

浅海風波のスペクトルについての実験的研究

郭 金 棟*・陳 茂 松**・沙 陽 生**

1. 緒 言

海岸の波浪を予知する方法として Sverdrup-Munk の提案した有義波の考え方と Pierson によるスペクトル解析の考え方がある。浅海風波の性質を解明するため著者らの一人は有義波法により風速・吹送距離・水深と波浪の関係を考察した。この方法は代表波により不規則波を代表し、工学的な利用の点から見て最も実用的な方法ではあるが、波の性質の全般を理解するうえでは十分ではない。そこで著者らは浅海風波の発達の実態をよりの確に把握するためスペクトル解析を試みた。

Pierson が波浪解析にスペクトル理論を導入してから 10 数年間数多くの現地観測および実験資料の解析によって深海における風波の基礎的性質はかなり明らかになったが、浅海における波のスペクトルについては井島ら、岩垣・柿沼らによるいくつかの現地観測による報告が見られるだけである。現状では浅海における波浪のスペクトルが風速や風域と水深によっていかに変形するかはまだ不明のようである。本文は実験風洞によって測定した風波のスペクトルについてその初歩的な結果について報告する。

2. 実験装置および方法

実験は風洞水槽（長さ 72.0 m, 幅 1.0 m, 高さ 1.2 m）を使用して行なわれた。図-1 に示されたように送風機は flap-type 造波機先端約 10 m の所に設置し、吹出口は 50×100 cm でその下流部に整流装置が設けられ、ほぼ水面と平行して風を吹き出すように試みた。また造

波機が起こした規則波が支障なく吹出口の下を通って行くため吹出口は約 30 cm の高さが調整できようになっている。測定は風洞吹出口の下流 8.0 m（または 14.0 m）、18.0 m（または 20.0 m）、26.0 m、34.0 m と 42.0 m の 5 カ所に抵抗線式波高計を配置しインキ書オシロ グラフによって波形を記録した。風速は初め水槽中心で 3 つの断面にて測定を行なったが（図-2 参照）G-1 断面を除いてはほぼ同じ分布をなしておりその差は微小であることがわかり、最後には風下側 42.0 m の断面中心における最大風速のみを測定し解析に用いた。実験風速は 13.0～6.6 m/sec, また水深は浅水と思われる 3.0 cm から 8.0 cm の範囲で実験を行なった。送風機が起動されたのち風波は急速に発達し数分間で定常状態に達する。この時オシロ グラフは 25～50 cm/sec のペーパー速度で 4 分間連続して水面の変動を記録する。

図-2 Comparison of Velocity Profiles.

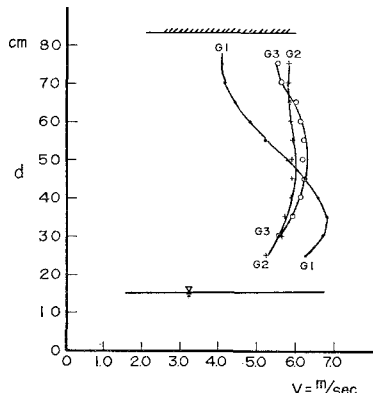
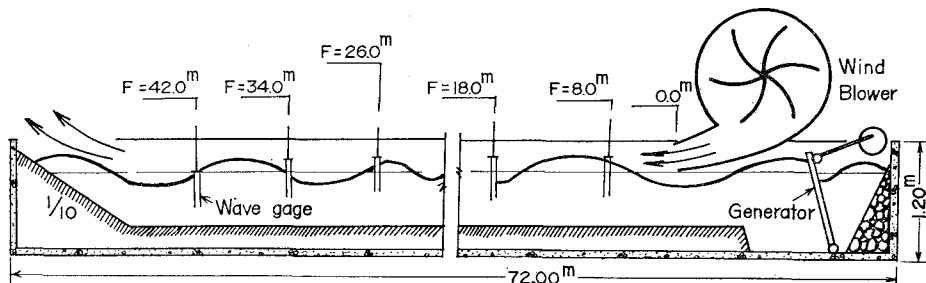


図-1 Wind and Wave Channel Facility.



* 正会員 工修 台湾成功大学副教授 水利工程系

** 台湾成功大学助教授 水利工程系

3. 浅海風波のスペクトル

記録された波形は Δt ごとに水面変動 $\eta(t)$ を読み取り、ディジタル化して IBM 1130 電子計算機により波のパワースペクトルを計算した。ここに使われた計算法は Blackman-Tukey による方法で Hanning の window を用いた。読み取り間隔は $\Delta t=1/10$ sec (または $1/15$ sec), データの総数 $N=800$, 最大 time lag $m=40$, folding frequency $f_m=5$ cps (または 7.5 cps), resolution $\Delta f=0.25$ cps (または 0.375 cps), 自由度は Tukey の式で計算すると約 40, したがって信頼度は 10% の限界で $0.73\sim 1.30$ である。

ここで述べたスペクトル密度 $\Phi(f)$ は次式によって定義されたものである。

$$\Phi(f)=\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-i2\pi f\tau)R(\tau)d\tau\cdots\cdots(1)$$

または,

$$R(\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(i2\pi f\tau)\Phi(f)df\cdots\cdots(2)$$

$f=\omega/2\pi$ は周波数, τ は time lag, ただし, 自己相関関数 $R(\tau)$ は次式,

$$R(\tau)=\lim_{T\rightarrow\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \eta(t+\tau)\eta(t)dt\cdots\cdots(3)$$

によって求められる。よって

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(f)df=R(0)=\bar{\eta}^2\cdots\cdots(4)$$

スペクトル密度の積分は $\tau=0$ である時の自己相関関数に等しくまた水面変動の 2 乗平均にも等しい。したがって Pierson-Neumann らが定義した波のスペクトル $[A(\omega)]^2$,

$$\eta(x,t)=\int_0^\infty \cos\{\omega t+kx+\varepsilon(\omega)\} \sqrt{[A(\omega)]^2 d\omega} \cdots\cdots(5)$$

とは 2 倍異なる。すなわち波の総エネルギー E は,

$$E=\int_0^\infty [A(\omega)]^2 d\omega=2\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(f)df=2\bar{\eta}^2 \cdots\cdots(6)$$

である。

(1) 吹送距離による波のスペクトルの変化

図-3 は水深 $d=26.0$ cm, 風速 $V=9.4$ m/sec の場合風洞水槽の中心にて測定された異なる吹送距離における波のスペクトルである。波は発達状態にあり fetch が長くなるとともにスペクトルは生長し, エネルギーの集中した peak は伸び周波帯は低周波の方に移動していく。強風または浅い水深の場合, fetch がある程度に達すると波のスペクトルは saturation の状態を示し, スペクトルの peak は最大になり, 主要周波数 (optimum frequency) は低周波側に移り低周波側のスペクトルのみが発達を見せる。図-4 は水深 $d=26.5$ cm, 風速 $V=$

図-3 Growth of Wave Spectra with Fetch for Reference of $V=9.4$ m/sec and $d=26.0$ cm.

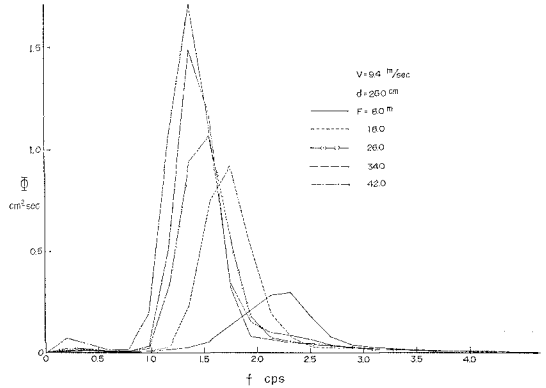


図-4 Growth of Wave Spectra with Fetch for Reference of $V=13.6$ m/sec and $d=26.5$ cm.

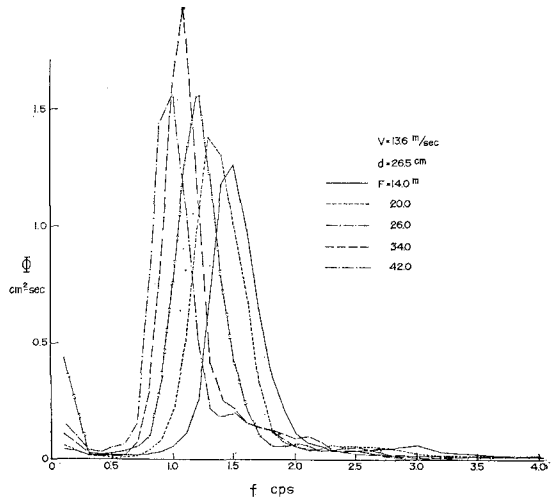
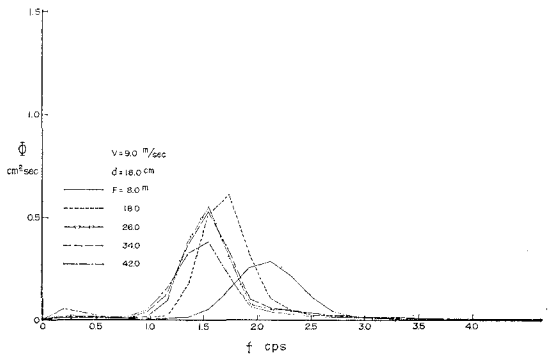


図-5 Growth of Wave Spectra with Fetch for Reference of $V=9.0$ m/sec and $d=16.0$ cm.



13.0 m/sec の場合で異なる fetch における波のスペクトルである。スペクトルの形は変形せずほぼ同じ peak を保ちながら低周波側にシフトしていき, エネルギーの集積した peak は水面の不安定によって部分碎波を引き起しエネルギー損失により若干減衰を示す。風速または水

深が小さい場合定常状態に達する最小吹送距離は短い。
 図-5 は水深 $d=16.0$ cm, 風速 $V=9.0$ m/sec の場合
 でありスペクトルは $F \approx 26.0$ m ですでに定常に達して
 いる。

(2) 風速による波のスペクトルの変形

固定水深にて風速を変えて実験を行ない、同一地点に
 おいて測定した異なる風速の波のスペクトルの変化を比
 較したのが 図-6, 図-7 および 図-8 である。これら
 の水深は $d=14.0$ cm, 吹送距離は 8.0 m, 34.0 m およ
 び 42.0 m である。一定水深の浅海において風速がある
 程度増加されるとスペクトルの peak は上限に達する。
 fetch が短い場合定常に達するために必要とする風速は

比較的小さいしまた当然スペクトル密度も小さい。同
 じ fetch では風速が早いほどスペクトルの低周波は発
 達しバンドは広くなる。いずれも equilibrium range の
 高周波側は著しい減衰が見られ ω^{-n} で表わされる。

(3) 水深による変化

図-9, 図-10 および 図-11 は風速がほぼ $V=12.75$
 m/sec の場合, 同じ fetch で異なった水深において実
 験したスペクトルの比較である。

スペクトルは水深が増すとともに発達し深海と思われ
 る水深に達した際定常状態を呈する。同じ fetch と風
 速において水深による主要周期を考察するとその変化は
 わずかである。

図-6 Growth of Wave Spectra
 with Wind Velocity for
 Reference $F=8.0$ m and
 $d=14.0$ cm.

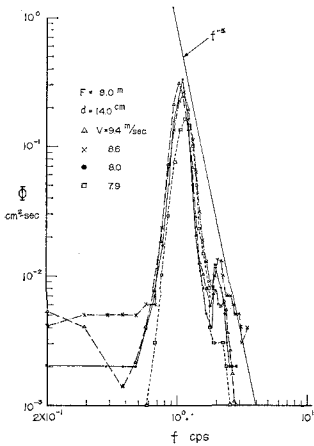


図-7 Growth of Wave Spectra
 with Wind Velocity for
 Reference of $F=34$ m and
 $d=14.0$ cm.

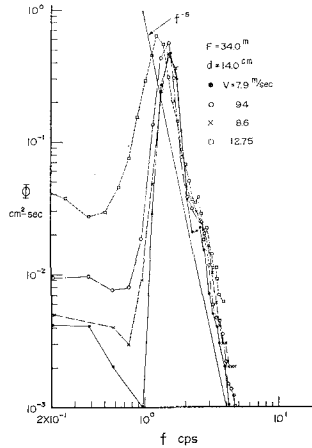


図-8 Growth of Wave Spectra
 with Wind Velocity for
 Reference $F=42$ m and
 $d=14.0$ cm.

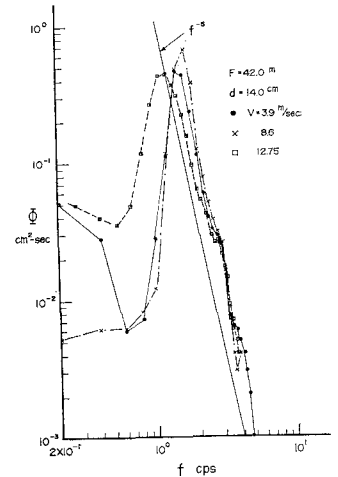


図-9 Growth of Wave Spectra
 with Water Depth for
 Reference of $V=12.70$ m/
 sec and $F=14.0$ m.

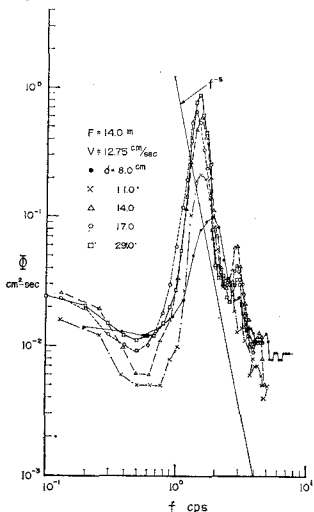


図-10 Growth of Wave Spectra
 with Water Depth for
 Reference of $V=12.75$ m/sec
 and $F=26$ m.

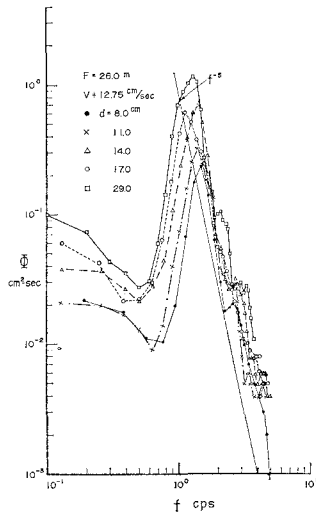


図-11 Growth of Wave Spectra
 with Water Depth for
 Reference of $V=12.75$ m/sec
 and $F=42$ m.

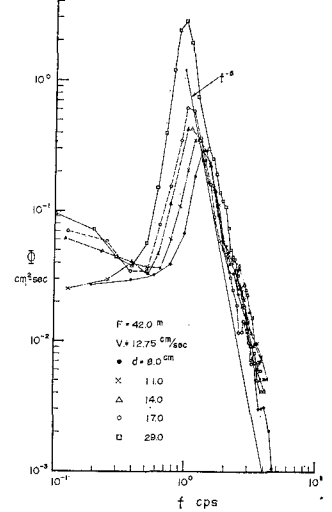
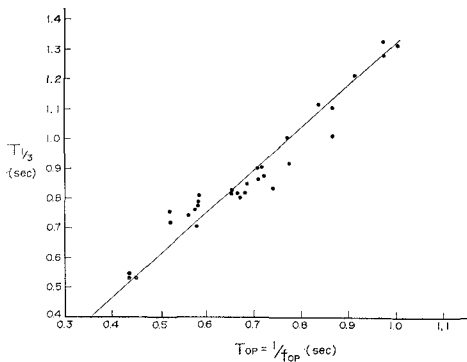


図-12 Relationships between $T_{1/3}$ and T_{op} .

(4) 主要周波数について

波のスペクトルが最も集積した主要周波数 f_{op} と $1/3$ 最大周期の関係をプロットしたのが 図-12 である。これによると $T_{1/3} = 1.33 T_{op}$ である。したがって主要周期はほぼ平均周期に等しい。なお、 f_{op} と風速・吹送距離と水深の関係を無次元的に表わしたのが 図-13 である。同図より水深による f_{op} の変化は無視できる程度である。当然ながら fetch が長くなると f_{op} は低周波側に移動する。

(5) Equilibrium Range

Phillips は相似性の考察よりスペクトルの高周波側の形は equilibrium range になり、次式、

$$\Phi(f) = \beta g^2 f^{-5}$$

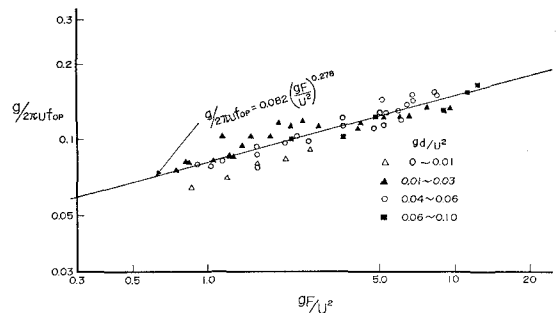
によって示されると指摘した。浜田は深海におけるスペクトルの高周波部分は $\Phi(f) = \beta g^2 f^{-n}$ で示されるとし、 n は常に 5 より大きくなることを理論および実験で証明した。本実験においても同様に $n=7 \sim 10$ という結果を得、fetch が増加するとともに n は多少大きくなる傾向を持っている。図-6~11 の上にも Burling による曲線 $\Phi(f) = 9.51 \times 10^{-6} g^2 f^{-5}$ をひいて比較した。いずれもエネルギー・スペクトルの大きい方では本実験が小さく、スペクトルの小さい方では本実験の方が大きく出ている。

4. 結 論

以上実験結果にもとづいて浅海風波の発達過程における波のスペクトルの変化を調べてみた。吹送距離の制限と資料の不足によりはっきりした結論をだす段階までにはいたっていないが、大体つぎのようなことがいえる。

(1) 波は吹送距離とともに発達しある段階で saturation 状態になる。この時スペクトルの peak は上限に達し、碎波によって peak は若干減少する。その後のスペクトルは変形せずに低周波側にシフトしていく。

(1) 風速または水深が比較的に小さい場合、定常状

図-13 Relation of $g/2\pi U f_{op}$ versus gF/U^2 .

態に達するまでの最小吹送距離も短い。

(3) 一定風速によって発達した波をある一定した吹送距離で測定すると、水深が大きいほど波のスペクトルは大きい。その上限は深海時のスペクトルである。

(4) スペクトルの高周波部分は急激に減衰し、equilibrium range におけるスペクトルの形は f^{-n} によって表示できる。 $n=7 \sim 10$ で吹送距離の増加とともに n は大きくなっている。

(5) 主要周期はほぼ平均周期に等しく、主に風速と吹送距離によって決まる。水深による影響は小さいようである。

参 考 文 献

- 1) Blackman-Tukey: The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering, N.Y. Dover Pub. Inc., 1958.
- 2) Burling: The spectrum of wave of short fetches, Dtsch. Hydrogr. Z. 12, 1959.
- 3) Hamada: An experimental study of development of wind waves, Rep. No. 2, Port and Harbour Tech. Res. Inst., Ministry of Transportation, June, 1963.
- 4) Hamada: On the f^{-5} law of wind-generated waves, Rep. No. 6, Port and Harbour Tech. Res. Inst., Min. of Transp. 1964.
- 5) Hamada et al.: A note on the development of wind waves in an experiment, Rep. No. 12, Port and Harbour Tech. Res. Inst., Min. of Transp., 1966.
- 6) Mitsuyasu: Wind wave in decay area, Rep. No. 6, Port and Harbour Tech. Res. Inst., Min. of Transp. 1964.
- 7) Mitsuyasu: Interactions between water wave and winds (1), Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ. Vol. 14, No. 48, 1966.
- 8) Mitsuyasu: On the growth of spectrum of wind-generated wave (1), Rep. Res. Inst. of Appl. Mech., Kyushu Univ., No. 55, 1968.
- 9) Phillips: The dynamics of upper ocean, Cambridge Univ. Press, 1966.
- 10) Pierson & Moskowitz: A proposed spectral form for fully developed wind sea based on the similarity theory of A.S. Kitaigorodskii, J. Geophys. Res. Vol. 56, No. 24, 1964.