

ホログラフィによる流速三方向成分の測定

MEASUREMENT OF THREE DIMENSIONAL COMPONENTS OF FLOW VELOCITY USING HOLOGRAPHY

簗 源亮*・藤田一郎**
By Motoaki YANO and Ichiro FUJITA

1. まえがき

この研究は、さきに発表した“ホログラフィ干渉法による流速測定⁵⁾”を継続して行ったものであり、一応ここでこれを完結した。

基本的な計測手法、装置等は前の研究と同じである。はじめにその手法について簡単にふれることとする。水路中に平面光を投光し、流れに含まれる微粒子群を照射すると、流れの中に一つの光の膜面が視認される。微小な時間間隔において、この膜面をホログラフィ二重露光法により記録すると、二重露光の時間間隔の間の膜面内の微粒子群の流れによる変位は、このホログラフィの再生像から干渉縞として求められ、流速分布は水路中のこの膜の断面において、ただちに求めることができる。

今回行った研究の内容は、流れの中にトレーサーとして、強制混入した微粒子に関することと、ホログラフィ再生像の干渉縞から厳密に流速を解析することの2つの事項についてである。

流れの状態や、速さ等の流体計測では、一般に流れの中にトレーサーを混入することは、その状態を変化させる恐れがあり、あまり好ましいことは考えられていない。しかしながら、このホログラフィを用いた流速測定法では、なんらかのトレーサーを流れの中に必要とする。

このために、さきに発表した研究⁵⁾では、自然の状態で流れの中に存在している微粒子群をそのままトレーサーとして、流速測定の研究を行った。この自然混入の微粒子群は、顕微鏡観察から推測すると、主として微細気泡からなっているようであり、その粒径、濃度分布等を正確に求めることはできなかった。

この測定法においてあまりこの自然混入のトレーサーにこだわりすぎると、流速測定は、実用上、低レイノルズ数の範囲の流れに限定され、特に乱れた流れの場合にその流速分布を明確に示す結果が得られなかった。

このことを改善するために、数多くの試みを行ってみたが、最終的に流れの中に適当なトレーサーを強制混入すること以外に方法が考えられなくなった。

このために、種々の諸元の明らかな粒子を流れの中に混入することにより、このトレーサーと流速測定結果との関係を求めるとした。

この結果、最適な粒子をトレーサーとして流れに与えた場合、自然混入のトレーサーの場合と比較して、はるかに鮮明な流速分布を示す干渉縞を得ることが可能となり、乱れた流れにおいても、流速測定ができるようになった。

ホログラフィ干渉法を応用した計測法の利点の1つはキャリブレーションをまったく必要としないことである。このために、この測定法では計測結果として直接求められる干渉縞画像だけから、正確に流速分布が求められる。ただ、この測定法は光学の応用であるため、これを求める過程において、やや面倒な幾何光学解析を行わなければならない。

さきに発表した論文⁵⁾では、計測手法の開発に重点をおいたため、得られた干渉縞画像から流速を求めるこの解析過程を省略したきらいがあった。ここであらためて述べるのは、これを補うことのほかに、この解析の計算時間を短縮する目的がある。

計算機の発達している現在、厳密な解法にかえて、繰返し試算により答を得ることは可能である。しかし、この測定法に関しては、実際に三枚一組のホログラフィ画像から繰返し計算により、流速の三方向成分を求めてみるとかなりの計算時間を必要とする。実験計測のオンライン処理をこの計測法に適用することは、いまのところまだ夢としても、完全な解析式を求めておくことは、こ

* 正会員 Ph.D. 神戸大学教授 工学部土木工学科
** 学生会員 神戸大学大学院

の研究を完結させることからも必要と思われる。

2. トレーサー

流れの中に、粒子をトレーサーとして混入し、流速を測定しようすれば、当然のこととして、その粒子は沈降することなく、流れとともに流下し、流れの状態をそのまま示すものでなければならぬ。このようなトレーサー粒子の粒径は、実際に入手し得るものを集めてみるとその大きさは 10^{-6} m 程度となり、光の波長と大差なくなる。

粒子が対象となるホログラフィでは、粒子からの情報光である散乱光がレイリー散乱であることを基として、その理論構成がなされており、個々の粒子を対象としたホログラフィそのものの研究はすでに数多く行われている²⁾。しかしながら、粒子群を対象とした研究は少なく、また、粒子からの散乱光の研究も、粒径が光の波長と同じ程度の大きさの領域では、その散乱光がレイリー散乱とミューア散乱の中間に属することもあって不明の点が多くまだ十分研究されておらない³⁾。

このほか、粒子の散乱光では、粒子の物質により、分光分析等でよく知られている波長が変化するラマン、あるいはブリリアント散乱が生じるだけでなく、偏光、複屈折等の光学上の現象を伴い、これらが複合したものとなる。

もとより、ここでは、この粒子散乱光について深くこれを探究しようとするものではなく、この流速測定法において最適なトレーサーを見い出すことを目的としている。

のことから、種々のトレーサーとなり得ると考えられる粒子を準備して、これらを順次実験に使用し、その粒子のトレーサーとしての適・不適を確かめることとした。

トレーサー粒子は、金属、非金属、有機物、無機物の4種類について、銅、アルミ、黒鉛、炭素、ナイロン、ポリスチレン、土の各粒子を用いた。

最初に予備実験として時間のかかる粒径別分類を行はず、入手した粒子を混合粒径のままトレーサーとして流れに混入して実験を行ってみた。この結果、銅、ナイロン、ポリスチレン粒子では干渉縞画像が得られず流速を測定することができなかった。また、アルミ粉末もその他の黒鉛、炭素、土粒子に比べるとあまり良好な結果は得られなかった。

のことから、粒径、濃度別の実験は主として簡単に入手し得る土粒子を用いて行うこととした。

土粒子を沈降分析法によって、粒径別に分類した後、各粒径別の粒子について、その重量を計量し、容量一定

の水と混合して原液を作る。この原液を全容量が既知である循環水路の流れに混入することにより、一定濃度のトレーサーとして実験に用いた。

実験は、流速分布を示す干渉縞が明確に得られる条件を粒径と濃度ならびに二重露光の時間間隔の間の粒子の変位等との関係について調べた。

流速分布を示す干渉縞の鮮明度は視認により、その程度を次の4段階に分けた。

- (イ) 干渉縞がまったく得られないもの
- (ロ) かすかに得られているもの
- (ハ) 得られてはいるが縞次数が数えにくいもの
- (ニ) 完全に縞次数が数えられるもの

粒径は $1 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲において4種類に分類した。

$10 \mu\text{m}$ 以上の粒径を用いなかつたのは、粒径が $10 \mu\text{m}$ 以上になると粒子の沈降が無視できなくなるからである。

濃度は $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ gr/cc}$ の範囲のものをこれも4種類に分類した。この範囲の濃度を定めたのは、最初の予備実験においてこの範囲外では測定が不可能であったためである。この範囲の濃度において、粒子を球と仮定すると 1 cc 当りの水に含まれる粒子の個数は約 10^5 個となる。

二重露光の時間間隔 T_d の間のトレーサー粒子の変位 $|d_m|$ は、流速 $|V|$ と、 $|d_m|=|V|\cdot T_d$ の関係があり、これもさきに発表した論文⁵⁾の結果を参照して $0 \sim 10 \mu\text{m}$ の間を4種類に分類した。

このようにして、おのおの4種類ごとに分けた粒径、濃度、粒子変位のおおのの組合せについて実験を行い、その結果を前記の(イ)～(ニ)の基準に従って判別した。

実験結果の中で、まず鮮明な干渉縞が求められた流速測定の可能な例のみについて、粒子変位 $|d_m|$ に関する成功例の数の分布を各粒径ごとに求めてみると、そのおおのの分布は前論文⁵⁾に発表したようなガウス分布に近い分布形を示す。ただ粒径が異なるとその分布は粒径に従ってその中心の粒子変位 $|d_m|$ が変化する。このことから、概略、粒径と粒子変位 $|d_m|$ の間にはある線形関係が存在するようと思われる。

したがって、粒子径で無次元化した粒子変位 $|d_m|/d_p$ と濃度の関係において総合的に実験結果を取りまとめてみると図-1に示すようになる。すなわち、このホログラフィ干渉法を用いた流速測定法では、トレーサーに用いられる粒子の粒径、濃度は任意であることは許されず、また、前論文⁵⁾にも述べたように二重露光の間の粒子の変位 $|d_m|$ 、ひいては流速と二重露光の時間間隔の関係も図-1に示す範囲内になければならないことが明らかとなった。

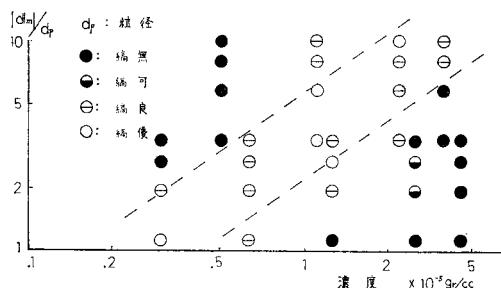


図-1 測定成功例とトレーサー粒子濃度、変位の関係

実験の結果である図-1が明確な関係を示しておらず多少ばらついた関係にあるのは流れの中に含まれている自然混入の粒子を取除くことが不可能であるため、これと強制混入した粒子が混合したものをトレーサーとして使用した結果がここに表われているのではないかと思われる。

沈降分析により粒径分類を行ったことはさきに述べたとおりである。この時、念のために顕微鏡を用いて平均粒径を求め、沈降分析で求めた粒径値と比較し、これらが一致することを確認した。粒子の顕微鏡観察による光学的特性と実験の結果とを照らし合わせてみると、トレーサーの適・不適の判断が行えるように思われる。一例として、粒子の偏光性があげられる。実験に使用しているルビーレーザー光は偏光であるため、偏光性の強い粒子はトレーサーとして適さない。ナイロン等の有機物はこの偏光性が強く、このためにトレーサーとして不適であったのではないかと思われる。使用した粒子中まったく偏光の認められなかったものは炭素粉末である。これ以外のものは、もともと岩石の粉末である土粒子も含めて多少の偏光性が認められた。

銅等の金属粉末の粒子がトレーサーとして良好な結果をもたらさなかったのは、確かにその酸化物、たとえば、 CuO_2 には顕著なラマン効果があることや、また、

偏光が多少認められたことも原因であろうが、大きな理由は、粒子の表面が鏡面に近く、散乱光が非拡散性であるためではないかと思われる。このため、粒子個々の情報である散乱光は方向性が強くホログラフィ記録面上で一様ではなくなり、特に流れが乱れた場合、二重露光によって十分な干渉が得られなかつたのではないかと思われる。

物体からの散乱光が非拡散性の場合には物体の照射光を一度ディフューザーで拡散させると効果があるが、ここでは試みていない。

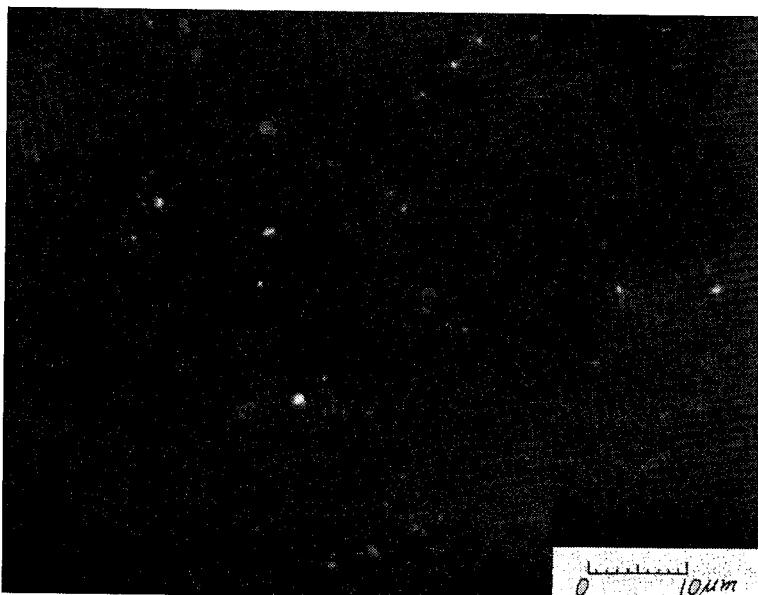


写真-1 土粒子の落射光顕微鏡写真（対物レンズ×100, 平行ニコル）

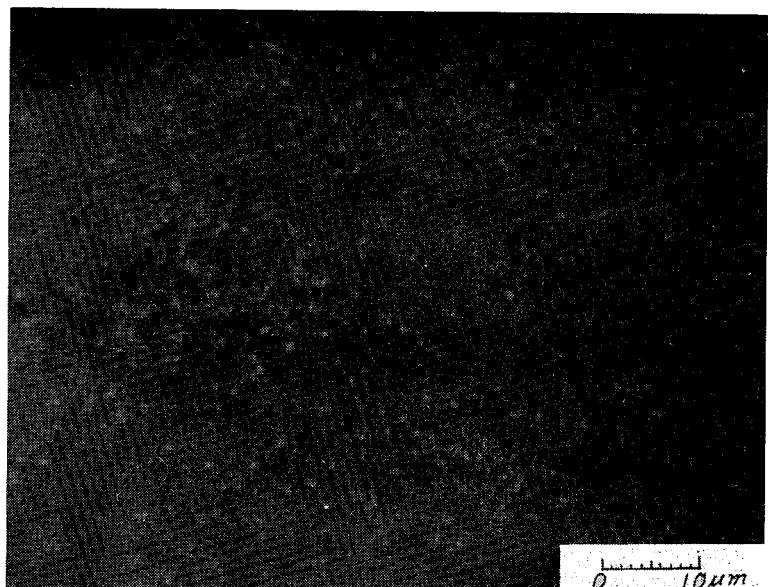


写真-2 炭素粉末の落射光顕微鏡写真（対物レンズ×100, 平行ニコル）

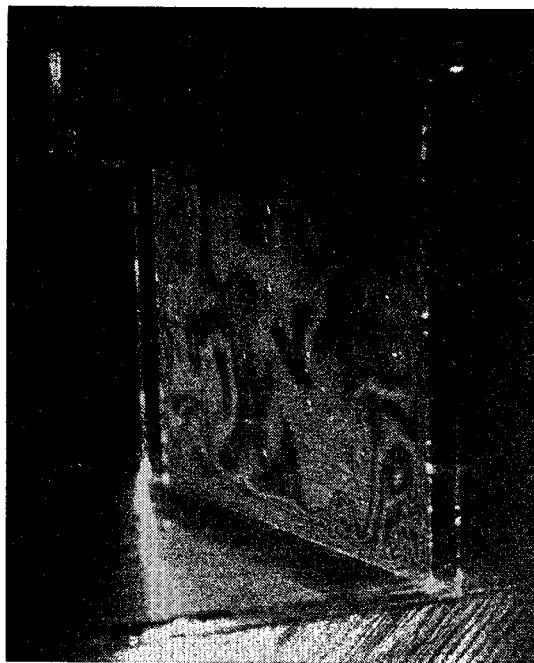


写真-3 干渉縞画像

顕微鏡による粒子の形状の一例を写真-1, 2に示す。上記の顕微鏡観察をもととしたトレーサーとしての粒子の判定法から、あらためて偏光のまつたくない、拡散性散乱光の粒子として炭素粉末を用いて実験を行ってみた。

具体的には、墨を用いたのであるが、粒径別分類に手数がかかるため市販の墨汁を用いた。この粒径は $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下であり、不確定性原理のため顕微鏡測定でこれを正確に求められず、推定しかできない。しかし、写真-2に示すようにその粒径はそろっている。トレーサーとして適合する図-1に示した実験結果を参考にして濃度、粒子変位 $|d_m|$ を定め実験を行なった。その結果の一例を写真-3に示す。これからもわかるように細部まで干渉縞が明確であり、炭素粒子はこの測定法に用いるトレーサーとして最適のものといえよう。

次に述べる流速三方向成分の解析は、すべて炭素粒子をトレーサーとした測定結果を用いている。

3. 流速解析

この測定法により、流速を計測

すると、ホログラフィの作成・再生の過程を経た計測の直接結果は、写真-3に示すような干渉縞画像として得られる。

水路中の光の膜面におけるある測点の流速は、この画像上のその測点に相当する点における干渉縞の本数を水路壁面等、流速が零の場所の干渉縞を基準として読み取れば、干渉縞と次の干渉縞の間の変位量が光源の波長に比例した値ゆえ、その測点のトレーサーの移動距離は求められ、計測できることとなる。

水路中の測点座標と画像上のこれに相当する点の座標との間には次のような光学上の関係が介在する。

(1) 水路内外の水と空気とでは、光の屈折率が異なるため、ホログラムに記録される光の膜面は実在のものではなく、図-2を参照して、屈折によるみかけ上のものである。

(2) ホログラフィ作成時と再生時とで使用する光源の位置とその波長が異なると、再生像における測点の座標、ならびに、その像の倍率は、作成時の原像のものと異なる。

(3) ホログラフィ再生像は三次元像ゆえ、ホログラフィ記録面上の異なる部分を利用して、おのおの視角の異なる像を再生することができる。このことを利用して、三枚の異なる干渉縞画像が得られれば、変位の三方向成分を求めることができる。

ホログラフィ作成時の、屈折率の違うことによるみかけ上の光膜位置は図-2を参照して、情報光（散乱光）が水路壁面上で屈折する点 (x_2, y_2, z_2) をまず定め、この点を利用して求める。

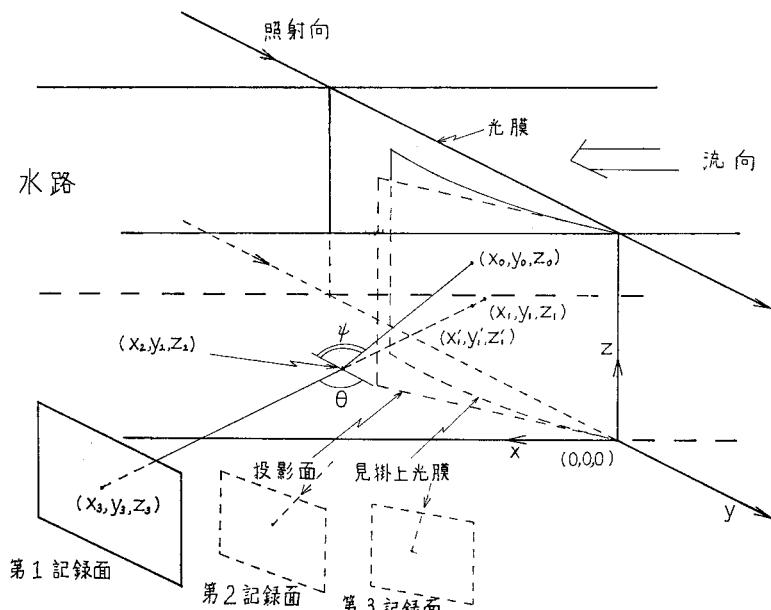


図-2 水路測定断面における幾何光学関係図

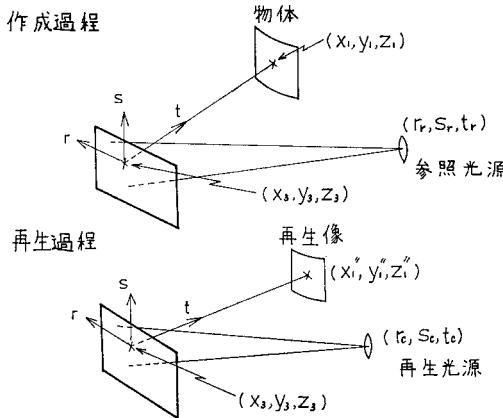


図-3 ホログラフィの作成・再生光学系

ホログラフィ再生時に、作成時と異なった光源を用いると再生像はゆがむ。このゆがみはホログラフィ作成時に流れの中の光膜における粒子群からの情報光(散乱光)が、フレネル・キルヒホフの回折理論に従うものとすると、情報光である光の位相が、図-3を参照して、その波長と各光源から記録面までの距離によって定まるところから、次のように求められる⁴⁾。

$$\text{像の横倍率 } M_t = \left| 1 - \frac{t_0}{t_r} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t_0}{t_c} \right|^{-1} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ただし、ここで上式(7)は光の媒体が一様な場合について導かれた式ゆえ、情報光源からの距離 t_0 はみかけ上の光膜上の相当測点から、ホログラフィ記録面上までの垂直距離となり、

$$t_0 = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}$$

で与えられる。また、 t_r 、 t_c はおのおの参考光源（前論文参照⁵⁾）、再生光源からホログラフィ記録面上までの垂直距離を示し、これは計測時に直接測定することにより求められる。

λ_1 、 λ_2 はおのおの作成、再生時に用いた光源の波長であり、 $\lambda_1 = 0.6943 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.5145 \mu\text{m}$ を使用した。

さきに求めたみかけ上の光膜の投影面上の相当測点の座標 (x'_1, y'_1, z'_1) をこの横倍率を用いて修正すれば、再生像写真-3と完全な相応関係にある面上で、測点に相当する点の座標が求められる。

以上、式(1)～(7)を用いて計算することにより、流れの中の光膜上の測点 (x_0, y_0, z_0) が直接の計測結果として得られた写真画像上において占める位置を求めることができ、この結果、流れの粒子群の移動によ

る干渉縞を、その測点について計数することが可能となる。

二重露光の時間間隔の間における流れ中の光膜の粒子群の移動 d_m による光路差 Δs は図-4を参照して、

$$\Delta s = n d_m \cdot (\mathbf{K}_0 - \mathbf{K}_i) \dots \dots \dots (8)$$

であり¹⁾、ここで \mathbf{K}_0 は粒子群への照射光の単位ベクトル、 \mathbf{K}_i は情報光(散乱光)の単位ベクトルである。さきに発表した論文⁵⁾では、流れが層流であるため簡単に水路壁外からの測角 (α, β) を用いて水路内における光の屈折の影響をこれに含めてしまっている。

光路差 Δs が光源の波長の整数倍になるたびに干渉縞が生じるゆえ、

$$\Delta s = N \lambda_i \dots \dots \dots (9)$$

$(N = \pm 1, 2, 3, \dots : \Delta s$ 正負に従って符号をとる) となる。照射光の方向余弦 (l_0, m_0, n_0) は、この測定の場合、水路に垂直に入射しているゆえ $(l_0=0, m_0=1, n_0=0)$ となる。情報光(散乱光)の方向余弦 (l_i, m_i, n_i) は流れの中の光膜上の測点 (x_0, y_0, z_0) と水路壁面上の屈折点 (x_2, y_2, z_2) から、

$$l_i = \frac{x_2 - x_0}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2}}$$

$$m_i = \frac{y_2 - y_0}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2}}$$

$$n_i = \frac{z_2 - z_0}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2}}$$

として求められる。

ホログラフィの記録は同時に異なる三方向から行っているため、上記式(8)、(9)より、

$$N_j \lambda_i = n [d_x(l_{ij} + l_0) + d_y(m_{ij} + m_0) + d_z(n_{ij} + n_0)] \quad (j=1, 2, 3) \dots \dots \dots (10)$$

ただし、 $d_m = (d_x, d_y, d_z)$

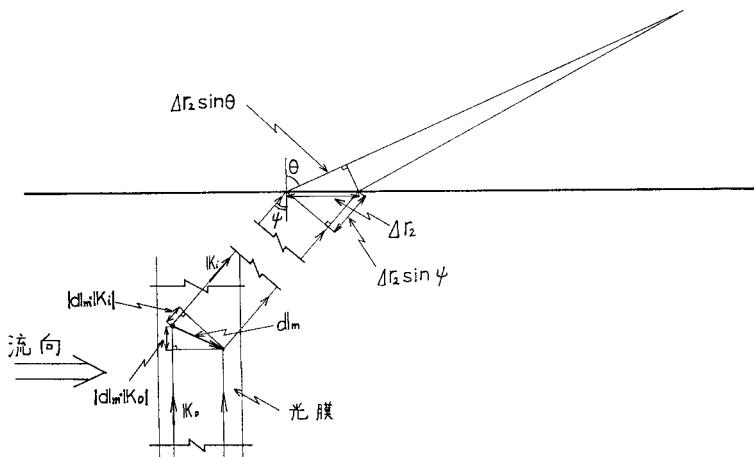


図-4 光膜内トレーサー変位と光路差の関係図

となる。流れの光膜の粒子群の変位の各方向成分 (d_x , d_y , d_z) は、

$$\begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{i_1} + l_0 & m_{i_1} + m_0 & n_{i_1} + n_0 \\ l_{i_2} + l_0 & m_{i_2} + m_0 & n_{i_2} + n_0 \\ l_{i_3} + l_0 & m_{i_3} + m_0 & n_{i_3} + n_0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{Bmatrix} \frac{\lambda_1}{n}$$

.....(11)

を解くことにより求められる。したがって、流速の三方向成分は、

より求めることができる。ここで T_d は二重露光の時間間隔である⁵⁾。

4. 流速解析の考察

トレーサー粒子の考察はすでに2.で行っているため、ここでは流速解析に伴う考察について述べる。

前論文⁵⁾中に述べたように、流れの中の光膜が生じる位置に、光膜と同じ大きさの座標格子を入れた板を設置し、同じ光学系を用いて、この測定板のホログラフィ記録再生を行い、座標格子の写真画像を求める。この写真の座標格子と、上記の式(1)～(7)を用いて格子点を求めたものとを比較してみると、図-5に示すようにはほぼ完全に一致する。ごくわずかな誤差が見られるのは、写真の収縮等計測誤差のほかに、再生像の写真撮影時に膜面の中心を写真フィルムの中心に完全に一致させておらなかったため、式(5)を導く条件が完全に満たされなかったこと、また、ホログラフィ作成時に記録面を完全にみかけ上の座標格子面の投影面に平行としておらなかっただため、式(7)の成立条件が完全に満たされていないこ

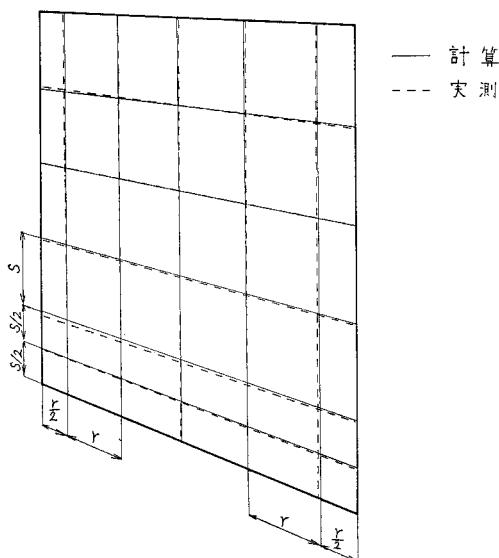
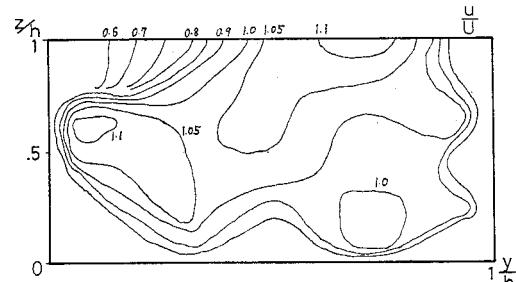


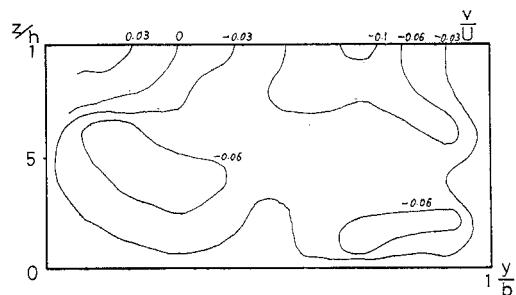
図-5 光膜座標格子の実測・計算値の比較図

と等が考えられる。

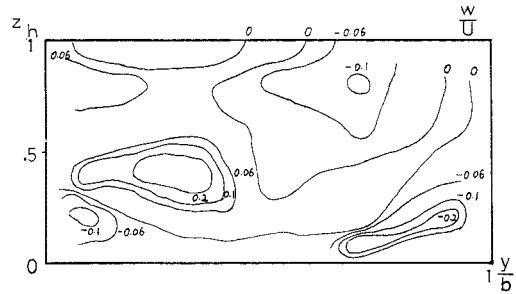
同時記録された三枚の異なったホログラフィ再生画像（その内の一枚を写真-3に示す）を用いて解析を行ってみると、図-6, 7に示すような流速の三方向成分 (u , v , w) が得られる。流れは開水路流れであり、水路壁面付近に境界層流れ、水路隅角部付近に渦流が見られる。水路床と側壁部では境界層流れの状態が異なっているようと思われるが、この流速分布はある瞬間の流れをとら



(a) 流下方向成分



(b) 橫斷面內水平成分



(c) 橫斷面內鉛直成分

図-6 流速三方向成分の等流速分布図

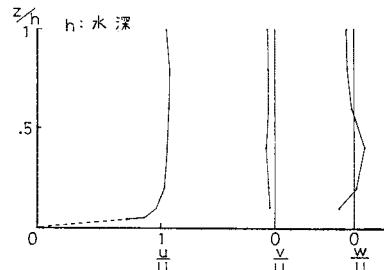


図-7 横断面平均流速の水深方向分布図

えたものゆえ、流れの水理特性を明らかにするには、さらに多くの同じ測定による資料を得る必要がある。したがって、ここではこれ以上測定した流れの水理特性そのものについてはふれず、あらためて実験を重ね、研究したのち公表したいと考えている。

この測定では照射光は水路に直交して入射しているため、入射時の屈折は考える必要がなかったが、斜めに入射したとしても、その取扱いは、本論文の解析手法を拡張すればよい。水路壁の透明板にはアクリル樹脂を用いており、ここでは厚さを零として解析している。この厚さは 1 cm 程度であるため特に考慮する必要はないものと思われる。光源の違いによる再生像のゆがみは、再生光源等に平行光線を用いれば、式(7)は $M_t=1$ と簡略

化できるがこのことについては、まだ実証しておらない。

謝 辞：本研究は文部省科学研究費試験研究の補助を受けて行ったものであることを記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Born, M. and Wolf, E. : Principles of Optics, Pergamon Press, pp. 282, 1964.
- 2) Burns, F.P. : Practical Limitation of Transmission Holography in Particle Analysis, Colloquium on Lasers and Electro-Optical Equipment, 1976.
- 3) 久保輝郎ほか：粉体，丸善，pp. 176～180, 1974.
- 4) 沼倉俊郎ほか：ホログラフィ，コロナ，pp. 23, 1974.
- 5) 範 源亮ほか：ホログラフィ干渉法による流速測定，土木学会論文集 255, pp. 75～80, 1976.

(1977.10.3・受付)