

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04335

研究課題名（和文）AIと数値シミュレーションを統合した塩害環境予測技術の開発

研究課題名（英文）Development of chloride attack Environment Prediction Technology Integrating AI and Numerical Simulation

研究代表者

崎原 康平（SAKIHARA, KOHEI）

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：20647242

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：海岸域に建設された鉄筋コンクリート構造物は、海から輸送される塩化物イオンが付着・浸海 岸域から発生する飛来塩分を予測することは、さらなる長寿命化が求められている昨今の鉄筋コンクリート構造物において、耐久設計や維持管理の観点からも重要である。そこで本研究では、AIと数値シミュレーションを用いた飛来塩分予測手法の開発し、その妥当性の検討を行った。その結果、AIによる飛来塩分予測では、LightGBMを利用することで精度の高い予測結果が得られた。数値シミュレーションでは、実験値と比較し良好な結果が得られた。また、各部材の付着塩分と風圧分布の間に、ある程度の相関があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

関連する既往研究として、AIや数値シミュレーション技術をコンクリート構造物表面のひび割れを対象に耐久性診断や維持管理に適用する研究が盛んに行われている。しかし、それらの研究はAIや数値シミュレーションを単体で使用する手法が主流である。また、塩害環境予測にAIを適用した研究はほとんどない。一方、本研究の最大の特徴は、AIと数値シミュレーションを組み合わせた塩害環境評価システムを開発することで、より適切な耐久性診断や維持管理が可能となる点である。このような研究は、国内外を見ても申請者が知る限り他にない。また、日本と同様な亜熱帯島嶼環境である東南アジア諸国への技術展開も可能である。

研究成果の概要（英文）：For reinforced concrete structures constructed in coastal areas, it is important from the perspective of durability design and maintenance management to predict the amount of airborne chloride generated from coastal areas, where chloride ions transported from the sea attach to and penetrate into reinforced concrete structures that are required to have a longer service life. In this study, we developed a chloride content prediction method using AI and numerical simulation, and examined the validity of the method. As a result, we found that the use of LightGBM in AI-based chloride content prediction resulted in highly accurate predictions. Numerical simulations showed good results compared to experimental data. It was also clarified that there is some correlation between chloride deposition and wind pressure distribution on each component.

研究分野：建築材料学

キーワード：塩害 飛来塩分 AI 機械学習 数値シミュレーション 薄板モルタル供試体 耐久設計 維持管理

## 1. 研究開始当初の背景

四方が海に囲まれた日本において、海岸付近の鉄筋コンクリート構造物は海から供給される飛来塩分による塩害の影響を受けやすい。特に、北西からの強い季節風の影響を受ける日本海側や多くの台風が通過する沖縄では、海から供給される非常に多くの飛来塩分により、鉄筋コンクリート構造物の重大な欠陥を引き起こす要因となる。そのため、塩害環境下にある鉄筋コンクリート構造物の耐久設計や維持管理を行うには、環境作用を定量評価する必要がある。一方、2015年9月の国連サミットで採択されたSDGsでは、17の目標が設定されており、レジリエントなインフラを整備し、包摂的で持続可能な産業化を推進するとともに、イノベーションの拡大を図る(目標9)ことや、都市と人間の居住地を包摂的、安全、レジリエントかつ持続可能にする(目標11)等が掲げられている。また日本建築学会でも2020年4月に「SDGs対応推進特別調査委員会」が設置され、現場でのロボットを活用した省人化や、AIの導入による作業の効率化向上を進める等、SDGs達成に貢献することが求められている。

地域毎で異なる環境作用が飛来塩分量に及ぼす影響として、山田・細山田ら(海岸工学論文集, 2003)や佐伯ら(土木学会論文集 E, 2010)は、消波施設が設置された背後で飛来塩分が増加傾向にあることを定量的に示し、村岡ら(海岸工学論文集, 1990)は海岸種類により発生する飛来塩分量が異なることを報告している。上述の観点から申請者は、飛来塩分データや公開されている気象や波浪データ、さらに空中写真から測定した消波施設の距離や砂浜幅等の各種情報から機械学習を用いて飛来塩分の予測を行い、その妥当性を検討している。しかし、気象や波浪の各観測所から遠い地域では、風速・風向や波高・周期といった機械学習に必要な学習データが取得できないため予測が難しいこと、複数地域における実測値が少ないため、地域毎の環境作用を定量評価した検討例が少ないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究は、AIと数値シミュレーションを組み合わせた塩害環境評価システムを開発するとともに、複数地域の飛来塩分データの収集および既往研究結果と比較検討することで、開発するシステムを実用化レベルまで引き上げることを目的としている。さらに、誰でも容易に操作でき、塩害環境区分を可視化できるアプリケーションを併せて開発することで、鉄筋コンクリート構造物の塩害に対する施工・維持管理法を確立するための一助とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 気象や波浪の各観測所から遠い地域の塩害環境評価

本研究では、一般公開されている気象計算オープンソースプログラムWRFおよび波浪推算プログラムSWANを援用することで、気象観測所から気象・波浪の各データが取得できない地域の気象・波浪の各データを数値計算により取得する。これをAIの学習データとして用いることで、この地域の飛来塩分を予測することを試みる。特に数値計算では、結果に影響を及ぼすパラメータが複数あるため、最適かつ合理的なパラメータの設定方法を確立する。

### (2) 地域毎に異なる環境作用の定量評価

我々はこれまでに、沖縄および新潟の2地域の検討に留まっているため、本研究では異なる複数地域の季節毎の風況、波浪、飛来塩分、地形条件の各データの収集を行う。風況データはアメダス、波浪データは全国港湾波浪情報網(NOWPHAS)の最寄りの各気象観測所で得られるデータを取得する。消波施設の距離、砂浜種類等の地形条件については、国土地理院の空中写真およびGoogle Earthの距離測定機能を利用した。

### (3) 鉄筋コンクリート構造物や部位ごとに異なる飛来塩分の評価

対象とする鉄筋コンクリート構造物を、数値シミュレーションが行えるようにモデル化し、飛来塩分量を市販もしくは開発する数値解析プログラムに入力することで、構造物に付着する飛来塩分状況を定量的に評価する。数値シミュレーションにおいては、オープンソース数値流体シミュレーションプログラム「OpenFOAM」を利用した。

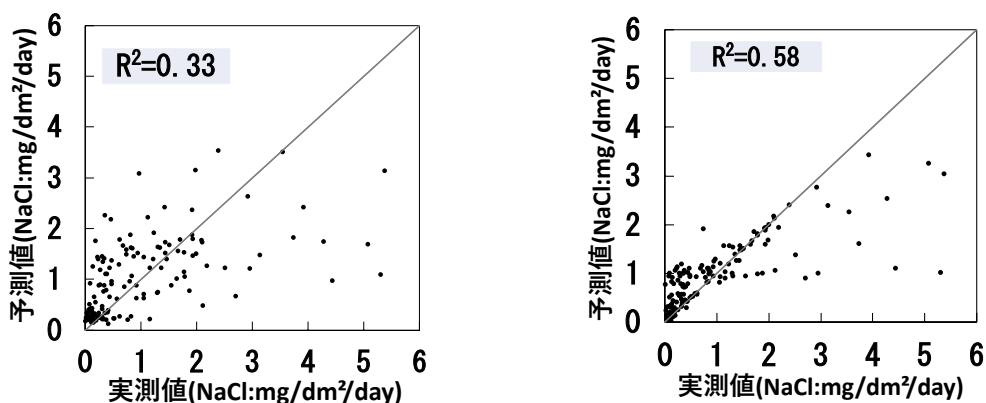
## 4. 研究成果

本研究では、機械学習の1つであるRandom Forest(以後、RFと略す)およびLightGBM(以後、LGBMと略す)を用いて、沖縄本島北部の辺野喜暴露場で測定した飛来塩分予測を行った。図1にRFおよびLGBMの飛来塩分予測結果を示す。図1より、RFの決定係数は0.33に対し、LGBMの決定係数は0.58となり、LGBMの精度が良いことが確認された。この理由として、RFは複数の決定木を並列に構築し、各決定木の推定結果の平均値により回帰を行うバギングが採用されているのに対し、LGBMは直前の決定木で求めた予測値を実測値の誤差を次の決定木が学習することで、その誤差が小さくなるブースティングを採用しているためと考えられる。しかしながら、本検討で用いた学習データは約150個と少ないため、予測値のばらつきが大きく精度も0.6程度であった。また、機械学習の予測精度に影響を与えるハイパーパラメータのチューニングも実施していなかったため、今後上述の課題について検討を行う予定である<sup>1)</sup>。

土木学会第 2 期塩害環境の定量評価に関する小委員会では実施された共通暴露試験で得られた飛来塩分データ（以後、全国データと称す）を用いて、複数の機械学習による予測精度の検討を行った。表 1 に、複数の機械学習による精度比較を示す。表 1 より、本検討においては、Extra Trees（以後、et と略す）が最も良い予測結果が得られた。ここで et とは、rf から派生した手法であり、rf がノード分割の際に評価関数を用いることで最も良い回帰精度を与える特徴量を使用する手法に対し、et はどの特徴量で分割するかをランダムに決定する手法である。

図 2 に、et で飛来塩分予測を行った際の特徴量の重要度を示す。ここで特徴量の重要度とは、どの特徴量（本研究では環境作用に関する説明変数）が予測に対して相対的に重要なのかを示す指標である。図 2 から、波高や距離に関する重要度が高いことがわかった<sup>2)</sup>。

図 3 に、新潟県の飛来塩分予測結果を示す。なお、機械学習は et を用いた。また、図 3(a) は気象庁や NOWPHAS で公開されている風況および波浪情報を学習データとして使用し、図 3(b) は風況データを WRF、波浪データを SWAN による各数値シミュレーションで得られた結果を学習データとして用いた。その結果、数値シミュレーションを用いた予測の方が、より現地の風況や波浪を再現でき、予測精度が向上することが確認された<sup>2)</sup>。



(a) RF の予測結果 (b) LGBM の予測結果

図 1 沖縄における飛来塩分の実測値と予測値の比較

表 1 複数の機械学習による精度比較

No.	手法		決定係数R <sup>2</sup>
1	et	Extra Trees Regressor	0.5021
2	rf	Random Forest Regressor	0.4086
3	catboost	CatBoost Regressor	0.3556
4	xgboost	Extreme Gradient Boosting	0.3498
5	ada	AdaBoost Regressor	0.3479

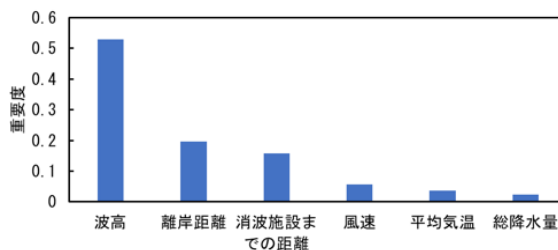
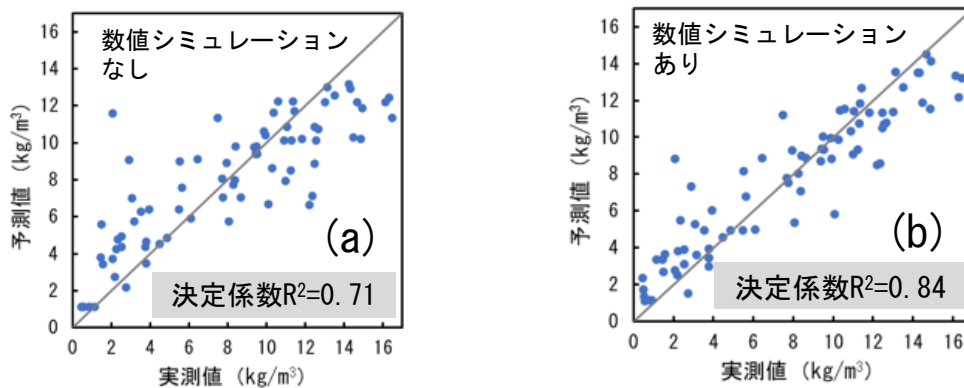


図 2 et による飛来塩分予測の特徴量の重要度



(a) 数値シミュレーションなしの場合 (b) 数値シミュレーションありの場合

図 3 数値シミュレーションで得られた風況・波浪情報の使用有無による精度比較

図 4 に、沖縄本島北部にある鉄筋コンクリート構造物の柱部材に付着する塩分の数値シミュレーション結果の一例を示す。同図より、飛来塩分粒子は海風によって輸送され、鉄筋コンクリート構造物に付着の様子が再現できた。また、海風は盛土の斜面に沿って吹き上がるため、海に近い柱 a 下部には飛来塩分が付着しない様子も確認された。

図 5 に、海側に最も近い柱 a の感水紙による付着塩分試験結果と OpenFOAM を用いた風況シミュレーションで得られた飛来塩分粒子の付着状況を示す。なお図中のカラーコンターは飛来塩分の付着面における風圧分布である。また、同図(a)は西面の結果、同図(b)は北面に対する結果を示している。同図より、シミュレーションの結果は実験結果の傾向をよく捉えられているのが確認された<sup>3)4)5)</sup>。

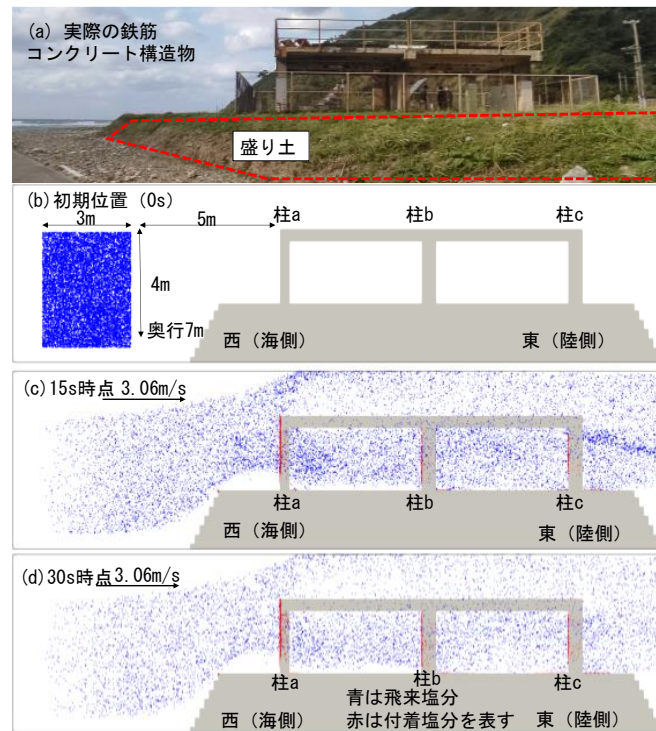


図 4 飛来塩分シミュレーション結果

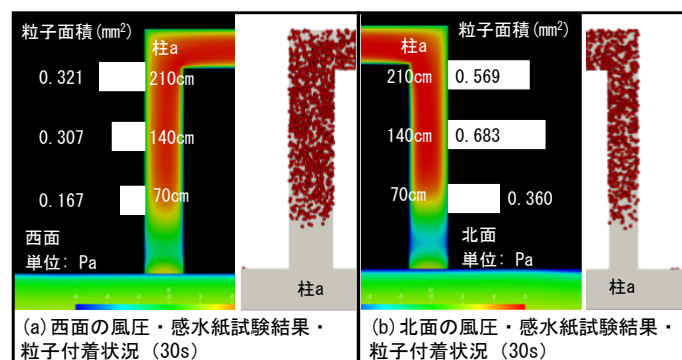


図 5 感水紙と付着塩分粒子および風圧分布の比較

<参考文献>

- 1) 請舛慧, 崎原康平, 中村文則, 滝勇太: 長期観測データに基づく沖縄本島海岸付近の飛来塩分子測における機械学習の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 544-549, 2021
- 2) 請舛慧, 崎原康平, 中村文則, 富山潤, 滝勇太: 地域毎の環境作用を考慮した機械学習による飛来塩分子測, 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, Vol. 21, pp. 301-306, 2021
- 3) 請舛慧, 崎原康平, 豊田颯太, 東舟道裕亮: 周辺環境を考慮した沿岸域の鉄筋コンクリート構造物における各構造部材に付着する塩分に関する研究, 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, Vol. 22, pp. 321-326, 2022

- 4) 豊田颯太, 崎原康平, 請舛慧, 富山潤: 沿岸域に位置する鉄筋コンクリート構造物の各部材に付着する塩分の数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 514-519, 2023
- 5) 豊田颯太, 崎原康平, 富山潤: 沿岸域における鉄筋コンクリート構造物に付着する塩分の環境要因を考慮した拡散・付着シミュレーションの検討, 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, Vol. 23, pp. 407-412, 2023

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 請舩慧, 崎原康平, 豊田颯太, 東舟道裕亮	4. 巻 22
2. 論文標題 周辺環境を考慮した沿岸域の鉄筋コンクリート構造物における各構造部材に付着する塩分に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 321-326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 請舩慧, 崎原康平, 中村文則, 富山潤, 滝勇太	4. 巻 21
2. 論文標題 地域毎の環境作用を考慮した機械学習による飛来塩分予測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 301-306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 請舩慧, 崎原康平, 中村文則, 滝勇太	4. 巻 43
2. 論文標題 長期観測データに基づく沖縄本島海岸付近の飛来塩分予測における機械学習の適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 544-549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 豊田颯太, 崎原康平, 請舩慧, 富山潤	4. 巻 45
2. 論文標題 沿岸域に位置する鉄筋コンクリート構造物の各部材に付着する塩分の数値解析的検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 514-519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 豊田颯太, 崎原康平, 富山潤	4. 巻 23
2. 論文標題 沿岸域における鉄筋コンクリート構造物に付着する塩分の環境要因を考慮した拡散・付着シミュレーションの検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 407-412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 豊田颯太, 崎原康平, 請舩慧
2. 発表標題 沿岸域における鉄筋コンクリート構造物の各部材に付着する塩分の輸送シミュレーション
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 請舩慧, 崎原康平, 豊田颯太, 東舟道裕亮
2. 発表標題 各構造部材の設置高さが付着塩分量に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会大会 (北海道) 学術講演梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田颯太, 崎原康平, 請舩慧, 東舟道裕亮
2. 発表標題 鉄筋コンクリート構造物の各構造部材に付着する塩分量と風速に関する解析的検討
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei UKEMASU, Kohei SAKIHARA, Sota TOYODA, Yoshitomo YAMADA
2. 発表標題 Relationship between the amount of airborne chloride deposited on the surface of each structural member and its surrounding environment
3. 学会等名 15th International Symposium between China, Korea and Japan on Performance Improvement of Concrete for Long Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sota TOYODA, Kohei SAKIHARA, Kei UKEMASU, Yoshitomo YAMADA
2. 発表標題 Wind simulation for airborne chloride deposition on reinforced concrete building in coastal areas
3. 学会等名 15th International Symposium between China, Korea and Japan on Performance Improvement of Concrete for Long Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田颯太, 崎原康平, 請舩慧, 東舟道裕亮
2. 発表標題 飛来塩分が付着するコンクリート構造物周辺の風況シミュレーションの試み
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告第61号
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 請舩慧, 崎原康平, 豊田颯太, 東舟道裕亮
2. 発表標題 沿岸域のコンクリート構造物の各構造部材に付着する飛来塩分の実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告第61号
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 請舩慧, 崎原康平, 中村文則, 東舟道裕亮, 滝勇太
2. 発表標題 機械学習および重回帰分析による環境作用を考慮した複数地域における飛来塩分予測
3. 学会等名 日本建築学会大会(東海) 学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立丞, 崎原康平, 滝勇太, 東舟道裕亮
2. 発表標題 機械学習と数値解析を用いたコンクリート供試体の塩化物浸透予測に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会(東海) 学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei UKEMASU, Kohei SAKIHARA, Fuminori NAKAMURA, Jun TOMIYAMA, Yusuke HIGASHIFUNAMICHI
2. 発表標題 Application of Prediction Airborne Chloride by Machine Learning Considering the Environmental Effects of Regions
3. 学会等名 14th International Symposium Between Japan, China and Korea Performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sota TOYODA, Kohei SAKIHARA
2. 発表標題 Simulation of Airborne Chlorides on Reinforced Concrete Structures in Coastal Areas Considering Environmental Factors
3. 学会等名 16th International Symposium between Korea, Japan and China on Performance Improvement of Concrete for Long Span Structure (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 豊田颯太, 崎原康平
2. 発表標題 沿岸域における鉄筋コンクリート構造物の雨掛りを考慮した数値解析による付着塩分予測
3. 学会等名 日本建築学会大会(近畿) 学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 崎原康平, 豊田颯太
2. 発表標題 沿岸域に位置する鉄筋コンクリート構造物に付着する塩分の数値解析的検討
3. 学会等名 第48回セメント・コンクリート研究討論会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関