

# 15 デジタル信号処理を用いたガイド波配管検査技術の高度化（第1報）

問山清和，佐野 誠

The advancement of guided wave inspection of pipe using digital signal processing (1st report)

TOIYAMA Kiyokazu and SANO Makoto

Guided wave is expected as the most promising technique for rapid long-range inspection of pipes. However, signal to noise ratio (SNR) is still required to be improved, especially in highly attenuative pipes covered with heat insulator and/or buried in the ground. Recently, pulse compression technique has been developed as an effective means for improving SNR in the field of radar detection.

In this paper, chirp pulse compression technique was applied to the long-range inspection of pipe using guided wave. The technical brief explanation about chirp pulse compression was described. Example waveforms of conventional burst wave excitation way and chirp pulse compression way were compared about SNR. The noise was visibly reduced and the improvement of SNR about 15 dB or more was achieved by the chirp pulse compression.

キーワード：ガイド波，配管検査，パルス圧縮，チャープ波，広帯域信号，SN比，時間分解能

## 1 緒 言

高度成長期に建設された石油化学プラントは，現在経年劣化が進んでおり，その安全性の確保が喫緊の課題となっている。特にプラントを構成する各種配管については，高経年化に伴う腐食の進展により，従来の局所的検査のみでは対応が不十分となってきており，配管全体を高速かつ網羅的に検査できる技術が大変強く求められている。

ガイド波技術は，配管を高速・広範囲に検査できる最も有望な技術として近年注目を集めている<sup>1)</sup>。1990年頃より Rose や Cawley らのグループにより，ガイド波非破壊評価についての理論的・実験的研究が数多くなされた<sup>2-5)</sup>。2000年代になると，英国・米国を中心に現場適用可能なガイド波検査装置が開発され，産業界での現場応用が図られはじめている。

それと同時に，現場適用に際しての様々な問題点も浮かび上がってきた。その一つに，多様なノイズ環境が挙げられる。検査現場で用いられる発電機やプラントの大型モーター等からの電磁ノイズ，内部流体や外来振動による振動ノイズ等，実験室では想定されなかった様々なノイズが存在するため，それらを低減する対策が必要である。もう一つは，保温材被覆配管や地中埋設配管など高減衰条件下にある配管への対策である。これらは配管の外壁が機械的に拘束されており，ガイド波エネルギーが配管外部に漏洩しガイド波伝播範囲が狭くなってしまふ。そのため有効な検査範囲を

確保するためには，ガイド波エネルギーをさらに効率良く送受信する仕組みが必要である。

本報では，上記課題対策の1手段として，パルス圧縮という信号処理技術をガイド波配管検査技術に適用することを考えた。このパルス圧縮技術は，レーダー・ソナー・通信等の分野において広く使われている技術で，装置・法令上の制約により送信できる信号振幅が制限されている中で，対ノイズ性（SN比の向上）と時間分解能の向上を同時に実現する信号処理技術である。パルス圧縮にはセンサ等のシステムに広帯域性が求められるが，ガイド波システムはこの要件を満たすもので，結果として著しいノイズ低減効果が得られたので報告する。

## 2 ガイド波パルス圧縮技術

### 2.1 ガイド波配管技術の概要

ガイド波とは，パイプ・板・棒・鉄道レールなど，超音波波長より短い間隔の境界面に囲まれた媒質中を長手方向に伝わる際の超音波伝播形態の総称である。

ガイド波は超音波エネルギーが外部に漏洩しにくく長距離減衰することなく伝播するため，配管等の長距離診断に有望とされている。図1にガイド波配管検査の模式図を示す。送信センサにより励起されたガイド波は，配管の長手方向に伝播する。伝播経路上に欠陥等の不連続面が存在すると，ガイド波エネルギーの一部がそこで反射する（欠陥エコーとなる）。この欠陥エコーを受信センサで検出することで，欠陥の存在を

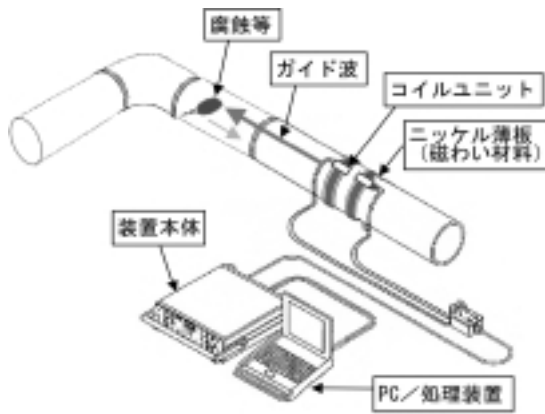


図1 ガイド波配管検査のイメージ  
（資料提供：株式会社シーエクスアール）

検知することが出来る。また欠陥エコーの到達時刻と、ガイド波の伝播速度（群速度）より欠陥の長手方向の存在位置を推定することができる。

## 2.2 ガイド波の分散性

パイプ中を伝播するガイド波は、無限媒質中を伝播するバルク波とは異なり、一般に伝播速度の周波数依存性（速度分散性）を示し、かつ多様な振動モードを持つ（多重モード性）という特徴がある<sup>6,7)</sup>。そのなかで、 $T(0, 1)$ と呼ばれるモードは唯一速度分散性が無いため、取り扱いが容易であることから配管検査には頻繁に用いられている。このことから本研究では、非分散性の $T(0, 1)$ モードを対象としたパルス圧縮技術について取り扱うこととした。

## 2.3 従来技術とパルス圧縮

従来のガイド波配管検査は、励振波形として2波程度の短いバースト波を用いて行われる。この方法は時間分解能が良いという特長があるが、1バースト当たりのサイクル数が少ないので超音波エネルギーが小さくノイズに影響されやすい欠点がある。次に超音波エネルギーを大きくする目的で、励振波形にサイクル数が多く時間的に長いバースト波が用いられることがある。超音波エネルギーが大きい分ノイズに強くなるが、時間分解能が悪くなる欠点がある。これに対しパルス圧縮では、上記の課題を解決するため、励振波形として周波数を連続的に掃引した変調波が用いられ、受信後の相関処理により波形がパルス状に圧縮される。時間的に長い波を用いるため超音波エネルギーが大きく、さらに相関処理によるノイズ低減効果が期待でき耐ノイズ性が向上するばかりでなく、波形がパルス状に圧縮されるため時間分解能の向上も同時に達成される。

## 2.4 ガイド波パルス圧縮の原理

パルス圧縮では、励振波形に周波数を時間的に掃引したチャープ波を用いる。チャープ波は以下の式で表される。

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

ここで $f_c$ はチャープ波の中心周波数、 $B_w$ はチャープ波の掃引周波数幅、 $T_w$ はチャープ波の時間幅である。式中の $W(t)$ は重み付けの窓関数であり、以下に示すハミング窓がよく用いられる。

$$W_{\text{Ham}}(t) = 0.54 - 0.46\cos(2\pi t/T_w)$$

送信センサから励振されたチャープ波形の $T(0, 1)$ モードガイド波は、欠陥や管端等で反射された後、受信センサにより検出されデジタル収録される。受信波形を $R(t)$ とすると、 $R(t)$ は近似的に励振チャープ波形 $S(t)$ とノイズ $N(t)$ とが重畳した波形となっている。

$$R(t) = \alpha S(t) + N(t)$$

この受信波形に対し、励振波形 $S(t)$ を参照波形として相互相関処理を行い、最終的なパルス圧縮波形 $C(t)$ を得る。相関の演算子を $\alpha$ とすると、

$$\begin{aligned} C(t) &= R(t) S(t) \\ &= [\alpha S(t) + N(t)] S(t) \\ &= \alpha S(t) S(t) + S(t) N(t) \end{aligned}$$

第1項は、励振波形 $S(t)$ の自己相関関数となっている。またノイズはチャープ波形に対し相関性を持たないため、第2項は0に近づいていく。結果としてパルス圧縮波形 $C(t)$ は、チャープ波の自己相関関数から構成され、同時にノイズ低減効果も持つことになる。

図2に、典型的な励振チャープ波形（窓なし、ハミング窓付き）と、それぞれの自己相関関数を示す。窓なしチャープ波・ハミング窓付きチャープ波とも自己相関関数がパルス状となっており、パルス圧縮手法が良い時間分解能を持つことを示している。

窓なしチャープ波の自己相関関数は、メインピークの横にサイドローブと呼ばれる振動がみられる。一方ハミング窓付きチャープ波の自己相関関数は、サイドローブレベルが極めて低くなっている。

このサイドローブは、別の小さな信号の存在を見落とす等の要因となるため、検査精度を確保するためにサイドローブレベルを小さくすることが必要条件となる。このような理由でパルス圧縮では、励振波形としてハミング窓付きチャープ波がよく用いられる。

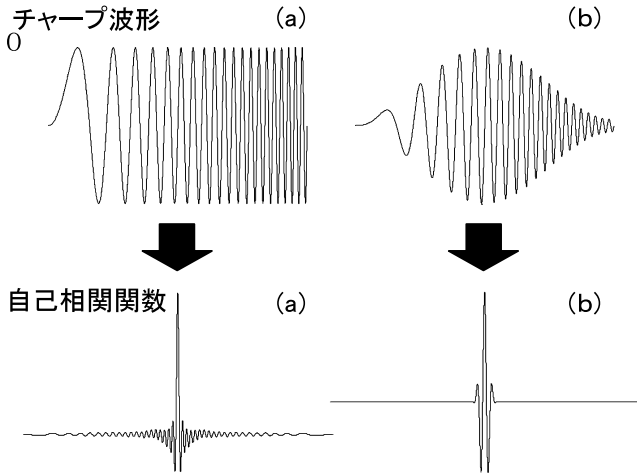


図2 典型的な励振チャープ波形とその自己相関関数  
(a)窓なし (b)ハミング窓付き

### 3 実験的検証

#### 3.1 実験装置と実験条件

配管用炭素鋼鋼管 (SGP-4B) 中に人工欠陥を配した試験片を用いて、ガイド波パルス圧縮の実験を行った。図3に、今回用いた試験片とセンサの配置を示す。試験片の長さ2.8mのSGP-4B管(外径114.3mm, 厚さ4.5mm)には、右の管端から400mmの位置に深さ1.5mm幅40mmの全周ノッチがある。管の中央位置に送信用センサが、管の中央から右へ600mmの位置に受信用センサが配置されている。送受信センサはここでは磁歪タイプを用いているが、センサの詳細については参考文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

実験装置の概略を図4に示す。チャープ信号の発生に任意波形発生装置 (HP 33120A) を用い、これをパワーアンプ (自作) により電力増幅した後、送信セン

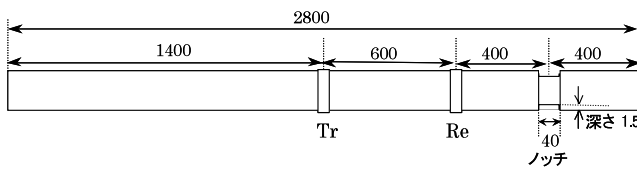


図3 実験に用いた試験片とセンサの配置  
Tr, Re はそれぞれ送信センサ, 受信センサを示す

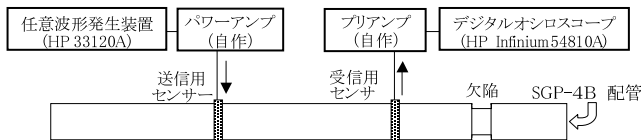


図4 実験装置の概略

サに投入する。受信センサから取得した受信信号は、プリアンプ (自作) を介し、デジタルオシロスコープ (HP infinium54810A) により収録する。収録された受信波形と参照波形 (ここでは任意波形発生装置から出力したチャープ波形) との相互相関処理は PC にて行った。

#### 3.2 実験結果

図5は、(A) 従来のバースト波励振における受信波形、(B) パルス圧縮による相関波形である。図5(A)における励起波形は、中心周波数  $f_c = 60k, 80k, 100kHz$ 、1バースト当たり2波の正弦波で構成されるバースト波であった。パルス圧縮における励振チャープ波は、中心周波数  $f_c = 60k, 80k, 100k$  の3種類で、周波数の掃引幅  $B_w = 1.5f_c$ 、チャープ波のパルス時間幅  $T_w = 10T_c$ 、ただし  $T_c$  は周波数  $f_c$  の正弦波の周期で  $T_c = 1/f_c$ 。いずれも収録のサンプリング周波数は10MHzで、S/N比の悪い状況を再現するため、加算平均処理は行っていない。

バースト励振受信波形 (A) ではある程度のノイズが認められるが、パルス圧縮による相関波形 (B) では明らかにノイズレベルが低減している様子が見取れる。

表1に、各信号のSN比を示す。各周波数の各信号ともに、バースト励振時とパルス圧縮時のSN比を比較すると、約15dBもしくはそれ以上のSN比の利得があり、パルス圧縮による良好なノイズ低減効果が確認された。また圧縮波形の時間幅については従来のバースト励振時と同等程度となっており、バースト励振時と同程度の時間分解能が得られていることが分かる。

## 4 結 言

伝播速度分散性を持たない  $T(0, 1)$  モードガイド波を用いた配管検査技術に、時間分解能を維持しつつノイズ低減することを目的にチャープ波パルス圧縮技術を適用した。その結果、パルス圧縮によって約15dBもしくはそれ以上のSN比改善効果があった。また時間分解能は、従来のバースト励振時と同等程度を維持していることが分かった。これにより、多様なノイズ環境において安定した配管検査が可能となることが示された<sup>9)</sup>。

なお本研究は、NEDO 平成15年度産業技術研究助成事業により実施した。

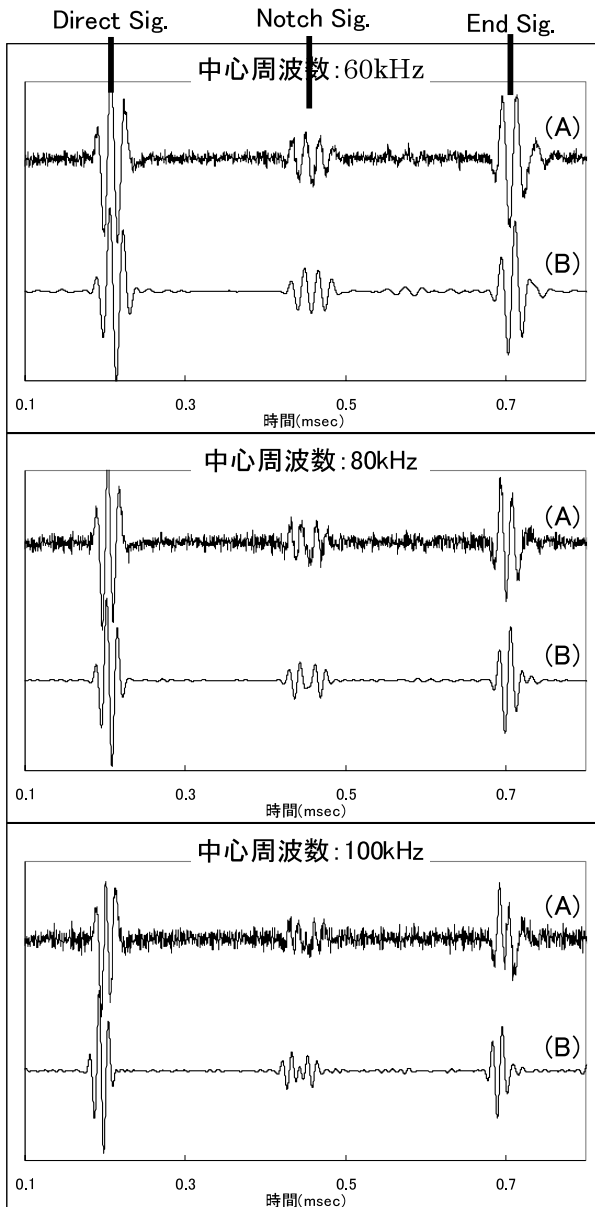


図5 配管検査波形の比較 (A)従来のバースト励振時の受信波形, (B)パルス圧縮後の相関波形

表1 各励振・処理法におけるSN比(単位 dB)

	Direct Sig.	Notch Sig.	End Sig.
60k バースト	14.2	5.8	12.7
60k パルス圧縮	32.1	20.2	29.9
80k バースト	16.4	5.5	13.7
80k パルス圧縮	34.9	21.4	30.8
100k バースト	12.1	1.7	7.6
100k パルス圧縮	35.2	22.2	30.5

## 文 献

- 1) 「特集 ガイド波による探傷」: 非破壊検査 **52** (12) pp. 653 - 682 (2003)
- 2) J. J. Ditri and J. L. Rose: Excitation of guided elastic wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions, J. Appl. Phys. **72** (2), pp. 2589 - 2597 (1992)
- 3) J. Li and J. L. Rose: Excitation and propagation of nonaxisymmetric guided waves in a hollow cylinder, J. Acoust. Soc. Am. **109** (2), pp. 457 - 468 (2001)
- 4) D. N. Alleyne and P. Cawley: Long range propagation of Lamb waves in chemical plant pipework, Materials Evaluation, Vol. **55**, pp. 504 - 508 (1997)
- 5) D. N. Alleyne et. al: The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes, J. Appl. Mech. **65**, pp. 635 - 641 (1998)
- 6) H. Nishino et. al: Modal analysis of hollow cylindrical guided waves and applications, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, pp. 364 - 370 (2001)
- 7) 西野秀郎: 「非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望」, 非破壊検査 **52** (12), pp. 654 - 661
- 8) H. Kwun et. al: The magnetostrictive sensor technology for long range guided wave testing and monitoring of structures, Materials Evaluation, **61** (1), pp. 80 - 84 (2003)
- 9) K. Toiyama et. al: High S/N ratio guided wave inspection of pipe using chirp pulse compression, to be published in Proceedings of ASME-PVP (2004)