

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560764

研究課題名 (和文) イオン・サイクロトロン加熱に関連する自発的トロイダル流
発生機構の解明

研究課題名 (英文) Study of toroidal flow generation mechanism during ICRF heating

研究代表者

村上定義 (MURAKAMI SADAYOSHI)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40249967

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、イオン・サイクロトロン加熱に関連する自発的トロイダル流発生機構を解明するため Alcator C-Mod 装置プラズマと同様なプラズマを仮定し、数値シミュレーションにより解析を行った。結果として、2種類のトロイダル流が駆動されることが分かった。さらに理論解析の結果、一方は Ohkawa モデルと関連し、他方はイオンのトロイダル方向のドリフト運動に関連することが明らかになった。

研究成果の概要 (英文)：

The toroidal flow generation by the ICRF minority heating is investigated numerically in the Alcator C-mod like plasma. We find that there exist two kinds of toroidal flow driving mechanisms. It is found that the $k//$ sign dependent flow would be related to the mechanism proposed by Ohkawa et al., and that the $k//$ sign independent one is generated by the net toroidal motion of energetic tail ions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：トロイダル流, ICRF 加熱, 理論シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

プラズマ流やその速度シアなどが、Hモード遷移、輸送障壁の形成など閉じ込め改善モードにおいて非常に重要な働きをすることが示唆されて来ている。JET (EU), C-Mod (米)、Tore Supra (独) などにおいて、NBI加熱などの駆動機構がない場合でも、イオ

ン・サイクロトロン加熱に関連する自発的なトロイダル流の発生が報告された。しかしながら、その発生機構の詳細は、未だ解明されていない重要な問題の一つである。

2. 研究の目的

本研究では、ICRF加熱により発生す

る高エネルギーテイルイオン粒子の振る舞いを数値シミュレーションにより詳細に解析し、自発的なトロイダル流の発生機構を明らかにすることを目的とする。特に、現実的なプラズマにおけるイオン捕捉を用いたトロイダル流生成機構(Ohkawaモデル)の検証を行うとともに、高エネルギーテイルイオンの有限軌道幅の効果によるトロイダル流の生成について研究を行う。

3. 研究の方法

本研究では、本研究では非軸対称系を含むトロイダルプラズマにおけるICRF伝播・吸収の解析コードTASK/WMおよび非軸対称プラズマにおける高エネルギー粒子の5次元位相空間における分布解析コードGNETの2つの数値シミュレーションコードを整備し研究を行う。

まずT. Ohkawa等により提案されているトロイダル流発生機構の検証を行う。初めに、論文で仮定されていると同様な1つの波数のRF電場を仮定し、実際的なトカマク配位においてGNETコードを用いてモデルの検証を行う。

GNETコードを用いて、様々な波数や共鳴位置についてトロイダル流の生成についてシミュレーションを行い、実際的な配位においてどのようなトロイダル流が生成されるか検証する。

4. 研究成果

本研究では、ICRF加熱により発生する高エネルギーテイルイオンの振る舞いおよびその分布についてGNETコードを用いた数値シミュレーションにより詳細に解析を行った。GNETコードは、5次元位相空間における少数イオンに関するドリフト運動論方程式の定常解を求めることができる。これにより現実的なプラズマにおけるイオン捕捉を用いたトロイダル流生成機構(Ohkawaモデル)の検証を行った。

実験結果との比較を考え Alcator C-Mod 装置プラズマと同様なプラズマにおけるICRF少数イオン加熱によるトロイダル流の発生について研究を行った。ICRF加熱により少数イオンは、垂直方向に加速され、イオン熱速度の30倍以上の高速に加速された高エネルギーテイルイオンが生成された。また、

平行方向の速度分布は非対称になっており、ICRF加熱によりトロイダル流が生成された。

ICRF加熱により発生した平均トロイダル流を調べるため、得られた分布関数を用いて平行方向速度に対する加重平均を評価した。結果として $r/a \sim 0.4$ 付近でピークとなるトロイダル流が得られた。トロイダル流の向きは co 方向であり、Alcator C-Modの実験結果と同様である。

次に、 $k//$ の符号を反転し、符号依存性について調べた。結果として、共鳴領域付近($r/a \sim 0.3$)で $k//$ の符号に依存するトロイダル流があることが分かった。また、前者に比べ大きく、 $k//$ の符号に依存しないトロイダル流が存在することが分かった。さらに、トロイダル電流を反転した場合、実験結果と同様にトロイダル流が反転することが得られた。

このトロイダル流発生機構を解明するため、まず Ohkawa モデルのトロイダル流を与える式を用いてシミュレーション結果との比較を行った。結果として、シミュレーションで得られた $r/a \sim 0.3$ 付近の $k//$ の符号に依存するトロイダル流が Ohkawa モデルと同様な傾向を示すことが得られた。

次に、典型的な高エネルギーテイルイオンのドリフト運動を考察した。ICRF波により垂直方向に加速されるため、捕捉イオンに対するバナナ平均したトロイダル方向のドリフト運動を評価した。結果として、高エネルギーテイルイオンでは、バナナ幅が有限となり、有限の回転変換シア効果およびポロイダルドリフト効果によりトロイダル方向に進行して行くことが分かった。また、この結果を用いて、ICRF加熱により駆動されるトロイダル流のモデル化を行い、シミュレーション結果との比較を行った。結果として、数値計算結果と比較的良好一致を得た。このことは、得られた $k//$ の符号に依存しないトロイダル流は、高エネルギーイオンのトロイダルドリフト運動により発生していることが分かった。

これら得られた研究成果は国内外で高く評価され、平成22年度プラズマ・核融合学会年会で招待講演に選ばれ、またプラズマのRF加熱に関する最も有名な国際会議 Topical Conf. RF Power in Plasmas 2011 (米国)でも招待講演に選ばれた。さらに、これまでの結果をまとめ Phys. Rev. Lett. 誌に投稿する予定である。

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 8 件)

- ① S. Murakami, K. Itoh, L.J. Zheng, J.W. Van Dam, A. Fukuyama, Simulation Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating, Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference, THW/P4-03 (2010), 審査有
- ② S. Murakami, T. Yamamoto, A. Fukuyama, J. N. Talmadge, K. M. Likin, J. W. Radder, Optimization Study of ICRF Heating in the LHD and HSX Configurations, Contrib. Plasma Phys. Vol. 50 Issue 6-7, pp. 546-551 (2010). 査読有
- ③ M. Osakabe, S. Murakami, T. Itoh, M. Isobe, S. Kobayashi, T. Tokuzawa, K. Nagaoka, H. Nakano, K. Tsumori, K. Ikeda, Y. Takeiri, O. Kaneko and LHD-group, Evaluation of Fast-Ion Confinement Using a Radially Injected Neutral Beam in the LHD, Plasma Fusion Res., Vol 5, S2042 (2010) 査読有
- ④ S. Nishimura, H. Sugama, H. Maassberg, C. D. Beidler, S. Murakami, Y. Nakamura, and S. Hirooka, A convergence study for the Laguerre expansion in the moment equation method for neoclassical transport in general toroidal plasmas, Phys. Plasmas 17, 082510 (2010) 査読有
- ⑤ Y. Todo, S. Murakami, T. Yamamoto, A. Fukuyama, D. A. Spong, S. Yamamoto, M. Osakabe, N. Nakajima, Numerical Analyses of Energetic Particles in LHD, Fusion Science and Technology, Vol. 58, No. 1, pp. 277-288 (2010). 査読有
- ⑥ T. Yamamoto, S. Murakami, A. Fukuyama, A Global Simulation Study of ICRF Heating by TASK/WM and GNET in Toroidal Plasmas, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 8 (2009) 査読有
- ⑦ 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 (2009) 621-624. 査読無し
- ⑧ T. YAMAMOTO, S. MURAKAMI and A. FUKUYAMA, Simulation Study of ICRF Wave Propagation and Absorption in 3-D Magnetic Configurations, Plasma Fusion Res. Vol. 3, S1075 (2008) 査読有

[学会発表] (計 22 件)

- ① 村上定義, 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, プラズマ・核融合学会 (北海道大学) 03aA02, 2010-12-03 (招待講演)
- ② S. Murakami, Optimization study of ICRF heating in the LHD and HSX configurations, Int. Stellarator/Heliotron Workshop 2009 (PPPL), 2009.10.16 (招待講演)
- ③ S. Murakami, Simulation study of toroidal flow generation by ICRF heating using GNET code, 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Chicago) J04.00006, 2010-11-09 (口頭発表)
- ④ S. Murakami, Simulation study of ICRF heating in the LHD by TASK/WM+GNET, 20th Int. Toki Conf. (TOKI) 0-6, 2010-12-08 (口頭発表)
- ⑤ S. Murakami, 18th International Toki Conference (Ceratopia Toki) 0-06, 2008-12-11 (口頭発表)
- ⑥ S. Murakami Simulation Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating, 23rd IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon) THW/P4-03, 2010-10-13 (ポスター発表)
- ⑦ S. Murakami, Simulation study of ICRF heating by TASK/WM+GNET in the LHD configurations, APFA/APPTC2009 (青森), 2009-10-30 (ポスター発表)
- ⑧ S. Murakami, Simulation of toroidal sheared flow generation by ICRF heating, 4th IAEA-TM on the Theory of Plasma Instabilities (京都大学時計台記念館), 2009-05-18 (ポスター発表)
- ⑨ S. Murakami, Simulation of toroidal sheared flow generation by ICRF heating, 18th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (Het Pand, Gent, Belgium), 2009-6-25 (ポスター発表)
- ⑩ S. Murakami, Radial Profile and Confinement of Energetic Particles during NBI and ICRF heating in LHD, 22nd IAEA Fusion Energy Conference (Geneva, Switzerland) EX/P8-3, 2008-10-17 (ポスター発表)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 定義 (MURAKAMI SADAYOSHI)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 40249967

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

福山 淳 (FUKUYAMA ATSUSHI)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60116499

伊藤 公孝 (ITOH KIMITAKA)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：50176327