

# フェーズドアレイ探傷システムを活用した表面波音速測定法の検討（浸炭材料評価への適用検討）

寺久保麻美<sup>\*1</sup> 荒川 敬弘<sup>\*2</sup>  
Terakubo Asami Arakawa Takahiro

フェーズドアレイ探触子を用いた表面波音速の測定方法を検討した。試験片に外部より表面波を送信し、これをフェーズドアレイ探触子の各素子で受信し、各素子での受信波の波形相関より伝搬時間差を求め、統計的に表面波音速を求めた。また、ウェーブレット解析により各周波数の波形を抽出し、周波数依存性についても検討した。

探触子の表面に取り付けてある保護膜が音速測定に影響する可能性があるため、保護膜のない探触子を試作して検討した。検討した測定法を、浸炭材に適用し、浸炭深さと表面波音速の関係を求めた。その結果、表面波音速と浸炭深さ／波長に相関がみられ、浸炭深さの測定に有効な手法であることが確かめられた。

キーワード：フェーズドアレイ探傷、表面波音速、浸炭材、深さ測定

## 1. はじめに

表面波の音速は、一般に二つの表面波探触子を一定間隔で離して表面波を送受信し、表面波が伝搬した距離と伝搬時間より求められる。しかし、探触子の入射点位置は、くさびおよび試験片の音速に依存して変化する。音速が未知の試験片の表面音速を測定する場合、絶対音速としては誤差が生じる。

例えば、くさびを音速 3100m/sec. の表面波に併せて作製した表面波探触子を用いて音速 2900m/sec. の試験片の音速を測定したときの測定誤差をスネルの法則による伝搬経路から求めると、約 0.9% となる（公称入射点間距離を 50mm とし、超音波のくさび内伝搬距離を 20.8mm として計算）。こ

の値は経年劣化や表面改質により変化が予測される音速変化率に対して無視できない値といえる。

これよりフェーズドアレイ探触子を用いて、各素子間での表面波の伝搬時間差より音速を測定することを検討した<sup>(1)(2)</sup>。

## 2. 測定方法

図 1 は 32 チャンネルのフェーズドアレイ探触子を用い、端に位置する一つの素子を送信用に用い、残りの素子を順次切り替えて受信したときの探傷結果の例を示している。図 1 の横軸は受信したチャンネル番号を示しており、素子間隔に伴う表面波の送受信間距離 (x) に換算できる。縦軸は伝搬時間 (t) であり、エコー高さを濃淡で表示している。

\*1：営業統括部 第一グループ

\*2：フェELLOW 工学博士 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 客員教授

図1ではそれぞれ、表面波の送受信と考えられるエコー（図1内青矢印で示した直線）や、ラテラル波の送受信によると考えられるエコーが観察できる。この表面波の傾きより音速を求めることができる。

フェーズドアレイ探触子の素子幅は小さく、表面波やラテラル波を送受信するのに適していると考えられる。

SN比を改善し、より精度よく音速を求めるために、外部より探触子で表面波を送信し、フェーズドアレイ探触子の各素子で順次受信することを

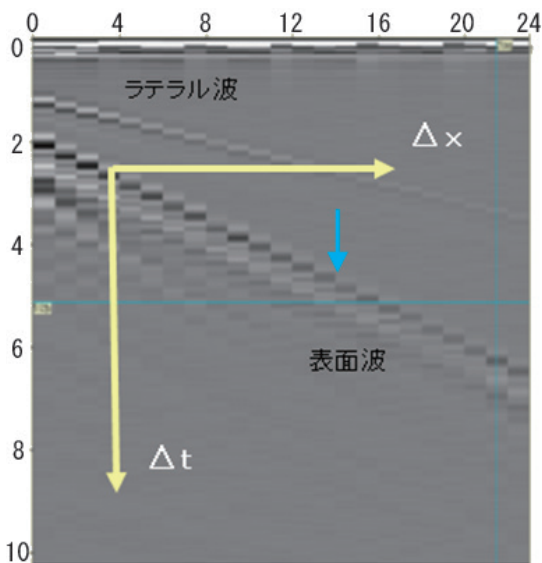
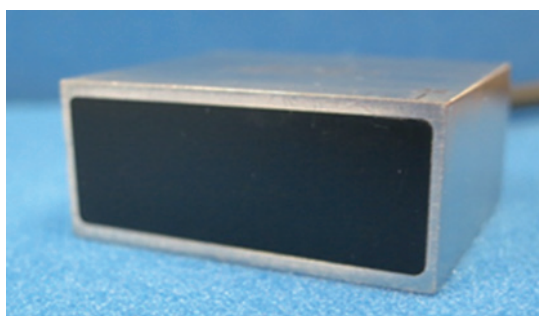


図1 フェーズドアレイ探触子の素子間の送受信結果の例

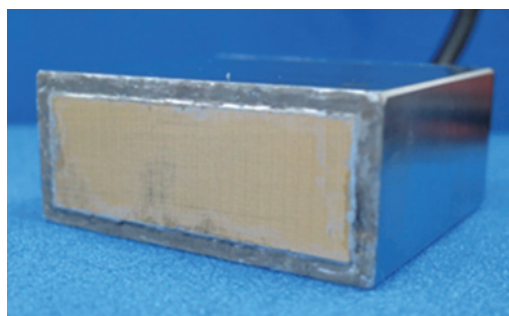
試みた。すなわち、各素子での伝搬時間差が求められる結果になる。伝搬時間差を求めるために、二つの波形のうちの一つの波形を  $\Delta t$  ごと移動させ、二つの波形の積の累積値を求め、最大となる累積値のときの  $\Delta t_n$  を伝搬時間差とする波形相関法を用いた。得られた各素子の伝搬時間差と伝搬距離との関係から最小二乗法により傾きを求め、これより音速を算定した。

一方、フェーズドアレイ探触子は、試験片との接触面に樹脂性の保護膜が取り付けられている。これが表面音速の測定結果に及ぼす影響を検討するために、保護膜を取り付けないフェーズドアレイ探触子を試作した。保護膜のあるフェーズドアレイ探触子は公称周波数 2.25MHz で素子間隔 1mm の 32 チャンネルであり、保護膜のないものは公称周波数 2MHz で素子間隔 1.5mm の 24 チャンネルである。図2に二つのフェーズドアレイ探触子の探傷面側の外観を示す。

探傷には、Multi2000（M2M社製）フェーズドアレイ探傷装置を用いた。あらかじめ、保護膜の有無による二つの探触子で STB-A2 標準試験片および購入材 SCM415H（浸炭試験片作製用）の音速を測定し、得られた波形をウェーブレット解析し、音速の周波数依存性を比較した。また、本測定方法を、有効硬化層深さ（以下、浸炭深さとする）を種々変えた試験片（板厚約 25mm）に適用し、



(a) 保護膜のある探触子



(b) 保護膜のない探触子

図2 フェーズドアレイ探触子の探傷面側の外観

浸炭深さと表面波音速の関係を検討した。この試験片の材料はSCM415Hを用い、浸炭温度および浸炭時間を種々変えて浸炭深さの異なるものを準備した。浸炭深さの測定は、JIS G 0557「鋼の浸炭硬化層深さの測定方法」の硬さ試験により行った。

### 3. 試験結果と考察

保護膜のあるフェーズドアレイ探触子と新たに試作した保護膜のない電極をむき出しにしたフェーズドアレイ探触子について、各素子で受信した波形の相関処理により重ね合わせた結果を比較して図3に示す。時間軸に注目すると、保護膜のある探触子では赤線で囲んだ第一波を見るとエコーは伝搬距離が長くなるにつれて、各ピークにおける位相速度が変化していることがわかる。一方、青線で囲んだ保護膜のない探触子の第一波については、各ピークにおける移送速度の変化は少ないことがわかる。このことより、保護膜が表面波の伝搬に大きな影響を及ぼしており、音速測定には保護膜のない探触子がより適していると考えられる。

得られた波形のウェーブレット解析により、周波数1、1.5、2、2.5、3、3.5および4MHzの波形を抽出し、表面波音速に及ぼす周波数の影響を検討

した。マザーウェーブレットには、Gabor、Gaussianを用いた。図4は、それぞれのマザーウェーブレットで抽出した2MHzの波形について各素子での相関結果を、保護膜のある場合とない場合とで比較して示している。Gaborの場合には波数が多くなるのが観察される。本手法の音速測定では、波の重ね合わせにより音速を求めるため、波数が多い場合、重ねる波を誤る可能性が懸念される。そこで、本試験におけるウェーブレットタイプには波数が少ないGaussianを用いて解析することとした。

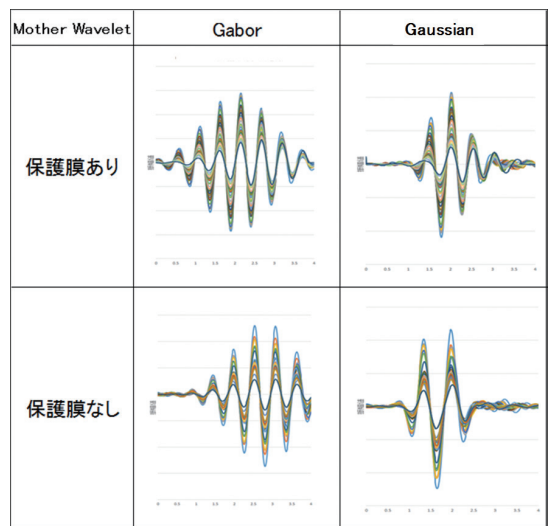
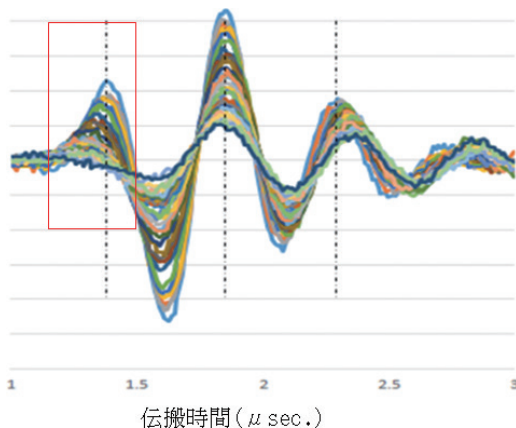
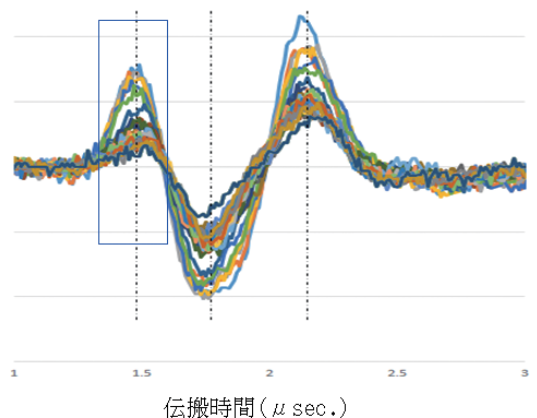


図4 各マザーウェーブレットで抽出した2MHzの場合の各素子での波形の相関結果の比較



(a) 保護膜のある探触子



(b) 保護膜のない探触子

図3 波形相関により一致させた波形群の比較

浸炭材試験片作製に用いた SCM415H 購入材(無垢材:25mm厚)と STB-A2 標準試験片を用いて測定した表面波音速として、Gaussian により抽出した各周波数の波形から測定した表面波音速の結果を図 5 に示す。赤の実線で結んだ結果は、保護膜のないフェーズドアレイ探触子での測定結果であり、丸印は SCM415H 購入材で、三角印は STB-A2 標準試験片の結果である。また、塗りつぶしで示したものは、4μsec. 長さの波形の相関を求めた結果であり、白抜きで示したものは、波形の第 1 波のプラス成分(半波)のみを抽出して波形相関を求めた結果である。いずれも、周波数の増大に伴って緩やかに音速は低下し、両者の材質の違いによる音速の差は、ほぼ各周波数ともに一定の値をとっているのがわかる。また、半波のみを抽出して相関を求めた方の曲線がよりなめらかになっている。

一方、青の点線で示した、保護膜のある市販のフェーズドアレイ探触子の場合には、周波数の増加に伴う音速の低下の度合いが急激であり、また、相関を求める波形の範囲で音速の測定結果が大き

く変化することがわかる。第 1 波のプラス成分のみ抽出した場合、すなわち波形のより立ち上がり側の方で評価すると、値は保護膜のない探触子の場合に近づく。これらのことより、保護膜が表面波音速測定に大きな影響を及ぼしていると判断された。

なお、表面波音速が周波数の依存性を持つことに関しては、表層部の組織の影響であるか、あるいは接触媒質(ここではマシン油を使用)の影響であるかなど、今後の検証が必要である。

図 6 は、各種浸炭材の浸炭深さが超音波音速に及ぼす影響をまとめている。×印実線で示した結果は、ウェーブレット解析を用いないで採取した全周波数の波形の相関より音速を求めた結果である。その他は、Gaussian をマザーウェーブレットにしたウェーブレット解析により各周波数の波形を抽出して求めた音速である。なお、ここでの浸炭深さ 0mm の値は、SCM415H 購入材(無垢材)に浸炭時の熱履歴のみを加えた試験片の測定結果である。全周波数の波形より求めた音速は、保護膜のある探触子では、2MHz の抽出波形からの結

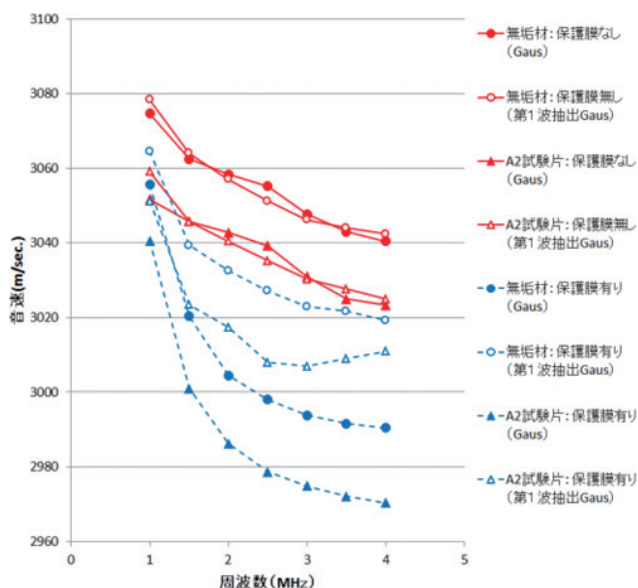
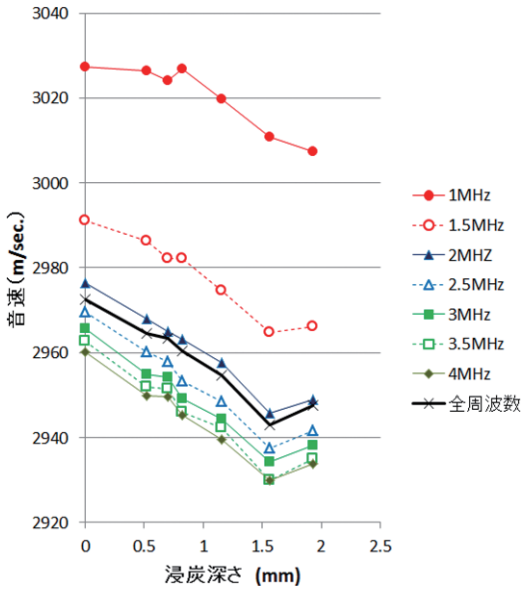
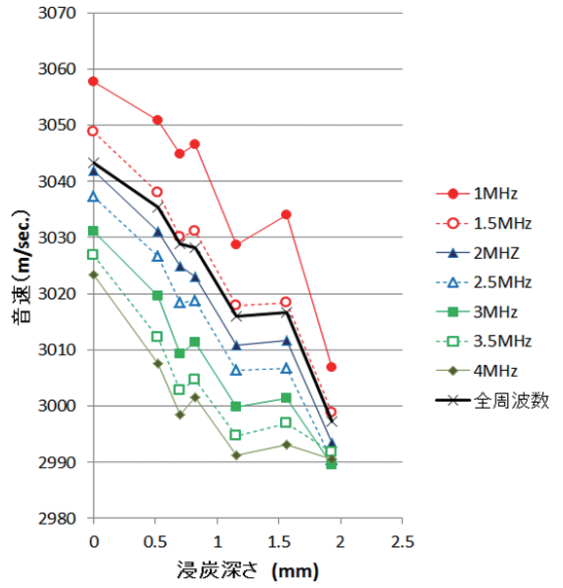


図 5 SCM415H 購入材と STB-A2 標準試験片で測定した表面波音速の周波数依存性



(a) 保護膜のある探触子



(b) 保護膜のない探触子

図6 表面波音速に及ぼす浸炭深さの影響

果に、また保護膜のない探触子では1.5MHzの抽出周波数の結果に近い。いずれの結果も浸炭深さの増加に伴い、各周波数とも音速は低下することがわかる。ただし、無垢材の音速測定で検討したように、保護膜のある場合には周波数の違いによ

る音速の違いが顕著で、保護膜の影響を強く受けていると考えられる。

図7は、保護膜のないフェーズドアレイ探触子の場合で、図6に示すデータを音速の誤差を少なくするため、波形の第1波のプラス成分の半

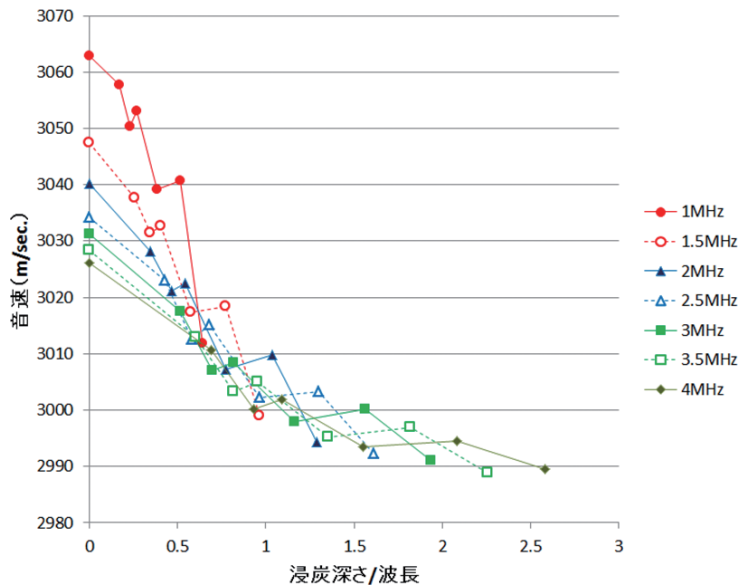


図7 表面波音速と浸炭深さ/波長の関係



波のみを抽出し、Gaussian をマザーウェーブレットとするウェーブレット解析により各周波数の波形を抽出して求めた音速を、浸炭深さ／波長で整理した結果である。浸炭深さ／波長の値が 0.5 付近より小さい領域を除けば、よい相関があるといえる。

このことは、表層部の浅い範囲を越えて浸炭が進んだ後の浸炭深さは、浸炭深さ／波長とで整理ができるといえる。

#### 4. おわりに

フェーズドアレイ探触子を用いた表面波音速の測定方法を検討した。試験片に外部より表面波を送信し、これをフェーズドアレイ探触子の各素子で受信し、各素子での受信波の波形相関より伝搬時間差を求め、統計的に表面波音速を求めた。また、受信波からウェーブレット解析により各周波数（1～4MHz）の波形を抽出し、周波数ごとの音速を求めることで周波数依存性も検討した。このとき、フェーズドアレイ探触子の探傷面側に取り付けてある保護膜が音速測定結果に影響を及ぼさうの

で、保護膜のない、電極をむき出したフェーズドアレイ探触子を試作して試験した。検討した測定方法を浸炭材に適用し、浸炭深さと表面波音速の関係を検討した。この結果、表面波音速と浸炭深さ／波長とは明確な相関があり、浸炭深さの測定に有効な手法であることが確かめられた。

ただし、STB-A2 標準試験片などの表面波音速に、なお周波数依存性が見られており、鋼材表層部の組織によるのか、接触媒質などの影響によるのかなどの検証が今後必要である。

#### 参考文献

- (1) 荒川敬弘、寺久保麻美：フェーズドアレイ探触子を用いた表面波音速測定法の検討と浸炭材評価への適用、日本非破壊検査協会平成25年度春季講演大会講演概要集、2013/6、pp.13-14
- (2) 寺久保麻美、荒川敬弘：フェーズドアレイ探傷システムを活用した表面波音速測定の検討、第19回神奈川県非破壊試験技術交流会・技術発表会講演資料、2015/10、pp.9-14



営業統括部  
第一グループ  
寺久保麻美

TEL. 03-6404-6154  
FAX. 03-6406-6044



フェロー 工学博士  
横浜国立大学 安心・安全の科学  
研究教育センター 客員教授  
荒川 敬弘

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547