

表一 実験条件およびしぶき濃度分布の特性量

Run	実験条件								しぶき濃度分布の特性量					
	$T(s)$	$L(m)$	$H(cm)$	$c(m/s)$	$U_m(m/s)$	$\bar{u}_*(m/s)$	H/L	$\bar{u}_*/c$	$C_{se}(\times 10^{-4})$	$x_e(m)$	$l(m)$	$h_e(cm)$	l/L	h_e/H
1	1.00	1.19	9.76	1.19	17.8	1.50	0.082	1.26	2.25	1.74	8.43	52.5	7.08	5.36
2	1.00	1.19	9.53	1.19	20.3	1.93	0.080	1.63	3.77	3.70	9.57	46.0	8.04	4.84
3	1.00	1.26	9.21	1.26	22.9	2.45	0.073	1.94	5.34	5.22	10.5	40.9	8.37	4.45
4	1.20	1.52	11.0	1.27	17.8	1.32	0.072	1.04	1.54	2.83	8.70	48.9	5.72	4.49
5	1.20	1.46	9.82	1.22	20.3	1.86	0.067	1.52	3.28	4.04	9.78	44.9	6.70	4.58
6	1.20	1.57	11.0	1.31	22.8	2.25	0.070	1.72	4.20	5.85	11.7	39.0	7.45	3.55
7	1.45	1.90	11.3	1.31	17.8	1.42	0.059	1.09	1.69	3.70	9.48	46.0	4.99	4.07
8	1.45	1.90	11.4	1.31	20.3	1.81	0.060	1.38	2.70	5.04	10.9	41.5	5.72	3.64
9	1.45	1.99	10.3	1.37	22.8	2.31	0.052	1.69	4.04	6.24	12.1	37.5	6.02	3.64

しぶき濃度分布の特性量を示す。 T, L, H, c, U_m, u_* はそれぞれ造波周期、水平床における波長、波高、波速、断面平均風速、水表面における摩擦速度である。記号にーを付けたものは風下方向に平均した値であることを意味している。しぶき濃度分布の特性量に関する説明は後節で述べられる。波高の測定は吹送距離 $x=9.70\text{ m}$ の位置を Pos. 1 として Pos. 6 ($x=15.7\text{ m}$) までの6地点で行われた。風速およびしぶき量の測定は浅海域では2 m 間隔で4断面 (Pos. 1, 3, 5, 6) で、陸域では1.5 mの間隔で8断面 (Pos. 7~14) で行われた。風速およびしぶきの計測法についての詳細は前報 (松永ら, 1995) を参照されたい。

3. 実験結果および考察

3.1 沖合海域におけるしぶき濃度

強風作用下にある沖合海域では、白波碎波が風下方向に一様に発生すると考えられる。この場合、しぶき濃度の風下方向の変化は鉛直方向の変化に比べて極めて小さく、しぶき濃度 C は鉛直方向の乱流拡散フラックスと沈降フラックスが釣り合った式

$$\frac{\partial}{\partial z}(w_0 C) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial C}{\partial z}\right) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

で規定される。ここで、 w_0 はしぶき粒子の沈降速度、 K は乱流拡散係数、 z は平均水深から鉛直上向きにとった座標である。波高 H で無次元化された鉛直座標 $\bar{z}$ を用い、 $\bar{z} \rightarrow \infty$ で鉛直フラックスが0であるという条件を用いると

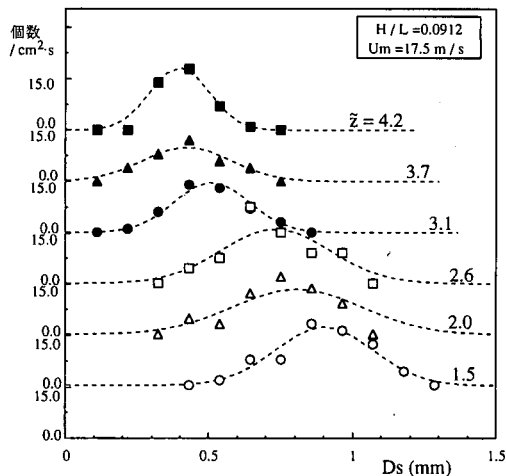
$$C = C_* \exp \int_1^{\bar{z}} -\frac{w_0}{K} d\bar{z} \dots\dots\dots (2)$$

を得る。ここで、 C_* は $\bar{z}=1$ 、つまり $z=H$ におけるしぶき濃度である。ここで、しぶきの沈降速度の z 依存性が明らかになれば、 $K=\kappa u_* z$ と仮定することにより沖合海域におけるしぶき濃度の鉛直分布が得られることにな

る。 κ はカルマン定数0.4である。

図一2は、雨滴紙を用いて得られたしぶき痕の単位時間・単位面積当たりの衝突個数 N (個/cm²・s) としぶき痕径 D_s (mm) との関係を、 $\bar{z}$ をパラメータとして示したものである。 D_s は、しぶき痕はすべて円形であると仮定して求められている。図中の点線は正規分布を仮定した近似曲線である。しぶき痕径の個数分布はほぼ正規分布に従い、平均径は上方に向かうにつれ小さくなることがわかる。

図一3は、各個数分布に対する最適正規分布曲線から標準偏差 σ および期待値 μ を求め、全ての個数分布を規格化したものである。図には3種類の条件の下で得られたしぶき痕径のデータが含まれている。データのばらつきはやや大きいが、全体的には実線で示す標準正規分布で十分近似できることがわかる。ここで、期待値 μ を改めてその高さの平均しぶき痕径 D_s と定義する。



図一2 しぶき痕径の個数分布

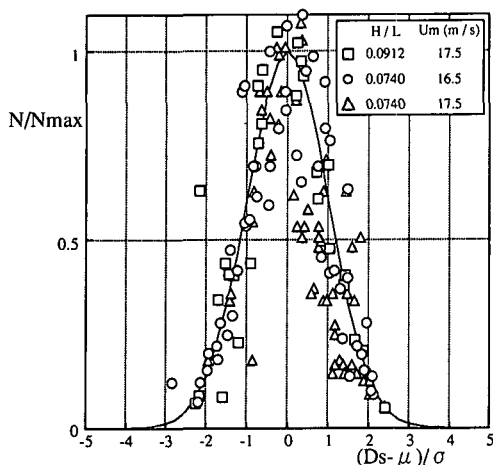


図-3 しぶき痕径の規格化された個数分布

図-4 は D_s の鉛直分布を示す。ややばらつきはあるものの D_s は近似的に

$$D_s \propto \bar{z}^{-3/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされることがわかる。佐粧他 (1990) は雨滴紙上のしぶき痕としぶきとの関係を詳細に調べている。彼らは経験式として

$$\left. \begin{aligned} m &= 0.043S & 0.1 \text{ mg} \leq m \leq 1.0 \text{ mg} \\ m &= 0.07S - 0.635 & 1.0 \text{ mg} \leq m \leq 12.0 \text{ mg} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

を提案している。ここで、 m は雨滴の質量 (mg) で、 S は雨滴痕面積 (mm^2) である。雨滴を球形、雨滴痕を円形と仮定し、 $m = \rho\pi D^3/6$, $S = \pi D_s^2/4$ を用いて (4) 式から D と D_s との関係を求めると近似的に

$$D \approx 0.42 D_s^{2/3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

なる関係を得る。佐粧他によって提案された経験式は雨滴痕径 1.5 mm 以上の雨滴に適用されるものであるが、図-4 で示されたしぶき痕のデータにもこの関係が適用できるものとする、しぶきの粒径分布として

$$D = D_* \bar{z}^{-1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

なる関係が得られる。ここで、 D_* は $z=H$ におけるしぶきの粒径である。これまで述べてきたように、今回しぶきの粒径の鉛直分布は雨滴紙によるしぶき痕の個数分布と佐粧他経験式に基づいて評価されている。前報 (松永他, 1995) では雨滴紙上のしぶき痕に基づき、単位時間・単位面積当たりに衝突する平均的な大きさをもつしぶきの個数を数え、測定によって得られた単位時間・単位面積当たりのしぶきの輸送量をその個数で割ることによりしぶきの平均粒径を求めた。どちらの方法においても $D \propto \bar{z}^{-1}$ なる関係が得られたことから (6) 式はかなり信頼できるものと思われる。

雨滴の沈降速度 w_0 と雨滴粒径 D との関係については Best (1950), 藤間他 (1982), 村本他 (1990) 等がある。

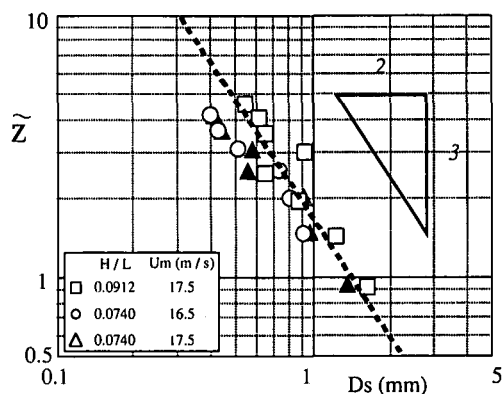


図-4 しぶき痕径の鉛直分布

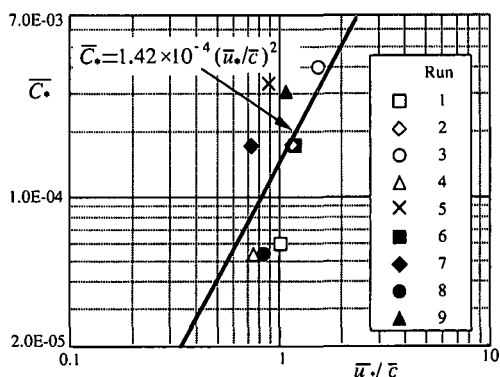
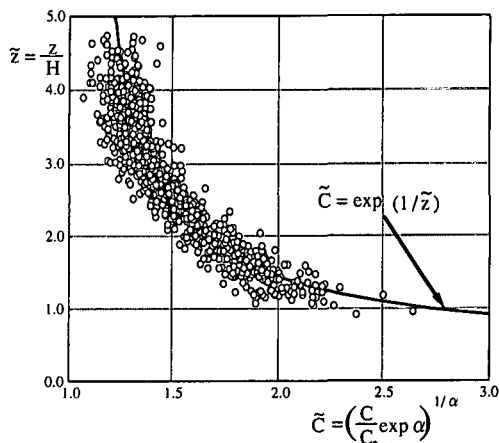
図-5 $z=H$ におけるしぶき濃度 $\bar{C}$ と波風係数 $\bar{u}_*/\bar{c}$ の関係

図-6 沖合海域におけるしぶき濃度分布

Best によって提案された経験式は

$$w_0 = 9.58 [1 - \{\exp(-D/1.77)\}^{1.15}] \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。ここで、 w_0 は (m/s), D は (mm) の次元である。図-4 と (5) 式から、今回の実験におけるしぶきの

粒径は0.2~0.7 mmの範囲にあることがわかる。この粒径範囲において、Bestの式は

$$w_0 = 5.50D \quad \dots\dots\dots (8)$$

で十分よく近似することができる。係数は (m/mm・s) の次元をもつことに注意する。従って、 w_0 の $\bar{z}$ 依存性は (6) 式から

$$w_0 = 5.50D_* \bar{z}^{-1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。従って、しぶき濃度分布は (2) 式から

$$C = \frac{C_*}{\exp \alpha} \exp \frac{\alpha}{\bar{z}} \quad \left(\alpha = \frac{5.50D_*}{Ku_*} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表わされることになる。

しぶき濃度の鉛直分布に (10) 式を適合させることにより C_* と α の値を評価することができる。このようにして得られた C_* の値を風下方向に平均し、その値を波風係数 $\overline{u_*}/\bar{c}$ に対してプロットしたものが図-5である。図から、 C_* は経験的に

$$\overline{C_*} = 1.42 \times 10^{-4} (\overline{u_*}/\bar{c})^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。また、 $\bar{\alpha}$ は9.0の値をとることが明らかとなった。図-6は規格化されたしぶき濃度分布と経験式

$$C = \frac{C_*}{\exp 9.0} \exp \frac{9.0}{\bar{z}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

との適合性を示したものである。沖合海域におけるしぶき濃度分布は、(12)式で十分よく表わされていることがわかる。

3.2 浅海域から陸域におけるしぶき濃度の変化

この節では、図-1で示された実験装置を用い、表-1の条件のもとで得られた浅海域から陸域モデル上のしぶき濃度について検討する。図-7は、浅海域から陸域にかけてしぶき濃度の鉛直分布が風下方向にどのように変化するかを示したものである。図中の実線は、(12)式と(11)式に基づいて評価された沖合海域におけるしぶき濃度分布である。浅海域・陸域へと風下方向に向かって水表面付近のしぶき濃度は急激に低減することがわかる。その理由は、浅海域に入って波高が減衰し、しぶきの供給が減少するためと考えられる。さらに風下側では大きなしぶきは沈降してしまい、微細なしぶきのみが移流されるため濃度分布は鉛直方向にほぼ一様となる。

図-8は、代表しぶき濃度 C_* を浅海域では $z=H$ 、陸域では $z=0$ の高さにおける濃度と定義し、しぶき濃度の鉛直分布を外挿することによって C_* を求め、吹送距離 x に対してプロットしたものである。 C_* の値は、浅海域では風下方向に進むにつれ指数関数的に減少し、陸域に入ると一定値に漸近する傾向が見られる。全実験に対する C_* の分布に指数関数の近似曲線を適合させ、(11)式から評価される沖合海域における C_* の値に達する位置を $x=x_e$ と定義する。つまり、 x_e はしぶきの沈降フラックスと拡散フラックスとの平衡状態が崩れ始める位置を

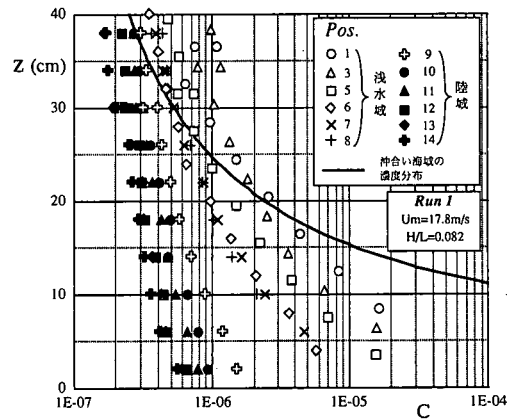


図-7 しぶき濃度分布の風下方向への変化

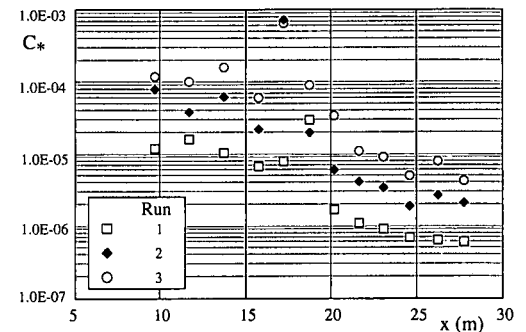


図-8 C_* の風下方向への分布

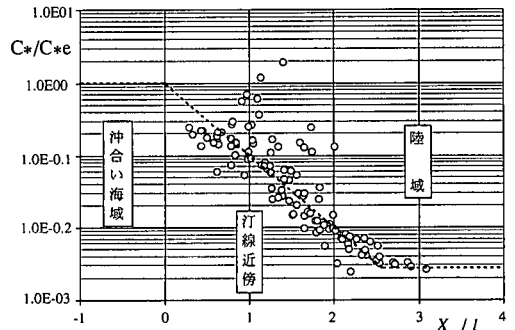
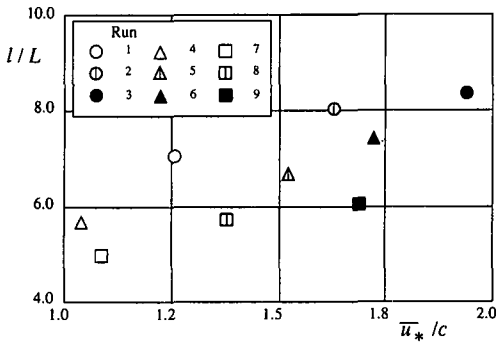
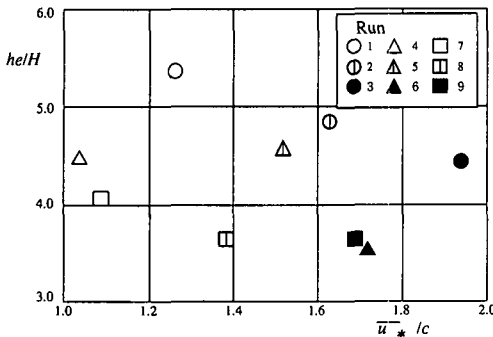


図-9 規格化された C_* の風下方向への分布

意味する。 $x=x_e$ での $z=H$ におけるしぶき濃度を C_{*e} 、その水深を h_e と定義する。また、 C_* の値が一桁減衰するのに要する距離を l と定義する。 $x=x_e$ なる位置が水平床にある場合は、浅海域モデルの斜面が沖に向かって続いているものとして水深 h_e が評価されている。

図-9は C_* に関する全データを C_{*e} と l を用いて規格化したものである。ここで、 x は改めて $x=x_e$ を原点として風下方向に取られた座標である。汀線近傍の領域ではデータにややばらつきが認められるものの、浅海域

図-10 l/L と $\overline{u}_*/c$ の関係図-11 h_e/H と $\overline{u}_*/c$ の関係

では C_* の値は風下方向に指数関数的に減少し、陸域ではほぼ一定となることがわかる。浅海域・陸域におけるしぶき濃度の数値シミュレーションにおいて水面に沿った境界条件として、 C_* を定量化するためには l と h_e が定量化されなければならない。

図-10 は、 l/L の値を $\overline{u}_*/c$ に対してプロットしたものである。 l/L の値は $\overline{u}_*/c$ の値が増大するにつれて大きくなる傾向がある。これは、 $\overline{u}_*$ が大きくなるにつれしぶき濃度も風下方向に一様となり、浅海域におけるしぶきの低減率が低くなるためと思われる。図-11 は、しぶき濃度が減衰し始める水深 h_e を波高で無次元化し、 $\overline{u}_*/c$ に対してプロットしたものである。 $\overline{u}_*/c$ が増大するにつれて、減衰し始める水深は浅くなることがわかる。これは図-10 で示した定性的傾向と一致する。また、 h_e/H の値は波形勾配が小さくなる程小さくなる傾向が認められる。

4. 結 論

本研究で得られた成果は、次のように要約される。

(1) 沖合海域では、しぶきの沈降と拡散が釣り合った場が形成され、しぶきの粒径に基づく沈降速度の評価から、しぶき濃度分布は、

$$C = \frac{C_*}{\exp \alpha} \exp \frac{\alpha}{z}$$

$$C_* = 1.42 \times 10^{-4} (u_*/c)^2$$

で表わされる。

(2) 浅海域では、しぶきの沈降と拡散の釣り合いが崩れ、特に水表面付近においては、しぶきの沈降が卓越し、しぶき濃度は風下方向に急速に減少する。陸域に入ると、しぶきの風下方向の変化も小さくなり、鉛直方向にほぼ一様な濃度分布となる。

(3) 数値シミュレーションにおいて必要な底面の境界条件として C_* の評価が得られた。

謝辞：本研究は平成7年度文部省科学研究費補助金基盤研究C(代表者 松永信博 課題番号 07650604)の援助を受けて行われたことを記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 佐粧純男・森 太郎・小野崎統・斎藤資志・筒井憲司 (1990): ろ紙による降水粒子の質量測定の精度について, 天気, 37 巻, 1 号, pp. 61-66.
- 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.
- 松永信博・植田 操・入江 功 (1994): 消波設岸によるしぶきの発生と設岸背後地への輸送, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1046-1050.
- 松永信博・植田 操・鶴崎賢一 (1995): 波に作用する風応力としぶき量の関係, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1031-1035.
- 村本健一郎・椎名 徹・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, pp. 7-186.
- Best, A. C. (1950): Empirical formula for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 76, pp. 302-311.
- Matsunaga, N., M. Hashida, H. Mizui and Y. Sugihara (1994): Quantity of spray transported by strong wind over breaking waves, Proc. 24th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 219-231.