

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：14301

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20226017

研究課題名（和文）トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発

研究課題名（英文）Development of Kinetic Integrated Simulation Code for Toroidal Plasmas

研究代表者

福山 淳（FUKUYAMA ATSUSHI）

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60116499

研究成果の概要（和文）：核融合炉において実現される核燃焼プラズマの挙動を正確に予測し、信頼できる制御手法を開発するため、運動論的効果を取り入れた炉心プラズマ統合シミュレーションコードを開発し、速度分布関数の時間発展に基づいた輸送シミュレーションおよび非軸対称効果を含めたトロイダルプラズマ統合解析を実現した。

研究成果の概要（英文）：In order to correctly describe the behavior of burning plasmas in fusion reactors and develop reliable control schemes, an integrated simulation code of reactor plasmas has been developed including the kinetic effects, and transport simulation based on the time evolution of velocity distribution functions and integrated analysis of toroidal plasmas including the non-axisymmetric effects have been carried out.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	26,800,000	8,040,000	34,840,000
2009年度	16,800,000	5,040,000	21,840,000
2010年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2011年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2012年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
総計	75,800,000	22,740,000	98,540,000

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：核融合，トロイダルプラズマ，粒子運動論，統合シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉（ITER）の建設が始まり、核融合炉の早期実現に向けた幅広い取り組み（BA）の活動も本格化しつつあった。核融合反応が持続的に維持される核燃焼プラズマの挙動を正確に予測し、信頼できる制御手法を確立するために、炉心プラズマ統合シミュレーションコードの開発が急務となっていた。

2. 研究の目的

核融合反応や外部からのプラズマの加熱と制御は、電子やイオンの速度分布関数をマクスウェル分布から変形させ、加熱や電流駆動の効率を変化させるだけでなく、輸送現象や不安定性にも影響を与える。本研究では、速度分布関数の変形を自己無撞着に記述し、現実のトカマクプラズマがもつ非軸対称性を考慮に入れた炉心プラズマ統合シミュレーションコードを開発する。

3. 研究の方法

速度分布関数の時間発展に基づいた運動論的統合シミュレーションコードを開発し、非軸対称効果を含めたトロイダルプラズマの時間発展統合解析によって、核燃焼プラズマの性能予測ならびに制御手法開発を行った。

4. 研究成果

トロイダル炉心プラズマ統合モデリングコード TASK および関連コード GNET 等の構成を図 1 に示す。

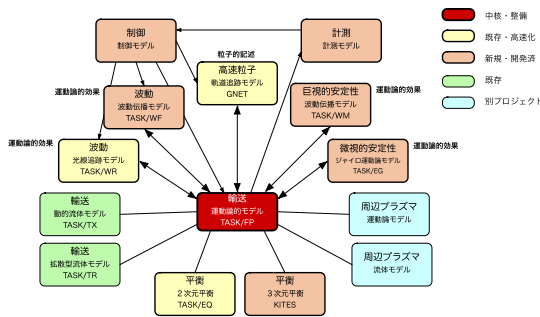


図 1 統合モデリングコードの構成

(1) 中核となる運動論的輸送解析モジュール (TASK/FP)は、速度分布関数の時間発展をフォッカープランク方程式によって記述する。従来の速度分布解析では1成分あるいは電子とイオンの2成分での解析であったが、DT核燃焼プラズマを記述するために、任意の数の粒子種について解析できるように拡張した。クーロン衝突項についても、粒子数や運動量だけでなくエネルギーも保存するように非線形衝突項を拡張し、高速成分だけでなくバルク成分を含めた統一的な解析が可能になった。そしてITERプラズマにおいて電子、重水素イオン(D)、三重水素イオン(T)、 α 粒子(He)が電子サイクロトロン波、中性粒子ビーム、イオンサイクロトロン波、核融合反応等によって加熱される場合の速度分布解析を世界に先駆けて行った。図2に各粒子種の速度分布関数(等高線表示)の規格化小半径 ρ 依存性を示す。横軸は磁力線方向の速度、縦軸は磁力線に垂直な方向の速度を示す。電子についてはマクスウェル分布からのずれは小さいが、重水素イオンは中性粒子ビーム加熱により、三重水素イオンはイオンサイクロトロン高調波共鳴加熱により、マクスウェル分布から大きくずれている。また、分布関数の変形を考慮に入れることにより、核融合反応率がより正確に計算できるようになった。さらに空間輸送項を導入して高速イオンの径方向輸送が加熱分布に与える影響を解析し、径方向拡散係数のエネルギー依存性が加熱分布および核融合出力パワーに大

きな影響を与えることを初めて定量的に示した。

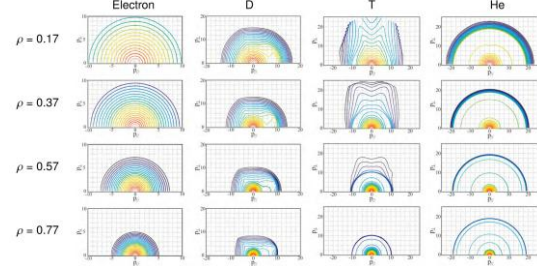


図 2 各粒子種々の速度分布関数(等高線表示)

(2) ヘリカル系プラズマにおいては磁場のヘリカルリップルとトロイダルリップルによって、高速イオンの軌道が複雑になるため、粒子軌道を追跡して速度分布関数を求めることが必要となる。5次元ドリフト運動論方程式を解く GNET コードを3次元波動伝播解析コード TASK/WM と組み合わせることにより、大型ヘリカル装置(LHD)プラズマにおけるイオンサイクロトロン波加熱の加熱効率を評価し、磁場配位およびサイクロトロン共鳴位置を変化させてその最適化を行った。

(3) ヘリカル系磁場配位における新古典輸送係数を正確に計算し、その結果をニューラルネットワークによりデータベース化したDGN/LHDモジュールと、径方向電流から径電場を計算するERモジュールを拡散型流体輸送モジュール TASK/TR に組み込んだ TASK3Dコードにより、LHDプラズマの輸送シミュレーションを行った。複数の異常輸送モデルについて実験における温度分布の再現性を比較するとともに、径電場評価モデルの比較も行った。系統的な輸送モデルの比較によって、より優れた乱流輸送モデルを提案する手掛かりが得られた。

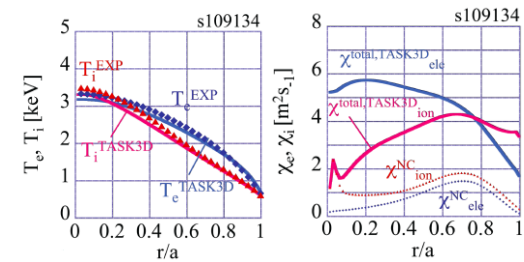


図 3 LHDプラズマ輸送シミュレーション例
左：温度分布，右：熱拡散係数分布

(4) 運動方程式を含めて磁気面平均された二流体方程式およびマクスウェル方程式を解く動的流体輸送モジュール TASK/TX は、プラズマの回転や径電場の時間発展を正確に取り扱うことができる。この方程式系に、ヘリカル磁場の効果を取り入れ、ヘリカル系プラズマの輸送シミュレーションを行った。そ

の結果、中性粒子ビーム加熱パワーの増大や磁気軸付近の電子サイクロトロン波加熱に伴って、径電場が負の状態から正の状態に移り、輸送に影響を与えることが初めて示された

(5) プラズマ回転や有限ラーモア半径効果を取り入れて磁気島を伴う3次元MHD平衡配位を求めるために、大アスペクト近似を用いずに非線形方程式を Jacobian-free Newton-Krylov (JFNK) ソルバーを用いて解く方法を考案し、新しい3次元平衡コード KITES を開発した。

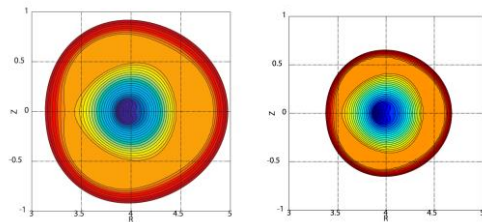


図4 KITES コードによる磁気島のある3次元平衡解析例 (トロイダル角: $0, \pi$)

(6) TASK コードに中性粒子発生数を視線方向に積分する中性粒子計測モジュールを組み込み、核融合出力パワーとの比較を行った。さらに中性粒子ビーム加熱モジュール等と組み合わせ、核融合出力維持の制御シミュレーションを試みた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者及び研究分担者に下線)

[雑誌論文] (計 31 件)

1. D. Raburn, A. Fukuyama, Inclusion of Pressure and Flow in the KITES MHD Equilibrium Code, Plasma Fusion Res., Vol. 8, 2402030 (4p) (2013) : 査読あり
2. D. Raburn, A. Fukuyama, Concept for Numerical Calculation of 3D MHD Equilibria with Flow, Plasma Fusion Res., Vol. 7, 2403108 (4p) (2012) : 査読あり
3. S. Azuma, A. Fukuyama, T. Takizuka, Analysis of the Bohm criterion for two-ion-species plasmas using PARASOL, Contributions to Plasma Physics, Vol. 52, No. 5-6, pp.512-517 (2012) : 査読あり
4. H. Seto, A. Fukuyama, Formulation of two-dimensional transport in tokamak plasmas for integrated analysis of core and edge plasma, Contributions to Plasma Physics, Vol. 52, No. 5-6, pp.384-390 (2012) : 査読あり

5. M. Honda, A. Fukuyama, N. Nakajima, On the Neoclassical Relationship between the Radial Electric Field and Radial Current in Tokamak Plasmas, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 80, No.11, pp.114502 (2011) : 査読あり
6. H. Nuga, A. Fukuyama, Kinetic integrated modeling of plasma heating in tokamaks, Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 2, pp.78-84 (2011) : 査読あり
7. D. Raburn, A. Fukuyama, The Bernoulli Equation and the Poloidal-sonic Singularity in an Inverse Aspect-ratio Expansion Formulation of Equilibria with Flow, Plasma Fusion Res., Vol. 6, pp.2403044 (2011) : 査読あり
8. M. Miki, A. Fukuyama, Transport Simulation of Helical Plasmas Using the TASK/TX Code, Plasma and Fusion Research, Vol. 5, S2040 (4p) (2010) : 査読あり
9. H. Nuga, A. Fukuyama, Fokker-Planck Simulation of Multi-Species Heating in Tokamak Plasmas, Plasma and Fusion Research, Vol. 5, S2068 (4p) (2010) : 査読あり
10. D. Raburn, A. Fukuyama, Numerical calculation of equilibria with poloidal-sonic flow and finite Larmor radius effects in large aspect-ratio tokamaks, Phys. Plasmas, Vol. 17, No. 12, 122504 (10p) (2010) : 査読あり
11. M. Honda, A. Fukuyama, T. Takizuka and K. Shimizu, Modelling of anomalous particle transport for dynamic transport simulations, Nucl. Fusion, Vol. 50, No. 9, 095012 (14p) (2010) : 査読あり
12. S. Murakami, T. Yamamoto, A. Fukuyama, J.N. Talmadge, K.M. Likin, and J.W. Radder, Optimization Study of ICRF Heating in the LHD and HSX, Configurations, Contributions to Plasma Physics, Vol. 50, No. 6-7, pp.546-551 (2010) : 査読あり

[学会発表] (計 124 件)

1. A. Fukuyama, Kinetic Integrated Modeling of Magnetic Fusion Plasmas, The 8th International Conference on Computational Physics (Hong Kong Baptist University, Hong Kong, 2013-01-10)
2. D. Raburn, A. Fukuyama: Inclusion of pressure and flow in a new 3D MHD

- equilibrium code, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Providence, RI, USA, 2012-10-29) BP8.99
3. A. Fukuyama, H. Nuga, D. Raburn, A. Wakasa, and S. Murakami: Kinetic Integrated Modeling of Burning Plasmas in Tokamaks, 24th IAEA Fusion Energy Conference (San Diego, CA, USA, 2012-10-09) TH/P6-13
 4. S. Murakami, K. Itoh, L. Zheng, J. Van Dam, P. Bonoli, J. Rice, C. Fiore, and A. Fukuyama: Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating in the Alcator C Mod Plasma, 24th IAEA Fusion Energy Conference (San Diego, CA, USA, 2012-10-09) TH/1-1
 5. S. Murakami, K. Itoh, L.J. Zheng, et al.: Simulation study of toroidal flow generation by the ICRF minority heating in the Alcator C-Mod plasma, 39th EPS Conference & 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2012-07-06) 05.119
 6. A. Fukuyama: Integrated Simulation of Burning Plasmas, 2011 Northeastern Asian Symposium on Plasma Fusion (Hotel Riviera Yuseong, Daejeon, Korea, 2011-09-26) : 招待講演
 7. A. Fukuyama: Integrated modeling of core, edge and peripheral plasmas, 13th International Workshop on Plasma Edge Theory (South Lake Tahoe, 2011-09-21) I-5 : 招待講演
 8. S. Murakami, K. Itoh, L.J. Zheng, J.W. Van Dam, and A. Fukuyama: Simulation study of toroidal flow generation by ICRF minority heating, Joint Meeting of the 19 Topical Conf. on RF Power in Plasmas and the US-Jpn RF Phys. Workshop (New Port, RI, USA, 2011-06-02) I11 : 招待講演
 9. 村上定義, 伊藤公孝, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, 福山淳: ICRF 少数イオン加熱によるトロイダル流駆動のシミュレーション研究, 第 27 回プラズマ・核融合学会年会 (北海道大学学術交流会館, 札幌, 2010-12-03) 03aA02 : 招待講演
 10. D. Raburn, A. Fukuyama: Numerical Calculation of MHD Equilibria with Poloidal-Sonic Flow and FLR Effects, 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Chicago, IL, USA, 2010-11-08) BP9.00112
 11. S. Murakami, K. Itoh, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, A. Fukuyama: Simulation study of toroidal flow generation by ICRF heating using GNET code, 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Chicago, IL, USA, 2010-11-09) J04.00006
 12. A. Fukuyama, H. Nuga, S. Murakami: Kinetic Integrated Modeling of Heating and Current Drive in Tokamak Plasmas, IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon, Korea, 2010-10-12) THW/P2-01
 13. S. Murakami, K. Itoh, L.J. Zheng, J.W. Van Dam, A. Fukuyama: Simulation Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating, IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon, Korea, 2010-10-13) THW/P4-03
 14. A. Wakasa, A. Fukuyama, S. Murakami, et al.: Integrated Transport Simulation of LHD Plasmas Using TASK3D, IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon, Korea, 2010-10-13) THC/P4-29
- [図書] (計 2 件)
1. S. Murakami, K. Itoh, T. Yamamoto, A. Fukuyama, Simulation Study of Toroidal Shear Flow Generation by a Local ICRF Heating, Proc. 18th Topical Conf "Radio Frequency Power in Plasmas", AIP Conference Proceedings 1187, pp. 621-624 (2009) : 査読なし
 2. A. Fukuyama, Integrated Transport Simulation of Burning Plasmas, 2nd ITER International Summer School (ed. by S.-I. Itoh, M. Shindo, S. Inagaki, and M. Yagi, AIP Conference Proceedings 1095), pp.199-214 (2009) : 査読なし
- [その他]
- 研究成果ホームページ : <http://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/kisc/>
 開発コードホームページ : <http://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>
6. 研究組織
 - (1) 研究代表者
福山 淳 (FUKUYAMA ATSUSHI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 60116499
 - (2) 研究分担者
村上 定義 (MURAKAMI SADAYOSHI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 40249967
 - (3) 研究協力者
若狭 有光 (WAKASA ARIMITSU)
京都大学・大学院工学研究科・特定研究員
Daniel Louis Raburn
京都大学・大学院工学研究科・特定研究員