

トレーサ追跡法と相関法を用いた孤立波砕波の流速分布測定

長尾昌朋*・神保誠二**・沢本正樹***

1. はじめに

砕波帯で起っている流体運動の内部機構を解明するためには、砕波点前後での波形や流速分布の経時変化を測定することが重要である。一般的に砕波点付近の流体運動は急激な過渡現象であり、戻り流れなどの影響で再現性が期待できないため、空間的な流速分布を測定するためには多点同時計測が不可欠である。このため、流れを可視化画像として光学的に記録して流速分布を測定する方法はレーザー流速計などに比べて測定精度が低いという欠点はあるが、同一時刻での流れ場全体の流速や水面形が測定できるという意味で優れた方法である。

可視化画像から流速分布を測定する方法にはいくつかの手法がある。砕波点付近の流速分布測定に適用され、砕波直後の流体運動や気泡の混入した波状段波などの砕波にともなう流体運動の内部機構の解明を試みたものとして、西村ら(1988)や真野ら(1990)が用いた相関法、著者ら(1991)が用いたトレーサ追跡法、小林ら(1992)が用いた Fourier 変換法がある。これらはトレーサとして使用する可視化画像の性質から大きく2種類に分けられる。相関法や Fourier 変換法は可視化画像の輝度の局所的な空間分布をトレーサとして使用し、相互相関関数や Fourier 係数を利用して2画面間の対応するトレーサを求めて流速を測定する。トレーサ追跡法は可視化画像に画像処理を施して求められたトレーサの位置を利用して、連続する数枚の可視化画像のトレーサを追跡することで流速を測定する。このため、可視化画像を利用した流速分布測定法の測定精度は可視化画像の状態に大きく支配されると考えられるが、一般的には経験的に精度が良いと考えられる条件を選んでおり、定量的な精度の考察は行われていない。

本研究では代表的な流速分布測定法としてトレーサ追跡法と相関法を選び、可視化画像の状態と流速測定精度の関係の関係を定量的にとらえ、流速分布測定法の適用範囲を考察する。さらにこれらの特徴をふまえて、可視化画像

の状態に応じて流速分布測定法を使い分けるより高精度な流速測定法の開発を試みる。また、可視化画像を用いた流速分布測定法は使用する機材の性能から測定可能な流速の範囲が限られてしまい、高速流体の流速分布を測定する場合には高速度カメラなどの特殊機材を必要としたが、ここでは撮影方法に工夫を施して測定できる流速の範囲を変更できる手法を開発し、一般的な機材を用いた高速流体の流速分布測定も試みる。

2. トレーサ法と相関法の精度の比較

トレーサ追跡法や相関法などの可視化手法を用いた流速測定法は、可視化画像の状態がその測定精度に大きな影響を与える。図-1に示されるトレーサ追跡法は連続する4画面におけるトレーサ粒子の複数の移動可能経路からもっとも妥当と考えられるものを選ぶので、トレーサ粒子間隔が小さくなると検索領域に存在するトレーサ粒子の数が多くなり、移動可能経路が増加するため誤った経路を選択する可能性が高くなる。また、図-2に示される相関法は可視化画像内のトレーサ粒子の局所的な空間分布を用いて2画面間のトレーサを対応づけるので、トレーサ粒子間隔に代表される空間分布の代表長さがテンプレートの大きさに比べて大きくなると空間分布が形成されないため、類似性の評価が困難となり、流速測定精度が低下すると考えられる。一般的には、このようなトレーサ粒子間隔に代表される可視化画像の特徴に流速測定精度が影響されると考えられる。

そこで、可視化画像の状態と流速測定精度の関係を調べるためにトレーサ粒子の間隔、速度、直径を変化させた実験を行った。円形の平板にトレーサ粒子を描き、それを回転させたものの一部をビデオカメラを用いて撮影し、VTRに記録した。これは実際の画像処理を含めた総合的な流速測定精度を求めるためである。可視化画像(256×240 dot)としてトレーサ粒子の間隔(5~100 dot)と直径(1~8 dot)を変化させたものを用意し、速度(10~50 dot/interval)に関しては平板の半径方向の分布に着目した。

この記録からトレーサ追跡法と相関法とを用いて流速分布測定を行い、個々のトレーサ粒子について円盤の回

* 正会員 博(工) 足利工業大学講師 土木工学科
 ** 正会員 修(工) 清水建設(株)
 *** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

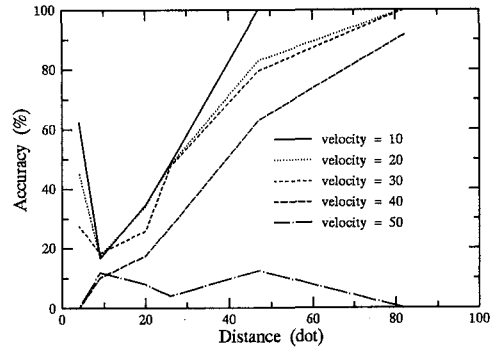
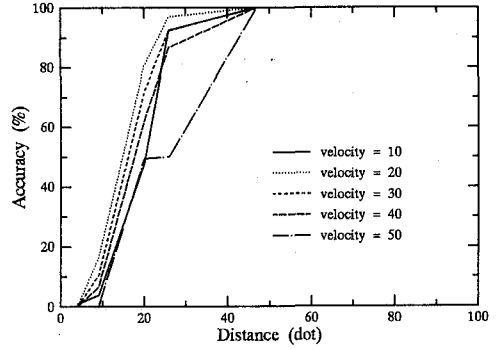
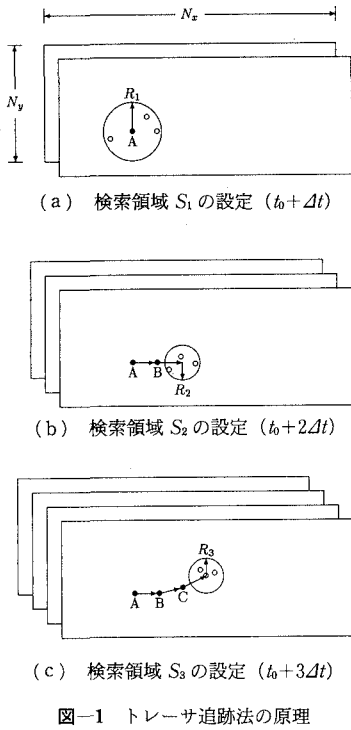


図-3 平均間隔に対する流速測定精度

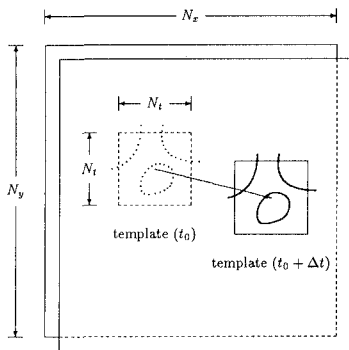


図-2 相関法の原理

転運動と比較して正しいものとそうでないものに分け、得られた流速の総数に対する正しい流速の割合を流速測定精度の尺度として使用した。流速測定法のパラメータは、トレーサ追跡法では $R_1=100$ dot, $R_2=R_3=60$ dot, 相関法ではテンプレートの大きさを $N_t=15$ dot, 検索範囲を ± 100 dot とした。

図-3 にトレーサ粒子の平均間隔に対する精度の変化を示す。トレーサ追跡法では平均間隔が 20 dot 以上の場合に精度が良いことがわかる。これは検索領域 S_1 に存在するトレーサ粒子数が数 10 個程度であれば正しい移動経路を推定できることを意味する。トレーサ粒子の移動経路数はトレーサ粒子の密度の 3 乗に比例するので、平

均間隔が小さくなると可能移動経路数が極端に多くなり、量子化誤差を含むいろいろな誤差から正しい経路を推定することが不可能となる。相関法では平均間隔が 10 dot 以下の場合、つまりテンプレート内に複数のトレーサ粒子が存在する場合、精度が良いことがわかる。平均間隔が大きくなると精度が低下するが、これはテンプレート内のトレーサ粒子が 1 個となり空間分布を形成できないため、検索範囲内の全てのトレーサ粒子に対して同じように高い相関を示すからである。さらに平均間隔が大きくなり、検索範囲を超えると逆に精度が上がるが、これは検索範囲内でトレーサ粒子が 1 個だけしか存在しないため必然的に正しい流速が得られるためである。よって、トレーサ粒子の平均間隔がトレーサ追跡法では R_1 の 1/5 以上、相関法ではテンプレートの大きさ以下であれば精度が良いと考えられる。

トレーサ粒子の平均速度は、どちらの方法に対しても平均速度が大きくなると測定精度を低下させる。一般的に流速が大きくなった場合には流体の変形運動も相対的に大きくなると考えられるため、どちらの手法でも平均速度の増加とともに精度が低下すると考えられる。また、トレーサ粒子の平均直径はどちらの方法に対しても測定

精度への影響は小さい。よって、トレーサ粒子の平均間隔を用いてトレーサ追跡法と相関法を使い分けるとどのような可視化画像に対しても精度の良い流速測定が可能となる。

3. 高速流体のための撮影法

可視化手法を利用した流速の測定範囲は、可視化画像の大きさ・空間分解能・撮影時間間隔で限定される。撮影時間間隔が限定された場合、最小流速は空間分解能から、また、最大流速は画像の大きさと流速推定法の精度から決められる。一般的に画像の大きさと空間分解能は測定対象によって決定されるので、流速の測定範囲を変更する場合は撮影時間間隔を変える必要がある。そこで、一般的なビデオカメラの1フレームに異なる時刻の画像を重ね合わせることで高速流体を含む広い範囲での流速測定を可能とした。

トレーサ追跡法では連続した4時刻での可視化画像が必要なので、ストロボスコープを短時間間隔で4回発光させ、ビデオカメラの1フレームに4時刻分のトレーサ粒子の移動経路を記録した。画像処理を施してトレー

サ粒子を抽出した2値化画像の例を図-4に示す。ここではトレーサ粒子の他に、水面や底面の領域も灰色で表示されている。このようにして抽出された4時刻分のトレーサ粒子に対してトレーサ追跡法を適用して流速を求める。基本的にトレーサ追跡法は異なる4時刻分のトレーサ粒子に対して行われるが、ここではトレーサ粒子の時刻を判断できないため全てのトレーサ粒子が異なる4時刻において存在するものと仮定している。しかし、このままでは流速の方向が判断できないのでトレーサ追跡法の最初の検索領域 S_1 の位置を孤立波の波速を考慮して岸方向に設定することで流速の方向を決定した。孤立波の砕波では流れが全て岸向きであるのでこのような方法が可能となる。

相関法の場合は異なる2時刻での可視化画像が必要である。そこで、2台のストロボスコープを使用してそれぞれに赤と青の光学フィルターを被せ、発光時刻をずらして可視化画像の撮影を行った。このようにして撮影された可視化画像は画像処理装置によってカラー画像として取り込まれデジタルデータとなる。原色を使用しているので2枚のモノクロ画像への分離は簡単である。図-5に撮影されたカラー画像の例を示す。

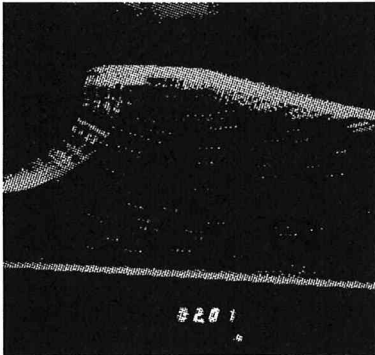


図-4 トレーサ追跡法で使用する可視化画像

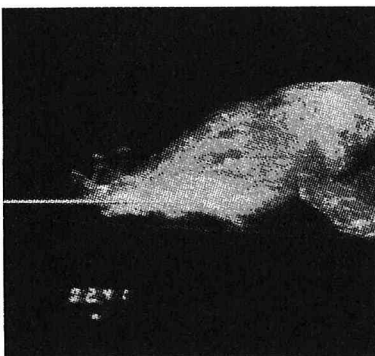


図-5 相関法で使用する可視化画像

4. 砕波帯の流速分布測定

実験装置の概要を図-6に示す。長さ13.5 m、幅0.3 m、深さ0.45 mの全面透明アクリル製の矩形造波水槽を用いた。一端に設けたピストン型造波機で孤立波を発生させ、岸側6.5 m部分に設置した勾配1/20の斜面で孤立波を変形させ、砕波させた。座標は図に示すように、静水面上の汀線を原点とし、水平方向沖向きを x 軸、鉛直上向きを y 軸とした。沖側の造波機の近くに水面センサを設置し、時間軸 t の原点とした。水面センサとビデオカメラの信号を基にして、2台のストロボスコープの点滅やタイマの開始・停止をタイミングコントローラで1 ms 単位で制御している。実験に用いた孤立波は斜面法先で水深0.20 m、波高0.06 mである。

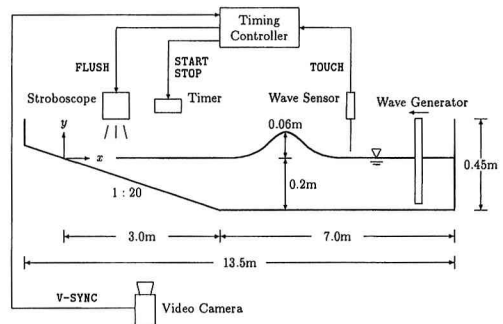
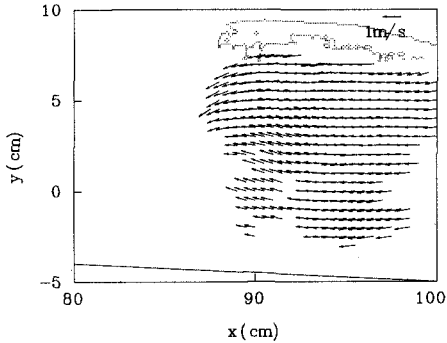


図-6 実験装置概要

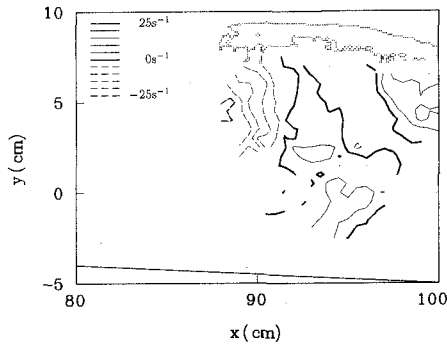
流れの可視化には、砕波突入前の領域では加熱処理によって比重調整した直径約1mmのポリスチレン粒子を、突入後の気泡を含んだ領域では混入気泡をトレーサとして使用した。水面形とこの流れの可視化画像はビデオカメラで撮影し、VTRに記録した。可視化画像の大きさはビデオカメラや画像処理装置の空間分解能などの条件を考慮して約0.25mとした。このままでは砕波帯全体を可視化できないので、再現性に注意した孤立波砕波の実験を行い、ビデオカメラを0.10mずつ移動して撮

影した。また、流速測定誤差を低減するため、1地点につき10回程度の撮影を行い、位相平均操作をしている。砕波時の高速な流れに対応するため、1/30s毎に撮影されるビデオカメラの1フレームの撮影時間1/60sの間にトレーサ追跡法の場合は5ms間隔で4回、相関法の場合は8ms間隔で色を変えて2回ストロボスコープを発光させている。

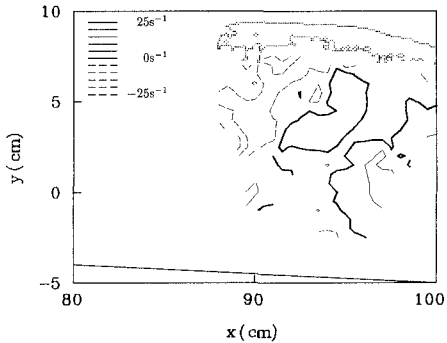
トレーサ追跡法で測定された流速は、トレーサ粒子の位置によって測定点の分布が異なるので流速分布として



(a) 流速分布

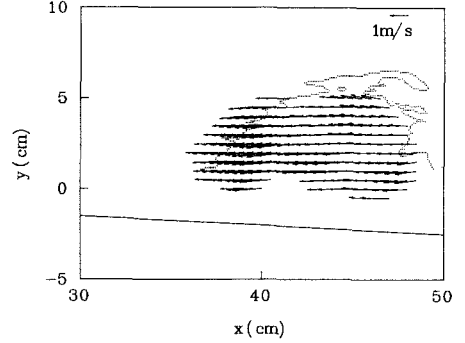


(b) 渦度分布

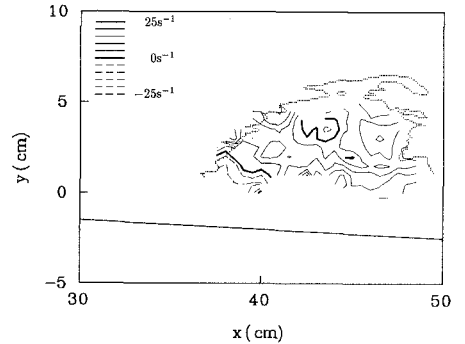


(c) 発散分布

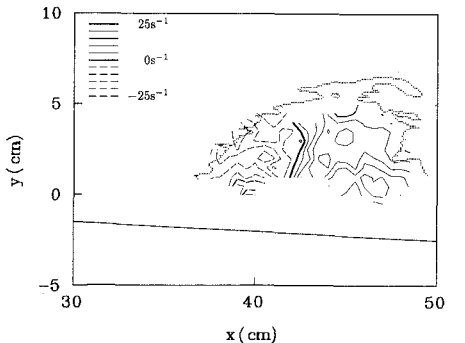
図-7 流速測定結果 ($t=2.34$ s)



(a) 流速分布



(b) 渦度分布



(c) 発散分布

図-8 流速測定結果 ($t=2.62$ s)

の使用には適さない。また、相関法を使用した場合でも再現性のある実験を行った場合は位相平均操作をすることで誤差を低減することが可能である。このため、可視化画像から得られた流速を局所的に直線分布であると仮定して、時空間的な流速分布を得る。孤立波砕波の規模を考慮して、流速の計算点を中心とした半径0.02 m以内の測定点で得られた流速から最小自乗法を用いて局所的な流速分布を決定した。また、時間軸に関する局所領域は空間との次元を一致させるため、実験での孤立波の波速1.6 m/sを乗じている。計算点では補間された流速の他に流速勾配が得られるので、加速度、渦度、発散も計算できる。

本研究行った実験では、孤立波は $x=0.88$ m, $t=2.34$ s で砕波し、砕波水深0.044 m, 砕波波高0.080 mである。 $x=0.60$ m, $t=2.48$ s で巻き砕波の砕波突出部が前方の水面に突入した。この突入によって巻き上げられた水塊は急激に成長し、 $x=0.35$ m, $t=2.64$ s 付近でさらに前方の水面に突入し、次の水塊を発生させた。砕波突出部の突入によって生じた気泡混入領域は $x=0.25$ m, $t=2.72$ s 付近で底面に到達している。このため、流速分布の測定には、 $t=2.52$ s までは砕波突出部の突入による影響が小さいのでポリスチレン粒子をトレーサとしたトレーサ追跡法を用いている。その後は砕波突出部の突入によって生じた混入気泡をトレーサとした相関法を用いた。

一連の流速分布、渦度分布、発散分布を図-7、図-8に示す。渦度分布および発散分布はその値が正の領域を実線、負の領域を点線の等値線で表している。等値線は細線が 5 s^{-1} 間隔、太線が 25 s^{-1} 間隔である。

浅水変形した孤立波は前傾化するため、前面ではやや上向き、その他の領域ではほぼ水平の流速分布を持っている。さらに斜面上を進行して波高が増大し、前傾化が進むと波峰部分での流速が波速と一致して砕波する(図-7)。この測定では波峰部分の最大流速として約1.0 m/sが得られているが、波峰に着目した波速である約1.6 m/sと一致する大きさではない。これは水面付近での乱反射がトレーサ粒子と識別が困難であるため、波峰付近で正しい流速が得られなかったためと考えられる。

流速の発散や渦度は量子化誤差を含んだ流速から計算するため、その誤差を見積もらなければ正しい考察をすることはできない。発散分布と渦度分布とは 10 s^{-1} 程度の誤差が含まれていると考えられるので、水面付近を

除いて全ての領域で発散、渦度ともほぼ0と考えられる。よって、砕波突出部が突入するまでは2次元のポテンシャル運動であると考えられる。

砕波突出部が前方の水面に突入すると水面がループを形成するので第1の水平渦となる。また、気泡を含んだ水塊をその前方に発生させる。この気泡混入領域は急激に成長し、その内部に正の渦度を持っていくことからこの水塊が第2の水平渦を形成する。また、砕波突出部が突入している領域では発散が正の値を持っていることから密度が低下していると考えられる。つまりここから気泡を含んだ流体が供給されている。逆に水塊の先端付近では発散が負の値を持っているので、ここから気泡が放出されていると考えられる。水塊の成長は砕波波高とほぼ同じ高さにまで達する(図-8)。この直後に、砕波前面でのループによって造られた第1の水平渦が底面に達する。このため、水塊の下部の気泡を含まない領域が前方へ押し出される。

5. おわりに

可視化画像の特徴に関するトレーサ法と相関法の流速測定精度の比較を行った結果、主にトレーサ粒子の平均間隔が影響を与えていることが明らかとなった。そして、トレーサ追跡法では平均間隔が大きい場合に精度が良く、逆に相関法の場合は小さい場合に良いので、これらを組み合わせることでのどのような可視化画像に対しても精度の良い流速測定が可能となる。また、高速流体に適応可能な可視化法を開発すること孤立波砕波の流速分布の測定が可能となった。

本研究の公表に当たり小川記念基金の補助を受けていることを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 小林智尚・日野幹夫・疋田賢七・萩原秀規 (1992): フーリエ変換を用いた画像処理による砕波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 56-60.
- 長尾昌朋・片岡暁彦・沢本正樹 (1991): 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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 56-60.
- 西村仁嗣・武若 聡 (1988): VTR 画像の相関解析による砕波時内部流速分布の推定, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 45-48.
- 真野 明・神尾成也 (1990): 相関法による砕波気泡混入領域の波動解析, 土木学会論文集, 第423号, pp. 171-180.