

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

松永信博¹・樋田操²・鶴崎賢一³

¹正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目-1)

²正会員 工修 日本文理大学教授 工学部土木工学科 (〒870-0397 大分市大字一木1727)

³学生員 工修 九州大学大学院総合理工学研究科 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目-1)

風洞付き二次元造波水槽を用いて強風下の沖合い海域で発生する飛沫量の実験を行った。白波砕波上の飛沫の粒径分布から飛沫濃度を定量的に評価し、水表面に作用する風応力との関係を明らかにした。飛沫量は水面上の摩擦速度と飛沫の沈降速度に強く依存する。また、画像解析結果から、飛沫粒径および飛沫の沈降速度は高さの-1乗に比例して減少することが示された。以上の検討結果に基づき、高さ10mの平均風速と卓越波の波速と波高から、白波砕波を伴う実海域における任意の高さでの飛沫濃度を評価できる半経験手法を提案している。

Key Words : strong wind, sea water spray, breaking wave, spray diameter, settling velocity

1. 緒論

我が国の沿岸域では、これまで様々な自然災害に見舞われてきた。その中でも甚大な被害をもたらすものは、台風による波浪災害である。このため、沿岸域における防災対策ではもっぱらこれらの災害をいかに予知し、軽減するかという点にエネルギーが注がれてきた。その結果、我が国の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海域開発プロジェクトが実現化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への被害や送電システムへの被害をもたらした。その後の調査から、災害の原因は強風によって陸域に輸送された海水飛沫や海塩粒子に基づく塩害であることが明らかとなった¹⁾²⁾。田中ら³⁾は台風9119号による塩害と内陸への塩分輸送量について中国地方を中心に調査を行った。その結果、広島県にもたらされた総降塩量は $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度と推定され、広島の間年総降塩量のほぼ1/5に当たることが明らかと

なった。入江を代表とする研究グループ⁴⁾も台風9117号、9119号による被害調査を九州全域にわたって行い、暴風時に自然海浜や人工構造物から発生する飛沫量を系統的に調査することが必要であると指摘した。このような現状において、鳥羽らが1950年代後半から取り組んだ海塩粒子の発生機構の解明や広域にわたった海塩粒子の輸送機構の解明に関する総合的研究^{5)~10)}は先駆的でありかつ貴重なものである。

塩害が生ずる直接の原因は、海水が飛沫となって大気中に取り込まれることにあるが、その飛沫の発生形態は様々である。Hayami & Toba¹¹⁾やToba¹²⁾は、水表面に形成された気泡が破裂する時に生ずる微水滴に関して詳細な研究を行い、微水滴の大きさ、発生個数、到達高さ等を測定した。また、Toba¹³⁾は風洞水槽を用いて風波を発生させ、水面上10mの高さにおける平均風速が13m/s以上になると飛沫が発生すること、飛沫は砕波による水粒子のちぎれよりもむしろ水表面における気泡の破裂によって供給されることを指摘した。また大気中に輸送される塩分量についても鳥羽らは総合的な研究を行っている。Toba & Tanaka¹⁴⁾は、1962年1月4日から2月3日にかけて巨大海塩核の沈降に関する現地観測を行い、海面から発生した海塩核は風によって輸送されることを明

らかにした。Toba⁹⁾ 10)においては、大気中の海塩粒子の鉛直分布が理論的に検討されており、実測結果が解析結果と定性的によく一致することが示されている。Toba¹¹⁾はまた世界の海洋上の塩分量に関するデータを集め、海面上と海面上 1km の高さにおける塩分量の分布図を季節ごとに示した。これらの一連の研究成果は、「塩害に関する基礎的研究第一報～第五報」^{12)~16)}や総合報告¹⁷⁾等において邦文としてまとめられている。

鳥羽らによる塩害に関するこれらの研究は主として海塩粒子の発生と輸送プロセスに関するものであり、水平スケールとして数 100km 以上に及ぶ長距離輸送を対象としたものであった。しかしながら、前述した様に最近では生活圏が海に向かって急速に拡大しており、海岸付近の数百 m から数 km の範囲における塩害、潮風被害、大気環境アメニティーの悪化などの問題に対して、詳細な調査、研究が求められている。従って、海岸工学の立場から行われている最近の研究では、海岸線から数 km の範囲における海水飛沫や海塩粒子の輸送に焦点が絞られている。石田ら¹⁸⁾は波と構造物の相互作用によって生ずる飛沫に注目して、風応力を局所的に作用させる実験を行い、飛沫の飛散形態を調べた。その結果、飛沫の発生量を低減させる構造物についていくつかの知見を得た。大木ら¹⁹⁾は潮風害防止対策として設置された遊水部付緩傾斜消波護岸から発生する飛沫量を調べ、従来の台形断面消波護岸に比べ飛沫の到達高さや飛散距離が十分低減することを明らかにした。仲座ら²⁰⁾は、沖縄本島の沿岸住宅地域を中心に生活環境アメニティーに関する調査を行い、沿岸における環境アメニティーは大気に含まれる飛塩量や風速に強く依存することを示した。灘岡ら²¹⁾は沿岸域における植生環境を工学的に評価するために、大気と土壌に含まれる塩分に着目して調査を行った。村上ら²²⁾は、砕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との関係を検討した。宇多ら²³⁾や仲座ら²⁴⁾は数値シミュレーションにより陸域における海塩粒子の輸送プロセスを調べた。村上ら²⁵⁾や滝川ら²⁶⁾、27)、28)は現地調査に基づいて植栽による飛沫塩分量の低減効果を調べた。仲座ら²⁹⁾、30)も防風林を有する沖縄本島海岸における気象や飛来塩分量の現地計測を行い、植生による飛来塩分量の除去効果や飛来塩粒子の沈降速度などを調べた。松永ら³¹⁾、32)は、巻き波砕波や崩れ波砕波から発生する飛沫量とその風下方向への輸送プロセスを実験的に調べた。さらに、大分県別府港に設置された消波護岸をモデルとして実験を行い、護岸背後に輸送される飛沫量の鉛直分布および風下方向の分布を調べた³⁰⁾、33)。浅井ら³⁴⁾も二次元水槽実験を通して波浪条件や海底性状が飛沫の発生に与える影響について調べた。

沿岸付近における塩分の輸送形態を議論する上では、鳥羽らが着目した海塩粒子としての輸送の他に海水飛沫

Wind →

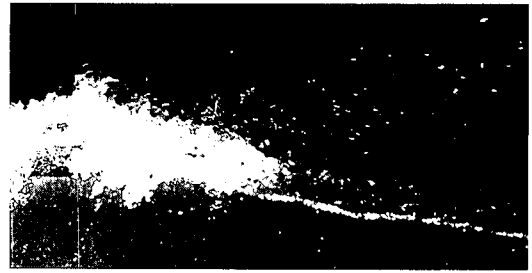


写真-1 飛沫の発生状況

としての輸送も重要となってくる。特に暴風時においては、鳥羽らが指摘したような気泡の破裂というプロセスよりは、むしろ砕波による水粒子のちぎれが重要である³¹⁾。

写真-1は、風洞水槽実験において可視化された、白波砕波からの飛沫の発生状況を示す。矢印の方向は風と波の伝播方向を表す。波峰から発生した多量の飛沫が風により風下方向に輸送されていることがわかる。従って、このような飛沫の発生形態においては水表面に作用する風によるせん断応力が重要な物理量となる。また、飛沫の粒径は海塩粒子の粒径に比べて大きく空間的に非一様であるため、飛沫の輸送量を定量的に評価するためには飛沫粒径の空間分布、つまり沈降速度の空間分布に関する知見が必要となる。

本研究の目的は、強風下にある沖合い海域から陸域へ輸送される飛沫量を実験的に定量化し、数値シミュレーション手法を用いて、陸域に輸送される塩分量を予測する上で重要となる海側の境界条件を提供することである。従って、風洞付き造波水槽を用いて、強風下にある沖合い海域を対象とした実験が試みられており、白波砕波上の飛沫量と飛沫の粒径分布との関係および飛沫濃度と水表面に作用する風応力との関係が明らかにされている。

ここで、模型実験を通して現地の状況を予測、評価する上で、相似則という問題が浮上する。飛沫の発生機構においては、水の表面張力が重要な役割を果たす。そのため、ウェーバーの相似則を考えるべきである。一方、飛沫の発生後の輸送過程においては、重力が影響するのでフルードの相似則を用いるべきである。模型の現地に対する縮尺が $1/n$ の場合に、両相似則を風速に関して適用すると、ウェーバーの相似則では $u_m = u_p \sqrt{n}$ 、フルードの相似則では $u_m = u_p \sqrt{1/n}$ となる。ここで、 u_m と u_p は、それぞれ模型と現地における風速である。この相反する条件を両立させることは困難である。そこで実験では、白波砕波からの飛沫の粒径に対しては水の表面張力を考慮して整理を試みた。しかし、飛沫の輸送過程に対してフルードの相似則に基づいて実験を行った場合、風速が小さすぎるために飛沫は十分に発生しない状況と

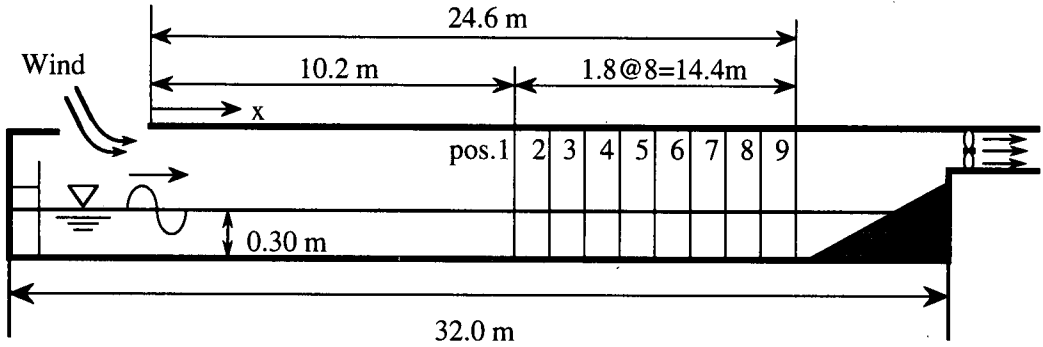


図-1 実験装置の概要

表-1 風応力に関する実験の条件および代表諸量

Run		Pos.	T_p (s)	U_m (m/s)	c (m/s)	\bar{u}_* (m/s)	\bar{U}_{10} (m/s)	\bar{z}_0 (mm)	\bar{u}_*/c	$\bar{C}_D (\times 10^{-3})$
1	風のみ	1~9	...	16.5	...	1.56	32.2	2.56	...	2.34
2			...	17.5	...	1.70	34.3	3.10	...	2.45
3			...	18.4	...	2.07	39.2	5.07	...	2.78
4	造波 + 風		1.00	16.5	...	1.39	28.9	2.46	1.01	2.32
5				17.5	1.37	1.59	32.5	2.86	1.16	2.40
6				18.4	2.13	40.7	4.74	1.55	2.73	
7			1.20	16.5	...	1.12	26.1	0.890	0.762	1.84
8				17.5	1.47	1.32	29.5	1.30	0.898	2.00
9				18.4	1.77	36.5	2.63	1.20	2.36	
10			1.40	16.5	...	1.14	26.1	1.01	0.745	1.89
11				17.5	1.53	1.30	28.2	1.72	0.850	2.13
12				18.4	1.67	35.0	2.31	1.09	2.28	

なる。従って、ここでは石田らの実験¹⁰⁾と同様に、風速に対しては縮尺を考慮せず、飛沫が発生している実海域での風速を与えることにより実験を行った。

2. 実験装置および実験方法

(1) 水表面に作用する風応力

実験には、高さ 0.94m、幅 0.6m の矩形断面を有する、長さ 32m の吸い込み式風洞付き二次元造波水槽を用いた。水槽の岸側端部には、反射波の影響を極力防ぐために可変勾配式の消波装置が設けられている。実験は、図-1 に示すように波が水平床上を伝播する場合を対象として行われた。全ての実験条件において、一様水深部の平均水深を 0.3m に固定した。この装置を用いて行われた実験の条件を表-1 に示す。表中、 T_p および c は造波による二次元規則波の周期および波速、 U_m は断面平均風速である。ここで波速 c は伝播方向に一定であるとし、微小振幅波理論から算定されている。なお、表中には実験データから決定された代表諸量も付記されており、そ

れらは後節で議論される。文字に $-$ を冠するものは風下方向にわたって平均した量を、冠しないものは各測定位置における局所量であることを表している。

水表面に作用する風応力を評価するための実験においては、断面平均風速 U_m を 16.5, 17.5, 18.4m/s と変化させた。造波周期は $T_p = 1.00, 1.20, 1.40$ s の 3 種類とし、造波せずに風応力のみを作用させた実験も含めて合計 12 種類 (Run 1~12) の実験を行った。風速の測定断面は、風の吸い込み口から風下側に 10.2m の位置を Pos.1 ($x = 10.2$ m) とし、以降 1.8m の間隔で Pos.9 ($x = 24.6$ m) までの 9 断面で行った。ここで、 x は吹送距離である。なお、これらの実験において、風速の測定には飛沫が多量に飛散する場でも計測が比較的容易でかつ正確なベーン式風速計が用いられた。測定は、鉛直方向に 2.0cm の間隔で行われた。

(2) 沖合い海域で発生する飛沫の濃度

沖合い海域を対象とした飛沫量の測定は、図-1 で示されるセットアップの下で行われた。沖合い海域で白波碎

表-2 飛沫粒径と飛沫量に関する実験の条件および代表諸量

Run	\bar{H} (cm)	L (cm)	T_p (s)	c (m/s)	\bar{H}/L	U_m (m/s)	\bar{u}_* (m/s)	\bar{u}_*/c	\bar{D}_* (mm)	\bar{C}_* ($\times 10^{-4}$)
1	12.5				0.0912	16.5	1.39	1.01	0.634	0.600
2	12.5	137	1.00	1.37	0.0912	17.5	1.59	1.16	0.809	1.74
3	12.4				0.0905	18.4	2.13	1.55	1.18	4.00
4	13.1				0.0740	16.5	1.12	0.762	0.583	0.536
5	13.1	177	1.20	1.47	0.0740	17.5	1.32	0.898	0.857	3.38
6	12.7				0.0718	18.4	1.77	1.20	0.900	1.74
7	14.9				0.0693	16.5	1.14	0.745	0.762	1.72
8	14.5	215	1.40	1.53	0.0674	17.5	1.30	0.850	0.559	0.540
9	14.2				0.0660	18.4	1.67	1.09	0.978	3.04

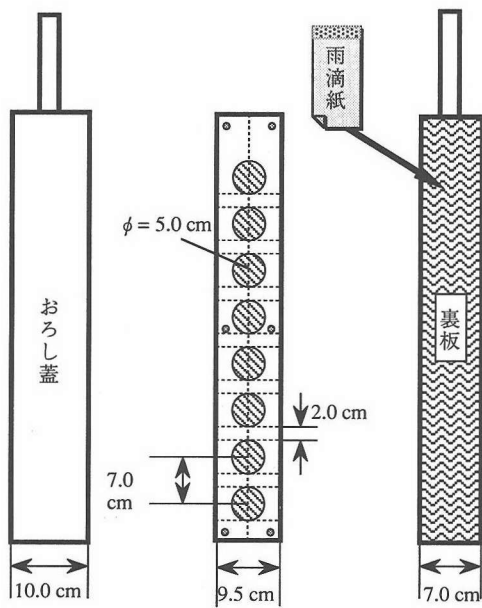


図-2 飛沫粒径の測定装置

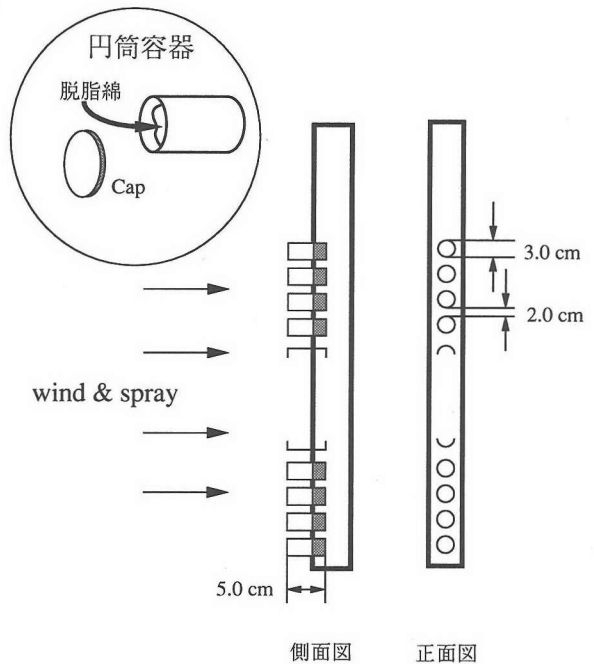


図-3 飛沫量の捕集装置

波が一様に発生している場合、実験系で正しく再現することは困難である。そこで本実験では浅海波ではあるが、水平床上を砕波しながら伝播する波浪場を沖合い海域で生起する波の場と同じものと仮定している。平均水深、造波周期 T_p および断面平均風速 U_m は表-1 で示された値と同じである。これらの条件において、水槽全域にわたって一様に崩れ波砕波（白波）が発生する場が形成された。表-2 に実験条件および実験結果に基づいて算定された代表諸量をまとめて示す。ここで、 H と L はそれぞれ砕波している卓越波の波高と波長である。その他の代表量は後節で説明する。

飛沫の沈降速度の鉛直分布を得るためには飛沫の粒径を評価する必要がある。飛沫の粒径分布の測定には、雨滴紙を貼り付けた装置を用いた（図-2 参照）。雨滴紙は、アニリンブルー粉末をベンジンに適量溶解させた溶液をろ紙に塗布し、乾燥させて作成した。飛沫粒径測定装置はおろし蓋、中板、裏板からなっている。裏板に雨滴紙を貼り付け、7cm 間隔で直径 5cm の円形孔をくりぬいた中板を、裏板とおろし蓋との間に挟み、水槽内に鉛直に挿入する。適当な時間でおろし蓋を上下させることにより円形孔を通過した飛沫が雨滴紙に付着し、雨滴紙を青色に変色させる仕組みになっている。なお、雨滴紙上

の飛沫痕の数と面積を求める方法としては、画像解析ソフト NIH image を用いた。

飛沫量の鉛直分布の測定は、表-2 の全実験条件 (Run1~9) の下で、全ての測定断面 (Pos.1~9) において行われた。飛沫量は図-3 で示すように直径 3cm, 深さ 5cm の円筒容器に脱脂綿を詰め、計測前後における容器の質量差から算定された。飛沫量の鉛直分布はその容器を 5cm 間隔で鉛直方向に配列して測定することにより得られた。

3. 実験結果とその考察

(1) 水表面に作用する風応力

a) 風速分布

図-4 は Run6 における碎波上の風速分布を示したものである。本研究における全ての実験条件において、平均水面上 3~8cm の間では水面波の存在のため風速の計測は困難であった。また、風洞天井付近では壁面境界層の存在により風速が急速に減少するが、水表面の近傍においては風速分布はほぼ対数分布に従うことがわかる。従って、諸量の算定、結果ならびに考察は、現地への適用を考慮して z の範囲を対数則が成り立つ $3.0\text{cm} < z < 40.0\text{cm}$ に対して行った。一般に、この様な接水境界層は粗面上の乱流境界層とみなされ、風速分布は、次式で与えられる³⁹⁾。

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

ここで、 u_* : 水表面における風の摩擦速度 ($=\sqrt{\tau_0/\rho_a}$)、 τ_0 : 水面に作用する風の摩擦応力、 ρ_a : 空気密度、 z_0 : 水面の粗度係数、 κ : Karman 定数 (≈ 0.40) である。測定断面における風速分布に対し式 (1) を適用することによって u_* と z_0 の値を求めた。図中の近似曲線によって示されるように、水平床の実験結果においては、 u_* は風下方向にほぼ一様となる。また、 z_0 は、風下方向へ減少する傾向にあるが、全実験の結果から判断すると、ばらつきは大きいもののほぼ一定値をとる傾向が認められた。

b) 水表面の抵抗係数

測定によって得られた風速分布に、式 (1) を適合させて算定された u_* と、 $z=10\text{m}$ における風速 U_{10} の比、

$$C_D = \left(\frac{u_*}{U_{10}} \right)^2 \quad (2)$$

で定義される水面の抵抗係数 C_D を評価した。ここで、

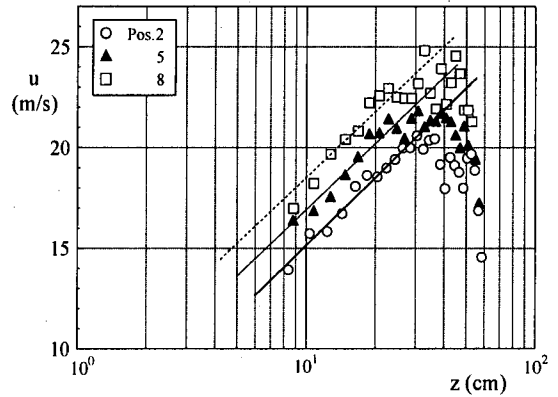


図-4 平均風速の鉛直分布 (Run6)

U_{10} の値は得られた u_* と z_0 を用いて式 (1) から算定された。図-5 は、 C_D と U_{10} の関係を示す。図中には、既往の研究において提案された経験式³⁶⁾も示されている。本実験の結果は、 U_{10} が小さい場合いずれの経験式からも大きく外れるが、 U_{10} が十分大きくなると Kondo⁴⁰⁾ によって提案された高風速域の経験式

$$C_D = 7.30 \times 10^{-5} U_{10} \quad (25.0\text{m/s} \leq U_{10}) \quad (3)$$

に漸近する傾向を示している。水面の抵抗係数の評価は、工学的にも大きな意義があるため、その算定が容易であるように、これまで C_D は U_{10} に対してまとめられてきた。しかしながら、無次元量 C_D が次元量 U_{10} のみによって普遍的に表わされるという考え方は、かなり疑問の余地がある。事実、 C_D を U_{10} で表わした場合、図-5 に示された様に多くの経験式が提案されており、著者らのデータも物理的理由は不明だが他のデータとの間に若干の相違が見られる。草場⁴¹⁾ は、風と風波の場を局所平衡の状態にあると考え、そのような場の統計的性質は4つの物理量、風の摩擦速度 u_* 、重力加速度 g 、風波のエネルギー E および風波の卓越振動数 $2\pi/T_p$ で決まるとしている。そして、この4つの物理量から独立な2つの無次元量 $\bar{E} = E(2\pi/T_p)^4/g^2$ および $\bar{u} = (2\pi/T_p) u_*/g$ を導入している。 \bar{u} は沖合い海域での u_w/c と同義であり、波風係数と呼ばれる。草場は、水面上で対数分布則が成立している場合でも水面抵抗ないし大気から海洋への運動量輸送は u_w/c に依存するとして、抵抗係数 C_D を u_w/c に対して評価している。

図-6 は、 C_D を草場⁴¹⁾ が提案した無次元摩擦速度 u_w/c に対してプロットしたものである。二次元規則波上に風応力のみを作用させた場合、全体としては図中に示す近似曲線によって表される⁴²⁾。しかしながら、抵抗係数 C_D を草場らが提案した波風係数 u_w/c でまとめた場合、 u_w/c

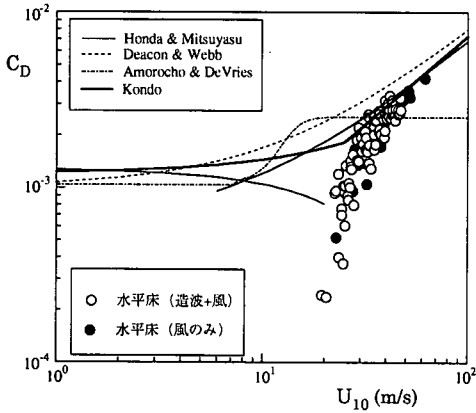


図-5 C_D と U_{10} の関係

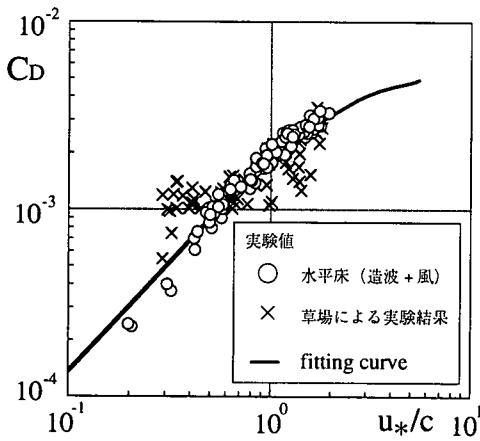


図-6 C_D の $u*/c$ に対する普遍性

の値は極めて狭い範囲に限られる。そのため、 C_D に対して $u*/c$ で十分に精度良く表すことが可能であるのかという問題が今後残されている。

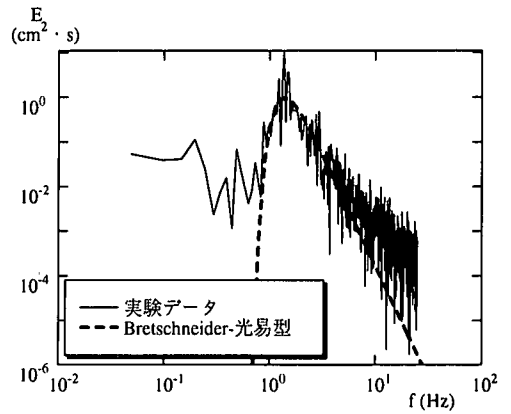
(2) 波浪場のスペクトル

風波に対する Bretschneider-光易型スペクトルは、次式で表される。

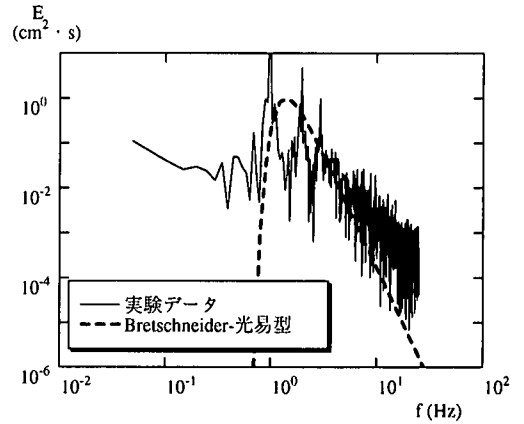
$$E(f) = 0.258 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^4] \quad (4)$$

ここで、 $E(f)$ は周波数スペクトル、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{1/3}$ は有義波周期、 f は周波数である。式(4)は次のように無次元表示される。

$$\tilde{E}(\tilde{f}) = 0.258 \tilde{f}^{-5} \exp(-1.03 \tilde{f}^4) \quad (5)$$



(a) Run3



(b) Run8

図-7 波浪場のスペクトル

図-7(a), (b)は、それぞれ表-1におけるRun3およびRun8のPos.2における波のスペクトルを示したものである。図中の破線は風波に対するBretschneider-光易型スペクトルを適当に平行移動させ重ねたものである。図-7(a)の風のみの場合、実験波は実際の海洋における風波と比較しても十分に広い周波数帯にわたって発生していることがわかる。また、造波した規則波に風波を加えた図-7(b)の場合においても一部エネルギーが低下する箇所が見られるものの、全体としては十分に広い周波数帯にわたって波が発生していることがわかる。以上のことから、本研究における実験波は、現地での風波の場を十分に再現しているものと考えられる。

(3) 沖合い海域で発生する飛沫の濃度

a) 飛沫濃度の輸送形態

図-8は、Run1~9の実験条件の下で得られた飛沫濃度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。図中の縦座標は、現地への適用性を考慮して無次元高さ z/H で表されている。飛沫濃度 C は次

式で求められている。

$$C = \frac{q}{\rho A t u(z)} \quad (6)$$

ここで、 $q(g)$: 飛沫量で、測定前後の円筒容器の質量差、 $\rho(g/cm^3)$: 水の密度、 $A(cm^2)$: 円筒容器の断面積、 $t(s)$: 曝露時間、 $u(z)(m/s)$: 高さ z における風速である。図は、白波を伴う碎波が風下方向に一樣に発生する様な場では、飛沫濃度 C の風下方向の変化は、鉛直方向の変化に比べて極めて小さいことを示している。従って、風下方向の飛沫濃度の変化を無視し、平均風速の鉛直成分は十分小さいと仮定すると、飛沫濃度 C は鉛直方向の乱流拡散フラックスと沈降フラックスが釣り合った式

$$\frac{\partial}{\partial z}(w_0 C) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial C}{\partial z}\right) = 0 \quad (7)$$

で支配される。ここで、 w_0 は飛沫粒子の沈降速度、 K は乱流拡散係数である。波高 H で無次元化された鉛直座標 $\bar{z}(=z/H)$ を用い、 $\bar{z} \rightarrow \infty$ で鉛直フラックスが 0 であるという条件を用いると

$$\frac{\partial C}{\partial \bar{z}} + \frac{w_0 H}{K} C = 0 \quad (8)$$

を得る。この微分方程式の解として次式を得る。

$$C = C_* \exp \int_1^{\bar{z}} -\frac{w_0 H}{K} d\bar{z} \quad (9)$$

ここで、 C_* は $\bar{z}=1$ つまり $z=H$ における飛沫濃度である。式 (9) から、飛沫の沈降速度 w_0 の z への依存性が明らかになれば、ラウスの浮遊砂濃度の算定にならって、

$$K = \kappa u_* z \quad (10)$$

とおくことにより、飛沫濃度の鉛直分布を半理論的に得ることができる。

b) 飛沫粒径と沈降速度の評価

飛沫の沈降速度は、その粒径に依存すると考えられる。従って、飛沫粒径の空間分布を明らかにすることが、沈降速度に関する知見を与えることになる。本研究では、飛沫粒径 $D(mm)$ を測定するために雨滴紙を用いたが、雨滴紙上の飛沫痕径 $D_s(mm)$ は、飛沫粒径とは異なる。

写真-2 は、雨滴紙により得られた飛沫痕の鉛直分布の

一例を示す。これにより飛沫は鉛直上方に行くほど小さな粒径となって飛散することがわかる。佐粧ら⁴³⁾は、無風の場合の雨滴痕径 D_s と雨滴粒径 D との関係を明らかにした。その関係を図-9 に示す。図中には、佐粧らによる実験値、経験式および本研究で適用した曲線が示されている。彼らは経験式として

$$m = 0.043 S \quad 0.1 mg \leq m \leq 1.0 mg \quad (11)$$

$$m = 0.07 S - 0.635 \quad 1.0 mg < m \leq 12.0 mg$$

を提案している。ここで、 m は雨滴の質量 (mg) で、 S は雨滴痕面積 (mm^2) である。雨滴を球形、雨滴痕を円形と仮定し、 $m = \rho \pi D^3 / 6$ 、 $S = \pi D_s^2 / 4$ を用いて式 (11) から D と D_s の関係を求めると近似的に

$$D = 0.42 D_s^{2/3} \quad (12)$$

の関係があることがわかる。

図-10(a), (b) は、Run3 および Run8 において得られた雨滴紙上の飛沫痕、および飛沫痕を画像解析することによって得られた単位時間、単位面積当たりに輸送される飛沫粒径の個数 N の分布を示す。図中、 z は平均水面からの鉛直距離である。水表面の近傍では、比較的大きな粒径の飛沫から小さな飛沫まで広範囲に分布しているが、上方に行くほど小さな粒径の飛沫が占める割合は増加する。

図-11(a), (b) は、得られた飛沫個数の対数値を縦軸に、飛沫粒径を横軸にプロットしたものである。図中の●印は、同じ個数密度をとる飛沫の中で、最大粒径 D_m を示している。また、図中の実線は●印のデータに対して、最小二乗近似を施すことにより求めたものである。図より、個数分布は、粒径の増加とともに指数関数的に減少することが分る。図中の近似曲線を用いて、単位時間、単位面積当たりに輸送される粒径 D の飛沫の質量 $M(g/cm^2 \cdot s)$ を次式で算定する。

$$M = \rho \frac{\pi}{6} D^3 N / 1000 \quad (13)$$

図-12 は、飛沫質量 M と飛沫粒径 D との関係を示す。図より、輸送される飛沫量は上に行くほど減少する。また、各々の z において、質量 M が最大となる粒径が存在することがわかる。この粒径を飛沫の代表粒径として D_R と定義する。その D_R の値も上に行くほど小さくなることがわかる。

図-13 は、Run2, 3, および 8 で得られた、飛沫の代表粒径 D_R の鉛直分布を示す。図から、白波を伴い、一樣

風速
小 ← → 大

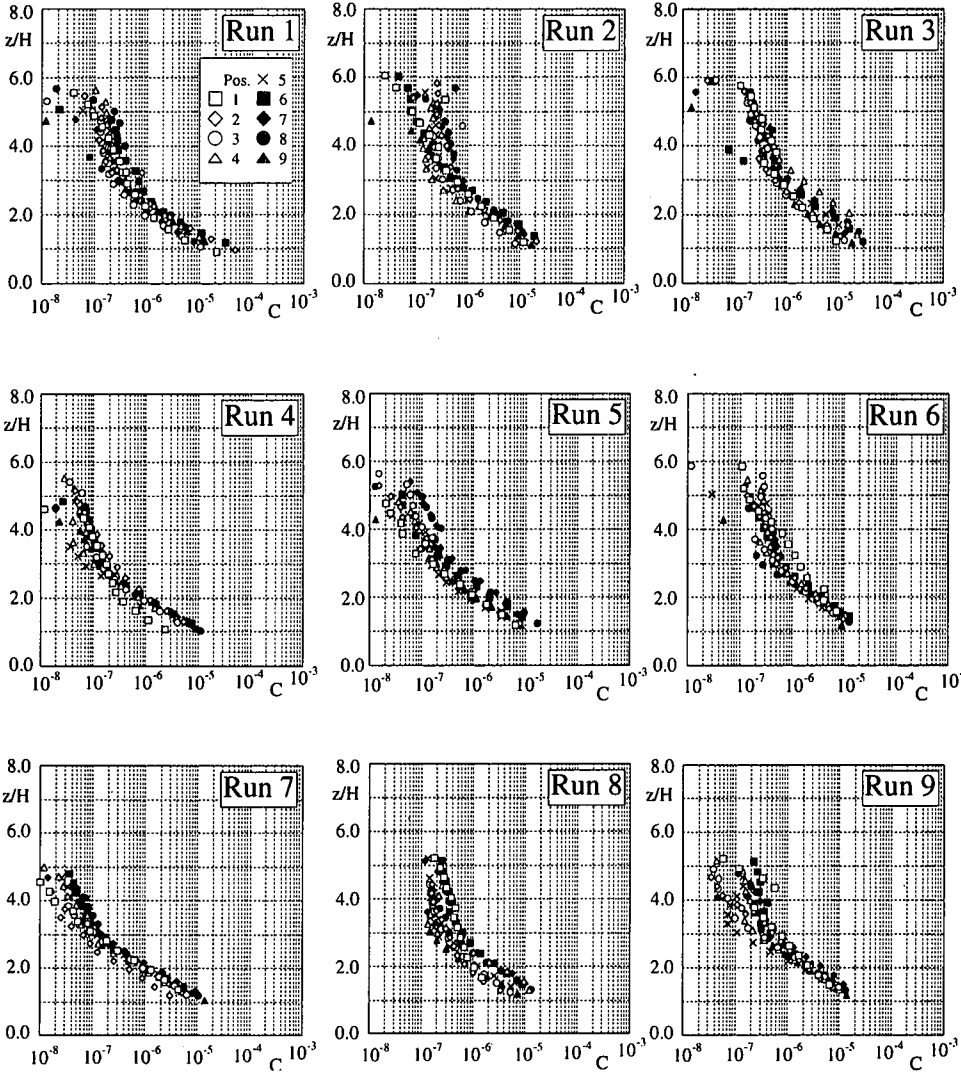


図-8 飛沫濃度の鉛直分布

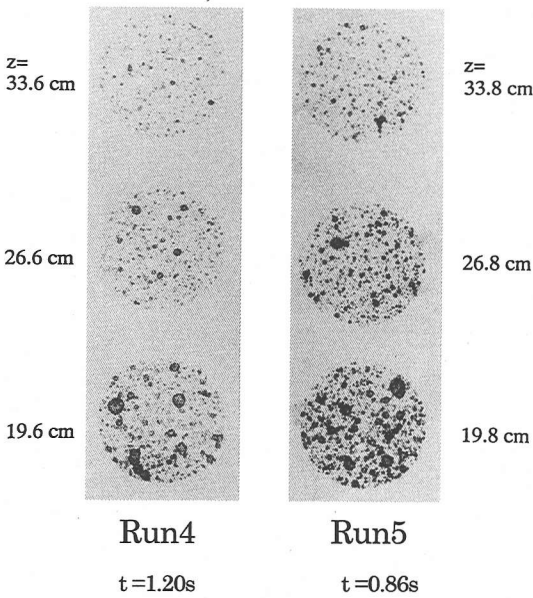


写真-2 飛沫痕の鉛直分布 (Pos.5)

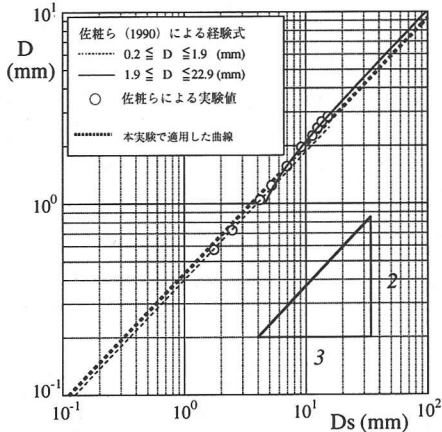


図-9 D_s と D の関係 (佐粧ら)

に碎波が進行する水面上では、飛沫の代表粒径 D_R は z^{-1} に比例して減少することがわかる。したがって、 $z=H$ における飛沫の代表粒径を D_* とすると、

$$D_R = D_* z^{-1} \quad (14)$$

となる。

雨滴の沈降速度 w_0 と雨滴粒径 D との関係については、Best⁴⁴⁾、藤間他⁴⁵⁾ および村本他⁴⁶⁾ 等の研究がある。Best によって提案された経験式は、次式で表される。

$$w_0 = 9.58 \left[-\exp\left\{-\left(D/1.77\right)^{1.147}\right\} \right] \quad (15)$$

ここで、 w_0 は (m/s)、 D は (mm) の次元である。

図-14 は、雨滴に対する w_0 と D との関係 Best の経験式 (15) および既存の実験結果について示したものである。飛沫の代表粒径の範囲は、 $D_R \leq 2.5$ mm である。従って、 $D_R = D$ と仮定すると、Best の経験式は、次式で十分近似することができる。

$$w_0 = 5.50D \quad (16)$$

ただし、式 (16) の係数は (m/mm·s) の次元をもつ。従って、 w_0 の z に対する依存性は式 (14) から

$$w_0 = 5.50D_* \tilde{z}^{-1} \quad (17)$$

で表わされることになる。

以上のことから、飛沫濃度 C の分布を表す式として、式 (9) に式 (10) と式 (17) を代入することにより、

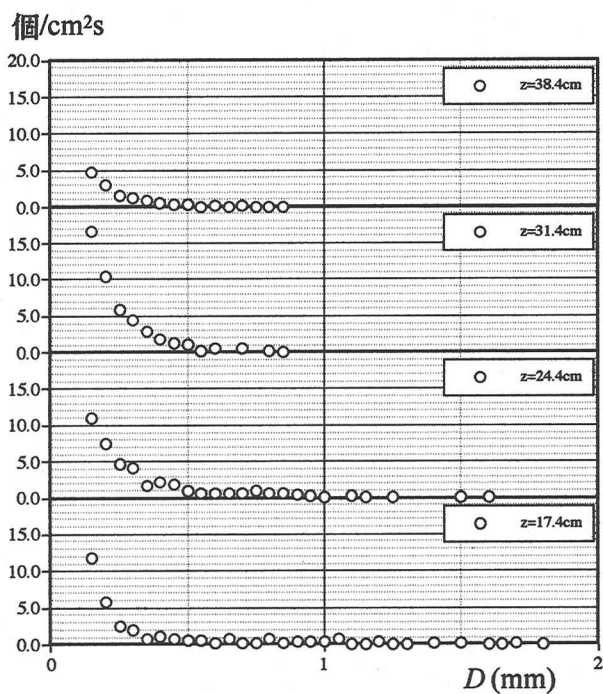
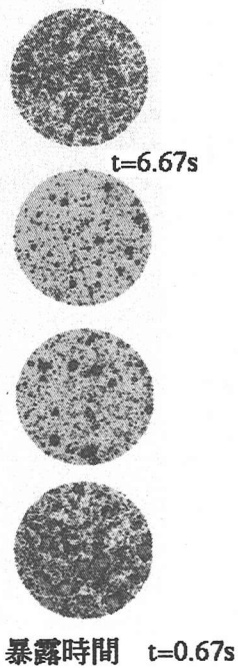
$$C = \frac{C_*}{\exp(\alpha/\kappa)} \exp\left(\frac{\alpha}{\kappa \tilde{z}}\right), \quad \alpha = \frac{5.50D_*}{u_*} \quad (18)$$

が得られる。

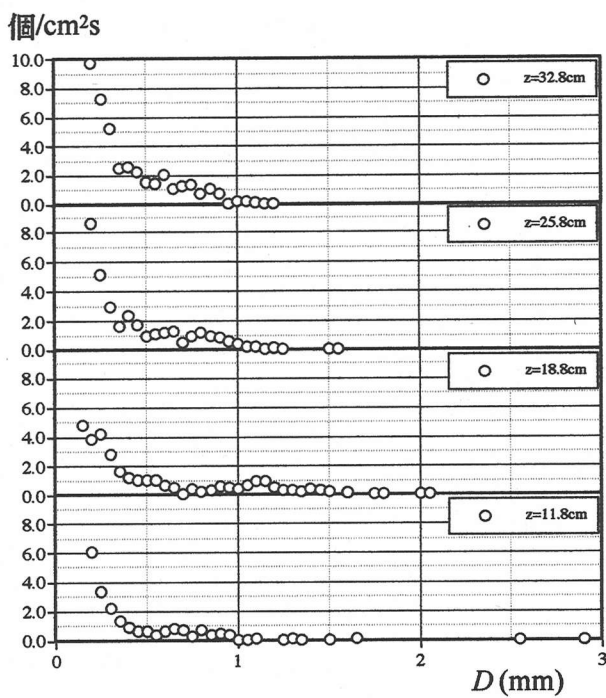
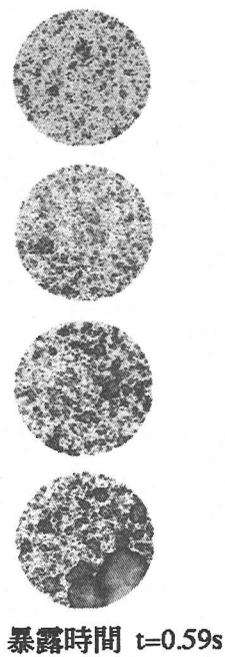
c) 飛沫濃度の評価

図-15 は、Run1 で得られた飛沫濃度の鉛直分布に式 (18) を適合させたものである。この場合、 C_* は 6.0×10^5 、 α は 3.04 である。飛沫濃度式 (18) は、実験値とよく一致していることがわかる。このように、飛沫濃度分布に式 (18) を適合させて求めた α の値と u_* の値から、 D_* を算定することができる。各実験で得られた D_* を風下方向に平均した値 \bar{D}_* を水の表面張力 T を用いて無次元化し、 \bar{u}_*/c に対してプロットしたものが図-16 である。無次元化された \bar{D}_* の値は \bar{u}_*/c に強く依存し、その約 2.5 乗に比例して増加することがわかる。すなわち、 $z=H$ における飛沫の粒径は水面に作用する摩擦速度の約 0.5 乗に比例して増加することを示している。 α の値は多少ばらつきがあるものの、全実験データからはほぼ 3.6 の値をとることが明らかとなった。 C_* の値も飛沫濃度の鉛直分布に式 (18) を適合させることにより算定することができる。

図-17 は、 C_* を風下方向に平均することにより得られた値 \bar{C}_* を \bar{u}_*/c に対してプロットしたものである。この図から \bar{C}_* は次式で与えられることがわかる。

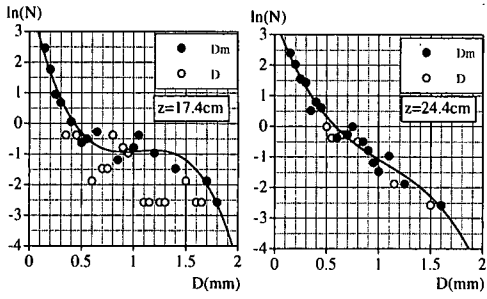


(a) Run 3

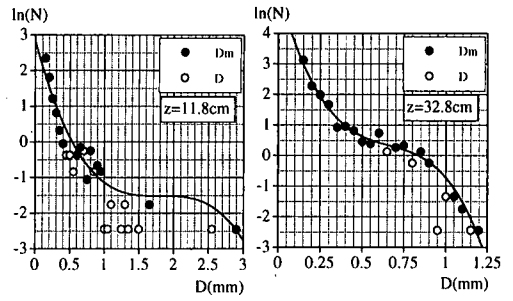


(b) Run 8

図-10 雨滴紙上の飛沫痕, および飛沫個数と飛沫粒径との関係



(a) Run3



(b) Run8

図-11 飛沫個数の対数値と飛沫粒径との関係

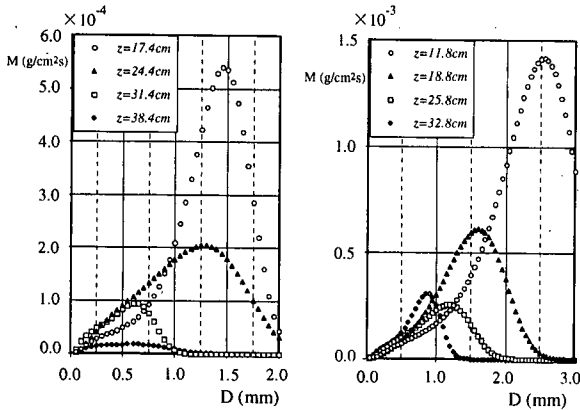


図-12 飛沫質量と飛沫粒径との関係

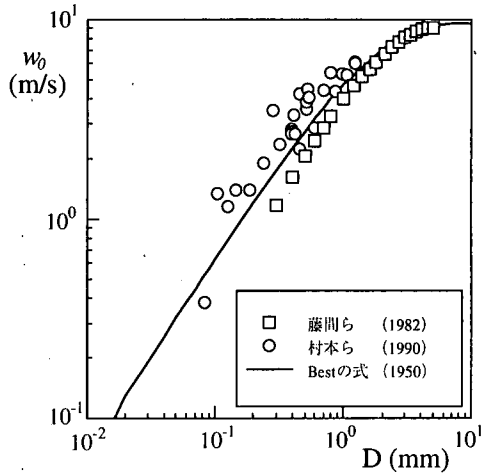


図-14 飛沫粒径と沈降速度との関係

$$\bar{C}_* = 1.42 \times 10^{-4} (\bar{u}_* / c)^2 \quad (19)$$

図-18 は各測定断面で得られたすべての飛沫濃度分布を \bar{C}_* と α を用いて規格化し、式 (18) との適合性を示したものである。飛沫濃度分布は式 (18) で充分良く表されていることがわかる。

沖合海域において白波が一様に発生している場合、水表面に作用する摩擦速度 u_* や $z=H$ における飛沫濃度 C_* は風下方向に一様であると考えられる。そのような場合、経験式 (19) における \bar{C}_* や \bar{u}_* は局所量 C_* や u_* で置き換えることが可能となる。従って、 $\alpha=3.6$ と式 (19) を式 (18) に代入することにより、沖合い海域での白波砕波上の飛沫濃度分布は、

$$C = \frac{1.42 \times 10^{-4} (u_* / c)^2 \exp \frac{3.6}{\kappa z}}{\exp(3.6 / \kappa)} \quad (20)$$

で与えられる。

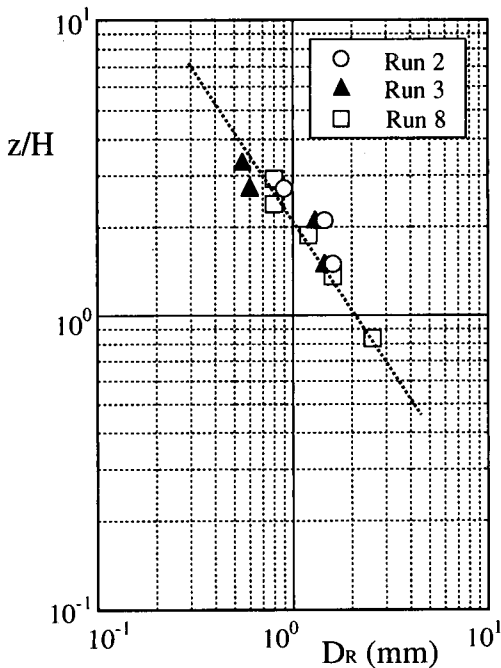


図-13 飛沫の代表粒径の鉛直分布

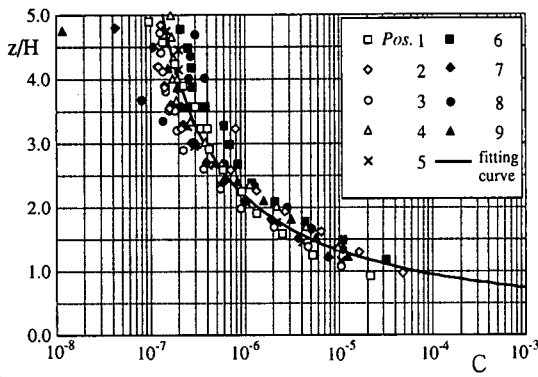


図-15 飛沫濃度の実験値と解析解との適合性 (Run1)

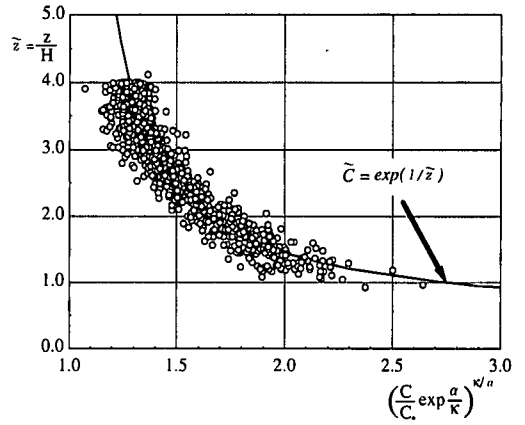


図-18 沖合い海域における飛沫濃度分布

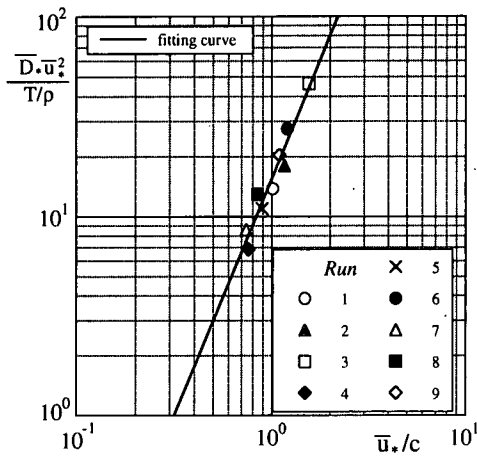


図-16 無次元摩擦速度 u_* / c と無次元 \bar{D} との関係

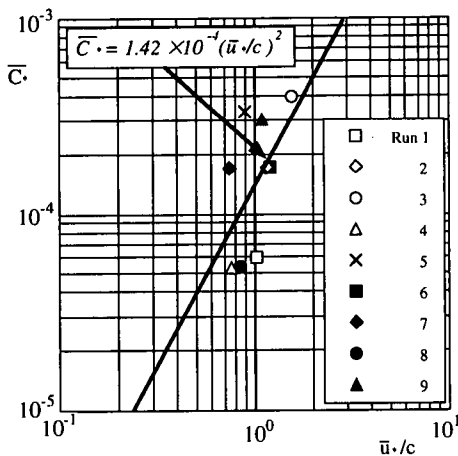


図-17 $z=H$ における飛沫濃度 \bar{C} と無次元摩擦速度 u_* / c との関係

4. 結論

本研究で得られた成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 飛沫を伴う強風下において水表面上の抵抗係数 C_D は、無次元摩擦速度 u_* / c に対して整理することにより、普遍的に評価することが可能である。
- (2) 飛沫の沈降と拡散が釣り合う場が形成される。この場合、飛沫の粒径と沈降速度の関係は

$$w_0 = 5.50 D_* \bar{z}^{-1}$$

で表される。

- (3) 飛沫濃度分布は、

$$C = \frac{C_*}{\exp(\alpha/k)} \exp\left(\frac{\alpha}{k\bar{z}}\right)$$

$$C_* = 1.42 \times 10^{-4} (u_* / c)^2, \alpha = 3.6$$

で表される。

以上のことから、波高 H および無次元摩擦速度 u_* / c が既知の沖合い海域において、任意の高さでの飛沫濃度を求めることが可能となる。

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。

参考文献

- 1) 熊本自然災害研究会編：台風 19 号による電力設備被害について，熊本自然災害研究会研究発表要旨集，pp. 7-11, 1992.
- 2) 目黒公郎，永田茂，立川貴重，片山恒雄：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. 194-201, 1993.
- 3) 田中正昭，鳥羽良明：台風 9119 号による塩害と内陸への塩分侵入量について，京都大学防災研究所年報，第 36 号 B-2，pp. 103-119, 1993.
- 4) 入江功他 13 名：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)，研究成果報告，pp. 1-172, 1994.
- 5) Hayami, S. and Toba, Y.: Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (I). Experiments at still sea water surface, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 14, pp. 145-150, 1958.
- 6) Toba, Y.: Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (II). Theoretical study on the shape of floating bubbles, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 15, pp. 121-130, 1959.
- 7) Toba, Y.: Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (III). Study by use of a wind flume, *Memoirs. Coll. of Sci., Univ. Kyoto, Ser. A*, Vol. 29, pp. 313-344, 1961.
- 8) Toba, Y. and Tanaka, M.: Study on dry fallout and its distribution of giant sea-salt nuclei in Japan, *J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II*, Vol. 41, pp. 135-144, 1963.
- 9) Toba, Y.: On the giant sea-salt particles in the atmosphere I. General features of the distribution, *Tellus*, Vol. 17, pp. 131-145, 1965.
- 10) Toba, Y.: On the giant sea-salt particles in the atmosphere II. Theory of the vertical distribution in the 10m layer over the ocean, *Tellus*, Vol. 17, pp. 365-382, 1965.
- 11) Toba, Y.: On the giant sea-salt particles in the atmosphere III. An estimate of the production and distribution over the world ocean, *Tellus*, Vol. 18, pp. 132-145, 1966.
- 12) 鳥羽良明，田中正昭：塩害に関する基礎的研究 (第一報)，海塩粒子の生成と陸上への輸送モデル，京都大学防災研究所年報，第 10 号 B，pp. 331-342, 1967.
- 13) 中島暢太郎，鳥羽良明，田中正昭：塩害に関する基礎的研究 (第二報)，巨大海塩粒子連続サンプラーの試作と測定例，京都大学防災研究所年報，第 11 号 B，pp. 19-28, 1968.
- 14) 田中正昭，鳥羽良明：塩害に関する基礎的研究 (第三報)，海塩粒子の三次元分布の解析，京都大学防災研究所年報，第 12 号 B，pp. 201-212, 1969.
- 15) 田中正昭：塩害に関する基礎的研究 (第四報)，海岸近くにおける海塩粒子の分布，京都大学防災研究所年報，第 13 号 B，pp. 445-456, 1970.
- 16) 田中正昭：塩害に関する基礎的研究 (第五報)，京都大学 防災研究所年報，第 14 号 B，pp. 1-12, 1971.
- 17) 鳥羽良明：海塩粒子—大気と海洋との相互作用の一要素として，海と空，Vol. 41, pp. 71-118, 1966.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 仲座栄三，津嘉山正光，照屋雅彦：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.
- 21) 灘岡和夫，内山雄介，東川孝治：大気および土壌中の塩分からみた砂浜海岸植生環境について，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 1171-1175, 1996.
- 22) 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.
- 23) 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，1992.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 滝川清，山田文彦，外村隆臣，松本健作，坂本鋼治：内海沿岸域における飛来塩分特性とその対策について，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 1176-1180, 1996.
- 27) 山田文彦，滝川清，外村隆臣：有明海沿岸域における飛来塩分の拡散機構とその数値モデルに関する研究，海岸工学論文集，第 44 巻，pp. 1216-1220, 1997.
- 28) 滝川清，山田文彦，外村隆臣，荒木宣博：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, 1998.
- 29) 仲座栄三，津嘉山正光，北村康司，日野幹雄：植生帯を有する海岸における飛来塩分量に関する研究，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 1181-1185, 1996.
- 30) 仲座栄三，津嘉山正光，北村康司，増田悦久，和田誠，糸数義直：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, 1998.
- 31) 松永信博，植田操，水井宏征，杉原裕司：碎波上の強風によって輸送されるしぶき量，水工学論文集，第 38 巻，pp. 499-504, 1994.
- 32) Matsunaga, N., Hashida, M., Mizui, H. and Sugihara, Y.:

- Quantity of spray transported by strong wind over breaking waves, *Proc. 24th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 219-231, 1994.
- 33) 松永信博, 檀田操, 杉原裕司: 巻き波砕波によって発生した飛沫の風による輸送, 九州大学大学院総合理工学研究科報告, 第16巻, pp. 353-358, 1994.
- 34) 松永信博, 檀田操, 鶴崎賢一: 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, 1995.
- 35) 松永信博, 檀田操, 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.
- 36) 松永信博, 檀田操, 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. 4046-4050, 1994.
- 37) Hashida, M., Matsunaga, N. and Irie, I.: Landward Transport of Spray Generated from a Wave Absorbing Sea Wall, *Proc. 25th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 1022-1033, 1996.
- 38) 浅井正, 村上和男, 西守男雄: 波浪条件や海底性状の変化が飛沫の発生に与える影響に関する2次元水路実験, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1191-1195, 1996.
- 39) 光易恒: 海面に及ぼす風の応力, 第19回水工学に関する夏期研修会講義集, pp. 1-1-B1-17, 1983.
- 40) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Boundary-Layer Met.*, Vol. 9, pp. 91-112, 1975.
- 41) 草場忠夫: 局所平衡下の風と風波, 九州大学学位論文, 1989.
- 42) Matsunaga, N., Hashida, M. and Kawakami, H.: Wind-Induced Waves and Currents in a Nearshore Zone, *Proc. 25th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 3363-3377.
- 43) 佐粒純男, 森太郎, 小野崎統, 斎藤貴志, 筒井窓司: ろ紙による降水粒子の質量測定の精度について, 天気, 第37巻, 1号, pp. 61-66, 1990.
- 44) Best, A. C.: Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 76, pp. 302-311, 1950.
- 45) 藤間克典, 井原俊夫, 山本博美, 真鍋武嗣, 古濱洋治, 北村勝巳, 今井雄司: マイクロフォン型雨滴粒径分布測定器の人工落下水滴による較正方法とその水滴形状の撮影結果, 電波研究所季報, Vol. 28, No. 147, pp. 503-519, 1982.
- 46) 村本健一郎, 椎名徹, 中田克男, 土合昌文: 画像処理による雨滴の大きさと落下速度の測定, 電子情報通信学会春季全国大会発表, pp. 7-186, 1990.

(1998. 11. 12 受付)

A RELATIONSHIP BETWEEN SPRAY QUANTITY AND WIND SHEAR STRESS ON WHITE CAPS UNDER STRONG WINDS

Nobuhiro MATSUNAGA, Misao HASHIDA and Ken-ichi UZAKI

When a large amount of sea water spray is transported landward by a strong wind, severe salt damages will be caused in the wide coastal region. In this study, the quantity of spray generated from white caps under strong winds has been investigated experimentally by using a wind-wave tank. Spray quantity depends strongly on the friction velocity on the water surface and the settling velocity of spray. The drag coefficient on white caps is given by an increasing function of the wind-wave factor. It is shown from image data processing that the settling velocity of spray decreases in inverse proportion to the height from water surface. The vertical profiles of spray concentration can be expressed universally by using these results.