

3 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2報）

問山清和, 佐野 誠

The advancement of guided wave inspection of pipe using digital signal processing (2nd report)

TOIYAMA Kiyokazu and SANO Makoto

Guided wave is expected as the most promising technique for rapid long-range inspection of pipes. In our previous work, we had applied the chirp pulse compression to the guided wave technique and the improvement of SNR about 15 dB or more had been achieved. In this study, we verified the chirp pulse compression technique in term of the applicability for actual inspection. The amplitude of the pulse-compressed waveform was correlated with the loss ratio of the section area of defects. In the environment of strong mechanical vibration noise, we could clearly observe the signals reflected from small defects (its loss ratio is $\sim 1.7\%$) by applying the pulse compression, although no signal were observed by conventional way. In inspecting pipes covered with anti-corrosion tape and partly buried underground, guided wave signal were highly attenuated and the acoustic field might be disrupted when the signal was passing through the buried area.

キーワード：ガイド波, 配管検査, パルス圧縮, 実証試験, 断面欠損率, ノイズ除去

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っている。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中で、ガイド波技術はその有望な技術の一つとして近年注目を集めている¹⁾。ガイド波を用いた配管検査技術の実用化研究は、米国、英国のグループが中心となって進められ、2000年代になると、英国の PI, GUL, 米国 SwRI により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始めている²⁾。それと同時に、現場適用に伴う問題点も徐々に表面化してきた。検査現場の多様なノイズ環境による検査精度の劣化問題や、保温材被覆配管・地中埋設配管を検査する際、ガイド波信号が減衰し検査が困難になる問題などがそうである。

著者らは上記課題解決の1手段として、パルス圧縮と呼ばれる SN 比改善に有効な信号処理手法をガイド波配管検査技術に適用し、15dB 以上のノイズ低減効果が得られた事を前回報告した^{3),4)}。今回はこれに引き続き、フィールド検査に対応したガイド波パルス圧縮検査システムを開発し、ガイド波パルス圧縮技術についての各種実証試験を行った。欠陥断面欠損率の定量評価性、従来技術では除去出来ない強いノイズに対する耐ノイズ性、部分埋設配管への検査適用性などについて検証したので報告する。

2 配管検査システムの開発

パルス圧縮を適用したガイド波配管検査技術を実用化するため、フィールド検査使用を考慮した配管検査システムハードウェアの一部（アンプセット）及び制御ソフトウェアを開発した。表1にシステムの基本仕様を示す。

ハードウェアは、アンプセット、制御部、液晶ディスプレイの主に3つの機材から構成される。図1はその外観写真である。今回開発したアンプセットには送信用パワーアンプ、受信用プリアンプが内蔵されている。また制御部には、市販の PXI システム（任意波形発生ボード、AD ボード、制御コンピュータユニット）を用いている。

すべてのハードウェアは、今回開発した制御ソフトによって制御される。制御ソフトは LabVIEW プラットフォームにて記述され、chirp 信号など励起信号の波形定義・波形発生・受信信号の収録・相関処理等のデータ処理・結果表示・保存等の機能を全て統括する。パルス圧縮処理を行う相互相関計算は、LabVIEW 上でソフトウェア的に行われる。計算に要する時間は、実用的な検査範囲をカバーするに十分なデータ長さ（探傷距離32m 相当：サンプリング周波数10MHz、収録時間20msec）に対して2秒以内となっており、実用的にはほぼ問題ない計算速さとなっている。

表1 配管検査システムの基本仕様

送信部	送信波形 送信パルス幅 送信電圧	Chirp, TSP, Burst, その他任意波形*1 Max 50msec*1 Max 70Vpp(50Ω負荷)*1
受信部	受信 ch 数 ゲイン 周波数帯域 全高調波歪 サンプリング	4 ch (同時受信) Max 52dB*2 2 kHz ~ 1 MHz (-3 dB) 0.2%以下 10MS/sec*1, 8 bit
制御部	制御 CPU 制御ソフト 同期加算平均 相関処理	Celeron850MHz LabVIEW7.0 任意回数*1 ソフトウェア上にて処理 (処理時間 2 sec 以内*3)
寸法 (幅・奥行・高さ)	制御部 アンプセット	271.3×396.5×177.0 470.8×462.6×147.1
その他	電源	AC100V(50/60Hz)

- * 1 ソフトウェア的に設定可能
- * 2 6, 20, 26, 40, 46, 52dB にてソフトウェア制御可能
- * 3 20msec(探傷距離32m 相当)分の受信波形に対して

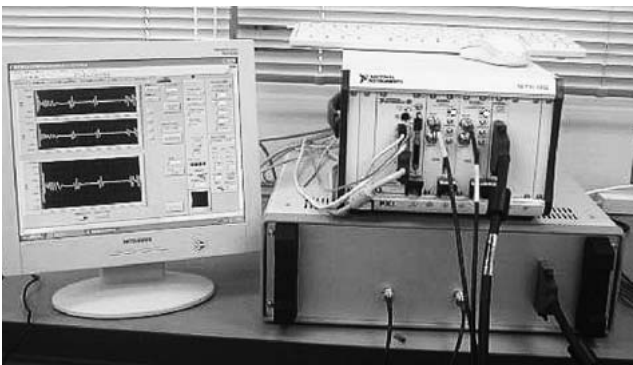


図1 配管検査システムの外観写真

3 実証試験

次にガイド波パルス圧縮技術についての各種実証試験を行った。欠陥(断面欠損率)の定量評価性, 従来技術では除去出来ない強いノイズに対する耐ノイズ性, および部分埋設配管への検査適用性について検証した。

3.1 欠陥断面欠損率の定量評価性の検証

Burst 信号を励起する従来のガイド波配管検査法は, 欠陥の断面欠損率とエコー振幅との間にほぼ直線的な相関関係があることが示され^{5),6)}, 有効な欠陥定量評価の手段とされている。開発したパルス圧縮手法を適用した際にも, 従来法と同様な相関関係が認められれば, 現場適用の際に混乱がない。ここではパルス圧縮手法を適用した際の, 欠陥断面欠損率の定量評価性

について実験的に検証した。

実験には長さ5mの配管用炭素鋼鋼管SGP-150A(外径165.2mm, 肉厚5.0mm)を数本用い, 各配管ごとに, 図2に示すように送信センサ(Tr), 受信センサ(Re), 欠陥(F1~F3)を配置した。欠陥位置(F1~F3)には表2に示すような様々な形状の人工欠陥のうち適当な3つを選んでそれぞれ配置した。欠陥配置の選択には特別な意味を持たせていない。ガイド波送信時には, 掃引周波数帯域DC~80kHz, 信号時間長0.5msec, Hanning 窓付き chirp 波形を励振した。エコー信号を受信後, パルス圧縮処理を行った。

図3に典型的なパルス圧縮後の探傷結果を示す。図の矢印で示された波形が各欠陥や管端からのエコー信号に相当する。管端E2のエコー振幅により規格化された各種欠陥エコー振幅と, 欠陥の断面欠損率との関係を図4に示す。両者の間にはほぼ線形な相関関係があることが見て取れる。従来のBurst波を用いる方法と同様に, エコー振幅から欠陥の断面欠損率を定量評価できることが示された。相関関係からの若干の逸脱は, 欠陥形状の違いによるものと推測される。

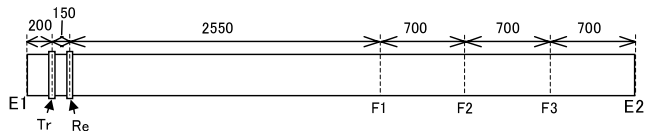
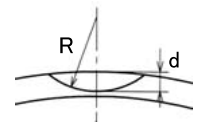


図2 試験片のレイアウト(単位 mm)

表2 人工欠陥の形状詳細

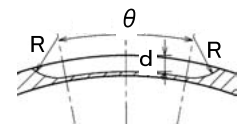
A. 球面状欠陥

深さ d/mm	4	4	4	2	3
曲率 R/mm	10	15	25	25	25
断面欠損率/%	1.7	2.1	2.6	0.9	1.7



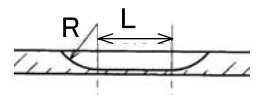
B. 円周方向に伸びた欠陥

曲率 R/mm	10	10	10
深さ d/mm	4	4	4
円周角 θ/deg	0	10.6	21.4
断面欠損率/%	1.7	4.1	6.5



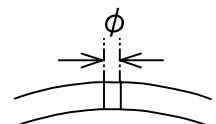
C. 軸方向に伸びた欠陥

曲率 R/mm	10	10	10
深さ d/mm	4	4	4
軸方向伸び L/mm	0	8	16
断面欠損率/%	1.7	1.7	1.7



D. 貫通穴欠陥

穴直径 φ/mm	24
断面欠損率/%	4.8



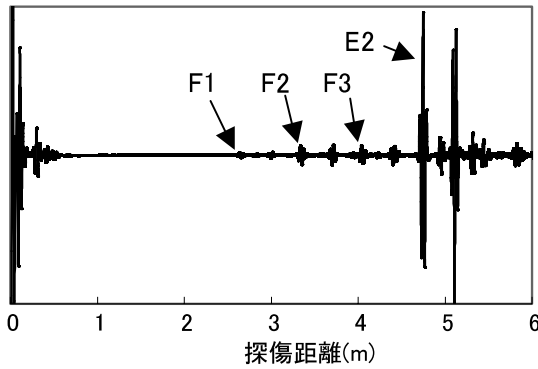


図3 典型的なパルス圧縮波形

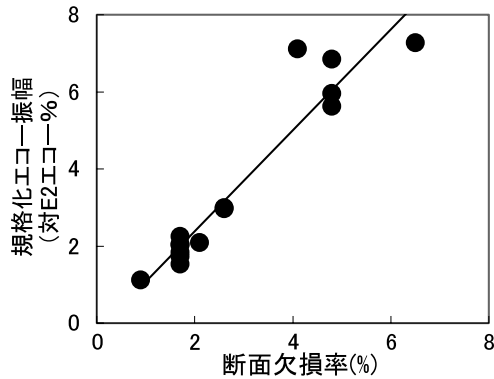


図4 エコー振幅と断面欠損率との相関

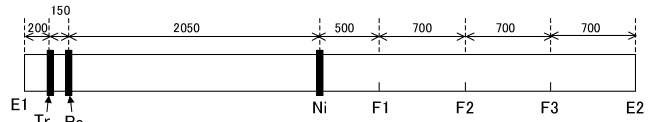


図5 試験片のレイアウト（単位 mm）

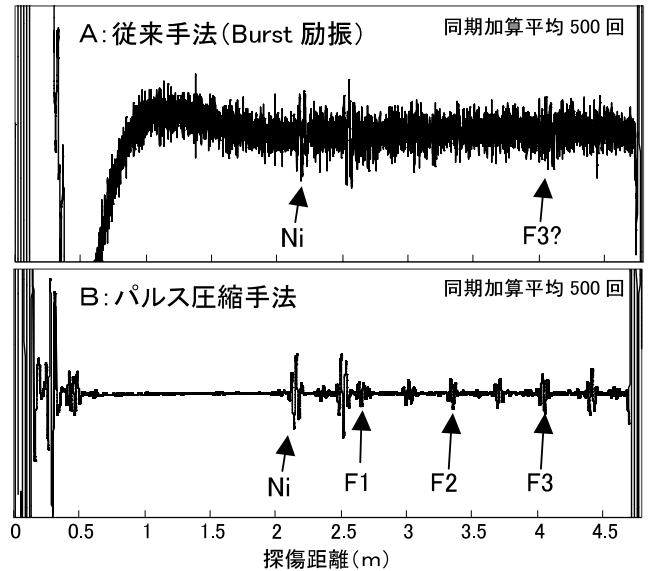


図6 強い振動ノイズ環境下での探傷結果比較

3.2 強いノイズに対する耐ノイズ性能の検証

ガイド波配管検査にパルス圧縮手法を適用するメリットとして耐ノイズ性の向上が挙げられる。従来法においても、同期加算平均等のノイズ除去手法があるが、ここでは従来法では除去できない強いノイズ環境に対して、パルス圧縮による耐ノイズ性能を検証する。

実験には図5に示す試験片を用いた。欠陥F1, F2, F3の断面欠損率はそれぞれ1.7%, 2.1%, 2.6%である。図5中に示すNi記号位置にはニッケル薄板が貼り付けてある。これは断面欠損率約5%相当の反射源となることが経験的にわかっている。稼動中配管におけるポンプ・モーター等の機械振動を想定して、回転中のディスクグラインダー本体部分を配管に当て機械振動を付与した状態において、従来法およびパルス圧縮手法によって探傷実験を行った。ノイズ除去のための同期加算平均は、両手法とも500回行った。

図6に探傷結果を示す。従来手法では同期加算平均後もノイズが十分除去出来ず、Ni以外の欠陥エコーはほとんどノイズに埋もれている。これに対しパルス圧縮手法ではノイズが十分除去され、断面欠損率1.7%までの全ての欠陥信号が明瞭に観測されている。NiエコーのSN比について両者を比較すると、従来手法では1.4dB、パルス圧縮手法では33.3dBと、パルス

圧縮の適用により実に31.9dBものSN比が改善されている。これにより、同期加算平均では除去出来ないほどの強い振動ノイズに対して、パルス圧縮の適用により十分な耐ノイズ性能を有することが明らかとなった。

3.3 部分埋設部の信号透過性についての検証

従来のガイド波配管検査において防油堤貫通部配管など部分埋設された配管は、ガイド波が伝播する際、非常に大きく減衰するため難検査箇所とされてきた。

パルス圧縮の適用により入射エネルギーの増大が期待されるため、部分埋設配管への検査適用性について、特に埋設部における信号透過性に注目して検証した。

実験には、図7に示すような部分埋設部を設けたモックアップ配管を用いて行った。図7-(A)の配管では、ジュートによる防食被覆処理がされた後、砂中に埋設されている。一方図7-(B)の配管では防食被覆なしに単に砂中に埋設されている。

各配管についてのパルス圧縮適用後の探傷結果を図8に示す。ジュート巻き配管(A)では、減衰が非常に大きく、埋設部を超えた先の管端エコーでさえ明瞭に観測されない。また埋設部に相当する領域では、ジュートによる配管の拘束によりガイド波音場が乱れたと

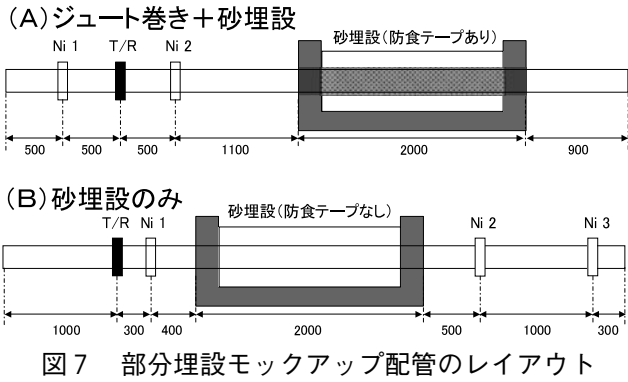


図7 部分埋設モックアップ配管のレイアウト

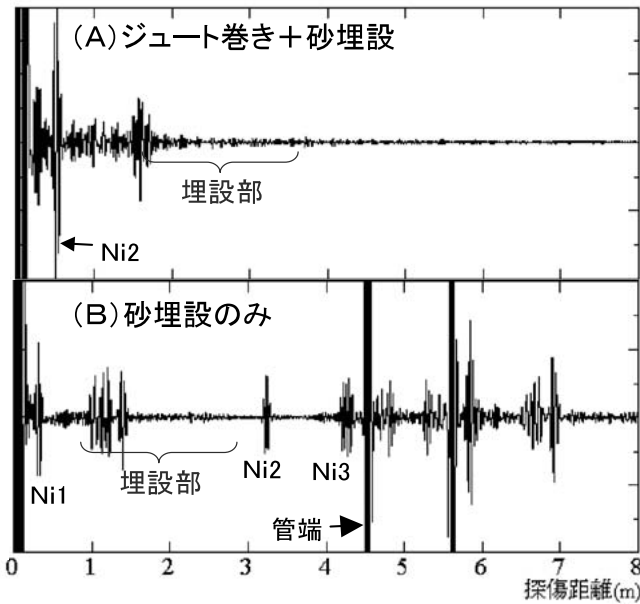


図8 部分埋設配管に対する探傷結果

思われる、ランダムな小振幅ピーク群が見られ、検出すべき埋設部の欠陥情報は、このピーク群に埋もれて検出できない状況にある。仮に入射パワーをいくら大きくしてもこの問題は解決されないことが容易に予想されることから、パルス圧縮適用によるパワー増大のみではジュート巻き埋設配管の検査は困難と判断される。

一方ジュート巻きを伴わない砂埋設のみの配管(B)については、埋設部を超えた先のニッケル貼付け部(断面欠損率約5%相当の反射源になることが経験的にわかっている)や管端からのエコーが明瞭に観測され、十分な信号透過性を持つ事が分かる。

4 結 言

パルス圧縮を適用したガイド波配管検査技術の実用化に向け、以下の開発・検証を行った。

1. フィールド検査適用を考慮した、パルス圧縮手法適用可能なガイド波配管検査システムを開発した。
2. ガイド波パルス圧縮技術について以下の実証試験を行った。

○欠陥の断面欠損率の定量評価性について

パルス圧縮適用後も、エコー振幅と欠陥断面欠損率との間にはほぼ線形な相関関係が認められた。

○強いノイズに対する耐ノイズ性について

強い機械振動ノイズが付与され、従来技術では検査不可能なノイズ環境下においても、パルス圧縮の適用によりノイズが効果的に除去され、探傷可能となることが確認された。パルス圧縮の適用によりSN比は31.9dB向上した。

○部分埋設配管への検査適用性について

ジュートによる防食被覆処理がされた砂埋設配管については、パルス圧縮適用後も非常に大きな減衰がみられ、同時に埋設部における音場の乱れが発生するため、現状では検査困難と判断された。防食処理されず砂中に埋設された配管については、十分な信号透過性を持ち検査適用の可能性はある。

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：「特集 ガイド波による探傷」、非破壊検査 52 (12) pp.653-682 (2003)
- 2) 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)
- 3) 間山, 佐野：「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)」, 西部工技研究報告 47, pp.56-59 (2004)
- 4) K. Toiyama et. al: High S/N ratio guided wave inspection of pipe using chirp pulse compression, Proc. ASME/JSME PVP conf., PVP-Vol. 484, pp.41-45 (2004)
- 5) 金原他：「ガイド波手法によるプラント配管検査への適用例」, 日本非破壊検査協会 第11回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.89-94 (2004)
- 6) 永井他：「埋設配管に対する長距離超音波探傷技術の開発」, 非破壊検査 51(10)pp.622-627(2002)