

画像処理による砕波帯内の運動機構に関する考察

渡 部 靖 憲*・佐 伯 浩**

1. はじめに

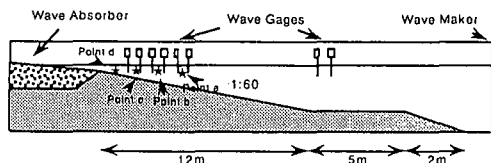
砕波帯内の流体の運動機構について、多くの研究がなされているが、このメカニズムは十分に解明されたとはいえない。これは実験的に砕波帯内の流体運動を計測するのが困難であるからである。また、砕波帯内では複雑な現象が絡み合っているため、この領域のモデル化においては時空間的な変動を考慮すべきである。砕波時の流体の速度場に関して L. D. V. などを用いて現在まで非常に多くの研究が成されてきた。しかし砕波帯内では、流体運動は時空間的に非定常、特に空間的に非周期的であるため時系列データだけでなく空間的な流速場をとらえる必要がある。こうした中で、中立粒子を波動場内に混入させ、そのビデオ画像から流速を算定する方法が近年行われてきている。西村ら (1988) は、ビデオ画素の濃度の相関関数を用いる相関法によって砕波時の流体の流速を評価した。また、長尾ら (1994) は、この相関法とトレーサ追跡法の精度を比較し、それぞれの特徴と欠点を明らかにしている。画像処理によって得られた流速は、一般的に精度が悪く、連続したデータをとるのが困難であることから、様々な努力が為されてきている。

本研究では、画像処理により砕波帯内の流速、渦度、運動エネルギー及びエネルギー散逸の空間分布を調べ、砕波帯内の運動機構を考察していく。

砕波時の流体運動は様々な運動のスケールが共存するため、適切な画像処理法を選ぶ必要がある。本研究で採用した画像処理法は空間相関関数を時間方向に発展させることで空間的に、比較的連続した流速場をとらえることができる。

2. 実験装置

図一に実験水槽の概略を示す。延長 24 m、幅 60 cm の二次元水槽にピストン式造波装置が設置してある。造波装置の前面に 1/10 勾配で延長 1 m の傾斜板を設置し、5 m の水平部をはさみ延長 12 m、勾配 1/60 の斜面を設定し水路終端に透過性消波工を設置している。計測機



図一 実験水槽概略図

械として入反射分離のために水平部に容量式波高計 2 本、砕波点近傍に 50 cm 間隔で 6 本の波高計を設置した。また流速の検定にはレーザードップラー流速計を使用した。中立粒子は、直径 2-3 mm、比重 1.0 の白色樹脂を用いた。画像は、高速ビデオカメラにより毎秒 125 コマで撮影し、解析は 320×240 画素で行った。

3. 画像処理法

水面波は基本波動だけ考えても水面付近と底面近傍では流速は大きく異なるが、前述したように砕波帯内では様々なタイムスケールの流体運動が存在する。画像処理によってこのような場を考えると、最小タイムスケールはビデオカメラの撮影コマ数によって決定されるが、さらに長いタイムスケールの運動についても解析される必要がある。砕波帯内のように大規模な流れ構造と小規模な乱れ、あるいは戻り流れのように比較的流速の遅い流れが混在する領域では、それぞれ流れのタイムスケールが異なるため画像処理方法に大きく依存する。これらのことを考えると、砕波点近傍の流体運動を画像処理するためによく使われてきたトレーサ追跡法や空間相関係数による相関法よりは、比較的広い範囲のタイムスケールの流速を算定できる時間相関係数を用いた方法が有効と思われる。この方法は、あらかじめ全ての画素に濃度の時系列を与えておき、テンプレート内の画素の相関係数の最も大きい時刻までの時間をラグタイムとして評価し流速を与えるものである。この相関係数は、空間相関係数を時間方向に拡張した形となり、次式で表される。

* 学生会員 工修 北海道大学大学院 工学研究科

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

$$C(x_0 + \Delta x, t + t')$$

$$= \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} (f(x_0, t) - \overline{f(x_0)}) (f(x_0 + \Delta x, t + t')) \right)}{\left(\int_{-\infty}^{\infty} (f(x_0, t) - \overline{f(x_0)})^2 dt \int_{-\infty}^{\infty} (f(x_0 + \Delta x, t + t'))^2 dt \right)^{1/2}} \quad (1)$$

ここで、 f は濃度を示し上線は平均値を表す。また Δx はテンプレート内の空間座標の差、 t' はラグタイムである。速度 v は最大相関関数を示すラグタイムを用いて式(2)で表される。

$$v = \frac{\Delta x}{t_{\max}} \quad (2)$$

本研究では、一周期を 10 の位相に分けてそれぞれの位相ごとに解析している。また解析後、データをガウスフィルターにかけることによって小さなノイズを除去している。

4. 結果と考察

本研究で扱った波は全て周期 1.2 秒、沖波波高 8 cm、水路水平部における水深は 30 cm である。また、砕波水深は 15 cm であり、砕波形態は spilling breaker であった。砕波後の運動を空間的に広く追うため砕波点から 1 m 間隔でビデオカメラを移動させ撮影した。今後、砕波点を a 地点、岸側へ向かって 1 m おきにそれぞれ b 地点、c 地点と呼ぶことにする(図-1 参照)。画像データの相関係数が小さいもの(今回は 50 %をしきい値とした)に関しては図中で黒色で表している。また、各地点において図-2 に示す 5 つの位相について処理を行い時間変化を比較する。また各位相間の時間は 0.125 秒である。

写真-1、写真-2 はそれぞれ砕波直後(a 地点、位相②)の水平流速及び鉛直流速の濃淡図を示している。写真の明度は流速の大きさを表しており、灰色は 0 流速、明るい色になるのに従ってプラスの流速を、暗くなるのに従ってマイナスの流速の増加を表している。これらの図から砕波時の crest 前方から飛び出す foam region の流速の状態及び比較的流速の遅い底面付近や波の

trough 辺りの流速も検出していることがわかる。

写真-3、4 は b 地点及び c 地点における砕波後 bore 状となった状態(位相②)の水平流速を表している。b 地点における foam region の水平流速及びその分布は、1 m 岸側の c 地点に於いてもほぼ同等なものになっている。一方、この領域下の内部流速を比較してみる。図中の縦線で示した内部水平流速の変曲する位置と foam region の位置関係は、foam region が c 点の方が b 点よりこの変曲線より先行しているのがわかる。これらのことは砕波後しばらくは foam region は進行しているその周辺の内部波動から運動量またはエネルギーを供給され、一定速度もしくは波速の低下もあって内部波動運動よりも速い速度で進行していると考えられる。

写真-5、6 及び写真-7、8 はそれぞれ foam region 通過後の b 点の運動エネルギー、エネルギー散逸、及び c 点の運動エネルギー、エネルギー散逸を表している。

これらの位相は全て③の位相である。色の明るさはこれらのエネルギーの大きさを表しており明るいほど大きなエネルギーを持つ。運動エネルギーに関して、b 点では

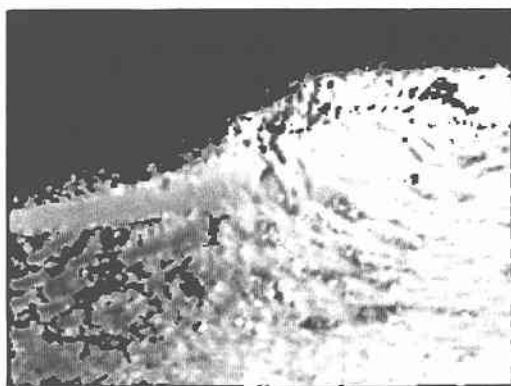


写真-1 水平流速の濃淡図 (a 地点, 位相②)

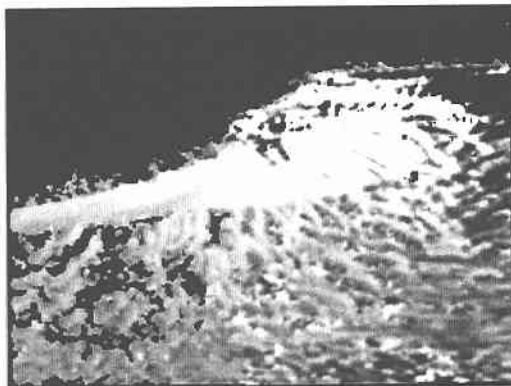


写真-2 鉛直流速の濃淡図 (a 地点, 位相②)

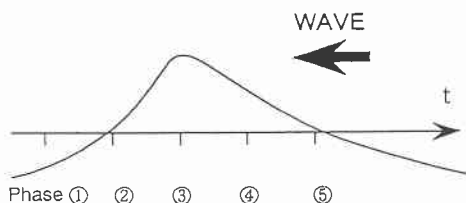


図-2 画像処理を行う位相の定義

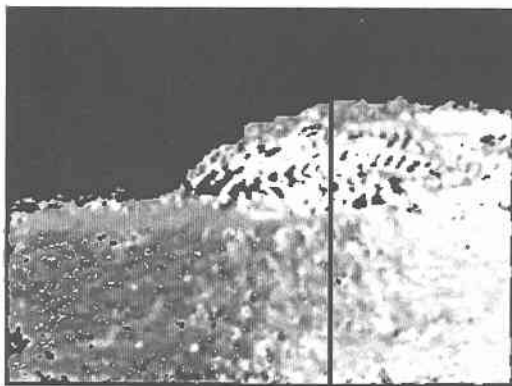


写真-3 水平流速の濃淡図 (b 地点, 位相②)

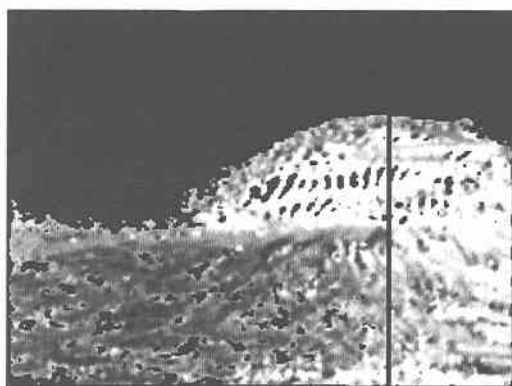


写真-4 水平流速の濃淡図 (c 地点, 位相②)

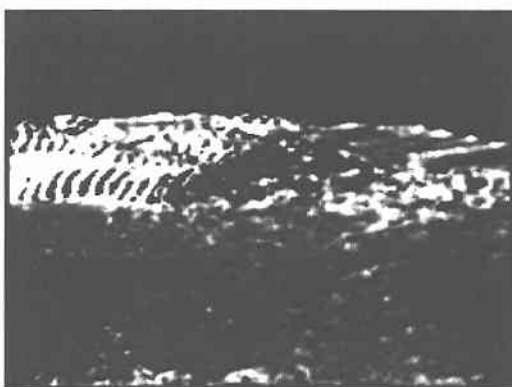


写真-5 運動エネルギーの濃淡図 (b 地点, 位相③)



写真-6 エネルギー散逸の濃淡図 (b 地点, 位相③)



写真-7 運動エネルギーの濃淡図 (c 地点, 位相③)



写真-8 エネルギー散逸の濃淡図 (c 地点, 位相③)

比較的 foam region の先端にエネルギーが集中しこの領域下では平均的に滑らかなエネルギー勾配を持つ、これに対して c 点ではこの領域の上層部だけではなく広い範囲に渡って局所的なエネルギーの集中箇所が数多く分散して見られる。これは先行する大渦の為に乱流拡散によ

って生成、輸送された乱れと考えられる。このような短いタイムスケールの運動も比較的良好に表されているといえる。エネルギー散逸についても同様に考察することができる。大渦の存在する上層にエネルギー散逸箇所がたまっている b 点に対し、c 点では乱流拡散により底面

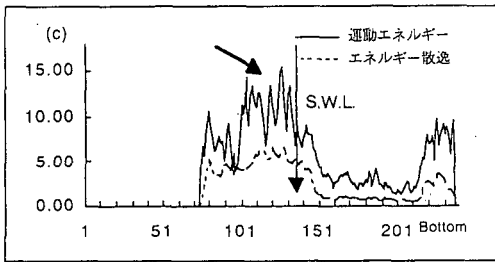
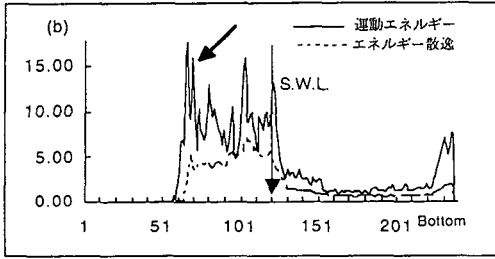
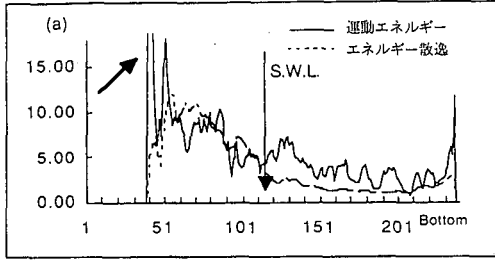


図-3 運動エネルギー及びエネルギー散逸の鉛直分布

近傍まで広く強い散逸が分布している。

これらの結果から、本研究で扱った spilling breaker では、先行する大渦は砕波後しばらくは内部波動運動からエネルギーを供給されるが、この大渦自体が直接エネルギーを失うばかりでなく生成した乱れを拡散することで内部波動エネルギーも減少させていく。その後、これらの一連したエネルギー損失過程を経て、運ばれる運動量の減少に伴い急激に内部波動及び foam region の運動は低下していく。

画像処理による空間的運動構造について前述した考察をモデルとして結びつけるには、時間的、空間的な変化を数値として与える必要がある。これは現段階では精度やノイズの問題により困難であり、今回は基礎的な研究として得られた物理量の平均量として分布型を与えていく。

図-3は、位相③における水平画素の運動エネルギー及び散逸の平均値の鉛直分布である。ここで (a), (b), (c) はそれぞれ a 点, b 点, c 点における値を表している。

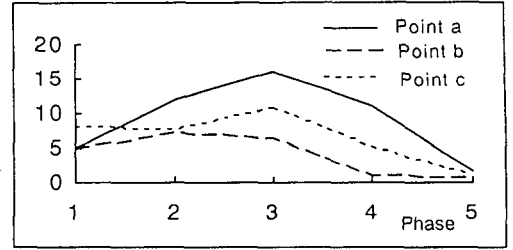


図-4 運動エネルギーの分散の時間変化

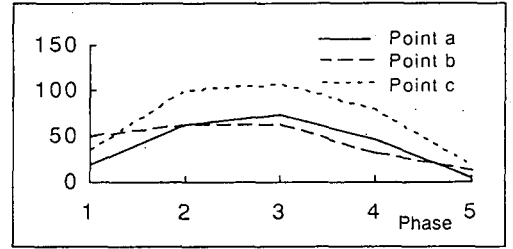


図-5 エネルギー散逸の分散の時間変化

S. W. L. 上部の集中した散逸が砕波の進行とともに下方へ広がり滑らかになっていく様子が分かる。また矢印で示した運動エネルギーの集中する位置が波の進行とともに下方へ移行していき拡散している。

図-4, 図-5 は各地点における運動エネルギー、エネルギー損失の分散の時間変化を示している。これらは相関係数が 70 % 以上の全画素に関する統計量である。砕波直後の a 点で広いレンジに渡って持っていたエネルギーが、砕波が進むに従ってあるレンジに集中し (b 点)、その後再びエネルギーのレンジが広がっていく (c 点)。前述した空間分布の考察と対比して考えると、砕波後 b 点の様に空間的に foam region 付近に比較的均衡したエネルギーが集中し、さらに砕波が進むと乱流拡散によって広いレンジのエネルギーを空間的にも広く分散させていくと考えられる。エネルギー散逸に関して a 点, b 点の分散はほぼ同様な時間変化を示しているが、c 点では幅広いレンジに分散している。a 点, b 点において波の上層部の大渦が主として受け持っていたエネルギー損失が乱れの拡散により広いレンジの散逸に移行する過程が現れていると考えられる。

5. 結 論

画像処理により砕波帯内の内部流速場及び運動エネルギー、エネルギー散逸を評価した。空間相関を時間方向に発展させることで比較的広い範囲のスケールの運動を捉えることができた。

これらの結果から、本研究で扱った spilling breaker

では、先行する大渦は碎波後しばらくは内部波動運動からエネルギーを供給されるが、この大渦自体が直接エネルギーを失うばかりでなく生成した乱れを拡散することで内部波動エネルギーも減少させていく。これら一連のエネルギー損失過程を経て、運ばれる運動量の減少に伴い急激に内部波動及び foam region の運動は低下していく。空間的に foam region 付近に比較的均衡した運動エネルギーが集中し、さらに碎波が進むと乱流拡散によって広いレンジのエネルギーを空間的にも広く分散させていく。碎波直後において波の上層部の大渦が主として受け持っていたエネルギー損失が乱れの拡散により広いレンジの散逸に移行する過程が現れていると考えられる。

碎波帯内の内部流速場を調べるとき、その時間及び空間変化を同時に考慮することは非常に重要であり、画像処理による解析は有効な手段である。今後、ノイズの少ない連続データを得るために中立粒子の改良、画像処理

法の改良を加える必要がある。また、乱れに焦点を絞って碎波帯内の運動機構をさらに調べていく。

参 考 文 献

- 青野利夫・服部昌太郎 (1988): 碎波帯内のエネルギー逸散過程に関する実験的研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 59-63.
- 泉宮尊司・堀川清司 (1982): 碎波によるエネルギー散逸過程に関する研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 150-154.
- 長尾昌朋・神保誠二・沢本正樹 (1994): トレーサ追跡法と相關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.
- 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤 (1984): 碎波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 1-5.
- 渡部靖憲・細川裕希・佐伯 浩 (1955): 碎波時の内部流速機構に関する考察, 土木学会北海道支部論文報告集, pp. 298-299.