

多方向不規則波の斜面上における碎波特性

高山 知司*・平石 哲也**・高山 優***

1. ま え が き

港湾構造物の設計における主要な外力は波であり、設計波の算定にあたっては、波浪現象を適確に把握しておかなければならない。特に、防波堤、海岸堤防、護岸などの海岸・港湾構造物の多くは碎波帯内に建設されるので、碎波による波高変化、平均水位の上昇量等を正確に推定しておかなければならない。碎波による波高変化については、従来から数多くの研究が進められている。なかでも、合田¹⁾は、不規則波浪の碎波変形の理論モデルを提案し、模型実験と現地観測データの解析によってその妥当性を検討して、碎波による不規則波の波高変化の推定法を提示した。ただし、この理論および実験は、単一方向へ進む不規則波を対象としたもので、現地観測データも汀線近傍の一測点でしか得られていない。実際の海の波は、波峰線が短く切れた“切れ波”となっており、これは様々な方向からの波が重なり合って生じるものと考えられている。このような多方向性を持つ波は、“多方向不規則波”と呼ばれており、碎波変形においても、海の波の多方向性を考慮する必要がある。しかしながら、これまで、実験室内で多方向不規則波を造波する装置がなかったため、多方向波の碎波による波高変化を実験的に調べることができなかった。近年、世界の主要水理研究所では、多方向不規則波を造波するために、“サーペント型”造波装置が設置されている²⁾。我国でも、当研究所が、幅 80 cm のピストン型造波機 35 台から成るサーペント型造波装置を開発し、その発生波の特性を検討している³⁾。そこで、本研究では、サーペント型造波機を用いて、一様勾配を持つ海底床上における多方向不規則波の碎波変形を実験によって調べ、単一方向不規則波を用いた場合との相違点を検討し、従来から用いられている単一方向波を対象とした碎波帯内の波高算定法の適用性を考察した。さらに、茨城県波崎町の観測栈橋において、碎波帯内における波高変化を観測して、模型実験結果との比較を行い、模型実験の再現性を検討

した。

2. 実験の内容

(1) 実験装置と斜面模型

図-1 に、実験水槽と造波装置の平面図を示す。水槽は、長さ 36 m、幅 24 m で、水深は 1.2 m までとることができる。水槽の南側の側壁に沿ってサーペント型造波装置が設置されている。本造波装置は、斜め波、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。水槽の他の 3 側壁沿いには、横スリットを有するプレストレスコンクリート製の傾斜板を置いた消波工を設置した。水槽の中央部には、縦 8 m、横 16 m で 1/10 勾配を持つ一様勾配の海底床模型を設置した。模型先端は、造波機前面から 4.7 m 離れた。

(2) 実験および解析方法

図-2 に、1/10 一様勾配を有する海底床模型上の波高変化を求めるために設置した容量式波高計の設置点を示す。図に示すように、海底床模型前面の平坦部には、造波板前面より 4 m 離して、4 本の波高計を組み合わせた波高計アレイを設置して、入射波の方向スペクトルを求めた。方向スペクトルの算定手法としては、最近開発されたベイズ型モデル⁴⁾を用いた。

模型床上では汀線と平行方向に 3 つ、汀線に直角方向に 1 つの測線を設け、各測線上で No. 5 から No. 9 まで 5 点で水位変動を計測した。ただし、一回の計測では、1 つの測線でしか計測を行わず、同一の波を 4 回作用させ

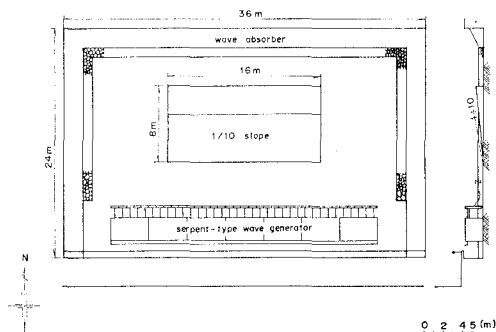


図-1 実験水槽平面図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部波浪研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官

*** 運輸省第四港湾建設局（前 波浪研究室）

て、各測線ごとに計測を行った。実験では、約4分間計測を行い、0.2秒間隔でサンプリングした1024個のデジタルデータを用いて統計解析を行い、各測点における周波数スペクトル、波高、周期、平均水位上昇量を求めた。

(3) 実験ケースと実験波の特性

実験では、斜面先端の水深を50cmとして一定とした。実験波の目標波高は、換算沖波高 H'_0 が10cmおよび15cmで、沖波周期 T_0 は1.5sと1.75sに変化させた。また、それぞれの波について、単一方向不規則波と多方向不規則波を造波した。主波向 θ_a は、汀線と直角方向 ($\theta_a=0^\circ$) と、それより 30° 傾いた方向 ($\theta_a=30^\circ$) の2種類とした。各ケースについて、2回波連を変えて波を作らせ、その平均値を実験結果として用いた。

単一方向不規則波は、Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを持つ不規則波を目標として造波した。多方向不規則波の造波目標とする方向スペクトルの方向関数としては光易型を用いた。ただし、目標主波向 θ_a に対し $\pm 45^\circ$ の範囲を波向範囲とした。また、造波信号作成時に設定する目標方向集中度パラメータ $S_{\max a}$ の値は25とした。

斜面前面に設置した波高計アレイによって入射波の周波数スペクトルと方向スペクトルを求めたところ、周波数スペクトル形は目標としたものとよく一致した。波向 $\theta_a=0^\circ$ で入射した単一方向不規則波の方向関数は線スペクトル形状を示し、単一方向波が造波できていること

が確認できた。図-3(1)は、主波向 $\theta_a=0^\circ$ 、 $S_{\max a}=25$ の多方向不規則波のピーク周波数 f_p における方向関数を示したものである。実線で示した実験値は、破線で示した計算値とほぼ一致しており、 $S_{\max a}=25$ の方向集中度を持つ多方向波が造波できた。図-3(2)および(3)は、それぞれ $\theta_a=30^\circ$ として単一方向波および多方向波を造波したときのピーク周波数 f_p における方向関数を示したものである。主波向 θ_a が 0° でない場合には、波の方向集中度が目標値より低下する傾向にある³⁾ ので図-3(2)の場合には、発生波の方向集中度は $S_{\max a}=25$ 程度であり、図-3(3)の場合には、方向集中度は、 $S_{\max a}=10$ 程度になった。

3. 現地観測の概要

(1) 観測地点と観測方法

図-4は、現地観測地点の平面地形を示している。図中A点には、茨城県鹿島港の南東約2km沖合の水深20mの地点に、運輸省第二港湾建設局の超音波式波高計が設置してあり、沖波解析には、この波高計の波形記録を用いた。B点の全長427mの観測栈橋では碎波帯内の波浪観測を行った。

A点からの波形は、アナログデータレコーダを用いて長時間記録した。B点の観測栈橋上には、No.1~4の4台の空中発射型超音波式波高計が設置してあり、No.1~4の波高計は、それぞれ、汀線から約378m, 258m, 145

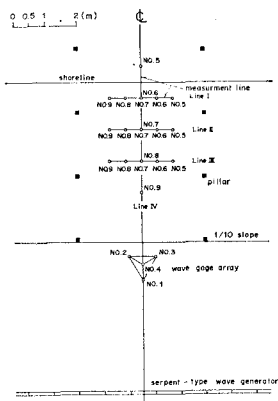


図-2 波高測定点

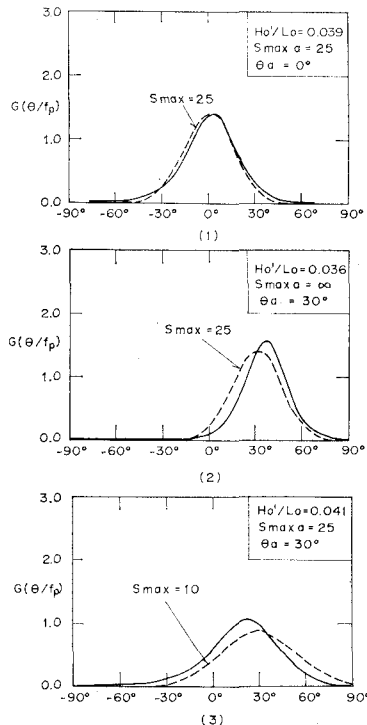


図-3 入射波の方向分布特性

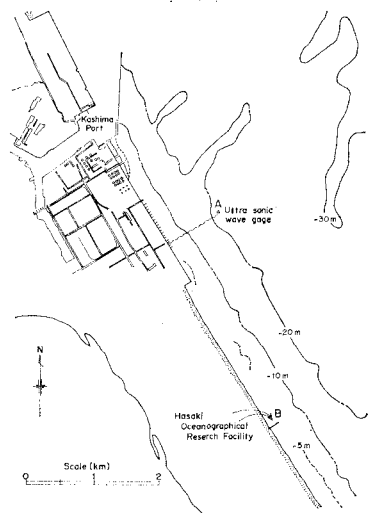


図-4 現地観測地点

m, 22 m の地点にある。また設置点の水深は、工事基準面を基準として 4.8 m, 4.13 m, 2.0 m および 0.4 m である。ただし、観測期間中、潮位を測定し、解析時には実水深に補正した。観測桟橋で測定した波形記録は、観測室のデジタルデータレコーダに収録した。

(2) 観測期間と解析方法

現地観測は、台風 8713 および 8715 号が関東南部に接近し、太平洋岸が暴風雨圏となった 1987 年 9 月 16 日 7 時から、9 月 18 日 18 時まで行った。観測期間中の毎正時と、毎正時の中間の時刻における前後 15 分間、計 30 分間のデータを 1 ケースとした。すなわち 9:30 を代表時とすれば、9:15~9:45 のデータを用いたことになる。そして 0.5 s 間隔でサンプリングした 3600 個のデジタルデータを用いて、波高、周期、平均水位上昇量および周波数スペクトルを求めた。観測期間中に A 点で観測した沖波の最大有義波高は、17 日 16:00 の 6.06 m であり、このときの最高波高は 9.02 m であった。なお、台風通過後に行われた深浅測量結果によると、観測桟橋周辺の海底床勾配は、約 0.015 であった。

4. 実験および現地観測の結果

(1) 砕波帯内の波高変化

最初に、模型実験斜面上の汀線に平行な方向の波高変化を調べた。図-1 に示した汀線に平行な測線 I, II および III の No. 5~No. 9 の測点で測定された有義波高 $H_{1/3}$ を比較したところ、 $\theta_a=0^\circ$ の場合には各測線上の $H_{1/3}$ はほぼ等しくなった。 $\theta_a=30^\circ$ の場合には、上手側の模型端に近い測点の $H_{1/3}$ が、他の測点に比べて 20% 程度小さくなった。しかし、中央部の No. 7 の $H_{1/3}$ が他点より小さくなることはなかったので、測線上の波高をほぼ代表できるものと考えて、水槽中央部の汀線に直角方向の測線 IV 上の波高を用いて波高変化を調べた。

図-5 は、測線 IV で測定した汀線に直角方向の波高変化を示す。図では、換算沖波波高 H_0' で除した無次元波高を示した。図-5(1) は、 $\theta_a=0^\circ$ の直角入射の場合で、黒印が単方向波、白印が多方向波の波高変化を示す。実曲線は、合田が算定した¹⁾ 砕波帯内の不規則波高を示す。単方向波の波高は、 $h/H_0' > 1$ の範囲ではあまり変化せず、 $H_{1/3}/H_0' = 0.9 \sim 1.0$ 程度である。そして、 $1 < h/H_0' < 2$ の区間では、実験値は、計算値より 1 割程度小さい。しかし、水深がさらに浅くなると計算値と実験値は一致する。多方向波の波高は、 $h/H_0' > 1.1$ の範囲では、単方向波より小さくなっている。これは、多方向不規則波の屈折係数が、成分波の屈折のため、直線状平行等深線海岸においても 1 以下になる²⁾ ため、および波高計設置用に模型床上に立てた 10 cm 四方の直柱による回折の、波高測定点における影響が、斜めから入射する成

分波を持つ多方向波の方が大きくなるためと思われる。しかし、 $h/H_0' < 1$ となると、多方向不規則波の波高は、単方向不規則波と一致し、計算値とも等しくなる。

図-5(2) は、 $\theta_a=30^\circ$ の場合を示し、白印が $S_{\max}=25$ 、黒印が $S_{\max}=10$ の実験値を示す。図から判かるように、波の方向集中度の相違による波高の差は小さい。 $h/H_0'=1.8 \sim 1.5$ では、実験値は、 $\theta_a=0^\circ$ の場合より小さく、計算値に比べると 20% 以上小さい。これは、成分波の屈折による多方向不規則波の屈折係数の低下が、直入射の場合より顕著になるためと思われる。しかし、 $h/H_0' < 1$ になると、屈折によって成分波の波向が 0° に近づくため、多方向不規則波の波高は、単方向波を対象とした計算値と一致する。

したがって、多方向不規則波の波高は、 $1 < h/H_0' < 2$ の区間では、主に成分波の屈折の影響のため、単方向波よりも小さくなることがわかった。しかし、水深が浅くなり、 $h/H_0' < 1$ になると、成分波の波向が 0° に近づくため、その波高は単方向波と一致し、計算値とも等し

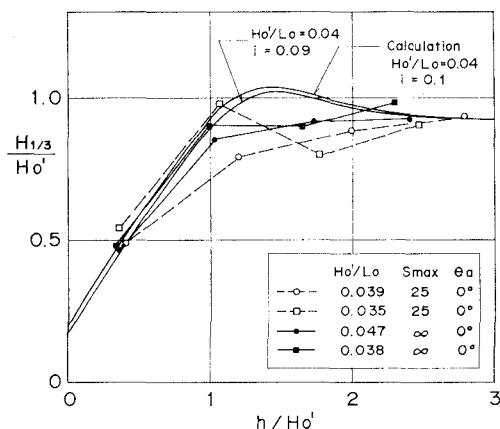


図-5(1) 実験における波高変化 ($\theta_a=0^\circ$)

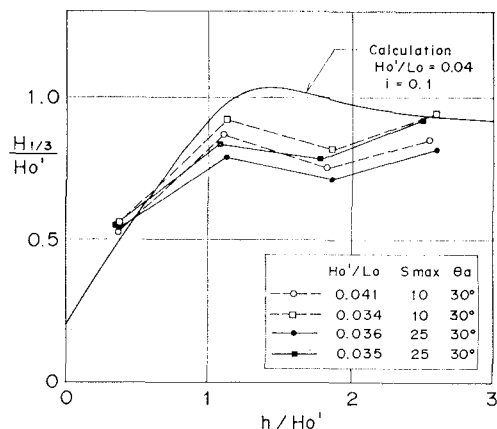


図-5(2) 実験における波高変化 ($\theta_a=30^\circ$)

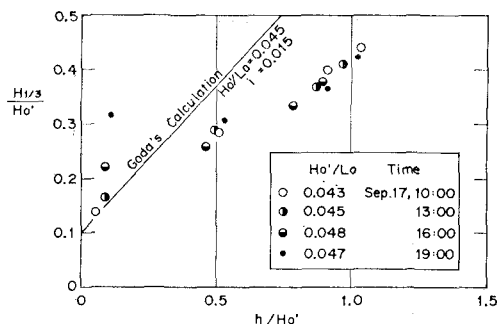


図-6 現地における波高変化

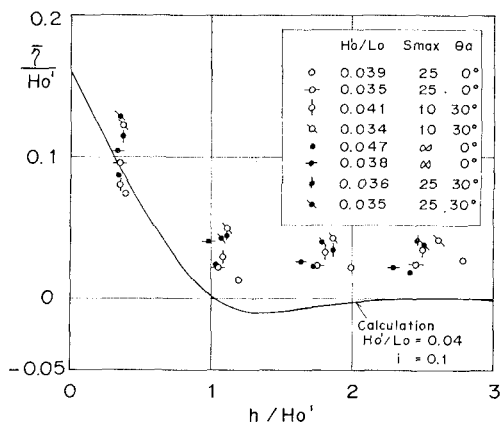


図-7 実験における平均水位上昇量の変化

くなる。ゆえに、相対水深が小さい水域では、従来の計算法によって碎波帯内の波高を算定することができるが、地形が複雑で屈折が生じやすい海域では、多方向波としての検討が必要である。

図-6 は、現地観測で得られた波高変化を示す。観測機橋上で観測された波高は、換算沖波波高の0.5以下であり、細実線で示した計算値より小さい。 $h/H_o' < 1$ でも、観測値と計算値が一致しない理由としては、現地の海底地形が複雑で平行等深線海岸になっていないことが挙げられる。したがって、平行等深線海岸を対象として提案された計算式を用いた場合には、現地の不規則波高を大きく見積る可能性がある。

(2) 平均水位上昇量の変化

図-7 は、実験で求めた平均水位上昇量 $\bar{\eta}$ の変化を示す。実線は、合田の理論¹⁾による計算値である。図-7 において、 $\theta_a = 0^\circ$ の場合、実験値は、単一方向波の場合も、多方向波の場合もほぼ等しく、入射波の方向集中度によっては、平均水位上昇量は変化しない。 $\theta_a = 30^\circ$ の場合には、入射角が 0° の場合に比べて $\bar{\eta}$ が大きくなる傾向にある。計算値は、 $h/H_o' > 1$ の範囲では実験値より小さいが、 $h/H_o' < 1$ の範囲では、実験値とほぼ一致した。

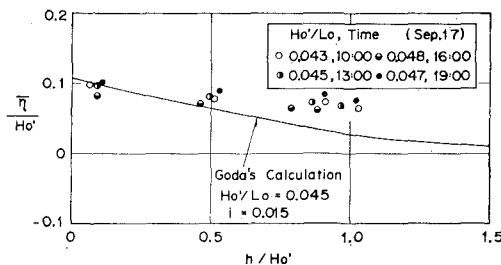


図-8 現地における平均水位上昇量の変化

図-8 は、現地観測で求めた平均水位上昇量を示す。ただし、柳嶋ら⁹⁾の手法に従って、気圧低下と吹き寄せによる水位上昇量を除去して、波だけによる水位上昇量を示している。海底勾配は平均値で、0.015 とゆるやかなため、各測点間の水位差は小さい。また観測時刻の違いにより大きな差は生じていない。計算値は、 $h/H_o' < 0.5$ の範囲で、観測値とほぼ一致しており、現地の地形が平行等深線海岸と多少ずれていても、 $h/H_o' < 0.5$ の範囲で、平均水位上昇量の計算値は、観測値をよく表していると言える。

(3) 周波数スペクトル形の変化

次に、周波数スペクトル形の変化を検討した。実験の場合、波高計アイレで測定されたスペクトル形を沖波のスペクトルとみなすと、そのスペクトル形は、Bretschneider-光易スペクトルとよく一致した。現地においても、A点で観測された沖波のスペクトルは、Bretschneider-光易型とよく一致した。実験において、模型床上の多方向不規則波と単一方向不規則波のスペクトル形を比較したところ、両者はほぼ一致し、顕著な差は見られなかった。また、 $\theta_a = 30^\circ$ で入射した場合と、直角方向から入射した場合を比べても、両者の間に顕著な相違は見られなかった。したがって、碎波帯内の周波数スペクトル形は、従来のように、直入射の単一方向不規則波のスペクトル形で代表することができる。

図-9 は、実験および現地における碎波帯帯内の周波数スペクトルの変化を示し、実線が実験における単一方向波の場合、破線が現地観測結果を示す。図では、エネルギー密度 $S(f)$ を $H_o' \cdot T_0$ で除した無次元周波数スペクトルを示した。横軸は $f \cdot T_0$ である。

海底床勾配が異なるために、実験値と観測値のエネルギーレベルには差がある。実験値および観測値の周波数スペクトル形を比較すると、水深が浅くなっても、両者共に、 $0.5 < f \cdot T_0$ の区間でのピーク周波数はほとんど変化しない。両者共に、水深が浅くなると、ピーク周波数より高周波数側のエネルギーが非常に小さくなり、高周波数側のエネルギー密度が、 $(f \cdot T_0)^{-1}$ に比例して減少するようなスペクトル形に近づく、また、両者共に、水深が浅くなるにつれて、低周波数側のサーフビートと

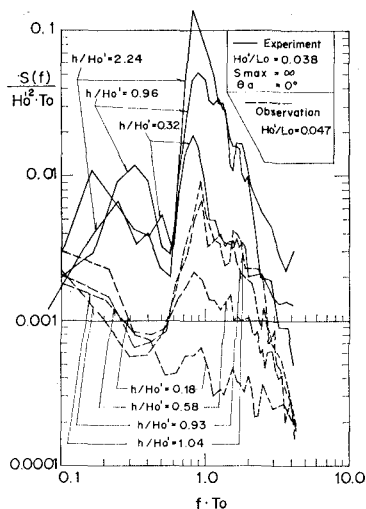


図-9 実験および現地における周波数スペクトルの変化

見られるエネルギーが増加している。しかし、低周波数帯のスペクトル形は、実験の場合、 $0.15 < f \cdot T_0 < 0.3$ でピークを持つ山型となるのに対して、現地観測の場合、 $f \cdot T_0$ が小さくなると、それに対応してエネルギーレベルが増すような形状となり、両者は異なる。したがって、模型実験の周波数スペクトルは、沖波のピーク周波数より高周波数側では、現地におけるスペクトル形の特性をよく再現しているが、低周波数側では再現性が悪い。

(4) サーフビートの検討

最後に、砕波帯内のサーフビートの振幅を検討した。

図-10は、実験および現地におけるサーフビートの振幅を求めたもので、振幅 ξ_{rms} は、ある上限周波数より低い周波数帯のエネルギーの0次モーメントの平方根として求めた。 $(\eta_{rms})_0$ は、沖波の水位変動量の標準偏差値である。サーフビートの上限周波数は、スペクトル形から検討して、 $f \cdot T_0$ が0.5となる周波数とした。図の一点鎖線は、合田が次式で示した、現地におけるサーフビート振幅の推定直線である¹⁾。

$$\frac{\xi_{rms}}{(\eta_{rms})_0} = \frac{0.04}{\left[\frac{H_0'}{L_0} \left(1 + \frac{h}{H_0'} \right) \right]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

合田は¹⁾、模型実験では主に水槽内の造波板と模型斜面との間で多重反射が生じるので、サーフビートが増幅されると述べて、図-10の破線で示された実験室内のサーフビート振幅の推定直線を提案している。

本実験におけるサーフビート振幅は、入射波の方向集中度および入射角が異なってもほぼ同じで、1/10 勾配の推定値より小さく、1/30 勾配の推定値とよく一致した。これは、平面水槽では、長水路に比べて、多重反射が起こりにくくなったためである。四角印で示した現地観測

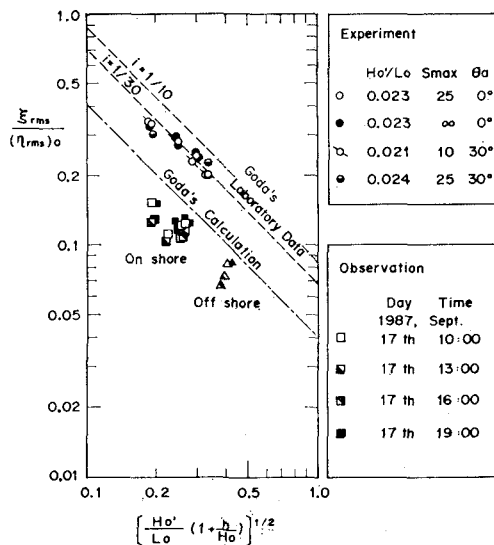


図-10 実験および現地におけるサーフビートの振幅

値に比べると、実験値は大きく、多方向波を作用させた場合でも、現地のサーフビート振幅を再現することはできない。今回の観測値は合田の推定値より小さい。合田の推定直線は、沖波波高 0.5~3m 程度の比較的波高の小さい場合の観測から求められたもので、無次元サーフビート振幅は波高によっても変化し、推定値とは一致しない可能性がある。

5. あとがき

本研究では、主に多方向不規則波の砕波特性を調べたが、成分波の屈折によって、その波高が、単一方向不規則波に比較して小さくなる場合があった。今後は、屈折の起こり易い複雑な海底地形上での多方向不規則波の砕波現象を検討する予定である。

最後に、現地波浪データは、当所水工部漂砂研究室の諸氏が取得したものであることを付記しておく。

参考文献

- 1) 合田良実：浅海域における波浪の砕波特性，港湾技術研究所報告，Vol. 14, No. 3, 1975, pp. 59~106.
- 2) M. D. Miles et al.: A multi mode segmented wave generator for the NRC hydraulics laboratory, Proc. of 21th American Towing Tank Conference, 1986.
- 3) 高山知司・平石哲也：サーベント型造波機で発生した多方向不規則波の特性，第34回海岸工学講演会論文集，1987, pp. 101~105.
- 4) 橋本典明：ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定，第34回海岸工学講演会論文集，1987, pp. 126~130.
- 5) 合田良実・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技術資料，No. 230, 1975, 45p.
- 6) 柳嶋慎一・加藤一正他2名：波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査，第35回海岸工学講演会論文集，1988,