

戻り流れによる砂質底面の3次元侵食への影響と砂の巻き上げ速度について

Study on Three-dimensional Erosion of a Sandy Bed due to Undertow and on Velocity of Suspended Sediment

渡部 靖憲*・佐伯 浩*・森 憲広**・稲垣 啓***

Yasunori Watanabe, Hiroshi Saeki, Norihiro Mori, Kei inagaki

The velocity field in a surf zone was experimentally investigated, and the effects of an undertow after wave breaking on turbulence and wave motion are discussed. In order to reveal the mechanisms of sand suspension over the bottom, the measurement of velocity distribution of sand transportation was tried by the particle image velocimetry.

It is important to understand the reciprocal relationship between turbulence caused by wave breaking and a cross-shore steady flow, such as a rip current or an undertow, as both of these are closely related to sediment rolling up and cross-shore sediment transport. On the other hand, high-strain turbulent flows that have three-dimensionally coherent eddy structures with oblique vortexes are generated in a surf zone, and the steady flow is strongly influenced by the three-dimensional vortexes generated at this time. This study was designed to investigate the three-dimensional characteristics of the velocity field and bed erosion in a surf zone, and the effects of undertow on them, of undertow on them, in order to clarify the mechanisms of fluid motion and the cross-shore sediment transport in this region.

1. はじめに

戻り流れは波自体の質量輸送に起因し、砕波後の波の運動に影響を与える。漂砂問題の観点から考えれば、戻り流れ自体の砂の輸送への影響だけでなく、流れと砕波によって生成された乱れの干渉による流速場の変化により砂の浮遊にも影響を与える可能性がある。一方、実海域においては、向岸流と離岸流が平面的に分布しており、実験水槽における戻り流れは必ずしも実海域に対応していない。この点を比較する意味においても、戻り流れが砕波帯内に与える影響を調べることは重要である。砕波帯内では、jetの突入により3次元的大規模渦構造が形成されていることは以前から指摘されている。(日野ら, 1983) こうした3次元の乱れはこの領域の時間平均流にも3次元的效果を与える(渡部ら, 1996)。

砕波帯内では、流速の増加と高歪みの大規模渦の生成により海底面の砂は浮遊させられ易くなるため、漂砂を予測するために多くの研究が為されてきた。その浮遊メカニズムは濁度計等によって計測された濃度時系列を用いて調べられてきたが特に浮遊砂が顕著となるPlunging Breakerにおいては空間的に流速分布が大きく異なるため、浮遊砂の輸送の時空間特性を明らかにする必要がある。

本研究は、砕波帯内における流れと乱れの関係及び3次元性を調べた実験結果をもとに、戻り流れが海底面上の砂の侵食速度に与える影響を考察するものである。また、砕波時に生成される大規模渦構造が砂を浮遊させ、砂の移動速度を動画像処理により解析し、それらの関係を調べた。浮遊砂において大規模渦が海底面に与えるせん断力は重要であるが、本研究では、このせん断力分布を数値シミュレーションによって計算し、その特性を調べている。

2. 実験装置

実験水槽は、全長24m、幅60cmの二次元水槽であり、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1mの傾斜板を設置し、5mの水平部をはさみ延長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ある。入反

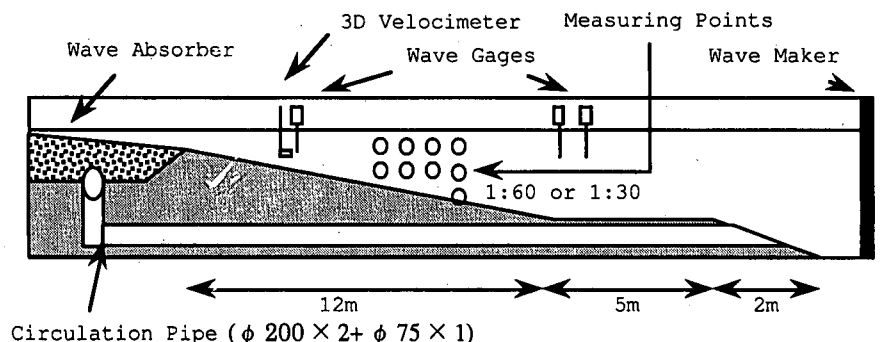


図1 実験装置

* 正会員 北海道大学大学院工学研究科

** 学生員 北海道大学大学院工学研究科

*** 正会員 建設省

射分離のために水平部に容量式波高計2本、砕波帯内に位相平均のための波高計及び流速計を設置した。また、戻り流れ及び砕波後の wave set up を制御するために水路の両端を結ぶ塩化ビニールパイプを底面に埋設した。この還流パイプの蓋を開閉することにより戻り流れ及び wave set up を抑制することができる。流速測定実験で使用した3次元アコースティックドップラー流速計は、L.D.V.と比較して精度は高くないが容易に3次元流速を計測することができる。流速は図1に示すように、鉛直方向に2cm間隔、水平方向に砕波前は4cm間隔で砕波後は2cm間隔で計測した。また、流速及び水位変動のデータはサンプリング間隔40msecで計測されている。海底砂の侵食実験においては、傾斜底面にわたって、5cm厚の砂を敷いた。砂は7号珪砂で、直径0.15mmである。また、造波開始前には、底面を平らにしている。底面形状は、超音波式の変位計によって測定している。また、画像処理においては、高速度ビデオカメラによって毎秒125コマで撮影し、解析は320×240画素を256グレースケールに変換し行った。浮遊砂画像濃度変化を明確にとらえるため、浮遊砂画像濃度のレンジをフィルターにより広げ解析を行った。

3. 結果と考察

著者等の過去の実験により Spilling Breaker における流速分布が得られるが、本研究においてもまずその結果をもとに砕波後の3次元性に着目し、考察をしていく。図2は、静水位以下4cmにおける時間平均直交流速 v (水槽奥行き方向)の分布を表している。この時の波は砕波水深13cm, 砕波波高12cm, 周期1.2秒であり、砕波形態は Spilling Breaker であった。図2より、●は環流パイプ封鎖条件、□は開放した条件によるものである。砕波直後から、直交流速が変化し始め、空間的に振動する結果が表れており、3次元的な流速場となっているのがわかる。日野ら(1984)が指摘したような砕波後の3次元的な組織的渦構造が、2次元水槽内のスケールの砕波に対してその効果として3次的な定常循環流を発生させている可能性がある。特に、環流パイプ封鎖時において波長程度の規模で明確に振動しており、2次元水槽内では2次元的な時間平均流と考えられる戻り流れの存在自体が、水槽奥行き方向の流れを強化させると言える。

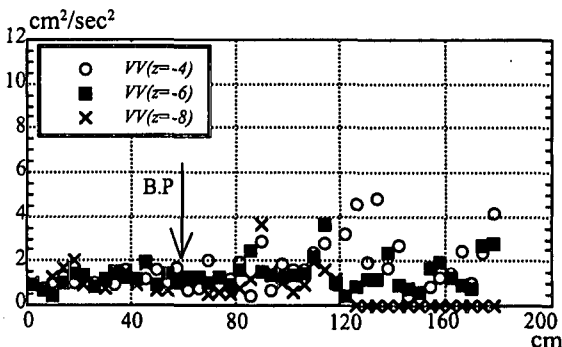
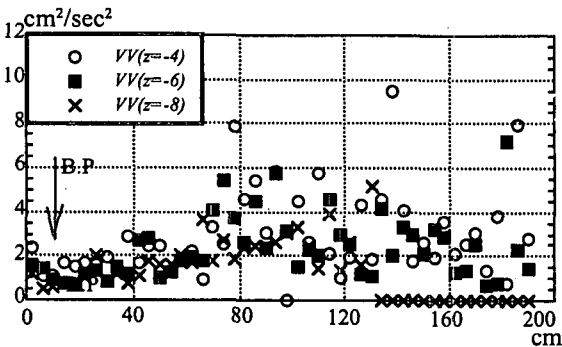
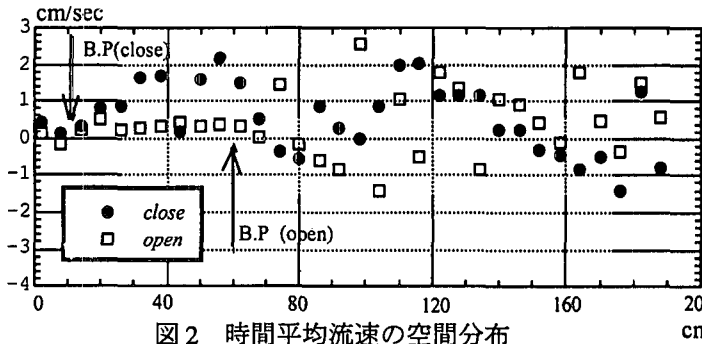
図3は、位相平均された流速の直交成分エネルギーの空間分布を表している。ここで(a)は環流パイプ封鎖時、(b)は開放時の結果である戻り流れを制御しない(a)のほうがそれぞれの水深において大きなエネルギーを持ち両者においてその空間分布も異なるのがわかる。この結果からも戻り流れの存在が砕波帯内の流速場の3次元性に寄与しているのがわかる。こうした戻り流れの存在による流速場の違いは海底の砂移動に影響を与えている可能性がある。

次に、戻り流れの有無による、水底に敷かれた珪砂の侵食状況の違いを比較すると共に前述した流速場の3次元性を検証していく。

図4はそれぞれ、環流パイプ封鎖時(a)、開放時(b)の造波開始から30分後の砕波帯内の底面地形侵食分布である。

この時、斜面勾配は1/30であり、波は周期1.2秒、砕波波高10cm、砕波水深15cmである。また砕波形態は Spilling Breaker である。

環流パイプ封鎖時の図4-(a)より側壁付近が大きく侵食され水路中心付近も侵食された3次元的底面形状分布になっているのがわかる。また、砕波点より沖側に砂が堆積しているこ



(a) 環流パイプ封鎖時 (b) 環流パイプ開放時

図3 流速の直交成分エネルギーの空間分布

($H_b=12\text{cm}$, $h_b=13\text{cm}$, $T=1.2\text{s}$)

とから、戻り流れにより侵食された砂が沖側に運ばれたと考えられる。また環流パイプ開放時についても同様に3次元的地面侵食をしているが、環流パイプ封鎖時と比較すると、岸側に砂が堆積しているのがわかる。これは環流パイプを開放したことにより戻り流れが抑制されたためと考えられる。側壁付近の侵食に関して、環流パイプ封鎖時の方が開放時より約1.2倍の侵食速度を持ち、侵食面積も封鎖時の方が大きいことも確認でき、なお最大堆積量は両ケースにおいてほぼ同じであった。砕波後の3次元的地形構造が顕著となるPlunging Breakerにおいては、さらに大きな違いが予想される。

図5は、それぞれ環流パイプ封鎖時、開放時の造波開始から6分後の砕波帯内の底面形状地形侵食分布である。この時斜面勾配1/30、波は、周期2.4秒、砕波波高13cm、砕波水深14cmであり、砕波形態は、Plunging Breakerであった。図5より、砕波時に激しい大規模渦を伴うため、ジェットの着水点近傍に大規模な侵食が発生しており、側壁付近を中心とした顕著な3次元の侵食及び水槽の中央部の堆積が見られる。この時の最大侵食量は、環流パイプ封鎖時の方が1.4-1.7倍大きく、どの分布も封鎖時では極端に側壁付近に侵食が集中する。一度3次元性を持った地形となると、流速場も急速に3次元的になり、局所的な地形侵食がさらに発達する。砕波によって3次元性を持った流速場にとって側壁を持つ2次元水槽は側方を拘束された特殊な空間と考えられるが、戻り流れの制御の違いだけで図4,5に示すような侵食分布及び侵食速度が大きく異なることは明らかであり、砕波による乱れと流れ及び地形侵食には関係があると考えられる。さらに、これらの結果は実海域において、離岸流の存在と海底地形分布の関係を結びつける目的においても基礎的データとして有効と考えられる。これらの実海域の現象と結びつけるためにさらに浮遊砂の挙動を調べていく必要がある。

次に、浮遊砂の時空間特性について調べていく。浮遊砂の移動過程を調べるとき、現在まで濁度計等によって計測された時系列データを元に多くの研究が為されてきたしかし砕波後の流速場は波の進行に伴って大きく変化していくため、砂の浮遊及び移動過程の空間分布を知る必要がある。砂粒子自体の速度を計測するのは不可能であるので、本研究では、これを動画像処理によって試験的に解析し、その適用性を検証していく。動画像処理法は渡部ら(1995)と同一の方法を採用している。この解析法は通常流体内に混入させた中立粒子の画像濃度を追うものであるが、浮遊砂の存在による濃度分布の変化が撮影することができれば、中間的尺度として画素内の平均濃度を追うことで浮遊砂の移動速度を評価できると考えられる。

図6はplunging point付近における(A)浮遊砂速度ベクトル (B)画像濃度分布及び(C)中立粒子を用いて動画像解析された流速ベクトルを示している。この時の波は図4の波浪諸元と同一である。図中の(1)-(3)はそれぞれ連続した位相

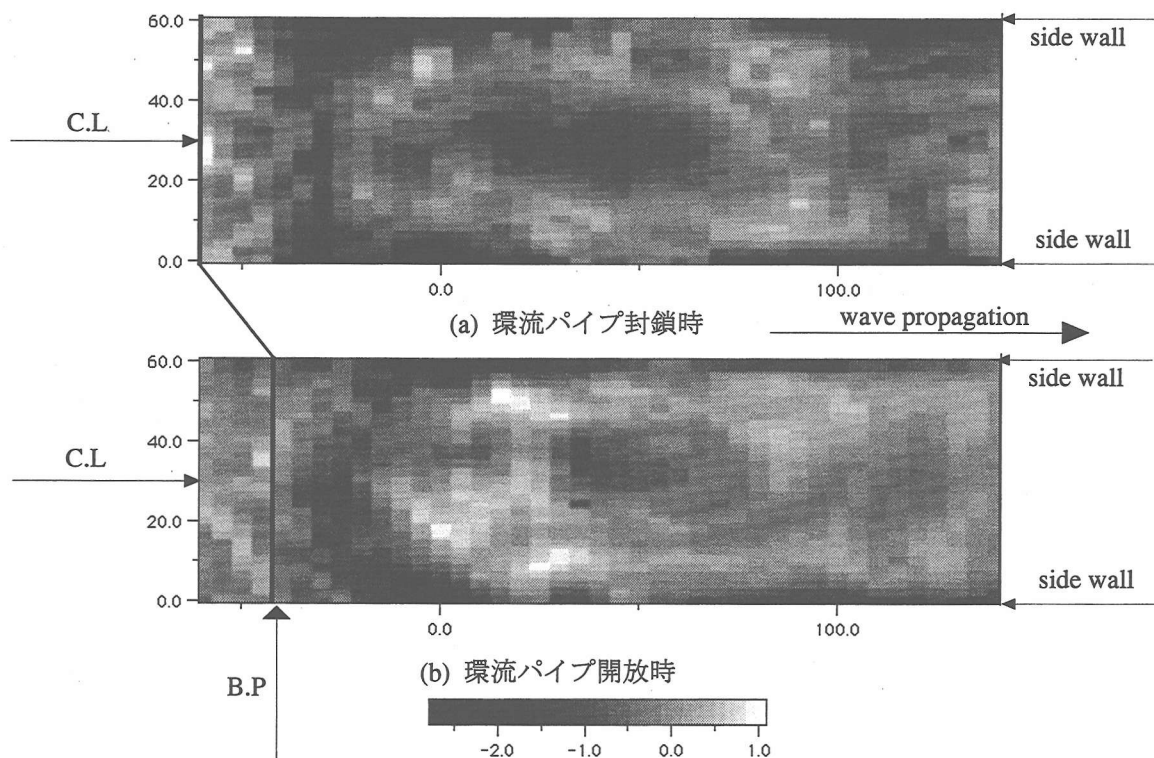


図4 底面地形侵食分布 (Spilling Breaker, 造波開始後 30 分)

($H_b=10\text{cm}$, $h_b=15\text{cm}$, $T=1.2\text{s}$)

を示し、それぞれの時間間隔は0.16秒である。また、jetの突入の伴う気泡の混入と浮遊砂の区別は(B)によって確認する必要がある。なお、Aに示す浮遊砂画像濃度速度ベクトルは十分な相関がとれており、信頼できるものである。位相(A,1),(C,1)においては、鉛直流速成分が大きくなるために示す浮遊砂の沈降が確認できる。2の位相になると、splash-upに伴う流速の増加により、(A,2)の様な巻き上がりが生じる。この時砂の巻き上がりは、斜め上方に発達しており、流速ベクトルの方向とは一致しない。位相では、浮遊砂は沈降しながら波の進行方向に輸送されている。これらの結果は砂の濃度分布の識別不可能であった欠測点が多いため、この問題への画像処理の適応性には課題があると言えるが、大まかな傾向はとらえることは可能と考えられる。今後、気泡と砂との識別やデジタルフィルターによる画像濃度の操作による画像処理の高精度化は可能と考えられる。

砕波帯内の砂の浮遊及び輸送の大きな原因の一つが大規模渦によるせん断力である。砂の浮遊機構を調べる上で外力としての底面におけるこのせん断力の評価は重要であるが、この領域では実験的な流速の計測が困難であるため明らかにされていない。著者等は高精度数値スキームを使った計算法により、大規模な砕波に対する流速場をほぼ再現することに成功した。本研究では、座標系を傾けることで底面勾配に対応させ、底面に働くせん断力を計算している(渡部ら、1996)。

図7は2度目のplunging point 付近のせん断力分布の一例を示したものである。波の条件はクノイド波で初期相対波高0.41楕円関数の母数0.98である。jetの突入で生成され水平渦に強いせん断力が集中しているが、底面近傍にも比較的強いせん断力が分布する。

図8は、底面近傍のそれぞれの高さにおけるせん断力の分布を示したものである。底面近傍では、岸沖方向にいくつものピークを持った複雑な分布となっており、底面砂に働く外力として、急激な力を与えられと考えられる。また底面極近傍(底面から法線方向に0.015y/hから0.045y/h)において、大規模渦の直下が大きなせん断力の変化が現れており、砂の巻き上げに大きく関わっているのが再確認できる。一方、図9に示す圧力分布の同様な図から、圧力は岸沖及び底面と法線方向に滑らかに分布しており、局所的な砂の巻き上げには、影響を与えないと言える。こうした急激な応力変化と砂の浮遊を結びつけるにはさらに詳細な解析が必要である。

4. 結論

○戻り流れが砕波後に与える流速を考察した。一般に2次元的な分布を持つと考えられる戻り流れは、砕波帯内の

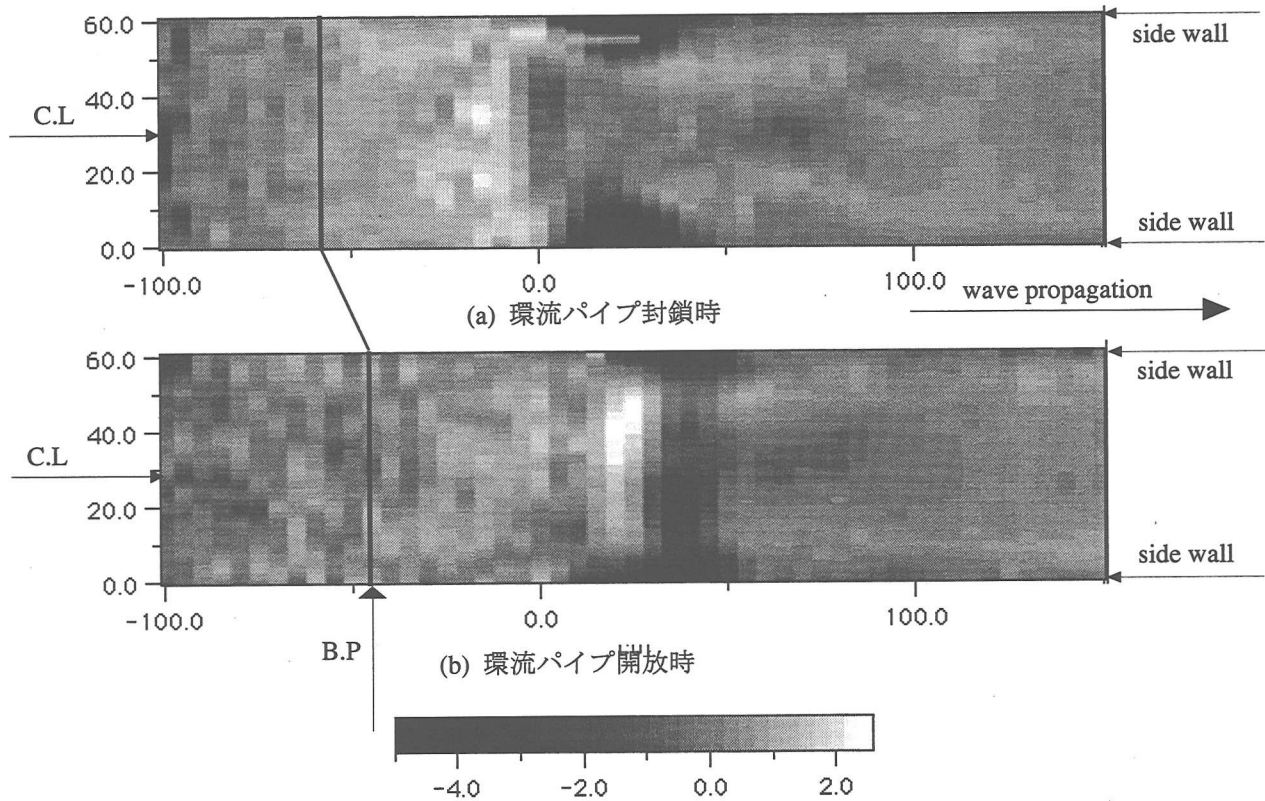


図5 底面地形侵食 (plunging Breaker, 造波開始後6分)
($H_b=13\text{cm}$, $h_b=14\text{cm}$, $T=2.4\text{s}$)

流速場への3次元性に寄与する。

○こうした時間平均流は海底部の侵食速度を増加させ、2次元水路で側壁付近の侵食を中心とした3次元的地形侵変化に寄与する。

○これらの結果と実海域における離岸流と海底地形の関係を調べていく必要がある。

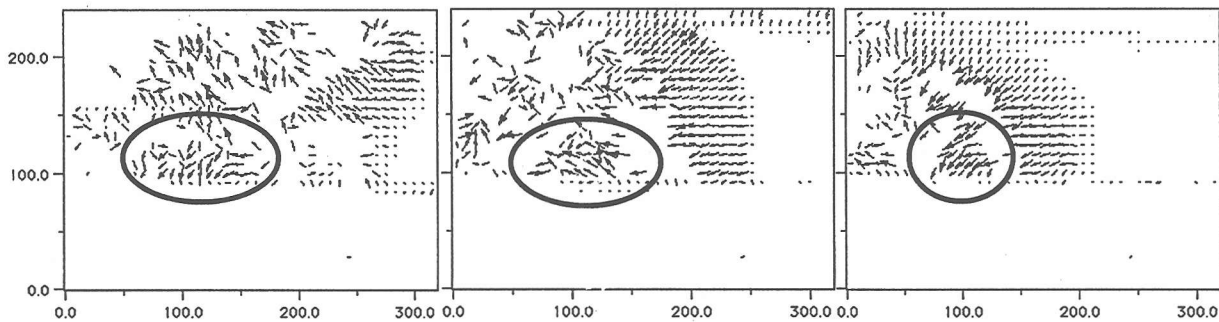
○動画画像処理により浮遊砂の移動速度を試験的に解析し、大まかな砂の移動をとらえることができた。

○この解析により浮遊砂の大まかな運動はとらえることが可能であることがわかった。しかし現実的な適用を考えればさらに高精度化をする必要がある。

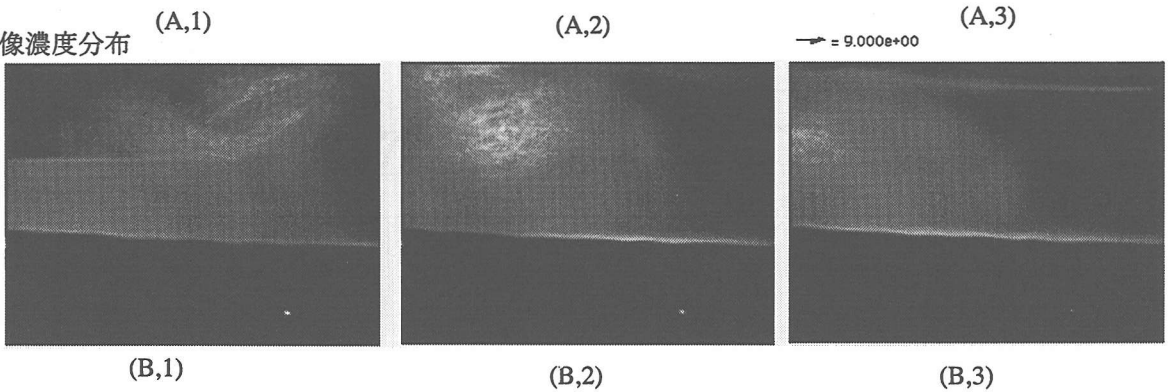
○数値シミュレーションにより、流速場を求め、底面近傍におけるせん断力分布を調べた。Plunging Breaker においては急激に底面近傍の応力が変化する複雑な空間分布となる。砂の浮遊のメカニズムを考える場合、さらに詳細な解析が必要となる。

○砕波後の流体運動を扱う上では3次元性を考慮する必要があるため、今後3次元シミュレーションによりさらにこれを調べていく。

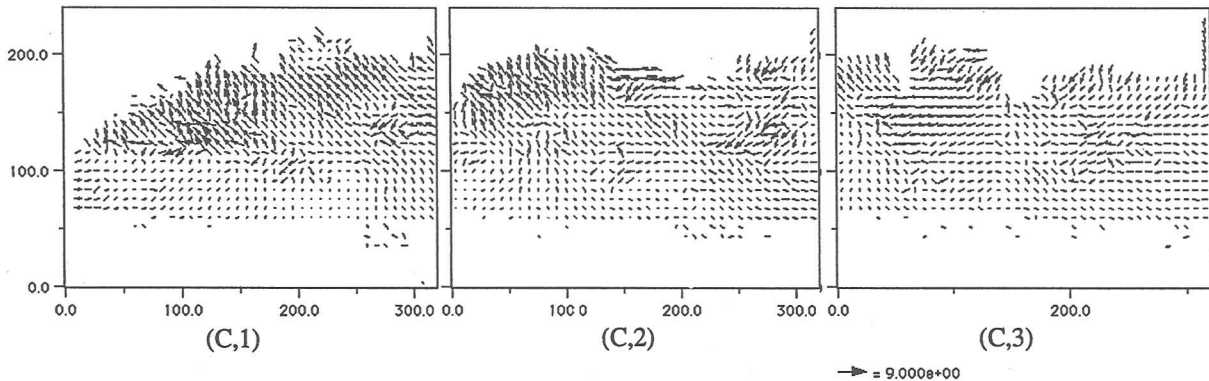
(a) 浮遊砂速度ベクトル



(b) 画像濃度分布



(c) 中立粒子を用いた流速ベクトル



← wave propagation

図6 画像処理結果 (plunging point)
($H_b=13\text{cm}$, $h_b=14\text{cm}$, $T=2.4\text{s}$)

参考文献

渡部 靖憲、森 憲広、黒木 幹男、佐伯 浩;砕波帯内における流れと流体の乱れに関する考察;海洋開発論文集,pp37-42,1996

渡部 靖憲、佐伯 浩;画像処理による砕波帯内の運動機構に関する考察;第42回海工論文集,pp116-120,1995

日野 幹雄、灘岡 知夫、小俣 篤;砕波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について;第36回海工論文集,pp1-5,1984

森 憲広、渡部 靖憲、稲垣 啓、佐伯 浩;砕波帯内の砂質底面の3次元的侵食と浮遊砂について;土木学会北海道支部論文報告集, pp. 110 - 115, 1996

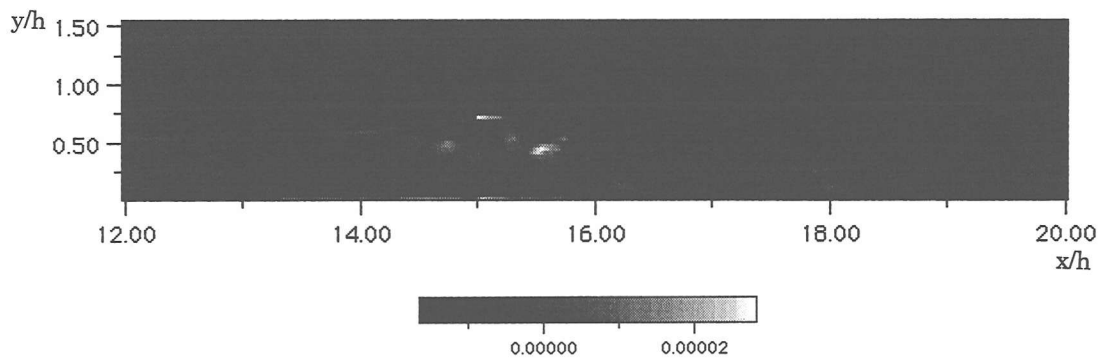


図7 せん断力分布 ($H/h=0.41, m=0.98, \text{Plunging Breaker}$)

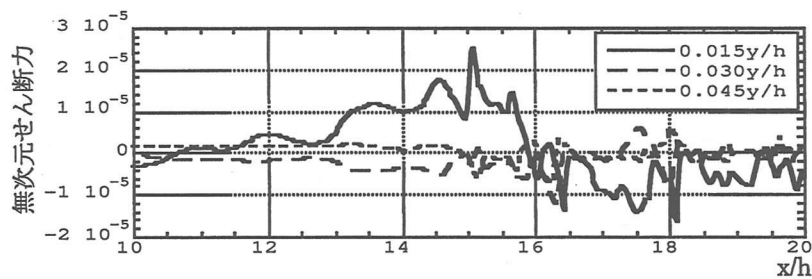


図8 底面近傍のせん断力分布

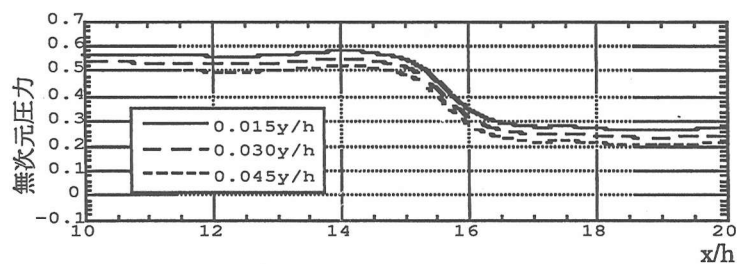


図7 底面近傍の圧力分布