

砕波上の強風によって輸送されるしぶき量

Volume of Spray Transported by Strong Wind over Breaking Waves

松永信博*、櫛田操**、水井宏征***、杉原裕司****

By Nobuhiro MATSUNAGA, Misao HASHIDA, Hiroyuki MIZUI and Yuji SUGIHARA

Two big typhoons hit the western part of Japan subsequently on September 1991. They gave extensive severe damages along the coastal region. An investigation about the damages showed that a large quantity of spray of sea water was distributed over a wide area and caused these disasters. Though a few experimental studies on salt damage have been made, many fundamental problems have been left unsolved. In the case when two-dimensional steep waves propagate on a sloping bed, the volume of spray carried by the strong wind is measured, and theoretical development is given for its vertical profiles. The concentration of spray decreases rapidly in the vertical direction and the variation in the leeward direction is very small. The dimensionless vertical profiles of the concentration depend strongly on the wave steepness rather than the wind velocity.

Key words: Salt damage, strong wind, spray of sea water, breaking wave, coastal environment

1. はじめに

我が国では、ほぼ毎年台風や冬期季節風による災害が沿岸域で発生しており、その防止対策は十分とは言えない。なかでも塩害対策は海岸構造物の設計や海浜浸食の防止対策と比較して重視されていなかった感がある。1991年7月から9月にかけて、九州及び中国地方を襲った台風による塩害は、沿岸部を中心に大きな被害をもたらした。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。しぶきは沿岸海域での砕波や構造物と波の衝突により発生する。これまで現地における塩害やしぶきの飛散に関する観測や調査はあるが^{1) 2) 3)}、風速としぶきの飛散分布との関係を実験や理論により系統的に調べた研究は極めて少ない^{4) 5) 6)}。

* 正会員 工博 九州大学助教授 総合理工学研究科 大気海洋環境システム学専攻
(〒816 春日市春日公園6-1)

** 正会員 工修 日本文理大学教授 工学部 土木工学科
(〒870-03 大分市一木1727)

*** 学生員 九州大学大学院 総合理工学研究科修士課程
(〒816 春日市春日公園6-1)

**** 正会員 工修 九州大学助手 総合理工学研究科 大気海洋環境システム学専攻
(同上)

沿岸域が台風や冬期季節風等の強風下にある場合、入射波の波形勾配は増大し、進行波の各波峰は崩れ波型碎波となって伝播する。そして、しぶきは碎けながら進行する各波峰から発生するため、しぶきの生成域は nearshore zone の全域に及ぶ。

本研究では、一様勾配斜面上に 2 次元規則波を入射させ崩れ波型碎波を生じさせると同時に水表面に強風を吹かせることによりしぶきの飛散量を測定した。さらに、理論的考察に基づいてしぶき飛散量の定量的評価を行った。このような研究は、強風下にある碎波帯からしぶきがどのように飛散し、陸域にどれだけのしぶきが供給されるかという問題を解明する上で、極めて重要な知見を与えるものと考えられる。

2. 実験装置および実験方法

実験には、長さ32m、幅0.6m、高さ0.94mの矩形断面の水路上部に直径0.73mの半円形ドームを取り付けた、吸い込み式風洞を有する 2 次元造波水槽を用いた。図-1 にその概要を示す。

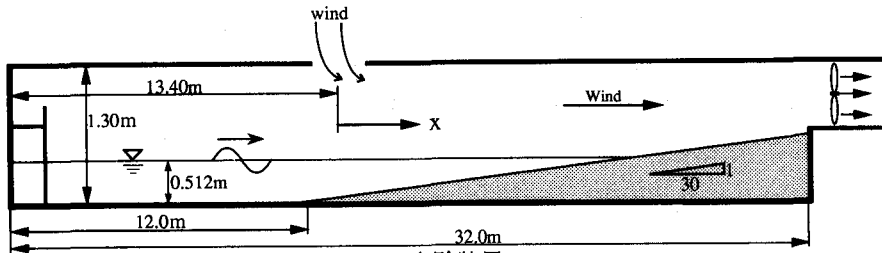


図-1 実験装置

海浜モデルとして底面勾配は1/30とした。水平床上的水深は0.512mに固定し、斜面上に沖波波形勾配 H_0/L_0 (H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長) が 3 種類の 2 次元規則波 ($H_0/L_0=0.048, 0.070, 0.090$) を入射させた。これらの波に、風洞出口での断面平均風速 U_0 が 17.0m/s, 14.8m/s, 10.7m/s の 3 種類の強風を吹かせた。崩れ波型碎波が形成され、定常的にしぶきを発生する状態でしぶき量を測定した。表-1 に実験 (Run 1~9) における H_0/L_0 と U_0 の値を示す。 γ については次節で説明する。しぶき量の測定位置は風の吸い込み口から風下方向へ、1.0m 毎 (Run4 においてのみ 1.2m 毎) の 16 断面とした。但し、最初の測定断面の吹送距離 (X) は 1.6m であった。しぶき量は、直径 3cm、深さ 5cm の容器に脱脂綿を詰め、それを各測定位置で鉛直方向に 5cm 間隔で 10 個配列することにより、単位時間・単位面積当たりのしぶき量 q

($g/cm^2 \cdot s$) 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の割合と定義し、 $C \equiv \frac{q/\rho_0}{U}$ から算定された。ここで、 ρ_0 はしぶきの単位体積当たりの密度、 U は測定位置における断面平均風速である。また、しぶきの大きさおよび個数の分布等に関する情報を得るために Run 6 において雨滴紙を用いたしぶきの観察も行った。

3. しぶきの飛散形態

写真-1 は、Run 6, $X=10m$ におけるしぶきの発生状況を示したものである。強風により崩れた波峰からしぶきが多量に飛散する様子がわかる。

表-1 実験条件

Run	U_0 (m/s)	H_0/L_0	γ
1	10.7	0.048	0.2
2	14.8	0.048	
3	17.0	0.048	
4	10.7	0.070	0.4
5	14.8	0.070	
6	17.0	0.070	
7	10.7	0.090	0.6
8	14.8	0.090	
9	17.0	0.090	

写真-2 (a)

と (b) は $X=10.2$

m と $X=15.0$ m に

おいて雨滴紙で得ら

れたしぶきの大き

さの鉛直分布を示

したものである。

写真中のスケール

は、wave set-up の

レベルから上向き

に取られたもので

あり、波頂の位置

は set-up の高さか

らそれぞれ 4.75cm,

1.75cm 上方であ

った。これらの写真

からしぶき量は風

下方向の変化に比

べ、鉛直方向に急

激に変化すること

がわかる。また、

しぶきの大きさ

に関しても同様の

傾向が観察され

る。

4. しぶき飛散量の定量化

図-2 は、Run 6 に

おいて得られたし

ぶきの濃度 C ($\equiv \frac{q/\rho_0}{U}$)

を吹送距離 X を

パラメータとし

て Z に対してプロ

ットしたもので

ある。ここで Z は

各測定位置にお

ける波頂高さか

ら鉛直上向きに

取られた座標で

ある。この図から

も明らかな様に

、濃度 C の X 方

向の変化は Z 方

向の変化に比べ

非常に小さいこ

とがわかる。この

理由として、吹

送域内に形成さ

れる崩れ波型碎

波からしぶきが

風下方向にほぼ

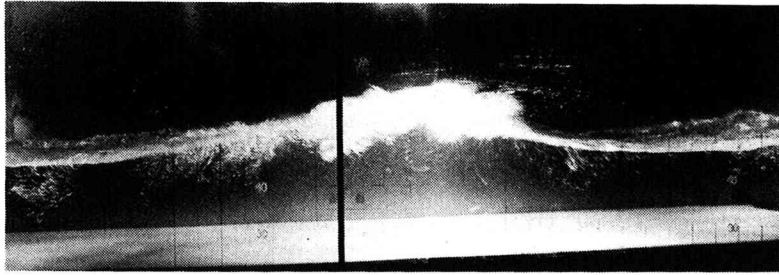
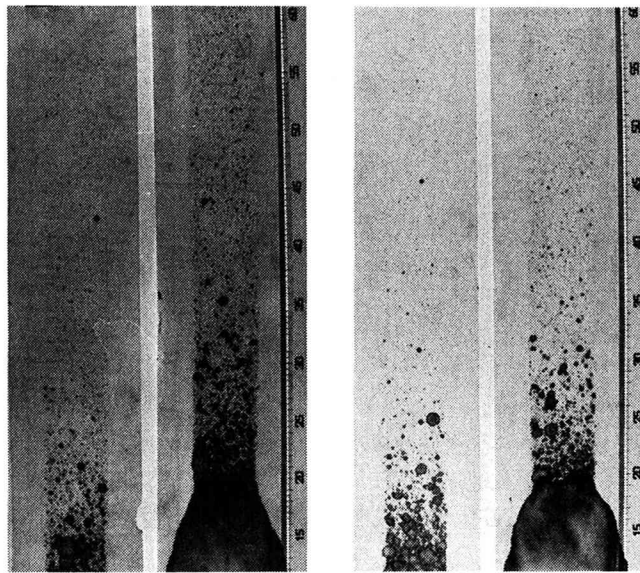


写真-1 しぶきの発生状況
($U_0=17.0\text{m/s}$, $H_0/L_0=0.070$, $X=10\text{m}$)



(a) $X = 10.2\text{m}$

(b) $X = 15.0\text{m}$

写真-2 しぶきの大きさの鉛直分布
(t は雨滴紙の挿入時間)

に比べ非常に小さいことがわかる。この理由として、吹送域内に形成される崩れ波型碎波からしぶきが風下方向にほぼ一様に供給されるためであると考えられる。

しぶきの濃度を規定する式は、

$$\frac{\partial(CU)}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Z} (V-v_0) C = \frac{\partial}{\partial X} (D \frac{\partial C}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Z} (D \frac{\partial C}{\partial Z}) \quad (1)$$

となる。ここで、 V : 鉛直方向の平均風速、 v_0 : しぶきの沈降速度、 D : しぶきの拡散係数である。今回の実験では $U=\text{const.}$, $V=0$ と仮定する。写真-2 (a), (b) と図-2 で示される様にしぶき濃度 C の X 方向の変化は Z 方向の変化に比べ十分小さいことにより、右辺第一項の X 方向の拡散項を無視する。Run 6 においては、 $U \sim 20\text{m/s}$, $C \sim 10^{-5}$ で、濃度が 1 オーダー低下する X 方向の距離

ΔX は15m程度、Z方向の距離 ΔZ は10cm程度である。また、Hosking & Stow⁷⁾によると、雨滴の直径が0.3mmから2.0mmの場合、沈降速度 v_0 は2.5m/s $\sim$ 8.3m/sの値をもつことが知られている。これらを考慮すると、左辺第一項のオーダーは

$$\frac{\partial(CU)}{\partial X} \approx U \frac{C}{\Delta X} = 1.3 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

となり右辺第二項のオーダーは、

$$\frac{\partial}{\partial Z} (v_0 C) \approx v_0 \frac{C}{\Delta Z} = 2.5 \times 10^{-4} \sim 8.3 \times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

となる。従って、各鉛直断面においては近似的にしぶきの沈降と拡散がつり合った場が形成され、濃度を支配する式は、

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left(D \frac{\partial C}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} (v_0 C) = 0 \quad (2)$$

となる。ここで、 $C = C^*(X)f(\tilde{Z})$, $D/v_0 = l_*(X)g(\tilde{Z})$, $Z = l_*(X)\tilde{Z}$ とおき、無次元量 $f(\tilde{Z})$, $g(\tilde{Z})$, $\tilde{Z}$ を定義する。 $C^*(X)$ は吹送距離Xにおける $Z=0$ でのしぶきの濃度で、 $l_*(X)$ は $Z=0$ における拡散係数と沈降速度でつくられる代表長さである。これらの関係を(2)式に代入し、 $\tilde{Z} \rightarrow \infty$ における境界条件を考慮すると、

$$\frac{\partial f(\tilde{Z})}{\partial \tilde{Z}} + g(\tilde{Z})^{-1} f(\tilde{Z}) = 0 \quad (3)$$

を得る。しぶきの大きさはZが増加する程小さくなるため、沈降速度 v_0 はZが増加するにつれ減少する。一方、拡散係数Dは一般にZが大きくなる程増大すると考えられる。これらを考慮して拡散係数と沈降速度から形成される無次元長さ $g(\tilde{Z})$ を

$$g(\tilde{Z}) = (1 + \tilde{Z})^\gamma \quad (\gamma > 0) \quad (4)$$

と仮定する。(4)式を(3)式に代入し、 $\tilde{Z}=0$ で $f(\tilde{Z})=1$ を考慮すれば、

$$f(\tilde{Z}) = \exp \left[\frac{1}{1-\gamma} \{1 - (1 + \tilde{Z})^{1-\gamma}\} \right] \quad (5)$$

を得る。(5)式において、 $f(\infty) \rightarrow 0$ であるから、 $0 < \gamma < 1$ でなければならない。図-3は、(5)式で与えられる無次元しぶき濃度 $f(\tilde{Z})$ の理論解を γ をパラメータとして示したものである。当然のことながら、 γ が小さい程 $f(\tilde{Z})$ の $\tilde{Z}$ 方向の減少率は大きくなる。

Run 6において各測定位置で得られた濃度のデータと理論解をそれぞれ両対数上で描き、それらを重ね合わせるにより最適の C^* , l_* , γ を算定した。そして、得られた C^* , l_* を用いて実験値を無次元化したものが図-4である。この場合、全ての測定位置における無次元しぶき濃度は、 $\gamma=0.4$ の理論曲線と非常によく一致していることが分かる。図中の $\tilde{C}$ は $C/C^*(X)$ で定義される無次元濃度で、理論展開における $f(\tilde{Z})$ と同じものである。

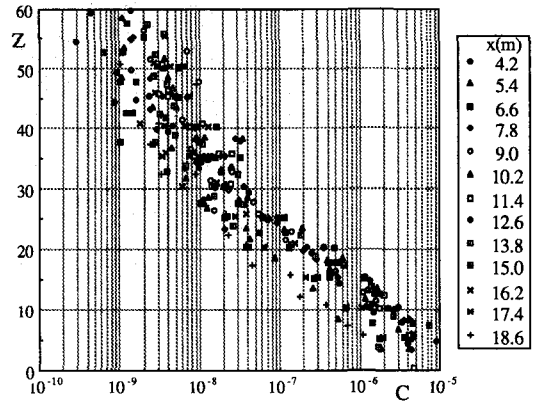


図-2 しぶき濃度の鉛直分布
(Run 6)

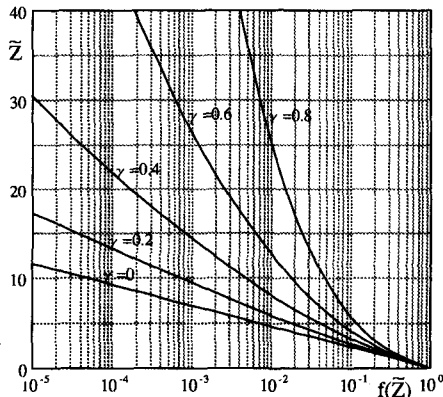


図-3 無次元しぶき濃度分布の理論解

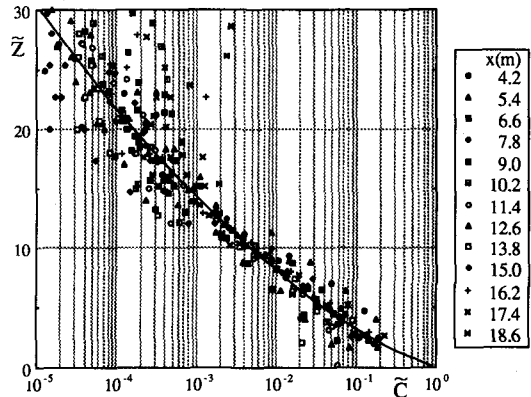
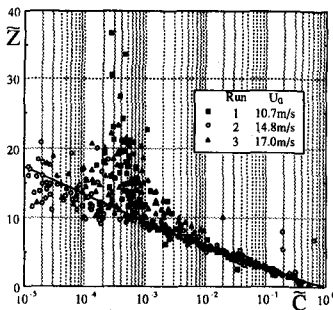
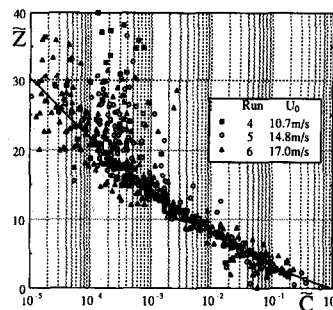


図-4 無次元濃度分布と理論解との比較 (Run 6)

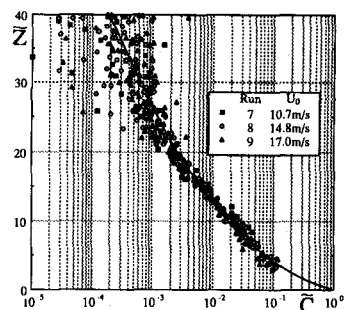
図-4を得たときと同じ手法を用いてRun 1～9までのデータを理論解と比較した結果、 $H_0/L_0 = 0.048$ (Run 1,2,3), 0.070 (Run 4,5,6), 0.090 (Run 7,8,9)の実験に対してそれぞれ $\gamma=0.2, 0.4, 0.6$ の理論解とよく一致することがわかった。また、 γ の値は、平均風速や測定位置にはほとんど依存しないことがわかった。



(a) $H_0/L_0 = 0.048$, $\gamma = 0.2$



(b) $H_0/L_0 = 0.070$, $\gamma = 0.4$



(c) $H_0/L_0 = 0.090$, $\gamma = 0.6$

図-5 無次元しぶき濃度と理論解との比較

図-5は、無次元濃度分布と理論解との適合性を風速 U_0 をパラメータとして示しており、両者はよく一致していることがわかる。このようにして得られた γ の値は表-1に示されている。

図-6は、 γ と H_0/L_0 との関係を示したものである。今回の実験範囲においては γ は H_0/L_0 に比例して増加する傾向にあり、沖波波形勾配が増加するにつれしぶきはより高くまで飛散することが示された。

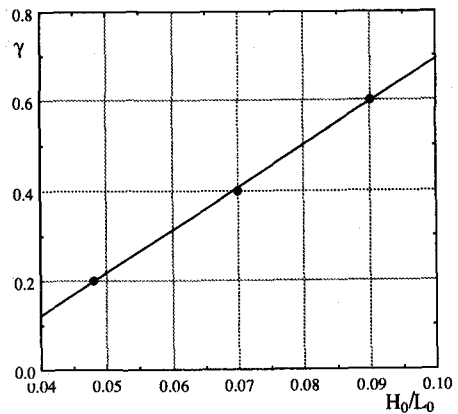


図-6 γ と H_0/L_0 との関係

5. おわりに

強風下における崩れ波型碎波によるしぶきの飛散形態および飛散量について実験を行い理論的考察を加えた。強風下にある碎波帯でのしぶき濃度は風下方向よりも鉛直方向に著しく変化し、鉛直断面における濃度分布はしぶきの沈降と鉛直方向の拡散とがつり合った形で表わされる。今回の実験条件においては、しぶきの無次元鉛直濃度分布は吹送域内の位置や平均風速にほとんど依存せず、沖波波形勾配に強く影響を受けることが明らかとなった。しぶきの拡散効果を示す無次元量 γ は沖波波形勾配に比例することが示された。沖波波形勾配が既知の沿岸域では γ の値が決定され、無次元鉛直濃度分布が求まることになる。任意の位置におけるしぶきの濃度を知るためには、 C_s や λ を波と風のパラメータと関係づけることが必要である。今後は、これらの関係を詳細に調べる予定である。

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日本文理大学土木工学科海洋環境研の4年生諸君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦：沿岸微気候の一要素としての飛塩量特性，環境システム研究，Vol.18，pp.88-93，1990.
- 2) 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓司：碎波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査，海岸工学論文集，第39巻，pp.1046-1050，1992.
- 3) 宇多高明・小俣篤・小西正純：海岸からの飛来塩分量の計算モデル，海岸工学論文集，第39巻，pp.1051-1055，1992.
- 4) 高田彰：越波の飛散分布，第19回海講論文集，pp.289-295，1972.
- 5) 石田昭・細井正延：飛沫の発生に関する実験的研究，第29回海講論文集，pp.385-388，1982.
- 6) 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄：飛塩（海塩粒子）拡散の数値流体力学的解析，海岸工学論文集，第40巻，pp.1036-1040，1993.
- 7) Hosking, J.G. and Stow, C.D.: Ground-Based Measurements of Raindrop Fallspeeds, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.8, pp.137-147, 1991.