

砕波帯における長周期波の発生に関する実験的研究

長瀬 覚*・水口 優**

1. はじめに

浅海域における長周期波は漂砂や海岸構造物の安定問題等に深く関わっており、重要な研究課題の一つである。長周期波の発生機構についてはこれまでいくつか議論があるが、未だ不明な点が多い。砕波帯における長周期波の発生については入射波の波群性により砕波点の変動することによるという Symonds et al. (1982) の理論がある。砕波点の岸沖方向の変動により radiation 応力の働く場が変動し、それが強制外力となって、砕波点の岸沖方向へ長周期波が発生することを示すものである。最近では Schäffer (1993) が波群構造を持つ入射波に必然的に伴う set-down 波と砕波帯内に持ち込まれる波群構造も考慮に入れて、その理論に詳細な検討を行っている。その発生理論を定性的に支持するものとして、Kostense (1984) による二成分合成波を用いた実験があるが、砕波帯内で起こる現象の説明が不十分であり、断片的な議論にとどまっている。実験水槽内は波群性入射波を造波すると造波板での境界条件を満たすために自由波が付随して発生すること、さらには岸側からの反射波が造波板で再反射することにより多重反射状態となるため、砕波帯で発生する長周期波を議論することは難しい。Kostense (1984) は 2 次のオーダーまで考慮した造波制御と造波板で反射波を吸収するという精密な実験を行っている。日野ら (1988) は砕波点と汀線との距離が長いステップ地形に、波高とその変動率が共に比較的大きくかつ波群周期の長い入射波を与えて、発生する長周期波が汀線付近では bore 状化し、非線形性の考慮が必要であることを報告している。

本研究は砕波後に一様水深部を有する地形上に、波高およびその変動率が比較的小さい単一波群性入射波を与えることの結果としての砕波点の岸沖方向の変動により、砕波点の岸沖方向へ長周期波が発生するというメカニズムについて実験的に検討し、砕波帯付近で起こる現象の解明を試みる。発生する長周期波に対してこれまで提案されている入・反射波分離手法 (水口, 1991; 香取

ら, 1992) を適用し、長周期波の挙動を調べる。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概要を図-1 に示す。長さ 20 m、幅 30 cm の両面ガラス張り二次元水槽において一端にフラップ型の造波装置が設置されている。他の一端には勾配 1/20 の斜面とその岸側に長さ 2 m にわたって一様水深部を設置した。沖側、岸側の一様水深部における水深はそれぞれ 33.5 cm、2.0 cm である。岸側一様水深部には基本波を消波させる目的で長さ 80 cm にわたって消波マットを設置した。測定計器としては入・反射波の分離を目的として、沖側一様水深部に 40 cm 間隔で 3 本の新容量式水位計 (正豊工学製、以下水位計とする) を設置した。また砕波帯付近における現象を詳しく調べるために 5 cm 間隔で 3 本の水位計とその中央に設置したレーザー・ドップラー式流速計 (LDV, DISA 製)、または小型大電流型電磁流速計 (EMCM, アレック電子製、以下流速計とする) のセットを砕波帯沖から消波マット直前ま

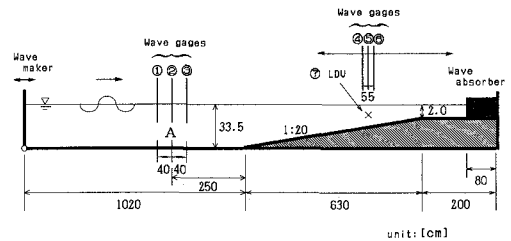


図-1 実験装置の概要

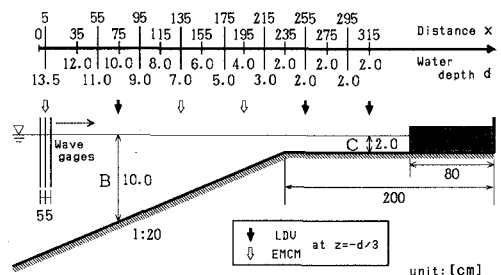


図-2 水位計・流速計の設置位置

* 学生会員 中央大学大学院 土木工学専攻
** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

での間に移動させた。あわせて高速ビデオカメラ (NAC 製, 200 コマ/s) による砕波点の変動状況の撮影も行った。水位計・流速計の設置位置と水深の関係を図-2 に示す。

実験に用いた波は造波信号として基本波の周期を T とし、波高変化が

$$H(t) = \begin{cases} H_M & t < t_0, t_0 + T_g < t \\ H_M(1 + \beta(1 - \cos(2\pi/T_g t))) & t_0 < t < t_0 + T_g \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

で表される単一波峰的な波群構造をもつ入射波を与えた。ただし、造波の初期段階で余分な変動が生じないように 3 s 間のゼロ状態の後 40 s 間にわたって波高を徐々に上げ、さらに 40 s 間一定の波高の状態を維持し定常状態に達した後に上記の波高変化を与えるという工夫をした。なお造波制御は 2 次のオーダーまで考慮していない。実験ケースは 2 ケースである。実験条件は基本波の周期 $T = 1.0$ s, 波群周期 $T_g = 8.0$ s, 沖側一様水深部で平均波

の波高 $H_M = 4.5$ cm (図-1 の A 地点) であり波高変動率 β としては砕波点の変動を微小にするために比較的小さな値 0.1, 0.2 の 2 種類とした。データの取得はサンプリング時間 0.02 s で AD 変換してパソコンのハードディスクに記録した。測定時間は造波開始直後から 180 s である。

3. 実験結果とその考察

(1) 基本波とその波群構造

$\beta = 0.2$ のケースにおける A (図-1), B (図-2) 地点の水位変動が図-3 である。波群構造としては A 地点では包絡線は上下対称な形であり、また波群ピークの波高は平均波の波高の約 1.4 倍と造波信号として送った波高変化式 (1) に一致する。斜面上に入って水深 10.0 cm の B 地点では波群の峰は尖り、谷は滑らかになって、浅海域の特徴が表れている。

図-4 は消波マットによる基本波の消波効果を示す。水位計と流速計の組み合わせによる浅海域での非線形性を考慮した疑似非線形長波理論 (例えば、水口, 1991) を適用し、入・反射波の分離を行った結果、反射波 η_r に見られるように基本波は十分に消波されている。基本波の消波が不十分な場合は水槽内で多重反射系が形成されて、そのために意図せぬ不安定な砕波点の変動が生じる。

図-5 は定常状態における砕波帯付近での状況を示す。平均波の砕波は $x = 125$ cm 付近で、砕波水深は約 7.5 cm, 砕波波高は約 5.9 cm, 砕波形式は崩れ砕波であった。砕波後、波峰高 (波高) は急激に減衰するが岸側一様水深部のはじまりに近い $x = 240$ cm 付近で波はほぼ再生され、C 地点では図-4 に見られるように波が 2

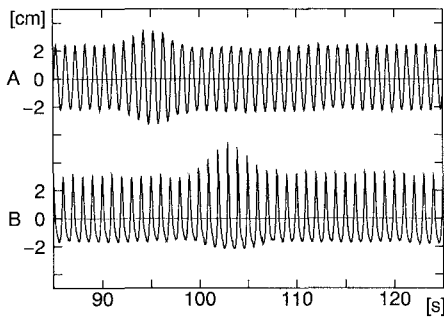


図-3 $\beta = 0.2$ のケースにおける水位変動
A, B は図-1, 2 における測定地点を表す。

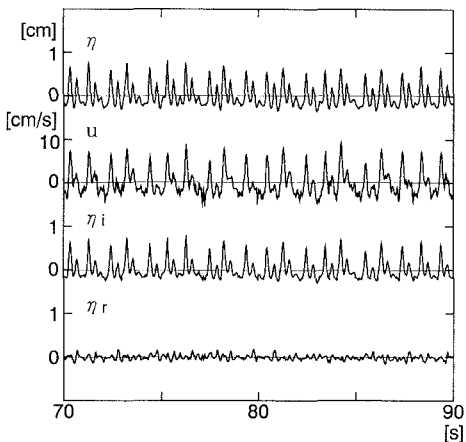


図-4 C 地点における基本波の消波状況
C 地点の位置は図-2 を参照、 η は水位変動、 u は流速変動、 η_i は入射波、 η_r は反射波を表す。

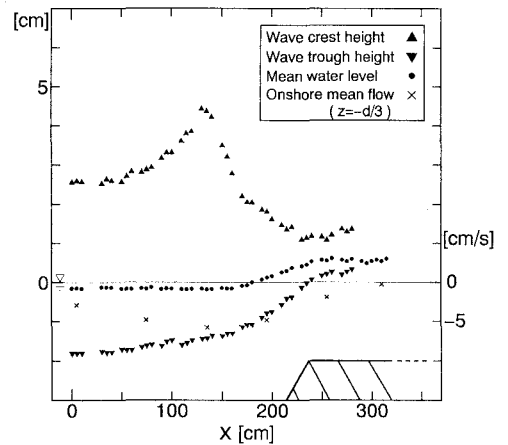


図-5 定常状態における波峰高、波谷高、平均水位、定常流速の岸沖方向分布
時間にして 70 s~90 s における約 20 波の平均値をプロットしている。流速計は底面から水深の 2/3 の所に設置した。

つに分裂する。平均水位は沖側では静水面からの小さな低下があり、 $x=180$ cm 付近から徐々に上昇しはじめ、岸側一様水深部で一定となり、そこでは約 0.6 cm の水位上昇がある。定常流速は砕波点付近が沖向きで最も強く、C 地点でほぼ 0 となる。

砕波帯内の波群構造の状況を、図-6 は空間的に、図-7 は時間的に示したものである。砕波後の波高減衰は波

高の違いにかかわらず、波の再生域直前までかなり直線的である。波群は基本波の群速度で伝播しており、平均波の砕波点直後の $x=130\sim 150$ cm の地点ではわずかながら波群構造の逆転が観察できる。しかし、砕波帯中央から波の再生域にかけては波群構造は消滅し、むしろ砕波の不安定性によって全体的な変動が見られる。砕波帯付近の波群構造のモデル化においては波群消滅率 κ (Schäffer, 1993) が用いられるが、砕波によって波群構造はほとんど消滅するので、近似的には $\kappa=1$ と考えてよいであろう。

図-8 は砕波点の岸沖方向の変動状況である。砕波の位置は波頂部に泡がではじめる地点と定義した。砕波点の時間変化は入射波の波高の時間変化の形状を反映している。Nakamura・Katoh (1992) は現地観測結果により砕波点の時間変動について、小さい波が大きい波より岸側で砕波するために砕波点まで伝播するだけの時間の遅

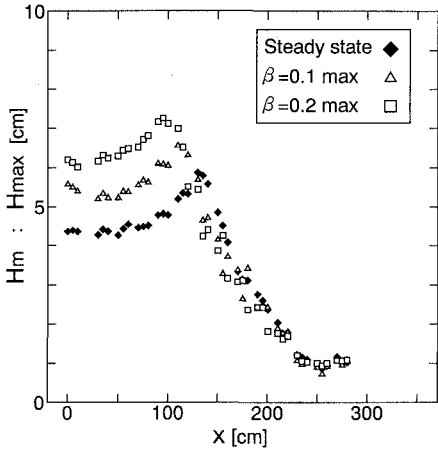


図-6 砕波による波高減衰
 H_m は定常状態における平均波高である。 H_{max} は $\beta=0.1, 0.2$ のケースにおける沖での最大波を表す。

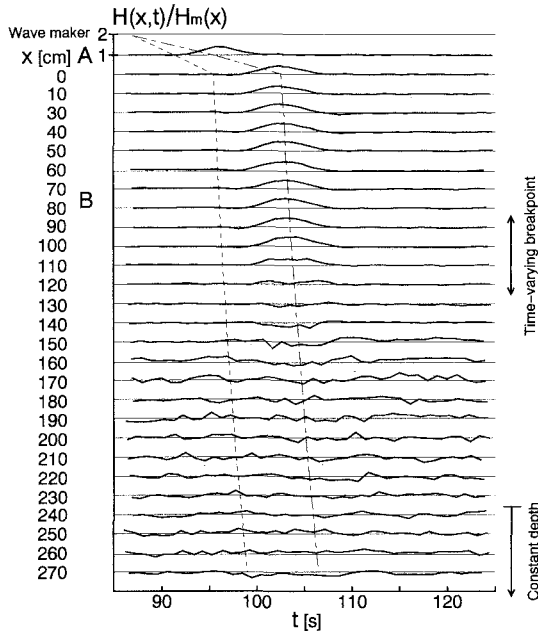


図-7 $\beta=0.2$ のケースにおける波高の時間変化
波高は各地点における平均波高で無次元化している。平均波高は図-6 を参照。点線、一点鎖線はそれぞれ微小振幅波理論による周期 8 s の波速、周期 1 s の群速度での伝播経路を表す。

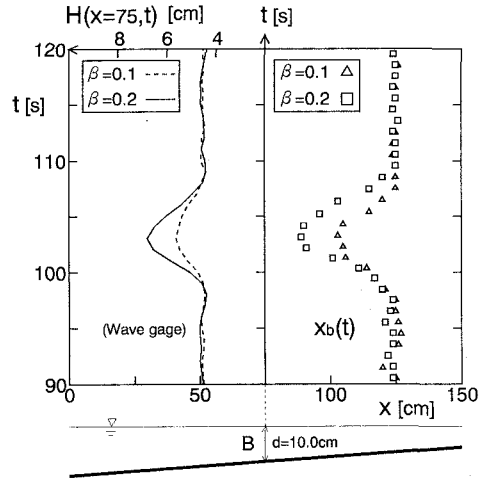


図-8 高速ビデオカメラによる砕波点の岸沖方向の変動状況
図の左側には入射波として砕波帯沖である B 地点 ($x=75$ cm) における波高の時間変化を示す。水位変動としては図-3 の B を参照。

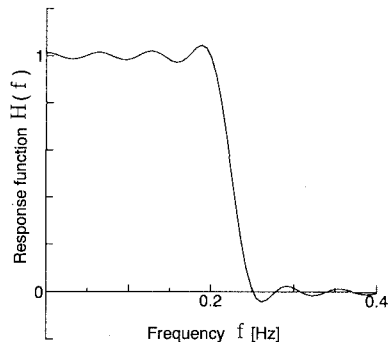


図-9 数値 low-pass filter の特性

れを考慮する必要を指摘している。ここではこの程度の波群性ではその扱いは必要でないと判断される。なお碎波形式は $\beta=0.1, 0.2$ のケースの最大波とも崩れ碎波であった。

(2) 碎波帯で発生する長周期波

長周期波は図-9 に示す特性をもつ数値フィルターを施したものと定義した。この数値フィルターにより 0.25 Hz 以上、すなわち 4s 以下の短周期な波は完全にカット

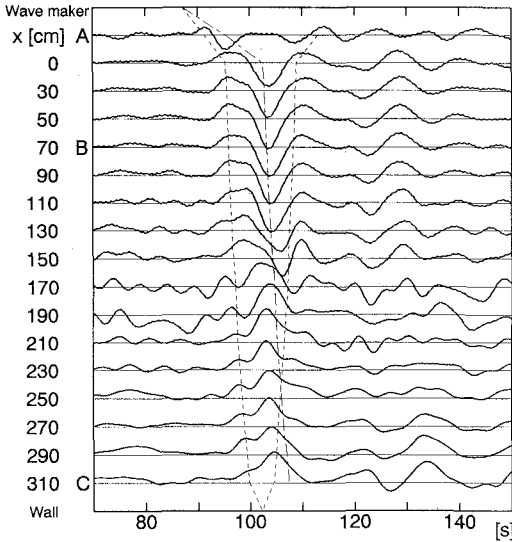


図-10 $\beta=0.2$ のケースにおける長周期波
定常状態における平均水位の位置に横軸を設定している。縦軸の単位は一目盛 0.2 cm である。点線、一点鎖線はそれぞれ微小振幅波理論による周期 8 s の波速、周期 1 s の群速度での伝播経路を表す。周期 8 s の波速での伝播経路は岸側の壁で反射され造波板で再反射されるまでを示す。

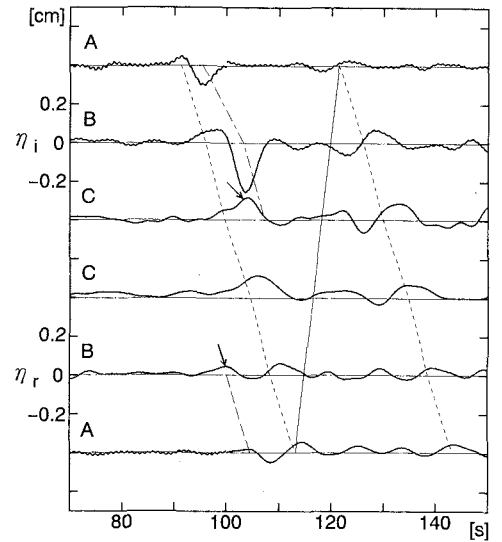


図-12 長周期波の入・反射波分離結果 ($\beta=0.2$)
点線、一点鎖線の意味は図-10 と同様である。実線は自由波の造波板からの再反射、矢印は碎波開始点において岸沖方向へ発生する長周期波、破線はそこから沖方向へ発生する長周期波の伝播経路を表す。A, B, C 地点における静水面からの平均水位はそれぞれ -0.08 cm, -0.15 cm, 0.59 cm であり、その位置に横軸を設定している。

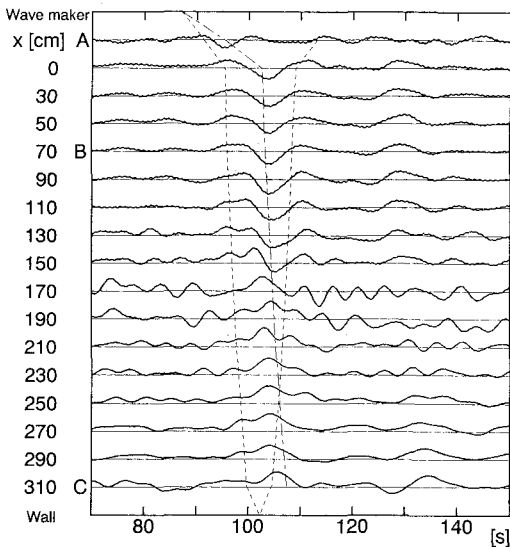


図-11 $\beta=0.1$ のケースにおける長周期波
図の説明については図-10 を参照。

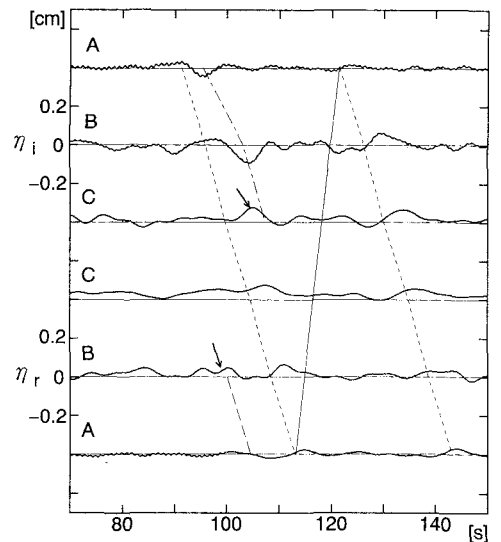


図-13 長周期波の入・反射波分離結果 ($\beta=0.1$)
図の説明については図-12 を参照。

されることになる。図-10, 11 は $\beta=0.2, 0.1$ のケースにおいて生データにこの数値フィルターを作用させて得られた長周期波である。波群中の平均水面の低下いわゆる set-down 波が基本波の群速度で伝播する様子が一点鎖線で示される。造波制御を 2 次のオーダーまで考慮していないので、造波板での境界条件を満たすために set-down 波と位相が逆で同程度の大きさの自由波が同時に発生する可能性がある。それを確かめるために波群周期での自由波の伝播経路を点線で示した。図-10 の A 地点の 91 s 付近に見られる波峰がその自由波のものであると考えられる。この自由波はここで見るように独立に追跡することが可能である。明らかにそれとは別に砕波帯において (例えば, $x=170$ cm 付近) set-down 波の到達よりわずかに早い時刻にはあるが、正の峰を持つ長周期波が発生して自由波の波速で伝播しているのがわかる。わずかに早い時刻で発生する理由としては砕波による波形の急激な突っ込みが影響しているのではないかと考えられる。 $\beta=0.1$ のケースにおいても長周期波の発生の定性的な様子は $\beta=0.2$ のケースと同様であり、その大きさは $\beta=0.2$ のケースの半分程度となっている。

図-12 は $\beta=0.2$ のケースの A, B, C 地点における長周期波の入・反射波への分離結果を示す。長周期波の入・反射波への分離は A 地点においては水位計群による香取ら (1992) の波形追跡法, B, C 地点においては水位計と流速計の組み合わせによる線形長波理論 (例えば, 水口, 1991) を適用した。特に A 地点では自由波と拘束波が混在しているため波形追跡法の適用は難しいが、便宜的に波速のあてはめは時系列の前半では set-down 波に着目して基本波の群速度を、後半では波群周期の波速をあてはめた。分離結果はほぼ良好である。考えられる長周期波のそれぞれの伝播経路を探ることで、矢印で示した B 地点における η_r , C 地点における η_i は単一波群性入射波による砕波点の岸沖方向の変動によって、砕波点域においてそれぞれ沖方向、岸方向へ発生する長周期波

であり、その後、長波の波速で伝播していることがわかる。図-13 の $\beta=0.1$ のケースも同様な傾向を示し、大きさとしてはやはり $\beta=0.2$ のケースの半分程度になっている。

4. おわりに

波群性入射波の砕波帯付近における挙動を解明する第一歩として、単一波峰的な波群構造を持つ入射波の砕波帯付近における挙動を明らかにした。砕波点の岸沖方向の変動により砕波帯の岸沖両方向へ長周期波が発生することを実験的に検証した。今後の課題としては実験手法として自由波、拘束波が混在する場における入・反射波分離手法の確立が必要であり、最終的な目標としては水口 (1994) などによる理論的な研究を参考にしながら、砕波帯において発生する長周期波の定量的評価を確立することである。

参考文献

- 香取完和・平良達也・水口 優 (1992): 波形追跡法による入射波の分離, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 16-20.
- 日野幹雄・仲座栄三・與那覇健次 (1988): 波群によって引き起こされる Bore 状サーフビートに関する研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 197-201.
- 水口 優 (1991): 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 31-35.
- 水口 優 (1994): 波群性入射波の砕波帯付近に発生する長周期波について, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 96-100.
- Kostense, J. K. (1984): Measurements of surf beat and set-down beneath wave groups, Proc. 19th ICCE, Houston, pp. 724-740.
- Nakamura, S. and K. Katoh (1992): Generation of infragravity waves in breaking process of wave groups, Proc. 23rd ICCE, Venice, pp. 990-1003.
- Schäffer, H. A. (1993): Infragravity waves induced by short-wave groups, JFM, Vol. 247, pp. 551-588.
- Symonds, G., D. A. Huntley and A. J. Bowen (1982): Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint, JGR, Vol. 87, C1, pp. 492-498.