

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760699

研究課題名(和文) 開磁気面平衡を考慮した球状トカマクの定常平衡制御技術の開発

研究課題名(英文) Development of equilibrium control technic for the spherical tokamak plasmas from initial phases to steady state phase

研究代表者

長谷川 真 (Hasegawa, Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：00325482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円、(間接経費) 630,000円

研究成果の概要(和文)：球状トカマクにおいてプラズマの位置と形状を同定して、その制御を行う技術の開発を行う。位置と形状の同定は通常、磁気計測によって行われるが、積分操作を伴うので長時間の運転になるとドリフトが発生し計測誤差が累積する。そこで、プラズマの可視光等の映像をリアルタイム収集して、画像から位置を算出し、磁気信号を推定して磁気計測値の補正を行う。本課題では、プラズマを模擬したライトを用いてテストを行ったが、良好な位置検出と補正が行えることを確認した。また併せてリアルタイム平衡計算コードの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this task is to develop the technic to identify and control plasma position and its shape on spherical tokamaks. In order to identify them, the magnetic signals are generally used. Since these signals are calculated with integration, errors called as drift errors are piled up in the long time plasma discharge. Thus, the idea is to acquire the images of plasma with visible lights, soft x-ray, and so on, and the plasma position is identified with the image in real-time. From this position, magnetic signals are estimated and errors are corrected. In this task, the operation test is done with a flashlight instead of plasma, and the good position detection and its drift error correction are confirmed. Furthermore, the real-time equilibrium calculation code is developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：球状トカマク 平衡制御 定常運転 プラズマ画像 Machine Vision

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合発電を目指した高温・高密度のプラズマ閉じ込め方式の一つとして球状トカマクが挙げられる。この方式は低い磁場でも高温・高密度のプラズマを閉じ込めることができる経済性の高い方式として脚光を浴び、世界各地で球状トカマクに関する研究がなされている。特に、センターソレノイドを用いないプラズマ電流の立ち上げに関する研究は、炉構造の簡素化・軽量化につながり、更に球状トカマクの特徴を最大限に引き出す低アスペクト比を実現させるものとして、非常に魅力的な研究テーマである。閉磁気面 (closed flux surface) を形成させてプラズマ電流を安定に立ち上げるためには、プラズマの位置や形状を把握し、それに応じて外部磁界の印加を行なうなど、きめ細かな制御が必要になる。

(2) 他方、トカマク装置によるプラズマの定常維持の達成も、将来の核融合炉実現のための重要な課題である。現在、九州大学にある QUEST 装置では、球状トカマク炉の定常運転の実証を行なうために、ダイバータ配位での超長時間プラズマ定常維持を目指している。ダイバータ配位は本質的に垂直位置に対して上下不安定であり、常にプラズマの位置、及び形状を正確にモニターし、適切な位置に留まるように水平磁場を用いてフィードバック制御を行う必要がある。プラズマの位置、及び形状を算出するには、通常、プラズマからの磁気信号が用いられる。磁気センサとしてホール素子などが挙げられるが、検出精度は周囲環境温度に大きく依存するため通常は用いられない。代わりにピックアップコイルやフラックスループなどの磁気センサの出力を積分器で積分したものが用いられる。しかし、どんな高精度の積分器であっても積分器の出力には必ずドリフト成分を有し、プラズマの放電が数時間におよぶ場合、このドリフト成分が無視できなくなり、正確なプラズマ位置・形状の算出は不可能になり、その制御も行えなくなる。

2. 研究の目的

球状トカマク装置において非誘導なプラズマ電流立ち上げ、及びその定常維持の達成は、将来の核融合炉の実現において重要な課題である。本研究は、これら課題解決の基盤となるプラズマ制御方法を構築することを目的とする。具体的には、先に述べた背景の課題を解決するために、まずリアルタイム平衡計算の開発及び実機への適用を行う。またこの計算を行う際に使用する磁気センサにおいて、本質的に生じ得るドリフト等を除去し、定常的にプラズマの位置・形状の制御を行う手法の検討などを行う。

3. 研究の方法

(1) 最初に本研究での基礎となる制御用

の平衡計算コードの研究開発を行う。オフラインでの平衡計算コードでは、与えられた初期パラメータに対して一連の計算手続きを何度も繰り返すことで収束性を高めた精度の高い計算をおこなうが、一方で多くの計算時間を要する。他方、制御用の平衡計算コードは、短時間でプラズマの位置や形状を同定することが重要であり、上の一連の計算手続きの実行時間が十分短い場合には、プラズマの位置や形状に大きな変化は無いものと仮定できるので、一連の手続きを実行するごとに新しい初期パラメータを与える。このようにすることで、比較的収束性を高め、且つ短時間でプラズマの位置や形状を同定することが可能となる。既にオフラインでの平衡計算コードは開発済みであり、これを制御に用いるためには、計算コードの高速化が必要になる。このために、それぞれの手続きに要する計算時間を計測し、ボトルネックとなる手続きを洗い出し、アルゴリズムの検討、およびコードの最適化を行い、高速化する。また、開発した本コードの実機への実装を行う。

(2) プラズマの位置、及び形状は、プラズマの2次元カメラ画像などを用いれば、プラズマの放電時間に依存することなく求めることが可能であるが、通常、画像データからプラズマの位置・形状を検出するには多くの計算時間を要し、数ミリ秒以内で計算を行える磁気センサの場合に比して到底及ばないため、2次元カメラ撮影の結果を直接的に制御に利用することはできない。そこで、本研究では両者の利点を取り入れた定常制御を提案する。すなわち、プラズマの速い移動や変化に対応するために位置・形状の同定は磁気センサを用いて検出する一方、そのドリフ

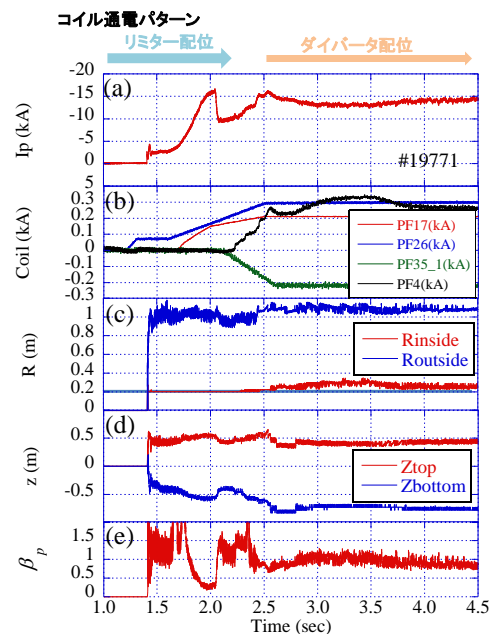


図1. 通电パターンをリミター配位からダイバータ配位へ移行したときの平衡計算結果。(a) プラズマ電流、(b) 各コイル電流、(c) プラズマ内外位置、(d) プラズマ上下位置、(e) ポロイダルベータ値

ト成分を除去するために、2次元カメラ撮影による位置・形状から積分値を補正する。

4. 研究成果

(1) 制御システムはナショナルインスツルメンツ製の PXIe システムを採用している。そのコントロールモジュールの CPU は 1.73GHz Intel Core i7-820 Quad Core であり、並列的にタスクを実行させることができる。具体的には本システムでは、他のモジュールを制御するループ、データを収集し制御信号等を計算する主制御ループがある。これらは 4kHz の動作周波数を持っている。今回新たに平衡計算を行う磁気解析ループ、及びプラズマの画像を収集して解析する画像解析ループの二つを付加した。

(2) リアルタイム平衡計算コードの開発では、まず各計算アルゴリズムの最適化を図った。例えば、フラックス分布が与えられたときの最外殻磁気面の探索では、極値を中心に徐々に領域を広げていき探索する手法にするなどの改善を施した。また、磁気軸位置や最外殻磁気面の位置がメッシュ粗さにより離散的にならないように、周囲値との線形補間を行い連続値となるような工夫を施した。結果、 $0.0 < R[m] < 1.5$, $-1.2 < z[m] < 1.2$ の範囲の真空容器内領域を 50mm ピッチで分割して 30×48 のメッシュ数としたときに、1回の計算に要する時間は約 2msec 弱であった。この時間は、だいたいメッシュ総数の 2 乗に比例している。

(3) このリアルタイム平衡計算コードの特徴として、プラズマ電流分布を再構成する際に、主制御ループで計算されるプラズマ位置の値を用いて計算の収束を高めている点が挙げられる。また、1回の計算毎に最外殻磁気面の探索を行っていることも挙げられる。これは、計算時間は多く必要とするものの、最外殻磁気面を構成するフラックス分布の

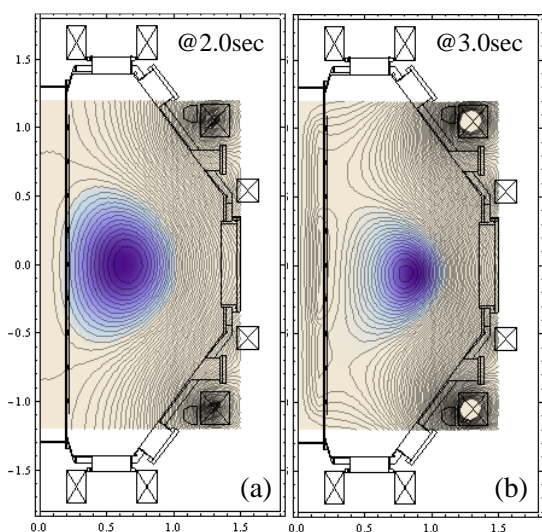


図 2. (a) 平衡計算によるリミター配位、及び、(b) ダイバータ配位のフラックス分布と電流密度分布

値を参照してプラズマ形状を制御するのではなく、直接最外殻磁気面の位置を参照して制御することが可能になり、より直感的なプラズマ形状の制御を提供することができる。

(4) 本リアルタイム平衡計算コードにおける計算結果の例を図 1 に示す。図 1 におけるプラズマ放電では、2.3 秒前後でコイル通電パターンをリミター配位からダイバータ配位に変えている。特に図 1(c) においてプラズマの内側位置が最初センタースタックに接しておりリミター配位であることがわかるが、ダイバータ配位の通電パターンになって、プラズマの内側位置はセンタースタックから離れてダイバータ配位として計算されていることがわかる。またこのときの時刻 2sec におけるリミター配位、および 3sec におけるダイバータ配位のフラックス分布、及びプラズマ電流分布を図 2 (a), (b) にそれぞれ示す。

(5) プラズマの画像を撮影するカメラタイプには、IEEE 1394b や CameraLink などいくつかの規格があるが、カメラの設置位置と制御システムまでの距離が離れていることから GigE Vision 規格を採用することにした。これは、カメラからの画像データを Ethernet ケーブルで転送するものであり、そのケーブル長は最大 100m である。本システムで採用した GigE Vision カメラの仕様を図 3 に示す。カメラ画像は、磁気計測の補正に使われ、その間隔は数秒であるが、これより充分短い時間間隔で画像が収集できればよく、140fps もあれば充分である。このカメラを使用してプラズマの画像を撮影し、その位置及び形状を算出するのが理想であるが、今回は、プラズマの光を模擬するものとして、懐中電灯を利用した場合を図 4 に示す。懐中電灯の位置、すなわちプラズマの位置の算出方法は、次の

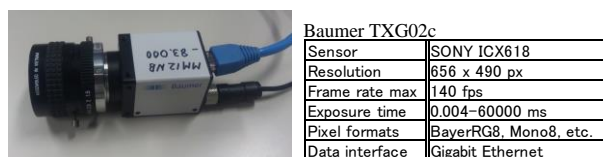


図 3. GigE Vision カメラ

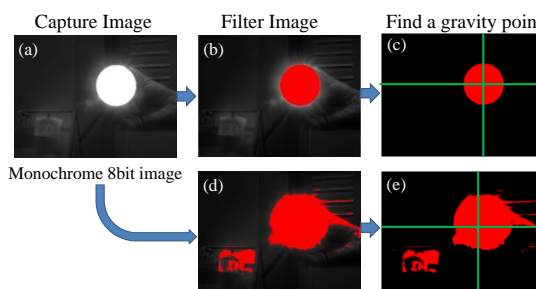


図 4. (a)プラズマを模擬したモノクロ 8ビット画像。(b), (d)スレッシュホルドレベル 160、及び 60 で 2 値化を行った画像。(c), (e) 2 値化の重心を取った画像。

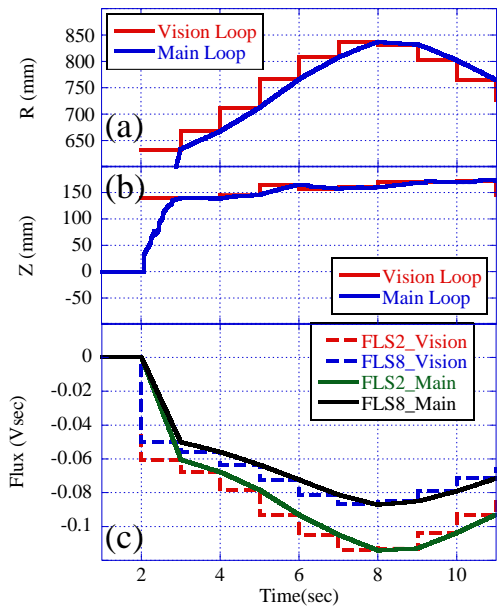


図5. (a) Vision Loop と Main Loop でのプラズマ R 位置と (b) z 位置。 (c) 各 Loop におけるフラックス値

とおりである。まず、GigE Vision カメラの前においた懐中電灯の画像をモノクロ 8 ビットで撮影 (図 4 (a)) して、この画像に対して 2 値化を行った (図 4 (b))。この 2 値化された画像の明るい箇所の重心が、求める位置とした (図 4 (c))。2 値化する際のスレッシュホールドレベルが適切でない場合、懐中電灯以外の箇所も明るい箇所と判断されるなどして、適切に位置の検出が行えていないことがわかる (図 4 (d), (e))。画像の 2 値化を行うフィルターや、その重心を求めるツールは、ナショナルインスツルメンツ社製の Vision Assistant で提供されるライブラリー群を使用した。この画像処理にかかる時間は 1msec 未満であり、磁気計測の補正間隔よりも充分短い。今後もし、プラズマ形状を求めるためのエッジ検出等、更に複雑な画像フィルターを使用するとしても、充分実用に耐えうるだろうことが予想される。

(6) 求めたプラズマ位置から磁気計測の補正を行うことを考える。プラズマを模擬した懐中電灯を GigE カメラの前で動かした際の結果を図 5 に示す。ここでは画像解析ループの動作周波数を 1Hz とした。画像解析ループは 1Hz 毎にプラズマの R 位置及び z 位置を算出していることがわかる (図 4 (a), (b))。また、その位置から推定される磁気計測値を 1 秒ごとに算出し、主制御ループにその値を出力する。主制御ループは受け取った瞬間から次に受け取る瞬間までの間に、主制御ループで保持している磁気信号の補正をかけている (図 4 (c))。例えば、フラックス名称 FLS2 の補正すべき値が -0.06Vsec であると、時刻 2 秒に画像解析ループから受け取った主制御ループは次の 3 秒までにリニアに、磁気信号値を -0.06 まで補正していることがわかる。以上のように、画像データを収集しフラックス

スループ値に適切に補正が行えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

① Makoto Hasegawa, Kazuo Nakamura, Hideki Zushi, Kazuaki Hanada, Akihide Fujisawa, Keisuke Matsuoka, Hiroshi Idei, Yoshihiko Nagashima, Kazutoshi Tokunaga, Shoji Kawasaki, Hisatoshi Nakashima, Aki Higashijima, Development of plasma control system for steady state operation on QUEST, 9th Asia Plasma and Fusion Association Conference, 2013 年 11 月 5 日, Gyeongju Hilton Hotel, Gyeongju City, Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 真 (HASEGAWA, Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号 : 00325482