

植生が後浜の飛砂量及び飛塩量に与える影響に関する数値的検討

上 堂 蘭 孝 一*

1. はじめに

後浜は、高波浪により前浜が侵食された場合や、波が前浜を越えた場合などは、背後地を波から守る防護施設としての機能を持っている。また後浜は、背後地への飛砂や飛塩の影響を軽減する効果も持っていると考えられる。後浜は、自然環境に配慮した海岸保全施設としての役割も果たすため、今後はこの領域を積極的に利用することが重要であると考えられる。

通常は後浜には砂草が生育しており、栗山・望月(1997)によると、砂草には飛砂の捕捉と、飛砂の発生を抑止する効果があることを見出している。また、砂草が後浜に生育することで、砂丘に生育する防風林との空間的な連携により、砂丘の背後地を、飛砂や飛塩災害から防護するといった機能も期待できる。

植生の飛砂量に与える影響に着目した研究は、現地調査や風洞実験(例えば、加藤・佐藤, 1998)によるものが多く、数値計算においては、風速場を数値モデルによって求める方法(例えば、栗山・上堂蘭, 1999)などがある。植生の飛塩量に与える影響に着目した研究は、植生(防風林)の塩分除去効果を数値モデルにより解析したものがある(例えば、灘岡ら, 1996; 仲座ら, 1993)。

しかしながら、後浜における飛砂及び飛塩現象に着目した研究は少ない。また、後浜に通常存在している砂草が、飛砂量及び飛塩量の両方に与える影響を検討した例は今までにほとんど無い。

そこで本研究では、植生を考慮した、風速場・塩分濃度に関する 2 次元の乱流境界層モデルを作成し、後浜の砂草が、飛砂量と飛塩量に与える影響を検討した。

2. 数値モデル

2.1 風速・塩分濃度計算モデル

一般的な砂丘海岸における風速場は、水平方向の風速の変化が、鉛直方向の風速の変化に比べて小さいため、境界層近似を仮定できる。さらに、沿岸方向に地形形状がほぼ一様であると仮定し、計算を行う場を岸沖方向と鉛直方向の 2 次元で表現する。

平均風速に関する定常の乱流モデルの基礎式として、連続式(1)と、植生による抵抗を含んだ平均流に関するナビエ・ストークス方程式(2)、また、塩分濃度に関する移流拡散方程式(3)を用いる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_m S U^2 \frac{u_i}{|U|} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{DC}{Dt} = W \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \gamma_c S C |U| \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 $i, j=1, 2$, u_i は i 方向平均風速(v, w)、 v は岸向き正の岸沖方向平均風速、 w は上向き正の鉛直方向平均風速、 x_i は i 方向座標(y, z)、 y は岸向き正の岸沖方向座標、 z は上向き正の鉛直方向座標、 p は圧力、 C は無次元塩分濃度、 ρ_a は空気密度、 U は平均風速、 S は葉面積密度、 $C_m (=0.5)$ は運動量交換係数、 $\gamma_c (=0.5)$ は植生によるフィルター効果の定数、 σ_t は灘岡ら(1996)と同様に 1.0 とした。渦動粘性係数 ν_t は宮田ら(1993)を参考に以下で定義した。

$$\nu_t = \lambda^2 \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| \quad \dots\dots\dots (4)$$

λ は混合距離で、植生のない領域では式(5)、植生の有る領域では式(6)とした。

$$\lambda = \kappa(z - z_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\lambda = \frac{2\kappa^3}{C_m S} (\lambda < \kappa(z - z_0)) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 κ はカルマン係数、 z_0 は地盤高さである。飛塩粒子の沈降速度 W は仲座ら(1993)を参考に式(7)とした。

$$W = W_0 \exp(-B(y - y_0)) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $W_0 (=0.06)$ は粒子の降下速度、 $B (=0.012)$ は定数、 y_0 は飛塩粒子の風上端位置である。

通常後浜に生育するような砂草と、起伏のある地形を正確に表現するために、デカルト座標系で表記された基礎方程式を一般座標系に変換した(中橋, 1992)。方程式の離散化法として、基本的に時間微分に関しては 1 次の

* 正会員 (株)エコー 環境水理部

前進差分,空間微分に関しては2次の中央差分を用いた。

風速の境界条件には,風上端で十分発達した乱流境界層の平均風速である対数分布を仮定し,塩分濃度の境界条件には,仲座ら(1993)をもとに指数関数式を与える。また,計算の安定化をはかるため,風上端では風速と塩分濃度を所定の値に徐々に近づけるようにした。入力条件である風上端以外では風速,塩分濃度,圧力の初期値を0とし,風速と塩分濃度がほぼ定常に達するまで計算を行う。

2.2 飛砂量計算モデル

前述の風速・塩分濃度計算モデルによって求めた風速より,摩擦速度 u_* を求める。摩擦速度の算定にあたっては,底面上 50 cm の風速値 u_{50} を用いることとし,それより下方では対数分布が成立すると仮定して以下の式で摩擦速度 u_* を求める。

$$\left. \begin{aligned} u_* &= \frac{u_{50}}{|u_{50}|} \frac{|u_{50}| - v'}{5.75 \log_{10}(500/z')} \\ v' &= 8.94 d(\text{m/s}), \quad z' = 10 d(\text{mm}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで, d は砂の粒径で式(8)では mm で与える。

風の進行方向の平衡状態の飛砂量 q_e は,以下の河村公式(河村, 1951)を用いて計算する。

$$q_e = K(\rho_a/g)(v_* + v_{*c})^2(v_* - v_{*c}) \dots\dots\dots (9)$$

ここで, K は無次元係数で,栗山・望月(1997)と同様に 0.8 とした。また, v_{*c} は流動開始摩擦速度, ρ_a は空気密度である。

3. 風速・塩分濃度計算モデルの検証

3.1 風速計算モデルの検証

風速計算モデルを検証するために,実験結果と本モデルによる計算結果との比較を行う。検証データには,宮田ら(1993)の風洞実験の観測結果を用いた。

図-1 は,計算領域を表したものである。植生の葉面積密度は $7.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ である。植生の風上端位置を $y_1 = 0 \text{ cm}$ とし,風下方向を正とした。風の流入境界条件として,風上境界($y_1 = -420 \text{ cm}$)より,7 cm 高さの風速値が 4.5 m/s となるような対数分布を仮定した。

図-2 は,風速の計算値と実験値との比較結果を表している。植生の風上端位置である $y_1 = 0 \text{ cm}$ を基準として,風下方向に $y_1 = 32, 120, 216 \text{ cm}$ 位置での風速の鉛直分布の比較結果を示す。どの地点でも,植生より上方では計算値の方が実験値よりやや大きくなっているものの,植生内部での風速分布は,実験値と良く一致している。

3.2 塩分濃度計算モデルの検証

塩分濃度計算モデルを検証するために,現地観測結果

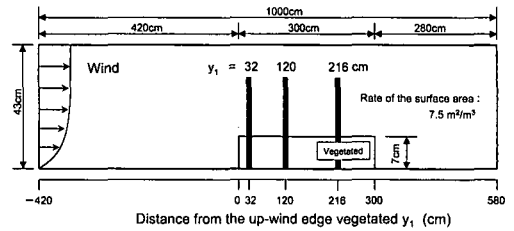


図-1 計算領域の構成(風速計算モデルの検証)

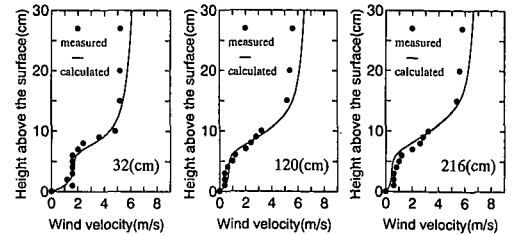


図-2 風速の計算値と実測値との比較
(左から $y_1 = 32, 120, 216 \text{ cm}$)

と本モデルによる計算結果との比較を行う。検証データには,仲座ら(1996)の現地観測結果を用いた。

図-3 は,計算領域を表したものである。対象とする領域には,2.4 m と 7.0 m の2種類高さの植生が生育しており,葉面積密度は全植生領域内の平均的な値である $0.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ を用いた。塩分濃度を比較する位置は,St. 1 (高さ 2.4 m の植生帯の中央位置),St. 2 (2種類の植生帯の接する位置),St. 3 (高さ 7.0 m の植生帯の中央位置)の3地点とした。風上端における風速の境界条件には,8 m 高さの風速値が 6.0 m/s となるような対数分布を仮定し,風上端における塩分濃度の境界条件には,仲座ら(1993)による指数関数式を与えた。

図-4 は,塩分濃度の計算値と観測値との比較結果を表す。ここで塩分濃度は,観測値と計算値ともに,風上端の地表面から 50 cm 高さの塩分濃度を基準として無次元化した。図を見ると,St. 1 と St. 2 における植生高さ(=2.4 m)より上方では,計算値の方が観測値より小さくなっている。しかしながら,植生内部での濃度分布は,St. 1~St. 3 全ての地点において,観測値とほぼ一致している。

池田ら(1995)によると,大気と植生の境界及び植生上部では,流れの渦運動(特に流下方向渦や鉛直方向渦)が発生することが見出されており,同時に,塩分粒子の拡散・混合運動も活性化されると考えられる。本モデルでは,このような塩分粒子の拡散・混合現象を十分に再現できていないことが考えられる。このことに関しては後で詳しい検討を行った。

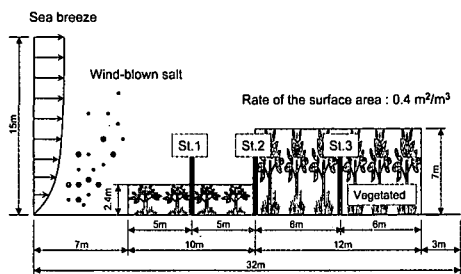
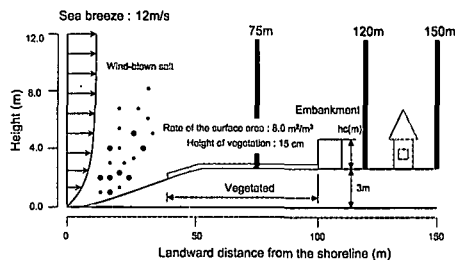
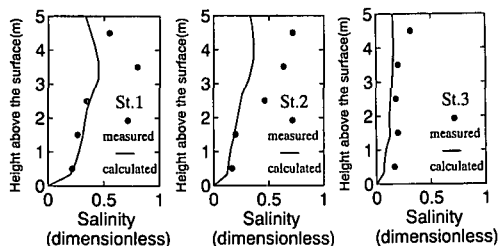


図-3 計算領域の構成 (塩分濃度計算モデルの検証)

図-5 モデル海浜
(植生の海浜の飛砂量及び飛塩量に与える影響)図-4 無次元塩分濃度の計算値と実測値との比較
(左から St. 1, 2, 3)

4. 植生の海浜の飛砂量及び飛塩量に与える影響

4.1 モデル海浜の概要

通常、海浜には砂丘に堤防が存在し、高波や高潮といった災害から背後を防護している。ここでは、後浜には砂草が生育し、砂丘には堤防が存在するようなモデル海浜を想定し、後浜に生育する砂草の後浜から砂丘にかけての飛砂量と、堤防背後の飛塩量に与える影響の検討を行う。堤防の構造形式として直立型の堤防をモデル海浜に導入し、堤防背後に飛来する塩分粒子の濃度を計算することにより、海岸構造物を飛塩対策として用いることも検討する。

対象とする海浜には、図-5に表すように、後浜付近には、高さ 15 cm、葉面積密度 $8.0 \text{ m}^2/\text{m}^3$ の砂草が生育し、砂丘付近には、地表面からの天端高さ $h_c=2.0, 2.3 \text{ m}$ の 2 種類の堤防が存在する。

なお、植生の飛砂量に与える影響の検討では、堤防及び堤防背後は解析対象外のため、堤防の天端高さは $h_c=2.0 \text{ m}$ のみとした。風速の入力条件としては、海側境界の地表面から 12 m の地点の風速が 12 m/s とし、それより下方では対数分布が成立すると仮定して計算を行う。

4.2 植生の海浜の飛砂量に与える影響

前述したモデル海浜における植生の飛砂量に与える影響を検討する。

図-6 は、植生がある場合 (堤防の天端高さ $h_c=2.0 \text{ m}$)

の風速の分布図を表している。植生の風上端である岸沖方向距離 40 m 付近から、植生上部の風速が減衰している。また、堤防の存在する 100 m 付近では、堤防の上方に風向が変化している。堤防の背後では、風速の小さな領域が存在しており、地表面近くでは陸方向と逆向きの風速も見られる。

図-7 は、植生がない場合 (堤防の天端高さ $h_c=2.0 \text{ m}$) と植生がある場合 (堤防の天端高さ $h_c=2.0 \text{ m}$) の飛砂量の比較を表している。植生がない場合には、0~50 m 付近まである程度の飛砂が発生している。また、50 m 付近で一旦は増加するものの、陸側になるにつれて、風下に存在する堤防の影響により、地表面付近の風速が小さくなるとともに飛砂量が減少している。一方、植生がある場合には、0~40 m 付近まで飛砂が発生しているものの、植生の生育限界である 40 m 付近から、飛砂量が急激に減少している。栗山ら (2001) は、後浜付近に生育する砂草の現地観測を行っており、砂草がない場合には、砂丘前面に砂が堆積し、砂草がある場合には、植生の風上端

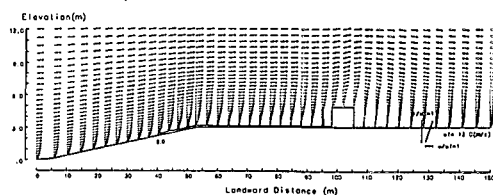
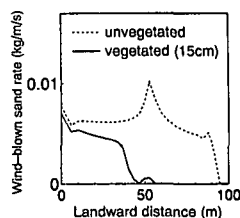
図-6 風速分布図 (植生あり・堤防の天端高 $h_c=2.0$)

図-7 飛砂量の比較 (植生なし・植生あり)

に砂が堆積することを見出している。今研究で対象としている海浜においても、砂草が生育していない秋から冬にかけては、後浜の凸部で侵食された砂が、砂丘の堤防前面に堆積することが考えられる。一方、砂草が生育している夏から秋にかけては、砂草の風上端付近に砂が堆積することが考えられる。

4.3 植生の海浜の飛塩量に与える影響

前述したモデル海浜における植生の飛塩量に与える影響を検討する。堤防の地表面からの高さ h_c が、堤防背後の飛塩量に与える影響を検討するために、植生がない場合は $h_c=2.0$ m の 1 種類、植生がある場合は $h_c=2.0$ 、 2.3 m の 2 種類の天端高について検討を行った。

図-8 は、岸方向距離 75, 120, 150 m における、植生なし ($h_c=2.0$ m) と、植生あり ($h_c=2.0, 2.3$ m) の無次元塩分濃度フラックス Cv (m/s) の鉛直分布を表している。また、図-9, 10 は、植生なし ($h_c=2.0$ m) と、植生あり ($h_c=2.0$ m) の無次元塩分濃度の分布を表す。ここで、塩分濃度は、風上端の地表面の塩分濃度を基準として無次元化した。

植生の生育している 75 m 地点では、地表面から約 1.5 m 以上の領域で、植生がない場合よりも植生がある場合の塩分濃度フラックスが高い。また、堤防背後の 120, 150 m 地点では、後浜に植生がない場合よりも植生のある場合の塩分濃度フラックスが、鉛直方向に一様に高くなっている。これは、植生の風上端で、一旦巻き上げられた塩分粒子が、地形形状や風向、さらに植生上部における風の乱れの影響により、風下・鉛直上方向へと輸送されていると考えられる。

また、植生がある場合に、堤防の天端高が 30 cm 高く

なると、堤防背後の 120 m や 150 m 地点における塩分濃度フラックスが全体的に低くなっている。つまり、堤防の天端高を高くすることにより、堤防背後への塩分粒子の輸送を軽減することができる。

次に、風の乱れ作用による塩分粒子の輸送・拡散現象を調べるために渦度による検討を行う。渦度 ω ($= (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$) は、風の流れの面である (y, z) 面に垂直な渦度成分である $\omega_1(y, z)$ により、以下の式で表せる。

$$\omega = \omega_1(y, z) = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \dots\dots\dots (10)$$

図-11 は、岸方向距離 75, 120, 150 m における、植生なし ($h_c=2.0$ m) と、植生あり ($h_c=2.0, 2.3$ m) の渦度の鉛直分布を表している。また、図-12, 13 は、植生なし ($h_c=2.0$ m) と、植生あり ($h_c=2.0$ m) の渦度分布を表している。ここで、渦度 ω は、風上端の地表面から 15 cm 高さの渦度 ω_0 を基準として規格化した。

岸方向距離 75 m 地点では、地表面から約 1 m 以上の領域で、植生がない場合よりも植生がある場合の渦度が高い。しかしながら、岸方向距離 120, 150 m 地点では、植生がある場合とない場合の渦度にほとんど差がない。

植生の生育している後浜付近では、植生がある方が、植生がない場合よりも渦度が増加し、同時に塩分濃度も、植生がある方が、植生がない場合より高くなる。しかしながら、堤防背後付近になると、植生がある場合とない場合の渦度の差がなくなる。同時に植生がある場合と植生がない場合の塩分濃度差の変化もほとんど見られなくなり、渦度の差がなくなった岸沖方向位置における塩分濃度差を保ったまま、陸側へと塩分粒子が輸送されていると考えられる。

以上のことから、塩分濃度が高くなる原因が、植生上

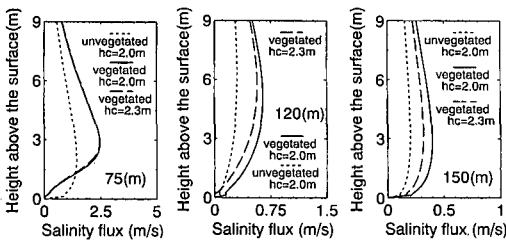


図-8 無次元塩分濃度フラックスの鉛直分布 (左から 75, 120, 150(m))

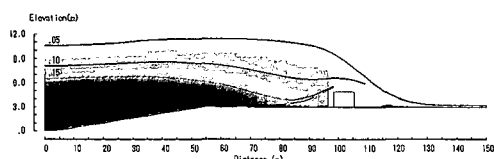


図-9 無次元塩分濃度分布 (植生なし・堤防の天端高 $h_c=2.0$)

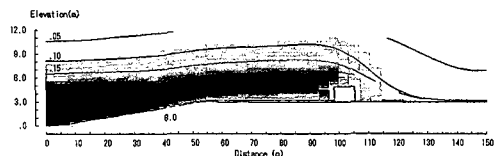


図-10 無次元塩分濃度分布 (植生あり・堤防の天端高 $h_c=2.0$)

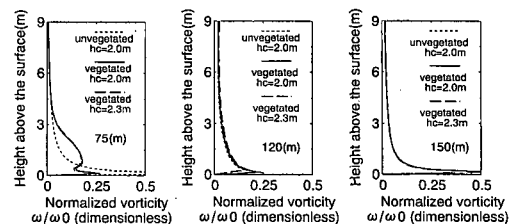
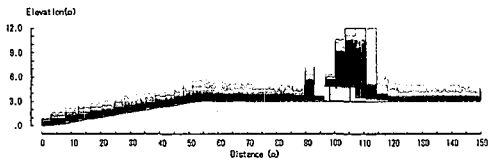
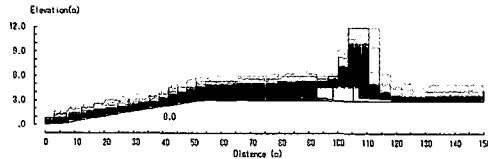


図-11 渦度の鉛直分布 (左から 75, 120, 150(m))

図-12 渦度分布 (植生なし・堤防の天端高 $h_c=2.0$)図-13 渦度分布 (植生あり・堤防の天端高 $h_c=2.0$)

部に発生する渦 (大気と植生の間での運動量の輸送及び交換が活発に起きていることに起因する) であると考え、植生の存在する後浜での植生上部における塩分濃度と渦には、以下の関係があると考えられる。

$$\left. \frac{dC}{dx} \right|_{z=z_1} \propto |\omega_v|_{z=z_1} \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 C は塩分濃度、 x は風速方向距離、 z_1 は地表面からの高さ、 ω_v は植生上部の渦度である。

また、堤防背後の地点における、堤防の天端高の違い ($h_c=2.0, 2.3$ m) による塩分濃度の差は、同じ地点で、堤防の天端高が違っても、渦度の鉛直分布がほとんど同じであることから、堤防により除去された塩分粒子量と、減衰した風速値の差に起因していると考えられる。

5. おわりに

植生を考慮した風速場・塩分濃度に関する2次元の乱流境界層モデルを作成し、後浜の砂草が飛砂量及び飛塩量に与える影響を検討した。検討結果を以下に示す。

1) 後浜に生育する砂草には、海浜における飛砂を捕捉・抑止する効果がある。

2) 後浜に生育する砂草は、地表面から約1.5 mより上方の飛塩量は増加させてしまう。砂草の上部で塩分濃度が高くなる原因は、同じ領域で渦度も同様に大きくなっていることから、砂草の上部における乱れにより、

塩分粒子が輸送され易くなったと考えられる。

3) 海浜において後浜に砂草が生えている場合には、背後の堤防の天端高を30 cm高くすると、堤防より陸側への飛塩粒子の輸送を減らすことができる。

6. 今後の課題・謝辞

本研究で作成した数値モデルでは、空気中に浮遊する粒子の拡散や混合過程に大きく寄与すると考えられる流下方向渦や鉛直方向渦を十分に表現することができなかった。砂草の存在する後浜付近の塩分濃度を正確に計算するためには、数値モデルを3次元LESへ拡張する必要があると考えられる。

本研究を進めるにあたり、独立行政法人 港湾空港技術研究所 栗山漂砂研究室長、ならびに内山研究官には、数々の有益なご助言を頂いた。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 池田駿介・金沢 稔・太田賢一 (1995): 可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の三次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, No. 515/II-31, pp. 33-43.
- 加藤史訓・佐藤慎司 (1998): 砂浜海岸の植生群落と地形変化の現地調査, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 666-670.
- 河村竜馬 (1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, 第5巻, pp. 95-112.
- 栗山善昭・上堂啓孝一 (1999): 後浜から砂丘前面にかけての飛砂量の数値計算, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 501-505.
- 栗山善昭・中島 剛・上堂啓孝一・望月徳雄 (2001): 後浜から砂丘前面にかけての植生が地形変化に及ぼす影響に関する現地観測と植生を考慮した飛砂量の数値計算, 港湾技術研究所報告, 第40巻 第1号, pp. 62-63.
- 栗山善昭・望月徳雄 (1997): 後浜から砂丘前面にかけての地形変化と植生, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 681-685.
- 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.
- 仲座栄三・津嘉山正光・山路功裕・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.
- 中橋和博 (1992): 格子形成法, 保原 充, 大宮司久明編 数値流体力学 基礎と応用, 東京大学出版会, pp. 167-195.
- 澁岡和夫・内山雄介・東川孝治 (1996): 大気および土壌中の塩分からみた砂浜海岸植生環境について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1171-1175.
- 宮田正史・池田駿介・武若 聡 (1993): 防風林の機能に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 556-560.