

## 論文審査の結果の要旨

氏名 岩本 昌倫

相対論的衝撃波は、シンクロトロンメーザ不安定により高強度の電磁波放射源になっていると考えられている。また、電磁波放射に伴って形成される航跡場の非線形崩壊を介して非熱的な高エネルギー粒子が生成される可能性も指摘されており、高エネルギー天体物理の研究対象として注目を集めている。本論文では、数値的な正確さを保ち、空間2次元の相対論的衝撃波の数値シミュレーションを実行することによって、相対論的衝撃波におけるシンクロトロンメーザ放射による大振幅な電磁波やその非線形発展に伴う粒子加速の可能性を実証することを目指し、以下の結果が得られた。

本論文は6つの章から構成される。第1章では、導入として相対論的衝撃波が注目される理由、高強度電波放射や宇宙線加速といった現象、また、シンクロトロンメーザ不安定や航跡場など、相対論的衝撃波を理解する鍵となる物理素過程などが解説された上で、本論文の問題意識が明確に提示されている。第2章では、本研究を通して使用された数値モデルの詳細が説明されている。相対論衝撃波を計算する上で特に留意された点は、1つは数値チェレンコフ不安定の影響を取り除くことであり、もう1つは計算結果の収束性である。後者は、シンクロトロンメーザ不安定は高波数まで電磁波を励起する為にシミュレーションの空間解像度を細かく取る必要があるが、多くの過去の計算では十分な解像ができていないと考えられている。本論文では、空間解像度依存性を調べ、計算結果の収束性を丁寧に確認することによって計算手法の確かさを示し、本論文の結果に対する計算手法による影響を排除した。

第3章、第4章が本論文の主要部である。第3章では、電子・陽電子系における大振幅の前駆電磁波が存在する場合の相対論的衝撃波について、そのグローバル構造及び前駆電磁波の特性、粒子のエネルギースペクトル分布が詳細に解析されている。多次元系では1次元系には含まれない空間自由度があるので、ワイベル不安定等により、衝撃波遷移領域において電子の速度空間におけるリング状分布が乱される可能性がある。結果として、シンクロトロンメーザ放射が弱められ、航跡場が形成されても粒子に影響を与え得るものではなく、可能性が先行研究で推測されていた。しかし、本論文は、衝撃波遷移領域でワイベル不安定が最も支配的になるようなパラメータ領域でさえ、大振幅の前駆電磁波が持続し続けることを示し、シンクロトロンメーザとワイベル不安定の共存は両不安定の典型的な空間スケール差によることを明らかにした。更に、上流の磁場配位の依存性を調査した結果、磁場配位に関係なく大振幅の前駆電磁波が生成されることを明らかにした。これは、コヒーレントな電波放射が相対論的衝撃波に本質的に備わった性質であることを示す、相対論的衝撃波の構造を規定する重要な結論である。

第4章では、電子・イオン系の相対論的衝撃波について、前駆電磁波と衝撃波上流のプラズマの相互作用や新しい粒子加速プロセスが示されている。電子・イオン系の相対論的衝撃波では、航跡場を介した電子とイオンのカップリングに伴う正のフィードバックによって、波の振幅が大幅に強化されることが明らかにされた。上流域の衝撃波近傍では、航跡場はパラメトリック減衰不安定の非線形プロセスによって崩壊する。そこでは上流域の誘導電場によって電子・イオンが共に加速され、上流静止系において計測した粒子のエネルギースペクトルに明確な非熱的分布を形成していることが見出された。粒子の加速メカニズムを解析した結果、粒子は上流のローレンツ因子の二乗まで加速されることを明らかにした。

第5章では、数値シミュレーション結果に基づいて、相対論的衝撃波のシンクロトロンメーザ放射の高速電波バーストへの適用可能性や高エネルギー天体における粒子加速現象への応用が議論された。第6章は本論文の結果がサマリーされている。

以上の本論文の結論は、宇宙プラズマ物理・高エネルギー天体物理の重要な研究対象である相対論的衝撃波の特性について新たな知見を加えており、大きな意義を持つものである。

なお、本論文は、天野孝伸、星野真弘、松本洋介（2～4章）、Jacek Niemiec、Arianna Ligorini、Oleh Kobzar、Martin Pohl（4章）との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値計算及び解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。