

水道管の漏水位置推定のための時間反転イメージングの基礎的検討

Fundamental Study on Time-reversal Imaging for Estimation of Water Pipe Leakage Location

丸山泰蔵¹⁾ 和田啓志²⁾ 中畑和之³⁾

Taizo Maruyama, Keishi Wada, and Kazuyuki Nakahata

¹⁾博 (工) 東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授

(〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 W8-22, E-mail: maruyama.t.ag@m.titech.ac.jp)

²⁾学 (工) 愛媛大学 大学院理工学研究科 学生 (〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番, E-mail: wada.keishi.19@cee.ehime-u.ac.jp)

³⁾博 (工) 愛媛大学 大学院理工学研究科 教授 (〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番, E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp)

In this study, we examine time-reversal imaging for guided wave inspection in a water pipe. Generally, guided waves exhibit multimodal and dispersion characteristics. Time-reversal imaging is one of the promising methods because it can automatically take the dispersion characteristics into account. The Green's function required in the process of time-reversal imaging is calculated using the normal mode expansion method for guided waves. The normal-mode solutions are obtained from the results of the semi-analytical finite element method.

Key Words : Guided Wave, Elastic Wave, Time-reversal Imaging, Water Pipe, Green's Function

1. はじめに

現在、日本における水道の普及率は 98.1%と非常に高い数値となっているが、更新が進んでおらず法定耐用年数を超過した水道管が多く存在するという問題がある。その原因として、水道事業に携わる人の数の減少や、水道管の更新コストが大きいことが挙げられる。適切な時期を選定して効率的な更新をするためには、漏水検知・位置推定技術の向上が望まれる。本研究では漏水音を用いた漏水検知・位置推定方法に着目する。水道管は長大構造物であるため、音波はその内部をガイド波として伝搬していると予想される。ガイド波は分散性と多重モード性を有しているため [1]、それらの特性を考慮した技術開発を目指す。

本研究では基礎的検討として、中空管に対して漏水音を模擬した音を発生させ、時間反転法を用いてガイド波の特性を考慮した音源位置の推定を行う。時間反転波動場はガイド波の伝搬モードのみから構成される Green 関数を半解析的有限要素法とノーマルモード展開 [1] によって数値的に求めることにより表現する。

2. 時間反転法による逆解析の概要

角周波数 ω の時間調和な波動場を考える。図-1 に示すように、中空管の点 \mathbf{y} に作用する外力 \mathbf{f} によってガイド波が発生し、そのガイド波を管の外表面の観測点 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N\}$ において計測するものとする。計測された変位を \mathbf{u} とすると、それらの関係は次のように表される。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}_i, \omega) = \mathbf{G}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}, \omega) \cdot \mathbf{f}(\mathbf{y}, \omega) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ は中空管に対する動弾性波動問題の Green 関数であり、その引数の \mathbf{x} は観測点、 \mathbf{y} はソース点である。周波数領域では複素共役を取ることで、時間反転を考慮できるため、時間反転波動場 \mathbf{u}^{TR} を次のように表す [2]。

$$\mathbf{u}^{\text{TR}}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{i=1}^N \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i, \omega) \cdot \overline{\mathbf{u}(\mathbf{x}_i, \omega)} \quad (2)$$

ここで、 $\overline{(\)}$ は複素共役を表している。式 (2) は厳密には時間反転波動の変位場となっていないが、Kirchhoff migration での指示関数として用いられることが多い [2] ため、本研究では式 (2) を時間反転波動場として扱う。

加振による音源位置では時間反転波動場の振幅が大きくなると予想される。円管を対象としているため、式 (1) の Green 関数 \mathbf{G} は複雑になるが、水道管の漏水調査では比較的遠方での音波の受信を行う。したがって、時間反転波動場も遠方で評価できれば十分であると予想される。以上より、ガイド波のノーマルモードのみで表現される遠方近似された Green 関数を用いることとする。その場合の Green 関数は対応する分散方程式の解があればノーマルモード展開から容易に求められる。本研究では、半解析的有限要素法 [1] によって分散方程式を解き、得られた解から Green 関数を構成する。

3. 数値実験結果

以下では、円筒座標系 (r [mm], θ [rad], z [mm]) で説明する。図-1 に示すように、外側が鋼、内側がモルタルの二層構造から成る水道管を考える。ここで水道管は中空であり内部には水は存在しないとする。材料定数は表-1 に示す通りである。加振点は $\mathbf{y} = (47.3, 0, 0)$ の 1 点とし、

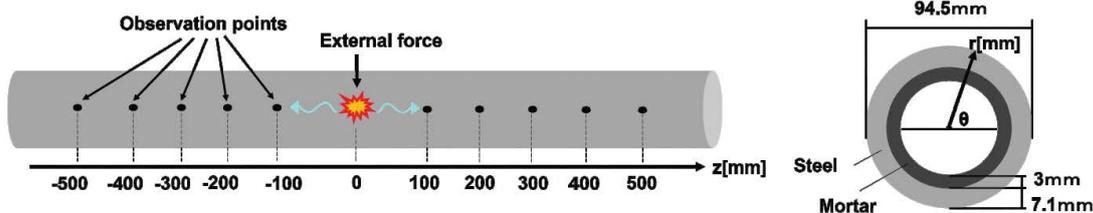
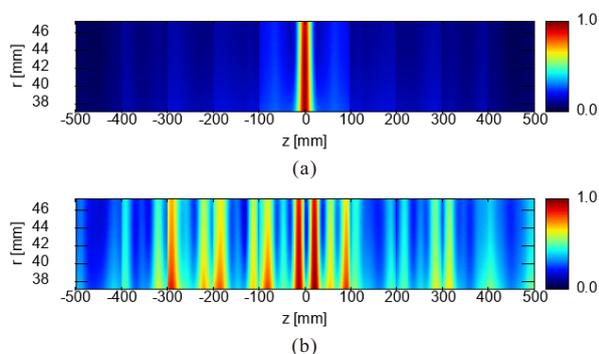


図-1 中空の円管に対するガイド波の計測条件（右図は円管の断面）

表-1 材料定数

	縦波速度 [m/s]	横波速度 [m/s]	密度 [g/cm ³]
鋼	5,850	3,230	7.8
モルタル	4,500	3,000	2.3

図-2 指示関数 I を用いたときの加振位置推定結果 (a) ケース 1, (b) ケース 2

$N = 10$ の観測点を用いた。観測点はすべて $r = 47.3\text{mm}$, $\theta = 0$ 上にあり、図-1 左に示すように $z = -500\text{mm}$ から $+500\text{mm}$ までを $z = 0\text{mm}$ を除く 100mm 間隔の位置に設けた。 r 方向のみの単位荷重として Dirac のデルタ関数で加振力を与えてシミュレーションによる観測データを用いた場合はケース 1, レーザーによって光音響効果で加振力を与えた実験データを用いた場合をケース 2 とする。

図-2 には指示関数として次で表される I を用いたときの結果を示す。

$$I = \int \mathbf{u}^{\text{TR}}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \overline{\mathbf{u}^{\text{TR}}(\mathbf{x}, \omega)} d\omega \quad (3)$$

ここで、積分範囲は用いた周波数 10kHz から 30kHz に対応する。図-2 は $\theta = 0$ の r - z 平面上の結果を示しており、得られた振幅の中で最も大きな値で正規化している。図-2(a) より、ケース 1 の場合は r 方向については位置が推定できていないが、 z 方向については良好に位置推定できている。一方、図-2(b) より、ケース 2 の場合は大きな値を取っている位置が散見され、位置推定がうまくいっていない様子がわかる。

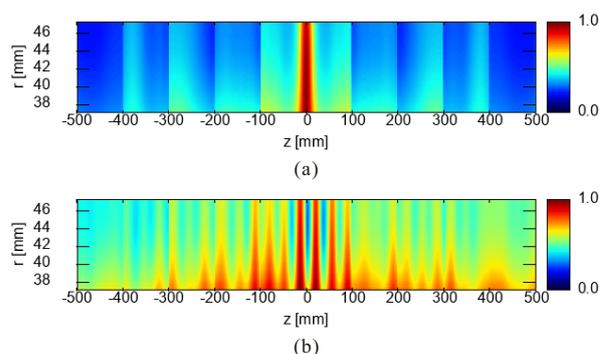
図-3 指示関数 I' を用いたときの加振位置推定結果 (a) ケース 1, (b) ケース 2

図-3 には、時間反転波動場をガイド波のモードごとに計算して、それぞれのモードの振幅の合計値である次の指示関数 I' を用いたときの結果を示す。

$$I' = \sum_{\alpha} \int \mathbf{u}_{\alpha}^{\text{TR}}(\mathbf{x}, \omega) \cdot \overline{\mathbf{u}_{\alpha}^{\text{TR}}(\mathbf{x}, \omega)} d\omega \quad (4)$$

ここで、下付き添字はガイド波のモード番号を意味する。図-3(a) より、ケース 1 の場合は図-2(a) と比較してコントラストが低下している様子がわかる。一方、図-3(b) より、ケース 2 の場合は図-2(b) と比較して大きな値を取る位置が $z = 0\text{mm}$ 付近に集中し、若干ではあるが位置推定結果が改善していると思われる。

4. まとめ

本稿では、中空管に対するガイド波の時間反転法による加振位置推定方法の概要と基本的な数値実験結果を示した。今後は、観測波形の処理方法の検討と満水状態の管に対する拡張を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Rose, J. L.: Ultrasonic Guided Waves in Solid Media, Cambridge University Press, 2014.
- [2] Moscoso, M., Novikov, A., Papanicolaou, G., and Tsogka, C.: Multifrequency interferometric imaging with intensity-only measurements, *SIAM Journal on Imaging Sciences*, Vol.10, pp.1005-1032, 2017.