

浅海風波の発達に関する実験的研究

湯 麟 武*・郭 金 棟**

1. 緒 言

深海における風波の予知およびその統計的性質については過去数多くの研究によりめざましい進展をとげた。その推算値と実測結果とはかなり一致したものであり P-N-J 法, S-M-B 法いずれも高い精度をもったものである。それに対し浅海風波の研究は深海風波よりも複雑な問題点があると同時に応用も比較的に少ないためいくつかの報告しか見られなかった。浅海有義波の推算法としてもっとも知られているのは Thijssse¹⁾ および Bretschneider²⁾ の方法であり, とくに Bretschneider の推算法はよく引用されてきた。ここで問題になるのは海底摩擦係数の取扱い方と推算曲線の信頼性である。海底摩擦係数についてはすでに岩垣^{3), 4)} らの研究があり, Bretschneider が考慮した海底摩擦係数ははるかに小さいことを指摘している。風速・風域および水深と有義波, すなわち 推算曲線の 関係についても Sverdrup-Munk の深海風波予知曲線のごとく現地および実験資料の充実によって修正を加えていくべきであろう。

本文は著者らの浅海風波に関する研究の一部であり, 実験によって一定水深の浅海における風速, 風域および水深と風波の関係を有義波法によって解析し, その無次元量の関係を求め, またこれらの統計的性質についても考察を試みた。ただし実験における風域は限られたものであるためにより長い風域における浅海風波の発達については現地観測に頼るものであり今後の機会にゆずる予定である。

2. 実験装置および実験方法

実験は長さ 72.0 m, 幅 1.0 m, 深さ 1.2 m の風洞水槽を使用して行なわれた。水槽の一端には Flap-type の造波装置があり, その先端 10 m のところに送風機を設置した。風洞の吹き出し口は 50 cm×100 cm で, その下流部に整流装置を設け, やや水面と平行して風を吹出すように試みた。水槽の高さのうち下側 40 cm はコンクリート モルタルでならした水平床を敷き, 風下側には 1/10 勾配の傾斜床を設け消波の作用をなす。

水深は 30 cm から 8 cm まで約 3 cm おきに変え,

また風速は 13.0 m/sec~6.6 m/sec の範囲で変化し実験を行なった。風速は水槽の中心で風速計および Pitot 管によって測定した。

波形は水槽の中心に 5 本の抵抗線式波高計をおのおの風洞の風下側 8.0 m (または 14 m), 18.0 m (または 20.0 m), 26.0 m, 34.0 m と 42.0 m の所に配置し風波がほぼ定常状態に達した時 (約 10 分) インキ書オシロ グラフを使用して記録した。記録紙の速度は 25 cm/sec または 50 m/sec, 記録時間は約 3~4 分である。

波高は水面変動曲線がほぼ平均値を取るゼロ線を上下に横切る区間内の最大値と相隣るつぎの区間内における最小値との差をもって波高とし, ゼロ線を横切らない波は無視する。すべての波高に関する統計量は 192 個の波高によるものである。周期は波形の Zero-up cross 時間を読み取り, すべて 153 波のデータを用いて周期の統計解析を行なったのである。

解析に使われた風速は送風機風下 42 m の所で測定した断面中心の最大風速である。風洞内の水位は風の吹き寄せにより堆積し平均水位が上昇するがここでは静水時の水深を用いて計算した。

3. 浅海風波の発達

水面上を吹送する風によって攪乱された水面は切線応力と圧力変動によりエネルギーを獲得し, エネルギー伝達によって波高, 波長と波速が増加され波速がほぼ風速に達するまで風波は発達していく。浅海における風波は波速が水深の制限を受け深海風波よりも早く定常状態に達しうる。また波高は波形の制限によりある程度高くなると砕波になり一度減衰してからさらに発達していく。実験室においては定常状態に達する吹送時間はきわめて短くほぼ数分間のものである。したがって定常状態の浅海風波は吹送距離 F によって決まり, 吹送距離が増すにしたがって波速と波高もともに増加され, わずかな距離で波高は急激に高くなり成熟状態に達するが, さらに吹送距離を増すと波形は不安定になり部分砕波が見られエネルギーを損失し波高は若干減衰する。とくに風速の大きい場合この傾向が一段と著しい。波高がもっとも大きい所は風速, 水深によって異なるが大体 $F=26\sim34$ m の所に見られ, それ以後は減衰しさらに増大, 減衰を繰り返す。周期は吹送距離とともに長くなるがある程度で

* 工博 台湾成功大学教授 水利工程系

** 正会員 工修 台湾成功大学副教授 水利工程系

やや定常になりそれ以後は増加しなくなる。

浅海風波の有義波高 $H_{1/3}$, 吹送距離 F , 風速 U および水深 d との関係を表わすのもっとも適切な方法としては Fetch graph がある。図-1は無次元量 $gH_{1/3}/U^2$ 対 gF/U^2 の関係を Parameter gd/U^2 で表わしたものである。すでに述べたように波高は一段発達してから部分砕波により波高が低減するため、実験結果にかなりのばらつきが見える。大体において Bretschneider の浅海風波の推算曲線と同じ傾向を持っているが、深海波の Fetch graph よりも大きい有義波高が得られている。

当然ながら水深 gd/U^2 が大きくなるほど $H_{1/3}/U^2$ は大きくなり、深海に達した場合 $gH_{1/3}/U^2$ は最大になる。よって S-M-B 深海風波の Fetch graph は Fetch が小さい所では過小に見積った恐れがある。同図にも Johnson と Rice⁵⁾, Huff⁶⁾ および浜田^{7),8)} らの実験データをプロットして比較した。これによると著者らの実験はやや過大のようである。これは恐らく風速の取り方の相違によるものである。

図-2 は $gH_{1/3}/U^2$ 対 gd/U^2 の関係を Parameter gF/U^2 によって表わしたものである。同図の上にも Bretschneider の浅海風波推算曲線で海底摩擦係数 $f=0.01$ に対する Steady state の曲線を引いて見た。実験結果はほぼこの関係をみたしており波高の極限を示している。Fetch による影響は実験データのちらばりにより定量的にはいい難いが Fetch が長いほど波高も当然大きくなりうる。

風波の周期・風速・水深と吹送距離の関係について無次元量 gT_{ave}/U^2 と gF/U^2 の関係を求めて見たのが図-3 である。水深による影響は Fetch と測点の制限により明確な関係曲線はひきがたく、その上限、すなわち深海の場合については次式

$$\frac{gT_{ave}}{U^2} = 0.092 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.31}$$

によって表わされ、深海波の周期予知曲線とやや近い関係をもっている。

Fig. 1. Relation of gH/U^2 versus gF/U^2 in shallow water.

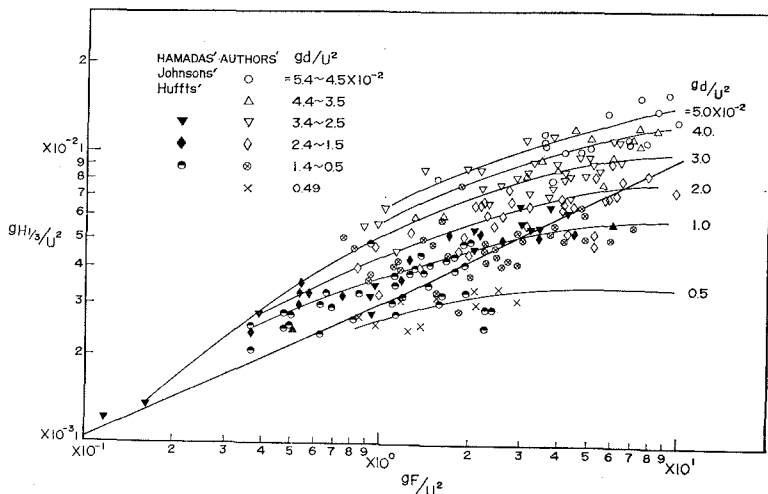


Fig. 2. Relation of gH/U^2 versus gd/U^2 in shallow water.

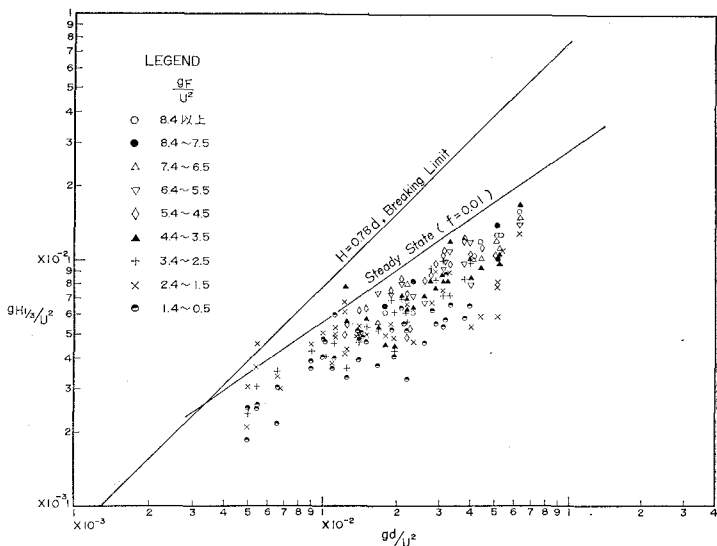
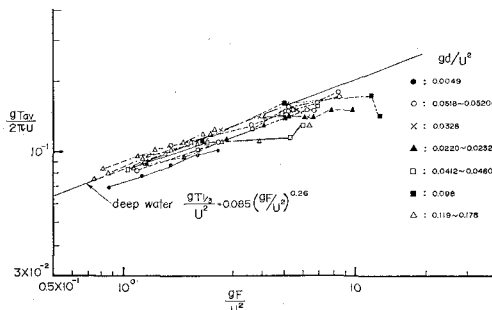


Fig. 3. Relation of $gT_{ave}/2\pi U$ versus gF/U^2 in shallow water.



4. 浅海風波の統計的性質

(1) 波高について

風波の特性を調べるために実験記録より 192 個の波高

をひろってその平均波高 H_{ave} 、有義波高 $H_{1/3}$ 、1/10 最大波高 $H_{1/10}$ および最大波高 H_{max} の関係を求めてみた。図—4 は平均波高 H_{ave} と有義波高 $H_{1/3}$ の関係であり、図—5 は 1/10 最大波高 $H_{1/10}$ と有義波高 $H_{1/3}$ の関係、また 図—6 は最大波高 H_{max} と有義波高 $H_{1/3}$ の関係をあらわしたものである。おたがいの関係は、

$$H_{1/3}/H_{ave}=1.38 \quad (1.60)$$

$$H_{1/10}/H_{1/3}=1.16 \quad (1.27)$$

$$H_{max}/H_{1/3}=1.39 \quad (1.64)$$

であり、いずれも Longuet-Higgins⁹⁾の理論値（カッコ内の数値）よりやや小さくなっている。いくつかの風洞実験報告にもこの現象が見られ、実験風波が Rayleigh 分布よりも正規分布に近い性質をもっているからであろう。図—7 はスペクトル帯域幅の広がりによる波高分布の特性を求めたものである。 ϵ はスペクトル帯域幅を表わす Parameter であり次式により求められる。

$$\epsilon = \sqrt{1 - (N_z/N_c)^2}$$

式中、 H_z は測定時間内の Zero-up cross の数、 N_c は同時時間内の波形の最大点の数である。波高の 2 乗平均の平方根 H_{rms} と H_{ave} 、 $H_{1/3}$ および $H_{1/10}$ の比例は大体一定値をたもち、スペクトルの幅の広がりによる影響は無視できる程度のものである。図中の実線はスペクトル幅を考慮した場合の理論値¹⁰⁾である。本実験の結果では ($\epsilon < 0.4$ について)

$$H_{ave}/H_{rms}=0.94 \quad (0.886)$$

$$H_{1/3}/H_{rms}=1.30 \quad (1.416)$$

$$H_{1/10}/H_{rms}=1.55 \quad (1.80)$$

の関係をもち、カッコ内に示した Narrow band spectrum の理論値と比較すると H_{ave}/H_{rms} は理論値よりやや大きく、 $H_{1/3}/H_{rms}$ と $H_{1/10}/H_{rms}$ は実験値のほうが小さくあらわれており、とくに $H_{1/10}/H_{rms}$ は一割ほど小さくなっている。その原因について考えると一つは実験風波の波高分布は正規分布に近いものと一般に実験室で起こる風波は実地海岸の風波よりも規則的であり、過大過小な波高の出現する頻度は比較的少なく、波は均一している。また同時に波高読取りの処理に際し小さい波形変化は往々にして無視される傾向がある。よって平均波高は若干過大になり、最大平均波高は小さくなりうる。その他波の非線型によることも考えられる。

図—8 は有義波高 $H_{1/3}$ とスペクトル解析によって求めた波の総エネルギー E の関係を考察したものである。これより深海における有義波高と波の総エネルギー E の関係

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

がそのまま浅海風波の場合にも適用しうることがわかる。

図—9 はいくつかの実験風波の波高分布の頻度を示すものである。

Fig. 4. Graph of $H_{1/3}$ versus H_{ave} .

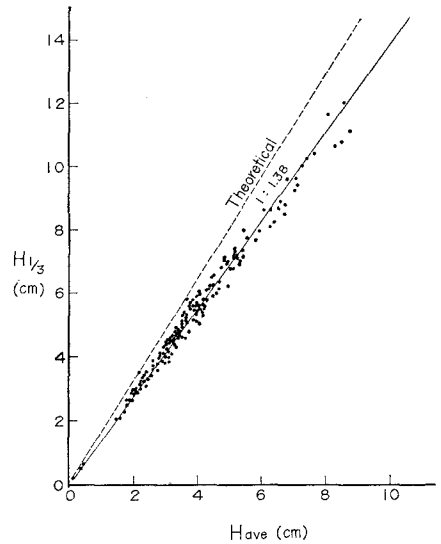


Fig. 5. Graph of $H_{1/10}$ versus $H_{1/3}$.

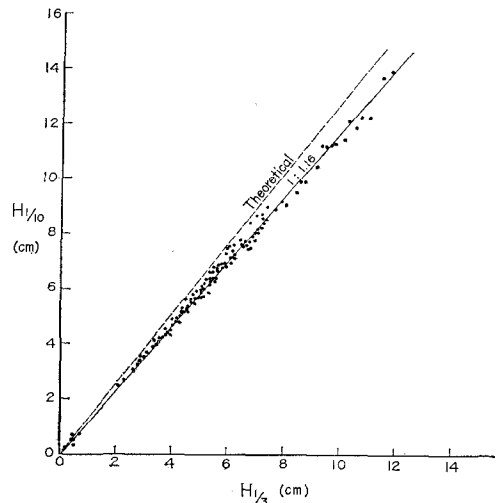
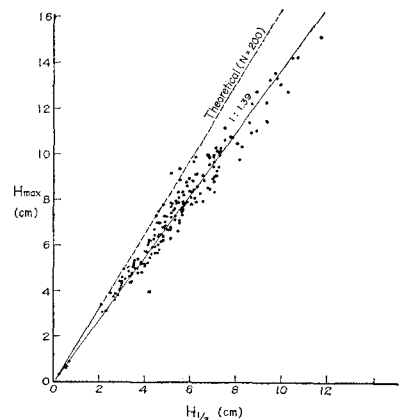


Fig. 6. Graph of H_{max} versus $H_{1/3}$.



(2) 周期について

深海風波の周期分布について Putz¹¹⁾ は Gamma 分布をなすと称し、また Bretschneider²⁾ は波の周期の2乗は Rayleigh 分布によって漸近されるといっている。浅海風波について各種周期の頻度分布を調べてみたのが図—10 である。1/3 最大周期 $T_{1/3}$ 、2 乗平均の平方根周期 T_{rms} 、最大周期 T_{max} と平均周期 T_{ave} との関係は図—11 が示すように

$$T_{ave} = T_{rms}$$

$$T_{1/3} = 1.23 T_{ave}$$

の直線にのっており、Sibul³⁾ の実験結果 $T_{1/3} = 1.24 T_{ave}$ とほぼ同じ値を示している。しかし現地海岸の観測結果では、1/3 最大周期 $T_{1/3}$ は大体平均周期 T_{ave} に等しいといわれ両者の相違を物語っている。

5. 結 論

以上著者らは風洞実験による浅海風波の発達過程における風速、風域、水深と波高の関係を無次元表示によりたがいの関係を求め、同時に波高と周期の統計的特性についても考察を行なった。その結果をまとめるとつぎのようである。

Fig. 7. Ratio of $H_{1/3}$ versus H_{rms} as a function of ϵ .

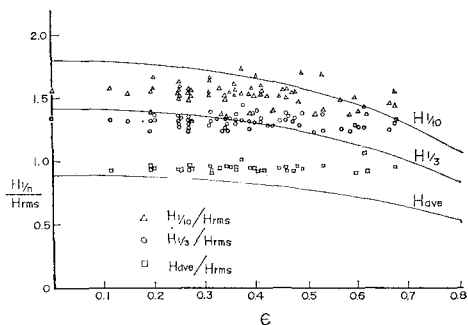


Fig. 8. Relationship between $H_{1/3}$ and E .

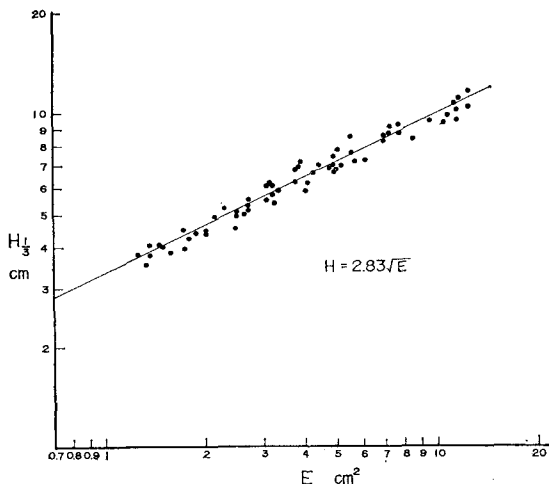


Fig. 9. Frequency distribution of wave heights.

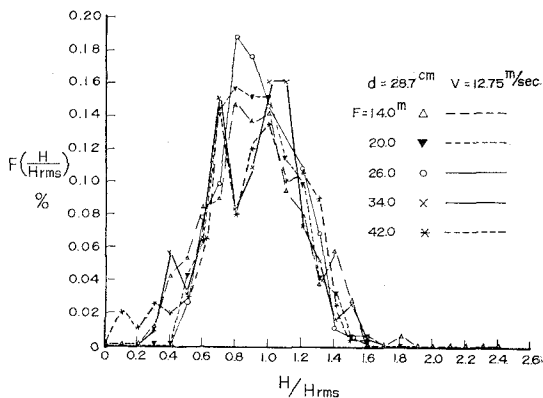


Fig. 10. Frequency distribution of wave periods.

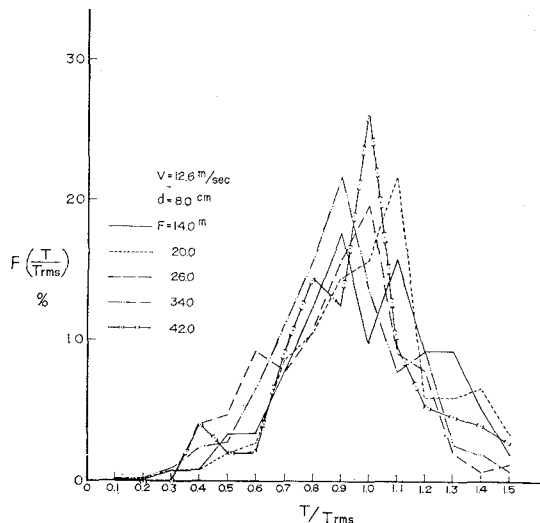
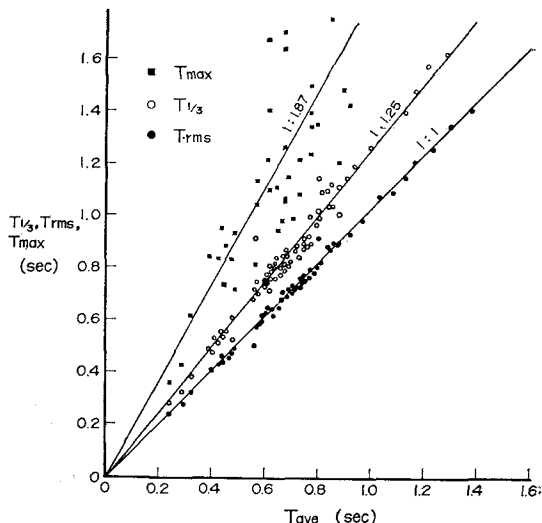


Fig. 11. Relationships of T , T_{rms} , and T_{max} versus T_{ave} .



(1) 浅海における風波の波高は Fetch が増すと同時に波高周期は増加する。ただし波形の制限を受け波は部分砕波を起し波高は若干減少し、さらに波長とともに波高も増してゆく。

(2) Bretschneider の浅海風波推算曲線はほぼ妥当であり、実験値はいずれも定常状態における波高と水深の関係曲線より小さい値を示した。ただし Fetch graph では深海波のそれよりは大きい波高を得ている。

(3) 実験における浅海風波の統計的性質は深海波と著しい変わりはない。波高分布は正規分布に近い、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波高 H_{ave} および 1/10 最大波高 $H_{1/10}$ の関係は深海波の Longuet-Higgins の理論値とはほぼ一致しており、スペクトルの幅による影響は無視できる状態である。周期もやはり正規分布をなしているが、統計的關係は現地海岸と若干異なっている。

(4) 波高と波の全エネルギーの関係は深海波の場合と一致している。

最後に本研究を行なうにあたり、実験、計算および資料整理に大いに助力していただいた 陳茂松、沙陽生助手、図面作製には 林国琛君の助力を得たことをここに記して深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

1) Thijse : Growth of wind-generated waves and energy transfer, Proc. Symposium on Gravity waves, National Bureau of Standards, Circular 521, Nov. 1952.

2) Bretschneider : Generation of wind waves over a shallow bottom, B.E.B. Tech. Memo. No. 51, Oct. 1954,
 3) 岩垣雄一・柿沼忠男・宮井 宏 : 現地海岸の海底摩擦係数について (1), 第12回海岸工学講演会講演集, 1965.12.
 4) 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, 1966.11.
 5) Johnson & Rice : A laboratory investigation of wind-generated wave, Trans. A.G.U. 33, 6, 1952.
 6) Hufft : Laboratory study of wind waves in shallow water, Jour. of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 84, No. WW 4, Sep. 1958.
 7) Hamada : On the f^{-5} Law of wind-generated waves. An experimental supplement, Report of Port and Harbour Research Institute, No. 12, June 1966.
 8) Hamada et al. : A note on the development of wind waves in an experiment, Report of Port and Harbour Research Institute, No. 12, June 1966.
 9) Longuet-Higgins : On the statistical distribution of the heights of sea waves, Jour. of Marine Research, Vol. 11, 1952.
 10) Cartwright & Longuet-Higgins : The statistical distribution of the maxima of a random function, Proc. Roy. Soc. (London) Ser. A, 230, 1956.
 11) Putz : Statistical distribution for ocean waves, Trans. A.G.U. Vol. 33, 1952.
 12) Bretschneider : Wave variability and wave spectra for wind generated gravity waves, B.E.B. Tech. Memo. No. 118, 1959.
 13) Sibul : Laboratory study of the generation of wind waves in shallow water, B.E.B. Tech. Memo. No. 72, 1955.