

## 論文審査の結果の要旨

氏名 岡 光夫

宇宙空間における高エネルギー粒子の衝撃波を介した生成機構は、宇宙プラズマ分野や宇宙線分野などにおける未解決の問題としてこれまで精力的に研究されてきた。しかし、遙か彼方の宇宙空間に発生する高エネルギー現象は、その結果として放射されるX線などを観測するよりほかに観測手段はなく、加速の現場を直接調べることはできない。

一方、地球前面定在衝撃波（バウショック）においては人工衛星による直接探査が行われており、まさに加速の現場を観測することができる。特に、磁気圏探査衛星GEOTAILは十年以上にもわたって継続的に観測を行っており、その豊富な観測データからバウショックを形成するプラズマの総合的な診断が可能になった。

本論文では、GEOTAIL衛星の観測データを包括的に解析することによって、バウショックにおける粒子加速の実態について論じられている。とりわけ、これまでほとんど報告がなされていないバウショックにおける電子加速について重点的な解析が行われており、太陽風パラメータに応じて電子の加速条件がどのように変化するか、など、新しい重要な知見が含まれている。論文は全七章と五つのappendixで構成されており、その中核は三章から六章である。以下に各章の内容を述べる。

### （第三章）電子の衝撃波統計加速

これまでに知られていた被加速電子が衝撃波遷移層に局在化する「スパイク」状の電子加速イベントとは明らかに異なり、被加速電子の空間プロファイルがなだらかに分布する電子加速イベントの発見について報告がなされた。観測データの様相から、粒子が衝撃波遷移層を行き来することで加速される「衝撃波統計加速理論（以下DSA理論）」の適用可能性が詳細に論じられた。適用に際しては、(1) 電子が指数関数的に上流にしみだしているか、(2) 電子がDSA過程で衝撃波を行き来しているか、(3) 電子のピッチ角散乱を担うホイッスラー波が存在するか、(4) 観測されたエネルギースペクトルはDSA理論と矛盾しないか、の4つのポイントを中心に議論がなされた。その結果、観測された冪型のエネルギースペクトルは、その冪指数が標準的なDSA理論で予言されるものとは異なっているものの、空間拡散係数の評価をより現実的なものになるようDSA理論を修正した結果、大きな矛盾なくDSA理論で解釈可能なことが示された。

### （第四章）ホイッスラー臨界マッハ数

本章ではバウショックにおける電子加速イベントの統計解析結果が論じられた。電子が有為に加速されている「非熱的イベント」に対して、エネルギースペクトルの冪指数のマッハ数および衝撃波角に対する依存性などが示された。冪指数はホイッスラー臨界マッハ数を境にして値が異なることが明らかになり、超臨界の場合は「スパイク」状で冪指数は3.0~3.5、亜臨界の場合は空間的になだらかで冪指数は3~5の幅広い値をとること、がわかった。ホイッスラー臨界マッハ数による電子加速の性質の差異が観測的に確認されたのは

はじめてのことである．第三章に示されたDSAイベントのように，亜臨界の場合はホイッスラー波が上流に存在するためにDSAが起きる可能性があることが指摘されている．

#### （第五章）衝撃波内部構造

第三，四章ではホイッスラー亜臨界の場合は電子加速現象がDSA理論によって解釈可能であることが示されたが，本章では衝撃波の内部構造をよく分解できていた1996年7月1日の観測例を解析することにより超臨界の場合の加速機構について議論している．高エネルギー電子は衝撃波ランプ領域で観測され，電子加速が明らかに非断熱的なものであることが示された．衝撃波遷移層中では6種類のプラズマ波動が観測されており，それぞれ暫定的にモードの議論がなされ，被加速電子の出現と対応してランプ領域で観測されたものは広帯域の静電波（BEN）であることが示された．これらの観測結果は最近提案されたサーフィン加速と矛盾していないこと，加速領域がランプであったことからドリフト加速・リップル加速の寄与も考えられること，など，観測事実に基づいた加速機構についての議論がなされた．本章における観測は今後の理論・数値シミュレーション研究による素過程の解明に重要な示唆を与えている．

#### （第六章）沿磁力線イオンビーム

ホイッスラー臨界マッハ数に対して亜臨界の場合は概して衝撃波角が小さく，電子のみならずイオンも上流に逃げるということが知られている（沿磁力線ビーム，FAB）．しかしながらFABの生成機構や生成率のパラメータ依存性はこれまで数値シミュレーション研究はなされてきたものの，観測的には未だに明らかになっていない．本章では，FABイオンを長時間継続して観測したイベント（1995年10月19日）について詳細な解析結果が報告された．イベント解析をテスト粒子シミュレーションとも組み合わせる行うことにより，従来議論のあった漏出説ではなく反射説を支持する結果を示した．また，従来よりも高精度のバウショックモデルを用いて解析することにより，衝撃波角が70度以上に達するまでの広い角度範囲で有為なFABフラックスが検出されることが示された．この結果は，バウショックの幅広いパラメータ範囲において反射イオンが衝撃波ダイナミクスに影響を与えていることを示唆する重要な結果である．

以上をまとめるに，本論文提出者はバウショックにおける非熱的粒子の生成について膨大な観測データに対して緻密なデータ解析研究を行い，宇宙空間における衝撃波を介した非熱的粒子加速機構について重要な新しい成果を挙げた．本論文には，寺澤敏夫氏，小嶋浩嗣氏，松本紘氏，藤本正樹氏，笠羽康正氏，斎藤義文氏，向井利典氏，篠原育氏との共著論文の内容が含まれるが，本論文提出者が主体となって研究遂行したものであると認められる．

以上により，審査員一同は博士（理学）の学位を授与するに十分値するものと判定した．