科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　２６　年　　６　月　２０　日現在

機関番号：　８２１１０
研究種目：　若手研究(B)
研究期間：　2012～2013
課題番号：　２４７４０３７６

研究課題名（和文）偏光計を用いた核燃焼プラズマのための磁場、電子密度及び電子温度の再構成法の研究

研究課題名（英文）Simultaneous Reconstruction of Magnetic Field, Electron Density and Electron Temperature of Burning Plasmas by Using Laser Polarimetry

研究代表者
今澤　良太（Imazawa, Ryota）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門　那珂核融合研究所・研究員

研究者番号：５０５８７０５３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　1,700,000円、（間接経費）　　510,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー光などの電磁波がプラズマ中を通過する際の偏光状態の変化は、近似的にはファラデー効果とコットン・ムートン効果と呼ばれる二つの変化過程の重ね合わせである。核燃焼プラズマのような高電子温度の場合、ファラデー効果による変化過程が弱められ、コットン・ムートン効果による変化過程は強められる。本研究では、両効果における電子温度に対する依存性が逆であることに着目し、コットン・ムートン効果が大きいレーザー波長を選ぶこと、及び両効果の相互作用を考慮することで偏光測定から電流分布（ひいては総プラズマ電流）、電子温度及び電子温度分布の同時再構築が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The change in the polarization state approximates the superposition of the two fundamental processes, the Faraday effect and the Cotton-Mouton effect. In plasma with a high electron temperature of burning plasma, the Faraday effect is degraded, whereas the Cotton-Mouton effect is enhanced. This study demonstrated that the simultaneous reconstruction of the current density, the electron density and the electron temperature from the measurement data for the Faraday and Cotton-Mouton effects by using long wavelengths to obtain a large Cotton-Mouton effect.
Existing fusion experimental devices use many diagnostics. However, a future reactor needs to be operated with fewer diagnostics. This study suggests that multi-parameter measurement using laser polarimetry shows promise for future reactors.

研究分野：　数物系科学

科研費の分科・細目：　プラズマ科学

キーワード：　プラズマ・核融合　プラズマ計測　偏光計測

１．研究開始当初の背景

核融合の磁場閉じ込め方式の１つであるトカマク方式において、内部磁場構造の同定及び制御は長時間維持・高性能化を目指した運転には不可欠である。内部磁場構造は直接測定できず、計測装置の測定データと整合し且つ力学的平衡が成立している磁場分布を推定する。高い同定精度を得るために、プラズマ内部の磁場情報を有するMSE(Motional Stark Effect)計測装置及び偏光計測装置が用いられており、現在主流であるのはMSE計測である。これは、ローカルな磁場のピッチ角が得られるからである。一方、偏光計の測定量は、レーザー光路上の磁場と電子密度との（そして核燃焼プラズマでは電子温度との）積の線積分量である。このため、偏光計のデータから磁場分布を同定するには、複数のレーザーを入射するとともに他の計測装置で測定した電子密度（核燃焼プラズマの場合はさらに電子温度）の情報を用いて再構築計算を行う必要である。

しかしながら、現在主流であるMSE計測は、将来の核燃焼プラズマ装置への適用に関する課題が多い。たとえば、

(1) 中性粒子ビーム(NB)の減衰
（計測に必要なNBがプラズマ中心まで届かず周辺部しか計測できない可能性がある）
(2) 不純物の蓄積やスパッタリングによる第一ミラーの光学特性の変化
（第一ミラーの光学特性のその場較正法を確立する必要がある）

偏光計はこれらの困難が無い。レーザーの入射ポート及びレーザー折り返し用のレトロリフレクターを適切に設計すれば(1)のプラズマ中心部の計測ができないという懸念はない。また、波長が100 μｍ以上のレーザーを用いることにより第一ミラーの光学特性の変化はほとんどないことが報告されており、(2)の懸念も小さい。

偏光計は将来の核燃焼プラズマ装置において実現性が高い計測装置である。しかしながら、これまで偏光計を主たる拘束条件とした平衡計算手法の例は少ない。偏光計が内部磁場構造の同定精度向上に寄与するという先行研究論文においても、MSEを重視し補助的に偏光計を使用した場合に精度が向上するという報告内容である。電流計測として偏光計が使用されているトカマク装置にTEXTORが挙げられるが、同装置の電流分布同定手法はポロイダル断面が円形のプラズマにしか使えず、ダイバータ配位を持つ核燃焼プラズマへの適用は困難である。

２．研究の目的

本研究では、将来の核燃焼プラズマ装置において内部磁場構造同定の主たる測定装置となる偏光計に着目する。これまで偏光計を主たる拘束条件とした平衡計算手法の例は少なく、本研究は他の研究に先行して偏光計を用いた内部磁場同定手法を確立する。

また。本研究で以下の目的も達成する。

(1) 新しい電子温度計測法の確立
(2) 新しいプラズマ総電流計測法の確立

以下、それぞれの特色・意義について説明する。

(*1 について*) 本研究では偏光計から最大限の情報を引き出し、磁場だけでなく電子密度と電子温度の分布まで再構成を行う。電子温度分布の再構成に成功すれば、新しい電子温度測定法を開拓したことになり、今後の核融合装置への波及効果も大きい。

(*2 について*) 偏光計データのみで内部磁場構造の同定を達成すれば、これは偏光計データを用いてプラズマ総電流を同定したことにもなる。プラズマ総電流計測はロゴウスキーコイルの信号を時間積分して行われるが、将来の核融合炉で想定される定常運転（10ヶ月程度の連続運転）のためには、積分器における信号のドリフトの課題を解決する必要がある。したがって、偏光計を用いたプラズマ総電流の同定を達成することには意義がある。

３．研究の方法

偏光計とは、直線偏光したレーザーをプラズマ中に入射し、入射前後の偏光状態の変化量を測定するものである。ある一地点での電場の軌跡は楕円となる。楕円の長軸とx軸との角度を方位角θと呼び、長軸と短軸の比の逆正接を楕円率角εと呼び、偏光状態は方位角θと楕円率角εで記述される。近似的には、方位角θはファラデー効果により変化し、楕円率角εはコットンムートン効果により変化し、それらの変化量は次の式によって表せる：

$$\begin{cases} \Delta\theta = C\lambda^2 \int n_e B_{\parallel} dz \\ \Delta\varepsilon = D\lambda^3 \int n_e B_{\perp}^2 dz \end{cases} \quad (1)$$

ここで、zはレーザーの進行方向を、λはレーザーの波長を、n_eは電子密度を、$B_{\parallel}, B_{\perp}$はそれぞれレーザーの進行方向に平行、垂直な磁場成分を、C, Dは定数を表している。偏光計データと整合するような平衡解を求めることにより、内部磁場構造の同定精度の向上が可能となる。

式(1)はCold Plasma近似に基づいており偏光計データには電子温度の情報が含まれていないが、核燃焼プラズマでは高温であることから相対論効果により偏光状態の変化量が電子温度T_eにも依存するようになる。本研究ではこの電子温度依存性に着目する。方位角及び楕円率角の変化量（$\Delta\theta$及び$\Delta\varepsilon$）の両者を計測し、力学的平衡を仮定して電流密度j_ϕ、電子密度n_e及び電子温度T_eの三物理量の同時再構築を行う。

研究代表者はITERに設置するポロイダル偏光計のための内部磁場構造同定コードCUPID（Current Profile IDentification）を

開発した。CUPID は(ステップ 1)プラズマ電流密度関数 j_ϕの係数からプラズマの力学的平衡を満たす磁場配位を計算する、(ステップ 2)計算した磁場配位と偏光計のデータとが整合するように j_ϕの係数を修正する、という 2 つのステップを繰り返すことで j_ϕの係数を探索する。まず、本研究では CUPID のフリーパラメータ（同定すべきパラメータ）を変更する。変更前後の入力データとフリーパラメータを次の表にまとめた：

	変更前の CUPID	変更後の CUPID
入力データ	・偏光計のデータ ・最外殻磁気面の位置及び形状 ・プラズマ総電流 ・電子密度 n_eの 1 次元径方向分布 ・電子温度 T_eの 1 次元径方向分布	・偏光計のデータ ・最外殻磁気面の位置及び形状
フリーパラメータ(未知数の数)	・プラズマ電流密度関数の係数(6)	・プラズマ電流密度関数 j_ϕの係数(4～6) ・電子密度関数 n_eの係数（3～5) ・電子温度関数 T_eの係数（3～5)

フリーパラメータが多くなるため同定が困難になる恐れがあるが、(1) 偏光計の視線数（データ数）の増加、(2)プラズマ電流密度関数、電子密度関数及び電子温度関数の式の変更、(3)解の探索法の変更により、j_ϕ、n_e及びT_eの同時再構築を実現させる。

次に、視線数や計測データの誤差の増減による、内部磁場構造、プラズマ総電流、電子密度分布及び電子温度分布の同定精度の変化を評価する。計測データの誤差は現在稼働している偏光計装置を参考にする。『ランダムに誤差を与えた後に同定計算を行う』というのを繰り返すことにより、同定精度を統計的に評価することが可能である。

４．研究成果

ITER に設置予定のポロイダル偏光計の測定条件で、偏光計の位角θ及び楕円率角εの測定データ並びに最外殻磁気面の位置及び形状の測定データから j_ϕ、n_e及びT_eの同時再構築を行った。モデルの中心電子密度は 10^{20} (m^{-3})、中心電子温度は 30 keV である。図 1(a)はポロイダル磁気面を、同図(2)は計測視線を、同図(c)は赤道面でのトロイダル磁場の径方向分布を、同図(d)は赤道面での鉛直方向磁場の径方向分布を示している。測定レーザーの波長は 119 μm とした。図 2 は再構築結果を示している。プラズマコア部分での電流密度 j_ϕ、電子密度n_e及び電子温度T_eの再構築誤差はそれぞれ 10 %、3 %、13 %程度であった。電流分布 j_ϕを積分すれば総プラズマ電流となる。総プラズマ電流の同定誤差は 10 %程度であった。図 2 は以下のことを明らかにしている：

(1) 他の計測器で測定した電子密度n_e及び電子温度T_eの情報が無くとも、偏光計から内部磁場構造（つまりは電流密度分布）が同定可能であること。
(2) 偏光計で電子温度が測定可能であること。
(3) 時間履歴に依存しない新たな総プラズマ電流測定方法を考案したこと。

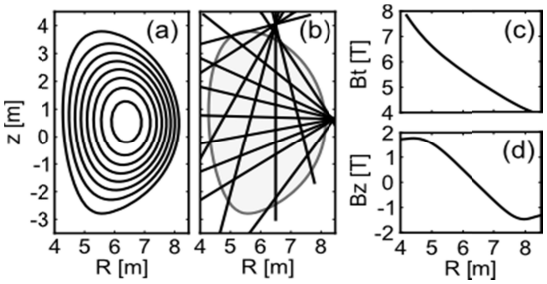

図 1　j_ϕ、n_e及びT_eの同時再構築に用いたプラズマモデルと視線レイアウト。(a)ポロイダル磁気面、(b)視線レイアウト、(c)赤道面でのトロイダル磁場の径方向分布、(d)赤道面での鉛直方向磁場の径方向分布。

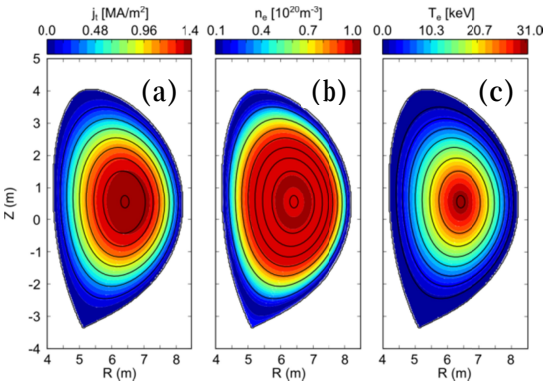

図 2　偏光計のデータ及び最外殻磁気面の位置及び形状から j_ϕ、n_e及びT_eを同時再構築した結果。(a)、(b)及び(c)はそれぞれ j_ϕ、n_e及びT_eの再構築結果

次に、中心電子温度だけを変えて再構築計算を行った。電子圧力が変わるが、磁場分布は図 1 と同じものを使用した。これは、本研究の目的が j_ϕ、n_e及びT_eの同時再構築であるため、入力モデルの物理的な整合性を問題としていないからである。図 3 は、中心電子密度を 10, 20, 30 keV として再構築結果を示している。電子温度が高いほど再構築誤差が小さかった一方、電流分布 j_ϕ及び電子密度n_eの再構築誤差は電子温度を変えてもほとんど変わらなかった。これは、偏光計の測定データにおける電子温度の寄与分が小さいからである。

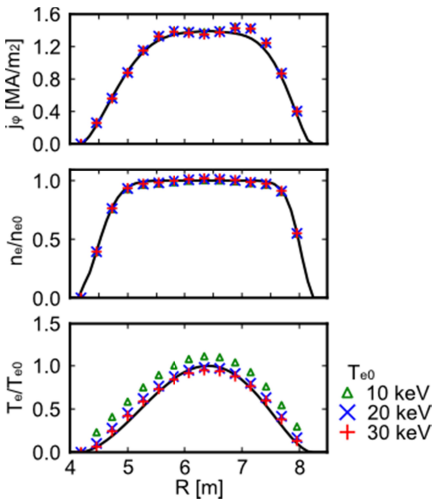

図 3　中心電子温度を 10 (△), 20 (×), 30 (＋) keV と変えて、j_ϕ、n_e及びT_eの同時再構築を実施した結果。上段、中段及び下段のグラフがそれぞれ j_ϕ、n_e及びT_eの赤道面での径方向分布を示している。

最後に、偏光計の測定データに測定誤差がある場合について、本手法の電流密度 j_ϕ、電子密度n_e及び電子温度T_eの同定誤差を評価した。偏光計の測定精度は、現在稼働している偏光計を参考とし、方位角 θ 及び楕円率角 ε の精度をそれぞれ 0.1 度及び 0.6 度とした。図 2 と同じ、波長 119 μm 及び 15 視線を用いた場合の、j_ϕ、n_e及びT_eの同定誤差はそれぞれ 12 %、8.4 %及び 31 %であった（図 4 (a) 参照)。誤差を低減する方法として、視線数を増やすことや波長数を増やすことが考えられる。波長数を増やす場合は、ファラデー効果とコットンムートン効果のカップリングの大きさが異なる波長を適切に選択することが重要である。例えば、15 視線・3 波長 (57, 119, 171 μm) を用いると、誤差は 3.8 %、3.9 %、22 %に低減できることを明らかにした。

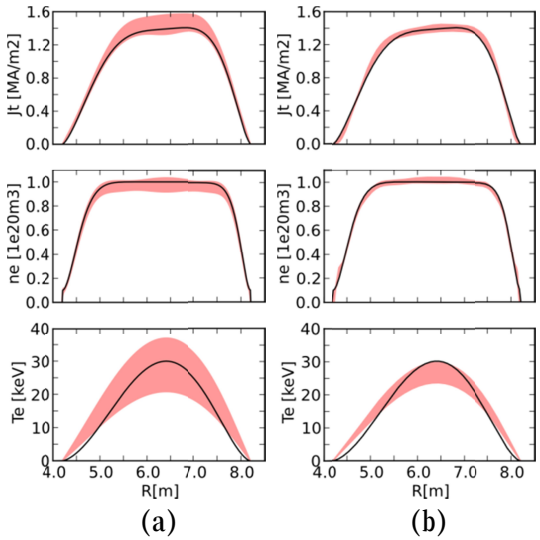

図 4　偏光計の測定誤差を考慮した場合の j_ϕ、n_e及びT_eの同定結果。いずれのグラフも赤道面の径方向分布を示しており、上段、中段及び下段のグラフがそれぞれ j_ϕ、n_e及びT_eの同定結果である。実線が真の分布で、色で示した領域は同定結果の 68 %信頼区間である。(a)は波長 119 μm 及び 15 視線を用いた場合、(b)は 3 波長（57, 119, 171 μm）及び 15 視線を用いた場合の結果である。

まとめ

レーザー偏光法の測定値から電流密度、電子密度及び電子温度という複数の物理量が同時に得られることを示した。また、再構築に使用した測定データは時間履歴ため、本手法は定常運転でのプラズマ計測に適用可能である。電流密度は積分すれば総プラズマ電流となることから、本手法は将来の核融合炉で想定される定常運転（10 ヶ月程度の連続運転）に適用可能な新たな総プラズマ電流測定手法を考案したと言える。

現在のプラズマ核融合実験装置は、多くの計測装置を利用しているが、将来の核融合炉では少数の計測装置による運転しなければならないと考えられる。本成果は、レーザー偏光法による電子温度計測という新たな計測手法を開拓したとともに、少数の計測器から多くのプラズマパラメータ（電流密度、電子密度、電子温度、総プラズマ電流）を取得できるため、将来の核融合炉に有望な手法である。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　1 件）

① R. Imazawa, Y. Kawano and Y. Kusama, “Separation of finite electron temperature effect on plasma polarimetry”, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 査読有り, Vol. 83, 2012, 123507-1～5
DOI: 10.1063/1.4770330

〔学会発表〕（計　4 件）

① 今澤　良太、河野　康則、伊丹　潔、草間義紀、核燃焼プラズマにおける偏光測定法を用いた電子温度測定の性能評価、日本物理学会　第 68 回年次大会、2013 年 03 月 26 日、広島大学 東広島キャンパス
② R. Imazawa, Y. Kawano, K. Itami and Y. Kusama, “Multiparameter Measurement Utilizing Poloidal Polarimeter for Burning Plasma Reactor”, International Workshop on Fusion Reactor Diagnostics, 2013 年 09 月 09 日～2013 年 09 月 13 日, Varenna Italy
③ 今澤良太、河野康則、伊丹潔、レーザー偏光法を用いた核燃焼プラズマの平衡再構築に関する研究、プラズマ核融合学会第３０回年会（招待講演）、2013 年 12 月 03 日～2013 円 12 月 06 日、東京工業大学大岡山キャンパス
④ R. Imazawa, Y. Kawano and K. Itami, “Multi-Parameter Measurement Using Finite Electron Temperature Effect on Laser Polarimetry for Burning Plasma Reactor”, 25th IAEA Fusion Energy Conference (発表確定), 2014 年 10 月 13 日～2014 年 10 月 18 日, Saint Petersburg, Russia

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）

〔その他〕

６．研究組織
(1)研究代表者
今澤　良太（IMAZAWA, Ryota）
独立行政法人日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門　那珂核融合研究所・研究員
研究者番号：50587053

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし