

巻き波砕波によって発生した飛沫の風による輸送

松永, 信博
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

櫛田, 操
日本文理大学工学部

杉原, 裕司
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

<https://doi.org/10.15017/17350>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 16 (3), pp.353-358, 1994-12-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン :
権利関係 :

巻き波砕波によって発生した飛沫の風による輸送

松永信博*・榎田操**・杉原裕司*

(平成6年8月25日 受理)

Transport of spray by the wind over a plunging breaker

Nobuhiro MATSUNAGA*, Misao HASHIDA** and Yuji SUGIHARA*

In the case when two-dimensional regular water waves propagate on a sloping bed and form plunging breakers, how water spray is transported by wind has been investigated. The concentration of spray in the air decreases exponentially both in the vertical direction and in the leeward one. The decrease can be explained theoretically from the balance between the convection of spray and its precipitation. The exponentially decaying profiles are observed at $w_0x/U_m l_0 < 3.0$, where w_0 is the settling velocity of spray, U_m the mean wind velocity, x the fetch and l_0 the height at which the concentration has fallen to e^{-1} .

1. 緒言

近年、ウォータ・フロントの開発や人工島建設に伴い、ますます多くの人々が沿岸域を親水空間としてまた居住空間として利用するようになってきた。このような現状において、海表面から発生するしぶきや海塩粒子が海域・陸域でどのように飛散・輸送されるかを明らかにすることは、沿岸域でのアメニティ向上や大気環境を保全する上できわめて重要な問題となっている¹⁾。塩害が生ずる直接の原因は、海水がしぶきとなって空気中に取り込まれることにある。海水中に取り込まれた気泡が破裂することによって生ずる微細海塩粒子については、Tobaによる先駆的な研究がある²⁾³⁾。さらに鳥羽は海塩粒子の発生機構や大気中の海塩粒子の分布等に関する詳細な総合報告を行っている⁴⁾。最近では、沿岸海域での砕波や構造物と波の衝突により発生したしぶきの輸送について現地調査がかなり行われている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。しかしながら、風速としぶきの飛散量との関係を実験と理論により系統的に調べた研究は極めて少ない様に思われる⁸⁾⁹⁾。これまで、著者らは崩れ波型砕波上を強風が吹く場合について実験を行い、理論的考察も加えることにより砕波帯域から輸送されるしぶき量の定量化を行った¹⁰⁾。

本研究では、巻き波型砕波によって発生したしぶき

が風によりどのように輸送されるかについて実験的に調べ、理論的考察を加えることによりしぶき量の定量化を試みた。さらに、巻き波型砕波によって生じたしぶきの輸送形態と崩れ波型砕波によって生じたしぶきの輸送形態の違いについても言及した。

2. 実験装置および実験方法

実験には吸い込み式風洞を有する二次元造波水槽を用いた。水槽の長さは32m、高さ0.94m、幅0.6mで、水槽上部に直径0.73mの半円形ドームが取り付けられている。Fig. 1にその概要を示す。海浜モデルとして底面勾配1/30の斜板を取り付けた。水平床上の水深は0.512mであった。斜面上に沖波波高勾配 $H_0/L_0=0.0191$ の2次元規則波を入射させた。ここで、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長である。この波は斜面上を伝播しながら巻き波型の砕波形態をとる。砕波上を吹く風の断面平均風速 U_m を10.9m/s、15.4m/s、18.1m/sに設定した。Table 1に実験条件を示す。ここで、 C_0 は沖波波速である。Table 1におけるしぶき濃度の代表量については4節で説明する。座標軸として砕波の突っ込み点(P1)から風下方向へ x 軸をとる。巻き波砕波の突っ込み点P1($x=0.0m$)から0.7m風下側の測定点P2($x=0.7m$)において、またP2からは風下方向に1.2m間隔でP9($x=9.1m$)までの合計8断面でしぶき量の測定を行った。しぶきは直径3cm、深さ5cmの容器に脱脂綿を詰め、容器の

*大気海洋環境システム学専攻

**日本文理大学工学部

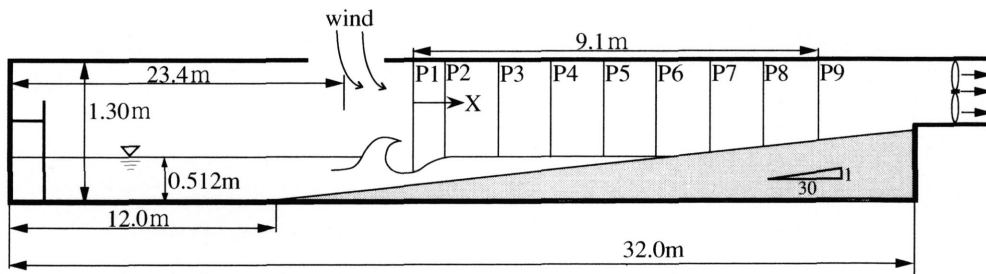


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up.

Table 1 Experimental parameters and characteristic quantities on concentration of spray.

Run	実験条件							しぶき濃度の代表量				
	T (s)	H ₀ (cm)	L ₀ (m)	C ₀ (m/s)	U _m (m/s)	H ₀ /L ₀	U _m /C ₀	C _(0, 0) (g/cm ³)	l ₀ (cm)	l ₀ /H ₀	w ₀ /U _m	
1					10.9		3.13	1.35×10 ⁻⁴	4.79	0.326	3.59×10 ⁻²	
2	2.2	14.7	7.69	3.50	15.4	0.0191	4.39	1.82×10 ⁻⁴	7.06	0.480	3.13×10 ⁻²	
3					18.1		5.17	2.68×10 ⁻⁴	9.07	0.617	4.02×10 ⁻²	

口を風向きに対し直角に向けることにより捕獲された。容器を各測定位置で鉛直方向に5 cm 間隔で10個程度並べ、単位時間・単位面積当たりのしぶき量 q (g/cm²・s) の鉛直分布を求めた。しぶきの濃度 C は、空気の体積に占めるしぶきの体積と定義し、 $C = q / \rho U_m$ から算定された。ここで、 ρ はしぶきの密度である。また、Run2 では雨滴紙を用いることによりしぶきの大きさも観察した。

3. しぶきの輸送形態

Fig. 2 は、巻き波が突っ込むことにより発生したしぶきが風によって輸送される様子を示したものである。この場合 $U_m = 18.1$ m/s であった。1回の砕波により粒径の大きなしぶきが多量に発生している様子がわかる。Fig. 3 (a), (b), (c) は、それぞれ $x = 1.9$ m, 5.5 m, 9.1 m において雨滴紙を用いて観察されたしぶきの大

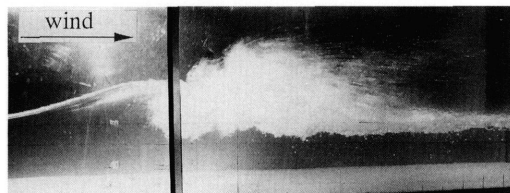


Fig. 2 Generation of spray by plunging breaker under strong wind in Run 3.

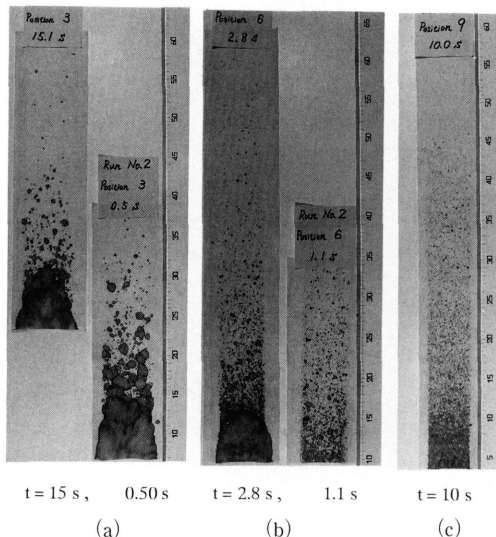


Fig. 3 Vertical profiles of spray size obtained by using droplet sampling papers; t being the time for which the papers were exposed to spray. Vertical scale unit is cm. (a) $x = 1.9$ m, (b) $x = 5.5$ m and (c) $x = 9.1$ m.

きさの鉛直分布を示したものである。この場合 $U_m = 15.4$ m/s であった。写真中のスケールは平均水面位置から鉛直上向きに取られたものである。これらの写真から、各測定点においてしぶきの大きさは上方に行

くにつれ急激に小さくなっていることがわかる。著者らは、崩れ波型破波上を強風が吹く場合しぶきの粒径分布は風下方向にあまり変化しないことを示した¹⁰⁾。しかし、巻き波型碎波によって発生したしぶきは、風下方向に輸送されるにつれ著しく小さくなる。これは、崩れ波型碎波の場合は碎波帯内にわたって一様にしぶきが供給されるのに対し、巻き波型碎波の場合は突っ込み点の一箇所のみでしぶきが多量に発生し、風下方向に移流しながら沈降するためであると考えられる。

4. しぶき輸送量の定量化

Fig. 4 は、Run1 におけるしぶきの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。ここで、z は波の峰から鉛直上向きに取った座標である。この図から、しぶき濃度は鉛直方向に指数関数的に減少しながら風下方向にも著しく低下することがわかる。これは、前述した様に突っ込み点の1箇所から発生したしぶきが沈降しながら風下方向に輸送されるためである。宇多らは、人工構造物から発生したしぶきが陸域に輸送される場合、沿岸付近ではしぶきの移流と沈降が釣り合った領域（移流・沈降領域）が形成されることを示した⁷⁾。巻き波型碎波によって発生したしぶきの輸送過程においても碎波後水表面からのしぶきの供給がほとんどないことから、陸上での輸送形態と同様に碎波点から岸方向においては移流沈降

領域が形成されると考えられる。この場合、しぶきの濃度Cを支配する式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}(W-w_0)C=0 \quad (1)$$

で表わされる。ここで、UとWはそれぞれx方向およびz方向の平均風速、w₀はしぶきの沈降速度である。実験結果を整理する上で、第1近似としてU=U_mとし、沈降速度w₀を一定と仮定する。さらに、W=0、濃度場を定常とすると、(1)式は

$$U_m \frac{\partial C}{\partial x} - w_0 \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

となる。

Fig. 4 で示したように、しぶき濃度は風下方向に急激に低下すると同時に鉛直方向にも指数関数的に減少する。従って、しぶきの濃度C(x, z)を

$$C(x, z) = C(x, 0) \exp(-z/l) \quad (3)$$

と仮定する。ここで、lはしぶきの濃度が波の峰(z=0)における濃度の1/eに減少する高さである。ここで、lはxに依存しないとして(3)式を(2)式に代入し、C(x, 0)を求めると、

$$C(x, 0) = C(0, 0) \exp\left(-\frac{w_0}{U_m} \frac{x}{l}\right) \quad (4)$$

となる。従って、しぶきの濃度分布は

$$C(x, z) = C(0, 0) \exp\left(-\frac{w_0}{U_m} \frac{x}{l}\right) \exp\left(-\frac{z}{l}\right) \quad (5)$$

で表わされることになる。ここで、C(0,0)は突っ込み点におけるz=0でのしぶきの濃度である。

Fig. 5 は、Run1~3 において得られたしぶきの濃度分布から点(x, 0)における濃度C(x, 0)の値を外挿して求め、濃度がC(x, 0)/eと等しくなる高さlを読み取ることによりしぶきの濃度を無次元表示したものである。この図から、U_m/C₀の値に関係なくしぶきの濃度は普遍的にC(x, z)/C(x, 0)=exp(-z/l)で与えられることがわかる。

Fig. 6 は、lの値を吹送距離xに対してプロットしたものである。しぶきが流下するにつれ、lの値はほぼ一定値に漸近することがわかる。その漸近値は風速

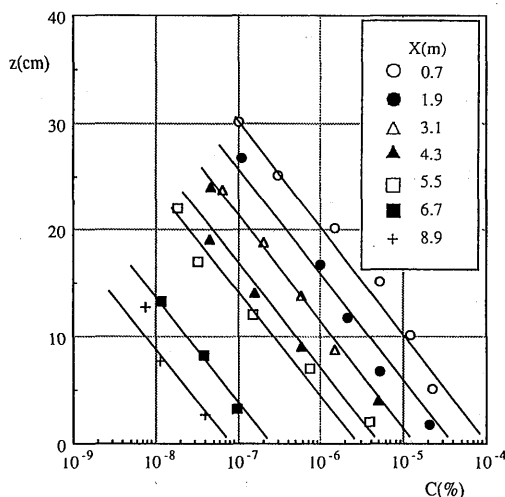


Fig. 4 Vertical profiles of C and their leeward variation.

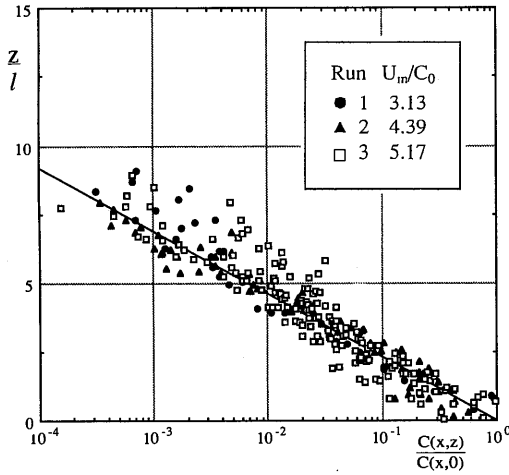


Fig. 5 Universal expression for C.

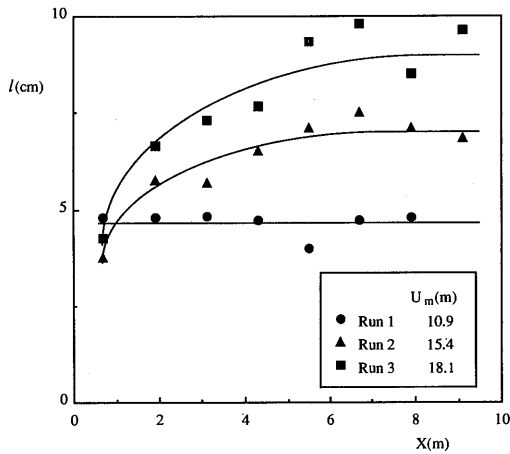


Fig. 6 Dependence of l on fetch.

が増加するにつれ大きな値をとるが、その漸近値に達するまでの吹送距離も長くなる傾向がある。Table 1 に漸近値 l_0 を示す。突っ込み点付近での l に対する l_0 の比は、平均風速が増大するにつれ大きくなる。これは、突っ込みによるしぶきの鉛直上向きの飛散速度と平均風速との比が密接に関係しているものと思われる。しかしながら、吹送距離 9 m に対して l_0 の変化は最大 5 cm 程度であり、 l は x に依存していないという仮定はほぼ妥当である。

Fig. 7 は、 l_0 を実験パラメータで無次元化し、定量化したものである。一種類の波に対するデータではあるが、 l_0/H_0 の値は U_m/C_0 に比例することから、巻

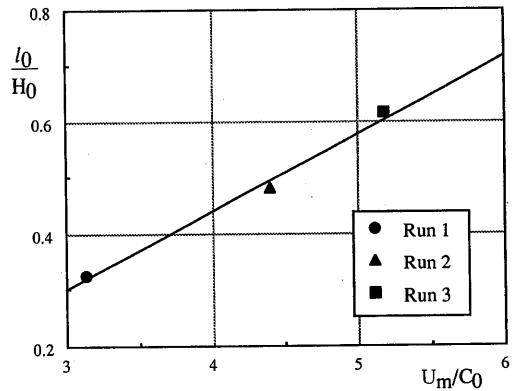


Fig. 7 Relation between l_0/H_0 and U_m/C_0 .

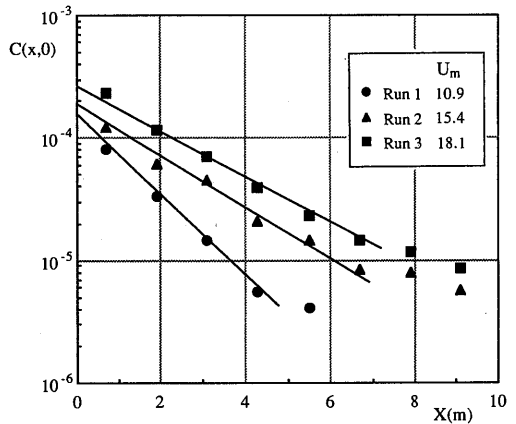


Fig. 8 Dependence of $C(x, 0)$ on fetch.

き波砕波によって発生したしぶきの代表到達高さは波高と風速に比例して増大することがわかる。

Fig. 8 は、外挿によって求めた波の峰におけるしぶき濃度 $C(x, 0)$ をしぶきの吹送距離 x に対してプロットしたものである。吹送距離の短い区間においては $C(x, 0)$ は、指数関数的に減少することがわかる。これは (4) 式で得られた $z=0$ における濃度の理論解と矛盾していないことを示す。 $z=0$ におけるしぶきの濃度は風速が大きい程全吹送距離にわたって大きな値をとることがわかる。しかしながら、吹送距離が大きくなるにつれ $z=0$ における濃度は指数関数的減衰からはずれ、一定値に漸近する傾向が見られる。この理由は、Fig. 3 で示した様に、しぶきの粒径が吹送距離の増加とともに著しく減少し、沈降速度 w_0 が低下

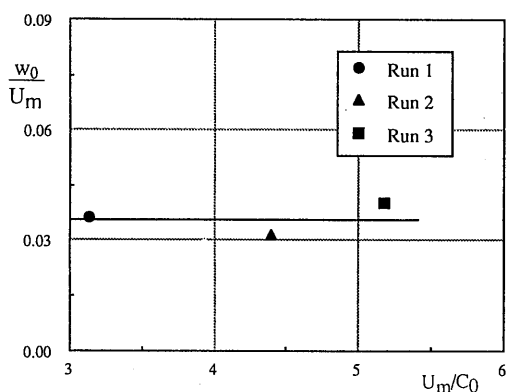


Fig. 9 Relation between w_0/U_m and U_m/C_0 .

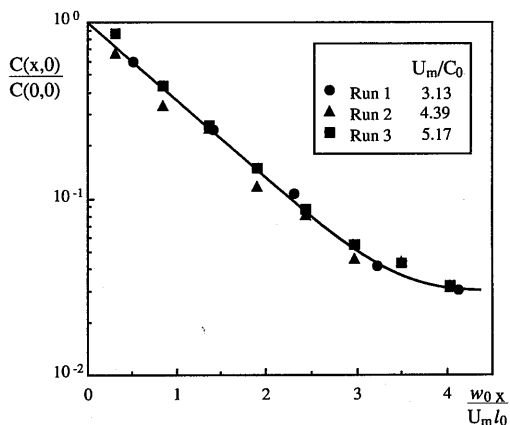


Fig. 11 Universal expression for $C(x, 0)$.

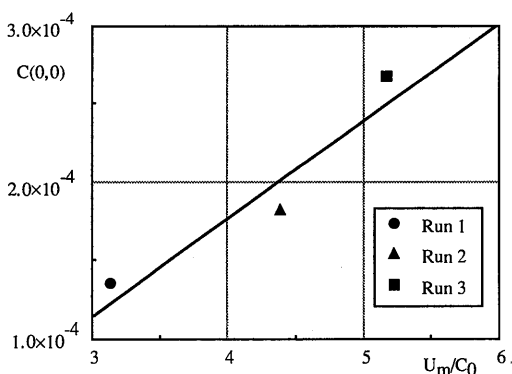


Fig. 10 Relation between $C(0, 0)$ and U_m/C_0 .

するためであると考えられる。従って、宇多らが指摘しているように⁷⁾、移流・沈降領域のさらに風下側ではしぶきの移流と拡散が釣り合った場が形成されているものと考えられる。

Fig. 9 は、Fig. 8 からグラフの勾配を読みとり、その値に Table 1 で示した l_0 をかけることにより求められた w_0/U_m の値を U_m/C_0 に対してプロットしてものである。このようにして求めたしぶきの沈降速度と平均風速の比 w_0/U_m は、全空間にわたって平均化された値を示すものである。さらに広範囲の実験を行う必要はあるものの、この図からしぶきの平均的沈降速度は平均風速の3.5%程度の値をもつことがわかる。

Fig. 10 は、突っ込み点での $z=0$ におけるしぶきの濃度 $C(0, 0)$ を Fig. 8 から読み取り、 U_m/C_0 に対してプロットしたものである。この図から碎波点にお

ける $z=0$ でのしぶき濃度は U_m/C_0 に比例して増加することがわかる。

Fig. 11 は読み取られた l_0 , w_0/U_m , $C(0, 0)$ の値を用いて、Fig. 8 に示したデータを無次元表示したものである。波の峰におけるしぶきの濃度の風下方向への依存性は、 U_m/C_0 のそれぞれの値に対して普遍表示されていることがわかる。この図から巻き波型碎波から発生したしぶきは $w_0x/U_m l_0 < 3.0$ の範囲において、しぶきの移流と沈降が釣り合った機構で輸送されることがわかる。

5. 結 論

巻き波型碎波によるしぶきは、突っ込み点の一箇所から発生するため、崩れ波型碎波上のしぶきの輸送形態とは著しく異なる。この場合、しぶきの輸送過程はしぶきの移流と沈降とが釣り合った形で表現できるものとして実験結果と解析結果とが比較された。その結果、しぶき濃度の分布は

$$C(x, z) = C(0, 0) \exp\left(-\frac{w_0}{U_m} \frac{x}{l_0}\right) \exp\left(-\frac{z}{l_0}\right)$$

で表わされることが確かめられた。しぶき量を予測するためにあらかじめ評価されなければならない代表量は、突っ込み点における波頂高さでの濃度 $C(0, 0)$ 、しぶきの沈降速度と平均風速の比、それとしぶきの代表到達高さ l_0 である。これらの代表量に関して以下のような結果が得られた。

- i) l_0/H_0 は U_m/C_0 に対して線形的に増加する。

ii) w_0/U_m は U_m/C_0 に対してほぼ一定値をとる.

iii) $C(0, 0)$ は U_m/C_0 に対して線形的に増加する.

今回の実験は非常に限られた狭い条件のもとで行われたものであり, 沿岸海域から陸域に向かって輸送されるしぶき量を定量的に予測するためには今後さらに広範囲の条件下で実験を行うことが必要である.

本研究は, 平成4年度文部省科学研究費補助金総合研究A (代表入江功九州大学教授) 「強風による沿岸部での塩害とその対策に関する研究」の援助のもとで行われたことを記し謝意を表します. また本研究を行うにあたり多大な協力をお願いした当時九州大学大学院生水井宏征 (株フジタ) ならびに日本文理大学技術員広瀬智彦の両氏に感謝致します.

参 考 文 献

- 1) 仲座栄三, 津嘉山正光, 照屋雅彦, 海岸工学論文集, **38**, 896 (1991).
- 2) Y. Toba, J. Oceanogr. Soc. Japan, **15**, 121 (1959).
- 3) Y. Toba, Memoirs Coll. Sci. Univ. Kyoto, Ser. **A29**, 313 (1961).
- 4) 鳥羽良明, 空と海, **41**, 71 (1966).
- 5) 仲座栄三, 津嘉山正光, 照屋雅彦, 環境システム研究, **18**, 88 (1990).
- 6) 村上和男, 加藤一正, 清水勝義, 福田真人, 宮崎啓司, 海岸工学論文集, **39**, 1046 (1992).
- 7) 宇多高明, 小俣 篤, 小西正純, 海岸工学論文集, **39**, 1051 (1992).
- 8) 石田 昭, 花田昌彦, 細井正延, 第29回海岸工学講演会論文集, 385 (1982).
- 9) 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹雄, 海岸工学論文集, **40**, 1036 (1993).
- 10) 松永信博, 檀田 操, 水井宏征, 杉原裕司, 水工学論文集, **38**, 499 (1994).