

新潟県沿岸部を対象とした飛来塩分量推定手法の構築

報告書

新潟大学 佐伯竜彦

1. はじめに

新潟県沿岸部は厳しい塩害環境下にあることが知られており、新設建造物の適切な耐久性設計、既設建造物の合理的な維持管理には、飛来塩分量を正確に把握する必要がある。しかしながら、飛来塩分量は局所的な環境条件（気象条件、周辺地形など）の影響を強く受けるため、地点ごとの飛来塩分量を正確に推定する手法は未だ構築されていない。

申請者らは、これまでの研究によって風速の二乗の積算値によって各地点の飛来塩分量を推定できることを確かめている。しかし、AMeDAS の風況データを用いても精度の良い飛来塩分量推定ができない地点があることも確認されており、AMeDAS 観測所から離れた地点では、他の方法で当該地点の風況を把握する必要があることがわかった。そこで本研究では、MSM（メソ数値予報モデル）のデータにより当該地点の風況データを用いて飛来塩分量の高精度な推定を行った。

さらに、周辺地形や家屋・植生などの定量化し難い要因の影響を機械学習により推定手法に取り込みむことにより局所環境の影響を考慮できる推定手法を構築し、新潟県沿岸部各地点の飛来塩分量マップを作成した。

2. データ取得と処理の概要

（1）飛来塩分量データ

①シリーズⅠ

新潟県沿岸部の 15 地点において、1992 年 9 月～1995 年 3 月の間で行われた、土研式塩分捕集器で毎月の飛来塩分量を調査データ¹⁾に、新潟県が 2002 年 3 月～2004 年 3 月の間で佐渡において実施した調査データ²⁾を加えシリーズⅠとした(図 1 参照)。

②シリーズⅡ

日本全国の計 101 地点(図 2 参照)で 2016 年 11 月～2017 年 4 月の間で行われた薄板モルタル供試体の暴露試験の結果³⁾を使用した。この暴露試験で測定されたのは、薄板モルタル供試体中の塩化物イオン濃度であるが、供試体中の塩化物イオン量を下式によって飛来塩分量に換算した³⁾。

$$C_{ab} = 0.48C_m$$

ここで, C_{ab} :飛来塩分量(mdd), C_m :水セメント比 60%の薄板モルタル供試体の塩化物イオン濃度(kg/m²)である.

なお本研究では, 飛来塩分量データは全て 100cm²(=1dm²)あたりに供給された塩化ナトリウム質量(mg/dm²)として整理している.

③シリーズⅢ

1984 年 12 月~1987 年 11 月にかけて旧建設省によって全国 266 地点で行われた土研式塩分捕集器による月ごとの飛来塩分量調査の結果⁴⁾を使用した. ただし, 調査当時の正確な地形状況の把握が困難であるため, 資料中に記載された調査地点の名称や離岸距離の数値から, 調査地点の正確な所在が現在確認できないもの(解体された橋梁や名称が変更された地点も含める), 土地開発などによって当時と海岸形状や土地環境が大きく変化していると考えられるものは除外することとした. 除外データ以外の 108 地点分(図 3 参照)のデータをシリーズⅢとし, 当時と地形が大きく変化していないものと仮定して, 地形データは現在のものを使用することとした.



図 1 飛来塩分量調査地点(シリーズⅠ)

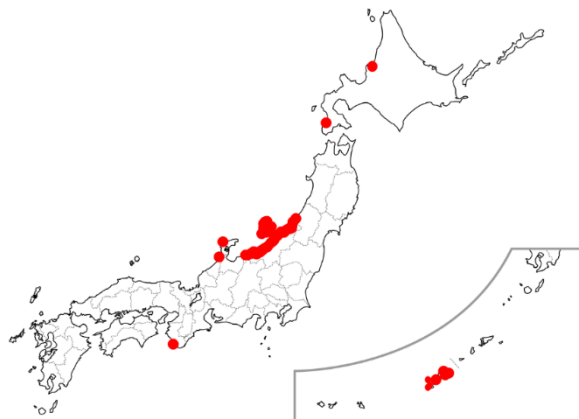


図 2 飛来塩分量調査地点(シリーズⅡ)

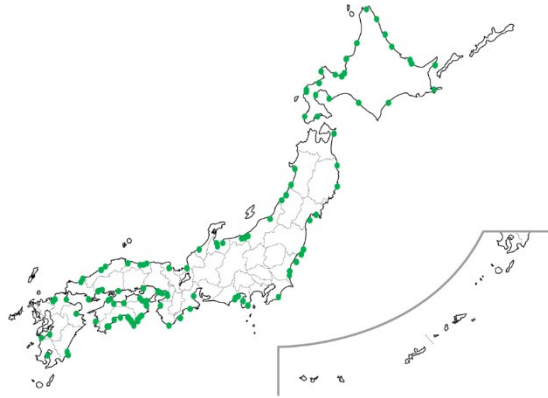


図3 飛来塩分量調査地点(シリーズⅢ)

(2) 風データ

本研究では, AMeDAS の風況観測地点が約 21 km 間隔であるために採集地点によっては観測地と距離が離れすぎてしまい風況が異なると考えられることから, MSM の風況データを用いている. 風況データについては, 飛来塩分調査期間における一時間ごとの風向・風況データを取りだし, 海側からの風のみを集計した.

さらに, 得られた風況データに対して, 以下の補正を行った.

①標高補正

MSM が地表面から高さ 10m 地点の風速であるのに対して, 飛来塩分捕集装置の設置高さは設置橋梁や場所の都合により様々である. 風速の鉛直分布が地表面からの高さによって対数的に変化することを考慮すると, MSM 風速を捕集地点の高さのものに補正する必要があることから対数則を用いて補正を行った. 補正に用いた計算式を式(1)に示す.

$$U_H = U_{MSM} \frac{\ln(\frac{H}{Z_0})}{\ln(\frac{H_2}{Z_0})} \quad \dots\dots (1)$$

ここで, U_H : 地表面からの高さ H (m) での風速(目的地点の風速), U_{MSM} : MSM 風速, Z_0 : 地表面粗度(m), H_2 : 2 地点の標高差+10(m)である.

②目的地点周囲の MSM 格子点 4 点での加重平均による補正

目的地点の風況を再現するに当たって, 最短距離にある MSM 格子点データは効果的であるが, 2 地点間に局所的な地形変化がある場合には, 風況が異なる可能性がある. また, 大気は流体であるため, 周囲の風の流れが互いに影響し合っていることから, 1 格子点のデータのみでは周辺環境の影響を十分に考慮できていないと考え, 最短距離以外の 3 格子点のデータ

も使用して距離による重み付けを行った. 使用した重み付き平均は以下の式の通りである.

$$U_H = \frac{\sum_{i=1}^4 U_{Hi} \omega_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \quad \dots\dots (2)$$

ここで, U_H : 目的地点での風速, U_{Hi} : 標高補正を行った MSM 格子点での風速, ω_i : 重みである.

目的地点と格子点との距離が近いほど目的地点の風況の影響が強くなるはずなので, 重みを目的地点と格子点との距離 (1_i) の逆数とすると, 目的地点での風速は式(1), 式(2) より次のように表される(式(3)).

$$U_H = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{L_i} U_{MSMi} \frac{\ln(\frac{H}{Z_{MSM0i}}) \ln(\frac{H}{Z_0})}{\ln(\frac{H_{MSMi}}{Z_{MSM0i}}) \ln(\frac{H}{Z_{MSM0i}})}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{L_i}} \quad \dots\dots (3)$$

③ 閾値の設定と風向による補正

田村らは, 飛来塩分の発生する風速の閾値を 4m/s に設定した. また, 風速の二乗の積算値を求める際に, 同風速においても風向によって単位面積当たりの飛来塩分量が変化すると考え, 次の式を用いて補正を行っている⁵⁾.

$$v_i'^2 = v_i^2 \cos \theta_i \quad \dots\dots (4)$$

ここで, $v_i'^2$: 角度補正した風速の二乗 (m^2/s^2), v_i^2 : 1 時間ごとの平均風速の二乗 (m^2/s^2), θ_i : 1 時間ごとの平均風向と捕集器具のなす角度

本研究においても, この研究に倣って閾値を 4m/s とし, 式(3-5)によって風向による補正を行った.

(3) 地形データ

説明変数として用いる汀線までの距離, 消波施設までの距離, 障害物による遮蔽率, 標高補正の際に使用する地点標高は GoogleEarth の距離測定機能, 標高データを利用した. 汀線までの距離を求める際は, 波跡の位置までで計測するものとし, 干満による汀線位置の変化については, 経時変化の把握が困難であることから今回は考慮していない⁵⁾.

(4) 降水データの取得と処理

MSM データから取得した時間降水量を風速と同様に周囲 4 点の加重平均を求め, 目的地点の時間降水量とした. また, 極めて少量の降水では海水飛沫の沈降や付着塩分の洗い流しは発生しないと思われるので, 今回は 0.1 mm/h を閾値とした. この閾値以上の時間降水量が見られた場合のみをカウントし, 総和を降水量, 回数を降水時間とした.

(5) 使用した機械学習アルゴリズム

本研究では、機械学習アルゴリズムに LightGBM を使用した。この手法は、決定木アルゴリズムに基づいた勾配ブースティングの一種であり、Leaf-wise による葉の分岐とヒストグラム化による分岐点の決定によって、勾配ブースティングの利点である予測精度の高さを保ったまま、弱点であった計算時間の長さを削減できるという特徴を持っている。また、今回は使用できるデータ数が少ないことを考慮し、全データから 1 データずつテストデータとしていく Leave-one-out 交差検証を採用した。

3. 飛来塩分量推定手法の構築

(1) 風データの補正

シリーズ I および II における調査地点は 7 割以上が新潟県内のものであることから、補正計算の有効性を新潟県内の AMeDAS 観測点のうち風況データを取得できる全 28 地点において AMeDAS データと MSM データとの比較を行うことによって検証した。AMeDAS データから求めた 4m/s 以上の風速の二乗の積算値と MSM データから求めた 4m/s 以上の風速の二乗の積算値との相関係数は補正前が 0.35, 補正後は 0.51 となった。相関係数が向上していることから、少なくとも新潟県内においては補正計算が風の精度が改善に有効的に働くことが確認された。このことから、飛来塩分量の予測精度も向上することが期待されたが、図 4、図 5 に示す通り精度はほとんど変化していない。しかし、新潟県のデータのみでの比較については(図 6、図 7)精度が向上している。この原因としては、現地状況の把握しやすい新潟県(本研究室において行われた先行研究や本研究を行うに当たって実施した村上市での現地調査など)に対して、その他の県は調査地点の詳細な情報を把握しきれず、地表面高さを仮定して補正計算を行ったために、補正がうまく機能しなかった可能性が考えられる。機械学習に使用したパラメーターは 4m/s 以上の風速の二乗の積算値、汀線からの距離、消波施設までの距離、遮蔽率の 4 つである。

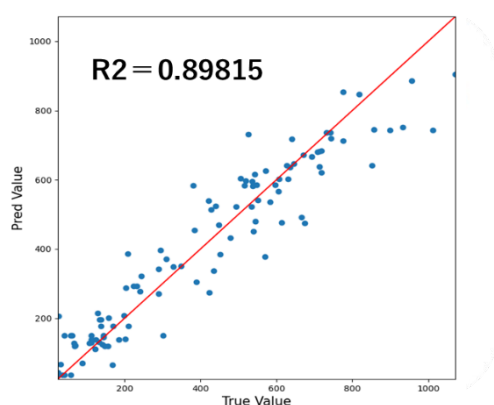


図 4 機械学習結果(風速補正前)

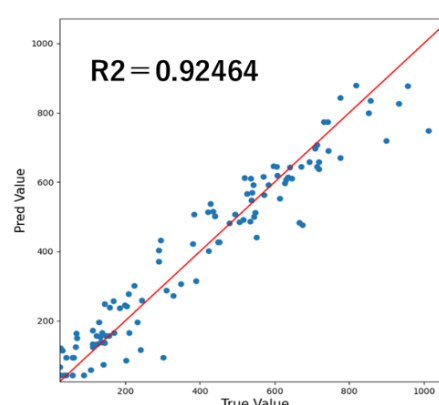


図 5 機械学習結果(風速補正後)

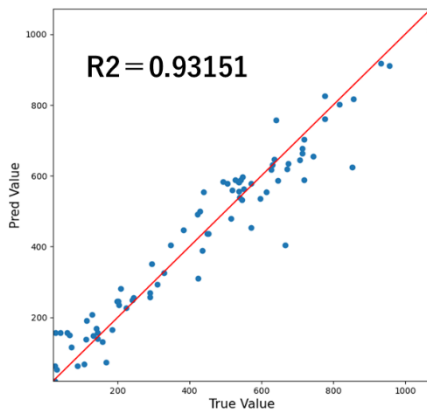


図 6 機械学習結果(風速補正前, 新潟県)

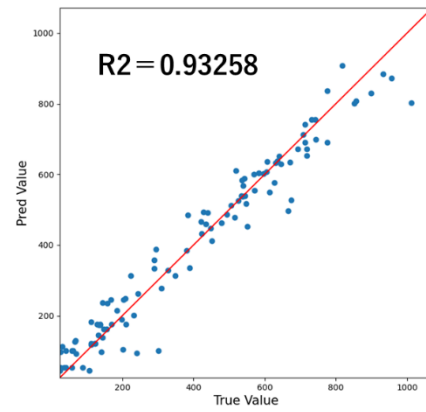


図 7 機械学習結果(風速補正後, 新潟県)

(2) 降水データの考慮

降水による海水飛沫の沈降や付着塩分の洗い流しの影響を考慮し, (1) で使用した機械学習のパラメーターに降水データを追加した. 図 8, 図 9 は調査期間内の総降水量と降水時間を追加した際の学習結果と SHAP 値である. SHAP 値の傾向は, 降水量は多いほど, 降水時間は短いほど飛来塩分量が多くなることを示している. 降水量については妥当な傾向と言えるが, 降水時間は予想とは真逆の傾向を示した. そこで, 降水量と降水時間から降水時間 1 時間当たりの平均降水量を求めパラメーターとして使用した. 学習結果と SHAP 値は図 10, 図 11 に示す通りで, SHAP 値は 1 時間当たりの平均降水量が多いほど飛来塩分量が多くなる傾向を示している. 時間降水量, 降水時間, 1 時間当たりの平均降水量の SHAP 値の傾向を合わせて考えると, 降水による海水飛沫の沈降や付着塩分の洗い流しは, ある一定以上の降水によって生じるものと考えられる. 精度に関しては図 4 と比較して図 8, 図 10 のどちらの場合についても精度が同程度で向上しているため, 降水データの使用は飛来塩分量の予測精度向上に有効だと言える. 特に, SHAP 値の傾向も併せて考えると 1 時間当たりの平均降水量を使用の方が適切に評価できると考えられる.

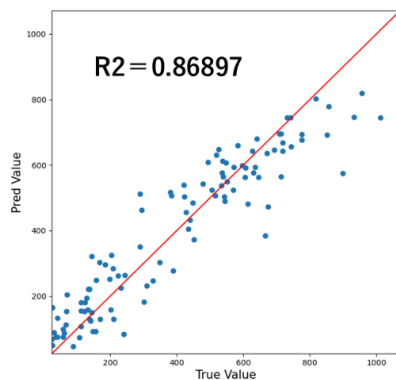


図 8 機械学習結果(降水量, 降水時間追加)

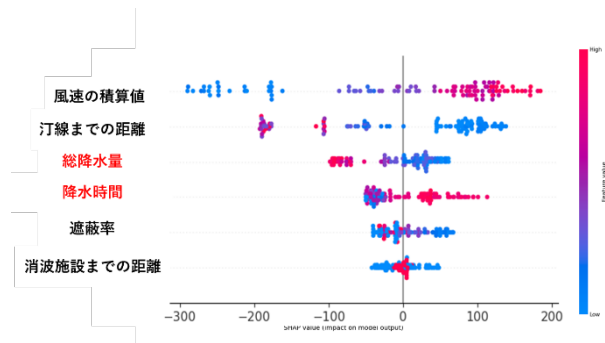


図 9 SHAP 値(降水量, 降水時間追加)

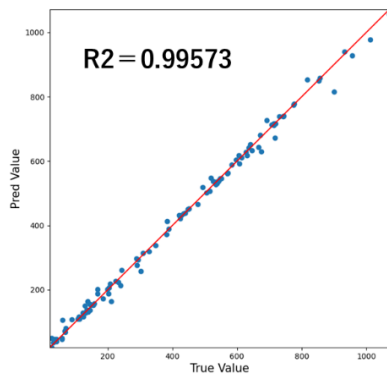


図 10 機械学習結果(降水時間 1 時間
当たりの平均降水量を追加)

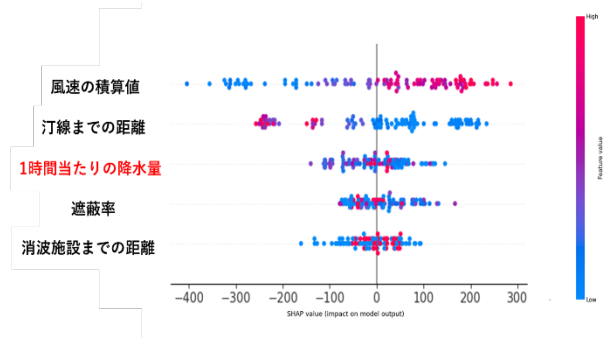


図 11 SHAP 値(降水時間 1 時間
当たりの平均降水量を追加)

(3) 学習データの追加

2. (1)③示した旧建設省による飛来塩分量全国調査⁴⁾のうち GoogleEarth にて地点が正確に確認できた 100 地点を追加の学習データとして使用した. 機械学習に使用したパラメータは (2) と同様のものを使用した. 追加前の 108 地点と比較すると倍近いデータ数で学習させることが出来るようになっているが, 図 4 と図 12 の比較から分かるように, データを追加しての学習はかえって精度が落ちる結果となった. 図 1~3 で追加前後の調査地点分布を確認すると, 追加前は新潟を中心にはほぼすべての地点が日本海側に位置しているのに対して, 追加後は太平洋側や瀬戸内海側に位置する地点が大幅に増えていることが分かる. 精度の低下は, 属する気候区分の異なるデータを学習に用いたためと考えられる. 宇田らの提案した飛来塩分量の推定式においても, 係数が日本海側と太平洋側で異なっている⁶⁾.

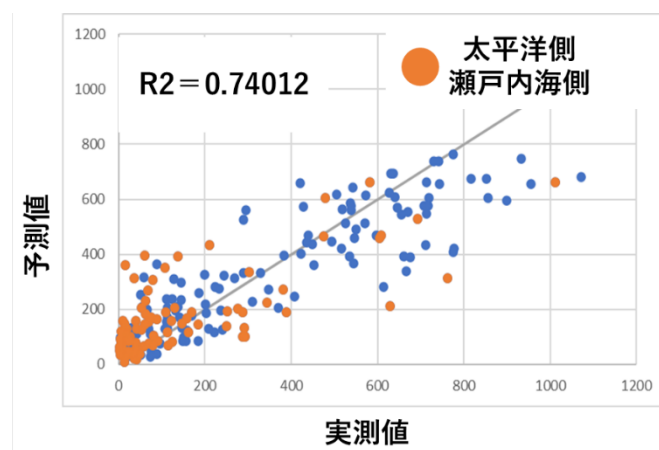
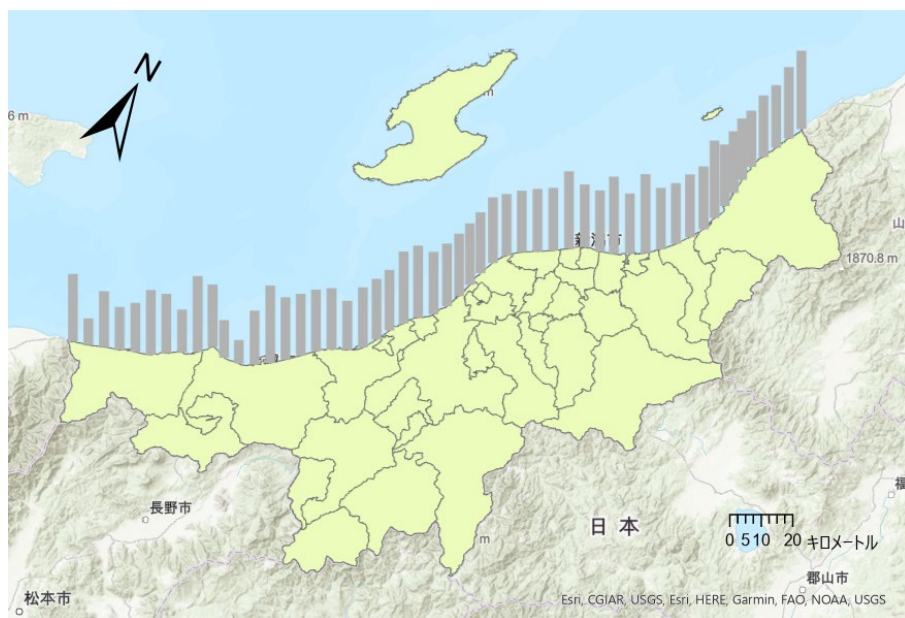


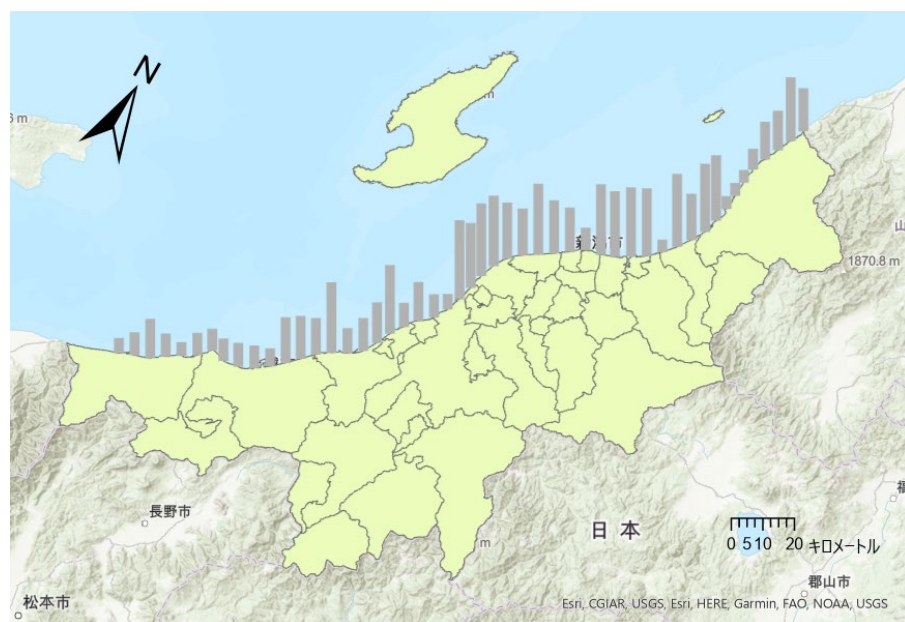
図 12 機械学習結果(地点追加後)

(4) 新潟県沿岸の飛来塩分量マップ

機械学習により新潟県本州側沿岸の飛来塩分量を 5km おきに推定した。結果を図 13 に示す。図より汀線付近では，地点によらずほぼ同等の飛来塩分量になっているが，100m 内陸では，地点によって大きく異なり，周辺地形が影響を及ぼしていると考えられる。



(a) 汀線付近



(b) 汀線から 100m

図 13 新潟県沿岸における飛来塩分量推定結果

4. まとめ

本研究では、機械学習によるメソ視点での飛来塩分量予測精度の向上を目的として、MSMとAMeDASデータの風速誤差の補正計算、降水データを追加パラメーターとすること、訓練データの増加について検討した。本研究により明らかになったことを以下に示す。

- (1) 風の精度は学習結果の向上に繋がると考えられるが、そのためには標高や捕集器具の地表面高さなどといった現地状況を正確に把握する必要がある。
- (2) 1時間当たりの平均降水量は飛来塩分量の予測精度向上に有効である。
- (3) 日本全国のデータを同時に学習データとして用いる場合、異なる気候区分を正確に区別させるためには、風のみでは不十分であるため他のパラメーターの追加について検討する必要がある。

謝 辞

本研究は令和3年度新潟県建設技術センターの研究助成を受けて行ったものである。ここに付記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋 毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 1-20, 2010. 1
- 2) (財)新潟県建設技術センター: 佐渡一周線松ヶ崎バイパス飛来塩分測定業務委託報告書, 2004
- 3) 佐伯竜彦, 富山 潤, 中村文則, 中村亮太, 花岡大伸, 安 琳, 佐々木 巖巖, 遠藤裕丈: 飛来塩分環境下にあるコンクリートの表面塩化物イオン濃度評価式の検討, 土木学会論文集 E2, Vol. 76, No. 2, pp. 98- 108, 2020. 3
- 4) 土木研究所資料, 第 2687 号, 飛来塩分量全国調査(Ⅲ)―調査結果およびデータ集―, 土木研究所資料, 第 2687 号, 1988. 12
- 5) 田村勇斗, 佐伯竜彦, 斎藤 豪: 風況と周辺地形を考慮した飛来塩分量予測手法に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 33 巻, pp. 1-13, 2022.
- 6) 宇多高明, 小俣 篤, 小西正純: 海岸からの飛来塩分量の計算モデル, 海岸工学論文集, Vol. 39, pp. 1051-1055, 1992