

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14446

研究課題名（和文）トカマクプラズマにおける内部輸送障壁の大域的応答の解明

研究課題名（英文）Analysis of global transport of internal transport barrier in tokamak plasmas

研究代表者

金 史良（Kin, Fumiyoshi）

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：40846747

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、トカマクプラズマにおける内部輸送障壁（ITB）の大域的応答の起源を探求し、ITBの形成機構の理解を目指した研究である。ITB形成/非形成時における熱流束や径電場のダイナミクスを多点空間で観測し、比較した結果、大域的な輸送の低減が径電場の成長に寄与し、ITBの発現に決定的な影響を及ぼしていることを明らかにした。この結果は、核燃焼プラズマ制御を目指す上で、従来の局所輸送モデルを拡張し、グローバルな輸送効果を取り入れたモデル開発の重要性を強調している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、トカマクプラズマにおける内部輸送障壁（ITB）の形成機構についての理解が大幅に進展した。大域的輸送がITBに与える影響は著しく、理論モデルの検証や改善に重要な発見となった。また、ITBは高温プラズマの乱流輸送を抑制し、プラズマの性能向上に重要な役割を果たす。ITB形成機構の解明は、トカマクプラズマの制御技術や将来の核融合エネルギー利用に関する基礎物理の構築に大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to investigate the origin of global response of Internal Transport Barrier (ITB) in Tokamak plasma and understand the formation mechanism of ITB. In order to verify core plasma transport and ITB formation, a comparison of the dynamics of heat flux and radial electric field was conducted during both ITB formation and non-formation conditions. The research yielded the following results: (1) dynamics of ITB formation in steady-state negative magnetic shear plasma, (2) global transient response of ITB against cold pulse, (3) development of a neural network-based analysis method for high time-resolution measurement of radial electric field, (4) occurrence of avalanching transport associated with bursty fluctuations and its impact on stiff profiles, and (5) influence of avalanching transport on radial electric field and ITB formation.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：プラズマ乱流輸送 内部輸送障壁 非局所的輸送 トカマクプラズマ 雪崩輸送 径電場ダイナミクス 過渡応答解析 ニューラルネットワーク

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

トカマク型核融合炉の定常運転の確立には、プラズマの圧力勾配によって駆動される自発電流の割合を増やす必要があり、そのためには大きな圧力勾配を持つ内部輸送障壁(Internal Transport Barrier: ITB)を形成することが必須となる。従来、ITBの形成には径方向の電場シアや磁気シアによる微視的乱流の抑制効果が重要視されていた。しかし、ITB内外で輸送係数が同時に変化したり、温度曲率(勾配の変化量)に分岐現象が見られたり、局所的なパラメータだけでは説明できない現象が多く観測されている[1]。このようなITBの非局所的・大域的な性質を理解するためには、グローバルな輸送機構の解明が必要であり、理論モデルの実験的な検証が強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、炉心級コアプラズマの揺動と熱流速及び径電場を多点空間で観測し、ITB形成やITB過渡応答時の大域的なダイナミクスを詳細に分析する。局所輸送モデルとグローバル輸送モデルによるITB形成をそれぞれ実験的に検証する。ITBの大域的応答の起源を探求し、ITBの形成機構の解明を目指す。

### 3. 研究の方法

最初の計画では、那珂研究所のJT-60U装置を用いてITBの解析・検証方法を確立し、米国のDIII-D装置でITB実験の提案および解析を進める予定であった。しかし、新型コロナウイルスの影響で米国への出張が困難となり、JT-60Uの実験データ解析のみ進めるよう計画を変更する必要があった。その点を踏まえた具体的な研究方法は、(1)先進的なデータ解析手法を用いて高時間分解能で熱流速や径電場の大域的な観測方法の開発、(2)ITB形成時の熱流速・径電場・揺動のダイナミクスの同時観測、(3)ITBの過渡応答解析の観測による物理モデルの検証、である。

### 4. 研究成果

研究成果を総括すると、ITBの形成には局所的な微視的乱流の抑制だけでは説明不可能であり、雪崩輸送などの大域的な輸送機構の抑制がITBの発現に大きな影響を及ぼしていることが分かった。以下、具体的な成果を記す。

#### (1) ITB形成時における微視的乱流抑制モデルの検証[2]

ITBの形成は、径電場シアや磁気シアによる微視的乱流の抑制モデルが広く知られている。本研究では、磁気シアが時間的に定常の状態が発現するITBに注目し、その時の径電場を評価した。結果は、径電場による乱流の剪断流効果は1桁程度小さく、径電場シアが乱流抑制に十分に発達していない状況下でITBが形成されていた。ITB形成時のイオン熱流速を評価すると、熱流速はITBの出現領域からプラズマ周辺分にかけて大域的に同時に減少しており、局所的な乱流抑制だけがITB形成の条件では無いことが示唆された。本研究では、剪断流モデルを改良した不均一電場モデルを導入することで、径電場曲率という電場の高次の空間構造の寄与を考慮すると、ITBの形成領域内で微視的乱流スケールを超える大域的な揺動や輸送が抑制されている可能性が見出された。これは、ペDESTAL領域に見られるH-mode輸送障壁の形成条件とは異なり、ITBの形成は大域的揺動や輸送の抑制が重要になり得る、との予測が得られた。結果は学会発表や論文[2]にて成果報告した。

#### (2) ITBの過渡応答解析による輸送モデルの検証[3]

プラズマに摂動を与えてその応答を観測する過渡応答解析は、輸送モデルの検証に広く用いられている。ITBプラズマに対して、プラズマ周辺部から超音速分子ビームを入射し、周辺冷却によるコールドパルス伝搬の実験解析を行なった。コールドパルスはITB領域に到達すると、ITBの温度を大きく下げて劣化させる。この時、ITBの勾配や幅が異なると、コールドパルスによるITBの応答特性が変化する。ITB幅が狭い場合は、コールドパルスによる熱流速と温度勾配の関係はフィックの法則で表現可能な様な、拡散的な輸送特性が見出されたが、ITB幅が広くなるにつれて、熱流速と温度勾配の関係が一意に決まらず、ヒステリシスを持つ非局所的な応答を示すことが分かった。ITBの状態によって、輸送が局所・非局所と質的に変わり得ることは、ITBが空間構造(高さ・幅・位置)に多様性を持つことを示す要因の一つとして考えられる。また、温度が定常状態に戻る前にコールドパルスを連続的に入射すると、ITBの温度勾配が増加したり減少したりする現象が発見され、周辺冷却によりITBを制御できる可能性を見出した。結果は学会発表や論文[3]にて成果報告した。

### (3)ニューラルネットワークによる分光スペクトルのノイズ除去法の開発[4]

プラズマのイオン温度やフロー及び径電場は、荷電交換反応分光法を用いて計測する。計測の時間分解能は、分光スペクトルのS/N比とトレードオフの関係にあるため、高時間サンプリングが難しい。本研究では、この問題を解決して荷電交換反応分光法の高時間分解能測定の実現を目指し、ノイズが大きい可視分光輝線から真のスペクトルを推定する方法を、ニューラルネットワーク(NN)を用いて開発した。この手法では、5層のオートエンコーダ方式のNNを使用して、JT-60U装置で観測されたHe I(667.8nm、706.5nm、728.1nm)に対するスペクトル推定を学習した。従来のガウス関数を使用した非線形回帰に比べ、特にS/N比が4以下の信号に対して、スペクトル推定精度と安定性が向上した。この手法を使用することで、高時間分解能測定でS/N比が小さくなるトレードオフの問題を解決し、分光計測の高時間分解能計測を実現できる可能性がある。結果は論文[4]にて成果報告した。

### (4)突発的揺動を伴う雪崩輸送の観測と硬直性分布への影響[5]

JT-60Uのコアプラズマ領域において、プラズマ加熱パワーが増加すると、密度揺動強度が突発的に増大することが反射型計測によって観測された。この突発揺動は、自己組織化臨界現象に即した大域的な熱輸送(雪崩輸送)と同期していることが判明した。雪崩輸送は、プラズマ全体に匹敵する領域に渡り、反磁性ドリフト速度の約1/10程度の速さで伝播し、これは拡散的な輸送速度を大きく超えている。この雪崩輸送現象は、温度勾配を緩和するように発生していることが分かり、加熱パワーの大きさに対して強くなることから、トカマクプラズマでよく知られる硬直性分布の形成に影響していることが示唆された。本実験においても、イオン温度や電子温度の分布は加熱パワーに依らずほぼ一定であり、硬直性分布の特徴を有していた。そこで、条件付き抽出法を用いて雪崩輸送の駆動熱流束を評価すると、熱流束は加熱パワーの増加分に匹敵する量であることが分かった。即ち、加熱パワーが増加しても、その分雪崩輸送が駆動する熱流が増加して熱を排出し、結果として温度分布が一定に保たれる。この結果は、グローバルシミュレーションなどで議論されてきた雪崩輸送による硬直性分布の形成機構が、実験的に証明されたと言える。本研究は学会発表や論文[5]にて報告し、学会賞を受賞するなど評価された。

### (5)雪崩輸送によるITB形成への影響[6]

負磁気シアプラズマでは、 $q$ 分布の最小値が有理数面に達すると、フローシア及び径電場が増大し、ITBの形成が起こりやすくなることで知られている。このITB形成の過程で、雪崩輸送と径電場の関係を調査した。ITBが形成されないプラズマでは、突発揺動と同期した雪崩輸送が存在して温度勾配が緩和する様子が確認され(図1上)、結果として径電場の成長が妨げられてITBの形成には至らない。実際に、雪崩輸送が発生する熱流束は、温度勾配を緩和するに足る十分なエネルギーを駆動していることが確認された。一方、ITBが形成されるプラズマでは、ITBへの遷移時に突発輸送と雪崩輸送が減少し、結果として温度勾配が維持され、径電場との正のフィードバックにより、温度勾配と径電場が共に成長してITB形成が進行する(図1下)。また、雪崩輸送はITB形成後も、ITB外側部からITB内部にまで伝搬して侵食していることが観測された。このように雪崩輸送が、ITBの形成を妨げるダイナミクスを示していることは初めての観測であり、輸送障壁の形成及び制御には、雪崩のような大域的輸送の影響を考慮する必要性を示す結果である。成果は論文[6]にて査読中である。

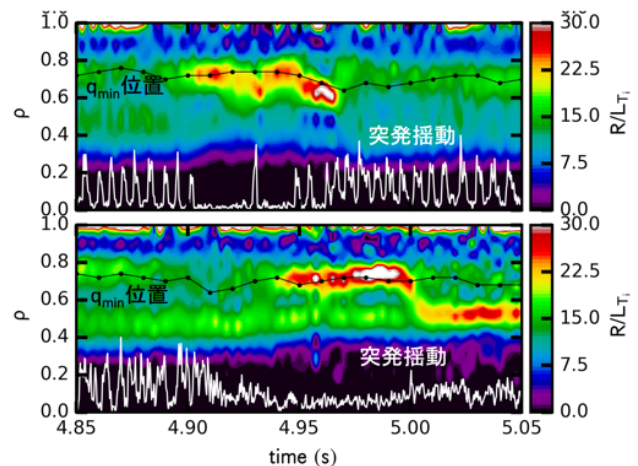


図1. ITB非形成(上)/形成(下)時におけるイオン温度勾配と突発揺動のダイナミクス

### <引用文献>

- [1] K. Ida and T. Fujita, Plasma Phys. Control. Fusion 60, 033001 (2018).
- [2] F. Kin et al., Plasma Phys. Control. Fusion 63, 035030(2021).
- [3] F. Kin et al., Nucl. Fusion 61, 026017 (2021).
- [4] F. Kin et al., Rev. Sci. Inst. 92, 053505(2021).
- [5] F. Kin et al., Nucl. Fusion 63, 016015(2023).
- [6] F. Kin et al., under review in Phys. Rev. Lett.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 F.Kin, K.Itoh, T.Bando, K.Shinohara, N.Oyama, M.Yoshida, K.Kamiya and S.Sumida	4. 巻 63
2. 論文標題 Experimental evaluation of avalanche type of electron heat transport in magnetic confinement plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 0165015 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/aca341	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 Kin F., Yoshida M., Takenaga H., Honda M., Tamura N., Narita E., Kamiya K., Bando T., Wakatsuki T., Isayama A.	4. 巻 61
2. 論文標題 Dynamics of weak-magnetic-shear-sustained internal transport barrier during supersonic molecular-beam injection in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 026017 ~ 026017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/abca3	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 Kin F, Itoh K, Yoshida M, Honda M, Kamada Y, Kamiya K, Narita E, Bando T	4. 巻 63
2. 論文標題 Spatio-temporal evolutions of ion heat flux and radial electric field during internal transport barrier formation on JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 035030 ~ 035030
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6587/abd9e3	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 Kin F., Nakano T., Oyama N., Terakado A., Wakatsuki T., Narita E.	4. 巻 92
2. 論文標題 Prediction of a single Gaussian shape of spectral line measured with low-dispersion spectrometer by using machine learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 053505 ~ 053505
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0039781	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 F. Kin, K. Itoh, T. Bando, K. Shinohara, N. Oyama, M. Yoshida, K. Kamiya, S. Sumida
2. 発表標題 Observations of bursty fluctuations measured by reflectometer associating to avalanche-like transport in JT-60U
3. 学会等名 Asia-Pacific Transport Working Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金史良、伊藤公孝、坂東隆宏、篠原孝司、大山直幸、吉田麻衣子、神谷健作、隅田脩平
2. 発表標題 JT-60Uにおける突発的揺動と雪崩的熱輸送の観測
3. 学会等名 プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金史良、伊藤公孝、篠原孝司、坂東隆宏、神谷健作
2. 発表標題 トカマクプラズマの内部輸送障壁形成における雪崩的熱輸送の役割
3. 学会等名 物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Kin, K. Itoh, M. Yoshida, M. Honda, Y. Kamada, K. Kamiya, E. Narita, T. Bando
2. 発表標題 Dynamics of heat transport and radial electric field during internal transport barrier formation on JT-60U
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Remote e-conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金史良、吉田麻衣子、竹永秀信、本多充、田村直樹、成田絵美、神谷健作、坂東隆宏、若月琢磨、諫山明彦
2. 発表標題 JT-60Uにおける内部輸送障壁を有するプラズマの過渡的イオン熱輸送解析
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------