

砕波水平渦の生成機構と移動特性

山下隆男^{*}・James R. Tallent^{**}・土屋義人^{***}

1. 緒 言

砕波に伴う波浪エネルギーの散逸現象は、非回転運動から回転運動への運動形態の変換過程であり、これによって波浪のエネルギーが渦エネルギーへと変換される。砕波により形成された大規模渦はより小さな渦を引き伸ばす (vortex stretching) ことにより順次その規模を縮小する。換言すれば、小規模渦へとエネルギーを伝達し、最小スケールの渦で粘性により熱エネルギーへと散逸してゆく (energy cascade)。砕波現象のように水面近傍に強い流れが形成されるせん断乱流の場合には、大きい乱流渦の作用のため、vortex stretching により定常的な乱流エネルギーの供給が行われ、短時間の内に全水深に拡散される。一般にこの vortex stretching は 3 次元的现象であり、trough 海面下での乱流渦の生成・拡散・消滅現象は極めて 3 次元性が強いと考えられるが、2 次元波動運動により形成される水面近傍、特に trough level より上 (surface layer と呼ぶこととする) での渦運動は水平渦的な特性が強いことも事実である。

このような、砕波帯に形成される乱流場の特性を解明することは surf zone dynamics の基礎的研究の最重要課題であり、近年各国で活発化している 3 次元海浜流モデルの構築には必須である。ここ 10 年来、砕波帯の乱流特性に関する研究は増加の一途にあるが、波動性運動の残っている場での乱れをどのようにとらえ解析、モデル化すればよいかという点になると、必ずしも明解な手法は存在していないようである。

本研究では、surface layer に形成される 2 次元性の強い砕波水平渦を実験水槽内で観察することにより、その生成、変形、移動の特性を調べ、砕波帯の渦運動に関する情報を提供することを試みる。特に、Svendsen¹⁾ により領域分けされた inner/transition region の明確な定義、水平渦の形成される時間間隔、長さスケール、移動特性、平均流・平均海面の空間的变化と砕波水平渦との関係等に着目した実験結果を示す。

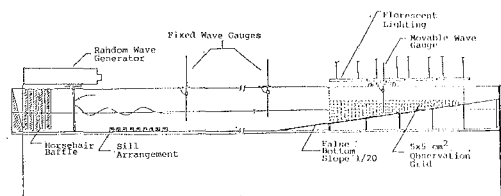
2. 実験方法

京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所内に設置されている造波水槽 (長さ 40 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.7 m, 3 面ガラス張り, ピストン型造波板) を用い、海底勾配 1/20 の一様斜面 (ステンレススチール製) 上での砕波について、以下の 4 ケースの造波条件で実験を行った。

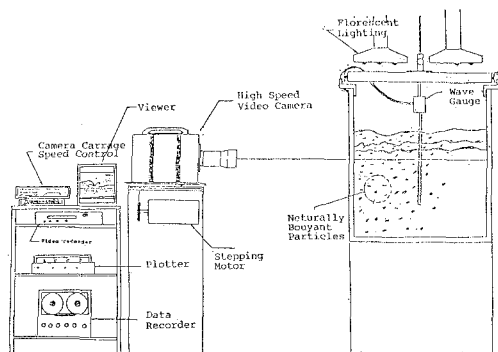
- | | | |
|----|-----------------|---------|
| #1 | $H_0/L_0=0.086$ | spiller |
| #2 | $H_0/L_0=0.072$ | " |
| #3 | $H_0/L_0=0.051$ | " |
| #4 | 孤立波 | plunger |

なお、 H_0/L_0 は一様水深部 (水深 40 m) での波形勾配を示す。

図-1 (a), (b) に実験装置の概略を示す。(a) において、造波板前面 (約 1.5~2 波長前面) にシルが配置されている。これは、ピストン型の造波装置を用いると、Fontanet 波²⁾ が生じ、安定した砕波現象が再現できない。



(a) 側面図



(b) 可視化実験装置

図-1 実験水槽

^{*} 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

^{**} 学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科

^{***} 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

ため、シルの設置位置、長さを試行錯誤的に変えることによって、Fontanet 波を位相差を利用して消波する目的で設置してある。この手法は極めて有効であり、規則波の全ケースについて碎波点の位置を数センチメートル以内に設定することができた。

図-1 (b) はハイスピードビデオシステム (HSV) (200 frs/sec) による可視化装置の概略を示したものである。HSV は波速とほぼ等速度で移動する台車 (stepping motor 駆動) に設置されており、碎波水平渦の全域が画面内に納まるよう調整されている。可視化の手法は、比重 0.997 (25°C) の中立粒子をトレースする方法と、蛍光染料を水表面流線上に注入し、ブラックランプで発光を強調させ表面からの痕跡線を撮影し、水平渦の境界を検出する 2 通りの方法を用いた。

一方、碎波波高および平均海面の分布の計測には容量式波高計を水槽上を移動する台車に取り付け、5 又は 10 cm 間隔で 300 波以上の水面変動を計測して、それらの時間平均値を用いた。また、空間波形および碎波水平渦の前面に形成される splash の高さの計測は水槽の側壁ガラス面にスケール用格子網 (5×5 cm) を写し込んだビデオ画像により求めた。

3. 実験結果

(1) Spiller の場合

前述した、3 ケースの規則波のうち、#1 のケースについて、ビデオ画像を詳細に解析し、以下の情報を得た。

(a) 中立粒子と水表面流線上に注入した蛍光染料の示す痕跡線から碎波水平渦の検出を行い、渦内の流向および、空間波形を求めた。

(b) 撮影面内で波浪の 2 周期以上にわたって追跡可能な中立粒子を選定し、その軌跡を求めた。

(c) 波高計により計測された水面変動から、平均海面、(MWL) および最大水位面 (MCL) を求めた。

以上の結果を同一図面上に表示すると図-2 のようである。図中、碎波の空間波形は任意の 1 波について求められたものであるが、造波板前面の 2 次波消波シルにより極めて安定した碎波現象が再現できており、任意の 1 波から求めた最大水位と波高計記録の 300 波以上の平均により求めた MCL とはほとんど一致していた。

この図より、spiller の場合の碎波水平渦の生成過程およびそれに伴う平均流速場の特性は、次のように解釈されよう。

(i) 自由表面流線のはく離が第一渦を形成するが、この渦は大規模渦へと発達せず、第二渦を形成するトリガーとしての役割をはたしている。この第一渦の移動する領域での MCL の低下する勾配はゆるやかで、水粒子運動には波動性が強く残っている。しかしながら、

surface layer での質量輸送速度は速くなっており、せん断流が形成されはじめている。

(ii) 第一渦が停止すると渦前面に splash が生じ、次の渦が生成されはじめている。この段階でも水粒子運動に明確な波動性が残っており、MWL の顕著な上昇は認められないが、MCL は急激に低下する。これにより第二渦が形成される。

(iii) 第二渦は数回の splash をくり返し、surface layer の厚さと同程度の鉛直スケールまで発達する。この領域では、MCL はほとんど変化しない。このことは、波動エネルギーが第二渦へ供給され、波高は渦の鉛直スケールと同程度まで低下しているが渦が発達するため波形は段波状に変形するためである。すなわち、大規模第二渦の形成は段波の形成を意味する。この段階では乱れは inner layer へ拡散、移流されており、水粒子運動の波動性が不明瞭となっている。

(iv) 第二渦は擬定常渦として伝播するのではなく、surface layer 以上のスケールまで発達すると停止し、次の渦が形成される。停止した第二渦は inner layer に放出され、これにより MCL の急激な低下が生じるとともに、surface layer から inner layer への強い鉛直流速成分が生じる。これは、停止した (自由渦となった) 第二渦が vortex stretching により 3 次元性が強くなるためであり、碎波現象において多くの人の目を引く顕著な縦渦はこの第二渦の引き伸しによって生じる。

(v) 第三、第四渦程度までは、スケールを減少しつつ第二渦と同様の機構を示すが、その後は surface layer 厚さのスケールの渦の形成、停止、次の渦の形成、停止をくり返す。第二渦が成長するあたりから MWL の上昇が始まる。この様子を強調したものが図-3 であり、MWL の 2 乗値と MCL を 1/5 した結果を示してある。この図から明らかなように、MCL の急激な低下より少し岸側で MWL の急激な上昇が認められる。これは渦が停止し内部へ拡散した位置での Reynolds stress の勾配が急となり MWL が上昇するものと考えられ、渦の

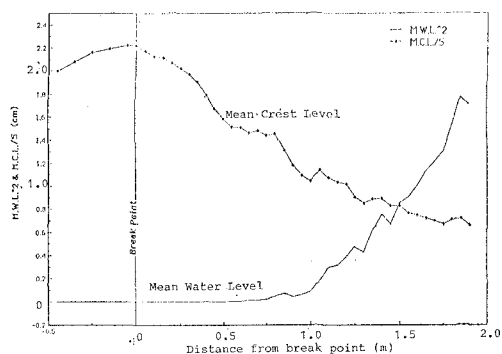


図-3 平均海面および平均波峰高の変化

inner layer への拡散, 移流が MWL を局所的に上昇させていると仮定すると, MWL の 3 回の急激な上昇が第 2 渦から第 4 渦までの 3 回の渦の inner layer への集中的拡散と対応する。

以上のことから, Svendsen によって定義された transition region とは, 第 1 渦の存在する擬ポテンシャル領域と第 2 渦の成長する領域で, surface layer から inner layer への乱れエネルギーの拡散が小さい領域であると解釈できる。また, inner region とは, 第 4 渦以後の surface layer 厚さの長さスケールを持つ渦が次々と形成される領域である。しかし, ここで示したように, spiller の場合にも, 第二渦を中心とした大規模な渦が inner layer に拡散する領域 (大規模渦領域) が存在する。これは乱流場としての砕波帯の境界であり, 海浜流, 海浜変形モデルを構築する場合, 擬ポテンシャル領域と従来の inner region の中間に位置するこの large eddy region を考慮に入れる必要がある。この領域では大きな乱れエネルギーを有する渦塊が海底面に達するため, もし移動床の実験を行えば, ここでの底質移動は活発であり, trough 地形が形成されることが予想される。

図-4 は, splash 高さを含めた静水面からの渦の高さ

を, 同一砕波内で検出された 10 ケの渦について示したものである。

一方, 図-5 は図-4 の最大渦高さのピーク間より渦の発生時間間隔 T_e を求め, 波の周期で無次元化した時間との関係で示したものである。これより, 波の一周期程度, すなわち一波长伝播すると inner region に達し, 渦の生成される時間間隔が一定になっていることがわかる。また, 図-4 において, 第 1 渦は波高の低下分を示し, 第 2 渦以後は渦高さ H (渦の鉛直方向スケール) を代表していると考えられるが, 第 2 渦から第 4 渦までは波高さが減少しており, それ以後はほぼ一定値となっている。これからも, 前述したように, 第 4 渦以後にいわゆる inner region が形成され, そこではほぼ同一規模の渦が同一時間間隔で順次生成されていることがわかる。

次に, 図-4 と同様の表示を, 波形勾配のより緩やかな #2 および #3 について行った結果を図-6 および図-7 に示す。これらより, spiller から plunger に近づくにつれて, 渦高さの減衰が顕著になっていることがわかる。これは第 1, 2 渦で波浪から渦へ多量のエネルギー変換が生じるため, 波形勾配が緩やかになるにつれて, 同

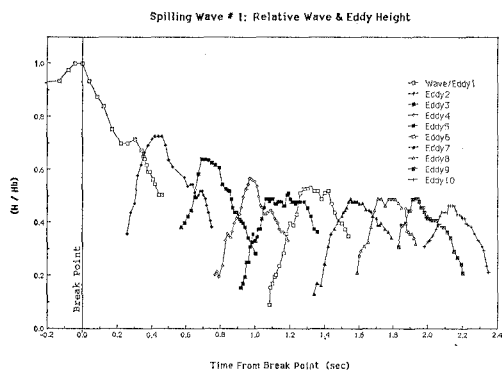


図-4 検出された水平渦の高さの時間変化
($H_0/L_0=0.086$)

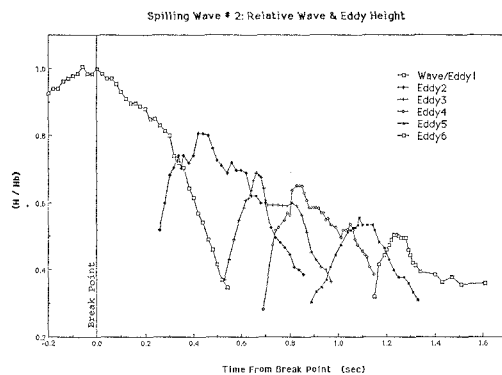


図-6 検出された水平渦の高さの時間変化
($H_0/L_0=0.072$)

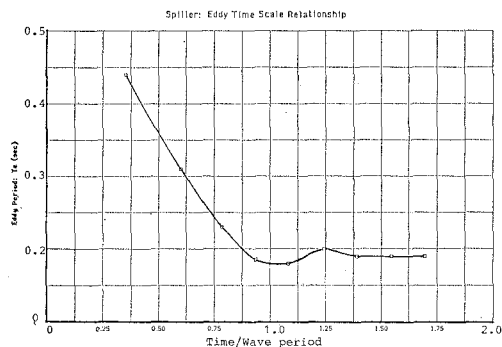


図-5 渦の発生する時間間隔

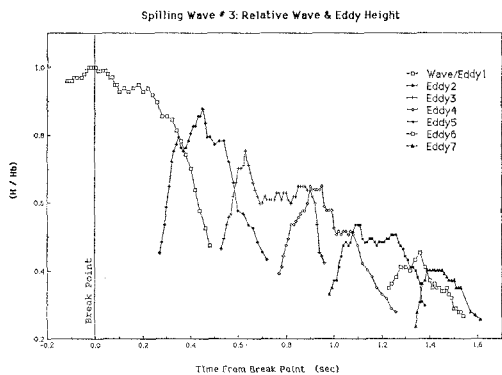


図-7 検出された水平渦の高さの時間変化
($H_0/L_0=0.051$)

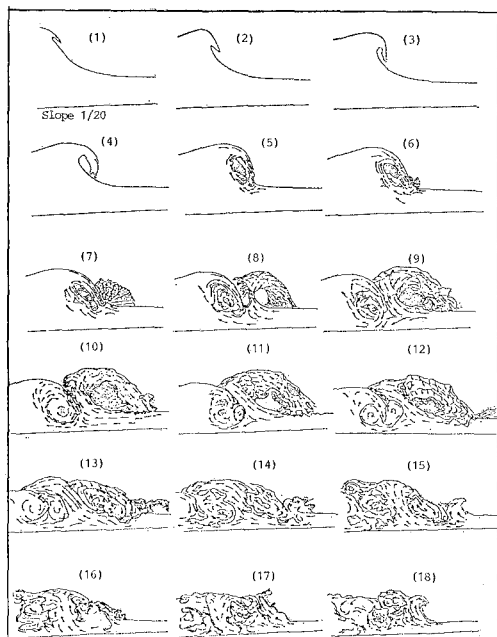


図-8 孤立波 plunger の水平渦の変化

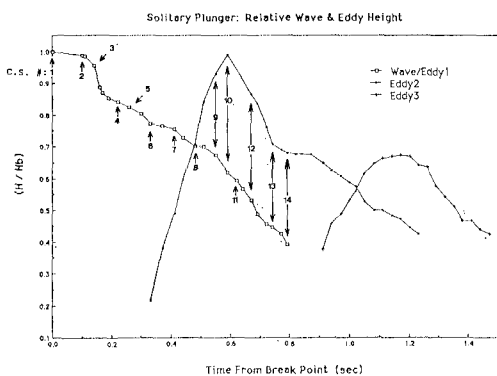


図-9 孤立波 plunger の渦高の時間変化

一規模の渦が次々と生成される典型的な steady bore 領域は存在しなくなることがわかる。

(2) Plunger の場合

ここでは、孤立波の plunging 型砕波の場合の解析から、spilling 型砕波との相違点を検討する。図-8 は、図-2 で示した砕波水平渦の解析と同様の手法で得られた孤立波 plunger の結果である。この場合、第一渦の規模が図-2 に比べて大きく、第一渦の停止と同時に生成

される第2渦の規模も必然的に大きくなっており、この2つの渦によって多量のエネルギー散逸が生じていることが推定される。図-9 は図-8 の場合の渦高さを第3渦まで示したものであるが、これより孤立波 plunger の第2渦の splash 高さは、砕波波高と同一程度に達することがわかる。なお、図中の番号は、図-8 の各ステージ番号と対応している。これらの図から判断される点は、(i) plunger の場合には第1渦ですでに surface layer 厚と同規模となっている。(ii) 第2渦は単一 splash で形成され、移動に伴って発達しない。(iii) 第3渦以後、明確な水平渦が形成されない。

一方、図-4, 6, 7 および 8 より、次のことが推定される。surf similarity parameter で整理される現象であると考えられるが、inner region における砕波水平渦のスケールは、波形勾配が急になり spiller の特性が強くなるに従って、長い区間 steady bore 領域が発生すると推定される。これは、inner region における砕波エネルギーの散逸率の分布特性は砕波形式だけで決定される問題ではなく、海底勾配と波形勾配との関係で明らかにする必要があることを示している。

4. 結 語

一樣傾斜海浜上における砕波の実験を行い、砕波水平渦の生成機構と移動特性を検討した結果、以下の点が明らかになった。

(1) spiller の場合、従来定義されていた transition region は一波長程度の長さで、波動運動の強く残っている擬ポテンシャル領域と、第2渦を中心とする大規模な渦が inner layer に拡散する大規模渦領域とに分割できる。平均海面の上昇は大規模渦領域から始まる。

(2) 砕波水平渦は、surface layer (trough 海面上) の厚さ以上の長さスケールになると移動を停止し、inner layer へ拡散し3次元性の強い渦となる。

(3) 波形勾配の急な spiller の場合、inner region において、同一スケールの渦が同一時間間隔で次々と発生する steady bore の領域が形成される。

参 考 文 献

- 1) Svendsen, I. A.: Wave heights and set-up in a surf zone, Coastal Engineering, Vol. 8, pp. 303~329, 1984.
- 2) Hulsbergen, C. H.: Origin, effect and suppression of secondary waves, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 392~411, 1974.