

孤立波碎波の水面形と流速分布の可視化計測

宮本 恭交*・長尾 昌朋**・新井 信一***・上岡 充男****

1. はじめに

数値計算手法の発達により、ナビエ・ストークス方程式を基礎方程式とした自由表面を含む流体数値計算法を、碎波をも含んだ波動場へ適用する例が多くなっている。特に計算機の進歩とともに 3 次元数値計算が可能となり、海底地形の複雑な潜堤周辺の波動場への適用（例えば、川崎・岩田, 1997；細山田ら, 1998；陸田ら, 1998）や碎波後の組織乱流構造の解明（例えば、渡部ら, 1998）が行われている。しかしながら、これらの計算値を検証するための碎波時の実験データは量・質ともに十分とはいえない。これは、碎波現象が急激な過渡現象であり、碎波後大量の気泡を流体内部に混入するため、波形や流速分布の測定が困難だからである。

著者らは周期波を対象として碎波点付近での流体運動を可視化手法を用いて計測してきた（長尾ら, 1997；宮本ら, 1998）。しかし、周期波の場合は戻り流れなどの影響で碎波点の変動するため、数値計算結果と比較できる精度での測定は困難であった。そこで、本研究ではより高精度な実験データを得るため、孤立波を対象として碎波帯での流体運動の詳細な計測を行う。

2. 実験方法

実験には図-1 に示すような長さ 27 m, 幅 80 cm の両面ガラス張りの鋼製水路を使用した。水路の一端に設置したピストン型造波装置で孤立波を発生させ、勾配 1:20 の斜面で変形・碎波させた。実験に用いた孤立波の諸量を表-1 に示す。再現性のある実験を行うため、水が十分に静止したことを確認してから孤立波を発生させた。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、水平岸向きを x 軸、鉛直上向きを y 軸とした。

碎波点から沖側の水位の測定には 4 本の容量式波高計を使用した。1 本は $x=600$ cm の位置に固定し、3 本は 1 波毎に移動させながら 10 cm 間隔で水位を測定した。各波高計の出力は造波信号とともに記録した。

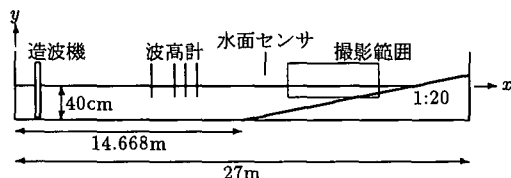


図-1 実験装置概要

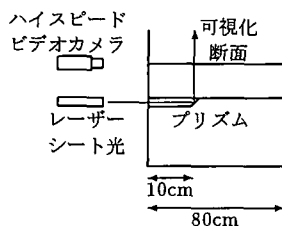


図-2 撮影範囲での水路横断面

表-1 実験条件

水平床部水深	h	40.00 cm
入射波高	H	12.72 cm
破波水深	h_b	9.14 cm
破波波高	H_b	17.27 cm
破波形態		plunging

碎波帯では、水面形や水路縦断面内の流速分布の測定に可視化手法が有効である。そのためには、水路縦断面での可視化画像が必要となる。水面形の変化によって可視化画像の輝度分布が変化しないように、一般的には水路底部からレーザーシート光を照射して水路縦断面を可視化している。しかし、斜面がアルミ製のため、水路底部よりレーザーシート光を照射することはできない。そこで、図-2 のように一端を 45° にカットしたプリズムを斜面底部に設置し、レーザーシート光を斜面と平行に照射してプリズムで 90° 反射させることで水路縦断面の可視化画像の撮影を可能とした。可視化画像の撮影にはハイスピードビデオカメラ (FASTCAM-Rabbit-mini 2,

* 正会員 修(工)

** 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

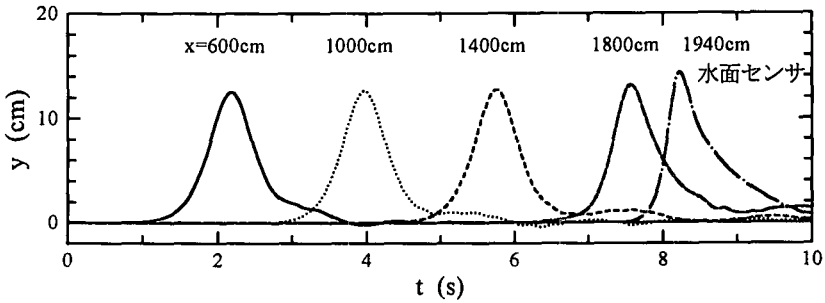


図-3 水位の経時変化

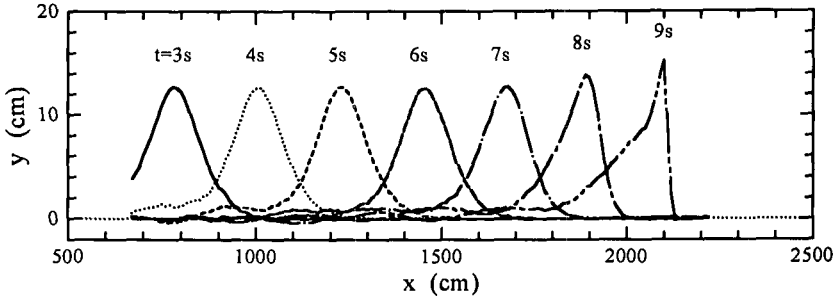


図-4 波形の空間分布

フォトロン製)を使用した。

砕波帯での水面形の測定は、流体をフルオレセインナトリウムで着色した可視化実験を行い、可視化画像の空中部分と流体部分の輝度の差から水面形を測定した。また、水路縦断面での流速分布を計測するため、直径約1mmのポリスチレン粒子をトレーサとして注入し、流体運動を可視化した。ポリスチレン粒子は比重が1よりやや大きいため、加熱処理を施して比重調整を行った。このトレーサを追跡して流速を推定する。

撮影条件はレーザーシート光の出力を2W、ハイスピードビデオカメラのシャッター速度を1/1000s、撮影時間間隔を1/400sとした。流速分布の推定に使用するトレーサ追跡法を考慮すると3/400sの間にトレーサ粒子が10~15dot程度移動していることが望ましい。そこで、画像処理の解像度が340×120dotであること、流体の最大速度が230cm/sであること、水槽の鋼製枠が75cm間隔で存在することなどを考慮して撮影範囲を横55cm、縦20cmとした。しかし、この撮影範囲では一度に砕波帯全体を撮影することができないため、砕波点付近から突入点付近までを岸沖方向に4分割、さらに上下方向に2分割し、合計8ヶ所の領域に分けて撮影した。撮影開始のトリガとして、砕波点より沖側に設置した水面センサの信号を用い、それぞれの可視化画像の時間軸を補正した。造波信号を基準として水面センサの信号の発生時刻を測定しているため、波高計と可視化画像の時間

軸を一致させることができる。水面形や流速分布の位相平均操作にはそれぞれ10波程度を使用した。

3. 水面形および流速分布の測定法

水面形測定のための可視化画像では、流体部分に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。同時刻の2値化画像を合成・平均し、さらに2値化した画像から境界を抽出すると水面形が得られる。

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の一種であるトレーサ追跡法を用いる。まず、トレーサ粒子の中心部で輝度値が極大値となる特性を利用してトレーサ粒子を抽出する。その際、周囲のピクセルの輝度値も利用して、トレーサ粒子の位置をサブピクセル単位で測定した。このようにして得られたトレーサ粒子に対してトレーサ追跡法を適用し、各トレーサ粒子の流速ベクトルを得た。

このようにして得られた流速ベクトルはその空間分布に偏りがあるため、格子状の着目点を設定してその地点での流速を内挿した方が便利である。また、1画像に含まれる流速ベクトルの個数はそれほど多いわけではないので、位相平均操作を施して流速分布を信頼できるものにする必要がある。そこで、以下の位相平均操作を行った。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する。その流速分布は局所空間内に存

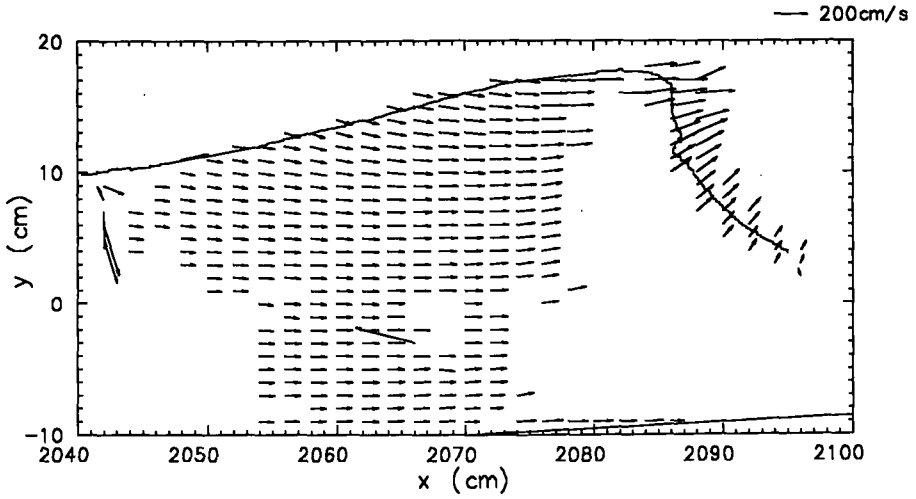


図-5 $t=8.8950$ sの流速分布

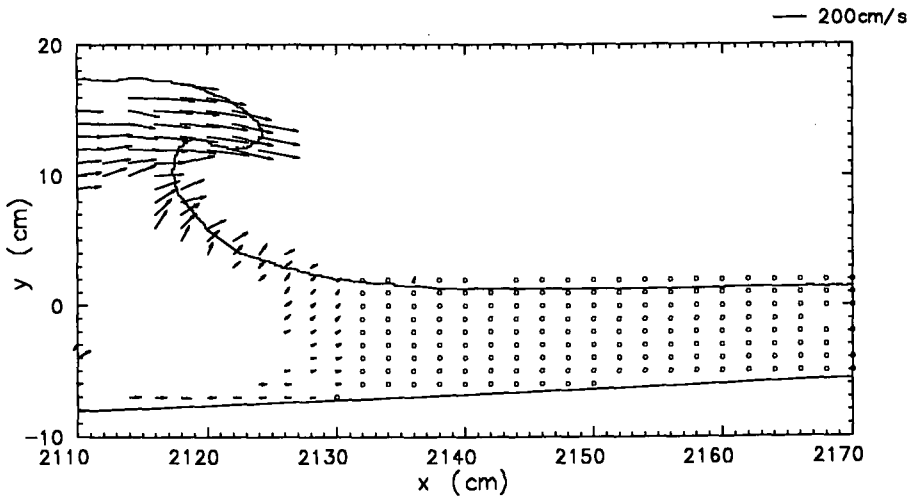


図-6 $t=9.0525$ sの流速分布

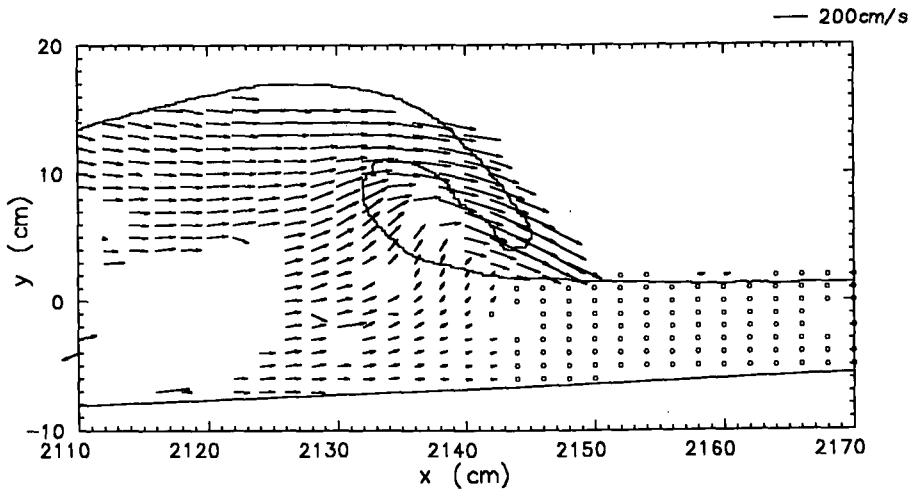


図-7 $t=9.1325$ sの流速分布

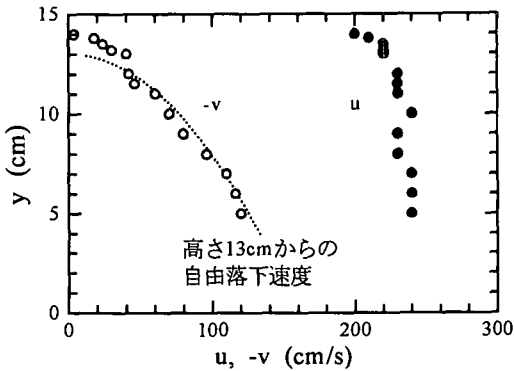


図-8 突出部の流速分布

在する流速ベクトルから最小自乗法で求める。ここで、最小自乗法を適用する際に複数の実験結果も利用する。そして、着目点の流速ベクトルを内挿してその時刻での平均流速とした。局所空間での流速分布を利用すると碎波帯全体での流速分布だけでなく、渦度分布や発散分布などが得られる。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 3 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碎波点付近での波速 230 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、平均操作の対象外とした。

4. 碎波帯の流速分布

各測点における水位の経時変化を図-3 に示す。入射波の波高水深比が 0.32 と比較的大きく、また、造波機の制御が十分ではないため、波の後部の水位が乱れているが、ほぼ理論値に近い孤立波が発生している。図-4 に孤立波の斜面上での変形過程を示す。水平床部から斜面部に進行すると波高増幅や波形の前傾化が起こっている。斜面の勾配が 1 : 20 と比較的大きいため、ソリトン分裂は起こっていない。波頂部の進行速度を波速と見なすと碎波点での波速はほぼ 230 cm/s である。

孤立波の碎波時の流速分布を図-5~図-7 に示す。流速はベクトルで表示しているが、流速が 0 の場合は白丸 (○) で表示している。一部の領域において流体内部であるにも関わらず流速ベクトルを表示していないのは、この部分にポリスチレン粒子を分散させることができず、流速が測定できなかったためである。また、流速が測定できた領域と測定できなかった領域の境界付近には、明

らかに誤りと考えられる流速ベクトルが存在することがある。これは、測定された流速データの個数が十分ではないため、誤ったデータを除去できなかったためである。

図-5 から碎波時の波頂部の流速は波速とほぼ一致していることがわかる。突出部が前方へ伸びていくと、突出部の流速は碎波時に比べやや大きくなっているように見える。そこで、図-7 の突出部の先端から付け根までの中央部分の流速に着目して、その水平方向成分 u と鉛直方向成分 v を高さ毎に整理したものが図-8 である。流速の水平成分は先端部に向かってやや増加しているものの碎波時の波速にほぼ一致している。鉛直方向成分は波上部からの自由落下速度と良く一致している。このことから、突出部内部には水平方向の圧力勾配が若干存在するが、突出部はほぼ自由落下していると考えられる。

5. おわりに

可視化手法を用いて孤立波の碎波帯での流速分布を詳細に測定した。この測定結果は、数値計算との比較に十分耐えうる精度を持っていると考えられる。さらに、碎波突出部での流速分布を詳細に調べたところ、この領域では自由落下に近い運動をしていることが確認できた。このことから、碎波時の波速や波高から碎波後に発生する循環や放出運動量が推定できると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり石田輝雄、齋藤英人、駒崎智勝、星野良幸(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

- 川崎浩司・岩田好一朗 (1997): 潜堤による平面 2 次元波の碎波変形の数値解析, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 55-59.
- 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.
- 細山田得三・吉田 茂・早川典生・犬飼直之・中田芳貴 (1998): SOLA-SURF 法による潜堤周辺波動場の三次元数値計算, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 55-59.
- 宮本恭交・長尾昌朋・新井信一・上岡充男 (1998): 周期波の碎波帯の可視化手法を用いた乱流計測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 111-115.
- 陸田秀実・河合ひろみ・安田孝志 (1998): C-CUP 法による気液界面の直接数値計算, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 55-59.
- 渡部増憲・森 憲広・佐伯 浩 (1998): 碎波の 3 次元 Large Eddy Simulation, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 146-150.