

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への応用

Image-based Simulation of Wave Propagation and its Application to Ultrasonic Testing

愛媛大学大学院
東京工業大学大学院

中畑 和之
廣瀬 壮一

Kazuyuki NAKAHATA Member
Sohichi HIROSE

A straightforward simulation method is desired for the reliable nondestructive ultrasonic testing (UT). The target models for the UT become more complicated than ever, such as dissimilar welding parts in nuclear power plant or debonding parts of reinforced steels in concrete material. In this study, a time domain simulation tool for ultrasonic wave propagation in heterogeneous and anisotropic materials with a complex outer surface is developed by combining the elastodynamic finite integration technique (EFIT) with an image based modeling approach. The EFIT is a grid-based spatial discretization method in conjunction with the leap-frog time marching scheme. In our simulation, geometries of targets are determined by digital images from two dimensional(2D) pictures or three dimensional(3D) CT and CAD data.

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

1. 緒言

シミュレーションを積極的に工学問題に取り入れようとする動きは活発であり、保全学や非破壊検査の分野も例外ではない。しかし、近年のシミュレーションに対するニーズはますます高度化しており、対象とするモデルの形状や構成要素は複雑化している。このような複雑な対象に対してシミュレーションを行う際に障害となるのが、数値モデルの作成である。筆者らは、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、材料の非均質性、局所的な異方性、3次元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^[1]。要素技術は有限積分法(FIT^[2]: Finite Integration Technique)である。FITは波動方程式を空間領域と時間領域で離散化し、時間ステップごとに波動場を計算する手法であり、液体-固体-気体中の超音波の伝搬を連成して解析することも可能である。ここでは、2次元超音波伝搬シミュレーションとして、コンクリートの垂直探傷、音響異方性を有する異材溶接部に対するフェーズドアレイ探傷を示し、3次元シミュレーションとしてタービン部材中の波動伝搬解析の例を示す。

2. 動弾性有限積分法

弾性波動場に対するFITは、動弾性有限積分法(EFIT^[2]: Elastodynamic Finite Integration Technique)と呼ばれている。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。ここで、固体は一般異方性(等方性含む)材料であるとする。以下ではインデックス表記とし、総和規約を適用する。 x_i 方向の粒子速度を v_i 、応力を τ_{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は以下のようになる。

$$\rho(\mathbf{x})\dot{v}_i(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial \tau_{ij}(\mathbf{x}, t)}{\partial x_j} + f_i(\mathbf{x}, t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\dot{\tau}_{kl}(\mathbf{x}, t) = c_{klij}(\mathbf{x}) \frac{\partial v_i(\mathbf{x}, t)}{\partial x_j} \quad (k, l = 1, 2, 3) \quad (2)$$

ここで、 $\dot{(\)}$ は時間 t に関する偏微分($\partial/\partial t$)、 ρ は密度、 f_i は材料に作用する物体力、 c_{klij} は弾性スティフネスである。運動方程式(1)を領域 V (その境界は S)で積分すると次式を得る。

$$\int_V \rho \dot{v}_i dV = \int_S \tau_{ij} n_j dS + \int_V f_i dV \quad (3)$$

ここで、上式にはガウスの発散定理を適用している。また、構成式(2)の積分は

$$\int_V \dot{\tau}_{ij} dV = \int_S c_{klij} v_i n_j dS \quad (4)$$

となる。いま、 ρ, c_{klij} は V 内で一定とし、式(3)と(4)を微小領域 $V(=\{\Delta x\}^3)$ で離散化する。離散化の詳細は、著者らの前論文^[3]を参照して頂くこととし、離散化後の結果を簡単に述べると、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、領域 V とピクセル・ボ

連絡先: 中畑和之

愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻
〒790-8577 愛媛県松山市文京町3

E-mail: nakahata@dpc.ehime-u.ac.jp

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。

$$\begin{aligned} \{v_i\}^z &= \{v_i\}^{z-1} + \Delta t \{\dot{v}_i\}^{z+\frac{1}{2}} \\ \{\tau_{ij}\}^{z+\frac{1}{2}} &= \{\tau_{ij}\}^{z-\frac{1}{2}} + \Delta t \{\dot{\tau}_{ij}\}^z \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 Δt は時間ステップ幅であり、上付き文字は整数次 z または半整数時 $z + \gamma$ の時間ステップを表す。結局、EFIT は式 (5) 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。なお、 Δt は CFL 条件を満足するように設定しなければ、解は不安定となる。

EFIT の定式化からは逸れるが、異方性材料には波の位相面の移動速度である位相速度と、エネルギーの伝搬速度である群速度の 2 種類が存在する。なお、等方性材料中ではこれらの方向・速度は一致する。位相速度を解析的に求めるためには、以下の Christoffel 固有方程式^[4] を解けばよい。

$$(\Gamma_{ij} - \rho v^2 \delta_{ij}) d_i = 0 \quad (6)$$

ここで、 d_i は波動の偏向ベクトル、 v は位相速度であり、 Γ_{ij} は位相の進行方向 l_k と c_{ijkl} からなるマトリクスである。この方程式から求められる 3 つの固有値 v が、1 つの P 波と 2 つの S 波の位相速度に対応する。また、次式によって x_i 方向の群速度 g_i を求めることができる。

$$g_i = \frac{1}{\rho v} c_{ijkl} d_i d_j l_k \quad (7)$$

上式で解析的に得られる群速度分布は、EFIT による数値計算で波動場を可視化しても求めることができる^[3]。

3. イメージベースモデリング

イメージベースモデリングとは、被検体の写真等のデジタル画像から、解析モデルを作成する方法である。2D モデルでは、写真等をスキャナで読みとり、画像処理を施した後に BMP 画像に変換する^[1]。2D イメージベースモデリングの流れを Fig.1 に示す。BMP 画像の 1 ピクセルと EFIT の 1 セルを一致させることで、コンクリート中の骨材分布等が簡単に、かつ忠実にモデル化できる。本稿はモノクロ印刷であるので表現できないが、実際は 24bpp でエンコードされた RGB カラーモデルで表している。RGB 明度は、赤・緑・青の輝度を示す 3 つの 8 ビット符号無し整数 (0 から 255 まで) で表せるため、本シミュレータは最大 256^3 の異なる材料定数が設定できることになる。

3D モデルでは、X 線 CT 画像や CAD データからボクセルデータを作成し、この 1 ボクセルと EFIT の 1 セルを一致させることで、複雑な外部形状を持つ対象でもロバストにデータを作成できる。3D イメージベースモデリングの流れを Fig.2 に示す。EFIT ではピクセル要素 (2D)、ボクセル要素 (3D) を用いているため、曲線部分は階段状に近似される。線形の波動問題では、波長に比べて十分に短いセル長を設定する^[1] ことにより、階段の影響を最小限に抑えて精度の良い解析が可能である。

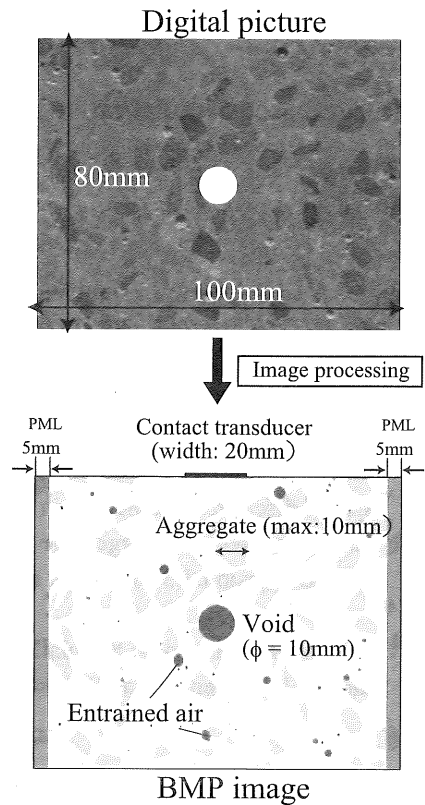


Fig.1 An example of 2D image-based modeling for concrete material

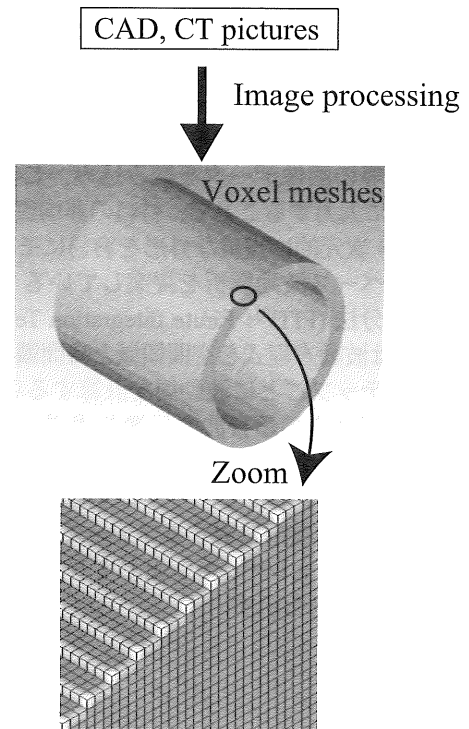


Fig.2 An example of 3D image-based modeling for cylindrical pipe

4. 超音波伝搬シミュレーション

4.1 コンクリート探傷のモデリング

Fig.1 に示した幅 100mm, 高さ 80mm のコンクリート断面について, イメージベース波動解析を行う. ここでは, 2D 波動場に対してシミュレーションを行う. 断面写真を画像処理することによって, BMP 画像を作成する. コンクリートはセメントペースト, 骨材, 気泡の 3 種類の媒質から構成されているものとし, それぞれ黒, 青, 緑の RGB カラーで表現している. 全体積に対する骨材含有率は約 30%, 骨材の最大粒径は 10mm であり, 中心に直径 $\phi=10\text{mm}$ の円形空洞が存在している. セメントペーストの P 波音速 $c_P=3950\text{m/s}$, S 波音速 $c_S=2250\text{m/s}$, $\rho=2050\text{kg/m}^3$ とし, 骨材は $c_P=4400\text{m/s}$, $c_S=2500\text{m/s}$, $\rho=2600\text{kg/m}^3$ とした. 上表面に設置した垂直探触子 (幅 20mm) から, 中心周波数が 200KHz の P 波が送信されるものとする. セル長は $\Delta x=0.025\text{mm}$ と設定した. 時間ステップ幅は, $\Delta t=3\text{ns}$ とし, $42\mu\text{s}$ (14,000 ステップ) まで計算している. モデルの両端には幅 5.0mm の PML (無反射境界) を設けている. EFIT で計算された変位場 $|u|$ のスナップショットを Fig.3 に示す. Fig.3[b] では, P 波が空洞で散乱しており, 同図 [c] では空洞から散乱した S 波がみられる. また同図 [d] では, 底面に到達した P 波が反射しているが, 同図 [e] や [f] をみると反射波の波動が拡散してしまい波面が崩れている. 従っ

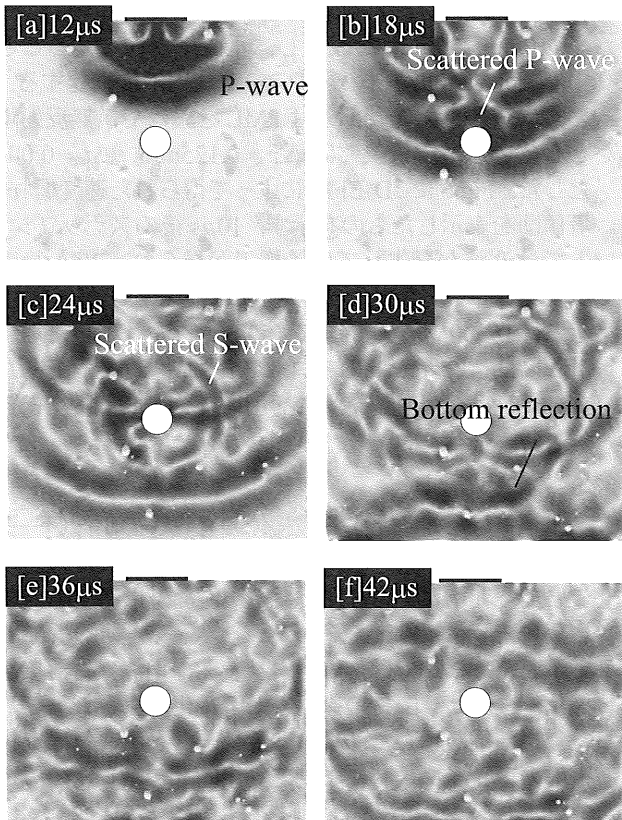


Fig.3 Snapshots of ultrasonic wave propagation in concrete material by means of the EFIT

て, 超音波がコンクリート中を伝搬すると, 骨材や気泡による多重散乱の影響で波動が次第に拡散していき, 介在物の疎密に依存して波面が局所的に変化していくことがわかる.

4.2 異材溶接部に対するフェーズドアレイ探傷のモデリング

鋼材溶接部の超音波探傷試験を困難にしているのは, 金属の結晶構造に起因する音響異方性と非均質性である. 音響異方性は溶接凝固組織のために結晶方位が揃ってしまうことによって引き起こされ, しかもその方位が局所的に異なるため溶接部は非均質材料となる. これらの要因によって, 超音波の伝搬経路は屈曲・散乱するため, 狙った位置に超音波が到達しないという問題が生じている. ここでは, フェーズドアレイ探触子を用いた超

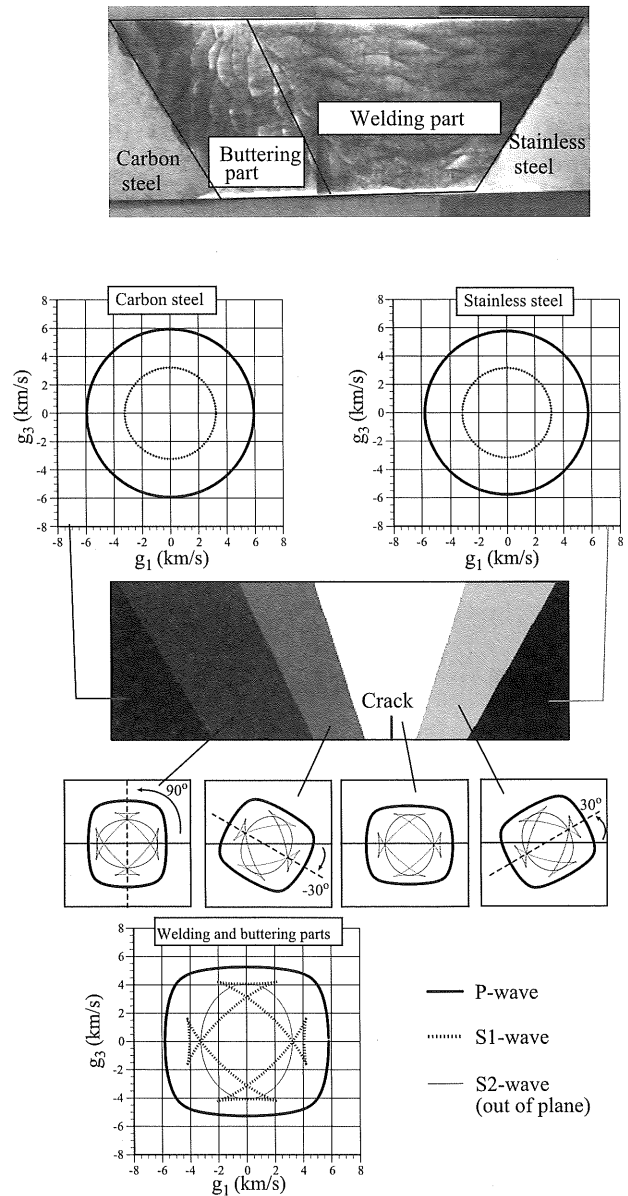


Fig.4 Model of dissimilar metal welding part which shows local anisotropy and heterogeneity

音波探傷シミュレーションの一例を示す。

溶接部内の結晶構造およびその周辺部は、Köhler ら^[5]の過去の事例を参考にして Fig.4 のようにモデル化を行った。炭素鋼は等方性 ($C_{11}=C_{22}=C_{33}=277.0$, $C_{12}=C_{13}=C_{23}=113.0$, $C_{44}=C_{55}=C_{66}=82.0\text{GPa}$, $\rho=7874\text{kg/m}^3$) とし、V 形溶接部とバタリング部は異方性のオーステナイト系鋼材 ($C_{11}=262.7$, $C_{12}=98.25$, $C_{13}=C_{23}=145.0$, $C_{33}=216.0$, $C_{44}=C_{55}=129.0$, $C_{66}=82.25\text{GPa}$, $\rho=7800\text{kg/m}^3$) とし、ステンレス鋼は等方性 ($C_{11}=C_{22}=C_{33}=259.7$, $C_{12}=C_{13}=C_{23}=103.9$, $C_{44}=C_{55}=C_{66}=77.9\text{GPa}$, $\rho=7800\text{kg/m}^3$) とした。溶接部は 3 つの部分に分けており、これらは弾性スティフネスは共通だが結晶方向が異なる。ここでは、 x_1-x_3 を伝搬する 2D 波動場を考える。この場合、溶接部とバタリング部は S 波の 1 つは純モード S 波 (面外) となるため、本解析では計算されない。このとき、式 (7) から求められた群速度 g の分布を Fig.4 の下部に示している。

フェーズドアレイ探触子から発せられた超音波が溶接内部に設定した高さ 5mm のき裂に向かって伝搬し、散乱する様子を Fig.5 に示す。フェーズドアレイ探触子は総素子数 24、ピッチ (2 素子の距離) は 1.0mm であり、中心周波数 2.0MHz のパルスを送信している。EFIT で

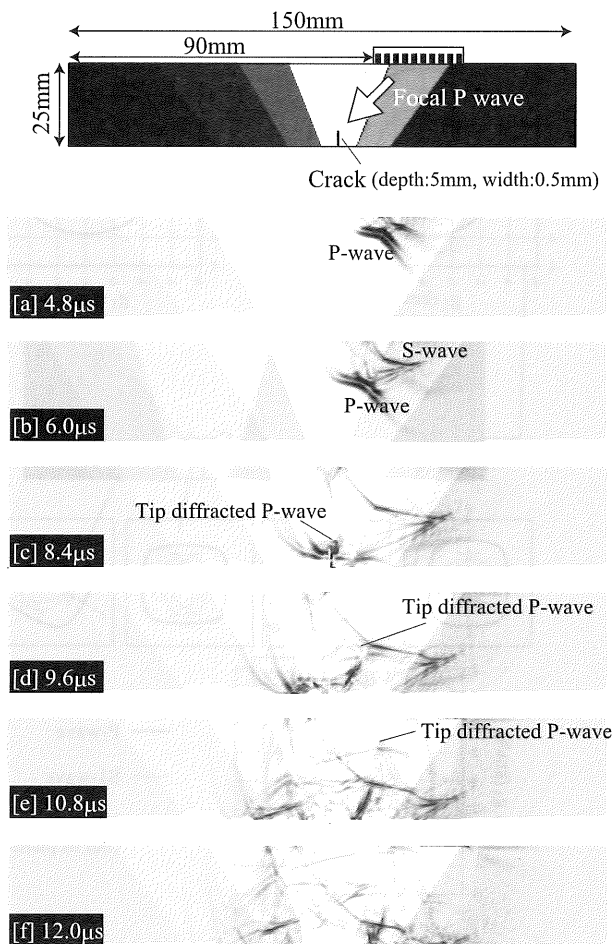


Fig.5 Snapshots of ultrasonic wave propagation in dissimilar metal welding part

は表面力を励起することによって超音波を発生し、ディレイ (時間差) を適切に設定することによってき裂の上端部に向かって P 波が集束するようにしている。詳細は省略するが、ビーム集束点から超音波を逆伝搬させ、集束点から個々のアレイ素子までの伝搬時間を予め計算することで、ディレイを求めた。EFIT の解析条件として、 $\Delta x=0.02\text{mm}$, $\Delta t=1.5\text{ns}$ で 8000 ステップの時刻更新を行い、可視化は変位の絶対値 $|u|$ を各時刻でプロットしている。Fig.5[a] では P 波が発生しており、続いて [b] では S 波も発生している。S 波は探傷に不必要な成分であるが、ピッチ・ディレイ・周波数の設定次第でこの例のように探傷領域内に発生してしまう場合がある。同図 [c] ではき裂の上端部に P 波が到達している。同図 [d] ではき裂上端部からの回折波が観察でき、[e] ではそれがアレイ探触子の方向に伝搬していくことがわかる。これらの結果から、ディレイを適切に設定することで、非均質性・異方性を呈するオーステナイト系鋼材の溶接部に存在するき裂からのエコーを十分捉えることができることを示した。

4.3 複雑形状を有する金属に対する超音波探傷の 3D モデリング

Fig.6 の上部に示すような発電プラントに用いられるタービン部材に対して、EFIT による 3 次元解析を行った。タービンの材質はステンレス鋼 ($c_P=5800\text{m/s}$, $c_S=3100\text{m/s}$, $\rho=7800\text{kg/m}^3$) とした、モデル側面に探触子 (10mm×20mm) を設置し、垂直応力を与えることで中心周波数 500KHz のパルスを金属内部に励起する。なお、タービンの先端部分は PML を設けて、無反射境界としている。解析条件は $\Delta x=0.125\text{mm}$, $\Delta t=0.005\mu\text{s}$ とした。Fig.6 に 3D-EFIT によって得られた速度場 $|v|$ の等値面を表示したものを示す。10 μs 後のスナップショットでは P 波が発生している様子が見られ、20 μs 後のスナップショットでは S 波が発生している様子が見られる。なお、10000 ステップまで (50 μs まで) 計算した場合の計算時間は 2 ノードのプロセス並列計算 (ノードあたり 16CPU スレッド並列計算) を用いて約 8 時間程である。

5. 結言

本稿では、対象とする被検体の写真等の画像データや CAD 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を容易にモデル化できるイメージベース波動解析について示した。ここでは、コンクリート探傷、異材溶接部の探傷、タービン部材の探傷のモデル化およびシミュレーション結果を示した。本シミュレータを用いれば異材溶接部のアレイ探傷時において効果的なディレイの設定ができ、き裂の高精度な評価に応用できることを示した。今後、ますますシミュレーションを超音波探傷に活用することが予想されるが、利便性と信頼性の高いものを開発していきたい。

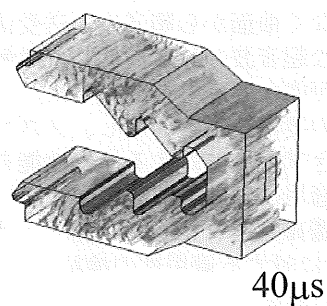
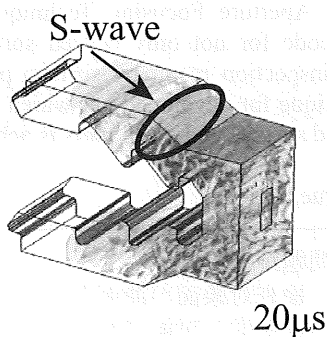
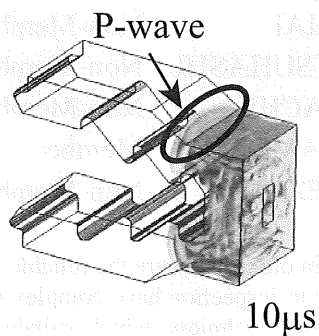
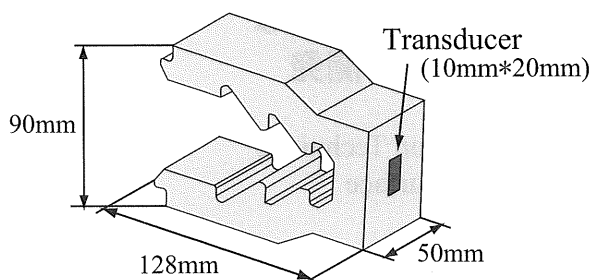


Fig.6 Snapshots of 3D ultrasonic wave propagation in turbine component

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] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] B.A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Volume 1, John Wiley & Sons, New York (1973)
- [5] Köhler, B. Müller, W., Spies, M., Schmitz, V., Zimmer, A., Langenberg, K.J. and Mletzko, U., “Ultrasonic testing of thick walled austenitic welds: modeling and experimental verification”, *Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, American Institute of Physics, **25(A)**, 57–64 (2006)