

波浪観測による海底摩擦係数の推定 について

岩垣 雄一・柿沼 忠男

ON ESTIMATION OF BOTTOM FRICTION FACTOR FROM RESULTS OF WAVE OBSERVATIONS

by Dr. Eng. 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.

This report is based on the results of the wave observations at the Akita coast. From the corresponding values of the significant wave heights at two stations, the loss of wave energy due to bottom friction is investigated quantitatively and the bottom friction factor of this coast is estimated. The estimated values of bottom friction factors are 0.033~0.090 and the mean is 0.057.

1. 緒 言

海岸構造物を設計するためには、外力としての設計波を決定する必要がある。多くの場合、現地における十分な波浪観測資料はないのが普通であるから、天気図や風の記録などから、その海岸へ来襲する波を予知したり追算することになる。海岸構造物は通常、比較的浅いところに作られるから、深海における波浪の予知のみでは十分ではない。どうしても深海から浅海を経て、目的とする海岸構造物に至るまでの波の変形を適格に把握することが必要である。浅海における波の変形の原因は、風による発達、屈折、回折、海底摩擦、浸透効果、水深変化、砕波、反射などがおもなものであるが、これらの現象にはまだ不明の点が多く、浅海における波浪予知の精度は非常にわるい。

従来、波の変形の原因の一つである海底摩擦による波高の減少は、実際問題において、あまり重要視されていなかった。しかし遠浅の海岸で波高がかなり大きい場合には、海底摩擦による波高減衰効果は非常に大きく、この効果を見捨てることは、波高を過大に見積ることになる。この場合、問題となるのは海底摩擦係数として、いくらの値を採用するかであつて、このことは河川や水路において、Manning の粗度係数をいくらにとるかということと同じ問題である。

海底摩擦係数 f は、海底の摩擦応力を τ 、海底流速を u_0 として、

$$\tau = f \rho u_0^2 \dots\dots\dots (1)$$

によつて定義される¹⁾。ここに、 ρ は海水密度である。Bretschneider は 1952 年から 1953 年にわたり、メキシコ湾の浅海における波のエネルギー損失(波高減衰)の観測を実施し、海底摩擦係数 f の値として 0.053~0.08 を得たが、一方、浅海における波の発達を表わす $gH_{1/3}/U^2 \sim gh/U^2$ (ここに、 $H_{1/3}$: 有義波高、 h : 平均水深、 U : 風速、 g : 重力加速度)の図表では、 $f=0.01$ とした曲線に観測結果がよくのることを明らかにした²⁾。このことから、いつでも $f=0.01$ の値を採用して、浅海波の波高を求めているが³⁾、わが

国の海岸でもそのままこの値を用いた図表が使えるかどうかは問題であり、また波浪観測をしてえられた摩擦係数と、風速から波高を求めるときの摩擦係数の値とが異なるのは、どのような理由によるものか、といったことが未解決な問題として残されている。Bretschneider が観測した メキシコ湾の海岸は平均粒径が 0.002 mm といったゼラチン状の底質で、5000 m ほどはなれた 2 点間の波高減衰を観測したわけである。一方、わが国においては、新潟海岸において井島がステレオによつて観測した波の資料を用い、岸が数 10 m ほどはなれた点での波高減衰によつて f の値を算定し、0.03~0.04 の値をえているが⁴⁾、精度の点で問題がある。

この論文は、著者らが秋田海岸で行なつた波浪観測⁵⁾の資料にもとづいて、沖側と陸側の対応する 2 点における有義波高から、この海岸の摩擦係数を求めて、海底摩擦による波のエネルギー損失を量的に明らかにしようとしたものである。

2. 摩擦係数の算定式

Putnam および Johnson¹⁾ は (1) 式を用いて、海底単位面積あたり、単位時間に摩擦によつて失なわれるエネルギー τu_0 の 1 周期あたりの平均 $(1/T) \int_0^T \tau u_0 dt$ を計算し、次式を得た。

$$D_f = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\rho f H^3}{T^3 (\sinh 2\pi h/L)^3} \dots\dots\dots (2)$$

また Putnam⁶⁾ は、砂層の厚さが波長 L の 0.3 倍以上のときには、浸透効果による単位面積あたり単位時間の平均のエネルギー消費量 D_p は次式で表わされることを示した。

$$D_p = \frac{\pi g^2}{\nu} \frac{\rho p H^2}{L (\cosh 2\pi h/L)^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 p は長さの 2 乗の単位で表わした透水係数で、速度の次元をもつ透水係数 k との関係は $k = gp/\nu$ である。

Bretschneider および Reid⁷⁾ は、海底摩擦、浸透、屈折、および水深変化の効果を考慮した定常状態の波のエネルギー方程式

$$\frac{d(nEcb)}{dx} = -(D_f + D_p)b \dots\dots\dots (4)$$

から、(2) 式および (3) 式を用いて、一定の海底勾配 m に対する海底摩擦係数 f を求める次式を導いている。

$$f = \frac{\frac{H_1(K_p K_r K_s)_2}{H_2(K_p K_r K_s)_1} - 1}{\frac{H_1}{(K_s)_1 m T^2} \int_{(h/T^2)_1}^{(h/T^2)_2} \frac{\phi_f K_p K_r}{(K_p K_r)_1} d(h/T^2)} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 x は波の進行方向に波向線に沿つてはかつた距離、 n は群速度と波速との比、 c は波速、 E は単位面積あたりの波のもつ平均のエネルギー、 b は相隣れる波向線の間隔、suffix 1 は沖側の地点①での値、suffix 2 は岸側の地点②での値、 K_p は浸透効果による波高減衰係数で、

$$K_p = (\tanh 2\pi h/L)^{8\pi p/\nu m T} \dots\dots\dots (6)$$

K_r は屈折係数で、

$$K_r = (b_0/b)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

K_s は浅水係数で、

$$K_s = (c_0/2nc)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

ϕ_f は

$$\phi_r = \frac{64\pi^3}{3g^2} \left(\frac{K_s}{\sinh 2\pi h/L} \right)^3 \dots\dots\dots (9)$$

である。また suffix 0 は沖波の値を示す。

いま浸透効果が無視できるものとすれば、 $K_p=1$ であり、また簡単のため

$$\int_{(h/T^2)_1}^{(h/T^2)_2} \frac{\phi_f K_r}{(K_r)_1} d(h/T^2) \approx \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{(K_r)_2}{(K_r)_1} \right\} \int_{(h/T^2)_1}^{(h/T^2)_2} \phi_f d(h/T^2) \dots\dots\dots (10)$$

とすれば、(5)式はつぎのようになる。

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

(10)式の近似についてはあとで検討する。

3. 秋田海岸における海底摩擦係数の推定

著者らが秋田海岸において実施した波浪観測の資料⁹⁾から、(11)式にもとづいて海底摩擦係数 f の値を求めようとするわけであるが、砕波していない資料をとり出して用いる必要がある。

この推定の対象となつた秋田市新屋海岸は、北緯約40度、東経約140度2分に位置し、海岸付近は日本海沿岸に似あわず、なだらかな地形であり、等深線はほぼ海岸線と平行に走っている。この海岸には、汀線より約2.3km、水深約15mの地点

に海底油田を採掘する石油資源開発KKの海中タワーが3基あり、波高計あるいは風速計などの観測機器のとりつけにも便利で、2点間の波高の減衰を観測するにはきわめて有効である。

Fig. 1 は秋田海岸付近の海図であり、Fig. 2 は等深線とともに観測地点の位置を示したものである。Fig. 3 はBジャケットと観測ブイ No. 1 を結ぶ海底断面を示したものであるが、この図によれば、海底はほぼ一様な勾配を示し、Bジャケットと観測ブイ No. 1 の間の平均海底勾配は 5.83×10^{-3} であることがわかる。このような秋田海岸において、地点①というのは沖側の測点であるBジャケットであり、地点②というのは岸側の測点であるブイ No. 1 である。つぎに、観測資料より(11)式にもとづいて f を求めるに際しての問題点を考察してみよう。

(1) 周期 T に対する考察

地点②における手動式簡易波高計による周期は不正確と思われるので、地

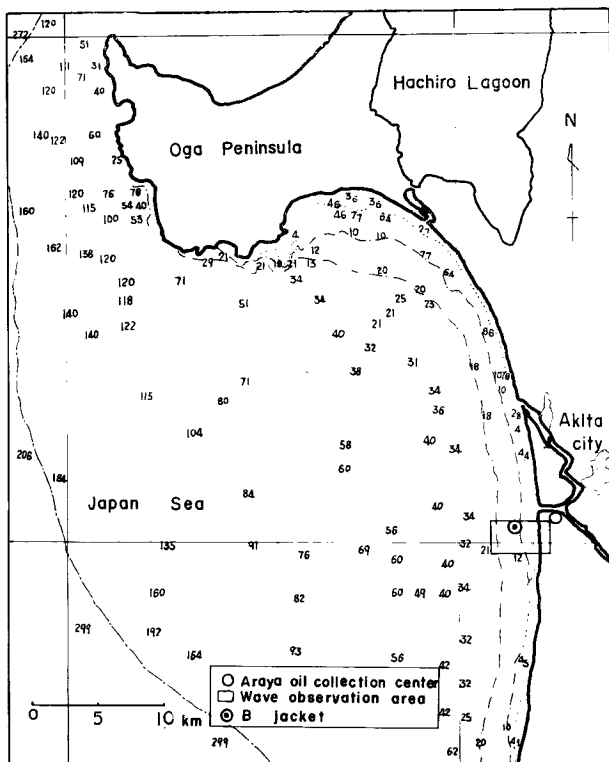


Fig. 1 Neighbourhood of the Akita coast

点①における水圧式波高計による有義波周期を用いた。地点①における有義波のエネルギーはこの有義波周期に対応した群速度で地点②に達するわけであるが、それに要する時間はほぼ 6 min であった。

(2) K_p に対する考察

浸透効果による波高減衰係数 K_p は (6) 式によつてあらわされる。秋田海岸の新屋浜の汀線付近のくい No. 2, No. 4, No. 7 および No. 15 の 4 点 (Fig. 2) での浜砂の中央粒径が、それぞれ 0.43 mm, 0.28 mm, 0.27 mm および 0.66 mm であることから、この沖の底質の透水係数 $k = gb/\nu$ の値は、0.085 cm/sec 程度⁶⁾あるいはそれ以下と推定される。この計算に用いる波の周期は 7.1~7.8 sec であるから、いま $T = 7.4$ sec を採用すれば、(6) 式より $(K_p)_1$ および $(K_p)_2$ を求め、 $(K_p)_2/(K_p)_1 = 0.99$ がえられる。このことは、地点①と②の間で波高が 1 % 減衰することを意味しており、観測値より摩擦係数 f の値を求めるときの精度を考慮すれば、浸透効果は無視してよいと思われる。

(3) K_r に対する考察

屈折係数 K_r は周期および波の方向によつて変化するが、波の方向の観測が困難であつたので便宜的につぎの方法によつて波向を決めた。すなわち、地点①で記録された波の周期はほぼ 7 sec 程度であるから、この周期で沖から地点①まで伝播してきたとすれば、水深が約 40 m のところから浅海領域に入ることがわかる。水深 40 m の等深線は、地点①から NW の方向で 8.8 km, WNW の方向で 6.6 km, W の方向では 5.5 km の距離にあるので、それぞれ 26 min, 20 min および 16 min かかつて地点①に波が到達することになる。したがつて、地点①で波が記録される時刻の 20 min 前、2 時間にわたる風向 (Fig. 4) を考慮して、ほぼ一定の風向の場合にはその方向を沖波の波向とし、風向にかなり変動がある場合には、最も可能性があると思われる 2 方向を選んで沖波の方向とした。地点①より沖では、等深線がほぼ平行であるとみなし、沖波の入射角 α_0 と地点①における波の入射角 α_1 との関係を示す Snell の法則

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1} = \frac{c_0}{c_1} \quad \dots \dots \dots (12)$$

を用いて α_1 を決めた。ここに、 c_0 , c_1 はそれぞれ沖波および地点①における波速をあらわす。このよう

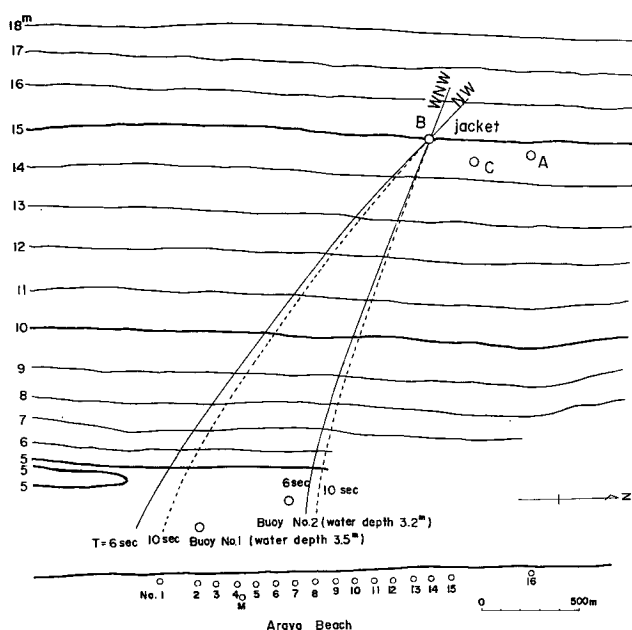


Fig. 2 Stations of wave observation

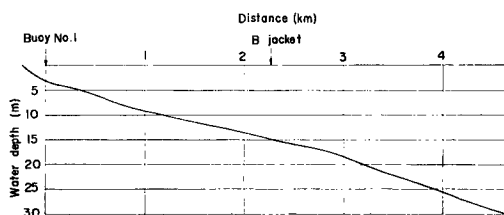


Fig. 3 Bottom topography (Jacket B ~ Buoy No. 1)

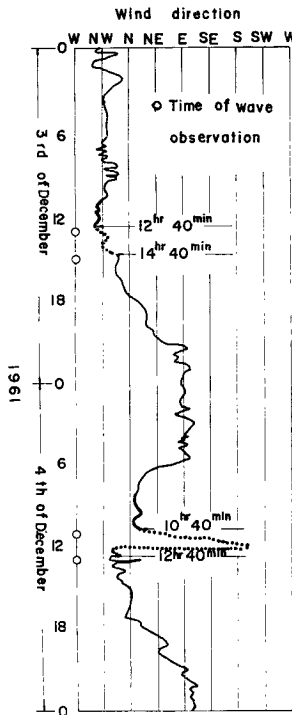


Fig. 4 Variation of wind direction at Araya (Thick lines and dotted lines show the variations of the wind direction during 2 hours till 20 minutes before wave observations)

にして定めた波向によつて、地点①から②までの領域において波向線法により屈折図を描き、屈折係数を求めた。Table 1 は $(Kr)_2/(Kr)_1$ の値を示す。

つぎに(10)式の近似について述べよう。(10)式の左辺における積分は K_r をふくんでいるため、 K_r と h/T^2 との関係を求め数値積分を行なわなければならないが、これは非常に面倒である。そこで、いま α_1 として 50.5° 、周期が 7.8 sec の波に対して、水深 15 m, 13 m, 11 m, 9 m, 7 m, 5 m および 3.5 m における地点①に対する屈折係数 $(Kr)_i/(Kr)_1$ を求め、(10)式の左辺の代りに

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(Kr)_i}{(Kr)_1} + \frac{(Kr)_{i+1}}{(Kr)_1} \right\} \frac{(h/T^2)_{i+1}}{(h/T^2)_i} \phi_f d(h/T^2)$$

としてこの値を計算すると、0.65 となり、また(10)式の左辺を右辺のようにあらわすと、0.68 という値がえられる。後者は前者にくらべて約 5 % 大きい、この程度の誤差は波高観測の精度から考えて許してよいと思われる。

(4) 風の効果に対する考察

以上は風が波におよぼす効果については考えていない。地点①におい

Table 1 Values of angles of incident waves α_1 and $(Kr)_2/(Kr)_1$

Date and time (1961)	α_1 (degree)	$(Kr)_2/(Kr)_1$
3 rd Dec., 1300	37.5	0.96
" , 1500	38.0 53.5	0.96 0.89
4 th Dec., 1100	38.0 54.5	0.97 0.90
" , 1300	36.0 56.5	0.95 0.87

Table 2 Wave heights and periods at Station ① and speeds and directions of wind at Araya

Date and time (1961)	Wave height H_1 (m)	Wave period T_1 (sec)	Incident Angle α_1 (degree)	Wind at Araya		
				Speed (m/sec)	Direction	Component of wind speed to wave direction (m/sec)
3 rd Dec., 1300	1.02	7.4	37.5	5.0	NW	5.0
" , 1500	0.82	7.2	38.0 53.5	5.5	WNW	5.3 4.7
4 th Dec., 1100	0.60	7.1	38.0 54.5	2.0	N	1.2 1.6
" , 1300	0.50	7.8	36.0 56.5	2.3	NE	0 -0.2

ては、ロビンソン 4 風杯型風速計 4 個が海面上 4.8 m, 6.1 m, 9.4 m および 13.6 m の高さに取り付けられ、海上風の風速の自記記録がえられたのであるが、風速計の取付け位置の関係上、風向によってはジャケット部材による障害があり、なかでも最上部のものに対しては遮へい効果が顕著であつた。このようなわけで、地点①における海上風の風速は不正確と思われるので、地点①から約 3.1 km はなれた地点にある石油資源開発 KK 新屋集油所 (Fig. 2) 内、地上 17 m に設置されているロビンソン 3 風杯型風速計およびセルシン型風向計の記録によつて、考察を進める。

Table 2 は地点①における波高、周期および陸上における風速、風向を示したもので、この資料にもとづいて風の効果を検討してみよう。

Wilson は定常状態における沖波の発達に対して、つぎの関係式を提案している⁹⁾。

$$\frac{gH}{U^2} = 0.26 \tanh \left\{ \frac{1}{10^2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{c}{U} = 1.40 \tanh \left\{ \frac{4.36}{10^2} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/8} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 U は風速、 F は吹送距離である。両式において、 gF/U^2 を大きくしていくと $\tanh \{ \}$ は 1 に近づくので、つぎのように書ける。

$$H = 0.027 U^2 \text{ (m-sec 単位)} \dots\dots\dots (15)$$

$$T = 0.897 U \text{ (")} \dots\dots\dots (16)$$

すなわち、これらは F が十分長く、波がこれ以上発達しない最大の有義波高と周期を与える式である。いま、観測時における地点①での波のエネルギー輸送量と、風速の波向への分値によつて (15), (16) 式から求められる波の最大のエネルギー輸送量とを比較し、前者の方が大きい場合には風の効果はない (風は波を発達させない) という考え方によつて検討してみよう。**Table 3** は単位幅あたり単位時間のエネルギーの輸送量 nEc を $(1/8)\rho g$ で割つた値を風速の分値ごとに示したもので、いずれの場合も前者の方が大きくなっている。このことから、観測当時の風は波が地点①から②へ伝播する間には、波高を増大させることはないと推定される。

一方、風速が 0 であれば、波はかえつて減衰する。すなわち、うねりの減衰である。これについては、深海に対しての Bretschneider の予知曲線⁹⁾があるが、減衰距離としての地点①から②までの距離が短かくて、その曲線を用いることができないので、Sverdrup および Munk のつぎの式¹⁰⁾を用いて検討することにする。

$$\frac{T_D}{T_F} = \sqrt{1 + 5.95 \cdot 10^{-4} \left(\frac{D}{gT_F^2} \right)} \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{H_D}{H_F} = \left(\frac{T_D}{T_F} \right)^{-2.65} \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 D は減衰距離、 T_F および H_F は風域の終端における周期および波高、 T_D および H_D は風域の終端から距離 D のところの周期および波高である。いま、かりに $T_F = 7.0 \text{ sec}$ 、 $D = 2270 \text{ m}$ として T_D/T_F の値を求めると 1.001 となり、したがつて (18) 式より H_D/H_F も 1 とみなしてよい。これから、うねりとしての地点①から②までの間の減衰はほとんどないとみなしてよいであろう。

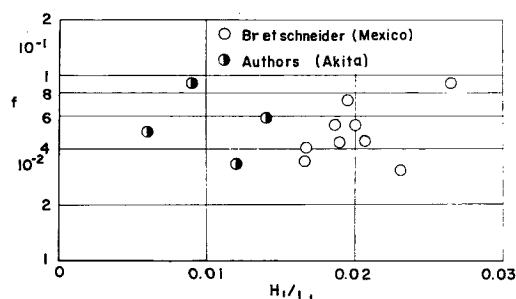
以上のことから、(11)式を用いて秋田海岸における海底摩擦係数を求め、**Table 4** に示すような値をえた

が、もし、波高の測定に $\pm 5\%$ の誤差があるとして f の値を計算してみると、約 $\pm 20\%$ の誤差を生ずることになる。 f の値は観測日時によってかなり異なっているが、全体を平均すれば、0.057 という値を与える。

Table 4 Values of bottom friction factors of the Akita coast

Date and time (1961)	H_2 (m)	$(K_s)_1$	$(K_s)_2$	α_1 (degree)	f	Mean value
3 rd Dec., 1300	0.80	0.913	1.06	37.5	0.058	0.058
" , 1500	0.74	0.917	1.06	38.0 53.5	0.041 0.024	0.033
4 th Dec., 1100	0.47	0.917	1.04	38.0 54.5	0.101 0.079	0.090
" , 1300	0.46	0.913	1.08	36.0 56.5	0.063 0.034	0.049
Note : H_1 and T_1 are shown in Table 2, and the values of $(K_r)_2/(K_r)_1$ in Table 1.					Whole mean value of f	0.057

Fig. 5 は秋田海岸でえられた海底摩擦係数 f と波形勾配 H_1/L_1 の関係を、Bretschneider によるメキシコ湾における観測結果とともに表わしたものである。これによれば、 f の値はかなりのばらつきを示しているのに、一般的に、 f の値が H_1/L_1 によってどのように変化するかは見出すことができない。

Fig. 5 Relationships between f and H_1/L_1

4. 結 語

以上、著者らは秋田海岸における波浪観測の結果にもとづいて、この海岸の海底摩擦係数を求め、平均値として 0.057 という値をえた。これは有義波高 H_1 が 0.50 m~1.02 m、有義波周期が 7.1~7.8 sec、水深は 15~3.5 m といった条件における値である。しかし、観測日時によって f の値は 0.033~0.090 まで変化し、波の特性によって系統的に異なっているようにも思われない。結局、波浪観測の精度をあげること、波の方向を正確に把握する方法を見出すこと、エネルギースペクトルをもつ不規則波の海底摩擦によるエネルギー損失の機構を明らかにすること、などがこの研究に要求される今後の課題であるが、なかなかむずかしい問題である。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、資料の整理や計算に大いに助力をいただいた神戸製鋼 KK の氈受昌和氏、KK 銭高組の立白正光氏、および防災研究所の人見哲夫氏に感謝の意を表したい。なお、この研究は文部省特別事業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) Putnam, J. A. and J. W. Johnson : The Dissipation of Wave Energy by Bottom Friction, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 1, Feb. 1949, pp. 67-74.
- 2) Bretschneider, C. L. : Field Investigation of Wave Energy Loss of Shallow Water Ocean

- Waves, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 46, Sept. 1954, pp. 1-21.
- 3) Bretschneider, C. L. : Revisions in Wave Forecasting, Deep and Shallow Water, Proc. of 6th Conf. on Coastal Eng., 1958, pp. 30-67.
- 4) 岸 力：海岸堤防に関する研究（5），海底摩擦による浅水波のエネルギー散逸，土木研究所報告，第93号の1，昭29. 7，pp. 1-9.
- 5) 岩垣雄一・樋口明生・土屋義人・吉田幸三・柿沼忠男・井上雅夫：秋田海岸の波浪観測について，第9回海岸工学講演会講演集，昭37. 10，pp. 75-80.
- 6) Putnam, J. A. : Loss of Energy Due to Percolation in a Permeable Sea Bottom, Trans. A. G. U., Vol. 30, No. 3, June 1949, pp. 349-356.
- 7) Bretschneider, C. L. and R. O. Reid : Change in Wave Height Due to Bottom Friction, Percolation, and Refraction, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 45, Oct. 1954, pp. 1-36.
- 8) 石原藤次郎・本間仁編：応用水理学，上巻，昭32. 4，p. 186.
- 9) Wilson, B. W. : Graphical Approach to the Forecasting of Waves in Moving Fetches, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 73, Apr. 1955, pp. 1-31.
- 10) Sverdrup, H. U. and W. H. Munk : Wind, Sea and Swell ; Theory of Relations for Forecasting, U.S.H.O. Pub. No. 601, March 1947, pp. 1-44.