

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540462

研究課題名（和文） 太陽圏終端衝撃波の巨視的変動要因の探究

研究課題名（英文） Investigation of the macroscopic variation in a heliospheric termination shock

研究代表者

坪内 健 (TSUBOUCHI KEN)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員

研究者番号：60397601

研究成果の概要（和文）：太陽風プラズマで満たされた太陽圏の終端衝撃波において、非一様・非定常な構造変動を誘発する要因となる太陽風構造の発展特性を理解するための数値シミュレーション研究を行った。特に影響が大きいと予想される太陽風中の衝撃波と電磁流体波動や太陽以外に起源を持つ粒子との相互作用過程に着目し、磁場構造の変動とそれに伴う粒子のエネルギー分布の変化がもたらされることで終端衝撃波へのエネルギー注入条件が通常の衝撃波と大きく異なることを示した。

研究成果の概要（英文）：The main purpose of this research is to investigate the dynamic evolution of the solar wind structure in the heliosphere, which will result in the non-uniform and non-stationary variation in the termination shock. Special attention is paid to the energetic processes occurred inside the heliosphere, where the upstream conditions for the termination shock are determined. Numerical simulation results show that the shock properties are largely modulated by the interaction with large-amplitude disturbances in the heliospheric electromagnetic field as well as the presence of non-solar origin particles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

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

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽圏とは、太陽表面から常時宇宙空間に超音速で放出される太陽風プラズマが星間プラズマを押しよけた空間である。太陽から100天文単位近く離れたところにその終端衝撃波（termination shock、以下TS）が形成されて太陽風の急減速が予想されて

いたが、2005、2007年に惑星探査機 Voyager-1、2号が実際に通過してその存在が立証された。

(2) Voyagerによる直接観測からTS周辺のプラズマ・電磁場環境が明らかになってきた。その結果からは地球磁気圏の定在衝撃波な

ど、従来の衛星観測で理解されてきたプラズマ中の衝撃波の性質とはプラズマの加熱率などの点で大きく異なることが示された。

(3) 星間物質中の中性粒子が太陽圏内に侵入した際に太陽紫外線や荷電交換反応で電離して太陽風磁場に捕捉された粒子であるピックアップイオン（以下 PUI）の全プラズマ中における含有率が TS 近傍では高い。PUI が運び込むエネルギーフラックスは太陽風の熱的成分に比べて遥かに大きいこと、衝撃波構造そのものに与える影響も大きいことが予想されている。また太陽風中で成長する大振幅の電磁場擾乱も衝撃波構造の変形・崩壊・再形成をもたらすことが、最新の数値シミュレーションや磁気圏観測で示されてきた。これらの要素が、Voyager の TS 観測が突き付けた従来の標準的な衝撃波理論との矛盾点を修正する上で鍵となることに着目した。

2. 研究の目的

(1) TS 領域に生じている物理過程の全貌を理解するには観測事実を基にした物理モデルを導入した数値シミュレーションとの連携が不可欠となる。プラズマ粒子ダイナミクスと巨視的構造の振舞双方を同時に計算できる粒子ハイブリッドコードに TS 領域のプラズマ環境を組み込んだ数値モデルを開発する。

(2) TS 周辺の大規模な変形過程およびこれが粒子ダイナミクスに与える影響に関する定量的な解析を行い、特に TS における非一様・非定常な構造変動を誘発する要因を突き止める。具体的に以下の二点に焦点を当てる。

① 太陽風中の大規模な電磁流体擾乱（アルフベン波、電流シートなど）と衝撃波との相互作用モデルから発生する特徴的な構造形成を担う物理特性を、パラメータ依存性の検証などを通じて詳細に分類する。

② PUI や重イオンなど、背景太陽風プラズマ以外の粒子成分が衝撃波構造の非定常性にもたらす効果を、含有率やエネルギー分布形状との定量的な関連性から明らかにする。

(3) 未知なる太陽圏境界のプラズマ現象の深奥に迫ることを本研究の目的とする。また波動粒子相互作用を通じた高エネルギープラズマの加熱・拡散過程への影響の検証を重視し、太陽圏外からの宇宙線粒子の侵入効率などの研究への発展を視野に入れている。

3. 研究の方法

(1) 本研究で目指す TS の巨視的構造変動とプラズマ粒子のエネルギー交換過程の双方

を同時に検証できる粒子ハイブリッドコードを大規模・多次元化に拡張する。10 億個オーダーの粒子運動を取り扱うことから数百 GB-1TB 程度の計算メモリが必要であり、プログラムは MPI を用いて並列性能を高めることでスーパーコンピュータでの実行を前提とした大規模計算環境に適合させる。テスト計算でエネルギー保存などを検証して計算精度などの保証を確認した後、実問題に投入する。

(2) 太陽圏境界の衝撃波構造と、その巨視的変動を誘発する各種要因として、Alfvén 波や電流シートといった太陽風中の磁場変動・PUI や重イオンなど太陽風より高エネルギー成分の混合・背景太陽風構造の巨視的な非一様性、を衝撃波上流領域に導入した数値シミュレーションを行う。計算データの解析を通じて、それぞれの要因ごとに衝撃波構造変動の特性およびこれに伴う粒子のエネルギー取得過程・分布特性を検証する。

① TS 面の変形をもたらす第一の要因として太陽風自体の動圧における空間非一様性を考慮する。特に太陽風中に速度の二層構造が出現する状況を初期プロファイルに設定し、衝撃波への成長と粒子の加速過程との関係を精査する。

② 太陽風中に大振幅の Alfvén 波を埋込んだプロファイルを設定し、衝撃波に衝突・通過する過程を通じて衝撃波とその周辺領域の磁場構造が変化する様子と、これに伴う粒子運動の特徴（エネルギー拡散など）を捉える。

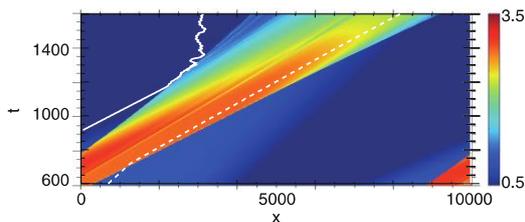
③ PUI は太陽風の動電場によって加速されるために磁場回りの旋回速度が太陽風速度程度となる。これをエネルギーに換算すると背景プラズマと比較して数十～数百倍まで及ぶ。この状況をシミュレーション上で再現し、更に衝撃波との相互作用まで計算を進めることで、太陽起源のプラズマとの加速過程の相違点を見出していく。

4. 研究成果

(1) 太陽風の速度二層構造から成長する相互作用領域（CIR）の境界は直に急峻化して衝撃波となり、粒子加速に寄与することが過去の衛星観測から明らかにされてきた。また前方の低速太陽風中を伝わる衝撃波（forward shock; FS）と後方の高速太陽風中を伝わる衝撃波（reverse shock; RS）における加速効率に非対称性があることも知られている。そこでシミュレーション空間に高速風-低速風のパターンを埋め込んだ系から計算を進め、CIR 特有の磁場構造の成長と粒子のエネルギー利得の相関を調べ上げた。

シミュレーションの結果もこの高エネルギー粒子分布の非対称性を再現したことから、改めてその原因についても検証した。最も顕著な相違点はFSとRSで磁場形状が異なるというもので、衝撃波の法線方向と磁場の成す角度がFSでは垂直に近い状態を保持しているのに対し、RSでは平行状態へと移行していた。その理由として、低速領域に比べて高速領域の方が太陽風の断熱膨張効果が強く、太陽の自転に伴う磁力線の巻込みが遅れることに起因することを示した。

磁場と衝撃波法線方向の成す角度が小さくなる（準平行衝撃波）と粒子が磁力線に沿って衝撃波の上流域に流出しやすくなる。すると流れ込んでくる太陽風プラズマとの間に生じるビーム不安定から成長する大振幅の磁気音波によって粒子が捕捉され、再度衝撃波に押し戻される。こうして衝撃波との多重相互作用を通じて粒子は高エネルギーに加速されることが、衝撃波による粒子加速理論で標準的に確立されている。この磁場形状変化に伴う衝撃波構造の違いが、RS側の高エネルギー粒子フラックスがFS側に比べて高くなる理由の少なくとも一部を裏付けていると結論した。



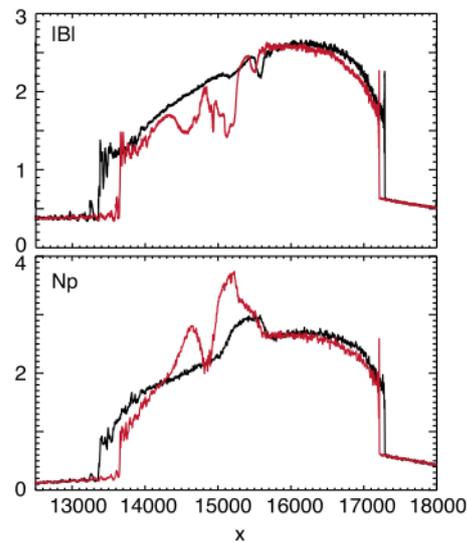
図：CIR 成長過程（磁場強度の時間発展を色づけで示す）と典型的な粒子軌道（点線：FS側、実線：RS側）。RS側の粒子が衝撃波面近傍を何度も往復していることがわかる。

(2) 太陽風中には断続的に大振幅の Alfvén 波が成長してプラズマ中を伝わる。特に高速風中で頻りに観測されることから、CIR 境界の衝撃波との相互作用は TS 到達前の太陽風プラズマのエネルギー分布を決定づける重要な一要素となる。そこで CIR 形成のシミュレーション系に更に Alfvén 波を組込んだ計算を行い、CIR と衝突後の Alfvén 波の構造・衝撃波特性・粒子のエネルギー分布間に見られる変化の関連性を解析した。

計算結果から、Alfvén 波は RS を通過して CIR 内部に侵入するに伴ってその磁場強度が減衰し、結果として局所的な弱磁場構造（magnetic decrease, 以下 MD）の形成に至ることが示された。これは MD の発生領域が主に CIR の高速風側（RS）であるという実際の衛星観測を裏付ける結果となった。MD 形成については、そのメカニズムが CIR 衝撃波下

流の温度非等方プラズマ中に磁場擾乱が加わったときのドリフト電流による磁場強度減衰効果で説明可能であることを突き止めた。MD 形成メカニズムに関してはこれまでも非線形 Alfvén ソリトンなどの説が提唱されてきたが、本研究で示した Alfvén 波と衝撃波の相互作用モデルは最有力視されている。

反磁性構造である MD では同時にプラズマ密度は高くなる。この性質から、衝撃波で加速された粒子が多く捕捉され、その結果圧力バランスが崩れることで衝撃波の成長が妨げられていることも判明した。これは RS が粒子を加速しやすい平行衝撃波へ移行することを遅らせる効果をもたらし、MD の形成が高エネルギー粒子の生成効率を低減させる可能性を示唆する結果となった。これは衛星のデータ解析研究者に検証を促すに至っている。また MD の出現は CIR 内部に非共鳴タイプのプラズマ空間拡散を引き起こすことも予見される。これは特に太陽圏の極域に分布する高エネルギー粒子の発生領域を特定する上で MD による影響を考察するという観点から、今後の更なる研究の進展が期待できる。



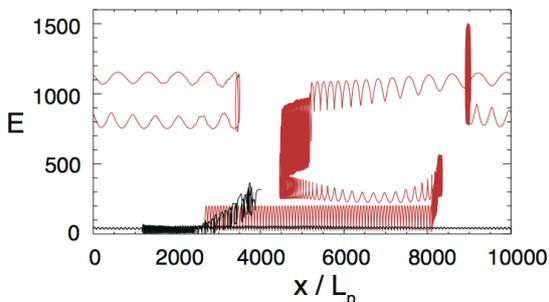
図：CIR 構造の磁場とプラズマ密度の空間プロファイル。黒線は通常の CIR、赤線が MD 形成時の CIR。RS 側（左衝撃波）で MD 形成時には衝撃波の伝播が遅れが生じていることがわかる。

(3) PUI のエネルギー密度は TS 領域では太陽風と同程度以上になることから、PUI のダイナミクスが TS 構造及びその近傍のプラズマ環境を決定づける重要な要素であることが Voyager 衛星の直接観測から示唆されている。そこで TS 到達前の PUI のエネルギー分布特性として、特に太陽圏内部の太陽風中を伝播する衝撃波による PUI 加速の影響を評価する

目的で、CIR 形成のシミュレーション系に PUI を導入した計算を行った。

取得したデータを解析した結果、低エネルギーの背景太陽風プラズマとは異なり、衝撃波面近傍に捕捉されることで波面電場を長時間受け続けられる効率の良い加速メカニズムが特に高速太陽風領域の PUI に対して働くことが示された。太陽風プラズマを効率よく加速するためには磁場と衝撃波法線方向の成す角度が小さくなる必要があった(成果(1))のに対し、PUI の加速ではこの角度が垂直に近いタイプの衝撃波で生じているという点で、発生源の(=初期エネルギーの)異なる粒子間ではそれぞれ選択的に異なる加速プロセスに従うことを明らかにした。

更に PUI は磁場に対する回旋半径が太陽風プラズマに比べて非常に大きいため、背景流体の運動に捕捉されることなく長距離の移動が可能となっている。そのため、しばし準周期的に複数形成される CIR 間を PUI が何度も往復する状況が発生した。往復の度に衝撃波での加速・反射を受けることから、単独の衝撃波では実現困難だった高いエネルギー領域まで加速される PUI の生成も確認できた。計算で得られた粒子の最高到達エネルギーを典型的な太陽風パラメータで評価すると 100keV 超に達し、PUI が TS で生成されると考えられている異常宇宙線成分の粒子源であるという説の妥当性も示唆できる結果となった。



図：PUI (赤線) と太陽風プラズマ (黒線) 双方の最高エネルギー到達粒子の位置変化と対応するエネルギーの変化。エネルギーの急上昇地点が衝撃波通過を示す。太陽風の加速が準平行衝撃波(成果(1)参照)近傍に長時間捕捉されている粒子の多重通過によるものでエネルギー上昇も小規模であるのに対し、PUI 加速は短時間のうちに高いエネルギーに到達していることがわかる。

(4) 本研究課題の推進を通じ、また近年の世界における研究の動向を鑑みて、太陽圏境界のプラズマ環境の物理においては、プラズマ素過程に基づく粒子のエネルギー獲得プロ

セスに改めて関心が高まっている。TS 周辺領域におけるプラズマのエネルギー密度や空間分布は、その供給源である太陽風プラズマのダイナミクス、特に TS 到達前の電磁場擾乱との相互作用過程および PUI など太陽以外に起源を持つ粒子成分の寄与を理解することで初めて正確に評価することが可能となる。

現在太陽圏外への脱出が間近と思われる Voyager-1 号からは太陽風由来・銀河系内由来双方の宇宙線が入り交じったデータが送られてきており、今後数年間における観測から太陽圏境界に関する多くの新事実が発見されることも確実視されている。本研究で考察した太陽風中の各種要因が誘発する TS 構造の非定常変動から、今度は逆に太陽圏の外縁部 (heliosheath) における粒子加速特性に与えている影響を検証することで、太陽圏境界構造の全体像の更なる解明が期待できる。その実現に向けて、本研究で得られた成果を土台として次の段階への研究の進展を図っているところである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① K. Tsubouchi, Generation process of magnetic decreases and the resulting kinetic effects on energetic particles within corotating interaction regions, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, vol.117, 2012, doi:10.1029/2012JA017639
- ② Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, Nonlinear dissipation of circularly polarized Alfvén waves due to the beam-induced obliquely propagating waves, *Physics of Plasmas*, 査読有, vol.19, 2012, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4748296>
- ③ K. Tsubouchi, Shock acceleration of particles in the nonstationary evolution of corotating interaction regions, *The Astrophysical Journal*, 査読有, vol.740, 2011, doi:10.1088/0004-637X/740/2/115

[学会発表] (計 10 件)

- ① 坪内健, Formation of magnetic decreases in the corotating interaction regions, *Nonlinear Wave and Chaos Workshop*, 2013 年 3 月 5 日、La Jolla Beach and Tennis Club (サンディエゴ、米国)
- ② 坪内健, Shock acceleration of interplanetary pickup ions at the

edges of corotating interaction regions、American Geophysical Union 2012 Fall meeting、2012年12月4日、Moscone Center (サンフランシスコ、米国)

- ③ 坪内健、Hybrid simulations on the pickup ion acceleration in the CIR system、第132回地球電磁気・地球惑星圏学会、2012年10月21日、札幌コンベンションセンター (札幌)
- ④ 坪内健、太陽風中の共回転相互作用領域境界における pickup ion の加速、日本天文学会 2012 年春季年会、2012 年 3 月 20 日、龍谷大学 (京都)
- ⑤ 坪内健、Hybrid simulations on the dynamics of interplanetary pickup ions in the nonstationary evolution of a corotating interaction region、American Geophysical Union 2011 Fall meeting、2011 年 12 月 5 日、Moscone Center (サンフランシスコ、米国)
- ⑥ 坪内健、Pickup ions in the corotating interaction region、第130回地球電磁気・地球惑星圏学会、2011年11月4日、神戸大学 (神戸)
- ⑦ 坪内健、CIR 衝撃波の粒子加速に対する magnetic decrease 構造の影響、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 27 日、幕張メッセ国際会議場 (千葉)
- ⑧ 坪内健、Kinetic processes in the CIR evolution with magnetic decreases: Hybrid simulations、American Geophysical Union 2010 Fall meeting、2010 年 12 月 15 日、Moscone Center (サンフランシスコ、米国)
- ⑨ 坪内健、Hybrid simulations on the energetics of CIR-related plasmas、第128回地球電磁気・地球惑星圏学会、2010年11月1日、沖縄県市町村自治会館 (沖縄)
- ⑩ 坪内健、Magnetic holes and associated particle energetics、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 23 日、幕張メッセ国際会議場 (千葉)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪内 健 (TSUBOUCHI KEN)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員

研究者番号：60397601