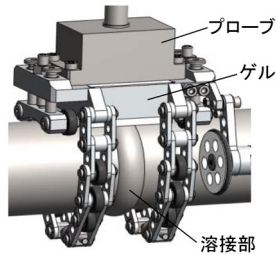
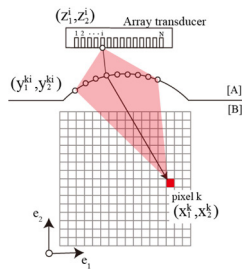


複雑な形状から製品内部をイメージングする アダプティブ超音波探傷技術

Adaptive UT Imaging Technology for Inside of Product with Complicated Shape Surface



林 恭平*¹
Kyohei Hayashi

青木 清隆*³
Kiyotaka Aoki

上林 正和*²
Masakazu Kamibayashi

中畑 和之*⁴
Kazuyuki Nakahata

各種製品の検査コスト低減や工期短縮の観点から、高効率検査技術の確立が望まれている。しかしながら、溶接による凹凸等の複雑表面形状を有する製品の内部検査では、表面研削やパテ盛り等超音波探傷検査のための表面平滑化処理が必要であり、無駄なコスト・時間を要していた。今回、複雑表面から平滑処理が不要な超音波信号処理技術を導入し、製品内部の微小欠陥をリアルタイムにイメージング可能とする検査技術を開発した。

1. はじめに

火力・原子力発電プラントや化学プラントを始めとした当社製品は、過酷な環境状態での運用が必要となる場合が多く、経年的な劣化に伴う各設備の損傷が懸念される。そのため、日常の保守点検に加え、各設備の損傷形態を十分に考慮した損傷検出精度の高い検査を行うことが重要である。一方で、近年は電力の自由化等に伴う保守費用削減の観点から、検査コスト低減や工期短縮のニーズが高まっており、より合理的な検査が求められている。そこで、溶接による凹凸等の複雑形状表面を有する製品について、表面研削など検査に関わる付帯工事を削減し、無駄なコストの削減や工期の短縮を目指した高精度超音波探傷ロジックを開発した。本報では、その技術の概要及び開発状況を紹介する。

2. 従来の超音波探傷技術の課題

超音波探傷技術は、製品内部を非破壊で検査する手法として広く用いられ、製品の表面に探触子を直接接触して内部に超音波を伝搬させ、受信した欠陥からの散乱波から欠陥の位置や大きさを推定する手法である。当社では、高精度の検査技術としてフェーズドアレイ超音波探傷技術⁽¹⁾を開発し、各種製品の検査工事へ適用している。フェーズドアレイ探傷に用いる探触子は、独立に励振できる微小な振動素子が複数個、アレイ状に配置された構造である。このため、各素子に適切な時間遅延(ディレイ)を与えて励振させることにより、超音波の伝搬角度を変えたり(ステアリング)、集束点を設定したり(フォーカシング)することが可能である。また、超音波ビームを制御・送受信して得られた情報から、製品内部の欠陥をイメージングできる。

しかしながら、溶接による凹凸等の複雑形状表面から超音波探傷検査する場合、探触子を接触させるための表面平滑化、すなわち表面研削やパテ盛り等の付帯工事が必要であり、無駄なコスト・時間を要する。このような凹凸を有する表面から直接検査できれば、表面研削など検査に関わる付帯工事を削減でき、無駄なコスト排除や工期短縮が可能となる。

なお、複雑な表面形状を有する溶接金属中を検査するためにアダプティブフェーズドアレイ超音波探傷技術⁽²⁾を開発しており、任意の表面形状(表面凹凸)を認識し、その情報に基づいて

*1 総合研究所 サービス技術部

*3 総合研究所 サービス技術部 グループ長

*2 総合研究所 サービス技術部 工博

*4 愛媛大学大学院 理工学研究科 教授 工博

超音波の励振条件を補正して内部の検査(イメージング)を行うものであるが、本技術ではフェーズドアレイ法を用いた表面形状把握と、表面形状計測結果をベースとした各素子の遅延時間再計算という2回探傷と表面形状に基づく遅延時間計算処理に時間を要することが課題であった。

そこで今回、全波形サンプリング処理技術を活用することで一度の探傷で複雑表面からの超音波信号を高精度化することに加えて、GPGPU (General Purpose computing on Graphics Processing Units) の高速並列計算処理技術を用いた、高速・高精度のアダプティブ超音波探傷技術を開発した。

3. アダプティブ超音波探傷技術の概要

3.1 波形処理技術について

新たな超音波波形処理技術として、FMC/TFM (Full Matrix Capture/Total Focusing Method) 技術を用いた。FMC/TFM 技術は、各素子で送受信した全波形から新たに波形を再合成し、空間分解能を高めた探傷画像を構築するイメージング技術である。本技術は、全波形サンプリング処理(FSAP: Full-waveforms Sampling And Processing)とも呼ばれる⁽³⁾。フェーズドアレイ技術はハードウェア上で遅延制御して超音波ビームを制御・送信して画像化するが、FMC/TFM 技術では PC 上でのポスト処理によって時間遅延を考慮しながら仮想的な超音波集束ビームを作成し、画像化する。図1に FMC/TFM 技術とフェーズドアレイ技術の比較を示す。FMC/TFM は、フェーズドアレイと比較して空間分解能が高く、且つ SN 比に優れた探傷画像が得られる。さらに、多点計測による受信波形処理により、あらゆる方向に伝搬した仮想の波から画像構築するため、探傷面(探触子面)に対して傾いたスリットや曲面も検出感度が低下することなく良好なイメージングが可能である。また、アレイ探触子の全素子の波形情報を保有しているため、任意に音速や遅延時間を調整した画像化を実現できる。本技術は全波形データを扱うため膨大な計算を実行する必要があるが、これまで処理時間の観点から実機検査への適用が困難であったが、近年は PC のデータ処理技術の向上や GPGPU の適用によって実用レベルに到達しつつある。

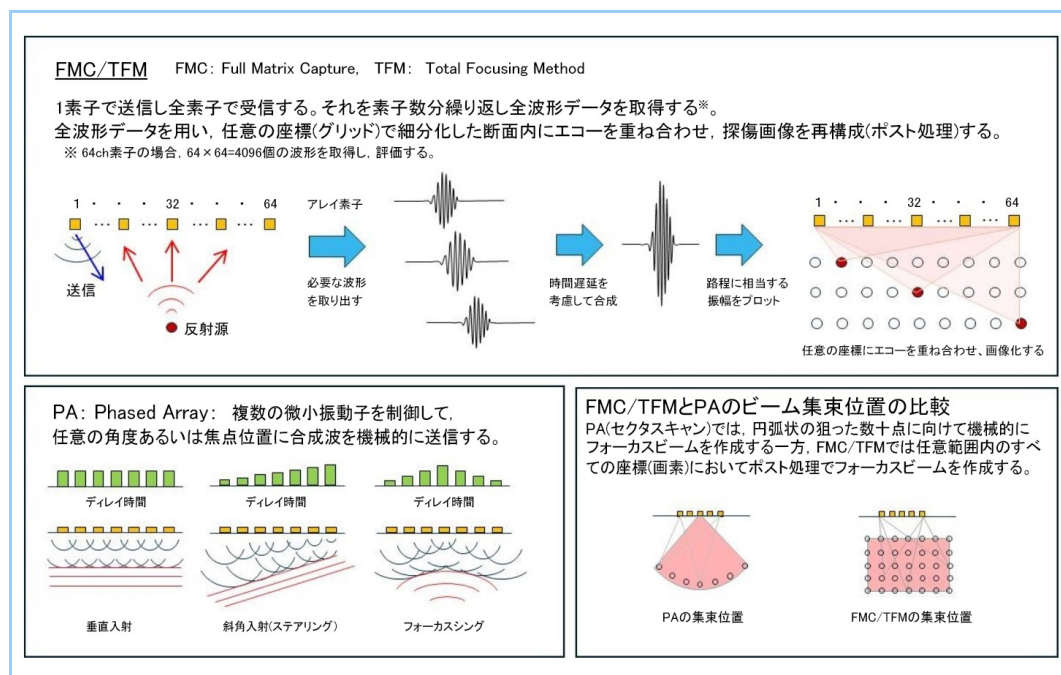


図1 FMC/TFM 超音波探傷技術とフェーズドアレイ(PA)探傷技術の比較

3.2 アダプティブ超音波探傷ロジックについて

超音波探傷では、探触子接触面と製品表面の間に効率よく超音波を伝達させるための水やゲルなどの媒質を介するため、凹凸表面形状から探傷する場合についても同様に考える。このとき、超音波は媒質-製品の2種類の材料界面で一部は透過し、一部は反射する。製品内部に透過した超音波は界面でスネルの法則を満足するように屈折し、同時にモード変換によって縦波だけではなく横波も発生する。これらの波は製品内部の欠陥部で散乱するため、その散乱波を検出することで欠陥の検出が可能となるが、凹凸表面形状の場合は一様形状表面の場合と異なり任意界面での反射・屈折現象を考慮しなければ、製品内部のイメージングができない。

そこで本研究では、一度取得した FMC データを用いて2段階の合成処理・画像化(TFM)の実行により任意凹凸表面から製品内部を映像化した。第1ステップとして、通常の FMC/TFM 方式を用いて表面形状を映像化し、その画像データから表面形状の座標を求める。第2ステップでは、表面形状に応じて超音波が屈折することを考慮し、製品内部の伝搬経路を推定する。ここで、材料表面の各点でスネルの法則を満足し、対象画素までの経路を高速に計算するロジックを実装し、GPGPU 計算による内部欠陥の高速映像化を試みた。

3.3 表面形状の推定ロジック

図2に表面形状認識結果を示す。初めに、探触子を製品表面上の任意の位置に配置し、FMC/TFM 処理して一次イメージングを取得する。このイメージング像は画素で構成され、各画素はビーム路程とエコー高さの情報を持つ。次に、画素の任意の列毎にエコー高さの閾値を超え、且つ最大エコー強度を有する画素を形状境界点と仮定して抽出する。本処理では、水平方向(振動素子の配列方向)に任意のピッチで同時並行処理し、表面形状を点群データとして取得する。このように、プロセスを単純化して並列処理可能とし、さらに GPGPU 計算によって高速処理を実現した。

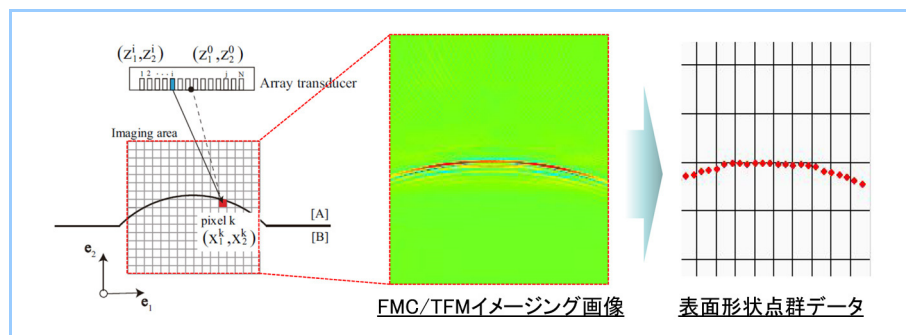


図2 超音波探傷による表面形状マッピング技術

3.4 フェルマー則を活用した波形再合成による内部イメージング

図3に曲面形状表面の製品内部のイメージング結果を示す。音速 c_A の媒質(ここでは水やゲル中の音速)から音速 c_B (製品素材の音速)の製品内部に超音波が入射する際、媒質-製品表面界面で超音波が屈折するが、素子から製品内部の解析対象位置までの伝搬経路は曲面の曲率によって変化する。伝播経路はスネルの法則にて一義に決定するが、ここではフェルマー則を活用し、超音波伝播時間が最小となるような伝播経路を導出することとした。フェルマー則とは、光や超音波などの波が2点を伝播するとき所要時間が最短になる経路を辿るという原理であり、この経路はスネルの屈折の法則を満足する。各画素までの伝播経路が計算できれば、各素子のディレイを考慮して画素までの集束ビームを合成し、製品内部を映像化できる。以上のように、イメージングのためには数ステップの処理を連続的に実施することになるが、一連の処理に必要な波形の取得は1度のみでよいと、探傷の高速化を実現できる。

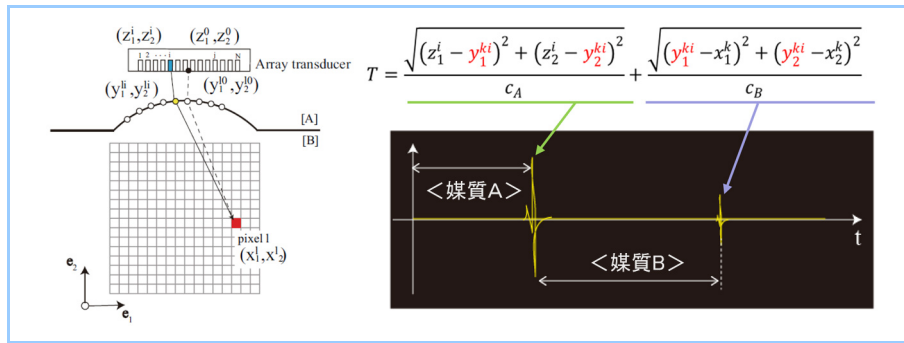


図3 凹凸による超音波屈折を補完する演算技術

3.5 アダプティブ超音波探傷ソフトウェアの構築

3.2～3.4項で述べた波形処理プログラムを組み入れたソフトウェアを試作した。本ソフトの計算では GPGPU 並列計算を導入し、図4(a) に示すシステムにて一連の処理を高速化した。図4(b)に従来の CPU 計算の処理時間と GPGPU 並列計算処理時間とを比較して示す。CPU は Intel 社 Core i7-6700K のシングルコア、GPGPU 計算は NVIDIA 社の GeForce GTX970 である。描画 する画素数が増加するほど計算時間は線形に増加するが、GPGPU 計算はその傾きが極めて 小さく、CPU 計算に対して 10 倍以上の高速化を実現した。なお、一般的なチューブ溶接部内部(40 mm×50 mm範囲)の詳細イメージングに十分な 20 万画素でも、1秒以内で映像化が可能であった。

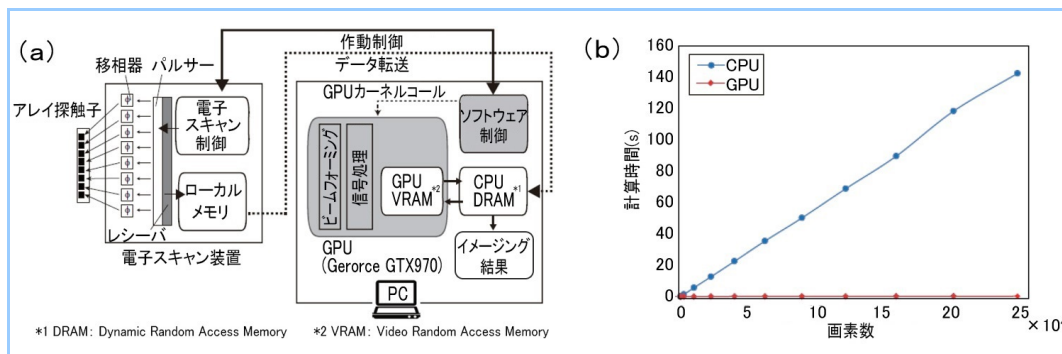


図4 (a) アダプティブ超音波探傷システム, (b) 本システムによる描画計算処理時間

3.6 アダプティブ超音波探傷システムの構築

これまでに述べた波形処理ロジックによる複雑形状表面からの超音波探傷を実施するには、一般的な FMC/TFM 超音波探傷を実施する装置構成に加え、製品表面とアレイ探触子間を適当な媒質で満たし、効率的な超音波の送受信を実現するための環境が必要となる。従来のアダプティブフェーズドアレイ探傷技術では、アレイ探触子と製品表面を水没させて探傷する局部水浸法を採用していたが、構造や作業上の制約によって適用できない場合も考えられる。そこで、超音波伝播媒質として水と同等の超音波伝搬特性を有する超音波透過ゲルを適用した。このゲルは、製品表面へ強く押し付けでも壊れることなく、凹凸表面へのなじみ性も高い。なお、ゲル上に配置したアレイ探触子を安定保持しながら凹凸部を走査するスキャナも開発した。

3.7 サンプルによる検証

図5(a)に示す溶接余盛を模倣した凸部(高さ 10mm, 幅 30mm)を有する試験体を用いて検証試験を実施した。試験体内部には、模擬欠陥として直径 2mm の円形の貫通横穴(SDH: Side Drill Hole)を5つ加工した。開発した波形処理ロジックによる表面形状の推定結果とレーザ表面測定器による測定結果とを比較評価したところ、表面形状推定誤差は最大 100 μm であった。試験体内部をイメージングした結果を図5(b)に示す。5つの SDH を分離してイメージングできており、位置推定精度: ±0.5mm 以内を満足した。なお、イメージングに要した時間は 1 秒以内/断面であり、リアルタイム検査の実現を可能にした。

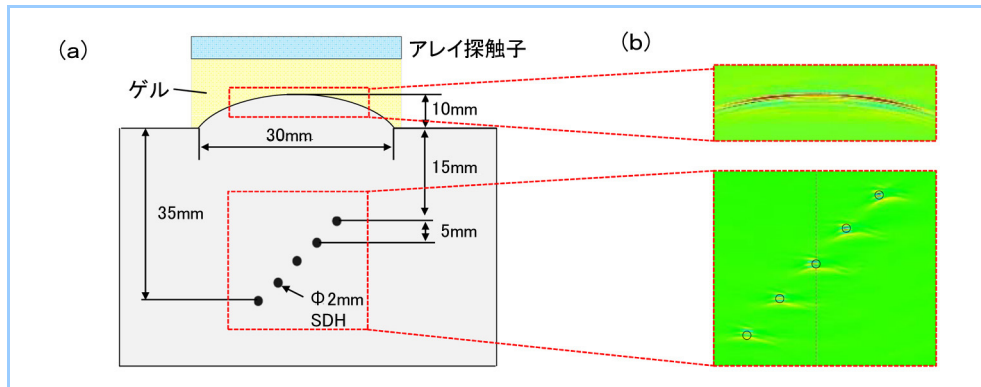


図5 (a) 検証用試験片, (b) アダプティブ超音波探傷結果

4. まとめ

溶接余盛などの複雑な凹凸表面からリアルタイムで製品内部の微小横穴を検出可能な高速アダプティブ超音波探傷法の基礎技術を確認した。本技術では、実用的な処理時間(1秒以内/断面)で内部欠陥の超音波探傷が可能となり、検査コスト低減・工期短縮への貢献が期待される。本技術については、今後実機検証試験を推進しながらさらに高度化を図り、当社プラント設備の稼働率向上へ寄与していく。

参考文献

- (1) 浦田幹康ほか, 火力発電プラントの非破壊検査技術, 三菱重工技報, Vol.52 No.4 (2015) p.36~40
- (2) 木村是ほか, 原子力発電所の信頼性を支える高度フェーズドアレイ技術, 三菱重工技報, Vol.44 No.1 (2007) p.24~26
- (3) 中畑和之ほか, 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) p.277-283