

超音波探傷訓練ツールへ向けたシミュレーション解析 における欠陥モデルの検討

Defect Model in TU simulation for UT training tool

発電技検	水野 亮二	Ryoji MIZUNO	
発電技検	上山 芳教	Yoshinori KAMIYAMA	
発電技検	古川 敬	Takashi FURUKAWA	Member

In ultrasonic testing for austenitic welds, it is generally said that the flaw detection in the weld is difficult because of spurious echoes by dispersion of the ultrasonic wave. Therefore, the ultrasonic examination personnel are required to have high level abilities to classify these echoes. It is important to train to maintain and improve the abilities. For the effective training, many samples are need with a variety of flaw characteristics and size. However, it is difficult to prepare such samples on the cost, the flaw as planned, and so on. We are developing the UT training tool using the UT simulation data.

In this study, defect model is investigated to reproduce the practical echoes from a variety of flaws using the simulation. It is possible to reproduce the echoes by stress corrosion crack and fatigue crack by optimization of the defect model

Keywords: Ultrasonic testing , FEM, UT simulation, defect model, SCC, Fatigue crack

1. 緒言

超音波探傷試験（以下、UT と記す）では、探傷技術者が探傷波形あるいは探傷画像を解釈してきずの識別、検出、寸法測定等を行っており、きず以外に起因するエコーが多数発生する部位（主に材料あるいは形状に起因）の探傷には技術者の知識や経験によるところが大きい。経験を積むための訓練の方法として、種々のきずを有する数多くの試験体を探傷して経験を積むことは有効であるが、数多くの試験体をそろえ、狙い通りの種類、寸法、位置にきずを付与することは容易ではない。一方、超音波探傷試験に関する物理現象を計算機内で再現するシミュレーション技術が開発されており[1,2]、探傷結果の解釈を支援等への活用[3]や訓練ツールへの活用も試みられている[4]。超音波探傷試験が難しい部位の一つであるオーステナイト系の溶接部に対して、実際の超音波探傷データを再現するためには溶接金属の柱状晶組織のモデル化が最も重要であり、柱状晶を六方晶のモデルとして扱い超音波の伝搬経路を再現した研究[5,6,7,8]や、マクロ組織を、後方散乱電子回折像(EBSP)で実測したモデル[9,10]、ポロノイ分割を応用して構築したモデル[11]、フェーズフィールド法によるモデル[12]などにより立方晶の物性値を設定することで、異方性に加えて減衰やノイズ(散乱)

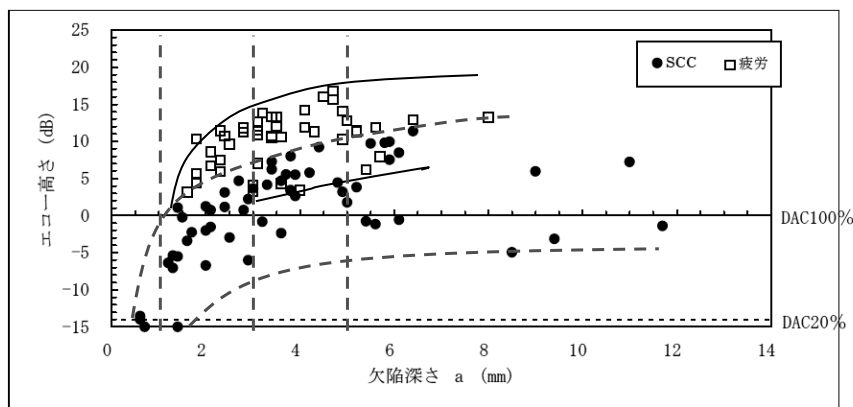
が再現されている。著者らも、断面の実測を伴わずに、簡便にある程度の溶接条件を反映する柱状晶組織のモデル化方法として、凝固シミュレーションに基づく溶接金属の柱状晶組織予測手法を検討しており[13,14]、きず以外に起因するエコーの再現方法は充実されつつある。

本研究では、種々のきずからのエコーを再現する方法を検討した。ここでは実際のきずの形状や寸法等を再現するという考え方ではなく、既往の実証試験等で整理されている多数のきずエコーのデータを再現するためのモデル化方法を検討する。

2. きずエコーに関する既往の知見

今回の検討で対象とする部位は、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部であり、対象とするきずの種類は応力腐食割れ(SCC)と疲労き裂とする。一般論として、きず寸法が大きくなるとある程度まではエコー高さも大きくなるが、同一寸法であっても必ずしも同程度のエコー高さになるとは限らない。図1はステンレス鋼管(150A×10t~600A×50t)のSUS304TP溶接部の溶接熱影響部に自然に近いきず(疲労き裂とSCC)を人工的に付与し、それらのきずに対して、横波45°斜角法で探傷して検出したエコーのエコー高さときず高さを整理した結果である[15]。超音波探傷試験はJEAC4207に基づき複数の探傷技術者により取得したデータの平均値を、きず高さ(引用した図は欠陥深さと表記)は探傷試験後に切断調査して実測したきずの最深部の高さである。SCCに比べると

連絡先:名前、〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町14-1
(一財) 発電設備技術検査協会、
E-mail: mizuno-ryouji@japeic.or.jp



注) エコー高さは最大エコー高さの平均値で示す。

図1 横波45°斜角法による疲労き裂とSCCに対するきず高さとの関係[15]

疲労き裂のエコー高さが大きい傾向(+6dBから+12dB程度)であるが、同程度の高さであっても6dBから12dB程度の相違が存在する。

UT訓練用のデータをシミュレーションで再現するためには、同一の高さであっても6dBから12dB程度の差異、きずの種類の違いも考慮すると18dB程度以上の違いを再現する必要がある。また、エコーの前後走査の動きや端部エコーの出方も再現できるようなモデル化が必要と言える。

3. きずのモデル化方法及びシミュレーション条件

UTシミュレーションにおいて、きずは一般に空隙としてモデル化することが多く、著者らも横穴や面状の人工きず(スリットや放電加工により付与したノッチ)のモデルは、それらの寸法と設置位置に空隙を設定したモデルとしている。しかし、スリット状のモデルを設定した場合には、スリット高さが0.5mm程度の場合にエコー高さがDAC100%程度となり、図1の結果を再現することは困難である。本来は、自然に近いきずと人工的なスリット状のきずとのエコー高さの違いの原因を考察し、きずの物理モデルを作成することが必要と考えられるが、本研究では、UTの訓練への活用が主目的であるため、試験で得られている現象を再現できるモデルを検討することとした。具体的には、牧野らにより提案されている「音響インピーダンス調整モデル」[16]を参考に、きずの内部に仮想的な物質を充てんさせ、反射率をさげることでエコー高さを低くする方法を検討した。ただし、エコー高さ以外にも、前後走査におけるエコーの動きや端部エコーの出方なども再現するため、きずモデルの形状も検討した。

図2に検討したきずの形状の例を示す。各々(a)スリット状のきずモデル(以下、モデル1と呼ぶ)、(b)φ0.5mm横穴を1mm刻みで複数配置し横穴の中央部にスリットを通したモデル(以下モデル2と呼ぶ)および(c)φ0.5mm横穴を1mm刻みで複数配置したモデル(以下モデル3と呼ぶ)に対して、仮想物質の種類ときず高さを変えてエコー高さや前後走査におけるエコーの動きをシミュレーションした。きずの高さ(裏面から先端までの距離)は1mm、3mmおよび5mmの3条件で、きずの内部には母材と同じ音速で密度を母材の70%、60%、40%および20%の4種類に変えた仮想媒質と、比較のために空隙も設定した。解析モデルの例を図3に示す。母材の厚さを35mmに設定し裏面に20mm間隔で5種類のきずモデルを並べ、左から右にむかって仮想媒質1から仮想媒質4および空隙を設定した。母材の表面側に、振動子高さ10mm、周波数2MHz、横波45度斜角探触子モデルを設置し、全てのきずモデルからエコーが得られるように探触子モデルの位置を1mm刻みで105箇所変えて計算した。表1に設定した主な物性値を示す。シミュレーション解析コードは、伊藤忠テクノソリューションズ社製のComWAVE8を使用し2次元(奥行き1要素)で解析した。

シミュレーション解析で求めたエコー高さは、あらかじめシミュレーションでRB-4に相当するφ3.2mmの横穴からの距離振幅補正曲線を計算し、その距離振幅補正曲線と比較したDAC%で評価した。

4. シミュレーション解析結果

図4に解析結果の例として、モデル3におけるきず高さ5mmの解析結果のBスコープ表示を示す。仮想媒質の密度が母材に近づくともエコー高さが小さく、密度を小さく設定するとエコー高さが大きくなる結果であり、また、

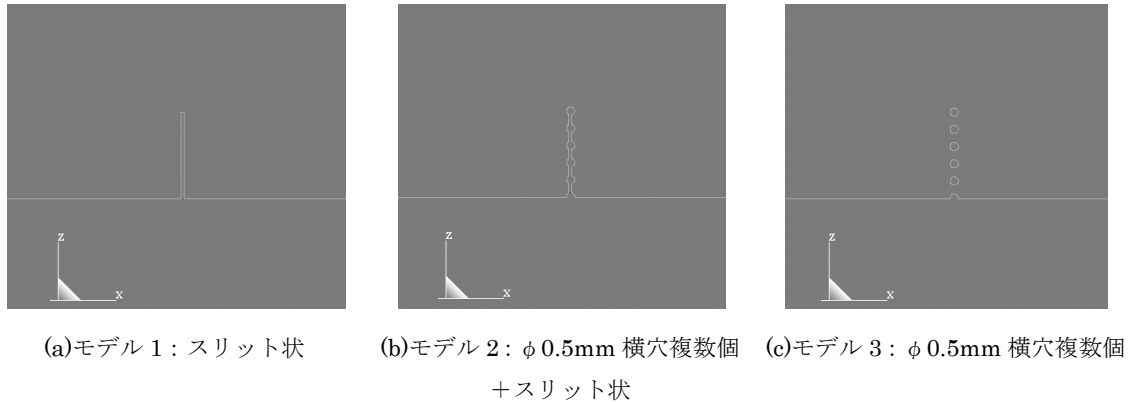


図2 きずモデルの形状

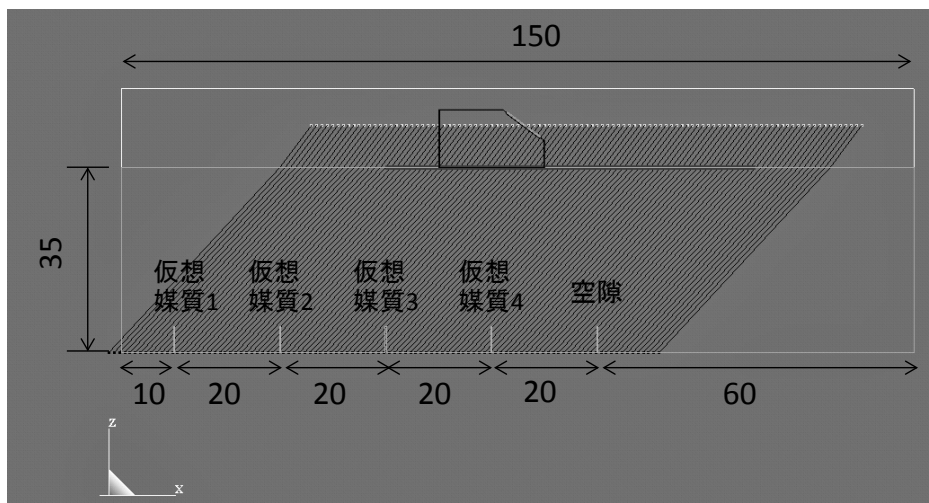


図3 解析モデルの模式図

表1 設定した材料の物性値

材料	設定値
ステンレス鋼母材	縦波音速 5.7km/s, 横波音速 3.1km/s, 密度 $7.9 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
仮想媒質 1(70%)	縦波音速 5.7km/s, 横波音速 3.1km/s, 密度 $5.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
仮想媒質 2(60%)	縦波音速 5.7km/s, 横波音速 3.1km/s, 密度 $4.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
仮想媒質 3(40%)	縦波音速 5.7km/s, 横波音速 3.1km/s, 密度 $3.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
仮想媒質 4(20%)	縦波音速 5.7km/s, 横波音速 3.1km/s, 密度 $1.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
空隙	縦波音速 0.34km/s, 横波音速 0, 密度 1.29kg/m^3
くさび材	縦波音速 2.73km/s, 横波音速 1.43km/s, 密度 $1.18 \times 10^3 \text{kg/m}^3$

きずモデルの形状を変えることで板厚方向の指示の出方（前後走査におけるエコーの動きに対応）が変わる結果となった。全てのきずモデルに対する最大エコー高さを表2に示す。モデル1から3に対して、きず高さ1mmにおいてエコー高さは約-8dBから+6dBの範囲に、高さ3mmでは約-4dBから+12dB、高さ5mmでは約-2dBから+15dBに分布しており、図1に示したきず高さとおエコー高さの

関係に対応する結果が得られた。今後、きずモデルの形状の最適化等の検討の余地はあると考えられるが、UTの訓練用データをシミュレーションで作成する上でのきずモデルの考え方を得ることができた。

5. まとめ

UTシミュレーション解析を探傷技術者の訓練へ適

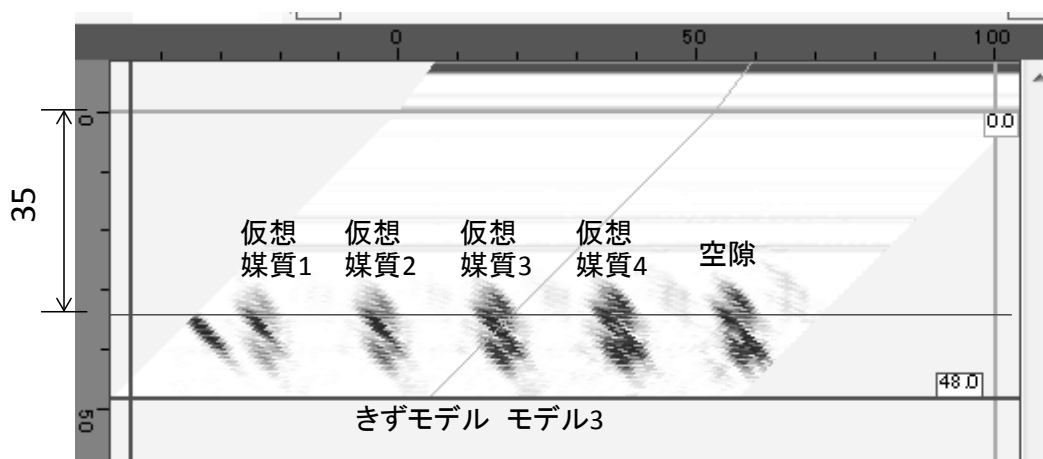


図5 きずモデル3（高さ5mm）における解析結果の例 Bスコープ表示

表2 シミュレーション解析結果（最大エコー高さ DAC%）

	きずモデル1			きずモデル2			きずモデル3		
	高さ 1mm	高さ 3mm	高さ 5mm	高さ 1mm	高さ 3mm	高さ 5mm	高さ 1mm	高さ 3mm	高さ 5mm
仮想媒質1	-8.0	-0.9	0.0	-3.1	0.0	3.5	-8.0	-4.4	-1.9
仮想媒質2	-6.0	0.0	3.5	-1.9	3.5	6.0	-6.0	-3.1	0.0
仮想媒質3	-0.9	6.0	9.5	0.8	8.0	9.5	-6.0	0.0	3.5
仮想媒質4	3.5	9.5	12.6	4.1	10.9	12.6	-6.0	2.3	5.1
空隙	6.0	12.0	14.8	6.8	12.0	14.8	-3.1	3.5	4.6

用することを目的に、きずのモデル化方法を検討し、疲労き裂や応力腐食割れに対する試験結果を再現する見通しが得られた。今後、きずモデルの形状の最適化等を行い訓練への適用性を評価する予定である。

参考文献

- [1] 特集 超音波 NDT のための最近のシミュレーションI、非破壊検査 48(4)、1997、p.233
- [2] 特集 超音波 NDT のための最近のシミュレーションII、非破壊検査 48(5)、1997、p.285
- [3] 古川他、平成20年度火力原子力発電大会論文集別冊 CD-ROM、2009、p.123
- [4] 古川他、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、2007、p.145
- [5] 松本他、非破壊検査、32(2)、1983、p.134
- [6] 廣瀬他、非破壊検査、39(2)、1991、P.74
- [7] J. A. Ogilvy, British Journal of NDT, 27(1), 1985, p.13
- [8] J. A. Ogilvy, NDT & E International 25(1), 1992, p.3
- [9] C. Nageswaran et al., Insight, 51(12), 2009, p.1
- [10] 中畑他、保全学、10(2)、2011、p.49
- [11] 坂本他、保全学、11(2)、2012、p.77
- [12] 菅原他、第22回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、2015、p.57
- [13] 水野他、第21回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、2014、p.185
- [14] 古川他、NDI資料 UT-00103、2015、p.27
- [15] 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
- [16] 牧野他、NDI資料 UT-00021、2011、p.15