磁場閉じ込めプラズマの乱流シミュレーション・デ ータに対する画像を用いた解析

メタデータ	言語: ja
	出版者:
	公開日: 2023-05-02
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: SADAKATA, Tsubasa, NUNAMI, Masanori,
	KATAGIRI, Takahiro, OSHIMA, Satoshi, NAGAI, Toru
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10655/00013625

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 International License.





磁場閉じ込めプラズマの乱流シミュレーション・データに対する 画像を用いた解析

定方 翼*1·沼波 政倫*2.*3·片桐 孝洋*4·大島 聡史*4·永井 亨*4

Image-based Analysis for Turbulence Simulation Data of Magnetic Confined Plasmas

Tsubasa Sadakata^{*1}, Masanori Nunami^{*2, *3}, Takahiro Katagiri^{*4}, Satoshi Ohshima^{*4} and Toru Nagai^{*4}

-1-

Key words: Fusion Plasma, Gyrokinetics, Visualization, Similarity Analysis, Clustering

1. はじめに

核融合研究は、持続可能な人類社会を支え得る究極 のエネルギー源の実現を目指し、世界規模で進められ ている.磁場を用いた核融合炉では、約1億度に熱せ られた高温のプラズマをトーラス状の磁場で閉じ込め て,燃料となる重水素と三重水素の核融合反応によっ て生成するアルファ粒子によって燃料プラズマを自己 加熱し、高温状態を維持しながら炉心の核融合反応を 持続させる。核融合研究における数値シミュレーショ ンは、高温プラズマ物理から装置壁との相互作用の物 理まで多岐にわたる現象がその対象となるが、その中 でも、炉心プラズマの輸送シミュレーションは最大規 模の計算量を必要とする.これは、 炉心プラズマが強 い非平衡性を有するために、熱平衡分布ではなく位相 空間上に複雑に分布した系を扱わねばならず、その第 一原理モデルが、位相空間上の分布関数に対する発展 方程式 (ボルツマン方程式) に基づいているためであ る.磁場閉じ込め系では特に、異方性を持った強磁場 の環境下であることを利用したジャイロ運動論¹⁾(粒 子速度空間を3次元から磁場に垂直方向と平行方向の

- National Institute for Fusion Science / National Institutes of Natural Sciences, Toki 509-5292, Japan
- *3 名古屋大学大学院 理学研究科 Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan
- *⁴ 名古屋大学 情報基盤センター Information Technology Center, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan

2次元に簡約した計5次元の位相空間上の運動論モデ ル)と呼ばれるモデルが、大型計算機を用いたシミュ レーション研究で広く利用されている。ジャイロ運動 論シミュレーションでは、3次元の実空間のみで記述 される従来の流体モデルに比べて2次元速度空間の分 だけ自由度が増大し、1002倍程度大きな計算量を必要 とする. このシミュレーションが対象とする物理問題 として、炉心プラズマ乱流に起因する熱輸送や燃料粒 子輸送が挙げられるが、これらはプラズマ閉じ込め性 能を左右するため、核融合炉の成立性に直結する最重 要課題の一つとなっている.一方で近年では、スーパ ーコンピュータ「富岳」を始めとした大型計算機と計 算技術の進歩によって、核融合プラズマの理論研究や 定性的な物理研究のみならず、実験データ解析、乱流 輸送モデル開発, さらには, 炉心プラズマ設計など, 具体的な核融合炉を見据えた定量的なシミュレーショ ン研究が幅広く展開されている.本稿では、ジャイロ 運動論シミュレーションから得られる5次元位相空間 の分布関数という巨大なデータに対する新しい解析手 法として、特に可視化の観点から議論し、これまで見 えてこなかったプラズマ乱流の側面を明らかにすべ く,我々が進行している取り組みについて紹介する.

2. 核融合プラズマの乱流シミュレーション

本稿では、炉心プラズマが作る微細な乱流構造を 解析するために開発されたジャイロ運動論コー ド GKV^{2} に基づいたシミュレーション結果に対し て議論を進める. GKV は、プラズマ分布関数を $f(k_x, k_y, z, v_{\parallel}, v_{\perp}) = F_M + \delta f$ のように熱平衡成分 F_M と

 ^{*1} 名古屋大学大学院 情報学研究科 Graduate School of Informatics, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan
*2 自然科学研究機構 核融合科学研究所

摂動成分 & に分け、以下に示す摂動成分 & に対する 時間発展方程式であるジャイロ運動論方程式(フーリ エ空間上で表現されたジャイロ運動論方程式)を解 く.(詳細は参考文献[1,2]を参照されたい.)

$$\frac{\partial \delta f_k}{\partial t} + v_{\parallel} \nabla_{\parallel} \delta f_k + i \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_D \delta f_k + N_k - \frac{\mu}{m} \nabla_{\parallel} B \frac{\partial \delta f_k}{\partial v_{\parallel}} \\ = -\frac{q F_M}{T} \left[v_{\parallel} \left(\nabla_{\parallel} J_{0k} \delta \phi_k + \frac{\partial J_{0k} A_{\parallel k}}{\partial t} \right) + i \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_D J_{0k} \delta \phi_k \\ - i \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_* J_{0k} (\delta \phi_k - v_{\parallel} A_{\parallel k}) \right] + C(\delta f_k).$$
(1)

GKV コードでは、特定の磁力線に沿った局所領域 (フラックス・チューブ領域) に注目し,式(1) に基 づき摂動分布関数の時間発展を解くことで、プラズマ 乱流の微細現象を高精度に取り扱う.磁場揺動や極微 細スケール乱流を定量的に扱えるため、大型ヘリカル 装置 (LHD)³⁾ や JT-60U といった実際の大型プラズ マ実験装置を対象にした解析や輸送予測計算にも応用 されている.磁力線に垂直方向の実空間は波数空間 (kr.kr)としてスペクトル法で、磁力線に平行方向の 実空間と速度空間 (z, v₁, v₁) は有限差分で解き,時間 方向には4次のルンゲクッタ法が用いられる.出力 は、5次元位相空間 (k_x, k_y, z, v₁, v₁) 上の摂動分布関数 *δf*の時間ステップごとのデータであり、これらのデー タに対して例えば2次元速度空間上で積分を行うこと で、図1のようなプラズマ密度の3次元実空間分布な どを評価することができる。また、実空間上の1点に 注目すれば、その局所領域での2次元速度空間分布関



図1 GKV コードから評価された磁場閉じ込めプラズマの3次 元実空間密度揺動の様子.図では、大型ヘリカル装置 (LHD)の磁場配位における結果を示している.5次元位 相空間上の分布関数を2次元速度空間上で積分すること で密度揺動の3次元実空間分布が得られる.

数を得ることになる. こうした大規模ジャイロ運動論 シミュレーションが各国で数多く実行されている中か ら、近年の研究で明らかになってきた重要な物理とし て、ゾーナルフローと呼ばれるメソスケールの流れ構 造の形成とプラズマ輸送の抑制効果が挙げられる.こ れは、プラズマ乱流が非線形過程を通じて、トーラス 中のポロイダル方向(小半径の円周方向)に沿って帯 状に形成された流れが、 プラズマの輸送抑制に重要な 寄与(輸送の低減)を及ぼすという現象である。特 に、 プラズマの輸送レベルを如何に低減し閉じ込め性 能を向上するかが最重要課題の一つである核融合研究 にとっては、この現象を我々の手で制御することが炉 の実現に向けた必須の課題として認識されている.従 って、ゾーナルフローの物理を理解することが強く求 められている. こうしたゾーナルフローや乱流を伴う 複雑な構造は、5次元位相空間上の非線形相互作用に 起因して形成されるものであるが、図1で示したよう な速度空間上を積分した実空間分布や、ある空間一点 に注目した速度空間上の分布関数構造など、これまで は、5次元空間分布関数の豊富な情報量の一部のみに 限定した解析にとどまっていた.

ジャイロ運動論シミュレーション・デー タの可視化

ジャイロ運動論シミュレーションから出力される5 次元分布関数のデータをより直感的に理解するため、 先行研究では図2に示すようなヘッドマウントディス プレイを用いた可視化ツールを開発した⁴⁾.本ツール は、5次元位相空間分布関数に対して、3次元実空間 を模擬した仮想空間上の揺動振幅データの一点を指し 示すと、その空間点に対応する2次元速度空間分布関 数が表示される.一旦、3次元空間上の点を介して残 りの2次元空間分布を表示することで、結果的に5次 元データの可視化を実現している.

また、5次元データに対して主成分解析を行い、実 空間3次元において、分布関数の主要な成分を抽出す ることで次元圧縮とデータ量の圧縮を実現する方法も 提案されている⁵⁾.一方、GKVコードでは、前章で述 べたように、実空間上の磁場に垂直な2次元空間はス ペクトル法による波数空間として取り扱っている.こ れを3次元の実空間上で模擬するためには、フーリエ 空間上で出力された磁力線垂直成分のデータを実空間 に逆フーリエ変換する必要が生じるため、処理が煩雑 になるだけでなく、そもそも波数空間上でのデータ解 析を求められる場合も多い.そのため上述の可視化法 では、詳細な物理解析には適さないことが問題となっ

- 2 -----



図2 (左)3次元実空間上にプロットした分布関数(2次元速度空間に対しては積分したもの).(右)モーションコントローラで実 空間上の座標点を選択し,対応する速度空間分布を可視化した様子.



図3 実空間座標 z(または、ンミュレーンヨン時間)を固定し、波数空間 (k_x, k_y) 上に速度空間分布関数 $(v_{\parallel}, v_{\perp})$ をマッピンク した例.

ていた.特に磁場閉じ込めプラズマ乱流では、これま でに定式化されてきた理論的枠組みの観点において も、磁場に垂直な空間上におけるフーリエ空間上の構 造を直接的に議論できることが重要である. そこで我 々は、GKV の出力データからのダイレクトな解析を 実現するため、2次元波数空間(kx,kv)上における残 りの次元方向の分布関数情報を画像データとして取り 扱う新しい可視化手法を提案した. すなわち. 時系列 ごとの5次元という高次元位相空間上の分布関数の特 徴を捉えるために、各シミュレーション時間における 2次元速度空間 (v1, v1) 上の分布関数の, 2次元波数 空間 (kx, ky) 上の分布画像として,残りの実空間座標 (z) 上に並べたプロットを作成した. 図3は、速度空 間分布プロットを波数空間上にマッピングした例であ る、マッピング結果は、シミュレーション時間ごとに 連続で可視化され、波数空間上での大域的な構造の変 化を捉えることができる。前章で述べたゾーナルフロ ーは、これまでの多くの研究において、波数空間上の ゾーナルフロー領域(k=0の領域に対応)における 揺動振幅が大きいときに支配的になることが知られて いたが、揺動振幅、すなわち速度空間上における積分 量に対してのみの議論にとどまっていた.しかし本手 法によって,この領域における分布関数の5次元構造 が明確に確認できるようになった.さらに後述するよ うに,当該領域の分布関数には振幅が支配的であるだ けでなく,分布関数構造の形状そのものがシミュレー ションの長時間にわたって,強固に持続していること が初めて明らかになった.

ジャイロ運動論シミュレーション・デー タの解析

4.1 類似度解析

波数空間上にマッピングされた2次元速度空間上の 分布関数の構造に対して、その類似度を評価すること は、構造の特徴を定量化することと、分布関数構造の 持続時間を評価するために重要になる、そこで我々は、 画像の類似度解析で利用されている局所特徴量に基づ く手法を採用した、画像の局所特徴量とは、画素値の 急な変化、例えばグレースケールにおける形状や輪郭 を、ベクトルの配列として表したものである、本手法 では、最初に各波数空間点における速度空間分布の画 像データから特徴量抽出を行う、特徴量としては、



図4 類似度解析の流れ.各波数空間点における2次元速度空間分布データに対して,1.グレースケール化, 2.しきい値処理,3.AKAZE特徴量抽出,4.特徴量の総当たり比較,の順で類似度解析が進む.



図5 類似した特徴量の可視化.波数空間上において、高い類似度が検出された領域がマークされる. シミュレーションの長時間ステップにおいて、ゾーナルフロー領域(左図の矩形領域)にはマ ークされた部分、すなわち、高い類似度を有した構造が強固に維持されていることが分かる.

AKAZE 特徴量⁶⁾を採用し,抽出された特徴量につい て,全ての波数空間点における画像データの間で総当 たりで比較し,類似度を評価する.AKAZE 特徴量は, 非線形性スケール空間の利点を生かした高速なマルチ スケール特徴抽出・記述ができる.一連の操作を図4 に示す.同じ波数空間座標におけるシミュレーション 時間を進めたときの速度空間分布関数の類似度を計算 することで,シミュレーションにおいて同じ構造がど の程度持続しているか計算することができる.図5に 示すように,本類似度解析により,ゾーナルフロー領 域において,長時間維持される構造が確認できる.

4.2 クラスタリング

波数空間上における速度空間分布関数の構造に関し て、より正確な特徴を議論するために、教師なし機械 学習の1つであるクラスタリングを速度空間分布プロ ットに対して適用する、クラスタリングとは、データ の集合を類似したデータごとにクラスタと呼ばれるサ ブセットにグルーピングする手法である.数あるクラ スタリングアルゴリズムの中でも、K-means アルゴリ ズム⁷⁾は、クラスタ数 K とデータ数 N に対して、 O(KN)の計算量となり効率的であるため、マーケテ ィングやバイオインフォマティクスなどさまざまな分 野で活用されている⁸⁾.K-means アルゴリズムは、ク ラスタリング対象の各データから最も近いクラスタ中 心(重心)までの距離を最小にする重心を探索する. N 個のデータを K 個のクラスタに分割し、同一クラ スタ内のデータは類似し、別クラスタのデータは類似 しないデータとなる分割を特定する.K-means アルゴ リズムの概略を以下に示す.

ランダムに K 個のデータを初期重心として選択する
以下の式(2) で定義された J を計算する
各データを最も近いクラスタに割り当てる
各クラスタの重心を再計算する
Jを再計算し、J とする

5. の手順を J の変化量がしきい値 J_{threshold}
以下, すなわち |J – J'| < J_{threshold} を満たすまで繰り返す.

ここで, s_i を各データとして, μ_j をクラスタ c_j に属するデータの平均とする. μ_j とクラスタ c_j に属するデータとの二乗誤差の和は次式で定義される.

$$J = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{K} \|s_i - \mu_j\|^2.$$
 (2)

クラスタ割り当てと重心の再計算は、重心の移動距離 が事前に設定したしきい値以下となるまで繰り返され る.GKVから出力された速度空間分布プロットを Kmeans アルゴリズムの入力として与え、速度空間分布 プロット間の画素値のユークリッド距離を計算するこ とで、K個のクラスタを特定する.そして、同一クラ スタに割り当てられた速度空間分布プロットを図6に 示すように濃淡で表現し、時系列に可視化する.これ により、波数空間における類似した構造の配置を捉え ることができる.本クラスタリングによって、2次元速 度空間分布関数の類似性が、波数空間においてある種 の構造を示していることを初めて明らかにした.さら に、類似した構造の持続時間を定量化するために、波 数空間座標の各速度空間分布関数について、同じクラ スタに割り当てられる時間をカウントしている. 図7 は、持続時間を可視化した例である. この図7から、 波数空間座標の原点近傍では、長時間持続している構 造が存在することがわかる. 実際、また、波数空間に おける原点付近のカウント数、すなわち、類似構造の 持続時間は、その他の波数空間座標におけるカウント 数よりも大きい. このカウント情報を用いることで、 シミュレーションにおいて分布関数のロバストな構造 が発生する領域を特定することができる.

5. おわりに

本稿では、近年のスーパーコンピュータ性能の急速 な進歩に応じて、発展が著しい磁場閉じ込めプラズマ 乱流シミュレーションから出力される5次元位相空間 分布関数データの評価、解析手法を紹介した. 波数空 間における大域的な特徴を捉えるために、2次元速度 空間分布関数を画像データとして出力し、各シミュレ ーション時間においてz座標を固定しながら、2次元 波数空間にマッピングすることで、5次元空間上の分 布関数の直感的な解析が可能となるデータ解析手法を 提案した.次に、さらなる詳細な解析を目指し、2次 元速度空間分布関数の類似度解析を実施した. 提案手



図6 速度空間分布関数に対するクラスタリングの可視化(K=7の場合).(a)から順にシ ミュレーション内の時刻t=1.0,6.0,11.0,16.0,21.0における結果を表す.



図7 類似した構造の持続時間の可視化例(シミュレーション時刻 t=21.0の原点付近).各波数空間座標において類似構造の持続時間がカウント数として表示される.矩形で囲んだ領域や,波数空間の原点近傍(拡大図)での持続時間は他の領域と比べて長くなっていることが分かる.

- 6 -

法は、 画像の局所特徴量抽出による類似度解析手法を 応用したものである、本手法により、2次元速度空間 上の特徴的な構造が、波数空間上のゾーナルフロー領 域に持続して存在することを初めて明らかにした. ま た、ジャイロ運動論シミュレーションの出力データ全 体に対して、K-means アルゴリズムによるクラスタリ ングを適用することで、大規模な速度空間分布関数の 中から類似した構造を効率的に特定し、その持続時間 を計算した. さらに, 分布関数の2次元速度空間上の 構造の類似性は、波数空間上においてもロバストに保 持されていることが明らかになった. 加えて、同一ク ラスタに連続して割り当てられる時間をカウントする ことで、類似した構造の持続時間を定量化した、今後 は、本手法をさらに多くのシミュレーション事例に適 用し,分布関数構造の類似度の普遍性を解析する.加 えて、分布関数構造の時間変化を学習することによ り、シミュレーションの初期段階で、その後の分布関 数の発展の予測を行う分布関数の時間発展モデルを構 築することを目指している.

参考文献

1) X. Garbet, Y. Idomura, L. Villard and T. H. Watanabe:

Gyrokinetic simulations of turbulent transport, Nuclear Fusion, **50**, 043002 (2010)

- T.-H. Watanabe and H. Sugama: Velocity-space structures of distribution function in toroidal ion temperature gradient turbulence, Nuclear Fusion, 46, 24 (2006)
- 3) Y. Takeiri, T. Morisaki, M. Osakabe, M. Yokoyama, S. Sakakibara, H. Takahashi, Y. Nakamura, T. Oishi, G. Motojima, S. Murakami *et al.*: Extension of the operational regime of the LHD towards a deuterium experiment, Nuclear Fusion, 57, 102023 (2017)
- S. Kitazawa, M. Nunami, H. Ohtani, T. Katagiri, M. Hagino and T. Nagai: The 81st national convention of IPSJ, 2M-05, Fukuoka, Japan (2019)
- 5) Y. Asahi, K. Fujii, D. Manuel Heim, S. Maeyama, X. Garbet, V. Grandgirard, Y. Sarazin, G. Dif-Pradalier, Y. Idomura and M. Yagi: Compressing the time series of five dimensional distribution function data from gyrokinetic simulation using principal component analysis, Physics of Plasmas, 28, 012304 (2021)
- P. F. Alcantarilla, J. Nuevo and A. Bartoli: Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces, British Machine Vision Conference (BMVC), 09 (2013)
- J. MacQueen: Some methods for classification and analysis of multivariate observations, 281, University of California Press, Berkeley (1967)
- A. Jain: Data clustering: 50 years beyond k-means, Pattern Recognition Letters, 31, 651 (2010)