

高速風洞水槽による風波の発達について

国 司 秀 明・今 里 哲 久

ON THE GROWTH OF WIND WAVES BY HIGH-SPEED WIND FLUME.

By Dr. Sci. Hideaki KUNISHI and Norihisa IMASATO.

Synopsis : The growth of wind-waves under the strong wind (8m/sec-34m/sec) is studied by the wind flume experiments. The friction factor γ^2 and the roughness parameter z_0 become larger and larger with wind speed, depending on the fetch. Some discussions are given in comparison with Kunishi's experimental study (1959, 1962, 1963).

1. ま え が き

風浪の発生と発達の問題は、古来多くの人々の関心を集めながら、その機構解明はまだ必ずしも十分にはなされていない。すでによく知られているように、この問題に関する議論は、古く遮蔽効果の立場から Jeffreys^{5) 6)} (1924, 1925) によっておこなわれたが、近代的な取扱が発展をみせるのは、Sverdrup と Munk^{7) 8)} の研究以後である。今日、エネルギースペクトルの概念が風浪理論に取入れられ、J. W. Miles^{9) 10) 11)} と O. M. Phillips^{13) 14)} に代表される理論的な取扱も進んでいる。しかしながら、この問題を十分に把握するには、著者の一人、国司^{1) 2) 3) 4)} が指摘したように、精密な実験事実の集積と、それを基礎にふまえた、理論的検討が必要である。

国司^{1) 2) 3) 4)} は1959年に、風路中心で 1.6~11m/sec の風速について水槽実験を行い、波の発生、発達機構を議論したが、それによれば、初期動揺の過程を経て、水面の粗度として初期波の発生をみ、この波は水面粗度の性格を示しながら発達して風浪波へと移行していく。この時、風の摩擦係数 γ^2 は風速と共に大きくなり、水面上10mの高さに換算された風速 W_{10} の 20m/sec で 2.1×10^{-3} となっている。しかし、さらに高風速になった時、波はどのように発達していき、 γ^2 はどうかという問題は、風洞水槽の構造上から、未解決のままに残されていた。このような場合に、 γ^2 が一体どれ位の値になるかということは、台風に伴う高潮の問題とも関連して、実用上非常に興味ある問題である。

1961年に京都大学防災研究所に、風路中心の値で 5~40m/sec の範囲の風を送れる高速風洞水槽が完成したので、かかる高風速時の実験が可能となった。1962年に予備実験を開始して以来、多くの技術的な問題を解決しながら実験を繰返し、一応の結果が得られたので、その結果の概要を述べ、とくに、摩擦係数 γ^2 と粗度示数 z_0 とを中心として考察をおこなった。

2. 実験方法と測定結果

使用した風洞水槽は、京都大学防災研究所宇治川水利実験所に設置された高速風洞水槽で、その概要を Fig. 1 に示したが、水槽部の全長 40m、巾80cm、水深約 150cm、風路断面は 80×80 で水槽の風下側には勾配約 4°の消波スロープ (S) が取付けてある。なお、このスロープ部分の天井が高くなっているが、これは上下が可能で、今回の実験では天井を下げて吹出し口から約 30m まで、80×80 の風路断面となるようにした。また天井板を適当にずらせて、風路中心付近の平均風速 W が、測定点であまり違わないように考慮した。

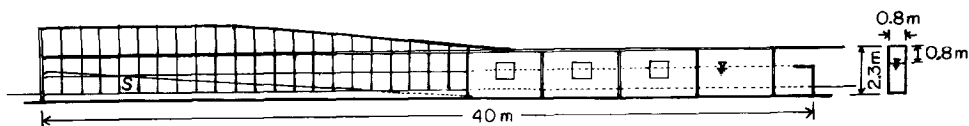


Fig. 1 Schematic view of high-speed wind flume.

吹送距離 10.9, 17.0m (Run. 31-42); 7.9, 13.9, 20.0m (Run. 51-62) の2組, 計5点で波浪要素と風速の鉛直分布とを測定した。

波浪要素は国司¹⁵⁾の方式にしたがって, Fig. 2 に示したような電気抵抗式の波高計を設計し, 各測定ごとに感度校正をおこなって使用した。この波高計の線形度は平衡点から $\pm 10\text{cm}$ で1%以内, $\pm 15\text{cm}$ で3%以内であった。

風速分布の測定はFig. 3 のような3杯の接点式風杯型風速計を使用して, 8m/sec から 34m/sec までの風速についておこなった。風速計は, 使用風速の範囲では, 回転数との間により直線性を示していたが, 測定日ごとに, 基準風速計とピトー管とを使って, 煙風洞で感度検定をおこなった。また応答時定数は数秒であった。

静止水面を基準面とした風速分布の一例をFig. 4 に示す。最近この分布の kink の存在が問題にされているが^{16) 17) 18)}, 今回の測定結果については点のばらつきもあって, いづれとも断じ難いので, 風速分布は次の(1)式で表わされる中立大気に対して成り立つ対数分布にしたがうものとして, 最小自乗法で摩擦速度 W_* と粗度示数 z_0 とを求めた。

$$\frac{W}{w_*} = 5.75 \log \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

波浪要素については得られた波の記録から連続した 100個の波について, 平均波高 $\bar{H}$ および平均周期 $\bar{T}$ とを求めた。Fig. 5 は $\bar{T}$ の風路中心風速 $\bar{W}$ による変化を示したものであるが, 国司^{3) 4)}の実験との接続はあまり滑かではないけれども, 全体としては国司の測定結果の延長上にあるものと考えられ, $\bar{T}$ は $\bar{W}$ と共に増加している。 $\bar{H}$ についても事情は同様である。(Fig. 6)

国司^{3) 4)}は, Fig. 7 に示されたように $w_*\bar{H}/\nu_a$ と w_*L/ν_a との関係を使って波の発達状況を特徴づけた。今回の測定値について同様の手続きをとってみると, 予想されるように点は国司の実験の延長上に分布しており, 風浪波の段階に入っていることを示している。このことは, $g\bar{H}/w_*^2$ のフェッチグラフ (Fig. 8) にも現れており, 国司^{3) 4)}の実験と較べてみると, 少し $g\bar{H}/w_*^2$ の大きい方はずれてはいるが, 一般に認められているようにほぼ直線上に分布している。

またFig. 9 に示したように, 代表風速として摩擦速度 w_* のかわりに風路中心風速 $\bar{W}$ をとってフェッチグラフ¹⁹⁾を作ってみると, Kunishi^{3) 4)}, Johnson and Rice²⁰⁾, Bretschneider and Rice²¹⁾, Hamada and Mitsuyasu and Hase²²⁾, 等の測定結果とも一致していた。Fig. 7 でわかるように, 風浪波の段階では $w_*\bar{H}/\nu_a \propto w_*L/\nu_a$ の関係が成り立っているから, 当然波形勾配は一定となるが, 今回の実験では 0.11~

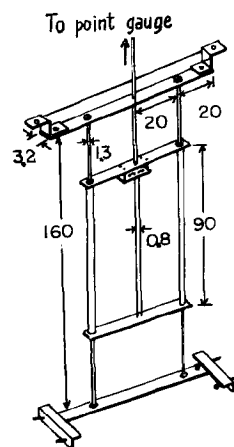


Fig. 2 Sensor of wave meter (unit: cm).

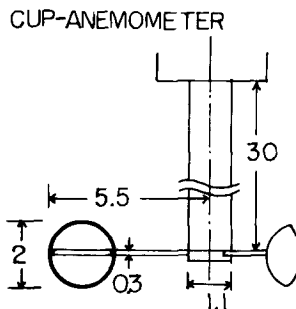


Fig. 3 Cup-anemometer (unit: cm).

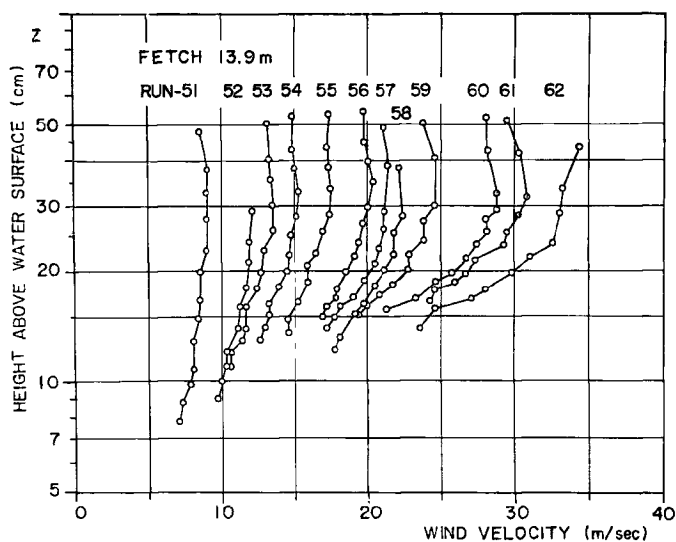


Fig. 4 Wind profiles.

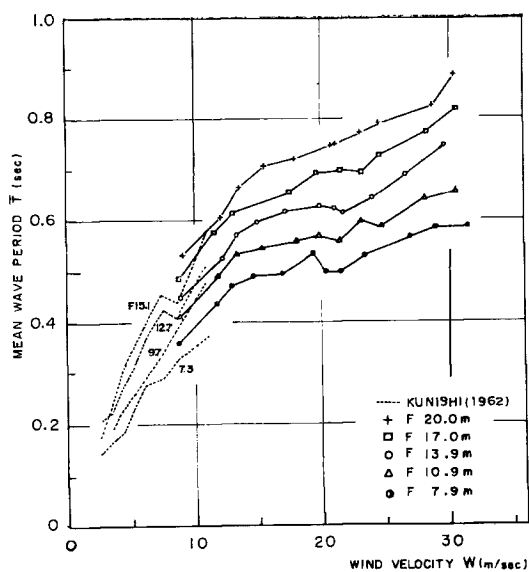
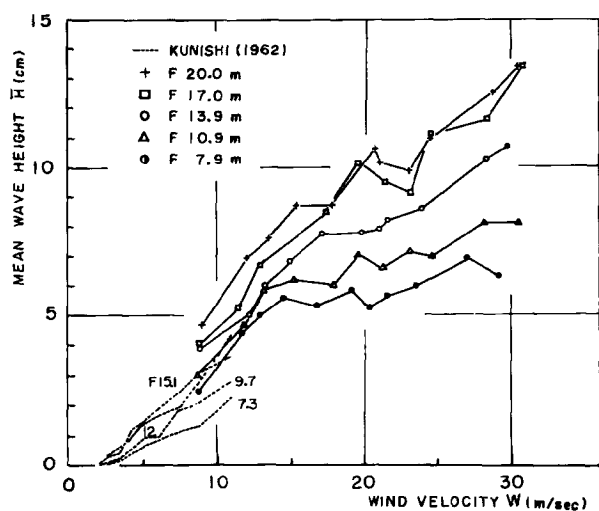
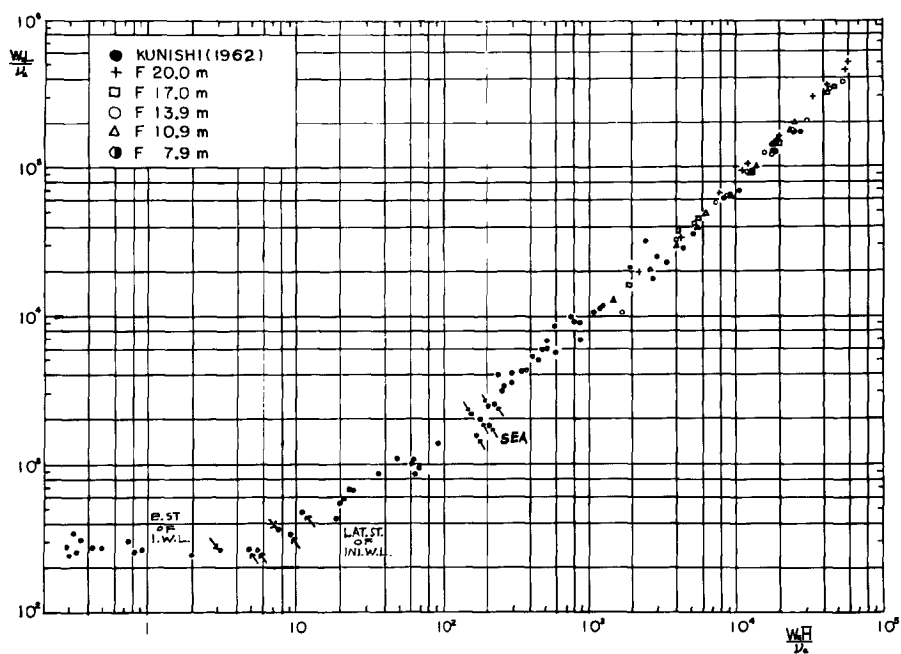


Fig. 5 Relation between mean wave period T and wind velocity W .

Fig. 6 Relation between mean wave hight $\bar{H}$ and wind velocity W .Fig. 7 Empirical universal law between $w_*\bar{H}/\nu_a$ and w_*L/ν_a .

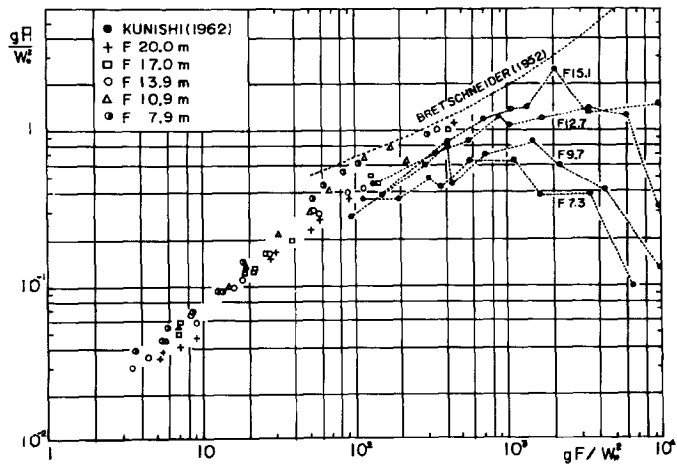


Fig. 8 Fetch graph.

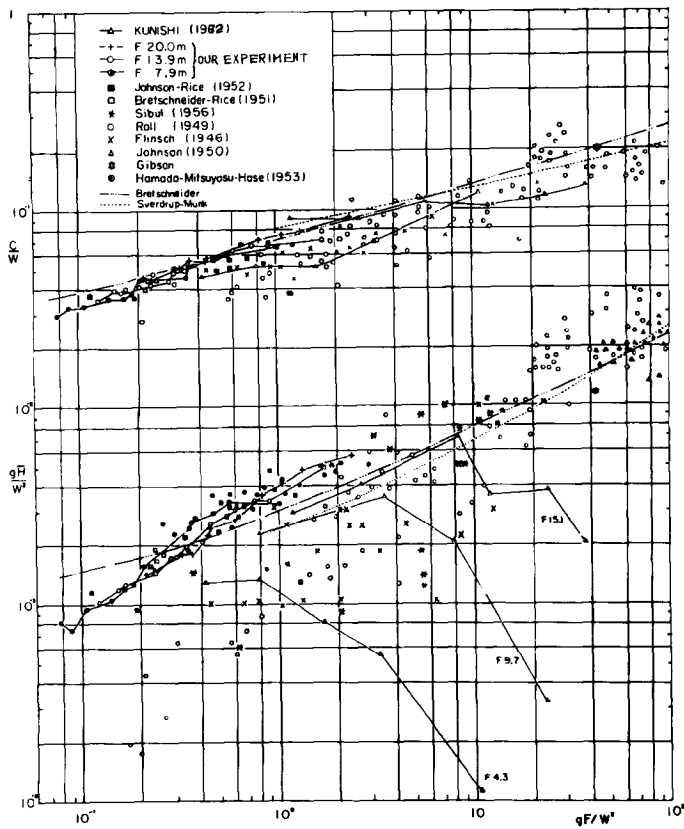


Fig. 9 Fetch graph (after Wiegel).

0.15位の値で、国司^{3) 4)}の結果0.10よりやや大きい値を示している。

3. 水面摩擦係数と粗度示数

海洋学では普通、水面における風の摩擦応力 τ_0 を水面上 10m の高さでの風速 W_{10} を使って

$$\tau_0 = \rho_a \gamma^2 W_{10}^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表わし、無次元の係数 γ^2 を摩擦係数と呼んでいる。ここで ρ_a は空気の密度である。これまで、多くの人がこの係数に関心を寄せ、さまざまな結果を報告している^{23) 24)}。多くの人の最近のほぼ一致した見解では、この γ^2 の値は以前に考えられていたような一定値ではなく、風速と共に増すようである。Fig. 10 に点

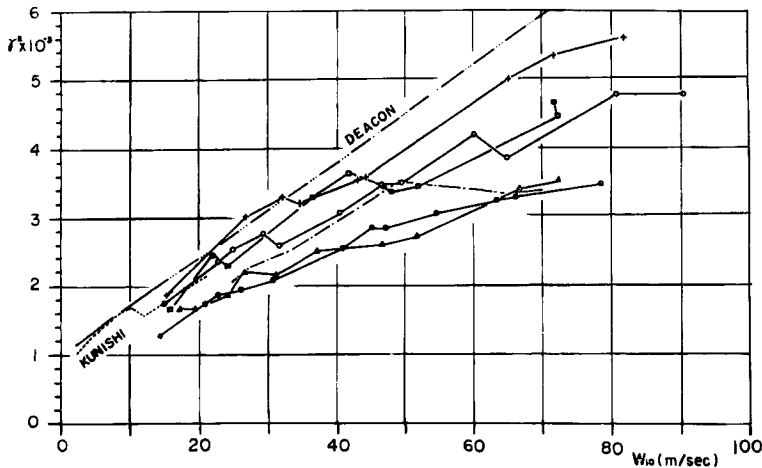


Fig. 10 Friction factor.

線で示した国司^{3) 4)}の水槽実験の結果も同様であって、風速と共に大きくなり、 W_{10} が 20m/sec のとき、 2.1×10^{-3} という値をとっている。同じ図に一点鎖線で示したこの高速風洞水槽による予備実験から得た γ^2 は³⁾ (F9.6 ; 13.6m で値の平均値をとってある)、国司^{3) 4)}の実験の延長上を風速と共に増加していき、 W_{10} が 50m/sec 付近で一定値 3.4×10^{-3} となっていた。今回の実験では、 W_{10} が 50m/sec 付近までは予備実験の結果と傾向はよく一致しているが、それから先では一定値を示すことなく増加して、最大値 5.6×10^{-3} という大きな値になっている。

予備実験をおこなった時、水槽側面のガラスの強度の関係から、水深約 110cm とせざるを得なかったもので、水面は吹出し口から 40cm ほど低く、またそのために水位計をそれだけ下げなければならなかったので、水位計支持棒(図2の巾 3.2cm の上側のアングル)が風路内にかなり入っていた。このために、風速分布が歪み、とくに高風速の場合にそれが著しかったことや、吹出し口と水面との接触が滑かでなかったことなどが、おそらくこのような違いを生んだのであろう。今回の本実験では、その後ガラスを透明プラスチックにとりかえて補強したので、このような欠陥はなくなっており、今回の測定結果の方が信頼出来るものと考えられる。

なお、Fig. 10 の三点鎖線は Deacon²⁴⁾が多くの測定結果に基いて、2 ~ 13m/sec の風速に対して与えた式の延長を示したもので、今回の測定値は、この外挿値よりは小さい。

これらの点からみて、今回得られた γ^2 の値は、一般的にこれまで想像されていたよりはかなり大きいけれども、まず信頼できるものと考えられる。しかしこれらの値が外洋にも直ちに適用できるかどうかには、

なお問題が残されているし、後に示すように、整理の方法自体にもいくつかの問題があるから、今後の十分な検討が必要である。

なおまた、この γ^2 には明らかな吹送距離への依存が認められることを記しておかなければならない。国司^{3) 4)}の結果では吹送距離に依存してはいるが、風速が大きくなると、この依存度はそれ程大きくはない。これはすぐ次に示す gz_0/w_*^2 の値が、風速が大きくなった時に一定値に近づいていたためであるが、今回の実験ではそのような傾向が認められなかったことに対応している。

最後に、 γ^2 を支配する z_0 の平均波高 H 並びに吹送距離 F との関係について簡単に記しておこう。外洋では z_0 を含む無次元量 gz_0/w_*^2 が一定値をとることが Charnock²⁵⁾ や Ellison²⁶⁾ によって主張されており、国司の実験でもそれを支持しているようであるが、Fig. 11 に示した w_*H/ν_a との関係を見ると、この

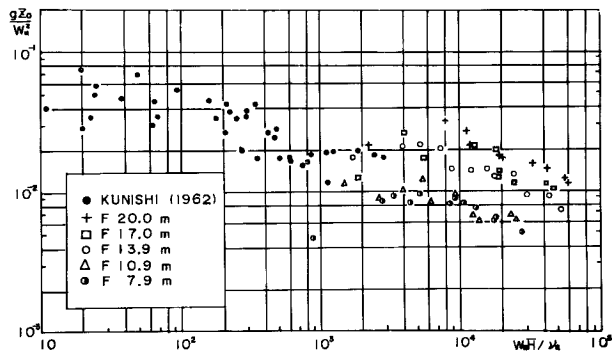


Fig. 11 Relation between gz_0/w_*^2 and w_*H/ν_a .

量は吹走距離 F に依存しつつ小さくなっていて、一定値をとるとは認められない。

また、 z_0 の別の無次元量 w_*z_0/ν_a と w_*H/ν_a との間には

$$\frac{w_*z_0}{\nu_a} = 0.115 + 0.1 \frac{w_*H}{\nu_a} \dots\dots\dots (3)$$

なる関係が成立すると国司^{3) 4)}は結論したが、今回の実験ではむしろ w_*H/ν_a の 2 乗に比例しているようで

$$\frac{w_*z_0}{\nu_a} = 5.9 \times 10^{-6} \left(\frac{w_*H}{\nu_a} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

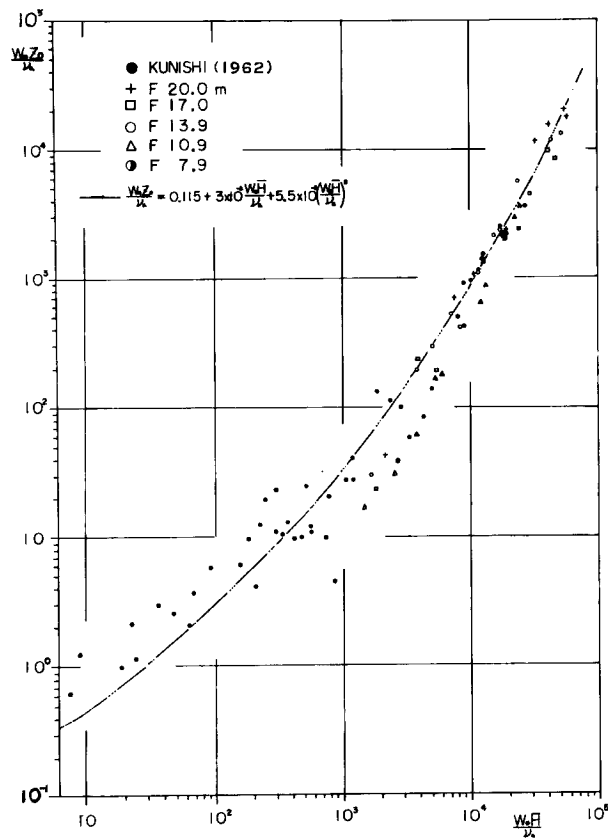
とあらわせる。さらに両者を合わせて全体的にみると、Fig. 12 に三点鎖線で示した 2 次の関係、

$$\frac{w_*z_0}{\nu_a} = 0.115 + 3.0 \times 10^{-2} \left(\frac{w_*H}{\nu_a} \right) + 5.5 \times 10^{-6} \left(\frac{w_*H}{\nu_a} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

で一応あらわせる。しかし点の乗りぐあいは必ずしもよくはなく、むしろ w_*H/ν_a の 10^2 以下では (3) 式、 10^3 以上では (4) 式、 10^2 と 10^3 との間では w_*z_0/ν_a がほぼ一定の値をとるとみる方がよいかも知れない。

4. む す び

今回の実験から得たことを、国司^{3) 4)}の実験と対比させてまとめて記しておく。第一に、測定結果はおおむね、国司の延長上に位置している。第二に、これは相違点であるが、粗度示数 z_0 の値が大きくて H^2 に比例して増加しており、かつまた吹走距離に依存しているために、摩擦係数 γ^2 も吹走距離に依存しつつ風速と共に大きくなり、その最大値は 5.6×10^{-3} にも達している。また gz_0/w_*^2 も吹走距離に依存して変化し、一定値を示さない。

Fig. 12 Relation between $w_* z_0 / \nu_a$ and $w_* H / \nu_a$.

以上われわれは先の国司^{3) 4)}の取扱いにならって固定壁面の粗度からの類推で議論を進めて来たわけであるが、このようなやや異なった結果は水面上の粗度が固定壁の場合と必ずしも同じ性質ではないということを示唆している。問題の核心はなぜそのような異なるかを明らかにすることであり、今後の重要な研究問題である。その第一歩はおそらく近年その価値の認められてきた風波発達に関する Miles^{9) 10) 11) 12)}の機構との対比から始められるべきであろう。

またこれに関連して、実は風速分布の基準面をどこにとるべきかという問題がある。Fig. 13はさまざまな基準面に対する実測値の対数分布からの残差の自乗和を示したものである。図からわかるように、残差の自乗和が最も小さくなる基準面の位置は記号Cで示した平均的な波の山よりも随分高いところにあらわれており、粗度示数 z_0 も摩擦係数 γ^2 も非常に小さくなる。例えば図の Run-59 の場合には、 z_0 は $5 \times 10^{-3} \text{cm}$ 、 γ^2 は 10^{-3} の程度となる。このようなことは、いかにも常識離れているという意味で、われわれはこのような立場を無視し、基準面を平均的な水面にとったが、今後、十分検討しなければならない問題である。これらの問題の解決には、理論的考察ばかりでなく、例えば flux method による応力測定などの新しい実験を付加する必要があるかも知れない。

またこのような水槽実験によって得られた結果が、そのまま外洋の十分に発達した風波に適用出来るかどうかということも、大きな課題の一つとして残されている。それは、水槽実験で得られている波が、これま

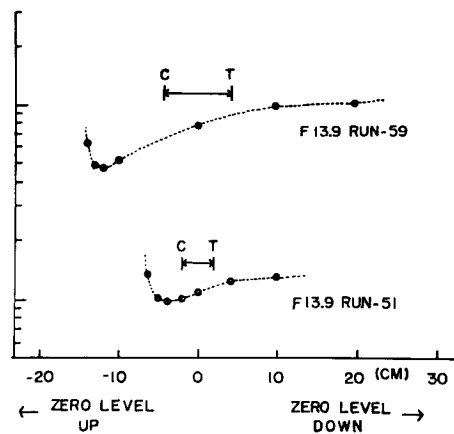


Fig. 13 Variance of the residual of wind profile. C shows the position of mean wave crest and T of mean wave trough.

での考察から風浪波ではあるけれども、波形勾配が大きく、非常に若い波であることがわかるからである。この問題を解決するには、もっと吹送距離の大きいところ、例えば湖水とか、海洋観測塔とかでの研究が必要である。

最後にこの研究を遂行するに当って、多くのご助言をいただいた速水頌一郎教授に深く感謝の意を表する。また技術的な援助をいただいた田中耕三郎、今井繁一両技官、並びに実験資料の整理や計算に助力していただいた岩本詔子、仁井田繁子両嬢に深く感謝するものである。

参 考 文 献

- 1) 国司秀明, 風洞水槽による風波の研究 (I), 京大防災研年報, 第1号, 1957, 119-127.
- 2) Hayami, S., and H. Kunishi; A wind flume study on the generation of waves, Proc. Inter. Oceanog. Cong. (preprint), 1959, 753-755.
- 3) 国司秀明, 風洞水槽による風波の研究 (II), 日本海洋学会創立20周年記念論文集, 1962, 470-487
- 4) Kunishi, H.; An Experimental Study on the Generation and Growth of Wind Waves., Des. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., No. 61, 1963, 1-41.
- 5) Jeffreys, H.; On the formation of water waves by wind, Proc. Roy. Soc. A 107, 1925, 189-206.
- 6) Jeffreys, H.; On the formation of water waves by wind. (2nd paper), Proc. Roy. Soc. A. 110, 1926, 241-247.
- 7) Sverdrup, H. U., and W. H. Munk; Empirical and theoretical relation between wind, sea, and swell, T. A. G. U., Vol. 27, 1946, 823-827.
- 8) Sverdrup, H. U., and W. H. Munk; Wind, sea and swell; theory of relations for forecasting, H. O. Pub. No. 601, 1947,
- 9) Miles, J. W.; On the generation of surface waves by shear flows, J. F. M., Vol. 3, 1957, 185-204.
- 10) Miles, J. W.; On the generation of surface waves by shear flows. Part 2., J. F. M., Vol. 6, 1959, 568-582.

- 11) Miles, J. W. ; On the generation of surface waves by turbulent shear flows., J. F. M., Vol. 7, 1960, 469-478.
- 12) Miles, J. W. ; On the generation of surface waves by shear flows. Part 4, J. F. M., Vol. 13, 433-448.
- 13) Phillips, O. M. ; On the generation of waves by turbulent wind. J. F. M., Vol. 3, 1957, 417-445.
- 14) Phillips, O. M. ; The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves., J. F. M., Vol. 4, 1958, 426-434.
- 15) 国司秀明 ; 電気抵抗式波高計の設計について, 京大防災研年報, 第3号, 1959, 65-73.
- 16) Sheppard, P. A. ; On the effects of turbulent flow—eddy fluxes, Geoph. Res. Paper, No. 19, 1951, 345-354.
- 17) Fleagle, R. G., J. W. Deardorff, and F. I. Badgley. ; Vertical distribution of wind speed, temperature and humidity above a water surface., J. M. R., Vol. 17, 1958, 141-157.
- 18) Takeda, A. ; Wind profiles over Sea Waves., J. Oceanog. Soc. of Japan, Vol. 19, 1963, 136-142.
- 19) Wiegell, R. L. ; "Wind Waves and Swell", Proc. 7th Conf. on Coastal Engineering, Council on Wave Research, The Engineering Foundation, 1961, 1-40.
- 20) Johnson, J. W., and E. K. Rice. ; A Laboratory Investigation of Wind-Generated Waves., T. A. G. U., Vol. 33, 1952, 845-854.
- 21) Bretschneider, C. L., and E. K. Rice. ; The generation and decay of wind waves in a sixty-foot channel., Inst. Eng. Res., Issue 327, Ser. 3, Univ. of Calif., Berkeley, 1951.
- 22) Hamada, T., H. Mitsuyasu., and M. Hase. ; An experimental study of wind effect upon water surface., Report of Trans. Tech. Res. Inst., Tokyo, 1953, 22pp.
- 23) Wilson, B. W. ; Note on Surface Wind Stress over Water at Low and High Wind Speeds., J. G. R. Vol. 65, 1960, 3377-3382.
- 24) Deacon, E. L., and E. K. Webb. ; The Sea, Vol. I, Chap. III, 1962, 43-87.
- 25) Charnock, H. ; Wind stress on a water surface., Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., Vol. 81, 1955, 639.
- 26) Ellison, T. H. ; Atmospheric turbulence. Surveys in mechanics, Cambridge Univ. Press, 1956, 400-430.