

現地海岸における海底摩擦係数について

岩 垣 雄 一*・柿 沼 忠 男**・宮 井 宏***

1. 緒 言

浅海における海岸波浪の予知法を確立するに際しては、現地海岸での海底摩擦係数の値が、波浪特性や海底の状態によってどのように変化するかを調べておくことが必要になってくる。

著者らは、前報告¹⁾において、沖側と陸側の相対応する2点間の有義波高の減衰と波浪スペクトルの変形から、有義波法と波浪スペクトル法によって求めた海底摩擦係数の値が、浅海における風波の推算に際して Bretschneider が考慮した海底摩擦係数の値²⁾ 0.01 よりはるかに大きく、有義波法によって求めた海底摩擦係数の値は波の周期が大きいほど小さくなる傾向があり、波浪スペクトル法によるものでも1個の資料を除けば、そうした傾向があることを見出した。

その後、著者らは、資料を追加して³⁾、現地海岸における海底摩擦係数の値を算出したが、やはり、Bretschneider が考慮した 0.01 よりはるかに大きく、有義波法によって算出した値は、波の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⁴⁾ 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、1個の資料を除けば、同じ傾向をもつが、かなりばらつき、理論値のほぼ 10~120 倍にもなることを見出した。

この研究は、1964 年 1~2 月に、京都大学防災研究所が大阪府二色の浜海岸において実施して得た波浪観測資料にもとづいて、有義波法と波浪スペクトル法により海底摩擦係数を算出し、比較的小さな波に対する海底摩擦係数と波浪特性との関係を見出だすとともに、著者らが各地海岸で海底摩擦係数として求めた値（海底摩擦以外の風などの影響が入っている可能性があるため、見掛けの摩擦係数と考えてよい）を、 h_N/L_N (h_N ：陸側の波浪観測地点の水深、 L_N ：波浪スペクトルの各成分波の陸側の波長あるいは陸側の有義波の波長) の値によって区分し、深海波に近く摩擦による波高の減衰があまり期待できない資料と比水深が小さく摩擦の効果が期待される資料とを識別できるようにした。

2. 波浪の資料

(1) 二色の浜海岸の位置と海底地形

観測の対象とした二色の浜海岸は、北緯 $34^{\circ}26'$ 、東経 $135^{\circ}20'$ に位置し、等深線はほぼ海岸線と平行に走っている。図-1 は、二色の浜海岸位置図、図-2 は、等深線とともに波浪観測地点および底質採取点の位置を、図-3 は、ブイ No. 1, 2, 3 および 4 を結ぶ海底断面を示したものである。図-3 によれば、二色の浜海岸の海底は、ブイ No. 1 とブイ No. 3 の間にはほぼ一様な勾配を示し、その間の平均海底勾配は 3.66×10^{-3} であり、ブ

図-1 二色の浜海岸位置図

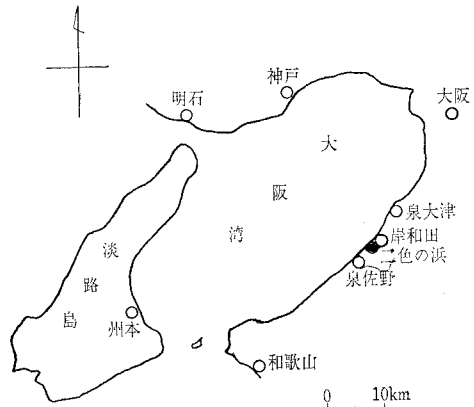
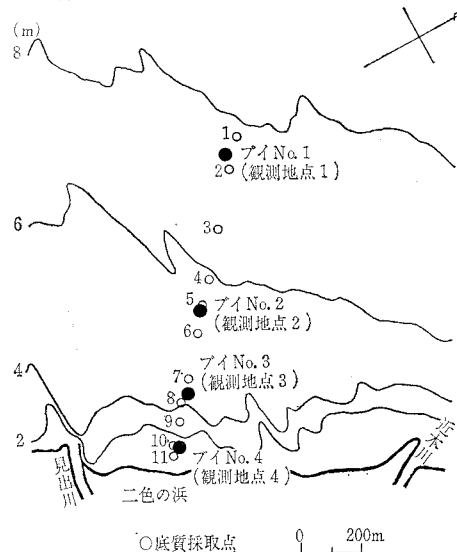


図-2 波浪観測地点および底質採取点位置図（二色の浜海岸）



* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所

*** 学生会員 京都大学大学院学生

イ No. 3 と 4 の間の平均海底勾配は 1.81×10^{-2} である。

(2) 波浪資料と浅海における波浪スペクトルの変形の実例

波浪資料は、図-2 に示した位置にあるブイ No. 1, 2, 3, 4 の上下運動を、1000 mm および 400 mm 望遠レンズ付きの 16 mm 撮影機によって、2 コマ/sec ごとに 10~15 分間の同時観測をして得たフィルムを、映写機 (Elmo DM 16 mm) を改良し、1 コマ送りができるようにしたものによって映写し、ブイの上下運動を読みとることによって得たわけであるが、表-1 は、二色の浜海岸で得た波浪資料と諸条件を示す。表-1 中に示す風の資料は、観測地点から約 4.6 km はなれた岸和田港におけるものである。

図-4 (a), (b), (c) および (d) は、二色の浜海岸で得た沖側と陸側の対応する 2~3 点での浅海における波浪スペクトルの変形を示す。

図-3 海底断面図 (ブイ No. 4-3-2-1, 二色の浜海岸)

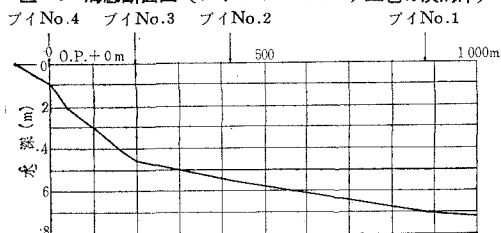


表-2 は、図-4 (a)~(d) に示した各波浪資料について、波浪スペクトルの各成分波の周期 T_f および有義波周期 $T_{1/3}$ に対する h/L (h : 各波浪観測地点での水

図-4 浅海における波浪スペクトルの変形の代表例 (二色の浜海岸)

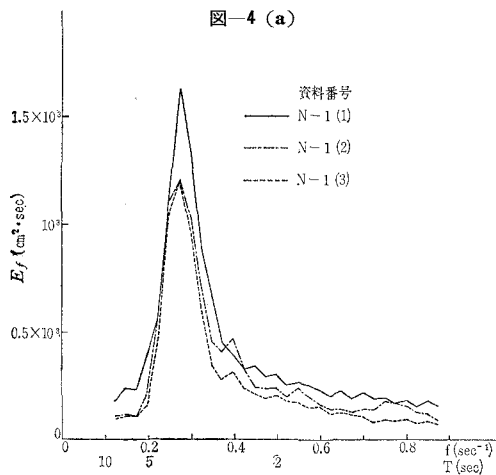


表-1 波浪資料と諸条件 (二色の浜海岸)

資料番号 () 観測地点 No.	水深 (m)	有義波高 (cm)	有義波周期 (sec)	観測日時 (1964 年)	波向	岸和田港における風			
						風向	風速 (m/sec)	風速の波向 への分値 (m/sec)	
N-1 (1)	8.6	76.6	3.4	1 月 31 日 16 時 20 分	WNW	WNW	8.5	8.5	
N-1 (2)	7.1	71.8	3.3						
N-1 (3)	6.2	65.2	3.4						
N-2 (1)	8.6	87.0	3.9	1 月 31 日 17 時 10 分	WNW	NW	11.1	10.3	
N-2 (2)	7.1	87.5	3.9						
N-2 (3)	6.2	76.3	3.8						
N-3 (1)	8.9	76.4	3.9	2 月 1 日 11 時 30 分	WNW	WNW	7.3	7.3	
N-3 (2)	7.4	71.7	3.7						
N-4 (1)	8.7	85.9	3.9	2 月 1 日 12 時 30 分	WNW	NW	9.4	8.7	
N-4 (2)	7.2	81.0	3.6						
N-5 (1)	8.4	89.2	3.9	2 月 1 日 14 時 20 分	WNW	WNW	7.5	7.5	
N-5 (2)	6.9	80.3	4.6						
N-6 (2)	7.2	76.9	3.5	2 月 4 日 11 時 40 分	NNW	NNE	6.9	4.8	
N-6 (3)	6.3	69.7	3.5						
N-6 (4)	2.7	57.3	3.3						
N-7 (2)	6.9	58.3	3.1	2 月 4 日 15 時 40 分	NW	NNE	6.2	2.4	
N-7 (3)	6.0	50.6	3.0						
N-7 (4)	2.4	42.0	3.1						
N-8 (2)	6.7	62.9	3.2	2 月 4 日 16 時 40 分	NW	NNE	5.5	2.1	
N-8 (3)	5.8	48.5	3.2						
N-8 (4)	2.2	50.6	3.2						

表-2 波浪スペクトルの各成分波の周期および有義波に対する h/L

観測地点 No.	波浪スペクトルの各成分波の 周期 T_f (sec)						有義波資料 No.			
	5	4.44	4	3.64	3.33	3.08	N-1	N-2	N-6	N-7
(1)	0.24	0.30	0.35	0.42	0.47	0.59	0.48	0.37	—	—
(2)	0.21	0.25	0.30	0.35	0.40	0.48	0.42	0.31	0.38	0.46
(3)	0.19	0.23	0.27	0.31	0.35	0.43	0.35	0.29	0.34	0.43
(4)	0.11	0.13	0.15	0.17	0.18	0.21	—	—	0.19	0.19

深, L : T_f あるいは $T_{1/3}$ に対する各波浪観測地点での波長) を示したものである。

図-4 および 表-1 をみると、 h/L の値が 0.5 に近く、深海波とみなせるような T_f および $T_{1/3}$ の場合

図-4 (b)

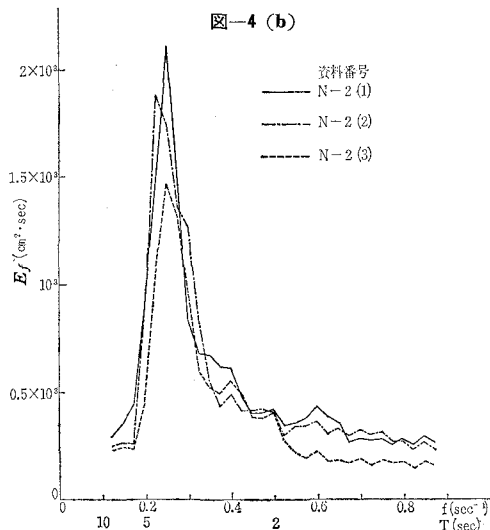


図-4 (c)

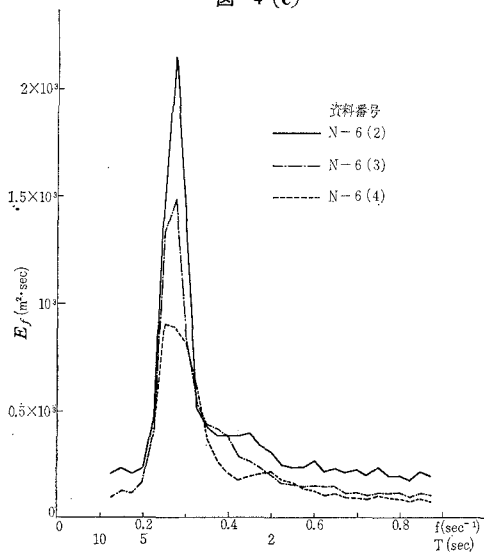
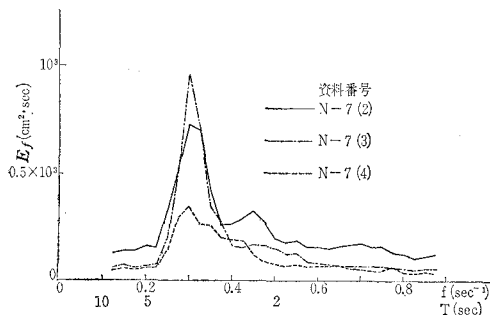
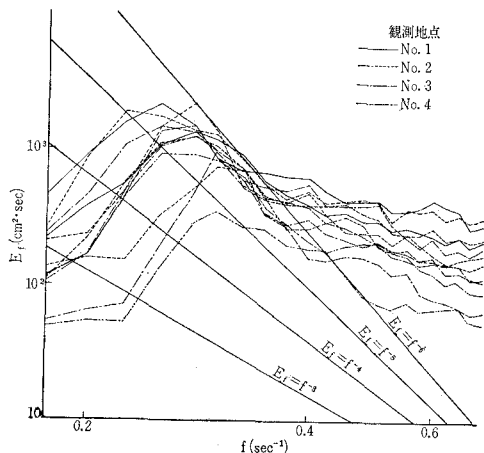


図-4 (d)



にも、沖側と陸側の相対応する 2~3 点間の spectral-energy および有義波高に、かなりの減衰があることがわかる。こうした減衰は、観測時における海面観測および表-1 に示した風の資料から、white cap によって生じたとも思われるが、どのような理由によって生じたかを解明することは、真の海底摩擦係数を算出する場合

図-5 浅海における波浪スペクトルと $E_f=f^{-3}$, f^{-4} , f^{-5} , および f^{-6} との比較



に、きわめて重要な問題であろう。

図-5 は、この解析で求めた波浪スペクトルと $E_f=f^{-3}$, f^{-4} , f^{-5} , および f^{-6} との比較を示したもので、スペクトルは観測地点ごとに示してある。この図をみると、解析で得た波浪スペクトルは、ピーク付近の高周波側において $f^{-3} \sim f^{-5}$ にほぼ平行であることがわかるが、この結果は、さき新潟県潟町海岸の水深 15m のところに取りつけた接点間隔 5cm の階段抵抗式波高計によってえたもの（スペクトルのピークにおける周期：5.5~9.6 sec⁵⁾）および鳥取県日吉津海岸の水深 11.8m と 3.4m に設置した波浪観測用ブイによってえたもの（スペクトルのピークにおける周期：5.7~10.0 sec⁶⁾）とほぼ同一である。

3. 二色の浜海岸における海底摩擦係数の値

表-1 に示した波浪資料 N-1~8 を用い、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⁷⁾ にもとづいて、有義波法および波浪スペクトル法によってこの海岸の海底摩擦係数を求める。ここに、有義波法においては、後述の式(1)中の波の周期 T を沖側の地点の有義波周期 T_1 と陸側の地点の有義波周期 T_2 との平均値として f の値を算定し、一方、波浪スペクトル法においては、便宜上、Bretschneider⁸⁾ にしたがって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る。

a) 浅水係数 K_s に対する考察 この解析で用いた各観測地点 1~4 における浅水係数 $(K_s)_1 \sim (K_s)_4$ の値は、0.91~1.00 で、 $(K_s)_{1-3}$ は、 $T=5$ sec で最小、 $(K_s)_4$ は、 $T=3$ sec 付近で最小となる。また、 $(K_s)_2/(K_s)_1$, $(K_s)_3/(K_s)_1$, および $(K_s)_3/(K_s)_2$ の値は 0.97~1.00 で、 $T=4$ sec 付近で最小、 $(K_s)_4/(K_s)_3$ の値は 0.93~1.10 で、 $T=3$ sec から 5 sec まで一様に増加する。

b) 浸透効果による波高減衰係数 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によって、採集した底質（中央粒径約 0.28 mm）の透水係数を求め、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) 屈折係数 K_r に対する考察 表-1 に示した目視観測による波向にもとづいて、屈折係数を求めたが、 $(K_r)_2/(K_r)_1$, $(K_r)_3/(K_r)_1$, および $(K_r)_3/(K_r)_2$ の値は 0.99~1.00 で、 $(K_r)_4/(K_r)_3$ の値は 0.95~0.99 である。

d) 内部摩擦の効果に対する考察 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深海波の波高の減衰⁹⁾ は無視してよいことがわかった。

e) 風の効果に対する考察 2. で示した風と波の資料からみれば、資料によっては、沖側の観測地点におけ

る波が風の影響を受けて発達したり、あるいは、逆に2.(2)でのべたように、white cap によって減衰し陸側の観測地点に伝達したとも考えられる。

しかし、たとえば、white cap による減衰が、風速、風向の波向になす角、波浪スペクトルの各成分波の周期(あるいは、有義波周期)、および spectral energy (あるいは、有義波高)とどのように関連しているかが、現状においては明確に知られていないので、この解析では、こうした風の効果を含めたまま、後述する式(1)を用いて、この海岸の海底摩擦係数を求めることにした。

ただし、便宜的にはあるが、 $h_N/L_N \geq 0.4$ ($K_s)_N \geq 0.975$) の波浪資料は、spectral energy あるいは有義波高の減衰は海底摩擦によるよりも風などによる影響が大きいとして、この解析には用いなかった。

f) 摩擦係数の算出 以上のことから Bretschneider-Reid の算定式を簡化した

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

によって、二色の浜海岸での海底摩擦係数を求めた。ここに、添字1は沖側地点での値、添字2は陸側地点での値である。

結局、 f の相対誤差 $|df/f|$ が 100% 以下 (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を考慮して求めた) のものについて、 $h_N/L_N < 0.4$ の場合の N-1~8 の有義波法および波浪スペクトル法による f の値は、表-3 に示すとおりである。こうして求めた 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製するに際して、Bretschneider が考慮した f の値²⁾ 0.01 よりはるかに大きい。

表-3 海底摩擦係数の値 (二色の浜海岸)

	波浪資料	有義波法	波浪スペクトル法		波浪資料	有義波法	波浪スペクトル法
$f_{(1) \sim (2)}$	N-1	—	1.10~1.66	$f_{(2) \sim (3)}$	N-1	0.89	0.066~1.13
	N-2	—	0.21~0.47		N-2	0.35	0.30~1.70
	N-3	0.53	1.17~1.21		N-6	0.92	0.14~3.13
	N-4	0.37	0.063		N-7	—	3.65~5.20
	N-5	0.37	0.15~1.29		N-8	—	1.35~5.70
$f_{(1) \sim (3)}$	N-1	1.16	0.51~1.43	$f_{(3) \sim (4)}$	N-6	0.28	0.21~0.32
	N-2	0.32	0.37~3.40		N-7	0.37	0.43~1.03
					N-8	—	0.091~0.31

4. 海底摩擦係数と波浪特性との関係

図-6 は、 $h_N/L_N < 0.4$ の波浪資料を用いて、秋田海岸¹⁰⁾、泉佐野海岸³⁾、日吉津海岸³⁾、および二色の浜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、波に関する Reynolds 数 R_{eT} に対してプロットしたもので、層流境界層理論¹⁾によって求めた

f と R_{eT} との関係、

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

をも記入してある。ここに、 $R_{eT} = u_b^2 \max T / \nu$ (u_b : 海底流速、 ν : 海水の動粘性係数) であるが、この解析では、沖側と陸側の値、 $(R_{eT})_1$ と $(R_{eT})_2$ を求め、その平均値を採用した。

図-6 をみると、求めた f の値は、有義波法および波浪スペクトル法のいずれによっても、 R_{eT} が大きいほど小さくなる傾向があり、波浪スペクトル法によって求めた f の値は、かなりばらついていて、 R_{eT} の値が 2×10^4 から 2×10^6 へ増大するにつれて、層流境界層にもとづく理論値のほぼ 20~600 倍から 10~70 倍になっていることがわかる。

図-6 海底摩擦係数と波に関する Reynolds 数との関係

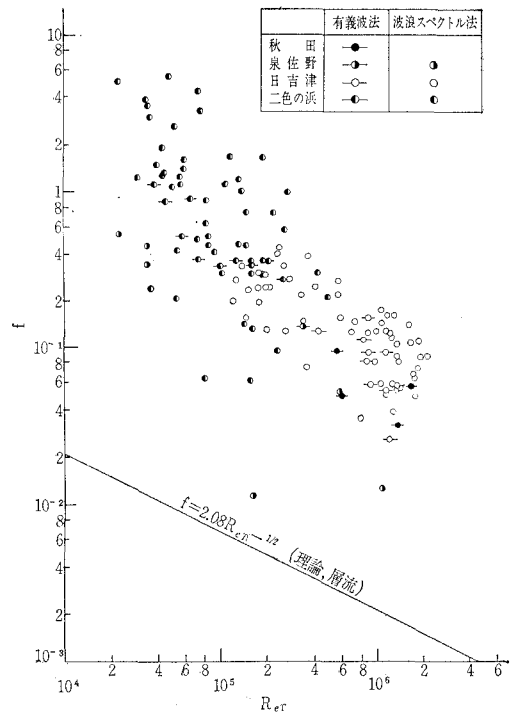


図-7 は、図-6 から、有義波法によって求めた f の値を取り出してプロットしたものである。この図をみると、有義波法によって求めた f の値は、 R_{eT} の値が 4×10^4 から 2×10^6 へ増大するにつれて、層流境界層にもとづく理論値のほぼ 100 倍から 10~70 倍になっていることがわかる。

図-8 および 図-9 は、それぞれ波浪スペクトル法および有義波法によって求めた f の値を、 h_N/L_N によって区分しプロットしたものである。これらの図をみると、 R_{eT} の値が小さくて f の値が大きい点は、 h_N/L_N が比較的大きい場合であることがわかる。いま、便宜的ではあるが、 $h_N/L_N < 0.2$ の点だけに着目すれば、図-8 に示した f の値は、かなりまとまった傾向を示し、 R_{eT} の

図-7 有義波法によって求めた海底摩擦係数と波に関する Reynolds 数との関係

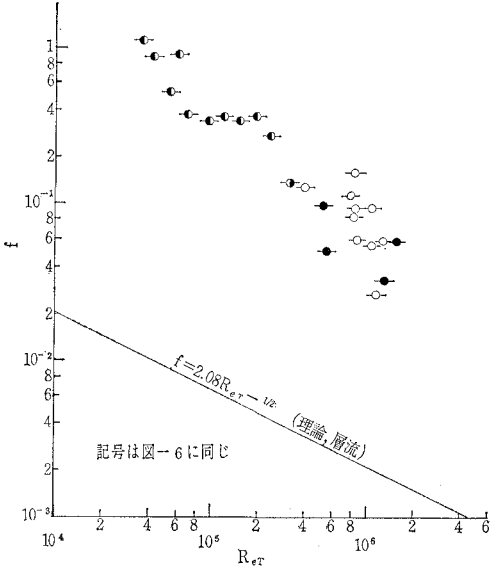
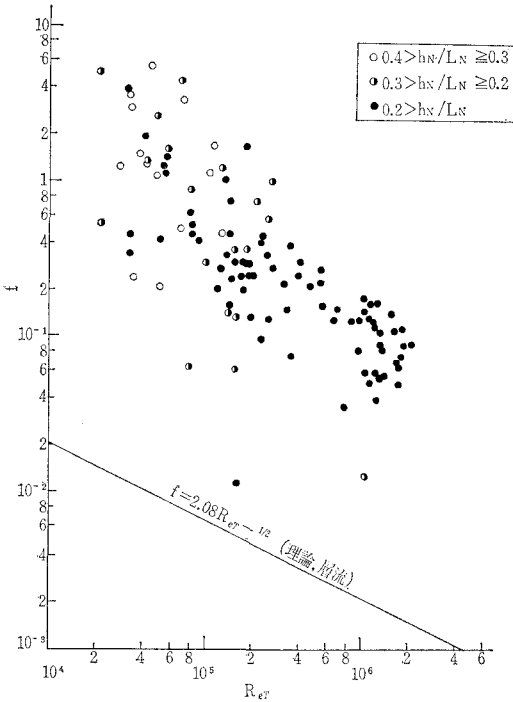


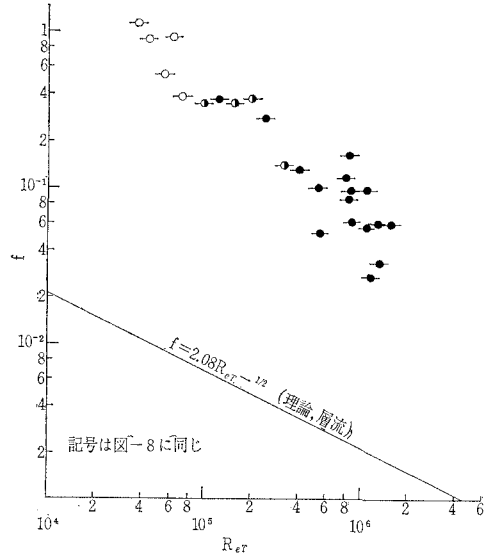
図-8 h_N/L_N によって区分した f と R_{eT} との関係 (波浪スペクトル法)



値が 3×10^4 から 2×10^6 へ増大するにつれて、層流境界層にもとづく理論値のほぼ 40~200 倍から 20~100 倍になっていることがわかる。また、同様に、図-9 からは、 R_{eT} の値が 10^5 から 2×10^6 へ増大するにつれて、層流境界層にもとづく理論値のほぼ 70 倍から 10~70 倍になっていることがわかる。

以上、ここで解析した波浪資料は、風の影響下におけ

図-9 h_N/L_N によって区分した f と R_{eT} との関係 (有義波法)



る波浪の資料であり、多かれ少なかれ風の波におよぼす効果を含めたまま海底摩擦として求めたものであるから、今後、風の波におよぼす効果をくわしく調べる必要がある。

5. 結 語

以上、著者らは二色の浜海岸における波浪観測の結果にもとづいて、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から、各周期に対する海底摩擦係数を求めて、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、陸側の波浪観測地点の水深と陸側の有義波の波長あるいは陸側の波浪スペクトルの成分波の波長との比、 $h_N/L_N < 0.2$ の場合には、二色の浜海岸において有義波法から求めた海底摩擦係数の値は、0.28 と 0.37、波浪スペクトル法からは 0.063~4.00 という値を得た。これらの値は、浅海における風波予知図を作製するに際して 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、この海岸での海底摩擦係数の値と秋田海岸、泉佐野海岸、および日吉津海岸での値から、有義波法によって求めた海底摩擦係数の値は、波に関する Reynolds 数 R_{eT} が大きいほど小さくなる傾向があり、 $h_N/L_N < 0.2$ の場合を考えれば、 R_{eT} の値が 10^5 から 2×10^6 に増大するにつれて、層流境界層にもとづく理論値のほぼ 70 倍から 10~70 倍になっていることを見出だした。

さらに、波浪スペクトル法によるものでも、同じ傾向が見出だされるが、かなりばらつき、 $h_N/L_N < 0.2$ の場合には、 R_{eT} の値が 3×10^4 から 2×10^6 に増大するにつれて、層流境界層にもとづく理論値のほぼ 40~200

倍から 20~100 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、風の波におよぼす効果を調べることで、海底の状態をよく調べることで、波浪スペクトルの各成分波の干渉を調べることで、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の方々に絶大なご援助をいただき、また資料の整理や計算に際して、防災研究所の人見哲夫氏には大いに助力をいただいた。ここに心から感謝するしだいである。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) 岩垣雄一・柿沼忠男：浅海における波浪スペクトルの変形に関する二、三の実例，第 11 回海岸工学講演会講演集，昭 39. 11，pp. 49-55.
- 2) Bretschneider, C.L. : Generation of Wind Waves over a Shallow Bottom, B.E.B. Tech. Memo. No. 51, 1954, pp. 1-24.
- 3) 岩垣雄一・柿沼忠男：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，京都大学防災研究所年報第 8 号，昭 40. 3，pp. 379-396.
- 4) Eagleson, P.S. : Laminar Damping of Oscillatory Waves, Proc. A.S.C.E., Vol. 38, No. HY 3, 1962, pp. 155-181.
- 5) 柿沼忠男・宮井 宏：波浪スペクトルの変動性について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭 39. 11，pp. 67-68.
- 6) 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. 3，pp. 459-478.
- 7) 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.
- 8) Bretschneider, C.L. : Modification of Wave Spectra on the Continental Shelf and in the Surf Zone, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., 1963, pp. 17-23.
- 9) 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. 3，pp. 21-42.
- 10) 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 37.10，pp. 81-84.