

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

昨年度は、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波数 k によらずほぼ一定となる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。探索して得られた場のエネルギースペクトル $E(k)$ は NS 方程式の数値計算結果と同様のスケールリング $E(k) \propto k^{-3} (\ln(k/k_0))$ を示した (k_0 はスケールリング領域の下限波数)。この結果を中心にまとめた内容を今年度成果(1)-①として発表した。

昨年度の数値計算コードで探索した場合は、波数 k によらない流束一定条件が時間的に瞬間的に満たされるものであった。統計的に定常な乱流の定常状態のサンプルとしては、時間的に定常に流束一定条件が満たされる場がより適切であると考えられる。今年度は、昨年度開発したコードを基にある一定時間区間でエンストロフィー流束が波数 k によらずほぼ一定となる状態の探索するコードを作成した。そのコードの予備の実行で探索された場合は、エネルギースペクトルのみならず、流れ場の空間的構造も、NS 方程式で得られた乱流場にある程度類似することが示唆された。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

昨年度より開始した MC で流束一定状態を探索する研究は、未だ萌芽的である。一定の成果は得られているものの、進展は手探り状態である。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

本研究で作成された一定時間区間で流束一定条件を満たす状態を探索するコードは、その時間区間を長くするに従って計算時間も長くなり、効率化の必要がある。また、探索された場合は、エネルギースペクトル以外にも乱流場の特徴的な性質を保有していると考えられるが、その適切な定量的指標を考える必要がある。また、本研究の本来の目的となる物理系は 3 次元流体であり、これまでのノウハウを参照して、3 次元流体で流速一定場を探索するコードを開発するのが、次の段階となる。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① Kyo Yoshida, "Ensemble model of turbulence based on states of constant flux in wavenumber space", *Physical Review E* **106**, 045106 (2022).

(2) 学会発表

- ① 吉田恭, 「波数空間における定流束状態を用いた乱流のアンサンブルモデル」, 京大数理解析研究所 RIMS 共同研究「乱流の予測可能性と可制御性」(京都大学数理解析研究所, 京都, オンライン, 2022 年 7 月 20 日)
- ② Kyo Yoshida, "Numerical search of flux-constant states in turbulence", poster presentation, The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba (Epochal Tsukuba International Center, 14 Oct 2022)

(3) その他

なし

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	○	36,000	0
※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。			