

逆風による波の減衰に関する実験的研究 (1)

光 易 恒*・水野信二郎**

1. 緒 言

うねりが風波の発生域内に進入して、風の方向と逆向きに伝播する際、うねりの減衰が起こることはよく知られている。その減衰機構は風波の発生の問題と同様に重要であり、すでに理論的研究はPhillips¹⁾、Longuet-Higgins²⁾その他によって、2, 3 発表されているが、それらの理論の正否を判断するに十分な実験的研究は、著者等の知る限りでは、ほとんど見当たらない。

この論文の目的は、(1) 風洞水槽内で造波機によって起こされた規則波が逆風によって減衰する過程を詳細に調べ、その特性を明らかにすること、(2) 実験結果を逆風による波の減衰に関する理論的研究の結果と比較検討すること、等である。

2. 実験装置および方法

実験は、九州大学応用力学研究所津屋崎実験所に新しく設置された風洞水槽（測定部長さ 13.4 m, 断面幅 0.6 m, 高さ 0.8 m, 水深 0~0.4 m）を使用して行なわれた。実験装置の概略図を図-1 に示す。風は図の右端から、ハニカム、スクリーン部を経て整流され、さらに縮流されて測定部に入る。

境界層を厚くするためと、水面付近の気流の流れを横方向に一樣にするために、遷移板が設けられた。遷移板の下流端から 8.54 m の所に排風筒を入れて風を上方に逃がし、また、風洞の排風筒より下流の部分を密閉したので、造波機的位置では無風状態になっていると考えてよい。

造波機で起こした波が水槽の右端で反射されるのを防ぐために、勾配約 1/10 の消波機を取り付けたが、なお

不十分なために、さらに、遷移板の下方にフィルター (5) を置いた。また、造波機のすぐ前方にあるフィルター (2) は、造波板による風波の反射の影響を防ぐために設けたものである。

以上の準備をした結果、水槽の送風機側の端よりの反射率は、用いられた実験波では高々 7 % であることが確かめられた。

波の測定は、電気抵抗線型の波高計 6 個を使用して、風波の発生域の終端からはかって、右方向に 26 cm の位置を測点 No. 1 と定め、以下 1.2 m の間隔で、測点 No. 2, 3, 4, 5, 6 を定めて、各断面の中央で行なわれた。設定風速 U_r は遷移板の上方に置かれた標準ピトー管より決定し、水面上の風速の鉛直分布の測定は、測点 No. 2, 4, 6 の 3 点で標準ピトー管を使用して行なわれた。

実験の手順は次のとおりである。水槽中の水が十分に静まるのを確かめて、風を吹き、風速を設定風速に維持する。風波が発生しはじめて約 2 分後（このとき風波は定常状態に達している）に造波機を作動させると、風波に逆らって規則波が伝播する。規則波の発生と同時に、各測点の波高計からの出力をデータレコーダに 5 分間同時記録する。得られた波高計の出力は規則波の信号に風波の信号が重畳されている。それゆえ、規則波の減衰特性を調べるためには、なんらかの方法で波高計の出力から規則波のみを分離してとりだすことが必要である。今回のデータ解析では、波高計の出力に低域濾波器 ($f_c = 1.78 \text{ Hz}$) を接続し、その出力信号をペン・レコーダに記録し、約 1 分間の記録波形から規則波の波高を読みとった。この方法で波高を測定すると、高風速 (10 m/sec および 12.5 m/sec) において、最も風下の波高計 (No. 1) では、かなりの量の風波の成分が記録波形に含まれるが、

風波の特性周期数と、規則波の基本波成分がかなり分離している他の測点では十分有効であった。今後、共存波のスペクトル解析あるいは規則波について位相平均をとる方法などによって風波を除去し、それらの結果を検討することを計画している。

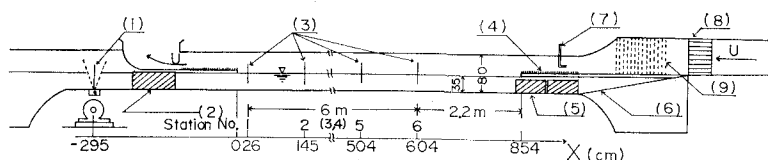


図-1 実験装置

- (1) 造波機 (2) フィルター (3) 波高計 (4) 遷移板 (5) フィルター (6) 消波機
(7) 基準ピトー管 (設定風速用) (8) ハニカム (9) スクリーン

* 正会員 理博 九州大学教授 応用力学研究所

** 正会員 理博 九州大学助教授 応用力学研究所

実験に用いた波の特性は表-1 に示すとおりである。周期と初期波高がそれぞれ異なる 9 種類の規則波につ

表-1 実験波の特性

T (sec)	L (cm)	h/L	H_{00} (cm)	H_{00}/L
0.8	97.7	0.297	1.5	0.0154
			2.5	0.0256
			4.0	0.0409
1.0	142	0.246	1.5	0.0105
			2.5	0.0176
			4.0	0.0281
1.2	186	0.188	1.5	0.0081
			2.5	0.0134
			4.0	0.0215

T : 波の周期, L : 波長, h (=35 cm): 水深
 H_{00} : 波高の代表値

いて、5 個の設定風速 (U_r : 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 m/sec) に対して、波高の減衰特性が解析された。

3. 実験結果

(1) 水面上の風速分布

水面上の境界層の風速分布が、風波のみ発達している場合 (以下“風のみ”という) と造波機による逆行波の上に風波が重畳している場合 (以下“波と風”という)

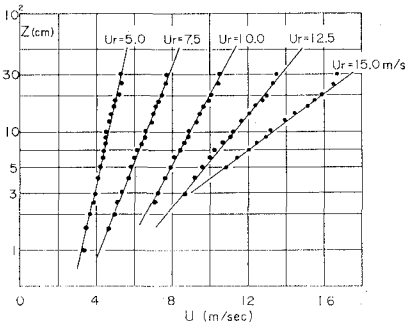


図-2 (a) “風のみ” 測点 No. 2 の風速分布

について、それぞれ測点 No. 2, 4, 6 で測定された。測定結果の数例が 図-2 (a) と (b) に片対数グラフで示

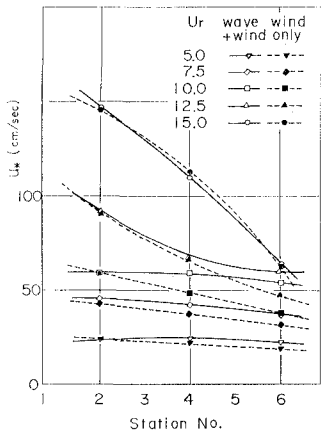


図-3 風の摩擦速度

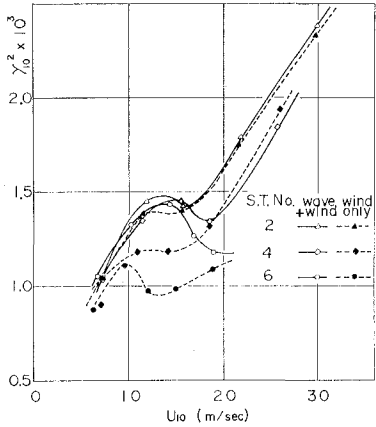


図-4 風の摩擦係数

されている。図に見られるように、風速分布の水面に近い部分是对数分布 $U/u_* = 1/\kappa \ln(Z/Z_0)$ によって十分よく近似される。

ここに、 u_* は摩擦速度、 κ は Kármán 定数 (≈ 0.4), Z_0 は粗度定数、 Z は無風時における水面上からの鉛直距離を表す。 u_* を測定 Data から最小二乗法近似で

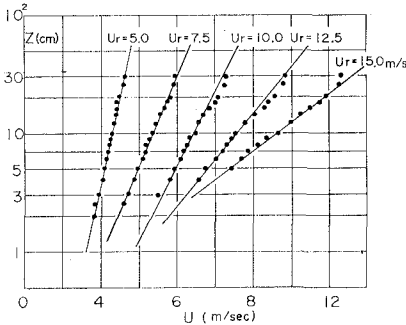


図-2 (b) “波と風” 測点 No. 2 の風速分布

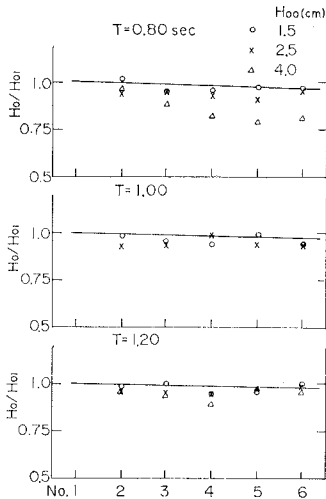
計算し、図-3 にまとめてプロットした。また、海におけるデータとの比較の便のために、今回の測定データより求めた $\tau_{10}^2 - U_{10}$ 特性が 図-4 に示されている。ここに U_{10} は水面上 10 m における風速で、 u_* , Z_0 の値より求めることができ、 τ_{10}^2 は海面に作用する応力を、 $\tau \equiv \rho_a u_*^2 = \rho_a \tau_{10}^2 U_{10}^2$ と表現した場合の、いわゆる水面の摩擦係数で、 u_* , U_{10} より求めることができる。図-3 によると、 u_* は、一般に Fetch および設定風速とともに増加している。“風のみ”のデータと“波と風”のデータとを比較すると、測点 No. 2 では両者の値は各設定風速においてほぼ一致しているが、測点 No. 4 および特に測点 No. 6 では、“波と風”の値の方がやや大きめであり、規則波が水面上の風速分布の勾配にかなりの程度影響を与えることを示している。次に、 τ_{10}^2 の振舞いで注目されることは、 τ_{10}^2 は U_{10} の増加とともに、ほぼ直線的に増加することが見られるが、こまかく見る

と、 $U_{10} \approx 10 \sim 15$ (m/sec) において勾配がゆるやかになっていること、測点 No. 2 のデータを除いて、一般に“風のみ”のデータが低い値を示す傾向があること、および測点 No. 6 のデータでは“波と風”と“風のみ”の r_{10}^2 の値にかなりの差が見られるが、 $U_{10} > 15$ m/sec では、風速の増大により、“波と風”の r_{10}^2 の値が減少しはじめて、“風のみ”のデータに近づくこと等である。

(2) 逆風における規則波の減衰

a) 無風時における波の減衰

造波機によって起こされた波は、無風時において、水の内部粘性、底面摩擦および側壁の影響等によって、波



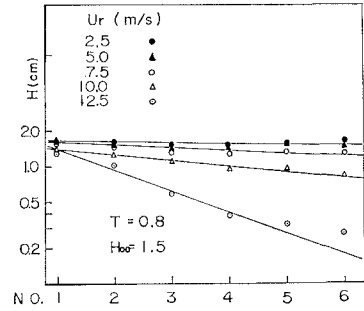
図—5 波高の減衰（無風時）

高が減衰する。図—5 は無風時における各測点での波高値 H_0 を測定 No. 1 における波高値 H_{01} で無次元化したものである。

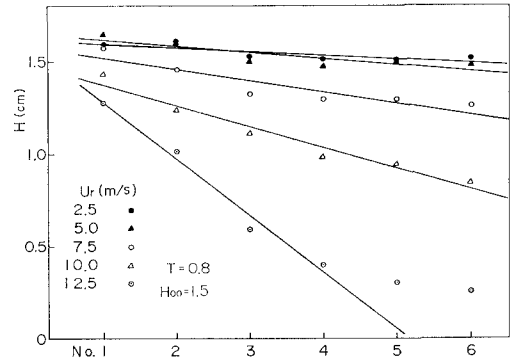
実線は岩垣³⁾らの式から求めた波高減衰の理論曲線で、底面および両側壁の摩擦に基づくものである。内部粘性の効果は、前者に比べて 1 桁値が小さいので無視した。実験値と理論曲線とを比較すると、一般に実験値の方がやや減衰率が大きめであるが、周期 0.8 秒、波高 4 cm の波は特に減衰が著しいので、他の原因に基づくものと思われる。その原因は現在のところ明確ではないが、高風速 (10 m/sec) における逆風の実験の際に、規則波の波面が横方向に強い三次元的変化をひき起こしたことから考えると、周期が短く、波形勾配の大きい波は波峰線の方に不安定となりやすいことがあげられる。

b) 逆風時の減衰特性

図—6 (a) と (b) には逆風時において各測点 (6 点) の波高が、設定風速 U_r とともに減衰する模様の一例を普通目盛と片対数目盛で示してある。図から明らかなように各測点における実測値の間にはかなりのバラツキがあつて、2 点間の勾配から減衰率を求めようとすると、正となる場合が起こるので、各測点の波高値を結ぶ最適



図—6 (a) 波高の減衰（逆風時）



図—6 (b) 波高の減衰（逆風時）

な直線を最小二乗法によって計算し、 dH/dX と $d \log_e H/dX$ が求められた。ただし、この計算の際に、波高値をグラフにプロットして見て、明らかに直線からはずれている値は取除かれている。このようにして求めた直線が図—6 に実線で示されている。このようにして得られた減衰率 $(dH/dX)_1$ 、 $(d \log_e H/dX)_1$ は、風による減衰率 dH/dX 、 $d \log_e H/dX$ と無風時における減衰率 $(dH/dX)_0$ 、 $(d \log_e H/dX)_0$ との和になっているものと考えられるので、風のみによる減衰率を

$$\frac{dH}{dX} = \left(\frac{dH}{dX} \right)_1 - \left(\frac{dH}{dX} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d \log_e H}{dX} = \left(\frac{d \log_e H}{dX} \right)_1 - \left(\frac{d \log_e H}{dX} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

によって、それぞれ求めた。

4. 各種の理論と実験結果との比較

逆風域を進行する規則波の減衰率は、われわれが今回問題としているように時間的に定常状態にある場合には次式で与えられる。

$$C_g \cdot dE/dX = -R \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、左辺の C_g は規則波の群速度、 E は規則波のエネルギーで次式で与えられる。

$$E = \rho_w \cdot g a^2 / 2 = \rho_w g H^2 / 8 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 $a (= H/2)$ は規則波の振幅である。また、式 (3) の右辺の R は規

則波を減衰させるように作用している各種の機構による波に対する仕事率を一般的に表現したものである。 R の中には当然、水の粘性による効果も含まれるが、今の場合、この影響を前もって近似的に取除いた測定量を基にして、逆風のみによる波の減衰を調べようとしているので、これに関する議論は省略する。

逆風による波の減衰機構として従来提出されている代表的なものをあげると、[I]波面に沿って流れる乱れた気流と波との相互作用によるもの(Phillips¹⁾、[II]うねりとうねりに重畳して発生した風波との2次のオーダーの非線型干渉(radiation stress)ならびにうねりの峯における風波の碎波の効果によるもの(Phillips¹⁾、[III]波の峯付近で碎波しつつある風波による仮想水平応力の効果(maser-like action)によるもの(Longuet-Higgins²⁾、[IV]うねりの峯と谷とにおける接線応力の差(variable tangential stress)の効果によるもの(Longuet-Higgins²⁾、[V]波の残留前進速度に対する風の応力の効果によるもの(Sverdrup & Munk³⁾が、風波の発達機構として考えたものに対応)などがあげられる。

このうち、[I]に関しては、Phillipsが提出した式を基にして数値的に検討した結果、われわれの実験条件においては、この効果は分子粘性の効果の数分の1程度で無視できることがわかった。そこで[II]以下の機構について、詳しい検討を行なった。[II]以下の機構について、式(3)の右辺の R を、それぞれ、原著者の提出した式(ただし、われわれの実験条件に合わせるため、浅水波の式に変形)にしたがって、具体的に表現すると次のようになる。

$$[II] \quad R_p = A_p \cdot \frac{3}{2} \rho_a u_*^2 \frac{\pi H}{L} \cdot C_w \coth kh \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 A_p は今回新たに導入した無次元定数、 C_w は風波の位相速度、 $k(=2\pi/L)$ は波数、 h は水深である。

$$[III] \quad R_L = A_L \tau_0 u = A_L \rho_a u_*^2 \frac{\pi H}{L} \cdot C \coth kh \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 A_L は今回新たに導入した無次元定数、 u は波の軌道粒子速度、 C は波の位相速度である。

$$[IV] \quad R_L' = \frac{1}{2} \tau_1 u = A_L' \frac{1}{2} \rho_a u_*^2 \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 C \cdot \coth kh \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 τ_1 は波形 η と同位相の variable tangential stressの振幅であるが、今回特にこれを次のように仮定した。

$$\tau_1 = A_L' \rho_a u_*^2 \cdot \frac{\pi H}{L} \dots\dots\dots (8)$$

$$[V] \quad R_{S.M.} = \tau_0 \cdot u_0 = A_{SM} \frac{1}{2} \rho_a u_*^2 \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2$$

$$\cdot C \frac{\cosh 2kh}{(\sinh kh)^2} \dots\dots\dots (9)$$

ここに u_0 は水面における波の残留前進速度、 A_{SM} は今回新たに導入された無次元定数である。

上記の各式を一瞥すると、それらは、一般的に次のように表現され、非常に類似した形をしていることがわかる。

$$R = A \rho_a u_*^2 \cdot (kH/2)^n \cdot C \cdot F(kh) \dots\dots\dots (10)$$

相互の差は、 A および $F(kh)$ の形と、 n の値(1または2)とである。式(10)を式(3)の右辺に代入して、 $k/g = (1/C^2) \cdot \tanh kh$ の関係を利用して変形すると、式(3)は次のようになる。

$$\frac{dH}{dX} = 4A \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \left(\frac{u_*}{C}\right)^2 \frac{C}{C_g} \tanh kh \cdot F(kh) \dots\dots\dots (11)$$

($n=1$ の場合)

$$\frac{d \log_e H}{dX} = A \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \cdot \left(\frac{u_*}{C}\right)^2 \frac{C}{C_g} k \cdot \tanh kh \cdot F(kh) \dots\dots\dots (12)$$

($n=2$ の場合)

すなわち、 $n=1$ の場合には、波高は進行距離 X とともに直線的に減衰し、 $n=2$ の場合には、指数的に減衰することが示される。これらの式の左辺は波高の減衰の実験結果を用いて、式(1)および式(2)から得られる。他方、右辺に関しては、それぞれの機構について、測点 No. 2 における風速分布より求めた u_* の値ならびに無風時の波の特性を基にして計算を行ない、各機構について今回導入した無次元定数 A の値を求め、その性質を調べた。

波の発達機構としての、Miles 機構⁷⁾ は、逆風の場合には、 $U(Z_c) = C$ となる高さ Z_c が存在しないので、減衰機構としては作用しない。しかしながら、Miles 機構による波に対する仕事率の式を形式的に求め本来の Miles 機構と混同を避けるため、 β のかわりに A_M を使用して表現すると、

$$R_M = A_M \cdot \frac{1}{2} \rho_a U_1^2 \cdot (kH/2)^2 C \dots\dots\dots (13)$$

となり、形式的には式(10)で $n=2$ としたものに对应していることがわかる。ただし、 $U_1 = u_*/\kappa$ である。

理論と実験との比較の結果を無次元比例定数を基にして述べると次のようになる。ただし、 A_p および A_L は減衰率の理論値に対する実測値の比とみなすことができるが、 A_L' 、 A_{SM} 、および A_M は、理論式における未定係数として残された無次元定数であるので、理論値に対する実測値の比という解釈はあてはまらない。

[II]の機構に対応する A_p の値は大部分 0.7~7 の範囲にあり、 H/L とともに増大する傾向がある。ただし、 u_*/C に対する依存性ははっきりしない。[III]の機構に対応する A_L は大部分 0.4~4 の範囲の値をとり、

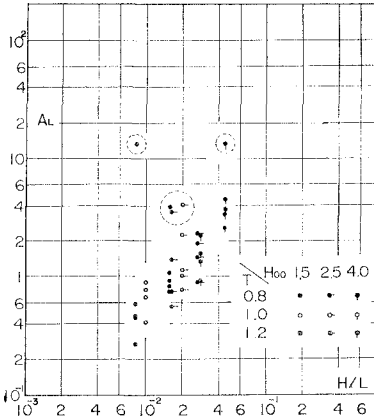


図-7 減衰係数 A_L と H/L との関係

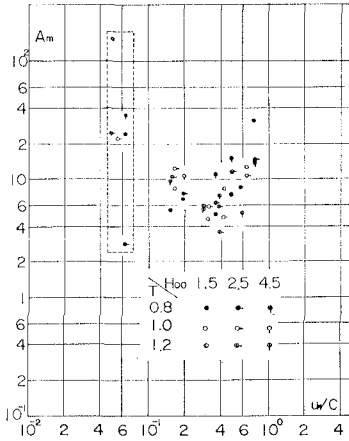


図-8 減衰係数 A_M と u^*/C との関係

この値が1に近いという意味では、理論と実験との一致は最も良好といえる。

しかしながら、図-7 に示されたように、 A_L は明らかに H/L に依存し、 H/L とともに増大する。このことは、式 (11) より考えて、 dH/dX が H に依存することを意味し、実験の範囲内では直線的な減衰で近似できたけれども、一般的には、指数的減衰を生じることになる。したがって、理論と実験とが定性的に一致しないことになる。 u_*/C に対する依存関係は A_p と同様あまり明瞭でない。[II] および [III] の機構により実験結果を解析して明らかになったことは、減衰量のオーダーとしては、近似的に一致するが、直線的に減衰するという基本的な性質が実際には適切でないということである。[IV] の機構に対応する A_L' は大部分 16~90 の範囲の値をとり、 H/L ならびに u_*/C に対する依存性はあまり

はっきりとしない。この A_L' は variable tangential stress の振幅 τ_1 が、波形勾配 H/L ならびに、水面におよぼす風の応力 $\tau_0 = \rho_a u_*^2$ に比例するとおいた場合の比例定数であるので、たとえば、 τ_1 が τ_0 と同程度の場合を考えれば、 A_L' は L/H のオーダーと考えるので A_L' が数十の値をとってもおかしくはない。ただし、この機構を裏付けるためには、水面上の気流の特性に関する非常に精密な測定が必要であらう。[V] の機構に対応する A_{SM} は大部分 10~50 の範囲内の値をとり、 H/L あるいは u_*/C に対する依存性は、 A_L' と同様はっきりしない。

最後に Miles 機構に類似した式における β に対応する係数 A_M は、4~15 の範囲内の値をとり、 H/L あるいは u_*/C に対する依存性はあまり明瞭でない。ここで、興味ある事実、 A_M の値が、実験水槽における波の発達に関する測定結果を Miles 機構をもとにして解析して得られる β の値と同程度である事実である。このことは、風と波との相互作用の機構に関して、結果的には、Miles 機構による式と同様な式となるが、機構自体は、Miles 機構とは異なったものが少なくとも実験室においては存在し、それは順風の場合にも逆風の場合にも適用できることを示唆しているようにも考えられる。しかしながら、これを確かめるためには同じ実験条件による順風の場合の波の発達に関する実験ならびに波面近くの気流の精密な測定などが必要である。図-9 は、今回得られたすべてのデータを Miles 機構と同形の式により整理した結果である。すなわち、横軸には $KX = [A_M (\rho_a / \rho_w) (u_*/C)^2 (C/C_g) (\pi/L) \tanh kh] X$ がとられている。

まえに、図-8 において、 β に対応する A_M が散乱してはいるけれども、 u_*/C にあまり依存しなかったことよりも予想されるように、全体のデータは、ごく大きっぱにみれば一本の線にまとまっているように見える。

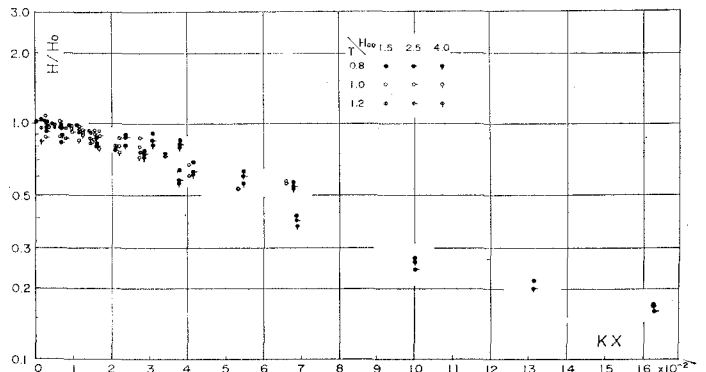


図-9 逆風による波の減衰特性の無次元表示

$$\left(K = \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{u_*}{C} \right)^2 \tanh kh \cdot \frac{\pi}{L} \right)$$

5. 結 語

研究はまだ初期の段階にあり、はっきりした結論を導くことはできないが、現在の段階でいえることは、(i) 逆風によって、予想以上に大きな波の減衰が生じること (ii) 従来の理論の中では Longuet-Higgins の提出した maser-like action によるものが、実測値に最も近い減衰量を与えるが、定性的に一致しない点があること、(iii) Miles 機構による式を形式的にあてはめて、 β に対応する係数 A_M の値として、波の発達に関する実験で従来報告されている β の値と同程度の値 (Miles による計算値よりは少し大きい) が得られたことなどである。実際の波の減衰は、さまざまな機構が総合されて生じているものと考えられるので、理論的な複合モデルによる解析が必要であるが、これは今後の問題である。

終りに、本研究を進めるに際して、各種の計測を主として担当された江藤賢次氏、実験ならびにデータ解析で援助を受けた本多忠夫、田中道芳の両氏、ならびに実験データの整理において助力を得た秦裕司氏および力石国

男氏に対して厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Phillips, O.M. : The Dynamics of the Upper Ocean (Cambridge University Press), 1966, pp. 148-154.
- 2) Longuet-Higgins, M.S. : A Nonlinear Mechanism for the Generation of Sea Waves, Proc. Roy. Soc. A., 311, 1969, pp. 371-389.
- 3) 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行 : 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究 (2). 第11回海岸工学講演会講演集, 1964, pp. 62-68.
- 4) Phillips, O.M. : On the Attenuation of Long Gravity Waves by Short Breaking Waves, J. Fluid Mech., 16, 1963, pp. 321-332.
- 5) Longuet-Higgins, M.S. : Action of a Variable Stress at the Surface of Water Waves, Phys. of Fluids, 12, 1969, pp. 737-740.
- 6) Sverdrup, H.U. & Munk, W.H. : Wind, Sea and Swell : Theory of Relations for Forecasting, U. S. Navy Hydrographic Office Pub. No. 601, 1947, p. 44.
- 7) Miles, J.W. : On the Generation of Surface Waves by Shear Flows, J. Fluid Mech. 3, 1957, pp. 185-204.