

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02221

研究課題名（和文）コンクリート表面近傍における電磁場応答の逆問題解析に基づく鋼材腐食の非破壊評価

研究課題名（英文）Nondestructive evaluation of steel corrosion in the concrete structures based on the inverse analysis of electromagnetic responses near the surface of concrete

研究代表者

鎌田 敏郎（Kamada, Toshiro）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10224651

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、かぶりコンクリートの影響を受けず、鋼材の腐食状況をコンクリート表面近傍で評価可能な非破壊評価手法を開発した。具体的には、腐食に伴う鋼材表面のミクロな磁性変化を、コンクリート表面近傍における空気中での電磁場応答として評価、定量化した。次に、外部より印加する交流磁場により腐食部の電磁場応答を能動的に制御し、かぶりコンクリート表面近傍における電磁場応答のマクロセンシングが可能な条件を明らかにした。さらに、コンクリート表面近傍の電磁場応答から「逆問題解析」により鋼材表面近傍における腐食状況をイメージングするアルゴリズムの開発を行い、腐食状況の再構成を行う手法の評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、コンクリート中鋼材表面の腐食を、コンクリート表面から計測し、鋼材表面の腐食状況を定量的、かつ視認性高く評価可能な非破壊評価技術として開発した。また、これらの手法を用いて、腐食を模擬した鋼板、鋼棒などの試験体の局所的な腐食を検出、可視化できることを確認した。本研究の成果は、コンクリート中鋼材を評価する新たな非破壊評価技術としてインパクトを有するものと考えられる。社会的な意義としては、高速道路や新幹線などの基幹的な社会基盤に対して現在実施されている大規模更新・修繕事業に適用し、必要かつ効果的な対策を講じる手法として活用される可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This research focused on establishing a nondestructive evaluation method for evaluating the status of corrosion of the steels in concrete structures directly from the surface of concrete without influenced by its cover. For this purpose;

(1) Microscopic change of magnetic properties near the surface of internal steel were evaluated and quantified by the electromagnetic response in the air. (2) By controlling the alternating current magnetic field, the appropriate testing condition for macroscopic sensing at the concrete surface was revealed. (3) Furthermore, the algorithm of imaging the corrosion status near the steel surface was developed by “inverse problem analysis”, and the method of reconstructing corrosion status was evaluated.

研究分野：土木材料、施工および建設マネジメント関連

キーワード：コンクリート表面 鋼材腐食 電磁場応答 逆問題 非破壊評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

社会基盤施設の多くを成す鉄筋コンクリート構造物において、構造物の構造安全性能に直接的な影響を与えるコンクリート内部の鋼材の腐食状況、鋼材腐食の可能性や腐食速度の評価は極めて重要であり、合理的な予防保全やライフサイクルコスト最小化のための方法論が求められている。従来は電気化学的手法をはじめ種々手法が適用されていたが、腐食状況を適確に評価する手法は未だ確立されていない。これは、鋼材がコンクリート中にあることで、鋼材の腐食状況を直接把握できないうえ、コンクリートの品質や含水状態、あるいはひび割れや剥離などの存在が検出信号に影響を及ぼし、非破壊評価手法の精度が大きく低下するなどの課題があるからである。既存の構造物においてコンクリート内部の鋼材の腐食の進展に伴って発生する減肉、腐食生成物の生成とともに変化する鋼材表面での磁気的現象を直接的に把握することは難しい。このため、磁気特性に焦点を当てることにより、コンクリート中での現象を空気中での現象として等価に把握することにより、鋼材表面におけるマイクロな磁性変化を、コンクリート表面近傍における磁気現象として非破壊で評価することが可能になる。以上の着想に基づき、コンクリート表面近傍における電磁場応答を逆問題解析することで、鋼材表面における腐食を再構成することが、コンクリート中鋼材の非破壊評価を構築する上で適切なアプローチであると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、かぶりコンクリートの影響を受けず、鋼材の腐食状況をコンクリート表面近傍で評価可能な非破壊評価手法の確立を目指した。具体的には、腐食に伴う鋼材表面のマイクロな磁性変化を、コンクリート表面近傍における空気中での電磁場応答として捉え、定量化することとした。次に、コンクリート表面近傍で検出した定量化データを、静磁場、動磁場により能動的に制御し、コンクリート中でのマイクロな磁気現象に変換することで、コンクリート表面近傍において鋼材表面の腐食状況を適確に評価可能なマロセンシング手法として確立することとした。さらに、コンクリート表面近傍における空気中での電磁場応答を基に鋼材表面の腐食状況を逆問題解析に基づきイメージングし、最終的には、コンクリート内部にあるため把握が困難であった鋼材の腐食現象を、すべてコンクリート表面近傍における空気中での現象として明らかにする非破壊評価手法として確立することを目的とした。

3. 研究の方法

研究目的を達成するため、以下の3つの研究テーマを設定し、開発を行った。

(1) 鋼材表面近傍のマイクロな磁性変化の評価

鋼材表面に発生する腐食状況として切削加工により腐食を模擬した断面欠損試験体 および腐食、塩水噴霧などにより腐食を模擬した試験体を作製した。これらの試験体を、GMR (巨大磁気抵抗効果素子) センサ、MI センサ (磁気抵抗) など高感度磁気センサを用いて計測し、腐食深さ・腐食範囲などが、鋼材表面近傍における磁気特性に与える影響を定量的に評価することとした。具体的には、腐食生成物の存在、鋼材の減容などにより、鋼材表面に発生する局所的な形状変化、透磁率、導電率などの電磁的特性の変化が電磁場応答にもたらす影響を鋼材表面近傍で測定し、腐食状況とこれらの電磁場応答の関係を明らかにした。

(2) コンクリート表面近傍における電磁場応答のマロセンシング

外部より印加する交流磁場により腐食部の電磁場応答を能動的に制御し、かぶりコンクリート表面近傍における電磁場応答のマロセンシングが可能な条件をまず明らかにした。また、電磁場有限要素法解析 (PHOTO-eddy, PHOTO-j ω 他) を用いて電磁場応答を解析し、これら解析結果とコンクリート表面近傍の電磁場応答の関係を実験的に評価した。

(3) 電磁場応答の逆問題解析による腐食部のイメージング

コンクリート表面近傍の電磁場応答から逆問題解析により鋼材表面近傍における腐食状況をイメージングするアルゴリズムの開発を行った。コンクリート表面近傍の電磁場応答を波数空間のフーリエ解析により基本波数パターンに分解し、これらの波数パターンに対応する鋼材表面近傍の腐食状況を再構成することにより、腐食状況の可視化を行う手法の評価を行った。

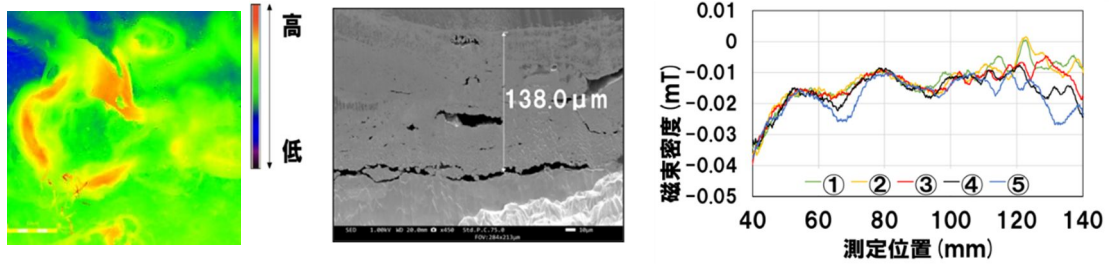
4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

鋼材表面近傍のマイクロな磁性変化の評価

腐食鋼材の表面形状、および断面形状と、鋼材表面近傍における磁気分布との関係を把握するため、腐食試験体の作製、観察、磁気特性の評価を行った。図-1 は、中性塩水噴霧サイクル試験により作製した腐食鋼材に対し、レーザー顕微鏡を用いて表面形状 (図-1(a)) を、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて断面 (図-1(b)) を観察した事例である。腐食生成物の磁気特性は試料振動型磁力計 (VSM) によって測定し、腐食生成物の質量磁化の値を算出した。これらより、鋼材の腐食の進行に伴い、腐食生成物の磁気特性に変化が生じることを明らかにした。そ

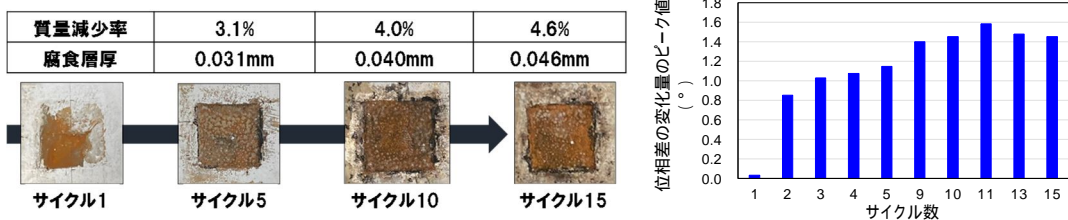
その後、MI センサを用い、鋼材表面近傍での磁気分布を測定した。測定事例を図-1(c)に示す。



(a) 腐食部の高さ(色相表示) (b) 断面 SEM 画像 (c) 鋼材表面近傍における磁気分布
図-1 鋼材表面近傍における観察と磁気分布の計測結果

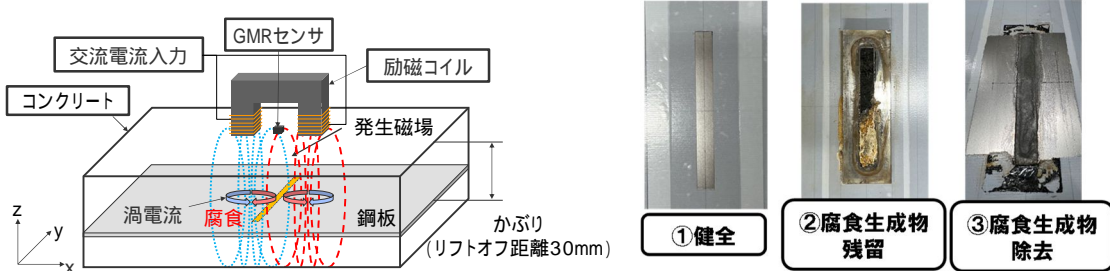
コンクリート表面近傍における電磁場応答のマクロセンシング

濃度 3% の塩水に 24 時間浸漬し、その後 48 時間乾燥させる乾湿繰返試験を実施し、逐次測定を行った(図-2(a))。この試験体に対し、コンクリート表面位置に相当するリフトオフ 30mm から、周波数 200kHz の交流磁場とサーチコイルを用いて位相差の変化量を測定した。位相差の変化量のピーク値はサイクル 10 までは徐々に増加し、サイクル 11 以降はほとんど変化しないことがわかった。また、腐食部と健全部の境界部近傍で電流密度、位相差の変化量は大きくなることを確認した。また、腐食生成物が電磁場応答に与える影響は、断面欠損に比べ小さいことが明らかになった。

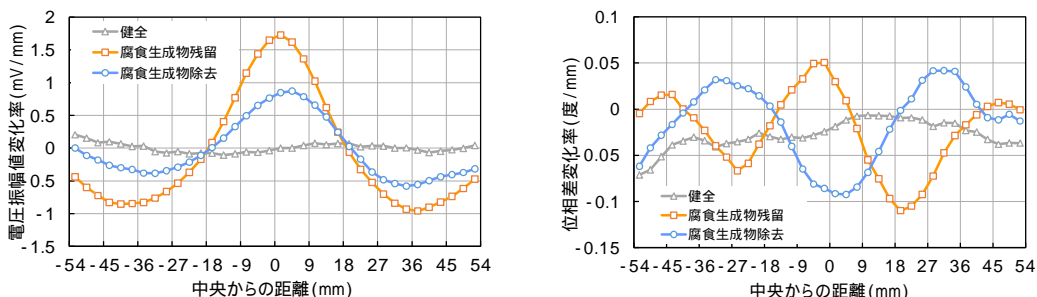


(a) 乾湿繰返り試験による腐食状況 (b) 位相差の変化量のピーク値
図-2 乾湿繰返り試験による腐食の進展と腐食状況の評価

次に、電食により腐食を模擬した鋼板(健全、腐食生成物残留、腐食生成物除去の3種類)を作製した。X線回折による成分分析で、腐食生成物は主に α -FeOOH と Fe_3O_4 であることを確認した。この試験体に対し、リフトオフ 30 mm から 4kHz の交流磁場を印加し、GMR センサで電圧振幅値、位相差の計測を行った(図-3-(a))。試験体の腐食範囲は 135 mm × 15 mm で、腐食深さを 1 mm とした。電食部において、電圧振幅値の変化率は腐食の中央部で凸の形状となるが、位相差は、腐食生成物残留と腐食生成物除去の場合では逆の傾向を示すことがわかった。電圧振幅値変化率、および位相差変化率における正負のピークの出現状況と腐食生成物の有無との関係を表-1 に示す。これらの関係より、腐食生成物の存在を推定できることが示唆された。



(a) 計測システム (b) 試験体(電食)



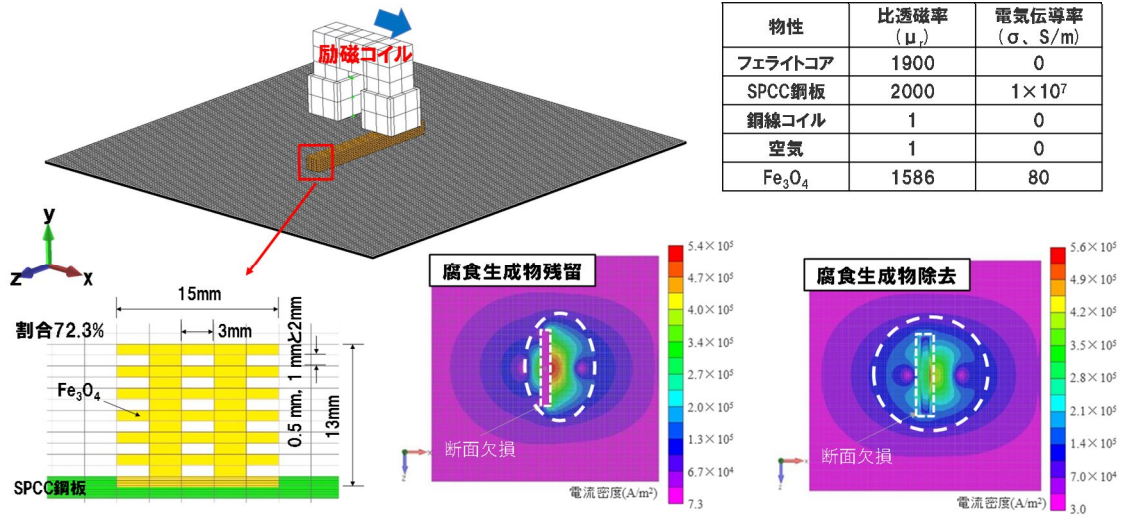
(c) 電圧振幅値変化率 (d) 位相差変化率

図-3 腐食を模擬した試験体による評価実験

表-1 各評価指標と腐食生成物の有無との関係

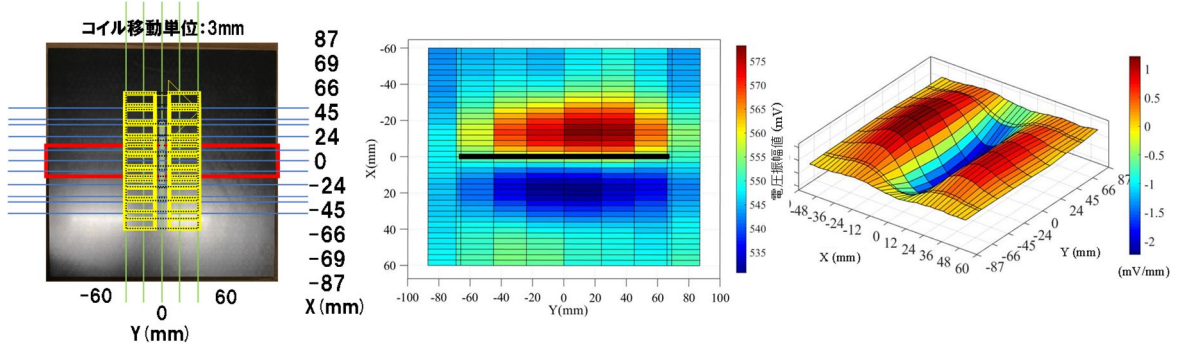
電圧振幅値変化率	位相差変化率	腐食生成物
正のピーク	正のピーク	あり
正のピーク	負のピーク	なし

鋼板表面での渦電流による二次的な誘導磁場の分布がセンサの受信信号に及ぼす影響を把握するため有限要素解析を行った。図-4 に解析モデルを示す。解析結果より、腐食生成物の存在が鋼板表面での渦電流の分布状況に影響を及ぼす可能性があることが明らかになった。



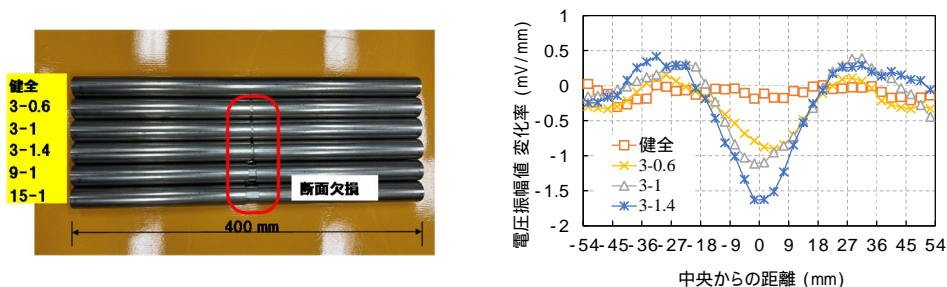
(a) 解析モデル (b) 腐食生成物が鋼板表面の渦電流分布に及ぼす影響
 図-4 腐食生成物の有無による渦電流解析（振幅値結果）

試験体表面における断面欠損の範囲（長さ 135mm，幅 3mm，深さ 1mm）を可視化するため、リフトオフ 30mm から二次元的に走査計測を行った事例を図-5 に示す。電圧振幅値，電圧振幅値変化率のいずれも色相の変化で断面欠損の存在，位置が視認性高く表現されることがわかった。



(a) 走査計測 (b) 可視化イメージ(電圧振幅値) (c) 可視化イメージ(電圧振幅値変化率)
 図-5 鋼材表面の可視化・イメージング例

鉄筋を想定し、断面欠損により腐食を模擬した丸鋼に対して計測を行った事例を図-6 に示す。断面欠損が存在する場合、断面欠損の位置で電圧振幅値変化率が負のピークを示した。電圧振幅値のピーク差と電圧振幅値変化率のピーク値から、鋼棒の断面欠損の有無，位置，および大きさが評価できる可能性があることがわかった。



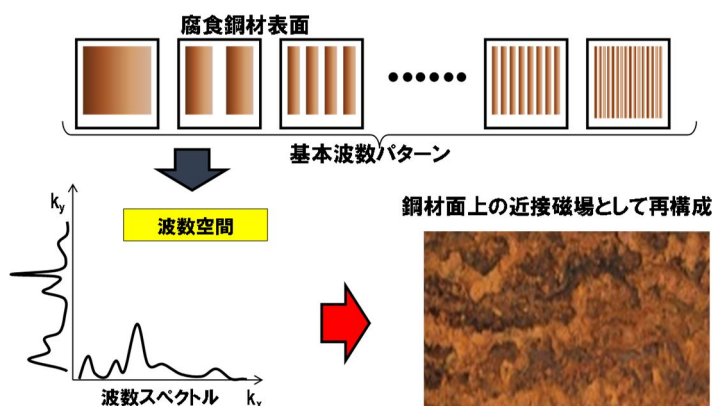
(a) 断面欠損を有する試験体（丸鋼） (b) 電圧振幅値変化率

図-6 鉄筋腐食を模擬した試験体による評価実験

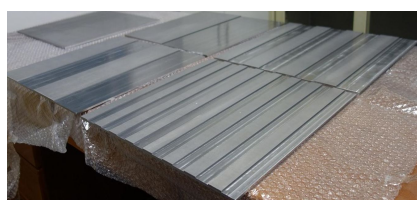
電磁場応答の逆問題解析による腐食部のイメージング

(1), (2)の評価後, 鋼材表面の腐食状況をイメージングするための基礎的な検討を行った. 鋼材表面での検討により得られたコンクリート面での磁性変化を鋼材形状と対応付け, コンクリート表面近傍の電磁場応答から逆問題解析により鋼材表面近傍における腐食状況をイメージングするアルゴリズムの開発を行った. まず, 鋼材表面の電磁場応答を計測し, 波数空間のフーリエ解析(式(1))により基本波数パターンに分解し, これらの波数パターンに対応する鋼材表面近傍の腐食状況を再構成することにより腐食状況のイメージングを行うための基礎評価を行った. 図-7(a)に逆問題解析のアルゴリズム, 図-7(b)に基本波数パターン試験体, 図-7(c)に多点同時計測を行うために開発されたセンサアレイ(8×8チャンネル)を示す.

$$H_i(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} h(k_x, k_y, z) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad \dots\dots (1)$$



(a) 逆問題解析のアルゴリズム



(b) 基本波数パターン試験体



(c) センサアレイと信号処理装置

図-7 逆問題解析による腐食部のイメージングの検討

(2)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究では, コンクリート中鋼材表面の腐食を, コンクリート表面近傍で計測し, 鋼材表面の腐食状況を評価可能な非破壊評価技術として開発した. また, これらの手法を用いて, 腐食を模擬した鋼板, 鋼棒などの試験体の局所的な腐食を検出, 可視化できることを確認した. これまでに, コンクリート内部における鋼材表面の腐食に伴う磁性変化を定量的に把握した事例は報告されていないことから, 本研究の成果はコンクリート中鋼材を評価する新たな非破壊評価技術としてインパクトを有するものと考えられる.

本研究は, コンクリート中で進展する腐食に伴う磁気現象を空気中での現象として等価に把握し, 外部磁場の制御によりミクロな磁性変化をコンクリート表面近傍で効率よく計測可能な電磁場応答へと変換した事例として, 先例のない成果と位置付けられる.

これらの成果は5本の査読付き論文として発表し, 公開を行った. また, 発表論文のうち, 1本は日本材料学会の「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan)へ英文論文として掲載され, 国内外からのオープンアクセスを可能とした.

(3)今後の展望

コンクリート構造物において, 構造物の構造安全性能に直接的な影響を与えるコンクリート内部の鋼材の腐食状況の評価は, 今後ますます重要性を増すと考えられる. このため, 本成果は, 高速道路や新幹線などの基幹的な社会基盤構造物に対して現在実施されている大規模更新・修繕事業に必要な効果的な対策を講じる手法として活用される可能性がある. さらに, 合理的な予防保全維持管理やライフサイクルコスト最小化のための方法論として貢献が期待できる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Li Shen, Shinichi Hattori, Koki Terasawa, Toshiro Kamada	4. 巻 71
2. 論文標題 A basic study on GMR sensor-based eddy current nondestructive testing method for corrosion detection in concrete structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 795-802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 梅谷晃大・江藤慶太・服部晋一・寺澤広基・鎌田敏郎	4. 巻 22
2. 論文標題 高周波交流磁場の位相変化に着目したコンクリート中鋼材の腐食評価手法に関する基礎的研究	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 139-144
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 沈 力・服部晋一・寺澤広基・鎌田敏郎	4. 巻 22
2. 論文標題 鋼板の腐食損傷および腐食生成物がGMRセンサにより検出される磁場に与える影響に関する研究	5. 発行年 2022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 151-156
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 服部晋一・沈 力・寺澤広基・鎌田敏郎	4. 巻 22
2. 論文標題 高周波交流磁場の位相変化に着目した コンクリート中鋼材の腐食評価手法に関する基礎的研究	5. 発行年 2022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 1258-1263
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田口 暁久・梅谷 晃大・寺澤 広基・服部 晋一・鎌田 敏郎
2. 発表標題 鋼材表面近傍における腐食生成物の磁気特性に関する基礎評価
3. 学会等名 土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江藤 慶太・梅谷 晃大・服部 晋一・寺澤 広基・鎌田 敏郎
2. 発表標題 鋼材表面の腐食がコンクリート表面近傍での電磁場応答に与える影響に関する基礎的検討
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田口 暁久・梅谷 晃大・寺澤 広基・服部 晋一・鎌田 敏郎
2. 発表標題 鋼材表面近傍における腐食生成物の磁気特性に関する基礎評価
3. 学会等名 土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021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
研究分担者	寺澤 広基 (Terasawa Koki) (50750246)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	内田 慎哉 (Uchida Shinya) (70543461)	富山県立大学・工学部・准教授 (23201)	

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