

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400475

研究課題名(和文) 太陽圏外縁部に分布する高エネルギー粒子の生成機構の解明

研究課題名(英文) Generation processes of energetic particles distributed in the heliospheric outer boundary

研究代表者

坪内 健 (Tsubouchi, Ken)

東京工業大学・大学院理工学研究科(理学系)・流動研究員

研究者番号：60397601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽風プラズマで占められた領域「太陽圏」が銀河系内の星間物質と接触する外縁部に分布している数千～百万電子ボルト領域の高エネルギー粒子生成を担う物理プロセスを解明するため、特に星間空間の中性粒子を起源とするピックアップイオンと呼ばれる荷電粒子の物理特性に着目した数値シミュレーション研究を行った。衝撃波における太陽風プラズマと異なる加速過程・エネルギー分布の安定性・加速効率と電磁場構造パラメータとの関連性、といった内容を検証し、高エネルギー粒子源としてのピックアップイオンの優位性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to elucidate the physical process of generating high energy particles in the heliospheric boundary region by means of numerical simulations. Particular attention is paid to the dynamics of pickup ions, which originate in interstellar neutral particles and are ionized in the heliosphere. It is validated by investigation of their acceleration mechanism at collisionless shock waves, stability of the energy distribution, and the parametric dependence on the acceleration efficiency that pickup ions can be the dominant component of the suprathermal particles (keV to MeV range) in the heliosphere, which will be the source of further accelerated cosmic ray particles.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：宇宙科学 宇宙空間 宇宙線 超高層物理学 プラズマ・核融合 粒子加速 太陽圏

1. 研究開始当初の背景

(1) 打上げから 30 年近い月日を経た惑星探査機の雄、Voyager 1 号から 2004 年に突如もたらされた観測データによって、理論的な予想に過ぎなかった「太陽圏」の概念を一新する時代の幕が明けられた。太陽圏外縁部は主として星間物質との圧力がつり合う接触面と太陽風が急激に減速する終端衝撃波 (termination shock、以下 TS) といった構造によって星間空間から隔てられていて、TS で加速された太陽風プラズマと星間物質との荷電交換による高速中性粒子の生成や特異宇宙線成分 (anomalous cosmic rays、以下 ACR) の加速といった複雑なエネルギー交換過程が進行していると考えられてきた。

(2) TS を Voyager 1, 2 号がそれぞれ 2004、2007 年に通過した際に取得したデータからは、太陽圏構造の 3 次元非対称性・TS におけるプラズマ化熱効率の低下・TS 通過後も増加し続ける ACR 強度、といった従来の磁気圏観測などからの類推では説明困難な現象が数多く見つかってきている。また 2008 年に打ち上げられた IBEX 衛星の観測からは、TS の下流域 (heliosheath) にリボン状に密集した高エネルギー粒子生成領域が存在することを発見するなど、太陽圏外縁部の非定常・非一様な構造とこれに伴って現れる多彩なエネルギー現象の姿が明らかになってきた。

(3) まもなく人類は太陽圏外の世界を直接探査する時代に突入するが、今後の探査計画を考慮しても Voyager 探査機や IBEX 衛星の観測データが当面の間唯一の太陽圏外縁部情報であり、観測面では米国に太刀打ちできないが、国内の計算機環境は良好であり、これを駆使した理論・シミュレーション研究では十分に伍していける。太陽圏物理の今後の発展を考慮すると、将来取り返しのつかない遅れを生じさせないためにも国内でも研究の継続及び協力体制の構築が重要である。

2. 研究の目的

(1) 太陽風プラズマで占められた領域「太陽圏」が銀河系内の星間物質と接触する圏界面内部に分布している keV から MeV 領域の高エネルギー粒子生成を担う物理プロセスの解明を主目的とする。この heliosheath 領域ではプラズマ組成が地球近傍の太陽風とは大きく異なり、特にピックアップイオン (pickup ion、以下 PUI) と呼ばれる荷電粒子のダイナミクスが支配的である。PUI は星間中性粒子が太陽風プラズマとの荷電交換を通じて帯電した粒子で、ACR の起源と考えられているため、その加速過程の理解が本研究課題において本質的に重要である。

(2) そこで PUI の物理素過程に焦点を絞り、衝撃波に代表される標準的な高エネルギー粒子生成機構に対し、大量の粒子数を含む系

を導入した数値シミュレーションを進めて、以下の内容を検証する。

1 PUI 密度の増加に伴う衝撃波変成・乱流生成が粒子加速過程にもたらす影響を評価し、加速効率の定量化を図るとともに、PUI に特徴的なエネルギー分布の安定性を議論する。

2 太陽圏内部の電磁流体波動や既加速粒子が TS を通過後に heliosheath 構造に及ぼす変形・崩壊・再形成といった巨視的な変動の性質を調べ、高エネルギー粒子生成との関連性を追究する。

3 衝撃波以外で PUI 加速を担うと考えられる物理モデルについて、衝撃波加速モデルとのエネルギー分布の相違点を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 太陽圏外縁部、heliosheath 領域のプラズマ組成として、低エネルギーの太陽風プラズマ・実効熱エネルギーの高い PUI・それぞれのマイナー成分 (He, N, O など)・非熱的宇宙線粒子の混在化における各粒子成分のダイナミクス、特にエネルギー分布の変動を調べるための数値シミュレーションを行う。対象とする現象がイオン運動のスケール (ジャイロ半径・周期) となることから、電子は電荷中性を満たす断熱流体として近似し、イオンを個別粒子と扱ってその運動を解き進めるハイブリッド粒子コードを適用する。その際、高エネルギー領域の粒子分布を議論する上で統計的に有意な粒子数を確保する必要があるため、スーパーコンピュータの使用を前提とした MPI 並列化を進めた多次元化も行った。

(2) 衝撃波における PUI 加速には、熱的な太陽風プラズマとは異なる機構が働いていることが明らかになっているが、特に PUI 密度をパラメータとした加速効率の違いを比較する他、PUI 密度の違いによるエネルギー分布の安定性を精査する。

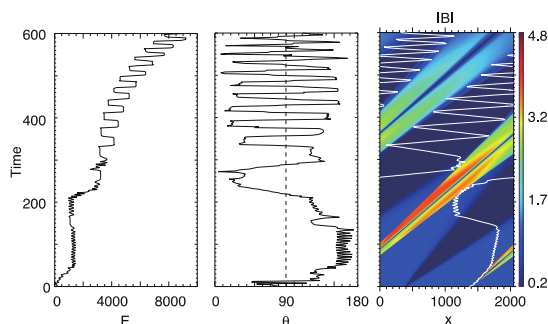
(3) 太陽圏内部および heliosheath 領域における高エネルギー粒子生成メカニズムとして衝撃波以外の要素も取り込んだ数値計算を実行するとともに、粒子種 (太陽風、PUI、宇宙線など) 間のエネルギー交換過程に関するモデル構築を進める。

4. 研究成果

(1) 太陽圏外縁部における TS 単独での粒子加速過程では到達可能なエネルギーが低すぎる問題を解決する要因を、太陽圏内部における補助的な加速過程に求めた。着目したのは高速太陽風と低速太陽風の相互作用から生成される衝撃波で、高エネルギー粒子の主成分である PUI が衝撃波を挟んで上下流域を往復する際のローレンツ力のバランスの崩

れによって正味の加速が磁場方向に働く、ドリフト加速のメカニズムを示した。その結果、イオンの運動が磁力線に沿うものとなり、高速-低速流パターンが連続して現れる状況ではエネルギー損失を抑えて衝撃波間を複数回往來することが可能となり、単独の衝撃波では実現困難だった 100keV に至る加速を達成できることが確認できた。

更により大規模な 2 次元シミュレーションで系の長時間発展を検証した結果、PUI が二段階の加速を受けて最終的に 500keV に至るエネルギーを取得可能であることを確認した。これは衝撃波の生成源となる高速-低速太陽風の出現パターンが連続する状況において、第一段階として複数の衝撃波を往復しながらドリフト加速を繰り返し受け続けることによる磁力線方向のエネルギー増加を経て、150keV を越えるあたりからは第二段階の、より加速効率の高い拡散過程へと移行するものである。これは TS において MeV 領域まで加速されるために必要となる初期エネルギーの条件を十分満たすことを期待できる結果となった。



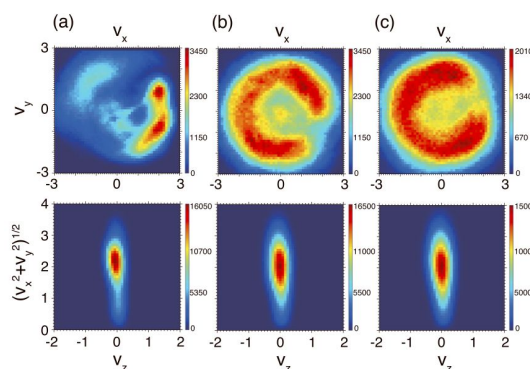
図：シミュレーション時間内で最高エネルギーを獲得した PUI の (左) エネルギー (中央) ピッチ角 (右) 軌道 (白線) と背景磁場の、時間発展の様子。時間 $T=300$ あたりまでは、PUI は衝撃波に長時間 (30 イオンジャイロ周期ほど) 捕捉され続けながら加速を受けているのに対し、大体エネルギーが 3000 (典型的太陽風パラメータを適用すると 150keV 程度) を超えたあたりから、衝撃波面で瞬時に跳ね返されながら正味のエネルギーが上昇している。

(2) 太陽風プラズマを構成するプロトンやヘリウムイオンなどはほぼ同じ速度で宇宙空間を伝播するが、磁気圏前面の定在衝撃波 (バウショック) において減速される際、その減速度は質量/電荷比によって異なることから、バウショック下流では各イオンの間に秒速 100km オーダーの速度差が生じる。そのためマイナー成分のイオンが背景磁場に捕捉されて、PUI と同様に速度空間上でリング形状の分布を呈する。この分布は不安定であることからプラズマ波動が励起されて、秒スケールの数ジャイロ周期中に等方的に散乱される。

一方、地球磁気圏観測衛星 Geotail が捉えたデータからは、このヘリウムイオンのリン

グ状速度分布が数十分間 (数百ジャイロ周期) に渡ってバウショック下流に存在し続けている現象が観測された。そこでプロトンとヘリウムイオンが混在する系における衝撃波発展の様子を 1 次元および 2 次元シミュレーションで計算し、まずヘリウムイオンが磁力線の運動に引き込まれることで衝撃波下流にリング状速度分布を形成することを再現した。更にはこの分布が安定に存在するための太陽風の条件についてパラメータ依存性を検証したところ、2 次元計算からは 1 次元結果と比較してリング状分布が短時間で崩壊する結果も得られた。これは励起される波動の自由度が増えることによってヘリウムイオンビームがより散乱されやすくなったことを示唆するものである。これより PUI の安定性を議論する上で太陽風条件にさらに制限をつけることを確認した。

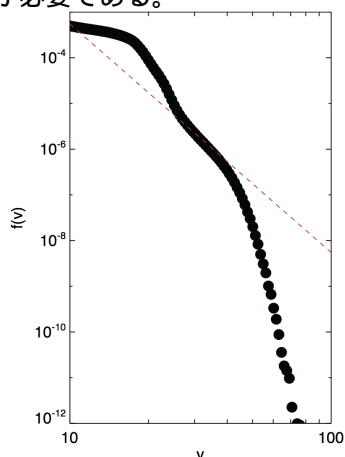
その結果、観測から示唆される安定に維持されるリング状分布は、励起されるプラズマ波動の強度が十分弱い時に出現可能であり、その条件が太陽風プラズマ温度とプロトン/ヘリウムの密度比という二つの要因で決定されることを理論計算との比較によって確認した。以上の研究より、太陽圏外縁部における PUI を特徴づける速度分布の安定性を議論する上で重要な知見が得られた。



図：衝撃波下流におけるヘリウムイオンの速度分布の 2 次元シミュレーション結果。上段は磁場に垂直な平面、下段は磁場に対する (横軸) 平行- (縦軸) 垂直成分の分布を示す。また (a) から (c) にかけて、衝撃波通過直後から下流に向けての遷移を示している。(b)(c) より、衝撃波下流においてリング形状が安定に維持されている様子が確認できる。

(3) 太陽圏外縁部の TS で効率よく粒子加速機構が働くには、太陽圏内部での事前加速が必要であることはこれまでの研究でも示されてきた。一方で近年の太陽風観測によると、太陽圏内部における高エネルギー粒子のエネルギー分布に衝撃波による加速では説明できない例が多く確認されている。この衝撃波非依存タイプの加速機構について提唱されている理論モデルのうち有力なのが、速度非一様な太陽風から成長する圧縮・膨張構造の間で粒子が断熱加熱・冷却を繰り返しながら正味のエネルギーを獲得する「ポンプ加

速」と呼ばれる過程である。本研究ではこの太陽風構造を再現した中での粒子加速の特徴についてシミュレーション結果を解析した。その結果、衝撃波が存在しない環境でも100keVを超える加速が可能であることを立証するとともに、圧縮・膨張構造の空間スケールの拡大に伴って加速効率が高まることも明らかにし、衝撃波非依存の加速理論を裏付ける上で有力なモデルとなりうる結果となった。ただし高エネルギー領域のベキ分布については観測で示されたものと必ずしも一致する結果とはならず、これが別の加速機構によるものなのか、シミュレーションの有限性に制限された結果なのかは、今後の更なる検証が必要である。



図：衝撃波非依存モデルを適用した時の PUI の速度分布。赤点線は観測で確認されている太陽風中のベキ分布を示している。最大エネルギーは典型的な太陽風パラメータを適用したとき、150keV 程度まで加速されている。

(4) 非熱的領域の高エネルギー宇宙線の生成には衝撃波による加速が不可欠であることが標準理論として確立されて久しいが、太陽風に代表される宇宙空間の熱的背景プラズマを直接加速するだけでは MeV を越える高エネルギーに達するのが難しいという問題も指摘されてきた。本研究課題では特に PUI という太陽風とは異なるエネルギー利得を持つ粒子の振舞を考慮し、PUI が ad hoc な仮定を導入することなく数百 keV まで加速されるプロセスを立証できた。これは粒子加速問題におけるミッシングリンクである keV~MeV 領域の加速メカニズムや ACR の物理特性に対する理解を深める成果につながるものであり、更には太陽以外の恒星風の境界領域におけるプラズマダイナミクスの研究へと発展させていくことも期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

K. Tsubouchi, T. Nagai, and I. Shinohara, Stable ring beam of solar

wind He^{2+} in the magnetosheath, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, vol.121, 2016, 査読有, 1233-1248, DOI:10.1002/2015JA021769
K. Tsubouchi, Particle acceleration at corotating interaction regions in the heliosphere, *The Astrophysical Journal*, vol.795, 2014, 査読有, DOI:10.1088/0004-637X/795/1/47
 Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, Collisionless damping of circularly polarized nonlinear Alfvén waves in solar wind plasmas with and without beam protons, *The Astrophysical Journal*, vol793, 2014, 査読有, DOI:10.1088/0004-637X/793/2/138
 成行泰裕、羽田亨、坪内健、太陽風アルヴェン波とイオンビーム不安定性、*Journal of Plasma and Fusion Research*, vol.89, 2013, 査読有, 573-578

[学会発表](計 13 件)

K. Tsubouchi, Particle acceleration affected by the evolving velocity structures in the solar wind, American Geophysical Union 2015 Fall meeting, 2015 年 12 月 18 日, サンフランシスコ (米国)

坪内健、太陽風の世界速度勾配構造の成長に伴う高エネルギー粒子生成、第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会、2015 年 11 月 3 日、東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)

坪内健、Acceleration of pickup H^+ , He^+ , and O^+ in the corotating interaction regions、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 25 日、幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)

K. Tsubouchi, Acceleration of pickup ions between the magnetically-connected CIRs, American Geophysical Union 2014 Fall meeting, 2014 年 12 月 15 日、サンフランシスコ (米国)

坪内健、Efficient mechanism of pickup ion acceleration、第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会、2014 年 11 月 3 日、キッセイ文化ホール (長野県松本市)

K. Tsubouchi, T. Nagai, and I. Shinohara, Generation of pickup He^{2+} in the magnetosheath, URSI General Assembly, 2014 年 8 月 21 日、北京 (中国)

K. Tsubouchi, Particle acceleration at corotating interaction regions in the heliosphere, Asia-Oceania Geosciences 11th Annual meeting, 2014 年 7 月 30 日、ロイトン札幌 (北海道札幌市)

坪内健、Pickup ion acceleration via multiple reflection between two

successive CIRs、日本地球惑星科学連
合 2014 年大会、2014 年 5 月 1 日、パシ
フィコ横浜 (神奈川県横浜市)

K. Tsubouchi, Generation of pickup
He²⁺ in the magnetosheath, American
Geophysical Union 2013 Fall meeting,
2013 年 12 月 11 日、サンフランシスコ
(米国)

坪内健、長井嗣信、篠原育、Trajectories
of the solar wind He⁺⁺ across the bow
shock、第 134 回地球電磁気・地球惑星
圏学会、2013 年 11 月 3 日、高知大学(高
知県高知市)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

坪内 健 (TSUBOUCHI, Ken)

東京工業大学・大学院理工学研究科 (理学
系)・流動研究員

研究者番号 : 6 0 3 9 7 6 0 1