

周期波の碎波帯の可視化手法を用いた乱流計測

宮本 恭交*・長尾 昌朋**・新井 信一***・上岡 充男****

1. はじめに

碎波帯内の現象を再現するためには、段波モデルや局所水深モデルなどの碎波モデルが多く用いられているが、それらの多くは波高減衰や時間平均流速などを対象としたものである。さまざまな工学的問題に対してはそれだけでは十分でない場合が多く、乱流現象をも考慮した計算が行われている（例えば、辻本, 1997; 灘岡・大野, 1997; 渡部ら, 1997）。そのためにも、碎波帯での流体運動の内部構造を測定することが重要であるが、碎波が急激な過渡現象であり、また、大量の気泡を流体内部に混入するため、碎波点前後での波形や流速分布を測定することには困難が生じていた。このような領域では可視化手法を利用した測定方法が有効であり、近年、碎波帯の流速分布測定に多く利用されている。しかし、渡部・佐伯（1995）のように碎波帯の乱流運動まで測定している例はそれほど多くない。

そこで、本研究では碎波帯全体の流体構造を把握するために、流体運動の可視化画像に工夫を施して水面形と流速分布を同時に測定するとともに、乱流成分の測定の可能性について考察する。

2. 実験方法

実験装置の概要を図-1 に、実験に用いた波の諸量を表-1 に示す。総アクリル製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 の斜面上で碎波させた。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。基本的に長尾ら（1997）の実験と同様である。

碎波帯での水面形と流速分布を同時に測定するためには、可視化手法が有効である。流速分布の測定のために、直径約 1 mm のポリスチレン粒子をトレーサとして注入した。ポリスチレン粒子は比重が 1.046 程度と真水に比べて重いので、比重を調整した塩水を使用してポリスチ

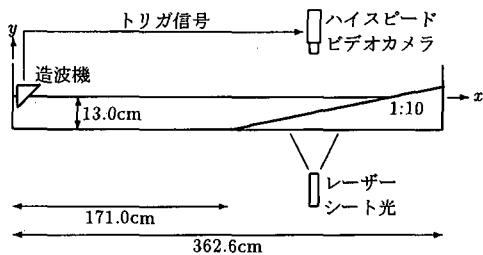


図-1 実験装置概要

表-1 実験条件

水平床部水深	h	13.00 cm
周期	T	0.780 s
換算沖波波高	H_0'	2.11 cm
碎波水深	h_b	3.00 cm
碎波波高	H_b	2.60 cm
碎波形態		plunging

レン粒子が流体中に浮遊するようにした。また、水面形の測定のために、流体をフルオレセインナトリウムで着色した。

流体運動の可視化画像は、水路底面から幅 0.8 cm のレーザーシート光を照射し、水路側面からハイスピードビデオカメラ (FASTCAM-Rabbit-2, フォトロン製) で撮影した。空中部分 (低輝度)、流体部分 (中輝度)、ポリスチレン粒子 (高輝度) がはっきりと識別できるようにフルオレセインナトリウムの濃度、レーザーシート光の出力、ビデオカメラの絞りなどを調整した。

撮影に際しては、画像処理の解像度 340×240 dot、流体の最大速度 70 cm/s などを考慮して、撮影範囲を 24 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。可視化画像の例を写真-1 に示す。この撮影範囲では碎波帯全体を一度に撮影できないため、3ヶ所に分けて撮影した。撮影範囲の中心は $x=269$ cm, 282 cm, 296 cm である。また、造波機の運動をトリガとして撮影を開始することで、それぞれの可視化画像の時間軸 t の補正を行った。撮影時間は 30 周期である。

* 学生会員 足利工業大学大学院 工学研究科
** 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) 砕波前 ($x=269$ cm, $t=0.680$ s)(b) 砕波後 ($x=282$ cm, $t=0.135$ 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)

3. 水面形および流速分布の測定法

このようにして撮影された可視化画像では、流体部分は空中部分に比べて明るいいため、この中間の輝度をしきい値として2値化することで流体部分と空中部分を識別できる。同位相の画像を合成・位相平均し、これらの境界を抽出すると水面形が得られる。また、砕波による気泡混入領域は流体部分に比べて輝度が非常に高いため、同様の手法で気泡混入領域の範囲も測定できる。

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。これらの手法の流速推定精度はトレーサ粒子の空間分布密度に関して相反する性質を持つため、これらを併用するとトレーサ粒子の分布に影響されずに高精度な流速分布の推定が可能となる。ここでは、PTVとして連続する4時刻の可視化画像を利用するトレーサ追跡法を、PIVとして2時刻の可視化画像を利用する相関法を使用した。それぞれ可

視化画像の時間間隔は1/400 sと1/200 sである。ただし、トレーサ追跡法に関しては、トレーサ粒子の抽出の際に流体部分の輝度むらに対処する必要がある。また、気泡混入領域ではトレーサ粒子が判断できないため、相関法だけの適用となる。なお、両手法ともトレーサの位置に関して、サブピクセルでの測定を可能としている。

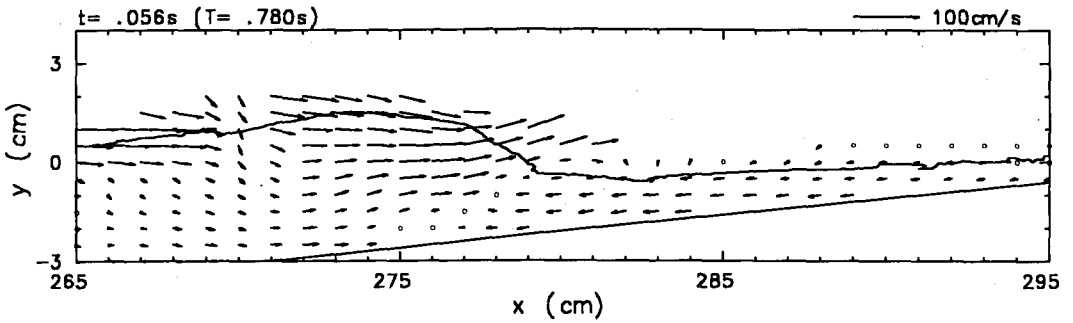
このようにして得られた流速ベクトル(u, v)はその空間分布に偏りがあるため、まず、着目点を中心とした時間軸を含む局所空間に線形の流速分布を仮定し、その空間内に存在する流速ベクトルから流速分布を最小自乗法で求め、そして、着目点の流速ベクトルを内挿して位相平均流速分布($\langle u \rangle, \langle v \rangle$)とした。着目点を均等に分布させることで、砕波帯全体での流速分布や渦度分布などが得られる。さらに、可視化画像から得られた流速ベクトル(u, v)と位相平均流速分布($\langle u \rangle, \langle v \rangle$)との差から流速の変動成分(u', v')が得られるため、これを位相平均することで乱れエネルギー($\langle u'u' \rangle + \langle v'v' \rangle$)/2やレイノルズ応力 $-\langle u'v' \rangle$ の分布も計算できる。

この位相平均操作を行う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。また、局所空間内で平均的な流速ベクトルから極端に異なる流速ベクトルは異常ベクトルと判断し、位相平均操作の対象外とした。

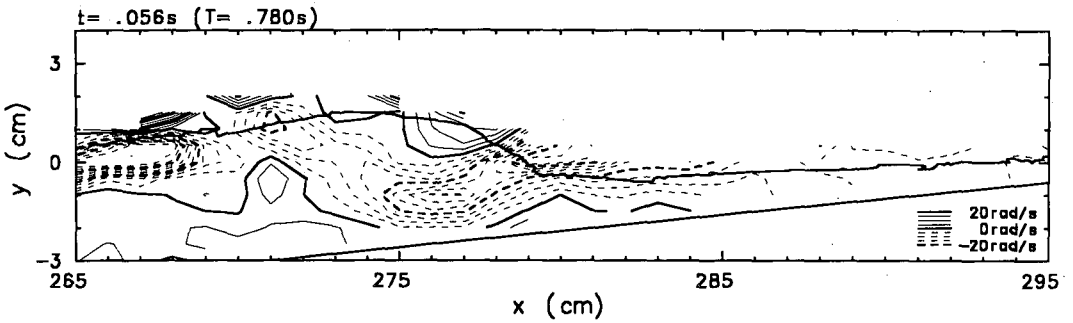
4. 砕波帯の流速分布

波前方の戻り流れに砕波突出部が突入すると、気泡を大量に含んだ水塊が前方へ巻き上げられる。また、突出部の一部は流体内に巻き込まれて第1の水平渦を形成する。図-2に砕波後0.1 Tの流況を示す。ちょうど砕波突出部が前方の水面($x=277$ cm付近)に突入した状態で、波先端の水面付近に巻き上げられた水塊の岸向き・上向きの流速が確認できる。また、波先端から第1の水平渦($x=276$ cm付近)までの領域に強い負の渦度が存在するが、これは戻り流れと波運動とのせん断力に起因する。また、強い乱れは突入点付近に存在するが、強いレイノルズ応力は波の頂上部に存在している。

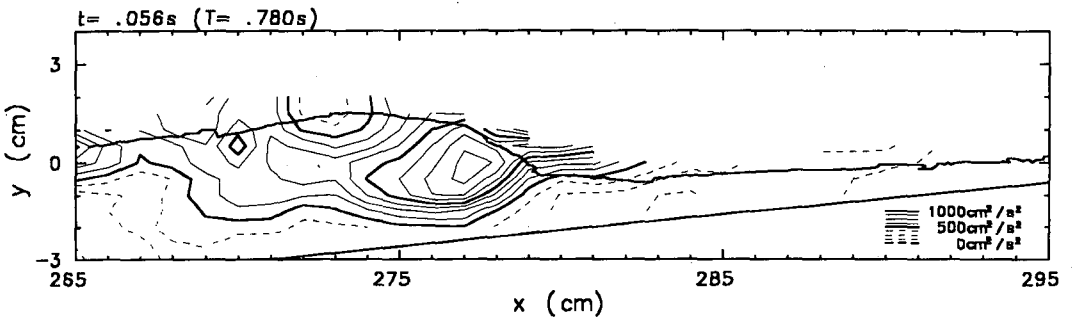
図-3に砕波後0.2 Tの流況を示す。図中の破線は気泡混入領域を表している。この巻き上げられ気泡を大量に含んだ水塊は波速に匹敵する流速を持っている。この水塊の先端は再び前方の水面($x=285$ cm)に突入している。戻り流れとのせん断領域を表す負の渦度は気泡混入領域の下部に存在する。 $x=278$ cm付近に存在する第1の水平渦の渦度はかなり弱くなっている。強い乱れは負の渦度と同じ領域に存在している。水塊の突入および戻り流れとのせん断力によって乱れが発生していると考え



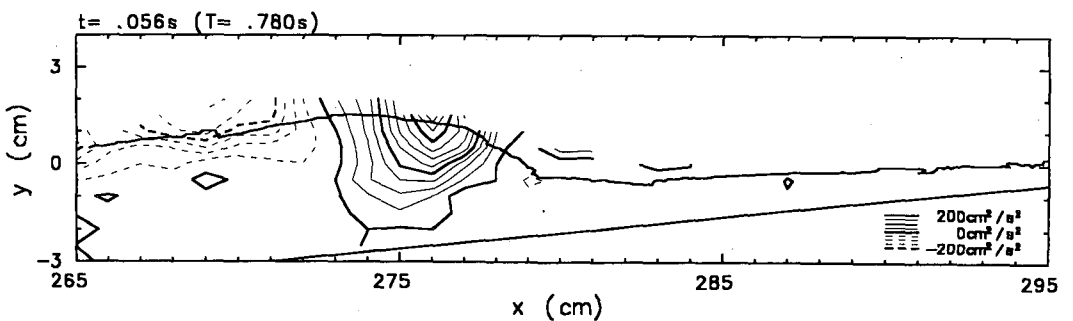
(a) 流速分布



(b) 渦度分布

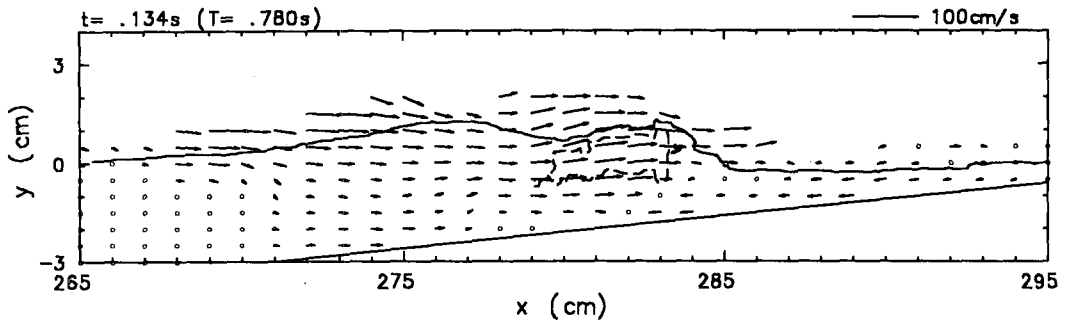


(c) 乱れエネルギー分布

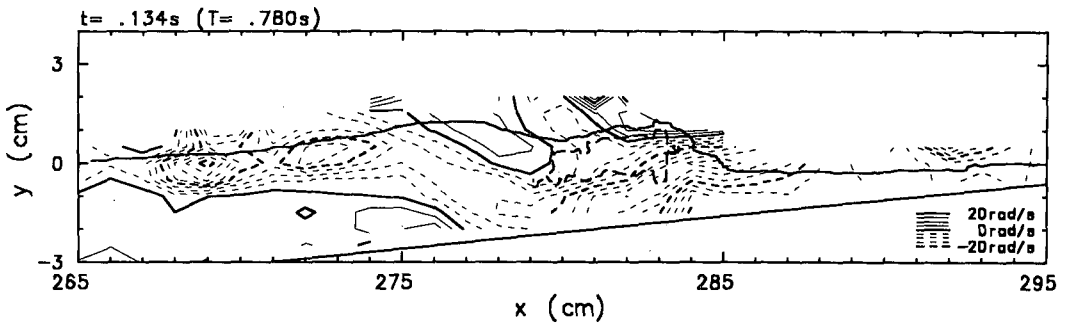


(d) レイノルズ応力分布

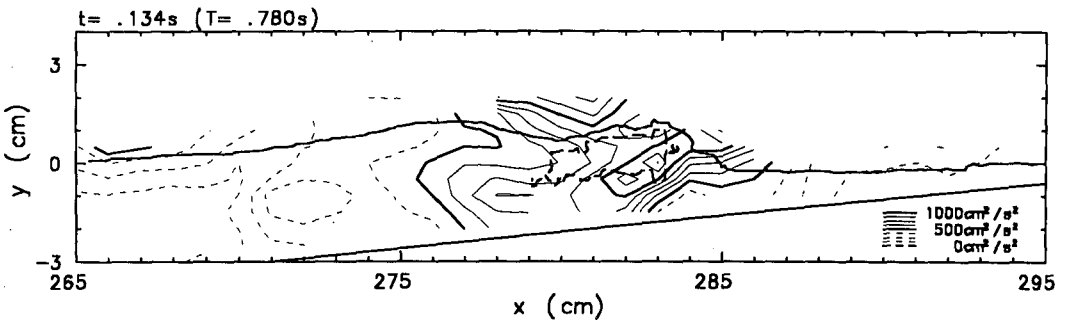
図-2 碎波帯での流速、渦度、乱れ強度、レイノルズ応力の分布 ($t=0.056s$, 碎波後 $0.1T$)



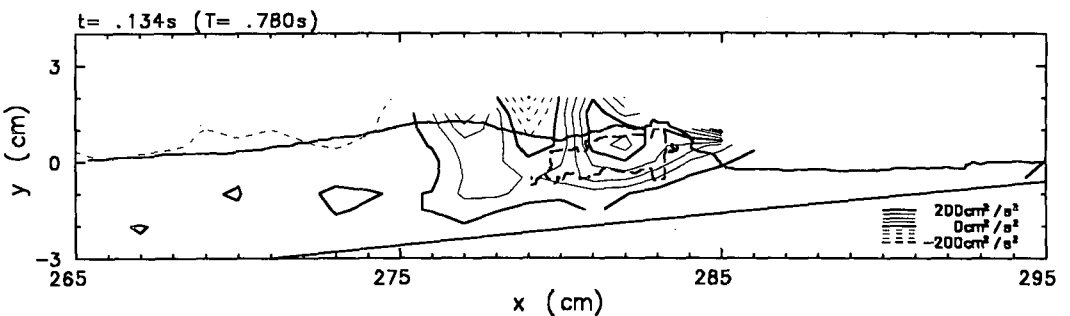
(a) 流速分布



(b) 渦度分布



(c) 乱れエネルギー分布



(d) レイノルズ応力分布

図-3 砕波帯での流速, 渦度, 乱れ強度, レイノルズ応力の分布 ($t=0.134\text{s}$, 砕波後 $0.2T$)

られる。これに対して強いレイノルズ応力は波および水塊の頂上部に存在している。

5. おわりに

流体運動の計測に可視化手法を利用する場合、空中部分、流体、トレーサ粒子が適切に識別できる可視化画像を作成することで、水面形、気泡混入領域、流速分布の同時計測が可能となった。また、ハイスピードビデオカメラを使用することで乱流運動の測定も可能であることが確認できた。この手法を用いて碎波帯の流体運動を測定した結果、碎波帯での乱流構造の概略がとらえられた。しかし、測定された乱流成分には碎波現象自体の変動や流速推定法の誤差も含まれていると考えられるため、今後これらの項目について考察する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり菊池大祐，前山徹(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

- 辻本剛三 (1997): 乱流モデルによる碎波点近傍の流れ場の数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 101-105.
- 長尾昌朋・新井信一・上岡充男 (1997): PTVとPIVを組み合わせた碎波帯の流速分布測定, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 116-120.
- 灘岡和夫・大野修史 (1997): 水深積分型乱流エネルギー輸送方程式を連結させた碎波帯内波動場モデルの提案, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 106-110.
- 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.
- 渡部靖憲・森 憲広・稲垣 啓・佐伯 浩 (1997): 碎波帯の平均流速場と流体運動スケールについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 121-125.