

論文 時間フィルタ法と複鉄筋探査への応用

田中 俊幸^{*1}・眞弓 雄一郎^{*2}・竹中 隆^{*3}

要旨：本論文は通常の合成開口処理では困難であるコンクリート中の複鉄筋探査を，時間フィルタ法を用いた合成開口処理を行うことによって位置推定を可能にするというものである。ここで時間フィルタ法とは，従来の電磁波レーダによる測定データに，時間帯域増幅フィルタ関数を適用して合成開口処理を行う方法である。複鉄筋を配置した試験体に対する測定データに対して時間フィルタを適用して合成開口処理を行い，得られた合成開口処理画像から，従来の方法では探査不可能であった複鉄筋の下部の鉄筋をも探査できることを明らかにしている。

キーワード：複鉄筋探査，時間フィルタ法，非破壊検査，電磁波レーダ，合成開口処理

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性や健全性の評価は非常に重要である。これらの評価を簡便に行うために，非破壊検査¹⁾⁷⁾の導入が進められている。コンクリート構造物中の鉄筋探査を行う場合には，電磁波レーダを利用することがある。電磁波レーダ法によれば，鉄筋の存在は容易に推定できる。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ので，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。我々は，鉄筋からの反射波の到達時間に対して最小二乗線形テーラー微分補正法を適用し，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⁸⁾⁹⁾。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¹⁰⁾。これらの方法によれば，コンクリート構造物の表面近傍にある鉄筋の位置推定を正確に行うことができる。しかし，コンクリート構造物中には複数の鉄筋が配置されていることが多い。これらの鉄筋のなかで表面近傍の鉄筋は精度良く位置推定できるが，深い位置に存在する鉄筋の位置推定は非常に困難である。上部の

鉄筋と下部の鉄筋の位置が真上から見て重ならず配置されているときは，送信装置と受信装置を分離し，送信アンテナと受信アンテナの間隔を変化させて鉄筋からの反射波の測定を行い，得られた全てのデータを利用して合成開口処理を行うことにより，下部の鉄筋の位置推定を行うことができることを示した¹¹⁾。しかし，この方法では，上部の鉄筋と下部の鉄筋が真上から見て全く同じ位置に配置されている場合，下部の鉄筋の存在を確認することはできなかった。

本論文では，時間フィルタを導入して合成開口処理を行い，複鉄筋の位置を推定する方法を提案している。自作したコンクリート試験体に対して提案する手法を適用し，複鉄筋の探査を行うことができることを示している。

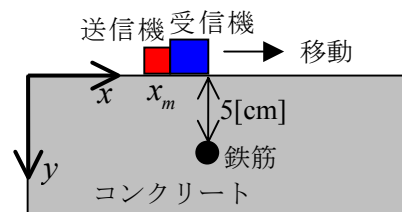


図-1 試験体の構成図

*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1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)

2. データの処理方法

2.1 問題の設定

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、M個の異なる受信波形 $E(m, n)$ を得るものとする。 m は送信アンテナの位置 $x_m, (m=1, 2, \dots, M)$ に対応し、 n は受信時間 $n\Delta t$ に対応する。ここで、 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、電磁波レーダから出力される電界波形を図-2に示す。

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	1GHz
距離分解能(Δx)	0.25cm
時間分解能(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

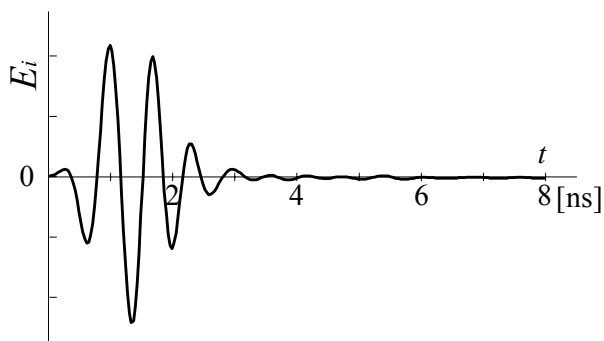


図-2 電磁波レーダの出力波形

2.3 従来の合成開口処理

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、式(1)

の平均減算処理

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

によって削除される。従来の合成開口処理は式(2)で与えられる。

$$I(x, y) = \sum_{m=1}^M \tilde{E}(m, n_a(m, x, y)) \quad (2)$$

$$n_a(m, x, y) = \text{int} \left(\frac{t_a(m, x, y)}{\Delta t} \right)$$

ここで、 $I(x, y)$ は合成開口処理により得られる各点における重み、 t_a は鉄筋からの反射波の到達時間であり、 int は実数を整数化する演算子である。

2.4 提案した合成開口処理

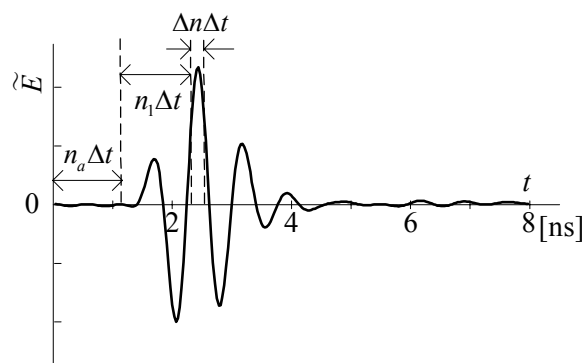


図-3 平均減算処理後の波形

図-3に平均減算処理後の鉄筋からの反射波の波形を示す。我々は式(3)のように合成開口処理を提案する¹⁰⁾。

$$I(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^{\Delta n} \tilde{E}(m, n_a(m, x, y) + n_1 + i) \quad (3)$$

これは、受信パルスの中で大きな振幅の部分(図-3の $\Delta n\Delta t$ の区間)だけを集中的に足すというパルスの形を積極的に利用する方法である。従来の合成開口処理と違って、得られた合成開口処理画像のコントラストが大きくなり、鉄筋の存在を特定しやすい利点がある。ただし、この方法はコンクリート中の電磁波の伝搬速度が正確に推定されていることが前提である。我々は、電磁波到達時間に対して最小二乗線形テーラー微分補正法を適用し、コンクリートの比誘電率を推定している^{8),9)}。

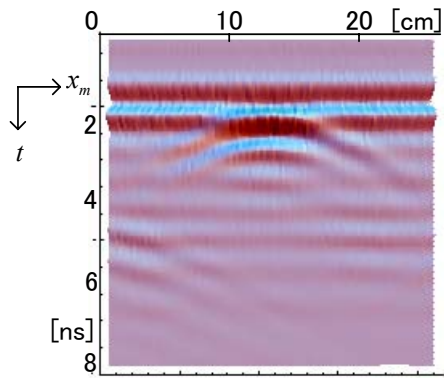


図-4 電磁波レーダの受信波形

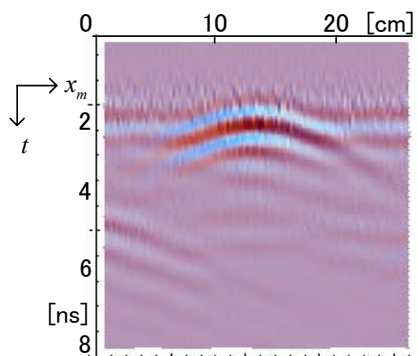
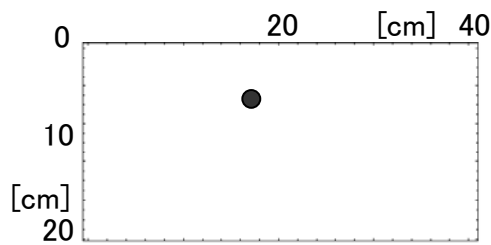
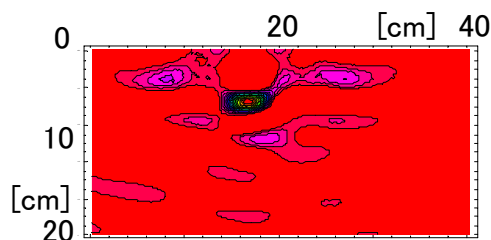


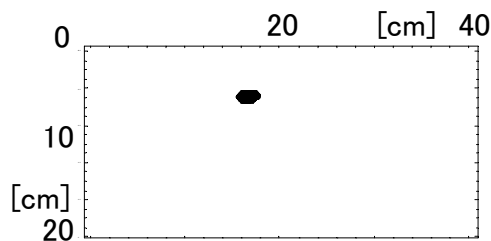
図-5 平均減算処理後の波形



(a) 鉄筋の配置



(b) 従来の合成開口処理画像



(c) 提案した合成開口処理画像

図-6 合成開口処理画像

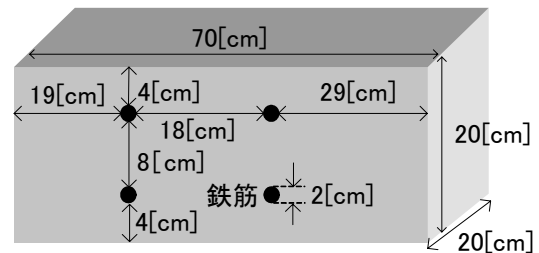
図-4に図-1の試験体に対する電磁波レーダの受信波形を、図-5に式(1)による平均減算処理後の波形を示す。図-6(a)に鉄筋の配置、図-6(b)に従来の合成開口処理画像、図-6(c)に提案した合成開口処理画像を示す。図-6(b)より従来の合成開口処理画像では偽像が多く現れており、この図から鉄筋の正確な位置を推定するには熟練が必要である。一方図-6(c)では、コンクリート中の鉄筋の位置が精度良く推定されていることが分かる。

2.5 時間フィルタ法

図-7に示すようにコンクリート中に複数の鉄筋が存在する場合を考える。この場合、合成開口処理によって上部の鉄筋は精度良く推定できるが、下部の鉄筋の推定は困難である。図-7のように鉄筋が垂直に重なって存在する場合



(a) 試験体の写真



(b) 試験体の寸法

図-7 試験体の構成図

は上部の鉄筋からの反射波に下部の鉄筋からの反射波が隠れてしまうからである。また、コンクリートは損失性媒質なので、電磁波の振幅は距離とともに指数関数的に減衰する。従って、下部の鉄筋による反射波の振幅は上部の鉄筋による反射の振幅に比べて非常に小さくなる。このことも、下部の鉄筋の推定を困難にする理由の一つである。

一方、電磁波の減衰を考慮に入れて合成開口

処理を行う方法が提案されている。しかしながらこの手法は、観測界に含まれる雑音も一緒に増幅してしまうので、下部の鉄筋を合成開口処理により推定することは困難である。そこで、本論文では時間フィルタ法を提案する。

時間フィルタ法とは、受信した電界波形の一部の時間帯だけを増幅させる方法である。

$$\tilde{E}'(m,n) = F(m,n) \times \tilde{E}(m,n) \quad (4)$$

$$F(m,n) = F(n) = \begin{cases} k & N_s \leq n \leq N_s + N_d \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 N_d は時間フィルタ幅、 N_s は時間フィルタ開始時間、 k は増幅係数である。すなわち時間フィルタとは時間波形を時間指数 N_s から N_d の間だけ k 倍に増幅し、その他の時間では波形をそのまま出力する時間帯域増幅フィルタである。なお、増幅係数 k は増幅される時間帯域の測定データの最大値が、オリジナルの測定データの最大値に等しくなるように選ぶ。

時間フィルタ適用後のデータ $\tilde{E}'(m,n)$ に対して合成開口処理(式(3))を行い、合成開口処理画像を得る。この操作を時間フィルタ幅 N_d を固定し、 P 個の異なる時間フィルタ開始時間 N_s に対して行い、 P 枚の合成開口処理画像を得る。これらの P 枚の合成開口処理画像を総合的に評価して、コンクリート中の鉄筋の有無について考察する。

3. 時間フィルタ法の適用例

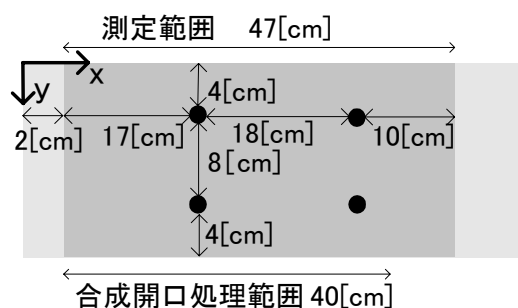


図-8 試験体の測定範囲

試験体の測定範囲を図-8に示す。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。鉄筋は左右に2本、上下に2本の合

計4本を配置している。この試験体の中央部を x 方向に47cmに亘って測定する。観測点の数は183である。

図-9に平均減算処理後の観測波形を示す。上部の鉄筋からの反射波は認識できるが、下部の鉄筋からの反射波は認識できない。図-10(a)に鉄筋の位置、図-10(b)に時間フィルタを用いずに合成開口処理した結果を示す。上部の鉄筋については存在だけでなく位置も正確に推定できているが、下部の鉄筋については存在さえも確認できていないことが分かる。なお、試験体の比誘電率は最小二乗線形テーラー微分補正法を用いて推定した結果11.4であった。

図-11に時間フィルタ法を適用した波形に対して合成開口処理を行った結果を示す。時間フィルタ幅は1[ns]とし、時間フィルタ開始時間は(a)3[ns]、(b)4[ns]、(c)5[ns]、(d)6[ns]、

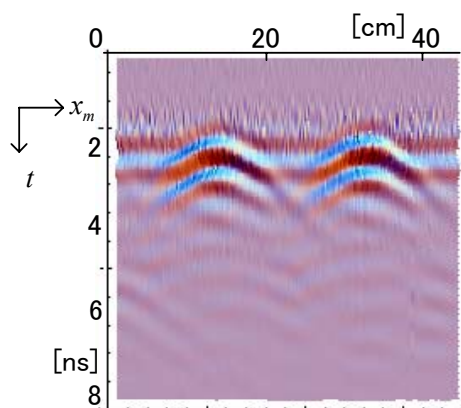
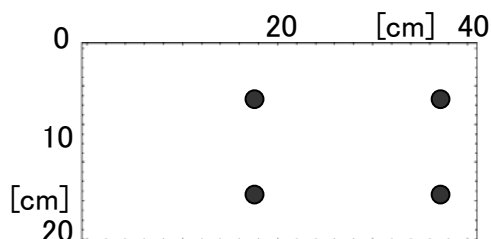
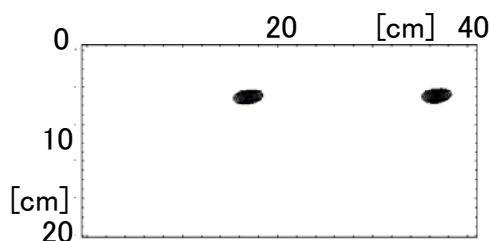


図-9 平均減算処理後の観測波形



(a) 鉄筋の配置



(b) 合成開口処理画像

図-10 合成開口処理画像

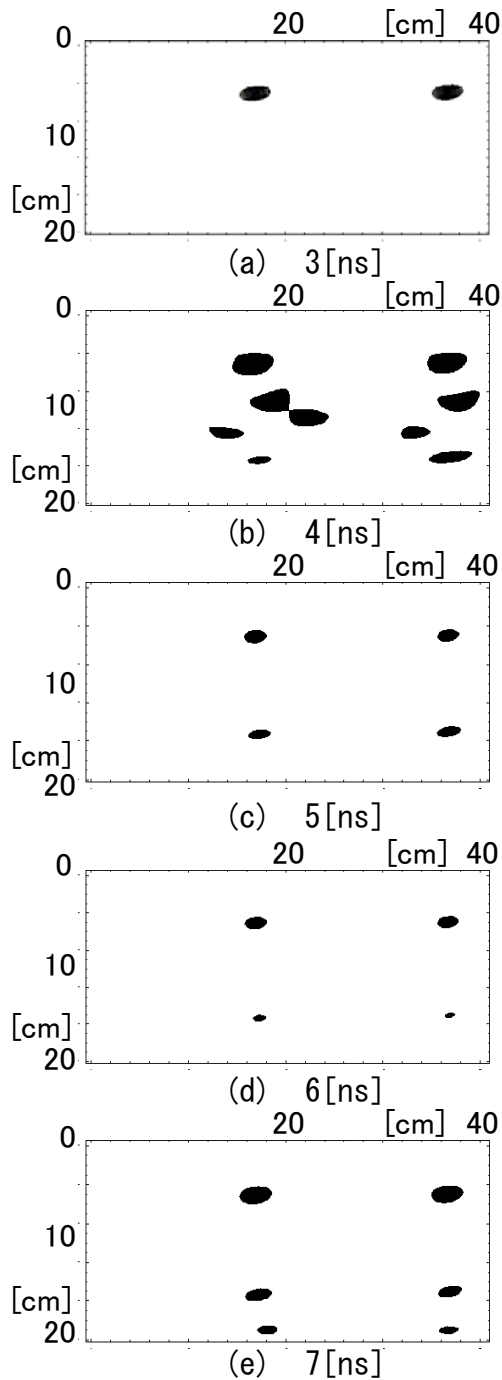


図-11 時間フィルタ後の合成開口処理画像

(e) 7[ns]である。図-11 (a)より時間フィルタ開始時間が 3[ns]のときには奥の鉄筋を認識できていない。この場合、時間フィルタの増幅時間帯域は 3[ns]~4[ns]であるので、上の鉄筋からの反射波の一部を増幅し、下部の鉄筋からの反射波をほとんど増幅していないためであると思われる。時間フィルタ開始時間が 4[ns]のとき、時間フィルタの増幅時間帯域は 4[ns]~5[ns]であ

る。この時間帯は、上部の鉄筋からの反射波は通過しており、下部の鉄筋からの反射波はまだ観測されていない。すなわち、観測波形の雑音成分だけが増幅されていることになる。従って、図-11 (b)では多くの偽像を含む画像となっている。図-11 (c)では、時間フィルタの増幅時間帯域 5[ns]~6[ns]が下部の鉄筋からの反射波の受信時間に相当する時間帯になっているために、下部の鉄筋の存在をはっきりと認識できている。また、位置も精度良く推定されている。図-11 (d)では、図-11 (c)の場合と同様に、下部の鉄筋の推定に成功している。しかし、時間フィルタの増幅時間帯域 6[ns]~7[ns]には、下部の鉄筋からの反射波の終わりの部分だけしか含まれていないために、図-11 (c)と比べて下の鉄筋の合成開口処理像の値は小さくなっていることが分かる。時間フィルタの増幅時間帯域が 7[ns]~8[ns]の場合は、コンクリートの底面からの反射波も増幅されているので、図-11 (e)からも分かるように、底面の影響も合成開口処理画像に含まれている。底面は平面なので、平均減算処理によって底面の影響は打ち消されるように思われるが、鉄筋と底面との間には多重反射を生じるので、下部の鉄筋の下の底面部分だけに重みが現れている。

時間フィルタの増幅時間幅、開始時間、開始時間の増分を様々な場合に対して数値計算を行ったが、本論文では、紙面の都合上、時間フィルタ幅を 1[ns]と固定し、時間フィルタの開始時間を 3[ns]から 7[ns]まで 1[ns]刻みの結果のみを示した。全ての数値結果から、時間フィルタ幅は電磁波レーダの出力パルスのパルス幅の 1/3程度に選ぶと良いことが分かった。また、フィルタの開始時間は、上部の鉄筋からの反射波が通過する時間を考慮に入れて決定し、フィルタ開始時間の増分は少なくともフィルタ幅と同じに選ぶ必要があり、精度を保つためには、フィルタ幅の 1/2程度に選ぶべき良いことが分かった。

本論文で提案する時間フィルタ法は、複数のフィルタ開始時間に対する合成開口処理画像

(図-11(a)～(e))から総合的に判断して、コンクリート内部に鉄筋が存在しているのか偽像なのかを判断する方法である。例えば、複数の合成開口処理画像に同じ位置に現れている画像は、鉄筋であると判断し、1枚の合成開口処理画像にだけしか現れていない像は偽像であると判断する。この判断基準により、上部の鉄筋だけでなく下部の鉄筋の存在も確認できることがわかる。今回は複数の合成開口処理画像から目視により上記の判断を行ったが、判断を自動化することも可能である。

4. まとめ

本論文ではコンクリート中に存在する複鉄筋の位置推定を、時間フィルタ法を組み込んだ合成開口処理を用いて行った。時間フィルタ法を適用することによって従来の合成開口処理では位置推定が困難であったコンクリート中の下部に存在する鉄筋の位置推定を可能にした。本手法の特徴は、新たに電磁波レーダ装置を開発する必要はなく、現有の電磁波レーダによって得られる測定データを利用して、複鉄筋の探査ができるところにある。

今後の課題は以下の通りである。

- ・他の電磁波レーダに対しても時間フィルタ法を適用し、本手法の汎用性を確かめる。
- ・時間フィルタの各パラメータの最適値を求める。
- ・複数の合成開口処理画像からの判断の自動化を実現する。

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, 山口純一郎, 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

- 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) 木村憲明, 土井恭二, 森康成, 弓井孝佳: コンクリート床版検査用3次元映像化レーダの開発, 三井造船技報, No.174, pp.38-44, 2001.10
- 4) 喜嶋省吾, 田中俊幸, 竹中隆: マイクロ波を用いたコンクリート診断に関する基礎的研究, 第11回電子通信学会九州支部学生会論文集, B-12, 2003.9
- 5) 大西貴之, 田中俊幸, 竹中隆: マイクロ波を用いたコンクリートの電気定数の推定法, 第12回電子情報通信学会九州支部学生講演会, B-10, pp.40, 2004.9
- 6) 永富兼三, 田中俊幸, 竹中隆: 実データを用いた Real GA によるコンクリート中の鉄筋の位置推定, 電子情報通信学会 2005 年総合大会論文集, C-1-4, 2005
- 7) Tanaka, T., Kijima, S., Nagatomi, K., Ohnishi, T. and Takenaka, T.: Diagnosis of Concrete Structure using Microwave, Progress in Electromagnetic research symposium 2005, pp.458, Aug. 2005
- 8) 川崎晴久: 数値解析の基礎, 共立出版株式会社, pp.183-186, 1993
- 9) 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
- 10) 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, Soul, pp. 846-849, Nov. 2003
- 11) 永富兼三, 田中俊幸, 竹中隆: マイクロ波を用いたコンクリート中にある複数の鉄筋の位置推定法, 第12回電子情報通信学会九州支部学生講演会, B-21, pp.51, 2004.9