

反射性フレークによる可視化から得られる乱流場の情報

Information of turbulent velocity field obtained from flow visualization using reflective flakes

- 栗田 朋幸, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail : t.kurita@fm.me.es.osaka-u.ac.jp
後藤 晋, 阪大, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, E-mail : goto@me.es.osaka-u.ac.jp
Tomoyuki KURITA, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan
Susumu GOTO, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan

We numerically investigate information obtained from a visualized pattern of turbulence using reflective flakes. The pattern depends on the orientation of flakes, and the orientation is changed by the shearing motion of the fluid. The shearing motion is mainly governed by coherent structures at the Kolmogorov length, and the orientation of flakes becomes a function of the location after about $50\tau_\eta$ (where τ_η is the Kolmogorov time). Therefore, the visualized pattern reflects such coherent structures.

1. 緒言

流れを可視化する方法に、光をよく反射する微小な鱗片状粒子を用いる方法があり、このような粒子は反射性フレークと呼ばれる。フレークを用いた可視化実験は比較的容易に行うことができ、室内実験においてよく用いられる。フレークを用いて乱流を可視化すると Fig. 1(a) のような明暗模様を得られるが、この模様から流れのどのような情報が得られるのかは明らかではない。

先行研究⁽¹⁾によると、明暗模様の明るさ、すなわちフレークからの反射光の強度は、フレークの空間分布ではなく、フレークの向きに依存する。これは、フレークがその慣性を無視できるほど微小であるので、フレークの並進運動が流体粒子と同一であると近似できるためである。

フレークの回転運動⁽¹⁾については、フレークを厚さが無限小の楕円板とみなすと、無限小流体面素⁽²⁾の配向変化と同様である。すなわち、フレークの配向は流れのせん断速度（速度勾配）によって変化する。速度勾配は主に乱流中の最小渦によって支配されるため、フレークの配向は最小渦から強く影響を受けるはずである。したがって、明暗模様は最小渦の存在を反映していると予想される。

本研究では、直接数値シミュレーションにより乱流中のフレーク群を追跡し、フレークの挙動およびフレークによる乱流の可視化で得られる情報を明らかにする。

2. 直接数値シミュレーション

非圧縮流体に対するナビエ・ストークス方程式の直接数値積分を 2 種類の系で行った。1 つ目は、周期境界条件を課した立方体内の流れで、フーリエ・スペクトル法を用いた。2 つ目は、自転軸が歳差運動する球体容器内の流れで (Fig. 2)、壁面には粘着境界条件を課し、有限差分法を用いた。

フレークの支配方程式は、フレークの位置と法線ベクトルを \mathbf{x}_p および \mathbf{n} 、流速を \mathbf{u} とすると、

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_p, t) \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{n}}{dt} = -\nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) + \mathbf{n}[\mathbf{n} \cdot \nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})] \quad (2)$$

と表される。式 (2) の右辺第二項は \mathbf{n} と平行で、 \mathbf{n} の大きさを一定に保つはたらきのみをするため、 \mathbf{n} の方向変化には関与しない。したがって、 \mathbf{n} の方向変化は右辺第一項のみで決まり、無限小面素の法線ベクトル \mathbf{s} の時間発展

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = -\nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{s}) \quad (3)$$

と方向に関して同一である。上述の流体計算で得られた乱流場で、式 (1), (2) を数値積分してフレーク群を追跡

した。その際、フレークの位置での流速と速度勾配は、補間により求めた。

3. 結果

3.1 可視化の模擬

上述の数値計算法によってフレーク群を追跡し、得られたフレーク群の配向を用いて、可視化実験における明暗模様を数値的に模擬した (Fig. 1(b))。流れの支配パラメータは室内実験と同一である。この際、レーザー光の入射方向および観察者の視線方向を適当に定め、レーザーシート光の断面上にある個々のフレークの法線ベクトルから反射光の強度を評価した。シミュレートされたフレークの明暗のパターンは、Fig. 1(a) の室内実験結果とよく似ており、数値計算の妥当性を確認することができる。以下では、周期境界条件を課した立方体内の流れに対して解析した結果を示す。

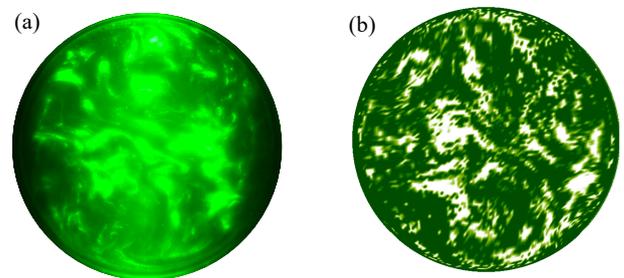


Fig. 1 Flake visualization of turbulence in a precessing sphere. (a) Experimental result. (b) DNS result. The control parameters (Reynolds number and Poincaré number) are common.

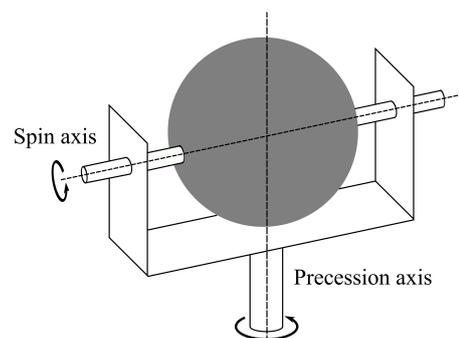


Fig. 2 Precessing sphere.

3.2 フレークの挙動

明暗模様と流れの情報を対応付けるためには、フレークの配向が位置の関数として決まることを確かめる必要がある。そのために、フレークの初期条件として、同じ位置に3つのフレークを配置し、それぞれの法線ベクトル ($\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$ とし、大きさは全て1とする) を直交させた。また、 N_1 および N_2 を

$$N_1 = \frac{|\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2| + |\mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{n}_3| + |\mathbf{n}_3 \cdot \mathbf{n}_1|}{3} \quad (4)$$

$$N_2 = \mathbf{n}_1 \cdot (\mathbf{n}_2 \times \mathbf{n}_3) \quad (5)$$

と定義する。これらは、同じ位置にある3つのフレークの方向が揃った時 ($\mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_3$), $N_1 = 1$ および $N_2 = 0$ となる。これらの量の時間発展を Fig. 3 に示す。十分に時間が経ったフレークの配向は初期条件に依存せず、空間位置の関数として表されることが分かる。さらに、時間をコルモゴロフ時間で規格化すると、異なるレイノルズ数における時間発展が一致することから、フレークの配向の変化は、乱流中の最小スケールの運動から強く影響を受けることが分かる。そこで、管状の最小渦の周囲にあるフレークの配向を調べたところ、Fig. 4 に示すように渦の中心から見て規則的になっていることが分かった。

3.3 フレークを用いた可視化によって得られる情報

フレークの配向に関して得られた知見より、明暗模様は最小渦の存在を反映するはずである。最小渦の周囲では、フレークの配向が渦の中心から見て規則的であることから、可視化実験においてレーザー光の入射方向と観察者の視線方向に対して、ある特定の方向を向いて存在する管状渦は、明暗模様から同定できると期待される。Fig. 5 はフレークによる可視化を模擬したものに、低圧力法⁽³⁾で得た渦軸を同時に描いたものである。図の中央付近に注目すると、確かに乱流中の管状渦は筋状の明暗模様となって現れていることが分かる。

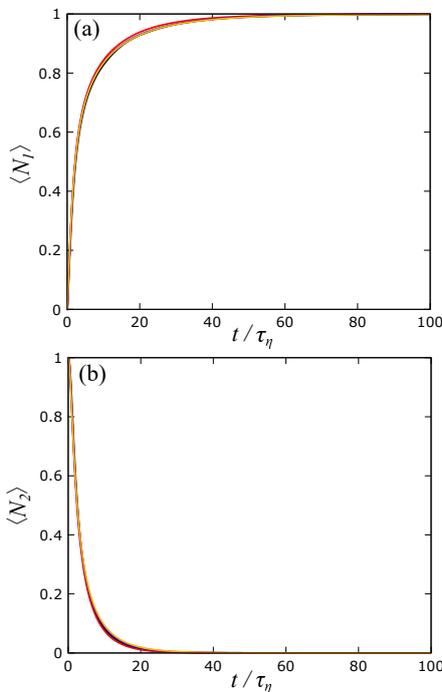


Fig. 3 Time evolution of the ensemble average of (a) N_1 and (b) N_2 . Time is normalized by the Kolmogorov time scale τ_η . Taylor-length based Reynolds number is $R_\lambda = 50$ (black), 96 (red), 176 (blue) and 271 (yellow).

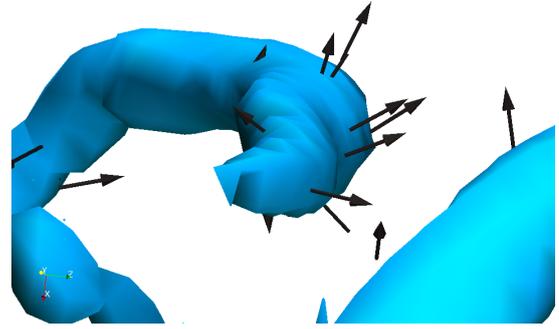


Fig. 4 Isosurfaces of the enstrophy and flake normal vectors in turbulence ($R_\lambda = 176$).

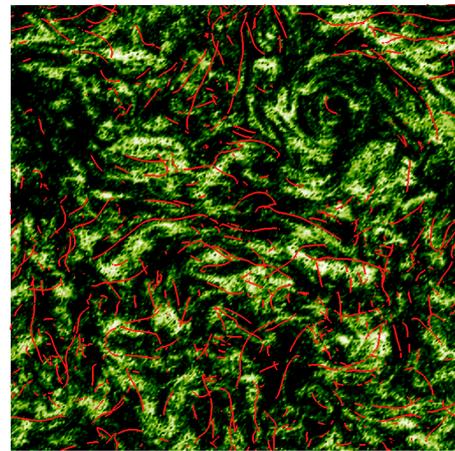


Fig. 5 Numerical simulation of the flake visualization of turbulence in a periodic cube. Vortex axes identified by the low-pressure method are drawn with red lines.

4. 結言

フレークによる可視化の明暗模様はフレークの配向によって決まり、また、流れに応じて変化するフレークの配向は、位置の関数とみなせる。したがって、明暗模様は流れの情報と対応付けて考えることができる。さらに、フレークの配向は乱流中の最小スケールの運動から強く影響を受け、明暗模様もそれを反映する。すなわち、フレークによる可視化結果から、最小渦の存在を読み取ることができる。

参考文献

- (1) Goto, S., Kida, S. and Fujiwara, S., “Flow visualization using reflective flakes,” *J. Fluid Mech.*, 683 (2011), pp. 417-429.
- (2) Batchelor, G. K., “The effect of homogeneous turbulence on material lines and surfaces,” *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 213 (1952), pp. 349-366.
- (3) Miura, H. and Kida, S., “Identification of tubular vortices in turbulence,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, 66 (1997), pp. 1331-1334.