A102

微小物体まわりの Hele-Shaw 流れの 微視的流脈による可視化

孤島 永周[○], 三好 徹, 三神 史彦, 西川 進榮 (千葉大学)

Visualization of Hele-Shaw flow around micro obstacles by using micro streaklines

Norichika KOJIMA, Toru MIYOSHI,

Fumihiko MIKAMI and Nobuhide NISHIKAWA

ABSTRACT

Hele-Shaw flows around micro obstacles are visualized by using micro streaklines generated by two-beam interference technique of UV laser, in combination with the photochromic method. This type of flow is a model of blood flow in the lung. Two types of flow channels are used: (1) the Hele-Shaw cell on the slide glass containing irregular shaped obstacles of about 300 μm in size, (2) the microfluidic PDMS chip containing 200 μm diameter cylinders. The flow in the both cells are visualized by streaklines with their interval in the order from 80 μm to 90 μm . It was found that the visualized image agrees with the potential streaklines calculated by a panel method.

Keywords: Micro flow, Photochromic method, Hele-Shaw flow, Molecular tagging velocimetry, Two-beam interference technique

1. 緒 言

肺胞における血流は網目状になっており、全体としては薄いシートのようになっていることが知られている。このシートフローのモデルとして、微小物体まわりの Hele-Shaw 流れは重要である。

このようなマイクロスケールの流れの計測には非接触型の測定手法が要求されるが、著者らは、レーザ干渉光を利用したフォトクロミック法による微視的流脈を用いて毛細管内の可視化を行ってきた¹⁾²⁾。この手法は、2本の紫外レーザ光の交点に生ずる干渉縞の微細な明暗パターンを、フォトクロミック染料の溶液に照射することによって流体をラベリングし、微細な流脈を生成するものである。トレーサ粒子を用いないので、マイクロスケールの流れで顕在化するブラウン運動によるノイズが発生しないため時間平均を行う必要がなく、非定常流れにも適用可能という特長がある。さらにタイムラインを併用することにより、速度2成分の測定も可能になる。

本研究では、この微細な流脈を利用して、微小物体まわりの Hele-Shaw 流れの可視化を試みた。また、Hele-Shaw 流れは速度ポテンシャルを持つ流れとして扱うことが出来るので、可視化画像と二次元の境界要素法であるパネル

法で計算したポテンシャル解の流脈パターンとの比較を行った。

2. 実験装置

2.1 干渉光学系

光学系は既報¹⁾²⁾の干渉光学系を用いた。Fig.1に干渉光学系の概略を示す。He-Cd レーザ (325nm, 20mW) のビームは、ビームエキスパンダ (L1, L2) によってビーム径 4.28mm に拡大される。また、1/2 波長板 (HW) を回

Fig.1 Optical setups for a two-beam interference technique

(a) Type I : Slide glass

(b) Type II : Microfluidic chip

Fig. 2 Micro Hele-Shaw cells

転させることによって偏光ビームスプリッタ (PBS) を反射したビームの光量を調節できる。マッハツェンダー干渉計 (HM1, HM2, M1, M2) とシリンドリカルレンズ (CL, 焦点距離 100mm) によってステージ (STG) に取り付けたマイクロ流体チップ内に微細な明暗の点列を生成する。レンズ類は紫外線を透過する合成石英のものを使用した。

照明は次の二通りの方法を用いた。第一は、Nd:YAG レーザをローダミン B 水溶液で満たしたセルに照射することにより得られる橙色の蛍光を照明として使用する方法 (光源 A とする) である。このとき Nd:YAG レーザのスペckルノイズを遮断するために鏡筒内にシャープカットフィルター (O-56) を挿入する。第二は、ストロボ光をバンドパスフィルター (中心波長 : 532nm, 半値全幅 : 8.6nm) に通すことにより単色光として使用する方法 (光源 B とする) である。このとき前述のシャープカットフィルターは鏡筒から取り外す。

2.2 マイクロ流路

本実験では 2 種類のマイクロ流路を用いた。スライドガラス上に作製した Hele-Shaw セル (Type I) とマイクロ流体チップ (Type II) である。

スライドガラス上の Hele-Shaw セルは、Fig. 2(a) に示すように、カバーガラスの向かいあった 2 辺とスライドガラスの間にスペーサとして白金線 ($\phi = 50\mu\text{m}$) を挟み、白金線に沿ってシリコンコーキング剤で接着した。同時にセル内に微小物体をシリコンコーキング剤で作製した。一方、Fig. 2(b) に示すマイクロ流体チップ (フルイドウェアテクノロジー (株)) の材質は PDMS (Polydimethylsiloxane) で、流路の平板間距離は $30\mu\text{m}$ である。また、流路内には Fig. 3 に示すような物体が配置されている。物体形状は直径 $d = 200\mu\text{m}$ の円柱であり、円の中心間距離を s とすると、Fig. 3(a) は 2 つの円柱が $s/d = 1.5$ で流れと垂直方向に並んでおり、Fig. 3(b) は 3 個

(a) 2 cylinders

(b) 3 cylinders

Fig. 3 Micro obstacles in the Type II cell

Table 1 Experimental conditions

Channel type	Test fluid	Back light
Type I	acetone	A
Type II	mineral oil	B

の円柱が、 $s/d = 1.5$ で正三角形の頂点の位置に配置されたものである。

2.3 実験流体

溶質のフォトクロミック染料はスピロピラン類の一種 (記録素材総合研究所, サニーカラー Purple, CAS114747-45-4) を用いた。この溶液は紫外光により無色から紫色に変わるが、熱や可視光による逆向きの反応のため、紫外光の照射を止めると徐々に退色する³⁾。

溶媒は、Type I の流路ではアセトン、Type II の流路では鉱油 (Johnson & Johnson, ベビーオイル) を用いた。これは Type II の流路の材質である PDMS がアセトンにより直ちに膨潤するためである。鉱油もまた PDMS チップを変形させる性質を持つが、その反応速度はアセトンよりも遅く、短時間であれば使用に耐えられる。なお、PDMS は膨潤によって変形しても、十分乾燥させることにより元の形状に戻る性質を有する。実験流体はこれらの溶媒にフォトクロミック染料を飽和まで溶解したものを使用した。

また、実験流体の種類により照明方法も変更した。アセトンを溶媒として用いる場合は光源 A を使い、鉱油を溶媒として用いる場合は光源 B を用いた。これは鉱油を溶媒としたときのフォトクロミック染料の発色が赤色に近くなるので、光源 A の橙色光では流脈の観察が困難だからである。可視化条件をまとめたものを Table 1 に示す。

2.4 撮影システム

ヘッドタンクに貯められた実験流体は、静水圧差によりマイクロ流路内に流れ込む。物体の上流側に紫外レーザの干渉光が照射され、フォトクロミック反応によって下流側に微細な流脈を生成する。このようにして可視化されたマイクロ流路内の流体の挙動を、対物レンズ ($10\times$, $NA=0.25$) と鏡筒を取り付けた CCD カメラ ($1008\times 1018\text{pixel}$, Kodak MEGAPLUS ES1.0/SC) を用いて撮影した。

3. パネル法

Hele-Shaw 流れは速度ポテンシャルを持つ流れとして扱うことができる。本研究では任意形状の物体を扱うため、パネル法⁴⁾を用いてポテンシャル解を計算し可視化画像

Fig. 4 Flow around a obstacle

Fig. 5 A second-order vortex panel method

と比較を行った。

Fig. 4に示すような流れ場において、速度ポテンシャルを ϕ とすると、流れ場の支配方程式は次式で表される。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

ここで Γ_∞ は無限遠境界、 Γ は物体表面境界、 U_∞ は一様流流速、 $\mathbf{n}$ は物体表面における内向き単位法線ベクトルである。Fig. 5に示すように物体を N 枚のパネルに分割し、それぞれのパネル上に単位長さあたりの循環 γ の渦を線形に分布させるとこの渦による速度ポテンシャルは以下のように表せる。

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \gamma(x', y') \tan^{-1} \frac{y - y'}{x - x'} d\Gamma(x', y') \quad (2)$$

ここで (x, y) は領域内の任意の点を表し、 (x', y') は物体表面上の点を表す。式(2)を用いて、流れが物体表面に沿う条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -U_\infty \cdot \mathbf{n} \quad (3)$$

を各パネル上の中央の点(control point)で満たすようにすると γ_j を未知数とする連立方程式が得られる。このときケルビンの循環定理から、物体まわりの循環がゼロになる条件を加えて、最小二乗法を用いて計算した。この結果より流れの速度場を求め、対応する可視化写真における流脈の開始点を出発点として仮想粒子を4次精度のRunge-Kutta法によって追跡し、流脈を描画した。

4. 結果および考察

4.1 流脈による可視化

Fig. 6にType I 流路における不規則な形状の微小物体まわりの流れの可視化画像を示す。物体の大きさは約300 μm 、平板間距離は(a)が66 μm 、(b)が42 μm で、流脈

(a)

(b)

Fig. 6 Hele-Shaw flow around micro obstacles in the Type I cell

(a)

(b)

Fig. 7 Hele-Shaw flow around micro obstacles in the Type II cell

Fig. 8 The computational result by the panel method

の間隔は $90\mu\text{m}$ である。物体背後に流脈線が回りこんでいるようすが捉えられており、ポテンシャル流れの特徴が現れている。

Fig. 7はType II 流路における直径 $200\mu\text{m}$ の円柱群まわりの流れのようすを示したもので、流脈の間隔は $78\mu\text{m}$ である。Fig. 7(a)では上流の3本の流脈線、Fig. 7(b)では上流の2本の流脈線が円柱の $100\mu\text{m}$ の隙間に集中しており、この場所で流れが加速されていることがわかる。

Type I 流路と Type II 流路における可視化画像を比較すると、Type II の画像では、Fig. 7(a)(b)に示すように円柱後端から下流側に、周囲に比べて白い領域が線状に伸びている。これは、物体表面での粘着条件のために物体近傍では流速が遅くなり、よどみ点付近を通る流体粒子が円柱後端まで流れる間に熱退色反応により消色することが原因と考えられる。ここに Hele-Shaw 流れの物体表面における粘着条件とポテンシャル流れのすべり条件との違いが現れているが、流れのパターンは次節で述べるようにポテンシャル流れと見なすことができる。一方、Type I 流路では、アセトンの粘度が低いことから流速が大きく、物体近傍を通った流体粒子の熱退色反応の影響は見られない。このことは、Type I では画面全体ではっきり流脈がわかるのに対し、Type II の画像は画面の下半分で流脈の色が薄くなっていることから、紫外レーザーの干渉縞の照射位置を通過した後の熱退色反応の影響が Type II 流路で大きいことを確認できる。Type II 流路で入口圧力を増加させ流速を上げることができれば、この点は改善されると思われる。

4.2 ポテンシャル解との比較

Fig. 6 (a) の画像について、パネル法を用いてポテンシャル解との比較を行った。この画像から物体表面上の各点の座標を読み取り、50枚のパネルに分割した。計算結果をFig. 8に示す。中心の多角形は物体を表し節点を○印で示している。図に示した曲線は流脈であり、流れ関数の等値線を等間隔に表示したものではないことに注意が必要である。これを可視化画像と重ねたものをFig. 9に示す。これより、可視化画像とパネル法から求めたポテンシャル解に非常に良い一致が見られた。この結果より、Hele-Shaw セル内の流れはマイクロスケールにおいてもポテンシャル流れとして扱えることがわかった。

Fig. 9 The comparison of the visualization image with the potential flow streamlines

5. 結言

微小物体まわりの Hele-Shaw 流れを、レーザー干渉光を利用したフォトクロミック法による微視的流脈を用いて可視化を行った。

1. 平板間隔 $66\mu\text{m}$, $42\mu\text{m}$ の Hele-Shaw セルにおける約 $300\mu\text{m}$ の物体まわりの流れを、微視的流脈を用いて可視化することが出来た。
2. PDMS 製のマイクロ流体チップを用いて直径 $200\mu\text{m}$ の円柱群まわりの流れを、微視的流脈を用いて可視化を行うことができた。
3. Hele-Shaw セル内の流れはマイクロスケールにおいてもポテンシャル流れとして扱えることがわかり、このようなマイクロ流路の設計にパネル法が有効であることがわかった。

今後は、マイクロ流体チップ内の流れをより明瞭に可視化し、さらにタイムラインを併用することにより、速度2成分の計測を行う。また、鉱油よりも低粘度で、なおかつフォトクロミック染料の濃厚な発色が得られる溶媒への変更を検討する。

本研究の一部は、平成 14～15 年度科学研究費補助金若手研究(B)No.14750109 の補助を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) 三神史彦・孤島永周・西川進榮: 二光束干渉法によるマイクロ流れの可視化計測, 可視化情報, Vol.23 Suppl.1 (2003), pp.313-316.
- 2) Mikami, F., Kojima, N., Nisikawa, N.: A Laser-Interferometric Molecular Tagging Method for Microflow Visualization, FLUCOME'03 (2003, Sorrento, Italy), CD-ROM, pp.1-11.
- 3) Chibisov, A.K. and Görner, H: Photoprocesses in Spirooxazines and Their Merocyanines, J. Phys. Chem. A, Vol.103, (1999) pp.5211-5216.
- 4) 登坂宣好・中山司: 境界要素法の基礎, 日科技連, (1987) pp.160-169.