

ねじりモードガイド波によるエルボ部の減肉の最適計測手法

Optimum measurements for pipe wall thinning in an elbow using torsional guided waves

(一財)発電技検 古川 敬 Takashi FURUKAWA Member
徳島大学 西野 秀郎 Hideo NISHINO Member

This paper presents an application of numerical simulation for ultrasonic guided wave in piping with elbow. A displacement field of torsional guided waves in elbow and piping beyond elbow was computed using three-dimensional finite element models. We tried to utilize the predicted displacement field to optimize the measurement condition or estimation of defect detectability. Experimental validation was carried out using artificial defects in elbow and beyond elbow region. Good agreement was obtained between model prediction and the experimental data.

Keywords: Torsional ultrasonic guided waves, elbow piping, wall thinning, FEM simulation

1. はじめに

配管の減肉検査等において、ガイド波を用いて広範囲を探傷する方法や遠方から探傷する方法が期待されており、直管に対してガイド波を用いたパルス反射法による探傷方法が規格化されている[1]。しかし、曲がり管や分岐管の様な複雑な形状を有する部位に対しては、まだ課題が多い状況と言える。エルボ部においては、周波数に依存して振幅分布に偏りを生じることが、実験ならびにシミュレーション等で明らかにされつつある[2-4]が、計測の方法や計測結果の評価方法は研究中である。こうした部位を探傷する場合には、欠陥の発生が想定される位置に応じて、適正な計測条件を選定することや計測条件における欠陥検出性を把握した上で探傷結果を評価することが重要と考えられる。

本研究では、ガイド波探傷における計測条件の最適化に数値シミュレーションを活用する方法について検討している。具体的には、大規模有限要素法(FEM)を用いた数値シミュレーションにより最大振幅値分布を予測し、振幅値を基に欠陥検出性を評価する方法を試みている。ここでは、周波数を変えたシミュレーション解析で予測した振幅値と、実験で評価した検出性との相関性を調査した。

2. 数値シミュレーションを用いたガイド波の振幅分布予測

FEMを用いたガイド波の伝搬シミュレーション解析で

は、ガイド波が伝搬する部位を計算機のメモリ空間内にモデル化するため大規模な解析となる。本報では、市販の大規模超音波解析ソフトウェア（伊藤忠テクノソリューションズ社製 ComWAVE）とワークステーション（12コアCPU、メモリ96GB）を使用して解析した。ガイド波の送信は、配管の外面に接触させた送信部から円周方向に初期変位を与える方法とし、受信は任意の位置のFEMメッシュの変位成分を時系列で取得する方法とした[4]。図1は50A sch40（外径60.5mm×肉厚3.9mm）アルミニウム管及び90°ロングエルボをモデル化した例である。実際の測定と同様に直管の外周上に等間隔で8箇所の送信部を設定し、全て同位相で初期変位の波形を周方向に加振してねじりモードのガイド波（T(0,1)モード）を送信した。図2は解析結果の例であり、図2(a)はこれまでと同様に振幅値分布を時系列で表示した波面の伝搬状況の図である。ここに示した例では、ガイド波がエルボ部を通過する際に腹側の振幅値分布が増加していることを定性的には確認できるが、最大振幅値を示す場所を特定しにくかった。そこで図2(b)に示す様に、解析した全ての時系列データの振幅値から各位置における最大振幅値を抽出し、最大振幅値分布を表示することとした。この図の振幅値が大きな位置では、欠陥検出感度が高いのではないかと推測できる。実験結果と比較してこの仮説の検証を行った結果を次項に示す。本報ではシミュレーション解析及び実験ともに50A sch40アルミニウム管及び90°ロングエルボにおける条件で検討した。

連絡先:名前、〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町 14-1、
(一財)発電設備技術検査協会 NDE センター、
E-mail: furukawa-takashi@japeic.or.jp

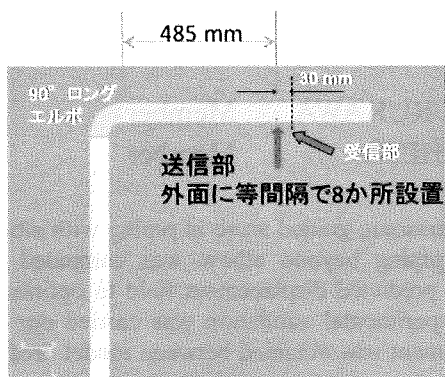
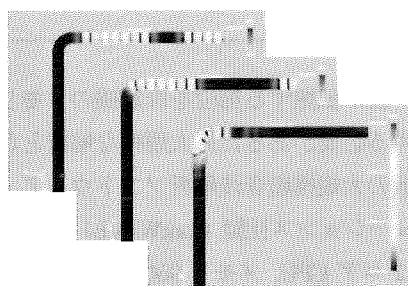
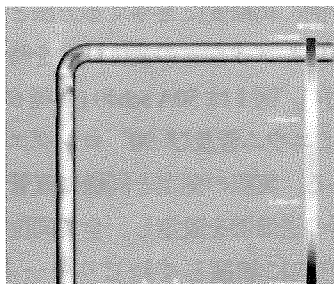


図1 エルボ部の解析モデル



(a) 時系列の振幅値分布 (波面の伝搬状況の表示)



(b) 全時系列データから各場所の最大振幅値の取得

図2 最大振幅値分布の表示方法

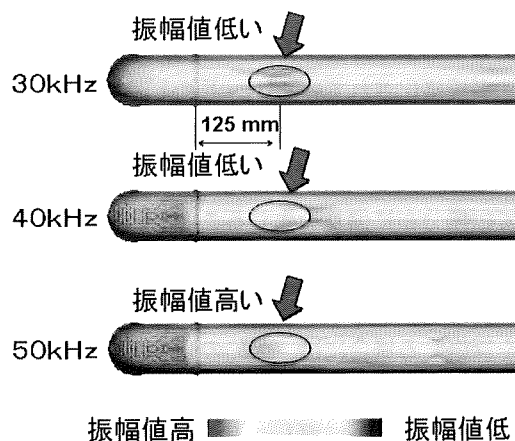
3. ガイド波の振幅分布と検出感度の比較

3.1 エルボ通過後の模擬減肉の検出

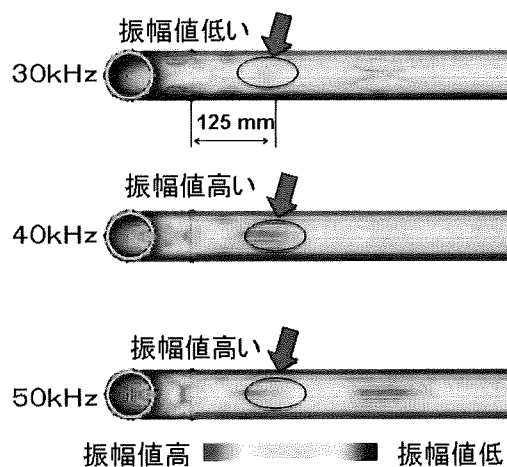
最初に、エルボ通過後の直管部においてシミュレーション解析で予測した振幅値と実験で測定した検出感度の結果を比較した。図3はロングエルボ通過後の直管部における周波数別の最大振幅値分布を示した結果である。エルボの背側と腹側の直管部において最大振幅値の偏りが確認でき、偏りが生じる位置は周波数によって変動することが確認できる。例えば、エルボと直管の接合部から約120 mm~130 mm離れた位置付近の振幅値分布に着目すると、エルボの背側では周波数50 kHz, 40 kHz, 30 kHzの順に振幅値が増大する結果であった。一方、腹側では30 kHz, 50 kHz, 40 kHzの順に振幅値が増大する結果であ

った。

エルボ通過後の直管部において最大振幅値が欠陥検出感度と相関を持つかどうかを検証するため、模擬減肉を付与した実験により検出感度を評価した。図4は実験配置を示した図であり、エルボ越えの直管部の背側ならびに腹側にφ9.5 mmの超鋼カッターで円柱状の模擬減肉を付与して検出性を評価した。背側に模擬減肉を付与した時の実験結果と腹側に付与した実験結果を図5に示す。検出感度は、各々周波数30 kHz, 40 kHz及び50 kHzでの断面欠損率(%)に対する反射率(%)の増加率[2]で評価した。実験で評価した検出性は、背側の欠陥に対して周波数30 kHz, 40 kHz, 50 kHzの順に感度が高い結果であり、腹側の欠陥に対しては周波数30 kHz, 50 kHz, 40 kHzの順に感度が高い結果であった。解析で予測した振幅値は実験結果と同様の傾向であることが確認された。



(a) エルボ背側の振幅値分布



(b) エルボ腹側の振幅値分布

図3 エルボ通過後の直管部における周波数毎最大振幅値分布の解析結果

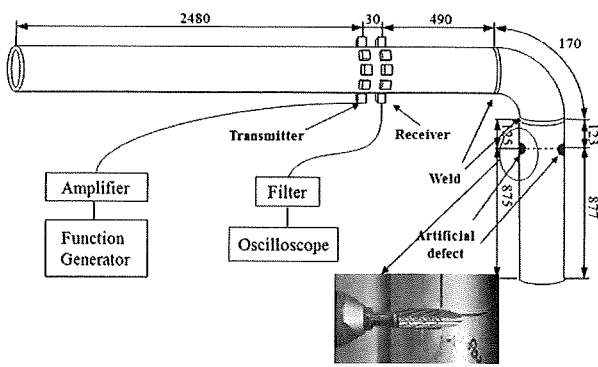


図4 実験配置図と模擬減肉の付与状況

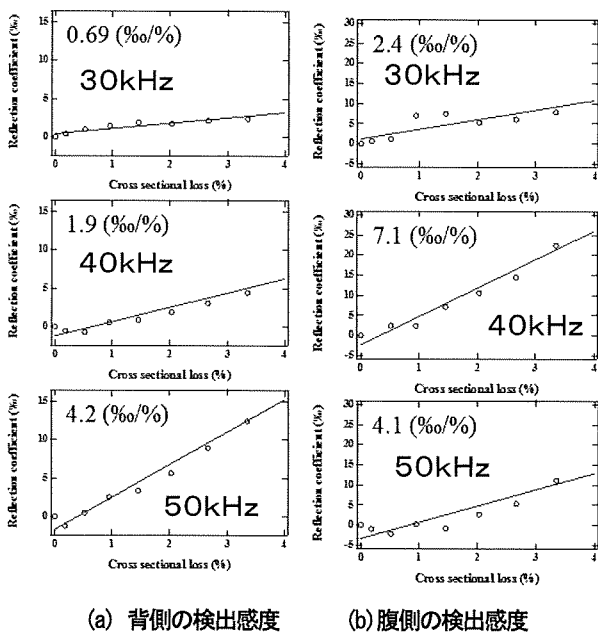


図5 周波数別の検出感度

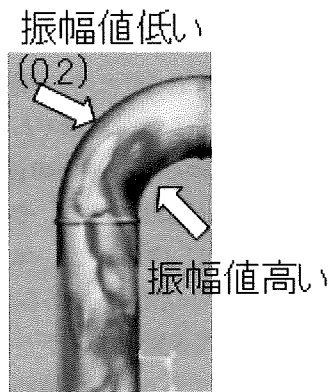
3.2 エルボ部における模擬LDIの検出

エルボ部における液滴衝撃エロージョン(LDI)は、エルボ背側に発生することが多い。したがって、背側の振幅値が大きい条件で探傷すれば効果的にLDIを検出できると考えられる。図6はロングエルボにおいて、送信波の周波数30kHzと50kHzにおける最大振幅値分布を示した結果である。周波数50kHzではエルボ部の背側の振幅値が大きいのにに対し、30kHzでは腹側の振幅値が大きい結果である。送信波の振幅値を1とした時に、エルボ背側45°中央位置における振幅値は30、40、50kHzで各々0.8、1.2、1.4であった。振幅値が高い領域では、欠陥反射も大きくなることから、周波数50kHzでLDIの検出感度が高くなることが期待される。

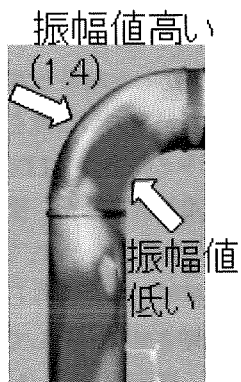
定量的な推定に向けてシミュレーション解析を用いて、模擬LDIモデルを設置して検出感度を評価した。図7は

模擬LDIモデルの設置位置でありφ12mmの球体でエルボ背側の外面から肉厚を減じるモデルとした。図8は減肉の深さを1mm刻みで漸増させた時の周波数50kHzにおける反射波のシミュレーション波形である。図中の点線で囲った伝搬時間(約390μsから約440μs)で模擬LDIモデルによる波形の変化が確認される。その前後の波束(伝搬時間350μs付近及び470μs)は、エルボ両端の溶接部を模擬したモデルからの反射波である。図9はシミュレーション解析を用いて模擬LDIモデルの深さの漸増により得られた検出感度であり、周波数別の断面欠損率(%)に対する反射率(%)の増加率である。周波数30kHzでは1.6%/%, 40kHzでは4.4%/%, 50kHzでは8.7%/%で50kHzの検出感度が高い解析結果であった。これは、図6に示した振幅値に対応した結果と言える。

シミュレーション解析結果の妥当性を確認するため、φ12mmのボールエンドミルで模擬LDIの深さを漸増させた実験により検出感度を評価した。図10には、模擬LDIの付与状況と実験の配置図を示す。実験ではφ12mmのボールエンドミルで模擬LDIを付与し、0.2mm刻みで貫通するまで深さを漸増させた。そして各深さにおける反射波の振幅を計測し、断面欠損率(%)に対する反射率(%)を整理した。その結果をシミュレーション解析結果と合わせて表1に示す。周波数30kHz、40kHz及び50kHzにおける検出感度は各々1.2%/%, 3.6%/%及び10.0%/%であり、シミュレーション結果は実験結果と同様の傾向であるとともに、ほぼ同じ感度であることが確認された。



(a) 30 kHz



(b) 50 kHz

図6 周波数毎最大振幅値分布の解析結果

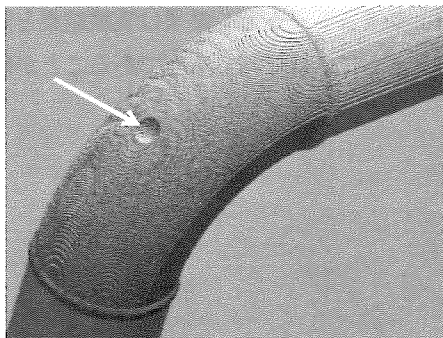


図7 模擬LDIモデルの設置位置

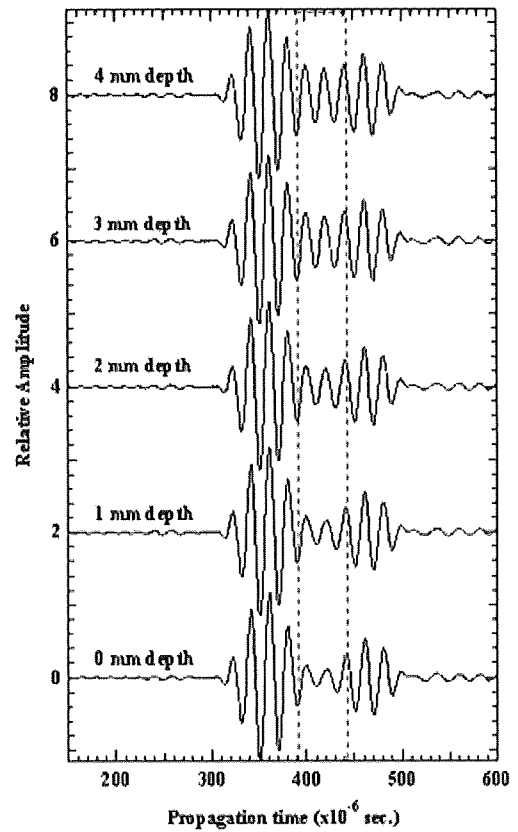


図8 模擬LDIモデルの減肉深さ漸増に伴う反射波のシミュレーション波形(周波数 50 kHz)

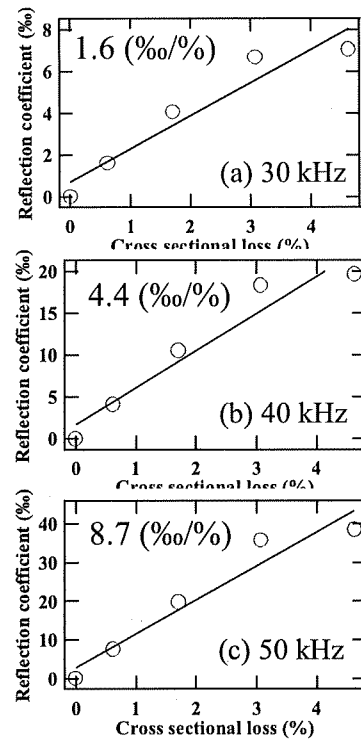


図9 模擬LDIモデルの検出感度線(シミュレーション解析)

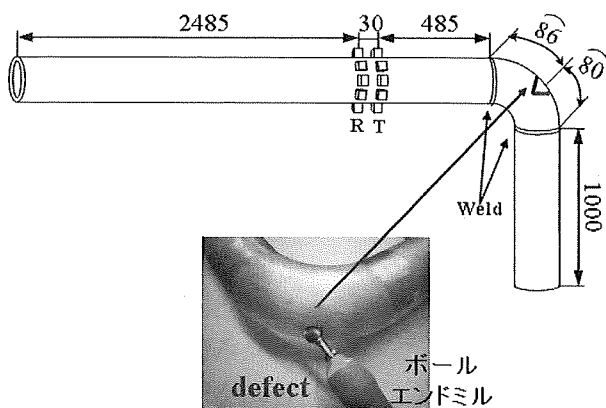


図10 LDI 模擬欠陥の付与状況

表1 模擬LDIに対する検出感度比較
(反射率(%)/断面欠損率(%))

	解析結果	実験結果
30 kHz	1.6	1.2
40 kHz	4.4	3.6
50 kHz	8.7	10.0

4. まとめ

本報では、エルボ部及びエルボ通過後の直管部におけるガイド波の振幅値の分布をシミュレーション解析し、検出感度の予測や計測条件の最適化に活用する方法を検討した。ガイド波の振幅値が高い領域に模擬減肉が存在する場合には実験により実測した検出感度も大きく、ガイド波の振幅値が低い領域に模擬減肉が存在する場合には、検出感度が低いことを実験で確認した。ガイド波の周波数が変わると振幅値が高いあるいは低い領域が変動するが、この場合においても、シミュレーション解析で

得られたガイド波の振幅値と模擬減肉の検出感度は比較的良好な相関を示すことを確認した。これらの結果より、シミュレーション解析結果を基に、計測条件の最適化の検討や検出感度を予測する可能性が見出せた。

謝辞

本研究は、経済産業省原子力安全保安院による平成23年度高経年化技術評価高度化事業によってなされた。

参考文献

- [1] 日本非破壊検査協会規格 NDIS2427、“ガイド波を用いたパルス反射法による配管の探傷試験方法通則”、2010.5.12 制定
- [2] 溝渕裕貴、増田修一、吉田憲一、西野秀郎、“T(0,1)モードガイド波によるエルボ管に導入した欠陥の検出感度評価”、日本非破壊検査協会平成22年度秋季大会講演概要集、2010、pp.11-12.
- [3] 林高弘、“ガイド波伝搬の数値シミュレーション”、非破壊検査 Vol.52, No.12, 2003、pp.662-666.
- [4] T. Furukawa and I. Komura, "Simulation and visualization of guided wave propagation by large-scale 3D FEM", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.3, No.3, 2011, pp.92-101.