

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340148

研究課題名(和文) 3次元全粒子シミュレーションによる月面磁気異常と太陽風の運動論的相互作用の研究

研究課題名(英文) Study on kinetic interactions between the solar wind and the lunar magnetic anomaly via three-dimensional full particle simulations

研究代表者

臼井 英之 (USUI, HIDEYUKI)

神戸大学・システム情報学研究科・教授

研究者番号：10243081

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：月面磁気異常上空に形成される小型磁気圏の境界層電流を担う電子ダイナミクスを3次元電磁粒子シミュレーションによって明らかにした。まず、境界層の北側、南側の両方の領域において、赤道域から高緯度に向かうturn-aroundな特徴的な電子フラックス構造を明らかにした。また、境界層赤道面での電子フラックスは境界層最内側で最も強く、電子の磁場に対する旋回運動の空間依存性によるためであることを突き止めた。この境界層電流の幅はその場所での電子の旋回運動半径にほぼ等しいことも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We studied the electron dynamics in the boundary current layer in the small-scale magnetosphere formed above the lunar magnetic anomaly by performing the three-dimensional electromagnetic particle simulations. We found a turn-around structure of the electron flux in the both hemispheres in the boundary current region. We also clarified that the maximum electron velocity observed in the most inner region of the magnetosphere is due to the electron cyclotron motion itself, not the drift motion of the electrons. We also confirmed that the width of the boundary current layer is approximately equal to the radius of the local electron cyclotron motion.

研究分野：宇宙理工学

キーワード：月面磁気異常 全粒子シミュレーション 小型磁気圏 境界層電流 太陽風 電子ダイナミクス

### 1. 研究開始当初の背景

グローバルな固有磁場を持たない月にはその表面に磁気異常がローカルに分布している。太陽風と月面磁気異常の相互作用に関する研究はこれまでもいくつかあり米国のルナープロスペクターによる電子加熱の発見は磁気異常による小型磁気圏の存在を示唆している。2000 年前後には月面小型磁気圏形成に関する数値シミュレーション研究が行われた。MHD シミュレーション例では小型磁気圏形成が見られるが、太陽風の運動論的效果を考慮した場合、果たして小型磁気圏が明確に形成されるかどうかははまだ謎である。

2007 年秋に月探査衛星「かぐや」が打ち上げられ、プラズマ観測装置 MAP-PACE によって高度 100km 以下における太陽風イオンと電子の同時観測が行われた。データ解析の結果、磁気異常に関連した太陽風イオンの反射や電子加熱に関する観測的事実が次々と示された。特に 10km 高度では、太陽風イオンと磁気異常の相互作用は非常に顕著であり、入射太陽風は減速され、反射イオン加熱や、電子の加熱も同時に観測される。このように、かぐやデータ解析により、月面磁気異常周辺には 100km スケールにわたって MHD 的観点では説明できないプラズマ領域が存在することが明らかになった。

磁気異常に相当する小規模ダイポール磁場の規模は、イオン慣性長スケール以下の数キロ～数十キロオーダーであるため、小型磁場構造を通過するイオンはほとんど非磁化とみなされ磁場との相互作用はほとんどないと予想される。しかし、準備的なシミュレーション結果では、有限ラーマ半径効果が効く電子流の存在により、小規模磁場構造の場合でも、電子を介してイオンダイナミクスへの影響が現れる可能性が示唆された。本研究では太陽風の月面磁気異常に対する応答について電子の運動論的效果を考慮して明らかにする。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、月面磁気異常上空に形成された小型磁気圏境界層領域の電子ダイナミクスに着目し、それを運動論的観点から 3 次元プラズマ粒子シミュレーションにより解明することである。本研究では、月面下に中心を持つ 1 つの磁気ダイポールを Reiner Gamma 磁気異常としてシミュレーション領域内に設定し、ダイポール中心から磁気圧と太陽風動圧が釣り合う点までの距離を磁気異常の代表長  $L$  とする。磁気異常では  $L$  が太陽風電子のジャイロ半径よりも十分大きく、イオンのジャイロ半径より小さい。このような状況において、磁気異常上空において小型磁気圏が形成されることはこれまでの研究において明らかにされており、磁気圏境界層において、太陽風電子とイオンの磁場に対する応答差に起因する静電界が形成され

ることも知られている。磁気圏境界層では、電子フラックスによる強い電流が観測されているが、この電子フラックスの原因を電子運動論レベルで解明することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

本研究では、電子、イオンとも粒子として扱う 3 次元プラズマ全粒子シミュレーションを用いて、月面磁気異常と太陽風プラズマの相互作用現象を再現し、小型磁気圏形成および関連したプラズマ素過程、粒子加熱加速、電場形成の基礎解析を行う。図 1 にシミュレーションモデルを示す。磁気異常に相当する磁気ダイポールの中心を月面下  $0.2L$  の位置に置き、 $x$  方向に太陽風に相当するプラズマ流を流す。プラズマ流は月面で吸収される。なお、プラズマ流のイオンジャイロ半径を  $r_{Li}$  とすると本モデルでは  $r_{Li}/L=4$  を採用する。すなわち、上のシミュレーションモデルでは、電子は磁化されているが、イオンはほぼ非磁化とみなされる。

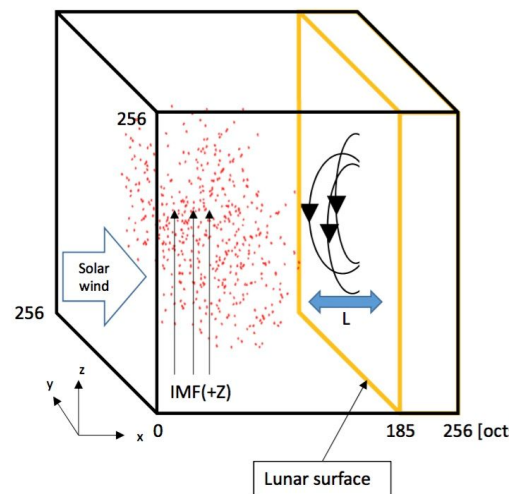


図 1: 3 次元シミュレーションモデル

### 4. 研究成果

#### 4.1 ミニ磁気圏の形成

図 2 に、太陽を含む子午面におけるイオン密度コンター図と前面におけるイオン流の反射及び電子加熱の様子を示す。コンター図からもわかるように、非磁化とみなされるイオンの空間分布から明らかに磁気圏が形成されていることがわかる。磁気異常上空では、電子流がダイポール磁場に捕捉される一方でイオン流はより月面側に流れ込むことによって空間的に電荷分離が生じ、このために局所的に太陽側に向かう電界が誘起される。この分極電界によってイオン流が減速され、一部プラズマ流とは逆の方向に反射される。図の左上の粒子位相空間図にはこのイオンの反射の様子が示されている。一方、電子はイオン反射領域で  $x$  方向に加熱されており、

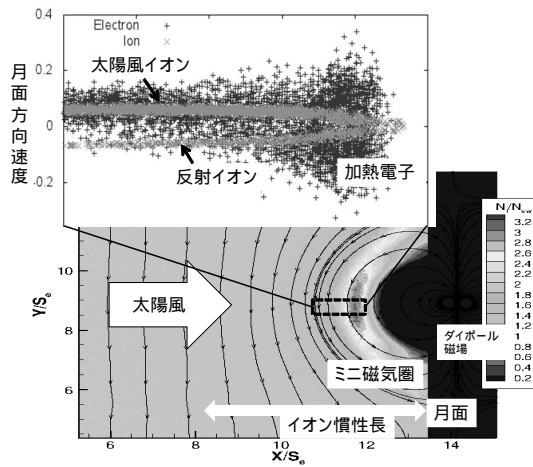


図 2: 「ミニ磁気圏」イオン密度とイオン反射, 電子加熱

何らかの静電的なプラズマ不安定性が生じているのではないかとと思われる。

図 3 に赤道面でのプラズマ密度コンター図を示す。特徴的な点は、イオン、電子とも夕方に比べて朝方に密度が高いことである。こ

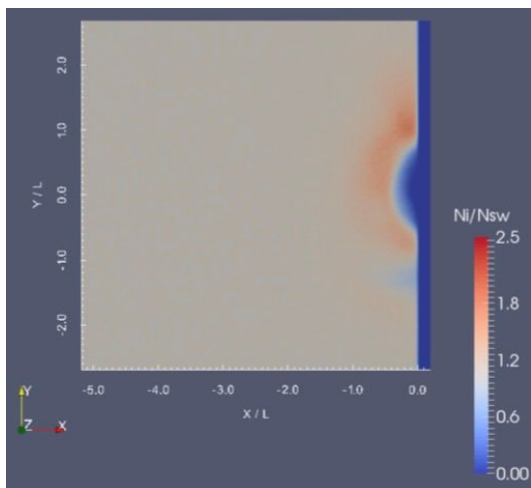
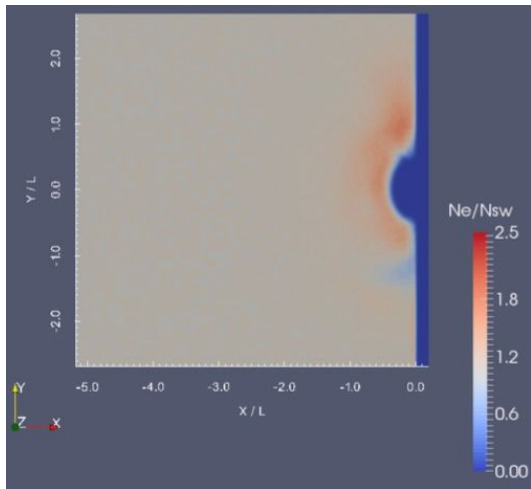


図 3: 赤道面での電子(上)、イオン(下)の数密度分布

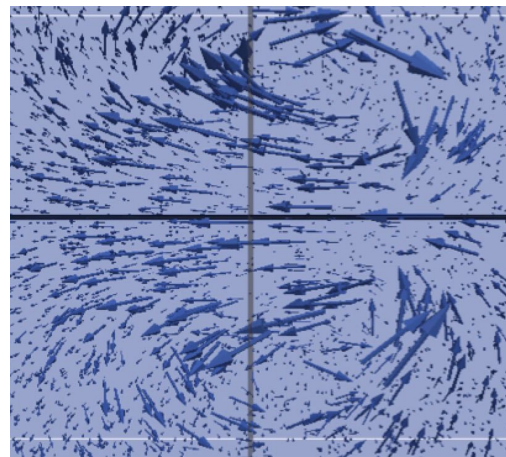
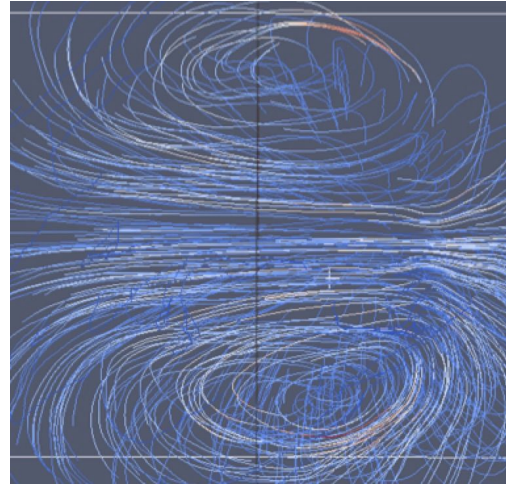


図 4: 月面から上空を見た電流フラックス構造。上は流線、下はベクトル。

の朝夕非対称性はこれまでのシミュレーション研究でも示されており、境界層でのプラズマダイナミクスと密接に関連している。イオンがほぼ非磁化であることを考えると、境界層電流は電子流が主であり、電子ダイナミクスが重要となる。

図 4 に、月面から見上げた磁気異常領域での電流フラックス構造を流線とベクトルで示す。中央の横線が赤道面に相当する。赤道面を含む境界層低緯度領域においては朝側から夕方側に向かう(図では右から左)フラックスが顕著であるが、中高緯度領域(図の上側と下側)においては逆に朝側に戻るフラックスが見える。すなわち、今回のシミュレーション結果の一つの特徴的な結果として、北側、南側の両方において赤道から高緯度に向かう turn-around な電子フラックス構造が挙げられる。

次に、特に赤道域での電子流に特に着目し、そのメカニズムを運動論レベルで調べた。図 3 にも示されているが、磁気圏前面の境界層領域では、電子よりイオンがより内側に入っている。これはイオンの慣性が電子に比べて大きいため、より多くのイオンが内部磁気

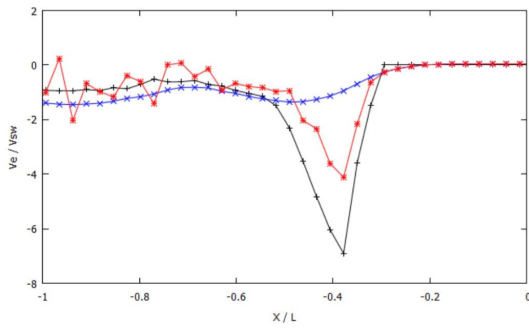


図 5: 磁気異常上空、太陽方向の線上での電子速度 (朝方、夕方方向成分) の空間変化

圏に進入できるためである。この結果、境界層領域では、電荷分離が生じ太陽方向に向かう電界が発生する。この電界と磁気異常ダイポール磁場により電子は朝方から夕方に向かう方向 ( $y$  方向) に  $E \times B$  ドリフト速度を持つと考えられる。

図 5 に、磁気異常上空、太陽方向の線上での電子の  $y$  方向速度成分 (朝方、夕方方向の成分) の空間変化に関するプロットを示す。青線はシミュレーションで得られた電場  $E_x$  とダイポール磁場  $B_z$  を用いて計算された  $E \times B$  速度、赤線は電子の流体方程式から得られた理論値、黒線はシミュレーション内の粒子データから得られた速度値を示す。図に示されるように、 $x/L$  が  $-1.0$  から  $-0.5$  付近までは電子の  $y$  方向速度は  $E \times B$  値とほぼ一致するが、 $x/L$  が  $-0.5$  から  $-0.4$  の境界層内側に相当する範囲では、それぞれの値が大きくなる。この原因を探るために、その領域での電子の個々の速度を位相空間でプロットして電子ダイナミクスの観点から調べた。

図 6 に磁気異常上空の各高度での電子ダイナミクスを位相図としてプロットした。左上の図は、縦軸が  $y$  方向速度成分で横軸は月面との距離である。他の 4 つのパネルは、磁場に垂直な 2 つの速度空間 ( $x$  方向と  $y$  方向) において電子をプロットしたものである。左下の図は乱されていない太陽風電子を速度

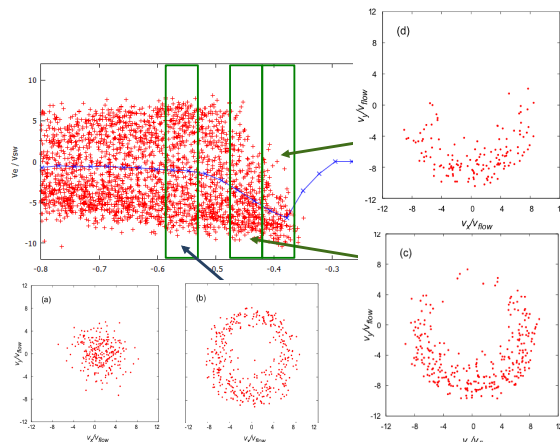


図 6: 境界層領域での電子の位相図

空間上に示したものであるが、ほぼマックスウェル分布をしている。一方、パネル(b)-(d)に示したように境界層領域では、電子分布は速度空間上でリング状の広がりを見せている。これは、境界層に存在する太陽方向の電界によって急に  $x$  方向に加速を受けたためであり、その結果、磁場周りの回旋速度が増加しそれによってラーマ半径が大きくなる。パネル(b),(c)ではこの様子が見られる。パネル(d)に示されるように、境界層の最内側ではジャイロ運動によって電子はマイナス  $y$  方向側 (夕方側) に最大速度を持つものしか見えない。この電子のジャイロ運動の空間依存性により正味の電子流は境界層の最内側で最も強くなる。図 5 にも示したように、この結果は電子の有限ラーマ半径を考慮しない流体モデルでは再現、説明できないことであり、小型磁気圏境界層における電子の運動論的效果の重要性を示す顕著な例である。また、この境界層電流の幅は、その場所での電子の回旋運動半径にほぼ相当することも明らかとなった。このように、境界層電流の本質を電子ダイナミクスの観点から解き明かせることは、本研究で得られた知見の中でも最も重要なものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Y. Ashida, H. Usui, I. Shinohara, M. Nakamura, I. Funaki, Y. Miyake and H. Yamakawa, Full Kinetic Simulations of Plasma Flow Interactions with Meso- and Micro-scale Magnetic Dipoles, Physics of Plasmas (査読あり), 21, 122903 2014. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904303>.

〔学会発表〕(計 12 件)

1. 臼井 英之、松原琢磨、三宅 洋平、磁気異常上空の小型磁気圏境界における電子ダイナミクスに関する粒子シミュレーション解析, [PPS 1 3] 月の科学と探査, 日本地球惑星科学連合大会 JpGU2016, 2016 年 5 月 22 日、幕張メッセ (千葉県)
2. 松原琢磨、臼井英之、沼波政倫、松本正晴、西野真木、三宅洋平、月面磁気異常上空の太陽風電子ダイナミクスの 3 次元シミュレーション解析, 地球電磁気地球惑星圏学会(SGEPSS)秋大会、東京大学 (東京都) 2015 年 10 月 30 日
3. 臼井 英之、梅澤 美佐子、三宅 洋平、Masaki N Nishino、芦田 康将、月面磁気異常上空における太陽風応答の 3 次元全粒子シミュレーション, [PPS23-18] 月の科学と探査, 日本地球惑星科学連合大会 JpGU2015, 2015 年 5 月 26 日、幕張メッセ (千葉県)

4. 臼井英之, 「太陽風・小型磁気圏相互作用のシミュレーション研究のレビュー」, 平成 26 年度 STE 研究集会「太陽圏シンポジウム」および「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」, 2015 年 3 月 5 日、名古屋大学 太陽地球環境研究所(愛知県)(招待)
5. 臼井英之、芦田康将、篠原育、中村雅夫、梅澤美佐子、三宅洋平、西野真木、小型ダイポール磁場のプラズマ流応答に関する 3 次元粒子シミュレーション、第 11 回宇宙環境シンポジウム、大阪府立大学 I-site なんば(大阪府)、2014 年 12 月 11 日。
6. H. Usui, Full kinetic simulations on plasma and field disturbance in the vicinity of spacecraft, the 24th International TOKI conference (ITC24), Nov. 4, 2014, Toki-City Gifu, Japan.(Invited)
7. H. Usui, Full Kinetic Simulation on Plasma Flow Response to a Meso-scale Magnetic Dipole, URSI General Assembly, Aug.18, Beijing, China, 2014. (Invited)
8. 臼井英之、芦田康将、篠原育、中村雅夫、山川宏、三宅洋平、小型ダイポール磁場とプラズマ流の相互作用に関する 3 次元粒子シミュレーション、PEM37-P08、日本地球惑星科学連合大会 JpGU、横浜パシフィコ(神奈川県)、2014 年 4 月 28 ~ 5 月 2 日
9. H.Usui, PIC Simulation on the Solar Wind Interactions a small-scale magnetic dipole, AOGS, ST14-22-D1-AM1-P1-003, Brisbane, Australia, June 25, 2013. (Invited)
10. 梅澤美佐子、臼井英之、松本正晴、西野真木、三宅洋平: 太陽風プラズマと月面局所磁場の相互作用に関する粒子シミュレーション、日本地球惑星科学連合 JpGU2013 年大会、幕張メッセ(千葉県)、2013 年 5 月 23 日
11. 臼井英之、梅澤美佐子、松本正晴、西野真木、三宅洋平: プラズマ粒子シミュレーションによる太陽風 - 小型ダイポール磁場相互作用の解析とその Reiner Gamma 磁場への応用、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、幕張メッセ(千葉県)、2013 年 5 月 23 日
12. H. Usui, Full Particle-In-Cell simulations on the solar wind interactions with a small-scale magnetic dipole, EGU 2013,

Austria, Vienna, April 08, 2013. (Invited)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

臼井英之 (USUI, Hideyuki)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授

研究者番号：10243081

### (3)連携研究者

西野真木 (NISHINO, Masaki)

名古屋大学・大学院工学研究科・研究員

研究者番号：50466794