

没水水平版による波の分裂と波浪制御に関する研究

小島 治幸*・井島 武士**

1. はじめに

波を消波する方法の一つとして入射波高を減衰させることのほかに、入射波長を短くすることによりその作用を低減する方法が考えられる。すなわち、波の進行方向にある長さの没水水平版を設けることによって強制的に波を分裂させる方法で、著者らはこれが新しい波浪制御法となりうる可能性に着目して研究を進めている(Ijimaら, 1986; 小島ら, 1988a; 小島ら, 1988b)。水平版による波の分裂とは、水深の深い海域を進行する規則波が水深の浅い没水水平版に入射するときに、それが微小振幅波であっても水深の急激な減少による自由表面条件の非線形性によって変形しソリトン分裂を起こし、水平版上で碎波すると否にかかわらず、通過した波が再び深い海域を進むとともに、基本周波数の1, 2, 3倍等の周波数をもつ成分波に分裂し、各成分波がそれぞれの周波数に対応する位相速度で相互に作用することなく進行する現象である。分裂によって励起された高周波数成分の振幅がある大きさに成長することによって、通過波の見かけの周期が入射波のそれよりも不規則に短縮されることになり、没水水平版は、入射波を短波長の有義波に変換する機能を持つことになる。これにより、防波堤に作用する波力を版上で碎波を起こすことなく50%程度まで軽減することができ(小島ら, 1988a)、長波長の波に対して遮断効果の低い透過性構造物においても効果的に消波できること(Ijimaら, 1986)が分かっている。

本研究は、上記の方法の確立を目的とし、二次元水理実験により、波の分裂条件を調べ、次に多成分波が重畳したランダム波の分裂現象および分裂が起こるときの波の統計的性質を明らかにするものである。

2. 実験の方法と条件

実験は、二次元水路(長さ28m, 幅0.30m, 深さ0.50m)を用い、水深 $h=0.38$ mをとって、次の3点について水理実験を行った。a) 没水水平版とその下の流体域

を不透過な固定領域とした矩形潜堤に対する単一正弦入射波の実験を行い、分裂波の発生と成長に係わる版上水深や版の長さ、水平版下の流体運動等の影響について相対水深(h/L)を0.06から0.45まで変えて詳細な検討を行った。この場合、水平版と潜堤の天端長(B)は水深の2倍と5.25倍、版上水深は $h_s/h=0.263$ と0.184である。b) 二成分波が重畳した入射波を用いて、水平版上の流体域での非線形干渉によって励起する成分波の成長と、分裂波が再び深い海域を進行するときの各成分波の挙動等を調べた。実験では、二成分入射波における周波数の比を0.1毎に変えて、合計45種類の入射波に対して行なった。c) 海洋波を対象とした多成分波が重畳した入射波に対する水平版の分裂機能を調べる目的で、0.80~2.42秒までの12種類の有義波周期で Bretschneider-光易型スペクトルをもつランダム入射波における、通過波のスペクトル形状の変形や有義波周期と波高の変化、および波浪の非線形性を示すひずみ度と尖鋭度の変化について検討した。

以上の実験においては、通過波は水平版の後方1.0mから20~40cm間隔で設置された6本の波高計で、反射波はその前方2.0mから3本の波高計で測定した。また、不規則波の実験では20cm間隔で波高分布の測定も行なった。これらの測定データをフーリエ解析および分離推定法(合田ら, 1976)により解析し、入射波と反射波、通過波における各々の成分波の振幅やスペクトル形状を求めた。なお、実験に用いた水路は、反射波を吸収する機能の造波装置と反射率10%以下の消波装置を有し、多重反射の影響を極力小さくしている。

3. 分裂波の発生と成長

没水水平版による分裂波の発生や成長に影響を及ぼすと思われる版上水深や版の長さ、水平版下の流体の運動等の影響について調べ、効率よく波を分裂させる条件を検討した。この場合、各成分波の成長の大きさを示す指標として、通過波における3倍周波数までの成分波の energy flux と入射波の energy flux との比の平方根(Tp_i , $i=1\sim3$)を用いた。 $i=1$ の Tp_1 は、基本周波数成分波の通過率を意味している。

* 正会員 Engr. 九州大学助手 工学部水工土木学科

** 正会員 工博 東和大学教授 工学部土木工学科

(1) 水平版と矩形不透過潜堤の比較

図-1 (a) と (b) は水平版と矩形潜堤に対する結果を示している。図中の実線は、井島ら(1976)が提案した境界要素法の線型計算による基本周波数の通過率を表している。水平版と矩形潜堤の違いは、基本周波数の energy flux 比すなわち通過率に顕著に現われている。水平版では、相対水深が $h/L=0.15$ ($B/L=0.3$) 付近で測定通過率が50%以下のかなり顕著な最小値を示すが、潜堤の場合は、通過率の測定値は相対水深にあまり係わりなく75%前後を示している。2倍、3倍周波数成分の energy flux 比においては、水平版と潜堤とも大きな差異はみられないが、潜堤の方が波長の長いところで成分波の成長がやや高い傾向にある。これより、版の下領域で流体の運動があっても、不透過潜堤のように運動がないときでも、分裂波における高周波数成分波の発生や成長に関して大きな違いはなく、波の分裂現象は、没水物体の上面と自由水面の間の流体運動によって誘発させられる現象と言うことができる。

図-2 は水平版と潜堤の通過波における基本周波数と2倍周波数の振幅の比 (A_2/A_1) を表わしている。水平版の方が潜堤より相対水深 h/L の広い範囲で大きな値となり、 $B/L=0.3\sim0.5$ で2倍周波数の振幅が基本周波数のそれと同程度の大きくなる。これは、前述した

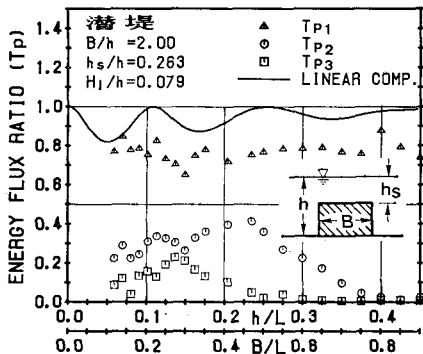


図-1 (a) 通過波の各成分波と入射波のパワー比

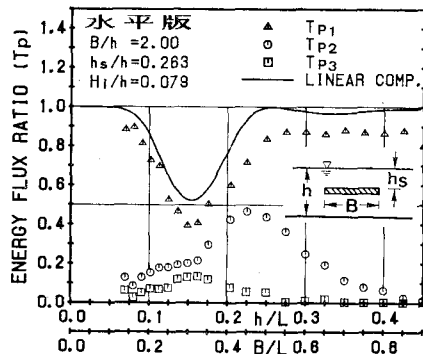


図-1 (b) 通過波の各成分波と入射波のパワー比

ように、水平版による通過率が $B/L=0.3$ 付近で最小値を示すため A_1 が小さくなり、パワーとしては潜堤の方が大きい値であるにもかかわらず、 A_2 と A_1 の比としては、水平版の方が大きい値を示すことになる。また、入射波高の違いによる影響が潜堤の方に顕著に現われている。波高が $H_1/h=0.171$ のときは全相対水深で版上砕波が起こっており、水平版では A_2/A_1 の値が他の波高のそれと同じ程度であるが、潜堤では小さく2倍成分波の成長が著しく減少している。これらの結果は、終局的に、不透過潜堤よりも水平版の方が効果的に長波長の波を制御することができることを示している。従って以下、水平版についてのみ考える。

(2) 水平版の諸元の影響

図-3 (a) に水平版の長さが水深の2.00倍と5.25倍のパワー比を示している。水平版が長いほど相対水深の小

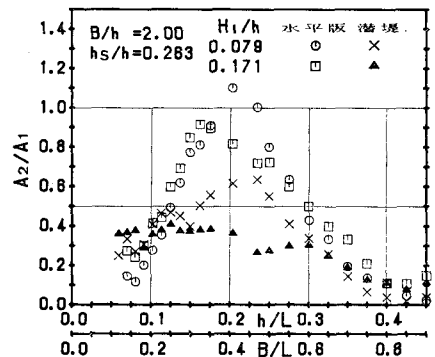


図-2 通過波における2倍成分波と基本成分波の振幅比

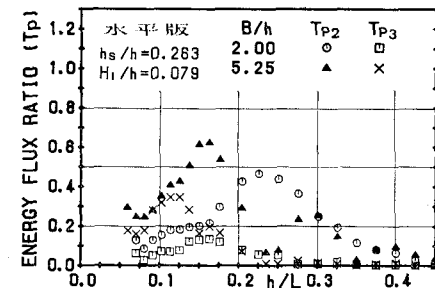


図-3(a) 2種の水平版長に対する2倍・3倍成分波の発生

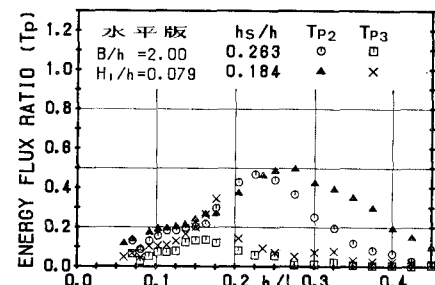


図-3(b) 2種の版上水深に対する2倍・3倍成分波の発生

さいところで高周波数成分波のパワーが最大値を示すと
 ともに、それらの値が全体的に高い。また、図-3(b)に
 示すように、版上水深が小さくなると振幅・水深比の増
 大により非線形性が強まることから、2倍、3倍成分波
 の値が大きくなり、特に2倍成分波の場合は、版上水深
 の変化によってパワーの最大値自体はあまり変わらない
 が、相対水深のひろい範囲で Tp_2 が50%に近い値をと
 り、相対水深の大きいところで高い値を示す。ところが、
 3倍成分波の場合は、最大値自体が大きい値を示し、各
 成分波ごとに成長の様子が異なっていることが分かる。

4. 二成分入射波の分裂

図-4(a) は二成分入射波のフーリエ解析の結果の一
 例で、通過波の各成分波の振幅を入射波の基本成分波の
 振幅 ($a_{11}=a_{12}=2.0$ cm) で無次元化した値を示してい
 る。上段は周波数 $f_1=0.500$ Hz と $f_2=0.667$ Hz の成
 成分波を重ねた入射波、下はその波が水平版上を通過して
 終端から 2.0m 離れた点での通過波の結果である。通過
 波においては、各々の成分波の2倍あるいは3倍周波数の
 成分ばかりではなく基本成分波の各周波数の和と差の
 成分波が誘発されており、特にこの場合では、和の成分
 波の成長が卓越している。特に、 f_1+f_2 , $2f_1+f_2$, f_1+2f_2
 の成分波の振幅は、基本成分波の2倍や3倍周波数成分
 の振幅よりも大きく、基本成分波のそれぞれとほぼ同程
 度になっている。Phillips(1960) の非線形共鳴干渉理論
 によると深海波では f_1+f_2 のような二次干渉は起こら
 ず、 $2f_1+f_2$ や f_1+2f_2 のような三次以上の干渉が起こる
 といわれているが、水平版上のように水深波長比が小さ
 いところを通過する波の場合は、分散関係式がほぼ直線
 になることにより、Bryant(1973) が言う near-resonance
 現象が起こり、二次干渉波が誘発されその振幅が成長す
 ると考えられる。また、図-4(b) に示す各調和成分波の
 振幅の場所的変化をみると、水平版を通過した後の振
 幅はほぼ一定であり、二次・三次干渉で励起された高調
 和成分波が互いに干渉することなく各周波数に対応した
 位相速度で独自に進行していることを示唆している。

入射波の2成分波間の周波数の比によって、2次・3
 次干渉で発生する各成分波がどの程度成長するかを調べ
 るため、入射波の一方の周波数 f_1 を固定し、他の周波
 数 f_2 を変化させたときの通過波における各成分波のパ
 ワーと入射波の全パワーとの比を図-5 に示す。上段に
 $f_1=0.4$ Hz ($h/L_1=0.082$)、下段に $f_1=0.667$ Hz ($h/
 L_1=0.148$) の結果を示している。この二つを比較する
 と、 f_1 が低周波数つまり長周期の波ほど f_2 が高く広い
 範囲の波と非線形干渉を起こし、2次・3次干渉波が成
 長している。またこの結果は、周波数の高い波、例えば
 $f_2=1.314$ Hz ($h/L_2=0.425$) が単独で水平版に入射して

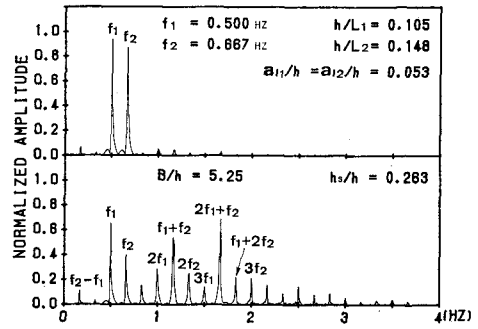


図-4 (a) 2成分入射波と分裂波の振幅

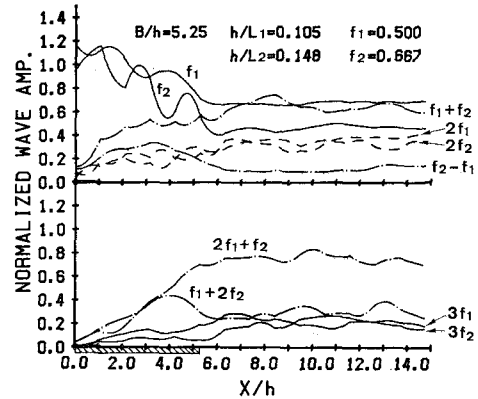


図-4 (b) 分裂波における各成分波の振幅の場所的变化

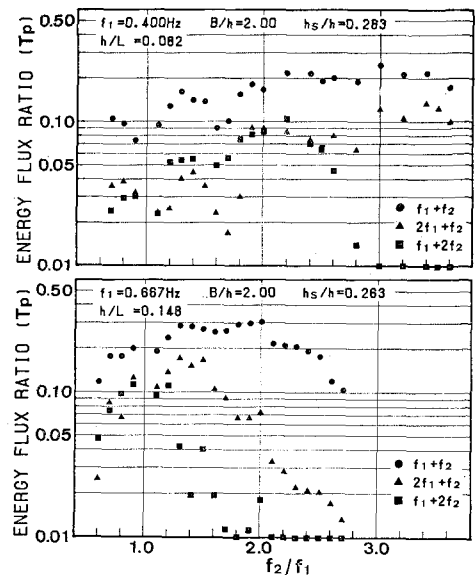


図-5 2成分入射波の周波数比に対する成分波の成長

も分裂波はほとんど起こらないが (図-1(a) 参照)、そ
 れよりも周波数の小さい波が共存すると、お互いに非線
 形干渉しあい2次・3次波が誘発することを意味してい
 る。すなわち、単一成分波よりも多成分の波が重合して
 いる場合の方が、非線形干渉が起こり易く、分裂波を活

発に誘発することを示している。

5. 多成分ランダム入射波の分裂

(1) 分裂波のスペクトル形状の変化

図-6 は、水平版上からそれを通して水深の深い海域にかけてスペクトル形状が場所的にどの様に変化していくかを表している。これは、有義波周波数が $f_{1/3} = 0.500 \text{ Hz}$ ($h/L_{1/3} = 0.105$) の不規則波の場合で、水平版 ($B/h = 5.25$) の始端付近 ($x = 0.1B$) ではスペクトルの形が入射波のそれとほぼ同じであるが、波が水平版上を進行するにしたがいピーク付近のエネルギーが高周波数成分へ移行しスペクトル形状の偏平化が進み、スペクトルの形が場所的に変わっていく様子がうかがえる。しかし、一旦水平版を通過した後 ($x > 1.0B$) は、スペクトルの幅が広がったまま、場所的に変化せずほぼ同じ形を保っている。このことから、エネルギースペクトルの有義波周波数付近に尖鋭なピークをもつ海洋波に対しても、没水平版は、短波長の有義波に変換する機能のあることが確認された。

このときの周期の変化を、水平版の長さが $B/h = 2.00$ と 5.25 について、通過波の有義波周期と入射波のそれとの比として表したのが図-7 である。この結果と規則波の高周波数成分のパワー比の結果 (図-3) を比べると、

規則波では、2倍成分波へのエネルギー輸送率が最大となる相対水深は、 $B/h = 2.00$ のときに $h/L = 0.225$ 付近で、 $B/h = 5.25$ のときは $h/L = 0.15$ 近傍である。ところが、多成分波が重合する不規則波の場合では、周期の変化率が大きくなる相対水深がこれらの値よりも小さくなる。すなわち、同じ水平版の長さでも、単一の周期の波よりも複数の周期の共存した波の方が、効果的に波の分裂が起こることを示すものである。これは、二成分波のところで述べたように、入射波において2つの周波数の成分波が存在する場合、周波数の小さい波ほど非線形干渉し合う波の周波数の範囲が広がり、基本波のエネルギーが2次・3次干渉波へと移行して、波の分裂が効率よく起こるためと考えられる。

(2) 分裂波の統計的性質

水平版による偏平化されたスペクトルを持つ波群における波高の頻度分布を調べた結果の一例を図-8 に示す。この結果は、水平版の長さが $B/h = 5.25$ のときに周期の変化率 ($T_{1/3}/T_{1/3}$) が大きい $h/L_{1/3} = 0.095$ の場合で、ゼロアップクロス法によって波を定義して波高を求めている。波高分布は、周期変化率の小さいところではほぼレーリー分布に従うが、変化率が大きい場合は図に示すように $H/\bar{H} = 1$ 近傍の分布がレーリー分布より高く、 $H/\bar{H} = 1.6 \sim 3.0$ のところで頻度が低くなる傾

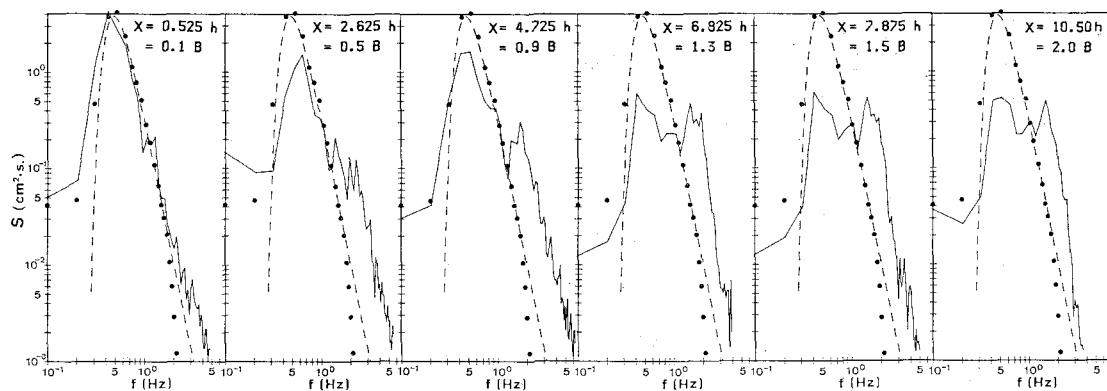


図-6 スペクトル形状の場所的な変化 (— — 目標スペクトル, ● 入射波, — 通過波)

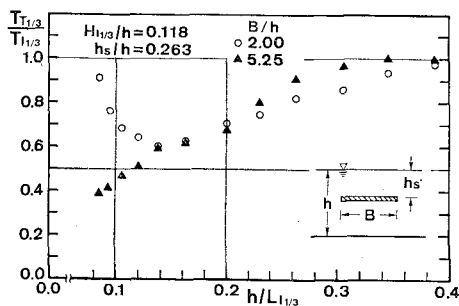


図-7 没水平版による有義波周期の変化

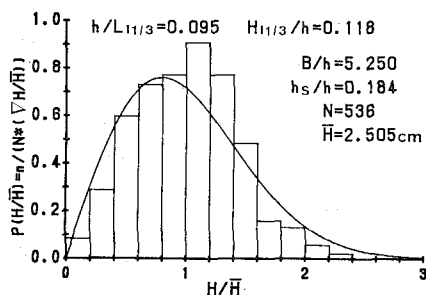


図-8 通過波の波高頻度分布

向にある。この分布は、スペクトルが相当ひずんだ海の波に対しても波をゼロアップクロス法で定義する限りほぼレーリー分布で表せるという合田・永井(1974)の結果とは異なり、混成防波堤の伝達波に関する波高分布(合田ら, 1976)と同様、レーリー分布が成立しない特殊な例であると思われる。

図-9 は、分裂波の波群における有義波高($H_{T1/3}$)とスペクトルの関係および波の非線形性について検討したものである。 m_0 と $\sqrt{\beta_1}$ 、 β_2 は、それぞれ波の総エネルギーとひずみ度、尖鋭度を表し、図中の破線は波浪観測からの実測波形より得られた比例係数で3.8(Goda, 1979)を表し、一点鎖線は水面変動の度数分布が正規分布に従うときの $\beta_2=3$ を表している。実験より得られた有義波高とスペクトル波高の比例係数は、周期変化率の大きい、つまり分裂波が顕著に励起する相対水深が $h/L_{1/3}=0.085\sim 0.16$ 付近までは3.3程度と小さく、相対水深が大きく分裂波が発生しにくくなるに従って、その係数は3.8に漸近する。分裂波が顕著に起こるところで比例係数が小さくなる理由は、図-9の波高分布で示したように、平均波高の2~3倍の波高の度数がレーリー分布より低いことにより、有義波高の値がレーリー分布に従う波群の有義波高よりも小さくなるためと考えられる。

波の非線形性を表すひずみ度 $\sqrt{\beta_1}$ は、周期変化の大きい相対水深のところで0.2よりも大きくなり非線形性が強く現われ、相対水深が大きくなるにつれて正規分布に従うときの零に近づく傾向がみられる。しかし、尖鋭度に関しては、水平版による波の分裂の程度による顕著な変化傾向はみられず、実験を行った範囲では、 β_2 は3.0よりも小さく、水面波形の度数分布のピークのところが正規の分布のそれよりも低い結果となった。

6. あとがき

本研究より以下のことが明らかになった。

(1) 波分裂にともなう高周波成分波の発生と成長に関して、水平版と不透過な矩形潜堤とは大きな違いはみられないことから、波の分裂現象が版上の流体域におけ

る有限振幅波としての自由表面条件に拘束されて起こるものと解される。また、基本波に対する水平版の波の遮断機能は入射波を波長に関して選択的に遮断する傾向が顕著であり、潜堤ではそれが余り顕著でなく、通過波における2倍成分波と基本成分波の振幅比では水平版の方が大きく、実用上、水平版の方が有利となる。

(2) 入射波が単一成分の場合よりも2つ以上の成分波が存在するとき、成分波相互間で非線形干渉が起こるため、二次・三次波が発生しその振幅が著しく成長する。こうして、波と構造物との非線形干渉を積極的に誘発することにより入射波のエネルギーをより有効に短波長の波に移行することができる。

(3) 水平版を通過した後の波のスペクトル形状は、版上で偏平化が行われたまま一定の形を維持し、通過波の有義波周期は入射波のそれより50%以下になる場合がある。そのときの通過波の波高分布はレーリー分布に従わず、また有義波高とスペクトル波高の比例係数は3.3程度になる。

上記の現象は、現在おこなっている数値解析によって次の機会にさらに明らかにしたい。最後に、本研究の実施については、九州大学水工土木学科技官牛房幸光氏、元4年生の高尾仁君の真摯なる協力に負うところが多い。ここに感謝の意を表したい。なお、本研究の一部は、1988年度の文部省科学研究費(奨励研究)の助成を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 井島武士・周 宗 仁(1976): グリーンの公式による2次元水面波の境界値問題の解析, 土木学会論文報告集, No. 252, pp. 28~32.
- 小島治幸・井島武士・長野 敦(1988a): 没水水平板による波の分裂に関する実験的研究, 九州大学工学集報, Vol. 61, No. 5, pp. 615~622.
- 小島治幸・井島武士(1988b): 没水水平板および不透過潜堤による波の分裂と制御に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 195~200.
- 合田良実・永井康平(1974): 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港研報告, 13巻, 1号, pp. 3~37.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976): 不規則波実験における入射波・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp. 1~26.
- Bryant, P. J.(1973): Periodic waves in shallow water, J. Fluid Mech. 59, part4, pp. 625~644.
- Goda, Y.(1979): A review on statistical interpretation of wave data, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 18, No. 1, pp. 5~32.
- Ijima, T., T. Uwatoko, Y. Ushifusa, H. Kojima, (1986): Experiments on the Improvement of Wave Interception Effect of Sea-Balloon Breakwater, Memoirs of the faculty of Engineering, Vol. 46, No. 2, Kyushu Univ.,
- Phillips, O. M.(1960): On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 1. The elementary interactions, J. Fluid Mech., 9, pp. 193~217.

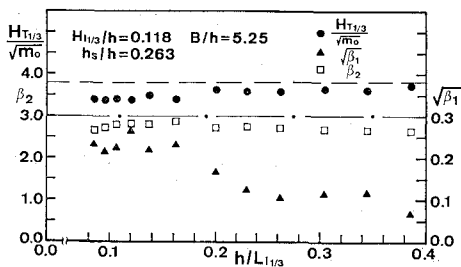


図-9 有義波高とスペクトルの関係及び歪度と尖鋭度