



ステンレス鋳鋼配管における超音波伝播シミュレーション

Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Cast Austenitic Stainless Steel Piping

原子力安全基盤機構	坂本 一信	Kazunobu SAKAMOTO	Non Member
発電設備技術検査協会	古川 敬	Takashi FURUKAWA	Member
発電設備技術検査協会	古村 一朗	Ichiro KOMURA	Member
発電設備技術検査協会	上山 芳教	Yoshinori KAMIYAMA	Non Member
富山大学	三原 毅	Tsuyoshi MIHARA	Member

Abstract

It is well known that volumetric inspection by ultrasonic testing for cast austenitic stainless steel (CASS) piping, which is extensively used in primary loop of Japanese pressurized water reactors (PWR), is challenging due to unexpected beam skewing, dispersion and attenuation by its coarse and anisotropic crystal structures resulted from manufacturing process. The miss or false calling of the flaws and the deterioration of sizing performance are of great concerns in the ultrasonic testing for the material. A simulation model of the ultrasonic wave propagation in CASS was developed to understand the unique behaviors in CASS which gives adverse effect on the ultrasonic testing, and to confirm the field ultrasonic testing data.

The developed method was compared with the actual wave propagation obtained through the visualization technique applied to the CASS mock-up and verified to reproduce actual phenomena well including beam skewing, dispersion due to the coarse grain structures.

Keywords: Cast austenitic stainless steel, CASS, Pressurized Water Reactor, PWR, Ultrasonic testing, simulation, modeling, visualization

1. はじめに

ステンレス鋳鋼 (CASS) は、我が国のみならず、世界の加圧水型原子炉 (PWR) プラントにおいて、安全上重要な原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する一次系冷却材配管として広く用いられている。この CASS 製一次系冷却材配管の溶接部に対しては、供用期間中検査として、運転開始後の発電用原子力設備の維持のための技術的諸規定を定めた一般社団法人 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格[1]に基づき定期的な超音波探傷試験を実施することが要求されている。しかしながらこの材料に対する超音波探傷は、音響異方性を有する粗大な鋳造組織の影響を受けて超音波の曲がり、散乱、減衰等が著しくなるため、炭素鋼等に比べて非常に困難である。また、材料中を伝播する超音波の挙動についても十分な理解が得られておらず、未だに欠陥の検出性に対する確

証が十分ではなく、またサイジング性能についても定量的に確証されていないのが現状である。世界においても、これは重要な課題として取り上げられ、同材料に対する超音波探傷精度を高めるための研究、技術開発が積極的に行われている[2-5]。

このことから、CASS 中を伝播する超音波を予測するシミュレーション解析技術の活用が、CASS の超音波探傷を行う上での最適な検査技術・条件の選定、及び検査結果の評価等の場において、更には将来的に検査従事者が同材料における超音波伝播を把握するための教育ツールとして活用されることが期待される。このような背景の下、著者らは大規模 FEM による CASS 配管を対象とした超音波伝播シミュレーションモデルの構築を試みた。

2. FEM コード及びモデル化

2.1 FEM コード

本研究では、音響異方性を有する CASS 材料の超音波

連絡先:坂本一信, 〒105-0001 東京都港区虎ノ門
4-1-28, 原子力安全基盤機構 原子力システム安全部,
E-mail: sakamoto-kazunobu@jnes.go.jp

伝播をより忠実に再現する必要がある。このため、FEMを用いた解析では数億以上の大規模な要素数となる。そこで、このニーズに対応した市販の並列型 3 次元有限要素法伝播解析コード“ComWave”（伊藤忠テクノソリューションズ社製）を使用した。

メッシュサイズについては、周波数 1MHz での CASS 中、及びくさび内の縦波波長に対して十分小さくなるように、 $0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ のボクセル要素とした。解析ステップ数は、解析領域内で最も早い音速である約 $6,000\text{ m/s}$ において 1 要素分超音波が進む時間が約 17 ns であることを考慮して 14 ns とした。計算機の並列数（コア数）は 4 から 8 である。

2.2 探触子モデル

超音波の送信方法は、振動子に対応する FEM メッシュに初期変位を与える方法とし、振動子の寸法、くさびの形状、寸法を模擬して超音波を送信するモデルとした[6]。今回解析で用いた探触子モデルの一例を Fig. 1 に示す。

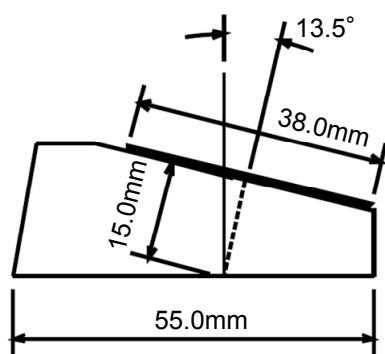
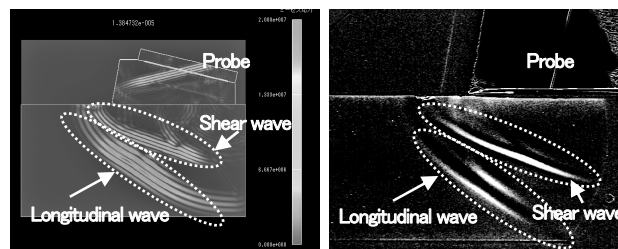


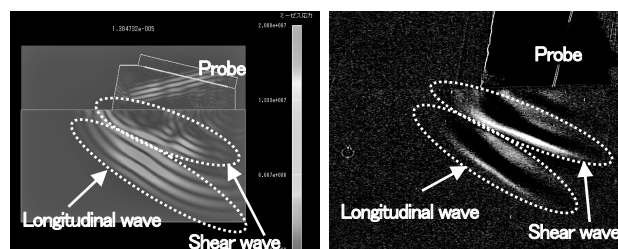
Fig. 1 Probe model

CASS の探傷には、低周波数の探触子が一般的に用いられる。本研究では低周波数探触子の特性が反映できることを確認するため、代表的な探触子設定を用いて送信音場をシミュレーション解析し、光弾性超音波可視化法[7]で発生音場を測定した結果との比較を行った。Fig.1 に示した 1.0MHz 及び 0.5MHz の 38mm 径の振動子を用いて縦波斜角 36 度の条件でパイレックスガラス内の音場についてシミュレーション解析及び測定を行った結果を Fig. 2 に示す。シミュレーション解析のコンタ図は変位の絶対値を表示しており、光弾性可視化法では最大せん断応力を表示している。なお、光弾性可視化法ではストロボの閃光特性が曇り込まれているために波数が違って見えること、また縦波に比べて横波の感度が 2 倍に表示されることに留意する必要がある[7]。

本稿では、超音波の進行方向及び指向性について比較した。図に示すように、探触子から発生した音場の波面形状及び指向性ともに開発したモデルは実験結果をよく反映しており、モデルの精度を検証することができた。



(a) 1.0M38 LA36



(b) 0.5M38 LA36

Fig. 2 Simulation (left) vs Visualization result (right) of generated elastic wave from the transducer

2.3 結晶情報モデル

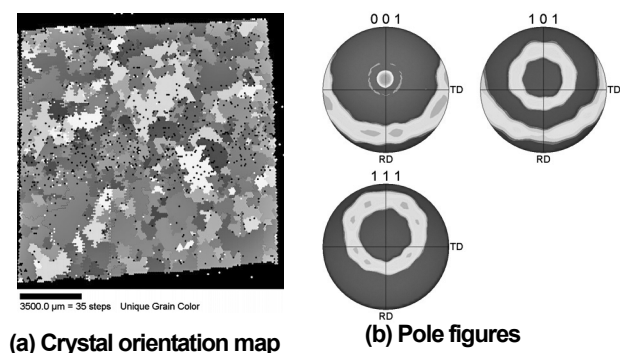
音響異方性を有する材料に対する超音波探傷のシミュレーションモデルでは、マクロ的視野から主に集合組織の音響特性がモデル化されてきた[8]。例えば、オーステナイト系鋼の柱状晶組織は、集合組織の音響特性が横等方性を示すことから六方晶モデルとして取り扱われてきた[9]。この六方晶モデルは、超音波の伝播経路の評価という観点からは有効であるが、金属組織等で生じるエコー（ノイズ）や超音波の減衰等の再現は困難である。このモデルは、超音波の波長に対して結晶粒が比較的小さい場合には有効なモデルといえる。しかし CASS のような粗大な結晶組織の寸法が超音波の波長と同程度となる場合には必ずしも十分なモデルとは言えず、この六方晶モデルをエコーの振幅やノイズレベルの評価に活用することは困難である。

実際の検査現場における CASS の超音波探傷では、通常のステンレスに比べて SN 比が小さく欠陥検出やサイジングが難しいことが大きな課題の一つである。本シミュレーションモデル開発の目的は、欠陥検出における識

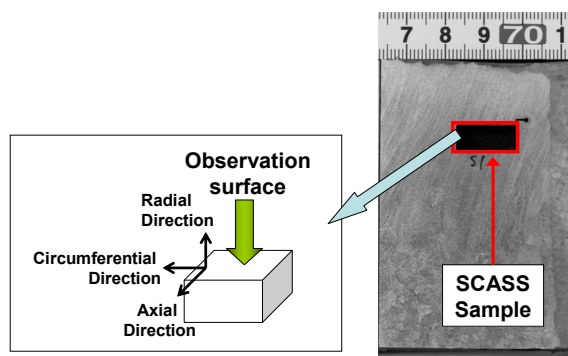
別性の評価や SN 比の評価に活用可能とすることである。このことから、CASS 中の超音波伝播を減衰やノイズも含めてより忠実に再現することが不可欠である。そこで、柱状晶組織をより詳細にモデル化する方法を検討した。

Fig. 3 に EBSP (Electron backscattered diffraction pattern) にて分析した結晶方位分布の例を示す。図(a)及び(b)は、各々オーステナイト相の結晶図と極点図である。CASS に見られる柱状晶組織の粒径は 1~3mm 程度であり周波数 1MHz から 2MHz の超音波の波長と同程度であった。また結晶方位は、柱状晶の成長方向 (Radial Direction から約 15 度傾いた方向) に [001] 方向が局在しており、横方向には結晶方位が一様に分布していることが確認された。

超音波の波長に比べて粒径が小さい場合には、Fig. 3(b) を踏まえて横等方性の音響特性を示す六方晶モデルでも対応可能であるが、Fig. 3(a)を踏まえると粒径の影響も考慮したモデルとする必要があると考えられる。



(a) Crystal orientation map (b) Pole figures



(c) Sample location and observation image (SCASS: Statically CASS)

Fig. 3 Crystal mapping and its pole figures

そこで、粒径に対応した寸法で柱状晶の領域を分割し、その領域に立方晶の物性値と結晶方位を設定してモデル化する方法を検討した。具体的な結晶方位の設定方法は、柱状晶の成長方向に [001] 方向を局在して配向させるとともに、ねじり方向にはランダムに分布させたモデルと

した。

本研究では、国内の実機 CASS 相当材料に対する音速測定により Table 1 に示す六方晶としての 5 個の独立した弾性定数を導出し、この数値を用いて立方晶の弾性定数を算出した。本研究で用いた立方晶の弾性定数を Table 2 に示す。

Table 1 Elastic stiffness calculated from wave velocity measurement (Trans isotropic)

Elastic Stiffness(GPa)	
C ₁₁	265.8
C ₁₂	114.0
C ₁₃	128.5
C ₃₃	215.0
C ₄₄	117.1

Table 2 Elastic stiffness of FCC model

Elastic Stiffness(GPa)	
C ₁₁	215.0
C ₁₂	128.5
C ₄₄	117.1

2.4 結晶構造モデル

(1) 断面組織写真の再現モデル

結晶のモデリングにおいて、第 1 ステップとして実機モックアップのマクロ写真を忠実に再現したモデルを作成した。本モデルでは、断面の組織写真をもとに、各結晶の領域を分割し、それぞれの領域に輝度に応じて任意の階調に分割した番号を割り当てた。割り当てたそれぞれの番号毎に、各結晶の弾性定数及び結晶方位情報を入力する。

Fig. 4 は、モデル作成対象のマクロ組織写真、及び写真を基に設定した形状、領域である。対象は、国内 PWR 実機を模擬して作成した静铸造材 (Statically CASS) と遠心铸造材 (Centrifugally CASS) の狭開先 TIG 溶接部である。静铸造材、遠心铸造材ともに材質は SA351 CF-8M である。この領域において、組織写真の濃淡は結晶粒を示していると考え、写真の濃淡を任意の階調に変更して平面を分割する方法とした。Fig. 5 は、この手法にて 4 個に領域を分割することにより作成したモデルの例である。尚、3.1 章にて後述する解析では 8 階調での結果を示すが、ここでは結晶境界がより鮮明に表現される 4 階調でのモデル例を示している。

表示については 2 次元モデルとなるが、結晶方位を 3 次元で設定する必要があることに加え、奥行き方向の変

位を拘束させないようにして計算する必要があるため、実質的には3次元モデルとなる。具体的には、2次元のモデルを奥行き方向へ単純に押し出し、擬似的な3次元モデルとした。

先述したように、柱状組織を有する CASS では柱状晶の成長方向と[001]方向が概ね一致しており、横方向については、ランダムに結晶方位が分布している。これを反映し、各結晶粒に情報を割り当てる。

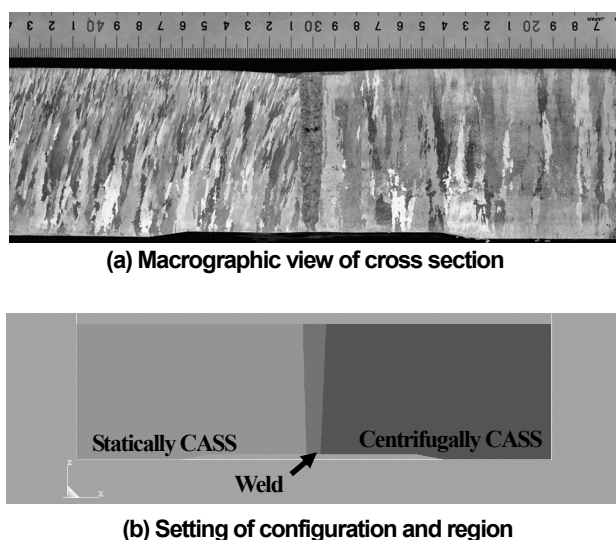


Fig. 4 Model setting from the photograph

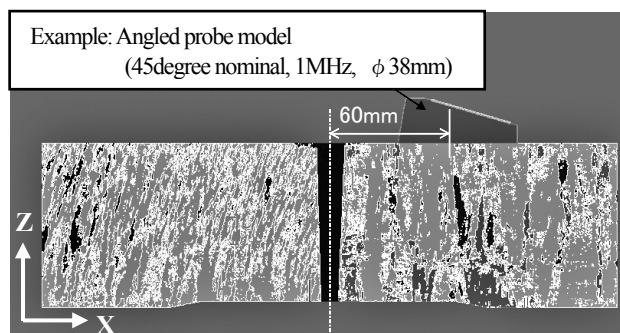


Fig. 5 Modeling of grain structures

(2) ボロノイ要素分割モデル

第2ステップとしては、より汎用的に様々な結晶組織構造に対応できるモデル構築を目的として、ボロノイダイアグラムを用いた結晶領域分割を行った[10]。第1ステップと同様、分割した結晶粒に対して弾性定数及び結晶方位を割り当てる。

Fig. 6 にボロノイ要素の概念図を示す。ボロノイ分割によりモデルを作成する機能には、等軸晶モデル、及びこれを元に特定の方向にスケール倍および回転させることにより CASS 製配管に見られるような柱状晶モデルを作成する機能を加えた。

各ボロノイ要素内では、組織配向が一定であるとし、粒径にはばらつきをもたせた。こうしてボロノイ分割で作成した各結晶粒モデルに、第1ステップと同様、弾性定数及び結晶方位を割り当てる。このプロセスにて、Fig. 4(a)に示す結晶構造を模擬して作成した CASS 配管溶接部モデルの例を Fig. 7 に示す。

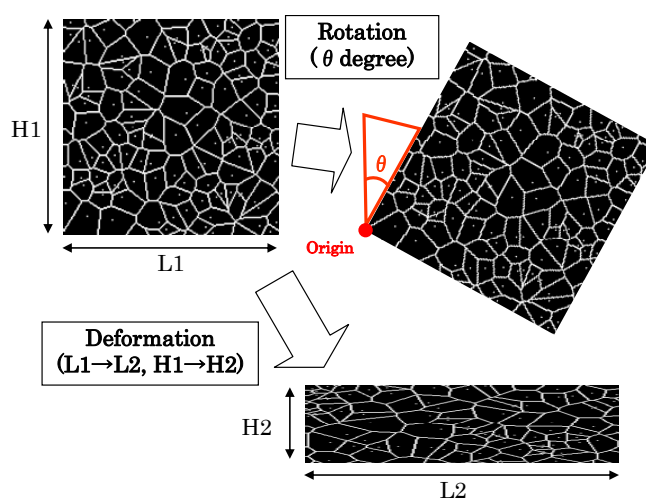


Fig. 6 Voronoi decomposition image

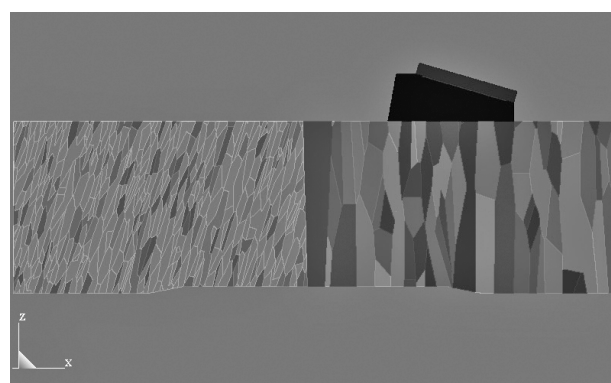


Fig. 7 CASS welding model by Voronoi decomposition

3. シミュレーション結果及び検証

3.1 組織写真に基づくモデル

Fig. 5 に例示した組織写真を忠実に再現したモデルにて超音波伝播シミュレーションを行い、その結果を可視化で得られた実際の伝播挙動と比較することでモデルの

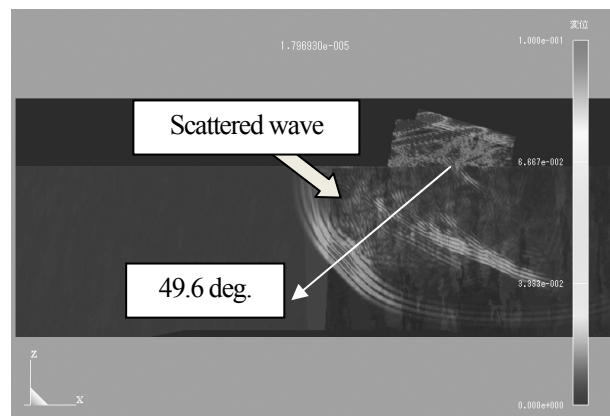
有効性の確認を行った。ここでは、組織モデルとして、写真から得られた領域を8階調に分割し、Table 3に示す条件の結晶情報をそれぞれ入力し、解析を行った結果を示す。組織写真より、静铸造材についてはZ軸から約17度傾いて柱状晶が成長しており、遠心铸造材についてはZ軸に沿って柱状晶が成長している。これを反映して[001]方向とZ軸とのなす角は、静铸造材については17度を中心として、遠心铸造材については0度を中心としてそれぞれ正規乱数分布させた関係を設定した。

Table 3 Input information of crystalline orientation

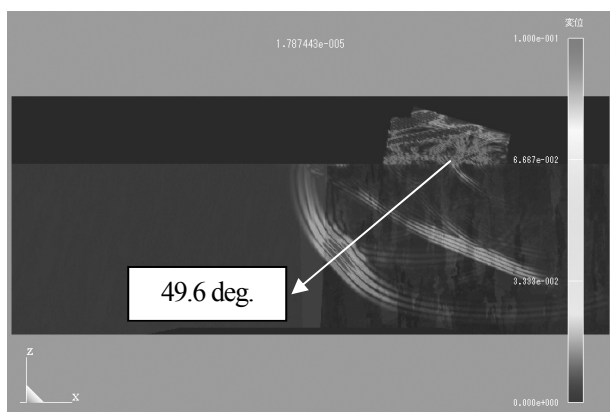
material	Region #	Tilt angle of [100] direction from Z-axis	Twist angle from Z-axis
Statically CASS	1	12.5	0.06
	2	17.2	25.36
	3	15.7	8.70
	4	18.3	36.39
	5	17.3	26.33
	6	16.9	21.59
	7	16.4	15.76
	8	18.9	40.32
Centrifugal CASS	1	-4.5	0.06
	2	0.2	25.36
	3	-1.3	8.70
	4	1.3	36.39
	5	0.3	26.33
	6	-0.1	21.59
	7	-0.6	15.76
	8	1.9	40.32

Fig. 8に中心周波数1MHz、振動子径φ38mm探触子及び縦波45度斜角用くさびをモデル化し、遠心铸造材部に超音波を入射する条件にてシミュレーションを行った結果を光弾性超音波可視化法により測定した可視化画像[11]、及び従来の六方晶モデルにてシミュレーションを行った結果とあわせて示す。ここで、(a)が今回開発したモデルでの超音波シミュレーションにて得られた伝播状況を静止画で表示したもの、(b)がFig. 5の結晶粒分割条件を用いて、それぞれの結晶の情報として従来の六方晶モデルを入力した材料条件にて(a)と同様のシミュレーションを行った結果、(c)が実機モックアップ中(Fig. 4(a)に示す)を伝播する超音波音場の可視化画像である。ここで、(c)の実機モックアップは2.4にて組織をモデル化した材料であり、青線及び赤線は、スローネスカーブから算出された位相速度方向及びエネルギー伝播方向をそれぞれ示している[12]。

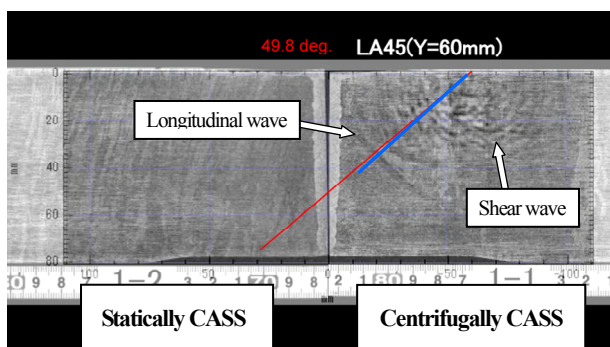
Fig. 9は、上記と同一の探触子条件にて静铸造部に超音波を入射した結果を示す。遠心铸造材部での結果と同様、(a)が今回開発したモデルでの結果、(b)が従来の六方晶モデルでの結果、(c)が実機モックアップでの可視化画像である。



(a) FCC model



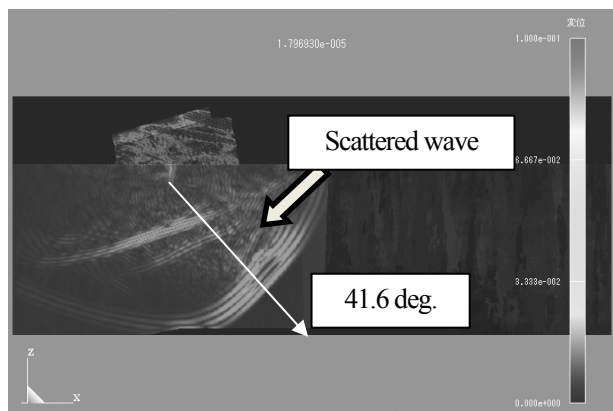
(b) Trans isotropic model



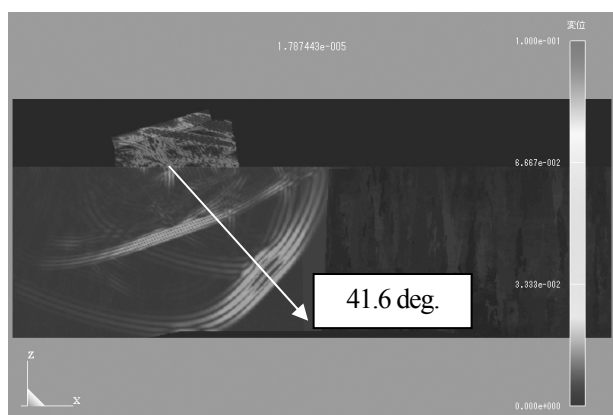
(c) Visualization result

Red line (Theoretical energy flow): 49.8°
Blue line (Theoretical phase direction): 48.0°

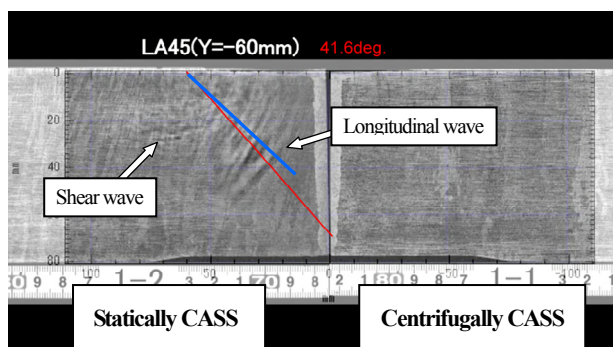
Fig. 8 Simulation and visualization results of ultrasonic wave propagation into centrifugal CASS



(a) FCC model



(b) Trans isotropic model



(c) Visualization result

Red line (Theoretical energy flow): 41.6°
 Blue line (Theoretical phase direction): 47.3°

Fig. 9 Simulation and visualization results of ultrasonic wave propagation into statically CASS

Fig. 8 及び Fig. 9 に示されたように、今回開発したモデル、従来の六方晶モデルでの両解析結果で得られた波面の伝播方向や波面の形状は、可視化結果とほぼ同等である。また今回開発したモデルでは、波面の形状に乱れが

あり散乱された波面も可視化結果をよく再現できている。これに対して既存の六方晶モデルでは、波面の形に乱れが無く、散乱された波面が存在しない。この今回の立方晶の物性値を与えるモデルでは、超音波探傷におけるノイズの要因である散乱を再現することが確認できたことから、本解析モデルの妥当性が検証されたと考える。

3.2 ボロノイ分割モデル

マクロ組織写真を基づきボロノイ分割で作成した Fig. 7 に示すモデルにて超音波伝播シミュレーションを実施した。解析結果例として、縦波 45 度斜角法で、遠心铸造材側から静铸造材側に向けた入射でのシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。ここで示した結果は、Fig. 8 で示した結果とはほぼ同じ時間での伝播状況を静止画で表示したものである。

図から判るように、マクロ組織写真を基にボロノイ分割で類似の結晶構造を模擬したモデルにおいても、縦波の志向性は若干異なるものの、写真を忠実に再現したモデルと同様、可視化で得られた実際の波面伝播方向、波面形状、及び複雑な散乱の様子を良く再現できることが確認でき、本モデルの有効性を示すことができた。

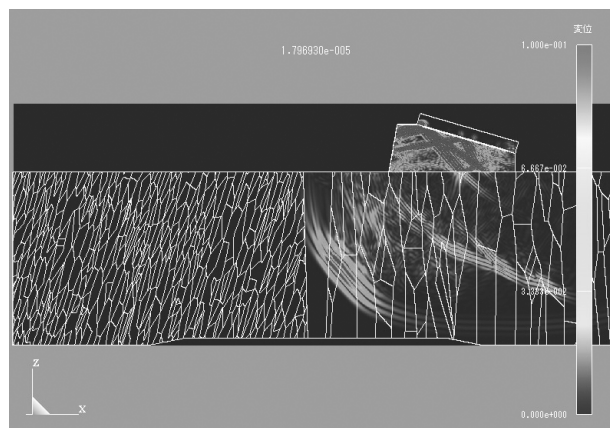


Fig. 10 Simulation of ultrasonic wave propagation into centrifugally CASS using Voronoi decomposition model

4. まとめ

並列型 3 次元有限要素法伝播解析コードを用い、CASS 中を伝播する超音波のシミュレーション及びその検証を行った。本モデルにて実際の CASS 中の超音波伝播をよく再現でき、その有効性を示すことができた。

参考文献

- [1] Japan Society of Mechanical Engineers, “Code for Nuclear Power Generation Facilities - Rules on Fitness-for-Service for Nuclear Power Plants”, JSME S NA 1-2008, Oct. 2008.
- [2] M.T. Anderson, S.E. Cumblidge, S.R. Doctor, “Low Frequency Phased Array Techniques for Crack Detection in Cast Austenitic Piping Welds: A Feasibility Study”, Material Evaluations/January 2007, pp55-61.
- [3] M. Anderson, S.Crawford, et. al, “Assessment of Crack Detection in Heavy-Walled Cast Stainless Steel Piping Welds Using Advanced Low-Frequency Ultrasonic Methods” U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6933, March 2007.
- [4] Y. Kurozumi, “Development of Ultrasonic Inspection Techniques for Cast Stainless Steel”, Journal of the Institute of Nuclear Safety System, 2000, No 7, pp159-171.
- [5] F. Rupin, B. Chassignole, et. al, “Flaw Detection in Cast Stainless Steel Using Advanced Low-Frequency Ultrasonic System and Multi-Scattering Filtering” Proceedings of the 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, October 2010, pp772-781.
- [6] 古川、古村, “有限要素法(FEM)による超音波探傷シミュレーションの展開”, 非破壊検査 Vol. 60, No.4, 2011, pp192-197.
- [7] 伊達、島田, “固体内超音波の光弾性可視化法による定量評価”, 非破壊検査 Vol. 36(9), 1987, pp.605-612.
- [8] 伊庭, “音響異方性を有する鋼溶接部の超音波斜角度探傷法”, 鉄と鋼 Vol. 73(6), 1987, pp616-628.
- [9] 木村、福原、星本、松本、山脇、伊藤、植竹, “軽水炉施設の超音波探傷技術に関する研究”, 金属材料技術研究所研究報告集 Vol.7, 1986, pp.19-35.
- [10] F. Jenson, et. al, “Modeling of Ultrasonic Propagation in Cast Stainless Steels with Coarse Grained Structures”, Proceedings of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, May 2009, pp336-344.
- [11] T. Furukawa, H. Yoneyama, Y. Horii, N. Uesugi, “Measurement of Ultrasonic Wave Propagation in Austenitic Stainless Steel Welds”, Proceedings of 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, JRC, New Orleans, May 24-26, 2000, B195-B201.
- [12] K. Sakamoto, T. Furukawa, et. al, “Study on the Ultrasound Propagation in Cast Austenitic Stainless Steel”, E-Journal of Advanced Maintenance, 投稿中(EJAM11-45).

(平成 24 年 2 月 2 日)