

氏 名	塩崎 優		
学位（専攻分野）	博士（学術）		
学位記番号	総研大甲第 840 号		
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 24 日		
学位授与の要件	物理科学研究科 核融合科学専攻 学位規則第 6 条第 1 項該当		
学位論文題目	歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の非線形発展		
論文審査員	主査	教授	中島 徳嘉
		助教授	藤堂 泰
		教授	岡村 昇一
		教授	東井 和夫
		教授	福山 淳（京都大学）

論文内容の要旨

フィッシュボーン不安定性は高エネルギー粒子によって駆動される MHD 不安定性である。トカマクプラズマにおけるフィッシュボーン不安定性の空間構造は、内部キンク不安定性と同様に安全係数 q が 1 よりも小さいプラズマ中心に存在し、主なポロイダル／トロイダルモード数は $m/n=1/1$ である。理論研究によって反磁性ドリフトフィッシュボーンと歳差ドリフトフィッシュボーンの 2 種類が存在することが知られている。前者においては不安定性の実周波数はバルクイオンの反磁性ドリフト周波数にほぼ等しく、後者においては高エネルギーイオンの歳差ドリフト周波数にほぼ等しい。後者の周波数はエネルギー原理において高エネルギーイオンによる不安定性の駆動がほぼ最大になる値である。周波数が高エネルギーイオンからの寄与によって決定されていることから、歳差ドリフトフィッシュボーンはその性質に高エネルギーイオンが本質的な役割を果たすモード、すなわち非摂動論的モードであると言える。

フィッシュボーン不安定性の線形段階の性質については多くの理論的な研究がなされているが、非線形段階に関する理論・シミュレーション研究はほとんど行われていない。唯一の例外として反磁性ドリフトフィッシュボーンのシミュレーション研究があるが、その研究では MHD 非線形性と電気抵抗が考慮されておらず、非線形段階の研究としては不十分である。我々は高エネルギー粒子 -MHD 統合シミュレーションコード MEGA を用いて歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の非線形シミュレーションを実行し、その飽和過程の解明に成功した。

歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の研究に先立ち、TFTR トカマクにおいてアルファ粒子によって不安定化されたトロイダル・アルヴェン固有モード (TAE) に関するベンチマークテストを実行し、NOVA-K コードによるモード構造、周波数及び成長率の解析結果と比較して良好な一致を確認した。

次に、フィッシュボーン不安定性が観測された PDX トカマクと同様の条件を設定し、現れる不安定性の線形段階の性質を調べた。シミュレーションの初期条件として、捕捉粒子が主成分である高エネルギーイオン分布と矛盾のない MHD 平衡を構築して用いている。この初期条件では $q=1$ 磁気面が $r/a=0.3$ に存在し、高エネルギーイオンが存在しない状態では内部キンク不安定性が発生する。このときの内部キンク不安定性の実周波数は 0 である。高エネルギーイオン圧力が異なる平衡を調べた結果、高エネルギーイオン圧力があるしきい値を超えると不安定性の実周波数が内部キンク不安定性の 0 付近から高エネルギーイオン歳差ドリフト周波数程度に遷移することを見いだした。高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換を調べたところ、この不安定性が高エネルギーイオンによって駆動されていることが確認できた。これらの結果から、この不安定性は歳差ドリフトフィッシュボーンであると結論できる。

歳差ドリフトフィッシュボーンの非線形挙動を、5つの異なる初期条件についてシミュレーションを実行して調べた。歳差ドリフトフィッシュボーンの飽和過程は以下のようによまとめることができる。

1. 線形成長段階においては Joule 加熱による単位時間あたりのエネルギー変換率が

高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換率と比例して増大する。線形成長段階において前者の値は後者よりも一桁ほど小さい。不安定性飽和時においては高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換率がほぼ一定の値を取るのに対して、Joule 加熱によるエネルギー変換率がそれと同レベルに達して不安定性が飽和する。

2. 不安定性の成長とともに磁気再結合によって磁気島が形成される。さらに線形成長モードの磁場揺動に含まれる $m/n=1/1, 2/1$ 成分及び非線形結合によって発生する $m/n=3/2$ などの成分の重なりによって乱れた磁力線領域が発生する。

3. 磁気島と乱れた磁力線領域における高エネルギーイオンの軌道は初期平衡配位における軌道とは大きく異なり、フィッシュボーン不安定性の駆動に寄与できなくなると考えられる。その結果、不安定性の駆動に寄与できる共鳴粒子数が減少し、高エネルギーイオン圧力勾配も同時に減少するため、高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換率は増加せずほぼ一定レベルを保つものと考えられることができる。

4. 不安定性の飽和時において、高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換は継続している。フィッシュボーン不安定性と同様に高エネルギー粒子によって駆動されるアルウ^グエン固有モードの場合は、高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換が停止することによって不安定性が飽和する。これはアルウ^グエン固有モード自身によって共鳴粒子が捕捉（波動-粒子捕捉）されるからである。フィッシュボーン不安定性の飽和過程においては波動-粒子捕捉は重要ではないと結論できる。

5. 径方向速度の飽和レベルと線形段階における複素周波数の絶対値から推定したプラズマ変位の飽和レベルは $q=1$ 磁気面半径と同程度である。これは磁力線ポアンカレプロットにおいてプラズマ中心の位置が大きく動いていることと矛盾しない。反磁性ドリフトフィッシュボーンに関する過去のシミュレーション研究においては、プラズマ変位の飽和レベルは $q=1$ 磁気面半径の 10%にも満たない大きさであった。そのシミュレーション研究においては MHD 非線形性と電気抵抗が考慮されておらず、磁気再結合が発生しない制約があったことが我々の結果との違いをもたらしていると考えられる。フィッシュボーン不安定性の非線形発展においては、MHD 非線形性と電気抵抗を考慮することが必要不可欠であり、磁気再結合が重要であると結論できる。

6. 不安定性飽和時において周波数低下が起こる。高エネルギーイオンが小半径方向に輸送され、その分布が平坦化するとともに周波数が低下する。

7. 初期条件は全てプラズマ中心における q 値が 1 よりも小さい場合であり、調べられたフィッシュボーン不安定性は内部キンク不安定性と同様にプラズマ電流によっても駆動されている。プラズマ中心における q 値を 1 に近づけると電流駆動型の性質は弱まり、磁場揺動の飽和レベルは小さくなるが、プラズマ変位の飽和レベルはこの場合も $q=1$ 磁気面半径と同程度である。

以上のように、歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の非線形シミュレーションに世界で初めて成功し、その飽和過程を解明した。本研究の結果は、歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の非線形段階における磁気再結合と乱れた磁力線領域の重要性を示している。今後のフィッシュボーン不安定性の非線形シミュレーションにおいては、本研究のような磁気再結合を取り扱うことが可能なモデルと手法が用いられねばならない。また、磁気再結合はイオンラーモア半径や電子慣性などのプラズマの微視的効果が

重要な複雑な過程であるため、フィッシュボーン不安定性の完全な理解のためにはそのような効果を取り入れていくことも今後は必要であろう。

論文の審査結果の要旨

歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性は実周波数等の性質に高エネルギーイオンが本質的な役割を果たす高エネルギー粒子駆動 MHD 不安定性である。従って、アルウ`エン固有モード (TAE) 等の解析のように、MHD 揺動により実周波数や固有関数をほぼ同定し、高速イオンを摂動的に分散式に導入するといった摂動論的取り扱いができない非摂動論的高エネルギー粒子駆動 MHD 不安定性であると言える。この非摂動論的な性質のため、その非線形発展や飽和機構は現在までのところ明らかにされておらず、将来的な大型装置における垂直中性粒子ビーム入射による加熱を想定すると、歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の非線形発展及び飽和機構の解明は極めて重要な研究課題と考えられる。この飽和機構等の解明において重要な点は、実験結果との比較において理論モデルの妥当性を検証しつつ、その物理機構を解明する必要性である。

本論文では、以上の点を考慮して、歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性が最初に観測された PDX トカマクと同様の条件下で、高エネルギー粒子 - MHD 統合シミュレーションコード MEGA を用いた非線形シミュレーションを実行し、線形及び非線形段階での実験結果とシミュレーション結果の整合性を綿密に検討しつつ、歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の飽和機構の解明に世界で初めて成功している。

その飽和過程をエネルギー収支の観点から見ると、線形成長段階においては、高エネルギーイオンから MHD 流体への単位時間あたりのエネルギー変換率と比例してジュール加熱によるエネルギー変換率も増大するが、後者の値は前者よりも一桁ほど小さい。非線形段階においては高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換率はほぼ一定の値を取り、ジュール加熱によるエネルギー変換率がそれと同レベルに達して不安定性が飽和する。

この飽和過程を MHD 揺動と粒子軌道の観点から見ると、不安定性の成長とともに磁気再結合によって磁気島が形成され、さらに線形成長モードの磁場揺動に含まれる $m/n=1/1$, $2/1$ 成分及び非線形結合によって発生する $m/n=3/2$ などの成分の重なりによって乱れた磁力線領域が発生する。磁気島や乱れた磁力線領域の形成により高エネルギーイオンの軌道は初期平衡配位における軌道と比較して小半径方向に大きく広がる。この結果、共鳴粒子数の減少と圧力勾配の減少から、高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換率は増加せずほぼ一定レベルを保つものと考えられる。小半径方向速度の飽和レベルと線形段階における複素周波数の絶対値から推定したプラズマ変位の飽和レベルは $q=1$ 磁気面半径と同程度であり、磁力線ポアンカレプロットにおいてプラズマ中心の位置が大きく動いていることと矛盾しない。更に、不安定性飽和時には、小半径方向への輸送に伴う高エネルギーイオン分布の平坦化により、実験で観測されているように周波数低下が生ずる。

不安定性の飽和時において、高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換は有限の値で継続しており、固有モード自身によって共鳴粒子が捕捉(波

動-粒子捕捉)され、高エネルギーイオンから MHD 流体へのエネルギー変換が停止することによって不安定性が飽和するアルウ^{en}固有モードの場合とは、飽和の物理機構が異なっている。フィッシュボーン不安定性の飽和過程においては波動-粒子捕捉は重要ではなく、磁場揺動が作り出す磁気島や乱れた磁力線による高速イオン分布の小半径方向の平坦化と共鳴粒子の減少が本質的と結論できる。

以上のように、歳差ドリフトフィッシュボーン不安定性の非線形シミュレーションに世界で初めて成功し、その飽和過程を解明すると同時に、同不安定性の非線形段階における磁気再結合と乱れた磁力線領域の重要性を明確に示した、独創的、且つ、発展性のある研究であり、更なる研究の進展が期待される。