

京都大学	博士 (工学)	氏名	山本泰弘
論文題目	Studies of Toroidal Flows Driven by Electron Cyclotron Heating in Three-Dimensional Torus Plasmas (3次元のトーラスプラズマにおける電子サイクロトロン加熱のトロイダル流への影響)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、核融合エネルギーの利用を目指したトーラス型磁気閉じ込め装置プラズマにおける電子サイクロトロン加熱 (ECH) により駆動されるトロイダルトルクとそのトロイダル流への影響について、モンテカルロ法を用いた数値シミュレーションにより解析を行った研究成果をまとめたものであって、7章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、核融合反応、トロイダル型磁場によるプラズマ閉じ込めおよびトロイダル流について概説し、本研究の目的と構成について述べている。</p> <p>第2章では、本研究に用いた ECH による高エネルギー電子の運動論的解析のために開発されているモンテカルロ解析コード GNET について、用いられている基礎方程式、数値解析手法であるグリーン関数法およびクーロン衝突モデル、さらに ECH 加熱モデルについて説明している。次に、本研究でトロイダル流を評価するために用いている運動量釣り合いの式について説明している。</p> <p>第3章では、大型ヘリカル実験装置 (LHD) プラズマにおける ECH によるトロイダル流駆動に関するシミュレーション結果および実験結果との比較・検証について述べている。まず、軸対称な磁場配位と、非軸対称な LHD 磁場配位において GNET コードを用いて $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクと衝突トルクを評価している。軸対称な磁場配位においては、電子の有限軌道幅による効果を除いて、$\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクと衝突トルクが打ち消し合う結果が得られた。また LHD 磁場配位においては、$\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクが支配的となることが示され、またトルクの向きは加熱位置よりも径方向内側で Counter 方向、外側で Co 方向であり、LHD 実験によって得られているトロイダル流の変化方向と一致することが示されている。次に、2つの特徴的な実験に対して比較検証を行っている。結果として、両方向 NBI 加熱によって維持されたプラズマ中に ECH を重畳させた場合では、得られたトロイダル流が実験結果と良く一致した。また、Co-NBI 加熱によって維持されたプラズマ中に ECH を重畳させた場合には、NBI トルクを打ち消すほど強い ECH トルクが中心部で得られず、実験とは乖離が見られることが示されている。さらに、ECH トルクの磁場配位依存性や加熱位置依存性を調べている。結果として、電子が捕捉されやすいリップボトムを ECH 加熱した場合、リップトップを加熱した場合よりも大きなトルクが得られた。また、磁場配位依存性については、軌道効果によって高エネルギー電子の閉じ込めが改善された内寄せ配位で小さなトルクが得られ、また逆に高エネルギー電子の閉じ込めが比較的悪い外寄せ配位において、最も大きなトロイダルトルクが得られている。また、得られたトルクで駆動されるトロイダル流を評価したところ、粘性が比較的小さく、トルクが比較的大きい標準配位で最も大きなトロイダル流が得られることが分かった。トロイダル流は駆動力のトルクだけでは決まらず、新古典粘性などの減衰項にも依存することを示した。</p> <p>第4章では、準ヘリカル対称装置 (HSX) プラズマにおける ECH によるトロイダル流駆動に関するシミュレーション結果および実験結果との比較・検証について述べている。完全にヘリカル対称な磁場配位を用いた場合、ヘリカル対称な方向にはトルクが打ち消されるが、準ヘリカル対称な QHS 配位においては、その小さな非対称モードによって $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクが支配的になることが示された。また、ray-tracing シミュレーションにより吸収パワーを</p>			

評価すると、QHS 配位では、Mirror 配位の場合より 1.5 倍吸収パワーが大きいにも関わらず、Mirror 配位で得られたトルクのピーク値は QHS 配位の 2 倍程度大きいことが得られた。次に、得られた $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクをアンペールの式を用いて運動量釣り合いの式に導入し、解くことによってトロイダル流を評価している。結果として、Mirror 配位では粘性が大きく、吸収パワーも小さいにもかかわらず、Mirror 配位でより大きなトロイダル流が得られ、実験結果と良い一致を示している。また、 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクにおいて重要である径方向電流の径電場依存性・密度依存性・温度依存性を調べている。強い径電場が存在する場合には $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによって径方向ドリフト速度が抑制され、径方向電流が減少することが得られた。温度・密度依存性に関しては、温度が低下するほど、また密度が増加するほど衝突周波数が増えるため、高エネルギー捕捉電子の径方向平均自由行程が小さくなり、径方向電流が小さくなることを示している。

第 5 章では、トカマクプラズマにおける ECH によるトロイダル流駆動に関するシミュレーション結果について述べている。理想的なトカマクプラズマでは、磁場配位に軸対称性があると考えられるが、実際には有限個のトロイダル磁場 (TF) コイルによるリップルや共鳴磁場摂動 (RMP) によって、3 次元的磁場成分が存在する。この 3 次元的磁場成分をもつトカマクプラズマにおける ECH による $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクおよび衝突トルクを GNET コードにより評価している。結果として、TF リップルや RMP によって ECH による電子電流が増加し、正味のトルクを発生させることが得られている。また、GNET による計算結果を TF リップルによって生じる $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクに関する理論モデルと比較し、理論モデルと定性的に良い一致が得られている。トロイダルモード数を $n = \pm 3$ として RMP の影響を評価し、捕捉電子の軌道が変化することによって、RMP モードの方向が磁力線方向に近い場合に最も大きなトルクが得られることが示されている。

第 6 章では、LHD プラズマ中のトロイダル流についてトーラス内外非対称性を発生させる Pfirsch-Schlüter (PS) 流に関するシミュレーション結果および実験結果との比較・検証について述べている。特に ECH 加熱を行ない電子温度がイオン温度に比べ高く、径電場が電子ルート上の解をとり、大きな正の径電場が得られた場合に PS 流が大きな非対称性を作り出すことが示された。また、LHD において観測されたトロイダル流の非対称性は PS 流によって説明できることが示された。さらに、トロイダル流の非対称性からプラズマ中の静電ポテンシャルを評価し、これらは荷電交換分光装置による計測結果と比較的良好一致が得られている。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合エネルギーの利用を目指したトーラス型磁気閉じ込めプラズマにおける電子サイクロトロン加熱 (ECH) により駆動されるトロイダルトルクとそのトロイダル流への影響について、モンテカルロ法を用いた数値シミュレーションにより解析を行った研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 3次元磁場配位における高エネルギー粒子に対する運動論シミュレーションコード GNET を拡張し、大型ヘリカル実験装置 (LHD) における ECH により加速された高エネルギー電子が駆動するトロイダル流を評価した。両方向 NBI 加熱プラズマに ECH を重畳させた場合、得られたトロイダル流の変化は実験結果と定量的に良い一致が得られ、ECH による高エネルギー電子が発生させる $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクの重要性を初めて示した。
2. 準ヘリカル対称装置 (HSX) における ECH による $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクの重要性を示すため、ヘリカル対称性の度合いが異なる 2 つの ECH プラズマ実験結果と得られたトロイダル流についての比較検証を行った。結果として、実験結果と同様にヘリカル対称性の度合いが低い磁場配位において大きなトロイダル流が得られ、HSX のトロイダル流駆動における $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクの重要性を示した。
3. 3次元的磁場配位を有したトカマクプラズマにおける ECH による $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ トルクの重要性を示すため、トロイダル磁場リップルおよび共鳴磁場摂動による 3次元磁場成分を仮定しトロイダル流駆動の可能性を検証した。結果として、3次元称成分の影響で ECH による電子電流が増加し、正味のトルクを発生させることを初めて示した。また、トロイダル磁場リップルの場合、理論モデルと定性的に良い一致を示した。
4. LHD プラズマ中のトロイダル流について Pfirsch-Schlüter (PS) 流の影響を評価した。径電場が電子ルートの解となり、大きな正の径電場が得られた場合に PS 流がトーラスの内側と外側で大きな非対称性を作り出すことが分かった。また、LHD 実験で観測されたトロイダル流の大きな非対称性は PS 流によって説明できることを示した。

以上のように、本論文は新たに開発したシミュレーションコード等を用いて、トーラス型装置における電子サイクロトロン加熱に関連するトロイダル流の物理について解析を行っており、炉心プラズマにおけるトロイダル流の理解に大きく、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 3 年 2 月 19 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。