

冬期響灘沿岸における飛沫塩分量の現地観測

蘆田 操*・松永信博**・香月 理***

1. 緒 言

近年, 我が国の沿岸域における防災技術や波浪制御技術は著しく向上し, ウォーターフロント開発事業や海上空港建設事業など, 様々な沿岸開発プロジェクトが実現されることとなった。しかしながら, 人々の生活空間が海に向かって拡大するにつれ, 沿岸海域の環境の悪化等, 新たな問題も派生している。その一つに塩害が挙げられる。1991年9月に九州, 西中国地方を相次いで襲った台風9117号と9119号は, 広域にわたって農作物の収穫不良や送電システムの漏電による停電等の塩害をもたらした(目黒他, 1993; 田中他, 1993; 入江他, 1994)。このような塩害が生ずる直接の原因は, 台風や冬季節風の来襲時に, 海域の白波砕波や消波構造物から発生する飛沫が, 強風により大気中に取り込まれて陸域に輸送されることにある。著者らはこれまで, 風洞付き大型二次元造波水槽を用いて, 強風下における沖合い海域からの飛沫の発生と輸送過程, 浅海域における飛沫の輸送過程, 消波護岸からの飛沫の発生と陸域への輸送過程, 飛沫量の低減工法, 等に関して模型実験による系統的な研究を行ってきた(松永他, 1994, 1995, 1996, 1999; Hashida他, 1996)。今後これらの検討結果を現地に適用するためには, 飛沫塩分量に関する現地観測を行うことにより, 強風下において海域や海岸構造物から発生する飛沫量と, その陸域への輸送過程を定量的に解明することが重要である。これまで, 飛沫塩分量の現地観測は, 宇多ら(1992), 村上ら(1995), 仲座ら(1998), 滝川ら(1998)など多くの研究例がある。しかしながら, 強風下において消波護岸から発生する海水飛沫量とその陸域への輸送過程を, 現地観測を通してその実体を明らかにしようという試みはほとんど行われていない。

本研究では, 冬季節風が発達する響灘沿岸において, 北九州港埋め立て地の消波護岸を対象とした現地観測を行った。そして, 強風下において消波護岸から発生する飛沫塩分量と, その陸域への輸送過程を明らかにするこ

とにより, 塩害対策のための基礎となるデータを提供しようとするものである。

2. 観測方法

北九州市の北部に位置する響灘廃棄処分場D地区第3区画において, 北西の季節風が発達した日に観測を行った。図-1および図-2に, それぞれ観測位置および観測位置前面における消波護岸の標準断面図を示す。基礎捨石(5~100 kg/個)および被覆石(300~500 kg/個)の傾斜堤法面は, 3.2トン型テトラポッドの2層積みとし, 天端は2個並びで被覆されている。護岸前面の法面勾配は1:4/3である。観測用ポールは, 図-3に示すように護岸背後から陸域方向に $x=10, 20, 50, 100, 200, 300$ mの6地点に設置した。それぞれの観測点を護岸背後からPos. 1, 2, 3, 4, 5, 6と呼ぶことにする。表-1に観測日時および観測中の平均風速値 U_{10} を示す。 U_{10} は, 地表面からの高さ10 mにおける風速である。風速や風向の変化を考慮して, データ採取時間を変えることにより, 合計11通り(Case 1~11)の観測を行った。表-2には観測項目を示す。図-3は, 観測方法の概要を示した

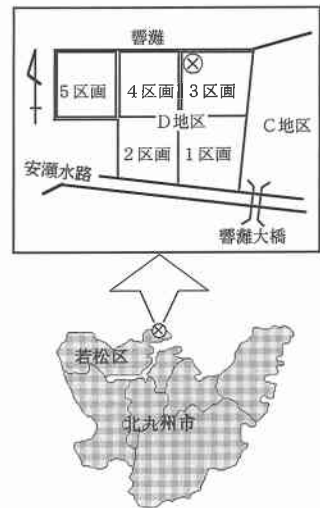


図-1 観測位置

* 正会員 工修 日本文理大学 教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 九州大学 助教授 大学院総理工学研究科
*** 正会員 工修 九州電力株式会社

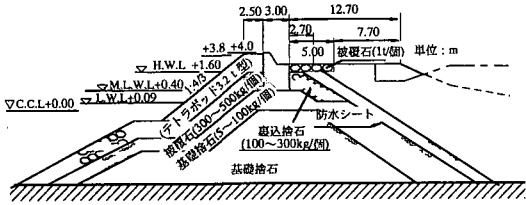


図-2 消波護岸の標準断面図

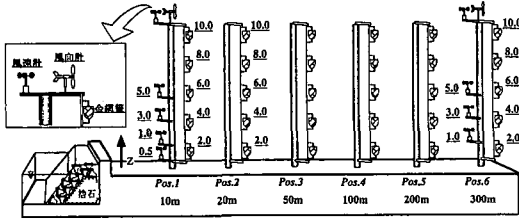


図-3 観測方法の概要

ものである。

風向の計測は、Pos. 1 および Pos. 6 の 2 測点において $z=10\text{ m}$ の高さで行った。風速の計測は、三杯式風速計を用いて Pos. 1 ($z=0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0\text{ m}$) および Pos. 6 ($z=1.0, 3.0, 5.0, 10.0\text{ m}$) で行った。風向および風速のデータは、5分間隔でデータロガーに取り込んだ。

飛沫塩分量の計測は、Pos. 1~6 において鉛直上向きに 2 m 間隔 ($z=2\sim 10\text{ m}$) で行った。飛沫塩分量の捕捉には、金網状の籠の中にガーゼを入れたものを用いた。籠は円筒状であるので、風向が変化しても常に飛沫塩分量の捕捉断面積は等しくなっている。籠に入れたガーゼは、観測終了後、プラスチック容器に入れて密閉し回収した。塩分量の分析は、ガーゼの入ったプラスチック容器にイオン交換水約 100 ml を入れ、十分に攪拌した後、イオン測定器を用いて濃度を求め、付着塩分量を算定した。

3. 観測結果および考察

3.1 埋め立て地上の風速分布

図-4 は、Pos. 6 の $z=10\text{ m}$ における 30 分毎の風速ベクトルの変化を示す。図中、凡例の矢印の長さは風速 5 m/s に相当する。観測期間中は、5 m/s 以上の強い季節風が吹いていることがわかる。とくに、Case 7~11 においては、表-1 の U_{10} の値からもわかるように、13 m/s 以上の北西の季節風が 27 時間も吹き続けたことがわかる。全ての観測において Pos. 1 と Pos. 6 で得られた平均風速の鉛直分布を調べた。その結果、Pos. 1 では、護岸の影響を受け風速分布に速度欠損が認められたが、護岸背後は障害物の無い平地となっているため、Pos. 6 では乱流

表-1 観測日時

	観測日時	U_{10} (m/s)
Case 1	1998年 11月18日17:30~11月20日17:30	7.48
Case 2	1998年 11月20日17:30~11月21日17:30	5.48
Case 3	1998年 12月8日14:00~12月9日15:00	7.94
Case 4	1998年 12月9日15:30~12月9日17:30	5.79
Case 5	1998年 12月9日17:30~12月10日 7:30	3.75
Case 6	1998年 12月10日 7:30~12月10日16:30	4.85
Case 7	1999年 1月7日14:30~1月7日17:30	13.10
Case 8	1999年 1月7日17:30~1月8日 8:30	13.61
Case 9	1999年 1月8日 8:30~1月8日12:00	13.19
Case 10	1999年 1月8日12:00~1月8日15:00	13.01
Case 11	1999年 1月8日15:00~1月8日17:30	13.04

表-2 観測項目

測定項目	測定高さ (m)	測定機器	測定位置	測定時間
風向	10.0	風向計	Pos. 1, 6	5min 間隔で連続測定
風速	0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0	三杯式風速計	Pos. 1	
	1.0, 3.0, 5.0, 10.0	三杯式風速計	Pos. 6	
飛沫塩	2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0	金網籠	Pos. 1~6	表-1 参照

境界層が十分良く発達していることがわかった。

一般に粗面上に発達した乱流境界層内の風速分布は、

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。ここで、 u_* ：地表面における風の摩擦速度、 z_0 ：地表面の粗度係数、 κ ：カルマン定数 (≈ 0.4) である。片対数紙上にプロットされた平均風速の鉛直分布のデータに、式 (1) を適合させることにより、地表面に作用する風の摩擦速度 u_* と、粗度係数 z_0 を評価することができる。本研究では、Pos. 6 で得られた風速データを 1 時間平均し、その鉛直風速分布に式 (1) を適合させることにより $u(z)$ と u_* を算定した。

図-5 は、Pos. 6 における 1 時間平均風速 $u(z)$ を u_* で規格化し、 z/z_0 に対してプロットしたものである。すべてのデータは、 u/u_* で十分普遍化でき、式 (1) で与えられる対数分布に従うことがわかる。

図-6 は、摩擦速度 u_* を、 $z=10\text{ m}$ の平均風速 U_{10} に対してプロットしたものである。若干のばらつきはあるものの、 u_* の値は U_{10} の増加とともに線形的に増加することがわかる。ここで、

$$C_D = (u_*/U_{10})^2 \dots \dots \dots (2)$$

で定義された地表面の抵抗係数 C_D を図-6 のデータから求めると、 $C_D = 2.84 \times 10^{-3}$ となる。一般に滑面での抵

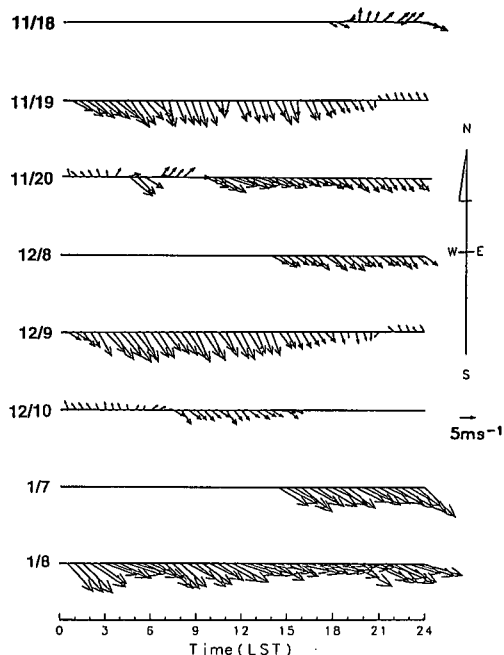


図-4 観測期間における風速ベクトル

抗係数が $C_D=1.0 \times 10^{-3}$ であることを考えると、得られた値は妥当であると思われる。また、地表面の粗度係数 z_0 は、約 $5.5 \times 10^{-3} \text{m}$ であった。

3.2 飛沫塩分量

図-7は、全ての観測における飛沫塩分量の鉛直分布が、風下方向にどのように変化するかを示したものである。飛沫塩分量 s ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) は、単位時間・単位面積当たりに捕捉された塩分輸送量である。Case 2, 4, 5, 6で見られるように、風速が比較的小さい場合、飛沫塩分量は鉛直方向にも風下方向にもほぼ一様であることがわかる。これは、護岸に波が衝突する際に発生した大きな粒径の飛沫が護岸背後で落下し、非常に小さい粒径の飛沫のみが風下方向に移流されるためと考えられる。 U_{10} が 7m/s 以上になると、護岸背後で発生する飛沫量は増大し、風下方向の変化も顕著となる。これは、護岸から発生した飛沫が落下しながら風下方向に輸送されるためである。 $x=300 \text{m}$ (Pos. 6)に達すると、沈降速度の大きな飛沫はほとんど落下してしまい、微細粒子として輸送されるため、飛沫塩分量は鉛直方向にほぼ一様となる。

図-8は、図-7で示された飛沫塩分量 s を鉛直方向に積分した値 S ($\text{mg}/\text{cm} \cdot \text{s}$)を護岸からの距離 x (m)に対してプロットしたものである。風速が小さい場合は、飛沫塩分量の積分値は、風下方向にほぼ一定値をとることがわかる。風速が大きくなると、飛沫塩分量の積分値は風下方向に急激に減少することがわかる。

図-9は、 $x=300 \text{m}$ (Pos. 6)における飛沫塩分量の積

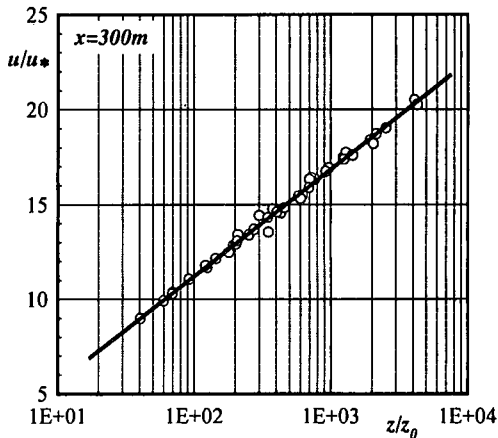


図-5 風速分布 (pos. 6)

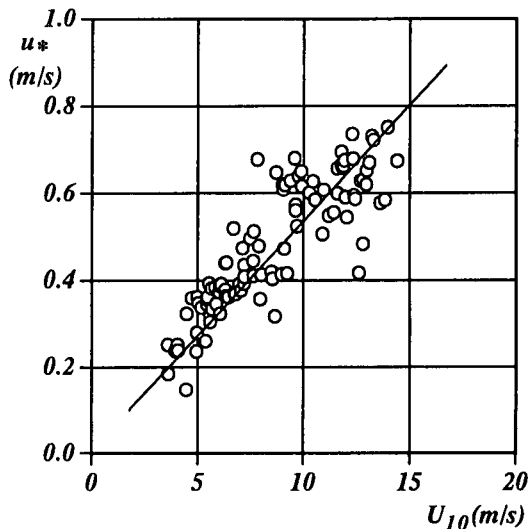


図-6 u_* と U_{10} の関係

分値 S_∞ を用いて、図-8のデータを規格化したものである。ここで、図中の l は風向を考慮することにより算定された護岸からの吹送距離である。 g は重力の加速度である。 $g/l/U_{10}^2 \leq 10$ において、塩分量 S/S_∞ は指数関数的に減少している。したがって、護岸のごく近傍では、飛沫の移流と沈降が釣り合った場が形成されていることがわかる。一方、 $g/l/U_{10}^2 \geq 50$ においては、 S/S_∞ の値はほぼ一定となり、移流によって飛沫が輸送されていることがわかる。

図-10は、 S_∞ と U_{10} の関係を示したものである。データにはかなりのばらつきが見られるが、その原因としては、まず、観測のCaseによっては観測時間が最長で2日という場合もあり、その観測期間の平均風速を用いたことが挙げられる。また、波高や潮位の影響が考慮されて

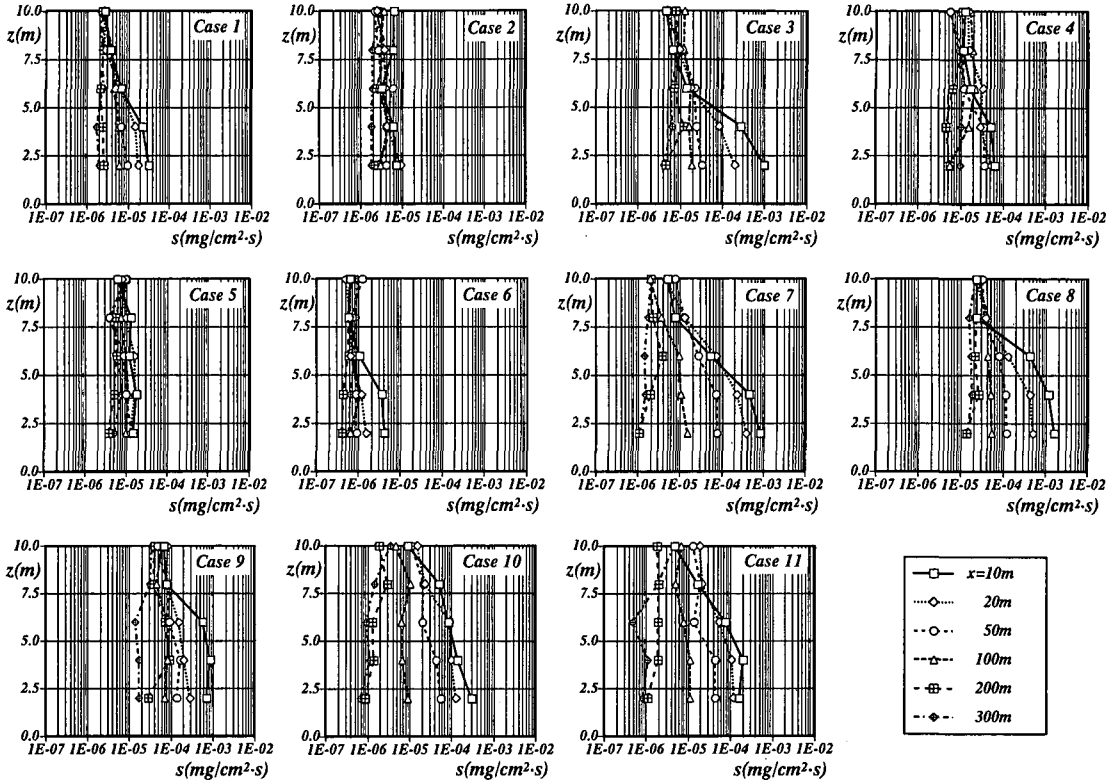


図-7 飛沫塩分量の鉛直分布

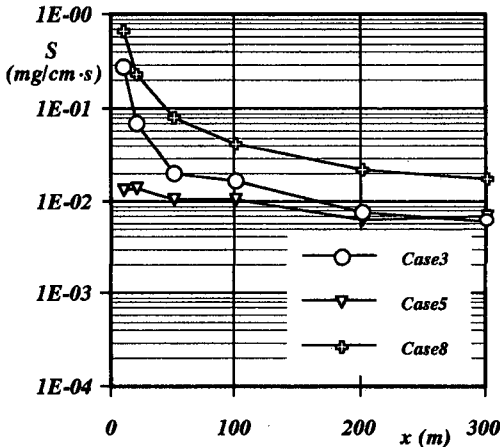


図-8 飛沫塩分量の風下方向の変化

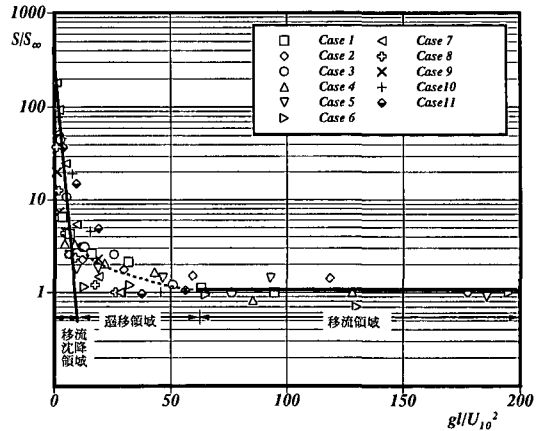


図-9 飛沫塩分量の普遍表示

いないことも考えられる。しかしながら、おおまかには図中の実線のように、 S_∞ は U_{10} の増加とともに増加する傾向が認められる。この実線を用いることにより、例えば吹送時間が10時間の場合、 $z \leq 10$ mで $U_{10} \equiv 5.0 \sim 13.0$ m/sの範囲において、 $x=300$ mにおける飛沫塩分量を $0.18 \sim 0.72$ mg/cm²と算定することができる。

また、図-9および10を用いることにより、任意の U_{10} と l における飛沫塩分量の積分値 S を算定することができる。

4. 結 論

本研究によって、冬季節風作用下の消波護岸から発生する飛沫塩分量は、風下方向に十分流下するとほぼ一

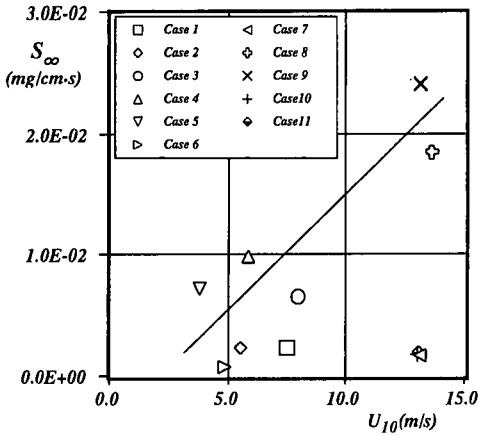


図-10 S_{∞} と U_{10} の関係

定値となり、 $x=300\text{ m}$ において $U_{10} \approx 5.0 \sim 13.0\text{ m/s}$ の風速が 10 時間続いた場合、 $0.18 \sim 0.72\text{ mg/cm}^2$ の塩分量が陸域に移流されることが明らかとなった。

本観測を行うにあたり、多大な御配慮を頂いた北九州市港湾局の方々、また、本論文の作成に御協力頂いた九州大学大学院博士課程の鶴崎賢一氏、日本文理大学海洋環境研究室の山口貴生君および近藤賢次君に、ここに記して、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

入江 功・他 13 名 (1994): 強風による沿岸部での塩害とその対

策に関する研究, 平成 4 ~ 5 年度科学研究費補助金総合研究 (A) (代表 入江 功), 研究報告書, pp. 1-172.

宇多高明・小俣 篤・小西正純 (1992): 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.

滝川 清・山田文彦・外村隆臣・荒木宜博 (1998): 飛来塩分特性の数値モデルと防風ネットを用いたその抑制効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1181-1185.

田中正昭・鳥羽良明 (1993): 台風 9119 号による塩害と内陸部への塩分侵入量について, 京大防災研年報, 第 36 号 B-2, pp. 103-119.

仲座栄三・津嘉山正光・北村康司・増田悦久・和田 誠・糸数義直 (1998): 強風時の飛来塩分量と降雨中塩分濃度に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1176-1180.

松永信博・植田 操・入江 功 (1994): 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.

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.

松永信博・植田 操・鶴崎賢一・岸岡賢祐 (1996): 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.

松永信博・植田 操・香月 理 (1999): 強風下における消波護岸からの飛沫の発生とその低減工法, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 401-406.

村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎 靖・西守男雄 (1995): 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.

目黒公郎・永田 茂・立川賢重・片山恒雄 (1993): 台風 19 号による大規模停電の都市機能への被害波及に関する調査研究 - 広島地域における大規模停電の影響, 生産研究, 第 44 巻, 4 号, pp. 192-201.

Hashida, M., N. Matsunaga and I. Irie (1996): Landward transport of spray generated from a wave absorbing sea wall, Proc. 25 th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1022-1033.