

ビデオ画像解析と Boundary-Fit 法を用いた砕波変形の 内部特性に関する研究

滝川 清*・山田文彦**・松本健作***・飯尾昌和****

1. はじめに

浅海域において、波は複雑な海底地形の影響を受けて変形し、やがて砕波に至る。この一連の砕波変形過程の内部特性(速度・質量輸送等)を定量的に明らかにし、砕波によるエネルギー逸散量を厳密にモデル化することは、波および海浜変形予測の基礎資料として、海岸工学上極めて重要な課題である。

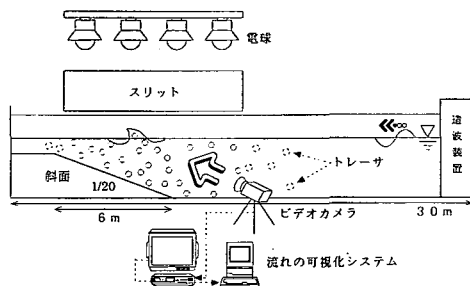
砕波時の内部特性のうち速度場に関しては、L.D.V.(レーザー流速計)を用いた水口ら(1985)や画像処理を用いた西村ら(1988)、渡部ら(1995)など非常に多くの研究例がある。しかしながら、砕波変形過程においては、水塊が水表面へ突入することにより、気液混相流としての側面、また、強い渦運動を伴った乱流としての側面など様々な流体運動要素が混在している。そのため、砕波帯内の現象は非常に複雑であり、現状ではその内部特性は十分に解明されておらず、物理的根拠が明確なエネルギー逸散モデルは確立されていない。

本研究は、エネルギー逸散モデルを構築する前段階として、通常のビデオカメラを用いて画像解析を行い砕波変形の内部特性(流速場・渦度場など)を定量的に明らかにする一手法を示すとともに、Boundary-Fit 法を用いて、複雑な海底・水面形状にも対応した数値解析手法の開発を行うものである。

2. 可視化実験の概要

実験には、図一1に示す長さ30 m、幅0.5 m、深さ0.8 mの片面ガラス張りの2次元造波水槽を用い、水槽内に長さ6 m、勾配1/20の斜面を設置した。実験は典型的な plunging 型砕波が生じるような条件で行った。入射条件を表一に示す。

可視化実験ではトレーサ注入法を用い、比重約1.02、直径約1 mmのポリスチレン樹脂球をトレーサとして水中に投入し、砕波変形過程をビデオカメラ(SONY, Handy Cam)で撮影した。なお、鮮明なビデオ画像を記



図一1 実験装置

表一 入射条件

周期 (s)	入射水深 (cm)	入射波高 (cm)	砕波点水深 (cm)	砕波形態
2.08	48.30	18.50	24.00	巻き波砕波

録するために、スリット光を用い、撮影を夜間に行った。また、計測精度の比較のためレーザー流速計を用いて流速の鉛直分布を測定した。

3. 画像解析の概要

画像解析では、流れの可視化画像から空間的な速度分布を計測する汎用解析システム(Current, カノマックス社製)を用いた。また、今回はビデオカメラ出力を録画装置(SONY製ハイエイトまたは光ディスク)に録画し、その録画画像を同装置によりフレーム単位(1/30秒)で制御しながら画像処理を行った。

次に汎用解析システム(Current)における画像処理部の手順を示す。

- ① 録画画像はA/D変換され、パソコンに接続されたフレームメモリ(512×480画素)に256階調の濃淡画像として入力される。
- ② 1フレームの画像(1/30秒)は、1/60秒単位のフィールド画像2枚(ODD, EVENフィールド)から構成されているため、フレーム画像を各フィールド画像に分離する。
- ③ 分離されたフィールド画像に対して、ラブラシアソ・フィルタ(高木ら, 1991)などにより画像改善

* 正会員 工博 熊本大学教授 環境システム工学科

** 正会員 工修 熊本大学助手 環境システム工学科

*** 学生会員 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科

**** 学生会員 熊本大学大学院 工学研究科

を行い、トレーサ粒子像を背景画像から分離する。

- ④ 256階調のフィールド画像に対して、しきい値を設定し2値化(背景:0, 対象:1)処理を行う。
- ⑤ 2値化画像に対して孤立点除去、障害物の設定を行う。
- ⑥ 2値化画像から個々のトレーサ粒子の重心位置を計測する。

また、Currentでは速度の計測方法として以下の2種類の手法が用意されている。

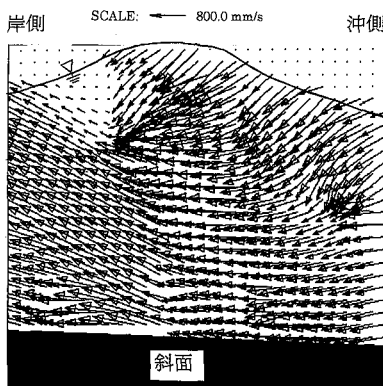
- ① PTV (Particle Tracking Velocimetry): 画像処理部で得られた数時刻のトレーサ粒子の重心位置から3及び4時刻法(小林ら, 1989)を用い、流速を計測する。
- ② PIV (Particle Image Velocimetry): 異なる時刻の2枚の画像を用い、トレーサ粒子の分布パターンの類似性(濃度相関法)から流速を計測する。

3.1 画像解析結果

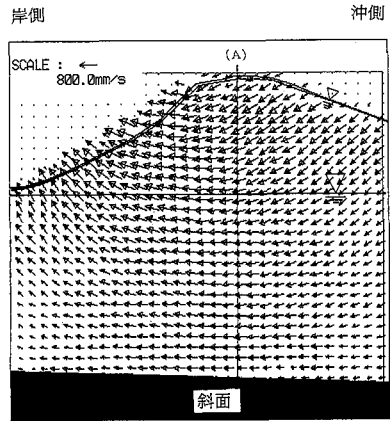
通常、画像解析の測定精度はL.D.V.などに比べて低く、使用する機材の性能やトレーサ粒子の分布状態に大きく依存する。そのため、砕波変形のように非定常性の強い現象では、高速カメラなどの特殊で高価な機材を多く必要とする。そこで長尾ら(1994)は、撮影方法を工夫し、ストロボスコープを短時間間隔で4回発行させ、ビデオカメラの1フレームに4時刻分のトレーサ粒子の移動経路を記録することで、一般的な機材を用いた砕波時の流速分布の測定を行っている。

本研究では、トレーサ粒子の分布が不均一であることに着目し、造波を数回に分けて行い、同位相における画像解析結果を複数重ね合せ、スリット光のみによる計測精度の向上を試みた。

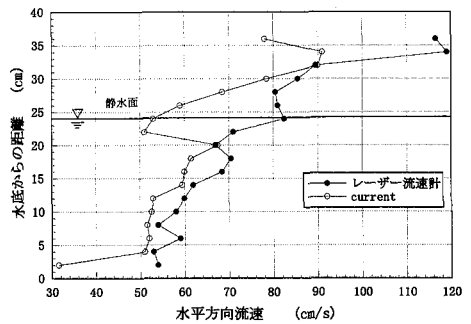
図一2に可視化画像1枚のみを用いたPTVによる画像解析結果を示す。1画面中のトレーサ粒子の分布がまばらであるため、補間演算後の流速分布は実際の流況と



図一2 画像解析結果(流速ベクトル, 手法1)



図一3 画像解析結果(流速ベクトル, 手法2)



図一4 水平方向流速の鉛直分布の比較

かなり異なっている(手法1)。

そこで、画像解析結果の足し合わせにより計測精度の向上を試みた。図一3にその結果を示す(手法2)。

図はPTVによる20枚の画像処理結果より得られたものである。位相合わせには波峰がガラス面上の標識点を通過する時刻とビデオカウンターを用い、モニター上でコマ送りなどの微調整を行った。図一2に比べて流速分布の定性的な精度は向上している。

そこで、画像解析による流速分布の定量的な精度を検証するため、図一3のA断面においてレーザー流速計を用いて測定した結果との比較を行った。図一4は砕波直前の水平方向流速の鉛直分布を示す。図中の黒丸はレーザー流速計、白抜きは手法2の結果である。

図より静水位以下においては底面近傍を除くと両者はほぼ一致しており、定量的にも十分な精度を有していることがわかる。しかし、静水位より上では両者に多少の開きが見られる。これは、画像解析における水表面条件の設定方法に起因すると考えられる。PTVでは水表面条件の設定が困難であるため、今回は4時刻中の平均水表面を求め、補間計算時にその1つ上の格子点で速度を

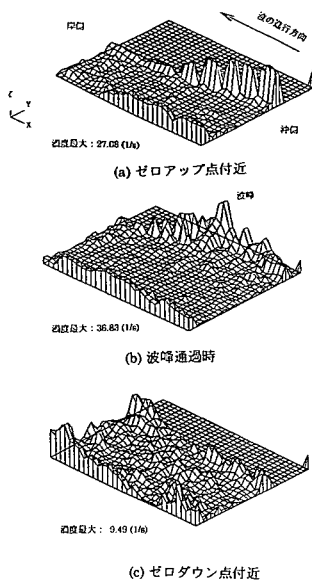


図-5 渦度の鳥瞰図

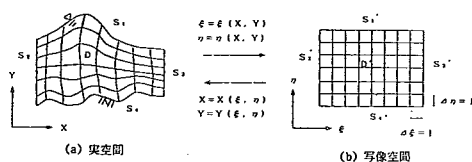


図-6 座標変換

4.1 基礎方程式

基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 (u, v) は (x, y) 方向の速度成分、 ρ は密度、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 (F_x, F_y) は (x, y) 方向の物体力成分である。

実際の計算においては基礎式を直交座標(実平面, x, y)から境界適合座標(写像平面, ξ, η)に変換する(図-6)。変換後の基礎式および計算方法の詳細は滝川ら(1995)に詳しい。ここでは改良点について述べる。

4.2 格子生成法

砕波変形は時間とともに境界が移動する移動境界問題であるために、BFC法を用いて解析する場合、各時間ステップにおいて計算格子を生成する必要がある。

Tompsonら(1974)は、楕円型偏微分方程式(4)を数値的に解いて格子生成を行う方法を示した。

$$\begin{aligned} ax_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} &= -J^2 [x_{\xi} P(\xi, \eta) + x_{\eta} Q(\xi, \eta)] \\ ay_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} &= -J^2 [y_{\xi} P(\xi, \eta) + y_{\eta} Q(\xi, \eta)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$\begin{aligned} J &= x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}, \quad \alpha = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2, \quad \beta = x_{\xi} x_{\eta} + y_{\xi} y_{\eta}, \\ \gamma &= x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2 \end{aligned}$$

下付き添字は偏微分を表す。さらに制御関数(湧き出し項) P は次式で表される。(Q も同様)

$$\begin{aligned} P(\xi, \eta) &= -\sum_{i=1}^N a_i \frac{\xi - \xi_i}{|\xi - \xi_i|} \exp(-c_i |\xi - \xi_i|) \\ &\quad - \sum_{j=1}^M b_j \frac{\xi - \xi_j}{|\xi - \xi_j|} \exp(-d \sqrt{(\xi - \xi_j)^2 + (\eta - \eta_j)^2}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$a \sim d$ は定数であり、それらすべてが正数の場合、右辺第1項は任意の線への引き寄せを、第2項は任意の点へ

0とした。また、底面付近での誤差は補間計算時の格子間隔が大きすぎたためと考えられる。

しかしながら、砕波直前的高速現象を通常のビデオカメラの画像からある程度の精度で計測できることなどを考えると、本手法は砕波変形の内部特性の概略を空間的に調べる場合には有効である。図-5に砕波直前の渦度分布の経時変化を鳥瞰図により示す。図中、反時計周りを渦度の正方向とした。

今後さらに、PIVによる濃度相関法を用いて水表面付近の計測精度を上げ、流体内部のPTVの結果と足し合わせる手法を開発すれば、同程度の装置であっても計測精度を向上することは可能である。

4. 任意海底形状における砕波変形の数値解析手法

浅海域での砕波変形は海底の影響を強く受けるため、数値解析においては自由表面はもとより、複雑な海底形状にも対応した解析手法が必要である。

一般に、自由表面流の数値解析手法には、自由表面に適合した計算格子を用いる free-surface-fitting 法と、気液二相を同時に計算して自由表面を解の一部として追跡する VOF 法(Hirt・Nichols, 1981)などに代表される free-surface-capturing 法とがある。

筆者らは、前者の手法すなわち格子生成法と境界適合座を用いた Boundary-Fit (BFC) 法により任意海底形状にも対応した砕波変形過程の数値解析手法を開発中である(滝川ら, 1995)。

の引き寄せを表す。

ここで、格子生成過程において、制御関数は

- ① 境界に格子を集中する。
- ② 境界に格子を垂直に交差させる。
ように選択されなければならない。

筆者らは、(5)式中の係数を調整することで、碎波変形時の多価関数となる水表面を含んだ境界形状に対しても、格子生成がある程度可能であることを示している。(滝川ら, 1995) しかし、Tompson らの方法では2つの条件を満足するように $P \cdot Q$ の係数を自動的に決定することはできない。そのため、格子生成には手間が掛り、もし不適当な係数を与えてしまうと図-7 のように水表面に格子が集中しない場合が生じる。

Steger ら (1979) は、格子分布に対する要求が主に境界付近でのみ起こることに着目して、上記2つの条件を境界付近でのみ課するような制御関数を、ポアソン方程式

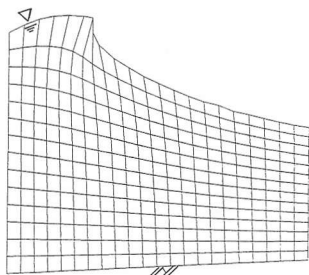
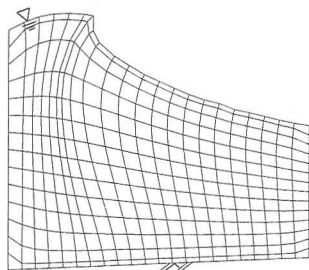
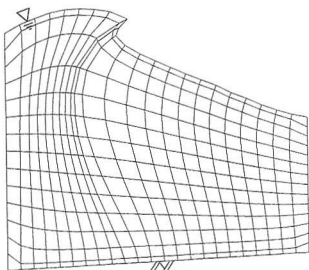


図-7 格子生成の結果 (Tompson らの手法)



(a) 碎波直前



(b) 巻き込み後

図-8 格子生成の結果 (Steger らの手法)

を繰り返しの解くプロセスの中で自動的に決めていくことで、希望する格子を自動的に生成する方法を提案している。

そこで今回は、可視化実験で得られた画像に対して、Steger らの手法を用い、水表面および海底面に自動的に格子を引き寄せるような格子生成を行い、その有効性を確認した (図-8)。

4.3 適用計算例

本計算手法の適用性を検証するために、一様斜面勾配上での巻き波碎波を対象に2次元の計算を行い、室内実験との比較を行う。計算の入射条件は表-1と同じである。なお、碎波変形計算には、表-1の入射条件を用いた滝川ら (1983) の FEM による碎波直前の速度および圧力の計算結果を初期条件として用いた。

解析領域は、 x 方向に 250 cm、 y 方向が波峰で約 50 cm であり、分割数は x 方向が 60、 y 方向が 20 である。また、時間ステップは安定条件より 1/1000 秒とした。

(1) 境界条件

まず、水表面では時間的に変動する水面の位置を計算する必要があるが、ここでは MAC 法にならって水表面の格子点をラグランジュ的に移動させることで運動学的条件を表現した。また、力学的境界条件は粘性応力と表面張力を無視し、水表面上で圧力を 0 とした。

次に、入射境界では、逐次 FEM の計算結果を入力し、通過境界においては図-9 に示すとおり減衰領域を接続しているため、特別な開境界処理は行っていない。その他の詳細は滝川ら (1995) に同じである。

(2) 計算結果

図-10~11 に計算結果を示す。

図-10 は水表面の経時変化を表している。時間の進行とともに波形が切り立ち、巻き込みが形成される様子が



図-9 初期格子

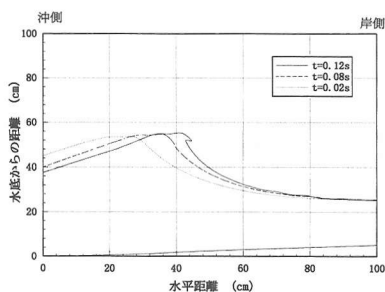


図-10 水表面の経時変化

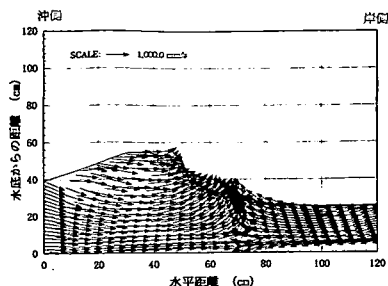
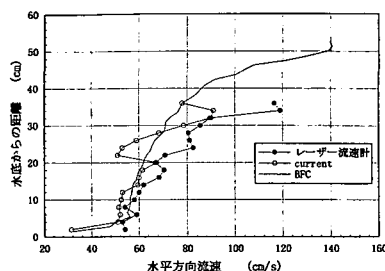
図-11 流速ベクトル分布 $t=0.10$ s

図-12 水平方向流速の鉛直分布の比較

再現されている。なお、今回は計算の安定性を維持するために、水表面に対して Longuet-Higgins ら (1976) のフィルターにより毎時間ごとに平滑化を行った。

図-11 は $t=0.10$ s の流速ベクトルの分布を示す。定性的な性質は可視化実験の結果とよく一致している。そこで、計算結果の精度を検証するために、水平方向流速の鉛直分布について、レーザー流速計および可視化実験の結果と比較を行った。その結果を図-12 に示す。

実験の波峰高さは位相平均のため計算値とは若干異なっているが、流速値を比較してみると、本計算手法の妥当性が確認できる。

5. 主要な結論

本研究より得られた結論を要約すると以下のとおりである。

1) 砕波変形のような高速現象を通常のビデオカメラを用いて画像解析する場合、画像解析結果を重ね合わせることで計測精度を向上できる。また、本手法は、砕波変形の内部特性の概略を空間的に調べる場合、特に

有効である。

- 2) Steger らの格子生成法は砕波変形のような移動境界問題に対しても格子を自動的に生成できる。
- 3) 任意の海底および水表面形状に対応した砕波変形の数値解析手法を開発し、計算結果をレーザー流速計などの実験結果と比較し、その妥当性を示した。

今後は、水塊突入後の空気混入の影響などを調べるために画像解析手法の改良を行うとともに、VOF 法などの考え方を取り入れた数値解析手法を開発し、砕波変形の内部特性を定量的に解明し、物理的根拠が明確なエネルギー逸散モデルを構築してゆきたい。

参考文献

- 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, 機械学会論文集中 (B), 55 巻, 509 号, pp. 107-115.
- 高木幹雄, 下田陽久 (1991): 画像解析ハンドブック, 東大出版会, p. 18.
- 滝川 清, 岩垣雄一, 中川政博 (1983): 有限要素法による斜面上の波の砕波変形と内部機構の解析, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 20-24.
- 滝川 清, 山田文彦, 松本健作 (1995): Boundary-Fit 法による任意海底形状の砕波変形解析, 海岸工学講演会論文集, 第 42 巻 (1), pp. 86-90.
- 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砕波の流速分布測定, 海岸工学講演会論文集, 第 41 巻 (1), pp. 161-165.
- 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.
- 水口 優, 友金幸浩 (1985): 巻き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.
- 渡部靖憲, 佐伯 浩 (1995): 画像処理による砕波帯内の運動機構に関する考察, 海岸工学論文集, 第 42 巻 (1), pp. 116-120.
- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of fluid (VOF) method for the dynamic of free boundaries, J. Comp. Phys., 39, pp. 201-225.
- Longuet-Higgins, M. S. and E. D. Coklet (1976) The deformation of steep surface waves on water, Proc. R. Soc. Lond., A, 350, pp. 1-26.
- Steger, J. L. and R. L. Sorenson (1979): Automatic mesh-point clustering near a boundary in grid generation with elliptic partial differential equations. J. Comp. Phys., 33, pp. 405-410.
- Tompson, J. F. et al. (1974): Automatic numerical grid generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two dimensional bodies, J. Comp. Phys., 15, pp. 299-319.