



## 解説

# 臨界状態プラズマ乱流における帯状流と乱流の相互作用

## The Interaction Mechanism between Zonal Flows and Turbulence Close to the Stability Threshold

小林すみれ<sup>1)</sup>, GÜRCAN Özgür D.<sup>1)</sup> and ROGERS Barrett N.<sup>2)</sup>

KOBAYASHI Sumire<sup>1)</sup>, GÜRCAN Özgür D.<sup>1)</sup> and ROGERS Barrett N.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>フランス国立科学機関, エコール・ポリテクニク, プラズマ物理研究所, <sup>2)</sup>アメリカ合衆国ダートマス大学物理学部

(原稿受付: 2015年12月25日)

乱流と乱流中に自己発生する帯状流は、プラズマの集団的振る舞いにおいて中核をなす問題である。核融合プラズマ実験においては、乱流によるエネルギーや粒子の径方向における輸送により、プラズマ閉じ込めが悪化するため、乱流の抑制が解決すべき最大の問題の一つであるが、帯状流が乱流の活動を大きく抑制する性質を持つことが近年の研究で明らかになってきており、帯状流コントロールによるプラズマ閉じ込めの改善が期待されている。しかし、乱流と帯状流の相互作用の詳細は、まだ解明されていない点が多い。本解説では、簡易な円柱プラズマという形状を用いて、理論モデルとジャイロ運動論シミュレーションとの比較により得られた乱流と帯状流の相互作用に関する最近の研究を紹介する。

### Keywords:

plasma turbulence, zonal flow, gyrokinetic simulation, predator-prey, turbulent spectrum

### 1. はじめに

乱流とは、大まかにいえば、様々な種類の流体に発生する大小様々な大きさの渦であり、自然界において普遍的に発生する現象である。乱流の重要性の一つは、通常の拡散に比べて非常に効果的なエネルギーや粒子の輸送にある。太陽で常に発生している核融合反応を地上の実験装置で再現することをめざす核融合研究においては、定常状態で磁気的にプラズマを閉じ込めることが主要な目標の一つである。しかし、近年の核融合プラズマ研究から、電磁流体力学方程式 (MHD) によって計算される巨視的な不安定性が安定なパラメタ領域においても、微視的な規模 (波長がジャイロ半径かそれ以下の波長) の乱流が比較的短い時間内で発生し、乱流に起因する大規模なプラズマ粒子とエネルギーの径方向への輸送がプラズマの閉じ込めを不可能にしている大きな原因の一つであることが明らかになってきた[1]。そのために、閉じ込めを阻害する微視的乱流によるプラズマ粒子・エネルギーの輸送現象を理解することは最重要課題の一つである。一方で、プラズマ乱流現象で満ちている宇宙空間では、木星や地球などの多くの惑星磁気圏において、高いプラズマ閉じ込めが実現されていることが探査機による観測・データ解析などにより解明されてきているが、そのメカニズムはまだ多くの謎に包まれている。

乱流中に自己発生する不思議な現象として、帯状流 (ゾナルフロー) と呼ばれるメゾスケールの流れがある。木星や土星の大気中 (図1を参照) や地球のジェット流な

どに見られるように、乱流の非線形現象によって自己発生的に生じる帯状流は、二次元であらわされる流体・プラズマ中において偏在する現象である。

乱流という混沌状態から帯状流という大きな流れが自己誘発されるというこの不思議な現象は、一見、エントロピー増大の法則に反するように見受けられる。その謎を解く鍵は、(主に二次元で近似できる流体では) エネルギーの他に、エンストロフィーと呼ばれる物理量が保存されることに起因すると考えられている。エンストロフィー保存の条件が加わることで、乱流が自己組織化すると、総合的なエントロピーを増やすことができるからである。



図1 木星の大気上に見られる帯状流 [Credits: NASA/JPL/University of Arizona].

また帯状流は、乱流と相互に作用し、乱流活動を抑制したり、規則的なリズムで制御したりするなど、乱流環境に多大な影響を及ぼすと考えられている。近年、様々な磁化プラズマ中でも、帯状流の存在が実験的に確認されるようになり[2]、また理論モデルやジャイロ運動論の数値シミュレーション研究といった方法論の革新により、帯状流が存在するパラメタ領域（臨界状態）において、帯状流が乱流輸送を大きく抑制するという考えが広く受け入れられるようになってきた[1, 3-9]。これらの研究をきっかけに乱流プラズマ研究においては、ドリフト波乱流を中心とする研究からドリフト波-帯状流乱流への相互作用に重点を置く研究へと、大きなパラダイムシフトが起こった[1, 4]。また帯状流の存在は、トカマクやステラレータ型装置において、プラズマ閉じ込めの悪いLモードと呼ばれる状態から、閉じ込めの良いHモードに遷移するときに現れるリミットサイクルと呼ばれる変動時に、重要な役割の一つを担うと予測されている。しかしリミットサイクル時の変動が、帯状流の変動によるものなのか、またその時の時空構造など謎はまだ多く残されている。

粒子間衝突がほとんど存在しないプラズマ中においても、速度空間での拡散が粒子間衝突のように働き、プラズマ輸送などに影響を与えること[10]、位相空間における現象の重要性[11]などが、最近の研究により理解されるようになった。日米を中心とする研究者により、近年大きく前進した帯状流の理論の進展については、[12]などに詳しく紹介されている。

強い磁場中のプラズマ乱流現象は、回転流体中の乱流、特に地球物理分野での乱流ダイナミクスと類似点が多い。例えば、木星などの惑星大気中における帯状流を形成するために必要なコリオリの力、重力、ロスビー波（コリオリ力の強さが緯度方向に変化することで誘発される）は、プラズマ流体においては、それぞれ、磁場の力（ローレンツ力）、静電ポテンシャル、ドリフト波（プラズマ圧力勾配により駆動される）に置き換えられる[13]。

これまでの多くの理論研究が、長谷川-三間モデルとチェイニー方程式[14]との関係を解明することで、地球・惑星流体物理学（geophysical fluids dynamics）と磁化プラズマの間での類似関係を明らかにしてきた[15-17]。

しかし、実際の磁化高温プラズマ中では、微視的不安定性（例えば、トカマクにおけるイオンや電子温度勾配モード）が、運動論が重要となる小さなスケールでも重要となるため、実験とともに、運動論的物理を内包するモデルを用いた数値計算が不可欠である。また帯状流は、流体モデルでは安定でも運動論モデルで不安定になるような、成長率が比較的微小な境界領域で発生することが多い。簡易化された理論モデルでは、鍵となると考えられるような重要な運動論的な物理現象（ランダウ減衰や有限ラーモア半径効果など）を正確に再現することは容易ではない。

微視的スケールで発生するプラズマ乱流の理解を深めることは、核融合・宇宙プラズマの両プラズマ分野において欠かすことのできない重要課題であるが、実際には6次元の運動論方程式をそのまま解くことは今日の数値計算機性

能をもってしても達成が困難である。そのため主に核融合分野において、ジャイロ運動論という背景磁場が存在する磁場形状において適用できる5次元の運動論的モデルが開発され、実験炉研究において続々と新しい成果をもたらしている。（最近では、太陽風の乱流研究にもジャイロ運動論を用いるという新しい試みが進められており、運動論効果が重要になる運動論スケールにおいて、宇宙探査機からの観測に類似したジャイロ乱流スペクトルの存在が示された[18].）

本解説記事では、微視的乱流とそれによって誘発される帯状流、およびそれらの相互作用が存在するシンプルな系として円柱プラズマ（Zピンチ）のジャイロ運動論シミュレーション結果について紹介し、大域的な構造である帯状流と微視的乱流の相互作用のモデル化について解説する。また本解説の最後では、円柱プラズマ研究で得た知識をもとに、トカマク型装置で得られた実験結果への応用の可能性についても解説する。

## 2. 帯状流によるゆらぎの局在化と線形成長率の減衰

この章では、ジャイロ運動論数値計算の研究結果をもとに、帯状流が一時不安定性（プライマリモード；ここではエントロピーモードの固有モード）を局在させる様子、そしてその局在化によって帯状流が非線形段階で飽和する可能性などについて解説する。

筆者らのグループは、メリーランド大学を中心とした研究者によって開発された、5次元の（局所的）非線形ジャイロ運動論モデルコード（GS2）[19, 20]を用い、ダイポール形状と円柱プラズマ磁場形状（Zピンチ）において様々な数値実験を行った。このような円柱対称な磁場形状では、ポロイダル方向の磁力線によりプラズマが閉じ込められる。ダイポール形状におけるプラズマ閉じ込め実験は、1970年代にボイジャーIIのミッション中に観測された、惑星のダイポール状磁場における高いプラズマ閉じ込めにヒントを得て発案された革新的なアイデアである[21]。実際に、東京大学のRT-1装置[22]や、MITのLDX装置[23]などのダイポール形状を用いた実験研究は、核融合実験炉として、また惑星におけるプラズマダイナミクスを理解するためにも注目される革新的でユニークな研究である。

ジャイロ運動論モデルは、今日の核融合実験プラズマにおいて、大型並列数値計算機を使用すれば実行可能な場合が多く、なおかつ現実に実験炉で起こっている物理を再現するモデルとしては、最も進んだモデルと考えられている。しかしながら、トカマクなどの複雑な形状においては、非線形な乱流の相互作用のエッセンスを抽出するのが非常に難しい。この理由のひとつには、強い磁気シアアが存在する複雑な形状がある。磁気シアアは、トカマク型核融合実験におけるプラズマの閉じ込めにとって欠かせない構造であるが、同時に帯状流と乱流の相互作用の原理を理解する上で、詳しい解析を困難にしている大きな原因の一つである。構造上、磁場のシアアが存在しない円柱プラズマ

(Zピンチ)におけるこれまでのジャイロ運動論研究では、LDX装置や、RT-1装置のようなダイポール形状の実験結果と一致した結果が見出されてきており、またトカマク型装置で観測される多数の性質を持つことが確認されている。例えば、実験で観察された高レベルのピンチ現象をジャイロ運動論数値計算でも質的量的に再現することができるとともに、帯状流と乱流に関して、ポロイダル形状によく似通った特徴が観測されることがわかってきた[24-27]。

また後に紹介するように、これらの磁気シアのない形状では、複雑な形状におけるジャイロ運動論シミュレーションでは、はっきりと識別することの難しい乱流と帯状流の捕食者-被食者的関係が、非常に明瞭に現れる。これらは、トカマク型やステラレーター型などの装置で観測されているが、運動論の計算では識別することが難しい、LH遷移時に観測される帯状流と乱流のサイクル[1, 28, 29]と関連していると予測されるため、その原理の理解を深めるためにも、便利な形状と考えられる。

円柱プラズマ(Zピンチ)系においては、静電的なエントロピーモード[30]が圧力勾配によって駆動され、半径方向の $E \times B$  ストリーマがケルビン-ヘルムホルツ(KH)不安定性によって壊され帯状流が形成される。(微視的な不安定性を考えるため、理想MHDモードである交換型不安定性は安定な領域を考える。)安定性限界に近い領域では、帯状流が安定的に維持され、準静的な低輸送状態が形成される。

プラズマ勾配(径方向)により駆動される線形不安定性は、径方向のプラズマの流れ(ストリーマ)を形成し(図2a)プラズマ勾配を平坦化させようとする。その後、ストリーマの振幅が大きくなると非線形効果が重要になり、径方向のプラズマの流れがKH様不安定性により不安定になり破壊され始め(図2b)、その結果、帯状流が形成されると考えられる。また、時間的に安定で支配的な帯状流(図2c)は、臨界状態(stability threshold)に近いパラメタ領域において形成される。

ジャイロ運動論的モデルを用い、非線形飽和段階で帯状流強度などの条件を変えて、それらによるプライマリモードの線形成長率の変化や非線形輸送レベルを計測し、不安定波の形状の変化を調べた結果、プラズマ輸送強度は帯状流のわずかな変化にも強く依存することがわかった。

安定性限界をわずかに超える状況では、粒子間衝突がごく小さければ安定な帯状流が乱流輸送を抑制するが、衝突

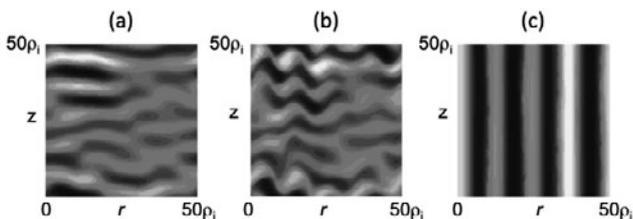


図2 (a)線形段階、(b)非線形段階のはじまり、(c)飽和した非線形段階(静的な帯状流が卓越したケース)における、静電ポテンシャル( $\phi$ )を示す。

がある程度大きいパラメタ領域では帯状流の減衰[31]が大きくなるため、再度乱流が卓越し、乱流と静的な帯状流が交互に卓越するサイクル(捕食者-被食者様のダイナミクス)を形成する(図3)。

このサイクルにおける乱流と帯状流の相互作用を、非線形ジャイロ運動論コードによって詳細に調べたところ、帯状流の振幅が増大するにしたがってゆらぎが空間的に局在化するようになり、帯状流の速度シア最小の領域にゆらぎが集中するとき帯状流は飽和レベルに達する(その後、帯状流は衝突によって減衰する。)ことがわかった(図4)。また線形成長率は、局在化が起こるにつれ大きく減衰することも観測された。図4は、ジャイロ運動論シミュレーションにおける、帯状流(a, b)と帯状流以外の成分(c, d)を示す。線形不安定性(被食者)により形成される帯状流(捕食者)(図4a)は、線形不安定性が局所的する(図4c)まで成長する。その後、帯状流は、衝突により減衰される(図4b)。帯状流の強さが弱まると、線形

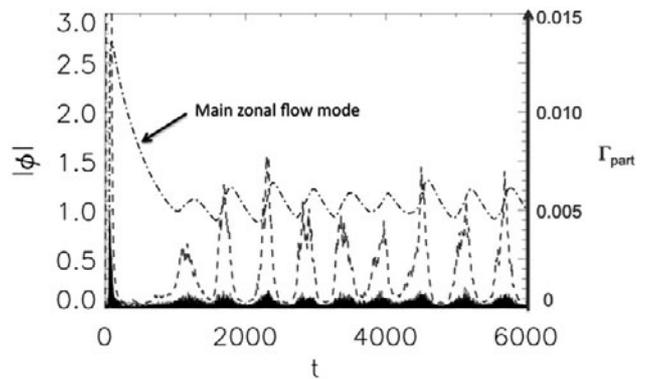


図3 ジャイロ運動論シミュレーションにおける帯状流(一点鎖線)と粒子輸送(点線)の関係。

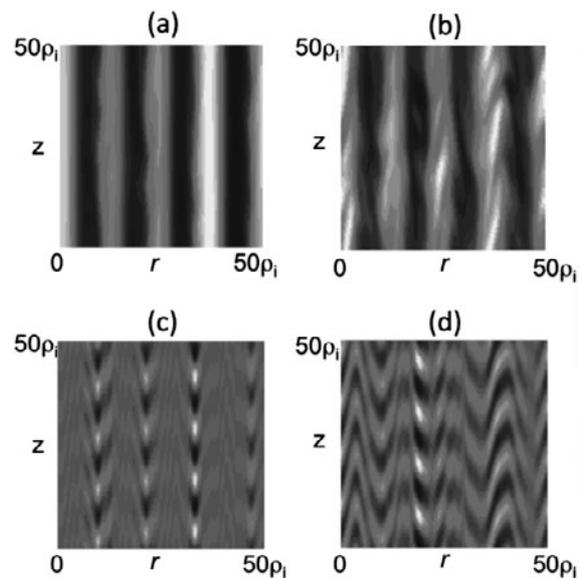


図4 ジャイロ運動論シミュレーションにおいての実空間での静電ポテンシャルの分布。強い帯状流(a)が存在する間、帯状流以外の成分(c)は、速度シアが最小の場所に局在化される。帯状流が衝突などの効果によって弱まると(b)、線形不安定性が全体に広がり(d)、再度、帯状流を強化する。このサイクルが、捕食者-被食者サイクルを形成する。

不安定性が再度活発になり (図 4 d), 帯状流を再形成する. この循環が捕食者-被食者関係を作ると考えられる.

微視的乱流がプラズマ輸送において主要な役目を果たし, 帯状流のわずかな変化が乱流輸送レベルに強く影響を及ぼす理由として, 少しの帯状流の強さによって, このような局在化が occur, いわゆる輸送バリアの様な構造が形成されることも, 一因として考えられるであろう.

### 3. 帯状流が存在する乱流中におけるジャイロ運動論スペクトル

小さなスケールにまで及ぶスペクトルを得るためには, 速度空間においても高い解像度が必要であるが, ジャイロ運動論シミュレーションでは, エネルギーや粒子の輸送を主に行う波数空間に重点が置かれることが多く, プラズマ閉じ込め実験や, 理論モデルで予測されるスペクトルと, ジャイロ運動論数値計算との比較解析が難しい. この為, 円柱プラズマのような比較的シンプルな系におけるジャイロ運動論シミュレーションは, 現実的な物理メカニズムを犠牲にすることがなく, トカマクなどの装置で観測される現象を抽出・解析し, 他のシステムにおける結果と比較考察し一般化するにあたって, 利便性が高いと考えられる.

一般に一樣な乱流においては, スケールの同程度の渦が相互作用してエネルギーを伝達し, 乱流スペクトルを形成する. ある大きさに投入されたエネルギーは, 乱流現象によって, 徐々に小さなスケールへと伝達されていく. 通常の流体では, 小さい渦へと徐々に伝達されたエネルギーは, このカスケードと呼ばれる現象により, 衝突の効果が重要になる分子レベルのサイズで熱に変換される. この結果, 直接エネルギー投入や散逸が行われない波数  $k$  の領域 (慣性領域と呼ばれる) では, 次元解析の結果, コルモゴロフ (Kolmogorov) スペクトル  $E_k \propto k^{-5/3}$  という有名なスペクトルが予測される. 実際に, 様々な流体においてこのコルモゴロフスペクトルの存在が観測されてきた.

また衛星を使った研究により, 宇宙に自然に存在するプラズマ流体にも同様のスペクトルの存在が存在することがわかってきた. 図 5 は, 私たちの太陽系を満たす, 太陽風と呼ばれるプラズマ中においても, エネルギーの出入りのない広範囲な波数空間 (慣性領域) で非常に明瞭なコルモゴロフ様 (Kolmogorov) スペクトルが, 観測されることを示している. これは, 太陽風というプラズマ乱流においても, 他の流体に見られるように, ほぼ同じ大きさの渦同士の作用 (波数空間における局所的な作用) が, その他の相互作用よりも優勢であることを示している.

通常の流体と異なり, 太陽風や核融合実験のプラズマでは, ほとんどプラズマ粒子同士の衝突が存在しない (例えば, 平均自由行程は, 空気中では,  $10^{-7}$  m 程度であるが, 核融合実験では, 装置の寸法程度, 地球付近の太陽風では, 地球と太陽の距離に匹敵する). その代わりに, 低衝突・無衝突プラズマでは, 様々な運動論的效果がエネルギー散逸に重要な役目を果たしていると考えられる.

一般に, 磁化プラズマ実験のように, 圧力勾配駆動型の

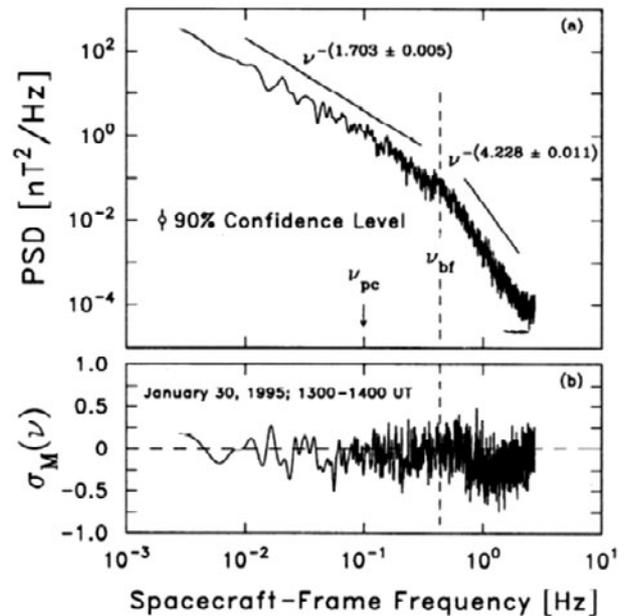


図 5 太陽風で長年観測されてきた乱流磁場成分のスペクトルは, コルモゴロフ理論で予測されるもの ( $E_k \sim k^{-5/3} \sim k^{-1.7}$ ) とよく一致する [32].

不安定性が重要な役割を果たすシステムにおいては, 波数空間におけるエネルギー投入領域が広い為, 慣性領域を明確に定義することが難しく, そのため特定のスペクトルは存在しないと考えられることが多かった. しかし龍野ら [33, 34] のグループによる理論と数値計算研究により, 小さな規模 ( $1 \leq k\rho_i$ ) ( $\rho_i$  はイオンのラーマー半径) では, 非線形位相混合 (phase-mixing) 効果により,  $k^2 |\phi_k|^2 k^{-10/3}$  というジャイロ運動論スペクトル ( $\phi$  は静電ポテンシャル) が現れることが示された.

また帯状流が存在する場合には, 帯状流と微小な渦の直接相互作用が重要になることが予測される. これらについて, 帯状流が優勢に存在する臨界状態における非線形ジャイロ運動論シミュレーションを行った結果, 帯状流が優勢な乱流中では, 電界エネルギーとプラズマ密度の両方で小さなスケール (波動空間の値が大きくなることと同義) では, 特有のスペクトルが発生することが観測された (図 6 を参照) [35].

このスペクトルは, 長谷川-三間モデルを元に, 帯状流と乱流の直接相互作用を加味した理論予測 [36, 37],

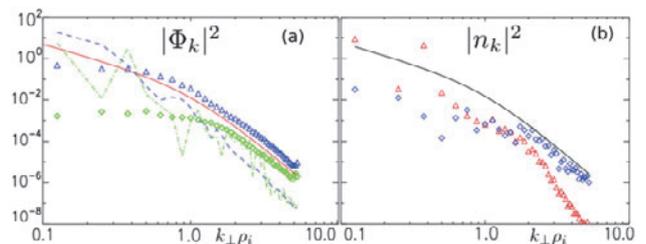


図 6 帯状流が優勢なパラメータにおける, 静電ポテンシャル (a) と数密度 (b) のジャイロ運動論スペクトルを示す. 理論モデルによる予測 (赤の実線 (a) と黒の実線 (b)) とよく一致する.

$|\phi_k|^2 \sim |n_k|^2 \sim k^{-3}/(1+k^2)^2$  (図では、赤(左図)と黒(右図)の曲線で示されている)とよく一致する。これにより、帯状流が安定な系では、帯状流と微小な渦(乱流)の直接相互作用が、一般的な乱流で優勢と考えられる微小な渦同士の相互作用(局所的な作用)よりも卓越し、乱流ダイナミクスを決定していることを示唆していると考えられる[38]。さらに、最近の Tore Supra トカマク実験炉(仏)における観測でも、同様なスペクトルが観測されている[37]。これらの結果は、ジャイロ運動論モデルが有意と考えられる乱流場において、この特有のスペクトルが、自己組織化の兆候や程度を示す目安となる潜在的な可能性を示唆している。

#### 4. ジャイロ運動論と捕食者-被食者モデルとの比較分析

第2章で見たように、帯状流と乱流の相互作用は、捕食者-被食者(Predator-Prey)様の関係を発生させることが知られている[1, 4, 39]。この章では、帯状流と乱流の更に詳しい相互作用について、シミュレーション結果と Predator-Prey (P-P) モデルとを時間的に適合解析することにより、実効的な乱流の成長率や帯状流の減衰率などを見積もるといふ新しい試みについて解説する。

捕食者-被食者ダイナミクスは、異なる種の間における連結関係による競争により、生態系の個体数が周期的に変化する様子を理解するために、生態系に関連する広い分野で研究されてきた。うさぎとキツネなどに代表されるような、捕食者-被食者関係だけでなく、宿主と寄生虫の関係、免疫系とがん細胞の相互関係、また革新的なテクノロジーがもたらされたときの、新しい装置と旧来の装置の販売数の時間的変化(旧来の装置の値段が減少することによる)など、このシンプルなアイデアは、生物学だけでなく、社会科学など広い分野において応用できると考えられている。

プラズマ乱流においては、乱流を餌として発生・成長する帯状流は捕食者の役割を、またプラズマ圧力勾配により発生する線形不安定性を源として成長する乱流は、被食者の役割を果たす。あるパラメータ領域(例えば、先に述べられたトカマクやステラレータなどの核融合実験装置における、L-H 遷移時など)では、このダイナミクスが、捕食者-被食者のような関係を示すが、その他の非線形システムがカオス的なダイナミクスを示す領域でも、先に述べた(波数空間における)局所的なカスケードや、その他の運動論効果とともに捕食者-被食者関係が背後に共存していると考えられる。

今回筆者らは、Lotka-Volterra モデルという一般的な捕食者-被食者モデルを用いた。Lotka-Volterra モデルは次のように示される。

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma_{\text{eff}} N - c_1 N E_v \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_v}{\partial t} = c_2 E_v N - \gamma_z E_v \quad (2)$$

$N = \sum_k |\phi|^2 (1+k^2)$  は、帯状流以外(被食者)の(ドリフト波などによる)エネルギー(運動エネルギーと内部エネルギーの総計)、 $E_v = |\phi_q|^2 q^2$  は、帯状流の運動エネルギー(捕食者)である。 $\gamma_{\text{eff}}$  は、帯状流存在下での、被食者の実効(effective)成長率で、 $c_1$  と  $c_2$  は、被食者と捕食者間の(非線形)相互作用係数、 $\gamma_z$  は、帯状流の減衰率をモデル近似している。

乱流と帯状流の時間推移図(図7)に見られるように、ジャイロ運動論シミュレーションにおいて、これらの関係は、捕食者-被食者 P-P (Lotka-Volterra) モデルにより、被食者(赤の破線)と捕食者(青の破線)の関係として定量的に適合することができる。また、これにより捕食者-被食者関係を現す係数を推定することができる。

様々なパラメータ領域において適合解析を行った結果、見積もられた実効的な乱流の成長率は、密度勾配に伴い線形成長率が増加しても一定に保たれることが示された。図8(下図)において、プラズマ密度勾配( $R/L_n$ )の値が大きくなると、システムに注入される、自由エネルギーが増えるため、一般には、不安定性の線形成長率が大きく増加する。しかし実効的乱流成長率(赤色のデータ)の値は一定である。またそのレベルは先に観測された(2章)帯状流存在下でのジャイロ運動論の線形分析により得られた成長率とおおよそ一致する[40]。これは、乱流による帯状流を用いた自己統制プロセスと考えられる。すなわち、増加したエネルギーが、帯状流に譲渡されて、その帯状流が乱流を抑制していることに起因すると考えられる。これは第3章で、帯状流が優勢な系では、帯状流と乱流の直接的な相互作用が卓越するという推論と一致する。またこの結果は、準線形の輸送モデル[41-43]においても、帯状流の影響を考慮に入れる必要があることを示唆している。

帯状流が壊れる原因については、主に、衝突によるという説や、KH 不安定性による崩壊という可能性が論じられている。筆者らは適合解析結果をそれぞれのジャイロ運動論計算において使用された衝突率と帯状流の減衰率を比較した。その結果、粒子間衝突率をもとに見積もられた拡散様の帯状流減衰率と(図8、青色の破線)、定量解析により得られた帯状流の減衰率(図8の青色の実線)とがおおよそ一致する。つまり、当該パラメータ領域では、帯状流の減衰が、ほぼ衝突に起因し、KH 不安定性による効果がほとんど無視できることを示唆すると考えられる。したがって、KH 不安定性のような二次的(Tertiary)不安定性が帯状流の減衰に役割を果たす場合、ダイナミクスは本解説で

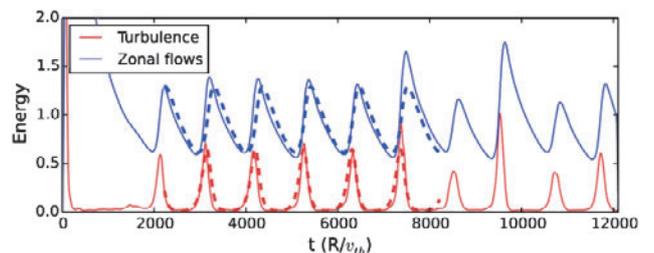


図7 ジャイロ運動論シミュレーションにおける、乱流(赤)と帯状流(青)の時間推移。

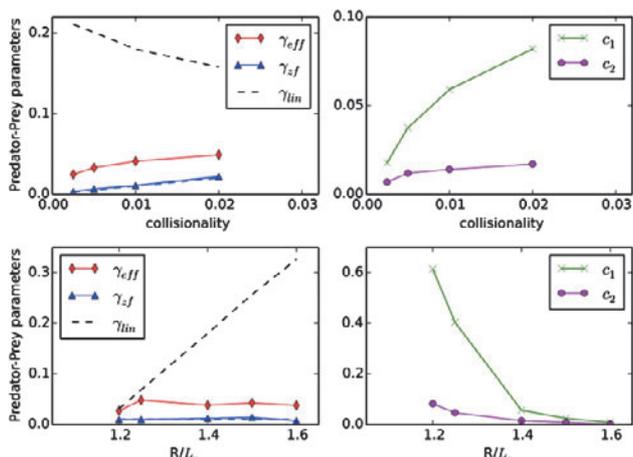


図8 P-Pモデルパラメータの衝突係数(左上と右上の図)への依存性と、プラズマ圧力勾配への依存性(左下と右下の図)。

示されるような単純なP-P関係を失い、複雑化することが予測される。

带状流の減衰については、まだはっきり理解されておらず、実験において減衰率を測る方法は解明されていないが、このような定量解析による分析は、带状流の減衰率を測る方法としての新しい可能性を示唆している。

## 5. まとめと展望

本解説では、非線形ジャイロ運動論シミュレーションを用いて、静電プラズマ乱流における带状流の影響、特に、带状流の飽和と線形モードの局所化の関係、静的なエネルギースペクトルにおける非局所相互作用の効果、および動的な带状流と乱流の相互作用のモデルなどについて紹介した。これらの研究では、乱流中に発生する带状流が安定なパラメータ領域では、带状流による乱流の自己抑制が行われるため、特徴的なスペクトルがつくられること、また、带状流と乱流の関係を、簡易な捕食者-被食者モデルによって捉える事により、背景に作用する物理機構を推測する可能性などが示された。

本解説で紹介したような単純化されたシステムでの研究は、带状流と乱流の非線形な相互関係を本質的に理解し、核融合実験炉での予測能力を高めるためのモデル作りの助けになると考えられる。P-Pモデルのような低次元モデルによってシステムの振る舞いを簡易に予想できるようになることは、带状流による乱流の抑制が重要となる核融合プラズマの制御などにつながり、実用上も大変有用となる可能性を秘めていると考えられる。

ここで紹介した円柱系と、トカマク型などのトラス系では、带状流の減衰機構が異なる。トカマク系では、磁気シアーにより、円柱系に比べてKH不安定性が抑制されると考えられる。しかし、今回の研究結果が示唆するように、捕食者-被食者様の関係が観察される場合にはKH不安定性が抑制されているとすれば、類似したアプローチをトカマク系でも応用できることが期待される。

現在、ジャイロ運動論シミュレーションだけでなく、実験で得られたデータを適合解析する可能性が模索されている。図9は、トカマク型核融合実験装置 DIII-D で、リミッ

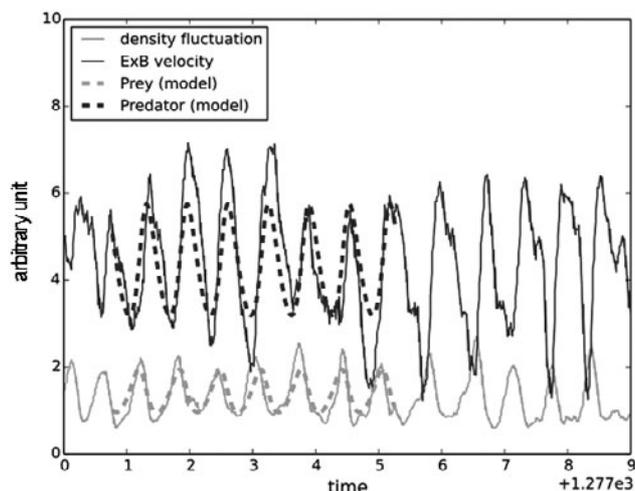


図9 トカマク型核融合実験装置 DIII-D の I-phase リミットサイクル中の振動データ[44]を、捕食者-被食者 P-P (Lotka-Volterra) モデルにより時間適合した例。

トサイクル時に得られた振動データ[44]を、捕食者-被食者 P-P (Lotka-Volterra) モデルにより時間適合した例をしめす。図中の E×B 速度(任意のオフセット)、規格化された数密度振幅を表している。今回紹介したような方法で、パラメタがどのような機構を通してシステムの振る舞いに影響を与えるか(例えば、粒子間衝突の程度と、带状流の減衰率、さらに乱流輸送レベルの関係)などを更に探ることができるとも考えられる。

また、带状流の少しの変化が、系(乱流の活発度や、エネルギーなどの各種の輸送など)に大きな影響を与えるため、带状流と乱流の動的輸送応答の解明は、磁化プラズマ閉じ込め実験時の乱流輸送軽減のために必須だけでなく、他の分野においても、極めて大きな影響を持ちうる。例えば、地球のジェット気流と異常気象の関係、太陽中の带状流と太陽活動の周期の関係などの地球温暖化や環境問題を理解する上でも大きな可能性を秘めていると言えるだろう。

## 謝辞

今回の解説に関するジャイロ運動論シミュレーション研究では、NERSC(アメリカ国立エネルギー研究科学計算センター)及び、IFERC(国際核融合エネルギー研究センター)の大型並列計算機において数値計算を行いました。GS2コード及び、ジャイロ運動論モデルの使用において兵庫県立大学の沼田龍介准教授と、電気通信大学の龍野智哉准教授に大変お世話になりました。また、P. Diamond 教授と T.S.Hahn 教授らと有意義な議論もたいへん助けになりました。感謝いたします。

## 参考文献

- [1] K. Itoh *et al.*, Plasma Phys. **13**, 055502 (2006).
- [2] A. Fujisawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 165002 (2004).
- [3] P.H. Diamond *et al.*, Phys. Rev. Lett. **72**, 2565 (1994).
- [4] P. Diamond *et al.*, Plasma Phys. Controlled Fusion **47**, R35 (2005).

- [ 5 ] H. Biglari *et al.*, Phys. Fluids **B2**, 1 (1990).  
 [ 6 ] T.S. Hahm and K.H. Burrell, Phys. Plasmas **2**, 1648 (1995).  
 [ 7 ] Z. Lin *et al.*, Science **281**, 1835 (1998).  
 [ 8 ] B.N. Rogers *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 5336 (2000).  
 [ 9 ] R. Numata *et al.*, Phys. Plasmas **14**, 102312 (2007).  
 [10] T.H. Watanabe and H. Sugama, Phys. Plasmas **11**, 1476 (2004).  
 [11] Y. Kosuge and M. Lesur : プラズマ・核融合学会誌 **90**, 289 (2014).  
 [12] Itoh : プラズマ・核融合学会誌 **81**, 972-977 (2005).  
 [13] 長谷川晃 : 大阪大学工業会 Techno net **554**, 35-41 (2011).  
 [14] J.G. Charney, Geophys. Publ. Oslo **17**, 1 (1948).  
 [15] W. Horton and A. Hasegawa, Chaos **4**, 227 (1994).  
 [16] D. Del Castillo-Negrete, Nonlinear Processes Geophys. **17**, 795 (2010).  
 [17] P.H. Diamond *et al.*, Plasma Phys. Controlled Fusion **53**, 124001 (2011).  
 [18] G.G. Howes *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 065004 (2008).  
 [19] W. Dorland *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 5579 (2000).  
 [20] M. Kotschenreuther *et al.*, Comput. Phys. Commun **88**, 128 (1995).  
 [21] A. Hasegawa, Comments on Plasma Phys. Controlled Fusion **1**, 147 (1987).  
 [22] H. Saitoh *et al.*, Phys. Plasmas **22**, 024503 (2015).  
 [23] A.C. Boxer *et al.*, Nat. Phys. **6**, 207 (2010).  
 [24] P. Ricci *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 245001 (2006).  
 [25] S. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 055003 (2009).  
 [26] S. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 235004 (2010).  
 [27] S. Kobayashi and B.N. Rogers, Phys. Plasmas **19**, 012315 (2012).  
 [28] J. Li and Y. Kishimoto, Plasma Phys. **17**, 072304 (2010).  
 [29] T. Estrada *et al.*, Europhys. Lett. **92**, 35001 (2010).  
 [30] P. Ricci *et al.*, Phys. Plasmas **13**, 062102 (2006).  
 [31] Z. Lin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 3645 (1999).  
 [32] T. Tatsuno *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 015003 (2009).  
 [33] G. Plunk *et al.*, J. Fluid Mech. **664**, 407 (2010).  
 [34] S. Kobayashi and O.D. Gurcan, Phys. Plasmas **22**, 050702 (2015).  
 [35] A. Hasegawa and K. Mima, Phys. Fluids **21**, 87 (1978).  
 [36] Ö. Gürcan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 255002 (2009).  
 [37] M. Nakata *et al.*, Phys. Plasmas **19**, 022303 (2012).  
 [38] R.J. Leamon *et al.*, J. Geophys. Res. **103**, 4775 (1998).  
 [39] K. Miki *et al.*, Phys. Plasmas **19**, 092306 (2012).  
 [40] S. Kobayashi *et al.*, Phys. Plasmas **22**, 090702 (2015).  
 [41] C. Bourdelle *et al.*, Phys. Plasmas **14**, 112501 (2007).  
 [42] J.E. Kinsey, Fusion Sci. Tech. **48**, 1060 (2005).  
 [43] J.E. Kinsey *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 450 (2005).  
 [44] L. Schmitz *et al.*, Nucl. Fusion **54**, 073012 (2014).



こばやし  
小林すみれ

アメリカのダートマス大学でPhDを取得後、現在はフランスでポスドクをしています。今まで、磁化プラズマ中における乱流輸送や、磁気リコネクション、また太陽風環境における乱流などを研究させてもらってきました。アメリカでは、ズンバというエクササイズにはまっていましたが、フランスでは運動をほとんどしていないにも関わらず、食べ物が美味しいため、いつもパン屋さんの前などでジレンマに陥っています。京都出身。



Özgür Gürcan

カリフォルニア大学サンディエゴ校(UCSD)でPhDを取得後、現在はフランス国立科学機関(CNRS)の常任研究員。理論が専門だが、数値計算関係にも詳しい。UCSDのP. Diamond教授や、ソウル国立大学のT.S. Hahm教授らとの共同研究多数。乳製品も食べないベジタリアンのため、乳製品天国のフランスではレストラン探しに苦勞中。趣味の木工で最近ではメガネフレームまで自作し、周りを驚かせる。istanbul出身。



Barrett Rogers

MITで理論物理学のPhDを取得後、プラズマ物理の世界に入り、メリーランド大学でのJ. Drake教授らとの共同研究を経て、現在はダートマス大学の物理学教授。実験と宇宙におけるプラズマにおいて、磁気リコネクションから、不安定性が作り出す様々な乱流現象(帯状流を含む)にいたるまで、理論と数値計算によってプラズマ物理の様々な現象の解明に携わる。いつも誰にでもとっても優しくお世話になりっぱなしです。