

波の碎波変形と質量輸送量及び undertow に関する研究

仲 座 栄 三*・河 野 二 夫**・宮 里 一 郎***・天 野 和 宏****

1. はじめに

最近、強非線形・強分散性を有する波動方程式が提案され(例えば;灘岡, 1994), 非碎波領域では多方向不規則波に対しても極めて精度の良い計算手法が開発されている。しかしながら, 碎波帯内の波の計算へこの理論を適用しようとすると, 大きな壁にぶつかってしまう。

それは, 基本的には非回転の波動成分から回転運動を伴う渦・流れへのエネルギーの遷移プロセスに対するモデル化が未だ十分でないことに基いている。このモデル化が遅々として進展しないのは, 碎波帯内の流体運動に関する情報が十分でないことに起因しており, なんと云っても気泡を大量に含んだ流体運動の計測の難しさにある。

これまで, 数々のハイテク技術が碎波帯内の流速場の解明のための計測に持ち込まれてきた。しかしながら, 気泡を大量に含む碎波帯内では, 乱れの計測はおろか平均流の実態さえも十分に計測されていない。本研究では, 碎波帯内の平均流や波動運動の計測に超小型プロベラ流速計を導入し, その計測に成功した。

本研究では, この計測手法を用いて波による質量輸送や undertow の形成を実験的に明らかにする。さらに, 碎波に伴い形成される bore による質量輸送量や trough level 付近でのせん断流の鉛直分布を明らかにすると共に, 波動成分から渦・流れ成分へのエネルギー遷移プロセスを明らかにする。また, このことを通じて波の碎波変形と平均水位の上昇量との関連を明らかにする。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要を図-1 に示す。図示のとおり, 用いた水槽は, 長さ 27 m 幅 0.7 m の二次元不規則造波水槽である。実験では, 底面勾配 1/20 及び 1/10 の 2 種類の海底モデルを用いた。また, 流速の測定には, 2 台の 2 成分電磁流速計と 3 台の超小型プロベラ流速計を用い, 水位変動の測定には 12 台の容量式波高計を用いた。データの

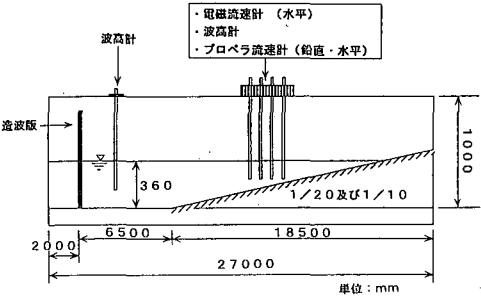


図-1 実験装置概要

サンプリングは, 静水状態から造波後 2 時間経過を待ってから行った。データのサンプリングレートは 50 Hz であり, 1 測定のデータ数は 6000 個とした。実験波は全て規則波とした。表-1 に, 実験に用いた入射波諸元を示す。表中の水深は, 図-1 の斜面前面における一定水深部の値である。Case-1 及び Case-2 は碎波形式がそれぞれ典型的な spilling 形と plunging 形に対応する。

超小型プロベラ流速計については, 様々な流れの状況下で電磁流速計を用いて検定を行うことで, あらかじめキャリブレーションと応答性を把握し, その適用性の検討を行った。その結果, 流速値に関しては電磁流速計と殆ど一致し, 応答性については, 若干プロベラ流速計の方が遅れる傾向にあることが分かった。データ解析ではそれらを考慮して, プロベラからの信号を必要量だけシフトして用いることとした。

表-1 実験諸元

CASE	1	2
底勾配 i	1/20	1/10
水深 h_0 (cm)	0.36	0.36
周期 T (s)	1.00	1.40
沖波々高 H_0 (cm)	13.8	8.87
碎波形式	崩れ波 spilling	巻き波 plunging

* 正会員 工博 琉球大学助手 工学部環境建設工学科
** 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木工学科
*** 正会員 琉球大学大学院 工学部建設工学専攻
**** 西濃建設株式会社

波の前傾化や砕波による変形,あるいは砕波後の bore 領域の形成や気泡の混入領域などの可視化には, 4 台の 3 CCD ビデオカメラを用い, 電子シャッタースピードを 1/1000 s として撮影を行った。

3. 実験結果及び考察

図-2 に, Case-1 に対する平均波高分布及び平均水位の分布を示す。図示の $\eta_{\max}$ 及び $\eta_{\min}$ は, 波の平均的な crest level と trough level を示す。図-3 に, ビデオカメラによる映像を基に波の砕波変形の様子スケッチ図を示す。図-3 に示すとおり, 波頂よりも僅かに前面で, 波という水面形内に閉じこめられていた水粒子が飛び出すことによって砕波が始まる。ここで新たに形成された渦 (非ポテンシャル領域) は, 波の波頂前面を滑るような形で成長を続ける。このことによって容量式波高計で捉えた波形は波頭が成長した形になり (crest level が高くな

り), 結果として波高が見かけ上増大する。波高が減少するのは, この渦領域が平均水面位置まで降りてきた所から始まる。特に, 気泡混入領域が波の trough level まで降りてきて, この位置付近で激しい運動量の混合 (強いせん断流) が形成される付近からは, 波高減衰の割合も大きくなる。また, この位置より岸側で, 著しい渦領域の拡散が生じると共に, 日野ら (1984) によって指摘された斜降渦の発生が顕著に見られ, 渦領域が鉛直方向に激しく拡散される様子が伺える。

平均水位の変化も, ほぼこの地点を境にして増加傾向を示す。すなわち, 砕波による Radiation Stress の変化は, 図-2 の T.P. で示す位置付近 (渦領域が下降し trough level に達した時点) から, 直接せん断力として作用し, 運動量の拡散という形で内部領域に分配される。また, この作用は圧力勾配と釣り合うことになり, 平均水面はこの地点を境にして上昇することとなる。砕波点

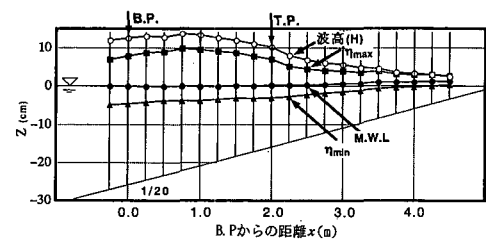


図-2 平均波高及び平均水位の岸沖変化 (Case-1)

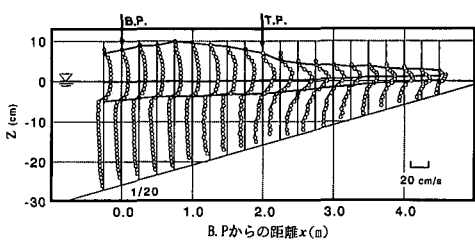


図-4 平均流速の分布

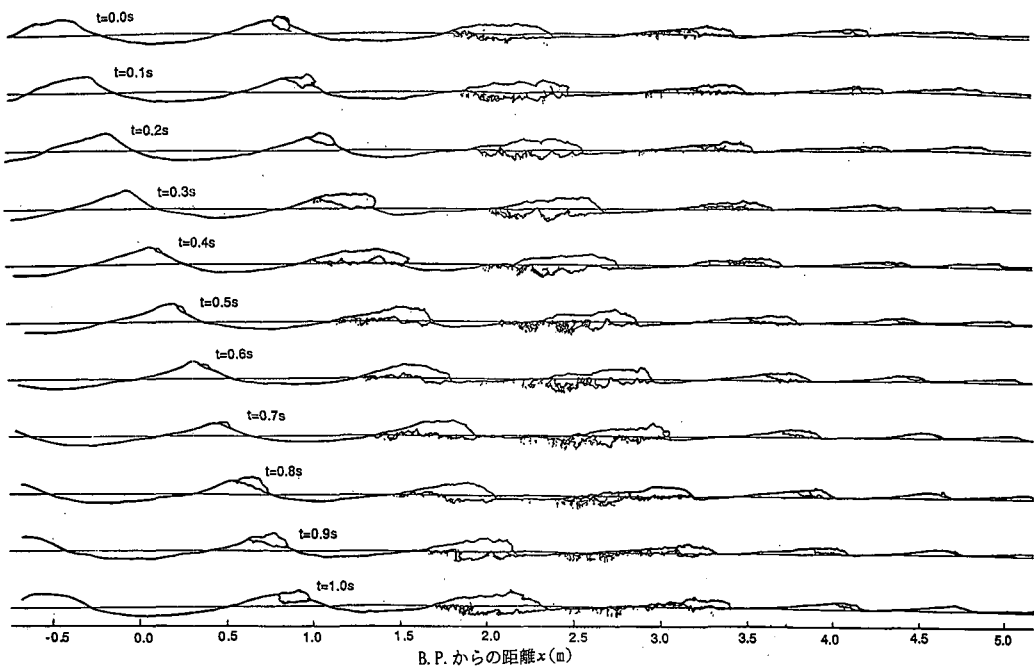


図-3 波の砕波に伴う渦 (気泡混入) 領域の発達・減衰過程のスケッチ

から T.P. 点までの間には、波の運動量は主として渦領域内部の回転流成分へ変換される。これこそが、碎波点から始まる岸方向への質量輸送量の増大を意味し、また平均水面の増大を伴わない意味でもある。

図-4 に、平均流速（水平方向）の鉛直分布を示す。ここで、平均流速とは、Euler 流速の時間的な平均値 (Eulerian drift velocity) を意味する。trough level よりも下側を流れる戻り流れ (undertow) に関しては、従来の実験結果と同様な傾向が見られる。流速の鉛直分布に若干のバラツキがあるのは、水槽内に生じる長周期波の影響によるものであり、それによる流速の長周期変動は T.P. で示す位置付近で最大となる。この長周期変動は、入射波が一定振幅の作用下で生じる現象であることから、一種の自励振動であると判断される (日野ら, 1986)。波の trough level よりも高い所で、かつ非碎波領域の流速分布は、いわゆる Eulerian Stokes drift である。crest level 付近の流速分布は、碎波点を過ぎたあたりから上向きにシャープな分布形になった後、波高が減衰し始める付近で波進行方向に大きく張り出すような分布形をとる。特に、T.P. の記して示す位置付近では、平均流速の鉛直分布が bore の渦領域の中心部に大きく引きずられた形となっている。これが、まさしく Svendsen (1984) が指摘する Surface roller による実質的な質量輸送の現れと判断される。

次に、Case-2 に対する (plunging 碎波の場合の) 実験結果を示す。図-5 に、平均波高及び平均水面、波の crest level と trough level の岸沖変化を示す。また、図-6 に、ビデオ画像より得られた碎波及び Surface roller の発生・発達を示す。波頂前面で大きく巻き込んだ水塊の突入により、plunging point では水塊の上方への飛び出しが生じている。ビデオ画像からは、Peregrine (1983) や山下ら (1988) によるこうした碎波の進行パターンの他に、ポテンシャル領域と非ポテンシャル領域との境目で常に spilling 形碎波と同様な水粒子の飛び出しが続き、それが汀線まで続く碎波現象を維持させている様子が捉えられた。また、図-6 では、水塊の突入によって爆発的に生じた水面の高まりと気泡混入領域は、plunging point を境に岸側及び沖側の両方向に拡散していく様子がよく現れている。図-7 に平均水平流速の分布を示す。図示のとおり、P.P. 付近で trough level より平均水面までの間には、強いせん断流が形成されている。また、底面付近の流れは、P.P. 付近から剝離している様子が分かる。平均水面については、従来より指摘されているとおり、P.P. 付近で wave set-down の最降下点を取り、それより岸側から wave set-up が形成されている。

図-8 及び 9 に、図-4 に示す B.P. ($x=0.0\text{m}$) 及び T.P. ($x=2.0\text{m}$) の位置における、水面波形及び流速波形

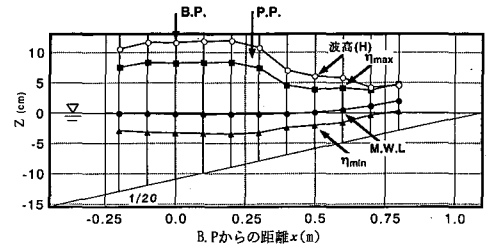


図-5 平均波高及び平均水位の岸沖変化 (Case-2)

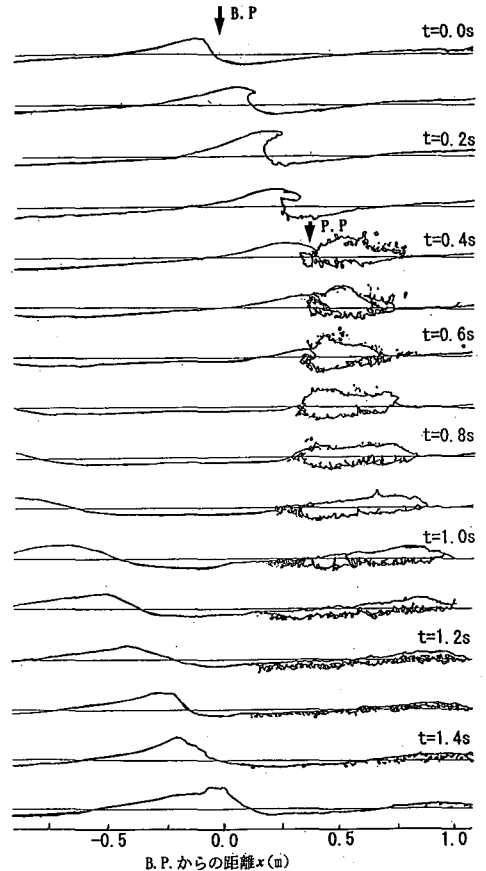


図-6 波の碎波に伴う渦（気泡混入）領域の発達・減衰過程のスケッチ

に対する観測値 (●印) と Dean の流れ関数法による計算値 (実線) との比較を示す。図-8 に示すように、B.P. 付近における実測値は、Dean の流れ関数法から予測した流速値とほぼ一致する。波形の一致度に対して、流速値の一致度が比較的に悪いのは主に平均流速の影響によるものと考えられる。図-9 に示すように、渦領域が最大となる地点における流速値は、実測値の方が計算値の約倍程度も大きくなっており、実測値と計算値との対応は、水底付近でも良くない。このように、Dean の流れ関数法の

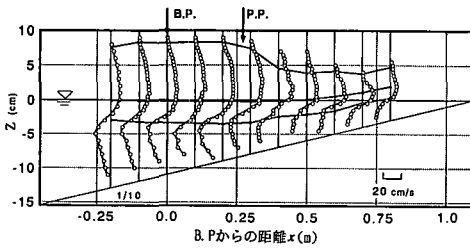


図-7 平均流速の分布

適用性が渦領域で悪くなるのは、基本的に Dean の流れ関数法がポテンシャル波の存在を仮定していることによるものであるが、水底付近でも適用性が悪いのは、流れの影響に加えて、斜面の影響や上述した容量式波高計で得られる見かけの波形の影響によるものと思われる。

4. おわりに

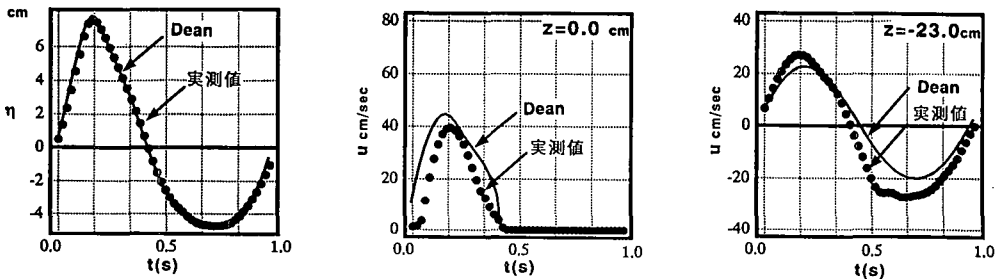
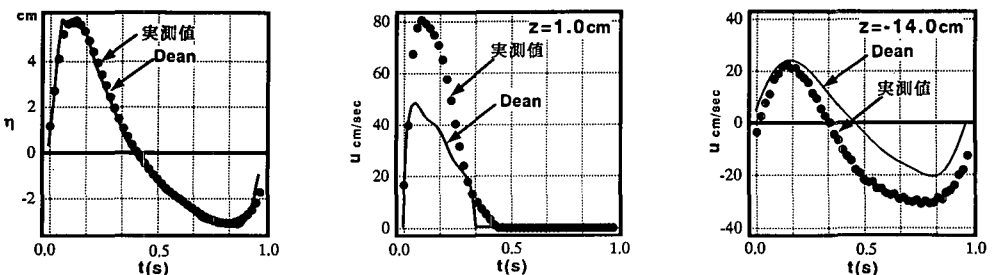
本研究では、実験的に波の碎波変形と平均水位の変化を調べ、それと波の質量輸送量及び undertow の形成との関連を明らかにした。大量に気泡を含む碎波帯内の流速分布の測定には、超小型プロベラ流速計を用い、Surface roller による質量輸送量などを明らかにした。また、碎波による渦領域の発生から発達・減衰過程を詳細に調べることにより、波高の変化や平均水位の岸沖変化に対して物理的な考察を加えることができた。

今後、ここで得られた知見を基に、新たな波・流れに

関する数値計算手法を開発する予定である。数値計算では、碎波点から幾らか岸側までの間で Radiation Stress を回転流速成分に変換する遷移領域を設ける必要があり、この操作で碎波に伴う Radiation Stress の変化が直ちに圧力勾配とバランスするのを押さえることができるものと考えられる。

参考文献

- 岩垣雄一・酒井哲郎 (1974): Stream Function Theory による斜面上の碎波の水粒子速度の表現について, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 27-32.
- 岡安章夫・原 幸司・柴山知也 (1992): 斜め入射による碎波帯内定常流の 3 次元分布, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 67-70.
- 栗山善昭・尾崎 靖 (1993): 沿岸砂州周辺の沿岸流速分布, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 266-270.
- 柴山知也・樋口雄一・岡安章夫 (1985): バックウオッシュと巻碎波による碎波帯内流速場の構造, 第 32 回海岸工学講演会論文集, 第 00 巻, pp. 65-69.
- 灘岡和夫・八木 宏・悦道博之 (1992): 鉛直分布構造を考慮した海浜流のモデル化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 211-215.
- 灘岡和夫・Serdar Beji・大野修史 (1994): 新たな波動モデルによる強分散性非線形場の解析法の確立と室内実験による検証, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 11-15.
- 日野幹雄・灘岡和夫・上野成三 (1986): 碎波過程に着目したサーフ・ピートの発生に関する実験的研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 179-183.
- 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. 179-183.

図-8 Dean の流れ関数法による水面及び流速波形の計算値と実測値との比較 ($x=0.0$ m, Case-1)図-9 Dean の流れ関数法による水面及び流速波形の計算値と実測値との比較 ($x=2.0$ m, Case-1)

- 集, pp. 1-5.
- 山下隆男, James R. Tallent, 土屋義人 (1988): 碎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. 85-58.
- Dean, R. G. (1965): Stream function representation of non-linear ocean waves, *Jou. Geophysical Res.*, Vol. 70, No. 18, pp. 4561-4572.
- Fredsoe, J. and R. Deigaard (1992): Mechanics of coastal sediment transport, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 3, p. 369.
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 4, p. 324.
- Peregrine, D. H. (1983): Breaking waves on beaches. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 15, pp. 149-178.
- Svendsen, I. A (1984): Mass flux and undertow in a surfzone, *Coastal Engineering*, Vol. 8, pp. 347-365.
-