

R008-05

C 会場 : 11/26 AM1 (9:15-10:45)

10:15~10:30:00

地球バウショックにおける電子の熱的・非熱的エネルギー分配に関する観測的研究

#本多 龍一朗¹⁾, 天野 孝伸¹⁾

(¹⁾ 東大院理

Observational studies of thermal and non-thermal electron energy partition at Earth's bow shock

#Ryuichiro Honda¹⁾, Takanobu Amano¹⁾

(¹⁾ Graduate School of Science, the University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Science

A shock wave converts the upstream bulk kinetic energy irreversibly into downstream thermal energy. While this conversion can be described macroscopically by the conservation laws of mass, momentum, and energy (Rankine-Hugoniot relations), the energy partition among particle species, such as ions and electrons, cannot be physically predicted in collisionless plasmas. Previous studies have investigated the dependence of energy partition on shock parameters such as the Mach number using observations and numerical simulations, but the details remain not fully understood (Schwartz et al. 1988; Ghavamian et al. 2013; Raymond et al. 2023).

In collisionless shocks in space, thermal and non-thermal particle populations coexist. Observations of electron distributions downstream of Earth's bow shock show a thermal distribution at low energies and a non-thermal power-law distribution at high energies, which is similar to cosmic rays generated in high-energy astrophysical shocks such as supernova remnant shocks. Understanding the energy partition between thermal and non-thermal components at Earth's bow shock may provide a clue for evaluating the energy conversion efficiency into cosmic ray electrons at astrophysical shocks.

In this study, we aim to understand the energy partition between ions and electrons, and further, the partition between the thermal and non-thermal components of electrons, by analyzing in-situ spacecraft observation data from Earth's bow shock. A correlation between the shock's electron temperature jump and the potential in the de Hoffmann-Teller Frame (HTF) has been shown in previous studies (Schwartz et al. 1988; Hull et al. 2000). Therefore, in this research, we calculate the potential defined in the HTF (hereafter referred to as shock potential) using the generalized Ohm's law and discuss it as an indicator of electron energy partition. We use observational data obtained by MMS (Magnetospheric Multi-Scale) spacecraft in burst mode. We calculated the shock potential by assuming that the electron inertial term in the generalized Ohm's law is negligible and that the shock is one-dimensional and stationary. We find that the shock potential falls within the range of ~10-100 eV. No clear correlation was found between the shock potential and the shock parameters. These results are consistent with the previous studies (Schwartz et al. 1988, Hull et al. 2000).

Observations from Earth's bow shock have also shown that the downstream electron distribution exhibits a "flat-top" shape, where the thermal distribution connects to a non-thermal power-law distribution through the so-called "shoulder." We have confirmed that the shock potential coincides with the "shoulder" energy as reported previously (Schwartz et al. 1988). Based on this result, we adopted the shock potential as the transition energy between thermal and non-thermal populations and calculated the energy partition between them. We will discuss how the energy partition is regulated by the shock parameter and its relation to the recent work by Lalti et al. (2024).

衝撃波は、上流のバルク運動エネルギーが不連続面を介して下流の熱エネルギーへと不可逆的に変換される現象である。この変換は、質量、運動量、エネルギーの保存則 (Rankine-Hugoniot 関係式) によって巨視的に記述できるが、無衝突プラズマではイオンや電子といった個々のプラズマ粒子種へのエネルギー分配比率を物理的に予言することはできない。各粒子種へのエネルギー分配について、観測や数値シミュレーションを用いてマッハ数などの衝撃波のパラメータ依存性が調べられているが、その詳細は未だ理解されていない。(Schwartz et al. 1988; Ghavamian et al. 2013; Raymond et al. 2023)

宇宙空間の無衝突衝撃波では熱的エネルギーを持つ粒子と、熱平衡から乖離した非熱的粒子が存在する。特に、地球近傍にあるバウショックの電子分布の観測からも、低エネルギーにおける熱的な分布と高エネルギーにおける冪乗則に従った非熱的分布が見られる。このような冪乗則分布は、超新星残骸衝撃波のような高エネルギー天体物理衝撃波において観測される宇宙線においても共通して見られる。地球バウショックと宇宙線の生成エネルギー帯は大きく異なるものの、非熱的成分の冪乗則はその共通性から重要な研究課題である。仮に地球バウショックで観測されるような非熱的電子のスペクトルが宇宙線電子と連続的に接続するとすれば、熱的成分と非熱的成分へのエネルギー分配を理解することは、宇宙線電子へのエネルギー変換効率を理解する上でも重要な鍵となる。

本研究では、イオンと電子へのエネルギー分配、および電子の熱的・非熱的成分へのエネルギー分配を理解することを目的として、地球バウショックの人工衛星観測データ解析を行う。イオンと電子へのエネルギー分配については、衝撃波の電子温度ジャンプと HTF (de Hoffmann-Teller Frame) におけるポテンシャルの相関が先行研究 (Schwartz et al. 1988; Hull et al. 2000) により示されている。そのため、本研究では一般化されたオームの法則を用いて HTF で定義したポテンシャル (以下、衝撃波ポテンシャルと呼ぶ) を計算し、電子へのエネルギー分配の指標として議論する。解析には、MMS (Magnetospheric Multi-Scale) 衛星の FPI (Fast Plasma Investigation) および FGM (Fluxgate Magnetometer) が

バーストモードで取得した観測データを使用する。また、上流下流のインターバルやマッハ数などのパラメータは、先行研究の 91 個の衝撃波イベントの解析結果より採用した (Amano et al. 2024)。FGM と FPI の観測時間分解能が異なるため、解析には FGM の時間分解能を FPI に合わせるようデータを平滑化して用いた。一般化されたオームの法則では電子の慣性項を無視し、一次元・定常を仮定して、衝撃波ポテンシャルを求めた。しかしながら、バーストモードの観測時間が短いため、先行研究の上流・下流インターバル全体にわたってデータが常に存在するわけではない。データが十分に存在する数イベントについて衝撃波ポテンシャルの値を算出したところ、先行研究で報告されている $\sim 10\text{-}100\text{ eV}$ の範囲に収まることが確認された (Hull et al. 2000)。また、これらのイベントについて衝撃波ポテンシャルとマッハ数などのパラメータとの間に明確な相関は見られず、この点も先行研究の知見と一致する (Schwartz et al. 1988)。

また、地球バウショックの過去の観測により、地球バウショック下流の電子分布は熱的分布が「肩」と呼ばれる屈曲点を介して非熱的な幕乗則へと接続される、フラットトップ型の分布を示すことが知られている。このような分布は、衝撃波ポテンシャルによって加速された上流の粒子が、背景の粒子と不安定性を介して混合することによって形成すると定性的に理解されている。本研究では、解析対象とした複数イベントについて熱的分布と非熱的分布の境界に「肩」が存在することを確認した。さらに、先行研究 (Schwartz et al. 1988) と同様に衝撃波ポテンシャルの値と「肩」の位置が一致することが見出された。この結果に基づき、衝撃波ポテンシャルの値を熱的・非熱的エネルギーの境界として採用し、この仮定のもと、熱的・非熱的成分へのエネルギー分配の比率を求めた。先行研究 (Lalti et al. 2024) では、電子の断熱・非断熱な振る舞いの違いが衝撃波パラメータに依存する可能性が示唆されているため、本研究では求めたエネルギー分配比率と衝撃波パラメータの関係についても議論する。