

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 34 NO. 4 DEC. 1995

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第34巻 第4号 (Vol. 34, No. 4) 1995年12月 (Dec. 1995)

目 次 (CONTENTS)

1. 飛沫の発生と疑似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査
.....村上和男・加藤一正・清水勝義・柳鳴慎一・中村聡志・尾崎 靖・福田真人
.....宮崎啓司・山田邦明・西守男雄..... 3
(Field Studies on the Generation of Sea Salt Sprays and the Reduction of its
Transportation by Imitation GreeneryKazuo MURAKAMI,
Kazumasa KATOH, Katsuyoshi SHIMIZU, Shin-ichi YANAGISHIMA, Satoshi
NAKAMURA, Yasushi OZAKI, Masato FUKUDA, Keiji MIYAZAKI, Kuniaki YAMADA
and Danwo NISHIMORI)
2. 半たわみ性材料によるコンクリート舗装の急速補修
.....八谷好高・市川常憲.....33
(Fast Rehabilitation Method with Semi-rigid Materials for Airport Concrete
PavementsYoshitaka HACHIYA, Tsunenori ICHIKAWA)
3. 港湾空間における港湾資本の推計及び港湾空間特性モデルの作成に関する研究
.....高橋宏直・山本幸司.....69
(A Study on the Capital Stock of Port Space and the Port Space Model to
Explain Port Characteristics
.....Hironao TAKAHASHI, Koshi YAMAMOTO)

1. 飛沫の発生と疑似植栽による 飛沫抑制効果に関する現地調査

村上和男*・加藤一正**・清水勝義***・柳嶋慎一****
中村聡志*****・尾崎 靖*****・福田真人*****・宮崎啓司*****
山田邦明*****・西守男雄*****

要 旨

本論文は、沿岸域における海面からの飛沫(海塩粒子)の発生および疑似植栽による飛沫軽減に関する現地調査の結果を述べたものである。本現地調査は茨城県鹿島灘の波崎海岸において実施された。海面からの飛沫の発生に関する調査は波崎海洋研究施設の観測棧橋上で実施した。また疑似植栽による飛沫軽減に関する調査は同海岸の砂浜において、ガーゼに付着する塩分量からの飛沫量分布およびプロペラ風速計による風速分布の測定により実施した。

現地観測の結果、海面からの飛沫の発生は砕波点近傍で多いこと、およびその鉛直分布は下層から上層に向かって減少する指数分布をしていること、飛沫の発生量は風速と波速の相対速度と強い相関があること、更に飛沫の陸上部への輸送は海風時のみであることが示された。また、測定ガーゼに付着した飛沫量は、空気中の塩分濃度にその空気のガーゼへの接触量との積によって表されることが示された。

陸上部への飛沫の輸送に関しては、汀線近傍では下層から上層に向かって減少する指数分布を示した飛沫量分布が、内陸部に輸送されるにつれて、地表付近は減少、上層部は若干増加することが示された。これは、地表近傍の風速の減少と鉛直方向の拡散によるものと考えられることができる。また、植栽による飛沫軽減の効果は、風速が減少する疑似植栽ネットの背後域での飛沫量の減少によって確認された。また、飛沫の地上への落下は小さいことが確かめられた。

キーワード：飛沫，植栽，塩害，現地調査

* 海洋環境部環境評価研究室長
** 海洋環境部漂砂研究室長
*** 水工部主任研究官
**** 海洋環境部主任研究官
***** 元海洋環境部漂砂研究室
***** 元海洋環境部環境評価研究室
***** 海洋環境部環境評価研究室

1. Field Studies on the Generation of Sea Salt Sprays and the Reduction of its Transportation by Imitation Greenery

Kazuo MURAKAMI¹, Kazumasa KATOH², Katsuyoshi SHIMIZU³,
Shin-ichi YANAGISHIMA⁴, Satoshi NAKAMURA⁴, Yasushi OZAKI⁵,
Masato FUKUDA⁵, Keiji MIYAZAKI⁶, Kuniaki YAMADA⁶
and Danwo NISHIMORI⁷

Synopsis

This paper describes the field investigations of the generation of sea salt sprays from the sea surface and the reduction of the spray transportation by greenery planted in the coast. This field studies were carried out at Hazaki-Coast in the Sea of Kashima, Ibaraki Prefecture. The field measurements of the spray generations were carried out on the observation pier of the HORF (Hazaki Oceanographical Research Facility), and the measurements of spray transportation were carried out on the sandy beach.

From the results, it is shown that the amount of the spray generated from the sea surface is related to the relative velocity between wind velocity and wave velocity at the wave breaking zone, but the spray is transported to the land only when the wind is blown from the sea to land. The amount of the spray attached to the gauze is expressed by the concentration of salt in the atmosphere multiplies the volume of air touched to the gauze. The spray transported to land area shows the landward exponential distribution at the shoreline, and the concentration decreases near the surface of the land and increases in the upper part. The concentration distribution changes are due to the wind velocity profile and vertical diffusion processes.

It is confirmed that the amount of spray attached to the gauze is reduced behind the imitation greenery net, and the amount of spray fallen down to the land is very small.

Key Words : Sea Salt Spray, Greenery, Salt Damage, Field Study

¹ Chief of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division

² Chief of Littoral Drift Laboratory, Marine Environment Division

³ Senior Research Engineer, Hydrodynamics Engineering Division

⁴ Senior Research Engineer, Marine Environment Division

⁵ Ex-Member of Littoral Drift Laboratory, Marine Environment Division

⁶ Ex-Member of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division

⁷ Member of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. 飛沫に関する既往の研究	7
2.1 沿岸域の環境と飛沫	7
2.2 飛沫の発生と輸送	7
2.3 飛沫の測定法	9
3. 飛沫に関する現地調査	10
3.1 現地調査位置と観測時期	10
3.2 飛沫塩分量の測定方法	10
3.3 飛沫の測点配置	12
4. 現地調査結果	14
4.1 海面からの飛沫の発生	14
4.2 陸上部への飛沫の輸送	19
4.3 飛沫の地上への落下	22
5. 飛沫調査結果の検討	23
5.1 海面からの飛沫の発生メカニズム	23
5.2 飛沫の輸送・付着メカニズム	25
6. 結論と今後の課題	31
参考文献	31

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。また海岸は、自然災害に対する安全性を向上させるとともに、人々の憩いの場所としての空間を創造するような海岸整備が要請されている。しかし海岸は、海岸付近に住む人々にとって、海からの高波の来襲や海岸侵食等の自然災害からの脅威にさらされてきた領域でもある。特に、海からの飛沫（海塩粒子）の飛散は塩害の原因となり、昔から悩みの種であった。塩害からの被害を防止するために、自治体および住民は生活の知恵として種々の工夫を行っている。このような塩害による被害の防止・軽減は、人々の憩いの場所として的高質な海岸空間を創造するためには必要不可欠な課題である。

これらの被害を軽減する方策を検討する際には、海岸線付近の飛沫の空間分布を把握するとともに、海面からの飛沫の発生のメカニズムおよび陸上部への飛沫の輸送のメカニズムを解明する必要がある。また飛沫の輸送量の軽減として、海岸付近に植栽された樹木の効果が大きいと考えられる。この樹木は、海岸付近の景観・環境を形造るとともに塩害等からの防災機能も併せ持つ。この樹木の植栽の方法等を検討する際にも、飛沫の輸送および樹木や家屋等の構造物への付着のメカニズムを把握する必要がある。

以上のような観点から、茨城県鹿島灘の波崎海岸において、海からの飛沫の発生および陸上部への飛沫の輸送、および疑似植栽ネットによる飛沫の輸送量の軽減に関する現地調査を実施した。また、これらの調査結果と風・波等の海象条件との関連を求めた。さらに、観測された風速分布を用いて空気中の塩分の拡散輸送の数値計算を行い、疑似植栽ネットや陸上部への飛沫の付着メカニズムの検討を行った。

2. 飛沫に関する既往の研究

2.1 沿岸域の環境と飛沫

海岸は、人々に憩いと安らぎを与える場所として重要な空間である。また海岸は、人と海との接点として良質な景観を有する空間として存在する。しかしながら、海岸近傍に生活する住民にとって、海は様々な被害を与えてきた場所でもある。海からの飛沫の飛散は、その被害の一つである。

飛沫による被害は塩害として認識されており、海塩粒子の付着・蓄積により、一般家庭用品、コンクリートや鉄鋼等の建設構造物、電柱の碍子等への電力施設、およ

び農作物等への被害を与えている。冬季風浪の激しい日本海側のある小都市でのアンケート調査結果（第四港湾建設局，1988）によると、その地方の海岸部に住む一般家庭の内、36%の家庭で越波や飛沫による被害が生じていると回答し、また97%の家庭で飛沫による被害を意識していると回答している。また、比較的波の小さな瀬戸内海の小都市でのアンケート結果（村上他，1994）においても、25%の人は飛沫による被害を受けており、また40%の人が飛沫による被害を意識していると回答している。このように、海岸付近に住む人々にとって、海からの飛沫の飛散による塩害の被害は、海岸付近の生活環境を考える上で重要な問題となっている。

このような塩害は、海水中に含まれている塩分(NaCl)が金属の腐食を著しく促進させる作用をもっていること、および大部分の農作物は塩分に弱い性質を持っていることに起因する。図-1に示すのは、大気中のNaClの濃度と鉄の腐食量との関係である（第四港湾建設局，1988）。金属の腐食は、金属が酸素と化合して電子を奪われ陽イオンになることであり、海水中に含まれている塩素イオン(Cl⁻)が腐食を促進させるイオンとして知られている。建設省の調査結果（1986）によると、全国のコンクリート橋の被害実態調査結果と年平均の飛沫塩分付着量(NaCl重量)とに良い相関が示されており、塩害によるコンクリート橋の劣化損傷に飛沫の飛散量の影響が大きいことを示している。

2.2 飛沫の発生と輸送

飛沫は、海における波と風的作用によって生成された海塩粒子が風によって輸送されたものである。図-2に海から発生する海水滴の大きさと飛沫の現象との関係を

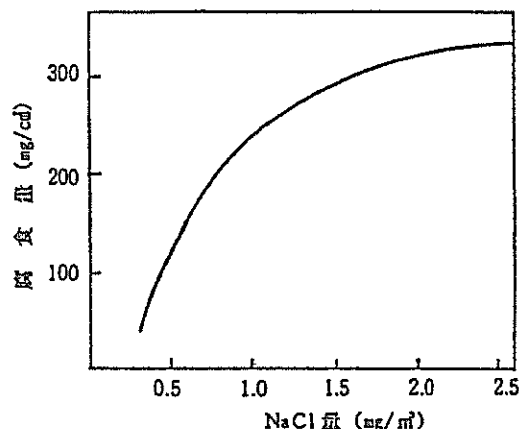
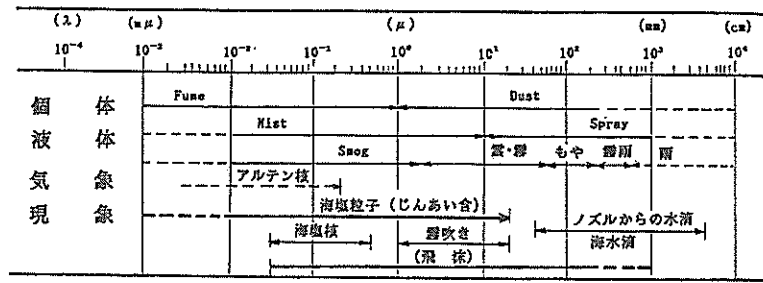


図-1 大気中のNaClの濃度と鉄の腐食量との関係



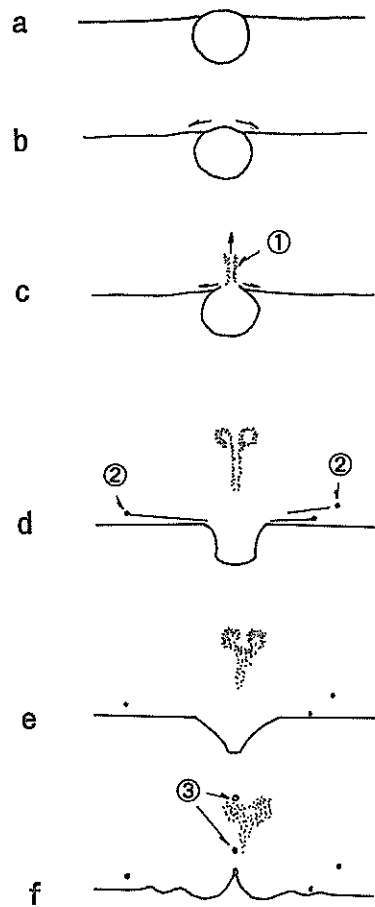
図一 2 海から発生する海水滴の大きさと飛沫の現象との関係

示す(大即他, 1986)。数ミクロンから数十ミクロンの非常に細かい霧状の海水滴から、数ミリ程度の比較的粒径の大きな海水滴がある。粒径の細かい数ミクロンの飛沫(海塩粒子)は、図一3に示すように、海水面に浮かぶ気泡が破裂して空気中に飛び散るもので、その海塩粒子は海岸から数十 km もの内陸部に輸送される。このような細かい粒径の飛沫に関しては鳥羽 (1966) による研究例がある。

一方、波頭が風によってちぎれて飛び散る比較的粒径が大きな飛沫がある。特に、風によって発達した波は碎波点近傍で碎波する。この碎波点近傍で碎波直前の波頭からちぎれて飛び散る飛沫、および碎波によって空気中に飛び散る飛沫は、比較的粒径も大きく、飛沫量も多い。本研究では、飛沫による沿岸域の生活環境に及ぼす影響を考慮する観点からすると、大きなものから小さなものまですべてが対象となるが、植栽による飛沫量の軽減という観点からすると、数十 km もの内陸部に輸送される粒径の細かい飛沫よりも、比較的粒径の大きな飛沫が対象となる。

写真一1に、波頭から飛沫がちぎれて空気中に飛び散る様子を示す。写真一1(a)は波と風の進行方向が同じ場合、写真一1(b)が反対方向の場合である。風の力によって飛沫が飛び散る様子がよく分かる。

この飛沫の陸上部での分布の測定は以前から実施されている。例えば、徳永・田代 (1987) による構造物に付着している塩分量と海岸からの距離の関係、あるいは薄井・清水 (1986) による飛沫塩分量の鉛直分布の測定結果がある。これらの結果から、海岸からの距離が増加するにしたがって構造物に付着する塩分量は減少すること、また飛沫塩分量の鉛直分布の下層から上層にかけて減少する分布から下層から上層に増加する分布へと変化していく様子が報告されている。このような飛沫量の測定結果から、陸上部への飛沫の輸送モデルが幾つか報告されている(例えば、鳥羽, 田中, 1977)。



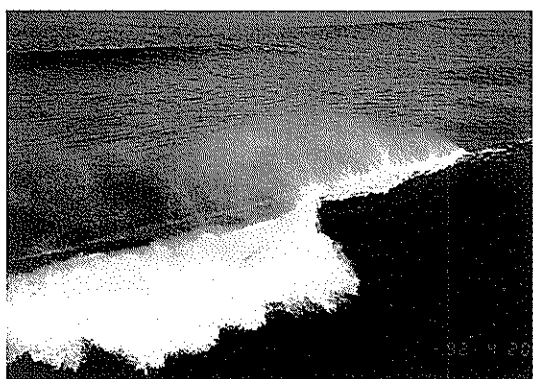
気泡の破裂による海塩粒子の生成の模式図

図一 3 気泡の破裂による飛沫の発生 (鳥羽(1966)による)



波高 1m 順風 8m/sec

写真一 (a) 飛沫の発生 (風と波進行方向が同じ場合)



波高 1m 逆風 8m/sec

写真一 (b) 飛沫の発生 (風と波進行方向が反対の場合)

2.3 飛沫の測定法

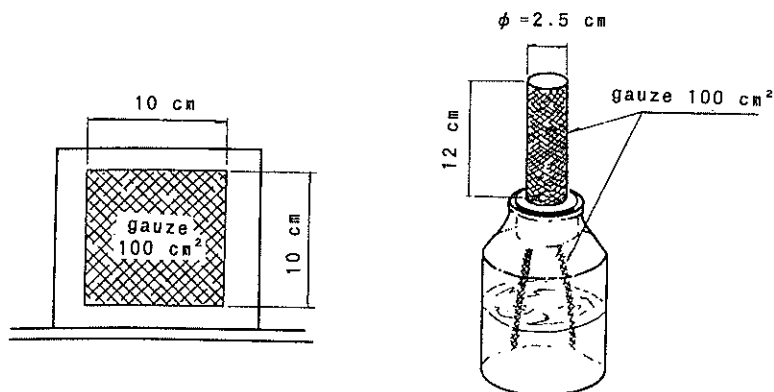
大気中の塩分濃度の測定法は寺部 (1987) によって表一に示すように沈降法, 吸着法, 吸引法に整理されている。雨水に含まれる塩分量を測定する場合には沈降法

が適しているが, 大気中の塩分量の測定には吸着法が適している。吸着法の中で一般によく用いられている方法は, 乾式クロス法 (又は乾式ガーゼ法) と湿式円筒ガーゼ法 (又は湿式ガーゼ法) である。

乾式ガーゼ法は, 乾いたガーゼを図一4(a)に示すように木枠で固定し, 空气中に一定期間放置する方法で, JIS (z2381) 屋外暴露試験方法通則の参考法として掲載されている。この方法において, 事前に水洗いしたガーゼをよく乾燥させ, 二つ折りにして木枠に取り付ける。これを, 直接雨の当たらない風通しのよい所に放置する。一定期間放置後回収されたガーゼは, 細かく切断され水50 ml を加えて20分間加熱する。冷却後, JIS の定める吸光度法によって塩化物イオンの濃度を測定する, という方法によって大気中の塩分量を測定する方法である。乾式ガーゼ法は設置方法が簡単なためによく用いられている。しかし, 乾式ガーゼ法は海塩粒子が乾燥している場合には, 海塩粒子がガーゼに接触しても付着しない場合

表一 飛沫の測定法 (寺部, 1987)

採取法	装置, 器具, 方法
沈降法	デボジットゲージ 円筒型ダストジャー 広口びん
吸着法	湿式円筒ガーゼ法 (Wet Candle Method) 乾式クロス法 (Dry Cloth Method) アルカリろ紙による方法
吸引法	吸引管による方法 ハイボリュームサンプラーによる方法 アンダーセンサンプラーによる方法 カスケードインパクターによる方法 その他



(a) 乾式ガーゼ法

(b) 湿式ガーゼ法

図一4 (a): 乾式ガーゼ法, (b): 湿式ガーゼ法

が考えられ、塩分量を過小評価する可能性がある。

ガーゼに接触した海塩粒子をできるだけ付着させる方法として、湿式ガーゼ法がある。湿式ガーゼ法とは、図一4(b)に示すように、500mlの広口びんのゴム栓部にガーゼを巻き付け、そのガーゼの先端が広口びんの中の水に浸されてガーゼは常に湿った状態にしておいて、海塩粒子がガーゼに付着しやすくように工夫した方法である。大気中に暴露されるガーゼの面積は100cm²に設定しておいて、後にガーゼに付着した塩分量を測定する方法である。この方法はISO(国際標準化機構)にも登録されている方法である。

乾式ガーゼ法、湿式ガーゼ法のどちらにも長所、短所がありそうである。乾式ガーゼ法は、測定法が簡易なこと及び空気の流れをあまり阻害しないという長所があるが、乾いた海塩粒子が付着しにくいという短所を持つ。一方、湿式ガーゼ法の場合、海塩粒子が付着しやすいという長所を持つが、ガーゼの断面を空気が通過しないので空気の流れを変化させること、及び空気の流れに対して直接風を受ける断面と広口びんの背後に位置する断面とがあり、飛沫の付着量が異なるという短所を持つ。

飛沫の測定法には、その他、建設省土木研究所が開発した土建式塩分捕集器(建設省,1986)や、試薬フィルムに海塩粒子を付着させる方法(中島他,1968)等、多くの方法が工夫・検討されている。しかし、空気中の塩分濃度は非常に微量なのでその測定は容易ではないようだ。

3. 飛沫に関する現地調査

3.1 現地調査位置と観測時期

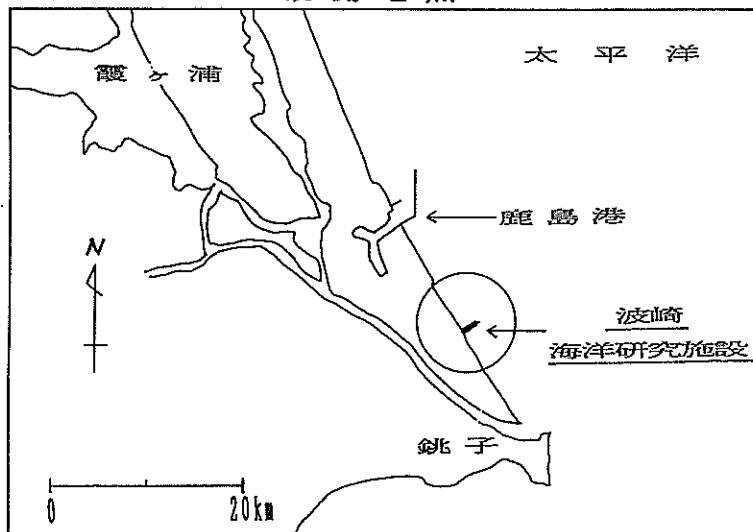
飛沫の発生およびその輸送に関する現地調査を茨城県鹿島灘に位置する波崎海洋研究施設の観測栈橋を用いて行った。その位置を図一5に示す。また観測栈橋の概要を写真一2に示す。観測地点近傍の海岸形状は、図一6に示すごとく、沖側には平均勾配1/50~100の緩やかな遠浅な海岸となっている。陸上部は汀線から100mまでは緩やかな勾配の砂浜となっているが、約100mの地点に高さ約5mの小高い丘が存在し、その奥は松林から民家へと続いている。

観測は、表一2に示すように5回、延べ9日間の調査を行っている。この調査において、はじめの2回は海面からの飛沫の発生に関する調査を、3回目は飛沫の陸上部への輸送、4,5回目は陸上部への輸送とともにネットによる飛沫の軽減に関する調査を行っている。

3.2 飛沫塩分量の測定方法

空気中の塩分濃度を直接測定することは難しい。したがって、飛沫量の測定は塩分の物質への付着量を測定して行う。付着塩分量の測定方法には前章で述べたように幾つかあるが、ここでは海の近傍での測定であり、海塩粒子は比較的ガーゼに付着しやすいものと考えて、測定法が簡単な乾式ガーゼ法によった。塩分の付着量は空気中の塩分濃度にその空気の通過量との積によって表され

観測地点



図一5 観測地点(茨城県波崎海岸)



写真-2 観測棧橋の概要

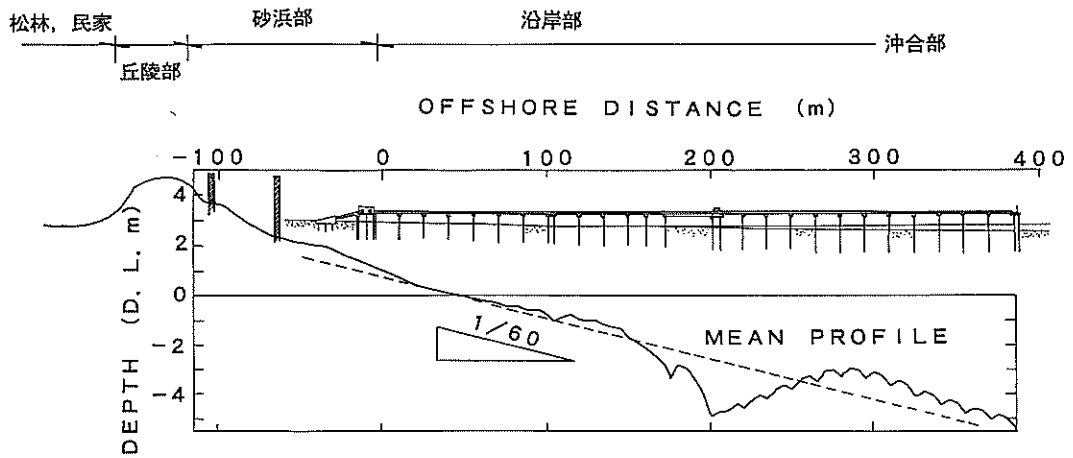


図-6 観測地点近傍の鉛直断面勾配

表-2 波崎における飛沫調査日

	調査日	調査目的	備考
第1回目	1991年11月1日	海面からの飛沫の発生	海からの風
	1991年11月2日	海面からの飛沫の発生	海からの風
第2回目	1992年2月25日	海面からの飛沫の発生	陸からの風
	1992年2月26日	海面からの飛沫の発生	陸からの風
第3回目	1992年12月22日	陸上部での輸送	海(一部陸)からの風
	1992年12月23日	陸上部での輸送	陸からの風
第4回目	1993年3月10日	ネットによる飛沫軽減	海からの風
第5回目	1993年11月5日	ネットによる飛沫軽減	海からの風
	1993年11月6日	ネットによる飛沫軽減	海からの風

るものと考えられるから、測定点での空気の流れを阻害しない方法が望ましい。そこで、塩分の捕捉器は図-7に示すように10cm四方の補足窓(受風面積100cm²)を設けた寸法16cm四方の亚克力板2枚の間にガーゼを挟んだものとした。この捕捉器を写真-3に示す。

飛沫の鉛直分布を測るために、図-8に示すように飛沫捕捉ガーゼをポール(長さ5mと10m)に1m間隔に固定した。なお、陸上部の測定においては既存の電柱を利用した場合もある。捕捉器の面は原則として風向に直角になるように取り付けた。なお、写真-4に飛沫捕捉のガーゼを取り付けたポールの写真を示す。捕捉器に取り付けられたガーゼは空気中に1~2時間放置された後に回収され、ポリエチレン袋に分析作業まで保存した。

付着塩分量の測定はKent-Taylor社の電導度計を用いた。同器は比較的低い塩分濃度での電導度が測定可能な分析器である。まず、回収されたガーゼを200mlのイオン交換水に浸し十分に攪拌した後、その溶液の電導度と水温を測定して溶液中の塩分量を求めた。次に、ガーゼの空気中への放置時間および受風面積で割ることにより単位面積・単位時間当たりの付着塩分量(g/m²/h)を

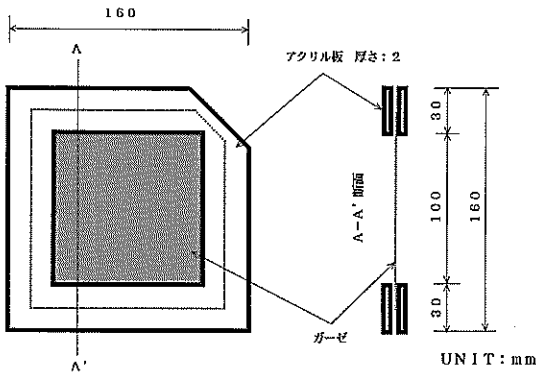


図-7 塩分捕捉器

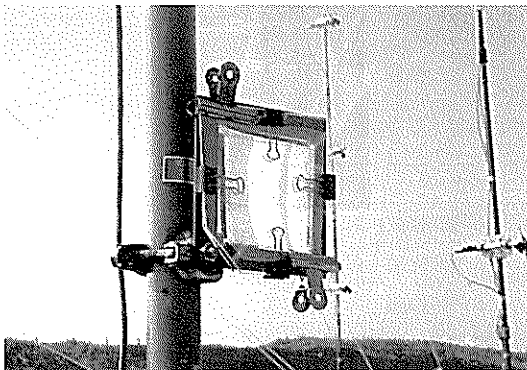


写真-3 飛沫捕捉器(ガーゼ)

算定した。この付着塩分量(飛沫量)の一連の測定の流れを図-9に示す。

飛沫の空間分布を測定するとともに、風速・風向、波高等の測定も同時に実施した。また、陸上部の風に関しては現場型風速計(米国 Young 社製 Model 27106)を前記のポールに取り付けて風の観測を実施した。写真-5に現場型風速計を示す。

波高に関しては、観測栈橋上に設置されている超音波式波高計によって測定した。また、海上の風速についても、観測栈橋に設置されている超音波風速計によって測定した。

3.3 飛沫の測点配置

ポールに取り付けられたガーゼによる捕捉器の測点配置の平面図を図-10(a)~図-10(e)に示す。(a)の1回目、(b)の2回目の観測は海面からの飛沫の発生に重点をおいた観測のために、ポールを観測栈橋に取り付けた。しか

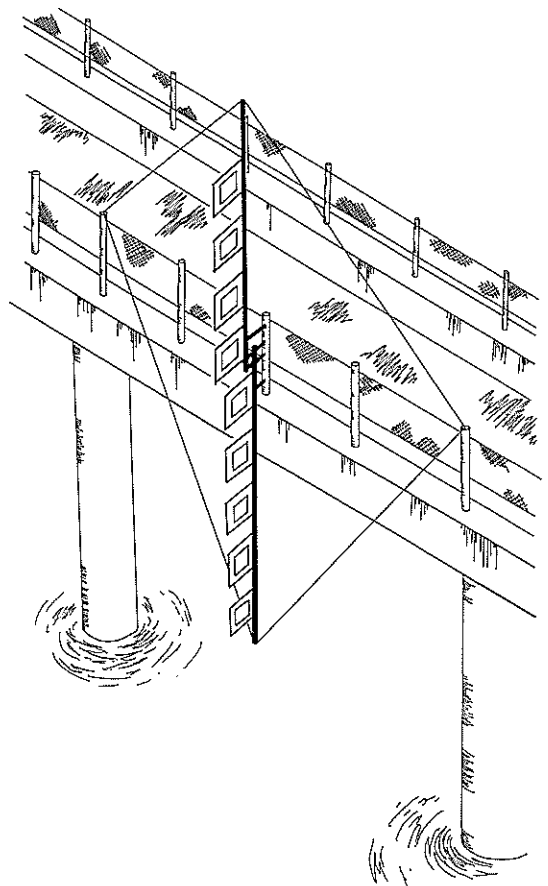


図-8 飛沫捕捉ガーゼと測定ポールの取り付け法



写真-4 飛沫捕捉器（ガーゼ）の取り付けポール

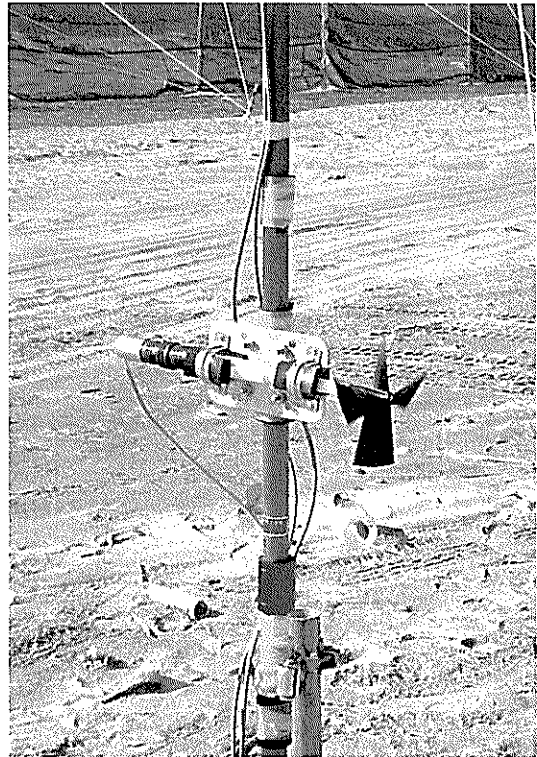


写真-5 現場型風速計（米国 Young 社製 Model 27106）

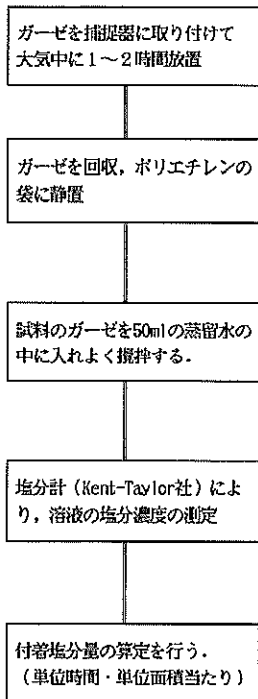
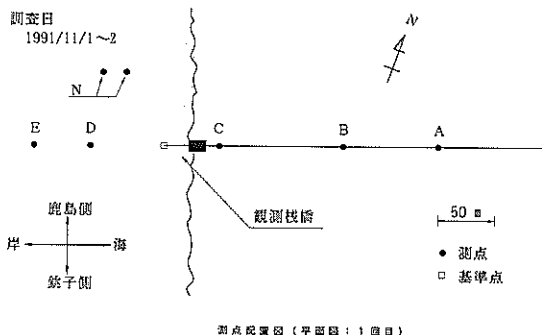


図-9 飛沫塩分量の測定の流れ

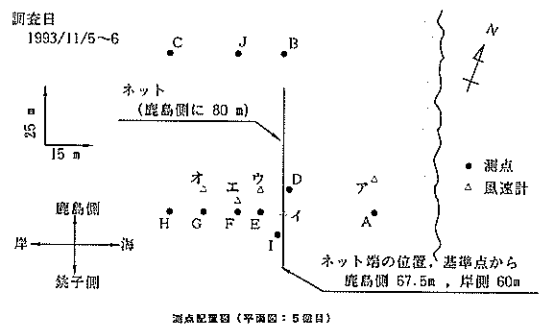
し、(c)の3回目以降からの観測は、主として飛沫の陸上部への輸送を主眼としている。捕捉器の設置高度は、海上においては海面上1m~10m、陸上部においては地上1m~9mの高さまで1m間隔に設置した。

なお、陸上部の風の観測地点についても同図中に示す。海上部の風速に関しては、観測棧橋の先端（汀線から約380m）の地点で海面から10mの高度で1時間おきに測定した。また、陸上部の風に関しては、疑似植栽ネット周辺の風速分布を詳細に測るために、20台の風速計を5本のポールに取り付け、地上1m~7mの高度まで1.5m間隔で連続的に測定した。なお、本風速計は1方向測定可能なプロベラ式であるので汀線近傍の測点のみ同一地点に2台の風速計を取り付けて、岸沖方向と汀線方向の風速を測り、他の19点は総て岸沖方向の風速を測定した。

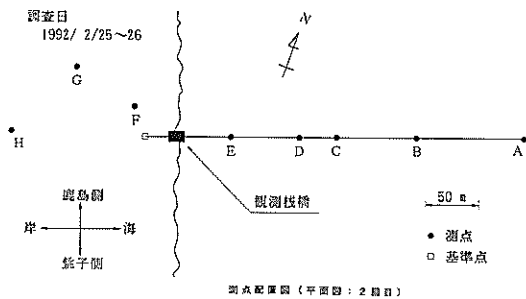
海岸線近傍に植栽された樹木の飛沫軽減のメカニズムを把握するために、砂浜上に疑似植栽ネットを設置した。ここでは、実際の樹木を用いた調査は、樹木の有り無しによる比較ができないこと、海面からの飛沫の発生から内陸部への輸送までの自然条件の測定可能な調査フィールドの選定の困難さから、植栽の代わりに疑似植栽ネット



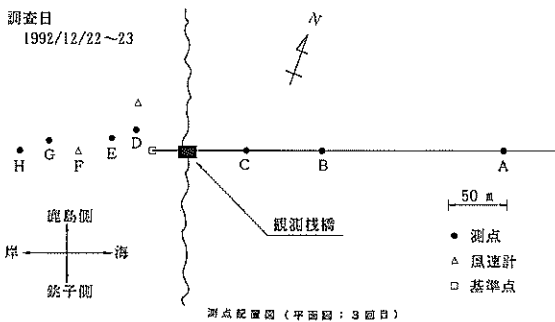
図一10(a) 塩分捕捉器の測定配置図 (1 回目調査)



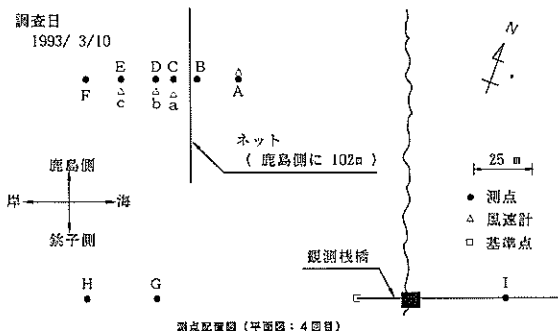
図一10(e) 塩分捕捉器の測定配置図 (5 回目調査)



図一10(b) 塩分捕捉器の測定配置図 (2 回目調査)



図一10(c) 塩分捕捉器の測定配置図 (3 回目調査)



図一10(d) 塩分捕捉器の測定配置図 (4 回目調査)

トを海岸に設置して行った。疑似植栽ネットによる現地調査の情景を写真一6に示す。ネットの幅は80m、高さは3mである。このネットは、海岸の防砂用に用いられるもので、ネットのメッシュ間隔は縦1.2mm、横1.2mmである。このネットを図一10(d), (e)に示すように、満潮時の海岸汀線から約20m内陸部に、また観測栈橋の基準点から67.5m北側に端部がくるように設置した。そして、このネット周辺の風速分布及び飛沫量分布が把握できるように風速計と塩分捕捉器を配置した。

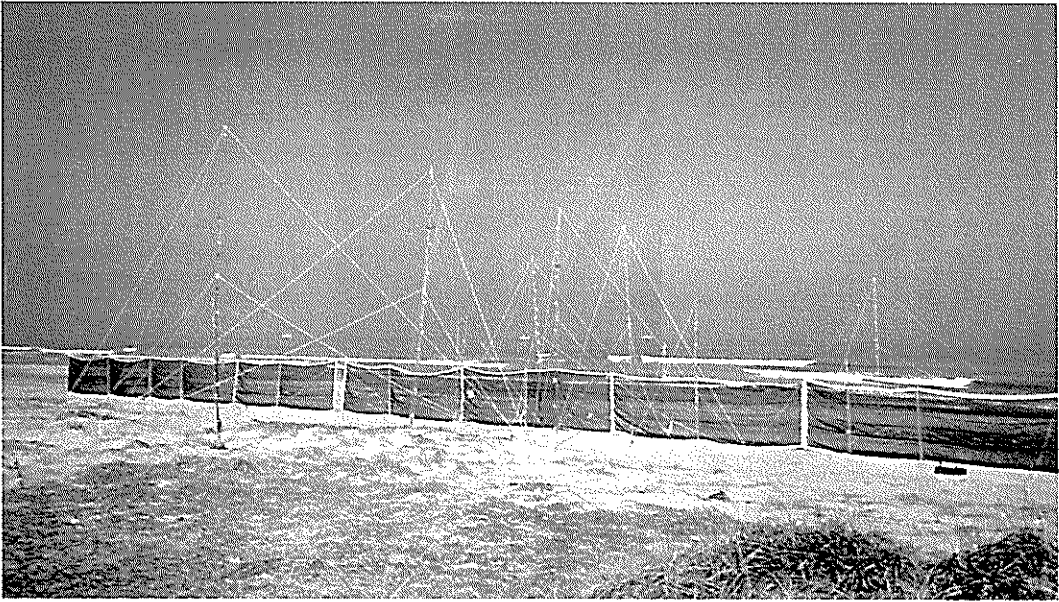
4. 現地調査結果

4.1 海面からの飛沫の発生

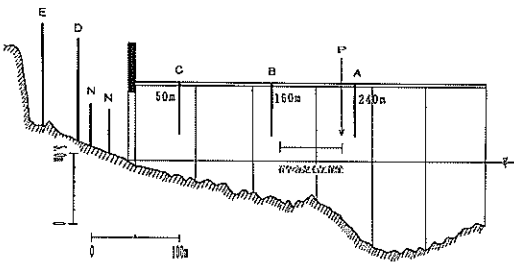
飛沫の現地調査として、まず海面から飛沫がどのように発生してくるのかの観測を行った。塩分捕捉器の配置は図一11(a), (b)に示したもので、観測栈橋上に測定ポールを設置し、図一8に示すようにガーゼを取り付けている。波の砕波点近傍からの発生が大きいものと予想して、その前後に測点を配置している。

海上部の観測結果の一覧を表一3に示す。同表には飛沫調査時の風・波等の自然条件も示している。海上部の観測結果から、飛沫量と海面からの高さとの関係を1991年11月について図一12に、1992年2月の結果を図一13に示す。飛沫量の単位は $g/m^2/h$ である。1回目の1991年11月の観測は、当初ガーゼの空気中への放置時間を1時間に設定したが、1時間という短期間の間には気象条件は大きく変化しないこと、2時間放置した場合は1時間の約2倍の結果が得られたこと、及び1時間の場合の作業の大変さ等から1992年の観測から放置時間を約2時間に延長して、その結果を1時間に規準化して示している。

図一12の結果から、砕波帯近傍の測点Bの海面近傍の飛沫量が多いこと、また砕波帯の沖側の測点Aよりも岸側の測点Cの方が飛沫量が多いことが分かる。この時の風向は沖から岸に向かう風なので、砕波帯近傍で発生した飛沫が風によって運ばれて、測点Cで観測されたもの

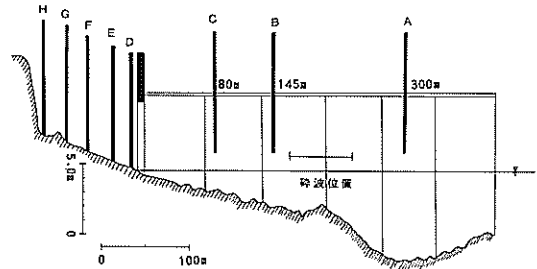


写真一六 疑似植栽ネット



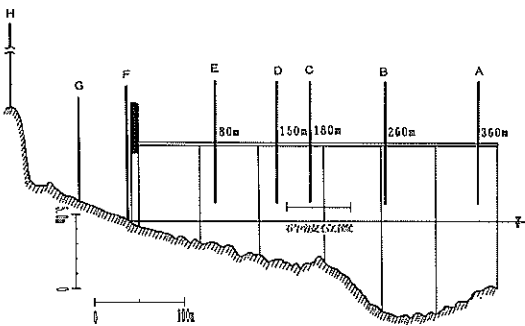
測点配置図（側面図：1回目）

図一11(a) 疑似植栽ネット設置位置の平面配置図（1回目調査）



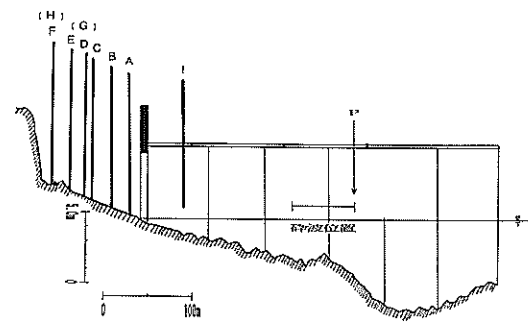
測点配置図（側面図：3回目）

図一11(c) 疑似植栽ネット設置位置の平面配置図（3回目調査）



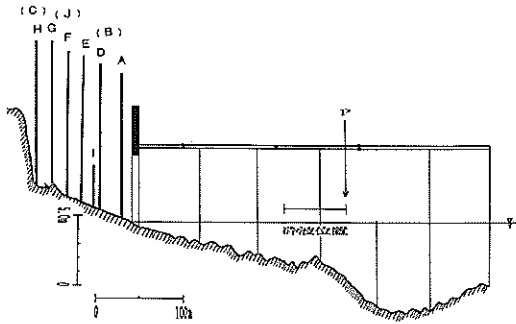
測点配置図（側面図：2回目）

図一11(b) 疑似植栽ネット設置位置の平面配置図（2回目調査）



測点配置図（側面図：4回目）

図一11(d) 疑似植栽ネット設置位置の平面配置図（4回目調査）



測点配置図 (側面図: 5回目)

図一11(e) 疑似植栽ネット設置位置の平面配置図 (5回目調査)

と考えられる。なお、砕波帯真上の測点 B の結果は、砕波によるしぶきが直接ガーゼに接触したため、非常に大きな飛沫量となっている。なお、測点 B の下部での測定は飛沫の付着量が多すぎてガーゼから海水が下に垂れる状態であったために正確な飛沫付着量は得られないので、ここでは塩分量の測定を除外している。このように飛沫量が大きき場合の測定は、表一 1 の沈降法を用いる必要があるであろう。

1992年2月の観測においては、海上部の測点を図一11(b)のように増やし、砕波帯近傍での飛沫量の測定に努めた。その結果を図一13に示す。2回目の観測は、表一3からも分かるように陸からの風となっている。そのため

表一3 海上部での飛沫観測結果

調査番号	観測期日	Case	区 間	発生量 Q (mg/m ² /h)	相対風速 V _r (m/sec)	風 速 V (m/sec)	風 向 θ (°)	平均水深 h (m)	波 速 C (m/sec)
第 1 回 目	1991年 11月1日	-1	A-P	55.9	3.52	11.03	318.2	2.25	4.70
		-2	A-P	66.4	6.20	12.62	327.4	2.16	4.60
	1991年 11月2日	-3	A-P	9.9	5.31	9.67	349.8	1.81	4.21
		-4	A-P	20.1	4.16	8.88	344.4	1.97	4.39
		-5	A-P	12.6	3.09	7.93	344.3	2.10	4.54
		-6	A-P	29.1	2.83	7.87	342.3	2.23	4.67
		-7	A-P	43.9	3.49	8.71	340.4	2.27	4.72
		-8	A-P	34.7	3.11	8.45	337.5	2.25	4.70
		-9	A-P	27.4	3.45	8.40	342.7	2.13	4.57
第 2 回 目	1992年 2月25日	-1	C-D	215.0	9.96	7.52	233.3	3.05	5.47
			C-E	151.0	9.33			2.39	4.84
			C-汀線	140.3	8.55			1.68	4.06
			D-E	116.2	8.95			2.03	4.46
			D-汀線	127.3	8.13			1.35	3.64
			E-汀線	127.1	7.31			0.61	2.82
	-2	C-D	286.5	10.06	8.11	232.4	2.69	5.13	
		C-E	201.5	9.42			2.04	4.47	
		C-汀線	133.8	8.69			1.43	3.74	
		D-E	153.3	9.01			1.68	4.06	
		D-汀線	94.3	8.23			1.10	3.28	
		E-汀線	40.5	7.25			0.57	2.30	
-3	C-D	85.2	6.60	7.80	257.7	2.49	4.94		
	C-E	63.9	5.92			1.85	4.26		
	C-汀線	51.4	5.39			1.42	3.73		
	D-E	52.3	5.49			1.50	3.83		
	D-汀線	41.1	4.93			1.09	3.27		
	E-汀線	27.0	4.00			0.56	2.34		
1992年 2月26日	-4	C-D	42.6	6.66	2.72	244.5	3.06	5.49	
		C-E	36.2	6.11			2.49	4.94	
		C-汀線	37.2	5.25			1.70	4.06	
		D-E	32.8	5.78			2.17	4.61	
		D-汀線	36.0	4.87			1.40	3.70	
		E-汀線	38.2	4.04			0.84	2.87	

飛沫の発生と疑似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査

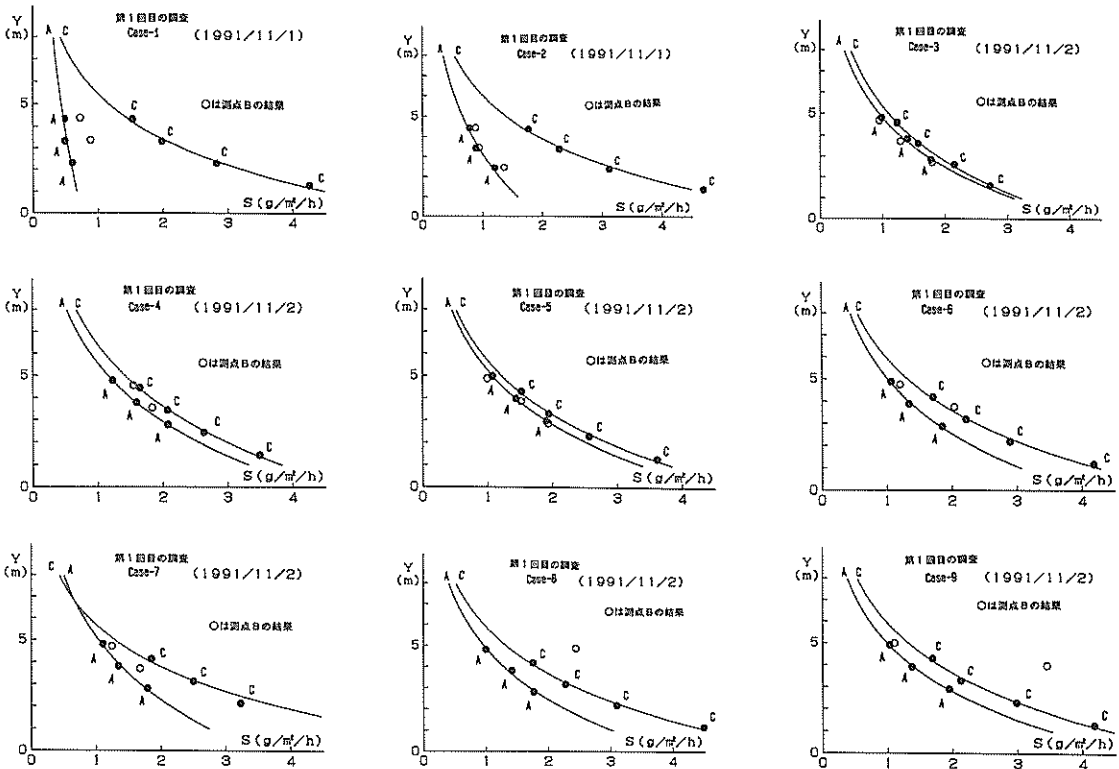


図-12 海上部の塩分付着量分布 (1回目調査)

に、波の進行方向と風とが反対方向に進むので、飛沫が波頭からちぎれるように飛び出している様子が見られた。その様子を写真-1に示した。写真-1(b)が波と風が逆流の場合の飛沫の飛び出しの様子を示したものである。順流の場合と逆流の場合で、両者の風速としてはそう大きな差がないのに、飛沫の発生量としてはかなりの差が見られる結果となっている。

図-13の結果からも Case-(4)を除いては図-12の結果と同様に砕波帯近傍の測点 C (Case-(2)の場合は測点 B と C)が最も大きい飛沫量となっている。なお Case-(d)の場合は、風速が小さかったこと及び波高が他の調査時よりも大きかったこと等のために沖側での砕波が多く、測点 A での飛沫量が他の測点より大きい結果となったものと思われる。

図-12, 13の結果から、海面からの飛沫の発生量についての検討を行った。まずこれらの鉛直分布から、海上部での飛沫量は海面近傍で大きく、上空に行くにしたがって減少する分布となっていることが分かる。図-12, 13に描かれた曲線は、飛沫量の測定値を指数関数で近似したものである。指数関数によってかなり良い近似が可能となっている。

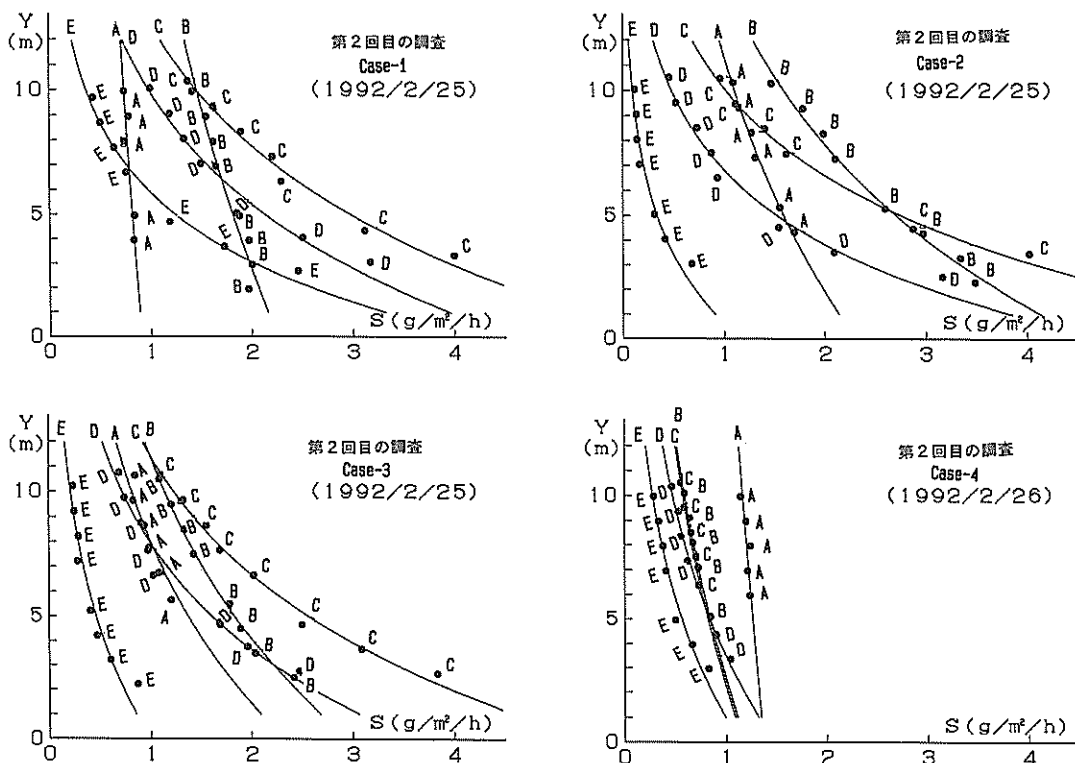
いま風速分布を一様と仮定すると、飛沫量と空気中の塩分濃度が比例するものと考えられる。また飛沫の粒子の沈降速度と鉛直拡散による輸送量が釣り合うと仮定すると、定常的には式(1)によって表すことができる。この解は、式(2)の指数関数で与えられる。

$$w_f c + E_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$c = c_a \exp\left\{-w_f \frac{(z-a)}{E_z}\right\} \quad (2)$$

- ここに、 w_f : 飛沫 (海塩粒子) の沈降速度,
- c : 飛沫の塩分濃度,
- E_z : 鉛直拡散係数,
- c_a : 高度 a での飛沫の塩分濃度,
- z : 高度

である。これより、図-13の鉛直分布を当てはめると w_f/E_z の関係が得られる。その結果を表-4に示す。 w_f/E_z の値は沖から岸に近づくにつれて大きくなっていることがわかる。この結果から、飛沫の鉛直分布の形状を2つの領域に分けて考えることができる。砕波帯より沖合いでは細かな粒径の飛沫が波頭から空気中に飛び出しているので飛沫の鉛直分布がたっているのに対し、砕



図一三 海上部の塩分付着量分布（2回目調査）

表一四 飛沫と鉛直分布と w_f/E_z

	測点	C (g/100m ² /h)		W_f/E_z l/cm
		C(z=2m)	C(z=10m)	
Case-1	A	0.86	0.71	0.023
	B	2.04	1.46	0.042
	C	4.54	1.43	0.144
	D	3.36	1.00	0.151
	E	2.61	0.36	0.249
Case-2	A	1.96	1.11	0.072
	B	3.75	1.57	0.109
	C	5.07	1.00	0.203
	D	3.07	0.46	0.236
	E	0.68	0.09	0.249
Case-3	A	1.89	0.82	0.104
	B	2.46	1.14	0.096
	C	3.93	1.25	0.143
	D	2.64	0.71	0.164
	E	0.71	0.20	0.159
Case-4	A	1.32	1.14	0.018
	B	1.00	0.57	0.070
	C	1.00	0.57	0.070
	D	1.18	0.46	0.116
	E	0.82	0.29	0.132

波点付近およびそれより岸側では比較的大きな粒径の飛沫が飛び出し、汀線付近ではほとんど飛沫の飛び出しはなく、大きな粒径の飛沫が落下しているために飛沫の鉛直分布は下に大きくなっているものと解釈される。なお、式(1)、(2)は断面方向には変化しない定常状態での解であり、また単一粒径の場合の解である。しかし、沖合いから砕波帯、汀線近傍と飛沫の鉛直分布は大きく変化していること、また空気中の飛沫は大きささまざまな粒径のものが含まれており、大きい粒径の粒子は早く沈降し、小さい粒径のものはなかなか沈降しないで空気中に残り、測定された飛沫量はこれらの合成された結果である。また、飛沫量は空気中の塩分濃度と風速の積に比例すると思われ、厳密には異なる解析が必要となろう。

次に、海面からの飛沫の発生量の算定を行う。飛沫の発生量の算定方法の考え方を図一四に示す。風上側の測点 j の飛沫量 q_j と風下側の測点 i の飛沫量 q_i から、測点 j と測点 i の区間で発生した飛沫量は

$$Q_r = \frac{q_j - q_i}{L} = \frac{q_j - q_i}{L \cos(\theta)} \quad (3)$$

$$q_j = \int c_j(z) dz \quad (4)$$

$$q_i = \int c_i(z) dz \quad (5)$$

で与えられる。ここで、

L : 測点 j と測点 i の距離、

θ : 海岸法線と風向とのなす角度

である。なお、この式による飛沫量の算定には、風は風向・風速とも観測対象海域では一様で、かつ飛沫濃度の鉛直分布は沿岸方向に一様であると仮定している。この結果を表-3に示す。2回目の観測のCase-1, Case-2の観測時の発生量が大きいことが分かる。この時の風速は7.5~8.1m/sであり、他の観測時に比べてそう大きいものではない。風向が陸から海に向かう風となっているために大きな飛沫量となったものと思われる。この風向きと波向きの効果を考慮するために、相対風速 V_r を次式によって定義し、相対風速と飛沫発生量の関係を示したものが図-15である。

$$V_r = \text{風速の岸沖成分} - \text{波速} = V \cos(\theta) - C \quad (6)$$

である。ここに、 V は風速、 $C(\sqrt{gh})$ は波速である。非常に良い相関を示している。 Q_r は相対風速 V_r の自乗に比例して増加する傾向がみられる。

4.2 陸上部への飛沫の輸送

海岸付近の塩害は陸上部に運ばれた飛沫が問題となる。前節で述べたように、海面からの飛沫の発生は、要約すれば、波の碎波帯近傍から発生し、風によって運ばれる。飛沫の発生量は風と波との相対風速と良い相関を示すことから、海からの風よりも陸からの風の方が飛沫発生量は大きい。しかし、塩害として問題になるのは海からの風の場合である。

表-2の3回目の調査から飛沫の陸上部の輸送に焦点を絞った現地観測を行っている。3回目の1992年12月の陸上部の飛沫量分布を図-16(a), (b)に示す。(a)の海風の

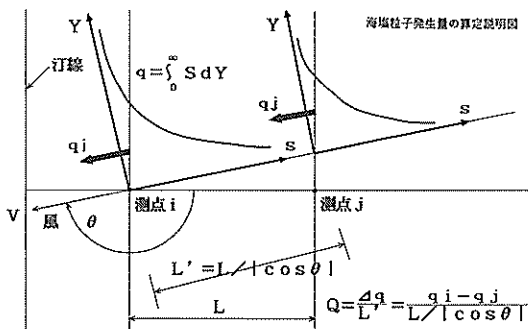


図-14 飛沫発生量の算定説明図

場合には2.2~0.8g/m²/hの飛沫量が見られたが、(b)の陸風の場合には最高でも0.2g/m²/hであり、ほとんど飛沫はゼロとみなすことができる。

陸上部の飛沫の鉛直分布は、汀線近傍の測点では海上の飛沫分布と同様に、上空に行くにしたがって減少する指数分布を示しているが、内陸部に輸送されるにつれて地表近傍で減少し、上層で増加する傾向が見られる。このような分布傾向は他の観測結果(例えば Hotta, 1990)にも共通して見られる傾向である。

このような海からの飛沫の被害を軽減する手だてとして、幾つかの方法が考えられる。例えば、飛沫の発生量を減らすこと、飛沫の輸送量を減少させること、および構造物を塩害に強い材料を使うこと等が挙げられる。ここでは、2番目の海岸への樹木の植栽による飛沫の輸送量を軽減する方法の検討を行う。

海岸付近は人々の海との触れ合いの場所であり、良質な景観を有する空間として重要視されている。このような空間に樹木を植えることは、景観を向上させるとともに塩害からの被害を軽減するという防災上の意味も持っている。そこで、ここでは飛沫の陸上部への輸送とともに、樹木による飛沫軽減のメカニズムを把握するための現地調査を実施した。図-10(e)に疑似植栽ネットと風速

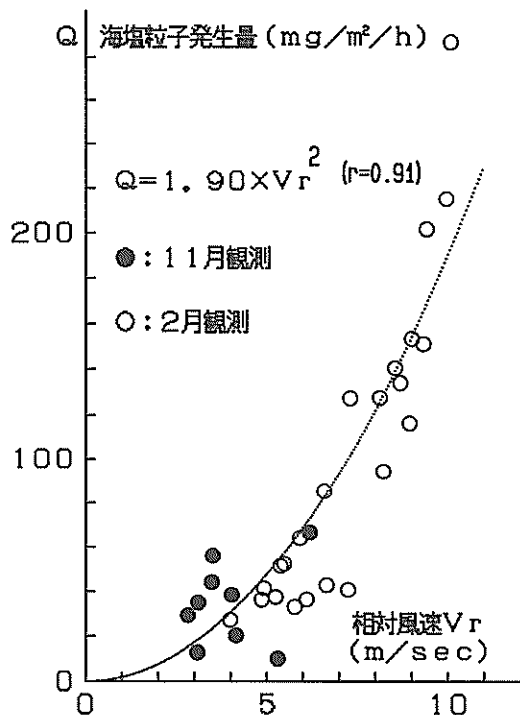


図-15 相対風速と飛沫発生量の関係

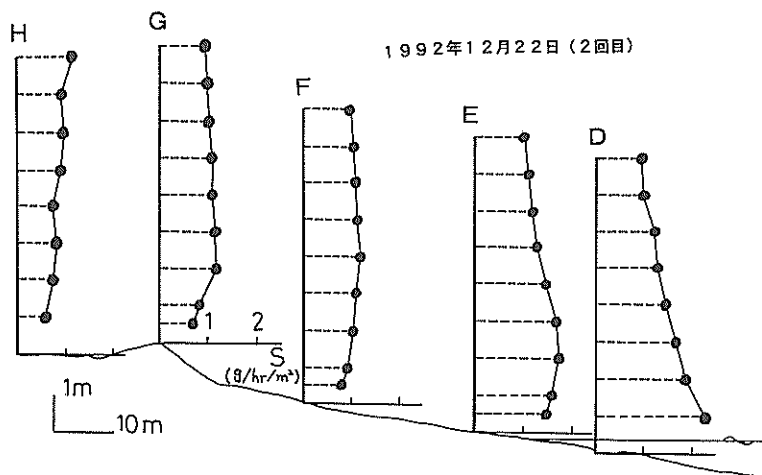


図-16(a) 陸上部の飛沫量分布 (海風の場合)

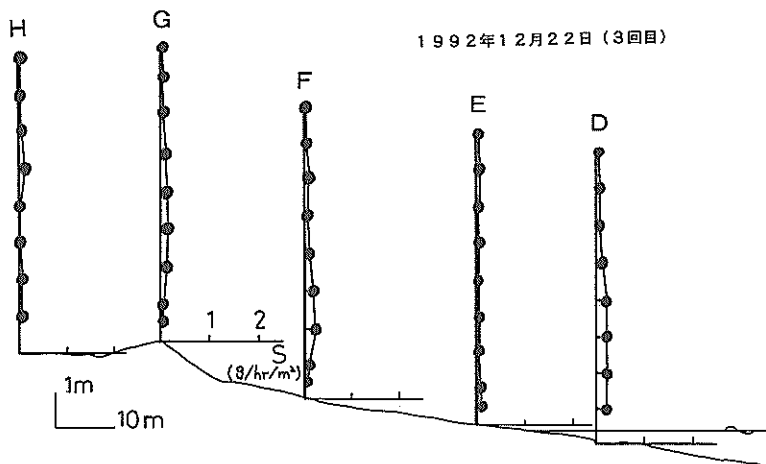


図-16(b) 陸上部の飛沫量分布 (陸風の場合)

計、飛沫量捕捉ガーゼの平面配置を示した。また図-17には、風速計と飛沫量捕捉ガーゼの側面配置を示す。このような測定配置において、風速分布と飛沫量分布の測定をネットがある場合とない場合について調査した。

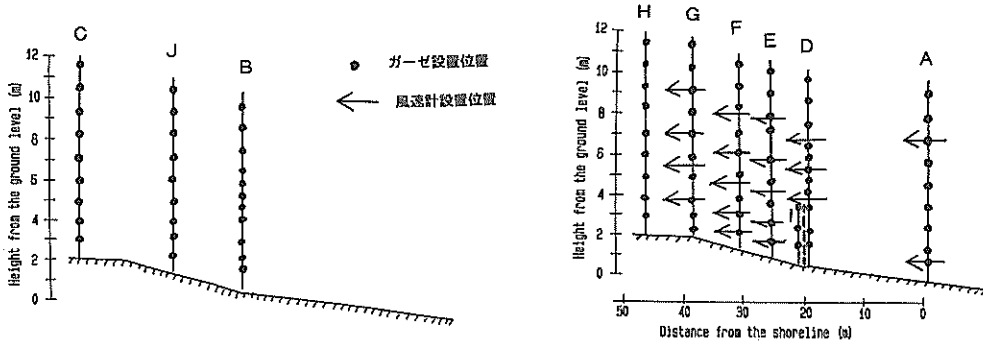
まずネットがない場合の岸沖方向成分の風速の鉛直分布の結果を図-18に示す。地表面近傍の風速は上層に比べて若干遅くなっており、地表面あるいは海面の粗度の影響が現れている。また、汀線から約60m離れた所に高さ5mの小高い丘があるために、地表付近の風速の値が汀線近傍よりも小さい値を示している。次に、ネットがない場合の飛沫の鉛直分布を図-19に示す。汀線近傍の測点では前述の海上での測点と同様な指数分布を示しているが、内陸部に輸送されるにつれて地表面近傍の測点の飛沫量は減少し、上層の飛沫量が増加する。陸上部でのこのような分布は、飛沫の地上への落下或いは付着と

上層への拡散の結果によるものと考えられる。

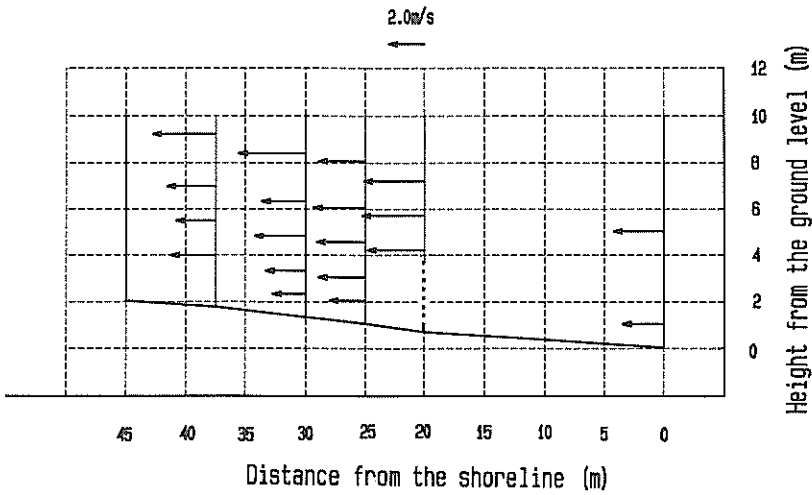
次に、疑似植栽ネットを設置した場合の風速と飛沫量の鉛直分布を図-20, 21に示す。ネット背後の風速が極端に小さくなっており、上層の風速が増加している様子が分かる。ただし、ネットは風を完全に遮断しているわけではないのでネット背後でも逆風とはなっていない。飛沫量分布もネット背後では極端に減少しており、上層での飛沫量がかなり増加している。このことは、塩分が上層に拡散しているのみならず、風の上昇流によって運ばれているものと思われる。

なお、ネットによる飛沫量分布の変化を見るために、図-10(e)に示したようにネットのある断面(A-H断面)とネットのない断面(B-C断面)での比較を図-22に示す。ネット背後の測点での比較から、ネットは配置した場合地上付近では大きく減少しているが、上層では明ら

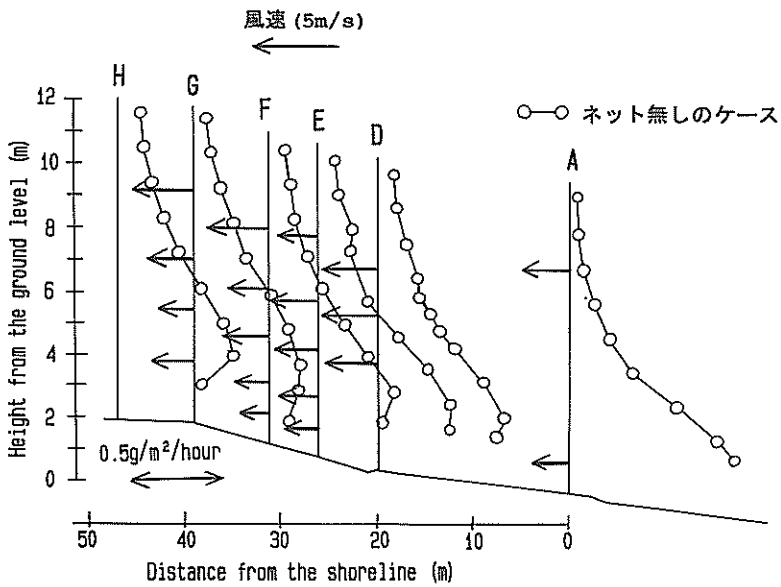
飛沫の発生と疑似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査



図一七 風速計と捕捉ガーゼの側面配置



図一八 風速分布 (ネットがない場合)



図一十九 飛沫量分布 (ネットがない場合)

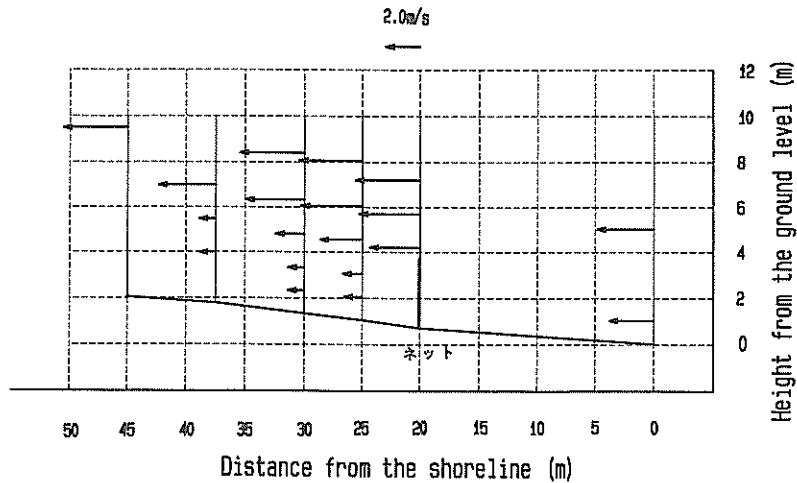


図-20 風速分布 (ネットがある場合)

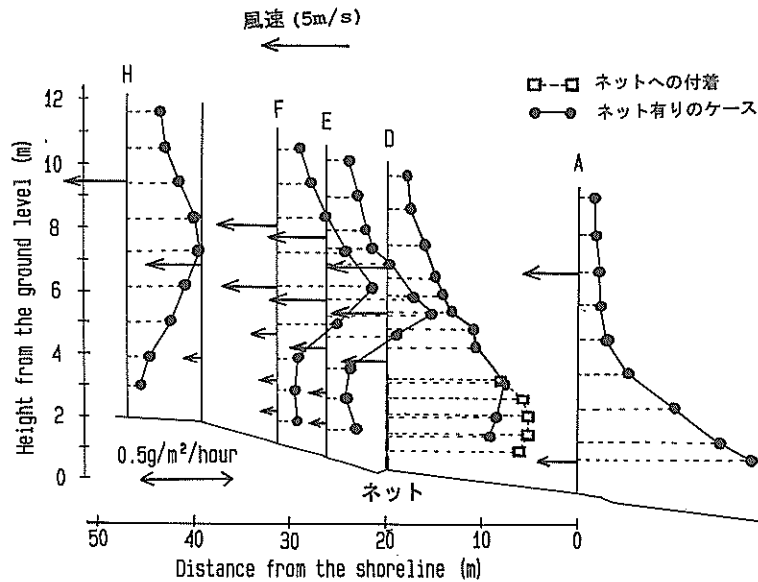


図-21 飛沫量分布 (ネットがある場合)

かに増加していることがこの図からもわかる。このような飛沫分布は、津田海岸での実測結果(村上他, 1994)からも得られており、同様な現象が実際の家屋や樹木においても生じているものと思われる。

4.3 飛沫の地上への落下

飛沫の陸上部への輸送機構を求めるためには、飛沫粒子の沈降速度、すなわち飛沫の地上への落下量を把握する必要がある。4.1の海上部での測定では、最も大きい砕波点近傍の分布と汀線近傍の分布とは、図-13に見ら

れるように汀線部においてかなり飛沫量は減少している。しかし、図-16, 19にみられるように汀線以降の陸上部ではあまり減少していない結果となっている。このことは、砕波帯近傍で発生した大きな飛沫は比較的早く沈降し、比較的細かい粒径の飛沫が陸上部に輸送されていると考えることができる。

地表への落下量を把握するために、捕捉ガーゼを地表に置いて飛沫の落下量の測定を実施した。その方法を図-23に、またその結果を表-5に示す。ここで、正味の沈降量の測定にはかなりの困難が伴った。例えば、海岸

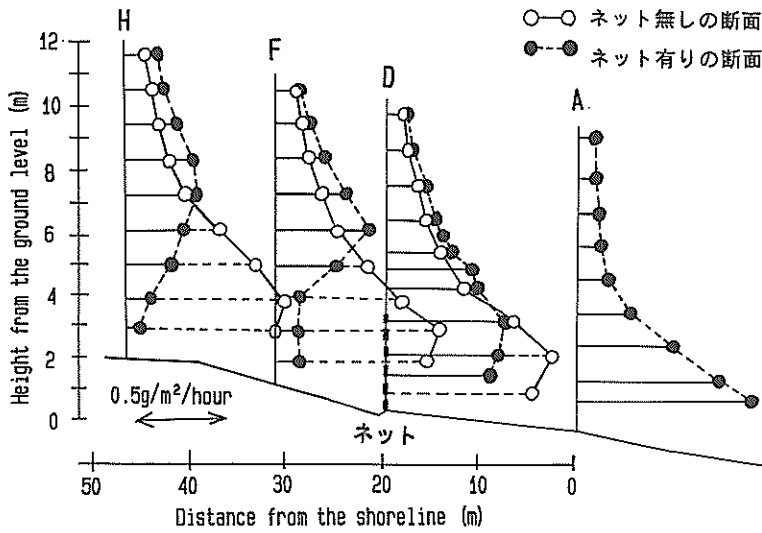


図-22 飛沫量分布のネットがある場合とない場合の比較

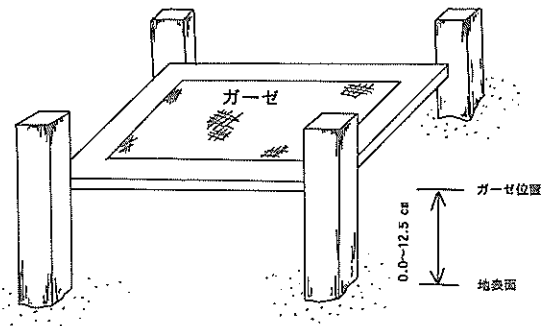


図-23 地表面への付着（沈下）量の測定法

の砂は風が吹くと砂浜上を転がり、ガーゼに接触すると塩分がガーゼに付着してしまう。そこで、砂浜上に鉄板を敷いてその上にガーゼを置いたケース、ガーゼを地上9～12.5cm 浮かせてガーゼと砂浜との間に空間を空けたケース等の測定を行った。表-5の結果をみると、ガーゼを地表に置いたケースでの塩分付着量が小さく、地表とガーゼとの間に空間が生じている場合には比較的大きな塩分の付着量が生じていることが分かる。地表への落下量は、表-5のガーゼと地表との空間がないケースの値と考えられ、0.005～0.01g/m²/hの値が得られている。この値は、垂直に設置した場合のガーゼへの付着量に比べて1/50～1/400程度である。この量は、汀線から50mの幅の砂浜において、地上から8mの高さまでで概算した全体の飛沫量の1.25%～10%の飛沫量の沈下に相当するものと算定される。

表-5 飛沫の地上への付着（落下）量

試料番号	付着量 (g/m ² /h)	地表上 (m)	設置条件 (南南東5.9m/s)
1	0.0107	0.0cm	下に鉄板を敷いた
2	0.0093	0.0cm	下に鉄板を敷いた
3	0.0045	0.0cm	ガーゼのみ設置
4	0.0290	9.0cm	ガーゼと地表に空間
5	0.0231	9.0cm	ガーゼと地表に空間
6	0.0259	12.5cm	ガーゼと地表に空間

5. 飛沫調査結果の検討

5.1 海面からの飛沫の発生のメカニズム

観測桟橋上からの測定によって、海面からの飛沫の発生に関して幾つかの知見を得た。その中で、海面からの飛沫は波の砕波点近傍から多量に発生し、その量は相対風速（風の岸沖方向成分の風速と波速との相対速度）と良い相関で表せることが図-15で示された。この関係からすると、海面からの飛沫の発生量は陸風の方が海風よりも発生量が多いことになる。事実、観測結果は陸風時の方が大きい飛沫を表している。しかし、陸風時は陸上部ではほとんど飛沫は観測されず、塩害の観点からす

ると海風時が問題となる。

海上部での飛沫量分布の変化をみると、図-13の飛沫量分布から分かるように砕波点近傍から汀線にかけての飛沫量は急激に減少することがわかる。飛沫の鉛直分布を指数分布に仮定した場合の表-4の w_f/E_z の値も、岸側で大きい値となっている。これは、砕波点近傍で発生した飛沫の粒径が大きく、すぐに沈降してしまうものと考えられる。したがって、飛沫発生源の砕波帯の位置を沖側におけば大きな粒径の飛沫は陸上部には輸送されないものと考えられる。

陸上部にとって飛沫の発生量として重要なのは、汀線近傍の測点での飛沫量になる。これが風によって内陸部に運ばれて塩害の原因となる。図-24に示すのは、各調査時に汀線近傍の測点で実施した飛沫量の鉛直分布である。この飛沫量の分布が、陸上部への輸送の境界条件となる。その調査時の風速・風向および有義波高・周期を表-6に示す。風向 θ は $0^\circ \sim 90^\circ$ および $270^\circ \sim 360^\circ$ が海からの風であり、Obs.-No. 1, 3, 8 が鹿島港側からの強風、Obs.-No. 5, 9, 10 が鹿島港側からの弱い風、Obs.-No. 11, 12 が沖側からの風、Obs.-No. 4, 7 が陸風となっている。海からの風が強い Obs.-No. 1, 3, 8 の飛沫量が多い。また、陸風時にはほとんど飛沫量はないことがこの結果からもわかる。Obs.-No. 6 は風速はそう大きくないのに大きな飛沫量となっている。これは、波の大きさあるいは風向きの影響が関係しているものと思われる。

表-6の結果から、次式による重回帰分析によって陸

上部への飛沫輸送の境界条件となる汀線近傍の飛沫量の算定を試みた。

$$Y_i = B_0 + B_1 X1_i + B_2 X2_i \quad (7)$$

ここに、 Y_i は汀線近傍の飛沫量(海面から高度10mまでの飛沫量の積分値)、 $X1_i$ は風に関する説明変数、 $X2_i$ は波に関する説明変数、 B_0, B_1, B_2 はそれぞれ偏回帰係数である。風に関する説明変数としては、以下の3つのケースについての計算を実行している。

$$X1_A = W \cos(\theta) \quad (8)$$

$$X1_B = (W \cos(\theta))^2 \quad (9)$$

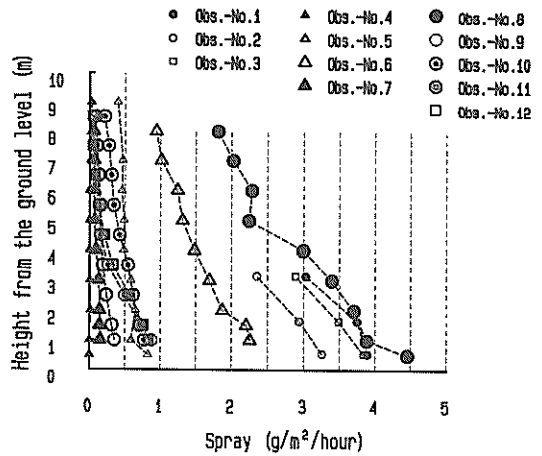


図-24 汀線近傍での飛沫量分布

表-6 汀線近傍の飛沫分布調査時の風向・風速と有義波高・周期

調査番号	測定番号	調査年月日	調査時間	風向・風速	有義波高・周期
第1回目	Obs.-No. 1	1991/11/01	15-16	12.8m/s, 329.6°	1.4m, 5.3 s
	Obs.-No. 2	1991/11/02	10-11	7.9, 344.3	2.0, 7.7
	Obs.-No. 3	1991/11/02	13-14	8.7, 339.2	2.1, 8.0
第2回目	Obs.-No. 4	1992/02/25	11-13	8.1, 232.3	1.5, 7.3
第3回目	Obs.-No. 5	1992/12/22	9-11	4.6, 325.9	2.2, 10.6
	Obs.-No. 6	1992/12/22	11-13	6.2, 284.6	1.5, 5.4
	Obs.-No. 7	1992/12/22	13-15	1.7, 239.0	1.7, 5.9
第4回目	Obs.-No. 8	1993/03/10	15-17	7.4, 324.0	1.0, 4.5
第5回目	Obs.-No. 9	1993/11/05	11-13	1.6, 315.0	0.5, 8.2
	Obs.-No. 10	1993/11/05	13-15	1.9, 293.0	0.6, 8.3
	Obs.-No. 11	1993/11/06	7-9	3.4, 358.0	0.5, 5.4
	Obs.-No. 12	1993/11/06	9-11	2.5, 22.0	0.6, 5.6

注) 風向 θ は真沖向きからの風を0度とし、時計回りに回転する。

$$X_{1c} = W \cos(\theta) |W| \quad (10)$$

である。ここに、 W は風速、 θ は汀線から直角方向の海からの風を 0° として時計回りに計測した風向である。また、波に関しては有義波高を用いている。重回帰分析の結果から、偏回帰係数の結果と各々の成分の飛沫量への寄与度を表一7に示す。ここで寄与度とは、式(7)における偏回帰係数と説明変数の積によって求められる飛沫量の全体の飛沫量に占める割合の全12回の測定結果の平均である。

また、各々の偏回帰係数の結果から得られた飛沫量と実測値との比較を図一25に示す。式(8)の風速の岸沖成分によるものが最も良い相関を示している。この場合には、汀線近傍の飛沫量の寄与度は風によるものが80%以上になっており、波による寄与度は高々5%であった。以上述べたように、海面で発生した飛沫の陸上部への輸送は、風向が大きな要因であることがわかる。

なお、ここでの解析は、現地調査が遠浅の海岸において比較的波の静穏時に実施されているために、陸上での飛沫量に対する波の寄与はあまり大きくない結果となったものと思われる。しかし、風は弱くともうねりの波高が大きい場合、あるいは塩害の被害の多い時化時には波高も大きな要因と考えられる。したがって、ここで得られた結果から、陸上部への飛沫の輸送量を求める算定式

を提案するには、まだデータ不足であると思われる。この点に関しては今後の検討課題である。

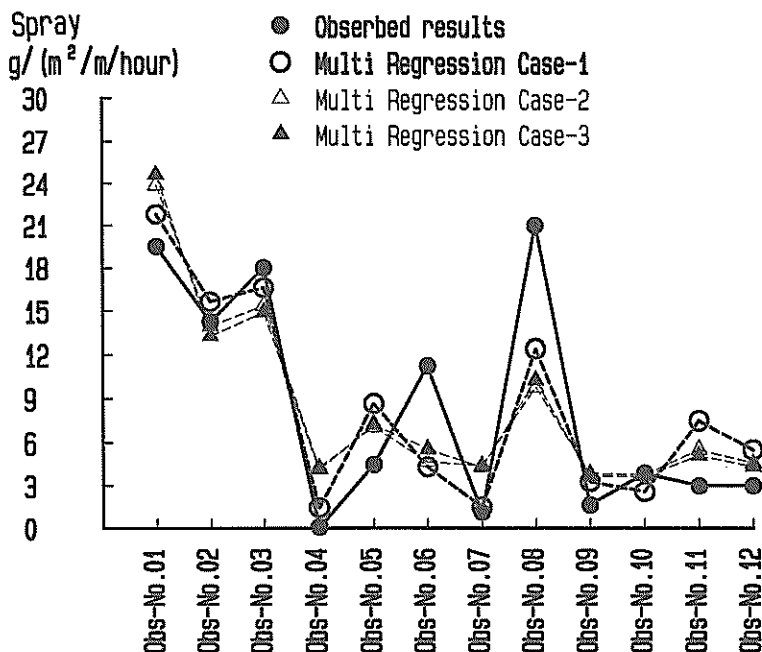
5.2 飛沫の輸送・付着のメカニズム

前章において、陸上部の飛沫量と風速の鉛直分布、および飛沫のネットと地上への付着の結果を得た。これらの結果から、陸上部での飛沫の輸送・付着のメカニズムの考察を行う。

飛沫は、海面から砕波や風の影響を受けて空気中に飛散しそれが風によって運ばれるという輸送メカニズムを示す。そして、飛沫による構造物への塩分の付着量は、空気中の塩分濃度に構造物に衝突（あるいは通過）する空気の容積との積によって表せると考える。これより、

表一7 重回帰分析の結果と寄与度

ケース番号	偏回帰係数	B_0 (定数項)	B_1 (風)	B_2 (波)
Case-1	偏回帰係数	1.44	2.44	0.46
	寄与率	11.8 %	83.4 %	4.8 %
Case-2	偏回帰係数	4.25	0.20	1.65
	寄与率	35.0 %	47.8 %	17.2 %
Case-3	偏回帰係数	3.92	0.18	1.73
	寄与率	32.3 %	49.7 %	18.0 %



図一25 重回帰分析による汀線近傍の飛沫量分布

調査対象域内の風速分布と塩分濃度分布が分かれば、塩分の付着量・輸送量が把握できる。

上記の検討を行うために、塩分の拡散計算を行った。風速分布、飛沫量分布は汀線方向に関しては均一と仮定して鉛直2次元での計算を実施した。図-26に計算領域の格子配置を示す。高さ約15m、幅約55mの範囲を高さ50cm、長さ1.25mの長方形格子(29×45)に分割している。図-6に示すように、実際の砂浜の地形は陸上部最左端の地点では、汀線部に比べて2~3m程高度が高いが、その点を考慮して段差をつけた格子配置にすると、段差の近傍で不自然な風速分布になるので、ここでは便宜上砂浜の高度を水平と仮定している。

計算領域全体の風速分布の算定は、図-26の実測結果のある格子点ではその値を代入し、他の格子点の風速を次式のように連続条件式を満たすように修正しながら内

挿した。なお、各断面での風による空気の流れは一定になるように水平風速を補正している。

$$u_{i,j}^{(n+1)} = (1-4\alpha)u_{i,j}^{(n)} + \alpha(u_{i+1,j}^{(n)} + u_{i-1,j}^{(n)} + u_{i,j+1}^{(n)} + u_{i,j-1}^{(n)}) \dots\dots\dots(11)$$

$$v_{i,j}^{(n+1)} = v_{i,j}^{(n)} - (u_{i,j}^{(n+1)} - u_{i,j}^{(n)}) \frac{\Delta z}{\Delta x} \dots\dots\dots(12)$$

$$\text{Max} \left| \frac{u_{i,j}^{(n+1)} - u_{i,j}^{(n)}}{u_{i,j}^{(n+1)}} \right| < \text{EPS} \dots\dots\dots(13)$$

$$u_{i,j} = u_{i,j} \frac{Q_0}{Q} \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 $u_{i,j}$ は格子点(i, j)の水平風速、 $u_{i,j}^*$ は格子点(i, j)の流量補正後の水平風速、 Q_0 は一定流量、 Q は各断面での流量、 $v_{i,j}$ は格子点(i, j)の鉛直風速、 α は格子点(i, j)の重み度、 (n) は計算の繰り返し回数、EPS は収束係数

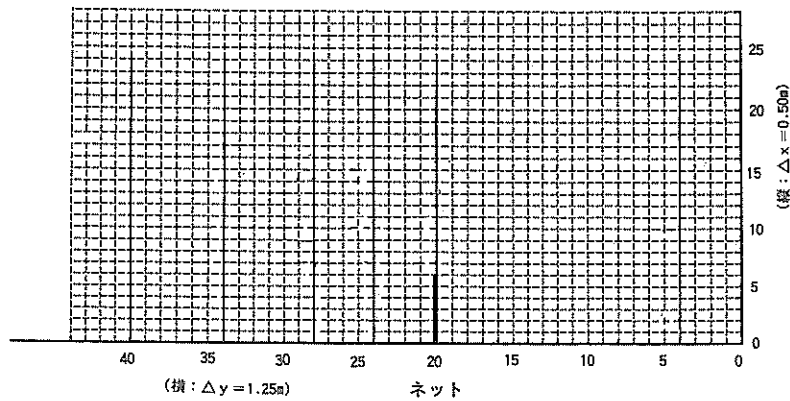


図-26 計算格子

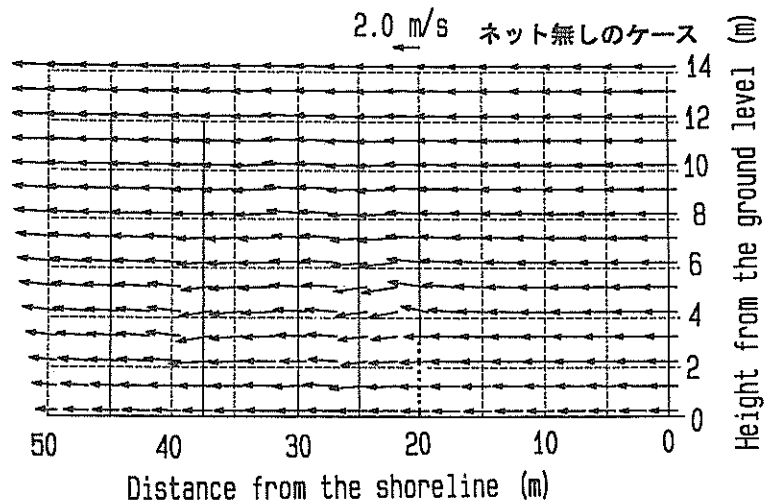


図-27 風速の内挿結果 (ネット無し)

である。

境界条件として、風上側の境界での水平風速は汀線近傍の測点での観測結果を鉛直方向に内挿し、風下端では風速勾配をゼロと仮定した。また、上層端と地表面での鉛直風速をゼロに仮定した。

式(11)~(14)より内挿した風速の疑似植栽ネットがないケースの結果を図-27に示す。計算領域全般に上層から下層にかけて徐々に減少する鉛直分布となっている。 $u_1^{(2)}$ の風速をゼロと仮定しているため、地表面近傍の風速が若干減少している。なお、風速の測定点では観測値をそのまま代入し、連続の式を満たすように内挿しているため所々で不自然な流れとなっている箇所がみられ

る。

次に、疑似植栽ネットを設置した場合の風速分布の内挿結果を図-28に示す。このネットは空気の流れを完全に遮断するわけではないので、ここでは便宜上ネット直上方の風速の測定結果の10%の速度で空気がネットを通過すると仮定しての計算を行っている。地表面近傍の風速がかなり小さくなっていること、およびネット直前で上向きの流れとなっていることが分かる。

次に、風速の内挿された結果を用いて塩分の拡散計算を実施した。上流端の塩分濃度の境界条件を次式で与えた。

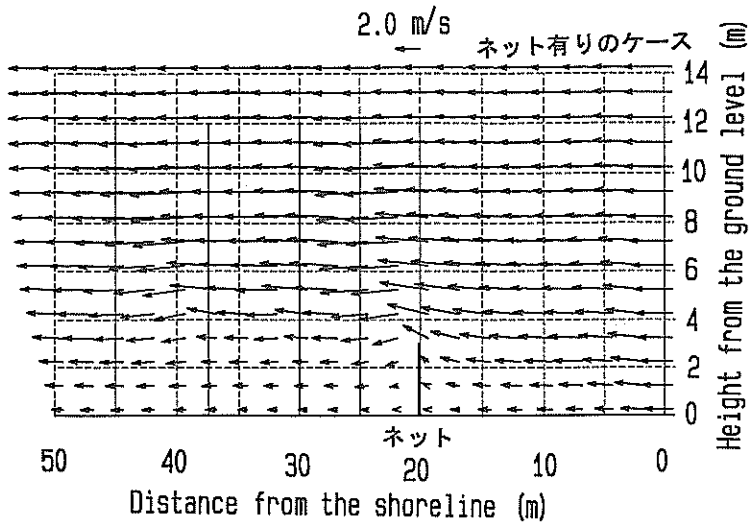


図-28 風速の内挿結果 (ネット有り)

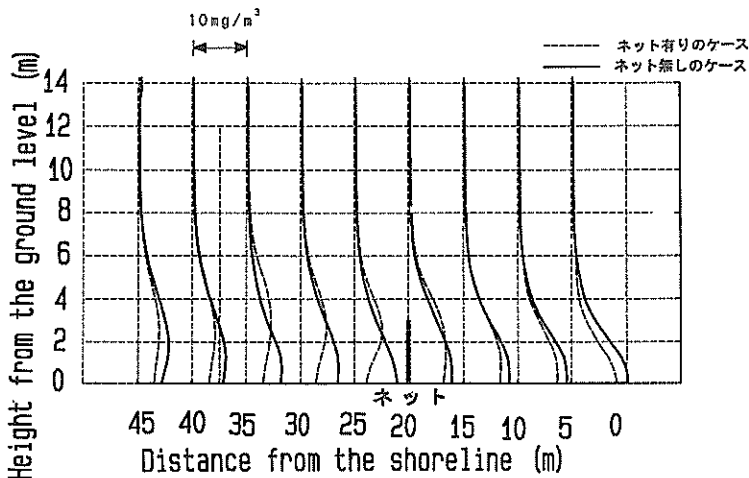


図-29 空気中の塩分濃度計算結果 ($K_z=0.05m^2/s$, 実線: ネット無し, 破線: ネット有り)

$$\text{塩分濃度} = \frac{\text{汀線近傍での飛沫の付着量}}{(\text{ガーゼの面積} \cdot \text{空気中への放置時間} \cdot \text{風速})} \dots\dots(15)$$

塩分濃度の拡散計算結果を、図-29に示す。計算条件は表-8に示すように、観測値の内挿結果を移流項に、水平拡散係数 $K_x=1.0\text{m}^2/\text{s}$ 、 $K_z=0.05\text{m}^2/\text{s}$ を与えた。また、地表面近傍の飛沫量が小さくなること、および内陸部に行くにつれて飛沫は上層部に拡散するという飛沫量分布の測定結果から、飛沫粒子の沈降速度は非常に小さいものと判断されてここでは考慮していない。ただし、飛沫の地上への付着は計算領域外の濃度をゼロに設定し、次式に示すように鉛直拡散により域外に流出するという境界条件を設定した。

$$\text{Flux}_0 = -K_{z0} \frac{\partial c}{\partial z} \dots\dots(16)$$

ここに、 Flux_0 は飛沫の地表面への付着量、 K_{z0} は地表面近傍の鉛直拡散係数である。図中の実線がネットがない場合の、破線がネットがある場合の塩分濃度の曲線である。

実線のネットがない場合の塩分濃度は、地表面近傍では徐々に減少し、上層部は徐々に増加している様子が認められる。この塩分濃度分布に単位面積・単位時間当たりの空気の通過量との積によって表した飛沫量の結果をネットがない場合を図-30の実線によって示す。塩分濃度の鉛直分布に比べて、上層部での増加の程度は同様であるが、地表面近傍の飛沫量の減少の程度は塩分濃度に比べてかなり大きい。これは、地表面近傍での塩分濃度は余り減少しないが風速が大きく減少しているために、飛沫量としての値も大きく減少しているものと考えられ

る。

疑似植栽ネットを設置したケースについて計算結果を次に示す。ネットの存在により、空気の通過量はネット上空の風速の10%に仮定したが、塩分濃度に関しても、飛沫のネットへの付着を考慮して10%に減少すると仮定した。図-29の破線によりネット有りのケースの塩分濃度分布の結果を示す。当然のことながらネット背後では濃度が減少し、ネット前面での空気の上昇によって上層部に拡散した様子が読みとれる。しかし濃度に関しては、ネットの前面での減少はほとんどない。前と同様に、塩分濃度と空気の通過量との積による飛沫量の結果を図-30の破線によって示す。飛沫量分布は、ネット背後の領域で減少するのみならず、ネット前面でも減少し、上

表-8 計算条件

風場の計算	計算条件
計算格子	縦29 (高さ0.5m), 横45 (幅1.25m)
計算時間	定常になるまで
ネットの透過率	ネット上部の風速の10%と仮定
地表面の扱い	$W_x(0, 1) = 0.75 \cdot W_x(1, 1)$ と仮定
塩分の拡散計算	計算条件
計算格子	風場と同じ
計算時間	定常になるまで
拡散係数	水平: $1.0\text{m}^2/\text{s}$, 鉛直: $0.05\text{m}^2/\text{s}$
境界条件	上流端: 実測値, 下流端: 濃度勾配無し
ネットの透過率	ネット直前の10%と仮定
地表面の扱い	$0.25 \cdot K_z \cdot \partial c / \partial z$ で付着と仮定

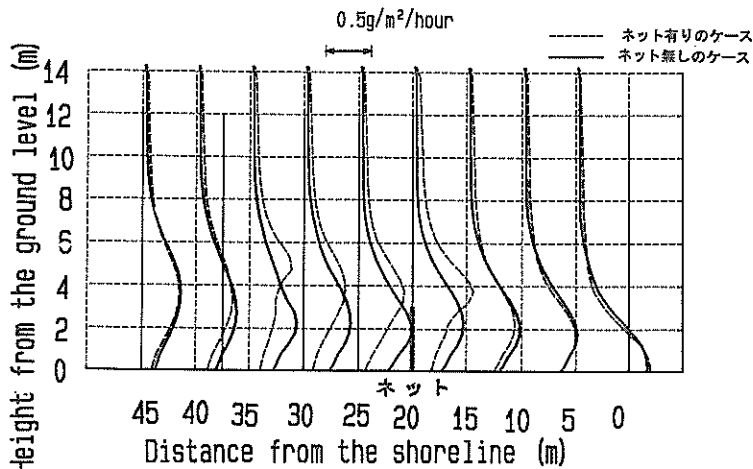


図-30 飛沫量分布の計算結果 ($K_z=0.05\text{m}^2/\text{s}$, 実線: ネット無し, 破線: ネット有り)

飛沫の発生と疑似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査

層に移流・拡散している様子がわかる。このような分布はネット前面の結果を除いて図-21の現地調査結果とも類似している。

次に、地表面への付着を無視して鉛直拡散係数をゼロとした場合の同様の計算を実施した。その結果を、空気中の塩分濃度については図-31に、飛沫量分布については図-32に示す。鉛直拡散係数を考慮した場合と比較して、ネットがある場合には大きな差はないが、ネットがない場合には塩分濃度、飛沫量分布ともかなりの差がみられた。これは、ネットがある場合には、空気の流れに上昇流が発生し、飛沫は上層へ輸送されるのに対し、ネットがない場合には空気の流れに上昇流がないために、移流項・拡散項とも働かないので飛沫が上方に拡散しない

ためと考えられる。このことから、飛沫の上層への輸送と地表面への付着を考慮して鉛直拡散係数を考慮した方が実際の観測結果の分布に近くなるものと思われる。

次に、このようにして求めた飛沫量分布の計算結果と実測値との比較をネットがない場合についてを図-33に、ネットがある場合についてを図-34に示す。ネットがない場合には、計算結果の実線と実測値の黒丸がよい精度で近似しており、ほぼ満足できる結果が得られている。しかし、ネットがある場合には傾向は類似しているが、詳細にみるとネット前面の飛沫量、ネット背後の飛沫物布形に若干の相違がみられる。これは、ここでの飛沫量の算定が塩分濃度にその断面での空気の通過量と仮定したために、乱れが大きくて風速が変化する領域での

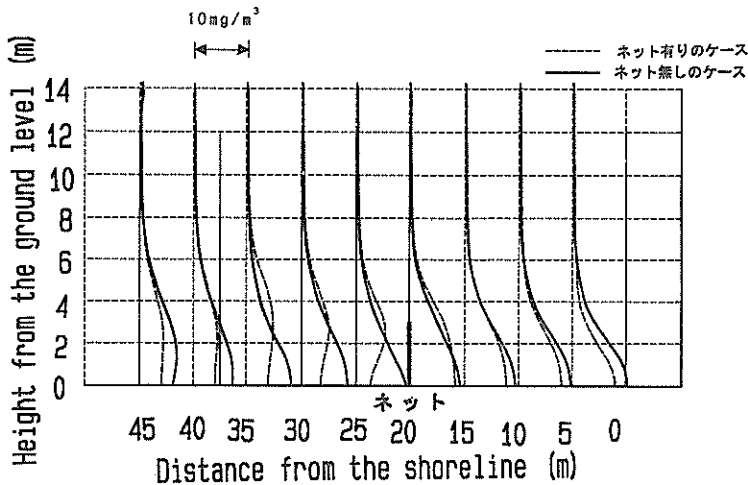


図-31 空気中の塩分濃度計算結果 ($K_z=0.0\text{m}^2/\text{s}$, 実線: ネット無し, 破線: ネット有り)

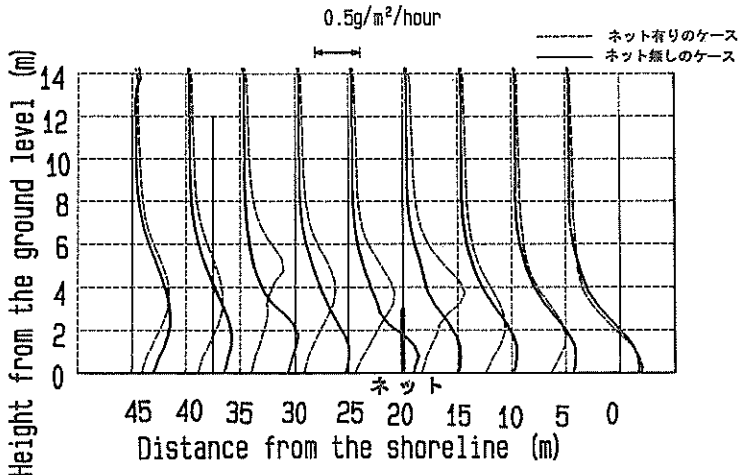
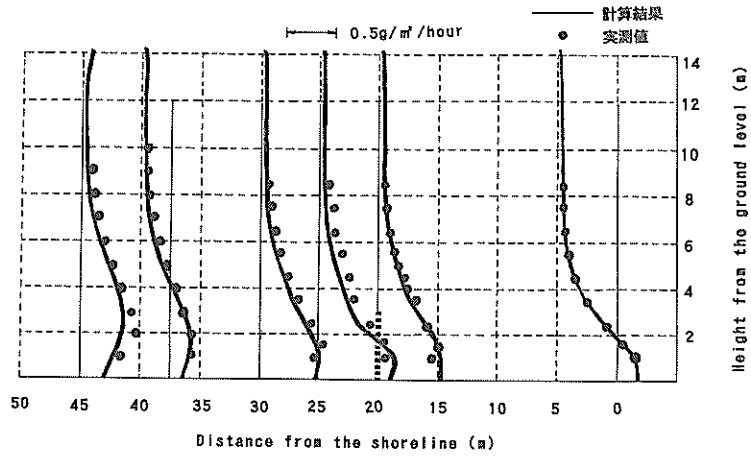
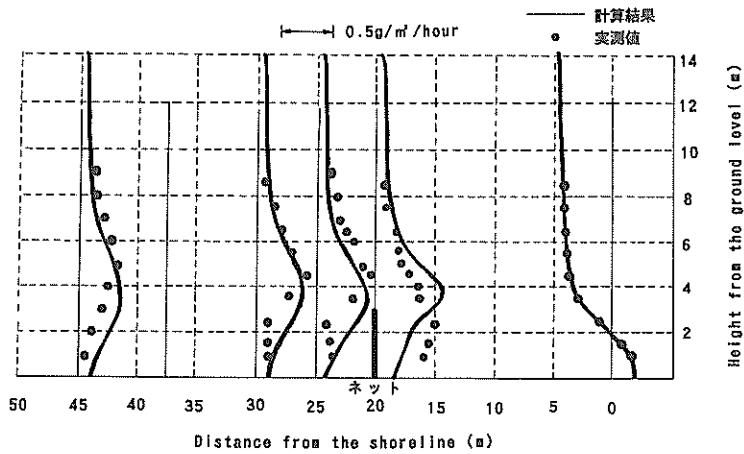


図-32 飛沫量分布の計算結果 ($K_z=0.0\text{m}^2/\text{s}$, 実線: ネット無し, 破線: ネット有り)



図—33 飛沫量の計算結果と測定結果の比較（ネット無し）



図—34 飛沫量の計算結果と測定結果の比較（ネット有り）

相違が大きくなったものと思われる。しかし、分布形の傾向は類似しているものと考えられる。

以上のことから、構造物に付着する飛沫量は空気中の塩分濃度に、その断面との空気の接触量との積によって表すことができるものと考えられる。ここでは、空気との接触量は風速と断面積との積によって表される通過量とほぼ等しいものと仮定した。前述の飛沫量の計算結果は塩分濃度と風速との積を基準に算定している。しかしながら現象を詳細に考えると、塩分捕捉ガーゼを通過する風速はガーゼがない場合の同じ点での風速に比べるとガーゼの影響を受けて当然小さくなる。したがって、ネットを通過する空気量は周辺の風速と断面積との積とはならない。しかしながら、空気の通過量を基準にして求めた計算結果がほぼ実測結果を表していることから、周辺の風速とガーゼの断面積との積を接触量とすることは近

似的には正しいものと考えられる。

しかし、ネット前面の領域およびネットへの付着量は、実測結果ではネットがない場合の同じ測点での飛沫量とほとんど変化ないのに対し、数値計算結果ではかなりの減少となっている。これは、数値計算の場合ネット前面の領域では塩分濃度はほとんど変化ないのに対し、風速はネットの影響を受けてかなり弱まったことによるものと考えられる。このように周囲の風速に影響を及ぼすような場合には、構造物への空気の接触量は風速によって表すことができなことを示している。

以上のことから、構造物への飛沫量の算定は、近似的には空気中の塩分濃度にある断面への空気の接触量として風速とその断面積との積によって表すことができるものと考えられる。しかしながら、風がまともによつかるような構造物への飛沫量の算定には空気の流れの乱れ成

分を考慮する必要があるであろう。

このようなことは、飛沫量の測定において周囲の風速分布にできるだけ影響を及ぼさないような形でガーゼの設置方法が大切であることを示している。また、不透過の栈橋の桁近傍にガーゼを設置した場合には風速が弱まって飛沫量が小さくなることが現地観測によっても確かめられている。

最後に、疑似植栽ネットがある場合とない場合の飛沫の内陸部への輸送量の差を算定した。その結果を図-35に示す。飛沫量の鉛直分布の積分から、ネットがない場合には3.00g/m/hourの飛沫量が海から輸送されて、3.03g/m/hourの飛沫量が内陸部に輸送された。この結果は、上流端と下流端でほとんど同じ飛沫量が輸送されており、飛沫の地上への落下量は無視できることがこの結果からも示された。これに対しネットがある場合には、2.98g/m/hourの飛沫量が海から輸送されて、2.04g/m/hourの飛沫量が内陸部に輸送された。この結果は、高さ3mの疑似植栽ネットによる飛沫量軽減は約30%であったことがわかる。かなり効果的な飛沫軽減策であった。汀線近傍の飛沫分布から判断すると、高さ10m程度の樹木であればより効果的な飛沫削減策がとれるであろう。今回の調査では、大がかりな工事を含まない形での疑似植栽ネットの設置であったために、かなり低い高度のネットしか設置できなかった。もう少し高いネットでの検討が必要であると思われる。また、実際の樹木とネットとの違いを把握しておく必要があるであろう。

6. 結論と今後の課題

本研究で得られた結論をまとめると以下の通りである。

- ①：海上での現地調査により、砕波点近傍に飛沫の大きな供給源があることが確かめられた。
- ②：海上部の飛沫量分布は、上空に行くにしたがって減少し、その分布形は指数関数によって近似可能である。
- ③：海面からの飛沫の発生量は、陸風時の方が海風時より多い。砕波帯内における飛沫発生量は、当該区間の平均水深を用いた波速と風速・風向より定まる相対風速との関係で表されることがわかった。
- ④：砕波点近傍で発生した飛沫は、汀線近傍まで輸送される間にかかなりの量が沈降する。これらの飛沫の粒径は大きいものと考えられる。
- ⑤：汀線近傍で下に多い指数分布をした飛沫量の分布は、陸上部に輸送されるにつれて、地表付近では減少、上層では若干の増加がみられる。これは、鉛直方向の拡散と地表付近での風速が小さくなることによる。

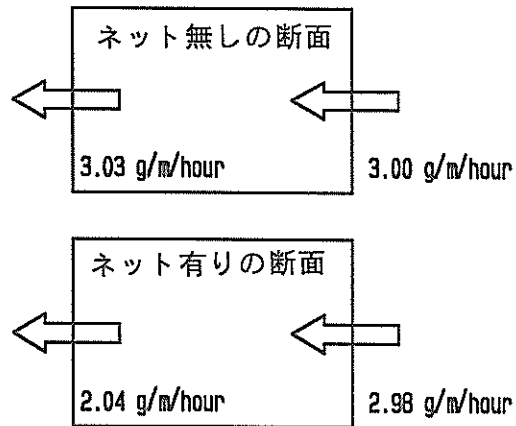


図-35 疑似植栽ネットによる飛沫量の軽減量

- ⑥：測定ガーゼに付着した飛沫量は、近似的には空気中の塩分濃度と風速の積に比例するものと考えられる。構造物への飛沫の付着量は空気中の塩分濃度とその空気中の構造物への接触量と考えることができる。
- ⑦：高さ3mの疑似植栽ネットにより、内陸部への飛沫の輸送量が30%減少する結果が得られた。この結果より、植栽による飛沫量の軽減が期待できる。
- ⑧：飛沫量の地表への付着が小さかったことから、陸上部における飛沫の沈下量は小さいものと考えられる。

本研究は、波崎海岸での現地調査の結果である。したがって、飛沫の発生源としての海岸形状、砕波形状による飛沫発生量の大きさ等の検討は不十分であった。また、一度発生した飛沫を植栽等の障壁で減少させることは、かなりの効果は得られたが、空気の流れが上昇流となることから完全には防ぎきれないものと思われる。したがって、飛沫の発生量を減少させることが重要であると思われる。このためには、飛沫が発生しにくい海岸形状を考える等の対策を合わせ考える必要がある。この点に関しては、水路実験で検討する予定である。

最後に、本調査は多くの人による共同調査の成果である。ここに、本調査に参加していただいた当研究所海洋環境部漂砂研究室栗山善昭主任研究官に感謝いたします。また、本論文の推敲をしていただいた小笹博昭海洋環境部長に深く感謝いたします。

(1995年9月29日受付)

参考文献

- 薄井二郎・清水 一 (1986)：海岸段丘ふきんの飛沫塩分の分布、北海道林業試験場研究報告、第24号、pp. 29-36。

- 運輸省第四港湾建設局海域整備課(1988)：飛沫防止対策調査委託報告書, 103p.
- 大即信明・樫野紀元・片脇清士・小林明夫・宮川豊章(1986)：塩害(I), コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 技報堂出版, p.4.
- 建設省総合技術開発プロジェクト(1986)：コンクリートの耐久性向上技術の開発, 1985年度報告書, pp.76-87.
- 寺部本次(1987)：海塩粒子の測定法—JIS及びISOを中心にして, P.P.R., Vol. 18, pp.25-29.
- 徳永友幸・田代敬大(1987)：海塩粒子による構造物の被害に関する研究(2), 熊本工業大学研究報告, 第12巻, 第1号, pp.265-270.
- 鳥羽良明(1966)：海塩粒子—大気と海洋の相互作用の一要素として—, 海と空, 第41巻, 第3, 4合併号, pp.71-118.
- 鳥羽良明・田中正昭(1967)：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, 京都大学防災研年報, 第10号, B, pp.331-342.
- 中島暢太郎・鳥羽良明・田中正昭(1968)：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, 京都大学防災研年報, 第11号, B, pp.19-28.
- 村上和男・山田邦明・西守男雄(1994)：沿岸域の飛沫に関する現地調査—津田における現地調査結果とアンケート調査結果—, 港湾技研資料, No. 784, 48p.
- Hotta, S.(1990)：A literature review of salty wind damage in Japan—On the effect of air transported—, PACON 90, Vol. II, pp.45-52.

2. 半たわみ性材料によるコンクリート舗装の急速補修

八谷好高*
市川常憲**

要 旨

重荷重である航空機が低速走行ならびに駐機する空港エプロンでは、耐荷性に優れているコンクリート舗装が使用される。コンクリート舗装を補修するときにコンクリートによるオーバーレイ工法を採用すると、当該施設を長期間閉鎖しなければならない。これに対処するために、超速硬セメントのような養生時間の短い材料を用いるコンクリートの利用も考えられるが、その施工性は良好とはいえ、大量施工はできない現状にある。

近年道路分野においては、アスファルト舗装の耐流動性を高めるために、半たわみ性舗装の施工量が増加している。これは、アスファルト舗装の表層に半たわみ性材料(空隙の大きなアスファルト混合物中の空隙にセメントミルクが充填された材料)を用いる形式のものであり、通常のアスファルトコンクリートと同様の施工形態を採るため、施工時間も短縮でき、大量施工も可能である。

そこで、この半たわみ性材料を空港コンクリート舗装の急速補修工事へ適用することを試みた。室内試験では、セメントミルクの強度発現性、流動性保持能力、高温時注入の可能性およびアスファルト混合物の耐荷性を取り上げて検討した。現地試験では、室内試験により選した材料を用いて試験施工を実施し、早期交通開放の可能性と材料の耐荷性を検証した。

一連の試験の結果、次のような知見が得られ、空港コンクリート舗装の急速補修工法として本工法の実用性が検証された。

- 1) 交通開放時間はセメントミルクの強度発現状況に大きく依存するので、セメントミルク注入時のアスファルト混合物の温度を高くすることで、早期交通開放が可能となる。
- 2) 半たわみ性材料の強度は母体アスファルト混合物自体の強度を高めることで大きくできるので、改質アスファルトを用いることにより航空機荷重に対する耐荷性が確保できる。

キーワード：半たわみ性材料、コンクリート舗装、オーバーレイ、急速補修、セメントミルク、アスファルト混合物、室内試験、試験施工

* 土質部滑走路研究室長

** 土質部滑走路研究室研修生(株式会社日本空港コンサルタンツ)