

氏名	さとう ゆう 佐藤 優
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成27年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 量子エネルギー工学 専攻
学位論文題目	The Interaction between Magnetic Island and Poloidal Flow in TU-Heliac
指導教員	東北大学准教授 北島 純男
論文審査委員	主査 東北大学教授 橋爪 秀利 東北大学教授 長谷川 晃 東北大学准教授 江原 真司 東北大学准教授 北島 純男 東北大学准教授 松山 成男

論文内容要約

2011年3月11日に発生した東日本大震災による原発事故は、民衆の原発に対する不信感を大いに募らせた結果となり、2015年時点において稼働中の原発は0である。原発を養護する側が訴える原発の必要性の一つとして電力需要が挙げられるが、昨年夏の電力需要のピーク時に日本の原発がほぼ停止していたにも関わらず、電力不足が起こらなかった事実は原発不要論者の格好の批判材料になったと考えられる。更に昨今の社会不安の一つである人口減少も伴い、今後原発に関わる業界は厳しい状況が続く事が予想される。しかしながら、原発の積極的廃棄は原子力技術の低下につながり、国益の観点から望ましくないと考える。原発は資源を他国に依存しているが、資源の他国依存は日本の経済活動の土台が資源輸入国に左右される危険性を示唆しており、この点も国益を損なっていると考えられる。以上述べた発電システムの危険性、原子力技術、資源の依存、これらの課題をクリアできる発電技術はまさに夢の発電技術であり、多くの不安を抱える日本社会に安心を提供する素晴らしい技術である。既存の実用化されているどの技術もそれをクリアするに至っていない。ではどういった発電技術がそれを可能にするのか。それが核融合発電である。

核融合発電は21世紀におけるエネルギー問題を根本的に解決する究極の発電方法であるが、定常的な発電システムの確立には種々の困難があり、現状実用化に至っていない。しかしながら、電磁流体等を包含するプラズマ物理や、プラズマ診断及び炉工学等、多様な学問領域を取り扱う核融合は、その実用を目指す過程で多くの物理的および工学的知見を生み出してきており、多分に学際的である。これは日本の国益に大いに貢献しようと考えられる。しかしながら、上述したようにエネルギー問題で核融合の必要性を述べる事は原発同様困難であり、この観点から科学研究費等の圧迫が懸念される。従って、核融合炉実現は近年では国際協力のもと大型トカマク装置 ITER を用いた ITER 計画を始め、より具体的かつ現実的な計画の提示が求められている。

核融合発電を実用レベルにまで引き上げるには、より少ない制御パラメータで核融合反応をコントロールする事が望まれる。そのためには核融合プラズマにまつわる物理現象を詳細に明らかにしなければならない。実用炉として期待されている核融合方式の一つとして磁場閉じ込め方式が挙げられる。この方式は核融合反応に必要な通常の構造材料の融点を超える超高温プラズマを閉じ込める容器として磁場を用いる磁場閉じ込め方式である。正負の荷電粒子で構成されるプラズマはアンペールの法則により磁力線に絡みつ়く性質があり、磁場閉じ込め方式はこの性質を利用してプラズマを閉じ込める。しかしながらこのプラズマと閉じ込め磁場との相互作用が種々のプラズマの不安定性を生み出す原因になっており、定常的に安定な高温プラズマを閉じ込めなくてはならない磁場閉じ込め核融合炉実現を困難にする中心課題である。

磁場閉じ込め型核融合炉は一般に入れ子になったトーラスの磁力線構造を有している。あるトーラスを取り巻く磁力線は面を形成し、これを磁気面という。電磁的な幾つかの不安定性の解消のため、入れ子状になった磁気面毎に磁力線の向きを変化させている。この角度は回転変換 ι と呼ばれ、回転変換が有理数の磁気面を特に有理面という。回転変換が無理数の面では磁力線は無限回磁気面を周回するのに対し、有理面では有限回の周回のあと元の位置に戻る。このときのトロイダル及びポロイダル方向の周回数をそれぞれトロイダル及びポロイダルモード数 n, m といい、 $\iota = n/m$ で表される。磁力線に束縛されたプラズマは磁気面上のみ自由に移動する事ができ、プラズマのパラメータは同一磁気面上で均一化される。従って 3 次元構造を有するプラズマは磁気面をトポロジーとして定義した関数に簡略化する事ができる。しかしながらこの単純化した取り扱いを困難する要因がある。それは摂動磁場によるトポロジーの破壊である。摂動磁場は閉じ込め磁場に比べ小さな副次的な磁場であり、閉じ込め磁場コイルの設置誤差により偶発的に、あるいは外部から能動的に印加される。摂動磁場によって磁力線構造は乱され面は維持できなくなり、散り散りになる。この構造をストキャスティック構造という。ただし、上述の有理面は摂動磁場により共鳴し、局所的な入れ子状の磁気面を新たに形成する。これを磁気島という。どちらの構造もそのスケール長だけ磁力線に束縛されたプラズマが自由に移動できるようになり、主要な閉じ込め磁場の系外への粒子輸送を増大させる事につながる。従って摂動磁場はプラズマの閉じ込めを劣化させる望ましくない現象であり、その抑制手法が研究されている。反対に、この摂動磁場の粒子輸送効果を利用し、H-mode と呼ばれる閉じ込め改善モード時の周辺局在化モード (edge localized modes: ELMs) 制御に利用する事も検討されている。こういった有用性及び非線形物理への学術的知見の提供の観点から、摂動磁場により励起されたストキャスティック構造或いは磁気島がプラズマに与える影響、特にプラズマ流との相互作用は大いに価値があり、核融合発電の実現に寄与するものであると考えられる。よって本論文では磁気島とプラズマのポロイダル流の相互作用に関する実験的研究を東北大学ヘリアック装置 (TU-Heliac) において行う事を目的とする。

本論文は全 9 章から構成される。以下各章を概説する。

Chapter 1 序論

本章では上述の本論文の背景と目的について述べられている。本研究では磁気島とポロイダル流の相互作用について、以下の事を調査した。

1. 多点マッハプローブの開発 (本論文 Chap. 4)
2. 磁気島によるポロイダル流への減速効果の調査 (本論文 Chap. 5)
3. 磁気島による過渡的なポロイダル流への影響の調査 (本論文 Chap. 6)
4. 磁気島によるプラズマパラメータへの影響の調査 (本論文 Chap. 7)
5. 磁気島による閉じ込め改善現象の妥当性及び原因の調査 (本論文 Chap. 8)

更に、多変数関数であるプラズマパラメータを効率的にハンドリングするテンソル様の演算規則の考案およびプログラム開発を行った(本論文 Chap. 3)。

Chapter 2 実験装置

本章では本論文で使用した実験装置について述べられている。上述の様に実験は TU-Heliac において行った。TU-Heliac は磁気島とポロイダル流の相互作用研究を行う上で以下の利点を有している。

1. 3 種の閉じ込め磁場コイルに流す電流比を調整する事により、回転変換分布を制御できる。従って磁気島が発生する有理面の位置を制御できる。
2. 外部摂動磁場コイル (PFCs) を有しており、閉じ込め磁場にストキャスティック構造及び磁気島を励起できる。
3. プラズマ中に挿入した六ホウ化ランタン (LaB₆) 製熱陰極バイアスによる ExB ポロイダル流の駆動力を制御

できる。

計測はラングミュアプローブの一種であるトリプルプローブ及びマッハプローブを用いて行った。トリプルプローブは電子温度、密度、浮遊電位、空間電位を、マッハプローブはポロイダル流をそれぞれ計測するために用いた。トリプルプローブ法に関しては、本実験条件において許容され得る種々の仮定を明示し、導出を詳細に行った。特に電子温度の評価は逐次代入を用いてより高い精度で評価した。対象とするプラズマは 18.7 kHz の交流オーミック加熱により励起したヘリウムプラズマであり、その代表的な電子温度 T_e 密度 n_e はそれぞれ $T_e \sim 10$ eV、および $n_e \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ である。またプラズマへの入力パワー評価のため、電流電圧評価にそれぞれロゴスキーコイル及びワンターンコイルを用いた。

Chapter 3 テンソル演算規則の定義及びプログラムの開発

プラズマは多変数関数であり、その変数は計測技術及び解析技術の向上によって更に増加するものと考えられる。数式は物理量同士の関係を記述しているが、多変数の或いは多次元の記法に関しては検討の余地があると考えられる。既存の多次元の変数を記述する記法としてテンソルがあるが、異なる添字同士の演算に関していくつかの 2 項演算は明確に定義されていないものと考えられる。そこで添字の位置の及び字によって加減乗除及び内積、外積、直積を定義する演算規則を考案した。また、パーミュテーションシンボルに用いる互換の最少回数を定式化し、更に上記演算規則を用いて多次元配列を一次元配列で記述する際の配列のアサインメントに関して定式化した。

Chapter 4 多点マッハプローブの開発

計測点を 3 つ持つ多点マッハプローブを開発した。マッハプローブは遮蔽体を挟んだ 2 つの電流補修面で構成されるラングミュアプローブである。片方の補修面を流れに対し正対させ、もう片方を流れに対し遮蔽体の影になるように配置する。このとき両方で計測されるイオン飽和電流には差が生じ、この電流比からプラズマ流速を評価できる。プラズマは放電毎にばらつきを持つので、空間毎のプラズマ流の変化を知るためには複数点で同時計測できるマッハプローブが望ましい。計測毎に配線の数が多くなるので、プラズマの擾乱を考慮しシャフト直径 3 mm の 3 点マッハプローブを開発した。電流補修面は製作上の誤差から面積にばらつきがあったため、指向性を持つプラズマ流の中にマッハプローブを挿入し、シャフトに対し方位角方向のプラズマ流速分布を計測する事により面積比の校正を行った。マッハプローブのプラズマ流の絶対値評価に関しては、粘性やイオンラーマ半径及びプローブ径に応じて種々の計測理論が提案されているが、未だ研究途上と考えられる。そこで、本研究においては本実験条件において許容され得るいくつかの仮定を用いた単純なモデルからプラズマ流速ベクトルを定式化した。この式で評価したプラズマ流はドップラー分光器で評価したプラズマ流速と同オーダーであり、計測及び評価の妥当性の傍証が得られたと考えている。

Chapter 5 磁気島によるプラズマ流の減速効果の調査

磁気島により生ずる径方向輸送はプラズマを中のポロイダル流に対し減衰力として作用する事が予想される。プラズマ周辺に磁気島を励起しマッハプローブを用いポロイダル流速を評価しこの減衰効果を調査した。磁気島より内側、プラズマ中間付近で最も減速する事、減衰量は磁気島の幅に対し単調増加する事が観測された。また、ポロイダル流速の増加に応じてこの減速量が減少する結果が得られた。そこで単純なせん断応力の式から減速量を定式化し、磁気島励起時のせん断応力がポロイダル流速に反比例すると仮定し、L-M 法による任意関数フィッティングを行い未定係数を決定すると、現象を良く説明できる事ができた。

Chapter 6 磁気島による過渡的なポロイダル流の影響の調査

プラズマをポロイダル方向に駆動した時に生ずる減衰力はプラズマのイオン粘性とイオンと中性粒子の荷電交換による摩擦力にバランスしており、減衰力をポロイダルマッハ数 (\propto ポロイダル流速) の関数としてプロット

した時に分岐解が生ずる事が理論的に提唱されている。解の分岐はポロイダル駆動力がある閾値に達した時にポロイダル流速が急激に増大する事を意味しており、この現象は TU-Heliac においても実験的に観測されている。この極値はイオン粘性によって生ずるため、磁気島励起による径方向粒子輸送の増大によりイオン粘性の極値が増大する可能性が示唆される。そこで、ポロイダル流速が急峻に増大した時の減衰力を磁気島幅（磁気島のスケール長に比例）の関数としてプロットし、依存性を調査した。結果として、磁気島幅の増大に応じて減衰力は単調増加した。従ってイオン粘性は磁気島幅と正の相関を持っているという傍証が得られた。

Chapter 7 磁気島によるプラズマパラメータへの影響の調査

より顕著な磁気島によるプラズマの変化を調査するために、磁気島をプラズマ圧力の高い中間位置に配置し、磁気島有り無しの条件におけるプラズマパラメータの比較を行った。電極バイアスによるポロイダル駆動力が大きい時、磁気島有りの条件のほうが無しの条件に比べ、ポロイダル流は磁気島周辺で増加・磁気島内側で減少し、電子圧力は全体的に増大し、従って電子圧力で評価した蓄積エネルギーは増大した。またプラズマの閉じ込めの度合いを抽象的に評価するため、エネルギー閉じ込め時間の評価を行った。エネルギー閉じ込め時間は蓄積エネルギーとその時間微分値及び入力パワーの関数として定義される。上述の通り本実験は 18.7 kHz の交流オーミック加熱を行っているため、入力パワーは単一周波数を仮定し、ヒルベルト変換を用いて平均電力を評価した。結果として、磁気島有りの条件は無しの条件に対し、無バイアス付近を除くどの電極バイアスによるポロイダル駆動力においても増大する事が明らかになった。この結果は磁気島励起時に閉じ込めが改善されるという、「磁気島は本質的にプラズマ閉じ込めを劣化させる」という認識とは異なるものであり興味深い半面、現象の評価には慎重にならなければならないため、次章において種々の検討を行った。

Chapter 8 磁気島による閉じ込め改善現象の妥当性及び原因の調査

磁気島による閉じ込め改善現象の妥当性及び原因を検討するために、以下の点について評価を行った。

1. 時間平均 $E \times B$ 径方向粒子束
2. $E \times B$ シアー率
3. 時間平均レイノルズ応力

時間平均 $E \times B$ 径方向粒子束に関しては、磁気島励起により、磁気島領域およびその内側において増大し、それより外側では磁気島有り無しでほぼ一致した。従って磁気島により本来増大するはずの径方向輸送が何らかの要因により抑制された事が分かる。また $E \times B$ シアー率は乱流輸送の低減の度合いの指標である。磁気島励起によって $E \times B$ シアー率はプラズマ周辺で増大しており、この領域は径方向輸送が抑制されたと考えられる領域と一致している。従って、乱流輸送の低減は閉じ込め改善現象に関わっている可能性が示唆される。マッハプローブのイオン飽和電流値からバイスペクトル解析を用いてレイノルズ応力の評価を行い、乱流による層流へのエネルギー輸送の評価を行った。計測点の都合上磁気島付近の評価しか行えなかったが、本評価手法において磁気島周辺においてレイノルズ応力は磁気島励起により増大した。これは磁気島励起時において、乱流のエネルギーが層流へと輸送された事を肯定する評価結果であり、また磁気島によって乱流輸送が低減したとする上記評価結果と矛盾しない。

Chapter 9 結論

本研究では、磁気島とポロイダル流の相互作用に関する種々の調査を行い、各章で述べたような結果が得られた。特筆すべきは、磁気島よりプラズマの閉じ込めが改善される条件が存在するという事実であり、その原因が乱流輸送の低減に起因するものであるという仮説である。Chapter 8 で述べた評価はこの仮説を支持している。