

5 新しい非接触センサーと信号処理によるガイド波探傷技術の開発

問山清和

Air-coupled guided wave inspection that improved SNR with pulse compression

TOIYAMA Kiyokazu

The non-contacted and rapid plate inspection technique was developed using air-coupled ultrasonic guided wave and digital signal processing. Air-coupled ultrasonic technique has a problem that the signal to noise ratio (SNR) is quite low comparing with other conventional ultrasonic methods. In the study, the SNR was improved by applying pulse compression. The inspection system, including air-coupled ultrasonic transducer, has a nonlinear property of its transfer function, which causes a deformation of transmitted original waveform. The new pulse compression method was proposed that compensates the waveform deformation effect to improve the spatial resolution of inspection. By applying this method to the inspection using non-contact sensors, a round hole with 1mm diameter in a 3mm-thick and A4-size aluminum plate could be detected with no averaging process.

キーワード：空気結合ガイド波，パルス圧縮，信号処理，空間分解能，SN比，伝達関数補償

1 緒言

空気超音波を用いた探傷技術は非接触であるため、検査装置が簡素で低コストとなり、水や接触媒質の塗布が許されない被検体も検査可能となるなど大きなメリットがある。しかし、空気／被検体間の超音波伝達効率が低いので、収録信号のSN比が低くなるのが短所である。最近では、高出力の信号源や高感度な探傷子をもった装置の開発¹⁾や、さらに狭帯域信号の斜入射による高効率ガイド波励起手法^{2) 3)}でSN比が改善され、CFRPのような樹脂材を、2探傷子透過法により探傷する応用例⁴⁾が報告されている。

今回、我々は空気超音波によるガイド波の励起・受信を用いた、反射法による板材の広域探傷技術の確立を目指し、パルス圧縮処理等の信号処理によりSN比の改善を行い、従前のバースト信号による手法と比較した。さらに、センサーやアンプ等の周波数特性が不均一であると、通常のパルス圧縮ではパルス圧縮波形に歪みが生じる。これらの影響を補正する改良型パルス圧縮手法を適用した。

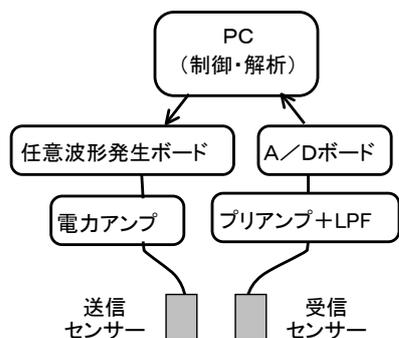


図1 実験装置の構成概略

2 ガイド波送受信特性

2.1 実験装置

実験装置の概略構成を図1に示す。送信側は汎用の任意波形発生ボード (40MS/sec, 12bit), 汎用電力アンプにより構成され、最大 300Vpp の任意電圧信号を印加できる。受信側は自作のプリアンプ (80dBup) とローパスフィルタ (LPF, カットオフ周波数 2MHz), 汎用A/Dボード (10MS/sec, 12bit) から構成される。送受信のセンサーの配置は、送受信特性を測定する実験には図2-(a), (b)のような水平対向配置および斜入射対向配置を用い、探傷実験には図2-(c)のような斜入射並列配置を用いた。

2.2 ガイド波の広帯域送受信特性

パルス圧縮を適用するには、比較的広い周波数帯域での送受信を必要とする。そこで、空気超音波センサーの周波数帯域の把握と、これを用いてガイド波の広帯域送受信ができるかどうか確認するために、A, Bの2つの測定を行った。

測定Aでは、空気超音波センサーの送受信伝達特性を求めた。センサーは、図2-(a)のような水平対向配置をとり、任意波形発生器から発生させた広帯域チャープ電圧信号を、電力アンプを介さずに直接送信センサーに印加し、その受信信号を、プリアンプを介さずに直接A/Dボードにより収録した。測定Bでは、アルミ板へのガイド波励起・受信を含めた伝達特性を求めた。センサーは図2-(b)のように厚さ 3mm のアルミ板に対し、A0モードガイド波を励起・受信できるように空気超音波センサーを入射角 8.5deg にて斜入射対向配置した。送信センサーへの印加信号は、任意波形発生器からの広帯域チャープ信号を電力アンプ

にて 300Vpp まで増幅したものをを用いた。アルミ板中に A 0 モードガイド波を励起・伝搬させ、その漏洩波を受信し、プリアンプおよび L P F を介した後、A / D ボードにて収録した。

通常の伝達関数測定には、広帯域パルス信号を送信することが多いが、ここでは測定の S N 比向上を目的に、パルス信号に替えて式 (1) で定義される広帯域チャープ信号を用いた。中心周波数 f_c は 400kHz、周波数比帯域 Bw/f_c は 2.0 とし、励振時間 T_w は、各センサー配置において、測定信号が他の散乱信号等と重ならないようにできる最大時間とし、測定 A では $T_w=0.625\text{msec}$ 、測定 B では $T_w=0.1\text{msec}$ とした。W (t) は窓関数で、ここでは漸減余弦窓を用いた。

$$s(t) = W(t) \cdot \sin \left[2\pi \left\{ \left(f_c - \frac{Bw}{2} \right) t + \frac{Bw}{2T_w} t^2 \right\} \right] \quad \dots (1)$$

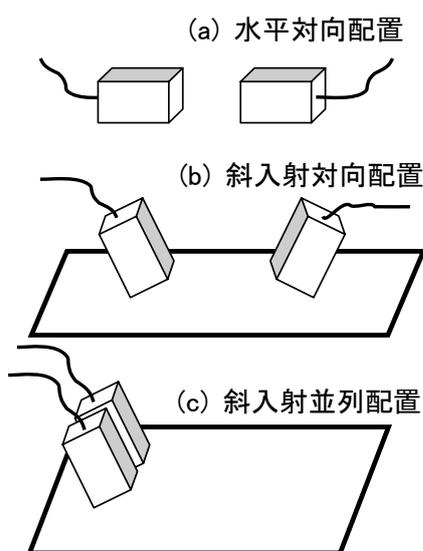


図2 送受信センサーの配置

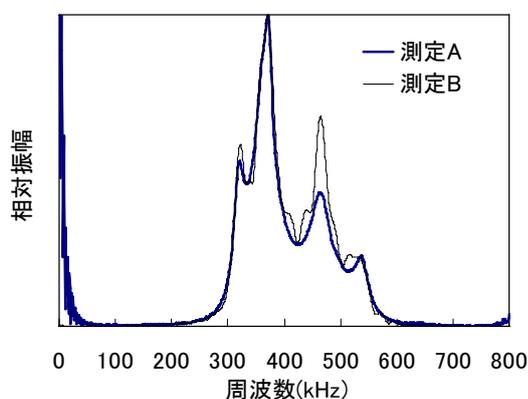


図3 伝達関数の振幅スペクトル

図3に求めた伝達関数の振幅スペクトルを示す。測定 A、測定 B とともに約 300kHz から 550kHz に有効な感度があり、約 370kHz に最大感度となるような、ほぼ同様なスペクトル形状となっている。このことは、現状の空気超音波センサーが有する周波数帯域を十分に生かした広帯域ガイド波の送受信ができていていることを示している。もし試験体がより薄くなり、かつより広帯域な送受信をする必要がある場合は、センサーの最適入射角度が大きく変動するため、そのままでは十分な広帯域送受信ができないことが予測されるが、その場合は、ある程度入射角に分布を持たせるようセンサー形状（とくに超音波出射面形状）を変えるなどして対応すればよい。

さらにスペクトル形状の詳細についてみると、よくみられるガウス関数形状とは異なり、複数の鋭いピークが重なった形となっている。このことは少サイクルのバースト信号や、パルス圧縮のチャープ信号などの広帯域信号を励起した場合に、波形が大きく歪む可能性があることを示唆している。

3 パルス圧縮信号処理

3.1 従来パルス圧縮処理

ここでは、通常のパルス圧縮手法について述べる。任意波形発生器からの出力信号（以下、送信信号と呼ぶ） $s(t)$ として、式 (1) で定義されるようなチャープ信号を用いる。次に受信信号 $r(t)$ に対し、適当な参照信号 $ref(t)$ を用いて、 $r(t)$ と $ref(t)$ との相互相関演算をしてパルス圧縮信号 $c(t)$ を得る。この演算を時間領域で行うと非常に時間がかかるため、通常は F F T を使った周波数領域での計算を行う。即ち、 $s(t)$ 、 $ref(t)$ 、 $r(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $S(\omega)$ 、 $Ref(\omega)$ 、 $R(\omega)$ とすると、パルス圧縮信号 $c(t)$ は次式で与えられる。

$$c(t) = F T^{-1} \{ R(\omega) \cdot Ref(\omega)^* \} \quad \dots (2)$$

記号 “ $F T^{-1}$ ”、 “ $*$ ” はそれぞれ逆フーリエ変換、複素共役を示す。通常は参照信号 $ref(t)$ として送信信号 $s(t)$ を用いることが多い。

3.2 伝達関数を考慮した改良型パルス圧縮

上記パルス圧縮手法は、受信信号 $r(t)$ には送信信号 $s(t)$ に近い信号が得られると仮定しているが、実際にはセンサー、アンプ等の影響を大きく受け受信信号が歪み、結果的にパルス圧縮信号もパルス形状から大きく歪むことが多い。

受信信号 $r(t)$ は、本来得るべき欠陥からのエコー振幅や遅延等の時間情報（以下、欠陥時間情報と呼ぶ） $p(t)$ と、送信信号 $s(t)$ 、センサーやアンプ等のインパルス応答 $t(t)$ との畳み込みになっていると考えられ、 $p(t)$ 、 $t(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $P(\omega)$ 、 $T(\omega)$ とすると、式（2）への代入から式（3）が得られる。

$$c(t) = FT^{-1} \{ P(\omega) S(\omega) T(\omega) \text{Ref}(\omega)^* \} \dots (3)$$

ここで $\text{Ref}(\omega)$ を、カイザー関数 $K_\beta(\omega)$ を使って式（4）のように決めることで、改良型パルス圧縮信号 $c(t)$ は、式（5）のようになる。

$$\text{Ref}(\omega) = \left[K_\beta(\omega) / \{ S(\omega) T(\omega) \} \right]^* \dots (4)$$

$$c(t) = FT^{-1} \{ P(\omega) \cdot K_\beta(\omega) \} \dots (5)$$

つまり、改良型パルス圧縮手法とは、パルス圧縮信号が、カイザー関数の逆フーリエ変換関数と欠陥時間情報との畳み込みとなるよう、参照信号を定める手法である。この手法によって、センサー・アンプ等による伝達関数の影響を補正しつつ、deconvolutionに伴う信号振幅の小さい周波数帯域についての過剰なノイズ増幅を避けることができる。ここでカイザー関数 $K_\beta(\omega)$ は、 ω の有限区間で定義されパラメータ β によって関数形が変化する実窓関数である。詳細は省略するが、 β は下記パルス圧縮信号の SN 比と分解能を大きく左右する⁵⁾。最終的には、改良型パルス圧縮信号 $c(t)$ は次の式（6）により計算する。

$$C(t) = FT^{-1} \left[R(\omega) K_\beta(\omega) / \{ S(\omega) T(\omega) \} \right] \dots (6)$$

$K_\beta(\omega)$ に関する ω の定義区間は、前述のように deconvolution に伴うノイズ増幅を避けるため、 $T(\omega)$ 、 $S(\omega)$ の有効帯域より若干狭くしておく必要がある。例えば ω の定義区間は、 $T(\omega)$ と $S(\omega)$ 各振幅スペクトルの -20dB 幅の共通部分とするとよい。この ω の定義区間の決定方法もまた、パルス圧縮波形の分解能や SN 比を決める重要な要素となる。送信信号 $S(\omega)$ の帯域の選び方は、 $T(\omega)$ とほぼ同じか少し広めに設定すると効率の良い送受信ができる。伝達関数 $T(\omega)$ の有効帯域よりもむやみに広帯域送信をしても受信信号として回収されず SN 比が改善されない。

4 探傷実験

ガイド波を使った反射法による探傷実験のレイアウトを図4に示す。試験体は厚さ 3mm、A4サイズのアルミ板で、図のように直径 5mm の貫通穴が設けてある。

送受信センサーは図2-(c)のような斜入射並列配置で、A0モードガイド波を励起・受信できるように、入射角は 8.5deg とした。

探傷は3通りの手法（A：バースト励振法、B：通常パルス圧縮法、C：伝達関数を考慮した改良型パルス圧縮法）を用いて行った。各手法で用いた送信信号や受信時の平均化条件は表1のとおりである。

通常パルス圧縮手法では、式（1）で定義されるチャープ信号を送信信号および参照信号として用いた。送信信号の振幅スペクトル $S(\omega)$ が伝達関数 $T(\omega)$ より若干広帯域となるように、中心周波数 f_c と周波数掃引幅 Bw/f_c を決めた。また相関後のサイドローブ抑制のためハニング窓を用いた。

伝達関数を考慮した改良型パルス圧縮手法では、式（1）で定義されるチャープ信号を送信信号として用いた。送信信号をなるべく広帯域とするため矩形窓を用いた。カイザー関数の定義域は、 $T(\omega)$ と $S(\omega)$ 振幅スペクトルにおける -26dB 幅の共通区間とし、パラメータ β は SN 比と分解能のバランスが良い $\beta = 4$ を用いた。

表1 送信信号および平均化に関する条件

	送信信号の条件		平均化回数
バースト励振法	$f_c = 370\text{kHz}$	10 サイクル ハニング窓 バースト信号	1, 10, 1000
通常パルス圧縮	$f_c = 430\text{kHz}$	$Bw/f_c = 0.8$ $Tw/f_c = 1000$ ハニング窓 チャープ信号	1, 10
改良型パルス圧縮	$f_c = 430\text{kHz}$	$Bw/f_c = 0.8$ $Tw/f_c = 1000$ 矩形窓 チャープ信号	1, 10

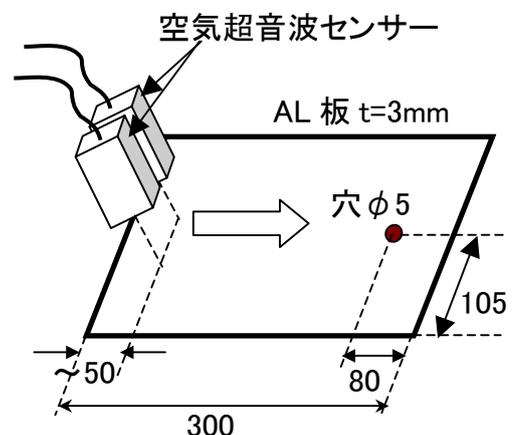


図4 探傷実験のレイアウト概要

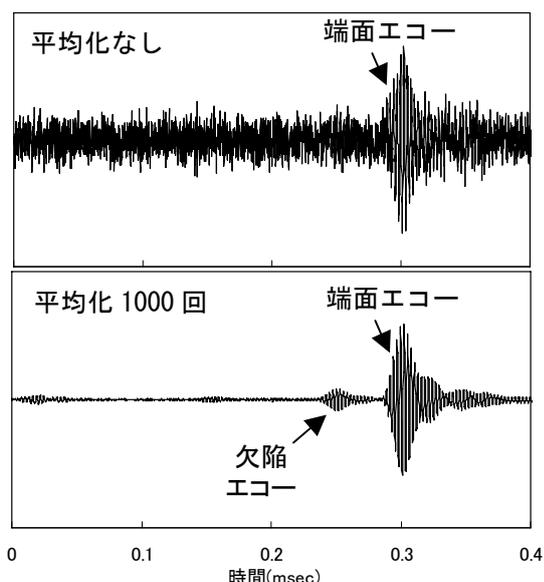


図5 バースト励振法による探傷結果

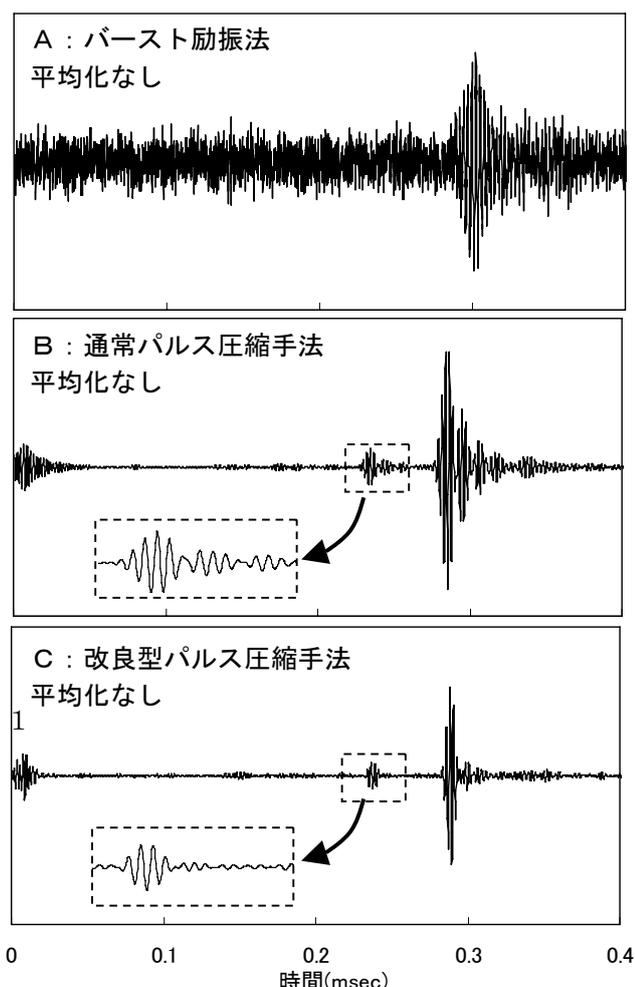


図6 各信号処理を適用した探傷波形の比較

図5に、バースト励振法による探傷結果を示す。平均化処理をしない場合ではノイズが非常に大きいため欠陥エコーが判別できないが、平均化を1000回行くと、欠陥エコーは充分判別できる。

次に平均化を行わないで、A：バースト励振法、B：通常パルス圧縮法、C：改良型パルス圧縮法で探傷した結果を図6に示す。バースト励振法に比べ、通常パルス圧縮法を適用することにより、効果的にSN比が改善している。しかし詳細にみると、端面エコー、欠陥エコーともに、複数の波束が重なったような形状に歪み、分解能が低下している。これは前述のように、伝達関数の振幅スペクトルが複数の鋭いピークが重なったような異形となっていることが一因と考えられる。

一方、伝達関数の影響を補正する改良型パルス圧縮法では、端面エコーや欠陥エコーは左右対称のパルス形状となり、明らかに分解能が向上している。

これにより、空気超音波センサーを使ったガイド波探傷が、改良型パルス圧縮信号処理の適用により、平均化することなく、高SN比かつ高分解能にて実施できることが示された。

5 結 言

空気超音波によりガイド波を送受信した板材の広域探傷技術に、パルス圧縮処理を適用し、実用的なSN比を達成した。ガイド波送受信に関する伝達関数が、複数のピークが重なった振幅スペクトルであったため、通常のパルス圧縮手法では、欠陥エコー形状が大きく歪み分解能が低下した。伝達関数の影響を補正した改良型パルス圧縮手法を適用すると、欠陥エコー形状の歪みが解消し、分解能は大きく向上し、厚さ3mmアルミ板中の直径1mm貫通穴を、反射法により探傷が可能となった。

この研究の一部は、平成20年度JSTシーズ発掘試験A（発掘型）の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 高橋, 馬場, 小倉: 第14回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集(2007), 99
- 2) 西野: JSNDI平成19年度秋季大会講演概要集(2007), 27
- 3) 林他: 非破壊検査, 50 [2] (2001), 108
- 4) 宮本他: JSNDI平成19年度春季大会講演概要集(2007), 197
- 5) 問山他: 超音波テクノ, 18 [5] (2006), 12