GPU 計算を実装した全波形サンプリング処理方式による
内部欠陥の三次元超音波映像化中畑 和之^{*1}, 堀口 貴志^{*2}GPU accelerated 3-D ultrasonic flaw imaging using
full waveforms sampling and processing techniqueKazuyuki NAKAHATA^{*1} and Takashi HORIGUCHI^{*2}^{*1,*2} Graduate Schools of Science and Engineering, Ehime University
3 Bunkyo, Matsuyama-shi, Ehime 790-8577, Japan

Received 27 August 2015

Abstract

We develop a three dimensional (3-D) flaw imaging system using the full waveforms sampling and processing (FSAP) technique and an ultrasonic matrix array transducer. In FSAP, each array element is sequentially used as an emitter and all other array elements are used as receivers. By changing the emitting element, we obtain a set of signals of every two-element combination. The combination of all signals enables the generation of focal beams at any point in the region of interest. Using the focal beams, we can reconstruct high-resolution 3-D images of flaws. In this study, we introduce massively parallel calculations with graphics processing unit (GPU) to accelerate the beam-forming in FSAP. Here, we implement the GPU accelerated FSAP on a signal acquisition system with a multiplexer, which can rapidly switch the ultrasonic transmission and reception. We validate the performance of the FSAP imaging system by 3-D numerical simulations with the elastodynamic integration technique and experimental measurements with an acrylic specimen. The results show high-speed calculation of the beam-forming, and accurate and clear flaw images.

Key words : Ultrasonic testing, Matrix array transducer, 3-D flaw imaging, Full waveforms sampling and processing (FSAP), Full matrix capture (FMC), GPU computation, EFIT simulation

1. 緒 言

非破壊検査において、フェーズドアレイ探触子を用いた超音波映像化法が普及しつつある。フェーズドアレイ探触子を用いる一般的な映像化手法 (Drinkwater and Wilcox, 2006) では、超音波ビームの集束点をいくつか設定し、その点に向けて超音波が送信されるように電子スキャン装置でアレイ素子の遅延制御を行う。例えば、セクタスキャンの場合は集束点が扇型を描くように、リニアスキャンの場合は深さ方向に一定で水平方向に複数箇所集束点を設けるが、実時間処理のためには集束点は多くても数十個程度である。近年では、Full matrix capture (FMC) (Holmes et al., 2005) や Sampling phased array (SPA) (Bernus et al., 2006) 等のアレイ映像化手法も提案されている。これは、電子スキャン装置を用いた同時励振は行わず、基本的には1素子で送信し、受信は全素子で個別に行う。送信素子を変えながら、各送受パターンで得られる波形をハードウェアに記憶する。すべてのパターンを取り終わった後に遅延処理を行い、ターゲットの“画素”に集束ビームを送る、いわゆるポスト処理を応用したビームフォーミング映像化手法である。我々も、全波形サンプリング処理 (Full waveforms sampling and

No.15-00471 [DOI:10.1299/transjsme.15-00471], J-STAGE Advance Publication date : 1 December, 2015

^{*1} 正員, 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)^{*2} 愛媛大学大学院理工学研究科

E-mail of corresponding author: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp

processing, FSAP) 方式 (中畑他, 2010) を提案しており, 基本的な概念は FMC や SPA と同じであるが, 散乱振幅 (Schmerr, 1998; Kitahara et al., 2002) やアボダイゼーション (Olbrish and Shung, 1997) を導入して欠陥分解能の向上を図っている. アレイ探触子を利用した映像化手法に開口合成法 (Synthetic aperture focusing technique, SAFT) (Romero-Laorden et al., 2013) があるが, FMC の遅延操作が開口合成法の路程調整に対応すると考えれば, 論理的には両者の映像化は同じ結果となる. FMC は一つの素子ずつ超音波を送受信し, それをポスト処理するために実時間処理が困難であったが (Holmes et al., 2005), 近年では Graphics processing unit (GPU) をビームフォーミングの計算に用いて, 高速処理する研究 (Sutcliffe et al., 2012; Rougeron et al., 2014) も進みつつある. また, Field-programmable gate array (FPGA) を FMC に実装し, 高速化を試みた研究例 (Njiki et al., 2013) も報告されている. しかし, FMC の研究では, いずれもリニアアレイ探触子を用いた被検体断面の映像化の事例が多く, FMC のマトリクスアレイ探触子への応用とその高速化については, 研究成果は少ない.

本研究では, FSAP 方式をマトリクスアレイ探触子ができるように拡張し, 対象とする材料の三次元領域を映像化するシステムを開発した. ここでは, NVIDIA 社の Compute Unified Device Architecture (CUDA) による開発環境を利用した GPU 計算技術を導入し, ビームフォーミングの高速化を試みている. また, 計測実験を行い, マトリクスアレイ探触子を用いた場合の映像化の妥当性の検証, および欠陥の分解能についても検証を行った. 開発したシステムでは 129 チャンネル (以後, ch) 以上のアレイ素子が駆動できないため, ここでは動弾性有限積分法 (Elastodynamic finite integration technique: EFIT) (Fellinger et al., 1995) を援用して, 256 ch を使用した場合の数値シミュレーションも示す.

2. 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式

2.1 マトリクスアレイ探触子を利用した FSAP 方式

FSAP 方式は, 一般的なフェーズドアレイ法 (セクタスキャン, リニアスキャン) のように電子スキャン装置上で集束ビームを制御するのではなく, コンピュータのメモリ上に超音波の受信波形をストレージし, その波形データを元に任意の場所への集束ビームを合成する方法である. FSAP 方式は, 1 ch 毎に送信・受信を繰り返して波形記憶マトリクスと呼ばれるメモリに原波形を保存する. 原波形を保存しているため, 計測後でもビームフォーミング (ビームステアリングやフォーカシング) 処理や, 周波数フィルタ等の波形処理等ができる点が特徴である. 以下に, 三次元映像化のためのマトリクスアレイ探触子を利用した FSAP 方式の概要を示す.

図 1(a) に示すように, 超音波を送受信する振動素子をマトリクス状に合計 N 個配置した場合を考える. チャンネル番号 1 で送信した超音波が欠陥で散乱し, その散乱波を同じ素子番号 1 で受信するときの波形を S_{11} とする. 同様に, チャンネル番号 1 で送信し, 番号 2, 3, ..., N で受信していく. このとき, N 個の散乱波 ($S_{11}(t)$, $S_{12}(t)$, ..., $S_{1N}(t)$) が波形記憶マトリクス (図 1(b)) にストアされる. 一つの送受信の組み合わせでサンプル数 N_t を保存するとする. 送信素子を変えて, 各々の素子で受信していくと, 波形記憶マトリクスのすべての要素が埋まることになり, 計 $N \times N$ の組み合わせの波形が記憶される. ここで, 波動の相反定理より $S_{ij} = S_{ji}$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$) が成り立つため, 実際には全波形を保存する必要はなく, 組み合わせは $\frac{N^2 + N}{2}$ パターンでよい.

次に, 図 1(a) に示すように, 映像化領域をボクセルに分割する. x_1 方向のボクセル数を K , x_2 方向のボクセル数を L , x_3 方向のボクセル数を M とする. いま, 超音波を送信するターゲットボクセルを位置 $\mathbf{x}$ とし, これが座標系の $[k, l, m]$ 番目にあるとする. マトリクスアレイ探触子の中心座標 $\mathbf{x}^o$ からターゲットボクセル $\mathbf{x}$ までの伝搬時間を T_{klm}^o (これを基本伝搬時間と呼ぶ) とする. 材料内部を伝搬する超音波の速度を c とすれば, 基本伝搬時間は次式で表される.

$$T_{klm}^o = \frac{2|\mathbf{x} - \mathbf{x}^o|}{c} \quad (1)$$

送信素子 i からボクセル $\mathbf{x}$ を経由し, 受信素子 j までの伝搬時間 T_{klm}^{ij} は次式で表される.

$$T_{klm}^{ij} = \frac{|\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^o|}{c} + \frac{|\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^o|}{c} \quad (2)$$

式 (1) と (2) から, 基本伝搬時間からの遅延時間 ΔT_{klm}^{ij} を求める.

$$\Delta T_{klm}^{ij} = T_{klm}^o - T_{klm}^{ij} \quad (3)$$

Fig. 1 (a) Geometry of array transducer with total N elements and (b) signal matrix storage S_{ij} for all transmit and receive combinations.

波形記憶マトリクスにストアされた受信波形 $S_{ij}(t)$ から Δt_{klm}^{ij} だけシフトしたものを、全ての素子の組み合わせパターンで重ね合わせる。その波形を $F(\mathbf{x}, t)$ と表すことにすれば、

$$F(\mathbf{x}[k, l, m], t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N S_{ij}(t - \Delta t_{klm}^{ij}), \quad k = 1, \dots, K, \quad l = 1, \dots, L, \quad m = 1, \dots, M. \quad (4)$$

となる。式 (4) は、各送受信パターンの波形に遅延制御を行い、それらを重ね合わせた波形は結果的に探触子の中心を基準時刻としたボクセル $\mathbf{x}[k, l, m]$ までの集束ビームとなることを表している。この計算をビームフォーミングと呼ぶ。映像化のためには、 $F(\mathbf{x}, t)$ から基本伝搬時間に相当する時刻 $t = T_{klm}^0$ の振幅を抽出し、その振幅値を R とする。

$$R(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}[k, l, m], T_{klm}^0) \quad (5)$$

その振幅値 R にカラー（あるいは濃淡）を付けて表示する。欠陥がターゲットボクセルに存在するときは大きな振幅が得られ、欠陥がない場合には振幅値は小さい。従って、FSAP 方式は他のボクセルとの相対的な信号強度によって欠陥の位置や形状を示すものである。

2.2 GPU 計算によるビームフォーミングの高速化

本研究では、GPU 計算を導入することで、ビームフォーミングの計算を高速化した。元来、GPU は画像処理を行うための演算装置であり、複数の画素を同時に処理する必要があるため、Central processing unit (CPU) と比較して多くの演算装置を有している。GPU の性能は種類によって大きく異なる。現時点で NVIDIA 社の最新のアーキテクチャである Kepler は、ストリーミングプロセッサ (SP) と呼ばれる最小コアが数十～数百個搭載されたストリーミングマルチプロセッサ (SMX) の集合体からなる。SMX 内部では、高速メモリであるレジスタやシェアドメモリ等のオンチップメモリがあるが、数十 kB 程度しか容量がない。大容量のものは Video random access memory (VRAM) と呼ばれるオフチップメモリに記憶され、種類によるが 1 ボードあたり最大で 12GB が利用可能である。SMX はキャッシュメモリを介してこのビデオメモリにアクセスする。メモリバンド幅は 300GB/s を越える GPU ボードがあり、デスクトップ用の CPU では高々数十 GB/s 程度であるから、CPU 計算に比べて高速アクセスが可能である。SP のクロック数は最近の機種では 1GHz 程度のもが多く、CPU のそれに比べると 1/3 程度である。各 SP は加算・乗算・積和・比較等の演算機能と、シフト・OR・AND などの論理演算が可能である。本研究では、NVIDIA 社のノート PC にマウントできる GPU (Geforce GTX880M) を使用した。

GPU 計算用のコードを作成するために、PGI 社の CUDA FORTRAN (Accelerator Fortran Ver.13.6 for Windows 64 bit) (The Portland Group, 2015) を使用した。CUDA FORTRAN によって、FSAP 方式の Dynamic link library

Fig. 2 Hierarchic structure in CUDA. (a) grid, (b) block, and (c) thread.

(DLL) を作成し、外部から呼び出すこととした。CUDA FORTRAN は三つの並列計算の粒度を持っており、それぞれはグリッド、ブロック、スレッドと呼ばれている。これらは階層状の構造になっており、計算を実行する最小の単位がスレッド (図 2(a))、スレッドの集合体がブロック (図 2(b))、ブロックの集合体がグリッド (図 2(c)) である。ここでは、映像化領域を一つのグリッドとし、その中で $B_x \times B_y \times B_z$ 個の三次元ブロックに分け、さらにブロックの中で $S_x \times S_y \times S_z$ 個スレッドを定義した。ターゲットボクセル一つに対して、一つのスレッドがビームフォーミングの計算を担当することにした。計算実行時に、グリッド上にカーネル (GPU に動作させるプログラム) を生成し、スレッドそれぞれがそのカーネルを担当する。GPU の各プロセッサは SIMD (Single instruction multiple data) 型のデータ処理を実行する。従って、GPU 計算では、大量のスレッドを生成することにより、この SIMD 計算を並列に行う。ここで、カーネルに分岐処理が多用されるとオーバーヘッドがかさみ並列計算の性能が発揮できない。また、GPU は CPU に比べてメモリアクセスが速いが、ビームフォーミング時には S_{ij} へのアクセスが律速になることが分かったので、ここではオフチップメモリへのアクセス回数を控えて、オンチップメモリを活用した。コーディング時には、これらの点に注意して FSAP 方式の DLL を作成した。

さて、FMC とは異なり FSAP では波形処理やアポダイゼーションを導入することができる (中畑他, 2010)。これらの波形処理を維持したまま高速化するには、波形記憶マトリクスのメモリ S_{ij} を波形処理後に VRAM 上で上書きするか、あるいはアポダイゼーションでは以下のように重み関数 W_{ij} をカーネル上で積算する。

$$F(\mathbf{x}[k, l], t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} S_{ij}(t - \Delta t_{kl}^{ij}). \quad (6)$$

なお、本研究で使用したマトリクスアレイ探触子は、比較的広帯域の超音波波形が得られたので特段の波形処理は導入していないが、上記のようにすることで GPU 計算時に高速性を損なうことなく、波形処理を導入したビームフォーミングが可能である。

2.3 FSAP 方式を実装した三次元欠陥映像化システムの構成

図 3 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。GPU 計算で用いるノート PC と計測装置を制御する PC は同じものである。ここでは、超音波を送受信するためにジャパンプローブ製のパルサー・レシーバ (JPR-300C) を用いた。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。素子の切り替えはマルチプレクサが行う。ここでは、高速リレー回路を導入したマルチプレクサ (ジャパンプローブ製, MUX-128D) をシステムに組み込んだ。レシーバで受信したデジタル信号は、USB 3.0 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、DLL を呼び出し、FSAP 方式のカーネルを実行する。GPU の VRAM にコピーされた波形記憶マトリクスのデータを用いて、GPU 計算によるビームフォーミングおよび欠陥像出力を行う。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。

Fig. 3 Hardware and software architecture of the proposed flaw reconstruction system: (left-hand side) signal acquisition system with fast multiplexer and (right-hand side) PC with CUDA-enabled GPU.

前節で述べたように、1 ボクセルあたりのビームフォーミング計算に使用する超音波送受信チャンネルの組み合わせは N^2 個であるので、メモリアクセスおよび加算の回数は N^2 である。映像化範囲の総ボクセル数は $K \times L \times M$ であるので、単純に見積もれば、欠陥像合成におけるメモリアクセス数は全部で $N^2 \times K \times L \times M$ 回になる。本研究では、パルサーレシーバ、マルチプレクサ等のハードウェアの制御、並びに、FSAP 方式によるビームフォーミングおよび欠陥像の三次元表示等のソフトウェアの制御をナショナルインスツルメンツ社の LabVIEW を用いて行っている。

3. 数値解析による FSAP 方式の検証

本研究で用いたマルチプレクサは最大で 128 ch までしか切り替えることができない。しかし、マトリクスアレイ探触子は 256 ch のものが市販されている。そこで、256 ch のマトリクスアレイ探触子を使用したときを想定し、FSAP 方式の性能を数値シミュレーションで検証してみる。

3.1 EFIT による大規模並列計算

ここでは、計測波形を模擬するために、EFIT を用いて散乱波を数値的に作成した。超音波領域の三次元波動場を解くためには、必然的に計算規模が大きくなるため、ここではマルチコア並列計算技術を導入した EFIT を用いることにした。EFIT の概要を簡単に述べる。三次元直交座標系の位置ベクトルを $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ とし、粒子速度を $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ 、応力を $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}, t)$ とする。運動方程式を領域 V (その境界は S) で積分すると次式を得る。

$$\int_V \rho(\mathbf{x}) \dot{v}_i(\mathbf{x}, t) dV(\mathbf{x}) = \int_S \tau_{ij}(\mathbf{x}, t) n_j(\mathbf{x}) dS(\mathbf{x}) + \int_V f_i(\mathbf{x}, t) dV(\mathbf{x}), \quad i = 1, 2, 3. \quad (7)$$

ここで、 $\dot{v}_i = \partial v_i / \partial t$ 、 ρ は密度、 $\mathbf{n}$ は S 上の法線ベクトル、 $\mathbf{f}$ は物体力である。また、応力と速度は、

$$\int_V \tau_{ij}(\mathbf{x}, t) dV(\mathbf{x}) = \int_S \lambda(\mathbf{x}) \delta_{ij} v_k(\mathbf{x}, t) n_k(\mathbf{x}) + \mu(\mathbf{x}) (v_i(\mathbf{x}, t) n_j(\mathbf{x}) + v_j(\mathbf{x}, t) n_i(\mathbf{x})) dS(\mathbf{x}), \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (8)$$

の構成関係を満足する。上式で、 λ と μ はラメ定数であり、これを用いて縦波音速は $c_P = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ 、横波音速は $c_S = \sqrt{\mu/\rho}$ と表される。EFIT では、 λ 、 μ 、 ρ は V 内で一定とし、 V を微小な立方体 Δx^3 (ボクセル) とし、式 (7) と (8) を空間方向に離散化する。離散化後の物理量の配置は、応力と速度場がずれて配置される、い

Fig. 4 Numerical flow models with (a) five drilled through-holes and (b) five cavities.

わゆるスタッガードグリッドとなる．時間軸については，中心差分で近似する．

$$\{v_i\}^h = \{v_i\}^{h-1} + \Delta t \{\dot{v}_i\}^{h-\frac{1}{2}}, \quad \{\tau_{ij}\}^{h+\frac{1}{2}} = \{\tau_{ij}\}^{h-\frac{1}{2}} + \Delta t \{\dot{\tau}_{ij}\}^h \quad (9)$$

ここで， h は整数， Δt は時間ステップ幅である．式 (9) より，EFIT では速度 $\mathbf{v}$ と応力 $\boldsymbol{\tau}$ を交互に時間更新することになり，陽的に解を求める．差分法と同様に，Courant 条件 $\Delta t < \frac{\Delta x}{\sqrt{3}c_p}$ を満足するように決める．

いま，50 mm × 50 mm × 35 mm のアルミニウム直方体 ($c_p = 6360$ m/s, $c_s = 3040$ m/s, $\rho = 2700$ kg/m³) を考える．図 5 のように 2MHz の中心周波数（最大帯域で 6MHz 程度までのスペクトルを有する）を持つ超音波を発振すると仮定すれば，このときの横波の最小波長は 0.5 mm となる．EFIT は最小波長の 1/10 程度の Δx を設定すれば，工学的に十分な精度で計算できる（中畑他, 2014）ので，本研究では $\Delta x = 0.05$ mm とした．また，Courant 条件より $\Delta t = 4.5$ ns とした．このとき，計算領域は $1000 \times 1000 \times 700 = 7$ 億要素となる．ここでは，京都大学学術情報メディアセンターのシステム A（Cray XE6）を用いて並列計算を行う．

3.2 数値解析結果

図 4 に示すような 2 種類のモデルを考える．図 4(a) は直径 2 mm の貫通横穴が深さ方向に互いにずれて 5 つ存在する欠陥モデル（横穴モデル）であり，図 4(b) は直径 2 mm の球形空洞が深さ，水平方向に互いにずれて 5 つ存在する欠陥モデル（内部空洞モデル）である．いずれも，欠陥は等間隔で並んでいる．50 mm × 50 mm × 35 mm のアルミニウム直方体の上部にマトリクスアレイ探触子（256 ch）を設置する．図 5(a) に示すように，素子サイズは 1.3 mm × 1.3 mm であり，素子ピッチは 1.4 mm の正方形配置（16 ch × 16 ch）とする．数値解析では，探触子が接触するボクセルの垂直応力グリッド (τ_{33}) を，図 5(b) の入射波形で励起することで超音波を発生させている．また，欠陥から散乱された波動がモデルの表面に到達したとき，同ボクセルの垂直応力の変化を受信波としている．ここでは，1 素子ずつ超音波を送受信し，縦波音速 ($c = c_p$) で FSAP 方式による映像化を行う．

図 6 に横穴モデルの映像化結果を示す．ここでは， R の値を最大値で正規化して表示している．図 6(a) は等値面を抽出してレンダリングしたもの ($0.76 \leq R \leq 0.83$) である．探触子設置面の真下にある領域では 5 つの形状が鮮明に識別できる．図 6(b) は x_2 方向の断面図（N-1 断面）を示しているが，欠陥と欠陥の間は， R が最大値の半分以下（信号レベルが -6 dB）であることがわかる．FSAP 方式は，全画素に集束ビームを送信しているのので，浅い横穴から深い横穴まで同じ検出感度で映像化されている．しかし，探触子設置面の真下以外の領域，すなわちモデルの側壁部近傍の横穴は R の値が小さいため，欠陥像が把握できない．これは，ステアリング角が大きくなる側壁付近の横穴では，超音波ビームの横穴における反射角が大きくなり，アレイ素子に超音波が返らないためで

Fig. 5 (a) Matrix array transducer (total element number N is 256, pitch is 1.4 mm, and element length is 1.35 mm). (b) Incident wave and its Fourier spectrum

Fig. 6 (a) 3-D image of drilled holes (iso-surface volume rendering, $0.76 \leq R \leq 0.83$). (b) Image of cross section N-1. (c) Image of cross section N-2.

Fig. 7 (a) 3-D image of cavities (iso-surface volume rendering, $0.7 \leq R \leq 0.76$). (b) Image of cross section N-3.

ある。なお、底面付近のアーチファクトは欠陥と裏面との超音波の多重反射に起因するものであると考える。

図 7(a) は、内部空洞モデルの等値面を抽出してレンダリングしたもの ($0.7 \leq R \leq 0.76$) である。図 7(b) の断面図からも、5つの球は識別できることがわかるが、モデル上方の空洞は再構成値 R が小さい。これは、マトリクスアレイ探触子から発振した超音波ビームのステアリング角が大きい場合、指向性が小さくなるためにエコーの受信強度が低下するためであると考えられる。

以上のシミュレーションの散乱波形は、京都大学スーパーコンピュータシステム (AMD Opteron, 2048 コア) を用いて Flat MPI による並列計算を行って得られたものである。EFIT 中で MPI 分割は三次元方向に行っており、各方向の軸部は 1 ボクセル列だけデータを通信している。1 シミュレーションあたり 3600 ステップの時間更新を行っており、計算時間は 25 分ほどである。従って、256 ch すべての波形を得るのに 256 シミュレーション、計 107 時間程度を要した。

4. 計測波形を用いた FSAP 方式の妥当性確認

4.1 マトリクスアレイ探触子

ここでは、図 8(a) に示すようなマトリクスアレイ探触子を用いて欠陥映像化実験を行った。このアレイ探触子はジャパンプローブ製で、振動素子を x_1 方向に 16 ch, x_2 方向に 16 ch 配列させており、素子ピッチは 0.6 mm, 素子サイズは 0.5 mm × 0.5 mm である。この探触子の 1 素子から超音波をアクリル底面に送信したときの底面からの反射波を図 8(b) に示す。フーリエスペクトルのピーク周波数は 3.3MHz である。なお、素子毎の送受信波形のばらつきは小さいことを確認している。このアレイ探触子は 256 ch を有するが、使用するマルチプレクサの最大制御 ch 数が 128 であるので、図 8(a) に示すような半分より下の部分を励振する。なお、アレイ探触子とアクリル被検体との間に接触溶媒としてグリセリンペースト (ソニーコート) を使用した。

4.2 アクリル被検体中の人工欠陥の映像化

本研究では、模擬欠陥として底面に 6 個の平底穴を有するアクリル被検体 ($c = 2270\text{m/s}$) を用いて計測実験を行った。使用したアクリル被検体の写真とその寸法を図 9 に示す。アクリル被検体の高さは 10 mm で、図 9(b) に示すように、ここでは 4 つの平底穴 (A1, B1, C1, C2) を映像化の対象とする。図 9(c) と (d) に示すように、平底穴の直径は、A1 が 0.8 mm, B1 が 2 mm, C1 と C2 が 3 mm である。平底穴の高さは、A1 が 5 mm, B1 が 4 mm, C1 と C2 が 3 mm である。また、A1, B1, C1 を横切る面を E-1 断面とし、C2 を横切る面を E-2 断面と呼ぶ。

図 10 に FSAP 方式によるアクリル A1, B1, C1 の映像化結果を示す。マトリクスアレイ探触子を図 10(a) の赤い枠の部分に設置した。探触子の中心 $\mathbf{x}^0$ が C1 の上に来るようにした。このとき、 x_1 方向に 16 ch, x_2 方向に 4 ch の計 64 ch を用いた。映像化領域は図 10(b) に示すような 10 mm × 8 mm × 5 mm とし、ターゲットボクセルの一辺は 0.1 mm とした。従って、 $K = 101$, $L = 81$, $M = 51$ となった。また、サンプリング間隔は 10ns とし、 $N_t = 1024$ 個のデータを保存した。再構成された R の値は最大値で正規化し、図 10(c) は $0.3 \leq |R| \leq 0.4$ で等値面表示したものである。三つの平底穴の天頂面が映像化できていることがわかる。図 10(d) は、 x_2 方向の断面図である。

Fig. 8 (a) Image of matrix array transducer with 256 elements. The element size and pitch are 0.5 mm and 0.6 mm, respectively. Here we can excite elements up to 128 channels. (b) A reflected waveform from the bottom surface of an acrylic material.

Fig. 9 Flat-bottomed holes A1, B1, C1, and C2 in an acrylic specimen.

Fig. 10 (a) Transducer location. (b) Imaging area. (c) 3-D image of A1, B1, and C1 (iso-surface volume rendering, $0.3 \leq |R| \leq 0.4$). (d) Image of cross section E-1.

数値解析結果（図 7）と同様に、ステアリング角が大きくなる A1 の天頂部は B1 や C1 に比べて受信エコー振幅が低下するため、再構成値 R が小さい。

4.3 励振素子数を変えた場合の空間分解能の検討

ここでは、FSAP 方式の水平方向と垂直方向の分解能を検証した。分解能の計算式としては、Fresnel 近似に基づく集束レンズの光差原理から導かれた理論式（Armstrong, 1965）を用いる。水平方向の分解能を r_h 、深さ方向の分解能を r_v 、入射波の波長を λ とする。図 11 に示すように、開口を $2a$ 、ビーム集束深さを d 、それらを見込む角を θ とすると、水平方向 r_h および垂直方向 r_v の分解能は、

$$r_h = \frac{\lambda}{2 \tan \theta} \quad r_v = \frac{\lambda}{\tan^2 \theta} \quad (10)$$

と表される。

ここでは、 x_2 方向に 4 ch 使用し（固定）、 x_1 方向の励振 ch 数を変えながら映像化を行った。すなわち、 x_1 方向に 8 ch 使用している場合は、 $N = 8 \times 4 = 32$ ch を駆動していることになる。いま、 x_1 方向の励振 ch 数を n とすると、 x_1 方向の開口は $2a = 0.6 \times (n - 1) + 0.5$ [mm] と表される。まず、A1 と B1 に着目し、これらの水平方向の分解能について検討を行った。図 12 の左側に示すようにアレイ探触子を設置し、 n を 4, 8, 12, 16 に変更した場合の E-1 断面を示す。図 12(a) は $n = 4$ の場合の結果であるが、水平方向に A1 と B1 が重なっていることがわかる。図 12(b)～(d) までは、A1 と B1 の天頂部が水平方向に互いに分離していることがわかる。4 ch 使用した場合、 $a = 1.15$ mm であり、ビーム深さ $d = 6$ mm とすると、 $\theta = 10.8^\circ$ となる。 $\lambda = 0.69$ mm であるので、式 (10) から $r_h = 1.8$ mm となる。同様の計算で、8 ch 励振で 0.88 mm、12 ch 励振で 0.58 mm、16 ch 励振で 0.43 mm となる。距離 1 mm で並んでいる A1 と B1 を 8 ch 以上使うことで分離できたので、FSAP 方式の分解能は理論式とほぼ同等であることがわかった。次に、C2 とアクリル底面を用いて垂直方向の分解能を調査した結果を図 13 に示す。図 13(a) と (b) では C2 の天頂部が再現されているが、本来は存在しない C2 の真下のアクリル底面が虚像として映像化されている。

図 13(c) と (d) では、天頂部およびアクリル底部が正しい位置に現れており、垂直方向に分離ができているとい

Fig. 11 Aperture $2a$ and focal depth d of an array transducer

Table 1 Elapse time for data acquisition, GPU computation, and 3-D image output.

N	32ch	64ch	96ch	128ch
Data acquisition	2.389s	8.976s	19.749s	34.723s
GPU computation	0.136s	0.529s	1.190s	2.020s
3-D image output	0.749s	0.711s	0.701s	0.725s
Total time	3.274s	10.216s	21.64s	37.468s

える．垂直方向の分解能の理論式は， $d = 7 \text{ mm}$ としたとき，4 ch の場合で $r_v = 25.6 \text{ mm}$ ，8 ch で 6.12 mm ，12 ch で 2.68 mm ，16 ch で 1.50 mm である．12 ch 以上使うことで C2 と底面を分離できたので，垂直方向の分解能も理論式とほぼ同等であることがわかった．

4.4 映像化時間

本研究で製作した映像化システムの三次元欠陥の映像化に要する時間について述べる．映像化範囲を K ， $L = 101$ ， $M = 51$ とし，励振素子数 N を 32，64，96，128 ch と変化させた．計測波形のサンプル数 N_t は 2300 である．GPU 計算によるビームフォーミングにおいて， $S_x = S_y = S_z = 8$ とし，1 ブロックあたりのスレッド数は 512 とした．また，ブロック数は $B_x = B_y = 13$ ， $B_z = 7$ としたので，GPU 計算で生成するスレッド数は 605,696 である．

波形取得 (S_{ij} のデータストア)，欠陥像の再構成に要する計算時間，三次元画像の出力時間を表 1 に示す．全体の合計時間は，32 ch 使用時に約 3.3 秒，64 ch では約 10.2 秒，96 ch では 21.64 秒，128 ch では 37.5 秒を要した．このうち波形取得が全体に占める割合は，32 ch の場合は 73%，64 素子では 88%，96 素子では 91%，128 素子では 93% である．GPU 計算に要する時間の割合は，いずれも数% 程度であり，128 ch でも最大 2 秒程度である．なお，図 10(c) の再構成では $N = 64\text{ch}$ を使用して映像化したが，波形のサンプリング数と再構成する画素数が表 1 の 64 ch の検討よりも少ないため，要した時間は 9.0 秒程度であった．現時点のシステムにおいて波形取得に多くの時間を要している．この部分がボトルネックであることがわかったので，今後は，マルチプレクサのスイッチング処理やデータ転送を工夫し，さらなる高速化が検討課題である．

5. 結 言

本研究では，これまでリニアアレイ探触子を用いた内部欠陥の二次元映像化に留まっていた FSAP 方式を拡張して，マトリクスアレイ探触子を用いた内部欠陥の三次元映像化を行うシステムを開発した．FSAP 方式は，送信素子を変えながら，各送受パターンで得られる波形を PC メモリ等に記憶する．すべてのパターンを取り終わった後，コンピュータ上で遅延処理を行い，ターゲット領域の各点に集束ビームを送る，ポスト処理を応用したビームフォーミング映像化である．ここでは，GPU 計算技術を導入し，ビームフォーミングの高速化を試みた．数値シミュレーションと計測実験の両側面から，マトリクスアレイ探触子を用いた場合の FSAP 方式の映像化の妥当性の検証を行った．三次元空間に分布する欠陥が精度良く映像化できることが数値解析および実験で明らかになった．ただ，ステアリング角度が大きい場合は受信エコーの振幅が小さくなるため，映像化における再構成値は小さくなることが示された．また，映像化に要する時間を測定したところ，ビームフォーミングのための GPU 計算時間は最大で 2 秒以内であったが，波形取得時間がそれ以上に多くかかり，現在のシステムでは本映像化手法の大部分を占めている．

Fig. 12 Investigation of horizontal resolution with images of flat-bottomed holes A1 and B1. Matrix array transducer excites array element with (a) $n = 4$, (b) $n = 8$, (c) $n = 12$, and (d) $n = 16$.

Fig. 13 Investigation of vertical resolution with images of flat-bottomed hole C1. Matrix array transducer with excites array element with (a) $n = 4$, (b) $n = 8$, (c) $n = 12$, and (d) $n = 16$.

謝 辞

本研究の一部は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（京都大学），および，革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの支援を受けました。

また，マトリクスアレイ探触子は，ジャパンプローブ株式会社から提供を受けました。同社の馬場比路志様のご協力に感謝いたします。

文 献

- Armstrong, J. A., Fresnel holograms: their imaging properties and aberrations, *IBM Journal of Research and Development*, Vol.9, No.3 (1965), pp.171–178.
- Bernus, L., Bulavinov, A., Dalichow, M., Joneit, D., Kroening, M. and Reddy, K. M., Sampling phased array - a new technique for signal processing and ultrasonic imaging, *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol.48, No.9 (2006), pp.545–549.
- Drinkwater, B. W. and Wilcox, P. D., Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review, *NDT & E International*, Vol.39 (2006), pp.525–541.
- Fellinger, P., Marklein, R., Langenberg, K. J. and Klaholz, S., Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT –elastodynamic finite integration technique, *Wave Motion*, Vol.21 (1995), pp.47–66.
- Holmes, C., Drinkwater, B. W. and Wilcox, P. D., Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation, *NDT & E International*, Vol.38 (2005), pp.701–711.
- Kitahara, M., Nakahata, K. and Hirose, S., Elastodynamic inversion for shape reconstruction and type classification of flaws, *Wave Motion*, Vol.36 (2002), pp.443–455.
- 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, Vol.59, No.6 (2010), pp.277–283.
- 中畑和之, 矢野智之, 川村郡, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一, 骨材による多重散乱を考慮したコンクリート中の超音波の3次元伝搬シミュレーションと実験波形による検証, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2 (2014), pp.I.203-I.211.
- Njiki, M., Elouardi, A., Bouaziz, S., Casula, O. and Roy, O., A real-time implementation of the total focusing method for rapid and precise diagnostic in non destructive evaluation, *Proceedings of the 2013 IEEE 24th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors* (2013), pp.245–248.
- Olbrish, K.D. and Shung, K.K., Physical apodization of ultrasonic arrays, *Proceedings of SPIE*, Vol.3037 (1997), pp.196–205.
- Romero-Laorden, D., Villazón-Terrazas, J., Martínez-Graullera, O. and Ibáñez, A., *Advancements and Breakthroughs in Ultrasound Imaging*, Ch. Strategies for Hardware Reduction on the Design of Portable Ultrasound Imaging Systems (2013), Intech.
- Rougeron, G., Lambert, J., Iakovleva, E., Lacassagne, L. and Dominguez, N., Implementation of a GPU accelerated total focusing reconstruction method within CIVA software, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, AIP Conference Proceedings, Vol.1581 (2014), pp.1983–1990.
- Schmerr, L. W., *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation* (1998), Plenum Press.
- Sutcliffe, M., Weston, M., Dutton, B. and Cooper, I., Real-time full matrix capture with auto-focusing of known geometry through dual layered media, *Proceedings of the NDT 2012 Conference in British Institute of Nondestructive Testing* (2012).
- The Portland Group, Inc., PGI CUDA FORTRAN Compiler,
<<http://www.pgroup.com/resources/cudafortan.htm>> (参照日 2015 年 8 月 25 日).

References

- Armstrong, J. A., Fresnel holograms: their imaging properties and aberrations, *IBM Journal of Research and Development*, Vol.9, No.3 (1965), pp.171–178.
- Bernus, L., Bulavinov, A., Dalichow, M., Joneit, D., Kroening, M. and Reddy, K. M., Sampling phased array - a new technique for signal processing and ultrasonic imaging, *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol.48, No.9 (2006), pp.545–549.
- Drinkwater, B. W. and Wilcox, P. D., Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review, *NDT & E International*, Vol.39 (2006), pp.525–541.
- Fellinger, P., Marklein, R., Langenberg, K. J. and Klaholz, S., Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT –elastodynamic finite integration technique, *Wave Motion*, Vol.21 (1995), pp.47–66.

- Holmes, C., Drinkwater, B. W. and Wilcox, P. D., Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation, *NDT & E International*, Vol.38 (2005), pp.701–711.
- Kitahara, M., Nakahata, K. and Hirose, S., Elastodynamic inversion for shape reconstruction and type classification of flaws, *Wave Motion*, Vol.36 (2002), pp.443–455.
- Nakahata, K., Hirata, M. and Hirose, S., Flaw reconstruction from scattering amplitude using full waveforms sampling and processing, *Journal of JSNDI*, Vol.59, No.6 (2010), pp.277–283 (in Japanese).
- Nakahata, K., Yano, T., Kawamura, G., Saitoh, T. and Hirose, S., Three dimensional simulation of ultrasonic multiple scattering by distributed aggregates in concrete and its validation with measured signals, *Journal of JSCE (Division A2)*, Vol.70, No.2 (2014), pp.I.203-I.211 (in Japanese).
- Njiki, M., Elouardi, A., Bouaziz, S., Casula, O. and Roy, O., A real-time implementation of the total focusing method for rapid and precise diagnostic in non destructive evaluation, *Proceedings of the 2013 IEEE 24th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors* (2013), pp.245–248.
- Olbrish, K.D. and Shung, K.K., Physical apodization of ultrasonic arrays, *Proceedings of SPIE*, Vol.3037 (1997), pp.196–205.
- Romero-Laorden, D., Villazón-Terrazas, J., Martínez-Graullera, O. and Ibáñez, A., *Advancements and Breakthroughs in Ultrasound Imaging*, Ch. Strategies for Hardware Reduction on the Design of Portable Ultrasound Imaging Systems (2013), Intech.
- Rougeron, G., Lambert, J., Iakovleva, E., Lacassagne, L. and Dominguez, N., Implementation of a GPU accelerated total focusing reconstruction method within CIVA software, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, AIP Conference Proceedings, Vol.1581 (2014), pp.1983–1990.
- Schmerr, L. W., *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation* (1998), Plenum Press.
- Sutcliffe, M., Weston, M., Dutton, B. and Cooper, I., Real-time full matrix capture with auto-focusing of known geometry through dual layered media, *Proceedings of the NDT 2012 Conference in British Institute of Nondestructive Testing* (2012).
- The Portland Group, Inc., PGI CUDA FORTRAN Compiler,
<<http://www.pgroup.com/resources/cudafortran.htm>> (accessed on 26 August, 2015).