

神戸大学大学院 学生員 藤田一郎
神戸大学工学部 正員 寛 源亮

1. まえがき

この研究は、前報²⁾で発表した流れの任意断面における乱流速三成分のホログラフィ干渉による測定法を応用したものである。本研究では、乱流速度成分の他に流速勾配も求められ、開水路流れにおける局所等方性等の乱流理論を検討することができた。

2. 実験方法

実験装置はこれまでと同じ幅10cm、長さ220cmの循環式開水路。ホログラム作成用光源としてルビーレーザー、再生用光源としてアルゴンレーザーを使用した。光学系を図-1に示す。レーザー光は二枚のハーフミラーと一枚の全反射ミラーで三本の光束とする。そのうち一本は参照光として用い、残りの二本の光束は半円筒レンズを用いてそれぞれ一平面内に拡げ、流れの部分において互いに直交するように入射させた。本研究ではトレーサーとしてある一定濃度の墨粒子(墨汁)を流れの中に混入し流速計測にはホログラフィ干渉法を用いた。計測する開水路断面には、平面状の互いに直交した光の膜が入射光による流れの中の墨粒子の散乱光として視認される。この状態を図-2に示す。光膜上の任意の点における流速はこれまで発表してきた解析法^{2),3)}によって三次元的にその値を求めることができる。従って、光膜の交線上とその近傍において乱流速三成分を求めればその交線上の点に関して三方向の流速勾配が得られる。流速勾配は従来の例えば熱線等の計測法では得られなかった成分も含めてすべて求められる。本研究では計測点として6点を光膜交線上に設定している。二枚の光膜のうち一方は水平にし水路床に近づけた。これは乱流境界層近辺の流れをとらえようとしたためである。流速解析に使用した三枚の干渉縞画像のうちの一枚を写真-1に示す。鉛直、水平の二枚の光膜上に流速分布を近似的に示す干渉縞が現われている。

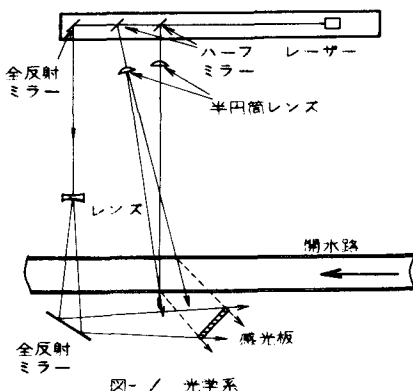


図-1 光学系

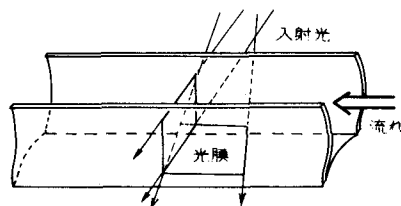


図-2 光膜の位置関係

3. 結果並びに考察

三次元的流速解析の手法については既に発表済みである。ここでは得られた流速分布、流速勾配の値を用いて局所等方性理論の仮説、乱流スケール等に関連して解析、検討を行なう。平均操作等の統計処理はエルゴード定理が空間的に成立していると仮定して行なった。具体的には光膜交線方向、即ち流れに対して横断方向に空間的平均操作を行なっている。測定精度は連続式を検討することにより行なった。連続式は $\frac{2u_i^2}{2\Delta x_i} + \frac{2u_j^2}{2\Delta x_j} / \{ \frac{2u_i^2}{2\Delta x_i} + \frac{2u_j^2}{2\Delta x_j} \}$ の値に関して10%程度の誤差範囲内で成立しているの、以下の論議はこの程度の誤差を含むものとする。この誤差は三方向からホログラフィを再現し、流速等各三成分を求めるときの視角が狭かったため生じたものと思われる。今後、改良を行なう。

局所等方性理論に関する検討は、乱流エネルギーのうち散逸エネルギーの値を比較することにより行なった。一般に非圧縮性流体について、乱流による粘性散逸のエネルギーは次式で与えられる¹⁾。

$$E = \nu \left(\frac{2u_i^2}{2\Delta x_i} + \frac{2u_j^2}{2\Delta x_j} \right) \frac{2u_k^2}{2\Delta x_k} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 u_i は乱流速変動成分を表わす。また、 $i=1$ は流下方向成分、 $i=2$ は横断方向の成分、

$i=3$ は鉛直上向き成分を示すものとする。一方、流れが局所等方性乱流と考えた場合には散逸エネルギーは、次式で表わされる¹⁾。

$$\varepsilon_i = 15\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2)$$

本研究では、(1)(2)式の速度勾配の各項を求めることができるので、 ε 、 ε_i の値の比較が可能となる。その結果は $\varepsilon/\varepsilon_i = 2.14$ であった。これより、本研究で対象とした開水路における水路床近辺の流れの瞬間的な値に対して、局所等方性はオーダー的には成立するが厳密には成り立っていないと考えることができる。

乱流スケールに関しては、まずPrandtlの混合距離を三軸方向について求めた。例えば、流下方向に対しては、 $\bar{\lambda}_1^2 = -\overline{u_i' u_i'} / \left\{ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right\}$ より求められる。その結果、 $\bar{\lambda}_1 = 0.99(\text{cm})$ 、 $\bar{\lambda}_2 = 1.81(\text{cm})$ 、 $\bar{\lambda}_3 = 0.13(\text{cm})$ であった。これより、瞬間的に流れの中には、横断方向に幅広く厚さの薄い渦が含まれていたことが推測される。これ



写真-1 干渉パターン

を干渉パターンから推測される実際にその瞬間に存在していた渦と比べると、必ずしも形状が一致しているとは言えないが、そのオーダーはほぼ一致していると考えられる。また、平均操作に関して一般に $\overline{\partial u / \partial x} = \partial \bar{u} / \partial x$ としている。本研究では、このどちらの値も別々に求められたので、それらの値を混合距離を求める場合に適用し、その差違を検討してみた。 $\partial \bar{u}_i / \partial x_i$ etc. を用いた場合に得られる混合距離を λ_i etc. とすると、 $\lambda_i / \bar{\lambda}_i = 0.96$ 、 $\lambda_1 / \bar{\lambda}_1 = 0.99$ であった。また、流れが等方性と仮定した場合に得られるマイクロスケールを求めると $0.92(\text{cm})$ であり、先程求めた渦のオーダーとほぼ一致した。

また、Reynolds応力を渦動粘性係数を用いて表わすと、 $-p \overline{u_i' u_j'} = p(E_m)_{ik} \cdot (\partial \bar{u}_j / \partial x_k + \partial \bar{u}_k / \partial x_j)$ となる¹⁾。一方、よく二次元 shear flow等で行なわれるように、Reynolds応力を $-p \overline{u_i' u_j'} = p(E_m')_{ij} \cdot (\partial \bar{u}_i / \partial x_j)$ と仮定し、この両者の渦動粘性係数 $(E_m)_{ik}$ 、 $(E_m')_{ij}$ の値を比較すると、次のようになった。

$$(E_m)_{ik} = \begin{pmatrix} 0.05 & 0.16 & -0.09 \\ 0.03 & -0.36 & 0.05 \\ -0.35 & 0.65 & -0.25 \end{pmatrix} (\text{cm}^2/\text{sec}), \quad (E_m')_{ij} = \begin{pmatrix} 0.45 & -0.26 & -0.03 \\ 0.09 & -0.55 & 0.16 \\ -22.7 & 0.31 & -1.74 \end{pmatrix} (\text{cm}^2/\text{sec}), \quad \frac{(E_m)_{ik}}{(E_m')_{ij}} = \begin{pmatrix} 0.12 & -0.60 & 2.76 \\ 0.39 & 0.66 & 0.35 \\ 0.02 & 2.13 & 0.14 \end{pmatrix}$$

これより、本研究における測定点での流れは homogeneous とは考え難いことがわかる。従って、これらの値によって、流れの種類がどのようなものであるかを確かめることができると考えられる。

4. あとがき

本研究では、水路床付近の流況の検討を試みた。しかしながら、今回用いた水路は長さ並びに水理条件が不十分であったため、境界層が十分に発達しておらず、計測は境界層内で行なえたとは言えない点がある。得られた干渉パターン等から推測すると、少なくともその位置は境界層外縁付近であると思われる。今後、水路を改良し境界層を十分に発達させた上で計測点を定め、測定を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) Hinze, J.O. : Turbulence, McGraw-Hill (1975)
- 2) 寛, 藤田 : 乱流速三成分の測定と解析, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集 (1977)
- 3) M. Yano and I. Fujita : Holographic Flow Velocity Analysis, Proceedings of the International Symposium on Flow Visualization (1977)