

一般財団法人新潟県建設技術センター
平成 29 年度研究助成報告書

新潟県における橋梁の飛来塩分の
自動予測技術に関する事業

平成 30 年 3 月

研究代表者

長岡技術科学大学 中村文則

新潟県における橋梁の飛来塩分の 自動予測技術に関する事業

研究代表者 長岡技術科学大学 中村 文則

新潟県では、多数の橋梁が海岸近傍に設置されているとともに、冬季の激しい波浪・強風により、飛来塩分によるコンクリート構造物の劣化が進行しており問題となっている。本研究では、構造物に作用する飛来塩分の予測を高精度化するために、気象・波浪条件の変化と飛来塩分の時間・空間的な変動について現地観測を実施するとともに、それを数値シミュレーションにより予測する方法について検討を行った。さらに、公開されている気象・波浪データから橋桁に作用する飛来塩分量を自動的に予測する自動予測システムの開発を行った。その結果、予測モデルを用いることで橋桁に作用する飛来塩分を高精度で予測できることが確認でき、飛来塩分を自動で予測できる自動予測システムを開発することができた。

キーワード：塩害、飛来塩分、自動予測、数値シミュレーション、実構造物

1. はじめに

海域から発生する飛来塩分は、風によって輸送され、コンクリート構造物表面に到達し、その後、コンクリート内部の鉄筋が腐食することで、コンクリート構造物が塩害劣化するため問題となっている。特に、新潟県では、多数の橋梁が海岸近傍に設置されているとともに、冬季の激しい波浪・強風により、飛来塩分によるコンクリート構造物の劣化が進行していることが報告されている。

このような構造物の塩害劣化を軽減させるためには、構造物に到達する飛来塩分を正確に予測し、その対策を行うことが重要となる。現状では、構造物に到達する飛来塩分の予測は、コンクリート標準示方書²⁾に記載されているような海岸からの距離で定める方法が一般的に広く使用されている。しかしながら、飛来塩分は気象・波浪および周辺地形の影響により複雑に変化することから、海岸からの距離だけでは予測が難しく、構造物周辺の条件によっては予測結果と大きく差が生じる場合がある。

このような問題を解決していくためには、飛来塩分の発生・輸送過程に影響する構造物周辺の地形、気象・波浪条件を考慮し、構造物表面に到達する飛来塩分量を予測できる方法を確立することが有効である。

本研究では、構造物に作用する飛来塩分の予測を高精度化するために、気象・波浪条件の変化と飛来塩分の時間・空間的な変動について現地観測を実施するとともに、それを数値シミュレーションにより予測する方法について検討を行った。さらに、公開されている気象・波浪データから橋桁に作用する飛来塩分量を自動的に予測する自動予測システムの開発を行った。

2. 実構造物周辺の気象・波浪条件と飛来塩分量 に関する現地観測

実構造物に到達する飛来塩分量の現地観測は、既往研究において橋桁周辺の時間・空間的な変化を現地観測で確認した例は少ない。気象・波浪条件と飛来塩分量の時間・空間的な変動を詳細に把握しておくことは、飛来塩分量を高精度で予測するために必要不可欠である。そのため、気象・波浪条件と橋桁周辺の飛来塩分量に関する現地調査を実施した。

(1) 観測期間および観測場所

観測期間は、2018年2月18日8時～2月19日8時の24時間である。観測場所は、新潟県上越市に位置する図-1のような実橋梁周辺である。この地域は、冬季に季節風の作用が卓越することで高波浪が来襲し、大気中の飛来塩分量が多い場所である。図-2は現地調査を実施した2月18



図-1 対象とした橋梁(新潟県上越市)



図-2 2月18日14時の海域の状況

日14時時点の海域の状況である。このときの波浪条件は、波高3.1m, 周期7.8s, 風速は9.0m/s程度である。

(2) 現地観測方法

a) 観測項目

気象・波浪条件と飛来塩分量の関係を把握するために、現地観測の項目は、飛来塩分量、飛来塩分(海水飛沫)粒子の粒径、風速・風向とした。波浪条件は、現地観測を実施せずに、隣接する海域に設置されている全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)²⁾の観測結果を用いた。

b) 風速・風向および飛来塩分の観測方法

風速・風向は三杯式プロペラ風速計(アイネクスト製)を用いて測定を行った。測定間隔は1分間隔であり、データロガーに値を収集した。

大気中の飛来塩分の測定は、図-3のようなガーゼ法による塩分捕捉器を作製して実施した。この捕捉器は、直径48mmの円筒形のメッシュにガーゼを2重で巻きつけたものであり、そこに付着した塩分を採取するものである。冬季の日本海沿岸では、降雨・降雪が頻繁に作用するため、そのような条件でも測定できるように、ガーゼの下部には降水をためておくことができる構造になっている。

塩分捕捉器の暴露終了後は、密閉された袋に捕捉器を入れ、分析室内まで運び、ガーゼおよび捕捉器内部に溜まった降水を取り出すとともに、容器内を蒸留水で洗浄した。その後、ガーゼを乾燥させ、降水と洗浄水を含めて50mlとなるように蒸留水を追加した。50mlの溶液は80度に加熱し、その状態で10分間攪拌し、常温(20~25℃)に戻して、塩化物イオン測定用のイオン強度調整剤を5ml追加後に、塩化物イオン量を測定した。塩化物イオン量の測定は、塩化物イオンメータ(HORIBA製)を用いて測定を行った。測定した塩化物イオン量は、単位時間・単位面積当たりの塩分量に変換している。

ガーゼで採取した塩分量との比較を行うために、ガーゼ法と合わせて土研式捕集箱を設置し、飛来塩分の壁面

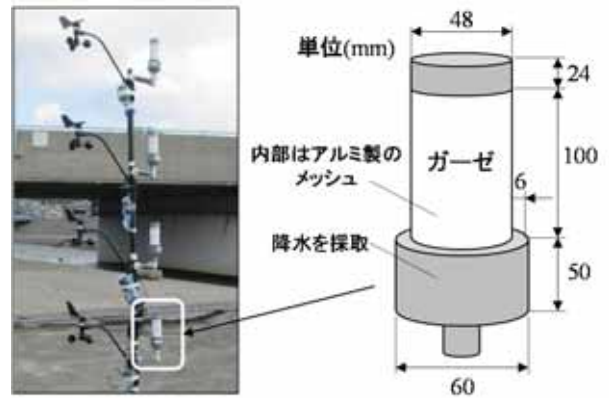


図-3 風速計と飛来塩分捕捉器

への到達量も同時に観測した。

c) 飛来塩分の粒径分布

飛来塩分の粒径分布は、寸法76mm×52mmの感水試験紙(Syngenta製)を大気中に暴露し、そこに到達した飛来塩分粒子の粒径を測定した。この試験紙は、最小粒径50μmまでの液滴を測定できるものである。

採取した飛来塩分粒子は、デジタルカメラ(CanonIXY650, 2020万画素)で感水試験紙の縦30mm・幅40mmの範囲で撮影し、画像処理を行うことで粒径分布を算出した。画像処理の方法は、撮影した画像を2値化し、それを円検出することで、飛来塩分粒子を粒径ごとに整理した。画像処理に用いたプログラムは、一般的に幅広く使用されているopenCVとプログラム言語C++を組み合わせたものである。その後、画像処理で得られた感水試験紙上の飛来塩分粒子の直径を式(1)を用いて、実際の大气空間に飛来している粒径に変換を行った。

$$D_a = 1.03 D_k^{0.88} \quad (1)$$

ここで、 D_a は大気中の飛沫粒径(μm)、 D_k は感水試験紙上での飛来塩分の粒径(μm)である。

(3) 観測点の配置

観測点は、図-4に示すようなNo.1~3の3地点であり、風速計12台、塩分捕捉器を1回の観測で2~7個、土研式捕集箱1個を配置した。各観測点では、風速計、塩分捕捉器を地表面から高さ1.0, 1.5, 2.0, 2.5mに設置した。土研式捕集箱は、観測点No.2に受風窓が高さ0.4mとなるように設置し、それとともに隣接する位置に塩分捕捉器を設置した。2月18日14~16時の期間以外は、観測点No.1に風速計4台、No.2に風速計4台および塩分捕捉器2個を設置することとした。

飛来塩分粒子の粒径を測定するための観測点は、観測点No.P1~P4に配置し、地表面から高さ150cmの位置に感

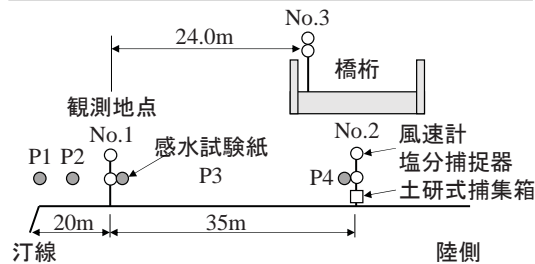
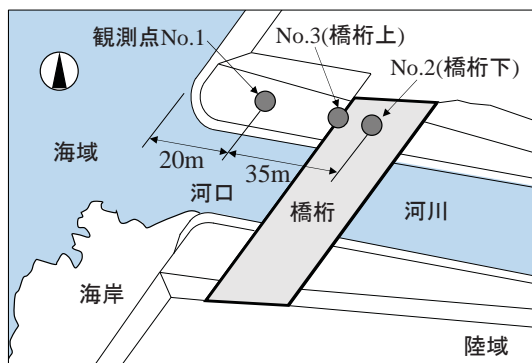


図4 現地観測点の配置

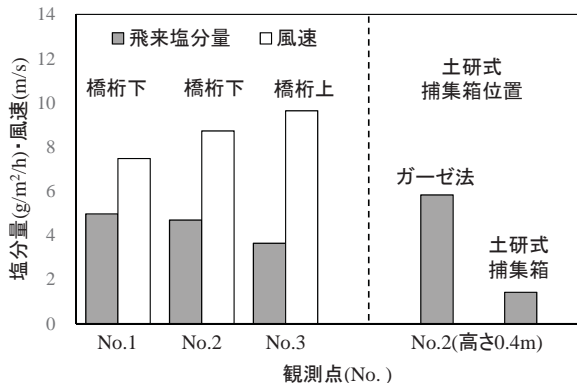


図5 各観測位置での風速と飛来塩分量

水試験紙を設置した。土研式捕集箱および飛来塩分の粒径分布の測定は、2月18日14～16時の2時間のみ実施した。

(4) 観測結果および考察

a) 橋桁周辺の風速・飛来塩分量の空間分布

構造物周辺の風速と大気中の飛来塩分量の観測結果を図-5に示す。図の値は2月18日14～16時の観測結果を示したものであり、鉛直方向の平均値である。図に示すように、風速は橋桁海側No.1で7.5m/s、橋桁上で9.6m/sとなっており、橋桁上No.3のほうが海側からの風が強くなっていることがわかる。これは、橋桁の高欄に当たった風が橋桁上に集中するためであり、観測点No.3の周辺で風速が局所的に大きくなっている。

塩分量は、海岸側の観測点No.1で最も大きく5.0g/m²/hとなっており、橋桁上で最も小さい結果となった。これは、飛来塩分が海域で発生し、その粒子が重力により沈降するため、汀線付近で最も塩分量が大きく、地表面からの高さが高い位置で塩分量が小さくなるためであると

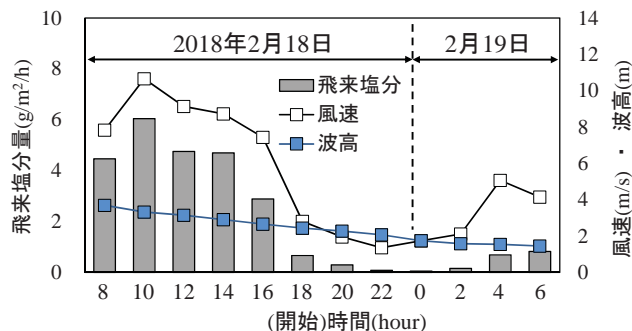


図-6 風速・波浪・飛来塩分の観測結果

考えられる。

図の土研式捕集箱を設置した観測点No.2(高さ0.4m)の観測結果では、採取された塩分量は、ガーゼ法より土研式捕集箱のほうが小さくなっている。これは、ガーゼ法では、風がガーゼを通過するため、大量の塩分がガーゼに付着するが、土研式捕集箱では風が通過しないためである。

b) 気象条件と飛来塩分量の時間変動

観測点No.2における風速と飛来塩分量の各時間の観測結果を図-6に示す。図に示すように、観測を開始した2月18日8～16時の期間では、風速が7～10m/s程度と大きく、観測された飛来塩分量も大きい傾向が見られる。その後、2月18日16～18時の期間に風速が大きく減少し、飛来塩分量も同様に減少する傾向が見られた。この結果から、飛来塩分量に風速が大きく影響していることが確認できる。2月18日20時から2月19日4時頃までは、飛来塩分量が小さくなっているが、これは、陸風が卓越していたためである。

2月19日4～6時では、風速が再び海側からの方向となり、飛来塩分量が増加する傾向にある。風速は4～5m/s程度であり、飛来塩分量は1.5g/m²/hで風速に対して塩分量が少ない傾向である。これは、海域の波浪の変動による飛来塩分の発生量が影響していると考えられる。図の青色線は、NOWPHASによる波浪の観測結果である。観測期間全体では海域の波高は1～4m程度であり、観測を開始した2月18日8時で最も大きく3.6m程度である。その後は、ほぼ一定間隔で波高が減少する傾向であり、飛来塩分の発生量も減少していると考えられる。

d) 飛来塩分粒子の粒径分布

感水試験紙に到達した飛来塩分粒子の状況を図-7に示す。図は汀線付近で高さ1.5mの位置に3分間暴露した結果である。図の青色の部分が、試験紙表面に到達した飛来塩分粒子である。図から、汀線付近のNo.P1のほうが、飛来塩分粒子が大量に到達しており、粒径が大きい粒子の数も多い傾向が見られる。

塩分粒子の粒径分布を整理した結果を図-8に示す。感

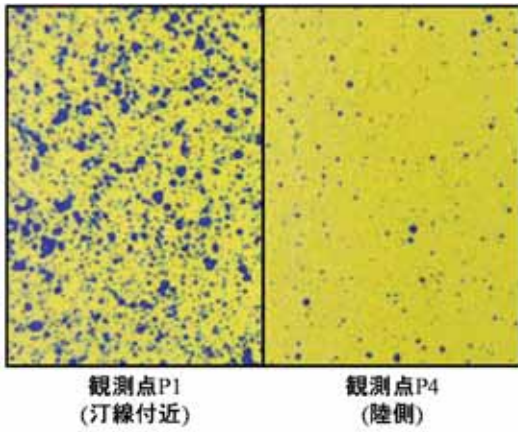


図-7 感水試験紙に到達した飛来塩分粒子

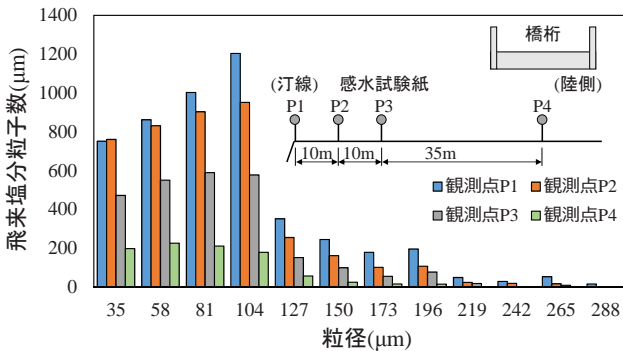


図-8 各観測点での飛来塩分の粒径分布

水試験紙を用いて飛来塩分の粒径分布を測定した結果では、汀線から55mの範囲で直径80~100μm程度の粒径が多く分布していることが確認された。各観測点の結果では、粒径分布に大きな差が見れてなかった。

3. 地形・気象・波浪条件を考慮した飛来塩分の予測モデルの開発

構造物表面に到達する飛来塩分量の時間・空間的な分布を高精度で実施できるようにするために、地形・気象・波浪条件を考慮した飛来塩分の予測モデルの開発を行った。

(1) 予測モデルの全体構成

構造物の塩害の要因となる飛来塩分は、海域の波から発生し、風によって輸送され、構造物表面に到達する。そのため、それらの物理過程を統合的に組み合わせた図9のような構成で予測モデルの開発を行った。

図に示すフローは、計算の順序を表したものであり、海域の波浪計算を実施し、その結果から飛来塩分の発生量について計算を行う。発生した飛来塩分は大気中の風によって輸送されるため、風況の計算を事前に実施しておき、その結果を用いて海域から発生した飛来塩分の輸

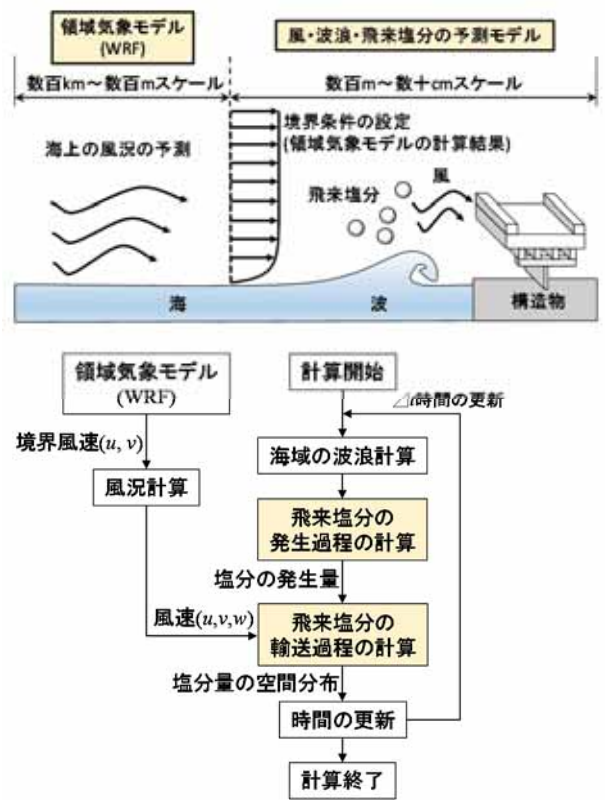


図-9 計算全体の構成

送過程の計算を実施する。風況の計算で境界に設定する風速は、上図のように領域気象モデルにより沖海域上の空間で計算を行い、その結果を設定した。

これらの過程を統合して計算を行うことで、海域から発生する飛来塩分の発生・輸送過程の計算を実施した。

(2) 各過程の計算モデルおよび基礎方程式

a) 波浪モデル

海域の波浪場の計算モデルは、海域の波の伝播現象を計算できる平面2次元の修正ブシネスク方程式とした。支配方程式を式(2)~(3)に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x \cdot Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + M_D D_x = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) \\ + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x \cdot Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + M_D D_y = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) \\ + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} \right) \end{aligned} \quad - \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu_t \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

ここで、 η は水位変動(m)、 Q_x 、 Q_y は線流量(m²/s)、 g は重力加速度(m/s²)、 h は静水面から水深(m)、 $D(=h+\eta)$ は全水深(m)、 t は時間(sec)、 B はブシネスク方程式の定数(=1/21)、 M_D は砕波によって海水面に生じる渦エネルギーである。波の砕波による波高の減衰は式(4)の算定式で計算を行った。

$$M_D = \frac{5}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \sqrt{\frac{q - q_r}{q_s - q_r}} \tan \theta \quad (4)$$

$$q_s = 0.4(0.57 + 5.3 \tan \beta) C_c h$$

$$q_r = 0.4(a/h) C_c h$$

ここで、 q は流量振幅(m³/s)、 a は水位振幅(m)、 h は水深(m)、 C_c は波速(m/s)、 θ は波向、 β は海底勾配である。

b) 風況モデル

構造物形状およびその周辺の地形を汎用的に考慮できる風況モデルの構築を行った。大気中の空気を非圧縮性流体と考え、式(5)および(6)に示す3次元の連続式とナビエ・ストークス方程式により計算を実施した。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ - \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} =$$

ここで、 x 、 y 、 z は3次元座標(m)、 u 、 v 、 w は x 、 y 、 z 方向の風速(m/s)、 p は圧力(Pa)、 ν_t は風の乱流拡散係数(m²/s)である。

風の乱流モデルは、流体計算で使用されている $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた。乱れエネルギーの輸送方程式、粘性散逸率の輸送方程式は式(7)および(8)である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 k は乱れエネルギー量、 ε は粘性散逸率、 σ_k (=1.0)、 σ_ε (=1.3)、 C_1 (=1.44)、 C_2 (=1.92)はそれぞれ格子乱流やチャンネル乱流の基礎実験データをもとに求められた係数である。これらの計算から求められた値を用いて、乱流粘性係数 ν_t は式(9)により算出した。

$$\nu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

ここで、 C_μ (=0.09)は係数であり、 ρ は大気密度(kg/m³)である。

c) 飛来塩分の発生・輸送過程モデル

海域の波動場からの飛来塩分の発生過程は、波の砕波から飛沫状の塩分粒子が発生するとしてモデル化した。村上ら³⁾の現地調査結果の一部を参考に、海域の波の砕波帯上で、式(10)のような飛来塩分の鉛直分布となるように与えた。

$$c_a(z) = c_0 \exp(-A_w z) \quad (10)$$

ここで、 c_a は飛来塩分の鉛直分布(g/m³)、 A_w は鉛直方向の減衰係数、 z は鉛直高さ(m)、 c_0 は海水面から大気中に供給される飛来塩分の総量であり、波の砕波の強さに比例

するとして式(11)のように与えた.

$$c_0 = a_g \cdot M_D \cdot D_X \quad (11)$$

ここで, M_D は砕波によって生じる海水面の渦動粘性係数であり, D_X は全水深(m), a_g は飛来塩分の発生量の比例係数である.

飛来塩分の輸送過程の計算は, 3次元の移流拡散方程式を用いており, 計算に用いた支配方程式を式(12)に示す.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial c}{\partial z} = \nu_t \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) - Q \quad (12)$$

ここで, c は大気中の飛来塩分濃度(g/m^3)である. w_s は飛来塩分粒子の沈降速度であり, 仲座ら⁴⁾を参考に海岸からの距離によって式(13)のように指数的に減少させている.

$$w_s(x) = w_0 \exp(-B_d x) \quad (13)$$

ここで, w_0 は波の砕波帯で発生する飛来塩分粒子の代表沈降速度(m/s)であり0.340m/sを与えた. B_d は飛来距離による減衰係数であり, 今回の計算では海岸近傍の狭い空間であるため0.0とした.

(3) 計算ケース

気象・波浪・飛来塩分の予測計算は, 橋桁周辺の飛来塩分の空間分布の測定を行った2018年2月18日14~16時を再現する条件で実施した.

(4) 計算条件および境界条件

a) 海域空間(波浪場)

海域の波浪計算の領域は, 図-10のような岸沖方向1060m, 沿岸方向310mの空間である. 計算格子間隔は1.0mの等間隔である. 波を造波する造波境界は, 計算領域の沖側境界から200m位置に設定し, 沖側境界ら100mまでは波の減衰帯を設置した. 沖側境界および側面境界は自由流出境界とした.

波浪計算に設定する造波境界条件には, 対象地点から北側に20km程度進んだ地点に設置されている全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の観測点の観測結果を設定した. 造波する波の波形は不規則である. 計算には, 2018年2月19日14時の波浪条件として有義波高3.5m, 周

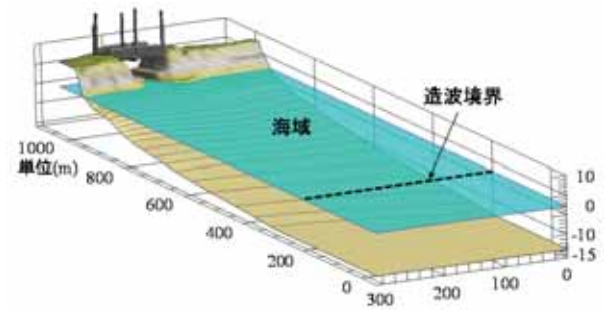


図-10 海域の波浪計算の領域

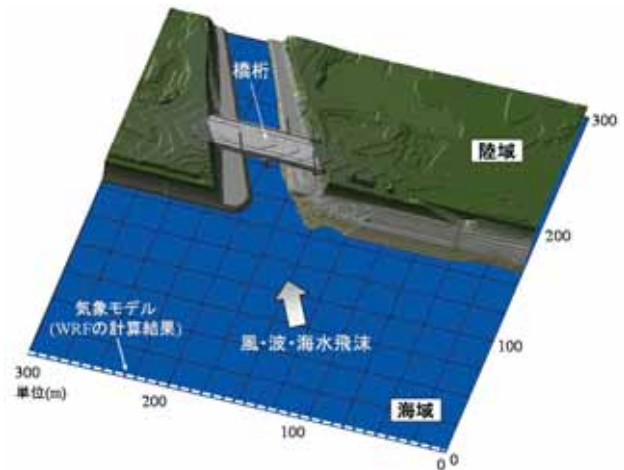


図-11 風・飛来塩分の輸送計算の領域

期8.0sを設定した.

海域の潮位条件は, 新潟県柏崎市に設置されている潮位計の観測結果を設定した. 2018年2月18日14時の潮位はT.P+0.08mである.

b) 大気空間(風の場合および飛来塩分の輸送過程)

大気中の風および飛来塩分の輸送過程の計算領域は, 図-11のように対象とした構造物を中心とした岸沖方向300m, 沿岸方向300m, 高さ20mの空間である. 計算格子間隔は水平方向が0.5m, 鉛直方向が0.25mであり, 計算格子数は2880万格子である. 海域の波浪計算で求めた飛来塩分の発生位置とその量に応じた塩分濃度を, 図の空間に与えることで飛来塩分の輸送過程の計算を行っている.

風の流入境界は, 図の点線で示す海域沖側の境界である. 流入境界に設定する風速・風向の設定は, 海上の風速・風向を領域気象モデルによって推定を行い, その値を設定することとした. 領域気象モデルは, 米国気象センター(NCAR)やペンシルバニア州立大学が共同で開発しているWRF(Weather Research & Forecasting Model : WRF-ARW, ver. 3.6.1)⁹⁾を用いた. 計算領域は, 日本海を中心とした図-12のような範囲であり, 3段階のネスティングを設定した. 最小計算領域の格子間隔は100mである. 計算条件および使用した物理モデルを整理したものを表

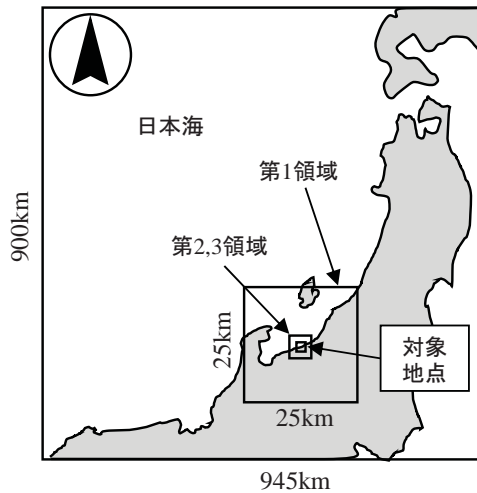


図-12 領域気象モデル WRF の計算領域

表-1 領域気象モデル WRF の計算条件

水平格子間隔	第1領域	第2領域	第3領域
	2.5km	0.5km	0.1km
水平格子数	99×99	100×100	100×100
鉛直層数	32		
初期時刻	(UTC) 00,06,12,18		
物理モデル	雲微物理	WSM3	
	放射(短波)	Dudhia	
	放射(長波)	RRTM	
	大気境界層	MYJ	
	地表面過程	Noah-LSM	

1)に示す。風速・風向の計算結果は、10分間隔で出力を行い、現地観測を行った2時間の平均値を境界に設定した。

風の計算境界への入力には、領域気象モデルWRFで計算した地表面から高さ10m位置の風速・風向を式(14)のべき乗則を用いて、鉛直分布に変換して設定した。

$$u_b(z) = u_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (14)$$

ここで、 $u_b(z)$ は各高さの風速(m/s)、 u_0 は地表面から10mの位置での風速(m/s)、 z は地表面からの高さ(m)、 z_0 は基準高さ(=10m)、 α は係数であり0.15を設定した。

計算条件全体を整理したものを表-2に示す。実際の計算では、平面2次元空間で海域の波浪計算を実施し、その結果を3次元の大気空間に入力することで、風況に応じた飛来塩分の輸送過程を計算している。

(5) 計算結果および考察

a) 風況計算の境界に設定した入力風速

風況計算の境界に設定する風速の予測のために、領域

表-2 風・波・飛来塩分の計算条件

項目	計算パラメータ	単位	設定値	
計算全体	計算格子間隔(x,y方向)	dx, dy	m	0.50
	計算格子間隔(z方向)	dz	m	0.25
飛来塩分解析	飛来塩分発生量係数	a_g	—	0.196
	発生点での鉛直塩分量減衰係数	A_w	1/m	0.2
	飛来塩分の発生時の沈降速度	w_0	m/s	0.34
	距離による塩分粒子径の減衰係数	β	1/m	0.0
	大気の乱流拡散係数	v_t	m^2/s	0.0

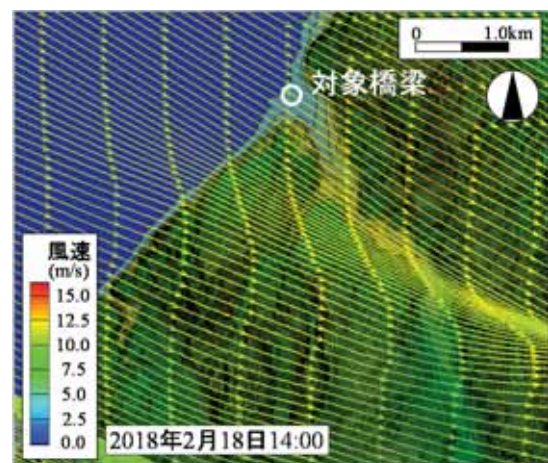


図-13 領域気象モデル WRF の計算結果

気象モデルを用いて計算を実施した。図-13は、対象とした橋梁周辺の風速の分布を予測した計算結果である。図のベクトルは、地表面から10m位置の風速の平面分布である。図に示すように、対象とした橋梁およびその沖側海域では、北西方向の風が卓越している。橋梁周辺の観測点No.1で実施した結果も風向が北西となっていたことから、領域気象モデルの計算結果は、橋梁周辺の風況を再現できていると考えられる。対象橋梁位置の海域側の高さ10mでの風速 u_0 は8.0m/sであり、この結果をべき乗則で鉛直分布に変換し、大気空間(風の場合)の境界位置に設定した。

b) 橋桁周辺の風・波浪・塩分の空間分布の計算結果

図-14は、2月18日14時の波浪および風況の空間分布を示した計算結果である。図の線は、橋桁周辺の風の流線を示したものである。図から橋桁周辺の3次元的な風の流れが計算できていることが確認できる。橋桁上で風速が大きくなっており、観測結果と同様の傾向が見られる。

図-15は、波から発生した飛来塩分の空間分布を示し

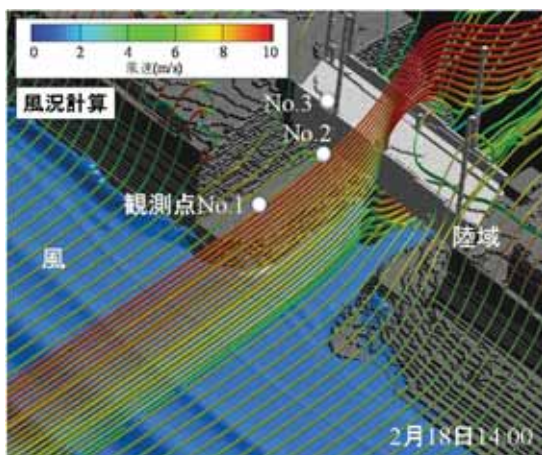


図-14 橋桁周辺の風況の計算結果

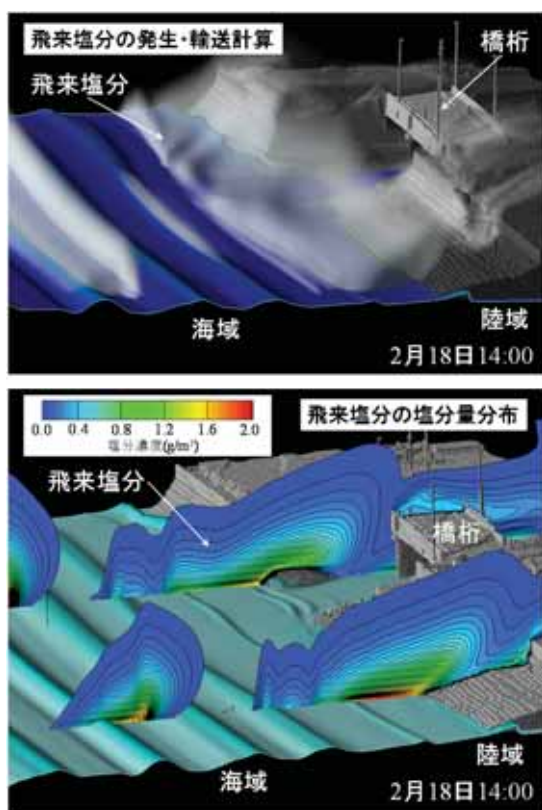


図-15 飛来塩分の空間分布と計算結果

た結果である。図の値は、気象モデルWRFの計算結果を直接計算に設定した場合、風速が若干過大となったため、今回の解析では風速を0.9倍した値を境界に設定することとした。上図の白色の部分に飛来塩分であり、海域から発生し、風によって輸送されている状況を確認できる。下図は、大気中の飛来塩分の濃度を断面で示したものである。海水面上の低い位置で飛来塩分濃度が大きくなっており、大気中の地形・風・波の条件に応じて、飛来塩分が橋桁周辺まで輸送していることがわかる。

c) 風と飛来塩分の計算結果と観測結果の比較

図-16は、2月18日14～16時の各観測点における観測結

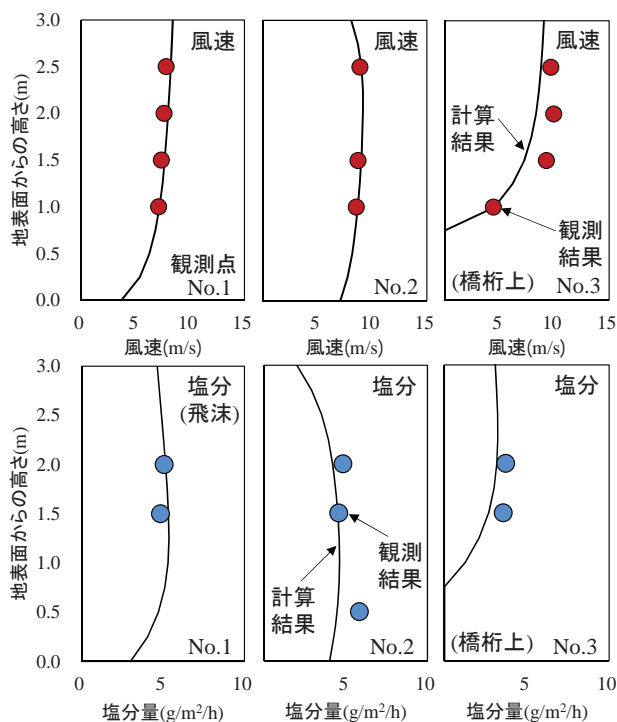


図-16 風速・飛沫の観測結果と計算結果の比較

果と計算結果を比較したものである。上図は風速の計算結果と観測結果を比較した結果である。図に示す通り、橋桁上の観測点No.3で、計算結果の風速が若干過小となっているが、計算結果は観測結果の全体的な傾向を再現できている。

下図は、飛来塩分量の計算結果と観測結果を比較したものである。図に示すように、観測点No.2の高さ0.4mの位置では計算結果のほうが過小になっているが、その他の点では計算結果と観測結果は概ね一致しているといえる。

この結果から、地形・気象・波浪を考慮した飛来塩分の発生・輸送過程を計算することで、橋桁に作用する飛来塩分の空間分布を高精度で予測できることが明らかになった。

4. 飛来塩分量の自動予測技術(自動予測システム)の開発

飛来塩分の予測モデルにより、橋桁周辺に作用する飛来塩分を高精度で予測できることが確認できたことから、この成果を応用し、飛来塩分を自動で予測できる自動予測システムの開発を実施し、その実構造物への適用性について検証を行った。

(1) 自動予測システムの全体構成

本検討で構築した飛来塩分の自動予測システムの全体構成を図-17に示す。図に示すように、気象・波浪データをweb上で取得し、それを入力して飛来塩分を予測す

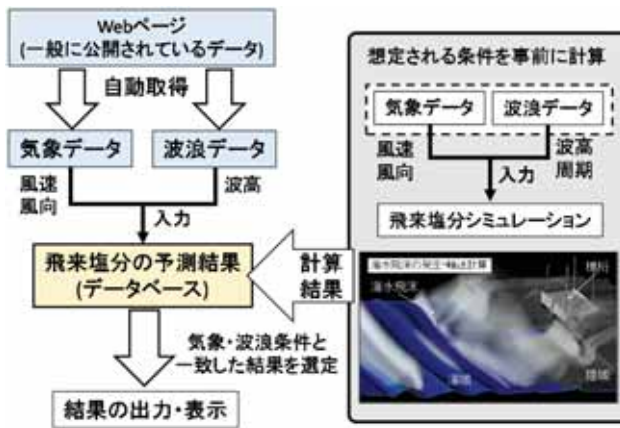


図-17 飛来塩分の自動予測システムの構成



図-18 システムの予測結果出力画面の構成

ることで、各時間の飛来塩分量を自動的に予測できる構成とした。飛来塩分の予測は、風・波・飛来塩分の予測モデルを用いた。ただし、このモデルによる計算では、計算時間が膨大に必要であり、リアルタイムでの予測が物理的に不可能である。そのため、図の灰色の部分で示すように、想定される気象・波浪条件での飛来塩分の計算を事前に実施し、その結果からデータベースを作成することで、予測計算に必要な時間を数秒程度に短縮した。

(2) 自動予測システムの構築方法

a) 気象・波浪データの自動取得

web上で気象・波浪データを自動で取得するシステムの開発を行った。取得するデータは、風速・風向・降雨量および波高・周期である。

気象データとなる風速・風向・降雨量は、気象庁のアメダス、Weather Hacks等のwebサイトから取得することとした。波浪データとなる波高・周期は、国土交通省港湾局が公開している全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)から取得した。

データの取得方法は、データが公開されているwebサイトにアクセスし、Html形式のデータをXml形式に変換後、使用しているPC内にデータを保存する方法とした。このような処理を任意の時間に到達したときに実行することで、各時間の気象・波浪データを自動で取得することが可能となる。

b) 飛来塩分の予測結果のデータベースの作成

データベースは、対象とする構造物に作用する気象・波浪条件を整理し、そのケースを対象に気象・波浪・飛来塩分の予測計算を事前に実施し、その結果から作成した。各計算結果は、風速・風向・波高の条件でファイル名を整理し、自動取得した風速・風向・波高データの条件と一致するデータを抽出するように設定した。また、風および飛来塩分の空間分布の静止画を事前に作成し、同様の方法で抽出できるようにしている。

c) 予測結果の出力・表示

データベースから抽出した結果は、アプリケーションの画面上に出力・表示し、任意の時間で自動更新する設定とした。図-18に構築した自動予測システムの出力画面を示す。図の機能①は、取得した気象・波浪データを表示する部分である。気象庁およびNOWPHASのweb上での最新のデータの更新は30分後となるため、1時間前のデータで処理・表示を行った。図の②は、飛来塩分の予測結果のデータベースから取得した各観測地点の飛来塩分量を表示する部分である。図の③および④はデータベースから取得した飛来塩分と風の空間分布の静止画を表示させる部分である。

d) 各処理の統合

各処理およびそれらを統合したアプリケーションをMicrosoft Visual Studio 2013およびプログラム言語Visual C#を用いて作成し、任意に設定した時間および時間間隔で実行するようなシステムを構築した。任意の時間の設定には、C#のタイマー機能を利用した。

(3) 構築したシステムの実構造物への適用性の検証

a) 対象とした実構造物および予測期間

対象とした構造物は、これまで現地観測および予測計算を実施してきた新潟県上越地方の実橋梁とした。予測期間は、現地観測を実施した2月18日8時～19日8時までの24時間である。

b) 飛来塩分の予測結果のデータベースの構築条件

予測結果のデータベースの構築に必要な気象・波浪データは、対象とした橋梁に隣接する気象庁の観測点の1時間間隔のデータ、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の20分間隔のデータを取得した。飛来塩分の予測結果のデータベースは、風速が1～20m/s、風向が西南西、西、西北西、北西、北北西、波高が1～4mの条件で計算を実施し、その結果を整理して作成した。

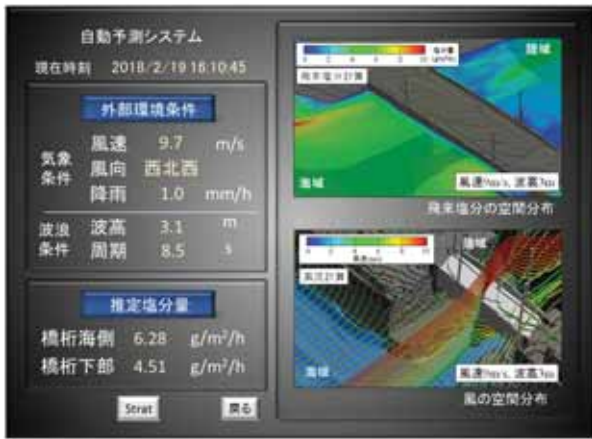


図-19 自動予測システムの実行時の結果

(4) 自動予測技術による飛来塩分量の予測結果

a) 構築したシステムの実行結果

構築した自動予測システムの実行時の状況を示した結果を図-19に示す。図は2018年2月18日14～16時の現地観測の状況を再現した結果である。図より、気象・波浪条件の取得結果が表示されており、それに応じた橋桁の海側と橋桁下の飛来塩分量の予測結果が示されている。図の右側には、この時の気象・波浪条件に応じた飛来塩分の空間分布が表示されている。

b) 自動予測システムの予測結果の検証

現地観測を実施した2月18日8時～19日8時の期間の予測結果を図-20に示す。図の折れ線グラフは、風速の観測結果と予測結果を比較したものである。予測に用いた気象庁の観測点は、海岸から0.5km程度離れた位置にあり、周辺地形や障害物の影響で海岸近傍と比較して風速が低下していると考えられるため、今回の検討では気象庁の観測結果を2.1倍に補正した値を用いた。また、2月18日22時～19日2時の間では、風が陸風となっているため、風速の予測結果は表示していない。図に示すように、風速の予測結果は、2月18日10時と16時で観測結果と差が見られるが、全体的な傾向は再現できている。2月19日4時以降では、現地観測では海風であったが、気象庁から取得した風向データは陸風となっていた。

図の棒グラフは、飛来塩分量の予測結果と観測結果の比較を示したものである。図に示すように、海域からの風が卓越している2月18日8～20時の期間では、予測結果は、飛来塩分量の観測結果を概ね再現できている。18日8時の結果は、予測結果のほうが過大となっているが、これは設定した波浪条件を1m間隔で区分していることにより、実際は波高3.5mを4.0mとして扱っているためである。2月18日16～18時で飛来塩分量の予測結果が過小に示されているが、これは気象庁から取得した風速が観測結果より小さいためである。

これらの結果から、自動予測システムは実構造物に適

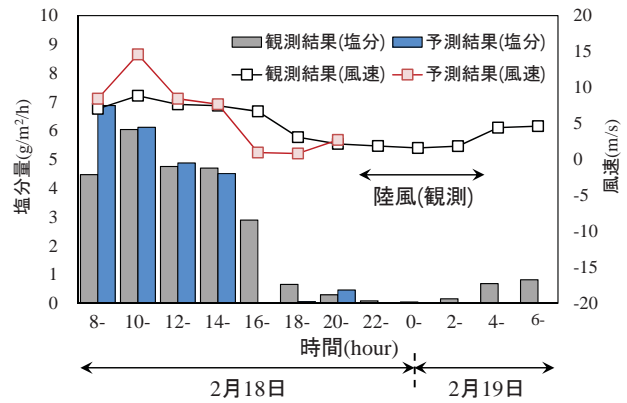


図-20 システムの予測結果と観測結果の比較

用することが十分に可能であり、対象地点の状況を正確に再現しているような風速・風向・波高データを取得することが重要であることが確認された。

4. 結論

本研究では、気象・波浪条件に応じた飛来塩分の変動を把握するために現地観測を実施したとともに、飛来塩分を自動で予測できる自動予測システムの開発を行った。その結果、気象・波浪作用に応じた飛来塩分量の時間的な変動を確認でき、予測モデルにより実構造物周辺の気象・波浪作用と飛来塩分量の時間・空間的な変動を予測できることが明らかになった。さらに、気象・波浪作用に応じた飛来塩分を自動的に予測できる自動予測システムを開発できたとともに、予測結果と観測結果の比較から実構造物に適用可能であることが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp.172-173，2013
- 2) 国土交通省港湾局：全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS:Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours)，<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 3) 村上和男，加藤一正，清水勝義，福田真人，宮城啓司：砕波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査，海岸工学論文集，第39巻，pp.046-1050.，1992
- 4) 仲座栄三，津嘉山正光，山路功祐，日野幹雄：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，No.2，pp.1036-1040，1993
- 5) 領域気象モデル(Weather Research & Forecasting Model)：<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
- 6) 中村文則，大原涼平，井野裕輝，山口貴幸，下村匠：構造物周辺の地形・風況・飛来塩分の詳細調査とその予測技術の確立，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集，第17巻，pp.615-620，2017.10