

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：14303

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2020～2022

課題番号：20KK0063

研究課題名（和文）トラスプラズマの正準フラックスチューブへの凍結モデルを検証する国際共同実験

研究課題名（英文）International collaborative experiment to investigate toroidal flowing plasma frozen in canonical flux tube

研究代表者

比村 治彦（Himura, Haruhiko）

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：30311632

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：拡張MHDでは、抵抗のない動的なプラズマは磁束管ではなく、正準フラックスチューブ（CFT）に凍結すると予測されている。この予測を国際共同実験で検証するために、京都工繊大とウィスコンシン大学マディソン校でCFTを検出するための新しい多面体プローブを開発した。また、この多面体プローブをMST装置とRELAX装置にインストールして、国際共同実験を実施した。京都工繊大では、複合型プローブ測定に必要な周波数帯域が1MHzのアイソレーションアンプのプロトタイプ製作にも成功した。多面体プローブから速度場の3次元測定ができる初期結果が得られており、CFTを検出する本実験の準備が完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマ物理で広く知られているプラズマの流体的取り扱い方法にMHDモデルがある。理想MHDではプラズマは静的であり、磁束管に凍結する。しかし、近年、プラズマ中に一定方向へと流れるプラズマ流が発見されるなど、静的ではない動的なプラズマが存在している。このような動的なプラズマをモデル化するために、先進プラズマ物理学ではMHDモデルを拡張した拡張MHDモデルが考えられてきている。拡張MHDでは、抵抗のない動的なプラズマは磁束管ではなく、正準フラックスチューブに凍結すると予測されている。これをトラスプラズマで検証した実験はなく、本研究ではこれを世界で初めて国際実験として実施した。

研究成果の概要（英文）：In extended MHD, dynamic plasmas are predicted to frozen-in canonical flux tubes (CFTs) rather than magnetic flux tubes. To verify this in international joint experiments, Kyoto Institute of Technology and the University of Wisconsin-Madison have developed innovative polyhedral probes to detect velocity fields. The polyhedral probes were installed in the MST and RELAX machines. Then, international joint experiments were conducted on those. Kyoto Institute of Technology also succeeded in fabricating a prototype of an isolation amplifier with a frequency bandwidth of 10 MHz, which is necessary for combined probe measurements. Initial results have been obtained that allow three-dimensional measurements of the ion velocity field from the polyhedral probe. Resultantly, preparations for measuring CFT in toroidal plasmas have been completed.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：正準フラックスチューブ 正準ヘリシティ 多面体マッハプローブ 国際共同実験

1. 研究開始当初の背景

プラズマを、電流を流すことができる電荷をもたない気体と考えるモデルは、1流体プラズマ、あるいはMHDプラズマと呼ばれている。このMHDプラズマが完全導体である時、つまり、プラズマ内の抵抗値が無視できる時、MHDプラズマは理想MHDプラズマと呼ばれるモデルにしたがう。この理想MHDプラズマモデルでは、磁場に閉じ込められているプラズマは、磁束管に凍結されると帰結されている。

一方で、プラズマを1流体プラズマとみなさない先進プラズマ物理学では、プラズマをMHDとして考えていない。このため、MHD以外の流体モデルは、すべて拡張MHDと呼ばれている。例えば、拡張MHDの一つである2流体プラズマモデルでは、完全電離している高温プラズマは、イオン流体と電子流体で構成されているとみなされている。この時、図1のように、イオン流体と電子流体は磁束管に凍結するのではなく、正準フラックスチューブに凍結すると予測されている。しかしながら、これをドーナツの形状をした磁化トーラスプラズマ検証した実験はまだない。

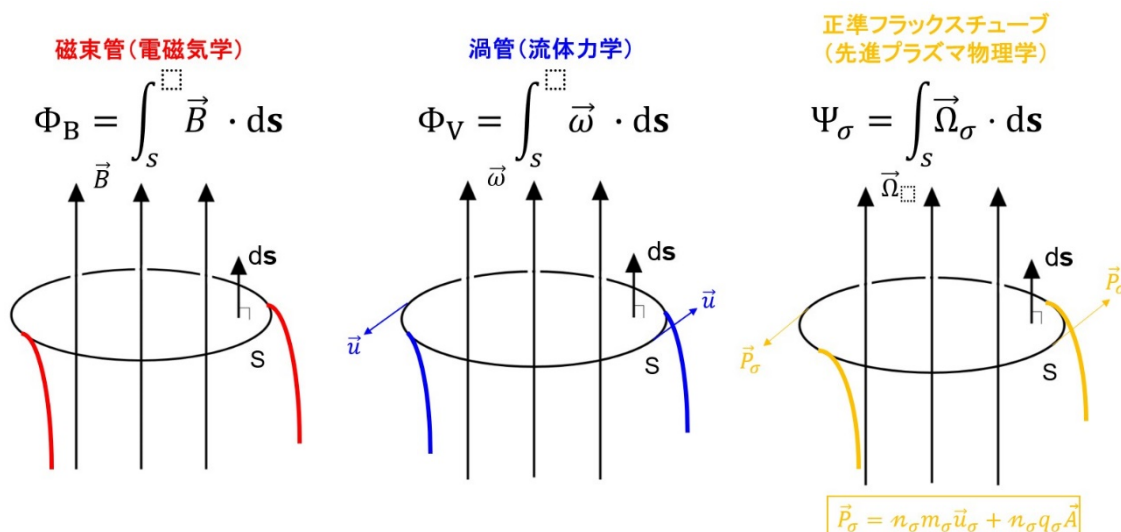


図1 各チューブの比較。正準フラックスチューブは、電磁気学と流体力学の双方の概念を含む。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、トーラスプラズマの中で、イオン流体が速度場を有している時、そのトーラスプラズマは正準フラックスチューブに凍結しているのか、この未解明事項の検証実験を世界で初めて実施する。この実験のために、第一に、日米国際共同チームで、正準フラックスチューブを直接測定するこれまでに例を見ない新しい形のプローブを、米国ウィスコンシン大学をハブ組織として、開発する。第二に、その新型プローブセットを完全電離している高温のトーラスプラズマ内へと挿入して、トーラスプラズマ中の正準フラックスチューブの空間・時間発展を直接測定する。この実験は、まずウィスコンシン大のMST装置で行う。その後、全く同じ新型プローブセットをMST装置と同程度のトーラスプラズマサイズで、プラズマ電流とプラズマ温度が低い京都工繊大のRELAX装置内に挿入して、正準フラックスチューブの空間・時間発展測定を行う。これら2つの装置から得られるデータを比較することで、イオン流体が速度場を持つ場合のトーラスプラズマの正準フラックスチューブへの凍結の正否と、そのランキスト数(核融合プラズマ分野では、collisionality)依存性について明らかにする。

3. 研究の方法

この国際共同研究は、コロナ禍の真ただ中であっても、3週間に1回の頻度での独米日オンラインミーティングを通じて進められた(図2参照)。代表者も日本からプローブ部品や回路を送るなどしながら実験準備が進められた。2021年、MST装置で行われた第一回実験は、実験者はウィスコンシン大学の

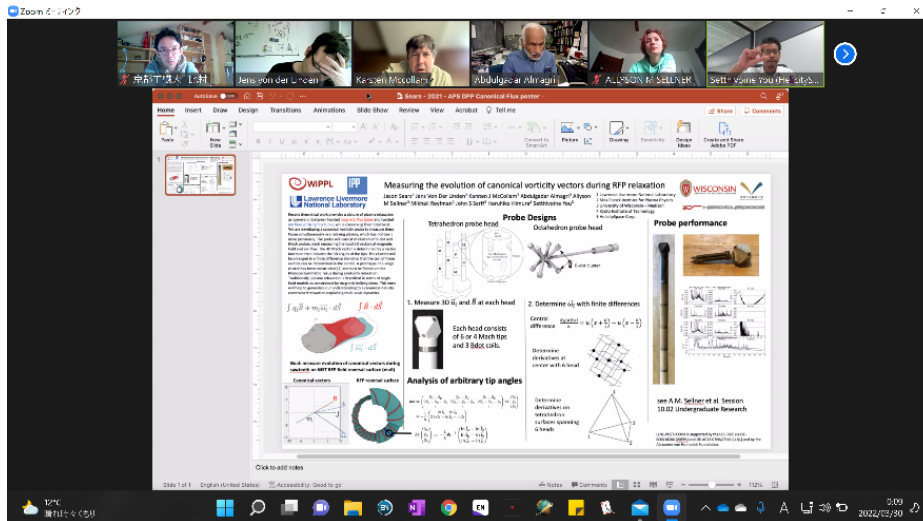


図2 本国際共同研究は、コロナ禍であっても、3週間に1回のオンラインで実施した。

研究者が務めて、代表者他、米国外に在住していた研究者はオンラインでその実験に参加した。2022年の実験では、代表者もウィスコンシン大学に2回渡航して、この実験を共同で実施した。このように、テレワークを駆使すれば、比較的大型の実験装置を共同で使う国際共同実験でさえ、フルスピードとは言わないまでも、進められることを示せたことが第一の成果である。

4. 研究成果

正準フラックスチューブへの凍結予測を国際共同実験で検証するために、CFTの検出に不可欠な渦度ベクトルを直接測定するプローブのプロトタイプを米国ウィスコンシン大学(UW)をハブ組織として開発した。図3のように、このプローブは多面体の頂点にイオン飽和電流を測定するための電極が置かれていることが特徴である。これで、1つの多面体の重心位置での渦度ベクトルが原理的に測定される。この多面体を7つ配置することで、渦度ベクトルの空間分布も測定できる。この新型プローブは、現在、国際共著として投稿準備中である。

図3のプロトタイププローブで明らかとなった問題点は、プローブの耐久性にある。プロトタイプに用いた絶縁材や信号線では、測定での累積熱負荷に対して十分な耐久性を持たない。このため、このプロトタイプを大型化、具体的には1.5インチに大きくしたプローブを最終プローブ型とした。この実験は、2023年度に実施される。この一方で、京都工繊大側では、複合型プローブを用いた測定準備を完了し、実際に初期データを得た。

この新型プローブをRELAX装置に挿入するために必要なプローブ導入機や信号取り出し用の真空部品の製作も完了した。これらはまだ未投稿のため、文章のみでとどめるが、正準フラックスチューブの実



図3 一つの多面体で渦度を測定し、その空間分布を測定する新型プローブの鳥観図。



図3 RELAXで渦度だけでなく、磁場と電場を同時に測定するための複合プローブ。一つの円柱側壁に、多面体となるように電極孔が空けられている。(投稿準備中)

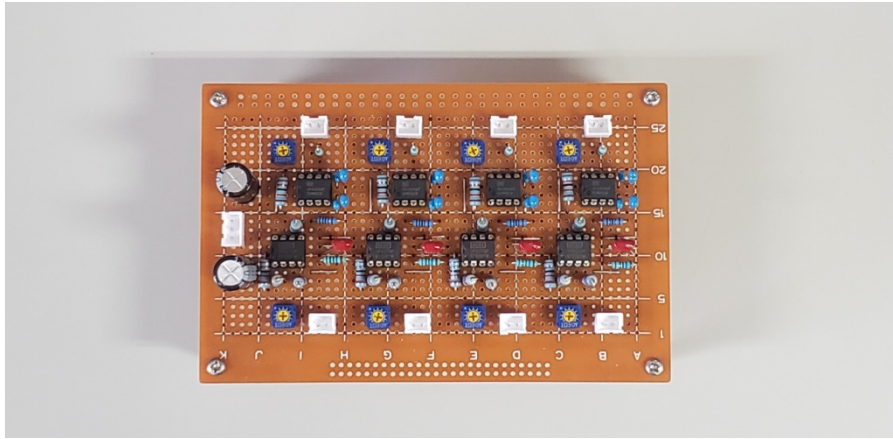


図 3 RELAX では、独自に絶縁アンプ等のエレクトロニクスに開発も進めた。市販品の周波数特性を上回る絶縁アンプの開発にも成功した。量産化が次の課題である。

験に必要な磁気プローブ測定系も正しい信号を取得できるセットアップを見出し、それに向けて仕様を電極の八面体へと改造した。さらに、RELAXでは、RFPTーラスプラズマだけでなく、トカマクーラスプラズマの生成実験も整えた。加えて、RELAXに多チャンネル実験に供するためのエレクトロニクスを独自に開発し、次々に導入している。エレクトロニクスの量産を終了次第、本実験が実施できる所まで完了した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S. Inagaki, A. Sanpei, H. Himura	4. 巻 -
2. 論文標題 Multiple-pinhole camera for monitoring three-dimensional plasma shape	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Sanpei, T. Okamoto, S. Masamune, Y. Kuroe	4. 巻 9
2. 論文標題 A Data-Assimilation Based Method for Equilibrium Reconstruction of Magnetic Fusion Plasma and its Application to Reversed Field Pinch	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 74739 ~ 74751
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3081146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inoue Takeru, Himura Haruhiko, Sanpei Akio, Murase Takanori, Nakagawa Sho, Shimizu Takashi, Shimizu Akihiro, Isobe Mitsutaka, Hayashi Hiromi	4. 巻 184
2. 論文標題 Optimum set for completely supporting existing toroidal field coils toward the investigation of two-fluid physics in toroidal plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 113285 ~ 113285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2022.113285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 INAGAKI Shinichiro, SANPEI Akio, INOUE Takeru, HIMURA Haruhiko	4. 巻 18
2. 論文標題 Initial Experimental Results of Three-Dimensional Plasma Structure Reconstructed from Seven Independent X-Ray Images on RELAX	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202010 ~ 1202010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.1202010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 SANPEI Akio, HIMURA Haruhiko, INOUE Takeru, INAGAKI Shinichiro, KOJIMA Natsuki, TAKAOKA Ryota, SASAKI Takahiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Relationship between Edge Magnetic Field and Rotation of the Spatial Structure of Visible Light Emitted from Low Aspect RFP Plasmas on RELAX	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402024 ~ 2402024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.2402024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 INAGAKI Shinichiro, SANPEI Akio, INOUE Takeru, KOJIMA Natsuki, TAKAOKA Ryota, SASAKI Takahiro, HIMURA Haruhiko	4. 巻 18
2. 論文標題 First Experimental Monitoring of the Three-Dimensional Structure of Toroidal Plasmas Using Multiple Soft X-Ray Imaging Techniques	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402046 ~ 2402046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.2402046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高岡亮太, 比村治彦	4. 巻 99
2. 論文標題 10MHzの-3dB通過帯域を持つ広帯域絶縁アンプの開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 プラズマ核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 9 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 A. Sellner, A. Almagri, K. McCollam, M. Reyfman, J. Sarff, C. Forest, J. Linden, J. Sears, S. You, H. Himura
2. 発表標題 Development and implementation of a 3D 6-tip mach probe arranged in an octahedral geometry on WiPPL device
3. 学会等名 APS Division of Plasma Physics Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 メタステートでの拡張MHDプラズマの保存量の検証研究
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三瓶明希夫 他
2. 発表標題 RFP におけるMHD不安定性とヘリカル配位相転移の相関
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上孟流 他
2. 発表標題 Finite element analysis of support structures attached to RELAX machine for producing not only reversed-field pinch but also tokamak
3. 学会等名 AAPPS-DPP (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲垣泰一郎 他
2. 発表標題 1つのビューイングポート上のマルチピンホールから得る軟X線データとフーリエベッセル級数展開法を用いたトーラスプラズマの三次元再構成方法
3. 学会等名 第38回プラズマ核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 京都工芸繊維大学プラズマ基礎工学研究室
3. 学会等名 Fusion2030研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 RELAXトカマクフォーメーションの準備と研究計画
3. 学会等名 先進トカマク研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Himura
2. 発表標題 Investigation of two-fluid plasma state by extending ion skin depth
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Himura
2. 発表標題 Research Plan for Investigating Canonical Flux Tube of Toroidal Plasmas in RELAX
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 RELAXプラズマダイナミクスを2流体プラズマとして検証する実験計画
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 10年後を見据えたプラズマ科学の学術課題
3. 学会等名 プラズマ核融合学会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比村治彦
2. 発表標題 電場 2 軸成分同時測定用キャパシティブプローブの開発と実験
3. 学会等名 日米科学技術協力事業核融合分野報告会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比村治彦、他
2. 発表標題 実験装置の概要II RELAX
3. 学会等名 先進トカマク開発のための実験研究研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Himura
2. 発表標題 Current status of RELAX
3. 学会等名 RFX seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Himura
2. 発表標題 Investigation of two-fluid plasma state by extending ion skin depth in laboratory plasmas
3. 学会等名 MST seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Inoue, et al.
2. 発表標題 Modification of the RELAX for producing tokamaks as well as RFPs for investigating two-fluid toroidal plasmas
3. 学会等名 APS Division of Plasma Physics Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Sellner, et al.
2. 発表標題 Development and implementation of a 3D 6-tip mach probe arranged in an octahedral geometry on WIPPL device
3. 学会等名 APS Division of Plasma Physics Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都工芸繊維大学プラズマ基礎工学研究室
<http://nuclear.es.kit.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三瓶 明希夫 (Sanpei Akio) (90379066)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授 (14303)	
研究分担者	武村 勇輝 (Takemura Yuki) (60705606)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------