

海岸波浪の予知に関する研究（第2報）

—大瀧海岸における浅海波の推算—

柿沼忠男・石田 昭

STUDIES ON WAVE FORECASTING (2nd Report)

—Estimation of Shallow-water Waves off the Ōgata Coast—

By Tadao KAKINUMA and Akira ISHIDA

Synopsis

Wave forecasting is one of the most important problems in coastal engineering at present. The problem of forecasting shallow-water waves is, however, somewhat handicapped by lack of adequate data for storm winds and waves.

In this paper, the graphical approach by Bretschneider in 1954 for wind waves in shallow water is discussed, and a modified new graphical approach is proposed. The significant wave heights and periods estimated by this approach are compared with those observed off the Ōgata coast. It should be noted that the relationship between bottom friction factors and wave Reynolds numbers off some Japanese coasts obtained by Iwagaki-Kakinuma (1966) are reasonable for the significant wave method.

1. 緒 言

海岸構造物を設計する場合には、外力としての設計波を決定することが必要になる。海岸構造物は通常水深 20 m 程度以下の領域に構築するのが普通であるから、そうした浅海領域における海岸波浪を適確に予知あるいは追算することが要求される。こうした浅海における海岸波浪の推算は、たいていの場合、浅水、屈折、浸透、および海底摩擦の諸効果を沖波の推算値に考慮した Bretschneider の方法¹⁾によって行なわれている。

この論文は、そうした Bretschneider の方法に若干の疑問点があるのを指摘すると同時に、移動性風域に対する沖波の予知法の一つである岩垣—柿沼による修正 Wilson 法²⁾を浅海に拡張した新しい一方法を提案し、大瀧海岸における波浪観測値と比較検討したものである。

2. 資料の整理

(1) 海上風の推定

推定しようとする領域は、昭和41年11月下旬～42年1月上旬の日本海側で、北緯 35～45° にあるので、北緯 40° に対する海上風と傾度風との間の経験的な関係³⁾、すなわち、海上風の傾度風に対する風向偏角 17°、風速比 0.67 を適用した。使用した天気図は、中型天気図（3時、15時）、日刊天気図（6時）、および極東天気図（Ⅱ）（9時、12時、21時）であるが、空気密度としては、便宜上、25°C で 950 mb における値 $1.3 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$ を採用し、傾度風の算定には、北緯 40° として Humphrey の数表を用いた。

(2) 波浪実測値

新潟県大潟海岸(北緯 37°13', 東経 138°19') の水深 6~7m のところに設置されている京都大学防災研究所の階段抵抗式波高計による波浪記録を利用した。Fig. 1 は、大潟海岸付近図を示したものであるが、等深線はかなり深いところまで海岸線とほぼ平行に走っていることがわかる。この海岸には、第一人工島といわれる帝国石油KKの栈橋があって、その先端付近に、三角形配列をした3台の波高計が設置されている。Fig. 2 は、そうした波高計の配置を栈橋の鋼管杭(海面付近の直径 565 mm) およびストープ(直径 422 mm) とともに示したものである。

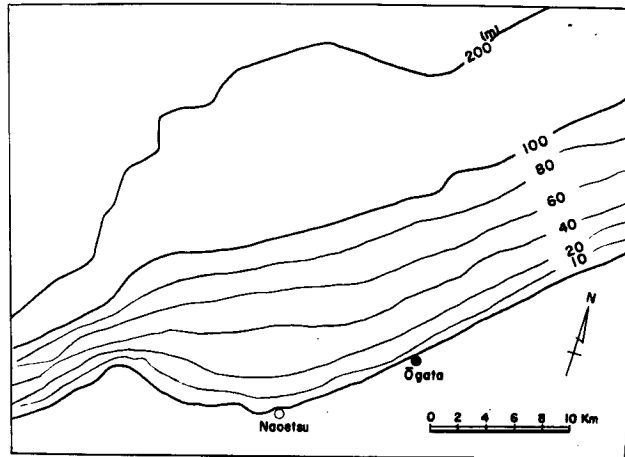


Fig. 1 Topographic map of the Ōgata coast.

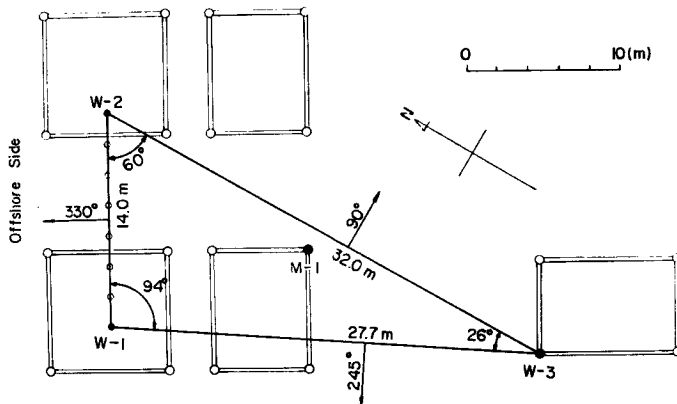


Fig. 2 Array of wave gauges.

Table 1 は、この推算に用いた波浪資料と諸条件を示したもので、有義波とともに、パワースペクトルのピークにおけるエネルギー密度と周波数、波向、および観測地点から約 10 km 離れた直江津港における風の資料が記してある。なお、スペクトル解析は、10分間の波浪記録をデジタル・トレーサ OT-50 によって 1 sec ごとに読みとり、lag 40, 自由度ほぼ 30 とし、Blackman-Tukey の方法によって、京都大学のデジタル計算機 KDC-II を用いて行なったが、パワースペクトルの第 1 ピーク付近の高周波側では、 $E_f \sim f^{-n}$ ($n=3\sim 5$) を得た。(Fig. 3)

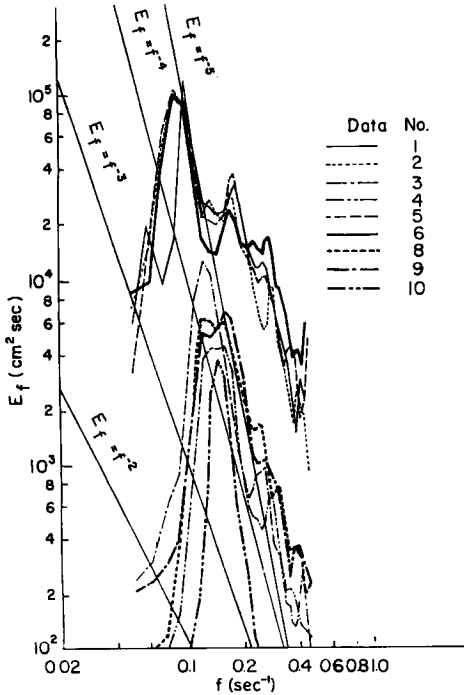


Fig. 3 Power spectra.

3. 波浪推算法

1) Bretschneider の方法

Fig. 4 は、吹送距離 F_0 までの領域を深海として描いた Bretschneider の方法¹⁾の説明図である。 F_0 まで沖波として発達し、波高 H_0 、周期 T_0 をもった波 (点A) に対して、彼は、うねりの浅海での波高減衰を最初にとり入れ、 $A \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow C \rightarrow B$ の順序で浅海での風波を推算する方法を提案し、海底摩擦係数の値として 0.01 が実測値とよく合うことを示した。しかし、もし、Fig. 4 中、太い点線で示すように、風による発達を先にとり入れて、 $A \rightarrow a' \rightarrow b' \rightarrow B'$ の順序で推算すれば、波高と周期の値によって発達と減衰の仕方が異なることから、 B' は B と必ずしも一致しないであろう。結局、同一現象において、推算する順序が異なることによって、異なった結果が生ずることになり、しかも、海底摩擦効果を先にとり入れて推算しなければならない理由はない。また、周期として $(T_1 + T_2)/2$ を与えていることも不明確である。

Table 1 Wave data and conditions

Data No.	Date and time (Dec., 66)	Significant wave (St. No. W-2)		Spectral peak (St. No. W-2)			Wind at Naoetsu		Wave direction
		Height (m)	Period (sec)	First peak	Second peak	Speed (m/sec)	Direction		
				Energy density (cm ² sec)	Frequency (sec ⁻¹)	Energy density (cm ² sec)	Frequency (sec ⁻¹)		
1	1 st, 1200	3.33	11.0	1.65×10^5	0.087	3.22×10^4	0.187	12.6	N to NNW
2	1 st, 1400	3.48	10.7	9.91×10^4	0.087	—	—	11.2	NW
3	10 th, 0900	0.93	6.8	1.24×10^4	0.125	—	—	3.0	SSE
4	10 th, 1600	0.62	6.2	4.34×10^3	0.138	—	—	1.4	ENE
5	14 th, 2300	3.21	7.8	1.02×10^5	0.087	3.66×10^4	0.187	8.3	NW to NNW
6	15 th, 0500	2.67	6.9	9.83×10^4	0.100	2.32×10^4	0.175	4.5	NW
7	15 th, 0900	1.52	7.0	*	*	*	*	1.7	S
8	31 st, 1800	1.21	8.8	6.02×10^3	0.125	—	—	3.4	S
9	31 st, 2200	1.10	8.5	5.11×10^3	0.125	6.63×10^3	0.163	4.1	SSW
10	1 st Jan., 67, 1600	0.50	6.5	3.86×10^3	0.150	—	—	3.7	SSW

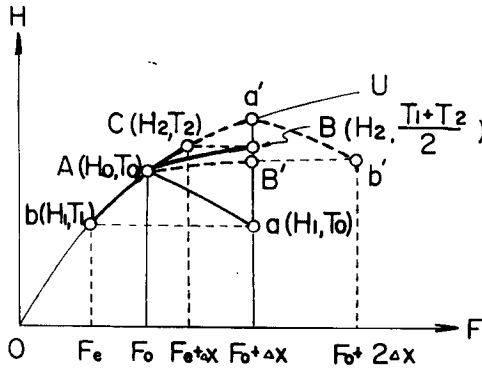


Fig. 4 Bretschneider's method.

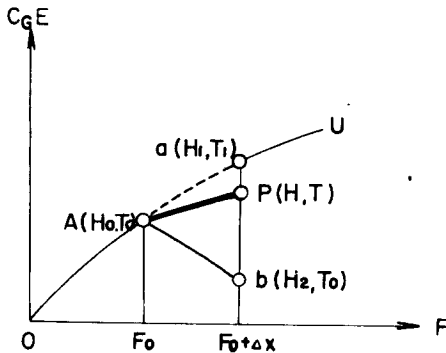


Fig. 5 Authors' method.

って、 $F_0 + \Delta x$ における $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の関係が求まるので、浅海波に対する Bretschneider の観測結果^{1),4)}

$$gT_{1/3}/2\pi U = 2.82(gH_{1/3}/U^2)^{0.57} \quad (0.01 \leq gh/U^2 \leq 1.0) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 U : 風速、 h : 水深、を併用することによって、点Pの有義波高と有義波周期を算定する。

4. 波浪の推算結果

2. 得た海上風の分布図から、波浪推算地点に影響があると思われる16方位ではかった3方向について、有義波法、すなわち、沖波に対しては、岩垣一柿沼の方法、浅海では、新しく提案した方法、によって推算した。なお、深海におけるうねりの減衰の推算には、Bretschneider の予知曲線を用いた。

この結果、沖波として卓越波高をもたらす方向は、すべて NNW であった。Table 1 に示した波向は、W-1, 2, 3 (Fig. 2) での波浪記録からパワースペクトル、クロススペクトルを求め、第1ピークの成分波の3点での位相差を算定して、そうした成分波の波向を示したものである。この解析では、浅海において、海底摩擦、屈折、浅水効果を一様な海底勾配に対する Bretschneider-Reid の式にもとづいて考慮したが、推算して得た有義波周期 $T_{1/3}$ estimated に対して、等深線が平行な海岸として求めた波浪推算地点での波向は、沖波の波向 NNW より W $\sim 7^\circ 50' \sim 12^\circ 20'$ (後に示すような $2/3 T_{1/3}$ estimated に対しては $4^\circ 20' \sim 9^\circ 20'$) 傾いている結果を得た。こうした波向と Table 1 における波向とは、比較的好く一致している。

Fig. 6 は、種々の海底摩擦係数 f の値による有義波高の推算値と実測値とを比較したものである。また、

(2) 新しく提案する方法 (Fig. 5)

岩垣一柿沼²⁾にしたがって、波の発達状態を規制するものは、エネルギー輸送量であると考え、風と海底摩擦などの効果を同時に考慮する。

Fig. 5 は、吹送距離 F_0 までの領域を深海として描いた新しく提案する方法の説明図である。 F_0 まで沖波として発達し、エネルギー輸送量 $(CgE)_A$ (このときの波高を H_0 、周期を T_0 とし、点Aで示す) をもった波は、 Δx 進んだ後に、風速 U によって $(CgE)_a - (CgE)_A$ だけ増加して $(CgE)_a$ (このときの波高を H_1 、周期を T_1 とし、点aで示す) にまで達する。また同時に、 $(CgE)_A$ は海底摩擦など浅海における影響をうけて、 $(CgE)_A - (CgE)_b$ だけ減少して $(CgE)_b$ (このときの波高を H_2 、周期を T_0 とし、点bで示す) に達する。以上のことから、吹送距離 $F_0 + \Delta x$ における CgE (このときの波高を H 、周期を T とし、点Pで示す) は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} CgE &= (CgE)_A + [(CgE)_a - (CgE)_A] \\ &\quad - [(CgE)_A - (CgE)_b] \\ &= (CgE)_a + (CgE)_b \\ &\quad - (CgE)_A \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここに、 Cg : 群速度、 $E : 1/8\rho gH^2_{1/3}$ 、 ρ : 海水の密度、 g : 重力の加速度である。式 (1) によ

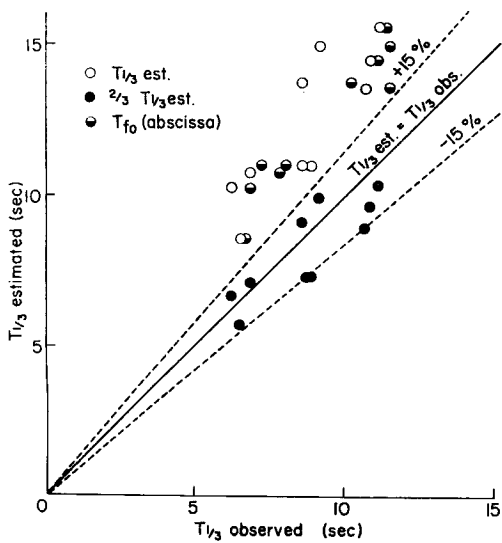


Fig. 7 Comparison of the estimated significant wave periods with the observed.

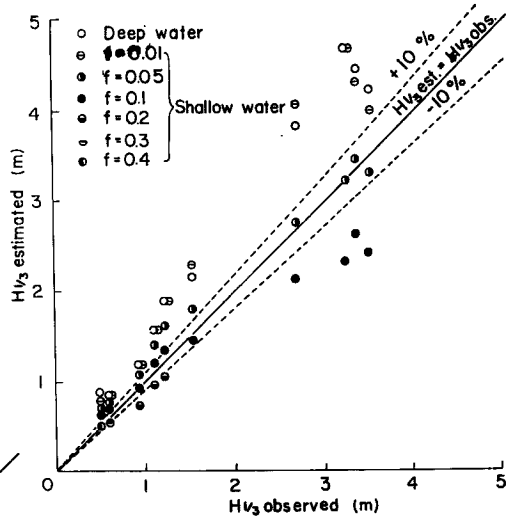


Fig. 6 Comparison of the estimated significant wave heights with the observed.

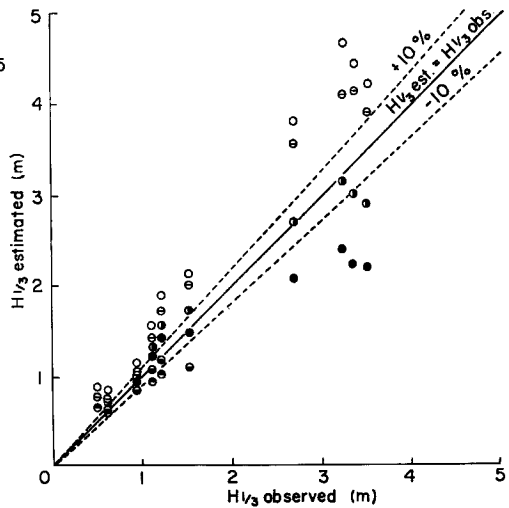


Fig. 8 Comparison of the estimated significant wave heights used $2/3 T_{1/3 est.}$ with the observed. The symbols are the same as Fig. 6.

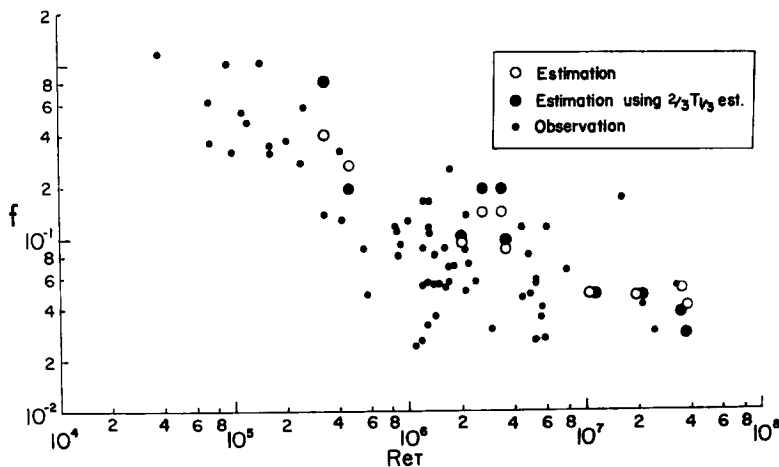


Fig. 9 Relationship of bottom friction factor against wave Reynolds number.

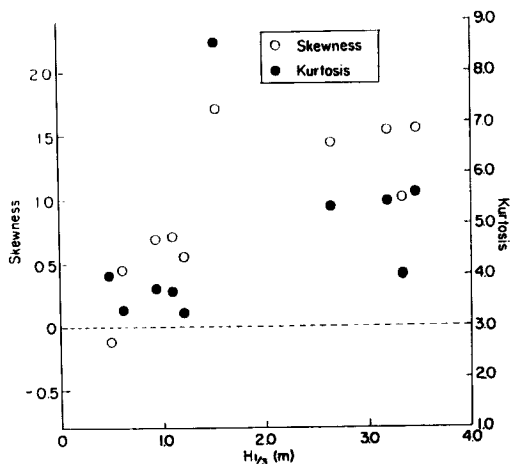
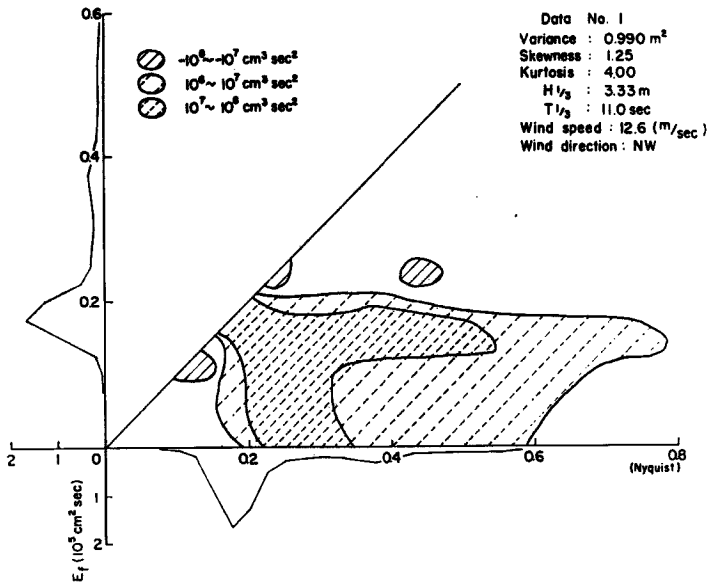


Fig. 10 Skewness and kurtosis (Data No.1~10).

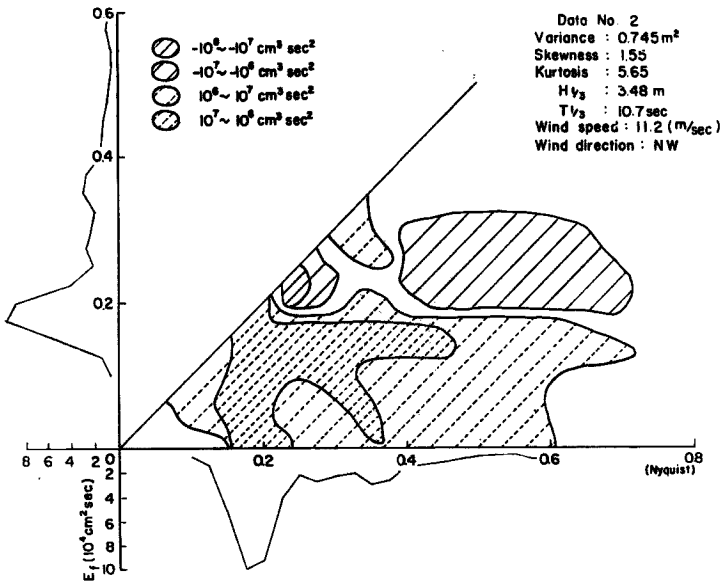
Fig. 7 は、有義波周期の推算値と実測値とを比較したものであるが、図中には、スペクトルのピーク周期に対するものも描かれている。Fig. 8 は、Fig. 7 からわかるように、有義波周期の推算値が実測値のほぼ $3/2$ 倍であることに着目し、推算値の $2/3$ 倍の周期を用いて、種々の f に対する浅海での有義波高を推算し、実測値と比較したものである。

Fig. 9 は、こうした両者の方法によって得た有義波高の推算値と実測値とが一致する海底摩擦係数 f の値を、従来の観測値⁹⁾ とともにプロットしたものである。Fig. 9 をみると、両者の f の値は大差がなく、しかも、これまで観測によって得た f の値の範囲内にあることがわかる。

Fig. 10 は、Table 1 に示した波浪資料の momental skewness および kurtosis の値 (読みとり間隔 1 sec, 記録の長さ 10 min) を、横軸に有義波高 $H_{1/3}$ をとってプロットしたものである。この図をみると、有義波高 1.52 m の資料番号 7 を除けば、この解析に用いた波浪資料は、有義波高の値が小さければ Gauss 分布に近く、大きいほど Gauss 分布からはずれ、しかも、たいいていの資料が正の skewness をもっていることがわかる。なお、Fig. 11 (a)~(j) には、1 Nyquist=0.5 cps として、各成分波間の非線型干渉の程度

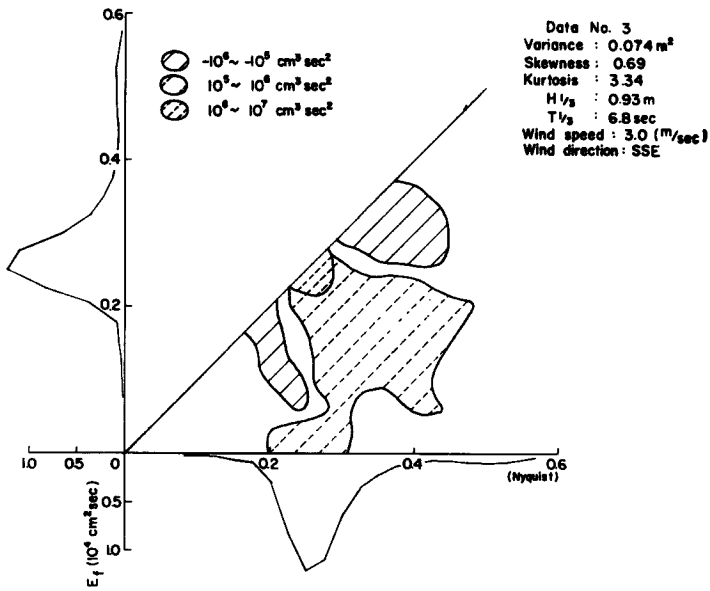


(a)

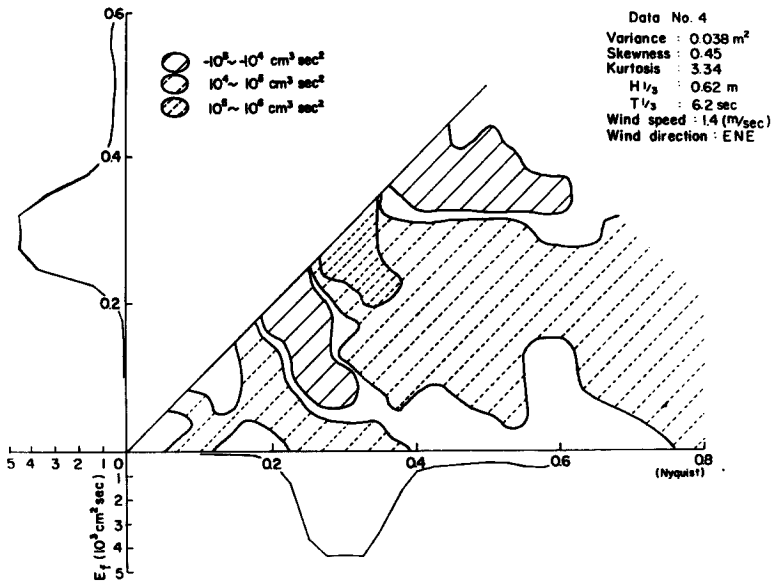


(b)

Fig. 11 (a)~(b) Bispectra (1 Nyquist=0.5 cps).

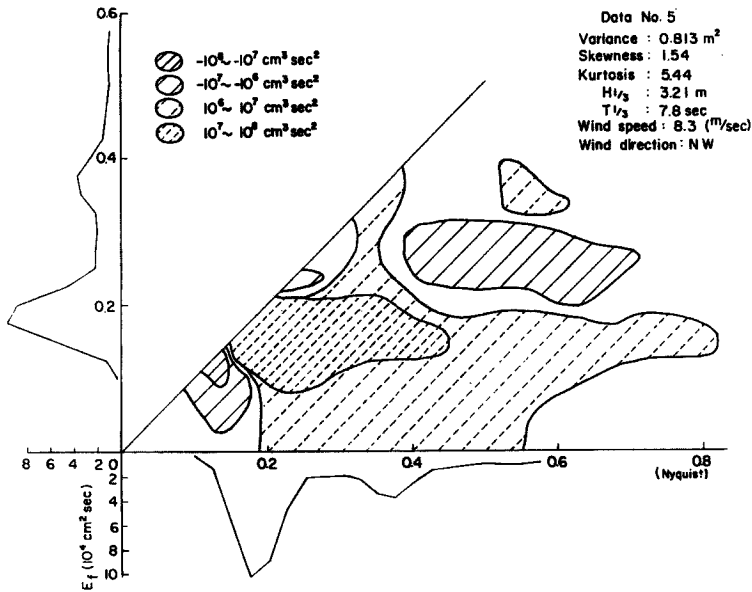


(c)

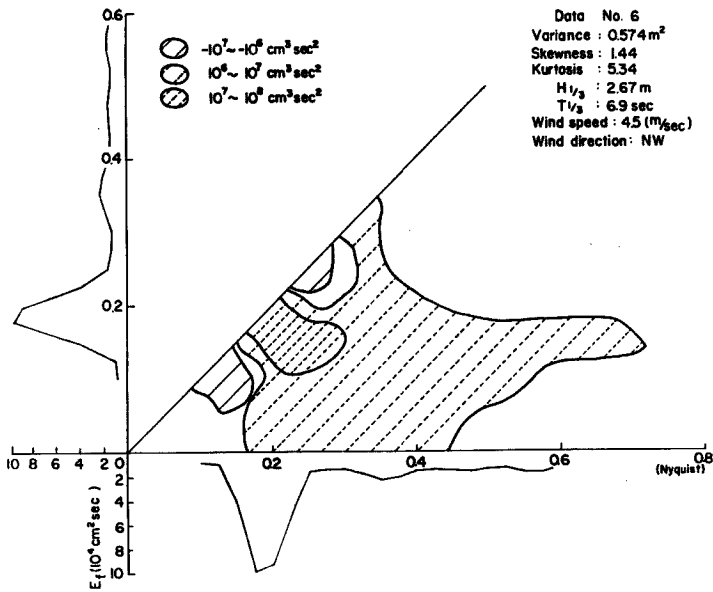


(d)

Fig. 11 (c)~(d) Bispectra (1 Nyquist=0.5 cps).

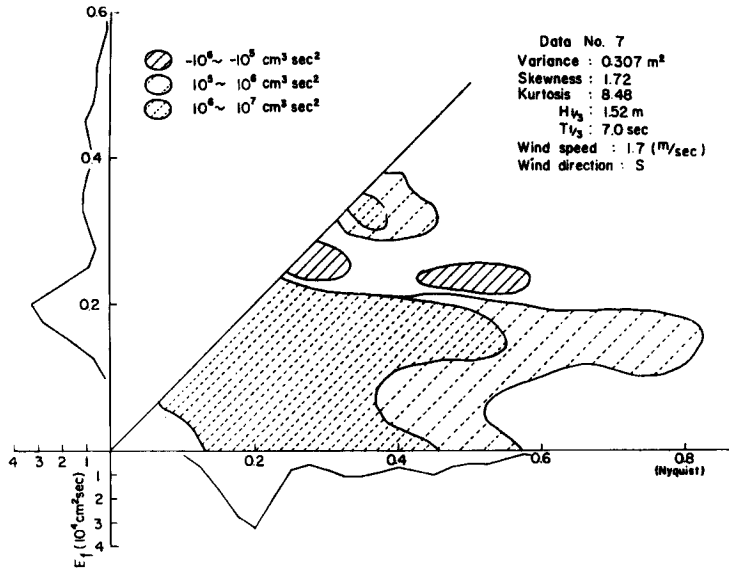


(e)

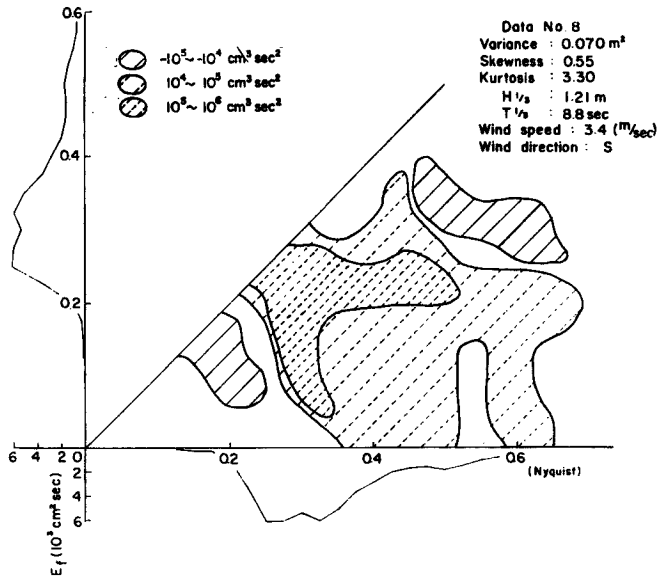


(f)

Fig. 11 (e)~(f) Bispectra (1 Nyquist=0.5 cps).

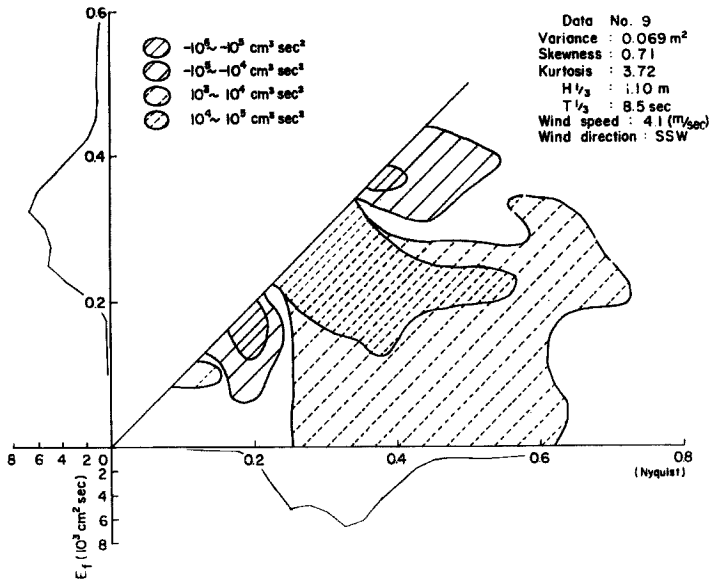


(g)



(h)

Fig. 11 (g)~(h) Bispectra (1 Nyquist=0.5 cps).



(i)

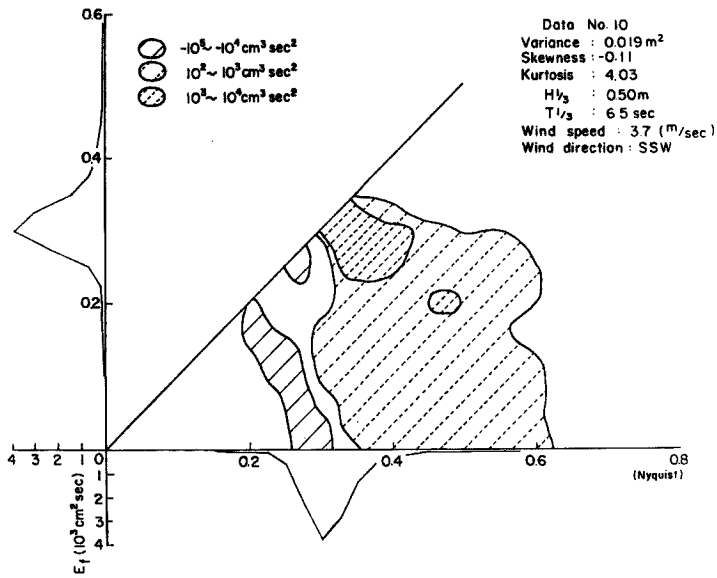


Fig. 11 (i)~(j) Bispectra (1 Nyquist=0.5 cps).

を示す bispectra がプロットしてある。

5. 結 語

以上、著者らは、沖波の発達とうねりの深海における減衰の推算法として、それぞれ、岩垣一柿沼の修正 Wilson 法と Bretschneider 法を用い、さらに浅海波の発達の推算法として Bretschneider 法を改良した新しい方法を適用して、大瀧海岸における波浪を推算し、実測資料と比較検討した。この場合、いろいろな数値の海底摩擦係数を用いて波高を試算したが、その中で実測値に適合する海底摩擦係数を選び出し、波の Reynolds 数との関係を調べた結果、これまでに観測して得られている両者の関係とほぼ一致することから、それがかなり妥当なものであることがわかった。

しかし、ここで推算した結果は、たいいていの場合、波浪推算地点においてうねりとなっているので、今後はさらに適用例を増加させて、浅海における海岸波浪の予知法の合理化と精度向上に努めたいと考えている。

最後に、この研究を進めるのにあたり、終始、御激励、御指導を賜わった岩垣雄一教授に深く感謝の意を表するとともに、資料の整理や計算に大いに助力を頂いた京都大学大学院学生門司剛至氏と防災研究所の人見哲夫技官に心から謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Bretschneider, C.L.: Generation of Wind Waves over a Shallow Bottom, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 51, Oct. 1954, pp.1—24.
- 2) 岩垣雄一・柿沼忠男：海岸波浪の予知に関する研究（第1報）—伊勢湾台風時における沖波の推算—, 京都大学防災研究所年報第5号A (10周年記念号), 昭37.3, pp.284—295.
- 3) 井島武士：海岸・港湾測量, 昭35, p.13.
- 4) 坂本信雄・井島武士・佐藤昭二・青野 尚：浅海における風波の図式計算法, 第7回海岸工学講演会講演集, 昭35.11, pp.137—147.
- 5) 岩垣雄一・柿沼忠男：現地海岸の海底摩擦係数について(2), 第13回海岸工学講演会講演集, 昭42.12, pp.21—29.