

論文 機械学習による屋外暴露試験に供したコンクリートの塩化物イオン浸透予測に関する研究

足立 丞*1・崎原 康平*2・滝 勇太*3・山田 義智*4

要旨: 本研究では、屋外暴露試験に供したコンクリートの塩分浸透に関する既往研究の文献調査を実施し、得られた実験データを機械学習に用いることでコンクリート中の塩化物イオン浸透予測に関する検討を行った。その結果、機械学習による予測値は一部結果を除いて実測値の傾向を概ね捉えることができた。しかし、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度付近の予測値は、実測値との誤差が大きいことが確認された。また、本研究範囲におけるコンクリートの塩分浸透予測に影響を与える特徴量（説明変数）の重要度は、コンクリートの暴露面からの距離、材齢、離岸距離、水セメント比の順に大きいことが示された。

キーワード: 塩害、屋外暴露試験、塩化物イオン、機械学習、ランダムフォレスト

1. はじめに

海岸付近で建設される鉄筋コンクリート構造物は、海から飛来する塩分（以後、飛来塩分と称す）によりコンクリート内部に塩化物イオンが浸透・蓄積すると、コンクリート内部の鉄筋が腐食し、構造物の耐久性が損なわれやすい。そのため、塩化物イオンの浸透・拡散挙動を的確に把握することは、鉄筋コンクリート構造物の耐久設計および耐久診断において重要である。

しかし、コンクリート中への塩化物イオン浸透・拡散挙動は、コンクリートの細孔状態や含水状態等の影響を受けるだけでなく、地域毎の環境条件（風況、離岸距離、防波堤の有無、供試体の設置方向）等も複雑に関係しているため、その浸透・拡散挙動を精度良く予測できる手法の確立には至っていないのが現状である。

一方近年では、AI等の最先端情報技術の活用が注目を集めており、その中でも機械学習は、促進試験や屋外暴露試験により測定したコンクリート中の塩化物イオン濃度分布や環境条件の各データを学習させることで、塩化物イオンの浸透挙動を精度良く予測できる可能性がある。

新垣ら¹⁾は、機械学習の1つであるニューラルネットワークを用いて、様々な環境下におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の予測を検討している。その結果、ニューラルネットワークによる塩化物イオン濃度の予測値は、実測値をよく表すとことを確認している。しかし、ニューラルネットワークは、過学習を起こしやすいことや中間層やユニット数を試行錯誤的に決定しなければならない等の課題も挙げている。

そこで本研究では、既往研究の文献調査で得られた測定データを基に、決定木と比べ過学習が起きにくく、塩

化物イオン予測に影響を与える各要因の重要度を求めることができる機械学習の1つであるランダムフォレスト（Random Forest）²⁾を用いて、コンクリート中の塩化物イオンの浸透予測について検討を行ったので報告する。

2. 学習データの作成とランダムフォレストの概要

2.1 学習データの作成について

機械学習に用いる学習データは、金子ら³⁾が行った既往研究の選定条件を参考に、日本建築学会と日本コンクリート工学会の屋外暴露に関する論文および梗概を中心に調査し、表-1に示す6条件を満たすものとした。

本研究の学習データとして使用した既往文献の概要一覧を表-2に示す。塩害地域における屋外暴露試験の文献数は文献4)~10)の7報であった。屋外暴露試験の地域としては、沖縄県国頭村辺野喜、北海道岩内郡共和町、

表-1 調査対象とした文献の選定条件

①	骨材は海砂を使用していないもの（除塩済みのものを除く）
②	コンクリートの水セメント比は、65%以下のもの
③	全塩化物イオン量を測定しているもの
④	塩化物イオンを浸透面より4cm以上測定しているもの
⑤	1つの条件につき、測定点が深さ方向に4点以上あるもの
⑥	陸上で実施しているもの（飛沫帯、海上および海中は除く）

*1 琉球大学 工学部環境建設工学科 建築コース (学生会員)

*2 琉球大学 工学部工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)構造計画研究所 IoE ビジネス推進部室長 博士(工学)

*4 琉球大学 工学部工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 既往文献の概要

文献 No.	W/C (%)	セメント種類※	暴露環境		測定条件		暴露面方向
			地域	離岸距離 (m)	測定材齢 (日, 年)	測定位置(cm) (暴露面からの距離)	
4)	25, 30, 40, 55	H	新潟県新潟市 関屋分水	20	1, 3 年	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5	陸
5)	50, 60	N, E	沖縄県国頭村辺野喜	40	0.5, 1, 1.5, 3 年	0.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.5, 5.5, 7.5	海, 陸
6)	60	N, E	北海道岩内郡共和町 沖縄県国頭村辺野喜	40	1 年	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5	海
7)	45, 55, 60, 65	N	沖縄県国頭村辺野喜	10, 100, 350	162, 457 日	0.5, 1.5, 2.0, 7.5	海, 陸
8)	60	N	北海道岩内郡共和町	80	1, 3, 5 年	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5	海, 陸
9)	60	N	北海道岩内郡共和町	50, 80, 150	1, 3, 5, 7, 10 年	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5	海
10)	60	N	北海道岩内郡共和町	80	1, 3, 5, 7, 18 年	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5	海

※H：早強ポルトランドセメント，N：普通ポルトランドセメント，E：普通エコセメント

新潟県新潟市関屋分水の3地域であり、いずれも海岸からの距離が近く飛来塩分の多い地域であった。暴露期間は1～3年以内が多く、中には10年や18年といった長期間の暴露試験結果もあった。暴露試験に用いられたセメント種類は普通ポルトランドセメントNと普通エコセメントE、早強ポルトランドセメントHの3種類であり、水セメント比は25%～65%の範囲であった。なお、次節で概説するランダムフォレストで使用した学習データセットは、参考文献4)～10)で抜き取れた値のみを使用しており、全部で587組である。

2.2 ランダムフォレストの概要

ランダムフォレストは、データの特徴量（説明変数）をランダムに選択して決定木を構築する処理を複数回繰り返し、各決定木の推定結果の多数決や平均値により分類や回帰を行う手法である（図-1参照）。以降では、本研究で用いたランダムフォレストのアルゴリズムの詳細について述べる。なお、本研究で使用した特徴量は水セメント比、セメント種類、離岸距離、測定材齢、測定位置、暴露面方向である。

(1) 決定木

決定木とは、図-1に示すようにデータを分割するルールを次々と作成していくことにより、分類や回帰を実行するアルゴリズムである。決定木は、分析結果の解釈が容易である利点を有するが、過学習を起しやすいう点もある。しかし、ランダムフォレストでは複数の決定木から、アンサンブル学習を行うことで過学習の影響を受けにくいという特徴を有する。

(2) k分割交差検証¹¹⁾

交差検証とは、データを学習用とテスト用に分割する

処理を繰り返し、モデルの構築と評価を複数回行う処理である。本研究では、全データをk分割し、k-1個の集合を学習データに、残りの1個の集合をテストデータに使用する処理をk回繰り返すk分割交差検証を採用した（図-2参照）。また、本研究の学習及びテストデータはその種類や内容に関係なくランダムに使用し、データ分割数はk=10として最適な決定木の数や深さを決定した。

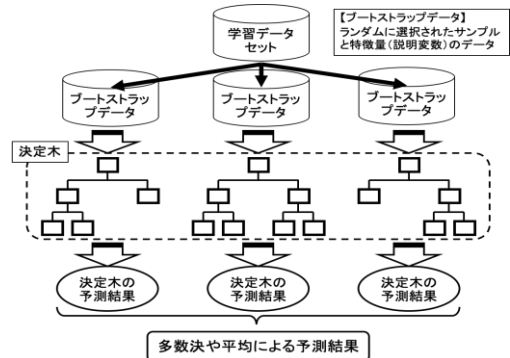


図-1 ランダムフォレストの概念図

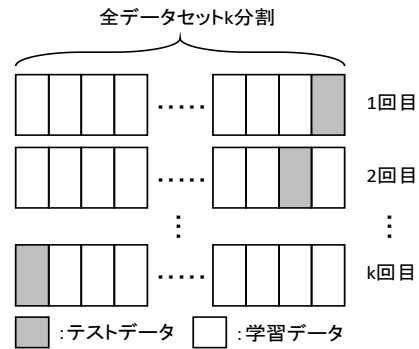


図-2 k分割交差検証

3. 全塩化物イオン濃度の予測結果と考察

3.1 材齢別の比較

図-3 に材齢別における全塩化物イオン濃度の比較を示す。また、同図上段は文献 No.8, 同図下段は文献 No.10 の結果である。なお、同図は材齢以外の離岸距離、水セメント比、セメント種類、暴露面の方向（海側、陸側）の条件は同じである。同図上段より、材齢が増加するにしたがってコンクリート中の全塩化物イオン量の実測値は増加する傾向であった（図-3(a)~(c)参照）。また、同図下段も、上段と同様に材齢が増加するに伴い、コンクリート中の全塩化物イオン量の実測値は増加する傾向を表していた（図-3(d)~(f)参照）。一方、予測値は材齢の違いに関わらず実測値と比較して良好であることがわかった。しかし、図-3(f)の材齢が18年の結果を見ると、表面からの距離が約0.5cmの予測値は同位置の実測値と比較し全塩化物イオン量の値が大きく乖離する結果となった。これは、本研究の文献調査の範囲内では機械学習に用いた10年以上の学習データが少ないためと考えられる。

3.2 離岸距離別の比較

図-4 に離岸距離別における全塩化物イオン濃度の比較を示す。また、同図上段は文献 No.9, 同図下段は文献 No.7 の結果である。同図上段の結果から、離岸距離の増加に関わらずコンクリート内部に浸透する全塩化物イオン量の実測値は同程度であった（図-4(a)~(c)参照）。この理由として、同図上段の結果は、海岸とコンクリート供試体の間に飛来塩分を遮蔽する建築物等が少ないため、離岸距離が離れても実測値が減少する傾向を示さなかつ

たと考えられる。また、同図上段の予測値は実測値と同様の傾向を示していた。一方、同図下段の結果では、海岸と供試体の間に飛来塩分を遮蔽する建築物等が多いため、離岸距離が大きくなるにつれコンクリート中の全塩化物イオン量の実測値は減少する傾向を示していた。しかし、予測値は離岸距離が大きくなるにつれ増加し実測値と逆の傾向であった。この理由として、沖縄県辺野喜暴露場以外の暴露場は、海岸と供試体の間に飛来塩分を遮蔽する建物が無かったことや建築物等の有無を特徴量として機械学習に考慮していないことが考えられる。

3.3 水セメント比別の比較

図-5 に水セメント比別における全塩化物イオン濃度の比較を示す。また、同図上段は文献 No.4, 同図下段は文献 No.7 の結果である。同図上段の結果から、実測値は水セメント比の違いに関わらずどれも同程度であった。この理由として、材齢が1年以下と短いためと考えられる。予測値は、コンクリート表面付近が低く予測されているものの全体的に実測値の傾向を捉えられている（図-5(a)~(c)参照）。同図下段の結果に着目すると、実測値は同図上段の結果と同様に水セメント比の違いによらず同程度の結果となった。しかし、図-5(e)(f)の予測値はコンクリート表面付近においてばらつきが確認された。この原因については究明できておらず今後の課題である。

3.4 セメント種類別の比較

図-6 にセメント種類別における全塩化物イオン濃度の比較を示す。実測値において普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを比較すると早強ポルト

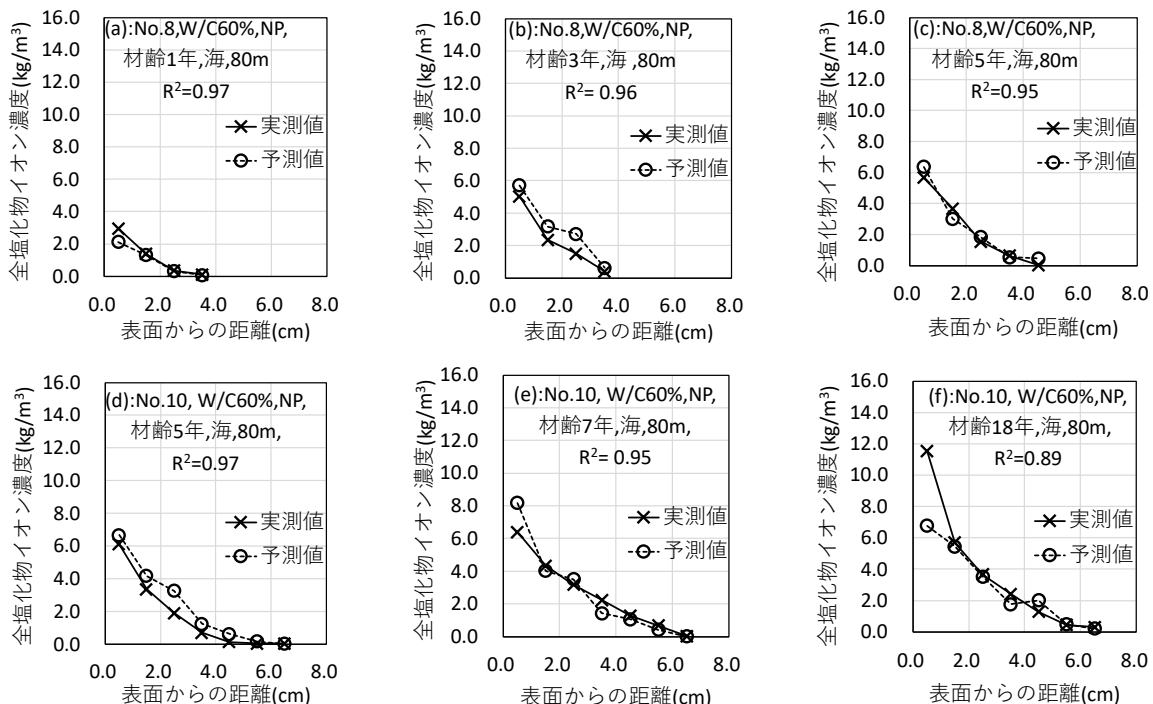


図-3 材齢別における全塩化物イオン濃度比較（上段：文献 No. 8, 下段：文献 No. 10）

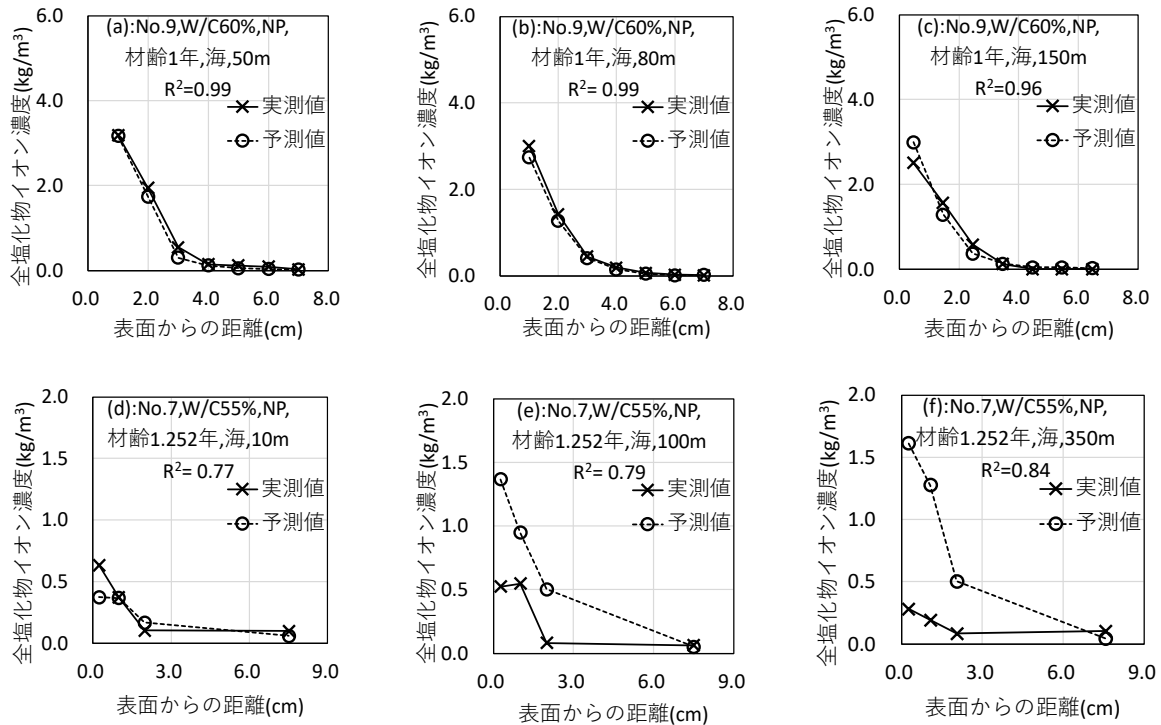


図-4 離岸距離別における全塩化物イオン濃度比較（上段：文献 No. 9，下段：文献 No. 7）

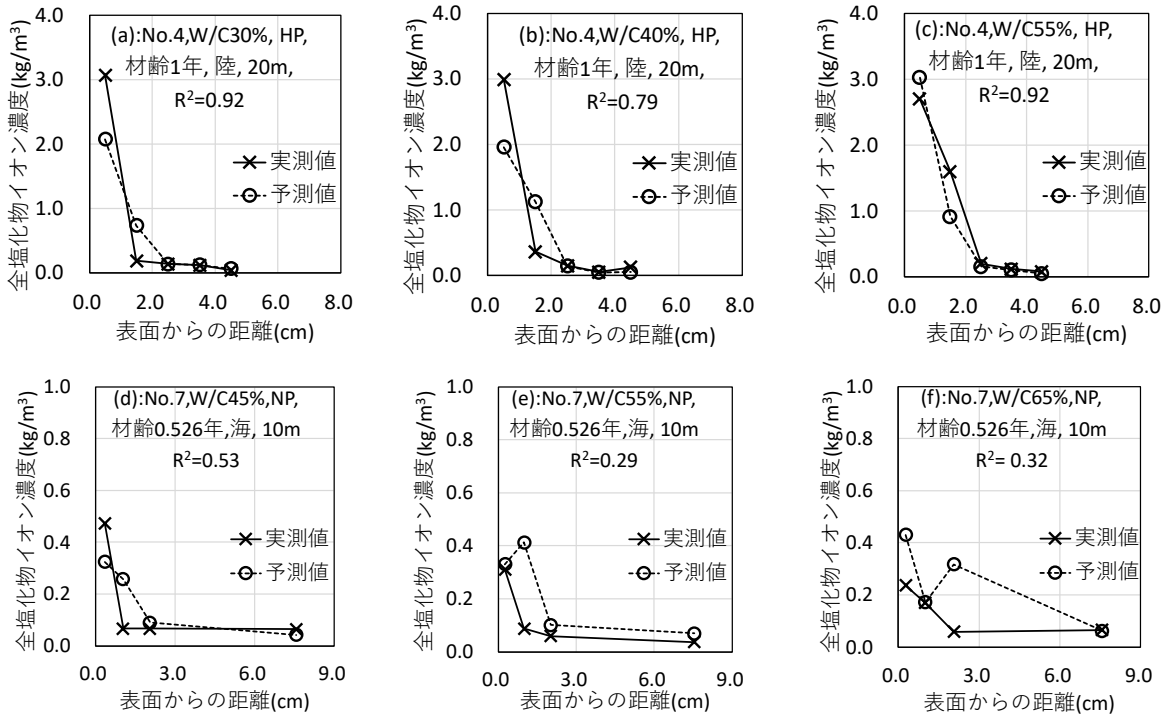


図-5 水セメント比別における全塩化物イオン濃度比較（上段：文献 No. 4，下段：文献 No. 7）

ランドセメントのほうが高い結果となった。また、普通ポルトランドセメントと普通エコセメントを比較すると実測値は同程度であった。予測値は、全体的な実測値の傾向を捉えることができた。しかし同図の比較においては、水セメント比や離岸距離の条件が異なるため、セメント種類がコンクリートの遮塩性に与える影響については、今後学習データを増やして詳細な検討が必要である。

3.5 暴露面の方向別比較

図-7 に暴露面の方向別における全塩化物イオン濃度の比較を示す。また、同図上段は海側方向、同図下段は陸側方向の結果である。同図より、暴露面からコンクリート中に浸透する全塩化物イオン量の実測値は海側方向が陸側方向に比べ大きくなる傾向があった。一方、予測値に着目すると海側方向は実測値の傾向を捉え良好であ

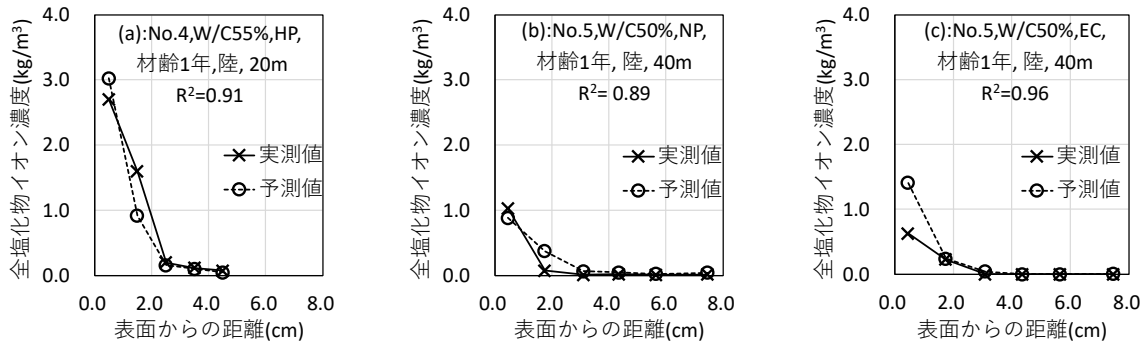


図-6 セメント種類別における全塩化物イオン濃度比較 (左: 文献 No. 4, 中・右: 文献 No. 5)

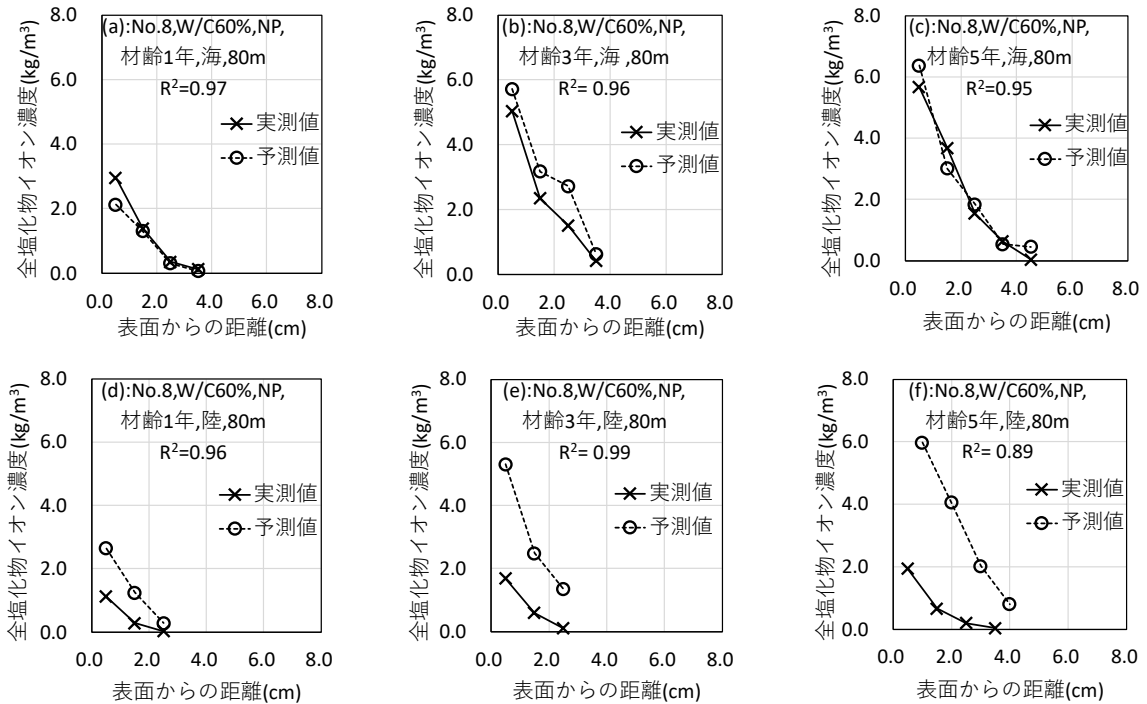


図-7 暴露面の方向別における全塩化物イオン濃度比較 (文献 No. 8)

った。しかし、陸側方向の結果は予測値がどれも実測値より大きく表れる結果となった。この理由として、本研究で用いたデータは海側方向と比較して陸側方向の学習データが少ないためと考えられる。なお、図-6 の陸方向別のデータの予測値の精度が高い理由は、セメント種類や離岸距離の違いなどが影響していると考えられる。

3.6 予測値の精度検証および特徴量の重要度について

図-8 に実測値と予測値の精度比較を示す。同図より、機械学習による推定結果は、実測した全塩化物イオンが 10kg/m^3 以上の場合に予測精度が若干低いものの、全体的に実測値の傾向をよく捉えており、決定係数も 0.74 と高い数値であった (図-8(a)参照)。しかし、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度付近 (1.2kg/m^3 程度) では、数値のばらつきが大きくなり実測値の傾向を捉えることができず決定係数も 0.51 と低い値であった (図-8(b)参照)。これは、学習データが少ないことや飛来塩分が遮蔽されることによる影響の有無が考えられるため、

今後、更なる学習データの収集や予測結果に影響を与える可能性がある説明変数の追加等を行うことにより予測精度の向上を図る予定である。

図-9 に機械学習による特徴量 (説明変数) の重要度を示す。ここで、特徴量の重要度とは、どの特徴量が予測に対して相対的に重要なのかを示す指標であり、0 以上 1 以下で表される。同図より、特徴量の重要度は、暴露面からの距離が 0.57 と最も高く、その次に材齢が 0.37 であった。一方、離岸距離と水セメント比については、それぞれ 0.03 と 0.01 と重要度が低い。一般的に、離岸距離と飛来塩分に相関があることや、水セメント比の違いが塩化物イオンの浸透挙動に影響を与えることが知られている。また、本研究の離岸距離と水セメント比の重要度が低い理由として、前述したコンクリートの材齢や飛来塩分が遮蔽されることによる影響などが考えられるため、今後は、上記を考慮した学習データや風況および降雨量等の説明変数の追加し、詳細な検討を行う予定である。

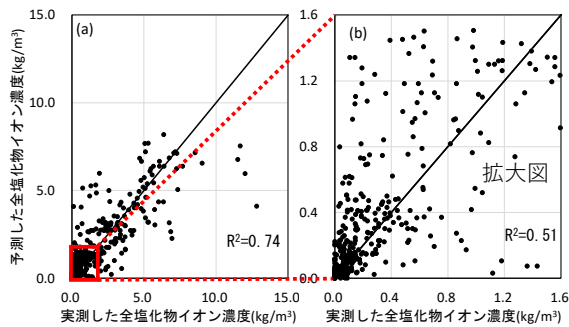


図-8 実測値および予測値の精度比較

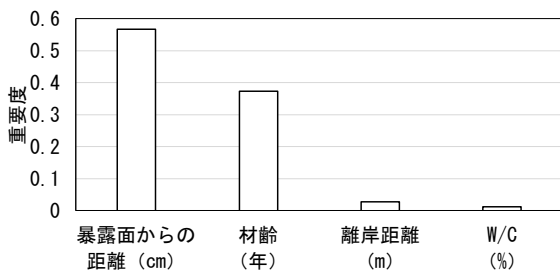


図-9 特徴量（説明変数）の重要度

なお本稿では、既往研究の文献調査で得られた学習データを用いて構築した機械学習の有用性を検討したが、その学習データ数は多くないため、今後はより多くのデータを収集し、未学習データによる機械学習の有用性の検討を行いたい。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 機械学習の1つであるランダムフォレストを用いて、コンクリート中の全塩化物イオン濃度を予測した結果、予測値は実測値と比較して、一部結果を除いて傾向を捉えることが確認された。
- (2) 実測値と予測値の精度を比較した結果、全体的には良好な予測であったが、腐食発生限界塩化物イオン濃度付近 (1.2kg/m^3 程度) の予測値は、ばらつきがあり、その精度は低い結果であった。今後、予測精度を向上させるには、学習データの収集や予測結果に影響を与える説明変数の追加等が必要である。
- (3) 本研究における学習データの範囲では、コンクリート暴露面からの距離と材齢の特徴量の重要度が高く、全塩化物イオン濃度予測に与える影響が大きいことが確認された。一方、水セメント比と離岸距離の特徴量の重要度が低い理由として、水セメント比ではコンクリートの材齢、離岸距離では建物による飛来塩分の遮蔽の影響等が考えられる。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費（若手研究）「人工知能を応用した塩害環境評価システムの開発」（研究代表者：崎原康平，課題番号：18K13871）の一環として行ったものである。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 新垣貴裕，山田義智，大城武，榊田佳寛：ニューラルネットワークによるコンクリート中への塩分浸透の予測，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.257-262，1998.7
- 2) Breiman, Leo: Random Forests, Machine Learning 45 (1): pp. 3-5, 2001.
- 3) 金子樹，阿部道彦，榊田佳寛：促進および屋外暴露環境におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散に関する考察，日本建築学会構造系論文集，Vol.81，No.722，pp.643-653，2016.4
- 4) 田中良樹，藤田学，河野広隆，渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.517-522，2001.7
- 5) 徳村忠太，山田義智：エコセメントを用いたコンクリートの塩害環境下における塩化物イオン浸透特性に関する実験的研究，日本建築学会九州支部研究報告，No.48，pp.145-148，2009.3
- 6) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇，高橋英孝：エコセメントを用いたコンクリートの遮塩性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1039-1044，2009.7
- 7) 掛川勝，榊田佳寛，大城武，清水昭之，鹿毛忠継，伊部博：飛来塩分とコンクリートへの塩分浸透に関する調査，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.147-148，1994.9
- 8) 金谷光秀，榊田佳寛，阿部道彦，西山直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.747-752，1996.7
- 9) 竹田祐二，榊田佳寛，中村成春：海岸地域におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.609-614，2002.7
- 10) 森本悠，榊田佳寛，杉山央，李榮蘭：海岸地域におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透挙動，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.583-584，2011.8
- 11) Kohavi Ron: A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection, Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol.2, No.12, pp.1137-1143, 1995.