

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 6月 10日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560865

研究課題名（和文） トカマクにおける磁気面上の運動量バランスの研究

研究課題名（英文） Study of momentum balance on the flux surface in a tokamak

研究代表者

菊池 満 (KIKUCHI 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・上級研究主席

研究者番号：10150525

研究成果の概要（和文）：新古典理論等を用いてトカマクプラズマ回転の基礎となる磁気面上の運動量バランス方程式を解析し、残留トロイダル回転を求める表式を得た。また、磁気面上の流れの物理やそれが磁場に垂直方向の輸送やMHD不安定性に及ぼす影響を総合的に分析し、Rev. Mod. Phys. 論文(IF=43.9)やSpringer 著書として公表した。

研究成果の概要（英文）：Using the neoclassical parallel transport theory etc., momentum balance equations on the flux surface are analyzed and the expression for the residual toroidal rotation is obtained. Also, effects of flow on the flux surface to the perpendicular transport and MHD instability are systematically analyzed, which has been published in the Rev. Mod. Physics journal (IF=43.9) and also Springer book.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：回転、新古典論、自発回転、残留応力

1. 研究開始当初の背景：核融合炉の高圧力化の障害となる抵抗性壁モードの安定化に有効なトロイダル回転が注目されていた。

2. 研究の目的：トカマクプラズマの磁気面上のプラズマの流れと圧力勾配・径電場の関係を系統的に分析し、核融合炉におけるプラズマ回転への外挿性を高める。

3. 研究の方法：新古典理論等を用いてトカマクプラズマ回転の基礎となる磁気面上の運動量バランス方程式を解析し、残留トロイ

ダル回転を求める表式を得る。また、磁気面上の流れの物理やそれが磁場に垂直方向の輸送やMHD不安定性に及ぼす影響を総合的に分析する。

4. 研究成果：

(1) 平成21年度：研究実施計画に基づき1) 新古典理論によるプラズマの流れと径電場の関係の評価を行った。本年度は、初年度として、まずは新古典理論による磁気面上の流れの構造、粘性力の機構、諸物性量の体系化

を図った。また、それらがJT-60の実験において果たした役割についてまとめた。その上で、運動量バランスにおいて小さな寄与しかない電子を除いた、主イオンと不純物に関する運動量、熱流束バランス方程式から、不純物と主イオンのトロイダル回転、ポロイダル回転の表式を導出した。これらの成果は以下のように具体化した。

成果1：磁気面上の運動量バランスにおける物理の体系化：新古典理論を用いてトカマクプラズマ回転の基礎となる磁気面上の運動量バランス方程式の体系化を進め、その成果を小著「物理学と核融合」（京都大学学術出版会）において第7章“衝突輸送”として出版した。

成果2：米国物理学会(APS)においてプラズマ自発回転やRWM安定化を含むトカマク定常化に係わるJT-60の23年間の研究成果を口頭発表した。

成果3：プラズマ自発回転やRWM安定化を含むトカマク定常化に係わるJT-60の20年間の研究成果をAIP Proceedingsに論文として掲載した。

成果4：日本物理学会年会において、不純物イオンと主イオンのプラズマ回転の特性の違いに関する評価結果に関する講演を行った。

(2)平成22年度：研究実施計画に基づきトカマクにおいて非軸対称磁場が加わった場合のオフセットトロイダル回転のこれまでの理論(Callen理論)を21年度の成果を踏まえて見直し、Callen教授と異なる表式を得た。その違いは2つの点で生まれる。まず、残留ポロイダル熱流が生み出す残留ポロイダル回転として磁気面上の一次流れを正確に取り入れた表式を得た。また、測定に用いられている不純物流速が主イオントロイダル流速と異なることから、見た目での残留トロイダル回転はShaing教授が求めた非両極性粒子束を0にするための残留トロイダル回転に上記2項が加わる形で残留トロイダル回転が生まれることを導いた。

これらの成果は以下のように具体化した。

成果1：21年度に出版した「物理学と核融合」（京都大学学術出版会）にトカマクプラズマ回転の物理等を追記した英訳版を“Frontier in Fusion Research Physics and Fusion”としてSpringer Verlag Londonから3月に出版した。

成果2：定常運転に関わるIAEA技術会合(12

月、ウイーン)において、新古典トロイダル粘性に伴う残留トロイダル回転に関する上記の研究成果を含む定常トカマクの物理を冒頭講演として発表し、論文“Physics of steady state operation of tokamaks”を執筆した。

成果3：プラズマ核融合学会の年会(12月、札幌)で新古典トロイダル粘性に伴う残留トロイダル回転に関する上記の研究成果を講演した。

成果4：テキサス大学において開催されたITERサマースクールにおいて磁気面上の運動量バランスを用いて定常トカマク炉の物理について講義し、その内容を“Physics of plasma control toward steady-state operation of ITER”としてFusion Science and Technologyに論文を掲載した。

(3)平成23年度：研究実施計画に基づき、新たに得たトカマクにおいて非軸対称磁場が加わった場合のオフセット・トロイダル回転の表式及び定常トカマクプラズマにおける運動量バランスについて、以下の成果を得た。第1回アジア・太平洋輸送ワーキンググループ会議のプレナリー・セッションで口頭発表を行うとともに、欧州物理学会においてポスター発表を行った。さらに、東北アジアシンポジウムでは、会議冒頭のプレナリ講演で運動量バランスを含む定常トカマク研究の総合講演を行った。また、プラズマコンファレンスでも、オフセット・トロイダル回転に関する解析式について口頭発表を行うとともに、運動量バランスを含む定常トカマク研究のポスター発表を行った。

成果1：第1回アジア・太平洋輸送ワーキンググループ会議(6月14-17日)
PL-1”On the offset toroidal rotation in Neoclassical Toroidal Viscosity”

成果2：38th EPS conference (Strasbourg, 6月27-7月1日)、P4.115 “On offset toroidal rotation in NTV”

成果3：2011North East Asian Symposium, plasma fusion(9月26-27日、韓国太田) Plenary 1, “Prospect and Issues of steady state operation of tokamak”

成果4：JIFT WS, (京都大学、10月24-26) ”Flow structure in symmetric torus and symmetry breaking”

成果5：プラズマコンファレンス2011(金沢、11月22-25) 22F5, “Analytical

formula of offset toroidal rotation in NTV” ; 23P125-B, “Progress of Physics understanding in Steady State Tokamak Research” .

成果6 : Review of Modern Physics 投稿、2011年12月、” A Review of Steady State Tokamak Research”

(4) 平成24年度(繰り越し分) : 研究実施計画に基づき、新たに得たトカマクにおいて非軸対称磁場が加わった場合のオフセット・トロイダル回転の表式及び定常トカマクプラズマにおける運動量バランスについて、以下の成果を得た。

成果1 : 第2回アジア・太平洋輸送ワーキンググループ会議のプレナリー・セッションで口頭発表を行った。

成果2 : 第2回プラズマ学校とワークショップで新古典粘性に関する招待講演を行った。

成果3 : Hモードに伴うSOL流の加速に注目して核融合炉の熱制御の問題を分析し、WCIシンポジウムやTTF2013で招待講演をおこなった。

成果4 : 磁気面上の流れに注目した定常トカマク研究のレビュー論文を Rev. Mod. Phys. に出版した。

成果5 : IAEAから流れと乱流の関係を含む1200ページにせまる大著Fusion Physicsを2012年に発行した。

成果6 : さらに、中国 科学出版社から「物理学と核融合」(京都大学学術出版会)の中国語版の出版が決定した。

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6件)

① M. Kikuchi, M. Azumi, Steady State Tokamak Research - Core Physics, Reviews of Modern Physics **84**(2012) 1807-1854. (査読有り)

② M. Honda, M. Kikuchi, M. Azumi, Collisionality dependence of a shielding factor of a beam driven current, Nuclear Fusion **52**(2012) 23021. (査読有り)

③ M. Kikuchi, On offset toroidal rotation in NTV, Proc. 38th EPS conference (Strasbourg, June27-July1), 35G (2011) P4.115

<http://ocs.ciemat.es/EPS2011PAP/html/autor.html> (査読無し)

④ M. Kikuchi, D.J. Campbell, Physics of

plasma control toward steady-state operation of ITER, Fusion Science and Technology, **59**(2011) 440-468. (査読有り)

⑤ M. Kikuchi, Physics of Steady-state Operation of Tokamaks, Proc. 6th Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices (CD-ROM), IAEA, Vienna, 2011 (査読無し)

⑥ M. Kikuchi and the JT-60 Team, Plasma Physics found in JT-60 Tokamak over the Last 20 years, AIP conference Series 1150 (2009) 161-167 (査読有り)

[学会発表] (計15件)

① M. Kikuchi, T. Takizuka, Is H-mode relevant for fusion reactor - Transport, Divertor Particle and Power Handling, and Implications for Fusion, TTF2013 (US-EU Transport Task Force Meeting), Invited talk, April 9-12, 2013, Santa Rosa, California

② 菊池 満, Hモードの核融合炉への適用性について、日本物理学会第68回年会、2013年03月26-29日、広島大学(東広島)

③ 菊池 満、トカマクの残留トロイダル回転に対する不純物粘性の影響、粘性・フロー研究会、2013年02月25-26日、京大(宇治)

④ M. Kikuchi, Is H-mode relevant for Fusion Reactor, World Class Institute Symposium (Invited), Nov. 14-16, 2012, KIST, Seoul.

⑤ 菊池 満、新古典トロイダル粘性(NTV)における不純物粘性の影響、日本物理学会秋季大会、2012年09月18-21日、横浜国立大学(横浜)

⑥ M. Kikuchi, Key questions and issues in turbulent transport in tokamaks, 2nd APTWG conference (Invited), May 15-18, SWIP, Chengdu

⑦ 菊池 満、自己組織化臨界輸送と径電場シエ、日本物理学会第67回年会、2012年03月24-27日、関西大学(兵庫西宮)

⑧ M. Kikuchi, M. Azumi, Progress of Physics understanding in Steady State Tokamak Research, Plasma Conference 2011, Nov. 22, 2011, Kanazawa.

⑨ M. Kikuchi, M. Honda, Analytical formula of offset toroidal rotation in NTV, Plasma Conference 2011, Nov. 22, 2011, Kanazawa.

⑩ M. Kikuchi, Flow structure in symmetric torus and symmetry breaking, US-Japan JIFT Workshop, Oct. 25, 2011, Kyoto University. Uji.

⑪ M. Kikuchi, Prospect and Issues of

steady state operation of tokamak, Plenary talk, 2011North East Asian Symposium, plasma fusion, Sept. 26, 2011, Daejon.

⑫ M. Kikuchi, On the offset toroidal rotation in Neoclassical Toroidal Viscosity, Plenary Talk, 1st APTWG conf., NIFS, Toki, June 14-17, 2011

⑬ 菊池 満、トカマクにおけるプラズマ回転、プラズマ・核融合学会、2010年12月2日、北海道大学（札幌）

⑭ 菊池 満、軸対称系新古典理論とプラズマ回転、第65回物理学会年会、2010年3月20日、岡山大学（岡山）

⑮ M. Kikuchi and the JT-60 Team, Summary of steady-state research during 23 years of JT-60 tokamak experiments, Bulletin of the American Physical Society, 51st Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, N04 1 (Oral Talk), Nov. 4, 2009, Atlanta, US

[図書] (計4件)

① 菊池満、聚変研究物理（「物理学と核融合」）、科学出版社（北京）、2013年、270ページ

② M. Kikuchi, K. Lackner, M. Q. Tran (ed), Fusion Physics, IAEA, Vienna, 2012, 1129 Pages

③ M. Kikuchi, Frontier in Fusion Research - Physics and Fusion, Springer Verlag, London, 2011, 284 pages

④ 菊池 満、「物理学と核融合」、京都大学学術出版会、2009年、258ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 満 (KIKUCHI 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・上級研究主席

研究者番号：10150525

(2) 研究分担者

永見正幸 (NAGAMI MASAYUKI)

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・研究嘱託

研究者番号：70370442