

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03583

研究課題名(和文) プラズマの急激な変化に伴うMHD平衡の過渡応答解析と制御シナリオの開発

研究課題名(英文) Transient Response Analysis and Control Scenario Development for MHD Equilibrium with Rapid Plasma Changes

研究代表者

中村 祐司 (Nakamura, Yuji)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：20198245

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：将来のエネルギー源のひとつと考えられている核融合炉開発を目指したトラスプラズマ磁場閉じ込め装置において、磁場の抵抗性拡散時間や、プラズマ・コイル等を含めた回路系の過渡応答時定数と比べて急激にプラズマが変化する現象が見られる。しかしこの現象に対する3次元効果はこれまで十分な研究が行われていなかった。本研究では3次元効果を考慮したMHD平衡ダイナミクスを解析するため、3次元MHD平衡モジュール、渦電流計算モジュール、輸送計算モジュールとプラズマ・外部導体系の電磁的相互作用を計算するモジュールから構成される新しい3次元MHD平衡ダイナミクス・シミュレーション・システムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能な社会を支える将来のエネルギー源のひとつと考えられている核融合炉開発を目指したトラスプラズマ磁場閉じ込め装置において、磁場の抵抗性拡散時間やプラズマ・コイル等を含めた回路系の過渡応答時定数と比べて急激にプラズマが変化する現象が見られ、場合によっては運転が停止する恐れがある。このため、これを制御するシナリオが検討されているが、非軸対称性による3次元効果については十分に分かっていない。本研究ではこの3次元効果の影響を解析するためのシミュレーション・システムの基盤となるバージョンを完成させた。これらの研究をさらに進めることにより、より安定した核融合エネルギー源の実現に寄与することができる。

研究成果の概要(英文)：In torus plasma magnetic confinement devices, which are aimed at developing fusion reactors, considered to be one of the future energy sources, there is a phenomenon in which the plasma changes rapidly compared to the resistive diffusion time of the magnetic field and the transient response time of the circuit system including plasma, coil, etc. However, 3D effects on this have not been sufficiently studied until now. To analyze 3D MHD equilibrium dynamics, we have developed a new 3D simulation system consisting of a 3D MHD equilibrium module, an eddy current calculation module, a transport calculation module, and a module for calculating the electromagnetic interaction between the plasma and the external conductor system. dynamics simulation system, which consists of a 3-D MHD equilibrium module, an eddy current calculation module, a transport calculation module and a module to calculate the electromagnetic interaction of the plasma and external conductor system.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合プラズマ MHD平衡 渦電流 ディスラプション 非軸対称性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 持続可能な社会を支える将来のエネルギー源のひとつと考えられているフュージョン炉開発を目指したトラスプラズマ磁場閉じ込め装置において、磁場の抵抗性拡散時間やプラズマ・コイル等を含めた回路系の過渡応答時定数と比べて急激にプラズマが変化する現象が見られる。また、装置サイズが大きく時定数が長い核融合炉では、プラズマ電流制御、加熱制御、ディスラプション制御等のためのアクチュエータに対して、MHD 平衡は過渡的に変化すると考えられる。

(2) トカマク型装置においても、これらは重要な課題であり、国内外で数値シミュレーション研究が精力的に行われているが、多くの解析では軸対称性を仮定しており、非軸対称性を考慮した3次元効果の解明が重要となっている。

(3) ヘリカル型装置は本質的に非軸対称であるので3次元解析が行われているが、外部導体系との電磁的結合を考慮したMHD平衡の過渡応答解析の例は多くない。

2. 研究の目的

本研究では、ポートやベローズなど真空容器の非軸対称性や外部コイル系が作る磁場の非軸対称性がMHD平衡の過渡応答にどのような影響を及ぼすのかという学術的「問い」に答えるため、3次元効果(非軸対称性)を考慮したMHD平衡ダイナミクスの数値的予測モデルを確立し、その物理機構を解明すること、ならびにアクチュエータによるMHD平衡制御シナリオを検証・開発することを目的とし、新しい3次元統合シミュレーション・コードの開発と、これを用いた制御シナリオの開発・検討を目指す。

3. 研究の方法

本研究の主たる目的である、非軸対称性を考慮したMHD平衡ダイナミクスの数値的予測モデルを確立するため、3次元MHD平衡モジュール、渦電流計算モジュール、輸送計算モジュールとプラズマ・外部導体系の電磁的相互作用を計算するモジュールから構成される新しい3次元MHD平衡ダイナミクス・シミュレーション・システムを開発する。そのため、以下の手順で開発を進める。

(1) 3次元MHD平衡モジュールとしてはヘリカル系プラズマに対するMHD平衡コードとして標準的に用いられているVMECコードを用いるが、トカマクにおける自由境界平衡を矛盾なく求める方法を開発する必要がある。さらに非軸対称性がトカマクのセパトリックス近傍の磁力線構造に及ぼす影響を調べるため、新しい3次元MHD平衡コードの開発に着手する。

(2) 真空容器中の渦電流とプラズマ電流のカップリングを考慮するには、真空容器の位置においてプラズマ電流が作る磁場を求める必要があるが、VMECは逆解法コードであり、プラズマ内の磁場しか求めていない。そこで、Virtual-Casing法に基づき、VMECで得られた平衡データから真空容器の位置においてプラズマ電流が作る磁場を計算するコードを開発する。

(3) 軸対称配位では、真空容器中の渦電流は真空容器をトロイダル方向に一周する円形コイルの集合と見なすことで比較的容易に計算することができるが、非軸対称性があると使えない。そこで、真空容器上を流れる電流を面電流で近似し、なるべく少ない時間で非軸対称渦電流を求める。

(4) 非軸対称性を考慮した1次元輸送計算モジュール(主にプラズマ電流分布の時間発展を求める)は既に開発済みであるが、境界条件として渦電流やコイル系との電磁的結合を解析する必要がある。

4. 研究成果

(1) VMECはプラズマ外の磁場構造を求めていないので、直接セパトリックス構造やリミターからプラズマ境界を決めていない。そこで、Virtual-Casing法に基づき、VMECで得られた平衡データからプラズマ外部の磁場を求めるコードを開発し繰り返し計算をすることで、セパトリックス構造やリミターと矛盾のないトカマクプラズマの自由境界平衡を求めることが

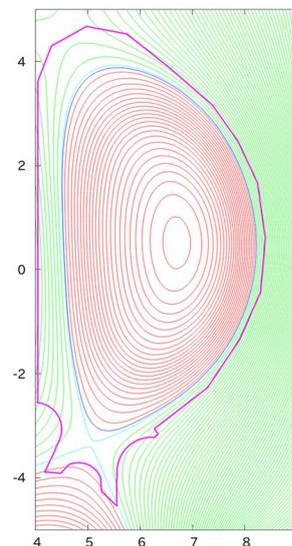


図1 VMECで得られたトカマクの自由境界平衡

できるようになった(図1)。同時に、これを用いて真空容器の位置においてプラズマ電流が作る磁場を計算することが可能となった。

(2) 渦電流やコイル系とプラズマ電流との電磁的結合をモデリングする最初の段階として軸対称性を仮定して回路方程式で表し、軸対称トカマクの電流クエンチシミュレーションを行った。渦電流は通常行われているように円電流の集合で近似し、固定境界MHD平衡計算とプラズマ電流分布の時間発展と解いた。計算では定常状態から急激に電子温度を低下させ、プラズマ電流と渦電流の時間変化を求めた(図2)。この計算では平衡を固定境界としたため仮想的な計算であるが、渦電流が増加する時間帯では、プラズマ電流の減衰はL/Rで決まる時間より早くなること示された。

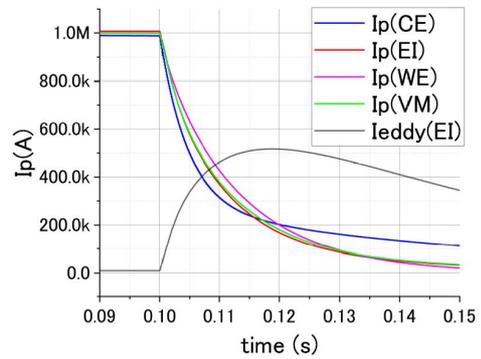


図2 電子温度が1keVから10eVに低下(t=0.1s)した後のプラズマ電流と渦電流の時間変化

(3) ポートやベローズなど真空容器の非軸対称性並びにプラズマ平衡の非軸対称性を考慮すると、渦電流計算も非軸対称性で行う必要がある。そのため、従来のコードで行われているように真空容器やプラズマを円電流の集合で記述し回路方程式系を解く方法は使えない。そこで、真空容器上を流れる電流を面電流で近似し、なるべく少ない時間で非軸対称渦電流を求めるコードkedy3Dを開発することとした。このコードでは真空容器を形状に沿った曲線座標系(s, θ, ζ)で記述し(∇sは真空容器面の法線ベクトル)、容器上の渦電流Jを流れ関数Tを用いて表す(J = ∇T × ∇s)。得られる渦電流に対する方程式はこの流れ関数に対する積分微分方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{\mathbf{J} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \nabla s}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \sqrt{g} d\theta' d\zeta' \right] = -\nabla \times \left(\frac{\mathbf{J}}{\sigma d} \right) \cdot \nabla s - \frac{\partial \mathbf{B}_{ex} \cdot \nabla s}{\partial t}$$

となる。ここで、σは真空容器の電気伝導度、dは厚さ、B_{ex}はプラズマ電流やコイル電流が真空容器上に作り磁場を表す。この式を(θ, ζ)面上でスタッガードメッシュを用いて差分化し、Tについて解く。まず、この手法を軸対称の場合に対して適用したコードを開発した。この場合、上記の渦電流方程式に加えてトロイダル周回電圧に対する条件式が必要である。得られたコードを用いて図2と同様の計算を行った結果、(2)と渦電流分布も含めて同じ結果を得た。

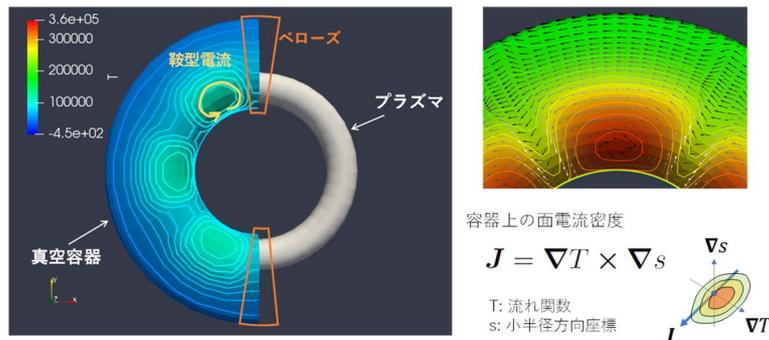


図3 電気抵抗が大きいベローズを有する真空容器上に流れる渦電流

(4) 次に(3)で示した手法を非軸対称の場合に適用したコードkedy3Dを開発した。この場合、計算にはトロイダル周回電圧だけでなく、ポロイダル周回電圧に対する条件を加える必要がある。テスト計算としてベローズを有する真空容器に流れる渦電流を、kedy3Dコードを用いて計算した。結果を図3に示す。ベローズのある領域ではトロイダル方向の電気抵抗が大きいので、図3では真空容器形状は軸対称だが、ベ

テスト計算

- 作成したコードの妥当性検証のため、電流クエンチシミュレーションを行った
- プラズマは電流の減少に伴い、内側リミターへ向かって収縮消滅する設定
- 輸送計算は行わない

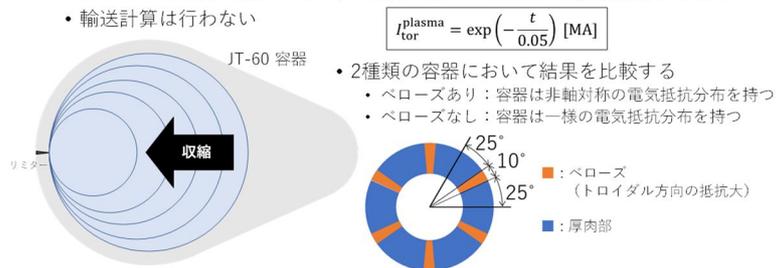


図4 電流クエンチによるプラズマ収縮シミュレーション

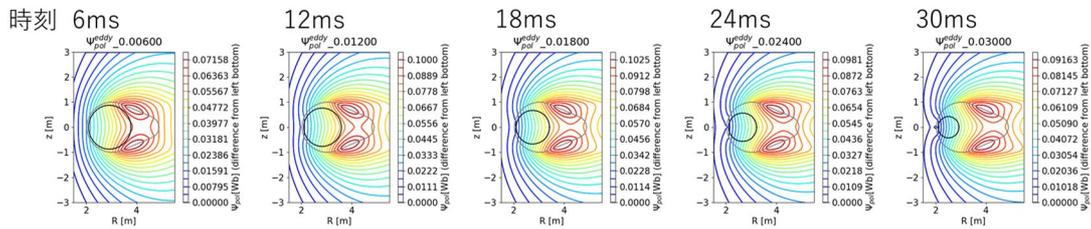


図5 電流クエンチに伴うプラズマ収縮と渦電流の作るポロイダル磁束（ベローズあり、厚肉部）

ローズの領域だけ電気抵抗が大きいと設定した。電気抵抗が大きいベローズ領域では小さな渦電流しか流れず、ベローズ間の厚肉部で鞍型電流が流れることが分かる。その結果真空容器に流れるトロイダル電流はベローズがない場合に比べて小さくなることが確認された。(5) 渦電流計算コード keddy3D が完成したので、渦電流計算と自由境界 MHD 平衡計算を組み合わせたテスト計算を行った。ここでは輸送計算を行わず、一様プラズマ電流が 50ms の時定数で指数関数的に減衰すると仮定した。計算は JT60 の真空容器を模擬し、ほぼ円形断面の（内側）リミタープラズマが電流減衰とともに収縮消滅する設定とした（図 4）。図 5 に電流クエンチに伴う、ベローズ間の厚肉部におけるプラズマ収縮と渦電流の作るポロイダル磁束の時間変化を示す。図より 30ms でプラズマはトラス内側にシフトし、リミターにより収縮していることが分かる。図には示していないがベローズ部における渦電流の作るポロイダル磁束分布は図 5 とは大きく異なるが、プラズマ形状の非軸対称性は小さい。

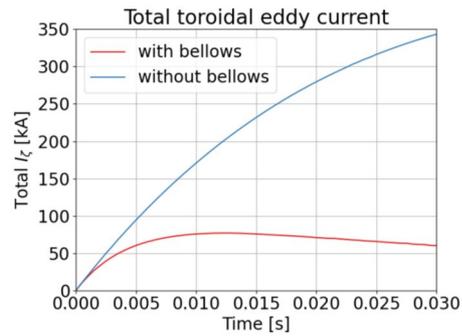


図6 総トロイダル渦電流の時間変化

同様の計算をベローズなしの真空容器に対して行った。図 6 に示すように真空容器に流れる総トロイダル渦電流は、ベローズがある場合に比べて非常に大きい。また、ベローズがない場合、プラズマの内側シフトとそれに伴うプラズマ収縮は遅くなることが分かった。これは渦電流が作る垂直磁場成分がプラズマをトラス外向きにシフトさせる方向にかかるためである。

(5) 3次元 MHD 平衡コード VMEC は磁気面の存在を仮定し、磁気座標系上で MHD 平衡を求めるコードである。しかし、軸対称性が破れると、とくにセパトリックス近傍では磁気面が崩れる可能性がある。これらの現象を解析するコードとして我々は HINT2 を開発してきたが、相補的なコードとして繰り返し法に基づく新しい 3次元 MHD 平衡コードの開発を進めている。HINT2 やこの新しいコードは計算コストがかかるため、平衡の時間発展を求めるには向かないが、モデリングを行う上でスナップショット的にセパトリックス近傍の磁力線構造を調べることを計画している。

以上の通り、非軸対称性を考慮した MHD 平衡ダイナミクスの数値的予測モデルを確立するため、3次元 MHD 平衡モジュール、渦電流計算モジュール、輸送計算モジュールとプラズマ・外部導体系の電磁的相互作用を計算するモジュールから構成される新しい 3次元 MHD 平衡ダイナミクス・シミュレーション・システムはほぼ完成した。とくに非軸対称渦電流計算コードはゼロからの開発で完成までに予想外の時間がかかってしまったが、今後開発したシミュレーション・システムを用いて制御シナリオの研究に進む予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山下湧志朗、石澤明宏、中村祐司
2. 発表標題 トカマクにおける電流クエンチのシミュレーション
3. 学会等名 MHD研究会「プラズマの複雑現象を対象としたデータマイニングの活用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下湧志朗、石澤明宏、中村祐司
2. 発表標題 トカマクにおける電流クエンチのシミュレーション
3. 学会等名 MHD及び高エネルギー粒子が核融合炉心プラズマに与える影響に関する研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 駒井克哉、高尾怜、石澤明宏、中村祐司
2. 発表標題 トカマクにおける真空容器を流れる非軸対称渦電流の数値解析
3. 学会等名 第25回NEXT(数値トカマク)研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 駒井克哉、石澤明宏、中村祐司
2. 発表標題 トカマクにおける真空容器を流れる非軸対称渦電流の数値解析
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高尾 怜, 石澤明宏, 中村祐司
2. 発表標題 非軸対称トカマクプラズマのディスラプション時に真空容器を流れる渦電流の数値解析
3. 学会等名 第35回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下湧志朗, 中村祐司, 石澤明宏
2. 発表標題 非軸対称性を考慮したトカマクにおける電流クエンチの数値シミュレーション
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yushiro Yamashita, Yuji Nakamura, Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 Numerical Simulations of Non-axisymmetric Current Quench in Tokamaks
3. 学会等名 30th International Toki Conference (ITC30) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷 瞭太, 中村祐司, 石澤明宏
2. 発表標題 非軸対称性を考慮したMHD平衡計算コードの開発
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------