

波動場数値計算の碎波判定によって発生する飛来塩分とその輸送に関する数値実験

細山田得三*・山田文則**・田安正茂***

海水面から発生する飛来塩分は、沿岸域の植生や人間の生活環境にも深く影響を与えるばかりでなく、建設構造物などの腐食に影響を与えるため、その動態について土木工学の各分野で強く関心が集まっている。特に海面から大気へ放出される塩分量とそれが風によって輸送され構造物に付着する素過程の理解が海岸工学研究者に対して要請されている。本研究では飛来塩分の発生とその大気中での輸送を結合させるため、ブシネスク方程式による波動場数値計算と大気中の飛来塩分の輸送モデルとを結合させた。このモデルを用いて防波堤の構造形状や飛来塩分の粒径を変化させた数値実験を行い、構造物の形状に依存した飛来塩分の発生を表現することができた。

1. はじめに

海水面から発生する飛沫・飛来塩分は、沿岸域の住民の生活に影響を与えるばかりでなく、各種建設構造物の耐久性を悪化させる主要因であり、その動態を把握し対策を立てることが土木工学の各関連分野で強く望まれている。塩分によって長期的な耐久性が阻害される構造物としては特にコンクリート構造物と鋼構造物が挙げられる。海岸近くにおけるコンクリート構造物で特に海水面の上昇と下降によって没水と大気への露出を繰り返す場合、電位の変化による腐食の進行が著しい(例えば岸谷・西澤, 1986)。このような構造物は鉄筋に電位を付加することによる腐食の進行を遅らせる対策が講じられる。また、一方、鋼構造物としての橋梁などは防食効果を付加した塗装によって腐食の進行を遅らせている。これらの対策は長期的なデータの蓄積が不可欠であり、どの程度効果を上げているか未だ十分な事例が報告されていない。また、直接海水に接触する構造物だけでなく、空气中を輸送される飛来塩分によっても構造物の耐久性は阻害される。しかしながら、構造物の腐食に対する飛来塩分の影響や飛来塩分そのものの実態が十分把握されていない。

このため飛沫の発生や飛来塩分の動態に関する研究が様々な立場から取り組まれている。これらの研究は以下の通りに分類される。

1. 飛来塩分の発生を物理化学的に微視的に把握することを目的とする研究
2. 飛来塩分の発生を制御する海岸構造物に関する研究
3. 発生した飛来塩分が大気中を風によって移流・拡散する素過程に関する研究
4. 飛来塩分が付着した構造物が腐食していくプロセスの実態やその対策工に関する研究

1 は、数値実験によって水表面の運動を基礎方程式に従って厳密に取り扱うものであり、VOF 法などによるナビエ・ストークス方程式 (以下 NS 方程式) の数値計算が挙げられる。また杉原・津守 (2002) の研究に見られるような室内実験における画像処理技術を用いた水表面でのガス交換の研究も含まれる。2 は、消波ブロックやパラペットの形状を工夫することによる飛沫発生を抑制する研究がある (例えば浅井ら, 1998; 楢田, 1999)。3 は例えば仲座ら (1993) のように数値実験において発生した飛来塩分と風の動きを連立させて解き、それらの動態を把握するものである。4 に関しては、海岸工学の範囲を離れ、材料および構造系の研究者が精力的に取り組んでいる。

これらの研究は海岸工学をはじめとする土木工学、またそれを越えた各研究分野で個別に行われているが、相互の研究成果を関連させて総合的な飛来塩分の予測を行う研究は今のところ十分ではないと思われる。飛来塩分の実体は、未だ未解明の部分が多いが、例えば飛沫 (水滴) に溶解している成分やエアロゾルとして沿岸から数キロ程度飛来するものもある。前述した 1 の項目に関する研究では海面における微視的な力学過程が厳密に取り扱えるものの大気に飛散した塩分の現地スケールの輸送と結びつけるには時間および空間スケールという点において隔たりが大きい。一方、項目 3 に示した大気中に発生した飛来塩分の風による移流・拡散に関する研究では海面の変動による飛来塩分の発生が十分に検討されていない場合が多い。ここでは先にあげた項目 1 および 2 を小さなスケールの現象、項目 3 を大きなスケールの現象と位置付ける。そして両方の中間のスケールを対象として飛沫と飛来塩分の発生および飛来塩分の大気での輸送を考慮できる数値モデルを構成することは工学的に有用である。

本研究では、波のエネルギーが碎波によって気泡の発生に寄与し、その結果、飛来塩分が発生するというモデルを構成する。波のエネルギーは碎波によって逸散するが、その量は波動場の数値モデルであるブシネスク方程

* 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系
** 長岡技術科学大学大学院工学研究科建設工学専攻
*** 正会員 工修 福井工業高等専門学校助手 環境都市工学科

式の碎波減衰係数を用いて評価する。ここでは角野ら(2000)による既往研究の成果より、散逸エネルギーから波動場内での気泡の発生量を推定し、これによって海面からの飛来塩分の発生量とした。次いで定常的な風の場合を与えて塩分の移流・拡散を計算することにより飛来塩分の陸上への輸送量を計算した。本論文は数値モデルの詳細を記述するとともに、種々の海岸構造物を対象とした場合の飛来塩分の発生と輸送の結果について報告するものである。

2. 数値モデルの構成

数値モデルは以下に示すような素過程によって構成されている。実際の数値計算ではこれらのモデルを結合している。

- 波動場数値計算による碎波の強さ、エネルギー減衰の評価とこれに応じた気泡と飛来塩分の発生のモデル化
 - 定常風の場合の数値計算
 - 発生した飛来塩分の風による移流・拡散
- 以下の節では、それらの手法について順を追って説明する。

2.1 飛来塩分の発生モデル

碎波から発生する飛来塩分には、大きく2つに大別することができる。①碎波によって海水面がちぎれることによって発生する飛沫、②碎波によって生成される気泡から発生する飛沫である。本研究では、内陸部の塩害に非常に強く関係する粹表面の気泡(②)によって発生する飛沫について計算を行った。以下にその内容について説明する。

飛来塩分の発生要因となる海水面下の気泡は、碎波によって海水面が乱れることで生成される。この気泡は、海水表面で破裂すると同時に飛沫を発生させる。そのため、本計算モデルでは、海水面の乱れの度合いをエネルギー減衰量とし、海水面下に生成される気泡量と気泡から発生する飛沫量を計算することによって、飛来塩分の発生量の計算を行った。波動場において飛来塩分の発生に寄与する乱れは、修正ブシネスク方程式による波動場の数値計算における碎波減衰係数を用いて計算した。式(1)、(2)には連続条件式および1次元の修正ブシネスク方程式を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \cdots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = & \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial x} \right) \\ & + Bgh^2 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} - F_d Q \quad \cdots (2) \end{aligned}$$

ここで η , Q , g , D , h , x , t は水位変動, 1次元の線

流量, 重力加速度, 平均水深, 水深, 水平座標, 時間であり, F_d は Dibajnia ら (1987) による碎波減衰係数である。本研究では F_d を用いて波動場の波のエネルギー損失を評価した。

波のエネルギー減衰量の計算は、碎波減衰係数と波のエネルギーの積で評価し、これに以下に示す角野らの実験結果を考慮することによって気泡の生成体積を計算する。

$$W_{\text{loss}} = F_d E \quad \cdots (3)$$

$$V_{\text{air}} = a \cdot W_{\text{loss}} \cdot D_{\text{air}}^3 \quad \cdots (4)$$

ここで, W_{loss} , E は波の碎波によるエネルギー減衰量, 波の全エネルギー量であり, V_{air} , a , D_{air} はそれぞれ気泡生成体積, 比例係数, 気泡の直径である。式(3), (4)は角野ら(2000)がおこなった海水面の乱れと気泡生成量に関する実験結果を利用している。式(4)では碎波から生成される気泡量と波のエネルギー減衰量が比例している。海水面下に生成した気泡は、すべて飛沫として大気中に飛来すると仮定した。これより、碎波によって発生した気泡量と飛来塩分発生量の関係は、式(5)のようになる。

$$C = \frac{V_{\text{air}} \cdot D_{\text{salt}}}{D_{\text{air}}} \quad \cdots (5)$$

ここで, C は飛来塩分の発生量であり, 気流による塩分の移流・拡散計算において海面上での境界条件となる。 D_{salt} は飛沫の直径である。本研究において発生する飛沫の直径をモデル化するには至らず、計算ごとに定数を与えた。

2.2 風の場合の計算と塩分の拡散

海上の風を非圧縮性流体と考え、式(6)、(7)に示すような連続式とNS方程式による数値計算を行った。

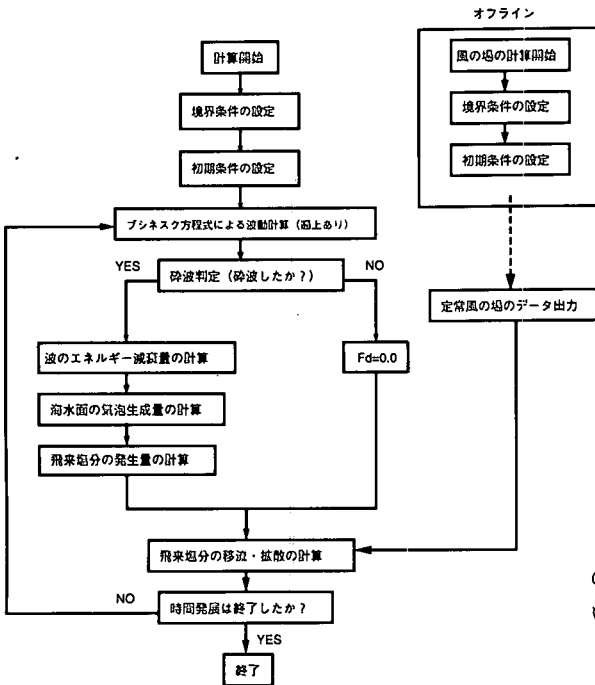
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \cdots (6)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_i}{\partial x_m} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_n} \right) \quad \cdots (7)$$

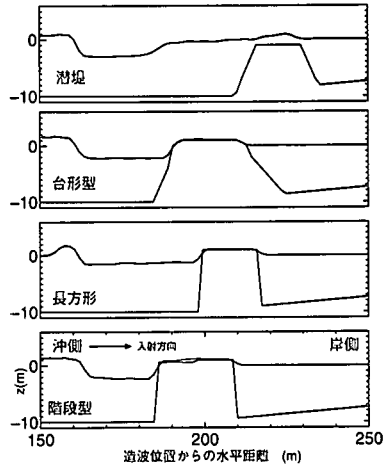
u_i , x , t , p , g_{x_i} , ν_t はそれぞれ, i 方向の流速, 2次元座標, 時間, 圧力, i 方向重力加速度, 乱流粘性係数である。計算はオフライン処理として1回だけ行い、定常風の場合を作成して、塩分の拡散計算に用いた。飛来塩分の拡散には、式(8)のような拡散方程式により計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + (w - w_s) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right) - Q \quad \cdots (8)$$

ここで, w_s , Q および k はそれぞれ海塩粒子の沈降速度, 塩分吸収量, 風の計算で求めた k - ϵ 乱流モデルによって計算した乱流拡散係数である。飛来塩分の沈降速度 w_s の計算には、一般的に浮遊砂の沈降速度に対して用いている方法を採用した。すなわち、粒子の沈降速度を規定



図一 数値モデルのフローチャート



図一 各種構造物に対する波の作用状況

の初期値をストークスの沈降速度として反復計算を行い、飛来塩分の粒径に応じた沈降速度を求めた。

2.3 数値モデルの全体構成

前節までに示した個別の数値モデルを1つの数値モデルとして構成する。図一にはそれぞれのモデルの関係についてフローチャートで示す。図に示しているとおり、波動場の計算、海面での飛来塩分の発生、それに伴う飛来塩分の輸送についてはすべて同一プログラムに組み込まれ、同じ時間ステップにおいて計算される。ただし風の場合に関しては定常な場を考えているため、前もって計算された風の場合をデータとして保管（オフライン処理）して飛来塩分の移流に用いた。

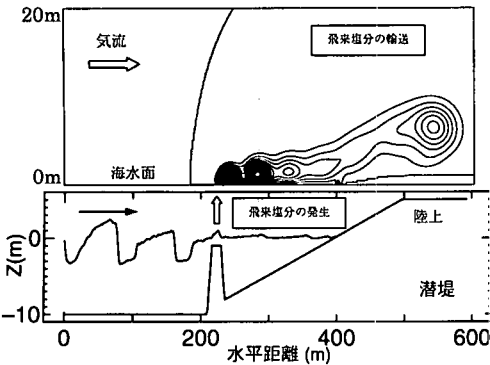
2.4 計算領域の概略および計算条件

風と飛来塩分輸送の計算領域は2次元で図二（上段）に示すように600m×20mの範囲である。気流は左端（沖側）において風速5m/sを鉛直方向に一律に与え、右端（岸側）で自由流出とした。波動場の計算は図二（下段）に示すように風の領域と対応させ、沖海域（造波点）を0m、海岸地点を600mとした。海底地形は、沖海域から200m程度場所までを水平勾配とし、200m付近に各種構造物を設置した。構造物の設置位置から300m程度は、海底勾配を1:100の一定勾配とした。設置した構造物の形状は台形型の潜堤、台形型の沖防波堤、長方形型ケーソン、上段に小段を設けた階段型の4種である。左端の沖側での入射波の条件は新潟西海岸の設計波浪に対応して周期9s、波高4mとした。

3. 計算結果及び考察

3.1 波の作用状況

図一には波動場数値計算によって計算された各種構造物への波の作用状況を示す。図中の左から入射した波



図二 波動場と飛来塩分輸送の結合計算結果の例

する式は、以下に示す式 (9), (10), (11) である。

$$C_d Re^2 = \frac{4}{3} \frac{D_s^3}{\mu} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g \quad (9)$$

$$C_d = \frac{24}{Re} (1.0 + 0.150 \cdot Re^{0.687}) \quad (10)$$

$$Re = \frac{D_s \cdot V_s}{\nu_{air}} \quad (11)$$

ここで、 C_d , Re は抵抗係数および粒子レイノルズ数であり、式 (10), (11) で評価される。 ν_{air} , D_s , μ , ρ_s , ρ_f はそれぞれ、空気動粘性係数、飛来塩分粒子の粒径、空気の粘性係数、飛来塩分粒子の密度および周囲流体の密度である。これら3式において粒径を既知として w_s

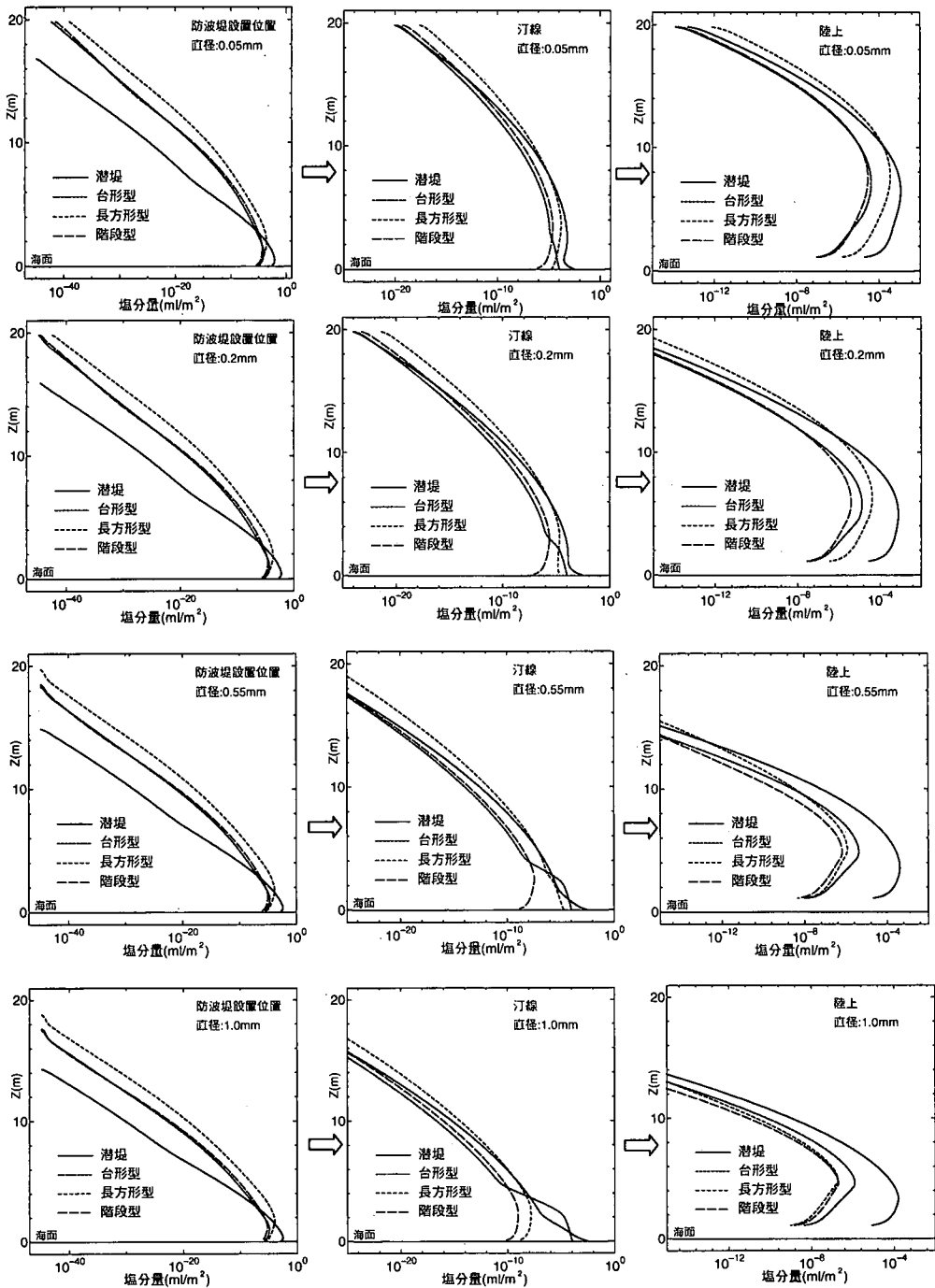


図-4 大気中の飛来塩分濃度の鉛直分布

が構造物の変形を受けて伝播している。本数値モデルには波の遡上および越流公式による越波が考慮されており、構造物による波形の変動も計算されている。このような波動場数値計算の碎波係数から発生させた飛来塩分の輸送の全体は図-2 (上段) に示されており、構造物の

周辺から飛来塩分が発生していることがわかる。図-2 (上段) は潜堤を対称とした例であるが、この場合に限り、構造物よりも岸側や汀線付近からの飛来塩分の発生も見られる。

3.2 発生した飛来塩分の鉛直分布

図-4には飛来塩分の鉛直分布をしめす。図の縦方向の4列は発生した飛来塩分の粒径分布を種々変化させたものであり、横方向の3つのカラムは各分布データを示した水平位置である。また、各図とも線種を変えて4種類の構造形状の違いを示している。沖側の防波堤設置位置付近(図中の右カラム)での大気中の塩分の分布は、海面付近において潜堤での値が最も高くなっているが高度が高くなるにつれて急激に塩分量が低下している。これに比べてその他の天端が海上に出ている構造物の場合、潜堤よりも海上での塩分の量は少ないが、高度の上昇による飛来塩分量の低下率は小さくなっている。この理由は、構造物の天端が水面よりも高いことにより、鉛直上方成分の風が潜堤よりも卓越するからである。図-5には沖の構造物直背後の鉛直方向風速の鉛直分布を示しており、潜堤以外では構造物の背後の海面から1m程度の高さでピークを取る。長方形型の場合、上にいくに従い、 W が急激に小さくなるが、これは天端幅が短く、構造物による気流への影響が小さいためと考えられる。構造物の中では長方形型の構造が鉛直上向き風速が小さい割には飛来塩分が高い値を取っている。この理由は碎波減衰係数 F_d の計算に地形勾配が含まれているため設置位置の地形勾配に依存した高めの F_d を取り、その結果飛来塩分の発生量が増加したことも考えられる。図-5の中カラムは汀線付近での飛来塩分の鉛直分布である。潜堤と長方形型が大きな値をとる傾向は沖側と同様であるが、台形型が海面近くで大きな値を取るようになる。これは台形の形状が越波をおこしやすいため構造物の岸側に伝播した波から発生するものや汀線まで到達した波の碎波による発生とも考えられる。このことは岸側への波の伝播がより顕著な潜堤での分布にも顕れている。陸上での飛来塩分の分布は潜堤や台形型のような岸側への波の伝播が顕著な構造物で大きな値を取っていることが分かる。飛来塩分の分布に対する粒径による違いは当然、径が大きく沈降速度が大きい場合ほど飛来塩分が上空に到達する量が少なくなる。このことは海洋構造物周辺よりも岸側にいくほど顕著である。

4. 結論および考察

本研究では、波動方程式に基づく碎波からの飛沫の発生と輸送に関する数値計算モデルの開発および検討を行った。その結果、本計算モデルは、構造物の形状に従い、碎波から発生する飛沫を計算できることが明らかになった。

本研究において碎波の影響を考慮する場合、従来用いられている碎波指標 F_d を適用したが、構造物の形状ごとの碎波に対する影響を評価するにはやや無理があるこ

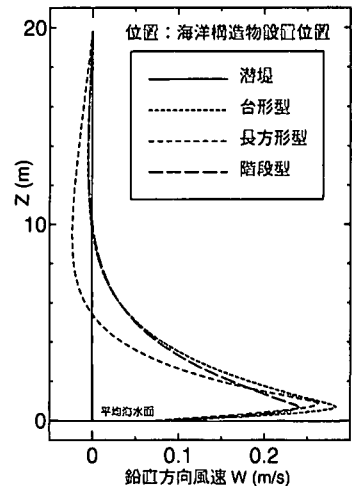


図-5 鉛直方向風速 W の鉛直分布

とは否めない。波動場を計算するための運動方程式は修正ブシネスク方程式を基本として様々な発展があり、例えば乱流運動エネルギーを未知数とした1方程式乱流モデルを波動方程式と連立させて解く数値モデルも提案されており、適宜導入していきたい。また実海岸での2次元の波動場で飛来塩分輸送を3次元としたモデルへの発展も検討していきたい。さらに建設材料の研究者と連携をはかり、波の諸元に応じた飛来塩分の発生と輸送および構造物への付着まで視野に入れたモデルに発展させていく予定である。

謝辞: 長岡技術科学大学丸山久一教授、同大学下村匠助教授には研究の動機付けと飛来塩分による構造物の腐食に関する調査資料の紹介を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 浅井 正・西村男雄・村上和男 (1998): 飛沫の発生と輸送に関する二次元水路実験, 港湾技研資料, 23 p.
- 角野昇八・館川徹也・竹村健治・山岸達也 (2000): 沿岸碎波における混入気泡容積特性とその再曝気現象に与える効果, 海岸工学論文集, 第47巻, 土木学会, pp. 136-140.
- 岸谷孝一・西澤紀昭 (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, pp. 3-13, 106.
- 杉原裕司・津守博通 (2002): 気液界面における表面更新乱流の特性, 水工学論文集, 第46巻, pp. 529-534.
- 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄 (1993): 飛沫 (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.
- 植田 操 (1999): 強風下の沿岸海域から発生する飛沫量とその陸域への輸送に関する研究, 博士論文 (九州大学).
- Mohammad Dibajnia, 渡辺 晃 (1987): 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 291-295.