

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420461

研究課題名(和文) 電磁波を利用したフレッシュコンクリート一括診断と電磁波レーダ法の改善

研究課題名(英文) Fresh concrete collective diagnosis using electromagnetic waves and Improvement of electromagnetic wave radar method

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートの不均質分布を非破壊で測定する方法を提案し、比誘電率の深さ依存性について明らかにした。また、コンクリートの打設から数か月の比誘電率の経日変化を明らかにした。これらを用いて表面からの深さと経日に対する比誘電率分布の近似曲線を求めた。コンクリート構造物が設計図通りに製作されても、コンクリートの配合比が安全基準を満たしていない場合、構造物は要求される耐用年数を満たすことはできない。そこで、新鮮なコンクリートの混合比、すなわち水、セメントおよび骨材の割合を検査する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：We proposed the nondestructive testing method to measure the inhomogeneous distribution of concrete and clarified the depth dependency of relative permittivity. We also clarified the variation per day of relative permittivity in several months after concrete placement. Using these results, an approximate curve of the relative permittivity distribution with respect to the depth from the surface and the day from cast was obtained. Even if the concrete structure is manufactured according to the design drawing, if the compounding ratio of concrete does not meet safety standards, the structure can not satisfy the required service life. Therefore, we proposed a method of inspecting the mixing ratio of fresh concrete, that is, the proportion of water, cement and aggregate.

研究分野：電磁波応用工学

キーワード：コンクリート診断 フレッシュコンクリート 成分評価 電磁波レーダ 鉄筋探査 非破壊検査

### 1. 研究開始当初の背景

現在のフレッシュコンクリートの診断は、診断項目によって種々の装置が用いられている。圧縮強度試験以外はリアルタイム試験なのでコンクリート打設前にすべて検査することが望ましいが、それぞれの試験において測定器が異なるためすべての試験の実施は困難である。また、個人住宅などではこれらの試験は行われていないのが現状である。世界的に見てもこれらを一括して診断するシステムは開発されていない。

一方、コンクリート構造物の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。電磁波レーダ法は電磁波の到達時間を利用して鉄筋や空洞の有無を容易に探査できる手法であるが、かぶりや鉄筋径を正確に推定することはできない。現在でもコンクリートレーダは改良されて続けているが、探査手法には大きな改良が見られず、正確なかぶりの探査を行うことはできていない。以下に現状の問題点を列挙する。

- ・フレッシュコンクリートの統合的な診断方法がない。
- ・鉄筋径やかぶりを正確に推定できていない。
- ・比誘電率を一定として推定を行っているので、鉄筋推定の誤差が大きい。

### 2. 研究の目的

(1) これまでに生コンの水、セメント、細骨材の配合比の推定、塩分含有量の推定の可能性について示してきた。ここでは、推定精度の向上と、推定容器の設計と制作を目指す。

(2) コンクリートの比誘電率を非破壊で測定し、比誘電率分布の近似式を求める。

(3) 送受信器分離型簡易レーダ装置の作成および電気定数の簡易推定と逆解析による詳細推定を行う。特に、誘電体埋込アンテナを作製し、表面反射波を軽減して鉄筋探査精度を向上させることが目的である。

(4) 逆問題の解法である FBTS 法の高精度化と高速化アルゴリズムの作成を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) フレッシュコンクリート診断

アンテナとフレッシュコンクリート診断容器を一体化したフレッシュコンクリート診断装置の理論設計と製作並びに評価を行う。また、研究期間中にフレッシュコンクリート内の水分が時間とともに下部に移動することを見出したので、水分の移動を観測するための新たなフレッシュコンクリート評価システムを考案し、製作及び評価を行う。

#### (2) コンクリートの比誘電率分布の測定

同軸プローブによる推定だけでなく、1対のダイポールアンテナをコンクリートに複数組埋め込み、電気定数を測定する。ダイポールアンテナを正しく配置するため、3Dプリンタを使用してアンテナのスペーサーを

製作し、比誘電率分布の深さ方向と経日変化の精度を向上する。さらに、比誘電率分布の近似式を求める。

(3) 誘電体アンテナを作成し、コンクリート中の物体の探査に最適な送受信部を作成し、実測により、送受信部を評価する。遺伝的アルゴリズムを利用し、鉄筋の位置推定を行う。

(4) 不均質分布を非破壊で推定する手法である FBTS 法を改良し、高速に比誘電率分布を推定するマルチグリッド FBTS 法を提案し、その有効性を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) フレッシュコンクリート診断

単体のアンテナ

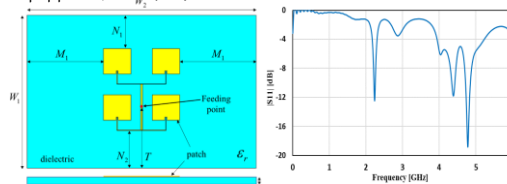


図 1-1 MSAA 図 1-2 S11 周波数特性

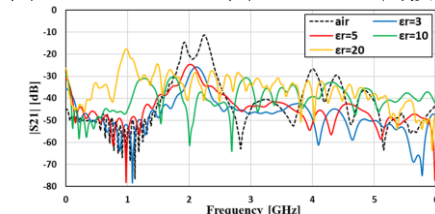


図 1-3 S21 周波数特性

図 1-1, 1-2 にマイクロストリップアレイアンテナ (MSAA) の設計図と、S11 反射特性を示す。図 1-3 に診断容器内が空気、比誘電率 3, 5, 10, 20 の時の透過波の周波数特性を示す。生コンの比誘電率は 20 程度であるので、比誘電率が 20 の時に整合をとるように設計したため、比誘電率が 20 の時が平坦で大きな振幅を受信できていることがわかる。

図 1-1 の MSAA を図 1-4 のように 2 組上下に配置して水分の移動を観測するシステムを構成する。

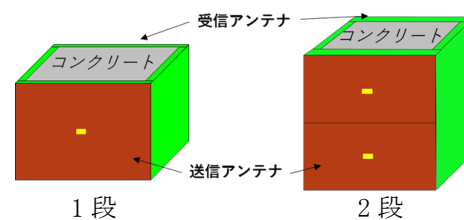


図 1-4 MSAA の配置

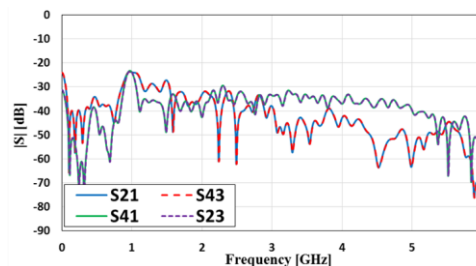
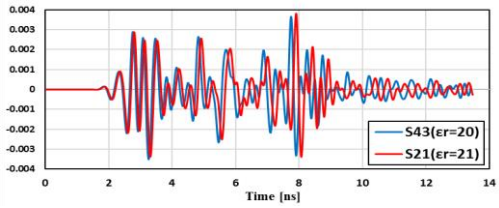
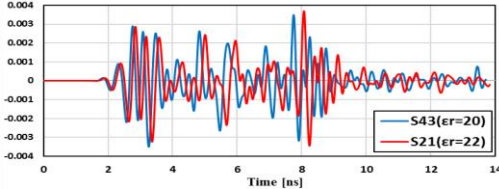


図 1-5 2 段配置の透過波の周波数特性

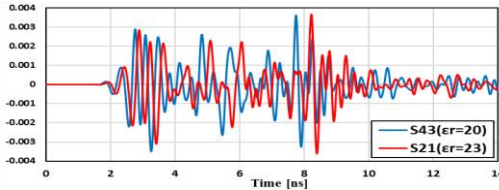
	媒質A	媒質B	媒質C
上側(S43)	$\epsilon r=20$ $\sigma=0.1$	$\epsilon r=20$ $\sigma=0.1$	$\epsilon r=20$ $\sigma=0.1$
下側(S21)	$\epsilon r=21$ $\sigma=0.1$	$\epsilon r=22$ $\sigma=0.1$	$\epsilon r=23$ $\sigma=0.1$



媒質 A



媒質 B



媒質 C

図 1-6 時間応答波形

図 1-5 に 2 段配置の S21 と S43 透過特性を示す. 上下ともに同じ周波数特性をしており, 互いの影響を受けていないことがわかる.

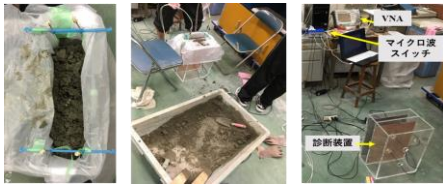


図 1-7 実験の様子

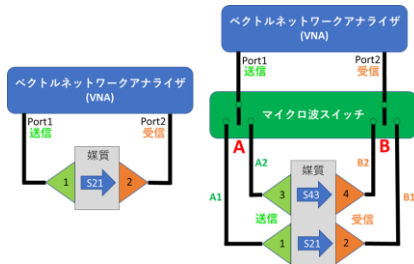
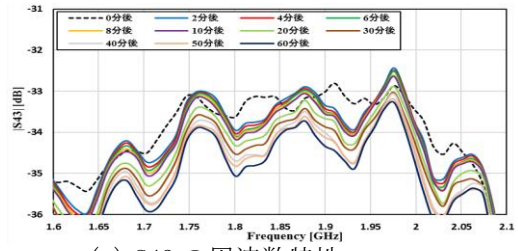


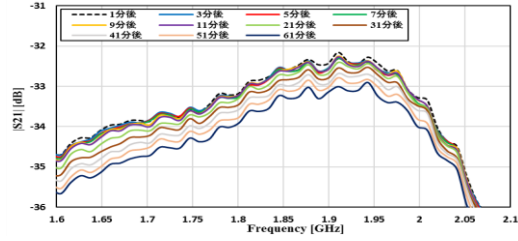
図 1-8 測定装置のブロック図

標準配合比の生コンに対する測定結果を示す. S43 は 1 時間経過すると約 1 dB 減衰しているが, S21 は 1 時間経過しても約 0.8 dB しか減衰していない. すなわち上部の水分が下方に移動するため, 上部の方が受信レベルの変化が大きく, 水分の移動がより多く行われていることが分かる. 今後はこの水分移動量の違いと, 生コンの水分比を明らかにし, 生コン配合比の精度向上を目指す.

なお, 作成したシステムにおいて下部だけに合板を入れたときの時間応答を観測し, 上部と下部とで相互影響が少なく, それぞれのアンテナ間の媒質の電気定数を得ることができることを確かめている.



(a) S43 の周波数特性



(b) S21 の周波数特性

図 1-9 透過波の周波数特性の時間変化

## (2) コンクリートの比誘電率の測定

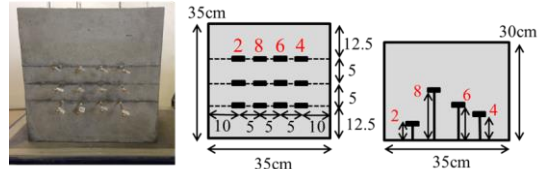
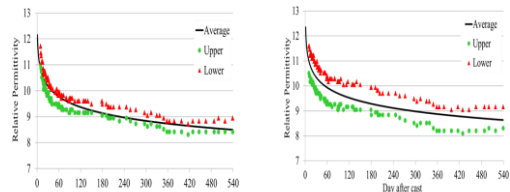


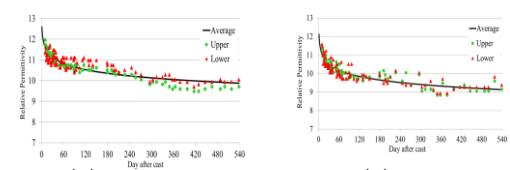
図 2-1 コンクリート試験体と設計図

ダイポールアンテナを 12 本作製し, コンクリート試験体に表面からの深さ 2, 4, 6, 8 cm の 4 つの深さに対して 3 本ずつのアンテナを上下に埋め込んだ. 中央部分のアンテナを送信, 上部と下部をそれぞれ受信とし, 同じ深さに対して 2 組の経路で比誘電率を推定する.



(a) 2cm

(b) 4cm



(c) 6cm

(d) 8cm

図 2-2 比誘電率の経日変化

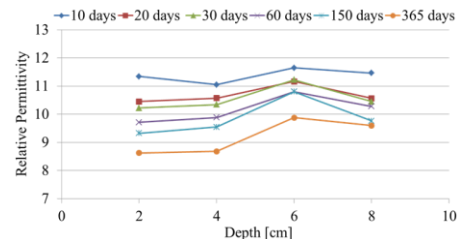


図 2-3 比誘電率の深さ依存性

0 日から 540 日まで比誘電率の変化を測定した. すべての深さにおいて, 比誘電率は下

がり続けていることがわかる. すなわち1年6か月でもコンクリートは安定していないことがわかる. また, 今回の実験で2,4cmはコンクリートの比誘電率が少し異なる値をしているが, 6,8cmでは2つの経路で比誘電率の値は近い. この原因は, 2,4cmでは中央部のアンテナが上の方に曲がったために, 上の方が伝搬距離が短くなったことにより, 比誘電率が見かけ上, 小さくなったのではないかと考えている. また, 比誘電率の深さ依存性を示している. 打設から日が浅い時には比誘電率の値は深さによらずほぼ一定の値をしているが, 1年を過ぎたあたりから深さが深くなると比誘電率が大きくなる傾向が観測される.

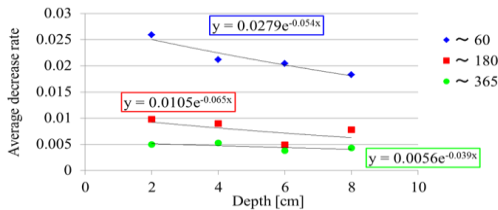


図 2-4 比誘電率の平均減少率の近似式

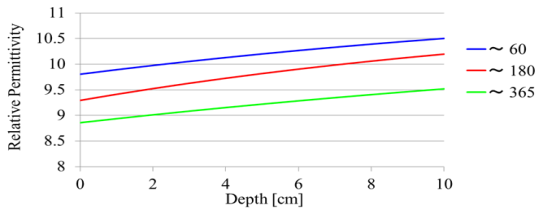


図 2-5 比誘電率の深さ特性

図 2-4 に打設からの経日において3つの比誘電率分布を提案した. この近似式は, 1日当たりの平均変化量をもとに作成している. 図 2-4 で示した近似式を利用して作成した比誘電率の深さ特性を図 2-5 に示す.

アンテナ間隔が移動しないように3Dプリンタでアンテナのスペーサーを作成した.

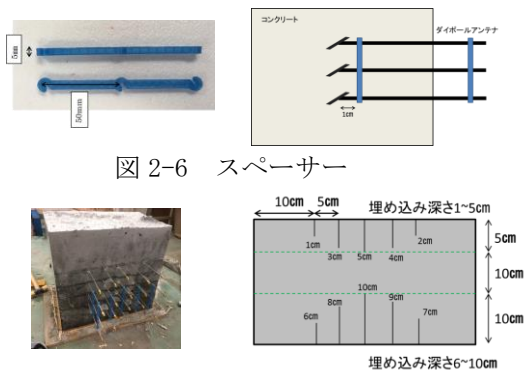


図 2-6 スペーサー

図 2-7 コンクリート試験体

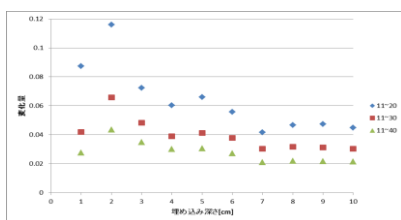


図 2-8 平均変化量の経日変化

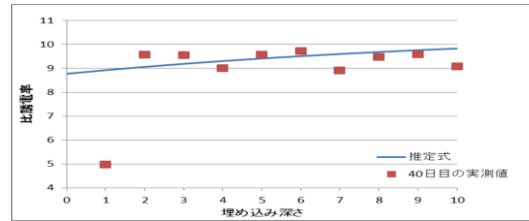


図 2-9 平均変化量を元にした比誘電率

図 2-6 にスペーサーとその配置を, 図 2-7 に試験体の写真とアンテナの深さを示す. 図 2-8 は比誘電率の平均変化量を表し, 図 2-9 に比誘電率分布を示す. スペーサーの使用により測定値のばらつきがおさえられた. また, 以下に比誘電率の近似式を示している.

$$\epsilon_r(x) = 10.61 - 0.0461 \times 40 \times e^{-0.085x}$$

今後はこの近似式を用いて, レーダによる鉄筋探査の精度向上を図る必要がある.

### (3) 誘電体埋め込みアンテナの作成と探査

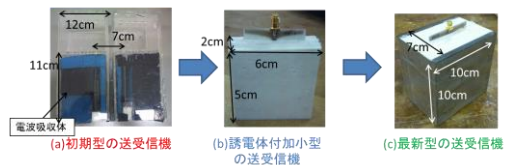


図 3-1 アンテナの改良

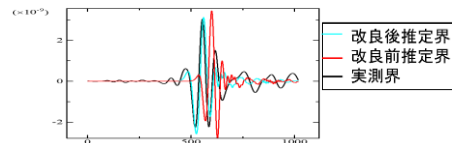


図 3-2 入射電流源と観測界

図 3-1 にアンテナの改良の様子を, 図 3-2 に改良されたアンテナの入射電流源と実測界と推定界を示す. 実測界と推定界 (計算界) は非常によく一致していることがわかる.

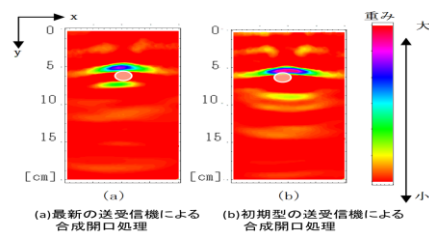


図 3-3 合成開口処理画像

図 3-3 より改良した送受信機を用いると, 推定画像の重み強い部分がより小さな領域に絞られていることがわかる.

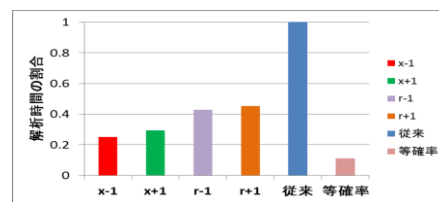


図 3-4 GA の解析速度の比較

遺伝的アルゴリズム (GA) を利用した鉄筋の推定は実測値でも成功しているが, 非常に



時間がかかることが難点であるので、アルゴリズムの高速化を試みた。GA が収束してくると同じ適応度を持つ同じ染色体が多数存在することになる。同じ染色体同士では、次世代もクローンができるだけであり、新たな進化は生まれにくい。そこで、適応度が高い同じ染色体が親に選ばれた場合は、1つの親だけを左右どちらかに1マス移動する、あるいは同じかぶりになるように半径を±1だけずらすことを提案した。図3-4に提案したアルゴリズムに対する解析時間の変化を示している。Xが横方向、rが半径である。いずれも大幅な時間の短縮がみられる。特に4つの交差を等確率で実施した場合は、通常の推定に対して約1/10に時間が短縮されていることがわかる。

#### (4)FBTS法の高速化と高精度化

##### ①コンクリート中の空洞探査の高精度化

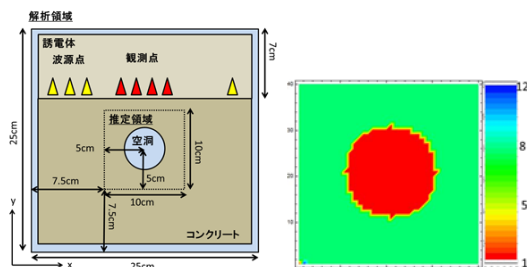
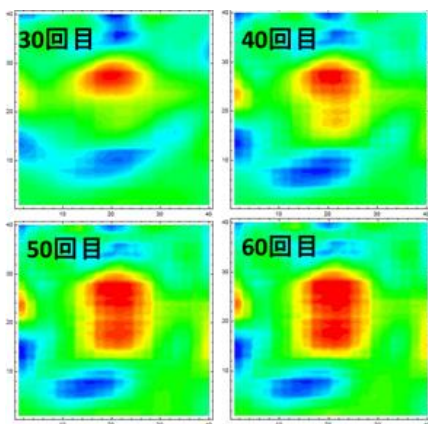


図 4-1 構成図 (a) 真値



(b) 探査結果

図 4-2 空洞の推定結果

マルチグリッドの考え方を導入することにより、従来の探査結果を大幅に改善することができた。

##### ②タイムシフト(TS)-FBTS法の提案

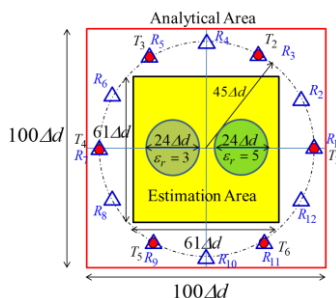
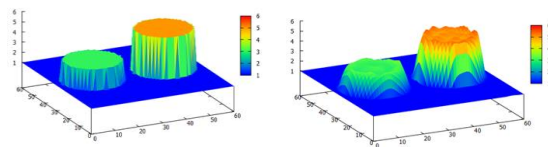
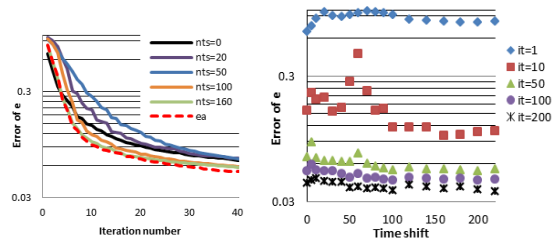


図 4-3 問題の構成図



(a) 真値 (b) 推定結果

図 4-4 TS-FBTS の推定結果



(a) 誤差の収束 (b) 誤差とタイムシフト

図 4-5 タイムシフトと再構成誤差の関係

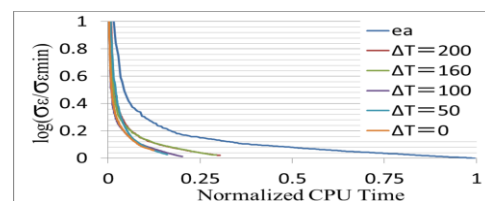


図 4-6 TS-FBTS法の時間短縮

図 4-3 に問題の構成図を示す。波源点は 6 か所、観測点は 12 か所である。通常の FBTS 法は、N 個の波源から 1 つずつ電磁波を放射し T 秒間観測するので、全部で NT 秒の時間が必要となる。TS-FBTS 法では各波源点において時間シフト量  $\Delta T$  だけずらしてパルスを照射させるため、観測時間は  $T + \Delta T * (N-1)$  となる。この時間差の分だけ時間が短縮される。

図 4-4 に真値と再構成結果を示す。精度良く推定できていることがわかる。誤差の収束や時間短縮を図 4-5, 6 に示す。TS-FBTS を使うと収束誤差を変えないことなしに解析時間を 1/5 に縮小できていることがわかる。

#### 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 2 件)

1. 早田裕一郎, 田中俊幸, 森山敏文, “ダイポールアンテナを利用したコンクリートの比誘電率分布の推定”, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J100-C, No. 8, pp. 323-331, Aug. 2017. (査読有)
2. 田中俊幸, 遠江一仁, 森山敏文, 竹中隆, “コンクリート構造物の比誘電率分布の推定”, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J99-C, No. 9, pp. 440-447, Sep. 2016. (査読有)

[学会発表] (計 31 件)

1. 平野貴大, 藤本孝文, 田中俊幸, “フレッシュコンクリート成分評価用アンテナシ

- システム -第四報-", 電子情報通信学会技術研究報告 マイクロ波研究会, 信学技報, vol. 117, no. 291, MW2017-115, pp. 21-26, 2017年11月.
2. 平野貴大, 藤本孝文, 田中俊幸, “フレッシュコンクリート成分評価用アンテナシステム -第三報-", 電子情報通信学会技術研究報告 宇宙・航行エレクトロニクス, SANE2016-111, Vol. 116, No. 427, pp. 87-92, 2017/1/28.
  3. 廣重明男, 都知木晃一, 田中俊幸, 森山敏文, “マルチグリッドを考慮した FBTS 法によるコンクリート中の空洞検出”, 電子情報通信学会技術研究報告 宇宙・航行エレクトロニクス, 信学技報, vol. 116, no. 427, SANE2016-116, pp. 115-120, 2017年1月.
  4. 田中俊幸, 森山敏文, “タイムシフトパルス入力による FBTS 法の高速化” 電子情報通信学会 2016年ソサイエティ大会講演論文集, C-1-7, 2016. 9. 20-23.
  5. 平野貴大, 藤本孝文, 田中俊幸, “フレッシュコンクリート成分評価用アンテナシステム -第二報-", 電子情報通信学会技術研究報告 アンテナ伝搬 信学技報, vol. 116, no. 186, AP2016-73, pp. 31-36, 2016年8月.
  6. Toshiyuki Tanaka, Akio Hiroshige, Toshifumi Moriyama, and Takashi Takenaka, “Speed-up of FBTS Method by Using Time-delay Pulses”, PIERS 2016 in 上海 8/8-11.
  7. 川島義経, 田中俊幸, 森山敏文, “鉄筋探査用 Real-GA の改良と比誘電率の影響について”, 電子情報通信学会技術研究報告 宇宙・航行エレクトロニクス SANE2015-87, Vol. 115, No. 403, pp. 29-33 2016/1/21-22.
  8. 谷山力哉, 藤本孝文, 田中俊幸, “フレッシュコンクリート成分評価用アンテナシステム”, 電子情報通信学会技術研究報告 宇宙・航行エレクトロニクス SANE2015-86 Vol. 115, No. 403, pp. 23-28 2016/1/21-22.
  9. 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” 電子情報通信学会技術研究報告 アンテナ伝搬 AP2015-11 Vol. 115, No. 12, pp. 51-56, 2015/4/22-23.
  10. Toshiyuki Tanaka, Toshifumi Moriyama, and Takashi Takenaka, “The Hollow Detection in the Concrete Wall Using 2D-FBTS Method from Real Data”, PIERS 2015 in Prague 7/6-9
  11. 川島義経, 松本頌平, 田中俊幸, 実データをを用いた GA によるコンクリート中の鉄筋探査に関する研究, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 14D-04, 2015. 5
  12. 遠江一仁, 田中俊幸, 竹中隆, 森山敏文, “比誘電率分布を考慮した合成開口処理による鉄筋の推定”, 信学技報, Vol. 114, No. 397, SANE2014-118 pp. 73-78 2015. 1 月
  13. 牧島慎一, 田中俊幸, 藤本孝文, 森山敏文, 竹中隆, 谷山力哉, “電磁波を用いたフレッシュコンクリートの配合評価”, 信学技報, vol. 114, no. 318, MW2014-123, pp. 1-6, 2014年11月20日.
  14. 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年11月20日.
  15. 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その 2”, 信学技報, vol. 114, no. 318, MW2014-125, pp. 11-16, 2014年11月20日.
- [その他]  
なし
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・准教授  
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
    - (4) 研究協力者  
遠江 一仁 (TONOE, Kazuhito)  
松本 頌平 (MATSUMOTO, Kohei)  
牧島 慎一 (MAKISHIMA, Shinichi)  
谷山 力哉 (TANIYAMA, Rikiya)  
早田 裕一郎 (SODA, Yuichiro)  
都知木 晃一 (TOCHIKI, Koichi)  
川島 義経 (KAWASHIMA, Yoshitsune)  
廣重 明男 (HIROSHIGE, Akio)  
平野 貴大 (HIRANO, Takahiro)  
堀口 元貴 (HORIGUCHI Genki)  
坂元 涼 (SAKAMOTO, Ryo)  
三股 清司 (MIMATA, Seiji)  
丸林 祐己 (MARUBAYASHI, Yuki)