

水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究

本 多 忠 夫・* 光 易 恒**

1. 緒 言

水面に作用する風の剪断力並びに水面粗度を知ること、は、高潮の予報精度を良くするためにも、或は広く大気・海洋間の相互作用を解明する上でも極めて重要である。このため昔から多くの研究が行なわれてきたにも拘らず、未だに充分な解決が得られていない。その原因としては、次のような事情が考えられる。

- ① 風速に応じて水面が複雑に変化する、即ち、吹送流および風速によって変化する。風速が増大すると風波は砕波する。
- ② 一般には、水中にも大気中にも温度成層が存在し、これが風の乱れの特性に影響を与える。
- ③ 測定法自体に問題がある。即ち、水面に作用する風の剪断力の測定法としては、i) Eddy correlation 法 (Reynolds 応力の直接測定)、ii) Wind profile 法 (log law の適用)、iii) Wind set-up からの逆算、iv) 乱流エネルギーの dissipation を用いる technique 等があるが、i) を除きいずれも間接的な方法で、それぞれ問題を含んでいる。

この研究も風の剪断力ならびに水面粗度の問題を実験的に明らかにすることを最終目的とするものである。ただし、上述のような問題点を考慮して本研究のねらいを次の4点におく。

- ① 低風速から高風速にわたり広範囲の風速について、風洞水槽という制御可能で規則的な条件のもとに水面の抵抗係数の特性を明らかにする。
- ② 摩擦速度の測定は Wind profile 法によるが、Wind set-up 法による測定も行ない両者の関連を調べる。
- ③ 風波を高周波成分まで出来るだけ精密に測定して、水面の抵抗係数あるいは水面粗度と風波との関連を明らかにする。
- ④ 界面活性剤を用いて風波の発生を抑制した場合とそうでない場合について同様な測定を行ない、風の剪断力、水面粗度等に及ぼす風波の効果を明らかにする。但し、③に関しては現在まだ解析を終了して

いないので今後の報告にゆずる。

2. 実験方法及び風に関するデータ

実験には高速風洞水槽(長さ 17 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.8 m)を使用した。主要な測定量とその求め方は次のとおりである。

(i) 風洞水槽の代表的な各断面における風速の鉛直分布: 断面平均風速で $U_r=5, 7.5$ 及び 10 m/s の3ケースにつきピトー管を用いて測定する。(ii) 図-1 に示す

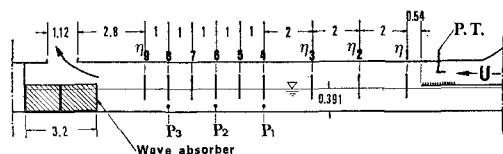


図-1 風洞水槽 (単位: m)

各測点における水位変動: 電気抵抗型波高計で計測する。(iii) η_4, η_6 及び η_8 の3測点における水面上の静圧: ピトー管を用いる。(iv) 静圧と同じ測点での平均水位: マノメータにより計測する。

水槽内の水に界面活性剤(ラウリル硫酸ナトリウム)を混入して風波の発生を抑えた場合と水道水のままで風波の発生を許した場合について、それぞれ同様な測定を行なった。これは界面活性剤により風波の発達が抑制される機構を調べることと、水面に作用する風の剪断力の風波への依存性を明らかにすることの2つを目的として行なわれたものである。

この研究のデータ解析においては、本実験で得たデータの他に、別の機会に行った2つの実験から得たデータの中から風に関するデータを使用した。一つは規則波の風による増幅特性を調べた一連の実験^{1),2)}のデータであり、他の一つは風波の高周波成分の特性を調べた³⁾際のデータである。本実験で得られたデータを DATA 1, 規則波の増幅特性を調べた実験から得られたデータを DATA 2 及び風波の高周波成分の特性を調べた実験から得られたデータを DATA 3 と今後呼ぶことにする。実験期日はそれぞれ異なるが、DATA 1, DATA 2 及び

* 正会員 九州大学助手 応用力学研究所

** 正会員 理博 九州大学教授 応用力学研究所

表-1

		t_a (°C)	t_w (°C)	ν_a (cm ² /s)	ν_w (cm ² /s)	S (dyn/cm)	d (cm)
DATA 1	水道水	5.8~13.0	5.3~11.2	0.14	0.16	72~67	39.1
	活性剤入	4.5~13.1	2.9~ 7.1	0.14	0.16	27	39.1
DATA 2	水道水	5.0~23.8	4.7~17.0	0.14~0.15	0.18	75	33.5
	活性剤入	3.0~14.1	3.8~11.0	0.14	0.17~0.20	27	33.5
DATA 3	水道水	14.0~13.0	11.0	—	—	—	38
	活性剤入	—	—	—	—	—	—

t_a : 気温, t_w : 水温, ν_a : 空気動粘性係数, ν_w : 水の動粘性係数, S : 水の表面張力, d : 水深

DATA 3 を得るに際して使用した風洞は同じである*。
各実験の条件は表-1 のとおりである。

3. 実験結果

3.1 風速分布及び水面の抵抗係数

水面上における時間平均風速の鉛直分布 $u(z)$ は、界面活性剤使用の有無によらず、少なくとも水面近くで対数分布

$$u(z) = a \ln z + b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 a 、 b は各データごとの定数、に従うことがわかった。その数例は図-2 に示す。一般に界面活性剤

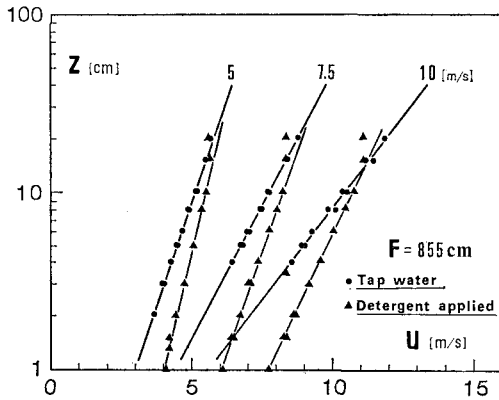


図-2 水面上の風速分布

を使用して風波の発生を抑えた場合の方が小さな速度勾配をもつことがわかる。実測した風速分布をよく知られた対数分布

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

にあてはめることにより、 u_* 及び z_0 を推定した。ここに、 $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_a}$ は風の摩擦速度 (τ_0 は風の剪断力, ρ_a は空気密度), κ はカルマン常数, z_0 は水面の粗度パラメータである。また水面上 10 m における風速 U_{10} は (1) から外挿により求められる。このようにして得た摩

擦速度 u_* と U_{10} との関係を図-3 にまとめて示した。△印は界面活性剤を使用して風波の発生を抑えた場合、その他は水道水の場合に対応する。高風速時のデータとして、国司・今里⁹⁾による実験データおよび Miller による Hurricane Donna の現場実測データがある。これ等も比較のため図-3 に示しておく。ただし、今回の実験式を導く際にはこれ等のデータは使用していない。図-3 から次のことがわかる。 $U_{10} \leq 8$ m/s においては、 u_* と U_{10} と

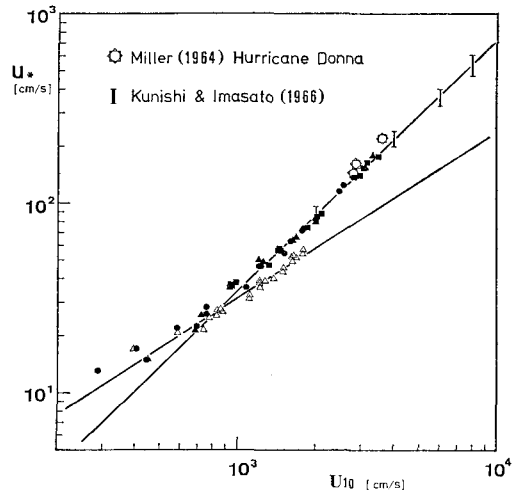


図-3 u_* と U_{10} との関係 (●, ■ 及び ▲: 水道水, △: 界面活性剤を混入)

の関係は界面活性剤を使用して風波の発生を抑えた場合とそうでない場合とでは大差ない。しかし、 $U_{10} \geq 8$ m/s ではその違いが明瞭に現われている。そこで、波の影響を受けない (少なくとも小さいと考えられる) 場合の u_* と U_{10} との関係を界面活性剤のデータのみを基に指数曲線として最小自乗法により近似した。波により大きな影響を受けている場合の u_* と U_{10} との関係を求めるには $U_{10} \geq 10$ m/s の水道水のデータのみを使用した。 $U_{10} \geq 10$ m/s のデータに限定したのは次のような理由による。細心の注意をして実験並にデータ解析を行なっても、 U_{10} が 8 m/s 前後のデータは散乱の傾向を示し、しかも $U_{10} \geq 10$ m/s のデータと $U_{10} \leq 8$ m/s のデータとでは u_* と U_{10} との関係が明瞭に異なっていることを考慮したためである。

$U_{10} \leq 8$ m/s においては、 u_* と U_{10} との関係は界面活性剤を使用して風波の発生を抑えた場合もそうでない場合も大差なく、共に

$$u_* = 7.38 \times 10^{-2} U_{10}^{0.878} \quad (U_{10} \leq 8 \times 10^3 \text{ cm/s}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされることがわかった。界面活性剤を用いて風波

* 風波の高周波成分の特性を調べた実験の後、風洞水槽には約 5 m の延長改良工事を行った。したがって、DATA 3 は風洞水槽の改良工事前のデータであり、他は改良工事後のデータである。

の発生を抑えた場合には、 $8 \leq U_{10} \leq 20$ m/s においても式(3)が成立する。一方水道水で普通に風波が発生する場合には、 $8 \leq U_{10} \leq 30$ m/s において u_* と U_{10} の関係は次式で与えられることがわかった。

$$u_* = 3.57 \times 10^{-3} U_{10}^{1.327} \quad (U_{10} \geq 8 \times 10^2 \text{ cm/s}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

図-3 には (3) および (4) が実線で示されている。国司・今里および Miller の台風時のデータともかなりよい一致がある。

(3) および (4) から抵抗係数 $C_D = (u_*/U_{10})^2$ が次式のように表現される。

$$C_D = 5.45 \times 10^{-8} U_{10}^{-0.244} \quad (U_{10} \leq 8 \times 10^2 \text{ cm/s}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$C_D = 1.27 \times 10^{-5} U_{10}^{0.654} \quad (U_{10} \geq 8 \times 10^2 \text{ cm/s}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

抵抗係数の実用公式としては、 $C_D = A(1 + BU_{10})$ の形のものが多く提案されている。そこで、本実験のデータをこの形の実験式にあてはめるとそれぞれ次のようになることがわかった。

$$C_D = (1 - 1.89 \times 10^{-4} U_{10}) \times 1.28 \times 10^{-3} \quad (U_{10} \leq 8 \times 10^2 \text{ cm/s}) \quad \dots\dots(7)$$

$$C_D = (1 + 1.078 \times 10^{-3} U_{10}) \times 5.81 \times 10^{-4} \quad (U_{10} \geq 8 \times 10^2 \text{ cm/s}) \quad \dots\dots(8)$$

(5) と (7) との比較及び (6) と (8) との比較が図-4 に示されている。いずれの形の実験式を用いても、本実験のデータの範囲内では大差がない。

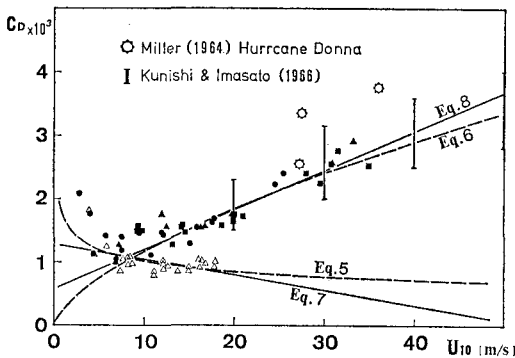


図-4 C_D と U_{10} との関係 (●, ■ 及び ▲: 水道水, △: 界面活性剤を混入)

ここで抵抗係数に関する我々の実験式 (7) 及び (8) を従来のものと比較してみる。代表的な実用公式としては Van Dorn⁶⁾

$$\left. \begin{aligned} C_D &= 1.04 \times 10^{-3} & (U_{10} \leq 5.6 \text{ m/s}) \\ D_D &= 1.04 \times 10^{-3} + 1.92 \times 10^{-3} \\ &\quad \times (1 - 5.6/U_{10})^2 & (U_{10} \geq 5.6 \text{ m/s}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

及び Deacon & Webb⁷⁾

$$C_D = (1 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3} \quad (U_{10} = \text{m/s}) \quad \dots\dots(10)$$

をあげることができる。最近の研究では Kondo⁸⁾ および Amorocho & De Vries⁹⁾ がそれぞれ次のような実用式を提案をしている。

Kondo (1975)

$$\left. \begin{aligned} C_D &= (1.2 + 0.025 U_{10}) \times 10^{-3} & (8 \leq U_{10} < 25 \text{ m/s}) \\ C_D &= 7.3 \times 10^{-5} U_{10} & (25 \leq U_{10} < 50 \text{ m/s}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

Amorocho & De Vries (1980)

$$\left. \begin{aligned} C_D &= 1.04 \times 10^{-3} & (0 < U_{10} \leq 7 \text{ m/s}) \\ C_D &= 2.54 \times 10^{-3} & (20 \leq U_{10} \leq 30 \text{ m/s}) \\ \text{transition} & & (7 \leq U_{10} \leq 20 \text{ m/s}) \end{aligned} \right\}$$

一般式

$$C_D = 1.5 \times 10^{-3} \left[1 + \exp \left(-\frac{U_{10} - 12.5}{1.56} \right) \right]^{-1} + 1.04 \times 10^{-3} \quad \dots\dots(12)$$

これ等の実験式と今回我々が求めた式 (7) 及び式 (8) をまとめて図-5 に示した。Deacon & Webb の式は我

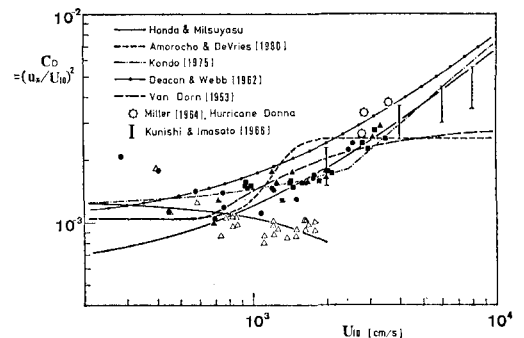


図-5 C_D と U_{10} との関係 (●, ■ 及び ▲: 水道水, △: 界面活性剤を混入)

々の式に比べて過大な抵抗係数を与えることがわかる。Van Dorn 及び Amorocho & De Vries の式は高風速で抵抗係数が飽和する点に特長がある。Kondo の結果は高風速については我々の式に似ているが、低風速になるとかなり異なってくる。

3.2 水面勾配

風洞水槽でおこる水面勾配には、風の剪断力による効果の外に、風下に行くに従って総圧の損失に伴って静圧が低下することによる平均水面の吸上げの効果が無視できない。そのため、風の剪断力のみによる“実質”水面勾配は、測定された平均水面から静圧勾配によって生じた吸上げ分を差引く必要がある。この“実質”水面勾配を求めた手順は次のとおりである。図-1 に示した各測点で電気抵抗型波高計を用いて水位変動を測定し、その時間平均値を平均水位 $\bar{h}'$ とした。図-6 には $\bar{h}'$ の測定例が示されている。この $\bar{h}'$ から水面勾配 $\Delta \bar{h}' / \Delta x$ がわかる。また、ピトー管により水路内の静圧勾配を測定し、相等する水面勾配 $\Delta \bar{h}'' / \Delta x = \rho_w g \Delta P_0 / \Delta x$ (P_0 : 測

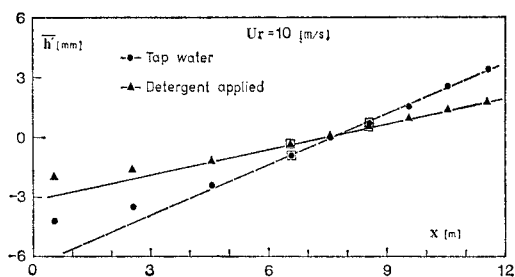


図-6 測定された平均水位 (静圧勾配による効果を含んでいる)。□ は平均水位をマンメータで直接読みとった値

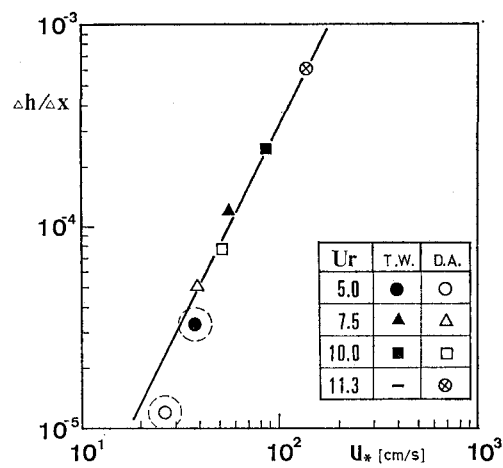


図-7 水面勾配と摩擦速度との関係 (T.W.=Tap Water, D.A.=Detergent applied)

定した静圧, ρ_w : 水の密度) を求める。風の剪断力のみによる“実質”水面勾配はこの両者の差, 即ち $\Delta h / \Delta x = \Delta(\bar{h}' - \bar{h}'') / \Delta x$ と定義する。風の剪断力と水面勾配 $\partial h / \partial x$ との関係は運動方程式の積分により $\partial h / \partial x = n\tau_0 / \rho_w g d$ ($n=1+\tau_b/\tau_0$, τ_b : bottom friction) で与えられる¹⁰⁾。測定した水面勾配と u_* との関係を 図-7 に示す。このデータを基にして (水面勾配と u_* との関係を求めた。ただし, ○で囲んだデータは低風速時のデータで測定精度に問題があるので実験式を導く際には除外した。この結果, 風の剪断力 τ_0 により, 一様水深 ($d=39.1$ cm) の水槽内に生じる水面勾配 $\partial h / \partial x$ は, 次式により与えられることがわかった。

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 101\tau_0 / \rho_w g d = 1.01\rho_a u_*^2 / \rho_w g d \dots\dots\dots (13)$$

(ρ_a : 空気密度)

図-7 からわかるように, 式 (13) は界面活性剤の有無によらず成立する。

4. 結 語

(1) 水面の抵抗係数に関し, 低風速から高風速まで広範囲に適用できる実験式を導いた。それは, $U_{10} \leq 8$

$\times 10^2$ cm/s では (7), $U_{10} \geq 8 \times 10^2$ cm/s では式 (8) で与えられる。

(2) 波面の状態は風の速度だけでなく吹送時間や吹送距離にも依存する。それにもかかわらず波面の抵抗係数は風速 U_{10} のみによって大局的に決まる。これは一見奇妙であるが, 次のような理由によるものと考えられる。波面の抵抗係数を大局的に支配するのは波の高周波成分であり, その高周波成分は多くの場合飽和した状態である。このため抵抗係数は風速と水面の物性のみによって決まり, 吹送距離には依らない。

(3) 実験ならびにデータの解析に細心の注意を払ったにもかかわらず, 風速 U_{10} が 8 m/s 前後で実験データの散乱がみられる。これは波面の状態がこの風速領域で変化するため, 抵抗係数自身もこれに応じた変化を示し, 遷移領域特有のデータのちらばりが生じると考えられる。この点に関しては今後更に詳しい検討を行なう予定である。

(4) 今回の実験式を規準にしてみると, Deacon & Webb (1962) の式は $U_{10} \geq 10$ m/s で過大な抵抗係数を与え, Van Dorn (1953) の式は $U_{10} \leq 5$ m/s 附近ならびに $U_{10} \geq 30$ m/s で我々の式との違いが大きい。この原因は, これ等の式が主として $U_{10} \leq 15$ m/s のデータを基にしているので, 高風速の場合には適用できないと云うことにつける。また最近提案された Amorcho & De Vries (1980) では, $U_{10} \geq 20$ m/s で抵抗係数が飽和するものとしているが, この点に関しては今後更に検討の必要がある。

この研究は, 自然災害特別研究「高潮の発生機構とその極値に関する研究」(代表: 土屋義人) の一部として行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) 本多忠夫・光易 恒: 1978 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 119~120, 1978.
- 2) 光易 恒・本多忠夫: 1978 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 145~146, 1979.
- 3) Mitsuyasu, H. and T. Honda: Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Vol. XXII, No. 71, pp. 327~355, 1975.
- 4) 国司秀明・今里哲久: 京大防災研年報, 第9号, pp. 1~10, 1966.
- 5) Miller, B. I.: Mon. Weather Rev., 92, 389, 1964.
- 6) Van Dorn, W. G.: J. Mar. Res., 12, pp. 249~276, 1953.
- 7) Deacon, E. L. and Webb: The Sea (ed. M. N. Hill), Vol. 1, pp. 43~87, New York; Interscience, 1962.
- 8) Kondo, J.: Boundary-Layer Meteorol., 9, pp. 91~112, 1975.
- 9) Amorcho, J. and J. J. De Vries: J. Geophys. Res., Vol. 85, No. C1, pp. 433~442, 1980.
- 10) Keulegan, G. H.: J. Res. nat. Bur. Stand., 46 (5), pp. 358~381, 1951.