

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05666

研究課題名（和文）太陽圏境界領域における多成分プラズマのエネルギー分配メカニズムの研究

研究課題名（英文）Mechanism of energy partitioning in multi-component plasmas around the heliospheric boundary region

研究代表者

坪内 健（Tsubouchi, Ken）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・客員研究員

研究者番号：60397601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：太陽圏の境界領域を構成するプラズマ成分には太陽風以外に星間空間由来のプラズマおよび中性粒子の電離から生成されるピックアップイオンが混在しており、境界不安定性による混合や衝撃波による加熱においてそれぞれに特有の振舞を取る。本研究では境界領域に生じる諸現象を数値シミュレーションで再現することで、これら粒子成分へのエネルギー配分過程がもたらすプラズマ構造の特徴を検証し、将来の観測ミッションで期待されるデータに太陽圏境界構造がどのように反映されるかという予測につなげた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽圏の境界では太陽風の運び出す磁場が星間プラズマの侵入を妨げている。地球を始めとする太陽系惑星はこの太陽圏に囲われていることで、銀河系内の高エネルギー宇宙線に曝されずに済んでいると言える。本研究は星間物質のエネルギーが太陽風との相互作用によって境界で散逸される過程の検証を通じてその観測的痕跡を予測するという点で、生命進化にも甚大な影響を及ぼす宇宙放射線環境の形成過程に関する理解を深め、今後太陽系外惑星に生命が存在する可能性を議論する際の一つの判断基準を提供することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The plasma components that constitute the boundary region of the heliosphere include not only solar wind but also interstellar plasma and pickup ions generated from the ionization of neutral particles. Each component exhibits specific behavior during mixing due to boundary instability and heating caused by shock waves. In this study, we replicated the typical phenomena occurring in the boundary region through numerical simulations to verify the characteristics of plasma structures resulting from the energy partitioning processes in these particle components. This research aims to connect these findings to predictions on how the heliospheric boundary structure will be reflected in the expected data from future observational missions.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：太陽圏 太陽風 ピックアップイオン ヘリオポーズ 終端衝撃波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽風プラズマが膨張した状態で形成される空間、太陽圏においては、太陽から 100 天文単位程度の位置で太陽風プラズマ・星間プラズマ間の圧力平衡が成立する境界領域が形成されると予想されてきた。近年 Voyager 探査機が直接通過したことでその存在が立証された一方、その場のプラズマ・磁場を直接観測する Voyager からは終端衝撃波 (TS) で加速される異常宇宙線 (ACR) について、IBEX 衛星の観測する高速中性粒子 (ENA) からは太陽圏界面 (HP) の構造について、それぞれ従来の理論予測と異なる現象が確認され、太陽圏境界の研究は新たなフェーズに入った。

IBEX の捉える ENA は、主に太陽圏境界において星間空間由来の中性粒子と太陽風プラズマとの間の電荷交換によって中性化した粒子で、太陽風磁場に捕捉されることなく直進する。そのため一部の粒子は地球近傍の観測衛星に直接到来することで、その到来方向とエネルギー分布のデータから太陽圏境界のプラズマ構造を推定できる。IBEX 観測以前、ENA は境界全域に等方的に分布していると予測されていたのに対し、局所的にリボン状に密集した構造 (IBEX リボン) が発見されたことを受け、その形成メカニズムを説明する理論モデルが次々と打ち出されている。現在では HP 近傍で発生していることがほぼ確実視されており、HP で発生する物理現象の痕跡を知るプローブとして利用することが期待できる。

これらの観測成果において、先行理論との矛盾を引き起こす中心的な役割を果たしているのがピックアップイオン (PUI) の振舞である。PUI は上述の電荷交換過程において、ENA とは逆に帯電した星間粒子で、実効的な熱エネルギーが太陽風プラズマに比べて 3 桁ほど高くなる。そのため太陽圏境界におけるエネルギー密度の大半を担っており、星間物質との圧力平衡の特性などを理解する上で PUI が担う物理過程の検証が本質的に重要となる。

2. 研究の目的

太陽圏境界は太陽風プラズマが主成分である惑星間空間とは異なり、星間プラズマとの接触・中性粒子との電荷交換による PUI や ENA の生成・ACR 成分の加速による高エネルギー粒子生成、といった多様な系が混在している。プラズマ境界構造に生じる典型的な現象として、主に動径方向の圧縮構造 (磁気リコネクション) と接触面沿いのシア構造 (ケルビン=ヘルムホルツ不安定性) に着目し、この粒子組成の大きく異なる環境が及ぼす影響について粒子運動を直接解き進める数値シミュレーションで検証することで、太陽圏境界特有の現象の発現を確認する。

特に各粒子成分の比率と構造スケールとの相関・構造形成に伴うエネルギー分配比率及びエネルギー毎の密度空間分布の変動に関する定量化を図り、IBEX リボン構造の形成パターンと PUI ダイナミクスとの関連性を明らかにする。更に太陽圏内部から伝わる種々の擾乱 (惑星間空間衝撃波、乱流など) と上記現象との相互作用過程を再現することで、リボン構造に非定常性をもたらす要因を究明する。

PUI は太陽圏境界における高エネルギー成分である ACR や IBEX リボン構造を構成する ENA の粒子源であることから、宇宙線加速を担う物理過程の検証実験という点においても本研究の意義は大きい。またリボン構造の形成・変動過程そのものが太陽圏との接触を通じて星間空間の環境を伝える「窓」であり、太陽圏境界の研究は恒星の物質圏と星間空間の接触領域の環境を知ることにつながる。今後系外惑星の宇宙線環境などを調べる上でも、本研究によって得られる恒星圏境界の知見が活用されることが期待できる。

3. 研究の方法

太陽圏境界の典型的なプラズマ成分として低エネルギー太陽風・実効熱エネルギーの高い PUI・星間プラズマ・中性粒子・高エネルギー宇宙線が混在する環境を設定し、境界層で発生するプラズマ構造の成長過程及びこれに伴う各粒子成分のエネルギー・空間分布の変動を数値シミュレーションで再現する。特に PUI の運動を精密に追跡するために、イオンのジャイロ半径・周期を十分に細分化できる粒子ハイブリッド法 (電子を断熱流体として近似し、イオンの粒子運動を解き進める手法) を主に使用する。

境界層で発生する物理現象として磁気リコネクションやケルビン=ヘルムホルツ不安定性の状況について太陽圏境界の観測データに基づく環境を設定し、PUI を始めとする粒子の組成比率を固

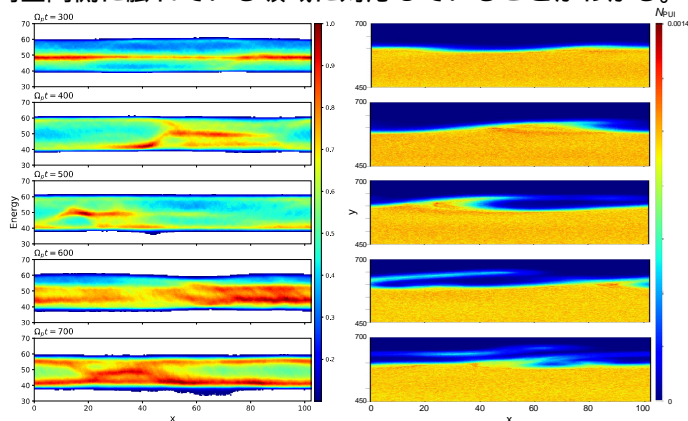
定した計算を行う。観測事例との比較検討を進めるために、リボン構造の形成から変動に至る過程における高エネルギーPUIの寄与を定量的に見積もる。計算には京都大学及び名古屋大学のスーパーコンピュータを利用する。

4. 研究成果

(1) 太陽風プラズマと星間プラズマが接するHPでは、両者の間に密度・HPに沿う速度成分・圧力などに法線方向の空間勾配があるため、ケルビン=ヘルムホルツ不安定性(KHI)が成長する。太陽圏側にPUIを配置した2次元シミュレーションを実行した結果、KHI自体はPUIを含まない場合と同様、最初の線形段階における小スケールの渦形成に始まって、渦同士の合体・崩壊からの非線形段階の乱流生成に至る過程を確認した。KHIが非線形段階に達した後にシステムが発展する様子を下図に示す。図は上から下に向かって時間の経過を表す。いずれも横軸はHPに沿う方向の空間座標で、下図右は縦軸をHP法線方向の座標としたPUI密度の2次元空間マップ(上方が星間空間)を、下図左はHP法線方向に積分したPUIのエネルギー別コラム密度をそれぞれ表す。下図左より、KHIの成長に伴ってPUIのエネルギーが局所的に密集するとともに空間拡散しながらHP沿いに移動していく過程が確認できる。下図右のPUI密度マップと比較すると、この局所的な密度増大構造はKH渦が星間空間側に膨れている領域に対応していることがわかる。

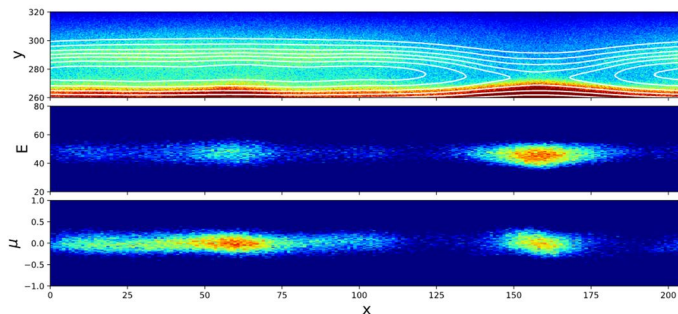
KH渦の成長によって星間空間内のPUIが太陽圏内に引き込まれていく過程が、この局所的なコラム密度の増加によって表されている。

IBEXで発見されたENAリボン構造はHP近傍のプラズマ(特にENA源であるPUI)環境を反映していると考えられている。リボン構造に局所的な増大及びその移動が見られた場合、それがHP沿いにKH渦が成長している様子を捉えたものだとして解釈できることを、この計算結果は示唆していると言える。



(2) 太陽風磁場と星間磁場が反転して接している場合、HP上で磁気リコネクションの発生が考えられる。この状況を想定して、HP上の磁気リコネクションの成長がHP近傍に分布するPUIのコラム密度構造に反映される過程及びこれを観測として検出したときに予想される特性について検証した。計算結果を下図に示す。いずれも横軸はHP沿いの空間座標で、縦軸は上からHP法線方向の空間座標(白線は磁力線、色マップはPUI密度)、HP法線方向に積分したPUIのエネルギー別コラム密度、PUIのピッチ角に対するコサイン値の分布をそれぞれ表す。図より、強度の高いPUIコラム密度領域が磁力線再結合領域に集中して現れていることがわかる。再結合領域ではリコネクションに伴って磁力線が磁場垂直方向に動くためにピッチ角コサイン値が初期状態のゼロ近傍でそのまま保持されているのに対し、その外側では磁力線の曲率半径より大きなジャイロ半径を持つPUI速度に磁場平行成分が現れることで拡散している状態が確認できる。PUIがENAとなるまでの典型的な時間スケール(年単位)の間は速度分布がピッチ角散乱を起こさずリング形状を保つことが、

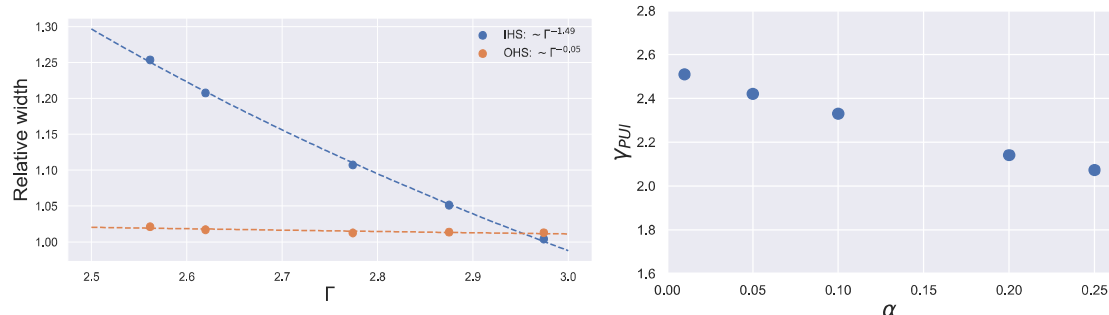
IBEXリボン構造を形成するために必要な条件と考えられているが、計算結果は磁力線の再結合領域がその条件を満たすと同時に、PUIコラム密度にも顕著な増加が確認された。これよりIBEXリボンとして観測されたENAの空間構造に切断が見られる場合、その領域に磁気リコネクションが発生していると解釈できる可能性を本研究で示すことができた。



(3) TSとHPに囲まれたヘリオシース(HS)はTSで加熱された太陽風プラズマ、PUIで構成される太陽圏最遠の領域であり、星間物質との相互作用の影響を直接受けている。これまでの観測から、HSではPUIがエネルギー密度の大半を担っていることが判明している。ここではPUIを含む太陽風プラズマと星間プラズマを衝突させる1次元衝撃波管モデルを用いてTSとHP双方が自己無撞着に生成される計算を行い、PUIがTS通過時に受ける加速・加熱プロセスがPUI密度の違いに応じてHSのプラズマ環境に及ぼす影響について検証した。PUI密度が増加すると太陽風の磁気音波の位相速度が増すことからマッハ数は低下するため、TSでのプラズマ圧縮率も低

下する。その結果 HS の厚みが拡大することを下図左に示す。横軸が TS における圧縮率、縦軸が PUI を含まない場合に対する相対的な厚みを表す（青線が太陽圏側、赤線が星間空間側）。これは太陽風流量が一定の条件下で HS 内のプラズマ総量が保存される要請から説明付けられる特徴となる。また観測で確認される HS の厚みと電磁流体モデルから求めた理論値との比から逆に太陽風中の PUI 密度を推定できることもこの結果は示唆する。

TS での加熱特性に対してはプラズマの比熱比が及ぼす影響も大きい。下図右に、背景プラズマに対する PUI の相対密度と TS での加熱を断熱過程と仮定したときの PUI の比熱比との関係を示す。比熱比は PUI 密度が高くなるほど低下、つまりより等方的な分布を取ることがわかる。背景の太陽風は通常適用される $5/3$ より高い値を示し、太陽圏外縁部で観測的に示唆されている事実と整合する。衝撃波の圧縮率などは比熱比に強く依存することから、太陽圏構造を電磁流体モデルで構築する上でも、比熱比を正確に評価することが今後益々重要になる。



(4) 太陽圏境界では太陽風の運び出す磁場が星間プラズマの侵入を妨げていることから、地球を始めとする太陽系惑星は銀河系内の高エネルギー宇宙線に曝されずに済んでいる。生命進化に甚大な影響を及ぼす宇宙放射線環境の成立に関する理解を深めるには、星間物質のエネルギーが太陽圏境界で散逸される過程の検証を通じて観測データから立証することが必要である。現状ではプラズマ・電磁場のその場観測が Voyager に限られ、IBEX のような ENA リモート観測がこれからは主体となり、2025 年に打上げ予定の後継ミッションである IMAP によって更なる発展が期待される。遠隔で取得された観測事例に対して詳細な物理過程を解釈するには、数値シミュレーションによる事前の評価が求められる。本研究の成果からは、実際に HP 近傍に生じる大規模な変動現象として磁気リコネクションや KH 不安定性の発生に対応する PUI の分布の変化を調べることで、その特徴を派生する ENA 観測の解釈に適用するアイデアを提唱するに至った。本研究はまだ定性的な議論にとどまっているが、より実際の観測データに適合させるために PUI と ENA の生成過程も直接組み入れた計算モデルを開発して、構造変動の時間・空間スケールやエネルギー分布に関して定量的な精密化を図っていくことを今後展開していく計画である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 坪内 健	4. 巻 915
2. 論文標題 Variations in the pickup ion density structure in response to the growth of the Kelvin-Helmholtz instability along the heliopause	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac01d6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 坪内 健	4. 巻 122
2. 論文標題 Pickup ion acceleration in the successive appearance of corotating interaction regions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research, Space Physics	6. 最初と最後の頁 3935-3948
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/2016JA023817	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13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Properties of the heliosheath plasma associated with the compression at the termination shock
3. 学会等名 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Energy density composition in the inner heliosheath affected by pickup ions
3. 学会等名 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Relationship between the inner heliosheath thickness and the pickup ion density
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Structural variations in the pickup ion density associated with magnetic reconnection at the heliopause
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Contribution of pickup ions to the radial profile of the heliosheath
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Properties of the heliopause fluctuations embedded in the pickup ion density profiles
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Local concentration of pickup ions in the outer heliosheath: Relevance to the IBEX observation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Hybrid simulations on the evolution of the pickup ion density structure associated with the fluctuating heliopause
3. 学会等名 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 The Kelvin-Helmholtz instability along the heliopause and the consequent pickup ion dynamics
3. 学会等名 Asia-Oceania Geosciences Society 15th annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Response of the pickup ion in the outer heliosheath to the fluctuating heliopause
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Pickup ion dynamics in the velocity shear layer across the heliopause
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Evolution of pickup ion density structures in the outer heliosheath
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坪内 健
2. 発表標題 Pickup ion dynamics in the outer heliosheath associated with the growth of Kelvin-Helmholtz instability at the heliopause
3. 学会等名 American Geophysical Union 2017 Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------