

自由長波制御により造波された波群拘束長周期波の 浅水・碎波変形と構造物による重複波の特性

池 野 正 明*・田 中 寛 好**

1. はじめに

不規則波の波群に拘束された長周期波は、沖から浅海域へ伝播する従いその振幅が増幅され碎波帯付近では短周期波成分よりも卓越する場合がある。この長周期波は、最近前浜侵食や浮遊砂に顕著な影響を及ぼす報告例（加藤・柳嶋，1992；佐藤ら，1993）や船体係留時の surge の固有周期に近いために係留索が切断される事例（松良ら，1994）が起きており、長周期波がこれらに及ぼす影響を十分解明しておく必要がある。

水理模型実験において通常の造波方法で波群を造波すると、拘束長周期波だけでは造波板での境界条件を満たすことができないため、これ以外に数種類の自由長周期波が発生し実験時の拘束長周期波の正確な再現の妨げとなっている。

本研究は、これらの自由長周期波を消去することにより波群に拘束された長周期波を正確に再現する造波方法を検討し従来の造波方法との比較によりその有効性を示すとともに、2成分合成波を対象に拘束長周期波の浅水・碎波変形を伴う伝播特性と構造物により重複波が形成される場での長周期波の特性を実験により検討したものである。

2. 波群拘束長周期波の造波方法

通常、2成分合成波のピストン型造波板の変位は、1次オーダーでは以下のように表される。

$$X_p^{(1)}(t) = \frac{g}{B_1 2\pi f_1} \cdot a_1 \cdot \sin 2\pi f_1 t + \frac{g}{B_2 2\pi f_2} \cdot a_2 \cdot \sin 2\pi f_2 t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 f_1, a_1 および f_2, a_2 は2成分合成波の基本周波数と振幅、 B_1, B_2 は f_1, f_2 に対応する水位と造波板変位との伝達関数である。

本来、造波すべき目標である2成分合成波の波群に拘束された長周期波の水位変動は次式で表される。

$$Y_B(t) = G_{12} \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - (k_1 - k_2)x\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 x は造波板中立点から前方の距離、 G_{12} は基本周波数 f_1, f_2 の1次波と2次長周期波との間の伝達関数である（Sand, 1982）。

ただし、実験では、水路端に造波板が実際には存在し、式（2）の水位変動に対応する速度ポテンシャルは造波板における境界条件を2次オーダーで満足することができない。このため、波群を通常の造波板変位に対応する式（1）で造波すると、それに付随して次式で表される水位変動が発生する。これらは、2次オーダーまでの展開により誘導できる。

$$Y_F(t) = -\frac{2\pi(f_1 - f_2) \cdot C_{12}}{g} [a_1 \cdot a_2 \cdot (F_{11} + F_{12}) \cdot \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - \Delta k_f x\} - a_1 \cdot a_2 \cdot F_{23} \cdot \sin\{2\pi(f_1 - f_2)t - \Delta k_f x\}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Δk_f は周波数 $f_1 - f_2$ と造波水深 h との間の分散関係式を満たす自由波の波数である。 F_{11}, F_{12}, F_{23} は、造波水深、基本周波数およびその振幅に依存する関数であり、紙面の都合上詳細説明は割愛するが、その関数形は Barthel et al. (1983) に詳しい。 C_{12} は、ピストン型造波板の場合、次式で表される。

$$C_{12} = \frac{8\pi(f_1 - f_2) \cdot \cosh \Delta k_f h \cdot \sinh \Delta k_f h}{\Delta k_f (\sinh 2\Delta k_f h + 2\Delta k_f h)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上記の式（3）は拘束長周期波の式（2）と周期が等しい自由波となる。式（3）の自由波は、関数 F_{11}, F_{12}, F_{23} に関係する3種類の長周期波から構成されている。式（3）中、まず F_{11} に対応する項は造波板付近で再現すべき拘束波と逆位相となる parasitic wave Y_P 、つぎに F_{12} に対応する項は造波板境界が移動することにより発生する displacement wave Y_D 、最後の F_{23} に対応する項は1次オーダーの減衰定常波に起因する local disturbance wave Y_L である。

水路内で式（2）の拘束長周期波を正確に発生させるためには、式（3）の自由長周期波を消去する必要がある。そのためには、式（3）と逆位相となる自由長周期波を発生させる制御信号を造波板の変位に付加すればよい。Barthel et al. (1983) と同様に、付加すべき2次オ

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部 構造水理グループリーダー

オーダーのピストン型造波板の変位を誘導すると次式を得る。

$$X_p^{(2)}(t) = a_1 \cdot a_2 \cdot F_{23} \cdot \cos 2\pi(f_1 - f_2)t + a_1 \cdot a_2 \cdot (F_{11} + F_{12}) \cdot \sin 2\pi(f_1 - f_2)t \quad \cdots (5)$$

上記の式(5)は、造波板における境界条件を2次のオーダーまで完全に満足させるために付加される変位量である。式(3)および式(5)中の local disturbance wave に対応する F_{23} に関する項の寄与分は、 F_{11} と F_{12} に関する項の寄与分には比較的小さいため、実用上無視することができる (Sand, 1982)。従って、以下の水理模型実験への適用の際には、式(5)中の F_{23} に関する項を省略して用いている。

3. 水理模型実験

2.の造波方法により2次元造波水路(長さ76.5m, 幅0.9m, 深さ1.2m)を用いて水理模型実験を実施した。まず、図-1に示す、1/20勾配と1/200勾配斜面を組み合わせたステップ海底地形上で浅水・碎波変形実験を実施した。実験水深は水路中央の水平床部で80cmと50cmの2種類である。入射波は、基本周波数 f_1 を0.5~1Hzとし、基本周波数との差が0.05~0.3となるように他方の周波数 f_2 を設定した2成分合成波である。 f_1 と f_2 の成分波の各々の波高は6~8cmであり図中央の1/20勾配斜面上で碎波するように設定した。図-1に示すように、○印と●印の位置に容量式波高計と電磁流速計を配置し水位変動と岸沖流速変動を同時計測した。つぎに、図中の1/200勾配斜面上の $X=66$ mの地点に直立ケーソン堤を設置し越波しない条件で重複波実験を実施した。なお、現時点で長周期波に対する適切な反射波吸収制御法は確立していないため、既存の反射波吸収制御法は用いず、実験水路が長いことを利用して、長周期波が直立堤により反射され造波板まで到達する以前に測定を終了した。

計測された生データをFFT解析し0.25Hz以上の短周期成分のフーリエ係数を0で置き換え逆FFT解析により時系列データに戻して長周期波成分を抽出した。さらに、3台の波高計データを用いた合田の方法および波高計と流速計データを用いた疑似非線形長波理論(久保田ら, 1989; 水口, 1991)により入射分離を行い、短・長周期波の岸向き(入射)・沖向き(反射)成分を算定した。

4. ステップ海底地形上の長周期波の浅水・碎波変形

(1) 自由長波制御法による発生波の特性

図-2は、実験に先立ち、拘束波 Y_B と自由波 Y_P , Y_D および従来の造波法と自由波制御法による発生波を予測計

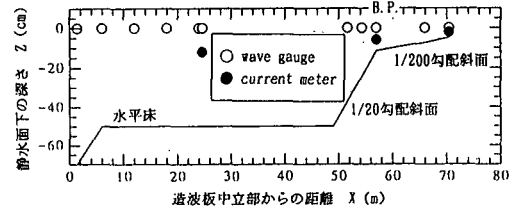


図-1 実験に用いたステップ海底地形の模型(水平床部の水深が50cmの場合)

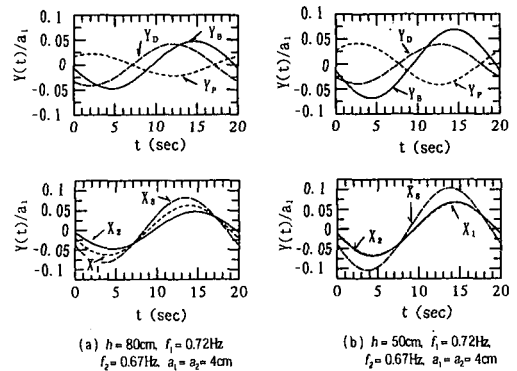


図-2 造波板により発生する拘束波と自由波および従来法と自由波制御法による発生波の予測計算例

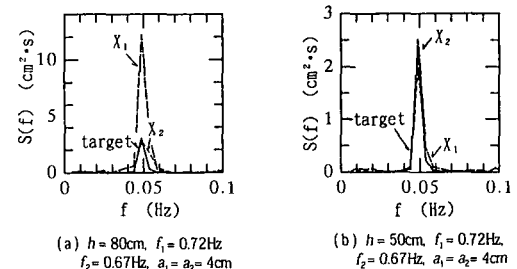


図-3 従来法と自由波制御法による長周期波のパワースペクトルの実験結果の比較例

算した例である。図中、上段が Y_B , Y_P , Y_D の波形、下段が従来の造波法 X_1 , Y_P と Y_D を共に消去して造波した場合 X_2 , Y_P のみを消去して造波した式(5)中の F_{12} を0)場合 X_3 の発生波の波形である。図はいずれも造波板中立部から前方に6mの地点の出力波形である。

図-2によると、水深が80cmの場合の図(a)では、 Y_D の振幅が Y_P の振幅よりもかなり大きい。これに伴い、 Y_B 以外に Y_D と Y_P を発生させてしまう従来法 X_1 では、 Y_B のみが存在する X_2 よりも長周期波の振幅が大きくなる。さらに、比較のために実施した X_3 では、 Y_P のみが消去されているため中途半端な制御となり、 X_1 よりも振幅がさらに大きくなっている。これに対し、同様の条件で水深のみが50cmと浅い場合の図(b)では、 Y_D と

Y_p の振幅がほぼ等しく互いに逆位相の関係にあるため相殺され、従来法 X_1 でも X_2 とほぼ同じ長周期波が再現できる。ただし、ここでも X_3 では過大な振幅となっている。

つぎに、図-2 の予測結果を検証するため、従来法 X_1 と自由波制御法 X_2 により造波された長周期波のパワースペクトルの実験値と拘束長周期波の目標値を比較したのが図-3 である。図-3 中の実験結果の特性は、図-2 に示した造波法 X_1 と X_2 による計算結果の特性と一致し、かつ造波法 X_2 の有効性が認められる。

(2) 波群と長周期波の伝播特性

図-4 は、上記 3 種類の造波方法による長周期波高の実験値と短周期波高の実験値との比 (同一地点の H_{rms} の比) の岸沖分布を示した例である。図中の B. P. は砕波点を示している。なお、本実験における砕波形態は全て崩れ波砕波であった。図-4 によると、造波方法の違いにより生じる沖での長周期波高の差異は造波水深や基本周波数に依存してその大小関係が変化する。さらに、岸側へ伝播するに従いこの差異が拡大されている。また、長周期波高は岸側へ伝播するに従い浅水変形を受けて増幅され砕波帯内で最大値を示す。

図-5 は、造波法 X_1 と X_2 による海底地形上の代表点

における短周期波と長周期波の実験波形を比較したものである。図(a)は水平床上の砕波点より沖の地点、図(b)は砕波点、図(c)は砕波帯内の地点に対応している。図-5 によると、沖での X_2 による長周期波波形は、 X_1 の場合に比べ波群のセットダウン波としての性質をよく再現していることから造波方法の有効性が確認できる。つぎに、砕波点における両造波法による波形を比較すると、波群の極大点付近で砕波により波群が一部削られる時の長周期波のセットアップ部に著しい差異が認められる。砕波帯内の両造波法による長周期波を比較すると、 X_2 による振幅が若干大きく波群との位相も異なっている。

(3) 長周期波の岸向き成分と沖向き成分の伝播特性

上記の図-4、図-5 で示した長周期波の実験結果には、海底地形急変部あるいは水路岸側端部消波材からの反射波および砕波帯内で新たに発生し沖へ伝播する長周期波成分が混じっている可能性がある。本実験では、予め消波材の短周期波成分の消波効果は確認しているが、長周期波成分を完全に消波することはむずかしい。そこで、波高計と流速計によりデータを同時計測している 3 地点を対象に長周期波の岸向き成分と沖向き成分を入反射分離して各々の伝播特性を議論する。

図-6(a) は、造波法 X_2 による実験結果であり、3 地点における長周期波の岸向き成分の伝播特性を示したものの例である。図(b) は、同一条件下の 3 地点における長周期波の沖岸向き成分の伝播特性を示したものの例である。図中には群速度 C_g と自由長波の波速 C_f を記入している。図(a)によると、沖での波群のセットダウン波としての長周期波はその振幅を変化させながら砕波帯内でも存在する。これに加えて、砕波点では沖での拘束波よりも短い周期で群速度とは異なる波速の新たな長周期波が発生し砕波帯内を伝播している。この発生波は、先に図-5(b) で示した、砕波により波群の一部が削られる時の長周期波のセットアップに対応するものであると推察されるため、波群の一部が変化したことに伴う‘拘束波’というべきであろう。また、長周期波の沖向き成分は自由波の波速で伝播しているが、砕波帯内で新たに発生し沖へ伝播する長周期波成分と消波材からの反射波成分等を分離することは現時点では困難である。

図-7 は、造波法 X_2 による実験結果であり、3 地点における長周期波の岸向き成分のパワースペクトルを比較したものの例である。図-7 によると、沖での長周期波のパワースペクトル成分は周波数 0.05 Hz の拘束波に対応しているが、砕波帯内ではこの周波数成分が増幅され、さらにその 2 倍、3 倍周波数等に対応する長周期成分が発生している。

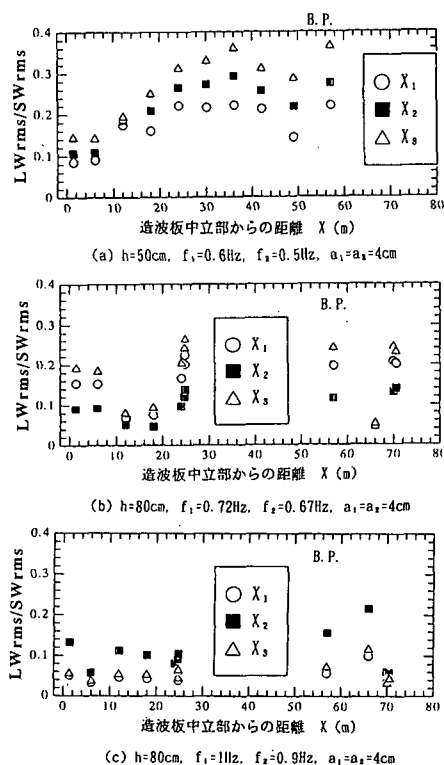


図-4 3 種類の造波方法による長周期波と短周期波の H_{rms} 比 (実験値) の岸沖分布の比較例

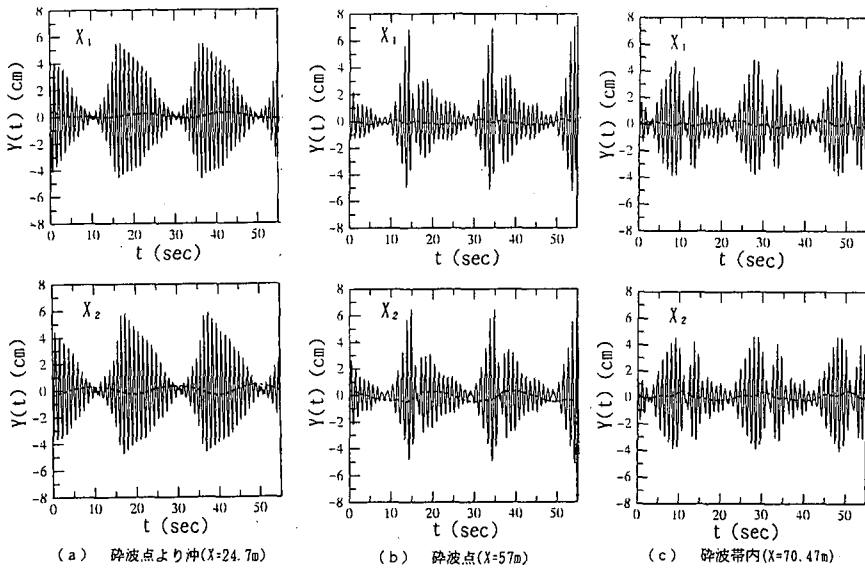


図-5 従来法と自由波制御法による短周期波と長周期波の実験波形の例
($h=80$ cm, $f_1=1$ Hz, $f_2=0.95$ Hz, $a_1=a_2=4$ cm)

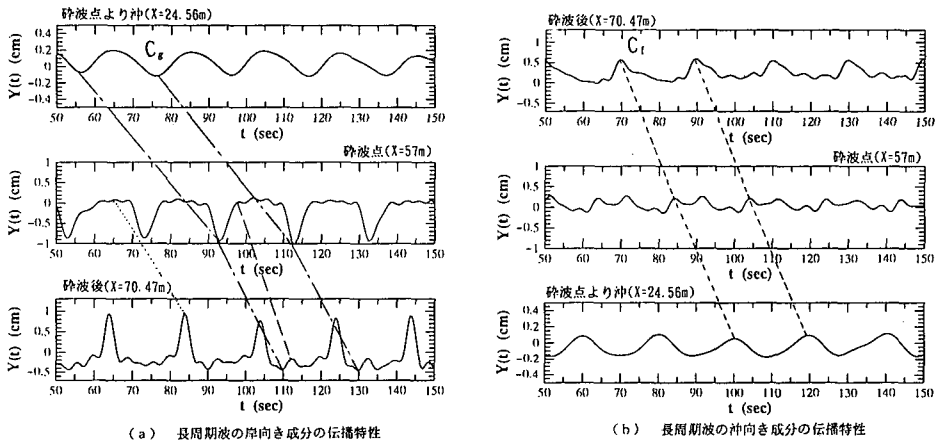


図-6 入射分離された長周期波の伝播特性

(自由波制御法 X_2 , $h=50$ cm, $f_1=1$ Hz, $f_2=0.95$ Hz, $a_1=a_2=3$ cm)

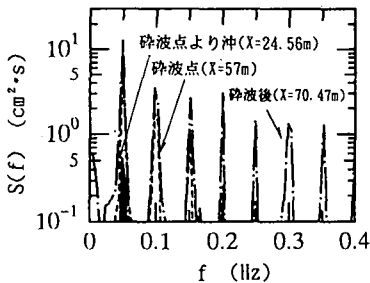


図-7 長周期波の岸向き成分のパワースペクトル
(自由波制御法 X_2 , $h=50$ cm, $f_1=1$ Hz, $f_2=0.95$ Hz, $a_1=a_2=3$ cm)

5. 直立ケーソン堤前面における長周期波の特性

図-8は、図-1中の1/200勾配斜面上に設置した直立ケーソン堤前面(図-1中の横軸 $X=62$ mと $X=53.6$ mの地点)において波高計と流速計の同時計測データから長周期波の入射波成分と反射波成分を分離した例である。図では、造波法 X_1 と X_2 の両者を比較している。なお、既存の反射波吸収制御は用いず実験水路が長いことを利用して、長周期波が直立堤により反射され造波板まで到達する以前の測定結果である。

直立堤近傍で新たな長周期波が発生する可能性もあるが、波群が直立堤により反射されると、入射波の周波数

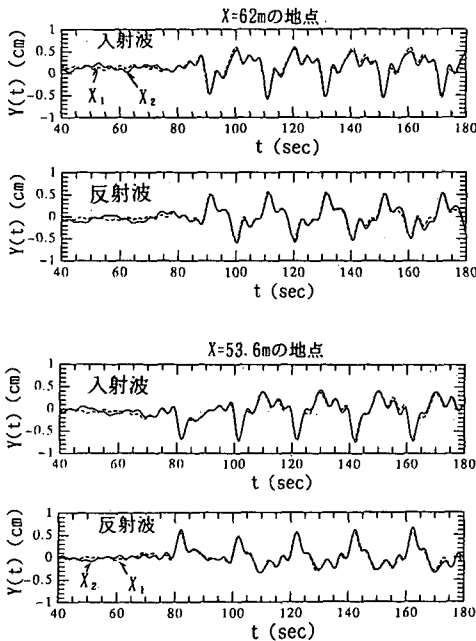


図-8 入射波分離された直立堤前面における長周期波の比較

($h=83.1$ cm, $f_1=1$ Hz, $f_2=0.95$ Hz, $a_1=a_2=3$ cm)

f_1 成分と直立堤による反射波の周波数 f_2 成分が非線形干渉を起こし、入射波と同じ周波数 f_1-f_2 の長周期波が新たに発生し得る。このため、長周期波の特性が進行波の場合よりも複雑になる。図-8によると、入射波の長周期波成分が直立堤に到達していない $t=80$ s以前と反射波発生後の $t=80$ s以後では、かなり入射波(岸向き成分)の振幅が増大し波形も変化している。これらの長周期波が加わるにより、従来の造波法 X_1 による長周期波との差異が進行波の場合よりも小さくなる傾向にある。また、長周期波の岸向き成分と沖向き成分が逆位相の関係になるため相殺させる傾向になり、重複長周期波の振幅は進行波の場合よりも小さくなった。これらの特性は直立堤前面のその他の地点においても同様である。

6. 結 論

以上、本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 波群拘束長周期波 Y_B と予期せぬ主な自由長周期波 Y_F , Y_D の振幅比は造波水深・基本周波数により様々変化する。これに伴い、従来法で造波すると、実験条件により長周期波の振幅が再現すべき拘束波の振幅より過大になったり過小になったりする。従来法で拘束波の振幅を再現できるのは $Y_F=Y_D$ の場合のみである。
- (2) 自由長波制御の場合と従来法とで浅水・砕波変形を比較すると、浅海域へ伝播するに従い両者の差異

が拡大され、砕波帯内でその差が最大となる。

- (3) 砕波前の沖の長周期波は周波数が f_1-f_2 のセットダウン波に対応するが、砕波帯内の長周期波には f_1-f_2 の2倍, 3倍周波数成分等が含まれる。砕波の度合いにより波群との位相関係も様々変化する。
- (4) 砕波帯内の長周期波の岸向き成分は、本実験の範囲内では自由波としての特性は明瞭には認められず、むしろ砕波により波群中央で波高が増大する部分で削られることによるセットアップ波としての特性が強い。
- (5) 構造物前面での重複波の場合は、長周期波の岸向き成分と沖向き成分が逆位相の関係で相殺させる傾向になり、振幅は進行波の場合よりも小さくなる。
- (6) 入射波の周波数 f_1 成分と構造物による反射波の周波数 f_2 成分が非線形干渉を起こし、同じ周波数 f_1-f_2 の長周期波が発生し得るため、長周期波の特性が進行波の場合よりも複雑になる。これらの長周期波が加わるにより、自由波制御法と従来の造波法による長周期波の差異が進行波の場合よりも小さくなる傾向にある。

なお、著者らが開発した造波ソースプログラムの実験システムへの組み込みには日本テトラポッド株式会社の小山裕文氏の協力を得たことを付記する。

参 考 文 献

- 加藤一正・柳嶋慎一 (1992): 長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, 第452号/II-20, pp. 41-50.
- 久保田 進・水口 俊・堀田新太郎・竹沢三由雄 (1989): 現地遡上域における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 119-123.
- 佐藤慎司・島谷 学・志村豊彦 (1993): 不規則砕波帯における浮遊砂輸送量の解析法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 321-325.
- 出口一郎・榎木 亨・石川博英 (1994): 2成分波に拘束された長周期波の浅水変形と Boussinesq 方程式による解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 66-70.
- 長瀬 寛・水口 俊 (1994): 砕波帯における長周期波の発生に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 91-95.
- 松良精三・堀美洋一・菅沼史典・宮本義彦 (1994): 波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 71-75.
- 水口 俊 (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 俊 (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.
- 山本吉道・谷本勝利 (1994): 波群性に起因する長周期波に及ぼす海底勾配の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 81-85.
- Barthel, V., E. P. D. Mansard, S. E. Sand and F. C. Vis (1983): Group bounded long waves in physical models, Ocean Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 261-294.
- Sand, S. E. (1982): Long wave problems in laboratory models, J. Water Ways, Port, Coastal Ocean Div., ASCE, 108, WW4, pp. 492-503.