

浅海における波浪スペクトルの変形と 海底摩擦係数の推定について

岩 垣 雄 一・柿 沼 忠 男

ON THE TRANSFORMATION OF OCEAN WAVE SPECTRA IN SHALLOW WATER AND THE ESTIMATION OF THE BOTTOM FRICTION FACTOR

By Yuichi IWAGAKI and Tadao KAKINUMA

Synopsis

One of the most important problems in coastal engineering is the transformation of waves as they approach the shore through shallow water.

In this paper, from the damping of the significant wave heights and the transformation of the wave spectra observed at Izumisano Coast and Hiezu Coast, the loss of wave energy due to bottom friction is investigated quantitatively and the bottom friction factors of these coasts are estimated. In estimating the bottom friction factor by the wave spectrum method, it is assumed conveniently that each component wave propagates independently.

The values of bottom friction factors at Izumisano Coast estimated are 0.14 and 0.55 by the significant wave method, and 0.013~0.054 and 0.25~0.55 by the wave spectrum method. At Hiezu Coast, the values estimated are 0.027~0.16 and 0.040~0.44 respectively. It should be noted that these values are much greater than 0.01 which was given by Bretschneider to be generally used in forecasting shallow water ocean waves.

It is found that the longer the significant wave period or the higher the value of the accompanying-wave Reynolds number is, the smaller the value of bottom friction factor estimated by the significant wave method is, and that these values are about ten~seventy times the theoretical values obtained in the laminar wave boundary layer theory. In addition, the values estimated by the wave spectrum method seems to have the same tendency as by the significant wave method except Data No. I-1, and are about ten ~ one hundred and twenty times the theoretical.

1. 緒 言

海岸に來襲する波浪を適確に予知することは、海岸構造物を設計するための設計波浪を決定したり、あるいは海岸での漂砂量を推定するという意味において、海岸工学上きわめて重要な問題の一つである。

実際の海岸には、種々の波高や周期をもった一連の波、いわゆる不規則波が來襲してくるわけであるが、従来はこうした不規則波を一つの代表値であらわすことによって、その特性を知ろうとした。たとえば、Sverdrup-Munk は、目視観測の値とよく一致するような有義波という一つの平均波を提唱し、これを用いて、深海における波浪予知法を提案している¹⁾。しかし、たとえば、海岸堤防の越波量に関する実験によると、そうした不規則波の大きさを示す代表値が一定であっても、波の不規則性の程度によって越波量が異な

り^{2),3)}, こうした場合には, その不規則波の特性を一つの代表値のみによってあらわすことは不適当であって, どうしても波浪エネルギーの周期あるいは周波数に対応する分布, すなわち波浪エネルギースペクトルを知ることが必要になってくる。

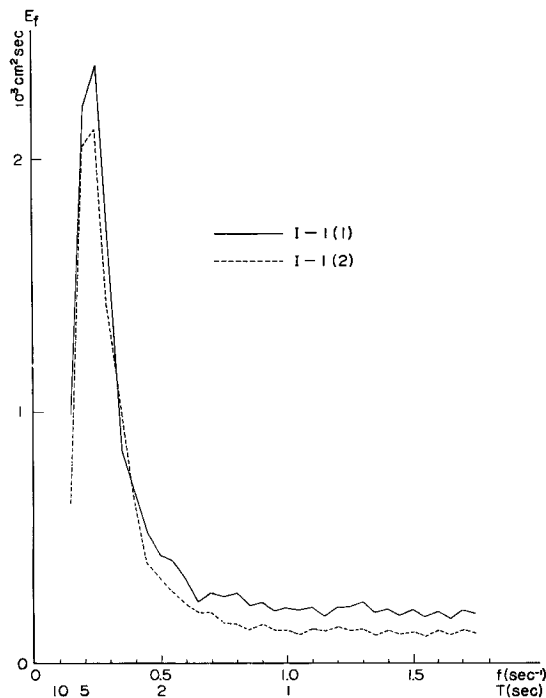
深海においては, こうした不規則波のエネルギースペクトルに関して, 詳細な研究が行なわれるようになり, いわゆる理論的な波浪スペクトル⁴⁾の一つである Neumann スペクトルにもとづいて, PNJ 法⁵⁾という波浪予知法が確立されているが, 浅海においては, 波浪の資料がきわめて少なく, Bretschneider が海底摩擦係数として 0.01 という値を用いて, 深海における有義波の特性から浅海における有義波を推定する一つの便宜的な方法⁶⁾を提案しているに止まっている。まして, 浅海における波浪スペクトルの変形についての資料は皆無といってよい状態で, その実態がわからなければ海洋波浪を適確に予知することはできない。

この論文は, 1963 年 2 月および 10 月に, 京都大学防災研究所が大阪府泉佐野海岸⁷⁾および鳥取県日吉津海岸⁸⁾において実施してえた波浪観測の資料のうち, 沖側と陸側の相対対応する 2 点間の波浪スペクトルの変形から, これらの海岸の海底摩擦係数を算出するとともに, 有義波法によって求めた海底摩擦係数とも比較し, 海底摩擦による波高減衰を量的に明らかにしようとしたものである。

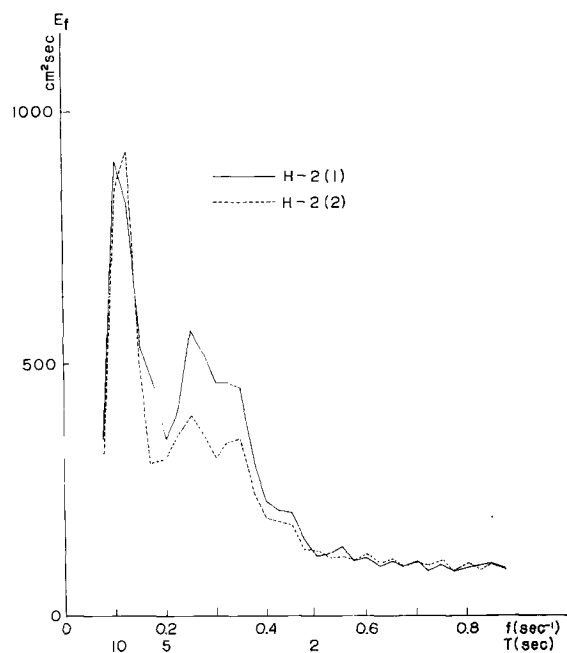
2. 浅海における波浪スペクトルの変形

水深が波長の 1/2 程度以下の領域においては, 波は風の影響のほか, 海底の影響を受けて, 浅水, 屈折, 回折, 反射, 海底摩擦, 浸透効果, 砕波などによってその特性を変える。

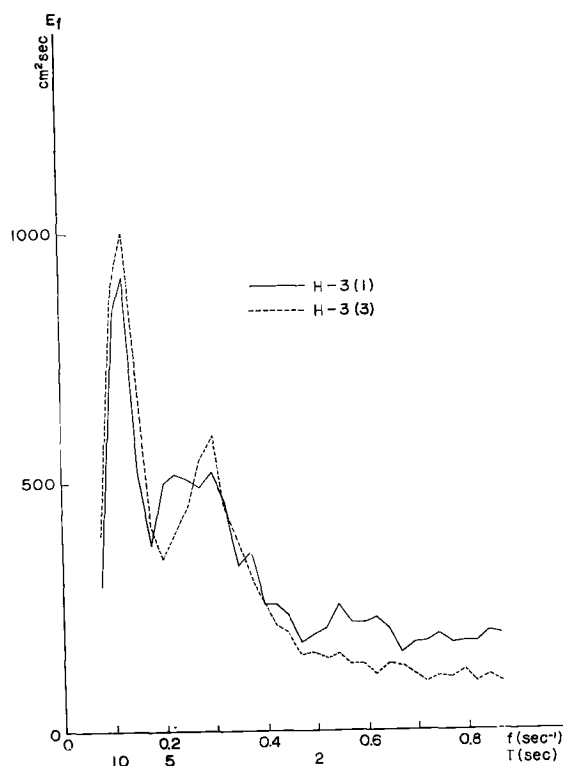
Fig. 1(a), (b), (c), (d) および (e) は, 沖側と岸側の対応する 2 点での浅海における波浪スペクトルの変形の実例^{7),8)}を示したもので, 横軸に周波数 $f(\text{sec}^{-1})$ あるいは周期 $T(\text{sec})$, 縦軸にエネルギー密度 $E_f(\text{cm}^2\text{sec})$ をとってあらわしており, 図中, (1) は沖側の資料をあらわし, (2) と (3) は岸側の資料を



(a) Izumisano Coast



(b) Hiezu Coast



(c) Hiezu Coast

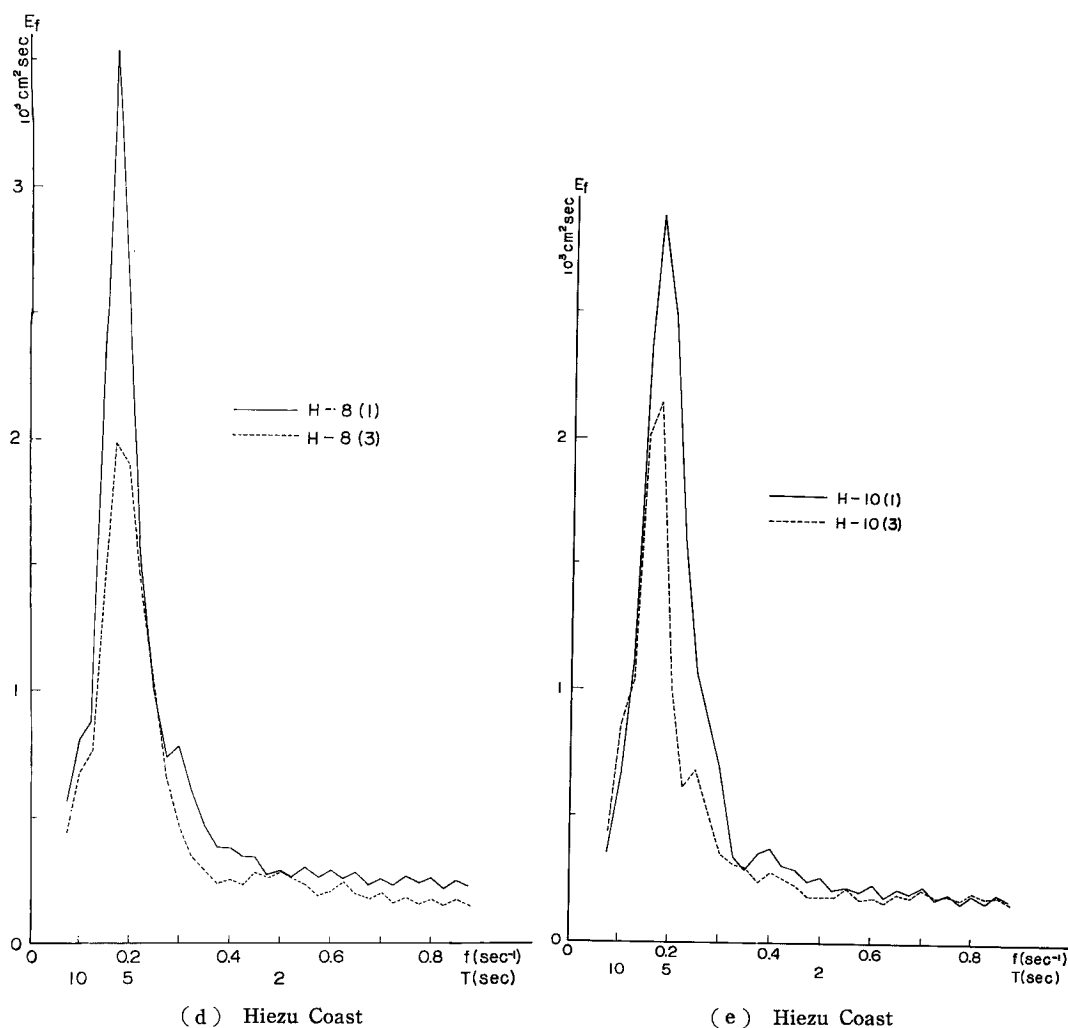


Fig. 1(a)~(e) Transformation of ocean wave spectra in shallow water.

あらわす。

Fig. 1 をみると、とくに、(b) および (c) においては、大、小の顕著なピークが二つあり、スペクトルのピーク周波数のほぼ2倍の周波数付近に、小さなピークが存在していることがわかる。風の資料から、こうした現象をみると、うねりと風波が共存しているようにも思われるが、また、こうした現象は、浜田・柴山・加藤⁹⁾が風波の実験において見出し、Tick¹⁰⁾ が示唆しているような非線型成分を示しているのかもしれない。すなわち、非線型性のため、重ね合わせの原理はやぶれ、波動運動の個々の成分波はたがいに作用を及ぼしあうようになり、その結果、成分波の挙動を別々に考察することができなくなるわけである。

さて、一般に、長周期の波は、短周期の波より、はやく海底の影響を受け、その結果、長い距離にわたり、海底摩擦などによってその波高を減衰する。不規則波が海岸に向かって伝達する場合にも、こうした撰択的な波高減衰が、場合によっては波浪スペクトルのピーク周期の短周期への移行をもたらすかもしれない。

Bretschneider は、メキシコ湾の浅海領域において、岸側の有義波周期は、沖側にくらべて小さい値を示す

という観測結果をえている¹¹⁾。しかし、スペクトルの各成分波は異なった浅水係数および屈折係数をもつとして解析した Pierson-Tuttel-Woolley¹²⁾によれば、エネルギー損失がなくても、そうした有義波周期の移行をもたらすような波浪スペクトルの変形は生じうるので、そうした有義波周期の移行が海底摩擦によって生じたとは断定できない。Bretschneider は、波浪スペクトルの各成分波は独立に伝達すると仮定し、いわゆる理論的な波浪スペクトル⁴⁾の一つである Bretschneider 深海波スペクトルを用い、自乗平均波高が 30 ft, 平均周期が 12 sec の場合について、1) 浅水効果のみ、2) 海底摩擦のみ、および 3) 浅水効果と海底摩擦の両者による波浪スペクトルの変形を求めている¹³⁾。その結果によると、浅水効果のみによる 1) の場合には、波浪スペクトルのピーク周期は、浅くなるにしたがって長周期へ移行し、2) の海底摩擦のみによる場合には、逆に短周期へ移行するが、3) の浅水効果と海底摩擦による場合には、短周期への移行は海底摩擦のみの場合ほど大きくなく、きわめて浅くなると、浅水効果が重要となり、比較的長周期に、第 2 のピークがあらわれる。

Fig. 2 (a), (b) および (c) は、それぞれ、前述の 1), 2) および 3) の場合の Bretschneider の結果を示したものである。また、Fig. 2(d) は、等深線がたがいに平行な直線である海岸に、入射角 40° で進入してくる波について、同様な方法で、屈折による波浪スペクトルの変形を求めたものであり、Fig. 2(e) は、底質が粗砂 (平均粒径: $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$) で、海底勾配 m が 1.32×10^{-3} の場合を想定し、 $p/\nu m = 0.27 \text{ sec}$ (p : 長さの 2 乗の次元をもつ透水係数, ν : 動粘性係数) として、浸透効果による波浪スペクトルの変形を求めたものである。

この研究においては、Fig. 1 に示すような浅海における 1 次元波浪スペクトルの変形から、便宜上、Bretschneider¹³⁾ にしたがひ、波浪スペクトルの各成分波は独立に伝達すると仮定して、各成分波ごとに海底摩擦係数を求めて、エネルギースペクトルをもった不規則波の海底摩擦によるエネルギー損失の機構を解明しようとするわけである。

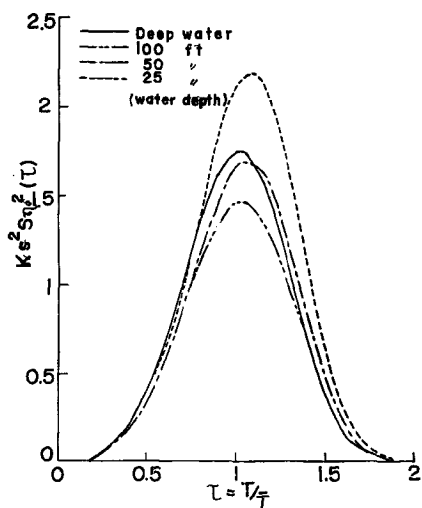


Fig. 2(a) Transformation of wave spectra due to shoaling effect (after Bretschneider¹³⁾).

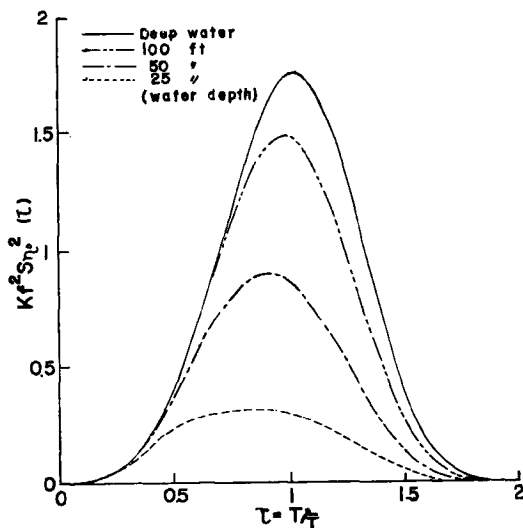


Fig. 2(b) Transformation of wave spectra due to bottom friction ($f/m=7.6$) (after Bretschneider¹²⁾).

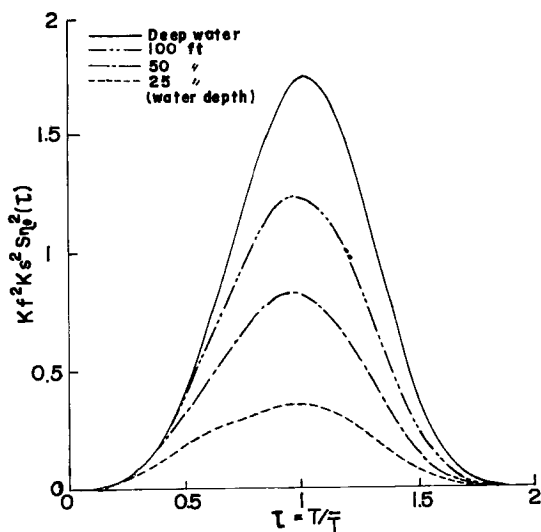


Fig. 2(c) Transformation of wave spectra due to shoaling effect and bottom friction ($f/m=7.6$) (after Bretschneider¹²⁾).

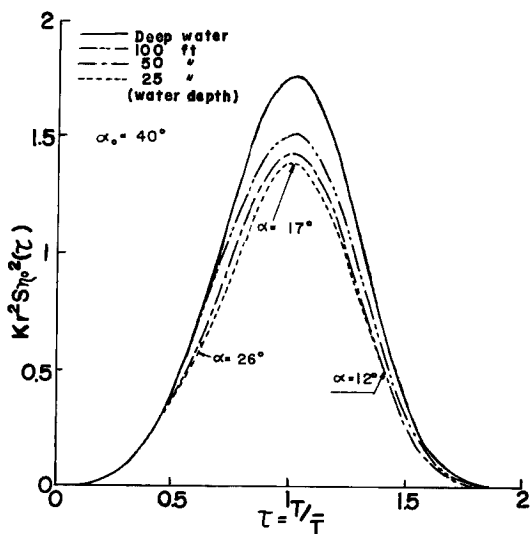


Fig. 2(d) Transformation of wave spectra due to refraction.

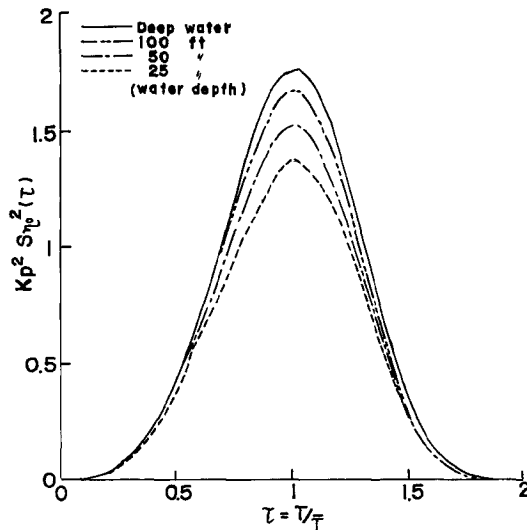


Fig. 2(e) Transformation of wave spectra due to percolation
($p/\nu m = 0.27$ sec).

3. 海底摩擦係数の算出

(1) 算出の方法

海底摩擦係数 f は, 海底の摩擦応力を τ , 海底流速を u_b として, $\tau = f\rho u_b^2$ (ここに, ρ : 海水の密度) で定義される¹⁴⁾。Bretschneider-Reid¹⁵⁾ は, 海底摩擦, 浸透, 屈折および浅水による波高の変化を決定するために, 微小振幅波の理論を用いて, 定常状態の波のエネルギー方程式から, 数多くの算定式を提案した。その後, Reid—梶浦は, Putnam が見出した浸透効果によるエネルギー消費量¹⁶⁾を4で割ったものが正しいことを指摘した¹⁷⁾。次式は, Bretschneider-Reid の一様な海底勾配 m に対する海底摩擦係数 f の算定式である。

$$f = \frac{\frac{H_1(K_p K_r K_s)_2 - 1}{H_2(K_p K_r K_s)_1}}{\frac{H_1}{(K_s)_1 m T^2} \int_{(h/T^2)_1}^{(h/T^2)_2} \phi_f K_p K_r d(h/T^2)}, \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに, 添字1は沖側の地点での値, 添字2は岸側の地点での値, K_p は浸透効果による波高減衰係数で, Reid—梶浦による修正の結果は,

$$K_p = (\tanh 2\pi h/L)^{2\pi p/\nu m T} \quad \dots\dots\dots (2)$$

K_r は屈折係数で,

$$K_r = (b_0/b)^{1/2}, \quad \dots\dots\dots (3)$$

K_s は浅水係数で,

$$K_s = (c_0/2nc)^{1/2}, \quad \dots\dots\dots (4)$$

ϕ_f は

$$\phi_f = \frac{64\pi^3}{3g^2} \left(\frac{K_s}{\sinh 2\pi h/L} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。また、 b は相隣れる波向線の間隔、 n は群速度と波速との比、 c は波速、 ν は動粘性係数、 p と速度の次元をもつ透水係数 k との関係は $k = gp/\nu$ であり、添字 0 は沖波の値を示す。

なお、以上の式で、有義波法においては、周期 T を沖側の地点の有義波周期と岸側の地点のそれとの平均値として f の値を算出し、一方、波浪スペクトル法においては、 $E_f = H_f^2/4$ という関係式を用いて、各周期に対する平均波高 H_f を求め、周期ごとに f の値を算定する。この方法は、Bretschneider が理論的に浅海における波浪スペクトルの変形を推算したときのもと同じである¹³⁾。

また、この解析に用いる波浪資料は、沖側および岸側のブイの上下運動を望遠レンズ付き 16 mm 撮影機によって同時撮影し、そのフィルムを映写機によって映写し、ブイの上下運動を読みとることによってえたもの^{7,9)}であるから、観測時および読みとり時に誤差が入っているわけで、こうした誤差によって、 f の相対誤差がいくらになるかを知ることが必要になってくる。沖側波高および岸側波高の観測および読みとり誤差を、それぞれ、 dH_1 および dH_2 とすれば、 f の相対誤差 $|df/f|$ は次式で与えられる。

$$\left| \frac{df}{f} \right| = \frac{1}{\frac{(K_p K_r K_s)_2}{(K_p K_r K_s)_1} H_1 - H_2} \left| H_2 \frac{dH_1}{H_1} - \frac{(K_p K_r K_s)_2 H_1}{(K_p K_r K_s)_1} \frac{dH_2}{H_2} \right| \dots \dots \dots (6)$$

(2) 泉佐野海岸における海底摩擦係数の値

泉佐野海岸は北緯30°24'、東経138°18'に位置し、等深線はほぼ海岸線と平行に走っている。この海岸の海底勾配は、観測地点1と2の間が 4.3×10^{-3} であり、1と3の間が 4.0×10^{-3} である⁷⁾から、えられた資料 I-1 (1), (2) および I-2 (1), (3) から、前述した算定式にもとづいて、有義波法と波浪スペクトル法によって、この海岸の海底摩擦係数 f の値を求める。

(a) K_s に対する考察 浅水係数 K_s は式(4)によってあらわされる。この解析で用いた観測地点1, 2, 3における浅水係数 $(K_s)_1, (K_s)_2, (K_s)_3$ の値は0.90~1.00で、 $T=3 \sim 5$ sec で最小となる。また、 $(K_s)_3/(K_s)_1$ と $(K_s)_2/(K_s)_1$ の値は0.95~1.02で、 $T=3$ sec 付近で最小となる。

b) K_p に対する考察 浸透効果による波高減衰係数 K_p は式(2)によってあらわされる。

Hazen は、均等係数 d_{60}/d_{10} がおよそ2以下の場合に、透水係数 k (cm/sec) を求めるつぎのような実験式を与えている¹⁸⁾。

$$k = C_1 d_{10}^2, \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 d_{10} は有効径を cm であらわしたものであり、 C_1 ($\text{cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$) はおよそ100から150まで変化する。

Table 1 は、採取した底質の有効径、均等係数および透水係数を示したものである。この表をみると、海底表面での資料の均等係数の値は3.6~18.5で、2より大きな値を示しているが、この解析では、便宜的に $C_1=100$ ($\text{cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$) とした Hazen の実験式を用いて、各採取点での透水係数を求めた。実際には厚さが0.3 L 程度の砂層内の資料の粒度分布から透水係数を求めねばならないわけであるが、資料の採取が困難なので便宜的に海底表面での透水係数を用いて、式(2)によって K_p を求めた。なお、底質資料番号12および13は、有効径 d_{10} を求めることができなかったため、便宜上、Casagrand-Fadum によるきれいな砂利に対する透水係数の最小値 $10 \text{ cm/sec}^{19)}$ を用いて解析した。Fig. 3 は、 $(K_p)_2/(K_p)_1$ および $(K_p)_3/(K_p)_1$ を周期に対してプロットしたものである。ここに、

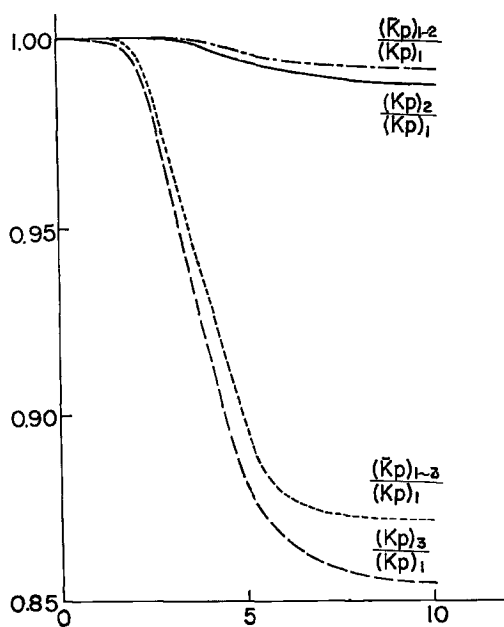
$$\frac{(K_p)_{1 \sim 2, 1 \sim 3}}{(K_p)_1} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{(K_p)_i}{(K_p)_1} + \frac{(K_p)_{i+1}}{(K_p)_1} \right] \dots \dots \dots (8)$$

で、①、②および③は観測地点1, 2および3、 i は底質採取点、 $i+1$ は i より一つ岸側の採取点をあらわし、 N は①~②あるいは①~③の分割数を示す。Fig. 3 からわかるように、 K_p の $(K_p)_1$ に対する比は $T=10$ sec 付近で最小となり、 $(K_p)_{1 \sim 2}/(K_p)_1$ および $(K_p)_{1 \sim 3}/(K_p)_1$ の値は0.99および0.87程度である。

c) K_r に対する考察 屈折係数 K_r は波の周期および波の方向によって変化するが、波の方向は目視観

Table 1 Permeability coefficients of bottom sediment at Izumisano Coast.

Bottom sediment data number	Effective grain size d_{10} (mm)	Uniformity coefficient d_{60}/d_{10}	Permeability coefficient k (cm/sec)
1	0.154	10.5	0.023
2	0.176	18.5	0.032
3	0.176	16.3	0.032
4	0.620	6.3	0.384
5	0.308	12.9	0.096
6	0.202	7.8	0.040
7	0.233	10.4	0.053
8	0.330	8.2	0.109
9	0.354	2.9	0.123
10	0.702	3.8	0.490
11	—	—	10
12	—	—	10
13	0.162	12.5	0.026
14	1.001	3.6	1.000

Fig. 3 K_p ratios at Izumisano Coast).

測と、観測地点からはほぼ 8km の距離にある岸和田港における風向記録から推定した。I-1 の波向はほぼ WNW と思われるが、I-2 については WNW および NW のどちらか判定不可能である。この解析に用いた $(K_r)_2/(K_r)_1$ および $(K_r)_2/(K_r)_1$ の値は 0.96~1.0 である。

d) 内部摩擦の効果に対する考察 粘性のための内部摩擦による深海波の波高の減衰は、

$$H/H_0 = \exp[-(8\pi^2\nu/L_0^2) \cdot \sqrt{2\pi/(gL_0)} \cdot x] \dots\dots\dots (9)$$

によってあらわされる²⁰⁾。ここに、 x は波向線にそった距離で、 H_0 および L_0 は深海波の波高および波長、 H は x だけ離れた点での波高である。式 (9) にもとづいて、I-1 および I-2 に対する内部摩擦による波高減衰を調べたのであるが、周期が 2 sec 以上の波は内部摩擦による波高の減衰は無視しうほど小さいことがわかった。

e) 風の効果に対する考察 観測地点 1 における波が、風による影響を受けて発達するかどうかは、有義波法においては、観測地点 1 での有義波高、有義波周期および波向と、観測時における風速および風向がわかれば、著者らの方法²¹⁾によって判定することはできるが、波浪スペクトル法においては、同一周期に対応する波のエネルギーの風による変化を考慮することになり、こうした波浪スペクトルの風による変形の問題があまり明確でない現状においては、風の効果を見出すことはきわめて困難である。

観測時における岸和田港での風速および風向は、I-1 では 13.5 m/sec, WNW, I-2 では 7.4 m/sec, NW であって、Wilson の経験式にもとづいた著者らの方法²²⁾によれば、I-1 のとき観測地点 1 での有義波高は風によって 1.8% 程度増大して観測地点 2 に到達することになる。この程度の増分は測定誤差の範囲に入り、風による波の発達は無視することができる。一方、I-2 のとき観測地点 1 での有義波高は風によって 8% 増大して観測地点 3 に到達することになるが、800 m 程度の距離を風速 7.2 m/sec 程度の風が吹いて波高がこのような増大するかどうかは問題である。なお、8% の増分を考慮して有義波法によって求めた f の値は考慮しない場合の f の値より 64% 大きい。

この解析においては、風の効果を無視することにして、今後の解析に待つことにした。

f) 摩擦係数の算出 以上のことから、式 (1) を簡単化した。

$$f = \left[\frac{H_1(K_p K_r K_s)_2}{H_2(K_p K_r K_s)_1} - 1 \right] / \left[\frac{H_1}{(K_s)_1 m T^2} \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{(K_r)_2}{(K_r)_1} \right\} \times \right. \\ \left. \frac{1}{2N} \sum_{i=2}^N \left\{ \frac{(K_p)_i}{(K_p)_1} + \frac{(K_p)_{i+1}}{(K_p)_1} \right\} \left\{ \frac{(h/T^2)_2}{(h/T^2)_1} \phi_f d(h/T^2) \right\} \right] \dots\dots\dots (10)$$

によって、泉佐野海岸での海底摩擦係数の値を求め、Table 2 に示すような値をえた。I-1 は波向 WNW に対する値を示し、I-2 は波向 WNW と NW に対する値の平均値を示している。なお、Table 2 中に示した f の相対誤差 $|df/f|$ は、映写時の波高の読みとり誤差を 1 mm とし、映写時のブイの旗の大きさ⁷⁾を考慮して、式 (6) によって求めたものである。Table 2 をみると、I-2 の f の値はかなり大きな値を示しているが、この資料の波高は有義波高にして 30 cm 程度で、I-1 の有義波高が 86 cm であるのにくらべると波高がかなり小さい。

結局、I-1 および I-2 の有義波法による f の値はそれぞれ 0.14 および 0.55 であり、波浪スペクトル法から求められた f の値は 0.013~0.054 および 0.25~0.55 である。

(3) 日吉津海岸における海底摩擦係数の値

日吉津海岸は北緯 30°45'、東経 133°22' に位置し、等深線はほぼ海岸線と平行に走っている。この海岸における平均海底勾配は、観測地点 1 と 3 の間で、 1.10×10^{-2} となっている。⁸⁾ 得られた資料 H-1~10⁸⁾ を用い、泉佐野海岸の場合と同様にして解析するわけであるが、この解析においては、観測地点 1 での資料 (1) に観測地点 3 での資料 (3) を対応させて、有義波法および波浪スペクトル法によって、日吉津海岸の海底摩擦係数 f の値を求めた。

Table 2 Values of bottom friction factors at Izumisano Coast.

Data number	Method	T (sec)	H_1 (m)	H_2 (m)	H_1/H_2	$(K_p)_2/(K_p)_1$	$(\bar{K}_p)_{1-2}/(K_p)_1$	$(K_r)_2/(K_r)_{1WNW}$	$(K_s)_2/(K_s)_1$	$(K_s)_f$	f	$ df/f $ (%)	R_{er}
I-1 (1)	Wave spectrum method	5	0.94	0.91	1.04	0.991	0.994	0.996	1.003	0.915	0.013	22.7	1.1×10^6
" (2)		4	0.97	0.91	1.07	0.996	0.997	0.997	0.987	0.930	0.054	11.7	5.8×10^6
$(h_1=5.7 \text{ m})$ $(h_2=4.3 \text{ m})$		3.3	0.78	0.75	1.04	0.999	0.999	0.998	0.973	0.965	0.019	75.7	1.6×10^6
	Significant wave method	3.8	0.86	0.77	1.13	0.997	0.997	0.997	0.999	0.940	0.14	4.0	3.3×10^6

Note: The value of T in the significant wave method is the mean value of the wave period offshore and onshore.

Data number	Method	T (sec)	H_1 (m)	H_3 (m)	H_1/H_3	$(K_p)_3/(K_p)_1$	$(\bar{K}_p)_{1-3}/(K_p)_1$	$(K_r)_2/(K_r)_{1WNW}$	$(K_r)_3/(K_r)_{1NW}$	$(K_s)_3/(K_s)_1$	$(K_s)_1 f_{WNW}$	f	$ df/f $ (%)	R_{er}
I-2 (1)	Wave spectrum method	5	0.17	0.14	1.28	0.881	0.938	0.988	0.979	1.018	0.920	0.24	0.245	3.2×10^4
" (3)		4	0.19	0.15	1.29	0.925	0.958	0.992	0.989	0.983	0.930	0.48	0.470	3.2×10^4
$(h_1=6.1 \text{ m})$ $(h_3=3.7 \text{ m})$		3.3	0.29	0.23	1.29	0.955	0.979	0.995	0.995	0.945	0.970	0.55	0.550	2.3×10^4
	Significant wave method	2.6	0.34	0.26	1.32	0.970	0.992	1.000	1.000	0.980	0.987	0.55	0.550	$1.1 \times 4.6 \times 10^3$

Note: $f = (f_{WNW} + f_{WN})/2$, and the value of T in the significant wave method is the mean value of the wave periods offshore and onshore.

Table 3 Permeability coefficients of bottom sediment at Hiezu Coast.

Bottom sediment data number	Permeability coefficient		Effective grain size d_{10} (mm)	k_2/k_1	Uniformity coefficient d_{60}/d_{10}
	Permeability test, k_1 (cm/sec)	Hazen's formula, k_2 (cm/sec)			
1	0.0063	0.0066	0.081	1.05	1.7
2	0.0053	0.0059	0.077	1.12	1.9
3	0.0064	0.0056	0.075	0.87	2.0
4	0.0058	0.0009	0.031	0.15	4.3
5	0.0038	0.0034	0.058	0.90	2.5
6	0.0047	0.0005	0.022	0.11	6.6
7	0.016	0.0136	0.177	0.85	2.3
8	0.026	0.019	0.138	0.73	1.9
9	0.029	0.024	0.156	0.83	2.3

a) K_s に対する考察 この解析で用いた $(K_s)_1, (K_s)_3$ の値は 0.91~0.96 で、それぞれ、 $T \approx 7$ sec および 4 sec で最小となる。また、 $(K_s)_3/(K_s)_1$ の値は 0.92~1.27 で、 $T \approx 3$ sec で最小となる。

b) K_p に対する考察 直径 4 cm, 長さ 24 cm の定水位透水試験器を製作し、これによって透水係数 k_1 (cm/sec) を求めた (Table 3)。使用した底質資料の容量は 80~170 cm³ である。Table 3 をみると、こうして求めた透水係数 k_1 は、均等係数 d_{60}/d_{10} がおよそ 2 以下の値を示すときには、従来いわれているように、Hazen の実験式による透水係数 k_2 とよく合っているが、2 程度よりも大きな値を示すときには、きわめて小さい値を示すことがわかる。

この解析においては、定水位透水試験による透水係数 k_1 を用い、式 (2) によって、各周期に対して K_p を求めたが、いずれも $K_p \approx 1.000$ であって、浸透効果は無視してよいと思われる。

c) K_r に対する考察 波向は日吉津小学校における風向記録と目視観測から推定した。日吉津小学校は日吉津海岸の汀線から 800 m 離れたところにあり、その間は畑地でなんらの障害物もなく、陸上 17 m の高さにセルシン型の風向計が設置されている⁸⁾。すべての資料に対して、沖波としては、波向は NNE と思われるが、NE の波向に対しても屈折係数を求めた。観測地点 1 での波向 NNE についての $(K_r)_3/(K_r)_1$ の値は 0.99~1.00 であり、NE については 0.99~1.01 である。

d) 内部摩擦の効果および風の効果に対する考察 泉佐野海岸と同様、観測時においては、周期 2 sec 以上の波に対して、粘性のための内部摩擦による波高の減衰は無視してよいことがわかった。

また、風の効果についてであるが、観測時の風速および風向は、H-1 では 10.1 m/sec, NNE, H-2 は 9.4 m/sec, NNE, H-3 は 11.2 m/sec, NNE, H-4 は 10.5 m/sec, NNE, H-5 は 10.1 m/sec, NNE, H-6 は 11.2 m/sec, NNE, H-7 は 7.8 m/sec, NE, H-8 は 7.8 m/sec, NNE, H-9 は 9.0 m/sec, NNE, H-10 は 8.0 m/sec NE であり、著者らの方法²²⁾によれば、すべての資料の観測地点 1 から 3 までの有義波高の風による増分はすべて 1% 以下である。この程度の増分は測定誤差の範囲に入り、有義波法においては、風の効果は無視してよいと思われる。一方、波浪スペクトル法においては、3. (2) e) にのべたような理由で、風の効果は無視することにする。

e) 摩擦係数の算出 以上のことから、式 (1) を単純化した

$$f = \frac{\frac{H_1(K_r K_s)_2}{H_2(K_r K_s)_1} - 1}{\frac{H_1}{(K_s)_1 m T^2} \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(K_r)_2}{(K_r)_1} \right] \left[\frac{(h/T^2)_2}{(h/T^2)_1} \phi_f d(h/T^2) \right]} \quad \dots\dots\dots (11)$$

によって、日吉津海岸での海底摩擦係数の値を求め、Table 4 に示すような値をえた。すべての値は、波

Table 4 Values of bottom friction factors at Hiezu Coast.

Data number	Method	T (sec)	H_1 (m)	H_3 (m)	H_1/H_3	$(K_r)_3/(K_r)_1$	$(K_s)_3/(K_s)_1$	$(K_s)_1$	f	$ df/f $ (%)	$R_{\epsilon T}$
H-1 (1)	Wave	10	0.57	0.49	1.16	0.991	1.266	0.961	0.13	30.9	9.9×10^5
		8	0.53	0.44	1.12	0.993	1.216	0.921	0.16	33.9	5.8×10^5
	spectrum	6.7	0.46	0.39	1.18	0.996	1.120	0.913	0.15	48.2	3.4×10^5
		5.7	0.38	0.33	1.15	0.997	1.050	0.927	0.20	70.4	1.7×10^5
	method	5	0.39	0.32	1.23	0.998	0.995	0.950	0.28	81.7	1.2×10^5
		5.3	0.67	0.53	1.28	0.998	1.023	0.938	0.13	38.5	4.1×10^5
H-2 (1)	Wave	10	0.60	0.57	1.05	0.991	1.266	0.961	0.12	35.8	1.3×10^6
		8	0.57	0.61	0.94	0.993	1.216	0.921	0.060	62.6	1.1×10^6
	spectrum	6.7	0.49	0.46	1.00	0.996	1.120	0.913	0.076	59.8	4.5×10^5
		5.7	0.42	0.35	1.22	0.997	1.050	0.927	0.25	64.2	2.0×10^5
	method	5.7	0.42	0.35	1.22	0.997	1.050	0.927	0.25	64.2	2.0×10^5
		6.4	0.72	0.69	1.05	0.996	1.100	0.915	0.059	64.2	9.1×10^5
H-3 (1)	Wave	10	0.57	0.60	0.96	0.991	1.266	0.961	0.055	50.5	1.4×10^6
		8	0.60	0.63	0.95	0.993	1.216	0.921	0.052	56.8	1.1×10^6
	spectrum	5	0.45	0.37	1.21	0.998	0.995	0.950	0.25	81.9	1.7×10^5
		5.7	0.82	0.72	1.14	0.997	1.050	0.927	0.083	45.6	8.7×10^5
	method	5.7	0.82	0.72	1.14	0.997	1.050	0.927	0.083	45.6	8.7×10^5
		5.7	0.82	0.72	1.14	0.997	1.050	0.927	0.083	45.6	8.7×10^5
H-4 (1)	Wave	10	0.66	0.56	1.81	0.991	1.266	0.961	0.17	28.4	1.3×10^6
		8	0.76	0.61	1.25	0.993	1.216	0.921	0.17	25.4	1.2×10^6
	spectrum	6.7	0.67	0.48	1.38	0.996	1.120	0.913	0.22	31.2	5.5×10^5
		5.7	0.55	0.42	1.32	0.997	1.050	0.927	0.25	45.3	3.0×10^5
	method	5	0.52	0.42	1.24	0.998	0.995	0.950	0.22	64.4	2.2×10^5
		5.7	0.93	0.69	1.34	0.997	1.050	0.927	0.61	26.4	8.6×10^5
H-5 (1)	Wave	10	0.14	0.68	1.08	0.991	1.266	0.961	0.11	29.0	1.8×10^5
		8	0.80	0.75	1.06	0.993	1.216	0.921	0.092	30.8	1.6×10^6
	spectrum	6.7	0.69	0.56	1.24	0.996	1.120	0.913	0.15	35.1	7.0×10^5
		5.7	0.54	0.40	1.35	0.997	1.050	0.927	0.28	57.9	2.7×10^5
	method	5	0.52	0.39	1.32	0.998	0.995	0.950	0.30	57.0	1.9×10^5
		4.4	0.51	0.40	1.27	0.999	0.938	0.974	0.24	79.8	1.5×10^5
H-6 (1)	Wave	10	0.70	0.65	1.07	0.991	1.266	0.961	0.11	32.1	1.7×10^5
		8	0.79	0.78	1.01	0.993	1.216	0.921	0.071	36.7	1.7×10^6
	spectrum	5.7	0.44	0.40	1.11	0.997	1.050	0.927	0.13	96.3	2.6×10^5
		5	0.49	0.37	1.31	0.998	0.995	0.950	0.31	63.5	1.7×10^5
	method	4.4	0.52	0.38	1.36	0.999	0.938	0.974	0.35	66.6	1.3×10^5
		5.8	0.82	0.77	1.06	0.997	1.060	0.925	0.064	59.9	1.1×10^6

Data numbre	Method	T (sec)	H_1 (m)	H_3 (m)	H_1/H_3	$(K_r)_3/(K_r)_1$	$(K_s)_1/(K_s)_3$	$(K_s)_1$	f	$ df/f $ (%)	R_{et}
H-7 (1) " (3)	Wave spectrum	10	0.72	0.63	1.15	0.991	1.266	0.961	0.14	26.8	1.6×10^6
		8	0.69	0.62	1.12	0.993	1.216	0.921	0.13	31.6	1.1×10^6
		6.7	1.05	0.91	1.15	0.996	1.120	0.913	0.075	25.1	1.8×10^6
		5.7	1.45	1.12	1.29	0.997	1.050	0.927	0.090	17.8	2.1×10^6
	method	5	1.35	0.90	1.51	0.998	0.995	0.950	0.18	18.0	1.1×10^6
		4.4	1.06	0.60	1.76	0.999	0.938	0.974	0.39	23.0	3.5×10^5
		4	0.83	0.56	1.47	0.999	0.927	0.988	0.41	35.4	2.3×10^5
	Significant wave method	5.3	1.11	0.96	1.17	0.998	1.020	0.938	0.027	33.3	1.2×10^6
H-8 (1) " (3)	Wave spectrum	10	0.57	0.52	1.09	0.991	1.266	0.961	0.15	35.2	1.1×10^6
		8	0.59	0.55	1.08	0.993	1.216	0.921	0.13	38.3	8.8×10^5
		6.7	0.92	0.71	1.29	0.996	1.120	0.913	0.13	23.3	1.2×10^6
	method	5.7	1.19	0.89	1.33	0.997	1.050	0.927	0.11	20.2	1.3×10^6
		5	1.03	0.87	1.18	0.998	0.995	0.950	0.083	37.4	9.4×10^5
	Significant wave method	5.4	1.03	0.81	1.26	0.998	1.030	0.936	0.12	26.1	8.5×10^5
H-9 (1) " (3)	Wave spectrum	10	0.58	0.60	0.98	0.991	1.266	0.961	0.091	43.6	1.3×10^6
		8	0.65	0.68	0.95	0.993	1.216	0.921	0.059	53.6	1.3×10^6
		6.7	0.44	0.90	1.04	0.996	1.120	0.913	0.048	38.4	1.7×10^6
		5.7	1.05	0.95	1.11	0.997	1.050	0.929	0.057	37.3	1.4×10^6
	method	5	0.92	0.73	1.26	0.998	0.995	0.950	0.13	35.0	6.7×10^5
		4.4	0.78	0.52	1.50	0.999	0.938	0.974	0.34	35.4	2.5×10^5
		4	0.68	0.53	1.28	0.999	0.927	0.988	0.25	62.3	2.0×10^5
	Significant wave method	5.6	0.97	0.83	1.17	0.997	1.040	0.929	0.091	32.4	1.2×10^6
H-10(1) " (3)	Wave spectrum	10	0.51	0.54	0.87	0.991	1.266	0.961	0.040	93.0	1.3×10^6
		8	0.68	0.64	1.05	0.993	1.216	0.921	0.096	34.6	1.2×10^6
		6.7	0.97	0.90	1.08	0.996	1.120	0.913	0.067	31.0	1.7×10^6
		5.7	1.07	0.93	1.16	0.997	1.050	0.927	0.084	30.6	1.4×10^6
	method	5	1.00	0.65	1.54	0.998	0.995	0.950	0.28	24.5	5.5×10^5
		4.4	0.80	0.50	1.59	0.999	0.938	0.974	0.44	32.5	2.4×10^5
		4	0.66	0.52	1.25	0.999	0.927	0.988	0.13	71.4	2.0×10^5
	Significant wave method	6.0	0.92	0.85	1.08	0.997	1.080	0.921	0.058	41.6	1.3×10^6

Note: $h_1=11.8$ m, $h_3=3.4$ m. The values of f for $|df/f|>100\%$ are eliminated. The values of T in significant wave method are the mean values of the wave periods offshore and onshore.

向 NNE に対して求めたものであり, $|df/f|$ が100%以下のものについてのみ表記してある。

結局, $H=1\sim10$ の有義波法による f の値は, 0.13, 0.059, 0.083, 0.16, 0.096, 0.054, 0.027, 0.12, 0.091および0.058であり, 波浪スペクトル法からは, 0.13~0.28, 0.060~0.25, 0.052~0.25, 0.17~0.25, 0.092~0.30, 0.071~0.35, 0.075~0.41, 0.083~0.15, 0.048~0.34, 0.040~0.44という f の値が得られた。以上, 求めた f の値は, 波浪スペクトル法および有義波法のいずれによっても, 浅海における風波の予知のための図表を作成するに際して Bretschneider⁶⁾ が考慮した f の値0.01よりはるかに大きな値を示す。

(4) 海底摩擦係数と波浪特性との関係

Fig. 4 は, 秋田海岸²¹⁾, 泉佐野海岸および日吉津海岸において求めた海底摩擦係数 f のうち, $|df/f|$ が100%以下のものを周期 T に対してプロットしたものである。この図をみると, 有義波法によって求めた f の値は周期が大きいほど小さくなっていることがわかる。一方, 波浪スペクトル法によって求めた f においても, かなりばらついてはいるが, I-1 の資料を考えなければ, 同じ傾向が見出される。

Fig. 5 は, Fig. 4 と同一の資料を用いて, 海底摩擦係数 f を, 波に関する Reynolds 数 R_{eT} に対して, 層流境界層理論²³⁾によって求めた f と R_{eT} との関係式

$$f = 2.08 R_{eT}^{-1/2} \dots\dots\dots (12)$$

とともに, プロットしたものである。ここに, $R_{eT} = (u_{b\max} H / \nu) (u_{b\max} T / H) = u_{b\max}^2 T / \nu$ で, 岩垣・土屋・坂井²⁴⁾が提唱した波に関する Reynolds 数であり, Eagleson の論文²³⁾にある Reynolds 数 R_θ の4倍にあたるが, この解析では, 沖側と岸側のこうした Reynolds 数, $(R_{eT})_1$ と $(R_{eT})_2$ を求め, $R_{eT} = [(R_{eT})_1$

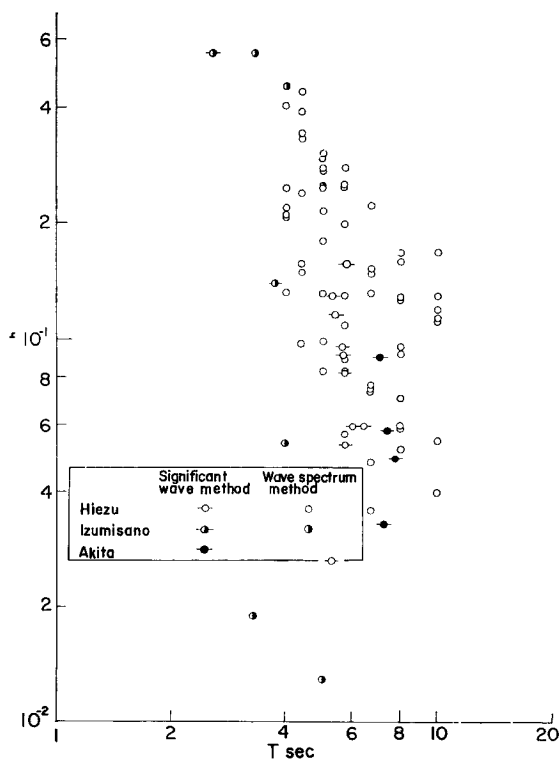


Fig. 4 Relationship of bottom friction factor against wave period.

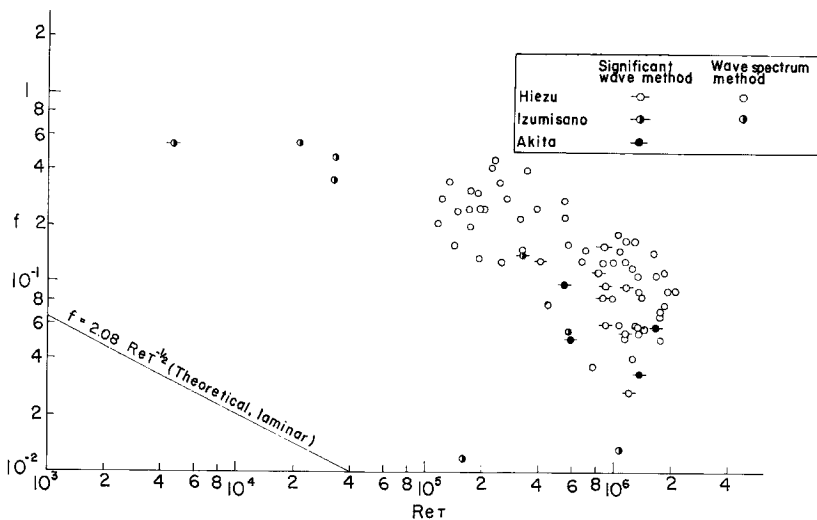


Fig. 5 Relationship of bottom friction factor against accompanying-wave Reynolds number.

$+(R_{eT})_2]/2$ とした (Table 1 および 2, Fig. 5)。

Fig. 5 をみると、有義波法によって求めた f の値は、 R_{eT} が大きいほど小さくなり、層流境界層にもとづく理論値の約10~70倍の値を示すことがわかる。一方、波浪スペクトル法によって求めた f においても、I-1 の資料を考えなければ、同じ傾向が見出だされるが、かなりばらついており、 f の値は層流境界層にもとづく理論値の約10~120倍になっている。

f の値が層流境界層にもとづく理論値より大きいのは、境界層内の流れが乱流であることも一因であろうし、また、 f の値がばらついているのは、海底の状態が関係しているとも考えられるが、とくに、波浪スペクトル法で求めた f の値のばらつきは、波浪スペクトルの各成分波が独立に伝達すると仮定したことによるのかもしれない。

波動運動する流体の乱流境界層に関しては、現在までのところ、十分な解明はなされていないが、最近、Jonsson によって実験的研究が進められ²⁵⁾、また、梶浦によって、理論的研究が行なわれている²⁶⁾ので、今後、こうした研究を参照して、検討を加えてみたい。また、Zhukovets は、medium sand と fine sand との混合による cement shell の水底に対して波の減衰の実験を行ない、有限振幅波の理論にもとづいて水底摩擦係数を求め、波に関する Reynolds 数 (かりに、水底流速を微小振幅波の値 u_{bmax} とすれば、 R_{eT} の $1/\pi$ 倍に相当する) に対してプロットし、パラメータとして、水底の状態をあらわす relative smoothness を提案して、 f の値のばらつきを整理している²⁷⁾。今後、現地観測において、海底の状態をよく調べ、こうしたことも検討してみたい。

4. 結 語

以上、著者らは泉佐野海岸および日吉津海岸における波浪観測の結果にもとづき、有義波法によって海底摩擦係数を求めるとともに、浅海における波浪スペクトルの変形の実例から、各周期に対する海底摩擦係数を求めて、エネルギースペクトルをもった不規則波の海底摩擦によるエネルギー損失機構を解明しようとした。

その結果、泉佐野海岸においては、有義波法から求めた海底摩擦係数の値は0.14 および 0.55であり、波浪ス

ペクトル法からは0.013~0.054および0.25~0.55という値をえた。一方, 日吉津海岸においては, 有義波法からは0.027~0.16, 波浪スペクトル法からは0.040~0.44という値をえた。これらの値は, 浅海における風波予知図を作成するに際して Bretschneider が考慮した海底摩擦係数の値0.01よりはるかに大きい。また, これら両海岸での海底摩擦係数の値と秋田海岸での値から, 有義波法によって求めた海底摩擦係数の値は, 周期あるいは波に関する Reynolds 数が大きいほど小さくなる傾向があり, 層流境界層にもとづく理論値のほぼ10~70倍の値を示すことを見出した。また, 波浪スペクトル法によるものでも, I-1 の資料を考えなければ, 同じ傾向が見出されるが, かなりばらつき, 層流境界層にもとづく理論値のほぼ10~120倍になることがわかった。

結局, 波浪観測の精度をあげることで, 波浪スペクトルの計算法の精度をあげることで, 風の波におよぼす効果を調べることで, 微小振幅波の理論にもとづいた海底摩擦係数を求める算定式について吟味すること, 波浪スペクトルの各成分波の干渉, などがこの研究に要求される今後の課題である。こうした点を少しずつ解決して, 現地海岸の海底摩擦による波高減衰を調べていきたいと考えている。

最後に, この研究を行なうにあたり, 波浪観測に際して, 大阪府土木部港湾課および建設省倉吉工事事務所の方々に絶大な御援助をいただき, また資料の整理や計算に際して, 大阪市総合計画局の池田順一, 大学院学生宮井宏および防災研究所の人見哲夫の諸氏には大いに助力をいただいた。ここに深謝の意を表する次第である。なお, この研究は文部省特別事業費および試験研究費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) Sverdrup, H.U. and W.H. Munk : Wind, Sea and Swell : Theory of Relations for Forecasting, U.S. Hydrographic Office, Pub. No. 601, 1947, pp. 1-44.
- 2) Paape, A. : Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves, Proc. 7th Conf. on Coastal Eng., Vol. 2, 1961, pp. 674-681.
- 3) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫 : 由比海岸堤防の模型実験について, 京都大学防災研究所年報第6号, 昭38, pp. 328-337.
- 4) Walden, H. : Comparison of One-Dimensional Wave Spectra Recorded in the German Bight with Various "Theoretical" Spectra, Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, Easton, Maryland, 1961, pp. 67-94.
- 5) Pierson, W.J., G. Neumann, and R.W. James : Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics, H.O. Pub. No. 603, 1955, pp. 1-284.
- 6) Bretschneider, C.L. : Generation of Wind Waves Over a Shallow Bottom, B.E.B. Tech. Memo. No. 51, 1954, pp. 1-24.
- 7) 樋口明生・土屋義人・柿沼忠男 : 名古屋港および泉佐野海岸における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報第7号, 昭39, pp. 420-433.
- 8) 樋口明生・柿沼忠男 : 日吉津海岸における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報第8号, 昭40, pp. - .
- 9) 浜田徳一・柴山煒彦・加藤始 : 風浪の発達に関する実験的研究, 第10回海岸工学講演会講演集, 昭38, pp. 7-12.
- 10) Tick, L.J. : A Non-Linear Random Model of Gravity Waves I, J. Math. Mech., Vol. 8, No. 5, 1959, pp. 643-651.
- 11) Bretschneider, C.L. : Field Investigation of Wave Energy Loss of Shallow Water Ocean Waves, B.E.B. Tech. Memo. No. 46, 1954, pp. 1~21.

- 12) Pierson, W.J., I.J. Tuttel and I.A. Woolley : The Theory of the Refraction of a Short-Crested Gaussian Sea Surface with Application to the Northern New Jersey Coast, Proc. 3rd Conf. on Coastal Eng., 1953, pp. 86-108.
- 13) Bretschneider, C.L. : Modification of Wave Spectra on the Continental Shelf and in the Surf Zone, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., 1963, pp. 17-33.
- 14) Putnam, J.A. and J.W. Johnson : The Dissipation of Wave Energy by Bottom Friction, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 1, 1949, pp. 67-74.
- 15) Bretschneider, C.L. and R.O. Reid : Modification of Wave-Height Due to Bottom Friction, Percolation, and Refraction, B.E.B. Tech. Memo. No. 45, 1954, pp. 1-36.
- 16) Putnam, J.A. : Loss of Energy Due to Percolation in a Permeable Sea Bottom, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 3, 1949, pp. 349-356.
- 17) Reid, R.O. and K. Kajiura : On the Damping of Gravity Waves Over a Permeable Sea Bed, Trans. A.G.U., Vol. 38, No. 5, 1957, pp. 662-666.
- 18) テルツァギ・ベック著小野薫ら訳 : 土質力学, 基礎編, 昭36, p. 38.
- 19) 18) p. 41.
- 20) 岩垣雄一 : 海岸および港湾の模型実験について, 海岸工学の最近の進歩, 昭36, pp. 21-42.
- 21) 岩垣雄一・柿沼忠男 : 秋田海岸の海底摩擦係数について, 第9回海岸工学講演会講演集, 昭37, pp. 81-84.
- 22) 岩垣雄一・柿沼忠男 : 秋田海岸における波浪推算の一例, 第10回海岸工学講演会講演集, 昭38, pp. 25-30.
- 23) Eagleson, P.S. : Laminar Damping of Oscillatory Waves, Proc. A.S.C.E., Vol. 38, No. HY3, 1962, pp. 155-181.
- 24) 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行 : 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究, 土木学会第19回年次学術講演会講演概要, 昭39, pp. 55-1~55-2.
- 25) Jonsson, I.G. : Measurements in the Turbulent Wave Boundary Layer, I.A.H.R. Congress, London, 1963, pp. 85-92.
- 26) Kajiura, K. : On the Bottom Friction in an Oscillatory Current, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 42, 1964, pp. 147-174.
- 27) Zhukovets, A.M. : The Influence of Bottom Roughness on Wave Motion in a Shallow Body of Water, Acad. S. USSR, No. 10, 1963, pp. 943-947.