

写像法を用いた電磁超音波による配管減肉計測シミュレータの開発

Development of NDT Simulator with Method of Mapping for Detection of Pipe Wall Thinning using EMAT

神戸大学大学院工学研究科 山口 紘史 Hiroshi YAMAGUCHI Student Member
神戸大学大学院工学研究科 小島 史男 Fumio KOJIMA Member
神戸大学大学院工学研究科 小坂 大吾 Daigo KOSAKA Student Member

This paper is concerned with a simulator related to nondestructive test using Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT). The simulator developed here can be applied to pipe wall thinning of stainless steel used in nuclear power plants. First, mathematical models for the inspection are given by a transient eddy current equation and by a time dependent elastic wave equation in two dimensions. Secondly, shape of pipe wall thinning is modeled by B-spline function and is applied to the mathematical models using method of mapping. Finally, the validity of the proposed simulator is shown through numerical experiment.

Keywords: simulation, eddy current analysis, ultrasonic testing, finite element method

1. 緒言

原子力プラントの高経年化に伴い、重要構造物の配管に減肉が発生することが問題となっている。高経年化により減肉箇所が増大すると、検査にかかる時間とコストが膨大になるため、状態監視保全を取り入れた新しい配管減肉診断手法が求められている。電磁超音波探触子(Electromagnetic Acoustic Transducer:EMAT)

[1][2]は、磁石および励磁コイルにより、ローレンツ力を利用して超音波を発生させ、その超音波の変位と磁場による渦電流の変化を誘導起電力として検出する非破壊検査手法である。非接触で検査ができ、高温、高振動の環境で使用可能なため、状態監視保全への適合性が高いと考えられている。本研究では、EMATを用いた配管減肉検査の定量化を、シミュレーションを用いた数理科学的なアプローチにより行う。減肉形状をB-spline関数により自由にモデル化し、そのモデル化した減肉が存在する検査領域を減肉の存在しない検査領域からの写像法により表すことで、任意の減肉形状に対応できる配管減肉計測シミュレータを開発した。これにより、さまざまな形状の配管減肉に対する超音波伝播を可視化することができ、その物理現象の解析を行うが可能となる。本論文では、開発したシミュレータの有効性を確かめるため、半楕円減肉を想定し、数値実験結果と実測定結果を比較して検証を行った。さ

らに超音波伝播の可視化を行い、減肉により変化する超音波伝播の解析を行った。

2. EMATを用いた検査の概要とモデル化

2.1 EMATの動作原理

Fig.1に示すように、EMAT装置はコイルと磁石から構成されている。まずEMATコイルに印加した高周波電流 I により変動磁場が生じ検査対象の表面付近に渦電流 J が発生する。磁場 H と J との相互作用による電磁力 F が発生し、検査対象表面に生じた振動が超音波として試験体中を伝播する。超音波が反射して表面にまで戻ってくると、これによる変位 u と磁場 H との相互作用により、渦電流 J' が発生する。この J' による磁場変化によってEMATコイルに誘導電流が発生し電圧変化 V を出力信号として検出する。Fig.1に出力信号 V を示す。信号のピーク間距離が、超音波が一往復する時間を表し、これをTOFという。TOFと超音波の伝播速度から検査対象の厚みを求めることができる。

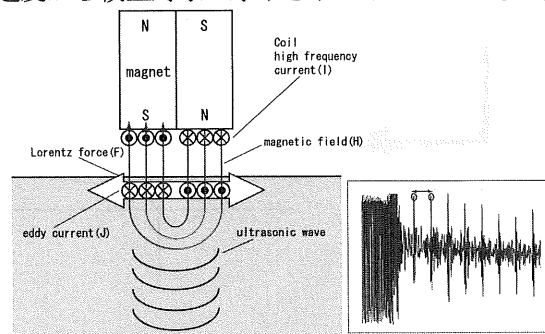


Fig.1 Illustration of NDT by EMAT

連絡先:小島 史男、〒657-5801 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻、電話: 078-803-6493、e-mail:kojima@koala.kobe-u.ac.jp

2. 2 配管減肉のモデリング

Fig.2に示すように、配管の外半径を r_a 、内半径 r_b 、配管上部に減肉のある配管モデルを考え、この配管モデルの配管外部の空気領域を含めた2次元の検査領域 Ω を次のように定義する。

$$\Omega = \{(r, \theta) | \theta_1 < \theta < \theta_2, r_{in} < r < r_{out}\} \quad (1)$$

配管減肉の左端、右端をそれぞれ q_0^L 、 q_0^R とし、 q_0^L から q_0^R の間で減肉部分の座標をM点サンプリングする。減肉の形状関数 $c(\theta, \mathbf{q})$ をB-spline関数により以下のように表す。

$$c(\theta, \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^M q_i^M B_i^M(\theta) \quad q_0^L \leq \theta \leq q_0^M \quad (2)$$

\mathbf{q} は減肉に関するパラメータで、 \mathbf{q} を次のように与える。

$$\mathbf{q} \in R^{M+2} = \{q_0^L, q_0^R, q_1^M, \dots, q_M^M\} \quad (3)$$

形状関数 $c(\theta, \mathbf{q})$ を考慮した場合の $\Omega(\mathbf{q})$ を導体領域 $\Omega_c(\mathbf{q})$ 、配管内部の空気領域 $\Omega_{air}^1(\mathbf{q})$ 、配管外部の空気領域 Ω_{air}^2 の3つの領域に分割する。それぞれの領域は以下のように表される。

$$\Omega_c(\mathbf{q}) = \{(r, \theta) | \theta_1 < \theta < \theta_2, c(\theta, \mathbf{q}) < r < r_a\} \quad (4)$$

$$\Omega_{air}^1(\mathbf{q}) = \{(r, \theta) | \theta_1 < \theta < \theta_2, r_{in} < r < c(\theta, \mathbf{q})\} \quad (5)$$

$$\Omega_{air}^2 = \{(r, \theta) | \theta_1 < \theta < \theta_2, r_a < r < r_{out}\} \quad (6)$$

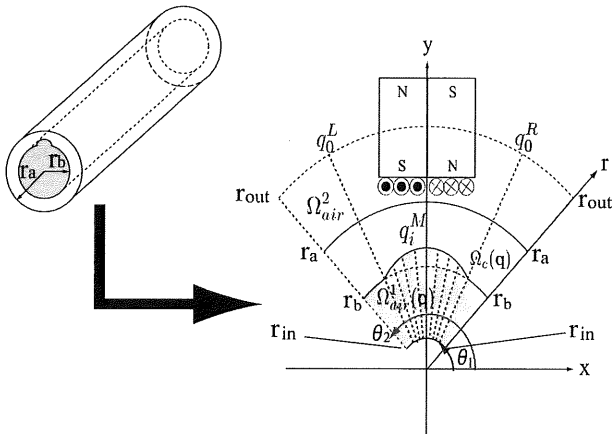


Fig.2 Inspection area in two-dimensions

2. 3 EMATの検査過程の数学モデル

検査領域 $\Omega(\mathbf{q})$ を定義した場合、弾性体の変位 \mathbf{u} および磁束密度 \mathbf{B} は極座標系を用いれば r, θ 成分を、渦電流 \mathbf{J} 、磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} は z 成分のみを持つ。 \mathbf{A} の z 軸方向成分の関数 $A_z(t, r, \theta)$ および超音波の2次元の変位成分 $\mathbf{u}=(u_r(r, \theta), u_\theta(r, \theta))$ によって準定常電磁場を表す式および電磁力が作用する弾性体の運動を表す式は以下のように表される。

$$\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} - \frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A_z = \begin{cases} 0 & \text{送信部} \\ \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \times \mathbf{B}_M \right)_z & \text{受信部} \end{cases} \quad \text{in } \Omega^e(\mathbf{q}) \quad (7)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A_z = \begin{cases} J_z & t(0, \tau) \text{ 送信部} \\ 0 & \text{受信部} \end{cases} \quad \text{in } \Omega^1_{air}(\mathbf{q}) \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + [\mathbf{L}_u] \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (9)$$

$$[\mathbf{L}_u] = \begin{bmatrix} -(2G+\lambda) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - G \frac{\partial^2}{\partial y^2} & -(G+\lambda) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ -(G+\lambda) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & -G \frac{\partial^2}{\partial x^2} - (2G+\lambda) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \cos\theta \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \sin\theta \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \cos\theta \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$\mathbf{F} = (F_r, F_\theta) \quad \mathbf{B}_M = (B^r_M, B^\theta_M)$$

$$F_r = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \left(\frac{\partial A_z}{\partial r} - B^\theta_M \right) \quad (10)$$

$$F_\theta = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} + B^r_M \right)$$

$J_z(t, r, \theta)$ はEMATコイルへの励磁電流であり、 τ は励磁電流が流れている時間を表す。 \mathbf{B}_M は磁石による磁束密度、 μ_0 は空気中の透磁率、 σ は検査材料の導電率、 ρ は検査材料の密度、 λ, G はLame定数である。ローレンツ力 \mathbf{F} は式(10)より表される。コイルの巻き数を N 回とすると、そのうち i 番目のループを貫く磁束 Φ_i は以下のように表される。

$$\Phi_i = \int_{coil_i} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \oint_{coil_i} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} \quad (11)$$

電磁誘導の法則より検出電圧 \mathbf{V} は以下のように表される。

$$V = -\sum_{i=1}^N \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} \quad (12)$$

2. 4 写像法による減肉領域の表現

Fig.2 の $\Omega_c(\mathbf{q})$ 、 $\Omega_{air}^1(\mathbf{q})$ は減肉形状により変化するため、Fig.3 にしめすように、減肉の存在しない領域(参照領域) Ω' からの写像を考える[3]。このとき、 $\Omega'_c \rightarrow \Omega_c(\mathbf{q})$ の写像 T_c と、 $\Omega_{air}^1 \rightarrow \Omega_{air}^1(\mathbf{q})$ の写像 T_{air} は以下のように表される。

$$T_c(\mathbf{q}) = \begin{cases} r_c = \frac{(c(\theta', \mathbf{q}) - r_a)(r' - r_a)}{(r_b - r_a) + r_a} & (r_b < r' < r_a) \\ \theta = \theta' & (\theta_1 < \theta' < \theta_2) \end{cases} \quad (13)$$

$$T_a(\mathbf{q}) = \begin{cases} r_{air} = \frac{(c(\theta', \mathbf{q}) - r_{in})(r' - r_{in})}{(r_b - r_{in}) + r_{in}} & (r_m < r' < r_b) \\ \theta = \theta' & (\theta_1 < \theta' < \theta_2) \end{cases} \quad (14)$$

また、微分演算子は次のように変換される。

$$\frac{\partial}{\partial r} = \left(\frac{\partial r}{\partial r'}\right)^{-1} \frac{\partial}{\partial r'} \quad \frac{\partial}{\partial \theta} = -\left(\frac{\partial r}{\partial r'}\right)^{-1} \frac{\partial r}{\partial \theta'} \frac{\partial}{\partial r'} + \frac{\partial}{\partial \theta'} \quad (15)$$

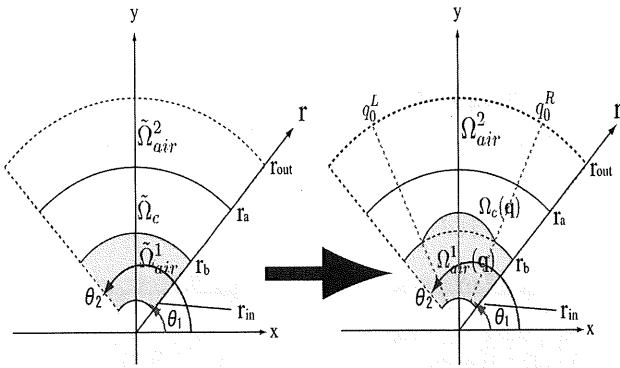


Fig.3 Transformation of inspection area with method of mapping

3. 検査シミュレータの構築

渦電流解析の式(7)、(8)を Galerkin 有限要素法により離散化すると[4]、フーリエ級数ベクトル $A_z^N(t)$ に関する常微分方程式を得ることができる。 A_z は次のように表される。

$$A_z \approx \sum_{i=1}^N A_z^i(t) \varphi_i(r, \theta) \quad (16)$$

$\{\varphi_i(r, \theta)\}_{i=1}^N$ は有限要素法における基底関数を表す。空間 Galerkin 有限要素法に関する時間微分項については、

Newmark- β 法[5]を適用することでマトリクス方程式が得られる。有限要素法により離散化した式に写像法を適用すると以下のマトリクス方程式が得られる。

$$[C_e^N] \{A_z^N(t)\} + [K_e^N] \{A_z^N(t)\} = \{f_e(t)\} \quad (17)$$

それぞれの成分は以下のように表される。

$$[C_e^N]_{ij} = \sigma \iint_{\Omega'_c} \varphi'_i(r', \theta') \varphi'_j(r', \theta') r'_c \frac{\partial r'_c}{\partial r'} dr' d\theta' \quad (18)$$

$$[K_e^N]_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \iint_{\Omega'_c} \left\{ r'_c \left(\frac{\partial r'_c}{\partial r'} \right)^{-1} \frac{\partial \varphi'_j}{\partial r'} \left(\frac{\partial r'_c}{\partial r'} \right)^{-1} \frac{\partial \varphi'_i}{\partial r'} + \frac{1}{r'_c} \right.$$

$$\left. \left(- \left(\frac{\partial r'_c}{\partial r'} \right)^{-1} \frac{\partial r'_c}{\partial \theta'} \frac{\partial \varphi'_i}{\partial r'} + \frac{\partial \varphi'_i}{\partial \theta'} \right) + \left(- \left(\frac{\partial r'_c}{\partial r'} \right)^{-1} \frac{\partial r'_c}{\partial \theta'} \right. \right.$$

$$\left. \frac{\partial \varphi'_j}{\partial r'} + \frac{\partial \varphi'_j}{\partial \theta'} \right\} \frac{\partial r'_c}{\partial r'} dr' d\theta' + \frac{1}{\mu_0} \iint_{\Omega_{air}^1} \left\{ r'_{air} \left(\frac{\partial r'_{air}}{\partial r'} \right)^{-1} \right.$$

$$\left. \frac{\partial \varphi'_j}{\partial r'} \left(\frac{\partial r'_{air}}{\partial r'} \right)^{-1} \frac{\partial \varphi'_i}{\partial r'} + \frac{1}{r'_{air}} \left(- \left(\frac{\partial r'_{air}}{\partial r'} \right)^{-1} \frac{\partial r'_{air}}{\partial \theta'} \frac{\partial \varphi'_i}{\partial r'} \right. \right.$$

$$\left. + \frac{\partial \varphi'_i}{\partial \theta'} \right) \left(- \left(\frac{\partial r'_{air}}{\partial r'} \right)^{-1} \frac{\partial r'_{air}}{\partial \theta'} \frac{\partial \varphi'_j}{\partial r'} + \frac{\partial \varphi'_j}{\partial \theta'} \right) \left\} \frac{\partial r'_{air}}{\partial r'} dr' d\theta'$$

$$+ \frac{1}{\mu_0} \iint_{\Omega_{air}^2} \left\{ r' \frac{\partial \varphi'_j}{\partial r'} \frac{\partial \varphi'_i}{\partial r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial \varphi'_j}{\partial \theta'} \frac{\partial \varphi'_i}{\partial \theta'} \right\} dr' d\theta' \quad (19)$$

$$\{f_e(t)\}_j = \iint_{\Omega_{coil}(\Omega_{air}^2)} J_z(t, r', \theta') \varphi'_j(r', \theta') r' dr' d\theta' \quad (20)$$

写像法により参照領域 Ω' の関数と減肉の形状関数 $c(\theta', \mathbf{q})$ によって方程式を全て表現することができる。そのため、パラメータベクトル \mathbf{q} を与えることで、減肉形状の変化を考慮する必要なく任意の減肉形状をモデル化し数値計算を行うことが可能となる。超音波伝播の式(9)も同様に Galerkin 有限要素法、写像法を適用すればマトリクス方程式を得ることができる。

4. シミュレータの有効性検証

4. 1 実験環境

シミュレータの有効性を検証するために、数値実験結果と実測定結果を同じ条件で行い、出力信号の TOF を比較することで、開発したシミュレータの精度が正確であるか検証した。検査対象として Fig.4 に示すよう

な外径 $d_o=315.0[\text{mm}]$ 、内径 $d_i=285.0[\text{mm}]$ 、減肉幅 $a=15[\text{mm}]$ 、減肉深さ $b=3[\text{mm}]$ の半楕円形の配管減肉が存在する SUS304 の配管を用いる。また、導体の透磁率 μ_0 と導電率 σ 、密度 ρ 、Lame 定数 λ 、 G はそれぞれ次の値を用いる。

$$\begin{aligned}\mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}] \\ \sigma &= 1.39 \times 10^{-6} [\Omega^{-1} \text{m}^{-1}] \\ \rho &= 7.93 \times 10^3 [\text{kg/m}^3] \\ \lambda &= 122.0 \times 10^9 [\text{Pa}] \\ G &= 81.0 \times 10^9 [\text{Pa}]\end{aligned}$$

センサの寸法を Fig.4 右図に示す。コイルはフレキシブル基板であり、コイルの直径は $6.0[\text{mm}]$ である。また、磁石はネオジウム磁石を用いており、磁束密度 $0.50[\text{T}]$ である。コイルのリフトオフは $0.1[\text{mm}]$ であり、入力には Fig.5 に示す電圧 $400[\text{V}]$ 、周波数 $2.0[\text{MHz}]$ の 2 周期の sin 波形バースト波を与える。

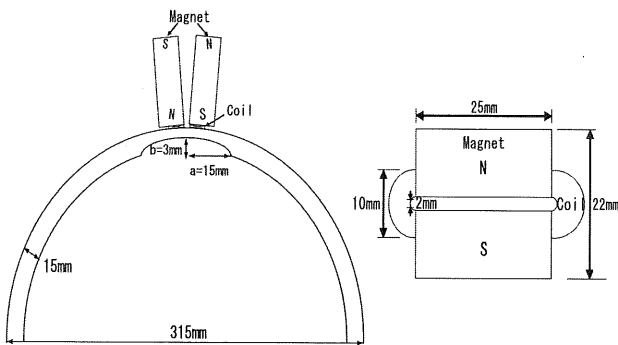


Fig4.Size of EMAT and specimen

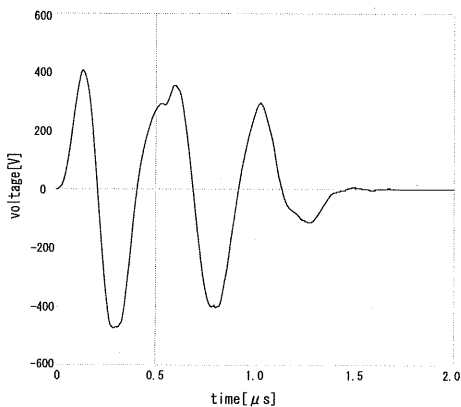


Fig5.Waveform of applied voltage

4. 2 有限要素分割

渦電流解析での有限要素分割についての定義域は厳密には空間無限領域まで考慮する必要があるが、空気中では磁気ベクトルポテンシャルは指数関数的に減少するので、数値解析上は検査領域の周りの十分大きい有解領域で考える。電磁場の計算における渦電流の分

布が試料表面に集中するので、表皮効果を基準にして導体表面に近いほど細くなるように分割幅を連続的に変化させている。表皮効果の式を次に示す。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\pi f \sigma \mu}} \quad (21)$$

材料内部の有限要素分割については波動伝播が均一に伝わるように等間隔で分割されている。渦電流解析で用いた有限要素数は 252384(ノード数:253680)、超音波伝播の解析用いた有限要素数は 167992(ノード数:169171)である。Fig.6 に有限要素分割図を示す。

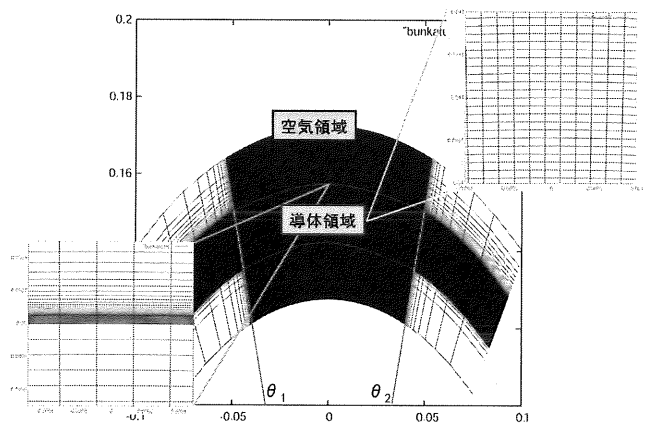


Fig6.Finite element division

4. 3 実験結果

センサ位置を減肉中央と減肉の存在しない部分(健全部)に配置し、それぞれ数値実験および実測定を行った。それぞれの出力信号を Figs.6-7 に示す。

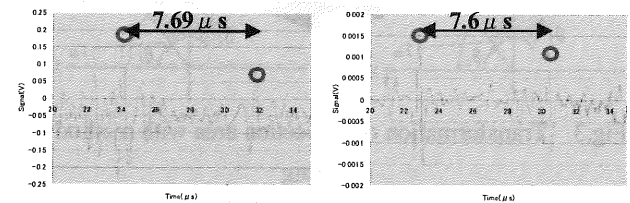


Fig.6 Output signal on the center of pipe wall thinning

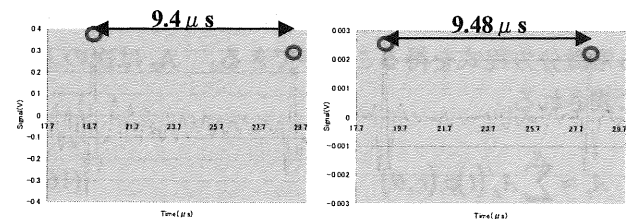


Fig.7 Output signal on a part which there is not the pipe wall thinning

出力信号は 15[μs]~25[μs]の時間区間での信号を表している。実測定結果と数値実験結果から TOF を計算し比較すると、減肉中央部および健全部両方とも実測定結果と数値実験結果の TOF の差が 0.1 μs 以下となっており、シミュレーションが実測定を非常に正確に模擬できていることが確認できた。また、減肉中央部と健全部の TOF を比較すると、減肉中央部では TOF が短くなっており、管の厚みに比例して TOF が変化していることが確認できた。

5. 超音波伝播の可視化

開発したシミュレータを用いて、EMAT により送信された超音波の検査対象内の伝播形態を可視化することにより超音波の挙動を解析する。式(9)の弾性体の運動を表す式について、両辺の発散及び回転をとると、変位 \mathbf{u} の発散 $\nabla \cdot \mathbf{u}$ と回転 $\nabla \times \mathbf{u}$ に関する波動方程式が得られる。

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t^2} - (2G + \lambda) \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \quad (22)$$

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla \times \mathbf{u})}{\partial t^2} - G \nabla^2 (\nabla \times \mathbf{u}) = \nabla \times (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \quad (23)$$

(23)式は音速 $c_d = \sqrt{\frac{2G + \lambda}{\rho}}$ で伝播する発散による波動

P 波を、(23)式は音速 $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ で伝播する回転による波

動 S 波を表している。本研究で用いている EMAT は、S 波の送受信に適した構成であるため、S 波である式(9)の回転の z 成分 $(\nabla \times \mathbf{u})_z$ を計算する。Fig.8 に示すように、減肉中央部、減肉部、健全部の 3 点にセンサを配置した場合の S 波成分を計算し、S 波が底面に反射した時刻の状態を等高線図に表した。Figs.9-11 に減肉中央部、減肉部、健全部の濃淡図および出力信号を示す。

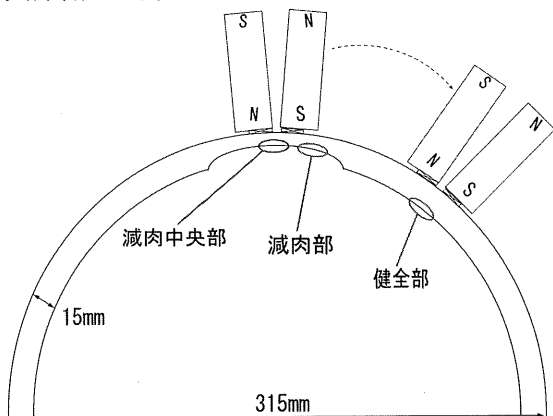


Fig.8 Illustration of sensor position on the pipe

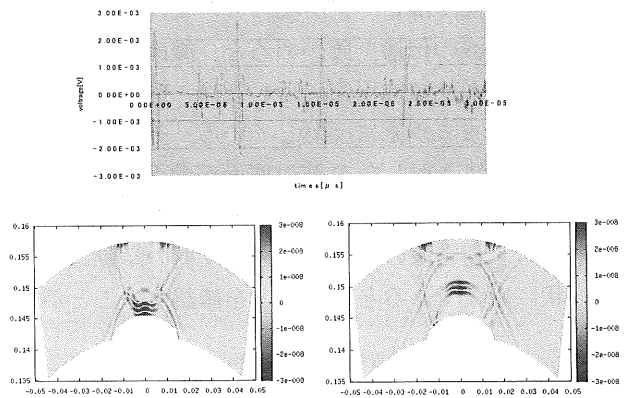


Fig.9 output signal and contour map that denotes the propagation of S wave on the center of pipe wall thinning

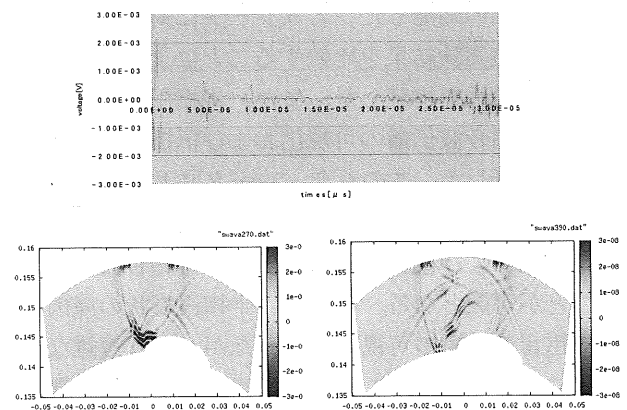


Fig.10 output signal and contour map that denotes the propagation of Swave on the pipe wall thinning

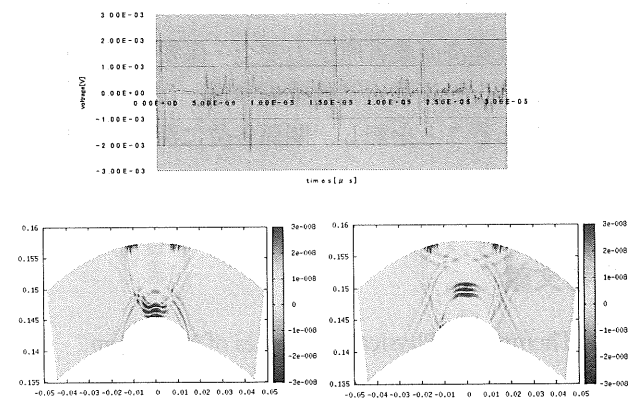


Fig.11 output signal and contour map that denotes the propagation of Swave on a part which there is not the pipe wall thinning

Figs.9-11 から見て取れるように、センサ位置が減肉中央部と健全部である場合、出力信号にピークが現れて

おり、減肉部ではピークが現れていない。
そこで超音波の伝播を確かめると、減肉中央部、健全部では底面が比較的平面に近いので、底面に入射したS波がそのまま垂直に反射している。それに対し減肉部では底面に入射したS波は底面が曲面になっているため、反射波が散乱していることが見て取れる。このことから、超音波の底面における反射の挙動は、底面の形状に忠実であるということを確認することができた。

6. 結言

写像法を用いることで、任意の減肉形状に対応できる電磁超音波法による配管減肉計測シミュレータを開発した。この開発したシミュレータに対して、実測定結果と数値実験結果を比較することにより、シミュレータの有効性を検証した。また、半楕円形の減肉形状に対する超音波伝播の可視化および伝播する超音波の挙動を解析した。このシミュレータにより B-spline 関数により任意の形状にモデル化した配管減肉に対する測定結果および検査対象内を伝播する超音波を模擬することが可能となる。今回は、半楕円形状の減肉に対して超音波伝播の可視化を行ったが、より複雑な減肉形状に対しても行うことで、配管減肉検査の定量化に有用に活用できることが期待できる。

謝辞

本研究は経済産業省原子力安全・保安院の「平成20年度高経年化対策強化基盤整備事業」において実施した研究であることを記し、関係各位に深甚の謝意を表す。

参考文献

- [1] R. Thompson, "Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers. In: W.P. Mason, (ed)", Physical Acoustics, Vol. 19, Academic Press New York, (1990)
- [2] K. Kawashima, "Theory and Numerical Calculations Of the Acoustic Field Produced in Metal by an Electromagnetic Ultrasonic Transducer", J. Soc. Am., 60 (1976)
- [3] F. Kojima, "Computational Method for Crack Shape Reconstruction of Steam Generator Tubes Using Method of Mapping", Electromagnetic Nondestructive Evaluation, (2000)
- [4] O. Axelsson and V.A. Barker, "Finite Element Solution of Boundary Value Problems", Theory and Computation, ACADEMIC PRESS (1984)
- [5] 戸川隼人, "有限要素法による振動解析", サイエンス社 (1981)