

氏名	Shishir PUROHIT
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	総研大甲第 2103 号
学位授与の日付	2019 年 9 月 27 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	Imaging diagnostics study for structure identification in MHD equilibrium and instability
論文審査委員	主査 教授 榊原 悟 准教授 鈴木 康浩 教授 PETERSON, Byron Jay 教授 長崎 百伸 京都大学エネルギー理工学研究所 准教授 三瓶 明希夫 京都工芸繊維大学

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full: Shishir PUROHIT

Title: "Imaging diagnostics study for structure identification in MHD equilibrium and instability"

Magnetohydrodynamics (MHD) is one of the efficient methodologies to describes the macroscopic plasma behavior. The plasma boundary shape and the mode structure are critical to the MHD studies. The MHD equilibrium is associated with the plasma boundary shape/ flux surfaces and the Shafranov shift (shift in the plasma magnetic axis under increasing plasma β). Whereas MHD instabilities (mode structures) immensely influence the plasma via macroscopically changing plasma temperature (T_e) and density (n_e) profiles. In order to perform, MHD studies, sophisticated diagnostics and/or supporting numerical modeling are required.

Identification of the plasma boundary is a challenging problem, for example, in the three-dimensional (3D) plasma geometry of the stellarator. Traditionally magnetic diagnostics are employed, sometimes this data is coupled with the kinetic profile measurements in the MHD equilibrium calculation. This approach provides not only the plasma boundary shape but also the realization of the Shafranov shift. Such a methodology is generally considered as the indirect measurement of the plasma boundary and then sometimes the discrepancy of the calculated equilibrium and measured data appears. Another approach, which is almost a direct measurement of the plasma boundary, is the reconstruction from imaging diagnostics. In order to reconstruct the plasma boundary, there are different methodologies, and tomographic reconstruction is one of the important procedure. The tomographic reconstruction is either done by considering the reconstruction as an inversion problem or forward problem where the emission profile is reconstructed by the linear combination of orthogonal basis functions.

The progress toward the realization of fusion-grade plasma offers a range of challenges for the study of MHD equilibria and instabilities. Fusion reactors are expected to be more complicated in terms of the design and associated peripherals, like coil system heating systems and so on. The shape of the cross-section shape will be irregular or non-conventional. The presence of heavy neutron flux will add to this constrained situation. The magnetic diagnostics / Thomson Scattering and Electron Cyclotron Emission (ECE) diagnostics may not be operational for the fusion reactor. Imaging diagnostics under proper care will be available for such a constrained environment. The imaging diagnostics will be subjected to viewing restrictions, without a complete view of the plasma. This is a very serious issue in recovering the plasma

a complete view of the plasma. This is a very serious issue in recovering the plasma boundary for a fusion-grade plasma with a bigger device, which serves as the basic motivation of the work presented here in this doctoral project. "Development of the reconstruction procedure for 3D stellarator fusion plasma with a tangentially restricted viewing imaging diagnostic". The expected capabilities for the reconstruction are, it can give the global emission information (complete plasma boundary) from observations in a smaller plasma volume information, handle complex plasma cross-section shapes and at moderate computation expense. The new reconstruction procedure is then designed to address the stated objectives. The series expansion analogy is adopted for this proposal. Under series expansion the two-dimensional (2D) emission profile on a poloidal cross section is expanded into orthogonal fast decaying basis functions. The convenient and often employed orthogonal basis functions are Fourier – Bessel (FB) functions which have the orthogonality and fast decaying nature. One of the inherent properties of Fourier – Bessel (FB) functions is that, they are defined on a fixed domain or shape, for example a circle. As the Fourier – Bessel (FB) function are defined on a fixed shape it is very difficult to employ such functions for the irregular shaped plasma. Therefore a domain-independent function is required. An interesting recommendation is the Laplacian Eigen Function (LEF) which possesses fast decaying and orthogonality character. The LEF is an Eigenfunction of the Laplacian equation and for any given non-trivial solution, ϕ , is referred to the Eigenfunction of the corresponding Eigenvalue, λ , for the Laplacian operator. The Eigen function can be calculated very handily by the Green's function. The Green's function for the Laplacian operator is only a function of the distance between two points defined over any irregular domain. LEF being solely a function of distance means that LEF is independent of the shape of the domain, which is a considerable quality to be exploited for the fusion plasma tomography especially for tangential viewing geometry. The LEF is calculated at the target image plane from the respective green's function. Different LEF patterns corresponding to different Eigenvalues are then achieved. The expansion coefficients which are calculated by L1 type regularization assisted the least squares fitting. The recovery of the coefficient is considered a simple matrix inversion problem. Subsequently the emission profile is determined. Interestingly, the LEF based and therefore reconstruction procedure is independent of the wavelength of the emission, applicable of Soft X-ray/VUV and visible imaging diagnostics.

The LEF based tomographic reconstruction method is applied to the Heliotron J plasma where the SX diagnostic view the plasma normal to the \mathbf{B} . The 2D emission profiles are recovered successfully for simulated and experimental data set and compared with the standard Phillips-Tikhonov. The reconstruction method is also benchmarked for a circular cross-section, tokamak plasma for tangential viewing geometry. The plasma boundary shape and equilibrium plasma emission were successfully recovered. The method is also extended to the simplified stellarator plasma,

a non-circular plasma cross-section. The simplified stellarator plasma geometry considers a horizontally elongated plasma with toroidal symmetry, no rotation of the ellipse in the toroidal space. The equilibrium plasma emission and the plasma boundary were recovered successfully. The most important feature of this new method is with the restricted viewing case. The half images were employed for the recovery of the global emission profile for the simplified stellarator case and an acceptable 2D emission profile was recovered successfully. The LEF reconstruction procedure is eventually applied to the LHD plasma for the simulated and experimental data set, tangential VUV imaging diagnostic, for the recovery of the VUV emission profile

A minor project was also carried out as a part of the Ph.D. project in which a new design for the soft X-ray tomographic diagnostic at Heliotron J (H-J) device was given in order to improve the capability of tomographic diagnostic, especially addressing the identification of the higher poloidal mode number structures in the plasma. The current Heliotron J soft X-ray system (installed at toroidal angle, $\phi = 45^\circ$) design harbors a triad of soft X-ray arrays looking to the plasma in a radial configuration from nearly 90° degrees apart poloidally. Each array has 20 lines of sight, effectively 60 lines of sight are available for the tomographic reconstruction. The diagnostic is found to be capable of generating the 2D equilibrium emission profile. The major challenge was the identification of the higher mode structures. Which was most likely associated with the low number of arrays and lack of information from the plasma. The reconstruction was performed with a simulated 2D emission profile for $m=1/n=1$ and with the reconstructed image the $m=1/n=1$ mode is identifiable, however the reconstruction fails when $m=2/n=1$ is considered. The reconstruction was again conducted with seven arrays for $m=2/n=1$. An improved image is received with a clearly identifiable mode structure. Unfortunately the image does not exhibit the mode structure shape as per the assumed shape. This was due to the flux surface compression at $\phi = 45^\circ$ location. A new location was then searched. The $\phi = 0^\circ$ is where the flux surfaces are uniform and flux compression is absent. Tomographic reconstruction for this new location with seven arrays in then performed with simulated emission profile for $m=2/n=1$ and $m=3/n=2$. The resultant images clearly represent the input mode structures. This enabled a new design for the H-J soft X-ray tomography diagnostic design. The new diagnostic should have seven arrays looking to the plasma in the normal direction of the magnetic field, B , at $\phi = 0^\circ$ location. This exercise was carried out by L2 type Philip-Tikhonov regularization and singular-value decomposition assisted least squares fitting.

Results of the doctoral thesis screening

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 Shishir PUROHIT

Title
論文題目 Imaging diagnostics study for structure identification in MHD equilibrium and instability

将来の核融合炉では、装置の複雑化や放射線に対する遮蔽が必要となるため、炉心プラズマを制御する上で必要とされる電磁流体力学 (MHD) 平衡や不安定性を観測するための計測機器の設置が制限される。イメージング計測は、プラズマを直接監視でき、かつ平衡を再構築する際に必要とされる磁気軸位置や磁気面形状、不安定性制御に必要なモード構造等を直接観測できることから、核融合炉を制御する上で重要な計測機器として大きく期待されている。一方、カメラで計測したイメージデータは、視線に沿った積分量であるために、積分量から局所量への逆変換を適切に施す必要がある。出願者は、ラプラス固有関数を世界で初めて核融合プラズマのイメージング計測に適用し、固有関数のパターンデータの足し合わせとして画像を再構築する方法を開発した。このことにより、イメージング計測のカメラの視野がプラズマ全体を捉えられない場合においても、プラズマ境界形状やモード構造を同定できることを示した。

これまでの核融合プラズマ研究におけるイメージング計測では、逆問題を解いて画像を再構築する手法 (トモグラフィ) により積分量を局所量へ変換する方法が主であった。逆問題の解き方としては、正則化項をペナルティ関数として加えた最小二乗法や固有関数の重ね合わせとして画像を再構築する方法が提案されている。現在のトモグラフィ手法では、正則化項を追加した最小自乗近似が主要な方法として用いられているが、固有関数の重ね合わせとして画像を再構築する手法は、古くより核融合プラズマのイメージング計測に応用されてきた。一例としてフーリエ・ベッセル関数を用いた画像再構築が挙げられ、先行研究において、本関数を適用することにより不安定性による揺動パターンを再構築可能であることが示され、また、計測視野が不十分な場合 (プラズマの半分、もしくは一部しか観測できない場合) でも、プラズマ全体の形状が再構築可能である可能性が、近年示された。

一方、フーリエ・ベッセル関数は、基本的に二次元ポロイダル断面上での画像パターンをモデル化するために用いられている。トカマクのように軸対称性を仮定できる系では、単一ヘリシティを仮定することにより三次元パターンを表現できるが、大型ヘリカル装置 (LHD) をはじめとするステラレータ装置の三次元形状を表現することは不可能である。そこで出願者は、対象とする問題の形状に依存せず、かつ、対象とする物体の境界のみから計算可能なラプラス固有関数の重ね合わせでイメージデータを再構築する方法を提案した。ラプラス固有関数は、プラズマを十分囲む計算領域を設定し、境界上の位置と、計算領域内の位置の距離から定義されるグリーン関数を用いて数値的に計算できる。これまで

医療，天文，地球物理学の分野ではラプラス固有関数を応用した事例があるが，核融合プラズマの分野での応用例は世界初である。また，ラプラス固有関数の重ね合わせとして画像データを再構築する場合，数学的に固有関数の線形結合として定義されるが，線形結合の係数（固有値に対応）を求める際に，正則化により最小限のパターンで精度よく画像を再構築できるようにし，「ラプラス固有関数＋正則化」という新しい画像再構築スキーム（LEF法）を提案した。

出願者は，まず新しく開発した手法を単純な形状を持つ円形トカマクに適用し，シミュレーションデータを用いて，これまで多くの場合に用いられてきた標準的な手法であるPhillips-Tikhonov正則化法（PT法）と比較した。その結果，LEF法とPT法はよく一致し，LEF法による画像再構築がこれまで提案された手法と遜色がないことを示した。次に，円形断面の上半分，左半分しか観測できない場合を想定し，プラズマ形状という巨視的な構造の画像再構築に対して，LEF法とPT法を適用し，比較した。その結果，PT法ではプラズマ形状の再構築ができなかったが，LEF法ではプラズマ面積の半分しか画像データがない場合においても，プラズマ形状を再構築することが可能であることを示した。これは，本研究の目的である，将来の核融合炉におけるイメージング計測の問題点を解決する手段を見出したことを意味する。

次に，LEF法を実際の実験データを基にした画像再構築に適用した。京都大学・Heliotron J装置に設置された軟X線計測器のデータを用いてLEF法とPT法を比較した。Heliotron J装置は二次元軟X線計測アレイが設置されており，プラズマ形状の同定を目指している。LEF法とPT法を用いて，二次元計測アレイのデータから，プラズマのポロイダル断面形状の同定を行った。その結果，実際の実験データを用いた画像再構築でもLEF法はPT法によく一致し，実際の実験データに含まれるノイズの影響を含めても画像再構築が可能であることを示した。

最後に，LHDに設置されている真空紫外線カメラ画像をLEF法により再構築することができるか否か確かめるために数値実験を行った。LHDには接線方向を見込む位置にカメラが設置されているので三次元の固有関数パターンが必要である。そこで，径方向に16，ポロイダル角方向に16，トロイダル角方向を160グリッドに分割し，ラプラス固有関数による画像パターンを構築した。これらの画像パターンを用いてsynthetic画像をあらかじめ計算し，これらのsynthetic画像の重ね合わせとして，元の接線カメラ画像を再構築した。その結果，ガウス関数で定義された発光強度分布をLEF法により再構築することに成功した。このことにより，LEF法がLHDのような複雑な三次元形状に対しても適用可能であることを示した。

以上のように，本論文で提案された手法は，将来の核融合炉で予想されるプラズマ全体を見ることのできない限られた計測視野においても，プラズマ境界のような巨視的な構造に対して，全体を再構築できることを示した。また，ラプラス固有関数による画像再構築が，これまで主に行われてきたトモグラフィの結果と遜色がないことを示した。これは，イメージング計測による核融合炉制御に対する有効性を示す非常に重要な成果である。これらの成果は博士論文の内容として相応しく，本審査委員会は本論文が博士論文として適切であると判断した。