

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24年 5月24日現在

機関番号：32665  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21740403  
 研究課題名（和文） 二流体電磁流体力学理論に基づく高ベータプラズマの平衡および巨視的安定性の検証  
 研究課題名（英文） Relaxation and global stability of high-beta plasma based on two-fluid MHD  
 研究代表者  
 浅井 朋彦（ASAI TOMOHIKO）  
 日本大学・理工学部・講師  
 研究者番号：00386004

研究成果の概要（和文）：極限的に高いベータ値を有する磁化プラズモイドである磁場反転配位（Field-Reversed Configuration：FRC）について、自発的に駆動されるトロイダル流について、安定性や緩和機構の関わりからの観点から検証を行った。トロイダル流の空間構造と時間発展の精密な測定から、トロイダル流の駆動機構に関する新たなモデルが示唆された。また、超アルヴェン速度移送時などに巨視的不安定性の成長が抑制されるなどの諸現象について、トロイダル流との関係が検証された。

研究成果の概要（英文）：Spatial distribution of spontaneous toroidal flow and its relation with stability and relaxation process have been investigated. Precise measurement of toroidal flow profile suggest a possible mechanism of toroidal spin-up of FRC plasma. Roles of toroidal flow in suppression of global instability in super Alfvénic translation has also been studied

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：プラズマ工学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：磁場反転配位（FRC）、二流体MHD、フローシア、イオンドップラー分光、自己組織化プラズマ、コンパクトトラス、マッハプローブ、粒子・プラズマ加速

1. 研究開始当初の背景

研究の対象とした磁場反転配位（Field-Reversed Configuration: FRC）プラズマは、プラズマ中を流れる反磁性電流のみで閉じ込め配位が形成されるシステムであり、極限的に高いベータ値（～100%）を有する。このため、高効率でコンパクトな核融合炉心のほか、D-3He核融合を実現しうる方

式としても興味を持たれている。一方で、閉じ込めや配位持続時間を制限する大域的不安定性の存在や、緩和過程が従来の電磁流体力学（MHD）で記述できないなどの課題を有している。

2. 研究の目的

磁化プラズマを記述するMHDでは、プラズ

マを一流体として取り扱い、束縛条件として「磁気ヘリシティ」という大域的保存量を導入するしかし、高ベータで特性長の短い領域内に強いフローが存在する場合など、MHDでは現実のプラズマを正確には記述できないことが指摘されており、これに替わる理論として、イオンと電子を互いに独立した流体として取り扱う「二流体MHDモデル」が用いられる。

ベータ値が100%近い磁場反転配位(FRC)では、後述する分離セパトトリックスによる安定化効果や乱流の影響による閉じ込めの劣化などの現象が発現している可能性があり、この研究では高いベータ値のほか超音速フローなどの極限的パラメータを有するFRCをサンプルに緩和過程や不安定性の原理を検証し、また、その制御を試みる。

二流体効果を含む非MHD物理が極限的なパラメータを持つFRCにおいて支配的であるということは、他の磁場配位においても潜在的な影響が存在していることを示唆しており、今後、パラメータが核燃焼領域に近づくことで、影響が顕著となる可能性がある。このため磁化プラズマの平衡や緩和現象を統一的に記述する指導原理の確立に貢献することをめざす。

### 3. 研究の方法

実験は主として日本大学理工学部で所有する逆磁場テータピンチ型FRC装置NUCTE-IIIと、新設された移送装置NUCTE-Tを用いて実施した。実験の実施にあたり、下記の装置開発・改造を行った。

#### (1) イオンドップラー分光(IDS)計測システムの開発

FRC内部のトロイダルフローおよびその空間分布を観測するため、マルチアノードPMTを使用したIDSシステムを開発した。

#### (2) コンパクトトモグラフィカメラの開発

FRC内で発生するマイクロ秒オーダーの緩和現象や不安定性の成長を観測するため、トモグラフィカメラおよび解析システムを開発した。

#### (3) FRC高速移送法の開発

アルヴェン速度前後で移送される際に発生する緩和や閉じ込め向上、トロイダル磁場の発生機構を検証するため、FRCの移送速度の制御法について研究を進め、 $\sim 200\text{km/s}$ での移送を実現した。

#### (4) 磁気ヘリシティ入射装置の開発

FRCに積極的にヘリシティを注入しその応答を観測するため、磁化同軸ガンを応用したヘリシティ入射装置を開発した。

上記システムを用い、FRCの高速移送時およびヘリシティ注入時の応答や巨視的挙動、フローの分布およびその時間発展を観測し、検

証した。

### 4. 研究成果

逆磁場テータピンチ法により生成されるFRCにおいて、生成直後に常磁性方向のフローがあることがはじめて観測され、また、生成後、磁場のセパトトリックス近傍に、フローの速度シアが自発的に形成されることがわかった。また、この自己形成されるトロイダルフローについて、磁化同軸プラズマガンを用いたスフェトマック入射法により、ベータを大きく変化させない程度にトロイダル磁場を印加することで、積極的に制御できる可能性が実験的に示された。この実験では、トロイダルフローの減速に合わせて回転不安定性の成長速度の低下および閉じ込めの改善も観測されており、これまで同不安定性の唯一の制御法とされた多極磁場法に替わる、また先行技術と異なり閉じ込め性能の劣化を伴わない制御法となりうる。

また同様の安定化効果がFRCの超アルヴェン速度移送に際しても発生していることがこの実験から見いだされた。これらの安定化機構の類似性や、FRCにおける自発的トロイダルフロー発現のメカニズムを明らかにするため、より精度の高いフローの解析システムの開発を進めた。この結果、その解析データで見られたトロイダル流速の脈動が、装置軸方向にアルヴェン速度で進行する磁場の擾乱を仮定することで説明できることがわかった。さらに、このトロイダルフローに見られる脈動やフローの時間発展が、前述の磁気ヘリシティ注入の有無で変化することが観測されており、FRCの平衡および安定性のメカニズム解明へ向けた大きな成果であると言える。

### 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7件)

1. T. Asai, S. Akagawa, K. Akimoto, N. Tada, Ts. Takahashi, H. Tazawa, "Time evolution of a magnetic structure of the field-reversed configuration in a super-Alfvenic translation process", *Plasma and Fusion Research* 6, 2402151/1-4 (2011). (査読あり)
2. S. Elgriw, D. Liu, T. Asai, A. Hirose and C. Xiao, "Control of magnetic islands in the STOR-M tokamak using resonant helical fields", *Nuclear Fusion* 51, 113008/1-10 (2011). (査読あり)
3. T. Asai, H. Itagaki, Ts. Takahashi, Y. Matsuzawa, Y. Hirano, To. Takahashi, M. Inomoto, L.C. Steinhauer and A. Hirose,

“Active Stability Control of a High-Beta Self-Organized Compact Torus”, in 23th IAEA Fusion Energy Conference ICC/P5-01/1-8 (2010). (査読あり)

4. H. Tomuro, T. Asai, K. Iguchi, Ts. Takahashi, and Y. Hirano, “Development of a compact tomography camera system using a multianode photomultiplier tube for compact torus experiments”, Review of Scientific Instruments 2010, 81, 10E525 1-3. (査読あり)
5. T. Asai, H. Itagaki, H. Numasawa, Y. Terashima, Y. Hirano, and A. Hirose, “A compact and continuously driven supersonic plasma and neutral source”, Review of Scientific Instruments 2010, 81, 10E119 1-3. (査読あり)
6. Toshiki TAKAHASHI, Hiroki SHIONOYA, Hirotomo ITAGAKI and Tomohiko ASAI, “Plasma Shielding with a Rotating Magnetic Field for a Space Elevator”, Journal of Plasma and Fusion Research, Series 2010, 9, 452-456. (査読あり)
7. 今中平造, 加治屋貴博, 浅井朋彦, 小野靖, “ワッシャーガンを用いた短パルス中性粒子ビーム入射装置の開発”, 電気学会論文誌A 129, 802-808 (2009). (査読あり)

[学会発表] (計 44 件)

1. Y.Fujikawa, T.Asai, M.Gouda, Ts.Takahashi, L.C.Steinhauser, To.Takahashi, “Reconstruction of a toroidal flow profile of a field-reversed configuration”, 21st International Toki Conference, 2011年11月29日, 岐阜県土岐市.
2. T. Takahashi, F.P. Iizima, T. Watanabe, T. Asai, “Toroidal spin-up caused by an anomalous loss of the electron angular momentum of a field-reversed configuration”, 21st International Toki Conference, 2011年11月28日, 岐阜県土岐市.
3. Fusaki P. IIZIMA, Toshiki TAKAHASHI and Tomohiko ASAI, “Electron fluid perturbation and related electron transport in a field-reversed configuration”, 21st International Toki Conference 2011年11月28日, 岐阜県土岐市.
4. 多田直樹, 秋本和宏, 山内貴紀, 浅井朋彦,

高橋努, “移送過程における磁場反転配位プラズマの磁気構造”, Plasma Conference 2011, 2011年11月23日, 石川県金沢市.

5. 関口純一, 瓜生博俊, 井通暁, 高橋俊樹, 高橋努, 浅井朋彦, “移送法によるFRCプラズマのパラメータ制御”, Plasma Conference 2011, 2011年11月23日, 石川県金沢市.
6. 福本直之, 宮澤順一, 後藤基志, 高橋俊樹, 菊池祐介, 永田正義, 浅井朋彦, 政宗貞男, 山田弘司, “中性粒子化セル中におけるCTパラメータの変化と中性粒子フロー生成との関係”, Plasma Conference 2011, 2011年11月23日, 石川県金沢市.
7. 松永宏幸, 高瀬敦司, 板垣宏知, 高橋努, L.C.Steinhauser, 浅井朋彦, “磁化同軸ガンを用いたFRCプラズマへの磁気ヘリシティ注入”, Plasma Conference 2011, 2011年11月23日, 石川県金沢市.
8. 藤川雅透, 郷田みどり, 高橋努, Loren.C.Steinhauser, 浅井朋彦, “FRCプラズマ内部のトロイダル流速分布の再構成”, Plasma Conference 2011, 2011年11月23日, 石川県金沢市.
9. 板垣宏知, 山崎翠, 藤田侑希, 高津幹夫, 小口治久, 浅井朋彦, “IGBTインバータによる連続生成磁化プラズマの生成および保持特性”, Plasma Conference 2011, 2011年11月23日, 石川県金沢市.
10. To. Takahashi, F.P.Iizima, T. Asai, “Toroidal spin-up due to electron fluid fluctuation of a field-reversed configuration”, Workshop on Innovation in Fusion Science (ICC2011) and US-Japan Workshop on Compact Torus Plasma, 2011年8月19日, アメリカ合衆国・シアトル.
11. H. Uryu, T. Asai, H. Tomuro, J. Sekiguchi, Ts. Takahashi, M. Inomoto, To. Takahashi, “Control of field-reversed configurations through a translation process”, Workshop on Innovation in Fusion Science (ICC2011) and US-Japan Workshop on Compact Torus Plasma, 2011年8月19日, アメリカ合衆

国・シアトル.

12. M. Inomoto, T. Ii, K. Gi, T. Umezawa, Y. Ono, T. Asai, S. Okada, "Neutral Beam Injection to Oblate FRC Formed by Plasma Merging Method", Workshop on Innovation in Fusion Science (ICC2011) and US-Japan Workshop on Compact Torus Plasma, 2011年8月19日, アメリカ合衆国・シアトル.
13. T. Asai, H. Matsunaga, Y. Fujikawa, Y. Matsuzawa, Ts. Takahashi, H. Itagaki, M. Inomoto, To. Takahashi, L.C. Steinhauer, "New control methods for stabilization and equilibrium of a field-reversed configuration", Workshop on Innovation in Fusion Science (ICC2011) and US-Japan Workshop on Compact Torus Plasma (招待講演), 2011年8月19日, アメリカ合衆国・シアトル.
14. Tomohiko Asai, Midori Yamazaki, Hiroaki Tomuro, Michiaki Inomoto, Toshiki Takahashi, "Plasma Shield by Rotating Magnetic Field for Innovative Space Transportations", 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011年6月9日, 沖縄県宜野湾市.
15. Tomohiko Asai, Syunsuke Akagawa, Kazuhiro Akimoto, Naoki Tada, Tsutomu Takahashi, Hiroyasu Tazawa, "Time evolution of a magnetic structure of the field-reversed configuration in a super-Alfvénic translation process", 20th International Toki Conference (ITC-20), 2010年12月8日, 土岐市.
16. Hiroyuki Matsunaga, Yuuki Komoriya, Hiroyasu Tazawa, Tomohiko Asai, Tsutomu Takahashi, Loren Steinhauer, Hiroto Itagaki, Takumi Onchi, Akira Hirose, "Magnetized plasma flow injection into tokamak and high-beta compact torus plasmas", 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2010年11月11日, 米国シカゴ.
17. TORU II, KEI GI, TOSHIYUKI UMEZAWA, MICHIAKI INOMOTO, YASUSHI ONO, ATSUSHI OSAKI, HIROYUKI MATSUNAGA, TOMOHIKO ASAI, "Merging Formation of Large-Size Field-Reversed Configurations with the Assistance of Neutral Beam Injection", 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2010年11月9日, 米国シカゴ.
18. 沼澤 廣斗, 寺嶋 悠紀, 藤田 侑希, 平野 洋一, 浅井 朋彦, 小口 治久, 板垣 宏知, "小型磁化同軸ガンによる高速プラズマ流の加速特性", 第8回核融合エネルギー連合講演会, 2010年6月11日, 高山市.
19. 松澤 芳樹, 赤川 駿介, 関谷 修平, 小森谷 勇樹, 平山 泰行, 田澤 仁康, 藤川 雅透, 浅井 朋彦, 平野 洋一, 高橋 努, "分光計測による磁場反転配位プラズマにおける中性粒子の計測", 第8回核融合エネルギー連合講演会, 2010年6月11日, 高山市.
20. 高橋 努, 日吉 まゆ, 田邨 尚郎, 赤川 駿介, 井口 一輝, 小森谷 勇樹, 佐藤 幸志, 平山 泰行, 秋本 和宏, 藤川 雅透, 山口 荘輔, 松澤 芳樹, 浅井 朋彦, 平野 洋一, "磁場反転配位プラズマ移送過程のセパトリックス構造", 第8回核融合エネルギー連合講演会, 2010年6月11日, 高山市.
21. 赤川 駿介, 井口 一輝, 小森谷 勇気, 佐藤 幸志, 関谷 修平, 田澤 仁康, 平山 泰行, 秋本 和宏, 多田 直樹, 山口 荘輔, 戸室 啓明, 藤川 雅透, 松澤 芳樹, 浅井 朋彦, 平野 洋一, 高橋 努, "移送 FRC プラズマにおける反射前後の比較", 第8回核融合エネルギー連合講演会, 2010年6月11日, 高山市.
22. Y. Komoriya, Y. Hirayama, Y. Fujikawa, T. Asai, Ts. Takahashi, Y. Matsuzawa, To. Takahashi and Y. Suzuki Toroidal spin-up and velocity shear of a field-reversed configuration plasma, 19th International Toki Conference, 2009/12/09, 岐阜県土岐市.
23. H. Itagaki, H. Numasawa, K. Kishi, Y. Terashima, Y. Fujita, T. Awane, T. Asai, T. Takahashi, Y. Hirano Characteristic of a repetitively injected spheromak in a vertical guide-field, 19th International Toki Conference, 2009/12/08, 岐阜県土岐市.
24. 福本直之, 宮澤順一, 後藤基志, 高橋俊樹, 菊池祐介, 永田正義, 浅井朋彦, 政宗貞男, 山田弘司, "SPICA 装置を用いた高速 CT プラズマの中性粒子フロー化とその定量的評価", 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009年12月4日, 京都市国際交流会館.
25. 根本祐一, 東晃由, 松永宏幸, 今中平造, 浅井朋彦, 井通暁, 高瀬雄一, 関子秀樹, 小野靖 "ワッシャーガンイオン源による NBI の生成と評価", 第26回プラズマ・核

- 融合学会年会, 2009年12月4日, 京都市国際交流会館.
26. 高橋俊樹, 浅井朋彦, 高橋努, FRCのトロイダル流速時間発展における電離の影響, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  27. 福本直之, 宮澤順一, 菊池祐介, 永田正義, 高橋俊樹, 浅井朋彦, 高橋努, 政宗貞男, 三瓶明希夫, 井通暁, 入江 克, SPICA装置のCT生成加速部電源一段化と高速中性粒子フロー生成への応用, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  28. 戸室啓明, 井口一輝, 浅井朋彦, 多チャンネルPMTトモグラフィカメラによるコンパクトトーラスの放射光分布計測, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  29. 平山泰行, 田邨尚郎, 小森谷勇樹, 赤川駿介, 藤川雅透, 松澤芳樹, 高橋努, 浅井朋彦, 高橋俊樹, FRCプラズマにおけるトロイダル流の空間分布, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  30. 田澤仁康, 小石章太郎, 板垣宏知, 浅井朋彦, 高橋努, 平野洋一, 磁束保持管中の磁化プラズマ流の緩和現象, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  31. 沼澤廣斗, 板垣宏知, 藤田侑希, 岸香織, 寺嶋悠紀, 栗根毅, 浅井朋彦, 高繰り返し生成ガンスフェロマックの生成効率第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  32. 根本祐一, 東晃由, 松永宏幸, 今中平造, 浅井朋彦, 井通暁, 高瀬雄一, 関子秀樹, 小野 靖, ワッシャーガンイオン源によるNBIの生成と評価, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  33. 井口一輝, 小森谷勇樹, 大崎敦史, 浅井朋彦, 高橋努, 平野洋一, 高橋俊樹, 井通暁, 移送FRCプラズマにおけるセンターソレノイドを用いた電流駆動, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/04, 京都市国際交流会館.
  34. 藤田侑希, 沼澤廣斗, 寺嶋悠紀, 藤谷公彦, 山崎翠, 浅井朋彦, 平野洋一, 小口治久, “垂直磁場領域における移送ガンスフェロマックの大域的挙動”, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2009年12月2日, 札幌市.
  35. 小森谷勇樹, 松永宏幸, 浅井朋彦, 高橋努, Loren Steinhauer, “磁化同軸ガンによるFRCプラズマへの磁気ヘリシティ注入”, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2009年12月2日, 札幌市.
  36. 寺嶋悠紀, 岸香織, 板垣宏知, 沼澤廣斗, 栗根毅, 藤田侑希, 平野洋一, 浅井朋彦, 高繰り返し同軸ガンにおけるスフェロマック衝突時の真空紫外分光計測, 第26回プラズマ・核融合学会年会 2009/12/01, 京都市国際交流会館.
  37. 赤川駿介, 田邨尚郎, 日吉まゆ, 高尾昂平, 関谷修平, 佐藤幸志, 田澤仁康, 小森谷勇樹, 平山泰行, 藤川雅透, 松澤芳樹, 浅井朋彦, 平野洋一, 高橋努 FRCプラズマの移送過程における閉じ込め特性, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/01, 京都市国際交流会館.
  38. 廣井雅典, 池山多恵子, 浅井朋彦, 高橋努, 大熊康典, 野木靖之, FRCプラズマの抵抗率, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/01, 京都市国際交流会館.
  39. 池山多恵子, 廣井雅典, 浅井朋彦, 高橋努, 大熊康典, 野木靖之, 磁場反転配位プラズマ周辺での電場検出, 第26回プラズマ・核融合学会年会, 2009/12/01, 京都市国際交流会館.
  40. 伊井亨, 大崎敦史, 魏啓為, 松永宏幸, 梅澤俊之, 平野洋一, 浅井朋彦, 井通暁, 小野靖, “TS-4装置におけるNBIを用いた大型FRCの合体生成”, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2009年11月30日, 札幌市.
  41. 大崎敦史, 伊井亨, 魏啓為, 梅澤俊之, 浅井朋彦, 平野洋一, 井通暁, 小野靖, “ワッシャーガンをプラズマ源としたNBIの評価と球状トカマクへの入射実験”, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2009年11月30日, 札幌市.
  42. 山口莊輔, 赤川駿介, 田澤仁康, 平山泰行, 藤川雅透, 戸室啓明, 井之脇祐太, 松澤芳樹, 浅井朋彦, 平野洋一, 高橋努, “移送磁場反転配位プラズマの放射光計測”, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2009年11月30日, 札幌市.
  43. 多田直樹, 山内貴紀, 秋本和宏, 赤川駿介, 松澤芳樹, 浅井朋彦, 平野洋一, 高橋努, “FRCプラズマの下流部における反射点の測定”, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 2009年11月30日, 札幌市.

44. T. IKEYAMA, M. HIROI, T. ASAI, TS. TAKAHASHI, Y. OHKUMA, Y. NOGI, Detection of electric field around field-reversed configuration plasma, 51st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2009/11/05, 米国, ジョージア州アトランタ.

[図書] (計 1 件)

1. Tomohiko Asai and Tsutomu Takahashi, Topics in Magnetohydrodynamics, INTECH (Chapter 5: MHD Activity in an Extremely High-Beta Compact Toroid (pp.117-134)を執筆) (2012).

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: プラズマ光源とその紫外光発生方法  
発明者: 浅井朋彦他 4 名  
権利者: 日本大学  
種類: PCT 国際出願  
番号: PCT/JP2010/053213  
出願年月日: 2010/03/01  
国内外の別: 国外

名称: 同軸磁化プラズマ生成装置  
発明者: 浅井朋彦他 2 名  
権利者: 日本大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-171864  
出願年月日: 2009/07/22  
国内外の別: 国外

名称: 同軸磁化プラズマ生成装置  
発明者: 浅井朋彦他 2 名  
権利者: 日本大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-171864  
出願年月日: 2009/07/22  
国内外の別: 国外

○取得状況 (計 1 件)

名称: 同軸磁化プラズマ生成装置と同軸磁化プラズマ生成装置を用いた膜形成装置  
発明者: 浅井朋彦, 高橋努  
権利者: 日本大学  
種類: 特許  
番号: 特許第 4769014 号  
取得年月日: 2011 年 6 月 24 日  
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅井 朋彦 (ASAI TOMOHIKO)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号: 00386004