

# 3 方向制御ガイド波パルス圧縮法による配管検査技術の開発

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3報)

問山清和, 佐野 誠

Rapid pipe inspection technique using unidirected guided-wave chirp pulse compression  
The advancement of guided wave inspection of pipe using digital signal processing (3<sup>rd</sup> report)

TOIYAMA Kiyokazu and SANO Makoto

In this study, we developed the uni-directed guided-wave excitation technique with chirp pulse compression. We verified noise reduction characteristics of this technique by observing clear reflection signals from small defects (its cross-section loss were less than 4.3%) in strong noise condition. In this condition every small signal were buried in noise by conventional way. We also carried out field-testing for inspection of petrochemical plant pipeworks that was in operation.

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

## 1 緒言

石油化学プラントの経年劣化に伴い，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。配管全体を高速かつ網羅的に検査できる技術が強く求められている。ガイド波技術はその有望技術として近年注目を集めている<sup>1-3)</sup>。すでにいくつかの実用化試験が行われているが<sup>4-7)</sup>，同時に現場での問題点も明らかとなってきた<sup>4,6,8)</sup>。例えば，稼働中配管では振動ノイズ等の影響により検査不能となったり，長い配管などでは信号が減衰し十分長い検査範囲が確保できなかつたりする。このため更なるSN比の改善が求められている。

このため，著者らはパルス圧縮と呼ばれる信号処理手法をガイド波技術に適用し，効果的にSN比が改善する事を報告した<sup>9,10)</sup>。またガイド波パルス圧縮検査装置を開発し，これを用いたラボレベルでの実証試験の結果についてもいくつか報告した<sup>11-13)</sup>。

本報ではまず，実用化に必須なパルス圧縮方向制御技術(特許出願済<sup>14)</sup>)について紹介する。パルス圧縮適用のメリットは，強いノイズ環境下でも検査が可能となることである。これを検証するため，西部工業技術センター内に設置された各種機器が発生するノイズ環境を調べ，その中で最も強いノイズ環境下で検査を行った。その事例を報告する。最後に，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も報告する。

## 2 パルス圧縮方向制御技術

配管に励起されたガイド波は，図1(A)のように配管の左右両方向に伝搬する。ガイド波が左右両方向に伝搬されると，左右にある欠陥等からのエコー信号が受信

信号上に重畳して現れる。これが欠陥位置の同定など信号解釈を複雑にする。これを防止するため，図1(B)のように複数の送信センサを用いて，時差を設けて励振を行うなどして，ガイド波を一方向に伝搬制御(以下，方向制御と称する)する技術が開発され，現場の必須技術となっている。パルス圧縮を適用した場合の，方向制御技術についてはまだ開発例がなかったため，今回パルス圧縮方向制御技術について開発した。

パルス圧縮手法では，励振波形としてチャープと呼ばれる時間的に長い広帯域信号を用いる。この場合も，1対の送信センサを用い，時差を設け振幅を反転させて励振する事で，ガイド波を方向制御することができる。また同様に，受信時にも受信センサを1対適当な間隔を置いて設置し，2つの受信信号を適当に時間をずらして加減算する事により，特定方向からの信号成分をキャンセルすることができる。パルス圧縮処理により分解能の良いパルスを得るためには，送信センサ対・受信センサ対の間隔を各々うまく調整する必要がある(本技術の詳細は公開特許公報<sup>14)</sup>を参照のこと)。

図2には，方向制御しない場合と，方向制御した場合の，探傷波形(パルス圧縮処理適用後)を示している。どちらも図3に示す試験配管を用いている。方向制御によって探傷信号が大変単純になり，信号の解釈が大変容易になっている事がわかる。

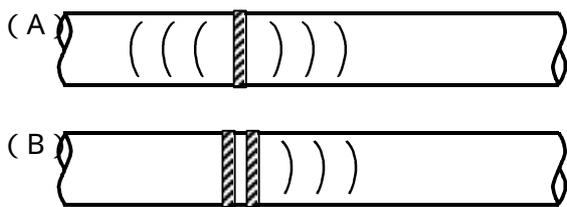


図1 ガイド波の伝搬の様子 (A: 左右に伝搬する様子, B: 方向制御により右方向にのみ伝搬の様子)

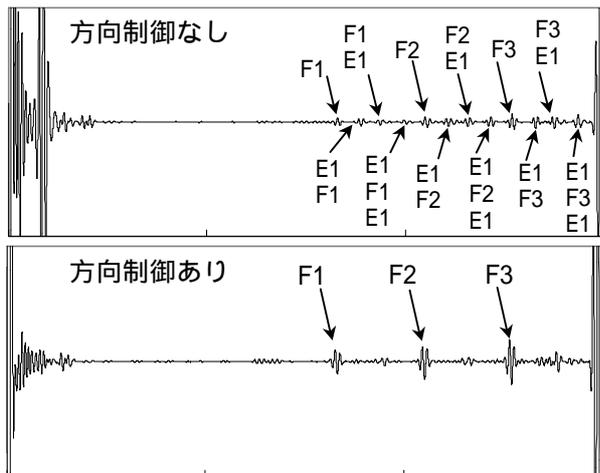


図2 方向制御の有無によるパルス圧縮信号の比較

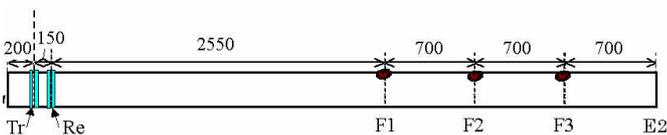


図3 試験配管のレイアウト

### 3 ノイズ環境の調査

この節では、パルス圧縮適用のメリットである「強いノイズ環境下でも検査が可能となる事」を検証する前準備として、プラント内のノイズ源を想定し、モーター、ポンプ、およびディスクグラインダ等の電気機器によるノイズの発生状況について調査し、ノイズと探傷信号の周波数関係を調べた。

測定対象としたノイズ源は、図4に示すような、西部工業技術センター内に設置されているA:ダクトファン、B:水循環ポンプ1、C:水循環ポンプ2、D:電動グラインダである。これらをガイド波受信センサの付いた1.5m長の鋼管片を測定対象近傍に置き受信センサからの信号を差動型プリアンプ(40dBup)と、ローパスフィルタ(カットオフ周波数 500kHz)を経由して収録した。A~Cに

については電氣的ノイズのみを測定し、Dの場合のみグラインダ振動を配管に付与し、電氣的ノイズと振動ノイズを合わせた状態で測定した。

図5にノイズの測定結果を示す。A~Cを総じて見ると、30kHz~150kHz程度の周波数帯域にノイズが分布していることがわかる。D(電動グラインダ)については、30kHz程度の低周波から400kHzを超える高周波域まで延びるインパルス状ノイズが観測された。

A~Dいずれの場合においても、モーター・ポンプ等機器近傍では、ガイド波探傷における探傷信号帯域(20k~200kHz)と重なる周波数帯域のノイズが存在することがわかった。これらモーターやポンプなどが併設されている機器配管などの検査においては、ガイド波探傷信号帯域と重なるため、ノイズの影響を受ける。

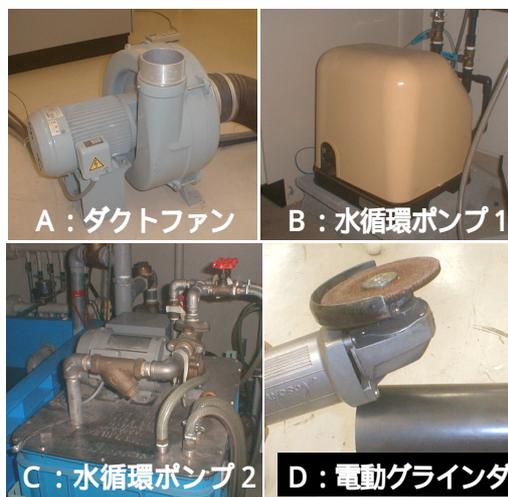


図4 ノイズを測定した対象機器

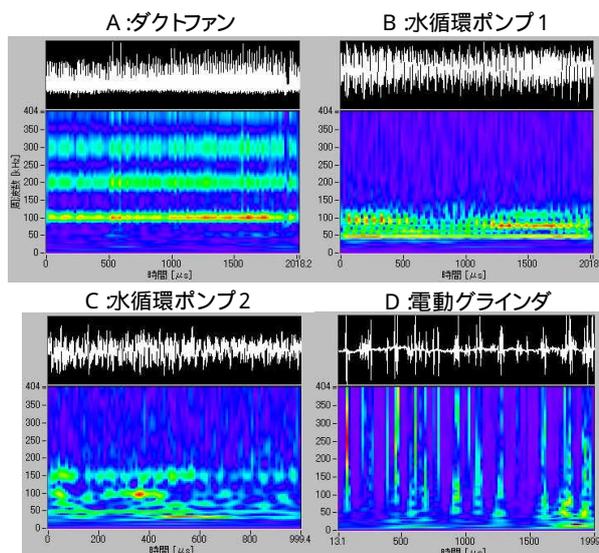


図5 ノイズ測定結果 (上側: 測定波形, 下側: ウェーブレット解析図)

## 4 ノイズ除去性能の検証

稼働中配管では、探傷信号の周波数領域に近い強いノイズが混入し、加算平均しても除去困難な場合が多い。このため検査が困難となる場合がある。ここでは、前節において最も振幅が大きく、かつ探傷信号の周波数帯域に近いダクトファンのノイズ環境において、パルス圧縮のノイズ除去性能の検証を行った。

実験に用いた試験片の配置を図6に示す。試験片は炭素鋼鋼管 SGP-80A を用い、図中記号“Tr”、“Re”の位置にそれぞれ、磁歪型のTモードガイド波送信センサ、受信センサを設置している。記号“F1”、“F2”位置にはそれぞれ機械加工した皿状人工欠陥(断面欠損率3%)、ドリル貫通穴 11.5(断面欠損率4.3%)を設けている。図7の写真は各欠陥の形状を示している。

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。バーストおよびチャープの中心周波数は、ダクトファンのノイズ周波数帯域とちょうど重なる100kHzとした。どの場合においても200回の加算平均処理を行った。

図8は、A:バースト励振法、B:チャープ励振によるパルス圧縮法の結果を示している。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。さらにこの場合は、入射信号とノイズの周波数がほぼ一致しているため、周波数フィルタによるノイズ除去効果は期待できない。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。これらより、強いノイズ環境下においても、パルス圧縮を適用することにより探傷可能となることがラボレベルにおいて明らかに示された。

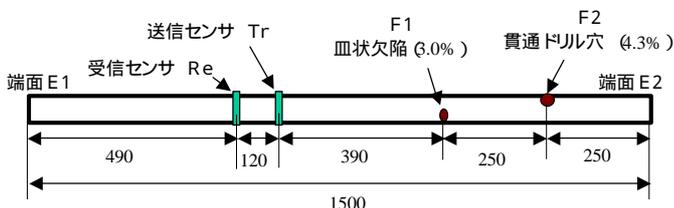


図6 試験片のレイアウト

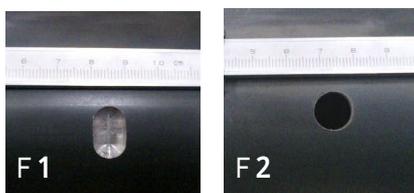
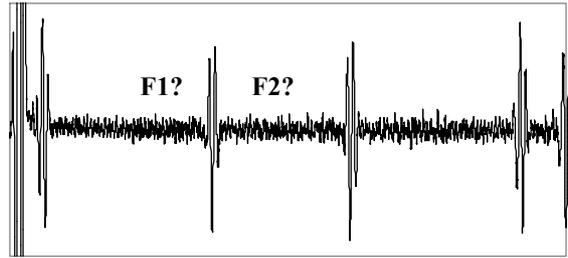


図7 模擬欠陥の写真

A 従来法 (Burst励振法)



B: 開発手法 (パルス圧縮)

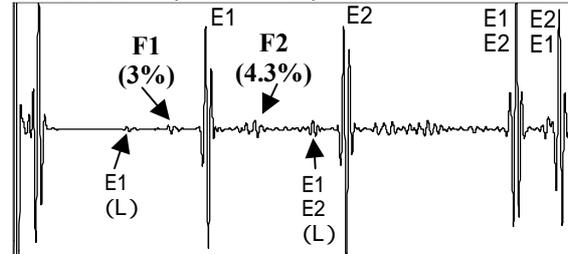


図8 各手法による探傷波形の比較



図9 検査した配管の外観写真

## 5 フィールドテスト

実際の石油化学プラント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。

検査対象配管は、タンクヤード内にあるポンプに繋がったラック配管で、外形10インチ公称肉厚 6.6mm の炭素鋼鋼管で、外面塗装が施されていた(図9参照)。内部流体はナフサで、検査時ポンプは稼働中していた。配管の直線部分は50m以上あり、そのうち20m程の部分を検査した。

図10(A)に配管のレイアウトを示す。図中の“W”、“S”、“FL”、“Noz”記号は、それぞれ溶接線、サポート、フランジ、ノズルを示す。溶接線間の距離はおよそ 5.5m となっている。

図10(B)は、開発手法(パルス圧縮手法)による探傷結果を示す。図中“F”記号で示された信号は欠陥を示しており、センサ位置から20mの範囲で欠陥検出できていることがわかる。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。このよう

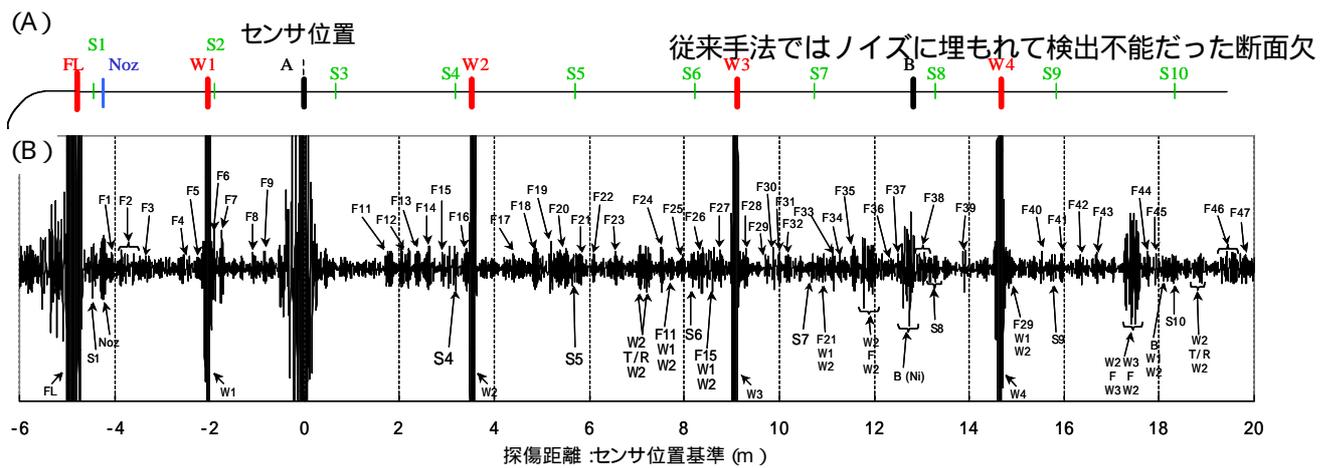


図10 配管のレイアウト (A) および探傷結果 (B)

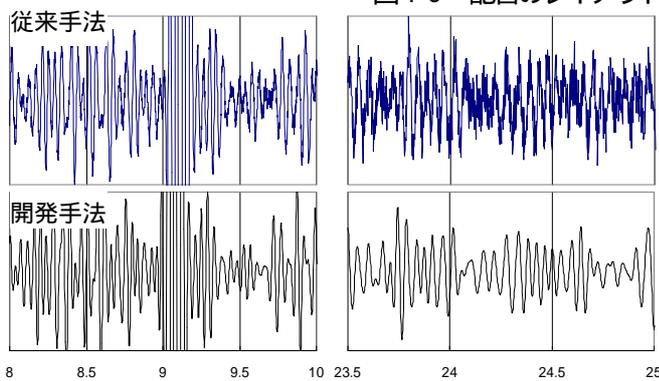


図11 従来法 (上) と開発手法 (下) による探傷波形

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。

図11は、従来のガイド波手法と、開発したガイド波パルス圧縮による探傷波形を比較したものである。今回検査した現場のノイズ環境は比較的穏やかであったため、探傷距離10m以下においては、両手法にそれほど大きな違いは見られなかった。しかし探傷距離20mを超えた領域では、ガイド波信号の減衰に伴って従来手法の探傷波形はノイズの重畳が目立っている一方、開発手法ではほぼノイズの影響が表出しなかった。開発手法のノイズ除去性能が改めて確認された。

## 6 結言

1. 配管検査のフィールド適用に必須な、ガイド波パルス圧縮方向制御技術を開発した。
2. モーター・ポンプ等電気機器のノイズを測定し、探傷信号との周波数関係を調べた。ノイズは概ね 30k ~ 400kHz に分布し、ガイド波信号帯域(20k ~ 200kHz)と重なっていた。
3. 従来手法では検査困難な強いノイズ環境下で、開発手法(パルス圧縮)を適用した配管検査を行った。

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。同手法のノイズ除去性能が実証された。  
4. 石油化学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。稼働配管に対して、センサから前後20m範囲で欠陥検出できることを確認した。20mを超える遠方の信号では従来/開発手法では明らかなノイズレベルの差が見られた。

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. Toyama 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) 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」