

砕波時の戻り流れの内部流速場への影響について

On the Effect of Return Current to Inner Velocity Field of Breaking Wave

渡部靖憲*・細川裕希**・佐伯 浩***

Yasunori Watanabe, Hiroki Hosokawa, Hiroshi Saeki

The physical characteristics of breaking wave are investigated in cases of permitting to occur the return current and compulsorily removing it. Breaking wave motion is complicated by variety factors and connecting them. Effective one of these factors is return current which have a large scale effect compare with other factors as viscosity, capillary stress, and turbulent. Therefore it is very important to investigate how the return current affect to the inner velocity field at breaking. Since the fluid motion is temporally and spatially unsteady in the breaking zone, the measurement of fluid motion should be carry out in the view of these aspects. In this paper, the inner velocity at breaking is specially investigated by particle image velocimeter. Especially, we could understand that the structure of fluid motion is suffered by the return current.

Keywords; return current, inner velocity, particle image velocimeter

1. はじめに

砕波帯内の流体は、様々な要因が影響しあい非常に複雑な運動構造を示す。戻り流れは、波自体の質量輸送の結果として発生するが、時空間的に大きなスケールを持ち砕波帯内の運動機構を決定する要因として重要である。戻り流れを排除することによって、地形効果または他の幾何学的な擾乱に起因する非線形効果だけによる砕波帯内の運動機構や砕波過程を調べることは、この現象を単純化して考察するだけでなく戻り流れが砕波過程において周りの流体に与える影響を観ることができる。一方、戻り流れを許容する場合と排除する場合は、大まかに言って、実海域において離岸流の存在する場所とそうでない場所に相当する。こうした観点からも戻り流れを低減した場合の波動運動機構を調べることは重要である。

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り様々な努力が為されている。

本研究では、2次元造波水槽の底面下に環流パイプを埋設することでWave Set-up及び戻り流れを低減させ、波動運動の変化を比較していく。また、その空間的な速度場の空間構造を比較するためにビデオ画像の動画画像処理を行った。ここで、砕波時の流体運動はそのタイムスケールが大きく異なるため、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ている。

2. 実験装置

図1に実験水槽の概略を示す。延長24m、幅60cm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2mの傾斜板内を設置しその中に環流パイプの流出口を取り付けた。5mの水平部をはさ

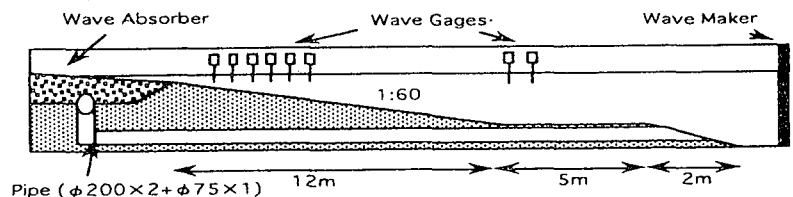


図1 実験装置

み延長12m、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。この消波工の底部に環流パイプ流入口が設置されており水槽の底面下を通り流出口とつながっている。この流入口を開放することに

* 学生会員 北海道大学大学院 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 五洋建設株式会社

*** 正会員 北海道大学工学部

よって戻り流れを低減させることができる。計測機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50cm間隔で6本の波高計を設置した。中立粒子は、直径2-3mm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。また、流速計としてレーザードップラー流速計を用いた。

3. 画像処理法

前述したように砕波点近傍では様々なタイムスケールの流体運動が存在し、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。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。本研究では空間相関関数を時間方向に発展させた(1)式を採用し、適当な時間内で最大相関関数をもつラグタイムで流速を評価する。

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

ここで、 f は濃度を示し 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(2)式で表される。

$$v = \frac{\Delta x}{t'_{\max}} \quad (2)$$

4. 結果と考察

まず、戻り流れを許容した場合と低減した場合について、砕波波高、砕波水深などの違いを調べていく。図2は沖波波形勾配と砕波波高比を表したものである。●は環流パイプの流入口を封鎖した場合（以後、管封鎖時とする）、○は開放した場合（以後、管解放時とする）であり、それぞれ戻り流れを許容したものと低減したものと考える。この図から砕波波高が若干管解放時の方が小さいように見えるが、大きな波形勾配ではばらつきが目立ち明瞭な傾向は観られない。図3は沖波波形勾配と無次元砕波水深との同様な比較である。これに関しても管解放時の方が僅かに小さな砕波水深を示すが、砕波点の計測誤差等を考慮すれば両者の大きな差異は認められない。また、Battjes(1974)が用いたパラメータ $a\omega^2/g\alpha^2$ (a :振幅、 ω :角周波数、 g :重力加速度、 α :地形勾配)と波形勾配でまとめると図4のように両者は完全に同一直線上にプロットされる。これらの結果は、今回与えた底面勾配による実験では、戻り流れは一般に砕波指標等で扱われる砕波の性質を表す物理パラメータには大きな影響を与えないことを示している。

図5はL.D.V.で計測した砕波点でのtrough levelに

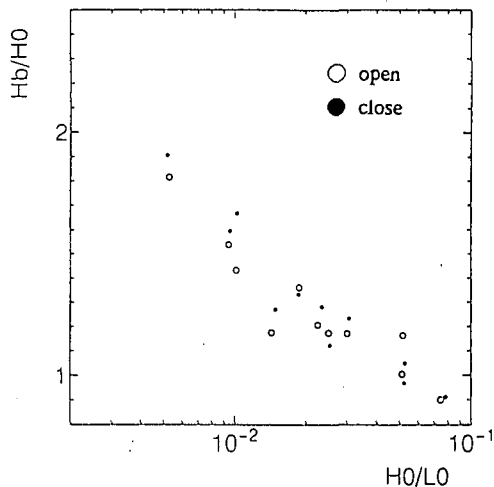


図2 砕波波高比と沖波波形勾配の関係

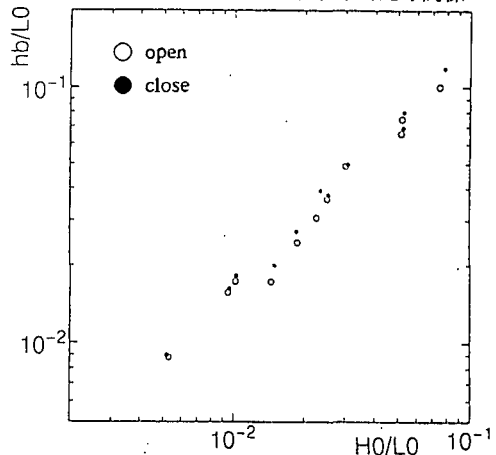


図3 無次元砕波水深と沖波波形勾配の関係

おける流速の時系列である。この時の波浪緒元は周期、沖波波高がそれぞれ1.2sec, 8cmであり、位相平均したデータを流速のゼロダウンクロスから一周期分示している。ここで、実線が管封鎖時、破線が管解放時である。両者には明らかな流速の違いが観られ、その平均流速の差は最大流速の10-15%と小さくない(図6)。これらの平均流速が示す流入する運動量の違いが波動場に与える影響を調べていく。図6の管開放時では底面近傍からtrough level付近まで弱い正の流速が存在し、波の質量輸送によって水槽と環流パイプを循環する流れが発生していることを示している。波によって運ばれる運動量とこれらの流れによる運動量は圧力の変化量として平均水位に反映される。図7は、図5、図6と同一波浪緒元での平均水位の空間変化を示している。管開放時の方がwave set down及びwave set upが小さく現れている。後者は環流パイプの直接的な効果として現れ、前者は前述した循環流によって波高の増加率が抑制されることに起因するradiation stressの勾配の減少に影響されていると考えられる。ここで循環流はほぼ定常なものと考えている。

次にこれらの流れが砕波点における内部流速場に与える影響を調べていく。写真1、写真2はそれぞれ管封鎖時と開放時の流速場の濃淡図である。波浪緒元は前図と同一のものであり波は右から左へ進行している。位相a,b,c間の時間間隔は0.128secであり低い相関係数(今回は50%とした)の画素は黒色で示してある。また速度は明るい色ほど正の流速が大きく、グレーは流速が0、負の流速が大きくなるほど黒色に近づく。2つの写真で位相bを比較してみると波のcrest下の線で囲んだ部分の水平流速が管封鎖時の方が全体的に流速が小さい。また管封鎖時にはcrestからform regionを形成しているboreの上層部に水平及び鉛直流速が集中しており強くこの領域を前方へ押し出している。位相cにおいては、この領域の通過後、管開放時にはまだ広い範囲にわたって大きな水平流速が存在しているのに対して、管封鎖時には戻り流れが大きく影響すると思われるtrough level以下の領域だけでなく水表面付近についても比較的小さな値をとっている。これらの両者の内部流速場の違いは、管封鎖時について、戻り流れによって主としてtrough level以下の流速が抑えられるにも関わらず過剰な運動量が運ばれる必要があり、そのためboreの上層部の飛び出し速度が大きくなっていると思われる。管開放時の結果と比較すれば、戻り流れのない場合、あるいは流れ共存場における波動運動と比べて砕波を引き起こす擾乱として十分な影響を及ぼし特に流れ場の空間的構造に影響を与えている

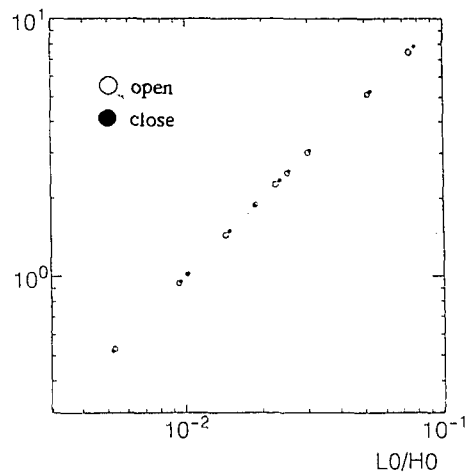


図4 砕波パラメータ $a\omega^2/g\alpha^2$ と沖波波形勾配との関係

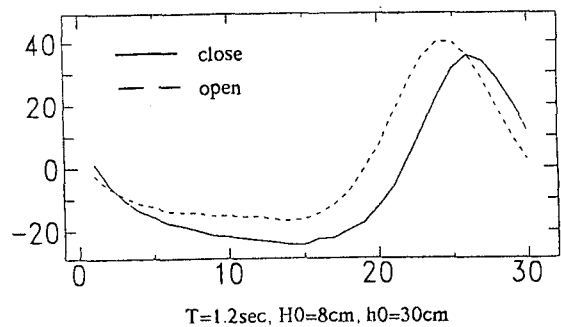


図5 trough level における流速時系列

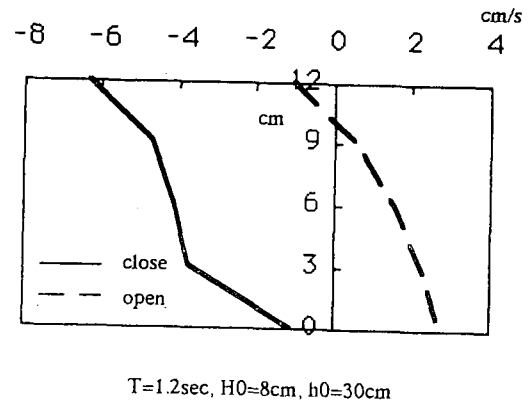


図6 平均流速分布

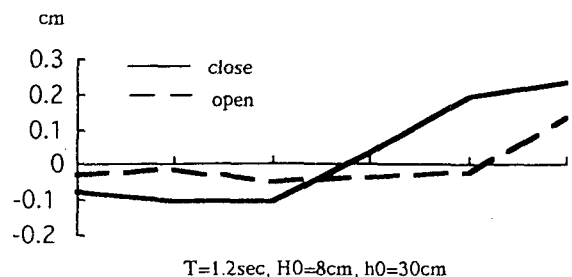


図7 平均水深の空間変化

5. 結論

実験水槽の両端に環流パイプを埋設しwave set upを低減し戻り流れの影響を抑えることでこれが流れ場に与える影響を調べた。環流パイプを開放した場合、波の進行と同一方向の循環流が発生する。この流れの存在は碎波に影響するが、弱い流れの共存場として取り扱い環流パイプを封鎖した場合と比較できる。

本研究で設定した底面勾配に於いては、戻り流れを許容した場合とこれを低減した場合では一般的に碎波指標で用いられるパラメータに明確な相違がみられない。

環流パイプ封鎖時と開放時のある断面に流入する運動量の差は平均水位に反映される。開放時では、循環流の存在によって波高の増加率が小さくradiation stressの勾配が小さいためwave set downは環流パイプ封鎖時と比べて小さくなる。

画像処理により碎波点近傍の内部流速場を計算し両ケースについて比較した。碎波点に於いてtrough level以下の領域で戻り流れにより流速が低下するにも関わらず過剰な運動量を運ぶためboreの上層部の飛び出し速度が大きくなると考えられる。

環流パイプ封鎖時の結果は、戻り流れのない場合、あるいは流れ共存場における波動運動と比べて碎波を引き起こす擾乱として十分な影響を及ぼし特に流れ場の空間的構造に影響を与えているといえる。この影響は底面勾配が大きくなったときさらに顕著に現れると考えられる。

《参考文献》

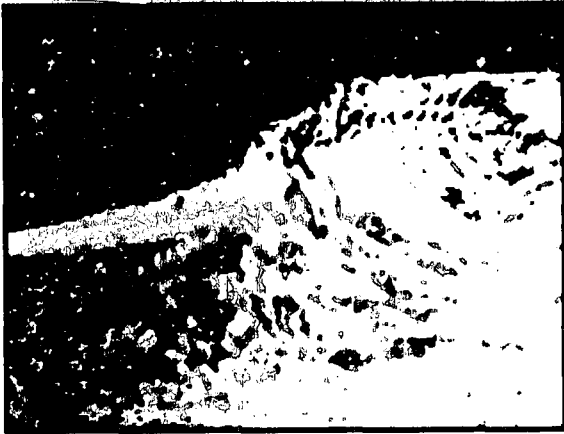
- 西村仁嗣・武若 聡(1988)；VTR画像の相関解析による碎波時内部流速分布の推定,海岸工学講演会論文集,第35巻pp.45-48
長尾昌朋・神保誠二・沢本正樹(1994)；トレーサ追跡法と相関法を用いた孤立波碎波の流速分布測定,海岸工学講演会論文集,第41巻,pp.161-165
Battjes, J. A. (1974) ; Surf similarity, Proc. Conf. Coastal Eng., 14th, pp.466-79
O.M.Phillips ; The Dynamics of the Upper Ocean

-40 cm/s

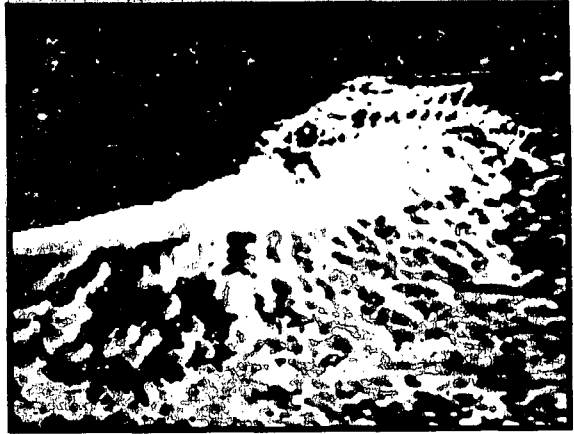
0 cm/s

40 cm/s

a (水平流速) Horizontal V



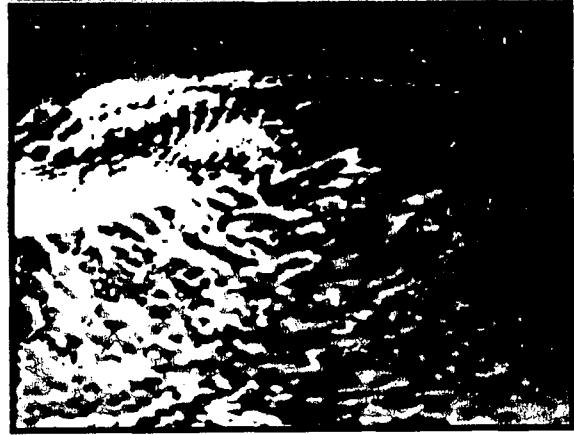
a (鉛直流速) Vertical V



b (水平流速) Horizontal V



b (鉛直流速) Vertical V



c (水平流速) Horizontal V



c (鉛直流速) Vertical V

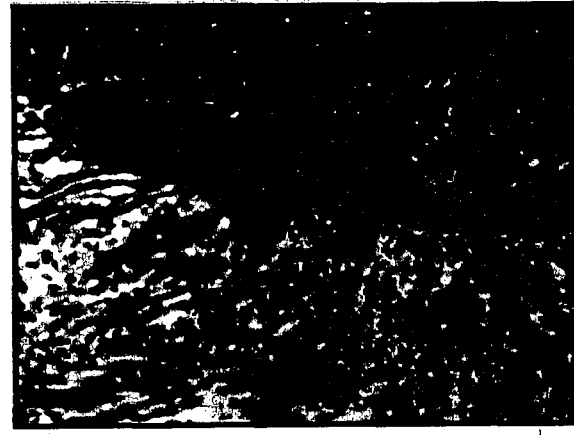


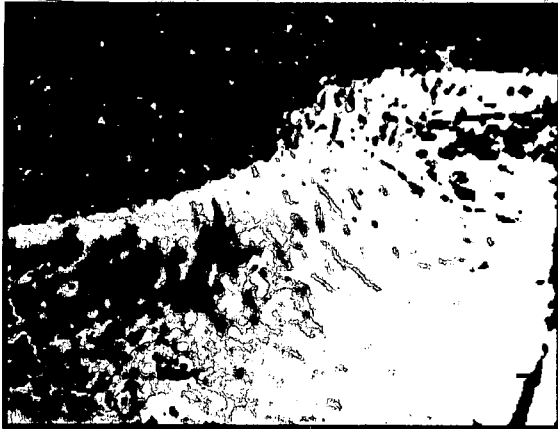
写真1 環流パイプ封鎖時の碎液内部流速分布

-40 cm/s

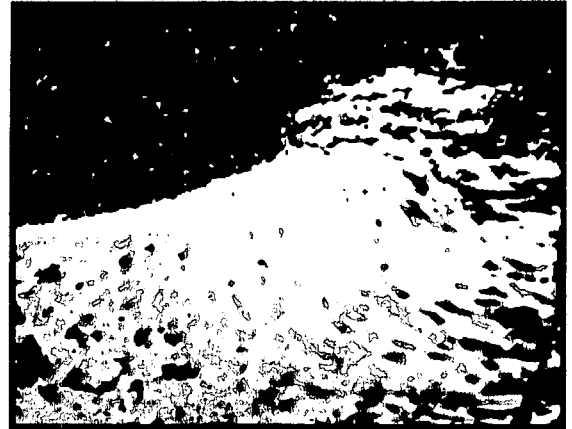
0 cm/s

40 cm/s

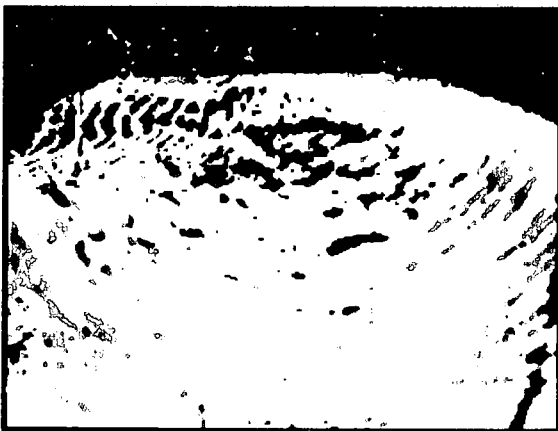
a (水平流速) Horizontal V



a (鉛直流速) Vertical V



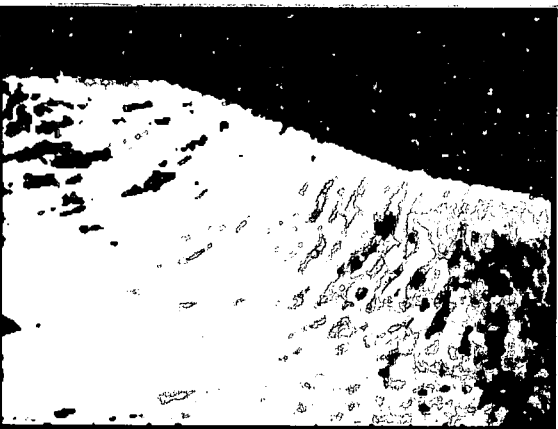
b (水平流速) Horizontal V



b (鉛直流速) Vertical V



c (水平流速) Horizontal V



c (鉛直流速) Vertical V

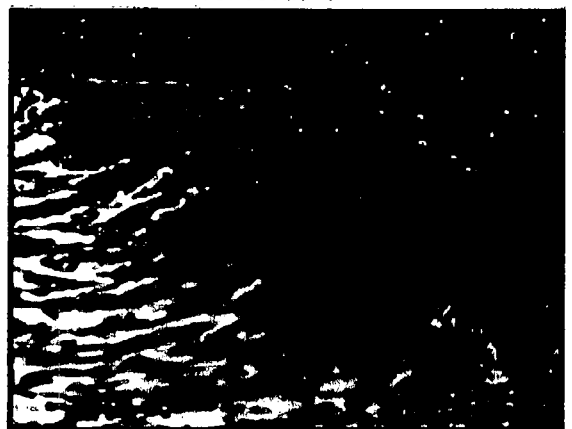


写真2 環流パイプ開放時の碎波内部流速分布