

神戸大学工学部 正員 寛 源亮
神戸大学大学院 学生員 〇木佐幸佳

1. まえがき

これまでのホログラフィ干渉法を応用した流体計測は、主として密度変化を対象としており、流速測定の実例は少ない。流れの任意断面における流速分布を求めた例はこれまでにない。本実験は水中の微粒子群に一平面内にのみ広げた光束を照射することによって光膜をつくり、このホログラムを二重露光法により作成し、流速分布を求めた。光膜の再生像上には流速分布をあらわすホログラフィ干渉縞が生じ、この縞の考察、解析を行なった。

2. 微粒子群のホログラフィ

光ホログラフィは物体に光を照射することによって得られる情報光とよとの照射光とを干渉させて物体の情報をとらえるものである。情報光 A_i とよとの照射光 A_o の合成光 A_{oi} を考えるとその平均強度 I_{oi} は次のようになる。

$$I_{oi} = I_o + I_i + A_o^* A_i + A_o A_i^* \quad (1)$$

ただし、* は共役であることを示し、 A は複素振幅を表す。この式でホログラフィに関係するのは右辺第3項である。微粒子が m 個から成るとすれば、(1)式の右辺第3項は次のようになる。

$$A_o^* A_{mi} = \sum_m A_o A_{mi} \exp i \{ (\phi_{mi} - \phi_o) + \omega_{pm} t \} \quad (2)$$

ただし、 ω_{pm} はドップラー効果による角速度の変化、 A は振幅、 ϕ は位相をあらわす。この式において $(\phi_{mi} - \phi_o)$ は微粒子の位置に関する項、 ω_{pm} は粒子運動によるドップラー効果に関する項である。したがって、流速を求める場合、(i) 1回露光によりドップラー効果から微粒子群の速度を求める方法と、(ii) 二重露光により微粒子群の変位と露光の時間間隔から速度を求める方法がある。(i)の方法について考えると、光膜の再生像には流速 $|V_m|$ に応じて、 $|V_m| T = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ ($n=1, 2, \dots$) の暗い縞が得られる。しかし、現在のレーザーは光量の条件を満足しないために測定可能な場合は極微流速に限られる。(ii)の方法においては、ドップラー効果による影響を除く必要があり、その条件は $|V_m| T \ll \frac{\lambda}{2}$ である。本実験の場合、使用したパルスビーレーザーは $T = 30 \times 10^{-9} \text{ sec}$, $\lambda = 0.6943 \times 10^{-6} \text{ m}$ であるから、測定しうる流速の範囲は $0 \sim 2 \text{ m/sec}$ である。実験における流速は十分この範囲内にある。

ホログラムからの再生段階において、微粒子群の光膜の情報に関する成分 A_{di} は

$$A_{di} = \sum_m \epsilon_i A_{mi} A_o^* \exp i (\phi_{mi} + \omega_{mi} t) \propto A_{mi} \quad (3)$$

となり、微粒子群の情報光に比例し、光膜が再生される。ただし、 ϵ_i は実験定数をあらわし、読出光は照射光と同じであるとする。二重露光の場合、この再生光の平均強度 I_{di} は次のようになる。

$$I_{di} \propto \sum_m 4 A_{mi}^2 \cos^2 \left\{ \frac{(\phi_{mi})_1 - (\phi_{mi})_2}{\lambda} \right\} \quad (4)$$

ただし、添字の数字は露光の順番を示す。 m 粒子の変位 dl_m を求めると次のようになる。

$$(\phi_{mi})_1 - (\phi_{mi})_2 = \frac{2\pi}{\lambda} dl_m \cdot (k_o - k_i) \quad (5)$$

ただし、 k は光波の単位ベクトルを示す。(4)式より得られる次式に応じて再生像に明るい縞が生じる。

$$\frac{(\phi_{mi})_1 - (\phi_{mi})_2}{\lambda} = n\pi \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

(5)(6)式より、流速 $|V_m|$ が次のように求まる。

$$|V_m| = \frac{|dl_m|}{T_d} = \frac{n\lambda}{T_d (\cos \alpha + \cos \beta)} \quad (7)$$

ただし、 α, β は照射角、情報光の散乱角をあらわし、 T_d は二重露光の時間間隔をあらわす。

3. 実験

ホログラフィで問題となる光学系の振動を除去するため、本実験ではゴム、砂、新聞紙等を用いて外部からの振動伝達を防いだ。水路は開水路と管水路を用い、主に高さ20cm、幅13cm、長さ310cmの矩形断面の管水路において層流を対象とした。ホログラフィ光源はホログラム作成には前述のダブルパルスルビーレーザーを用い、再生には波長 $0.5145 \times 10^{-6}m$ のアルゴンレーザーを用いた。

実験は流況の異なる流れの流速分布をホログラフィ干渉縞として得るとともに、流速を1~5cm/s、二重露光の時間間隔を100~300 μ sの範囲で変化させてホログラフィ干渉縞が得られる条件を調べた。

4. 考察

得られたホログラフィ干渉縞を写真-1, 2に示す。また、得られたホログラムの実験例から二重露光の時間間隔内の粒子の変位距離をみると、干渉縞が得られる範囲は粒子の変位距離が3~6 μ mであることがわかった。このことから、ホログラフィ干渉縞作成の可否は二重露光の時間間隔と流速との関係によって定まる。

一方、写真-1の干渉縞を解析する。この場合、流れは層流に近いと近似するには1枚の写真で十分である。本実験では照射角は90°である。また、一般に光膜の再生像は参照光と流出光とが同一でないといやがみが生じるから、 n , β の値は直接光膜の再生像からは求められない。そのため、座標を入れた板の再生像を使って、光膜の再生像上に座標を決定した。繰り回数 n は水路壁面上では流速が0であるから、これを基準にして座標各点において値を読みとった。

散乱角 β は光膜の再生像をつくる時に用いたホログラムの部分の座標と流れの中におかれた板の座標との位置関係から求めた。

以上のようにして求めた流速分布を図-1に示す。図中の実線は層流境界層の流れのBlasiusの解である。図において、左側は理論曲線と一致しているが、右側では一致していないことがわかる。これは管路入口で流速分布がかたよっているため、境界層の発達が左右で異なってきたためと思われる。

5. 結論

層流の場合、解析が可能な縞模様を得られたが、乱流の場合には複雑な縞模様を得られた。そのため、今後、乱流への拡張として瞬間的な流速分布を求めるとともに、各種の乱流について多くのホログラフィ干渉縞を得て、これらを分類して直接利用することが可能と思われる。

干渉縞は層流の場合、流れを横切る任意断面においても生じた。これは干渉縞が流れ方向の変位を光膜位置で二重露光内でとらえた状態をあらわしていることを示している。したがって、今後、厳密に流速を測定する場合同時に別方向から3枚のホログラムをつくって再生像を求め、これから、流速の3成分を求めなければならない。

現在のところ、ホログラフィ計測の可否は光源によって大きく左右されるため、今後のこの汎用性はレーザー開発によるところが大きいと思われる。

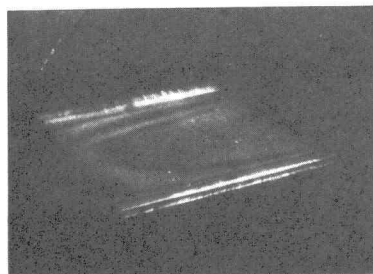


写真-1 管水路層流におけるホログラフィ干渉縞

$$|V| = 2 \text{ cm/s}, T_d = 300 \mu\text{s}$$



写真-2 開水路乱流におけるホログラフィ干渉縞

$$|V| = 2 \text{ cm/s}, T_d = 300 \mu\text{s}$$

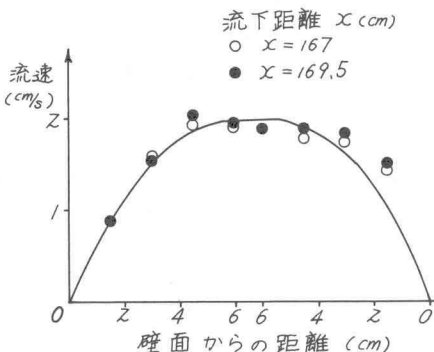


図-1 流速分布図