

# 護岸越波流量における波の多方向性の影響

平石 哲也\*・望月 徳雄\*\*・鈴木 康正\*\*\*

## 1. はじめに

海岸および港湾の背後地を防護する施設としては、護岸が一般的に用いられる。護岸の設計においては、背後地への越波が許容値を超えないように天端高と構造様式が決められる。護岸からの越波量が許容値を超えると、水たたき部などの施設が破壊されたり、排水機能が阻害される。護岸の越波量を算定し、護岸構造を設計する基となる平均越波流量推定法は、主に2次元水路を用いた模型実験結果から導かれたもので、外力となる波は単一方向不規則波である(合田, 1970)。実際の海域では、沖合の海の波は多方向不規則波としての性質を有しており、浅海域へ伝播してくると、屈折効果により多方向波を構成する成分波の波向が汀線に対して直角の方向に揃ってくるので、一方向不規則波に近い性質を持つようになる。従来の護岸は、汀線付近の浅海域に建設されてきたので、外力となる波を単一方向不規則波として越波量を考慮しても支障がなかった。最近では、港湾構造物が沖合の大水深域へ展開されつつある(運輸省, 1992)ので、人工島や新しい港湾施設に建設される護岸は、外海に直接面し、水深が比較的深い海域に建設されるため、外力となる波を単一方向不規則波として扱うことができない。また、浅海域においても、港内のように防波堤・岸壁からの反射波が重量している水域に親水性護岸を建設するためには、外力となる波の多方向性を考慮しておく必要がある。多方向不規則波の越波に関する研究としては、防波堤を越流した多方向波の背後水域における波高分布を調べた例はあるが(平口ら, 1991, Hiraishi and Takayama, 1993)、越波量を測定し、波の多方向性の影響を検討した例はない。そこで、本研究では、直立護岸および、親水性護岸として多用されている緩傾斜護岸を対象として、単一方向波と多方向波を作用させて越波量を測定し、越波量に及ぼす波の多方向性の影響を検討した。

## 2. 実験内容

### (1) 実験模型

本実験においては、1/30の一樣勾配斜面を平面水槽内に設置し、斜面の終端部に直立護岸および緩傾斜護岸模型を設置した。護岸模型背後に越波量の測定箱を取り付け、波高と越波量の計測を行った。図-1は、造波装置、波高計、模型などの実験装置の配置を示す。使用した水槽には、50 cm幅の造波板が30枚並んだサーペント型造波装置(平石, 1992)があり、斜め規則波、斜め単一方向不規則波および多方向不規則波を造波することができる。

斜面模型の形状寸法は、幅12.6 m×奥行き5.4 m×高

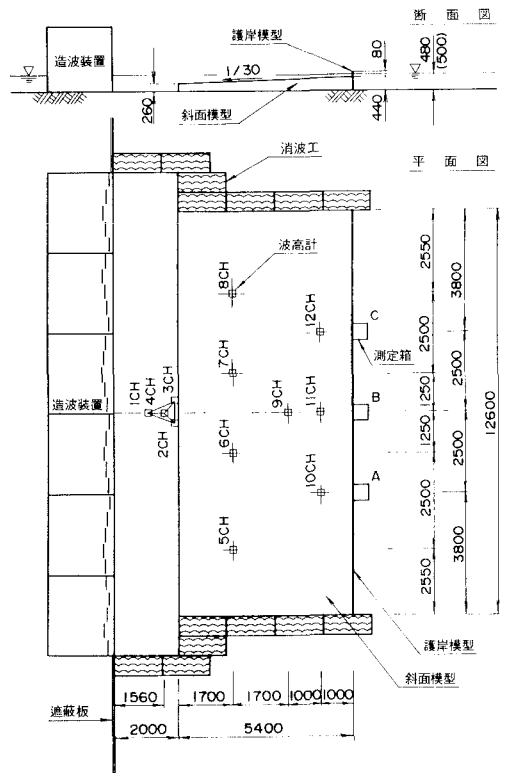


図-1 実験装置の平面配置

\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官  
 \*\* 運輸省港湾技術研究所漂砂研究室  
 \*\*\* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長

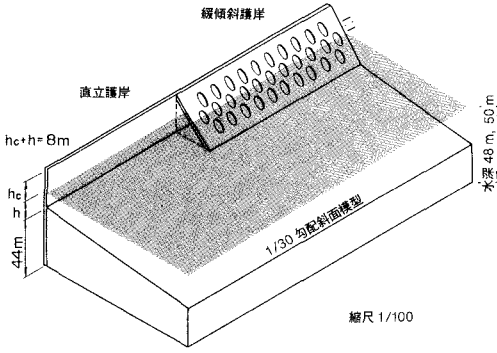


図-2 護岸模型の外観

さ0.26~0.44 mとなっている。

図-2に護岸模型の外観を示す。直立護岸模型は、幅12.6 m×高さ0.08 mのラワン合板製である。緩傾斜護岸は、直立護岸の前面に10 mmピッチで10 mmの穴を千鳥に開けたラワン合板を斜めに取り付けたものである。越波流量測定箱は、幅0.5 m×奥行0.5 mで、多方向波の有効造波領域(平石, 1991)を考慮して、斜面模型中央のB点およびそれより左右2.5 m離れたA点, C点に設置した。B点は、有効造波領域の中央部に相当し、A, C点は、有効造波領域の端部に相当する。

斜面模型の側面には、反射波の影響を消すため消波工を設置した。沖波の計測は、三角形の3頂点および中心点に容量式波高計を取り付けた星型アレイを造波装置面から1.56 m離して設置して行った。斜面模型上での波の計測のために、容量式波高計4台を沖側に、サーボ式波高計4台を岸側の水深の浅い所に設置した。

## (2) 実験条件

表-1に実験条件を示す。模型縮尺は1/100である。実験波は、Bretschneider-光易型の周波数スペクトルをもつ単一方向不規則波および多方向不規則波を使用した。沖波の有義波高 $H_{1/3}$ は、現地スケールで全て4 mとし、有義波周期 $T_{1/3}$ は、8.44 s, 14.62 sの2種に変化させた。このとき波形勾配はそれぞれ0.036および0.012になる。水深 $h$ は、造波装置前面で、48 mと50 mの2種類とし、これは、護岸前面水深でそれぞれ4 mと6 mに相当し、護岸天端高 $h_c$ は、それぞれ、4および2 mになる。波の入射角 $\theta$ は、主波向が汀線に対して直角方向の波向となるようにした。多方向不規則波の方向関数は光易型とし、造波信号作成時に用いる多方向不規則波の波の方向集中度パラメータ $S_{max}$ は、10および25とした。同一条件で、直立護岸と緩傾斜護岸に対して、実験を行い、波の計測時間は4分で、サンプリングタイムは、0.05 secとした。波の計測を開始して、1分後から2分間、測定箱のカバーを開放し、採水し、越波流量の計測を行った。

表-1 護岸越波流量における波の多方向性の影響

模型縮尺	1/100
海底勾配	1/30
護岸形式	直立護岸, 緩傾斜護岸
波の種類	単一方向不規則波, 多方向不規則波
周波数スペクトル	Bretschneider-光易型
方向関数	光易性 ( $S_{max}=10, 25$ )
波高	4m
周期	8.44 s ( $H_o'/L_o=0.036$ ), 14.62 s ( $H_o'/L_o=0.012$ )
水深	48 m ( $h_c=4$ m, $h=4$ m), 50 m ( $h_c=2$ m, $h=6$ m)
主波向	$0^\circ$

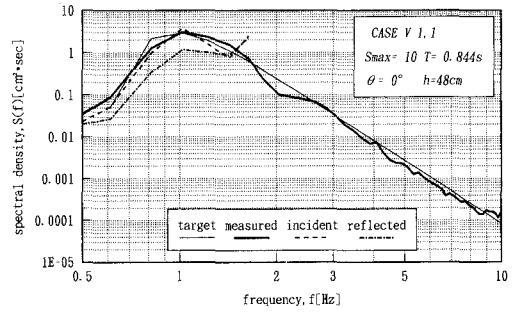


図-3 実験波の周波数スペクトル

## (3) 実験に用いた波の特性

波の解析は、ゼロアップクロス法を用いて、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ を求めた。図-1に示す波高計アレイの4台の内の2台, No.1およびNo.4の記録から、周波数スペクトルおよび反射率を解析した。図-3は、解析した不規則波の周波数スペクトルの例を示す。図中の細実線は、目標とするBretschneider-光易型のスペクトルで、太実線は、実験波の周波数スペクトルを表している。実験波の周波数スペクトルは、目標とほぼ一致しており、精度のよい造波ができています。

水槽の反射率は、波の入射波分離計算(合田・鈴木ら, 1976)を行うことにより求めた。直立護岸および緩傾斜護岸ともに反射率が1.0に近く、波のエネルギーがほぼ完全に反射されていた。

波高計アレイNo.1~No.4の4台の波高計の同時記録からベイジアンモデル(橋本, 1992)を用いて方向関数を解析した。図-4は、ピーク周波数近傍の周波数帯における方向関数形を示す。図中の細実線(TAG)は、各 $S_{max}$ に相当する理論値を表しており、下から順番に $S_{max}=10, 25, 50, 75$ に相当する。図-4の場合には、 $S_{max}=25$ を目標として造波したが、実験波(EXP)は、

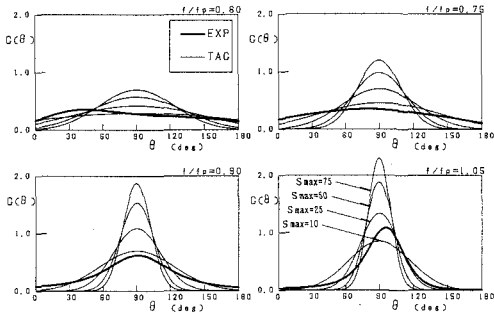
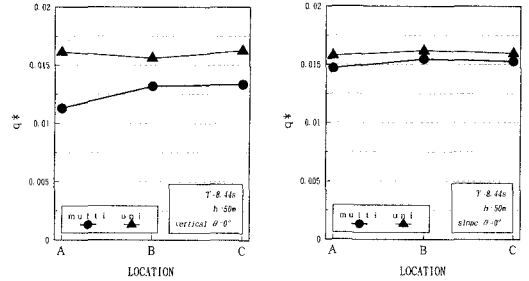


図-4 実験波の方向分布関数



(1) 直立護岸 (2) 緩傾斜護岸  
図-6 場所による越波流量の違い

$S_{max}=25$  の分布形よりエネルギーの方向集中度が小さく、 $S_{max}=10\sim 20$  程度になった。 $S_{max}=10$  の場合についても分布形のピークは目標値より若干低くなった。本実験により造波した波の方向集中度が目標値より若干低くなった原因は、模型床端部の水深急変部の影響が考えられる。なお、沖合で多方向性を有する波は、海底床上の屈折のために護岸前面で方向集中度が増加する。本実験において、造波装置前面で  $S_{max}=10, 20$  とすると、エネルギー平衡方程式 (高山ら, 1991) の計算に従えば、護岸前面で  $45\sim 75$  程度となる。一方向不規則波の方向関数の分布形は、 $S_{max}=100$  で表されるものより鋭いピークを示し、方向集中度が十分高くなっている様子がみられた。

3. 実験結果

(1) 護岸前面の波高分布

図-5 は、護岸前面および斜面部での無次元波高分布を示したものである。無次元波高は、各測点の波高値を入射波分離計算で得られた入射波高で除したもので、1.0 より大きくなっており、これは反射波が共存しているためである。同水深位置で比較すると、波高の違いはあまり見られず、単一方向波の場合  $1CH\sim 5CH$  で  $1.3\sim 1.6$ 、 $10CH\sim 12CH$  で  $1.3\sim 1.4$  であった。

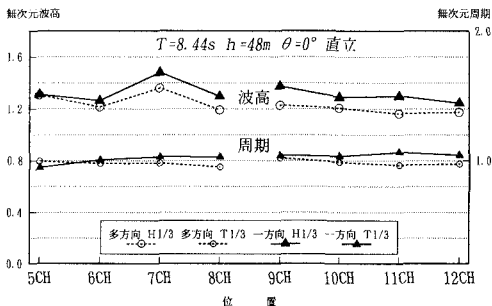


図-5 護岸前面の波高および周期の分布

多方向波の無次元波高は、対応する単一方向波のケースより  $0.1\sim 0.2$  程度下回った。水槽横手方向に波高比の差がないことから、ほぼ一様な波が水槽内に形成されていると言える。無次元周期は測定周期を入射波周期で除したもので、一方向波、多方向波ともに斜面の全域で  $1.0$  程度となっており、周期の変化はみられなかった。

(2) 越波流量の平面分布

図-6 は、A, B, C, 3 点の測定箱で計測された直立護岸および緩傾斜護岸での越波流量の一例を示す。縦軸に無次元越波流量、横軸に測定箱の位置を表している。無次元越波流量は、測定した越波流量  $q(m^3/m\cdot s)$  を用いて  $q^*=q/\sqrt{2gH_0^3}$  で計算した。図中の▲印が一方向波での越波流量を示し、●印は、多方向波での実験結果を示している。各点の越波流量を比較すると顕著な違いは見られない。他のケースについても同様であった。したがって、有効造波領域内であれば測定越波流量の場所的な変化は小さくほぼ一様な結果が得られることがわかった。しかし、緩傾斜護岸の一部のケースでは、A, B, C の場所的な差が大きいのも見受けられた。これは、緩傾斜護岸の模型では、形状や微妙な取付法が各点における越波流量に影響し、測定値のばらつきが大きくなったためと思われる。実験中、波を作用させると緩傾斜護岸の法面を波が遡上するようなケースが見られた。

(3) 単一方向波と多方向波の越波流量の比較

図-7 は、単一方向波と多方向波の越波流量の比較を示す。図は、測定点 B における多方向波の流量を単一方向波のそれで除した無次元越波流量比を示す。直立護岸では、多方向波を作用させた場合の流量が単一方向波を作用させた場合に比べて、 $0.70\sim 0.84$  倍となり、平均  $0.78$  倍であった。緩傾斜護岸の場合は、 $0.34\sim 1.00$  倍となり、平均で  $0.80$  倍であった。緩傾斜護岸においては、実験結果がばらついているが、全体的に見て、単一方向波の場合に比較して、多方向波の場合は、2 割程度の越波流量の低減を期待することができる。

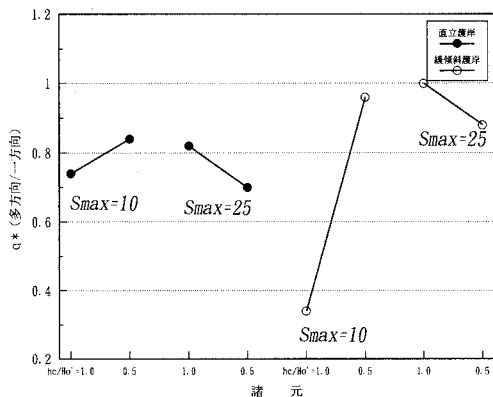


図-7 単一方向波と多方向波の越波流量の違い

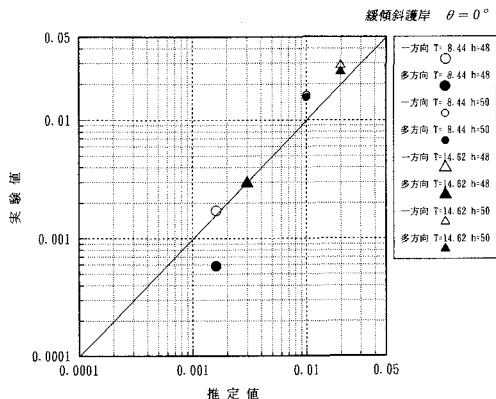


図-9 越波流量の推定値と実験値の比較 (緩傾斜護岸)

(4) 越波流量算定図と実験値の比較

図-8 および図-9 は、2次元模型実験結果より導かれ、設計等で広く用いられている越波流量算定法(合田, 1970)による無次元越波流量の推定値と実験値を比較したものである。緩傾斜護岸については、高山・永井ら(1982)にしたがって、換算天端高係数 1.2 を用いて、計算を行った。図の縦軸および横軸が、それぞれ実験値および推定値を表している。図-8の直立護岸の単一方向波の場合は、実験値が推定値の 1.73~4.99 倍となり、平均で 2.8 倍程度であった。特に、越波流量が小さな場合には、現在の算定法は、越波量を過少評価してしまうようである。越波流量が大きい場合には、実験値と推定値の差が小さくなり、現行の推定式を適用できる。多方向波の場合は、実験値が推定値の 1.25~3.69 倍となり、平均 2.2 倍であった。

図-9の緩傾斜護岸の単一方向波の場合は、推定値の 0.98~1.62 倍となり、平均で 1.3 倍程であり、推定値と実験値がよく一致した。緩傾斜護岸の越波流量においては、現行の算定法にしたがって精度よく推定できる。多

方向波の場合は、0.37~1.55 倍となり、平均で 1.0 程度であった。越波量が低いケースでは、推定値は、多方向波の実験値より大きくなり、多方向性による越波量の低減効果を考慮した推定が必要になる。

4. 多方向波の越波特性に関する考察

3. で示したように、多方向不規則波を用いると、単一方向不規則波に比較して、護岸越波流量は小さくなること が明らかとなった。その原因は、多方向不規則波を構成する成分波である斜め波の越波特性が直方向波と異なるためと思われる。斜め波の越波特性については、高山・永井ら(1984)の研究結果があり、斜め不規則波の場合には換算天端高係数が入射波角によって変化し、1.0 より小さくなる。そこで、多方向波の斜め成分波に対する護岸越波流量を線形重ね合わせることにより、多方向波の越波流量を理論的に算定した。ここでは、計算を簡単にするために、海底は一樣で勾配がなく、水深は一定とした。今、無限に続く直線状の護岸が  $x$  軸上にあり、 $y$  軸を、護岸法線を 0 とし、直方向波の進行方向が正となるように取る。完全反射を仮定すると、護岸前面の多方向波の水位変動は次式で示される。

$$\eta(x, t) = K \sum_{n=1}^{N_s} 2a_n \cos(k_n x \cos \theta_n + \sigma_n t + \varepsilon_n) \dots (1)$$

ここで、 $\eta(x, t)$  は、時間  $t$  における護岸前面の水位である。添字  $n$  は、 $n$  番目の成分波の諸量であることを示し、シングルサンメーション法(高山・平石ら, 1989)によって、波向の異なる  $N_s$  個の成分波を重ね合わせて多方向波の水位変動を計算した。 $N_s$  は、500 とした。 $a_n, k_n, \theta_n, \sigma_n, \varepsilon_n$  は、それぞれ、成分波の片振幅、波数、波向、角周波数および初期位相を示す。 $K$  は、波の非線形効果による波高増大および砕波減衰を考慮するために導入された係数(合田ら, 1975)で、ここでは、護岸前面水深が十分に深いものとして、非線形効果による波高増大の

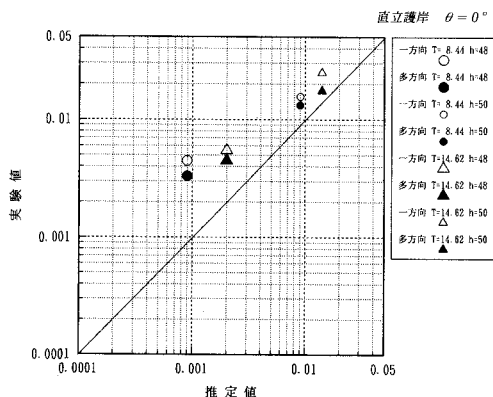


図-8 越波流量の推定値と実験値の比較 (直立護岸)

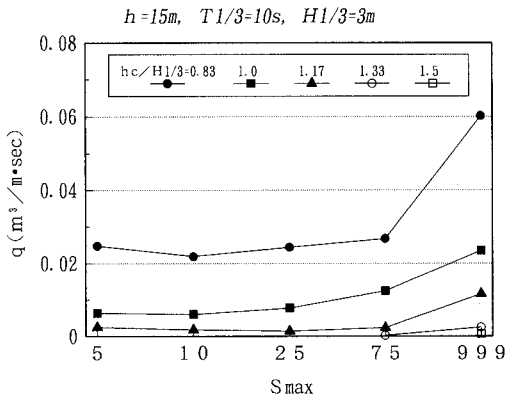


図-10 方向集中度による越波流量の違い

みを計算した。

$$K = \min \{ [1.0 + bH_{1/2}/h], c \} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、直立護岸の場合は、 $b=1.0$  および  $c=10$  とした。水位  $\eta(x, t)$  が護岸の天端を越えると、越流が生じ越波する。越波流量  $q$  は、次式で計算できる。

$$q = \begin{cases} C(\eta - h_c^*)^{3/2} & (\eta \geq h_c) \\ 0 & (\eta < h_c) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $C$  は越流係数で  $C_0\sqrt{2g}$  で表される。 $C_0$  は合田ら (1975) の結果を参考にして 0.5 とした。 $h_c^*$  は、斜め入射の成分を考慮した修正天端高である。ここでは、高山・永井ら (1984) によって示された、換算天端高係数と波入射角の関係図を参考にして、各成分波に関して、換算天端高係数を考慮して、修正天端高を次のように算定した。

$$h_{cn}^* = \left[ \sum_{n=1}^{N_s} \frac{S(f_n) \Delta f_n}{m_0} h_{cn} \right] \dots\dots\dots (4)$$

$$h_{cn} = \begin{cases} \frac{h_{c0}}{1 - |\sin \theta_n|} & (|\theta| \leq 15^\circ) \\ \frac{h_{c0}}{1 - |\sin 15^\circ|} & (|\theta| > 15^\circ) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $f$ ,  $S(f)$ ,  $\Delta f$ ,  $m_0$  はそれぞれ、周波数、スペクトル密度、周波数間隔および波の全エネルギーを表す。 $h_{c0}$  は、修正前の護岸天端高である。

図-10 に数値シミュレーションの結果を示す。ただし、実験では、護岸前面が 1/30 勾配の海岸床を有しているが、本計算は水深変化を考慮していない。本計算では、護岸前面水深  $h=15$  m とし、波高  $H_{1/3}=3$  m, 周期  $T_{1/3}=10$  s の波を作用させ、越波流量  $q$  を計算した。図では、波の方向集中度  $S_{max}$  による越波流量の変化を示しており、図の横軸右側の  $S_{max}=999$  は単一方向不規則波に相当する。縦軸は、計算による越波流量  $q$  を示し、護岸天端高

は、2.5~4.5 m に変化させた。図に示されるように、天端高が低い程、護岸の越波流量が多くなっている。波の方向集中度の違いによる越波流量の比較をすると、波の多方向性が大きく変化しても、越波流量は大きく変化していない。単一方向波と多方向波の差は大きく、多方向波の場合の越波流量は、一方向波の場合の越波流量の 0.3~0.4 程度となった。したがって、波の多方向性を考慮すると、越波流量は減少し、それは、斜め入射の成分による越波流量が直方向波と比較して小さくなるためであることがわかった。

5. あとがき

多方向不規則波の越波実験を行い、以下のことが明らかとなった。1) 多方向不規則波による護岸の越波量は単一方向波の場合に比べて、海底勾配が 1/30 の場合には 0.8 倍程度に減少する。2) 多方向波が有する斜め入射成分が越波量を減少させる要因であり、数値的に確認できた。

参考文献

運輸省港湾局 (1992): 人と地球にやさしい港湾の技術をめざして, 大蔵省印刷局, 107 p.  
 合田良美 (1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 9, No. 4, pp. 3-41.  
 合田良美・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 14, No. 4, pp. 3-44.  
 合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法港湾技研資料 No. 248, 24 p.  
 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, Vol. 21, No. 2, pp. 151-205.  
 高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志 (1984): 斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験, 海岸工学論文集, Vol. 31, pp. 542-546.  
 高山知司・平石哲也・立石義博 (1989): 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, Vol. 36, pp. 153-157.  
 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 碎波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, Vol. 30, No. 1, pp. 21-67.  
 橋本典明 (1992): 海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究, 港湾技研資料 No. 722, 118 p.  
 平石哲也 (1991): サーベント型造波装置の有効造波領域の拡張法に関する検討, 海岸工学論文集, Vol. 38, pp. 126-130.  
 平石哲也 (1992): 多方向波の発生とその応用に関する研究, 港湾技研資料 No. 723, 176 p.  
 平口博丸・池野正明・井上素行・柏木洋之・阿部光信 (1991): 越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法, 海岸工学論文集, Vol. 38, pp. 531-535.  
 Hiraishi, T. and T. Takayama (1993): A new approach to extension of effective test area in multi-directional wave basin, 25 th Congress, IAHR, C-3-3, pp. 88-95.