

流れにおかれた物体の変位と物体まわりの流れの計測

Measurements of the deformation of an immersed body
and the velocity around it

神戸大学大学院	学生員	○藤田	一郎
神戸大学工学部	正員	篁	源亮
神戸大学大学院	学生員	山崎	平弥
神戸大学工学部	学生員	末永	清冬

1. まえがき

変位の測定法の一つに、ホログラフィを応用した光学的な手法がある。著者らは、その中の二重露光法を流れの可視化に適用し、流体計測を行なっている。⁽³⁾ この手法では、流れの中の任意断面内における瞬間的な流速三方向成分の計測が可能である。本研究においては、底面粗度も含めて、物体まわりの流れに、この手法を適用した。同じ方法を用いて、流れに置かれた物体の変位についても計測を試みた。一応、変位を示す干渉じまが得られたが、防震処置が十分でなかったため計測系全体の移動と物体の変位が重畳するなどして、結果的には十分な計測が行なえなかった。

2. 流速としま次数の関係

流速、変位等の測定結果について述べるに先だち、この干渉法の精度を求めるために流速と干渉じまの関係を明らかにする。流速解析には、得られた流速分布を示す干渉像であるホログラフィ三次元像を、異なる三方向から撮影した三枚の写真を用いる。このホログラフィ像には、等流速線が干渉じまの形で現われており、これは測定断面における流速の瞬間値を表わしているものである。この像を異なる方向から観察した場合には、流速を示す干渉じまの様子は視角とともに変化する。

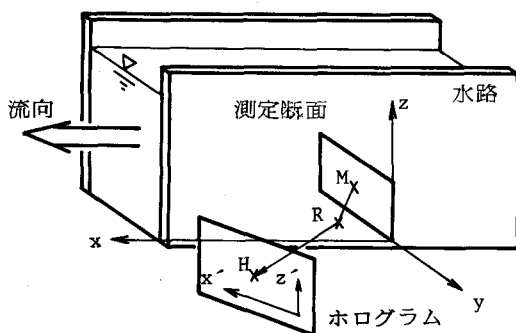


図-1 座標関係図

流速測定断面とホログラフィの座標関係を図-1に示す。ここに $M(x_0, y_0, z_0)$ は測定断面上の点、 $R(x_2, y_2, z_2)$ は水路壁面上における散乱光の屈折点、 $H(x_3, y_3, z_3)$ はその散乱光が到達したホログラム記録面上の点である。但し、水路壁の厚さは散乱光方向への影響が小さいとして無視している。ホログラム記録面上でH点を水路壁面側へ $\Delta x'$ 、鉛直上向きに $\Delta z'$ それぞれ移動させた場合のしま次数の変化を ΔN_x 、 ΔN_z とすれば次式が成立する。

$$\frac{\Delta N_x}{N} = C_x \cdot \frac{\Delta x'}{|d|}, \quad \frac{\Delta N_z}{N} = C_z \cdot \frac{\Delta z'}{|d|} \quad (1)$$

但し、 C_x 、 C_z は粒子移動ベクトル $d(dx, dy, dz)$ 及び M, H, R 点の座標に依存する係数であり、その内容は次のごとくである。

$$C_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|d|}{N} \cdot \frac{n}{\lambda_1 r_0^3} \cdot [dx\{r_0^2 - (x_2 - x_0)^2\} - dy(y_2 - y_0)(x_2 - x_0) - dz(z_2 - z_0)(x_2 - x_0)]$$

$$\times \left(\frac{\partial r_2}{\partial x_3} - \frac{\partial r_2}{\partial y_3} \cdot \frac{r_2}{x_2 - x_0} \right)$$

$$C_z = \frac{|d| \cdot n \cdot 1}{N \lambda_1 r_0^3} [-dx(x_2 - x_0)(z_2 - z_0) - dy(y_2 - y_0)(z_2 - z_0) + dz\{r_0^2 - (z_2 - z_0)^2\}]$$

$$\times \frac{\partial r_2}{\partial z_3} \frac{r_2}{z_2 - z_0}$$

$$r_0 = [(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2]^{1/2}$$

$$r_3 = [(x_3 - x_0)^2 + (z_3 - z_0)^2]^{1/2}$$

$$\Delta x' = [(\Delta x_3)^2 + (\Delta y_3)^2]^{1/2} = \sqrt{2} \Delta x_3 = \sqrt{2} \Delta y_3$$

$$\Delta z' = \Delta z_3$$

N: しま次数

n: 水の屈折率 (=1.33)

λ_1 : 入射光の波長 ($=0.6943 \times 10^{-6} \text{m}$)

但し、ホログラムは測定断面に対して 45° 傾けて設置したとしている。 r_2 は H, M 点の座標に依存する値であり、その内容については参考文献⁽³⁾を参照されたい。

ここで、粒子移動ベクトルの各成分と、各点の座標に具体的な値を代入してみると (1) 式は図-2 に示すようになる。この図において例えば $dx = 10 \mu\text{m}$ 、露光間隔が $50 \mu\text{sec}$ の場合、流速では 20cm/sec に対応する。また、この図では流下方向成分(x方向成分)が卓越している場合を示しており、z 方向よりもx 方向に視点を移動する方が、しま次数の変化は大きいことがわかる。干渉しま次数はその明暗に応じてステップ関数的に、1 本ずつ計数するものであるが、上記の関係よりホログラフイ影像に対する視角、即ち、ホログラ

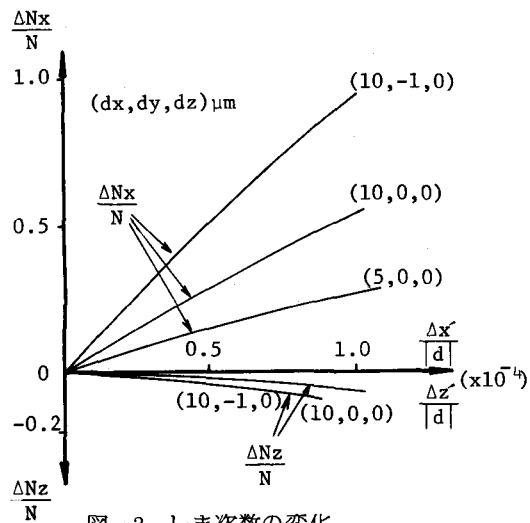


図-2 しま次数の変化

ム上の測定に利用している点H をその前後で変化させれば、明線と暗線の間のしま次数も数えられる。この方法はホログラフイ影像を撮影した写真と対比しながら視認して行なうものであるからその判読精度は、単なる写真の判読に比べて明らかに向上する。

3. 実験方法

実験には、長さ 5.15m (測定部分 1m)、幅 15cm の循環式開水路を使用している。光学系、並びに解析手法については説明は省略する。

まず、底面粗度をつけた場合について説明する。底面粗度は、直径 3mm の塩ビ棒による粗度で形成させた。取り付けは、粗度と乱流境界層の発達との関係を明らかにするために、底面の左右で異なる粗度となるようにした。粗度は、一方の粗度指数 $\alpha = S/k$ (棒の間隔/棒の直径) を 10 、他方を 2.5 とした。測定断面は、leading edge から $5.7, 10.2, 20.0, 49.2 (\text{cm})$ の4 断面とした。但し、測定断面はいずれの場合も棒と棒の間でとっている。水深は、約 17cm で測定断面はそのうち底面から 7.3cm の部分を占めている。流速は測定断面上の各点で得ることができるが、本研究の場合、図-3 に示すように測定断面上に 9×9 のメッシュを考え、そのメッシュ上での流速を求めた。また、測定は同一断面で2~8回行なっている。

一方、物体まわりの流れについては、水路底面の中央に設置した角柱（ $2 \times 2 \times 10\text{cm}$ ）の下流側 6.9cm 、また水路壁に設置したセキ（高さ 3.5cm ）の下流側 3.0cm における鉛直断面内の流速分布を測定した。また、それとは別に斜面上の風波についても流速分布の測定を行なった。物体の変位測定に関しては、流れが水と空気の場合について実験を行なった。

4. 実験結果及び考察

1) 底面せん断力の分布

本研究では、底面せん断力はカルマンの運動量積分方程式を用いて間接的に求めた。但し、平均流速 U と運動量厚 θ のこう配の値については、4つの測定断面のそれぞれの中間の位置における値で代表させた。従って、せん断力は4測定断面の各々の中間の3断面について得られた。結果を図-3に示す。ポイント2は粗度指数（棒の間隔/棒の直径） $\alpha=10$ の部分の点、ポイント6は $\alpha=2.5$ の部分の点を代表している。ポイント4は、その中間の点である。これによると粗度の違いにより摩擦抵抗係数 C_f は、ある程度異なってくることがわかる。

2) 境界層の発達について

境界層の厚さは、干渉じま画像から直接考察することもできる。例えば、写真-1はleading edgeからそれぞれ $5.7, 10.2, 49.2\text{cm}$ における断

面の干渉じまを示している。これをみると、いずれの場合も干渉じまの間隔が壁面付近で急激に密になっている。これは、その部分での流速こう配が急であり、従って、流況も外部とは著しく異なることを示している。このことは、境界層の存在を明らかにするものであると考えられる。写真がleading edgeからの各断面を示していることを考えると、明らかに境界層が発達していることがわかる。ほとんどの場合、底面部分の干渉じまが非常に複雑になっていることから、この部分は乱流境界層であることが想像される。

図-4は、排除厚 δ_* 、運動量厚 θ の下流方向への分布を示す。いずれの場合も、厚さは下流に向けて発達している。また、粗度の違いによる発達の差もある程度みられる。

また、構造的な面から考えると、底面付近ではNakagawa, Nezu, 宇民, 上野らのモデル⁽¹⁾⁽²⁾のようなU字型と思われる渦が存在していることが想像される。例えば、写真-1-(a)においては、その渦が横断方向に数個並んでいるのがわかる。写真-1-(b)をみると、右側の部分に境界層内部から伸びてきた、

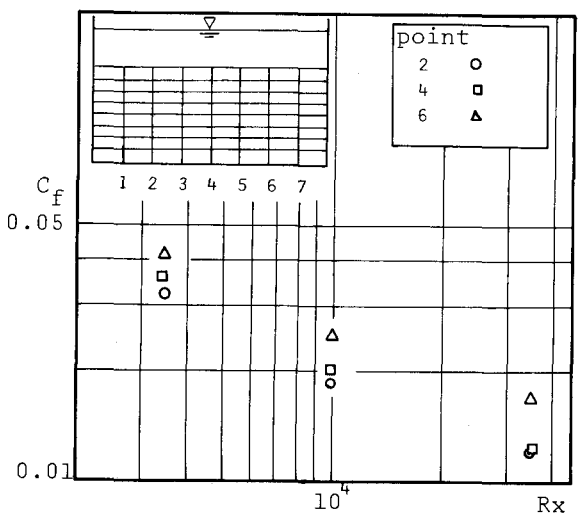
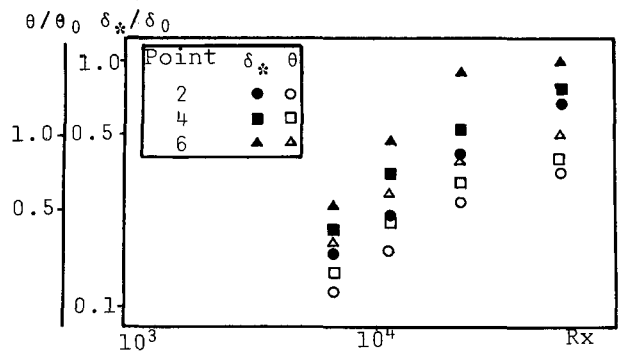


図-3 C_f - R_x の関係



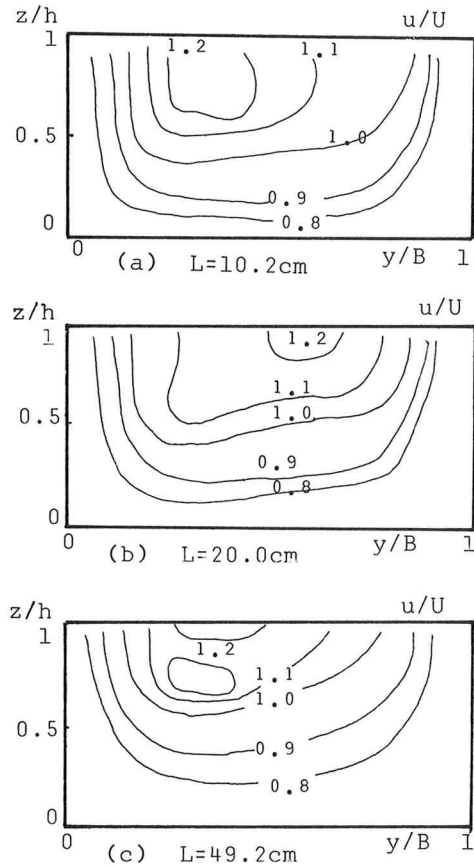
δ_0, θ_0 : $R_x = 5.9 \times 10^4$
point 7における値
 θ : 運動量厚
 δ_* : 排除厚

図-4 δ_*, θ - R_x の関係

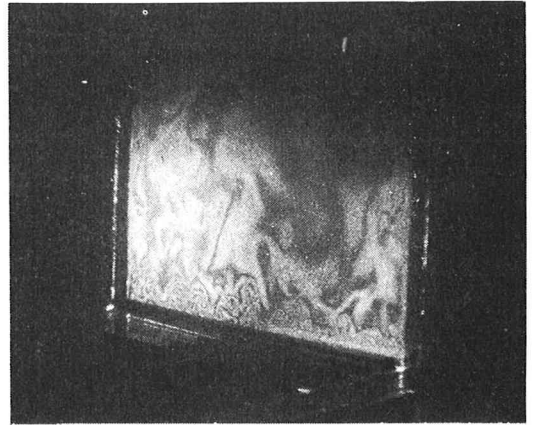
ejectionと思われる流れが現われているのがわかる。本研究で得られた干渉じま画像からは、境界層外部からの流れ込みに相当するinjectionと思える流れは見られなかった。leading edge からの各測定断面における流下方向成分の平均流速分布を図- 5 に示す。

3) 物体後流の流速分布

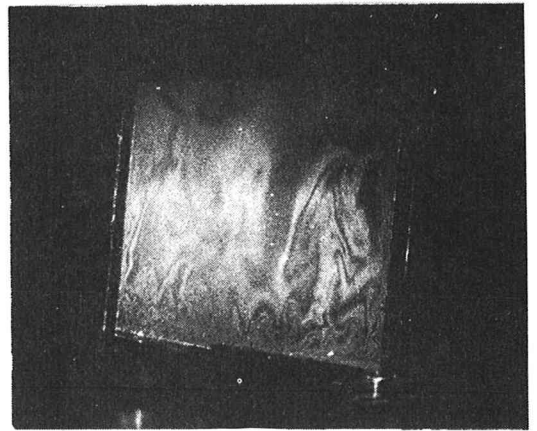
角柱、セキによる後流の流速分布と、解析に用いた干渉じま画像を図- 6,7、写真- 2,3 に示す。角柱の場合には、写真からみても乱れた部分が中央部に細く集中しているのがわかる。これは、角柱表面からはく離れた流れの部分を示しているものと思われる。図- 6 は、流速



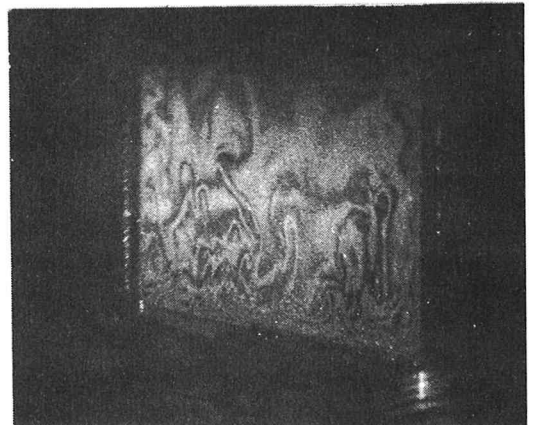
h : 測定断面高
 B : 水路幅



(a) $L=5.7\text{cm}$



(b) $L=10.2\text{cm}$



(c) $L=49.2\text{cm}$

L : leading edgeからの距離

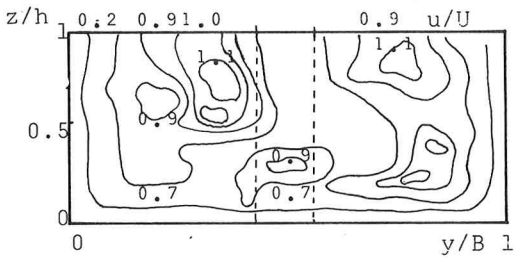
図- 5 平均流速分布図 (流下方向成分)

写真- 1 粗面上流れの干渉じま画像

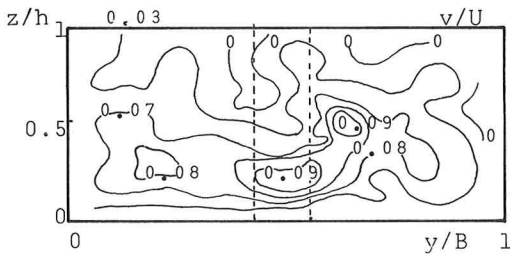
三成分について、等流速線図を描いたものである。但し中央部分の破線は角柱の位置を示す。写真-2は、流速解析に使用した三枚の干渉じま画像を示す。

写真-3は、セキによる後流の流速解析に使用した三枚の干渉じま画像のうちの一枚を示す。これを見ると、流速こう配が急激に変化している部分が現われている。この部分は、自由流線に相当する部分であると考えられる。図-7は、流下方向成分についての等流速線図を描いたものである。但し、破線はセキの位置を示す。

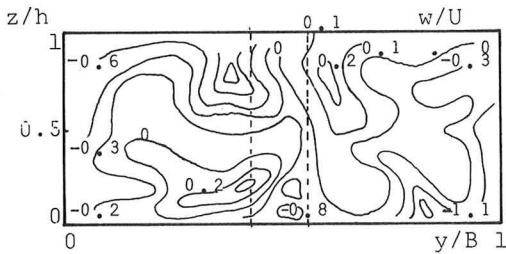
写真-4は、この手法を風波に応用した場合を示す。この場合は、斜面上の風波にともなう流れを示している。流速解析は行っていないが、写真から見る限り壁面よりも水面付近の干渉じまが密になっていることより、風



(a) 流下方向成分



(b) 横断面内水平成分



(c) 横断面内鉛直成分

$$Re = U \cdot d / \nu = 1700$$

(d: 角柱の一辺の長さ)

図-6 角柱後流の流速分布

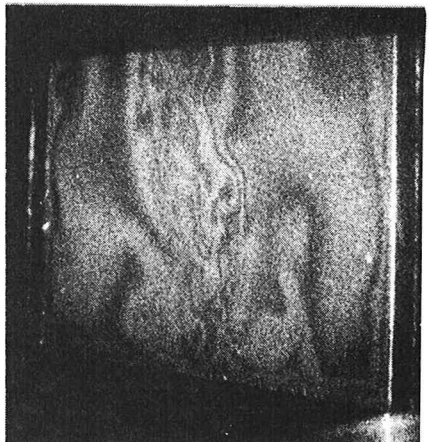
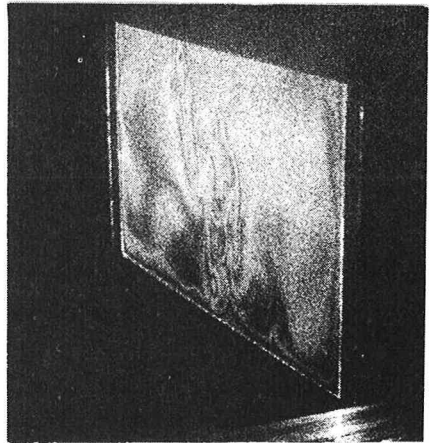
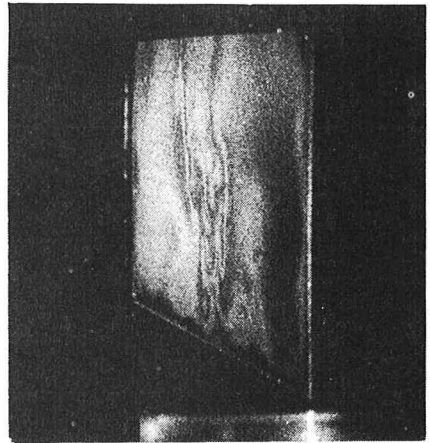


写真-2 三方向から撮影した角柱後流の干渉じま画像

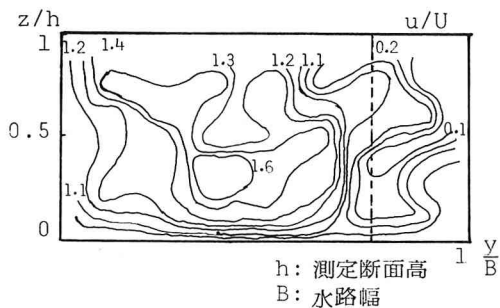


図-7 セキ後流の流速分布 (流下方向成分)

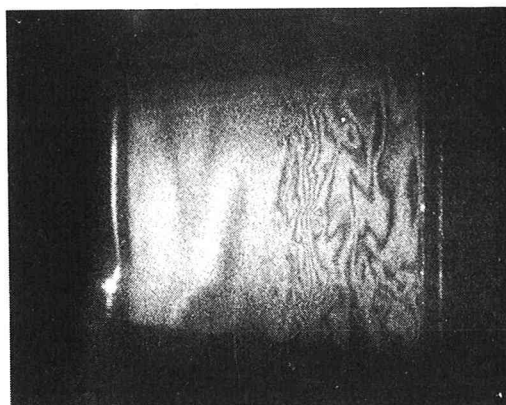
波による影響が大きいことは明らかである。但し測定断面の上端の部分は、不規則に変形した水面により入射光が散乱されており、水面との境界の形は不明確になっている。

3) 物体の変位について

物体の変位は、流れが水の場合と空気の場合について計測を試みた。写真-5は、空気の流れの中に置いたセキの変位を表わしている。水中の流体力による物体の変位測定は、今後の課題である。底面せん断力については、二重露光法を応用して直接測定することが出来るはずである。今後、水路の防震法等の問題点を解決すれば、直接流体力を測定することも可能になるものと考えている。

参 考 文 献

- 1) Nakagawa, H., Nezu, I.: Prediction of the contributions to the Reynolds stress from bursting events in open-channel flows, Jour. Fluid Mech., Vol. 80, pp. 99-128, 1977
- 2) 宇民, 上野: 可視化法による大スケール乱れに関する研究 (2), 京都大学防災研究所年報, 第20号 B-2, pp. 331-354, 1977
- 3) 筧, 藤田: ホログラフイによる流速三方向成分の測定, 土木学会論文報告集, 276, pp. 45-52, 1978



$Re = U \cdot h / \nu = 4600$
(h: セキ高)

写真-3 セキ後流の干渉じま画像

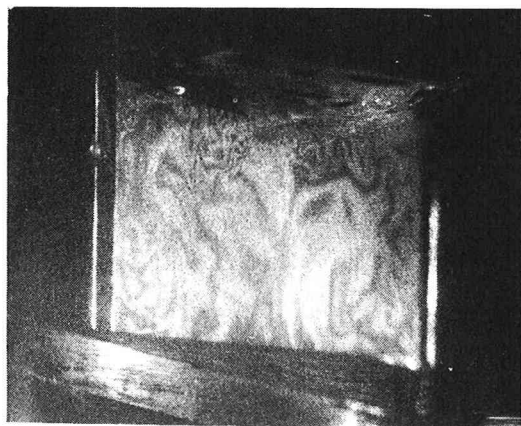


写真-4 風波の干渉じま画像

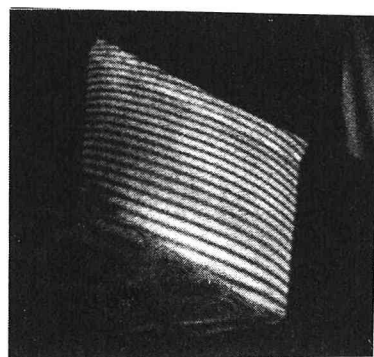


写真-5 セキの変位を表わす干渉じま画像