

# 低周波アレイ探触子を用いたコンクリート内部の鉄筋および円筒管の高速映像化

## High-speed Ultrasonic Imaging of Steel Bars and Pipes in Concrete using Low Frequency Array Transducer

愛媛大学 大学院	小澤 耀生	Akio OZAWA
愛媛大学 大学院	中畑 和之	Kazuyuki NAKAHATA
ジャパンプローブ(株)	大平 克己	Katsumi OHIRA
東芝プラントシステム(株)	小川 健三	Kenzo OGAWA

The use of ultrasonic arrays for non-destructive testing has been widely spread in recent years. As an array imaging method, we propose the full-waveform sampling and processing (FSAP) technique that utilizes a complete set of signals of all combinations of transmission and reception elements. The ultrasonic beam is synthesized from the signal set by the post-processing with the GPU calculation. In this study, pipes and reinforced steel bars in concrete material were reconstructed with the FSAP. Since the ultrasonic wave attenuates significantly in concrete, we develop an array transducer with a 50 kHz center frequency. For the effective focusing of ultrasonic beam in concrete, the ultrasonic wave field radiated from the array transducer is simulated using the multi-Gaussian beam model. In experimental measurements, it was shown that the shapes of pipes and steel bars in a concrete specimen with 800 mm height were reconstructed with high accuracy in real time.

**Keywords:** Ultrasonic Imaging, Full-waveform Sampling and Processing (FSAP), Array Transducer, Concrete, Internal Steel Bars and Pipes, GPU Calculation

## 1. はじめに

超音波アレイ探触子を用いた非破壊検査が金属材料等の探傷で導入されている[1]。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]であり、リニアスキャンやセクタスキャン等の映像化法がある。著者らは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]による映像化手法を提案している。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。それぞれの波形はコンピュータ内のメモリに保存する。送信素子を変えながら、各素子で受信し、すべての送受信パターンを得る。映像化対象の各画素にビームが集束するように、ポスト処理でビームを合成する。本研究では、FSAP方式をコンクリート構造部材に適用する。ここでは、高さ800mmのコンクリート供試体を作成し、内部の鉄筋

や円筒管の映像化を試みた。

コンクリートは骨材分布に起因して波動減衰が顕著であるので、深部まで超音波が到達するように、送信周波数を調整する必要がある。ここでは、音場シミュレーションを行い、コンクリート深部でも効率的にビームが集束でき、適切な分解能を有する探触子を設計・製作した。また、現場での実時間映像化のために、Graphics Processing Unit (GPU) 計算[3]を導入してFSAP方式を高速化した。ここでは、FSAP方式を実装した超音波アレイ映像化システムの概要を示し、コンクリート供試体の内部映像化の事例を示す。

## 2. アレイ映像化

### 2.1 FSAP方式の映像化原理

FSAP方式では、1素子から超音波を送信し、各素子で受信する。この操作を繰り返し、波形記憶マトリクスと呼ばれるメモリに全ての素子の組み合わせの波形を保存する。Fig.1(a)のように、振動素子を一列に並べたリニアアレイを考える。素子番号*i*で送信し、*j*で受信したときの時刻歴波形を $M_{ij}(t)$ とし、すべての送受信パターンをFig.1(b)の波形記憶マトリクスに保存する。各パターンで時

連絡先: 中畑和之、〒790-8577 松山市文京町3  
愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻  
E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp

刻歴サンプル数 $N_t$ 個を保存する。波形記憶マトリクスのすべての要素が埋まると、合計 $N \times N$ パタンの波形が保存されることになる。超音波を送信する位置の画素を $\mathbf{x}[k, l]$ とし、画素 $\mathbf{x}$ とアレイ探触子の中心座標を $\mathbf{x}_0$ とすると、この往復の伝搬時間 $T_{kl}^0$ （基本伝搬時間と呼ぶ）は以下のように示される。

$$T_{kl}^0 = \frac{2|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|}{c} \quad (1)$$

ここで、 $c$ は材料中を伝搬する縦波音速である。素子番号 $i$ から発振した超音波が $\mathbf{x}[k, l]$ に到達し、素子 $j$ に戻ってきた時間と、基本伝搬時間との差（ディレイ）は $T_{kl}^0 - \Delta t_{kl}^{ij}$ となる。ディレイを考慮しながら、 $i$ と $j$ の全ての組み合わせを重ね合わせると、画素 $\mathbf{x}$ への集束ビームが合成される。これは以下の式で表される。

$$F(\mathbf{x}[k, l], t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij}(t - \Delta t_{kl}^{ij}) \quad (2)$$

映像化のためには、基本伝搬時間 $T_{kl}^0$ の振幅値を抽出する。

$$I(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}[k, l], T_{kl}^0) \quad (3)$$

すべての画素でこの計算を行い、 $I(\mathbf{x})$ 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、散乱波の振幅値から評価する。

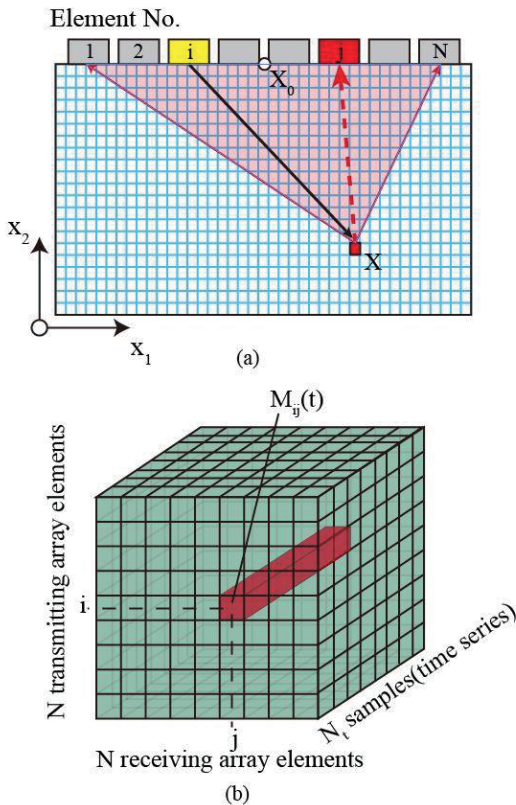


Fig.1 (a) Location of array transducer and focal point  $\mathbf{x}$ , (b) Signal matrix storage.

## 2.2 超音波映像化システム

Fig.2 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、送信素子を高速に切り替えながら、散乱波を各素子で受信するために、電子スキャン装置(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 を経由して波形記憶マトリクスとして CPU 側の Dynamic random access memory (DRAM) に保存される。次に、GPU ボードの VRAM にデータを転送し、GPU 計算によってビーム合成のカーネルを実行する。 $x$ 方向に $K$ 個、 $y$ 方向に $L$ 個の画素があるので、全画素に集束ビームを送信するのに必要な演算回数は $N^2 \times K \times L$ 回である。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。GPU 計算のカーネルコードを作成するために、PGI 社の CUDA FORTRAN (Accelerator Fortran Ver.15.4 for Windows 64 bit) を使用した。この CUDA FORTRAN によって FSAP 方式の Dynamic link library (DLL) を作成し、外部から呼び出すこととした。

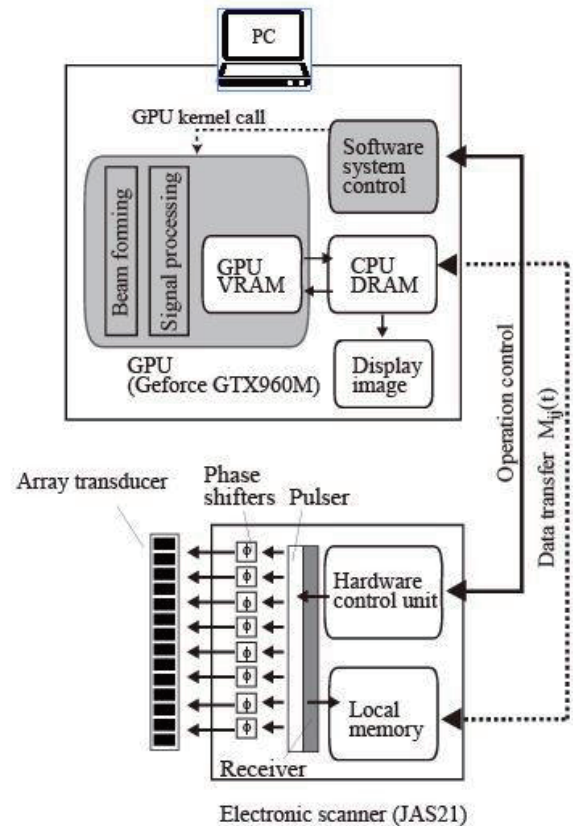


Fig.2 Hardware and software architectures of the proposed flaw imaging system

### 3. 低周波アレイ探触子

コンクリート標準示方書によれば、コンクリート中の骨材の最大粒径は、鉄筋コンクリートで 20mm、無筋コンクリートで 40mm と示されている。コンクリートを対象として超音波探傷を行う場合は、骨材による散乱減衰の影響を考慮する必要がある。この影響を小さくするには、骨材径よりも送信波の波長 $\lambda$ を大きくすることが肝要である。

$$\lambda \left( = \frac{c}{f} \right) > 40 [\text{mm}]$$

音速  $c$  を 4000 m/s と仮定すると、少なくとも  $f = 100\text{kHz}$  以下の周波数を選択すればよい。ここで、探触子を設計するにあたって、中心周波数を 50kHz としたときの音場をマルチガウシアンビーム理論[4]を用いてシミュレーションしてみた。映像化断面のアレイ探触子からの放射音場を Fig.3 に示す。アレイ素子のピッチは 29mm、奥行きは 210mm として、これを 16 素子配置した場合を想定する。Fig.3 の左に示す図は、探触子の中心から深さ 700mm にビームを集束させた場合、Fig.3 の右に示す図は、深さ 700mm で探触子の中心から 250mm 左側に焦点を設定した場合のシミュレーション結果である。いずれも意図した位置にメインローブが発生していることがわかる。

シミュレーションで設計した形状に倣って、Fig.4 に示すようなコンポジット素子のアレイ探触子を作成した。ここでは、可搬性を考慮して 1 探触子あたり 8 素子とし、実際はこの探触子を 2 つ用いて計 16 個の素子で映像化を行う。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 Fig.5 に示す。50 kHz 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。

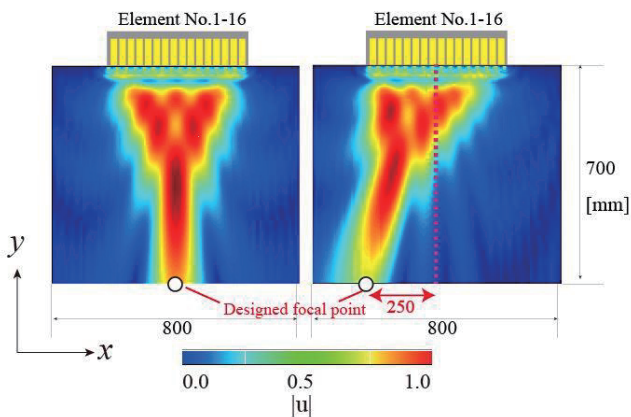


Fig.3 Radiated ultrasonic wave fields calculated with the MGB simulation[4].

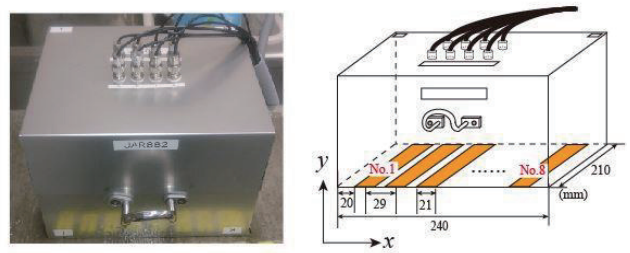


Fig.4 Picture of the low frequency array transducer with 16 elements (left) and its element configuration (right).

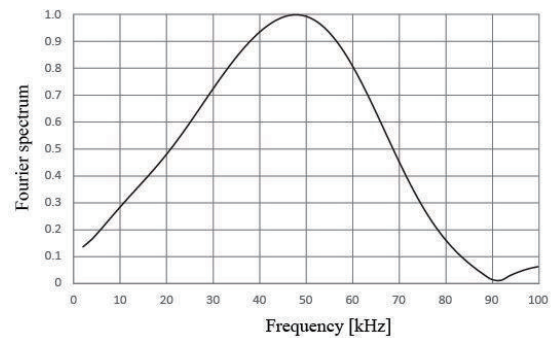


Fig.5 Frequency spectrum of reflected signal from flat bottom surface in acrylic material.

### 4. コンクリート内部の映像化結果

本研究では、Fig.6(a)に示すようなコンクリート供試体を作成した。供試体の高さ 800mm、幅 800mm、奥行き 300mm であり、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。供試体は水中養生後に、室外で自然乾燥させている。映像化時の縦波音速  $c = 4260\text{m/s}$  であり、密度は  $2700\text{kg/m}^3$  である。供試体内部には鉄筋( $\phi = 25\text{mm}$  と  $29\text{mm}$ )、鋼製の中空円筒( $\phi = 42\text{mm}$ )、プラスチックフレキシブル電線管(PF管、 $\phi = 42\text{mm}$ ) が奥行き方向に配置されている。FSAP 方式によって得られた再構成結果を Fig.6(b)に示す。映像化範囲は  $800\text{mm} \times 800\text{mm}$  であり、集束ビームは画素 1mm 毎に送信した。ここでは、全画素で得られた  $I(x)$  のうち、そ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、円筒、PF 管の位置を正確に再構成できていることがわかる。また深部の  $\phi = 29\text{mm}$  の鉄筋と  $\phi = 42\text{mm}$  の円筒を比較すると、円筒の方が境界部の値が大きい(赤色が濃い)ことがわかる。これは、散乱波の位相を反映したものであり、音響インピーダンスの違いに起因する。すなわち、鉄筋と円筒では音響インピーダンスが大きくことなることから、位相を評価することで鉄筋と円筒の識別が可能であると考えられる。

なお、本研究で開発した FSAP 方式の映像化システムは、上記の設定では、1 秒間に 5 フレームの更新ができ、リアルタイム映像化が実現できている。

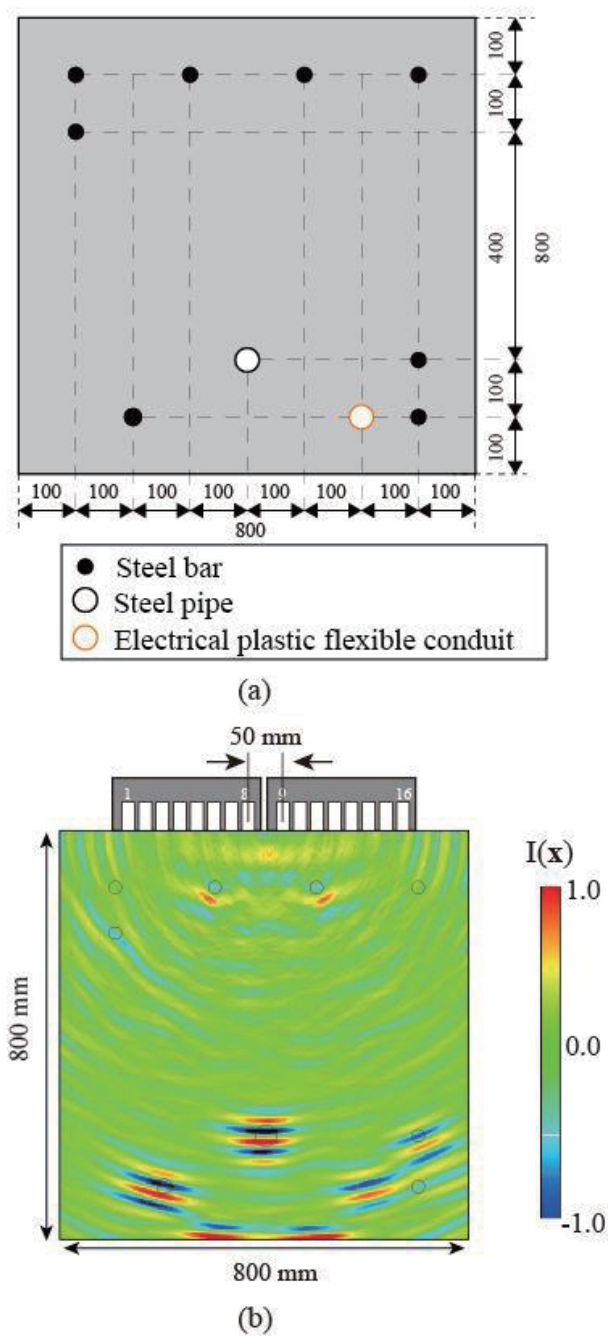


Fig.6 (a) Concrete specimen and (b) Images of steel pipe, steel bar, and plastic flexible conduit.

## 5. 結言

本研究では、発電プラントで用いられるコンクリート部材の内部を非破壊的に評価することを目標として、低周波アレイ探触子を用いた FSAP 方式による超音波映像化を試みた。ここでは、音場シミュレーションに基づいて、50 kHz の中心周波数を有する低周波アレイ探触子を製作した。このアレイ探触子を用いて FSAP を実行した結果、高さ 800mm の供試体内部の鉄筋や円筒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、高速に FSAP 方式が実行でき、実時間で内部像の出力が可能であった。今後はアレイ探触子の軽量化を行うこと、より多くの実構造部材で検証を行っていきたいと考える。

## 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.
- [3] G. Rougeron, J. Lambert, E. Iakovleva, L. Lacassagne, N. Dominguez, Implementation of a GPU accelerated total focusing reconstruction method within CIVA software, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conference Proceedings, Vol.1581, pp. 1983-1990, 2014.
- [4] X. Zhao and T. Gang, Nonparaxial multi-Gaussian beam models and measurement models for phased array transducer, Ultrasonics, Vol.49, pp.126-130, 2009.