

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282092

研究課題名(和文) 土木建築構造物の施工・維持管理に向けたアクセシブルレーダ技術の先駆的開発

研究課題名(英文) Development of advanced accessible radar technique for construction and maintenance of civil engineering structure

研究代表者

三輪 空司 (Miwa, Takashi)

群馬大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30313414

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：インフラ設備の施工維持管理では、鉄筋探査や地中レーダ等レーダの近くを詳細に探査する技術が求められてきている。そこで、本研究ではパワーショベルのバケットやコンクリート用ドリルと一体化したアンテナを開発し、実験的に本手法によりアンテナ近傍の反射体の検出が可能であり、地中内において前方探査用自動車レーダと同様なシステムの有効性を示した。また、コンクリート内の鉄筋を励磁コイルにより振動させその振動変位をレーダで計測する加振レーダ法を提案し、腐食した鉄筋の振動変位が健全鉄筋の5倍程度増加することが確認でき、本手法の有効性も示した。

研究成果の概要(英文)：In the construction and maintenance of infrastructure, it has been required to more accurately measure around the radar. We developed antennas mounted on the bucket of the back-hoe and on the core drill for concrete in this research. Through the experimental approach, we show that the developed antenna is useful for detection of the forward of the antenna. This technique is expected to play a roll of an automotive radar in concrete or underground. Moreover, we developed a vibro-radar method in order to evaluate the corrosion of re-bar in the concrete. In this technique, the re-bar is forced to vibrate by an excitation coil on the surface. Then, the vibration displacement of the re-bar is measured by a Doppler radar method. Experimental results show that the vibration displacement of the corroded re-bar is 5 times larger than the healthy re-bar.

研究分野：計測工学

キーワード：レーダ アンテナ 前方探査 鉄筋腐食 加振 ドップラ変位計

1. 研究開始当初の背景

高度成長期に建設された土木建築構造物の多くは、40年以上を経過し、今後、維持管理にかかわる点検・診断、対策工事に要する費用が増大することが懸念されている。インフラ設備の維持管理では、高精度で効率的に点検できる非破壊検査技術の開発や、施工時の安全管理、工期短縮やコスト削減のためにも、高精度かつ効率的な非破壊検査手法の開発が必要とされている。

コンクリート構造物を対象とする場合、現状の非破壊検査技術を手法別にみると、弾性波、衝撃弾性波法、超音波法、電磁誘導法、テストハンマー、自然電位法等があるが、いずれも分解能が低い。また、Reinforced Concrete (RC)レーダと呼ばれるマイクロ波レーダ法は、商用の製品も国内外を含め多く存在し、空洞探査、鉄筋配置の探査に利用されてきた。しかし、これまでレーダ法ではコンクリート内の『深部』を診るための技術開発がなされており、鉄筋の腐食や、鉄筋背部の微小空洞の探査といった、比較的近くを詳細に探査するには向いていない。

さらに、レーダの近くをより正確に診たいという要求は微破壊的な検査にも多い。例えば、大規模な既設コンクリート構造物の耐震補強工事において補強鋼棒を挿入する際には、既存の鉄筋を壊すことなく穿孔する必要があるが、数m規模の構造物の鉄筋位置を外部から探査する手法はなく、掘削しながらドリル前方の近傍を探査するといった Measurement While Excavating (MWE)技術が期待されている。MWE技術は施工時の安全管理においても重要であり、パワーショベル等の掘削バケットによる既設インフラ設備の損傷事故を防ぐための、ショベル前方の埋設物探査等、MWE技術は今後の維持、施工管理のキーテクノロジーとなっている。

2. 研究の目的

このような背景を鑑み、従来のより遠くを診るレーダ技術ではなく、より近くを正確に診ることのできる新規なレーダ技術の創成は、今後の土木建築構造物の施工、維持管理に極めて重要な技術となり得る。本研究では対象に近づきながらレーダ近傍の様子を詳細に把握する技術をアクセシブルレーダ技術と称することとし、本研究では、アクセシブルレーダ技術の先駆的な研究として、以下の3点の技術に着目した技術開発を行う。

- (1) パワーショベル等の掘削バケット前方探査用レーダ
- (2) RC 構造物掘削用コアドリル前方探査用レーダの開発
- (3) レーダ技術による RC 構造物中の鉄筋腐食評価法の開発

各技術項目において既存の手法は存在せず、全く新規な研究である。技術項目(1)では研究期間内に指向性アンテナ、レーダ装置を含め

たハードウェアの開発を行い、実機のバケットにアンテナを装着し、実際に掘削しながら埋設物検知の実証実験を行い有効性の検討を行う。(2)では、主にアンテナの開発を行い供試体レベルで掘削時の鉄筋前方探査実証試験を行い、コアドリルの5cm前方の鉄筋探査を可能なアンテナを開発する。(3)は応用技術となるが、ドップラレーダ振動変位計測等の波動情報を最大限に利用した腐食評価法の検討を行い、鉄筋かぶり数cmの鉄筋腐食の程度を評価可能なレーダ計測法を開発を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 掘削バケット前方探査用レーダ

地中建機用バケット一体型地中レーダアンテナシステムに必要なアンテナ要件として、広帯域であること、バケット前方への指向性が強いこと、バケットと一体化するためにアンテナの機械的強度が保てることが条件に挙げられる。そこで、導体に細長いスリットを設けたスロットアンテナに着目し、TYPE1、TYPE2の二種類のアンテナの開発及び、イメージング法の基礎検討を行った。

TYPE1スロットアンテナはバケット底面を地板とし、地板に垂直な方向に電波を強く放射するため、バケット前方指向性が弱い。そのため、複数のスロットを配した八木宇田スロットアンテナ構造とし、地板裏面に厚さ1cmのキャビティを設け裏面への放射を抑圧する構造とした。FDTD法(有限時間差分法)による数値電磁界シミュレーションにより、形状の最適化を行い、地板法線方向から前方45度方向に指向性のあるアンテナを開発した。図1に開発したアンテナを示す。本アンテナを送受信アンテナとして使用し、図2に示したバケット底面の空洞部にアンテナを装着した。また図のように、重機により実際に掘削しながら、バケットに装着したアンテナにより直径5cmの埋設鉄パイプを対象とするレーダ探査実験を実施し、性能評価を行う。

また、掘削時リアルタイムレーダの実現にあたり、多数の反射波が重畳することや、バ

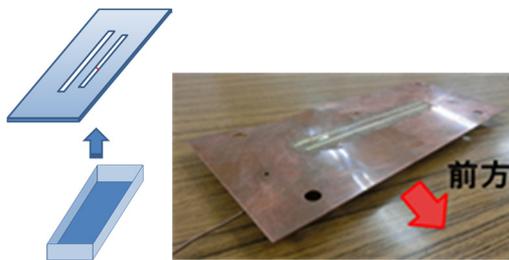


図1 開発したアンテナ (TYPE1) の概要



図2 使用したバケット及び実験の様子

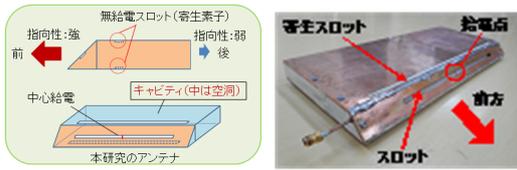


図3 TYPE2 アンテナの概要

ケット内部での反射波の影響等もあり、明瞭に対象の反射波を捉えられない場合もある。そこで、より前方への指向性に特化したアンテナとして、バケットの爪部分に装着可能な形状で前方に指向性を有する図3のようなアンテナ(TYPE2)も検討した。本アンテナはアタッチメント形式で爪部分に装着可能な形状を有しており、くさび上の部分にスロットアンテナを配している。

また、バケットの移動と共にスキャンされるアンテナからの波形情報からイメージングをベースに反射体の特定をする手法も検討した。イメージングのためには、バケットの三次元的な位置、姿勢等の6自由度の情報を精度1cm以下で得ることが求められる。そのため、超音波トランスデューサを送受信にアレイ状に配置し位置推定する方法を検討した。位置推定には、重機側に配置した4つの受信センサアレイを用い、バケットに取り付けた4つの送信センサの各位置をGPSの位置推定原理を応用して推定する。ここで、バケットに配置した送信機間の相対位置は不変であるため、その先見情報を用い4つの送信位置を独立に推定するのではなく、バケットの位置、姿勢の6自由度のパラメータとして、4×4の16組の送受信の組み合わせから同時に推定するアルゴリズムを開発し、空中実験により性能評価を行った。

(2) コアドリル前方探査用レーダ

構造物のリニューアル工事等において穿孔用コアドリルによりコンクリートを穿孔中に、構造物内の既存鉄筋や、電力配線を破損してしまう事故を防ぐために、図4に示すようなコアドリルの円筒部に鉄筋探査用レーダアンテナを一体化させ、穿孔中にアンテナの前方の鉄筋を探索しながら掘削可能なコアドリル一体化アンテナの開発を行った。

アンテナに要求される条件は、円筒形状であること、広帯域であること、円筒前方に電波を放射可能であることである。そこで、スロットアンテナを基本とし、図5のように、円筒先端に4本のスロットを配し、対向する2本のスロットの組み合わせをそれぞれ送受信に用いた逆相二点給電を行った。本アンテナは、後方にも電波が放射されるが、コンクリート内では媒質の減衰の影響により後方への放射による反射波の影響は小さくなることが予想できる。本アンテナを用い空中実験を行い、逆相二点給電が可能であることを確認し、シミュレーションと同様な傾向のアンテナ特性が得られており、RC供試体を用いて鉄筋探査性能の実証実験を行った。

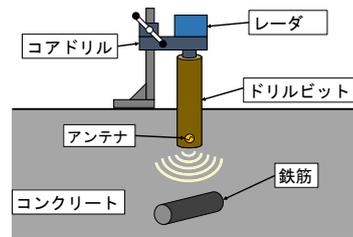


図4 コアドリル前方探査レーダの概念図

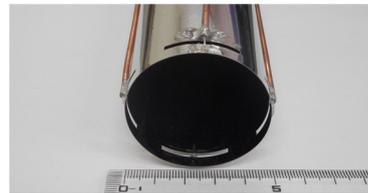


図5 試作アンテナの概要

(3) 鉄筋腐食評価レーダ

コンクリート表面近傍の鉄筋腐食を電磁波レーダにより評価する手法の検討として、当初計画では、超広帯域レーダを用い鉄筋直上を鉄筋と平行にアンテナをスキャンした際の反射応答より、鉄筋腐食を評価する予定であった。しかし、評価パラメータの再現性に問題があり、単なるレーダイメージングのみでの鉄筋腐食の評価は困難であると判断した。

そこで、図6のように励磁コイルによりコンクリート内部の鉄筋を正弦加振し、レーダにより非接触に鉄筋振動変位を計測する加振レーダ法を提案した。鉄筋が健全であれば、加振に対して振動変位は小さく抑えられるが、鉄筋が腐食し、腐食生成物が発生すると、その弾性係数がコンクリートよりも小さいため、振動変位が大きくなることが予想される。

図7に加振レーダにおけるドップラ変位計測の概念図を示す。原点にあるアンテナから、計測対象に向け単一周波数 f 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。この間、計測対象を単一周波数 f_0 で振動させると、電波の波長に対して、振動変位が十分小さければ、反射波は周波数 f の無変調成分と周波数 $f \pm f_0$ の1次ドップラ成分の2種類の波に分離するものとみなせる。このとき、無変調成分、ドップラ成分を直交検波して得られる複素振幅 $\dot{E}_0(f)$ 、 $\dot{E}_\pm(f)$ はそれぞれ近

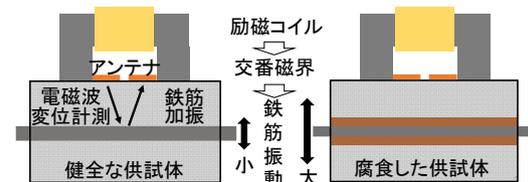


図6 加振レーダ法の概念図

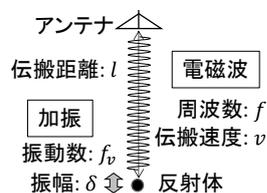


図7 変位計測概念図

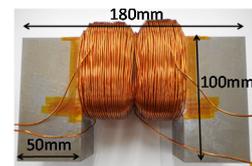


図8 使用した励磁コイル

似的に(1)、(2)式のように表される。

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

$$\dot{E}_\pm(f) \cong \pm 2\pi f \delta \dot{E}_0(f)/v \quad (2)$$

一般に、上式は空間分解能を有していないが、電磁波の周波数 f を f_L から f_H まで掃引しながら、その伝達関数を計測し、逆フーリエ変換すればレーダ応答（インパルス応答） $\dot{g}_0(t)$ 、 $\dot{g}_+(t)$ がそれぞれ以下で与えられる。

$$\dot{g}_0(t) = \dot{R} \text{sinc} \left\{ \pi(f_H - f_L) \left(t - \frac{2l}{v} \right) \right\} \quad (3)$$

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

無変調成分 $\dot{g}_0(t)$ 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。一方、正のドップラ波形は $\dot{g}_0(t)$ の微分波形と同一形状となり、その振幅は振動変位 δ に比例する。したがって、距離 l にある反射体の振動変位 $\delta(l)$ は無変調成分の微分波形とドップラ成分波形の反射波到達時刻の振幅比として以下で与えられる。

$$\delta(l) = v \left| \dot{g}_+(2l/v) / \frac{d}{dt} \dot{g}_0(2l/v) \right| \quad (5)$$

したがって、両成分の反射波が分離していれば、レーダによる高い空間分解能で任意の距離の振動振幅を推定することが可能である。

この計測には汎用的な伝達関数計測機器であるネットワークアナライザを用いる。得られた伝達関数より無変調成分のレーダ波形が計測できる。一方、ドップラ成分は送信周波数を振動周波数 f_v だけシフトしてアンテナに送信し、ドップラ効果によって逆シフトされた成分を計測することで得られる。

開発した励磁コイルを図 8 に示す。コアにはコの字型の 100 層の積層鋼板を使用し、コイルには直径 1.5 mm のエナメル線を 500 巻している。このシステムにより、RC 供試体の鉄筋腐食前後の振動変位を比較し、腐食評価の可能性を検討した。

4. 研究成果

(1) 掘削バケット前方探査用レーダ

TYPE1 アンテナを用いた地中計測には、ネットワークアナライザを用い 0.2~1 GHz までのアンテナ間の伝達特性を計測し、逆フーリエ変換を行うことによりインパルス応答（レーダ波形）を得た。図 9 に実機によるレーダ探査の様子を示すが、アンテナと埋設物間の距離が近づくにつれ反射波が近づく様子が見られ、本アンテナにより埋設物の検出が可能であることが実証実験により明らかとなった。

また、TYPE2 アンテナでは試作アンテナを地中に埋設して得られたアンテナ特性の結果を図 10 に示す。図より TYPE2 アンテナはバケット前方に強い指向性を有することがわかった。さらに、TYPE2 の方が低周波でのアン

テナ効率が高いことも実験的に示され、今後のアンテナ開発の指針が得られた。

また、バケット位置推定実験では、図 11 に室内実験の概要を示すが、図のような送受信センサ配置により、提案法を用い送信アレイを 50 cm 移動させた際の相対位置推定誤差を 83%低減でき、1 cm の誤差で十分に位置推定可能であることを実験的に示した。

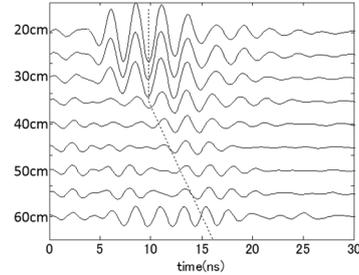


図 9 TYPE1 アンテナによる地中探査の様子

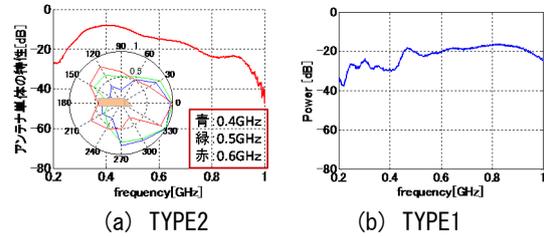


図 10 地中内でのアンテナ特性計測結果

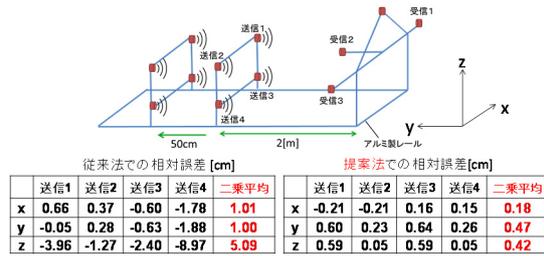


図 11 バケット 3 次元位置の推定実験結果

(2) コアドリル前方探査用レーダ

反射計測のための送受信計測の方法として、図 12 のように、2x2 の送受信の組み合わせにより 4 つの波形を計測し、以下の演算により、二点逆相送受信構成とした結果を示す。

$$S = (S_{11} - S_{21}) - (S_{12} - S_{22}) \quad (6)$$

送受信の偏波は直交しているため、アンテナ間を直接伝わる波は抑圧されること期待できるが、アンテナ間の直達波は逆相給電により小さくなっていることがわかる。通常、アンテナ近傍では、強いアンテナ間直達波により、反射波の特定が困難になるが、本アンテナ構成により、アンテナ近傍の反射波においても感度の高い計測が可能であると考えられる。

次に、鉄筋コンクリート供試体を用い、本アンテナによる鉄筋探査実験を行った。本アンテナは円筒径であるため、図 13 のようにコアドリルの穿孔時の隙間に挿入可能であり、5 mm 毎に穿孔、アンテナ挿入、計測を繰り返すことにより穿孔中のレーダ計測を模擬した。

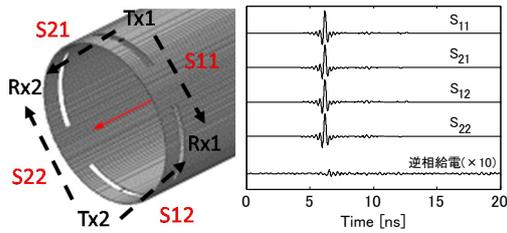
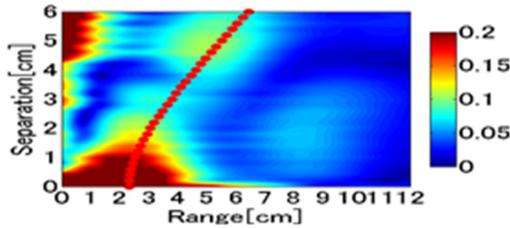


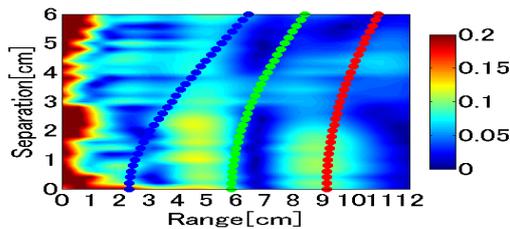
図 12 試作アンテナの概要



図 13 穿孔後の空隙及びとアンテナ挿入の様子



(a) 前方に鉄筋あり



(b) 前方に鉄筋なし

図 14 穿孔後の空隙及びとアンテナ挿入の様子

鉄筋は直径 16 mm であり、深さ 20 cm に 15 cm 間隔のメッシュ状に配筋した。

図 14(a)にアンテナ前方に鉄筋がある位置での本レーダ波形と鉄筋までの距離依存性を示す。横軸はコンクリートの比誘電率を 9 とし、時間軸を片道距離に換算した。赤い線はアンテナ給電点と鉄筋の配置から幾何学的に求まる鉄筋位置の理論値であり、鉄筋からの予想到達時刻に沿って、反射波が見られることがわかる。一方、ドリル進行方向に鉄筋がない場所での結果を図 14(b)に示す。図より、直達波と似た時間遅れで現れる波は直達波のサイドローブであると考えられ、前方に鉄筋がある場合とは明らかに異なるパターンを示した。間隔が 2 cm 以下では(a)図の場合は極めて大きな反射を示すものの(b)図では小さく、反射波の到達時刻のパターンから鉄筋の有無を判断できると考えられる。これにより、鉄筋の近接センサとしての実用化が期待される。

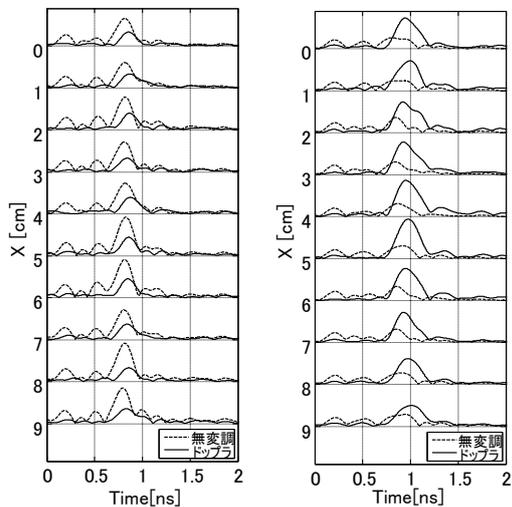
(3) 鉄筋腐食評価レーダ

本計測では励磁コイルに 30 App、周波数 25 Hz の交流電流を印加し、加振を行った。送受信アンテナにはボウタイスロットアンテナを用いた。またネットワークアナライザの周波

数掃引を 1~9 GHz である。供試体の鉄筋かぶりは 4 cm であり、供試体中央の D16 鉄筋直上における 10 cm 区間を 1 cm ずつコイルとアンテナを移動させながら計測した。

図 15(a)に供試体の加振レーダ計測により各計測点において得られた時間波形を示す。破線で示される無変調成分は微分後の波形であり、波形を比較しやすくするため振幅を調整している。無変調成分において 0.2 ns 付近に見られるピークはアンテナ間を直接伝わる直達波であり、実線で示されるドップラ成分では振幅が低下していることがわかる。また、0.8 ns 付近に現れるピークは幾何学的位置関係から、鉄筋の反射波であり、ドップラ成分においても明瞭にピークが確認できた。

次に、RC 供試体を 6% の NaCl 水溶液に 5 時間浸漬したのち、0.3 A の定電流で鉄筋と推移溶液中の極板間を 40 時間通電させ、鉄筋を腐食させた。このとき、腐食減量は 6.4% であった。図 15(b)に電食後の加振レーダ計測における時間波形を示す。図よりドップラ成分は無変調成分に比べ、電食前よりも大きくなっており、両波形の比較により明らかに腐食の有無を判断できる。図 16 に両レーダ波形のピークから(6)式によって得られる振動変位を推定した結果を示す。電食前は 5 μm 程度の振動変位であるが、電食後において 20~30 μm と 4~5 倍の振動振幅の増加が見られた。これは世界初の成果であり、今後、振動変位と腐食量の関係を定量的に検討していくことにより、腐食評価レーダの実用化が期待できる。



(a) 電食前

(b) 電食後

図 15 鉄筋かぶり 4cm の供試体における加振レーダの時間波形

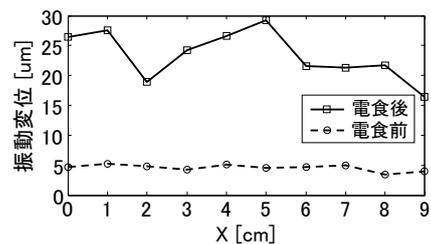


図 16 加振レーダによる鉄筋の振動変位

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件 全て査読有)

- 1) 三輪空司, 本多秀聡, 栗田伸幸, 小澤満津雄, 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, コンクリート工学年次論文集, **39**, in press, (2017)
- 2) 三輪空司, 栗田伸幸, 碓氷淳, 励磁コイルを用いた加振ドップラレーダによるコンクリート内振動体の選択的イメージング, コンクリート工学年次論文集, **38**, 2073-2078, (2016)
- 3) 三輪空司, 周波数掃引加振ドップラ計測による逆合成開口イメージング, 計測自動制御学会論文集, **52**, 538-544, (2016) DOI:109746/sicetr.52.538
- 4) 三輪空司, 山村允, 小澤満津雄, 超広帯域 RC レーダによる鉄筋腐食評価とその鉄筋径依存性, 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, **16**, 371-376, (2016)
- 5) 本多秀聡, 三輪空司, 栗田伸幸, 小澤満津雄, 励磁コイル加振による鉄筋微小振動のマイクロ波変位計測と鉄筋腐食評価への応用, 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, **16**, 365-370, (2016)
- 6) 三輪空司, 山村允人, 羽賀望, 小澤満津雄, 鉄筋節の周期構造のレーダ計測と鉄筋腐食評価への応用, コンクリート工学年次論文集, **37**, 1681-1686, (2015)
- 7) 津野祐丞, 三輪空司, 羽賀望, RC 構造物穿孔時前方探査のためのアンテナ一体型同軸円筒コアドリルの適用性, 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, **15**, 331-336, (2015)
- 8) 三輪空司, 山口諒, 親本俊憲, 羽賀望, RC 構造物内の細径配線探査への円偏波レーダの適用, 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, **15**, 325-330, (2015)
- 9) T. Miwa, Improvement of Horizontal Resolution by Doppler Image under Forced Vibration, Key Engineering Materials, **596**, 152-157 (2014)

[学会発表] (計 18 件)

- 1) 鈴木智洋(三輪空司), 送受信トランスデューサアレイを用いたバケットの3次元位置推定, 第7回電気学会東京支部栃木・群馬合同発表会, 足利工業大学(栃木県・足利市), 2017年3月3日
- 2) 三輪空司, 鉄筋腐食評価のための電磁波ドップラ法による鉄筋のアクティブ振動変位計測, 平成28年度非破壊検査協会秋季講演大会, ハーネル仙台(宮城県・仙台市), 2016年10月6日
- 3) 鈴木智洋(三輪空司), スロットアンテナを用いた掘削時前方リアルタイム計測, 電気学会産業応用部門大会2016, 群馬大学(群馬県・前橋市), 2016年8月30日
- 4) 三輪空司, 励磁コイル加振マイクロ波変位

計による鉄筋振動計測, 電気学会産業応用部門大会2016, 群馬大学(群馬県・前橋市), 2016年8月30日

- 5) 山本諒(三輪空司), 掘削時前方探査レーダにおけるバケット一体型アンテナの地中特性, 地下電磁計測ワークショップ, 東北大学(宮城県・仙台市), 2015年11月27日
 - 6) 三輪空司, 掘削時前方探査のためのバケット一体型アンテナの実験的検討, 物理探査学会大132回学術講演会, 早稲田大学国際会議場(東京都・新宿区), 2015年5月11日
 - 7) 三輪空司, 掘削バケット前方埋設物の地中レーダ監視システムの開発, 平成26年度建設施工と建設機械シンポジウム, 機械振興会館(東京都・港区), 2014年11月27日
 - 8) 山本諒(三輪空司), バケット一体型アンテナを用いた掘削時前方探査レーダに関する研究, 第57回自動制御連合会, ホテル天坊(群馬県・渋川市), 2014年11月10日
 - 9) 山村允人(三輪空司), 鉄筋節の周期イメージに着目した鉄筋腐食探査レーダ, 第57回自動制御連合会, ホテル天坊(群馬県・渋川市), 2014年11月10日
 - 10) 三輪空司, RC 構造物穿孔のためのコアドリル一体型前方監視レーダの一検討, 第57回自動制御連合会, ホテル天坊(群馬県・渋川市), 2014年11月10日
- 他8件

○出願状況 (計 1 件)

名称: 加振レーダ装置及びデータ解析装置
発明者: 三輪空司
権利者: 群馬大学
種類: 特許
番号: 2017-034707
出願年月日: 2017年2月27日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~miwalab/research.html>

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

小澤 満津雄 (OZAWA Mitsuo)
群馬大学・大学院理工学府・准教授
研究者番号: 80313906

羽賀 望 (HAGA Nozomi)
群馬大学・大学院理工学府・助教
研究者番号: 50638476