

一様等方性乱流 DNS を用いた Lagrange 的加速度の解析

Analysis of Lagrangian acceleration by DNS of isotropic turbulence

○高橋 一樹, 名大院工, 名古屋市千種区不老町, E-main1:kazuki@fuid.cse.nagoya-u.ac.jp

石原 卓, 名大院工, 名古屋市千種区不老町, E-mail:ishihara@cse.nagoya-u.ac.jp

Kazuki Takahashi, Dept. of CSE, Graduate School of Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya

Takashi Ishihara, Dept. of CSE, Graduate School of Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya

To study the properties of extreme events in Lagrangean acceleration we analyze Lagrangian data obtained from a direct numerical simulation of forced homogeneous isotropic turbulence which was performed on 1024^3 grid points with $R = 283$. The extreme events are known to be trapping events by vortex filaments. Our analysis shows that the extreme Lagrangian accelerations are accompanied by spiral motions whose frequency is about $0.5\tau_\eta^{-1}$ and whose duration is less than about $10\tau_\eta$, where τ_η is the Kolmogorov time scale. It is found that the extreme events are strongly correlated with time variation of Lagrangian vorticities.

1. はじめに

乱流現象の記述には、空間の固定点で観測する Euler 的なものと流体粒子の軌跡に沿って観測をする Lagrange 的なものがある。これまで、測定等の容易さにより、数値計算においても実験においても Euler 的視点に基づく乱流研究が多く行われてきた。しかし、近年では計算機や実験測定技術の発展から Lagrange 的視点からの乱流研究も盛んに行われるようになってきている。乱流中の Lagrange 的な物理量の変動の理解は、乱流による拡散・混合・輸送現象の理解のために重要であり、その中でも特に、Lagrange 的加速度は、流体粒子の振る舞いそのものを特徴づける基礎的なものであるため、乱流による拡散・混合・輸送現象の理解とモデル化の必要性から多くの研究がなされている。⁽¹⁾

流体粒子の加速度に関して、La Porta⁽²⁾ 等は、Lagrange 的に粒子を追跡する実験により、Lagrange 的加速度は間欠性が強く、乱流中で非常に大きい値を取りうることを示した。近年の乱流の大規模直接数値計算 (最大格子点数 4096^3) を用いた Euler 的な視点からの場の解析⁽³⁾ では、圧力勾配の間欠性はレイノルズ数が大きくなるにつれて大きくなることが分かっている。よって、加速度の大きい流体粒子に着目して高レイノルズ数乱流場を解析することは、高レイノルズ数乱流場における強い間欠性の動的な性質を理解する上で有益であると考えられる。また、Navier-Stokes 方程式の解の特異性発現の可能性についても重要な知見を与えるのではないかと期待できる。

そこで、本研究では、高レイノルズ数乱流の間欠性を動的に理解するための第一歩として、乱流の直接数値計算 (格子点数 1024^3 、テラーマイクロスケールに基づくレイノルズ数 $R = 283$)⁽⁴⁾ によって得られた、Lagrange 的なデータベースを用いて、特に加速度の大きい粒子に着目した解析を行い、乱流場において強い加速度を持つ粒子の動的な性質の理解を試みる。

2. 解析手法

本研究で用いるデータは、一辺のサイズが 2 の周期箱において外力のある非圧縮 Navier-Stokes 方程式に従う、統計的な準定常状態の乱流場 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ (格子点数 1024^3 、 $R = 283$)⁽⁴⁾ によって流される $O(10^5)$ の数の流体粒子の位置、速度、渦度のデータである。ここで、乱流場はフーリエスペクトル法を用いて 4 次のルンゲクッタ法で時間発展させたものであり、流体粒子は方程式 $d\mathbf{x}/dt = \mathbf{u}(\mathbf{x}(t), t)$ の右辺を 3 次スプライン補間を用いて評価して、4 次のルンゲクッタ法で時間発展させたものである。粒子を追跡した時間は、およそ $0.5T = 16\tau_\eta$ である。ここで T は積分長 L のスケールの渦の回転の特徴的な時間スケール、 τ_η は

コルモゴロフの時間スケールである。

本研究では、加速度の大きい粒子に着目するため、まず、 $O(10^5)$ の数の各粒子の加速度の大きさ $a(t)$ の積分時間内の最大値 $a_{\max} = \max_t[a(t)]$ を求め、次にこの $a_{\max}$ の全粒子における平均 $\langle a_{\max} \rangle$ と標準偏差 $\sigma_{a_{\max}}$ を求めた。そして、これらの値を用いて閾値を定め、粒子の選別を行った。本研究では、各種物理量の Lagrange 的な時間変化を評価するために自己相関関数を用いた。

3. 解析結果

Lagrange 的データベース⁽⁴⁾ の解析により、加速度の大きい粒子について、加速度ベクトル $\mathbf{a}(t)$ の自己相関関数が $2\tau_\eta$ ほどの時間スケールで振動する一方、加速度の大きさ $a(t) = |\mathbf{a}(t)|$ の自己相関関数は $10\tau_\eta$ より小さい程度の時間スケールでゆっくり減少することが分かった。また、速度ベクトルの相関は加速度ベクトルの相関の時間変化を反映したものであることが示唆された。また、加速度の大きい粒子においては速度と加速度の間の角度の余弦が約 0.2 程度の直交関係に近いところにピークを持つことが分かった。以上は、加速度の大きい粒子が、渦管にトラップされて螺旋運動しており、その振動数が $0.5\tau_\eta^{-1}$ 、その持続時間が $10\tau_\eta$ 未満であることを示すものであると考えられる。

また、加速度の大きい粒子は渦度ベクトルと加速度ベクトルが、向きに関しては直交関係を保ちつつ、また大きさに関しては変動の時間スケールを等しくするように時間変化しており、加速度の間欠性が渦度の間欠性に強く依存したものであることが分かった。

参考文献

- (1) Yeung, P. K. "Lagrangian investigations of turbulence" *Annu. Rev. Fluid Mech.* **34** 115 (2002)
- (2) La Porta A., Voth, G. A., Crawford, A. M., Alexander, J. and Bodenschatz, E. "Fluid particle accelerations in fully developed turbulence" *Nature* **409**, 1017(2001)
- (3) Ishihara, T., Kaneda, Y., Yokokawa, M., Itakura, K. and Uno, A. "Small-scale statistics in high-resolution direct numerical simulation of turbulence: Reynolds number dependence of one-point velocity gradient statistics" *J. Fluid Mech.* **592**, 335(2007)
- (4) Ishihara, T., Kaneda, Y. "Relative diffusion of a pair of fluid particles in the inertial subrange of turbulence" *Phys. Fluids* **14**, L69(2002)