

FSAP 方式による超音波イメージングの高速化と コンクリート非破壊検査への応用

愛媛大学大学院 学生員 ○堀口貴志, 川村 郡
愛媛大学大学院 正会員 岡崎慎一郎, 中畑和之

1. はじめに

アレイ探触子が工業分野における超音波探傷法で普及しつつある。現行では、アレイ探触子を用いて、リニアスキャンやセクタスキャンなどの方法¹⁾によって材料内部の欠陥が映像化されている。これらの方法は遅延回路を搭載した電子スキャン装置が必要であり、一般的に高価である。一方、著者らは電子スキャン装置を必要としない映像化手法である全波形サンプリング処理 (Full-waveform Sampling and Processing, 以後 FSAP) 方式²⁾ を提案している。FSAP 方式は、アレイ探触子の振動素子から個別に超音波の送受信を行い、得られた波形を PC 上のメモリにストアし、全ての波形パターンが得られた後に時間遅延 (ディレイ) を考慮して集束ビームを作成する手法である。ここでは FSAP 方式の現場への応用を意図して、FSAP 方式に GPGPU (GPU による汎目的計算) を導入し、演算を超並列処理することで高速化を試みた。GPGPU を実装した FSAP 方式を用いて、コンクリート供試体中の欠陥の映像化の検証結果を示す。

2. 全波形サンプリング処理方式の高速化

FSAP 方式の詳細については論文²⁾ を参照して頂くこととし、以下に GPGPU を導入した FSAP 方式による欠陥再構成の概要を簡単に述べる。FSAP 方式は、従来のように電子スキャン装置で集束ビームを制御するのではなく、PC のメモリ上に超音波波形をストレージし、そのデータを元に集束ビームを合成する方法である。図-1 に示すように、 i 番目の素子から送信され、 j 番目の素子で受信された欠陥エコー $M_{ij}(t)$ を PC のメインメモリに波形記憶マトリクスとして保存する。 i と j の組み合わせを変えながら、各素子で超音波を送受信していくと、波形記憶マトリクスの全ての要素が埋まることになる。アレイ探触子の素子の総数が N 個ならば、組み合わせは N^2 パターン存在する。この中から必要な波形データを選択して PC メモリ上でディレイを設定し、映像化領域の 1 画素にビームが集束するように波形を合成する。

図-2(a) に波形取得から欠陥再構成までの流れを示す。まずメインメモリの内容を GPU (デバイスメモリ) へコピーする。著者等は波形処理としてデコンボ

リューション処理を提案しているが、この処理は主としてフーリエ変換が時間を占める。波形記憶マトリクスの全パターンに FFT と逆 FFT を 1 度ずつ実行するので、全部で $2 \times N^2$ 回である。ここでは CUDA ライブラリの CUFFT を用いて高速に実行している。

次に、映像化したい部分の画素 (x 方向に k 番目、 y 方向に l 番目に位置する画素) とアレイ探触子の中心までの縦波の伝搬時間 T_{kl}^0 (以下、基本伝搬時間とよぶ) を計算する。送信素子および受信素子から画素番号 $[k, l]$ までの伝搬時間と基本伝搬時間との差から、送信素子と受信素子におけるディレイ $\Delta T_{kl}^i, \Delta T_{kl}^j$ が求められる。これらの和からトータルのディレイ $\Delta T_{kl}^{ij} = \Delta T_{kl}^i + \Delta T_{kl}^j$ が求まる。 $M_{ij}(t)$ から ΔT_{kl}^{ij} だけシフトさせ、それらを重ね合わせる。

$$F_{kl}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij}(t + \Delta T_{kl}^{ij}) \quad (1)$$

ここで、 x 方向に K 個、 y 方向に L 個の画素があるとするれば、全部で $N^2 \times K \times L$ 回の演算が必要になる。図-2(b) に示すように、CUDA を用いた GPU 計算では映像化領域を 2 次元ブロックに分ける。ブロックの中でスレッドが定義され、全てのスレッドでは SIMD 演算 (全て同じ命令を同時に実行する) が行われる。ここでは、1 つのスレッドが 1 つの画素の計算を担当する。最終的に、各画素で基本伝搬時間に相当する振幅値を抽出し、色をつけて出力する。

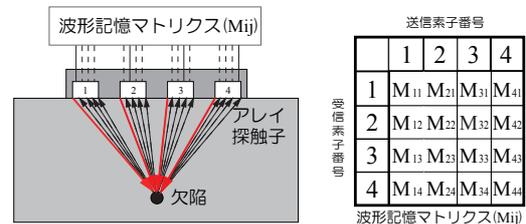


図-1 FSAP 方式による 4 素子の場合の計測波形の記録

3. 高速化性能の検証

1 ブロック中の x と y 方向のスレッド数 (S_x, S_y) を変化させて、映像化に要する時間を調べた。この結果、 $S_x=16, S_y=32$ の時、最も映像化に要する時間が短いことがわかった。このスレッドパターンを用いて、

キーワード： 超音波映像化, 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式, GPGPU, 非破壊検査

連絡先 〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3, E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp

総素子数 $N=64$ 個, 映像化範囲を $40\text{mm} \times 40\text{mm}$, 画素数が $K=400, L=400$ で映像化を行ったときの時間は 0.27s であった. 同じ映像化範囲・画素数を CPU で計算した場合は約 46s であったので, 約 170 倍の高速化が得られた. 図-3 に画素数を増加させた時の GPU と CPU の速度の比較を示す. 画素数が増えると, CPU 計算による映像化時間の増大に比べて GPU 計算はあまり変化しないことがわかる.

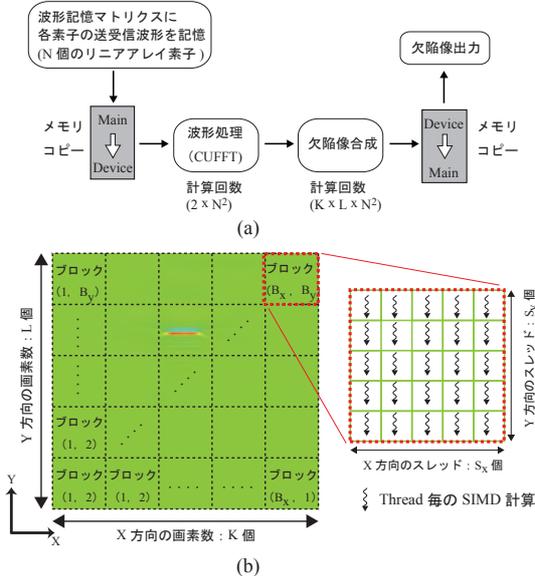


図-2 GPU 計算を導入した FSAP 方式のフロー (a) と CUDA におけるブロックとスレッド (b)

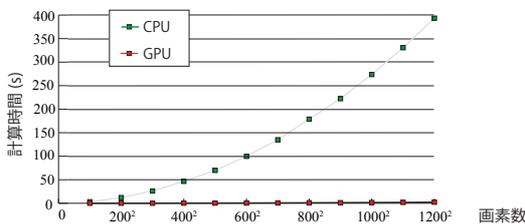


図-3 画素数を変化させた場合の GPU と CPU による計算時間の比較

4. コンクリート中の人工欠陥の映像化結果

低周波アレイ探触子 (公称中心周波数 $400, 200\text{kHz}$) を用いたコンクリート (骨材の最大粒径が 10mm , 骨材率は 50%) の内部欠陥の映像化結果を示す. なお, 今回使用した周波数帯域において波動分散による影響は顕著ではないことを事前に確認している.

中心周波数 400kHz のアレイ探触子 (素子ピッチは 5mm) を用いて, 図-4 の下側左に示すようなコンクリート供試体中の欠陥 (スリット) を映像化した結果を同図の下側右に示す. アレイ探触子は, コンクリート中の欠陥の真上になるように設置した. 欠陥深さは探触子設置面から真下に約 80mm である. 超音波の送受信に用いた素子数は 24 で, 欠陥を含む $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ の範囲を映像化した. 参考までに図-4 の上に素子番号 12 で超音波を送受信したときの波形を示す. $35\mu\text{s}$ 付近の波形が欠陥からのエコーに相当する. この結果から, FSAP 方式によって欠陥の位置およびその

形状を精度よく映像化できることがわかる.

中心周波数 200kHz のアレイ探触子 (素子ピッチは 10mm) を用いて, 図-5 の下側左のコンクリート供試体中の欠陥を映像化した結果を同図の下側右に示す. アレイ探触子の設置位置は前節と同様にし, 欠陥の深さは探触子設置面から深さ約 150mm である. 超音波の送受信に用いた素子数は 16 で, 欠陥を含む $70\text{mm} \times 70\text{mm}$ の範囲を映像化した. 図-4 の結果と比べると, 超音波の波長が大きいため映像化結果は若干ぼやけているが, スリットの位置や大きさは確認できる. 図-5 の上に素子番号 8 で超音波を送受信したときの波形を示す. 欠陥からのエコーは $70\mu\text{s}$ 付近に現れるはずであるが, S/N 比が小さく, エコーを識別することは困難である. 骨材や微小空隙からの散乱波成分はランダムノイズに相当するが, 各送受信方向からの波形を重ね合わせる FSAP 方式では, ノイズが平均化されることで, 欠陥部からの散乱波成分が相対的に高くなるため, 欠陥の再構成が可能であると考えられる.

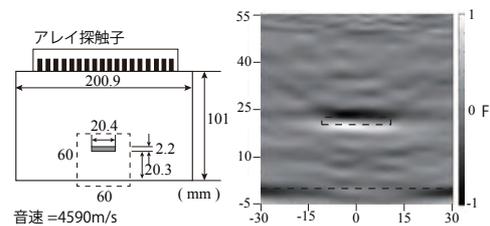
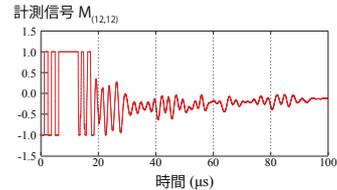


図-4 400kHz アレイ探触子を用いたコンクリート中のスリット欠陥の映像化結果

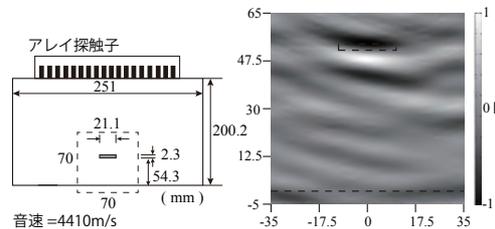
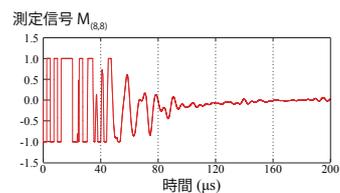


図-5 200kHz アレイ探触子を用いたコンクリート中のスリット欠陥の映像化結果

参考文献

- 1) 廣瀬壯一監修: 特集 フェーズドアレイ超音波探傷, 非破壊検査, Vol.62, No.2, pp.75-101, 2013.
- 2) 中畑和之, 平田正憲, 廣瀬壯一: 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, pp.277-283, 2010.