# 全波形サンプリング処理方式による電磁波レーダ法の高精度化に関する検討

### 1. はじめに

コンクリート構造部材中の補強鉄筋等の介在物の 位置を把握するための非破壊検査法の一つに電磁波 レーダ法<sup>1)</sup>と呼ばれる手法がある.この手法は,電 気的な特性インピーダンスが異なる材料の界面で電 磁波が散乱することに着目し,受信波形から介在物 の位置を推定するものである.現行の電磁波レーダ 法の映像化は,装置の設置面から垂直方向に電磁波 を照射し,鉄筋からの反射波の到達時間から鉄筋像 を出力する方法である.本研究では,超音波アレイ映 像化で用いられている全波形サンプリング処理 (Full waveforms sampling and processing: FSAP) 方式  $^{2)}$  に よる映像化手法を電磁波レーダ法に応用し,鉄筋の 再構成精度の向上を目的とする.ここでは,参照波形 を用いたデコンボリューション処理によって受信波形 を処理し,分解能の向上を試みる.本手法の有効性を 検証するために,電磁界有限積分法(Electromagnetic finite integration technique: EMFIT)<sup>3)</sup>で計算された波 形を FSAP 方式による映像化に入力し,鉄筋の再構成 シミュレーションを行う.

## 2. FSAP 方式による映像化手法

ここでは,送・受信アンテナの配置パターンを変化 させることにより,組み合わせを変化させて波形を取 得する.このとき,各組み合わせの電磁波の受信波形 をコンピュータに記憶させる.例として,送信アンテ ナを1箇所,受信アンテナを3箇所に設置した時の FSAP 方式による電磁波の送受信を図-1 に示す.アン テナ番号1で送信した電磁波は鉄筋で散乱し,その 電磁波を番号2,3,4の受信アンテナで受信する.こ の時,送信iおよび受信jで送受信した信号を $e_{ij}(t)$ とすれば, e<sub>12</sub>, e<sub>13</sub>, e<sub>14</sub>の3つが波形記憶マトリク スに保存される.次に送信アンテナを変更し,同様に 各アンテナで電磁波を受信する.この作業を繰り返し て,波形記憶マトリクスを埋めていく.なお,現行の 装置では同一のアンテナで電磁波を送受信できないた め,ここでは,波形記憶マトリクスの対角成分は計算 しない.

波形記憶マトリクスから必要な波形を取り出し,コ ンピュータにおいて適当な遅延(ディレイ)操作を行 い,映像化したい領域の1画素にビームが集束する ように波形を合成する.いま,映像化したい断面を x<sub>1</sub>-x<sub>2</sub>とし,x<sub>1</sub>方向の画素番号をk,x<sub>2</sub>方向の画素番 号をlとする.画素(k,l)への集束ビームをF(k,l:t)

愛媛大学大愛媛大学大愛媛大学大	学院学院	正員正員		i. [i F	, 司 崎 中 灯	奇慎	[一 ]之	郎
	取得波	形の保存	± №.	受 i 1	信ア 1	2 $e_{12}$	テナ 3 e <sub>13</sub>	No. 4 e <sub>14</sub>
			言アンテ	2 3	e <sub>21</sub> e <sub>31</sub>	e <sub>32</sub>	e <sub>23</sub>	e <sub>24</sub> e <sub>34</sub>
			澎	4	e <sub>41</sub>	$e_{42}$	e <sub>43</sub>	$\sim$

学生員

逆生昌

松本大史

田智達郎

愛媛大学大学院

**豪媛大堂大堂院** 

図-1 FSAP 技術の基本原理

と表すことにすれば,

$$F(k,l:t) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} e_{ij}(t + \Delta t_{ij}(k,l))$$
(1)

のように書ける.ここで, $\Delta t_{ij}$ はディレイである.映像化のためには,F(k, l:t)から基本伝搬時間(画素からアンテナ配列の中心位置までの路程に相当する伝搬時間) $t = T_{kl}^0$ の振幅を抽出する.その振幅の値をR(k, l)とすると,

$$R(k,l) = F(k,l:T_{kl}^{0})$$
(2)

で表される.この振幅値を画素毎にプロットすることで,鉄筋の映像化を行う.

### 3. 波形処理手法

FSAP 方式では, すべての原波形を保存しているため,後処理で波形処理や波形合成が可能となる.電磁波レーダ装置で受信した電磁波には,実際にはアンテナや装置の周波数特性,装置の電気回路のノイズ等も含まれる.従って,受信した電磁波をそのまま鉄筋の再構成に用いると分解能が低下する恐れがある.ここでは,下記に示すように,鉄筋からの散乱成分のみを抽出する波形処理を行う.信号  $e_{ij}(t)$ をフーリエ変換し周波数域で表現したものは

$$e_{ij}(\omega) = \beta(\omega)\alpha(\omega)P_i(\omega)P_j(\omega)C_{ij}(\omega)A_{ij}(\omega)$$
(3)

と表すことができる.ここで, $\beta$ はアンテナの帯域 特性や計測後の電気回路の影響等を表す関数である.  $\alpha$ は減衰を表す関数, $P_i \ge P_j$ は送信経路および受信 経路における電磁波の伝搬時間の関数, $C_{ij}$ は電磁波 ビームの回折, $A_{ij}$ は鉄筋からのアンテナjに向かう 散乱成分を表している.いま,平板導体から距離 の位置にアンテナを設置し,この導体に向けて電磁波 を送信する.このときの受信波を参照波とすれば,

$$e^{\text{ref}}(\omega) = \beta(\omega)\alpha'(\omega)\exp(2ikD)C'_{ij}(\omega)R(\omega)$$
(4)

のように表される.ここで, k は波数, R は導体での 平面波の反射率である.式(3)と(4)から, 散乱成分は,

$$A_{ij}(\omega) = \frac{e_{ij}(\omega)}{e^{\text{ref}}(\omega)} \exp(2ikD)R(\omega) \frac{\alpha'(\omega)C'_{ij}(\omega)}{\alpha(\omega)C_{ii}(\omega)}$$
(5)

のように求まる.ここで,減衰  $\alpha$  は計測時には通常 明らかである.ビームの回折  $C_{ij}$ も理論的に求めるこ とができるが,ここでは,これらをまとめて  $S(\omega) = \alpha'(\omega)C'_{ij}(\omega)/\alpha(\omega)C_{ij}(\omega)$ と置き,Sを平滑化フィル タ<sup>4)</sup>に相当するものとして扱う.ここでは,フィルタ 関数として次式を用いた.

$$S(\omega) = 2^{-\left|\frac{|\omega| - \omega_0}{a}\right|^2} \tag{6}$$

ここで  $\omega_0$  はフィルタの中心周波数, a は半値幅である.式(5)の左辺をフーリエ変換し,時刻歴応答 $A_{ij}(t)$ にしたものを波形記憶マトリクスの $e_{ij}(t)$ と置き換え,式(2)を実行することで内部鉄筋の映像化を行う.

4. コンクリート中の鉄筋の映像化

シミュレーション

EMFIT で計算された TE モードの電磁波の波形 <sup>3)</sup> を用いて,FSAP 方式による鉄筋の映像化シミュレー ションを行った.数値モデルを図-2の上部に示す.モ デルの大きさは高さ 280mm,幅 400mm で,表面か ら深さ 90mm と 210mm の位置に直径 20mm の鉄筋 を設置した.ここでは,セメントおよび骨材の誘電 率  $\varepsilon = 43.83 \times 10^{-12}$ F/m,透磁率  $\mu = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m,電気伝導率  $\rho = 0.001$ S/m は同じものを用いた. EMFIT による電磁波伝搬の計算例を図-2の下部に示 す.これは幅 40mm の送信アンテナをモデルの上部の ある一点に設置し,そこから放射された電磁波(送信



図-2 数値モデルとコンクリート中を伝搬する電磁波のス ナップショット



図-3 鉄筋の映像化結果 (左: FSAP, 右: Bモード)

波の中心周波数は 1.0GHz)の *E*<sub>3</sub> 成分を可視化した ものである.電磁波はコンクリート内部に円筒状に伝 搬し,鉄筋で散乱することがわかる.

このアンテナをモデルの上部で移動させ,合計で 8×8-8=56 パターンの波形の組み合わせを取得す る.ここで,参照波として,平板導体から490mm離し た位置で取得した電磁波の反射波形を利用した. 平滑 化フィルタのパラメータは, $\omega_0=1.5$ GHz,a=0.7GHz と設定した.映像化範囲は,図-2のモデル図の点線 で囲む部分とした.FSAP 方式による鉄筋の映像化結 果を図-3の左側に示す.比較のため図-3の右側には, 一般的な電磁波レーダ法で用いられている B モード の映像化の結果も示している.双方とも,上位の鉄筋 に関しては強い反応が見られる.一方,下位の鉄筋に 関しては, FSAP 方式による映像化では, 鉄筋による 反応が見られるが, Bモード像では鉄筋が検出できて いないことがわかる.これは, FSAP 方式では, 複数 の送・受信パターンで波形を計測しているため,深部 の鉄筋からのシグナルも計測できるパターンがあり, これが有効に作用しているためである.

#### 5. 結言

本研究では,コンクリート中の鉄筋の位置と形状を 高精度に推定するために,FSAP方式を用いた電磁波 映像化に関する検討を行った.一般的な映像化手法で あるBモードに比べて,FSAP方式による映像化では 深さ方向に複数存在する鉄筋が鮮明に分離できること がわかった.今後は,実験によって本手法の妥当性を 検証していきたい.

#### 参考文献

- 1) 魚本健人,加藤佳考: コンクリート構造診断工学,オーム社, pp.75-77, 2008.
- 2) 中畑和之,平田正憲,廣瀬壮一:全波形サンプリング処 理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成,非破壊 検査, Vol59, No.6, pp.277-283, 2010.
- K. Nakahata et al., Simulation of ultrasonic and electromagnetic wave propagation for nondestructive testing of concrete using image-based FIT, Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, No.1, pp.28-37, 2012.
- 4) 井口尚之:マイクロ波地中レーダの研究,東京工業大学 卒業論文,2002.3