

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560572

研究課題名(和文) 電磁波を利用したコンクリート診断技術の高性能化

研究課題名(英文) Superior performance of the concrete diagnostic technic using electromagnetic wave

研究代表者

田中 俊幸 (TANAKA, TOSHIYUKI)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50202172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート構造物は長年の耐久性が求められるため、現状調査や保守・管理が重要となります。安全調査において最も精度が良いのは円柱コアを採取する破壊検査です。破壊検査では鉄筋のかぶりや半径だけでなくコンクリートの質も確認できます。しかしながら構造物全体を検査することは不可能であり、検査後の修復も大変です。

本研究では電磁波を利用した非破壊検査により鉄筋径や鉄筋のかぶりを精度良く探査する方法を提案しています。また、生コンの状態で成分配合比を推定することにより、生コンが安全基準を満たしているかどうかを確認する手法を提案しています。

研究成果の概要(英文)：The long durability is expected of a concrete structure. Periodic check and repair are needed to get the long durability. The destructive test from which a pillar core is extracted is best for safety test. The depth and the radius of a reinforcing bar can be confirmed exactly by destructive test. However, it's impossible to check the whole structure, and many costs are also necessary for restoration after a check.

In This research, the method to examine the depth of the reinforcing bar and the diameter of the reinforcing bar is proposed by non-destructive test for which a electromagnetic wave was used. The method to confirm whether ready mixed concrete satisfies a safety standard is proposed.

研究分野：計測工学

キーワード：非破壊検査 電磁波レーダー 鉄筋探査 成分推定 比誘電率分布 遺伝的アルゴリズム 生コン コンクリート構造物

1. 研究開始当初の背景

コンクリート診断法は円柱コアを採取して内部構造およびコンクリートの組成を診断する破壊検査と非破壊検査に大別される。円柱コアを採取する破壊検査は、内部構造を直接調査診断できるため、探査精度は非常に高い。しかし、構造物に穴を開けるため補修をしなければならない。また、配管・配線などを切断する恐れもあるので、構造全体を調査することは時間、費用、安全性の面から実質的に不可能である。したがって、非破壊検査が注目を集めている。非破壊検査には目視調査、打音調査、弾性波法、超音波法、電磁波レーダ法、赤外線法、デジタルカメラ法、放射線透過試験などがある。これらの調査項目は健全度診断に必要であるが、何れの方法に対しても十分な診断精度が得られているとは言い難い。既存技術にも電磁波レーダ法によるコンクリート中の鉄筋調査がある。しかし、この方法は電磁波パルスをコンクリート中に照射し、鉄筋からの反射パルスの到達時間を利用して、鉄筋の半径を零、コンクリートの比誘電率をある値(例えば 8.0)に仮定してかぶりを推定しているため、以下のような欠点がある。

- 一般に、レーダの位置によって鉄筋上の反射点は移動する。かぶりが少ない場合は反射点の移動は大きなものとなるが、かぶりの推定アルゴリズムに鉄筋の半径が考慮されていないために、鉄筋探査の精度は著しく低下する。
- コンクリートの比誘電率が未知のために正確なかぶりを推定できない。
- 鉄筋の大きさを推定できない。

2. 研究の目的

本研究では電磁波レーダを利用したコンクリート構造物の非破壊内部診断方法の開発について議論する。特に、コンクリート内部の電気定数分布を測定する方法を提案し、その電気定数分布関数をコンクリート構造の内部推定アルゴリズムに追加し、内部診断の精度の向上を図る。さらに、フレッシュコンクリートの水、セメント、細骨材の配合比を推定する方法を確立する。

3. 研究の方法

本研究には大きく分けて次の3つの計画がある。

(1) コンクリートの電気定数の非破壊測定

打設後のコンクリートの電気定数(比誘電率、導電率)の経日変化、並びにコンクリート内の深さ方向に関する電気定数の変化を実測する。このために、誘電率測定プローブの設計・製作が必要となる。さらに、電気定数分布を探査アルゴリズムに取り入れ、鉄筋の探査精度を向上させる。

(2) コンクリート診断用アンテナの作成

送受信器分離型レーダのアンテナを小

型化して、送受信アンテナの間隔を縮め、取得できるデータ数を増やし、探査精度の向上を図る。

(3) フレッシュコンクリート診断

フレッシュコンクリート診断用のためにアンテナと探査容器一体型の計測装置を設計し、水、セメント、砂の配合比の診断や塩分濃度測定の精度を向上させ、診断アルゴリズムを確立する。

4. 研究成果

(1) コンクリートの電気定数の非破壊測定



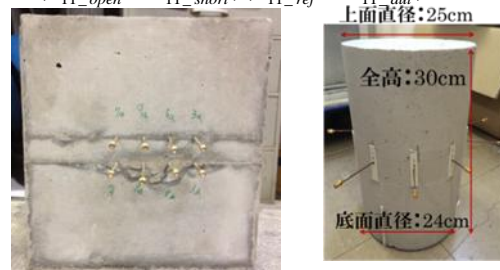
図 1-1 誘電体プローブ

図 1-1 に誘電体プローブ、式(1-1)に比誘電率の計算式を示す。

$$\epsilon_{dut} = \frac{A+B}{(S_{11_open} - S_{11_ref})(S_{11_short} - S_{11_dut})}$$

$$A = \epsilon_{ref}(S_{11_ref} - S_{11_short})(S_{11_open} - S_{11_dut}) \quad (1-1)$$

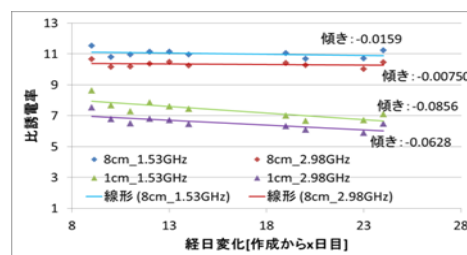
$$B = (S_{11_open} - S_{11_short})(S_{11_ref} - S_{11_dut})$$



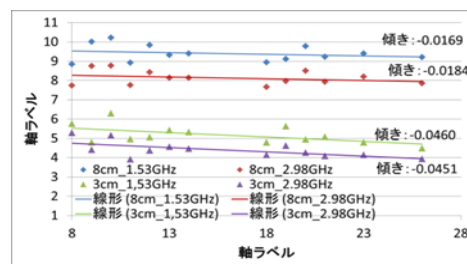
(a)直方体型 (b)円柱型

図 1-2 試験体の写真

図 1-1 に示す誘電体プローブを図 1-2 に示すコンクリート試験体に深さを変えて直接埋め込み、電気定数の経日変化と、埋め込み深さによる変化の両方を測定する。



(a) 直方体型



(b) 円柱型

図 1-3 比誘電率の経日変化

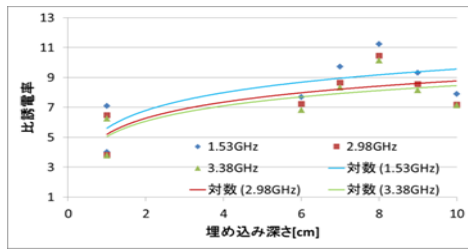


図 1-4 比誘電率の深さの変化

図 1-3 に埋め込み 8cm と 1cm の作成から 24 日目までの経日変化を示す. 図より埋め込みが 8cm, 1cm とともに日が経つにつれて比誘電率が減少していることが確認できる. また埋め込みが 8cm と比較して 1cm の方が大きく減少していることが容易にわかる. このことから, 表面近傍より比誘電率が減少していくということが分かる. 比誘電率は周波数のによって異なるので, 2 つの周波数 (1.53GHz, 2.98GHz) に対して示している. 周波数が高くなるほど, 比誘電率が小さくなることもわかる. 図 1-4 に作成して 24 日目の比誘電率の深さ特性を示す. 比誘電率は深くなるにつれて単純に大きくなりながらある値に収束していくことを予想していたが, 期待したように滑らかな特性は得られなかった. 複数の試験体を作成した後, その原因は粗骨材の粒の大きさにあることをつきとめた. 現在はこの対策を検討中である.

また, 我々が提案する比誘電率の深さ依存性の近似関数を式(1-2)に, 土木研究所が提案している近似式を式(1-3)に示す.

$$\varepsilon_r(x) = s \log(x+t) + u \quad (1-2)$$

$$\varepsilon_r(x) = \left(\frac{x}{\frac{1}{a} + \frac{x}{c-b}} + b \right)^2 \quad (1-3)$$

表 1-1 最小 2 乗法によるパラメータの決定

a	0.1920	s	1.220
b	5.476	t	0.3600
c	13.99	u	7.000

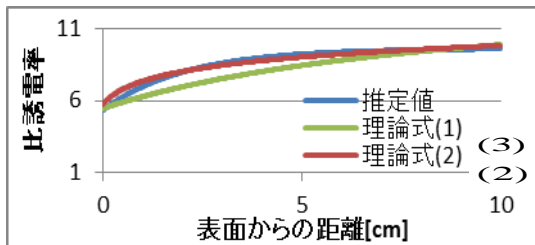
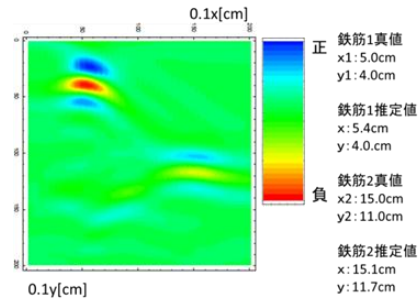


図 1-5 比誘電率分布の近似曲線

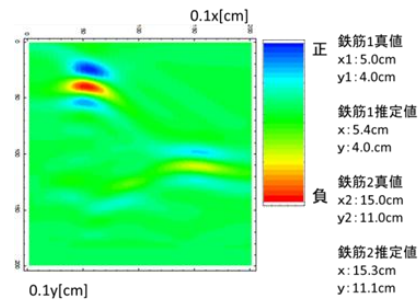
表 1-1 に測定データに対して式(1-2), (1-3)に最小 2 乗法を適用したときの最適なパラメータを, 図 1-5 に最適なパラメータを用いた時の近似曲線を示す. 図より提案した近似式の方が実測値を直接近似した式に見ていることが分かる.

式(1-2)の比誘電率分布もつコンクリート

に対して合成開口処理を適用した結果を図 1-6 に示す. (a)は通常の合成開口処理, (b)は比誘電率の不均質分布を考慮した合成開口処理による推定結果である. 通常の合成開口処理で用いる比誘電率を, 鉄筋までの平均の比誘電率とした場合は, 浅い鉄筋は正確に深さを推定することができるが, 深い鉄筋は実際よりも深い位置に鉄筋が存在するように示されることを明らかにした. 真値と比較して 7mm の誤差であるが, 鉄筋探査では 10cm より深い鉄筋探査の場合のかぶりの要求精度は 10%程度なので, かぶりの 7mm の差は決して無視してよい数値ではない.



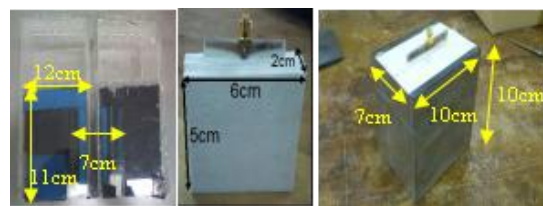
(a) 通常の合成開口処理画像



(b) 不均質合成開口処理画像

図 1-6 合成開口処理画像

(2) コンクリート診断用アンテナの作成



(a) 初期型 (b) 誘電体埋込 (c) 改良型

図 2-1 アンテナの写真

アンテナ改良の写真を図 2-1 に示す. 初期型 (a) はビバルディアンテナをアクリルケースに入れ, 電波吸収体を配置した構造である. (b) は誘電体埋込型である. コンクリートと同じ比誘電率を持つ誘電体の内部にアンテナを埋め込むことによって, コンクリートの表面反射波を少なくし, できるだけコンクリート中に電波が入り込むようにした構造である. (c) は最新のアンテナである. アンテナを手で持ったままで測定できるように, 電波吸収タイルと電波防護布でアンテナの側面を覆った構造である. 図 2-2 にアンテナの

S11 反射特性を示す。反射特性なので、小さ

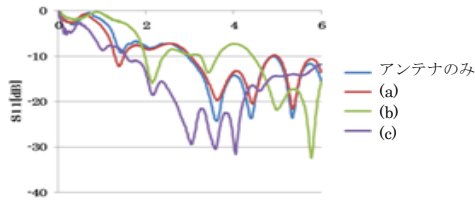


図 2-2 S11 反射特性

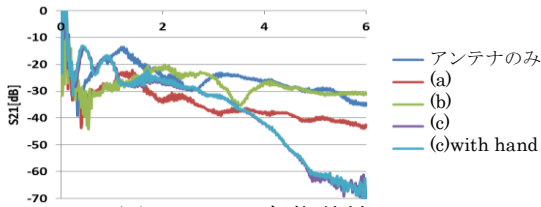


図 2-3 S21 伝搬特性

い値の方が反射が小さいことを表す。改良型は最も低周波から反射係数が小さくなっており、1GHz から電波を放射できていることが分かる。図 2-3 に図 2-1 のアンテナを 2 つ作成し、それらを空气中に正対して配置したときの受信特性を示す。受信特性なので、S21 の値が大きい方が特性がよいことを表す。改良型は誘電体の中にアンテナを埋め込んでいるため、空气中に放射する電磁波が少なく、一見すると最も悪い特性のように思われる。しかし、改良型の場合、手で持った時と手を離しているときで S21 特性は殆ど変わらないことが分かる。これは、アンテナの外側に電波が漏れていないことを表している。ここでは示していないが、アンテナ (a), (b) では手で触ると S21 の値が変化している。したがって、(a), (b) のアンテナでは測定時にアンテナを持つことはできないため、計測時に自由な測定ができなかった。

表面反射波が小さくなったことを示すために、S21 を逆フーリエ変換してパルスの時間応答に変換した波形を図 2-4 に示す

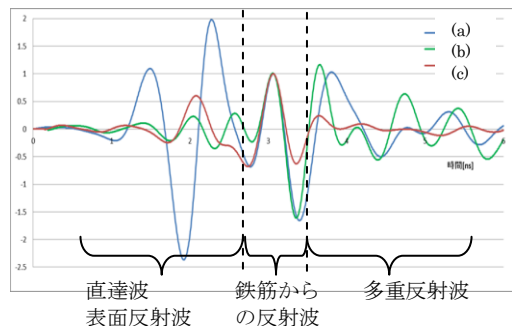


図 2-4 パルス応答

図 2-4 にコンクリート中の鉄筋の真上に 2 つのアンテナを配置したときの時間波形を示す。伝搬時間を考慮して鉄筋からの反射波の振幅が 1 になるように、それぞれの波形を規格化している。初期型は吸収体を配置しているにも関わらず大きな直達波と表面反射波を受信していることが分かる。誘電体埋込型

(b) ではシールドしていないために多重反射の影響が大きく現れている。一方改良型では鉄筋からの反射波の振幅が最も大きいことが分かる。従って改良型アンテナを用いることで、鉄筋からの反射波をより正確に受信できることが期待できる。

(3) フレッシュコンクリート診断

フレッシュコンクリート診断に使用する容器写真を図 3-1 (a) にそのサイズを表 3-1 に示す。使用するアンテナを図 3-2 に示す。



(a) 合板容器 (b) アクリル容器
図 3-1 フレッシュコンクリート容器

表 3-1 フレッシュコンクリート容器のサイズ

	高さ [cm]	奥 [cm]	幅 [cm]
A	20cm	30cm	10cm
B	20cm	30cm	9cm
C	20cm	30cm	8cm
D	20cm	30cm	7cm
E	20cm	30cm	6cm
F	20cm	30cm	5cm

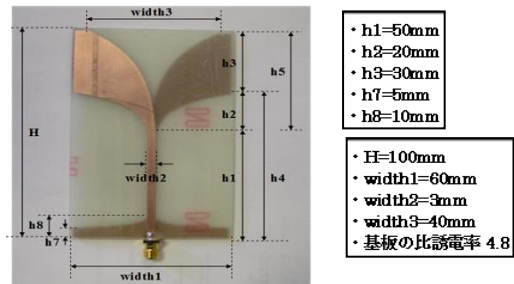


図 3-2 ビバルディアンテナ

図 3-2 のアンテナを図 3-1 の容器の両側に配置し、ネットワークアナライザを用いて S21 伝搬特性を測定した結果を図 3-3 に示す。

フレッシュコンクリートの成分推定を行うためには、一様な変化を観測する必要がある。容器の幅が長くなるにつれて減衰量は一樣に大きくなるはずである。しかし、長さが 9cm と 10cm ではそれより短い場合と比較して減衰の割合が一樣でないことが分かる。受信

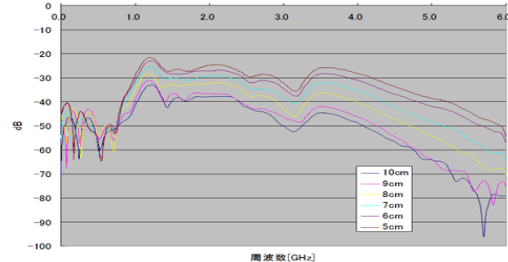


図 3-3 S21 受信特性

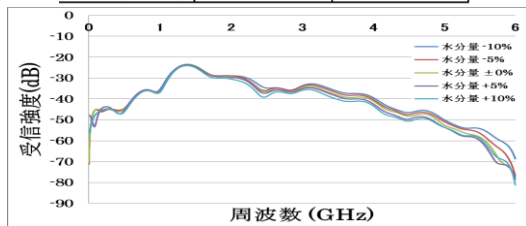
強度が小さくなりすぎているため、誤差の影響を強く受けるためである。一方、長さがあり小さいと多重反射の影響を強く受ける。これらより、容器の幅を8cmと決定した。しかしながら合板の容器では比誘電率が様でないため、今後は図3-1(b)に示すようにアクリルで容器を作成することにした。

(I)水分推定

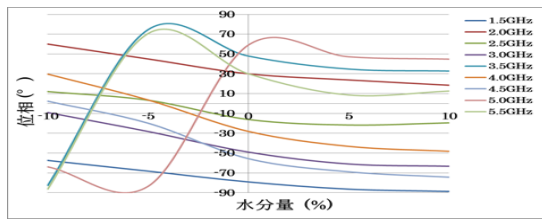
水、セメント、細骨材の標準配合比に対して水分量だけを変化させた試験体を作成し、水分量の変化に対するS21の変化を観察する。

表 3-2 水分配合比

水(g)	セメント(g)	砂(g)
1440(-10%)	3200	9600
1520(-5%)	3200	9600
1600(±0%)	3200	9600
1680(+5%)	3200	9600
1760(+10%)	3200	9600



(a) 振幅特性



(b) 位相特性

図 3-4 水分量に対する S21 の変化

水分が増えると周波数が 1.6GHz 以上では受信振幅は小さくなっているが、1.6GHz 以下では、振幅に大きな変化はみられない。一般に水の導電率は周波数が高くなると急激に大きくなるが、周波数が低いときには大きな変化がないことから、容易に予想できる。一方位相は水分量が増えるにつれて小さくなっていることが分かる。これらを考慮して水分量の推定は、位相変化量で推定することとする。位相変化量と水分量の実験式を式(2-1)に示す。

$$\text{水分量} = 80g \times \frac{\text{平均位相変化量}[\text{°}]}{9.23^\circ} \quad (2-1)$$

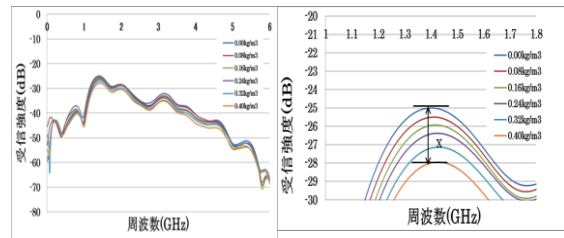
(II)塩分量の推定

基準配合比に対して塩分を追加した時のS21の変化を示す。水分量の変化とは逆に塩分が増加すると1GHz以上の周波数に対して一様に振幅が減衰しており、逆に位相はほとんど変化がないことが分かる。これより、受信強度から塩分量を推定することができる。

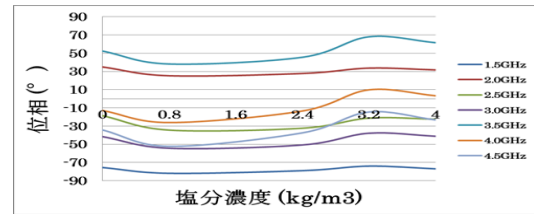
$$\text{塩分量} = 0.48g \times \frac{S_{21}\text{の減少量}[\text{dB}]}{0.27\text{dB}} \quad (2-2)$$

表 3-3 塩分配合比

水(g)	セメント(g)	砂(g)	NaCl(g)	Cl-(Kg/m³)
1600	3200	9600	0	0
1600	3200	9600	0.8	0.08
1600	3200	9600	1.6	0.16
1600	3200	9600	2.4	0.24
1600	3200	9600	3.2	0.32
1600	3200	9600	4	0.4



(a-1) 振幅特性 (a-2) 振幅特性の拡大図



(b) 位相特性

図 3-5 塩分量に対する S21 の変化

(III)湿度補正

配合比の推定実験を行う際に、フレッシュコンクリートの試験体を準備するときの湿度が探査結果に大きく依存する。すなわち、湿度が低いときには、フレッシュコンクリートを指定した配合比に調整する作業中に水分が蒸発するため、蒸発量を見積もって最初の水分量を推定することにする。水分量の補正式(2-3)を実験的に求めた。式(2-3)を求めるために行った湿度と水分減衰量の関係を示す。湿度が80%を超えると、補正量は非常に小さくなるのが分かる。

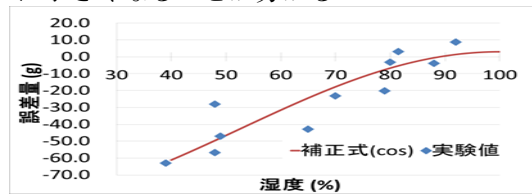


図 3-6 湿度の変化に対する水分推定量

$$f(x) = -(a-3) + a \cos\left(\frac{b(x-100)}{100} \pi\right) \quad (2-3)$$

(IV)粗骨材の評価

粗骨材が含まれている場合、通常のS21の評価では正しく配合比を推定できなかった。そこで、ざるを用いて5mm以上の石を取り除いた後にS21を評価することとした。湿度による補正を行うことによって、配合比を推定できることを示した。

(V)推定実験

標準配合比によるフレッシュコンクリートを評価者が作成する。次に協力者が水と塩を適当に追加して攪拌する。評価者はフレッシュコンクリート容器に試料を挿入し、S21を測定する。振幅と位相を解析し、湿度

補正を行い水分量と塩分量を推定する。

上記推定実験を複数回繰り返し推定精度を確かめたところ、水分量の推定誤差は0.5%、塩分量の推定誤差は10.1%だった。塩分推定誤差をもう少し小さくする必要があるが、フレッシュコンクリートには本来塩分は含まれていないはずなので、塩分含有量の安全基準を満たしているかどうかを評価することは十分に可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)総数4

- ① 田中俊幸, 森山敏文, 竹中隆, 観測界から2次元FDTD解析用線電流源を作る方法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J97-C, No.6, pp.279-281, Jun. 2014. 査読有.
- ② Toshifumi Moriyama, Toshiyuki Tanaka, Takashi Takenaka, Image Reconstruction of Objects with Time Reversal and Equivalent Fields, Proceedings of International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, pp.1393-1396 (2013.09)査読有.
- ③ Toshiyuki Tanaka, Takashi Takenaka, Toshifumi Moriyama, Concrete Imaging without Information of Incident Field, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, in USB, pp.1597-1601 (2013.08)査読有.
- ④ Toshifumi Moriyama, Takashi Takenaka, Toshiyuki Tanaka, else, Time Reversal Imaging without Information of Incident Field, Proceedings of the 2013 URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory, in CD, pp.123-126 (2013.05)査読有.

〔学会発表〕(計21件)

- ① 谷山力哉, 藤本孝文, 田中俊幸, 牧島慎一, フレッシュコンクリート成分評価用アンテナシステム, 信学技報, vol. 114, no. 318, MW2014-124, pp. 7-10, 2014. 11. 20, 長崎大学.
- ② 松本頌平, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, GAを用いたコンクリート中の鉄筋検査装置, 平成26年度電子情報通信学会九州支部学生会第22回学生会講演会, C-12, 2014. 9. 20, 鹿児島大学.
- ③ 牧島慎一, 田中俊幸, 藤本孝文, 森山敏文, 竹中隆, 谷山力哉, 砂利を含んだフレッシュコンクリートの電磁波を利用した成分推定, 平成26年度電子情報通信学会九州支部学生会第22回学生会講演会, B-28, 2014. 9. 20, 鹿児島大学.
- ④ 遠江一仁, 永野弓太郎, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, コンクリートの電気定数測定法に関する一検討, H26年電気関係学会九州支部連合大会, CD-ROM 14-2A-08, 2014. 9. 18, 鹿児島大学.
- ⑤ 遠江一仁, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, コンクリートの比誘電率とその経日変化の測定, 電子情報通信学会2014年総合大会, C-2-121, 2014. 3. 20, 新潟大学.
- ⑥ 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 波源情報を必要としないコンクリート中の鉄筋および空洞探査, 電子情報通信学会2014年総合大会, C-1-18, 2014. 3. 20, 新潟大学.
- ⑦ 遠江一仁, 久々宮健太, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 市販のコンクリートレーダを利用した鉄筋の位置推定に関する研究, 電子情報通信学会技術報告SANE2013-113, pp. 1-6, 2014. 1. 23, 長崎市美術館.
- ⑧ Tsuyoshi TOKUTAKE, Yuuki TANAKA, Takashi TAKENAKA, Toshiyuki TANAKA, Tosifumi MORIYAMA, The Diagnosis of the Concrete Structure by using Electromagnetic Waves, 平成25年度電子情報通信学会九州支部学生会第21回学生会講演会国際ポスターセッション, IS-2, 2013. 9. 23, 熊本大学.
- ⑨ 松本頌平, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, GAを用いたコンクリート中の鉄筋検査に関する研究, 平成25年度電子情報通信学会九州支部学生会第21回学生

会講演会, C-8, 2013. 9. 23, 熊本大学.

- ⑩ 遠江一仁, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 経日変化に対するコンクリートの電気定数及び分布の変化, 平成25年度電子情報通信学会九州支部学生会第21回学生会講演会B-3, 2013. 9. 23, 熊本大学.
- ⑪ 田中雄喜, 徳竹剛志, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, コンクリート壁中の空洞探査, 平成25年度電子情報通信学会九州支部学生会第21回学生会講演会B-10, 2013. 9. 23, 熊本大学.
- ⑫ 衛藤健太, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 電磁波を利用したフレッシュコンクリートの成分評価, 平成25年度電子情報通信学会九州支部学生会第21回学生会講演会B-15, 2013. 9. 23, 熊本大学.
- ⑬ 松本頌平, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 実測データを基にした2D-FDTD用入射電流源の決定法H25年度電気関係学会九州支部連合大会, 01-2P-06, 2013. 9. 21, 熊本大学.
- ⑭ 遠江一仁, 久々宮健太, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, コンクリートレーダを用いた鉄筋探査の高精度化に関する研究, H25年度電気関係学会九州支部連合大会, 01-2P-07, 2013. 9. 21, 熊本大学.
- ⑮ 大石拓矢, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 藤本孝文, 電磁波を利用したフレッシュコンクリートの成分推定-その2-, 電子情報通信学会2013年総合大会, C-2-85, 2013. 3. 21, 岐阜大学.
- ⑯ 田中雄喜, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, コンクリートレーダー用アンテナの開発電子情報通信学会2013年総合大会, C-2-129, 2013. 3. 19, 岐阜大学.
- ⑰ 田中雄喜, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, FBTS法による層状コンクリート中の空洞探査に関する研究平成24年度電子情報通信学会九州支部学生会第20回学生会講演会C-28, 2012. 9. 26, 長崎大学.
- ⑱ 調恒明, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 誘電体埋め込み型アンテナを用いたGAによる鉄筋の推定, 電子情報通信学会2012年総合大会, C-1-1, 2012-3. 21, 岡山大学.
- ⑲ 衛藤健太, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, music法を用いた均質媒質中にある物体の位置推定, 平成23年度電子情報通信学会九州支部第19回学生会講演会, C-10, 2011. 9. 28, 佐賀大学.
- ⑳ 調恒明, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, 誘電体埋め込み型ビバルディアンテナによる鉄筋探査, 平成23年度電子情報通信学会九州支部第19回学生会講演会, B-14, 2011. 9. 28, 佐賀大学.
- ㉑ 田中俊幸, 松尾大輔, 久々宮健太, 藤本孝文, 森山敏文, 竹中隆, マイクロ波を利用したフレッシュコンクリート診断, 電子情報通信学会2011年ソサイエティ大会, C-2-81, 2011. 9. 29, 北海道大学.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 俊幸 (TANAKA, Toshiyuki)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 50202172

(2)研究分担者

森山 敏文 (MORIYAMA, Toshifumi)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号: 20452873

藤本 孝文 (FUJIMOTO, Takafumi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 40264204