

# 直立防波堤での打上げにより生じる飛沫の粒径分布について

## Particle Size of Splash Caused by Wave Overtopping at Vertical Breakwaters

山城 賢<sup>1</sup>・吉田明德<sup>2</sup>・村上和康<sup>3</sup>・加嶋武志<sup>3</sup>

Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Kazuyasu MURAKAMI and Takeshi KASHIMA

In order to clarify the particle size of splash that is caused by wave-overtopping at breakwaters and transported by wind, field observations were conducted at Waku fishing port in Yamaguchi prefecture in the winter season from December 2006 to February 2007. The violent wave run-up at a vertical breakwater and the transportation of splash by wind were recorded by 3 digital video cameras. Wind velocity and wind direction were also measured with an anemometer. The splashes were caught with a kind of Litmus paper which reacts to salt water, and the particle sizes of splashes were analyzed by image processing technique. Based on the observed data, we found explicit formula to determine size distributions of splashed water particles as functions of run-up height and wind velocity.

### 1. はじめに

飛沫や海塩粒子の発生と輸送特性について現地観測により検討した例は、仲座ら (1990), 宇多ら (1992), 村上ら (1992) など数多くある。これらの観測により得られた成果は、例えば、飛来塩分量の数値シミュレーションの検証や改良, さらにそれらのシミュレーションを用いた防風林や防風ネットの飛来塩分低減効果の解明等に役立っている。また、特に護岸等の海岸構造物により発生した飛沫や海塩粒子に関する現地調査としては、樋田ら (1999) および松永ら (2002) による消波護岸で生じる飛沫の現地観測などがある。これらの観測結果は、暴浪時に大量の飛沫や海塩粒子が発生する構造物の背後における飛来塩分の輸送特性の解明に貢献している。

一般的に、飛沫・飛来塩分の現地観測では、乾燥したガーゼを曝露し、それに付着した海水の塩分を計量する手法が用いられ、塩分濃度の空間分布を調べることで様々な検討がなされている。このような検討手法は有効であるが、現状では、飛沫の実態を解明するための重要なファクターである飛沫の粒径に関する知見が依然として得られていない。そのため、数値シミュレーション等においても粒径については、様々な仮定のもとでパラメータの一つのように取り扱われることが多い。

著者らは、2005 年の冬季から山口県下関市にある和久漁港地区において、防波堤での大規模な打上げによって発生する飛沫の輸送特性を解明することを目的に現地

観測を行ってきた (山城ら, 2006, 2007)。本論文では、一連の飛沫輸送に関する現地観測の一環として、簡易な手法ではあるが、これまで未解明であった陸域に落下する飛沫粒径の計測を試みた結果について述べる。

### 2. 現地観測

#### (1) 和久漁港地区の概略

対象地域である和久漁港地区の位置および概略を図-1 に示す。和久漁港は日本海に面し北西方向に港口を有しており、特に冬季風浪時には暴風暴浪に晒される。そのため、港口から約 70 m 沖に図-2 に示す直立防波堤 (天端高 7.1 m, 堤体幅 13.1 m, 延長 140 m) が設置され、これにより暴浪を防ぎ港内の静穏度が確保されている。しかしながら、暴浪時には直立堤で大規模な打上げが頻繁に生じ、発生した飛沫や海塩粒子が強風に陸域に運ばれ、地区全体で窓枠の錆などの家屋被害、植木の枯死、洗濯物が干せないなどの塩害が生じている。

#### (2) 観測内容

観測は 2006 年 12 月 17 日および 2007 年 2 月 14 日と 15 日に実施した。観測項目は防波堤での飛沫の打上げ高と飛沫の輸送距離、風向風速および陸域に落下する飛沫の粒径である。観測位置を図-1 に示す。風向風速は、プロベラ式風向風速計を漁港にある岩の頂上に設置し、連続的にサンプリング間隔 2 秒で計測を行った。設置高は地表面からおおよそ 5 m (DL+11.3 m) である。飛沫の打上げ高と飛沫輸送距離の観測は直立堤をほぼ真横に望める約 2 km 南の岬からデジタルビデオカメラにより連続撮影し、その記録からモニタ上で計測した。飛沫の打上げ高と飛沫輸送距離の観測方法の詳細については、山城ら (2006, 2007) を参照されたい。ただし、ここでの飛沫輸送距離とは、撮影記録から目視で判別できる飛沫の最大飛距離を意味しており、海塩粒子を含め目視で判別でき

1 正 会 員 博(工) 九州大学大学院助教 大学院工学研究院環境都市部門  
2 正 会 員 工博 九州大学准教授 大学院工学研究院環境都市部門  
3 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

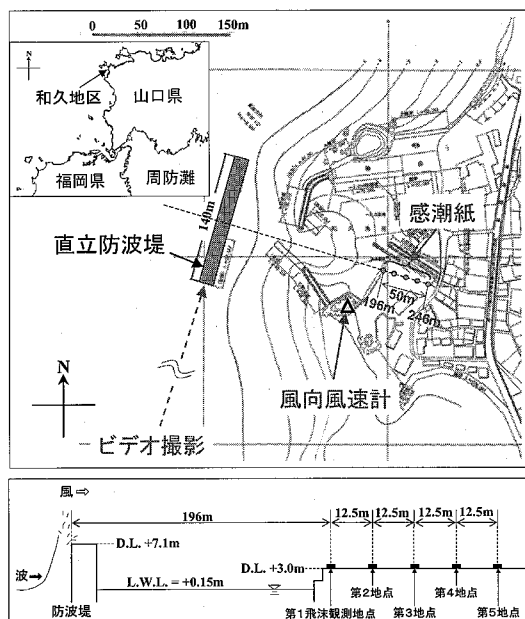


図-1 和久漁港地区の概略および観測位置

ないほど細かい飛沫は含まれない。飛沫粒径の観測は、海水の塩分に反応して変色する感潮紙（㈱カイジョーソニック製）を利用した。感潮紙（感水紙ともいう）は本来検潮所において使用されるものである。感潮紙を10 cm 四方程度の大きさに切り取り、地面に固定して10 分間曝露することで地面に落下する飛沫を捕捉した。曝露時間は、幾度かの試行の結果、飛沫の重複が少なく適度な数の飛沫が得られる時間として設定した。飛沫の観測位置は、図-1 に示すように防波堤から196m 離れた位置を第1 観測地点とし12.5 m 間隔で計5 地点設定した。

### 3. 飛沫粒径の解析

#### (1) 画像データへの変換

飛沫粒径の計測に際し、まず、観測後の感潮紙をスキャナで画像データに変換した。この時の解像度は400 dpi で一定とした。得られた画像データについて、中央部の7 cm 四方の範囲を解析対象として2 値化を行った。2 値化の際には白と黒の閾値（本解析では青の濃度を閾値に設定した）を設定する必要があるが、これを一定値とすると、感潮紙自体の色むらのため飛沫痕を適切に抽出できない場合があった。そこで、感潮紙の飛沫痕と2 値化画像を比較しながら、適切に飛沫痕を抽出できるよう感潮紙毎に閾値を設定した。したがって、2 値化の過程には人為的な影響が含まれやすいことになる。図-3 は左図が実際の感潮紙の飛沫痕で、右図が2 値化した画像である。次に、2 値化画像から飛沫の痕跡を抽出して個々の飛沫痕の面積（ $S$ ）と円形度（ $C$ ）を求めた。円

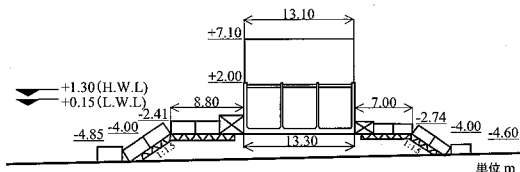


図-2 直立防波堤の断面図

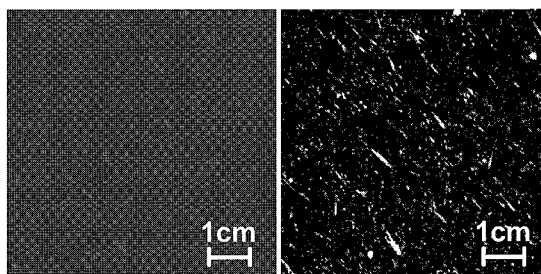


図-3 感潮紙に付着した飛沫の痕跡と2 値化画像

形度とは図形の面積と周囲長から形状の複雑さを測る特徴量であり、図形が円に近いほど1 に近づく。円形度の算定式を式（1）に示す。

$$C = 4\pi S / L^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $S$  は図形（ここでは飛沫痕）の面積（ $\text{mm}^2$ ）、 $L$  は飛沫痕の周囲長（ $\text{mm}$ ）、 $\pi$  は円周率である。なお、画像データの2 値化と飛沫痕の面積および円形度の算定には、フリーソフトウェアのJTrim とLIA32 を使用した。

#### (2) 飛沫痕と飛沫粒径の関係式の導出

飛沫痕と飛沫粒径の関係を調べるために、マイクロペットを用いて、一定量の海水を感潮紙に落下させる予備実験を行った。海水は和久漁港地区で採取した。実験は、感潮紙に対し垂直に海水を落下させた場合と、飛沫が角度を持って地面に落下することを想定して、感潮紙を水平面から70° 傾斜させた場合について行った。落下させた海水量は1  $\mu\text{l}$  から7  $\mu\text{l}$  まで変化させ、それぞれの海水量について実験を10 回行い、前述の方法で飛沫痕の面積と円形度を算定した。なお、海水の落下高さは50 cm とした。飛沫が大きいほど落下高さ、すなわち、飛沫の衝突速度が飛沫痕の大きさに強く影響するが、今回の観測では、後述するように粒径が400  $\mu\text{m}$  以下（海水量で0.034  $\mu\text{l}$  以下）の非常に小さな飛沫が主たる対象であること、また、現地における実際の飛沫の衝突速度が不明であることから予備実験において落下高さの影響は考慮していない。図-4 は実験で得られた海水量（ $\mu\text{l}$ ）と飛沫痕の面積（ $\text{mm}^2$ ）および飛沫痕の面積（ $\text{mm}^2$ ）と円形度の関係を示している。各プロットは10 回の実験における中央値である。平均値ではなく中央値で整理した理由は、平均値では10 回の実験でははずれ値が影響し、中央値に比

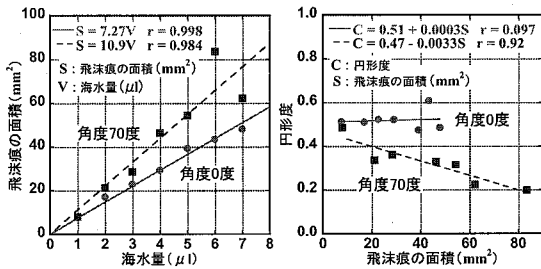


図-4 予備実験で得られた海水量と飛沫痕面積の関係および飛沫痕面積と円形度の関係

べて若干ながら相関が低かったためである。図より、海水量と飛沫痕の面積がほぼ比例関係にあり、落下の角度によって傾きが異なること、垂直に落下する場合は円形度がほぼ0.5であるのに対し、角度を持って落下する場合は飛沫痕の面積によって円形度が変化して、面積が小さいほど円形度が0.5に近づくことがわかった。この結果をもとに式(2)に示す関係式を得た。

$$V = S/\alpha \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{cases} \alpha = 7.27 & (0.5 \leq C \leq 1.0) \\ \alpha = 7.27 + (542.5 - 1095C)/S & (0.0 < C < 0.5) \end{cases}$$

ただし、 $V$ は海水量(μl)である。なお、実際に現地で観測された飛沫は、実験での最小値である1μlに比べて非常に小さいが、図-4などの結果から式(2)は小さな飛沫に対して十分に適用可能と仮定しそのまま利用した。したがって、この関係式を用いて飛沫痕の面積と円形度から飛沫の容積を求め、飛沫を球と仮定して粒径を算出した。

#### 4. 観測結果

##### (1) 観測結果の概略

図-5は観測結果の時系列で、図中に枠で示した時間

に感潮紙による飛沫観測を実施した。表-1に図-5の時系列から飛沫観測時について算出した諸量を示す。ただし、2006年12月17日における第1回目の飛沫観測時(図中のNo.1)については、ビデオカメラの不具合のため、打上げ高と飛沫輸送距離が一部欠測しており、それぞれの平均値等は得られた記録のみを使用して算出している。また、表中に示す風速の補正値とは防波堤に垂直な風速成分である。表-1には、各観測地点における飛沫の50%粒径および平均粒径を示している。特に、12月17日の観測結果では50%粒径と平均粒径との差が大きい。後述する飛沫粒径のヒストグラムをみるとわかるが、飛沫の粒径分布が広く、微小な粒径の飛沫が圧倒的に多い場合に50%粒径が小さくなり、平均値との差が大きくなる。

2006年12月17日は他の観測日に比べ、防波堤での打上げが激しく頻繁に生じていた。2007年2月14日と15日の飛沫の打上げ高は同程度であったが、発生頻度は14日の方が多く、また、14日は風速も大きかった(春一番)ため、ビデオ映像から得られた飛沫輸送距離も15日に比べて大きい。なお、飛沫の打上げ高と輸送距離および風速の関係については既に報告している(山城ら, 2007)。各観測日の風向に着目すると、12月17日と2月15日は概ねWNWの風であり、これは防波堤にはほぼ垂直に吹く方向である。一方、2月14日はSWからWSWの風向であった。この場合、防波堤で生じた飛沫は、ほとんどが北東の方向に流されてしまい、感潮紙を設置した観測点では、防波堤で生じた飛沫を的確に捕捉できず、加えて、観測点の南西側にある海岸と港口の防波堤からの飛沫の影響が強くなり、また、風速計を設置した岩や観測地点の南側にある建物が遮蔽物となるため、現象が複雑となる。以上の理由から、以降の検

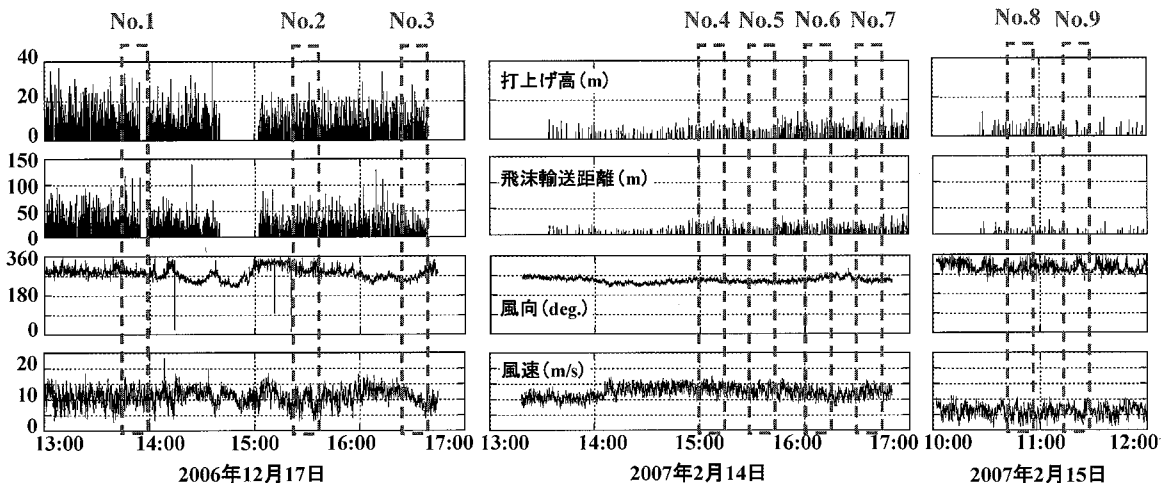


図-5 打上げ高, 飛沫輸送距離, 風向・風速の時系列

表-1 観測結果の概略

| 観測日        | No. | 観測時刻          | 飛沫の 50 %粒径(μm) (平均粒径(μm)) |            |            |            |            | 打上げ高       |            |    | 飛沫輸送距離     |            | 風向風速         |                |              |
|------------|-----|---------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|------------|------------|--------------|----------------|--------------|
|            |     |               | 第 1 地点                    | 第 2 地点     | 第 3 地点     | 第 4 地点     | 第 5 地点     | 最大値<br>(m) | 平均値<br>(m) | 回数 | 最大値<br>(m) | 平均値<br>(m) | 平均値<br>(m/s) | 最多風向<br>(deg.) | 補正值<br>(m/s) |
| 2006.12.17 | 1   | 13:50 ~ 14:00 | 42.2(106)                 | 42.2(101)  | 25.0(79.6) | 61.8(127)  | 64.2(131)  | 29.6       | 10.5       | 46 | 114.1      | 30.2       | 11.1         | 283.1          | 11.0         |
|            | 2   | 15:25 ~ 15:35 | 35.2(101)                 | 39.2(103)  | 34.0(93.8) | 32.8(91.2) | 31.0(90.0) | 29.3       | 11.3       | 72 | 81.4       | 30.6       | 9.4          | 297.0          | 9.0          |
|            | 3   | 16:25 ~ 16:35 | 16.2(66.0)                | 13.6(49.4) | 13.6(39.2) | 13.6(38.4) | 13.6(38.4) | 28.1       | 9.6        | 69 | 56.5       | 18.6       | 10.8         | 257.7          | 9.3          |
| 2007.2.14  | 4   | 15:00 ~ 15:10 | 32.4(39.6)                | 31.0(38.6) | 33.6(45.6) | 32.0(39.6) | —          | 9.5        | 5.5        | 15 | 33.5       | 19.9       | 13.5         | 249.0          | 10.8         |
|            | 5   | 15:31 ~ 15:41 | 31.0(35.8)                | 31.6(34.8) | 23.6(31.4) | 32.0(36.4) | 27.8(33.6) | 5.7        | 4.4        | 13 | 15.3       | 10.4       | 13.0         | 241.3          | 9.3          |
|            | 6   | 16:00 ~ 16:10 | 33.0(44.0)                | 36.6(38.0) | 23.8(33.0) | 34.8(38.2) | 31.6(35.6) | 9.8        | 5.7        | 25 | 28.0       | 14.7       | 12.1         | 250.6          | 9.8          |
|            | 7   | 16:30 ~ 16:40 | 32.6(38.6)                | 36.6(38.0) | 37.4(36.8) | 20.6(34.6) | 18.0(29.8) | 11.1       | 5.9        | 26 | 26.5       | 13.2       | 12.3         | 247.2          | 9.5          |
| 2007.2.15  | 8   | 10:45 ~ 10:55 | 31.8(38.6)                | 41.0(36.8) | 43.2(40.6) | 39.2(41.6) | 29.6(32.6) | 8.6        | 5.2        | 8  | 12.2       | 8.0        | 5.6          | 293.6          | 5.4          |
|            | 9   | 11:15 ~ 11:25 | 36.6(34.2)                | 24.4(32.4) | 19.6(29.4) | 19.0(30.8) | 22.2(27.8) | 7.9        | 5.8        | 6  | 11.1       | 8.3        | 5.8          | 299.1          | 5.5          |

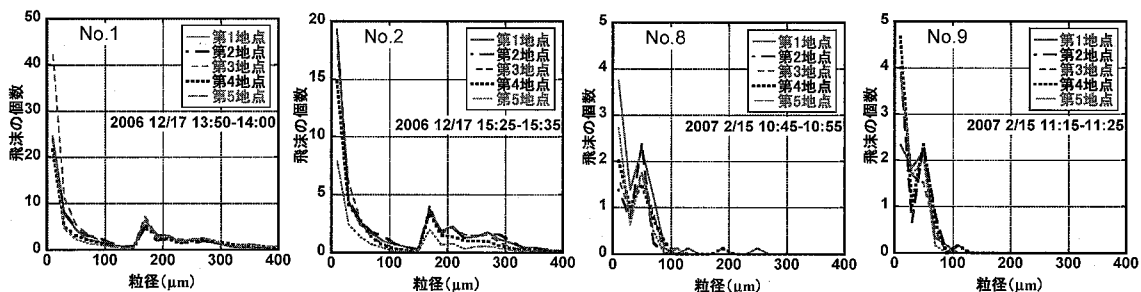


図-6 飛沫粒径のヒストグラム (打上げ1回あたり)

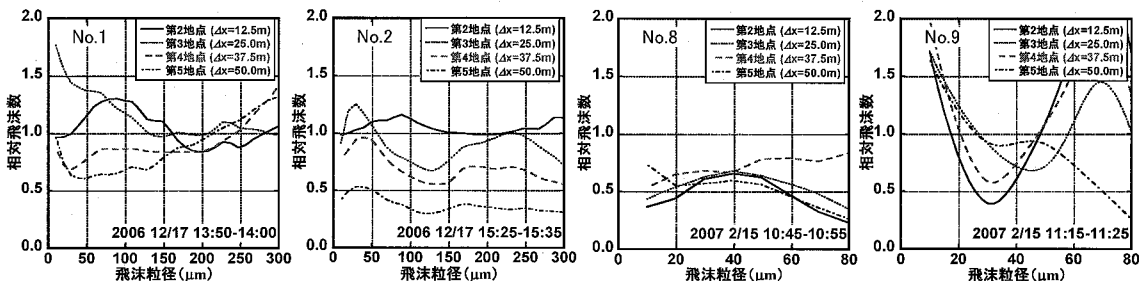


図-7 観測地点による飛沫粒径分布の変化

討においては、2月14日の観測結果および12月17日のNo.3の観測結果を除くこととした。

## (2) 飛沫の粒径分布

図-6に検討対象とした4ケース (No.1, No.2, No.8, No.9) について飛沫粒径のヒストグラムを示す。これらは、打上げの発生回数で除しており、1回の打上げで飛来してくる平均的な粒径の分布を表している。概して飛沫の粒径は細かいもの程多く粒径が大きくなるにつれ急激に減少する傾向がある。12月17日の2つのケース (No.1, No.2) では、160 ~ 180  $\mu\text{m}$  で第2のピークが現れ、そこから再び減少しており、あたかも2つの分布が混在しているように見える。この第2のピークについては、おそらくは港口の防波堤など、対象の直立堤ではない異なる発生源からの飛沫と思われるが現段階で

は不明である。また、2月15日の観測結果では、100  $\mu\text{m}$  以上の飛沫はほとんど存在せず、飛沫の数そのものが12月17日の結果に比べて少ない。図-7は第1地点の粒径分布を基準とし、第2地点から第5地点までの粒径分布の比を平滑化して示したものである。空間的な粒径分布の変化は観測ケースによってまったく異なり、例えば、No.2では防波堤から遠ざかるにつれてほぼ一様に減少しているが、No.1やNo.9の結果では、粒径によって増減し、その傾向は明確ではない。また、No.8については、第2地点以降での粒径分布に大きな変化はない。飛沫観測を実施した地点は防波堤から約200 ~ 250 m 離れており、宇多ら (1992) が飛沫の飛来機構に関して設定した領域区分のうち風による移流と重力による沈降が卓越する移流沈降領域にあたると思われる。この移流

沈降領域は、飛沫の打上げ高や風速の程度にもよるが、今回の飛沫の観測範囲 (50 m) に比べてかなり広いと思われ、飛沫粒径の空間変動を調べるには 50 m の観測範囲では不十分であったといえる。

## 5. 飛沫の打上げ高および風速と飛沫粒径の関係

### (1) 平均ヒストグラム

前述のとおり、飛沫粒径分布の空間変化特性が現れない程度の範囲で観測を実施したとすれば、各観測地点のヒストグラムを平均したものは、観測範囲における代表的な粒径分布といえる。そこで、両端の2点を除いた第2地点から第4地点の3地点間 (25 m) で平均したヒストグラムを図-8に示す。図中には、12月17日の観測結果における第2のピークを無視し、140  $\mu\text{m}$  までの範囲で近似した曲線を併せて示している。

### (2) 飛沫の打上げ高および風速と飛沫粒径分布の関係

図-8に示した飛沫の粒径分布は、防波堤で生じる飛沫の打上げ高および風速 (風向補正風速) に依存すると思われる。図-9は粒径分布の近似曲線の係数と飛沫の打上げ高および風速との関係を示しており、それぞれ相関が高いことがわかる。したがって、防波堤から 200 m 程度離れた地点に限定されるが、飛沫の打上げ高と風速から落

下する飛沫の粒径分布をある程度推定できるといえる。

## 6. おわりに

本研究では、過去に例がないと思われる現地での飛沫粒径の計測を試み、直立堤で生じる飛沫の粒径分布について幾つかの知見を得た。既往の研究成果にこれらの知見を加え検討すれば、飛沫の飛散過程の解明に大いに役立つものと思われる。ただし、現段階では飛沫粒径の観測結果は少なく、粒径分布の空間的な変化特性を明らかにするには、現地観測を継続することが必要である。また、鉛直方向における粒径分布の変化を把握できるよう、観測方法を工夫することが今後の課題である。本論文において飛沫の打上げ高および風速により飛沫粒径分布を近似できることを示したが、著者らは、これまでに当該防波堤における来襲波浪と飛沫の打上げ高の関係を明らかにしており、それらの知見をもとに、当該地区における飛沫の簡易的な予測法を提案したいと考えている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、和久漁港漁業協同組合の方々、下関市豊北総合支所の西野政次氏を始め水産振興課の方々および㈱三洋コンサルタントの西井康浩氏には、現地観測に御協力頂くとともに貴重な情報を頂きました。また、ビデオ撮影の際には、養護老人ホーム松涛園の敷地の一部をお借り致しました。さらに、観測でのデータ収集においては㈱測研の古賀大補氏、古賀洋樹氏、児玉充由九州大学技術職員、横田雅紀九州大学助教、修士課程の小野貴也君 (現㈱三洋コンサルタント)、古本裕一君 (現九州大学博士後期課程)、白尾國貴君に協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 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.
- 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦(1990)：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.
- 植田 操・松永信博・香月 理(1999)：冬季響灘沿岸における飛沫塩分量の現地観測，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1246-1250.
- 松永信博・児玉真史・植田 操・香月 理(2002)：冬季季節風下において消波護岸から発生した海水飛沫の陸域への輸送に関する現地観測，土木学会論文集，No. 712/ II -60，pp. 107-116.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓司(1992)：砕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.
- 山城 賢，吉田明德，西井康浩，橋本裕樹，石堂 濯，加嶋武志(2006)：現地観測による越波飛沫特性について，海岸工学論文集，第53巻，pp. 726-730.
- 山城 賢，吉田明德，村上和康，加嶋武志(2007)：直立防波堤で生じる飛沫の輸送に対する風の影響，海洋開発論文集，Vol. 23，pp. 865-870.

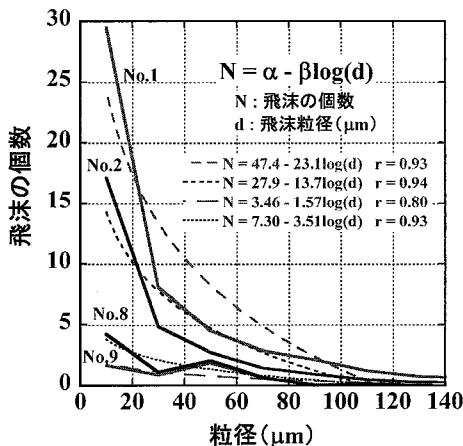


図-8 平均的な粒径分布

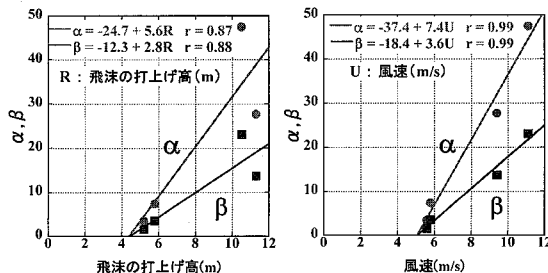


図-9 粒径の近似曲線の係数と打上げ高および風速の関係