

# 港湾技術資料

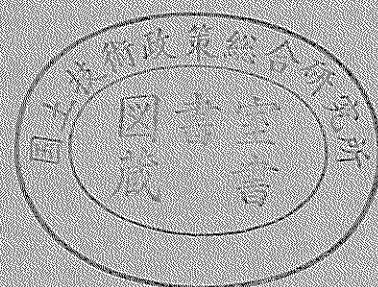
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 843      Sep. 1996

飛沫の発生と輸送に関する二次元水路実験

浅	井		正
西	守	男	雄
村	上	和	男

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

1. はじめに .....	5
2. 水理模型実験 .....	5
2.1 実験施設および模型の概要 .....	5
2.2 実験方法 .....	6
2.3 実験ケース .....	8
3. 実験結果と考察 .....	9
3.1 飛沫量の鉛直分布に与える影響 .....	9
3.2 総飛沫量の水平分布と飛沫の伝搬特性 .....	13
3.3 飛沫の発生量の変化特性 .....	17
4. おわりに .....	21
参考文献 .....	21
記号表 .....	22
付 録 .....	23

# Experimental Study on Production and Transport of Sea Salt Spray

Tadashi ASAI\*  
Danwo NISHIMORI\*  
Kazuo MURAKAMI\*\*

## Synopsis

Sea salt spray is the small particle of seawater, splashed up by wind and wave actions. A spray, transported to inland area by wind, gives several damages to those area, because the spray contains salinity. From this point of view, two dimensional model experiment is carried out to describe the production of spray and its transportation to inland area. In this study, effects of wind, wave action and bottom slope upon the spray production are discussed.

Summary of this paper is shown as follows.

- (1) Amount of spray production is increased exponentially by the increase of wind speed. Spray production is also influenced by incident wave condition. Amount of spray production tends to increase proportionally to the square of incident wave steepness, if the breaker type is similar.
- (2) Large amount of spray is produced, when wave breaking is forced in the offshore side of breaker zone. In this study, plunging breaker is observed in the case of forced wave breaking, because bottom slope changes rapidly. Splash and horizontal roller due to the plunging breaker heavily disturb water surface. Large amount of spray is splashed up from this disturbed area. Effect of surface disturbance can be expressed by using the wave energy dissipation by wave breaking, which includes both of the effects of bottom slope and incident wave condition.
- (3) When wave breking is forced in the offshore, only the small part of spray is transported to shoreline. Large amount of spray drops down to seawater, because the diameter of spray splashed from plunging breaker is larger than the spray from surging breaker. Comparing the results between the case when wave breaking is forced in the offshore and not, difference of spray amount at shoreline becomes much smaller than that at breaker zone.
- (4) Amount of spray production shows a good relationship with wave energy dissipation ratio associated to wave breaking. Wave energy dissipation ratio is expressed by the terms of incident wave action, breaking water height and bottom slope.

**Key Words** : Sea salt spray, Salt damage, Wave breaking, Energy dissipation, Model experiment

---

\* Member of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division

\*\* Director of Special Research (Environmental Issues)  
(Former Chief of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division)

# 飛沫の発生と輸送に関する二次元水路実験

浅井 正\*  
西守 男雄\*  
村上 和男\*\*

## 要 旨

飛沫とは、風や波により乱れた海面から飛散した水滴が海塩粒子として空中に浮遊する状態にあるものをいう。これらの陸上部への伝搬が周辺地域に塩害をもたらす原因となっており、塩害を抑制する上で沿岸域での飛沫の発生と陸上部への輸送機構の解明が重要である。このような観点から、本研究では、飛沫の発生およびその輸送のメカニズムを室内実験により明らかにするとともに、飛沫の発生量と波浪や風等の自然条件の関係について検討した。さらに、強制砕波による飛沫の発生・輸送量の変化についても検討し、海岸性状の変化にともなう飛沫への影響について比較・検討を行った。

今回の研究から明らかになった主な結論は次に示すとおりである。

- (1) 風速の増加により、飛沫の発生量は指数的に増加する。ただし、同一の風速条件下でも、入射波の条件によっても飛沫の発生量が25倍程度変化する場合があった。飛沫の発生量は入射波の波形勾配の2乗に比例して増加する傾向にある。また、砕波の形式がPlunging型(巻き波)のときに、他の砕波形式の場合とくらべて飛沫の発生量が大きくなる。
- (2) 強制砕波を行うことにより飛沫の発生量が大きくなる。これは強制砕波地点の前後で水深や海底勾配といった海底地形条件が急変するため、Plunging型の砕波が誘発されるからである。飛沫の発生量に与える海底性状の影響は、波浪変形および砕波形式への影響として考慮することにより入射波の影響と同様に扱うことができる。
- (3) 強制砕波を行った場合に発生する飛沫の陸上への伝搬率は、斜面床のみを設置した場合と比べて非常に小さい。このため、砕波帯内で2~10倍程度の値を示す飛沫量の差が、汀線上では2倍程度まで減少する。強制砕波を行うことによって砕波帯を沖側に移動させると、汀線から砕波帯までの距離の増大にともなって背後地まで伝搬される飛沫量が減少する傾向にある。このため、斜面床のみを設置した場合より砕波点の位置が1.5~2倍沖側に移動する場合には強制砕波を行った方が伝搬量が小さくなるケースもみられた。
- (4) 飛沫発生量の変化特性は、砕波時のエネルギー逸散率を用いて表すことができる。エネルギー逸散率とは砕波による乱れの強さを入射波高、砕波水深および海底勾配の条件を使って表現するものである。したがって、このパラメータを用いることにより、飛沫の発生量に与える入射波および海底性状の影響を表すことができるといえる。

キーワード：飛沫、塩害、砕波、エネルギー逸散、模型実験

\* 海洋環境部環境評価研究室

\*\* 特別研究官（環境担当）

（前海洋環境部環境評価研究室長）

## 1. はじめに

海岸は、地域住民の海とのふれあいの場であり、良質な景観をもった空間として重要視されている。我が国の海岸整備は背後地の安全を第一の目的として実施されてきたが、現在では、快適な海岸づくりも重要な目的の一つとして求められるようになってきている。

たとえば、海岸護岸は、高波の襲来や海岸線の浸食から背後地の安全を守るだけでなく、海から陸地へ輸送される飛沫（海塩粒子）を遮断することにより住民の快適な生活を塩害から守る役目も果たしている。海から輸送される飛沫は、周辺の民家における金属の錆、庭木や樹木および農作物に影響を与えるだけでなく、コンクリート構造物や電柱の碍子等にも悪影響を与えている。

この一方で、景観を高めたり、背後地から海岸へのアクセスを容易にするために、従前からある護岸の天端を低くする工夫がなされている。その代表例として面的防護があげられるが、これは潜堤と低天端式護岸を組み合わせることにより、低天端の構造物でも防災上の目的を果たせるようにしたものである。また、構造物による消波では、通常、砕波等にもなう渦や気泡、しぶきなどの生成に波エネルギーが消費されることを利用して波高を低減させている。このため、従前のように直立型の護岸を背後地の直前に設置して線的に防御する方法では、護岸前面で飛沫が発生するため、自然海浜の場合とくらべて飛沫の伝搬量が多くなりやすく、越波の影響も直接背後地におよぶようになる。そこで、面的防御を行って飛沫の発生地点を沖側に移動させることができれば、背後地へ輸送される飛沫量への影響を軽減でき、自然海浜の状態に近づけられるであろうと期待されている。しかし、この場合の砕波帯内の波浪特性の変化が飛沫発生量に与える影響についてもわからない点が多い。

そこで、著者らは、香川県津田海岸において背後地の飛沫量調査を行い、沿岸域の風や波浪などの自然条件との関係について検討を行っている（村上ら、1994）。この結果、沿岸域に輸送される塩分量が風向と風速から説明されることを示した。また、離岸堤等の海岸性状や海岸での植栽により、飛沫量の軽減が可能であることを示した。さらに、植栽の効果を検討するために、茨城県波崎町において海岸に疑似植栽（防風ネット）を設置し、ネット前後で飛沫量の空間分布の計測を行った（村上ら、1995）。この結果、疑似植栽への飛沫の吸着により背後地へ輸送される塩分量が30%程度減少することが確認された。しかし、疑似植栽の前面に発生する上昇流により飛沫が背後に運ばれるため、疑似植栽の設置だけでは飛沫

の輸送を完全に防ぐことは難しい。したがって、飛沫の発生量を抑える方法を検討し、複合的な対策を講じることが重要であるといえる。

飛沫の発生機構に関する代表的な研究として、鳥羽らによる一連の研究（たとえば Toba 1965a, Toba 1965b）がある。ただし、これらの研究では粒径が数ミクロン程度の粒子（海塩核）の発生・伝搬を対象としており、このような微細な粒子では海岸から数 km～数十 km の広い領域が伝達範囲として議論の対象とされる。このため、砕波帯からの飛沫の供給は線源にすぎないため小さいとみなし、風波により広領域で発生する飛沫だけを対象にすれば十分であるとして検討を行っている。これに対して、沿岸域周辺での飛沫の伝搬を取り扱う場合には、砕波帯で発生する粒径の大きな飛沫についても検討する必要がある。前述のように、海岸線付近では砕波帯からの飛沫の供給量が支配的となるため、砕波帯での飛沫の発生機構を明らかにすることが重要となる。沿岸域での飛沫の発生については、松永ら（1995）が風応力の計算結果から飛沫量の推定を行った例があるが、波浪条件が与える影響について検討されている例はほとんどない。

このような観点から、本研究では、飛沫の発生およびその輸送のメカニズムを室内実験により明らかにするとともに、飛沫の発生量と波浪や風等の自然条件の関係について検討するものである。さらに、強制砕波を行うために水中に構造物を設置して、飛沫の発生・輸送量の特性の変化について検討し、海岸性状の変化にともなう飛沫への影響について比較・検討を行った。

## 2. 水理模型実験

### 2.1 実験施設および模型の概要

模型実験は、港湾技術研究所の水質化学実験棟にある幅 1 m×長さ 22 m×高さ 2 m の造波装置付二次元風洞水槽で実施した。水路にはフラップ型造波装置が設置されており、最大波高 20 cm、周期 0.2～2 s の造波性能をもつ。また、送風機は、最大流量 15 m<sup>3</sup>/s の風を起こす能力をもつ。

図-2.1は、本実験における模型と計測機器の配置を示したものである。実験を通じて、水深は 50 cm で一定とした。海底勾配 1/30 の一様斜面模型床を造波機前面から 1.7 m 離して設置し、緩傾斜護岸の模型をそれぞれ配置した。模型縮尺は水平、鉛直ともに 1/30 である。海底性状の変化による影響を検討するために、水深を急激に浅くしてその領域で強制砕波を起こすようにした場合についても実験を行った。水深を浅くした領域は汀線から 3.2

mの位置に岸側端がくるように設置した。緩傾斜護岸模型は汀線の位置に法面がくるように設置した。実験に使用した模型は全てベニア合板製である。なお、水深を浅くする領域は、反射率を実際と合わせるために、表面に $\phi=1$  cm程度の穴を無数にあけて透過性をもたせている。

## 2.2 実験方法

### a) 水位変動の測定方法

水位変動の計測は、水路中の3ヶ所に設置された容量式水位計( $\eta_1 \sim \eta_3$ :計測技研製 C-600BNC)で測得した値を、水位計増幅器(計測技研製 CH-306)を用いて増幅することにより実施した。水位計の設置位置は図-2.1および表-2.1に示すとおりである。入射波の諸元は、一様勾配斜面床沖側の水平床部分に設置された2台の水位計( $\eta_1, \eta_2$ )から、2点法(合田ら 1976)を用いて入射波分離を行うことにより算出した。残りの1台の水位計( $\eta_3$ )は強制砕波地点の岸側に設置し、透過波の測定に

用いた。透過波の水位変動には砕波後の乱れが多く含まれているため、水位変動のrms値(分散の平方根)を用いて波高の代表値とした。なお、斜面床のみを設置されていない場合にも、比較対照のため、斜面床部分に設置した水位計を用いた水位計測を行っている。なお、この場合、水位計で取得される値は砕波帯の岸側での水位変動を表している。

水位変動記録はA/D変換ポートを用いて直接パーソナルコンピュータに内蔵されているハードディスクに収録した。各ケースにおいて、サンプリング周波数は50 Hzとし、造波後、波が安定してから48秒間の水位変動を記録した

### b) 砕波水深および砕波形式の測定方法

砕波水深および砕波形式の測定は、各実験ケースについて砕波点近傍での波形変化の様子を8 mmビデオを用いて20~30波ずつ撮影し、そのVTR画像を解析することにより実施した。

表-2.1 実験ケース

波高 $H_0$ (cm)	周期 $T_0$ (sec)	波形勾配 $H_0/L_0$	風速 $U$ (m/s)	飛沫量の計測位置 $x$ (m)			
				砕波帯内 $x_b$		汀線 $x_s$	背後地 $x_i$
				潜堤設置	斜面床		
10	1.0	0.064	10-11,11-12,12-13,13-	-3.2	-3.2	0.0	1.4
16		0.102	5-10,10-11,13-	-3.2	-2.4		
10	1.2	0.044	10-11,11-12,12-13,13-	-3.2	-2.4	0.0	1.4
16		0.071	5-10,10-11,13-	-3.2	-2.4		
10	1.4	0.033	10-11,11-12,12-13,13-	-3.2	-1.4	0.0	1.4
13		0.043	5-10,10-11,13-	-3.2	-2.4		
水位計の設置位置 (m)			風速計の設置位置 (m)				
$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$		$U_1$	$U_2$	$U_3$	
16.0	15.5	2.2	水面からの高さ 汀線からの距離	1.1 5.2	0.7 5.2	0.3 5.2	

※ 各計測機器の設置位置は岸向を正として汀線からの距離で示している。なお、砕波帯内での飛沫量の計測位置は、それぞれ強制砕波を行った場合と斜面床のみの場合の値を示す。

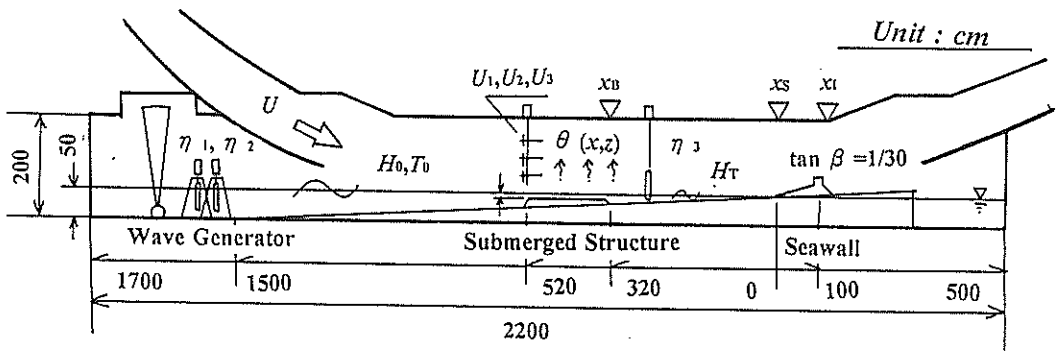
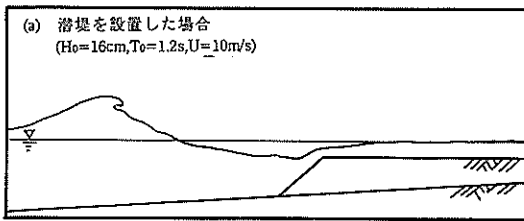


図-2.1 実験装置の概要

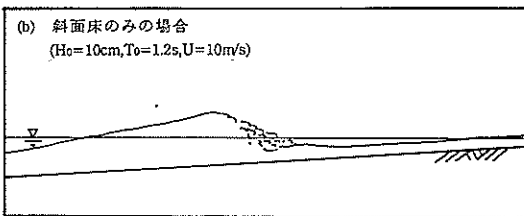
砕波水深の測定方法は次に示すとおりである。まず、VTR 画像から砕波点（表面から気泡が発生し始める点）が撮影されている画像を抽出し、ビデオプリンターを用いて出力した。その画像出力を用いて汀線から砕波点までの距離を計測し、砕波水深の値を算定した。図-2.2は、ビデオプリンターの画像出力をもとに、砕波点付近の水面形状をスケッチしたものである。(a)、(b)は図名に示す波浪条件での水面形状を示しており、それぞれ Plunging 型（巻き波）および Surging 型（砕け寄せ波）の砕波の代表例を表している。なお、本論文中に現れる Plunging 型砕波とは段差による急激な水深変化によって生じる強制砕波のことをいい、Splash および Horizontal Roller による強い水面の乱れをとまなう。この他の砕波形式の分類は、VTR 画像から Iversen (1952) の基準をもとに判定を行っている。なお、VTR 画像の例を付図-1として巻末に掲載している。

### c) 風速の測定方法

風速の計測は2つの項目について行った。1つめの項目は、水路内の代表風速の測定であり、飛沫の採取時に同時計測を行うことにより実施した。もう1つの項目は、陸上部での風速の鉛直分布の変化を詳細に検討するために、測線を細かくとった風速の計測である。なお、飛沫の採取時の代表風速と比較ができるように、2番目の項目の測定時にも、1番目の項目と同じ測定地点の風速を測定している。



(a) Plunging 型砕波  
( $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$ ,  $U=10\text{m/s}$ )



(b) Surging 型砕波  
( $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$ ,  $U=10\text{m/s}$ )

図-2.2 砕波変形の例

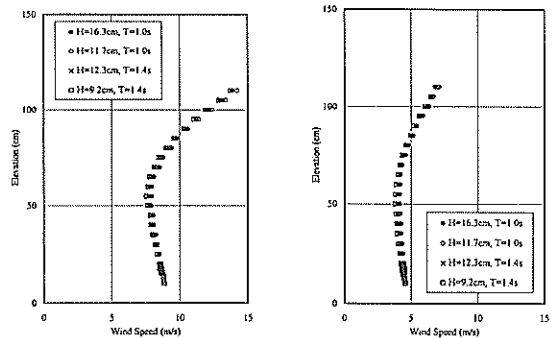
水路全体の代表風速の計測は、プロペラ式風速計（Young 社製 GILL PROPELLER ANEMOMETER MODEL 27106）を用いて実施した。汀線から5.2m 沖側の地点に同一断面の鉛直方向に3台の風速計 ( $U_1 \sim U_3$ ) を設置し、これらから得られた風速の平均値を用いて水路内の風速の代表値とした。風速計の設置位置は図-2.1および表-2.1に示すとおりである。このときの風速記録の収録は、水位変動記録と同じ装置を用いて水位変動との同時収録により実施した。なお、各風速計設置地点の風速は、48秒間のデータの平均値を用いて表している。

鉛直分布の詳細検討に用いる風速の値は、 $\phi=6\text{mm}$  のピトー管（理化精機工業製 AF-522-3）を各測点に設置して計測を行った。ピトー管の圧力差は微差圧伝送器（Fisher-Rosemount 社製1151DR）を用いて電圧に変換した。この電圧信号を A/D 変換器を用いて直接パーソナルコンピューター内のハードディスクに収録した。なお、各測点の風速は180秒間の平均値で与えている。

鉛直分布の計測を行う前に、造波を行った場合（入射波高2 ケース×入射波周期2 ケース）と行わない場合で汀線上の風速の鉛直分布を計測した。その結果、図-2.3に示すようにそれぞれの測点での風速の値にはほとんど差がみられなかった。これより、水面の粗度の変化による風速分布への影響は無視できるといえる。そこで、風速の鉛直分布の計測は、造波装置を作動させないで実施することにした。

### d) 飛沫の採取および分析方法

飛沫中の水分は、捕捉してもすぐに蒸発してしまうため、その量を直接計測するのが難しい。このため、現地では飛沫に含まれている塩分をトレーサーとして、塩分量の計測結果から間接的に飛沫中の水分量を求めることが多い。しかし、水路実験で飛沫のトレーサーとして塩



(a)  $U=9.2\text{m/s}$

(b)  $U=4.6\text{m/s}$

図-2.3 波浪条件が風速の鉛直分布に与える影響

化ナトリウムを用いることは、実験装置の保守管理上の理由からあまり好ましいと言えない。そこで、今回の実験では、蛍光染料をあらかじめ水路内に一様に溶かしておき、これをトレーサーとして用いることにより飛沫量の計測を行うことにした。なお、実験に使用した蛍光染料はウラニン（フルオレッセン・ナトリウム）である。

飛沫の採取は図-2.1に示す3つの断面で、乾式ガーゼ法を用いて実施した。各断面の汀線からの距離は表-2.1に示すとおりである。断面  $x_B$  の位置は碎波により最も飛沫の発生が激しい地点の岸側となるように選んでおり、断面  $x_B$ ,  $x_S$ ,  $x_1$  における飛沫量はそれぞれの飛沫の発生量および汀線までの輸送量、護岸模型背後への輸送量を表している。図-2.4に捕捉器の概要を示す。アクリル板で曝露面積  $A=0.1m \times 0.1m$  の枠を設け、その間を通過する飛沫をガーゼにより捕捉する。図に示すように同一断面に4個の飛沫捕捉器を設置した。各断面において、それぞれ2回ずつ飛沫量の計測を行い、その平均値を用いて飛沫量の鉛直分布を求めた。

図-2.5に飛沫量の分析手順を示す。実験後、一定時間  $t$  (min.) の間飛沫に曝したガーゼを蒸留水 (体積  $V=50$  ml) に浸し、よく攪拌させてガーゼ中の蛍光染料を溶出させる。この溶液の蛍光染料濃度  $c$  を蛍光光度計 (日立製 分光蛍光光度計 F-2000) を用いて計測する。この蛍光染料濃度  $c$  を水路内の蛍光染料濃度  $c_0$  と比較することにより、1分間内にガーゼを通過する単位面積あたりの飛沫量  $\theta(x, z)$  (ml/m<sup>2</sup>/min.) は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \theta(x, z) &= [q/c_0]/A/t \\ &= [(V \cdot c/a)/c_0]/A/t \\ &= (6250 \cdot c)/(c_0 \cdot t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

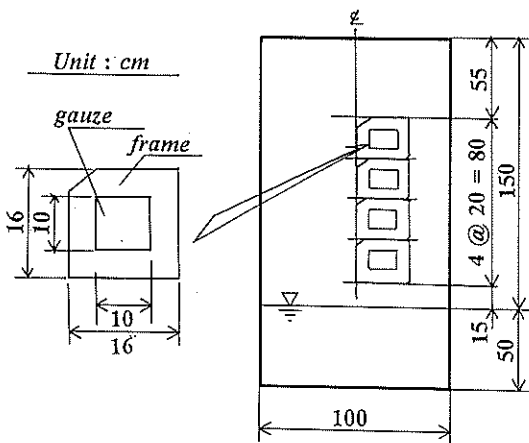


図-2.4 飛沫捕捉装置

ここで、 $x, z$ : それぞれ汀線での水面を原点としたときの水平および鉛直方向の距離であり、 $q$ : ガーゼに付着した飛沫中の蛍光染料の量 ( $=V \cdot c$ : mg),  $a$ : ガーゼから蒸留水への蛍光染料の溶出率である。 $a$  の値は20ppm ( $=c_0$ : 水路内の蛍光染料濃度) の規定溶液を噴霧したガーゼからの溶出率を計測し、その結果から  $a=80\%$  とした。

なお、水路内の蛍光染料濃度は、高濃度による濃度消光が起きない限界濃度をあらかじめ求めておき、これを越えない値として  $c_0=20$ ppm に設定した。水路内の蛍光染料濃度は実験が終了する度に水路内の4ヶ所で採水を行い、計測している。また、蛍光光度計による測定限界は2 ppb であり、これ以下の場合ではバックグラウンドの粉塵等の影響が無視できなかった。ガーゼの曝露時間  $t$  は実験ケースごとに選定し、ガーゼから水滴がしたたり落ちない範囲で、できる限り長時間曝露時間がとれるようにした。

### 2.3 実験ケース

入射波および風速の条件が飛沫量に与える影響を検討するために、表-2.1に示すような実験を行った。入射波の波高を2種類、周期を3種類変化させ、それぞれの入射波条件に対して風速を3~4種類ずつ変化させて実験

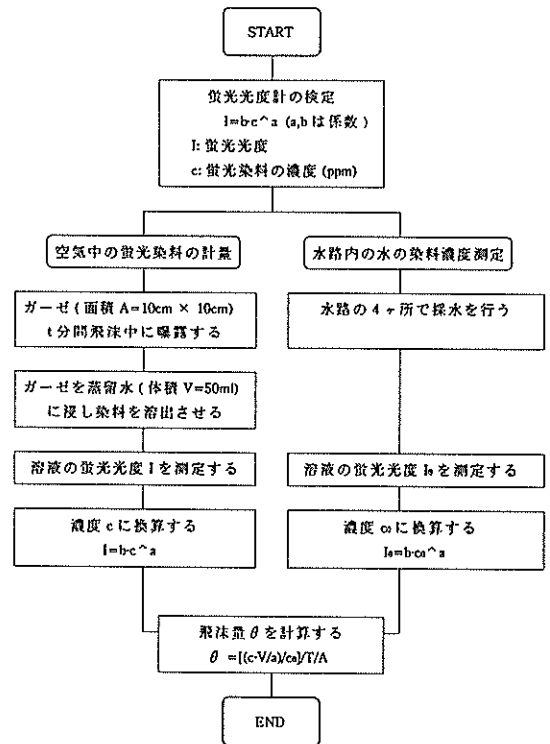


図-2.5 飛沫量の分析手順 (フロー)



を行った。また、全てのケースについて、強制砕波を行った場合と斜面床のみの場合について同じ条件の入射波および風を与えて飛沫量を測定した。両者の実験結果を比較することにより、海岸性状の変化による強制砕波の影響を検討した。

入射波の相似則は Froude 則を用いている。このとき、入射波の波形勾配は、強制砕波にともなう飛沫の発生を測定できるよう、一様勾配斜面のみを設置した場合に強制砕波地点もしくはそれより岸側で砕波が発生するように設定した。このため、沖合でも砕波がみられるような大規模じょう乱時の波浪条件は除外している。また、水深の浅い領域で実験を行ったため、観測される砕波形式は Plunging 型および Surging 型のみであり、実験を通して Spilling 型の砕波はみられなかった。

風による乱れおよび拡散を支配する相似則は Reynolds 則であり、Froude 則では表現できない。一般に、模型実験において Froude 則と Reynolds 則の両方を満足させるように相似率を設定することはできない。このため、風速の条件は、事前に様々な風速を与えて行った予備実験の結果から決定した。したがって、現地観測結果と比較を行う場合には、別途、風速の相似則について検討する必要がある。

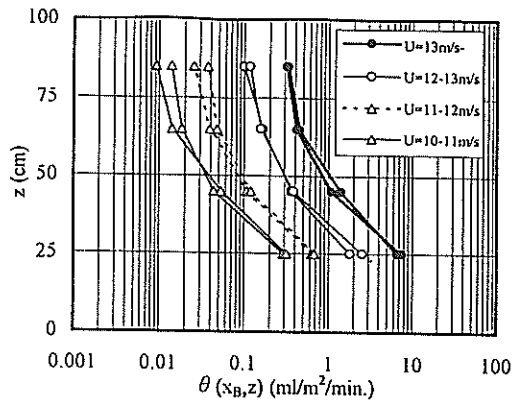
### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 飛沫量の鉛直分布に与える影響

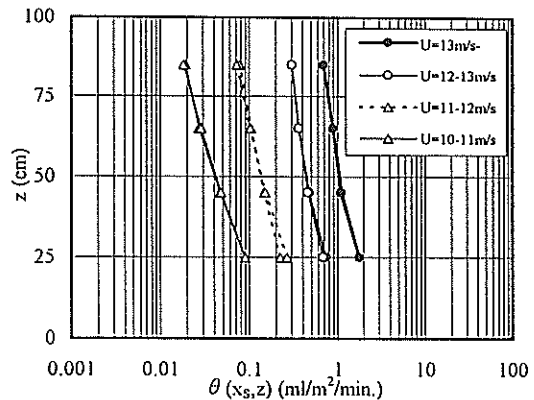
##### a) 風速が与える影響

図-3.1は、風速を変化させた場合の(a)砕波帯内 (Breaker zone, 飛沫の発生領域)  $x_B$ , (b)汀線上 (Shoreline)  $x_S$  および(c)背後地 (Inland)  $x_I$  の各測線での飛沫量の鉛直分布の代表例を、縦軸に高さ  $z$  (cm), 横軸に飛沫量  $\theta(x, z)$  ( $\text{ml}/\text{m}^2/\text{min.}$ ) をとって示したものである。それぞれの場合の風速の値は凡例に示すとおりであり、グラフの線が太いほど風速が大きな場合である。ここで、どの図の場合でも強制砕波を行っており、入射波の条件は  $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$  で一定とした(他のケースについては、巻末の付図-2を参照のこと。なお、付図-2の書式は後述の図-3.4と同じとした)。

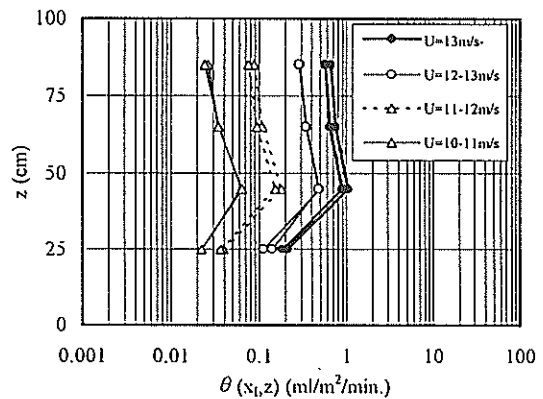
図-3.1の(a)のグラフは、砕波帯内で飛沫がさかんに発生し、飛散している状態の鉛直分布を表している。Toba (1965a, 1965b) などに示されているように、海岸線の境界条件として与えられる飛沫量の鉛直分布は一般に指数分布  $\theta(x, z) = \theta_0(x) \cdot \exp(-kz)$  (ただし、 $\theta_0(x) = \theta(x, 0)$ ) で表されることが多い。ところが、どの図でもグラフの形状が対数軸上で下に凸となっており、鉛直分



(a) 砕波帯内 ( $x_B = -3.2\text{m}$ )



(b) 汀線上 ( $x_S = 0.0\text{m}$ )



(c) 護岸上 ( $x_I = 1.4\text{m}$ )

図-3.1 風速が飛沫の鉛直分布に与える影響 ( $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$ )

布を指数分布（対数軸上で直線になる）とはみなせない。水面付近の（ $z=0.25\text{m}$ ）の  $\theta(x_B, z)$  が、上空（ $z=0.45\text{m}$ ）の場合と比べて非常に大きい。それぞれのグラフはほぼ平行にならんでおり、風速が大きいくほど  $\theta(x_B, z)$  は大きくなる傾向にある。

これに対して(b)では、それぞれのグラフがほぼ直線になっており、 $\theta(x, z)$  が  $z$  方向に指数分布とみなせるようになってきている。これは、水面付近（ $z=0.25\text{m}$ ）での  $\theta(x, z)$  の減少量（ $=\theta(x_B, z) - \theta(x_S, z)$ ）が、他の高さでの減少量とくらべて大きいためである。 $z=0.65\text{m}$  および  $0.85\text{m}$  の地点ではわずかではあるが、 $\theta(x, z)$  の値が増加している。砕波帯内で発生した飛沫は汀線上までの間に、一部分は沈降し、残りの部分は鉛直方向に拡散しながら輸送される。飛沫粒子の沈降が鉛直分布に与える影響は、沈降した分の飛沫量が空気中より減少することにある。水面付近で減少量をもっとも大きいということは、水面付近で飛沫の沈降量が大きいことを意味している。また、このことは砕波帯内で発生した飛沫のうち、沈降しやすい性質をもった部分が水面付近に集まる傾向にあることを示している。

また、 $z=0.65\text{m}$  および  $0.85\text{m}$  の地点で  $\theta(x, z)$  が増加しているのは、拡散によって鉛直方向の飛沫量の差が小さくなったためと考えられる。これに対して、飛沫粒子が十分に拡散すると、その結果として、鉛直方向の飛沫量の差  $|\partial\theta/\partial z|$  が小さくなる。また、鉛直上方への飛沫の輸送についても拡散の果たす役割は大きい。図より、 $0.5\text{m}$  より上方では(b)のグラフの方が、(a)とくらべて  $\theta(x, z)$  が大きくなっており、 $|\partial\theta/\partial z|$  が小さくなっている。また、風速が大きくなるほど  $|\partial\theta/\partial z|$  は小さくなる傾向にあり、乱れが大きくなることにより、上下方向に飛沫量の拡散が進んでいることがわかる。

(c)のグラフでは、地表面付近（ $z=0.25\text{m}$ ）の  $\theta(x, z)$  が減少し、 $z=0.45\text{m}$  で最大値をとっている。また、全体的に飛沫量の分布が上方に移動しており、護岸の存在による風速分布の変化にともなって飛沫の巻き上げが生じていると考えられる。対数表示のためわかりにくくなっているが、総飛沫量  $\Theta(x)$  の値は両図とも背後地の方が小さい。これは、護岸のとくにパラペット部分で飛沫の捕捉が行われているためである。飛沫の巻き上げおよび捕捉の効果については、後の節で述べることにする。

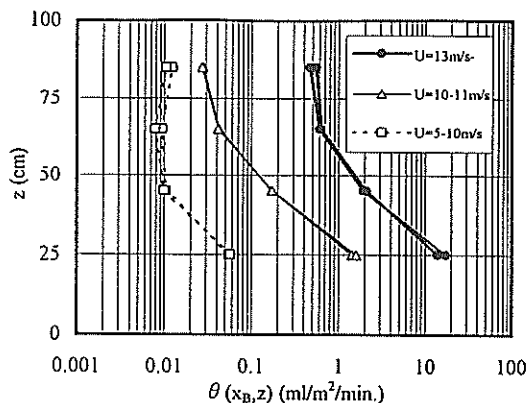
#### b) 入射波の条件が与える影響

図-3.2は、入射波の条件を変化させた場合の砕波帯内での飛沫量の鉛直分布  $\theta(x_B, z)$  の変化を示したものである。図の(a)は入射波の波高  $H_0$  (cm) と周期  $T_0$  (s) をそれ

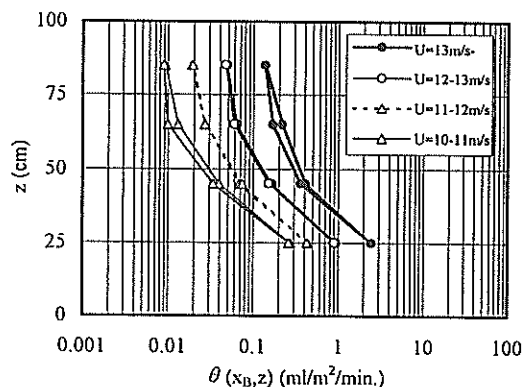
ぞれ  $H_0=13\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$  とした場合を示し、(b)は  $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$  の場合を示す。図の両軸等、表示方法は図-3.1と同じであり、それぞれのプロットの風速  $U$  の値は凡例に示すとおりである。両図とも、強制砕波を行った場合の値を示している。

図-3.2の(a)と(b)を比較すると、 $U$  が  $13\text{m/s}$  以上の場合で、(a)図の水面付近（ $z=0.25\text{m}$ ）の  $\theta(x_B, z)$  が(b)の6~7倍になっており、全体的な傾向として入射波高が大きいほど  $\theta(x_B, z)$  の値が大きくなる。他の風速の場合についても、 $\theta(x_B, z)$  の値は(a)の方が大きい。したがって、入射波高が大きい方が  $\theta(x_B, z)$  が大きくなる傾向があるといえる。

これに対して、図-3.3は、入射波の周期  $T_0$  を変化させた場合の  $\theta(x_B, z)$  の変化を図-3.2と同様にして示したものである。入射波の条件は、それぞれ(a)  $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$ , (b)  $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$  である。



(a)  $H_0=13\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$



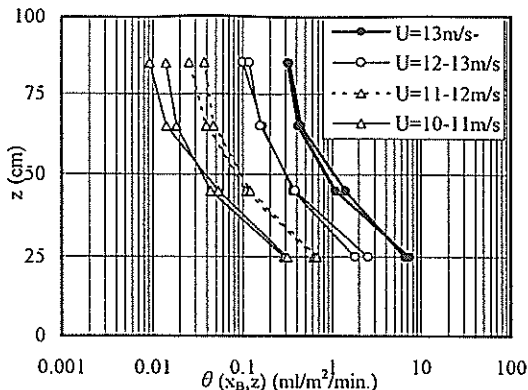
(b)  $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$

図-3.2 入射波高の変化にともなう飛沫量の鉛直分布の変化

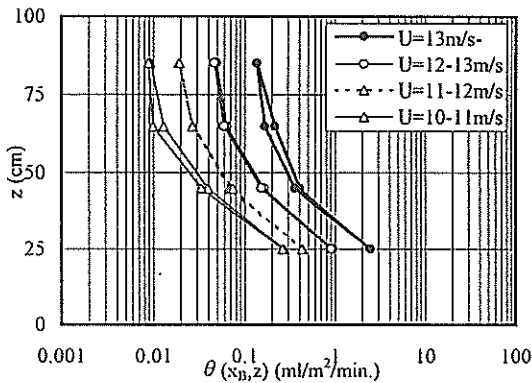
さきほどと同様に、 $U$ が13m/s以上の場合の水面付近の $\theta(x_B, z)$ を比較してみると、(a)の方が(b)とくらべて2.5~3倍程度大きくなっている。しかし、 $U$ が5~10m/sの場合では、 $T_0$ が増加しているにもかかわらず、(b)の方が $\theta(x_B, z)$ が大きくなっている。

図-3.2および図-3.3の検討結果より、飛沫量は入射波の波形勾配 $H_0/L_0$  ( $\propto H_0/T_0^2$ )が大きくなるほど大きくなると推察される。しかし、 $H_0/L_0$ の定義より、飛沫量の変化量は周期の変化に対して敏感なはずであるが、実際には波高の変化により敏感になっている。これは、飛沫の発生領域が浅海域~極浅海域にあっており、浅水変形のために波形に与える周期の影響が小さくなるからと考えられる。なお、今回の実験では、塩害の被害がもっとも大きくなる高波浪時を対象としているため、 $H_0/L_0$ が比較的大きな波を与えている。このため、入射波に与える浅水変形の影響は大きい。

そこで、それぞれの場合について砕波帯内の波浪変形



(a)  $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$



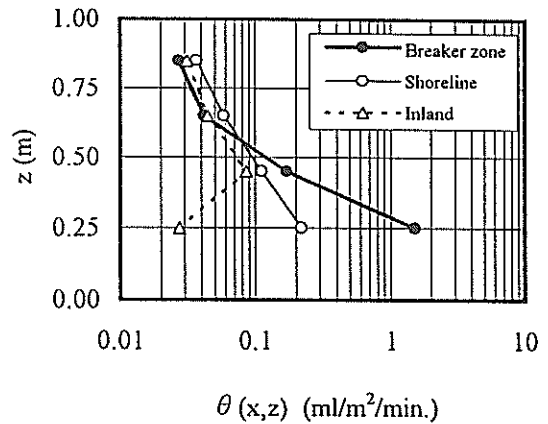
(b)  $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$

図-3.3 入射波周期の変化にともなう飛沫量の鉛直分布の変化

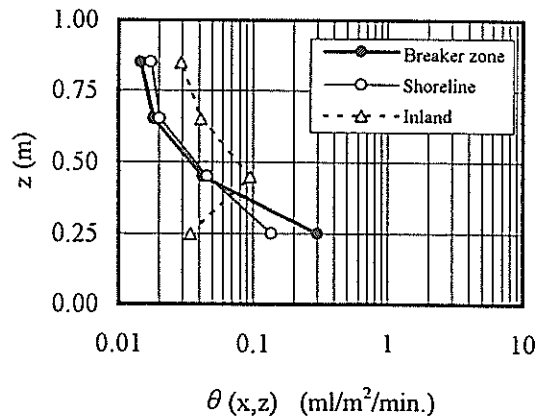
と飛沫の発生状況について観察を行った。その結果、砕波によって水面に形成される乱れの状態が入射波の条件により変化すること、および、水面上の乱れが大きいほど測定される飛沫量が大きくなっていることがわかった。水面の乱れの大きさは、斜面上の砕波形式によって変化する。両者の関係については3.1c)で詳しく述べることにする。

### c) 構造物の設置による影響

図-3.4に(a)強制砕波を行った場合と(b)斜面床のみの場合の各測定断面での $\theta(x_B, z)$ の鉛直分布を示す。このときの実験条件は、 $H_0=13\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$ ,  $U=10\text{-}11\text{m/s}$ であった。図-3.4(a)では砕波帯内での $\theta$ が水面付近で非常に大きく、(b)と比べるとその約6倍になっている。(a)では砕波帯内から汀線まで飛沫が輸送される間に $\theta$



(a) 強制砕波を行った場合



(b) 斜面床のみの場合

図-3.4 強制砕波を行うことによる飛沫の鉛直分布の変化( $H_0=13\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$ ,  $U=10\text{-}11\text{m/s}$ )

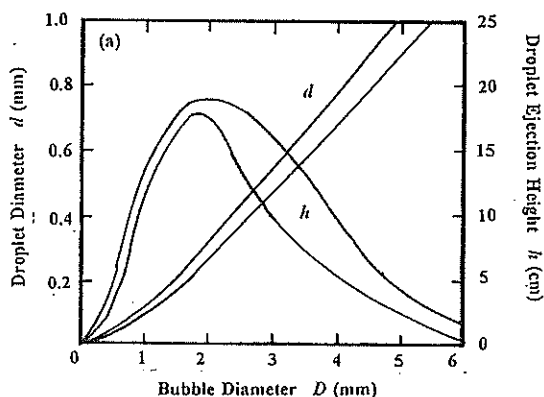
$(x_B, z)$  が急減している。ここでも、減少の大部分は水面付近に分布する飛沫成分で起こっている。減少した分の飛沫は再び水面に沈降したとすると、強制砕波を行った場合には沈降しやすい性質をもった飛沫が水面付近に多量に分布すると考えられる。

砕波帯内の波浪変形の状態をみると、入射波の波形勾配  $H_0/L_0$  が大きいと、強制砕波を行った場合のほとんどのケースで、強制砕波を行うために水深を急変させたところで Plunging 型 (巻き波) の砕波が観察された。砕波形式は  $H_0/L_0$  が大きいほど Heavy Plunging になる傾向にあった。このとき、Plunging Point で形成される Splash および Horizontal Roller から大量の飛沫の発生が観察された。この大部分が水面付近に分布し、汀線に輸送される間に沈降してしまうのは飛沫の粒径が大きいためと考えられる。

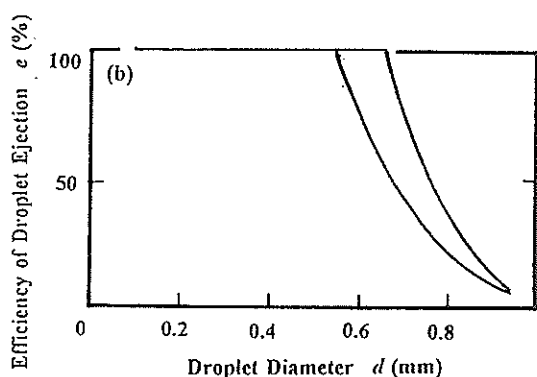
飛沫の粒径とその沈降しやすさに関する研究として、Wu (1979) は水面上で与えられた直径の気泡を破裂させたときに生じる水滴 (droplet) の粒径を計測し、水滴が沈降せず飛沫になる確率を粒径ごとに求めている。図-3.5(a)は(a)砕波により生じる気泡の直径 (bubble diameter)  $D$  と飛散する水滴の直径 (droplet diameter)  $d$  および水滴の飛散高さ (droplet ejection height)  $h$  の関係を実験結果をもとに示したものである。また、(b)は、飛散した全水滴のうち再び水面に落下する量を除いた部分の割合を示し、飛散した水滴がすべて飛沫となった場合に100%としている。実験回数が膨大であるため、両図とも実験値の変動幅の上限と下限を示す2本のグラフを用いて、実験値の傾向とその変動幅を示している。この結果から、Wu は水滴の粒径は気泡の直径の10%程度となり、気泡が大きいくほど生成される水滴も大きくなることを明らかにした。また、水滴の粒径が大きいくほど重力の影響を強く受けるため、粒径0.6mmを境に飛沫として空中に分布する量は急激に減少し、1.0mm以上の粒径の水滴はほとんど沈降するという結果を得ている。また、水滴が上方へ飛散する高さも図-3.5(a)からわかるように、粒径0.7mm前後で最大となり、これ以上大きくなると飛散する高さも減少する。

今回の実験でも、Plunging 型砕波によって水面上の乱れが大きくなると、砕波帯内で飛散する水滴の粒径も増大すると考えられる。しかしながら、粒径の大きな水滴はあまり上方まで飛散することができず、水面付近の飛沫濃度が増大することとなる。また、粒径の大きな水滴は飛沫としてとどまらずに沈降する割合も大きいので、汀線に輸送される間の減少量も大きくなる。

これに対し、図-3.4(b)のように斜面床のみを設置した



(a) 気泡の大きさと飛散する水滴の性質の関係



(b) 飛散した水滴が飛沫になる割合

図-3.5 水面の気泡の大きさと飛沫の粒径の関係 (Wu(1979)より)

場合にみられる砕波形式は主に Surging 型 (砕け寄せ波) であった。このとき、砕波点より岸側の水面では広領域にわたって白波 (whitecaps) が形成され、白波の全域から飛沫が発生しているようであった。ただし、水面の乱れが小さいため、飛沫の粒径は小さく、その発生を実際に確認するのは困難であった。このときの飛沫の発生量は小さいが、途中で沈降する量も少ないため、全体として汀線まで輸送される割合は大きい。砕波点から汀線までの間が砕波帯となるために、砕波帯内と汀線で総飛沫量がほとんど同じ値になる場合もみられた。

また、斜面床のみを設置した場合には、砕波時の水深波長比  $h_B/L_0$  が小さい時に Plunging 型と Surging 型の中間的な形式の砕波がみられることがあった。今回の実験では水深が浅い領域に波形勾配が大きい波が入射する場合を対象としたため、実験をとおして Spilling 型の砕波はみられなかった。

### 3.2 総飛沫量の水平分布と飛沫の伝搬特性

#### a) 海上での飛沫の伝搬過程について

図-3.6は、各測定断面での総飛沫量  $\Theta(x)$  を汀線からの水平距離を  $x$  軸にとって表したものである。このときに実験条件は  $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$ ,  $U=10\text{--}11\text{m/s}$  であった。図中の実線および破線はそれぞれ強制砕波を行った場合と斜面床のみの場合を示している。

3.1で示したように、砕波帯内では強制砕波を行った場合の方が  $\theta(x_B, z)$  の値が大きかった。そのため、 $\Theta(x_B)$  の値についても、 $10^1$ 倍程度大きな値になっている。ところが、汀線へ輸送される間に強制砕波による飛沫量の差異が小さくなり、 $\Theta(x_S)$  や  $\Theta(x_I)$  については実線と破線の間に2倍程度しか差がなくなっている。この原因の1つとして、砕波帯の沖側への移動にともなう伝搬距離の増加によって、汀線に輸送されるまでの沈降水量が増大

することも考えられる。しかし、図のように飛沫の発生領域がほとんど移動しないときでも、飛沫量の急減が確認される。したがって、強制砕波により、発生する飛沫の粒径が大きくなったため、陸上へ輸送されにくい性質をもつようになったと考えた方がよい。

これまでにえられた知見をまとめることにより、図-3.7に(a)強制砕波を行った場合と(b)斜面床のみの場合で

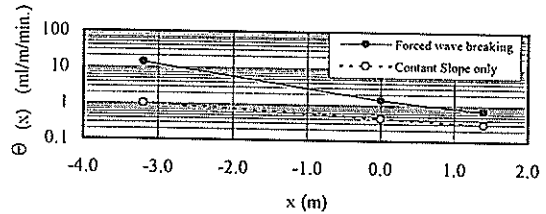
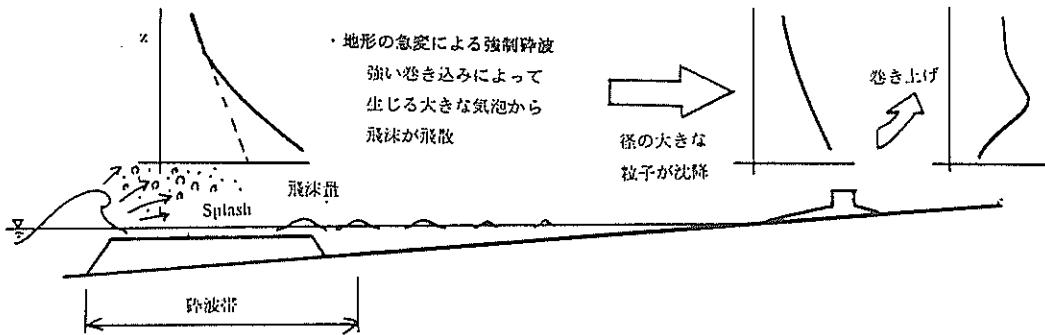
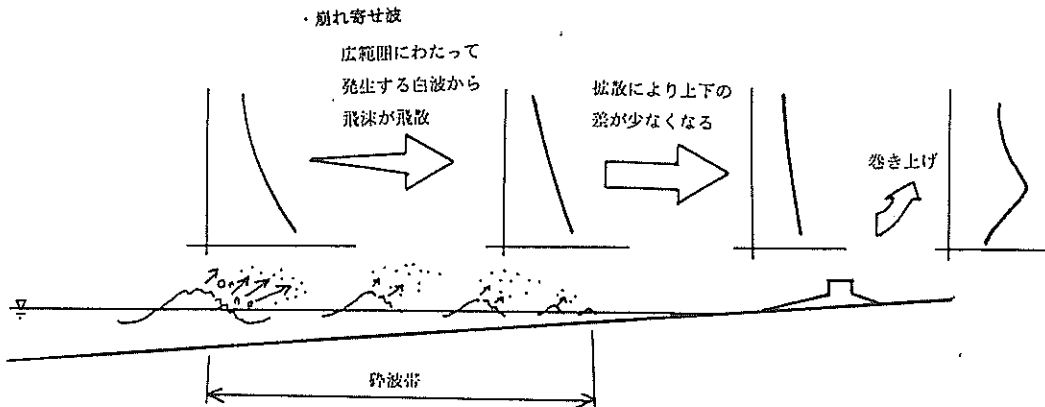


図-3.6 強制砕波が飛沫の伝搬に与える影響  
( $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$ ,  $U=10\text{--}11\text{m/s}$ )



(a) 強制砕波を行った場合



(b) 斜面床のみの場合

図-3.7 飛沫の発生および輸送機構 (模式図)

の飛沫の発生および輸送機構の変化を模式的に表してみた。

3. 1にも示したように、強制砕波を行った場合には、強制砕波地点の沖側端で Plunging 型の砕波が発生し、飛沫量の大部分が砕波により強く乱れた水面から飛散する。ただし、飛沫の粒径が大きいために汀線まで輸送される間にその大部分が沈降する。そして、陸上を輸送される間に地面への沈降や舞い上がりの効果によって、飛沫量の最大値が表面より上空の地点になっている。

これに対して、斜面床のみを設置した場合には、Surging 型砕波が砕けながら進行することにより、岸沖方向の広い領域で白波がたつようになる。飛沫は砕波帯の全域から発生している。砕波帯が汀線付近まで広がっていること、および飛沫の粒径が小さいことから、汀線に輸送される間の飛沫量の減少は小さい。このため、砕波帯の飛沫量では強制砕波を行った場合の方が $10^1$ 倍程度大きくなるが、汀線に輸送される間に両者の差は小さくなっている。この定量的な評価については3. 2b)で行うこととする。なお、陸上を輸送されるとき飛沫の分布形状は、強制砕波を行った場合とあまり変わらない。

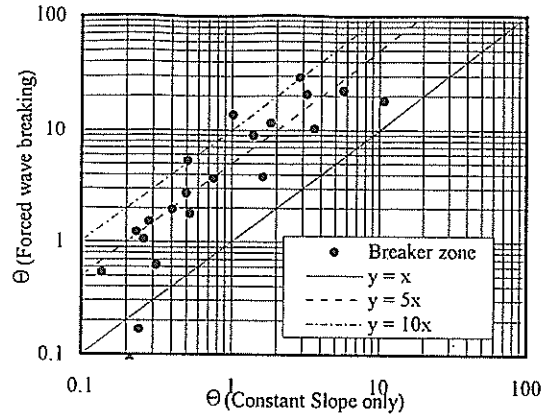
#### b) 強制砕波による汀線への飛沫伝達量の変化

図-3.8は、強制砕波を行った場合の各測点での総飛沫量  $\Theta(x)$  (ml/m/min.) の値を  $y$  軸として、斜面床のみを設置した場合の  $\Theta(x)$  を  $x$  軸にとって示したものである。(a), (b), (c)はそれぞれ砕波帯内  $x_B$ 、汀線上  $x_S$  および背後地  $x_I$  での値を示している。

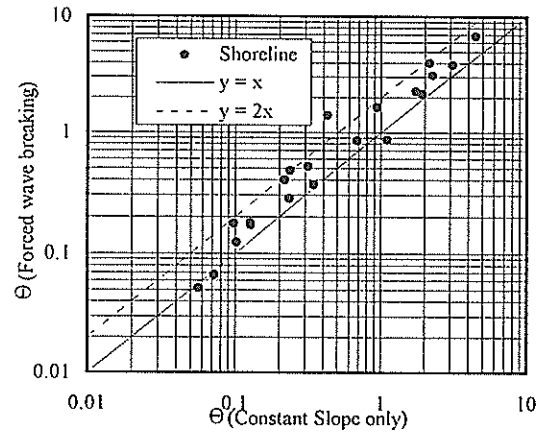
(a)より、砕波帯内では強制砕波を行った場合の方が  $\Theta(x_B)$  の値が大きく、平均的には斜面床のみの場合のほぼ5倍程度になっている。ただし、斜面床のみの場合の飛沫量  $\Theta(x_B)$  が1.0ml/m/min. より大きな領域ではばらつきが多くなり、斜面床のみの場合のときの値の2~10倍の範囲の間に強制砕波を行った場合の値が分布している。

また、 $\Theta(x_B)$  が0.2~0.3と総飛沫量が小さい領域では、強制砕波を行った場合の方が値が小さくなる場合がみられた。このときの実験条件は、入射波高  $H_0$  が小さな場合にあっている。したがって、 $H_0/h$  が小さいため、強制砕波が行われず、斜面床のみの場合と同じような状態になっていると考えられる。

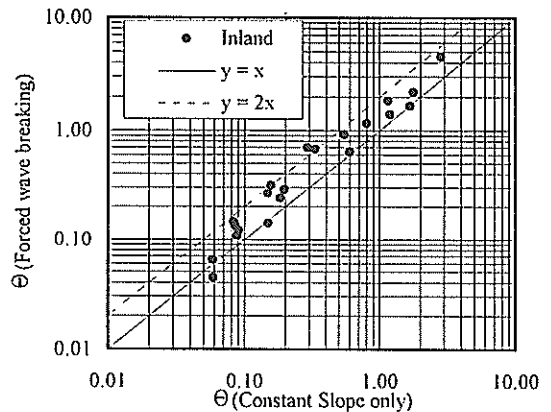
(b)および(c)のグラフでも、ほとんどの場合で強制砕波を行った場合の方が  $\Theta(x)$  は大きい。しかし、両者の差は2倍以下に縮まっており、多くの場合で  $\Theta(x)$  の値が同程度の大きさになっている。このことから、強制砕波により飛沫の伝搬特性が変化し、汀線までの伝搬率  $\Theta(x_S)/\Theta(x_B)$  が非常に小さくなることがわかる。また、



(a) 砕波帯内  $x_B$



(b) 汀線上  $x_S$



(c) 背後地  $x_I$

図-3.8 強制砕波による総飛沫量の変化

このことは強制砕波を沖合で行うことにより、汀線での総飛沫量が増加することを抑えることができることを示している。

図-3.9は、強制砕波にともなう砕波位置の変化によって、汀線上の総飛沫量が斜面床のみの場合と同程度まで抑えられた例を示している。実験条件は  $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$ ,  $U=12\text{--}13\text{m/s}$  であり、入射波が小さい場合に相当する。このとき、砕波水深が小さくなるので、斜面床のみしか設置されていない場合では、砕波点が強制砕波地点より岸側にずれる。これを逆に言えば、強制砕波を行うことにより、飛沫の発生領域（砕波帯）を沖側に移動できることを示している。強制砕波を行った場合の総飛沫量は、汀線まで伝搬する間に急激に減少する傾向があった。このため、強制砕波を行った場合の総飛沫量は、砕波帯内の値と比較すると斜面床のみの場合より大きくなるが、汀線から背後では同等かこれより小さい値となっている。

したがって、強制砕波により、飛沫の発生する領域を沖側に移動させることができれば、陸域へ輸送される飛沫量も軽減できると考えられる。図-3.10は、強制砕波に

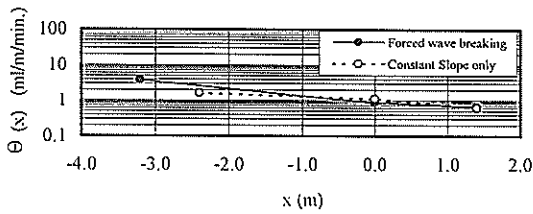


図-3.9 砕波位置の変化による汀線上の総飛沫量の変化

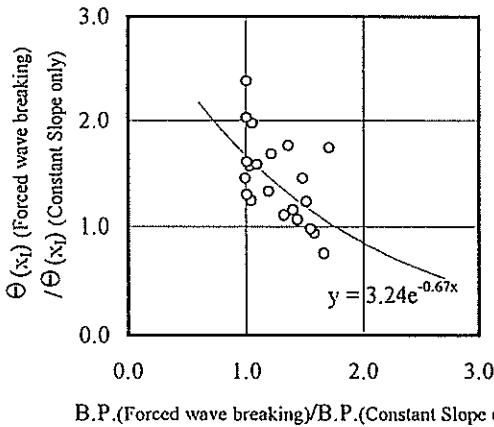
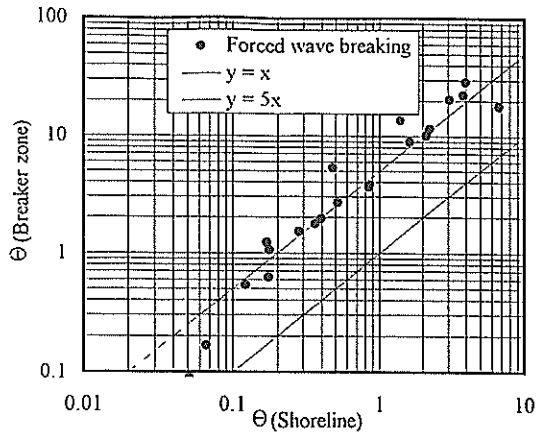


図-3.10 砕波位置の変化による背後地へ伝搬される総飛沫量の変化の特性

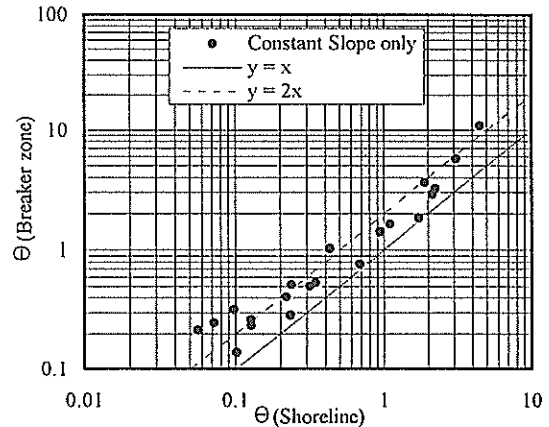
ともなう背後地  $x_b$  へ輸送される飛沫量の変化を砕波点 B.P. (Breaking Point) の変化を用いて整理した値である。砕波点近傍で発生する飛沫量が一番大きいと考えられるので、砕波点を用いて飛沫の発生領域を代表させることにした。したがって、砕波点の変化の値が大きいほど、飛沫の発生領域が沖側へ移動していることを示している。図中の曲線はプロットの値から計算した近似曲線である。曲線の式は図中に示すとおりである。

図より飛沫の発生地点を沖合に移動させることにより、陸域へ伝達される飛沫量が斜面床のみのときの値に近づく傾向にあることがわかる。この値が1となるのは、斜面床のみのときとくらべて砕波点が沖側に1.5~2倍程度移動した場合である。ただし、今回の実験では、この値が1以下になった場合は少なく、データのばらつきも大きいので、今後、さらに実験等を行って検証を進める必要があるであろう。

図-3.11は、(a)強制砕波を行った場合と(b)斜面床のみ



(a) 強制砕波を行った場合



(b) 斜面床のみの場合

図-3.11 強制砕波による総飛沫量の伝搬特性の変化

の場合の砕波帯内での総飛沫量  $\Theta(x_B)$  の値を y 軸として、汀線上での総飛沫量  $\Theta(x_S)$  を x 軸に用いて示したものである。したがって、この図の切片の逆数は、砕波帯から汀線までの飛沫の伝搬率  $\Theta(x_S)/\Theta(x_B)$  を示している。

(a)では、 $\Theta(x_B)$  が  $\Theta(x_S)$  のほぼ5倍になっている。したがって、砕波帯から汀線までの飛沫量の伝搬率は約20% ( $=1/5$ ) である。この値は  $\Theta(x_S)$  の値に関わらず、ほぼ一定である。これに対して、(b)では  $\Theta(x_B)$  の値にばらつきがあるが、伝搬率は概ね50% ( $=1/2$ ) 程度である。ただし、場合によっては総飛沫量がほとんど減少しない ( $\Theta(x_S)/\Theta(x_B) \approx 1$ ) 場合もみられている。したがって、強制砕波によって生成される飛沫は、そのうち沈降する割合が多いことに特徴があり、その値は80% ( $=1-\Theta(x_S)/\Theta(x_B)$ ) で発生した飛沫量の値に関係なくほぼ一定であるといえる。

また、斜面床のみを設置した場合には汀線付近まで白波で覆われることが多かった。これが伝搬率の上昇に与える影響は大きいと考えられるが、砕波帯より岸側で発生した飛沫によって、汀線上の方が総飛沫量が大きくなることはなかった。このことは、砕波後にみられる2次の乱れや、この乱れと風の相互作用から生じる白波から発生する飛沫量は総飛沫量全体を増加させるほど大きくはないことを示している。砕波後の水面から発生する飛沫量が小さいということについては、強制砕波を行った場合にも同様である。したがって、汀線への伝搬量を与えるためには、砕波帯での飛沫の発生量とその伝搬特性を求めることが重要である。

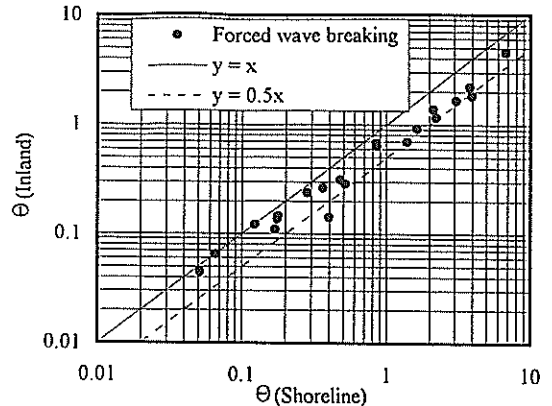
### c) 護岸による飛沫輸送への影響

図-3.12は、(a)強制砕波を行った場合と(b)斜面床のみの場合の護岸背後地での総飛沫量  $\Theta(x_I)$  を y 軸として、汀線上での総飛沫量  $\Theta(x_S)$  を x 軸にとって示したものである。図-3.11と同様に、この図の切片は、汀線から背後地までの飛沫の伝搬率  $\Theta(x_I)/\Theta(x_S)$  を示している。

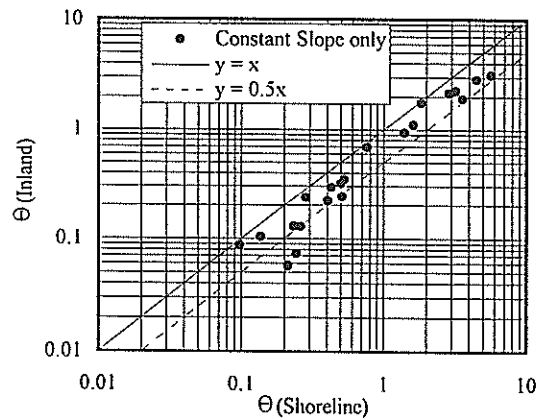
図-3.6では対数軸を用いて表していたため明瞭に判別できなかったが、図-3.12では明らかにすべての場合で護岸背後で総飛沫量が減少していることがわかる。その伝搬率は50~100%の範囲でばらついているが、概ね60%程度である。この間の飛沫量の減少は、地表面への沈降か護岸のパラペット部(天端高 SWL上0.2m)への付着によるものと考えられる。測定範囲より上方への飛沫の輸送は最上部の測点 ( $z=0.85\text{m}$ ) での飛沫量の絶対値が小さいため無視できる。

また、地表面の沈降量についても、現地調査から無視

できるほど小さいという結果が得られている。村上ら(1995)が茨城県波崎町海岸に防風ネットを設置してその前後で飛沫量の鉛直分布を測定したところ、総飛沫量の30%程度が防風ネットによりトラップされ、残りの約70%が岸側に伝搬される結果が得られた。これに対して、ネットを設置せずに飛沫量を計測した結果では、陸上を輸送される間の飛沫量の減少はほとんどみられなかった。これらの結果と直接比較することはできないが、飛沫の地面への沈降量は無視しても問題ないと考えられる。したがって、護岸前後での飛沫量の減少はパラペット部による捕捉およびパラペット背後での風速の急減による飛沫の落下が原因であるとみなされる。なお、村上らの使用した防風ネットは、通風性が保たれていること、および高さが3mと比較的低いため上空を通過する飛沫量の割合が多くなることから、護岸とくらべて伝搬率が大きくなっていると考えられる。



(a) 強制砕波を行った場合



(b) 斜面床のみの場合

図-3.12 護岸の前後での総飛沫量の変化

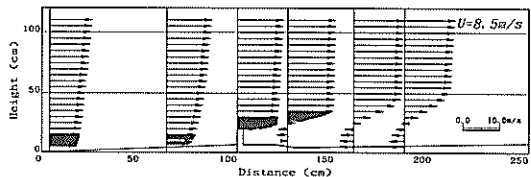


また、図-3.12の両図で、飛沫量の伝搬率の傾向は等しく、陸上への伝搬過程については、強制碎波の影響はみられないと考えられる。また、汀線上での風速分布についても、強制碎波の有無や入射波の条件による変化はほとんどみられなかった。このため、以後、護岸の前後での伝搬特性について検討を進める上で、強制碎波のありなしについては議論しない。

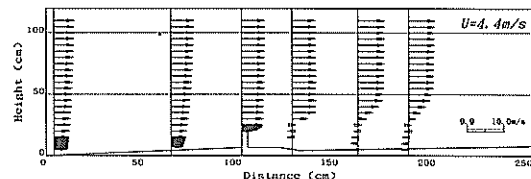
図-3.13は、汀線より岸側で風速の鉛直分布を測定した結果を示している。(a)、(b)は、それぞれ  $U=8.5\text{m/s}$ 、 $4.4\text{m/s}$  の場合を示している。汀線より岸側には緩傾斜護岸の模型が設置されており、そのパラペット部は汀線より  $1.0\text{m}$  離れている。また、天端高は前述のように SWL 上  $0.2\text{m}$  である。

図より、護岸の背後で風速が急減し、底面付近では風向の逆転がみられている。これは、護岸の背後では風が大きな渦を巻いていることを示している。風速の減少領域は汀線から離れるほど上方に広がっており、背後地の測定点 ( $x_1=1.4\text{m}$ ) 付近では、 $z<0.45\text{m}$  の範囲で風速の減少が認められる。そして、 $z=0.2\text{m}$  付近の地点で  $U=0\text{m/s}$  となり、それより下方では風向が逆転する。このため、図-3.4でも示したように、背後地での飛沫量の鉛直分布は  $z=0.45\text{m}$  の測点で最大になり、それより下方では飛沫量が減少する。

今回の実験では、風速の変化にともなう鉛直分布形状の変化はみられなかった。風速の値そのものは沖側の風速に比例して増減するが、風速の減少領域、風向が逆転する高さや逆方向への風速の値等、分布形状の特性は、(a)と(b)の間で差異がみられなかった。



(a)  $U=8.5\text{m/s}$



(b)  $U=4.4\text{m/s}$

図-3.13 汀線より岸側での風速分布

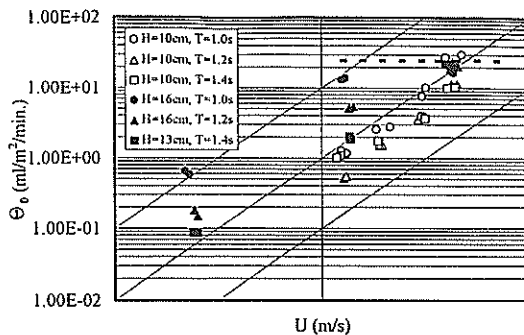
### 3.3 飛沫の発生量の変化特性

#### a) 風速が与える影響

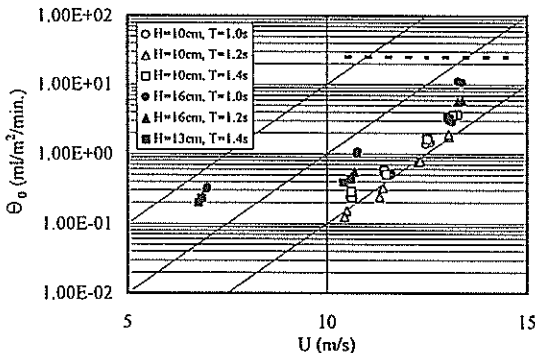
図-3.14は、飛沫の発生量  $\Theta_0$  を風速  $U$  で整理したものである。ここで、 $\Theta_0$  は碎波帯内の総飛沫量  $\Theta(x_B)$  に等しいと定義して与えている。図の(a)と(b)は、それぞれ強制碎波を行った場合と斜面床のみの場合を示しており、プロットの形状は凡例に示す入射波の条件を表している。

プロットは、波浪条件ごとに右上がりの直線上にあり、それぞれのプロットはほぼ平行に並んでいる。したがって、風速の増加により、 $\Theta_0$  は指数的に増加しているといえる。一般に、 $\Theta_0$  は上空の風速の影響をもっとも強く受けると言われている。(a)図では、風速が  $7\text{m/s}$  から  $13\text{m/s}$  に変化すると、 $\Theta_0$  の値は  $30\sim 100$  倍程度に増加しており、風速の与える影響は非常に大きい。しかし、風速が  $10.5\text{m/s}$  の場合をみると、波浪条件の変化によっても  $\Theta_0$  が  $25$  倍程度増減していることがわかる。したがって、波浪条件の変化による  $\Theta_0$  の増減も、風速の影響とくらべて無視できないといえる。

また、今回の実験では、 $\Theta_0$  が  $20\text{ml/m}^2/\text{min}$  を超えて大



(a) 強制碎波を行った場合



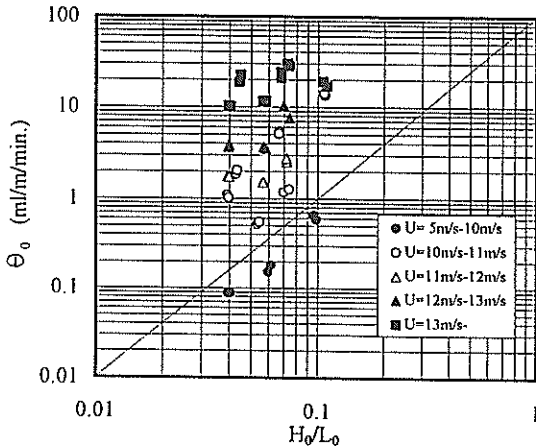
(b) 斜面床のみの場合

図-3.14 飛沫の発生量と風速の関係

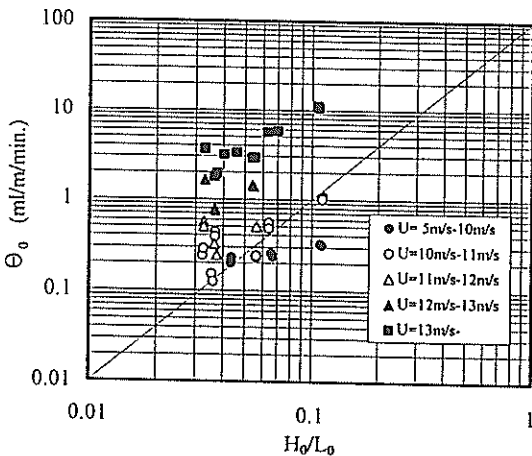
きくなると、プロットがほぼ横這いの状態になり、 $\Theta_0 = 20 \sim 30 \text{ ml/m/min.}$  でほぼ一定値をとるような傾向にあった。これは、強風のために、水面から飛散する水滴の量が限界に達しているため、これ以上増加することができなくなっているものと考えられる。このとき、目視で確認できるほど大きな粒径 ( $d=0.1 \sim \text{数 mm}$ ) の飛沫が盛んに発生する様子が観察された。粒径の大きな粒子は重力の影響により飛散せずにすぐに沈降してしまうため、 $\Theta_0$  として観測される値への寄与はほとんどない。このため、風速が大きな場合には条件を変化させても、 $\Theta_0$  がほとんど変化しなくなっている。

b) 入射波の条件および構造物の設置による影響

図-3.15は、飛沫の発生量  $\Theta_0$  を入射波の波形勾配  $H_0/L_0$



(a) 強制砕波を行った場合



(b) 斜面床のみの場合

図-3.15 飛沫の発生量と入射波の波形勾配の関係

$L_0$  で整理したものである。図の(a)と(b)は、それぞれ強制砕波を行った場合と斜面床のみの場合を示しており、プロットの形状は凡例に示す風速条件を表している。

図-3.15より、(a)、(b)両図とも風速条件に関係なく、 $H_0/L_0$  が大きくなるほど  $\Theta_0$  が増加する傾向がある。たとえば、(a)図の黒丸の場合では、 $H_0/L_0$  を0.04から0.1に増加させると、 $\Theta_0$  の値は6~7倍に増加する。両図の左下から右下にのびる斜線は  $\Theta_0 = a \cdot (H_0/L_0)^2$  ( $a$ : 定数) のグラフを示しており、 $\Theta_0$  は入射波の波形勾配の2乗に比例する傾向にある。 $(H_0/L_0)^2$  は入射波のエネルギーの大きさを表す量であり、 $\Theta_0$  は入射する波エネルギーと関係があるといえる。

ただし、(b)の黒丸 ( $U=5-10 \text{ m/s}$ ) のプロットでは、 $H_0/L_0$  が小さくなくても  $\Theta_0$  があまり減少しない。条件によっては  $U=10-11 \text{ m/s}$  のときの  $\Theta_0$  よりも大きな値になっている。この実験条件は、3.1で砕波形式が Plunging 型との中間的な形式に変化した場合にあたり、砕波状況の変化が飛沫の発生量に影響を与えていると考えられる。したがって、飛沫量の増加を説明するためには、同一の海底地形条件のもとでも、入射波の条件だけでなく砕波形式の変化まで考慮する必要があるといえる。

また、(a)の黒四角のプロット ( $U=13 \text{ m/s}$ ) は、 $\Theta_0$  の値が入射波の条件に関わらず  $20 \sim 30 \text{ ml/m/min.}$  でほぼ一定となっている。これは、3.2a)でも示したように、強風のために、水面から飛散する水滴の量が限界に達しているためと考えられる。このため波浪条件を変化させても、 $\Theta_0$  の値はほとんど変化しない。

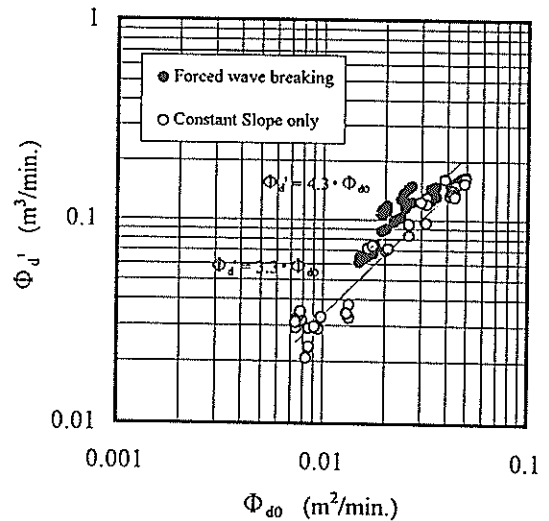


図-3.16 砕波によるエネルギー逸散率とエネルギー損失量の関係

(a), (b)の両図を比較すると、総飛沫量で考えた場合にも、同じ実験条件では強制砕波を行った場合の方が $\Theta_0$ の値が大きくなる。これは強制砕波にともなって大量の水が飛散するためと考えられる。海底性状の変化は、入射波の条件とともに砕波状況の変化をとおして飛沫の発生量に影響を与えているといえる。

### c) 飛沫の発生量に与える砕波変形の影響

3.2b)で、飛沫の発生に与える海底性状の効果は、波浪条件に与える砕波変形の影響を考慮することによって評価すべきであることを述べた。これまでの検討結果から、入射波と海底性状の条件から決定される砕波変形によって海面に生成される乱れの強さを評価することができれば、この量を用いて飛沫の発生量を説明できると考えられる。砕波による海面上の乱れは、砕波によって逸散した波エネルギーが渦として供給されることにより生成されると考えられる。そこで、海面上の乱れの強さを表す指標として砕波によるエネルギー逸散率 $\Phi_d$ を用いることとした。ここで、 $\Phi_d$ は、岸沖方向の単位長さあたりの砕波によるエネルギー損失量を表す量である。今回の解析では、 $\Phi_d$ として水口(1978)の定義式を微小振幅波の仮定の下に(3.1)式のように変形した値(たとえば本間・堀川, 1985)を用いることとした。

$$\Phi_d = k \cdot [H_0^2 \tan \beta \sqrt{gH_0}] / (8h_B) \quad (3.1)$$

ここで、 $g$ : 重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)、 $k$ : 強制砕波によるエネルギー逸散の増加を考慮するための割り増し係数である。水口の式の特徴は $\tan \beta$ を与えることにより海底地形の影響を考慮できるところにある。また、もともとの定義式には波の再生を考慮する項も含まれているが、今回の実験では、すべてのケースにおいて砕波後の再生波高が入射波高と比べて十分小さかったこと、および汀線の付近まで海面が白波で覆われる場合が多く再生点の特定が困難だったことから、波の再生による効果は考慮していない。

強制砕波によるエネルギー逸散率の割り増し係数 $k$ の決定は以下に示す方法で行った。まず、砕波帯内のエネルギー損失を定量化するため、入・反射波と透過波の計測値から、(3.2)式を用いて砕波によるエネルギー損失量 $\Phi_d'$ を計算した。

$$\Phi_d' = k \cdot [H_0^2 - H_T^2 - H_R^2] / 8 \times \sqrt{gh_B} \quad (3.2)$$

ここで、 $H_T, H_R$ : それぞれ、透過波と反射波の波高である。(3.2)式は砕波点から透過波の計測地点までに失われた波エネルギー全体を表す量であり、物理的には砕

波帯内にわたって $\Phi_d$ を積分した量を意味する。したがって、両者を比較する際は $\Phi_d$ の空間変動と砕波帯の幅の影響を考える必要がある。実験でえられた $\Phi_d'$ の値を $\Phi_d$ と比較することにより、もっとも適当な $k$ の値を求めた。

図-3.16に $k=1.0$ とした場合の砕波によるエネルギー逸散率 $\Phi_{d0}$ とエネルギー損失量 $\Phi_d'$ との関係を示す。図の黒丸と白丸はそれぞれ強制砕波を行った場合と斜面床のみの場合を表している。図中の実線は、それぞれのプロットに対する近似直線である。 $\Phi_{d0}$ と $\Phi_d'$ は非常によい相関を示しており、黒丸と白丸のどちらともほぼ直線で近似できる。それぞれの近似直線は、図に示すように、 $\Phi_d' = 4.26 \cdot \Phi_{d0}$ および $\Phi_d' = 3.34 \cdot \Phi_{d0}$ で与えられる。したがって、同じ $\Phi_{d0}$ を与えても強制砕波を行った場合の方がエネルギー損失量 $\Phi_d'$ が大きくなり、黒丸と白丸の $\Phi_d'$ の比は約1.3となっている。

ただし、エネルギー損失が行われる領域を考えると、強制砕波を行った場合ではPlunging Pointの近傍の狭い範囲でエネルギーの大部分が損失されるのに対して、斜面床上で白波が一面にたった状態では砕波点より岸側の海面全体でエネルギー損失が行われる。このため、このときのエネルギー損失が行われる領域とくらべて、強制砕波を行った場合には1/2~1/3程度に小さくなっている。海面の乱れの大きさは単位長さあたりのエネルギー逸散量(=エネルギー逸散率)に依存するので、実際には砕波帯の幅が狭まっている分、 $k$ の値は大きくなると考えられる。そこで、強制砕波によるエネルギー逸散の割り増し係数を $k=1.3 \times (2 \sim 3) \approx 3.0$ と見積もることとした。

図-3.17(a)~(e)に波によるエネルギー逸散率 $\Phi_d$ と飛沫発生量 $\Theta_0$ との関係を示す。(a)~(e)のそれぞれの場合の風速の値は図中に示すとおりである。図中の黒丸と白丸はそれぞれ強制砕波を行った場合と斜面床のみの場合を示す。ここで、 $k$ の値はさきほどの考察結果から3.0として与えている。

図より、(b)~(e)の場合では、強制砕波を行った場合のプロットが斜面床のみの場合のプロットの延長線上に並ぶようになっている。どの風速条件においても割り増し係数を $k=3.0$ で与えることにより、海底性状の異なる2つのプロットが同一線上に並ぶようになった。このことは、海底性状の変化による影響を $k$ として適当に与えることにより、飛沫の発生量 $\Theta_0$ を $\Phi_d$ で表現できることを示している。なお、(a)図では、黒丸と白丸が横に並んでプロットされているが、これは総飛沫量が小さいため両者の差がはっきりとでなかったためと考えられる。

(1)式から割り増し係数 $k$ の物理的な意味を考えると、

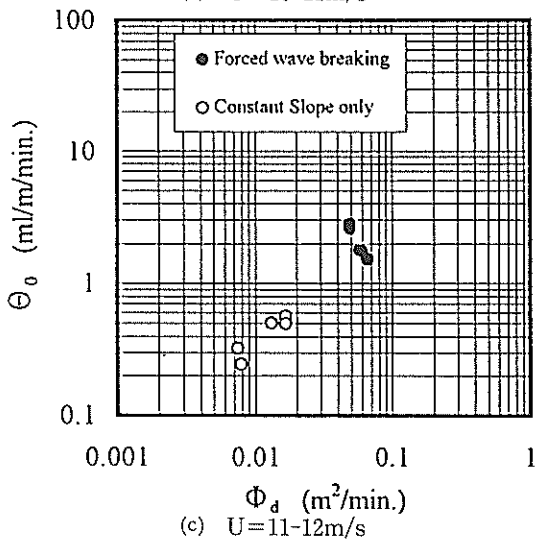
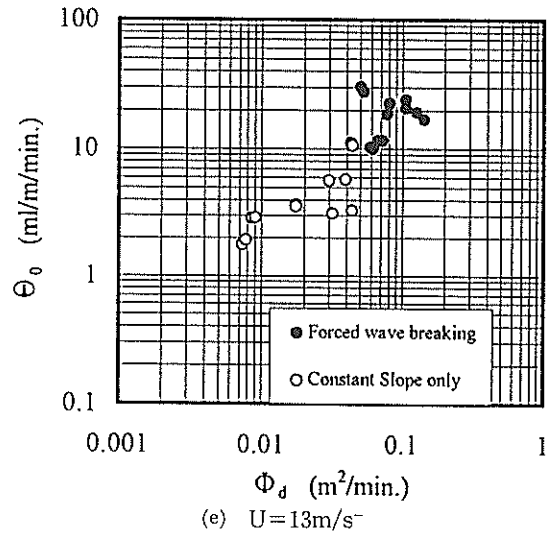
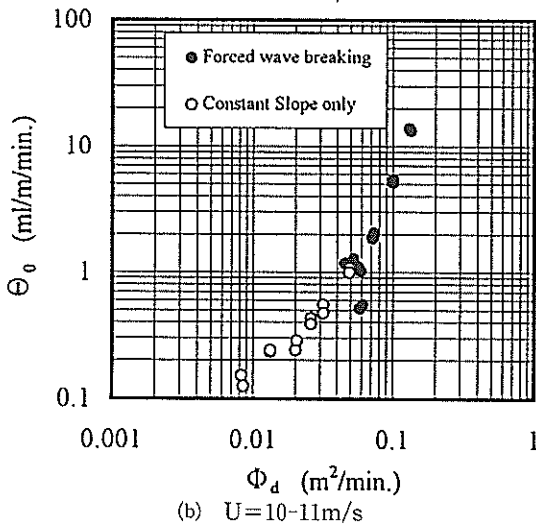
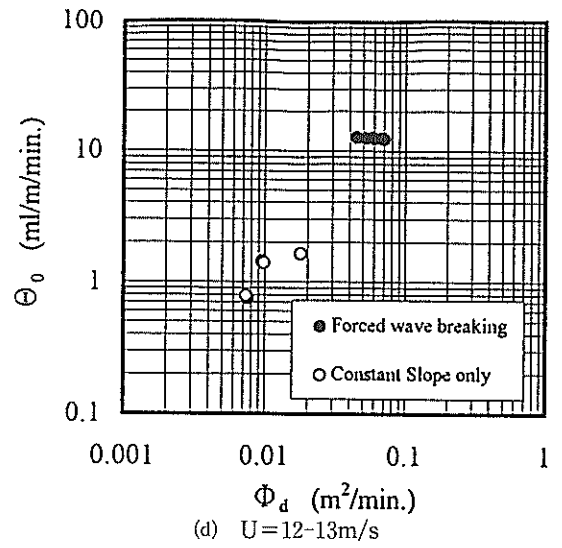
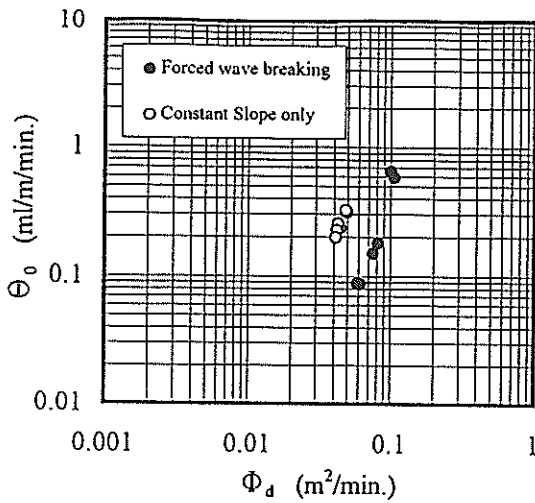


図-3.17 砕波によるエネルギー逸散率と飛沫発生量の関係

砕波水深  $h_b$  を小さくする効果と底面勾配  $\tan\beta$  を大きくする効果の2つをあげることができる。これは、強制砕波を行うために設けた急激な水深の減少、あるいは見かけ上の底面勾配の増加としてエネルギー損失の増加を考えるということである。どちらで考えた場合にも、強制砕波による砕波変形への影響は、海底地形の急激な変化として(1)式の中で考慮される。

#### 4. おわりに

今回の研究から明らかになった主要な結論は以下に示すとおりである。

- (1) 風速の増加により、飛沫の発生量は指数的に増加する。ただし、同一の風速条件下でも、入射波の条件によっても飛沫の発生量が25倍程度変化する場合があった。飛沫の発生量は入射波の波形勾配の2乗に比例して増加する傾向にある。また、砕波の形式が Plunging 型(巻き波)のときに、他の砕波形式の場合とくらべて飛沫の発生量が大きくなる。
- (2) 強制砕波を行うことにより飛沫の発生量が大きくなる。これは強制砕波地点の前後で水深や海底勾配といった海底地形条件が急変するため、Plunging 型の砕波が誘発されるからである。飛沫の発生量に与える海底性状の影響は、波浪変形および砕波形式への影響として考慮することにより入射波の影響と同様に扱うことができる。
- (3) 強制砕波を行った場合に発生する飛沫の陸上への伝搬率は、斜面床のみを設置した場合と比べて非常に小さい。このため、砕波帯内で2~10倍程度の値を示す飛沫量の差が、汀線の上では2倍程度まで減少する。強制砕波を行うことによって砕波帯を沖側に移動させると、汀線から砕波帯までの距離の増大にともなって背後地まで伝搬される飛沫量が減少する傾向にある。このため、斜面床のみを設置した場合より砕波点の位置が1.5~2倍沖側に移動する場合には強制砕波を行った方が伝搬量が小さくなるケースもみられた。
- (4) 飛沫発生量の変化特性は、砕波時のエネルギー逸散率を用いて表すことができる。エネルギー逸散率とは砕波による乱れの強さを入射波高、砕波水深および海底勾配の条件を使って表現するものである。したがって、このパラメータを用いることにより、飛沫の発生量に与える入射波および海底性状の影響を表すことができるといえる。

今回の結論を誘導するにあたり、砕波形式と飛沫の粒径の関係にさまざまな仮定をおいた。今後、飛沫の粒径

分布を実際に計測し、砕波変形の状況と飛沫の粒径や発生量の関係について明らかにしていきたい。また、今回の知見は模型実験から得られたものである。風の相似則はよくわかっていないため、現地での適用にあたっては、その再現性について検証する必要がある。

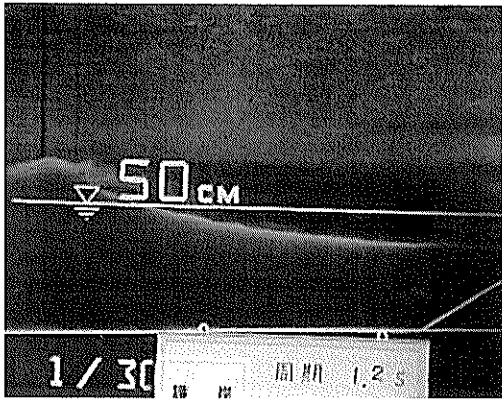
(1996年6月28日受付)

#### 参考文献

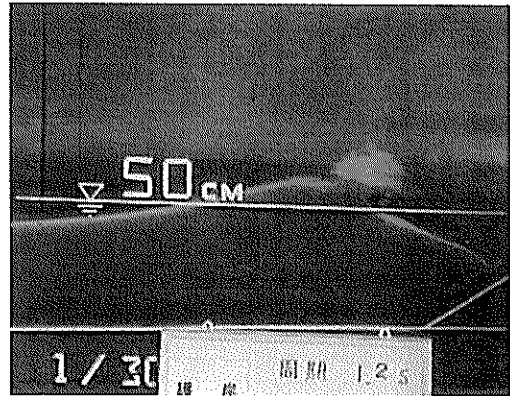
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976) : 不規則波実験における入・反射波の分離推定手法, 港湾技術資料, No.248, 24p.
- 田中正昭 (1970) : 塩害に関する基礎的研究(第4報) - 海岸近くにおける海塩粒子の分布 -, 京大防災研究所年報, 第13号 B, pp.445-456.
- 本間 仁監修・堀川清司編 (1985) : 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582p.
- 松永信博・植田 操・鶴崎健一 (1995) : 波に作用する風応力としぶき量の関係, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1031-1036.
- 水口 優・辻岡和男・堀川清司 (1978) : 砕波後の波高変化についての一考察, 第25回海岸工学講演会論文集, pp.425-429.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓司 (1992) : 砕波帯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.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎 靖・西守男雄 (1995) : 植栽による飛沫の軽減に関する現地実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1036-1040.
- Iversen, H. W. (1952) : Waves and breakers in shoaling water, Proceedings of 3rd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp1-12.
- Toba, Y. (1965a) : On the giant sea-salt particles in the atmosphere I. General features of the distribution, Tellus 17, No.1, pp.131-145.
- Toba, Y. (1965b) : On the giant sea-salt particles in the atmosphere II. Theory of the vertical distribution in the 10-m layer over the ocean, Tellus 17, No.3, pp.365-382.
- Wu, J. (1979) : Spray in the atmospheric surface layer: Review and analysis of laboratory and oceanic results, Journal of Geophysical Research, Vol.84, No.C4, pp.1693-1704.

記号表

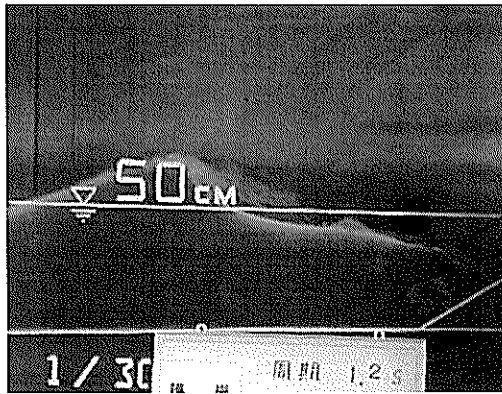
		$\theta(x, z)$ :	飛沫量(≡単位面積あたり単位時間に通過する飛沫量 ; ml/m <sup>2</sup> /min.)
A :	飛沫捕捉装置の曝露面積	$\theta_0(x)$ :	$z=0$ での飛沫量(≡ $\theta(x, 0)$ )
a :	ガーゼから蒸留水への蛍光染料の溶出率	$\Phi_d$ :	砕波によるエネルギー逸散率(≡岸沖方向の単位長さあたりの砕波によるエネルギー損失量)
B.P. :	砕波点(= Breaking Point)	$\Phi_{d0}$ :	強制砕波によるエネルギー逸散の増加を考慮しない場合の砕波によるエネルギー逸散率(≡ $\Phi_d/k$ )
c :	蛍光染料濃度	$\Phi_d'$ :	砕波によるエネルギー損失量(≡岸沖方向の単位長さあたりの砕波によるエネルギー)
$c_0$ :	水路内の蛍光染料濃度	$\phi$ :	直径
D :	砕波により生じる気泡の直径	$ \partial\theta/\partial z $ :	飛沫量の鉛直勾配の絶対値
d :	砕波から飛散する水滴の直径		
e :	砕波から飛散した水滴のうち再び水面に落下する量を除いた割合(%)		
k :	強制砕波によるエネルギー逸散の増加を考慮するための割り増し係数		
$H_0$ :	入射波高		
$H_0/L_0$ :	入射波形勾配		
$H_R$ :	反射波高		
$H_T$ :	透過波高		
h :	砕波から飛散する水滴の飛散高さ		
$h_B$ :	砕波水深		
$L_0$ :	入射波の波長		
q :	ガーゼに付着した飛沫中の蛍光染料の量		
SWL :	静水面(= Still Water Level)		
$T_0$ :	入射波周期		
t :	飛沫捕捉装置の曝露時間		
$\tan\beta$ :	海底勾配		
U :	風速		
$U_i$ :	i 番目の風速計		
V :	飛沫捕捉用のガーゼから蛍光染料を溶出するための蒸留水の体積		
x :	水平方向(原点を汀線上にとり, 岸向きを正とする)		
$x_B$ :	飛沫量の計測位置(砕波帯内)		
$x_I$ :	飛沫量の計測位置(背後地)		
$x_S$ :	飛沫量の計測位置(汀線)		
z :	鉛直方向(原点を静水面上にとり, 上向きを正とする)		
$\eta$ :	水位		
$\eta_i$ :	i 番目の水位計		
$\Theta(x)$ :	総飛沫量(≡ $\int \theta(x, z) dz$ ; ml/m/min.)		
$\Theta_0$ :	飛沫の発生量(本論文では, $\Theta(x_B)$ で与える)		



(a) 非対称性がみられる



(c) Splash からの水滴の飛散



(b) 波頭部の Over-turning

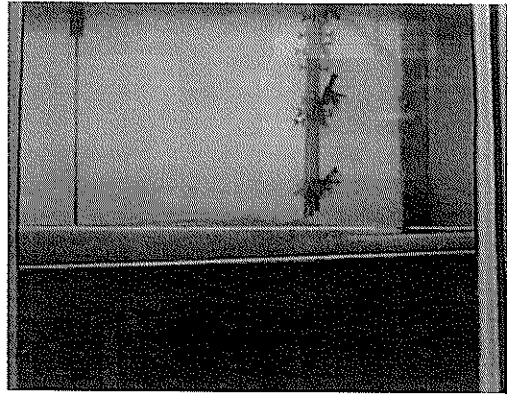


(d) Horizontal roller による水面の乱れ

付図-1.1 砕波時の水面の VTR 画像例 (Plunging 型砕波,  $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$ ,  $U=10\text{m/s}$ )



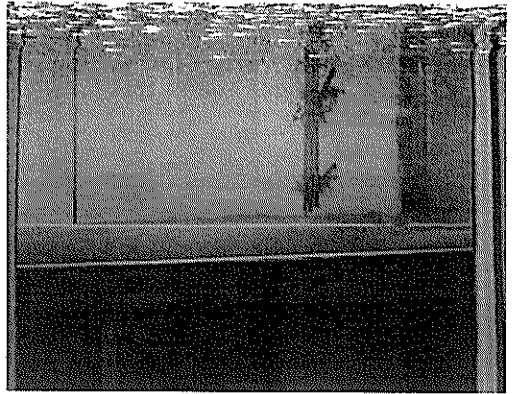
(a) Surging による連行渦の進行 (1/4)



(c) Surging による連行渦の進行 (3/4)



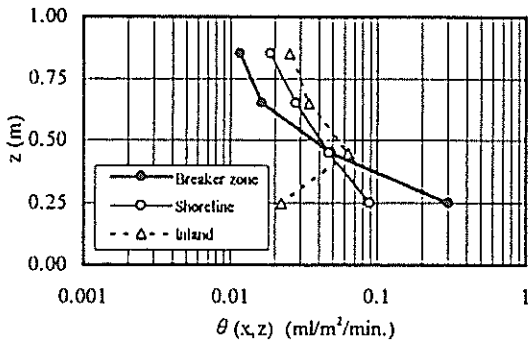
(b) Surging による連行渦の進行 (2/4)



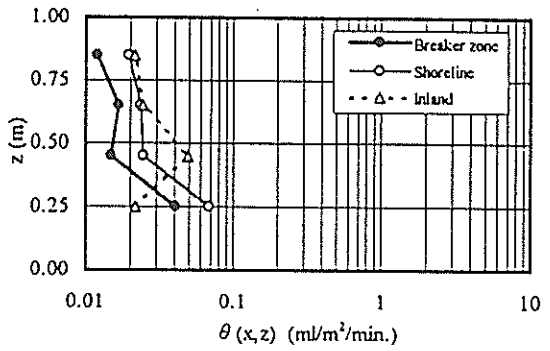
(d) Surging による連行渦の進行 (4/4)

付図-1.2 砕波時の水面のVTR画像例 (Surging 型砕波,  $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$ ,  $U=10\text{m/s}$ )

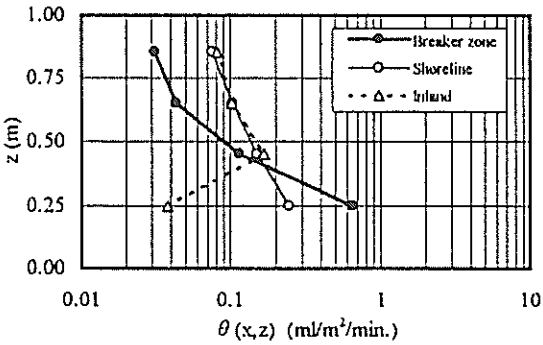




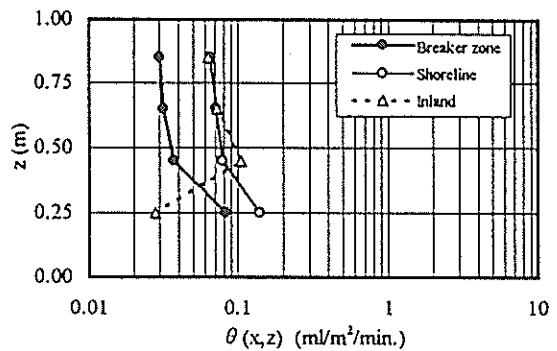
(a)  $U=10-11\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



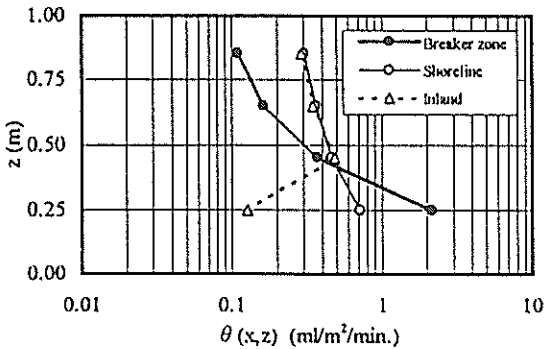
(e)  $U=10-11\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



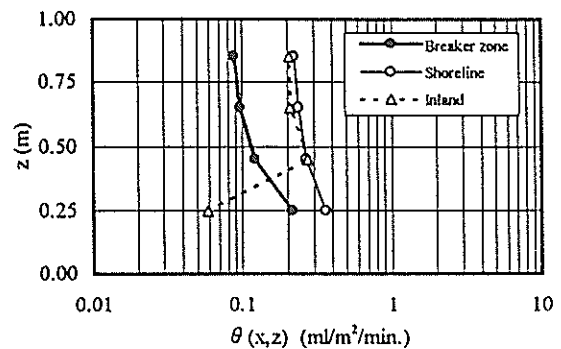
(b)  $U=11-12\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



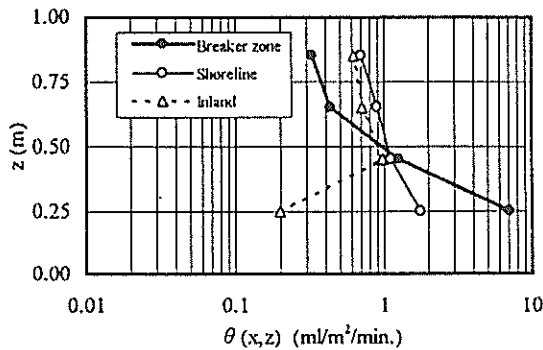
(f)  $U=11-12\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



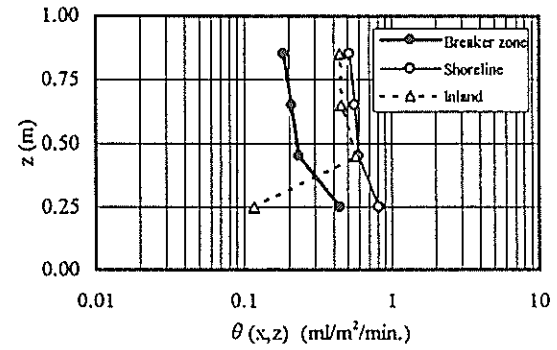
(c)  $U=12-13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



(g)  $U=12-13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

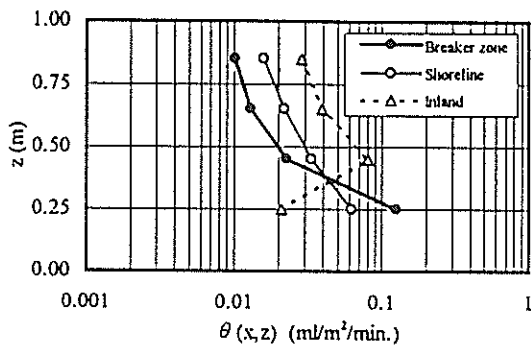


(d)  $U=13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合

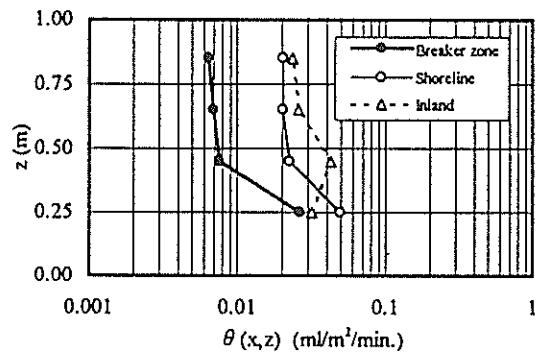


(h)  $U=13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

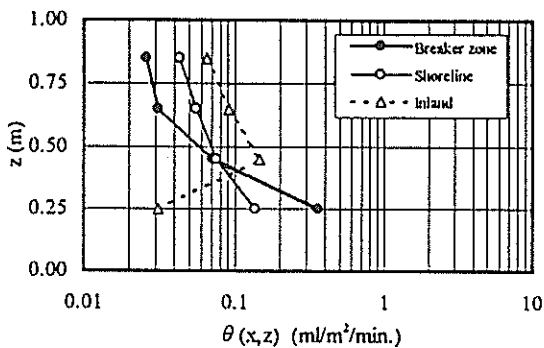
付図-2.1 飛沫量の鉛直分布 ( $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$ )



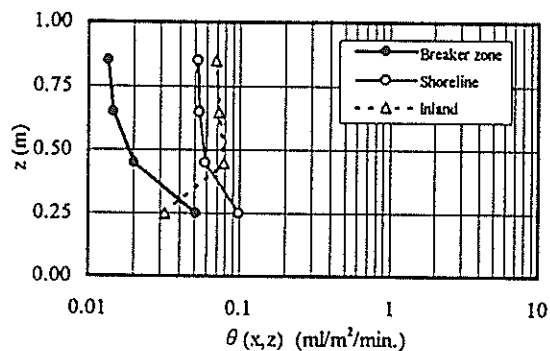
(a)  $U=10-11\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



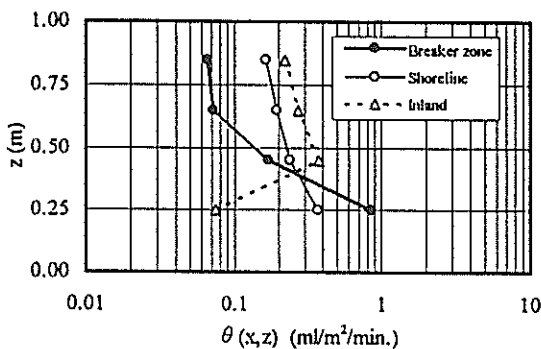
(e)  $U=10-11\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



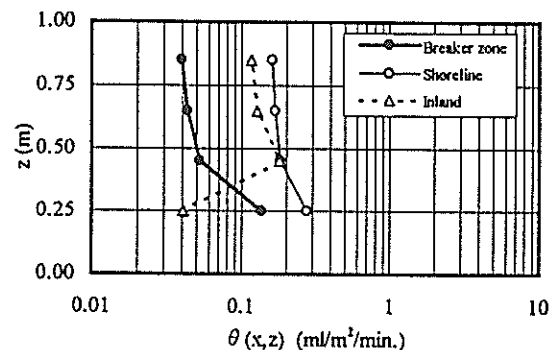
(b)  $U=11-12\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



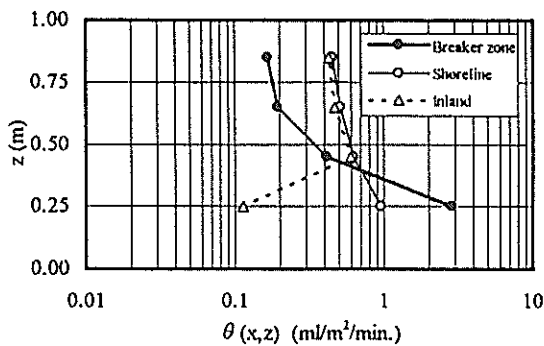
(f)  $U=11-12\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



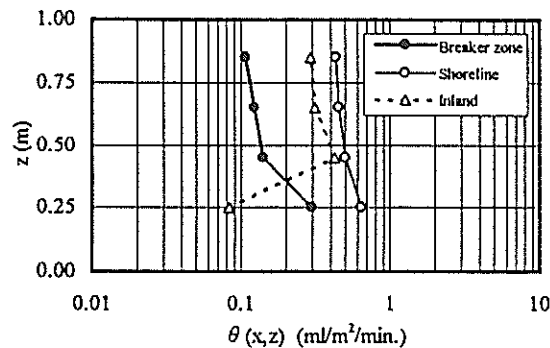
(c)  $U=12-13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



(g)  $U=12-13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

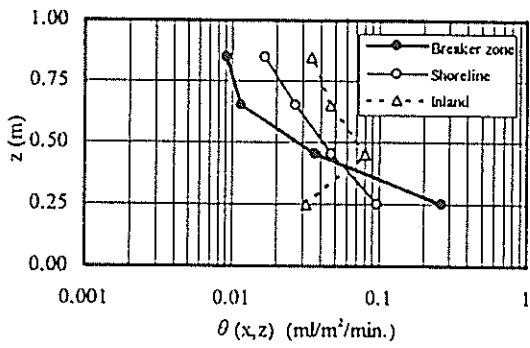


(d)  $U=13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合

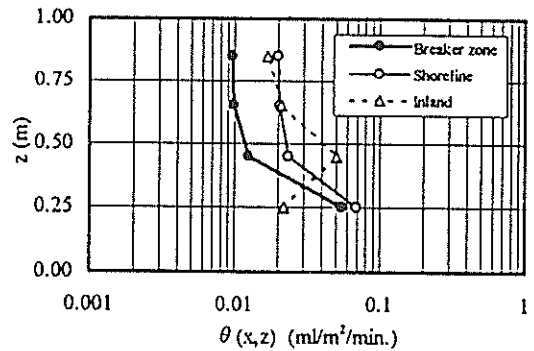


(h)  $U=13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

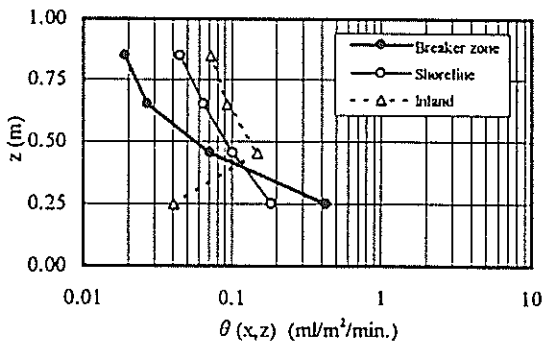
付図-2.2 飛沫量の鉛直分布 ( $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$ )



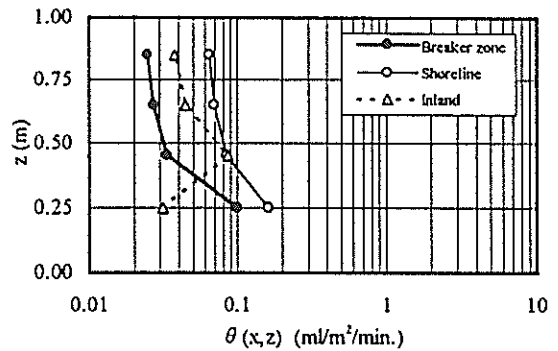
(a)  $U=10-11\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



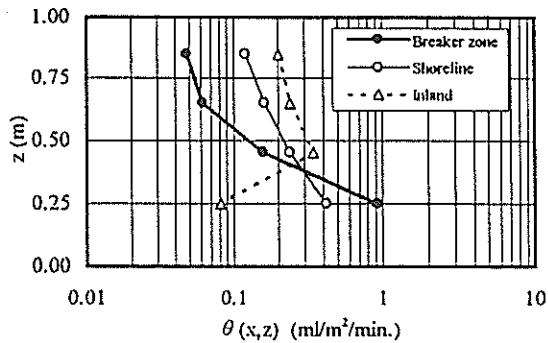
(e)  $U=10-11\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



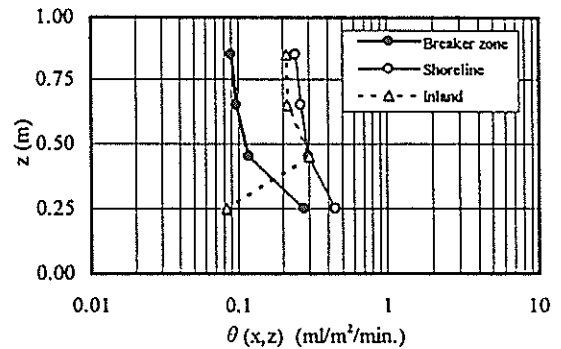
(b)  $U=11-12\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



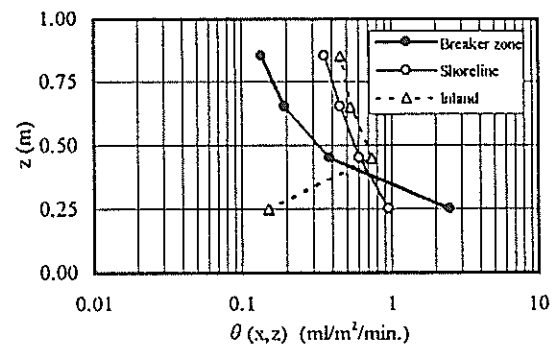
(f)  $U=11-12\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



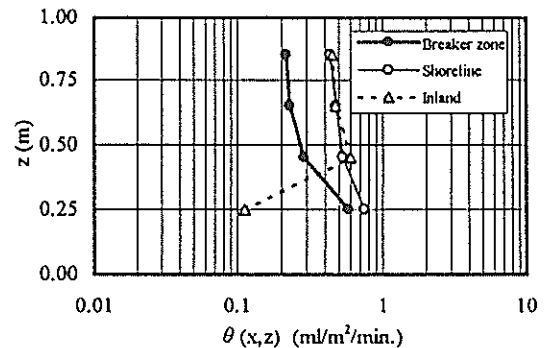
(c)  $U=12-13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



(g)  $U=12-13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

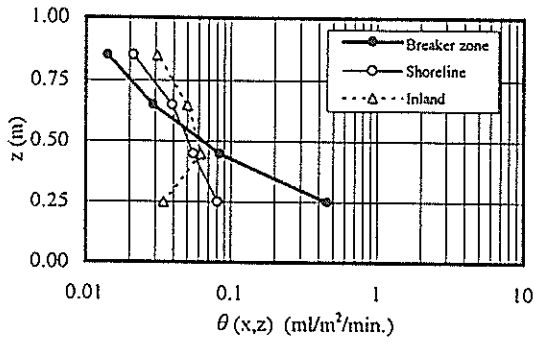


(d)  $U=13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合

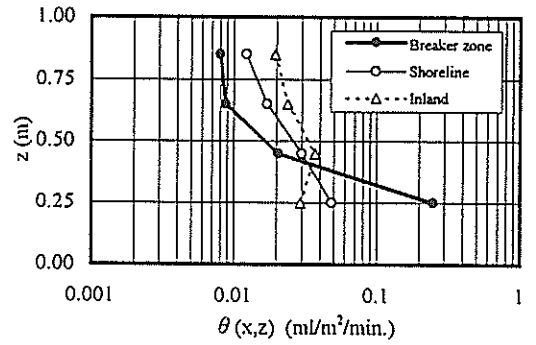


(h)  $U=13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

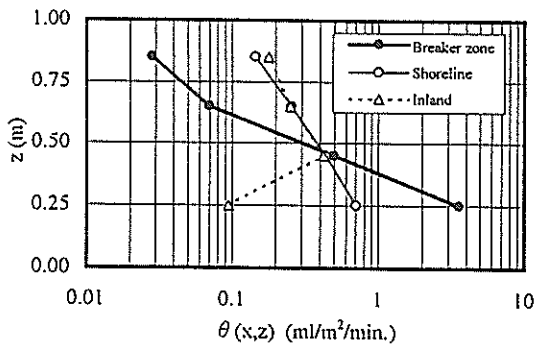
付図-2.3 飛沫量の鉛直分布 ( $H_0=10\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$ )



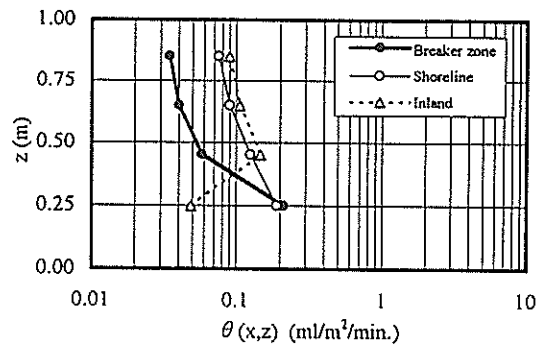
(a)  $U=5-10\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



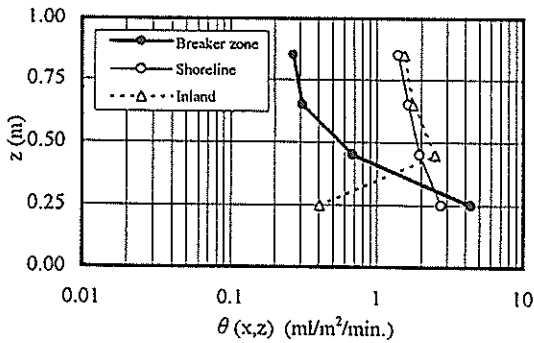
(d)  $U=5-10\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



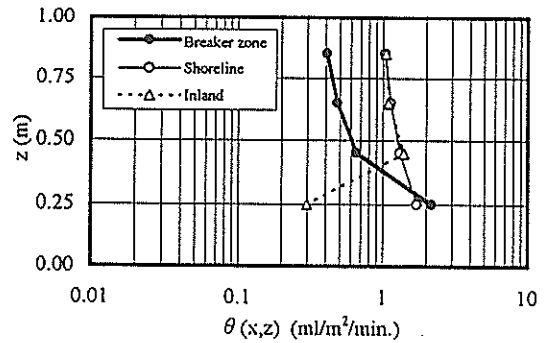
(b)  $U=10-11\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



(e)  $U=10-11\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

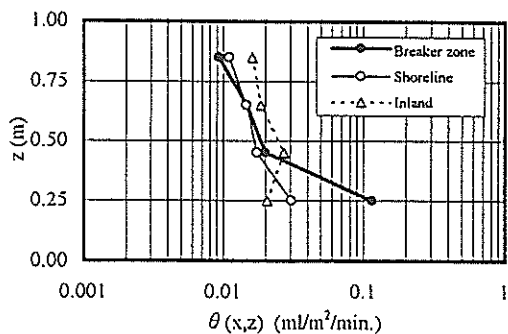


(c)  $U=13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合

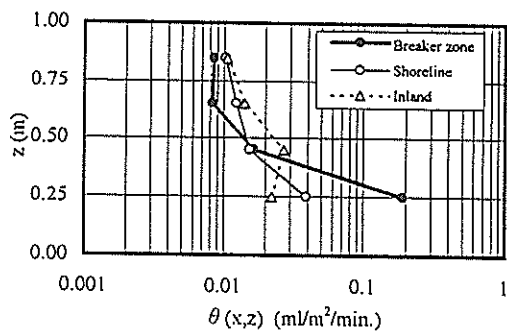


(f)  $U=13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

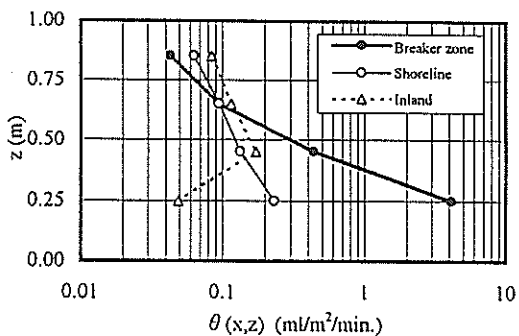
付図-2.4 飛沫量の鉛直分布 ( $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.0\text{s}$ )



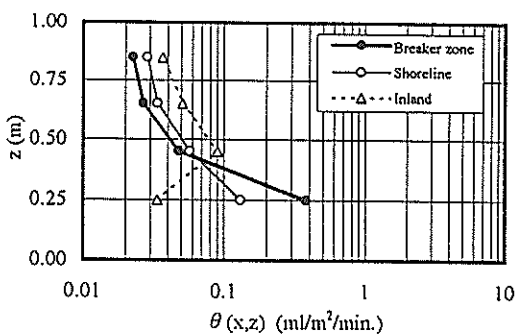
(a)  $U=5-10\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



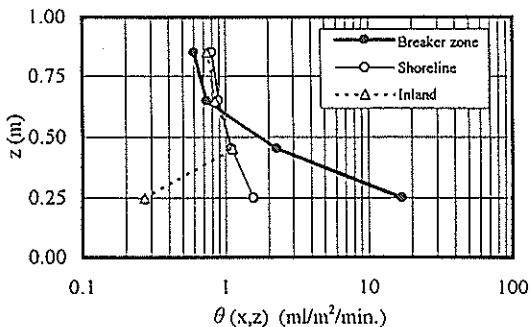
(d)  $U=5-10\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



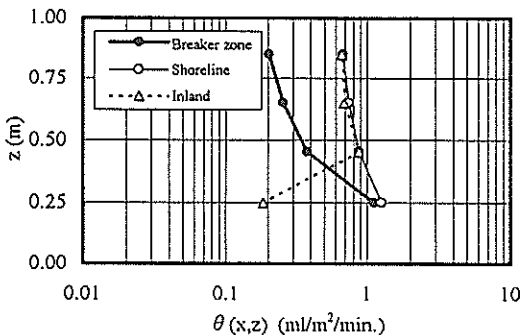
(b)  $U=10-11\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



(e)  $U=10-11\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

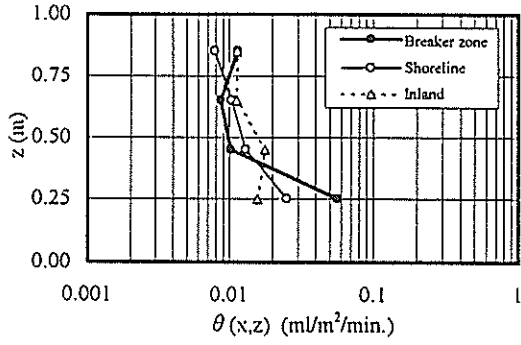


(c)  $U=13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合

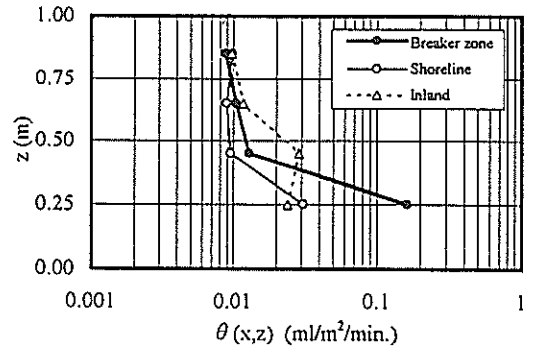


(f)  $U=13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

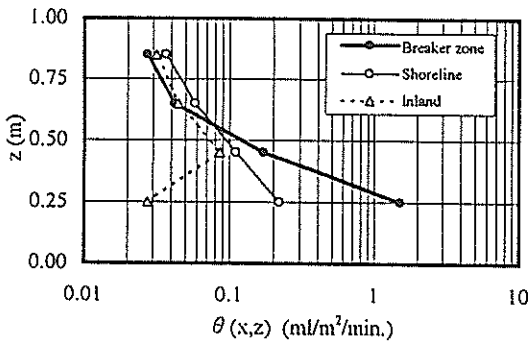
付図-2.5 飛沫量の鉛直分布 ( $H_0=16\text{cm}$ ,  $T_0=1.2\text{s}$ )



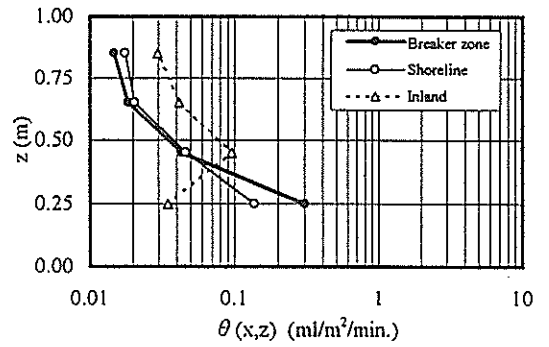
(a)  $U=5-10\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



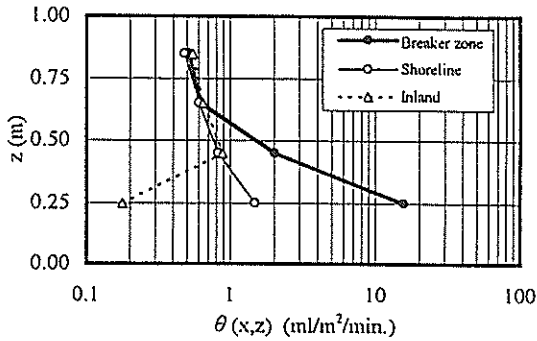
(d)  $U=5-10\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



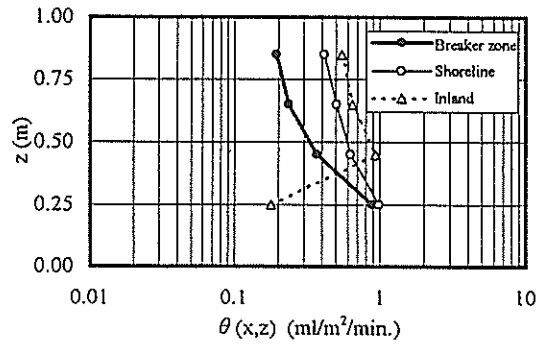
(b)  $U=10-11\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



(e)  $U=10-11\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合



(c)  $U=13\text{m/s}$ , 強制砕波を行った場合



(f)  $U=13\text{m/s}$ , 斜面床のみの場合

付図-2.6 飛沫量の鉛直分布 ( $H_0=13\text{cm}$ ,  $T_0=1.4\text{s}$ )

港湾技研資料 No.843

1996. 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Edited by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright ©(1996) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。