

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03513

研究課題名(和文)磁化閉じ込めプラズマにおける輸送障壁の動的応答の研究

研究課題名(英文) Research on dynamical response of transport barrier in magnetically-confined plasma

研究代表者

伊藤 公孝 (Itoh, Kimitaka)

中部大学・その他の部局・顧問

研究者番号：50176327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁化閉じ込めプラズマにおける輸送障壁の動的応答の例として、H-モード輸送障壁(H-TB)と内部輸送障壁(ITB)に関わる動的応答を対象に、強相関乱流の方法を応用した。

H-TBにおけるリミットサイクル発生の機構を理論・実験で検証説明し、また大規模なH-TBの崩壊現象ではテアリングモードの突発をJT-60U実験装置の観測データに発見しモデルも提示した。ITBについては、新仮説(大域的な弾道的な熱輸送の消失がITBの発生を促すという描像)を、同装置の実験結果の中に見出し、ITB形成と崩壊に対する弾道的な熱輸送の効果を実験的に評価した。

以上の様に多くの成果を達成し広く発信した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不均一磁化プラズマは、太陽風などの自然現象として、また実験室でも磁場閉じ込め制御核融合をテーマに、世界中で研究されている。これらのプラズマに現れる輸送障壁の動的応答は、社会的にも学術的にも重要な未解決問題である。

学術的意義としては、こうした未解決問題の解明のために、ごく最近展開された強相関乱流理論の描像を応用する点である。その結果の一例であるが、H-モードの輸送障壁で、リミットサイクルや崩壊現象に新たな描像を提案し実験検証し、全く新たな描像を見出した。これらの成果は、輸送障壁の安定的保持を通じた核融合開発への寄与や、太陽風爆発への減災へ寄与など、社会的にも大きな意味を持つ。

研究成果の概要(英文)：Research has been conducted aiming at to present an understanding of dynamical responses of various transport barriers in magnetically-confined plasmas. Method of multiferroic turbulence was applied. As examples, the edge transport barrier of H-modes (H-TB) and the internal transport barriers (ITB) were chosen.

Investigations on H-TB has clarified the mechanism of limit cycle dynamics to appear, which was confirmed by experimental observations. More importantly, it was discovered that some of the abrupt decay of H-TB, i.e., the edge-localized mode (ELM), is triggered by tearing mode. For ITB, a new picture of formation/decay mechanisms was presented with quantitative confirmation by experimental observations: the disappearance of avalanche leads to the ITB formation. These discoveries renew the conventional pictures of dynamics of transport barriers in magnetically-confined plasmas.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：輸送障壁発生機序 大域的弾道的熱輸送 乱流の捕捉 リミットサイクル 崩壊現象

## 1. 研究開始当初の背景

不均一磁化プラズマは、太陽風などの自然現象や、また実験室でも磁場閉じ込め制御核融合を対象として、世界中で研究されている。これら観測されるプラズマの多くは乱流輸送に支配されている。乱流輸送によってプラズマの不均一性が消失することもあるが、同時に、乱流輸送に起因して急峻な勾配が形成されることも知られており、それらは輸送障壁と呼ばれることが多い。輸送障壁は自律的に維持される一方、形成や消失は維持時間に比べて短時間で突発的に起きることが多く、プラズマに現れる輸送障壁の動的応答は、プラズマ物理学の重要な未解決問題であった。突発的に消失する場合には、太陽フレアの爆発や、磁場閉じ込めプラズマの H-モード障壁崩壊現象 ELMs (edge-localized modes) など、短時間に大量のエネルギーを流出させるため、甚大な影響を与えうる。

磁場閉じ込めプラズマに焦点を絞れば、H-モードの障壁に加えて、プラズマ内部に現れる内部輸送障壁(ITB)もあり、H-モード障壁と ITB の双方を適切に制御することは核融合原型炉の設計に必須であるとされる。重大な ELMs の発生や予期せぬ ITB の消失を未然に防ぐことが不可欠であり、そのためには輸送障壁の動的応答の機序を正確に理解することが求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、磁化閉じ込めプラズマの乱流構造の動的現象の典型例として、H-モード輸送障壁と内部輸送障壁(ITB)に関わる動的応答を対象に選ぶ。未解決の諸問題(例えば、H-モード障壁での edge-harmonic oscillation (EHO)や障壁崩壊現象 ELMs、ITB の発生・崩壊機序、など)に理解を与えることを目的とする。

学術的意義として目指すものは、こうした未解決問題を解明するために、ごく最近展開された強相関乱流理論(多スケール乱流の発達している状況で多種の乱流構造(含む障壁)が共存する場合に、乱流構造形成機構を解析するために提示された方法)の描像を応用し輸送障壁の動的応答の理解に資するという、プラズマ乱流研究の方法論を示す事にある。同時に、得られる成果は、輸送障壁の安定的保持による核融合開発の加速や、太陽風爆発の減災等に寄与するなど、社会的にも大きな意味を持つ。学術的・社会的意義のある成果を生むことを目的とする。

## 3. 研究の方法

この研究では、乱流プラズマの輸送障壁に於いていくつもの場(密度と速度や電磁場など)の輸送障壁が共存し、それを作り出す乱流の非線形効果に干渉が生じているという描像に立って研究を進める。そのためには、2.項で紹介した最新のプラズマ乱流理論「強相関乱流」の展開を応用することが適切である。

その描像に立って、自発的な動的応答を生み出す機構としては、(a)乱流構造に内在する非線形機構に閉じた問題として扱うべきテーマと、(b)強相関乱流に、別種の摂動(例えば MHD 不安定性)が重畳された時に起きる問題と、その二種類を区別することで研究を進める。さらに結果として発生する動的応答については、(a)リミットサイクルの様な準定常的な応答を示すものと、(b)ELMs のように突発的な崩壊応答を示すものとに区分する。こうした研究手順を取れば、動的応答発生機構として(少なくとも)二種類の多様性があり、発現する動的応答にも(少なくとも)二種類の多様性が現れることになる。発生機構と発生現象を整理して分類できる研究成果を求める方法を取ることによって、動的応答の機序を理解するための枠組みを提供することができる。動的応答の機序が整理できれば、それぞれの問題を解決するための操作手法を見出すための物理的基盤を提供することができる。

## 4. 研究成果

### (1) H-モード輸送障壁の動的応答

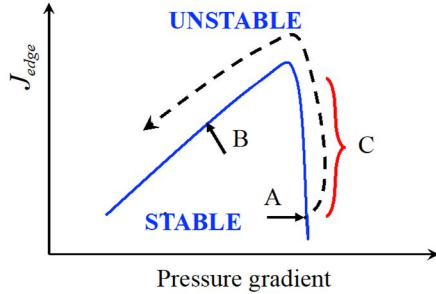
#### 概観

このテーマが重要視されるのは、とりわけ、輸送障壁の突発的崩壊現象(ELMs)が現れるためである。この突発的崩壊現象には、準周期的に現れるものや短周期で非周期的なものなど、多種のものがある。一度の崩壊によってプラズマ外部に突発的に流出するエネルギーの大小にも種々のパターンがあり、従来は、周期や損失エネルギーの大小の違いから、Type-I, Type-II, Type-III・・・と現象論的にカテゴリー分けされてきた。とりわけ、Type-I ELMs と呼ばれるものは、崩壊時の放出エネルギーが大きくプラズマを閉じ込める容器に大きな損耗を与えるため、将来の原型炉などを設計する上では確実に抑制することが求められる。そのためには、Type-I ELMs の発生機序を正確に理解することが必須であり、H-モード輸送障壁の動的応答理解の重要性が明らかになる。ここにあげた Type-II, III 等と名付けられているものも含め何がどの様に選択され発現するのか、理解を得る必要がある。

動的応答には、ELMs のように突発的に輸送障壁が崩壊するのではなく、障壁近傍に小振幅でコヒーレントな振動が現れる edge-harmonic oscillation (EHO) という現象も知られており、ELMs や EHO はじめ多種の動的応答を考えるべき、問題の複雑さを示している。

## EHO と Type-I ELMs

上記 Type-I ELMs は、通説では peeling-ballooning mode (P-M mode)によって起きるとされている。H-モードでは、周辺の圧力勾配が高くなり、それにつれて(トカマクに必須な)トロイダル電流にプラズマ周辺に集中した成分  $J_{edge}$  が現れる。圧力勾配と  $J_{edge}$  の双方が P-B mode の駆動源になっており、定性的には図に示す様な不安定領域が知られている[J. W. Connor, Plasma Phys. Contr. Fus. **40**, 531 (1998)]。



プラズマパラメタが安定領域から不安定領域に入る時にどのような動的応答が生じるのか。先行研究の結果では、A の様な道筋で不安定領域に入る時には、圧力勾配と揺動振幅の組がリミットサイクル振動をしめす事が理論的に示されている[K. Itoh, et al.: Plasma Phys. Contr. Fus. **63**, 025002 (2021)]。実験でも検証され[K. Kamiya et al.: Commun. Phys. **4**, 141 (2021)]、P-B mode を初めて実験で明確に同定したものになっている。さて、この様な研究結果が得られれば、Type-I ELMs に関する従来の発生モデルが書き換えられるべきことは明らかである。従来の考え方では、A の様な軌道で不安定領域に入ると、点線に沿ったパラメタの変化が起き(Cの部分では圧力勾配が抑制されたまま周辺電流が増加する)周辺の輸送障壁が消失するとされていた。しかし、P-B mode では図の点線の軌道のCの部分でリミットサイクルが起きることになるなら、リミットサイクルを伴わない大抵の Type-I ELMs は、通常言われている様な話(Aの方に不安定領域に入り点線の様に発展する)では説明できないことになる。

上図でBのように不安定領域に入るとすればどうなるか、準線形理論を用いて検討した[1]。その結果、不安定領域に入る時の揺動振幅の初期値を  $\varepsilon(0)$  とすると、その後、規格化された揺動の二乗振幅  $A(t)$  は

$$A(t) = \varepsilon(0) \{\cos(t/\tau_0)\}^2, \quad \tau_0 = (\alpha_c \tau_{peel} / \varepsilon(0) \gamma_0)^{1/2} \quad (1)$$

と発展することが予言される。記号の定義は[1]に譲り、細かな記号の定義を説明しなくても(1)式から分かることを述べる。(1)式は、B から不安定領域に入ると時間  $(\pi/2)\tau_0$  が経過した後  $\cos(t/\tau_0)$  がゼロになりP-B mode の振幅は爆発的な増大を示すことを導く。爆発的な増大という意味では観測と定性的に一致する。しかし、問題は爆発的な増大に至る時定数  $\tau_0$  の持つ性質である。ここに初期値  $\varepsilon(0)$  が含まれているが、初期値は背景揺動の非線形機構で生まれるものであり、着目するモードから見れば、ランダムな微小値をとるように振る舞うだろう。その結果  $\tau_0$  が長い時定数となり、モードが成長を始めてから爆発するまでの経過時間がゆっくりしたものになり、突発性を説明するのが困難になる。また、引き続く不安定性の発生において  $\tau_0$  がランダムな値を取るようになって、経過時間もランダムになる。準周期的な爆発的発達という Type-I ELMs の説明には妥当しないことになる[1]。

当研究グループの先行研究では、Type-III ELMs と呼ばれるものが、乱流の非線形構造である「ストリーマー」である例が発見されている。Type-III ELMs の原因は、従来 MHD モードとされてきたが、この発見は、Type-III ELMs の機構が通説通りとは限らないことを実証した。この考えを推し進めれば、現象論的に Type-... と一括りにされていたもののなかにも物理的には異なった機構で発生するものが複数あってもいい、という描像へと研究を誘う。

Type-I ELMs についても、P-B mode であるという固定観念から離れ、多様性がありうるとの仮説のもと、JT-60U の実験データを詳細に分析した。その結果、従来の定説とは異なり、テアリングモードのパリティを持つモード(トロイダルモード数  $n=1$ )が爆発的に発生することを確認した。これは新しいデータ解析法を適用して従来着目されなかったデータを統合的に組み合わせることで導かれた結論である。(定説のP-B mode であれば、テアリングモードとは逆のパリティを持っており、明確に区別できる。)この実験的発見を国際会議で発表し[2]、論文を執筆している。このテアリングモードは、ブレカーサーの振幅が閾値を超えると磁気面破壊が起き、電流拡散係数(hyper resistivity と呼ぶ)で不安定化され爆発的成長を起こす。規格化された磁場揺動  $B_n$  の時間発展が

$$B_n = B_{n0} \{1 - \gamma B_{n0}^{1/2} t\}^{-2} \quad (2)$$

と振る舞うことが理論的に導かれた[3]。記号の定義は[3]に譲り、前と同様に細かな記号の意味を知らなくとも(2)式から分かることを述べれば、時間  $t$  (これは磁気面破壊が起きる時を原点  $t$

= 0 に選んでいる) が有限な時間で、右辺の分母がゼロに近づき、磁場揺動  $B_n$  が爆発的に増大することを示している。爆発までに至る短い時間を(2)式は予言しているが、それは実験結果と準定量的にも一致しているという初期の結果を得ている。

## (2) 流れと乱流の結合ダイナミクス

### ストリーマーと乱流の結合再考

前項で触れた様に、Type-III ELMs が(全てはそうではないかもしれないが)ストリーマー遷移で突発することが見出されたことは、輸送障壁の中のストリーマーの活動を再考する動機となる。H-モードの輸送障壁では、強い半径方向電場とポロイダル方向の流れが発生することはよく知られている。それに付随して、トロイダル方向の流れも誘発され、この流速はポロイダル方向の流速を大きく上回る。これらの流れは半径方向に勾配を持つので、トロイダル方向の流れの勾配(PVS)によって不安定性が起き、PVS が閾値を超えると、乱流により作られるメゾスケール構造は、帯状流からストリーマーへと遷移する。これは Type-III ELMs のトリガーを説明する一つの仮説である。

乱流によるストリーマーの励起の問題は、準粒子的なモデルによる準線形理論で解析されたり、揺動のエンベロープ・モジュレーション方程式で解析されるなどしてきた。新しい視点でこの問題を再吟味した。準粒子的なモデルによる準線形理論をさらに大振幅の場合に拡張するため、波動運動論的なシミュレーションで励起機構を検討した。その結果、ストリーマーの運動につれて、乱流が捕捉される場合や散乱される場合なども取り扱うことが可能になり、そうした波動パケットの運動区分について準線形理論を超える範囲まで整理することができ、駆動率も議論することができた[4]。

### 揺動捕捉の実験検証

マイクロ揺動がメゾスケール電場やメゾスケール渦構造に捕捉される可能性は、理論的に長く指摘されてきた、それは、メゾスケール構造を作る機構の素過程となっている。しかしながら、実験ではほとんど観測されて来なかった。

基礎実験プラズマ装置 PANTA(Plasma Nonlinear Turbulence Analysis)では、ドリフト不安定性が発生し、同時に帯状流とメゾスケール渦が共存する様なプラズマ状態を実現することができる。その状態では、流れや渦よりさらに微細な揺動が共存している。先進揺動解析方法を駆使して、渦の中に捕捉されたマイクロ揺動を観測し、そのマイクロ揺動塊が渦構造の中を回転運動していることや、捕捉条件が外れる様相を観測することに成功した[5]。マイクロ揺動塊の運動について観測結果と理論的予測を比較するとともに、揺動と帯状流や渦とのエネルギー授受を計測し、授受率を定量的に把握することにも成功している。多スケール乱流の基本的素過程を実験的に計測することに成功して、新境地へと研究を進めることができたと言ってよさそう。

### 乱流揺動に起因する輸送障壁のリミットサイクル

乱流揺動と半径方向電場と平均勾配の結合によって、輸送障壁の発生条件近傍でリミットサイクルが生じうることはかねてから理論的に指摘されており[例えば S.-I. Itoh, et al.: Phys. Rev. Lett. **67**, 2485 (1991)]、この描像は、ELM の一種で dither と呼ばれる現象のモデルとして発展している。さらに別種のメゾスケール流が共存したらどの様な動的応答が現れるかを調べることは、H-モード輸送障壁の動的応答を理解する上で必要なテーマである。実際、dither が起きる前に別種のメゾスケール揺動である GAM (geodesic acoustic mode) が励起されている場合について実験結果を精密に解析した[6]。その結果、GAM が励起されている状態からリミットサイクル状態へと遷移していることが確認された。その機序として、GAM に移送されていた乱流エネルギーが、リミットサイクルに現れるメゾスケール流れ場に供給されるという選択現象が起きているという描像が提示された。また、GAM が励起されている位置とリミットサイクルの流れ場が現れる位置とは、(重なる部分もあるが)一致していないので、エネルギーの移送が非局所的過程を通じて起きていることも示唆されている。

## (3) 内部輸送障壁の動的応答

### 問題の焦点

内部輸送障壁は、多様な実験手法で多種のものが実現されており、その発生・維持機構にも多様なものがあるだろう(レビューの例としては S.-I. Itoh, et al.: J. Nucl. Mater. **220-222**, 117 (1995))。ここで取り上げるものは、プラズマ内部で、圧力勾配が急峻な領域と平坦な領域とが、狭い領域を境に接している様な場合である。しばしば通用している説明は、内部輸送障壁では温度勾配が大きくそのため半径方向電場が強くなり、その不均一性によって乱流が抑制されるために内部輸送障壁(ITB)ができるという説明である。もっともらしく思う向きもあるが、発生機構を考えると(矛盾すると言っているかもしれないが)少なくとも不十分である。問題点は、L-モードから ITB が成長を始める時刻のプラズマを考えればわかる。その時点ではプラズマ分布はL-モードと変わらず、乱流を抑制する強い電場もできていないはずであり、乱流輸送が抑制される理由がない。ITB が形成される機序を理解するためにも、ITB の動的応答を研究する必要がある。

### アバランチによる熱輸送

乱流輸送について通常考慮されるのは、相関長や相関時間の短いマイクロ揺動により引き起こされるものが考慮される。しかし、乱流輸送はそうした揺動だけで引き起こされているわけではない。マイクロ揺動の塊と、背景プラズマ分布の変化のペアが、パリステイックに長い相関長をもってプラズマを伝播する現象がある。仮にアバランチと呼んでおく。このタイプの揺動は、

同一箇所での揺動のみに着目したオイラー的な相関では相関長・時間が短い、離れた位置・時間での揺動の関係に着目するラグランジュ的な相関を観測すると乱流塊の相関長・時間が長く、結果として相当なエネルギー輸送に寄与することが理論的に指摘されている。(丁寧な説明は成書[7]に述べられている。)マイクロ揺動の塊がバリステックに伝播する現象は知られていたが、本研究では、JT-60Uの揺動データを再検討し、バリステックな伝播が起きていることを確認し、それに伴う電子エネルギー流束を評価することができた[8]。プラズマの加熱入力を増した時、バリステックな伝播成分によるエネルギー損失が増加していることを示し、高加熱密度でこうしたプロセスが重要になることを示した。

関連する時事象として、トカマクの鋸歯状振動が起きた場合、中央部から周辺へ、熱パルスだけではなく揺動の塊などが搬送され、付随してプラズマを回転させるトルクもパルス状に伝播することを実験的に確認した[9]。

#### アバランチとITBの生成・消滅

アバランチが相当量のエネルギーをプラズマ中心部から周辺へと運ぶことだけでなく、それがITBの生成・消滅のきっかけをなしていることが発見された[10]。この研究で、ITBを発生させる経験的な手順に沿って行われた実験について再吟味した。この一連の実験では、追加加熱入力が低い場合ITBができず、追加加熱入力が高くなるとITBが形成されている。揺動データを分析すると、ITBができない場合、アバランチ輸送が発生している一方、加熱入力が高い場合、アバランチが途中で消失し、それに伴って内部輸送障壁が成長することが発見された。これは偶然の一致とは考えられない。その理由は、次の様な観測から導かれる。内部輸送が発達する途中の状況ではITBの境面から外部へ流出する総エネルギー流束が減っている。同時に、アバランチで運ばれていた電子エネルギー流束の評価量も減っている。後者は、前者の半分程度に相当し、エネルギーバランスから考えて因果関係があると言えるだろう。加熱エネルギーが十分大きくないと、一時消失したアバランチが再度現れ、そこでITBは消失に向かう。

#### (4) まとめ

以上に紹介した本研究の成果は、輸送障壁の動的応答を研究することにより、従来のモデルとは異なる新たな描像や因果関係を示したものであり、今後の研究の方向を決めるものである。大きな成果が上がったと言って良い。

#### 引用文献

- K. Itoh and K. Kamiya: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 023501 (2024)
- K. Itoh and K. Kamiya: 'Reconsideration of ELMs', invited talk at 7th Asia-Pacific Conf. on Plasma Physics (Nagoya, Nov., 2023) CD-5-I2
- K. Itoh and K. Kamiya: J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 025001 (2024)
- M. Sasaki, et al.: Phys. Plasmas **28**, 102304 (2021)
- H. Arakawa, et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **65**, 115002 (2023)
- T. Kobayashi, et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **64**, 114002 (2022)
- 伊藤早苗、伊藤公孝「プラズマ乱流輸送の基礎」(岩波、2023)
- F. Kin, K. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **63**, 016015 (2023)
- J. Zhang, et al: Phys Plasmas **30**, 082305 (2023)
- F. Kin, K. Itoh, et al., Sci. Rep. **13**, 19748 (2023)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Arakawa Hiroyuki, Sasaki Makoto, Inagaki Shigeru, Lesur Maxime, Kosuga Yusuke, Kobayashi Tatsuya, Kin Fumiyo, Yamada Takuma, Nagashima Yoshihiko, Fujisawa Akihito, Itoh Kimitaka	4. 巻 65
2. 論文標題 Identification of trapping finer-scale fluctuations in a solitary vortex in linear magnetized plasma	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 115002 ~ 115002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/acfb3	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 該当する

1. 著者名 Kin F., Itoh K., Bando T., Shinohara K., Oyama N., Terakado A., Yoshida M., Sumida S.	4. 巻 13
2. 論文標題 Impact of avalanche type of transport on internal transport barrier formation in tokamak plasmas	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 19748/1~19748/9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-46978-0	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 Itoh Kimitaka, Kamiya Kensaku	4. 巻 93
2. 論文標題 On the Role of Peeling-Ballooning Mode in Triggering the Type-I ELMs	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 23501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.023501	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 Itoh Kimitaka, Kamiya Kensaku	4. 巻 93
2. 論文標題 Why the ELM-Control-Coils are Effective in Suppressing Type-I ELMs	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 25001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.025001	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 Jajima Yuki, Sasaki Makoto, Ishikawa Ryohtaroh T, Nakata Motoki, Kobayashi Tatsuya, Kawachi Yuichi, Arakawa Hiroyuki	4. 巻 65
2. 論文標題 Estimation of 2D profile dynamics of electrostatic potential fluctuations using multi-scale deep learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 125003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/acff7f	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 KODAHARA Takumi, SASAKI Makoto, KAWACHI Yuichi, JAJIMA Yuki, KOBAYASHI Tatsuya, YAMADA Takuma, ARAKAWA Hiroyuki, FUJISAWA Akihito	4. 巻 18
2. 論文標題 Analysis of Turbulence Driven Particle Transport in PANTA by Using Multi-Field Singular Value Decomposition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.1202036	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 Sasaki M., Kasuya N., Kawachi Y., Kobayashi T., Nishizawa T., Arakawa H., Yamada T., Fujisawa A.	4. 巻 30
2. 論文標題 Nonlinear simulation of resistive drift waves in cylindrical magnetized plasmas in the presence of symmetry breaking particle source	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 82302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0150748	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 ZHAO Kaijun, NAGASHIMA Yoshihiko, GUO Zhibin, DIAMOND Patrick H, DONG Jiaqi, YAN Longwen, ITOH Kimitaka, et al.	4. 巻 25
2. 論文標題 Effects of sawtooth heat pulses on edge flows and turbulence in a tokamak plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Science and Technology	6. 最初と最後の頁 015101 ~ 015101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2058-6272/ac7c60	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 該当する

1. 著者名 Kin F., Itoh K., Bando T., Shinohara K., Oyama N., Yoshida M., Kamiya K., Sumida S.	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 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016015 ~ 016015
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 Kamiya Kensaku, Itoh Kimitaka, Aiba Nobuyuki, Oyama Naoyuki, Honda Mitsuru, Isayama Akihiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Unveiling the structure and dynamics of peeling mode in quiescent high-confinement tokamak plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 141-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00644-x	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 Sasaki M., Arakawa H., Kobayashi T., Kin F., Kawachi Y., Yamada T., Itoh K.	4. 巻 28
2. 論文標題 Interactions of drift wave turbulence with streamer flows in wave-kinetic formalism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102304-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0059839	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 Sasaki M., Itoh K., McMillan B. F., Kobayashi T., Arakawa H., Chowdhury J.	4. 巻 28
2. 論文標題 Formation of density corrugations due to zonal flow in wave-kinetic framework	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112304-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0055777	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 該当する



[学会発表] 計12件(うち招待講演 4件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kimitaka Itoh
2. 発表標題 Reconsideration of ELMs
3. 学会等名 Edge Physics Forum at Max-Planck-Institute for Plasma Physics (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kimitaka Itoh, Kensaku Kamiya
2. 発表標題 Reconsideration of ELMs (Edge-Localized-Modes)
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木真, 仲田資季, 小林達哉, 河内裕一, 西澤敬之, 伊藤公孝
2. 発表標題 巨視的電場存在下における帯状流・乱流相互作用
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木真
2. 発表標題 波動運動論と乱流構造形成
3. 学会等名 第26回若手科学者によるプラズマ研究会(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐々木真, 仲田資季, 小林達哉, 河内裕一, 西澤敬之, 伊藤公孝
2. 発表標題 巨視的電場存在下における帯状流・乱流相互作用
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木真, 仲田資季, 小林達哉, 河内裕一, 西澤敬之, 伊藤公孝
2. 発表標題 波動運動論に基づく大域電場中の乱流・帯状流相互作用
3. 学会等名 閉じ込め輸送研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木真, 伊藤公孝, B. F. McMillan, 小林達哉, 荒川弘之, J. Chowdhury
2. 発表標題 帯状流による階段状密度分布の形成
3. 学会等名 物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木真, 伊藤公孝, B. F. McMillan, 小林達哉, 荒川弘之, J. Chowdhury
2. 発表標題 波動運動論による帯状流・乱流間相互作用
3. 学会等名 閉じ込め・輸送研究会2021「プラズマの定量的予測と制御に向けたトロイダルプラズマの燃焼閉じ込め・輸送に関する研究」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木真、仲田資季、伊藤公孝、B. F. McMillan、小林達哉、荒川弘之、J. Chowdhury
2. 発表標題 トロイダルプラズマにおける帯状流による乱流塊の空間伝播・局在化現象
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

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 (招待講演) (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 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊藤 早苗、伊藤 公孝	4. 発行年 2023年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 206
3. 書名 プラズマ乱流輸送の基礎	

〔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
研究分担者	神谷 健作 (Kamiya Kensaku)  (60360426)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・上席研究員  (82502)	
研究分担者	佐々木 真 (Sasaki Makoto)  (70575919)	日本大学・生産工学部・准教授  (32665)	

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			
ドイツ	マックスプランクプラズマ物理学研究所			
中国	西南物理学研究所	東華理工大学	西南交通大学	
米国	UCSD			
英国	Warwick University			
インド	Institute for Plasma Research			