

スペクトル解析の海岸工学への応用

文献調査委員会

1. はじめに^{1)~3)}

ある海岸が問題にされ、そこに何らかの海岸構造物を造り、襲来する波から海岸を保全しようとする場合、まずそこに襲来する波を正確に実測することが必要になってくる。従来は「有義波高」等という統計的代表値を用いていたが、近年観測計器の発達に伴ない長時間の自記記録ができるようになってきた。それとともに電子計算機が急速に発達、普及したことから複雑な計算が迅速にでき、有用な解析結果が得られるようになった。こういった解析方法の一つに「スペクトル解析」がある。

この解析方法は 1938 年に Taylor が風の擾乱のスペクトル解析の仕方を系統的に記述したのがその最初である。その後 1949 年に Tukey が Taylor の auto-correlation の代りに auto-covariance function を導入し、スペクトル計算結果の有意性の検討ができるようになったので、今日ではこの Tukey の方法がおおむね標準的な計算法になっている。

さらに、1958 年 Blackman と Tukey は Tukey の方法を吟味し、より詳細に検討を加えている。

「スペクトル解析」は海岸工学の分野では先に述べたような波浪観測結果をスペクトル計算するにとどまらず、波の発生問題、海底摩擦等による波浪スペクトルの変形、不規則波の波力スペクトル、さらに表面波の 2 次干渉、波浪の予測フィルター・変換フィルターにまで応用されている。

2. パワースペクトル^{4)~12)}

(1) 計算方法

パワー スペクトルを計算するには、ウィナー・キンチン (Wiener Khintchine) 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 $P(\omega)$ 、自己相関関数を $R(\tau)$ とすると

$$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau \\ = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega\tau d\tau \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega \\ = 2 \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega) \cos \omega\tau d\omega \quad \dots\dots\dots(2)$$

である。

実際に得られたデータから自己相関関数とパワースペクトルを計算する方法をここで述べておこう。ただし、ここでは角周波数 ω ではなく、周波数 f の関数として扱うことにする。

記録波形を時刻 t_1, t_2, \dots, t_N に等分割して、各時刻 t_n での値を $x(t_n)$ とし、

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3 = \dots = t_N - t_{N-1} = \Delta t \quad (3)$$

とした場合、時間的遅れ $\tau = t_{n+k} - t_n$ に対する自己相関関数 R_{xx} は、

$$R_{xx}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} \tilde{x}(t_n) \tilde{x}(t_{n+k}) \\ (k=0, 1, \dots, m) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし

$$\tilde{x}(t_n) = x(t_n) - \bar{x}, \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t_n) \quad \dots\dots(5)$$

である。これをフーリエ変換するとパワー スペクトルが得られる。パワー スペクトルが実数であると仮定して差し支えない場合には

$$P\left(\frac{r}{m} \frac{1}{2\Delta t}\right) = \Delta t \left\{ R_{xx}(0) + 2 \sum_{k=1}^{m-1} R_{xx}(k) \right. \\ \left. \cos\left(2\pi \frac{r}{2m} k\right) + (-1)^r R(m) \right\} \\ (r=0, 1, \dots, m) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし

$$P\left(\frac{-r}{m} \frac{1}{2\Delta t}\right) = P\left(\frac{r}{m} \frac{1}{2\Delta t}\right) \\ P\left(\frac{m+r}{m} \frac{1}{2\Delta t}\right) = P\left(\frac{m-r}{m} \frac{1}{2\Delta t}\right) \quad \dots\dots(7)$$

となる。しかし、記録の長さが有限時間であり、また時間を分割するため ひずみ を生じているので (厳密には積分だから連続変化させなければならない)、この ひずみ を修正するため、つぎの関係式を用いる。

$$\bar{P}\left(\frac{r}{m} \frac{1}{2\Delta t}\right) = \sum_{n=-i}^i a_n P\left(\frac{r-n}{m} \frac{1}{2\Delta t}\right) \\ (r=0, 1, \dots, m) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 a_n はウィンドー (Window) といわれるもので、表-1 の値が用いられる。なお Window につい

表-1 Window

	a_0	$a_1=a_{-1}$	$a_2=a_{-2}$	$a_3=a_{-3}$
Hamming	0.54	0.23	0	0
Hanning	0.50	0.25	0	0
赤池 W_1	0.5132	0.2434	0	0
W_2	0.6398	0.2401	-0.0600	0
W_3	0.7029	0.2228	-0.0891	0.0149

ては赤池によって、くわしい研究が発表されている。

(2) 計算精度・計算誤差

パワー スペクトルの計算手順を具体的に示しながら、計算精度、計算誤差について簡単に述べる。

1) Δt : 読み取り間隔

Δt をあまり大きくとると、不規則波を構成している短い周期の単弦波（以下「成分波」ということにする）は抽出できなくなる。そこで、知りたい成分波の最小周期を T_{min} とすれば、 $T_{min}/2$ の間隔で読み取る必要がある。

2) $\Delta\omega$: パワーを区別したい角周波数の間隔

ΔT : パワーを区別したい周期の間隔

ω_1 と ω_2 とのパワーを区別したいと思えば、 $|\omega_1 - \omega_2| = \Delta\omega$ として 3) 以下の計算を行なう。ここに、

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T - \Delta T/2} - \frac{2\pi}{T + \Delta T/2}$$

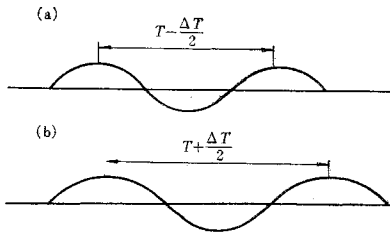
$$= \frac{8\pi \Delta T}{4T^2 - (\Delta T)^2} \dots\dots\dots (9)$$

T : 中心周期

ΔT : 中心周期 T 付近で ΔT を区別する。

簡単に言えば、図-1 (a), (b) の成分波のパワーを区別するということになる。

図-1 2 成分波の区別



3) m : lag (ずらし) の最大値

これは以下の計算できる。

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{m \Delta t} \quad \text{すなわち}$$

$$m = \frac{\pi}{\Delta\omega \Delta t} = \frac{4 T^2 - (\Delta T)^2}{8 \Delta t \Delta T} \dots\dots\dots (10)$$

1), 2) で $\Delta t, \Delta T$ が決まっているので、 m は決まるわけである。

4) f : 自由度

これは計算誤差をどの程度におさえるか、言いかえれ

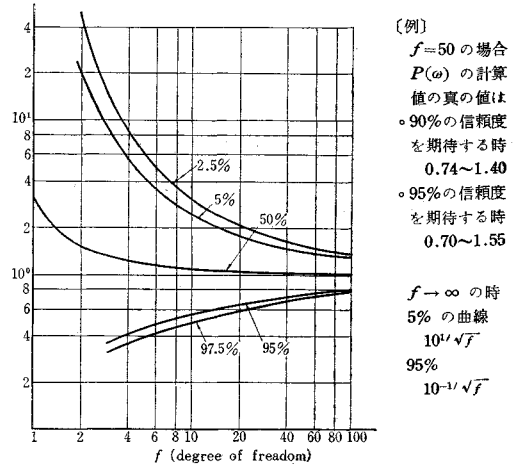
ば計算結果の精度をきめる因子である。自由度 f を大きくとれば計算精度はよくなる。そして f は

$$f = \frac{N - m/4}{m/2} = \frac{2N}{m} - \frac{1}{2} \doteq \frac{2N}{m} \dots\dots\dots (11)$$

(N : 読み取り総数; 後述)

によってきまる。なお、自由度 f と計算精度との関係は図-2 に示した。

図-2 自由度 f と計算精度との関係



$$f = \frac{N - m/4}{m/2} = \frac{2N}{m} - \frac{1}{2} \doteq \frac{2N}{m}$$

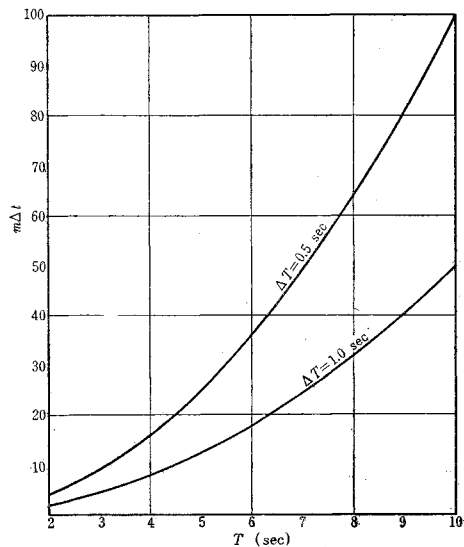
5) N : 読み取り総数

N を読み取り総数にすると、 $N \Delta t$ が読み取る記録の長さになる。 N は自由度 f , ずらしの最大値 m の関数であり、4) のところで示した式により

$$N = \frac{m}{2} \left(f + \frac{1}{2} \right) \doteq \frac{mf}{2} \quad \left(\because f \gg \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (12)$$

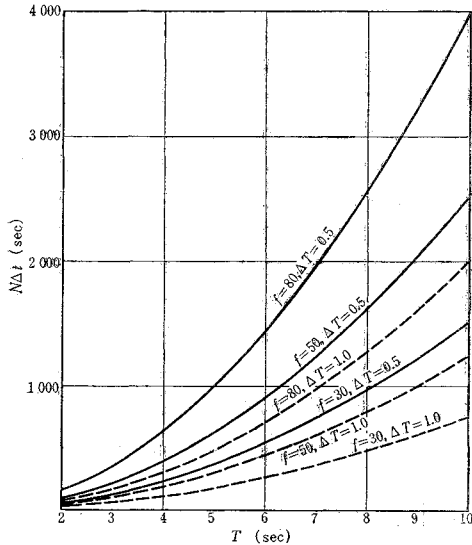
となる。

図-3 分解能を示すグラフ



以上 1) から 5) までの手順に従えば、計算に必要な諸元はすべて定まり、あとは電子計算機で計算するだけであるが、ここで自由度 f , lag の最大値 m , 読み取り総数 N 等の相互関係を 図-3, 4 にあらわしておく。

図-4 中心周期と最小必要読み取り個数との関係



3. クロススペクトル

まず、相互相関関数は 2 つの定常ランダム・プロセス $x(t)$, $y(t)$ について次式で定義される。

$$R_{yx}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)} \dots\dots\dots(13)$$

これのフーリエ変換をつくると、

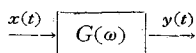
$$P_{yx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yx}(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau \dots\dots\dots(14)$$

となる。これがクロス スペクトル (cross spectrum) である。

パワー スペクトルだけでは雑音が入ってくる現象の解明は無理であるが、クロス スペクトルを計算すれば雑音の影響を消すことができる。

4. 周波数応答関数

時間に関する関数 $x(t)$ が応答関数の系を通過して $y(t)$ になったとしよう。

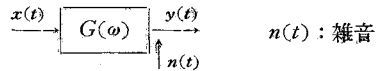


こういった問題を解くとき、普通にとられる方法は $x(t)$, $y(t)$ を ω の関数に変換し、

$$Y(\omega) = G(\omega) \cdot X(\omega) \dots\dots\dots(15)$$

の関係式より $G(\omega)$ を決定している。ここに、 $X(\omega)$, $Y(\omega)$ は $x(t)$, $y(t)$ のパワー スペクトルであり、 $G(\omega)$

が応答関数である。 $f=2\pi\omega$ の関係により ω を f に変え $G(f)$ を考えるとき、 $G(f)$ は周波数応答関数と呼ばれる。上にモデルとして考えた系は、外部から雑音が入ってこない場合であるが、自然界の現象は何らかの形で雑音が入ってくるのが普通である。これをモデル化すると次のようになる。



このような系を解析するにはクロス スペクトルを導入する必要がある。

入力 $x(t)$ のパワー スペクトルを $P_{xx}(f)$, 出力 $y(t)$ のパワースペクトルを $P_{yy}(f)$, 入力と出力のクロス スペクトルを $P_{yx}(f)$, 雑音のパワー スペクトルを $P_{nn}(f)$ とすると

$$P_{yy}(f) = |G(f)|^2 P_{xx}(f) + P_{nn}(f) \dots\dots\dots(16)$$

$$P_{yx}(f) = G(f) P_{xx}(f) \dots\dots\dots(17)$$

が成立している。また

$$r^2(f) = \frac{|P_{yx}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \dots\dots\dots(18)$$

をコヒーレンシ (coherency) といっており、外部雑音の混入の度合を示す値として用いている。雑音が全くないときは $r^2(f) = 1.0$ であり、雑音が多くなればなるほど 0 に近くなってゆく。

5. バイスペクトル

$x(t)$ が定常ランダム・プロセスであるとする、イスペクトル $B(\omega_1, \omega_2)$ は次の式で定義される。

$$B(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} S(\tau_1, \tau_2) \exp(-j\omega_1\tau_1 - j\omega_2\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \dots\dots\dots(19)$$

ここに $S(\tau_1, \tau_2)$ は

$$S(\tau_1, \tau_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} B(\omega_1, \omega_2) \exp(j\omega_1\tau_1 + j\omega_2\tau_2) d\omega_1 d\omega_2 \dots\dots\dots(20)$$

であり、

$$S(\tau_1, \tau_2) = \langle x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2) \rangle \dots\dots\dots(21)$$

として求められる。この式の $\langle \rangle$ はアンサンブル平均 (Ensemble Average) を意味する。しかしながら、定常ランダム・プロセスである場合には、アンサンブル平均は時間平均に等しいから、

$$S(\tau_1, \tau_2) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2) dt \dots\dots\dots(22)$$

として時間平均を計算することによって求められる。

3 次の相関関数、バイスペクトルには

$$\begin{aligned} S(\tau_1, \tau_2) &= S(\tau_2, \tau_1) = S(-\tau_2, \tau_1 - \tau_2) \\ &= S(\tau_1 - \tau_2, -\tau_2) = S(-\tau_1, \tau_2 - \tau_1) \end{aligned}$$

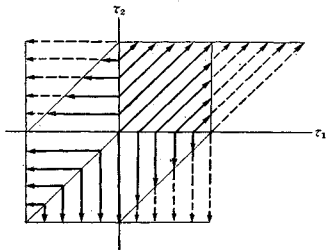
$$=S(\tau_2-\tau_1, -\tau_1) \dots\dots\dots(23)$$

$$\begin{aligned} B(\omega_1, \omega_2) &= B(\omega_2, \omega_1) = B(\omega_1, -\omega_1-\omega_2) \\ &= B(-\omega_1-\omega_2, \omega_1) = B(\omega_2, -\omega_1-\omega_2) \\ &= B(-\omega_1-\omega_2, \omega_2) \dots\dots\dots(24) \end{aligned}$$

証明は省略するが、これらの関係式を使えば、 $S(\tau_1, \tau_2)$ については $\tau_1 > 0, \tau_2 > 0$ の範囲について求めればすべての τ_1, τ_2 における値が定まり、また $B(\omega_1, \omega_2)$ についても $\omega_1 > 0, \omega_2 > 0$ の範囲に関して計算すれば、すべての ω_1, ω_2 に対する $B(\omega_1, \omega_2)$ の値が定まる。

さらに、 $S(\tau_1, \tau_2)$ については 図-5 に示す矢印の上で $S(\tau_1, \tau_2)$ が同一の動きを示すことが得られる。数値

図-5 $s(\tau_1, \tau_2)$ 平面で同じ値をとる点の状態



計算に際しては、この特性を利用する。パイスpekトルは波形の上下非対称性が大きいような現象の機構解明の手段となりうるわけであるが、現在その実測、計算がようやく試み始められた段階である。

6. 波の発生・発達^{13)~67)}

波の発生、発達を論ずるのは、主として風と波の関係をスペクトルの形で与えるのが普通である。ここでいう「風」とは、もちろん自然の風であるが、風速、風向だけでなく、その風が吹いている区間(吹送距離; fetch), 吹き続く時間(吹送時間; duration)が大切な要素である。

Sverdrup・Munk・Bretschneider は、いわゆる S.M. B. 法として名高い風速、吹送距離、吹送時間を知って統計的代表値としての有義波高を知る方法を提案したが、ここにはスペクトルの考えは入っていない。その後、Neumann が提唱したスペクトルを使って波のスペクトルを予測する方法を Pierson・Neumann・James が確立した (P.N.J. 法)。

また風域が移動する場合に、波が発達しながら進行する過程を図式的に計算するものに Wilson の図式法がある。その他、波浪推算法には Bretschneider の方法などがある。

風波の発生、発達の理論としては、Kelvin-Helmholtz の密度の異なる 2 層流体の potential flow の境界面における不安定問題としての理論的な取り扱いと、Jeffreys が提唱した波の crest による風の sheltering の効果に

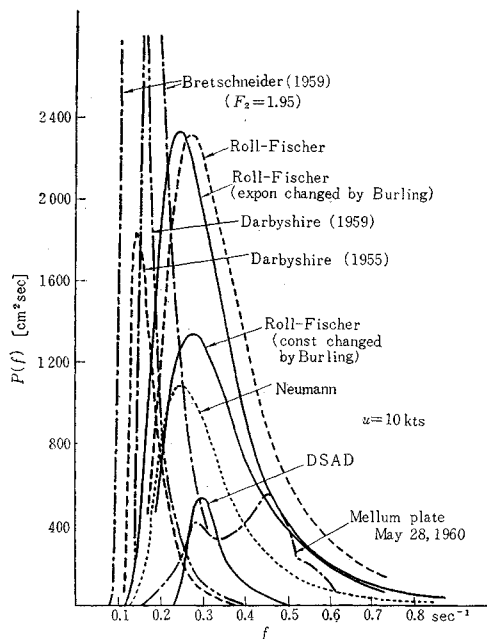
もとづくものがある。

これらはいずれも計算方法は明確であるが、取り入れられている物理的要素に制限があり、風波の発生、発達についてすべてを説明するということはむずかしい。

さらに、1950 年前後には、Wuest (1949), Eckart (1953), Lock (1954) などの理論があいついで発表されている。

Eckart は海面上を吹送する風はある大きさと強さおよび継続時間を持ち、平均風速 U をもって進行する多数の gust (風の息) の集合であって、これらのおおのこの gust によって水面に垂直に作用する圧力分布に対応して波が発生し、その重合の結果として海面で観測されるような不規則な波形の波が発生し、それが種々の方向に進行すると考えた。要するに、水面における圧力分布の移動に伴って波が発生するという考えで、波の存在による海面の乱れは gust の圧力分布には何らの影響を与えないと仮定している。Lock も厳密な計算を行なっているが、これから風波発達の物理的過程を直観的に

図-6 各種の理論的スペクトルと実測例



とらえることは困難である。取り扱いが多小簡略化されても十分物理的な意味をとらえ、かつ実用的な取り扱いに結びつきうるものとしては、Phillips と Miles の新たな角度からの理論の展開がある。

Phillips は Eckart の仮定したような特殊の gust を考えず、完全に乱れた状態の風で、多くの wave number と対応する移動速度をもつ圧力分布を考え、これによって生ずる波のスペクトル密度を計算する方法をとり、波の発生と発達の段階を 2 つに分けた。initial stage にお

いては、圧力分布の移動速度が同じ wave number をもつ波の進行速度と近似するとき、resonance の状態でその wave number の波が発生することを見出し、また第2の主要な波の発達段階 (principal stage) でも同じような resonance の状態で波が成長を続け、スペクトル密度は時間 t に比例して増加するという結論を得た。

この方法では、波は微小振幅波として取り扱われ、Eckart と同様に波の存在は圧力分布とは全く無関係であるとしている。

このような共鳴現象による波の発生機構を Resonance Theory と呼んでいる。しかし、この方法において計算された波高が実測に近い値を示すためには、Eckart と同様に圧力強度は 10^2 倍以上大きくしなければならないことになり、やはり波の発生機構を正確に表わしているとは言い難い。

Miles は Jeffreys の提唱した波の風に対する reaction を考え、Phillips の強調した風の turbulent motion を無視し、turbulence は単に風速のある鉛直分布の維持に関連するものとし、対数型の鉛直分布をもつ風の吹送とそれによる波との間の interaction によって、風から波にエネルギー輸送が行なわれるとする Interaction Theory によって波の発生と発達に対する説明を与えた。もちろんこの場合もやはり波は無限小振幅波であるから、その限度内での発達を示すことになるが、実測値との一致はきわめて良好である。その initial stage における波のエネルギー密度の増加は、Phillips の principal stage におけるごとく時間 t に比例し、その後の principal stage においてはエネルギー密度は時間の指数関数として増加してゆくことになる。この理論は、さらに Lighthill によって具体的解釈が与えられ、長く疑問とされていた波の発生機構の解釈は本質的な点で終止符が打たれたことになる。もちろんこの理論のみで波の成長段階がすべて説明されるのではなく、実際に観測される風速をはるかに凌駕するような著しく発達した波の存在、あるいはうねりに含まれるきわめて長周期の波の存在は、この理論の限界である無限小振幅波の域を出たものと考えられ、波に含まれる種々の wave number の間で non-linear interaction が起ることや、碎波により波のエネルギーの移動があることがこれを説明する方法として盛んに論議されるようになってきている。

浜田・柴山・加藤は風波の発達を実験室で調べ、non-negative damping factor を導入し、Miles のいう β と比較検討している。

また風波が発生域を離れて無風領域に進行してゆく場合の特性を実験室でくわしく検討した研究としては、光易・木村のものがある。

日野は Miles, Phillips の風波発生機構の理論を用い

て、風波スペクトル、海面摩擦応力、fetch graph などを実験的に誘導している。

なお、井島は波の発生・発達に関する内外の論文を系統的に手際よく解説しており、この節をまとめるのにおおいに参考にさせていただいた。

波を発生、発達させる力となる風については、一定風速の風が海面に吹きつけた場合の効果ばかりでなく、風の乱れのスペクトルを測定して風から波にエネルギーが移行する様子をさらにくわしく研究しようという趨勢にある。

7. 波浪観測^{(68)~(67)}

海で波浪を観測する方法としては、1) 海中にポールを立てそれに電気接点を取りつけ表面波高変化を電流、電圧変化にして測定するいわゆる直接観測法と、2) 水底もしくは水中に一種の圧力計を設置し、波高変化を水圧変動にして取り出す間接観測法がその主たるものである。直接観測法は問題ないとして、水圧変化を表面波高変化にかえる間接観測法では、換算する際にいろいろと問題がある。すなわち、逆の言い方をすると、表面の波高が水中の圧力に変わる場合、相似にはならず波形のかどがとれスムージングしたようになる。本間・堀川・小森は表面波形と水中圧力波形のパワー スペクトル、クロス スペクトルを計算することにより、規則波の取り扱いでは一定としている波高補正係数 n を不規則波では周波数により変える必要があることを述べている。

実験室ではもとより、現地でもデータレコーダー等が観測に用いられるようになり、波形の連続記録を読み取る作業が能率化するにつれスペクトルの計算が多くされるようになっており、ある海岸での波を問題にするようなとき、有義波高等と共にスペクトルの形も論じられるようになってきている。

岩垣・柿沼は秋田海岸での波浪スペクトルを算出し、有義波法と比較することによって、P.N.J. 法の妥当性の検討を行なっている。

その他、高橋・鈴木・佐々木は鹿島港で、内田・斎藤・東条・近藤は小名浜港での観測から波浪スペクトルを求め研究している。

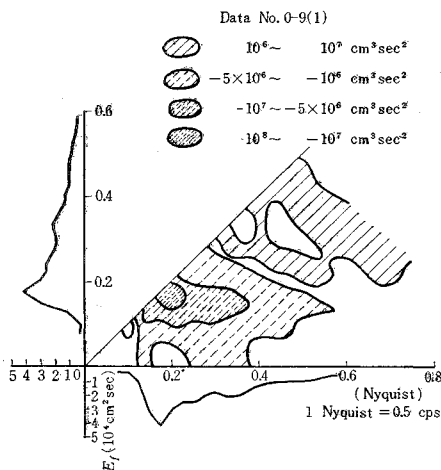
また、岩垣・樋口・柿沼・宮井は現地海岸で得られた波浪記録を周波数分析器にかけ、パワー スペクトルをアナログ的に出す方法を検討している。

周知のように風域の中の波はただ振幅および周期だけでなく進行方向も異なる無数の波の重ね合わせであって、いわゆる方向スペクトル (directional spectrum) をもった波である。このような問題を最初に取り扱ったのは Arthur のようである。彼によると、波高は主方向

に対して偏角を θ とすると、 $\cos \theta$ に比例して変動するといっている。すなわち、もし主方向上の波高を 1 とすると、 30° および 45° の方向の波高はそれぞれ 0.866, 0.707 となる。Pierson はこの仮定を利用して方向スペクトルの式を提案している。また Barber は一線上にならんだいくつかの波高計の記録を統計的に解析して波の進行方向を求めようとした。その後、Cox・Munk や Chase, Longuet-Higgins などが研究を行なったが、近年、Mobarek は風洞水槽における実験結果に基づき、方向スペクトルは circular normal distribution function で表わされ、Longuet-Higgins の観測結果とかなり一致するといっている。また、永田は 1 点における波の軌道運動の測定から波向および波向分布を求める方法ならびにこれに用いる電磁流速計について研究している。

スペクトルの考え方は海岸波浪を定常 ランダム プロセスと考え、独立した成分波の線型重ね合わせとして取り扱っているのであるが、近年非線型に関する理論的研究も進み、surf beat, 砕波、スペクトルの成分波間でのエネルギー輸送といった問題に関して非線型性効果が示唆されはじめている。こういった非ガウス過程の解析方法としてバイスペクトル (bi-spectrum), さらに高次のスペクトルを求める必要がおこってくる。柿沼・石田・門司は現地海岸での波浪観測記録からバイスペクトルを計算し、波高が大きい場合には比較的強い非線型効果があらわれることを指摘している。この他バイスペクトル

図-7 バイスペクトルの計算例
(柿沼・石田・門司による)



に関しては、Hasselmann・Munk・MacDonald の研究がある程度である。

また浜田は 2 成分波間の 2 次干渉について計算を行ない、さらに波形スペクトルが連続な幅をもっている場合についても検討している。

8. 波の変形^{86)~95)}

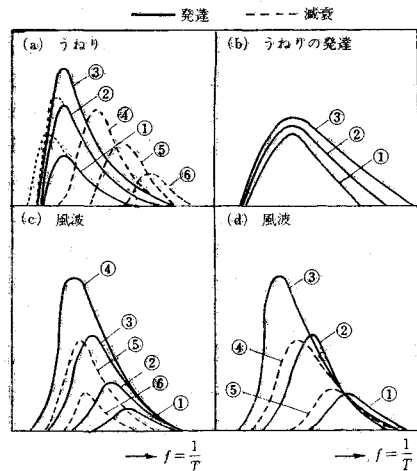
スペクトル解析を行なって波の変形を論ずるのは、応用範囲も広く、いろいろな研究がある「波の変形」としては

- 1) 台風、低気圧の進行に伴っておこる、ある地点での波浪の変形
- 2) 海岸構造物(たとえば潜堤等)による波の変形
- 3) 不規則波の反射
- 4) 海底摩擦等による浅海領域での波の変形
- 5) 島などのしゃへい効果
- 6) 斜面へのうち上げ高

が考えられる。

台風、低気圧による波の変形を論ずるには、有義波高、有義周期等の統計的代表値の変化を調べるのも 1 つの方法であるが、スペクトルの変形で論じた方がより適切であろう。井島・鈴木は日本沿岸における波浪の実測から、台風や低気圧による波のスペクトルの変化を図-8 の 4 つのパターンに分類している。(a) は、台風が

図-8 スペクトルの変化のパターン図
(井島による)



発達する場合で、発達の場合は実線または点線のように Optimum Period の位置はあまり変わらずに発達し、減衰の場合は破線のように短周期の方へ移ってゆく。台風が定常状態で徐々に接近する場合は (b) のように Optimum Period はほとんど一定のまま短周期帯のみが発達することもある。

また太平洋岸で見られる風波のスペクトルの変化は (c) の場合が多く、日本海岸では (d) の形が多い。発達時におけるスペクトルの交差は観測値として必ずしも有意なものでなく、(c) の場合でもみられる。減衰時の形は (d) では発達時の逆に近い形が多いが、(c) では

Optimum Period の位置が発達時のような短周期側にもどらないことが多い。これを著者は台風通過後も残っている太平洋岸での擾乱波（太平洋岸では、なんらかの風域の影響で常に周期 9 sec 程度、波高 0.3~0.5 m の波が存在している）の状態にもどり、それ以下の周期に減衰しないことによると解釈している。

海岸構造物による波の変形をスペクトルの観点から取り扱った研究はまだ少ない。堀川・小森は潜堤による波の減衰を線型理論が適用できるという仮定をおいて、沖波と潜堤通過後の波のスペクトルを計算することにより、次のような結論を出している。すなわち、不規則波を潜堤にあてた場合、潜堤により沖波のスペクトルが縮小し、波浪の卓越周期の 1/2, 1/3 の周期の波が発生したような効果が見られるということである。

波の反射に関する研究は Mische, Healy 等によって規則波による反射の研究がされて以来いろいろ研究されてきたが、不規則波による反射の研究としては鹿島のものがある。鹿島は護岸の前面の任意の点で得られる不規則波波形記録から入射波と反射波のパワースペクトルを区別する方法を提唱している。波形を記録する点が 2 点の場合、3 点の場合について述べ、1 点の場合も可能性はあるが非常にむずかしいと述べている。入射波が観測点を通過し、護岸で反射した観測点にもどってくる間の時間は素波（成分波）により異なるが、それぞれ一定の位相差があることを期待しているのがこの考え方の骨子になっている。

波が深海から浅海領域に入り、水深が波長の 1/2 程度以下になると、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。深海と浅海の数点で波浪を観測し、それぞれの波浪スペクトルを計算することによって周波数別の海底摩擦係数を求める研究が、岩垣・柿沼・宮井によって行なわれている。彼らは波に関するレイノルズ数を導入し、波浪特性と海底摩擦係数の値の関係も考察している。これによれば、波に関するレイノルズ数が大きいほど海底摩擦係数は小さくなる傾向にあり、また Bretshneider が考慮した海底摩擦係数 0.01 よりはるかに大きいとしている。

本間・堀川・趙は佐渡ヶ島のしゃへい効果を波の方向分散の観点から定性的に検討している。島が海岸の前面に存在している場合に海岸の波を推算するには、まず波の方向分散や屈折の作用の観点から島のしゃへい効果を検討し、島の存在を無視するかあるいは海岸から島までの対岸距離を対象にすればよいかをきめてから波の推算を行なう方がより実際に近い結果が得られることを指摘している。

不規則波による斜面へのうち上げ高の研究は、まだ始

められた段階であり、首藤や堀川・小森の研究がある程度である。

9. 波力のスペクトル^{96)~104)}

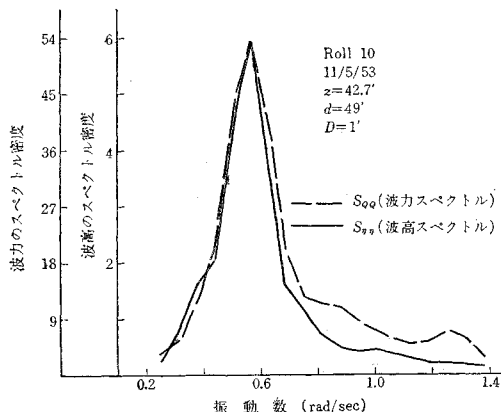
海岸構造物に作用する波力に関しては、規則波によるものについてはかなり深く研究され、実用的な公式からやや複雑な実験式まで数多く出されている。一方、不規則波を対象としたものでは現在までのところ Wiegel, Reid, Барштейн, Borgman, 日野の研究がある。

Wiegel・Beebe・Moon は 1957 年円柱に働く波力についてまず規則波を用いて実験を行ない、主として波高と波力の関係について論じている。その後、不規則波の波高のスペクトルと波力のスペクトルを求めたところ両者はきわめてよい相似形をなしているが、高周波数域に移るにつれて両者の開きが大きくなることを認めている。

Reid も不規則波の波形と波力の波形の相似性を指摘している。

この問題については Borgman が Wiegel の研究を基に引続き研究を行なっている。彼は統計理論を用い、

図-9 波力スペクトルと波高スペクトルの比較 (Borgman による)



不規則波が円柱形の杭にあたる時の波力スペクトルの理論式を導いている。

さらに、日野は海中の柱状体の受ける不規則波の波力を通信理論の特性関数の方法により求め、波力の相関関数とスペクトルの数式を求めている。また、波高スペクトル $S_H(f)$ と波力スペクトル $S_F(f)$ が

$$S_F(f) \approx \left[\frac{8C^2}{\pi} \varphi_0 f_s \left(\frac{V_0}{\sqrt{2}\varphi_0} \right) + (2\pi fK)^2 + \dots \right] \left[\frac{(2\pi f)^2 \cosh^2 kz}{\sinh^2 kd} \right] S_H(f) \dots \dots \dots (25)$$

の関係で表わされ、高周波成分に移るほどこの両者の違

いが大きくなることを示し、Wiegel らの実験結果との傾向一致を指摘している。

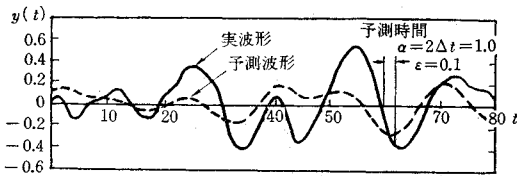
Барштейн はカスピ海における 棧橋や杭 に対する不規則波の振動実測から、これら透過構造物、特に杭に対する不規則外力の算定法を提案している。

10. その他^{105)~111)}

以上述べてきた分類に入らなかったものについてここでまとめてみると、まず長周期波のスペクトルがあげられる。Snodgrass・Munk・Miller は California の沿岸で得た観測から長周期波のスペクトルを求め、反射等も検討している。また日野は東京湾に進入する長波の振動特性を数値実験によって求めている。進入波としては乱子モデルによって広い幅にわたる連続スペクトルをもつ自然な不規則変動を湾口の水位として与えているが、彼によれば波長の長い変動はほとんど湾奥で完全反射され、波長の短い波ではエネルギーの減衰が激しいとのことである。さらに Munk・Cartwright は地球を一周するような長周期波(潮汐)について検討を行なっている。

スペクトルの考えを理論的に究明し、その性質を利用しようとした例としては、日野の予測・変換フィルターの研究がある。彼はホワイトノイズのスペクトルが一定

図-10 波浪予測の計算例(日野による)



値となることを利用している。出力のスペクトルには波浪スペクトルとしては一般的である Neumann スペクトルを与えているが、入力スペクトルがホワイトノイズのスペクトルで一定値をとるので応答関数が簡単に求まることになる。これを逆に変換することによって近い未来における波高を時々刻々予測する問題を取り扱っている。

この他スペクトル解析は海岸工学から海洋工学へと応用の分野を広め、各所で研究、応用されているが、現在筆者の知る限りでは以上のようなところである。

なお、スペクトル解析を波の問題に応用した例をまとめた書物としては Ocean Wave Spectra, Time Series Analysis が著名である。

また、この解説記事をとりとまとめるにあたっては、東京大学教授 堀川清司博士から貴重なご教示をいただいた。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Taylor, G.I.: The spectrum of turbulence, Proc. Roy. Soc. London, Vol. 164, (1938).
- 2) Tukey, J.W.: The sampling theory of power spectrum estimates, Symposium on Application of Autocorrelation Analysis to Physical Problems, (1949).
- 3) Blackmann, R.B. and J.W. Tukey: The measurement of power spectra, Dover, (1958).
- 4) 赤池弘次: スペクトル推定の統計理論, スペクトル推定の実際, 統計数理研究所講習会テキスト, 統計数理研究所, (1964).
- 5) Akaike, H.: On a design principle of lag window for the estimation of spectra, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Vol. 14, (1962).
- 6) 川鍋安次: 計算機によるスペクトル解析の仕方と実際例, 海上気象参考資料, その IV, 神戸海洋気象台, (1965).
- 7) 宇野木早苗: Digital computer による波浪記録の解析法(試案).
- 8) 小河原正巳: 応用統計学, 日本応用力学編, 克誠堂.
- 9) Rice, S.O.: Mathematical analysis of random noise, Bell System Tech. Jour., Vol. 23, 283; Vol. 24, 46, (1945).
- 10) Rice, S.O.: Statistical properties of a sine wave plus random noise, Bell System Tech. Jour. Jan, (1948).
- 11) 宮脇一男: 雑音解析, 朝倉書店.
- 12) 堀川 明: ランダム変動の解析, 共立出版.
- 13) Kelvin and Helmholtz (1871): Lamb, Hydrodynamic, 6th ed., (1932).
- 14) Jeffreys, H.: On the formation of water waves by wind, Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Vol. 107, (1925).
- 15) Jeffreys, H.: On the formation of water waves by wind (Second Paper), Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Vol. 110, (1926).
- 16) Sverdrup, H.U. and W.H. Munk: Wind, sea and swell, Theory of relations for forecasting, U.S. Navy, H.O. Pub. No. 601, (1947).
- 17) Neumann, G.: Die Entstehung der Wasserwellen von Wind, Deut. Hydro. Zeit., Bd. 2, Ht. 5, (1949).
- 18) Neumann, G.: Über Seegang, Dunung und Wind, D.H.Z., Bd. 3, Ht. 1/2, (1950).
- 19) Neumann, G.: Über die komplexe Natur des Seeganges, 1 Teil, D.H.Z., Bd. 5, Ht. 2/3, (1952).
- 20) Neumann, G.: 同上 2 Teil, D.H.Z. Bd. 5, Ht. 5/6, (1952).
- 21) Neumann, G.: On ocean wave spectra and a new method of forecasting windgenerated sea, B.E.B. Tech. Memo. No. 43, (1953).
- 22) Longuet-Higgins, M.S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves, Jour. Mar. Res., Vol. II, No. 3, (1952).
- 23) Thijsse, J.Th.: Growth of wind-generated waves and energy transfer, Gravity Waves, Nat. Bur. Stand. Cir. 521, (1952).
- 24) Van Dorn, W.G.: Wind stress on an artificial pond. Jour. Mar. Res., Vol. 12, No. 3, (1953).
- 25) Keulegan, G.H.: Hydrodynamic effects of gales on Lake Erie, Jour. Res. Nat. Bur. Sta., Vol. 50, No. 2, (1953).
- 26) Darbyshire, J.: The generation of waves by wind, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 230, (1955).

- 27) Darbyshire, J. : An investigation of storm waves in the North Atlantic Ocean, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A. Vol. 230, (1955).
- 28) Darbyshire, J. : An investigation into the generation of waves when the fetch of the wind is less than 100 miles, Quart. Jour. Roy. Meteorol. Soc. London, Vol. 82, No. 354, (1956).
- 29) Darbyshire, J. : A further investigation of wind generated waves, Deut. Hydro. Zeit. Bd. 12, Ht. 1, (1959).
- 30) Darbyshire, J. : The spectra of coastal waves, D. H.Z. Bd. 12, Ht. 4, (1959).
- 31) Eckart, C. : The generation of wind waves on a water surface, Jour. Appl. Physics, Vol. 24, No. 12, (1953).
- 32) Eckart, C. : The generation of wind waves in turbulent wind, Jour. Fluid Mech., Vol. 2, (1957).
- 33) Lin, C.C. : The theory of hydrodynamics stability, Cambridge Univ. Press, (1955).
- 34) Pierson, W.J.Jr. and W. Marks : The power spectrum analysis of ocean wave records, Trans. A.G.U. Vol. 33, No. 6, (1952).
- 35) Pierson, W.J.Jr. : An interpretation of the observable properties of Sea waves in terms of energy spectrum of the Gaussian record, Trans. A.G.U.. Vol. 35, No. 5, (1954).
- 36) Pierson, W.J.Jr., G. Neumann and R.W. James : Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics, U.S. Navy Hydro. Office, Pub. No. 603, (1955).
- 37) Pierson, W.J.Jr. : Wind generated gravity waves, Advances in Geophysics, Vol. II, Academic Press Inc., New York, (1955).
- 38) Pierson, W.J.Jr., G. Neumann and R.W. James : Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. U. S. Navy, H.O. Pub. No. 603, (1955).
- 39) Johnson, J.W. and E.K. Rice : A laboratory investigation of wind-generated waves, Trans. A.G.U., Vol. 33, No. 6, (1952).
- 40) Phillips, O.M. : On the generation of waves by turbulent wind, Jour. Fluid Mech., Vol. 2, (1957).
- 41) Phillips, O.M. : The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 4, (1958).
- 42) Miles, J.W. : On the generation of surface waves by shear flows, Jour. Fluid Mech., Vol. 3, (1957).
- 43) Miles, J.W. : 同上 (Part 2) Jour. Fluid Mech., Vol. 6, (1959).
- 44) Miles, J.W. : 同上 (Part 3) Jour. Fluid Mech., Vol. 7, (1960).
- 45) Miles, J.W. : 同上 (Part 4) Jour. Fluid Mech., Vol. 13, (1962).
- 46) Burling, R.W. : Wind generation of waves on water, Ph.D. Dissertation, Imperial College, Univ. of London, (1955).
- 47) Wilson, B.W. : Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetches, B.E.B. Tech. Memo. No. 73, (1955).
- 48) Sheppard, P.A. : Transfer across the earth's surface and through the air above, Quart. Jour. Roy. Meteorol. Soc., Vol. 84, (1958).
- 49) Beach Erosion Board : Shore protection planning and design, Tech. Rep. No. 4, Dep. Army, Corps of Engineers, U.S.A., (1961).
- 50) Bretschneider, C.L. : The generation and decay of wind waves in deep water, Trans. A.G.U., Vol. 37, No. 3, (1952).
- 51) Bretschneider, C.L. : Revisions in wave forecasting, deep and shallow water, Proc. 6th Conf. Coast. Eng., (1958).
- 52) Bretschneider, C.L. : Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves, B.E.B. Tech. Memo., No. 118, (1959).
- 53) 浜田徳一, 柴山輝彦, 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, (1963).
- 54) Hamada, T., A. Shibayama and H. Kato : A note on the development of wind waves in an experiment, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., (1966).
- 55) 光易 恒, 木村久雄 : 減衰領域における風波の研究, 第 11 回海岸工学講演会講演集, (1964).
- 56) 光易 恒 : 波と風の相互作用に関する研究 (1), (2), 第 13, 14 回海岸工学講演会講演集, (1966), (1967).
- 57) 光易 恒 : 博多湾の風と波 一低風速時の一例一, 第 15 回海岸工学講演会講演集, (1968).
- 58) 国司秀明 : 風洞水槽による風波の研究(II), 風波の発生と発達について, 日本海洋学会誌, 創立 20 周年記念論文集, (1962).
- 59) 井島武士 : 波浪予知論 (風波の発達に関する諸研究について), 水工学シリーズ 64-06, 土木学会水理委員会, (1964).
- 60) 日野幹雄 : 風浪スペクトルの発生・発達と海面摩擦係数に関する研究 (1), (2), (3), 第 10, 11, 12 回海岸工学講演会講演集, (1963), (1964), (1965).
- 61) Hino, M. : A theory on the fetch graph, the roughness of the sea and the energy transfer between wind and wave, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., (1966).
- 62) 光田 寧 : 強風時における乱れのスペクトルについて, 京大防災研年報, 第 6 号, (1963).
- 63) 塩谷正雄 : 大気最下層における乱れのパワースペクトル 鉄道技研速報, No. 62-288, (1962).
- 64) 竹田 厚 : 波の上の風速の高度分布, 第 9 回風に関するシンポジウム, (1962).
- 65) 川鍋安次 : 風の構造, 「海と空」, 第 39 卷第 3 号, (1962).
- 66) 加藤 始, 武村莞爾 : 水面上の風速分布 (第 1 報) 一浅水波面上の場合一, 港湾技研報告, 第 5 卷第 1 号 (1966)
- 67) 浜田徳一 : 水波上の風の性質について, 港湾技研報告, 第 7 卷第 4 号, (1968).
- 68) 中間 仁, 堀川清司, 小森修蔵 : 水圧変動波形と水面波形の相関性, 第 12 回海岸工学講演会講演集, (1965).
- 69) Hom-ma, M., K. Horikawa and S. Komori : Response characteristics of underwater wave gauge, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., (1966).
- 70) 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, (1963).
- 71) 高橋智晴, 鈴木椿実, 佐々木弘 : 鹿島港における波浪観測について, 第 13 回海岸工学講演会講演集, (1966).
- 72) 内田則夫, 斎藤幸義, 東条貞義, 進藤 勉 : 小名浜港の風波について, 第 14 回海岸工学講演会講演集, (1967).
- 73) 岩垣雄一, 樋口明生, 柿沼忠男, 宮井 宏 : 海岸波浪の周波数分析器による解析, 京都大学防災研究所年報, 第 9 号, (1966).
- 74) 柿沼忠男, 石田 昭, 門司剛至 : 大瀧海岸における波浪推算の一例, 第 15 回海岸工学講演会講演集, (1968).
- 75) Arthur, R.S. : Variability in direction of wave travel,

- Ocean Surface Waves, Annals N.Y. Acad. Sci. Vol. 51, Art 3, (1949).
- 76) Pierson, W.J., Jr. : Wind generated gravity waves, Advance in Geophysics, Vol. 2, (1955).
 - 77) Barbar, N.F. : Finding the direction of travel of sea waves, Nature, Vol. 174, (1954).
 - 78) Barbar, N.F. : The directional resolving power of an array of wave detectors, Proc. Conf. Ocean wave Spectra, (1963).
 - 79) Cox, C. and W. Munk : Statistics of sea surface derived from sun glitter, Jour. of Marine Res., Vol. 13, No. 2, (1954).
 - 80) Chase, J., et al. : The directional spectrum of a wind generated sea as determined from the data obtained by the stereo wave observation project, Dept. of Meteorology and Oceanography, New York Univ., New York, (1957).
 - 81) Longuet-Higgins, M.S., D.E. Cartwright and N.D. Smith : Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, (1963).
 - 82) Longuet-Higgins, M.S. : The directional spectrum of ocean waves and processes of wave generation, Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, Vol. 265, (1962).
 - 83) Mobarek, I. El-Sayed : Directional spectra of laboratory wind waves, Proc. A.S.C.E., Vol. 91, No. WW 3, (1965).
 - 84) 永田 豊 : 波の方向スペクトルの測定——電磁流速計の応用——, 沿岸海洋研究ノート, 2巻1号, (1963).
 - 85) 柿沼忠男, 石田 昭, 門司剛至 : 記録にもとづく波浪の非線型性の解析, 第15回海岸工学講演会講演集, (1968).
 - 86) Hasselman, K., W. Munk and G. MacDonald : Bispectra of ocean waves, Time Series Analysis, (1963).
 - 87) 浜田徳一 : 表面波の2次干渉 (1), (2), 第11, 12回海岸工学講演会講演集, (1964), (1965).
 - 88) 井島武士・鈴木篤実 : 台風による波のスペクトルの変化 第10回海岸工学講演会講演集, (1963).
 - 89) 堀川清司・小森修蔵 : 潜堤による風波の減衰機構について, 第15回海岸工学講演会講演集, (1968).
 - 90) 鹿島遼一 : 不規則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回海岸工学講演会講演集, (1968).
 - 91) 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・三の実測, 第11回海岸工学講演会講演集, (1964).
 - 92) 岩垣雄一・柿沼忠男・宮井 宏 : 現地における海底摩擦係数について, 第12回海岸工学講演会講演集, (1965).
 - 93) 本間 仁・堀川清司・趙栄耀 : 佐渡島の波に対するしゃへい作用, 第13回海岸工学講演会講演集, (1966).
 - 94) 首藤伸夫 : 不規則波の打ちあげ高, 第23回年次学術講演会講演概要, (1968).
 - 95) 堀川清司・小森修蔵 : 不規則な波のはいり高に関する一実験, 第13回海岸工学講演会講演集, (1966).
 - 96) Higuchi, H. and T. Kakinuma : Observations of transformation of ocean wave characteristics near coasts by use of anchored buoys, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., (1966).
 - 97) Wiegel, R.L., K.E. Beebe and J. Moon : Ocean wave forces on circular cylindrical piles, Trans. A. S.C.E., Vol. 124, (1959).
 - 98) Reid, R.O. : Correlation of water level variations with wave forces on a vertical pile for nonperiodic waves, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., (1956).
 - 99) Барштейн, М.Ф. : Воздействие нерегулярной волны на сквозные инженерные сооружения, Строительная Механика и Расчёт Сооружений, No. 1, (1964) (透過構造物に対する不規則波の作用, 応用力学と構造物の計算, 1964年1月号) [土木学会誌 Vol. 49, No. 11, 1964, 文献抄録欄に鹿島遼一の訳で登載].
 - 100) Borgman, L.E. : Random hydrodynamic forces on objects, Annals of Mathematical Statistics, (1967).
 - 101) Borgman, L.E. : The spectral density for ocean wave forces, Santa Barbara Coastal Eng. Conf., (1965).
 - 102) Borgman, L.E. : Spectral analysis of ocean wave forces on piling, Proc. A.S.C.E., Vol. 93, No. WW 2, (1967).
 - 103) 日野幹雄 : 柱体に働く不規則波の波力 (1), 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 4, 1968年1月.
 - 104) 日野幹雄 : パイルに働く波力のスペクトルの理論——流れと波の共存する場合——, 第15回海岸工学講演会講演集, (1968).
 - 105) Snodgrass, F., W.H. Munk and G. Miller : Long-period waves over California's continental borderland. Part 1, Background spectra, Jour. Marine Res., Vol. 20, No. 1, (1962).
 - 106) 日野幹雄・日野和子 : 東京湾の進入長波に対する振動応答特性, 第11回海岸工学講演会講演集, (1964).
 - 107) Munk, W.H. and D.E. Cartwright : Tidal spectroscopy and prediction, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, No. 1104, Vol. 259, (1966).
 - 108) 日野幹雄 : 波浪の予測フィルター・変換フィルター, 第14回海岸工学講演会講演集, (1967).
 - 109) Ocean wave spectra, National Academy of science, Prentice Hall, (1963).
 - 110) Time Series Analysis, The SLAM Series in Applied Mathematics, John Wiley and Sons, Inc., 1963.
 - 111) 土木学会 : 水理公式集, 昭 38.

【担当委員 小森修蔵 :

電力中央研究所技術研究所土木第1部】

第15回海岸工学講演会講演集頒布

第15回海岸工学講演会が去る12月5~6日福岡市において行なわれました。今回の講演発表数は57編を数えこれらを収録した今回の講演集は370ページを越えるものとなりました。本講演集ご希望の方は土木学会へお申込み下さい。

体 裁 : B5判 8ポ2段活版印刷372ページ

定 価 : 3500円

送 料 : 150円