

技術資料



Technical Data

高減衰材探傷における結晶粒径および結晶方位を考慮した超音波シミュレーション技術の開発

岡本有史^{*1}, 森永 武^{*1}, 伊藤智啓^{*2}

Development of Ultrasonic Simulation Technology Considering Grain Size and Crystal Orientation for Inspection of High-Attenuation Materials

Yuji OKAMOTO, Takeru MORINAGA and Toshihiro ITO

Synopsis

Ultrasonic testing of steel with a coarse grain structure presents significant challenges. The phased array technique, however, offers a promising solution. In phased array applications, probe design plays a key role, and ultrasonic simulation is commonly employed to support this process. Nevertheless, in coarse-grained steel, the correlation between simulation and experimental results tends to be low, which hinders the design of an optimal probe. This low correlation is likely due to the simulation model's inability to accurately represent the material's microstructure, including grain size, crystal orientation, and the distribution of both. In this paper, we developed a simulation model that integrates experimentally obtained microstructural data. The developed simulation technology showed a high correlation with experimental results.

1. 緒 言

大同特殊鋼(株)では、スクラップを原料として、輸送機器や発電機、鋼構造物などの各種産業分野に使用される様々な特殊鋼製品（以下、鋼材）を生産している。これら鋼材は、過酷な使用環境に耐えうる特性が求められるため、用途に応じて様々な検査を実施している。

鋼材内部の非破壊検査方法としては、超音波探傷試験が広く用いられている¹⁾。これは、超音波を材料中に伝播させ、内部に存在する空隙、介在物などの欠陥からの反射波を検出し、その位置や大きさなどを検査する方法である。

しかし、粗大な結晶粒を有する鋼材（以下、高減衰材）では、超音波探傷が困難となる場合がある。超音波

が鋼材内を伝播するときの模式図を Fig. 1 に示す。超音波は個々の結晶粒界での音響インピーダンスの違いにより、散乱（以下、粒界散乱）する。この粒界散乱は結晶粒が大きいほど、または超音波の波長が短い（周波数が高い）ほど強くなることが知られている²⁾。高減衰材は結晶粒が粗大であり、結晶粒間の異方性が大きい金属組織であるため、超音波の伝播経路での屈折や散乱により、超音波の減衰が大きい^{3), 4)}。

高減衰材の探傷において、粒界散乱や結晶粒の異方性による散乱減衰の影響を低減する必要があり、低周波の超音波を利用することが望ましいとされる⁵⁾。一方で、低周波では微小な欠陥を検出できないというトレードオフの関係にある。そのため、金属組織や検出する欠陥のサイズに合わせて探傷条件を検討する必要がある。

2025年10月21日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 名古屋工業大学大学院 電気・機械工学専攻、工博 (Dr.Eng., Department of Electrical and Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology)

近年、高減衰材に対して、フェーズドアレイ探傷法（以下、PAUT）を適用した事例が報告されている^{1), 6)}。PAUTの原理をFig. 2に示す。PAUTは複数の独立した振動子における超音波の送受信タイミングを制御することで、超音波の集束位置や伝播方向を制御できる¹⁾。PAUTを用いれば、超音波を集束させて音圧を高められるため、散乱減衰が大きい検査対象においても、欠陥からの反射波を得やすい。

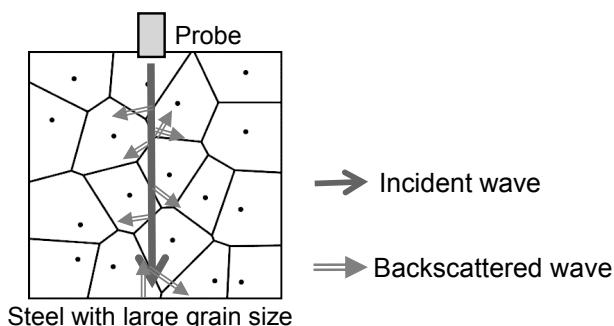


Fig. 1. Grain boundary scattering.

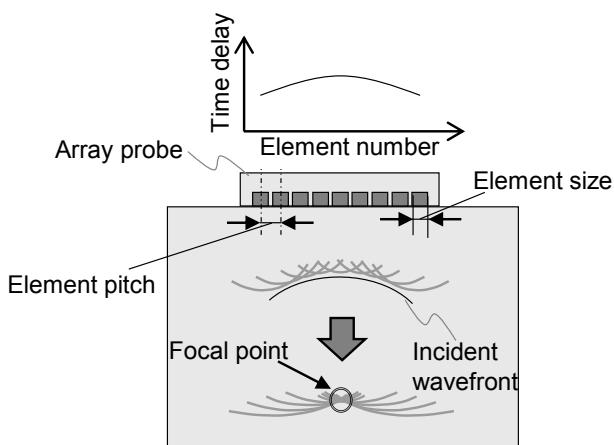


Fig. 2. Beam-focusing principle for point-focused incidence.

PAUTの適用には検査対象の金属組織に合わせて、最適なアレイプローブを設計する必要がある。このとき、素子サイズ、素子ピッチ、集束位置、周波数、開口量（同時励振数）など検討すべきパラメーターが多数ある。材料の形状を考慮すると、さらに複雑であるため、アレイプローブの設計には超音波シミュレーションが活用されることが多い^{6), 7), 8)}。

しかし、高減衰材では、欠陥で反射した信号と超音波の散乱などによるノイズとの比 Signal/Noise（以下、S/N）において、シミュレーションと実際の超音波探傷

（以下、実探傷）との相関が低く、最適なアレイプローブを設計できないことが課題である⁹⁾。この原因は、高減衰材の結晶粒径、結晶方位およびそれらの分布を、従来の超音波シミュレーションでは考慮されていないためと考えられる。

そこで、本研究では、高減衰材に適したアレイプローブを設計するために、結晶粒径と結晶方位およびそれらの分布を考慮した超音波シミュレーション技術を開発する。

2. 超音波シミュレーション手法

2. 1 有限要素法

超音波シミュレーションの方法として、空間を有限の要素に分割して解析する有限要素法を用いて陽解法で伝播解析する¹⁰⁾。ここでは Element by Element 法を用いて、要素ごとに剛性方程式を解く¹¹⁾。これにより複雑な幾何形状だけでなく、要素ごとに材料の異方性、不均質性を反映し、金属材料を伝播する超音波の挙動を高精度に評価できる。

2. 2 ボロノイ分割法によるモデル化

鋼材の結晶粒を有限要素法で再現するには、結晶粒の形状を考慮したモデル化が必要であり、ボロノイ分割法を用いる^{12), 13)}。ボロノイ分割法によってモデル化された結晶粒の例をFig. 3に示す。ボロノイ分割法は、解析領域内にランダムに母点を配置して、最も近い母点間を等分することで、領域を分割する。そして、最も近い母点で要素をグループ化して同一の材料に設定することで、結晶粒の形状をモデル化する。ボロノイ分割法は核から成長して結晶粒が形成される過程に類似していることから、結晶粒分割法として有用である。分割された結晶粒ごとに、異方性主軸を回転させた異なる弾性定数を設定することで粒界散乱を模擬する。

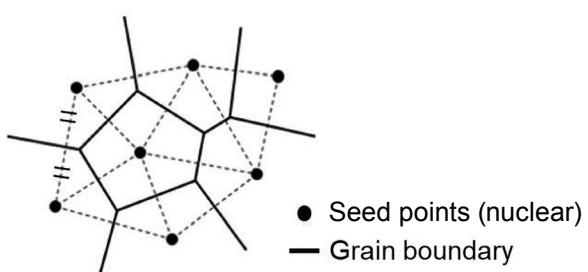


Fig. 3. Voronoi tessellation.

2. 3 モデル化の課題

ボロノイ分割によるモデルでは、粗大な結晶粒である高減衰材において、シミュレーションと実探傷の相関が低いという課題がある。ボロノイ分割法によるシミュレーションと実探傷の結果を Fig. 4 に示す。平均結晶粒径を約 1.5 mm, 50 mm 角の高減衰材を対象とした例では、底面エコーの減衰と散乱ノイズに差があり、シミュレーション結果は実探傷との相関が低い。

この原因は、シミュレーションでは、均一な粒径分布で異方性主軸を解析平面内でランダムに回転させて弾性定数を設定しているのに対し、実探傷した高減衰材では結晶粒径と結晶方位および、それらの分布が一様ではないことにあると考える。そこで、これらの金属組織の特徴をシミュレーションモデルに正確に反映させることで、精度向上を試みる。

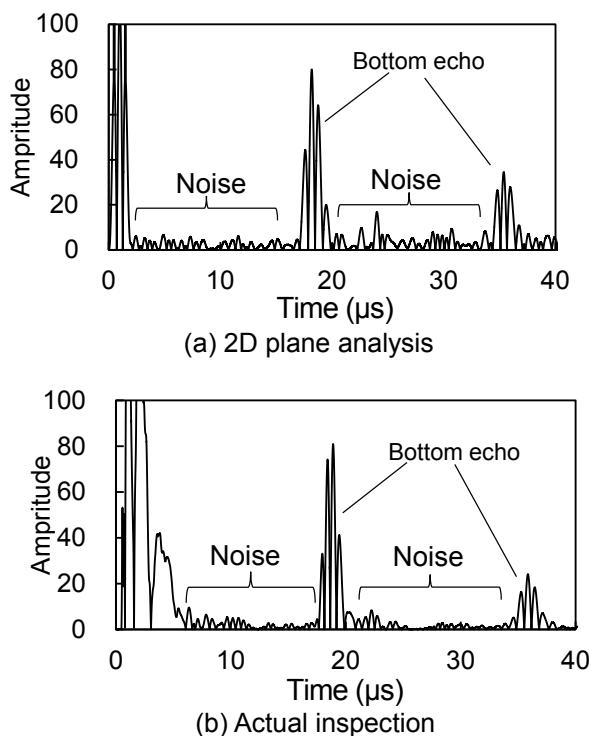


Fig. 4. Inspection of hole flaws for (a) 2D plane analysis (b) actual inspection.
(Element size, 20 mm, frequency, 1.0 MHz
normalize the bottom echo to 80 %).

3. シミュレーションモデル改善

本章では、検査対象とする高減衰材の結晶粒と結晶方位およびそれらの分布を測定し、シミュレーションモデルに反映させる手法について述べる。

3. 1 高減衰材の金属組織について

シミュレーションモデル構築の対象となる 155 mm 角の高減衰材の横断面マクロ画像と部位ごとに平均結晶粒径の分布を測定した結果を Fig. 5 に示す。測定した結晶粒径は中心部が最も粗大であり、外側ほど微細になっていることがわかる。

次に、横断面マクロ画像を 3×3 の 9 等分し、電子後方散乱回折法（以下、EBSD）を用いて中心部、周辺部、角部で結晶方位分布を計測した結果を Fig. 6 に示す。周辺部 (a) では偏りがなく、角部 (b) では (101) 面に偏り、中心部 (c) では分布が (001) 面に偏りが認められる。部位ごとに結晶方位の分布に差があることがわかる。

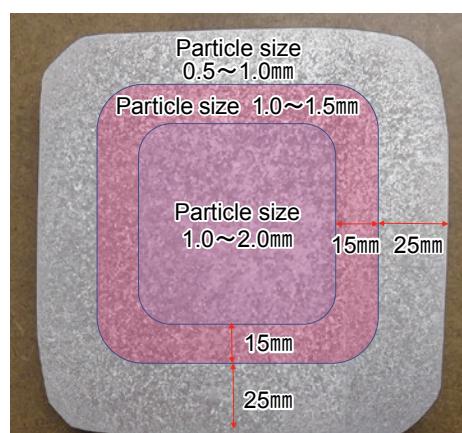


Fig. 5. Particle size distribution.

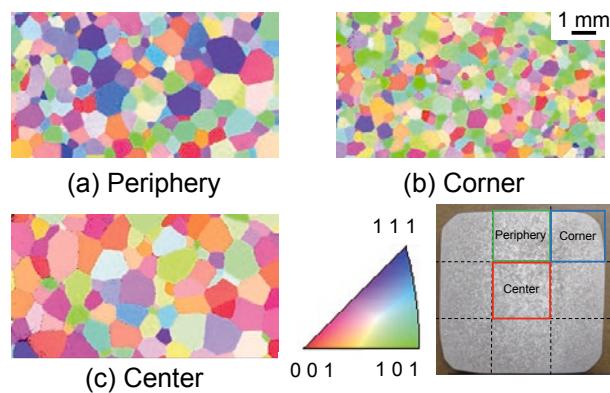


Fig. 6. IPF map.

3. 2 結晶粒径分布の考慮モデル作成

以下に、横断面マクロ画像から得た結晶粒径分布を反映したモデルの作成方法を示す。

EBSDにて計測した粒径分布データをもとに、ボロノイ分割法における母点密度を、材料の結晶粒径分布に従わせるための写像関数を決定する。横断面マクロ画像をFig. 5で示した3つの領域に分割し、その領域の面積と測定した結晶粒径より求めた。領域毎の結晶粒数をTable 1に示す。結晶粒数からそれぞれの領域での母点の密度を求め、一様な乱数から得る値を母点密度に相当する値へ変換する写像関数を決定する。母点の発生確率と変換座標をTable 2に、写像関数をFig. 7に示す。この写像関数は乱数で得る一様な値を正規化した座標に変換する。

この写像関数を用いると、周辺部に母点が集まるので、周囲の平均粒径が小さく、中心部で平均粒径が大きいモデルを作成できる。この手法を用いて作成したボロノイ分割によるモデル化結果をFig. 8に示す。なお、各結晶粒は後に異なる弾性定数を与えるため、結晶粒ごとにランダムに色分けして区別している。

Table 1. Crystal grain information for each area.

Domain	Area [mm ²]	Average grain size [mm]	Grain area [mm ²]	Number of grains
Center (0-70 mm)	4900	1.500	1.767	2773
Middle (70 mm-100 mm)	5100	1.300	1.327	3842
Outside (100 mm-155 mm)	12500	0.800	0.503	24868
Total	22500			31483

Table 2. Mapping function information.

Domain	Sum of base point ratio	Upper bound of random value	Normalized coordinates
Center (0-70 mm)	0.08807	0.2968	0.4667
Middle (70 mm-100 mm)	0.2101	0.4584	0.6667
Outside (100 mm-155 mm)	1.000	1.000	1.000

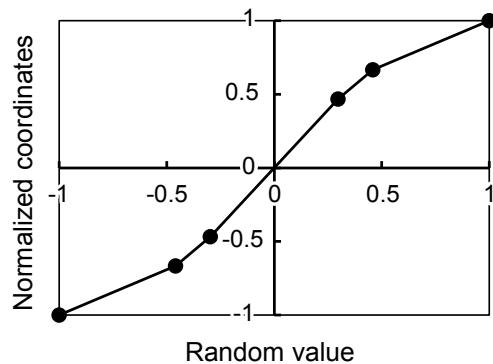


Fig. 7. Mapping function.

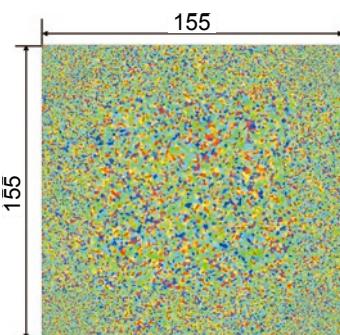


Fig. 8. Voronoi tessellation models with mapping functions.

3. 3 結晶方位分布を考慮したモデル作成

従来の粒界散乱を模擬したシミュレーションでは結晶粒を構成する要素に、異方性主軸を解析平面内でランダムに回転させた弾性定数を与えていたが、ここでは異方性主軸方向の偏りを考慮してモデル化する手法を示す。

結晶方位分布の計測結果 (Fig. 5) をシミュレーションモデルの異方性主軸方向に反映する。材料の音響インピーダンスに影響する3次元の弾性定数 (応力-ひずみマトリクス) $[\bar{D}]$ は3次元の応力 σ とひずみ ε で式 (1) の通りに関係づけられる。

$$\{\sigma\} = [\bar{D}] \{\varepsilon\} \quad (1)$$

異方性主軸回転図をFig. 9に示す。結晶方位のオイラー角に合わせて、異方性主軸を3軸まわりに角度 α だけ回転 (座標変換マトリクス $[Q_{3(\alpha)}]$ と表す) させ、次に回転された2軸まわりに角度 β だけ回転 ($[Q_{2(\beta)}]$) させ、さらに回転後の3軸まわりに角度 γ だけ回転 ($[Q_{3(\gamma)}]$) させる。この操作で、異方性主軸を回転させた材料行列 $[\bar{D}']$ は式 (2) で表される。ここで、3軸、2軸まわりの回転テンソルは式 (3)、(4) で表される。

粒径分布を考慮したボロノイ分割で作成した結晶粒毎に、EBSDで計測したオイラー角 (α, β, γ) を与えて座標変換した3次元の材料行列 $[\bar{D}']$ を作成する。

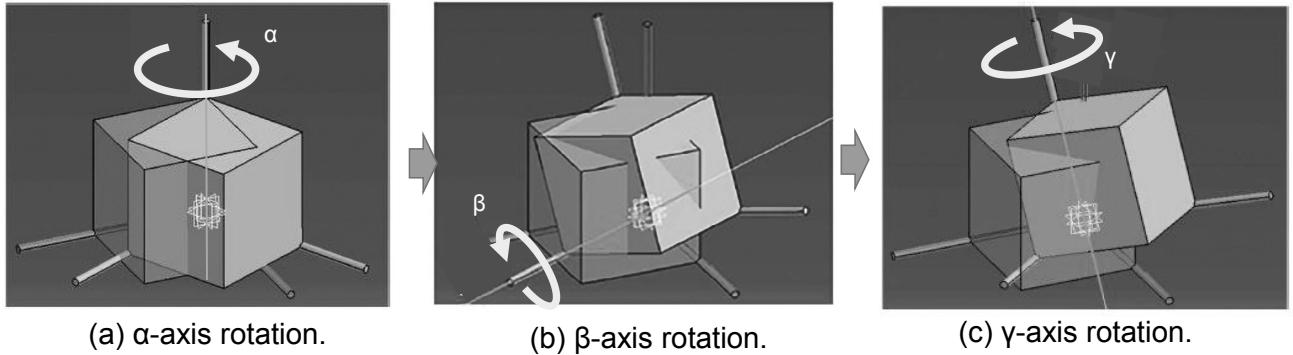


Fig. 9. Rotation of the anisotropic principal axis.

$$[\bar{D}] = [Q_{3(\gamma)}][Q_{2(\beta)}][Q_{3(\alpha)}][\bar{D}][Q_{3(\alpha)}^{-1}][Q_{2(\beta)}^{-1}][Q_{3(\gamma)}^{-1}] \quad (2)$$

$$[Q_{3(\alpha)}] = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \sin^2\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sin 2\alpha}{2} & \frac{\sin 2\alpha}{2} \\ \sin^2\alpha & \cos^2\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sin 2\alpha}{2} & -\frac{\sin 2\alpha}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha & 0 & 0 & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\alpha & 0 & 0 & \cos\alpha & 0 & 0 \\ -\frac{\sin 2\alpha}{2} & \frac{\sin 2\alpha}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos^2\alpha & -\sin^2\alpha \\ -\frac{\sin 2\alpha}{2} & \frac{\sin 2\alpha}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin^2\alpha & \cos^2\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[Q_{2(\beta)}] = \begin{bmatrix} \cos^2\beta & 0 & \sin^2\beta & 0 & 0 & \frac{\sin 2\beta}{2} & \frac{\sin 2\beta}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin^2\beta & 0 & \cos^2\beta & 0 & 0 & \frac{\sin 2\beta}{2} & \frac{\sin 2\beta}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\beta & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\beta & 0 & 0 & \sin\beta & 0 \\ \frac{\sin 2\beta}{2} & 0 & -\frac{\sin 2\beta}{2} & 0 & 0 & \cos^2\beta & -\sin^2\beta & 0 & 0 \\ \frac{\sin 2\beta}{2} & 0 & -\frac{\sin 2\beta}{2} & 0 & 0 & -\sin^2\beta & \cos^2\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\beta & 0 & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\beta & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

本研究では、異方性主軸回転後は平面ひずみを仮定して2次元平面解析する。このとき、 $\epsilon_x = \gamma_{zx} = \gamma_{yz} = 0$ として、これらにかかる成分を除去して作成する解析平面内の2次元の弾性定数 $[D]$ を用いて、応力-ひずみ関係は式(5)のように表される。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

このようにして、EBSDで計測した結晶方位のデータから作成した材料行列 $[D]$ をボロノイ分割で作成した結晶毎に設定することで異方性主軸の偏りを反映したシミュレーションモデルを作成する。

4. 改善モデルによる解析検証

4. 1 シミュレーション条件

前章にて記載した手法を用いて作成した結晶粒径、結晶方位を考慮したモデルのシミュレーションと実探傷を比較し、モデルの精度を評価する。155 mm 角の高減衰材に平底溝（幅 6.8 mm、高さ 77.5 mm）を設けた Fig. 10 に示すモデルを解析する。シミュレーション条件を Table 3 に示す。アレイプローブを 155 mm 角の鋼材の上面中央に置き、焦点を底面中心に合わせて、シミュレーションする。

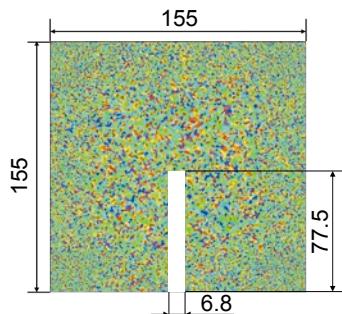
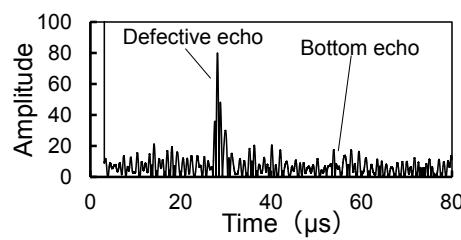


Fig. 10. Analytical model.

Table 3. Analysis conditions

Number of elements	32 ch	48 ch	64 ch
Element size	0.7~3.5 mm	1.3~3.1 mm	1.3~2.2 mm
Element pitch		0.1 mm	
Center frequency		0.3 MHz, 1.0 MHz	
Wave number		2 cycles	
Focus position		Bottom surface(155 mm)	
Mesh size		0.025 mm	



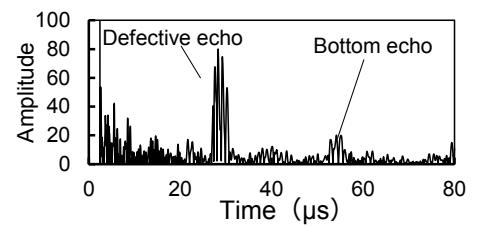
(a) Simulation (1.0 MHz, 32 ch)

4. 2 シミュレーション結果

欠陥エコーを 80 % に正規化した PAUT のシミュレーションと実探傷の代表波形を Fig. 11 に示す。散乱ノイズ、底面エコーの減衰はともに近い結果が得られた。Fig. 3 に示した従来シミュレーションと比較しても、実探傷との相関が高くなることがわかる。

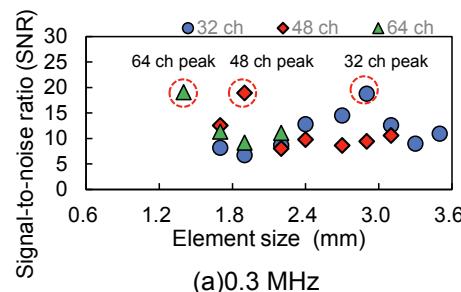
次に、同時励振数 32, 48, 68 ch ごとのアレイプローブの素子サイズと S/N のシミュレーション結果を Fig. 12 に示す。

同時励振数ごとに S/N が最大となる素子サイズが異なる結果となる。開口量（素子サイズ × 同時励振数）で整理した結果を Fig. 13 に示す。同時励振数によらず、S/N が特定の開口量で最大となることから、PAUT の検出能は素子サイズではなく、開口量が影響すると考えられる。すなわち、金属組織と欠陥サイズから周波数を選定すれば、アレイプローブの最適な開口量を決定することができる。

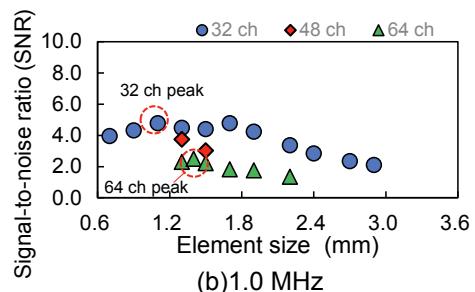


(b) Actual inspection (1.0 MHz, 32 ch)

Fig. 11. Simulation and actual flaw detection received waveforms.

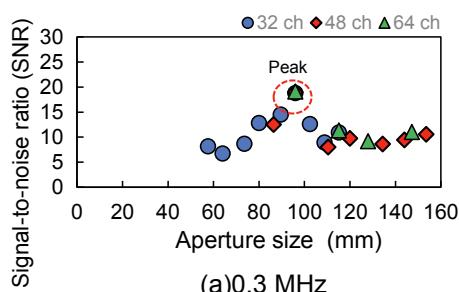


(a) 0.3 MHz

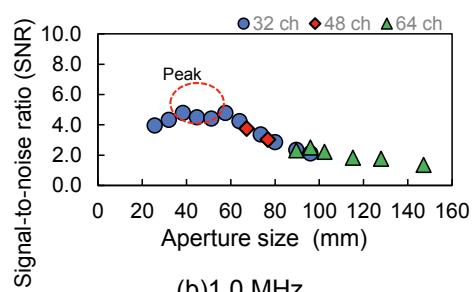


(b) 1.0 MHz

Fig. 12. Relation between element size and S/N in simulation.



(a) 0.3 MHz



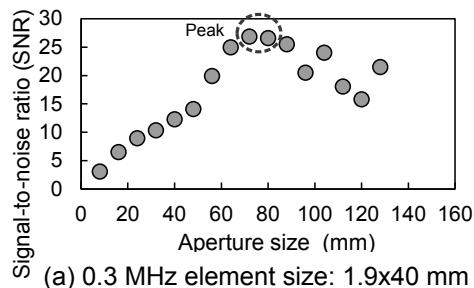
(b) 1.0 MHz

Fig. 13. Relation between aperture size and S/N in simulation.

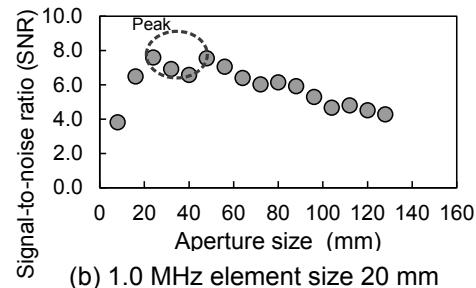
4. 3 実探傷との比較検証

開口量と S/N の関係について実探傷とシミュレーションを比較する。実探傷における開口量と S/N の関係を Fig. 14 に示す。実探傷では公称周波数 0.3 MHz と 1.0 MHz のアレイプローブを用いて計測し、開口量は同時に励振数を変えることで変更した。シミュレーション結果 (Fig.13) と比較すると、公称周波数 0.3 MHz のとき、実探傷では 70 mm 前後で S/N は最大値となるが、シミュレーションでは開口量が 95 mm 前後となり、結果にやや差が生じた。この差異の原因は、アレイプローブの周波数特性が考えられる。

そこで、実探傷で用いたアレイプローブの減衰影響が少ない、水中における表面反射波とシミュレーションの入力波形を周波数解析 (FFT 解析) した結果を Fig. 15 に示す。0.3 MHz では、実探傷プローブの公称周波数より中心周波数がやや高くなる。一方、1.0 MHz では、実探傷で用いたプローブの中心周波数とシミュレーションの周波数特性の違いは僅かである。0.3 MHz において、実探傷とシミュレーションに差が生じた理由はアレイプローブの周波数特性の違いであり、シミュレーション結果は妥当といえる。また、0.3 MHz と 1.0 MHz の結果の比較から中心周波数が低いほど、最適な開口量は大きくなる傾向がある。

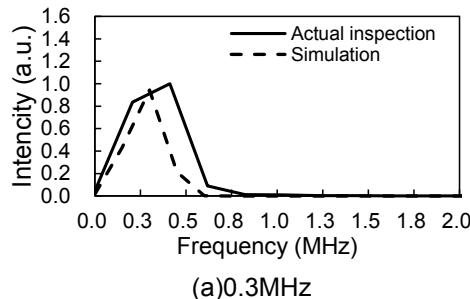


(a) 0.3 MHz element size: 1.9x40 mm

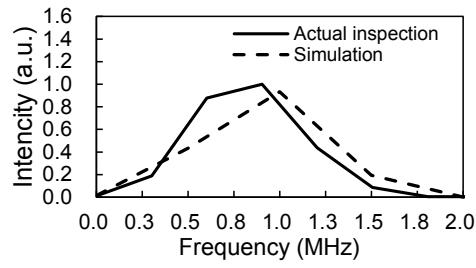


(b) 1.0 MHz element size 20 mm

Fig. 14. Relation between aperture size and S/N in actual inspection.



(a) 0.3MHz



(b) 1.0MHz

Fig. 15. Comparison of frequency spectrum between actual inspection and simulation.

5. 結 言

本研究では、粒界散乱の原因への影響が大きい結晶粒径および結晶方位の分布を考慮したシミュレーション方法を開発し、以下の結論を得た。

- (1) 粗大な結晶粒を有する高減衰材に対しても、結晶粒径分布と材料異方性主軸方向の偏りを考慮することで、実探傷と高い相関をもつ高精度なシミュレーションができることが示された。
- (2) 本シミュレーション技術を用いて、周波数(波長)による最適な開口量が定まるこことを確認した。

以上より、本シミュレーションを用いることで、高減衰材に対する最適なプローブ設計が可能となる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、名古屋工業大学の正宗 浩氏 (～2024 年度在籍) には多大なるご協力をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

(文 献)

- 1) 樹神啓司, 伊藤光宏: 電気製鋼, **89**(2018), 39.
- 2) 宇田川義夫: 超音波技術入門 発信から受信まで, 日刊工業新聞社, (2010), 42.
- 3) 林山, 東海林一: 電力中央研究所報告, **Q17003** (2018).
- 4) 黒住保夫, 岡野行光, 西川雅弘: 日本原子力学会誌, **Vol.39**(1997), No.4.
- 5) 片岡克仁: 電気製鋼, **72**(2008), 281.
- 6) 森永武, 諸頭慧, 樹神啓司, 森大輔: 超音波部門講演会資料, **1**(2021), 13.
- 7) 石谷和典, 池上泰史, 樹神啓司, 森大輔: 電気製鋼, **92**(2021), 113.
- 8) 池上泰史, 酒井幸広, 中村均: 超音波による非破壊評価シンポジウム, **14**(2006), 137.
- 9) 伊藤智啓, 中村正也: CAMP-ISIJ, **17**(2004), 938.
- 10) 只野裕一: ぶらすとす(日本塑性加工学会会報誌), 第 4 卷, 第 37 号(2021-1), 41.
- 11) 柴出圭司, 伊藤智啓, 川嶋絢一郎, 超音波による非破壊評価シンポジウム, **13**(2006), 125.
- 12) 森永武, 諸頭慧, 岡田美典, 奈良光洋: 超音波による非破壊評価シンポジウム, **31**(2024), 93.
- 13) 正宗浩, 伊藤智啓, 岡本有史, 森永武: 非破壊検査協会 2024 年秋季講演大会講演概要集, (2024), 21.
- 14) 正宗浩, 伊藤智啓, 岡本有史, 森永武: 超音波による非破壊評価シンポジウム, **32**(2025), 59.



岡本有史



森永 武



伊藤智啓