

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

灘岡和夫*・内山雄介**・東川孝治***

1. はじめに

古来より、海岸林は、強風・飛砂・飛塩・津波・高潮・海霧などの災害防止のための海岸防災林としての機能を果たしてきた。一方、白砂青松の言葉に表されるように、海岸林は良好な景観を創出する機能も併せ持ち、近年のウォーター・フロント開発熱の高まりと相まって、海岸林をアメニティの一要素として重要視する機運が高まっている。

このような要請から、海岸域に植生が導入されているものの、具体的な植栽計画となると技術者の経験に依存するケースが多く、環境圧の厳しい沿岸域では、しばしば植生が根付かないことなどが問題となっているのが現状である。そのため、植生の生育環境を工学的に予測する技術が強く求められている。

砂浜海岸の植生を取り巻く環境要素として、風、風に伴う転砂・飛砂、飛沫海塩粒子(以降、単に飛塩と呼ぶ)、遡上波、土壌特性、地下水環境などが挙げられる。風とそれに伴う転砂・飛砂、飛塩などの各環境要素の特性に関する研究は枚挙に暇がないが、植生と環境要素との関係を論じた例はきわめて少ない。その中で、例えば、仲座ら(1991, 1993)は現地観測と数値計算により、村上ら(1995)は擬似植栽ネットを用いた現地実験により、飛塩に対する植生のフィルター効果について検討している。また、中西・福本(1987)は遡上波の最大到達部と植生種との関係について、丸山・三浦(1981)は飛砂に伴う地形変化と植生種の出現について論じている。

そこで本研究では、植生環境を工学的に予測するための第一段階として、沿岸域特有の環境圧と考えられる塩分環境に特に着目し、現地観測と数値実験により、砂浜海岸の植生を取り巻く環境を大気・土壌環境の両面から総合的かつ定量的に明らかにすることを目的とした。

2. 現地観測の概要

2.1 観測時期および観測場所

現地観測は、1995年12月13～14日に、茨城県鹿島郡波崎町須田浜に位置する運輸省港湾技術研究所海洋観測棧橋(HORS)周辺の砂浜および背後のクロマツ林において実施した。海浜形状は数kmにわたって沿岸方向にほぼ一様であり、砂浜幅約100m、背後に約150mの林帯幅の海岸林(クロマツ林)、そして両者を分断するように、幅約40m、高さ2～3m程度の砂丘が続いている。

2.2 観測方法および分析方法

a) 測点配置

代表的な観測項目の一覧を表-1に、観測機器の設置状況および地形断面を図-1に示す。なお、1995年11月6～7日に予備観測を行い、土壌水分の時間変動を調査するために、砂浜中央部および松林中央部にテンシオメータを30cm間隔で深さ1.2mまで各5本設置した。

土壌塩分濃度及び水分量は、岸沖方向に砂浜上4点、砂丘直背後1点、クロマツ林内5点の計10測点を設け、鉛直方向に地表面から20～100cmの範囲で20cm間隔にサンプリングを行った。また、風速及び飛塩量は、砂浜上2点、砂丘上1点、クロマツ林内3点の計6測点を岸沖方向に設け、鉛直方向に地表面から約1m～7mの範囲に1m間隔で機器を配置した。

b) 飛沫海塩粒子の捕捉・分析方法

海塩粒子の捕捉器は、 $\phi=6.0$ cmの塩ビ管を2～3cmの厚さに輪切りにしたものにガーゼを二重に張り付けたもの(受風面積約113cm²)である。これらを各測点にガーゼ面が岸沖方向に向くように取り付け、ガーゼは空気中に約4時間暴露した後、ポリエチレン袋に入れて保存し、分析に供した。付着塩分量の定量は、回収したガーゼを蒸留水に浸し十分に攪拌した後、その溶液の電気伝導度及び水温を電気伝導率計(東亜電波工業株式会社製)により測定し、溶液中の塩分量を求めた。

c) 土壌水分量・塩分濃度の分析方法

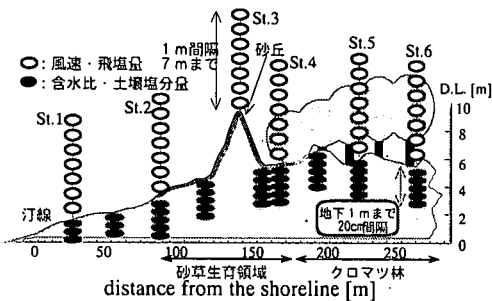
サンプリングした砂に蒸留水を混入して十分に攪拌した後、b)と同様の手順で溶液中の塩分量を算定した。

d) クロマツの葉への付着塩分量の分析方法

* 正会員 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

** 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻博士課程・日本学術振興会特別研究員

*** 正会員 JR 四国



図一 観測機器等の配置・地形断面

表一 主要な観測項目・機器等一覧

測定項目	測定機器	測定間隔
風速	三杯式風速計	1分毎
風向	矢羽式風向計	1分毎
土壌水分量	サンプリング, テンシオメータ ^{a)}	
土壌塩分濃度	サンプリング	
分光反射特性	分光照度計	
松の付着塩分量	葉のサンプリング	
飛塩量	手製の捕捉器	4時間暴露

注) テンシオメータは予備観測のみ, 測定は1分間隔

クロマツ林前面から岸沖方向に約30m間隔で5点, 鉛直方向に葉のある領域内の下方から, 約50cm間隔で4~5点の測点を設け, サンプリングした。そして, 回収した松葉を細かく裁断し, 蒸留水に浸して十分攪拌した後, 3日間静置し, b)と同様に溶液中の塩分量を算定した。

3. 測定結果および考察

3.1 砂浜海岸植生の生育状況

ある環境負荷がかかったときの, 植生の応答を考える上で, 植生の成長度合を表す何らかの指標を与える必要がある。図-2は, クロマツ林の幹径・密度(単位面積当たりの本数)・樹高・幹高(非葉部高さ)・葉の分光反射特性(NIR/R値)・落葉堆積厚さの岸沖分布を示している。これらより, 海岸線から遠ざかるにつれてクロマツの幹は太く, 密度は疎らに, 樹高は高くなっていく傾向が分かる。工藤ら(1995)は葉の分光反射特性として, 長波帯域(0.7~1.1μm)の反射率と短波帯域(0.55~0.68μm)での反射率の比をNIR/Rと定義し, これが松の生育状況の指標となり得るとしている。しかしながら, 本観測ではNIR/R値に松の樹高や砂草の分布状況などとの明確な相関が見られなかった。そこで本研究では, 簡単に, 松の樹高を生育状況の指標として以下の議論を進める。

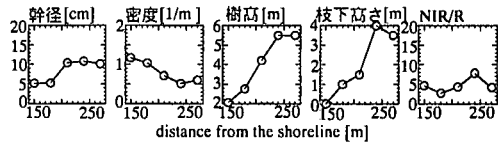


図-2 マツの幹の直径, 密度, 樹高, 枝下高さ, NIR/R

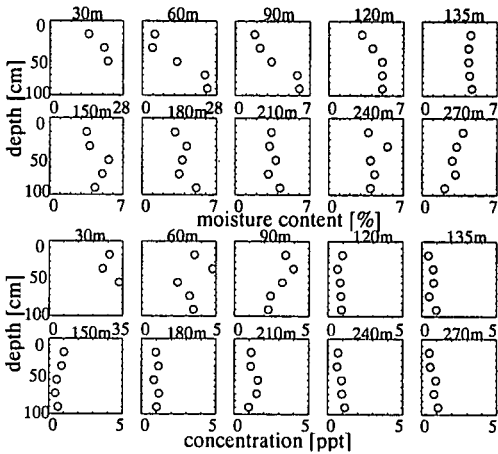


図-3 土壌水分量(上)と土壌塩分濃度(下)の分布

3.2 土壌環境特性

予備観測時におよそ3潮汐にわたって測定した土壌水分には, 時間的な変動はほとんど見られなかった。植生帯周辺での土壌水分分布にかかわる以下の議論では, 空間分布特性のみを取り扱う。

まず, 図-3(上)に表層1mでの土壌水分量の岸沖断面の鉛直分布を示す。これを見ると, 砂浜(汀線から30m地点~120m地点まで)での分布形は概ね相似であり, 下層ほど大きい傾向にあることが分かる。これに対して, クロマツ林帯では土壌水分に明瞭な分布がみられない。また, 砂浜と比較して地表面付近の水分量が大きく, クロマツの根による吸水や落葉層の存在などによる保水作用の影響があることが予想される。

図-3(下)は, 表層1mの土壌塩分濃度(間隙水に対する塩分の重量濃度)の岸沖断面鉛直分布である。まず, クロマツ林帯では明確な分布を持たず, しかもその値はきわめて小さい。したがってクロマツ林の生育環境として土壌中塩分の寄与は小さいものと考えられる。ただし, 樹高に応じてクロマツの根は測定最深部1mよりも深く根付いていると考えられることから, 今回の表層部のみの観測データからは土壌塩分濃度とマツとの関係を厳密に論じることはできない。

土壌塩分の供給源として, 地表面からは, ①遡上波, 特に時化時の長周期波の遡上, ②飛塩の沈降・付着によ

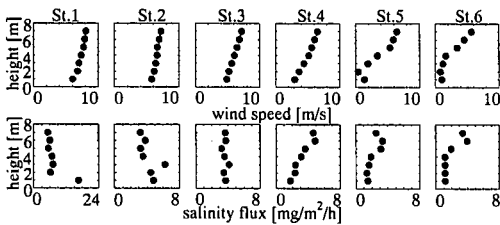


図-4 平均風速 (上) と飛塩フラックス (下) の分布

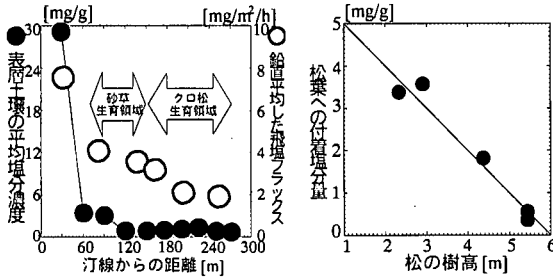


図-5 塩分と植生の関係 図-6 付着塩分と樹高の相関

る塩分、地下からは、③地下水面からの浸透流による移流・分散が考えられる。ここで、植生(砂草)の生育に関係の深い砂浜中央部付近の60 mと90 m地点に着目すると、深さ40 cmの位置で塩分濃度がピークを示している。このピーク位置や塩分濃度の分布形は①などによる塩水の重力排水と③に関わる毛管ポテンシャルによる上向き浸透流とのバランスで決定されていると推察される。

3.3 大気環境特性

図-4(上)の4時間平均風速(風速ベクトルの絶対値)の岸沖断面内鉛直分布を見ると、風速は汀線付近で最大で、内陸にいくにつれて変形され、クロマツ松帯中で大きく減速されている。また、これに関連する図-4(下)の飛塩フラックスの岸沖方向の鉛直分布からも同様に、飛塩が砂浜上で徐々に減少し、松林内部で急減している様子が見て取れる。このような傾向は仲座ら(1991)による実測データにも見られ、一般的な飛塩分布特性であるものと考えられる。

3.4 大気・土壌環境と海岸植生との関係

大気・土壌中の塩分の岸沖分布と海岸植生との関係を、ハマニンニクなどの砂草と、クロマツとに分けて考察する。図-5は表層1 mでの平均土壌塩分濃度と鉛直断面平均した飛塩フラックスの岸沖分布を、砂草および松の生育領域と比較して示したものである。これを見ると、土壌塩分濃度も飛塩フラックスも汀線付近で大きく、汀線から離れるにしたがって指数関数的に減少しているが、特に土壌塩分の急変部と砂草の生育領域の最前部(汀

線から約80 mの地点)がほぼ一致していることが分かる。一方、マツと土壌塩分、飛塩に明確な対応関係は見られない。また、クロマツによる飛塩フラックスのsink量の時間積分値と考えられる松葉への付着塩分量は、クロマツの樹高とよい相関があることが分かる(図-6)。

これらのことから、砂浜海岸の植生は土壌中および大気中の塩分環境に少なからず影響を受けており、塩分分布に応じた生育状況を示していることが分かった。

4. 数値シミュレーション

4.1 シミュレーションの概要

マツには飛塩、砂草には土壌中の塩分濃度分布が、その生育環境に対してきわめて重要な役割を果たしていることが現地データから判明した。これらを具体的な植栽計画に反映させるための基礎的な知見を得るべく、植生(マツ)の分布形態と大気中の海塩粒子の拡散状況との関連性、土壌中の塩分濃度の鉛直分布と地表面および地下水面からの不飽和浸透流との関係について、以下のような数値実験により考察した。

飛塩については運動方程式(1)と連続式(2)及び式(3)で表される塩分濃度の輸送方程式を連立させて、風速・飛塩濃度がほぼ定常になるまで数値積分した。また、土壌に関しては、塩分による浸透ポテンシャルの変化を考慮した式(4)のRichardsの不飽和浸透流式と式(5)の溶質(塩分)の移流分散式を連立させて解いた。

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_D A U u_i \dots (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots (2)$$

$$\frac{DC}{Dt} = W \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - C_{cut} \dots (3)$$

$$(C_c(\psi) + S) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x_i} - \delta_{is} \frac{\rho}{\rho_f} \right) - F \dots (4)$$

$$\frac{\rho}{\theta} \frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{DC_L}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{i,j} \frac{\partial C_L}{\partial x_j} \right) \dots (5)$$

ただし、 $i, j=1, 2, 3$, u_i : i 方向風速(u, v, w)と座標(x, y, z), C_D : 葉の抵抗係数($=0.5$), A : 葉面積密度($=1.0 [1/m]$), U : スカラー風速, C : 無次元飛塩濃度, W : 飛塩粒子の沈降速度, ν_t : 渦動粘性係数, σ_t : 係数($=1.0$), C_{cut} : 植生による飛塩のsink項, ψ : matric potential, $C_c(\psi)$: 比水分容量, S : 比貯留係数, $K_i(\psi)$: 不飽和透水係数, ρ, ρ_f : 間隙水と純水の密度, F : 植生の根等によるsink項, C_s, C_L : 溶質の固相および液相濃度, $D_{i,j}$: 溶質の分散係数テンソル, θ : 土壌水分量である。

大気計算では、沿岸方向に場が一様であるとして2次元計算を行い、乱流モデル、植生による飛沫塩分のフィ

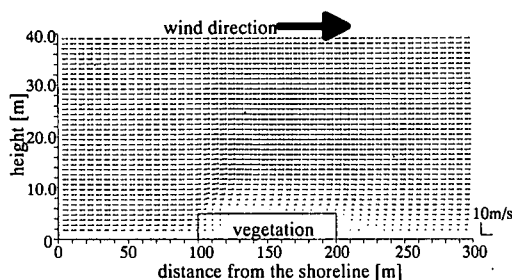


図-7 風速分布の一例 (run-1)

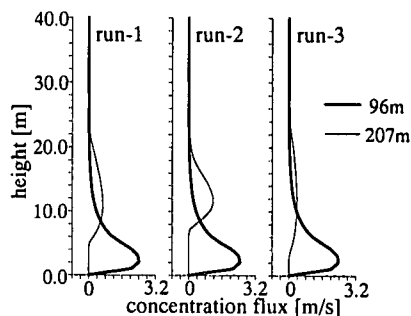
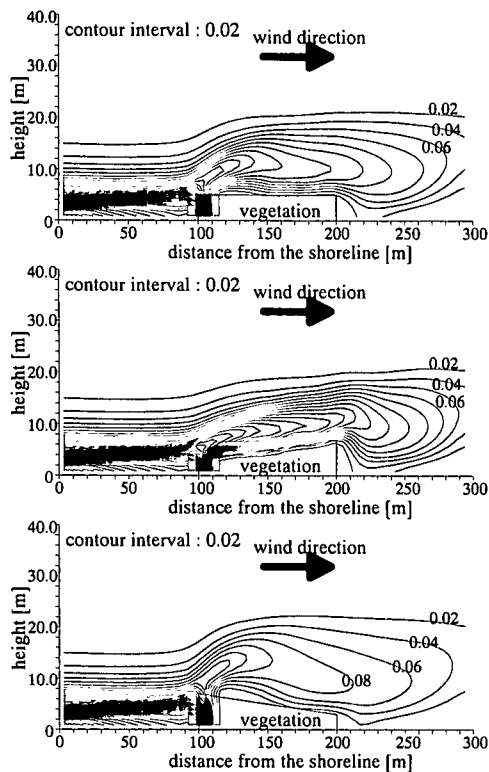
図-9 植生帯前面部 (96 m) と後縁部 (207 m) での無次元塩分濃度フラックス Cu の鉛直分布

図-8 無次元塩分濃度分布 (上から順に run-1, 2, 3)

ルター効果 (式 (1), (3) それぞれの右辺最終項), 塩分の沈降速度 W には仲座ら (1993) が用いたものと同様のモデルを使用した。

一方, 土壌特性に関しては, $\psi \sim \theta$ および $\psi \sim K_i$ の関係式にいずれも谷 (1982) の式を用い, 式 (5) 中の分散係数テンソルは非主軸成分が 0 と仮定して, Bear and Dagan (1964) の式を用いている。

計算は, 空間的には, 移流項に 3 次精度の風上差分を, 他の項は 2 次精度の中央差分を, 大気的非定常項はオイラー後退差分を用いて離散化し, MAC 法のアルゴリズムで解いた。また, 土壌の時間差分は拡散項に Crank-

Nicholson スキーム, 移流項に Adams-Bashforth スキームを用いて離散化した。

4.2 海風時の飛塩分布と松林の関係について

ここでは, 植生分布と海風時流況での飛塩拡散状況との関係を考察するべく, 3 ケースの計算を行った。松を想定したモデル植生が高さ 5 m で一様に繁茂しているケース (run-1), 植生帯の岸沖断面積は run-1 と同じで, 植生帯上流端・下流端の高さを各々 3 m と 7 m になるように線形的に分布させたケース (run-2), 逆に 7 m と 3 m のケース (run-3) の計算を行った。流入部で鉛直方向に一樣な 5 m/s の風と, exp 型の塩分濃度分布を与えた。

ほぼ定常に達した時点での風速分布は, 例えば run-1 では図-7, この時の無次元塩分濃度の空間分布は各ケースについて図-8 のようになる。これを見ると, 汀線側の松は過大な飛塩を受け, 内陸に行くにつれて濃度が低下するという傾向が良好に再現されている。各ケースでの植生帯前面部と後縁部での無次元塩分濃度フラックス分布 (図-9) を見ると, run-2 で模式的に表現した, 現地で見られたような植生分布の場合には, 前面部と後縁部での差が最も小さいことから, 植生帯中で失われる塩分量 (すなわち葉や土壌に付着して生育を阻害すると考えられる要素) が小さくなっていることが分かる。ところが, run-2 は 3 ケースの中では背後地へ最も多く塩分を流下させており, 塩風害防災林としての機能が低いとも言える。

4.3 土壌塩分量の供給源について

砂浜に分布する砂草の生育範囲に対して重要な役割を果たしている土壌中の塩分濃度分布と, 地表面および地下水面からの不飽和浸透流との関係について数値計算に基づく検討を行った。ただし, ここでは簡単のため, 現地海浜での土壌への塩分供給が地表面と地下水面で行われると考え, 鉛直一次元的なシンプルな状況を想定し, 吸着や相変化等の化学プロセスは考慮しないこととした。また, 土壌物性 (透水係数など) には砂の条件を与え, 地下 1.2 m に地下水面を設定した。計算は地下水面

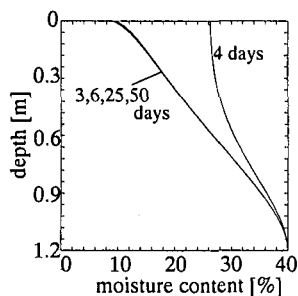


図-10 土壌中の水分 (run-6)

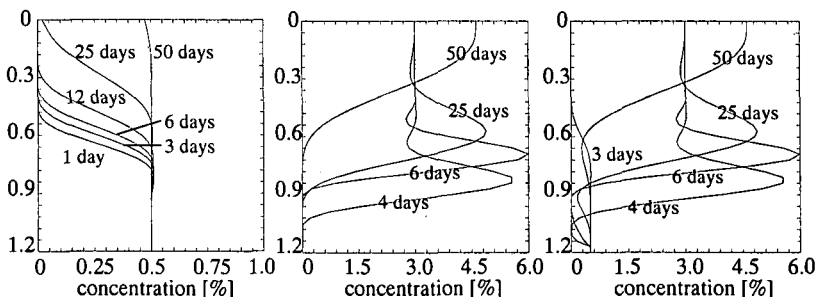


図-11 塩分濃度分布 (左から run-4, run-5, run-6)

のみから連続的に0.5%の塩分供給を行うrun-4、地表面のみで3.0%の塩分供給を行うrun-5、地下水面(0.5%)と地表面(3.0%)の両方で供給するrun-6の3ケースを行い、run-5, 6では、時化時の遡上波による塩分供給を想定し、計算開始後3日目に地表面から塩分と一定流量(=20.0 mm/day)の浸透流を24時間与えた。また、いずれのケースも砂草の蒸発散作用を想定して、地表面から1.0 mm/dayの日蒸発散量を一様に与えた。

50日間に対する数値積分を行った結果を図示する。まず、土壌水分量分布は図-10のようであり、地表面からの浸透直後の4日目のみ上層で水分量が多くなっているほかは、定常な分布形が保持されている。ここでは示さないが、run-4, 5においてもほぼ同様の水分分布形であった。一方、土壌塩分濃度は、各ケースに対して図-11のようになる。これらより、1)毛管ポテンシャルによる上向き浸透流はrun-4に見られるように地下水中の塩分を地表面付近まで輸送すること、2)run-5, 6における計算値は、図-3(下)の砂浜中央部付近60 m, 90 m地点での観測値とよく似たピーク値を有する分布パターンを示していること、3)run-5, 6の結果から、濃度のピーク位置は、1)で述べたような上方への浸透流により、地表面近傍の比較的高い位置に押し上げられていること、などが分かった。

5. おわりに

本研究では、砂浜海岸の植生は土壌中および大気中の塩分環境に少なからず影響を受けており、塩分分布に応じた生育状況を示していることを明らかにした。また、現地で見られるような樹高分布を取ることににより、マツ林内に貯留される飛塩量が低減され得ること、毛管ポテンシャルによる地下水面からの上向き浸透流が海岸土壌中の塩分濃度の鉛直分布に多大な影響を及ぼしているこ

とを数値計算により示した。

最後に、海岸植生にはここで着目した塩分以外にも、風・飛砂などの様々なインパクトをはじめ、蒸散作用などの考慮すべき様々な因子がある。植生環境をより精緻に把握・予測するためには、このような様々な環境要素を観測等で解明し、本研究で示したような数値モデルに組み込むことが今後の課題であると考えられる。

謝辞：本研究での現地観測の遂行に当たり、運輸省港湾技術研究所漂砂研究室の加藤一正室長・柳島慎一主任研究官、東京工業大学灘岡研究室の皆さんに多大なるご助力をいただいた。また、本研究は文部省科学研究費補助金試験研究(B)(1)(課題番号:07555642、代表者:灘岡和夫)および同特別研究員奨励費(内山雄介)の一部を使用した。併せて深大なる感謝の意を表します。

参考文献

- 工藤勝輝・藤井寿生・岩下圭之・西川 啓 (1995): 土木構造物の植生環境への影響について、第22回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 428-429.
- 谷 試 (1982): 一次元不飽和浸透流によって生じる水面上昇の特性、日本林学会誌, Vol. 64, pp. 409-418.
- 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1991): 大気環境アメニティの一要素としての飛塩量特性、海岸工学論文集, 第38巻, pp. 896-900.
- 仲座栄三・津嘉山正光・山路祐祐・日野幹雄 (1993): 飛塩(海塩粒子)拡散の数値流体力学解析、海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1036-1040.
- 中西弘樹・福本 紘 (1987): 南日本における海浜植生の成帯構造と地形、日本生態学会誌, Vol. 37, pp. 197-207.
- 丸山幸平・三浦貞親 (1981): 海岸林の土壌-植生系への効果に関する研究、新潟大学農学部演習林報告, 第14号, pp. 43-78.
- 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.
- Bear, J. and Dagan, G. (1964): Moving interface in coastal aquifers, ASCE, HY, Vol. 90, No. 4, pp. 193-216.