

秋田海岸における波浪特性について

榎 国 夫

On the Characteristic of ocean waves on the coast of AKITA

Kunio ENOKI

(昭和46年10月30日受理)

1 緒 言

近年、海洋開発の発展に伴い、その基礎的研究の成果の蓄積及び海岸構造物に対する施工技術の進歩等が相まって、その対象を沿岸より近海へ、更に沖側へと領域を拡大しつつある。この様な大規模な海洋開発において、沖波の近海への侵入に対する問題すなわち大陸棚に入射する長波の変形、又吹送流、沿岸流等々、種々の問題点が提起されている。今回はこれら諸問題の中から海岸に到達した波浪に着目し、その特性の解析を試みたものである。波浪は不規則波であり、この不規則波を解明するには、一般に、波浪のデーターを統計的に解析し、その特性を求める有義波法と不規則波のエネルギースペクトルに関し、その各周波数成分を検討し、波浪の特性を求める波浪スペクトル法とがある。本報告に於いては、秋田港と八森港の2地点に於ける波浪データーを用い、特に、沿岸構造物、或いは浅海漁場に多大の影響を与える季節風が卓越する期間を解析の対象とした。

秋田港におけるデーターは運輸省第一港湾建設局秋田港工事事務所で観測されたものを使用した。観測機器は水圧式摺動抵抗型波高計であり、設置水深は13mである。この附近の海底勾配はおおよそ1/100とみなされ、底質は細砂である。この様な海底形状を持つ地点に波浪が入射した場合、沖側から観測地点に到達する迄にかなりの海摩底擦による波高減衰が生じているものと思われる。冬期間の卓越風向は、西を中心に西南西から西北西の間にその殆んどが含まれている。一方、八森港におけるデーターは、秋田県八森第2種漁港で観測されたものを使用した。観測機器は水圧式摺動抵抗型波高計であり、設置水深は11mである。又、海底勾配は約1/10であり、相当な急勾配である。この為、沖波は海岸附近迄浅海変形を受けず侵入し、何らかの disturb source があると、大きな反射や分散を生じる事になる。

2 水圧式波高計特性

データー解析に際して以上の地形的効果を考慮する事と共に、観測機器である水圧式波高計の特性を知る事が大切である。図-1の様に水深が b の海に波高 H 、波長 L の波が進んでいる場合を考える。此の時の波の周期を T とすると、微小振小振中波理論による波の波長 L は、

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots(1)$$

(1)式に於いて、水深が波長の1/2より深い時は、

$$\tanh \frac{2\pi h}{L} \approx 1$$

の近似が成り立って(1)式は

$$L_0 = gT^2 / 2\pi \dots\dots\dots(2)$$

と書き表わされる。ここに L_0 は深海波としての波長である。 $h/L = 0.5$ の時の(2)式の近似誤差は0.4%である。故に今回の解析において、周期を約10secとすると水深80mより浅い所では、浅海変形を受けた有限振幅波を観測している事になる。又、水深が波長の1/20より浅い時は、

$$\tanh \frac{2\pi h}{L} \approx 2\pi h/L$$

の近似が成り立って(1)式は

$$L = \sqrt{gh} T$$

と表わされる。云々ゆる長波である。種々の波に対する波長の関係を述べて来たが結局、海の波、一般に波浪に

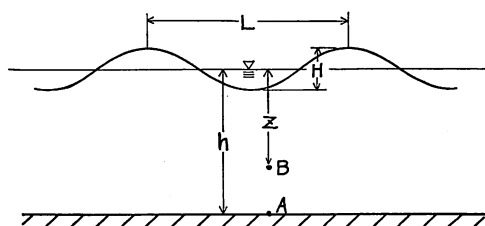


図1 水波の諸元

において、水深と周期が判かっていれば、波長を求める事が出来る。又図において水面からZの深さをの点Bでの圧力波高 $4PB/\rho = P_2$ は理論的には次の様に与えられている。

$$P_2 = \left(\frac{4PB}{\rho} \right) = H \frac{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \dots\dots(3)$$

ここで ρ は海水の密度で 1.03 。従って水底の点Aでの圧力波高 $4PA/\rho = P_1$ は(3)式で $Z = h$ とおいて、

$$P_1 = \frac{(4PA)}{\rho} H = \frac{1}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \dots\dots\dots(4)$$

故に、点A又は点Bに設置した水圧式波高計の記録によって、その周期Tと圧力波高Pが求められれば、(1)式からLが判り、それをういて(3)又は(4)式からHを求める事が出来る。

$$\therefore H = P_2 \frac{\cosh \frac{2\pi h}{L}}{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}$$

又は

$$H = P_1 \cosh \frac{2\pi h}{L}$$

以上で求めた波高は、水底圧力の変動を測って、それを水面波高に換算する訳であるから、直接水面波形を測って求めた水面波高との間に若干の誤差が含まれる事になる。この為の検定は少々手数がかかるので過去の経験的結果により、水圧式波高形で求めた水面波高1.3倍した値を水面波高として用いる事にする。

よって前式はそれぞれ

$$H = 1.3P_1 \cosh \frac{2\pi h}{L}$$

$$H = 1.3P_2 \frac{\cosh \frac{2\pi h}{L}}{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}$$

で与えられる。

3 出現波高、周期

海の波は、いろいろな値をもつ波高・周期および波向を持った波が重複して出来た不規則波である。その性質は複雑な様相を呈する。しかし、海岸構造物を設計施工するに当っては、その複雑な波を代表する波高、周期等を与える必要に迫られる。そこでこの波浪を統計的に処理しようとする試みがなされた。すなわちある波浪観測時間(20分間 or 10分間)中に、あらわれた波形記録のうちで、波高の最も大きいものから、順々に全体の1/3の波をとり、それらの波高、周期の平均値をとるもので

有義波と呼ばれており、1/3波とも表わされる。その波高、周期をそれぞれ、有義波高或いは $H_{1/3}$ 、有義周期或いは $T_{1/3}$ で表わす。同様に、最大波高 H_{max} 、1/10最大波高 $H_{1/10}$ 、および平均波高 H_{mean} 等もその用途により使用される。

表 1 波高、周期(秋田港)

日 時		平均波	1/3波	1/10波	最大波
S 44. 1. 15 18:00h	波高 [m]	1.98	2.73	3.08	3.58
	周期 [sec]	10.30	10.28	10.10	10.5
S 44. 3. 22 22:00h	波高 [m]	3.10	4.28	4.68	4.68
	周期 [sec]	11.20	12.34	9.60	12.3
S 44. 3. 23 0:00h	波高 [m]	3.56	4.64	5.09	5.20
	周期 [sec]	12.09	12.25	12.35	11.7
S 46. 1. 20 12:00h	波高 [m]	2.50	3.74	4.47	4.77
	周期 [sec]	10.15	9.77	9.77	10.2
S 46. 2. 1 12:00h	波高 [m]	3.12	4.79	5.52	6.11
	周期 [sec]	13.40	12.43	12.45	12.3

表 2 波高、周期(八森港)

日 時		平均波	1/3波	1/10波	最大波
S 42. 1. 14 13:00	波高 [m]	3.06	3.98	4.35	4.71
	周期 [sec]	11.51	12.07	10.58	10.5
S 42. 1. 15 15:00	波高 [m]	2.56	3.30	3.73	4.28
	周期 [sec]	11.8	11.24	10.88	9.41
S 42. 3. 27 19:00	波高 [m]	2.52	4.13	4.83	4.83
	周期 [sec]	9.13	9.54	8.82	12.3

表 3

日 時	$H_{1/10}/H_{1/3}$	$H_{1/3}/H_{mean}$	$H_{max}/H_{1/3}$
秋 田 港			
S 44. 1. 15 18:00	1.12	1.37	1.28
S 44. 3. 22 22:00	1.09	1.38	1.12
S 44. 3. 23 0:00	1.09	1.31	1.12
S 46. 1. 20 12:00	1.19	1.49	1.27
S 46. 2. 1 12:00	1.15	1.28	1.27
八 森 港			
S 42. 1. 14 13:00	1.09	1.30	1.18
S 42. 1. 15 15:00	1.13	1.28	1.29
S 42. 3. 27 19:00	1.17	1.35	1.37

秋田港と八森港における波浪データの各波高、周期の数列をそれぞれ、表-1、表-2で示した。

これらの各波高の間には次の関係があるとされている。

$$H_{1/10} / H_{1/3} = 1.3$$

$$H_{1/3} / H_{mesn} = 1.4 \sim 1.6$$

$$H_{max} / H_{1/3} = 1.8 \sim 1.9$$

表一、表二に於いての上の関係を実算したのが表一、三である。観測結果から求められた数値は例よりも全般に小さい。これは波浪データーを選ぶ際に観測時間(10分間)中を通して記録紙の振巾が大きい(すなわち波高が大きい)ものを選んだため、各波高の平均がそれほど差がなくなったためと推測される。観測データーをこの様な統計的処理で検討する限りにおいては、秋田港における波浪の特性と八森港におけるそれとには、大きな差異は認められない。しかし前述の如くこの二つの港湾の海底地形の構造を比較した場合相当な違いがあった。この影響が当然波浪にも出現して来るものと考えられるものでここでスペクトル解析を試みた。

4 スペクトル解析

波浪のスペクトル解析は、観測された波浪データーの特性を解明するために、その性格を特長づけるいくつかの量の間の関係を表わしたものであり、周波数を横軸にそれぞれの周波数に対応する波の振巾の強さを縦軸にとったものと略々考えることができる。この解析方法は、1938年 Taylor が風の擾乱のスペクトル解析の方法を示したのが初めてである。その後、1949年に Tukey が Taylor の auto-correlation でなくて auto-covariance function を導入した。更に Blackman と Tukey は Tukey の方法に改良を加え、現在では多くの研究者によって、この方法を用いた問題研究が行なわれている。今回の解析においては、最初に自己相関関数を求め、更にパワースペクトルを求める方法をとった。パワースペクトルを求める方法をとった。パワースペクトルを求めるには、Wiener Kchintchine の関係式が適用される。すなわち、一般にパワースペクトルを $S(\omega)$ 、自己相関関数を $R(\tau)$ とすると、

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega\tau d\tau$$

自己相関関数 $R(\omega)$ は

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega$$

$$= 2 \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \omega\tau d\omega$$

これらを、電子計算機による数値計算により、その波浪

データーを用いて、求めてやる事にする。まずデーターより、記録波形を等時間間隔 Δt に分割する。

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \dots = t_n - t_{n-1}$$

各時刻 t_n における海面水位 $X(t_n)$ を読みとる。

ラグタイム: $\tau = t_{n+k} - t_n$ に対する自己相関関数を求めると、

$$R(\tau) = \frac{2}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} \eta(t_n) \cdot \eta(t_{n+k})$$

$$k = 0.1.2 \dots n$$

N ; 分割されたデーター総数

$$\eta(t_n); X(t_n) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X(t_n)$$

そこで自己相関関数 $R(\tau)$ をフーリエ変換するとラインパワーは、

$$L_0 = \frac{1}{2m} (R_0 + R_m) + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m-1} R_k$$

$$L_h = \frac{1}{2m} (R_0 + 2 \sum_{k=1}^{m-1} R_k \cos \frac{\pi kh}{m} + R_m \cos \pi h)$$

$$h = 0.1.2 \dots m$$

$$L_m = \frac{1}{2m} \left\{ R_0 + (-1)^m R_m \right\} + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m-1} (-1)^k R_k$$

で与えられる。 L_h を移動平均し、平滑化の定数として Hamming のスペクトルウィンドウを用いる。

結果は角周波数 $\omega(h - \frac{1}{2})$ と $\omega(h + \frac{1}{2})$ の間に含まれるパワースペクトル密度 $S(\omega_h)$ は

$$S(\omega_h) = U_h \Delta t_m / \pi$$

で表わされる。従って角周波数 $\omega_k = \pi h / \Delta t_m$ ($h = 0.1.2 \dots m$) について、 ω_h を横軸上に $S(\omega_h)$ を縦軸上にプロットすればスペクトル密度関数を図示する事が出来る。この時の波の全エネルギーは $S(\omega_h)$ を周波数について積分すると求められる。

$$E = \int_0^{\pi/\Delta t} S(\omega_h) d\omega$$

$$= \sum_{n=0}^k S(\omega_h) \Delta\omega$$

単位記録時間内の波高の分布がレイリー分布をしているものとする、

$$H_{mean} = 1.772 \sqrt{E}$$

$$H_{1/3} = 2.83 \sqrt{E}$$

$$H_{1/10} = 3.60 \sqrt{E}$$

で与えられる。又角周波数 ω と周波数 f および波の周期 T の間には

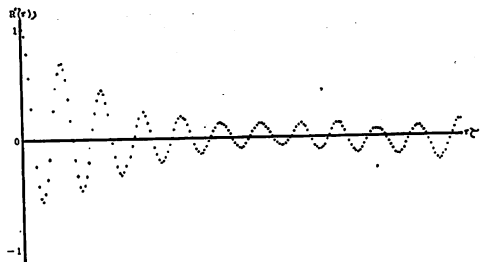


図 2 自己相関関数 (S44.1.15 18:00) 秋田港

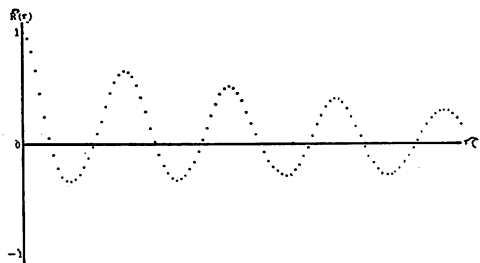


図 3 自己相関関数 (S44.3.22 22:00) 秋田港

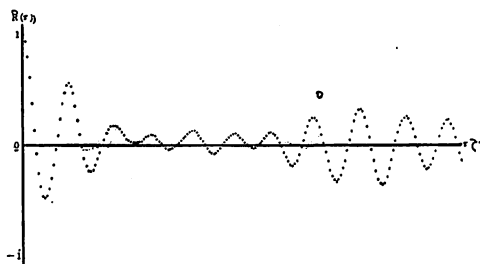


図 4 自己相関関数 (S44.3.24 0:00) 秋田港

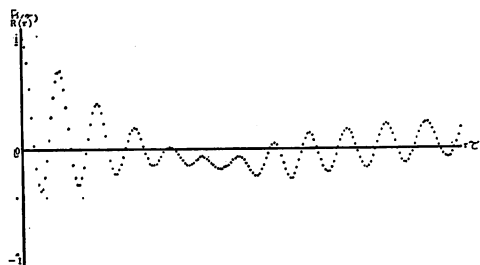


図 5 自己相関関数 (S46.1.20 12:00) 秋田港

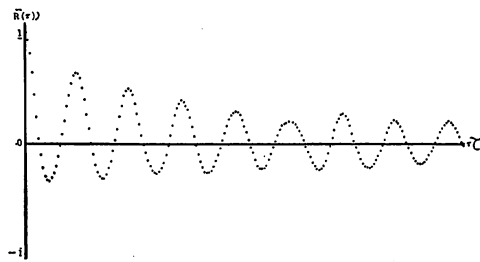


図 6 自己相関関数 (S46.2.1 12:00) 秋田港

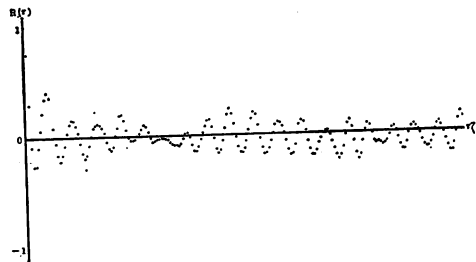


図 7 自己相関関数 (S42.1.14 13:00) 八森港

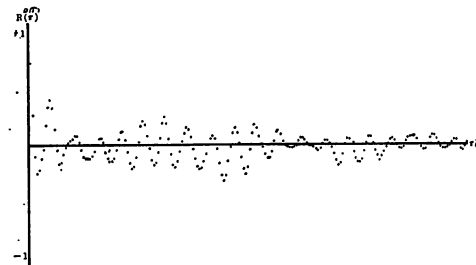


図 8 自己相関関数 (S42.1.14 15:00) 八森港

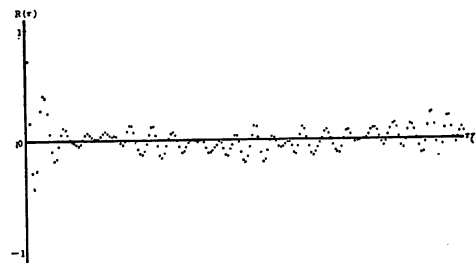


図 9 自己相関関数 (S42.3.27 19:00) 八森港

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$$

の関係がある。
 数値計算の結果を図で示す。
 図一2から図一6迄は秋田港の自己相関関数であり、図一7から図一9は八森港のそれである。縦軸に自己相関関数 $R(\tau)$ を取り横軸にラグタイム τ をとってある。図から判るように殆んど例は $R(\tau) = 1$ より、 τ が大きくなるにつれて、 $R(\tau)$ が一定の時間々隔で振動しながらゼロに収れんしていく事が判かる。これは波浪のデータのなかに、ランダムな成分と周期成分が混在している事を示している。これをさらに、詳細に検討してみると秋田と八森では、かなりの差異が認められる。秋田における自己相関関数の波形は比較的整っているが、八森のそれは相当なバラツキがある。風波の発生段階における差は殆んどないものと考えられるので、これは前述の秋田港と八森港近辺の海底形状の違いによるものと考えられる。秋田におけるそれは、沖波が海底の摩擦により減衰し浅海変形を充分受けて観測点に入射する。その際、短

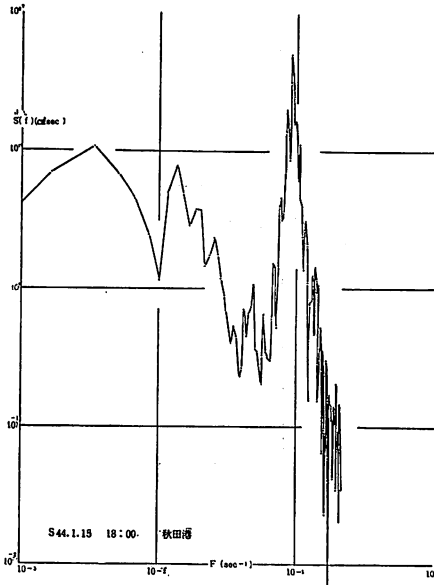


図 10 パワースペクトル

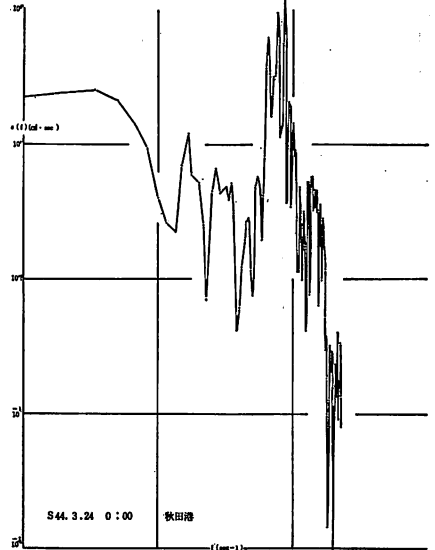


図 12 パワースペクトル

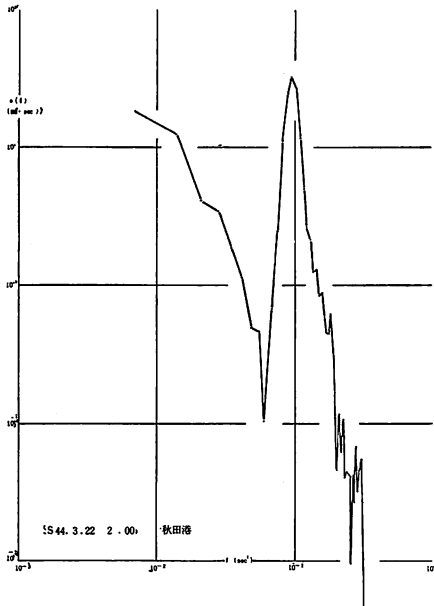


図 11 パワースペクトル

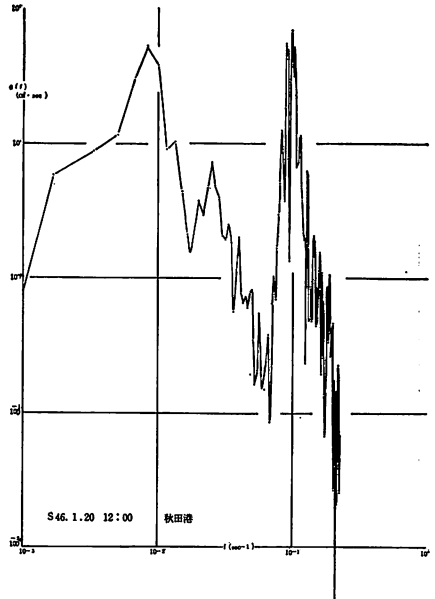


図 13 パワースペクトル

周期成分は消滅していき、周期の大きなものすなわちエネルギーの大きなものだけが生き残って観測される訳である。それに対して八森においては、沖波がすぐ観測点に入射する訳であるから、減衰効果はあまり顕著でなく沖で発生した風波が低周波から高周波までランダムに入り込んで来るものと考えられる。この各周波成分を解明するためにパワースペクトルを求め、それを図示した。図-10から図-14は秋田港におけるパワースペクトルであり、図-15から図-17は八森港のそれである。こ

れから判断すると、スペクトルのピークは共に認められる。第一のピークは、低周波側のもので、秋田港、八森港共に、 $f = 3 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}$ で周則になおすと2分から5分の長周期成分である。これは砕波のエネルギーの一部が長周期の波となって遠く伝わって来ることによる、いわゆる日本海のサーフビートではないかと考えられる。第三のピークは高周波側にあり、周期になおすと9秒から12秒となり、これは風波の卓越同期であり、表-1と表-2を比較してみると明確になる。さて第二

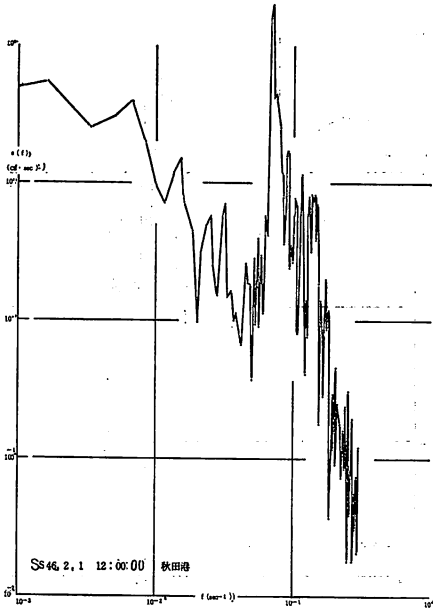


図 14 パワースペクトル

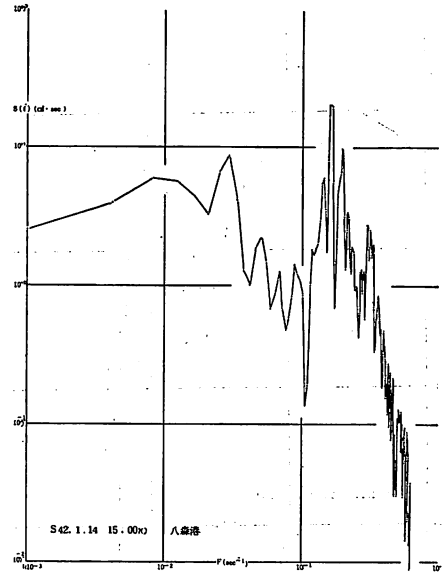


図 16 パワースペクトル

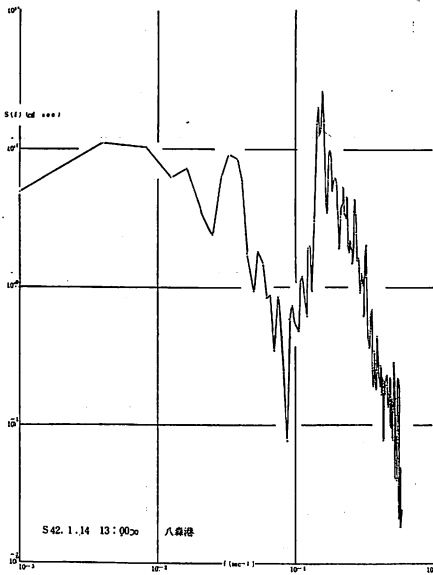


図 15 パワースペクトル

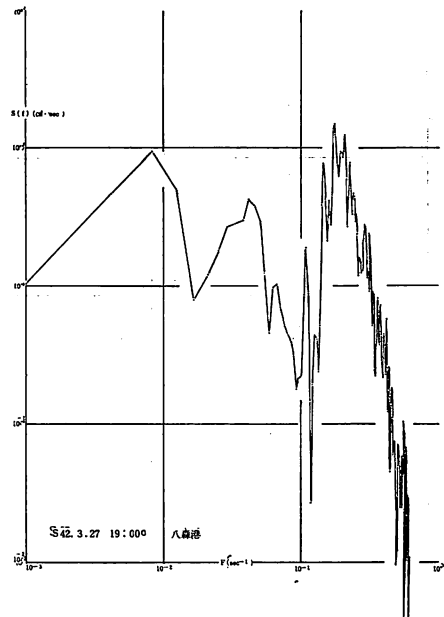


図 17 パワースペクトル

のピークであるが、これは秋田港において $f = 10^{-2} \sim 1.1 \times 10^{-2}$ で周期にすると90秒から100秒である。八森港のそれは30秒から50秒であり、これがこの二つの港のもつ固有の値である。これらの結果からこれら両港における海岸構造物、例えば消波 | においては、設計周波はほぼ10秒前後位にとれば良い事になる。第二のピークはその港湾或いはその附近の scale-effect になるのではないかと思われる。第三のピークより高周波側は、急激な減衰をみせているが、この減衰はほぼ

$$S(f) = 10^{-4} f^{-5}$$

に従うとみられる。

文 献

- 1) The measurement of power spectra, Dover 1958
- 2) スペクトル推定の統計理論, 統計数理研究所 1964
- 3) 波高計による観測データの処理方法

- 4) 不規則な波の入射および反射エネルギースペクトルの測定法について, 第15回海岸工学講演集 1968
- 5) Analysis of Records of Sea Waves;
Proc. Inst. Civil. Eng. Vol. 26, No.10
- 6) 秋田海岸における波浪推算の一例
第10回海岸工学講演集 1963
- 7) The Spectrum of turbulence
- 8) ランダム変動の解析
Proc. Roy. Soc. London, Vol. 169
- 9) 波浪観測データの集中処理方式について
第17回海岸工学講演会論文集 1970
- 10) 計算による波のスペクトルの浅海における変形
第18回海岸工学講演会論文集 1971
- 11) 雑音解析