

# 溶接部を対象とした超音波探傷シミュレータの精度検証

Accuracy Check of Ultrasonic Testing (UT) Simulator for Dissimilar Metal Welding Part

愛媛大学大学院

中畑 和之

The ultrasonic testing (UT) of a dissimilar metal welding part is difficult due to the acoustic anisotropy and local heterogeneity. The ultrasonic wave in the weld is skewed along crystallographic directions and scattered by metal grain boundaries. We already have proposed a straightforward UT simulation tool to predict wave propagation in the weld. The tool was based on the finite integration technique (FIT) and the image-based modeling. The FIT is a grid-based explicit numerical method and easily treats different boundary conditions which are essential to model wave propagation in heterogeneous materials. In our simulation, a picture of a specimen with a V-groove weld is scanned and fed into the image based FIT. Material parameters in the weld are mathematically determined from the metal grain structure which is obtained from EBSP photos. In this study, the accuracy of the image-based FIT simulation is checked by visualizations of wave propagation with a laser vibrometric measurement. From the measurement, the image-based FIT simulator possesses higher accuracy and reliability.

**Keywords:** Ultrasonic Simulation, Image-based Modeling, Finite Integration Technique, Heterogeneous and Anisotropic Materials

## 1. 緒言

原子力発電プラント等では、異材溶接継手における応力腐食割れを対象とした超音波探傷の研究が盛んに行われている<sup>[1,2]</sup>。これら溶接材料にはニッケル等をベースにした合金が用いられているが、溶接過程を経た溶接金属は温度勾配の影響のために結晶の成長方向は溶接部内部で一様ではないことが知られている。これに起因する音響異方性や金属粒による非均質性によって、超音波は溶接部内部で屈曲・減衰を生じる。音響異方性や非均質性が超音波探傷の精度を著しく低下させる要因となっており、異材溶接部の数理モデル化および波動伝搬特性を理論的に把握することは重要である。局所的に変化する結晶方向を考慮した溶接部のモデル化に関する研究は1980年代Ogilvyらによって精力的に行われた(例えば文献<sup>[3,4]</sup>)。異方性材料に対する超音波の放射音場を解析的に求める方法<sup>[5]</sup>も提案されたが、コンピュータの発展に伴って数値解析によって異方性材料中の音場を求める方法<sup>[6,7]</sup>が近年多くみられる。

著者らは材料の非均質性や局所的な異方性、あるいは3次的に複雑な外形を容易にモデル化できるイメージベース波動解析を提案している<sup>[8,9]</sup>。波動解析の要素技術として有限積分法<sup>[10]</sup>(Finite Integration Technique: FIT)を用いており、イメージベース処理<sup>[11]</sup>によって、対象とする被検体の写真やCT等の画像データを読み込み、これをそのまま数値解析に入力して波動解析を行うことができる。これまで、イメージベースFITと他の数値解析法との解の精度に関する比較検討は行っており、高い精度で波動方程式を解くことができることを示している。しかし、その解が実際の現象を正しく表現しているかについては未検討であった。そこで、本研究では超音波計測実験を行い、イメージベースFITの妥当性を検証する。

---

研究協力者 東京工業大学大学院 廣瀬 壮一，  
Fraunhofer Institute IZFP-D Bernd Köhler and Frank Schubert

実験はドイツ Fraunhofer Institute IZFP-D との共同研究において進められ、異材溶接部に超音波を送信した場合にレーザー振動計で被検体の表面変位を計測することによって、実際の波動伝搬を可視化する<sup>[12]</sup>。一方の数値モデルは、被検体の断面写真データをもとに金属の成長方向の情報を反映させており、異材溶接部の材料定数は、EBSP 計測によって結晶構造から導いたマクロな弾性スティフネスを採用した。この数値モデルを用いたイメージベース FIT による波動伝搬結果とレーザー振動計による被検体中の波動伝搬可視化結果を比較し、イメージベース FIT の信頼性を検討する。

## 2. 異材溶接部のモデル化

溶接部は、溶接時の熱勾配の影響によって金属結晶の成長方向が局所的に異なる。金属結晶の成長方向に起因して音響異方性が生じることが知られている。音響異方性の影響をイメージベース FIT に取り入れるために、ここでは溶接組織の数値モデル化を行い、弾性スティフネスを導出する。

### 2.1 溶接部の結晶構造

Fig.1 に、V 開先の一部を切り出した異材溶接部 (バタリングを含む) の供試体 (幅 115mm, 高さ 25mm, 板厚 5mm) の観察写真を示す。左側は SM490, 右側が SUS316 であり、多層盛溶接によって接合されている。溶接部の構成金属は約 70% がニッケルであり、その他にクロム, 鉄, マンガン等を含んだ合金となっている。Fig.1 の供試体写真中の A, B, C の視野において、金属組織を詳細に観察するために、後方散乱電子回折像 (Electron Back Scattering Pattern: EBSP) 測定を行った。EBSP は結晶粒毎の情報を得ることができ、結晶粒の方位分布が測定できる。Fig.1 に示すように、写真の断面を  $x_1-x_3$  断面とした。EBSP 測定時の座標軸であるが、TD (Transverse Direction) を  $x_1$  軸に、RD (Rolling Direction) を  $x_3$  軸とした。ND (Normal Direction) は板厚方向 ( $x_2$  軸方向) とした。ニッケルは立方晶であるので、以下は立方晶の方位分布について述べる。Fig.1 には、それぞれ ND と RD 方向から見た結晶方位分布を色付け (ミラー指数 [001] に近いほど赤が強い) している。また、集合組織の方位を見るために、Fig.2 に B 視野の極点図を示す。これは、ND 方向から観察した場合に、{001}, {101}, {111} の配向の集合程度を表している。つまり、値が大きくなるほど向きが揃った結晶粒が多いことを示している。{001} のみ RD 方向に赤色が強

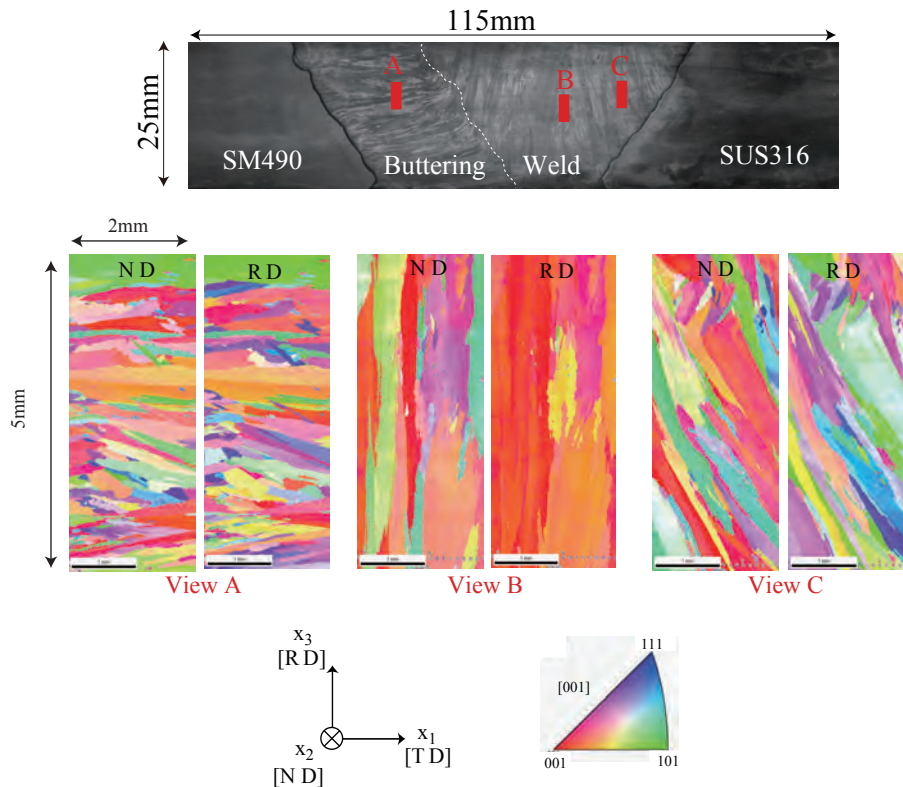


Fig.1 Photo of a dissimilar metal welding part (above figure) and EBSP pictures of view area A, B and C (bottom figures).

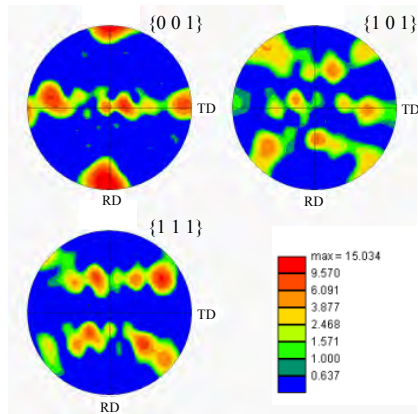


Fig.2 Pole figures of view area B in Fig.1.

くなっていることから、主として RD 方向を向く  $\{001\}$  面が多いことがわかる。なお、 $\{001\}$  の TD 方向も赤色が強くなっているため TD 方向を向いているとも言えるが、ニッケルは立方晶であるので  $\{001\}$  面が RD 方向を向いていることと等価である。一方、 $\{101\}$  と  $\{111\}$  面は全体的にランダムである。これらのことから B 点の金属結晶は RD 軸に垂直な断面内でランダムに分布していると言える。この傾向は A 視野と C 視野でも同様である。

Fig.3 は、供試体写真を画像処理し、輪郭（エッジ）を抽出したものである。Fig.1 の結晶方向は、Fig.3 に示すようなエッジの方向（代表的な部分を桃色波線で示している）にほぼ一致することがわかる。また、Fig.2 より、エッジの方向に対して回転対称に結晶がランダム分布していることになる。以上のことから、本論文では溶接部全体を EBSD 観察することなく、エッジ抽出した写真データを基に溶接金属の成長方向を推定した。

## 2.2 マクロな材料定数の導出

2.1 で述べたように溶接部の材料の大部分はニッケル ( $\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$ ) である。従って、溶接部ではニッケルの定数が支配的であるとしてモデル化を進める。後に示す FIT の計算には弾性スティフネスが必要となるので、ここではニッケル単結晶の金属の特性から溶接組織のマクロな弾性スティフネスを導出する方法<sup>[13]</sup>を述べる。以下では、弾性スティフネスの記述にインデックス表記 ( $i, j, k, l = 1, 2, 3$ ) を用いて、テンソル演算には総和規約を適用する。

基底の座標系 ( $x_1^O, x_2^O, x_3^O$ ) で定義された弾性スティフネス  $C_{ijkl}^O$  は、回転させるとみかけ上  $C'_{ijkl}$  となるとする。いま、直交軸の変換を表すテンソル  $l_{ij}$ <sup>[14]</sup> を用いれば、座標回転後の弾性スティフネスは次のようになる。

$$C'_{ijkl} = C_{mnpq}^O l_{mi} l_{nj} l_{pk} l_{ql} \quad (1)$$

となる。結晶が 3 次元的にランダムな配向をとったときのマクロな弾性スティフネス  $C_{ijkl}^M$  は回転空間に対して積分することで、次のように表される。

$$C_{ijkl}^M = \frac{1}{8\pi^2} \int \int \int_{\Omega} C'_{ijkl}(\Omega) d\Omega \quad (2)$$

いま、結晶の成長方向を  $x_3^O$  軸方向とする。Fig.2 の結果を考慮して、 $x_1^O$ - $x_2^O$  断面において結晶分布はラ

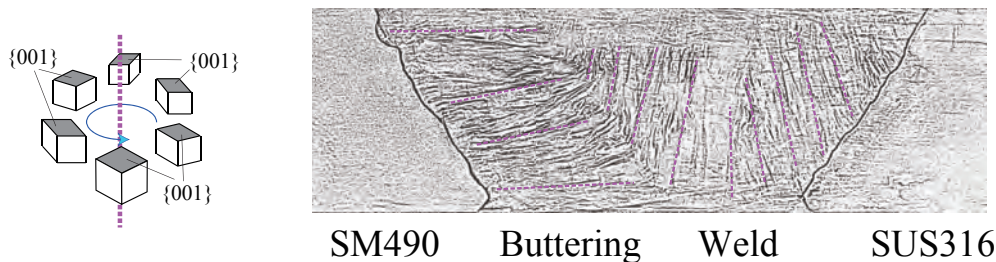


Fig.3 Schematic illustration of crystal orientation.

ンダム ( $x_3^O$  軸に回転対称) であるとする、式 (2) は

$$C_{ijkl}^M = \frac{C_{mnpq}^O}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ell_{mi} \ell_{nj} \ell_{pk} \ell_{ql} d\psi \quad (3)$$

となる。ただし、

$$\begin{pmatrix} \ell_{11} & \ell_{12} & \ell_{13} \\ \ell_{21} & \ell_{22} & \ell_{23} \\ \ell_{31} & \ell_{32} & \ell_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。立方晶の独立なパラメータは次の3つ：

$$\begin{pmatrix} C_{1111}^O & C_{1122}^O & C_{1122}^O & 0 & 0 & 0 \\ & C_{1111}^O & C_{1122}^O & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{1111}^O & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{2323}^O & 0 & 0 \\ & & & & C_{2323}^O & 0 \\ \text{Sym.} & & & & & C_{2323}^O \end{pmatrix} \quad (5)$$

であるから、これを式 (3) に代入すると次式を得る。

$$\begin{pmatrix} C_{1111}^M & C_{1122}^M & C_{1133}^M & 0 & 0 & 0 \\ & C_{1111}^M & C_{1133}^M & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333}^M & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{2323}^M & 0 & 0 \\ & & & & C_{2323}^M & 0 \\ \text{Sym.} & & & & & C_{1212}^M \end{pmatrix} \quad (6)$$

上式で

$$\begin{aligned} C_{1111}^M &= \frac{3}{4}C_{1111}^O + \frac{1}{4}C_{1122}^O + \frac{1}{2}C_{2323}^O \\ C_{1122}^M &= \frac{1}{4}C_{1111}^O + \frac{3}{4}C_{1122}^O - \frac{1}{2}C_{2323}^O \\ C_{1133}^M &= C_{1122}^O, \quad C_{3333}^M = C_{1111}^O, \quad C_{2323}^M = C_{2323}^O \\ C_{1212}^M &= \frac{1}{2}(C_{1111}^M - C_{1122}^M) \end{aligned} \quad (7)$$

の関係があり、結局独立なパラメータは5つとなることから、溶接部の組織はマクロ的には軸対称異方性 (横等方性) 材料と仮定できる。ニッケルの単結晶の弾性スティフネス<sup>[14]</sup> は、 $C_{1111}^O = 25.0$ 、 $C_{1122}^O = 16.0$ 、 $C_{2323}^O = 11.85 (\times 10^{10} \text{N/m}^2)$  であるから、溶接部を軸対称異方性材料と仮定した場合

$$\begin{pmatrix} 28.675 & 12.325 & 16.0 & 0 & 0 & 0 \\ & 28.675 & 16.0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 25.0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 11.85 & 0 & 0 \\ & & & & 11.85 & 0 \\ \text{Sym.} & & & & & 8.175 \end{pmatrix} \times 10^{10} \text{N/m}^2 \quad (8)$$

となり、上式を溶接部の弾性スティフネスとして、以後の計算で用いる。

式 (8) を基に、位相速度の逆数 (スローネス) および群速度の  $x_1-x_3$  断面の分布を Fig.4 にプロットした。均質な等方性材料では、P 波も S 波も全方位一定の音速で伝搬するが、Fig.4 のような異方性材料の場合は方向によって位相速度が異なり、さらにはエネルギーの伝搬速度である群速度が位相速度と一致しないこともある。本溶接モデルの場合、音速の異なる S 波が 2 種類存在し、両者の偏向方向も異なる。

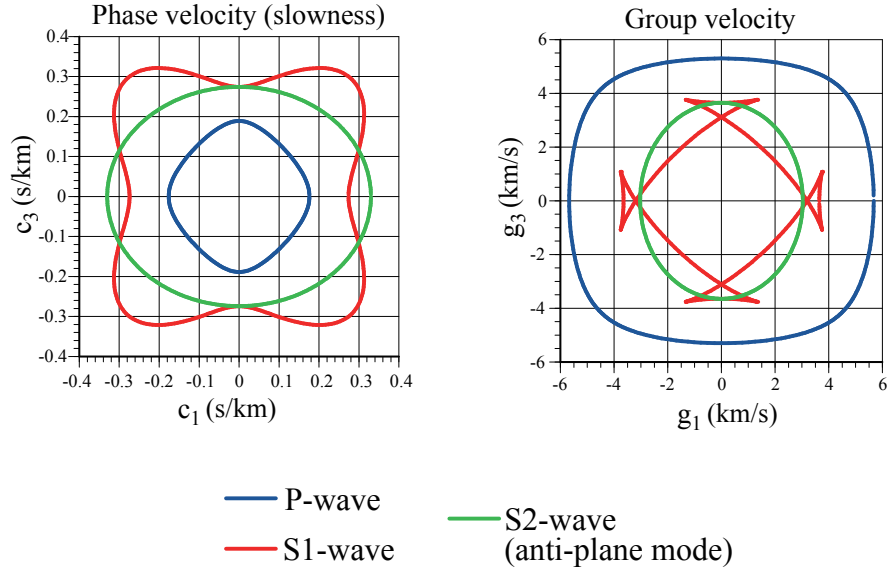


Fig.4 Slowness and group velocity of welding part (transversely isotropic material).

### 3. 動弾性有限積分法 (FIT)

#### 3.1 概要

すでに著者らは、イメージベース FIT の定式化<sup>[8]</sup>を公表しているので、ここでは要約に止める。支配方程式は3次元直交座標系  $(x_1, x_2, x_3)$  で記述される。FITの定式化では、固体は一般異方性(等方性含む)材料であるとする。 $x_i$  方向の粒子速度を  $v_i$ 、応力を  $\tau_{ij}$  とおいたとき、3次元波動場を支配する運動方程式および構成則の積分形式は以下ようになる。

$$\int_V \rho \dot{v}_i dV = \int_S \tau_{ij} n_j dS + \int_V f_i dV \quad (9)$$

$$\int_V \dot{\tau}_{ij} dV = \int_S C_{klij}^M v_i n_j dS \quad (10)$$

ここで、 $(\dot{\quad})$  は時間  $t$  に関する偏微分  $(\partial/\partial t)$ 、 $n_i$  はセル境界  $S$  の外向き法線、 $\rho$  は密度、 $f_i$  は材料に作用する物体力である。 $C_{klij}$  は4階のテンソルであるが、対称性によって独立パラメータは21個まで減る。セル内部で粒子速度と応力が一定であるとして上式を離散化すると、粒子速度と応力が違いにずれた格子状の配置 (Staggered grid) となる。このとき、イメージベース処理のために、セル  $V$  とピクセル・ボクセルサイズを一致させる必要がある。時間域の離散化については、中心差分近似を用いる。

$$\begin{aligned} \{v_i\}^z &= \{v_i\}^{z-1} + \Delta t \{\dot{v}_i\}^{z+\frac{1}{2}} \\ \{\tau_{ij}\}^{z+\frac{1}{2}} &= \{\tau_{ij}\}^{z-\frac{1}{2}} + \Delta t \{\dot{\tau}_{ij}\}^z \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\Delta t$  は時間幅であり、上付き文字は整数次  $z$  または半整数時  $z + \frac{1}{2}$  の時間ステップを表す。結局、FITは式(11)に基づいて、粒子速度と応力を交互に計算しながら、解を更新する。

数値的に安定して解析を実行するために、時間ステップ幅  $\Delta t$  は、 $n$ 次元解析の場合、次のような CFL 条件 (Courant-Friedrichs-Lewy Condition) を満足する必要がある。

$$\Delta t \leq \frac{1}{c_{P_{\max}}} \frac{\Delta x}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

ここで、 $c_{P_{\max}}$  はモデル化した材料の音速のうち、最も速い位相速度である。この条件を少しでも逸脱すれば、計算は発散する。

イメージベースモデリングとは、FITの1セルに写真等のデジタル画像を元に作成した1ピクセル(2次元)あるいは1ボクセル(3次元)を整合させることによって、対象とする材料の外形・介在物の分布形態を、“見た目どおり”にモデル化する方法である。これまで、デジタル断面写真、CT画像、投影光パターン等から被検体の数値モデルを作成している<sup>[15]</sup>。ただし、ピクセルデータやボクセルデータは方形の集合であるため、外側境界や介在物が曲線形状をしている場合でも階段状にしか表せないという欠点がある。

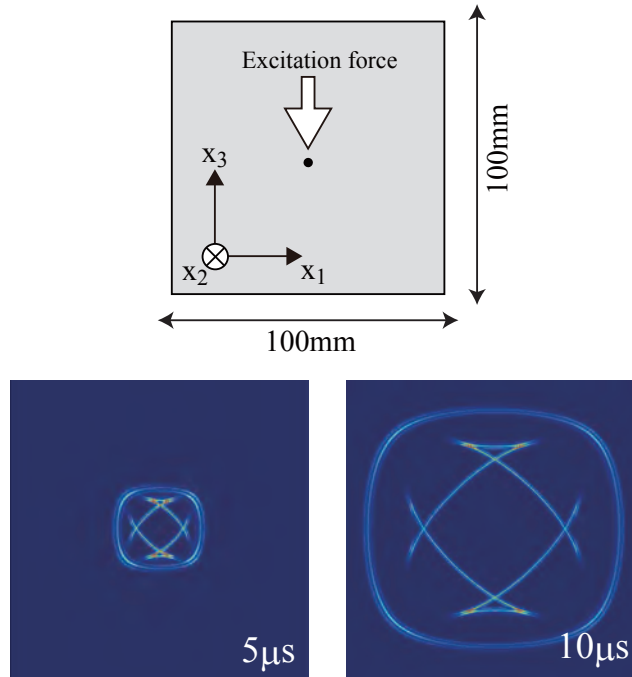


Fig.5 Wave propagation in a homogeneous transversely isotropic material using the FIT

このため、できるだけ小さくセルの長さを確保するのが望ましいが、むやみに小さく設定すれば計算機のメモリが不足してしまうし、大きすぎれば散乱体の形状を正確に模擬できないだけでなく、弾性波の伝搬を表現できない(人工的な数値分散)といった問題が生じる。これまでの著者らの研究<sup>[15]</sup>によれば、解析の精度(できるだけ少ない数値誤差で波動方程式を解くという意味)を保証するためには次式を満足することが推奨される。

$$\Delta x \leq \frac{1}{M} \lambda_{\min} = \frac{1}{M} \frac{c_{S\min}}{f_{\max}}$$

$$M = 12(\text{等方性材料}), 16(\text{異方性材料}) \quad (13)$$

ここで、 $\lambda_{\min}$  はシミュレーションで用いる最小の波長、 $f_{\max}$  は最大の周波数、 $c_{S\min}$  は最も遅い位相速度である。

### 3.2 横等方性材料の波動伝搬

Fig.4 で示したように、本論文で扱う溶接材料中には2つの横波(S1波、S2波)が現れる。しかし、この場合のS2波は $x_2$ 方向への純粋偏向(面外モード)を示すので、S2波は分離して考えることができる。従って、この場合 $x_1-x_3$ 面内の2次元波動場としてFITを適用することができ<sup>[8]</sup>、面内モード(P波とS1波)のみを計算の対象とする。

FITの動作確認のため、簡単な数値実験を行う。弾性スティフネスは式(8)を用いて、解析領域(100mm × 100mm)の中心で $x_3$ の向きに外力(中心周波数1.5MHz)を与えることで波動を発生させる場合を考える。なお、FITのセル長 $\Delta t$ は0.05mmとし、時間幅 $\Delta t$ は5nsとした。外力を与えて、5 $\mu$ sと10 $\mu$ s後の変位の絶対値 $\sqrt{u_1^2 + u_3^2}$ をFig.5に表示する。異方性材料中の波動場を可視化した場合、超音波はエネルギーの伝搬面である群速度曲面に沿って伝搬する。Fig.5では、解析的に求めたFig.4の群速度曲線に従って、FITで計算された波動が伝搬しているのがわかる。このことから、FITは与えられた弾性スティフネスを用いて、波動方程式を精度よく解くことができることが示された。

## 4. イメージベースFITによる超音波伝搬解析と実験による検証

現実の波動伝搬をイメージベースFITが再現できるのかを検証するために、Fig.1で示した異材溶接を含む供試体を用いて数値実験と計測実験を行った。まず、この異材溶接部にイメージベースモデリングを適用し、数値モデルを作成する。Fig.3に示したように、溶接部全組織をEBSP観察することなく、ここではエッジ抽出により溶接部全体の溶接金属の成長方向を推定している。Fig.3を見ると、桃色波線はパタ

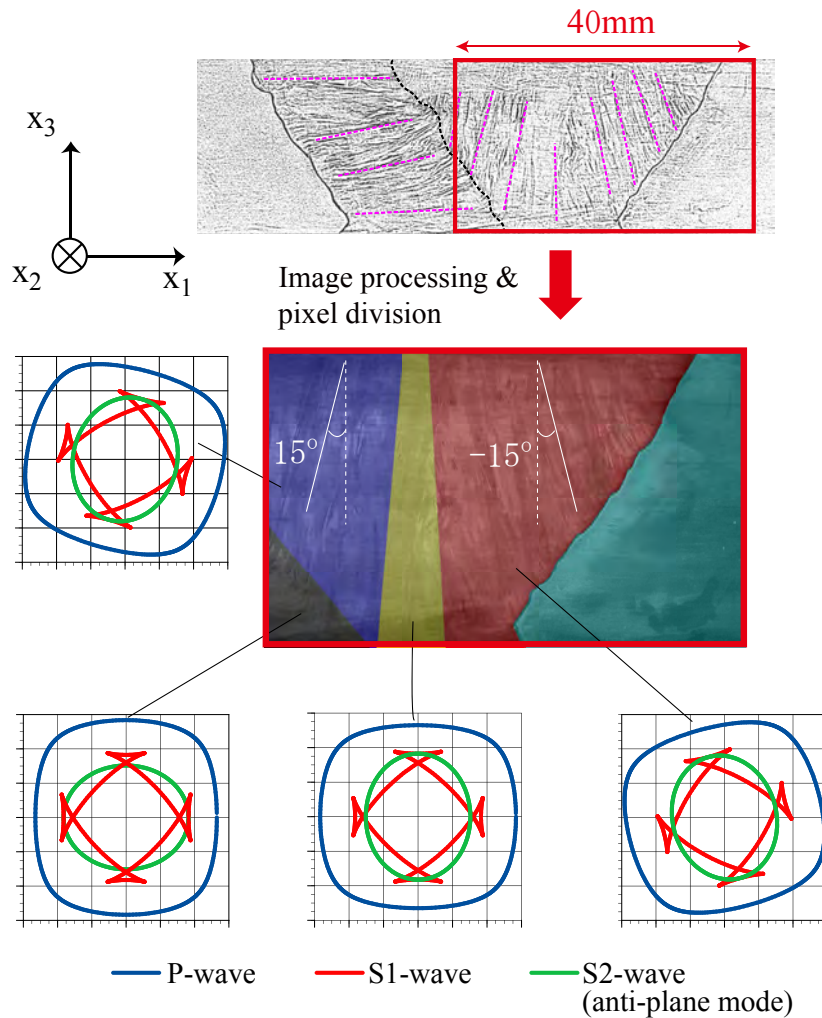


Fig.6 Image-based modeling of dissimilar metal welding part

リング部ではほぼ平行に、溶接部の中心では垂直方向に、溶接部の両端では全体的にやや中心を向いている。従って、Fig.6に示すように、溶接部内部の結晶の成長方向は主として青、黄色、赤の3つに分けられると仮定した。溶接部の全視野においてEBSP観察写真データがあれば、もっと細かい領域で金属の成長方向を区別することができるが、ここでは青い部分は垂直方向から $15^\circ$ 、赤い部分は垂直方向から $-15^\circ$ 傾いて、平均的に溶接組織が成長しているものとした。パタリングは黒とし、これは水平方向に溶接組織が成長しているとした。シアンはSUS316を表しており、等方性とした。これらの色(すなわち結晶方向)に応じて式(8)で得られた弾性スティフネスの基準座標を回転させて用いる。座標回転による群速度分布の変化をFig.6の下に示している。

溶接部の上部に探触子を設置し、ここから中心周波数4MHzでパルス波を送信する場合を考える。イメージベースFITによる $x_1-x_3$ 面の2次元波動伝搬シミュレーションの結果をFig.7に示す。なお、FITのセル長 $\Delta x=0.01\text{mm}$ 、時間幅は $0.001\mu\text{s}$ とし、時間ステップは5000まで計算した。Fig.7では、 $|u| = \sqrt{u_1^2 + u_3^2}$ のスナップショットを示している。溶接部は音響異方性を呈しているため、 $x_3$ 方向の真下に超音波を送信しているにも関わらず、P波は探触子から左下に屈曲して伝搬していることがわかる。

次に、シミュレーション結果と比較するため、レーザー振動計<sup>[12]</sup>によって超音波の伝搬を可視化した。Fig.8に示すように、ここでは直径10mmの垂直探触子(クラウトクレマー製)を溶接部上部に設置し、面内にP波超音波を送信している。この垂直探触子は供試体の板厚よりも大きく、かつ $x_2$ 方向の振動は一定であると推定されるため、実験は2次元波動場を模擬しているといえる。ここでは、被検体内部を伝搬する超音波の面外変位 $u_2$ をレーザー振動計によって計測する。超音波のP波成分は金属組織の膨張・収縮により伝搬するため、面内だけでなく面外方向にも変形する。従って、レーザー振動計で計測した面外変位 $u_2$ は、面内の超音波伝搬の様子を表しているといえる。Fig.9から、実験でも溶接内部でP波

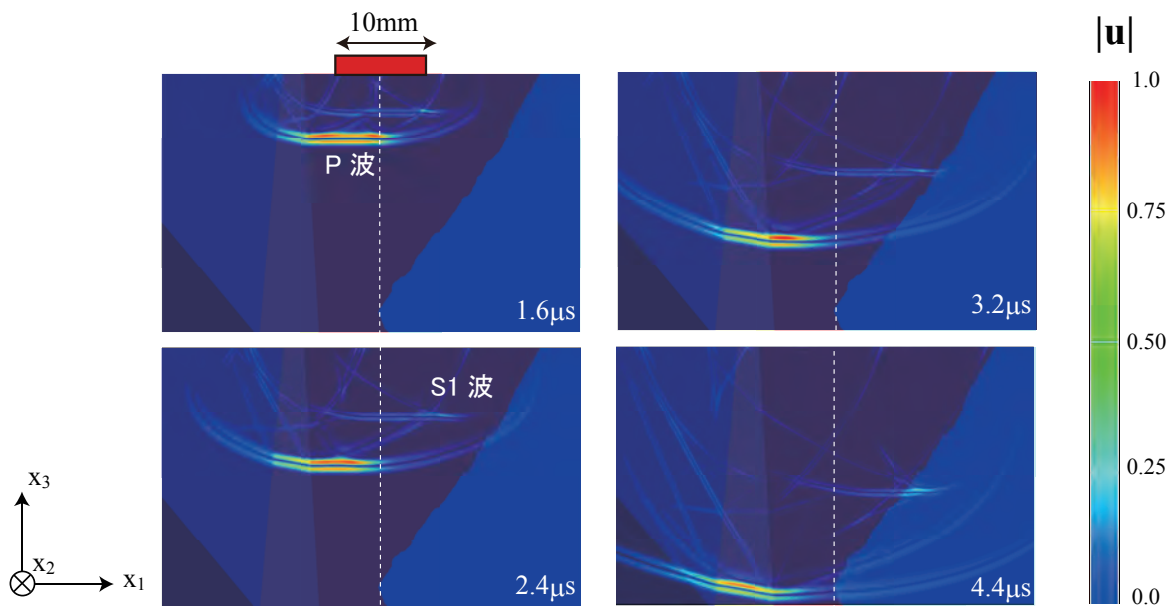


Fig.7 Snapshots of ultrasonic wave propagation with the image-based FIT

が左下方方向に伝搬していることがわかる．また，P波の底面の到達時間および到達位置は数値解析と計測実験ではほぼ同じである．ただ，FITは金属の結晶粒界の形状を入力していないため，実験の超音波の減衰や粒界散乱は表現できていないが，伝搬時間と方向という観点では実験結果と解析結果は良い一致を示しており，イメージベースFITによるシミュレーションは妥当であるといえる．

FITは画像イメージを基に入力データを作成するため，粒界もモデル化が可能であるし，局所的に異なる溶接組織もさらに小さな領域で定義することが原理的には可能であるが，これらは今後，高度な画像処理と組み合わせにより厳密なモデルを報告したいと考えている．なお，イメージベースFITの計算時間は，京都大学学術情報メディアセンターの2ノード×16スレッドの並列計算機(HX600<sup>[16]</sup>)を用いて5分程度である．これならば，実務的にも十分利用できる時間である．

## 5. 結言

イメージベースモデリングは，対象とする被検体の写真等の画像データを読み込み，これをそのまま数値解析に入力することで，非均質・異方性材料や複雑な外形を有する対象でも簡単にモデル化する方法である．ここでは，有限積分法(FIT)とイメージベースモデリングを組み合わせた波動伝搬解析手法を異材溶接部の超音波シミュレーションに適用した．本論文で用いた供試体は異材溶接部を含む鋼材であり，溶接時の熱勾配の影響によって結晶の成長方向が局所的に異なるものである．溶接部写真のエッジ抽出処理による模様と結晶の成長方向が同じであることをEBSP測定によって確かめた後，この画像処理した写真データを基に結晶方向をモデル化した．また，溶接組織の弾性スティフネスは結晶分布の特性から導出し，この定数をFITに適用することでシミュレーションを行った．シミュレーション結果とレーザー振動計測による波面の可視化結果は良好な一致を示した．今後は，金属粒界等をモデル化して，散乱や減衰等により厳密なモデルの提案をすること，さらにはイメージベースFITをきずの定量化等の逆解析に応用したいと考えている．

謝辞： 本研究は，スズキ財団(平成21年度科学技術研究助成，代表 中畑和之)の補助を受けて行われました．ここに，記して謝辞を表します．

## 参考文献

- [1] 古川敬, 古村一郎, 山下裕宣, 徳間英昭, 福田俊, “原子炉再循環系配管のSCC深さサイジング技術”, 保全学, 3, 51-55 (2004).



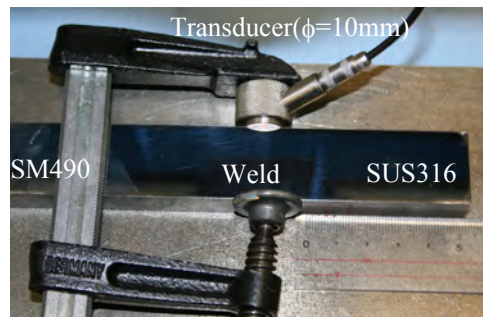


Fig.8 Setup of laser vibrometric measurement.

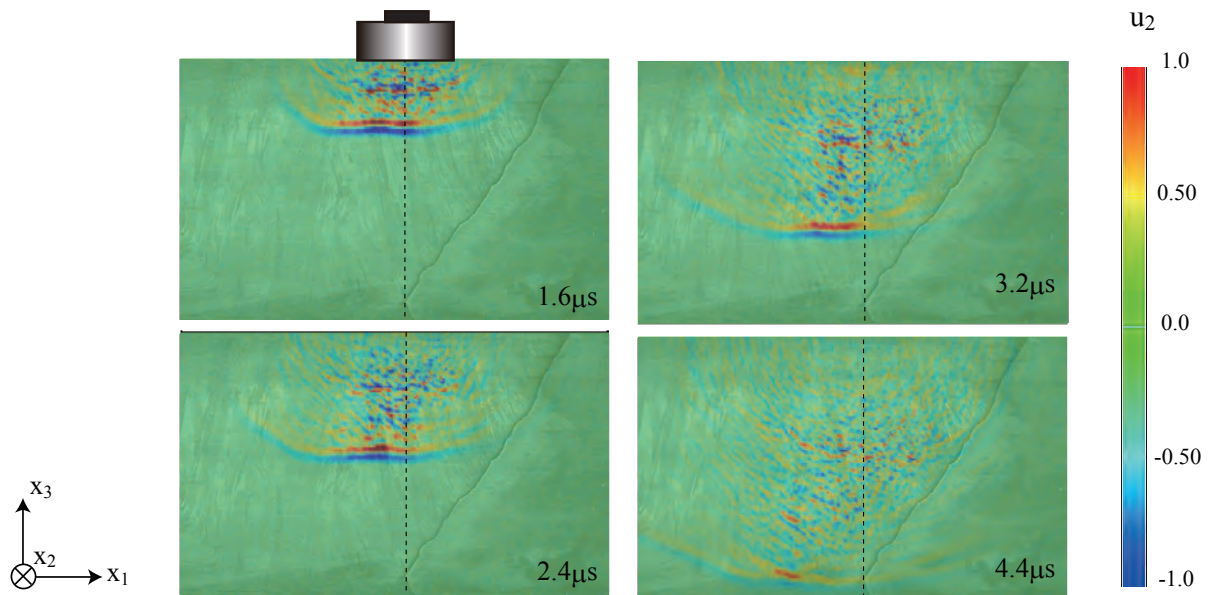


Fig.9 Visualization of displacement  $u_2$  by laser vibrometric measurement.

- [2] 奥山武志, 福富広幸, 林山, 緒方隆志, “ニッケル基合金による異材溶接継手部における超音波探傷試験の高精度化”, 電力中央研究所 研究報告 Q06007, (2007).
- [3] J.A. Ogilvy, “Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel”, *NDT International*, **18**, 67–77 (1985).
- [4] A.H. Harker, J.A. Ogilvy and J.A.G. Temple, “Modeling ultrasonic inspection of austenitic welds”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, **9**, 155–165 (1990).
- [5] M. Spies, “Elastic waves in homogeneous and layered transversely isotropic media: Plane waves and Gaussian wave packets. A general approach”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **95**(4), 1748–1760 (1993).
- [6] K.J. Langenberg, R. Hannemann, T. Kaczorowski, R. Marklein, B. Koehler, C. Schurig and F. Walte, “Application of modeling techniques for ultrasonic austenitic weld inspection”, *NDT & E International*, **33**, 465–480 (2000).
- [7] S. Halkjær, M.P. Sørensen and W.D. Kristensen, “The propagation of ultrasound in an austenitic weld”, *Ultrasonics*, **38**, 256–261 (2000).
- [8] 中畑和之, 廣瀬壮一, “非均質異方性材料中の弾性波伝搬解析のためのイメージベース EFIT の開発と非破壊検査への応用”, 応用力学論文集, **12**, 163–170 (2009).
- [9] 中畑和之, 徳永淳一, 廣瀬壮一, “イメージベース波動伝搬シミュレーションと超音波探傷法のモデル化への応用”, 非破壊検査, **59**(5), 231–238 (2010).
- [10] Fellingner, P., Marklein, R., Langenberg, K.J. and Klaholz, S., “Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT –elastodynamic finite integration technique”, *Wave Motion*, **21**, 47–66 (1995).
- [11] K. Terada, T. Miura and N. Kikuchi, “Digital image-based modeling applied to the homogenization analysis

- of composite materials,” *Computational Mechanics*, **20**(4), 331-346, (1997).
- [12] B. Köhler, F. Schubert, G. Hentges and N. Meyendorf, “Application of photo and particle acoustic methods,” *Proceedings of SPIE*, **5766**, 70-77 (2005).
- [13] 藤井太一, 座古勝, 複合材料の破壊と力学, 実教出版, (1987).
- [14] B.A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Volume 1, John Wiley & Sons, New York (1973).
- [15] 中畑和之, 高田恭兵, “有限積分法 (FIT) のイメージベース波動伝搬シミュレーションへの応用”, 非破壊検査, **60**(4), 204–209 (2011)
- [16] HX600 クラスタ, 京都大学学術情報メディアセンター, <http://www.iimc.kyoto-u.ac.jp/>