

平成22年 3月31日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20860092
 研究課題名（和文） 核燃焼プラズマにおける径方向電流トルクが駆動する回転の多流体輸送シミュレーション
 研究課題名（英文） Multi-fluid transport simulation of rotation driven by radial current torque in burning plasmas
 研究代表者
 本多 充（HONDA MITSURU）
 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・任期付研究員
 研究者番号：90455296

研究成果の概要（和文）：研究代表者が開発した多流体輸送コード TASK/TX を用いて、トカマクにおける高速中性粒子の電荷分離が引き起こすトルクに駆動されたプラズマ回転について研究を行い、その物理機構を明らかにするとともに、回転駆動効率が中性粒子ビームの垂直入射角に依存していることを初めて明らかにした。プラズマ密度分布や回転分布に影響を与える中性粒子の拡散型輸送モデルを開発し、モンテカルロコードとのベンチマークによってコアプラズマにおける中性粒子の挙動を良く再現できていることを示した。

研究成果の概要（英文）：Using a multi-fluid transport code TASK/TX developed by the representative of this research, plasma rotation driven by the torque arising from charge separation of fast neutrals in tokamaks has been studied and the physical mechanism of this torque was clarified. It is the first time to show the dependence of the efficiency of rotation drive on the vertical angle of a neutral beam injection. We have developed a diffusive transport model of neutrals that influence the formation of plasma density and rotation profiles. A benchmark with a Monte Carlo code verified that the model well reproduced the behavior of neutrals in a core region.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	670,000	201,000	871,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,770,000	531,000	2,301,000

研究分野：核融合プラズマの輸送現象・シミュレーション

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：プラズマ回転、輸送シミュレーション、径方向電流トルク、中性粒子ビーム、トカマク、中性粒子輸送、粒子輸送、体積拡大

1. 研究開始当初の背景

トカマクにおけるプラズマ回転とそれに付随して起こる現象が大きく注目されてい

る。JT-60U で観測された、外部から運動量を順方向に入射しているにも関わらず、周辺部分では逆方向に回転する現象は、実験解析に

よって高速イオンの影響が示唆されているが、数値計算で良く再現されるには至っていない。回転はプラズマの安定性にも寄与する重要な現象だが、その物理機構や回転速度の予測手法は確立されていない。

プラズマの追加熱に用いられる中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱は、入射された高速粒子の衝突減速過程によりトルクがプラズマへと移り回転を駆動する。ところが、捕捉イオンを考えると、1 バウンス周期でそのトルクは相殺されてしまう。実際は捕捉イオンとなった場合でもプラズマにトルクを与えられるはずであり、その機構は捕捉イオンの有限軌道幅効果によると考えられてきたが、これを自己無撞着な手法で輸送シミュレーションによって明らかにした研究はこれまでになかった。また、アルファ粒子は生成時における等方性から正味の衝突減速トルクはゼロであるが、有限軌道幅効果によってトルクが生じる可能性がある。しかし、アルファ粒子自身が駆動する回転については、少なくとも現実的なプラズマ配位を用いてはこれまでほとんど考えられてこなかった。

2. 研究の目的

(1) JT-60U では準垂直 NBI 入射時に衝突減速過程によるトルク入力がほとんどないにもかかわらず、プラズマ回転が観測されている。これを TASK/TX を用いた数値シミュレーションによって再現し物理機構の詳細を明らかにする。また、この現象を用いて定常状態において回転速度分布が決定される物理機構を明らかにする。

(2) 高速中性粒子の挙動を正確に計算することが出来る軌道追跡モンテカルロコード OFMC と連携し、TASK/TX にアルファ粒子の方程式系を組み込む事で、核燃焼プラズマにおけるアルファ粒子に起因する回転の生成機構を明らかにし、回転速度を定量的に予測する。

3. 研究の方法

有限軌道幅効果によって、電子とイオンの生成位置が異なるため (電荷分離) に径方向電流が生成され、それがトルクを生じていると理論的に予測できる。既存の多くのトカマクプラズマ輸送コードは陽に準中性条件を課しているため径方向電流を表す事が出来ず、径方向電流によって生じる $j \times B$ トルクを自己無撞着に扱えない。このため、粒子種ごとに連続の式と運動方程式を解き、プラズマ回転や径電場の時間発展も自己無撞着に計算できる流体型輸送コード TASK/TX を開発した。プラズマの時間発展と同時に背景プラズマと矛盾なく $j \times B$ トルクを計算出来るという TASK/TX の特長によって、他の輸送コードでは扱えなかった物理現象を明らかにするこ

とが出来る。

NBI によって生成された高速粒子の有限軌道幅効果を TASK/TX に取り込むには、電子とイオンそれぞれに異なる生成分布を与えるだけでよい。この生成分布の差が有限軌道幅効果であり、高速イオンによる径方向電流である。このため、如何に物理的に正しく粒子種ごとの生成分布を評価するかが重要になる。軌道追跡モンテカルロコード OFMC は高速粒子のプラズマ中での軌道を正確に追うことが出来るため、OFMC を改造して有限軌道幅効果を生成分布に落とし込む。

アルファ粒子についても基本的には NBI の場合と同様に OFMC を使った手法で取り組むことが出来るが、方向性を持った高速粒子が生成される NBI と異なりアルファ粒子は等方的に生成されるため、粒子種数に注意しないと数値的雑音によって結果が歪められるなど注意点も多い。

4. 研究成果

プラズマ電流と同方向の準垂直 NBI のポロイダル入射角のみを変化させると、水平方向からの入射が最もトロイダル回転を駆動している事がわかった。解析的評価から径方向電流トルクは高速粒子の軌道幅に比例していることがわかるため、最も軌道幅が狭くなる水平入射が最も回転を駆動するとは考えられていなかった。粒子軌道描画コードを用いて捕捉粒子の軌道を描画させることで、ポロイダル入射角を増していくと確かに軌道幅は増えていくが、電子の位置 (高速中性粒子が電離した位置) を挟んで高速イオンは内側にも外側にも移動するようになるため、内側にしか移動しない水平入射の場合と比較すると内側移動の効果が外側移動によってある程度相殺され、トルクが減少している事を突き止めた (図 1)。径方向電流トルクを評価する際には、軌道幅だけでなく高速粒子が電離した位置と粒子軌道も考慮に入れなければならないことがわかった。この知見は、NBI による回転駆動を定量的に評価に繋がるだけでなく、炉設計において回転駆動を最大化する NBI 設置の検討にも活かせる。

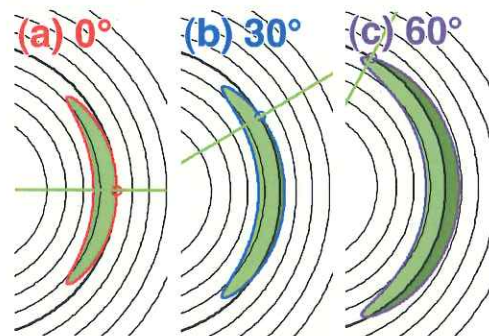


図 1 ポロイダル入射角度による捕捉粒子軌道の変化。濃い黒線は電離した磁気面、緑の線は NBI を表す。

プラズマ電流と逆方向にNBを入射した場合、捕捉粒子は順方向の場合と異なり電離磁気面より主に外側に動くようになるため、プラズマ周辺における粒子の軌道損失が無視できなくなる。そこで、高速イオンの損失効果を含めて有限軌道幅効果を考えることが出来るようOFMCを改造し、逆方向入射の場合でも径方向電流が引き起こすプラズマ回転を評価できるようにした。これら、高速粒子が引き起こす径方向電流によるプラズマ回転の研究によって、プラズマ・核融合学会の第14回学術奨励賞を受賞した。

核燃焼プラズマにおけるアルファ粒子は等方的に生成されるため衝突減速トルクは正味ゼロであるが、軌道効果を考えると径方向電流を介したトルクが方向性を持って生じる可能性がある。この効果を検証するため、OFMCコードを改造し、アルファ粒子が引き起こす径方向電流の効果を考慮できるようにした。予備的な計算によると逆方向のトルクが生じているが、結果の詳細な検討とTASK/TXにおけるアルファ粒子挙動のモデル化は現在進行中である。

粒子が運動量を運んでいることを考えればわかるとおり、粒子輸送は運動量輸送に大きな影響を与える。そのため、運動量輸送の物理に取り組むためには、まず粒子輸送を正確にコード内で表現することが重要になる。そこで、TASK/TXにおいて乱流が駆動する粒子輸送のモデリングを行った。TASK/TXは前述の通り運動方程式と連続の式を解いており、通常の輸送コードのように流束・勾配関係から導いた粒子輸送方程式（連続の式に流束・勾配関係で記述された粒子束の表式を代入したものに相当）に適切な乱流輸送モデルで評価した粒子拡散係数を直接入れ込んで、粒子の対流や拡散を表現することが出来ない。そこで、TASK/TXの運動方程式に導入した項を通じて乱流に起因する準線形粒子束を引き起こすモデルを構築し、その妥当性を確かめた。これはTASK/TXにしか適用できないモデルではなく、連続の式と運動方程式を組み合わせた一般的な方程式系にも適用可能な、汎用性の高い手法である。

粒子輸送やプラズマ密度に影響を与えるのは、中性粒子も同様である。中性粒子は特に周辺領域で粒子源として重要な役割を果たしているが、コア領域に中性粒子が存在していれば、粒子輸送に影響を与えるのは自明である。ゆえに中性粒子の特にコアにおける挙動を良く予測することが重要となる。挙動予測・解析に通常用いられているモンテカルロコードは十分なテスト粒子数を用いれば高精度

である半面、輸送コードに組み込むには計算時間がかかりすぎるため、長時間にわたる輸送シミュレーションには必ずしも適当でない。そこで、中性粒子のエネルギーや生成領域に着目して中性粒子を三群に分け、拡散方程式で輸送を近似できる中性粒子輸送モデルを構築した。このモデルを検証するためJT-60Uのパラメータを用いてモンテカルロコードTOPICS/NTと計算結果のベンチマークを行い、中性粒子密度分布がコアにまで渡って良く一致していることを確認した（図2）。

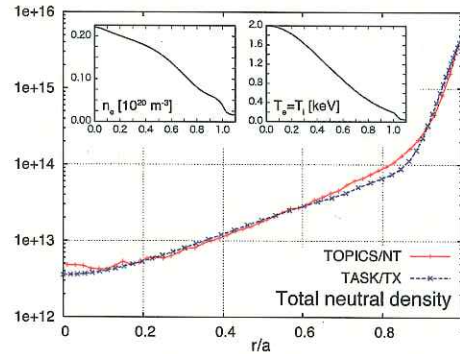


図2 全中性粒子密度分布の比較。図中左上の図は背景プラズマとして用いた密度分布、図中右上は温度分布である。

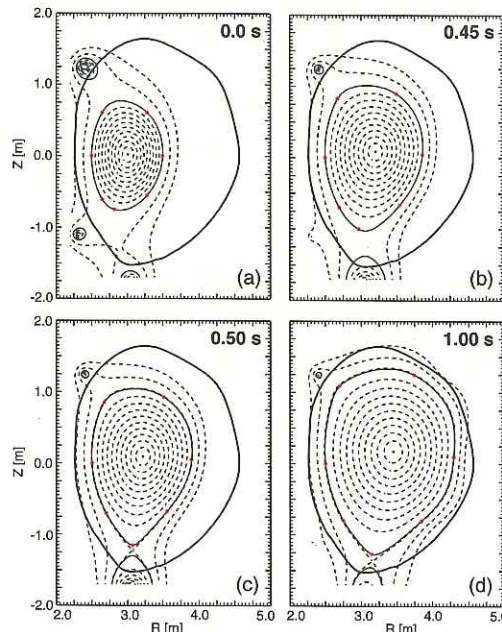


図3 JT-60Uのパラメータを用いた体積拡大シミュレーション。リミタ配位から始まり、ダイバータ配位へと遷移している。

TASK/TX は円柱座標系で記述されている。平衡の幾何形状を取り込み実験データとの直接比較を行うためには磁気面座標系への拡張が必要であり、現在方程式系を導出中である。磁気面の幾何形状は平衡コードによって計算されるため、平衡コードとの結合が必

要となり、そのため方程式系の導出と平行して平衡コードと輸送コードとの結合手法を考えている。そのため、まず統合輸送コード TOPICS における輸送ソルバーと平衡ソルバーの結合状況を調べた。現在 TOPICS で使われている磁束保存トカマク (FCT) 手法に基づく平衡ソルバーは輸送ソルバーと高い親和性を誇る半面、プラズマの立ち上げ時のような体積、言い換えればプラズマのトロイダル断面を貫くトロイダル磁束、が急激に拡大するフェーズには適用できないことがわかった。そこで、体積拡大フェーズのシミュレーションが行えるように TOPICS を改造した。プラズマ点火時のリミタ配位からプラズマ拡大時のダイバータ配位への遷移も含めた、立ち上げから一貫したシミュレーションが可能になった (図3)。この手法を用いることにより、ITER 機構が各極に依頼を出す ITER タスク (運転シナリオ作成) を請け負うことが可能になった。ITER や JT-60SA の運転シナリオの作成においても本手法の使用は必須であり、大きな前進となった。TOPICS の平衡ソルバーと TASK/TX との結合は今後の課題となっている。

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)

[雑誌論文] (計7件)

- ① M. Honda, Simulation technique of free-boundary equilibrium evolution in plasma ramp-up phase, Computer Physics Communications, 査読有, 2010, 掲載決定
- ② M. Honda, T. Takizuka, A. Fukuyama and K. Shimizu, Modeling of neutral transport for self-consistent transport simulations in tokamaks, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, 2010, 掲載決定
- ③ M. Honda, T. Takizuka, A. Fukuyama, M. Yoshida and T. Ozeki, Toroidal Rotation Profiles under the Influence of Fast-ion Losses Due to Toroidal Field Ripple, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol. 8, 2009, pp. 316-320
- ④ M. Honda, T. Takizuka, A. Fukuyama, M. Yoshida and T. Ozeki, Self-consistent simulation of torque generation by radial current due to fast particles, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 49, 2009, 035009 (10pp)

[学会発表] (計8件)

- ① 本多 充, Simulation study on effect of radial electric field and plasma rotations on formation of transport barriers, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009年12月3日, 京都市国際交流会館 (京都府)
- ② M. Honda, Modeling of neutral transport for self-consistent transport simulations in tokamaks, APFA2009/APTC2009, 2009年10月28日, 青森市男女共同参画プラザ (青森県)
- ③ M. Honda, Transport simulation on transport barriers associated with radial electric field and rotations, 12th International Workshop on "H-mode Physics and Transport Barriers", 2009年10月1日, プリンストン大学プラズマ物理研究所 (米国)
- ④ M. Honda, Simulation Study on Profile Peaking Associated with Anomalous Inward Pinch and Neutrals, 4th IAEA Technical Meeting on the Theory of Plasma Instabilities, 2009年5月19日, 京都大学 (京都府)
- ⑤ 本多 充, 高速粒子の荷電分離によるトルク精製のシミュレーション, 第25回プラズマ・核融合学会年会, 2008年12月3日, 栃木県総合文化センター (栃木県)
- ⑥ M. Honda, Self-consistent Simulation of Torque Generation by Radial Current due to Fast Particles, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008年10月17日, 欧州国連本部ビル (スイス)

[その他]

ホームページ等

<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/html/hyouyouyou.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本多 充 (HONDA MITSURU)

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・任期付研究員

研究者番号: 90455296