

PTV と PIV を組み合わせた砕波帯の流速分布測定

長尾 昌朋*・新井 信一**・上岡 充男***

1. はじめに

砕波帯では巻き上げられた水塊に多くの気泡を含むため、そのような領域をも含めて流体運動を測定しようとすると、レーザー流速計に代表される点計測の流速計ではその機構から大きな困難がともなう。このような領域では、流速の空間分布が得られ、かつ、水面形と流速の同時計測も可能であるという点から可視化画像を用いた流速の測定が有効である。

砕波帯の流速分布測定に可視化画像を適用し、その内部機構の解明に用いられた流速推定法として、西村・武若 (1988) や真野・神尾 (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) が用いたフーリエ変換法、渡部・佐伯 (1995) が用いた空間相関係数を時間方向に拡張した相関法などがある。これらの可視化画像を用いた流速分布の推定方法は、竹原ら (1996) の分類によるとトレーサ粒子の移動に着目した PTV (Particle Tracking Velocimetry) と画像の輝度分布の移動に着目した PIV (Particle Image Velocimetry) に分類される。PTV は画像中のトレーサ粒子の分布密度が小さい場合に有効であり、PIV はトレーサ粒子の分布密度が大きい場合や染料などのようにトレーサが連続的に分布する場合に有効であることが知られている (例えば、Adrian, 1991; 海津・藤田, 1994)。上述の例では使用する流速推定法に適した可視化画像を経験的に作り出しているが、1種類の流速推定法だけを用いているため、流速分布の測定精度は可視化画像の状態に影響されていると考えられる。

本研究では、画像の状態に応じて特性の相反する PTV と PIV を使い分けることにより、常に精度の高い流速測定が可能になると考え、これを気泡混入領域をも含んだ砕波帯全体の流速分布測定に適用した。

2. 実験方法

実験装置の概要を図-1 に示す。可視化手法を用いた

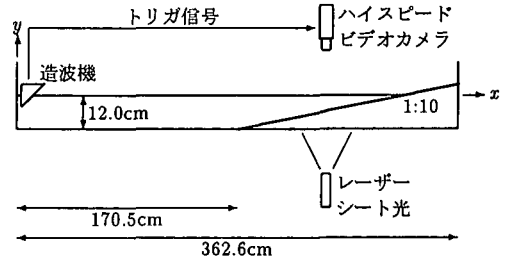


図-1 実験装置概要

表-1 実験条件

水平床部水深	h	12.00 cm
周 期	T	0.777 s
換算沖波波高	H_0'	1.96 cm
砕波水深	h_b	2.60 cm
砕波波高	H_b	2.50 cm
砕波形態		plunging

流速分布測定を行うため、長さ 326.6 cm、幅 15.1 cm、高さ 26.0 cm の総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プランジャ型造波装置により周期波を発生させ、岸側に設置した勾配 1:10 のアクリル製の斜面上で砕波させた。座標系は図に示すように、水路の沖側の端・静水面を原点とし、水平方向岸向きを x 軸、鉛直上向きを y 軸とした。実験に用いた波の諸量を表-1 に示す。

流速分布の測定には直径約 1 mm のポリスチレン粒子を注入トレーサとした可視化画像を用いた。ポリスチレン粒子は比重が 1.045 程度と真水に比べて重いいため、長時間の実験では全ての粒子が沈降するおそれがある。そこで本研究では、実験水路が比較的小さいことから、比重を調整した塩水を使用してポリスチレン粒子が流体中に浮遊するようにした。可視化画像は、水路の下側からレーザーシート光 (出力 2 W、幅 0.8 cm) を照射し、ハイスピードビデオカメラ (FASTCAM-Rabbit-2、フットロン製) で撮影した。撮影の条件は、画像処理の解像度が 256×240 dot であることや流体の最大速度が 70 cm/s

* 正会員 博(工) 足利工業大学助教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工 博 足利工業大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科

(a) $x=274$ cm, $t=0.000$ s(b) $x=274$ cm, $t=0.078$ s

写真-1 可視化画像の例(撮影の都合により波の進行方向は左向き)

であることなどから、撮影範囲を 18 cm 程度、撮影間隔を $1/400$ s、シャッター速度を $1/1000$ s とした。この撮影範囲では砕波帯全体を一度に撮影できないため、撮影範囲の中心を $x=260$ cm, 274 cm, 288 cm とし、砕波帯を 3ヶ所の範囲に分けて撮影した。その際、造波機の運動をトリガとして撮影を開始することで時間軸の補正を行った。また、この可視化画像から得られる流速を位相平均して合成するため、撮影時間は 12 周期分とした。可視化画像の例を写真-1 に示す。

3. 流速測定法

連続する可視化画像からの流速分布の推定法としては、トレーサ粒子の移動に着目した PTV と画像の輝度分布の移動に着目した PIV が挙げられる。一般的に PTV は画像中の粒子の分布密度が小さい場合が適用範囲であり、PIV は粒子の分布密度が大きい場合が適用範囲である。著者ら (1994) は、PTV の一種であるトレーサ追跡法ではトレーサ粒子の平均距離が想定最大移動距離の $1/5$ 程度以上であれば、また、PIV の一種である相関法ではトレーサ粒子の平均距離が相関関数を求めるテンプレートの大きさ以下であれば十分な精度が得られることを報告している。そこで本研究では、連続した可視化画像からの流速推定法としてトレーサ追跡法と相関法を用い、画像の特徴によってこれらを使い分けることと

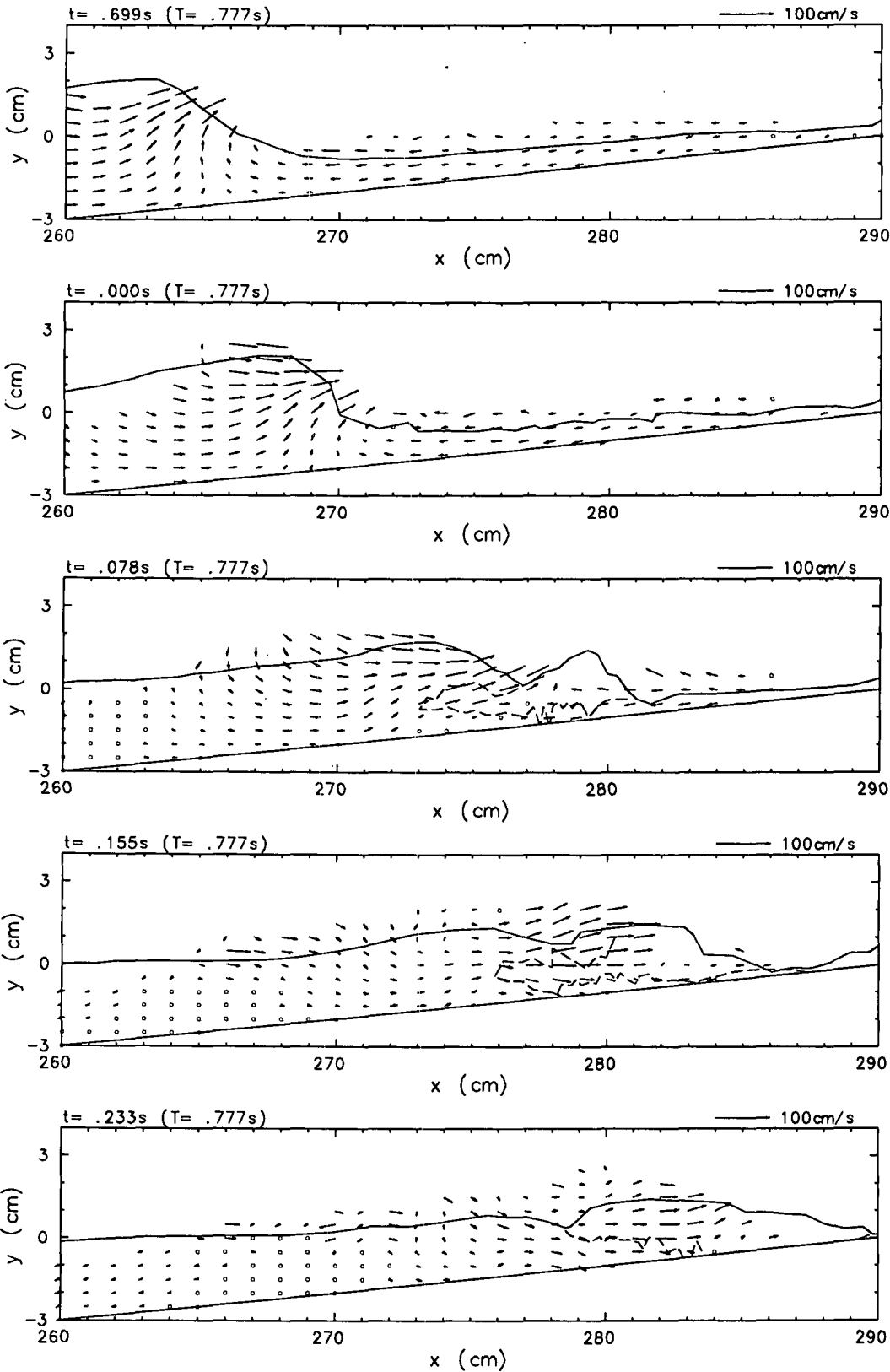
した。まず、トレーサ追跡法の適用範囲内となるべくトレーサ密度が高くなるようにポリスチレン粒子を投入した。そして、気泡混入領域以外の領域では流速分布の推定法としてトレーサ追跡法を用い、 $1/400$ s 間隔で連続する 4 画面の可視化画像を使用した。また、気泡混入領域や局所的にトレーサ分布密度の大きい領域では可視化画像の輝度分布の移動に着目し、相関法を $1/200$ s 間隔の 2 画面に適用して流速ベクトルを求めた。これによって、全ての領域で十分な精度の流速の推定が可能となる。

このようにして得られた流速ベクトルはその測定点の分布に偏りがあるため、そのままでは流速分布としての使用に不便を生じる。そこで、着目点の時間的空間的近傍に存在する流速ベクトルから最小自乗法を用いて局所的に線形分布を持つ流速分布を近似し、着目点での流速を内挿した。この流速ベクトルを利用する局所領域は流体運動の規模、トレーサ粒子の分布密度を考慮して、着目点から半径 1 cm 以内とした。時間軸に関しては、空間との次元を一致させるために砕波点付近での波速 70 cm/s を乗じている。実験で用いた波が周期波であるため、時間を波の位相に変換して位相平均操作も含めている。このような操作をすると、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。

このような平均操作によって流速推定法の誤差を小さくできるが、どのような流速推定法を用いても可視化画像の状態によっては明らかに異常と思われる流速ベクトルが発生し、測定結果に対して大きな影響を与える。一般的には、着目したベクトルをその周囲に存在するいくつかのベクトルと比較して極端に異なる場合に異常ベクトルと判断し、そのベクトルを取り除くということが行われている (竹原ら, 1996)。本研究では、得られた流速ベクトルの時間分解能が空間分解能に比べて高いことと流速分布計算法の特長から、一般的に行われている同じ画像内で比較する異常ベクトルの除去はせず、平均操作の時間的空間的局所領域内に存在する全てのベクトルを対象として、流速が平均値から標準偏差の 2 倍以上異なったベクトルを異常ベクトルと判断し、これらを除去した。

4. 砕波帯の流速分布

砕波直前から波状段波が形成される過程の半周期の流速分布を図-2 にベクトルで示す。図中の実線は水面を、破線は気泡混入領域を表している。また、渦度分布を図-3 に等値線で示す。ここで、実線の等値線は渦度が正の部分、点線は負の部分を示している。水面の上部にも流速や渦度が見られるのは、1 波毎に水面形が異なることや流速分布の計算で時間的空間的に平均操作を行って



図一2 流速分布

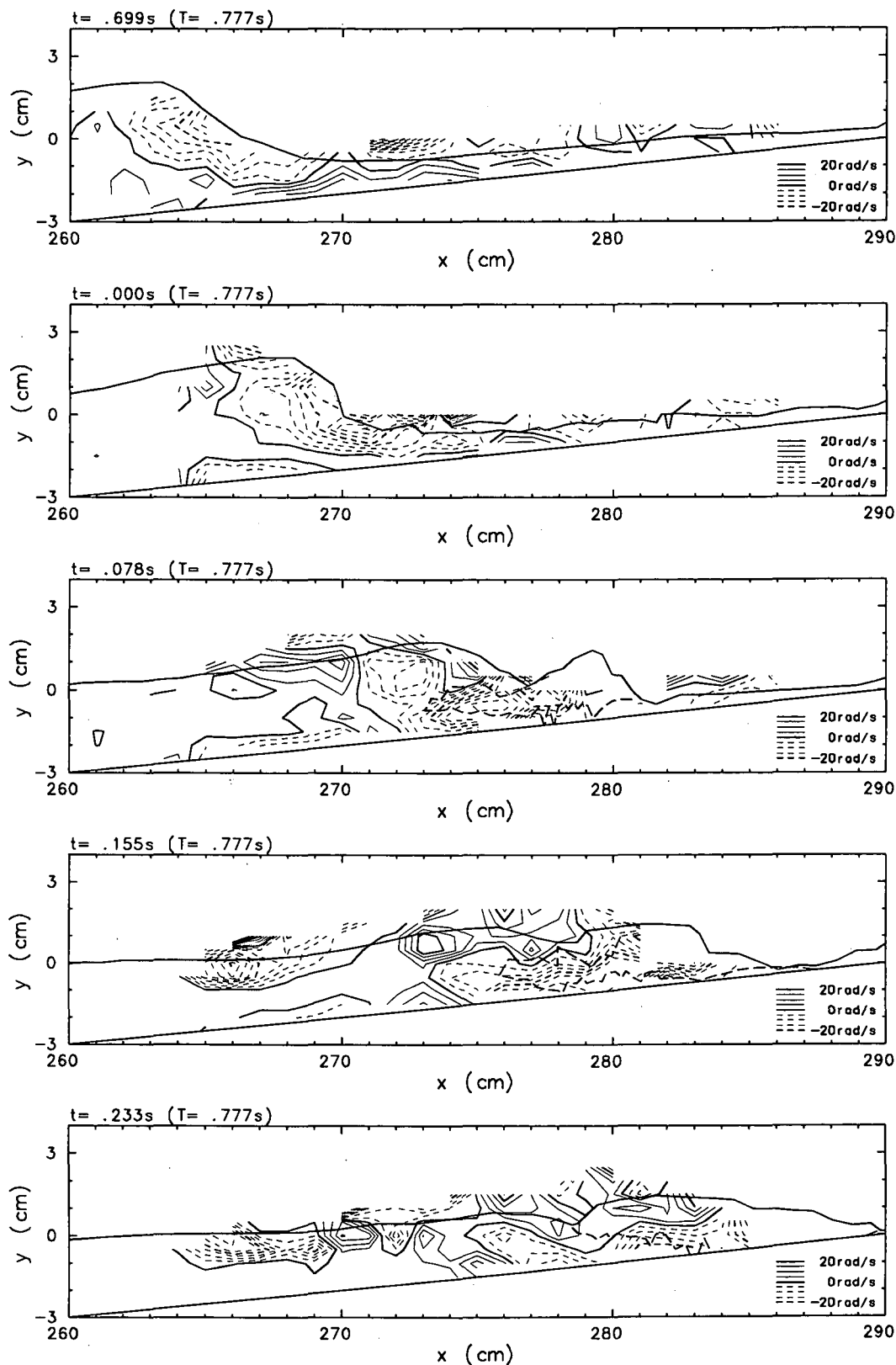


図-3 渦度分布

ることに起因する。また、図中の $x=266\text{ cm}$ の水面付近などに見られるような流速の乱れは、流体が可視化画像の端を通り過ぎたことが原因であると考えられる。

$t=0.699\text{ s}$ ($t=0.9T$) では波の戻り流れに次の波が進行してきている。波の先端付近は戻り流れの影響で負の渦度が生じているが、波本体のほとんどの部分は非回転である。 $t=0.000\text{ s}$ ($t=0.1T$) では碎波突出部が前方の水面に突入している。波の峰付近の流速は浅水理論の流速にほぼ一致している。 $t=0.078\text{ s}$ ($t=0.1T$) では突出部の先端の突入による気泡を大量に含んだ水塊が発生している。この水塊の水平流速は碎波時の最大流速に匹敵する。また、気泡混入領域の後方には第1の水平渦による負の渦度が、気泡混入領域の下部には碎波によって発生した水塊と戻り流れとのせん断による負の渦度が見られる。 $t=0.155\text{ s}$ ($t=0.2T$) では巻き上げられた水塊が再び前方の水面へ突入している。 $t=0.233\text{ s}$ ($t=0.3T$) では第1の水平渦が底面に達して戻り流れをせき止めるため、気泡を含んだ水塊に働くせん断力が小さくなり、全体的に波の進行方向への流体運動となっている。

5. おわりに

流速分布の測定には可視化画像の利用が有効であるが、測定された流速の精度は画像の特徴に大きく影響される。そこで、画像の特徴に関して相反する特性を持つ2種類の流速推定法を使い分け、その結果を合成することで、どのような画像に関しても高精度な流速測定を行うことが可能となった。この方法を碎波帯に適用した結

果、混入気泡の有無に関わらず精度の良い流速分布が得られた。

謝辞：本研究を行うにあたり榎本雄二、桜井修一（当時、足利工業大学4年）諸氏には水理実験等に協力して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 海津利幸・藤田一郎 (1994): 粒子画像シミュレーションによる PIV の精度の検討, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部 (A), pp. 384-385.
- 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碎波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 56-60.
- 竹原幸生・江藤剛治・村田 滋・道奥康治 (1996): PTV のための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 107-126.
- 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碎波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 56-60.
- 長尾昌朋・神保誠二・沢本正樹 (1994): トレーサ追跡法と相関法を用いた孤立波碎波の流速分布測定, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 161-165.
- 西村仁嗣・武若 聡 (1988): VTR 画像の相関解析による碎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): 相関法による碎波気泡混入領域の波動解析, 土木学会論文集, No. 423/II-14, pp. 171-180.
- 渡部靖憲・佐伯 浩 (1995): 画像処理による碎波帯内の運動機構に関する考察, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 116-120.
- Adrian, R. J. (1991): Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics, 23, pp. 261-304.