

巻き波型碎波に伴う流速場と底質の浮遊に関する研究

仲 座 栄 三*・津嘉山正光**・川 満 康 智***・吉 田 忍****

1. はじめに

碎波帯内は、波の波高や内部流速が劇的に変化するところである。このあまりにも劇的な波高の変化は、沖側からは予想だにできないような水理現象を碎波帯内に引き起こしている。例えば、海浜流、水位上昇、乱れ、大規模漂砂など、波高変化が急激であればあるほどその様子は著しい変化を伴う。

見た目に碎波帯を特徴づける「白く泡立った領域」、すなわち大量に気泡が混入し激しく乱れた領域は、ポテンシャル波動理論に基づく流体力学の華麗な展開を常に拒み続けている。例えば、最もシンプルな課題である碎波による波高減衰に関してさえも、これまでに導出されている理論や計算モデルは流体力学的に見れば非常に未熟な状態にあると言える。このことは碎波帯内の水理現象理解が未だ十分でないことから来ており、なんとと言っても碎波帯内の流速測定の困難さに起因している。

これまで、多くの研究者により、碎波帯内の水理現象解明が試みられている。しかしながら、大量に気泡を含み激しく乱れる碎波帯では、流速の乱れの測定はおろか、平均流速や水表面形状さえも十分に把握されているとは言いがたい。特に、巻き波型碎波時には、大量の気泡が水底付近まで深く入り込み、さらに気泡は波峰通過後も渦などにトラップされた形で水中に長時間滞在するため、流速測定が非常に困難である。

碎波帯内でも気泡混入があまりないような底面付近の流速場は、電磁流速計やドップラー流速計など流速測定技術の進歩と共に、乱れ成分も含めて解明がかなり進んできている。しかし、こうした気泡混入のない領域は、いわば碎波によって生成された乱れの拡散・消散領域であり、やはり碎波帯内の水理現象理解のためには、乱れの直接的なソースとなっている気泡混入領域の測定が必要不可欠と言える。

本研究においては、大量に気泡が混入している領域の

測定に超小型プロペラ式流速計を用い、巻き波型碎波下の流速場の解明及び砂の巻き上げ現象の解明を目指す。

2. 実験装置及び方法

実験装置の概要を図-1に示す。図示のとおり、長さ27 mの二次元造波水槽の一端に勾配が1/10の斜面（海岸モデル）を設置した。沖側水深は36.0 cmである。入射波には波高8.9 cm、周期1.4秒の規則波を用いた。

波高及び水表面形の測定には、容量式波高計を用いると共にビデオカメラを用いた。流速の測定には、気泡混入のない領域では電磁流速計と超小型プロペラ流速計を併用して用い、気泡混入領域では超小型プロペラ流速計のみを用いた。超小型プロペラ流速計の適用性については電磁流速計を用いて検証した。その詳細は仲座ら(1996)に示してある。

測定は、静水状態から造波し、造波後1時間を経てから開始した。流速のデータは1点につき6000個のデータを得た（サンプリングインターバル、50 Hz）。

3. 実験結果及び考察

この実験に関して、波高の変化や平均水位の変化、戻り流れなどの1周期平均量に関しては、すでに発表済みである(仲座ら、1995)。以下では、30波の位相平均に基づく流速場の瞬間像について説明していく。

図-2に、碎波直前から碎波後、波峰が巻き込み、先行波の谷に突入するまでの流速分布を示す。図中に示す波形は、ビデオカメラを用いて読みとったものである。巻

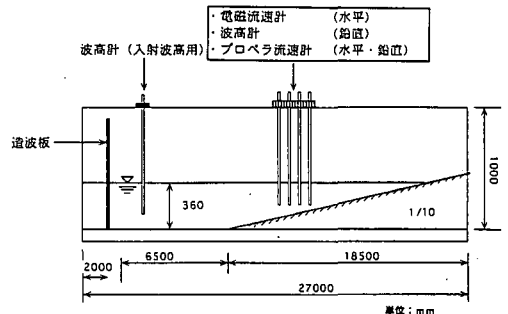


図-1 実験装置概要図

* 正 会 員 工 博 琉球大学工学部助教授 環境建設工学科

** 正 会 員 工 博 琉球大学工学部教授 環境建設工学科

*** 学生会員 琉球大学大学院工学研究科

**** 沖縄県嘉手納町役場

き込み部（ジェット）の突入と飛びだし、再突入に伴い組織的な渦が次々と形成されている。これは樫木ら（1973）によって見出された水平渦（horizontal vortex）に対応している。また、これらの渦の影響（ジェットの突入による影響）は水底まで達している。

大きく前傾化した波動流速と強い戻り流れとが波峰直前で衝突し、それが波頂付近にせり上がっている。この上向き流速とジェットの突っ込みとによって生じた噴流的な流れは、次第に大規模な渦構造を形成し、波の進行と共に拡散している。これらの渦構造は1周期内で殆ど拡散・消滅している。

Pedersen ら（1995）は、巻き波型碎波と砂粒子の拡散のシミュレーションを行っているが、彼らの計算では渦構造が長時間残っており、全体的に見ても本研究で得られたパターンと大きく異なっている。

4. 砂粒子移動シミュレーション

砂粒子の移動は、流速データが与えられれば、粒子の運動方程式を直接数値計算することでシミュレーションできることになる。しかし、これまで見てきた流速分布は電磁流速計や超小型プロベラ流速形で得られたデータは位相平均値であること、さらに生データで見ても測定器の応答性の問題から、流速の乱れ成分までを十分に測定し得ていない。砂粒子の拡散に関しては、流速の乱れ成分が必要であり、ここでは乱流モデルを用いて位相平均流速データから乱れ成分を予測することにする。

前章で見たとおり、渦の生成と拡散は波の進行につれて時間と共に変動している。すなわち、乱れの予測には、乱れの生成と消散とが時間的・場所的に変動するような方法を用いなければならないと考えられる。しかし、ここでは問題を簡単にするために、局所的な乱れの生成と消散とが釣り合っているという仮定を設ける。

N-S 方程式から乱れの運動エネルギーを導き、乱れの生成項と消散項とが等しいとき、さらに拡散に関して平均量の勾配型モデルを用いると次の関係式が得られる。

$$\nu_t = C_\mu \sqrt{kL} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P = \epsilon \quad \dots\dots\dots (2)$$

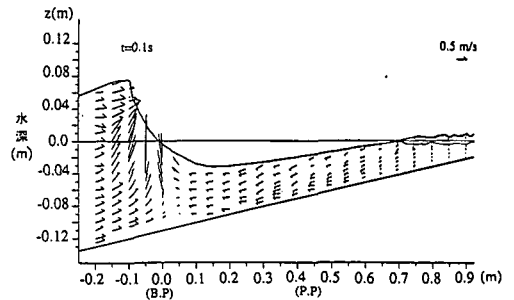
$$P = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}; \quad i, j = 1, 2 \quad \dots\dots (3)$$

$$\epsilon = C_\epsilon \frac{k^2}{L} \quad \dots\dots\dots (4)$$

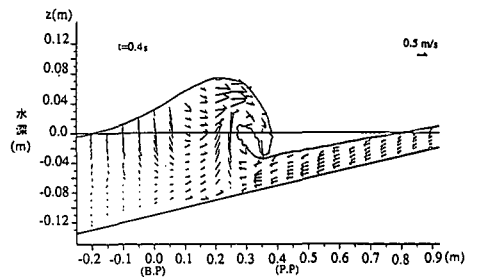
$$K = B_1 \frac{2}{3} L^2 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 k はカルマン係数、 ν_t は渦動粘性係数であり、Kolomogorov-Prandtl にならった。また、 K は乱れの運

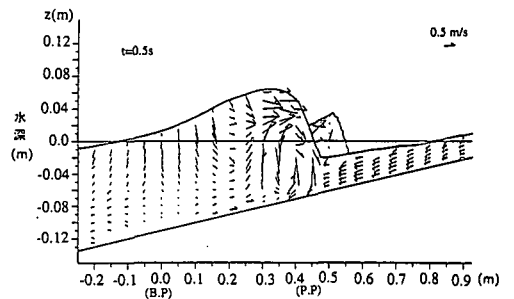
動エネルギー、 p は生成項、 ϵ はエネルギー消散項である。また、 C_ϵ 、 C は係数である。係数 B_1 は、Mellor &



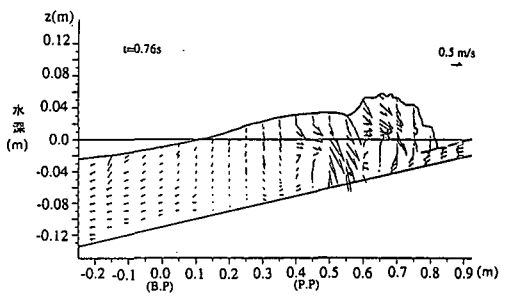
碎波点からの距離 x (m)
(a) $t = 0.1$ s



碎波点からの距離 x (m)
(b) $t = 0.4$ s



碎波点からの距離 x (m)
(c) $t = 0.5$ s



碎波点からの距離 x (m)
(d) $t = 0.76$ s

図-2 碎波帯内の位相平均流速ベクトル

Yamada にならい, 16.6 とした。

これらをまとめると, 乱れの運動エネルギーが次のように位相平均流の勾配と代表長さ L とから求められる。

ここで, 代表長さをいかに設定するかが問題となる。ここでは, 混合距離理論にならい, 次のように設定した。

$$L = \begin{cases} 0.1h, & z > 0.3h \\ kz, & z \leq 0.3h \end{cases} \quad (6)$$

ここで, h は水深, z は水底からの距離である。

以上の関係式を用いて, 位相平均流速データから乱れ強度が得られることになり, これから乱れの等方性を仮

定して, 乱れの速さを予測することが可能となる。これに, 正規分布に従う乱数を加えて乱れの速度成分とした。また, 砂粒子の径を 0.2 mm とし, 沈降速度は 2.53 cm/s の値を一様に与えた。

砂粒子の移動は運動方程式を解くのではなく, 砂粒子の移動をパフの移動として捉え, ラグランジュ的な粒子の追跡を行った。

砂粒子の放出は, 流速データの計測の問題から, 底面上 5 mm に位置する計算格子上で行った。数値計算では時間刻みを $dt = 0.01 \text{ s}$ としており, 砂粒子は全ての海底

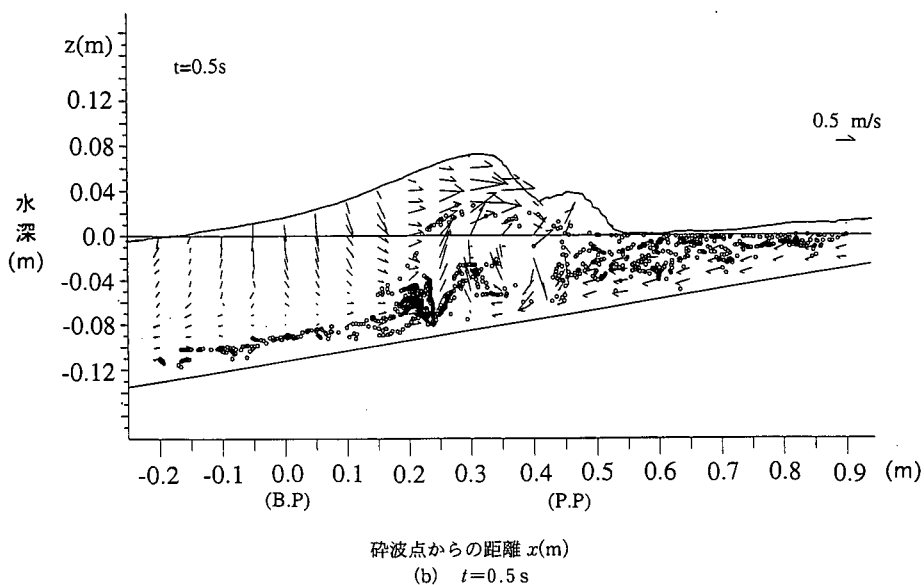
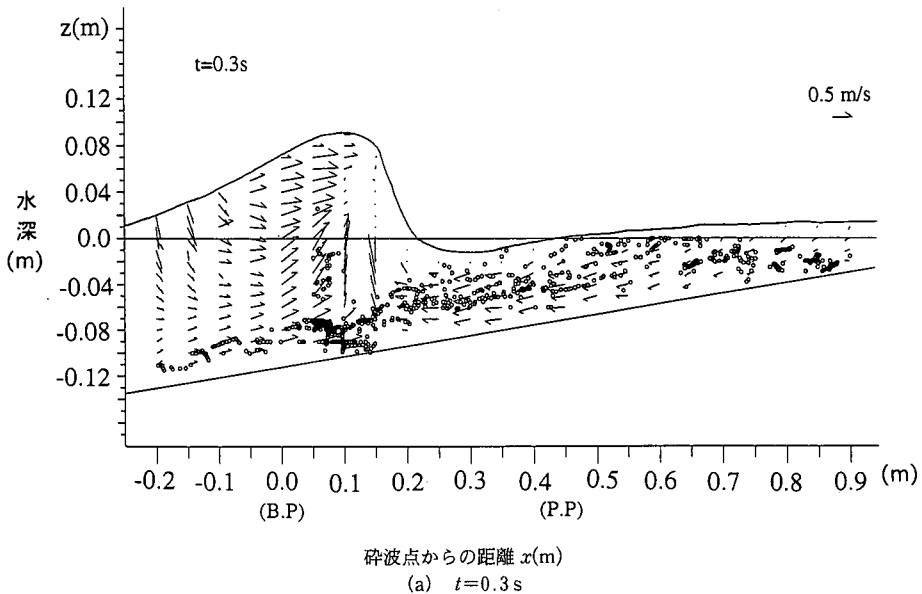


図-3 流速ベクトル及び砂粒子の移動

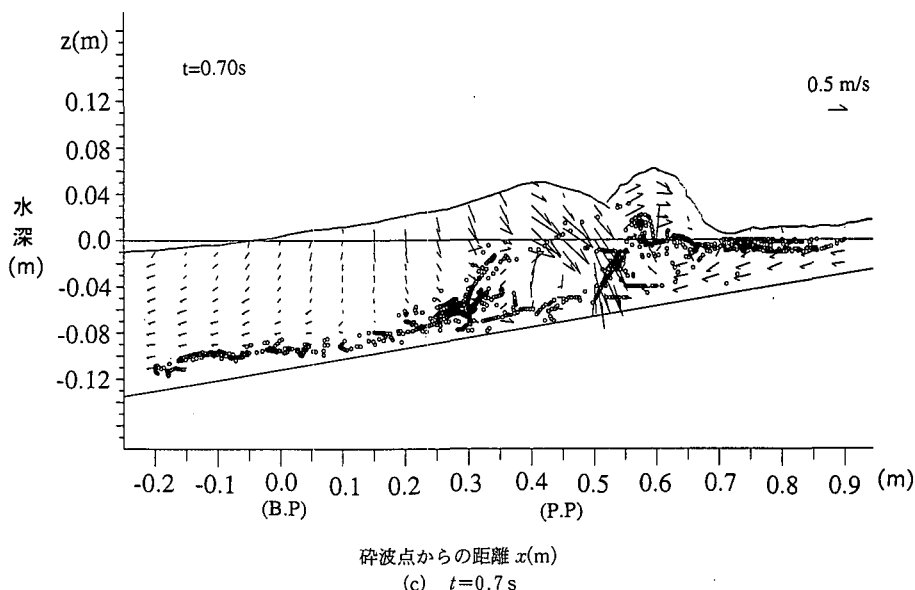


図-3 流速ベクトル及び砂粒子の移動

面（放出点）から dt 毎に1個ずつ放出させた。

図-3に、砂粒子の移動に関するシミュレーション結果を示す。図は瞬間像を示しており、○印が粒子の位置を意味する。

砕波が始まると同時に波峰直下で砂粒子の巻き上がりが見られる。さらに、先行する波の乱れの影響で、波の前面の谷の位置でもかなりの拡散が見られる。砕波直前のようにかなり波が前傾化している場合、波峰直下では底面境界層から渦塊が巻き上がることが灘岡・八木(1988)の数値計算で示されているが、ここに示す現象はそれよりも遙かに大きな現象であるものと判断される。図(b)は、波峰の巻き込み部が突入した瞬間に対応するが、水平渦に砂粒子が巻き込まれて拡散している。さらに、第二の水平渦によっても砂粒子が巻き込まれ移動している。

ここでは示していないが、波通過後の突っ込み点付近で巻き上がっていた砂粒子は、ポテンシャル流速と自らの沈降速度で降下し、海底付近に戻される。灘岡(1987)らは、巻き砕波の波峰通過後に底面に達した渦によって巻き上げられた砂粒子が、気泡の密度効果による上昇流で水表面に輸送され、それがパッチ状の砂雲を形成することを報告しているが、本シミュレーションではこうした現象までは現れていない。

図-4は、鉛直方向に積分された砂粒子の個数(dn)の時間変化 dn/dt の内 dn の値を示している。図示のとおり、波動流速と戻り流れとが収束し、上昇流を形成するところで、砂粒子の収束が生じている。突っ込み点直後では噴流的な流れと水平渦の効果で侵食が生じ、第二の

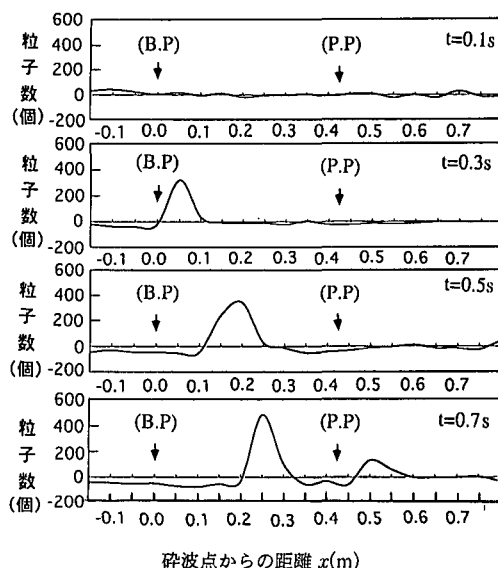


図-4 砂粒子の個数の時間変化

水平渦との間に堆積の第二ピークが生じている。また、砂粒子の分布を砂面と捉えた時、その形状は非対称形となっている。

ここで示した計算手法は簡易的なものであり、必ずしも乱れの影響を精度良く表しているものでない。しかしながら砂粒子の移動は移流による効果が大きく、ここで示した砂粒子の全体的な移動パターンはかなり信頼できるものと考えられる。

Zhang & Sunamura (1996) は、砕波に伴う渦の形成

と移動床の変形とを詳しく調べている。その中で、砕波帯内のバーの形成は渦の形成と深く関わっていることを示している。彼らの結果は、本研究の成果と定性的に良く一致している。

5. おわりに

最近、数値計算手法の開発や計算機の進歩と共に、砕波も含めた波動場の数値計算が精力的に行われるようになってきている。特に、MAC法などによる砕波の直接数値計算は、砕波による水塊の飛び出し・突入までを計算できるようになっている。しかしながら、これらの計算値を検証するためのデータは十分でなく、数値計算手法の開発が一人歩きする危険性がある。そのような状況下、これまで気泡を大量に含んだ砕波帯内の流速場の全体像を実験的に示すことができた。これらは、筆者らが開発した超小型プロペラ流速計による計測システムを用いた研究成果の一部である。

本研究の成果は、乱流数値シミュレーションなどでDNSによる計算結果が計算モデルの検証やチューニングのためのデータベースとして利用されると同様に、砕波の計算モデルの検証などにも利用できると思われる。

今後、他の砕波パターンや3次元的な渦構造の解明を含めて、データの信頼性を高めて行く予定である。

本研究の実験には、当時水工学研究室の学生であった宮里一郎、榎本真久両君にご協力頂いた。また、現水工学研究室の大城要文君には図面の作成などのご協力を頂いた。乱流理論の適用に関しては、清水建設(株)技術研究所の孟岩博士に貴重なご助言を頂いた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 榎木 亨・岩田好一朗・松本 昇 (1973): 砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 565-570.
- 柴山知也・樋口雄一・岡安章夫 (1985): バックウォッシュと巻き砕波による砕波帯内流速場の構造, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 302-306.
- 柴山知也・堀川清司 (1985): 砕波による底質の浮遊, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 302-306.
- 仲座栄三・河野二夫・宮里一郎・天野和宏 (1995): 波の砕波変形と質量輸送量及び undertow に関する研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 71-75.
- 仲座栄三・津嘉山正光・宮里一郎・榎本真久・川満康智 (1996): 巻き波型砕波に伴う組織的乱流構造に関する研究, 琉球大学工学部紀要, 第52号, pp. 51-56.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 砕波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 21-25.
- 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男 (1981): LDAを用いた砕波帯内の流速場に関する研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 24-28.
- 灘岡和夫・八木 宏 (1988): 渦系子法による波動境界層の数値シミュレーション, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 16-20.
- 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.
- Mellor G. I. & T. Yamada (1974): A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, J. of Applied Meteorology, Vol. 13, No. 7, October, pp. 1791-1806.
- Pedersen C., R. Deigaard, J. Fredsoe, and E. A. Hansen (1995): Simulation of sand in plunging breakers, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engg., ASCE, pp. 77-87.
- Zhang, D. P. and T. Sunamura (1996): Multiple bar formation by breaker-induced vortices, Proc. 24th ICCE, pp. 2856-2870.