

Cross BispectrumとCross Bicoherenceの活用について

伊藤, 早苗

九州大学応用力学研究所 | 九州大学極限プラズマ研究連携センター

伊藤, 公孝

九州大学極限プラズマ研究連携センター | 中部大学総合工学研究所

永島, 芳彦

九州大学応用力学研究所 | 九州大学極限プラズマ研究連携センター

小菅, 佑輔

九州大学応用力学研究所 | 九州大学極限プラズマ研究連携センター

<https://doi.org/10.15017/1929735>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 154, pp.6-17, 2018-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

Cross Bispectrum と Cross Bicoherence の活用について

伊藤 早苗^{*1,2} 伊藤 公孝^{*2,3} 永島 芳彦^{*1,2} 小菅 佑輔^{*1,2}

(2018年1月31日受理)

On the Application of Cross Bispectrum and Cross Bicoherence

Sanae -I. ITOH, Kimitaka ITOH, Yoshihiko NAGASHIMA and Yusuke KOSUGA

E-mail of corresponding author: *s-iitoh@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

Bispectrum and bicoherence analysis is a powerful method to analyze nonlinear interaction of turbulent plasmas. In this note, we explain the difference of the bispectrum and bicoherence analysis and possible research that can be pursued with these methods. Basic concept is explained by using several examples from previous successes brought by bicoherence and bispectrum analysis, such as drift wave-zonal flow interaction. Open questions are discussed that can be challenged by these methods. Problems such as spatial transport of fluctuation energy (i.e. turbulence spreading), momentum transport by the triplet correlation, and so on, are treated. Bispectrum and bicoherence analysis can be utilized to expand the forefront of plasma turbulence research.

Keywords: *plasma turbulence, nonlinear coupling, bicoherence analysis*

1. 緒言

磁場閉じ込めプラズマでは、ドリフト周波数帯領域の低周波揺動が重要な役割を果たしている¹⁾。特に、線形分散を大きく変えてしまうほど非線形相互作用が強いので²⁾、磁化高温プラズマの乱流や構造形成を理解するためには、非線形相互作用の理論及び実験による研究が重要である。非線形相互作用の観測に Bicoherence 解析が活用されている。初期の適用例には³⁻⁹⁾などが見られる。実測された bispectrum の値と乱流揺動の非線形結合度の定量比較なども行われ¹⁰⁾、非線形結合の定量解析が可能になってきた。近年、帯状流¹¹⁾のように、線形安定である一方ドリフト波から非線形励起される揺動の重要性が認識されるにつれ、bispectrum 解析は実際の実験研究で広く応用されるようになった^{9,12-17)}。その結果、帯状流や帯状磁場、ストリーマーなどの励起機構が実験的に検証されるなど、重要な発見がもたらされた^{12, 15, 16, 18)}。これらの適用例を含め、プラズマ研究の強力な方法として広く活用されている。プラズマの構造形成の物理への応用の俯瞰的な結果が^{19, 20)}にまとめて紹介されている。最近では、bicoherence 解析はルーチンになり、

解析手法が標準化し、収束等の理解も深まり、bicoherence 解析を活用して更に広い問題にチャレンジ出来るようになっていく。さらに、入門的な解説も^{21, 22)}などに見られる。

bicoherence 解析では、同一の物理量を対象に求める auto-bicoherence と、異なる物理量を組み合わせて解析する cross-bicoherence がある。その両者を活用する事で、更に研究が進むと期待出来る。例えば、帯状流の場合、密度とポテンシャル揺動の auto-bicoherence と cross-bicoherence には違いがある事が予想され、その差違も検証される事で理解が更に深まっている。微視的揺動のみならず、揺動のエンベロープと言う新たな観測量を抽出し、それを対象にした cross-bicoherence によって、密度揺動には見えないとされていた帯状流の観測にも成功している¹⁴⁾。これは parametric spectroscopy という新たな方法²³⁾の典型例である。

近年の観測では、密度やポテンシャルと言ったスカラー場の量のみならず、速度場揺動などベクトル場の揺動も観測され、ベクトル場とスカラー場の非線形結合も興味を集めている。多くの種類の物理量の探索において、それで何が解明できるのかという明確な問題意識とともに、どんな高次統計解析が必要かという展望を持つことが望まれる。その観点から、密度やポテンシャル揺動、速度揺動などの cross-bispectrum や cross-bicoherence を解析する事により広がり

*1 九州大学応用力学研究所

*2 九州大学極限プラズマ研究連携センター

*3 中部大学総合工学研究所

うる研究の可能性が俯瞰的に論じられている²⁴⁾。ここでは、今後研究の具体的な実験観測を容易にし、我が国において広く活用を図ることを目的として、和文報告としてそうしたテーマを紹介する。

この研究論文では、密度やポテンシャル揺動、速度揺動などの cross-bispectrum や cross-bicoherence を解析する事により広がる研究を説明する。なお、bispectrum 解析という言い方や、bicoherence 解析という言い方がよくなされている。ここでは、両者の区別を活かして説明を進める。Cross-及び auto-bicoherence 解析は規格化された値を使う。あるプロセス(モードの組み合わせ、など)に着目し、その非線形結合度を(他の多分観測されていない寄与と比較して)定量化する際に威力を発揮する。その一方で、cross-bispectrum では絶対値も含めた物理量の相関を論じる。物理量の強度の絶対値や、空間的輸送束などを解析する際に重要となる。それぞれに特徴ある意味を持つので、cross-coherence 解析や cross-bispectrum 解析を駆使することで、物理量の非線形結合や輸送解析を実験定量的に解析できる。

2. Model

2.1 対象の説明

磁化プラズマを考える。議論の明確化のため、slab plasma を考え、磁場を z 方向に取る。(Fig.1 参照。) drift 速度や、磁場方向速度を示しておく。局所的な座標として(x,y)を導入し、x が r に、y が θ に対応するものとする。

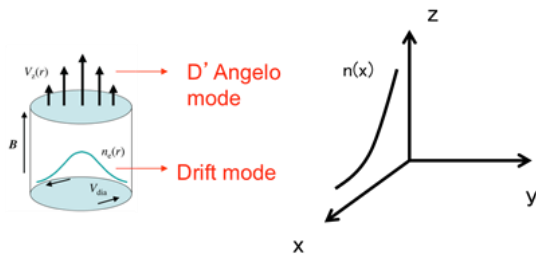


Fig.1 Magnetized inhomogeneous plasmas with two driving sources. Shown are radial gradients of density (pressure) and flows along the magnetic field. In the local coordinate, z is in the direction of the magnetic field, x is in the direction of inhomogeneity, and y corresponds to the poloidal direction.

また、揺動は準静電的揺動として、密度(n)やポテンシャル揺動(ϕ)、速度揺動(V)が測られているものとする。ここでは、時間スケールをドリフト周波数およびそれよりゆっくりした変動に限る。温度揺動は重要な物理量であるが、計測例が極めて限られているので、ここでは論じない。

このような条件で、不安定揺動としては、drift mode¹⁾、D'

Angelo mode²⁵⁻³⁶⁾、また、帯状流¹¹⁾、ストリーマー¹⁸⁾、などが揺動として励起される可能性があるとする。

2.2 二次相関

$\langle X, Y \rangle$ ($\langle \dots \rangle$ は同一位置での長時間平均)は標準的に解析されている。今は、同一点の物理量を対象にしているので、時間フーリエ分解した

$$X(f)Y(f)^* \quad (1)$$

で議論する。組み合わせを Table.1 に示す。

ここで auto-correlation (c1, c2, c10, c11, c12)は揺動強度として標準的に解析される。

スカラー量を見ると、 $\langle nm \rangle$ と $\langle \phi \phi \rangle$ の比は、ドリフト波を検定する中心的手法である。適切に規格化して、

$$\left\langle \frac{n}{n_0} \frac{n}{n_0} \right\rangle \approx \left\langle \frac{e\phi}{T_e} \frac{e\phi}{T_e} \right\rangle \quad (2)$$

の関係は、ドリフト波の検定の基礎に使われる。ここで n_0 は時間平均された密度である。

Table 1: Combinations of second order correlation

#	X	Y
c1	n	n
c2	ϕ	ϕ
c3	n	ϕ
c4	n	V_x
c5	n	V_y
c6	n	V_z
c7	ϕ	V_x
c8	ϕ	V_y
c9	ϕ	V_z
c10	V_x	V_x
c11	V_y	V_y
c12	V_z	V_z
c13	V_x	V_y
c14	V_x	V_z
c15	V_y	V_z

Cross correlation の中では、c3 は密度とポテンシャルの位相差を求めるためにルーチンとして解析されている。ドリフト

波の場合は

$$\frac{n}{n_0} = (1 - i\delta) \frac{e\varphi}{T_e} \quad (3)$$

がよく知られている。例えば、抵抗性ドリフト波の場合³¹⁾には、位相差は

$$\delta = \frac{\omega_e - \omega}{k_z^2 D_z} \quad (4)$$

で与えられる。 ω_e はドリフト周波数、 D_z は電子の磁場方向拡散係数である。位相差は波の励起の因果関係や密度勾配の緩和に伴う有限の粒子束を表すものと理解されている。実験データ解析にて評価もされている。

D'Angelo mode の場合は

$$\frac{n}{n_0} \approx \frac{e\varphi}{T_e} \quad (5)$$

となる。断熱応答に近く、これは、D'Angelo mode は平行速度シアによって駆動されるためである。D'Angelo mode は平行速度揺動に特徴があり、平行速度を緩和する。粒子束による分布の緩和がエネルギー源ではないので、ドリフト波とは異なり、勾配方向の粒子束を作るとは限らない。

そして、ドリフト波と D'Angelo mode が混在している場合、相関は

$$\frac{n}{n_0} = (1 - i\delta_D + i\delta_V) \frac{e\varphi}{T_e} \quad (6)$$

となる。ここで、位相差 δ はドリフト波の場合と同様であり、D'Angelo モードからの寄与³¹⁾は

$$\delta_V = \frac{c_s k_z \rho_s k_y \langle V_z \rangle' - c_s^2 k_z^2}{k_z^2 D_z \omega} \quad (7)$$

である。 c_s はイオン音速、 ρ_s は電子温度で評価されたイオンラーマー半径である。D'Angelo mode が不安定な場合である。ドリフト波は密度勾配を緩和させる位相関係を持つ一方で、D'Angelo mode は密度勾配をピークさせる(密度勾配に抗う粒子束を生み出す)位相関係を持つことが報告されている。

また、ベクトルとスカラー量の混合では、 nV_x (c4)は乱流輸送流束として解析されて来た。一方で、類似の量 nV_y (c5)、 nV_z (c6)は揺動に伴う運動量密度に対応するが、余り実験で評価されていないようである。ところで、c4 と c7 などは、ドリフト波では $n \sim \phi$ なのだが、c4 で残るのは1次の微量であり、c7 では面平均をとると打ち消される。

一方、ベクトル量の相関については $V_x V_y$ (c13)、 $V_x V_z$ (c14)、 $V_y V_z$ (c15)がしばしば Reynolds stress の評価に使われる。

最後に、c1, c2, c10 + c11 + c12 は揺動強度に結びつく。揺動強度は、ドリフト波を記述するモデルでしばしば

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 + \left(\frac{V_{\perp}}{c_s}\right)^2 \approx (1 + \rho_s^2 k_{\perp}^2) \left(\frac{e\varphi}{T_e}\right)^2 \quad (8)$$

と表現されている。

最近の研究例では、2次相関より得られる揺動強度がモードの判別に応用されている。ドリフト波に比し、D'Angelo mode では平行速度揺動が相対的に大きくなる。この特徴を、c1, c12 を利用して、ドリフト波の場合

$$\left\langle \frac{n}{n_0} \frac{n}{n_0} \right\rangle > \left\langle \frac{V_z}{c_s} \frac{V_z}{c_s} \right\rangle \quad (9)$$

となるのに対し、D'Angelo mode の場合には

$$\left\langle \frac{n}{n_0} \frac{n}{n_0} \right\rangle \approx \left\langle \frac{V_z}{c_s} \frac{V_z}{c_s} \right\rangle \quad (10)$$

と表すことができる。実際のデータ解析を通じて、ドリフト波と D'Angelo モードが異なる半径や周波数空間に共存することが報告されている^{32,36)}。

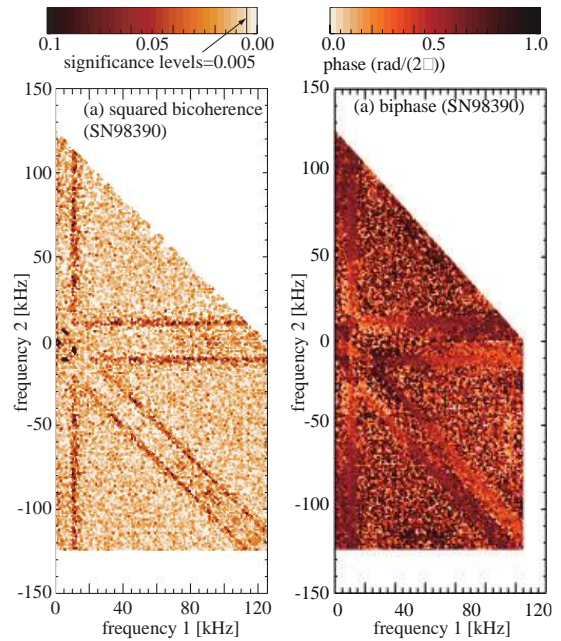


Fig.2 Examples of bispectral analysis for drift wavezonal flow turbulence in JFT-2M tokamak. (a) Bicoherence and (b) biphase analyses of floating potential fluctuation. The figures are quoted from Y. Nagashima, et al., PPCF 45 S1 (2006), and their layout is changed.

3. Bispectrum and cross bispectrum

3.1 Third order correlation

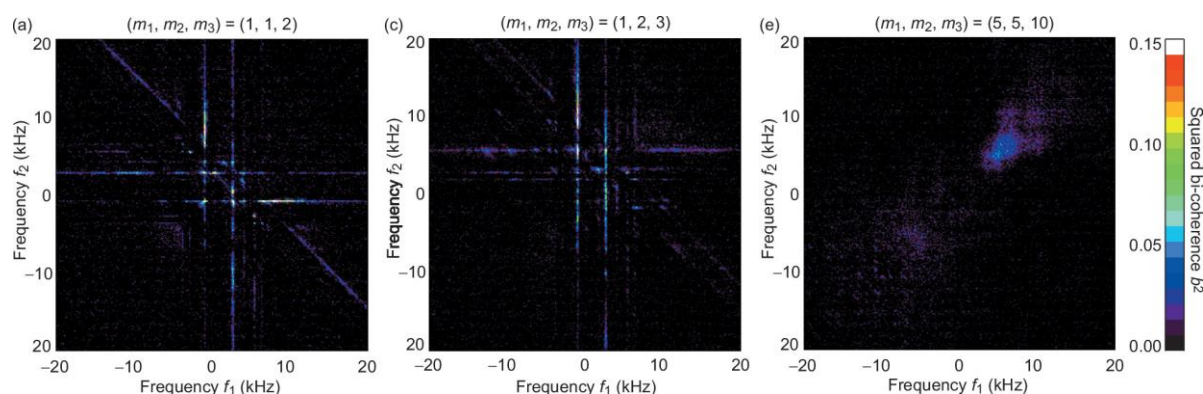


Fig.3 Example of bicoherence analysis with the mode number matched. Here the 2D Fourier spectrum in frequency and the poloidal mode number is evaluated from the azimuthal probe array (64 channels). Bioherence in frequency is evaluated for the data with mode number matched, $m_3=m_1+m_2$. Three different cases are shown, with $(m_1, m_2, m_3) = (1,1,2)$, $(1,2,3)$, and $(5,5,10)$. The figure is quoted from ³⁸⁾.

三次相関 $\langle X, Y, Z \rangle$ ($\langle \dots \rangle$ は同一位置での長時間平均)は、非線形機構の研究のため着目され研究されている。

多くの適用例では、周波数分解して、

$$X(f_1)Y(f_2)Z(f_1 + f_2)^* \quad (11)$$

を bispectrum として解析し、実験結果を対象に応用されている。(例を Fig.2 に示す。)非線形結合は、波数空間のマッチング条件も満たさなければならない。そこで、波数空間のフーリエスペクトルを扱う解析もしばしば行われている^{18, 37)}。さらに踏み込んだ解析³⁸⁾では、波数空間のマッチング条件を拘束条件として周波数上で bispectrum 解析を行うことで、波数と周波数の双方のマッチング条件を満たす非線形相関を求めている。例を Fig.3 に示す。これらを念頭に置いた上で、本稿では、周波数空間での bispectrum 解析を念頭に置いて議論する。

Table 2: Combinations of triplet correlation

#	X	Y	Z
b1	n	n	n
b2	ϕ	ϕ	ϕ
b3	n	n	ϕ
b4	n	ϕ	ϕ
b5	n	n	V_x
b6	ϕ	ϕ	V_x
b7	n	ϕ	V_x
b8	n	n	V_y
b9	ϕ	ϕ	V_y
b10	n	ϕ	V_y
b11	n	n	V_z

b12	ϕ	ϕ	V_z
b13	n	ϕ	V_z
b14	n	V_x	V_x
b15	n	V_y	V_y
b16	n	V_z	V_z
b17	n	V_x	V_y
b18	n	V_x	V_z
b19	n	V_y	V_z
b20	ϕ	V_x	V_x
b21	ϕ	V_y	V_y
b22	ϕ	V_z	V_z
b23	ϕ	V_x	V_y
b24	ϕ	V_x	V_z
b25	ϕ	V_y	V_z
b26	V_x	V_x	V_x
b27	V_x	V_y	V_y
b28	V_x	V_z	V_z
b29	V_x	V_x	V_y
b30	V_x	V_x	V_z
b31	V_x	V_y	V_z
b32	V_y	V_y	V_y
b33	V_y	V_z	V_z
b34	V_y	V_y	V_z
b35	V_z	V_z	V_z

スカラー場の量とベクトル場の量による3次相関を Table 2 に示す。b1~b4 がスカラー量の bispectrum, b5~b25 が、スカラーとベクトル量の混交の bispectrum, b26~b35 がベクトル量の bispectrum である。

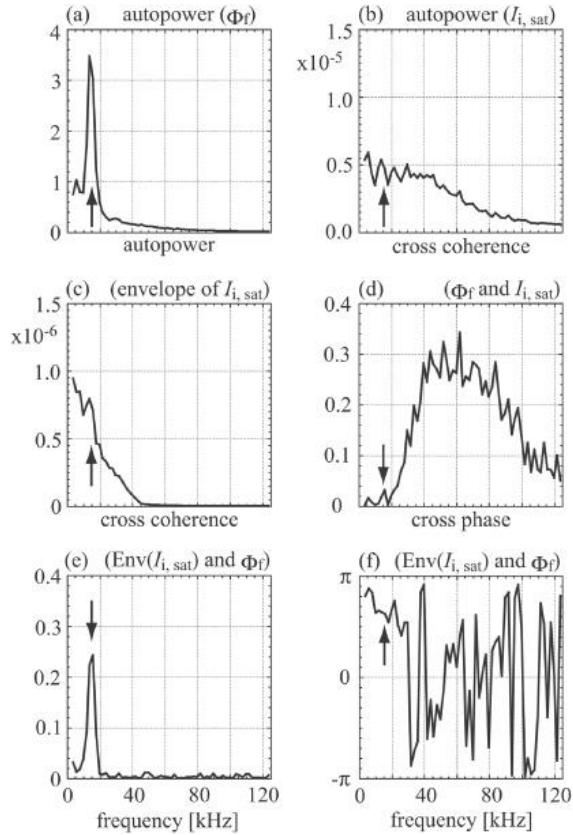


Fig.4: Analysis of low frequency fluctuation with floating potential and ion saturation current. Combination of floating potential, (a) auto-power of the floating potential, (b) auto-power of the ion saturation current, and (c) auto-power of the envelope of the ion saturation current, (d) squared cross-coherence between the floating potential and ion saturation current, (e) squared cross-coherence between the floating potential and the envelope of the ion saturation current, and (f) cross-phase between the floating potential and the envelope of the ion saturation current. In (e), significant coherence between the envelope and floating potential at zonal flow frequency (~10 kHz) is observed, indicating the envelope of the ion saturation current has information of zonal flows. The figure is quoted from Ref. ¹⁴⁾.

3.2 Scalar quantity

スカラー量の bispectrum は帯状流の研究に適用され、有効性を実証した ^{8,9,12-14)}。帯状流のドリフト波による励起の問題ではポテンシャル同士及びポテンシャルと密度を組み合わせたクロスバイスペクトルのような解析が広く行われている。

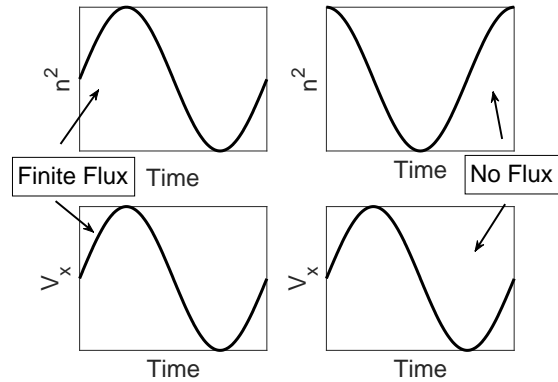


Fig.5 Spatial flux of fluctuation energy (represented by density fluctuation). Finite spatial flux results when the time evolution of fluctuation energy and radial velocity fluctuation are in phase.

帯状流とドリフト波の密度揺動に対する現れ方の違いを利用して両者の非線形性の違いや、ランダムな乱流揺動スペクトルが一樣に帯状流によって変調されているというような発見に結びついている。

更に、b1, b2, b3, b4 の違いを観察する事で、ドリフト波と帯状流の定性的な違いを描き出している (Fig.4)。それは、帯状流の変動が密度では微小である一方、電場 (ポテンシャル) に集中して現れるからである。帯状流の周波数を f とする。 n の周波数が f になる組み合わせでは、顕著な bispectrum のピークが見えない。一方、 ϕ の周波数が f になる組み合わせでは、顕著な bispectrum のピークが現れる。密度揺動そのものではなく、高周波密度揺動のエンベロープの時系列から周波数 f の成分を抜き出せば、エンベロープには帯状流が刻印されているので、 $\{n$ のエンベロープ, n , $n\}$ という組み合わせからも、帯状流と微視的ドリフト波の非線形結合を観測する事が出来る。一方、 $E \times B$ ドリフトによる揺動電場は通常時間変動がイオンサイクロロン周波数よりも極めて低いという近似の元で計算されている。一部のプラズマでは、電場振動の時間微分から評価される分極ドリフトの効果は無視できなくなる可能性がある。分極ドリフトの効果は例えば長谷川-三間方程式の導出などで既に導入されている一方、散逸性ドリフト波の様に径方向輸送を伴う系では密度揺動とポロイダル電場揺動の積の統計平均から、静電乱流中のポロイダル電流源として、存在しうる可能性があり、プラズマ中の電流の実測といった新規の研究に結び付く可能性がある。

3.3 スカラーとベクトル量混交の cross-bispectrum

3.3.1 揺動強度の空間移動

揺動強度が空間移動するような場合が実際に起きており、

研究が進んでいる。そのような過程を研究するためには、ベクトル量を含む bispectrum が重要になる。輸送現象を研究するためには、スカラーとベクトル量混交の cross-bispectrum は重要な役割りを果たしている。

Drift 波の揺動強度のうち密度変動が持つ成分は

$$nn \quad (12)$$

である。すると

$$V_x nn \quad (13)$$

は、「Drift 波の揺動強度のうち密度変動」が x 方向に移動する割合を指す。Turbulence spreading で取り扱われる物理量である^{39,40}。Figure 5 に示すように、揺動強度(密度で見たもの)が時間変動しているとする。同時に V_x も変動している。それらの変動が同期していると、平均として、揺動強度が x -方向に移動している事になる。この寄与を求めると、

$$n(f_1)n(f_2)V_x(f_1 + f_2)^* \quad (14)$$

という cross-bispectrum を求める必要がある。

ところで、乱流強度の(背景揺動による)空間移送は、乱流強度を決める重要な要素であると考えられている。たとえば、理論的には、乱流強度 I の空間流束は(局所的なモデルの範囲で) $-D \text{ grad } I + V I$ と評価される(しばしば拡散型の校が重要と見なされている)。その結果、乱流強度は

$$\frac{d}{dt} I = \gamma_L I - \gamma_{NL} I - \gamma_{\text{mod}} I + D \Delta I \quad (15)$$

のようなバランス方程式を満たすと考えられている。右辺の第一項は線形励起、第二項は非線形安定化項(ただし、DC 径電場の空間一次微分に起因する安定化効果⁴¹)を含む)、第三項は帯状流との結合効果、第四項が乱流強度の(背景揺動による)空間移送に基づく非線形安定化(励起)効果を示す⁴²。この局所化が適切か否かの問題は措くとして、その範囲においても、第四項は、他の3項と比較して、無視出来ない働きをなすとされている。実際、理論やシミュレーションを通じて、乱流フロントの伝搬や安定領域の侵食などが報告されている⁴³。フロントが伝搬することを示唆する実験も報告されている^{44,45}。また、直線プラズマでも、密度勾配が強い線形不安定な領域以外でもスペクトルの広がり観測されている³⁶。cross-bispectrum を求めることによって、新たな検証が可能になる。

3.3.2 Reynolds Stress

Reynolds stress の重要性は近年理論的/実験的に確認されている。通常、乱流によるプラズマのポロイダル回転励起(径電場駆動)に関係しては

$$V_x V_y \quad (16)$$

の2次相関が一粒子あたりのストレスとして、また、乱流による磁場方向の流れの駆動については

$$V_x V_z \quad (17)$$

が一粒子あたりのストレスとして解析されている。しかし、Reynolds stress は

$$\begin{aligned} n V_x V_y \\ n V_x V_z \\ n V_y V_z \end{aligned} \quad (18)$$

の3次相関で定義されている。Cross-bispectrum によって評価されるべきものである⁴⁶⁻⁵¹。

まず、プラズマのポロイダル回転励起(径電場駆動)に関係する成分については

$$\langle n V_x V_y \rangle \text{ と } n_0 \langle V_x V_y \rangle \quad (19)$$

の差について、実験的に検証が行われるレベルになっている⁵⁰。これまでの実験では、ポロイダル方向の渦の伸長に着目した結果、ポロイダル速度揺動と径方向速度揺動の位相関係に特に着目し、後者の項が解析されてきた。一方、実験データとしては密度揺動も同時に計測している場合がほとんどであり、三体相関項を解析することは十分可能な環境が整っている。

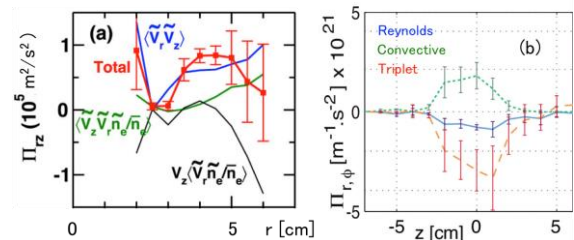


Fig.6 Observation of momentum flux. (a) Result on PANTA³²). The r is the radial direction and z is the direction of the magnetic field. (b) Result on TORPEX⁴⁹). The z is the vertical direction and ϕ is the toroidal direction. In both cases, the triplet term (green for (a) and red for (b)) is finite and can be dominant in some cases.

一方、プラズマの磁力線方向の運動励起に関係する成分については(Fig.6)、

$$\langle n V_x V_z \rangle \text{ と } n_0 \langle V_x V_z \rangle \quad (20)$$

の差の研究が始まっている^{32,51}。理論的にも、プラズマのトロイダル回転のvarietyを理解する上での鍵であると指摘されている⁴⁶。2次相関に焦点を当てた残留応力などの効果に加え、3次相関を考えることで乱流運動量の空間移送の効果(Turbulence momentum spreading)を取り入れることが可能となる。周辺領域のトロイダル流と炉心領域でのトロイダ

ル流の結合を生み出す効果も指摘されている⁵¹⁾。実験的に検証が行われる日も近い。例えば、DIII-D トカマクではパラレルレイノルズ応力について3体相関項を含む検証がなされている⁵²⁾。

複数のレイノルズ応力や粒子束などの輸送量の同時解析は、密度勾配や速度勾配など複数の不均一性(自由エネルギー源)が共存するなかで起きる乱流の理解にとって重要になる。近年、「強相関乱流」という考え方が提案され、プラズマ乱流研究の枠組みが拡張されている⁵³⁾。物性物理学分野では「強相関物質」の研究が展開しており、強磁性、強誘電性、等の共存など、複数の巨視的場の自発的発生(交差相関)が熱平衡状態で議論されている。プラズマ乱流における交差相関も重要であり、巨視場の生成・競合・消滅、トポロジー変化(散逸と対称性の変化)さらに、対称性の破れや対称性の変換などの機構にふかく関与しているものと考えられている。Figure 7 に説明されるように流れと圧力の勾配が共存する状況は実験室や宇宙のプラズマで広く観察され、2章に説明された drift wave と D'Angelo mode などがそこで問題となる揺動の例である。半径方向の密度(圧力)勾配と磁力線方向流の勾配を持つプラズマの構造形成機構を Fig.7 に概説する。ドリフト波と帯状流の励起・抑制の相互作用が起きることはよく知られている¹¹⁾。それに加え、D'Angelo mode を介在として密度や軸方向速度の勾配が変化していく。片方の緩和と他方の急峻化が起きることも可能であり、周回方向の速度駆動と、磁力線方向の駆動が転換することも可能である。自然界の多様な構造形成機構を反映している。複数種の不安定性や構造形成機構を含む系を念頭に、most probable structure や、交差相関の理論構造(非線形緩和の多様性)や競合する散逸率の定式化などの理論研究が行われている。あわせて、多種の揺動の共存に関し観測結果(Fig.8)も得られ始めており^{32,33)}、cross-bicoherence 解析を用いて、相互の非線形結合についても実験観測が試みられている。

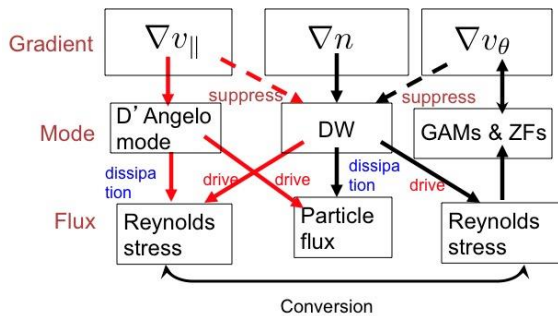


Fig.7: Structural formation in plasmas with radial gradients of density (pressure) and parallel velocity. In addition to the excitation and suppression of drift waves and zonal flows, D'Angelo modes can drive relaxation and steepening of parallel velocity profile and density profile.

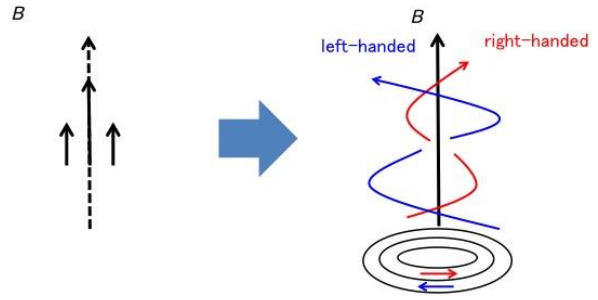


Fig.8: Development of zonal flows and helical flow pattern by D'Angelo modes³⁴⁾. The bicoherence of vector quantity V_z and scalar quantity ϕ , $V_z V_z \phi$, can be important for analyzing the process.

3.3.3 Reynolds Stress (補足)

もう一つの組み合わせ

$$nV_y V_z \quad (21)$$

については、それに基づく力

$$\frac{d\langle nV_y V_z \rangle}{dy} \text{ と } \frac{d\langle nV_y V_z \rangle}{dz} \quad (22)$$

は磁気面平均すると消えるとの発想から、重要視されていないものと思われる。しかし、L-H 遷移が起きる場合、ポロイダルショックが生まれる事が理論的に指摘され、計算例も示されている事から⁵⁴⁻⁵⁸⁾、今後動的観測精度が高まると、ポロイダルショックなど磁気面上で局在した非線形構造の重要性が見いだされる可能性もある。磁気面上で局在した非線形構造が生まれる過程では、

$$\frac{d\langle nV_y V_z \rangle}{dy} \text{ と } \frac{d\langle nV_y V_z \rangle}{dz}$$

のような、磁気面上で不均一な値を持つ力が、機能を発揮している可能性もある。Cross-bispectrum が重要な値になる可能性がある。(磁気面平均した輸送量だけではなく、輸送量の磁気面上の不均一性も理論的に重要性が指摘されている。例えば Stringer's spin-up 機構^{57,58)}や、揺動の上下非対称性から生まれるトロイダル流構造⁵⁹⁾などについても近年研究が蓄積されており、揺動の不均一性についての実験観測も報告が見られている^{60,61)}。こうした過程の実験検証では、新たな cross-bispectrum も活用されるであろう。)

3.3.4 n と ϕ の差

b5 から b13 までには、 n と ϕ が現れている。ドリフト波の場合は、近似的に $n \sim \phi$ なので、

b5, b6, b7

b8, b9, b10

b11, b12, 13

の性質は近いとされている。しかし、ドリフト波が準モードの

場合には線形励起に係わるボルツマン関係を常に満たすとは限らない。線形励起されたドリフト波乱流が空間に展開しているか、もしくは Turbulence spreading の様に乱流が広がる場合を cross-bicoherence 解析を異なる空間点で実施比較することにより、励起機構の差別化の実験検証に結び付く可能性がある。

3.3.5 ベクトル場が生み出す帯状流

ドリフト波と帯状流の結合の検定にスカラー量の bispectrum が威力を発揮した(3.2 章)。その一方で、D'Angelo mode のようなベクトル場が駆動する乱流においても帯状流が生成されることが報告^{34,35)}され、強相関乱流の一例として報告されている(Fig. 9)。こうした結合を検証する際に、

b22

などが有効となるであろう。また、垂直方向の流れ場(外部駆動等による、2次的な帯状流ではない)が存在し、Kelvin-Helmholtz 不安定性が生じた場合には、

b20, b21

などの量が鍵となる。

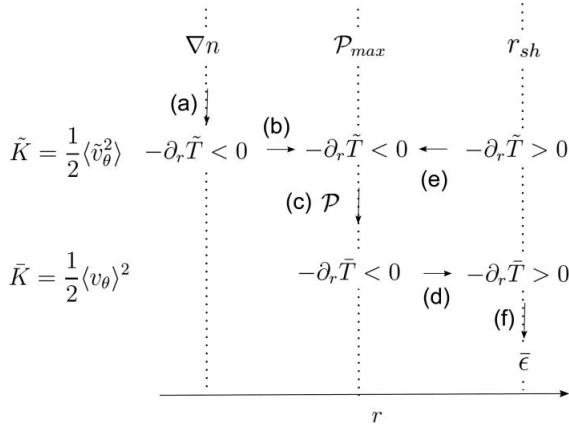


Fig.9: Energy balance of mean field and turbulent field⁶²⁾. The spatial flux of fluctuation energy, $T = \langle V_r V_\theta^2 \rangle$, can play an important role in fluctuation energy balance.

3.4 ベクトル量の cross-bispectrum

3.4.1 揺動強度の空間移動(1)

揺動強度が空間移動するような場合には、密度揺動だけでなく、揺動の運動エネルギーも移送される。

(15)式に示されるようなバランスを考える上では

$$\begin{aligned} V_x V_x V_x \\ V_x V_y V_y \\ V_x V_z V_z \end{aligned} \quad (23)$$

が揺動運動の x-方向のエネルギー移送に関連している。実際⁶²⁾、ポロイダル流の運動エネルギーの時間発展を解析し、

空間方向の揺動運動エネルギーのフラックスが重要となることが報告されている(Fig. 9)。

ドリフト波の場合では、x-方向の揺動速度とy-方向の揺動速度はほぼ等しく

$$V_x V_x \sim V_y V_y \quad (24)$$

である一方、z-方向の揺動速度は相対的に小さく

$$V_x V_x \sim V_y V_y \gg V_z V_z \quad (25)$$

となっている。b28 は b26, b27 に比べ重要性が低いと考えられる。密度との規格化因子を考えて

b5, b26, b27

が揺動強度の空間移送を担っている。密度との規格化因子を考えて

$$\left[\left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + \left(\frac{V_x}{c_s} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{c_s} \right)^2 \right] V_x \quad (26)$$

と表現される。

D'Angelo mode の場合には平行方向速度の揺動が無視できなくなり、空間方向の揺動エネルギー移送は

$$\left[\left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + \left(\frac{V_x}{c_s} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{c_s} \right)^2 + \left(\frac{V_z}{c_s} \right)^2 \right] V_x \quad (27)$$

となる。空間方向に揺動エネルギーが運ばれる結果、平行速度シアが強くなる不安定領域が空間的に局在していても、D'Angelo mode の存在領域が広がる可能性がある。このような仮説の検証にも cross-bicoherence 解析が有用となる。

3.4.2 揺動強度の空間移動(2)

同様の議論は、z-方向の移送現象についても言え、

$$\begin{aligned} V_z V_x V_x \\ V_z V_y V_y \\ V_z V_z V_z \end{aligned} \quad (28)$$

は、磁力線方向の揺動移送に関係する。今迄余り着目されていない物理量である。しかしながら、スクレイプオフ層(Scrape-off layer, SOL)における輸送現象では、磁力線に沿った一様性が無いため、磁力線に沿う構造も適切に考える必要がある。SOL の厚みの問題は近年重要性がましており、こうした auto-bispectrum ならびに cross-bispectrum の検討が必要である。

この場合、ドリフト波揺動の様な圧力勾配揺動では

$$V_x > V_z \quad (29)$$

であり、径方向の移送が卓越する。その一方で、D'Angelo mode では

$$V_x \approx V_z \quad (30)$$

となり、径方向への移送のみならず磁力線方向への移送が重要となる。径方向の移送量

$$\left[\left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + \left(\frac{V_x}{c_s} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{c_s} \right)^2 + \left(\frac{V_z}{c_s} \right)^2 \right] V_x \quad (31)$$

や軸方向の移送量

$$\left[\left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + \left(\frac{V_x}{c_s} \right)^2 + \left(\frac{V_y}{c_s} \right)^2 + \left(\frac{V_z}{c_s} \right)^2 \right] V_z \quad (32)$$

を比較することで、D'Angelo モードの特定につながることを期待される。支配的な揺動の特定は輸送特性を考える上で重要であり、今後の検証が待たれる。

3.4.3 Others

b31 $V_x V_y V_z$

について、例えば、ポロイダルレイノルズ応力が磁力線方向に移送される量を表す。前項と同様に、磁力線に沿った一様性がない系では無視できない可能性がある。

3.5 計測での新たな留意点

最後に、多種のベクトル場やスカラー場の非線形結合を正確に観測するための新たな実験的留意点についても触れる。

異なる種類のベクトル場同士の高次相関を研究するためにたとえば(28)にあるような cross-bicoherence を求める必要が出てくる。磁力線方向の量と、磁力線に垂直な方向の量との混交した相関を取り扱う。そのためには、観測点での基準となる磁力線の方向を正確に観測する必要がある。ドリフト波など、本稿で対象としている揺動は非等方性が極めて強い。磁力線の方向に誤差があると、磁力線方向の量と、磁力線に垂直な方向の量と観測値にクロストークが生じる。このクロストークは、高次相関に大きな誤差を齎す事が指摘されている⁶³⁾。

この事から、磁場内部の磁場の計測を高精度に実施し、揺動計測や高次相関に齎す誤差を押さえる必要が出てくる。通常時期面の観測は、MHD 平衡の再構成という手法で取り扱われ、揺動研究とは独立に取り扱われる事が通例である。磁気面の決定制度は中型のトカマクで 1cm 程度と議論されている。この誤差は、場合によっては、乱流の高次相関(特に非局所的相関)を議論する上で不満足な結果を齎しうる。今後、MHD 平衡較正と、揺動研究を統合して行う事も必要になろう。一つの先駆的試みは、GAM spectroscopy をプラズマの表面磁気面決定に適用した⁶⁴⁾。揺動研究の観点から、表面磁気面の検定を論じている。今後は、こうした統合的研究を更に展開する事も必要と考えられる。

4. Summary

この研究論文では、プラズマ乱流揺動の研究において bicoherence 解析がルーチンになり、解析手法が標準化し収束等の理解も深まった研究最前線において、bicoherence 解析を活用して更に広い問題にチャレンジ出来る状況を説明した。近年の研究では、密度やポテンシャルと言ったスカラー場の量のみならず、磁場や速度場揺動などベクトル場の揺動も観測され、ベクトル場とスカラー場の非線形結合も興味を集めている。そのような状況を踏まえ、密度やポテンシャル揺動、速度揺動などの cross-bispectrum や cross-bicoherence を解析する事により広がる研究を俯瞰した。bispectrum, bicoherence が重要であり、それらの実験的活用が勧められる。

多くの種類の物理量の探索において、それで何が解明できるのかという明確な問題意識とともに、同時にどんな高次統計解析が必要かという展望を持つことが望まれる。

謝辞

P.H. Diamond 教授、藤澤彰英教授、稲垣滋教授、山田琢磨博士、小林達哉博士との有益な議論に感謝いたします。本研究の一部は、科研費(26420852, JP15H02155, JP15K17799, JP16H02442)のサポートを受けました。

参考文献

- 1) B.B. Kadomtsev, Plasma Turbulence (Academic, New York, 1965)
- 2) A. Hasegawa, C. G. MacLennan and Y. Kodama, "Nonlinear behavior and turbulence spectra of drift waves and Rossby waves", Phys. Fluids, 22, pp.2122-2129, (1979)
- 3) Ch. P. Ritz, E. J. Powers, T. L. Rhodes, R. D. Bengtson, K. W. Gentle, Hong Lin, P. E. Phillips, A. J. Wootton, D. L. Brower, N. C. Luhmann Jr., W. A. Peebles, P. M. Schoch and R. L. Hickok, "Advanced plasma fluctuation analysis techniques and their impact on fusion research (invited)", Rev. Sci. Instrum. 59, pp.1739-1744, (1988)
- 4) C. Hidalgo, E. Sánchez, T. Estrada, B. Brañas, Ch. P. Ritz, T. Uckan, J. Harris, and A. J. Wootton, "Experimental evidence of three-wave coupling on plasma turbulence", Phys. Rev. Lett., 71, pp.3127-3130, (1993)
- 5) H. Y. W. Tsui, K. Rypdal, Ch. P. Ritz, and A. J. Wootton, "Coherent nonlinear coupling between a long-wavelength mode and small-scale turbulence in the TEXT tokamak", Phys. Rev. Lett., 70, pp.2565-2568, (1993)
- 6) J. S. Kim, R. J. Fonck, R. D. Durst, E. Fernandez, P. W. Terry, S. F. Paul, and M. C. Zarnstorff, "Measurements of Nonlinear Energy Transfer in Turbulence in the

- Tokamak Fusion Test Reactor”, *Phys. Rev. Lett.*, 79, pp.841-844, (1997)
- 7) R. A. Moyer, G. R. Tynan, C. Holland, and M. J. Burin, “Increased Nonlinear Coupling between Turbulence and Low-Frequency Fluctuations at the L–H Transition”, *Phys. Rev. Lett.*, 87, pp.135001-1-135001-4, (2001)
 - 8) G. H. Xia and M. G. Shats, “Inverse Energy Cascade Correlated with Turbulent-Structure Generation in Toroidal Plasma”, *Phys. Rev. Lett.*, 91, pp.155001-1-155001-4, (2003)
 - 9) P. H. Diamond, M. N. Rosenbluth, E. Sanchez, C. Hidalgo, B. Van Milligen, T. Estrada, B. Brañas, M. Hirsch, H. J. Hartfuss, and B. A. Carreras, “In Search of the Elusive Zonal Flow Using Cross-Bicoherence Analysis”, *Phys. Rev. Lett.*, 84, pp.4842-4845, (2000)
 - 10) K. Itoh, Y. Nagashima and S.-I. Itoh, P. H. Diamond, A. Fujisawa, M. Yagi, and A. Fukuyama, “On the bicoherence analysis of plasma turbulence”, *Phys. Plasmas*, 12, 102301-1-102301-9, (2005)
 - 11) P.H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh, and T.S. Hahm, “Zonal flows in plasma—a review”, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 47, pp.R35-R161, (2005)
 - 12) Y. Nagashima, K. Hoshino, A. Ejiri, K. Shinohara, Y. Takase, K. Tsuzuki, K. Uehara, H. Kawashima, H. Ogawa, T. Ido, Y. Kusama, and Y. Miura, “Observation of Nonlinear Coupling between Small-Poloidal Wave-Number Potential Fluctuations and Turbulent Potential Fluctuations in Ohmically Heated Plasmas in the JFT-2M Tokamak”, *Phys. Rev. Lett.*, 95, pp.095002-1-095002-4, (2005)
 - 13) Y. Nagashima, S. -I. Itoh, S. Shinohara, M. Fukao, A. Fujisawa, K. Terasaka, Y. Kawai, G. R. Tynan, P. H. Diamond, M. Yagi, S. Inagaki, T. Yamada, and K. Itoh, “Observation of the parametric-modulational instability between the drift-wave fluctuation and azimuthally symmetric sheared radial electric field oscillation in a cylindrical laboratory plasma”, *Phys. Plasmas* 16, pp.020706-1-020706-4, (2009)
 - 14) Y Nagashima, K Itoh, S-I Itoh, A Fujisawa, M Yagi, K Hoshino, K Shinohara, A Ejiri, Y Takase, T Ido, “In search of zonal flows by using direct density fluctuation measurements”, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 49, pp.1611-1625, (2007)
 - 15) A. Fujisawa, K. Itoh, H. Iguchi, K. Matsuoka, S. Okamura, A. Shimizu, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, C. Takahashi, M. Kojima, H. Nakano, S. Ohsima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T. Akiyama, K. Ida, K. Toi, S.-I. Itoh, and P. H. Diamond, “Identification of Zonal Flows in a Toroidal Plasma”, *Phys. Rev. Lett.*, 93, 165002-1-165002-4, (2004)
 - 16) A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, H. Iguchi, K. Matsuoka, S. Okamura, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, K. Ida, K. Toi, C. Takahashi, M. Kojima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T. Akiyama, Y. Nagashima, S.-I. Itoh, and P. H. Diamond, “Experimental Evidence of a Zonal Magnetic Field in a Toroidal Plasma”, *Phys. Rev. Lett.*, 98, pp.165001-1-165001-4, (2007)
 - 17) P. Manz, M. Ramisch, U. Stroth, V. Naulin, and B. D. Scott, “Bispectral experimental estimation of the nonlinear energy transfer in two-dimensional plasma turbulence”, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 50, pp.035008-1-035008-12, (2008)
 - 18) T. Yamada, S. -I. Itoh, T. Maruta, N. Kasuya, Y. Nagashima, S. Shinohara, K. Terasaka, M. Yagi, S. Inagaki, Y. Kawai, A. Fujisawa, and K. Itoh, “Anatomy of plasma turbulence”, *Nature Phys.* 4, pp.721-725, (2008)
 - 19) S. -I. Itoh, “Plasma Turbulence -Structural Formation, Selection Rule, Dynamic Response and Dynamic Transport”, *J. Plasma Fusion Res.* 86, pp.334-370, (2010) in Japanese
 - 20) S.-I. Itoh, S. Inagaki, A. Fujisawa, and K. Itoh, “Integrated Research of Dynamic Response and Dynamic Transport of Plasma Turbulence” *J. Plasma Fusion Res.* 90, pp.793-820, (2014) in Japanese
 - 21) T. Yamada and S. Oldenbürger, “Progress of Turbulence Analysis Methods – Multi-Scale Coupling”, *J. Plasma Fusion Res.*, 88, pp.309-314, (2012) in Japanese
 - 22) Y. Nagashima and H. Arakawa, “Observation of Nonlinear Energy Transfer in Plasma Turbulence”, *J. Plasma Fusion Res.*, 88, pp.315-321, (2012) in Japanese
 - 23) S. -I. Itoh, K. Itoh, M. Sasaki, A. Fujisawa, T. Ido, and Y. Nagashima, “Geodesic acoustic mode spectroscopy”, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 49, L7-L10, (2007)
 - 24) Sanae-I. ITOH, Kimitaka ITOH, Yoshihiko NAGASHIMA and Yusuke KOSUGA, “On the Application of Cross Bispectrum and Cross Bicoherence”, *Plasma Fusion Res.*, 12, pp.1101003-1-1101003-9 (2017)
 - 25) N. D'Angelo, “Kelvin—Helmholtz Instability in a Fully Ionized Plasma in a Magnetic Field”, *Phys. Fluids*, 8, pp.1748-1750, (1965)
 - 26) W.E. Amatucci, “Inhomogeneous plasma flows: A review of in situ observations and laboratory experiments”, *J. Geophys. Res.* 104, pp.14481-14503, (1999)

- 27) T. Kaneko, H. Tsunoyama, and R. Hatakeyama, “Drift-Wave Instability Excited by Field-Aligned Ion Flow Velocity Shear in the Absence of Electron Current”, *Phys. Rev. Lett.* 90 pp.125001-1-125001-4, (2003)
- 28) Peter J. Catto, Marshall N. Rosenbluth, and C. S. Liu, “Parallel velocity shear instabilities in an inhomogeneous plasma with a sheared magnetic field”, *Phys. Fluids*, 16, pp.1719-1729, (1973)
- 29) N. Mattor and P.H. Diamond, “Momentum and thermal transport in neutral-beam-heated tokamaks”, *Phys. Fluids*, 31, pp.1180-1189, (1988)
- 30) X. Garbet, C. Fenzi, H. Capes, P. Devynck, and G. Antar, “Kelvin–Helmholtz instabilities in tokamak edge plasmas”, *Phys. Plasmas*, 6, pp.3955-3965, (1999)
- 31) Y. Kosuga, S.-I. Itoh, and K. Itoh, “Density Peaking by Parallel Flow Shear Driven Instability”, *Plasma Fusion Res.*, 10, pp.3401024-1-3401024-7, (2015)
- 32) S. Inagaki, T. Kobayashi, Y. Kosuga, S. -I. Itoh, T. Mitsuzono, Y. Nagashima, H. Arakawa, T. Yamada, Y. Miwa, N. Kasuya, M. Sasaki, M. Lesur, A. Fujisawa, and K. Itoh, “A Concept of Cross-Ferroc Plasma Turbulence”, *Sci. Rep.*, 6, pp.22189—22189-6, (2016)
- 33) T. Kobayashi, S. Inagaki, Y. Kosuga, M. Sasaki, Y. Nagashima, T. Yamada, H. Arakawa, N. Kasuya, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, and K. Itoh, “Structure formation in parallel ion flow and density profiles by cross-ferroc turbulent transport in linear magnetized plasma”, *Phys. Plasmas*, 23, pp.102311-1-102311-9, (2016)
- 34) Y. Kosuga, S.-I. Itoh, and K. Itoh, “Zonal flow generation in parallel flow shear driven turbulence”, *Phys. Plasmas*, 24, pp.032304-1-032304-7, (2017) (2016)
- 35) M. Sasaki, N. Kasuya, S. Toda, Y. Kosuga, T. Kobayashi, H. Arakawa, T. Yamada, S. Inagaki, M. Yagi, K. Itoh, and S. -I. Itoh, Japan Physical Society Autumn Meeting (Kanazawa Univ. 2016 Sep.) ‘Turbulence simulation on competition between drift wave and axial flow driven instability in cylindrical magnetized plasmas’ 15pKA11
- 36) N. Dupertuis, S. Inagaki, Y. Nagashima, Y. Kosuga, F. Kin, T. Kobayashi, N. Kasuya, M. Sasaki, A. Fujisawa, M. Q. Tran, S. -I. Itoh, and K. Itoh, “Coexistence of Drift Waves and D’Angelo Modes at Different Position and Frequency in Linear Plasma Device”, *Plasma Fusino Res.*, 12, pp.1201008-1-1201008-3, (2017)
- 37) S. Oldenbürger, F. Brochard, and G. Bonhomme, “Investigation of mode coupling in a magnetized plasma column using fast imaging”, *Phys. Plasmas*, 18, pp.032307-1-032307-8, (2011)
- 38) T. Yamada, S. -I. Itoh, S. Inagaki, Y. Nagashima, S. Shinohara, N. Kasuya, K. Terasaka, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, A. Fujisawa, and K. Itoh, “Two-dimensional bispectral analysis of drift wave turbulence in a cylindrical plasma”, *Phys. Plasmas*, 17, pp.052313-1-052313-10, (2010)
- 39) Ö. D. Gürçan, P. H. Diamond, T. S. Hahm, and Z. Lin, “Dynamics of turbulence spreading in magnetically confined plasmas”, *Phys. Plasmas*, 12, pp.032303-1-032303-15, (2005)
- 40) X. Garbet, Y. Sarazin, F. Imbeaux, P. Ghendrih, and C. Bourdelle, Ö. D. Gürçan and P. H. Diamond, “Front propagation and critical gradient transport models”, *Phys. Plasmas*, 14, pp.122305-1-122305-12, (2007)
- 41) H. Biglari, P.H. Diamond, and P.W. Terry, “Influence of sheared poloidal rotation on edge turbulence”, *Phys. Plasmas*, 2, pp.1-4, (1989)
- 42) K. Itoh, S. -I. Itoh, K. Kamiya, and T. Kobayashi, “On the width of a pedestal in the H-mode”, *Nucl. Fusion*, 57, pp.022005-1-022005-5, (2017)
- 43) S. Sugita, K. Itoh, S. -I. Itoh, M. Yagi, G. Fuhr, P. Beyer, and S. Benkadda, “Ballistic propagation of turbulence front in tokamak edge plasmas”, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 54, pp.125001-1-125001-10, (2012)
- 44) L. Schmitz, L. Zeng, T. L. Rhodes, J. C. Hillesheim, E. J. Doyle, R. J. Groebner, W. A. Peebles, K. H. Burrell, and G. Wang, “Role of Zonal Flow Predator-Prey Oscillations in Triggering the Transition to H-Mode Confinement”, *Phys. Rev. Lett.* 108, pp.155002-1-155002-5 (2012)
- 45) T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, “Spatiotemporal Structures of Edge Limit-Cycle Oscillation before L-to-H Transition in the JFT-2M Tokamak”, *Phys. Rev. Lett.*, 111, pp.035002-1-035002-5, (2013)
- 46) P. H. Diamond, Y. Kosuga, Ö. D. Gürçan, C. J. McDevitt, T. S. Hahm, N. Fedorczak, J. E. Rice, W. X. Wang, S. Ku, J. M. Kwon, G. Dif-Pradalier, J. Abiteboul, L. Wang, W.H. Ko, Y. J. Shi, K. Ida, W. Solomon, H. Jhang, S. S. Kim, S. Yi, S. H. Ko, Y. Sarazin, R. Singh and C. S. Chang, “An overview of intrinsic torque and momentum transport bifurcations in toroidal plasmas”, *Nucl. Fusion*, 53, pp.104019-1-104019-20, (2013)
- 47) L. Wang, T. Wen, and P.H. Diamond, “Nonlinear parallel momentum transport in strong electrostatic turbulence”, *Phys. Plasmas*, 22, 052302-1-052302-10, (2015)
- 48) L. Wang, T. Wen, and P.H. Diamond, “Poloidal rotation driven by nonlinear momentum transport in strong electrostatic turbulence”, *Nucl. Fusion*, 56, 106017-1-

- 106017-7, (2016)
- 49) B. Labit, C. Theiler, A. Fasoli, I. Furno, and P. Ricci, “Blob-induced toroidal momentum transport in simple magnetized plasmas”, *Phys. Plasmas*, 18, pp.032308-1-032308-8, (2011)
- 50) Y. Nagashima, T. Kanzaki, F. Kin, S. Inagaki, T. Yamada, H. Arakawa, T. Kobayashi, M. Sasaki, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S. -I. Itoh, K. Itoh, the 11th Fusion Energy Forum Meeting (Kyushu Univ., 2016 July), “Dynamic Response of Reynolds Stress on the end plate biasing” 14P116
- 51) Y. Kosuga, S.-I. Itoh, P.H. Diamond, and K. Itoh, “How turbulence fronts induce plasma spin-up” *Phys. Rev. E*, 95, pp.031203(R)-1-031203(R)-4 (2017)
- 52) S. H. Müller, J. A. Boedo, K. H. Burrell, J. S. deGrassie, R. A. Moyer, D. L. Rudakov, and W. M. Solomon, “Experimental Investigation of the Role of Fluid Turbulent Stresses and Edge Plasma Flows for Intrinsic Rotation Generation in DIII-D H-Mode Plasmas”, *Phys. Rev. Lett.*, 106, pp.115001-1-115001-4 (2011)
- 53) S.-I. Itoh, S. Inagaki, K. Itoh, N. Kasuya, Y. Kosuga, M. Sasaki, T. Kobayashi, and K. Ida, Japan Physical Society Autumn Meeting (Kanasai Univ. 2015 Sep.) “Cross ferroic turbulence” 17aCN-10
- 54) K. C. Shaing, R. D. Hazeltine, and H. Sanuki, *Phys. Fluids B*, 4, pp.404-412, (1992)
- 55) T. Taniuti, H. Moriguchi, Y. Ishii, K. Watanabe, and M. Wakatani, “Solitary and Shock Structures Induced by Poloidal Flow in Tokamaks”, *J. Phys. Soc. Japan*, 61, pp.568-586, (1992)
- 56) N. Kasuya and K. Itoh, “Two-Dimensional Structure and Particle Pinch in Tokamak H Mode”, *Phys. Rev. Lett.*, 94, 195002-1-195002-4, (2005)
- 57) T. E. Stringer, “Diffusion in Toroidal Plasmas with Radial Electric Field”, *Phys. Rev. Lett.*, 22, pp.770-774, (1969)
- 58) A. B. Hassam, T. M. Antonsen, Jr., J. F. Drake, and C. S. Liu, “Spontaneous poloidal spin-up of tokamaks and the transition to the H mode”, *Phys. Rev. Lett.*, 66, pp.309-312, (1991)
- 59) Y. Camenen, A. G. Peeters, C. Angioni, F. J. Casson, W. A. Hornsby, A. P. Snodin, and D. Strintzi, “Transport of Parallel Momentum Induced by Current-Symmetry Breaking in Toroidal Plasmas”, *Phys. Rev. Lett.*, 102, pp.125001-1-125002-4, (2009)
- 60) A. Fujisawa, A. Ouroua, J.W. Heard, T.P. Crowley, P.M. Schoch, K.A. Connor, R.L. Hickok and A.J. Wootton, “Ballooning characteristics in density fluctuations observed with the 2 MeV heavy ion beam probe on the TEXT-U tokamak”, *Nucl. Fusion*, 36, pp.375, (1996)
- 61) G Birkenmeier, M Ramisch, G Fuchert, A Köhn, B Nold, and U Stroth, “Spatial structure of drift-wave turbulence and transport in a stellarator”, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 55, pp.015003-1-015003-14, (2013)
- 62) P. Manz, M. Xu, N. Fedorczak, S. C. Thakur, and G. R. Tynan, “Spatial redistribution of turbulent and mean kinetic energy”, *Phys. Plasmas*, 19, pp.012309-1-012309-6, (2012)
- 63) Kimitaka Itoh, Sanae.-I. Itoh, Yoshihiko Nagashima, Takuma Yamada, and Akihide Fujisawa, “Position Identification of Measurement for the Study of Symmetry-Breaking of Turbulence Structure in Toroidal Plasmas”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, pp.025002-1-025002-2 (2018)
- 64) Y. Nagashima, K. Itoh, A. Fujisawa, K. Shinohara, S.-I. Itoh, T. Ido, M. Yagi, K. Hoshino, A. Ejiri, Y. Takase, K. Uehara, Y. Miura, “Boundary of the geodesic acoustic eigenmode in the vicinity of the magnetic separatrix”, *Plasma Phys. Control. Fusion* 51, pp.065019-1-065019-10 (2009)