

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820442

研究課題名(和文) プラズマ回転と径電場の自律的分布形成による定常燃焼プラズマ維持の研究

研究課題名(英文) Study of maintaining a steady burning plasma based on autonomous formation of plasma rotation and radial electric field profiles

研究代表者

本多 充 (Honda, Mitsuru)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：90455296

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：磁気座標系に適合した二流体方程式系を導出し、それに基づく流体型輸送コード TASK/TXの開発に成功した。TASK/TXはプラズマの電磁場の発展と流体としてのプラズマの発展を無矛盾に取り扱える、他にない独自のコードである。新古典輸送モデルを改良し、実験で観測された径電場分布を良く再現することを確かめた。非軸対称摂動磁場に起因する新古典トロイダル粘性(NTV)を厳密に計算出来る枠組みを構築し、統合コードによるNTV解析とトロイダル回転予測計算を可能にした。第一原理計算による乱流輸送と無矛盾な分布を計算する新たな枠組みを構築し、動作の健全性と結果の妥当性が検証された。

研究成果の概要(英文)：The equations based on the two-fluid model on the flux coordinates were derived and they were successfully implemented in a fluid-type transport code TASK/TX. TASK/TX is a unique code in that it can self-consistently deal with the evolution of both the electromagnetic fields and the plasma fluid. Improving the moment-approach-based neoclassical transport mode, we obtained the very good agreement between the measured radial electric field in the experiment and that predicted by the model. We have developed the numerical framework that can accurately calculate the neoclassical toroidal viscosity (NTV) due to non-axisymmetric perturbed magnetic fields. The framework makes it possible to analyze the NTV in experiments and predict toroidal rotation with the NTV. We have also been developing the brand-new framework that can calculate the kinetic profiles consistent with turbulent transport using the first-principle gyrokinetic code. The verification study has been successfully demonstrated.

研究分野：核融合プラズマシミュレーション

キーワード：流体型輸送コード トカマク 新古典トロイダル粘性 径電場 準中性 新古典輸送 乱流輸送 摂動磁場

### 1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙プラズマや数理物理の分野などで回転が大きく取り上げられているが、トカマクの輸送分野でも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 プラズマではプラズマ電流と逆方向のプラズマ回転の方が順方向よりも低いパワーでHモード遷移するなど、径電場を介した回転の閉じ込めへの影響が強く示唆されている。しかし、プラズマ回転に影響を与える物理機構は多数存在し、定常時の回転速度や分布形状を予測する決定的な手法は未確立である。回転が分からなければ径電場も評価できないため、径電場シアによる乱流抑制が及ぼす粒子や熱の輸送への影響といった閉じ込めに係わる根幹の部分の予測すら困難にさせている。プラズマの自律性が高い原型炉では外部制御が困難であり、プラズマ内部の事情だけでどのように回転や径電場が決定されるかを明らかにせねばならない。そのためには粒子や熱に比べ理解が乏しかった運動量輸送物理のより深い理解と自己無撞着なシミュレーションが必須となる。

プラズマ回転を決定するトロイダル運動量は、径方向の運動量輸送とプラズマに生じたトルクを正確に評価することでその発展を追うことが出来る。径方向運動量輸送は対流・拡散という熱輸送の類似で記述されてきたが、内向きのピンチが支配的でそれが運動量拡散と関連していることや残留応力と呼ばれる自発的応力項の存在は運動量輸送に特有である。DIII-Dの実験で、残留応力は中性粒子ビーム(NB) 1 ユニット分もの大きさに相当する順方向トルクと付随するプラズマ回転を生んでいることが確認された。NBなどによる外部トルク入力が無効でない原型炉の核燃焼プラズマでは自発的に生じる残留応力トルクを正確に見積もることが回転予測に重要となるが、このトルクは径電場のシアに依存していることが分かっている。また、トロイダル磁場コイルや誤差磁場印加コイルなどで生じた非共鳴摂動磁場が引き起こす新古典トロイダル粘性(NTV)も自発トロイダル回転を引き起こすことが知られているが、NTVも径電場の非線形関数になっている上、核燃焼プラズマでは有意となるとの理論的結果が出ている。更に、従来核燃焼で生成されるアルファ粒子は等方的に生成されるためにトルクを生まないと考えられてきたが、研究代表者の研究により有限のリップル磁場が存在する現実のトカマクでは有意な逆方向のトルクが生じることを明らかにした。このように、核燃焼プラズマ内部で生じるトルク源は多い上それらは密接に径電場に関係しているため、プラズマの発展を追うためには運動量輸送・径電場・粒子と熱の輸送の自己無撞着な取扱いが必須である。

### 2. 研究の目的

(1) 磁気座標系における TASK/TX の支配方

程式を数値実装に適した形で改良した後に実装し、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改良する。これによりプラズマの形状効果による現象や実験プラズマの解析・予測に供することが可能になる。

- (2) 残留応力やNTVなど様々な自発トルク源のモデリングにより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。非両極性やNB駆動回転による自発的な電場構造の変化が引き起こすHモード遷移を調べ、境界輸送障壁の性能と回転・電場の連関性について明らかにするとともに、定常状態においても回転や径電場の自律的な落ち着きどころの決定に主要な役割を果たしている物理機構を明らかにする。
- (3) 原型炉において数少ない加熱装置を最大限駆使することで、どのような制御手法を用いた運転シナリオが定常かつ高出力のプラズマを得るのに最適かを探る。

### 3. 研究の方法

軸対称磁気座標系における磁気面平均されたTASK/TXの支配方程式を数値実装する作業を行う。理論に基づき構築された方程式体系は解析的に妥当でも必ずしも数値的に実装に適した形になっていないことが往々にしてあるため、開発と支配方程式の修正を繰り返しながら作業を進める。磁気座標系で書かれていることを活かして、実平衡を読むことの出来るインターフェースの開発を行う。量研機構で開発されている平衡コードMEUDASと世界的に用いられているGEQDSKフォーマットの両方に対応させる。数値実装終了後は、TASK/TXの方程式系は既存の流体モデルに基づく理論体系と矛盾無く構築されているので、新古典諸量や準線形乱流粒子束などの理論式が数値的にコード内で再現できているかを調べるとともに、他の輸送コードでは扱えないがTASK/TXには扱える物理が存在することを示す。

TASK/TXの数値実装は時間が掛かる事が予想されるため、NTVや残留応力のようなトルク源についての研究を平行して進める。開発したモジュールは量研機構で開発している統合コードTOPICSと結合し、統合プラットフォームを構築する。これにより、拡散型輸送方程式の枠組みでプラズマ回転の研究を行うことが出来る。残留応力に関しては径電場シアが関わる自発トルクの解析式が存在しており既に数値的にモデル化が完了している。しかし、解析式であるため定量性に掛ける部分があるため、予測計算に供するためにJT-60Uの実験データを用いてモデルを較正する。NTVに関しては、ヘリカル装置への適用で実績がある3次元大域的ドリフト運動論方程式ソルバFORTEC-3Dを用いて第一原理的アプローチにより厳密に評価できる。FORTEC-3Dは3次元平衡を必要とするため、3

次元平衡 VMEC を導入し、座標間を繋ぐインターフェイスを構築する。またこれらを輸送コードに統合した統一の枠組みを構築する。ここで開発したモジュールや枠組みは TASK/TX でも用いることが出来る。これにより、JT-60U プラズマにおいてどのような状況下で NTV が有意となるかについて定量的に調べることが出来るとともに、ITER や JT-60SA のプラズマ回転に対する NTV の影響を予測することが出来る。

電場形成と H モードは密接に関連している。JT-60U では同加熱パワーでもプラズマ回転の向きによって閉じ込め性能が異なる現象が見られている。NB による回転駆動の違いによる H モード閉じ込め性能の変化などの物理課題に取り組む。

#### 4. 研究成果

本研究計画の中核をなす磁気座標適合型流体輸送コード TASK/TX の開発に成功した。既存の拡散型輸送コードと異なり二流体方程式系に基づく TASK/TX は多くの物理現象を再現できる特徴を持つが、これまでの TASK/TX は円柱座標系を仮定しており、座標系も方程式系もトカマクの輸送物理と対応関係が明確ではなかった。トカマクにおける磁気座標系上で、支配的な輸送物理を再現できる方程式系を導出し、数値的な困難を乗り越えて安定に解く事に成功した。既存の拡散型輸送コードと異なり二流体方程式系に基づく TASK/TX は多くの物理現象を再現できる特徴を持つ。電荷中性のわずかな破れによる径電場の生成 (図 1) や、自発的な両極性流束、座標系の違いによる実質的なトロイダル方向の質量増大現象など、既存の拡散型輸送コードでは取扱い不可能な多くの現象を再

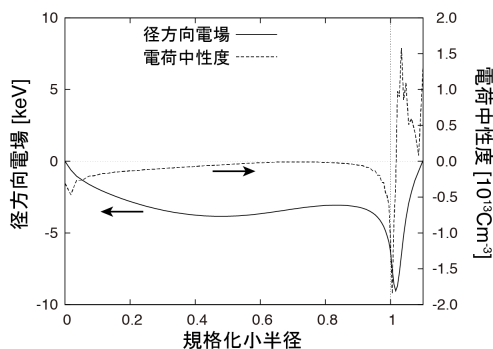


図 1 電荷中性度の僅かな破れと、それに対応する径電場の分布

現できることが数値計算で示された。さらに、外部の新古典輸送コードなしに多岐に渡る新古典輸送現象を再現する事が出来、既存の新古典コードとのベンチマークによってその妥当性が確認された。このことは TASK/TX が新古典輸送ソルバとしての機能も備えていることを示している。また、高速ビーム粒子に対するモデリングを拡張することで、ビームの入射方向の違いによる粒子輸送の向

きの違い、すなわち密度ピーキング・ブロードニング現象が新古典輸送によって生じることを明らかにし、実験観測結果と定性的に一致していることを確認した。

非軸対称摂動磁場に起因する NTV を定量的に評価するため、3 次元新古典輸送ソルバ FORTEC-3D と 3 次元平衡コード VMEC を統合型輸送コード TOPICS に繋げたプラットフォームを開発した。これにより平衡や磁場にモデル化を必要とせず、トカマクプラズマの実平衡配位と実際の摂動磁場を直接取り込むことができ、NTV の実験における定量的な評価が可能となった。また、この枠組みは予測計算にも適用できる。NTV の実験解析に当たり、既に開発していた TOPICS のトロイダル運動量ソルバと径電場ソルバを用いて、径電場が NTV に与える影響と、NTV がトロイダル回転に与える影響に着目して研究を進めた。解析の結果、摂動磁場リップルの大きさと共に、径電場が零となる位置が NTV のピーク位置に対応していることが分かり、プラズマ電流と順方向にビームを打ち込んでプラズマ回転を駆動する放電では径電場が零になる場所が内部に発生するため、そこで NTV がピークをとることが分かった。NTV トルクを考慮したトロイダル回転シミュレーションを行うと、実験で観測された炭素のトロイダル回転分布をよりよく再現できることが示された (図 2)。また、JT-60SA プラズマにおいて、NTV の影響がどのように現れるか予測計算によって示した。さらに、JT-60U の磁場リップル強度の異なる複数の L モード放電に対して統合モデルを適用することで、JT-60U のトロイダル回転分布形成において NTV が大きな

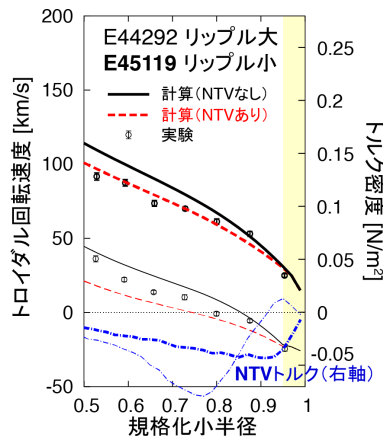


図 2 JT-60U の摂動磁場リップルの大小 2 放電に対する NTV の評価と、NTV を含めたトロイダル回転分布の計算

役割を果たしていることを明らかにした (図 2)。

トカマクプラズマの回転を左右する自発的なトルクに、非軸対称性の磁場摂動が引き起こす新古典トロイダル粘性 (NTV) と乱流に関連する残留応力があり、それらは核融合炉においてとりわけ重要となる。NTV については電子とイオンが作る NTV の違いについて調べるとともに、ITER で挿加されるテストプラ

ンケットモジュール(TBM)が作るトロイダル方向に不均一な静的磁場摂動に起因する NTV や、JT-60SA において外部コイルが印加する摂動磁場が作る NTV を定量的に評価した。その結果、ITER での TBM の挿加は回転に対して大きな影響を与えうる NTV を生んでいることが分かる一方、JT-60SA においては 10kA のコイル電流が作る摂動磁場は NTV に大きな影響を与えていない結果となった。

多流体方程式に基づく輸送コード TASK/TX は新古典輸送理論と高い整合性が求められるため、Matrix Inversion を拡張した。これまで広く用いられてきた新古典摩擦係数は衝突率が高い領域において適切でなくなる上、質量数の近い粒子種同士の衝突は正確に扱えなかった。質量比による近似を排したほか、より高次の新古典流の効果を低次の流れに繰り込むことで高精度の摩擦係数行列を導出し、それを数値実装することで新古典輸送モデルを拡張することに成功した。トロイダル回転分布の計算には境界の運動量を予測する適切なモデルが必要となる。JT-60U での高精度計測データを見直すことで、プラズマ境界においてプラズマの放電の種類によらず径電場の勾配がほぼゼロである実験事実を発見した。計測された径電場は拡張した Matrix Inversion を用いて高い精度で再現可能なことを確かめた(図3)。径電場とトロ

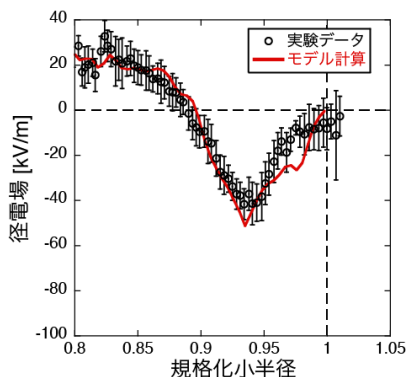


図3 JT-60U のHモード放電の径電場計測データと新古典輸送モデルによる計算結果の比較

イダル運動量は相互に関連しているため、径電場の勾配から境界のトロイダル運動量を導くモデルを開発・実装した。スクレイブオフ層の密度・温度勾配を計算するモデルと新古典トロイダル粘性計算を組み合わせることで、境界から中心まで一貫してトロイダル回転が計算できるようになり、JT-60U の実験分布とも良い一致を示していることが分かった。

核融合プラズマの性能を決定する乱流輸送はこれまで複雑な物理を簡約化した輸送モデルで対応してきた。近年の計算機性能の向上に伴い、第一原理に基づくジャイロ運動論コードと輸送コードを直接結合することで、大規模な計算が必要な中でも計算資源を節約しつつ第一原理的な扱いにより乱流輸送を評価することで定量的にプラズマの性

能評価を行おうと試みている。そのテストベッドとして、新たに開発した高精度の空間離散スキームを用いた輸送ソルバ TRESS とフラックスチューブジャイロ運動論コード GKV を組み合わせた TRESS+GKV という枠組みを構築し、乱流輸送と無矛盾の密度・温度分布を計算するためのフラクスマッチングツールとして開発を進めている。準線形モデルを用いた計算では、外部からの熱入力と新古典・乱流熱流束が一致する分布が得られている(図4)。電子とイオンの熱交換を考慮してもパワーバランスに到達することを実証した。TRESS にあたる部分は、将来 TASK/TX と置換することも視野に開発を進めている。

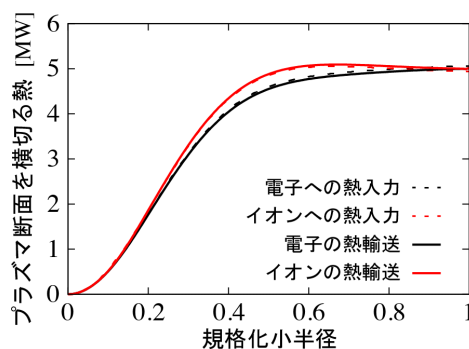


図4 プラズマの電子とイオンへの熱入力と、電子とイオンの熱輸送が、それぞれ釣り合っている

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計13件)

N. Aiba, M. Honda, K. Kamiya, Impact of ion diamagnetic drift on MHD stability at edge pedestal in JT-60U rotating plasmas, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 57, 2017, 022011 (10pp)

doi: 10.1088/0029-5515/57/2/022011

M. Nakata, M. Honda, M. Yoshida, H. Urano, M. Nunami, S. Maeyama, T.H. Watanabe, H. Sugama, Validation studies of gyrokinetic ITG and TEM turbulence simulations in JT-60U tokamak using multiple flux matching, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 56, 2016, 086010 (11pp)

doi: 10.1088/0029-5515/56/8/086010

M. Honda, A. Fukuyama, Development of the fluid-type transport code on the flux coordinates in a tokamak, Computer Physics Communications, 査読有, Vol. 208, 2016, 117-134

doi: 10.1016/j.cpc.2016.08.008

M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, M. Yoshida, N. Hayashi, K. Kamiya, A. Matsuyama, K. Shinohara, G. Matsunaga, M. Nakata, S. Ide, H. Urano, Integrated modelling of toroidal rotation with the 3D non-local drift-kinetic code

and boundary models for JT-60U analyses and predictive simulations, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 55, 2015, 073033 (11pp)  
doi: 10.1088/0029-5515/55/7/073033  
K. Tani, M. Honda, T. Oikawa, K. Shinohara, Y. Kusama, T. Sugie, Effects of the radial electric field on the confinement of fast ions in ITER, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 55, 2015, 053010 (15pp)  
doi:10.1088/0029-5515/55/5/053010  
K. Kamiya, M. Honda, H. Urano, M. Yoshida, Y. Kamada, K. Itoh and JT-60 Team, Boundary condition for toroidal plasma flow imposed at the separatrix in high confinement JT-60U plasmas with edge localized modes and the physics process in pedestal structure formation, Physics of Plasmas, 査読有, Vol. 21, 2014, 122517 (8pp)  
doi: 10.1063/1.4904815  
M. Yoshida, S. Ide, H. Takenaga, M. Honda, H. Urano, T. Kobayashi, M. Nakata, N. Miyato, Y. Kamada, Temporal and spatial responses of temperature, density and rotation to electron cyclotron heating in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 53, 2013, 083002 (10pp)  
doi: 10.1088/0029-5515/53/8/083022  
M. Honda, Impact of higher-order flows in the moment equations on Pfirsch-Schlüter friction coefficients, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.21, 2014, 092508 (10pp)  
doi: 10.1063/1.4895795  
K. Kamiya, G. Matsunaga, M. Honda, N. Miyato, H. Urano, Y. Kamada, K. Ida, K. Itoh, and the JT-60 team, Edge Radial Electric Field Formation after the L-H Transition on JT-60U, Contribution to Plasma Physics, 査読有, Vol. 54, 2014, 591-598  
doi: 10.1002/ctpp.2014100  
M. Honda, S. Satake, Y. Suzuki, G. Matsunaga, K. Shinohara, M. Yoshida, A. Matsuyama, S. Ide, H. Urano, Experimental analyses and predictive simulations of toroidal rotation driven by the neoclassical toroidal viscosity in rippled tokamaks, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 54, 2014, 114005 (14pp)  
doi:10.1088/0029-5515/54/11/114005  
M. Honda, S. Ide, T. Takizuka, N. Hayashi, M. Yoshida, M. Yagi, T. Fujita, Development of the transport-code framework for self-consistent predictions of rotation and the radial

electric field, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 53, 2013, 073050 (11pp)  
doi: 10.1088/0029-5515/53/7/073050  
M. Honda, Coulomb Logarithm Formulae for Collisions between Species with Different Temperatures, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 52, 2013, 108002 (3pp)  
doi: 10.7567/JJAP.52.108002  
E. Narita, M. Honda, N. Hayashi, T. Takizuka, S. Ide, K. Itami, A. Isayama, T. Fukuda, Turbulence Analyses of Improved Electron Energy Confinement in H-Mode Plasmas with Gyrokinetic Calculations, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 8, 2013, 1403028 (8pp)  
doi: 10.1585/pfr.8.1403082

〔学会発表〕(計14件)

本多充, TASK/TX の新古典輸送特性と粒子輸送モデリング、第72回日本物理学会年次大会、2017年3月17日、大阪大学(大阪府豊中市)  
本多充、トカマク磁気座標系における流体型輸送コード TASK/TX の進展、第33回プラズマ・核融合学会年会、2016年12月1日、東北大学(宮城県仙台市)  
本多充、ITG/TEM 不安定プラズマにおける大域的電子・イオン熱輸送シミュレーション、2016年日本物理学会秋季大会、2016年9月14日、金沢大学(石川県金沢市)  
本多充、JT-60Uにおける新古典トロイダル粘性の影響、第30回プラズマ・核融合学会年会、2013年12月03日、東京工業大学(東京都大田区)  
M. Honda, Predictions of Toroidal Rotation and Torque Sources Arising in Non-axisymmetric Perturbed Magnetic Fields in Tokamaks, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月19日、京都国際会館(京都府京都市)  
M. Honda, Physics and modeling of toroidal rotation and torque sources in JT-60U, 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), 2016年6月29日、Kaohsiung (Taiwan)  
本多充、局所ジャイロ運動論計算を組み合わせたトカマクにおける大域的輸送シミュレーション、第71回日本物理学会年次大会、2016年3月19日、東北学院大学(宮城県仙台市)  
本多充、ジャイロ運動論コード GKV とトカマク輸送コード TRESS による連成輸送計算、第32回プラズマ・核融合学会年会、2015年11月24日、名古屋大学(愛知県名古屋市)  
本多充、トカマク磁気座標系における流体型輸送コードの開発、2015年日本物理

学会秋季大会、2015年9月16日、関西大学（大阪府吹田市）

M. Honda, Development of the multi-fluid transport code on the tokamak flux coordinates, 42nd EPS Conference on Plasma Physics, 42nd EPS Conference on Plasma Physics, 2015年6月25日, Lisbon (Portugal)

M. Honda, Toroidal rotation modeling with the 3D non-local drift-kinetic code and boundary models for JT-60U analyses and predictive simulations, Plasma Conference 2014, 2014年11月18日、朱鷺メッセ（新潟県新潟市）

M. Honda, Integrated Modeling of Toroidal Rotation with the 3D Non-local Drift-kinetic Code and Boundary Models for JT-60U Analyses and Predictive Simulations, 25th IAEA Fusion Energy Conference, 2014年10月16日, Saint Petersburg (Russia)

M. Honda, Experimental analyses and predictive simulations of toroidal rotation driven by the neoclassical toroidal viscosity in tokamaks, 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2013年10月4日、九州大学（福岡県春日市）

M. Honda, Simulations of toroidal rotation driven by the neoclassical toroidal viscosity in tokamaks, 40th EPS Conference on Plasma Physics, 2013年07月01日, Espoo (Finland)

〔その他〕

受賞関連：

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

本多 充 (Honda, Mitsuru)

国立研究開発法人・量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・先進プラズマ研究部・主幹研究員

研究者番号：90455296