

論文の内容の要旨

論文題目 *Fine Structures of Field-Aligned Electron Acceleration in the Dayside Cusp Region*

(地球磁気圏昼側カusp領域における沿磁力線電子加速の微細構造)

氏名 田中 宏樹

地球磁気圏内でしばしば観測される沿磁力線方向への電子の加速機構の解明は宇宙プラズマ物理学における最大の未解明問題の一つである。これまでの研究により、地球オーロラ粒子加速領域においては高度数千キロ上空に形成された準静的な沿磁力線電場によって電子が加速されるという説が確立されている。このような粒子加速は、観測結果のあるパターンから、“Inverted-V”型加速などと呼ばれている。しかし、その沿磁力線電場の形成過程の物理については明らかになっていない。一方、inverted-V型加速領域近傍においては Inverted-V型加速よりも時間・空間的に微細な構造をもつ別の電子加速現象 (Field-Aligned electron Bursts: 以下 FABs) の存在が知られている。これまでにわかっている FABs の特徴から、FABs は Inverted-V型加速と密接に関係していることが示唆されており、沿磁力線加速機構の解明において重要なものと考えられている。さらに極最近の飛翔体観測により、FABs はオーロラ領域のみならず地球磁気圏昼側カusp領域でも観測例が報告され、FABs の地球磁気圏全体における役割についても重要視されるようになってきている。しかし、観測的にその構造の詳細を明らかにするには、相当の高時間分解能を有するプラズマ分析器が必要となるため、加速過程に迫るだけの十分な観測が行われていないのが現状である。本研究においては、高時間分解能プラズマ観測器である LEP-ESA/ISA を開発し、SS-520-2 ロケットに搭載してその有用性を実証した。本ロケット実験では、磁気圏カusp領域においてこれまでにない精度で微細な沿磁力線電子加速現象の観測に成功した。詳細なデータ解析、およびそれらの結果を基にした数値計算などにより、沿磁力線電場の時間発展および FABs の詳細な加速過程を明らかにした。

○ 高時間分解能プラズマ分析器 LEP-ESA/ISA の開発

筆者らは、これまで主に磁気圏に存在するプラズマを対象とした分析器の開発を一貫して行ってきた。SS-520-2 ロケットに搭載された分析器 LEP-ESA/ISA (Low Energy Experiment – Electron Spectrum Analyzer / Ion Spectrum Analyzer)は約 10eV から 10keV までのエネルギーを全ピッチ角カバーしつつ 41ms (32 エネルギーステップ) で計測するという世界最高レベルの時間分解能を達成している。LEP-ESA/ISA はエネルギー分析部と粒子の飛行方向を調べる位置分析部より構成される。エネルギー分析部として、我々はトロイダル・トップハット型静電分析器を採用し、設計・製作した。これは視野 360 度を有し、装置内部に印加した電圧に応じて荷電粒子のエネルギーが弁別される仕組みになっている。また、位置検出部のアノードとして、「Delay Line Anode」という新しいタイプのアノードを開発した。これは荷電粒子がアノードに落ちた際に得られる 2 つのパルス信号の検出時間差を利用したもので、位置検出に必要な時間を大幅に短縮し、高時間分解能観測を実現する上で非常に重要な役割を果たした。この技術は本ロケット実験のみならず、将来の宇宙プラズマ観測にも応用されるものである。さらに本研究では、次期オーロラ観測衛星である INDEX 搭載用に、ロケットに搭載されたアノードを改良して期待通りの性能を得ることができた。

○ 観測データの解析

SS-520-2 観測ロケットは 2000 年 12 月 4 日、ノルウェー・スピッツベルゲンより打ち上げられた。ロケットは磁気圏カスプのやや高緯度側を飛行し、太陽風起源のイオンの降り込み、Inverted-V 型電子加速および微細な沿磁力線電子加速現象を観測した。このロケット実験では主に 2 つの科学的成果を得た。

一つ目は、Inverted-V 型電子加速領域において電子の加速と同時にイオンの減速が観測されたことである。従来の粒子による Inverted-V 型加速領域の観測では、電子またはイオンの加速エネルギーのどちらか一方から、あるいは間接的な方法でその Inverted-V の準静電的なポテンシャル量を推定するにとどまっていた。本研究では、inverted-V 型の加速電子と減速されたイオンを高時間分解能かつ同時に観測することに成功し、電子・イオン両方の分布関数を比較することで、ロケット上空に準静電的な沿磁力線ポテンシャルが存在していたことを直接的かつ定量的に示すことができた。さらに、そのイオンの減速は電子の加速が観測されるよりも時間的に遅く観測された。この時間的な遅れを説明し得るものとしては二つ考えられる。一つは空間的效果、つまりプラズマがロケット進行方向（水平方向）に流れていると、電子に対して速度の遅いイオンがよりロケットの進行方向に流されるため、結果的にイオンの減速が時間的に遅れて観測されるというものである。もう一つは時間的效果、つまり沿磁力線電場が徐々に成長している場合、イオンは電子と比較してその速度が遅いため、減速されたイオンがロケットに到達する時間が遅れるというもの

である。ロケットに搭載した他の分析器の結果から、観測領域のロケット方向へのプラズマの速度はイオンの遅れを説明できるほど大きくなかった。そこで、我々は観測されたイオンの時間的な遅れを Inverted-V の時間的変動を反映したものとして解釈し、そのモデル計算を行った。その結果、高度 4000km 付近で約 10 秒間かけて電場が成長したとすると、観測結果をうまく説明できることを示した。これまで Inverted-V の成長時間を観測から定量的に求めた例はなく、我々の結果は沿磁力線電場の形成機構を考える上で一つの制約を与えることができたと言える。

2つ目の成果は、Inverted-V 加速領域近傍で電子の微細な沿磁力線加速をとらえたことである。従来は FABs などの微細な沿磁力線電子加速現象の観測ではその詳細が不明であったため、個々の現象の違いが明確ではなかったが、我々の観測からは少なくとも2つのタイプの加速現象が存在することがわかった。一つはエネルギー分散構造と周期性を持っているタイプである。このようなタイプの FABs は Inverted-V の近傍のみならず、Inverted-V からやや離れた場所や、Inverted-V に重なって観測され、Inverted-V とは独立した加速機構によるものであることが示唆される。もう一つのタイプは上記のようなエネルギー分散性や周期性を持たず、Inverted-V のエッジ付近でしか観測されなかった。これら二つのタイプの区別は高時間分解能ロケット観測によって初めて得ることのできた成果の一つと言える。前者のタイプの一例を図1に示す。図は LEP-ESA によるピッチ角 30度以下（降り込み側）の観測結果を横軸時間、縦軸エネルギーで表示したもので、ロケット打ち上げ後 200~250 秒までの 50 秒間のデータである。図の両側に見える Inverted-V 型の降り込みの間に 1 秒スケールのエネルギー分散構造を伴った電子の降り込みが周期的に観測されている。様々な特徴からこの周期的な降り込みは過去に Inverted-V 付近で見られた沿磁力線電子加速と本質的には同じものと考えられるが、我々の高時間分解能観測によって新たに次のようなことがわかった。エネルギー分散とピッチ角分散を用いることで加速粒子は高度数千 km において生成されたことが明らかとなったが、加速域は一点ではなく高度 2000~6000 km 磁力線方向に広がっていることが示唆された。さらに、加速エネルギーが高いものほど高高度で生成された可能性が高いことが示された。このような加速機構の解明にとって重要な情報は、従来の観測能力では得ることができず、まさに高時間分解能観測によって初めてもたらされたと言える画期的成果である。

本ロケット実験の解析結果および過去の観測結果等を鑑みてその加速機構の候補を検討した結果、Inertial Alfvén Wave(以下 IAW)というプラズマの運動論を考慮したアルフヴェン波動の一種により電子が加速された可能性が高いことが分かった。この波動はオーロラ粒子加速高度付近において沿磁力電場を維持したまま伝播することができ、過去の理論的研究、衛星観測などからも有力な候補として挙げられていたものである。本研究では、ロケット実験で得られた各観測結果を基に独自の数値計算モデルを構築し、IAW による電子加速の妥当性を検討した。図2は IAW モデルによってロケット観測をシミュレートした結

果の一例で、観測と同じフォーマットでプロットしてある。数値計算の結果、降り込み電子のエネルギーレンジ、時間スケール、フラックスなどが観測とよく合うことが示された。その詳細な加速過程を調べると、加速された粒子は電離層起源の冷たい電子ではなく、50eV程度の太陽風起源の比較的温度の高いものとの共鳴加速であることがわかった。またその加速高度は2000kmから6000km付近で高高度ほど高いエネルギーの電子が生成されるといふ観測からの推測が再現された。これらの結果は、LAWによる沿磁力線電子加速の役割の重要性をさらに認識させるに至らしめた。

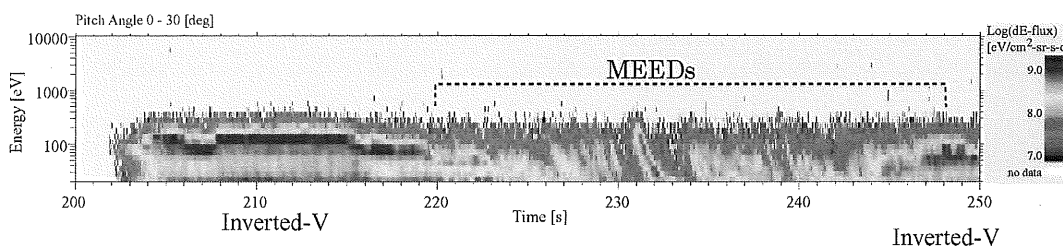


図1. ロケット打ち上げ後 200-250 sec 間に ESA データの Energy-time diagram (ピッチ角 30deg 以下)。Inverted-V 型加速領域の間でエネルギー分散構造を伴った 1sec スケールの電子の降込みが周期的に観測された。

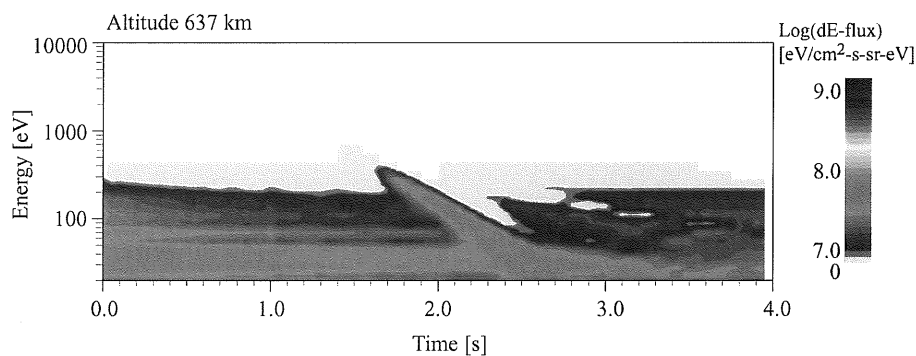


図2. Inertial Alfvén wave model による数値計算結果。ロケット高度における 4 秒間の Energy-time diagram。図1と同様のフォーマットでプロットしてある。