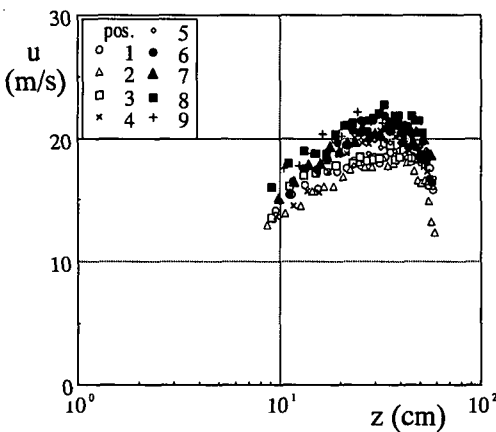
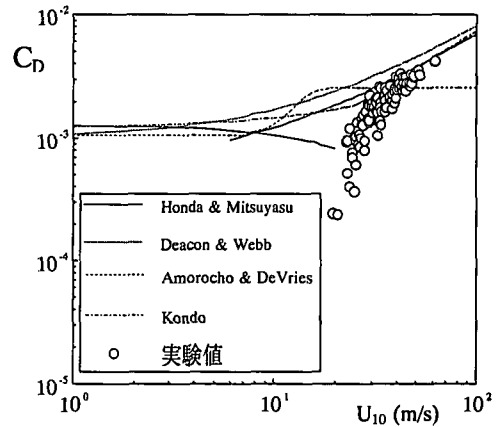


表一 実験条件および代表諸量

Run	$\bar{H}$ (cm)	$\bar{L}$ (cm)	T (s)	c (m/s)	$\bar{H}/\bar{L}$	U_m (m/s)	$\bar{u}_*$ (m/s)	$\bar{u}_*/c$	$\bar{z}_0$ (mm)	U_{10} (m/s)	$C_D(\times 10^3)$	$\bar{a}$	$\bar{C}_*$
1	造波なし					16.5	1.56		2.56	32.2	2.34		
2						17.5	1.70		3.10	34.3	2.45		
3						18.4	2.07		5.07	39.2	2.78		($\times 10^{-4}$)
4	12.5	137	1.00	1.37	0.0912	16.5	1.39	1.01	2.46	28.9	2.32	4.21	6.31
5	12.5				0.0912	17.5	1.59	1.16	2.86	32.5	2.40	4.26	9.00
6	12.4				0.0905	18.4	2.13	1.55	4.74	40.7	2.73	4.68	20.2
7	13.1	177	1.20	1.47	0.0740	16.5	1.12	0.758	0.89	26.1	1.84	4.30	3.01
8	13.1				0.0740	17.5	1.32	0.893	1.30	29.5	2.00	4.75	6.30
9	12.7				0.0718	18.4	1.77	1.20	2.63	36.5	2.36	3.86	9.10
10	14.9	215	1.40	1.53	0.0693	16.5	1.14	0.738	1.01	26.1	1.89	5.11	2.93
11	14.5				0.0674	17.5	1.30	0.846	1.72	28.2	2.13	4.36	5.41
12	14.2				0.0660	18.4	1.67	1.09	2.31	35.0	2.28	4.56	10.0



図一 風速分布 (Run 5)



図三 C_D と U_{10} の関係

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 ($\kappa=0.4$) である。図一において、風速はセットアップのために風下方向にわずかに加速するが、片対数紙上で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様であることがわかる。また、水面粗度 z_0 を x に対してプロットしてみると、 x に関して明瞭な依存性は認められず、ほぼ一定値をとることがわかった。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、

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

で定義される水面の抵抗係数 C_D を求めた。図三は、 C_D と U_{10} の関係をプロットしたものである。図中には、多くの研究者によって求められた風波に対する抵抗係数と U_{10} の関係も示されている (光易, 1983)。本実験の結果は U_{10} が十分大きい場合、Kondo (1975) によって提案された経験式、

$$C_D = 7.30 U_{10} \times 10^{-5} \quad (25 \text{ m/s} < U_{10}) \dots\dots\dots (3)$$

に漸近する傾向を示している。しかし、 U_{10} が小さい場合

はいずれの経験式からも大きく外れてくる。

水面の抵抗係数の評価は工学的にも大きな意義がある。その算定が容易であるように、これまで C_D は U_{10} に対してまとめられてきた。しかしながら、無次元量 C_D が次元量 U_{10} のみによって普遍的に表わされるという考え方はかなり疑問の余地がある。事実、 C_D を U_{10} で表わした場合、図三に示されたように多くの経験式が提案されている。そこで、 C_D を草場 (1989) が提案した波風係数 u_*/c に対してプロットすることを試みた。その結果を図四に示す。草場のデータは著者らのデータとは多少ずれている。図中の実線は、著者らの実験データに基づいて求めた最小二乗近似曲線である。抵抗係数 C_D は u_*/c の増加に伴い指数関数的に増大するが、その増加率は次第に減少し、やがて一定値に漸近する傾向を示している。

水面の抵抗係数 C_D とともに水面粗度 z_0 を定量的に評価することは、近年議論の対象となっている。草場 (1989) は、この問題に対していくつかの知見を与えている。図一五は、各測定断面における無次元粗度 gz_0/u_*^2 と u_*/c の関

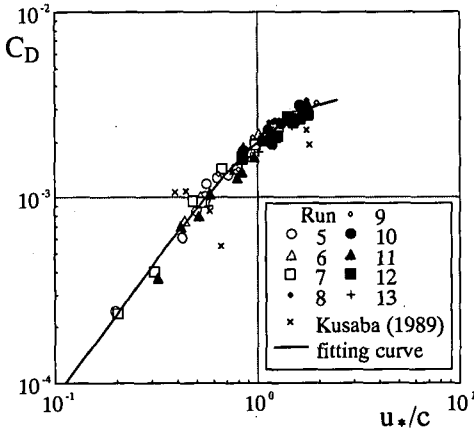
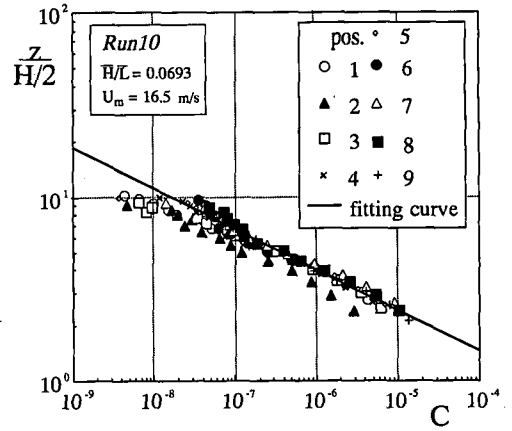
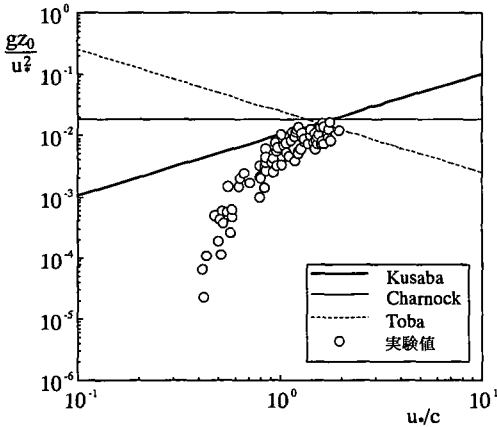
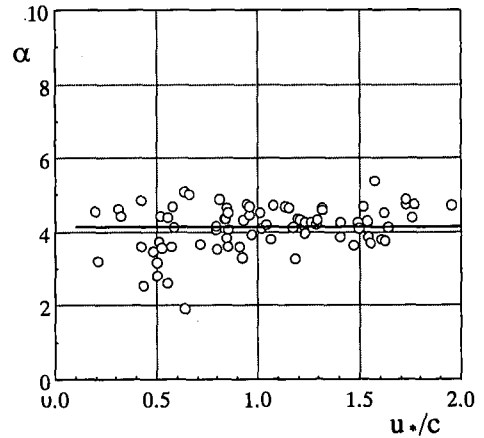
図-4 C_D と u_*/c の関係

図-6 しぶき濃度の鉛直分布

図-5 gZ_0/u_*^2 と u_*/c の関係図-7 α と u_*/c の関係

係を、これまでに提案された経験式とともに示したものである。ここで、 g は重力加速度である。本実験データから、 u_*/c が十分大きい場合には草場の経験式に漸近するが、 u_*/c の減少とともに無次元粗度は急激に減少することがわかる。

3.2 しぶき濃度分布

しぶきの捕集には脱脂綿をつめた円筒容器を用い、測定前後の質量差と捕集時間からしぶき量 q (g/cm²s) を求めた。しぶき量を測定位置の風速と水の密度で割ることにより、しぶき濃度 C を求めた。Run 10 におけるしぶき濃度の鉛直分布を図-6 に示す。 z 軸は波高の 1/2 で無次元化されている。この図から、しぶき濃度 C は風下方向にほぼ一様に分布していることがわかる。これは、白波が風下方向に一様に発生し、しぶきが水表面から比較的一様に供給されているためと考えられる。また、しぶき濃度分布は、両対数紙上で直線によって良く近似できることから、

$$C/C_* = \{z/(H/2)\}^{-\alpha} \quad (4)$$

なる経験式で表わされる。ここで C_* は $z=H/2$ 、即ち波頂高さにおけるしぶき濃度である。各断面の濃度分布に対し、式 (4) を適合させることによって α と C_* の値を算定した。 α を局所的な波風係数 u_*/c に対してプロットしたものが図-7 である。この図から、濃度勾配 α は白波が形成されている場合、 u_*/c にほとんど依存せず、平均値 $\bar{\alpha}$ は 4.2 をとることがわかる。また局所的な波形勾配 H/L に対しても、明瞭な依存性は認められなかった。 C_* を風下方向に平均した値 $\bar{C}_*$ を $\bar{u}_*/c$ に対してプロットしたものが図-8 である。この図から、 $\bar{C}_*$ は $\bar{u}_*/c$ の増加とともに指数関数的に増大していくことがわかる。図中に描かれた $\bar{C}_*$ に対する近似曲線は次式で表わされる。

$$\bar{C}_* = 6.31 \times 10^{-5} 10^{\bar{u}_*/c} \quad (5)$$

従ってしぶき濃度は、

$$C = 6.31 \times 10^{-5} [10^{\bar{u}_*/c} \{z/(H/2)\}^{-4.2}] \quad (6)$$

で表わされることになる。

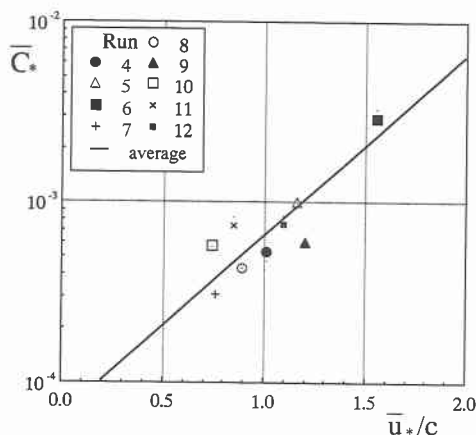
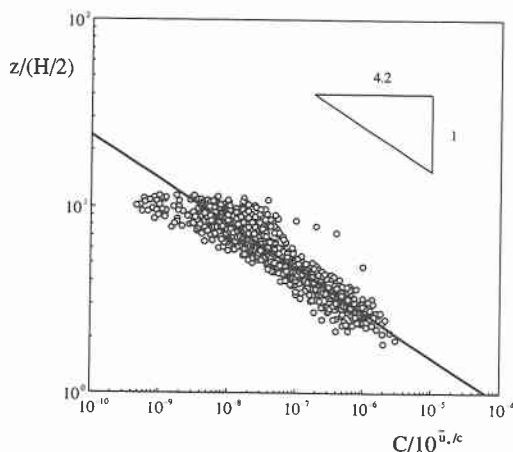
図-8 $\bar{C}$ と $\bar{u}_*/c$ の関係

図-9 しぶき濃度の実測値と経験式の比較

式(6)で与えられるしぶき濃度の経験式と実測結果との適合性を示したものが図-9である。しぶき濃度の定量的評価は一桁のオーダーの誤差を含むようであるが、経験式は実測データのほぼ中央を通っており、式(6)は妥当な評価式であることがわかる。

3.3 しぶきの粒径分布と拡散係数

写真-1に、最下点を除く下部3点におけるしぶき痕の分布状況を示す。 t は雨滴紙を風に露出させた時間である。雨滴紙の横の数字は、セットアップ面からの高さを示す。この写真から、しぶきの粒径は鉛直方向に減少し、風速の増加に伴ってしぶき量は増加することがわかる。まず各測定円内の平均的なしぶき痕を求め、その直径以上のしぶきの個数を数えることで、単位時間・単位面積あたりの衝突個数 n (個/cm²s)を算出した。次に各高さにおけるしぶき量 q (g/cm²s)を用い、しぶきの粒子が球形であることを仮定して粒径 D (mm)を次式求めた。

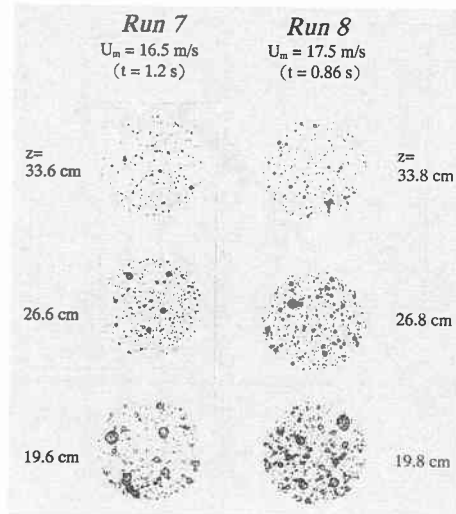


写真-1 しぶき粒径分布

$$D = 10\{6q/(\rho n \pi)\}^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

D の鉛直分布を図-10に示す。これによると、しぶきの粒径 D は z^{-1} に比例して減少する。また、今回の実験において発生したしぶきの粒径は、0.25から2.0 mmの範囲にあることがわかる。図-10から $z=H/2$ における粒径 D_0 を読み取り、 z_0 で無次元化したものを、 $\bar{u}_*/c$ に対してプロットしたものが図-11である。これによると、 $\bar{u}_*/c$ が増加するにしたがって D_0/z_0 も線型的に増加する傾向が見られる。図-5で示した様に、 z_0 の値は u_*/c の値とともに増加する傾向にあることから、発生するしぶきの粒径は波風係数の増加とともに大きくなると推測される。

図-12は、粒子の沈降速度 w_0 と粒径 D の関係について、Bestの経験式(1950)

$$w_0(\text{m/s}) = 9.58\{1 - \exp(-D/1.77)^{1.15}\} \dots\dots\dots (8)$$

および既存の実験結果(藤間ら, 1980; 村本ら, 1990)をプロットしたものである。Bestが提案した経験式は、他の二人のデータの中間的な値をとる。この経験式によると本実験で得られた粒径範囲では、 w_0 は近似的に D に比例することがわかる。しぶきの粒径分布が $D \propto 1/z$ であること、また本実験の粒径範囲では $w_0 \propto D$ という関係が成立することを考慮すると、しぶきの沈降速度 w_0 も $1/z$ に比例して減少することになる。Bestの経験式を、0.25< D <2.0 mmの範囲において $w_0 = 6.67D$ と近似し、その関係と図-10から得られる経験式

$$D/D_0 = \{z/(H/2)\}^{-1} \dots\dots\dots (9)$$

に代入することによって、

$$w_0 = 6.67D_0\{z/(H/2)\}^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

を得る。ここで w_0 は[m/s]、 D_0 は[mm]、係数は[m/mm・s]の次元をもつことを注意しておく。

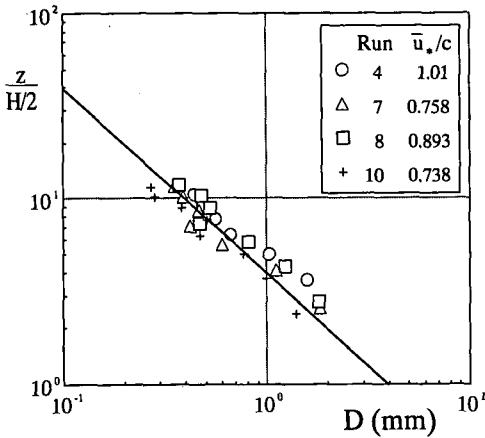
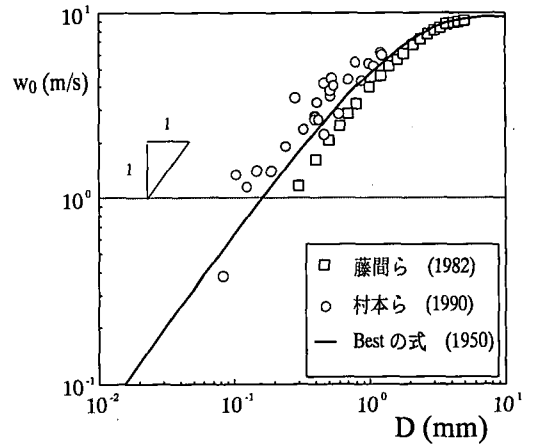
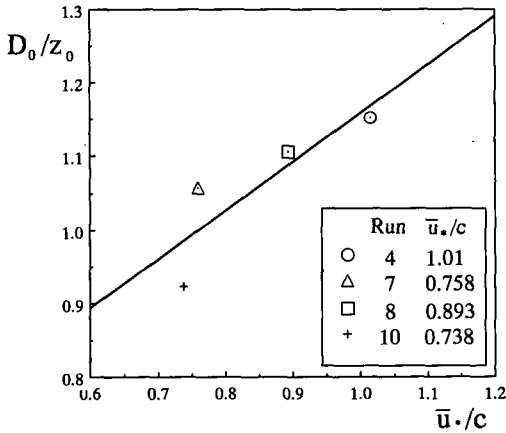


図-10 しぶき粒径の鉛直分布

図-12 w_0 と D の関係図-11 D_0/z_0 と u_*/c の関係

しぶきの濃度分布は、水平方向の変化が鉛直方向のそれに比べて非常に小さいことを示している。従って水平方向の濃度変化を無視し、平均風速の鉛直成分は十分小さいと仮定すると、しぶき濃度 C は、拡散と沈降が釣り合った形

$$\frac{\partial}{\partial z}(Cw_0) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial C}{\partial z}\right) = 0 \quad (11)$$

で表わされる。ここで、 K は乱流拡散係数である。上式は、 $z \rightarrow \infty$ で鉛直方向の濃度フラックスが 0 であることを用いて次式のように書き換えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{w_0}{K}C = 0 \quad (12)$$

しぶき濃度分布が式 (4) で与えられるならば、式 (12) から $w_0/K = \bar{\alpha}/z$ となる。 w_0 に対し式 (10) を用い、 $\bar{\alpha} = 4.2$ を考慮すると、拡散係数 K は、鉛直方向に一定値を取り、

$$K = \frac{6.67 D_0 H}{8.4} \quad (13)$$

で表わされる。本実験から評価された D_0 (mm) と H (cm) を用いると、Run 4, 7, 8, 10 のしぶきの拡散係数は、それぞれ $K = 0.47, 0.41, 0.48, 0.40$ (m^2/s) と概算することができる。

4. 結 論

風速 U_{10} と波速 c および波高 H が既知であるならば、図-4 から水面に作用する摩擦速度 u_* を推定することができ、波風係数 u_*/c の値を求めることができる。従って、式 (6) から白波上の任意の高さにおけるしぶき濃度を推定することができる。また、図-5 と図-11 から波頂高さにおけるしぶきの粒径を得ることができる。このような場のしぶき濃度の拡散係数は式 (13) で与えられる。本実験を行うにあたり多大な協力を頂いた日本文理大学海洋環境研究室の皆さんに、深く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 松永信博・植田 操・水井宏征 (1994): 碎波上の強風によって輸送されるしぶき量, 水工学論文集, 38 巻, pp. 499-504.
- 光易 恒 (1983): 海面に及ぼす風の応力, 第 19 回水工学に関する夏期研修会講義集, pp. 1-1-B1-17.
- Kondo, J. (1975): Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. Boundary-Layer Met., Vol. 9, pp. 91-112.
- 草場忠夫 (1989): 局所平衡下の風と風波, 九州大学学位論文.
- Best, A. C. (1950): Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 76, pp. 302-311.
- 藤間克典・井原俊夫・山本博美・真鍋武嗣 (1982): マイクロフォン型雨滴粒径分布測定器と落下水滴の形状, 電波研究所季報, Vol. 28, No. 147, pp. 503-519.
- 村本健一郎・椎名 誠・中田克男・土合昌文 (1990): 画像処理による雨滴の大きさと落下速度, 電子情報通信学会春季全国大会発表集, p. 7-186.