

斜面上の砕波変形過程の内部特性とその数値解析

滝川 清*・山田文彦**・有元光久***・田渕幹修****

1. ま え が き

斜面上の砕波変形現象に関して、従来より多くの理論的、実験的研究が行われ、特に近年の LDV (あるいは FLV) や VTR 装置などの計測技術の発達に伴って、砕波の乱れや渦構造などエネルギー逸散の機構に関する多くの知見が得られている。しかし砕波現象は多量の気泡を連行する変化の激しい現象であり、実験的にその機構を十分解明するには限度があると思われる。実験に代わる方法として数値解析がある。砕波時の流体塊の突入前まではポテンシャル運動として扱うことが可能で、Longuet-Higgins, Cokelet (1976) を始めとする周辺積分法 (BEM)、滝川ら (1983) の有限要素法 (FEM)、また、等角写像法を利用した日野・灘岡 (1983) の共形変換法などがある。しかし砕波の水塊の突入後の乱れ、渦の発生、消滅の変形過程は非ポテンシャル運動であり、粘性流体を対象とした解析が必要となる。現在の所、砕波後の運動を計算したものとしては差分法の MAC 法を利用した Miyata ら (1986) の TUMMAC 法、酒井ら (1987) 及び滝川ら (1989, 1990) の SMAC 法などの 2, 3 の例があるのみである。

本研究は斜面上砕波の変形過程を砕波前から砕波後を含めて計算できる砕波の数値シミュレーションシステムの開発をめざしたもので、砕波実験を行って砕波時のエネルギー逸散の数値モデルを検討し、SMAC 法の改良特に従来より問題とされていた水塊突入後の計算処理などを行ってその適用例と共に砕波変形過程の内部特性に関して報告するものである。

2. 砕波の内部特性に関する実験的研究

砕波帯における流体運動は非常に複雑であるが、近年の計測技術の進歩により直接内部流速の測定などを行い、砕波の内部構造を解明しようとする研究が数多く行われている。酒井ら (1983)、青野ら (1984)、日野ら

(1984)、三村ら (1984) を始めとする L. D. V を用いたその後の一連の研究は、砕波によって生じる大規模渦及びそれが崩壊した後に生じる乱れの構造に関するものである。また、VTR 装置を用いて酒井ら (1985) は水塊の突入と渦の挙動を調べ、堺ら (1986) は、酒井らが指摘した渦の生成サイクルと気泡連行深の関係を調べ、山下ら (1988) は水平渦の生成と移動の関係を調べ、西村ら (1988) は VTR 画像処理により砕波流速の推定を試みている。本研究では、砕波に関する従来の知見に加えて、更に数値計算を行う際の砕波に伴うエネルギー逸散の数値モデルを検討することを目的の一つとして 2 次元電磁流速計 (東京計測(株); SFT-200-07L) を用いて砕波帯の流速測定を行った。

実験は 図—1 に示すように長さ 38 m、幅 0.5 m の片面アクリル張り 2 次元造波水路中に勾配 1/20 のアルミ板斜面を設置した。入射波としては周期 2.08 s、入射水深 48.3 cm、入射波高 18.5 cm、沖波波形勾配 0.0283 の規則波を入射させ、砕波波高水深比は 0.927 の典型的な Plunging 型砕波である。

流速の測定範囲は、波峰の第一突っ込み点より沖側 4 cm から岸側 50 cm の水平 54 cm の区間、鉛直方向には静水面上方 10 cm から下方へ 18~22 cm の区間とし、この範囲を 2 cm×2 cm のメッシュで合計 444 点の測定点を配置した。各測定点ごとに 30 波分の流速データから位相平均流速を求めると共に、各測定間の位相は同時に計測した水位変動の記録より同期させて求めた。なお、流速及び波高のデータはサンプリング間隔を 0.05 秒として解析した。得られた流速データの中にはセンサーが空中に露出期間のものや、センサー部分 (直径 7 mm) による乱れ、あるいは気泡の影響があるものが含まれている。センサーが空中に露出する期間については水面の位置のデータより判断し、用いるデータから除外したが、センサー部に起因する乱れや気泡の影響が含まれるものについては、これを通常の流速変動と区別することは難しく流速データにはこれらの影響が残されたままであり、この意味では定量的には十分な精度は有していない。図—2 は、このようにして得られた第一突っ込み点

* 正会員 工博 熊本大学助教授 土木環境工学科

** 正会員 工修 (株)熊谷組 四国支店

*** 正会員 工修 水資源開発公団

**** 正会員 熊本大学講師 土木環境工学科

以浅での位相平均流速の空間分布を各時刻ごとに示したものである。計測精度の割には、下層部ならびに波峰後部の波動的流況や、波峰前面のボア内部の流況を比較的良好く計測できているようである。これらの流速データを基に、渦度 $\omega = (\partial u / \partial y - \partial v / \partial x)$ を各測定点間の差分により求めたのが 図-3 である。x 軸は岸方向（左向き）、y 軸は鉛直上向きのため、 ω は時計回りが負の値を取る。 ω の値は視覚的にとらえ易いように各測点での円の大きさを表している。これらの図から平均の Trough level 付近より上層部の surface layer(山下ら, 1988) では、砕波の前面部分では常に新しい大きな渦が次々と現れ、これらは波峰の通過と共にすぐに小さくなるが、波峰の第一突っ込み点で生じた水平渦は波峰通過後も残存し岸側へ移動する様子が分かる。

図-4 の各図は、図-1 中に示した各位置での水位、渦度、歪度、及び Reynolds 応力項 $(-\rho u'v')$ の時間変化を示したものである。Trough level より下層部ではこれらの値は小さくその時間変動は波運動として解釈できるが、上層部の Surface layer では各々の絶対値が最大となる出現位相はほぼ水位変動と一致し、また各々の相関性が高いことが分かる。以上の実験の結果、三村ら(1984) が示したように砕波帯の流速場が非回転の波動流速成分と回転性の強い渦度成分の重畳、すなわち Surface layer 内の非ポテンシャル領域とそれより下方のポテンシャル領域として考え得る点が確認される。更に Surface layer におけるエネルギー逸散は、渦度、歪度と強い相関にあり、また、流体塊の突っ込みに伴う大きな渦度の発生、移動と関連しており数値モデルの検討にはこれらを考慮する必要がある。

3. 砕波変形過程の数値シミュレーションシステム

砕波の時点までは、ポテンシャル理論に基づく有限振幅波として解析可能であるが、砕波後の変形過程については粘性流体を対象とした解析を行う必要がある。ここでは、酒井ら(1987)と同様に滝川ら(1983)の FEM 解析結果を初期条件とした SMAC 法を用いる。斜面上砕波過程の数値シミュレーションシステムとして、別途計算された FEM 解析結果より、SMAC 法計算のための初期条件及び左右両境界の条件を補間してこれらをコンピュータより直接入力できるようにすると共に、従来より問題であった波峰部流体塊の突入後の処理や砕波過程でのエネルギー逸散の数値モデルを導入し SMAC 法の改良を図ったものである。

(1) 衝突セル

MAC 法では解析領域を微小な領域（セル）に細分しあらかじめ流体域に配置した粒子（マーカ）によって、流体域の判別（フラグging）を行って計算する。従っ

てセルには、マーカのないセル（空セル）、空セルに接するセル（表面セル）および流体で満たされたセル（流体セル）に区別される。流体塊の突入のような場合には、表面セル同士が接近する事になるが、従来の MAC 法では、この表面セルに挟まれると流体セルと見なしてしまうため、突入後も空気を含んだ様な結果になる。ここでは、これを防ぐため、表面セル同士の突入の場合、マーカがセル内で十分に接近するまでは表面セルと同様の扱いをする衝突セル（col cell と呼ぶことにする）を考案し、フラグging のアルゴリズムに加えている。

(2) 数値モデル

SMAC 法は、基本的には流体の連続式および N-S 方程式を差分法により解く解法で、移流慣性項の差分には通常 2 次の風上差分（Doner-Cell 法）が用いられる。砕波のような激しい流動運動を精度良く計算するには、移流項の正確な評価が重要であるが、このためには非常に細かな格子間隔と時間刻みが必要とされる。ここでは砕波に伴うエネルギー逸散項を先の実験結果等から推定し SMAC 法に取り込む事にした。

砕波時の渦運動や乱れに伴うエネルギー逸散を Reynolds 応力項 $(-\rho u'v')$ として評価する事にすると、これは 図-4 などからも明らかのように、渦度、歪度と密接に関連しており、従来の Plandtl 型の表現を用いて

$$-u'v' = (\alpha l)^2 \left| \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{1/2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 α は定数で今回の計算では $\alpha = 0.005$ とした。また l は混合長を意味し従来では砕波の波高や水深等が用いられたが（樫木, 1973）、ここでは実験結果より分かるように、砕波時には、気泡を多く含み乱れの激しい点で渦度の絶対値が大きくなる事から、渦度と微小要素の面積の積 $\omega \cdot A$ 、つまりある点での循環値 Γ をその点の流速で割った値とし、渦の半径という概念で取り扱う。

$$l = \frac{\Gamma}{u} = \frac{1}{u} \int \omega_n dA \div \frac{\omega \cdot A}{u} \dots\dots\dots (2)$$

また、砕波時の流体塊の突入等に伴う、乱れの急激な変化に対しては、歪度 γ の時間変化項が関与すると考えこれを、Reynolds 応力項と対比して記述すると下記の通りである。

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} (u'v'_i) \equiv \beta \cdot |l| \frac{\partial}{\partial t} (\gamma) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 β は定数で今回の計算では $\beta = 0.008$ とした。

本来、乱れのエネルギー逸散を評価する上では、乱れの輸送方程式を考慮し、Reynolds 方程式と関連させた応力方程式モデルとして考える必要があるが、ここではモデルの簡便さの点で Reynolds 応力項を直接評価する方法を用いたものである。なお、流体抵抗の意味からは

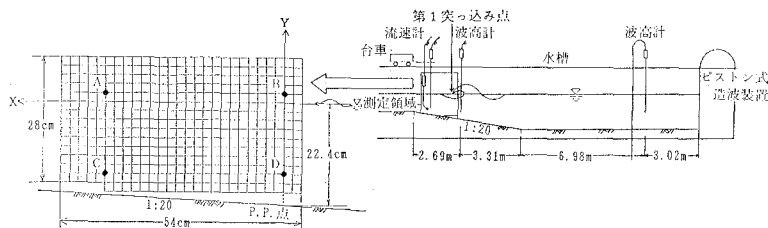


図-1 実験装置

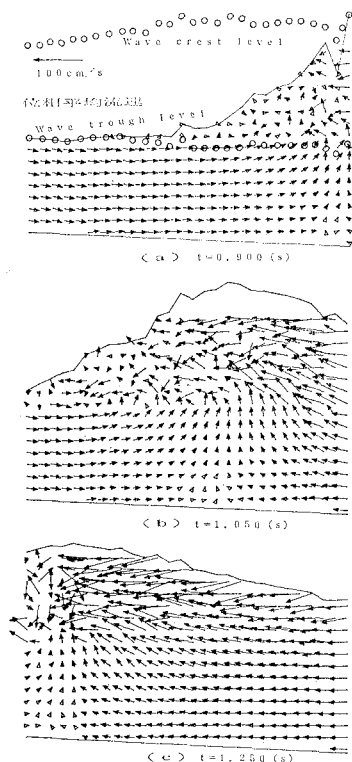


図-2 位相平均流速

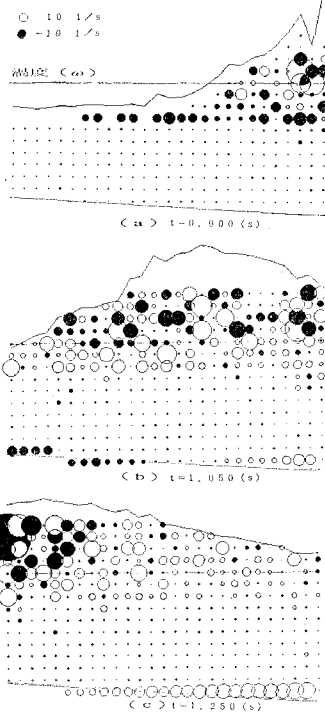
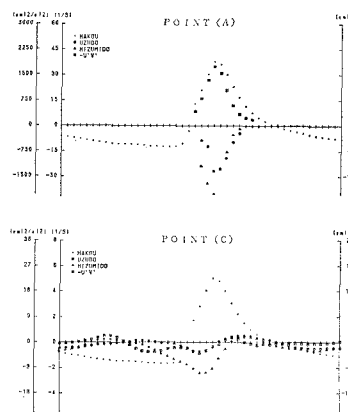


図-3 渦度分布


 図-4 渦度, 歪度, $-u'v'$, 水位の時間変化

式 (1) は速度 2 乗に比例する抵抗, 式 (3) は加速度に比例した抵抗という事になる。

4. 数値計算結果

計算領域は 2 次元領域の計算を行う。このため運動の 3 次元性に起因する現象は再現できない。斜面に沿って x 軸を取り, これと直行して y 軸を取る。したがって, 重力加速度は x 成分を有する。SMAC 法で用いる計算セルの大きさは x 方向に 2 cm, y 方向に 1 cm とし, 計算の時間刻みは安定条件から 0.003 s とした。計算の初期条件は FEM の砕波直前の流速の結果を用いるが, FEM と SMAC 法の計算メッシュが異なるため, SMAC

用に計算データを補間して用いる。この一連の操作はコンピューターにより直接入力できるようになっている。

図-5 は先の実験条件と同一の数値シミュレーション結果で, 各時間ステップのマーカー粒子を描いたものである。左右の解析境界上で FEM 結果を逐次補間入力できるように計算アルゴリズムを作成し計算し

た結果である。計算の初期状態からの時刻 $t=0.5$ s での第一突っ込み点で, 底面からの波峰高さや巻き込み jet 内の空洞高さは実験ではそれぞれ 37.6 cm, 4.7 cm, 数値計算では 40 cm, 5 cm であり, その後の第 2 渦, 第 3 渦の発生状況も実験の VTR 画像と良く一致しており砕波変形過程が良好に再現できていることが分かる。

図-6 の各図は砕波の数値モデルを比較したもので, (a) 図は従来の SMAC 法による結果, (b) 図は式 (1) の Prandtl 型 (モデル 1), (c) は式 (3) の歪度の時間項 (モデル 2) によるエネルギー逸散項を考慮した場合である。図は時刻 $t=0.7$ s でのマーカー粒子と波先付近での渦度を示している。第 2 の渦の生じる時刻である

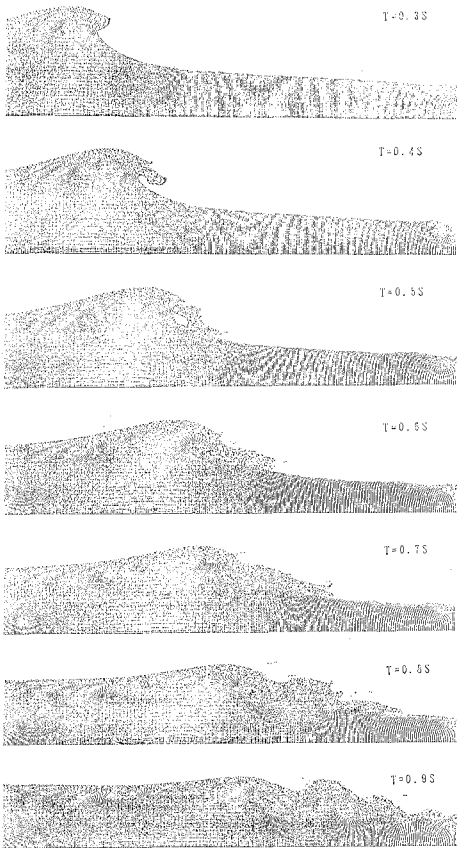


図-5 砕波過程の数値計算 (マーカー粒子)

が、モデル1、モデル2を考慮すると、波先部での粒子の飛び出しが小さくなり、渦の形成状態もより強調され、より実験に近い状態で計算できモデルの妥当性が伺える。図-7は、周期 $T=2.5\text{ s}$ 沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.0083$ 、砕波水深 $h_0=13.4\text{ cm}$ 、砕波波高 $H_b=11.3\text{ cm}$ の波が $1/20$ 勾配上で Plunging 型砕波をする過程の数値計算結果で、波先近傍での圧力分布を示している。図(a)の時刻 $t=0.4\text{ s}$ では、巻き込み jet の内部には負圧 ($-200 \sim -300\text{ cm}^2/\text{s}^2$) が生じている。この時の水粒子加速度は $4\text{ G} \sim 5\text{ G}$ となっており、重力加速度を大幅に上回っている。しかし、 0.1 s 後の衝突時には水粒子加速度は 1.5 G となることからこの現象は非常に過渡的なものと考えられる。図(b)は水塊突っ込み時であるが、この時の最大波圧は $8.1 \times 10^3\text{ cm}^2/\text{s}^2$ 程度と計算され、直立堤の砕波波圧公式 (Minikin 公式) に実験条件を当てはめると衝撃波圧は $8.5 \times 10^3\text{ cm}^2/\text{s}^2$ となり計算結果とほぼ一致する。図(c)は水塊が突入後ボアを形成し始める時点で、図でも複数の波圧のピークが出現する。波圧の最高値は $1.1 \times 10^4\text{ cm}^2/\text{s}^2$ となっており、衝突時よりも大

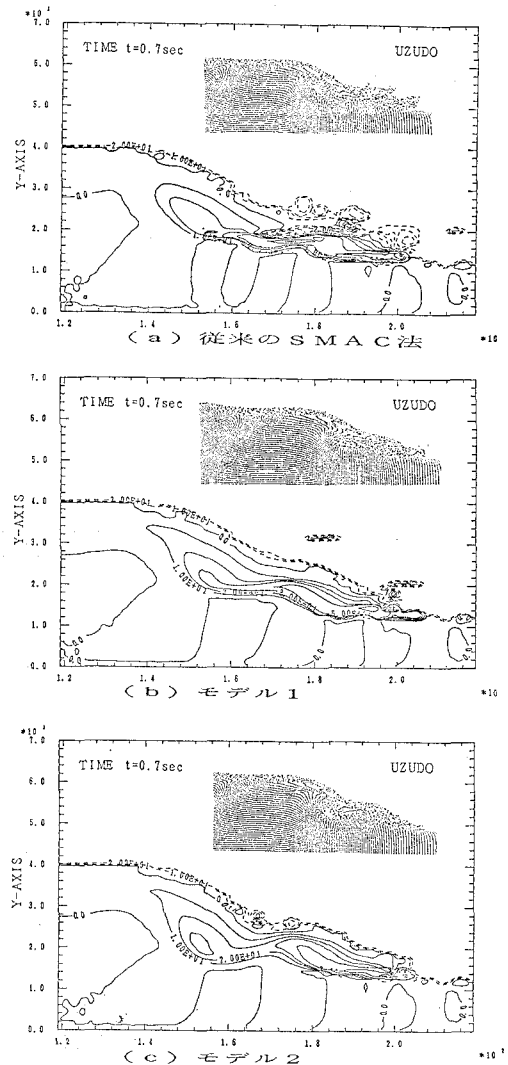


図-6 数値モデルの比較

きな波圧が出現しており、一般的に言われるように巻き込み jet の着水時ではなく Bore の発生過程において最高波圧が生じている。また、図示していないが図-7の各時点での水粒子の全エネルギー (速度水頭と位置水頭の和) を調べると図(a)では jet 先端部に高いエネルギーが集中しその最高値は 33 cm 程度である。図-7(b)では、衝突により Bore の中央部、先端部スプラッシュ前面に極値が存在して、大きさはそれぞれ 35 cm 、 35 cm 、 30 cm であり衝突により 5 cm 損失しており、第一突っ込みによるエネルギー損失率は約 14% と計算される。図(c)では Bore 後部で比較的一様で 25 cm 程度、スプラッシュ前面で 30 cm 、また波圧最高点では 40 cm 程度を有しており、これらエネルギーの分布状態が第2渦以降の流体運動を支配していくことになる。

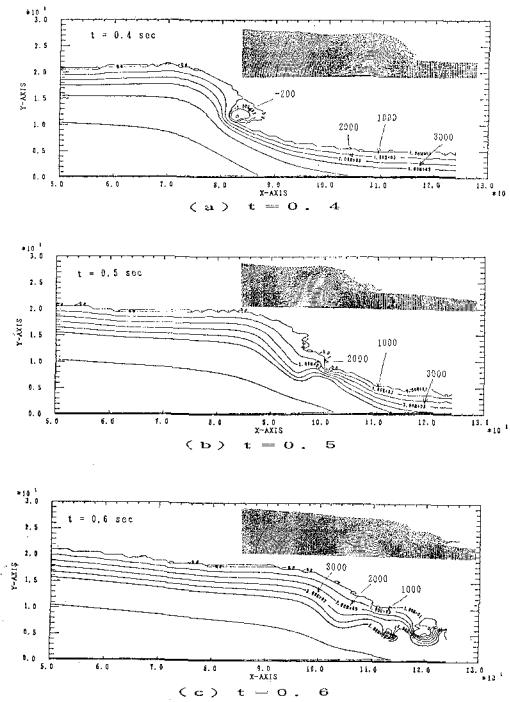


図-7 波圧分布

5. あとがき

斜面上を進行し、砕波変形する過程の一環した数値計算システムを開発したもので、計算も十分な精度を有しており波変形及び砕波機構に関する詳細な検討が可能となり、この適用計算によって今後多くの知見が得られるものと思われる。しかし、空気混入や乱れの3次元性など今後解決すべき問題も残されている。また、任意海底形状や構造物による砕波機構も重要な課題であり、現在その数値シミュレーション手法の開発も進行中である。

最後に、この研究の一部は、文部省科学研究費一般研

究B（代表：熊本大学工学部，三池亮次），一般研究C（代表：熊本大学工学部，滝川清）によったことを付記する。

参考文献

- 酒井哲郎・三反畑勇(1983): 砕波による乱れのレイノルズ応力について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 30-34.
- 酒井哲郎・田中秀明(1985): 斜面上の砕波における水塊の突っ込みと渦の挙動, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 酒井哲郎・水谷太作・田中秀明(1987): 斜面上の巻き波型砕波の砕波後の運動の機構の数値解析, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 71-75.
- 堺 茂樹・佐伯 浩(1986): 砕波後の波の変形と気泡連行深に関する研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 16-20.
- 榎木 亨(1973): 砕波特論, 水工学シリーズ 73-B-2, 土木学会水理委員会.
- 青野利夫・服部昌太郎(1984): 砕波下での大規模乱れ構造に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 6-10.
- 滝川 清(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(1989): 斜面上の砕波変形機構の数値解析, 昭和63年土木学会西部支部, II-6.
- 滝川 清・加行 孝(1990): 斜面上の砕波変形過程の内部特性平成元年土木学会西部支部, II-73.
- 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.
- 日野幹雄・灘岡和夫(1983): 共形変換を用いた任意断面地形形状の波動場の解析法, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 89-93.
- 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤 (1984): 砕波帯内の乱れの組織的運動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.
- 三村信男・岡安章夫・柴山知也・Preecha Kamronrithisorn (1984): Plunging 砕波によって発生する砕波帯内流速場の構造, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 11-14.
- 山下隆男・James R. Tallent・土屋義人 (1988): 砕波水平渦の生成機構と移動特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 54-58.
- Longuet-Higgins, M. S., E. D. Coklet(1978): The deformation of steep surface waves on water, Proc. Roy. Soc. London, A 364 1-28.
- Miyata, H(1986): Finite-Difference Simulation of Breaking Waves, J. Comput. Phys 65, 179-214.