

超音波探傷シミュレーション技術を活用した訓練用データの試作

Prototype of UT Training Simulator using Large Scale FEM Simulation

(一財)発電設備技術検査協会	古川 敬	Takashi FURUKAWA	Member
(一財)発電設備技術検査協会	上山 芳教	Yoshinori KAMIYAMA	
(一財)発電設備技術検査協会	山本 敏弘	Toshihiro YAMAMOTO	Member
(一財)発電設備技術検査協会	直本 保	Tamotsu JIKIMOTO	Member

Ultrasonic testing (UT) is one of the most appropriate non-destructive testing because of capabilities for flaw detection and flaw height sizing of flaw. Interpretation and analysis of UT data are not easy, to identify and classify relevant indications are sometimes very difficult. UT personnel shall be qualified to an appropriate level in accordance with a code and standard. In addition, personnel should keep and improve their skills. In this paper, an FEM UT simulation was applied to make UT training data. A prototype of a virtual specimen was presented.

Keywords: Ultrasonic Testing, Welds, Flaw Detection, Training, Simulator, FEM

1. はじめに

プラントの保全において非破壊検査技術、中でも超音波探傷試験（以下、UT と呼ぶ）は構造健全性評価の欠陥寸法を計測する重要な技術の一つである。UT では、探傷試験技術者が探傷結果（波形又は画像）を解釈してきずの識別、検出、サイジングを行う。この解釈とは、探傷器等の表示器上の信号がきずに由来する信号であるか否かを判別することである。この判別は、用いている探傷条件に加えて、試験体の形状の情報や探触子の位置変化に対する信号の応答などを手掛かりとして様々な要因を勘案しており、UT 技術者の最も重要な技量の一つと言える。こうした技量を取得し技量を高めるためには訓練が効果的である[1]。

この訓練において、種々のきずを狙い通りに付与した試験体を作製し、それらを訓練に用いることは最も有効な方法と言えるが、多くの試験体を製作し、管理・保管するには多大なコストを要し、付与したきずの位置や寸法の「正解」を測定することも容易なことではない。

一方、UT 結果の解釈を支援する技術の一つとしてシミュレーション解析が活用されてきている[2]が、シミュレーション解析が、探傷結果を再現できる信頼のある結果を出力できて、実際の探傷と同程度の量の結果が出力できるのであれば、前述の「数多くの試験体を探傷」したデータに代替することができると考えられる。しかも、シミュレーション解析で設定した試験体の条件の中の欠陥の位置や寸法は「正解」であり、それらを開示して訓

練すればオープンな訓練に、伏せて訓練すればブラインド訓練に活用できると考えられる[3]。

本報では、シミュレーション解析技術を UT の訓練に活用する取り組みとして、試験体及びきずのモデル化方法、実際の UT と同様の条件（探触子や走査等）をモデル化する方法、UT 訓練用解析データの作成・表示方法等を検討し、UT 技量の訓練用データを試作した事例を紹介する。

2. 主要な技量と訓練の方法

2.1 主要な技量

UT の技量には多様な内容があり、本報で対象とするシミュレーション解析の活用がすべての内容を網羅するものではない。ここでは、UT 技術者が持つべきと考えられる主要な技量を挙げ、本シミュレーション解析で対応が可能な範囲を明確化することとする。

UT 技術者にとって、(1)探傷の原理や試験対象部位（溶接部等）、想定されるきずに関する知識が必要になるとともに、(2)探傷装置の取り扱いに熟知することが必要となる。そして(3)規格や手順書に従って UT を実施し、(4)UT 結果の記録・分類、(5)UT 結果の解釈・評価を行う必要がある。また、規格や仕様に従って手順書を作成することも重要な技量の一つである。これら(1)～(5)のうち、(1)は主に座学で習得する内容であり、(2)は実際の探傷器を用いた訓練や PC 上で動作するテキスト[4]等の活用で対応が可能と考えられる。(5)は試験対象部位の材質、形状等ならびに探傷試験の条件を考慮し、規格や仕様に従って探傷試験結果を解釈・評価する技量であり、探傷試験

以外の知識や経験等も求められる。

ここで、(3)～(4)は試験体を用いた実技訓練が重要と考えられる。具体的な技量として、(3)では探触子を決められた方法(通常は、手動探傷の場合はジグザグ走査[5]、自動探傷の場合は矩形走査)で、決められた範囲内を走査できるかどうか、(4)では探触子位置を考慮しながらエコーを観察し、きずの可能性のある「疑わしい」エコーを見分けることができるか、きずと判断したエコーに対して、最大エコー高さ、反射源位置、指示長さ等の記録ができるかどうか求められる。

なお、手動探傷では、疑わしいエコーに対してきずエコーかどうかを特定する際や最大エコー高さを求める場合に前後・左右走査に追加して振子走査や首振り走査を行う場合もある。自動探傷では通常は矩形走査で探傷データを収録し、エコーの特定や記録においても振子走査や首振り走査は行わない。

(3)及び(4)の訓練へシミュレーション解析を活用した事例を以下に示す。

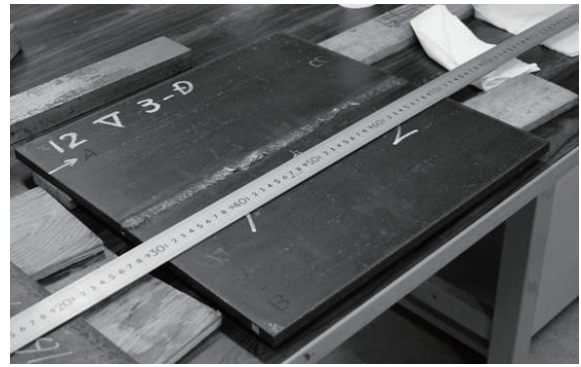
3. 試験体のモデル化及び解析方法

3.1 試験体のモデル化

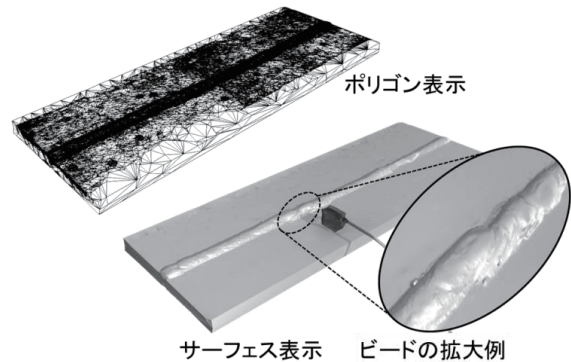
試験体のモデルは、図面やCADデータを基に入力することもできるが実際の溶接ビードの形状をモデル化する方法の一つとして3Dスキャナを用いて試験体の外面形状を取り込んだ例を示す。図1は炭素鋼平板突合せ継手の写真とこの試験体の形状をSHINING3D社製EinScanで取り込んだポリゴンデータの例である。

金属組織のモデルは、一般的なフェライト系鋼であれば母材も溶接金属部も等方均質体としてモデル化できるが、圧延鋼板やオーステナイト系溶接金属部のような集合組織の場合は、金属組織に応じたモデル化を行うことが重要となる。図2には、オーステナイト系の突合せ溶接金属の組織をモデル化した例を示す。この様な不均一な柱状晶組織を設定することで柱状晶に起因する“ノイズ”を再現することができ、オーステナイト系溶接部のUTに対するノイズと欠陥との識別の訓練に活用できると考える。

きずのモデルについては、きずが想定される任意の位置に任意の形状・寸法、傾きで設定することができる。ただし、きずの性状により図3[6]に示す様に欠陥寸法とエコー高さの関係性を考慮したきずの設定が重要となる。



(a) 炭素鋼平板突合せ溶接試験体の外観



(b) 3D スキャンデータの例

図1 試験体のモデル化の例

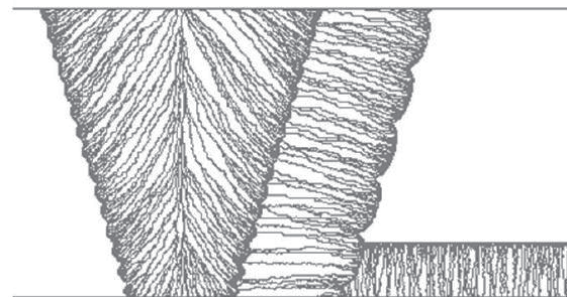


図2 オーステナイト系溶接金属組織モデルの例

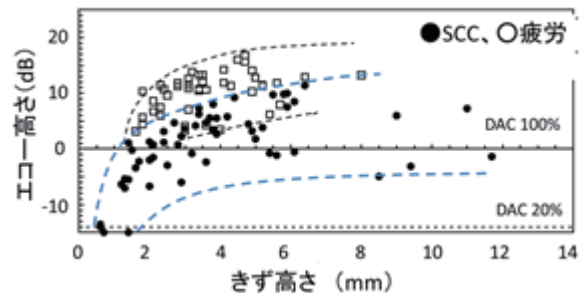


図3 疲労亀裂とSCCに対するきず高さとの関係[6]

3.2 解析方法

UTでは図4に示すように探触子を前後、左右に走査しており、手動UTでは各々の探触子位置での探傷波形をその場で解釈している。自動UTでは探触子位置毎の探傷波形を一旦保存し、画像化した結果や波形を再生して解釈している。各探触子位置における探傷波形の解析が瞬時に可能であれば逐次解析すればよいが、現時点では高精度で瞬時に解析できる方法は無いため、あらかじめ各探触子位置での探傷波形を解析し、手動UTあるいは自動UTの訓練かに応じて、後述する方法で解析済みのデータを再生することとした。また、現時点では計算時間等の関係で溶接部全体の3次元モデルでの計算は困難であるため、図5に示す様に超音波ビームに直交する軸方向を薄く切り出した疑似的な2次元モデルで前後走査の解析を行い、溶接線方向の切り出し位置を変えて解析し、3次元のデータを再構築することとした。

シミュレーション解析の例として、図1に示した板厚12mm炭素鋼平板突合せ溶接部に対する、公称周波数4MHz、横波70°斜角探傷を想定した。探触子の走査範囲は、前後走査を1mmステップで走査長63mm（探触子の位置は64か所）、左右走査は1mmステップで走査長100mm（101断面）とした。矩形走査を想定し、6,464か所（64×101）の探触子の位置でシミュレーション解析を行った。解析は市販のUTシミュレーション解析コード（CTC社製ComWAVE）を用いた。解析コード及び解析モデルの妥当性（精度）は既報[2,7]に記した。今回の解析の主要な条件を表1に示す。

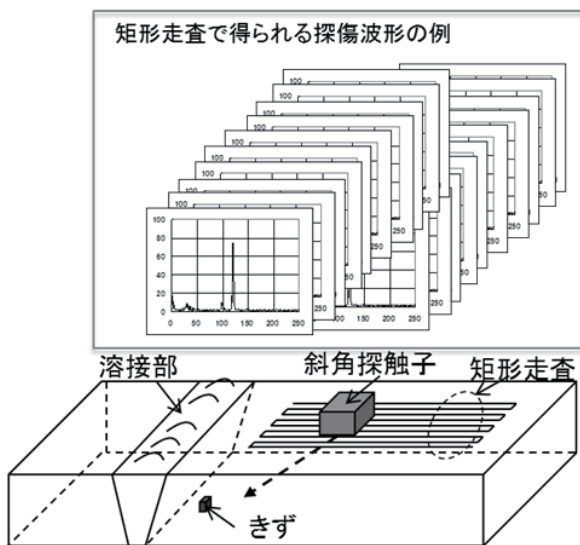


図4 UTにおける探触子走査の例

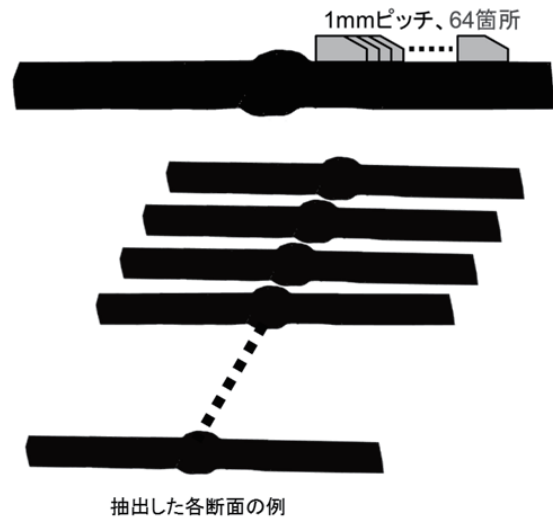


図5 2次元断面の切り出し例と前後走査の解析方法

表1 主要な解析条件

要素形状・寸法	立方体・25 μ m
解析時間ステップ	3.4 ナノ秒
総ステップ数	17,770
試験体の音速・密度 (鋼)	縦波: 5.9 km/s, 横波: 3.23 km/s 密度: 7.9×10^3 kg/m ³
くさびの音速・密度 (アクリル)	縦波: 2.73 km/s, 横波: 1.43 km/s 密度: 1.18×10^3 kg/m ³

4. 訓練用データの表示方法

シミュレーション解析で得られた前後、左右走査の波形を探触子位置に対応させて表示・再生すればUTの訓練に活用できる。図6は自動UT結果のように表示した例である。この表示例は自作のソフトで表示したが、市販の自動UT用のソフトでの表示も検討中である。

手動UTの訓練の場合は、探触子の位置に対応して波形を逐次再生させる必要がある。探触子位置の入力にはマウスやトラックパッドを、波形の表示にはPCやタブレットの活用も考えられる。ここでは一例として、机上に投影可能な短焦点プロジェクターとタッチ操作センサーが組み合わされた機器（Xperia Touch、SONY製）を活用した事例を図7に示す[8]。タッチ操作センサーで検知した位置に対応して探触子位置の座標と再生した波形を同時にプロジェクターで表示した。

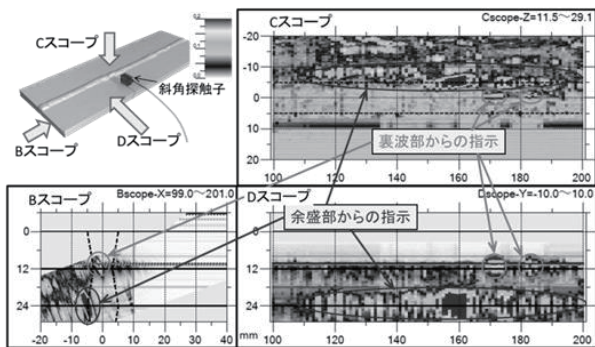


図6 自動UTの訓練を想定した表示例

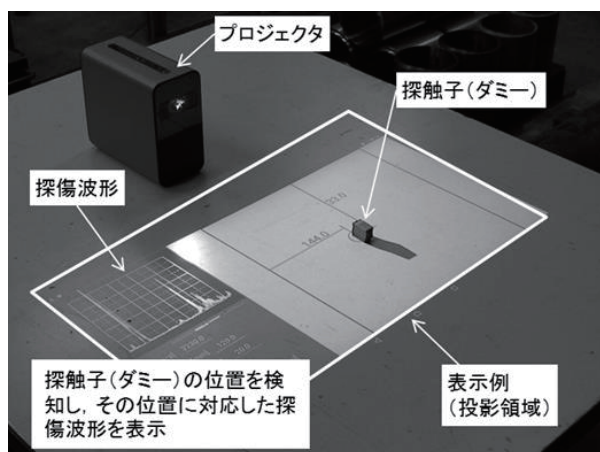


図7 手動UT訓練を想定した表示例

5. まとめ

シミュレーション解析を活用してUTの技量訓練用のデータの試作を試みた。今後解決すべき課題がいくつか残されているものの、訓練へ活用できる見込みが得られたと評価する。UT技量の実技訓練は、実際の試験体を用いる方法が基本ではあるが、冒頭に述べた課題を考慮すると、複数の代替案の検討も重要と言える。代替案の中には、試験体で取得した膨大な探傷データを再生する方法[9]なども提案されており、今後訓練等に活用されていくことが期待される。

参考文献

- [1] 平澤ら、“ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の超音波探傷試験員に対する教育・訓練の有効性に関する検討” 保全学、Vol. 15, No. 1 (2016) p. 77
- [2] 古川ら、“超音波伝搬シミュレーション解析を用いた超音波探傷の支援技術” 平成20年度火力原子力発電大会論文集別冊 CD-ROM (2009)、p. 123
- [3] 古川ら、“超音波探傷シミュレータ” 第14回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、平成19年1月、p. 145
- [4] (一社)日本非破壊検査協会 超音波探傷入門(パソコンによる実技演習) (2013)
- [5] JIS Z 3060:2015 鋼溶接部の超音波探傷試験方法 (2015)、p. 11
- [6] 独立行政法人原子力安全基盤機構 平成16年度原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの) 総括版 平成17年4月、p. 704
- [7] 古村ら、“光弾性可視化法による超音波探傷シミュレーションソフトウェアの検証” 発電技検技術レビュー Vol. 3, (2007)、p. 9
- [8] 上山ら、“タッチ操作可能な短焦点プロジェクターによる超音波探傷訓練シミュレータの試作” 第25回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、2018、p. 145
- [9] 東海林ら、“技量認定試験に使用可能なバーチャルUTシステムの試作” 電力中央研究所 研究報告 Q14007、2015