

乱流における流束一定状態の数値的探索

Numerical search of flux-constant states in turbulence

吉田 恭
筑波大学数理物質系

1. 研究目的

空気や水などの流体の乱れた状態つまり乱流は、非線形の強い力学系の著しく非平衡な状態であり、平衡系統計力学のような統計法則の理解は確立していない。これまで数値的な基礎研究は、主に支配方程式である Navier-Stokes 方程式の直接数値計算 (DNS) によって行われてきた。乱流の現象論として、エネルギーが大きいスケール (低波数) から小さいスケール (高波数) に統計的に流束一定で流れることが知られている。DNS でも、力学的時間発展でほぼ流束一定状態に緩和するのが確認されている。つまり定流束が力学時間発展で維持される状態が乱流状態の必要条件であると考えられる。そこでその状態が乱流状態の十分条件であるかを問うのは興味深い。もし (非典型的な状態を除いて) 十分条件であるならば、定流束状態のアンサンブルを考えることで、平衡系統計力学で成功しているアンサンブル理論の手法を乱流統計に導入する道が開ける。

本研究の目的は、上の問いに数値的に答えることである。具体的には、状態空間の中から時間間隔 T の間定流束を維持する状態を力学的時間発展によらずモンテカルロ的手法で数値的にランダムサンプリングを行う。一方で比較対象として DNS で乱流状態を得る。得られた定流束状態と乱流状態の性質を比較することにより、定流束状態と乱流状態の関係を調べる。その結果は、定流束状態のアンサンブルモデルの妥当性に関する知見となるであろう (図 1 参照)。

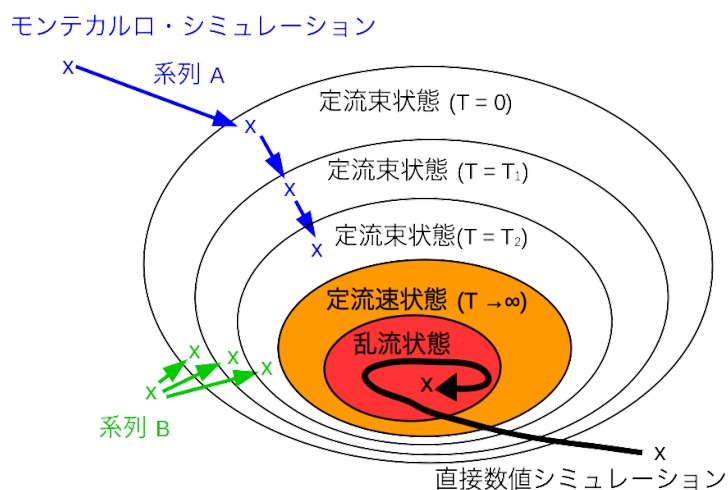


図 1: 定流束状態の数値的探索の概念図

2. 研究成果の内容

本研究は 2021 年度より始まり、2022 年度までの研究において 2 次元乱流でエンストロフィー流束が波数空間ではほぼ一定になる状態（準定流束状態）の数値的探索を行い、2023 年度以降の研究でその定流束が時間区間幅 T で維持される状態の数値的探索を行ってきた。

本年度は昨年度から継続して時間区間幅 T のエンストロフィー定流束状態の探索を後述の系列 A と系列 B について T を変化させながら行った。系列 A では、低エンストロフィー状態を初期状態に先ず $T=0$ の定流束状態を探索し、得られた準定流束状態を初期状態に $T_1(>0)$ の定流束状態を探索し、同様にして次の $T_2(>0)$ について定流束状態の探索を行った。系列 B では、エネルギースペクトルが乱流で知られたスケール則を満たす状態を初期状態に様々な T について定流束状態の探索を行った（図 1 参照）。双方の系列で得られた準定流束状態について、エネルギースペクトルは期待通り乱流のスペクトルと整合した。より高次の統計量である渦度 2 乗場のスペクトルの解析を行うと、系列 A も B も T の増大とともに DNS で得られた乱流場の結果に近づいたが、系列 B の方がより乱流場に近い結果が得られた。系列の違いによらず乱流場の結果に収束することが期待はされるが、その検証にはさらに大きな T での数値的探索が必要となる。しかし数値的探索の試行毎に時間区間 T の時間発展を計算する必要があり T の増加に伴い計算時間が増大するため、現時点でそれは現実的ではない。

本年度は、更にこれまでの結果を発表し論文にまとめることに注力した。国際会議 STATPHYS29 で本研究内容の発表を行った。論文を論文誌に投稿して、本年度末段階で査読者とのやり取りが続いている。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究は、数値的状态検索が主要部分を占め、そこに多くの計算資源が必要である。研究開始から 5 年経過しているが独自の内容であり依然試行錯誤が多い。課題を定めた上でその中で比較的自由に高性能のスーパーコンピュータを一定量使える学際共同プログラムは本研究の性質に適しており、果たした役割は本質的であり意義も大きい。

4. 今後の展望

2 次元流体系にはここで一旦区切りをつけて、今後は現実の水や空気の流れとより関係の深い 3 次元流体系の研究を行う。2 次元と比較して 3 次元は系の自由度も大きくより計算時間を要すると予想されるので、小規模の系から数値的探索を行う。2 次元系と同様 $T=0$ から始め、徐々に T を大きくしていく。予備的計算はすでに開始している。2 次元系と比べて 3 次元系はより現実の系に近いと、意義深い課題であると言える。

5. 成果発表

(1) 学術論文

無し。

(2) 学会発表

- ① Kyo Yoshida, "Numerical search for states with constant enstrophy flux in wavenumber space over a finite time interval in two-dimensional turbulence", 29th International Conference on Statistical Physics, Statphys29 (Palazzo degli Affari, Florence, Italy, 17 Jul 2025)
- ② Kyo Yoshida, "Numerical search for states with constant enstrophy flux in wavenumber space over finite time interval in two-dimensional turbulence", poster presentaiion, 17th Symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Center, 7 Oct 2025)

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus				
Miyabi-G	○	18900		
Miyabi-C				
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				