

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06994

研究課題名（和文）プラズマ乱流におけるストリーマーの3次元構造と動的応答

研究課題名（英文）Three-dimensional structure and dynamic response of streamers in plasma turbulence

研究代表者

山田 琢磨（Yamada, Takuma）

九州大学・基幹教育院・教授

研究者番号：90437773

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：メソスケール構造の一種であるストリーマーの理解は、プラズマ乱流において重要な研究である。九州大学の直線プラズマ装置PANTAにおいて、ストリーマーと、その構造形成に重要な役割を果たす媒介波、およびストリーマーを形作る搬送波を3次元的に計測して軸方向構造を明らかにした。また新しい解析手法により、周方向での非線形結合の確認や、周方向波数の局所空間情報を部分的に得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合発電の実現にはプラズマ乱流の理解し制御することが求められる。中でもメソスケール構造は乱流輸送に大きな影響を与え、例えばメソスケール構造の一種であるストリーマー構造はプラズマ内の輸送を増大させ、閉じ込めを劣化させてしまう。本研究では直線プラズマに発生するストリーマー構造を数多くの計測点や様々な解析手法によって3次元的に観測し、その詳細を明らかにした。特にこれまでのスペクトル解析・バイスペクトル解析を発展させた新しい解析手法はストリーマーの構造を明らかにするだけでなく、プラズマ乱流の精密計測実験の先駆けとなり大いに波及効果を生み出す。

研究成果の概要（英文）：In plasma turbulence research, it is important to understand the nature of streamer, which is one of the meso-scale structures. On linear plasma device, PANTA, of Kyushu University, streamer, its mediator, which has an important role for streamer formation, and its carrier waves, which form the streamer structure, have been observed three dimensionally and their axial structures were clarified. In addition, by using new analyzing methods, nonlinear coupling in the azimuthal direction was confirmed, and local information of the azimuthal wave number was partially obtained.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：乱流計測 非線形結合 ストリーマー

1. 研究開始当初の背景

メソスケールの一種であるストリーマーの理解と制御は、核融合プラズマの学理基盤となるプラズマ乱流の理解に必須の研究である。ストリーマーや帯状流などのメソスケール構造がドリフト波などのマイクロ揺動と非線形的に結合するプラズマ乱流の新しい描像は理論・シミュレーションによって予測されていたが、実験的には2004年に初めて帯状流が日本の核融合科学研究所で発見され(引用文献)、ストリーマーとその発生の起因となる媒介波は2008年に研究代表者によって九州大学の直線プラズマ装置(LMD-U)を用いて世界で初めて発見された(引用文献)。ストリーマーは帯状流と違って径方向に長く伸びた構造を持つため、径方向の輸送を増大し、プラズマの閉じ込めに深刻な影響を及ぼす。そのため、ストリーマーの構造解析や発生条件を探ることは核融合プラズマ研究において非常に重要である。研究代表者のこれまでの研究は、低温で近接性に優れた直線プラズマならば、トラスプラズマでは困難な多チャンネルプローブによる乱流計測が可能だという着想からストリーマーの発見に結びつき、直線プラズマ中のストリーマーや媒介波の構造を明らかにするなど、プラズマ乱流の精密物理実験の先駆として世界を大きくリードしてきた。しかしこれまでの研究は、直線プラズマを磁力線(軸)方向の一様性を仮定した準2次元系として扱ってプラズマの2次元断面内の乱流構造を探っていたため、より詳細にプラズマの非均一非局所乱流の全体像を観測するためには乱流揺動の3次元構造の計測が必要である。準2次元を仮定した局所乱流シミュレーションと全体を解くグローバルシミュレーションとの比較が示すように、準2次元系では乱流は逆カスケードが支配的となり、順カスケードが隠されるために乱流輸送が完全には理解できない。プラズマ乱流内のストリーマーなどのメソスケール構造の更なる理解のためには、3次元的なプラズマ乱流計測と着眼点の新しい解析手法が求められていた。

2. 研究の目的

LMD-Uの後継である九州大学の直線プラズマ装置PANTAを用いてストリーマーと、その構形成に重要な役割を果たす媒介波、およびストリーマーを形作る搬送波を3次元的に計測し、また既存のスペクトル解析・バイスペクトル解析を発展させた新しい解析手法を開発して、ストリーマー構造・媒介波・搬送波の詳細な構造を様々な手法で観測した。

(1) ストリーマー構造・媒介波・搬送波の軸方向構造と三者の関係について詳しく解析するために軸方向に並んだプローブを用い、相関解析をすることでストリーマー構造・媒介波・搬送波の軸方向構造について解析を行った。さらにストリーマー構造の包絡線を調べることによって、結果の妥当性を確認した。

(2) これまでの解析方法では、時間方向と周方向の2次元計測を行った後、揺動を周方向のフーリエ変換によって周方向モード数に分解し、各モード数がマッチング条件を満たす組み合わせはその周方向モード間に非線形結合が当然あるものとみなして抽出し、周波数方向でのバイスペクトル解析のみを行っていた。そこで本研究では逆に、ある時刻でのタイムスライス抽出し、その中で周方向モード数間の非線形結合を詳細に調べるために周方向のバイスペクトル解析を行った。媒介波を中心に解析を行い、媒介波とストリーマー構造の包絡線の位相差をバイフェーズ解析により求めた。

(3) メソスケール構造の発生と機構は理論・シミュレーション研究においては、ブラソフ方程式やジャイロ運動論と同じ数理構造を持つ波動運動論を元に導き出されるが、このモデルは実空間と波数空間からなる位相空間上において計算されている。しかし実験によって得られる情報は実空間における測定点が足りない、あるいは測定点が十分でもスペクトル解析によって波数は空間的に積分・平均化されてしまうことが多く、位相空間上で波動運動論モデルと比較することは困難である。そこで本研究では実験的に乱流の位相空間解析を行うことを目指して、波数の局所空間情報を求めることを試みた。そのためにまずは周方向に数値フィルターをかけてから波数スペクトルを計算するという解析を行った。

3. 研究の方法

九州大学の直線プラズマ実験装置PANTAを用いてストリーマーが発生する実験を行い、多数のチャンネルを持つ周方向静電プローブアレーでイオン飽和電流の揺動(電子密度揺動に相当)を計測することで、ストリーマー構造とその発生に重要な役割を果たす媒介波、またストリーマーを形作る搬送波(ドリフト波)を観測し、両者の間に存在する非線形結合について複数のバイスペクトル解析を用いて詳細を明らかにした。PANTAは軸方向の長さが $z = 4000$ mm、内径 $r = 450$ mmの直線装置である。ソース部に付けられた内径95 mmのガラス管にRFアンテナで3 kW、

周波数 7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生させることで真空容器内部に直径が約 100 mm の直線プラズマが発生する。ストリーマー構造は、放電条件を調整することで発生する。具体的には、軸方向に 0.09 T の磁場を発生させ、内部に封入したアルゴンの圧力を 1.5 mTorr に調整することで、ドリフト波乱流内にストリーマー構造が形成される。このとき中心部の密度は 10^{19} m^{-3} 程度、電子温度は $3 \pm 0.5 \text{ eV}$ のおおよそ平坦な分布である。軸方向 $z = 1885 \text{ mm}$ 、半径 $r = 40 \text{ mm}$ の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブが設置されている。このプローブは精密に周方向にプローブが配置されているため、特に精度の良い乱流の周方向モード数を観測するが可能である。

(1) 軸空間構造を解析するために周方向 64 チャンネルプローブに加えて、軸方向 $z = 1625 \text{ mm}$ と 1375 mm 、半径 $r = 40 \text{ mm}$ の位置でも同時に計測を行った。ストリーマーの搬送波となるドリフト波や、構造形成に関わる媒介波は個々がある周方向モード数と周波数を持つ単一の揺動であるため、これらの構造解析には相互相関解析を用いた。2 つの揺動のクロススペクトルの位相情報はこれらの位相差を表すので、ある参照波を基準として用いれば揺動の位相構造が特定できる。ストリーマー自体は搬送波が周方向に自己収束した構造体であり、その包絡線は媒介波と位相関係を保持する。つまり搬送波が形成する包絡線構造は媒介波と同じ周方向モード数と周波数を持つことになる。そのため、ストリーマーの位相構造を特定するためには、媒介波を参照波として、媒介波と 2 つの搬送波のバイスペクトル解析を行えばよい。この場合、バイフェーズが搬送波の包絡線（ストリーマー構造）と媒介波の間の位相差を表す。

また、バイスペクトル解析で得られた結果（ストリーマー構造の軸方向モード数など）の妥当性を確認するために、自己収束した構造体であるストリーマー構造の包絡線を求め、同時刻での各測定点でのストリーマー構造の包絡線を直接比較した。包絡線の抽出には、長時間平均を引くことであらかじめ低周波数成分を除去した後に、ヒルベルト変換を用いた。

(2) 周方向での非線形結合を確認するため、ある時刻でのタイムスライス抜き出し、周方向空間での各モード数間のバイフェーズを計算した。隣り合うタイムスライスではバイフェーズの計算結果がほぼ似通ったものになるため、十分に時刻が離れたタイムスライスをいくつも抜き出し、その平均を取ることでバイフェーズの計算結果とした。ストリーマー構造は搬送波が周方向に自己収束した構造体であり、その包絡線は媒介波と位相関係を保持する。つまり搬送波が形成する包絡線構造は媒介波と同じ周方向モード数と周波数を持つことになる。そのため、ストリーマーの位相構造を特定するためには、媒介波を参照波として、媒介波と 2 つの搬送波のバイスペクトル解析を行い、バイフェーズを計算すればよい。この時、バイフェーズが搬送波の包絡線（ストリーマー構造）と媒介波の間の位相差を表すことになる。

(3) 周方向波数の局所空間情報を計測することを目指し、周方向に並んだデータに数値フィルターをかけてから周方向波数スペクトルの計算を行った。まずは周方向 64 チャンネルのうちおよそ半分の領域を通過させ、反対側の領域を遮断し、境界はなだらかな関数で繋ぐようなフィルターを適用させた。フィルター適用後に周方向にフーリエ変換を行い、各周方向モードの強度の時間発展を求めた。求めた周方向波数は概ねフィルタリングされた領域の情報となり、フィルターの幅を調整することでさらに局所的な情報も取得可能となることが期待される。またフィルターの通過領域をずらすことで周方向モードの空間依存性についても調査した。

4. 研究成果

(1) PANTA にストリーマーが発生している状態（磁場 0.09 T、圧力 1.5 mTorr）で $z = 1885 \text{ mm}$ 、 $r = 40 \text{ mm}$ の周方向 64 チャンネルプローブと、 $z = 1625/1375 \text{ mm}$ 、 $r = 40 \text{ mm}$ 、周方向角度 0 の合計 3 つのプローブを用い、ストリーマーの包絡線構造、媒介波、搬送波の軸方向位相構造を観測した。媒介波は周方向モード数 $m_1 = 1$ 、 $f_1 = -1.2 \text{ kHz}$ で、径方向 $r = 30 \text{ mm}$ に節構造を持つ波であった。搬送波には、ドリフト波の中から代表として振幅が強く媒介波との結合が強い $m_2 = 2$ 、 $f_2 = 7.8 \text{ kHz}$ の波と $m_3 = 3$ 、 $f_3 = 6.6 \text{ kHz}$ の波を選んだ。ストリーマーの包絡線の位相構造を求めるために、周方向 64

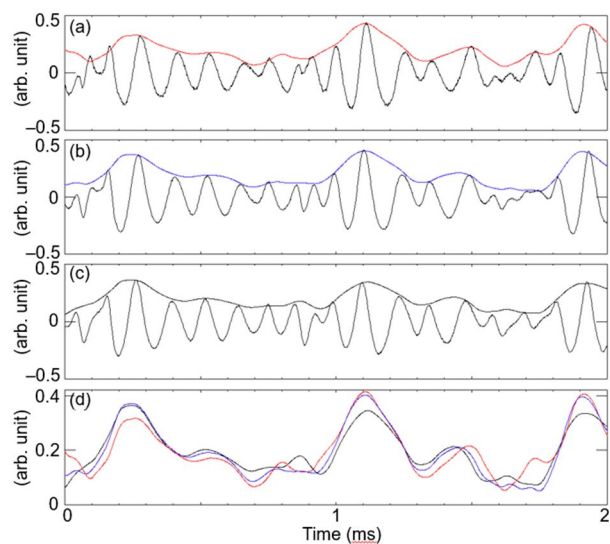


図 1. (a) $z = 1885 \text{ mm}$ 、(b) $z = 1625 \text{ mm}$ 、(c) $z = 1375 \text{ mm}$ におけるストリーマー構造の時間発展（低周波成分除去後）とその包絡線。(d) (a)-(c) の包絡線を重ねたもの。軸方向に位相が、搬送波は変化しているが、ストリーマー構造（包絡線）は変化していないことが分かる。

チャンネルプローブで媒介波を測定し、残りの軸方向に並ぶプローブで搬送波を測定した。結果として、媒介波とストリーマーの包絡線構造はともに位相差が軸方向にほぼ0で、軸方向モード数 n がともに0であることが示された。一方、搬送波についても相互相関解析により軸方向構造を求めると、結果は軸方向モード数がともに $n = -1$ と求まった。ここで負のモード数は、装置のエンド側からソース側へ向かう伝播方向である。これらの結果は、媒介波と搬送波が軸方向モード数についての3波結合条件 ($n: 0 - 1 = -1$) を満たすことから、妥当と言える。佐々木氏(研究協力者)の数値研究によると、搬送波の軸方向モード数が $n = -1$ であることは軸方向シアフローの影響であると示唆されている。

さらに結果の妥当性を確認するために、軸方向に並んだ各測定点でのストリーマー構造の包絡線を同時刻で直接比較した。図1に示すように、搬送波の位相は軸方向で変化するが、ストリーマー構造の包絡線の位相は軸方向で正確に一致した。以上のことから、ストリーマーの包絡線構造と媒介波は軸方向モード数 $n = 0$ を持つのに対し、搬送波は広い周方向モード数・周波数領域で軸方向モード数 $n = -1$ を持つことが明らかになった。

(2) PANTAのストリーマー発生放電で周方向64チャンネルプローブにより電子密度揺動を測定し、ストリーマーの包絡線構造、媒介波、搬送波を観測した。媒介波は(1)と同じく周方向モード数 $m_1 = 1$ 、 $f_1 = -1.2$ kHzである。図2は密度揺動のタイムスライス抜き出し、周方向モード数 $(1, m, m + 1)$ 間のバイフェーズ値を計算したものである。初めの1は媒介波の周方向モード数を示し、 m と $m + 1$ は隣り合う周方向モード数を持つ媒介波である。結果は、 $(1, 1, 2)$ の結合のバイフェーズ値のみ他の結合と大きく異なる値となり、他の結合はバイフェーズ値がほぼ変わらなかった。この結果の妥当性を確認するために、実際に密度揺動の時空間構造から媒介波成分を消去し、隣り合う周方向モード数のみを抜き出して重ね合わせたところ、 $m = 1$ & 2以外の重ね合わせの結果は媒介波の山の位置にほぼ揺動が収束して存在しストリーマー構造を形作っていることが確認できたが、 $m = 1$ & 2を重ね合わせた場合は、揺動の収束する位置が他と全く異なり、ストリーマー構造の形成に全く貢献していないことが分かった。よって $(1, 1, 2)$ の結合はストリーマー構造の形成に寄与せず、むしろ阻害していることが分かった。

周方向モード数に分解したバイフェーズ解析で非常に小さい振幅のモードまで詳細を調べ、各モードの振幅の大きさから元々の親であるモードを推定すると、2次元スペクトル図の高 m 低 f に向かう結合は構造の形成に寄与しているが、低 m 高 f に向かう結合は寄与していないと言えることが分かった。つまり、2次元スペクトル図における結合の方向により、ストリーマー構造の形成に貢献するかが決まってくる可能性が示唆された。

(3) PANTAのストリーマー発生放電で周方向64チャンネルプローブにより電子密度揺動を測定し、ストリーマーの包絡線構造、媒介波、搬送波を観測した。(1)

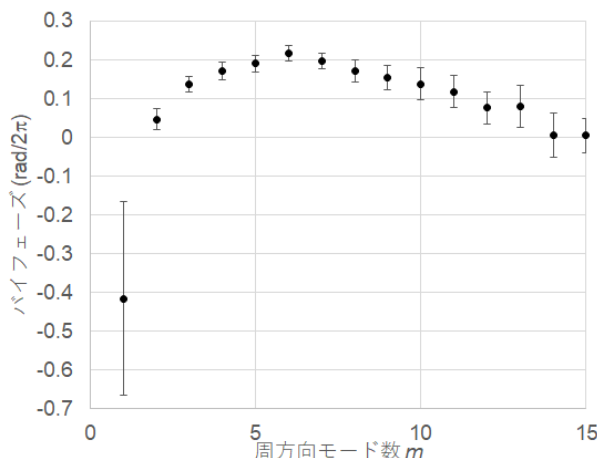


図2. 媒介波と搬送波間のバイフェーズ、すなわち媒介波とストリーマー構造の包絡線との位相差。横軸が m のとき、媒介波(周方向モード数1)と、搬送波(周方向モード数 m および $m + 1$) 間のバイフェーズ値を示す。 $(1, 1, 2)$ の結合のバイフェーズ値のみ、他のバイフェーズ値と離れた値を持つことが分かった。

(3) PANTAのストリーマー発生放電で周方向64チャンネルプローブにより電子密度揺動を測定し、ストリーマーの包絡線構造、媒介波、搬送波を観測した。(1)

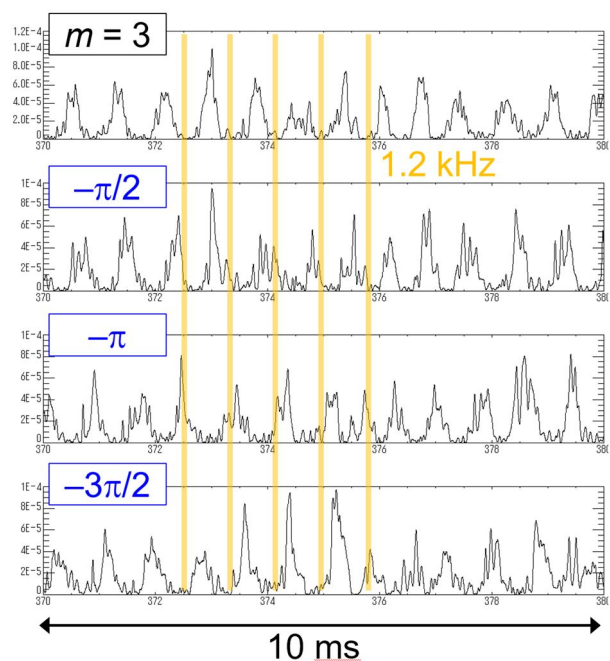


図3. PANTAのストリーマー発生時に周方向にフィルターをかけてから求めた周方向モード数 $m = 3$ (搬送波)の強度の時間発展。一番上の図に対して下図はフィルター適用位置をそれぞれ $-\pi/2$, $-\pi$, $-3\pi/2$ ずらした結果である。

と同じく媒介波は周方向モード数 $(m_1, f_1) = (1, -1.2 \text{ kHz})$ で、最も振幅が大きく媒介波との結合が強かった搬送波は、 $(m_2, f_2) = (2, 7.8 \text{ kHz})$ や $(m_3, f_3) = (3, 6.6 \text{ kHz})$ の波であった。周方向波数の局所空間情報を得ることを目指し、まずは周方向のおよそ半分の領域のみを通すフィルターを適用してから周方向にフーリエ解析を行い、各周方向モードの時間発展を調べた。図3は搬送波である周方向モード数 $m = 3$ の強度の時間発展である。一番上の図に対してフィルターを適用した周方向角度をそれぞれ $-\pi/2$, $-\pi$, $-3\pi/2$ ずらした結果も並べた。図を見ると、 $m = 3$ の強度が大きい領域がストリーマーと同じ周波数、つまり -1.2 kHz で周方向に伝播しているのが分かり、ストリーマーの乱流の塊が各フィルターを通過していく様子うかがえる。さらに通過中に細かい強度の増減も見られ、ライフタイムの短い現象が起きていることが示唆される。結論として、この新しい解析手法は非常に有用であり、更なる発展が期待できることが確認できた。今後も、波数の局所情報の詳細を求めることを目指し、乱流の位相空間解析を進めていく。

< 引用文献 >

- A. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 165002 (2004)
- T. Yamada *et al.*, Nature Phys. **4**, 721 (2008)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

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 ~ 102304
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 Kawachi Y., Inagaki S., Sasaki M., Kosuga Y., Yamasaki K., Kobayashi T., Kin F., Yamada T., Arakawa H., Nagashima Y., Moon C., Kasuya N., Fujisawa A.	4. 巻 28
2. 論文標題 Dynamic interaction between fluctuations with different origins in a linear magnetized plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112302 ~ 112302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0065887	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 Kawachi Yuichi, Inagaki Shigeru, Kin Fumiyoshi, Yamasaki Kotaro, Kosuga Yusuke, Sasaki Makoto, Nagashima Yoshihiko, Yamada Takuma, Arakawa Hiroyuki, Kasuya Naohiro, Moon Chanho, Hasamada Kazunobu, Fujisawa Akihide	4. 巻 62
2. 論文標題 Observation of spatiotemporal structures of temperature fluctuations by using of a statistical phase detection method in a linear magnetized plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 055011 ~ 055011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab8132	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 Kobayashi T-K, Fujisawa A, Nagashima Y, Moon C, Yamasaki K, Nishimura D, Inagaki S, Yamada T, Kasuya N, Kosuga Y, Sasaki M, Kawachi Y	4. 巻 63
2. 論文標題 Correlation-estimated conditional average method and its application on solitary oscillation in PANTA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 032001 ~ 032001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/abd980	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., Fujisawa A., Itoh K., Kosuga Y., Sasaki M., Inagaki S., Nagashima Y., Yamada T., Kasuya N., Yamasaki K., Hasamada K., Zhang B. Y., Kawachi Y., Arakawa H., Kobayashi T., Itoh S.-I.	4. 巻 26
2. 論文標題 Observations of radially elongated particle flux induced by streamer in a linear magnetized plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 042306 ~ 042306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5093218	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 KAWACHI Yuichi, INAGAKI Sigeru, HASAMADA Kazunobu, YAMASAKI Kotaro, KIN Fumiyoshi, KOSUGA Yusuke, SASAKI Makoto, NAGASHIMA Yoshihiko, KASUYA Naohiro, YAMADA Takuma, ZHANG Boyu, FUJISAWA Akihide	4. 巻 14
2. 論文標題 Estimation of Particle Flux Driven by Coherent Mode Using of Statistical Conditional Averaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402090 ~ 1402090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1402090	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 Arakawa H., Sasaki M., Inagaki S., Kosuga Y., Kobayashi T., Kasuya N., Yamada T., Nagashima Y., Kin F., Fujisawa A., Itoh K., Itoh S.-I.	4. 巻 26
2. 論文標題 Roles of solitary eddy and splash in drift wave/zonal flow system in a linear magnetized plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 052305 ~ 052305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5094577	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 Arakawa Hirotyuki, Inagaki Shigeru, Kosuga Yusuke, Sasaki Makoto, Kin Fumiyoshi, Hasamada Kazunobu, Yamasaki Kotaro, Kobayashi Tatsuya, Yamada Takuma, Nagashima Yoshihiko, Fujisawa Akihide, Kasuya Naohiro, Itoh Kimitaka, Itoh Sanae I	4. 巻 14
2. 論文標題 Ion temperature measurement by laser induced fluorescence spectroscopy in panta	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1450 ~ 1454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22962	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 Yamasaki K., Fujisawa A., Nagashima Y., Moon C., Inagaki S., Kasuya N., Kosuga Y., Sasaki M., Yamada T.	4. 巻 126
2. 論文標題 Fourier-rectangular function analysis for cylindrical plasma images	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 043304 ~ 043304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5108717	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 Zhang Boyu, Inagaki Shigeru, Hasamada Kazunobu, Yamasaki Kotaro, Kin Fumiyoshi, Nagashima Yoshihiko, Yamada Takuma, Fujisawa Akihito	4. 巻 61
2. 論文標題 Study of turbulence intermittency in linear magnetized plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 115010 ~ 115010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab434f	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 Makoto, KASUYA Naohiro, KOSUGA Yusuke, KOBAYASHI Tatsuya, YAMADA Takuma, ARAKAWA Hiroyuki, INAGAKI Shigeru, ITOH Kimitaka	4. 巻 14
2. 論文標題 Turbulence Simulation on Zonal Flow Formations in the Presence of Parallel Flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401161 ~ 1401161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1401161	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 Yamasaki K., Fujisawa A., Nagashima Y., Moon C., Inagaki S., Yamada T.	4. 巻 91
2. 論文標題 Tomography system for two-dimensional observation of fluctuation in magnetized plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033502 ~ 033502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5144480	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., Fujisawa A., Kosuga Y., Sasaki M., Yamada T., Inagaki S., Itoh S.-I., Kobayashi T., Nagashima Y., Kasuya N., Arakawa H., Yamasaki K., Hasamada K.	4. 巻 25
2. 論文標題 Extraction of nonlinear waveform in turbulent plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 062304 ~ 062304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5027124	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, ITOH Sanae-I., NAGASHIMA Yoshihiko, YAMADA Takuma, KOSUGA Yusuke, FUJISAWA Akihide	4. 巻 13
2. 論文標題 Symmetry-Breaking of Turbulence Structure and Position Identification in Toroidal Plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1102113 ~ 1102113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.1102113	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 Fujisawa A., Nagashima Y., Yamasaki K., Inagaki S., Yamada T., Sasaki M.	4. 巻 26
2. 論文標題 Combined methods of moment vectors and Stokes parameters to analyze tomographic image of plasma turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012305 ~ 012305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5048970	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 Tanabe H., Yamada T., Watanabe T., Gi K., Inomoto M., Imazawa R., Gryaznevich M., Scannell R., Conway N.J., Michael C., Crowley B., Fitzgerald I., Meakins A., Hawkes N., McClements K.G., Harrison J., O'Gorman T., Cheng C.Z., Ono Y., The MAST Team	4. 巻 57
2. 論文標題 Investigation of merging/reconnection heating during solenoid-free startup of plasmas in the MAST Spherical Tokamak	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 056037 ~ 056037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa6608	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 Kobayashi T., Inagaki S., Kosuga Y., Sasaki M., Nagashima Y., Yamada T., Arakawa H., Kasuya N., Fujisawa A., Itoh S.-I., Itoh K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Phenomenological Classification of Turbulence States in Linear Magnetized Plasma PANTA	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401019 ~ 1401019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.12.1401019	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., Kasuya N., Toda S., Yamada T., Kosuga Y., Arakawa H., Kobayashi T., Inagaki S., Fujisawa A., Nagashima Y., Itoh K., Itoh S.-I.	4. 巻 -
2. 論文標題 Multiple-Instabilities in Magnetized Plasmas with Density Gradient and Velocity Shears	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401042 ~ 1401042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.12.1401042	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., Kasuya N., Itoh K., Toda S., Yamada T., Kosuga Y., Nagashima Y., Kobayashi T., Arakawa H., Yamasaki K., Fujisawa A., Inagaki S., Itoh S.-I.	4. 巻 24
2. 論文標題 Topological bifurcation of helical flows in magnetized plasmas with density gradient and parallel flow shear	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112103 ~ 112103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5000343	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, Itoh Sanae-I., Nagashima Yoshihiko, Yamada Takuma, Fujisawa Akihide	4. 巻 87
2. 論文標題 Position Identification of Measurement for the Study of Symmetry-Breaking of Turbulence Structure in Toroidal Plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 025002 ~ 025002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.025002	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 Kanio S., Inomoto M., Yamasaki K., Yamada T., Cheng C. Z., Ono Y.	4. 巻 25
2. 論文標題 Magnetic island dynamics in magnetic reconnection in UTST experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012126 ~ 012126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5006092	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 Yamada Takuma, Inagaki Shigeru, Sasaki Makoto, Nagashima Yoshihiko, Kin Fumiyoshi, Arakawa Hiroyuki, Kobayashi Tatsuya, Yamasaki Kotaro, Kasuya Naohiro, Kosuga Yusuke, Fujisawa Akihide, Itoh Kimitaka, Itoh Sanae-I.	4. 巻 87
2. 論文標題 Three-Dimensional Structure of the Streamer in Linear Plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034501 ~ 034501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.034501	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 ARAKAWA Hiroyuki, SASAKI Makoto, INAGAKI Shigeru, LESUR Maxime, KOSUGA Yusuke, KOBAYASHI Tatsuya, KIN Fumiyoshi, YAMADA Takuma, NAGASHIMA Yoshihiko, FUJISAWA Akihide, ITOH Kimitaka	4. 巻 17
2. 論文標題 Formation Process of a Solitary Vortex in a Zonal Flow - Drift-Wave Dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1301106 ~ 1301106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1301106	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 Kawachi Yuichi, Sasaki Makoto, Kosuga Yusuke, Terasaka Kenichiro, Nishizawa Takashi, Yamada Takuma, Kasuya Naohiro, Moon Chanho, Inagaki Shigeru	4. 巻 12
2. 論文標題 Spatiotemporal dynamics of high-wavenumber turbulence in a basic laboratory plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 19799 ~ 19799
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-23559-1	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 Nagashima Yoshihiko, Fujisawa Akihide, Yamasaki Kotaro, Inagaki Shigeru, Moon Chanho, Kin Fumiyoshi, Kawachi Yuichi, Arakawa Hiroyuki, Yamada Takuma, Kobayashi Tatsuya, Kasuya Naohiro, Kosuga Yusuke, Sasaki Makoto, Ido Takeshi	4. 巻 92
2. 論文標題 A Proposal to Evaluate Electron Temperature and Electron Density Fluctuations Using Dual Wavelength Emission Intensity Tomography in a Linear Plasma	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033501 ~ 033501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.033501	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., Hallatschek K., Kasuya N., Lesur M., Kosuga Y., Itoh S.-I.	4. 巻 7
2. 論文標題 Enhancement and suppression of turbulence by energetic-particle-driven geodesic acoustic modes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16767 ~ 16767
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-17011-y	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9件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 山田琢磨, 稲垣滋, 佐々木真, 河内裕一, 山崎広太郎, 永島芳彦, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英, 伊藤公孝
2. 発表標題 直線プラズマにおける非線形現象の先進的解析
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田琢磨, 稲垣滋, 佐々木真, 永島芳彦, 山崎広太郎, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英, 伊藤公孝
2. 発表標題 PANTAにおける非線形現象の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田 琢磨, 稲垣 滋, 佐々木 真, 永島 芳彦, 山崎 広太郎, 糟谷 直宏, 小菅 佑輔, 藤澤 彰英, 伊藤 公孝, 伊藤 早苗
2. 発表標題 直線プラズマにおける非線形結合とストリーマー
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 琢磨, 稲垣 滋, 佐々木 真, 永島 芳彦, 山崎 広太郎, 糟谷 直宏, 小菅 佑輔, 藤澤 彰英, 伊藤 公孝
2. 発表標題 直線プラズマにおける非線形結合の研究,
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田琢磨
2. 発表標題 閉じ込めを左右するメソスケール構造～乱流内の非線形結合～
3. 学会等名 東京大学 先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター (APET)特別講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田琢磨, 稲垣滋, 佐々木真, 永島芳彦, 金史良, 挟間田一誠, 荒川弘之, 小林達哉, 山崎広太郎, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英, 伊藤公孝, 伊藤早苗
2. 発表標題 PANTAにおける乱流の三次元構造
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamada, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Nagashima, F. Kin, H. Arakawa, T. Kobayashi, K. Yamasaki, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, K. Itoh, and S.-I. Itoh
2. 発表標題 Three Dimensional Structure of Streamer in Drift Wave Fluctuations
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田琢磨, 稲垣滋, 佐々木真, 永島芳彦, 金史良, 挾間田一誠, 荒川弘之, 小林達哉, 山崎広太郎, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英, 伊藤公孝, 伊藤早苗
2. 発表標題 PANTAにおけるストリーマーと媒介波の三次元構造
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田琢磨, 佐々木真, 河内裕一, 山崎広太郎, 永島芳彦, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 稲垣滋, 藤澤彰英, 伊藤公孝
2. 発表標題 直線プラズマにおける非線形現象の位相空間解析
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 パリティ編集委員会、大槻 義彦	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 166
3. 書名 物理科学, この1年 2020	

〔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
---------	---------