

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14403

研究課題名（和文）弱磁化固体天体 - 宇宙プラズマ相互作用の粒子モデル計算機実験

研究課題名（英文）Particle Simulations on Space Plasma Interactions with Weakly-Magnetized Small Bodies

研究代表者

三宅 洋平 (Miyake, Yohei)

神戸大学・計算科学教育センター・准教授

研究者番号：50547396

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：月や小惑星などの弱（非）磁化固体天体と接触する太陽風プラズマ挙動、および地球極域や惑星圏を飛翔する人工衛星周辺に対する電離圏プラズマ応答を、粒子モデルプラズマシミュレーションにより明らかにした。地球極域電離圏を飛翔する人工衛星の計算機実験解析では、沿磁力線方向に長距離に伸展する電子粗密構造を捉えた。また月面上空の長距離計算機実験解析では、月面から100 km上空におけるプラズマ電磁波動の励起現象を捉えることに成功した。いずれも固体表面で生成された密度じょう乱や非熱的電子成分が、数100デバイ長以上離れた場所の電磁環境に影響を及ぼすことを示す結果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙プラズマと固体表面の相互作用の研究は、過去には人工衛星帯電やプラズマ計測への干渉等の観点から検討が行われてきた。一方で、こうした荷電分離領域の拡がりやプラズマの最小特性長であるデバイ長程度であるため、それらが宇宙プラズマ環境側へ与える影響は過小評価されてきた側面がある。しかし本課題の実施により、固体表面周辺で生成された密度勾配構造や非熱的電子成分が、特定の条件下において、表面から少なくとも数100デバイ長以上離れた場所の電磁環境にも影響を及ぼすことが明らかになった。固体プラズマ相互作用が表面近傍だけではなく、それが遠方のプラズマ環境と結合していることを示唆するという点で重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：The plasma environments near solar-system small bodies are numerically reproduced by means of the particle-in-cell plasma simulations, assuming two independent situations of an interplanetary magnetic field line contacting the Moon surface and a near-spacecraft region in the polar ionosphere. The simulations reveal that the excitation of low frequency electromagnetic waves at 100 km away from the Moon surface, as well as the presence of the electron wing that is reflected at the spacecraft surface and guided along geomagnetic field lines. Both results provide us important clues on the presence of long-range nature of body-plasma interactions in particular conditions. The spatial scale of the disturbance identified in the present study extends to hundreds of Debye lengths of the environment, which is much longer than previously considered.

研究分野：月惑星プラズマ環境学

キーワード：月惑星プラズマ 固体天体 プラズマ波動 固体天体プラズマ相互作用 衛星プラズマ相互作用 表面帯電 超高層物理学 数値シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間を満たすプラズマと太陽系惑星の相互作用は長年にわたり宇宙物理の重要なテーマである。近年、科学衛星を用いた月プラズマ探査により、弱(非)磁化かつ電離圏を有しない固体天体と宇宙プラズマの相互作用過程の重要性を示す観測結果が数多く得られている。これらの観測事実の一部は、天体表面での電子デバイ長スケール(数 10 m)の粒子吸着・反射・加速・加熱プロセスが、デバイ長よりはるか遠方(天体の上空)のプラズマ環境に影響することを示唆している。宇宙環境では磁場凍結条件により、電子輸送に関して磁力線に沿った疑似的な 1 次元性が実現されると仮定すると、固体表面と遠方プラズマ環境の相互干渉は決して不自然ではないが、その詳細は不明である。月、小惑星、水星、木星・土星の氷衛星では、天体表層の「固体プラズマ境界圏」と上空の外気圏、磁気圏、そして太陽風プラズマとの電気力学的な結合過程が重要である。すなわち天体表層での固体表面-プラズマ相互作用を正確に理解した上で、表層から高層プラズマ大気への荷電粒子・エネルギー輸送を記述する物理モデルを構築することは、我々が目指す太陽系惑星プラズマ環境の包括的な理解にとって重要な要素である。

2. 研究の目的

月や小惑星、水星、氷衛星など弱磁化かつ電離圏を有しない天体のプラズマ環境を正確に把握する上で、固体表面-プラズマ相互作用は必要不可欠の要素である。しかし、固体表面のデバイ長スケールのプラズマダイナミクスを定量化し、遠方領域でのプラズマ構造変化や波動励起と関連づける試みはまだ不十分である。本研究の目的は、固体天体や人工衛星の近傍で生起する固体プラズマ相互作用の結果として生み出されるプラズマじょう乱を数値的に予測した上で、高層への荷電粒子・エネルギー輸送を定量化し、両領域でのプラズマ過程の間の関連を明らかにすることにある。

3. 研究の方法

天体固体表面近傍の電磁プラズマ環境を定量的に解析できる独自の粒子モデルシミュレーションツール EMSES を駆使した、第一原理的なプラズマ現象数値解析手法を用いる。プラズマを多数の代表粒子の集合として表現する本手法は、天体表面近傍での荷電分離効果や非マクスウェル速度分布の厳密な取り扱いが可能である。

EMSES は、連続的な位置座標を持つ多数のプラズママクロ粒子の挙動と、離散的に定義された格子点上の電磁界発展を、Particle-In-Cell (PIC) 法に基づいて相互に解き進めることにより、電子デバイ長スケールのマイクロプラズマ現象を再現する。各々のプラズマ粒子の速度位置更新と電磁場更新は、それぞれ Buneman-Boris 法および Finite-Difference-Time-Domain 法を用いて処理される。このとき、各粒子に作用する電磁気力を求めるために、粒子に隣接する格子点上における電磁界の値を粒子位置に内挿する。また、各粒子の持つ速度モーメントの値を、粒子位置と隣接格子点間の距離によって計算される重みに基づいて、格子点上に配分することで電流密度値が計算される。

EMSES では、計算空間内部に固体表面境界を導入することで固体天体や導電性の人工衛星の存在を模擬する。固体表面では、プラズマ粒子、静電ポテンシャル、変動電磁界のそれぞれに対して、適切な境界処理を適用する。具体的には、表面に到達したプラズマ粒子はその表面に捕捉され、粒子が有していた電荷は衛星表面に蓄積される。次に静電ポテンシャルについては、導電性衛星の表面において等電位条件を課すため、衛星表面の電荷を等電位が実現されるような分布に再配置する。これは Capacitance Matrix 法によって実装されている。

4. 研究成果

4-1. 地球極域電離圏プラズマ-人工衛星相互作用の 3 次元プラズマシミュレーション

3 次元構造な構造を有する固体物体から磁力線に沿って準 1 次元的に伝搬するじょう乱の様相を明らかにするため、地球極域電離圏を飛翔する人工衛星の 3 次元シミュレーションを実施した。

図 1 にシミュレーション結果得られた人工衛星周辺のプラズマ構造の概要を示す。本計算モデルにおいては、衛星前面からほぼ沿磁力線方向に伸展する電子の粗密構造が確認された。この非常に細く、指向性の高い密度じょう乱は、最前方に電子密度の増加が認められ、その後方には低密度領域が続く構造となっている。当該密度構造の進展方向は、わずかに磁力線方向から傾いている。これは次のように説明される。衛星位置で形成された密度変動が磁力線に沿って遠方に伝搬するとともに、媒質としてのプラズマ自体が後方に移流する。したがって、衛星静止系における密度分布としては、磁力線からプラズマの移流方向にわずかに傾いた構造を形成する。このことは、磁力線と密度じょう乱伸展方向の間の角度から、密度変動の伝搬速度を算出できることを示している。実際に、伝搬速度を計算した結果、波長が数 m のラングミュア波の群速度と良い一致を示すことが判明した。このような波の伝搬と媒質の移流の複合構造は、アルフヴェン波やホイッスラーモード波などの他の波動モードに関連して観測されるアルフヴェン翼やホイ

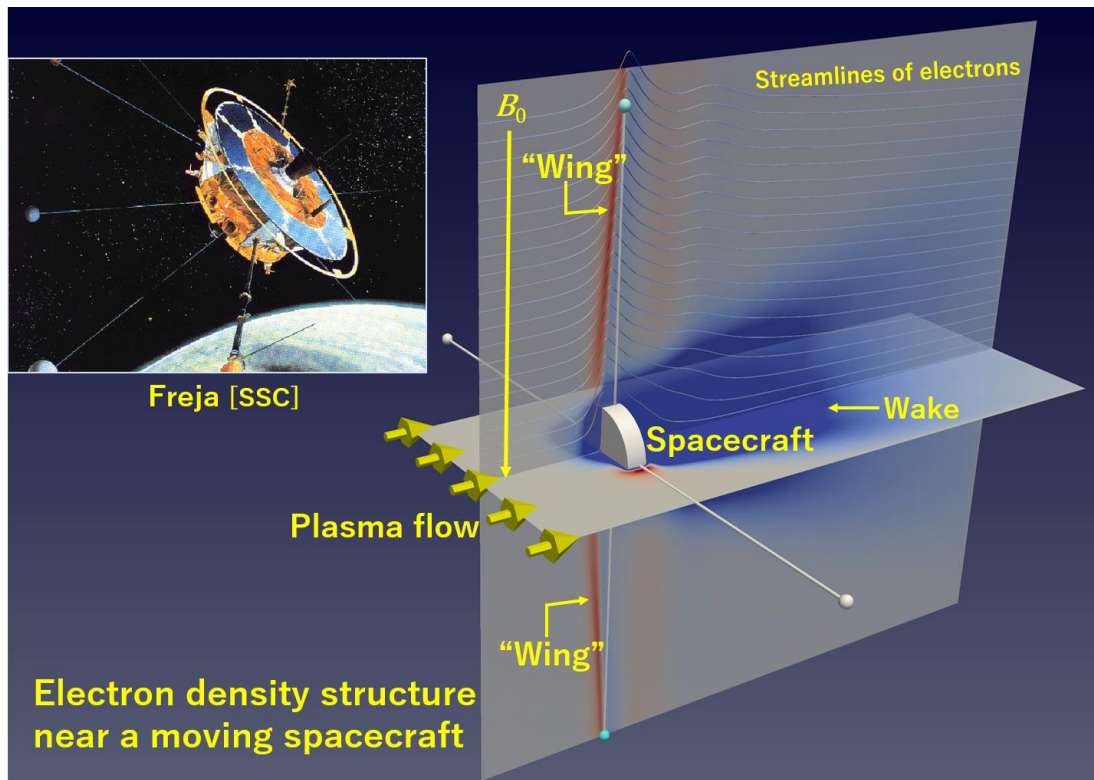


図 1. 衛星周辺の電子密度構造. 今回の計算では衛星下流側のウェイクの他に、沿磁力線方向に「電子翼」構造が認められた.

ッスラー翼などにも見られ、その類似性から本計算で得られた密度構造を「電子翼」もしくは「ラングミュア翼」と名付けることとした。電子翼構造の伝搬可能距離はラングミュア波の減衰率から見積もることが可能である。極域電離圏の物理パラメータに基づきこれを計算したところ、衛星から数 10 m、もしくは数 100 デバイ長に相当する距離を伝播可能であることが導かれた。

極域電離圏における人工衛星環境の 3 次元プラズマシミュレーションで確認された電子翼構造は、これまでその存在がはっきりと認識されていなかったが、科学衛星による「その場」観測機器への干渉を定量的に把握する上で重要な結果である。この成果は地球物理学分野の週刊誌において、Research Spotlight として取り上げられた (<https://eos.org/research-spotlights/electron-wings-can-interfere-with-spacecraft-measurements>)。現在は電子翼上に二次的に励起する波動現象について解析を進めている。前半で述べた課題と合わせ、宇宙空間における固体-プラズマ境界層物理の進展が期待できる。

4-2. 惑星電離圏環境における固体プラズマ相互作用現象の計算機実験解析

前項の電子翼を含む静電的なじょう乱の長距離波及効果が地球電離圏に限らず、より一般的な宇宙プラズマ環境に共通にみられる現象であることを実証するため、プラズマ条件が異なる惑星電離圏中の人工衛星プラズマ相互作用の計算機実験解析を実施した。カッシーニ探査機はグランドフィナーレと呼ばれる最後のミッションにおいて土星電離圏に関する多くの知見を獲得した。高度 3000km 以下でのラングミュアプローブ測定では電子密度の極端な低下や、地球電

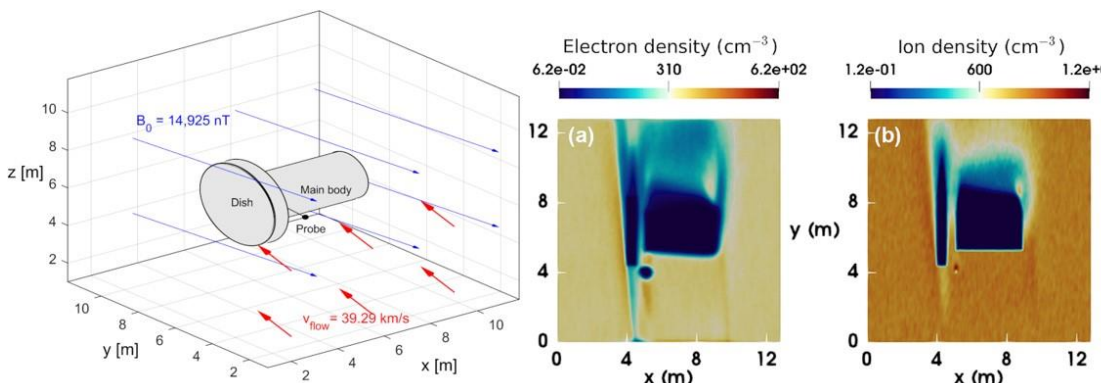


図 2. カッシーニ探査機を対象としたプラズマ粒子シミュレーションのモデル図 (左図)、および探査機周辺の電子・イオン密度分布のシミュレーション結果 (右図).

離圏とは大きく探査機電位の振る舞いを確認した。また当プラズマ環境では電子は強く磁化されており、電子回旋半径が人工衛星サイズを下回る長距離固体プラズマ相互作用の条件が満たされている。観測されたプラズマ環境条件を入力として、探査機と電離圏プラズマの相互作用シミュレーション解析を実施した。得られた主な成果は下記の通りである。

- ①土星の電離圏に突入したカッシーニ探査機は、光電子放出など有意な電子放出プロセスが存在しない場合においても、正に帯電することが分かった。この結果は土星電離圏プラズマを構成する負性粒子種が電子ではなく、負の重イオンであることを想定することで説明が可能である。強力な磁場と探査機に対する相対的なプラズマ流により、探査機静止系からは対流電場（電位勾配）が観測される。これに伴い、上述の正帯電に関わらず、探査機の一部は周囲のプラズマ
- ②に対して負の電位を持つことが確認された。これはラングミュアプローブによって測定された探査機電位が $\pm 1V$ の範囲で揺動していたことも整合的である。
- ③探査機に搭載された高利得アンテナ部からプラズマ流の上流に向かって、高指向性の電子低密度領域が形成されることを確認した。これは電子の回旋半径が探査機サイズより小さいという条件より、前年度の被継続課題に報告した地球極域電離圏衛星を対象とするプラズマ環境数値解析で確認された「電子翼」と同質のものであると解釈される（図2）。
- ④探査機の下流側には渦状の電子密度構造が確認された。希薄粒子流れであるプラズマ中がこのような渦構造を持つためには、数 m の空間スケールで有効に作用する実効的な粘性が必要であるが、この起源については今後の解析が待たれる。

本取り組みにおいては、負性イオンの卓越など地球電離圏とは大きく異なるプラズマ条件にもかかわらず、電子翼の形成など電子の磁化スケールと物体サイズの比によって規定される相互作用現象が共通して生じうることが確認された。これは長距離波及効果を持つ固体プラズマ相互作用現象の普遍性を示す結果であるといえる。

4-3. 固体天体表層から高層領域をつなぐ長距離1次元プラズマシミュレーション

月や小惑星などの非磁化固体天体上空の太陽風中における非熱的プラズマ生成とプラズマ波動現象を明らかにするために、天体表面に突き刺さる惑星間空間磁場に沿った長距離の1次元プラズマ粒子シミュレーションを実施した。粒子モデルに基づくプラズマ粒子シミュレーションでは計算の安定性のため、空間格子点幅はデバ依長以下であることが求められる。本研究がターゲットとした昼側の固体天体表層のおおむね高度10 mまでの領域は、光電効果により供給される濃い光電子によりデバ依長が1 m以下と小さく、これに合わせた空間解像度設定は長距離シミュレーションの実現上、大きな障害となる。そこで、天体表面からおおむね1 kmまでを空間解像度1 mで解く表層計算と、10 m~100 kmまでを対象とする空間解像度10 mの高層計算に分けて計算を実施した。このとき、表層計算から得られる天体表面帯電と静電ポテンシャル構造を、太陽風プラズマ電子やイオン、および光電子の反射・透過率に対応付け、高層計算に取り込むことにより、固体天体と太陽風プラズマ間の静電的相互作用の上空への波及効果を定量的に見積もることが可能になる。上述の計算モデルの工夫により、固体表面を起源とするプラズマ電磁波動の励起、およびその長距離波及効果を示唆するシミュレーション結果を初めて得ることに成功した。

図3に当課題実施によって得られた代表的な高層領域シミュレーション結果を示す。図3aはシミュレーション初期段階における太陽風電子の速度分布を、位相空間（空間座標-磁場平行方

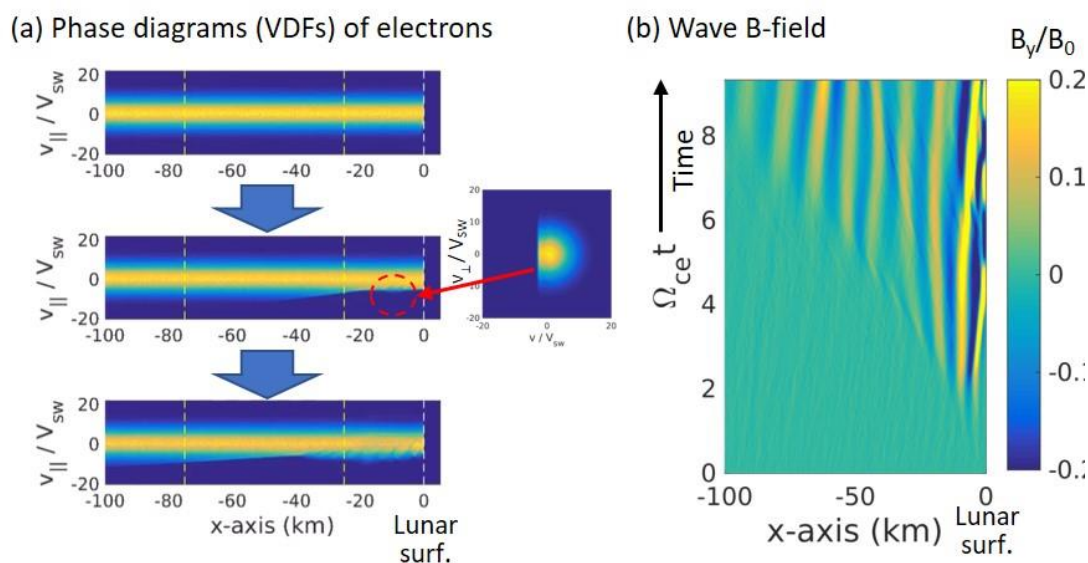


図3. 固体天体上空における(a)太陽風電子速度分布、および(b)波動磁界の時間発展.

向運動量) および速度空間 (磁場平行-垂直方向運動量) で表示したものである。昼側の固体天体表面は光電子放出による負電荷の流出により、太陽風空間に比べておおよそ 5~6 V の正電位となっている。実際には月面から高度 7~8 m の位置に電位の極小値 (-1~2 V) が存在するものの、宇宙空間から飛来する太陽風電子 (温度 10 eV) のうち、無視できない割合が天体表面に衝突することにより失われることがわかる。これは位相空間上では、 v_{\parallel} が負の逆流成分が欠損する形で現れる。このとき、速度空間の図からもわかるように v_{\perp} の方向には欠損は生じない。このような磁場に平行方向のみの電子速度分布の欠損は、実効的な電子温度異方性に対応すると考えられ、特定条件下ではプラズマ波動を励起しうる。このような不安定な速度分布関数は、おおむね電子の熱速度に対応する km/s で上空に伝播する。次に図 3b は、惑星間空間磁場に対して垂直方向の磁場、すなわちプラズマ波動磁界の電子サイクロトロン 9 周期分に対応する時間発展を示す。先述した不安定な電子速度分布の拡がりに合わせて、電磁波動が励起することを確認した。この波動は磁力線に対して右回りの円偏波を有しており、図 3a で確認された実効的な温度異方性と合わせて考えると、ホイッスラーモード波動に対応すると考えられる[9]。このような波動は、地球の双極子磁場や太陽コロナ中の磁力線構造に伴って生じることが幅広く認知されているが、本研究ではこうした現象が固体天体とプラズマの相互作用によっても生じうるという強い手がかりを与えるものである。

過去に月探査衛星などで確認されているプラズマ波動現象の端緒が、実際に固体表層 (表面から高々数 10 m) での電子欠損にある、とのかかなり確かな手がかりを得た。本報告では詳しく述べないが、励起した波動のポインティングフラックスの方向など、衛星観測と整合的な点もいくつか確認されている。上述の計算機シミュレーションは惑星間空間磁場と天体表面が垂直の条件に対応するが、実際にはこの両者の成す角度によって、電子の速度分布欠損より反射が卓越する場合など様々なバリエーションが想定される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Z. Zhang, R.T. Desai, Y. Miyake, H. Usui, O. Shebanits	4. 巻 504
2. 論文標題 Particle-In-Cell Simulations of the Cassini Spacecraft's Interaction with Saturn's Ionosphere during the Grand Finale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 964-973
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stab750	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyake Y., Miloch W. J., Kjus S. H., Pecseli H. L.	4. 巻 125
2. 論文標題 Electron Wing Like Structures Formed at a Negatively Charged Spacecraft Moving in a Magnetized Plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 e2019JA027379
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JA027379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Darian D., Miloch W. J., Mortensen M., Miyake Y., Usui H.	4. 巻 26
2. 論文標題 Numerical Simulations of a Dust Grain in a Flowing Magnetized Plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 043701 ~ 043701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5089631	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyake Y., Funaki Y., Nishino M. N., and Usui H.	4. 巻 1925
2. 論文標題 Particle simulations of electric and dust environment near the lunar vertical hole	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings: 8th Intl. Conf. Phys. Dusty Plasmas	6. 最初と最後の頁 20001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5020389	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 三宅洋平
2. 発表標題 イオン電流が駆動する表面帯電現象の物理機構について
3. 学会等名 宇宙環境シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miyake, Y., W. J. Miloch, and H. L. Pecseli
2. 発表標題 Simulations of Electrostatic Structure near Spacecraft in a Weakly-Magnetized Plasma
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miyake, Y., M. N. Nishino, Y. Harada, W. J. Miloch, and H. Usui
2. 発表標題 Recent Activities of Solid Body-Plasma Interaction Simulations
3. 学会等名 Symposium on Planetary Sciences
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Miyake
2. 発表標題 Numerical Simulations of Dust Plasma Environment near Lunar Surface
3. 学会等名 13th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-13): (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅洋平
2. 発表標題 粒子モデルプラズマ運動論シミュレーションの高効率計算技法
3. 学会等名 第二回ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅洋平, 西野真木
2. 発表標題 月面近傍プラズマ・ダスト環境の粒子モデルシミュレーション
3. 学会等名 第144回SGEPSS総会および講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅洋平, 西野真木
2. 発表標題 月縦孔・地下空洞探査に向けた月表層電磁気・ダスト環境の数値シミュレーション解析
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅洋平
2. 発表標題 Effects of Electrostatic Environment on Charged Particle Transport near Lunar Holes
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三宅洋平
2. 発表標題 Effect of Surface Topography on the Lunar Dust Environment: 3D Particle Simulations
3. 学会等名 8th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三宅洋平
2. 発表標題 UZUME計画：月縦孔・地下空洞周辺のプラズマ・ダスト輸送に対する静電気環境の影響
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三宅洋平
2. 発表標題 宇宙におけるプラズマ-固体境界層の理工学研究
3. 学会等名 宇宙地球惑星科学若手会夏の学校2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	臼井 英之 (Usui Hideyuki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	西野 真木 (Nishino Masaki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	Imperial College London			
ノルウェー	オスロ大学・数学自然科学部			
アメリカ合衆国	University of Colorado at Boulder	University of Southern California		