

## 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 (NS) 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。つまり流束一定が乱流状態の必要条件であると考えられる。そこで流束一定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、流束一定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、状態空間の中から流束一定の状態を力学的時間発展によらずモンテカルロ (MC) 的手法で数値的にランダムサンプリングを行い、その状態が乱流として望ましい性質を持つか調べる。

#### 2. 研究成果の内容

昨年度、周期境界条件正方形内の2次元流体系でエンストロフィー流束が波数空間である有限時間区間ほぼ一定となる状態 (流束一定状態) をモンテカルロ (MC) 的手法で探索する数値計算コードを作成した。

本年度は、そのコードを実行して流束一定状態の探索を行った。流束一定となる時間区間の幅は無窮大であることが理想的であるが、計算機上では有限区間で近似する必要がありその計算時間もその時間区間の幅に比例して増大する。時間区間の幅を十分に取ろうとすると1つ1つのMCに時間がかかり、パラメタ設定等の試行錯誤にも時間を要した。また、得られた流束一定状態とDNSから得られた乱流状態との比較を行うためのエネルギースペクトル以外の指標を検討し、4次モーメントに関連するスペクトルが有望であると示唆された。流束一定となる時間区間の幅を増加させるに従って、探索された状態の4次モーメントに関するスペクトルがDNSから得られた乱流状態のそれに近づくのが確認された。

2次元流体系での MC の実行に並行して、周期境界条件立方体内の 3次元流体系でエネルギー流束が波数空間、有限時間区間ではほぼ一定となる状態を MC 的に探索するコードの開発を行った。来年度にコードを本格的に実行する予定である。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

MC で流束一定状態を探索する研究は開始して 3 年目で、コード実行のノウハウも貯まりつつある。しかし依然未開の部分は多く試行錯誤は絶えない。小規模計算資源から比較的自由的な計画で計算機を使用できる学際共同利用の環境の役割と意義は大きい。

### 4. 今後の展望

2次元流体系の波数空間および有限時間空間でのエンストロフィー流束一定状態のサンプリングについては目処がたったので、妥当な限り流束一定となる時間区間の幅を大きくしたところで結果を論文にまとめる。本研究の本来の目的となる物理系は 3次元流体であり、今後は本年度開発した 3次元流体系の MC の実行も進めていく。まずは 2次元流体系のときと同様に波数空間での流束一定状態が瞬時的に満たされるといふ弱い条件での状態探索から始める。3次元流体系の MC は 2次元流体系のそれにも増して計算時間を必要とする。従って、限られた計算資源で有用な結果を得るためにコードの効率化を検討する必要もある。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

なし

#### (2) 学会発表

- ① [Kyo Yoshida](#), "An attempt to construct an ensemble model for turbulence", poster presentaion, YITP-YSF Symposium, Perspectives on Non-Equilibrium Statistical Mechanics: The 45th Anniversary Symposium of Yamada Science Foundation (Kyoto University, Japan, 4 Aug 2023)
- ② [Kyo Yoshida](#), "Ensemble model of turbulence based on states of constant flux in wavenumber space", 28th International Conference on Statistical Physics, Statphys28 (University of Tokyo, Japan, 11 Aug 2023)
- ③ [Kyo Yoshida](#), "Numerical search of flux-constant states in turbulence", poster presentaion, 15th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Center, 3 Oct 2023)
- ④ [吉田恭](#), 「乱流における波数空間および有限時間区間での定流束状態の数値的探索」, 日本物理学会 2024 年春季大会 (オンライン, 2024 年 3 月 19 日)

#### (3) その他

なし

筑波大学計算科学研究センター 2023 年度学際共同プログラム利用報告書

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Wisteria/BDEC-01	○	48,000	24,000
※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。			