

## 2 ガイド波超音波を用いたプラント配管高速検査技術の開発

問山清和, 佐野 誠

Rapid pipe inspection technique using guided wave

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 is still required to be improved, especially in pipes strongly affected by mechanical vibration noise. In this paper, chirp pulse compression technique was applied to the guided wave inspection. The technical brief explanation about chirp pulse compression was described. Noise reduction characteristics of this technique were verified with labo-level experiments. And field-testing was carried out for inspection of plant pipeworks that was in operation.

キーワード：ガイド波, 配管検査, パルス圧縮, ノイズ除去, フィールドテスト, 適用限界

### 1 緒 言

高度成長期に建造された石油化学プラントの多くは、老朽化が進み、特にプラントを構成する各種配管の腐食の進展が問題となりつつある。従来の配管検査では、損傷が生じやすい分岐管部、エルボー部、サポート部などに限定して検査を実施していれば一定の安全が確保された。しかしプラントの経年劣化に伴い、損傷がランダムに発生するようになったため、配管の全長的な検査が求められるようになってきた。

ガイド波技術は、配管全体を高速に検査できる技術として近年注目を集めている<sup>1-3)</sup>。すでいくつかの実用化試験が行われており、現場応用における問題点も報告されるようになってきた<sup>4-8)</sup>。その一つとしてSN比の改善は重要な問題である。検査現場では、モーター・ポンプ・コンベアの稼働による振動ノイズ・電気ノイズが生じ、これにより検査不能となることがあるからである。

このため著者らは、ガイド波技術に、パルス圧縮等の信号処理手法を適用し、効果的にSN比を改善させる技術の開発を、この3年間で検討してきた<sup>9-14)</sup>。

本報では3年間の研究の総括を行う。ガイド波技術、およびパルス圧縮技術(特許出願済<sup>15)</sup>)について概要を説明し、ラボ実験および、石油化学プラントの稼働中実機配管によるフィールドテストの結果について報告する。また、開発技術の適用限界、検出可能な欠陥等について説明し、開発技術適用によるメリットと期待される応用先を述べる。

### 2 ガイド波技術の概要

ガイド波とは、パイプ・板・鉄道レールなどの薄肉構造体中を、長手方向に伝わる超音波の総称である。

図1に、パイプ中を伝搬するガイド波振動形態例を示す。ガイド波は肉厚全体が振動し、その振動エネルギーが構造体内にパックされながら伝搬するので、エネルギーの散逸が少なく、長距離を伝搬する特長がある。

図2にガイド波配管検査の模式図を示す。送信センサより励起されたガイド波は、配管の長手方向に伝搬する。伝搬経路上に欠陥等の不連続面があると、ガイド波は反射する(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、欠陥の存在を検知できる。また欠陥エコーの到達時刻と、ガイド波の伝搬速度より欠陥の長手方向の位置を求めることができる。

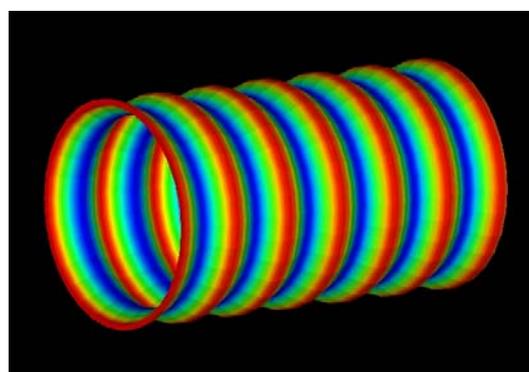


図1 ガイド波伝搬挙動のイメージ

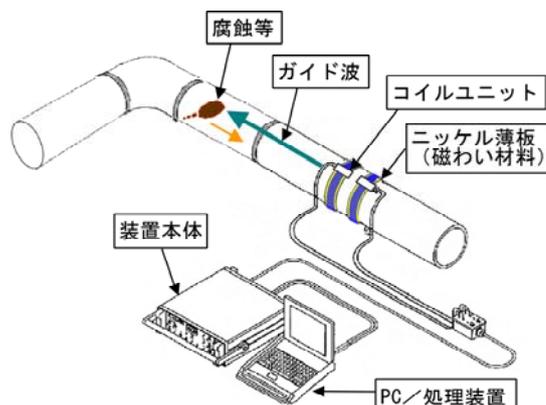


図2 ガイド波配管検査のイメージ  
(資料提供：株式会社シーエックスアール)

### 3 パルス圧縮技術

#### 3.1 パルス圧縮技術の概要

従来のガイド波技術では、図3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<sup>13) 14)</sup>。

#### 3.2 ラボ実験

ここではラボ環境における、パルス圧縮手法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4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  $\phi 11.5$ （断面欠損率4.3%）を設けている。探傷方法は、A：従来法であるバースト信号励振法（3波のハ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ている。

図5に各種法による実験結果を示している。A：バースト励振法では、200回の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 が識別不可能となっている。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ており、断面欠損率3%のF1エコーが判別可能となっている。この場合のSN比改善効果は約30dBであった。ラボレベルにおいて、パルス圧縮によるSN比改善効果が確かめられた。

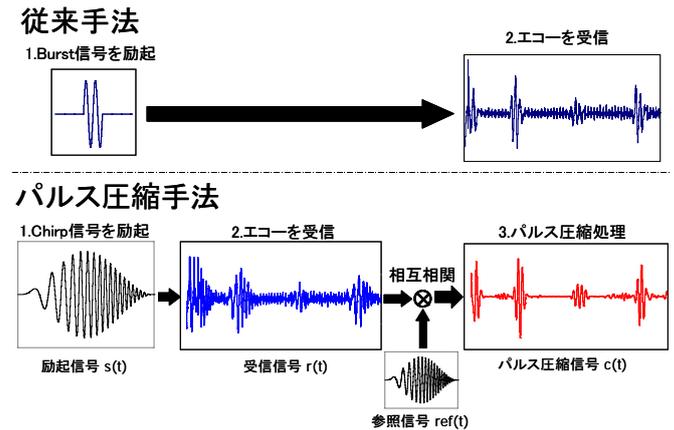


図3 パルス圧縮の概要

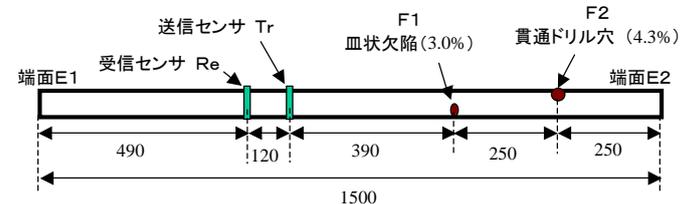
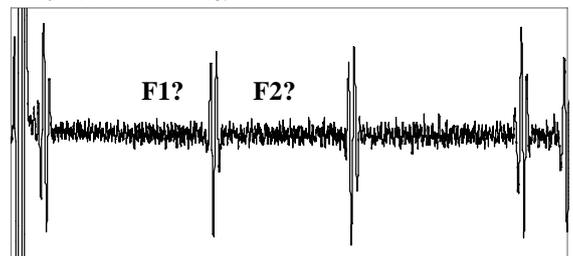


図4 試験片のレイアウト

A: 従来法 (Burst励振法)



B: 開発手法 (パルス圧縮)

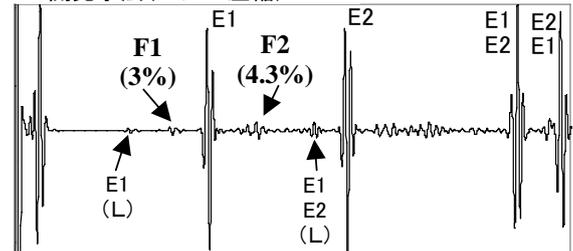


図5 各手法による探傷波形の比較 (ラボ実験)

### 3.3 稼働中実配管を用いた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6(A)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6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。なお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かった、センサ位置から3m以遠での欠陥情報が明瞭に認識できる。

ところで溶接部、フランジ部では、大きなエコー信号が生じ、近傍に欠陥があっても大きな信号に隠れて検出されない「不感帯」となっている(従来法、パルス圧縮法ともに)。このような部位では、従前の局所探傷検査により別途対応する必要がある。

## 4 適用のメリットと適用限界

### 4.1 適用限界について

ガイド波配管検査は、長距離伝搬性を持たせるべく低周波信号を用いるため、比較的分解能な検査方法である。従来法・パルス圧縮法ともに、ある程度の断面欠損率(約2~3%)を有する欠陥でないと検知できない。よって腐食、エロージョン/コロージョンといった、ある程度体積のある欠陥のみ検出可能である。疲労亀裂、応力腐食割れ、孔食などの微小欠陥は、ガイド波技術では検出できない。

検査対象となるパイプの材質にも制約が生じる。腐食、エロージョン/コロージョンなどが頻発し、孔食、応力腐食割れが比較的発生しにくい炭素鋼鋼管はガイド波検査の対象となるが、反対に孔食、応力腐食割れなどが頻発するステンレス管は検査対象から外れる。

パイプの設置状況についても制約がある。問題なく検査できるのは直管部のみで、エルボー部、分岐部、埋設部はガイド波波動場の乱れや減衰のため検査不能となる。また被覆管については、保温・保冷被覆については検査可能であるが、コンクリート被覆、アスファルトジュート被覆はガイド波波動場の乱れ・減衰により検査不能となる。また前述のとおり、溶接部、フランジ部、サポート部近傍は「不感帯」となるので、局所探傷法にて別途対応する必要がある。ただし溶接部・サポート部を跨いでの検査は可能である。

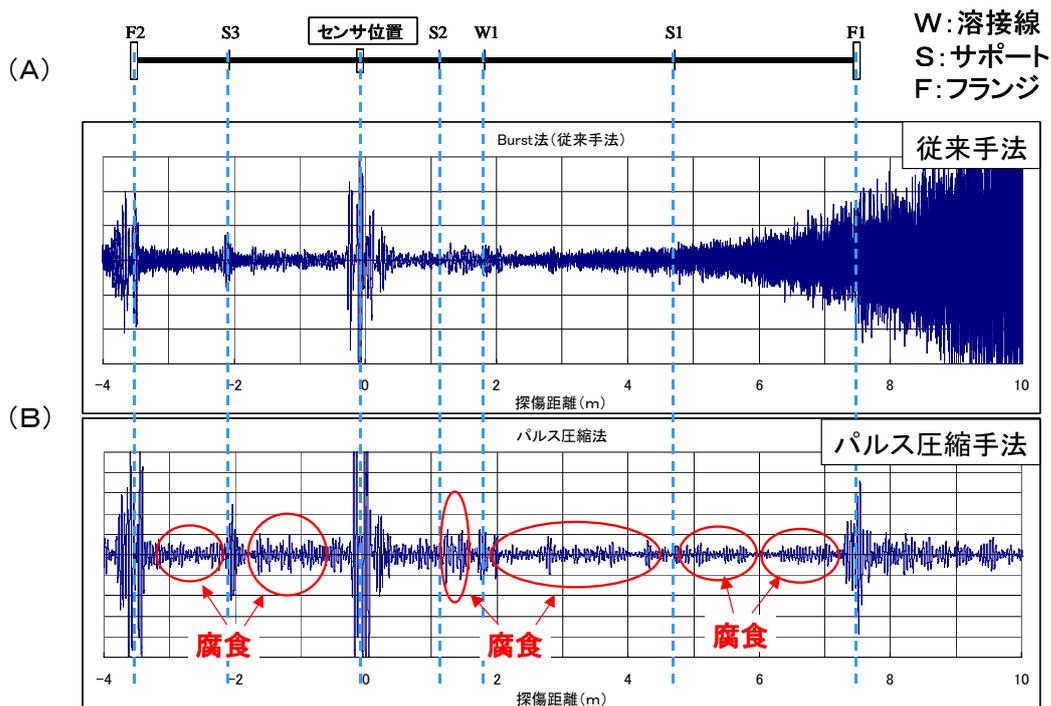


図6 対象配管のレイアウトと各手法による探傷波形の比較(フィールドテスト)

## 4.2 開発技術適用のメリット

開発したパルス圧縮技術を適用することにより、SN比の向上が達成されるため、従前技術に対し、以下のようなメリットがある。

### ○耐ノイズ性能の向上

稼働中の配管は、電気ノイズ、振動ノイズの影響を受け、検査不能となる場合がある。特にガイド波周波数域の強いノイズ環境下では、従前技術ではノイズ除去は不可能である。このような過酷なノイズ環境下でも、開発手法の適用により十分なSN比が確保され、検査が可能となる。

### ○有効検査範囲の延長

ガイド波は、距離伝搬によりある程度信号が減衰しSN比が劣化する。その程度は、配管の設置・腐食状況によって異なるが、従前手法においてセンサ位置から前後10mが検査可能範囲とされている。パルス圧縮の適用によりSN比が改善するため、検査範囲の延長が可能となり、センサ位置から前後20mが検査可能範囲となる。この場合、とくに垂直方向に伸びる棟槽配管の検査では、検査範囲の延長に伴い、検査のための足場を組む必要がなくなるため、大きなコストメリットとなる。

## 5 結 言

(1) ガイド波を用いた配管の高速検査において、ノイズの影響を除去し検査の信頼性を向上する、ガイド波パルス圧縮配管検査手法を開発した。

(2) ガイド波配管検査技術およびパルス圧縮手法について概略説明した。

(3) 開発したガイド波パルス圧縮配管検査手法について、ラボレベルでの検証を行った。従来手法ではノイズに埋もれて検出不能だった断面欠損3%の欠陥信号が、開発手法では明確に検出することができた。従来手法と比較し、約30dB以上のSN比の改善効果があり、同手法のノイズ除去性能が確認された。

(4) 石油プラントの稼働中配管を用いて、ガイド波パルス圧縮配管検査のフィールドテストを行った。隣接するコンベアからの振動ノイズの影響により、従前手法ではノイズに埋もれていた欠陥信号が、開発手法の適用により明瞭に検出できた。これにより、開発手法のSN比改善効果が、稼働中プラント配管を使って実証された。

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。

## 文 献

- 1) 西野：非破壊検査 52 (12), pp. 653-661 (2003)
- 2) 林：非破壊検査 52 (12), pp. 662-666 (2003)
- 3) 林：非破壊検査 54 (11), pp. 590-594 (2005)
- 4) 池田他：非破壊検査 54 (11), pp. 595-600 (2005)
- 5) 永井他：非破壊検査 52 (12), pp. 667-671 (2003)
- 6) 永井他：非破壊検査 51 (10), pp. 622-627 (2002)
- 7) 亀山他：非破壊検査 52 (12), pp. 672-678 (2003)
- 8) ガイド波による配管の信頼性評価研究委員会：非破壊検査 54 (11) pp. 586-589 (2005)
- 9) 問山他：広島西部工技研究報告 47, pp. 56-59 (2004)
- 10) K. Toiyama et al, Proc. ASME/JSME PVP conf., PVP-Vol. 484, pp. 41-45 (2004)
- 11) 問山他：広島西部工技研究報告 48, pp. 9-12 (2005)
- 12) 問山他：日本非破壊検査協会 平成17年度春季大会講演概要集, pp. 153-156 (2005)
- 13) 問山他：日本非破壊検査協会 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, pp. 47-52 (2004)
- 14) 問山他：超音波テクノ, Vol. 18, No. 5 (2006) pp. 12-16
- 15) 特願 2005-313200「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」