

## 電磁界有限積分法 (EMFIT) による電磁波非破壊検査のシミュレーション

愛媛大学大学院 学生員 伊賀達郎  
愛媛大学大学院 正員 中畑和之

### 1. はじめに

電磁波レーダ法は、電気的性質が異なる物質の界面で電磁波が反射することに注目し、反射波の到達遅延時間からコンクリート内部の検査を行う非破壊検査法である<sup>1)</sup>。超音波探傷 (UT) の分野では、現象の数理モデルの構築や波動伝搬シミュレーションは盛んに行われているが、電磁波レーダについては UT ほど多くは報告されていない<sup>2)</sup>。電磁波レーダ法の現象を理解し、また現状よりも画像化精度を向上させるためにも電磁波レーダ法の数理モデルの構築は重要である。そこで本研究では電磁波レーダ法のモデル化および電磁波伝搬解析技術を開発することを目的とする。ここでは、電磁波の支配方程式であるマクスウェル方程式を数値的に解くために有限積分法 (FIT) を採用し、これをイメージベース処理<sup>3)</sup>と組み合わせて電磁波の伝搬解析を行う。本報告では、EMFIT (Electromagnetic FIT) の定式化を簡単に述べ、鉄筋コンクリート中を伝搬する電磁波の可視化と電磁波レーダ法を模擬した鉄筋の画像化例を示す。

### 2. 電磁界有限積分法 (EMFIT) の定式化

映像化したい断面を  $x_1 - x_2$  面としたとき、電磁波レーダ法はその断面内で電場成分がゼロとなる Transverse Electric Wave (TE 波) を用いている。従ってここでは TE 波を対象とした EMFIT を構築する。直交座標系  $(x_1, x_2, x_3)$  とし、電場を  $E$ 、磁場を  $H$  とする。マクスウェル方程式<sup>4)</sup> のアンペール法則の式を領域  $S$  で積分すると次式を得る。

$$\int_S \left( \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \right) \cdot dS = \oint_C H \cdot dl \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$  は誘電率、 $\sigma$  は電気伝導率である。なお、上式ではストークスの定理を適用しており、 $C$  は  $S$  の周上の経路を表している。また、ファラデー法則の式を領域  $S$  で積分する。

$$\int_S \mu \frac{\partial H}{\partial t} \cdot dS = - \oint_C E \cdot dl \quad (2)$$

ここで、 $\mu$  は透磁率である。いま、 $\varepsilon, \sigma, \mu$  は領域  $S$  内で一定とし、式 (1) と (2) を微小領域  $S (= \{\Delta x\}^2)$  (以後、セルと呼ぶ) で離散化する。また、時間方向の離散化について中心差分近似を用いると、式 (1) と (2) は次式となる。

$$H_1^{n+\frac{1}{2}} = H_1^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_{3(i,j+1)} - E_{3(i,j)}) \quad (3)$$

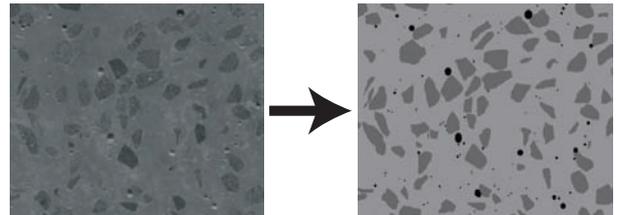
$$H_2^{n+\frac{1}{2}} = H_2^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_{3(i+1,j)} - E_{3(i,j)}) \quad (4)$$

$$E_3^n = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} E_z^{n-1} + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \left[ H_{2(i+\frac{1}{2},j)}^{n-\frac{1}{2}} - H_{2(i-\frac{1}{2},j)}^{n-\frac{1}{2}} - H_{1(i,j+\frac{1}{2})}^{n-\frac{1}{2}} + H_{1(i,j-\frac{1}{2})}^{n-\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

ここで、 $\Delta t$  は時間ステップ幅であり、上付き文字  $n$  は整数次の時間ステップ、 $(i, j)$  は節点の位置を表す。上式で  $\varepsilon, \sigma, \mu$  に上付きの  $(\ )$  が記しているが、これは隣り合うセルでパラメータの平均をとることを示している。

### 3. イメージベースモデリング

イメージベースモデリングとは、解析対象を“見たまま”にモデル化する技術である。画像処理を施したビットマップ画像の 1 ピクセルと EMFIT の 1 セルを一致させることにより、非均質材料や複雑な表面形状を有していても簡単に詳細な数値モデルを作成できる。2 次元イメージベースモデリングの流れは、まず被検体の写真をスキャナで読み込み、画像処理によって構成材料を RGB カラーに識別する。図-1 は、コンクリートの断面写真に画像処理を施し、数値モデルを作成した例である。



画像処理

図-1 数値モデルの作成例

### 4. 鉄筋コンクリート中を伝搬する電磁波伝搬シミュレーション

図-2 に示すような鉄筋コンクリートを考える。ここでは高さ 320mm、幅 400mm の鉄筋コンクリートをモデル化しており、深さ 160mm の位置に直径 40mm の 3 つの鉄筋が配筋されている。電磁波は空気中も伝搬するためコンクリート周辺に 15mm の真空領域を設定し、その外側に幅 5mm の吸収境界を設けた。セメントペーストの誘電率を  $\varepsilon = 66.41 \times 10^{-12}$  F/m、透磁率を  $\mu = 1.257 \times 10^{-6}$  H/m、電気伝導率を  $\sigma = 0.001$  S/m

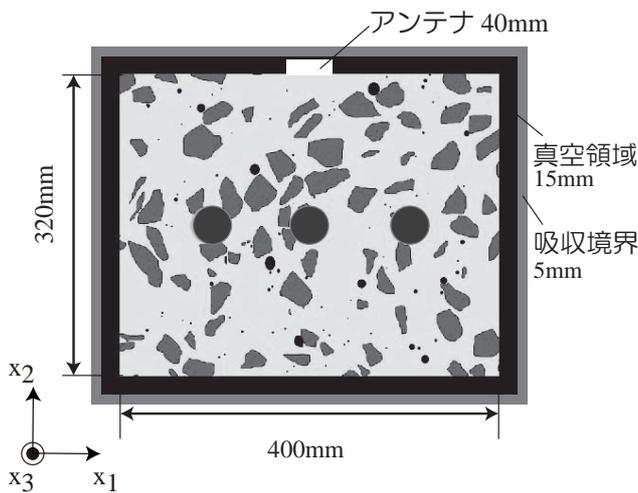


図-2 電磁波伝搬シミュレーションに用いた数値モデル

とし、骨材はそれぞれ  $\epsilon = 70.83 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ,  $\mu = 1.257 \times 10^{-6} \text{H/m}$ ,  $\sigma = 0.0001 \text{S/m}$  とした。セル長は  $\Delta x = 0.2 \text{mm}$ , 時間ステップ  $\Delta t = 0.2 \text{ps}$  とし, 32000 ステップまで (6400ps まで) 計算した。モデル上部に幅 40mm のアンテナを設置し, 中心周波数 1.0GHz のリッカー波で通電することで電磁波を発生させている。

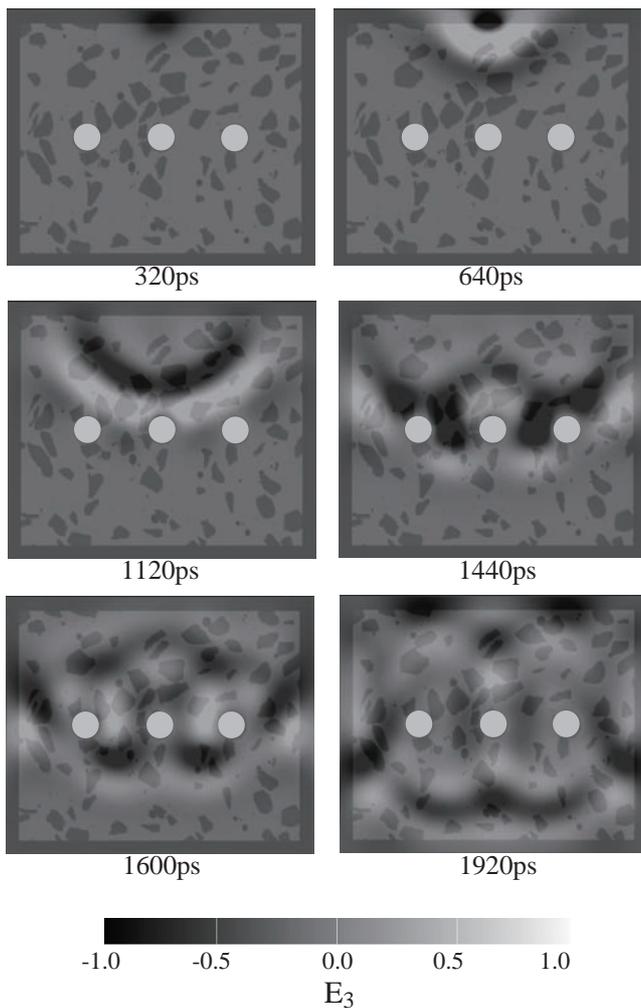


図-3 鉄筋コンクリート中の電磁波の伝搬挙動

EMFIT によって得られた電磁波の伝搬挙動を図-3 に示す。この図は電場  $E_3$  をプロットしたものである。波長に対して骨材や空隙の径が小さいため、電磁波は骨材や空隙によってあまり散乱することなく伝搬していくことが分かる。1440ps 後のスナップショットを見ると、電磁波は鉄筋で強く散乱していることが分かる。この時、電磁波の位相が反転しており、強い反射波がアンテナに向かって伝搬することがわかる。

### 5. 電磁波レーダ法を模擬した鉄筋の画像化

EMFIT で計算された電磁波の波形を用いて、電磁波レーダ法の鉄筋再構成のシミュレーションを行う。使用した数値モデルは図-2 と同じである。モデル上面に幅 10mm のアンテナを設置し、左から右に 20mm ずつ移動させながら計 19 回の送受信を行う。入力信号やセル長等の解析条件は図-3 の場合と同じである。アンテナを移動しながら、反射源までの伝搬時間と電磁波の速度から反射源までの深さを表示したもの (B スキャン像) を図-4 に示す。この結果、鉄筋のおおよその位置が再構成できており、EMFIT は電磁波レーダ法による鉄筋画像化を模擬することができた。

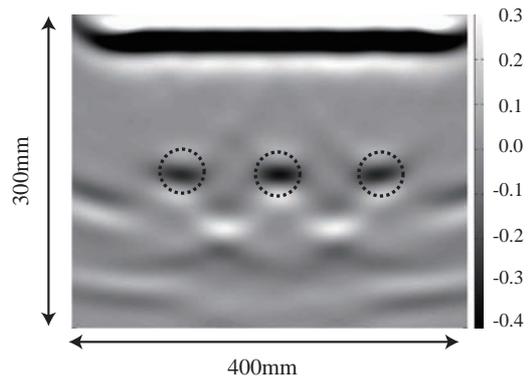


図-4 EMFIT の波形を用いた電磁波レーダ法の鉄筋再構成シミュレーション

### 6. 結論

本研究では、電磁波レーダ法の数理モデル化を行うために EMFIT (電磁界有限積分法) を開発し、これを用いて電磁波伝搬解析を行った。また、電磁波レーダ法を模擬してコンクリート中の鉄筋の再構成化シミュレーションを示した。今後は、本技術を 3 次元解析に拡張することや、電磁波レーダ法のアンテナの設計に役立てたいと考えている。

#### 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) 西尾壮平ら: 電磁波レーダ法によるコンクリートの内部探査に関する有限時間領域差分法解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.557, pp.29-36, 2002.
- 3) 中畑和之ら: イメージベース波動伝搬シミュレーションと超音波探傷法のモデル化への応用, 非破壊検査, Vol.59, No.5, pp. 231-238, 2010.
- 4) 渡邊靖志: 基礎の電磁気学, 培風館, 2004.