

名古屋工業大学

正員 ○ 石田 昭

名古屋工業大学

学生員 金 泰 順

1. はしがき : 風波のような不規則波のスペクトルは、観測および解析が比較的容易である周波数スペクトル、あるいはSTOPEの観測例に代表されるような波数スペクトルによって取扱われている。しかしながら、波数と周波数の間に一義的な関係が存在しないと考えられる自然現象においてはこれらのスペクトルは不完全な表示であり、周波数と波数によるスペクトル表示が必要となることはいうまでもない。現地波浪の波数・周波数スペクトルを得ることは非常に困難であるが、実験室内での風波ならば一方向に進行すると仮定できるので、比較的簡単である。本研究は実験水槽内で起した風波を写真観測することによって、その波数・周波数スペクトルを解析し、スペクトルをモデル化する基礎資料を得ようとするものである。

2. 実験方法および解析方法 : 実験に使用した風洞水槽は有効フェッチ約 20 m、幅 60 cm、高さ 120 cm の両面ガラス張り水槽である。水深は沖側 13 m が 28.7 cm、岸側 6 m が 8.7 cm であり、水深が変化する部分に約 1 m の長さの斜面を設置した。また風下端に砕石を置いて消波させた。風速 10 m/sec で発生する風波を水槽側面からカメラ（アサヒペンタックス SP、レンズ 28 mm F3.5、絞り開放、フィルム コダック TRI-X）およびストロボスコープ（閃光周波数 400 rpm、閃光間隔 $\Delta t = 0.15$ sec、閃光時間 $22 \mu\text{sec}$ ）を使用してスリット撮映した。読取りを行なうために、スライド用フィルムに反転し、プロジェクターで拡大して読取った。写真-1は観測した写真の一部であり、波の進行方向は右から左、時間経過は下から上である。縦線はガラス面に引いた間隔 $\Delta x = 5$ cm の読取り線であるが画面中央のガラス継手の部分は隠れてしまうので、この間の2点だけは目視によって推定した。x方向のサンプリングは 5 cm 間隔で 57 点（全長 280 cm）、y方向のサンプリングは 0.15 sec 間隔で 59 点（8.7 sec）とした。波数・周波数スペクトル $E(f, k)$ は次式によって求められる。

$$\rho(t_t, t_x) = \iint \eta(t, x) \cdot \eta(t + t_t, x + t_x) dt dx, \quad \text{①} \quad -M_t \leq t_t \leq M_t, \quad 0 \leq t_x \leq M_x$$

$$E(f, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \rho(t_t, t_x) \exp i(-k t_x + 2\pi f t_t) dt_t dt_x, \quad \text{②} \quad -\frac{1}{2\Delta t} \leq f \leq \frac{1}{2\Delta t}, \quad 0 \leq k \leq \frac{2\pi}{2\Delta x}$$

ここで、 M_t, M_x は二次元 Correlation

$\rho(t_t, t_x)$ の最大ラグの数で、それぞれ 15, 20 である。したがって解析の自由度は次式

$$n = 1.58 \left[\frac{M_x}{M_t} - \frac{1}{2} \right] \left[\frac{M_t}{M_x} - \frac{1}{2} \right] \quad \text{③}$$

に代入すると約 12 である。また $\Delta f = 0.222$ cps
 $\Delta k / 2\pi = 0.005$ cps となる。

以上の方法によって波数・周波数スペクトルを求めるのと同時に、写真-1の画面中央付近に設置した2台の波高計(W-1とW-2、間隔 15.05 cm)から周波数に関するスペクトルを求めた。サンプリングは 0.04 sec 間隔で 500 個とし、最大ラグ数を 45 としたので、自由度は約 20 である。

3. 解析結果および考察 : 図-1のF段

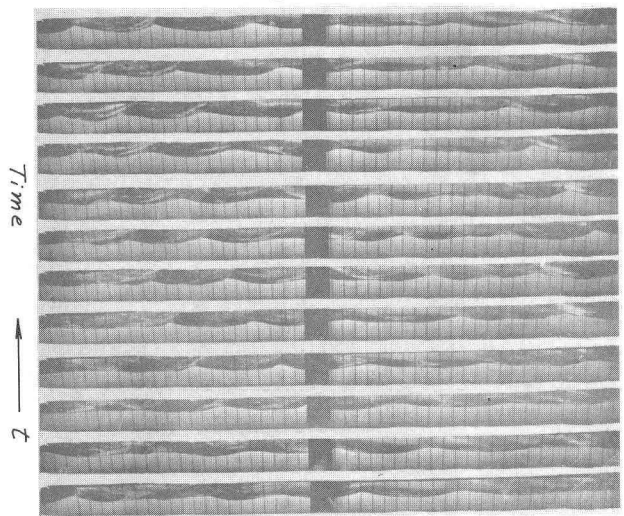


写真-1

Wave Direction

観測波形の一部分

の部分には得られた波数・周波数スペクトル $E(f, k)$ の等値線が示してある。また上段には波高計 W-2 から求めた周波数スペクトル $E(f)$ の値および波数・周波数スペクトルから求めた同一の波数を持つ波のエネルギーの和すなわち $\sum_k E(f, k)$ の値を示してある。この図をみると、風波のエネルギーは自由波の $f-k$ 関係を示す曲線を中心にしてかなり広い波数・周波数領域に分布することがわかり興味深い。 $E(f, k)$ の最大値は $f = 2.22 \text{ cps}$, $k/2\pi = 0.03 \text{ cpc}$ のところにあつて、微小振幅波理論による波長よりも長いことを示している。これは非線型性の効果であると考えることができ。 $f=0$, $k/2\pi \approx 0.005$ 付近を中心とするかなり強いエネルギー分布は、 $\eta(t, x)$ の読取りに際して平均水面があたかも画面の両端で $\pm 1 \text{ cm}$ の傾斜を持っているかのような読取り値になっていたことに主な原因があると思われる。また、 $f = \pm 2.22$ 付近では全ての波数上にかなりのエネルギーが分布している。これは観測区間 (280 cm) が卓越波長の整数倍になっていないことと、その区間が短いことが原因となって平均値が卓越周期ごとに変動することと関係がある。以上のような解析上の欠点のために、 $\eta(t, x)$ から求めた分散値は、波高計から求めた分散値の約 2 倍にも達し、図-1 上段に示した $\sum_k E(f, k)$ の面積も $E(f)$ の面積の約 2 倍になっている。 $f = -2.22 \text{ cps}$, $k/2\pi = 0.03 \text{ cpc}$ にエネルギーのピークがみられるが、これは若干の反射波があることを意味している。上段の図で $f \neq 2.0 \text{ cps}$ 以上の高周波側での $E(f)$ と $\sum_k E(f, k)$ の相違点は SWOP の報告に述べられているものと同じ傾向で、周波数スペクトルのほうが小さくなっている。しかし、1.6 cps から 2.0 cps の間では逆に周波数スペクトルのほうが大きくなっている。これらの原因は $f \neq 2.0 \text{ cps}$ を境にしてエネルギーの波数分布の幅が広がることと関係があるように思われる。図-2 は W-1 と W-2 から求めた $E(f)$ と $\sum_k E(f, k)$ を両対数表示したものである。高周波側はほぼ $f^{-5.5}$ 則に従っていることがわかる。なお $E(f)$ をみると、ピーク周波数の 2 倍のところに非線型効果によると考えられるエネルギーの二次的ピークがみられる。さて、図-1 の等値線の形から次のような数式による $E(f, k)$ の表示を試みた。まず自由波の $f-k$ 関係を $2\pi f = \alpha \sqrt{kg \tanh kh}$ のように修正する。 α は補正係数で 1.0 より大きく、この場合は 1.07 であった。この自由波の $f-k$ 関係式の上でピーク値が出現すること、そして誤差関数的に低減するものと仮定して次式 $E(f, k) = E(f_p, k_p) \exp -38 \left(\frac{k}{k_p} - 1 \right)^2 \exp -177 \left(\frac{2\pi f}{\alpha \sqrt{kg \tanh kh}} - 1 \right)^2$ を得た。 f_p と k_p は④式を満たす。

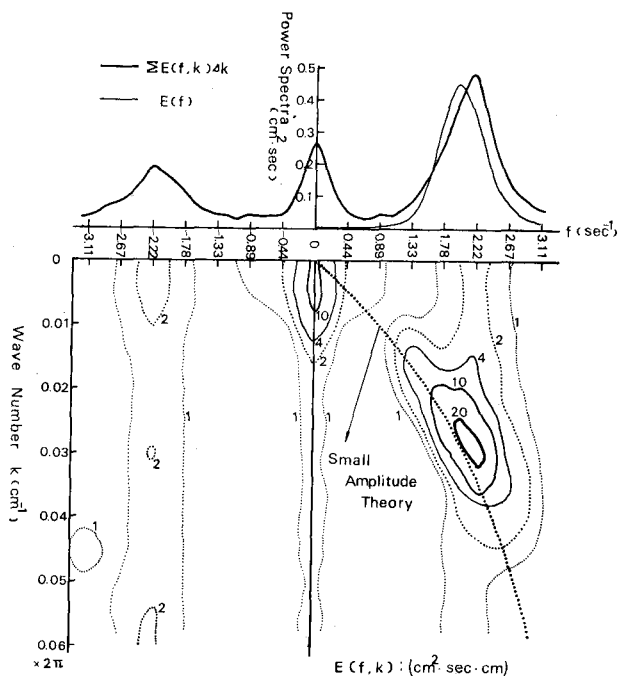


図-1 波数・周波数スペクトル $E(f, k)$ の等値線および $E(f)$

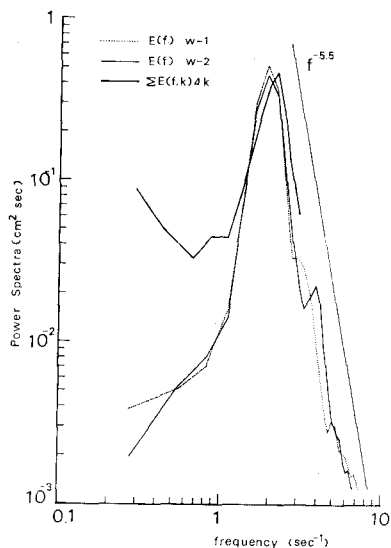


図-2 両対数表示による周波数スペクトル

最後に、本実験に際して助力をいただいた井本久仁吉 助手ならびに学部学生 平野耕一郎、藤井尚之の両君に感謝の意を表します。