

Plunging 砕波によって発生する砕波帯内流速場の構造

三村 信男*・岡 安章夫**・柴 山 知 也***
プリーチャ・カムロンリティソン****

1. 緒 論

砕波帯の流速場は、波の減衰、漂砂移動、あるいは汚染物質の拡散等、砕波帯で生じる諸現象に深い関わりを持っている。そのため、近年砕波の乱れに着目した研究が活発に取り組まれてきた。こうした最近の研究の多くは、① 砕波によるエネルギー逸散過程の解明¹⁾、② 流速場（平均流、乱れ）の構造とその統計的特性の把握^{2),3),4)}、③ レイノルズ応力の測定^{5),6)}、等を主たる目的として取り組まれており、流速測定技術の進歩ともあいまって様々な知見が得られつつある。しかし、その実態は必ずしも明らかになったわけではない。

砕波によって発生する乱流場は、時間的にも空間的にも非一様なきわめて取り扱いの難しい対象であり、こうした乱流場の特性を解明するためには、現象そのものの把握が不可欠であると著者らは考えた。砕波帯の流速場に対する現象論的把握の例は、樺木ら⁷⁾の研究に見られる。樺木らは、各種の条件下での砕波の特徴を実験的に検討し、plunging 型砕波では horizontal roller という組織的な渦が発生することを指摘した。本研究においても他に比して際立った特徴を示す plunging 型砕波を対象をしぼり、砕波によって発生する流速場の詳細な測定を行なうことによって、その構造を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験には、長さ 23 m、幅 0.8 m の二次元波動水路を用い、現象の二次元性をよくするため、水路中央に仕切り板を設けた。実験に用いた地形と測定領域を図-1に示す。本実験では砕波点を安定させることを主たる目的として、1/10 勾配の斜面とそれに続く一樣水深部をもつ固定床を模型地形として用いた。この水路において沖側平坦部の水深を 40 cm、岸側平坦部の水深を 10 cm とした。実験条件は典型的な plunging 型砕波が生じることを目標に予備実験を行い、表-1 に示すように選んだ。

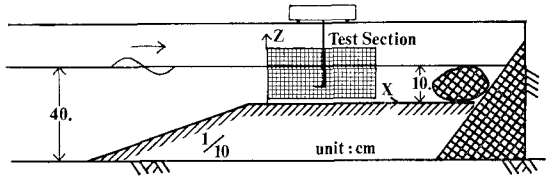


図-1 実験地形と測定領域

表-1 実験条件

T (周期)	H ₁ (波高)	H ₀ /L ₀ (換算中筋波長比 ^①)	H _b /h ₀ (岸筋波高水深比)
1.545 sec	6.95 cm	0.0201	1.016

実験において測定した項目は、水位変動と流速である。図-1 に示すように、水平床上に砕波点直前から岸方向に 80 cm、水底面上の 0.5 cm から 14.5 cm の領域をとり、水平方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸を設定して測定領域をした。この領域の中に、岸沖方向、鉛直方向各々 2 cm 間隔の格子状の測定点を配置した。測定点の総数は、328 点である。このように測定領域を設定すると、 $x=10$ cm 付近が砕波点、 $x=24$ cm 付近がつかみ点にあっていた。

さて、各測定点における水面変動と流速の測定には、容量式波高計と熱膜流速計とを対にして用いた。今回用いた熱膜流速計のスプリット型センサーは、1 方向の流速・流向とそれに直交する他の 1 方向の流速の絶対値を計測することができる。今回の測定では、流速・流向は鉛直成分に、流速の絶対値は水平成分に割り当てた。

上に述べた測定領域を全てカバーしようとするれば、センサーが空中に出てしまう期間が生じる測定点ができる。このような測定点では、各点での測定の間に頻繁にキャリブレーションを行なうことによって精度の高いデータを得るべく努めた。また、砕波直後の測線上ではまき込まれた気泡がセンサーをよぎる場合も多いと考えられる。これに対しては後に述べるようにデータ処理の過程で対処した。

3. データの処理

測定した水面変動と流速のデータは、 $\Delta t=0.01$ s で A-D 変換し、大型計算機によって処理した。図-2 に、

* 正 会 員 工 博 茨城大学助教授 工学部建設工学科

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

*** 正 会 員 工 修 東京大学助手 工学部土木工学科

**** 学生会員 M. Eng. 東京大学大学院工学系研究科

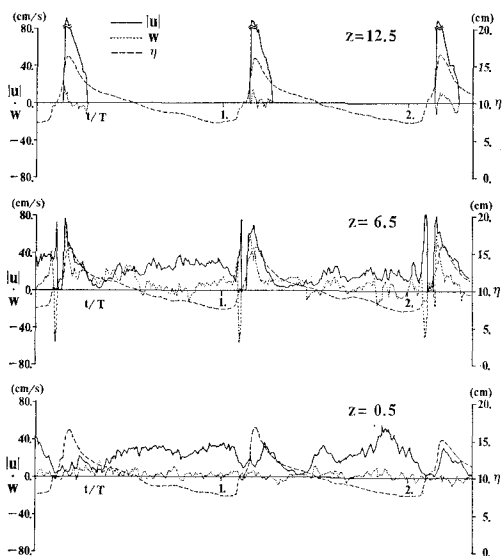


図-2 水位変動・流速データの例

(η: 水位変動, u: 水平流速, w: 鉛直流速)

$x=20$ cm の測線において得られたデータの一例を示すが、こうしたデータを用いて次のように処理を進めた。

(1) 有効な流速データの判定

得られた流速データの中には、水面付近の測定点で熱膜センサーが空中に露出する期間のものや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、水面の位置と流速自体のデータを用いて判定し、用いる流速データから除外した。気泡の影響については、予備実験の結果センサーに対する接触時間が長い場合にはデータがドロップアウトすることから判定できることがわかった。ただし、接触時間が短くなると、スパイク状のノイズが入るが、これを通常の流速変動と区別することは難しい。したがって、今回の流速データの中には、こうした意味で気泡による影響が残されている。

(2) 水平流速成分(u)の方向の判定

今回の測定では、水平流速成分(u)は絶対値しか求められない。そこで、基本的には波の峰の位相では岸向き、谷の位相では沖向きとして、水面 η が平均水面をよぎる位相付近で1周期に2度だけuの符号を反転させた。ただし、 $z=10.5$ cmより上の測点では、図-2に見られるような流速波形であったために、uは全て岸向きとした。

このような形で流向の判定を行なうことによって、平均水面付近の測定点や流向が反転する位相付近のデータには誤差が大きくなることが懸念されるが、現状ではこれ以上詳細な判定は難しい。

(3) 平均流速と乱れの分離

平均流速は位相平均法によって求めた。位相平均に用

いた波の数は30波であるが、上に述べた判定で気泡の影響があるとされたデータは除外したので30波分に満たないデータによって平均流速を算定した測定点、位相もある。また、センサーが空中に露出した期間の流速は0とした。乱れは位相平均流速からの偏差として定義し、同じく位相平均法によって乱れ強度 u' , w' を算定した。

砕波帯の流速場における乱れの定義については既に多くの議論がなされている⁸⁾。今回の実験では、流速データが間欠的にしか得られない測定点が多かったため、移動平均法やフィルター法はとり得ない。位相平均法は、砕波点のゆらぎをも乱れとして評価する点に問題があるが本実験では2.で述べたような模型地形を用いることによってその影響を極力小さくした。

さて、このようにして求めた位相平均流速がどの程度の回転性を有するかを調べるため、各位相における渦度の空間分布を算定した。渦度 ζ は次式を差分化し、正方形格子上に配置した4つの測定点における位相平均流速のデータを与えることによって、格子の中心点に対して求めた。

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \dots\dots\dots (3.1)$$

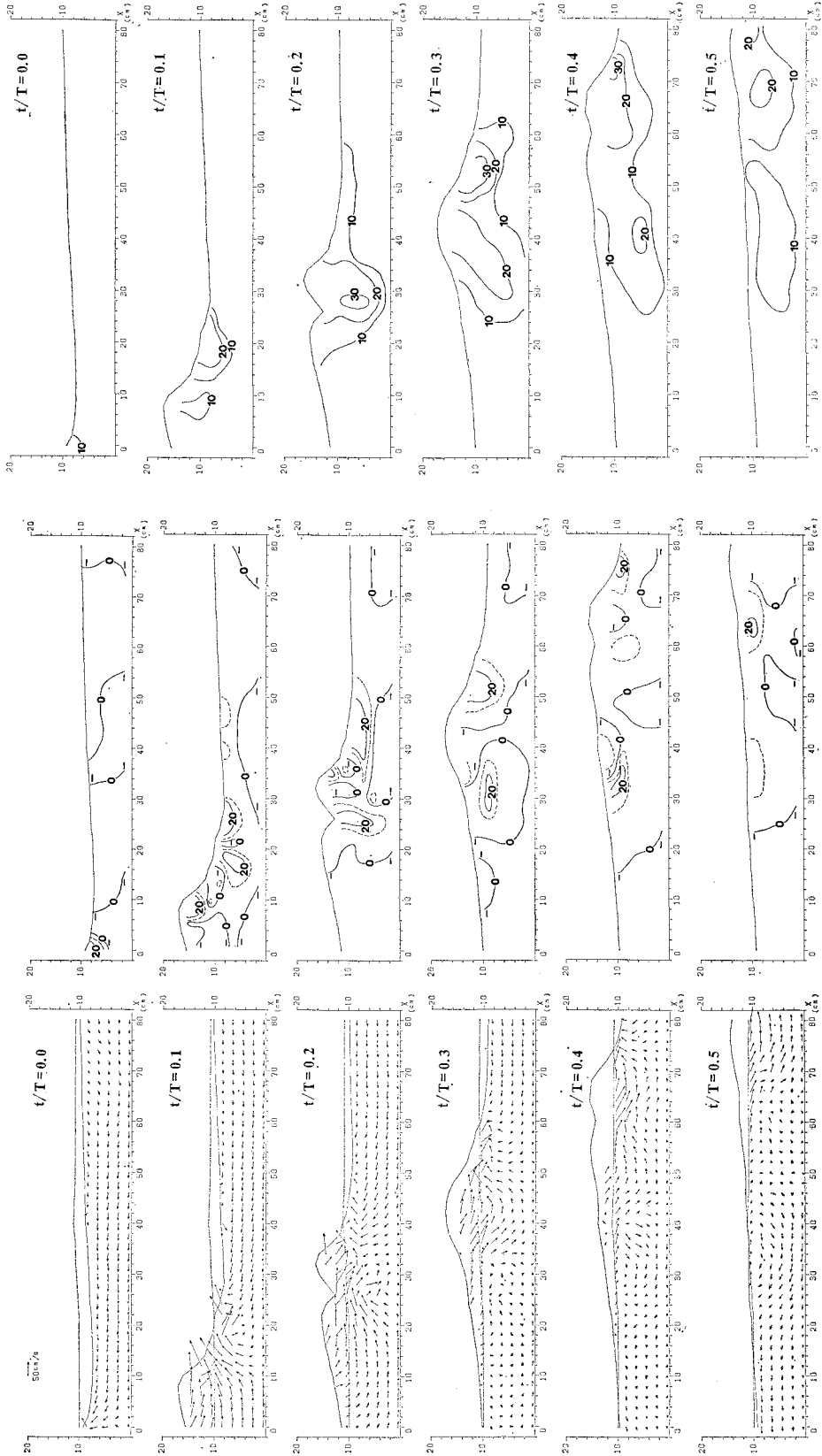
さらに、一周期間にわたる位相平均流速の平均をとることによって定常流成分を算定した。

4. 流速場の構造

(1) 位相平均流速と渦度

上のようにして得られた位相平均流速をベクトルによって表わした結果と渦度の空間分布とを図-3, 4に示す。図には、紙面の都合上、これらの位相変化が著しい半周期分だけ示してある。図に沿って現象の推移を見ると、 $t/T=0.01$ (T は周期)の位相付近で砕波が始まり、 $t/T=0.15$ で崩落した波面がつつまみ、その後波は砕波となって岸方向に進行する。これに対応する流速場の特徴は、大規模な渦が発生することである。流速ベクトルにおいてもその存在は観察されるが、渦度の分布をみると更に明瞭にその発生、発達の過程がみてとれる。この大規模な渦は、波の plunging によって発生し、 $t/T=0.2$ の位相ではほぼ底面にとどく規模に成長する。この渦は徐々に岸側に移動するが、砕波の前進からはとり残され、約半周期間存続する。一方、前進する砕波面には常に新しい渦が形成されるが、その規模は小さく、寿命も短い。

このような大規模な渦は、樫木らが horizontal roller と呼んだものと同じものであろう。この渦は、波の plunging に伴って周期的に発生するという意味で、組織的な性格をもっており、plunging 砕波の下で形成される流速場を特徴づけるものといえる。



図—3 位相平均流速

図—4 渦度の空間分布 (単位: 1/s)

図—5 乱れ強度の空間分布 (単位: cm/s)

改めて渦度の空間分布をみると、渦度の強い領域は、大規模で組織的な渦の領域と砕波前面とに集中しており、その他の領域ではほとんど渦度は0である。割愛した $t/T=0.5$ 以降の位相においても渦度はほとんど0であった。そうした点からすると、砕波帯における流速の周期成分は、非回転ないわゆる波動流速成分と砕波によって生じる回転性の強い渦とが重畳したものであると解釈できる。

(2) 乱れ強度

位相平均流速・渦度と同じ形で、乱れ強度の空間分布を示したものが図-5である。ここでは、先に述べたデータの精度上の観点から、乱れ強度としては w' を示してある。

図-5 をみると、乱れ強度の分布と渦度の分布との間に強い相関のあることがわかる。すなわち、乱れ強度の大きな領域は、砕波前面と波の plunging によって発生した大規模な渦の領域とに集中している。こうしたことから、plunging 型砕波では波面の崩壊によって乱れが発生する上で2つの経路があるように考えられる。一つは砕波前面における直接的な乱れの発生であり、もう一つは、まず大規模な渦にエネルギーが与えられ、その渦の減衰に伴って乱れが発生するという経路である。その意味からすれば、こうした大規模な渦の発生は、砕波帯の流速場におけるエネルギー過程にとっても重要な要素になっていると考えられる。

(3) 定常流成分

図-6 に、測定領域全体の定常流の分布を示す。これを見ると、平坦床においても斜面上と同様な定常流流速場、すなわち波の谷のレベルより下で冲向きで、その上で岸向きの流速場が発達していることがわかる。この中で、いわゆる底引き流れに注目すると、 $x=20\sim40$ cm

の範囲で流速が大きくなっている。この領域は、ちょうど大規模な渦が形成され停滞していた領域であり、定常流の流速場に対してもこの渦の寄与は大きいといえる。

5. 結 論

典型的な plunging 型砕波の条件下で、きわめて詳細な流速場の測定を行ない、可視化に対応するような現象の明瞭な把握を試みた。その結果、plunging 型砕波の下で発生する流速場の大きな特徴が大規模な渦の組織的発生にあることを改めて明らかにした。従来、砕波帯の流速場は(定常流)+(波動成分(周期成分))+(乱れ)という形でとらえられることが多かった。今回の測定結果は、こうして定式化される周期成分の中に非回転ないわゆる波動流速と回転性の強い渦とが含まれていることを示している。そして、この大規模な渦は、波動場と乱れ、あるいは定常流との間に介在する重要な流体運動であるといえる。

参 考 文 献

- 1) 泉宮尊司・堀川清司: 砕波によるエネルギー逸散過程に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 150~154, 1982.
- 2) Thornton, E. B.: Energetics of Breaking Waves within the Surf Zone, Jour. Geophys. Res., Vol. 184, pp. 4931~4938, 1979.
- 3) 瀬岡和夫・近藤隆道・田中則男: LDA を用いた砕波帯内の流速場に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 24~28, 1981.
- 4) 青野利夫・服部昌太郎: 砕波による乱れの空間特性に関する実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 25~29, 1983.
- 5) 青野利夫・大橋正和・服部昌太郎: 砕波による乱れ構造の実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 159~163, 1982.
- 6) 酒井哲郎・三反畑 勇: 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, 1983.
- 7) 榎木 享・岩田好一朗・松本 昇: 砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果に関する研究, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 565~570, 1973.
- 8) 岩垣雄一・浅野敏之・小岩俊樹: 周期波と流れの共存場における乱れの定義とその特性について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 10~14, 1981.

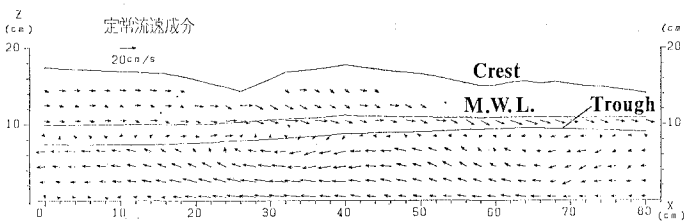


図-6 定常流成分の空間分布