

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）		所属		役職	
		岡崎慎一郎 （おかざきしんいちろう）		香川大学創造工学部		准教授	
②研究 テーマ	名称	劣化イメージング技術と磁気・電気化学的技術の融合による コンクリート橋梁の維持管理システムの開発					
	道路行政 技術開発 ニーズ	No.	HM5		政策 テーマ	持続可能なインフラメンテナ ンス	
		項目名	コンクリート内部の鉄筋の 状態を把握できる技術				
③研究経費（単位：万円）		令和5年度	令和6年度	令和7年度	総合計		
※R5は受託額、R6以降は計画額 を記入。端数切捨。		3,276	3,100	-	6,376		
④研究者氏名		（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加 下さい。）					
氏名		所属・役職					
石丸 伊知郎		香川大学創造工学部創造工学部・教授					
吉田 秀典		香川大学創造工学部・創造工学部・教授					
高橋 恵輔		香川大学イノベーションデザイン研究所・特命教授					
手嶋 克智		コニカミノルタ・プロダクトマネージャ					

⑤研究の目的・目標 (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。)

- 国内外で橋梁の老朽化は深刻であり、橋梁の崩壊や、崩壊に伴う2次被害が懸念されている。RCおよびPC橋梁の内部の状態は、鋼材腐食が進行し腐食ひび割れが生じないと近接目視では把握できない。構造物表面の劣化因子の評価による劣化進行の評価や、内部鋼材の腐食や、腐食による破断の有無を容易に迅速に評価する手法が求められている。
- そこで本研究では、図1の手法を提案する。本申請ではRCおよびPC橋梁を対象に、
 - 香川大学で独自に開発した中赤外分光イメージングデバイスによりコンクリートの表面の塩化物イオン濃度および含水率分布を二次元イメージングし、劣化懸念箇所を抽出する手法
 - 劣化懸念箇所付近における内部鋼材の腐食速度を分極抵抗法に基づき、香川大学で開発した独自のアルゴリズムにより非破壊で評価する手法
 - コニカミノルタ社が独自に開発した磁気センシング技術に基づくデバイスで鋼材破断を検知する手法
 という3手法を融合した方法の適用性を検討するとともに、国内外の実装を目標とする。
- RCやPC橋梁等コンクリート構造物の劣化懸念箇所のイメージング技術、内部の鋼材の腐食速度評価、鋼材の破断の有無の検知といった3つの手法を融合させることで橋梁の高度な維持管理システムを開発し、国内外の実装を目標とする。
- 令和5年度では、3つの手法それぞれに対して現場適用性を勘案して高度化し、室内試験結果と概ね同等な精度を確保することを目標とする。

RC・PC製の橋梁等の構造物の塩害劣化は未だに**深刻な問題**
 →どの箇所の鋼材が・どのくらい腐食して・さらに破断しているか
 を一気通貫に評価できる**非破壊検査システム**を提案

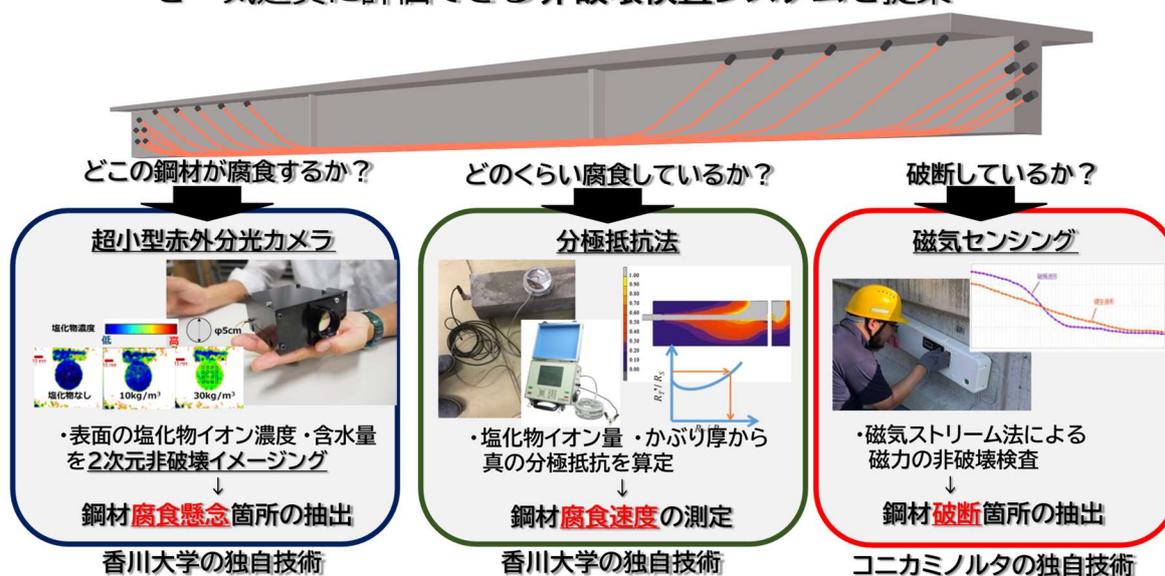


図1 本研究の全体像

⑥これまでの研究経過、目的・目標の達成状況

A 中赤外分光イメージングデバイスの現場適用性の検討

香川大学は、独自に開発した中赤外分光イメージングデバイスにより、室内でのコンクリート表面の塩化物イオン濃度および含水率の2次元イメージングに成功した。本研究では屋外における本手法の適用性を検討する。令和5年度は以下の内容を実施する。

A-1 屋外における適用性の検討

当初目標：①屋外用のデバイスを試作し、②屋外にあるコンクリート試験体の表面塩化物イオン濃度および含水率の2次元イメージングの精度確認を行う。

変更点と変更した理由：①に関し、7 μm 付近のコンクリートの固定化塩化物イオン（F氏塩）のピークに着目予定であったが、世界的な半導体不足に起因する仕様変更により、試作品ではこの付近にて感度が得られなかった。一方、**図2**に人工的に作製したF氏塩に対するFTIR機（据え置き型分光装置）の計測によると7 μm 付近のピーク挙動に加え、**12 μm にもピークを有することが判明した。**この範囲におけるスペクトルの吟味により固定化塩化物イオン量の定量化を目指す。

当該年度の成果（R5中間報告）：①に関し**図3**に試作機を示す。屋外にて十分な測定感度を得るために当初は機器の冷却や、対象物をハロゲンヒーター等で対応する予定であったが、同図に示す**ステルスマルチスリット**を試作・実装することで、ノイズとなりうる干渉縞の除去に成功し高い感度を得ることができた（**図4**）。引き続き7 μm 付近の感度向上と12 μm 付近のピークによる検量線の作成を行う。**図4**に示す試験体に対して**図5**に示す計測システムにより室内実証を行った結果、**図6**に示すような塩化物イオン濃度とピークの関係を取得できた。なお、表面含水率に関する検量線は作成完了している（**図7**）。塩化物イオンの検量線作成、塩化物イオンおよび含水率に関する屋外での実証試験およびイメージング画像の取得については1月から開始し、目標は、室内試験での測定精度に対して $\pm 10\%$ 、撮影時間1分を目標とする。年度内に当初目標を達成する見通しである。

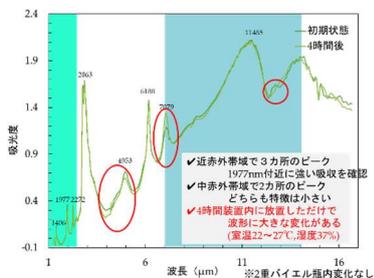


図2 F氏塩のスペクトル



図3 試作機とマルチスリット

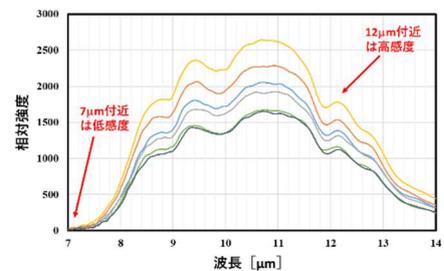


図4 試作機によるスペクトル

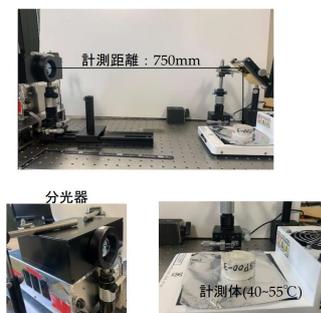


図5 計測風景

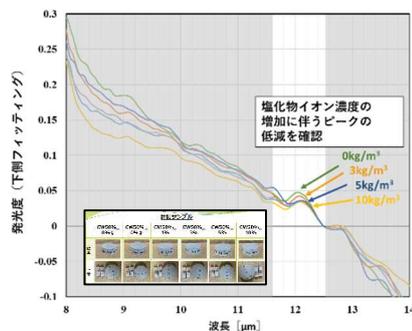


図6 塩分含有試験体のスペクトル

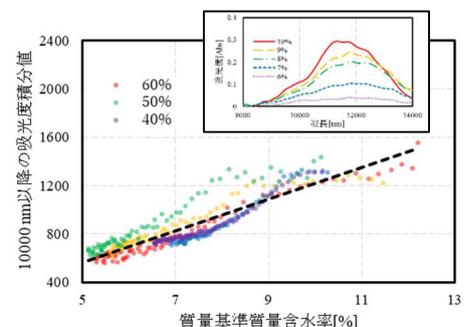


図7 含水率の検量線

B 電気化学的手法によるコンクリート中の鋼材の腐食速度を定量化する技術開発

真の分極抵抗を評価するため、香川大学が開発した電流分散範囲を特定できるアルゴリズムを基に、種々の条件を考慮できる手法を開発する。令和5年度は以下の内容を実施する。

B-1 真の分極抵抗の評価アルゴリズムの開発と試験

当初目標：①コンクリート中の含水率や塩化物イオン濃度が一様ではない場合における真の分極抵抗の評価アルゴリズムの開発、②コンクリート中にスターラップがある場合における真の分極抵抗の評価アルゴリズムの開発、を実施する。③さらに、試作機を完成させる。

変更点と変更した理由：③に関して、現状、四国総合研究所製CM-V、Giatec社製iCOR等も販売されており、塩化物イオンや水分の内部分布が一様な系においては概ね測定精度も良好なものである。そこで新規装置の開発を行うのではなく、それぞれの装置に対する精度検証と、コンクリート内部における塩化物イオン濃度が一様ではないケースに対しての真の分極抵抗値の補正方法を提案することで、既存の機器に対する本提案手法の合理的な実装をはかる。

当該年度の成果 (R5中間報告)：①コンクリート中の含水率および塩化物イオンが一様ではないケースにおいて、真の分極抵抗が一様の場合と比較してどの程度変化するかについて、実験値に基づいた解析を実施した。図8に有限要素モデルを、図9に有限要素解析によって得られた電流分布を示す。電流分布は、内部の均質性に影響を受けることが判明した。また、実験値から真の分極抵抗を評価する際に必要な、電流分布に基づくデバイス毎の被測定面積評価アルゴリズムを図11に、その結果に基づいて算定された真の分極抵抗に関して、場が均質な場合と非均質な場合で比較したものを図12に評価した結果を示す。なお、今回は項目Aの装置から塩化物イオン濃度が高く分布したと評価された領域を測定しており、その領域直下の鉄筋は一律に腐食していると仮定している。腐食一様分布と、分布を持たせた場合についての真の分極抵抗は、両者とも概ね相違が無いことが確認された。一方、解析による評価値は実験値と乖離があるため、計測可能かぶり厚や、塩化物イオン濃度、水分の分布が存在する系における実験を年度中に追加実施することで補正係数を設定し、鉄筋腐食速度に関する精度が±20%であることを年度内に確認することで達成する見通しである。

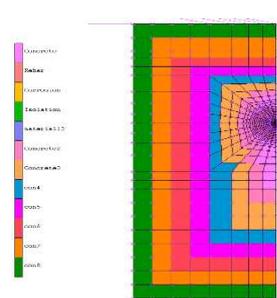


図8 有限要素モデル

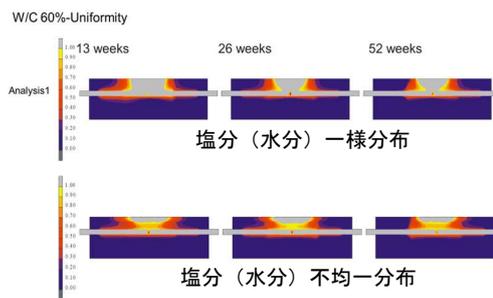


図9 解析結果の一例

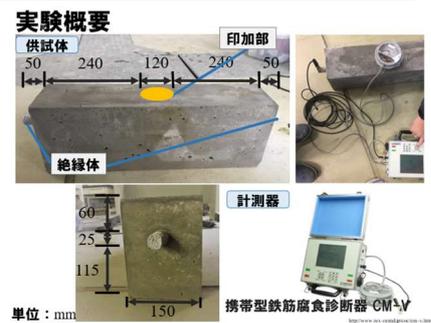


図10 試験体と測定機器

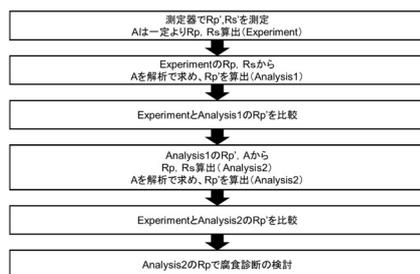


図11 被測定面積評価アルゴリズム

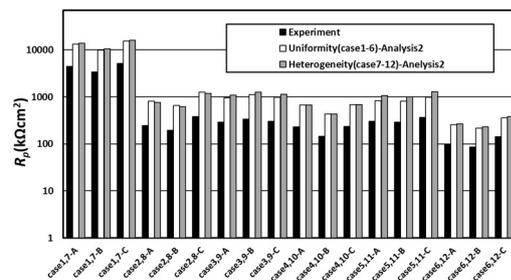


図12 分極抵抗値 (均質と非均質)

C 磁気センシングに基づく鋼材破断検知デバイスの高度化

コニカミノルタ社の研究グループが開発した磁気センシング技術は、スターラップの存在や、格子状の配筋により判定精度が低下する。そこで、現状の漏洩磁束法の着磁にパルス着磁法を適用し、破断の検知に最も適した機械学習アルゴリズムを選択する。令和5年度は以下の内容を実施する。

C-1 パルス着磁法の適用性の検討

当初目標：①パルス着磁法を用いた場合、かぶりが大きい場合には、過電流によるノイズが発生するため、数値解析によりノイズ発生条件を把握する。②破断の検知に最も適した機械学習アルゴリズムを選択するとともに、様々な構造物における波形を取得し、AI技術に基づいて破断の有無を判断できるアルゴリズムを開発する。

変更点と変更した理由：①に関して、種々の感度解析の結果、パルス着磁法の適用で生じる渦電流によるノイズの除去が困難であることが判明した。そこで、**図13**に示すハルバツハ配列に基づく漏洩磁束法に特化した着磁用磁石を独自に開発し、かぶり深部における計測精度の向上をはかった。

当該年度の成果（R5中間報告）：①に関して**図14**に、通常磁石およびハルバツハ配列磁石による着磁後の減衰波形の比較結果を示す。なお、ハルバツハ配列においては、構成する磁石のアスペクト比および厚みを順次変化させた複数の結果に対する感度解析を実施した。その結果、両極間の距離が251mm、磁石の厚み30mm、幅90mmの場合において通常の磁石よりも約20%の磁力を得た。この磁石を**図15**のとおりに試作した。計測可能かぶり厚に関する実験的検討を本年度中に実施するが、年度内に当初目標を達成する見通しである。

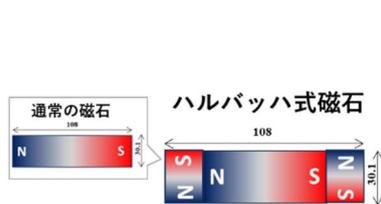


図13 ハルバツハ配列磁石

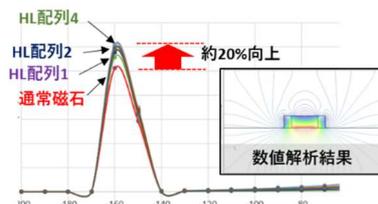


図14 各磁石による減衰波形

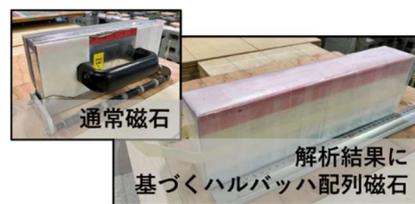


図15 試作した磁石

②に関し、破断の検知に最も適した機械学習アルゴリズムを選定した。データ数2240で検討した結果、SVRが最も頑健で精度が高いことを確認した。コンクリートの無い鋼材のみの中空桁に対する分類結果と、琉球大学に存置されている実PC橋梁撤去桁に対する結果を**図17**に示す。中空桁では正解率86%であり判別精度は高い。一方、実桁では正解率は68%となり精度が大きく低下した。スターラップ成分が邪魔をしているとのことである。そこで、元波形からスターラップのみで構成された中空桁の波形との差分を取った場合により検証を行っている。①で開発した磁石と上述の方法を組み合わせることにより、かぶり10cm以下では、目標値とした正解率90%を概ね確保できており、年度内に当初目標を達成する見通しである。

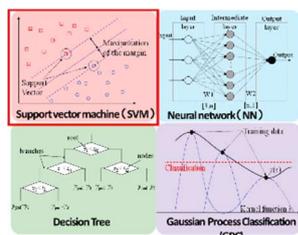


図16 アルゴリズム一例

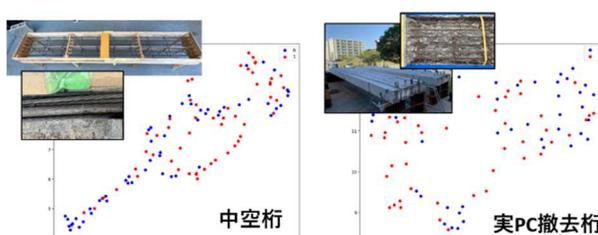


図17 判別結果（左：中空桁，右：実桁）

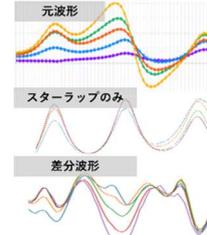


図18 差分波形

⑦特記事項

研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等

- ▶ 項目Aにおける中赤外分光イメージングデバイスによる測定結果を吟味すると、従来の据え置き機であるFTIR機の中でも反射法に基づく機器では計測されなかったスペクトルが、本機器では計測された。これはコンクリート表層のみならず、内部の情報に関するスペクトルをも同時に計測できている可能性が高く、この事象は放射光積算効果モデルにより説明可能ではないか、という検証作業に取り掛かっている。当該機器はこれまで、コンクリートの表層のみを計測していたと香川大学チームは考えていたが、この検証が妥当であれば、トモグラフィに関するアルゴリズムを組み合わせることにより、コンクリート内部の任意の位置におけるスペクトルが取得できる、機器の感度等の諸性能が向上されれば、鉄筋付近の塩化物イオン濃度を非破壊で推定できる可能性があることを示唆している。さらには、コンクリートのみならず、地盤や岩盤内部といった地球内部の検査も非破壊で可能であり、物理化学探査の超高度化といった破壊的イノベーションが期待できる。
- ▶ 項目Bにおける腐食診断では、市販のどのような機器であっても、シミュレーションを駆使して電流の分散特性を把握し、被測定面積が把握できれば、概ね正しく真の分極抵抗を評価できることを提示している。当該測定手法の大きな問題点として、鋼材の腐食領域が一樣ではない場合に、検査時に生じる電流は腐食箇所に集中して移動するために、各機器が仮定する被測定面積と一致せず、正しい分極抵抗評価を妨げることにあった。この問題点に対して、項目Aのデバイスにより塩化物イオン濃度が高い領域において、その直下の領域の鉄筋において一様に腐食が生じているといった仮定を設けることができれば、上述の電流の偏りを考慮しなくてよいことになるため、これらの方法を組み合わせることにより、真の分極抵抗および腐食速度を正しく評価できるものと考えている。
- ▶ 項目Cにおける破断検知では、国内での検証に加え、国外における検証が進んでいる。イタリアではポルチェベラ高架橋の事故を受け、鋼材破断に対する計測に対するニーズが高まっており、国内外のデータの大量取得とそれに基づいて機械学習モデルがより高性能化している点は特筆すべきである。また、韓国においては、軍事関連車両といった超重量車両の通行による橋梁へのダメージが問題となっており、そのような事例に対する検査結果も多く取得できている。橋梁に対する海外の国特有の問題に対しても解決できるポテンシャルを有している。破断検知アルゴリズムに自然言語処理AIモデルを搭載するといった試みも行っており、技術者に対して非常にフレンドリーなシステムが構築で来ている点も評価している。
- ▶ これらの技術の組み合わせにより、国内外の様々な橋梁に対する非破壊検査診断を容易に適切に可能とすることが期待される。

研究の見通し・進捗

項目Aに関しては、世界的な半導体不足に由来する国外製品の輸入の遅れが著しく、大幅な仕様変更を余儀なくされた。そのために塩化物イオン由来のスペクトルのピークの読みを従来とは異なる位置で行うことになり当初予定より遅れつつあったものの、2024年1月～3月で実施する検討でリカバリーできる見通しである。項目BおよびCに関しては、想定以上の進捗ができています。これらの技術群を基盤とする本研究は、次年度においては現場中心の測定を想定しており、実用化に向けた検討がより一層加速するものと考えています。