

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03750

研究課題名(和文)人工知能と超音波ガイド波計測の融合で配管の減肉深さは定量できるか？

研究課題名(英文) Quantitative evaluation of pipe wall thinnings utilizing the combination of guided inspections and artificial intelligence

研究代表者

西野 秀郎 (NISHINO, Hideo)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授

研究者番号：50316890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は広範囲高効率手法であるガイド波手法において減肉の定量を可能とする方法を付加することを目的に行うものである。実現手法には人工知能において最も広く用いられている教師付きの多層パーセプトロンを用いることとした。教師付きパーセプトロンにおける重要なオリジナルポイントは、(1)入力層に与える特徴量を多周波ガイド波反射率としたこと、(2)多数の学習データを独自の数学モデルで構築したこと、である。これらを用いた手法を人工減肉と実機減肉を用いて検証したところ、供用推定幅 $\pm 0.5\text{mm}$ において人工減肉では80%程度、実機減肉では100%の正答率を獲得できている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法は、公共インフラや産業インフラとして多く用いられている各種導管(パイプライン)の健全性を高効率かつ非破壊で検査できる手法である。現在は拭き取り検査に留まる各種検査を全域検査に置換できる可能性を秘めており、安心安全社会の実現に向けた研究開発の一つである。安全性の向上のみならず、産業や社会公共におけるコストの低減にも寄与する重要な研究課題である。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to add a method that enables the quantification of wall thinning in the guided wave method, which is an extensive and highly efficient method. The method used is the supervised multilayer perceptron, which is the most widely used method in artificial intelligence.

The important original points of the supervised perceptron are (1) the feature given to the input layer is the multi-frequency guided wave reflectance, and (2) a large number of training data were constructed using an original mathematical model. When the method using these features was verified using artificial and actual machine thinning, a correct response rate of about 80% was obtained for artificial thinning and 100% for actual machine thinning at an estimated service width of  $\pm 0.5\text{mm}$ .

研究分野：非破壊検査

キーワード：非破壊検査 超音波 ガイド波 人工知能 パーセプトロン パイプライン 減肉

### 1. 研究開始当初の背景

超音波ガイド波の利用目的は、減肉位置を特定する**減肉位置評定**と減肉深さの大小を評価する**減肉深さ評定(定量評価)**に二分される。減肉位置評定では、1980年代にはすでに多くの成果があり(例えば M.G.Silk et al: Ultrason., 17 (1979) 11) , 実用化も一定程度進んでいる。一方で減肉深さ評定では、減肉深さと検出信号の大小に単純な相関関係が無く、欠陥サイズの推定が難しく (R. Carandente: JASA, 127 (2010) 3440) , その解明が本分野の主要課題となっている。

減肉深さと検出信号の大小に単純な相関関係が見出せない中、研究代表者は軸対称の減肉(管軸に回転対称)であれば、どのような形状であっても**反射波形を計算で再現できる数学モデル** (H. Nishino: Mater. Trans. 56 (2015) 120) を提案している。さらに重要なことは、この数学モデルからは「多周波数で得た信号値の中で最も大きい値が、その減肉深さに相関している」という重要な知見を得ている。この知見から軸対称の減肉限定であるが、**多周波数のガイド波の反射率を用いること**で減肉深さの評価にも成功している(同上論文)。この数学モデルは、本研究においても中心的役割を担うが、軸対称で無い現実の欠陥形状の推定にこの数学モデルは直接的には使えない。この点の改善を、大量の検出波形データ(学習データ)とニューラルネットワークによる**人工知能(AI)**を用いて実現することが目的となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、超音波ガイド波計測における重要かつ未解明な配管減肉の減肉深さの定量を人工知能(AI)によって実現できるか? に解を与えようことを目的とする。AI は、**容易に得られる情報(入力)**から**知りたい情報(出力)**が得られる技術である。これまで研究代表者はガイド波の欠陥での反射現象を良く説明できる**数学モデル**を構築し、その中で多周波数の反射率に多くの減肉形状の情報が有することを証明している。本 AI では、入力は多周波数の反射率とし、出力は減肉深さである。AI の実現にはまた大量の学習データが必要である。数学モデルは、多種多量の学習データを極めて高速に取得できる。有限要素法の利用も併せて AI の精度を高める。

本研究の目的は、多周波数の超音波ガイド波の反射率を用いることで任意形状減肉の減肉深さを推定する AI を用いた方法の確立である。独自性・創造性の一つは AI の入力値に、多周波数の超音波ガイド波の反射率を用いることである。

もう一つの重要な独自性・創造性は、学習データに関する考え方である。AI の成長には多種多量の学習データ(入力値とその時の答えのペア)が必要である。大概の AI 構築では、多種多量の学習データが得られず、入口で頓挫する。本研究では、独自の数学モデルを用いて大量の学習データを生産し利用する。数学モデルは計算が速い、軸対称の円弧状減肉の反射振幅値を系統的に大量に計算し学習データにする。軸対称の減肉は、任意形状の減肉の部分集合である。

### 3. 研究の方法

本研究で使用した多層パーセプトロンの概要を図 1 に示す。入力層から第一中間層への活性化関数はリニア、最終層は softmax, それ以外は relu を用いた。最適化には Adam(パラメータは推奨値を使用)を用いた。

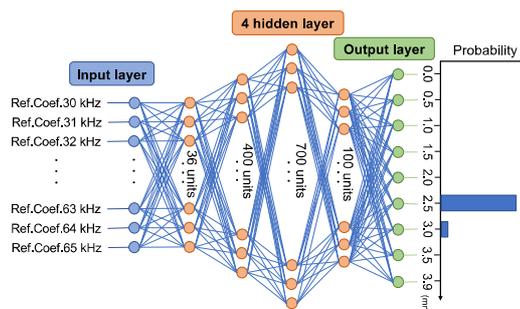


図 1 使用した多層パーセプトロン

#### (1) 人工減肉での検証

独自の数学モデルを用いて多種多量の学習データを用意する。実際の化学プラントに多い外径 89 mm, 肉厚 5.5 mm の鋼配管を想定し、深さは 0.5 mm ~ 5.0 mm (0.5 mm step), 開口幅は 10 mm ~ 500 mm の円弧状減肉を設定して、周波数 30 kHz ~ 65 kHz (1 kHz ステップ, 36 周波数)の減肉反射率と減肉深さのペアとして学習データ 10 万種類程度を取得し 1 セットとして AI を強化する。モデル計算は瞬時で、多セットの学習データで AI を強化して比較検討し最適条件を探る。セット条件は、実減肉の深さと開口の比(実機で 1/5~1/20)を目安に変化させた。図 2 に人工円弧減肉を示す。

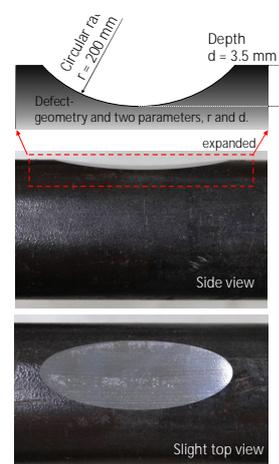


図 2 人工減肉の一例

#### (2) 実機減肉での検証

実機切り出し配管に発生している 6 種の実源肉を図 3 に示す。減肉深さは 1.3mm から貫通の 3.8mm までである。広く薄く分布した減肉から局所的な減肉, 比較的深い減肉が狭い範囲に密集したものなど、現場での多種多様な実際の減肉を用いてここで提案した減肉量の定量手法を検証した。

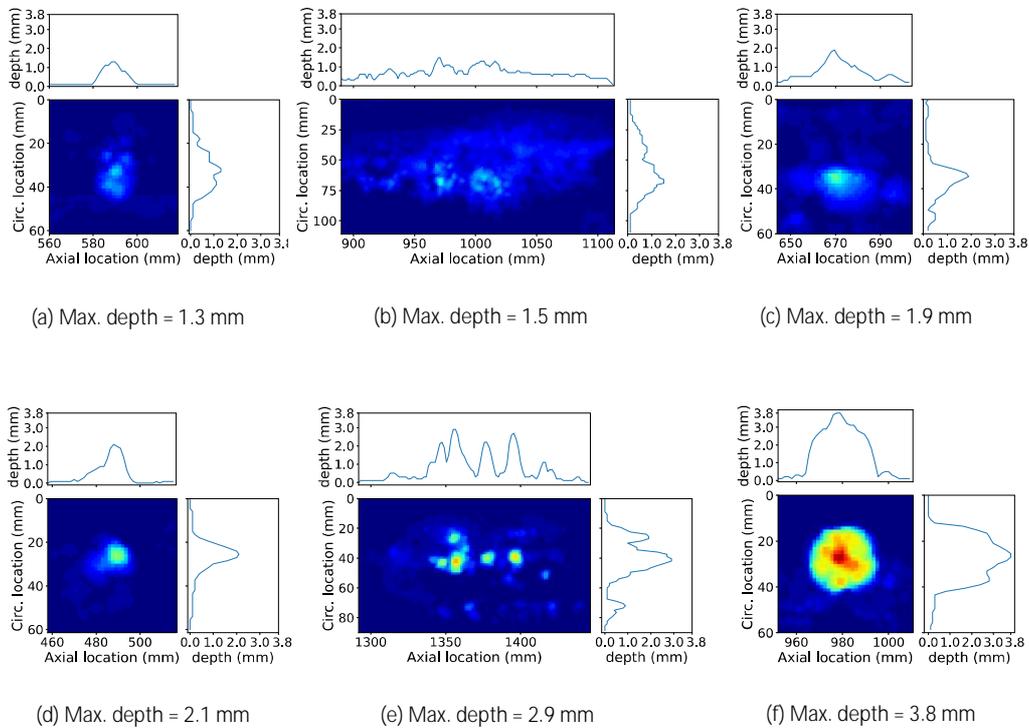


図3 評価を実施した実機減肉

#### 4. 研究成果

##### (1) 人工減肉での結果

図4 (a)と(b)に epoch に対する正答率とロスのグラフを示す。青線がトレーニングデータによる結果、オレンジ線が人工減肉による結果を示し、緑線は $\pm 0.5\text{mm}$ 許容における正答率を示している。各線実線はランダム 100 種類の初期値違いにより得られた平均値を示し、その上下に薄い色で示した範囲は標準偏差を示している。実際の使用においては、上限を示す初期値を利用することが実用的である。ここでは本手法の能力判定のための表記である。256 epoch においてロスが最小値を取っており、これ以降は過学習となる。推定精度は 55%と若干低めに見えるが、推定許容幅 $\pm 0.5\text{mm}$ において推定精度は 90%に達しており現場基準として十分な精度を取得できた。

256 epoch における個別の推定結果として、円弧減肉の半径  $R=50\text{mm}$  の場合で分類ステップ  $0.5\text{mm}$  の場合を図5に示した。それぞれ減肉深さは(a)から(f)で  $1.0\text{mm}$  から  $3.5\text{mm}$  ( $0.5\text{mm}$  step)に対応しており、赤の縦線が正解値を示している。青色とオレンジ色のバーは、それぞれ別の実験結果からの推定結果を示している。青色は  $1.0\text{mm}$  から  $3.5\text{mm}$  まで  $0.5\text{mm}$  ステップで作成した人工減肉に対応しており、オレンジ色は減肉深さ  $1.0\text{mm}$ ,  $2.0\text{mm}$ ,  $3.5\text{mm}$  の減肉深さの人工減肉に対応した結果である。全体として良好な推定結果が得られている。正答率は 75%で、 $\pm 0.5\text{mm}$  の許容幅では 100%であった。本手法の有用性が確認できた。

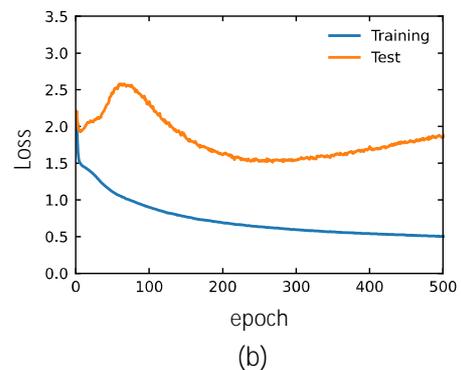
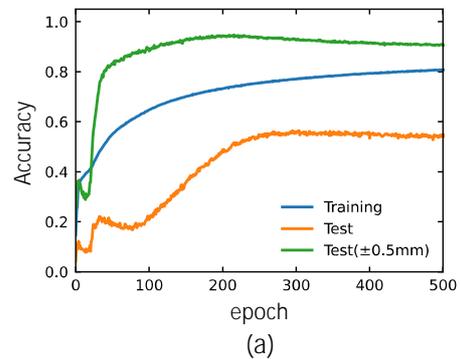


図4 人工減肉に対する推定精度とロス。ロスの極小値は 256 epoch にて発生、それ以後は過学習

##### (2) 実機減肉での結果

図6 (a)と(b)に epoch に対する正答率とロスのグラフを示す。先に示した人工減肉での結果に対してより良好な結果が得られている。全体的に高い推定精度と低いロスを達成している。このような高い数値を取得できた理由は今後の研究に委ねられる点である。トレーニングを示す青色の線とテストを示すオレンジ線がとても近い値を有しているが、これは極めて良好に実機データに AI が対応していることを示している。

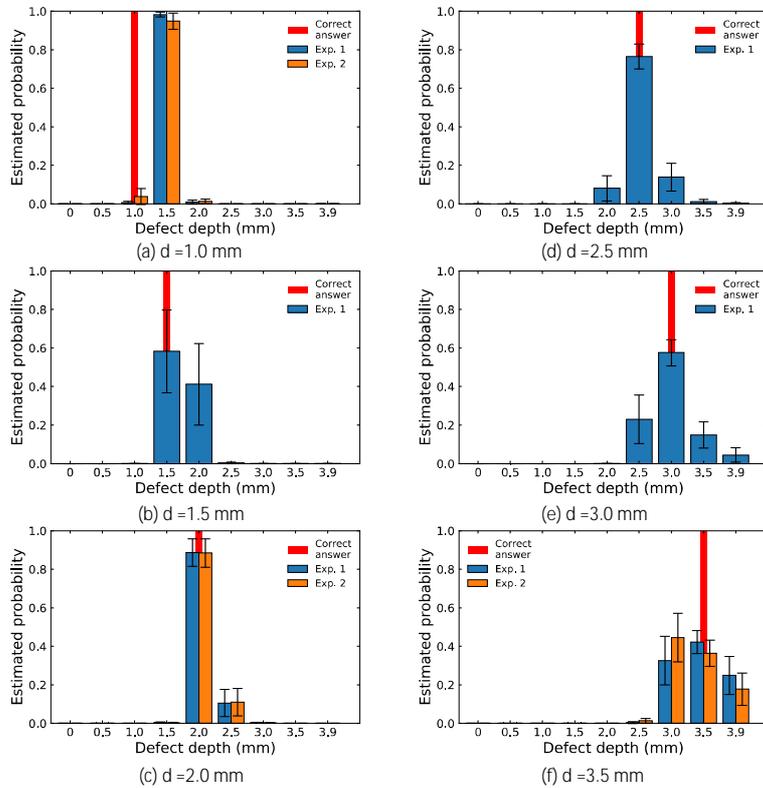


図5 人工減肉 (R=50mm) における分類結果. 赤の縦線が正解を示し, 青とオレンジのバーが推定結果を示している. 許容誤差  $\pm 0.5$  mm では全ての場合で正解に一致している.

最小ロス は 148 epoch において発生し, 以後は過学習である. 148 epoch における個別の推定結果を図6に示した. 分類ステップは 0.5mm である.

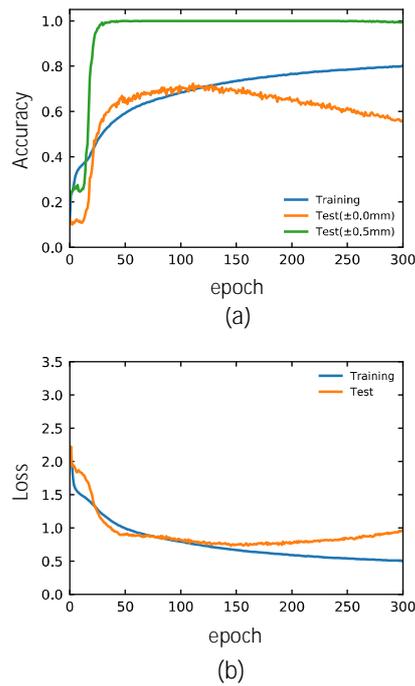


図6 実機減肉に対する推定精度とロス. ロスの極小値は 256 epoch, それ以後は過学習

図3に示す6個の実機減肉に対する個別の推定精度を図7に示す。赤の縦線が正解を示し、青とオレンジのバーは推定結果を示している。推定精度は75%に達し、許容誤差 $\pm 0.5$  mmでは100%であった。複雑な実機減肉においても良好な結果を示すことができた。

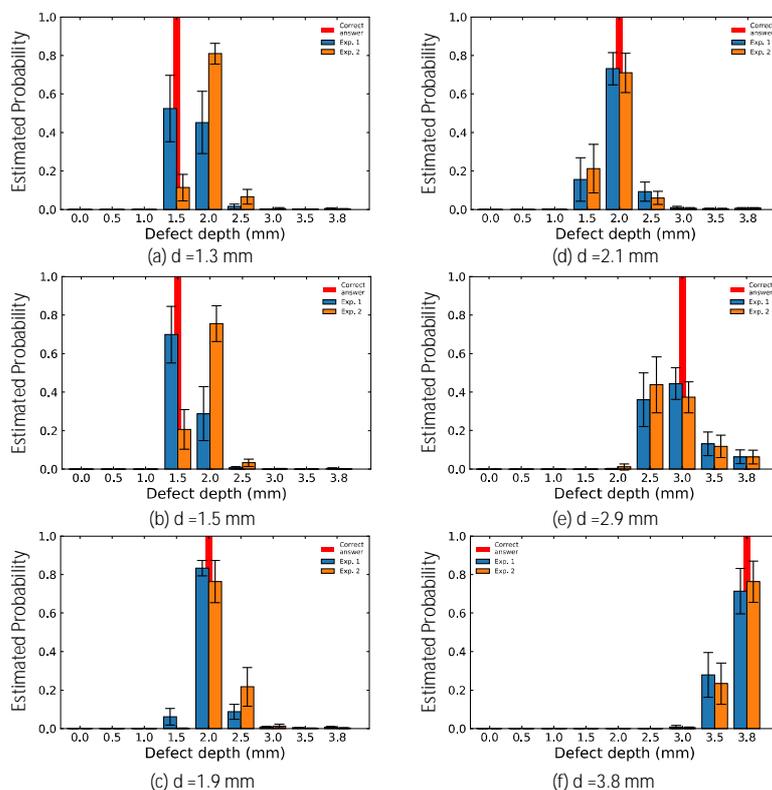


図7 実機減肉における分類結果. 赤の縦線が正解を示し、青とオレンジのバーが推定結果を示している。推定精度75%，許容誤差 $\pm 0.5$  mmでは全ての場合で正解に一致している。

#### まとめ

本研究は、ガイド波を用いて減肉の定量を行う先駆的な手法であり、他に類を見ないものである。本来ガイド波は広い範囲を効率的に検査できるもので、減肉位置の同定においては海外などでは実用化にも至っている。本研究により減肉の定量が可能になることで構造健全性監視技術の一つとして社会的に寄与できることを期待している。

#### 参考文献（本研究の主論文として）

R. Katsuma, K. Tada, T. Iriguchi, K. Seno, S. Kondo, M. Ishikawa, M. Goka, and **HIDEO NISHINO**, “Depth estimation of pipe wall thinning using multifrequency reflection coefficients of T(0,1) mode guided waves with supervised multilayer perceptron”, to be published in Structural health monitoring.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 R. Katsuma, K. Tada, T. Iriguchi, K. Seno, S. Kondo, M. Ishikawa, M. Goka, and H. Nishino	4. 巻 -
2. 論文標題 Depth estimation of pipe wall thinning using multifrequency reflection coefficients of T(0,1) mode guided waves with supervised multilayer perceptron	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 to be presented in Structural Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 川上太郎, 石川真志, 五家基樹, 西野秀郎
2. 発表標題 減肉部での多重反射を考慮した減肉反射数学モデルと断面欠損率が大きな場合への適用性
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野光暉, 石川真志, 五家基樹, 西野秀郎
2. 発表標題 T(0,1)modeガイド波の時間周波数領域信号を用いたCNNによる減肉深さ推定
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西川丈瑠, 石川真志, 西野秀郎, 古川敬
2. 発表標題 モルタルが付加された鋼板の SH 板波系ガイド波の伝搬挙動
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田康輝, 平野光暉, 石川真志, 五家基樹, 西野秀郎
2. 発表標題 多周波 T(0,1)mode ガイド波の時間領域信号を用いたDNN による減肉位置と深さ分布の同時推定
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田康輝, 平野光暉, 石川真志, 五家基樹, 西野秀郎
2. 発表標題 ガイド波時間波形を入力とする深層ニューラルネットワークを用いた減肉の位置と深さの同時推定
3. 学会等名 日本非破壊検査協会秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野光暉, 多田康輝, 石川真志, 西野秀郎, 五家基樹
2. 発表標題 T(0,1) modeガイド波の時間周波数領域信号を用いたCNNによる減肉深さ推定
3. 学会等名 第30回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 湯川宙, 石川真志, 西野秀郎
2. 発表標題 T(0,1)modeガイド波励起における円周方向への等間隔および不等間隔センサエレメント配置による不要な共鳴リングの影響
3. 学会等名 第30回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Katsuma, K. Hirano, M. Goka, M. Ishikawa, and H. Nishino
2. 発表標題 Multinomial classification of wall thinning of piping using a deep neural network based on the frequency variation of guided wave reflection coefficients at defect
3. 学会等名 48th Annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝間隆仁, 平野光暉, 石川真志, 五家基樹, 西野秀郎
2. 発表標題 数学モデルで算出したガイド波の欠陥反射率を学習データとするAIを用いた配管減肉の深さ推定
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 二羽信輔, 西野秀郎, 石川真志
2. 発表標題 不要な共鳴を抑制し広帯域励振を可能とするガイド波用圧電式リング型センサの設計指針
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝間隆仁, 平野光暉, 五家基樹, 石川真志, 西野秀郎
2. 発表標題 Quantitative evaluation of wall thinning of piping using deep neural network based on the frequency variation of the T(0,1) mode guided wave reflection coefficient
3. 学会等名 超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多田康輝, 石川真志, 五家基樹, 西野秀郎
2. 発表標題 ガイド波時間波形を入力とするDNNによる減肉発生位置と減肉深さの同時推定法の実機配管への適用
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澤田朱莉, 石川真志, 西野秀郎
2. 発表標題 板材の空中縦波透過率を利用した弾性物性測定
3. 学会等名 日本非破壊検査協会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 多田康輝, 平野光暉, 石川真志, 五家基樹, 西野秀郎
2. 発表標題 多周波ガイド波反射率を入力とする多層パーセプトロンを利用した実機配管の減肉量推定
3. 学会等名 日本非破壊検査協会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西川 文瑠, 石川 真志, 西野 秀郎
2. 発表標題 塗膜/金属板を伝搬するS0 mode Lamb波の Sheet波速度を利用した塗膜厚さの推定
3. 学会等名 日本非破壊検査協会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 入口智也, 多田康輝, 五家基樹, 石川真志, 西野秀郎
2. 発表標題 多周波ガイド波反射率を入力とするDNNの減肉量推定における SHAPを用いた説明可能性に関する研究
3. 学会等名 日本非破壊検査協会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sora Yukawa, Masashi Ishikawa, and Hideo Nishino
2. 発表標題 Spurious resonant phenomena of circumferential Lamb wave in axially propagating guided wave excitation by plural sensors located on the pipe girth
3. 学会等名 Ultrasonic Electronics symposium
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西川丈琉, 石川真志, 西野秀郎
2. 発表標題 多層板を伝搬するLamb波の特性方程式の特徴と3層板の伝搬特性
3. 学会等名 第31回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------