

強風による消波護岸からのしぶきの輸送

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土木工学科

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/10.15017/17415>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 18 (3), pp.269-274, 1996-12-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン :
権利関係 :

強風による消波護岸からのしぶきの輸送

松永信博*・櫛田操**・杉原裕司*

(平成8年9月12日 受理)

Transport of Spray from a Wave Absorbing Sea Wall by a Strong Wind

Nobuhiro MATSUNAGA, Misao HASHIDA and Yuji SUGIHARA

A landward transport process of spray generated from a wave absorbing sea wall under a strong wind has been investigated experimentally. Near the wall, the concentration of spray decays exponentially both in the leeward direction and in the upward direction. Its profiles are determined by the equilibrium between convection and sedimentation. The characteristic quantities of the profiles have been related to the experimental parameters.

1. 緒言

我が国の沿岸域では台風や冬期季節風による災害が頻繁に発生するため、その防災対策としてもつばら波浪・高潮災害対策や海岸侵食対策にエネルギーが注がれてきた。一方、1991年9月に九州および中国地方を相次いで襲った台風9117号と9119号が沿岸部を中心に甚大な塩害をもたらしたことは記憶に新しく、塩害対策の重要性も認識され始めた^{1)~3)}。

Hayami & Toba⁴⁾やToba^{5),6)}は、海水中に取り込まれた気泡が破裂することによって発生する海塩粒子について先駆的な研究を行った。また、鳥羽⁷⁾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して詳細な総合報告も行っている。最近の研究において、村上⁸⁾は現地調査に基づいて碎波帯内における海塩粒子の分布特性を調べ、海塩粒子の発生量と風の間を関係を検討している。また、宇多ら⁹⁾や仲座ら¹⁰⁾は陸域における海塩粒子の輸送モデルを提案している。松永ら^{11)~13)}は崩れ波碎波、巻き波碎波、白波など種々の碎波から発生するしぶき量と風応力との関係を実験的に調べている。しかしながら、海岸構造物と波の衝突によって発生したしぶきが陸域へどのように輸送されるかについて調査・研究された例は極めて少ない。

現在、高波浪が打ち寄せる海岸や港湾では、波のエネルギーを効率的に減衰させるために堤防・護岸や防波堤の前面に異形ブロックを設置する工法が広く用いられている。この工法は消波工と呼ばれ、ブロック間の空隙と粗度を利用して波浪エネルギーを減殺しようというものである。このため多量の海水飛沫の発生を伴う。特に暴風時に発生したしぶきは陸域の広範囲にわたって輸送され、塩害や潮風災害を引き起こす可能

性がある。このような問題を指摘し、遊水部付緩傾斜消波工による潮風災害防止効果について調査した大木らの先駆的研究¹⁴⁾は大変興味深いものである。

本研究は、大分県別府港に設置された標準的な断面形状をもつ消波護岸を対象として、強風下において消波護岸から発生したしぶきが陸域にどのように輸送されるかについて実験的に検討したものである。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1において、今回の模型実験で対象とした大分県別府港に設置されている消波護岸の断面を示す。現地における設計波は、沖波周期 $T_0=5.5s$ 、沖波波高 $H_0=2.5m$ である。実験には、長さ32m、幅0.6m、高さ0.94mの水路上部に直径0.73mの半円ドームを取り付けた吸い込み式風洞を有する二次元造波水槽を用いた。

Fig. 2に実験装置と護岸模型の概要を示す。模型の縮尺は1/16とした。現地に施工されている消波ブロックは4t型テトラポッドの乱積みであるが、本研究では4t型中空三角ブロックを1/16に縮小した模型の乱積みとした。この護岸模型に対して二次元規則波を作

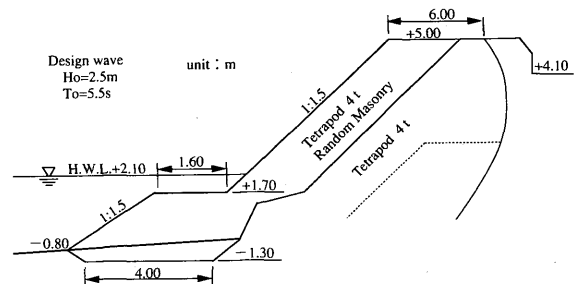


Fig. 1 Cross section of wave absorbing sea wall of Beppu Port

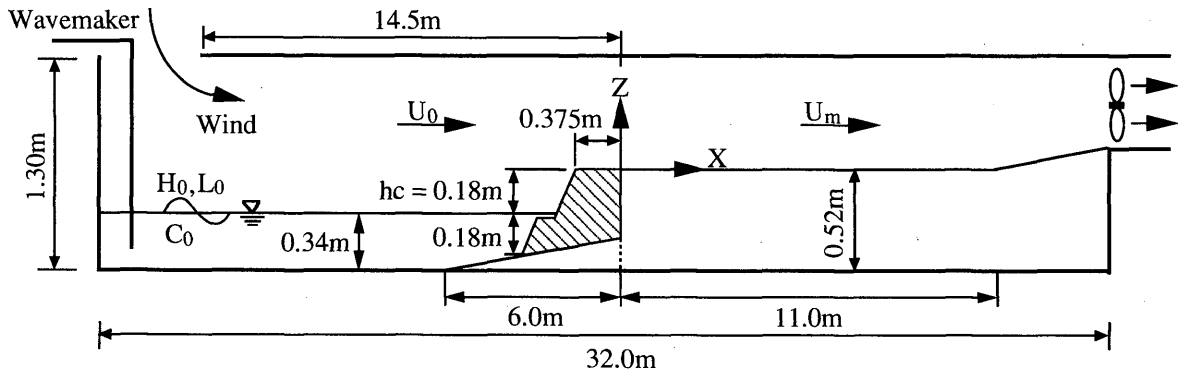


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up.

用させ、同時に強風を吹かせることにより消波護岸から発生するしぶき量を測定した。ここで便宜上、座標軸を護岸背後から風下方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸をとっている。しぶき量の測定位置は、原点から風下方向に、1 m 毎に12断面 ($x = 0 \sim 11\text{m}$) とした。各測定位置で、脱脂綿を詰めた直径 3 cm、深さ 5 cm の容器を鉛直方向に 5 cm 間隔で10~12個配列することにより、単位時間・単位面積当りに輸送されるしぶき量 $q(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ の鉛直分布を求めた。しぶき濃度は、空気の単位体積当りに占めるしぶきの体積と定義し、 $C = q/\rho U_m$ から算定した。ここで、 ρ はしぶきの密度、 U_m は陸域での断面平均風速である。

Table 1 は、実験条件およびしぶき濃度分布の代表量を示す。表中、 T は波の周期、 L_0 は沖波波長、 C_0 は沖波波速、 U_0 は水面上の断面平均風速である。 h_c は静水面上の護岸天端高さで18.1cmに固定されている。しぶき濃度分布の代表量 $C(0, 0)$ および l についてはそれぞれ Fig. 7 と Fig. 4 の説明において定義されている。護岸底面の海底勾配は 1/30 とし、護岸法先水深を18cm、一様水深部の水深を34cmに固定した。実験波の条件を現地に換算すると、Run 1, 2, 3 では $T = 5.5\text{s}$, $H_0 = 2.3\text{m}$, Run 4, 5 では $T = 4.8\text{s}$, $H_0 = 1.9\text{m}$ となり、設計波と比較してやや小さい波高となっている。

3. 実験結果および考察

3.1 しぶき濃度の鉛直分布

Fig. 3 は Run 1~Run 5 において得られたしぶき濃度の鉛直分布の風下方向の変化を示したものである。全体として、しぶき濃度は鉛直方向に指数関数的に減少することがわかる。また、十分流下した所ではしぶき濃度は鉛直方向に一様となる傾向が認められる。この理由は、消波護岸近傍で発生したしぶきは粒径が大きく、沈降しながら風下方向に輸送されるためである。一方、十分風下側では微細なしぶきのみが輸送され、しぶきの沈降が無視できるためである。すなわち、消波護岸付近の領域では、宇多ら⁹⁾が指摘している様に、風によるしぶきの移流と沈降が釣り合った領域が形成するが、 z の十分大きい所や十分流下した所では移流と拡散が釣り合った状態でしぶきが輸送されると考えられる。

Fig. 4 は、しぶき濃度の鉛直分布を模式的に示し、分布形を決定する代表量を定義している。ここで、 $C(x, 0)$ は $z = 0$ におけるしぶき濃度、 l はしぶき濃度が鉛直方向に $1/e$ だけ減少する高さ、 $C_*(x)$ はしぶき濃度が一定値に漸近する値、 z_* はしぶき濃度が $C_*(x)$ になる高さである。 $C(x, 0)$ の値は図中点線で示すように指数関数的に減少する領域の分布に基づいて外挿することによって求められている。Table 1 には、移流沈降領域における l の値を流下方向に平均したものが示されている。風洞を用いた実験においては、 $C_*(x)$ や z_* の値は風洞高さに極めて強く依存するものと考えられるため、本論文においてはそれらの定量化は検討されていない。

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

Run	Experimental Parameters								Characteristic Quantities		
	T (s)	H_0 (cm)	L_0 (cm)	C_0 (m/s)	U_0 (m/s)	H_0/L_0	U_0/C_0	h_c/H_0	$C(0,0)$	l (cm)	l/h_c
1	1.38	14.3	295	2.14	9.43	0.048	4.41	1.27	9.03E-5	7.52	0.42
2	1.38	14.3	295	2.14	13.1	0.048	6.12	1.27	8.58E-4	5.48	0.30
3	1.38	14.3	295	2.14	15.1	0.048	7.06	1.27	1.08E-3	5.28	0.29
4	1.20	11.7	225	1.88	13.1	0.052	6.97	1.55	6.01E-4	6.69	0.37
5	1.20	11.7	225	1.88	15.1	0.052	8.03	1.55	1.00E-3	5.96	0.33

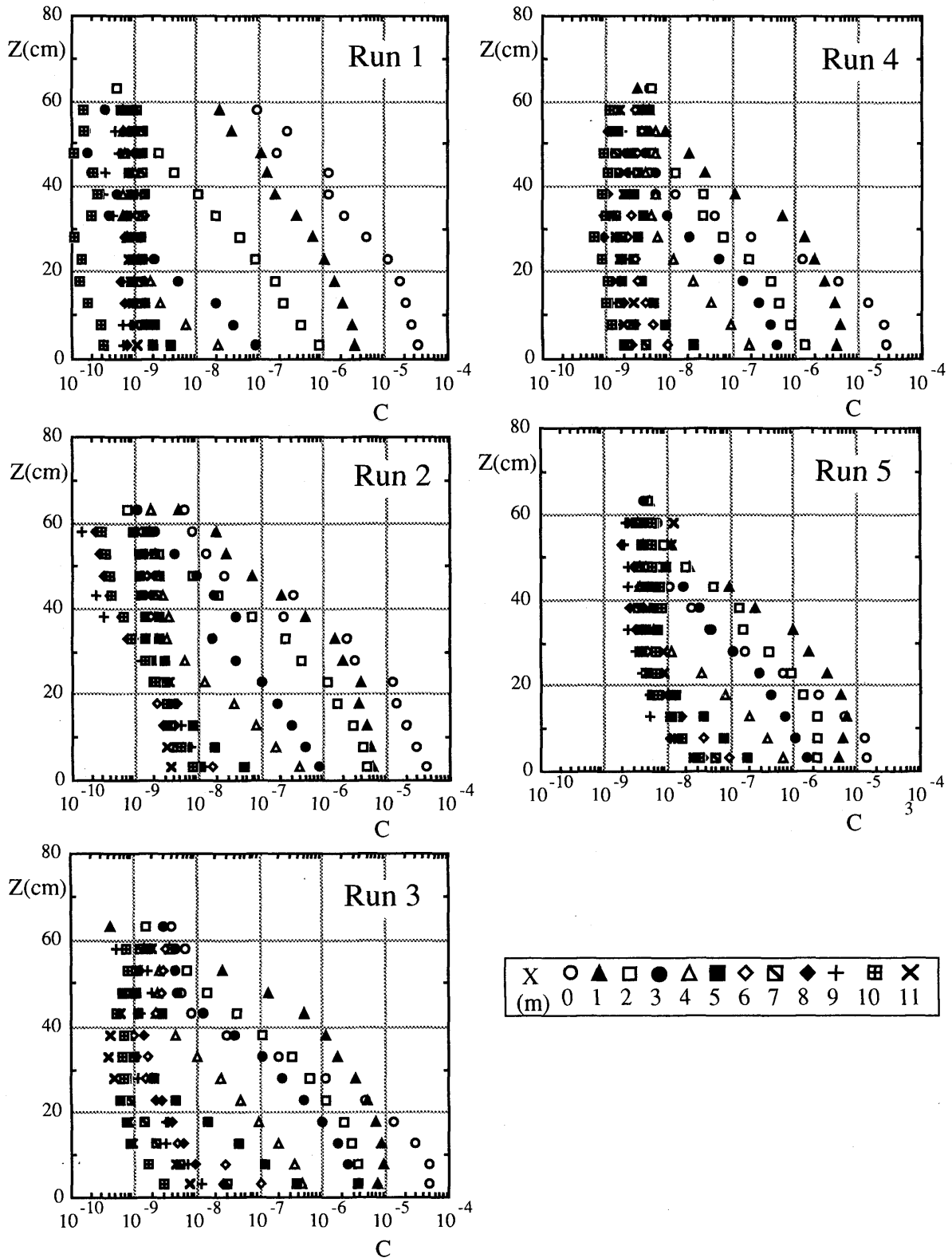


Fig. 3 Leeward variation of vertical profiles of spray concentration

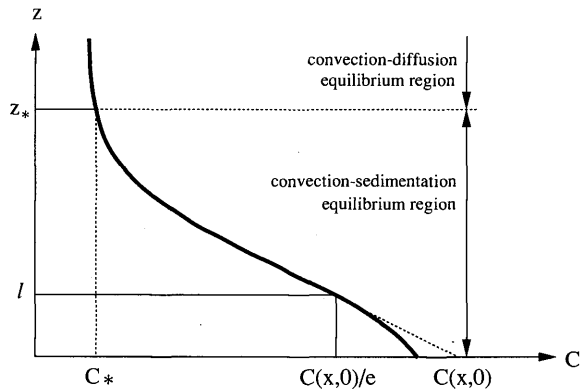


Fig. 4 Definition of characteristic quantities of spray concentration profiles.

3.2 しぶき濃度の定量化

宇多らの研究⁹⁾によれば、移流沈降領域におけるしぶき濃度 $C(x, z)$ は、次式で表わされる。

$$C(x, z) = C(0, 0) \exp\left(-\frac{w_0}{U_m} \cdot \frac{x}{l}\right) \exp\left(-\frac{z}{l}\right) \quad (1)$$

ここで、 $C(0, 0)$ は $x=0, z=0$ におけるしぶきの濃度、 w_0 はしぶきの沈降速度である。また前述したように、 $C_*(x)$ については考慮されていない。しぶ

き濃度の鉛直分布を、各測定位置での $C(x, 0)$ と l を用いて無次元化を行い、各実験について x をパラメータとして示したものが Fig. 5 である。図中の直線は、

$$\frac{C(x, z)}{C(x, 0)} = \exp\left(-\frac{z}{l}\right) \quad (2)$$

である。全体として、実験データは (2) 式にほぼ一致していることがわかる。これらの図において、(2) 式より下方にあるデータは護岸近傍のデータである。これは、Fig. 3 からわかる様に、護岸近傍ではしぶき濃度が $z=20\text{cm}$ の高さまでほぼ一様な値をとるためである。(2) 式より上方に出ているデータは、 z が十分大きい所や十分流下したところの値であり、沈降性の小さい微細なしぶきが輸送されている領域である。

Fig. 6 では、代表高さ l としぶき吹送距離 x との関係を示す。データにばらつきがある様に見えるが、 x 方向に 11m 流下する間に l の変化は 5cm 程度であり、 l は風下方向にほぼ一様とみなすことができる。

Fig. 7 は、 $C(x, 0)$ の風下方向への変化を示す。 $C(x, 0)$ の値は、風下方向に指数関数的に減少するが、

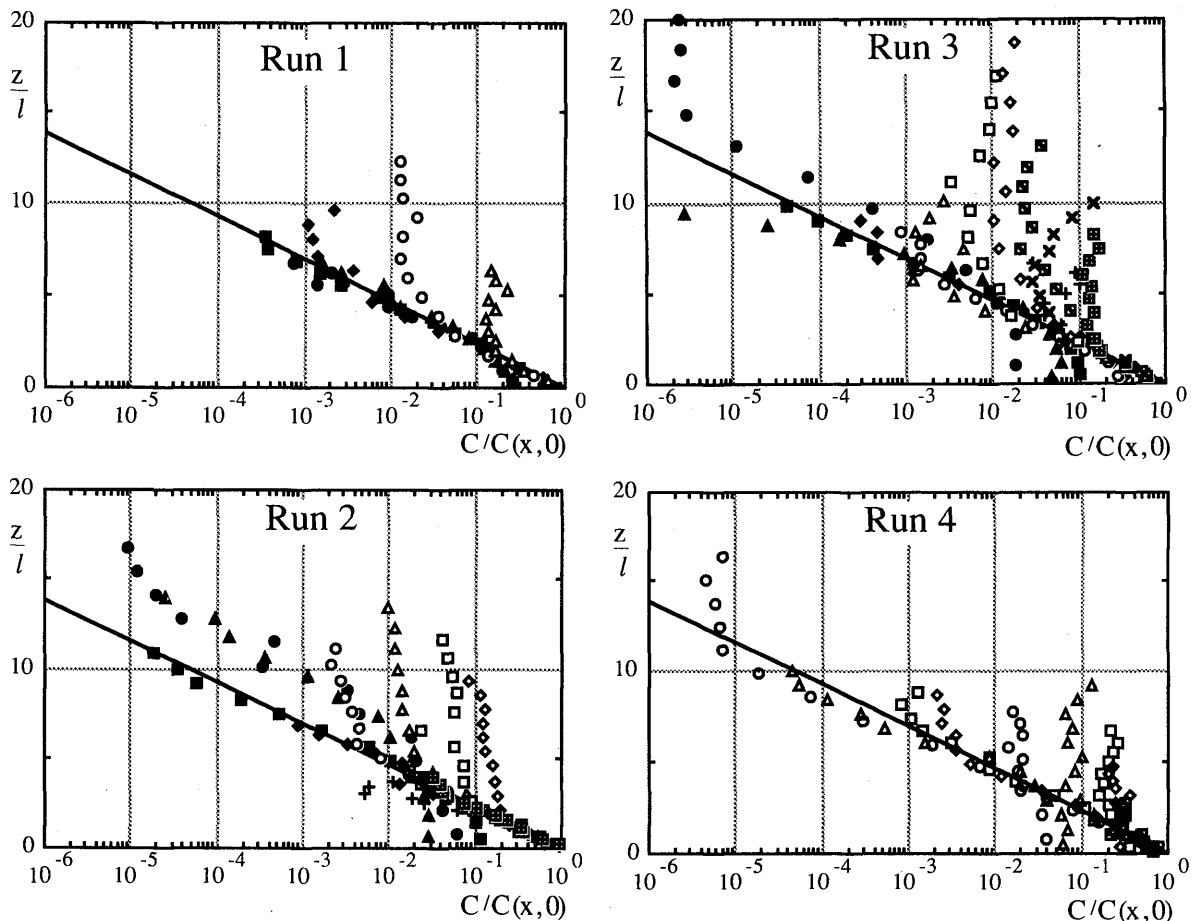


Fig. 5 Dimensionless profiles of spray concentration

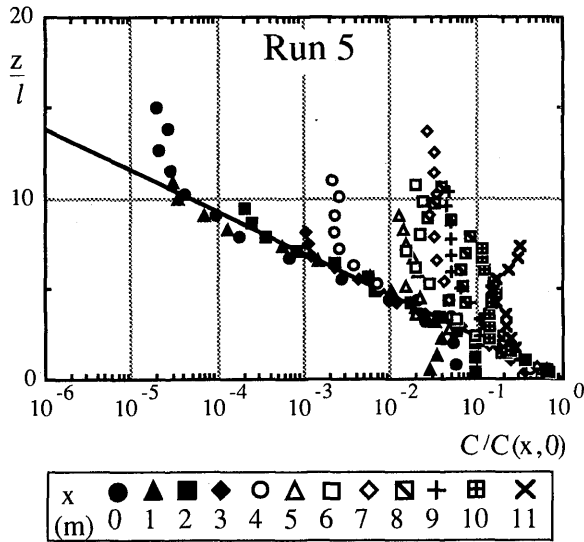


Fig. 5 Dimensionless profiles of spray concentration

ある程度流下すると一定値に漸近することがわかる。(1) 式からわかるように $C(x, 0)$ の値が風下方向に指数関数的に減少する領域がしぶきの移流と沈降がつり合って輸送される領域である。従って、今回の模型実験においては $x \leq 6\text{m} \sim 7\text{m}$ の範囲が移流沈降領域と考えられる。風速が大きくなるほど $C(x, 0)$ の x 方向の減少率は小さくなり、一定値に漸近する $C(x, 0)$ の値は大きくなる。また、風速が同じである Run 2 と Run 4、および Run 3 と Run 5 を比較すると、 $C(x, 0)$ の x 方向の変化は、沖波波形勾配 H_0/L_0 にあまり依存しないようである。Table 1 に示す $C(0, 0)$ の値は、Fig. 7 から、 $x=0\text{m}$ での $C(x, 0)$ の値を読み取ったものである。

Fig. 8 は、 $C(x, 0)$ を相対天端高 h_c/H_0 をパラメータとして、 U_0/C_0 に対してプロットしたものである。 h_c/H_0 が小さい方が $C(0, 0)$ は大きく、発生するしぶき量が多いことがわかる。また、風速が大きくなるほど $C(0, 0)$ は増加することがわかる。(1) 式において、 $z=0$ とおくことにより、次式を得る。

$$C(x, 0) = C(0, 0) \exp\left(-\frac{w_0}{U_m} \cdot \frac{x}{l}\right) \quad (3)$$

この場合、 $-w_0/U_m l$ は Fig. 7 の移流沈降領域の直線の傾きとして求められる。従って、 l の値として Table 1 の平均値を用いることにより w_0/U_m の大まかな値を推定することができる。Fig. 9 は、このようにして求めた w_0/U_m の値を H_0/L_0 をパラメータとして U_m/C_0 に対してプロットしたものである。 w_0/U_m は、風速が大きくなるにつれて線形的に小さくなる。一方、 H_0/L_0 が大きいほど w_0/U_m は大きくなる傾向が認められる。

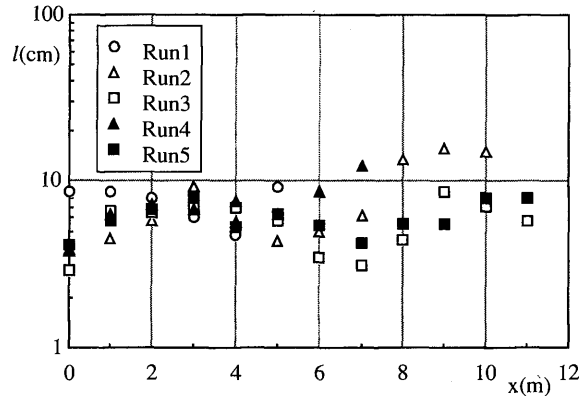


Fig. 6 Dependence of l on x

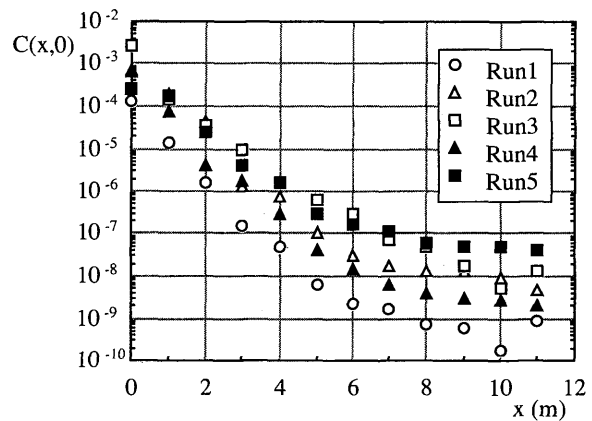


Fig. 7 Dependence of $C(x,0)$ on x

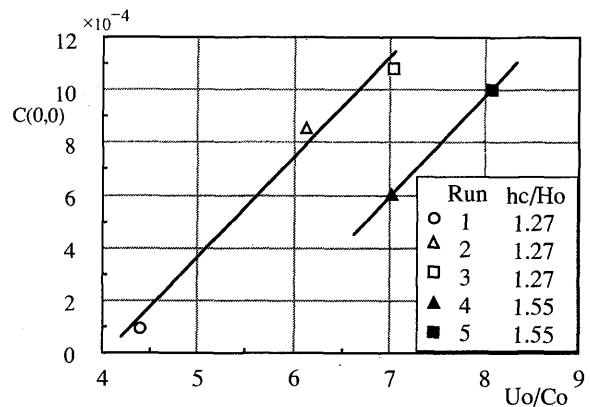


Fig. 8 Relationship between $C(0,0)$ and U_0/C_0

Fig. 10 は、移流沈降領域における流下方向の l の平均値 (Table. 1 を参照) を h_c で無次元化した値 l/h_c と U_m/C_0 との関係を示す。 l/h_c の値は、 U_m/C_0 に依存せずほぼ一定であることがわかる。

4. 結 語

強風下において消波護岸から発生するしぶきの陸域への輸送過程に関する実験を行った。得られた成果は、以下のように要約される。

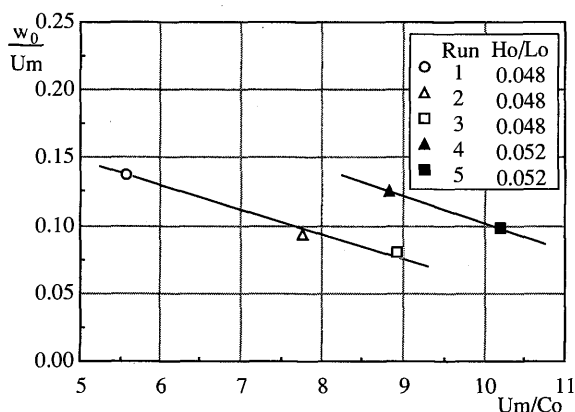


Fig. 9 Relationship between w_0/U_m and U_m/C_0

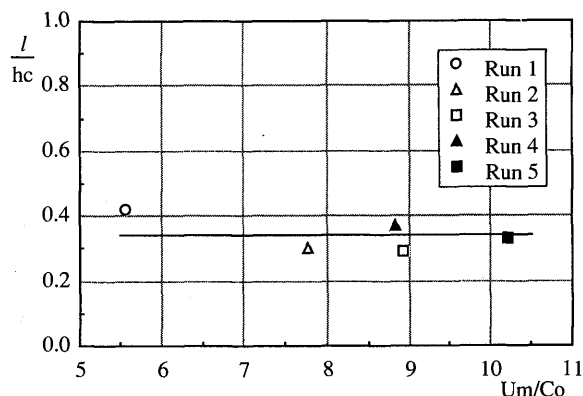


Fig. 10 Relationship between l/hc and U_m/C_0

(1) 消波護岸付近の領域では、風によるしぶきの移流と沈降が釣り合った移流沈降領域が形成される。鉛直方向に十分高い所や風下方向に十分流下した所では、しぶきは微細粒子となり、流体粒子の移流と拡散が釣り合ってしぶきが輸送される。

(2) 消波護岸における、沖波、風速、潮位の条件が与えられると、移流沈降領域における任意の位置でのしぶき濃度は、Fig. 8, 9, 10 と (1) 式から算定される。

今回の実験におけるパラメータの範囲は非常に狭く、しぶきの濃度分布に関する定量化が十分なされたとは言いがたい。今後、さらに広範囲の条件下で実験を行うと同時に、風下側におけるしぶき濃度を決定する代表量 $C_*(x)$ と z_* に関する定量化を現地計測を通して試みたい。

謝辞：本研究を行うにあたり、平成6年度総理工奨励研究費の援助をいただきました。ここに記し、謝意を表わします。また、本論文を作成するにあたり九州大学大学院総合理工学研究科修士課程川上裕史氏ならびに研究補助員有墨康子氏に多大な御助力をいただきましたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) 目黒公郎, 永田茂, 立川貴重, 片山恒雄, 生産研究, **44**, 194 (1992).
- 2) 田中正昭, 鳥羽良明, 京都大学防災研究所年報, **36**, 103 (1993).
- 3) 入江功, 平成4~5年度科学研究費補助金総合研究 (A) 研究成果報告書 (1994).
- 4) S. Hayami and Y. Toba, J. Oceanogr. Soc. Japan, **14**, 145 (1958).
- 5) Y. Toba, J. Oceanogr. Soc. Japan, **15**, 121 (1959).
- 6) Y. Toba, Mem. College of Sci., Univ. of Kyoto, **29**, 313 (1961).
- 7) 鳥羽良明, 海と空, **41**, 71 (1966).
- 8) 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).
- 9) 宇多高明, 小俣篤, 小西正純, 海岸工学論文集, **39**, 1051 (1992).
- 10) 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).
- 11) N. Matsunaga, M. Hashida, H. Mizui and Y. Sugihara, Proc. 24 th Int. Conf. on Coastal Engng, 219 (1994).
- 12) 松永信博, 樋田操, 杉原裕司, 九州大学大学院総合理工学研究科報告, **16**, 353 (1994).
- 13) 松永信博, 樋田操, 鷗崎賢一, 海岸工学論文集, **42**, 1031 (1995).
- 14) 大木喜久朗, 橋田望, 吉井勝彦, 黒川忠良, 杉浦国男, 第34回海岸工学講演会論文集, 526 (1987).