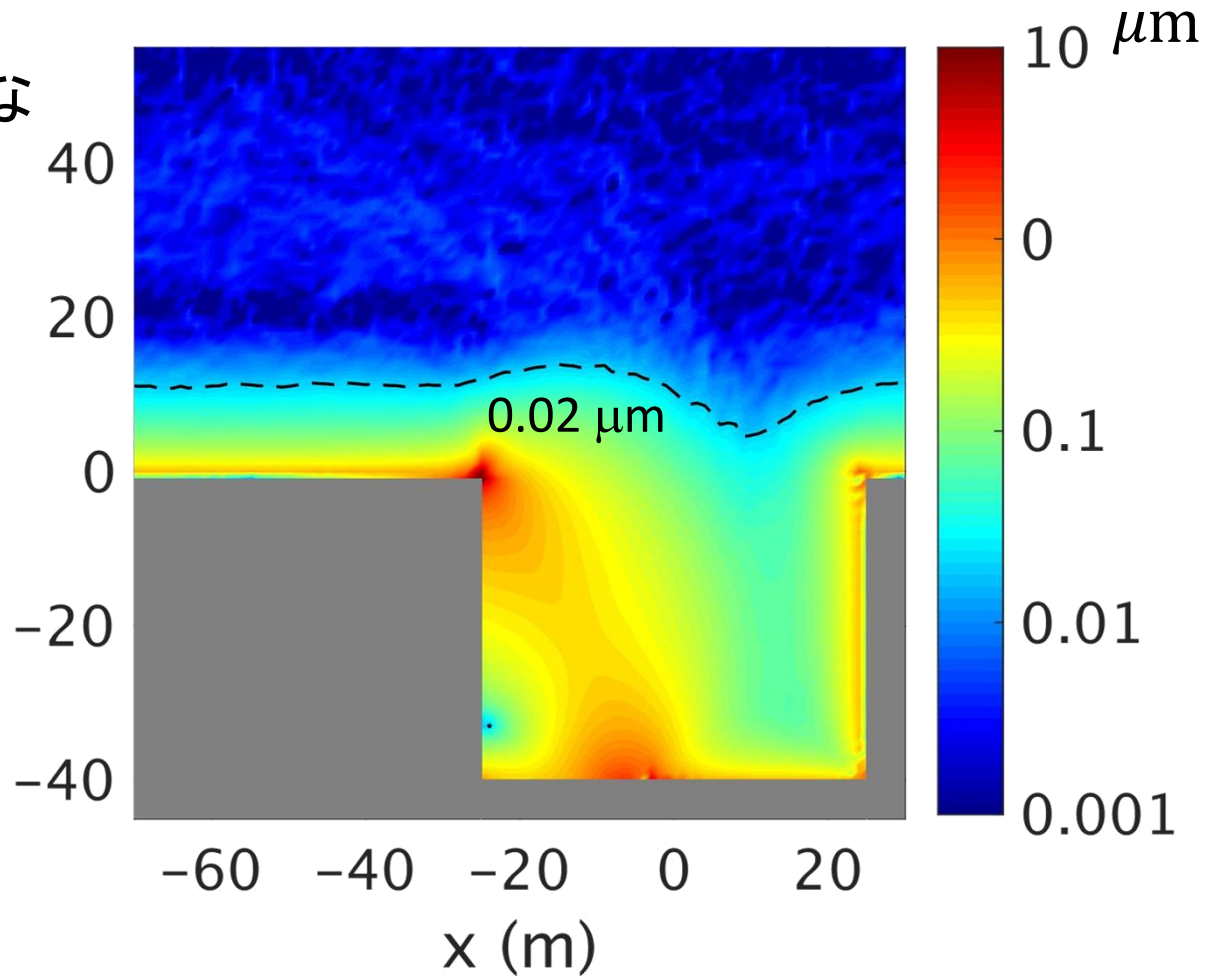


月面近傍・縦孔内部では静電気力の影響大

静電気力 F_e vs 重力 F_g (2)

➤ $\frac{F_e}{F_g} = 1$ となるような
ダスト半径 r_d の分布

- $F_e \sim q_d \sim r^2$
- $F_g \sim m_d \sim r^3$

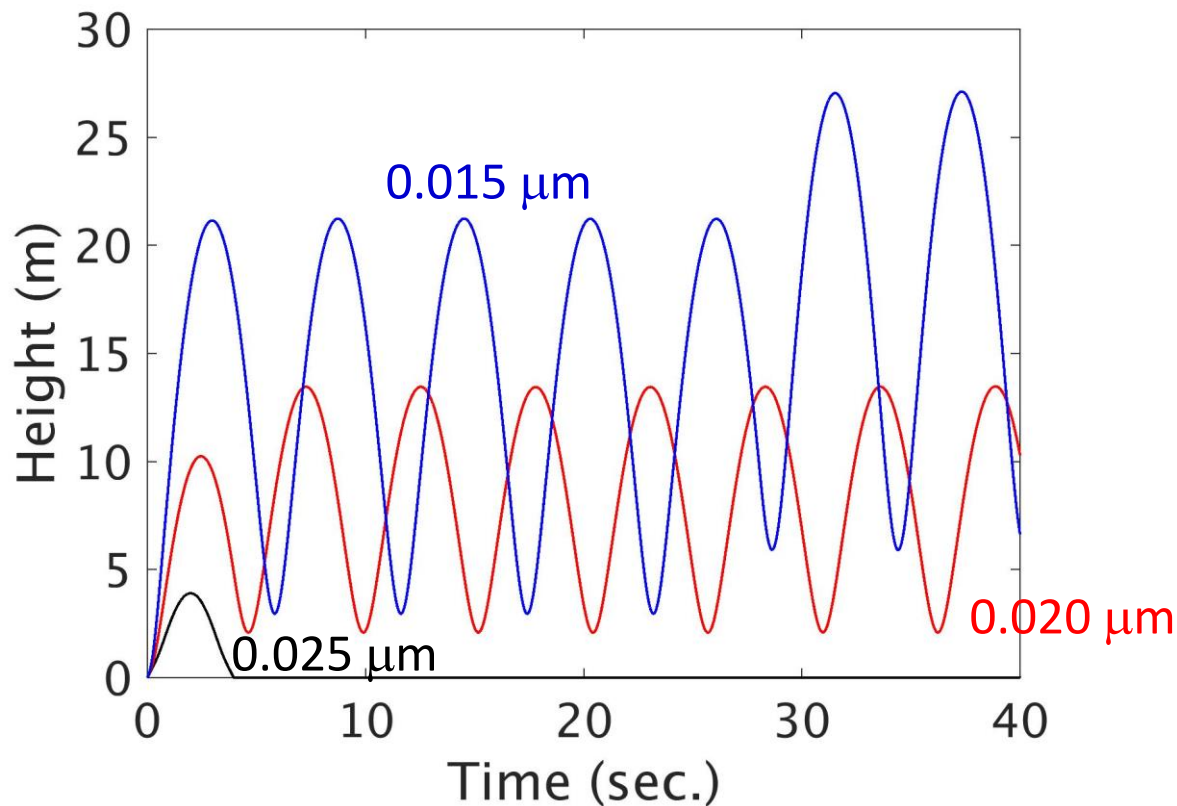


小サイズのダストほど静電気力の影響大

現象の時間スケールについて(1)

例)ダストの上下振動運動[e.g., Nittler et al., 1998]

(縦孔ではない)平らな月面上でもその存在が予測されている

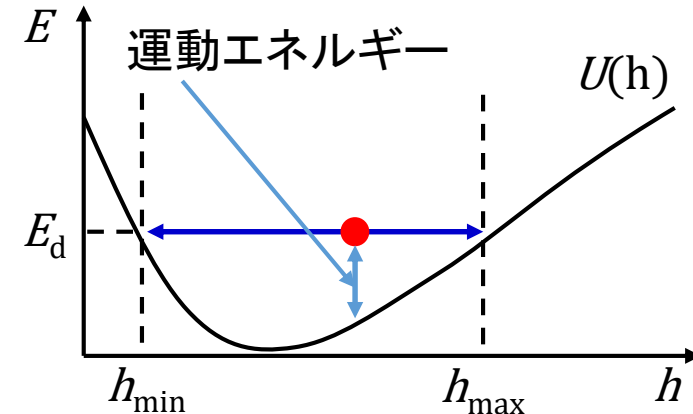


ダストサイズや初期条件などによって、浮遊の可否が決まる

現象の時間スケールについて(2)

1. 浮遊ダストの振動周期(簡単のためダスト帯電量は一定とする)

$$\tau_{\text{osc}} = 2 \int_{h_{\text{min}}}^{h_{\text{max}}} \frac{1}{\sqrt{(2/m_d)(E_d - U(h))}} dh$$



$$\sim 10^0 - 10^1 \text{ sec. for } r_d \sim 0.01 \mu\text{m}$$

2. ダストが各電流(大きいもので $\sim 10^{-6} \text{ A/m}^2$)により1素電荷量 e を得る(失う)時間

$$\tau_{1e} = \frac{e}{4\pi r_d^2 J_{\text{ph}}} \sim 10^1 - 10^2 \text{ sec. for } r_d \sim 0.01 \mu\text{m}$$

帯電緩和時間はこの10倍以上

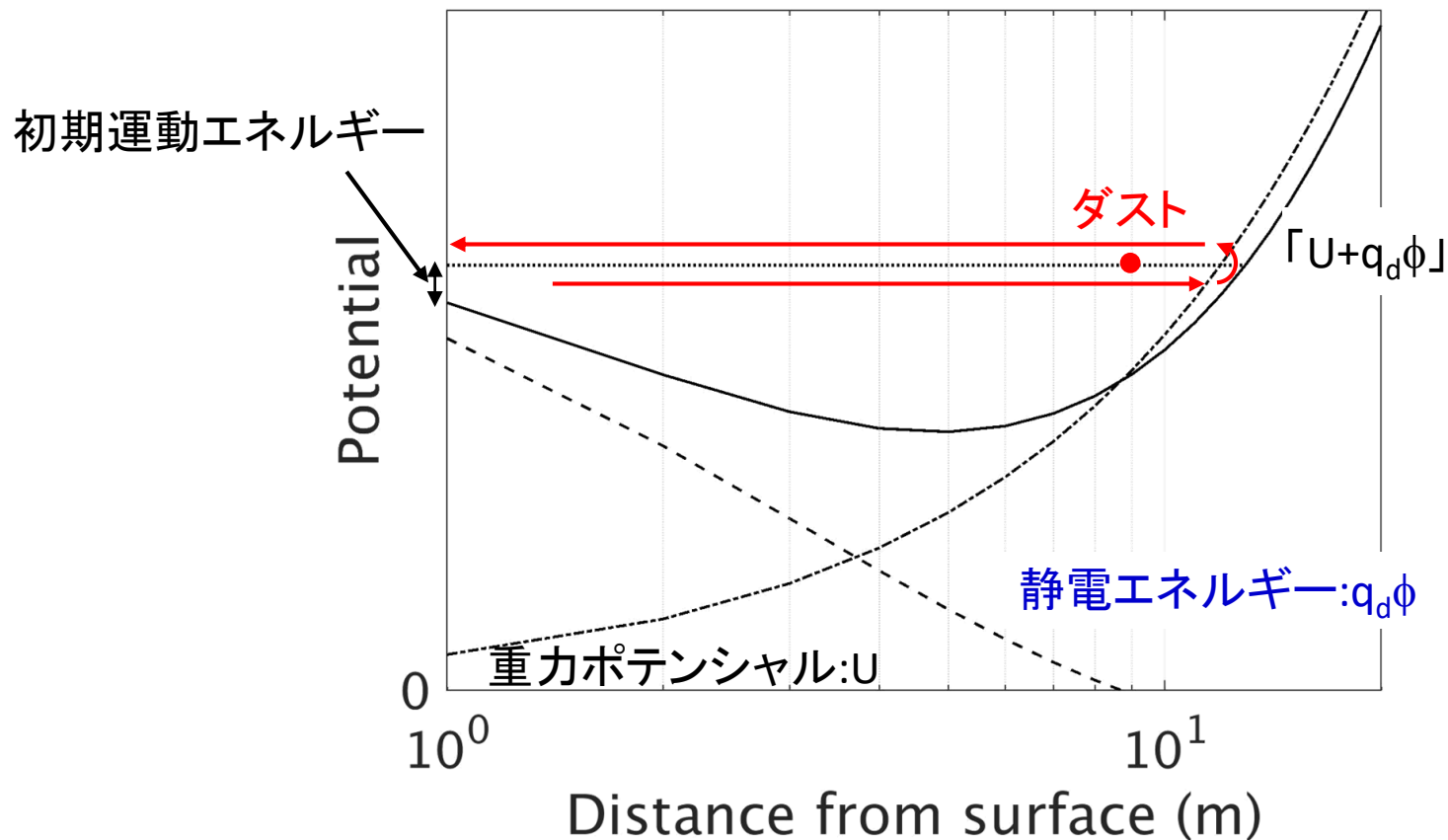
2は1に対してゆっくり変化. かつその変化は量子的

エネルギー保存？(1)

ダスト飛び出しからある一定時間の間、ダスト電荷量に変化しなければ、
(かつ電磁気的な加熱・加速機構がなければ)

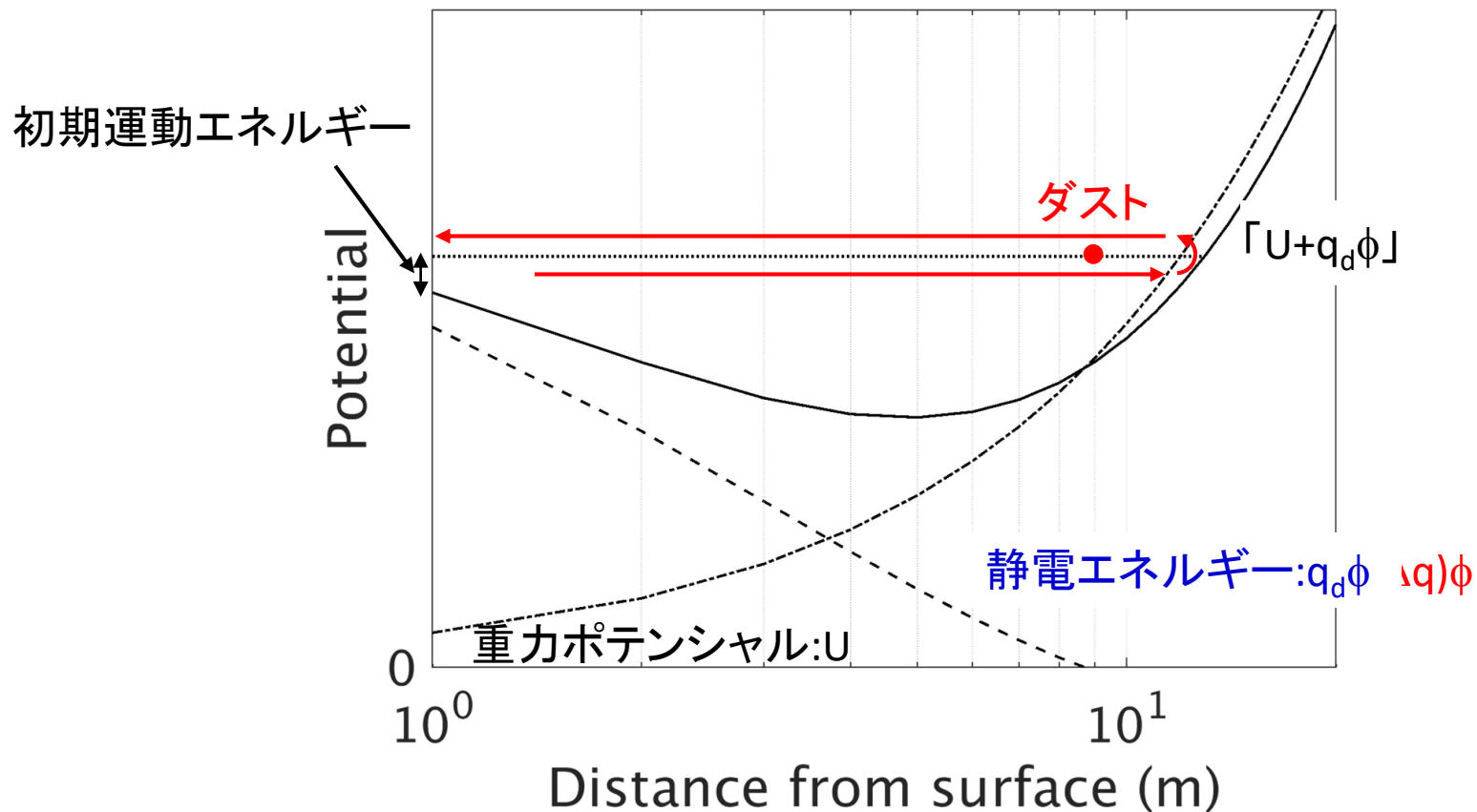
「ダストの力学的エネルギーは保存」

⇒ 「Dust levitation」は実現不可能



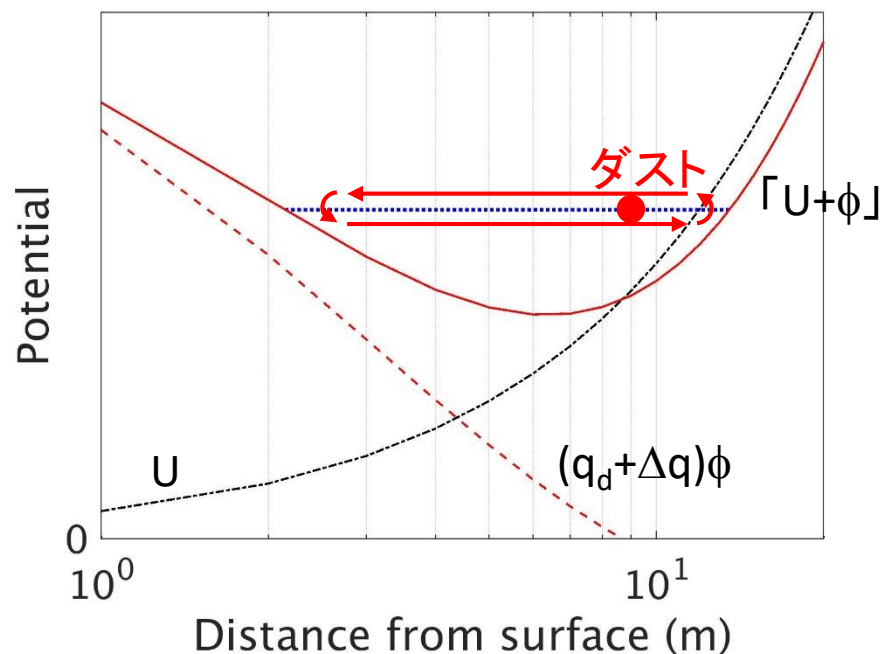
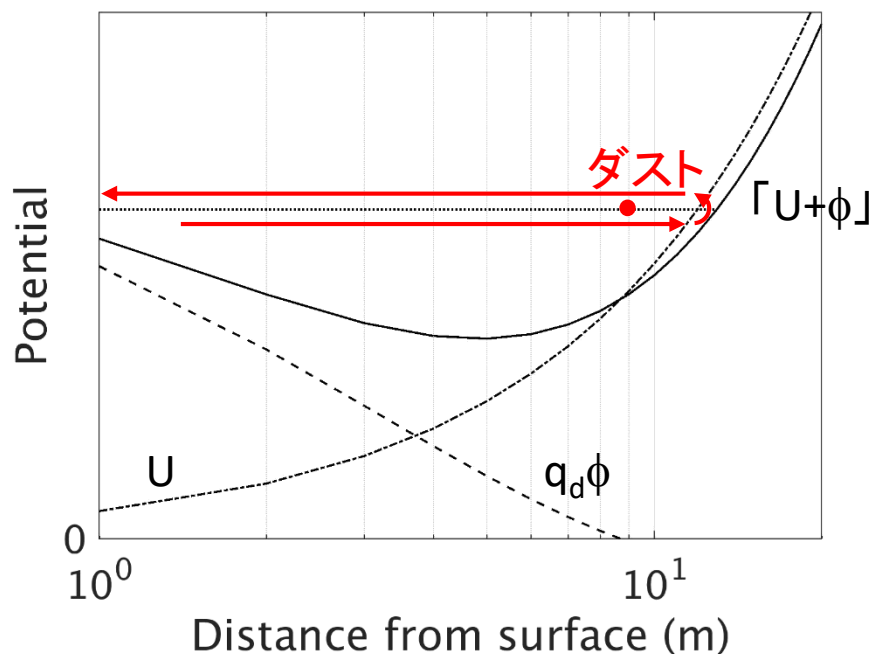
エネルギー保存？(2)

飛び出したダストが確率的に正の電荷を獲得したとする。



エネルギー保存？(3)

サブミクロンサイズダストが浮遊するためには、打ち上げられてから落下するまでに帯電量の変化が必要



* 図はダストの電荷が $2e$ から $3e$ に変化した場合

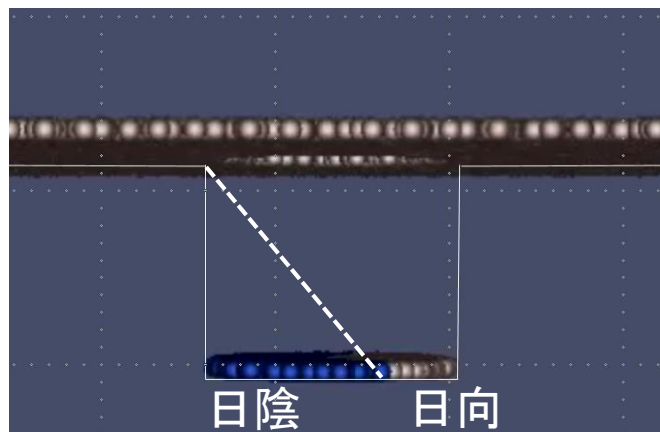
ポテンシャル構造、ダスト初期運動エネルギー、帯電量変動の様子がわかれば浮遊条件を算出可能

⇒(Stochasticな)ダスト帯電過程が重要な役割を果たす

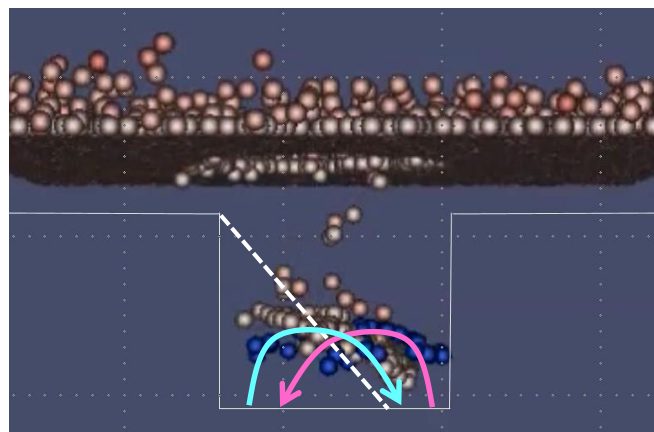
縦孔の場合は？

統計的なダスト帯電量変化から予測されるダスト挙動

1. 日向(日陰)のダストは正(負)に帯電



2. 帯電量が一定値を超えると日向・日陰境界を交差するように運動



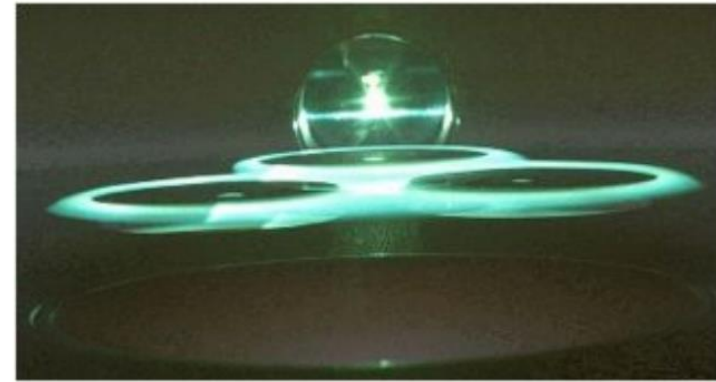
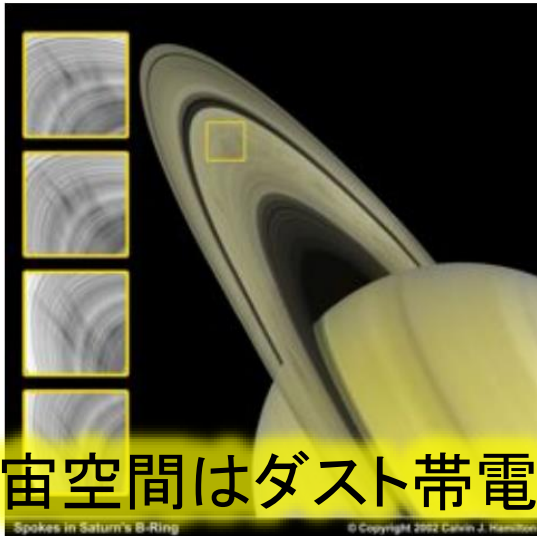
3. 境界を飛び越えたダストの帯電量の正負が逆転する方向にゆっくりと変化
(日向→正、日陰→負)

4. 帯電量が一定値を超えると再び交差運動

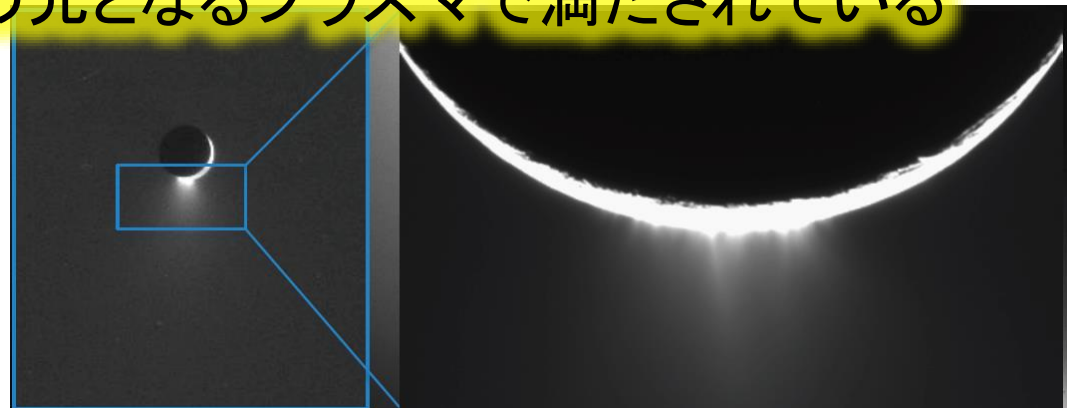
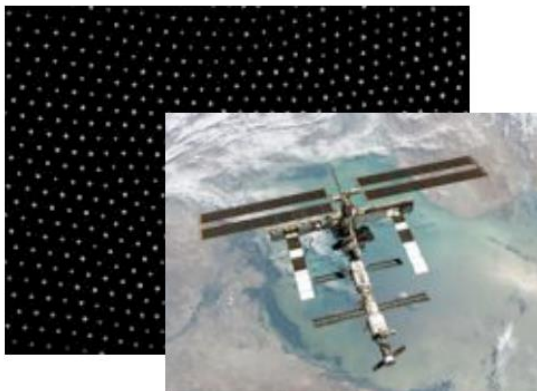
日向・日陰領域の間でダスト移動が持続する可能性
⇒ 粒子シミュレーションによる検証

電気力学相互作用を考慮した宇宙ダストの数値モデリング

Complex plasma



宇宙空間はダスト帯電の元となるプラズマで満たされている



[Images courtesy of W. J. Miloch & J. E. Wahlund]

「Complex plasma = ダストを含むプラズマ」 の数値モデリングの課題

- ダスト帯電過程
 - (通常のプラズマと異なり)ダスト帯電量が時間変化
 - 量子化された帯電量、統計的な帯電過程
- ダストダイナミクス
 - 電磁気力、重力、摩擦力、太陽光圧など多数の力学項が関与 ⇒ 扱うパラメータに依存
- ダスト-プラズマ相互作用、ダスト-ダスト相互作用
 - ダストプラズマ特有の電磁気現象
 - 弱結合？強結合？⇒適した数値モデルが異なる
- ダストの供給源となる惑星表面の最新の知見

(全般にわたる課題として)

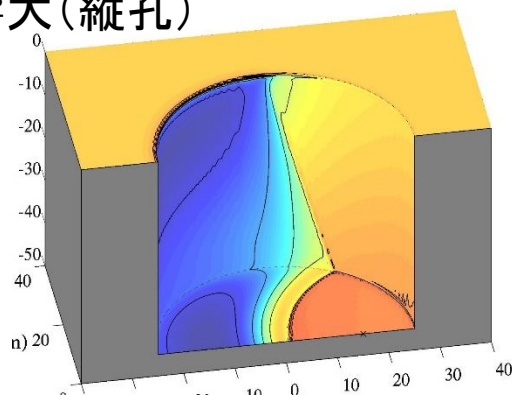
各物理プロセスの時空間スケールの乖離

まとめ

月縦孔周辺のプラズマ・ダスト環境に関する大規模粒子シミュレーション研究

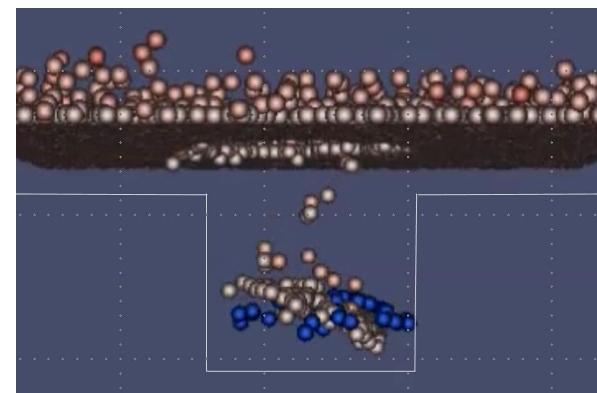
1. 電気環境

- 月面・太陽風プラズマ・光電子間の相互作用
⇒ 月面帯電、場所による電位差
- 地形による影響大(縦孔)



2. ダスト環境

- 月で静電気力が重要となるダストはサブミクロンサイズ
- 統計的な帯電量変化が振る舞いの予測に重要



今後の課題:

(月以外の宇宙環境への応用を見据えた)宇宙空間ダスト電気力学相互作用モデルの拡張

Questions?

References:

1. Usui et al., PIC Simulation on Plasma Flow Response to a Meso-scale Magnetic Dipole in Space, AIAA Science and Technology Forum, 2015.
2. Deca et al., Electromagnetic Particle-in-Cell Simulations of the Solar Wind Interaction with Lunar Magnetic Anomalies, Phys. Rev. Lett., 2014.
3. Farrell et al., Complex electric fields near the lunar terminator: The near-surface wake and accelerated dust, Geophys. Res. Lett., 2007.
4. Poppe&Horanyi, Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface, J. Geophys. Res., 2010.
5. Guernsey and Fu, Potential distribution surrounding a photo-emitting, plate in a dilute plasma, J. Geophys. Res., 1970.
6. Haruyama et al., Lunar holes and lava tubes as resources for Lunar science and exploration, Moon, 2012.
7. Robinson et al., Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits, Planet. Space Sci., 2012.
8. Miyake&Nishino, Electrostatic environment near lunar vertical hole: 3D plasma particle simulations, submitted.