

低周波アレイ探触子を用いたコンクリート深部の鉄筋映像化

愛媛大学 学生員 ○小澤耀生, 泉英輝
 愛媛大学 正員 中畑和之
 ジャパンプローブ 非会員 大平克己
 東芝プラントシステム 非会員 小川健三

1. はじめに

超音波アレイ探触子を用いた非破壊検査手法が金属材料等の探傷で導入されつつある。これは、電子スキャン装置を用いてアレイ素子の励振タイミングを制御することで、対象とする材料の任意の位置に超音波を送信する技術¹⁾である。これまで、著者らは超音波アレイ探触子を用いて全波形サンプリング処理 (Full-waveforms sampling and processing: FSAP) 方式²⁾による映像化を提案している。FSAP 方式は、アレイ探触子の1つの素子から超音波を送信し、それぞれの素子で個別に欠陥エコーを受信する。それぞれのエコーはコンピュータ内のメモリにストアし、送信探触子を変えながら、すべての送受信パターンを得る。これら全波形を用いて、映像化対象の各素子にビームが集束するように、遅延時間を考慮して送信ビームをポスト処理で再構成する。本研究では、FSAP 方式をコンクリート構造物に適用する。超音波の減衰の影響を考慮し、中心周波数が 50KHz の超音波アレイ探触子を開発した。ここでは、発電プラントのコンクリート擁壁を想定して高さ 800mm の供試体を作成し、深部の鉄筋や電線管等を映像化することを試みる。

2. FSAP 方式による映像化手法

FSAP 方式については、論文²⁾で詳細が示されているので、簡単に原理を述べる。アレイ状に並べた N 個の素子のうち、素子番号 i で送信し、 j で受信したときの時刻歴波形を $M_{ij}(t)$ とする。これを、すべての素子の組み合わせで送受信し、波形記憶マトリクスに保存する。映像化したい領域の画素 $\mathbf{x}[k, l]$ にビームが集束するように、以下のように遅延 $\Delta t_{kl}^{ij}(i, j = 1, \dots, N)$ を考慮して加算処理を行う。

$$F(\mathbf{x}[k, l], t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij}(t - \Delta t_{kl}^{ij}) \quad (1)$$

映像化のためには、アレイの中心から画素 \mathbf{x} までの距離に相当する伝搬時間 $t = T_{kl}^0$ の F の値を抽出する。すなわち、 $I(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}[k, l], T_{kl}^0)$ の値を画素上にプロット

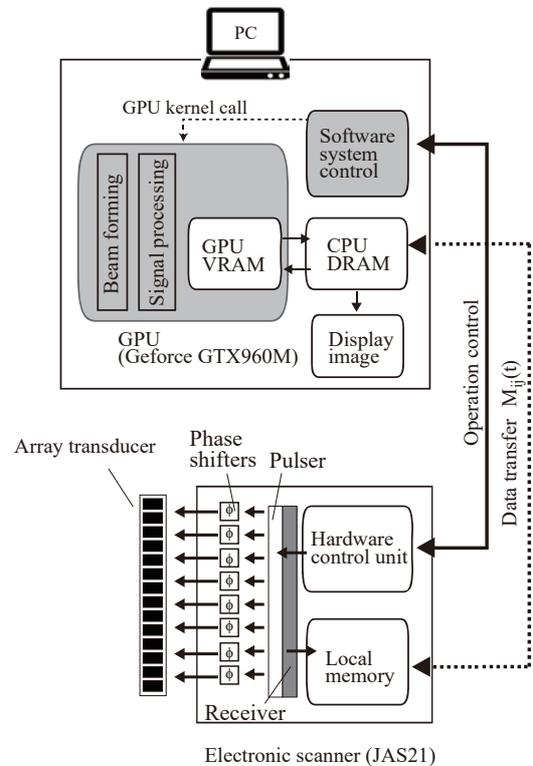


図-1 GPU 計算を導入した FSAP 方式のプロトタイプ概要図

する。各画素の I の値にカラーをつけて表示することにより、内部の散乱体の形状や配置を散乱波の強さから推定する。

図 1 に FSAP 方式を実装した超音波映像化システムの概要図を示す。ここでは、送信用の 1 素子を高速に切り替えながら超音波を全素子で受信するために、電子スキャナ (ジャパンプローブ JAS21) を使用した。波形取得命令が PC から発せられると、1 素子ずつ超音波が発振され、 N 素子で個々に超音波が受信される。レシーバで受信したデジタル信号は、USB3.0 を経由してコピーされ、波形記憶マトリクスとして CPU 側の Dynamic random access memory (DRAM) にストアされる。次に、FSAP 方式のビーム再構成のカーネルを実行する。ここでは、GPU 計算を導入し、ビーム再構成および欠陥像出力を高速に処理する。映像出力後に、再び波形取得の命令を発し、次の映像化をスタートさせる。

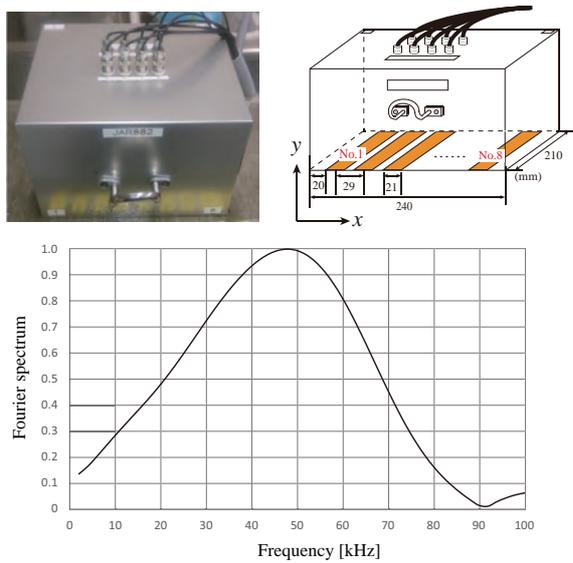


図-2 低周波アレイ探触子の概要およびアクリル底面からの反射波のフーリエスペクトル

3. 低周波アレイ探触子によるコンクリート内部映像化

超音波アレイ探触子を図2(上)に示す。素子ピッチが29mm, 設計中心周波数を50KHzとして, コンポジット素子のアレイ探触子を作成した。この探触子を2つ使用し, 素子数16のアレイ探触子として用いた。アレイ探触子の7番目の素子でアクリル底面に超音波を送信し, 8番目の素子で受信したときの波形のフーリエスペクトルを図2(下)に示す。50KHzを中心にブロードな周波数スペクトルが得られていることがわかる。

本研究では, 図3(a)に示すようなコンクリート供試体(縦波音速4300m/s)を作成した。供試体の高さは800mmであり, 内部には鉄筋($\phi=25\text{mm}$ と 29mm), 電線管(鋼製, $\phi=42\text{mm}$), プラスチックフレキシブル管(PF管, $\phi=42\text{mm}$)が埋設されている。コンクリート供試体の骨材の最大粒径は20mm, 骨材含有率は70%である。FSAP方式によって得られた再構成結果を図3(b)に示す。映像化範囲は800mm×800mmであり, 解像度は1mmである。ここでは, 全画素で得られた I の最大値で割ることで正規化したものに色をつけてプロットしている。映像化の結果から, 鉄筋, 電線管, PF管の位置を正確に再構成できていることがわかる。また鉄筋と電線管を比較すると, 境界部の色が青赤逆転している。これは, 音響インピーダンスの違いによる散乱波の位相反転によるものであり, このことから鉄筋と電線管の識別が可能である。なお, 本研究で開発したFSAP方式では, 上記の設定では, 1秒間に5フレー

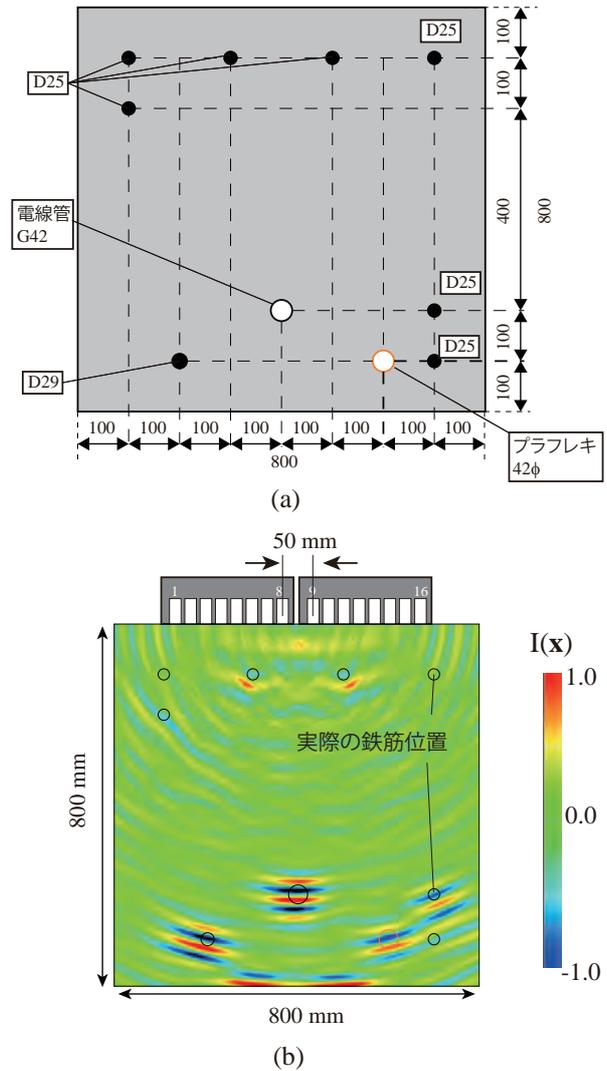


図-3 (a) コンクリート供試体と (b) コンクリート内部の映像化結果

ムの更新ができ, リアルタイム映像化が可能である。

4. 結論

本稿では, コンクリート擁壁の非破壊検査を想定して, FSAP方式によるコンクリート深部の映像化を行った。50KHzの中心周波数を有する超音波アレイ探触子を作成することで, 鉄筋や電線管等の位置や形状を精度よく映像化することができた。GPU計算を取り入れることで, ほぼ実時間で映像化が可能である。今後はアレイ探触子の軽量化を行い, 実用性を高めることが目標である。

参考文献

- 1) B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox, Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review, *NDT & E International*, Vol.39, pp.525-541, 2006.
- 2) K. Nakahata, S. Tokumasu, A. Sakai Y. Iwata, K. Ohira, Y.Ogura, Ultrasonic imaging using signal post-processing for a flexible array transducer, *NDT & E International*, Vol.82, pp.13-25, 2016.