

VTR 画像処理とトレーサ追跡法を組み合わせた 砕波内部流速場の測定

長尾昌朋*・片岡暁彦**・沢本正樹***

1. はじめに

砕波機構を解明する場合、砕波前後での波形と流速分布の時間変化を測定することが重要である。砕波点付近は急激な過渡現象であるため、流速分布の測定には追従性の良いレーザー流速計や熱膜流速計が用いられていた(水口ら, 1985; 青野ら, 1986)。この場合、測定点の空間分布の粗さが欠点となるため、多数回の繰り返し測定が必要であり、砕波現象の再現性という点で問題が残る。これに対して、流れを可視化して光学的に全体を記録し流速を調べる方法は、それらの測定装置と比較して測定精度が劣るという欠点もあるが、非接触で流速場全体の情報が得られるという意味で優れた面を持っている。

可視化手法として注入トレーサ法を使用して流速場を推定する方法には、①一定時間内のトレーサ粒子を追跡する方法、②異なる時刻の2枚の画像の平面相関解析を用いる方法、などがある。前者は流速・推定の処理が簡単であるが、流速がトレーサの存在する地点のみで推定されるため、任意点での流速推定は困難である。後者は任意点での流速推定が可能であるが、相関解析に大量の計算を必要とするので、処理に多大な時間を必要とする。また、両手法とも砕波現象のように測定対象の流速が大きい場合には撮影間隔を短くしなければならないので、特殊な撮映装置(例えば高速度ビデオカメラなど)が必要となる。そこで本研究では、撮映方法と処理方法に工夫を施したトレーサ追跡法を用いて、砕波現象のような流速の大きな現象を通常のビデオカメラを使用した可視化手法で流速を測定する手法を開発した。

2. 実験装置および方法

実験には図-1 に示す長さ13.50 m、幅0.30 m、深さ0.45 mの全面透明アクリル製の矩形断面水路を用いた。水路の一端に設置したピストン型造波機で孤立波を発生させた。この造波機は造波板の速度・移動距離を変える

ことによって、任意の孤立波を発生させることができる。また、他端には勾配1/20の斜面を設置して、ここで孤立波を砕波させた。砕波点付近の流速場を測定するための可視化画像の撮影にはビデオカメラとストロボを使用した。造波機の近くに設置した水面センサの信号とビデオカメラの同期信号を利用してストロボの発光を制御することで高速流体の可視化を可能にした。同時にタイマを作動させ、可視化画像の撮影時刻を正確に測定した。座標軸は図-1 に示すように静水面斜面法先を原点とし、水平岸向きをx軸、鉛直上向きをz軸とした。また、水面センサの信号を時間軸の原点とした。実験に用いた孤立波の諸量を表-1 に示す。

砕波点付近の流速の測定には可視化手法のひとつであるトレーサ注入法を用いる。ここでの問題はトレーサ材料であり、背景色や照明の工夫により高輝度で鮮明なビデオ画像の得られるものが理想的である。水流に用いられる固体トレーサとして、アルミ粉やポリスチレン粒子が挙げられるが、高速の水流の可視化には直径0.1 mm～1 mmの球形の粒子がよく用いられ、流速が大きいほど

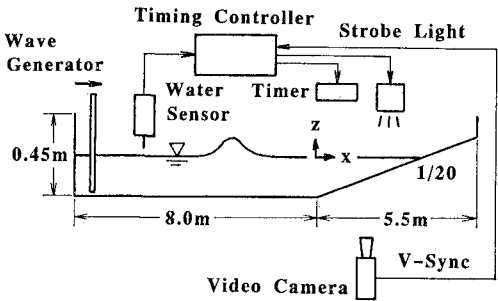


図-1 実験装置

表-1 実験条件

斜面法先部		砕波点			
水深 (cm)	波高 (cm)	位置 (cm)	水深 (cm)	波高 (cm)	形態
15.0	6.4	210	4.5	8.0	巻き砕波

* 正会員 工修 東北大学助手 工学部土木工学科
** 正会員 工修 三菱重工業(株) 機械事業本部
*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

直径の大きなものが使用される。本実験では、直径約 1 mm の白色のポリスチレン粒子をトレーサとして使用した。ポリスチレン粒子の比重は約 1.03 で沈降速度が大きく、静水状態ではすぐに沈降する。そこで、加熱処理によって比重調整し、孤立波発生前の静水状態でも十分な数のポリスチレン粒子が浮遊するようにした。

注入トレーサ法で可視化された画像を連続して記録するためにビデオカメラを使用した。奥行き方向の画像の空間スケールの差異を除去するため、ビデオカメラをできる限り水路から引き離して撮影した。ビデオカメラの画像入力時間間隔は 1/30 s、シャッター速度は 1/60 s である。照明には十分な照度を得るためにストロボを 2 台使用し、画像全体を均一に照らすため、水路の上方と下方に設置した。流速を推定するためのトレーサ追跡法では 4 時刻分のトレーサ粒子の軌跡が必要なので、ストロボの発光間隔を 4 ms として 1 フレームの撮影時間 1/60s の間にストロボを 4 回発光させた。これにより 1 フレームに連続する時刻での同一の粒子が 4 点記録されることになる。ストロボの発光間隔を変えることで幅広い流速に対応することができる。ビデオカメラの 1 画面の撮影範囲は画像処理の精度を考慮して横 20 cm、縦 15 cm としたので、 $x=190\text{ cm}\sim 220\text{ cm}$ の間を 10 cm 毎に移動して撮影を行なった。また、1 枚の画像から判断できるトレーサ粒子の数には限界があるので、十分に再現性のある実験を各測点で 10 回行なった。写真-1 に VTR 画像の一例を示す。

ビデオカメラで撮影された VTR 画像は画像処理装置を用いて 256×240 画素、256 階調 (8 bit) の離散化データに変換される。トレーサ粒子の抽出、トレーサ追跡法による流速の推定、流速場の計算等の作業はパーソナルコンピュータで行なった。

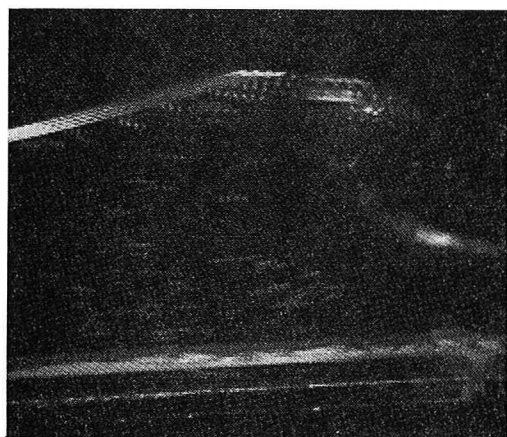


写真-1 VTR 画像の一例

3. トレーサ粒子の判別

トレーサ追跡法によって流速を推定する場合、まず、可視化画像からトレーサ粒子の位置を求める必要がある。ここでは、2 値化処理 (画像解析ハンドブック, 1991) を用いて、高輝度で撮影されたトレーサ粒子を背景から抽出する。トレーサ粒子と背景との輝度コントラストが十分にある場合には 2 値化は容易であるが、コントラストが小さい場合にはトレーサ粒子と背景の輝度レベルが変化し、しきい値を固定したままの 2 値化は困難である。この場合、しきい値を自動的に決定するために判別分析法が用いられる。これは、ある輝度によって輝度ヒストグラムを 2 クラスに分割した場合のクラス間分散が最大となる輝度を 2 値化のしきい値とする方法である。しかし、一般的にビデオカメラで撮影された画像は背景の照度が一様でないため、シェーディングと呼ばれる背景の輝度レベルの変動が存在する。このため、画像全体に同じしきい値を使用するとストロボに近い広範囲の領域がトレーサ粒子として判断される現象がしばしば発生する。そのためここでは部分画像分割法を用いた“しきい面”を用いてシェーディング補正を行ないトレーサ粒子を抽出する。部分画像分割法とは、隣接領域と 50% ずつ重なるようにした 32×32 画素の小領域部分画像に全体の画像を分割し、 15×14 領域の小領域毎に判別分析法を用いたしきい値を求め、それらを滑らかにつなぐことによってしきい面とする手法である。ただし、この小領域にトレーサ粒子が含まれていないと考えられる場合には画像全体から求められたしきい値に置き換えている。このように、判別分析法と部分画像分割法を用いた動的しきい値による 2 値化処理を行なうことで、トレーサ粒子が正しく抽出できる。

このようにして得られた高輝度な領域にはトレーサ粒

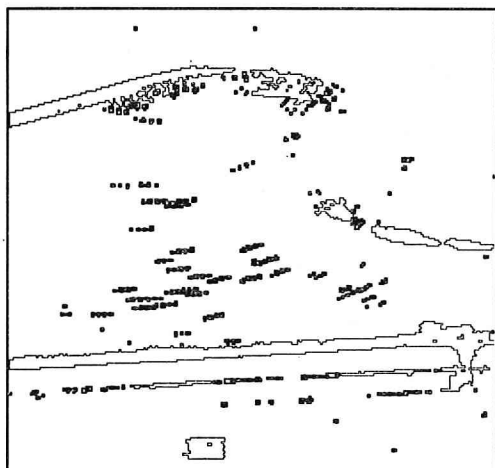


図-2 トレーサ粒子の抽出

子の他に水面および底面での反射も含まれる。これらを分離するためにトレーサ粒子の反射は点として、水面および底面の反射は面として撮影される特性を利用する。トレーサ粒子が隣合うことも考慮して、連結成分の面積が30画素以下のものをトレーサ粒子とし、それ以上のものを水面および底面と判断した。さらに、トレーサ粒子はその9点近傍の中心画素に輝度ピークを持つと考えられるので、これを利用して個々のトレーサ粒子の座標を決定した。写真-1のVTR画像から抽出したトレーサ粒子を図-2に示す。

4. トレーサ追跡法による流速の推定

流速を推定するためにはトレーサ粒子の移動経路を知る必要がある。そこで小林ら(1989)によるトレーサ追跡法を応用し、4時刻分のトレーサ粒子をそれぞれ対応づける。図-3にトレーサ追跡法の概念図を示す。まず、トレーサを一つ選び(粒子A)、その点を中心に Δt 時間に粒子が移動可能な範囲を R_1 の領域として定める。半径 R_1 内にあるトレーサの全てを粒子Aの移動先と仮定する。この中から一つのトレーサを選び出し(粒子B)、

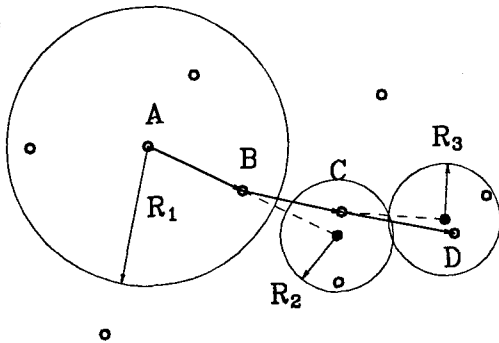


図-3 トレーサ追跡法の概念図

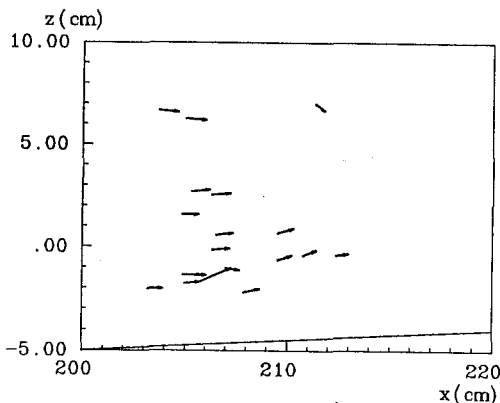


図-4 推定された流速ベクトル

流速ベクトルを求める。これを参考にして粒子Bの移動先を推定し、その点を中心に粒子の加速度、トレーサの位置の読み取り誤差、処理速度などを考慮した半径 R_2 ($< R_1$)の領域を定める。同様に半径 R_2 内にあるトレーサから粒子Cを選ぶ。これまでの粒子の移動履歴より加速度を考慮して粒子Cの移動先を推定し、その点を中心として R_2 と同様に半径 R_3 ($\leq R_2$)の領域を定め、この領域内のトレーサを粒子Dとする。このようにしてトレーサの移動可能な経路を決定し、ただ一つの移動経路が決定できればこの粒子の流速が推定できる。しかし、複数の経路が存在することが多いので、粒子A~粒子Dの移動距離と移動方向の分散が最小になるものを採用して流速を推定する。小林らによるトレーサ追跡法では連続する4枚の画像に粒子A~粒子Dを対応させるので、流れの方向が判断できる。しかし、本研究で行なった実験方法では流速の大きな現象を測定するために一枚の画像に4時刻のトレーサ粒子を撮影したので、実際とは逆方向の経路や誤った経路が発生した。そこで前後時刻の画像から得られたトレーサ粒子の経路を参考にして正しい経路を推定した。このようにして得られた流速ベクトルの一例を図-4に示す。ストロボ発光間隔4ms、孤立波の波速144cm/sを考慮して $R_1=10$ mmとし、トレーサ粒子の位置の誤差を考慮して $R_2=R_3=4$ mmとした。誤った流速ベクトルも存在するがほぼ妥当なものと考えられる。

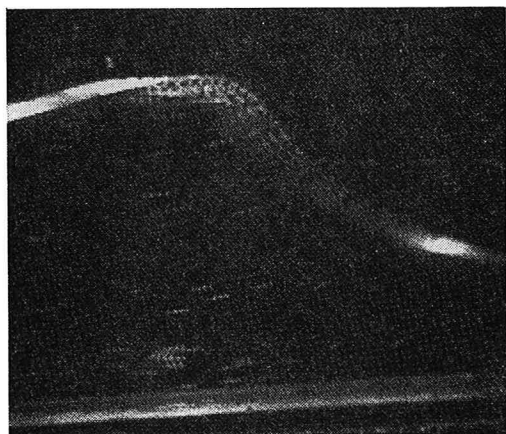
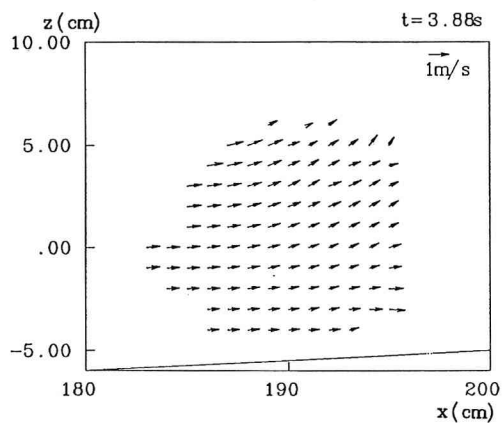
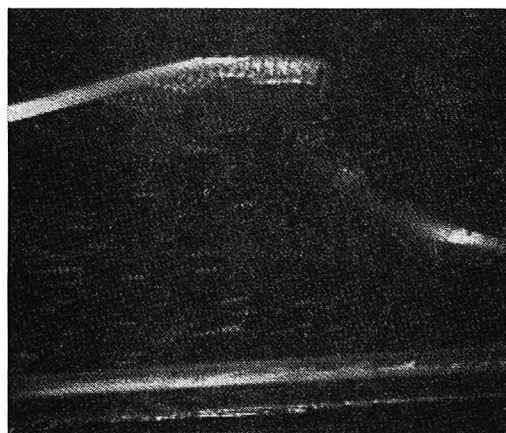
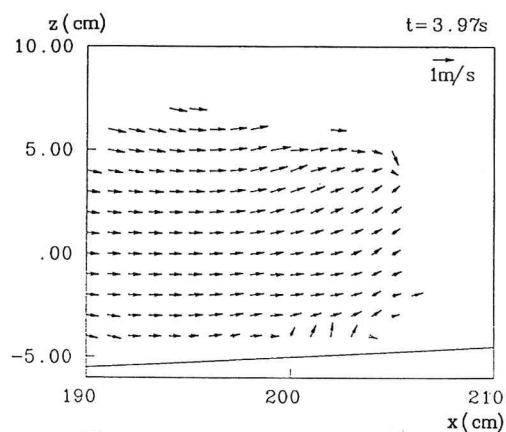
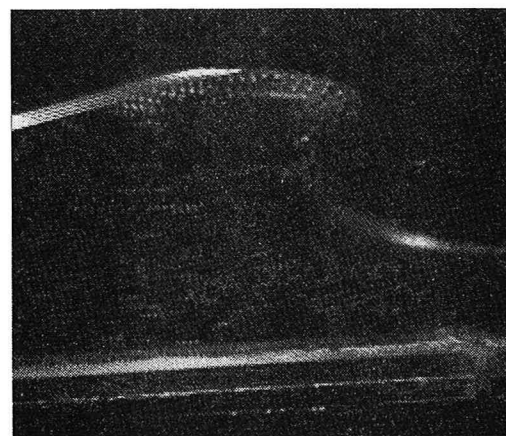
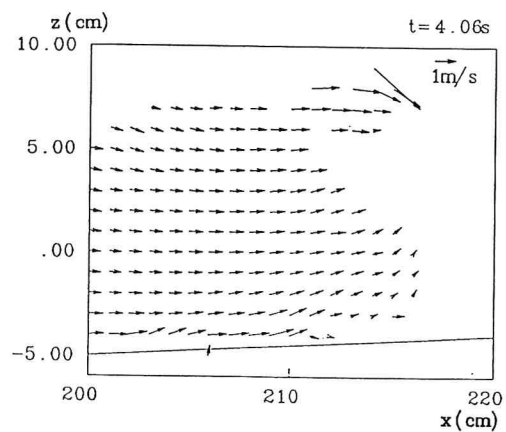
5. 巻き砕波の流速場

画像データより得られた流速データはトレーサ粒子の分布に起因する偏がある。また、判別できるトレーサ粒子の数には限界があるので、複数回行なった実験結果を位相平均を用いて重ね合わせる必要がある。しかし、流速データは必ずしも同じ場所に存在しないので、任意の場所・時刻(x_0, y_0, t_0)での流速および流速勾配を求めるために以下の式を適用した局所的な線形補間を行なう。

$$\begin{aligned} u &= A_1 + A_2(x - x_0) + A_3(z - z_0) + A_4(t - t_0) \\ w &= B_1 + B_2(x - x_0) + B_3(z - z_0) + B_4(t - t_0) \\ &\dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

係数 $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4$ は最小自乗法を用いて計算点毎に決定した。砕波の規模を考慮して計算点(x_0, y_0, t_0)を中心とした半径3cm以内の時空間に存在する流速データのみを採用し、かつその個数が10個未満の場合は流速がないものとして処理した。時間は距離との次元を一致させるため波速144cm/sを乗じている。計算点における流速および流速勾配は

$$A_1 = u, \quad A_2 = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad A_3 = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad A_4 = \frac{\partial u}{\partial t}$$

写真-2 ビデオ画像 ($t=3.88$ s)図-5 流速分布 ($t=3.88$ s)写真-3 ビデオ画像 ($t=3.97$ s)図-6 流速分布 ($t=3.97$ s)写真-4 ビデオ画像 ($t=4.06$ s)図-7 流速分布 ($t=4.06$ s)

$$B_1=w, B_2=\frac{\partial w}{\partial x}, B_3=\frac{\partial w}{\partial z}, B_4=\frac{\partial w}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

として求められる。これを利用して各計算点での加速度、渦度、発散も計算できる。このようにして得られた流速分布を図—5～図—7に、またこの時刻に対応するVTR画像を写真—2～写真—4に示す。最小自乗法を用いた線形補間により全体的に妥当な結果が得られている。水面や底面の近くに明らかに誤りと見られる流速が存在するが、画像処理の段階で乱反射によるノイズを除去できなかったことに起因すると考えられる。

6. おわりに

本研究では、VTR画像処理とトレーサ追跡法を用いて巻き砕波の流速分布の測定を行なった。高速流体の測定を可能とするために、1枚の画像に4時刻分のトレーサを撮影したため、本来のトレーサ追跡法に比べて多くの誤ベクトルが発生したが、前後の画像データを利用し

て誤ベクトルを除去したため、十分に実用になることが確かめられた。また、偏在する流速データから線形補間で流速場を再現する計算では、流れの状態に応じて渦度ゼロ、発散ゼロ等の拘束条件を課すことも可能であり、その場合より精度が向上すると考えられる。

最後に、本研究は文部省科学研究費試験研究(B)(代表者：澤本正樹)および小川記念基金の援助を受けているを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 青野利夫・服部昌太郎 (1986): 回転スペクトルを用いた砕波下での大規模渦に関する実験的研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 6-10.
- 小林敏雄・佐賀徹雄・瀬川茂樹・神田 宏 (1989): 二次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発, 日本機械学会論文集(B編), 55巻509号, pp. 107-114.
- 高木幹雄・下田陽久 (1991): 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 502-506.
- 水口 優・友金幸浩 (1985): 巻き砕波型砕波時の流れの場の実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 60-64.