

O-D2-19

月面帯電環境の計測と評価

三宅洋平^{1*}

三好由純², 原田裕己³, 西野真木⁴, 栗田怜³, 笠原慧⁵, 臼井英之¹, 永松愛子⁴,
奥村哲平⁴, 豊田和弘⁶, 中村紗都子²
月面静電気・放射線調査チーム(LERIT)

1. 神戸大学, 2. 名古屋大学, 3. 京都大学, 4. JAXA/ISAS, 5. 東京大学, 6. 九州工業大学

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

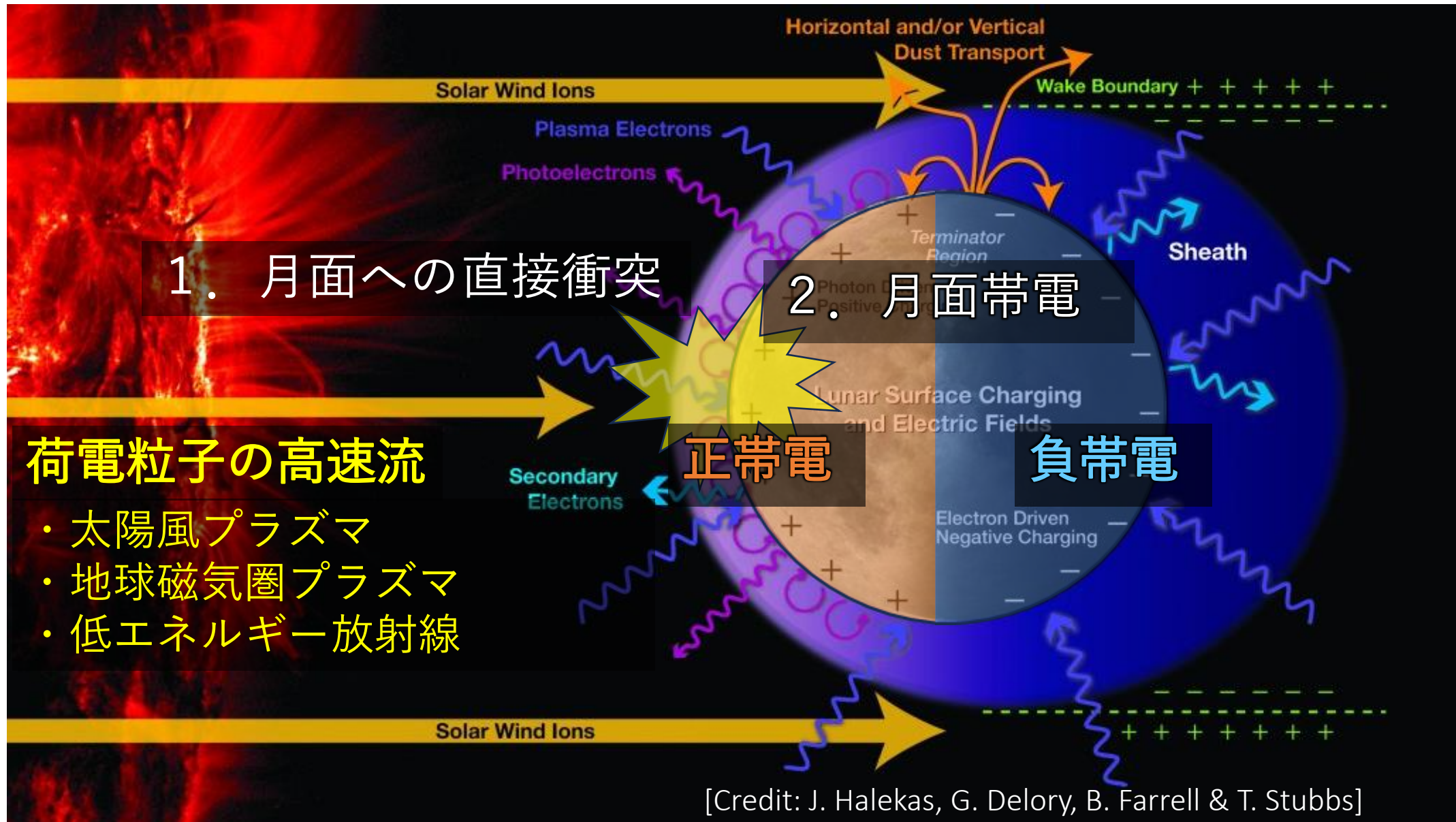
第26回惑星圏シンポジウム(SPS2025), 2025年3月4日, 東北大学.

発表の要旨

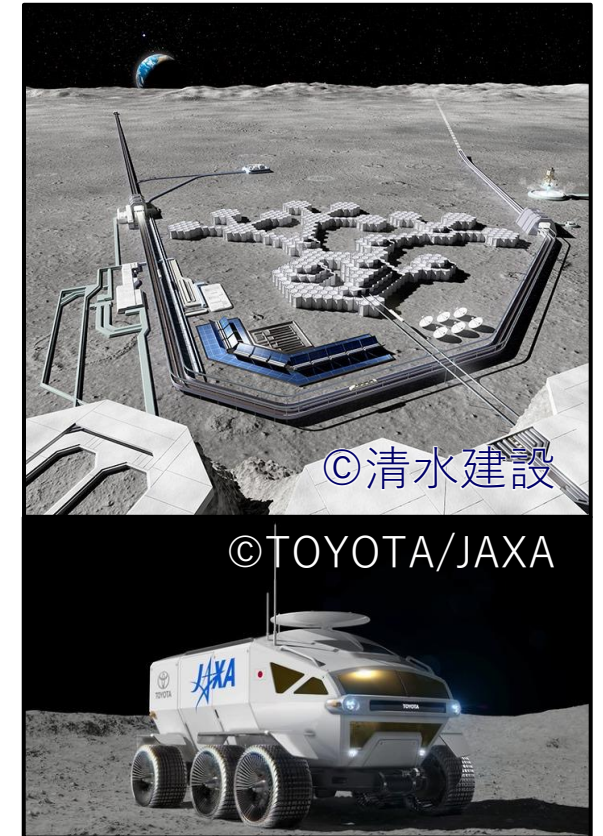
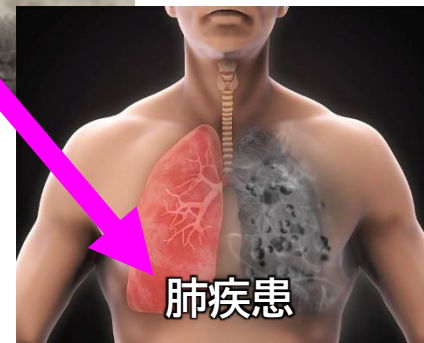
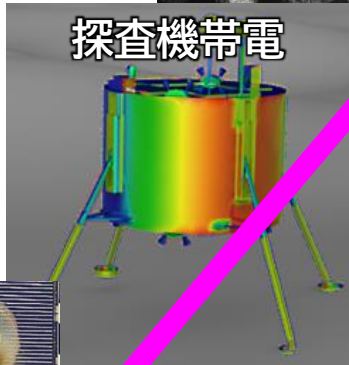
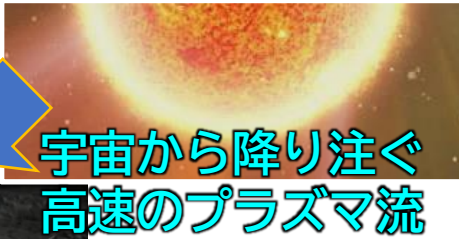
着陸機を用いた月探査の準備が急速に進む中、月面静電環境の定量的評価の重要性が高まっている。月の昼夜での「平均帯電描像」は過去の理論・数値・シミュレーション研究で多くの検討が行われた。しかし、近年の予測研究は、絶縁性で粗いレゴリス表面が帯電条件を大幅に変化させる可能性を示唆している。とりわけ特定の表層形状は月面電位を決定づける電流平衡状態の成り立ち自体を大きく変化させる可能性がある。またプラズマによる帯電現象は天体表面における静電エネルギー蓄積に他ならないが、それが月面レゴリス力学特性に如何なる寄与を与えうるかは未だ以て不明である。

本講演では観測・地上試験・数値モデル連携に基づく月面帯電環境予測と将来の観測計画の検討状況を紹介する。帯電現象は月面での様々な探査や活動に干渉する「やっかいもの」でもあるが、そのリスク評価にお困りのことがあれば、「月面静電気・放射線調査チーム(LERIT)」にぜひご相談いただきたい。

宇宙の荷電粒子（プラズマ）環境と帯電

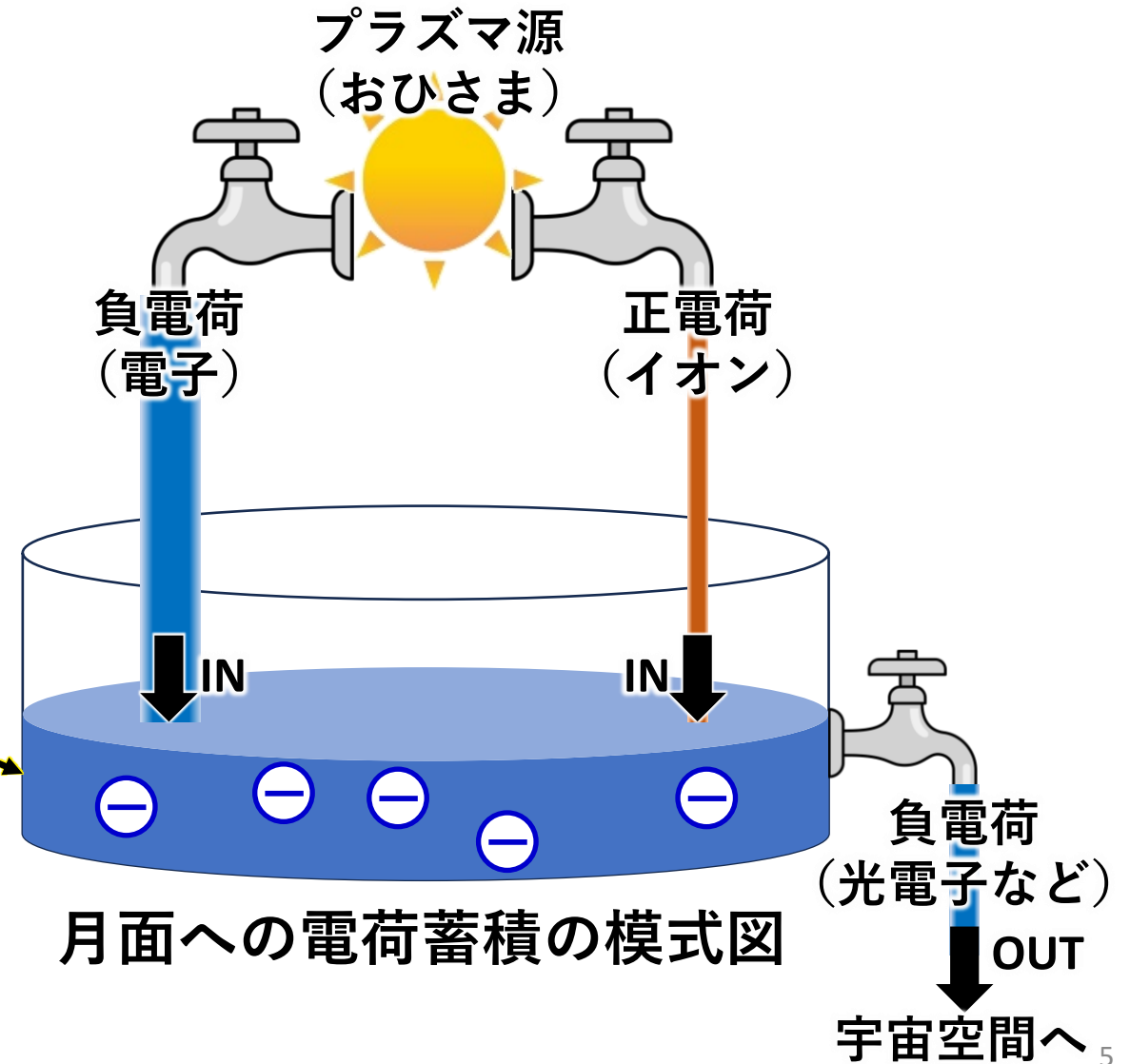
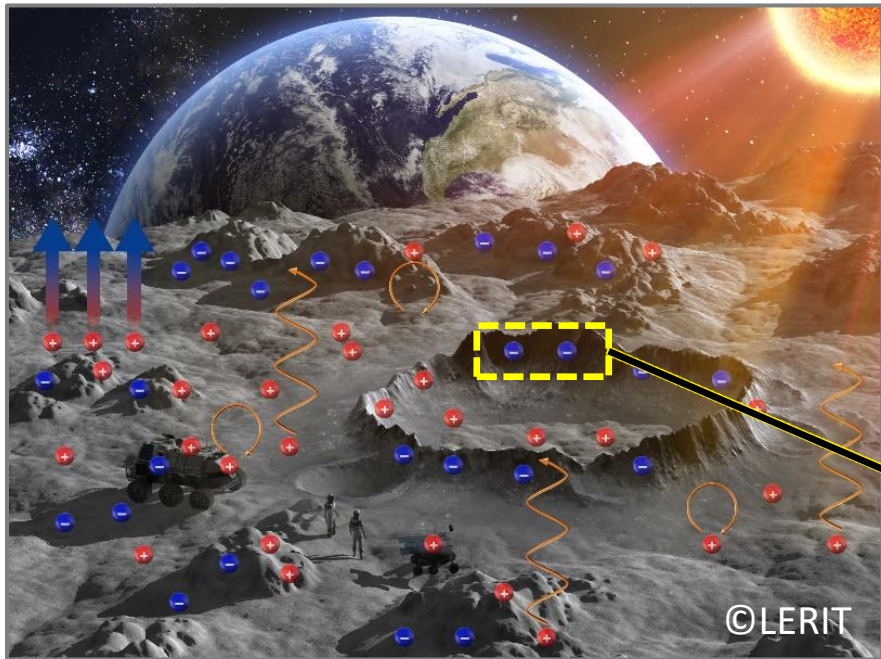


宇宙プラズマに支配される「月面天気」



月面人間社会への影響

プラズマによる月面（表面）帯電の物理模型



荷電粒子計測を通じた月面電位推定の試み

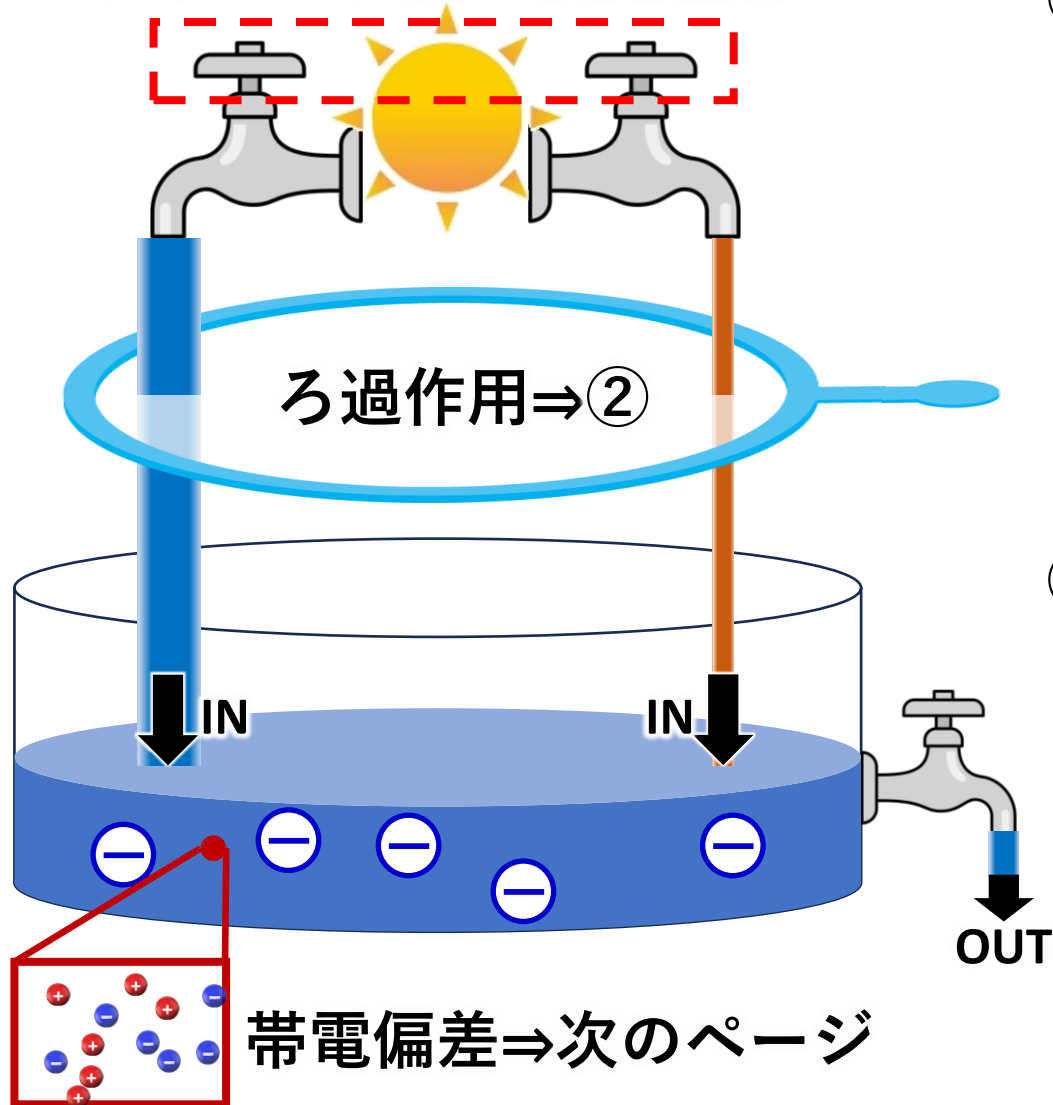
太陽風中

地球磁気圏中

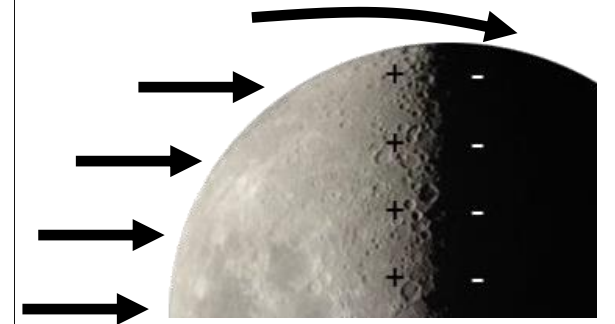
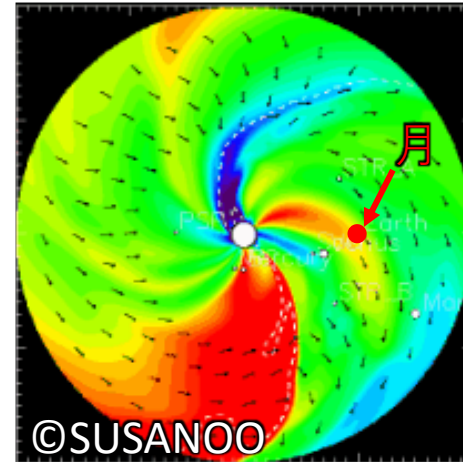
月の背景プラズマ環境・ 月面の日照条件	観測された典型的な月面電位 (変動範囲)	参考文献
太陽風・昼側 昼	+10 V程度 (0 V から +150 V)	Freeman et al. (1973), Freeman and Ibrahim (1975), Collier et al. (2011), Futaana et al. (2013), Vorburger et al. (2016)
太陽風・ 夜側 (昼夜境界を含む) 夜	-100 V程度 (-数100 V から 0 V)	Lindeman et al. (1973), Freeman and Ibrahim (1975), Benson (1977), Halekas et al. (2002, 2008), Nishino et al. (2017)
太陽風 (SEPイベント時) 太陽じょう乱時 夜	-1 kV程度 (-4.5 kV から -500 V)	Halekas et al. (2007, 2008, 2009)
地球磁気圏尾部ローブ・昼	+数10 V程度 (-60 V から +200 V)	Reasoner and Burke (1972, 1973), Burke et al. (1975), Freeman and Ibrahim (1975), Tanaka et al. (2009), Halekas et al. (2011), Poppe et al. (2012b, 2013), Harada et al. (2013, 2017)
地球磁気圏尾部ローブ・夜	-100 V程度 (-150 V から -数10 V)	Halekas et al. (2008), Harada et al. (2012), Saito et al. (2014)
地球磁気圏尾部 プラズマシート・昼 昼	+数10 V程度 (-1 kV から +80 V)	Reasoner and Burke (1972, 1973), Burke et al. (1975), Freeman and Ibrahim (1975), Halekas et al. (2005, 2011, 2012), Poppe et al. (2011, 2012a), Harada et al. (2012), Collier et al. (2017)
地球磁気圏尾部 プラズマシート・夜 夜	-1 kV程度 (-2 kV から -数100 V)	Halekas et al. (2005, 2008), Harada et al. (2012), Saito et al. (2014)

月面帯電の状態多様性を生み出す要因

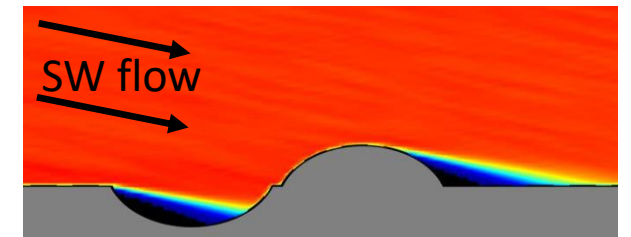
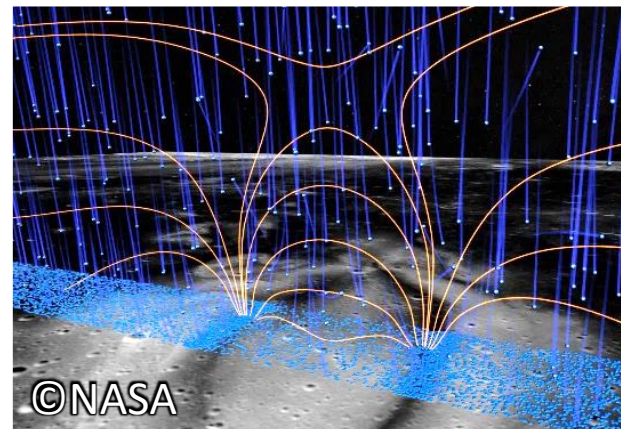
プラズマ入力の変動性①



①宇宙天気・背景プラズマ環境・月面上の緯度

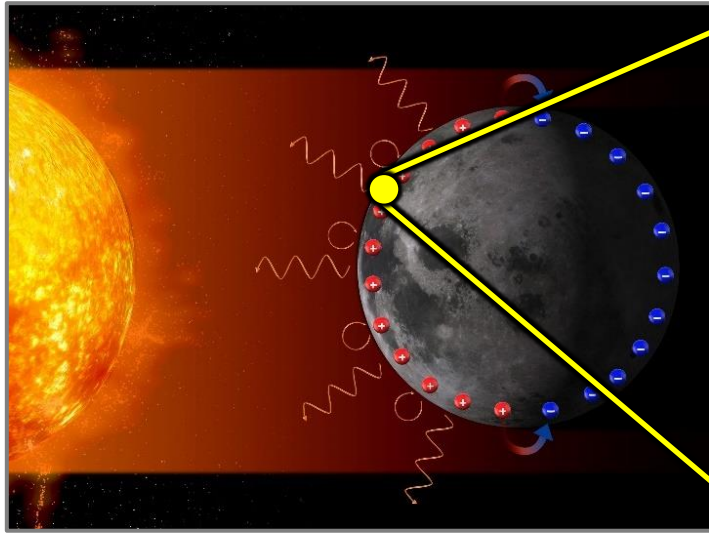


②地殻磁場／地表による粒子束・エネルギー変化

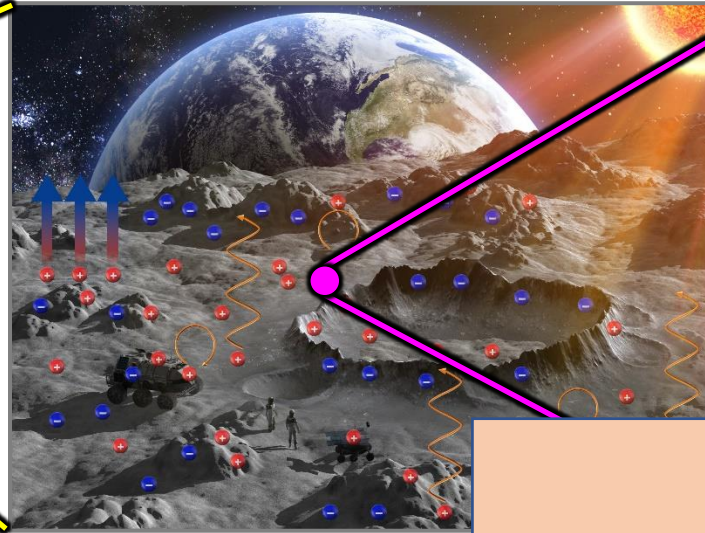


微視スケールの静電環境：帯電偏差描像

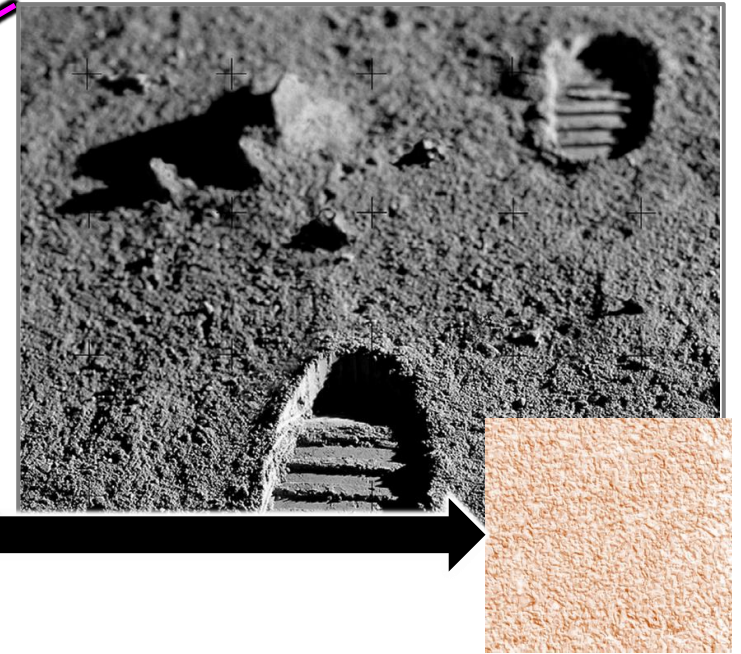
全球・広域スケール



地形スケール



土壌／レゴリススケール

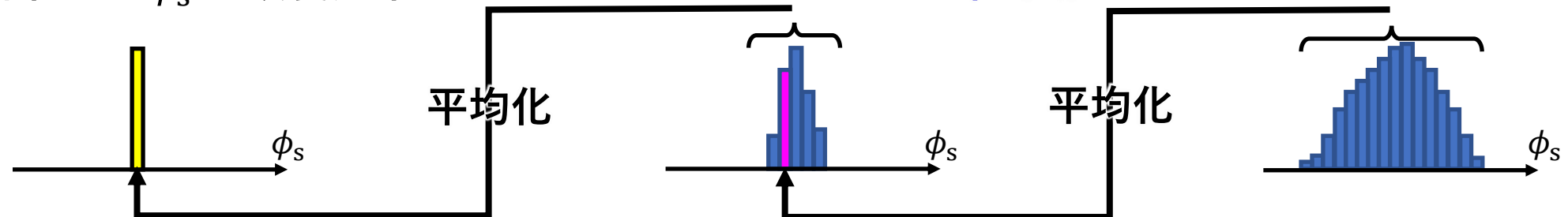


帯電状態
の見える方

$\sigma \sim \langle \sigma \rangle$
平均場

$\sigma = \langle \sigma \rangle + \Delta \sigma$
偏差場

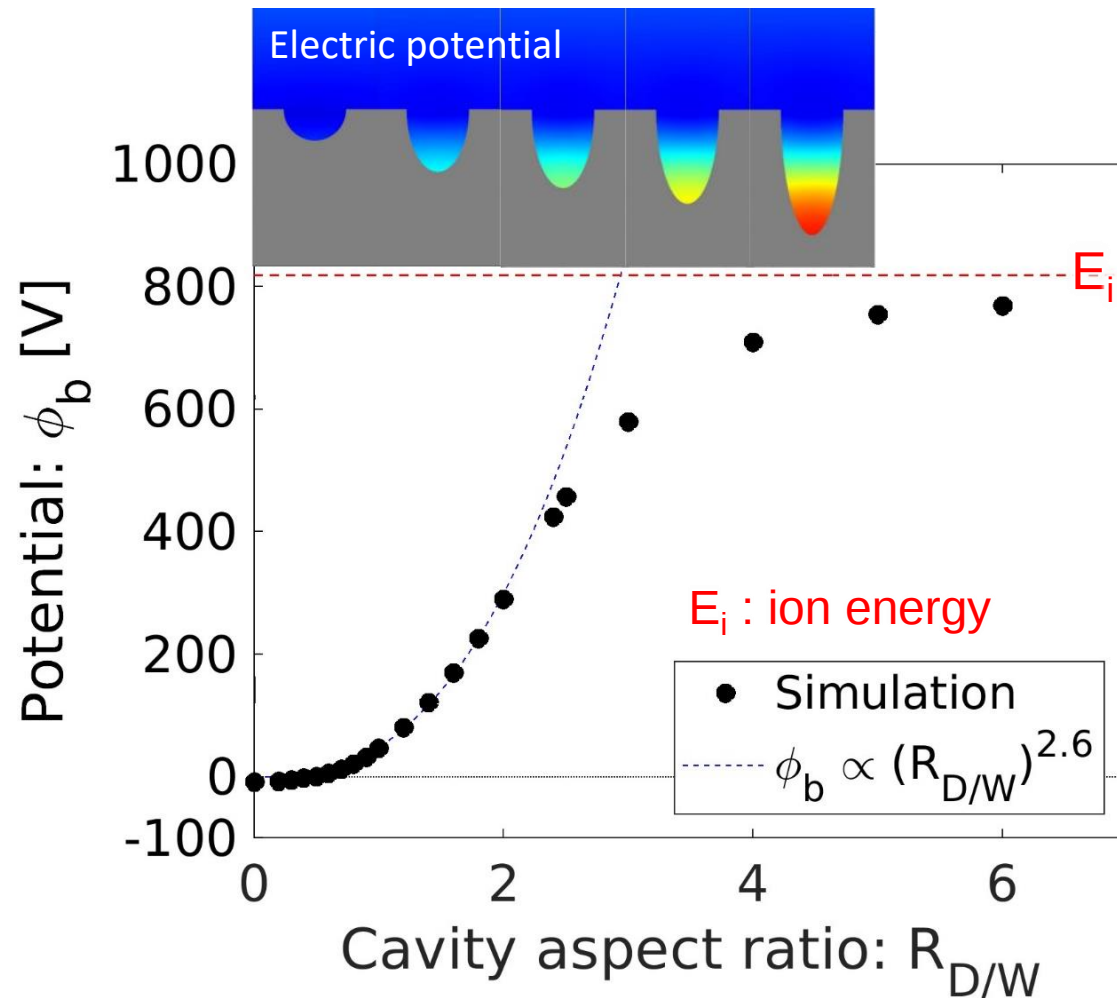
表面帯電量 ϕ_s の頻度分布：



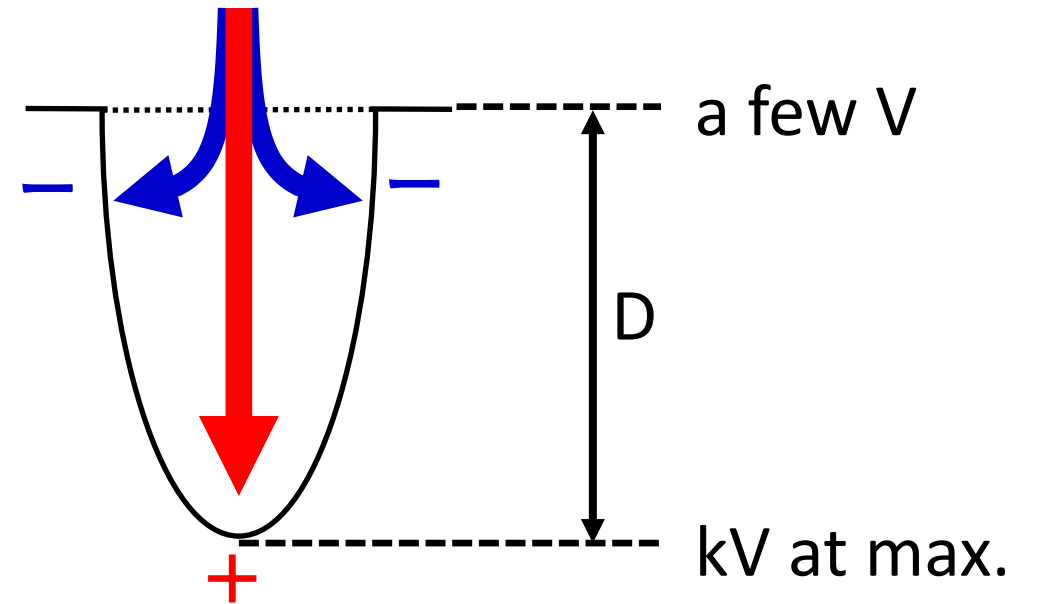
帯電偏差描像の概念実証

➤ 粒子モデル数値予測

[Nakazono & Miyake, JGR, 2023; 2025]



微視スケールの荷電分離と
その定着



表面形態の不規則性（粗面）は
「帯電状態の不規則性」
につながりうる。

帯電偏差の物理的意味づけ

月模擬砂への荷電粒子照射実験



[Courtesy of Xu Wang@LASP]

- レゴリス動力学や探査機放電リスクに直結する電気力学量：**電界 E**

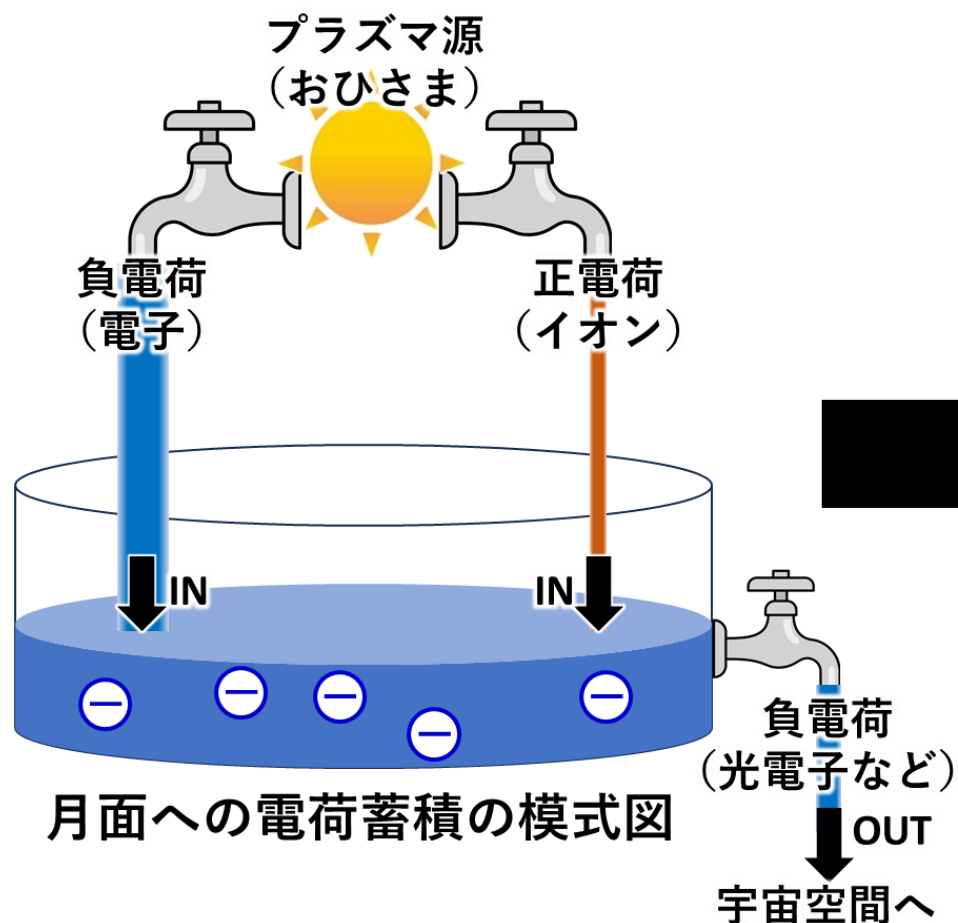
$$|E| \sim \frac{\Delta\phi}{D}$$

帯電偏差
偏差を生じる特徴距離

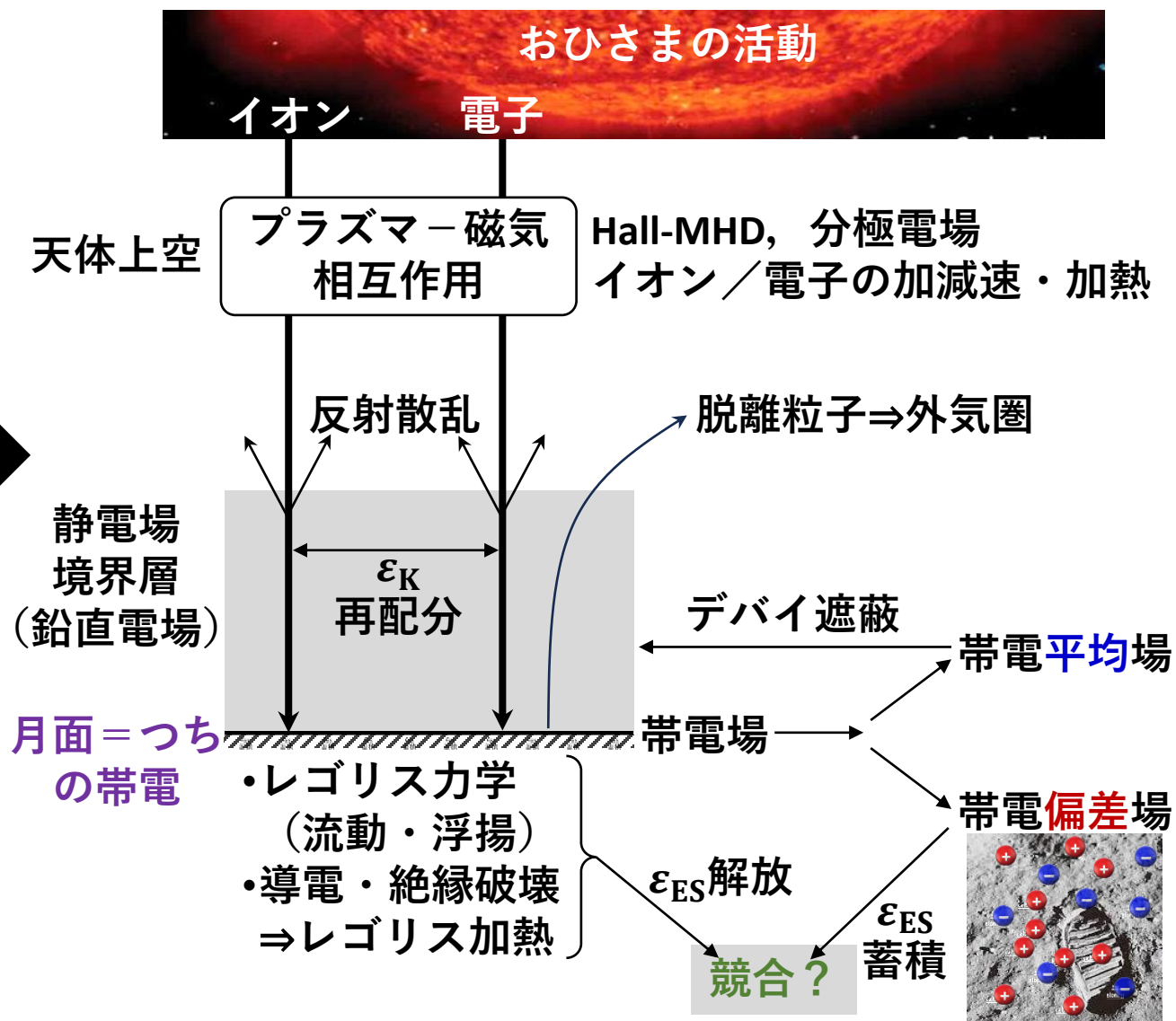
- 真空チャンバでのプラズマ照射実験
結果：帯電に伴う表面モホロジ変化
物理的な示唆：
 - 表面モホロジに依存した帯電偏差量
(静電エネルギー $\epsilon_{ES} \sim E^2$ 蓄積量)
 - モホロジ変化は帯電偏差緩和過程？
(ϵ_{ES} の解放過程？)

明らかにすべき月面帯電環境

➤ 素過程としての表面帯電

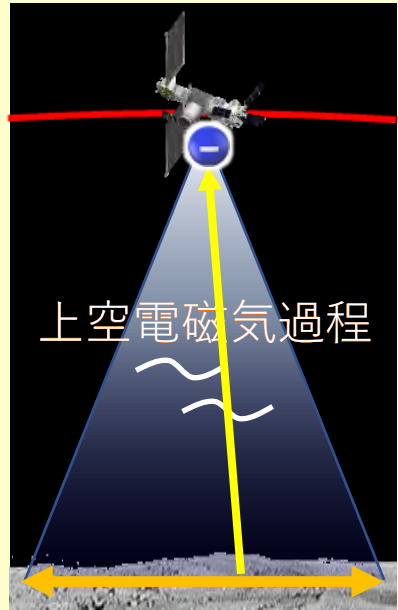


➤ 月面帯電をめぐる物理システム

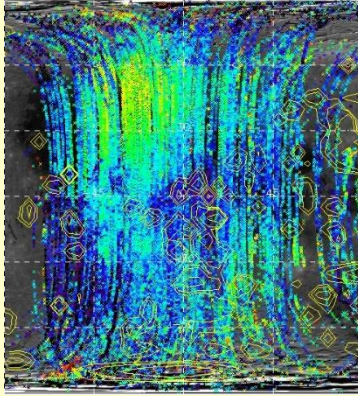


計測・実験・数理・AI技術による多面的アプローチ

月軌道上衛星観測

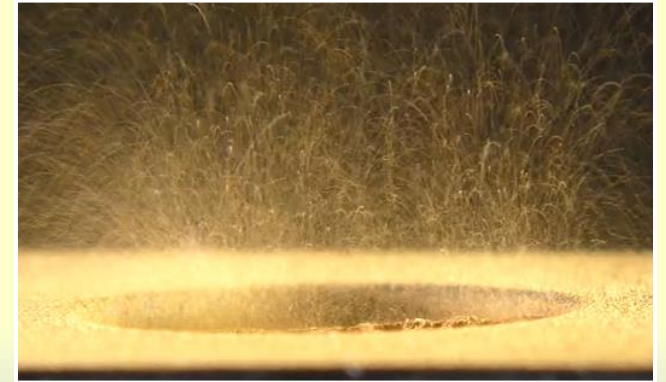
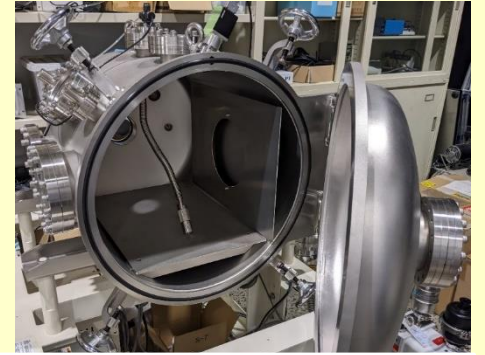


表層静電気環境



月離脱粒子による環境推定

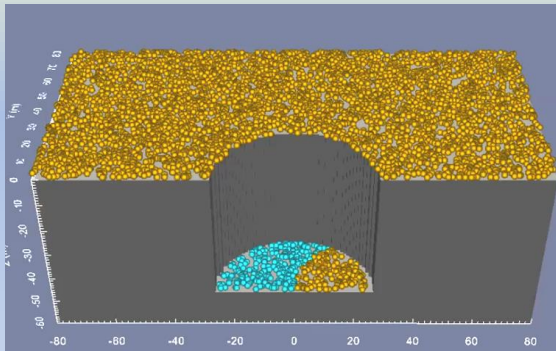
地上模擬試験



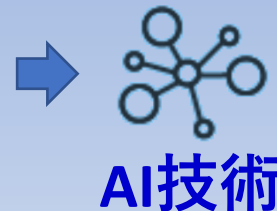
月面静電気・放射線
調査チーム (LERIT)
代表：三好由純@名大

↑ 現実世界

↓ サイバー空間

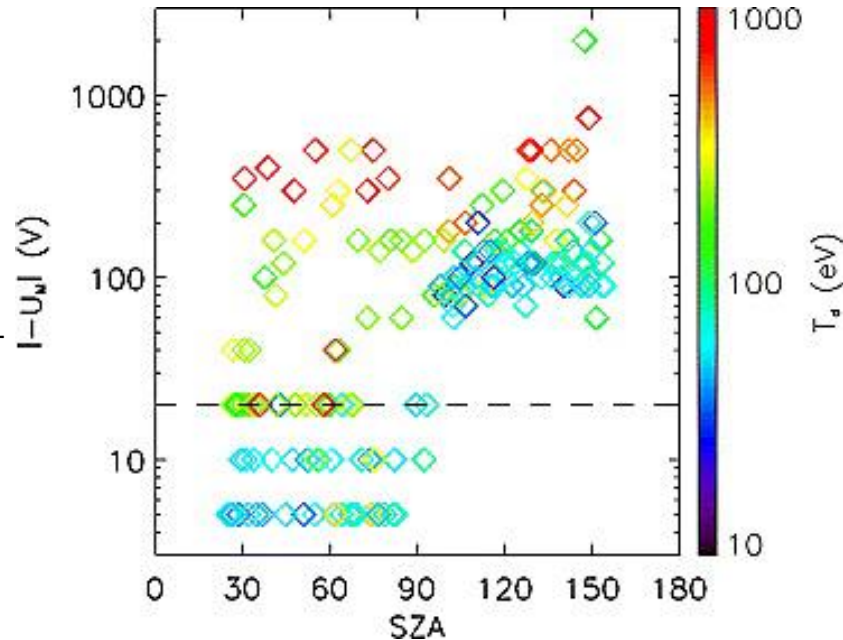
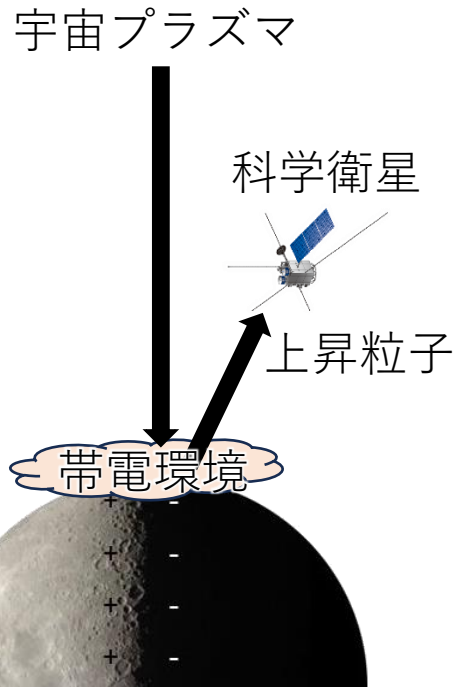


数値モデリング
と
シミュレーション

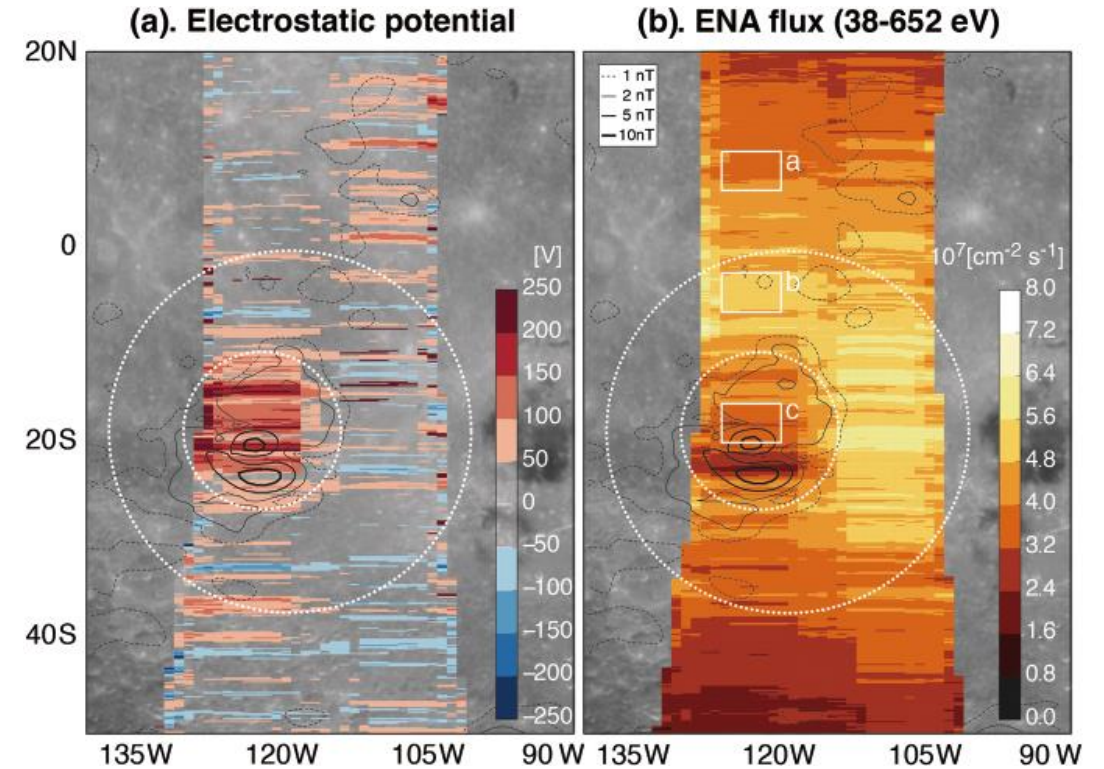


表面形態多様性
へのアプローチ

衛星観測：遠隔からの月面静電気環境類推



月面反射・上昇電子による
電位推定 [e.g., Halekas+, 2008]
⇒この後の京大・加藤様ご講演



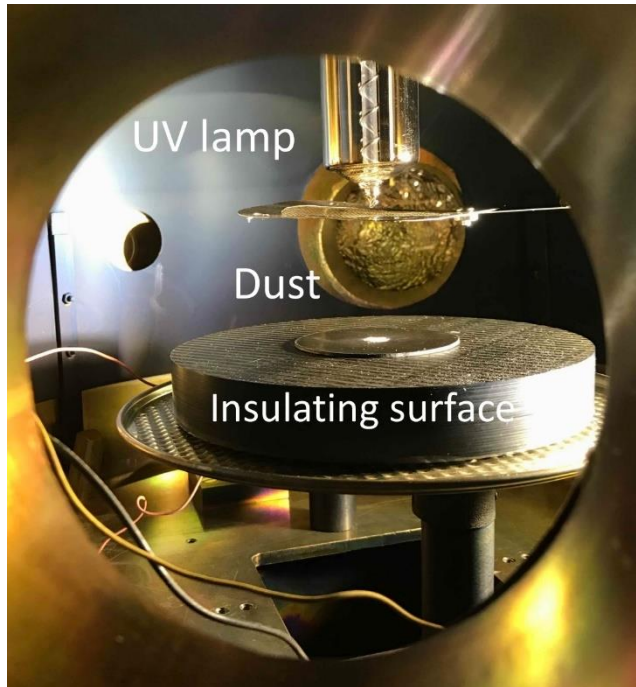
高速中性粒子による電位推定
[Futaana+, GRL, 2013]

- ☆帯電の原因
- 帯電の様態
- ★帯電の波及

得られるもの：

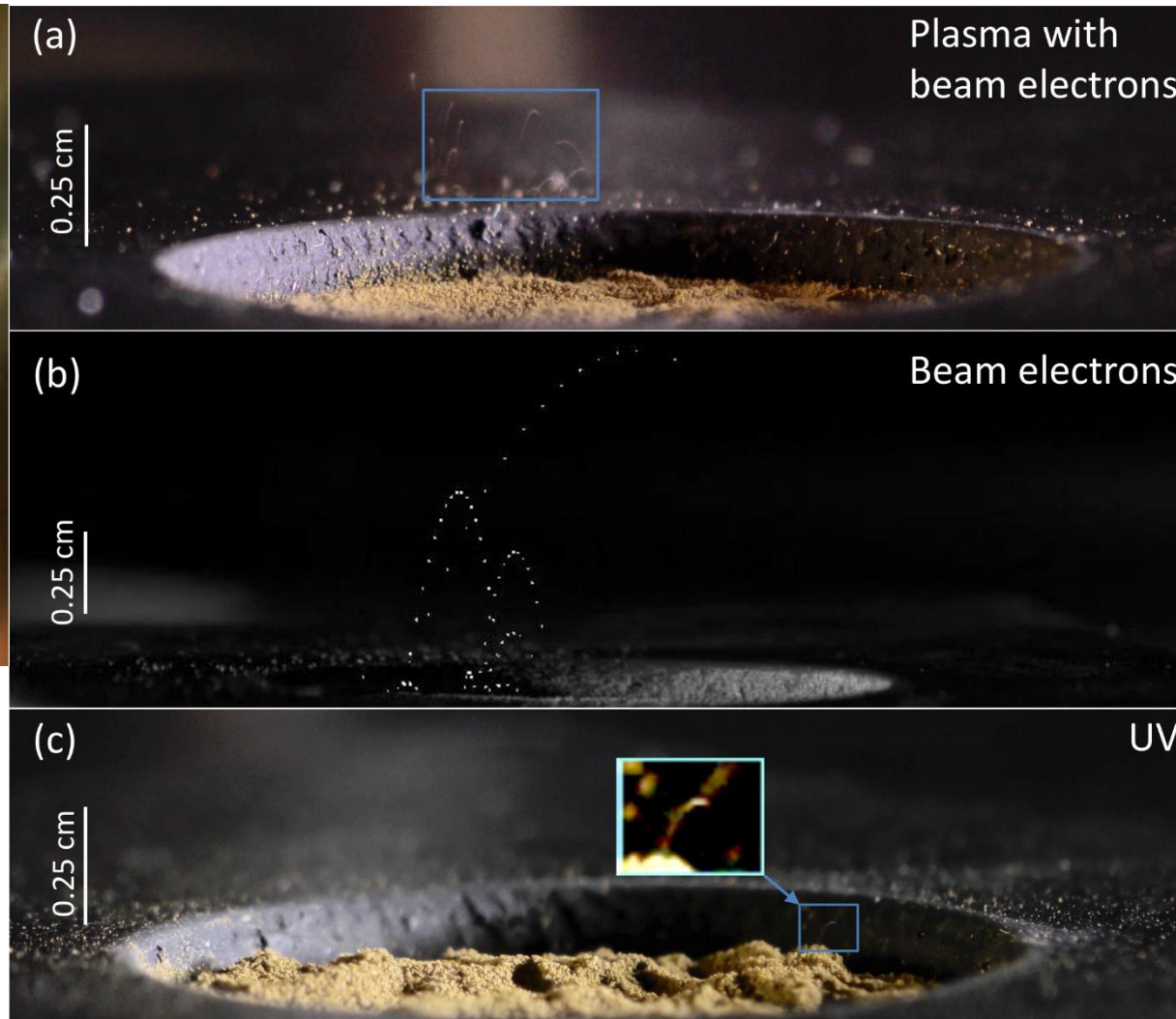
- ・広域にわたる静電気環境の平均描像
- ・宇宙放射線環境の変動に対する応答性

地上模擬試験：プラズマ制御照射下での レゴリス挙動検証と静電気環境類推



[Wang+, 2016]

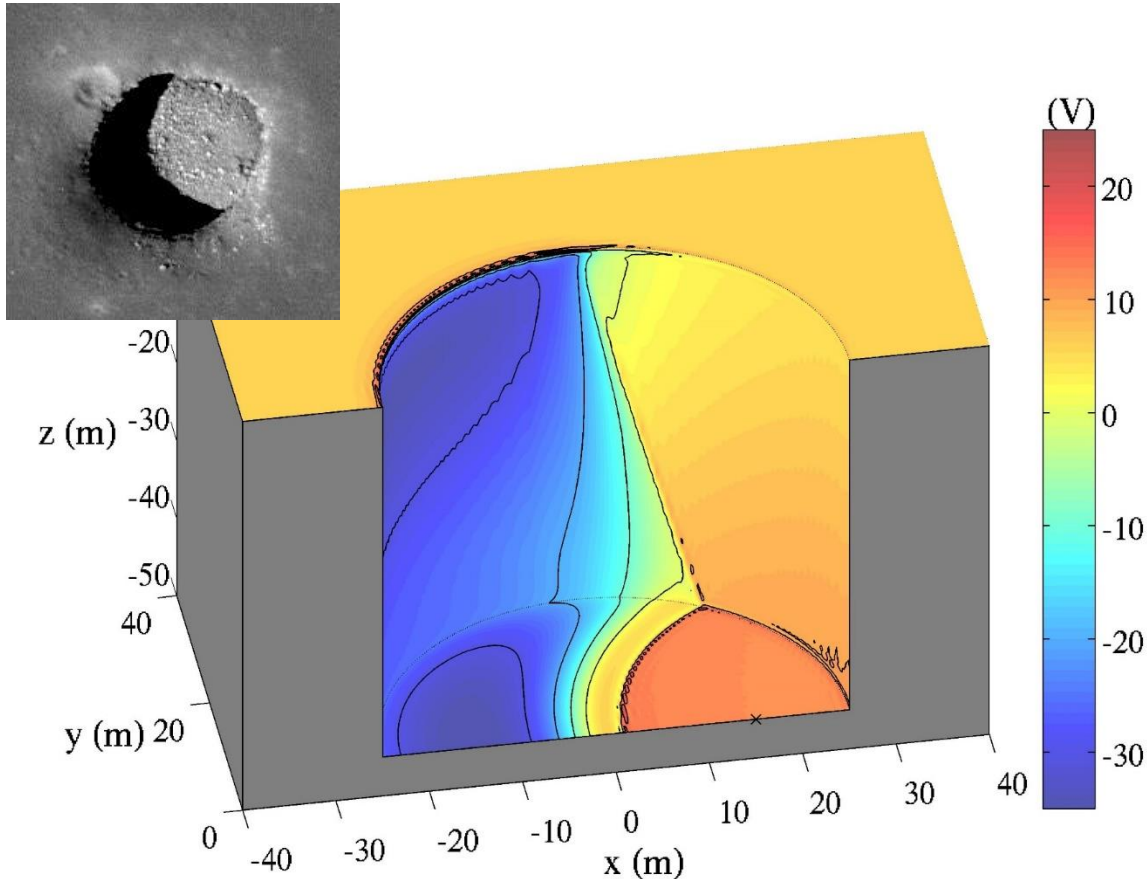
帯電の原因
☆帯電の様態
★帯電の波及



得られるもの：
制御された
帯電環境下での
レゴリス運動原理
帯電とレゴリス挙
動の関連性

応用：
レゴリス挙動から
月面帯電様態を
類推

数値研究：ボトムアップの物理過程検証

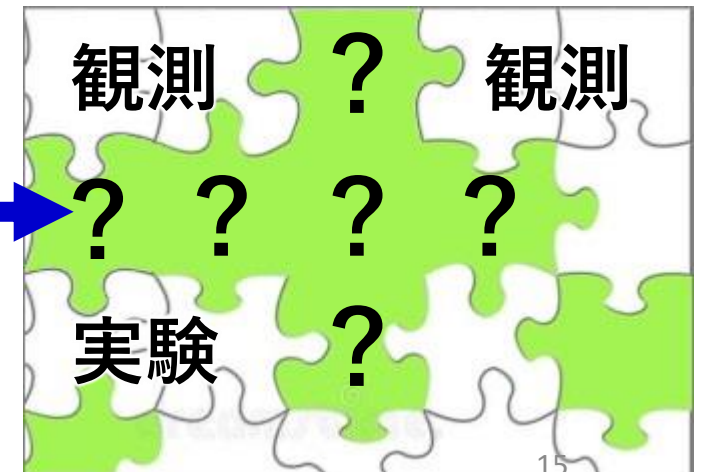


例：月縦孔の帯電分布モデリング
[Miyake+, 2015]

得られるもの：
一定の物理状態仮定下での
詳細物理プロセス／シナリオ

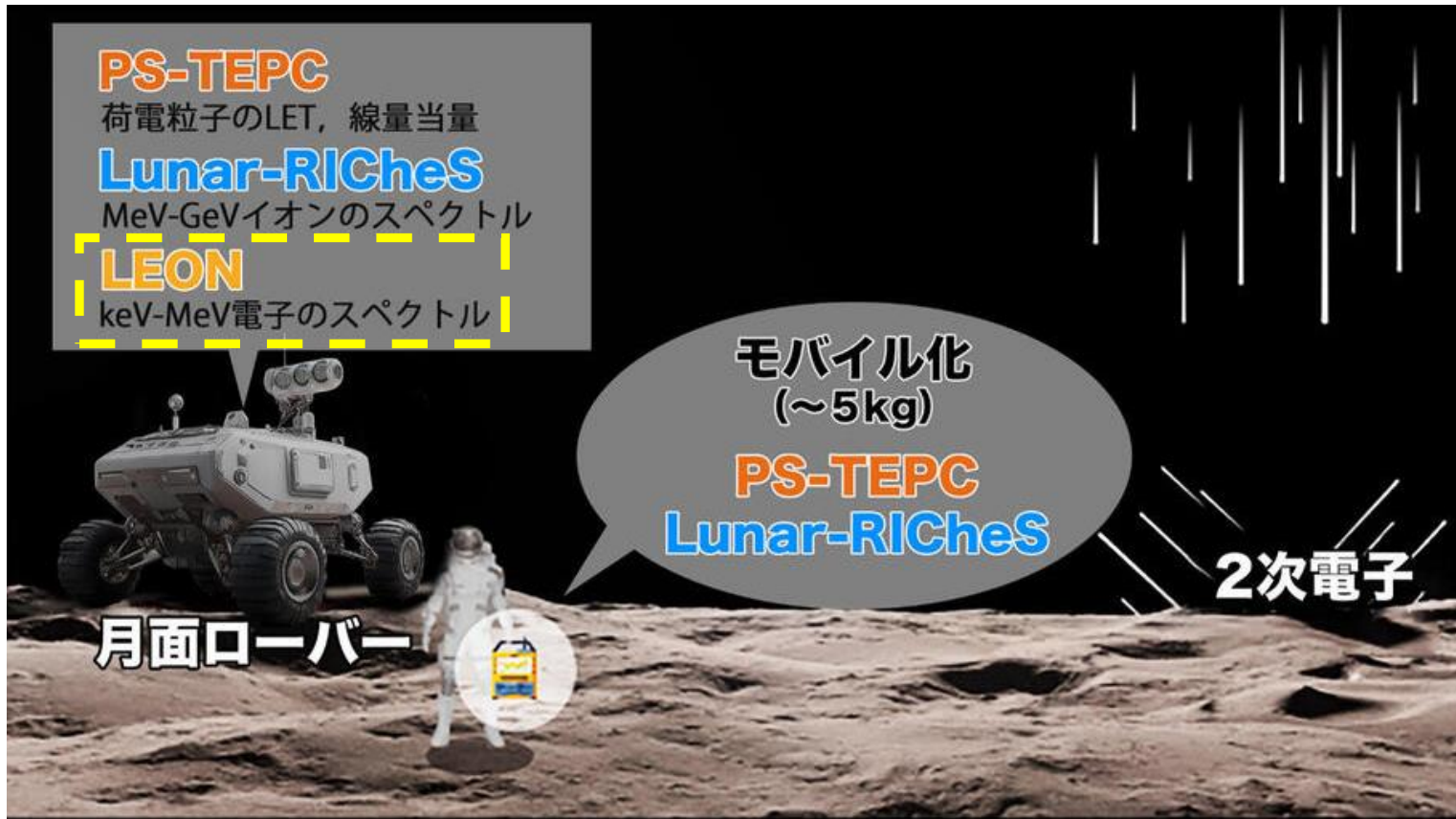
求められる役割：
実世界（観測・実験）で得た
物理的事実を「橋渡し」

数理
(理論 + 数値)



将来に向けて

月面での計測 1 : 原因 (荷電粒子) を測る



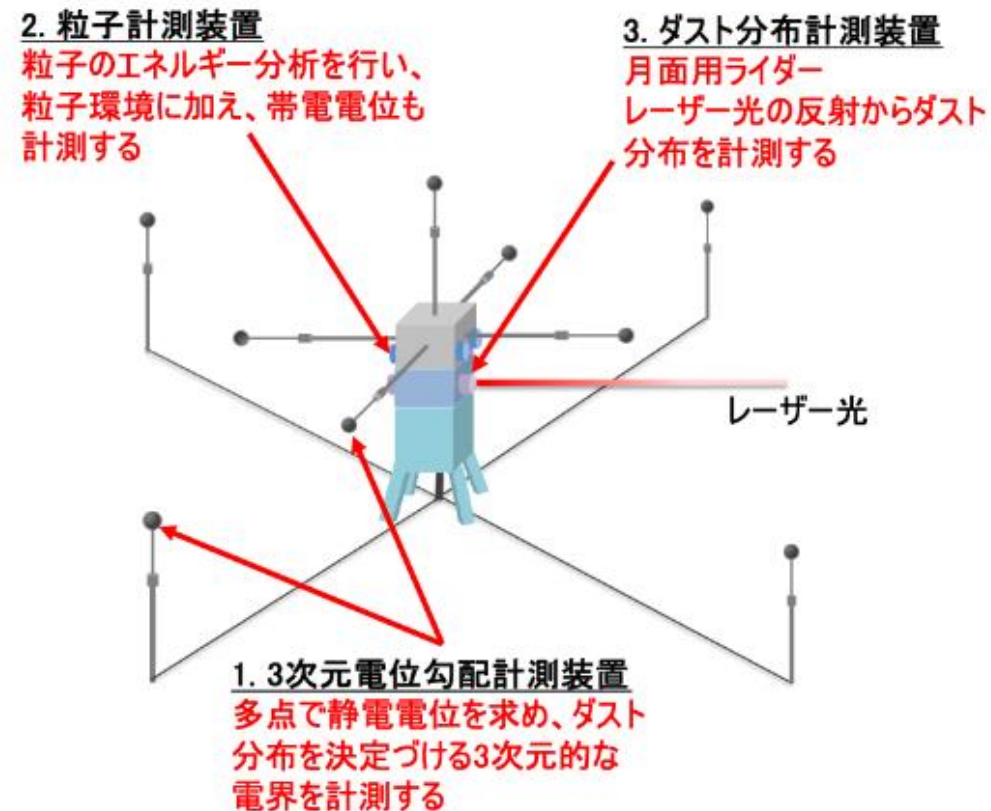
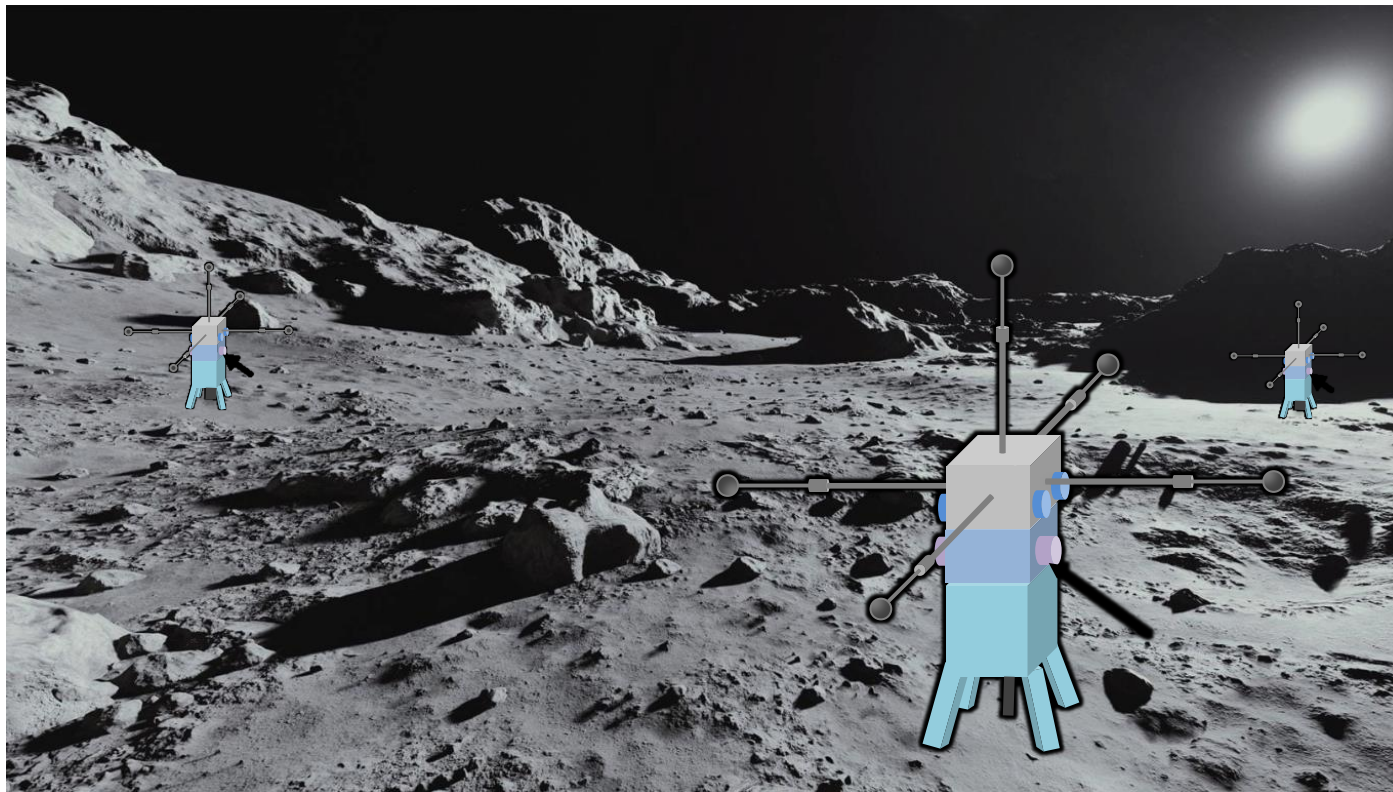
月環境用電子計測器LEON
固体物質の帯電を引き起こすkeV~MeVエネルギー帯の電子の入射エネルギーと到来方向を計測。
月面観測に向け、これまで個別部品で構成していた信号処理回路部分をASIC化することで観測器を小型化。

©名古屋大ISEE、東京大、京都大、神戸大、KEK、総研大、理研、東京理科大

JAXA月フィージビリティスタディの1テーマとして推進されている
ポータブル放射線・プラズマ計測器の開発と使用シナリオ検討に参画

将来に向けて

月面での計測 2 : 帯電状態 (数mスケール) を測る



月惑星表層静電気・レゴリス環境の物理的知見に基づき下記を提案・設計

- ・月面多点設置向け静電気・放射線環境計測パッケージ『月面百葉箱』
- ・月軌道上(例:月ゲートウェイ)からの遠隔静電気環境手法

月面帯電環境の計測と評価：まとめ

素過程としての月面帯電（表面帯電）は良く理解されているが、月や（希薄大気）固体天体特有の荷電粒子環境／プロセス

- ・ 太陽活動に伴うプラズマ条件変動
- ・ 天体上の緯度・地域依存性
- ・ 太陽放射（昼夜）条件
- ・ 磁気や表面によるバリア・ろ過効果

により、その様態は様々である。
加えて、微視スケールの帯電偏差
（局所電場・静電エネルギー蓄積）
に関する理解が不足している。

この物理的課題を解決するため、
月面静電気・放射線調査チーム(LERIT)を組織し、観測・実験・数理を統合した
研究戦略や、将来の月面での帯電環境計測に向けた準備を開始している。

日本惑星科学会誌「遊・星・人」第34巻に月面帯電に関する記事を掲載しています

https://www.wakusei.jp/book/pp/Contents_34.html

