

相対論的イオン音波の非線形波動現象に関する理論的研究

学位論文内容の要旨

宇宙空間を飛行する人工衛星や各種の探査機は、多くのデータを地上に送信しており、それは放送・気象・資源調査などに利用されている。近年、これらの人工衛星において、異常放電、搭載機器中の半導体メモリー（IC や LSI）の反転、それが引き金になって生ずる電子機器の破壊のような一連の機能障害が発生して大きな問題となっている。将来、開発が予定されている宇宙構造物やそこで利用されるコンピューターの規模は増大の一途を辿るものと考えられるが、システムが大型化し、利用頻度が増えれば増えるほど異常放電による影響は拡大し、より深刻化するものと予測される。

衛星の正常な運用に重大な障害を与えている現象として、プリカーサー事象、変調イオン音波孤立波、電気二重層、爆発的事象が報告されている。これらの問題の根底には、高速イオン（主に陽子）流に起因する keV から MeV の高エネルギープラズマ波動の影響がある。この波動中のイオンの速度は光速と比較ができるほど速いため相対論的效果が重要となり、大振幅の波が伝わるため非線形効果が強い。即ち、問題の根源は相対論的イオン音波の非線形相互作用にある。衛星の異常放電など現在判明している問題に加えて、宇宙構造物の建設やそこでの住居、各種の実験も計画されており、上記の問題の早期解明の必要性が認められている。従って、宇宙空間の利用な開発を推進するため、相対論的非線形イオン音波に関する研究の確立が要請されている。

本研究は、人工衛星に問題を引き起こしている相対論的イオン音波の非線形現象に着目し、光速イオン流と高次非線形性が変調包絡線孤立波、スパイク状孤立波、相対論的電気二重層、爆発的模式といった新しい波動モードを生じること、それらが互いに結合して高エネルギー波動現象を形成することを明らかにしている。本論文は、相対論的イオン音波の非線形波動構造に関する成果をまとめたものであり、宇宙空間の高エネルギー現象を明らかにすることによって、宇宙工学の基礎に寄与しようとするものである。本論文は全 6 章から構成される。

第 1 章は序論であり、相対論的非線形イオン音波の研究の背景と重要性について述べ、理論上

の問題点を明らかにし、本研究の目的と意義を述べている。

第2章では、相対論的プラズマのイオン音波孤立波を取り扱っている。プラズマ中のイオンの温度が電子温度と同程度の場合、非線形イオン音波に対する一次元、 $K-dV$ 方程式を導き、その解として孤立波を示した。イオン温度が0の場合には、二次元 $K-dV$ 方程式を導き、その孤立波を示した。これら孤立波の位相速度や振幅が相対論的效果および非線形効果によって大きく変化することを明らかにした。また、本章の結果がこれまでに得られている結果をすべて包括することを示した。さらに、人工衛星に問題を引き起こしているプリカーサー事象の発生原因が孤立波であることを明らかにした。

第3章では、相対論的イオン音波の非線形変調現象について述べている。宇宙空間においては、イオン音波の変調波モードは有限波数領域と小波数（長波長）領域において観測されているが、理論的な説明はされていなかった。本章では、上記の二領域で変調イオン音波が形成されること、これらのモードが分散関係によって結合していることを明らかにした。また、イオン音波の安定性を検討した結果、有限波数領域においては変調安定性と変調不安定性が存在し、両者を峻別する臨界波数が相対論的效果によって変化すること、小波数領域ではイオン音波は変調安定であること、さらに衛星や探査機に障害を生じている変調イオン音波は、本章で示された有限波数の変調包絡線孤立波および小波数の包絡線孤立波と同定されることを明らかにした。

第4章では、第2章で示した $K-dV$ 方程式の非線形性が極めて小さく、より高次の非線形性が重要である場合について論ずる。この場合、混合型修正 $K-dV$ 方程式が非線形イオン音波の挙動を支配する。この方程式の非線形性は正のものだけが知られていたが、本研究ではじめて負の非線形性を考慮した。その結果、スパイク状孤立波、電気二重層、爆発的モードが存在することが示された。スパイク状孤立波は高速太陽風の高エネルギー事象や磁気圏のプラズマシートで観測され、電気二重層は磁気圏中や太陽フレア粒子流でよく観測され、爆発的モードは太陽フレア、電波バースト、磁気圏尾部でのバーストで多く観測される。これら三者が互いに相補的に生成され、空間観測で知られるポテンシャル、密度、電場などの微細構造を形成することを明らかにした。

第5章では、磁化プラズマ中の磁場に傾いて伝わる相対論的イオン音波の高次非線形性について述べる。基礎方程式から非線形微積分方程式を導き、電子密度として捕捉粒子型分布を考える。導かれた非線形方程式が強い非線形項を含んでおり、定常解としてスパイク状孤立波と爆発的解を持つことを示した。それらの解は、惑星間空間や磁気圏でしばしば観測される、空間磁場と垂直に近い角度で伝わるスパイク状孤立波やⅢ型電波バースト事象を説明できる。本章で得られた

二種類のモードは非線形波動の基礎に新知見を与えると共に、高エネルギー波動に関する将来の空間観測に応用し得る可能性を有することを明らかにした。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめ、その工学的意義について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 頭 博 昭

副 査 教 授 本 間 利 久

副 査 教 授 深 井 一 郎

副 査 教 授 小 川 吉 彦

副 査 教 授 山 崎 初 男

本論文は、宇宙空間を飛行する人工衛星や探査機に搭載された半導体メモリーの反転や、それに基づく電子機器の破壊を生ずるなど、一連の障害を発生する原因と見なされている、高速イオン流に起因する相対論的非線形プラズマ波動について、理論的解析を行ない、その性質を明らかにしたものであって、全6章で構成されている。

第1章は序論であって、相対論的非線形イオン音波の研究の歴史について述べるとともに、従来の研究の問題点について明らかにし、本研究の目的と意義を述べている。

第2章はプラズマ中のイオン音波孤立波を、初めて相対論的領域において取り扱っている。プラズマ中のイオン温度が電子温度と同程度の場合について、非線形イオン音波に対する一次元 $K-dV$ 方程式を導くとともに、その孤立波解を示した。またイオン温度が0の場合に対して2次元 $K-dV$ 方程式を導き、孤立波解を示した。その結果、これらの孤立波解の位相速度や振幅が相対論的効果と非線形効果によって著しく変化することを初めて明らかにしている。また、非相対論的な扱いによって従来得られている結果は、すべて相対論的に扱った本章の結果に特別な場合として含まれているを示している。さらに、人工衛星の前述のような問題を引き起こしているプリカーサ事象の発生原因が孤立波によるものであることを明らかにした。

第3章では、イオン音波の非線形変調現象の、相対論的効果を明らかにしている。宇宙空間において、イオン音波の変調波モードは有限波数領域と小波数長波長領域で観測されていたが、それについての理論的説明はなされていなかった。著者はこの2領域において変調イオン音波が形

成されること、これらのモードが相対論的領域でも分散関係を通じて結合されていることを明らかにした。さらにイオン音波の安定性を検討した結果、有限波数領域では変調安定性と不安定性が存在し両者を分ける臨界波数が相対論的効果によって変化すること、小波数領域ではイオン音波は相対論的な場合でも変調安定であること、人工衛星等に障害を与える変調イオン音波は、ここに示された有限波数の変調包絡線孤立波および小波数の包絡線孤立波と同定しうることを初めて示した。

第4章は $K-dV$ 方程式の非線形性が小さく、高次の非線形性が重要となる場合について論じている。この場合、混合型修正 $K-dV$ 方程式が非線形イオン音波の挙動を支配することを示すとともに、非線形係数が負になる場合が初めて導かれ、これをもとにスパイク状孤立波、電気二重層および爆発的モードの存在が示された。さらに、これら三者が結合し、空間観測の基礎的物理量である電荷密度や電界等に微細構造を形成しうることを明らかにした。

第5章では、磁化プラズマ中で磁界に傾いて伝搬する、相対論的イオン音波の高次非線形性について解析している。捕捉型粒子分布を考慮し、基礎方程式から非線形微積分方程式を導くとともに、これが高次の非線形項を含むこと、スパイク状孤立波、および爆発的解を持つことを明らかにしている。これらの解によって惑星間空間や磁気圏で観測される、スパイク状孤立波や電波バーストを説明している。

第6章は結論であって、本論文の成果をまとめるとともに、その工学的意義について述べている。

これを要するに本論文は、近年進みつつある宇宙空間の利用に際してその重要性が認識され始めた、高速イオン流にもとづく相対論的イオン音波の非線形波動現象について理論的解析を行い、各種のモードの存在や高エネルギー粒子の発生の可能性を示すなど、その性質を明らかにしたものであって、宇宙工学ならびにプラズマ物理学に寄与するところが大きい。よって著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。