



## 特集記事・4

ここまできた鉄鋼の計測・制御・システム技術

# アレイセンサによる高精度超音波探傷技術

Advanced High Precision Ultrasonic Testing using Array Sensor

上田佳央  
Yoshio Ueda

住友金属工業(株) 総合技術研究所  
加工・計測技術研究開発部  
主任研究員

## 1 はじめに

品質管理や製品の出荷前の品質保証を目的として、鋼板や鋼管あるいは溶接部など様々な鉄鋼製品に超音波探傷方法が広く適用されている。基本原理を図1に示す。送信器からパルス状の高電圧が超音波センサ内の振動子(圧電素子)に印加されると数MHzの周波数の機械振動すなわち超音波が発生し、水などの媒質を介して被検査材中に伝搬する。被検査材内部の欠陥等の境界面で超音波が反射され逆方向に伝搬し、その一部が超音波センサに到達する。この到達した超音波が振動子で機械振動から電気信号に変換され、受信器で増幅された波形がモニタに表示される。波形の時間軸上(距離、深さ等に相当)の振幅の大小を評価することで、欠陥の位置や大きさ等を評価することができる。

医療機関などで胎児や内臓をモニタする“エコー”も基本的には同一の原理であり、人体へ適用可能な事からもわかるように、安全でかつ迅速に物体内部を評価できるところが利点の一つである。

鉄鋼のインラインで適用される超音波探傷では、鋼板や

シームレス鋼管、条鋼など製品のほぼ全域を所定の時間内に検査することが求められる。年々、品質保証精度や処理能率の要求が高まるにつれ、近代的な探傷設備では、単一センサの多数配置や、製品あるいは超音波センサの機械的な高速移動・回転機構部の開発などによって、要求仕様が満足されてきた。図2には棒鋼のインライン探傷方法の動作例を示す。

一方で、医療や原子力設備の検査における超音波検査技術および装置においては、鉄鋼のインライン検査ほど検査速度が重要視されないため、多大な演算時間を必要とするような高度な信号処理技術や装置の導入が受け入れられやすい環境にあり、このような背景を下に、医療分野や原子力分野ではアレイセンサを用いた様々な高度な検査技術が先行して発達してきた。

ところが、ここ十数年の半導体の性能や製造技術の飛躍的な進歩によって、高性能で高速かつ比較的安価な電子デバイスや信号処理装置の普及が進み、鉄鋼のインライン検査などの一般工業向けの超音波探傷装置においても、アレイセンサを用いた高度な探傷技術が開発・実用化されつつある。

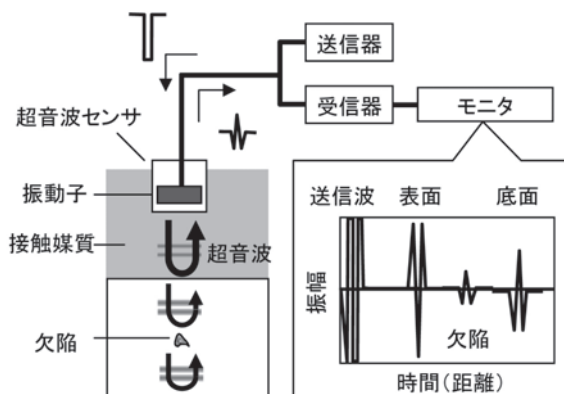


図1 超音波探傷の概要

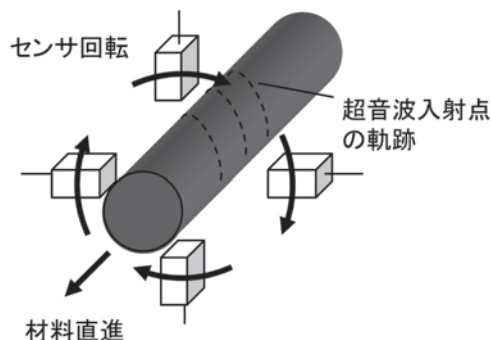


図2 棒鋼のインライン探傷の動作例

ここでは、アレイセンサを活用した様々な信号処理の原理やそれらを応用した鉄鋼業における実用化・開発事例等について紹介する。

## 2 アレイセンサとアレイ探傷装置

### 2.1 アレイセンサ

アレイセンサとは比較的微小な素子を高密度で規則的に配列し一つの筐体の実装したもので、各素子に接続された信号線が束ねられ、装置側と簡便に接続できるように多接点のコネクタが取り付けられているのが一般的である(図3)。素子数は32~128のものが普及している。

素子の材質も、従来はPZT(ジルコンチタン酸鉛)に代表されるセラミック系が主流であったが、屈曲性に富んだPZTとポリマー材の複合構造体(コンポジット材)が登場したことで加工性が向上し、様々な形態のアレイセンサが製造が容易になった(図4)。また、受信感度が高い特徴を併せ持つため、素子寸法の縮小による感度低下を補う効果もあり、アレイセンサではコンポジット材が多く使われている。

### 2.2 アレイ探傷装置

アレイセンサを駆動する代表的な探傷装置のブロック図を図5に示す。

アレイセンサの各素子は、送信側ではパルス発信機と受信



図3 アレイセンサと単一センサ

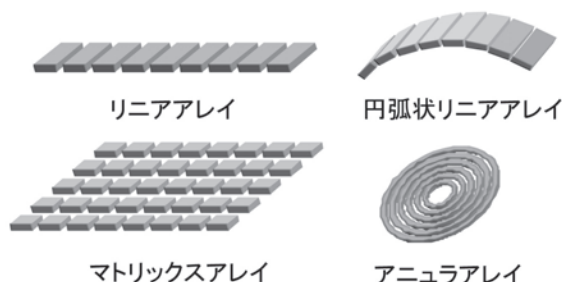


図4 様々な形態のアレイセンサ

側ではアンプ・A/D変換器とがそれぞれ接続されており、同期信号をトリガとして、遅延回路で設定された遅延時間のパターンによって、各素子毎に送信および受信処理が行われる。また、一般的にはコスト的な理由等で、アレイセンサ全素子数に対して発信機やアンプ・A/D変換器の数が抑えられており、マルチプレクサによって電子的すなわち高速にアクティブな素子あるいは素子群が切り替えられる。

## 3 フェイズドアレイ

### 3.1 ビームフォーミング

アレイセンサの各素子は、単一センサと同様の挙動を示すが、素子が微小で高密度に配列されていることにより、遅延時間(位相)を制御することで、超音波の波面や伝搬方向をコントロールし所望の超音波ビームを形成することができる(ビームフォーミング)。このような制御あるいは制御されたアレイセンサはフェイズドアレイと呼ばれる。これは単一センサの単なる配列では得ることができない特徴であり、アレイセンサの大きな利点の一つである。以下にその代表的なビームフォーミングであるフォーカシング(集束)とステアリング(偏向)を解説する。

#### (1) フォーカシング

図6に送信および受信でのフォーカシングの原理を示す。送信の場合、微小素子から発せられる超音波は球面状あるいは円筒状に拡がりながら伝搬する。図6(a)に示すような遅延時間のパターン(遅延パターン)で各素子から超音波が送信されると、各波面の接線をなだらかに結んだいわば合成波面は凹な円弧を形成する。各素子の波面の伝搬に伴い、合成

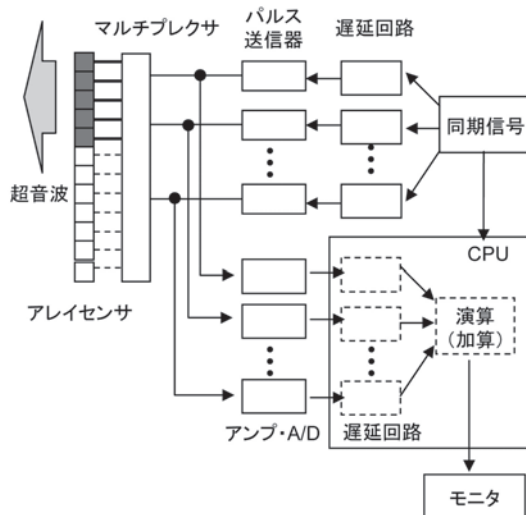


図5 アレイ探傷装置のブロック図

波面もその波面と直行する方向に伝搬し、ある特定の位置で集束することになる。その集束位置での強大なエネルギーによって、その位置の欠陥からの反射信号も大きなエネルギーをもつことになり、検出能の向上につながる。

受信の場合は、欠陥で反射された超音波は、欠陥を点音源とみなすと、同様に球面状あるいは円筒状に拡がりながら伝搬する。各素子で受信される欠陥の反射信号の到達時間すなわち時間軸上の欠陥信号の出現位置は、各素子の位置と欠陥までの距離に応じたずれを生じる。ここで、素子毎にそのずれに相応する時間分だけ遅延時間を与えるすなわち時間軸上でシフトさせると、欠陥信号の出現位置・位相が揃うことになる。これらの信号を加算することで、位相の揃った欠陥エコーは強めあい、位相がランダムな電気ノイズ等は平滑化され、欠陥信号のSN比が向上することになる。

送信におけるフォーカシングは、1回の送信により空間上の一点にしか集束効果を与えることができないが、受信におけるフォーカシングは、信号波形をメモリ上に記憶させ、空間上の任意の点に応じた遅延パターンで加算することで、1回の受信で空間上の任意の点に集束効果を持たせた結果を得ることが可能である。

## (2) ステアリング

フォーカシングと同様に、微小素子から発せられる超音波の波面がある角度で揃うように遅延パターンを与えることで、

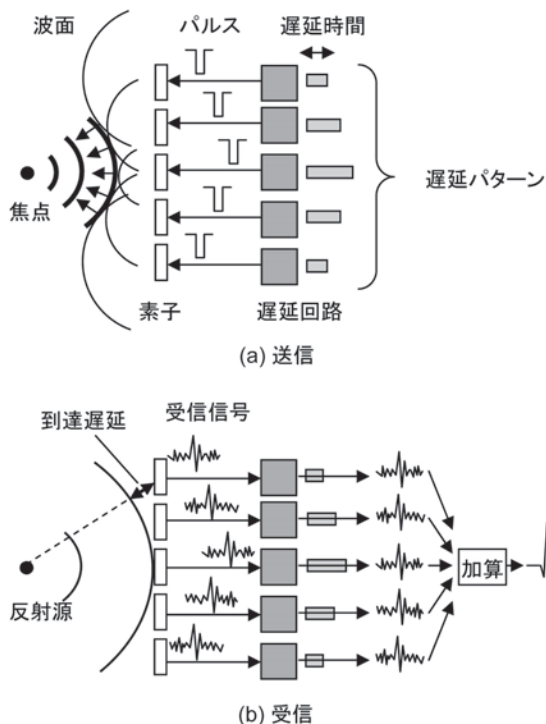


図6 フォーカシングの原理

その合成波面は波面と垂直な方向に伝搬することになり、遅延パターンの与え方によって、任意の角度にビームの向きをコントロールすることができる(図7(a))。また、フォーカシングとステアリングの遅延パターンを合成させることで、それぞれの効果を同時に持たせることが可能である(図7(b))。

さらにこれらのビームフォーミングと電子スキャンと組み合わせることで、広範囲の高速かつ高精度な探傷が実現できるため、多様な検査ニーズに応えることが可能となる。

なお、ここではリニアアレイセンサによる配列方向と深さ方向の2次元面内でのビームフォーミングを示したが、図4に示したようなマトリクスアレイセンサを用いると同様の概念で、3次元空間内でビームをコントロールすることが可能である。

## 3.2 開発・実用化例

鉄鋼業におけるアレイセンサを応用した超音波探傷技術の研究は、1980年代後半より進められてきたが、1990年代後半から電子回路・信号処理装置の飛躍的な進歩につられ、探傷装置の性能対コストも向上し、実用化を目指した開発が旺盛になってきた。ここでは、その例を紹介する。

### (1) UOE 鋼管の溶接部探傷技術<sup>1,2)</sup>

図8上段に示すように、樹脂性のウェッジ上に円弧状に配列したリニアアレイセンサの一部の素子群をフォーカシングさせながら電子スキャンする。電子スキャンによって、鋼管外面の一点から超音波が送受信され、複数の角度での探傷が可能となる。下段の探傷結果チャートに示されるように、偏向角65-80degで主に内面側の欠陥(①②③④)、55-65degで肉厚中央部の横穴(⑦)、46-55degで外面側の欠陥(⑤⑥)と一つのアレイセンサで、溶接部の内面から外面に亘る全断面探傷を可能としている。また鋼管の外径・曲率が変わっても、同一のセンサを適用できるため、機構部の簡素化や段取り換えの軽減などにも効果を発揮すると期待される。

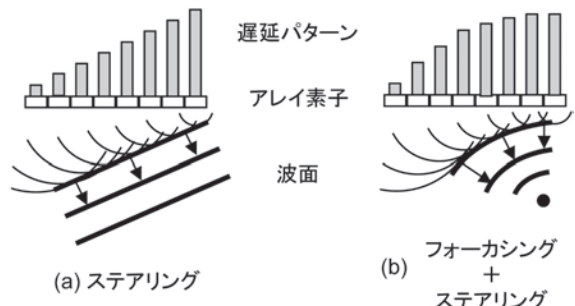


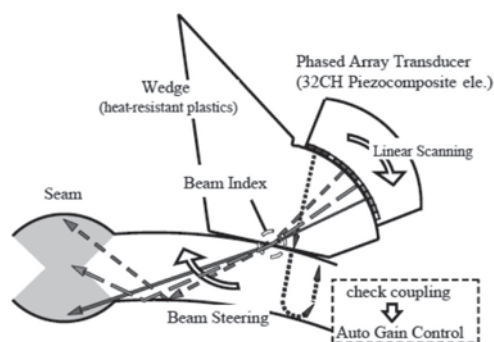
図7 ステアリングの原理

## (2) 電縫鋼管の溶接部探傷技術<sup>3)</sup>

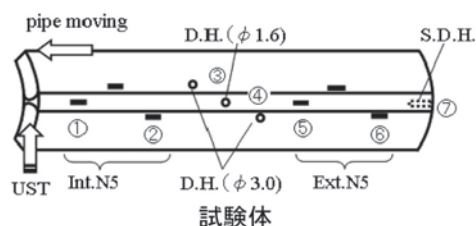
電縫鋼管の溶接不良は、溶接面に沿った面状欠陥や微小な酸化物が代表例である。これらの欠陥を高精度かつ高速に探傷する技術として、図9に示すフォーカシング+タンデム（溶接線に対して送信素子群と受信素子群の距離をずらすことで、面状欠陥での正反射信号を捕らえる手法）+電子スキャンを組み合わせた手法が提案されている。またここでは、電子スキャンによって得られる各深さ位置の探傷結果を溶接線に沿った機械走査位置毎に並べることで、溶接断面での欠陥像画像化も提案されている。画像データから探傷結果の詳細な解析が可能である。

## (3) 棒鋼の全断面探傷技術<sup>4,5)</sup>

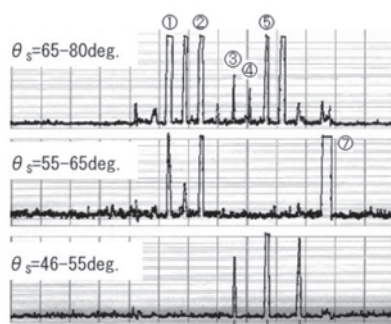
溶接部の探傷技術への応用が先行してきたが、近年、製品の全断面探傷技術への適用も実用化のフェーズを迎えてきた。図10に棒鋼の全断面探傷技術の例を示す。



センサおよび探傷の概略



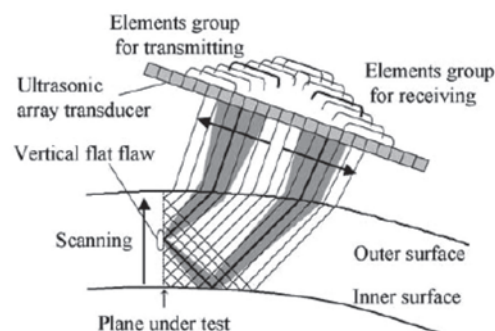
試験体



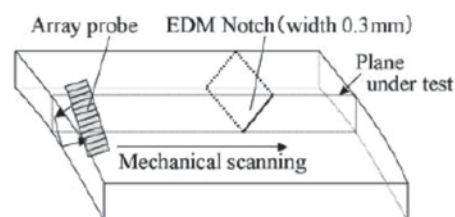
探傷結果チャート

図8 UOE鋼管の溶接部探傷技術<sup>2)</sup>

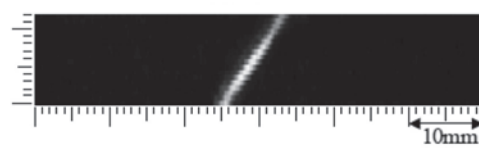
円弧状に配列されたアレイセンサの一部の素子群を用いて、フォーカシングとステアリングを組み合わせながら電子スキャンすることで、内部から表層に渡って、一つのアレイセンサで広範囲の探傷が可能となる。全断面をカバーするために、円弧状のアレイセンサが軸方向にずれた位置で円周方向に複数配置される。アレイセンサの素子面が材料と常に同心円となるように配置されていれば、材料の径が変わったとしても、遅延パターンを変更することだけで対応が可能となる。また、従来の単一素子を用いた全断面探傷においては、図2に示したように円周方向をカバーするためにはセンサの



センサおよび探傷の概略



試験体



探傷結果画像

図9 電縫鋼管の溶接部探傷技術<sup>3)</sup>

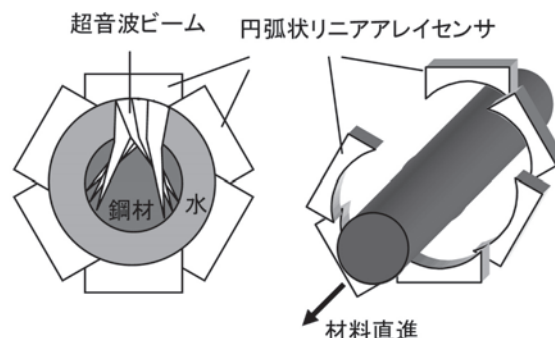


図10 棒鋼アレイ探傷技術

回転が必須であったが、図10の方式では回転機構が不要となり、メンテナンスの軽減や探傷速度の向上などの効果が期待できる。

また、送信では広範囲にエネルギーがいきわたるような遅延パターンを与え、受信側の演算でのみフォーカシングをかける、より高速な探傷を指向した棒鋼のアレイ探傷技術も報告されている<sup>6)</sup>。

## 4 大量データの高度信号処理による高精度化

近年、鉄鋼における超音波探傷の分野においても、医療分野のCT技術やレーダー分野の開口合成に代表される膨大な演算を必要とする探傷データの高度な信号処理技術や画像化技術の開発が進みつつある<sup>7,8)</sup>。ここでは代表例として、開口合成処理について紹介する。

開口処理の原理を図11に示す。開口が狭く指向角の広い(広範囲に超音波ビームを送信し、広範囲の反射信号を受信する)素子・センサを用いて多点で反射源からの反射波形を取得し、A/D変換されたデジタル波形がメモリに記憶される。センサの幾何情報と信号の伝搬速度等をもとに、信号の時間軸上の各サンプリング点が被測定空間上のどの位置から反射されたかを推定し、対応する空間上の線にサンプリング点の振幅値で重み付けをする。多数の波形データを用いて同様の処理を重ね合わせることで、実際に反射源のある空間上の点には、同位相の大振幅の値が重なり合い強調され、反射源の無い点は位相のランダムな振幅値が重なることで平滑化される。その結果、反射源の像が浮出ることになる。計測に用いた多点の狭開口のセンサが、合成された一つの広開口の

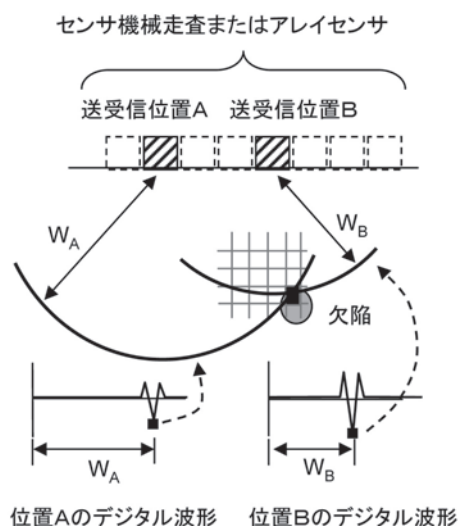


図11 開口合成の原理

センサとみなされることで開口合成といわれる。光学レンズが広開口であるほど集束効果が強いと同様に、超音波センサも開口が大きいほど高い集束効果が得られ、さらに上記処理は幅方向・深さ方向のあらゆる点に集束効果をもたらすため、広範囲で解像度の高い画像が得られる。

アレイセンサは、微小素子が規則的に多点並んでいる特性上、開口合成処理と相性が良い。機械的な走査を要せず、送信素子と受信素子の組み合わせを電子的に変えることで、瞬時に大量のデータを取得可能な利点がある。また演算量は膨大になるが、アルゴリズムは波形データの規則的な重ね合わせに過ぎないことから、高速化・安価化がすすむ並列演算装置の適用により、ほぼ実時間で開口合成処理を実現する市販装置も登場しつつある<sup>9)</sup>。

図12には、開口合成を用いた厚肉鋼材深内部の探傷技術の開発例を示す<sup>7)</sup>。ここでは、単一センサを機械走査しながら探傷することによって波形データを収集し、開口合成処理を行っている。開口合成処理の適用によって、探傷結果画像上の底部近傍の欠陥像が鮮明になりSN比の向上効果も得られていることがわかる。ここでは、単一素子の走査によって多点での探傷を行っているが、アレイセンサの適用によっても同様な結果を得ることが可能である。画像データは視覚的に理解しやすいだけでなく、空間上の信号の連続性を考慮した画像処理等により欠陥判定のロバスト性向上が期待されるほか、欠陥の定量評価が期待される。ハードウェアの性能向上に伴うシーズ技術の発達だけでなく、より高度な判定が要求されつつあるニーズの観点からも、今後益々、開発や実用化が進むと考えられる。

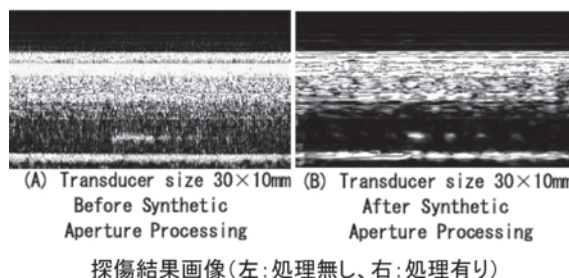
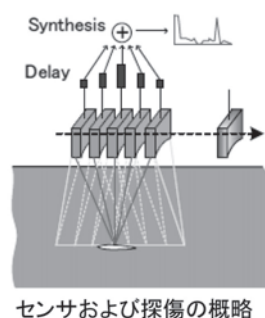


図12 開口合成を用いた厚肉鋼材の探傷技術<sup>7)</sup>

## 5 おわりに

アレイセンサの高感度化や電子デバイス、信号処理回路の高速化ならびに安価化を背景に、鉄鋼業の検査にもフェイズドアレイ探傷技術が普及しつつある。アプリケーションによってはフェイズドアレイによるインライン探傷が実用化されつつあり、高精度でかつ高速な検査によって、製品の品質保証および製造能率の向上に寄与している。一方、最近の並列演算回路を応用した超高速演算技術等により、開口合成に代表される大量データの高度信号処理技術の適用も実用化のフェーズに入りつつある。製品が高速に搬送されるインライン検査で、医療のCT技術のように製品内部を画像化しながらの検査も現実味を帯びつつある。

## 参考文献

- 1) 山野正樹, 永瀬誠, 大久保寛之, 堀切巧 : CAMP-ISIJ, 19 (2006) , 950.
- 2) 山野正樹, 大久保寛之, 堀切巧, 広瀬好博, 永瀬誠 : CAMP-ISIJ, 21 (2008) , 1135.
- 3) 飯塚幸理 : CAMP-ISIJ, 22 (2009) , 1052.
- 4) 松井晃一 : 非破壊検査, 56 (2007) 10, 516-519.
- 5) 村井純一, ドミニク ブラコニエ, 村上丈子 : 非破壊検査, 56 (2007) 10, 525-529.
- 6) 村井純一, 富田一臣 : 日本非破壊検査協会 平成22年秋季講演大会講演概要集, 127-128.
- 7) 松井穰, 飯塚幸理 : CAMP-ISIJ, 21 (2008) , 287.
- 8) 小関孝文, 高田一 : CAMP-ISIJ, 23 (2010) , 1046.
- 9) 唐沢博一, 磯部英夫, 浜島隆之 : 非破壊検査, 56 (2007) 10, 520-524.

(2010年11月30日受付)