

# 二成分合成波の碎波限界と長周期変動の相互関係に関する研究

佐藤 慎司\*・尾崎 元久\*\*・柴山 知也\*

## 1. 序 論

不規則波の碎波限界や平均水位変動の特性を理解することは、工学的に極めて重要である。不規則波の碎波に関しては、木村・瀬山<sup>1)</sup>や水口ら<sup>2)</sup>により室内実験や現地観測による多数のデータをもとに詳細な検討が行なわれ、ゼロダウncross法で定義した個々の波は規則波に比べて碎波しやすいこと、碎波限界に対するデータのばらつきが大きいことなどが指摘されている。また、この様な不規則波の特性を取り入れた碎波変形モデルとして合田<sup>3)</sup>は碎波限界の表示式に確率的な考え方を導入した不規則波の碎波変形モデルを提案している。しかし、規則波と不規則波でこの様な碎波特性の違いが表われる原因については、波の定義法をはじめとして多くの要因が複雑に影響していると考えられるためその理解は十分とは言えない。

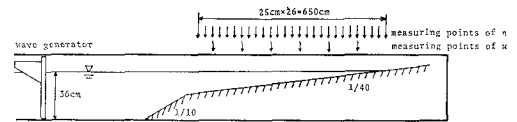
岩田ら<sup>4),5)</sup>は2つの自由波が重なり合った二成分合成波の碎波限界と遡上波の特性に関して実験と理論の両面から検討した。そして、ゼロダウncross法で定義される個々の波に注目すると規則波よりも二成分合成波の方が碎波しやすいこと、また合成波の方が遡上高さが大きくなることを示した。一方、不規則波の碎波に影響を及ぼす因子としては、個々の波の諸元の他に、碎波点近傍の流れ、前後の波の特性などが挙げられ、現地波浪に対してはさらに風の影響や地形や波の三次元性の影響なども考えられる。これらの諸要因のなかで前後の波の影響については磯部ら<sup>6)</sup>が、また個々の波の水深の定義法の影響については木村・瀬山<sup>1)</sup>が実験にもとづく詳細な検討を行なっている。また最近 Dally・Dean<sup>7)</sup>は、サーフビートによる流れが碎波限界に与える影響について考察し、流れの効果を含んだ碎波限界表示式とそれに基づく不規則波の碎波変形モデル提案している。しかし、モデルの適用範囲の検討や実験による検証は十分に行なわれているとは言えない。

本研究は不規則波浪場における碎波現象と長周期変動

成分の発生機構を解明するための基礎研究として、まず規則波と二成分合成波を用いて室内実験を行ない、碎波限界と水位や流速の長周期変動の特性を明らかにするとともに、両者の相互関係について考察を加えた。そしてその結果をもとに、不規則波の碎波現象に影響を与える一要因と考えられる流れの果たす役割について検討した。

## 2. 実験条件および方法

一端に無反射性不規則造波機を有する長さ 17 m、幅 0.5 m の二次元水槽内に図—1 に示す様に勾配 1/40 の



図—1 実験装置

斜面を設置し、規則波、不規則波および二成分合成波を発生させた。ただし一様水深部の水深を深くとるために斜面の先端部 2 m の区間は勾配を 1/10 とした。静水汀線から 6.5 m の区間に合計 27 個の測点を設け、25 cm 間隔で設置した 3 本の容量式波高計を用いて斜面上の 3 点の水位変動を同時に計測した。また静水汀線から 1 m おきの 6 個の測点では水位計測と同時に底面上 1 cm の点における水平流速変動をレーザ・ドップラ流速計（カノマックス社製、15 mW He-Ne）を用いて計測した。水位は鉛直上向きを正とし、流速は岸向きを正とした。水位変動と流速変動は各測定点で 100 秒間連続計測し、読み取り間隔 0.05 秒で A/D 変換した後磁気テープに記録した。また、水槽側面から水面変動をビデオカメラで 50 cm の区間毎に分割して撮影することにより碎波状況を記録した。

一様水深部の水深は全てのケースにおいて 36 cm とした。合成波は波高が同じで周期が若干異なる二つの正弦波を重ね合わせたものとし、最大波の波高 1-8 cm、成分波の周期 0.8-1.4 s で波群の周期は 5 s と 7 s の二種類とした。不規則波は一様水深部における水位変動が

\* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

\*\* 正会員 静岡県庁

Bretschneider・光易型のスペクトル特性を持つように造波信号を作成した。規則波と不規則の条件は合成波の条件にはほぼ対応するものとし、全部で計40ケースの実験を行なった。不規則波の実験条件と方法については佐藤ら<sup>8)</sup>を参照されたい。砕波限界はビデオ画像をコマ送り解析して約1700波の砕波に対してその諸元を読み取り、データを計算機に入力することにより整理した。

水位変動と流速変動記録にそれぞれ遮断周波数が波群の周波数となる様な数値ローパスフィルターをかけて長周期変動成分を抽出した。これらから各測点における長周期成分の伝播速度、長周期成分の振幅等の諸特性を明らかにした。また、長周期変動成分と砕波限界との関係を考察するため、ビデオ画面から読み取った砕波の一波ごとに対して砕波位置の砕波時刻における水位と流速の長周期成分の値を評価し、砕波の諸元とともに計算機に入力した。砕波点における水位や流速の長周期成分の値は、砕波位置をはさむ二測点における長周期変動の振幅と位相を内挿することにより評価した。

### 3. 長周期変動成分の特性

図-2は合成波条件において、水位と流速記録を全時間において平均して得られる平均水位 $\bar{\eta}$ と定常流速 $\bar{U}$ の分布である。図中 $T_1, T_2$ は成分波の周期、 $H_1, H_2$ は波高であり、 $T_0$ は波群の周期を表している。また、矢印は成分波の代表的な砕波点を示している。平均水位は砕波帯外では若干低下しており、波高の大きな波の砕波点付近から徐々に上昇し、汀線近傍まで上昇を続ける。一方定常流速は砕波帯外ではほぼ0で、波高の大きな波の砕波点から徐々に冲向きとなり、波高の小さな波が砕け、ほとんどの波が段波状となって進行する地点付近で最も強くなっているのがわかる。

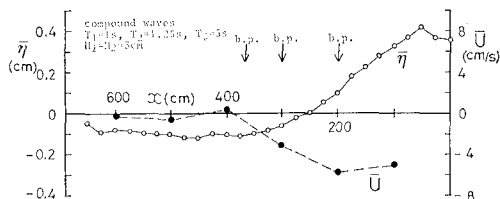


図-2 合成波条件における平均水位と定常流速の分布

合成波条件の水位や流速変動には、成分波相互の非線形干渉や砕波点の変動などの影響により、上記の定常成分に加えて波群の周期で変動する長周期成分が顕著にみられた。図-3は砕波帯内外の2点における流速変動の実測値 $u$ とその長周期変動成分 $u_l$ を示したものである。砕波帯外の水深の深い領域では波群の中央部に位置する波高の大きい波の通過時には平均水位の低下と冲向

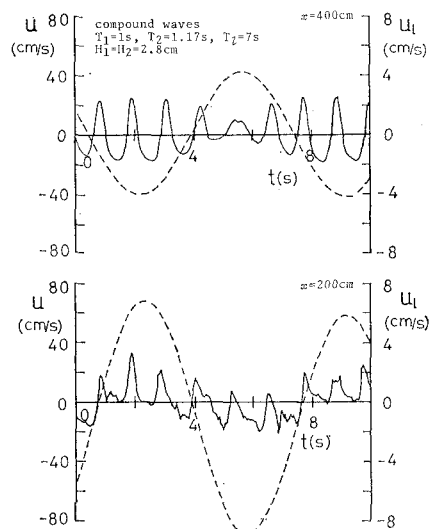
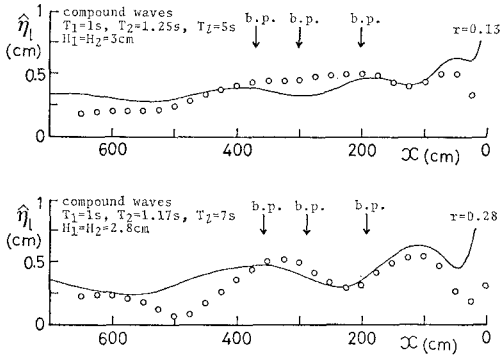


図-3 合成波のもとでの流速とその長周期成分

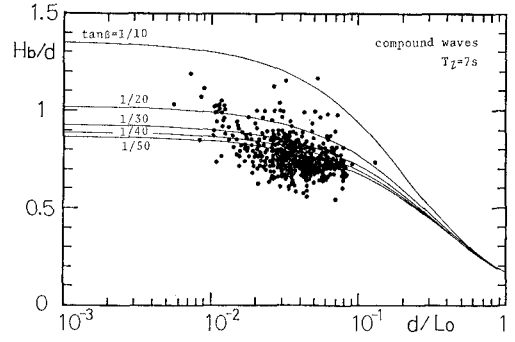
きの流れがみられ、波群の前後の部分では平均水位の上昇と岸向きの流れがみられる。これに対し、砕波帯内では波群の崩壊とともに長周期変動も複雑な挙動を示しているように思われた。

図-4は数値フィルターにより分離した長周期水位変動 $\eta_l$ の振幅を示したものである。実線は長周期変動が部分重複波を形成しているとして計算した振幅の計算値である。ここで反射率 $r$ は、実測された長周期水位変動の振幅をもとに評価した。このようにして評価した反射率の平均値は、波群の周期が5sの条件では約12%、7sの条件では約29%であった。図-5は長周期水位変動の伝播速度を示したものである。一点鎖線は波群の周期に対する波の位相速度 $C$ 、破線は成分波の周期に対する群速度 $C_g$ であり、いずれも微小振幅波理論により計算した。また実線は、汀線における反射を考慮した部分重複波のみかけの移動速度 $C_r$ である。図-4, 5より、波群の周期が5sの条件における長周期水位変動は、波高の大きな波が砕波する $x=400$  cmより沖側ではほぼ成分波の群速度で伝播しているのに対し、砕波帯内では部分重複波を形成しているとみなせることがわかる。これに対し、波群の周期が7sの条件では反射率が大きいため、砕波帯外でも部分重複波としての特性が顕著にみられた。

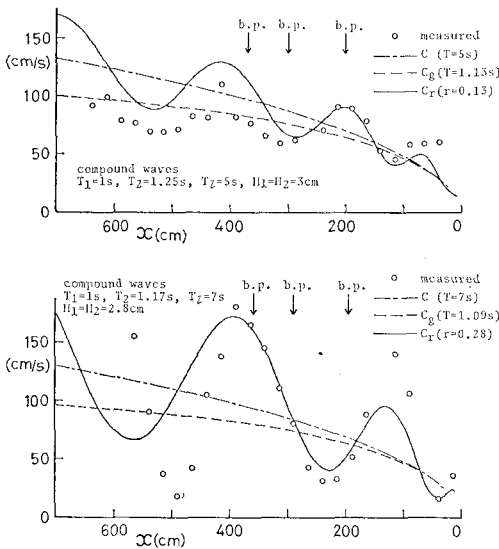
不規則波条件に対してはまず水位と流速のスペクトル解析を行ない、波浪変形に伴うスペクトル形状の変化について考察した。その結果、0.3 Hz以下の周波数成分は長周期変動成分とみなせるものと考えられたため、数値フィルターを用いてその特性を検討した。このような長周期の変動成分は砕波帯内で顕著であり、特に汀線近



図—4 水位変動の長周期成分の振幅



図—6 合成波の碎波条件



図—5 水位変動の長周期成分の伝播速度

傍における流速の長周期成分は波動成分の振幅にはほぼ四敵する大きさであった。

#### 4. 碎波条件と長周期流速変動との関係

##### 4.1 合成波の碎波の分類

まず規則波と二成分合成波の碎波条件について検討した。その結果、規則波のデータはちらばりが小さく合田の碎波指標とはほぼ一致していることが確認されたのに対し、合成波条件では図—6に示した様にデータのちらばりが大きい。ここで碎波水深は碎波位置における平均水深とした。また図中  $\tan \beta$  は底勾配であり、実線は合田<sup>9)</sup>が提案した碎波指標の近似式で、次式で表される。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[ 1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi d}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $H_b$  は碎波波高、 $d$  は碎波水深、 $L_0$  は沖波波長である。

規則波と合成波でこのような碎波限界の違いがあらわれる原因としては、長周期水位変動、長周期流速変動、前後の波の特性の影響等が考えられる。今回の実験条件では成分波の周期は約1秒であり、波群の周期は5~7秒であったため、碎波する個々の成分波にとって水位や流速の長周期変動はそれぞれほぼ定常な水深の変化および流れの重疊と感じられるであろう。そこで碎波に重要な影響を与える要因として、碎波位置における碎波時の長周期水位変動の値、長周期流速変動の値および波群中における碎波の相対的な位置の3つを抽出し、これらをパラメータとして碎波データの分類を行なった。まず長周期水位変動による水深の変化率は高々5%であり、これによる水深の変化を考慮して碎波データを整理しても依然として合成波の方が碎波しやすい傾向がみられた。長周期流速変動と波群中における碎波の位置については、碎波一波ごとにデータを分類し検討したところ、長周期流速変動の流速値により分類した方がまとまりの良い整理が行なえることがわかった。図—7, 8 は、波が碎波している時に長周期流速変動が岸向きとなっているもの(図—7)と沖向きとなっているもの(図—8)で分類して整理したものである。図中の線は後述する合田の碎波限界式を波・流れ場に拡張したものである。両者を比較すると図—8の方が図—7よりデータ数が多く、しかも碎波しやすい傾向があることわかる。

##### 4.2 斜面上の碎波に及ぼす流れの効果

3. で述べた様に碎波帯内に引き起こされる流れの強さは定常成分と長周期成分を加えると約20 cm/sにも達する。本項ではこの程度の強さの流れが碎波条件に及ぼす影響について検討し、合成波および不規則波の碎波特性の解釈を試みる。碎波に及ぼす流れの効果については、岩垣ら<sup>10)</sup>、堺ら<sup>11)</sup>により、流れによる波長の変化を考慮すればMicheの碎波限界式を準用し得ることが示されている。しかし、Micheの碎波限界式は底勾配の影

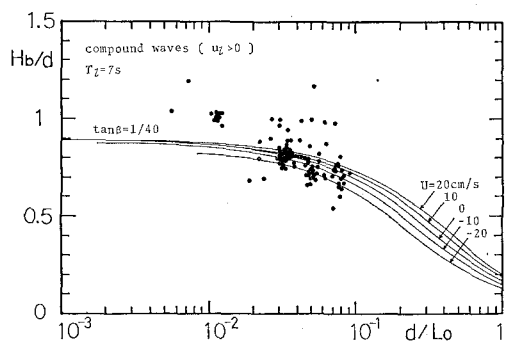


図-7 合成波の碎波条件(順流時の碎波)

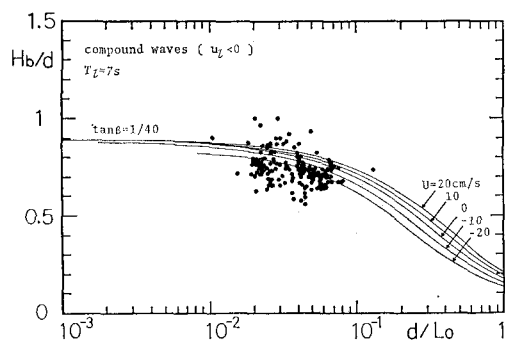


図-8 合成波の碎波条件(逆流時の碎波)

響を陽に含んでいないため斜面上の碎波に直接適用することができない。そこで、現在最も広く用いられている合田の碎波指標を波・流れ共存場に拡張して、実験結果との比較に用いることにした。

流れの影響を受ける波の碎波を考えるため、渡辺ら<sup>12)</sup>にならい、静水面における水平流速振幅と波速との比を指標として用いる。水深  $h$  で一様な流れ  $U$  (波の進行方向を正) がある領域に、流れがない場所での角周波数が  $\sigma$  の波が進行する場合、波数  $k$  は

$$(\sigma - kU)^2 = gk \tanh kh \quad (2)$$

という分散関係式を満たす。微小振幅波理論によれば、流れとともに動く座標系において静水面における水平流速振幅  $u_{b0}$  と波速  $C_b$  はそれぞれ

$$u_{b0} = \frac{H}{2} (\sigma - kU) \coth kh \quad (3)$$

$$C_b = \frac{g}{\sigma - kU} \tanh kh \quad (4)$$

で与えられる。波・流れ共存場における碎波限界は上式の  $u_{b0}/C_b$  が、流れがないときの碎波限界式から計算される値を超えた時に碎波が生じるものと考えることにより計算することができる。このようにして拡張した結果は、水平床条件に対しては岩垣ら<sup>10)</sup>が示した Miche の

碎波限界式とはほぼ一致することが確認された。したがって、今回の実験条件のような緩勾配条件における流れの効果を検討するうえでは適切な目安となる予想される。しかし、急勾配斜面に対する適用については今後波・流れ共存場の実験データを用いてその適用性を確かめる必要がある。

底勾配 1/40 の条件に対して計算した例が図-7, 8 に示されている。ただし、波の周期は 1.1 秒として計算してある。実験データは図-7 では  $U > 0$  の側に、図-8 では  $U < 0$  の側に多く集まっており、上述の碎波条件は実験データの分布状況を定性的に表していることがわかる。図-7 のデータのちらばりが大きいのは、同図のデータには波群後部に位置する波が多く、これらの波の碎波は波群中央部の波が碎けて水面が乱れている所で起こるためである。

### 4.3 不規則波の碎波と長周期流速変動との関係

図-9 は不規則波条件の碎波帯内における、水位変動、水位の長周期成分、流速の長周期成分の記録例を示したものである。図中の縦線はその波がちょうど碎波していることを示している。今回の実験においては不規則波の碎波はその 90% 以上が流速の長周期成分が負の時に発生していることがわかった。不規則波の碎波のうち、逆流の条件で碎波しているものに対して整理を行なったものが図-10 であり、合成波条件に対するものと同様に碎波しやすい傾向があることがわかる。ただし、碎波水深は長周期水位変動による水深の変化を考慮して評価してある。

以上に検討したように合成波および不規則波条件では、規則波条件とは異なり長周期の変動成分が卓越し、逆流の条件で碎波する波が圧倒的に多くなるため規則波条件より碎波しやすくなるものと考えられる。したがって合成波や不規則波の碎波条件を議論するうえでは、長周期水位変動による水深の変化とともに流速の影響も考える必要がある。

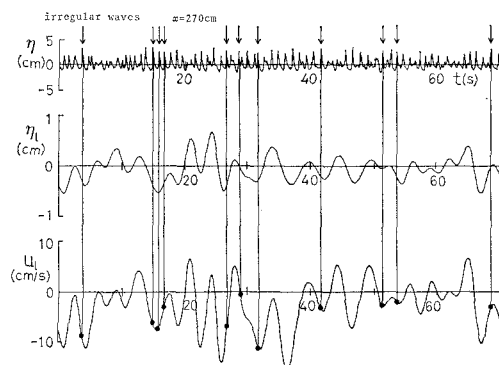
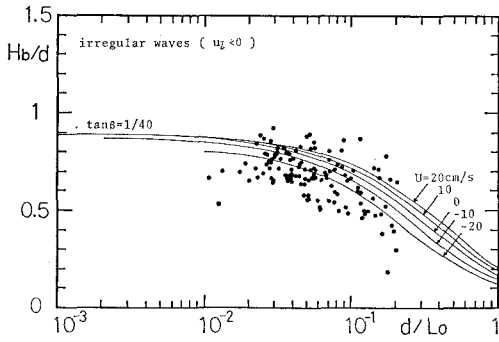


図-9 不規則波の水位変動と長周期変動成分



図—10 不規則波の碎波条件 (逆流時の碎波)

#### 4. 結 論

本研究では、合成波および不規則波の碎波限界と長周期変動成分の特性を解明することを目的として実験を行ない、以下の結論を得た。

- (1) 合成波の波群の周期が比較的短い場合における長周期変動は碎波帯外では群速度で伝播する拘束波となっているのに対し、碎波帯内では汀線からの反射波と重なり部分重複波を形成していることが認められた。合成波の波群の周期が長くなると汀線における反射率が高くなるため、碎波帯内外ともに部分重複波として特性が卓越してくる。
- (2) 合成波および不規則波の碎波限界を整理する際には、水位や流速の長周期成分の影響を考慮するとまとまりの良い整理が行なえる。緩勾配斜面における波流れ共存場の碎波限界は合田の碎波指標を拡張することにより評価できる。

本研究では、合成波や不規則波の碎波は長周期の流速変動の影響を考えることによりある程度解釈できることを示したが、碎波のデータのちらばりは依然として大き

く、不規則波の碎波現象を決定論的に扱うにはさらに詳細な検討が必要である。また、急勾配条件における碎波特性についても実験による検討が必要である。本研究は文部省科学研究費総合研究(A) (No. 63302048, 代表者中央大学・服部昌太郎教授) による補助を受けたことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 木村 晃・瀬山 明：斜面上の不規則波の碎波限界について，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 174-178, 1986.
- 2) 水口 優・堀田新太郎・中村孝志・川崎隆之：現地波浪の碎波条件について，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 152-156, 1987.
- 3) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，Vol. 14, No. 3, pp. 59-106, 1975.
- 4) 岩田好一朗・樺木 亨・信田 亘：緩斜面における不規則波の遡上高さと遡上周期，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 330-334, 1981.
- 5) 岩田好一朗・片岡純久・水谷法美：二成分波の碎波限界に関する一考察，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 46-49, 1985.
- 6) 磯部雅彦・西村仁嗣・柄登志彦：不規則波の碎波変形に関する実験的研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 139-142, 1980.
- 7) Dally, W. R. and R. G. Dean: Transformation of random breaking waves on surf beat, Proc. 20th Conf. on Coastal Eng., pp. 109-123, 1986.
- 8) 佐藤慎司・諫山太郎・柴山知也：緩勾配斜面における不規則波の底面流速変動特性に関する研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 78-82, 1988.
- 9) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 12, No. 3, pp. 31-69, 1973.
- 10) 岩垣雄一・浅野敏之・山中庸彦・永井文博：流れによる碎波に関する基礎的研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 30-34, 1980.
- 11) 堺 茂樹・佐伯 浩・尾崎 晃：一様流を伴う有限振幅波理論の適用性，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 64-68, 1983.
- 12) 渡辺 晃・原 哲・堀川清司：重合した波浪場における碎波について，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 5-9, 1983.