

# 伊勢湾西南海岸における海岸林及び堤防法面植栽の 塩害防止機能に関する研究

宮瀬 正\* ・ 柘植 貢\*\* ・ 田中茂信\*\*\* ・ 山崎典和\*\*\*\*  
 小林豪毅\*\*\*\*\* ・ 山本幸次\*\*\*\*\* ・ 目黒嗣樹\*\*\*\*\*

海岸林は海風の防風効果, 飛砂および飛沫の防止効果があるとされている。本研究の対象海岸である伊勢湾西南海岸は, 海岸林の分布はまばらであり, その規模も小さい。一方, 伊勢湾西南海岸は防護の観点から堤防の老朽化対策に併せ, 耐震対策としての押え盛土・護岸劣化対策としての堤防への覆土を計画している。本研究は, 覆土された堤防法面に植栽した樹木の持つ飛沫防止効果と, 従来の海岸林の持つ飛沫防止効果を比較し, 防護面で望ましい植栽計画を検討するとともに海岸の環境・利用に配慮した新たな海岸堤防の可能性について検討したものである。

## 1. はじめに

伊勢湾西南海岸の海岸林の面積は土地利用等により縮小傾向にある。また海岸林は松枯れによって壊滅的な状況下にあるが, 伊勢湾西南海岸を望ましい海岸空間として創出していくために海岸林は重要な要素として位置づけられている。

平成14年度に設置された「明日の伊勢湾西南海岸を考える懇談会」の下部組織である地域懇談会においては海岸の緑化や堤防が整備される前の自然海岸の回復を望む声が多い。

本研究はこれら地域住民の要望にも十分配慮しつつ海岸堤防の防災機能のみならず, 地域住民の日常生活環境として, また良好な自然環境として現況海岸を改善していくことを目的とした中部地方整備局三重河川国道事務所の一連の取り組みの一研究である。

本研究は, 先ず伊勢湾沿岸における海塩粒子の発生状況を風速とともに現地計測した。次に海岸林付近の海塩粒子拡散シミュレーションを行い, 現況の海岸林と堤防覆土への植栽計画を実施したときの海岸林について, それぞれの海塩粒子の低減効果を定量的に評価し, この結果を踏まえて望ましい海岸堤防上の植栽について検討・提案したものである。

## 2. 海塩粒子拡散状況調査

海岸林の飛沫防止効果を把握するため, まず現地において飛塩の観測を実施した。対象海岸域で海岸林がある場所とない場所において, 海岸線に直角方向の測線上でポールに海塩粒子捕捉器を鉛直方向に取り付け風速とともに塩分付着量を観測した。

調査は4測線で実施したが, ここでは海岸林の幅が約50mの測線と海岸林がない測線の結果を示す。海塩粒子の捕捉位置を図-1に, 側面図を図-2に示す。

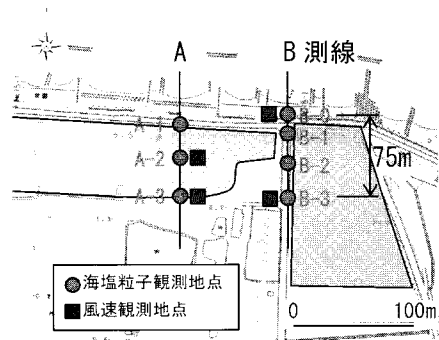


図-1 海塩粒子の捕捉位置

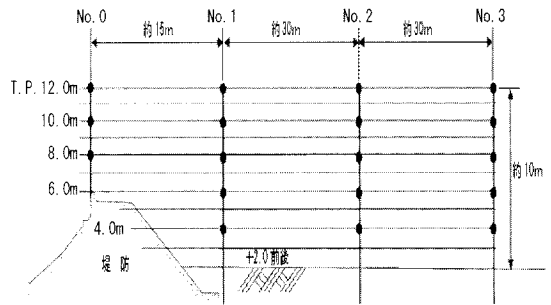


図-2 海塩粒子捕捉器縦断配置図

### (1) 調査概要

海塩粒子の計測は, ポール上に2m間隔でT.P.12m

- \* 国土交通省中部地方整備局三重河川国道事務所調査第一課専門調査員
- \*\* 国土交通省中部地方整備局三重河川国道事務所調査第一課課長
- \*\*\* 正会員 工修 (独法)土木研究所ユネスコセンター設立推進本部上席研究員 前国土交通省中部地方整備局三重河川国道事務所所長
- \*\*\*\* (株)アイ・エス・エー海岸部
- \*\*\*\*\* 正会員 博(工) (株)アイ・エス・エー海岸部
- \*\*\*\*\* 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室主任研究員
- \*\*\*\*\* 正会員 修(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室研究員

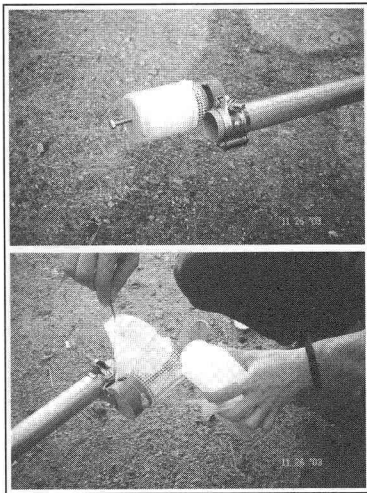


写真-1 海塩粒子捕捉器

まで設置した海塩粒子捕捉器(写真-1)にガーゼを取り付け、塩分を付着させた。付着した海塩粒子はそのイオン濃度換算で付着量を算出した。

調査回数：風況別に3回(強風時2回、静穏時1回)

調査時間：午前9時～午後3時

調査項目：風向・風速(4地点)、海塩粒子(11地点)

### (2) 海塩粒子捕捉調査結果

観測期間中最も風が強かった2004年1月27日の付着塩分量の観測結果を図-3に示す。海岸前面(No.0)では護岸天端近くの標高の低い地点に塩分量が多く、海岸林の前面(No.1)においては、風速に比例して上部に行くほど塩分量が多い。海岸林の中(A-2)では無風状態に近く、風速、塩分はともに殆ど検出されなかった。風の弱い日の観測では、塩分量は風速に比例して少なかったものの、塩分量の分布は風の強い日の測定とほぼ同じ傾向を示した。海塩粒子の流れの特性としては風速が比較的小さいにも係らず塩分量が大きい傾向にあったのが堤防天端直上付近であった。以上から海面付近においてはより粒径の大きい粒子もしくは多量の高塩粒子が移動しており、護岸を吹き上げる風とともに上昇したため、結果として天端付近で最も濃度が高くなったものと考えら

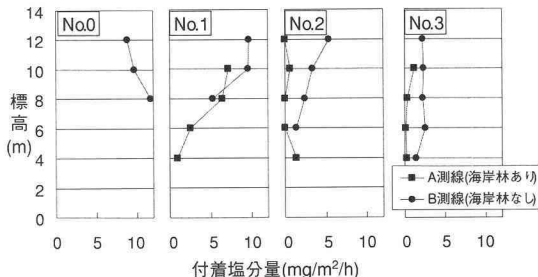


図-3 塩分付着量の現地観測結果

れる。堤防天端付近を吹き上がった海塩粒子はそのまま海岸林の前面を上昇しつつ吸着されたか、あるいは海風とともに海岸林上を通過していったものと考えられる。

### 3. 海塩粒子拡散の計算モデル

#### (1) 基礎方程式

海岸林の飛沫防止効果を検討するために、断面2次元の計算モデルを構築する。計算領域の風況場は次式で表される Navier-Stokes の方程式により計算する。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - f |u| u \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - f |w| w - g \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $u$ 、 $w$  はそれぞれ水平、鉛直方向の風速成分、 $p$  は圧力、 $\rho$  は密度、 $\nu$  は動粘性係数である。また、 $f$  は海岸林による風の減衰を表す抵抗係数であり、観測結果を基に定める。

飛塩の拡散については Fick の拡散方程式に飛沫の沈降と海岸林による補足効果を取り入れた次式を採用する。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial wc}{\partial z} = W \frac{\partial c}{\partial z} + K \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) - Q \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $c$  は塩分濃度、 $K$  は拡散係数であり、滝川ら(1998)にならい  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$  とする。また、 $W$  は飛沫の沈降速度、 $Q$  は海岸林による吸収項である。

式(1)~(4)を連立させて解くことにより、海塩粒子の拡散を計算する。数値計算には三角形メッシュを用いた有限要素法を採用する。この際、堤防背後など物理量の変化が大きいと考えられるところほど細かいメッシュとなるように分割している。

#### (2) 検証計算条件

海塩粒子の拡散は非常に複雑な現象であり、解析には多くの経験的なパラメータが必要になる。本研究では、これらを既存の研究成果と1月27日の観測結果を用いて、パラメータを同定する。

計算では風および塩分濃度を図-4に示すように領域の左端から境界条件として入力する。これらの鉛直分布は、パラペット上(B-0)で観測された平均風速および付着塩分量から次のように設定する。

一般に風速の鉛直分布は次の対数分布で表される。

$$u(z) = \frac{u_0}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $u_0$  は摩擦速度、 $z_0$  は粗度係数、 $\kappa$  ( $\approx 0.4$ ) は Karman 係数である。通常、 $u_0$  と  $z_0$  を定めるためには、風速分布を鉛直方向に細かく計測する必要がある。しかし、B-0地点では地表面付近のデータが得られていないため、植田ら (1999) の計測結果をもとに  $z_0 = 5.5 \times 10^{-3}$  m として地上10 m の平均風速から  $u_0$  を求めた。観測時の地上10 m における平均風速は10.2 m/s であったため  $u_0 = 0.54$  m/s となる。

付着塩分量の鉛直分布については、村上ら (1992) の研究により以下の指数関数でよく近似できることがわかっている。

$$s(z) = \alpha \exp(-\beta z) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $s$  は付着塩分量、 $\alpha$  と  $\beta$  は鉛直分布を与える定数である。パラベット上で得られた観測値は、 $\alpha = 19$ 、 $\beta = 0.086$  とすると式 (6) とよくあてはまる。

飛沫の付着メカニズムについては、村上ら (1995) と同様の考え方を採用する。ガーゼに付着した塩分量は塩分濃度と断面を通過した空気量 (風速  $\times$  断面積  $\times$  時間) との積で表すことができる。したがって、付着塩分量と塩分濃度の関係は次式で表される。

$$c = s/u \dots\dots\dots (7)$$

以後は式 (5) ~ (7) により設定した境界条件を用いて解析を行なう。

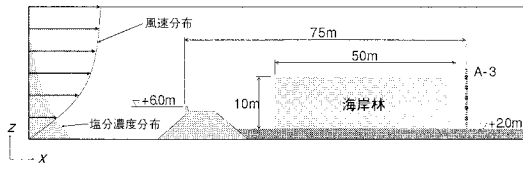


図-4 検証計算条件 (A 測線)

(3) 海塩粒子沈降のモデル化

海塩粒子は風に乗って霧状に拡散するとともに、重力により沈降する。飛沫の沈降速度  $W_0$  は松永ら (1996) と同様に次の Best の経験式を採用する。

$$W_0 = 9.58 \left[ 1 - \left\{ \exp \left( - \frac{d_0}{1.77} \right) \right\}^{1.15} \right] \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $d_0$  は飛沫の粒径である。上式の次元は  $W_0$  が m/s、 $d_0$  が mm なので注意が必要である。式 (8) からわかるように粒径が大きな飛沫ほど海岸付近に近い場所で地面に落ちる。そのため、結果的に海岸から離れるほど飛沫の沈降速度は小さくなる。仲座ら (1993) はこの効果を次のような指数関数で表している。

$$W(x) = W_0 \exp(-Bx) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $W$  は任意の距離の沈降速度、 $W_0$  は基準点

( $x=0$ ) での沈降速度である。また、 $B$  は経験係数であり、仲座らは0.012とすると観測値とよく一致したと報告している。

沈降の効果を評価するためには、基準点における飛沫粒径  $d_0$  を適切に定める必要がある。ここでは、パラベット上での飛沫粒径を仮定して、沈降の効果はそこから陸域部で導入することにする。 $d_0$  は海岸林のない B 測線で観測された塩分付着量と同定させて求めた。 $d_0$  を 0.2~1.0 mm と変えて計算を行ったところ、 $d_0 = 0.6$  mm のとき観測値とよく一致することがわかった。ただし、飛沫粒径は気象および海象条件によっても変わると考えられる。

海塩粒子の拡散状況は、発生時の飛沫粒径によって大きく異なる。すなわち、飛沫の発生量が多くても、その粒径が大きければ海塩粒子は広範囲に拡散しない。発生時の飛沫粒径を明らかにすることは、海塩粒子拡散の予測において極めて重要であるが、現在のところ十分な知見が得られていない。

(4) 海岸林のモデル化

海岸林は飛沫捕捉効果と防風効果の2つの機能により飛来塩分の拡散を抑制している。このうち、前者については、仲座ら (1993) が次のようなモデルを提案している。

$$Q = \lambda \cdot S \cdot c \cdot u \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $Q$  は海岸林による単位時間・単位体積あたりの塩分吸着量、 $S$  は植生の葉面積密度、 $\lambda$  は観測結果から決まる定数である。葉面積密度は樹種、状態、間隔などによって異なるが、ほとんどデータは得られていない。仲座ら (1996) は観測から得られた風速分布と同定させて葉面積密度を求めている。飛沫捕捉効果については、仲座らと同じ値 ( $S = 0.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\lambda = 0.35$ ) を用いて解析を行なうことにする。

海岸林による風の減衰効果は、式 (2)、(3) 中の右辺第3項で表す。抵抗係数  $f$  は海岸林の背後の A-3 地点で観測された風速と合うように設定する。その結果、 $f = 0.05$  とするとほぼ妥当な結果が得られることがわかった。

(5) 検証計算結果

海岸林のない断面 (B 測線) とある断面 (A 測線) に対する塩分濃度分布の計算結果を図-5 に示す。飛沫粒径を 0.6 mm と比較的大きく設定しているため、堤防背後で顕著な沈降が生じていることがわかる。海岸林のある部分では、飛沫捕捉効果および防風効果により塩分濃度が急速に低下している。ただし、この場合には、沈降の影響が大きいため、A-3 地点より風下側では海岸林の効果は顕著に表れていない。

図-6 は A-3 および B-3 地点における観測結果と計算

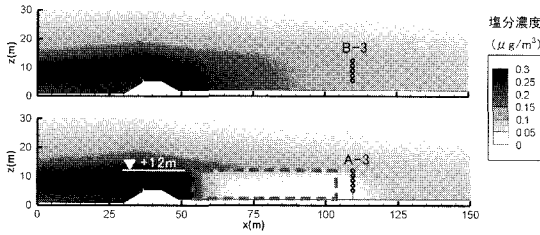


図-5 塩分濃度分布 ( $d_0=0.6$  mm)

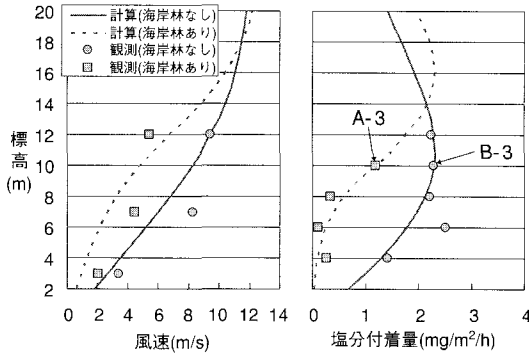


図-6 風速と付着塩分量の鉛直分布 ( $d_0=0.6$  mm)

結果を比較したものである。観測結果のばらつきを考えれば、本計算モデルは妥当であると考えられる。海塩粒子の発生および拡散は地域性の強い現象であり、経験的なパラメータが不可欠である。そのため、現在のところ予測にあたっては現地観測が前提となっている。しかし、パラメータさえ適切に設定すれば、海塩粒子の拡散を精度良く予測することが可能である。

#### 4. 堤防植栽計画に対する予測計算

##### (1) 堤防整備計画

伊勢湾西南海岸背後地域に住む住民からは、景観および親水性の面から海岸林の存在を重視する声が多い。しかし、実情としては堤防の背後に大規模な海岸林を整備することは困難である。そのため、図-7に示すように堤防の後背部に耐震対策、劣化対策として厚く盛土し、そこに植栽することが計画されている。このような植栽は良好な海岸環境を形成するのみならず、塩害の抑制にも役立つと考えられる。そこで、計画断面に対して海塩粒子拡散の計算モデルを適用し、その効果を検討する。

##### (2) 予測計算

予測計算ケースを表-1に示す。比較のため、検証計算と同様に植栽を行わない場合 (case1) と海岸林がある場合 (case2) についても計算を行う。植栽された樹木が海塩粒子により十分発育しないことも想定し、樹木の高さは10 m (case3) と15 m (case4, 図-8) の2ケースとする。また、飛沫粒径が大きい場合には、沈降

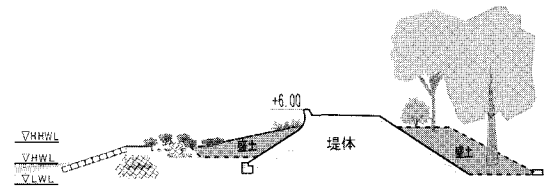


図-7 堤防への覆土と植栽イメージ

表-1 予測計算ケース

case No.	堤防形状	樹木 (樹冠部高さ)
case 1	計画断面	なし
case 2	計画断面	海岸林 (T.P.12 m)
case 3	計画断面 + 覆土	覆土植生 (T.P.12 m)
case 4	計画断面 + 覆土	覆土植生 (T.P.17 m)

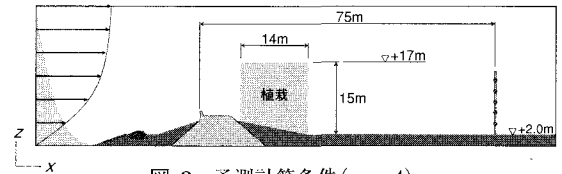


図-8 予測計算条件 (case 4)

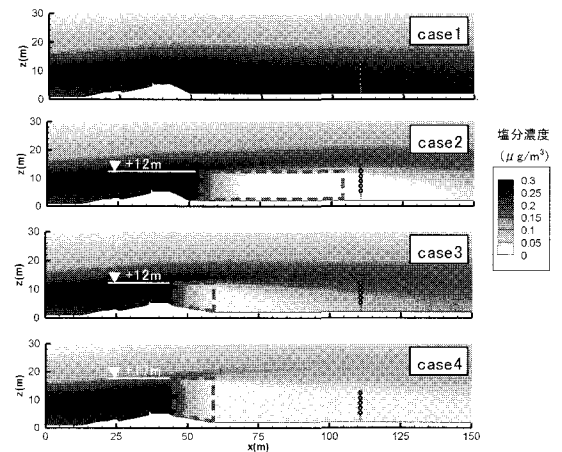


図-9 塩分濃度分布 ( $d_0=0.1$  mm)

の効果が大きく深刻な塩害は生じないと考えられる。そこで、予測計算では飛沫粒径を0.1 mmとして計算することにする。

予測計算結果を図-9 および図-10に示す。検証計算に比べて飛沫粒径が小さいため、風下側にも海岸林の効果が顕著に表れている。また、堤防裏法面の限られたスペース (ここでは14 mを想定) に植栽した場合にもかなりの飛沫防止効果が期待できることがわかる。特に樹木の高さが15 mである case4では、高さ10 m、幅50 mの海岸林がある case2よりも風下側への塩分拡散が抑制されている。塩害防止の観点からは、樹木が十分に成長可

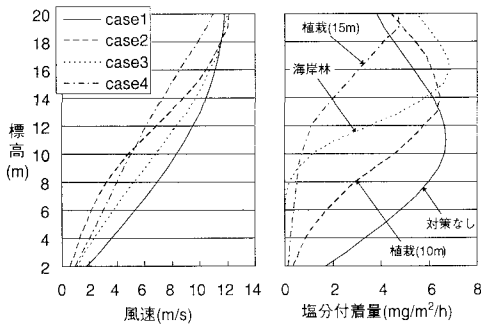


図-10 風速と塩分濃度の鉛直分布( $d_0=0.1$  mm)

能な植栽を行なうことが望ましい。

5. 堤防植栽の検討

伊勢湾西南海岸の海岸堤防への植栽についてはどのような樹種が適しているかを、平成15年度西南海岸海辺の生物国勢調査に基づく植生、防護・環境・利用および各工区の背後地の状況を踏まえて以下の条件を設定して検討を行い、表-2に示す樹種を抽出した。

- ・防風、防潮効果が高いこと (草本、藤本類は除外)
- ・管理の手間がかからないこと
- ・伊勢湾西南海岸の既存種であること
- ・景観に配慮したものであり、棘があったり、ハチなど

表-2 抽出された樹種の特長

和名	土地、土壌	日照	最大樹高	その他の特性
ハマゴウ	砂質土	陽樹	1 m	強靱な地下茎
トベラ	岩裂、砂～埴土	陽樹～中庸	8 m	成長早い
ネズミモチ	常緑樹林中、砂～埴土	陽樹～陰樹	5 m	成長早い
オオバイボタ	沿岸地、砂～埴土	陽樹～陰樹	6 m	成長早い
ヤマモモ	沿海岸部の林地、砂～埴土	陽樹～中庸	20 m	深根性、成長遅い
シラカシ	林地、砂～埴土	陽樹～陰樹	20 m	浅根性
タブノキ	深い土壌、埴土	陽樹～陰樹	20 m	成長早い

の謂集があつたりしない樹種であること。

6. とりまとめと今後の課題

本研究では、伊勢湾西南海岸において飛塩調査を行い、植栽による塩害抑制効果を数値計算により検討した。計算のみで飛塩の予測を行うには、気象および海象条件による飛沫の発生量およびその粒径を定量的に評価する必要がある。さらに樹木の葉面積密度などを一般化できれば、海岸林の計画に対して非常に有用なデータとなる。

植栽の塩害抑制効果を予測したところ、限られた領域の植栽でも海塩粒子の良好な吸着効果が期待できる結果となった。今後は海塩粒子を含む風が海岸林内を比較的自由に通抜けると同時に海塩粒子を取り除くことができる機能的な樹種と配置の検討が必要である。塩害に強く現在海岸付近に植生する樹種を抽出してはいるが潮風に直接当たる箇所に植栽すると本来の樹高に達しない場合や生育が不良となることもあるため、樹木の生育状況にあわせて柔軟に植栽計画を変更していく必要がある。

参考文献

滝川清・山田文彦・外村隆臣・荒木宣博(1998)：飛来塩分特性の数値モデルと防風ネットを用いたその抑制効果に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp. 1181-1185。  
 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄(1993)：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。  
 仲座栄三・津嘉山正光・北村康司・日野幹雄(1996)：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。  
 松永信博・榎田操・鶴崎賢一・片岡賢祐(1996)：強風によって沖合海域から浅海域へ輸送されるしぶき量の低減率について，海岸工学論文集，第43巻，pp. 1186-1190。  
 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓司(1992)：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。  
 村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎靖・西守男雄(1995)：植栽による飛沫（海塩粒子）の軽減に関する現地実験，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1036-1040。  
 榎田操・松永信博・香月理(1999)：冬期響灘沿岸における飛沫塩分量の現地観測，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1246-1250。