

15 ガイド波を非破壊検査に有効利用するための信号処理技術

問山清和

Signal processing technique to utilize guided waves effectively for non-destructive inspection

TOIYAMA Kiyokazu

Guided wave is expected as the most promising technique for rapid long-range inspection of plates, pipes, rails and so on. However, signal to noise ratio (SNR) is still required to be improved, especially in those strongly affected by electrical or mechanical noise. Also, velocity dispersion of guided wave is another problem. Its pulse of energy will spread out in space and time as it propagates, and this phenomenon worsens resolution and make experimental data hard to interpret because of signal overlap. In this paper, two signal-processing techniques are presented to solve these problems. One is “the pulse compression” for non-dispersive mode, and the other is “the dispersion-compensated pulse compression technique” for dispersive mode. The theoretical brief explanations are described. The applications of these techniques are experimentally shown and resulting improvements in SNR and spatial resolution are demonstrated.

キーワード: ガイド波, パルス圧縮, 信号処理, 分散性補償, SN比改善, 空間分解能改善

1 緒言

超音波の特殊な伝搬形態に「ガイド波」と呼ばれるモードがある。これは板、パイプ、レールなどといった細長い構造体中を伝わる場合によく観測されるモードで、一般の超音波に比べ広範囲に伝搬できる特長がある。これを生かして、板中を伝搬するガイド波を使った薄肉鋼板等のインライン欠陥検査が以前から行われている。またプラントの高経年化を背景に、パイプの長手方向に伝搬するガイド波を使った配管高速検査技術が開発され、実用化が進みつつある¹⁻³⁾。また最近では、パイプの円周方向に伝搬するガイド波を利用した腐食検査^{4,5)}や、鉄道レール中を伝搬するガイド波を利用した踏切レール底端部の腐食検査^{6,7)}も開発され始めている。

ガイド波を用いた検査手法における共通な課題として「ノイズ対策・SN比の向上」がある。薄鋼板等のインライン欠陥検査や、プラント配管の高速検査などでは、周辺機械等からの外乱ノイズが強い場合が多く、ノイズ対策が必要である。また検査装置の構築に有利とされる空気結合型センサ、EMATなどの非接触センサを活用するためには、これらの変換効率の低さを補う方法として、信号処理によるSN比の向上は必須である。

また、ガイド波の「速度分散性」によって生じる分解能低下の問題も大きな課題である。ガイド波は通常の超音波と異なり、周波数によって伝搬速度が異なるという特有の性質がある。もしインパルス状の広帯域ガイド波信号を励起

すると、伝搬速度の違いにより高周波と低周波成分が分離する波形崩れが生じ(図1を参照)、そのままでは検査に使えないといった問題が生じる⁸⁾。

本報では、SN比向上、速度分散性の問題を信号処理により解決するパルス圧縮技術⁹⁾、および分散性補償ガイド波パルス圧縮技術^{10,11)}について概説する。信号処理の理論については概要のみ説明し、具体的な実施方法や、実験結果を中心に説明する。なおこれらの技術については、現在特許出願中である^{12,13)}。また後者については、SN比向上と速度分散性の問題を同時に解決し得る、世界で初めての技術である。

2 パルス圧縮技術

2.1 パルス圧縮技術の概要

ガイド波の中には、非速度分散性のモードが例外的にある。配管中を長手方向に伝搬するT(0, 1)モードはその一つである。このモードは内部流体の影響を受けにくいモードでもあるので、配管高速検査としての現場適用がされ始めている。ここではT(0, 1)のような非速度分散性モードに対する、SN比向上のための信号処理技術「パルス圧縮技術」について概説する。

従来のガイド波技術では、図2に示すように、励振波形として2波程度の短いバースト波を用い、その受信波形から欠陥情報を得る。これに対しパルス圧縮では、励振波形

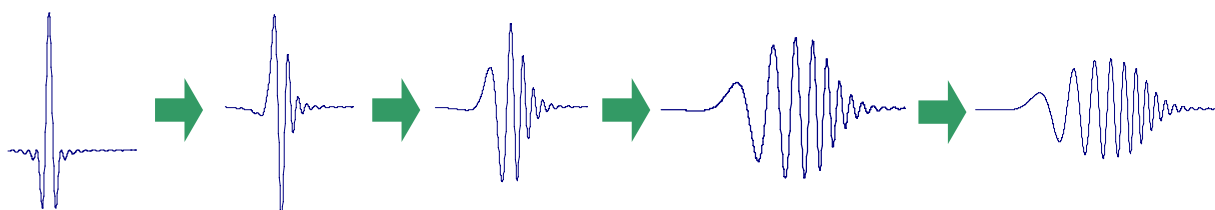


図1 伝搬に伴うガイド波の波形崩れの様子(モデル図)

として周波数を連続的に掃引したチャープ波を用いる。さらに、受信後の相互相関処理により波形がパルス状に“圧縮”され、この圧縮波形から欠陥情報を得る。時間的に長い波を励振するため超音波エネルギーが大きく、相関処理によるノイズ低減効果も期待できSN比が向上する。さらに、パルス状の圧縮波形が得られるため時間分解能の向上も同時に達成される。

励振に用いるチャープ波は、例えば以下の式のものが用いられる。

$$S(t) = \sin\{2\pi [(f_c - B_w/2)t + (B_w/(2T_w))t^2]\} \cdot W(t)$$

ただし f_c はチャープの中心周波数、 B_w は掃引周波数幅、 T_w は時間長さである。 $W(t)$ は重み付けの窓関数であり、ハンニング窓等がよく用いられる。

次に、受信波形 $R(t)$ に対して、参照信号 $Ref(t)$ との相互相関処理を行うことにより、パルス圧縮波形 $C(t)$ が次式の計算により得られる。

$$C(t) = \int R(\tau) Ref(t+\tau) d\tau$$

参照信号 $Ref(t)$ には、励振信号 $S(t)$ を用いることが多い。ただし高分解能を目指す場合は、種々の伝達関数の影響を考慮した特殊波形を用いることもある¹⁴⁾。

2.2 ラボ実験

ここではラボ環境において、パルス圧縮の検証結果について報告する。実験に用いた試験片の配置を図3に示す。試験片は炭素鋼鋼管SGP-80Aを用いた。記号“F1”、“F2”位置にはそれぞれ機械加工した球面状人工欠陥(断面欠損率3%)、ドリル貫通穴φ11.5(断面欠損率4.3%)を設けた。探傷方法は、A:従来のバースト信号励振法(3波のハンニングバーストを励振)、B:チャープ励振によるパルス圧縮(時間長さ:20msec, 周波数帯域:DC~200kHz)である。どの場合においてもノイズ低減のため200回の加算平均処理を行った。図4に、各手法による実験結果を示す。A:バースト励振法では加算平均処理を行っても依然ノイズが残存し欠陥信号F1,F2が識別できない。一方、B:チャープ励振によるパルス圧縮では、ノイズが顕著に減少し、断面欠損率3%のF1エコーが判別可能となった。この時のSN比改善効果は約30dBであった。ラボレベルで、パルス圧縮によるSN比改善効果が確かめられた。

従来手法



パルス圧縮手法

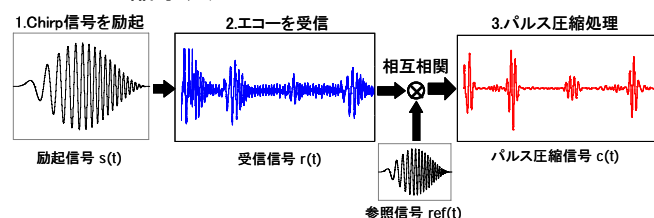


図2 パルス圧縮の概要

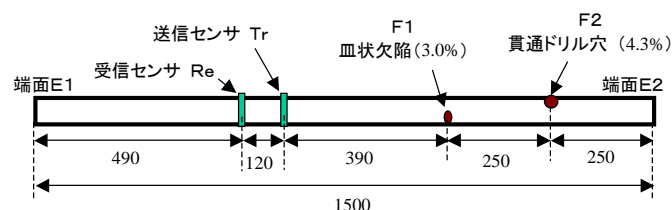
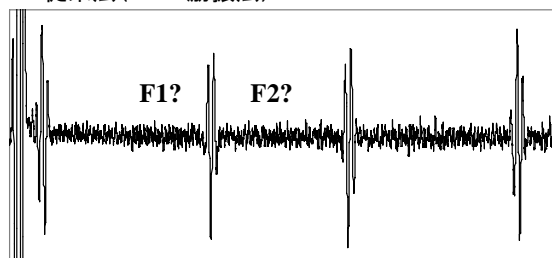


図3 試験片のレイアウト

A: 従来法 (Burst励振法)



B: 開発手法 (パルス圧縮)

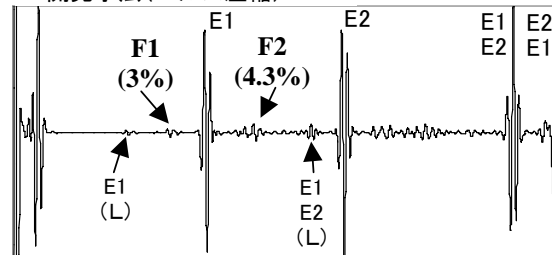


図4 各手法による探傷波形の比較(ラボ実験)

2.3 稼働中実配管を用いてのフィールドテスト

石油プラントの稼働中実配管を用いた、フィールドテストの結果について述べる。検査対象配管は、高さ5.5m位置のラック上に設置された炭素鋼鋼管SGP-80A(外径89.1mm肉厚4.2mm)である。配管近傍には稼働状態のコンベアが設置されており、強い振動ノイズの影響が懸念された。配管は全長200m以上あり、そのうち15m程の部分を検査した。図5に配管のレイアウトを示す。図中の“W”、“S”、“F”記号は、それぞれ溶接線、サポート、フランジを示す。フランジよりも遠方域では、ガイド波の波動

場が乱れ適切な欠陥検知ができないため、検査対象範囲から外している。

図5は、従来法（バースト法）および開発手法（パルス圧縮手法）による探傷結果を示す。本ケースではノイズが非常に強く、従来法ではセンサ位置から約3m以遠の領域では欠陥エコー信号がほとんど認識できない状況であった。遠方ほどノイズが大きくなっているのは、ガイド波信号の距離減衰補正を施している影響である。一方、パルス圧縮手法ではノイズは著しく低減され、従来法では認識できないセンサ位置から3m以遠での欠陥情報でも明瞭に認識できることがわかる。

3 分散性補償パルス圧縮技術

3.1 ガイド波の速度分散性の影響

ガイド波には速度分散性があるので、伝搬に伴って波形が崩れ、検査の障害となる。ここでは鉄棒の中を長手方向に伝搬するガイド波を例にとって、分散性の影響について実験的に示す。被検体の配置を図6に示す。直径32mm長さ2mの丸鉄棒を伝搬媒体に用い、図中”Slit”、”T/R”位置にそれぞれスリット欠陥、磁歪型L(0,1)モード送受信センサを配置した。図7は、直径32mmの鉄棒を伝搬するガイド波の群速度分散曲線（軸対称モード）である。L(0,1)モードは周波数によって群速度が大きく変動している。ここでは分散性の強さ（分散曲線の傾き）の異なる36kHzと64kHzを選び、受信信号を比較する。励振信号には、それぞれ所定の周波数にて2波のハミングバーストを用いた。

図8にその受信波形を示す。分散性の弱い36kHzでは波形崩れが少なく各波形は十分分離して認識出来るが、分散性の強い64kHzでは波形崩れの程度がひどくなり、スリット欠陥（記号“Slit”）も認識しづらくなっている事が分かる。

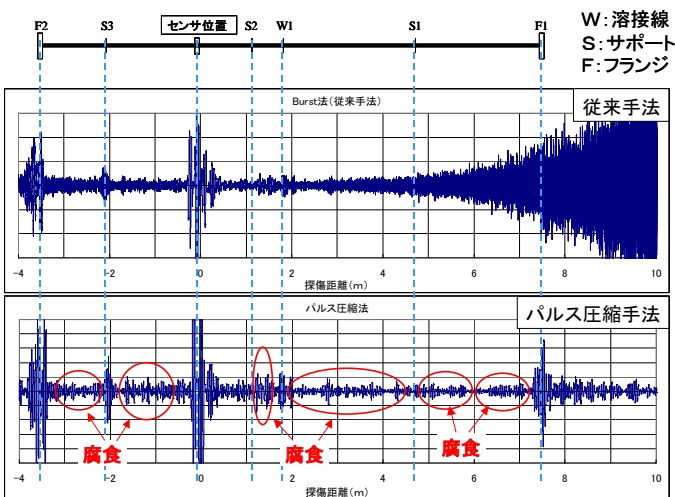


図5 対象配管の配置と探傷波形の比較（フィールドテスト）

3.2 分散性補償パルス圧縮の原理

ここでは分散性補償パルス圧縮手法の理論概要を述べる。図9はガイド波の伝搬の様子を模擬的に示したダイアグラムである。t=0, x=0を発したガイド波は、速度分散性により空間的に拡がりながら伝搬し、その後反射源分布 $z(x)$ によって反射され再び位置 $x=0$ に到達する。到達したガイド波は、時刻 t=0 に仮想発信源分布 $y(x) (\equiv z(x/2))$ から励起されたガイド波と等しくなる。

Wilcox¹⁵⁾によれば、ガイド波の速度分散情報が分かれば、ある地点で観測されたガイド波時間波形から、任意の時刻におけるガイド波空間波形を計算できる。励振信号にインパルスを用いた場合、計算から求められた時刻 t=0 における空間波形は、仮想発信源分布 $y(x)$ をよく反映する。しかしインパルス信号のエネルギーは弱くSN比が不足することが多いので、前述のパルス圧縮手法と同様に、励振時に広帯域なチャープ信号を励起し、その後計算から得られる時刻 t=0 における空間波形と、励振チャープ信号の等価空間波形との相互相関処理を行い、空間分解能とSN比が良い最終波形を得る。なお一連の処理にはFFTを活用して計算の高速化を図っている。詳細は文献^{10,11)}を参照頂きたい。

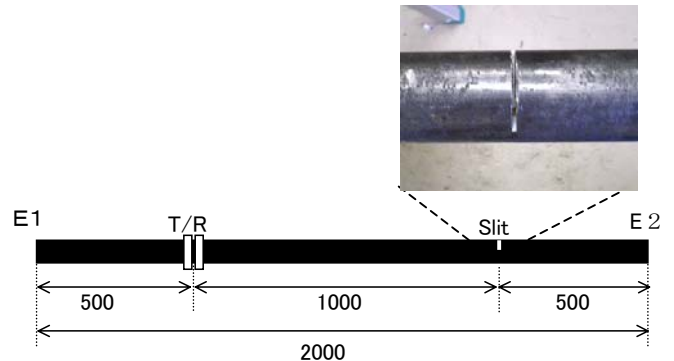


図6 実験に用いた被検体の配置

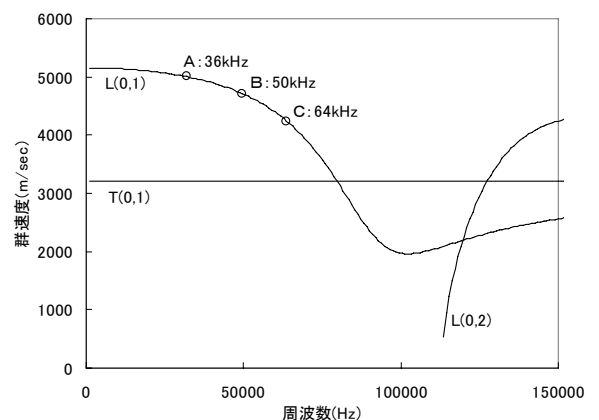


図7 鉄棒中を伝搬するガイド波の群速度分散曲線（鉄棒の直径はφ32mm）

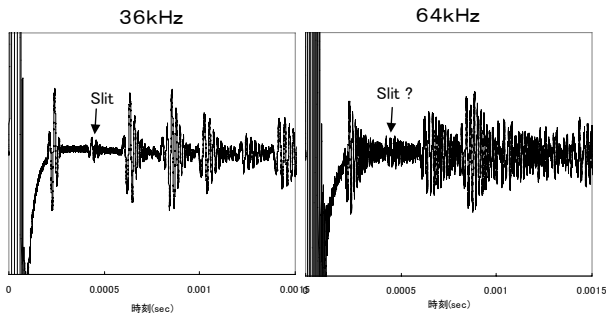


図8 鉄棒中を伝搬する L(0,1)モードガイド波の受信信号

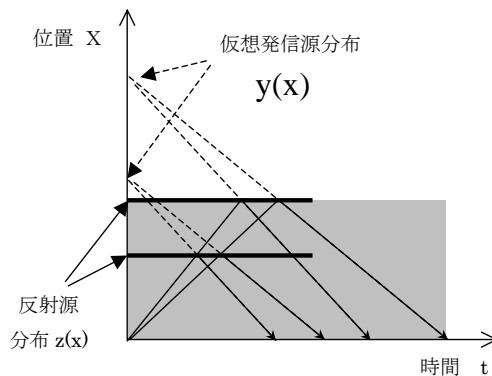


図9 ガイド波の伝搬を示すダイアグラム (t=0, x=0 にてパルス状ガイド波を励起)

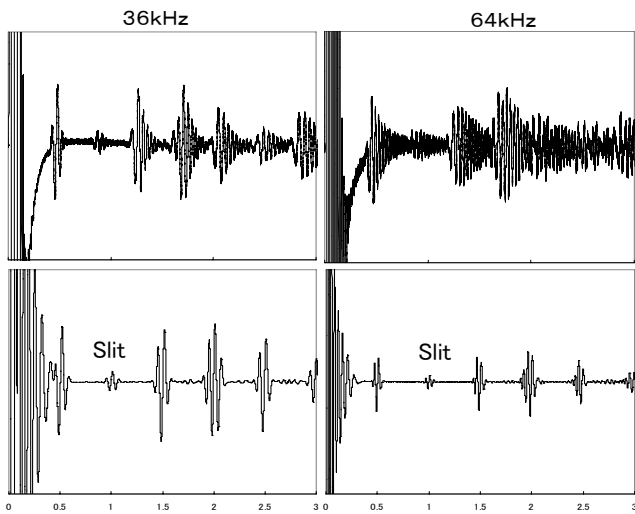


図10 従来手法と分散性パルス圧縮手法における最終出力の比較

3.3 実験的検証

ここでは図6に示す被検体を用いて、従来のバースト励振法、分散性ガイド波パルス圧縮手法の比較を行った。励振信号には、2波のハミングバーストおよび長さ $10/f_c$ 帯域幅 $2f_c$ のハミングチャープ信号をそれぞれ用いた(ただし f_c は中心周波数)。図10にその実験結果を示す。バースト励振手法では、速度分散性による波形歪みが目立つ結果と

なっているが、分散性ガイド波パルス圧縮手法では、分散性が強い 64kHz の場合でも分散性の影響が除去され、きれいなパルス状波形となっている。またバースト励振法に比べてノイズが除去されSN比が向上している事がわかる。

4 結 言

ガイド波を非破壊検査に利用する際に問題となる、SN比の向上、速度分散性による分解能低下の問題を、信号処理の面から解決する「パルス圧縮技術」と「分散性補償ガイド波パルス圧縮技術」を開発した。

T(0, 1)モードのような非速度分散性ガイド波については、「パルス圧縮」を適用することにより飛躍的にSN比が改善する。これはフィールド試験でも実証された。

また一般の速度分散性ガイド波についても、「分散性補償パルス圧縮」の適用により、速度分散性による波形崩れを補正し検査の分解能を向上させ、かつSN比を改善させることができた。上記の信号処理を適用し、ガイド波の非破壊検査への適用が進むことを期待する。

文 献

- 1) 永井ら:非破壊検査, Vol.54, No.12 (2003) pp.667
- 2) 亀山ら:非破壊検査, Vol.52, No.12 (2003) pp.672
- 3) 池田ら:非破壊検査, Vol.54, No.11 (2005) pp.595
- 4) 永溝:周方向に伝搬する超音波による円管健全性の非破壊評価, 名古屋工業大学博士論文 (2004)
- 5) 西野ら:第13回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 (2006) pp.55
- 6) T. Hayashi et. al, Ultrasonics, Vol.44, No.1 (2006) pp.17
- 7) 林ら:日本非破壊検査協会平成18年度春季大会講演概要集 (2006) pp.3
- 8) L. Laguerre et al, Ultrasonics, Vol.39 (2002) pp.503
- 9) K. Toiyama et. al, Proc. ASME/JSME Conf., PVP-Vol.484 (2004) pp.41
- 10) 問山ら:日本非破壊検査協会平成19年度秋季大会講演概要集 (2007) pp. 41
- 11) K. Toiyama et. al, Review of Progress in QNDE, Vol.27A (2007) pp. 587
- 12) 特開 2007-121092: 方向制御性を伴ったガイド波パルス圧縮探傷法および探傷装置
- 13) 特願 2007-172924: 構造物の非破壊診断方法
- 14) 問山ら:超音波テクノ, Vol. 18, no. 5 (2006) pp.12
- 15) P. D. Wilcox, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. Control, 50-4 pp.419 (2003)

