

内海沿岸域における飛来塩分特性とその対策について

滝川 清*・山田文彦**・外村隆臣***
松本健作****・坂本鋼治*****

1. はじめに

強風により内陸部へ運ばれる飛来塩分（海塩粒子）は、沿岸域における潮風害（塩害）の直接的な原因である。

九州各県下の農作物・電気設備等は、平成3年9月相次いで上陸した台風17・19号の潮風害により、多大な被害を被っており、それを一つの契機として飛来塩分量の軽減策が検討されている。海塩粒子が発生し、輸送されるメカニズムについては、村上ら（1992）、田中（1970）、浜田ら（1986）、仲座ら（1992）などの研究例がある。しかし、飛来塩分は地形・波浪・気象などの影響を強く受けるため、そのメカニズムには依然として不明点が多く残されている。そのため、防風林などの対策の効果が十分に検討されないまま、経験的に行われているのが現状である。本研究は、有明海に面した熊本県沿岸域における飛来塩分量の地域特性や空間分布特性などを現地観測により調査するとともに、防風林などの透過性フィルターの効果について数値解析により検討を行うものである。

2. 飛来塩分量の距離減衰特性及び地域特性

図一に示す熊本県玉名郡横島干拓で5地点、天草郡苓北町で18地点にガーゼを用いた捕塩具（滝川ら（1995a））により飛来塩分の現地観測を行った。横島干拓地で1993年に3回、1994年に2回実施し、苓北町でそれぞれ1回と2回の観測を実施した。これらの観測結果の一部を選び表一に観測状況、図二にCl⁻、Na⁺濃度を示す。また各図中の直線とその式は、各イオンの飛塩量と距離の関係を現す回帰式で、距離Xの指数が距離減衰の強度を表す係数である。一般に飛塩量の距離減衰の近似式として西川ら（1993）は次式を提案している。

$$C \cong C_1 \cdot X^b, \quad b = -0.6 \quad (\text{全国一律}) \cdots \cdots (1)$$

ここに、C：飛来塩分量(mdd), C₁：1 km 換算飛来塩分量 (mdd), X：海岸線からの距離 (km), ここで、1

$$\text{mdd} = 1 \text{ mg}/100 \text{ cm}^2/\text{day}$$

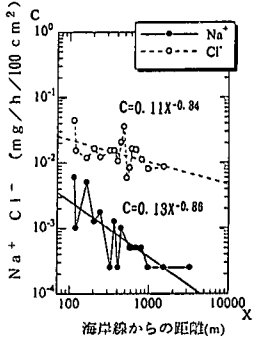
図（a）の苓北町の観測では観測時間は短かったものの特に南西方向（SW 方向）からの風向きが強く、海岸線から

表一 観測状況

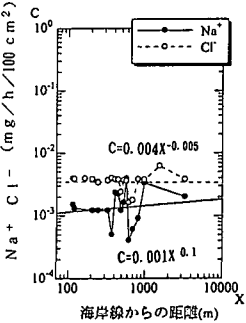
観測地	日 付 け (観測時間 h)	風 向	平均風 (m/s)	最大風 (m/s)	天 候
(a) 苓北町	1993 年 8 月 17 日 (6 h)	SW	3.8	8.1	曇り→雨
(b) 苓北町	1994 年 8 月 10 ~ 11 日 (23 h)	SE	3.3	5.0	晴れ→曇り
(c) 横島町	1993 年 8 月 9 ~ 10 日 (48 h)	SW	3.5	9.0	台風 7 号通過



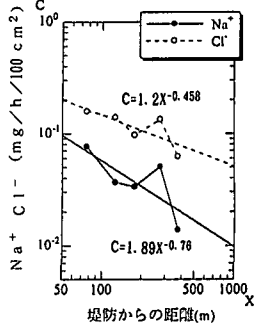
図一 位置図



図二(a) 苓北町



図二(b) 苓北町



図二(c) 横島町

* 正 会 員 工 博 熊本大学教授 環境システム工学科
** 正 会 員 工 修 熊本大学助手 環境システム工学科
*** 正 会 員 熊本大学技官 環境システム工学科
**** 学 生 会 員 工 修 熊本大学大学院 自然科学研究科
***** 正 会 員 宮崎県庁

らの距離に近いほど他の観測時（平均風速が約2 m/s以下の平常時）と比べて高い飛塩量が現れている。海岸線から1 m地点での飛塩量（ Na^+ ）を回帰式から求めると単位時間あたり0.133 mg/100 cm^2 となり、平常時の観測の0.004 mg/100 cm^2 と比べて約33倍も大きい値となった。しかし、水平到達距離は約2000 mで平常時観測と比べると到達距離は約半分であり、距離減衰を表すグラフの傾きは一番大きい値となった（ Na^+ で-0.86）。図（b）の観測は、常時、陸地方向からの風を受けていたため飛塩量も少なく、飛塩量と海岸からの距離減衰には殆ど相関がなく、 Na^+ にいたっては、逆に増加傾向にあった。このように、風向・風速に強く支配されて内陸に飛来しているものと推定される。また、これまでの一連の観測結果から、強い風が海から吹く場合には、高い濃度の塩分が飛来し、その海岸からの距離減衰係数は、ほぼ、-0.6となり全国平均的な値をとる傾向にある。図（c）の横島干拓での観測状況は、1993年8月台風7号が九州西海岸上を北上し、9日夜半頃から10日昼前にかけて熊本県下に強風が吹いた。この時、石張り護岸の上を波が水塊となって通過し、消波ブロック付近で碎波した。堤防付近での Na^+ 量と Cl^- 量は、それぞれ単位時間あたり約1.89 mg/100 cm^2 、約1.2 mg/100 cm^2 であり、平常時に比べ Na^+ が7～22倍 Cl^- が3～8倍の飛塩濃度が測定された。苓北町海岸は外海（東シナ海）に面していて、有明海内海の横島町海岸に比べると風波が発達し易く、強風時の有義波高の差はかなり大きなものになる。にもかかわらず、平均風速のほぼ等しい図（a）の苓北町の観測に示すように、海岸付近での Na^+ 量と Cl^- 量は、それぞれ単位時間あたり約0.13 mg/100 cm^2 、約0.11 mg/100 cm^2 であるが、約100 m内陸での飛塩量は横島町海岸の1/20～1/10にすぎず、飛塩量は横島干拓地のほうが内陸まで飛来している。これは、横島干拓での観測が台風接近時であることが支配的要因と考えられるが、さらに、消波ブロックが横島町海岸のものと比べて海側に設置しており、また、苓北海岸の海崖の存在と背後が丘陵地形であるために、粒径の大きい海塩粒子があまり飛来していない地域特性によるものと推測される。

3. 飛来塩分量の空間分布特性

飛来塩分量の空間分布特性などを把握するために、1995年には、横島干拓地で現地観測を行った。観測日時を表-2に示す。

3.1 観測方法および分析方法

飛来塩分量を空間的に捕捉する方法として、10 cm×20 cmのガーゼを網籠に巻き付け、それを高さ6 mのポールに1 m間隔で取り付けた（図-3）。この捕捉器は、干拓地内に6箇所設置した。観測地点の断面図を図-4

に示す。分析方法は、塩分を含んだガーゼを蒸留水に浸し、約4時間旋回浸透器にかけ、この水溶液中の Na^+ 濃度を原子吸光度光度計を用いて測定した。なお、農作物等に被害を及ぼすのは Cl^- であるが、 Cl^- は日常生活からも発生する（例えば、下水・し尿など）ため、観測データにばらつきが見られた。そのため、今回は Na^+ を飛来塩分量の指標として用いた。

表-2 観測日時

観測名	観測期間(観測時間)	平均風速(m/s)	累積降雨量(mm)	最大風速(m/s)	最大降雨強度(mm/h)
第1回	H.7.9.11-9.14(72 h)	1.25	0	NNW 4	0
第2回	H.7.9.14-9.18(97 h)	2.16	0	N 5	0
第3回	H.7.9.18-9.25(168 h)	1.23	98	SW 5	16
第4回	H.7.9.25-10.2(168 h)	1.03	49	NW 3E3	9
第5回	H.7.10.2-10.9(166 h)	1.1	12	N 4	5

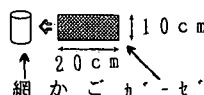


図-3 捕捉器

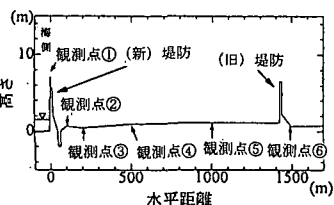


図-4 横断面図

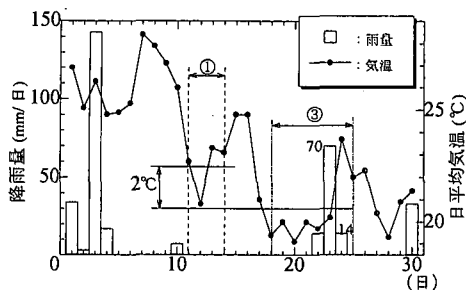


図-5 降雨・気温の経日変化

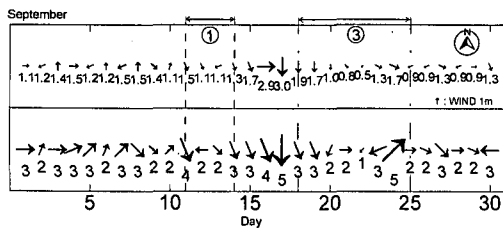


図-6 風速・風向の経日変化

3.2 観測結果

ここでは、第1回観測と第3回観測の比較を行う。

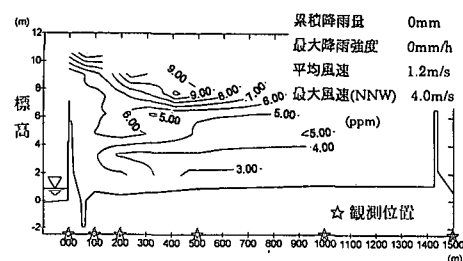
3.2.1 気象状況

平成7年9月の気象状況を示す。なお、気象データは熊本気象台が発表した岱明町のデータを用いた。図-5は、降雨量と平均気温の経日変化を示している。平均気温は9月中旬より徐々に下がっており、第1回観測と第3回観測では2°Cの温度差がある。また、降雨量は第1回観測中は0 mmであるが、第3回観測では台風14号の影響で98 mmの降雨量が観測されている。図-6は、風速・風向の経日変化を示しており、上段が平均風速、下段が最大風速である。矢印の大きさ及び添字は風速を、矢印の方向が風向を表している。第1回観測中の平均風速は1.3 m/sで、いずれも山風である。第3回観測中の平均風速も1.2 m/sと大差はないが、24日に台風14号の影響で5.0 m/sの最大風速（海風）を観測している。

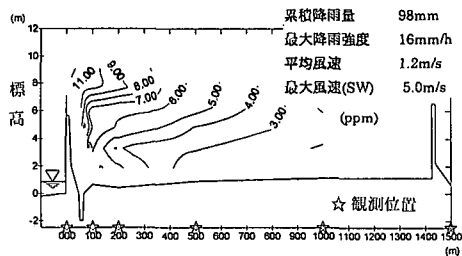
3.2.2 飛来塩分量の空間分布特性

観測で得られたNa⁺濃度の空間分布を図-7に示す。図中の数値はガーゼ200 cm²中に含まれるNa⁺濃度(ppm)を表し、測定点以外では線形補間により求めた。

(a) は第1回観測の結果であり、平均風速の変化が少なく、降雨も観測されていないので、ほぼ平常的な観測データであると考えられる。Na⁺濃度は地表から3 m付近までは、堤防から離れるにしたがって減衰しているが、3 mより上空になると距離には関係なく、ほぼ一様な分布を示している。



(a) 第1回観測



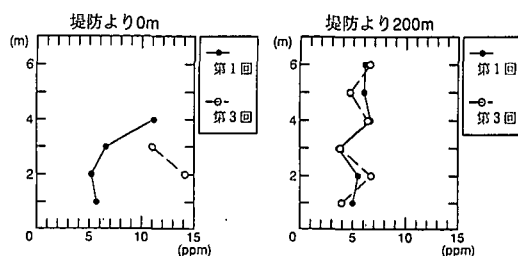
(b) 第3回観測

図-7 飛来塩分量の空間分布

(b) は第3回観測の結果を示しており、第1回観測の結果に比べてもNa⁺濃度は急激に減衰している。特に堤防から100 mの間は等高線の間隔が密であり、減衰傾向が著しい。これは、台風接近による強風や降雨が影響したものと考えられる。

3.2.3 飛来塩分量の鉛直分布特性

図-8は現地観測で得られた各測点でのNa⁺濃度の鉛直分布を示す。縦軸は各測点の地表からの高さ、横軸はガーゼ200 cm²中に含まれるNa⁺濃度である。図中の黒丸は第1回観測、白抜きが第3回観測の結果である。(a) は堤防上の測点1の観測結果であり、第1回観測では、濃度は高さとともに増加している。第3回観測の高さ1 mと4 mの観測点は、強風でガーゼが飛ばされたため測定不能であるが、断面平均濃度を試算すると、第3回観測は第1回観測の約2倍の濃度である。この原因の1つとして台風接近時の強風が考えられる。そこで波浪推算(S-M-B法)を行うと、第3回観測の最大風速は5.0 m/s、吹送距離は約24 kmであり、有義波高は約40 cm、有義波周期は約2秒となる。この程度の波であれば堤防付近で激しく砕けた可能性は低く、よって台風が直撃するような場合は、堤防上の飛来塩分量はさらに増加するものと考えられる。(b) は堤防から200 m離れた測点3の観測結果である。両観測のNa⁺濃度の鉛直分布は、ほぼ等しくなっている。堤防上での濃度差を考えると、台風時に発生する比較的大きな海塩粒子は沈降速度が大き



(a) 測点1

(b) 測点3

図-8 飛来塩分量の鉛直分布

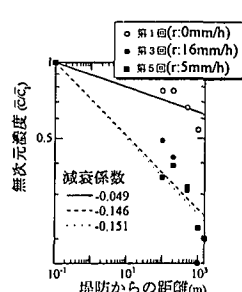


図-9 無次元濃度の距離減衰特性

く、遠くまで運ばれないものと考えられる。

3.2.4 飛来塩分量の降雨による減衰特性

これまでの観測結果より、飛来塩分量の要因として地形や気象の変化など種々の要因が考えられる。ここでは、降雨の有無などによる減衰特性について考察する。

図-9は、観測期間中の平均風速がほぼ等しい第1回・第3回・第5回観測のNa⁺濃度の距離減衰特性を示す。横軸は堤防からの距離、縦軸は各測点における断面平均濃度(C)を堤防上での断面平均濃度(C_i)で除した無次元濃度を示す。また、rは最大降雨強度である。

第1回観測では前述と同様、無次元濃度は両対数軸上で堤防からの距離と直線関係にあり、距離とともに指数的に減衰している。ところが、第3回・第5回観測のように降雨が観測された場合、無次元濃度の距離減衰特性はさらに強まり、今回の観測では回帰式の傾きは約3倍となった。このように、降雨量が飛来塩分量の減衰要因の一つであることは明らかであるが、減衰のメカニズムや、どの程度の降雨量から減衰効果が発生するかなどについては依然不明である。そのため、今後も現地観測を継続し、現象の解明を行う必要がある。

4. 飛来塩分の数値シミュレーション

飛来塩分は、沿岸付近で波が砕けることなどにより発生した海塩粒子が、風によって内陸部へと運ばれる現象である。現段階で、一連の現象を数値的にモデル化するには不確定要素が多い。そこで本研究は、現象を発生過程と輸送過程の2つに分けてモデル化を試みた。

ここでは、発生過程については計算結果のみを示し、主に輸送過程のモデルについて説明する。

4.1 発生過程の数値シミュレーション

筆者らは、斜面上および潜堤構造物上で波が砕波するような非常に非線形性の強い波動現象に対して、粘性流体(N-S方程式)を対象とし、FEMとSMAC法を組み合わせた数値解析手法を開発し、室内実験との比較によりその有効性を示している(滝川ら, 1991; 1995b)。図-10に同様の手法を用いて、防波堤に波が衝突する計算結果を示す。波が防波堤を越え(越波)、波しぶき(海塩粒子)が発生する状況が再現されている。

今後は、越波量・飛沫の発生状況などについて室内実験との比較を行い、計算精度などの詳細な検討を行う予定である。

定である。

4.2 輸送過程の数値シミュレーション

4.2.1 基礎方程式

現象を2次元的に考え、風速場の密度は一定であると仮定すると、基礎式は非圧縮性流体を対象とした連続式(2)とN-S方程式(3)、(4)で表される。

飛来塩分は観測結果から、海塩粒子の沈降速度が大きい堤防背後域以外ではミスト状であると考えられ、ここでは、基礎式としてFickの拡散方程式(5)を用いて検討する。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x + F_{ix} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y + F_{iy} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} \\ = w_0 \frac{\partial c}{\partial y} + \kappa \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + C_{cut} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$F_{ix} = C_D \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} |u| u \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_{iy} = C_D \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} |v| v \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、(u, v)は(x, y)方向の速度成分、ρは密度、pは圧力、νは動粘性係数、(F_x, F_y)は(x, y)方向の物体力成分、(F_{ix}, F_{iy})は(x, y)方向の透過層内での流体抵抗、C_Dは抵抗係数、εは空隙率、cは塩分濃度、w₀は海塩粒子の沈降速度、κは拡散係数、C_{cut}は透過層内での濃度の減衰項である。一般に透過層内での流体抵抗は、速度に比例した粘性抵抗、速度の2乗に比例した乱れ抵抗および加速度に比例した慣性抵抗の3項の和で表される。しかし、ここで対象とする流れ場は乱流であり、しかも定常状態での風速・濃度について検討を行うため、式(6)、(7)のように乱れ抵抗のみを考慮する。離散化はSMAC法に準じ、N-S方程式および拡散方程式中の移流項には3次精度の風上差分法を適用した。また今回は、乱流モデルは組み込まず、直接シミュレーションを行ったので、渦動粘性係数は考慮していない。次に、圧力および濃度の反復解法には前処理付き共役勾配法(MICCG法)を用いた。計算手順は、ほぼ定常状態になるまで風速場の計算を行い、その結果を用いて拡散場の計算を行った。

4.2.2 計算結果

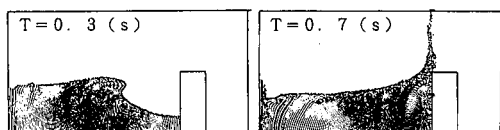


図-10 防波堤への波の衝突

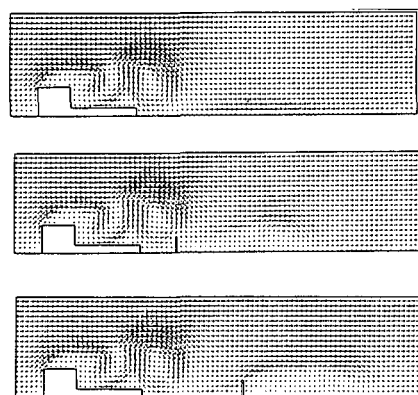


図-11 計算結果 (流速分布)

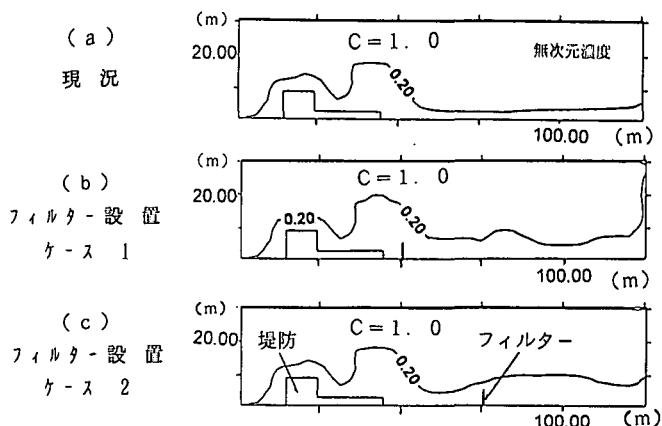


図-12 計算結果 (濃度分布)

図-11, 図-12は現地の地形を用い, 透過性フィルターの有無及び位置による流速分布, 及び濃度分布の変化で, 図-12では流入濃度で除した無次元濃度を示す。

解析領域は横 125 m, 縦 30 m, 計算格子幅はともに 50 cm, 計算時間ステップは 0.05 s である。また, 透過性フィルターの幅は 50 cm, 高さは 5 m, 抵抗係数 C_D は深尾ら (1980) の防風フェンスの実験結果を参考に 1.5 とした。なお, 今回の計算では w_b , C_{cut} は考慮していない。図よりフィルター背後で流速が減衰し, 濃度も減衰していることから透過性フィルター設置の有効性が数値的に確認できる。また, (b) と (c) の比較によりフィルターの設置場所に関しては, 堤防直後の風速場の乱れた場所よりも, 風速場が安定した場所に設置する方がより濃度の減衰効果が高いことが分かる。

5. 主要な結果

沿岸域での現地観測及び数値シミュレーションにより, 塩分量の飛来特性等を調べた。結果を以下に要約する。

1) 飛来塩分量は距離とともに指数的に減衰し, 強風時ほど減衰の係数は大きく全国平均値 (-0.6) に近づく傾向にある。また, その減衰特性は地域および気象の変化を強く受ける。

2) 飛来塩分量の空間分布も気象条件によって変化する。特に降雨の有無は減衰要因の一つである。

3) 飛来塩分の軽減策の一つである透過性フィルターの有効性が数値的に確認できた。また, その設置位置は, 風速場が安定した場所がより効果的である。

今後は現地観測により, 降雨および海塩粒子の沈降に

よる飛来塩分濃度の減衰をモデル化するとともに, 乱流モデルの組み込みや 3 次元解析を行い, 乱れの 3 次元性の影響などを解明する予定である。

謝辞: 現地観測にあたっては, 熊本県環境保全課, 横島町役場, 農林省家畜改良センター熊本牧場の方々に多大なるご協力を頂いている。ここに, 厚く謝意を表します。

参考文献

- 田中正和 (1970): 塩害に関する基礎的研究 (第 4 報), 京都大学防災研年報, 13・B, pp. 445-456.
- 滝川 滔, 山田彦彦, 有元光久 (1991): 斜面上の碎波変形過程の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第 38 巻, (1), pp. 61-65.
- 滝川 滔, 山田彦彦, 外村隆臣 (1995a): 潮風害による塩分飛沫量と植生による環境評価について, 平成 6 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 272-273.
- 滝川 滔, 山田彦彦, 松本健作 (1995b): 潜堤上碎波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第 42 巻, (1), pp. 66-70.
- 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐 (1993): 飛塩 (海塩粒子) の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, (2), pp. 1036-1040.
- 西川和広, 田中良樹 (1993): 飛来塩分量全国調査 (IV), 土研資料第 3175, p. 50.
- 浜田純夫, 日野伸一, 兼行啓治 (1986): 海岸付近の飛塩量調査, 山口大学工学部研究報告 Vol. 36, No. 2, pp. 255-260.
- 深尾康三, 岩佐義輝, 川端三郎 (1980): 中高層建物周辺の風害防止策に関する研究, 風工学シンポジウム, pp. 107-114.
- 村上和男, 加藤一正, 沼水勝義 (1995): 植栽による (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, (2), pp. 1036-1040.