

令和 5 年 9 月 14 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02395

研究課題名（和文）鉄筋振動変位スペクトロスコピーの劣化診断応用に向けた電磁パルス加振レーダの開発

研究課題名（英文）Development of Vibro-Radar with Electromagnetic Pulse for Deterioration  
Diagnosis Application of Rebar Vibration Spectroscopy

研究代表者

三輪 空司（Takashi, Miwa）

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：30313414

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では電磁パルスにより加振されたコンクリート内部の鋼材の広帯域な振動応答を計測可能なドップラレーダ変位計測システムを開発し、約8cmの深さの鋼材振動を非破壊的に計測可能とした。また、劣化コンクリートへの適用例として、PCシースのグラウト充填評価では、未充填の場合に特有の鋼材1次たわみ振動を計測できた。さらに、鉄筋腐食評価への適用では、鉄筋直上の振動応答のスキアン計測により、腐食部位においてパルス状の振動ピークが観測され、そのピーク値が磁性を有する黒錆の量に比例する可能性を示唆した。この研究は世界初の試みであり、鉄筋腐食の非破壊定量評価手法の開発に向けた極めて大きな成果になると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

RC構造物の劣化の主要因はコンクリート自体よりも鉄筋付着力の低下、PC鋼材のグラウト充填不足、鉄筋腐食など、鋼材の劣化に起因するものが多い。これまで、コンクリート構造物内の鋼材自身の機械的な応答は弾性波応答として間接的に計測するのみであったが、本手法の発展により直接これらを計測できれば極めて広範囲の劣化評価に応用できる。

特に鉄筋腐食評価においては、腐食量の定量評価が最大の課題となっており、本手法が磁性を有する黒錆が電磁パルスに反応して変形する応答を捉えていると考えており、振動応答のピーク値が黒錆量に比例することが示唆できたことは特筆すべき成果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, an Quadrature Doppler radar displacement measurement system was developed to measure the broadband vibration response of steel inside concrete vibrated by electromagnetic pulses, enabling nondestructive measurement of steel vibration at a depth of approximately 8 cm. As examples of applications to deteriorated concrete, we were able to measure the first-order deflection vibration of the steel material, which is specific to the unfilled case, in the evaluation of grouting of PC sheathing. Furthermore, as a result of the application to the evaluation of rebar corrosion, a pulse-shaped vibration peak was observed in the corroded area by scanning the vibration response just above the rebar, suggesting that the peak value is proportional to the amount of black rust. This research is the first attempt in the world and is considered to be an extremely significant achievement toward the development of a nondestructive quantitative evaluation method for rebar corrosion.

研究分野：計測工学

キーワード：非破壊検査 電磁パルス 加振 コンクリート構造物 電磁波レーダ 鉄筋腐食 振動計測

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期を中心に建設された橋梁や等の鉄筋コンクリート (RC) 構造物の半数は建設後 50 年以上が経過し、耐用年数を越えた RC 構造物の劣化進行が社会的な課題となっている。その劣化要因の多くは鉄筋腐食といわれており、鋼材の劣化診断技術が求められている。既存の劣化診断技術としてハンマや鋼球などにより弾性波を入力し、コンクリート表面での弾性波応答を捉える衝撃弾性波法が検討されている。しかし、弾性波はかぶりコンクリートのひび割れやセンサの接触状態の影響を受けやすいといった問題があり実用化の妨げとなっている。

そこで、我々は伝搬経路の影響を受けにくい電磁波に着目し、励磁コイルによりコンクリート中の鋼材を 100 Hz 程度で正弦振動させながら、ドップラ技術によりその振動変位を定量的に計測する加振レーダ法を提案し、腐食量に応じて振動変位が増加することを明らかにしてきた。しかし、単一周波数の加振では劣化に特有の共振現象を捉えることは困難であり、劣化評価の適用範囲が限られていた。

### 2. 研究の目的

鋼材の過渡振動応答を直接捉えることができれば、鋼材の付着低下、水平ひび割れ等、RC 構造物の様々な劣化現象を非破壊かつ高精度に捉えることが可能な画期的な技術になると考えられる。そこで、本研究では電磁パルスによりコンクリート内部の鋼材を加振し、その過渡振動応答を非破壊的に計測可能なシステムを開発することで、コンクリート内の鋼材劣化を評価する手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) パルスドップラレーダの定式化

パルス幅の十分狭い任意の単峰性パルス波  $u(t)$  を考える。尚、 $u(0) = 1$  である。このとき、レーダの送信変調パルス波形  $\dot{p}(t)$  は搬送周波数を  $f_c$  とすると式(1)のように表される。

$$\dot{p}(t) = e^{j2\pi f_c t} u(t) \quad (1)$$

反射体からの反射パルス波を送信点で受信した複素レーダ波形  $\dot{h}(t, T)$  は式(2)で表される。

$$\dot{h}(t, T) = R\dot{p}\left(t - 2\frac{L + \delta(T)}{v}\right) \quad (2)$$

ここで、 $T$  はパルス繰り返し時刻、 $L$  は送受信間距離、 $\delta(T)$  は反射体の振動波形である。反射波の遅延時間は  $\tau = 2L/v$  であるため、 $\dot{h}(\tau, T)$  は式(3)で表される。

$$\dot{h}(\tau, T) = Re \frac{j4\pi f_c \delta(T)}{v} u\left(\frac{2\delta(T)}{v}\right) \quad (3)$$

数 10  $\mu\text{m}$  オーダーの振動変位に対し、 $u(t)$  の空間分解能は 1 cm であり、 $u(2\delta(T)/v) \cong 1$  であるため、反射体の振動により(3)式は以下のようにその搬送波の位相のみが変化する。

$$\dot{h}(\tau, T) \cong Re \frac{j4\pi f_c \delta(T)}{v} \quad (4)$$

#### (2) 計測システムの開発

電磁パルス加振システムは図 1 に示すように、励磁コイルとパルス電源装置で構成する。パルス電源装置で大容量コンデンサに約 6 秒かけて 1000 V を充電し、接続した励磁コイルに放電することでパルス状の電流を印加する。励磁コイルのコアは図 2 に示すように U 字型の方向性電磁鋼体であり、FEM により形状の最適化を行っている。コイルの巻き数を増やして起磁力を増加させると周波数帯域が低下することから、片脚 8 巻、計 16 巻のコイルを使用した。本システムでは、ピーク値 3000 A 半値全幅 0.3 ms のパルス状の電流が印加可能であり、0~1.5 kHz 程度の帯域のパルス磁場を与えることができる。また、図 3 のようにコイルはリニアアクチュエータにより逐次移動でき、自動スキャン計測も可能である。

図 4 に直交検波パルスドップラレーダシステムの外観を示す。レーダパルス発生器によりパルス幅 0.1 ns のベースバンドパルスを 5 ns 周期で生成し、5.29 GHz の搬送波で変調後、下側波帯を送信アンテナから出力する。受信波形は復調後、直交検波し、レーダ波形は等価時間サンプリング方式により 1 ms の繰り返しで低周波信号に変換され、24bit AD 変換器により取得する。



図 1 開発した加振用電磁パルス源



図 2 開発したパルス加振用励磁コイル

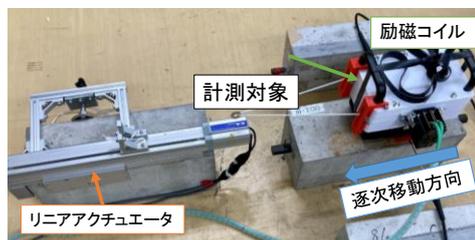


図 3 鋼材振動のスキャン計測の様子



図 4 開発した直交検波パルスドップラレーダ

### (3) PC 鋼材のグラウト充填評価への適用

本手法は鋼材自体の共振周波数の評価に有効であり、その適用例としてプレストレストコンクリート (PC) の劣化評価に適用した。PC は橋梁等の床版のせん断ひび割れを防ぐため、あらかじめコンクリート中に設置した鋼材を緊張させ、たわみに拮抗させる内部応力を与える構造であり、古くから首都高速道路をはじめ多く使用されている。通常、PC 鋼材はグラウト材を充填したシースで水分から保護されているが、グラウト充填不足を引き金に PC 鋼材が腐食、破断した構造物が顕在化してきている。シース内のグラウト未充填により鋼材は特徴的な共振振動を起こすが、樹脂シースの空隙を透過できない弾性波では評価は困難である。そこで、本手法で非破壊的にグラウト充填が評価できれば有用である。

計測対象の PC 構造物を模擬した供試体の概要を図 5 に示す。供試体寸法は高さ 150 × 幅 150 × 長さ 400 mm であり、かぶり 30 mm で内径 35 mm のポリエチレン樹脂シースを用いた。シース内には呼び径 23 mm の鋼棒を設置し、グラウト材の充填率が 100%、及び 0% の計 2 種類の供試体により、充填度による振動の違いを評価した。

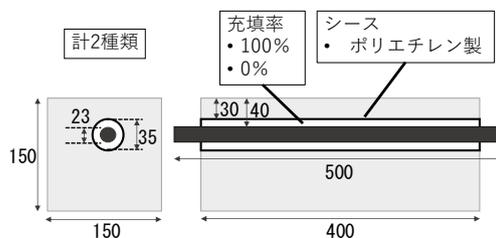


図 5 グラウト充填評価に使用した PC 供試体

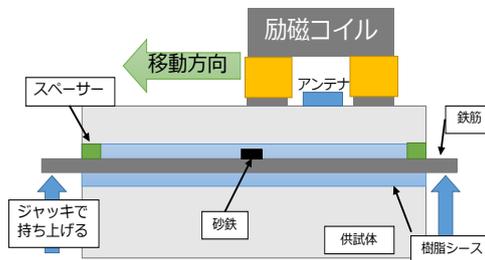


図 6 鉄筋腐食を模擬した砂鉄付き鉄筋計測

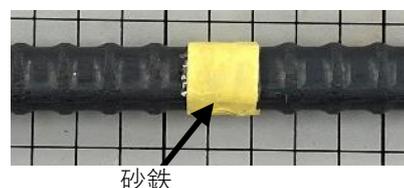


図 7 砂鉄を固定した鉄筋の様子



図 8 鉄筋腐食評価実験に使用した RC 供試体

### (4) 鉄筋腐食を模擬した砂鉄片への適用

乾湿繰り返しを受ける国内の多くの鉄筋コンクリート (RC) 構造物の鉄筋腐食においては、黒錆が多くみられることが知られている。黒錆は強い磁性を有するマグネタイトを主成分としており、既往の正弦加振レーダでの鉄筋振動変位増加機序の主要因である可能性が指摘されている。そこで、パルス磁場を用いて鉄筋腐食の有無による振動応答の違いを評価するため、鉄筋表面に黒錆を模擬した砂鉄片を固定し、過渡振動応答のスキュン計測を行った。

計測には図 6 のように中空の樹脂製シースが埋設されている供試体に砂鉄を固定した D16 鉄筋を通し、砂鉄がシース上面に接触しないように、両端のスペーサを介して、鉄筋を上押し付けた。計測対象となる砂鉄を固定した鉄筋を図 7 に示す。砂鉄は一片が 15 mm となるように 0~1.0 g の量の砂鉄をラップで包み、鉄筋の計測範囲の中央付近 (計測開始点から 120 mm) の計測面側に固定し、砂鉄量による違いを評価した。ドップラレーダによる変位は中央 200 mm の範囲を逐次移動計測し、8 mm の幅で移動平均を実施した。

### (5) RC 供試体の鉄筋腐食評価への適用

最後に、強制的に鉄筋を腐食させた RC 供試体の鉄筋腐食評価に本手法を適用する。計測に用いた RC 供試体を図 8 に示す。寸法は 100×100×400 mm であり、かぶり 35 mm に D19 鉄筋が埋設されている。この RC 供試体は電食試験により鉄筋中央部を局所的に腐食させており、計測面中央にひび割れと錆汁といった著しい劣化が確認できる。

本実験では鉄筋直上の鉄筋に沿った中央部の 200 mm の範囲に対してスキュン計測を行い、局所腐食した鉄筋の過渡振動応答を評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 変位計測の原理検証

直交検波システムにより計測した複素レーダ波形を繰り返し毎に並べ替えた複素レーダプロファイル  $\hat{h}(t, T)$  において、推定した反射波到達時刻  $\hat{t}$  での位相を抽出することで、計測量から過渡振動応答を  $\delta(T) = \hat{v} \angle \hat{h}(\hat{t}, T) / 4\pi f_c$  のように推定でき、レーザ変位計の結果ともよく一致した。

### (2) 計測システムの評価

上記の評価の他、本システムでは通常のレーダ方式だけでなく、サンプリングパルスの繰り返し周期をレーダパルスと完全に一致させ、両者の遅延時間差を 45 ps 単位で任意に制御することで、特定深度の  $\hat{h}(\hat{t}, T)$  のみを取得し続けるレンジ固定実時間サンプリング方式も可能とした。これにより、従来の等価時間サンプリング方式に比べ SN 比が 20 dB 以上の向上し、深さ 8 cm のコンクリート中の鋼材の過渡振動応答を広帯域に計測できる世界初のシステムを構築できた。

### (3) グラウト充填評価への適用結果

図 9 に充填率 0% の供試体での等価サンプリング方式において得られたレーダ波形を示す。0.5 ns 程度のピークは直達波であり、アンテナを供試体に押し付けているためアンテナ間の直達波は極めて小さい。1 ns 付近のピークは鋼材からの反射波であり、良好な SN 比で鋼材の反射波が計測されている。この遅延時間だけ遅延させたレンジ固定サンプリング方式により、パルス加振中の反射波の位相変化を計測し、変位波形を算出した。

図 10(a) に各充填率に対する PC 鋼材の変位波形を示す。振動波形の特徴は加振直後に加振パルスと同程度の鋭いパルス振動が現れ、その後 6 ms 程度の幅の低周波のパルス振動が表れている。さらに、充填率 0% では 100% に比べ、周期的な振動成分も現れている。

図 10(b) に変位スペクトルを示すが、低周波のパルス振動は 100 Hz 以下の帯域を持つ。これは、両供試体ではほぼ同様の特徴を持つため、供試体やコイル等に起因する振動であると考えられる。また、充填率 0% では 300 Hz に充填率 100% に比べ 20 dB 程度大きい鋭いピークスペクトルが表れていることがわかる。FEM による両端固定の鋼材の 1 次たわみ共振周波数は 430 Hz であるが、未充填供試体は鉄筋を保持するため鋼材両端の 10 mm 幅をモルタルで固定しただけである。このため、理論値より共振周波数が低下したと考えられる。

コンクリート内の鋼材自身の特徴的な振動の違いを、非接触、非破壊的に計測した結果は世界初であり、弾性波では評価困難な樹脂シーすでのグラウト充填不足の評価に本システムは極めて有用であると考えられる。

### (4) 腐食を模擬した砂鉄片への適用結果

図 11 に 1.0 g の砂鉄片を取り付けた鉄筋に対するレーダ波形の例を示す。0.5 ns 程度に見られるピークはアンテナ間の直達波、1 ns 付近に見られるピークが砂鉄付き鉄筋の反射波である。似た反射体形状である図 9 と類似の反射応答であり、砂鉄特有の反射応答は見られない。この反射波時刻での位相情報から、変位波形を算出した。

図 12(a)、(b) にそれぞれ計測した砂鉄付き鉄筋の変位波形、変位スペクトルを示す。それぞれ、上段は全ての位置での波形、スペクトルをまとめて表示しており、下段は計測位置に対応した変位波形、変位スペクトルのプロファイル表示である。図 12(b) より、180 Hz 以下の振動成分は砂鉄位置に対応したような変化は見られず、PC 供試体に見られた供試体やコイル固有の振動であると考えられる。また、中央付近には 280 Hz 程度の共振ピークが見られるが、これは中空構造内部の鉄筋の 1 次たわみ振動に対応すると思われる。

一方、図 12(a) から振動の初動にあたる 0.5 ms 付近のパルス状の振動波形の振動ピークがアンテナ位置 120 mm 付近で増加していることが確認できる。(b) 図では 1.5 kHz 程度までの広帯域にわたって振動スペクトルが増加しており、さらに、その増加位置は砂鉄を取り付けた位置に対応している。他に砂鉄位置に特有の明瞭な変化は見られないことから、鉄筋表面の砂鉄の磁性がパルス波形に影響を与えている可能性がある。

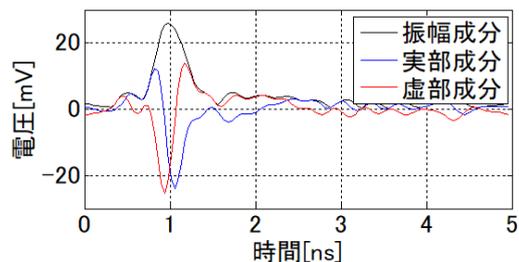
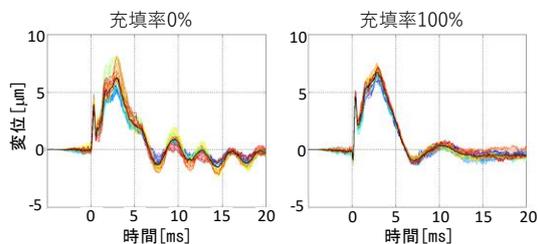
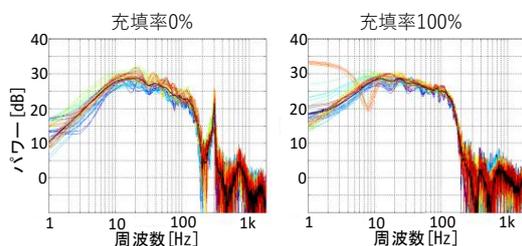


図 9 レーダ波形の様子 (充填率 0%)



(a) PC 鋼材の変位時間波形



(b) PC 鋼材の変位スペクトル

図 10 各グラウト充填率での PC 鋼材の振動特性

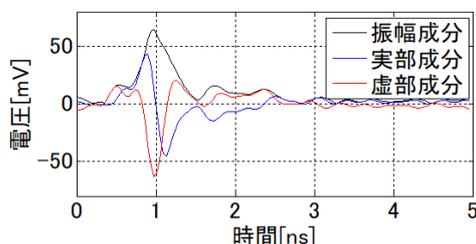
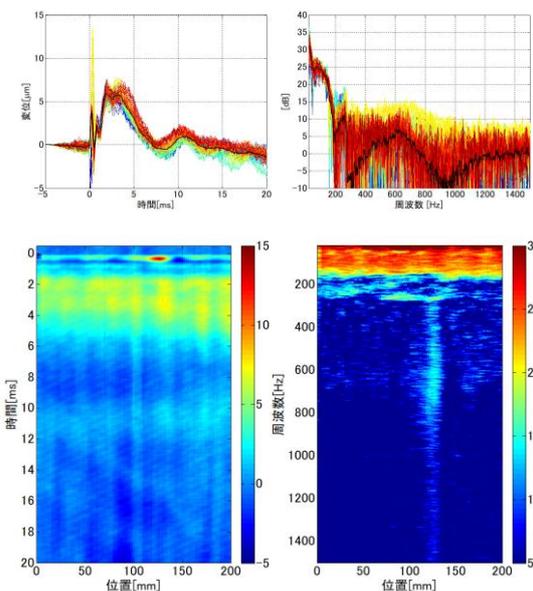


図 11 砂鉄付き鉄筋のレーダ波形



(a) 変位の時間波形

(b) 変位スペクトル

図 12 1.0g の砂鉄付き鉄筋の振動特性

次に、変位波形 0.5 ms 付近の初動のプロファイルを抽出し、砂鉄量毎に並べた結果を図 13 に示す。図から砂鉄を設置した 120 mm 付近においてパルス状の振動波形のピーク振幅が、砂鉄量の増加とともに徐々に増加していることがわかる。一方、それ以外の位置では砂鉄量に対応した系統的な変化は見られていない。砂鉄量に対し概ね、同様の位置に変位のピークが見られており、この変動は 15 mm 四方の砂鉄形状特有の変動であると考えられる。

図 14 に 0.5 ms 付近のパルス状の振動波形のピーク値と砂鉄の量の関係を示した結果を示す。0.5 ms 付近のパルス状の振動波形のピーク値は砂鉄量 1 g の範囲では砂鉄の量が多いほど大きくなっており、0.8 g までは、約 8.2  $\mu\text{m}/\text{g}$  の増加率で比例関係にあることが確認できた。

鉄筋に比べ砂鉄は微量なため、砂鉄の存在が磁気吸引力自体に影響は与えるとは考えにくい。一方で、鉄筋に比べ砂鉄は明らかに変形し易い形状であり、変形しやすい砂鉄が増加することで、パルス磁場の加振力による変形の影響を受けやすくなることから、砂鉄の量に応じて振動変位が増加したと考えられる。

#### (5) RC 供試体の鉄筋腐食評価への適用結果

図 15 にレーダ波形の例を示す。0.6 ns 程度にアンテナ間の直達波、1 ns 付近に鉄筋反射波のピークが見られており、反射波到達時刻での位相情報を基に変位波形を算出した。

図 16 に得られた変位波形プロファイルを示す。変位波形初動部 0.5 ms 付近において砂鉄を用いた実験で見られたような特徴的な鋭いパルス状の波形が確認できる。このパルス波形は RC 供試体のひび割れや錆汁が見られる中央部においてピーク値が約 2 倍の 5  $\mu\text{m}$  程度増加していることがわかる。この供試体は中央部で腐食しており、100 Hz 程度の正弦加振を行う加振レーダ法においても中央部で振動変位が 3 倍程度増加することがわかっている。本計測においてパルス状のピーク値が増加したことで 1 kHz 程度の広帯域にわたって振動変位が増加することもわかる。

砂鉄による実験結果と合わせ、パルス磁界による加振において、鉄筋の腐食生成物のうち磁性を有する黒錆が磁界に反応して瞬時に吸引力を受け変形することで、パルス振動のピーク振幅を増加させることが示唆された。

この研究は世界初の試みであり、鉄筋腐食の非破壊定量評価手法の開発に向けた極めて大きな成果になると考えられる。

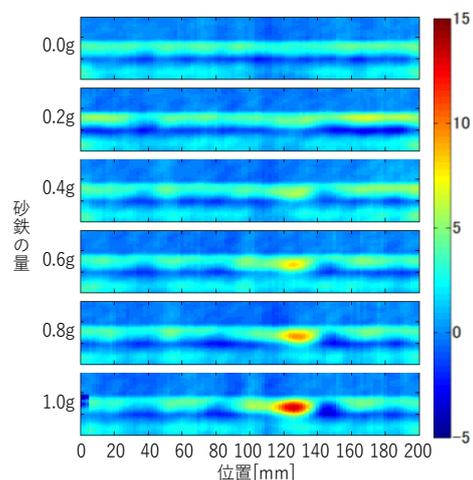


図 13 砂鉄の量の違いによる変位波形の変化

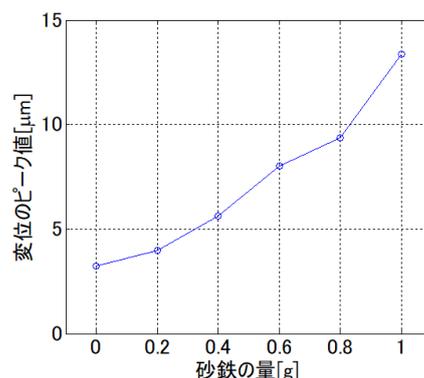


図 14 パルス状の振動波形のピーク値と砂鉄の量

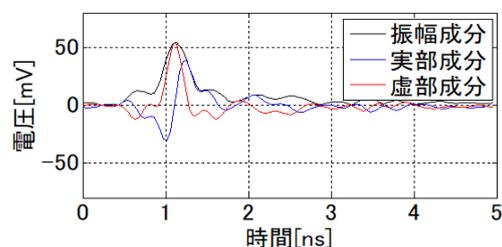


図 15 腐食 RC 供試体のレーダ波形

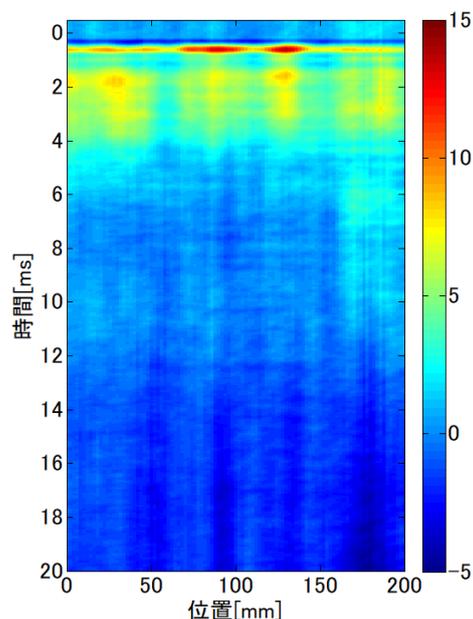


図 16 腐食 RC 供試体の変位波形のプロファイル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 清水崇至, 三輪空司, 服部晋一, 鎌田敏郎	4. 巻 21
2. 論文標題 レーダドップラ変位計測を援用した電磁パルス法によるPCグラウトの充填評価	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 213-218
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, 中村和弘, 清水崇至, 小澤満津雄	4. 巻 43
2. 論文標題 加振パルスレーダによる材料劣化したRC部材の鉄筋振動変位の空間分布計測	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 1169-1174
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 清水崇至, 三輪空司, 服部晋一, 鎌田敏郎	4. 巻 43
2. 論文標題 電磁パルスにより励振された鉄筋の加振レーダによる振動変位計測	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 1181-1186
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, 清水俊秀, 鈴木真, 鎌田敏郎	4. 巻 70
2. 論文標題 加振レーダ法によるRC床版の水平ひび割れ検知への適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 75-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11396/jjsndi.70.75	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 T. Miwa	4. 巻 Vol. 21, No. 7
2. 論文標題 Non-destructive and quantitative evaluation of rebar corrosion by a vibro-Doppler radar method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2546
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21072546	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 K. Takahashi and T. Miwa	4. 巻 Vol. 21, No. 3
2. 論文標題 A local oscillator phase compensation technique for ultra-wideband stepped-frequency continuous wave radar based on a low-cost software-defined radio	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 780
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21030780	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 久保田遼平, 三輪空司, 小澤満津雄	4. 巻 Vol. 20
2. 論文標題 RC構造物のひび割れ進展と加振レーダ法における鉄筋振動変位増加との関係	5. 発行年 2020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 173-178
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, 松井 隼平, 中村和弘	4. 巻 Vol. 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 1588-1593
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, 岡田矩幸	4. 巻 44
2. 論文標題 鉄筋腐食時の加振レーダ法による鉄筋振動変位計測とAE法による内部ひび割れ進展の同時モニタリング	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 1252-1257
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 T. Miwa, Y. Nakazawa	4. 巻 14
2. 論文標題 Nondestructive Evaluation of Localized Rebar Corrosion in Concrete Using Vibro-Radar Based on Pulse Doppler Imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 4645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs14184645	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 中澤有理, 三輪空司, 小澤満津雄22	4. 巻 22
2. 論文標題 加振レーダ法による複合サイクル試験中のRC供試体の鉄筋腐食評価	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 29-34
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 川上圭祐, 三輪空司, 亀田玖始, 後藤幹尚, 岩波光保	4. 巻 22
2. 論文標題 感潮河川におけるコンクリート橋台の鉄筋腐食評価への走査型加振レーダ法の適用	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 157-162
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, 清水崇至, 服部晋一, 鎌田敏郎	4. 巻 22
2. 論文標題 ドップラレーダを援用した電磁パルス法におけるコイル最適化とPCグラウト充填評価	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 255-260
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 後藤 幹尚, 岩野 聡史, 高鍋 雅則, 影澤 雅人, 三輪 空司, 岩波 光保, 千々和 伸浩, 津野 和宏	4. 巻 2
2. 論文標題 感潮河川にかかる橋梁の下部構造に対する非破壊調査の適用について	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 インフラメンテナンス実践研究論文集	6. 最初と最後の頁 48-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceim.2.1_48	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 清水崇至, 三輪空司, 服部晋一, 鎌田敏郎
2. 発表標題 レーダドップラ変位計測を援用した電磁パルス法によるPCグラウトの充填評価
3. 学会等名 第21回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三輪空司, 中村和弘, 清水崇至, 小澤満津雄
2. 発表標題 加振パルスレーダによる材料劣化したRC部材の鉄筋振動変位の空間分布計測
3. 学会等名 第43回コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水崇至, 三輪空司, 服部晋一, 鎌田敏郎
2. 発表標題 電磁パルスにより励振された鉄筋の加振レーダによる振動変位計測
3. 学会等名 第43回コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田矩幸, 久保田僚平, 三輪空司
2. 発表標題 加振 レーダ法における鉄筋腐食時の振動変位増加機序に関する AE 解析
3. 学会等名 2021センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川上圭祐, 清水崇至, 中村和弘, 三輪空司
2. 発表標題 直交検波パルスドップラレーダを用いたレンジ固定実時間サンプリングによる変位計測
3. 学会等名 2021センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大岩航平, 三輪空司
2. 発表標題 PC構造物のグラウト充填度評価のための電磁加振超音波ドップラエコー法
3. 学会等名 2021センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三輪空司、松井隼平、中村和弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久保田遼平、三輪空司、小澤満津雄
2. 発表標題 RC構造物のひび割れ進展と加振レーダ法における鉄筋振動変位増加との関係
3. 学会等名 コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水崇至、三輪空司
2. 発表標題 電磁パルス加振による鉄筋振動計測のための 直交検波パルスレーダの開発
3. 学会等名 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 小松桂太、三輪空司
2. 発表標題 パルスドップラレーダを用いた ハンドドリル先端のリアルタイム検知
3. 学会等名 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 小松桂太, 三輪空司, 高根沢彰兵
2. 発表標題 パルスドップラレーダを用いたハンドドリル先端モニタリングシステム
3. 学会等名 第37回センシングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村和弘, 三輪空司
2. 発表標題 加振パルスドップラレーダによるコンクリートの鉄筋振動変位イメージング
3. 学会等名 第37回センシングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中澤有理, 三輪空司, 小澤満津雄
2. 発表標題 加振レーダ法による複合サイクル試験中のRC供試体の鉄筋腐食評価
3. 学会等名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川上圭祐, 三輪空司, 亀田玖始, 後藤幹尚, 岩波光保
2. 発表標題 感潮河川におけるコンクリート橋台の鉄筋腐食評価への走査型加振レーダ法の適用
3. 学会等名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三輪空司, 清水崇至, 服部晋一, 鎌田敏郎
2. 発表標題 ドップラレーダを援用した電磁パルス法におけるコイル最適化とPCグラウト充填評価
3. 学会等名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三輪空司, 岡田矩幸
2. 発表標題 鉄筋腐食時の加振レーダ法による鉄筋振動変位計測と AE 法による内部ひび割れ進展の同時モニタリング
3. 学会等名 日本コンクリート工学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋爪一樹, 清水崇至, 三輪空司
2. 発表標題 コンクリート中の 鋼材振動変位計測のための 電磁パルス加振レーダシステム
3. 学会等名 第39回センシングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中澤有理, 亀田玖始, 川上圭祐, 三輪空司
2. 発表標題 加振レーダを用いた高速振動変位イメージングによる 鉄筋腐食評価の実フィールド適用
3. 学会等名 第39回センシングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋爪一樹, 清水崇至, 三輪空司
2. 発表標題 電磁パルス加振レーダ法による コンクリート中の鋼材振動計測
3. 学会等名 第13回電気学会栃木・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤大樹, 三輪空司
2. 発表標題 加振レーダ法による コンクリート中の鉄筋振動変位分布と X線CTイメージとの比較
3. 学会等名 第13回電気学会栃木・群馬支所合同研究発表会
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
研究 分担者	鎌田 敏郎  (Kamada Toshiro)  (10224651)	大阪大学・工学研究科・教授   (14401)	パルス加振装置開発、コイル 設計、FEM解析
研究 分担者	小澤 満津雄  (Ozawa Mitsuo)  (80313906)	群馬大学・大学院理工学府・教授   (12301)	RC供試体作製、FEM解析、鉄筋腐食試験、腐食評価

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
---------	---------