

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760667

研究課題名（和文） 実形状多流体トカマク輸送コードによるプラズマ回転と閉じ込め改善の研究

研究課題名（英文） Study of plasma rotation and confinement improvement using multi-fluid transport code with real geometry for tokamaks

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・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 の包含する物理を明らかにすると共に、モデルの拡張を行った。コードを用いて、径電場、径方向電流トルクとプラズマ回転の密接な関係を明らかにした。独自に導出した径方向電流トルクを評価する手法を高速粒子軌道追跡コードに実装し、シミュレーションや実験解析でトルクを定量的に評価する手法を確立した。ビーム駆動電流効率を予測する、衝突率効果を含めた新モデルを開発した。

研究成果の概要（英文）：Physics involved in a multi-fluid transport code TASK/TX developed by the representative of this research has been in detail elucidated and several models have been newly added or upgraded. Using the code, the close relationship among the radial electric field, the radial current torque and plasma rotation has been clarified. The way to quantitatively estimate the radial current torque for both simulations and experimental analyses has been firmly established by implementing the unique method into the orbit-following code. The novel collisionality-dependent model that can calculate the shielding factor of the beam-driven current has been newly developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

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：理論シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

トカマクのプラズマ回転とそれに付随して起こる現象が近年大きく注目されている。JT-60Uなどで観測されている周辺部分でのプラズマ電流と逆方向の回転は、精力的な実験解析や数値計算によって高速イオンのリップル損失に起因していることがわかった。しかし、回転を引き起こす物理はなお多数存

在し、定常時における回転の速度や分布形状を予測する決定的な手法は確立されていない。

近年 DIII-D 装置において、プラズマ内に自然に順方向に駆動するトルクが生じていたことが実験的に確認された。これは自発回転と呼ばれており、外部入力トルクによる回転駆動が相対的に小さくなる核融合炉での

プラズマ回転を予測する上で、自発的に生ずる回転の物理機構の解明は最も求められているものである。従来回転は対流と運動量拡散のみで扱われてきたが、この実験結果はその両者のみでは説明不能で、残留応力を考慮する必要があることを示している。研究代表者が開発を進めている多流体輸送コード TASK/TX はこれらを数値的に取り込むことが出来るので、自発回転の駆動機構や回転速度の定量的評価の研究に適したコードである。

トカマクプラズマの密度、温度や安全係数の時間発展を解析できる既存の拡散型輸送コードは基礎方程式導出の背景が比較的簡明でよく知られているため、数値計算によって生まれる結果の複雑さや非線形性の大部分は、使用する拡散係数などのモデルに由来している。しかし、より物理的な簡約化が少ない運動方程式群とマクスウェル方程式からなる TASK/TX は、その方程式が包含する物理機構が既存の理論体系と整合する形で明確には分かっていない。そのため、まずは基礎方程式が含む物理を明らかにし、その上でモデルの拡張を行い、磁気座標系に適用可能な方程式へと発展させていく必要がある。

核融合反応で生成される  $\alpha$  粒子はその等方性から順方向・逆方向の粒子が同じ割合で生成されるため、有意なトルクは生じないと考えられてきた。しかし、それを数値計算で確認した例はかつてなく、検証されている事実とは言えなかった。そのため軌道追跡モンテカルロコード OFMC と TASK/TX を用いてアルファ粒子のトルクについて調べることが、将来の核融合炉における自発的トルクを理解する観点から重要となる。

## 2. 研究の目的

- (1) プラズマに内在する自発回転の源は、残留応力など様々である。その性質を調べるため前に、まずは多流体輸送コード TASK/TX が包含する物理そのものをつぶさに検証し、拡張する。その後、自発回転の物理的性質を調べ、回転速度を定量的に予測する手法を確立する。
- (2) TASK/TX の方程式系を実験に直接適用可能な磁気面座標系で導出しなおして数値実装し、平衡コードと組み合わせることでプラズマの実形状を取り込めるように発展させ、実際のプラズマの解析や予測に用いることが出来るようにする。
- (3) 核燃焼プラズマにおけるアルファ粒子が引き起こす  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  (径方向電流) トルクの回転への影響を明らかにし、その結果生じる回転が不安定性の抑制にどれほど有意であるかを検証する。また、 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルクと径電場の関係について系統的な解釈を確立させる。

## 3. 研究の方法

TASK/TX の基礎方程式系に、既存の輸送理論で行われているオーダーリングの手法を適用して、どのオーダーでどの項が主要な役割を果たしているかを明らかにする。また、とりわけ重要となる新古典輸送理論との整合性がとれているかどうかを解析的に確認した後、数値的に正しく実装されているかをベンチマークなどによって検証する。その後、連続の式に乱流拡散係数を導入しない形で乱流粒子輸送を起こすためのモデルを導出し、粒子輸送の物理的背景を明らかにする。

自発回転の基となる  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルクは、ビーム入射が作るものについては TASK/TX シミュレーションによる再現に既に成功しているが、なぜ TASK/TX の方程式系では準中性を保つように電子とビームイオンで異なる修理源分布を与えるだけで  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルクが生まれるのか、その物理機構は分かっていない。自発回転に取り組むためにも、解析的手法を用いて基礎方程式を精査することにより、その仕組みを明らかにする。

$\alpha$  粒子の挙動を正確に追い、微小かもしれないそのトルクを評価するためには定量的手法が求められる。そこで、高速粒子軌道追跡モンテカルロコード OFMC を改良して、TASK/TX と必ずしも組み合わせなくとも、OFMC 単体で  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルクを評価する仕組みを実装する必要がある。

自発トルクについては多くの物理機構が提案されているが、その特性を調べるためにはそれぞれの物理に基づく適切なモデルを開発ないし採用する必要がある。まずは残留応力に起因する物理モデルを導入し、軸対称プラズマ内部の事情で決まるトルクについて調べることにする。

## 4. 研究成果

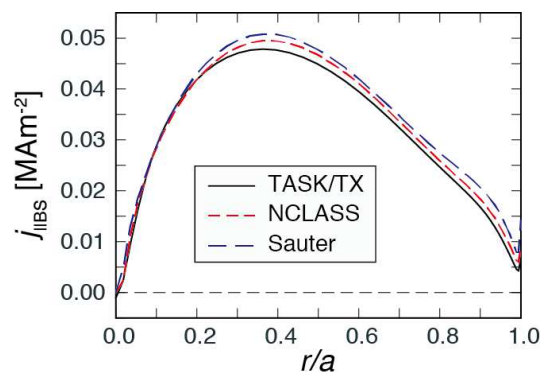


図1 自発電流分布を、TASK/TX、NCLASS、Sauter モデルで比較した図。

多流体輸送コード TASK/TX の包含する物理的性質を調べる研究が大きく進展し、その知見に基づく輸送モデルが複数開発された。二流体方程式系の中で非圧縮の磁気面内 1 次流

れがどのように記述されているかを調べた後、TASK/TX の系と適合する新古典輸送モデルを開発した。モーメント法に基づく新古典輸送モジュール NCLASS で評価した粘性・摩擦係数を適切なモデル化の後に TASK/TX のポロイダル方向運動方程式に導入することで、ポロイダル流、新古典抵抗率、自発電流、新古典粒子束といった新古典的性質が再現できていることを確認した。その結果は他のモデルと比較することで、妥当性を検証した (図 1)。開発したモデルは平衡と適合する磁気面座標系においても成り立つものである。

粒子輸送は連続の式によって流束として扱われるため、拡散・対流型の粒子束を陽に仮定しておらず、そのため直接乱流粒子拡散係数を方程式系に入れ込むことが出来ない。ゆえに TASK/TX の基礎方程式系と矛盾しない形で、乱流粒子輸送を起こすモデルが必要となる。新古典輸送理論に基づく粒子束は、そもそもトロイダル方向の運動方程式中に存在する磁気力 (ローレンツ項の構成要素) 項から生じている点に着目し、同様の手法に基づき準線形粒子束のモデルをその項に整合する形で導入するモデルを開発した。開発したモデルは通常の拡散項と同じ働きを持つ一方、流束とも完全に無矛盾であることが確認された。更に径電場との関連性も含めモデルの物理的・数値的性質を明らかにした。

径方向電流と径電場の関係について理論的な研究を行った。これまで  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルクが TASK/TX シミュレーションで再現できることは分かっていたが、プラズマ内部で何を媒介として高速イオン径方向電流の発生に伴いイオン径方向電流が変化しているのか分かっていなかった。基礎方程式を解析的に調べることにより径電場の時間変化による分極電流が短い時間スケールでは主要な役割を果たし、比較的長い時間スケールでは径方向輸送現象が分極電流に代わることが分かった。これにより、TASK/TX によるシミュレーション結果を理論的に解釈できるようになった。径電場と  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルク、プラズマ回転の関係を明らかにした本研究と、以下に述べる中性粒子ビーム入射 (NBI) のトルクを厳密に評価できるシミュレーションコードの開発などの成果により、第 7 回日本物理学会若手奨励賞を受賞した。

高速粒子軌道追跡モンテカルロコード OFMC に、独自に導出した  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルクの評価手法を実装することに成功した。これにより実験解析や予測シミュレーションにおいて、NBI がプラズマに与えたトルクを定量的に評価できるようになった。この機能を用いて核融合実証炉で核融合反応が作り出す  $\alpha$  粒子が自発的なトルクを生じさせるかどうか研究を行った。理想軸対称系では衝突によるト

ルクの移送過程がプラズマ電流と同方向のトルクを与える一方、 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  トルクは鏡像対称の分布となり、結果、正味のトルクは得られないことが分かった (図 2)。しかし、 $\alpha$  粒子の自発トルクは元々ゼロではなく打ち消し合った結果ゼロになっているという事実は、磁場のリップル (微小な揺らぎ) が存在する現実のトカマクでは対称性の破れから有限の逆方向トルクを生じさせることを示しており、この事実はシミュレーションでも確認されている。核融合試験炉における性能予測やモデル開発に大きく役立つ研究成果である。

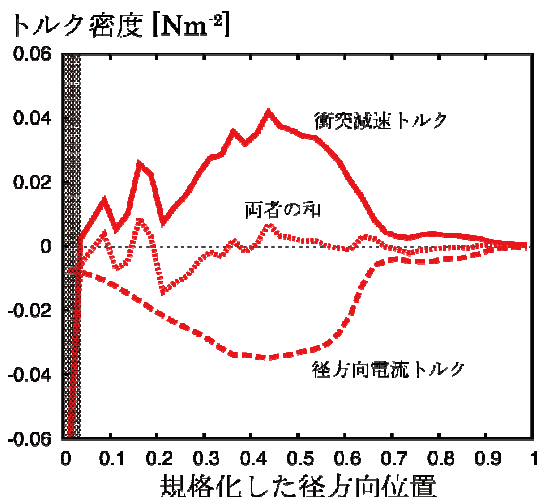


図 2 OFMC で計算した  $\alpha$  粒子が作る衝突減速トルクと  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  (径方向電流) トルクの分布。左端の網掛け部分は統計的に有意で無い部分を示している。

円柱座標における基礎方程式系に基づく TASK/TX を軸対称直線磁気座標系に対応させるための研究を進展させた。磁気座標系においては新古典現象など磁力線方向の運動が重要となるため、従来の円柱座標系ではポロイダル方向に取っていた座標を磁力線方向へと書き直し、トカマクプラズマの理論体系と高い親和性を持つ方程式系へと書き換えた。小旋回半径オーダリングを用いて方程式ごとに主要項を特定し、プラズマにおける主要な力のつり合い関係を全て記述できるようにした。従来の TASK/TX 向けに開発した粒子輸送・新古典輸送モデル等を新しい座標系においても適用可能な形に再導出することに成功した。さらに、電磁場を記述するマクスウェル方程式から磁束や電場の時間発展を記述する方程式系を導出した。導出した方程式群はオーダリングの取り方を変えることで既存の体系と矛盾しない結果を導くことを示した。ビームイオンの方程式も立て、高速イオン系を含んだ形で全体の方程式系を矛盾なくまとめることに成功した。これにより、磁気面座標系における基礎方程式系を

TASK/TX に数値実装する準備が整った。

NBI はプラズマ内に磁力線方向のビームイオンの流れ(イオン電流)を作り出すが、同時に背景プラズマを構成する電子との摩擦により同じ向きに電子も引っ張るため、電子電流がイオン電流を打ち消し正味の電流が流れないことになる。しかし、新古典現象によって電子が磁場に捕捉されることにより生じる捕捉電子はトロイダル方向に自由に動くことが出来ずイオン電流を打ち消すことが出来ないため、正味の電流駆動が可能となることが知られていた。これを電子の遮蔽効果と呼んでいるが、遮蔽効率を予測する従前のモデル(図3の“Lin-Liu”)は衝突率の依存性が含まれていなかった(衝突率ゼロの極限しか考えていなかった)。今回、モーメント法に基づく新古典的手法(図3の“MI-S”)によって衝突率依存性を含む新しい遮蔽因子モデルを導出するとともに、自発電流を予測するモデルが遮蔽因子モデルにも僅かの改変で適用できる(図3の“Fitted  $L_{31}$ ”)ことを発見した。衝突率がゼロの極限で既存のモデルに一致することを確認し、衝突率の増加と共に NB 駆動電流の駆動効率が減少していくことが分かった(図3)。また、これまでビームイオンと熱イオンの運動方程式を自己無撞着に解く TASK/TX のモデリングにおいてもビームイオン運動方程式を解くに当たって遮蔽因子を陽に含める必要があるかどうか分かっていなかったが、本研究により方程式系では電子とビームイオンの摩擦項を含めることで遮蔽因子は自然に含まれることになることが分かった。

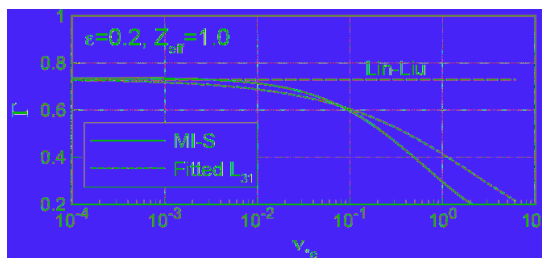


図3 逆アスペクト比 0.2、実効電荷数 1.0 における、NB 駆動電流の駆動効率(縦軸)と衝突率(横軸)の関係。

研究代表者は TASK/TX の開発に並行して、原子力機構で開発が進められている統合型輸送・平衡コード TOPICS の開発にも携わっている。TOPICS は TASK/TX と異なり輸送オーダーリングに支配される輸送現象の時間発展を追う拡散型輸送コードであり、異なる物理的背景を持つコードを共に開発することで、得られた物理的結果の妥当性を担保し、片方で得られた知見をもう一方に生かすなど、大きな相乗効果を挙げた。核融合プラズマにおける自発トルク源の有力な候補と目されている径電場シアによる残留応力モデル

を TOPICS に導入し、その影響について調べた。取り込んだモデルは温度勾配を主な駆動源としているため、輸送障壁が形成されるプラズマで有意な働きをすることがシミュレーションで明らかとなった。また、プラズマサイズに比して外部入力パワーが減少する ITER では NBI が有力なトルク源たり得ないが、残留応力がトルク源としての役割を果たす可能性がある事を回転予測シミュレーションで示した。

## 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 10 件)

- ① N. Oyama, H. Urano, K. Shinohara, M. Honda (以下 4 名), Effects of local toroidal field ripples due to test blanket modules for ITER on radial transport of thermal ions, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 52, 2012, 114013 (9pp)  
doi:10.1088/0029-5515/52/11/114013
- ② K. Kamiya, M. Honda (以下 10 名), Modifications to the edge radial electric field by angular momentum injection in JT-60U and their implication for pedestal transport, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 52, 2012, 114010 (12pp)  
doi:10.1088/0029-5515/52/11/114010
- ③ M. Yoshida, Y. Sakamoto, M. Honda (以下 5 名), Core and edge toroidal rotation study in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 52, 2012, 023024 (9pp)  
doi:10.1088/0029-5515/52/2/023024
- ④ M. Yagi, K. Shimizu, T. Takizuka, M. Honda (以下 3 名), Simulation Study of L/H Transition with Self-Consistent Integrated Modelling of Core and SOL/Divertor Transport, Contribution to Plasma Physics, 査読有, Vol. 52, 2012, 372-378,  
doi:10.1002/ctpp.201210019
- ⑤ M. Honda, M. Kikuchi and M. Azumi, Collisionality dependence of a shielding factor of a beam driven current, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 52, 2012, 023021 (12pp),  
doi:10.1088/0029-5515/52/2/023021
- ⑥ M. Honda, A. Fukuyama and N. Nakajima, On the Neoclassical Relationship between the Radial Electric Field and Radial Current in Tokamak Plasmas, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 80, 2011, 114502 (14pp)

- doi:10.1143/JPSJ.80.114502
- ⑦ M. Honda, T. Takizuka, K. Tobita, G. Matsunaga and A. Fukuyama, Alpha particle-driven toroidal rotation in burning plasmas, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 51, 2011, 073018 (9pp)  
doi:10.1088/0029-5515/51/7/073018
- ⑧ M. Honda, A. Fukuyama and N. Nakajima, Neoclassical Transport Modeling Compatible with a Two-Fluid Transport Equation System, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 6, 2011, 1403008 (11pp),  
doi:10.1585/pfr.6.1403008
- ⑨ M. Honda, A. Fukuyama, T. Takizuka and K. Shimizu, Modelling of anomalous particle transport for dynamic transport simulations, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 50, 2010, 095012 (14pp),  
doi:10.1088/0029-5515/50/9/095012
- ⑩ M. Honda, Simulation technique of free-boundary equilibrium evolution in plasma ramp-up phase, Computer Physics Communications, 査読有, Vol. 181, 2010, pp. 1490-1500,  
doi:10.1016/j.cpc.2010.04.014

[学会発表] (計 11 件)

- ① 本多 充, トカマクプラズマにおける非両極性径方向電流が引き起こすトルクと径電場の新古典的応答、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 27 日、広島県東広島市
- ② 本多 充, TOPICS と OFMC を用いたトロイダル運動量と径電場の輸送シミュレーション、第 29 回プラズマ・核融合学会年会、2012 年 11 月 27 日、福岡県春日市
- ③ M. Honda, Predictive Transport Simulations Consistent with Rotation and Radial Electric Field Using TOPICS with OFMC, 第 24 回 IAEA 核融合エネルギー会議、2012 年 10 月 9 日、米国サンディエゴ
- ④ M. Honda, Multi-fluid transport equations on the flux coordinates in tokamaks, 第 39 回プラズマ物理に関する欧州物理学会、2012 年 7 月 6 日、スウェーデン・ストックホルム
- ⑤ 本多 充, トカマク輸送コードにおけるトロイダル運動量・径電場モデリング、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 27 日、兵庫県西宮市
- ⑥ M. Honda, Collisionality dependence of shielding factor of beam driven current, Plasma Conference 2011, 2011 年 11 月 23 日、石川県金沢市
- ⑦ M. Honda, Neoclassical relationship

between the radial electric field and the radial current in tokamak plasmas, 第 38 回プラズマ物理に関する欧州物理学会、2011 年 6 月 28 日、フランス・ストラスブール

- ⑧ 本多 充, トカマクプラズマにおける径電場と径方向電流の新古典的關係、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 26 日、新潟県新潟市
- ⑨ 本多 充, DEMO 炉級プラズマにおけるアルファ粒子駆動トロイダル回転の研究、第 27 回プラズマ・核融合学会年会、2010 年 12 月 2 日、北海道札幌市
- ⑩ M. Honda, Alpha Particle-Driven Toroidal Rotation in Burning Plasmas, 第 23 回 IAEA 核融合エネルギー会議、2010 年 10 月 14 日、韓国大田市
- ⑪ 本多 充, TASK/TX 方程式系の新古典輸送特性、第 8 回核融合エネルギー連合講演会、2010 年 6 月 11 日、岐阜県高山市

[その他]

受賞関連 :

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

成果普及誌関連 :

[http://jolifukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2011/index\\_set.html](http://jolifukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2011/index_set.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・研究員

研究者番号 : 90455296