

ガイド波を用いた直管内部分減肉の3次元形状同定法

3-Dimensional Shape Identification of Pipe-Wall-Thinning With Ultrasonic Guided Wave

神戸大学大学院 古澤 彰憲
神戸大学大学院 小島 史男

Akinori FURUSAWA Student Member
Fumio KOJIMA Member

The aim of this work presented here is to demonstrate the way to identify the shape of pipe-wall-thinning in straight pipe. First, the database is developed to obtain approximate solution of waves reflected from pipe-wall-thinning with three-dimensional guided wave simulator and proper orthogonal decomposition (POD). In particular, we show that the database can be used to efficiently approximate the solutions to the guided wave propagation problem. Second, the inverse problem procedure is introduced to estimate the parameters characterizing the pipe-wall-thinning according to the comparison of the each approximate signal and the detected signal. The parameters are axial length, radial depth, and circumferential width of the pipe-wall-thinning. Finally, issues concerning the implementation of the method and numerical calculations are discussed. Numerical result shows that our method is applicable for three-dimensional shape identification with ultrasonic guided wave.

Keywords: FDTD Method, Structure Health Monitoring, Torsional mode, FAC

1. 序論

現在の発電プラントにおける配管肉厚管理方法は、超音波探傷(UT)を用いて配管にメッシュ状に設定された測定点を検査者が point-to-point で測定するものである。この検査方法では、最大減肉位置(最小肉厚位置)が測定点間にあった場合には対応できない問題点がある(Fig.1)。直管を長手方向に伝播するガイド波を用いた配管非破壊検査法は国内外を問わず広く研究されており[1]、Flow Accelerated Corrosion (FAC)をはじめとした、なだらかに配管肉厚が変化する欠陥の寸法測定方法の確立が期待されている。

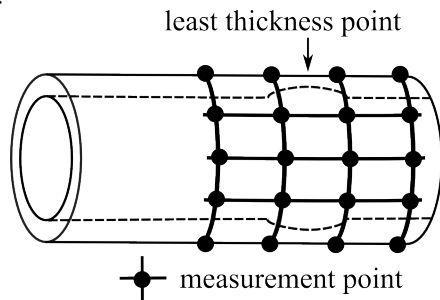


Fig.1 Measurement points of Pipe Wall Thickness based on contemporary technical standard in Japanese nuclear power plants. The points are arranged in longitudinal and circumferential direction at regular intervals

本研究では、直管内に設定した、長手方向になだらかに、円周方向に急峻に、配管肉厚の変化する欠陥の3次元形状同定を可能とすることを目的とする。3次元欠陥形状同定により、欠陥の寸法測定に加えて、従来の配管肉厚管理法の問題点であった最大減肉位置の見落としを解決する。直管内減肉の3次元形状同定は以下の方法によって行う。

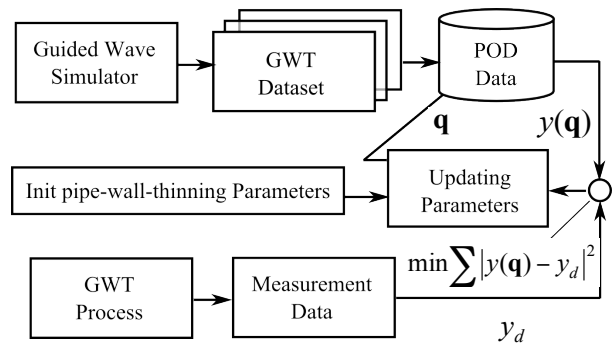


Fig.2 Schematic view of three dimensional shape identification of the pipe line defects with Guided Wave Testing. \mathbf{q} , $y(\mathbf{q})$, and y_d are parameter vector, simulated data corresponding to the parameter vector and measurement data, respectively.

最初に、3次元ガイド波シミュレータを用いて得た様々な減肉形状に対する検出波形に対して、Proper Orthogonal Decomposition (POD)を用いたデータ縮約を行い、任意の減肉形状検出波形を近似するデータベースを構築する。次に、解析対象となる減肉検出波形と、データベースを用

いて近似した減肉検出波形との残差平方和が最小になるよう逆解析を用いて減肉形状を同定する(Fig.2). 本研究では, 実測定データにガイド波シミュレータを用いて作成した模擬データを用いる.

2. データベースの構築

2.1 ガイド波減肉検査モデル

本節では, 減肉検出信号データベース構築にあたり, 想定するガイド波検査問題のモデル化を行う. 本研究では, 直管内になだらかに肉厚が変化する局所的な欠陥部が1つあり, ガイド波送信部, 受信部, 欠陥部がこの順に配置される場合を対象とする. ガイド波送信部では直管円周方向に一樣にねじり力が発生し, 理想的なねじり波が励起されるとし, ガイド波受信部は円周方向に等間隔に8点配置され, 各受信点では, ねじり方向の変位のみ計測されるものとする(Fig.3).

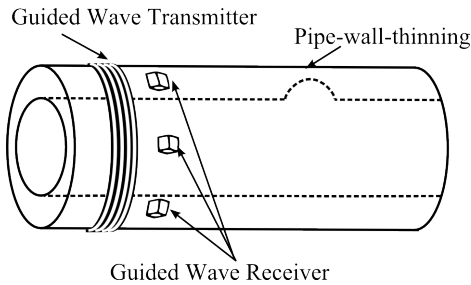


Fig.3 The Guided Wave Testing model. The transmitter, the receivers and the Pipe Wall Thinning are setup in this order.

2.2 減肉形状パラメータの設定

なだらかに肉厚の変化する直管内の部分減肉のモデル化について説明する. 長手方向減肉長さ, 半径方向減肉深さ及び円周方向減肉幅の3つの形状パラメータを用いて, 長手方向に楕円型, 円周方向には矩形型にモデル化するものとする(Fig.4).

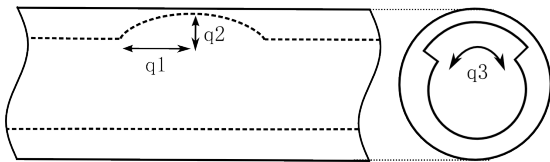


Fig.4 Pipe-wall-thinning Parameters. Pipe-wall-thinning is modeled elliptically in longitudinal direction and squarely in circumferential direction. q_1 , q_2 and q_3 in the figure are longitudinal extent to the least thickness point, its maximal depth and width in circumferential direction, respectively.

2.3 ガイド波検査シミュレータ

これまでに説明したガイド波減肉検査モデルと減肉形状モデルを用いてガイド波検査シミュレータを構築する.

本研究で対象とするガイド波は, 弾性体中を伝播する超音波であるので, ガイド波検査シミュレータは円柱座標系のフックの法則(式(1))と運動方程式(式(2))に対して Finite Difference Time Domain (FDTD) [2]法を適用し構築する.

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{T} = [c] \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & \frac{1}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial r} & 0 \end{bmatrix}^T \dot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} & -\frac{1}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{2}{r} + \frac{\partial}{\partial r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{T} + \mathbf{F} \quad (2)$$

ここで,

$$\mathbf{T} = [T_{rr} \quad T_{\theta\theta} \quad T_{zz} \quad T_{\alpha z} \quad T_{zr} \quad T_{r\theta}]^T \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{u}} = [\dot{u}_r \quad \dot{u}_\theta \quad \dot{u}_z]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = [F_r \quad F_\theta \quad F_z]^T, \quad (5)$$

$[c]$ はスチフネステンソルである. 境界は全て自由境界とし, 自由境界条件は以下の式(6)によって与えられる. 境界条件の実装には Ohminato ら[3]の方法を用いる.

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (6)$$

但し, \mathbf{n} は境界に対する法線ベクトルである.

2.4 POD を用いたデータベース構築

本節では, POD を用いたデータベースの構築[4]の手順について述べる.

1) ガイド波シミュレータを用いて, 減肉形状パラメータベクトル $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)$ に対する減肉検出波形データセット $\{y(\mathbf{q})_j\}_j^{N_s}$ を作成する. ここで, $1 \leq j \leq N_s$ であり, N_s は減肉形状パラメータの組み合わせの総数である.

2) 以下の式(7)に示す, 固有値問題の固有値と対応する固有ベクトルを得る.

$$\mathbf{C}\mathbf{V} = \lambda\mathbf{V} \quad (7)$$

但し, 行列 \mathbf{C} の要素 $[C]_{ij}$ は以下の式(8)のように求める.

$$[C]_{ij} = \langle y(\mathbf{q}_i), y(\mathbf{q}_j) \rangle \quad (8)$$

式(7)より得た固有値 λ_i , 対応する固有ベクトル \mathbf{V}_i を以下の式(9), 式(10)に従って正規直交化する.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_i \cdot \mathbf{V}_j = \frac{\delta_{ij}}{N_s \cdot \lambda_i}. \quad \text{但し, } \delta_{ii} = 1, \delta_{ij} = 0 (i \neq j). \quad (10)$$

3)固有ベクトル \mathbf{V}_i を用いて, 以下の式(11)のように基底関数 Φ を求める.

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^{N_s} \mathbf{V}_i(j) \cdot y(\mathbf{q}_j). \quad (11)$$

但し, $\mathbf{V}_i(j)$ は固有値 λ_i に対応する固有ベクトルの j 番目の要素である.

4)式(11)を用いて計算した基底関数 Φ を用いて, 減肉検出信号 $y(\mathbf{q}_j)$ は以下の式(12)で表される.

$$y(\mathbf{q}_j) = \sum_{k=1}^{N_s} \alpha_k(\mathbf{q}_j) \Phi_k. \quad (12)$$

ここで, α は以下の式(13)で表される係数ベクトルである.

$$\alpha_k(\mathbf{q}_j) = \langle y(\mathbf{q}_j), \Phi_k \rangle. \quad (13)$$

手順3,4)で求めた基底関数 Φ と係数ベクトル α を用いて, 入力した減肉検出信号のデータ集合 $\{y(\mathbf{q})\}_j^{N_s}$ を復元可能であることを示した. 次に, 構築したデータベースを, パラメータベクトル \mathbf{q} の値の範囲で, 任意の減肉形状の検出信号を近似するよう拡張する. 入力信号データセットにない減肉形状パラメータベクトル $\tilde{\mathbf{q}}$ に対応する係数ベクトル $\alpha_k(\tilde{\mathbf{q}})$ を以下の手順で求める.

1) $\tilde{\mathbf{q}} = (\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \tilde{q}_3)$ に対して, 最も近傍に存在するパラメータベクトルを以下の式(14-16)のように決定する.

$$\tilde{q}_{1_m} \text{ and } \tilde{q}_{1_{m+1}} \in \{q_1\}: q_{1_m} \leq \tilde{q}_1 \leq q_{1_{m+1}}. \quad (14)$$

$$\tilde{q}_{2_n} \text{ and } \tilde{q}_{2_{n+1}} \in \{q_2\}: q_{2_n} \leq \tilde{q}_2 \leq q_{2_{n+1}}. \quad (15)$$

$$\tilde{q}_{3_p} \text{ and } \tilde{q}_{3_{p+1}} \in \{q_3\}: q_{3_p} \leq \tilde{q}_3 \leq q_{3_{p+1}}. \quad (16)$$

2) $\tilde{\mathbf{q}}$ に対する係数ベクトル α を以下の式(17)を用いて近似する.

$$\alpha(\tilde{\mathbf{q}}) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (1 \pm \tilde{q}^1) (1 \pm \tilde{q}^2) (1 \pm \tilde{q}^3) \alpha_i. \quad (17)$$

但し,

$$\tilde{q}_1 = \frac{2(q_1 - q_{1_m})}{q_{1_{m+1}} - q_{1_m}} - 1, \quad (18)$$

$$\tilde{q}_2 = \frac{2(q_2 - q_{2_n})}{q_{2_{n+1}} - q_{2_n}} - 1, \quad (19)$$

$$\tilde{q}_3 = \frac{2(q_3 - q_{3_p})}{q_{3_{p+1}} - q_{3_p}} - 1, \quad (20)$$

$$\alpha_i = \alpha(q_{1_i}, q_{2_j}, q_{3_k}), \quad (21)$$

$$i \in \{m, m+1\}, j \in \{n, n+1\}, k \in \{p, p+1\}. \quad (22)$$

式(12)と同様に, $y(\tilde{\mathbf{q}})$ を求めることが可能となる(23).

$$y(\tilde{\mathbf{q}}) \approx \sum_{k=1}^{N_s} \alpha_k(\tilde{\mathbf{q}}) \Phi_k. \quad (23)$$

2.5 データベースを用いた減肉形状同定法

データベースを用いた減肉形状の同定方法について説明する. 2.4 節で構築したデータベースを用いることで, 入力したデータセットに対応する減肉パラメータの範囲内において, 任意の減肉形状に対する減肉検出波形を近似することが可能となった. データベースを用いて近似した検出信号を $y(\tilde{\mathbf{q}})$ とし, 解析対象となる, 実検出波形を y_d とする. $y(\tilde{\mathbf{q}})$ と y_d の残差平方和を最小にする $\tilde{\mathbf{q}}$ を実測定波形に対応する減肉形状とする. これは, 以下の式(24)に示す目的関数 J を最小化する問題として記述出来る. 但し, 今回は y_d をガイド波シミュレータを用いて求めた減肉検出波形にノイズを加えて作成した模擬測定波形とする.

$$\min J(\tilde{\mathbf{q}}) = \sum |y_d - y(\tilde{\mathbf{q}})|^2. \quad (24)$$

但し,

$$y_d = y(\mathbf{q}_{\text{target}}) \times (1 + e \times n(\mu, \sigma)). \quad (25)$$

e はノイズの強度, $n(\mu, \sigma)$ は平均 μ , 分散 σ の正規分布に従う乱数である.

3. 数値計算結果

3.1 数値計算条件

本節では, 数値計算時に設定した実験条件について説明する. 対象とするガイド波検査モデルは2章の Fig.3 に示した. その寸法は Fig.5 に示す. 但し, 今回は直管の両端からの反射波の影響を無くするため, 管の長さは十分に長く設定する. ガイド波送信部では, 直管の円周方向に理想的なねじり力が働くと想定し, 送信部において以下の式(26)で表される力が働くとする.

$$\mathbf{F} = [F_r \quad F_\theta \quad F_z]^T = [0 \quad W(t) \cdot \sin(2\pi ft) \quad 0]^T. \quad (26)$$

ここで, $W(t)$ はガウス型の窓関数であり, 周波数 f は 75[kHz] とした. ガイド波受信部は直管円周方向に等間隔に 8 点設定し, 各点における直管円周方向の粒子速度 \dot{u}_θ のみ理想的に受信するものとした.

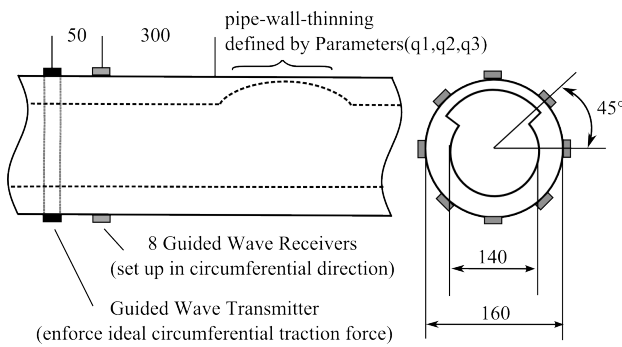


Fig.5 dimensional set up in numerical experiment.

今回の数値実験では、減肉形状パラメータ \mathbf{q} は以下のよう
に選定した。

$$\{q1\} = \{70, 105, 140, 175\} \text{ mm}, \quad \{q2\} = \{10, 30, 50, 70, 90\} \%, \\ \{q3\} = \{25, 50, 75, 100\} \%, \quad N_s = 80.$$

これらの減肉パラメータに対応する減肉検出信号のデータ
セット $\{y(\mathbf{q})\}_j^{N_s}$ を事前に準備し、2章で説明したデータ
ベースの入力とする。

模擬測定データ y_d は、ガイド波シミュレータに
 $\mathbf{q}_{\text{target}} = (123, 80, 60)$ の減肉パラメータを与え、 $e=0.03$,
 $\mu=0, \sigma=1$ のノイズを加えて作成した(式(25)). 模擬測定
信号を Fig.6 に示す。今回は受信点を周方向等間隔に 8 点想
定しているので、8 つの測定データがある。また、減肉検出信
号に対しては包絡検波を行っている。

3.2 形状同定結果

3.1 節で構築したデータベースを用いて、式(24)を最小に
するパラメータベクトル $\mathbf{q}_{\text{estimated}}$ を求めた結果とその
真値との相対誤差を以下に示す。

$$\mathbf{q}_{\text{estimated}} = (114.7[6.7\%], 88.8[11.0\%], 61.1[1.8\%]).$$

減肉形状パラメータは、最も相対誤差の大きい減肉深さで
も 11% に留まっており、今回の実験条件では 1.1[mm] であ
る。同様に、最大減肉位置までの距離の誤差は、8.3[mm]、円
周方向の減肉幅の誤差は 5.6[mm] となっており、現行の配
管減肉管理技術基準における詳細測定が 20[mm] ピッチ
程度であることから、本手法の有効性が確認できた。

4. 結論

3次元ガイド波シミュレータと、POD を用いたデータベ
ース型逆問題解析法によって、直管内の長手方向になら
かな、円周方向に急峻な部分減肉の形状同定法を示した。
模擬測定データの減肉パラメータの真値に対して、長手方
向減肉幅が 6.7%、最大減肉深さが 11%、円周方向減肉幅
が 1.8% と精度よく形状同定出来ており、本手法が、ガイ
ド波による直管内部分減肉の形状同定へ応用可能性である
ことを示した。

今後の課題として、円周方向にもなだらかな減肉の形状
同定に本手法が適用可能が検討を進めていく。また、本手
法を、シミュレータを用いた模擬測定データではなく、実
測定データに対して適用し、実現可能性を示す。

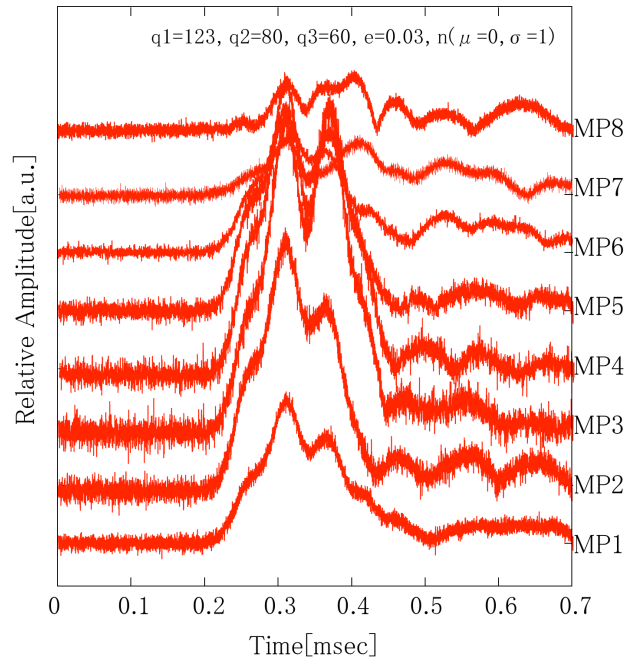


Fig.6 Time-domain simulated detected signals under
the dimension in Fig.5. Parameter $q1$, $q2$ and $q3$ are
123, 80, and 60, respectively. MP1-8 in the figure
correspond to 8 Guided Wave Receivers. Value of
each signal is relative to the amplitude of the
generated signal at the Guided Wave Transmitter.

参考文献

- [1] Joseph L. Rose, "A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential", Journal of Pressure Vessel Technology, vol.124, 2002, pp.273-282.
- [2] 佐藤雅弘, "FDTD 法による"弾性振動・波動の解析入門", 森北出版, 2003.
- [3] T. Ohminato and Bernard A. Chouet, "A Free-Surface Boundary Condition for Including 3D Topography in the Finite-Difference Method", Bulletin of the Seismological Society of America, vol.87, no.2, 1997, pp.494-515.
- [4] H. T. Banks, et al, "Evaluation of Material Integrity Using Reduced Order Computational Methodology", CRSC Technical Reports, CRSC-TR99-30, 1999, pp.5-11.

(平成##年##月##日)