

## 音響異方性を有する溶接金属部での 柱状晶伝搬エコーに関する超音波解析

—加圧水型原子炉1次系ステンレス鋼配管の粒界割れを対象として—  
(令和6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」)

Ultrasonic Analysis of Columnar Crystal Propagation Echo  
in Acoustically Anisotropic Weld Metals  
– Targeting Intergranular Cracking of Stainless-steel Piping  
in Pressurized Water Reactor Primary System –

“FY2024 Nuclear Regulation Research Technology Infrastructure Construction  
Project Subsidy ‘The Grant to Establish Technology Bases for Enhancement of  
Nuclear Regulation Research’”

松井 哲也 下平 昌樹 山口 義仁 外山 健  
勝山 仁哉

Tetsuya MATSUI, Masaki SHIMODAIRA, Yoshihito YAMAGUCHI, Takeshi TOYAMA  
and Jinya KATSUYAMA

原子力安全・防災研究所  
安全研究センター

Nuclear Safety Research Center  
Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

March 2026

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)  
は、下記までお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.  
Availability and use of the results of this report, please contact  
Library, Institutional Repository and INIS Section,  
Research and Development Promotion Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

## 音響異方性を有する溶接金属部での柱状晶伝搬エコーに関する超音波解析

### —加圧水型原子炉 1 次系ステンレス鋼配管の粒界割れを対象として—

(令和 6 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」)

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

松井 哲也、下平 昌樹、山口 義仁、外山 健、勝山 仁哉

(2025 年 12 月 24 日受理)

日本原子力研究開発機構安全研究センターでは、2024 年度より先進的な検査・構造健全性評価技術に関する基盤研究を進めており、その一環として超音波シミュレータによる模擬探傷画像及び機械学習を活用して超音波探傷結果診断技術を開発予定である。本研究では、そこで用いる超音波シミュレータの適用性を検証するため、シミュレータによるフェーズドアレイ超音波探傷での解析結果と実機事例を比較した。実機事例として、数少ない公開結果である 2020 年に報告された関西電力大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における粒界割れの超音波探傷結果を比較対象とした。

配管溶接部に対する入射角  $45^\circ$  のフェーズドアレイリニアスキャンを模擬した解析において、亀裂によるコーナーエコー及び端部エコーはその亀裂の位置に正しく検出された。一方、解析において溶接金属部内に強い柱状晶伝搬エコーが検出され、その強度は柱状晶異方性の対称軸角度への依存性が高いことがわかった。また、入射角  $31^\circ$  の場合にも強い柱状晶伝搬エコーが得られ、その柱状晶伝搬エコーは亀裂のコーナーエコーと繋がって、配管内表面における亀裂位置から溶接内部にまたがる形状であった。これは、実機事例とよく一致していることから、フェーズドアレイの入射角  $31^\circ$  で実測された溶接内部エコーの原因としては柱状晶伝搬エコーも考えられる可能性が示唆された。

---

本研究は、原子力規制庁の令和 6 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。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4

**Ultrasonic Analysis of Columnar Crystal Propagation Echo in Acoustically Anisotropic  
Weld Metals**

**- Targeting Intergranular Cracking of Stainless-steel Piping in Pressurized Water  
Reactor Primary System -**

**“FY2024 Nuclear Regulation Research Technology Infrastructure Construction Project  
Subsidy ‘The Grant to Establish Technology Bases for Enhancement of Nuclear Regulation  
Research’ ”**

Tetsuya MATSUI, Masaki SHIMODAIRA, Yoshihito YAMAGUCHI, Takeshi TOYAMA  
and Jinya KATSUYAMA

Nuclear Safety Research Center  
Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 24, 2025)

The JAEA Safety Research Center has been conducting fundamental research on advanced inspection and structural integrity assessment technologies since FY2024, including the development of a machine-learning-based ultrasonic flaw detection method using an ultrasonic simulator. To assess the simulator’s applicability, phased array ultrasonic testing (PAUT) results produced by the simulator were compared with actual measurement data. Due to limited publicly available datasets, an intergranular crack in the pressurizer spray line piping of Kansai Electric Power Co. Inc.’s Ohi Nuclear Power Station Unit 3 was selected as the reference case.

PAUT linear scanning analysis at a 45° incident angle detected the crack’s corner and edge echoes. Strong columnar-crystal propagation echoes were also observed within the weld metal, with their intensity showing dependence on the symmetric axis angle. Analysis at a 31° incident angle similarly identified strong columnar-crystal propagation echoes, which connected to the crack’s corner echoes and propagated into the weld region. These results align with actual measurements, indicating that the observed weld-metal echoes are likely attributable to columnar-crystal propagation.

---

**Keywords:** Ultrasonic Testing, Phased Array Linear Scan, Columnar Crystal Structure

This work was supported by the Secretariat of the Nuclear Regulation Authority, Japan.

目 次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1. はじめに                           | 1  |
| 2. 大飯発電所 3 号機における粒界割れ事象とその検査結果の概要 | 1  |
| 3. 超音波シミュレーションによる粒界割れの解析          | 6  |
| 3.1 解析方法                          | 6  |
| 3.2 解析結果                          | 12 |
| 3.3 考察                            | 31 |
| 4. 結論                             | 34 |
| 謝辞                                | 35 |
| 参考文献                              | 35 |
| 付録 1 配管材料の音響特性と溶接金属部柱状晶結晶方向の設定方法  | 37 |
| 付録 2 解析入力値の設定根拠                   | 40 |
| 付録 3 B スコープ像の作成方法                 | 41 |

Contents

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction  | 1  |
| 2. Overview of the Ohi Unit 3 Intergranular Cracking Incident and Its Inspection Results                                     | 1  |
| 3. Analysis of Intergranular Cracking Using Ultrasonic Simulation  | 6  |
| 3.1 Analysis Method  | 6  |
| 3.2 Analysis Results   | 12 |
| 3.3 Discussion   | 31 |
| 4. Conclusion  | 34 |
| Acknowledgements   | 35 |
| References   | 35 |
| Appendix 1 Acoustic Properties of Piping Materials and Method for Determining<br>Columnar Crystal Orientation in Weld Metals | 37 |
| Appendix 2 Rationale for Setting Analysis Input Values   | 40 |
| Appendix 3 Creating Method of B-scope Image  | 41 |

表リスト

|            |                          |    |
|------------|--------------------------|----|
| Table 3.1  | フェーズドアレイセンサの入力パラメータと設定根拠 | 10 |
| Table 3.2  | 各エコーピーク強度の相対比較           | 26 |
| Table A1.1 | 配管本体部（等方材）の音速            | 37 |
| Table A1.2 | 溶接金属部材料の異方性に関する剛性マトリクス   | 37 |
| Table A1.3 | 結晶方向を表す関数のパラメータ設定値       | 38 |

図リスト

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Fig. 2.1  | 大飯発電所 3 号機一次冷却材系統の加圧器スプレイライン配管溶接部            | 3  |
| Fig. 2.2  | フェーズドアレイ UT 詳細調査結果（入射角 45°）                  | 4  |
| Fig. 2.3  | フェーズドアレイ UT 詳細調査結果（入射角 31°）                  | 4  |
| Fig. 2.4  | 追加検査後に推定された亀裂形状                              | 4  |
| Fig. 2.5  | 亀裂部切断調査による断面マクロ・ミクロ観察の結果                     | 5  |
| Fig. 3.1  | 加圧器スプレイライン配管溶接部の解析体系                         | 8  |
| Fig. 3.2  | 亀裂部の断面写真                                     | 8  |
| Fig. 3.3  | 配管溶接金属部の柱状組織の解析モデル                           | 9  |
| Fig. 3.4  | ComWAVE のアレイ振動子テンプレートの入力パラメータ                | 10 |
| Fig. 3.5  | フェーズドアレイリニアスキャンのスキャンパターン（入射角 45°の場合）         | 11 |
| Fig. 3.6  | フェーズドアレイリニアスキャンの B スコープ結果（入射角：45°）           | 15 |
| Fig. 3.7  | $\varphi = +10^\circ$ での伝搬状況（入射角：45°）        | 16 |
| Fig. 3.8  | $\varphi = 0^\circ$ での伝搬状況（入射角：45°）          | 18 |
| Fig. 3.9  | $\varphi = -10^\circ$ での伝搬状況（入射角：45°）        | 20 |
| Fig. 3.10 | 柱状晶伝搬エコーの伝搬経路と B スコーププロットの関係                 | 22 |
| Fig. 3.11 | $\varphi = +10^\circ$ でのモード変換横波伝搬状況（入射角:45°） | 23 |
| Fig. 3.12 | モード変換横波によるコーナーエコーの伝搬経路と<br>B スコーププロットの関係     | 25 |
| Fig. 3.13 | モード変換横波による柱状晶伝搬エコーの伝搬経路と<br>B スコーププロットの関係    | 26 |
| Fig. 3.14 | フェーズドアレイリニアスキャンの B スコープ結果（入射角：31°）           | 28 |
| Fig. 3.15 | $\varphi = +10^\circ$ での伝搬状況（入射角：31°）        | 29 |
| Fig. 3.16 | フェーズドアレイリニアスキャン B スコープの実測と解析の比較              | 33 |
| Fig. A1.1 | 結晶方向を表す関数 $F$ とそのパラメータの説明図                   | 38 |
| Fig. A1.2 | 柱状晶異方性の対称軸の方向                                | 39 |
| Fig. A2.1 | フェーズドアレイ測定時の A スコープの波形                       | 40 |
| Fig. A3.1 | フェーズドアレイ B スコープ画像の作成方法                       | 41 |

List of Tables

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Table 3.1  | Phased Array Sensor Input Parameters and Configuration Rationale  | 10 |
| Table 3.2  | Relative Comparison of Echo Peak Intensities                      | 26 |
| Table A1.1 | Sound Velocity of the Pipe Body (Isotropic Material)              | 37 |
| Table A1.2 | Stiffness Matrix for Anisotropy of Weld Metal Material            | 37 |
| Table A1.3 | Parameter Settings for Functions Representing Crystal Orientation | 38 |

List of Figures

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Fig. 2.1  | Pressurizer Spray Line Pipe Weld of Primary Coolant System at the Ohi<br>Nuclear Power Station Unit 3                                     | 3  |
| Fig. 2.2  | Phased Array UT Detailed Investigation Results (Incident Angle 45°)   | 4  |
| Fig. 2.3  | Phased Array UT Detailed Investigation Results (Incident Angle 31°)   | 4  |
| Fig. 2.4  | Estimated Crack Shape after Additional Inspection   | 4  |
| Fig. 2.5  | Cross-Sectional Macro- and Micro-Observation of the Crack Section   | 5  |
| Fig. 3.1  | Analysis System for the Pressurizer Spray Line Pipe Weld  | 8  |
| Fig. 3.2  | Cross-Sectional Photograph of the Crack Section   | 8  |
| Fig. 3.3  | Analysis Model of the Columnar Structure of the Pipe Weld Matsl   | 9  |
| Fig. 3.4  | Input Parameters for ComWAVE Array Transducer Template  | 10 |
| Fig. 3.5  | Phased Array Linear Scan Pattern (Incidence Angle: 45°)   | 11 |
| Fig. 3.6  | B-scope Results of Phased Array Linear Scan (Incidence Angle: 45°)  | 15 |
| Fig. 3.7  | Propagation Pattern of $\varphi = +10^\circ$ (Incidence Angle: 45°)   | 16 |
| Fig. 3.8  | Propagation Pattern of $\varphi = 0^\circ$ (Incidence Angle: 45°)   | 18 |
| Fig. 3.9  | Propagation Pattern of $\varphi = -10^\circ$ (Incidence Angle: 45°)   | 20 |
| Fig. 3.10 | Relationship between the Propagation Path of Columnar Crystal Echoes<br>and the Propagation B-scope Plot                                  | 22 |
| Fig. 3.11 | Propagation Pattern of Mode-converted Shear Waves at $\varphi = +10^\circ$<br>(Incidence Angle: 45°)                                      | 23 |
| Fig. 3.12 | Relationship between the Propagation Path of Corner Echoes<br>due to Mode-converted Shear Waves and the B-scope Plot                      | 25 |
| Fig. 3.13 | Relationship between the Propagation Path of the Columnar Crystal<br>Propagation Echo of a Mode-converted Shear Wave and the B-scope Plot | 26 |
| Fig. 3.14 | B-scope Results of a Phased Array Linear Scan (Incidence Angle: 31°)  | 28 |
| Fig. 3.15 | Propagation Situation at $\varphi = +10^\circ$ (Incidence Angle: 31°)   | 29 |
| Fig. 3.16 | Comparison of Actual Measurement and Analysis of a Phased Array<br>Linear Scan B-scope  | 33 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Fig. A1.1 | Schematic of the Crystal Orientation Function $F$ and its Parameters | 38 |
| Fig. A1.2 | Direction of the Symmetrical Axis of Columnar Crystal Anisotropy     | 39 |
| Fig. A2.1 | A-scope Waveform during Phased Array Measurement                     | 40 |
| Fig. A3.1 | Creating Method a B-scope Image                                      | 41 |

## 1. はじめに

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経年劣化研究グループでは、2024年度より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）にて、先進的な検査・構造健全性評価技術に関する基盤研究を実施している。この基盤研究では、原子炉機器の健全性評価に資する非破壊検査や確率論的破壊力学手法の高度化を目的とし、以下の内容が進められている。

- ・積層造形（Additive Manufacturing）法により任意形状の欠陥を形成した金属試験体を製作し、非破壊検査による欠陥の検出確率や欠陥サイジング精度を調査する。
- ・超音波探傷試験（UT）の画像データから機械学習による分析により欠陥の位置や大きさを推定する逆解析手法を開発する。

特に、後者では、超音波の数値解析により得られる探傷画像を教師データとして用いることにより、様々な形状の検査対象物や欠陥を系統的に変化させ、大量の教師データを生成する計画である。教師データを得るための数値解析手法としては有限要素法（FEM）に基づく市販の超音波シミュレータ ComWAVE X2025（以下、ComWAVEという）<sup>1)</sup>を採用した。この解析ソフトの詳細は3.1節に記載するが、この解析ソフトを使用するにあたってその適用性を確認しておくことが不可欠であり、以下の2点を実施することとした。

- ① 解析により実際の UT 探傷画像中で見られるような欠陥等に起因する反射信号（以下、エコーという）が表現できることの確認。
- ② 解析で得られた探傷画像が実測された UT と同等のものであることの確認。

まず、①については、ステンレス鋼管溶接継手の UT を模擬した解析により、欠陥や溶接金属部性状等に由来する特徴的なエコーが得られることを確認し、この解析ソフトの基本的な適用性を検証できた。さらに、各種エコー強度に及ぼす材料パラメータや探傷条件の影響を調査し、エコーが溶接金属部の結晶異方性に依存することを示した<sup>2)</sup>。

本報では、上記②について、解析で得られた探傷画像を実際の UT による探傷画像と比較検証することを目的とした。比較対象としては、超音波探傷のうちフェーズドアレイ UT による2次元画像である B スコープ画像を選択した。UT による探傷結果としては、B スコープ画像が公開されている数少ない実機検査結果である2020年に報告された関西電力大飯発電所3号機加圧器スプレイライン配管溶接部における粒界割れのデータ<sup>3-6)</sup>を対象とした。

## 2. 大飯発電所3号機における粒界割れ事象とその検査結果の概要

本章では、関西電力大飯発電所3号機における粒界割れ事象とその検査結果の概要を示す。まず、大飯発電所3号機における一次冷却材系統の加圧器スプレイライン配管溶接部を Fig. 2.1<sup>3)</sup>に示す。2020年第18回定期検査の供用期間中検査（ISI）で超音波探傷試験（横波斜角45°、周波数2MHz）により、この図の加圧器スプレイライン配管（材質：オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316）溶接部の背側に長さ約60mmにわたって欠陥の指示が確認された。これは、

供用前検査（PSI）及び第 18 回定期検査以前の ISI の結果<sup>3,4)</sup>とは明らかに異なる有意な指示であった。その欠陥の詳細を確認するため、フェーズドアレイ UT での追加検査が行われた。フェーズドアレイ UT の方式として、超音波ビームを収束させた状態で直線状にスキャンするリニアスキャンが用いられ、縦波斜角 45°と縦波斜角 31°の入射角で測定された。それぞれの場合の B スコープ画像を Fig. 2.2 及び Fig. 2.3 に示す<sup>4)</sup>。これらの検査結果では、亀裂の起点である亀裂コーナー部からのエコー（以下、コーナーエコーという）と、そこから連続的に溶接金属部方向に伸びた明確なエコーが観測されている。この Fig. 2.2 の端部エコーと評価したエコーまでの作図結果（Fig. 2.2 中の右上）から、亀裂深さは 4.6 mm と評価された。これら追加検査に基づきその時点で推定された亀裂形状を Fig. 2.4 に示す<sup>4)</sup>。コーナーエコーが検出された溶接金属部近傍を起点として、亀裂の先端が溶接金属部を横断するような亀裂形状と推定された。

その後さらに亀裂発生原因を調べるため、当該溶接部の切断による詳細調査が実施された。その切断面のマクロ・ミクロ観察の結果を Fig. 2.5 に示す<sup>5)</sup>。亀裂は溶接金属部近傍に溶接境界に沿って進展している粒界型応力腐食割れ（SCC）であることが明らかになり、溶接金属部中心に入り込んだとした超音波探傷の追加試験に基づく推定とは異なっていることが判明した。この相違に関する分析では、超音波センサが配管外表面の凸部で浮いた状態となり、有効なセンサ素子が超音波センサ後方のみになったことが原因と報告されている<sup>6)</sup>。この点に関しては 3.3 節の考察で論じる。

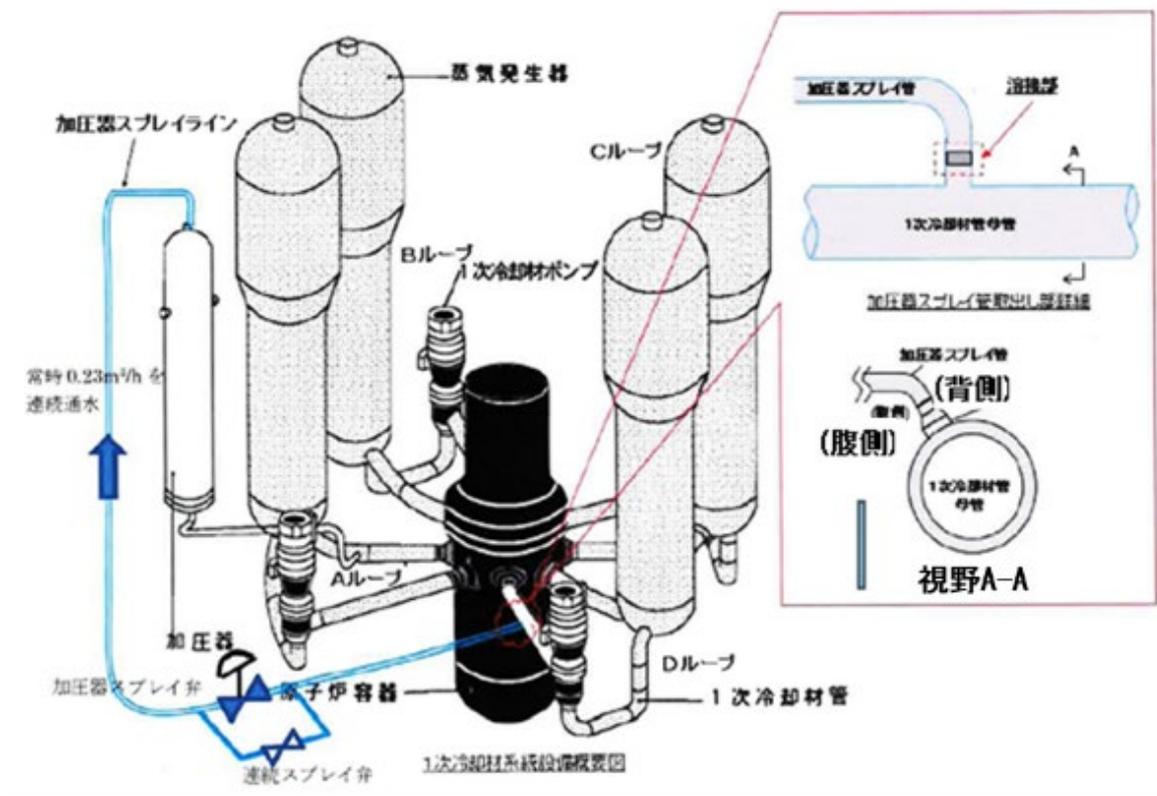


Fig. 2.1 大飯発電所3号機一次冷却材系統の加圧器スプレイライン配管溶接部<sup>3)</sup>  
 「資料提供：関西電力株式会社」

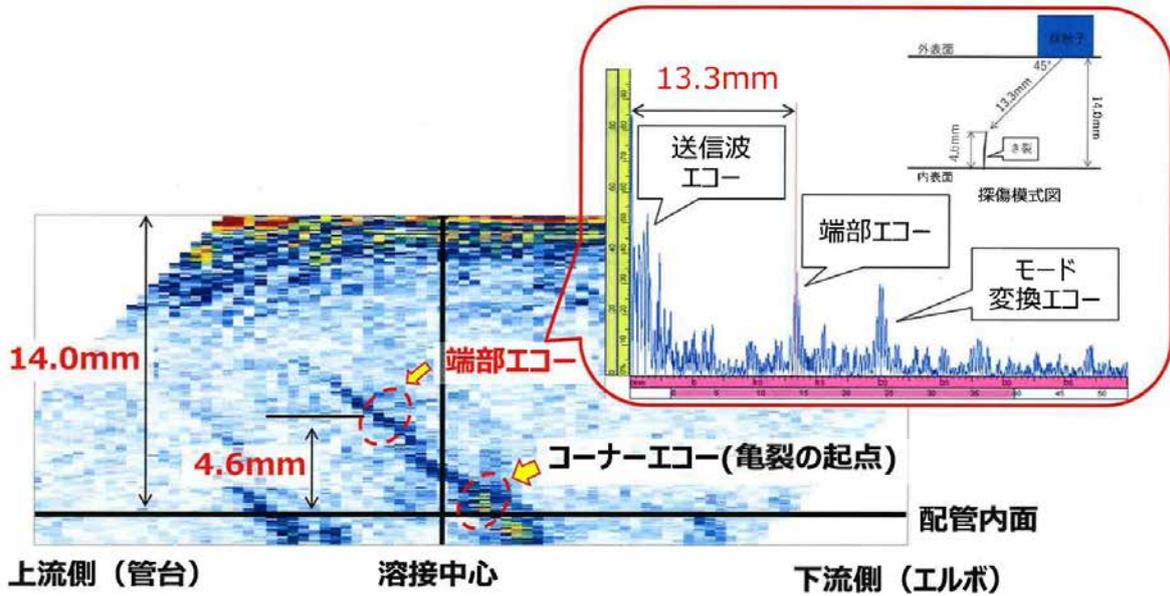


Fig. 2.2 フェーズドアレイ UT 詳細調査結果 (入射角 45°)<sup>4)</sup>  
 「資料提供：関西電力株式会社」

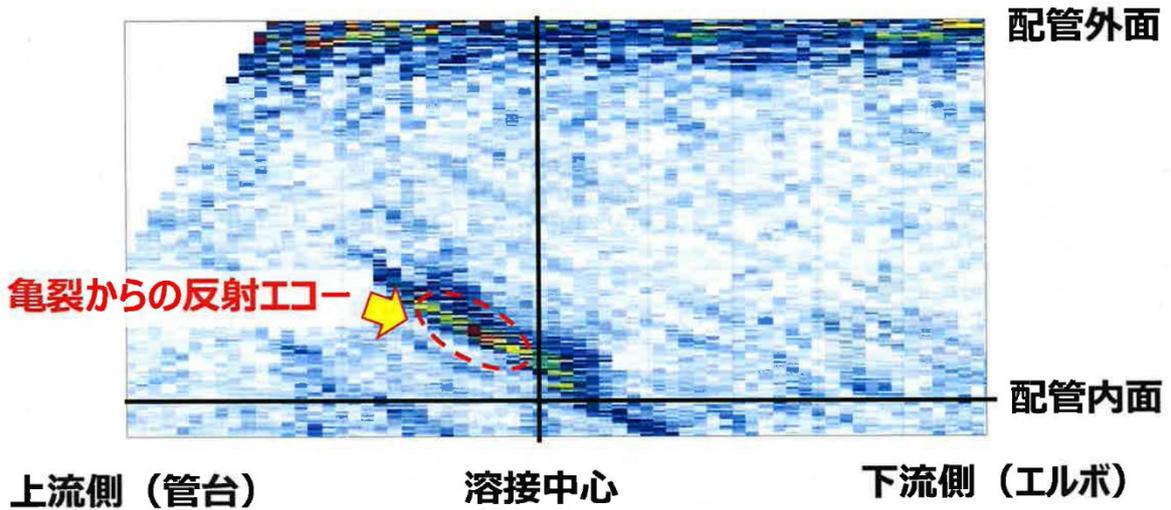


Fig. 2.3 フェーズドアレイ UT 詳細調査結果 (入射角 31°)<sup>4)</sup>  
 「資料提供：関西電力株式会社」

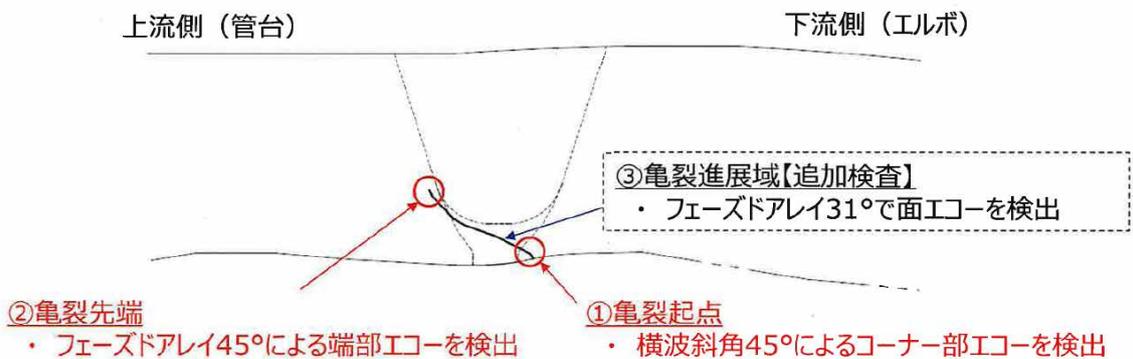


Fig. 2.4 追加検査後に推定された亀裂形状<sup>4)</sup>  
 「資料提供：関西電力株式会社」

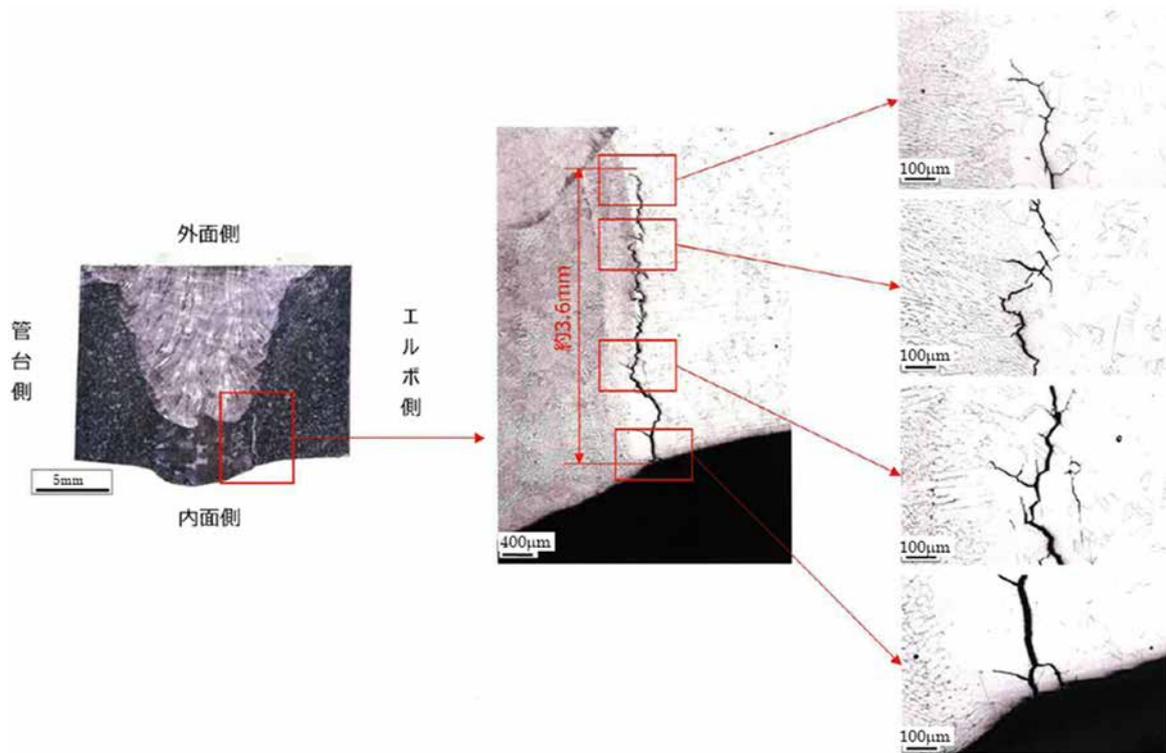


Fig.2.5 亀裂部切断調査による断面マクロ・ミクロ観察の結果<sup>5)</sup>  
「資料提供：関西電力株式会社」

### 3. 超音波シミュレーションによる粒界割れの解析

#### 3.1 解析方法

超音波シミュレータには、その手法として FEM に基づくものとレイトレース (Ray trace) 法に基づくものがあり、それぞれ著名な商用超音波シミュレータが存在する。FEM に基づく超音波伝搬解析では、体系を微小な要素に分割し、各要素における超音波伝搬を構成材料の弾性特性に基づき逐次解析することにより、超音波の縦波、横波を常時追跡するとともに、境界面における屈折やモード変換などの現象を原理的にすべて導出できる。したがって、解析体系によっては膨大な解析時間を要するが、発生している現象の解明のためには超音波伝搬現象を漏れなく追跡できる利点がある。一方、レイトレース法は、その名の通り音を光線追跡のように捉えて解析するもので、点源から複数の音線を発生させ、幾何光学の原理に基づき境界面での屈折や反射現象などの音線の変化を解析して、波面の進路と到達時間を追跡するものである。そのため、FEM に基づく解析と比較して解析時間が短く済む一方、境界面で解く現象を選択して解析する場合もあるため、解析者が想定せずに選択しなかった現象は見落とされてしまう可能性がある。

本研究では、現象を漏らさずに解析するとともに、その伝搬過程を詳細に確認するため、FEM に基づく超音波シミュレータである、伊藤忠テクノソリューションズ製 ComWAVE<sup>1)</sup>を採用した。なお、ComWAVE では超音波伝搬のような動的解析問題を取り扱うため、陽解法が採用されている。

大飯発電所 3 号機の粒界割れ事象を対象とした超音波探傷試験を模擬した解析の基本体系を Fig. 3.1 に示す。加圧器スプレイライン配管の溶接部及びその周辺部を 2 次元断面で解析する体系とした。当該部の配管仕様としては、材料は実機と同じ SUS316 とし、配管肉厚を 13.5 mm とした。また、溶接金属部初層はタングステン不活性ガス (TIG) 溶接で、2 層目以降は被覆アーク溶接で施工されており<sup>4)</sup>、その模擬方法は後述する。また、亀裂は TIG 溶接金属部の溶接境界に沿って直線状に配置し、亀裂深さは実機切断後の評価値<sup>6)</sup>である 4.4 mm とした。超音波の伝搬挙動には溶接金属部の結晶構造の影響があり、特にオーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属部ではその影響が大きいことが知られている<sup>7)</sup>。本研究では、溶接金属部での超音波の伝搬状況を確認するため、配管の曲がりには考慮せずに直管の形状として、フェーズドアレイセンサは常に配管に密着する体系とした。

Fig. 3.2 は Fig. 2.5 中の断面マクロ観察の図を拡大したものを示している<sup>5)</sup>。この断面写真から被覆アーク溶接金属部にはオーステナイト系ステンレス溶接金属の特徴である柱状晶の組織が確認でき、その生成過程を以下のように推測した。まず、柱状晶組織は溶接のパスごとに構成されているが、溶接金属部全体としては、図中に黄色実線矢印で示すように、柱状晶組織全体としてやや右上方向に傾いている。その傾きは、溶接中心線 (黄色破線) に対し時計回りに 10°程度であった。当該部の溶接は現地溶接で実施されているが、Fig. 2.1 の視野 A-A の図に示されているように加圧器スプレイ管が 1 次冷却材管に斜めに配置されていることから、溶接作業は加圧器スプレイ管が斜めの状態で行われたものと考えられる。すなわち、Fig. 3.2 の配管のエルボ側が管台側より位置的に高い状態で溶接されたと考えられ、溶接作業時の作業員

の姿勢や重力などの影響で溶接パスが図中左下側に傾いたことで、その後形成される柱状晶の全体の角度が逆に右上側に傾いたものと考えられる。また、溶接裏波部（図中下側の配管内表面から垂れ下がった部分）の形状は裏波の下方向への凸形状が実線矢印の逆方向に傾いているが、これは重力の影響によるものと考えられる。すなわち、裏波の傾向も、柱状晶方向が溶接時の傾きの影響を受けたことを示唆しているものと考えられる。

このような溶接金属部では、柱状晶の長軸方向と短軸方向とで音速差が生じることが知られており、Ogilvyによりそのモデル化方法が提案されている<sup>8,9)</sup>。ComWAVEではOgilvyモデルに基づき溶接金属部の柱状晶組織影響を考慮可能な解析機能を有し、その機能によって設定した柱状晶組織の長軸方向をFig. 3.3に示す。図中のそれぞれの赤い矢印が柱状晶の長軸方向を示している。本研究では、被覆アーク溶接金属部における溶接中心軸と、柱状晶異方性分布を定義する対称軸のなす角度（以下、対称軸角度という）を $\varphi$ とし、これをパラメータとして $\varphi = +10^\circ, 0^\circ, -10^\circ$ （時計回り方向を正）の解析モデルを作成した。Fig. 3.2の断面写真と比較すると $\varphi = +10^\circ$ のケースが実機の柱状晶に近い。この溶接金属部の音響特性及び柱状晶モデルの詳細は付録1に記す。

一方、TIG溶接金属部の結晶方位はFig. 3.2の紙面に対して垂直方向になっていたと報告されている<sup>5)</sup>。今回の解析体系は2次元としたため、TIG溶接金属部は実質的に等方な組織とみなせる。また、溶接金属部の超音波伝播解析では超音波の減衰も重要な因子となるが、今回の大飯発電所3号機の粒界割れの検査では超音波減衰に関する情報は掲載されていないため、考慮しないこととした。

フェーズドアレイセンサの入力パラメータと設定根拠をTable 3.1に示す。設定根拠に示すComWAVEテンプレートに関しては、ComWAVEの有するアレイ振動子テンプレートを利用しており、そのモデルをFig. 3.4に示す。そのほかの設定根拠は表中に示す参考文献から引用している（一部は付録2に記載）。

次に、フェーズドアレイリニアスキャンのスキャンパターンをFig. 3.5に示す。この図に示すアレイセンサの中心位置を図中の×印で示しており、リニアスキャンでアレイセンサを移動させる位置を赤丸印で示している。各々の赤矢印がリニアスキャンの1回の超音波伝播解析の超音波ビームの中心ラインを示し、矢印先端が超音波ビームの収束点を示している。1回の超音波伝播解析の完了後にフェーズドアレイセンサを1.5 mmピッチで横方向に移動させ、次の赤矢印の位置で解析を行い、これをスキャン回数分繰り返す。この図では17回の解析を実施するパターンを示している。これらのスキャン回数分の結果から、1枚のBスコープ2次元像を算出している（付録3にBスコープ2次元像の作成方法を示す）。

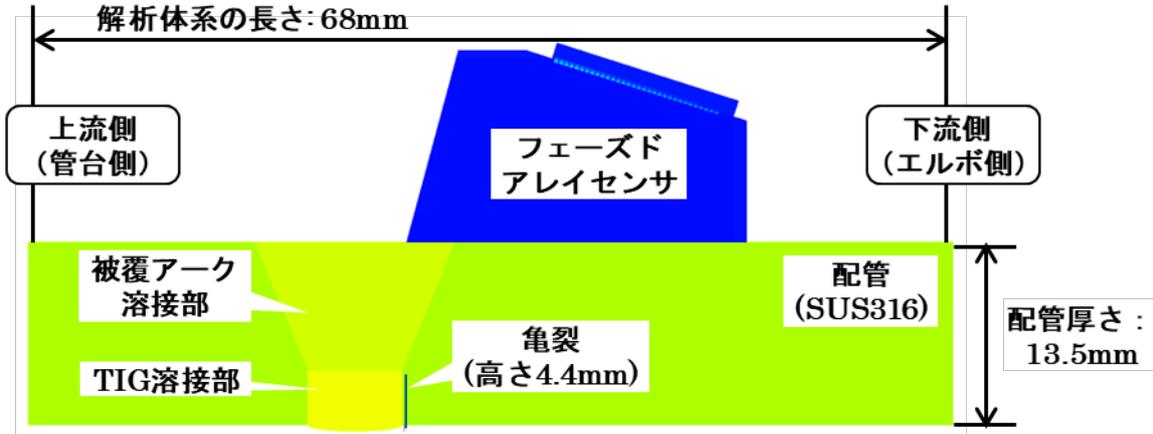


Fig.3.1 加圧器スプレイライン配管溶接部の解析体系

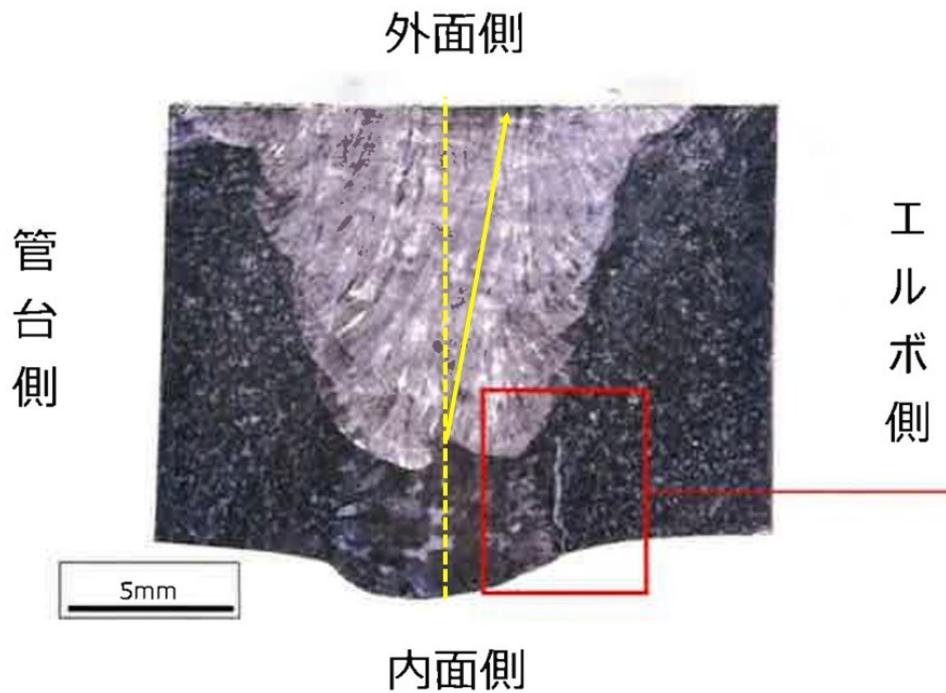
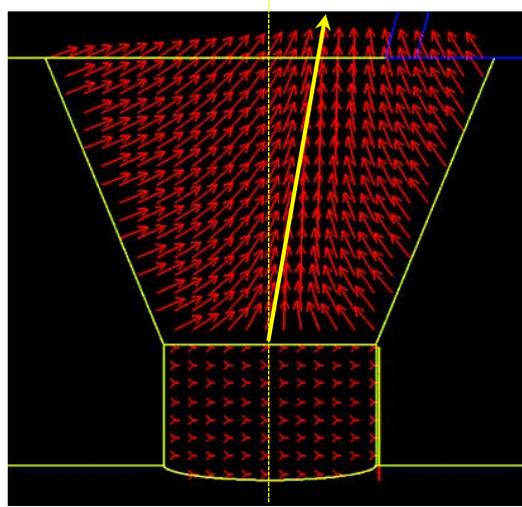
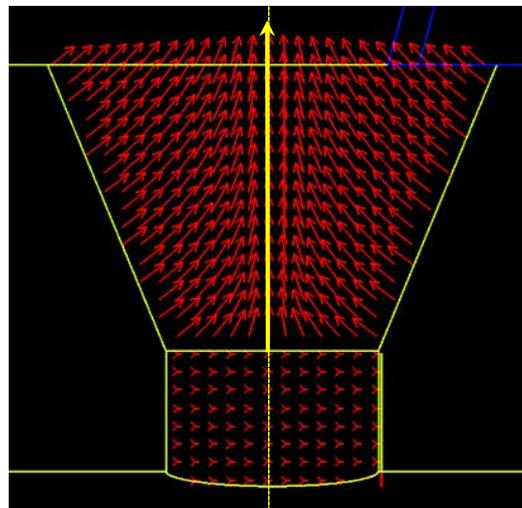


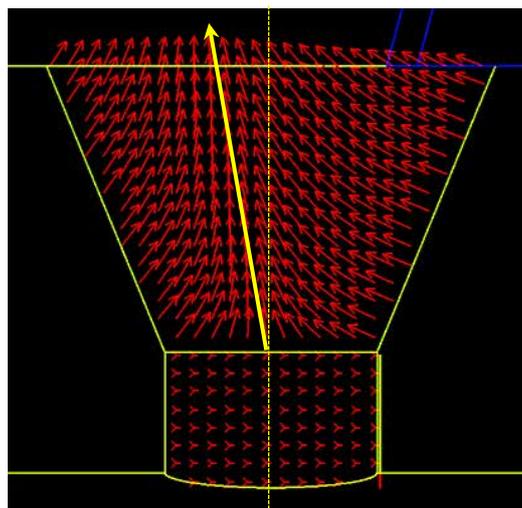
Fig. 3.2 亀裂部の断面写真<sup>5)</sup> (黄色線追記、破線：溶接中心、実線：柱状晶方向) 「資料提供：関西電力株式会社」



(1)  $\varphi = +10^\circ$



(2)  $\varphi = 0^\circ$



(3)  $\varphi = -10^\circ$

Fig.3.3 配管溶接金属部の柱状組織の解析モデル  
(点線：溶接中心、矢印：柱状晶対称軸の方向)

Table 3.1 フェーズドアレイセンサの入力パラメータと設定根拠

| No. | 入力パラメータ            | 入力値    | 単位     | 設定根拠                        |
|-----|--------------------|--------|--------|-----------------------------|
| 1   | 超音波の種類             | 縦波     | —      | Ref. 4)                     |
| 2   | 超音波の周波数            | 10     | MHz    | Ref. 3)から推定 (付録2参照)         |
| 3   | 振動子の数              | 32     | —      | Ref. 3)                     |
| 4   | 振動子長               | 0.35   | mm     | ComWAVEテンプレート               |
| 5   | 振動子高さ              | 0.2    | mm     |                             |
| 6   | 振動子幅               | 8      | mm     |                             |
| 7   | 振動子傾斜度             | 69.3   | ° または度 |                             |
| 8   | 振動子設置面の長さ          | 12.75  | mm     |                             |
| 9   | 振動子ピッチ             | 0.4    | mm     |                             |
| 10  | クサビ長               | 25     | mm     |                             |
| 11  | クサビ幅               | 15     | mm     |                             |
| 12  | クサビ前方傾斜度           | 15     | ° または度 |                             |
| 13  | クサビ高さ              | 6.54   | mm     |                             |
| 14  | クサビの縦波音速           | 2450   | m/s    | クサビ材料ポリエーテルイミドの音速 (Ref. 10) |
| 15  | クサビの横波音速           | 1050   | m/s    |                             |
| 16  | ビームの屈折角 (配管への入射角度) | 45, 31 | ° または度 | Ref. 4)                     |
| 17  | ビームの収束点            | 13.5   | mm     | Ref. 11)                    |

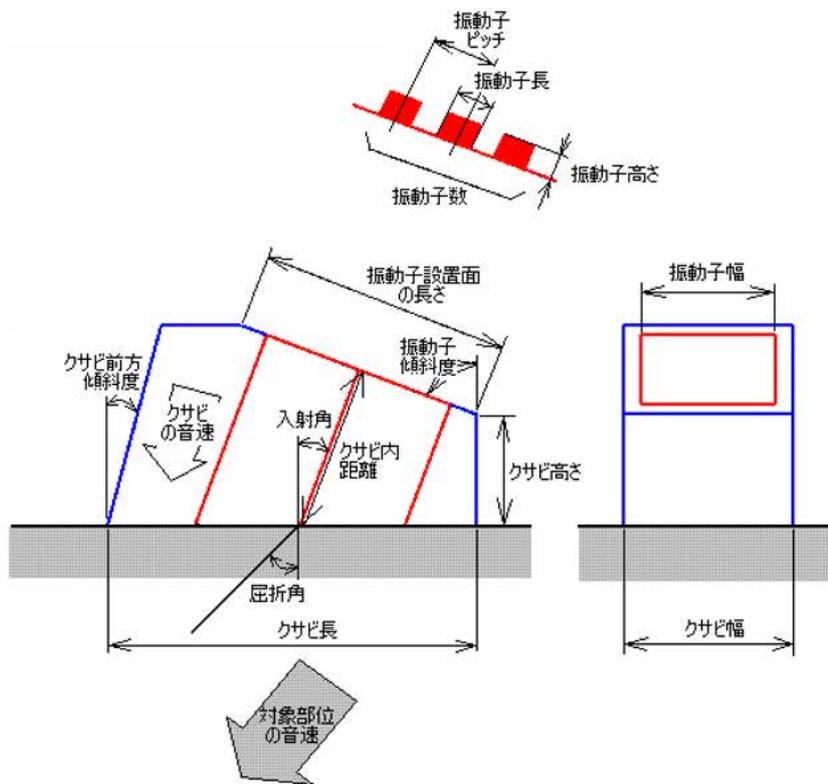


Fig. 3.4 ComWAVE のアレイ振動子テンプレートの入力パラメータ <sup>12)</sup>

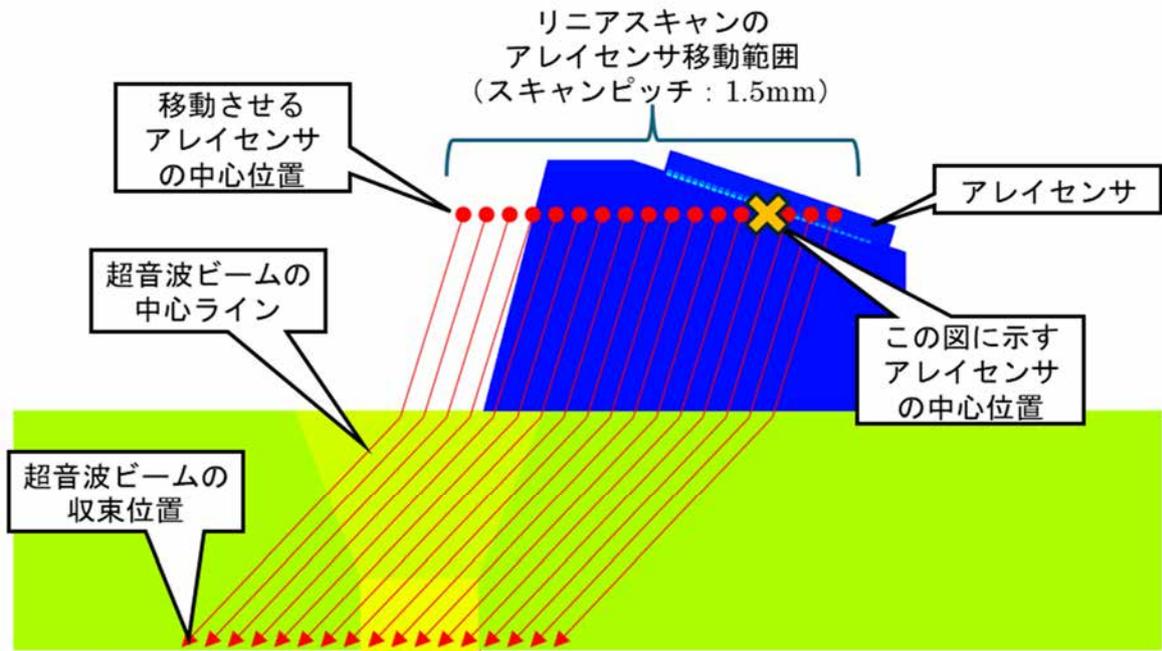


Fig. 3.5 フェーズドアレイリニアスキャンのスキャンパターン  
(入射角45° の場合)

### 3.2 解析結果

#### (1) 縦波斜角 45°のフェーズドアレイリニアスキャンの結果

前述の解析体系におけるフェーズドアレイリニアスキャン（縦波斜角 45°、B スコープ）に関し、被覆アーク溶接金属部の柱状晶異方性の対称軸角度  $\varphi$  を +10°、0°、-10°とした結果を Fig. 3.6 に示す。いずれの場合も、配管内表面における亀裂位置にコーナーエコー（図中①）が現れ、亀裂先端部には強度は小さいものの端部エコー（図中②）が現れている。溶接金属部内には特徴的なエコー（図中③）が現れており、その強度は、 $\varphi = +10^\circ$ で最も強く、 $\varphi = 0^\circ$ の場合では弱く、 $\varphi = -10^\circ$ ではさらに弱くなっている。また、左側の溶接境界の下部に別のエコー（図中④）が現れている。さらに、いずれのケースにおいても、溶接金属部左側の配管部に比較的強いエコー（図中⑤、⑥）が現れている。

まず、図中③～⑤のエコーに関し、解析から得られる波の伝搬過程を追跡することで、エコーの発生原因の同定を試みた。Fig. 3.7 に  $\varphi = +10^\circ$ での各時刻における超音波伝搬挙動を示す。この図では各図にアレイセンサが示されているが、そのアレイセンサの位置はアレイセンサ前方の約 1/3 が溶接金属部の右端に重なっている場合の解析結果である。各図は超音波伝搬挙動の経時変化を示しており、赤色の波が縦波を、青色の波が横波をそれぞれ示している。最初の経過時刻 2.6  $\mu\text{s}$  では縦波、横波ともにアレイセンサの内部にあり、経過時刻 5.4  $\mu\text{s}$  でアレイセンサ右側から縦波、横波が配管に入射している。さらに時刻が経過すると、図中に黒矢印で指している縦波の部分が溶接金属部右側の溶接境界に達し、経過時刻 7.1  $\mu\text{s}$  から 7.8  $\mu\text{s}$  にかけてその縦波が溶接金属部右側から垂直に下方へ伝搬している。さらにその縦波は配管内表面で反射し、経過時刻 8.6  $\mu\text{s}$  から 10.4  $\mu\text{s}$  までに示すように元の伝搬経路を逆に遡ってアレイセンサに入り検出されている。すなわち、入射角 45°で溶接金属部右上部に入った縦波は溶接金属部内で真下方向に偏向し、その結果、配管内表面で全反射してエコーとして検出されている。この現象は柱状晶伝搬エコーとして知られている現象<sup>7)</sup>であり、Fig. 3.6 のエコー③は柱状晶伝搬エコーと同定できる。柱状晶伝搬エコーの詳細は 3.3 節(1)項で考察する。

Fig. 3.8 に  $\varphi = 0^\circ$ のケースにおける超音波伝搬挙動を示す。 $\varphi = +10^\circ$ の場合と同様に、黒矢印で示す縦波の部分が溶接金属部内で真下方向に偏向して配管内表面で全反射してセンサに戻っていた。ただし、Fig. 3.7 (5) 経過時刻：7.8  $\mu\text{s}$  と Fig. 3.8 (5) 経過時刻：8.1  $\mu\text{s}$  の図で、溶接金属部内で真下方向に偏向している縦波と、偏向せずに溶接金属部内を伝搬している縦波を比較すると、 $\varphi = +10^\circ$ の場合に比べ  $\varphi = 0^\circ$ の場合に偏向せずに溶接金属部内を伝搬している縦波が大きく、溶接金属部内で偏向して全反射して戻るエコー強度が弱くなることがわかる。

柱状晶異方性の  $\varphi = -10^\circ$ での超音波伝搬挙動を Fig. 3.9 に示す。この  $\varphi = -10^\circ$ の場合は、 $\varphi = 0^\circ$ の場合よりもさらに溶接金属部内で真下方向に偏向している縦波は少なくなり、設定した 45°の入射角で溶接金属部内を超音波が伝搬する成分が増え、それは裏波部分で反射して、溶接金属部の左側に抜けている。

以上の結果をもとに柱状晶伝搬エコーの伝搬経路と B スコーププロットの間を Fig. 3.10 に示す。この図の B スコーププロットは Fig. 3.6(1)の図であり、この図において一点鎖線（赤）で示す線上を伝搬するよう設定した入射角 45°の縦波は、配管溶接金属部を通過する際に、実線の矢印で示したように下方向に偏向し、配管内表面でほぼ全反射する経路を進み、元の経路

を逆にたどりセンサで検出される。しかしながら、B スコープとしてプロットされる際には偏向現象は考慮されないため、入射方向のままに破線の矢印上にプロットされる。偏向して検出されるエコーがセンサに戻る時間は縦波がその偏向経路を伝搬する時間であり、その時間に相当する破線の先端に表示されることになる。したがって、この図ではちょうど TIG 溶接金属部内にプロットされる結果となる。フェーズドアレイリニアスキャンでは、この図のセンサ位置の前後のリニアスキャンでの超音波伝搬においても、同様の柱状晶伝搬エコーが生じており、それらが図中のエコー③の広がりとなってプロットされる。Fig. 3.6 (2)、(3)との比較からわかるように、この柱状晶伝搬エコー（エコー③）の広がりには溶接金属部の柱状晶異方性及びその対称軸角度によって大きく変化する。

次に Fig. 3.6 のエコー④に関する超音波伝搬経路を確認するため、 $\varphi = +10^\circ$ でのモード変換横波伝搬挙動を Fig. 3.11 に示す。まず、縦波がセンサから配管に入射した際に同時にモード変換により横波が発生する。この波はモード変換横波と呼ばれるが、その波がこの図の (1) 経過時刻  $5.8 \mu\text{s}$  において黒矢印で指している波である。その後、経過時刻  $8.4 \mu\text{s}$  から  $10.0 \mu\text{s}$  において、この横波が縦波より下方向に伝搬し、亀裂のあるコーナー部に向かっていき、配管内表面で反射する際に縦波に再度モード変換されている。そして、縦波になった成分がセンサに戻ってエコーとして検出される。したがって、このエコーは、モード変換横波によるコーナーエコーと考えることができる。

この結果に基づきモード変換された横波によるコーナーエコーとなる超音波の伝搬経路と B スコーププロットの関係性を Fig. 3.12 に示す。この図では Fig. 3.10 と同様に B スコープのプロットラインを一点鎖線（赤）で示しており、縦波が配管に入射した際に同時発生する横波が実線矢印で示すように亀裂のコーナー部に進み、配管内表面で反射する際に再度縦波にモード変換して元の経路を逆にたどり、センサで検出される。B スコープのプロットの際にはモード変換は考慮されないため、入射方向のままに点線矢印上にエコーがプロットされる。また、この伝搬は往路が横波、復路が縦波であり、横波の音速は縦波の音速の約  $1/2$  と遅いため（付録 1 参照）、縦波のみが伝播した場合と比較して往復で約  $1.5$  倍の時間がかかることになる。したがって、図中の破線矢印で表すように配管の外側にコーナーエコーがプロットされることになる。また、このエコーのモード変換横波及び縦波は母材部のみを伝搬するため、エコー①のコーナーエコーやエコー②の端部エコーと同様に溶接金属部柱状晶の影響を受けないエコーであり、その結果、Fig. 3.6 の B スコープ結果において  $\varphi$  がいずれの場合もほぼ同じ位置においてエコーが検出されている。

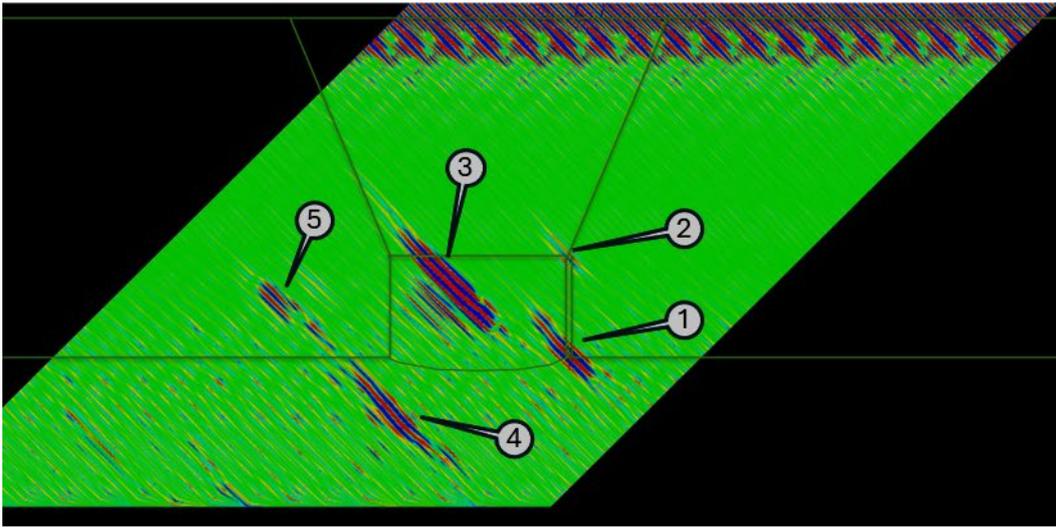
以上のエコー①から④のピーク強度の相対比較を Table 3.2 に示す。この表では  $\varphi = +10^\circ$ でのコーナーエコー強度を基準として、その強度比でそれぞれのピーク強度を示している。まず、①のコーナーエコー、②の端部エコー、④のモード変換横波コーナーエコーは先に記したように溶接金属部を通らないため、 $\varphi$  が異なっても強度に差がみられない。また、端部エコーはコーナーエコーの  $1/4$  から  $1/3$  程度の強度である。一方、柱状晶伝搬エコーは異方性の影響が大きく、その強度は  $\varphi = +10^\circ$ でコーナーエコーの  $3$  倍近くと非常に強いことがわかる。

次に Fig. 3.6 の残りのエコー⑤、⑥に関しそのエコーの原因を論ずる。これら 3 ケースのエコーはそれぞれ  $\varphi$  に依存した固有の原因で発生しており、また、前述した柱状晶による偏向や

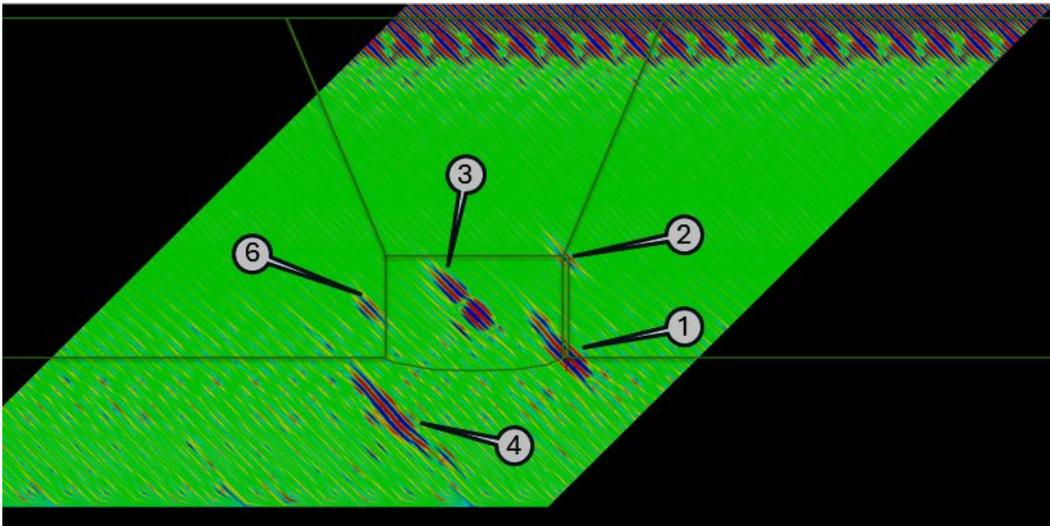
モード変換横波などの組合せで発生している。ここでは、超音波伝搬経路の詳細は示さないが、いずれも伝搬経路の分析に基づいて、原因同定を行った。

$\varphi = +10^\circ$ で見られたエコー⑤について、モード変換横波によるコーナーエコーの伝搬経路と B スコーププロットの関係を図 3.13 に示す。センサから配管に縦波が入射する際にモード変換で横波が発生することは前述の通りで、溶接金属部の真上にセンサが配置された場合、モード変換横波も溶接金属部を伝搬するため、縦波と同様に柱状晶異方性により偏向して伝搬する。その横波が溶接金属部裏波で反射する際に再度モード変換で縦波になり、センサに検出されることで、エコー⑤のように B スコープでプロットされる。

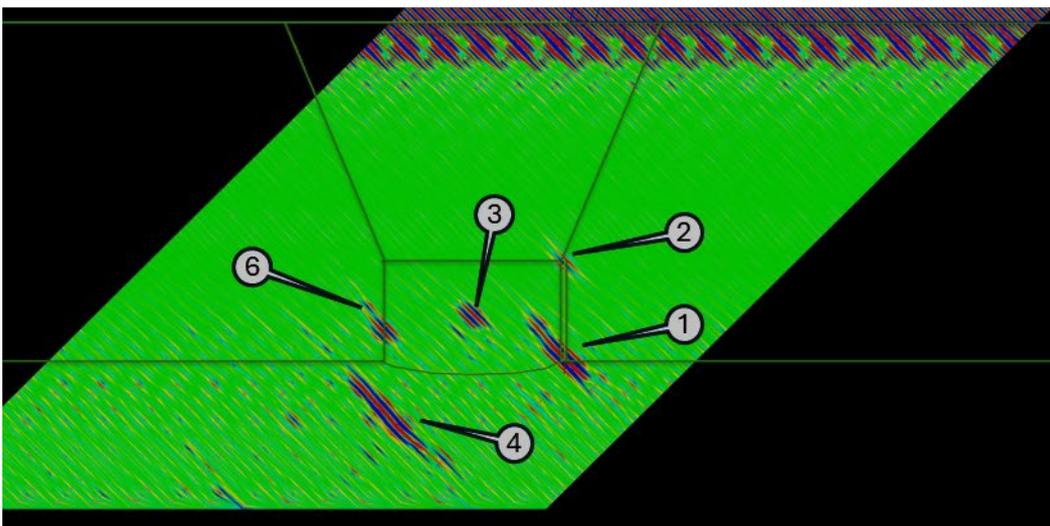
$\varphi = 0^\circ, -10^\circ$ で見られたエコー⑥は、溶接金属部の真上にセンサが配置されている場合に、縦波は溶接金属部で偏向していくが、偏向した縦波が TIG 溶接の左下端に収束し、その部分で回折現象が生じて縦波が円環状に上方へ拡散する。その成分の一部がセンサで検出された信号がエコー⑥であり、偏向が生じている影響で B スコープ表示では位置がずれてプロットされており、TIG 溶接の左側付近にプロットされる結果となっているものである。



(1)  $\varphi = +10^\circ$

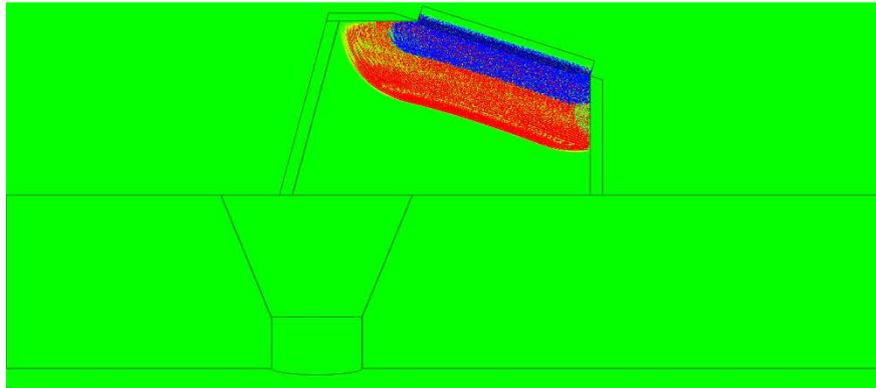


(2)  $\varphi = 0^\circ$

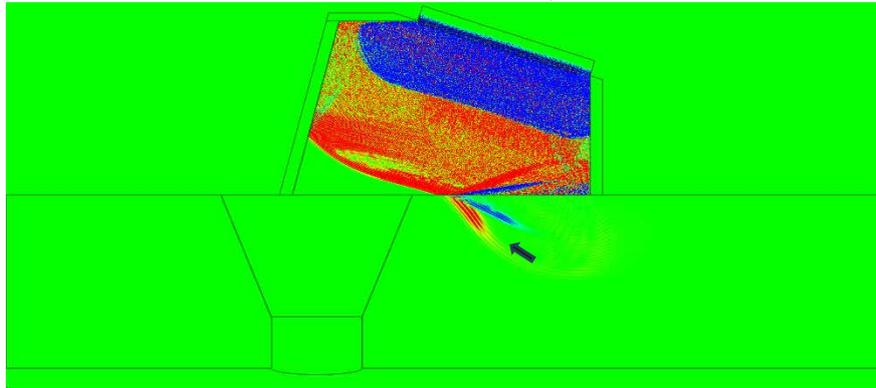


(3)  $\varphi = -10^\circ$

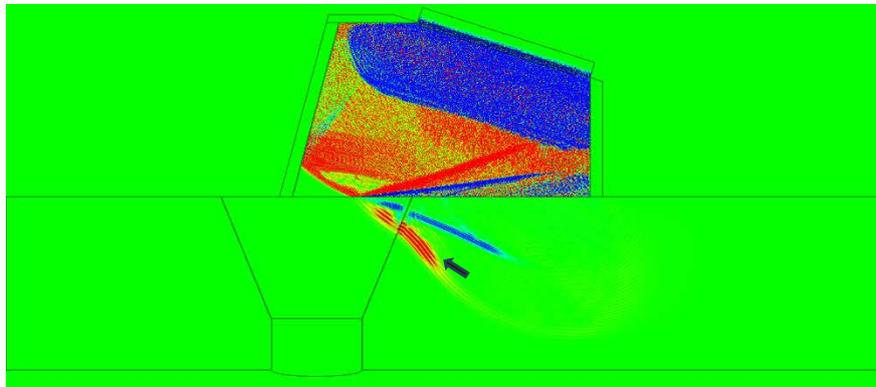
Fig. 3.6 フェーズドアレイリニアスキャンの B スコープ結果 (入射角 :  $45^\circ$ )



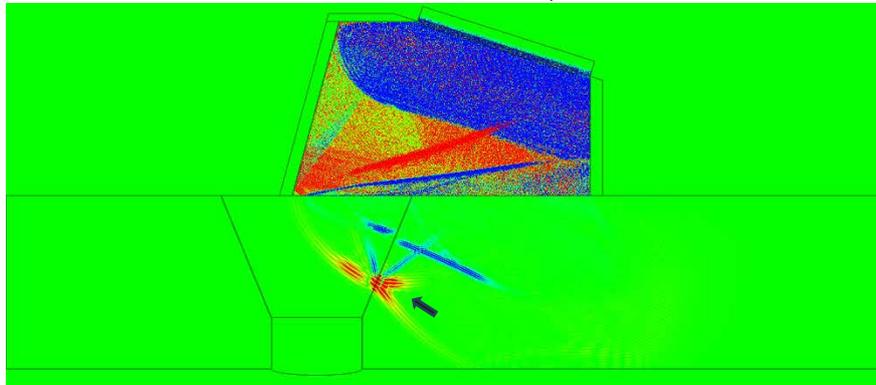
(1) 経過時刻 : 2.6  $\mu$ s



(2) 経過時刻 : 5.4  $\mu$ s

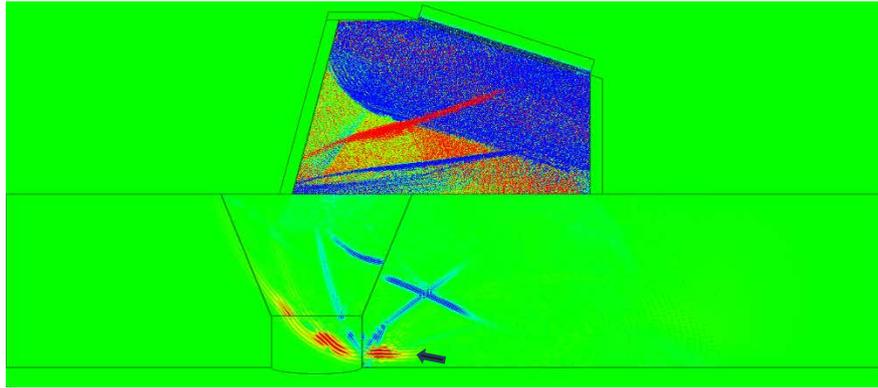


(3) 経過時刻 : 6.2  $\mu$ s

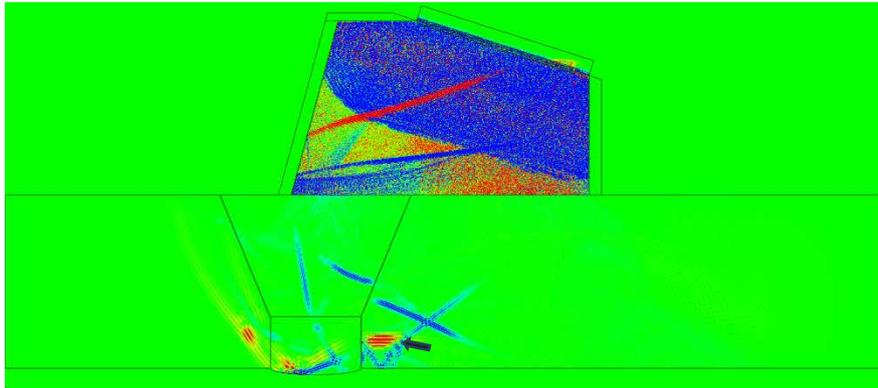


(4) 経過時刻 : 7.1  $\mu$ s

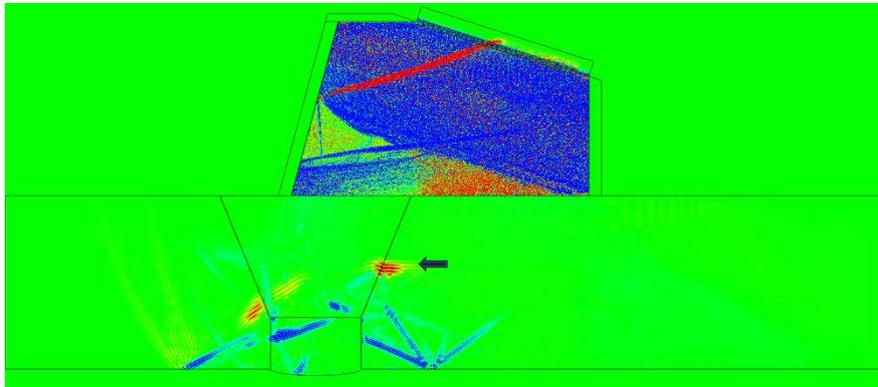
Fig.3.7  $\varphi = +10^\circ$ での伝搬状況 (入射角 :  $45^\circ$ ) (1/2)



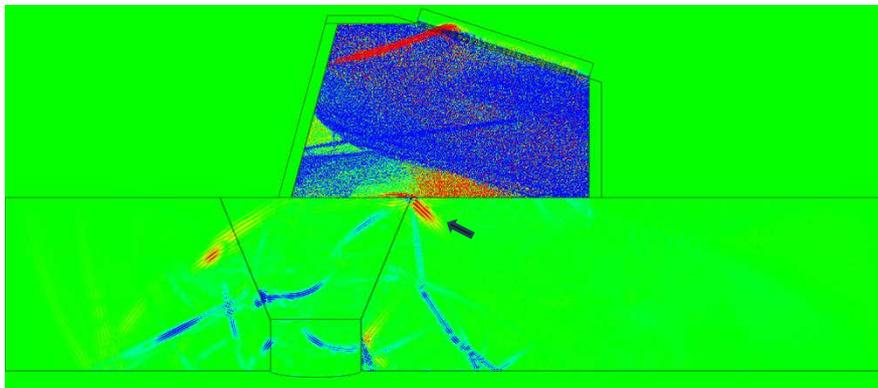
(5) 経過時刻 : 7.8  $\mu$ s



(6) 経過時刻 : 8.6  $\mu$ s

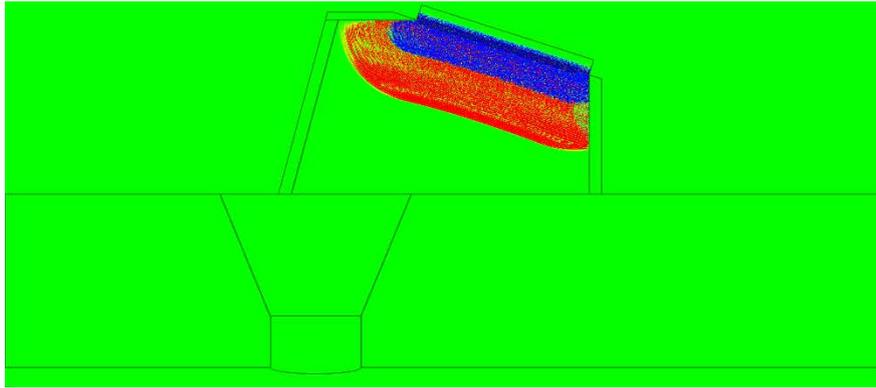


(7) 経過時刻 : 9.8  $\mu$ s

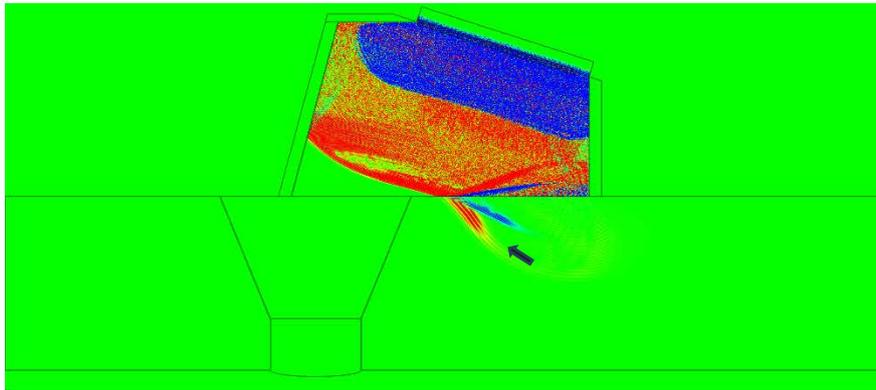


(8) 経過時刻 : 10.4  $\mu$ s

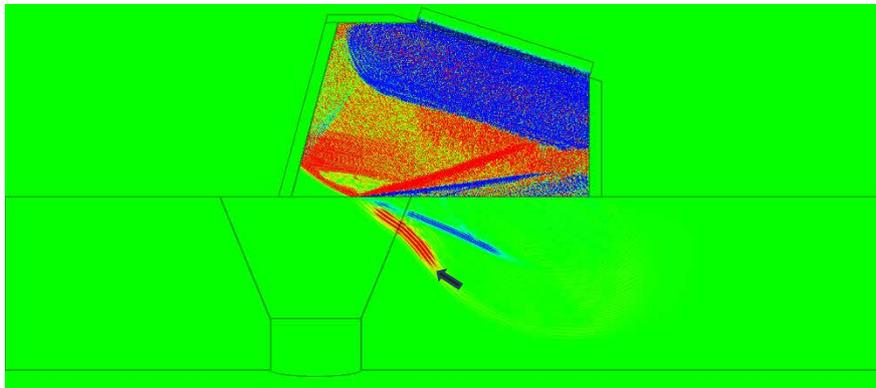
Fig.3.7  $\varphi = +10^\circ$ での伝搬状況 (入射角 :  $45^\circ$ ) (2/2)



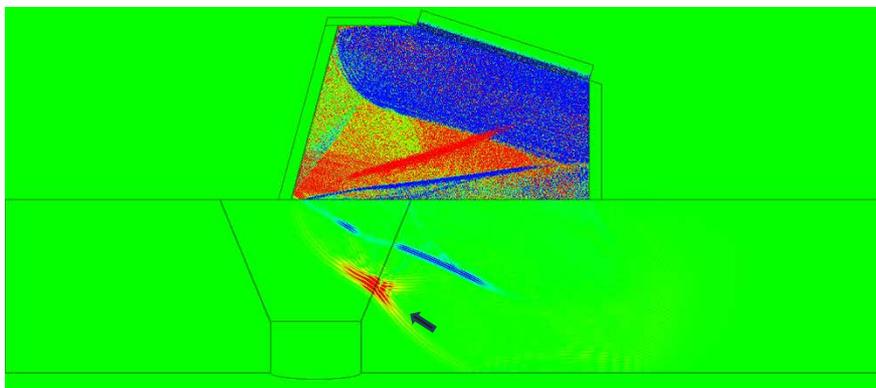
(1) 経過時刻 : 2.7  $\mu\text{s}$



(2) 経過時刻 : 5.4  $\mu\text{s}$

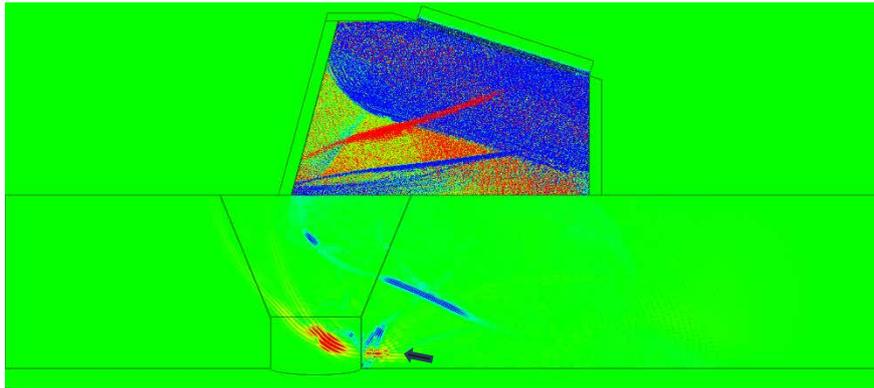


(3) 経過時刻 : 6.2  $\mu\text{s}$

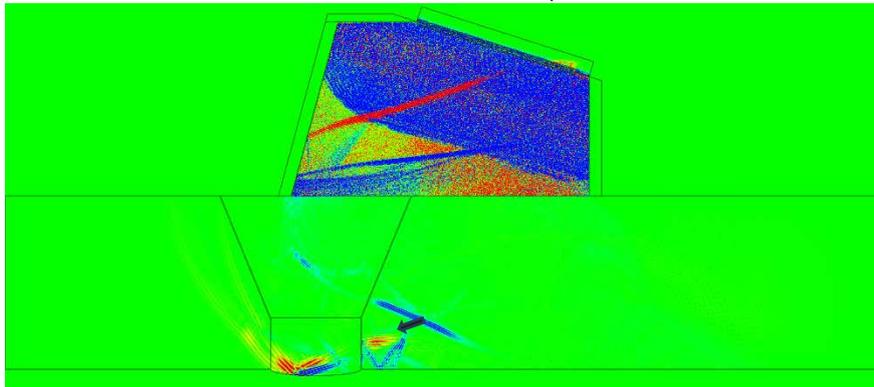


(4) 経過時刻 : 7.1  $\mu\text{s}$

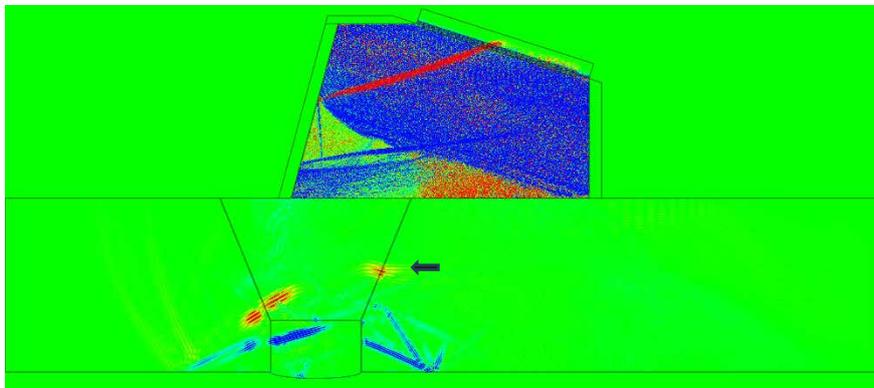
Fig.3.8  $\varphi = 0^\circ$ での伝搬状況 (入射角 :  $45^\circ$ ) (1/2)



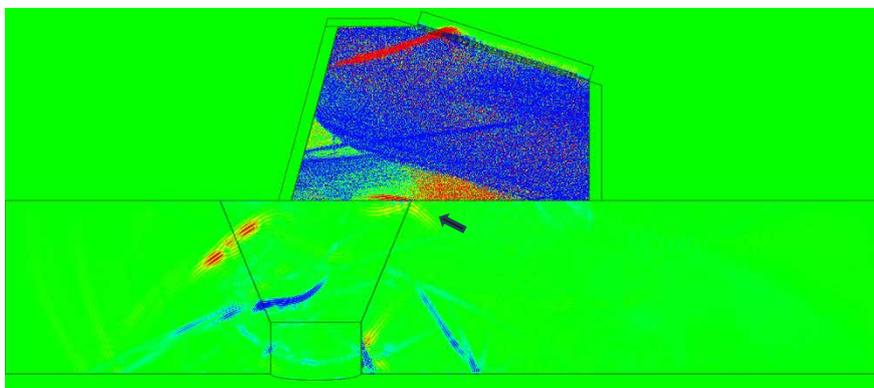
(5) 経過時刻 : 8.1  $\mu\text{s}$



(6) 経過時刻 : 8.7  $\mu\text{s}$

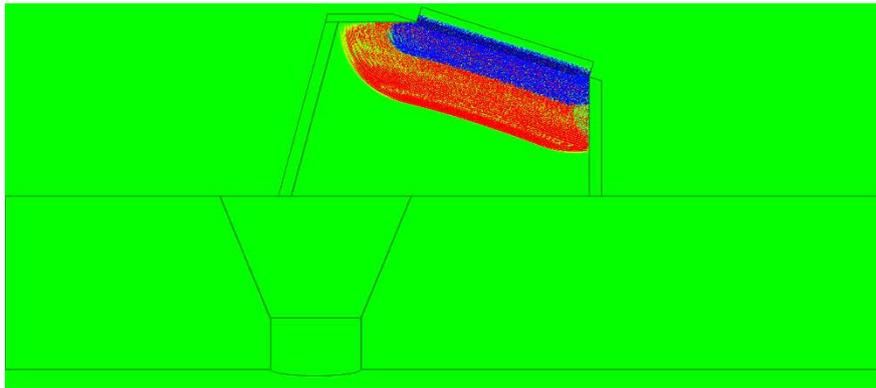


(7) 経過時刻 : 9.8  $\mu\text{s}$

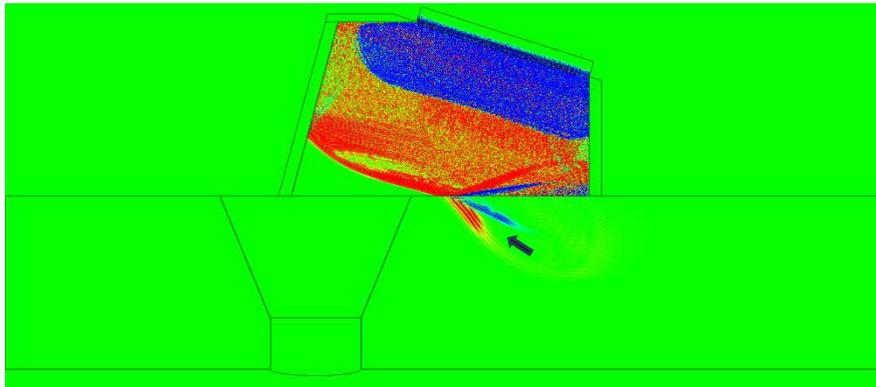


(8) 経過時刻 : 10.8  $\mu\text{s}$

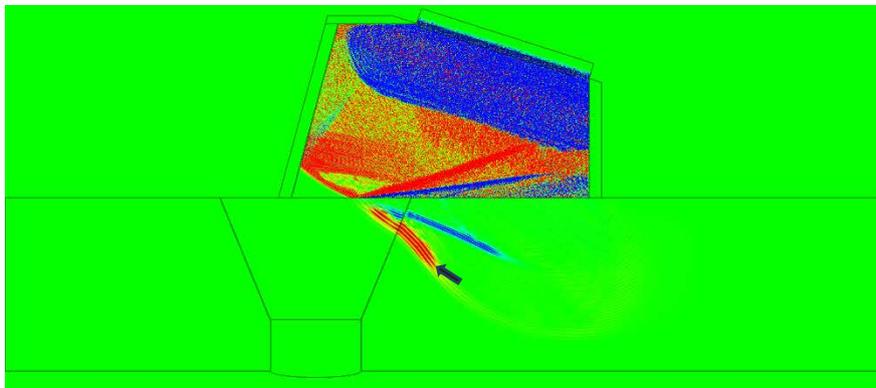
Fig.3.8  $\varphi = 0^\circ$ での伝搬状況 (入射角 :  $45^\circ$ ) (2/2)



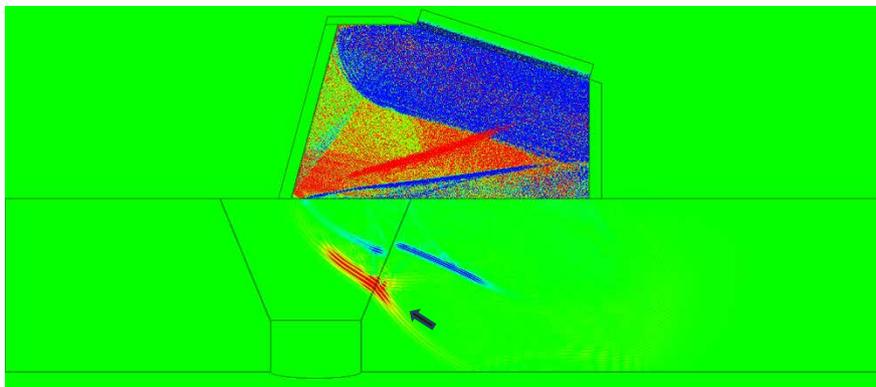
(1) 経過時刻 : 2.7  $\mu$ s



(2) 経過時刻 : 5.4  $\mu$ s

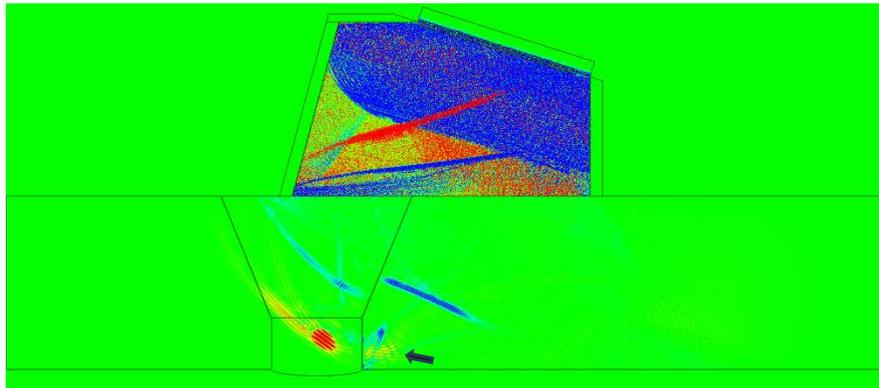


(3) 経過時刻 : 6.2  $\mu$ s

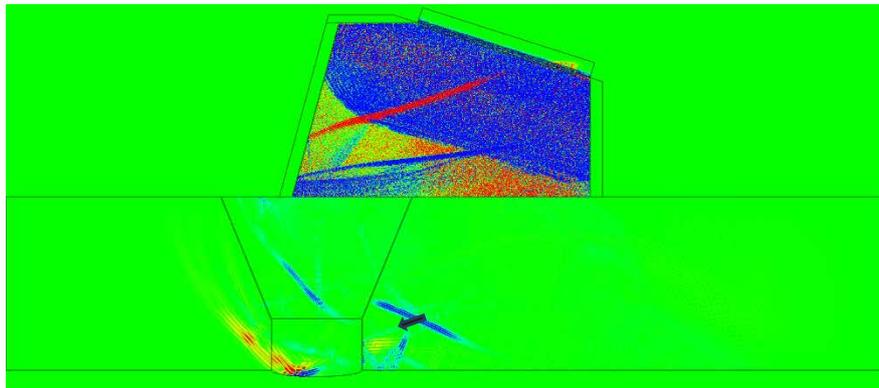


(4) 経過時刻 : 7.1  $\mu$ s

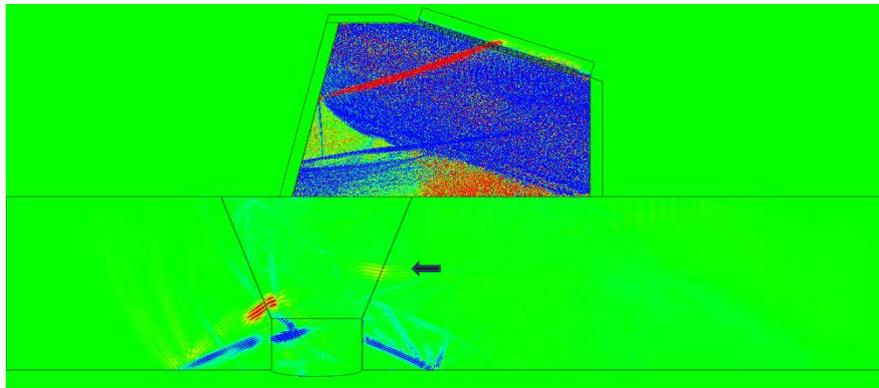
Fig.3.9  $\varphi = -10^\circ$ での伝搬状況 (入射角 :  $45^\circ$ ) (1/2)



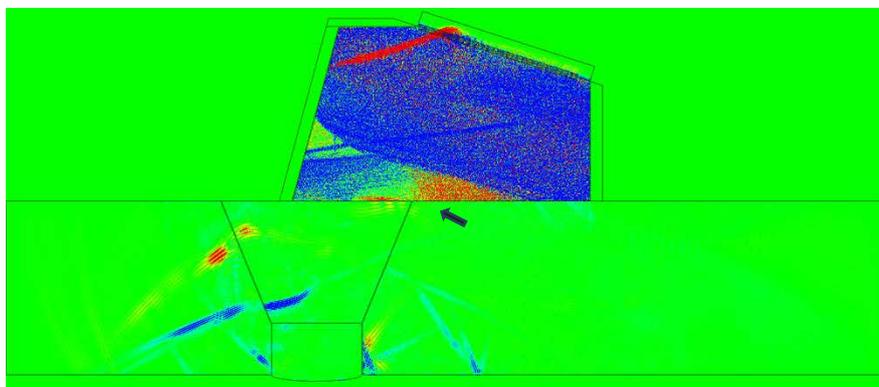
(5) 経過時刻 : 8.1  $\mu\text{s}$



(6) 経過時刻 : 8.7  $\mu\text{s}$



(7) 経過時刻 : 9.8  $\mu\text{s}$



(8) 経過時刻 : 10.8  $\mu\text{s}$

Fig.3.9  $\varphi = -10^\circ$ での伝搬状況 (入射角 :  $45^\circ$ ) (2/2)

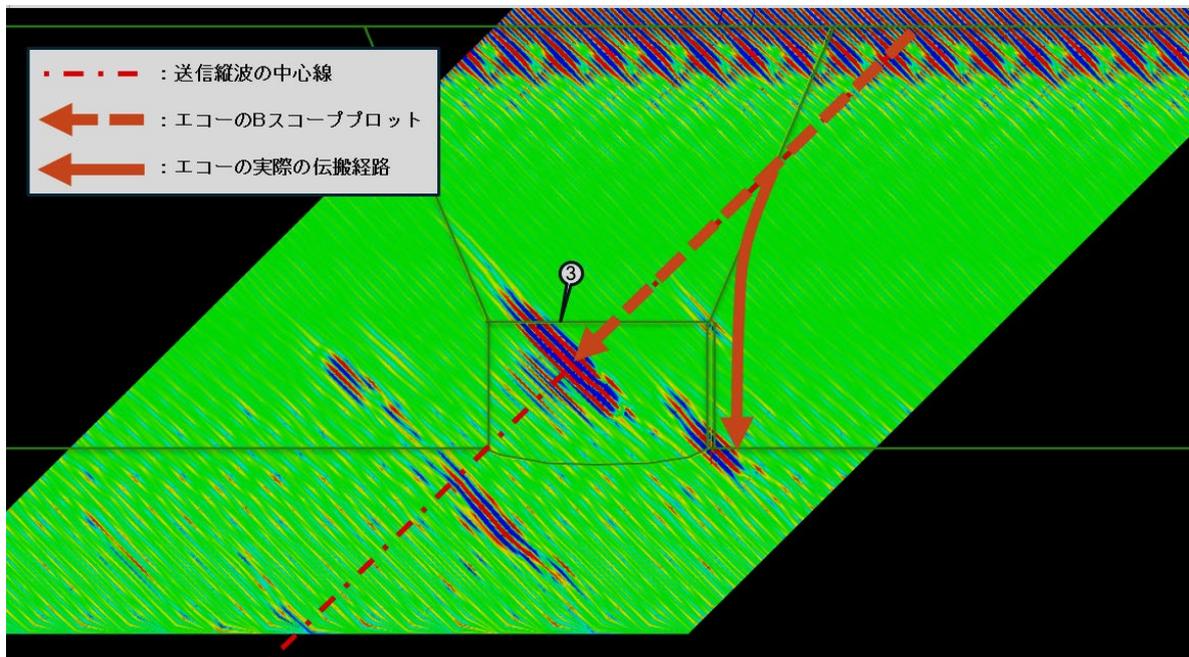
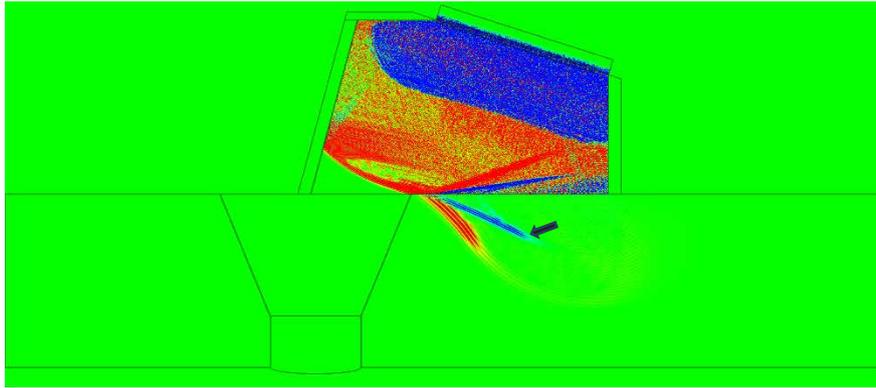
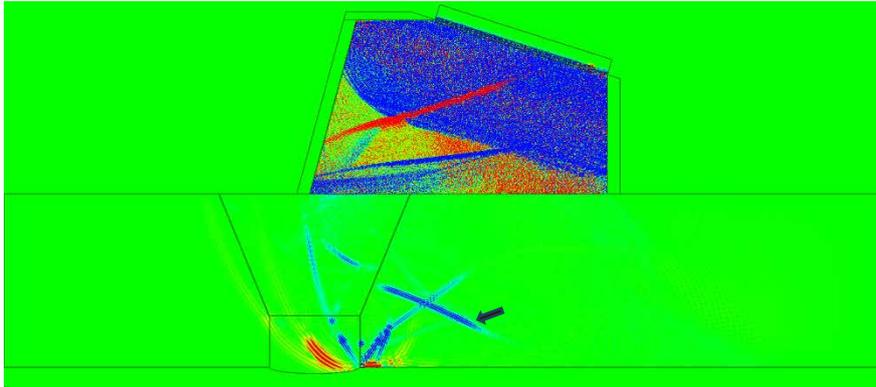


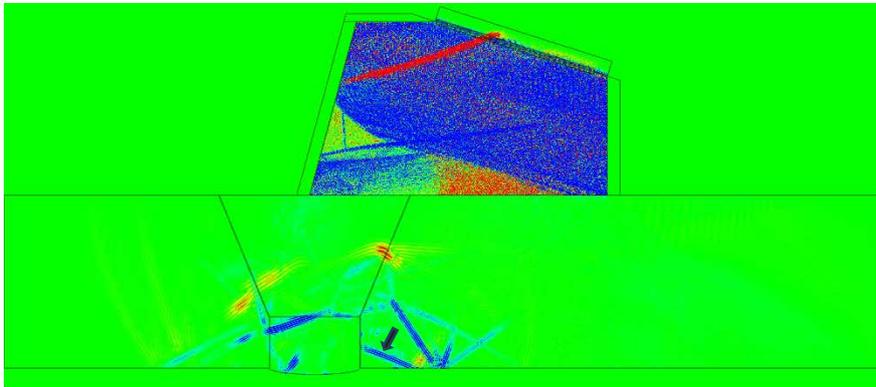
Fig. 3.10 柱状晶伝搬エコーの伝搬経路と B スコーププロットの関係



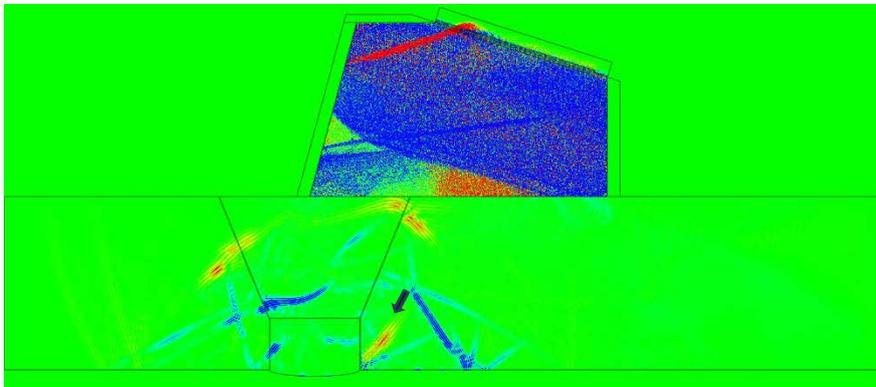
(1) 経過時刻 : 5.8  $\mu\text{s}$



(2) 経過時刻 : 8.4  $\mu\text{s}$

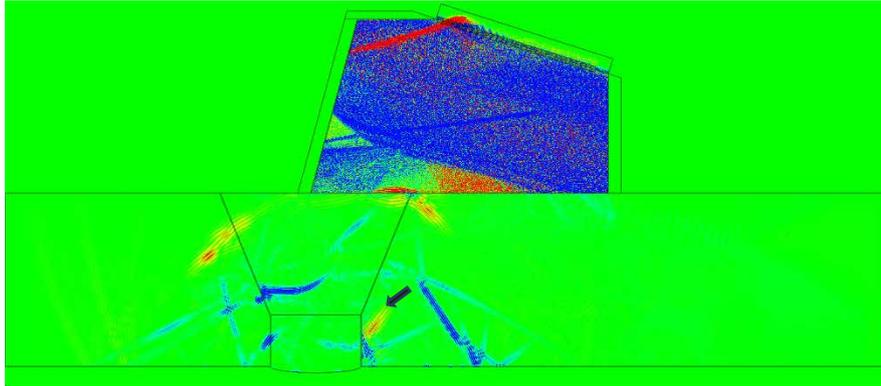


(3) 経過時刻 : 10.0  $\mu\text{s}$

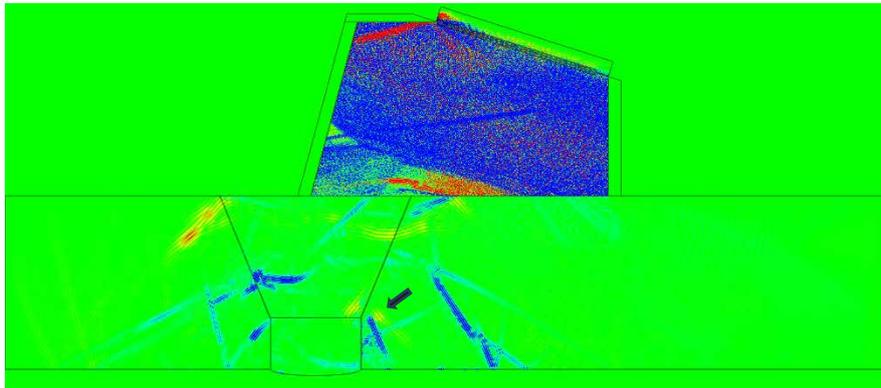


(4) 経過時刻 : 10.6  $\mu\text{s}$

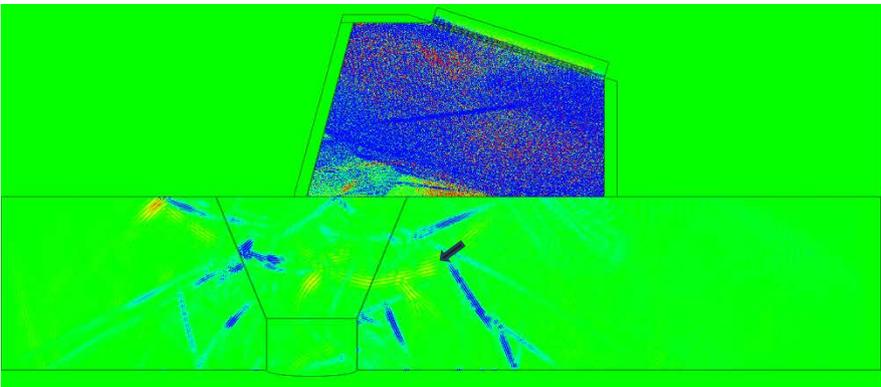
Fig.3.11  $\varphi = +10^\circ$ でのモード変換横波伝搬状況 (入射角:45°) (1/2)



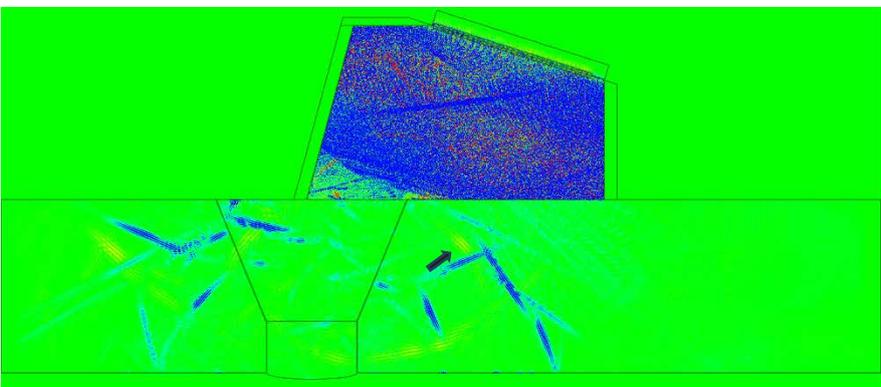
(5) 経過時刻 : 11.0  $\mu\text{s}$



(6) 経過時刻 : 11.2  $\mu\text{s}$



(7) 経過時刻 : 12.1  $\mu\text{s}$



(8) 経過時刻 : 13.1  $\mu\text{s}$

Fig.3.11  $\varphi = +10^\circ$ でのモード変換横波伝搬状況 (入射角:45°) (2/2)

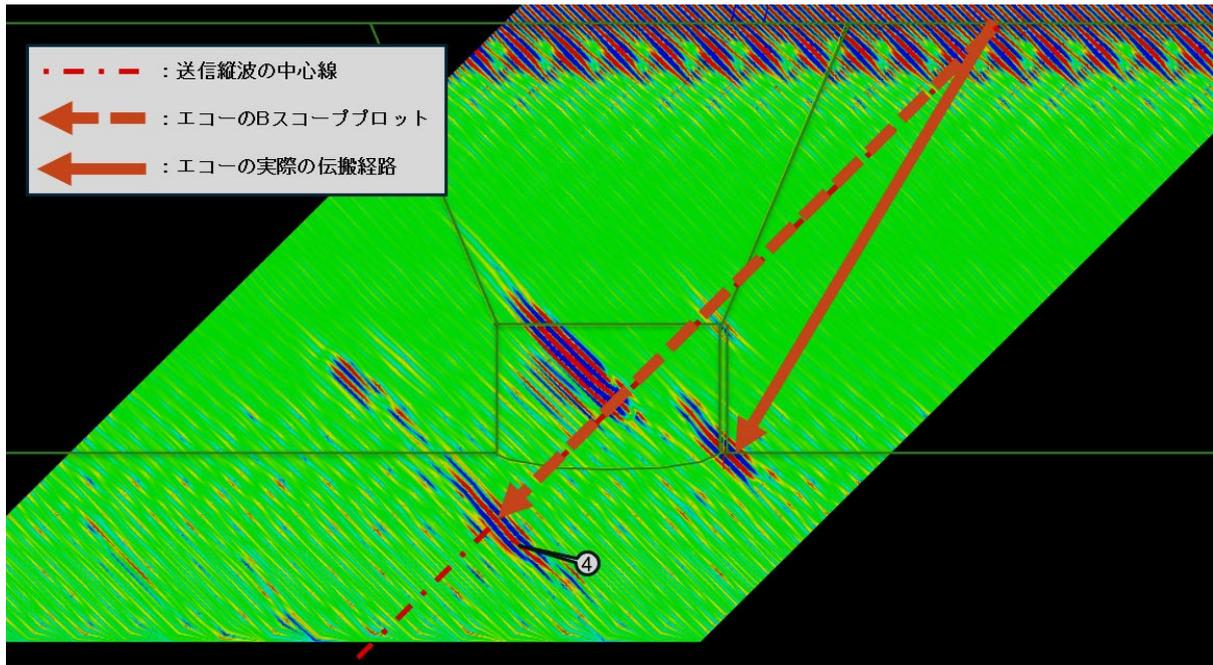


Fig.3.12 モード変換横波によるコーナーエコーの伝搬経路と B スコーププロットの関係

Table 3.2 各エコーピーク強度の相対比較

|                     | $\phi$ |      |      | 異方性の影響 |
|---------------------|--------|------|------|--------|
|                     | +10°   | 0°   | -10° |        |
| ①コーナーエコー            | 1 (基準) | 0.96 | 1.04 | 無      |
| ②端部エコー              | 0.28   | 0.30 | 0.31 | 無      |
| ③柱状晶伝搬エコー           | 3.15   | 1.48 | 0.56 | 大      |
| ④モード変換横波<br>コーナーエコー | 0.85   | 0.78 | 0.89 | 無      |

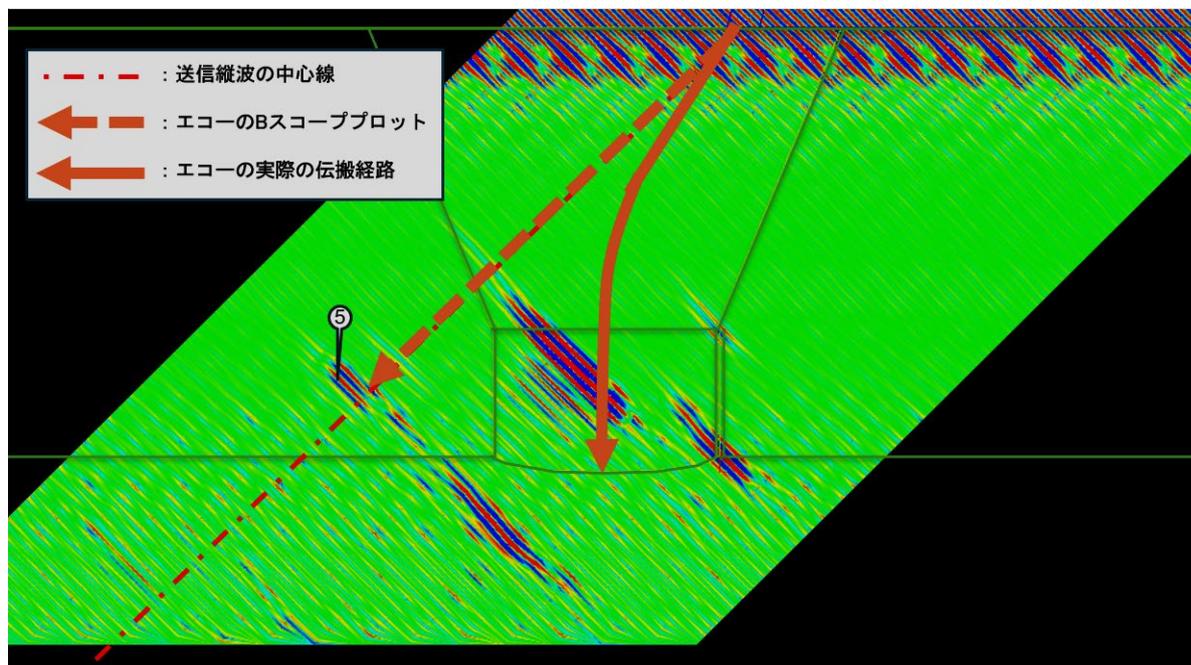


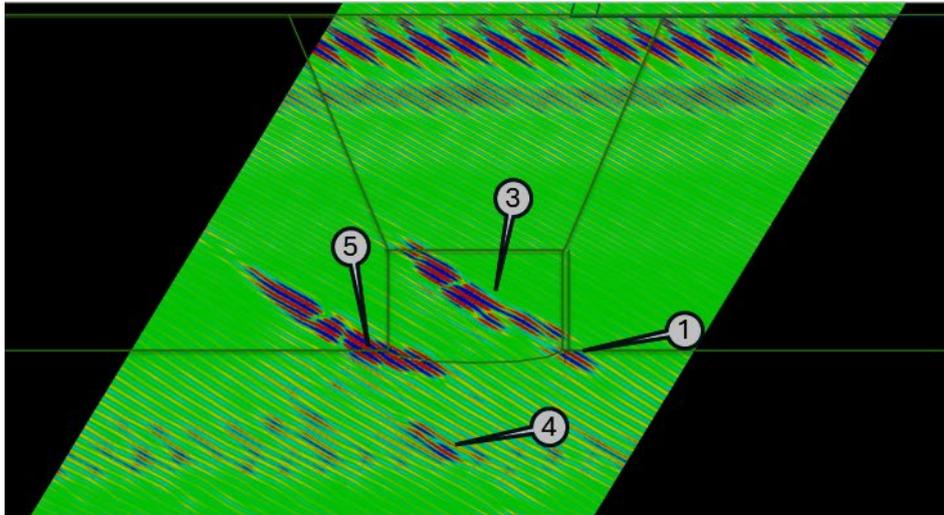
Fig.3.13 モード変換横波による柱状晶伝搬エコーの伝搬経路とBスコーププロットの関係

## (2) 縦波斜角 31°のフェーズドアレイリニアスキャンの結果

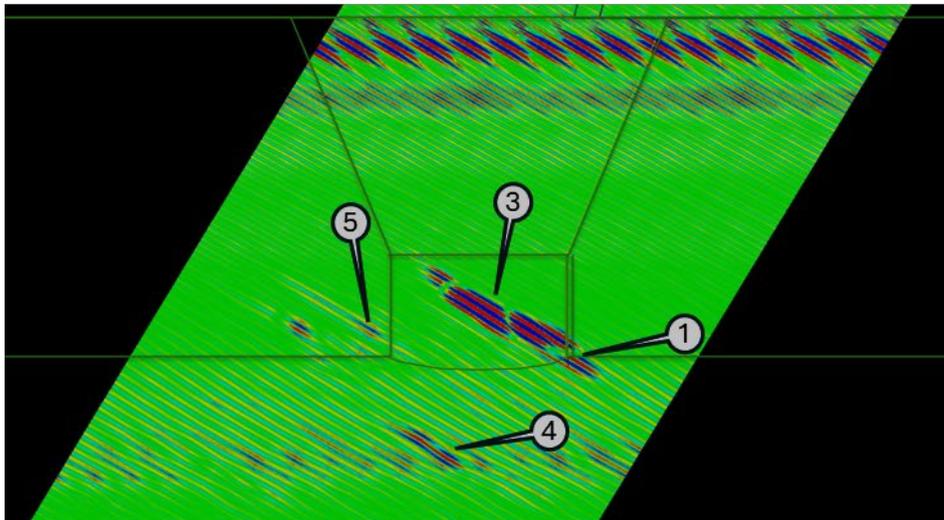
フェーズドアレイリニアスキャンの縦波斜角 31°での B スコープ結果を Fig. 3.14 に示す。この図でも柱状晶異方性の対称軸角度を  $\varphi = +10^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-10^\circ$ とした結果を示している。いずれの場合においても、配管内表面における亀裂位置からのコーナーエコー（図中①）があり、さらにそのエコーが溶接金属部内部に伸びていることがわかる。一方、亀裂の端部エコーは周辺のノイズと強度が同等でわずかに判別できるレベルであった。

溶接金属部内部に伸びているエコー（図中③）に関する  $\varphi = +10^\circ$ の場合の超音波伝搬の挙動を Fig. 3.15 に示す。図中の黒色矢印は、溶接金属部右上部に入射した縦波を示している。その縦波が経過時刻 5.8  $\mu\text{s}$  から 7.3  $\mu\text{s}$  にかけて溶接金属部右上部で真下方向に偏向して、配管内表面に向かっていることがわかる。そして、内表面で反射した縦波が元の経路をたどり、センサに戻っている。したがって、この偏向した波によるエコーは前節で示した柱状晶伝搬エコーであることがわかる。Fig. 3.14 の B スコープにおいては、亀裂のコーナーエコーと柱状晶伝搬エコーがほぼ繋がって検出されているとともに、その伸びている長さが柱状晶異方性の対称軸角度によって異なっている。

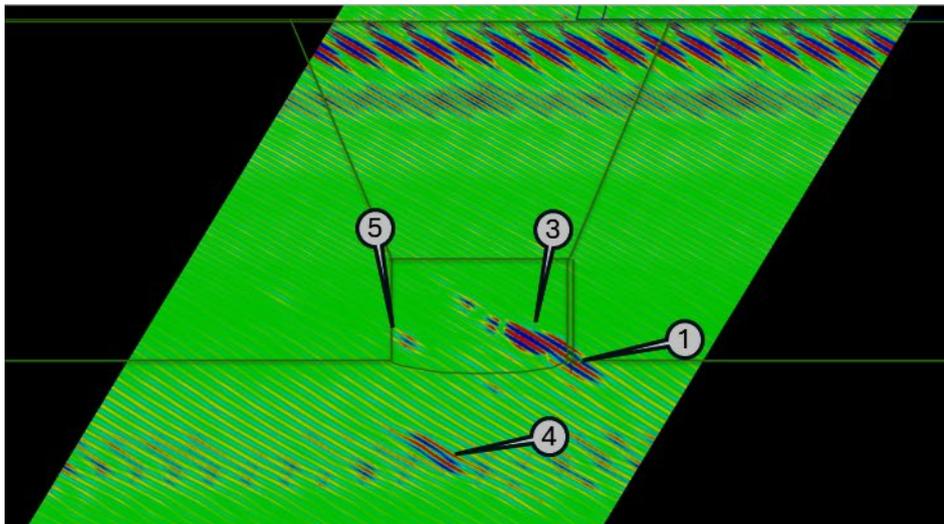
次に Fig. 3.14 の残りのエコーに関しその原因を論ずるが、以下では伝搬経路詳細は示さず、前節での入射角 45°におけるエコーとの類似で以下に記す。まず、エコー④に関しては、入射角 45°におけるエコー④と同じく、モード変換横波によるコーナーエコーである。入射角 45°の場合と同じく溶接金属部の影響を直接には受けないので、 $\varphi$  がいずれの場合も現れている。次にエコー⑤についても、前節で論じた入射角 45°の場合のエコー⑤と同様に、モード変換横波による柱状晶伝搬エコーであると判断できる。



(1)  $\varphi = +10^\circ$

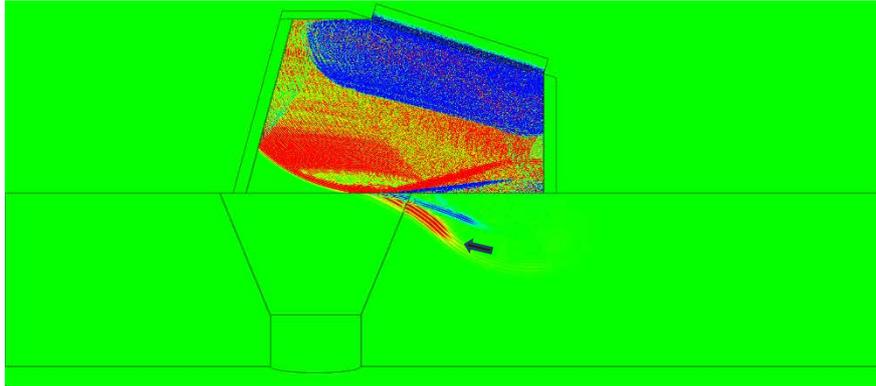


(2)  $\varphi = 0^\circ$

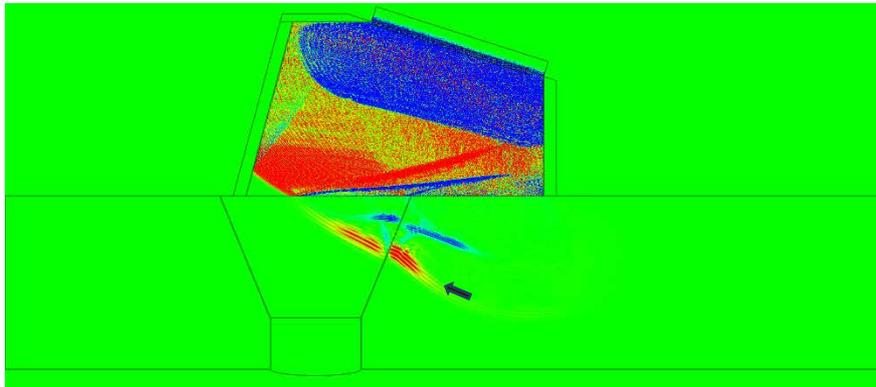


(3)  $\varphi = -10^\circ$

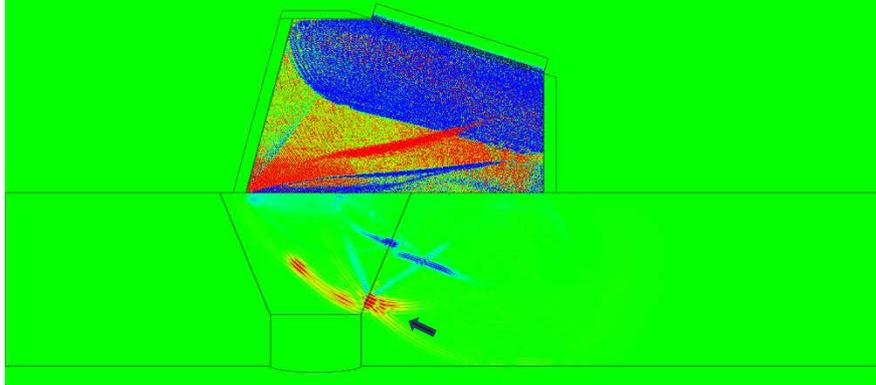
Fig.3.14 フェーズドアレイリニアスキャンの B スコープ結果 (入射角 : 31°)



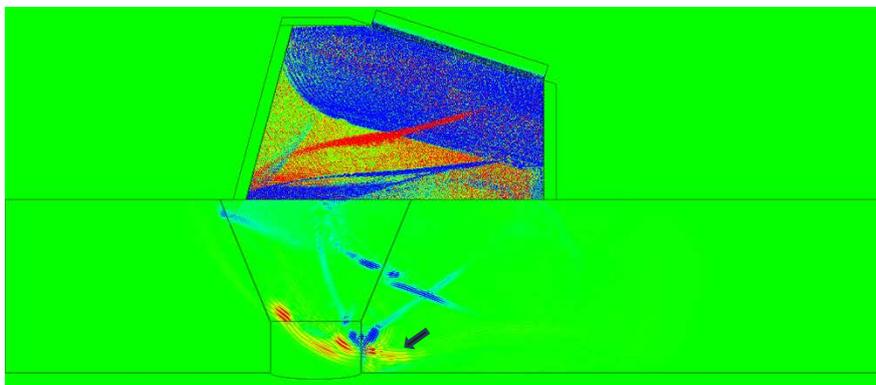
(1) 経過時刻 : 5.8  $\mu$ s



(2) 経過時刻 : 6.4  $\mu$ s

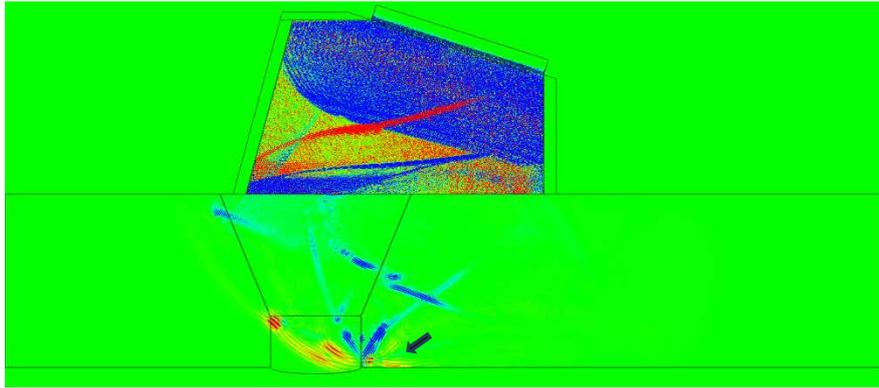


(3) 経過時刻 : 7.3  $\mu$ s

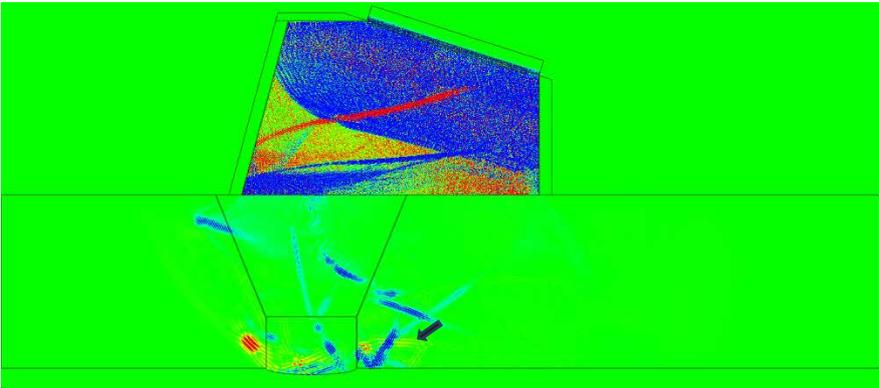


(4) 経過時刻 : 7.9  $\mu$ s

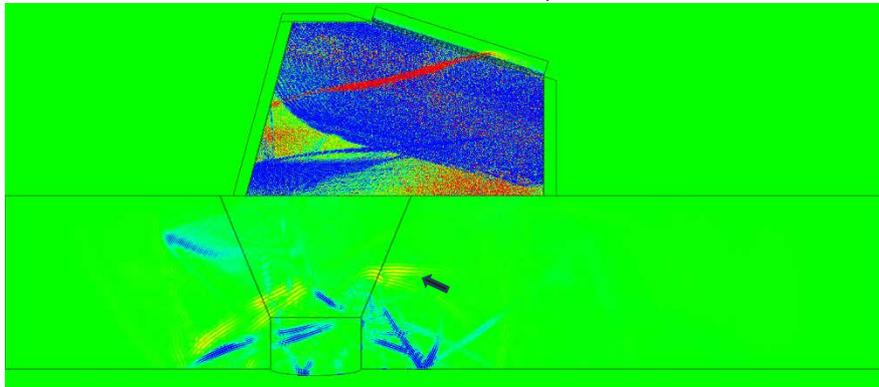
Fig.3.15  $\varphi = +10^\circ$ での伝搬状況 (入射角 :  $31^\circ$ ) (1/2)



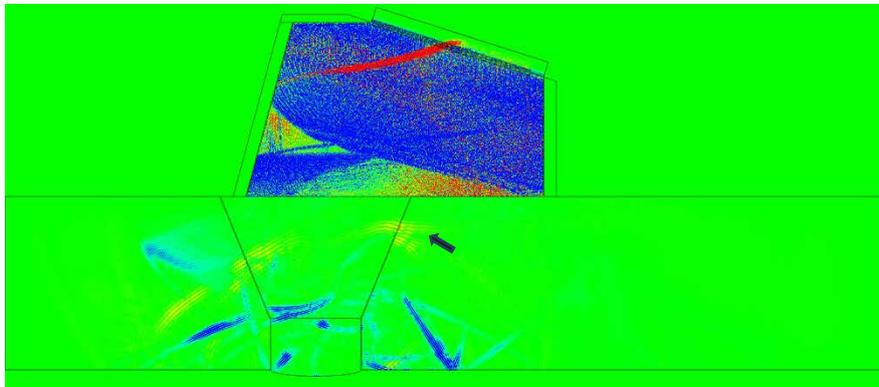
(5) 経過時刻 : 8.1  $\mu\text{s}$



(6) 経過時刻 : 8.4  $\mu\text{s}$



(7) 経過時刻 : 9.6  $\mu\text{s}$



(8) 経過時刻 : 10.2  $\mu\text{s}$

Fig.3.15  $\phi = +10^\circ$  での伝搬状況 (入射角 :  $31^\circ$ ) (2/2)

### 3.3 考察

#### (1) 柱状晶伝搬エコーについて

前節で論じてきた柱状晶伝搬エコーに関しては、JEAC4207-2022 解説表-2712-1<sup>13)</sup>の金属組織エコーの区分の中に柱状晶伝搬エコーとして以下の記載がある。

「オーステナイト系ステンレス鋼溶接部等の柱状晶組織によって、超音波の伝搬経路が偏向する。超音波は柱状晶組織の成長方向に偏向していく。これによって得られるエコーをいう。

(中略)

直射法 (0.5 スキップ) での探傷の範囲で超音波が偏向し、裏波形状部 (及び近傍) で反射されるエコーをいう。面反射エコーのため、非常に高いエコーが得られる。裏波形状がなくとも内面にほぼ垂直に反射するため、同様のエコーが得られる。」

ここで、改めて Fig. 3.2 の配管溶接金属部の断面写真を確認すると、溶接金属部右上の柱状晶組織は溶接境界面から内部に向けて左上方向に成長しており、この領域に入射した超音波はこの成長方向に沿って偏向することになる。また、Fig. 3.3 の配管溶接金属部の柱状組織の解析モデルで確認すると、柱状晶異方性の対称軸+10°のケースでは断面写真と同様な柱状晶組織の成長方向であるのに対し、対称軸が 0°、-10°となるにつれて、この領域の柱状晶組織の成長方向が水平に近づいている。このことが、対称軸が-10°の場合において、溶接金属部における超音波の下方向への偏向が少なくなることの原因と考えられる。

大飯発電所 3 号機の第 18 回定期検査では、横波斜角 45°の超音波センサを用いた超音波探傷試験によって今回の欠陥が検出されているが、その際の検査記録<sup>3)</sup>では欠陥部の周辺での柱状晶伝搬エコーが存在したことが示されている。その柱状晶伝搬エコーの高さは DAC (Distance-Amplitude Correction) で 7%及び 43%で、欠陥とみなされたエコー高さ DAC 176% に比べると 1/3 程度であった。この検査では検出されたエコーが柱状晶伝搬エコーか欠陥によるエコーかの判断は、エコー高さに加えてエコーの位置で判断がなされている。すなわち、エコーが検出されたセンサ位置から伝播経路を逆算し、溶接金属部内からエコーが来ていると判断される場合に、柱状晶伝搬エコーと判断されている。これはセンサがフェーズドアレイセンサではなく、通常のセンサ 1 素子の横波斜角 45°の超音波センサを用いた検査の場合の判断である。ここで、通常の 1 素子のセンサで柱状晶伝搬エコーを測定している際は検査員の手探傷で最大ピークの位置のみを検出するのが通常で、柱状晶伝搬エコーの広がりはあまり認識されてないことに留意されなければならない。

一方、今回の解析で示されたように、フェーズドアレイリニアスキャンの B スコープ画像では柱状晶伝搬エコーは溶接金属部内に広く分布し、それがコーナーエコーと繋がるとあたかも一つの亀裂が溶接金属部内に進展しているようにも見えるという特徴がある。これは従来の検査と大きく異なる点であり、これまであまり認識されていなかった知見である。

また、柱状晶伝搬エコーが柱状晶異方性の対称軸の向きによっても大きく影響を受ける点も新たな知見である。実際の溶接金属部での柱状晶異方性の対称軸は、溶接の開先形状や溶接時の傾き、さらには作業員の溶接姿勢などにも依存して変化すると予想されるため、柱状晶伝搬エコーに関して溶接金属部の柱状晶の傾きを考慮して検査方法の整理を進める必要があると考えられる。

## (2) 実測と解析との比較

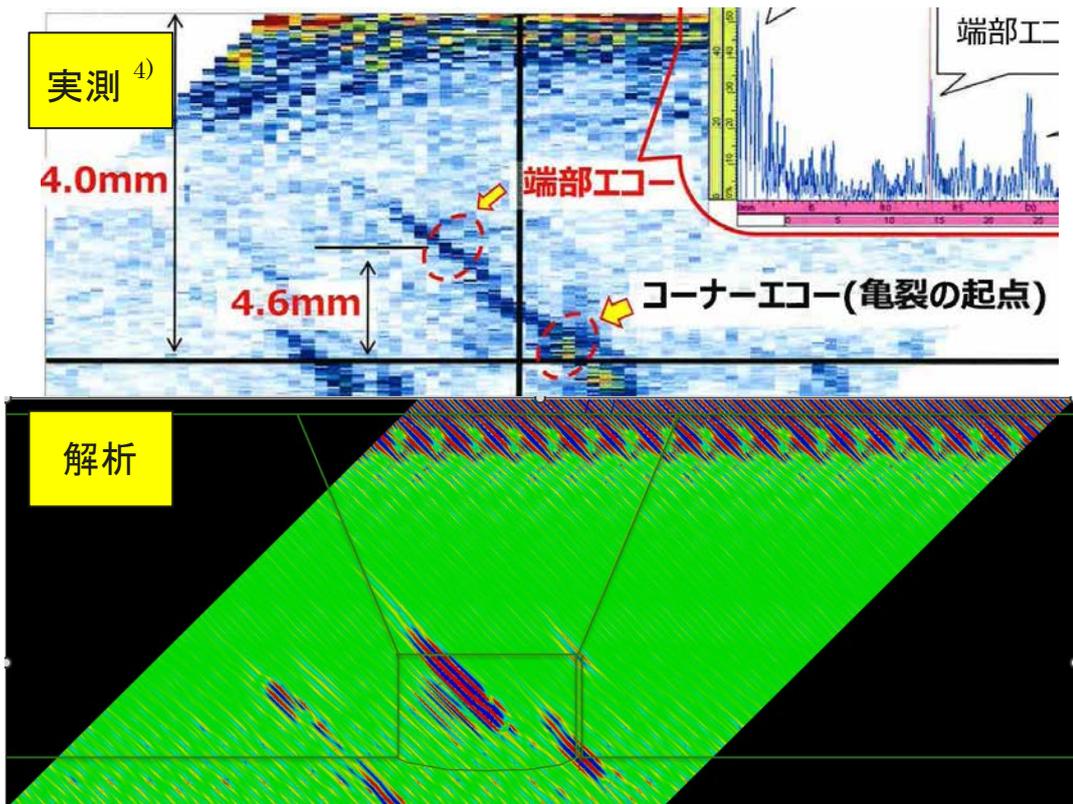
前節で示した解析結果を大飯発電所3号機における超音波探傷結果と比較するために纏めた図を Fig. 3.16 に示す。この図では実測と解析の結果で全体のサイズを合わせるために、まず配管の厚みを基準に実測と解析のサイズを調整し、位置を合わせるためにコーナーエコーの中心位置を基準に調整した。フェーズドアレイの入射角  $45^\circ$  と  $31^\circ$  のそれぞれに対して同様の調整を実施した。なお、比較に用いた解析結果は、実測の柱状晶異方性に近い、柱状晶異方性の対称軸 $+10^\circ$ のケースである。

まず、フェーズドアレイの入射角  $45^\circ$  の場合では、コーナーエコーと柱状晶伝搬エコーの位置は実測と解析でよく似た位置に存在している。また、解析でのモード変換横波による柱状晶伝搬エコーに関しても実測で同様のエコーがあることがわかる。一方、解析ではコーナーエコーと柱状晶伝搬エコーが繋がってはいない点と、解析で判定できる端部エコーが実測では不明確である点が異なっている。

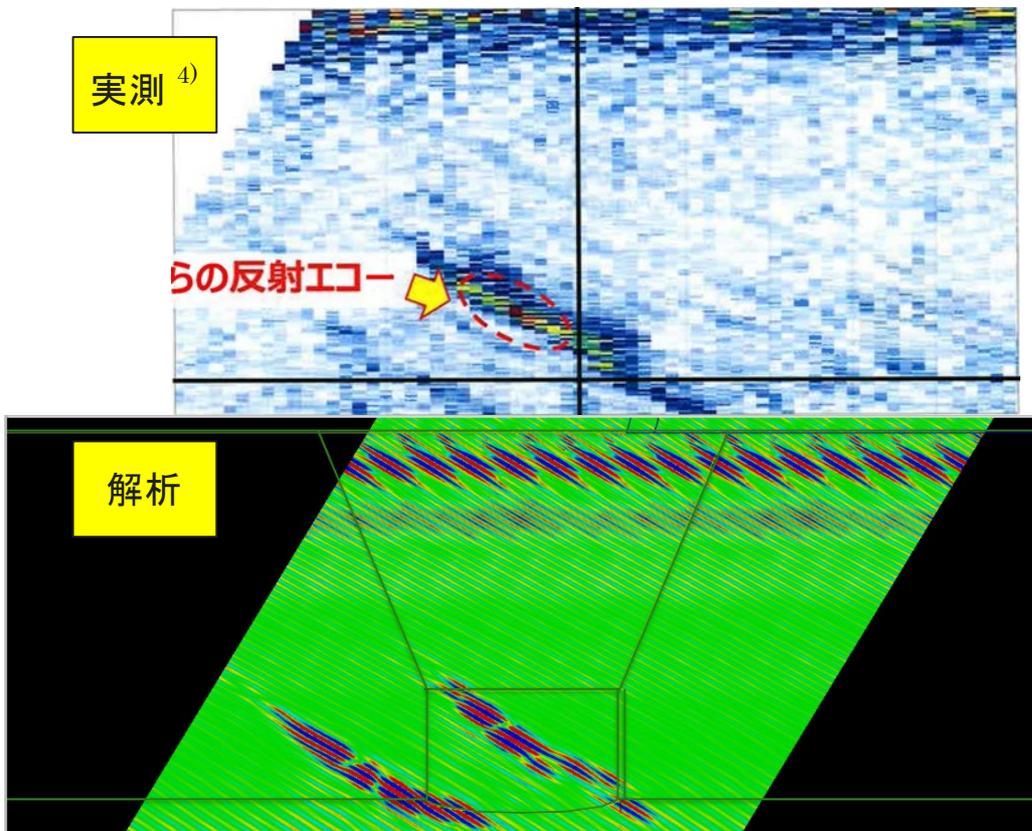
フェーズドアレイの入射角  $31^\circ$  の場合は、実測と解析の両方において、コーナーエコーと柱状晶伝搬エコーが繋がっており、その長さも類似していることがわかる。一方、端部エコーに関しては、実測と解析のどちらの場合も明確ではない。さらに、解析で顕著なモード変換横波による柱状晶伝搬エコーに関しては、実測においても弱いエコーではあるが存在している。解析では溶接金属部における超音波の減衰を考慮していないので、その点を考慮することにより、さらに実測のエコー強度に近づく可能性はあると考える。

実測のフェーズドアレイの入射角  $45^\circ$  の結果を溶接内部に伸びた亀裂と見誤った原因に関する報告<sup>6)</sup>では、その原因は「(配管の) 外表面の凸形状の影響で探触子は後ろのめりで、点接触の状態」であったために、「点接触の影響により超音波の入射位置が変化」し、亀裂の端部エコーが溶接内部に存在するかのように見誤ったものとしている。そしてその原因を再現した超音波シミュレーション結果も示されている。ここで、配管外表面の凸形状とは、Fig. 2.3 に示している配管の下流側（エルボ側）で溶接金属部の直前での緩やかな曲がり指している。今回 Fig. 3.16 に示した解析では、配管の曲がりは考慮せず、また、センサが浮くような設定もしていないため、報告<sup>6)</sup>の結論を否定するものではないが、仮に実測時にセンサが浮くことなく溶接金属部上を移動して測定されていたものならば、今回の解析のように柱状晶伝搬エコーを捉えていたものと解釈できる可能性もある。すなわち、センサの浮き及び柱状晶伝搬エコー誤認の両者が可能性として考えられる。

一方、フェーズドアレイの入射角  $31^\circ$  の実測結果に関しては事業者側から説明された資料はないが、入射角  $31^\circ$  で柱状晶伝搬エコーが生じている際のセンサの設置位置は溶接金属部のほぼ真上の領域で配管の曲がりの影響はない領域であり、また、実測で強いエコーが観測されていることから浮きの影響もなかったと考えられる。したがって、この入射角  $31^\circ$  のケースでは、解析と実測は同様に柱状晶伝搬エコーを捉えているものと考えられる。



(1) フェーズドアレイ入射角 45°



(2) フェーズドアレイ入射角 31°

Fig.3.16 フェーズドアレイリニアスキャン B スコープの実測と解析の比較  
「実測資料提供：関西電力株式会社」

#### 4. 結論

超音波シミュレータとして用いる ComWAVE の適用性を検証するため、フェーズドアレイ UT による B スコープ画像解析結果と実機事例を比較した。B スコープ画像実機事例としては、公開されている数少ない結果である 2020 年の関西電力大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における粒界割れを対象とした検査結果を用いた。この溶接部は、超音波伝搬挙動に影響する柱状晶組織を有するため、柱状晶異方性の対称軸をパラメータとして解析し以下の結果が得られた。

- 1) 配管溶接部に対する入射角  $45^\circ$  のフェーズドアレイリニアスキャンの結果、亀裂によるコーナーエコー及び端部エコーはその亀裂の位置で正しく検出された。一方、溶接金属部内に強い柱状晶伝搬エコーが検出され、その強度は、 $\varphi = +10^\circ$  の場合コーナーエコーの約 3.2 倍と強いものであったが、 $\varphi = 0^\circ$  では弱くなり、 $\varphi = -10^\circ$  ではさらに弱くなった。このことより、柱状晶異方性の対称軸への依存性が確認された。

また、この解析結果では、超音波入射時に横波に変換されたモード変換横波が亀裂コーナー部で縦波に戻って検出されるエコーも観測された。この場合、超音波は溶接金属部を伝搬しないため、溶接金属部の柱状晶異方性の影響を受けない。さらには、モード変換横波による柱状晶伝搬エコーも同定することができた。

- 2) フェーズドアレイリニアスキャンの入射角度を  $31^\circ$  とした解析結果においても  $45^\circ$  の場合と同様に強い柱状晶伝搬エコーが得られ、その柱状晶伝搬エコーは亀裂のコーナーエコーと繋がった状態で溶接内部の伸びている形状となった。また、その長さは柱状晶異方性の対称軸角度に強く依存することが確認された。
- 3) 柱状晶伝搬エコーそのものは一般的によく知られているエコーであるが、従来は 1 端子センサでの 1 次元での知見であったのに対し、今回の解析ではフェーズドアレイの 2 次元画像が得られることにより、柱状晶伝搬エコーの新たな特徴として、以下の知見が得られた。
  - ① 溶接金属部内部に長く伸びた柱状晶伝搬エコーが観測され、そのエコーが亀裂のコーナーエコーと繋がって観測される場合がある。この場合は、亀裂の溶接内部進展と誤認識しないよう注意を要する。
  - ② 柱状晶伝搬エコーの強度や形状は柱状晶異方性の対称軸角度に強く依存する。
- 4) 今回の解析結果を大飯発電所 3 号機の実測と比較した結果、少なくともフェーズドアレイの入射角  $31^\circ$  については、配管の曲がりの影響のない溶接金属部真上にセンサが設置されて測定されている場合に測定できる結果であった。このことから、実測は解析と同様に柱状晶伝搬エコーを捉えている可能性が示唆された。

## 謝 辞

本研究は、原子力規制庁の令和 6 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。

一般財団法人発電設備技術検査協会 古川 敬氏には多くの助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) engineering-eye, ComWAVE,  
<https://www.engineering-eye.com/ComWAVE/details/index.html> (accessed 2026-2-05).
- 2) 下平昌樹 他, “ステンレス鋼管溶接継手における欠陥及び柱状晶伝搬エコーに関する数値解析 1)研究開発の全体像及び数値解析によるエコーの再現性”, 日本保全学会, 第 21 回学術講演会, 2025, C-2-1-3.
- 3) 原子力規制委員会アーカイブ, “関西電力株式会社, 大飯発電所 3 号機 加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について, 2020 年 9 月 11 日”,  
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022010091?contents=NRA022010091-002-003#pdf=NRA022010091-002-003> (accessed 2026-2-05).
- 4) 原子力規制委員会アーカイブ, “関西電力株式会社, 大飯発電所 3 号機 加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について (9 月 11 日 公開会合における指摘事項の回答), 2020 年 9 月 18 日”,  
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022010092?contents=NRA022010092-002-002#pdf=NRA022010092-002-002> (accessed 2026-2-05).
- 5) 原子力規制委員会アーカイブ, “関西電力株式会社, 大飯発電所 3 号機 加圧器スプレイライン配管溶接部における事象の発生原因および対策について, 2020 年 12 月 24 日”,  
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022010096?contents=NRA022010096-002-002#pdf=NRA022010096-002-002> (accessed 2026-2-05).
- 6) 原子力規制委員会アーカイブ, “資料 20-1 PWR 1 次系ステンレス鋼配管粒界割れの知見拡充に関する検討状況について, 2022 年 6 月 24 日”,  
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA022010156?contents=NRA022010156-002-003#pdf=NRA022010156-002-003> (accessed 2026-2-05).
- 7) 日本非破壊検査協会, 超音波探傷試験Ⅲ 2017, 342p.
- 8) Ogilvy, J. A., “Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel”, NDT International, Vol. 18, 1985, pp. 67-77.
- 9) Ogilvy, J. A., “Ultrasonic beam profiles and beam propagation in an austenitic weld using a theoretical ray tracing model”, Ultrasonics, Vol. 24, No. 11, 1986, pp. 337-347.

- 10) 検査技術研究所, 総合カタログ Ver.2.0, <https://www.probe-kgk.com/pdf/071025-KGK.pdf> (accessed 2026-2-05).
- 11) ATENA, 技術レポート, “PWR1 次系ステンレス鋼配管粒界割れ 超音波探傷試験による亀裂性状把握手法の向上策”, ATENA 23-ME01 (Rev.0), 2023 年 4 月 28 日, <https://www.atena-j.jp/report/2023/04/atena-23me01rev0pwr1.html#000301> (accessed 2026-2-05).
- 12) 三原毅, “(フェーズドアレイ超音波探傷委員会解析ワーキンググループ) フェーズドアレイ UT の探傷範囲、焦点距離および異方性材料の特性評価”, 日本非破壊検査協会, 平成 28 年度超音波部門講演会, 2016.
- 13) 日本電気協会, “軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程”, JEAC4207-2022, (解 26) 解説表-2712-1.
- 14) 原子力安全基盤機構, 複雑形状部機器配管健全性実証 (IAF) 事業原子炉压力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集, JNES-RE-2012-0024, 付 1-28 & 32, <https://dl.ndl.go.jp/pid/14147306> (accessed 2025-11-04).
- 15) 裏垣博, 学位論文「超音波による音響異方性材料の溶接欠陥評価に関する研究」, 1992, <https://irdb.nii.ac.jp/01056/0001479678> (accessed 2025-11-04).
- 16) Mizota, H., Nagashima, Y., Amano, Y., Nakahata, K., “Simulation-aided time-reversal analysis for defect reconstruction in anisotropic materials”, *Insight*, Vol. 61, No. 11, Nov. 2019, pp. 669-675.

付録 1 配管材料の音響特性と溶接金属部柱状晶結晶方向の設定方法

1) 配管材料の音響特性

配管材料の音響特性として、配管本体は等方性、溶接金属部は異方性を有しているものとして取り扱った。配管本体の音速を Table A1.1 に示す。また、使用した溶接金属部材料の異方性に関する剛性マトリクスを Table A1.2 に示す。この剛性マトリクスの数値は文献<sup>15),16)</sup>から得られた数値及び式を用いている。

Table A1.1 配管本体部（等方材）の音速

| 材料                             | 縦波音速<br>[m/s] | 横波音速<br>[m/s] | 根拠   |
|--------------------------------|---------------|---------------|--|
| オーステナイト系<br>ステンレス鋼<br>(SUS316) | 5629          | 3087          | 左記音速は SUS316(室温)の<br>下記データ <sup>14)</sup> より算出 <sup>7)</sup><br>ヤング率 $E = 194.7 \text{ GPa}$ 、<br>ポアソン比 $\nu = 0.285$ 、<br>密度 $\rho = 7.95 \text{ Mg/m}^3$ |

Table A1.2 溶接金属部材料の異方性に関する剛性マトリクス（単位：GPa）<sup>15, 16)</sup>

|          |       |          |       |          |       |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| $D_{11}$ | 276.5 | $D_{12}$ | 113.5 | $D_{13}$ | 133.2 |
| $D_{22}$ | 276.5 | $D_{23}$ | 133.2 | $D_{33}$ | 212.0 |
| $D_{44}$ | 119.6 | $D_{55}$ | 119.6 | $D_{66}$ | 81.5  |

2) 溶接金属部柱状晶結晶方向の設定方法

柱状晶の方向に関しては、Ogilvy のモデル<sup>8,9)</sup>を適用している。そのモデルでは結晶の方向に関し、Fig. A1.1 に示す結晶方向を表す関数  $F$  を用いている（関数  $F$  に関するパラメータの説明も同図に示している）。ここで、 $F$  は溶接金属中の任意の点における柱状晶長軸方向を示すベクトルの正接成分に相当する。この式のパラメータに対する今回の解析の溶接金属部形状の数値を Table A1.3 に示す。この表の数値を用いてそれぞれの位置での結晶の方向を導出している。それぞれのパラメータの意味は、以下の通りである。

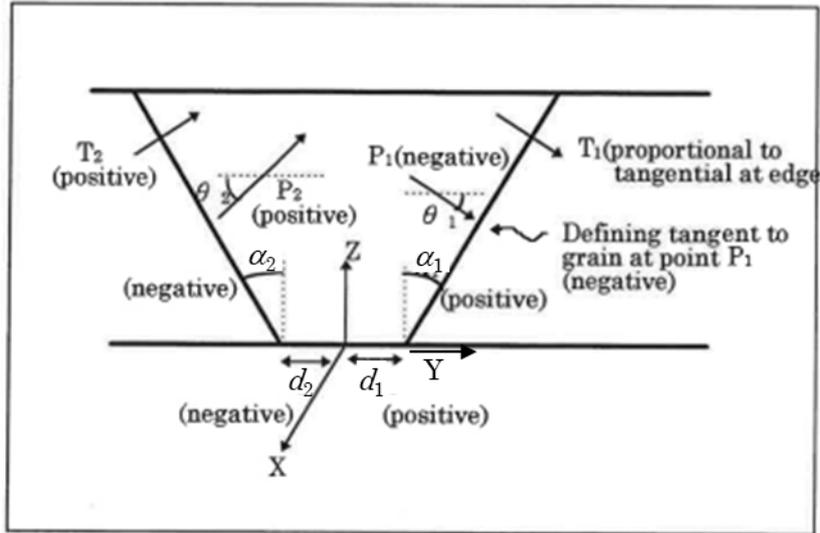
$z$ (最小) : 異方性を割り当てる領域の  $z$  座標下限値

(本解析では TIG 溶接、被覆アーク溶接境界位置)

$z$ (最大) : 異方性を割り当てる領域の  $z$  座標上限値

(本解析では TIG 溶接、被覆アーク溶接境界位置から配管外表面までの距離に相当)

- $y^+, y^-$  : 配管外表面側における溶接中心から開先先端 (+が右側、-が左側) までの距離  
 $\alpha_1, \alpha_2$  : 開先角度 (下付き文字 1 が右側、2 が左側)  
 $d_1, d_2$  : 配管内表面側における溶接中心から開先先端 (下付き文字 1 が右側、2 が左側) までの距離  
 (本解析では TIG 溶接、被覆アーク溶接境界位置で定義)  
 $T_1, T_2$  : 開先面上での柱状晶方向を示すベクトルの正接成分 (下付き文字 1 が右側、2 が左側)



$$F_1(y, z) = \frac{T_1 (d_1 + z \tan \alpha_1)}{y^\eta}$$

$$F_2(y, z) = \frac{T_2 (d_2 + z \tan \alpha_2)}{|y|^\eta}$$

Fig. A1.1 結晶方向を表す関数  $F$  とそのパラメータの説明図<sup>7)</sup>

Table A1.3 結晶方向を表す関数のパラメータ設定値

| $z$ (最小)   | $z$ (最大)   | $y^+$ | $y^-$ | $\eta$  |          |
|------------|------------|-------|-------|---------|----------|
| 0          | 9.5        | 7.4   | -7.4  | 0.85    |          |
| $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $D_1$ | $D_2$ | $T_1$   | $T_2$    |
| 22.3194    | 22.3194    | 3.5   | 3.5   | 0.57735 | -0.57735 |

柱状晶異方性の対称軸の方向に関しては、Fig. A1.2 に示すように、溶接中心の軸に対して、正負の方向に変更可能であり、結晶方向を表す関数  $F$  で導出した結晶方向のパターン全体をこの対称軸で傾けて再配置している。本研究では、対称軸に対して右側の領域 ( $z$  (最大)  $\times y^+$  の大きさ) を  $5 \times 5$  分割する点に対して上述の式で算出される解析モデルの各要素に対して関数  $F$  を求め、柱状晶長軸方向の角度を決定した。解析モデルの各要素における柱状晶長軸方向の角度は、上述の  $5 \times 5$  分割した点に対して指定した角度を線形補間することにより割り当てた。対称軸の左側にはこの線形補間結果を線対称で割り当てた。

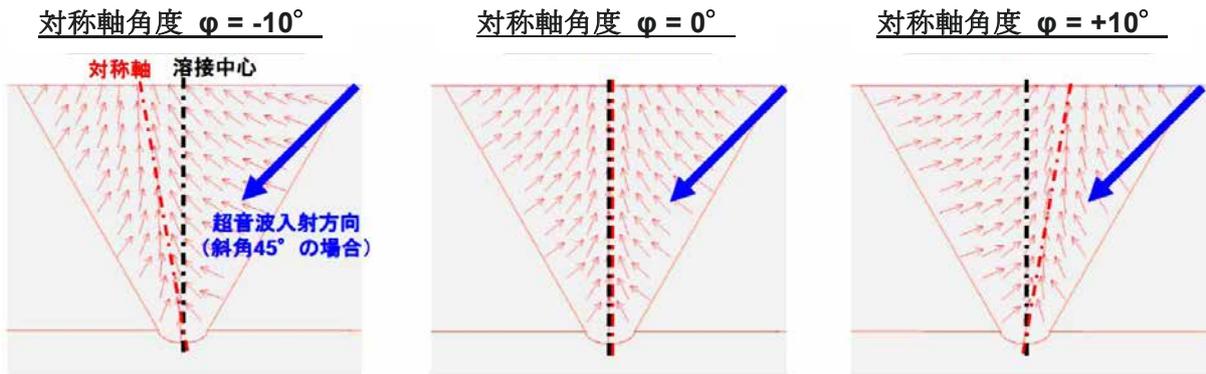


Fig. A1.2 柱状晶異方性の対称軸の方向

付録 2 解析入力値の設定根拠

Table 3.1 の超音波アレイセンサの入力パラメータのうち、超音波周波数の設定根拠について以下に記載する。

まず、Fig. A2.1 に Ref. 3)の資料中にあるフェーズドアレイ測定時の A スコープの波形を示す。この図の横軸の距離で約 35 mm の間に存在する波数を読み取り、その数値 121 を用いて超音波周波数を算出した。ただし、A スコープは整流表示されていることを考慮して 9.8 MHz と算出し、丸めて 10 MHz と判定した。

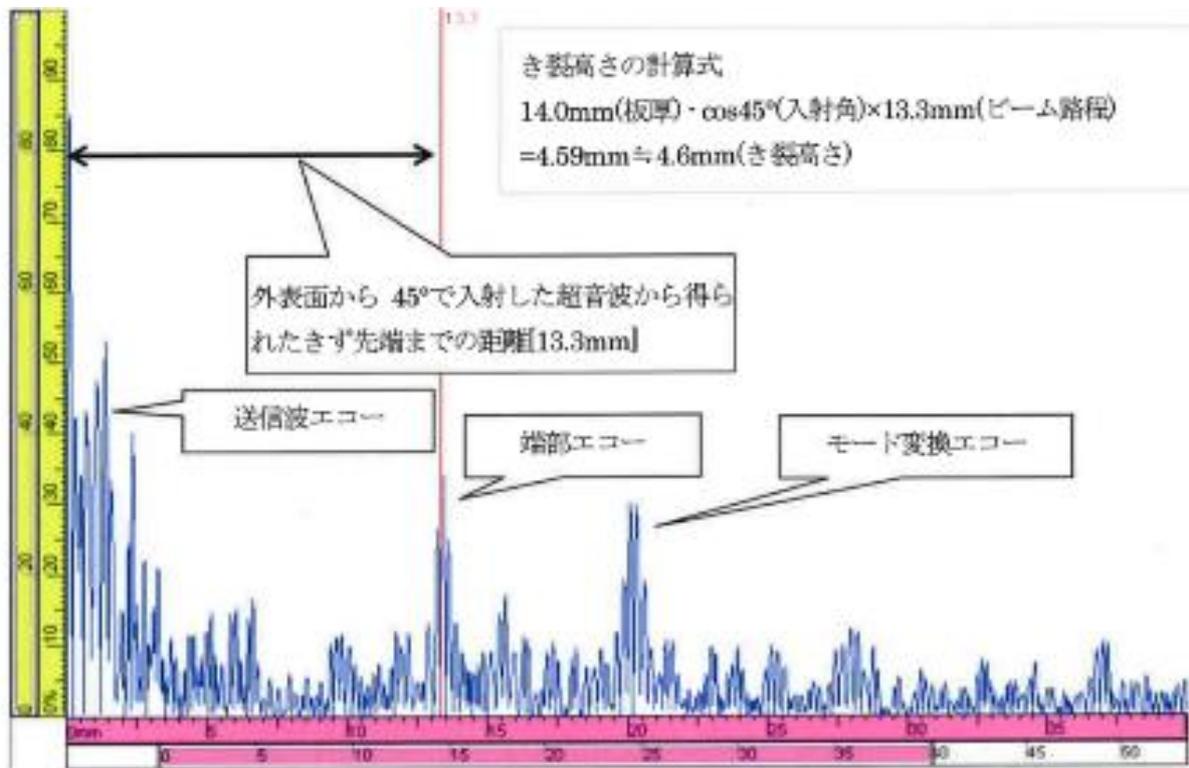


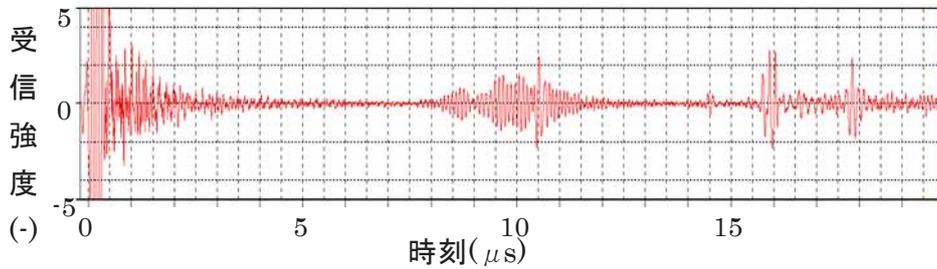
Fig. A2.1 フェーズドアレイ測定時の A スコープの波形<sup>3)</sup>

「資料提供：関西電力株式会社」

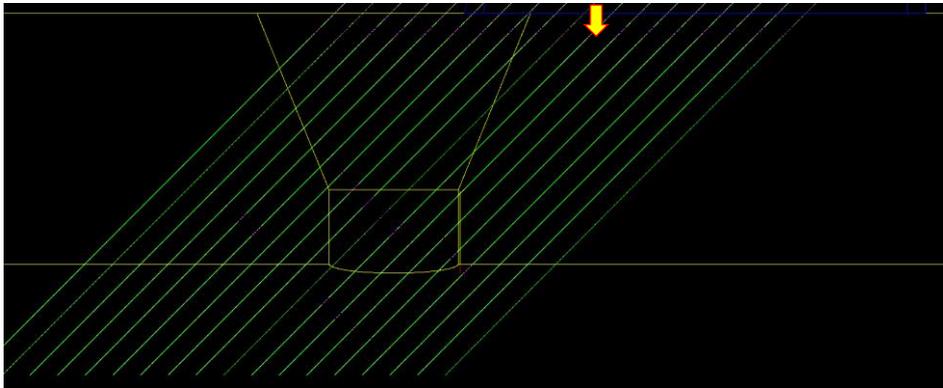
付録3 B スコープ像の作成方法

B スコープ像の作成方法を Fig.A3.1 を用いて説明する。

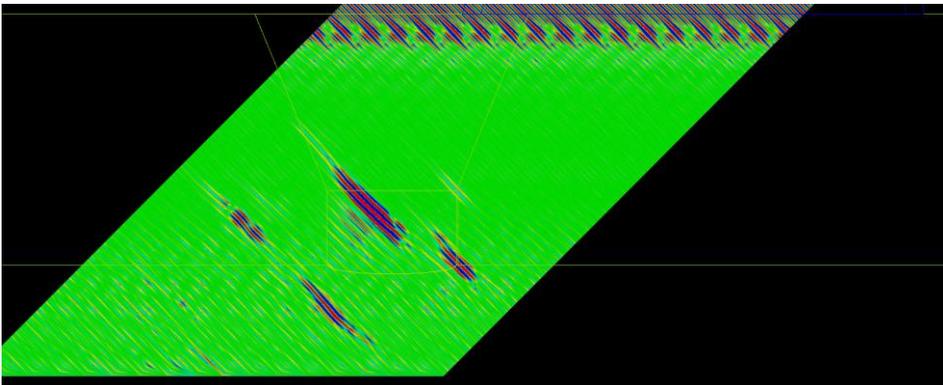
3.1 節の Fig. 3.5 のフェーズドアレイリニアスキャンのスキャンパターンで示した赤矢印 1 回の超音波伝播解析で得られる A スコープ (超音波の受信強度の経時変化) の例を Fig.A3.1(1) に示す。リニアスキャンの回数分 (Fig. 3.5 では 17 回分) 解析を行い、この A スコープ波形を 2 次元像としてプロットするのが B スコープ像であるが、Fig.A3.1(2)にその A スコープ波形を内挿補完せずにプロットしただけの結果を示す。17 回分の結果が線で表示され、その線は受信強度で色付けされている (緑色がゼロ値、赤が正、青が負)。この図の矢印の位置の線が(1)の A スコープのプロットである。次に各信号線の間の内挿補完を行った結果を(3)に示す。この段階が通常 B スコープと呼ばれる 2 次元像である。実際の検査においても超音波探傷器の内部で同様の計算が行われて B スコープ像を表示している。



(1)A スコープ波形の例 (下図(2)中の矢印の線に対応する A スコープ波形)



(2)内挿補完前の B スコープ表示



(3)内挿補完後の B スコープ表示 (完成版)

Fig.A3.1 フェーズドアレイ B スコープ画像の作成方法

This is a blank page.



