

強風下における水面の抵抗係数

日本文理大学 正 員 濱田憲明 正 員 樋田 操

九州大学 正 員 松永信博 学生員 鶴崎賢一 学生員 川上裕史

1.はじめに 水面上を強風が吹く場合、風波は風速の増大とともに徐々に波形勾配を増大し、遂にはほとんどの波が砕波するようになる。風域全体が砕波で覆われると、多量のしぶきが波面から発生して風下方向へ輸送され、陸域に塩害をもたらす。しぶきの濃度分布と、風および波の条件との関係の評価するためには、しぶきの発生に深く関与すると考えられる水面の抵抗係数について検討する必要がある¹⁾。

本研究は、水平床および斜床上の水面に強風が吹く場合の水面の抵抗係数を、風応力のみの条件および、同時に二次元規則波を造波した場合について実験的に求め、既往の研究²⁾と比較し、検討したものである。

2.実験装置および実験方法 実験には、長さ32m、幅0.6m、深さ0.94mの吸い込み式風洞を有する二次元造波水槽を用いた。図-1(a),(b)はそれぞれ水平床および斜床の場合の概要を示す。いずれの実験においても、一樣水深は30cmに固定された。水平床の実験では、水槽全域に白波を伴う砕波が発生する条件とし、断面平均風速(U_m)が16.5, 17.5, 18.4m/sの3種類の風を吹かせた。造波板による二次元規則波の周期(T_p)は、1.00, 1.20, 1.40sの3種類とし、造波をせずに風応力のみの実験も含めて合計12種類(Run1~12)の実験を行った。風速の測定は、風の吸い込み口から風下側10.2mの位置をpos.1とし、以降1.8mの間隔でpos.9までの、9断面で行われた。風速の測定には、しぶきを多量に含む場でも測定が容易なベーン式風速計を用い、各断面におけるセットアップ面($Z=0$ m)から鉛直上方に2cm間隔で測定した。斜床の実験は、法面勾配を1/30とし、 U_m を7.48~22.9m/sまで変化させた。この場合、波は、非砕波の波から白波を伴う砕波までを対象とした。造波周期は $T_p=1.00, 1.20, 1.45$ sの3種類とし、風応力のみの実験も含めて合計17種類(Run1~17)の実験を行った。風速の測定は、水平床と同じ方法により、斜床の法先から風下側1.2mの位置をpos.1として、以降、図に示す9断面で行われた。表-1(a),(b)にそれぞれ水平床および斜床における実験条件および実験結果の代表諸量をまとめて示す。ここで、 C は波速である。斜床における風の実験条件(Run1~8)中、 T_p は波高の実測データにより求めた卓越周期である。その他の諸量については次節で説明する。なお、文字に-を冠するものは風下方向への平均量を、冠しないものは、各測定断面での局所量を表している。

3.実験結果および考察 図-2は、斜床での実験(Run3, 風のみ, $U_m=15.4$ m/s)における風速分布を、pos.1およびpos.2について示す。水深変化とセットアップの影響により、風速は風下方向に増大するが、水槽の天井部に近い部分を除けば両断面ともほぼ対数分布を示すことができる。一般に、接水境界層は粗面上の乱流境界層とみなされ、風速分布は次式で近似できる²⁾。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} = \frac{2.303}{\kappa} \log \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

ここで、 $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_a}$:風の摩擦速度、 τ_0 :水面に作用する風の摩擦応力、 ρ_a :空気密度、 z_0 :水面粗度、 κ :カルマン常数(≈ 0.40)である。水平床および斜床の全ての実験条件に対して風速分布を検討した結果、片対数紙上の速度勾配は風下方向にほとんど一定である。このことから、摩擦速度 u_* は風下方向にほぼ一定であることがわかる。また、各風速分布図において、対数分布則の近似直線を外挿することにより、 $u(z)=0$ となる仮想高さ、すなわち水面粗度 z_0 が求められる。 z_0 を x に対してプロットしてみた結果、風下方向にほぼ一定であることがわかった。算定された u_* , z_0 および式(1)を用いて、 $z=10$ mにおける風速 U_{10} を外挿し、さらに水面の抵抗係数 C_D を定義により、

$$C_D = (u_* / U_{10})^2 \quad (2)$$

で求めた。 U_{10} に対する式(1)と式(2)を組み合わせると、 z_0 に対する次式が得られる。

$$z_0 = 10 \exp(-\kappa / \sqrt{C_D}) \quad (3)$$

式(3)から、 C_D を定量化することにより、 z_0 は自動的に決定されることになる。

図-3は C_D と U_{10} の関係をプロットしたものである。図中には、既往の研究における各種の実験式²⁾も示されている。 U_{10} が十分大きい場合、本実験の結果は、Kondoの実験式

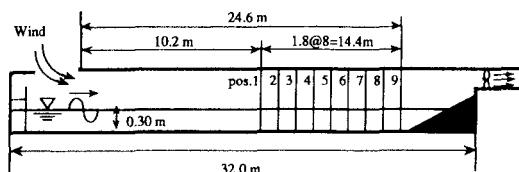
$$C_D = 7.30 U_{10} \times 10^{-5} (25 \text{m/s} < U_{10}) \quad (4)$$

に漸近することがわかる。しかし、 U_{10} が小さい場合には、特に水平床の条件において、いずれの実験式からも大きく外れてくる。図-3の結果は、無次元量 C_D を次元量 U_{10} のみにより、普遍化することが困難であることを示している。そこで、 C_D を草場³⁾の提案した波風係数 $u_* / \bar{c}$ に対してプロットしたのが図-4である。図中の点線は図-3の実験式に基づいて示したものである。 C_D の値はほぼ一つの近似直線で表され、 $u_* / \bar{c}$ の増加とともに指数関数的に増大することがわかる。 $u_* / \bar{c}$ がさらに増大し、より高風速になると、遂には、風からのエネルギー供給と砕波等による波自身のエネルギー損失の割合が等しい平衡状態に達することから、 C_D の値はやがて一定値に漸近すると考えられる。一方、 $u_* / \bar{c}$ が小さく、より低風速の条件では、既往の研究²⁾による C_D の値が、 $C_D \approx 10^{-3}$ とほぼ一定値に漸近するのに対して、実験値はかなり小さくなる。これは、よ

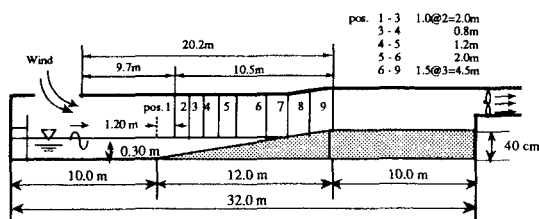
り低風速となり $u_* / \bar{c}$ が小さくなるほど z_0 は小さくなることから、式 (3) より、 C_D も小さくなることを考慮すれば、著者らの実験結果は妥当なものと考えられる。しかし、この点については風速分布の計測法や対数分布則の適用法等の相違もあり、今後の課題である。

参考文献)

- 1) 松永ら：海岸工学論文集, 42, 1031 (1995) .
- 2) 光易恒：水工学に関する夏期研修会講義集, 19, B-1-1 (1983) .
- 3) 草場忠夫：局所平衡下の風と風波, 学位論文 (1989) .



(a) 水平床



(b) 斜床

図－1 実験装置概要

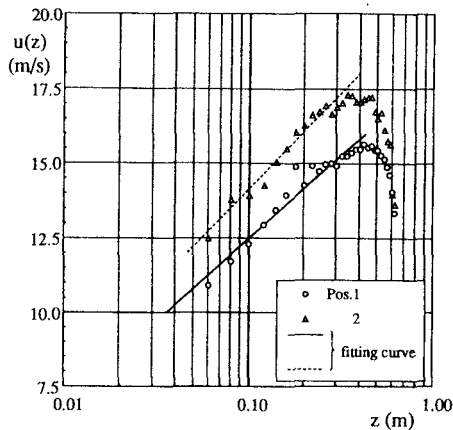
表－1 実験条件および代表諸量

(a) 水平床

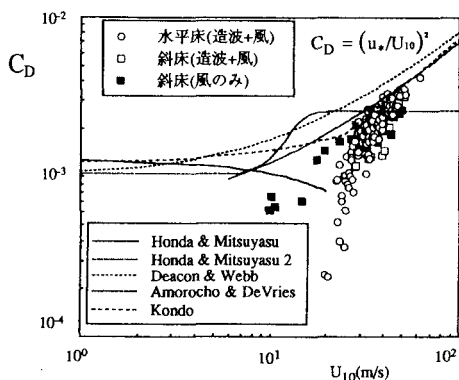
Run	Pos.	T_p (s)	U_m (m/s)	$\bar{c}$ (m/s)	U_* (m/s)	U_{10} (m/s)	z_0 (mm)	$U_* / \bar{c}$	$C_D (\times 10^{-3})$
1	風のみ	---	16.5	---	1.56	32.20	2.56	---	2.34
2		---	17.5	---	1.70	34.30	3.10	---	2.45
3		---	18.4	---	2.07	39.20	5.07	---	2.78
4	1~9	1.00	16.5	1.37	1.39	28.90	2.46	1.01	2.32
5			17.5		1.59	32.50	2.86	1.16	2.40
6			18.4		2.13	40.70	4.74	1.55	2.73
7			16.5		1.12	26.10	0.89	0.762	1.84
8	造波+風	1.20	17.5	1.47	1.32	29.50	1.30	0.898	2.00
9			18.4		1.77	36.50	2.63	1.20	2.36
10	造波+風	1.40	16.5		1.14	26.10	1.01	0.745	1.89
11			17.5	1.53	1.30	28.20	1.72	0.850	2.13
12			18.4		1.67	35.00	2.31	1.09	2.28

(b) 斜床

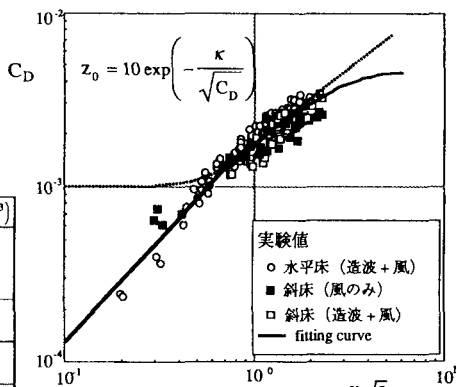
Run	Pos.	T_p (s)	U_m (m/s)	$\bar{c}$ (m/s)	U_* (m/s)	U_{10} (m/s)	z_0 (mm)	$U_* / \bar{c}$	$C_D (\times 10^{-3})$
1	風のみ	0.42	7.48	0.86	0.27	5.04	0.50	0.31	0.66
2		0.56	11.3	0.95	0.59	10.25	0.96	0.62	1.14
3		0.61	15.4	1.06	1.13	19.74	0.91	1.07	1.82
4		0.63	18.7	1.15	1.31	23.32	0.82	1.14	1.79
5		0.68	21.4	1.39	1.80	32.65	0.70	1.29	2.13
6	造波+風	0.69	17.5	1.08	1.44	23.86	1.31	1.33	1.93
7		0.70	19.8	1.11	1.76	28.22	1.64	1.58	2.07
8		0.79	22.1	1.11	2.26	32.83	3.03	2.05	2.40
9		1.00	17.7	1.19	1.50	23.22	2.05	1.26	2.05
10	造波+風	1.00	20.4	1.19	1.93	27.70	3.23	1.63	2.40
11		1.00	22.9	1.26	2.45	32.59	4.85	1.94	2.71
12		1.20	17.8	1.27	1.32	21.75	1.37	1.04	1.83
13		1.20	20.3	1.22	1.86	26.45	3.35	1.52	2.30
14		1.20	22.7	1.31	2.25	30.44	4.45	1.72	2.50
15		1.45	17.9	1.31	1.42	22.69	1.70	1.09	1.96
16		1.45	20.2	1.31	1.81	27.04	2.54	1.38	2.21
17		1.45	22.7	1.37	2.31	31.07	4.56	1.71	2.54



図－2 風速分布図 (斜床, Run3)



図－3 C_D と U_{10} の関係



図－4 C_D と $u_* / \bar{c}$ の関係