

氏 名	やま ざわ よう へい 山 澤 陽 平
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学 位 記 番 号	人 博 第 129 号
学位授与の日付	平成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 人 間 ・ 環 境 学 専 攻
学位論文題目	Nonlinear Phenomena in the Excitation of the Axisymmetric Electrostatic Waves in a Nonneutral Electron Plasma (非中性電子プラズマ中での軸対称静電波の励起における非線形現象)
論文調査委員	(主 査) 教 授 際 本 泰 士 教 授 後 藤 喬 雄 教 授 宮 本 嘉 久

論 文 内 容 の 要 旨

第一章では、本論文の位置付けと実験に用いた非中性電子プラズマの特徴について述べている。非中性プラズマは磁場と電場を組み合わせた閉じ込め配位の中に、長時間静かに保持することが可能であるため、集団運動としての波動現象の基礎研究に優れた特性をもっている。なかでも様々なモードで固有振動を示す静電波は大きな関心を集めている。本研究では軸対称の静電波の励起に伴って発現する2つの非線形現象について、初めて観測を行い理論的考察を試みたものである。

第二章では、本研究で用いられた実験手法、特に京都大学で開発された環状多電極型閉じ込め装置を中心に記述している。波動現象の実験的研究では波動の励起・観測技術が鍵となる。静電波固有振動の観測では、プラズマの閉じ込めを目的として電位障壁を形成するための電極を、波動を励起・観測するアンテナとして同時に用いる。世界的に広く用いられてきた Malmberg 型の閉じ込め方式に比べて、10倍近い多数の電極で構成される京大型の閉じ込め方式では、波動の励起・観測が柔軟かつ効果的に実行できる。本研究ではその優れた特性を活かして、高度に制御された方法により、従来認識されていなかった非線形現象を検出し、それを解明しようと試みた。

第三章では、今回の研究対象とした非線形現象の第一課題について述べている。ディオコトロン振動と呼ばれ、方位角方向に密度の「こぶ」が伝播する低い周波数(数 kHz 程度)の静電波固有振動(モード数 $m=1$)が、高い周波数(数 MHz)の軸対称静電波を励起することによって急激に減衰することを初めて見出した。この減衰の最中に軸対称静電波の励起に伴いこの「こぶ」が方位角方向に拡散していくことを、二次元の密度分布の時間発展の観測を通じて明らかにした。さらにその減衰率の依存性について詳細な計測を行い、励起された軸対称静電波の振幅の二乗に比例し、磁場強度に反比例することをつきとめた。

さらに、これらの実験結果を以下のようなモデルを用いて説明した。軸対称静電波は軸方向・径方向に振動する電場を持つ。この径方向の電場と、軸方向の磁界の結合によって電子は方位角方向にドリフト運動する。この方位角方向のドリフト運動と粒子密度の擾乱との結合によって発生する粒子束を軸対称静電波の周期(約500ms)で平均すると、二次の項として直流的な粒子束が方位角方向に発生する。この粒子の流れによりディオコトロン振動(周期約1ms)の「こぶ」が方位角方向に拡散し平滑化される。この理論モデルは測定された実験結果と定性的にも定量的にも良い一致をみせた。

第四章では、非線形現象の第二課題について述べている。軸対称静電波固有振動の励起に伴う履歴現象を、外部印加周波数をその共振周波数を通過して掃引することによって観測した。この中で励起された波動の振幅のふるまいは、外部印加周波数の掃引の方向に強く依存することを見出した。軸方向モード数 $n=1$ の静電波固有振動についての観測では、周波数上昇掃引時に励起された振幅の最大値は下降掃引時の当該値に比べてはるかに大きい。さらに、振幅が最大値を示すときの印加周波数は、上昇掃引時のほうが下降掃引時に比べて明らかに大きい。これらのふるまいは非線形項が正である場合の強制ダフィングの方程式から予測されるものと良い一致をみた。

高次のモード $n=4$ の静電波固有振動では全く新しい現象が観測された。下降掃引時において、振幅がゆるやかな増加と

急激な減衰を鋸歯状に繰り返すという現象がそれである。急激な減衰に伴い、低周波側にある $n=1, 2, 3$ モードの発生が検出されていることから、モード間遷移現象によって $n=4$ モードが $n=1$ と $n=3$ のモードに、あるいは $n=4$ モードが二つの $n=2$ モードに遷移したと考えられる。履歴現象とこのモード間遷移現象の2つの非線形現象が競合することによってこのような鋸歯状緩和振動が発現したと解釈される。

従来固有振動数については、無限長のプラズマについて動重力効果を計算した結果から、振幅の増加に伴い負のシフトが引き起こされると予想されていた。これに対して本研究においては、軸方向モード数 n が $n=1$ より増加するにつれて、振動数のシフトは正から負へと符号が逆転することが初めて見出された。その説明として、プラズマの有限長の効果を考慮した動重力モデルを構築した。それによれば、波長がプラズマ長と同程度の場合 ($n=1$) には正のシフト、波長がプラズマ長に比べて短くなると ($n=4, 5, \dots$) 負のシフトが引き起こされる。このモデルは実験で観測された傾向と良い一致をみせて、さらに従来の無限長モデルを包括している。

第五章では結論を述べている。即ち、本研究では円柱状の非中性プラズマにおいて、軸対称静電波固有振動の励起に伴い発現する二つの非線形現象について研究を行った。第一の課題では、外部から励振された軸対称静電波の非線形結合により誘導される流れによって、ディオコトロン振動に伴う密度分布の「こぶ」が、方位角方向に平滑化されて、振動振幅が急速に減衰することを実験的・理論的に示した。

第二の課題は、外部から励起する軸対称静電波の周波数をゆっくり掃引した場合に発生する履歴現象を中心に検討したものである。軸方向モード数 $n=1$ の波のふるまいについてはダフィングの方程式で現象論的に説明することができた。一方、 $n=4$ の波については、周波数掃引に伴う履歴現象と、モード間遷移現象という二つの非線形過程が競合して、周波数下降掃引時に振幅の緩やかな増加と急速な減衰を鋸歯状に繰り返すという新しい現象が初めて観測された。

さらに履歴現象に伴って観測される非線形の共振周波数シフトについて、従来の予測とは異なる傾向を観測し、プラズマの有限長を考慮した新しい動重力モデルを用いて統一的に説明した。

論文審査の結果の要旨

電子のみが存在するため電気的な中性条件が成立しない非中性プラズマは、密度分布の中心軸を閉込め磁場の方向と一致させると、数日にわたる良好な閉込め性能と、電気的に遮蔽されないことによる相関の強さを示す特徴的な多粒子系である。円筒状の電子プラズマの中に励起された集団運動である軸対称分布の静電波が引き起す、非線形協同現象の2つの局面について、最初の観測を行い、理論的な説明を試みたのが本論文の骨子である。

第1の実験は、軸方向には一様であるが、半径方向に突出た「こぶ」が円周方向に局在して回転するディオコトロン振動と呼ばれる長寿命の集団運動を、軸対称静電波を重畳することにより、急速に減衰させ得ることを初めて示したものである。申請者は電子密度の二次元分布の時間発展を計測することにより、ディオコトロン振動の減衰率が軸対称静電波の振幅の二乗に比例して、また磁場強度に反比例して増加することを示した。この実験結果に対して申請者は次の理論モデルを提唱し、定量的に良い一致を見た。即ち、軸対称波の持つ半径方向電場と磁場との結合によって電子は円周方向に振動する移流を受けるが、それと密度の高周波摂動との非線形結合の結果として、直流的な輸送効果が円周方向に現れ、「こぶ」が急速に円滑化される一種の拡散過程が有効とするものである。この解析は準線形理論の枠組に属するものであるが、従来の速度空間の拡散方程式に至る描像を実空間において展開し、実空間の密度分布として観測したところに大きな意義がある。

第2の実験は、軸対称静電波に属するが軸方向の波長と周波数が異なる波（周波数の増加の順にモード数 $n=1-4$ ）のそれぞれについて、外部から励起する周波数を掃引した場合に発生する履歴現象を観測したものである。最も特徴的な履歴現象として、各モード波の固有周波数を挟んで励起周波数を上昇させる場合と下降させる場合では、発生する集団運動の振幅に違いが生じて、途中で急速な分岐の発生が観測された。最も低い周波数でプラズマ長の2倍の波長を持つ $n=1$ モード波はその典型例であり、強制ダフィングの方程式によって現象論的に説明できた。一方高周波の $n=4$ モードについては、周波数上昇掃引の場合は典型例に近い特性であるが、周波数下降掃引の場合は異なっており、全く新しい現象が発見された。即ち、プラズマの集団運動として励起される波の振幅は、下降掃引に伴い、急速な減衰と緩やかな増加を鋸歯状に繰り返すことが、申請者によって初めて報告された。この急速な減衰の瞬間には、 $n=2$ モード同士のペアか $n=1$ モード + $n=3$ モードのペア

アのいずれかが発生して、その後緩やかに減衰する。このようなモード間の非線形的なエネルギーの移動が、この鋸歯状緩和現象の中核的過程であろうと考えられる。この解釈の立場から見ると、本実験は従来の非線形力学の枠組に履歴効果を加えることによって、非線形物理研究の新しい局面を切り開くものであり、その意義は高く評価される。

この $n=4$ モードの急速な減衰過程については更に注目すべきことがある。短時間ではあるが、エネルギーの受け手である低いモードの周波数は単独に存在する場合の固有周波数よりも下方にシフトして、3つの波の間に周波数の整合が成立つことが観測された。これは全く新しい現象であり、今後も詳細に検討する価値がある。この現象は申請者が別な条件で独立に確認した強い波動の持つ動重力効果とは矛盾しない。しかし、それよりも大きな周波数シフトが現れており、更なる検討に値する問題であると考えられる。これに関連して、低周波側にある $n=1$ モードについては波自身の動重力が増加するにつれて固有周波数が増加の方向にシフトすることを申請者は観測している。この実験結果は既に米国の研究者によって報告されている理論モデルとは反対の傾向にある。その理論的説明として、申請者はプラズマの有限長効果を取り入れた非線形モデルを提案し、実験との間に定性的な一致を得ている。この理論的検討の面では更に厳密な導出と物理的描像の明確化が望まれる。

以上申請論文の内容は、非中性プラズマの中に発生する集団運動が、外部からの強い励起によって如何に応答するかに注目し、過去の履歴が影響する環境の中で、多様な非線形現象として発現する過程に実験的・理論的検討を加えたものである。これらの成果は新しく、物理学的に興味深いものである。ここに発見された現象のいくつかは、多数の要素が相互作用するシステムにおけるマクロな現象に関して、新しい視点からの見直しを要請するものであり、人間・環境学研究科自然人間共生論講座の主旨に沿った論文と言える。

よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値のあるものと認める。また平成13年2月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。