

波群特性が異なる不規則波の浅水・砕波変形特性

間瀬 肇*・松本明男**・松元和伸**・岩垣雄一***

1. ま え が き

浅海域における波の諸特性を知ることは、海岸・港湾構造物に働く波力等の算定、あるいは、漂砂機構の解明にあたって重要であり、そのため数多くの研究が行われてきた。また近年、構造物の耐波設計においては、海の波の不規則性を考慮しなければならないことが明確になってきたので、不規則波浪の浅海特性の実態把握ならびに推算といった研究がさかんである。

水理模型実験で用いる不規則波は、従来、所定のエネルギースペクトルが再現されるようシミュレートされたものである。最近では、エネルギースペクトルが同じでも波群特性によって構造物の耐波性が左右されることがわかってきたが、このことは、水理実験において、スペクトルと波群の両者を考慮した不規則波を用いることが必要であることを意味している。

本研究は、入射波のエネルギースペクトル、沖波有義波高、沖波波形勾配はほとんど同じであるが、Groupiness Factor が異なる3種類の不規則波を用いて、砕波している波についての波高分布、砕波率（すべての波に対する砕波している波の割合）、波の非対称性といったこれまであまり調べられていない特性を含め、不規則波の浅海域での諸特性を詳細に調べるものであり、同時に入射波の波群特性の影響を検討するものである。また、個々波の定義法の相違による特性量の差を考察する。

2. 実験装置および実験方法

実験は、長さ 27m、幅 50cm および深さ 75cm の両面ガラス張り水槽で実施した。この水槽の一端には不規則波発生装置が設置されている。模型海浜の海底勾配は 1/20、一様水深部の水深は 45cm とした。

実験に用いた不規則波は、岩垣・間瀬・北¹⁾のシミュレーション法に基づいた波で、ピーク周波数が 0.6 Hz の Pierson-Moskowitz 型スペクトルを持ち、かつ3種類の異なった波群特性を持っている（岩垣らの Case 1,

2 および 4 である）。これらは波のエネルギースペクトル、沖波有義波高、沖波波形勾配はほぼ同じであるが、Groupiness Factor が異なっており、その結果波高の頻度分布が異なっている²⁾。ここでは、これら3ケースを Case A, B, C とする。

水位変動は、水深が 45, 29, 24, 19, 16, 13.5, 11.5, 8.5, 6.5, 4 および 2cm の地点で容量式波高計を用いて測定した。水深が 4cm および 2cm の地点を除いた各地点では、砕波している波の波高分布および砕波率を調べるために、波高計設置点を通過する波が砕波している場合はパルス信号を入力し、砕波している波か非砕波の波かを区別できるようにした。また、水槽の側方よりビデオで波を撮影し、パルス信号が砕波している波とうまく対応しているかをチェックした。水位変動記録とパルス信号記録は 0.04 秒ごとに A-D 変換し、後の解析に用いた。なお、データ数は1ケースあたり 26,500 個である。

3. 実験結果および考察

実験結果を整理するにあたり、実験で得られた水位変動からピーク周波数の 0.5 倍以下および 6 倍以上の周波数成分の変動を FFT 法を利用して除去した、補正した水位変動記録を用い、ゼロアップクロス法で個々波を定義した。ゼロダウンクロス法で個々波を定義した場合との比較検討は 4. で行う。

3.1 代表波高

図-1 は、最大波高 $H_{\max}$ と有義波高 $H_{1/3}$ の水深の減少に伴う変化を示したものである。波高と水深は、水深が 45cm の地点における $H_{1/3}$ の測定値から求めた沖波有義波高 H_0 で無次元化してある。図中の実線、破線および点線は、著者ら²⁾が提案した波高変化計算法に基づく計算結果である。

今回用いた3ケースの不規則波は、エネルギースペクトルが同じになるように造波されており、その結果、沖波有義波高や沖波波形勾配 H_0/L_0 もほとんど同じである。(b)図の $H_{1/3}$ には、3ケースの差はほとんど見られない。(a)図の $H_{\max}$ では、水深波高比 h/H_0 が 2.0 より小さい場合には3ケースの差はあまり見られな

* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

** 学生員 京都大学大学院工学研究科

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

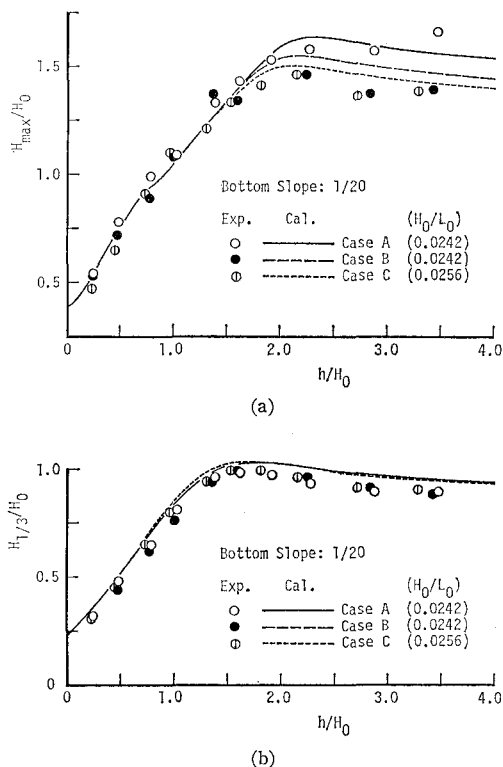


図-1 最大波高と有義波高の変化

いが, h/H_0 が 2.0 より大きい領域では差が見られ, Case A の実験結果が最も大きくなっている。

これら 3 ケースの不規則波は, Groupiness Factor が異なり, その結果入射波の波高分布も異なるので, 有義波高が同じであっても, 高波高部分の波高の出現率は, 裾広がりの分布形を持っている Case A が他の 2 ケースよりも大きい。そのため, 砕波がそれほど著しくない領域, すなわち, $h/H_0 > 2.0$ では, H_{max} や $1/10$ 最大波高 $H_{1/10}$ といった高波高の代表波高に差が現われる。砕波が卓越してくるころでは, 最大波高はほぼ水深によって制限されるので, 入射波の波高分布の差の影響はなくなって, 3 ケースの H_{max} や $H_{1/10}$ はほぼ同じになるものと思われる。

3.2 砕波している波の波高分布

図-2 は, 浅海域における波高の頻度分布を示したもので, 黒くぬってあるヒストグラムが砕波している波についての波高分布, 黒くぬっていないヒストグラムがすべての波についての波高分布である。横軸の波高は各地点の平均波高 $\bar{H}$ で無次元化してある。なお, 図中の折線は波高変化計算法に基づく計算結果²⁾である。

砕波している波についての波高の頻度分布を見ると, 波高の大きな波でも砕波していないものがあったり, 逆に波高の小さな波でも砕波しているものがあることがわ

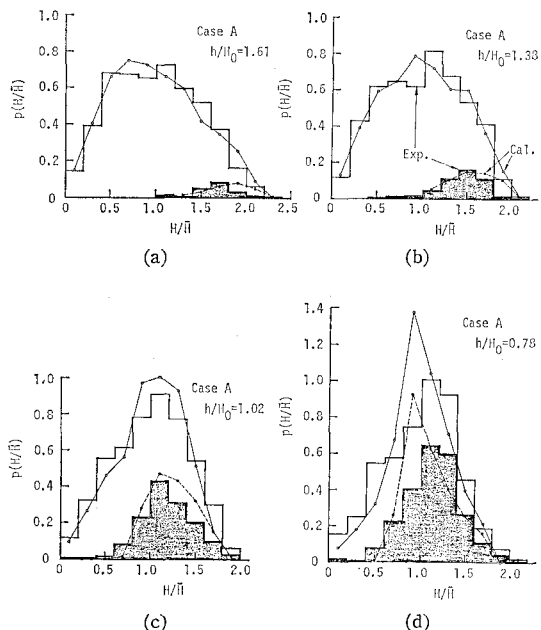


図-2 波高の頻度分布の変化

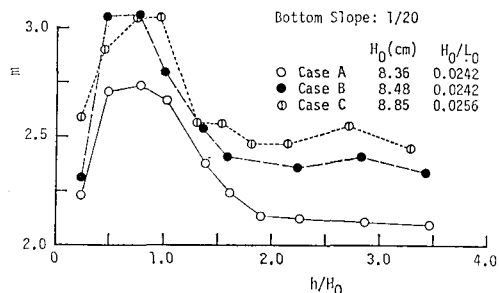


図-3 Weibull 分布の形状母数の変化

かる。またすべての波についての波高の頻度分布を見ると, 水深が減少するにつれ, 分布形が尖ってることがわかる。各地点で得られた波高分布に Weibull 分布をあてはめ, 最尤推定法で形状母数を求めると, 図-3 のようになる。形状母数 m は, 沖から h/H_0 が 2.0 まではあまり変化せず, それより浅くなると増加し, h/H_0 が 0.6 から 1.0 で最も大きくなり, その後また減少する。すなわち h/H_0 が 0.6 から 1.0 で, 波高の分布形は先鋭化している。

Battjes-Janssen³⁾ は, 不規則波の波高変化計算モデルにおいて, 砕波した波はすべて砕波限界波高を持つとしている。合田⁴⁾ は, 砕波した波を砕波していない波の確率密度に比例して配分している。図-2 の砕波している波の波高分布をみると, Battjes らの仮定は明らかに実際の現象と異なっている。合田の仮定は, 図-2 の (c)

と(d)のように h/H_0 が約 1.0 以下の場合には現象に近いが、それより水深の大きい場合には現象と異なる。Thornton-Guza⁵⁾ の波高変化モデルでは、沖から浅海まですべて波高分布を Rayleigh 分布と仮定しているが、図-3 によると、波高分布は水深変化に伴い変化し、一定の分布形を保持することはない。

碎波率については、文献 2) に示したが、 h/H_0 が 1.5 より小さくなると増加し始める。また、碎波率に及ぼす入射波の波群特性の差は見られなかった。

3.3 有義波周期

図-4 は、水深の減少に伴う有義波周期の変化を、水深が 45 cm の地点の有義波周期 $(T_{1/3})_0$ で無次元化して示したものである。この図より、汀線近くでは有義波周期は約 20% 増加しているが、合田⁴⁾ の結果のように 2 倍近く増加することはないことがわかる。すなわち、有義波周期はあまり変化しない。また、3 ケースの差はあまり見られない。

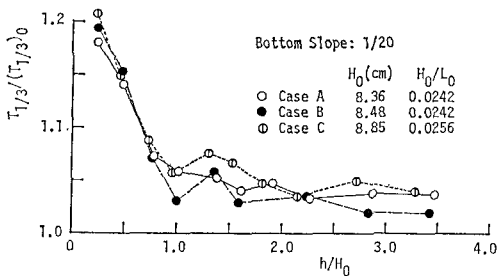


図-4 有義波周期の変化

3.4 波の非線形性、非対称性および波群特性

図-5 から図-11 は、それぞれ skewness $\sqrt{\beta_1}$ 、平均峰幅比 α 、平均前傾比 β 、平均峰高波高比 γ 、波高の平均連長 $j(\bar{H})$ 、高波の平均繰り返し長さ $l(\bar{H})$ および Groupiness Factor GF を示したものである。 α 、 β および γ の定義は図-12 に示してあるが、 β の逆数は Myrhaug-Kjeldsen⁶⁾ の vertical asymmetry factor, γ は horizontal asymmetry factor と言われるものである。Vertical asymmetry factor については、Funke-Mansard⁷⁾ および合田⁸⁾ によって、波が平均的に対称であっても、このパラメーターの期待値は 1 より大きくなることが指摘されている。今回用いた前傾比 β も同様であり、沖で約 1.11 となっている。浅海域においても同様に、波は β の値から予想されるもの以上に前傾化している。Vertical asymmetry factor は分母が T_1 となっているので、浅海域になって波の前面が切り立ってくると、値が大きくなり、その上限は ∞ となる。そのため本研究ではその逆数を用いた。

Skewness $\sqrt{\beta_1}$ が正であることは、波の谷より峰の方

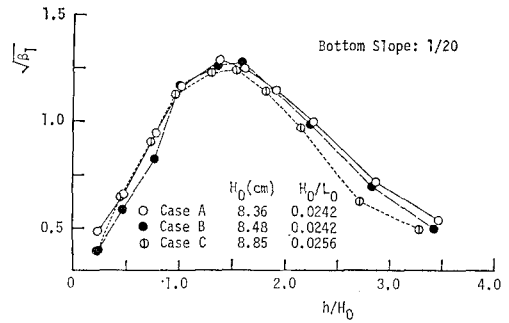


図-5 Skewness の変化

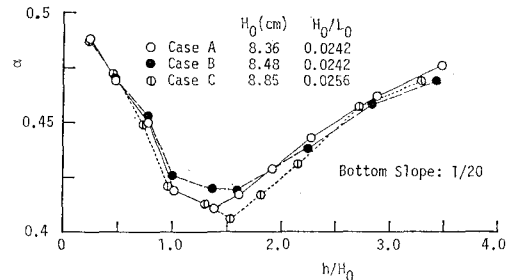


図-6 平均峰幅比の変化

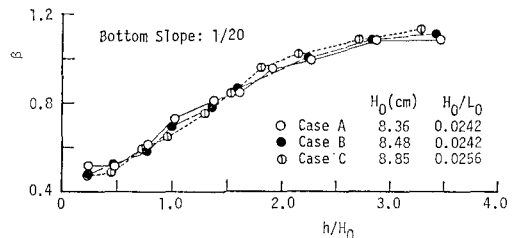


図-7 平均前傾比の変化

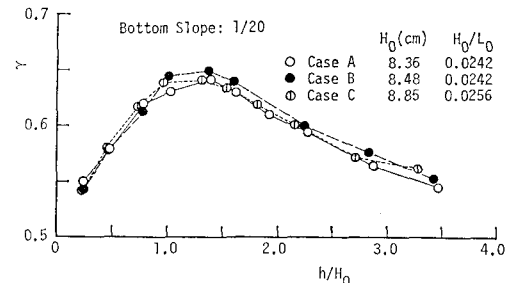


図-8 平均峰高波高比の変化

がその絶対値が大きいことを示しており、 γ は峰高と波高の比であるので、両者はどちらも平均水位を基準とした上下の非対称性を表すパラメーターである。 $\sqrt{\beta_1}$ そのものの値からはどの程度波が非対称になっているかを推定するのは難しいが、 γ の方は上下非対称性を量的に

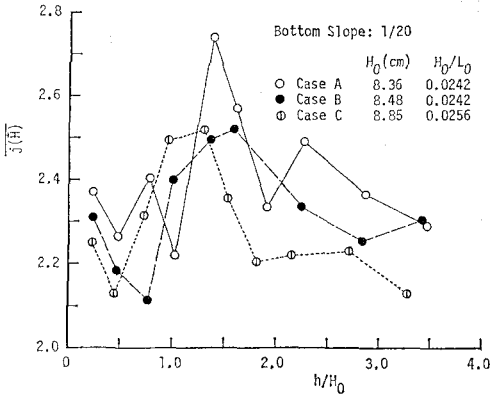


図-9 波高の平均連長の変化

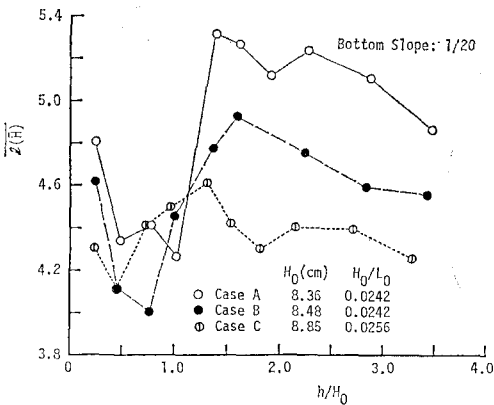


図-10 高波の平均繰り返し長さの変化

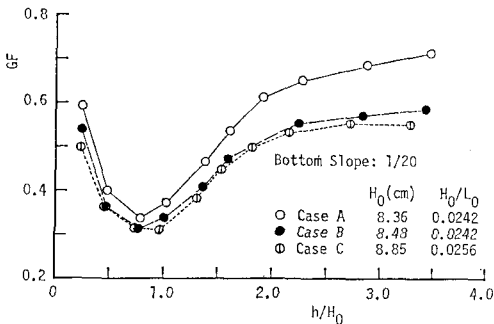


図-11 Groupiness Factor の変化

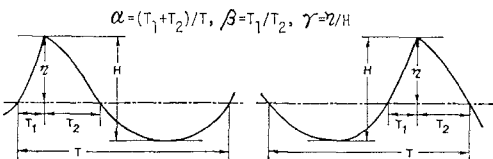


図-12 波の非対称性パラメーターの定義

その後減少し、波は上下対称になっていく。 α は h/H_0 が 1.5 付近で最も小さくなっており、峰の部分はやせた形をしている。汀線近くになると、水位が平均水位より上・下にある時間間隔はほぼ等しくなっている。 β は水深が減少するに従って単調に減少しており、波は浅海に進むにつれて前傾化し続ける。 h/H_0 が 1.5 付近は $H_{1/10}$ や $H_{1/3}$ が最大となる地点であり、かつ碎波率が増加し始める地点である。

合田⁹⁾は、彼が提案した前傾度パラメーターと skewness との間の相関が極めて弱いことを示したが、図-5 と図-7 から類推すると、水深の減少に伴う両者の変化傾向が異なるためであると考えられる。

波高の平均連長 $\overline{j(\bar{H})}$ や高波の平均繰り返し長さ $\overline{l(\bar{H})}$ は、 $\sqrt{\beta_1}$ や γ が最も大きくなる $h/H_0 \approx 1.5$ で最大となる。筆者ら⁹⁾のこれまでの研究においても、 $\overline{j(\bar{H})}$ が大きくなる地点は $\sqrt{\beta_1}$ が最大になる地点と対応していた。Groupiness Factor GF は $h/H_0 \approx 0.8$ で最も小さくなっている。 GF が小さいのは SIWEH の平均値回りの変動が小さいことを意味し、これはまた波列が平坦であることを意味する。そのため、波高の頻度分布は尖ることになり、このことは図-3 の Weibull 分布の形状母数が大きくなっていることから確かめられる。このように GF と m との間には負の相関があることがわかる。

$h/H_0 > 1.5$ までは、 $\overline{j(\bar{H})}$ 、 $\overline{l(\bar{H})}$ および GF に入射波の波群特性の差が現われているが、それ以後になるとその差は少なくなる。著者ら¹⁰⁾の緩斜面上の波の遡上に関する研究において、遡上高には入射波の波群特性の差があまり見られなかったが、その理由は、碎波が卓越してくると浅海域の波群特性に差がなくなるためである。なお、 $h/H_0 \approx 0.8$ では、 GF 、 $\overline{j(\bar{H})}$ および $\overline{l(\bar{H})}$ が同時に小さくなっており、波群は最も目立たなくなっている。

4. 個々波の定義法（ゼロアップクロス法とゼロダウンクロス法）による統計量の相違

合田⁹⁾は波の定義法による波高・周期の差を詳細に検討した。その結果、波高の代表値については、ゼロクロス法の定義の差による有意な差は認められないこと、周期の代表値については、前傾度パラメーターが正の大きな値をとるとき、ゼロダウンクロス法による値がゼロアップクロス法による値よりも小さく出る傾向にあることを示した。

本研究においても、ゼロダウンクロス法によって得られる $H_{\max}$ 、 $H_{1/10}$ 、 $H_{1/3}$ 、 $T_{\max}$ 、 $T_{1/10}$ および $T_{1/3}$ のゼロアップクロス法による値に対する比をすべての実験データを用いて調べた。その結果、 $H_{\max}$ を除く波高の

把握できるという利点がある。 $\sqrt{\beta_1}$ と γ は水深が浅くなるにつれて増加し、 h/H_0 が約 1.5 で最も大きくなり、

比は最大で5%の変動があるが、ほぼ1.0であること、 $T_{\max}$ を除く周期の比は $0.4 < h/H_0 < 1.5$ で1.0より小さくなっているが、その程度は最大で約10%であることがわかった。また $H_{\max}$ や $T_{\max}$ の比は変動が大きく、 $H_{\max}$ については定義法による差はみられないが、 $T_{\max}$ については平均的に見るとゼロダウンクロス法によるものが小さくなっていることがわかった。

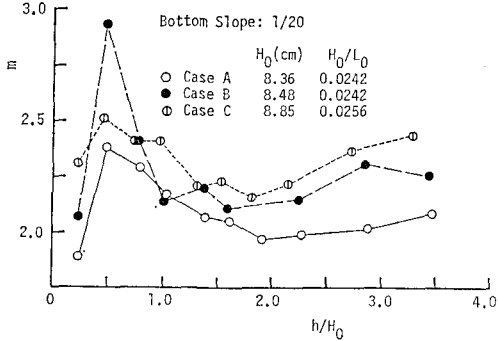


図-13 Weibull 分布の形状母数の変化
(ゼロダウンクロス法)

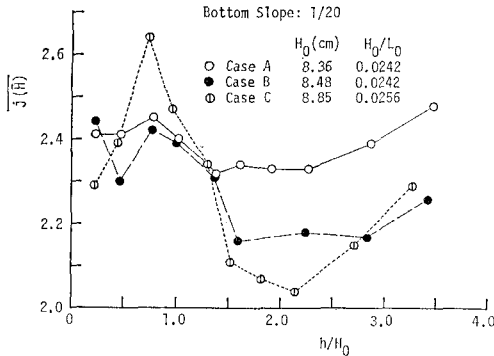


図-14 波高の平均連長の変化 (ゼロダウンクロス法)

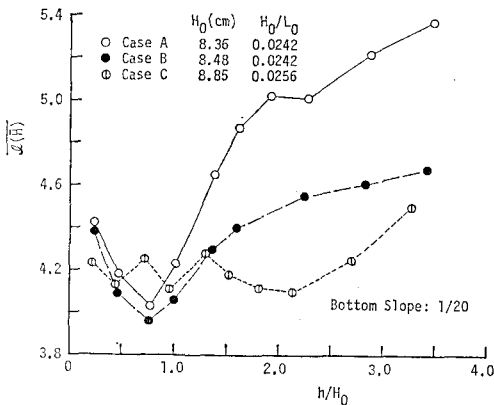


図-15 波の平均繰り返し長さの変化
(ゼロダウンクロス法)

その他、波の定義法の影響を受ける特性量を示すと、Weibull 分布の形状母数 m 、波高の平均連長 $j(\bar{H})$ 、高波の平均繰り返し長さ $\bar{l}(\bar{H})$ である。ゼロダウンクロス法で個々波を定義した場合のこれらの結果を図-13～15 に示す。

5. あとがき

本研究は、入射波のエネルギースペクトルは同じであるが、波群特性が異なる3種類の不規則波を用いて、碎波している波の波高分布や波の非対称性の変化といったこれまであまり調べられていない特性を含め、浅海域の不規則波浪の諸特性を詳細に調べたものであり、多くの図面を示した。個々の考察は本文に詳しいが、ここでは、水深波高比が1.5付近の有義波高が最大となる地点であり、碎波率が増加し始める地点を境にして、波の特性量の多くがその変化傾向を変えること、入射波の波群特性の影響は水深波高比が1.5より小さくなると現れなくなることとまとめてあとがきとする。

最後に、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(1)(代表者 岩垣雄一教授)ならびに奨励研究(A)による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 岩垣雄一・間瀬 肇・北 直紀: Wave Group を考慮した不規則波のシミュレーションとその特性, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 55-59, 1982.
- 2) 間瀬 肇・松本明男・岩垣雄一: 不規則波の浅水・碎波変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集 (印刷中), 1986.
- 3) Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., pp. 569-587, 1978.
- 4) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106, 1975.
- 5) Thornton, E. B. and R. T. Guza: Transformation of wave height distribution, Jour. Geophys. Res., Vol. 88, No. C10, pp. 5925-5938, 1983.
- 6) Myrhaug, D. and S. P. Kjeldsen: Parametric modelling of joint probability density distributions for steepness and asymmetry in deep water waves, Appl. Ocean Res., Vol. 6, No. 4, pp. 207-220, 1984.
- 7) Funke, E. R. and E. P. D. Mansard: The control of wave asymmetries in random waves, Proc. 18th Coastal Eng. Conf., pp. 725-744, 1982.
- 8) 合田良実: 波浪の統計的特性に関する二、三の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第4号, pp. 65-102, 1985.
- 9) 間瀬 肇・岩垣雄一: 複合断面の海浜における不規則波の碎波変形特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 25-29, 1984.
- 10) 間瀬 肇・土居宏行・岩垣雄一: 不規則波の遡上特性に及ぼす Wave Grouping の影響に関する実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 114-118, 1983.