

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14441

研究課題名(和文)次元削減技術を用いた5次元速度分布関数のダイナミクス解析

研究課題名(英文) Analyzing the phase-space dynamics of 5D distribution functions using the dimensionality reduction technique

研究代表者

朝比 祐一 (Asahi, Yuuichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究職

研究者番号：00824103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次元削減技術(主成分分析(PCA))を用いることで、第一原理的5次元核融合プラズマ乱流シミュレーションデータ中から特異的な位相(位置・速度)空間内構造を抽出した。この手法により、従来は高次元(5次元位相空間+1次元時間)ゆえ可視化困難であったデータを位相空間基底(3次元)と空間係数の時系列データ(3次元)の組として表現することが可能となり、同時に10TB規模のデータを10GB程度に圧縮した。これによって、核融合プラズマ閉じ込めにおいて重要な問題である突発的な熱輸送現象と関連する空間、速度空間構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、核融合プラズマ研究で実験解析、理論解析問わず幅広く利用される5次元(空間3次元、速度空間2次元)のジャイロ運動論的プラズマ乱流シミュレーションを対象とするデータ解析手法を開発した。本研究では、次元削減技術の一つである主成分分析により可視化困難であったデータを位相空間基底(3次元)と空間係数の時系列データ(3次元)の組として表現することに成功した。同時に10TB規模のデータを10GB程度に圧縮した。これによって、核融合プラズマ閉じ込めにおいて重要な問題である突発的な熱輸送現象と関連する空間、速度空間構造を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Phase space structures are extracted from the time series of five dimensional distribution function data computed by the flux-driven full-f gyrokinetic simulation code. Principal component analysis (PCA) is applied to reduce the dimensionality and the size of the data. It is shown that this method reduces the data size by the order of 2 to 3 (10 TB to 10 GB), without losing the ability to express the important physical phenomena like the avalanche like energy transport.

From the detailed analysis of the contribution of each principal component to the energy flux, we found that the avalanche like energy transport events are mostly driven by coherent phase space structures, indicating the key role of resonant particles. Another advantage of the proposed analysis is the decoupling of 6D (1D time and 5D phase space) data into the combinations of 3D data which are visible to the human eye.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合プラズマ 主成分分析 大規模データ解析 運動論的シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉において、プラズマの温度、密度、圧力の分布は炉心性能を決定づける。炉設計はプラズマ分布を基に行われるが、分布形状は単純な関数系を用いた仮定か実験結果の外挿により決定されることが多く、物理的な根拠に欠ける。これら工学的な手法に対して、物理に基づきプラズマ分布を予測するのが第一原理的シミュレーションである。高温であり無衝突性を有する核融合プラズマは、非 Maxwell 的な速度分布を示すことが知られ、第一原理的シミュレーションである 5 次元(空間 3 次元、速度空間 2 次元)のジャイロ運動論的プラズマ乱流シミュレーションが実験解析、理論解析問わず幅広く利用される。

ジャイロ運動論の計算自体は 5 次元で行われるものの、その物理解析は 3 次元の流体モーメント(すなわち速度空間の積分量)やさらに平均化した 1 次元の半径方向プロファイル(図 3 (a)参照)などに限定されてきた。高エネルギー粒子を対象として、速度分布関数自体の解析も行われるが、それらもある超空間内の 2 次元断面の解析に限ったものであった。一方、単純化された 2 次元(空間 1 次元、速度空間 1 次元)の運動論的シミュレーション解析では、位相空間において形成されるアイランドと呼ばれる閉じた構造が高エネルギー粒子の突発的な輸送の前兆現象となっていることが示されている。

申請者が取り組んできた 5 次元の運動論的シミュレーションでも雪崩的輸送と呼ばれる突発的な輸送現象を取り扱うことが出来るが、その速度空間構造との関連性に関しては解析されて来なかった。本研究の核心をなす「問い」は、「雪崩的輸送現象の前兆現象を、第一原理的運動論的乱流シミュレーションで扱われる 5 次元位相空間から抽出出来るか？」である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、雪崩的輸送現象の前兆現象を第一原理的運動論的乱流シミュレーションで扱われる 5 次元位相空間から抽出することを目的とする。同時に、5 次元位相空間の時系列データという超大規模データの解析を通じて、次世代のスーパーコンピューティングで必須となる大規模データの処理手法も確立する。

3. 研究の方法

本研究では、次元削減技術(主成分分析(PCA))によって、5 次元位相空間の時系列データからの位相空間構造抽出とデータ圧縮を行う。本研究で対象とする 5 次元時系列データは数 10TB 規模となり、通常は MPI などの分散処理が必要となる。本研究では、大規模データ処理フレームワーク Dask [<https://dask.org>]ベースで Incremental PCA を実装することで、MPI などの分散処理なしに、大規模データの PCA を可能にする。開発した PCA によって 3 次元位相空間基底を構築し、主成分ごとの位相空間構造とそれに対応する係数の空間構造を調べる。また、PCA による圧縮データから分布関数を再構築して熱輸送を計算することで、主成分ごとの熱輸送への寄与を調べる。これによってどのような空間、位相空間構造が雪崩的熱輸送と関連しているかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 主成分分析による 5 次元時系列データの圧縮

本研究では、5 次元分布関数時系列データの圧縮と特徴抽出を目的とし、5 次元分布関数時系

列データに対して主成分分析を適用した。主成分分析を適用するためには、5次元分布関数の時系列データを行列の形状で表現する必要がある。この表現は自由度が存在し、例えば、 $(N_t, N_r, N_\theta, N_\varphi) \times (N_{v_\parallel}, N_w)$ 、 $(N_t, N_r, N_\theta, N_\varphi) \times (N_r, N_\theta, N_\varphi) \times (N_{v_\parallel}, N_w)$ 、 $(N_t, N_r, N_\theta, N_\varphi) \times (N_r, N_\theta, N_\varphi) \times (N_{v_\parallel}, N_w)$ などと表すことができる。ここで $(m) \times (n)$ は m 行、 n 列の行列を意味し、括弧内の次元については1次元データとして平坦化することとする。t は時間、r は小半径方向、 θ はポロイダル方向、 φ はトロイダル方向、 v_\parallel は磁力線平行方向速度、 w は磁力線垂直方向速度である。図1は、5次元分布関数の時系列データを異なる形状の行列として行列化し、主成分分析した際の累積寄与率とデータ圧縮率の関係を示す。累積寄与率は、データの表現力と対応し、ある主成分の数でデータをどの程度表現出来るかを示す。以下では、3桁のデータ圧縮(10TB から 10GB)と高い累積寄与率を両立している $(N_t, N_r, N_\theta, N_\varphi) \times (N_{v_\parallel}, N_w)$ の分解でデータ解析を行う。この主成分分析は、本研究のために開発した Dask ベースの Incremental PCA によって実現されている。開発した Incremental PCA は、Dask ベースの機械学習ライブラリ Dask-ml にマージされた。

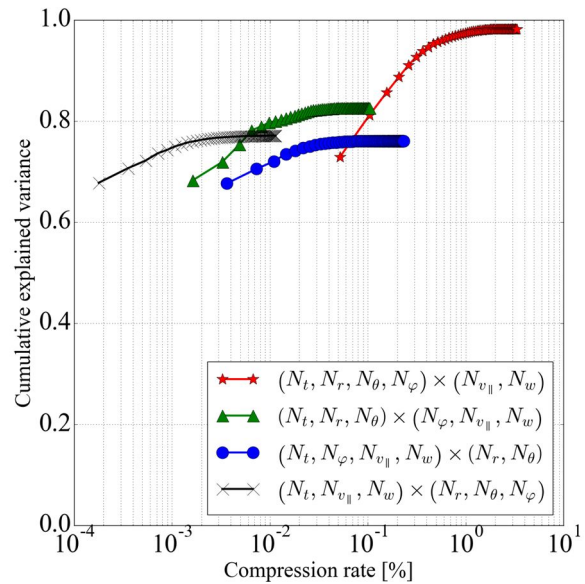


図1 異なる行列形状に対する分布関数の累積寄与率の圧縮率依存性

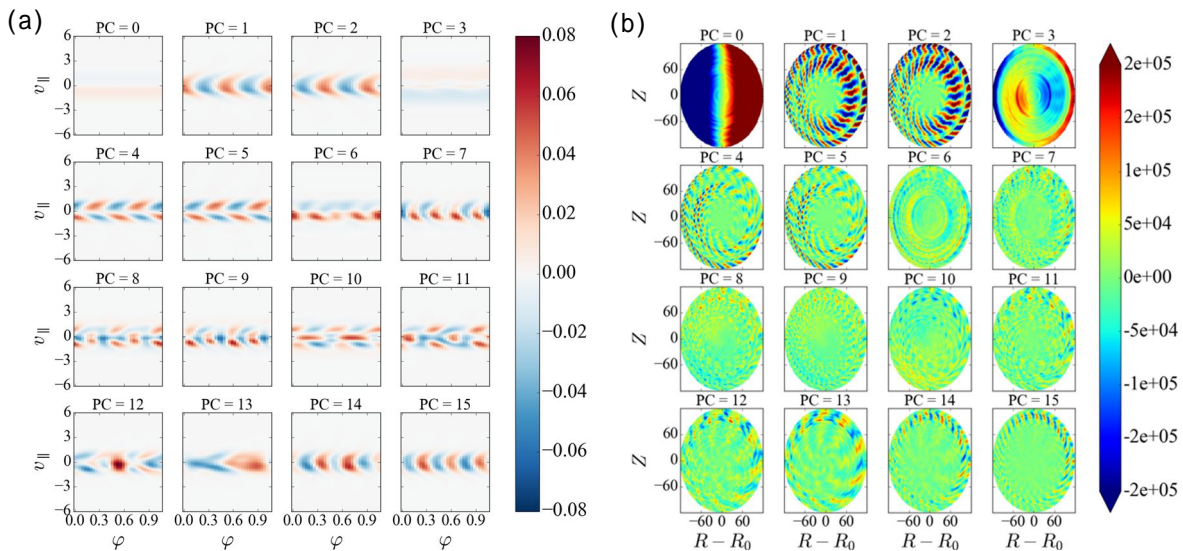


図2 (a)第16主成分までの位相空間基底の $w=0.12$ 断面、(b)雪崩的輸送が起きている時刻における第16主成分までの空間係数。横軸は大半径方向 R 、縦軸は鉛直方向 Z となる。

図2(a)は、 $(N_t, N_r, N_\theta) \times (N_\varphi, N_{v_\parallel}, N_w)$ の行列から構築した位相空間基底を示し、図2(b)はそれに対応する実空間係数を示す。図2(a)と図2(b)を見比べることで可視化困難であった5次元時系列データを3次元以下の画像の組み合わせとして表現出来ていることに注意されたい。プラズマの実験解析においても、主成分分析などによりデータの時間情報と空間情報を分解して解析することがしばしば行われる。本解析では考えを進め、同様の手法を高次元性に起因する可視化の困難さを克服するために利用している。図2(b)の空間構造を見ると、第0主成分は磁場強度分布、第3主成分は対流セルと呼ばれる構造であることがわかる。第1、第2主成分は、

n=12 のバルーニングモードと対応している。これらの主成分に対応する位相空間構造は図 2(a) の基底構造からわかる。第 1、第 2 主成分の位相空間構造は磁場との共鳴構造を示す。本手法により、ある主成分について位相空間構造と実空間構造が同時に得られていることに注意されたい。

(2) 位相空間構造と雪崩的熱輸送現象の関連性

図 3 に示すように、熱輸送を平均化した半径方向プロファイルからは、半径方向に伝搬する雪崩的な熱輸送が見られる。熱輸送は分布関数と電場のデータから速度空間の積分によって計算可能である。本研究で開発した手法により、分布関数を少数の主成分によって近似可能である。この近似分布関数から熱輸送を計算することで、どの主成分が熱輸送を担っているかを調べることが可能である。本研究では、図 3(a) の赤い点線で囲われた時間、半径方向範囲で分布関数に対して主成分分析を行った。図 3(b) は、この時間、半径方向範囲において各主成分の熱輸送に対する寄与を示す。図から雪崩的熱輸送を担っているのは主成分 1 と 2 であることがわかる。図 2 からこれらの主成分は、n=12 のバルーニングモードと対応する空間構造を有し、その位相空間構造は磁場との共鳴構造を持つことが明らかとなった。本研究では、主成分分析により雪崩的熱輸送を引き起こす空間、速度空間構造が物理的な知見を利用せず抽出できたと言える。

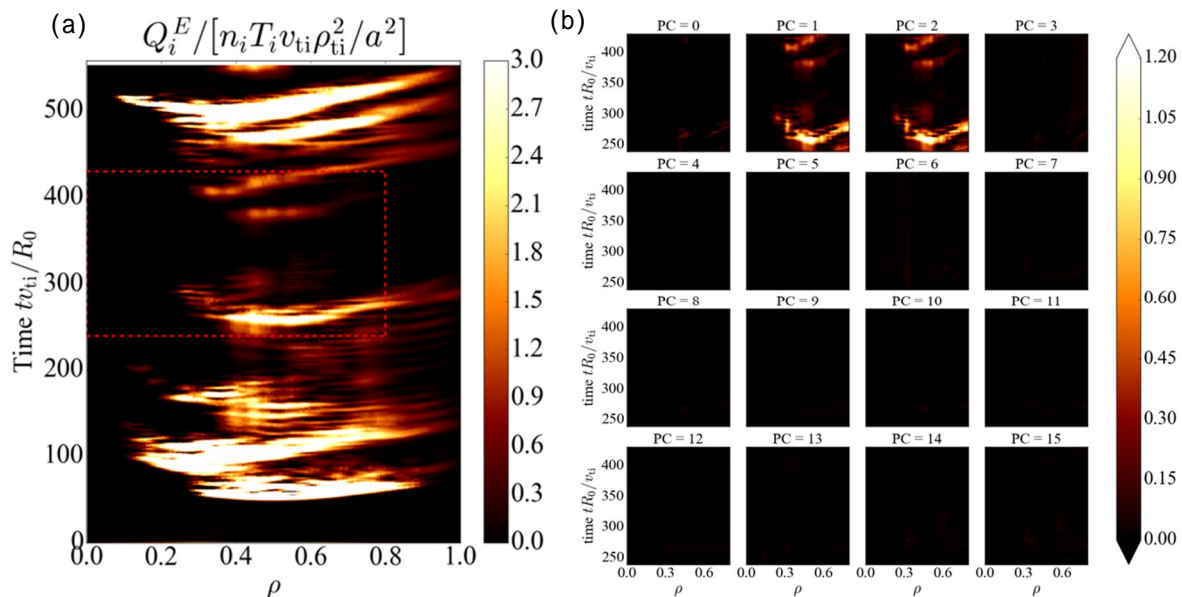


図 3 (a)乱流熱輸送の時空間分布、(b)各主成分の熱輸送への寄与

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Asahi Yuuichi, Fujii Keisuke, Heim Dennis Manuel, Maeyama Shinya, Garbet Xavier, Grandgirard Virginie, Sarazin Yanick, Dif-Pradalier Guilhem, Idomura Yasuhiro, Yagi Masatoshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Compressing the time series of five dimensional distribution function data from gyrokinetic simulation using principal component analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012304 ~ 012304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0023166	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 朝比祐一、藤井恵介	4. 巻 97
2. 論文標題 データ駆動アプローチを用いた雪崩的乱流輸送現象の解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 86 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 朝比祐一、藤井恵介, Dennis Manuel Heim, 前山伸也, 井戸村泰宏
2. 発表標題 主成分分析によるジャイロ運動論的シミュレーションの位相空間構造データの圧縮
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 朝比祐一
2. 発表標題 5次元分布関数時系列データの低次元表現
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井恵介, 朝比祐一, Dennis Manuel Heim, 前山伸也, 井戸村泰宏
2. 発表標題 ジャイロ運動論プラズマ乱流シミュレーションデータにおける 乱雑さの定量化と突発的輸送現象との関連
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 Yuuichi Asahi, Keisuke Fujii and Yasuhiro Idomura
2. 発表標題 Phase-Space Pattern Extraction from Terabyte-Scale Plasma Turbulence Simulation Data with Principal Component Analysis
3. 学会等名 3rd International Conference on Data Driven Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Asahi, K. Fujii, S. Maeyama, Y. Idomura
2. 発表標題 Phase-Space Pattern Extraction from 5D GyroKinetic simulation data
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------