先進的な検査・構造健全性評価技術に関する研究基盤の整備
～機械学習を活用した超音波探傷画像評価ツールの開発～

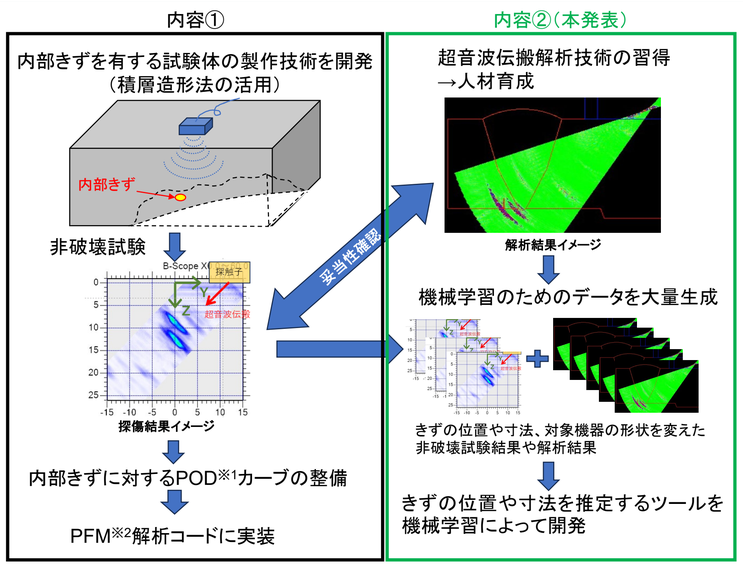
日本原子力研究開発機構　原子力安全・防災研究所　安全研究センター　　下平　昌樹

背景及び目的

本事業の位置づけ

既存軽水炉の更なる長期運転に伴い、これまで以上に、機器・構造物の健全性確保が求められる。また、想定されていなかった破損が生じる可能性も考えられ、破損の予兆となるきずを見逃さないため、非破壊検査結果の判定について妥当性確認が重要である。これらを受けて、本事業では以下の技術基盤整備に取り組んでいる。

① 健全性評価に資するため、内部きずを対象としたきず検出確率モデルを構築し、確率論的破壊力学解析コードを高度化
② 事業者による非破壊検査結果の妥当性を確認するための機械学習ツールの整備及び人材育成



※1　POD : Probability of Detection （きず検出確率）
※2　PFM : Probabilistic Fracture Mechanics （確率論的破壊力学）

本研究の目的

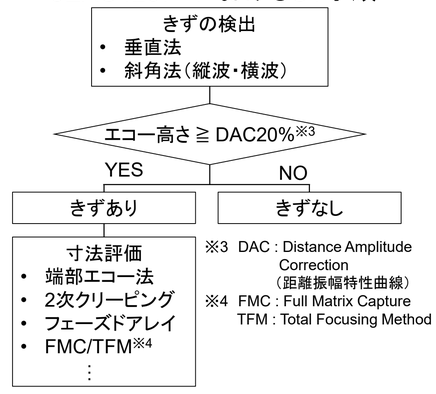
原子炉施設の供用期間中検査では、原子炉配管等を対象に、きずの有無が超音波探傷試験（Ultrasonic Testing ： UT）により確認される。原子炉施設の健全性を確保するためには、「きずを見逃さないこと」、「きず寸法を精度よく推定すること」が求められる。UTの結果判定には評価者の高い技能が不可欠であるが、電力事業者による非破壊検査結果の妥当性を確認するためには、規制側でもUT検査に係る人材育成や技術基盤整備を進める必要がある。

本研究では、機械学習を活用し、UT探傷画像から、きずの有無や寸法推定を行うツールを整備することで、評価者の技能や習熟度に依存しない結果判定を可能とするUT技術基盤を整備する。

期待されるアウトカム

- 機械学習ツールによる結果判定のサポート
- UT検査結果の信頼性向上

JEAC4207[1]におけるUT手順



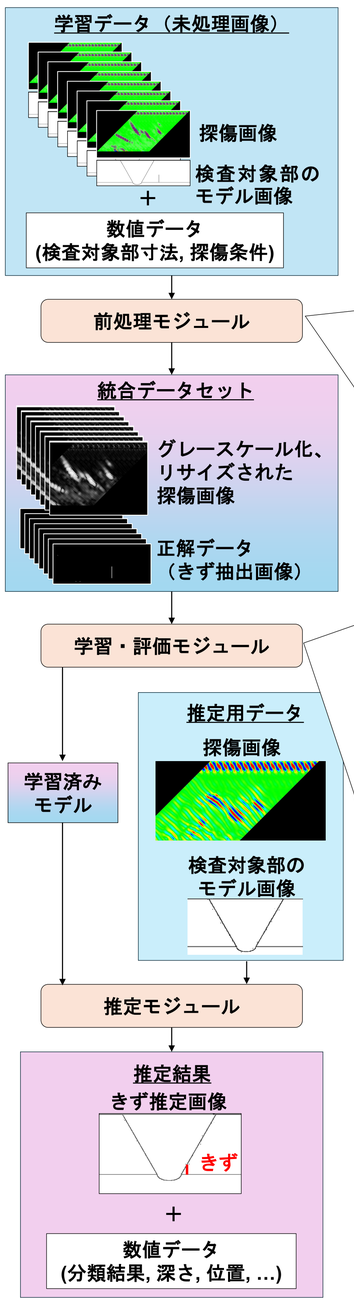
- 複雑な探傷結果を判定するための高い技能が必要
- 膨大なデータ数を取り扱う必要がある

[1] 日本電気協会, JEAC4207-2022, (2022).

ツール概要

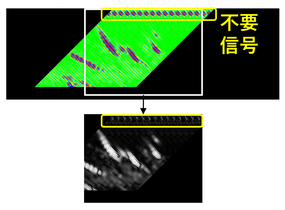
将来の活用が見込まれるフェーズドアレイやFMC/TFM等の探傷画像に基づくUT検査手法に対して適用することを想定し、以下の開発方針を定めた。

- 1枚の2次元探傷画像からきず有無判定/寸法推定を同時実行
- 検査対象部の図面上に、きずの位置を可視化



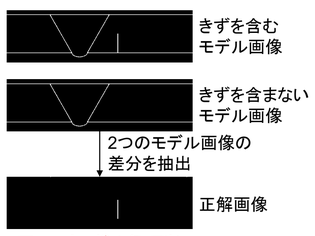
前処理モジュールの処理内容

- リサイズ（画素数統一）
- グレースケール化
- ノイズ（不要信号）除去等



学習の効率化

- 正解画像の作成

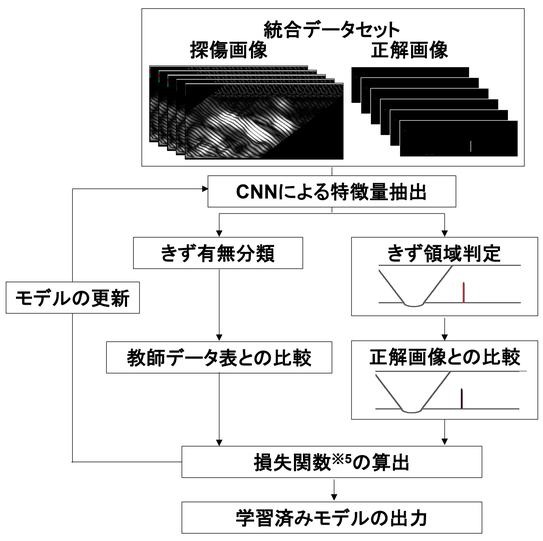


細長いきず（亀裂）の
特徴量抽出を補助

学習・評価モジュールの処理内容

学習モデルの特徴

- 畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network: CNN）
- 分類と領域判定を同時に行うマルチタスク学習



※　損失関数の定義：$\lambda_{class} \times$ きず有無分類誤差 $+ \lambda_{seg} \times$ きず領域判定誤差

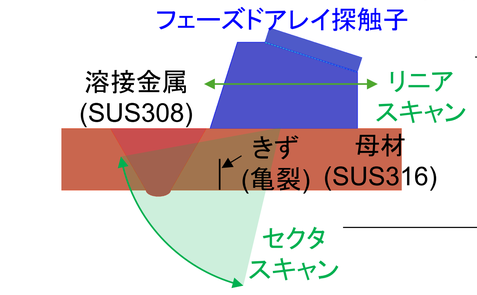
きず有無分類誤差：見逃し率、誤検出率　等
きず領域判定誤差：きず領域Pixelの一致度、きず輪郭の一致度　等

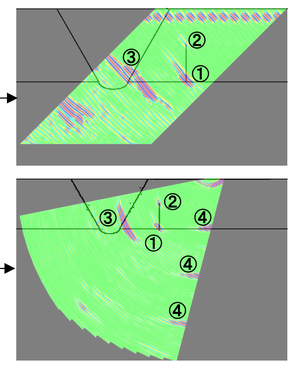
λ_{class}, λ_{seg}：重み（添字　class：きず有無分類, seg：きず領域判定）

検証方法

ツールの精度検証のため、UTシミュレーション（ComWAVE, 有限要素法）で得られた理想的な探傷画像を学習データとした。

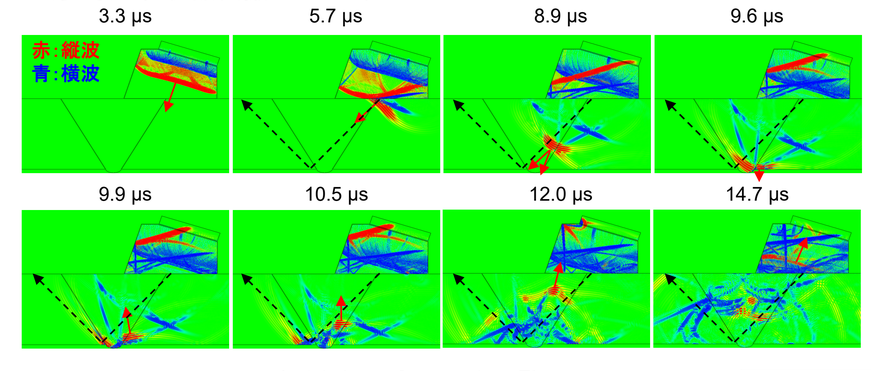
解析モデル
オーステナイト系ステンレス鋼管溶接部





主要エコー
①コーナーエコー
（きずの根元からのエコー）
②端部エコー
（きずの先端からのエコー）
③柱状晶伝搬エコー※6
④底面エコー

※6（参考）　柱状晶伝搬エコーの発生メカニズム



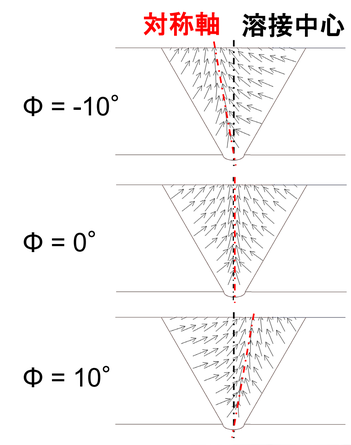
柱状晶組織の音速異方性に起因して超音波伝搬経路が変化し、意図した位置以外での反射が発生
（8.9 μs以降）

ComWAVE解析時のパラメーター一覧
（UT検査に関する国家プロジェクト[2]での試験条件を参考に設定）

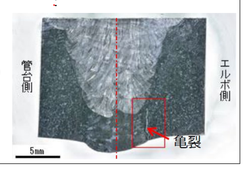
変数		範囲
配管, きず形状	肉厚 (mm)	10, 25, 35, 50
	きず深さ (mm)	0.5 – 10.5
	きず位置 (mm)（溶接境界からの距離）	1.0 – 8.0
	きずの傾き角 (degree)	-20, -10, 0, 20, 30（時計周りを正）
	柱状晶異方性分布を決める対称軸角度 (degree)	-10, 0, 10（時計周りを正）
探傷条件	走査方法	リニア, セクタ
	入射角 (degree)	リニア: 45, 60 セクタ: 5 – 85
	周波数 (MHz)	2, 5

柱状晶長軸方向分布

Ogilvyモデル[3]に基づき、柱状晶の異方性分布を模擬



実配管で見られる柱状晶組織の例[4]



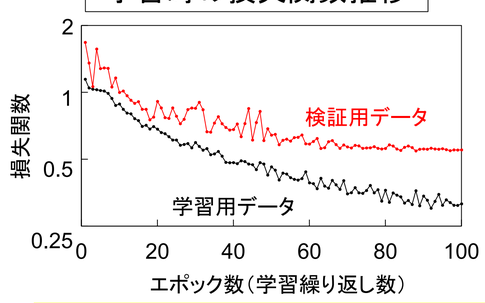
[2] JNES, 原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書, (2005).
[3] J. A. Ogilvy, NDT International, 18, pp. 67-77, (1985).
[4] ATENA, 第20回新規規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合資料, (2022).

精度検証結果

UTシミュレーションで得られた探傷画像及びモデル画像を用いて、ツールの動作確認及び精度検証を行った。学習時の主要条件は下表に示す通りとした。

項目	条件
探傷画像数	754 内、きず無しデータ数135
学習：検証：推定用データ比率	8 : 1 : 1
最大エポック数	100
備考	きずの見逃しを低減するように損失関数算出時の重みを調整

学習時の損失関数推移



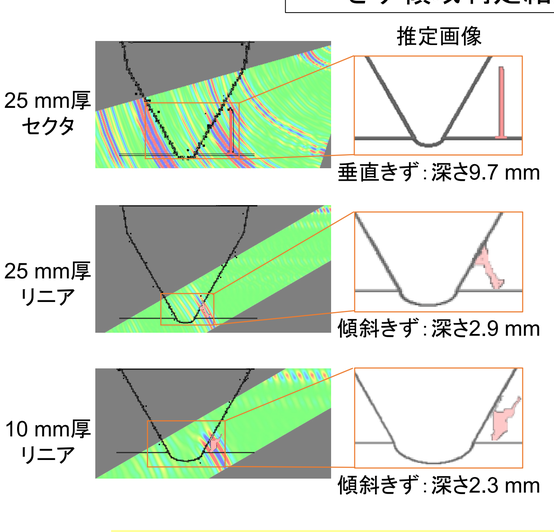
学習が飽和傾向にあることを確認

きず有無分類結果

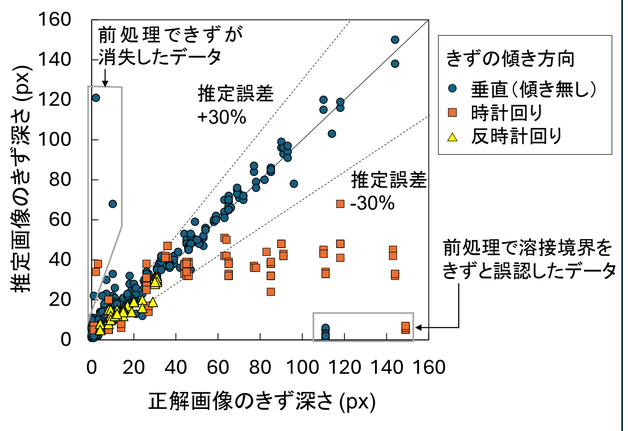
対象：推定用データ

正解＼推定	なし	あり
なし	9 (12.0%)	4 (5.3%)
あり	0 (0%)	62 (82.7%)

きず領域判定結果



きず深さ推定結果



- 配管内面に垂直なきずでは、優れた予測精度を得た。（約70%のデータに対して±20%以下）
- 傾いたきずでは、予測精度が低下し、過小評価の傾向が認められた。

結論

UT結果判定のサポートを目指し、機械学習に基づき、2次元探傷画像からきずを推定するツールのプロトタイプを開発した。UTシミュレーションで得られた探傷画像を学習データとした精度検証により、以下の結果が得られた。

- 約95%の精度できずの有無を分類できた。
- 探傷画像からきずの候補位置を可視化できた。
- 配管内面に垂直なきずでは、きず深さを精度よく推定できた。

今後の実施方針

- 画像前処理機能の改善（きず抽出方法の改良等）
- 実測データを用いた学習機能の搭載及び精度検証
- 誤検出、きず形状に依存した推定精度の違いの原因分析及び改善
- ユーザインターフェースの実装
- ツール適用可能な対象の拡張
- 非破壊検査資格の取得等を通した人材育成

謝辞

本研究は、原子力規制庁の令和7年度原子力規制研究技術基盤構築事業費補助金（原子力規制研究の強化に向けた技術基盤構築事業）の補助を受けたものである。

本研究成果の一部は、日本原子力研究開発機構のスーパーコンピュータ「HPE SGI8600」を利用して得られたものである。

（成果引用元）下平　他, 日本保全学会第22回学術講演会, C-1-4-4, “超音波探傷画像の機械学習に基づく亀裂推定ツールの開発”, (2026).