

不規則波の海岸堤防へのうちあげ

富 永 正 照*・橋 本 宏**

1. ま え が き

海岸堤防は陸上への侵入波を防止する目的を持っているために、その高さは波によるうちあげ高や越波量によって決定されている。一般に設計の際に用いられている方法はまず計画波を決定し、これに規則波による入射波とうちあげ高または越波量の関係を適用して堤防高が決定されている。海の波は波高、周期ともに不規則な変動をしており、このように決定された堤防高では不十分な場合があり得る。ここでは不規則な波によるうちあげ高について、模型実験による検討を行なったので報告する。

不規則な波によるはい上がりについては Sibul と Tickner¹⁾ による実験以来、主として一様勾配の場合についての検討が行なわれてきた。この場合、一般に深海波とはい上がりの関係が調べられている。しかし日本においては海岸堤防のり勾配はきつく、水深の浅い場所に設置されるために、その成果を用いることはできない。また浅い場所におけるうちあげは浅海での不規則な波の変形とも関係している。堤防にうちあげるまでに、不規則な波の波形、波高、スペクトルがどのように変化するかということと、堤防前面における入射波とうちあげがどのような関係にあるかという点について実験的な検討を行なった。

2. 実験方法

模型実験は延長 61m、幅 0.6m、高さ 1.375m の一部ガラス張り水路を使用して行なった。これには不規則波造波装置が取り付けられており、最大波高 30cm の波を起こすことができる。模型は図-1 に示すように海底

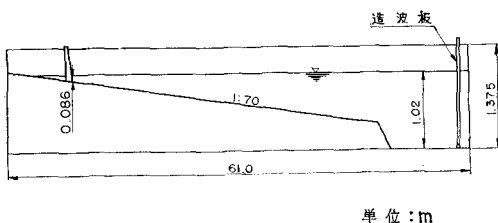


図-1 模型配置図

勾配 1/70、堤防のり勾配 1 割、堤脚水深 8.6cm である。

浅海での波の変形に関する実験では、光易Ⅱ型²⁾ のスペクトル形状を持つ有義波高 $H_{1/3}=10\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.5\text{sec}$ の波を用いた。必要とするスペクトルを持つ波を発生し、水深 67cm から 4.3cm までの 9カ所で、抵抗線式波高計を使用して波形を測定した。得られた波形はデータレコーダに記録し、これをデータ処理機によって A-D 変換し、波形頻度分布、波高分布、スペクトルを計算した。測定時間は 5 分間とし、このうち 0.1sec 間隔でサンプリングした 2500 個について計算を行なっている。

波のうちあげ高に関する実験は水深 8.6cm の位置に堤防を設置し、堤防のり面上のうちあげ波形を波高計によって測定した。波高計の抵抗線と堤防のり面とは約 2mm の間隔を持っている。入射波は $H_{1/3}=5\sim 15\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1\sim 2\text{sec}$ の範囲のものを使用した。堤防を設置した場合には反射波があるために測定時間が長くとれず、解析には 0.1sec でサンプリングした 400 個を使用している。このために精度は悪くなっている。

規則波によるうちあげ高と比較するために $H_0=2\sim 15\text{cm}$ 、 $T=1.0, 1.5, 2.0\text{sec}$ の規則波を発生してうちあげ高の測定を行なった。

3. 浅海における波の変形

波が深海から浅海に進むにしたがって、波形はひずんでくる。波の山はとがり、谷は浅くなり、また波の前後は非対称になる。有義波高 10cm、周期 1.5sec の場合の、各水深における平均波、有義波、1/10 最大波の波高と周期、0.1sec 間隔でサンプリングした波形の分散 η^2 、skewness、kurtosis 等が表-1 に示されている。波高はゼロアップクロス法によって求めている。

規則波では碎波点に近づくにしたがって波高は増大するが、この場合には増大はほとんど生じていない。平均波高は一度減少し、それから増加しているが 1/10 最大波高は水深の減少に伴って減少している。水深 20cm までは波高の変化は大きくないが、これより浅くなると水深にほぼ比例して減少している。波高分布を示したものが図-2 である。水深 67cm における波高はほぼレーレー分布になっているが、水深 20cm においてはレー

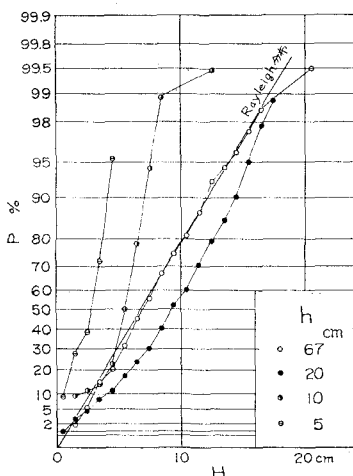
* 正会員 建設省四国地建高知工事々務所

** 正会員 建設省土木研究所

表—1 波の変形実験結果

h (cm)	H_m (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$H_{1/10}$ (cm)	T_m (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{1/10}$ (sec)	η^2 (cm ²)	$H_{1/3}/H_m$	$H_{1/10}/H_{1/3}$	skewness	kurtosis
67.0	7.44	11.5	14.4	1.29	1.39	1.33	9.08	1.55	1.25	0.168	3.18
55.3	6.96	10.8	13.9	1.28	1.45	1.32	8.01	1.55	1.29	0.241	3.29
42.9	6.62	10.6	13.1	1.29	1.40	1.38	7.44	1.60	1.24	0.317	3.25
31.5	6.89	10.5	13.0	1.34	1.50	1.46	7.52	1.52	1.24	0.386	3.03
20.0	7.47	10.8	12.7	1.39	1.56	1.44	7.67	1.45	1.18	0.842	3.39
10.0	5.22	6.97	8.00	1.38	1.64	1.66	3.12	1.34	1.15	1.236	4.20
8.6	4.58	6.23	7.20	1.35	1.68	1.68	2.67	1.36	1.16	1.408	5.03
5.0	2.55	4.07	4.80	1.32	1.83	2.48	1.14	1.60	1.18	1.477	6.97
4.3	1.82	3.32	4.05	1.09	1.64	2.47	0.84	1.82	1.22	1.105	4.67

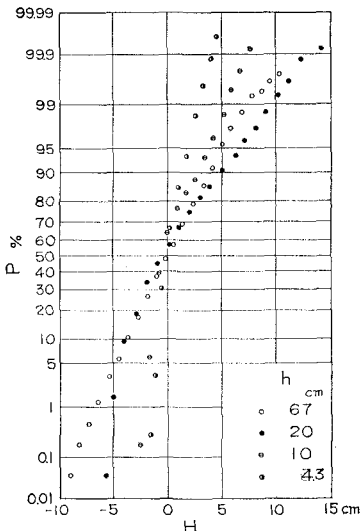
レー分布よりも正規分布に近い。波高の大きな波の割合も減少するが、波高の小さな波の割合も減少し、ある一定の高さになる傾向にある。浅海に波が進むにしたがって碎波する波があるために大きな波の割合は減少していると考



図—2 波高頻度分布

えられる。各波高比については水深が深ければレーレー分布から求めた値にほぼ等しいが、水深が浅くなると $H_{1/3}/H_m$, $H_{1/10}/H_{1/3}$ も減少している。水深が 10 cm になると 1 cm 以下の割合もかなり多いが、これは波の山の背面で平均水面付近に碎波にともなう波高の小さな波を生じているためである。各波高に対応する周期も変化し、 $T_{1/10}$, $T_{1/3}$ ともに増加している。すなわち波高の大きな波は周期も長いことを示している。

水面の高さ、すなわち波形の頻度分布を調べると図—3に示すように、水深が深ければ正規分布をしているが浅くなるとひずんでくる。表



図—3 波形頻度分布

—1 に示すように水深が 20 cm 以下になると skewness, kurtosis ともに増加している。

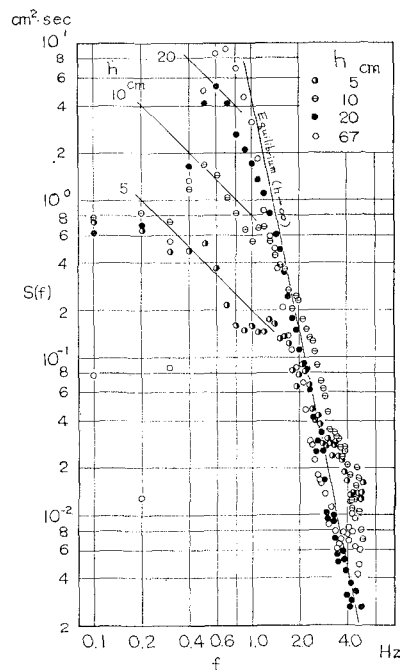
波のスペクトルの各水深における形が図—4に示されている。水深の減少に伴い、最大エネルギー密度は減少し、またピークの周波数は低周波側に移行している。周波数 0.1~0.2 Hz のエネルギー密度は、波が水深 67 cm から 20 cm まで進む間に大きく増加している。

深海および浅海域における平衡状態に達した後のエネルギースペクトルの形については、それぞれ Phillips³⁾ と井島・松尾⁴⁾ によって提案されている。すなわち深海においては、平衡状態のスペクトルの形を決定する支配的な物理量が重力の加速度と周波数であり、浅海においてはこれに水深が加わるとして次のように求められている⁴⁾。

$$S(f) = 2\pi\beta \frac{h^{5/2}}{g^{1/2}} \frac{\left(\tanh \frac{2\pi h}{L}\right)^2}{\left(\frac{2\pi h}{L}\right)^2 \left(\frac{4\pi^2 h f^2}{g}\right)^{1/2}} \quad \cdots (1)$$

ここで $S(f)$: 平衡スペクトル, β : 無次元定数, 0.8×10^{-2} , h : 水深, g : 重力の加速度, L : 周波数 f に対応する微小振幅波理論による波長である。

水深 10 cm および 5 cm における式 (1) の値が図—4



図—4 スペクトルの水深による変化

に実線で示されている。スペクトルのピークの周波数とその2倍周波数より大きな周波数においては式(1)で表わされる平衡値に達しているが、それ以外の周波数では平衡値以下である。各周波数ごとにエネルギー密度の水深による変化を調べてみると次のようになる。エネルギー密度が最大となる周波数(0.6 Hz)のエネルギー密度は水深20 cmまではほぼ一定であるが20 cm以下になると式(1)で表わされる値をとっている。ピークの高周波側(1~2 Hz)では造波機で発生した値がほぼ平衡値となっているが、浅くなるにしたがって一度減少し、さらに浅くなると平衡値に達している。低周波側(0.1~0.4 Hz)では水深の減少に伴い急激にエネルギー密度は増加するが、水深20 cmに達すると式(1)の平衡値に達するまでは一定値をとっている。

ここで生じている現象は、高周波側の粘性による減衰、水深変化によるエネルギーの増加、砕波によるエネルギー損失などによっていると推定される。水深が浅くなると微小振幅波理論によっても明らかのように、群速度の減少にともないエネルギーは増加する。しかしここで生じているような、ピークの低周波側の増加は説明することはできない。砕波による損失は中心周波数が限界に達したときに生じているが、これは単にその周波数のエネルギーが失われるばかりでなく低周波側の増大を押えていると推定される。

4. 波のうちあげ

不規則な波によるうちあげ高の実験結果が表-2にまとめて示されている。分散 η^2 は水深67 cmにおける入射波の値であり、 $(H_m)_0$ は $H_m=2.5\sqrt{\eta^2}$ の関係から求めた値に、平均周期と水深を用いて計算した浅水度係数をかけて求めている。うちあげ高については1波の定義をどのようにするかという点に問題があるが、ここでは波高と同様にゼロアップクロス法によって一波を定め、波のない場合の静水面から山までの高さをうちあげ高としている。すなわち平均水面の上昇はうちあげ高に含まれている。実験番号 No. 5 は入射波として White なスペクトル形状は持っているが、他のものは光易Ⅱ型のスペクトル形状である。

不規則波の平均うちあげ高 R_m と規則波のうちあげ高を比較したのが図-5である。規則波の場合の $(H_m)_0$ と

しては相当深海波高 H_0 を用いている。これによれば両者の間には大きな差は存在しないが White なスペクトルの場合には相当差がある。平均値の代りに有義波高、有義うちあげ高を使用した場合は $R_{1/3}/(H_{1/3})_0$ の値は $R_m/(H_m)_0$ と変わらないが $h/(H_{1/3})_0$ は $h/(H_m)_0$ と大きな差があるために規則波の結果とは一致しない。不規則波の場合には平均値ばかりでなく、うちあげ高の分布も問題になる。各うちあげ高の比、すなわち $R_{1/3}/R_m$ と $R_{1/10}/R_{1/3}$ の値を調べるとかなりばらついてはいるが $h/(H_m)_0$ が1~2の間ではレーレー分布の値より小さくなっている。堤防のうちあげ高は堤防前面の入射波と当然関係している。さきに調べた波の変形でも水深20~8.6 cmで同様の傾向を示している。

うちあげ高の分布について堤防前面での入射波高 H の分布と比較したのが図-6である。入射波高としては堤防のない場合の、堤防の位置での波形記録から求めた値を用いている。またこの図には水深67 cmにおける波高分布から規則波の波高とうちあげ高の関係を用いて求めたうちあげ高 R_e の分布も示されている。実験値 R と推定値 R_e の分布を比較すると、平均値ではほぼ一致しているが分布は相当異なっている。波高が小さく堤防前面に重複波が形成されていると推定される場合($H_{1/3}=5$ cm)には

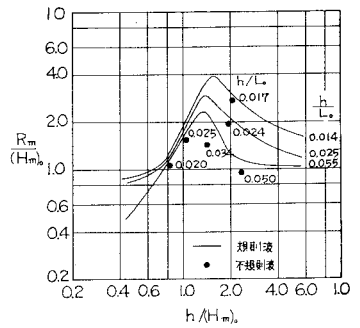


図-5 波のうちあげ高

うちあげ高の分布について堤防前面での入射波高 H の分布と比較したのが図-6である。入射波高としては堤防のない場合の、堤防の位置での波形記録から求めた値を用いている。またこの図には水深67 cmにおける波高分布から規則波の波高とうちあげ高の関係を用いて求めたうちあげ高 R_e の分布も示されている。実験値 R と推定値 R_e の分布を比較すると、平均値ではほぼ一致しているが分布は相当異なっている。波高が小さく堤防前面に重複波が形成されていると推定される場合

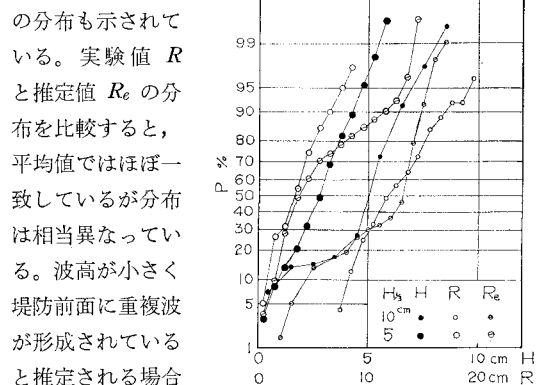


図-6 波高とうちあげ高の分布

表-2 うちあげ高実験結果 ($h=8.6$ cm)

No.	η^2 ($h=67$ cm) (cm^2)	R_m (cm)	$R_{1/3}$ (cm)	$R_{1/10}$ (cm)	T_m (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{1/10}$ (sec)	$R_{1/3}/R_m$	$R_{1/10}/R_{1/3}$	$(H_m)_0$ (cm)	$R_m/(H_m)_0$	$h/(H_m)_0$	h/L_0
1	2.02	3.47	5.82	7.79	1.05	1.25	1.25	1.68	1.34	3.66	0.95	2.35	0.0500
2	2.52	8.45	11.9	13.1	1.50	1.70	1.52	1.41	1.10	4.33	1.95	1.98	0.0245
3	2.46	11.7	17.6	20.3	1.75	2.36	2.22	1.50	1.15	4.28	2.74	2.01	0.0169
4	8.89	12.4	16.3	19.0	1.48	1.97	2.92	1.31	1.16	8.12	1.53	1.06	0.0252
5	5.12	8.61	15.0	17.4	1.28	1.56	1.37	1.74	1.16	6.05	1.42	1.42	0.0336
6	14.3	10.7	18.9	26.1	1.68	1.89	1.25	1.77	1.38	10.4	1.03	0.83	0.0195

R_e の分布幅が広い。波高が大きく碎波した波が堤防にうちあがる場合 ($H_{1/3}=10\text{ cm}$) には R_e の分布幅はせまくなっている。重複波となる場合には堤防前面での波高分布の幅が実際にはせまくなっているにもかかわらず、規則波の入射波高とうちあげ高の関係をを用いて推定を行なうと分布の幅は広がるためである。一方碎波となる場合には規則波の入射波高とうちあげ高の関係は、入射波高が増加しても碎波のためうちあげ高はほぼ一定値をとる領域があって推定値の分布幅がせまくなっている。以上の結果から深海波の波高分布に規則波の波高とうちあげ高の関係を適用して不規則な波によるうちあげ高の分布を推定する方法は問題があると考えられる。むしろ浅海での波の変形と堤防前面の波高、うちあげ高の2つに分けて考えるのが適当である。

堤防前面における入射波高とうちあげ高の関係については堤防前面の波の状態によって2つに分けることができる。碎波状態の波が作用する場合には、波形を bore でモデル化してその反射波高がうちあげ高に等しいとする取扱い⁵⁾が行なわれている。また重複波となる場合には、堤防前面の波高は入射波のほぼ2倍となり、波高中分面の高さが推定できればうちあげ高が求まる。この両者について波高とうちあげ高の関係を示したのが図-7である。重複波の場合は簡単のために合田⁶⁾によ

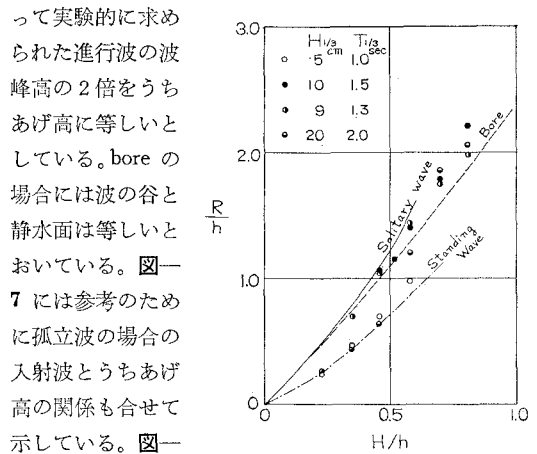


図-7 入射波高とうちあげ高の関係

って実験的に求められた進行波の波峰高の2倍をうちあげ高に等しいとしている。bore の場合には波の谷と静水面は等しいとされている。図-7には参考のために孤立波の場合の入射波とうちあげ高の関係も合せて示している。図-6に示した入射波

高とうちあげ高の分布から同じ確率を持つ H と R の関係を求めると図-7のようになる。波高の小さい場合には重複波に、また大きい場合には bore の値にほぼ等しくなっているが、周期やスペクトル形状によって両者の中間の値をとっている場合もある。うちあげが重複波型から碎波型にどのような条件で移行するかは明らかではない。周期の影響も考慮しなければならないであろう。

堤防前面の入射波とうちあげの関係についてはうちあげ高ばかりでなく波形についても同じような関係が存在する。入射波形とうちあげ波形の応答を調べた結果が図

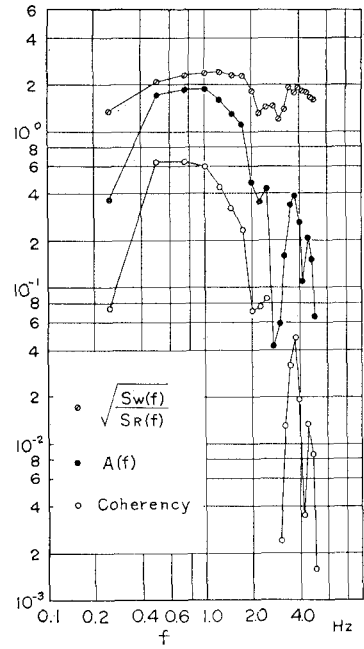


図-8 波とうちあげの応答 ($H_{1/3}=5\text{ cm}$, $T=1.0\text{ sec}$)

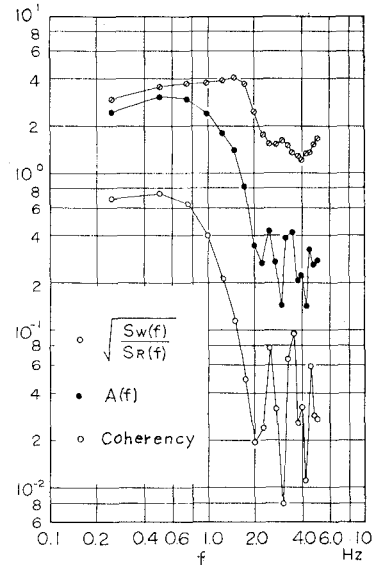
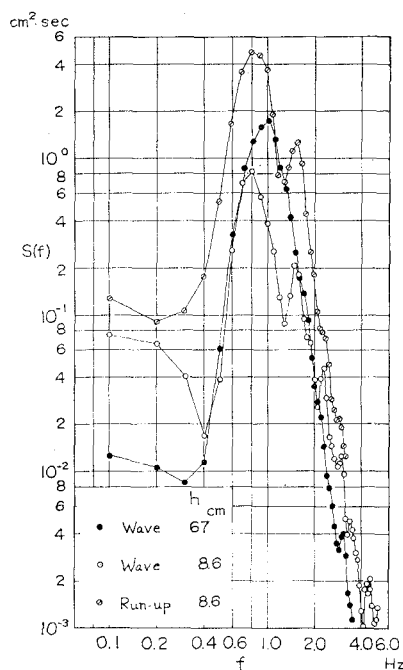
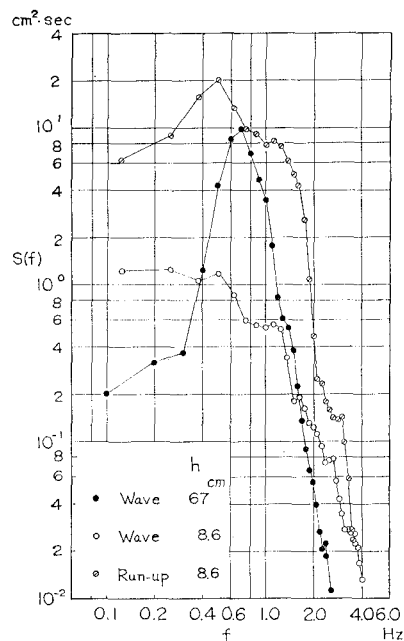


図-9 波とうちあげの応答 ($H_{1/3}=10\text{ cm}$, $T=1.5\text{ sec}$)

—8と図-9に示されている。ここで入射波形としては堤防のない場合の堤防の位置での波形を用いている。図-8は波高が小さく重複波となる場合であり、図-9は波高の大きい碎波となる場合である。波およびうちあげのスペクトルは図-10と図-11に示されている。スペクトルのピーク付近ではコヒーレンシーはかなり大きく、かなり線形性があると推定される。応答については



図—10 波とうちあげのスペクトル
($H_{1/3}=5$ cm, $T=1.0$ sec)



図—11 波とうちあげのスペクトル
($H_{1/3}=10$ cm, $T=1.5$ sec)

波高の小さい場合は2程度であり、大きい場合には3～4となっている。このことから堤防前面における波の状態が碎波または重複波のどちらかに限定されていればその範囲では線形な応答になっていると考えられる。

5. まとめ

海岸堤防のうちあげ高について、不規則波を対象に検討を行ってきたが次のような結論が得られた。

(1) 不規則な波が浅海に進むにしたがって波形はひずみ、波高分布の幅がせまくなる。

(2) 堤防へのうちあげ高は堤防前面の波高と関係があり、図—7 のようになる。

(3) 不規則な波の深海における波高分布に規則波の波高とうちあげ高の関係を適用して不規則な波のうちあげ高を推定する方法は、平均値についてはほぼよいが分布形は一致していない。

設計に際しては最大うちあげ高や 1/10 最大うちあげ高が問題となるが実験資料が少なかったために十分な検

討はできなかった。

参 考 文 献

- 1) Sibul, O.J. and E.G. Tickner: A Model Study on the Run-up of Wind Generated Waves on Levees with Slopes of 1:3 and 1:6, B.E.B. Tech. Memo. No. 67, 1955.
- 2) 光易 恒: 風波のスペクトルの発達 (2) —有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について— 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 1~7, 1970.
- 3) Phillips, O.M.: The Equilibrium Range in the Spectrum of Wind-Generated Waves, J. Fluid Mech. Vol. 4, 1958.
- 4) 井島武士・松尾隆彦: 碎波帯の波の研究 (2) —一周波数スペクトルの平衡領域および2次元スペクトルの観測例—, 第16回海岸工学講演会講演集, 1969.
- 5) 佐藤清一・岸 力: 海岸堤防に関する研究 (1) —海岸堤防に衝突する高さについて—, 土木研究所報告, 第88号, 1954.
- 6) Goda, Y.: Wave Forces on a Vertical Circular Cylinder, Experiments and Proposed Method or Wave Force Computation, Rept. on Port and Harbour Tech. Inst., No. 8, 1964.