

消波護岸からの飛沫の発生

GENERATION OF WATER SPRAY FROM WAVE-ABSORBING SEAWALLS

檀田操¹・松永信博²・香月理³

Misao HASIDA, Nobuhiro MATSUNAGA and Osamu KATSUKI

¹ 正会員 工博 日本文理大学教授 工学部土木工学科 (〒870-0397 大分市一本 1727)

² 正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科 (〒816-0811 福岡県春日市春日公園 6-1)

³ 非会員 工修 九州電力株式会社 (〒816-0811 福岡市南区塩原 2-1-47)

Generation of water spray from wave-absorbing seawalls and its transport processes have been investigated by using a wind wave tank. Vertically-integrated spray quantities just behind the seawalls Q_0 are much larger than those in a water region and increase with the increase of mean wind velocity U_m and slope gradient. The leeward distributions of spray quantities Q can be expressed universally by using Q_0 , U_m and the gravity acceleration g . The values of Q/Q_0 decrease exponentially in the region of $gx/U_m^2 < 0.5$ because of the balance between advection and settling of large spray, where x is the distance from the seawall. In $gx/U_m^2 \geq 0.5$, the decreasing rate of Q/Q_0 becomes very small due to the transport of minute spray.

Key Words : salt damage, sea water spray, wave absorbing seawall, atmospheric environment

1. まえがき

わが国では、台風や冬期季節風による波浪災害が沿岸域で頻繁に発生する。そのため、防災対策として異型消波ブロックを用いた工法が広く用いられてきた。消波ブロックで被覆された護岸や防波堤は、これまで多くの施工実績があり、その波浪に対する消波効果は十分に立証されている。しかしながら、この工法は適度の凹凸と空隙によって波浪エネルギーを吸収し消散させるという原理のために、強風を伴う暴浪時に多量の海水飛沫を発生させ、しばしば広域にわたって塩害を引き起こす。このため、海水飛沫の陸域への輸送過程を明らかにすることは、沿岸地域の塩害軽減対策を講ずる上で重要となっている¹⁾。また、沿岸域でのアメニティの向上や大気環境の保全という観点からも海水飛沫の発生および輸送過程の研究が行われている^{2), 3)}。海岸構造物から発生する飛沫の研究として、石田ら⁴⁾による道路橋脚や消波ブロックから発生する飛沫の飛散形態に関する実験的研究や、松永ら^{5), 6)}による大分県別府港に設置された消波ブロック被覆護岸を対象とした模型実験等が挙げられるが、消波ブロック被覆護岸から発生する飛沫量について系統的に調べた研究は極めて少ない。

本研究では、広く用いられている消波ブロック被覆護岸の標準的な法面勾配に対し模型実験を行い、波および

風速を変化させることにより護岸から発生する飛沫量およびその陸域への輸送過程を明らかにしている。また、飛沫低減を目的として標準法面勾配を変化させる実験を行い、飛沫発生量と法面勾配との関係についても検討している。

2. 実験方法

実験には、長さ 32m、高さ 0.94m、幅 0.6m の風洞付き二次元造波水槽を用いた。図-1 に、実験装置の概要を示す。水槽中央部には消波ブロック被覆護岸の模型を、護岸背後には陸域の模型として長さ 10m にわたって水平床を設置した。水域および陸域の風洞断面積を一様にするため、風洞天井を護岸上で高上げしている。

図-2 は、対象とした消波ブロック護岸の断面図を示す。その構造は 3.2 トン型テトラポッドの 2 層積みで、天端は 2 個並びである。法面勾配は 1:4/3 で一般に広く用いられている標準的な勾配である。従って、本研究ではこの断面を基本断面として、入射波と風の条件を種々変えることにより飛沫の発生および陸域への輸送過程を調べた。実験では、3.2 トン型テトラポッドの 1/25 模型で、砕石砂利(直径約 20~40mm)による中詰め捨石の法面を被覆した。一様水深部の平均水深は 25cm に設定した。護岸天端高さは水平床と同じ高さ(40cm)に設定し、

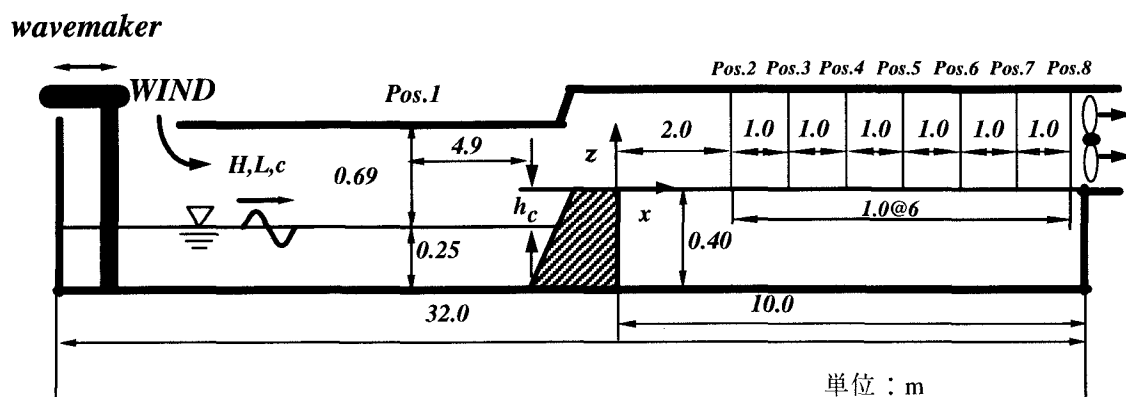


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

Run	T(s)	$\cot \theta$	Um(m/s)	H(cm)	c (cm/s)
1	1.0	4/3	9.2	12.4	141
2			11.0	12.0	146
3			13.6	11.9	144
4			16.1	10.0	139
5			18.6	7.2	143
6		1	13.6	11.9	144
7		5/3	13.6	11.9	144
8		2	13.6	11.9	144
9		2	16.1	10.0	139
10		2	18.6	7.2	143

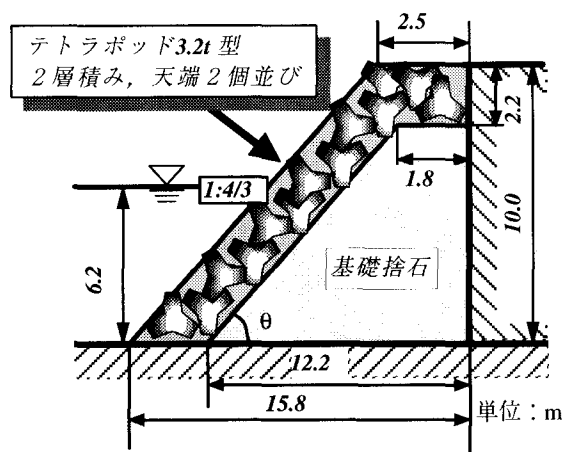


図-2 消波ブロック被覆護岸断面図

静水面からの高さ h_c を 15cm とした。実験条件は表-1 の Run1~5 で与えられている。この消波護岸に対して周期 $T = 1.0s$ の二次元規則波を入射させると同時に、水域全体で白波碎波が生じる様に強風を吹かせた。波の波高 H および波速 c は、Pos. 1 (消波護岸法先から 4.9m 沖側) で測定された。風速および飛沫量の測定は、Pos. 1 から Pos. 8 の地点で行われた。風速の計測には、多量の飛沫が存在する場でも比較的正確に計測できるベーン式風速計を用いた。飛沫は脱脂綿を詰めたフィルムキャップを等間隔に取り付けたポールを風洞水槽内に鉛直に挿入することにより捕集された。単位時間、単位面積当たりに輸送される飛沫量は、挿入前後におけるフィルムキャップの重量差を挿入時間とキャップ口の断面積で割ることにより算定された。飛沫の捕集装置および捕集方法等については松永⁷⁾において詳述されている。座標軸 x は護岸直後を原点として風下方向にとられている。 z は、Pos. 1 では平均水面から、陸域では水平床の底面から鉛直上向きに取られている。水平床上における断面平均風速は $U_m = 9.2 \sim 18.6 \text{ m/s}$ の間で変えられた。

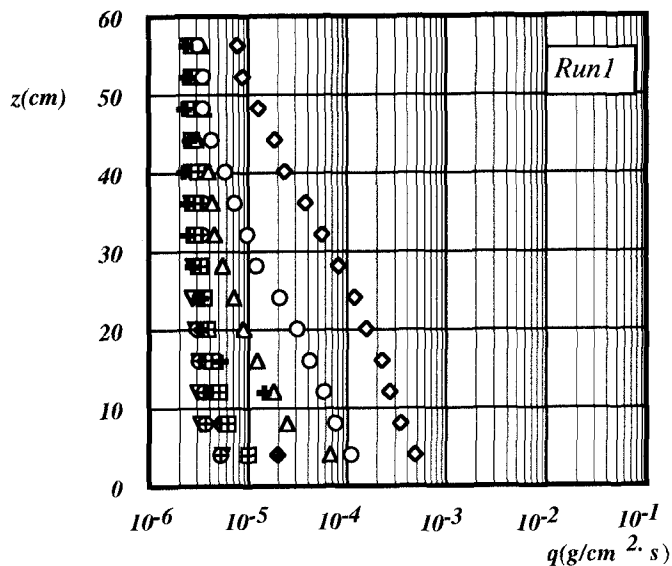
次に、飛沫発生量の低減効果を調べるために、法面勾配を 1:1、1:5/3、1:2 と変化させた実験を行った（表-1

Run6~10)．基本断面の実験と同じく $T = 1.0s$ の二次元規則波を造波し，水平床上の断面平均風速を $U_m = 13.6, 16.1, 18.6 \text{ m/s}$ の3種類に変化させた．これらの実験において，飛沫量の測定は図-1のPos. 1, 2, 4, 8の4断面で行われた．Run1~10のいずれの実験においても，強風により水域全体で発生した白波碎波が消波護岸に衝突する場が形成された．また，これらすべての実験において，波が護岸を越える現象つまり越波現象はほとんど確認されなかった．

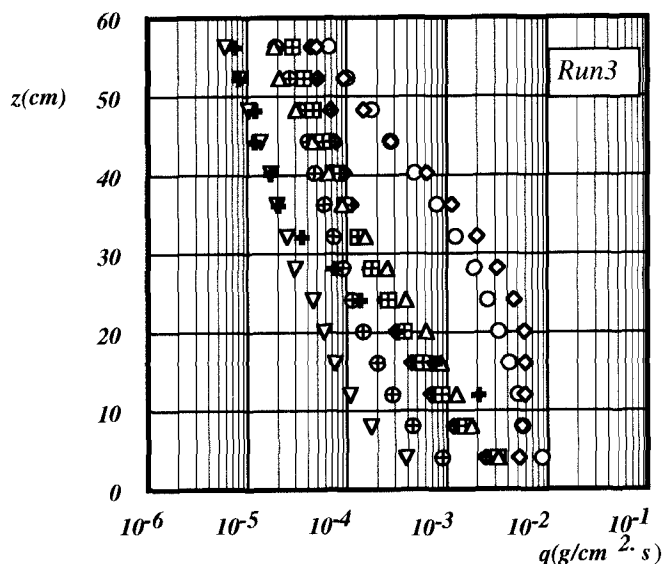
3. 結果および考察

3.1 基本断面からの飛沫の発生

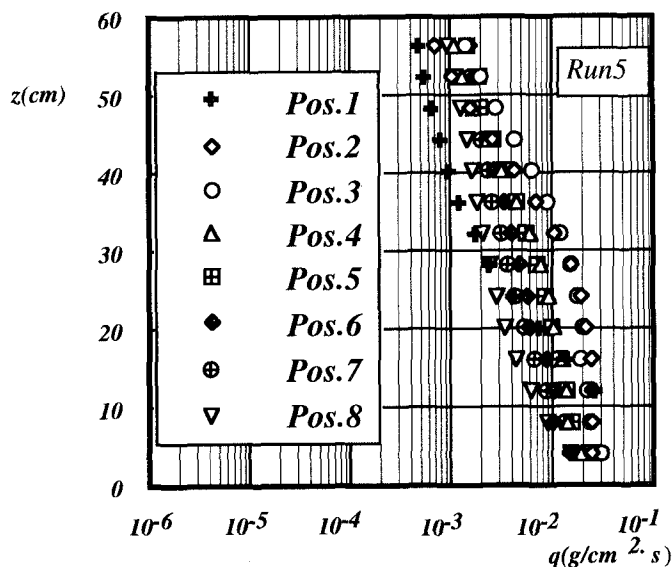
図-3 (a) ~ (c) は、それぞれの断面平均風速 U_m に対して、単位時間・単位面積当たりの飛沫量 q ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) が風下方向にどのように変化するかを示したものである。Pos. 1 で取られた水面上のデータは鉛直上方に向かって急激に減少している。この分布は松永ら^{7), 8)}によって半理論的に得られた沖合い海域での飛沫の濃度分布と類似しており、消波護岸前面まで飛沫の沈降と拡散が釣り合っ



(a)



(b)



(c)

図-3 飛沫量の鉛直分布の風下方向の変化

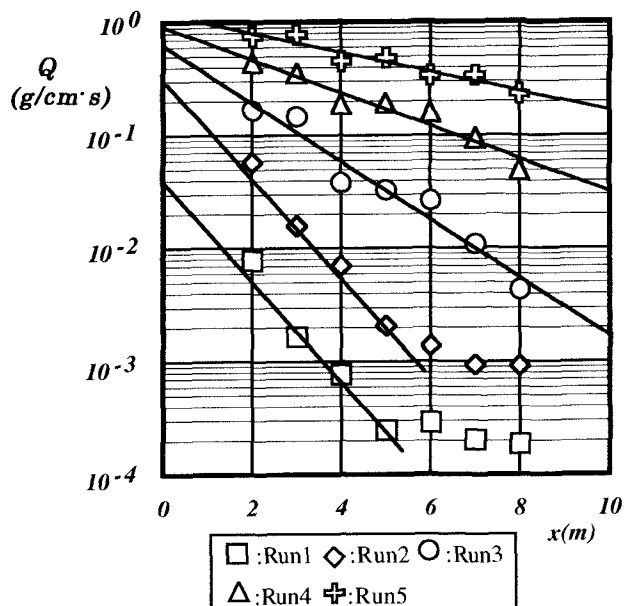


図-4 飛沫量積分値の風下方向の変化

た場が形成されているものと推察される。消波護岸背後においては、波が護岸に激しく衝突するため、飛沫量はかなり上方まで一様で大きな値をとる。しかしながら、陸域では底面からの飛沫の供給がないため、護岸付近では飛沫の移流と沈降が釣り合った場が形成される。このため飛沫量は鉛直方向に指数関数的に減少するプロファイルを形成する⁹⁾。また、Run 1 が示すように、風速が小さい場合には飛沫量は風下方向に急速に減少するが、Run 5 のように風速が大きくなると、飛沫量の風下方向の低減率は小さくなる。これは、重力による沈降よりも風による移流効果が卓越するためである。水平床上では飛沫の供給が無いため底面近傍の飛沫量は風下方向に低減するが、上方では微細飛沫が浮遊した状態が続くため風下方向の低減率は非常に小さくなる。また、十分風下の底面付近では水面上の飛沫量よりも小さくなるが、上空では水面上の飛沫量に漸近する傾向が認められる。このように、波の衝突により護岸から発生した多量の飛沫は移流・沈降過程を経て、最終的には沈降速度の小さな微細な飛沫が浮遊した状態で移流されることになる。

図-4 は、飛沫量 $q(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ を鉛直方向に積分した値 $Q(\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s})$ を護岸からの距離 $x(\text{m})$ に対してプロットしたものである。全体として飛沫量の積分値 Q は風下方向に指数関数的に減少することがわかる。風速が大きくなるにつれて Q の風下方向の低減率は小さくなり、風による移流効果が卓越することがわかる。一方、風速が小さい場合には、 Q の値は流下距離とともに急速に減少し、その後はほぼ一定となる。これは、前述したように風速が小さいほど、大きな粒径の飛沫は短い流下距離で沈降してしまい、風下では微細な飛沫のみが移流されるという過程を明瞭に示している。

図-5 は、護岸直後($x = 0\text{m}$)における飛沫積分量 Q_0 の

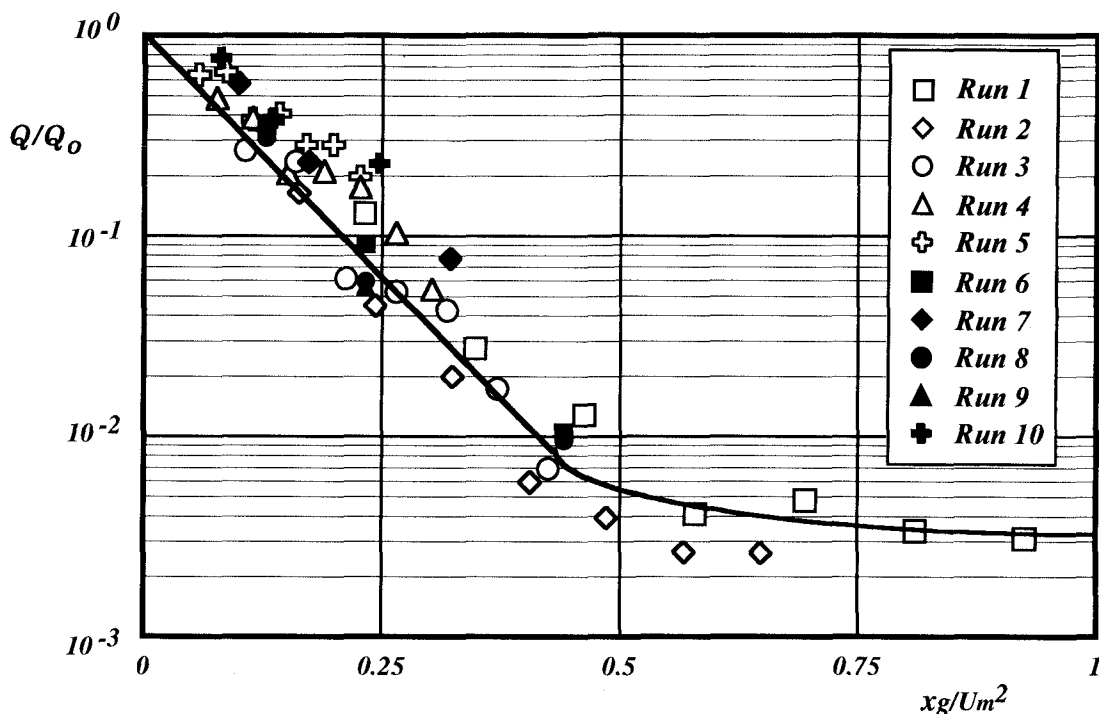


図-5 飛沫積分量の普遍表示

値を図-4 から外挿して求め、 Q/Q_0 の値を gx/U_m^2 に対してプロットしたものである。ここで、 g は重力の加速度である。様々な風と波の条件の下で得られた基本断面に対する諸量は白抜きの記号で示されている。図中の実線は白抜きのデータを近似的に表したものである。黒塗りのデータについては次節で説明する。基本断面に対する Q/Q_0 の風下方向の変化は、 gx/U_m^2 によって普遍表示されることがわかる。そして、 $gx/U_m^2 \leq 0.5$ では、 Q/Q_0 は指数関数的に減衰し、飛沫の沈降と移流が釣り合った場が形成されることがわかる。一方、 $gx/U_m^2 > 0.5$ では微細飛沫の移流により Q/Q_0 の低減率は非常に小さくなっていることがわかる。

図-6 の白抜きのデータは、基本断面をもつ護岸の直後での飛沫積分量 Q_0 と水平床上の断面平均風速 U_m の関係を示したものである。白抜きのデータに合わせて引かれた直線が示すように Q_0 は風速の増加に伴い、線形的に増加することがわかる。また、黒塗りのデータに関しては次節の法面勾配と飛沫発生量の関係において言及する。

図-7 は、Pos. 1 における飛沫量の積分値 Q_w と Q_0 の比と水平床上の断面風速 U_m との関係を示したものである。図中の実線はデータに適合するように引かれている。 Q_w/Q_0 は、風速の増加に伴い指数関数的に増加し、その後一定値に漸近していくことがわかる。このことは、風速が小さい場合には、消波護岸から発生する飛沫量は海面上の碎波による飛沫量に比べて桁違いに大きい、風速が大きくなると消波護岸から発生する飛沫量の増加に比べて沖合海域での碎波による飛沫量が急激に増大することを示している。

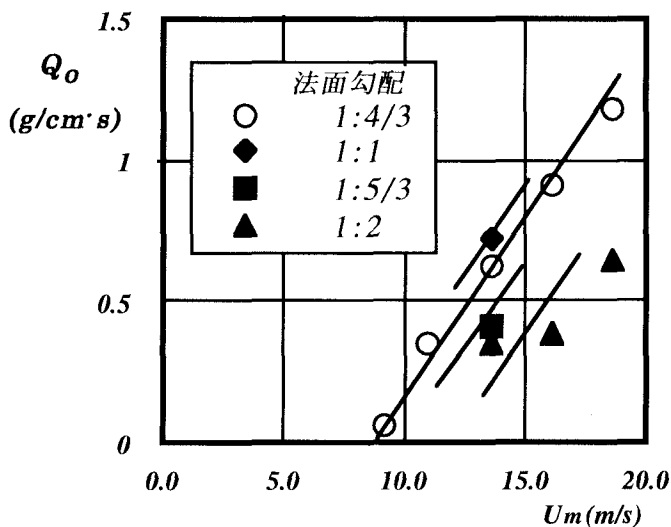


図-6 Q_0 と U_m の関係

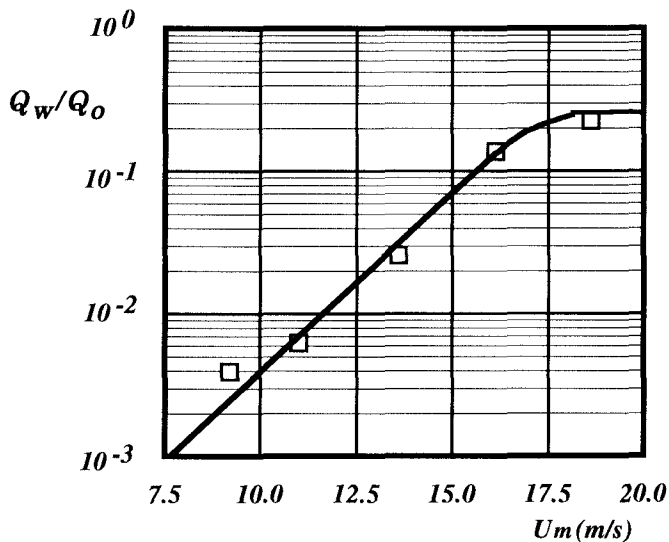


図-7 Q_w/Q_0 と U_m の関係

3.2 法面勾配と飛沫発生量の関係

図-8 は、 $U_m = 13.6\text{m/s}$ 、法面勾配が1:2 の場合 (Run8) における飛沫量 $q(\text{g/cm}^2\cdot\text{s})$ の鉛直分布を示したものである。図-3 (b) との比較から、波と風の条件が同じ場合法面勾配が緩くなると飛沫量は減少することがわかる。これは、法面勾配が緩くなるに従い、碎波の進行に対する法面での摩擦の影響が大きくなり、衝突時の飛沫の打ち上げ高さも低下するためである。図-9 は、 $U_m = 13.6\text{m/s}$ において得られた飛沫量 q を鉛直方向に積分した値 $Q(\text{g/cm}\cdot\text{s})$ を護岸からの距離 $x(\text{m})$ に対してプロットしたものである。いずれの法面勾配に対しても、 Q は風下方向に指数関数的に減少することがわかる。また、法面勾配が緩いほど、護岸から発生する飛沫量は減少していることがわかる。 $x = 4\text{m}$ において、法面勾配が1:2 (Run6) の Q の値は、1:1 (Run1) の場合の $1/3$ 以下に低減している。しかしながら、 $x = 8\text{m}$ では、 $\cot \theta = 1.0$ を除いて法面勾配の違いによる飛沫積分量の差はそれ程明瞭でない。このような傾向は、 $U_m = 16.1, 18.6\text{m/s}$ における法面勾配 1:4/3 と 1:2 の比較においても見られた。このように、護岸近傍では法面勾配が緩いほど飛沫発生量が低減することを明瞭に示すことができる。しかしながら、護岸から風下方向に十分流下すると、沈降しにくい微細な飛沫のみが移流されて存在するため、実験室系の短い吹送距離では、 Q の値に明瞭な違いを確認することは困難であると推察される。

図-5 には、Run6~10 で得られた飛沫積分量を Q_0 で規格化し、 gx/U_m^2 に対してプロットしている。図から、異なる法面勾配に対しても、消波護岸から発生する飛沫量は、このような無次元化を用いることにより普遍的に表されることがわかる。

図-6 には、法面勾配が1:1, 1:5/3, 1:2 における Q_0 の値を U_m に対してプロットしている。法面勾配が1:4/3 の場合、 $U_m \div 10\sim 20\text{m/s}$ の範囲において、 Q_0 は U_m に比例して増加する傾向が認められることから、他の法面勾配に対してもほぼ同じ割合で Q_0 が増加すると考え、同じ勾配で直線を引いている。法面勾配が緩やかになるにつれ Q_0 の値も小さくなることをわかる。

図-10 は、 $U_m = 15.0\text{m/s}$ における Q_0 の値と法面勾配 $\cot \theta$ との関係を示したものである。 Q_0 は、法面勾配が緩やかになるに従い、線形的に減少することがわかる。

4 まとめ

本研究では、消波ブロックにより被覆された護岸から飛沫がどのように発生し、風下方向に輸送されるのかについて調べた。また、消波護岸の法面勾配として1:4/3 が消波という観点から広く用いられているが、飛沫低減という目的から護岸の法面勾配が飛沫発生量に及ぼす効果についても調べた。

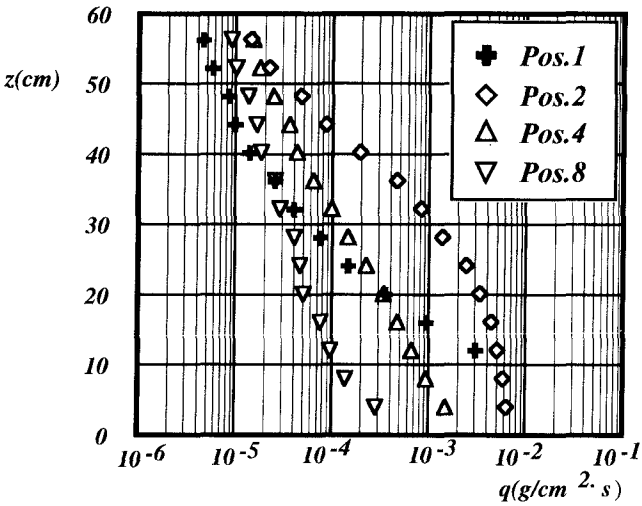


図-8 飛沫量の鉛直分布

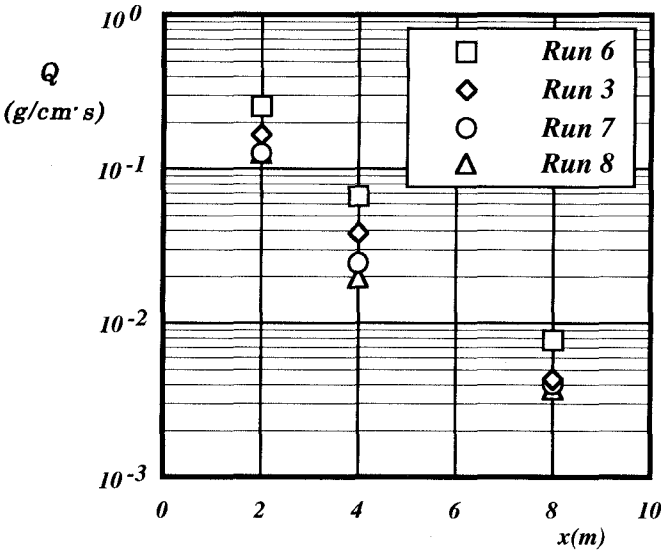


図-9 飛沫積分量のと流下方向の変化

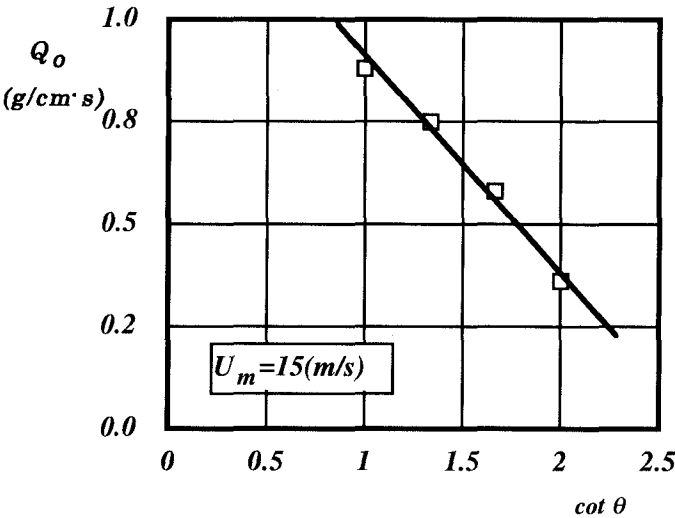


図-10 飛沫積分量 Q_0 と法面勾配の関係

本研究において得られた結論は、以下のとおりである。

1. 消波護岸直後の飛沫量の積分値 Q_0 は、水平床上の断面平均風速 U_m の増加に伴い、線形的に増加し、法面勾配の増加とともに大きくなる。
2. 無次元飛沫量積分値 Q/Q_0 は、無次元流下距離 gx/U_m^2 によって十分に普遍表示できる。この場合、 $gx/U_m^2 \leq 0.5$ では移流・沈降領域が、 $gx/U_m^2 > 0.5$ では飛沫の沈降が無視できる領域が形成される。
3. 水面上における無次元飛沫量積分値 Q_w/Q_0 は U_m の増加に伴い指数関数的に増加し、その後一定値に漸近する。このことは、強風時には自然海浜からの飛沫の発生も重要であることを示している。

実験結果を用いて、現地における消波護岸からの飛沫発生量を定量的に評価するためには、相似則が問題となる。しかしながら、1～3の結論に関しては、現地においても定性的に成り立っていると考えられる。但し、飛沫発生量や移流・沈降領域等の定量的評価に関しては、今後現地観測を通して詳細に調べる必要がある。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究（c）（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。実験およびデータ解析において、日本文理大学工学部土木工学科海洋環境研究室に配属された平成9年度および10年度の卒業生の方々に多大な御協力をいただきました。また、データの再整理および論文作成において、九州大学建設都市工学科4年生の津守博通君に、多大な御助力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大木喜久朗・橋田望・吉井勝彦・黒川忠良・杉浦国男：遊水部付緩傾斜消波工の潮風害防止効果について，第34回海岸工学講演会論文集，pp.526-530，1987.
- 2) 仲座栄三・津嘉山正光・照尾雅彦：大気環境アメニティの一要素としての飛塩量特性，海岸工学論文集，第38巻，pp.896-900，1991.
- 3) 村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎靖・西守男雄：植栽による飛沫（海塩粒子）の軽減に関する現地実験，海岸工学論文集，第42巻，pp.1036-1040，1995.
- 4) 石田昭・花田昌彦・細井正延：飛沫の発生に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp.385-388，1982.
- 5) 松永信博・樋田操・入江功：消波護岸によるしぶきの発生と護岸背後地への輸送，海岸工学論文集，第41巻，pp.1046-1050，1994.
- 6) Hashida, M., Matsunaga, N., and Irie, I. : Landward transport of spray generated from a wave absorbing seawall, Proc. 25th Coastal Eng. Conf, ASCE, pp.1022-1033, 1996.
- 7) 松永信博・樋田操・鶴崎賢一：強風によって輸送される白波砕波上の飛沫量と風応力の関係，土木学会論文集 No.635/II-49, pp.113-126, 1999.
- 8) 松永信博・樋田操・鶴崎賢一・岸岡賢祐：強風によって沖合海域から浅海域へ輸送されるしぶき量の低減率について，海岸工学論文集，第43巻，pp.1186-1190，1996.
- 9) 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.

(1999.9.30 受付)