

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420895

研究課題名(和文) トカマクプラズマにおける電流ホール平衡とその時間発展に関する研究

研究課題名(英文) Study on current hole equilibrium and its evolution in tokamak plasma

研究代表者

藤田 隆明 (FUJITA, Takaaki)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70354602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電流ホールの電磁流体力学平衡モデルを拡張し、実験結果との比較によりその妥当性を調べることを目的とした。JT-60の電流ホールプラズマにおける電流分布時間発展シミュレーションを行い、電流ホール内における電子あるいは電子電流の異常拡散の存在を示した。電流ホールプラズマへの中性粒子ビーム電流駆動の解析のため、高速イオン電流を含む軸対称平衡を自己無撞着に解くコードを開発した。電流ホールプラズマでの不純物輸送の解析のため、高価数不純物イオンの輸送モデルを改良し、タングステニオンの蓄積についてJT-60実験に近い計算結果を得た。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to extend the MHD equilibrium model of the current hole plasma and study validity of the model by comparing the calculation results with the experimental observation. The simulation of time evolution of the current profile in JT-60 current hole plasma indicates existence of anomalous diffusion of electrons or electron current in the current hole. A module for calculating an axisymmetric equilibrium considering current by fast ions with orbits shifted from the flux surface has been developed, in order to analyze the neutral-beam-driven current in the current hole plasma. The high-Z impurity transport model has been improved and the calculated accumulation of tungsten ions was close to the experimental observation in JT-60.

研究分野：プラズマ物理 核融合炉概念設計

キーワード：電流ホール 電磁流体力学平衡 中性粒子ビーム電流駆動 不純物輸送 輸送シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

大型トカマク装置 JT-60 及び JET において、プラズマの中心部にプラズマ電流がほぼゼロとなる領域が数秒間安定に持続することが発見され、研究代表者により「電流ホール」と命名された[1]。電流ホールの生成・維持については、プラズマの中心を外れた領域における自発電流あるいは非誘導駆動電流の増大にともなって発生する負の誘導電場がプラズマ中心部へ拡散することによりプラズマ中心部の電流が減少するが、何らかの電磁流体力学不安定性により中心の電流が負となることが妨げられているとの解釈がなされていた。研究代表者は、JT-60 における電子サイクロトロン波電流駆動 (ECCD)、中性粒子ビーム電流駆動 (NBCD)、さらには過渡的に発生させた誘導電場の拡散を用いた実験により、電流がいったんゼロ近傍となるとその状態を保つような何らかの機構が存在すること (電流クランプ) を初めて実験的に示した[2]。この機構は正方向の電流駆動源に対しても成り立っているように見える。電流クランプ現象が観測された実験に関する輸送計算は実施されておらず、どの程度の電流が電流ホール内に発生しうる状況であったか、また実測による誘導電場が計算と一致するかは不明であった。

電流ホールを含む電磁流体力学平衡モデルとしては、中心の安全係数  $q(0)$  が極めて高い負磁気シア平衡 (「高  $q(0)$  平衡」) とみなすことが一般的であった。一方、プラズマ中心部の局所的なポロイダルベータ値  $\beta_p$  が大きくなり磁気軸より大半径方向内側での電流密度及びポロイダル磁場が極めて小さくなった状態とみなす考え方 (「高  $\beta_p$  平衡」) もあった。また、従来の平衡計算では、ポロイダル平面における高速イオン電流の分布が正しく取り扱われておらず、それによる高  $q(0)$  平衡の磁気面形状及びその生成・維持・消滅過程に対する影響は不明であった。

### 2. 研究の目的

電流ホールプラズマの生成過程は逆誘導起電力により説明されるが、維持・消滅過程については未解明の部分がある。本研究では、トカマクプラズマにおける電流ホールの平衡モデルを拡張するとともに、様々な平衡モデルにおける電流ホールの形成・維持・消滅過程を輸送コードにより計算することで、定常状態及び時間発展の観点からそれらの平衡モデルの妥当性を調べる。これにより電流ホールの維持機構を解明することを目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 高  $q(0)$  平衡を用いて、電流クランプ現象が観測された実験に関する輸送シミュレーションを行い、どの程度の電流が電流ホール内に発生しうる状況であったか、また実測による誘導電場が計算と一致するかを明らかにする。

(2) 高  $\beta_p$  平衡を取り扱えるよう平衡コード及び輸送コードを改良し、実験の分布データとの比較や平衡の生成・維持・消滅過程 (時間発展) の輸送シミュレーションから、実験においてそのような平衡が得られていると解釈されうるかを明らかにする。

(3) ポロイダル平面における高速イオン電流の分布を正しく考慮するよう平衡コードを改造し、高  $q(0)$  平衡の磁気面形状及びその時間発展に対する高速イオン電流効果を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 電流分布の時間発展シミュレーション

量研機構の統合輸送コード TOPICS を用いて、JT-60 において正方向の ECCD に対して電流ホールが保たれた実験データのシミュレーションを行った。電流ホール内で入れ子状の磁気面が存在するとしてフォッカープランクコードで求められたピークした電子サイクロトロン波 (EC) 駆動電流 (図中破線) を計算に用いた場合の結果を図 1 (a) に示す。EC は時刻 5.2 秒から 6 秒にかけて入射されている。

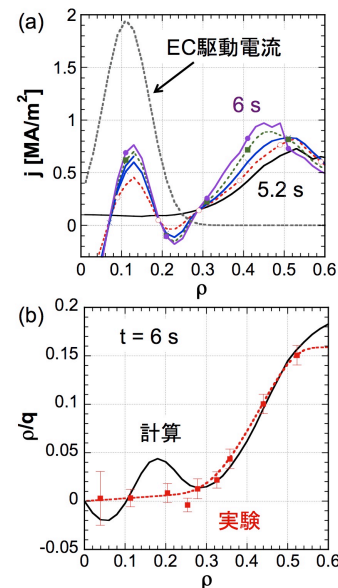


図1 (a) EC 駆動電流分布の計算値(破線)と電流分布の時間変化の計算結果(実線)。(b)時刻 6 秒における安全係数  $q$  の逆数と規格化小半径  $\rho$  の積 (ポロイダル磁場強度の指標) の径方向分布の実験値 (赤破線) と計算値 (黒実線) の比較。

電流分布の時間変化の計測に基づき評価された誘導電場は時刻 6 秒ではほぼ 0 となっていた[2]が、輸送シミュレーションでは時刻 6 秒でも負の誘導電場が残っており、そのため電流のピーク値は駆動電流値の 1/3 程度に留まった。しかし電流により生成されるポロイダル磁場の変化は実験データの誤差を超えた有意なものとなり実験とは合わない (図 1 (b))。このことから、EC 駆動電流が計

算と異なるかあるいは電流拡散に異常性があるかどうかの可能性が考えられる。一方、何らかの理由で EC 駆動電流が電流ホール内で一様分布となっていると仮定した場合の計算では、ポロイダル磁場の変化量は小さく、計測誤差を考えると有意に実験と異なると結論することは難しいことが分かった。本結果により電流ホール内における電子あるいは電子電流の異常拡散の存在を示した。電流拡散の異常性（正方向の電流クランプ）の有無についてはさらに解析を進める必要がある。

## (2) 高速イオン電流を含む平衡

JT-60 における電流ホールプラズマへの NBCD 実験では、電流駆動時間が ECCD の場合より長くより精度の高い解析が期待される。その解析においては磁気面から大きくずれた軌道を描く高速イオンが担う電流を考慮した電流ホール平衡モデルを用いることが望ましい。その構築を目的として、平衡磁場における高速イオンの軌道計算と高速イオン電流が作る磁場を含めた熱化プラズマの平衡計算を反復して実施することで、高速イオン電流を含む軸対称平衡を自己無撞着に解くコードを開発した。

最外殻磁気面の形状及び全トロイダル電流 (1MA) を固定してエネルギー500 keV の高速重水素イオンによる電流がない場合 (a) と 0.4MA の場合 (b) の平衡を求めた例を図 2 に示す。プラズマ電流分布はほぼ平坦としている。高速イオン電流が生成する磁場の効果により、通常ではあり得ない磁気軸がプラズマ中心より大半径方向内側にずれた平衡が得られた。今後、電流ホール平衡における高速イオン電流の効果を調べる。

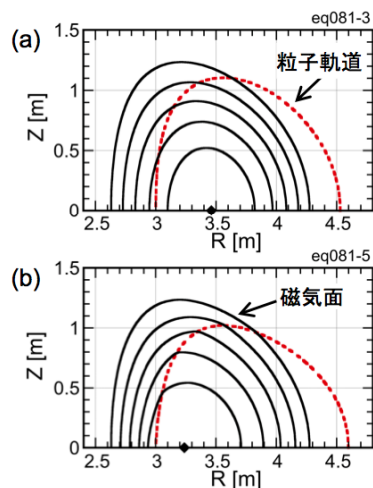


図2 (a)高速イオン電流=0、プラズマ電流=1 MA の平衡と(b)高速イオン電流=0.4 MA、プラズマ電流=0.6 MA の平衡との比較。黒実線は磁気面、赤破線は粒子軌道、菱形は磁気軸をそれぞれ示す。

並行して、従来円形断面平衡のみを対象としていた中性粒子ビーム駆動電流を高速に計算できる手法を任意形状の平衡に適用で

きるよう拡張した。また、名古屋大学の統合輸送コード TOTAL に組み込むための非定常 NBCD 解析コードの開発を開始した。

なお、高 $\beta_p$  平衡モデルの導入については、高速粒子電流を含む平衡よりも新規性・汎用性が小さいと判断し優先度を下げた結果、検討段階に留まった。

## (3) 高価数不純物の輸送

電流ホール平衡プラズマは一般に強い内部輸送障壁を有し高価数の不純物イオンの蓄積が懸念されているため、不純物イオンの輸送研究を進めた。量研機構の星野らによって提唱された高価数イオンに対する PHZ ピンチ、 $E_r$  ピンチモデルについて、TOTAL への実装、モデルの改良及び実験データの解析を行った。JT-60 の H モード実験の条件を用いて、計算により得られたタングステン蓄積のトロイダル回転依存性と実験値との比較を図 3 に示す。 $E_r$  ピンチについてはその導出の過程で用いられている条件を満たさず評価できなかったため PHZ ピンチと新古典輸送、異常拡散を考慮した解析を行ったところ、反プラズマ電流方向のトロイダル回転の増大とともにタングステン蓄積（プラズマ中心における電子密度に対するタングステンイオン密度の比）が増大する傾向は再現できた（図 3 の菱形）が、その増加率については実験値（図 3 の四角）より小さい値となった。

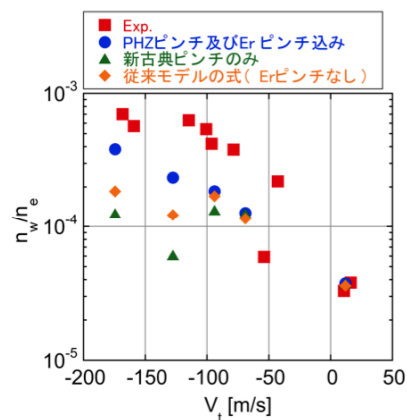


図3 タングステン蓄積のプラズマトロイダル回転依存性。四角は実験値、三角は新古典理論のみの場合の計算値、菱形は従来モデルでの計算値、丸は改良モデルでの計算値を示す。

その後、不純物イオン軌道に対する遠心力及びコリオリ力の効果の導入などの輸送モデルの改良を行ない、円形断面平衡において旋回中心の運動方程式を数値的に解き、それに基づいて PHZ ピンチ速度及び  $E_r$  ピンチ速度を計算するコードを開発し、TOTAL コードへ組み込んだ。軌道計算に基づく PHZ ピンチ速度は従来モデルより小さくなったが、トロイダル回転が大きい場合には、従来評価できず無視していた  $E_r$  ピンチ速度が PHZ ピンチ速度より大きくなり、その結果、タングステン蓄積が大きくなり（図 3 の青丸）、実験値に

近い結果が得られた。

#### (4) まとめと今後の課題

電子サイクロトロン波電流駆動に対して電流ホールが維持された実験のシミュレーションを行い、電流ホール内における電子あるいは電子電流の異常拡散の存在を示した。高速イオン電流を含む軸対称平衡を自己無撞着に解くコードを開発した。これらにより電流ホールの維持機構の解明に向けての研究が進展した。

高価数不純物イオンの輸送モデルの改良を行ない、JT-60におけるタングステンイオンの蓄積のプラズマ回転依存性の傾向をある程度再現した。

今後の研究課題として、電流ホール平衡における高速イオン電流の効果や高価数不純物の輸送解析が挙げられる。また、電流分布時間発展シミュレーションにおける誘導電場が実験解析結果とは異なっていたことについては、より電流駆動時間の長い中性粒子ビーム入射実験の解析を行なうことでその原因を探究することが考えられる。そのためにも、高速イオン電流を含む電流ホール平衡の輸送コードへの導入が望ましい。

#### 参考文献

- [1] T. Fujita, "Tokamak equilibria with nearly zero central current: the current hole", *Nuclear Fusion* **50**, 113001 (2010).
- [2] T. Fujita et al., "Current Clamp at Zero Level in JT-60U Current Hole Plasmas", *Physical Review Letters* **95**, 075001 (2005).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Yusuke SHIMIZU, Takaaki FUJITA, Atsushi OKAMOTO, Hideki ARIMOTO, Nobuhiko HAYASHI, Kazuo HOSHINO, Tomohide NAKANO and Mitsuru HONDA, "Particle Pinch Model of Passing/Trapped High-Z Impurity with Centrifugal Force Effect", *Plasma and Fusion Research*, **11**, 2403082 (2016), 査読有.  
DOI: 10.1585/pfr.11.2403082,
- ② Yusuke SHIMIZU, Takaaki FUJITA, Hideki ARIMOTO, Tomohide NAKANO, Kazuo HOSHINO and Nobuhiko HAYASHI, "Analysis of Tungsten Transport in JT-60U Plasmas", *Plasma and Fusion Research*, **10**, 3403062 (2015), 査読有.  
DOI: 10.1585/pfr.10.3403062,

[学会発表] (計12件)

- ① 藤田隆明, 「大きなトロイダルドリフトを有する高エネルギー粒子の電流を含む軸対称平衡の解析」, 日本物理学会第72回年次大会 (2017年), 2017年3月18日, 大阪大学 (大阪府豊中市)

- ② 松浦圭佑, 藤田隆明, 岡本敦, 清水友介, 「トカマクプラズマにおけるタングステン輸送モデルの改良」, 第48回日本原子力学会中部支部研究発表会, 2016年12月15日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- ③ 藤田隆明, 「ポロイダル平面における高エネルギー粒子電流の分布を考慮した軸対称平衡解析」, プラズマ・核融合学会第33回年会, 2016年11月29日, 東北大学 (宮城県仙台市)
- ④ 岡本敦, 藤田隆明, 清水友介, 松浦圭佑, 林伸彦, 星野一生, 仲野友英, 本多充, 「トカマクプラズマにおける粒子軌道解析に基づく高Z不純物イオンのピンチ速度の評価」, 日本物理学会2016年秋季大会, 2016年9月14日, 金沢大学 (石川県金沢市)
- ⑤ 清水友介, 藤田隆明, 岡本敦, 有本英樹, 林伸彦, 星野一生, 仲野友英, 本多充, 「JT-60U トロイダル回転プラズマにおけるタングステン輸送の解析」, プラズマ・核融合学会第32回年会, 2015年11月24日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- ⑥ Y. Shimizu, T. Fujita, A. Okamoto, H. Arimoto, T. Nakano, K. Hoshino, N. Hayashi, M. Honda, "Validation of Tungsten Transport Model in JT-60U Plasmas", 25th International Toki Conference, Nov. 4, 2015, Ceratopia Toki (Gifu-ken, Toki)
- ⑦ Y. Shimizu, T. Fujita, H. Arimoto, T. Nakano, K. Hoshino, N. Hayashi, "Analysis of Tungsten Transport in JT-60U Plasmas", Plasma Conference 2014, Nov. 20, 2014, Toki Messe (Niigata-ken, Niigata)
- ⑧ Y. Shimizu, T. Fujita, H. Arimoto, T. Nakano, K. Hoshino, N. Hayashi, "Analysis of Tungsten Transport in JT-60U Plasmas", 24th International Toki Conference, Nov. 4, 2014, Ceratopia Toki (Aichi-ken, Toki).
- ⑨ 清水友介, 藤田隆明, 有本英樹, 仲野友英, 星野一生, 林伸彦, 「JT-60U プラズマにおけるタングステン輸送の解析」, 第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014年6月20日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ⑩ 藤田隆明, 濱松清隆, 林伸彦, 「任意の軸対称平衡に適用できるNBCD高速解析法」, 第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014年6月20日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ⑪ 清水友介, 藤田隆明, 有本英樹, 「トカマクプラズマにおけるタングステン輸送の解析」, 第45回日本原子力学会中部支部研究発表会, 2013年12月17日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- ⑫ 藤田隆明, 林伸彦, 本多充, 濱松清隆, 「JT-60Uにおける電流ホール平衡の過渡応答の解析」, プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013年12月4日, 東京工業大学 (東京都目黒区)

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.ees.nagoya-u.ac.jp/~web.dai6>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤田 隆明 (FUJITA, Takaaki)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：70354602

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

林 伸彦 (HAYASHI, Nobuhiko)  
量子科学技術研究開発機構・核融合エネルギー研究開発部門 那珂核融合研究所・グループリーダー  
研究者番号：10354573

本多 充 (HONDA, Mitsuru)  
量子科学技術研究開発機構・核融合エネルギー研究開発部門 那珂核融合研究所・主幹研究員  
研究者番号：90455296

濱松 清隆 (HAMAMATSU, Kiyotaka)  
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹  
研究者番号：20354574