

## 人工知能と超音波を利用し、腐食した配管の減肉量を効率的に計測する新技術を開発しました

### <ポイント>

・配管の欠陥を検出する技術の一つガイド波法<sup>※1</sup>の特徴である広範囲の効率的な計測を踏襲した上で、人工知能（教師つき多層パーセプトロン<sup>※2</sup>）技術を融合し配管の減肉深さの計測を可能としました。

・多様な形状の実機減肉<sup>※3</sup>に対して、 $\pm 0.5\text{mm}$ の精度で減肉深さを計測できることを世界に先駆けて示しました。

特徴1：多周波のガイド波を利用することで、実機減肉の多様性に対応しました。

特徴2：人工知能に必要な30万個程度の学習データを、独自に数学モデルで高速に計算利用しています。実験やシミュレーションで収集する必要がありません。

・人工知能による配管減肉深さの自動判定が可能になることで、NDE4.0<sup>※4</sup>、DX<sup>※5</sup>、Digital Twin<sup>※6</sup>技術への応用も期待され、安全安心な社会に貢献します。

### <報道概要>

徳島大学大学院社会産業理工学研究部理工学域材料科学分野の西野秀郎教授は、配管の減肉量を効率的に計測できる新たな技術を三菱ケミカル株式会社との共同研究により開発しました。人工知能の一つである教師つき多層パーセプトロンと配管広域を効率的に超音波計測できるガイド波法を組み合わせることで実現しています。

従来の減肉深さ計測は、超音波探触子<sup>※7</sup>で一点一点探る必要があり、狭い範囲の抜き取り検査に留まっています。本手法では、一度の超音波の送受信で広範囲の配管減肉を計測できることを世界に先駆けて実際の腐食配管を用いて示しました。

ガイド波法は、計測範囲が広く減肉の位置を効率的に得ることができる一方で、減肉深さを計測することが困難でした。本技術は、教師つき多層パーセプトロンを利用しガイド波の欠点を補うことで、一度の測定で長距離領域の配管に対して減肉位置と減肉深さを同時に計測可能とするもので、空中架設配管<sup>※8</sup>に対して特に有望です。産業インフラや社会インフラで多用されている配管に対して効率的なモニタリングや減肉深さの自動診断への利用に期待されます。

この研究成果は、2024年7月24日（日本時間）に「Structural Health Monitoring 誌」に公開されました。

## <研究の背景と経緯>

工場などに多く敷設される配管は、自然環境や過酷な使用条件による腐食や劣化のため、定期的な補修や入れ替え作業が行われています。補修や入れ替えの最適化はコスト削減と安全性担保には必須の事項です。最適化には精度の高い検査による配管の健全性評価が有効です。

健全性評価が有効である一方で、多くの工場でもと多くの配管が使われていること、また効率的な検査手法が現状では見当たらず、検査の実施が追いつかないことが問題でした。2000 年前後にガイド波法が配管の効率的検査手法として世界的に注目されましたが、この方法は減肉の位置が計測できる一方で、減肉深さの計測が困難です。多くの配管メンテナンスの現場においては、配管肉厚の半分程度の減肉の発生を補修や入れ替えの目安にしています。すなわち、多くの配管に対して効率的に対応できる減肉深さの計測方法が求められています。

## <研究の内容と成果>

### 1) 概要

ガイド波法は、一度の送受信で配管の長距離領域に対して減肉位置の計測が可能である一方で、減肉深さの測定が困難でした。西野教授らのグループは、多周波数のガイド波の減肉反射率に、単一周波数にはない減肉深さの情報が含まれていることを示しました。さらに多周波数の減肉での反射率を人工知能(多層パーセプトロン)の入力層に与えることで、減肉量を推定できるアルゴリズムを構築実装し(図1)、減肉深さの推定を可能としました。

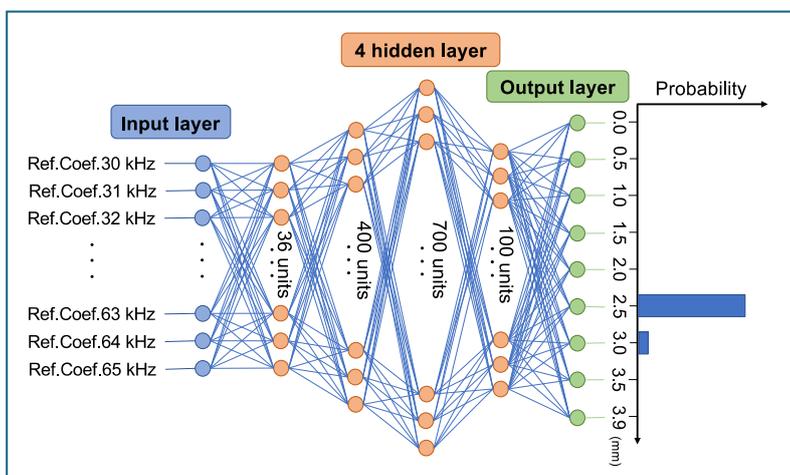


図1 人工知能(多層パーセプトロン)に多周波数(30-65kHz)の減肉反射率を与え、減肉量を0.0 mmから3.9 mmまでの9つの領域深さの何処に対応するか確率密度として得られる方法を構築した(分類という手法)。この図では、90%以上の確率で減肉深さ2.5 mmと判定している。

## 2) 人工知能への入力パラメータ (特徴1)

図2には、配管肉厚の半分の減肉(単純矩形状減肉<sup>※9</sup>)における周波数別の反射率を波動シミュレーション(有限要素法<sup>※10</sup>)で求めた結果を示しました。肉厚の半分は十分に大きな減肉ですが、周波数(40kHz)によっては反射率がゼロであることがわかります。単一周波数の減肉反射率を用いると減肉を見逃す可能性があることがわかります。一方で西野教授らのグループは、多周波数の反射率の中で最も高い反射率が減肉深さに相関する可能性を見出しています。このことを根拠に人工知能(多層パーセプトロン)の入力に多周波数のガイド波反射率を用いることを提案しています。

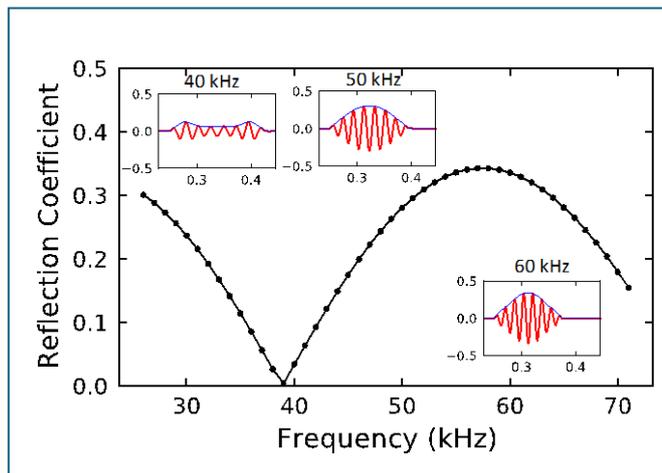


図2 ガイド波の周波数別の反射率の例(矩形状の単純な 50%減肉<sup>※11</sup>) 周波数により減肉でのガイド波の反射率が異なることが確認できます。40kHz では反射率はほぼゼロを示します。単一周波数を用いた計測では減肉を見逃す可能性があります。一方で多周波数の減肉反射率データ群には減肉深さ情報が含まれていることが本研究により示されており、人工知能(多層パーセプトロン)に利用しています。

## 3) 人工知能を育てる大量の学習データ (特徴2)

一般に教師付きの人工知能には大量の学習データが必要で、多いほど良いと言われています。ガイド波計測に人工知能を組み合わせた既報の研究では、多くは数値シミュレーションにて学習データの収集が行われています。計算時間が多くかかることから最大でも 100 に満たない学習データの収集利用に留まっているのが現状です。本研究では、減肉形状からガイド波の反射率を求める数学モデルを用いることで瞬時に大量の学習データの収集に成功しています。そのため今回の例では 30 万種程度の膨大な学習データを利用しています。これは世界的にもこれまでに無い圧倒的な規模です。教師付き人工知能の精度向上に大きく寄与しています。

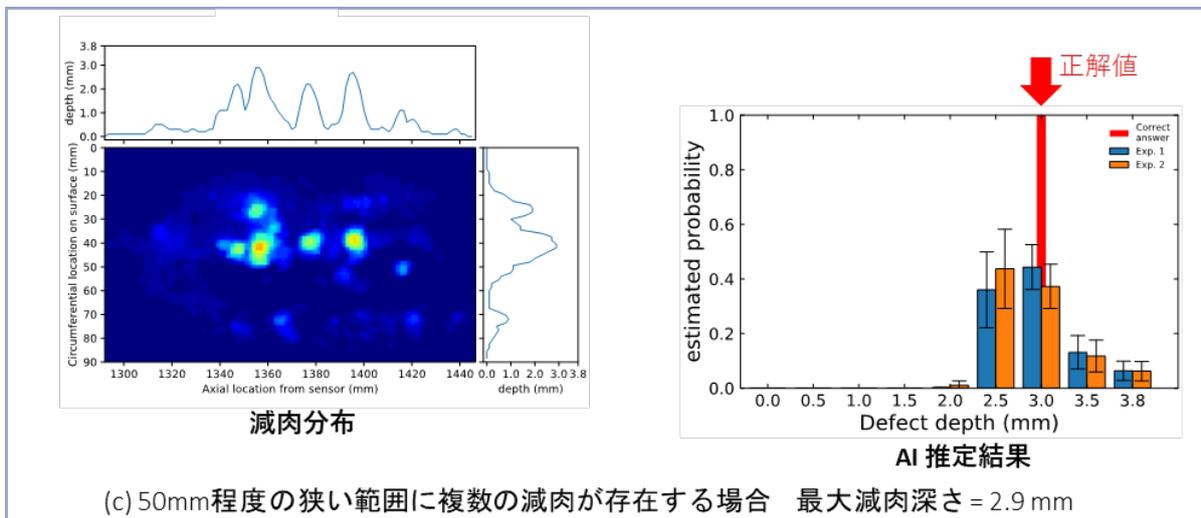
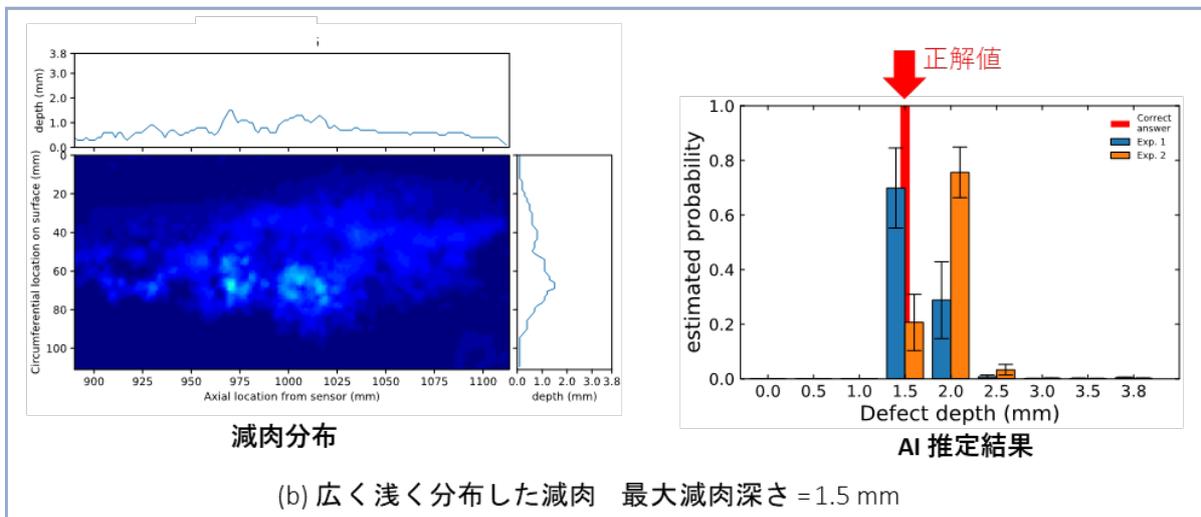
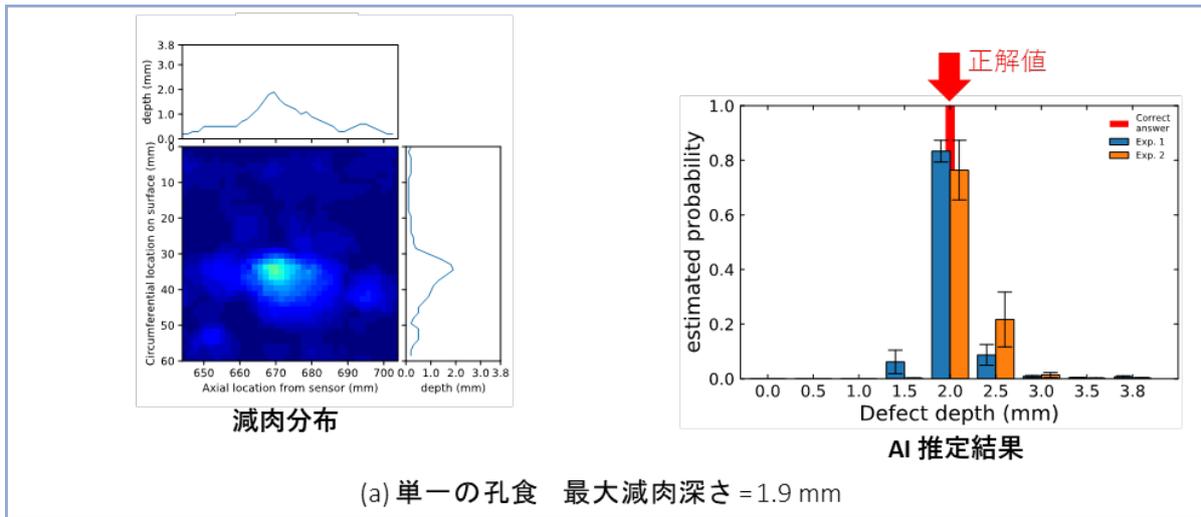


図3 状態の異なる3つの実減肉に対するAI(多層パーセプトロン)の評価結果

赤線は正解値を示し、青とオレンジのグラフは2回の異なる実験結果から得た推定結果を示す。全体としての正答率は75%、許容誤差 $\pm 0.5$  mmの正答率は100%が得られています。

#### 4) AI の推定結果

外径 60.5mm 肉厚 3.8mm の配管 (50A SGP 鋼管) に実際に発生した 3 種類の減肉とその推定結果を図 3 に示します。様々な形状の実減肉の減肉深さを高い正答率で推定できることを示しています。三菱ケミカルの実配管に発生した 6 種類の減肉を対象にした減肉深さ推定値は、許容誤差  $\pm 0.5$  mm においては 100% の正答率が得られています。

#### <今後の展開>

本研究は、ガイド波法と人工知能 (教師付き多層パーセプトロン) を融合することで、配管の減肉深さを短時間で効率よく計測できることを世界で初めて示しました。特に空中架設配管の検査に有効で、様々な領域の配管に利用されることが期待されます。

本方法を用いることで、抜き取り検査に代わりより広い範囲を対象にした検査への道が拓かれ、将来的な全数検査も視野に入ります。効率的なメンテナンスと安心安全に資する実用技術になることが期待されます。

今後はより実用的な観点から様々なプラントの配管に対して適用することで本技術の実用化技術の開発を行います。

#### 【用語説明】

- ※ 1 ガイド波: 配管やパイプなどの長手方向に伝わる超音波のこと。長手方向に長距離伝わることを特徴とする超音波の一種。  
ガイド波法: ガイド波を用いることで配管の傷や減肉を見つける方法。ガイド波は配管などを長距離伝わるため、効率的かつ低コストで検査が可能である。ガイド波は傷や減肉の位置を見つける良い方法であるが、大きさを獲得することができない。
- ※ 2 教師付き多層パーセプトロン: 多層パーセプトロンとは、ニューラルネットワークの一種で、入力層と出力層の間に単数または複数の中間層を有するものを言う。教師付きとは、人工知能に正解を与えることで人工知能の学習を行う方法のこと。一般に大量の学習データ (ビッグデータとも言われる) が高い精度の人工知能には必要である。
- ※ 3 実機減肉: 実際の工場などで使用中の配管に発生した減肉。実験室で人工的に作成する人工減肉と区別するために用いる用語。
- ※ 4 NDE 4.0: 産業のサイバー化やデジタル対応などを軸とした第 4 次産業革命として提唱されているインダストリー 4.0 に対応して存在する言葉の一つ。非破壊評価技術のサイバー化やデジタル対応などを通じて非破壊評価技術の新たなステップを提唱する概念。NDE は Nondestructive Evaluation の略。
- ※ 5 DX: デジタルトランスフォーメーションの略。さまざまなことをデジタル化することで業務などの改善を目指すもの。ここでは非破壊検査データ (ガイド波計測データ) のデジタル化により人工知能の適用を可能にすることで検査業務を改善する。
- ※ 6 Digital Twin: 実社会とそれをデジタルデータで模擬した仮想社会をペアにした概念。実社会をデータ (数値) 化し大量に収集することで仮想社会を作ることを第一とする。仮想社会に集められたデータを解析や人工知能等で利用することで、最終的に実社会に資することを目的とする。
- ※ 7 探触子: 超音波センサのこと。

- ※8 空中架設配管：地上に設置された配管のこと。地中に設置された埋設配管と区別するために使用する。
- ※9 単純矩形状減肉：自然に発生することがない減肉の隅が直角(矩形)状の減肉のこと。実験室において、超音波計測の基礎特性を収集するために用いられる。
- ※10 有限要素法：コンピュータ上で行う数値シミュレーションの一種。様々な物理現象の解明に用いられている。
- ※11 矩形状の単純な 50%減肉：単純矩形状減肉のうちで、肉厚方向の欠損率が半分すなわち 50%のものを言う。

#### 【謝辞】

本研究は、科学研究費補助金 21K03750 の支援を受けて実施されました。

#### 【論文情報】

掲載誌：Structural Health Monitoring

論文名：Depth estimation of pipe wall thinning using multifrequency reflection coefficients of T(0, 1) mode-guided waves with supervised multilayer perceptron

著者名：勝間隆仁(Ryujin Katsuma)<sup>1</sup>、多田康輝(Koki Tada)<sup>1</sup>、入口知也(Tomoya Iriguchi)<sup>1</sup>、妹尾虎太郎(Kotaro Seno)<sup>1</sup>、近藤慎佑(Shinsuke Kondo)<sup>1</sup>、石川真志(Masashi Ishikawa)<sup>1</sup>、五家基樹(Motoki Goka)<sup>2</sup>、西野秀郎(Hideo Nishino)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>徳島大学大学院、<sup>2</sup>三菱ケミカル株式会社

DOI 番号：10.1177/14759217241249240

お問い合わせ先

<研究に関すること>

徳島大学大学院社会産業理工学研究部理工学域  
機械科学系

担当者 教授 西野 秀郎

メールアドレス hidero.nishino@tokushima-u.ac.jp

<その他、徳島大学に関すること>

徳島大学常三島事務部理工学部事務課総務係

担当者 係長 奥村 泰輝

電話番号 088-656-7304

メールアドレス st\_soumuk@tokushima-u.ac.jp