27 白色光スペckル写真法による

流速分布計測 (第 2 報)

埼玉大学 細井健司[○]、川橋正昭、豊岡了、鈴木允

Measurement of Velocity Distributions
by Means of White-Light Speckle Photography (Part 2)

Kenji HOSOI*, Masaaki KAWAHASHI*
Satoru TOYOOKA*, Makoto SUZUKI*

White-light speckle photography has been applied to the measurement of flow velocity distributions in the open channel. The surface flow seeded with aluminium oxide particles is photographed with two pulsed illuminations of a white-light. A double-exposure specklegram is optically processed with spatial filtering technique. When white-light illuminations are also used in reconstruction, colored whole-field equi-velocity contours are drawn and quantitative informations about velocity fields are obtained by using color scale.

1、まえがき

流れの可視化は、流動状態を定性的または準定量的に把握するための有効な方法である。これまで知られている多くの方法では、流体中の質点の軌跡、すなわち流線を可視化する方法が最も一般的である。それに対して、スペckル写真法を流体計測に応用する場合、可視化および速度場の定量化が可能になる。筆者らは、前報^{1)~3)}で液体(水)表面の流れ場の計測に白色光スペckル写真法を適用した。流れの表面にトレーサを一樣に密に散布し、2台の白色パルス光(キセノンランプ)で適当な時間間隔をおいて照明し、その像を写真フィルム上に記録した。これは二重露光スペckルグラムと呼ばれ、これ自身可視化写真として観察できるが、これをレーザ光で光学的に処理することにより、速度の情報を得ることができ。これには、2つの方法がある。(I)ヤング縞による方法:スペckルグラムの小領域をレーザ光で照明し、回折面に観察されるヤング縞の間隔と方向からその点での速度ベクトルを定量的に求めることができる。しかし、この方法では面全体のベクトル線図を得ることは大変労力を要することである。(II)空間フィルタリング法:スペckルグラム全面をレーザ光で照明し、回折面に空間フィルタを置き、特定の空間周波数成分のみを取り出して結像すると、流速一定の軌跡

* Faculty of engineering, Saitama University, Urawa, Japan

が得られる。この方法によれば面全体の速度場が一挙に可視化される。

本報告では、後者の方法（空間フィルタリング法）において、再生過程でレーザー光に代って白色光を用いる方法について述べる。

Fig.1 Optical arrangement for spatial filtering.
Q:light source, S:specklegram, I:image plane,
F₁ and F₂:spatial filters having a hole,
L₁, L₂ and L₃:lenses

2、原理

二重露光スベックルグラムは、前報と同様の方法で作製した。Fig. 1 に空間フィルタリング法の光学系を示す。光源から出た光は、ピンホール F₁ を通過し、レンズ L₂ でコリメートされ、スベックルグラム S を照明する。焦点距離 f のレンズ L₂ の焦点面上 F₂ には、スベックルグラムのフラウンホーファ回折像が現われる。この面上に光軸からベクトル a だけ離れた位置に微小開口（直径 1mm）を置くと、開口の位置に相当する特定の空間周波数成分のみがフィルタを通過することができる。光源の波長を λ とすると、像面上で次式を満足する領域では明るくなる。

$$vtMa/f = n\lambda \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

ここで、t はスベックルグラムを

Table.1

記録するときのパルス光の発光間隔、M は撮影倍率である。この式は、一組のスベックルペアによる回折光の光路差を表わす式である。したがって、白色光を用いた場合は、ある n の値に対して、速度 v に対応する特定の波長 λ の光が選択的に干渉する。すなわち、干渉縞は色づいて見える。また、速度 v = 0 の領域では、全ての波長の光が n = 0 で干渉するので、白色の明縞になる。干渉縞と光路差の関係は、表 1 に示すニュートンのカラースケール⁴⁾によって結びつけられている。このように、干渉色を利用すると、流速分布についてより多くの情報が得られることを次に示す。

colour scale		V (mm/s)		
λ (nm)	colour	(1)	(2)	(3)
0	white	0.0	0.0	0.0
97	yellowish white	11.2	8.4	2.0
158	brownish white	18.3	13.7	3.2
234	brown	27.1	20.3	4.8
281	deep violet	32.5	24.4	5.8
306	indigo	41.7	26.6	6.3
430	gray blue	49.8	37.3	8.8
536	pale green	62.3	44.5	11.0
565	light green	65.4	49.0	11.6
664	orange	76.9	57.6	13.6
747	light carmine red	86.5	64.8	15.3
826	purple red	95.6	71.7	16.9
910	indigo	105.3	79.0	18.6
998	greenish blue	115.5	86.6	20.4
1101	green	127.4	95.6	22.5
1128	yellowish green	130.6	97.9	23.1
1258	flesh colour	145.6	109.2	25.8
1334	brown red	154.4	115.8	27.3
1376	violet	159.3	119.4	28.2
1426	gray blue	165.0	123.8	29.2
1534	green	177.5	133.2	31.4
1625	yellowish green	188.0	141.9	33.3

Fig.2 Whole-field equi-velocity patterns of rotating flow.
 (a)reconstructed with laser light:(b)reconstructed with white-light.

3、実験方法および実験結果

Fig.2 は、円筒シャーレ（内径106mm、深さ18mm）の中に水を満たし、水面にトレーサを浮かべて、0.535 rpsで定常回転している状態で二重露光スペックルラムを撮影し、空間フィルタリング法で再生した像である。Fig.2 (a)および(b)はそれぞれレーザ光および白色光で再生した像である。両者を比較すると、同図(a)では、レーザ光の高いコヒーレンシーにより、3次の縞まで確認することができるが、2次的スペックルにより粗れた画質になっている。一方、同図(b)の白色光で再生した像では、1次の縞まで確認できるが、2次的なスペックルの影響はほとんどなく、シャーレの輪郭線もはっきりと現われている。同図(b)では、色情報は失われているが、実際には図右に付記したように色づいて見える。実験条件は、白色パルス光の発光時間間隔 $t = 3.6 \text{ ms}$ 、撮影倍率 $M = 0.2$ 、フィルタの開口の光軸からの距離 $a = 3 \text{ mm}$ であり、これらの値を代入すると

$$v = 115.7 \times 10^3 \lambda - (2)$$

となる。ただし、 λ をnm単位で表わしたとき、 v がmm/sとなるように係数を決めた。 v と λ と色との関係を表1の(1)に示す。このような定常回転流れでは、速度成分は半径方向に直線的に変化しており、速度成分に対応した色の分布を示している。また、中央の明縞は白く、他の縞から明確に区別することができる。

Fig.3は、上記と同じ円筒シャーレ内のすみに直径12mmの円柱を固定し、回転しているシャーレを急に止めてから3秒経過した後の慣性流れを観察した結果である。Fig.3 (a)は、X方向、Fig.3 (b)は、Y方向にそれぞれ $a = 4 \text{ mm}$ の白色光で再生した等速度分布である。実験条件は $t = 3.6 \text{ ms}$ 、 $M = 0.2$ で、これらを(1)式に代入すると、

$$v = 86.8 \times 10^3 \lambda - (3)$$

となる。Fig.3 の λ と ν と色との関係を表1の2に示す。

次に Fig. 4 は、開水路内で行った実験系を示す。浅底回路水槽の開水路部(幅 30 cm、下部は透明なガラス)に水を満たし、水面にトレーサを浮かべ、カメラを取り付けた移動台車を水平方向に速度 20.0 mm/s で等速直線

運動させた。二重露光スベックルグラムは、開水路下部の2台の白色パルス光源の真上に台車が来たときに、任意のパルス発光間隔で照射して撮影した。台車下部に取り付けた透明アクリル板の中央部に、直径 18.9 mm、長さ 160 mm の円柱を取りつけ撮影したスベックルグラムを Fig. 5 に示す。実験条件は、 $t = 8.6 \text{ ms}$ 、 $M = 0.284$ 、 $Re = 370$ である。ヤング線の方法により求めた円柱まわりの流れのベクトル線図を Fig. 6 に示す。Fig. 7 の (a)、(b) は、それぞれ白色光で再生した、X 方向および、Y 方向の等速度線分布でいずれも $a = 5 \text{ mm}$ である。実験条件より、

$$\nu = 20.47 \times 10^3 \lambda - (4)$$

となる。表1の3に、 ν と λ と色との関係を示す。さらに代表的な色に対する線を、Fig. 8 下に示す。Fig. 8 の (a)、(b) は、Fig. 6 のベクトル線図を、X 方向、Y 方向に分解し、 λ に対する速度 ν に一致する等速度線分布を描いた。これより、Fig. 7 の白色光で再生した色分布と、Fig. 6 のベクトル線図から求めた等速度線分布がよく一致していることがわかる。Fig. 3 に示したような、円柱後ろの非定常流れは、一般に複雑で、速度場に関して言えば、実験的な解析も簡単ではない。本方法では、カラー写真を見ると明らかになるが速度 0 の領域は白色でそのまわりに色づいた等速度線が現われる。円柱後方ではこのように渦や死水領域が複雑に分布しているが、その様子が成分速度 0 の白い領域としてはっきりと観察される。

Fig.3 Whole-field equi-velocity patterns. White-light reconstruction, $a=4 \text{ mm}$.

Fig.4 Schematic diagram for double-exposure recording of flow in the open channel.

Fig.5 A specklegram of flow around cylinder placed in the open channel.

Fig.6 Velocity vector diagram obtained by point-wise measurement.

(X-direction)

(Y-direction)

Fig.7 Whole-field equi-velocity patterns. White-light reconstruction, $a=5\text{mm}$.

(X-direction)

(Y-direction)

Fig.8 Equi-velocity diagrams made from the diagram of Fig.6.

—=2.0mm/s (yellowish white),=5.8mm/s (deep violet)
 ---=11mm/s (pale green), -.-=15mm/s (light carmine red)
 -.-.-=20mm/s (greenish blue)

4、考察および結論

スペckル写真法を流体計測に応用するに際して、空間フィルタリング法による再生過程で白色光を用いると、次のような利点がある。

- (1) レーザ光による空間フィルタリングでは高いコヒーレンシーによる2次のスペckルノイズによって画質の低下した像となるが、白色光を用いた場合はこの影響はなく、比較的軟調で見やすい画像が得られる。
- (2) 成分速度0の領域は白い明線となり、他の領域と明瞭に区別できる。このことは、Fig.3やFig.7に示したような複雑な流れにおいて特に有効である。
- (3) 速度が大きくなるにつれて、カラースケールの順序に従って連続的に色が変わっていく。このことを利用すれば、速度の準定量化ができる。さらに、単色光による線と違って色の変化してゆく順序から速度場の増減を知ることができる。

以上のように、スペckル写真法では、Boone⁵⁾も指摘しているように、レーザを使う必要はない。これは、単にレーザという特殊な光源を使わなくてすむということのみならず、白色光を使うことによって積極的な利点があることもわかった。色表示は何よりも人間の視覚に直観的に訴える力が大きい点も見逃せない。

本研究を行うにあたり、埼玉大学工学部機械工学科学生堀越覚君の協力を感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 細井、川橋、豊岡、鈴木： 流れの可視化 2, (1982) 409.
- 2) M.Suzuki, K.Hosoi, S.Toyooka, M.Kawahashi : Experiments in Fluid (1983)
(to be published)
- 3) E.Bernabeu, J.C.Amare, and M.P.Arroyo : Appl.Opt.21, (1982) 2583.
- 4) 鶴田：O plus E, 22, (1981), 82.
- 5) P.M.Boone and L.C.De Beacker : Optik, 44, (1976) 343.