

論文 電磁波レーダを用いた鉄筋の位置・半径とコンクリートの比誘電率の同時推定

田中 俊幸^{*1}・眞弓 雄一郎^{*2}・竹中 隆^{*3}

要旨：電磁波レーダを利用すれば、鉄筋の存在を容易に確認できることはよく知られている。しかし、鉄筋の位置を推定するためには、コンクリートの比誘電率の値を推定する必要がある。また、鉄筋の半径を推定することはできない。本論文では電磁波レーダを利用して鉄筋の位置、半径およびコンクリートの比誘電率を同時に推定する手法を提案している。推定手法にはガウス・ニュートン法を用いている。

キーワード：速度推定法、非破壊試験、電磁波レーダ、コンクリート診断

1. はじめに

コンクリート構造物の健全性や耐久性の評価のために様々な非破壊検査が提案されている。非破壊検査法の1つに電磁波レーダ法¹⁾²⁾がある。電磁波レーダを用いれば、鉄筋の存在は容易に推定できるが、構造物の比誘電率を特定しなければ正確なかぶりを推定することはできない。しかし、コンクリート構造物の比誘電率は構造物ごとに異なるだけでなく、同じ構造物であっても場所によって異なるので、比誘電率とかぶりを同時に推定する必要がある。

我々は、鉄筋からの反射波の到達時間に対してガウス・ニュートン法（最小2乗線形テラ微分補正法）³⁾を適用し、コンクリート構造物の比誘電率とかぶりを同時推定する方法を提案した⁴⁾。また、コンクリート構造物中の鉄筋の位置を分かりやすく推定するために新たな合成開口処理法を提案した⁵⁾。さらに、複鉄筋の探査において、コンクリート表面から深部の鉄筋探査を行うために、時間フィルタを組み込んだ合成開口処理法を提案した⁶⁾。これらの方法によれば鉄筋のかぶりの推定を行うことはできるが、鉄筋の半径を求めることはできない。

鉄筋の半径はコンクリート構造物の耐荷力計

算において非常に重要なパラメータの一つである。さらに、送信アンテナから照射された電磁波パルスが鉄筋によって反射されるとき、かぶりが小さいほど、また鉄筋の半径が大きいほど、アンテナの移動に従って反射点も移動する。しかし、従来の推定手法では、鉄筋の半径を考慮せず反射点を固定して鉄筋の位置推定を行っているため、推定精度が悪くなる。

本論文では電磁波レーダを利用して鉄筋の位置、半径およびコンクリートの比誘電率を同時に推定する手法を提案している。推定手法にはガウス・ニュートン法を用いている。なお、電磁波レーダ装置は本手法を適用するために改良する必要はなく、既存の装置を利用することができる。コンクリート試験体に提案している手法を適用し、その有効性を明らかにしている。

2. データの処理方法

2.1 問題の設定

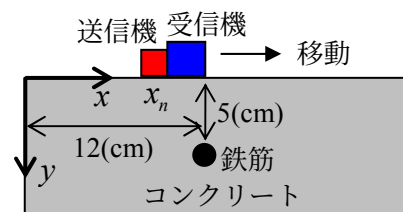


図-1 試験体の構成図

*1 長崎大学 大学院生産科学研究科助教授 工博（正会員）

*2 長崎大学 大学院生産科学研究科電気情報工学専攻 博士前期課程2年（非会員）

*3 長崎大学 工学部電気電子工学科教授 工博（正会員）

図-1に示すように、電磁波レーダを用いてコンクリート中にある鉄筋の位置を推定する問題を考える。電磁波レーダは、コンクリート表面に沿ってある方向に移動させ、 N 個の異なる受信波形 $E(m, n)$ を得るものとする。 n は送信アンテナの位置 $x_n = x_0 + n\Delta x$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$) に対応し、 m は受信時間 $m\Delta t$ に対応する。ここで、 x_0 は測定開始の位置、 Δx は測定間隔、 Δt は受信時間のサンプリング間隔である。

2.2 電磁波レーダの仕様

電磁波レーダの仕様を表-1に、レーダから出力される電界波形を図-2に示す。横軸はパルスの送信開始時間を基準とした時間であり、縦軸は電界の大きさを表わしている。しかし、使用したレーダ装置では、表示される電界の大きさの数値に物理的な意味はないので、単位の表示は省略している。

表-1 電磁波レーダの仕様

方式	パルス
中心周波数	1.4GHz
帯域幅	1 GHz
測定間隔(Δx)	0.25cm
サンプリング間隔(Δt)	31.25ps
観測時間長	8ns
時間データ数	256
送受信アンテナ間の距離	7.25cm

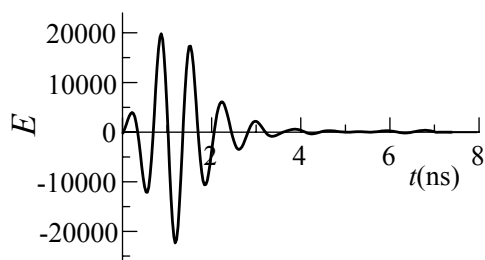


図-2 電磁波レーダの出力波形

2.3 反射波到達時間

図-3に図-1のコンクリート試験体に対する電磁波レーダの受信波形のBモード表示を示す。電磁波レーダの観測データには、直達波、表面反射波、鉄筋からの反射波が含まれる。直達波とは、送信アンテナから照射された電磁波が直接受信アンテナに受信される波であり、表

面反射波とは、送信アンテナから照射された電磁波がコンクリート表面で反射され受信アンテナで受信される波である。これらの波はコンクリート中の鉄筋の情報を含んでいないので、平均減算処理

$$\tilde{E}(m, n) = E(m, n) - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} E(m, n) \quad (1)$$

によって消去する。図-4に図-3の平均減算処理後の波形を、図-5に平均減算処理後のAモード表示を示す。図-5の軸は図-2と同じである。送信アンテナから照射された電磁波パルスが、鉄筋によって反射され、受信アンテナによって受信が開始されるまでの時間を到達時間 τ と呼ぶ。しかし、雑音の影響により到達時間（受信波形の立ち上がりの瞬間）を正確に特定することは困難である。そこで、送信アンテナから放射されるパルスの形状は以下の条件が満足される場合は、受信パルスの形状と同じであるという性質を利用する。

- コンクリートの導電率が小さい。
- コンクリートの電気定数の周波数分散が小さい。
- 多重反射がない。

使用している電磁波レーダの周波数帯ではコンクリートの導電率は0.1S/m程度であり、電気定数の周波数分散も小さい。また、コンクリート試験体の比誘電率は8程度なので、送信機と受信機間の距離7.25cmを考慮して、かぶり5cmの鉄筋の周囲5cm以内に他の鉄筋がなければ、対象の鉄筋からの反射波の到達時間から0.3nsまでの間には、他の鉄筋からの反射波を受信することはない。また、受信波形には多数のクラッターが存在するが、鉄筋による反射波は電界の反射係数が-1であるので、クラッターの振幅よりも十分に大きい。したがって、クラッターの存在は鉄筋からの反射波の極値の位置に大きな影響を与えない。一方、コンクリート中に空洞が存在する場合は、空洞とコンクリートの境界での反射係数は0.5程度であり、鉄筋による反射係数と負号が異なるので、受信波形の形状を大きく変えることになり、今回の解析対象から除

外することは容易である。したがって、本研究では、パルスの極値を与える時間を特定することにより到達時間を決定することにする。図-5に示すように最大値を与える時間 t_e と到達時間との差を補正時間 t_c とし、到達時間は、パルスの最大値を与える時間から補正時間を引くことにより求めている。

$$\tau = t_e - t_c \quad (2)$$

また、図-5の波形は図-2の波形に対して正負が反転している理由は、鉄筋による電界の反射係数が-1であることによる。

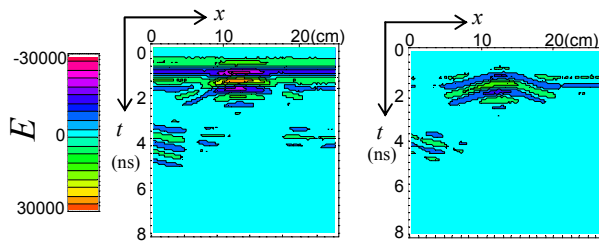


図-3 受信波形の
Bモード表示

図-4 平均減算処
理後のBモード表示

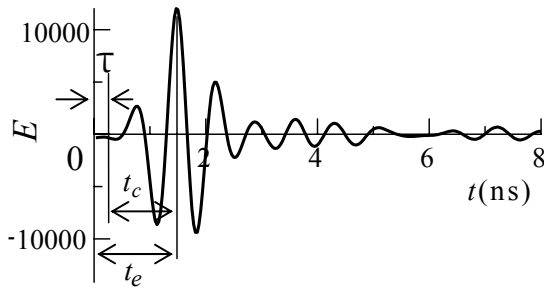


図-5 平均減算処理後のAモード表示

2.4 速度推定法

図-6に問題の構成、図-7に反射点と反射角を示す。鉄筋の中心を (x_T, y_T) 、半径を r_T 、

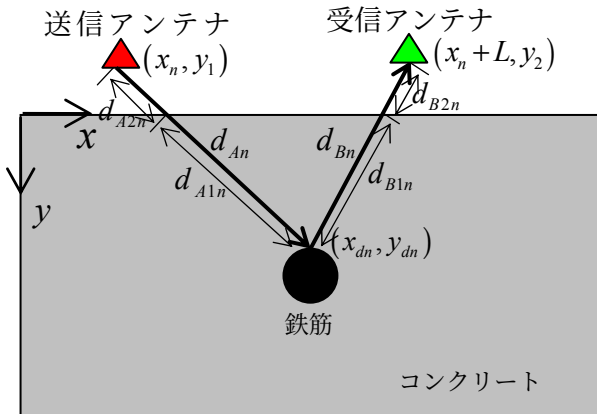


図-6 問題の構成

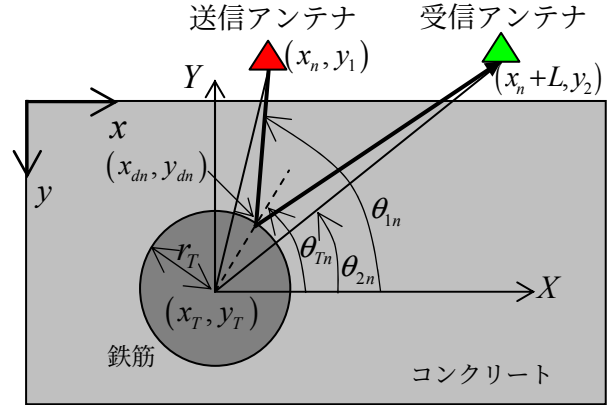


図-7 反射点と反射角

送信アンテナの位置を (x_n, y_1) 、受信アンテナの位置を $(x_n + L, y_2)$ 、電磁波パルスに対する反射点を (x_{dn}, y_{dn}) とする。 X 軸に対する反射角を θ_{Tn} とすると、反射点 (x_{dn}, y_{dn}) は鉄筋の中心の位置 (x_T, y_T) 、半径 r_T 、反射角 θ_{Tn} を用いて、式(3)のように表すことができる。

$$(x_{dn}, y_{dn}) = (x_T + r_T \cos \theta_{Tn}, y_T - r_T \sin \theta_{Tn}) \quad (3)$$

送信アンテナおよび受信アンテナから鉄筋の中心を結んだ直線の X 軸に対する角度をそれぞれ θ_{1n} 、 θ_{2n} とすると、鉄筋表面での反射角 θ_{Tn} は次式で近似できる。

$$\theta_{Tn} = \frac{\theta_{1n} + \theta_{2n}}{2} \quad (4)$$

ただし、

$$\theta_{1n} = \tan^{-1} \frac{y_T - y_1}{x_n - x_T} \quad (5)$$

$$\theta_{2n} = \tan^{-1} \frac{y_T - y_2}{x_n + L - x_T} \quad (6)$$

である。

図-6、7に示すように、 n 番目の送信アンテナと反射点との距離を d_{An} 、反射点と n 番目の受信アンテナとの距離を d_{Bn} 、それらのコンクリート中および空気中の距離を d_{A1n} 、 d_{A2n} 、 d_{B1n} 、 d_{B2n} とすると、 n 番目の受信位置における到達時間 τ_n は次式で与えられる。

$$\tau_n = \frac{d_{A1n} + d_{B1n}}{v} + \frac{d_{A2n} + d_{B2n}}{c} \quad (7)$$

ただし、

$$d_{An} = \sqrt{(x_n - x_{dn})^2 + (y_1 - y_{dn})^2} \quad (8)$$

$$d_{Bn} = \sqrt{(x_n + L - x_{dn})^2 + (y_2 - y_{dn})^2} \quad (9)$$

$$d_{A_1n} = \frac{y_{dn} d_{An}}{y_{dn} - y_1} \quad (10)$$

$$d_{B_1n} = \frac{y_{dn} d_{Bn}}{y_{dn} - y_2} \quad (11)$$

$$d_{A_2n} = d_{An} - d_{A_1n} \quad (12)$$

$$d_{B_2n} = d_{Bn} - d_{B_1n} \quad (13)$$

であり、コンクリート中の電磁波の速度を v 、自由空間での速度を c としている。式(7)～(13)より τ_n は v, x_T, y_T, r_T の関数であることがわかる。

各受信点に関する到達時間の誤差を次式で定義する。

$$\begin{aligned} r_n &= \tau_n(v, x_T, y_T, r_T) - \overline{\tau_n} \\ &= \tau_n(\mathbf{a}) - \overline{\tau_n} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $\overline{\tau_n}$ は観測点 $x_n + L$ における到達時間の測定値、 τ_n は観測点 $x_n + L$ における到達時間の推定値である、 $\mathbf{a}$ は次式で定義される推定パラメータベクトルである。

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= (a_0, a_1, a_2, a_3)^T \\ &= (v, x_T, y_T, r_T)^T \end{aligned} \quad (15)$$

到達時間の誤差に関して2乗誤差 R を導入する。

$$R = \sum_{n=1}^N r_n^2 \quad (16)$$

R が最小となるように推定パラメータベクトル $\mathbf{a}$ を決定する。何らかの方法で、推定パラメータの初期値

$$\begin{aligned} \mathbf{a}^{(0)} &= (a_0^{(0)}, a_1^{(0)}, a_2^{(0)}, a_3^{(0)})^T \\ &= (v^{(0)}, x_T^{(0)}, y_T^{(0)}, r_T^{(0)})^T \end{aligned} \quad (17)$$

が求められたとすると、この推定値に対する誤差は次式で与えられる。

$$e_n = \tau_n(\mathbf{a}^{(0)}) - \overline{\tau_n} \quad (18)$$

式(16)にガウス・ニュートン法を用いることにより次の連立一次方程式が得られる。

$$\sum_{n=1}^N \left[\frac{\partial \tau_n}{\partial \mathbf{a}^{(0)}} \right] \left[\frac{\partial \tau_n}{\partial \mathbf{a}^{(0)}} \right]^T \delta \mathbf{a} = - \sum_{n=1}^N \left[\frac{\partial \tau_n}{\partial \mathbf{a}^{(0)}} \right] e_n \quad (19)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \tau_n}{\partial \mathbf{a}} \right|_{\mathbf{a}=\mathbf{a}^{(0)}} &\equiv \frac{\partial \tau_n}{\partial \mathbf{a}^{(0)}} \\ \delta \mathbf{a} &\equiv \mathbf{a} - \mathbf{a}^{(0)} \end{aligned}$$

であり、“ T ”は転置を表す。

以下に推定の手順を示す。

- 1) 測定データ $E(m, n)$ の入力
- 2) 平均減算処理の実行 $\tilde{E}(m, n)$
- 3) 最大値を与える時間 $\bar{t}_e$ の探索
- 4) 到達時間 $\bar{\tau}$ の決定
- 5) 初期値 $\mathbf{a}^{(0)}$ の入力
- 6) 収束判定値 ε の入力
- 7) 誤差 e_n の計算
- 8) 式(19)を解き $\delta \mathbf{a}$ を求める
- 9) 推定値の更新 $\mathbf{a}^{(0)} \leftarrow \mathbf{a}^{(0)} + \delta \mathbf{a}$
- 10) 収束判定 $R \leq \varepsilon$ のとき終了

$R > \varepsilon$ のとき手順7)に戻る。

なお、提案手法では鉄筋の断面を円で表しているが、鉄筋が異形丸棒であっても同手法により近似的な円の半径を推定することができる。

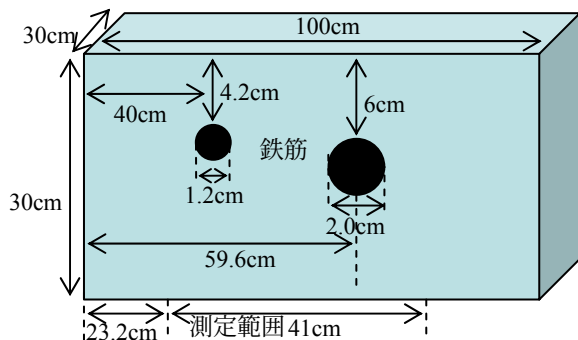
3. 速度推定法の適用例

3.1 試験体

図-8に使用した試験体を示す。なお、試験体の配合比はセメント：細骨材：水＝1：2.5：0.5である。試験体中には太さの異なる2本の鉄筋が配置されている。左側の鉄筋は異形丸棒D13(実測最大直径1.33cm, 最小直径1.20cm)であり、右側の鉄筋は異形丸棒D19(実測最大直径2.05cm, 最小直径1.75cm)である。図中の鉄筋の直径は真上から見た値である。

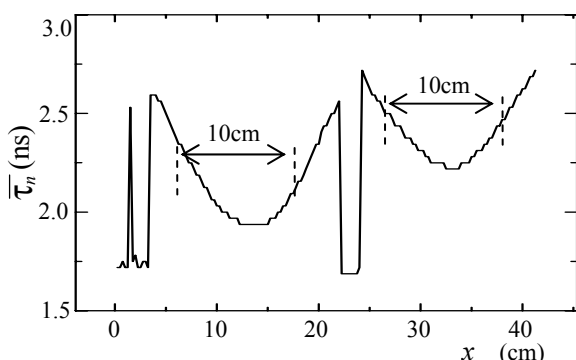


(a) 試験体の写真



(b)試験体の寸法と測定範囲

図－８ 試験体の構成図



図－９ 観測点に対する到達時間の変化

3.2 推定結果

測定間隔を 0.25cm とし 164 箇所観測を行った。

図－９に観測点 $x_n + L$ に対する到達時間 τ_n の変化を示す。横軸は観測点の位置を表し、縦軸は送信パルスが鉄筋で反射され受信が開始されるまでの時間(到達時間)を示している。送信アンテナと受信アンテナ間の中心が鉄筋の真上に位置するとき τ_n は最も短くなり、鉄筋から離れるほど長くなる。また、コンクリートは損失性媒質なので、鉄筋からの距離がある程度以上離れると、鉄筋からの反射波の振幅はクラッターの振幅よりも小さくなり、 τ_n の軌跡が乱れていることがわかる。また、使用した電磁波レーダのサンプリング時間は 31.25ps であり、提案している手法に対して十分な時間分解能を有していない。そこで、受信波形に対してスプライン補間を行い、波形の最大値を与える時間 t_e を決定している。

本研究では、鉄筋の水平位置 x_T を合成開口処理により推定し、得られた鉄筋の水平位置 x_T を

表－２ 推定結果 ($p = 5\text{cm}$)

	左側の鉄筋		右側の鉄筋	
	真値	推定値	真値	推定値
水平位置(cm)	16.8	17.0	36.4	36.5
かぶり(cm)	4.2	14.5	6.0	15.2
半径(cm)	0.6	-13.8	1.1	-14.5
比誘電率		1.1		1.4

表－３ 計算範囲と推定値の比較

(a) 左側の鉄筋

計算範囲(cm)	5.0	5.5	6.0	6.5
水平位置(cm)	17.0	17.0	17.0	17.0
かぶり(cm)	14.5	3.8	22.0	3.7
半径(cm)	-13.8	0.8	-22.0	1.2
比誘電率	1.1	9.5	0.5	9.9

(b) 右側の鉄筋

計算範囲(cm)	5.0	5.5	6.0	6.5
水平位置(cm)	36.5	36.4	36.1	36.3
かぶり(cm)	15.2	-16.0	6.2	14.9
半径(cm)	-14.5	18.0	1.3	-12.7
比誘電率	1.4	1.0	7.7	1.7

表－４ 推定結果

	左側の鉄筋		右側の鉄筋	
	真値	推定値	真値	推定値
水平位置(cm)	16.8	16.9	36.4	36.2
かぶり(cm)	4.2	4.2	6.0	6.3
半径(cm)	0.6	0.6	1.1	1.1
比誘電率		8.3		7.8
適合数		95		7

中心に計算範囲 $\pm p\text{ cm}$ に対して本アルゴリズムを適用している。なお、合成開口処理によれば、鉄筋の水平位置は左側が 16.8cm、右側が 36.4cm であった。

計算範囲を $p = 5$ としたときの推定結果を表－２に示す。表－２より左右の鉄筋の水平位置は真値とほぼ同じ値が得られているが、かぶりと半径は真値とはかけ離れた値になっている。特に、半径はマイナスの値である。これは測定に用いたレーダ装置の時間分解能が低いため、反射波の到達時間を正確に測定できないためである。また、推定に用いる τ_n の計算範囲 p を変化した時の推定結果を表－３に示す。推定結果は計算範囲に大きく依存することが分かる。一般に、観測データから内部構造を推定する逆

問題は悪条件であり、観測データに含まれるクラッターの影響を受け易いので、計算範囲によって推定結果が大きく変化しているものと考えられる。

そこで、計算範囲 p を 1.0cm～10.0cm まで 0.25cm 刻みで変化させて推定を行い、以下の条件に合う推定結果の平均を表-4に示す。

- 鉄筋の半径は正の値である。
- 鉄筋のかぶりは正の値である。
- コンクリートの比誘電率が指定された範囲内の値である。
- 推定反復回数が最大反復回数以内である。
- 2乗誤差が十分に小さい。

なお、表-4中の適合数とは、上記の5つの条件を満足した計算範囲の数を表している。また、表-4を求めた測定データを利用して鉄筋の半径を考慮せずに推定を行った場合は、殆どの計算範囲において比誘電率は8～9の間の値となった。これを考慮して、図-8の試験体に対して半径を有限として推定を行う場合には、比誘電率の有効範囲を7～10とした。このように、比誘電率の有効範囲は半径を考慮しない場合に得られた比誘電率の値を考慮して設定する必要がある。一方、本手法は反復の増加に伴って2乗誤差 R は必ず減少するが、収束までに要する反復回数と収束した2乗誤差はクラッターの量に関係し、より多くのクラッターを含んでいれば、収束までに多くの反復回数を必要とし、2乗誤差の値も大きくなる。ここでは、最大反復回数を100、2乗誤差 R の収束条件を 10^{-10} 以下としている。

表-4より左右の鉄筋ともに、真値に非常に近い推定値が得られたことがわかる。同時推定されたコンクリートの比誘電率は左右で多少異なる値となったがこれはコンクリート内部の比誘電率分布が不均一であるためと思われる。また、適合数が右の鉄筋に比べ左の鉄筋は極端に多くなっている。これは左側の鉄筋のかぶりが小さいため、受信パルスの振幅が大きく、正確

に推定することができたためだと思われる。

4. まとめ

本論文ではこれまで困難であったコンクリート中の鉄筋の位置、半径およびコンクリートの比誘電率を同時推定するガウス・ニュートン法に基づいたアルゴリズムを提案した。実験の結果、鉄筋の位置、半径および比誘電率はほぼ正確な値を推定することができた。今後の課題はかぶりが大きな鉄筋の半径を精度よく推定することである。

謝辞

本研究の一部は科学研究補助金(基盤研究(C)(2):16560417)の援助による。

参考文献

- 1) 中村英佑, 森濱和正, 山口順一郎, 松塚忠政: 鉄筋径を利用した非破壊試験による比誘電率分布とかぶりの推定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 1801-1806, 2005.3
- 2) 竹田宣典, 榊原泰造, 十河茂幸: かぶり, 鉄筋位置の非破壊試験における測定誤差に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1807-1812, 2005.3
- 3) 川崎晴久: 数値解析の基礎, 共立出版株式会社, pp.183-186, 1993
- 4) 眞弓雄一郎, 田中俊幸, 竹中隆: 鉄筋の位置とコンクリートの比誘電率の同時推定, 電子情報通信学会 2006 年総合大会講演論文集, C-1-21, 2006.3
- 5) Iwamoto, K., Tanaka, T. and Takenaka, T.: Breast cancer detection by using the synthetic aperture processing and the FBTS method, Proc. Asia-Pacific Microwave Conference, Seoul, pp. 846-849, Nov. 2003
- 6) 田中俊幸, 眞弓雄一郎, 竹中隆: 時間フィルタ法と複鉄筋探査への応用, コンクリート工学年次論文集, pp.1817-1822, 2006.7