

論文内容の要旨

論文題目

Observational Studies of Non-thermal Particles at the Quasi-Perpendicular Bow Shock

(準垂直衝撃波における非熱的粒子の観測的研究)

氏名 岡 光 夫

1960年代における高エネルギー電子の発見以来、地球前面定在衝撃波（バウショック）における電子加速過程の問題は未解決の課題として残されてきた。電子の加速が遷移層に集中して「スパイク」状の空間分布を呈すること、電子のエネルギースペクトルがベキ型であることが1980年代に判明したものの、その具体的な生成過程は未だに不明である。

かかる状況において、我々はバウショックにおいて電子の衝撃波統計加速（DSA）過程が働いていることを示す決定的な証拠を得た（図1）。「スパイク」イベント（たとえば図2）と異なり、電子フラックスは遷移層の上流から指数関数的に増大していた。ただし、観測されたDSA過程は上流で励起される電磁流体波動を介して粒子を散乱する古典的描像とは異なり、バウショックにより直接放射される「分散性ホイッスラー波」を介して粒子を散乱していた。一般に、このような分散性ホイッスラー波を上流に放射できるのは上流の磁場と衝撃波法線方向のなす角、衝撃波角、が比較的小さい（～60度）斜め衝撃波に特有のものであることが理論的に示されており、境目にあたるマッハ数と衝撃波角を組み合わせて「ホイッスラー臨界マッハ数」が定義されている。

このホイッスラー臨界マッハ数を観測的に確認するため、統計解析を行った（図3、図4）。具体的には87例のイベントを収集・解析し、エネルギースペクトルのベキ指数、電子フラックスやホイッスラー波の空間分布・パラメータ依存性を調べた。このような包括的かつ定量的な電子加速の観測的研究は初めてである。解析の結果、遷移層におけるベキ指数（図3）とホイッスラー波の上流における強度（図4）はともにホイッスラー臨界マッハ数を境にして値が大きく異なることが分かった。亜臨界の場合はホイッスラー波が上流に伝播しうるため、上流の波強度が大きい。この場合、これらの波を

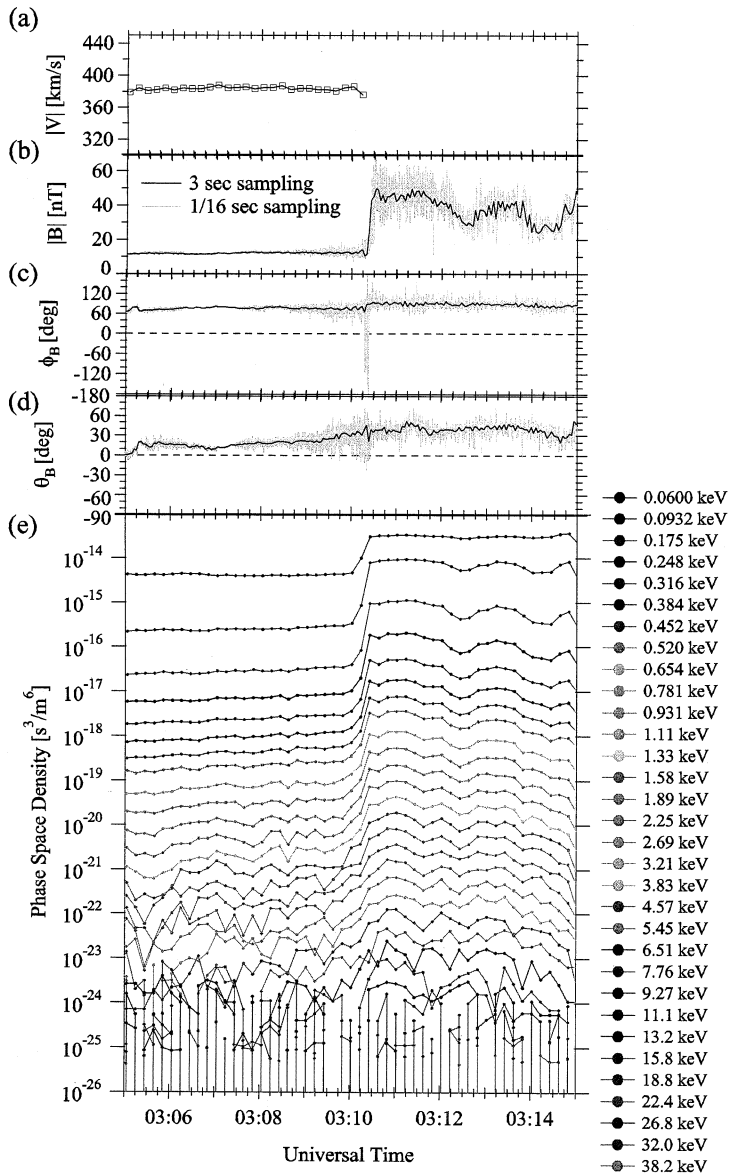


図1. 1995年2月11日に地球磁気圏尾部探査衛星 Geotail が取得した磁場と電子のデータ。03:10 頃の衝撃波通過前から磁場の擾乱が観測されており、それに伴い電子フラックスの指数関数的な増大が認められた。これらの現象が DSA 過程で説明できることが詳細な解析で確かめられた。

介して DSA 過程が起きる可能性がある。実際、DSA で説明可能であることを示した図1のイベントは亜臨界であったことが分かっている。また、電子の空間分布はスパイク的ではなく、なだらかであることの方が多かった。他方、超臨界の場合はホイッスラー波が上流に伝播することがないため、別の加速機構を考える必要がある。空間分布は「スパイク」的であることが多く、エネルギースペクトルも亜臨界の場合と比べて硬いため効率の良い加速過程でなければならない。

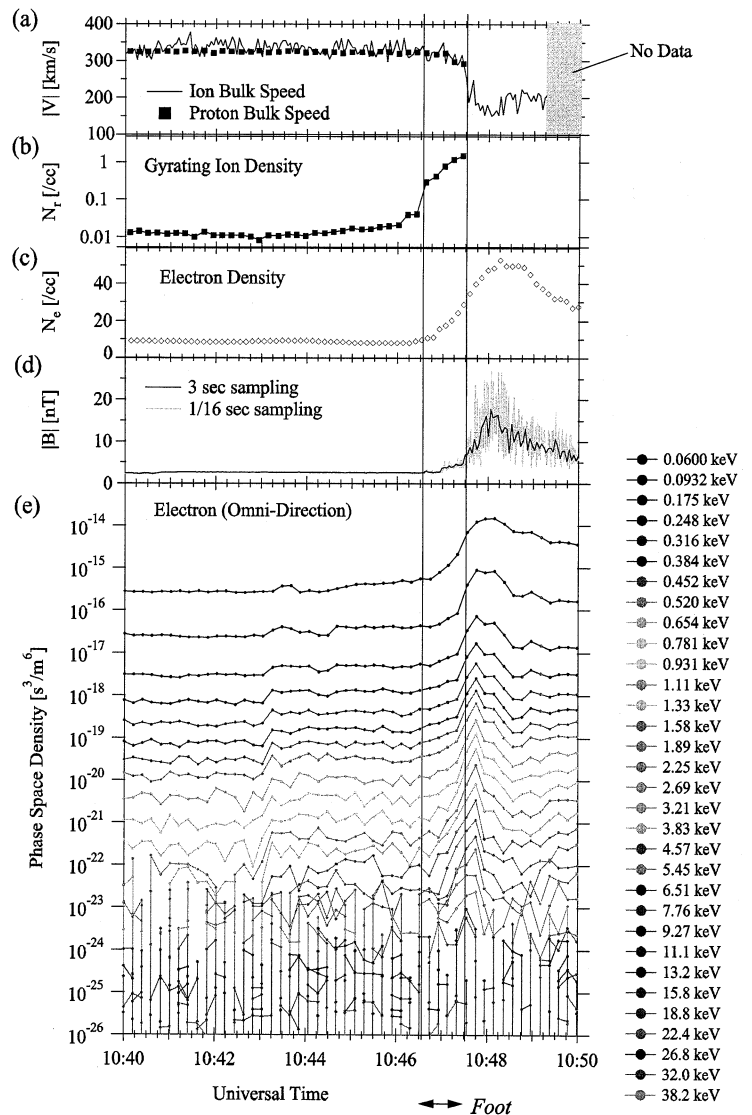


図2. 1996年7月1日に地球磁気圏尾部探査衛星 Geotail が取得した磁場とイオンと電子のデータ。10:47 頃の衝撃波通過の前後において、磁場構造の厚みに比べてずっと小さい領域に電子が閉じ込められていることが分かる。磁場データでは上流ではなくむしろ遷移層において擾乱が強いことが見てとれる。

スパイクイベントの加速機構を探るためには衝撃波の内部構造を詳細に調べなければならないが、一般に時間分解能などの制約により内部構造を分解することは難しい。しかしながら図2で示したイベントでは例外的に内部構造を分解していたうえ、全ての計測器が完全に機能しており、良質のデータが取得された。詳細な解析により、6種類の波が遷移層内部で観測され、それらのうち広帯域静電ノイズ (Broadband Electrostatic Noise, BEN) が電子の加速領域として同定されたランプ領域に対応していた。ここで、BENとして観測される実際の静電波の波形はソリトンの孤立波や乱流的な擾乱である。このような静電波の存在下では電子を捕捉して誘導電場で加速するサーフィン加速が起きる可能性が最近議論されているが、今回の結果はこの加速モデルと矛盾しない。ただし従来から有力視されているドリフト加速を完全に否定するものではなく、両者の関係が課題として残った。

亜臨界の場合に注意すべきことは、衝撃波角が比較的小さいことである。この場合、イオンの一部が磁力線に沿って上流側に逃散し (Field-Aligned Beam, FAB)、イオンフォアショックを形成することが知られている。しかしながら、FABイオンについては生成過程や生成率のパラメータ依存性など不明な点が多く残されていた。そこで例外的に Geotail 衛星が長時間バウショックに沿って FABイオンを観測していた 1995年10月19日のイベントを解析した。マッハ数は3.2程度で維持されていた一方、衝撃波角が60~80度程度まで変化しており、理想的な状況下での解析が可能であった。まずイベント解析を数値シミュレーションとあわせて行い、従来議論のあった漏出説と反射説のうち後者を支持する結果を得た。また、統計解析により FABイオンフラックスの衝撃波角依存性を定量的に取得したほか (図5)、このような広いパラメータ範囲に渡って FABイオンが存在することが確認された。このパラメータ範囲は先に解析した電子加速の亜臨界の場合と重なっており、これら FABイオンが存在することで電子加速にどのような影響を与えるのか、新たな課題が浮上した。

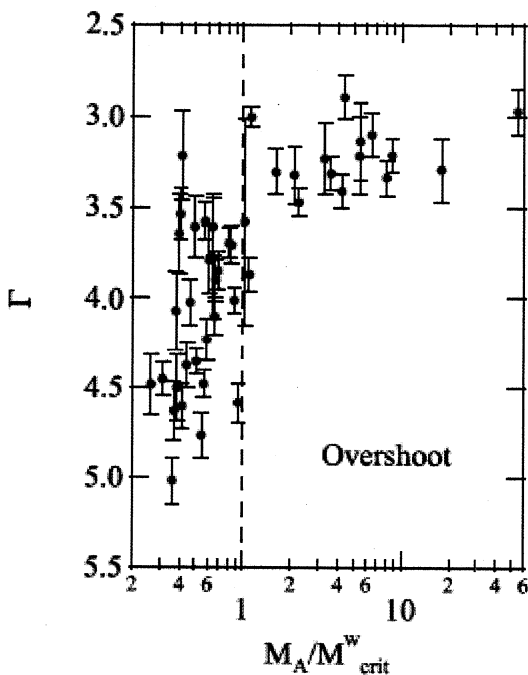


図3. エネルギースペクトルのベキ指数 Γ を、ホイッスラー臨界マッハ数で規格化したアルフベンマッハ数に対して整理したもの。 Γ は亜臨界の場合は幅広い値を取るのに対して、超臨界の場合は3.0-3.5の間に集中している。

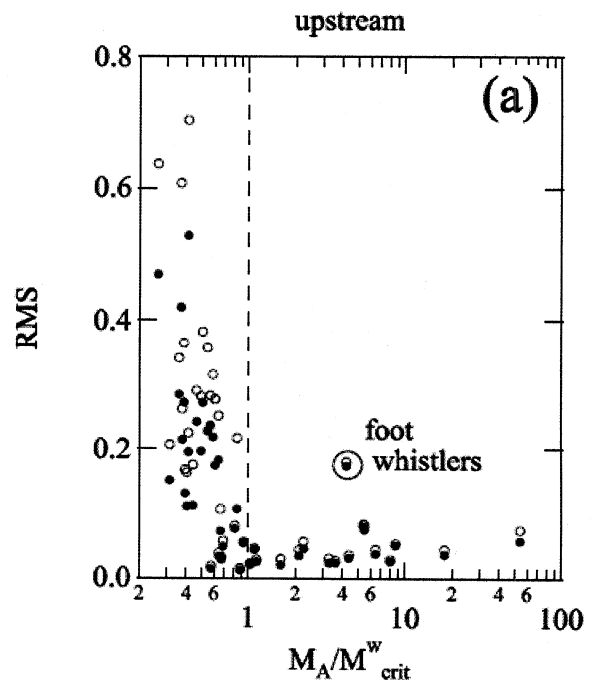


図4. 直上流で観測されたホイッスラー波帯の磁場擾乱 root mean square を、ホイッスラー臨界マッハ数で規格化したアルフベンマッハ数に対して整理したもの。フットホイッスラーは例外で、上流ではなく遷移層での観測に相当する。

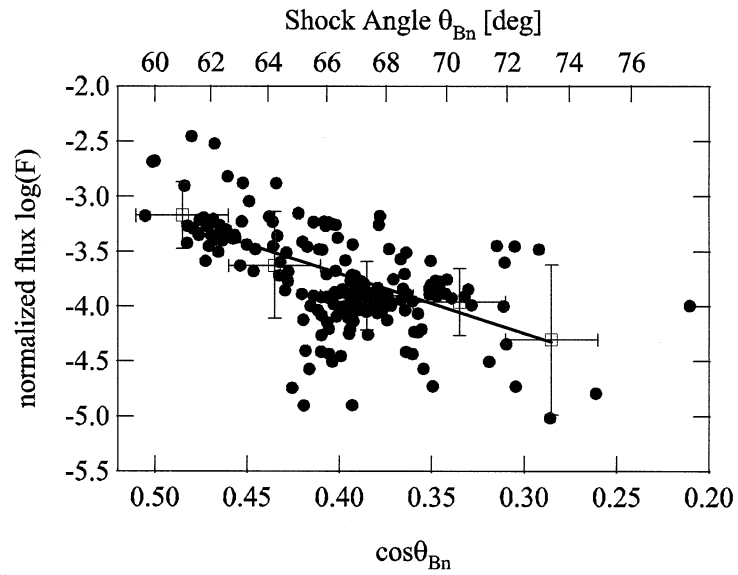


図5. 従来観測頻度から推測するしかなかった沿磁力線イオンビームフラックスを定量的に観測した。ビームのフラックスは太陽風フラックスで規格化されており、おおむね反射率に近い値になっている。