

論文 コンクリート構造物への飛来塩分の影響因子に関する感度解析

永島 勝^{*1}・下村 匠^{*2}

要旨：塩害環境下に置かれたコンクリート構造物に飛来する塩分量の時空間的分布に及ぼす、波、風の気象条件、海岸からの距離、構造物形状、周辺地形などの幾何学的条件の影響、ならびに海塩粒子の運動モデル種類による影響を数値解析により検討した。また、数値解析と新潟県における実測値との比較を行った。

キーワード：飛来塩分、数値解析、移流拡散、砕波

1. はじめに

コンクリート構造物の供用開始後の構造物の状態の経時変化を高い精度と一般性をもって予測することは重要である。その一部として必要となるのが、構造物の環境条件（境界条件）の評価である。構造物に到達する飛来塩分に代表される、個別の構造物の境界条件は、気候、波高などの巨視的な条件のみに依存するのではなく、構造物形状および周辺地形など局地的な条件の影響を複雑に受けるため、これを適切に評価するには相応の算定手法が必要である。

本研究では、波や風などの気象条件、海岸からの距離、構造物形状、周辺地形などの幾何学的条件が、沿岸部に置かれた構造物に到達する飛来塩分量に与える影響を、数値シミュレーションによりどの程度表現できるか検討した。数値シミュレーション法は、海岸工学分野において開発された山田・細山田¹⁾の方法を採用した。

2. 飛来塩分の発生と移動のモデル

2.1 計算フロー

本研究で用いる山田らの数値計算法のフローチャートを図-1に示す。まず、計算の対象とする地形の境界条件および波や飛来塩分に関する初期条件を与えた後、非線形性を考慮した波浪場の計算を行う。続いて、非定常緩勾配方

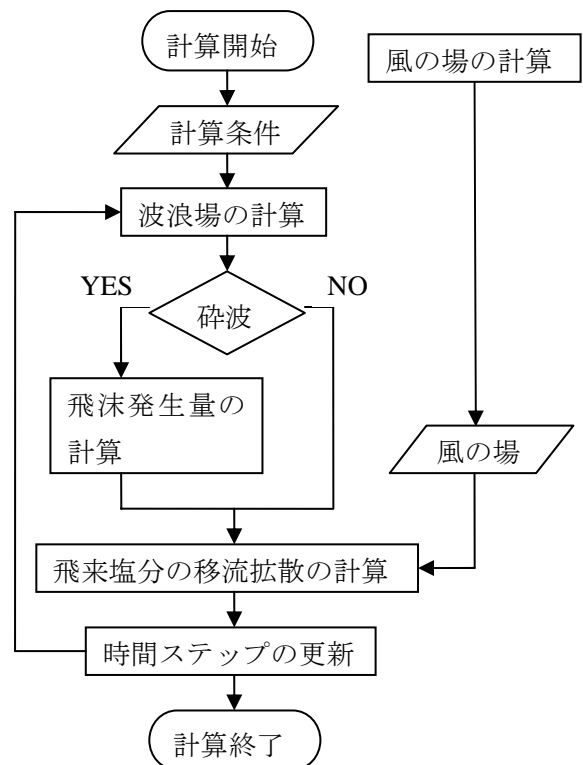


図-1 計算のフローチャート

程式の砕波モデルにより波の砕波の判定を行い、砕波が判定されると飛沫の発生量の計算を行う。続いて、あらかじめ計算しておいた風の場（風の速度ベクトル分布の定常解）を用いて、大気中における飛来塩分の移流拡散の計算を行う。つまり、飛来塩分の計算においては、風は定常状態を仮定する。次に、時間ステップを更新し、波浪場の計算と飛来塩分の移流拡散の計算を繰

*1 (株) 関配 工修 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 助教授 工博 (正会員)

り返す。

なお、本研究では、2次元の問題を対象とする。

2.2 風の場合

Navier-Stokes 方程式と連続式より式(1)の Poisson 方程式が導かれる。これをもとに風の場合の計算を行う。空気は非圧縮性と仮定する。計算は SOLA 法で行う。²⁾

$$-\frac{\partial D}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + 2\frac{\partial w \partial u}{\partial x \partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 u , w , P , Re はそれぞれ水平速度、鉛直速度、圧力、レイノルズ数である。また、 D は発散を表し式(2)で表される。

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

2.3 飛沫の発生モデル

海から飛来塩分粒子が発生するメカニズムは、大きく分けて、a) 砕波によって発生する、b) 海水が風によって海面からちぎれて発生する、の二つのパターンがある。さらに、砕波による飛来塩分の発生には、a1) 砕波によって海水中に混入された気泡が海面で破裂した時に発生する、a2) 砕波によってちぎれた海水が大気中に飛散することによって発生する、の二つのパターンがある。a1) による飛来塩分は粒子径が小さく風に乗って遠くまで運ばれるが、その他のパターンでは飛来塩分の粒子径が大きく、大部分の飛来塩分粒子はすぐに落下する。そこで、海岸近くの陸上に存在する構造物に到達する飛来塩分を対象とすれば、a1) の砕波の気泡によって発生する飛来塩分のみを考慮すればよいことになる。

気泡によって発生する飛沫量は、砕波による波のエネルギー損失量が気泡の発生量に比例するとし、式(3)、(4)より求める。

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

$$C = V_{air} \left(\frac{D_{salt}}{D_{air}} \right)^3 \quad (4)$$

ここで、 V_{air} , a , W_{loss} , D_{air} はそれぞれ気泡生成体積、比例係数、波の砕波によるエネルギー損失量および気泡の直径である。また、 C , D_{salt} は飛沫発生量、飛沫の直径である。気泡の直径と飛沫（水滴）の直径の関係は、図-2に示した Wu の研究³⁾の実験結果を用いた。実験結果に変動があるために上限と下限の2本の線で示してある。しかし、砕波によって発生する気泡の直径を検討するには至っていないため、山田らに倣い、飛沫発生量の計算において気泡の直径を3.5mm、飛沫の直径を0.55mmと仮定した。

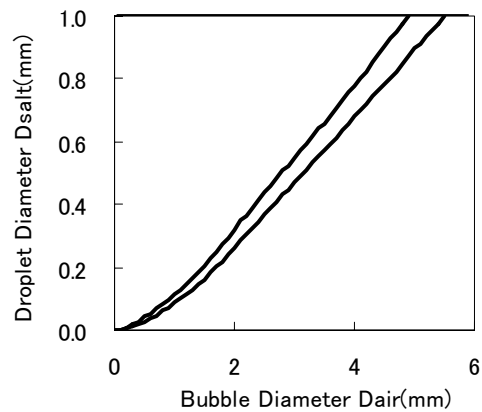


図-2 気泡の直径と飛散する飛沫の直径の関係

2.4 飛来塩分の移動モデル

飛来塩分の移動は、式(5)に示す移流拡散方程式に基づき計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + (w - w_s) \frac{\partial \bar{c}}{\partial w} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial w} \left(k_w \frac{\partial \bar{c}}{\partial w} \right) - Q \quad (5)$$

ここで、 c , w_s , Q , k はそれぞれ飛来塩分濃度、飛来塩分粒子の沈降速度、塩分吸収量、乱流拡散係数である。塩分吸収量は樹木や建物の飛来塩分遮蔽吸収効果を考慮できるように式に取り入れたものである。乱流拡散係数は、風の場合の計算のさいに算出される。飛来塩分粒子の沈降速度は、式(6)、(7)、(8)において、沈降速度 w_s

の初期値をストークスの沈降速度として反復計算を行って求めた⁴⁾。

$$C_d R_e^2 = \frac{4 D_s^3}{3 \mu} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g \quad (6)$$

$$C_d = \frac{24}{R_e} (1.0 + 0.150 \cdot R_e^{0.687}) \quad (7)$$

$$R_e = \frac{D_s \cdot w_s}{\nu_{air}} \quad (8)$$

ここで C_d , R_e , D_s , μ , ρ_s , ρ_f はそれぞれ抵抗係数, レイノルズ数, 飛来塩分の直径, 空気の粘性係数, 飛来塩分密度および空気密度である。

3. 感度解析

3.1 計算条件

構造物に到達する飛来塩分に対する影響因子の感度解析を行うために, 図-3のような600m×60mの範囲の2次元の解析対象モデルを設定した。図中の陸上に設置した構造物に到達する飛来塩分量の計算を行う。波は, 海岸から150m沖の地点で発生させた。波の発生点によって発生する飛来塩分量は変わるが, 本研究ではすべてこの条件にした。風は海側から陸側に向かって設定する。また, 構造物の周辺地形による影響を検討するために, 構造物の背後に壁を設置した。計算に用いた主な条件を表-1に示す。飛来塩分の境界条件は, $c|_{x=0}=0$, $\partial c / \partial x|_{x=600m}=0$, $\partial c / \partial z|_{z=0}=0$, $c|_{z=50m}=0$ とした。

図-4は表-1に示した条件の元で計算を行った風の場の計算結果を水平方向と鉛直方向の成分に分解して示したものである。飛来塩分の移流拡散過程の数値解析は差分法により行った。構造物に到達する飛来塩分量は, 到達飛来塩分量が安定してから3分間の値の平均値を用いた。

3.2 海岸からの距離

図-5は, 構造物と海岸の距離 L_1 を 5m, 50m および 250m とした場合の, 構造物に到達した飛来塩分量 ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$) を示したものである。

海岸からの距離 50m および 250m の構造物では, 構造物の海側の面における飛来塩分量は, 地表から高くなるにつれ増加している。これは,

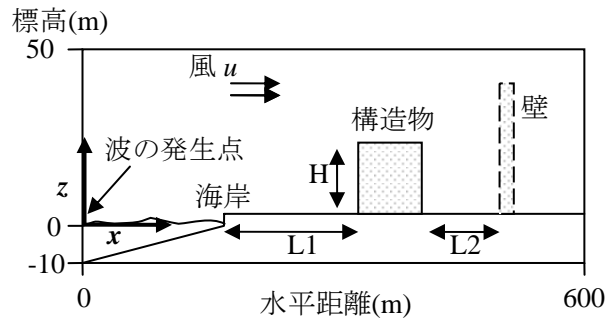


図-3 解析対象モデル

表-1 計算条件

構造物と海岸の距離 L_1	50m
構造物の高さ H	5m
壁の距離 L_2	∞ m (壁無し)
風速 u	5m/s
飛来塩分の直径 D_s	0.2mm
波の波高	4m
波の周期	9s
式(2)の比例係数	1.0
時間刻み間隔	0.1s
水平方向刻み幅	1.5m
鉛直方向刻み幅	0.25m

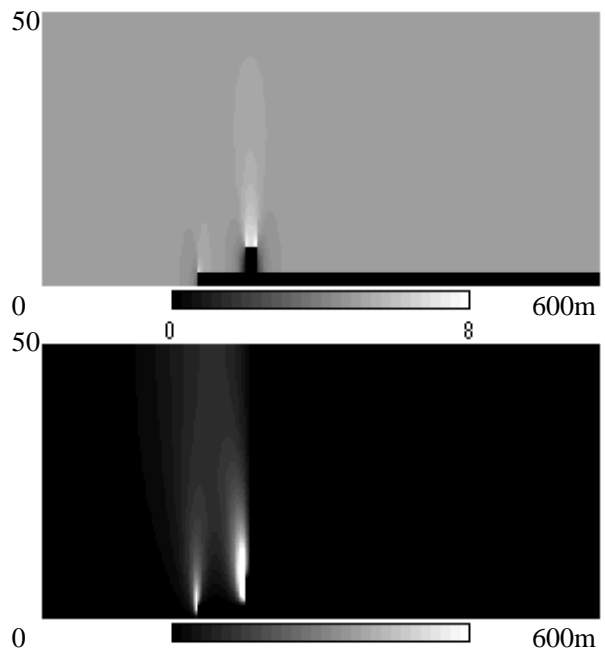


図-4 風の間(上:水平風速, 下:鉛直風速)

構造物の手前で上昇気流が発生するためである。しかし, 海岸からの距離 5m の構造物では, 逆に飛来塩分量は高いところほど減少している。これは, 海岸からの距離が非常に近いために, 飛

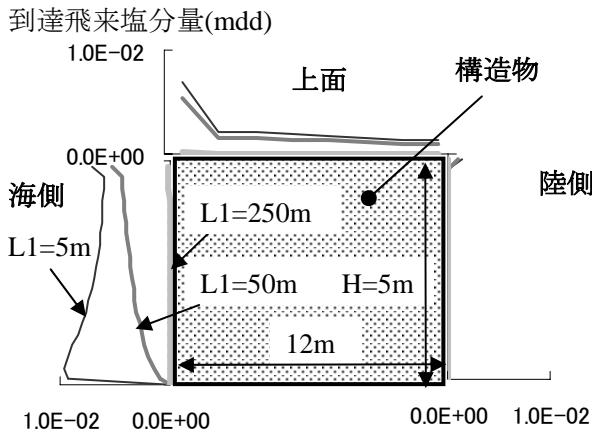


図-5 海岸からの距離 L1 を変化させた場合の到達飛来塩分量

来塩分が構造物の表面に直接到達するためであると考えられる。

構造物の上面および陸側の面に到達した飛来塩分量は、海側と同様に、海岸からの距離が遠い構造物ほど少なくなった。陸側の面の飛来塩分量は、海側に比較して非常に小さな値となった。そのため以後、構造物の海側の面の飛来塩分量のみに着目することにする。

コンクリート標準示方書の構造物の使用性照査では、海岸からの距離に応じて、コンクリート表面における塩化物イオン濃度が示されている。図-6に、本研究で得られた到達飛来塩分量の計算結果と、示方書に示された表面の塩化物イオン濃度の比較を行う。示方書の系列の縦軸は、海岸から100mのコンクリート表面における塩化物イオン濃度を1とした値、計算値の系列は、海岸から100mの到達飛来塩分量を1とした値である。示方書と計算値とでは、距離による減衰の様子が異なっている。この原因は、計算値は到達塩分量であるが示方書はコンクリート表面への付着や雨などによる洗い流しの影響を受ける表面塩分量であること、計算で仮定した粒子径や粒子の沈降速度が現実をよく表していないこと、などが考えられる。

3.3 構造物の高さ

構造物の高さ H を 2m, 5m および 30m とし、構造物に到達する飛来塩分量の計算を行った結

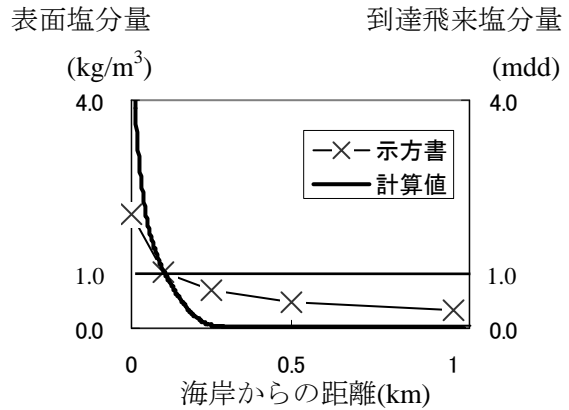


図-6 示方書の表面塩分量と到達飛来塩分量の計算値との比較

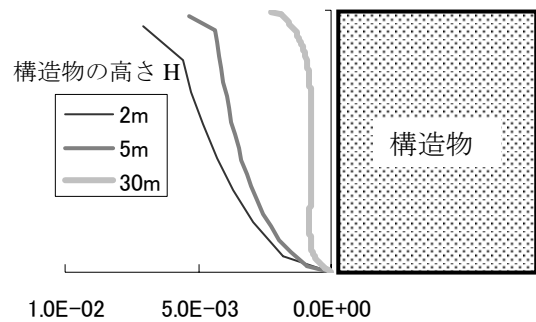


図-7 構造物の高さ H を変化させた場合の到達飛来塩分量 (海側)

果を図-7に示す。なお、縦軸はそれぞれの構造物の高さ H を 1 とした無次元量で示した。

構造物の高さが高いほど到達飛来塩分量が少なくなる結果となったが、これは、飛来塩分発生量が同じで構造物表面積が大きくなっていることにもよる。しかし、単位面積あたりの飛来塩分の最大値は確かに小さい構造物ほど大きい。

3.4 壁

周辺の地形が構造物に到達する飛来塩分量に与える影響を調べるために、構造物の背面に壁を設置し、構造物と壁の距離 L2 を変化させ計算を行った。構造物と壁の距離を 5m, 10m および壁なしとした場合の結果を図-8に示す。

構造物の背面に壁があると、壁が無い場合よりも、海側での到達飛来塩分量がわずかに少なくなっている。しかし、逆に陸側ではむしろほとんど影響がない結果となった。

3.5 風速

風速 u を 1m/s, 5m/s および 20m/s とした場合

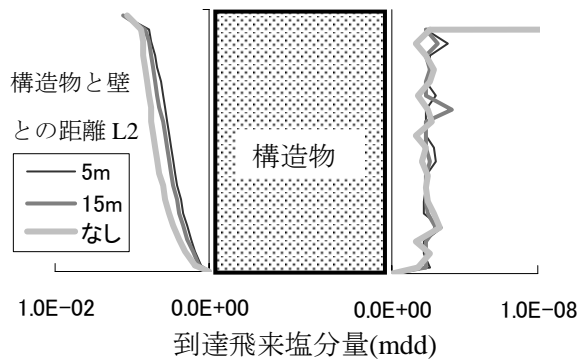


図-8 壁の距離 L2 を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側と陸側）

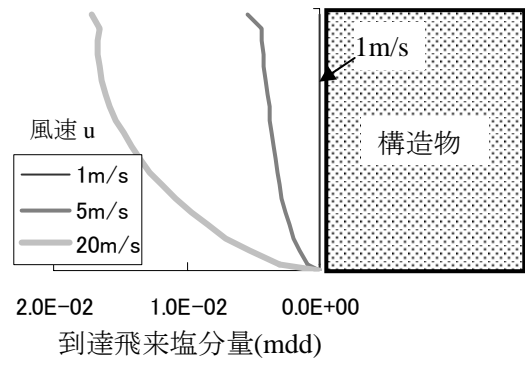


図-9 風速 u を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側）

の構造物に到達する飛来塩分量を図-9に示す。

到達飛来塩分量に及ぼす風速の影響は線形ではないことがわかる。これは、風速が大きくなると風の乱れが大きくなり、強い上昇気流が発生し、飛来塩分が遠くまで飛来するからである。

3.6 飛来塩分の直径

理想的には、飛来塩分の直径は、飛来塩分の発生機構モデルにより決定するべきであると考えている。しかし、現段階ではまだ検討が及ばないため、飛来塩分の直径を変化させた場合の到達飛来塩分量の計算を行った。ただし、式(4)の飛沫の直径は0.55mmで計算を行った。その結果を図-10に示す。飛来塩分の直径によって到達飛来塩分量が変わる理由は、飛来塩分の直径が大きくなると沈降速度が大きくなり、飛来塩分の飛来する距離が短くなるからである。

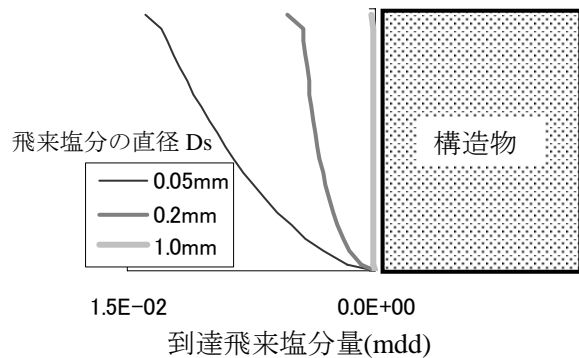


図-10 飛来塩分の直径を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側）

3.7 波

波の波高、周期を変化させた場合の結果を図-11に示す。波高が大きくなると、砕波によるエネルギー損失量が大きくなるために、到達飛来塩分量が多くなっている。

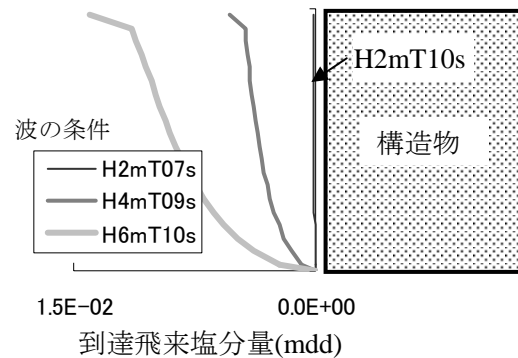


図-11 波の条件を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側）

4. 実測値との比較

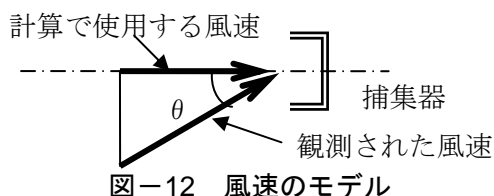
新潟県において測定された実測値²⁾との比較を行う。実測値は、1992年10月～1994年12月までの2年2ヶ月に渡って、土研式塩分捕集器を用い新潟県内の15箇所測定された結果の中から抽出した。表-2に示す4箇所を選び出し、本研究で用いた数値解析法により飛来塩分量の

計算を行った。計算で使用した風速は、各地点の近くの気象観測所のデータから、図-12のように毎月の最大風速とそのときの風向から求めた風速をモデル風速とし、これを1993年から1994年までの2年間の平均したものをを用いた。波の波高と周期は、新潟市の沖約4kmで観測されたデータ³⁾を平均したものをを用い、波の発生点を海岸から150m沖とした。

各地点の実測値と計算結果を表-3に示す。

表－2 観測地点の計算条件

観測地点	海岸からの距離	標高	風速	波の波高	波の周期	地形などの様子
A	0m	10m	2.7m/s	1.0m	5.8s	観測地点の背後に急な斜面
B	150m	4m	1.9m/s			
C	450m	7m	3.0m/s			
D	1000m	15m	3.0m/s			観測地点はF川に架かる橋



表－3 実測値と計算結果(単位：mdd)

観測地点	実測値	結果1	結果2
A	1.26	1.09E-23	2.51E-11
B	4.68	1.93E-17	0.54
C	0.46	2.48E-22	0.46
D	0.30	0	0.12

結果1は表－2の計算条件で計算したものである。結果2は、観測地点Cの結果が一致するように計算条件を変えて得られた結果である。風速を4倍、飛来塩分の直径を0.05mm、式(2)の比例定数を2.76E+05に設定した。

まず、結果1では、4箇所の飛来塩分量の計算結果は、定量的にも定性的にも実測値を再現することができなかった。結果2では、飛来塩分の発生源が同じであると考えられるCとDでは、値の大小関係が計算値において比較的再現できた。しかし、観測地点A、Bに対しては、やはりオーダー的にも程遠い結果となっている。

実測値と計算値が異なる理由として現段階で考えられるのは、a)風速、波のデータとして、年間の平均値よりも大きな値を与える必要があること、b) 碎波によって発生する飛来塩分の直径が正しく評価出来ていないこと、c) 碎波に影響を及ぼす海岸の様子、例えば砂浜、岩礁、消波ブロックの有無などを考慮していないこと、などある。実測値と計算値との違いの原因については、このような検討をさらに詳細に進めることで、もう少し的を絞れると思われる。今後も検討を続ける予定である。

5. まとめ

本研究では、海岸工学の分野で開発された、地形や構造物の形などの影響を合理的に考慮することができる山田・細山田の飛来塩分計算法を、コンクリート構造物の劣化予測問題に適用

することを試みた。その結果、海岸からの距離や風などによって構造物に到達する飛来塩分量が変わることを数値解析によって表現できることを確認した。しかし、実測値との比較を行なった結果、現段階では実構造物の飛来塩分量を予測できるレベルではないことが明らかとなった。その原因解明と改良は、今後の課題である。

参考文献

- 1) 細山田得三ほか：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，海岸工学論文集，第49巻，pp.1256-1260，2002
- 2) 高橋亮一ほか：コンピュータによる流体力学<演習>，第2版，構造計画研究所，pp.214-235，1985.2
- 3) Wu.J.：Spray in the atmospheric surface layer，Review and analysis of laboratory and oceanic results，Journal of Geophysical Research，Vol.84，No.C4，pp.1693-1704，1979
- 4) 福島祐介ほか：粒径分布を考慮したk-ε乱流モデルによる吹雪の流動解析，水工学論文集，第45巻，pp.679-684，2001.2
- 5) 土木学会新潟会：コンクリート構造物の塩害およびその対策に関する調査研究委員会報告書，その2，pp.1-30，1995.3
- 6) (財)沿岸開発技術研究センター：全国港湾海洋波浪観測25ヶ年統計資料，pp.422-423，1996.1