

氏 名 朝日 良光

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 1579 号

学位授与の日付 平成25年3月22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 非等方圧力 MHD 平衡解析に基づく LHD プラズマの  
圧力非等方度同定手法の研究

論文審査委員 主 査 教授 岡村 昇一  
教授 渡邊 清政  
准教授 大館 暁  
教授 中村 祐司 京都大学  
教授 政宗 貞男 京都工芸繊維大学

## 論文内容の要旨

LHD では、経済的な核融合炉心に必要の高 $\beta$ 放電( $\beta$ =プラズマ圧力/磁気圧力)を実現している。この高 $\beta$ 放電では接線入射 NBI のみによってプラズマを生成・維持していること、比較的低磁場、低密度運転のため熱圧力に比べてビーム圧力の割合が高いため、磁力線に平行方向の圧力が磁力線に垂直方向の圧力より高い非等方な圧力が予測されている。しかし、将来の高密度運転における核融合炉では等方圧力であることが予想されるため、LHD で得られた安定性や輸送の特性を将来の装置へ外挿するためには、現在の LHD 高ベータ実験の非等方圧力の平衡、安定性、輸送に対する影響を検証する必要がある。その第一歩として本研究では、圧力非等方度の同定法の確立を目指す。

過去の研究により、ヘリカルプラズマでは磁気計測値や磁気軸位置からプラズマの圧力非等方度を同定できる可能性が示唆されているが、非等方圧力プラズマにおいて磁束値と $\beta$ 値との関係を定量的に見積もる研究はなされていない。非等方度を同定するためには、なんらかの方法によって非等方ベータ成分 $\beta_{||}$ や $\beta_{\perp}$ と磁場や磁束の計測値( $B$ ,  $\Phi$ )を関係づける必要がある。本研究では、 $\beta_{||}$ や $\beta_{\perp}$ と磁気計測値とを平衡電流を介して関係づける手法を採用した。 $\beta_{||}$ や $\beta_{\perp}$ と平衡電流の関係づけに非等方圧力プラズマの平衡解析コードを、平衡電流と磁束値の関係づけに磁束値解析コードを用いることで、両者の関係づけを行った。

本研究では、非等方圧力 MHD 平衡解析コードとして ANIMEC コードを、磁束値解析コードとして JDIA2 コードを用いる。ANIMEC コードは、非等方圧力下でのプラズマの力の釣り合いを変分原理により求め、3次元 MHD 平衡を同定する。圧力非等方時には圧力分布は磁気面量とは限らないので、非等方圧力下の MHD 平衡解析ではどのように圧力分布をモデル化するかが重要となる。本研究では、幅広い圧力非等方度を表現可能で、圧力非等方圧力分布を規格化トロイダル磁束と磁場強度の解析的な関数系で表すことができる bi-Maxwellian モデルに基づいた非等方圧力分布を用いた。ANIMEC では、磁場に平行方向の圧力と垂直方向の圧力は、磁場に平行方向の力の釣り合いによって関係づけられるので、平行方向圧力分布のみを分布関数から規定する。平行方向圧力成分のうち、熱圧力成分を Maxwellian から、非等方な高エネルギー粒子による圧力成分を bi-Maxwellian モデルにより規定する。JDIA コードはプラズマ領域の格子分割された各要素に電流が流れたときに、それが計測ループで観測される磁束を計算するコードである。プラズマ内の平衡電流の分布は ANIMEC コードの結果を用いる。JDIA と ANIMEC はそれぞれ異なる定義の磁場・電流密度を変数として使っていたため、平衡解析結果をそのまま JDIA コードへ適用することはできなかった。そこで、JDIA コードを改良し電流密度の定義を合わせることで、非等方圧力プラズマの磁気計測信号を解析できるようになった。

磁束値と $\beta$ 値がどのような関係になるかを、非等方圧力 MHD 平衡解析コード ANIMEC と磁束値解析コード JDIA2 を使い、圧力分布、圧力非等方度、速度分布関数の形状、磁場配位を変えて調査した。まず圧力分布を  $(1-\rho^2)$  に比例すると仮定し、圧力非等方度を変えたプラズマに対して、ベータ値が反磁性磁束値とサドルループ値がどのような関係を持つかを調査した。磁場配位は高ベータ実験の標準配位である磁気軸 3.6m の内寄せ配位とした。反磁性磁束値 $\Phi_{DIA}$ は $\beta_{\perp}$ の一意関数でほぼ

表され、 $\beta_{\text{tot}} (= (\beta_{\parallel} + 2\beta_{\perp})/3)$  や  $\beta_{\text{eq}} (= (\beta_{\parallel} + \beta_{\perp})/2)$  では一意関数で表されなかった。また、サドルループ磁束値 $\Phi_{\text{SL}}$ は $\beta_{\text{eq}}$ の一意関数でほぼ表され、 $\beta_{\text{tot}}$ や $\beta_{\perp}$ では一意関数で表されなかった。このことから磁束値からそれぞれの $\beta$ 値を見積もるための較正関数を、 $\beta_{\perp}$ は $\Phi_{\text{Dia}}$ のみの関数として、 $\beta_{\text{eq}}$ は $\Phi_{\text{SL}}$ のみの関数として、求めた。具体的には、較正関数を等方圧力の場合の $\Phi_{\text{SL}}$  vs.  $\beta_{\text{eq}}$  と  $\Phi_{\text{Dia}}$  vs.  $\beta_{\perp}$  の関係を使った。この較正関数を使うことで、ある程度の精度で $\beta$ 値を同定可能であると予想される。しかし、圧力分布や磁場配位、分布関数の形状が変わっても、この関係が一般に成り立つかどうかかわからない。そこで、圧力分布や磁場配位、分布関数の形状の変化が圧力非等方度の同定にどの程度影響するかを考察するために、圧力プロファイル、磁場配位、捕捉粒子の比率を変えて調査した。その結果、 $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel}$  の範囲が 0.70 ~ 1.55 であれば、誤差 10%以下の精度で磁束値からベータ値 $\beta_{\perp}$ 、 $\beta_{\text{eq}}$ を同定可能であることを示した。しかしながら、非等方圧力プロファイルが異なる場合は、反磁性磁束値 $\Phi_{\text{Dia}}$ 、サドルループ磁束値 $\Phi_{\text{SL}}$ とも $\beta_{\perp}$ 、 $\beta_{\text{eq}}$ の一意関数で表すことができないので、非等方圧力分布を別の方法で同定する必要がある。

次に、非等方圧力プラズマで得られる MHD 平衡の性質を調べるため、平衡の性質を示す特徴的なパラメータである磁気軸位置と LCFS 幾何中心の位置の非等方圧力依存性を調査した。その結果、非等方圧力分布が等しければ、非等方度や分布関数の形状を変えても、磁気軸位置は $\beta_{\text{eq}}$ のほぼ一意関数で表され、非等方度を変えても一意関数からのズレは5%以下であった。過去には非等方度と磁気軸シフトの関係が解析的に考察され、磁気軸シフトは $\beta_{\text{eq}}$ に比例することが示された。この解析モデルでは、非等方圧力の磁気面量からのズレを $\epsilon^2$ と仮定している。本研究で用いた bi-Maxwellian 速度分布関数による解析では、圧力非等方度が $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel}=1.6$ のときに、圧力分布の磁気面量からのズレが非常に大きいと予測しており、このモデルと先述の解析モデルが同様の結果を示した理由は今後検証する課題である。

先述の通り作成した較正関数を基に、低密度で接線方向入射 NBI 加熱のみで生成・維持しているプラズマに対して $\beta_{\text{eq}}$ や $\beta_{\perp}$ を見積もった。この実験放電で得られるプラズマでは非等方な圧力が予想される。計測された磁束値から、数種類の仮定した圧力プロファイルそれぞれでの $\beta_{\parallel}/\beta_{\perp}$ を見積もることができた。さらに、平衡解析で得られた $\Phi_{\text{SL}}$  vs.  $R_{\text{ax}}$ の関係が圧力分布により異なる性質を利用して、トムソン散乱計測により見積もられた磁気軸位置から圧力分布を特定し、 $\beta_{\parallel}/\beta_{\perp}$ を同定した。

プラズマのトーラス閉じ込め装置では、磁力線に沿う方向と磁力線に垂直な方向とで、圧力値の異なる非等方圧力を持つプラズマが生成されることが多い。その理由としては、一般的に磁力線方向と磁力線に垂直方向では粒子の速度緩和が異なること、またプラズマ加熱のための中性ビーム入射や波動加熱による粒子加速が、磁力線に対して特定の方向になっているためである。大型ヘリカル装置(以下 LHD)は、経済的な核融合炉の条件である体積平均ベータ値 5%を超える炉心プラズマ条件を実現しているが、強力な磁力線方向の中性粒子ビーム加熱を用いているため、上記のような非等方圧力を持つプラズマが生成されていると考えられている。LHD の高ベータ放電で観測されているプラズマの閉じ込め特性を核融合炉心プラズマに外挿するためには、正確な平衡配位計算に基づくプラズマの安定性や輸送特性の解析が必須であり、また圧力の非等方度そのものがプラズマの閉じ込め特性に与える影響の解明が必要である。そのためには非等方な圧力を持つ MHD 平衡配位を、計測データに基づいて評価する手法の確立が求められる。

従来、磁場構造が 3 次元のヘリカルプラズマでは、圧力非等方を考慮した 3 次元 MHD 平衡解析コードが未開発だったため、計測データに基づいて圧力非等方度を定量的に評価することができなかった。実験研究としては、平衡電流の作る外部磁場(磁気計測値)と圧力非等方度との間の定性的な関係を調べるのみであった。出願者は、近年開発された非等方圧力を考慮した 3 次元 MHD 平衡解析コードと、自身が改良した磁束値解析コードを使って、磁気計測データに基づいてヘリカルプラズマにおける圧力非等方度を評価する手法を世界で初めて開発した。まず、出願者は幅広い圧力非等方度や圧力分布、速度分布関数形状に対して上記のコード群を用いた数値計算を行い、磁気計測値と非等方圧力値の間の定量的な関係を調べた。その結果、幅広い圧力非等方プラズマに適用可能な、非等方圧力値と反磁性ループ磁束信号及びサドルループ磁束信号との間の関係式(校正関数)を導出した。その校正関数を用いることにより、磁気計測値に基づいて精度良く非等方圧力値を評価することが可能となる。更に、プラズマの電子温度分布から導いた磁気軸位置を、非等方圧力分布の平衡計算と比較することにより、磁気面平均した圧力分布が一意に決まることを発見した。この関係と上記に示した校正関数に基づき、反磁性ループ磁束信号とサドルループ磁束信号に加えて、磁気軸位置計測値を用いることにより、非等方圧力値やその磁気面平均した分布形状を特定できる手法を開発した。

次に、中性粒子ビーム加熱により維持された LHD 放電に対して上記の手法を適用し、磁気計測値と電子温度分布から評価した磁気軸位置の情報から、非等方圧力値と圧力分布を評価した。ほぼ同じ加熱条件で電子密度の違う三種の放電に対して、圧力非等方度の電子密度依存性を調べたところ、密度の増加とともに磁場に垂直方向の圧力値に対する磁場に平行方向の圧力値の比が減少することがわかった。また同時に評価された圧力分布は、いずれの場合も電子密度と電子温度分布計測から評価した熱化圧力分布より尖塔化していて、さらに電子密度の上昇と共に尖塔度が増加することがわかった。これらの解析結果は、モンテカルロ数値計算によるビーム圧力の密度依存性の予測と定性的に一致しており、本研究で開発した圧力非等方度の評価手法の妥当性を裏付ける。

更に、非等方圧力値を持つ MHD 平衡配位の性質を調べるため、平衡の特徴的なパラメータであ

る磁気軸位置のプラズマ圧力によるシフト量と非等方圧力値との関係を調べた。その結果、従来圧力の非等方度が十分小さいという仮定の下で得られていた「磁気軸位置のシフト量は、磁力線に平行な圧力と垂直な圧力の等価平均圧力のほぼ一意関数で表される」という解析的表式が、LHDの高ベータ運転条件で予測されるような、圧力の非等方度が大きい場合にも適用可能であることを明らかにした。

以上のように、出願者は、磁気計測データに基づいてヘリカルプラズマにおける圧力非等方度と圧力分布を評価する手法を開発し、またその手法を実験に適用して手法の妥当性の検証を行ったことにより、高ベータヘリカルプラズマの実験結果の炉心プラズマへの外挿性を高める研究に大きな貢献をした。よって本論文の内容は学位（学術博士）の授与に十分値すると判断した。