

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02047

研究課題名(和文)実フィールドでの構造物劣化診断に向けたパイプロレーダ鉄筋腐食評価システムの創出

研究課題名(英文)rebar corrosion evaluation using vibro-radar system for degradation diagnosis of concrete structure in actual field

研究代表者

三輪 空司(Miwa, Takashi)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：30313414

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)：励磁コイルに周波数50Hz程度の交流を印可し、鉄筋を正弦振動させ、その振動をドップラレーダの原理に基づき定量計測する加振レーダ法を考案した。また、ネットワークアナライザを基礎とする加振レーダ計測系を開発し、実験を行った。

本システムを用い、RC供試体の鉄筋を強制的に腐食させる電食実験中の鉄筋振動変位をモニタリングした結果、鉄筋腐食量の増加にともない振動変位が4倍程度まで増加することがわかった。

さらに、実フィールドでの適用性について検討するため、八戸工大が所有する撤去橋梁において実験を行い、問題なく計測可能であることを確認した。また、腐食の進んだ鉄筋の振動変位が増加する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、電気的手法による鉄筋腐食評価では鉄筋腐食確率や腐食速度が評価されており、腐食量を非破壊的に定量評価することは困難であった。しかし、本研究により鉄筋腐食による腐食生成物の影響により、鉄筋に与えた正弦的な外力に対する振動応答が大きく増加することが明らかとなった。また、振動変位は腐食量に対応しており定量的な腐食量評価の可能性が示唆された。さらに、実フィールドでの有効性も示唆され、実用的な鉄筋腐食評価技術への発展が期待できる。

振動変位の増加は鉄筋の付着力の低下が要因と考えられ、これまで耐力推定に重要であるにもかかわらず、その場計測の困難であった鉄筋付着力の評価にも結び付く可能性がある。

研究成果の概要(英文)：An vibro-radar method was developed in which the sinusoidal vibration displacement of a reinforcing bar in a concrete was quantitatively measured based on the Doppler radar principle by applying an alternating current with a frequency of about 50 Hz to the exciting coil placed on the concrete.

We also developed a vibration radar measurement system based on a network analyzer. Using this system, as a result of monitoring the vibration displacement of the rebar during the electrolytic corrosion experiment that forcibly corrodes the rebar of the RC test pieces, it was found that the vibration displacement increased to about 4 times as the corrosion of the rebar increased.

Furthermore, in order to examine the applicability in the actual field, we successfully conducted an experiment on test pieces of removed bridge in Hachinohe Institute of Technology. In addition, the results showed that the vibration displacement of the corroded rebar increased.

研究分野：ドップラレーダ技術を用いた近距離探査システム

キーワード：電磁波レーダ 非破壊検査 鉄筋腐食 加振 振動変位

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国の 21 世紀における課題の一つに、『持続可能かつ安全、安心』な社会基盤設備の構築が挙げられる。しかし、高度成長期に建設された鉄筋コンクリート(RC)構造物の多くは 40 年以上を経過し、膨大な維持管理コストの増加が懸念されている。鉄筋が腐食、膨張すると、コンクリートに微細なひび割れが発生し、コンクリートの剥離や著しい強度低下の要因となる。腐食評価として鉄筋のはつり出しを伴う自然電位法や分極抵抗法等があるが、いずれも精度に問題があり、微破壊試験であることが問題となっていた。非破壊試験としては弾性波を用いて鉄筋腐食による内部ひび割れや伝搬速度の増加をとらえる手法が研究されているものの鉄筋の劣化を直接評価できないことや、接触的な手法であるため迅速性に欠けるなど実用には至っていない。このように、非破壊的に簡易かつ迅速に鉄筋の腐食を判別可能な信頼に足る方法は国内外において提案されておらず、高精度で効率的な鉄筋腐食評価技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

迅速かつ効率的な鉄筋の非破壊検査法として数 GHz 帯を使用する RC レーダが知られているが、空間分解能は 5 cm 程度であり、 μm オーダの鉄筋腐食の評価にはこれまで利用されていなかった。申請者はこれまで計測対象を振動させることにより非振動(直流)成分と振動(ドップラ)成分の両方を計測し、振動成分波形と非振動成分波形の振幅比から、計測対象の振動振幅が得られることを見出した。そこで、コンクリートの表面から励磁コイルにより鉄筋を振動させ、その鉄筋振動変位を非破壊的に計測できれば鉄筋-コンクリート間の鉄筋腐食による機械的変化を高精度に評価できると考えた。従って、本申請では高精度なアクティブ鉄筋振動イメージングシステムを試作し、鉄筋腐食進展期から劣化期までの腐食ステージを評価可能な評価システムを構築し、フィールド実証実験を通じて本手法の有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 加振レーダによる振動変位推定の定式化

レーダで照射された孤立反射物体が正弦的に振動する際の反射波レーダ波のドップラ周波数から、振動物体の振動変位を推定する手法について定式化した。

(2) 加振レーダシステムの構築

レーダ波形に対応するインパルス応答を得るため、1~9 GHz の広帯域にわたり周波数を掃引し、その伝達関数を計測可能なネットワークアナライザを用いたステップ周波数レーダシステムを基礎とした加振レーダシステムの構築を行った。



図 1 電食中の加振レーダ実験の概要

(3) 電食試験における鉄筋腐食の評価

鉄筋の腐食量と鉄筋振動変位との関係の評価するため、図 1 に示すような RC 供試体の電食試験を行った。電食試験とは 6% の食塩水に銅板、RC 供試体を浸漬し、鉄筋に陽極、銅板を陰極として電流を流し、鉄筋を強制的に腐食させる試験である。RC 供試体は鉄筋径 16 mm、鉄筋かぶり 30 mm とし、5 体を同時に電食開始した。電食電流は、38 日目まで 60 mA とし、それ以後 120 mA とした。電食試験の最中、供試体上面の鉄筋直上にコイルとアンテナを配置し、供試体上面から 1 日 1 回加振レーダ計測を実施し、鉄筋腐食による鉄筋振動変位の経時変化をモニタリングした。また、14、21、38、46、53 日目において、それぞれ 1 体ずつ電食を終了させ、鉄筋を除錆した後、その時点での鉄筋腐食減量の測定を行った。取り出した鉄筋の腐食減量から、電食試験における積算印加電流と腐食減量の関係を近似的に得た。

(4) フィールド実験への適用

フィールド実験として、青森県三戸郡三戸町で 1932 年より共用された橋長 35m、3 径間単純 RCT 桁のラーメン構造の黄金橋の撤去の際、橋梁から切り出した試験体に適用した。本試験体は図 2(a) のように八戸工科大学敷地内に気中暴露状態にある。計測は図の赤線枠内において鉄筋の位置を特定した後、図 2(b) のような配置で加振レーダ実験を行い実フィールドでの適用性を検討した。計測対象鉄筋は図 2(c) の鉄筋 4、5 であり、鉄筋 5 には錆び汁が多くコンクリート断面に現れていた。尚、鉄筋かぶりは 1.5 cm ほどである。この実験では図 2(d) に示すようなアクチュエータによる移動機構を用いて鉄筋に直交する方向に 5 mm 間隔で 60 mm スキャンし、イメージングベースの振動変位推定を行った。尚、本計測は加振周波数 57 Hz および 480 Hz とし、コイルに印加した電流は 5 Arms 程度とした。



(c) 計測対象鉄筋 (d) 実験の様子
図 2 フィールド実験の概要

4. 研究成果

(1) 加振レーダによる振動変位推定の定式化

アンテナから、計測対象に向け単一周波数 f の平面波状の電波を照射し、距離 l 離れた反射体からの反射波を受信する状況を考える。このとき、受信波の伝達特性 $G_0(f)$ は(1)式となる。

$$\dot{G}_0(f) \cong \dot{R}\dot{P}(f)e^{-\frac{j2\pi f 2l}{v}} \quad (1)$$

ここで $\dot{P}(f)$, \dot{R} はそれぞれ、送信パルスの周波数特性、反射体の反射係数である。さらに、そのインパルス応答 $\dot{g}_0(t)$ は(2)式となる。

$$\dot{g}_0(t) = \dot{R}\dot{p}\left(t - \frac{2l}{v}\right) \quad (2)$$

$\dot{g}_0(t)$ は反射体までの往復時間 $t = 2l/v$ においてピークを有する波形であり、通常のレーダ反射応答と等価な時間波形である。

さらに、計測対象を振動変位 δ 、単一周波数 f_v で正弦振動させると、計測対象が運動しているためドップラ効果が起こる。計測対象が等速で運動していれば、反射周波数が変化する周波数遷移が生じるが、電磁波の往復伝搬距離は $2l + 2\delta \sin 2\pi f_v t$ であり、振動振幅が波長に対して極めて小さく、その場で正弦振動する場合、反射電磁波の周波数遷移ではなく、周波数 $f \pm n f_v$ の n 次ドップラ成分への周波数分離が起こる。これは、いわゆる周波数変調と同じであり、反射波の周波数が振動周波数の整数倍で変調された成分に分離する。これらうち、元の周波数 f を無変調成分、変調成分のうち最も振幅の大きい1次成分 ($f \pm f_v$) をドップラ成分と呼び、以後、この二つの成分のみを議論する。ドップラ成分の受信波の伝達特性を $\dot{G}_d(f)$ とすると、無変調成分の伝達特性 $\dot{G}_0(f)$ を用いて近似的に(3)式のように表される。

$$\dot{G}_d(f) \cong \frac{2\pi f}{v} \delta \dot{G}_0(f) \quad (3)$$

したがって、振動物体に対するインパルス応答 $\dot{g}_d(t)$ は以下のように無変調成分波形 $\dot{g}_0(t)$ の時間微分と相似となり、その振幅は振動変位 δ に比例する。

$$\dot{g}_d(t) = \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \dot{g}_0(t) \quad (4)$$

ここで、このように、本手法では、通常の電磁波レーダ法で得られるレーダ波形（無変調成分）に加え、振動する物体のみを反射体とするレーダ波形（ドップラ成分）の二種類のレーダ波形が独立に得られることに大きな特徴を有している。また、反射波の到達時間と伝搬速度から、反射波のアンテナからの距離 l が得られ、無変調成分とドップラ成分での反射波の最大振幅をそれぞれ、 A_0 , A_1 とすれば、振動変位は $\delta = v A_1 / A_0$ となり、両者の振幅比として与えられる。したがって、両成分の反射波が明瞭に分離していれば、任意の距離にある振動物体の振動振幅をレーダによる高い空間分解能で推定することが可能である。

また、加振レーダ波形は反射体距離に対応した位相情報も有しており、アンテナを動かしながら得られた加振レーダ波形を合成開口処理することにより、静止物体、および振動物体の映像化も可能であり、画像上での振幅比較により、イメージング画像ベースでの振動変位を得ることも可能である。送受一体型レーダ波形の時間軸はアンテナから反射体までの距離に換算でき、ある距離 l に現れる波は、アンテナを中心とする半径 l の球面上の任意の点から到来した可能性がある。そこで、仮想波源の位置 (x, z) を仮定すると、 n 番目のアンテナ位置 $(x_n, 0)$ から仮想波源までの距離 l はアンテナ位置と仮想波源の位置の関数として式(5)で表される。

$$l(x_n, x, z) = \sqrt{(x_n - x)^2 + z^2} \quad (5)$$

光速を c 、比誘電率を ϵ_r とすれば、媒質の伝搬速度は $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ であり、ある仮想波源 (x, z) から各アンテナ位置に到来した波の振幅は遅延時間 $2l/v$ に表れる。したがって、アンテナ位置を中心と距離 l の同心円状に波形振幅 $g(x_n, 2l/v)$ を分布させ、すべてのアンテナ位置について足し合わせる操作を全ての仮想反射点に適用すれば、真の反射点のみで同一位相の波が成長し評価関数値が極大となる。無変調成分の時間微分とドップラ成分のレーダ波形に対応した評価関数 $\dot{h}_0(x, z)$, $\dot{h}_d(x, z)$ は式(6, 7)で表される。

$$\dot{h}_0(x, z) = \sum_{n=1}^N \frac{d}{dt} \dot{g}_0(x_n, 2l(x_n, x, z)/v) \quad (6)$$

$$\dot{h}_d(x, z) = \sum_{n=1}^N \dot{g}_d(x_n, 2l(x_n, x, z)/v) \quad (7)$$

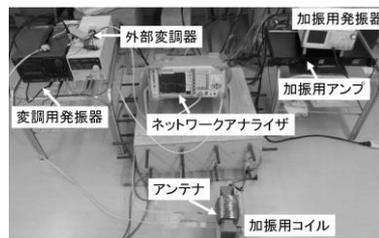
したがって、評価関数画像の最大値の位置を鉄筋の推定位置 (x_r, z_r) とし、鉄筋反射位置でのそれぞれの評価関数の振幅値を用いて、式(8)により鉄筋の推定振動変位が得られる。

$$\tilde{\delta}(x_r, z_r) = v |\dot{h}_d(x_r, z_r) / \dot{h}_0(x_r, z_r)| \quad (8)$$

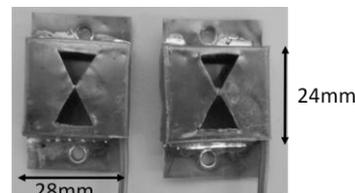
ここで、ドップラ成分は無変調成分の時間微分と等価であり絶対値部は時間の単位を持つことに注意されたい。これが、イメージングベースの鉄筋振動変位推定法である。

(2) 加振レーダシステムの構築

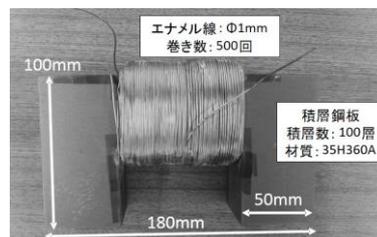
図 3(a)に本システムの概要を示す。レーダ波形に対応するインパルス応答はネットワークアナライザにより 1~9 GHz の広帯域にわたり周波数を掃引し、その伝達関数を計測し、逆フーリエ変換することで得られ、無変調成分と呼ぶ。また、振動物体のドップラ成分は GHz 帯の電磁波に対し 100 Hz 程度の周波数の変化した成分であるが、これを計測するために電磁波の送信周波数を振動周波数だけ変調する回路を外部に設けている。さらに、加振用の発振器や交流アンプも使用する。電磁波の送受信には図 3(b)に示すボウタイ状に開口部を設けたテーパ型のスロットアンテナ（ボウタイスロットアンテナ）を用いる。また、図 3(c)に励磁コイルを示す。コアにはコの字型の 100 層の積層鋼板を使用し、直径 1 mm のエナメル線を 500 巻した。コイルの直流抵抗は 2.4 Ω、インダクタンスは 200 mH であった。コイルへの印加電流は 10 A、印加周波数は 57 Hz であり、鉄筋はその 2 倍の 104 Hz で振動する。



(a) 加振レーダシステム



(b) ボウタイスロットアンテナ



(c) 励磁コイル

図 3 試作システム

(3) 電食試験における鉄筋腐食の評価

図 4 上段に電食試験開始後 38, 46, 53 日目に鉄筋を取り出した際の RC 供試体の切断面の様子を示す。38 日目から微細なひび割れが目立ち始め、46 日目では表面及び、側面に延びる腐食ひび割れが発生していた。

図 4 中段に鉄筋取り出し時点までの加振レーダ計測における無変調成分波形の経時変化を示す。それぞれの供試体において 0.7 ns 付近に鉄筋反射波のピークが見られているが、経過日数の増加によって振幅が徐々に低下する傾向がみられるものの明瞭な変化は見られないことがわかる。この振幅変化は通常のレーダ計測においても得られる情報であるが、前述のように水分により反射振幅は大きく影響を受けるため、振幅の低下だけから腐食の評価を行うことは困難である。

また、図 4 下段にドップラ成分波形の経時変化を示す。ドップラ成分では、電食初期は 0.7 ns 付近の振幅は小さいものの、経過日数 20~25 日において急激に振幅が増加し、その後も増加を続けていることがわかる。これは鉄筋の振動振幅が強くなったことを示しており、加振レーダ法におけるドップラ成分を観測し、モニタリングすることにより、非破壊的にコンクリート内部の鉄筋の動きやすさを捉えることが可能であることがわかる。また、46 日目以降のようなひび割れに対して、超音波法ではひび割れの反射が大きくなり、それ以深へ超音波が透過しにくくなるものの、電磁波では数 mm 程度のひび割れであれば影響を受けずに鉄筋の振動特性を評価できる。

また、図 4 の結果から鉄筋反射の無変調、ドップラ成分の振幅を求め、波形ベースの鉄筋振動変位の経時変化を算出した。さらに、電食後順次取り出した 5 体の鉄筋の単位断面面積当たりの腐食量と経過日数との関係を得た。

図 5 に鉄筋振動変位と推定鉄筋腐食減量の関係を示す。尚、振動変位は 5 体までの振動変位の平均値であり、その標準偏差幅も示している。図より単位鉄筋表面積あたりの腐食減量が 50~60 mg/cm² から振動変位が上昇していることがわかる。表面ひび割れが発生する腐食量は表面観察の結果から概ね 70 mg/cm² であり、ひび割れが表面に顕在化するまでに振動変位は一旦減少した後、増加に転じることがわかる。また、ひび割れ発生後も腐食量の増加と共に振動変位は 15~20 μm 程度（健全状態の振動変位の 3~4 倍）まで上昇していくことがわかる。それ以後は腐食

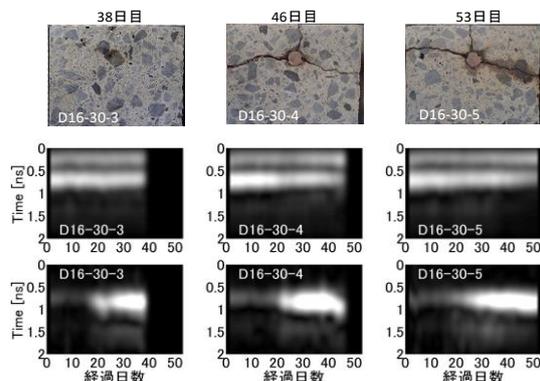


図 4 電食時の加振レーダ波形の経時変化

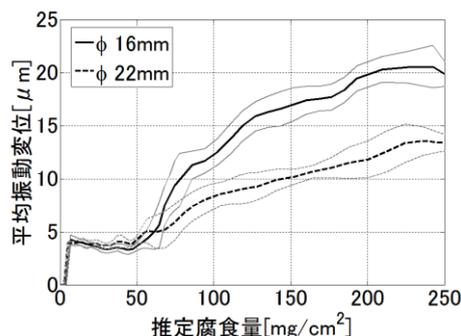


図 5 電食時の鉄筋振動変位と推定鉄筋腐食量の関係

量の増加によらず、頭打ちとなる傾向が見られた。また、直径 22 mm の鉄筋を用いた RC 供試体についても同様な傾向が見られた。

腐食初期に振動変位が減少する理由として、錆汁等の腐食生成物の膨張率が大きいこと、腐食初期では鉄筋周囲の膨張圧が増加し、鉄筋が振動しにくくなったためと考えられる。また、その後、膨張圧の増加に伴いコンクリート内部で微細なひび割れがコンクリート表面に向けて進展し始めると、ひび割れによりコンクリートが鉄筋を付着させようとする拘束圧が低下するため、鉄筋が動き易くなり振動変位が増加していくものと考えられる。

(4) フィールド実験への適用

鉄筋 4 は錆汁が確認されたが見かけ上最も劣化の少ない鉄筋である。図 6 に 57 Hz で移動計測を行った際に得られた無変調成分、ドップラ成分のレーダ波形を並べたレーダプロファイルを示す。図より埋設物に対して垂直に移動計測することで 0.7 ns 付近に鉄筋反射のプロファイルが得られている。また、ドップラ成分の信号強度は直流成分と比較して 60 dB ほど小さく、SN 比が大きく低下している。

図 7 に移動計測によって得られた加振周波数 57 Hz、480 Hz における直流成分とドップラ成分のイメージング後の断面イメージを示す。図より鉄筋位置が明瞭に得られることがわかる。また、鉄筋反射のピークの位置が実際のかぶりである 15 mm より深い位置に確認できるが、これは計測時に移動機構の治具がコンクリートの抵抗を受け、一定の動きができなかったためであると考えられる。断面イメージから鉄筋反射位置のピークを用いて(8)式により振動変位は 57 Hz、480 Hz においてそれぞれ 4.53 μm 、7.64 μm であり、480 Hz のほうが 56 Hz よりも約 68.5 % 大きい変位が得られた。

鉄筋 5 は見かけ上錆汁が最も確認された鉄筋である。図 8 に移動計測によって得られた加振周波数 57 Hz、480 Hz における直流成分とドップラ成分のイメージング結果を示す。図より鉄筋反射のピークの位置が実際のかぶりである 15 mm より深い位置に確認できるが、これも鉄筋 4 と同様の理由であると考えられる。断面イメージから鉄筋反射位置のピークを用いて振動変位を算出すると、57 Hz の振動変位は 17.1 μm 、480 Hz は 23.2 μm であり、いずれも鉄筋 4 の 3~4 倍の振動変位が得られた。また、480 Hz のほうが 56 Hz よりも約 35.5 % 大きい変位が得られた。

表 1 にフィールド実験の計測で得られた振動変位のまとめを示す。鉄筋 4 に比べ鉄筋 5 のほうが大きな振動変位となっており、この要因として、鉄筋 5 は錆汁が最も多く目視された鉄筋であり、コンクリート内部の劣化が激しいものであることが考えられる。そのため、コンクリート内部においてひび割れなどの劣化が起きており、鉄筋とコンクリートの付着力が弱まることで大きな振動変位が得られたと考えられ、本手法の有効性が確認された。

また、両鉄筋において振動変位は 57 Hz よりも 480 Hz のほうが大きく、大きい振動を得るには加振周波数は高い方が良いことがわかる。また、鉄筋によりその増加率も異なることから本構造物において振動変位の加振周波数依存性があることも実験的に示された。

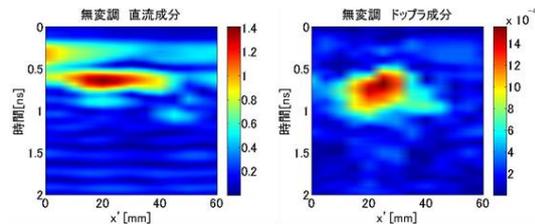
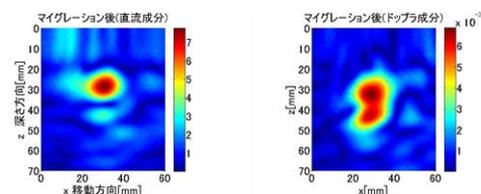
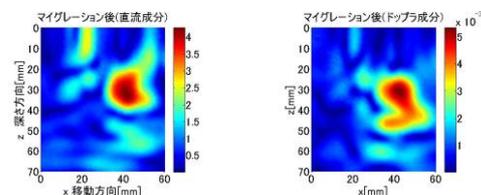


図 6 鉄筋 4 のレーダプロファイル (57Hz)

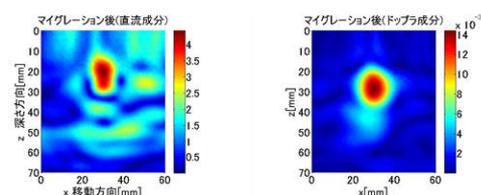


(a) 57Hz

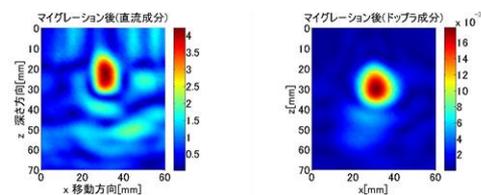


(b) 465Hz

図 7 鉄筋 4 のイメージング結果



(a) 57Hz



(b) 465Hz

図 8 鉄筋 5 のイメージング結果

表 1 フィールド実験での振動変位 [μm]

| | 57Hz | 480Hz | 増加率 [%] |
|-----------|------|-------|---------|
| 鉄筋 4 | 4.53 | 7.64 | 68.5 |
| 鉄筋 5 (錆汁) | 17.1 | 23.2 | 35.5 |
| 増加率 [倍] | 3.8 | 3.0 | |

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 三輪 空司 | 4. 巻 58巻11号 |
| 2. 論文標題 加振レーダ法による構造物内の非破壊鋼材腐食評価 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 計測と制御 | 6. 最初と最後の頁 843-847 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11499/sicejl.58.843 | 査読の有無 無 |
| 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 三輪 空司, 松井 隼平, 中村 和弘 | 4. 巻 42 |
| 2. 論文標題 加振パルスドップラレーダの開発と鉄筋振動変位の周波数依存性 | 5. 発行年 2020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 印刷中 |
| 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 三輪空司, 鈴木智洋 | 4. 巻 55巻8号 |
| 2. 論文標題 六自由度バケット位置姿勢推定法による地中建機用バケット一体型地中レーダシステム | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 499-506 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.9746/sicetr.55.499 | 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 三輪空司, 高橋一徳, 松井隼平 | 4. 巻 41 |
| 2. 論文標題 加振パルスドップラレーダによるRC構造物内鉄筋振動変位計測 | 5. 発行年 2019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 1781-1786 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 三輪空司, 本多秀聡, 富田沙希, 中川貴之 | 4. 巻 40 |
| 2. 論文標題 加振レーダ法を用いた電食中の鉄筋振動変位計測による早期鉄筋腐食検出の試み | 5. 発行年 2018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 1605-1610 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 三輪空司, 本多秀聡, 富田沙希, 中川貴之 | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 鉄筋腐食量評価のための加振レーダ法による電食中の鉄筋振動変位計測 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 非破壊検査シンポジウム論文集 | 6. 最初と最後の頁 97-102 |
| 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 小関 寿樹弥, 三輪 空司, 親本 俊憲, 宇治川 智 | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 レーザセンサ測位を用いたフリーハンド型RC レーダによる細径配線探査 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 非破壊検査シンポジウム論文集 | 6. 最初と最後の頁 107-112 |
| 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 堀内亮太, 三輪空司 | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 加振レーダを用いたイメージングによる鉄筋部位の高精度振動変位推定 | 5. 発行年 2018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 403-408 |
| 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 飯野和樹, 三輪空司, 迫井裕樹, 小澤満津雄, 阪口裕紀 | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 加振レーダ法における振動変位とコンクリートの弾性係数依存性の検討 | 5. 発行年 2018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 409-414 |
| 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 清水俊秀, 三輪空司, 鈴木真, 鎌田敏郎 | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 増厚床板下の水平ひび割れ探査のための加振ドップラレーダシステムの開発 | 5. 発行年 2018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 517-522 |
| 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 三輪空司, 本多秀聡, 小澤満津雄, 栗田伸幸 | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 鉄筋腐食評価のための加振RCレーダ法による鉄筋振動変位計測 | 5. 発行年 2017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 1777-1782 |
| 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 オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 本多秀聡, 三輪空司, 志岐仁成, 鬼束俊一 | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 加振レーダ法による塩害を受けたRC部材への鉄筋腐食評価の適用 | 5. 発行年 2017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 125-130 |
| 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 津野 祐丞, 三輪 空司 | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 円筒スロットアンテナによるコアドリル前方鉄筋探査 | 5. 発行年 2017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 527-532 |
| 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18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 中村和弘, 高根沢彰兵, 小松圭太, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 鉄筋振動変位計測のための加振パルスドップラレーダの開発 |
| 3. 学会等名 第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 久保田僚平, 三輪空司, 小澤満津雄 |
| 2. 発表標題 RC構造物中の鉄筋誘導加熱時のAE発生挙動と加振レーダにおける鉄筋振動変位との関係 |
| 3. 学会等名 第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水崇至, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 加振レーダ法のためのFEM磁界シミュレータを用いた励磁コイル形状の最適化 |
| 3. 学会等名 第10回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 三輪 空司, 小関 寿樹弥 |
| 2. 発表標題 マウスセンサを用いた 2D 測位によるフリーハンド型 RC イメージングレーダ |
| 3. 学会等名 第36回センシングフォーラム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 松井隼平, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 励磁コイル加振に伴うRC 構造物内鉄筋振動変位計測の鉄筋腐食評価への適用 |
| 3. 学会等名 第36回センシングフォーラム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高根沢彰兵・三輪空司 |
| 2. 発表標題 ハンドドリル先端モニタリングのためのRCドップラレーダの開発 |
| 3. 学会等名 第15回地下電磁計測ワークショップ |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田玲央, 三輪空司, 小澤満津雄 |
| 2. 発表標題 加振レーダ法における振動変位とコンクリートの弾性係数依存性 |
| 3. 学会等名 第15回地下電磁計測ワークショップ |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 清水俊秀, 三輪空司, 鈴木真, 鎌田敏郎 |
| 2. 発表標題 加振ドップラレーダ法を用いた増厚床版下の水平ひび割れ探査 |
| 3. 学会等名 2018年度非破壊検査秋季大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 三輪空司, 鈴木智洋, 高根沢彰兵 |
| 2. 発表標題 バケット一体型地中レーダシステムによる掘削面下の埋設物イメージング |
| 3. 学会等名 2018年度土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松井隼平, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 高周波加振ドップラレーダシステムにおける計測時間高速化 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田玲央, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 加振レーダ法によるフレッシュコンクリートの硬化過程の強度評価 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高根沢彰兵, 三輪空司, 高橋 一徳 |
| 2. 発表標題 鉄筋コンクリート穿孔時ドリル先端リアルタイムモニタリングに関する研究 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 三輪空司 |
| 2. 発表標題 加振レーダ法による鉄筋振動変位計測のRC構造物劣化評価への適用 |
| 3. 学会等名 土木学会応用力学委員会計算力学小委員会, 計算力学フォーラム(招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 清水俊秀, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 加振ドップラレーダにおける励磁コイルの最適化 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 飯野和樹, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 加振レーダ法によるコンクリート内振動変位の弾性係数依存性の検討 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 本多秀聡, 三輪 空司 |
| 2. 発表標題 加振レーダ法による実構造物RC部材への鉄筋腐食評価の適用 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 堀内亮太, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 鉄筋部位の加振ドップライメージングによる振動変位推定 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小関寿樹弥, 三輪空司 |
| 2. 発表標題 フリーハンド型RCレーダのためのレーザーマウスを用いたアンテナ位置推定 |
| 3. 学会等名 電気学会北関東支部群馬栃木合同発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| 松井隼平, 2019年度センシングフォーラム研究奨励賞, “励磁コイル加振に伴うRC 構造物内鉄筋振動変位計測の鉄筋腐食評価への適用”, (2020年3月26日) |
|---|

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 | 迫井 裕樹 (Sakoi Yuuki) (30453294) | 八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授 (31103) | |
| 研究分担者 | 小澤 満津雄 (Ozawa Mitsuo) (80313906) | 群馬大学・大学院理工学府・准教授 (12301) | |
| 研究分担者 | 栗田 伸幸 (Kurita Nobuyuki) (60435493) | 群馬大学・大学院理工学府・准教授 (12301) | |