

## 論文 機械学習によるコンクリート構造物の塩害劣化予測に関する研究

吉見 映輝\*1・富山 潤\*2・須田 裕哉\*3

**要旨:** 進展期までのコンクリート構造物内の鉄筋の腐食状態を外観から把握することは困難である。そこで、本研究では、環境作用、建設位置、構造物特性(W/C, かぶり, ひび割れの有無等)といった入手可能なデータを用いて、機械学習により腐食発生時期、腐食ひび割れ発生時期の推定が可能か検討し、本検討の範囲内において良い結果を得た。ただし、学習モデル構築に必要な十分かつ適切な学習データを既往の調査や研究から得ることが困難であったため、本研究ではコンクリート構造物の長期性能照査支援ソフトウェア(LECCA)を用い、各種条件を変えた入・出力値を学習データに採用した。実データでの検証が今後の課題である。

**キーワード:** ランダムフォレスト, 飛来塩分, 腐食発生時期, コンクリート構造物, 塩害劣化予測

## 1. はじめに

沖縄県は四方を海に囲まれた島嶼環境であり、海からの多くの飛来塩分が供給され、構造物の塩害が問題となっている。特にコンクリート構造物内の鉄筋の腐食の状態は外観だけでは把握が困難であり、表面にひび割れや錆び汁などの変状が確認された時点では、鉄筋はすでに腐食膨張が進んでいる状態である。環境作用や構造物の設計条件が塩害劣化速度に大きく影響し劣化推定を困難にしている。しかし、予防保全の観点から、構造物の長寿命化を図るためには、表面の変状が表れる前に鉄筋の腐食状況を把握(推定)し、措置することが重要である。

一方で、近年、複雑な回帰問題や分類問題に対して、機械学習など AI 技術の適用に関する研究が盛んに行われ、土木工学の分野においても AI 技術は急速に利用が進んできている<sup>1)</sup>。そこで本研究では、複雑な回帰問題と予想されるコンクリート構造物の鉄筋腐食の予測について機械学習の適用性を検討した。この検討では、環境作用、建設位置、構造物特性(W/C, かぶり, ひび割れの有無など)を入力とした機械学習モデルを構築し、コンクリート構造物の鉄筋腐食開始時期と腐食ひび割れ発生時期を予測対象とした。学習モデルの構築に必要な学習データを既往の調査や研究から十分かつ適切なデータを得ることが困難であったため、本研究では、コンクリート構造物の長期性能照査支援ソフトウェア(LECCA)<sup>2)</sup>を用い、各種条件を変えた入力値および出力値を学習データとした。実データでの検証は今後の課題である。

## 2. LECCA の概要および検討条件(解析条件)

LECCA(Long time Evaluation Program for Concrete Structures by Computational Analysis)は、日本コンクリート工学会「コンクリート構造物の長期性能シミュレーショ

ンソフト作成委員会」で開発されたコンクリート構造物の長期性能支援ソフトウェアである<sup>2)</sup>。LECCA では、塩分浸透、鉄筋腐食、凍害、中性化などの劣化予測が可能である。本稿では、それらのうち本研究で用いた塩分浸透、鉄筋腐食について概略を述べる。

## 2.1 塩害照査

## (1) 諸条件の入力

LECCA では、日本の 154 地点における過去の気象データ(風向・風速・気温・降水量など)が 1991 年から 2000 年までの 10 年間にわたってデータベース化されている。計算対象の地点を選択することにより、塩分浸透の計算に対して風向や風速を反映させることが可能である。関連して、塩分浸透の計算で必要となるセメントの種類、水セメント比、単位セメント量、ならびに単位水量を入力値としている。

## (2) 初期条件の設定

LECCA では、供用初期に含まれる塩分濃度と、後の塩分の拡散計算で必要となる見掛けの拡散係数を初期条件として与える。後者に関しては、実測値や以下の式(1)から得られる値を利用することが可能である。本研究では、式(1)を採用した。

$$\log_{10} D = 3.0(W/C) - 1.8, \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (1)$$

ここに、 $D$  は普通ポルトランドセメントを使用した場合の見掛けの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $W/C$  は水セメント比である。

## (3) 境界条件の設定

LECCA では、塩分浸透の計算を海洋構造物と陸上構造物に分けて初期条件を与える。その定義は、汀線から概ね 10m 以内に立地する場合を海洋構造物、それより離れる場合は陸上構造物にしている。本研究では、検討の第一歩として陸上構造物を対象としているため、以降に

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科博士前期課程 社会基盤デザインプログラム 学士(工学) (学生会員)

\*2 琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース教授 博士(工学) (正会員)

\*3 琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース准教授 博士(工学) (正会員)

は陸上構造物における境界条件について概略を説明する。

コンクリートへ浸透する塩分量を計算するためには、構造物表面に付着する塩分量を後の拡散計算へ境界条件として与える必要がある。LECCA では、計測値をそのまま与える方法と、宇多モデル<sup>3)</sup>により推定する方法のいずれかが選択できる。後者では、以下の考え方で飛来塩分量を推定している。図-1 に宇多モデルの塩分の飛来機構に関する領域区分を示す。

- ・ 塩分飛沫の発生は風速と海水の表面張力に支配されるので、ウェーバー則に従うと考えられる。
- ・ 飛来塩分の移動を①慣性領域、②移流沈降領域、③拡散領域の3つの領域に分類して②と③の境界における飛来塩分量を数理モデルにより計算する。

一方、文献4)では、宇多モデルにおける鉛直方向の飛来塩分濃度の分布の再検討を行って、図-2 に図示したように鉛直方向の距離  $z=4m$  を境界にして移流沈降領域の飛来塩分を求めている。

構造物に到達した飛来塩分は一部が構造物の内部に浸透する。これを考慮するため、以下の式による物理モデル<sup>5)</sup>により実際に浸透する塩分量を計算した。

$$\text{初期条件: } c|_{t=0} = C_{ini} \quad (2)$$

$$\text{境界条件: } \left. \begin{aligned} I_t|_{x=0} = W = \frac{m \cdot k \cdot V_0 \cdot C_{air}}{(V_0 + k \cdot C_{air})} \\ \frac{\partial c}{\partial x}|_{x=end} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $m$  飽和面積率(= $(0.526W/C-7.61)/57.4$ )、 $W/C$  は水セメント比、 $k$  は比例定数、 $V_0$  は単位時間当たりの離脱量( $mg/cm^2/年$ )、 $C_{air}$  は宇多モデルで計算した飛来塩分量( $mg/cm^2 \cdot 年$ )であり、気象データが反映される。

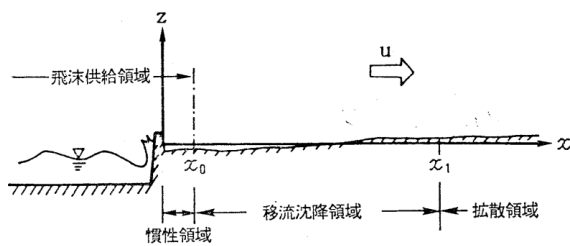


図-1 宇多モデルによる飛沫飛来に関する領域区分<sup>3)</sup>

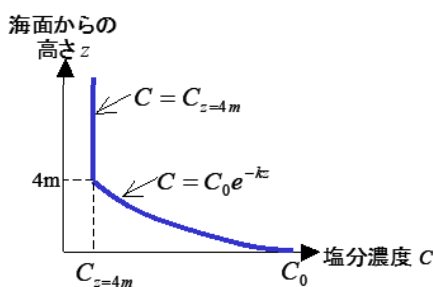


図-2 飛来塩分濃度の高度分布

#### (4) 塩分の拡散計算

以上で与えた初期条件、境界条件、見掛けの拡散係数などを用いて塩分の浸透解析を行う。LECCA では、Fick の非定常拡散方程式を有限要素法により解いている。

#### (5) 腐食発生時期および腐食ひび割れ発生時期の計算

腐食発生時期は、鉄筋位置での塩化物イオン濃度が、例えば、普通ポルトランドセメントの場合は、式(4)に示す腐食発生限界濃度  $C_{lim}$  に達する時期としている<sup>6)</sup>。

$$C_{lim} = -3.0 \left( \frac{W}{C} \right) + 3.4 \quad (4)$$

ここで、 $W/C$  は水セメント比である。

腐食速度モデルは、宮里モデル<sup>7)</sup>や実測値に基づく経験式を用いることができる。実測モデルとしては、松林モデル<sup>8)</sup>、森永モデル<sup>9)</sup>、松村モデル<sup>10)</sup>を選択することができる。本論文では松林モデルを採用した結果を示す。

### 2.2 検討ケース (解析条件)

本研究では、道路橋示方書<sup>11)</sup>の塩害の影響度合いと環境区分により、表-1 に示す異なる環境の3地点を選択した。また、コンクリート構造物の条件として、セメント種類は普通ポルトランドセメントとした。コンクリート構造物の条件を表-2、陸上構造物の境界条件を表-3にそれぞれ示した。

表-1 対象とした地域

地域区分	気象データの指定		気象データから算出した結果
	都市名	利用年	平均風速(m/s)
A	与那国	標準年	5.28
B	新潟	標準年	2.9
C	山口	標準年	1.39

表-2 コンクリート構造物の条件

水セメント比(%)	かぶり(mm)	ひび割れ深さ(mm)		
		0	25	50
35	50	0	25	50
50	70	0	35	70

表-3 陸上構造物の諸条件

設定位置		波浪条件のパラメータ	
汀線からの距離(m)	海面からの高さ(m)	波浪条件	海岸地形条件
1	2	日本海側	岩礫性
50	5	太平洋側	砂礫
100	10		
200			

### 3. 機械学習を用いた検討

#### 3.1 ランダムフォレストの概要

本検討ではアルゴリズムが単純で、一般的な決定木より性能のよい学習モデルが構築可能なランダムフォレストを用いた<sup>12)</sup>。ランダムフォレストのアルゴリズムでは、

データの説明変数をランダムに選択し、決定木を構築する処理を複数回繰り返す行い、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方法である。ランダムフォレストの概略図を図-3に示す。

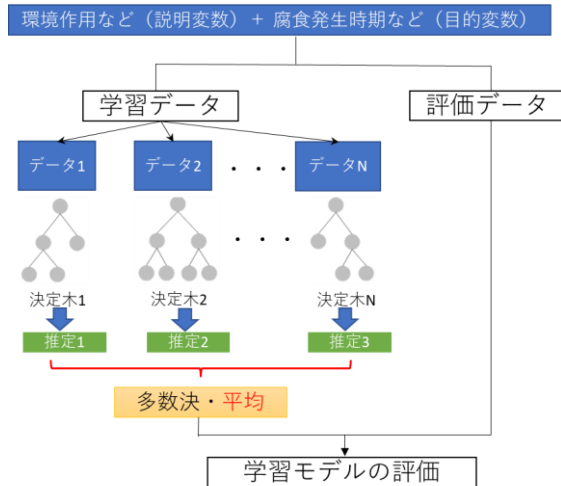


図-3 ランダムフォレストの概略図

### 3.2 説明変数と目的変数

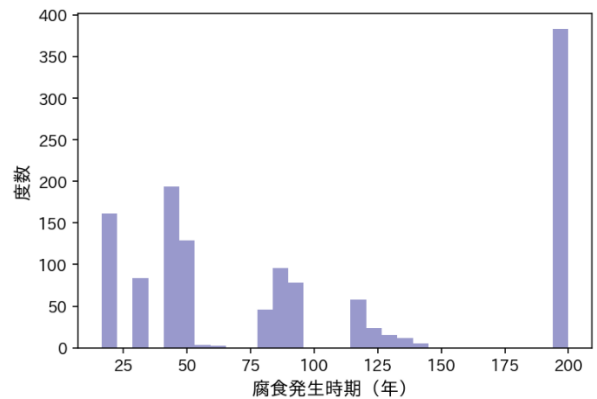
学習に用いた説明変数は、表-1 から表-3 に示した LECCA の入力値 12 個とした。また、目的変数として LECCA から得た腐食発生時期、腐食ひび割れ発生時期とした。今回の検討では、総数 1290 個のデータを 8 : 2 の割合で学習データと評価用データに分け、決定木の数は 10、決定木の深さを無制限として学習を行った。

今回検討した様々な条件を入力の変数の要約統計量を表-4、また、それらを入力とした LECCA による計算値として、腐食発生時期（年）と腐食発生ひび割れ発生時期（年）のヒストグラムを図-4に示す。ここで、LECCA では供用 150 年間の計算を行っており、その期間に腐食発生時期および腐食ひび割れ発生時期が生じなかった条件については、すべて 200 年と仮に設定した。この値については今後検討を行う予定である。また、ひび割れ有無については、表-2 にかぶりとともに示している値を用いており、機械学習におけるひび割れの入力値は、ひび割れなしを「0」、ひび割れが鉄筋位置に達している場合を「1」、鉄筋に達していない場合（かぶりの半分）を「0.5」とした。

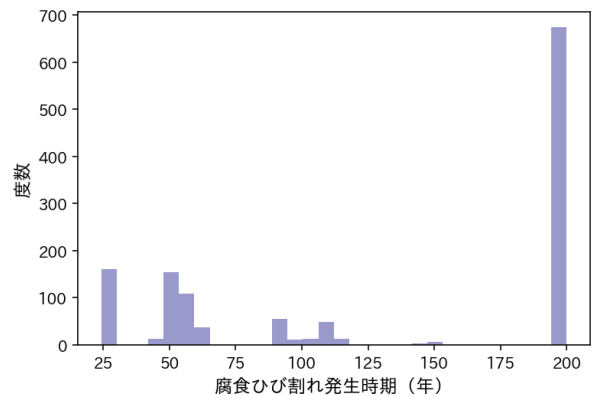
図-4 から、腐食発生時期、腐食ひび割れ発生時期ともに発生時期 200 年のデータが多くなっていることがわかる。これは前述のように供用 150 年経過後、腐食が生じていない、あるいは腐食ひび割れが生じていない状況である。しかし、それ以外のデータ群については、環境作用やかぶり、ひび割れなど条件により適度に結果がばらついていることから、本結果は学習データとして適切なデータといえる。

表-4 機械学習の入力データの要約統計量

	平均値	標準偏差	最小値	最大値
W/C(%)	43.94	7.36	35	50
かぶり(mm)	58.31	9.86	50	70
ひび割れ有無	0.49	0.41	0	1
汀線からの距離(m)	87.00	73.57	1	200
海面からの高さ(m)	6.40	3.14	2	10
波浪条件	0.47	0.50	0	1
海岸地形条件	0.48	0.50	0	1
平均風速(m/s)	2.89	1.47	1.39	5.28
年間平均飛来塩分量(mdd)	19.52	40.42	0.005	270.48
表面濃度(kg/m <sup>3</sup> )	6.79	2.82	3.6	10.8
見かけの拡散係数(cm <sup>2</sup> /年)	0.37	0.16	0.178	0.501
発錆塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )	2.4	0	2.4	2.4



(a) 腐食発生時期



(b) 腐食ひび割れ発生時期

図-4 ヒストグラム

#### 4. 解析結果および考察

##### 4.1 重回帰分析による推定結果

本節では、モデルの解釈の容易さから一般的に用いられている重回帰分析においても推定を行った。推定結果を図-5に示す。その結果、腐食発生時期および腐食ひび割れ発生時期の決定係数が、それぞれ0.7819、0.7618となっており、ともに正の相関がみられたが推定精度はそれほど高くはない。

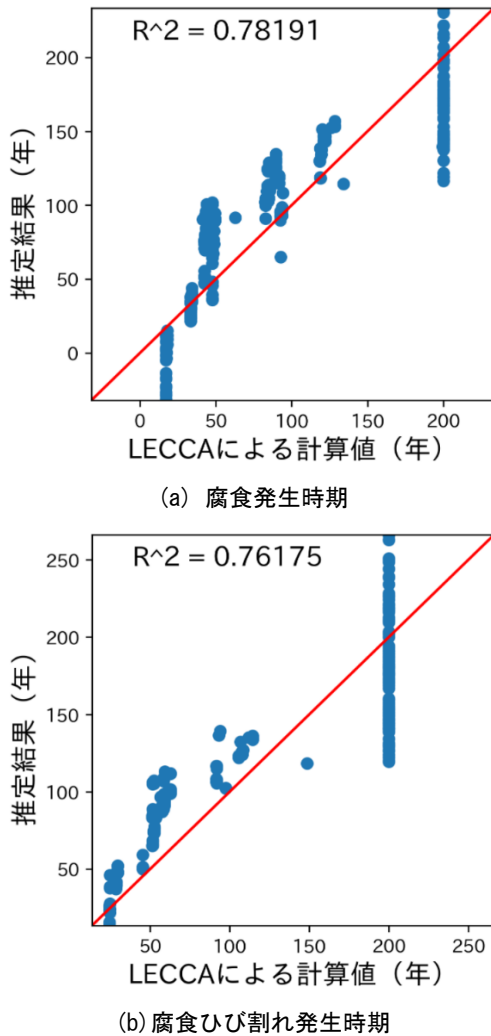


図-5 重回帰分析による推定結果

##### 4.2 ランダムフォレストによる推定結果

###### (1) 説明変数の重要度

図-6に12つの説明変数を用いた腐食発生時期と腐食ひび割れ発生時期の推定結果を示す。この結果より、本モデルの決定係数は、0.99以上と高い推定精度を示していることがわかる。つぎに、表-6および表-7に、腐食発生時期、腐食ひび割れ発生時期の説明変数(特徴量)の本推定に対する重要度を示す。この結果より、重要度と既往の研究から、入手容易なデータ等を考慮し、取得の難しい年間平均飛来塩分量、表面濃度、見かけの拡散係

数、発錆塩化物イオン濃度を除いた残り8つを説明変数に選択し、学習させた際の推定精度の検討結果を次節に示す。

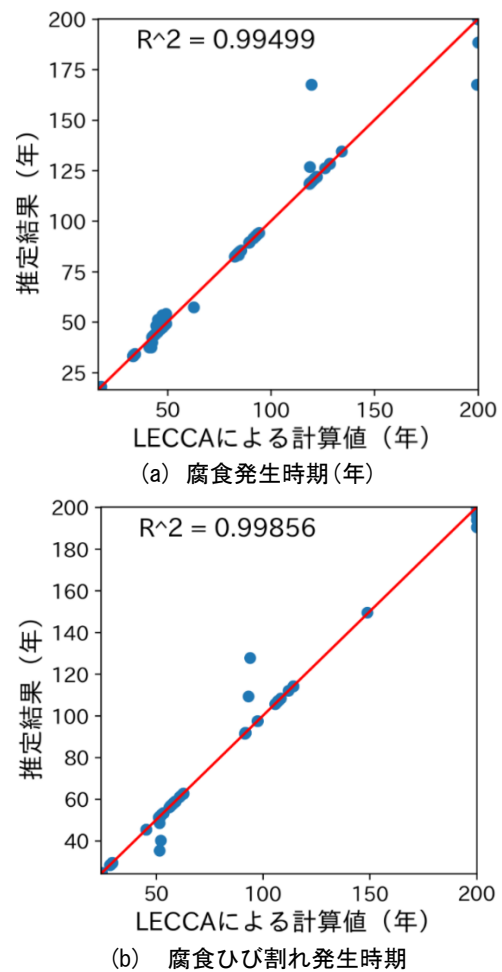


図-6 12つの説明変数を用いた場合の推定結果

表-5 腐食発生時期推定に対する説明変数の重要度

順位	特徴量	重要度
1	表面濃度	0.571456
2	見かけの拡散係数	0.202038
3	W/C	0.073262
4	かぶり	0.071681
5	年間平均飛来塩分量	0.046446
6	平均風速	0.022601
7	汀線からの距離	0.010543
8	ひび割れ有無	0.001446
9	波浪条件	0.000263
10	海岸地形条件	0.000263
11	海面からの高さ	0.000047
12	発錆塩化物イオン濃度	0

表-6 腐食ひび割れ発生時期推定に対する説明変数の重要度

順位	特徴量	重要度
1	表面濃度	0.30744
2	見かけの拡散係数	0.179728
3	W/C	0.216999
4	かぶり	0.13092
5	汀線からの距離	0.10163
6	平均風速	0.0375774
7	年間平均飛来塩分量	0.0375774
8	波浪条件	0.00363939
9	海岸地形条件	0.000758
10	海面からの高さ	0.0000733
11	ひび割れ有無	0.0000728
12	発錆塩化物イオン濃度	0

(2) 選定した説明変数を用いた推定結果

ここでは、4.2(1)の結果から説明変数を、W/C、かぶり、ひび割れ有無、汀線からの距離、海面からの高さ、波浪条件、海岸地形条件、平均風速の8つとした推定結果した結果について考察する。

まず図-7に、今回決定した8つの説明変数を、各々除いた際の腐食発生時期の推定結果をそれぞれ示す。これらの結果より、図-7(a)のW/C、図-7(b)のかぶり、図-7(d)の汀線からの距離、図-7(h)の平均風速を除いた推定結果はLECCAによる計算値と推定値の相関がみられず、上記4つの重要度が高いことがわかる。図-7(c)のひび割れ有無、図-7(e)の海面からの高さ、図-7(f)の波浪条件、図-7(g)の海岸地形条件を除いた場合の推定結果は、計算値と比較的高い相関はみられ、説明変数から除ける可能性はあるが、実際の塩害劣化事例から考えると、これらの条件は重要であるため、今後の検討課題である。

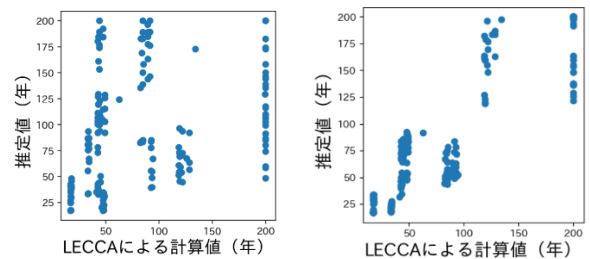
図-8に、選定した8つの説明変数を用いた場合の腐食発生時期および腐食ひび割れ発生時期の推定結果を示す。図-8から両結果ともに決定係数が0.99を超えており、説明変数を12つから8つに減らしても高い推定精度が得られていることがわかる。

4.1に示した重回帰分析の結果では、決定係数が0.8以下であったが、ランダムフォレストを用いた推定値はそれに比較すると非常に高い相関があることがわかる。

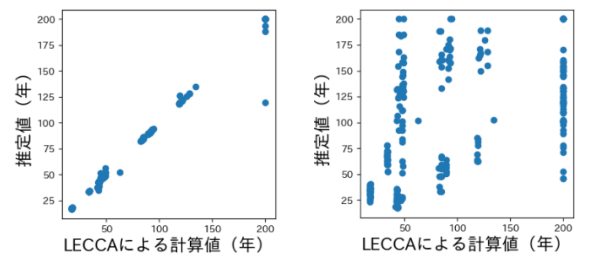
以上の結果より、コンクリート構造物内の鉄筋の腐食発生時期と腐食ひび割れ発生時期は、W/C、かぶり、ひび割れ有無、汀線からの距離、海面からの高さ、波浪条件、海岸地形条件、平均風速の8つのデータがあれば、

それらを入力値としたランダムフォレストによりある程度の精度で推定可能であると考えられる。

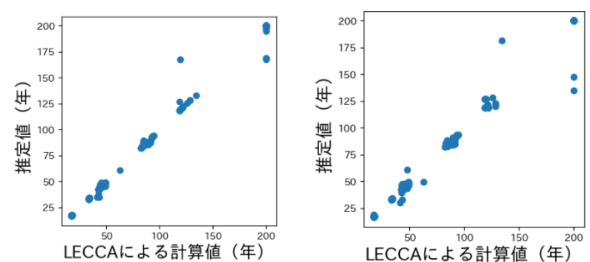
本研究で用いた学習データおよび評価用データはLECCAの入力値と出力値であることから、今後は、実データを収集し、今回構築した学習モデルの精度検証が必要である。また、今回の学習データに加え、収集した実データを入力としたさらなる学習モデルの高度化を行う予定である。



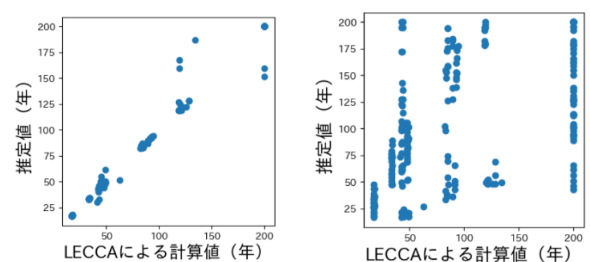
(a) W/C(%)を除いた場合 (b) かぶり(mm)を除いた場合



(c) ひび割れ有無を除いた場合 (d) 汀線からの距離(m)を除いた場合



(e) 海面からの高さ(m)を除いた場合 (f) 波浪条件を除いた場合



(g) 海岸地形条件を除いた場合 (h) 平均風速(m/s)を除いた場合

図-7 各説明変数を除いたときの腐食発生時期の相関関係

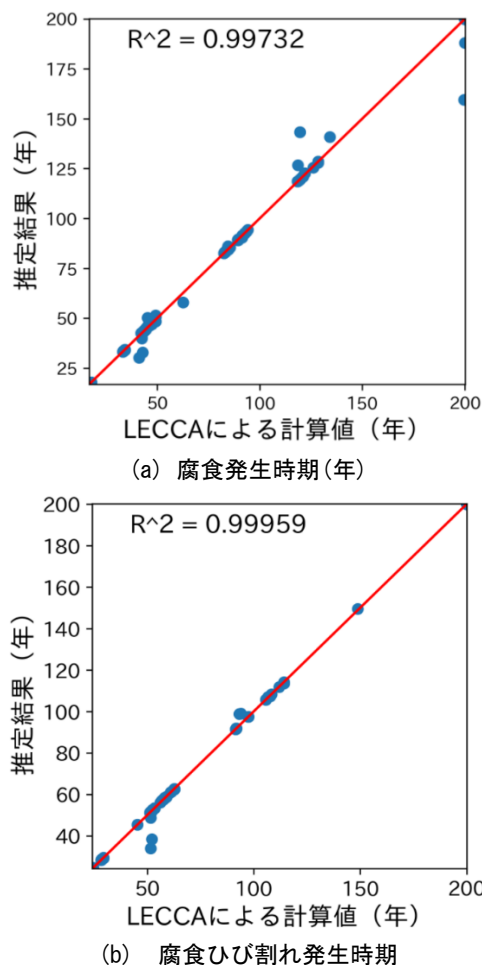


図-8 8つの説明変数を用いた場合の推定結果

## 5. まとめ

本研究では、塩害劣化予測として、腐食発生時期と腐食ひび割れ発生時期を対象に、LECCAを用いた計算値および入力値を機械学習により構築した学習モデルにより塩害劣化予測が可能かどうか基礎的検討を行った。以下に研究から得られた知見と今後の課題を示す。

- (1) 12個の説明変数を用いたランダムフォレストにより構築した学習モデルにより腐食発生時期、ひび割れ発生時期を精度よく推定することができた。
- (2) 12個の説明変数を重要度と既往の研究から入手容易なデータ等を考慮して選定した8つの説明変数を用いた学習モデルにおいても12個の説明変数を用いた学習モデルと同様の精度で腐食発生時期および腐食ひび割れ発生時期を精度よく推定できた。
- (3) 実際の塩害劣化例から考えると重要である説明変数の項目が腐食発生時期および腐食ひび割れ発生時期の推定結果の相関に影響が小さいケースがあったため、この点に関しては今後検討が必要である。
- (4) 本研究で用いた学習データおよび評価用データはLECCAの入力値と出力値であることから、今後は、

実データを収集し、今回構築した学習モデルの精度検証や学習モデルの高度化を行い、コンクリート構造物の置かれた環境、構造特性に応じた腐食発生時期と腐食ひび割れ発生時期を±1年の範囲で推定可能な学習モデルの構築を目指す。

## 参考文献

- 1) 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」:SIPインフラ連携委員会報告 インフラ維持管理へのAI技術適用のための調査報告書, 公益社団法人土木学会, 2019.
- 2) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラムLECCA2 理論解説書, 2010.
- 3) 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, 第39巻 pp.1051-1055, 1992.
- 4) コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会:コンクリート構造物の長期性能評価ー環境外力の評価手法ー, コンクリート工学, Vol.50, No.10, pp.946-950, 2012.
- 5) 山田義智・大城武・梶田佳寛:塩害環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第501巻, pp.13-18, 1997.
- 6) 土木学会:コンクリート標準示方書(2017年制定), 設計編, 2017.
- 7) 長谷川 裕介, 宮里 心一, 親本 俊憲, 横関 康祐:ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食速度解析モデルの提案 コンクリート工学論文集 Vol.17 No.1 109-118 2006.1
- 8) 松林裕二, 梶田佳寛, 笹渕優樹:塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する屋外暴露実験, 日本建築学会構造系論文, No.536, pp.9-15, 2000.10
- 9) 松村卓郎, 金津努, 西内達雄:海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法, 土木学会論文, No.634, V-45, pp.303-314, 1999.
- 10) コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム 委員会報告書 論文集:社団法人, 日本コンクリート工学協会, pp.202-203, 2004.
- 11) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書 (I 共通編・IIIコンクリート橋編)・同解説, 2012.3.
- 12) 須藤秋良:スッキリわかる Python による機械学習入門, 株式会社インプレス, 2020.10