

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2015～2017  
課題番号：15K06193  
研究課題名(和文) 材料の速度異方性を考慮したAEトモグラフィ法の開発

研究課題名(英文) AE-Tomography for anisotropic materials

研究代表者  
小林 義和 (KOBAYASHI, Yoshikazu)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：20339253

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CFRPなどの異方性を有する複合材料の健全性診断を行うために、速度異方性を考慮しAEトモグラフィ法を開発した。AEトモグラフィ法は、弾性波の到達時刻のみから、その弾性波の発信位置と対象の弾性波速度分布を同定する手法であるが、本研究では、AEトモグラフィ法における弾性波の発信点と弾性波速度分布の同定に利用されている波線追跡法に、スローネスプロファイルを用いて異方性の影響を導入することにより、異方性材料に対しても健全性診断を可能とするようにAEトモグラフィ法の拡張を行った。また、開発された手法に対し、様々な条件において弾性波速度分布の同定を行い、その性能の確認を行った。

研究成果の概要(英文)：A new algorithm of AE-Tomography was developed for evaluations of anisotropic materials in this study. AE-Tomography is a technique that identifies source locations of elastic waves and elastic wave velocity distributions by using only arrival times of the elastic waves on the basis of the ray-trace technique for considering heterogeneity of elastic wave velocity distributions that is caused by local damages and defects. The anisotropy is considered by using slowness profiles in the ray-trace technique that is used in the identifications of source locations of the elastic waves and elastic wave velocity distributions in AE-Tomography. The developed technique was verified by comparing the original elastic wave velocity distributions and identified elastic wave velocity distributions on various conditions, and it was confirmed that the technique qualitatively identifies elastic wave velocity distribution correctly.

研究分野：維持管理工学

キーワード：AEトモグラフィ法 異方性 複合材料 弾性波速度 位置標定 破線追跡法 速度プロファイル 逆解析

1. 研究開始当初の背景

工学分野においては、その優れた材料特性から CFRP 等の異方性を有する材料の利用が拡大しており、それらの健全性の診断方法を確立することは工学的に重要な問題である。このような異方性を有する材料の健全性診断は、従来 AE 試験等によって実施されることが多く、その位置標定によって求められた AE イベントの発生位置の分布と、波形等から算出されるパラメータ等を使ってその損傷を評価してきた。これらの手法では、その計算コストを抑制するために、多くの例で、均一な速度場と波線が直線となることが仮定されている。これらの仮定によって、ほぼリアルタイムな AE イベントの位置標定が可能となっており、その場で位置標定をする必要がある場合には有用ではあるが、その反面、実際の波線経路と仮定されている波線経路に速度構造の不均一性がある場合には、乖離が生ずるといった問題がある。この乖離は、速度構造の不均一性が強くなると共に大きくなっていくことから、対象の損傷が大きくなるほど、その位置標定精度に問題が生じることとなる。これは、損傷が大きく、診断が必要なもの程度位置標定精度が低下することを意味しており、改善すべき問題点である。さらに、AE 試験では、AE イベントの発生位置における情報を得ることはできるものの、それ以外の領域に存在する損傷を発見することができないという問題もある。一方、研究グループは 2002 年よりコンクリート構造物の非破壊検査について共同研究を実施しており、その過程でコンクリート構造物における二次元及び三次元問題を対象とした弾性波トモグラフィ法や AE トモグラフィ法のアルゴリズムを開発してきた。これらのアルゴリズムでは、本研究グループが提案している波線追跡法を採用することによって、対象をメッシュ分割し、メッシュにおける各セルで弾性波速度が均一であることを仮定した上で、メッシュ上での波線をメッシュの節点を頂点とする折線によって近似することによって、対象の速度構造の均一性によって生ずる波線の回折や屈折を自動的に考慮することを可能としている。また、波線のメッシュ依存性を低減するために、各セル中に節点と同じように波線の頂点となりうる中継点を設置しており、材料の損傷に起因する速度構造の変化に伴う波線経路の変化を考慮した、より高精度な弾性波速度分布の把握を可能にしている。AE トモグラフィ法は、Schubert によって提案された従来の弾性波トモグラフィ法と AE 試験の特徴を併せ持った手法である[1]。AE トモグラフィ法では、構造物内部で発生した AE の設置されたセンサーへの到達時刻のみから、AE の発生位置と構造物内の弾性波速度構造を明らかにすることが可能であり、従来の AE 試験のように AE イベントの発生位置近傍の情報だけではなく、同じデータから構造物の健全性の空間分布を求めることができる。Schubert によ

て提案された AE トモグラフィ法のアルゴリズムは、二次元モデルを対象とし、波線の回折や屈折等は考慮されていなかったが、研究グループでは、これを二次元及び三次元問題に対し、波線の回折及び屈折を考慮したアルゴリズムへと拡張している[2]。これらの手法は、コンクリート構造物を対象に開発されてきた経緯から、等方性材料が対象とされてきた。しかし、本手法が異方性材料に対しても応用が可能になれば、異方性材料の健全性診断の有力な手法になると思われる。

2. 研究の目的

本研究では、これらの知見に基づき、材料の異方性を考慮した AE トモグラフィ法の開発を目的とした。本手法が確立されることにより、従来困難であった異方性材料における高精度な AE の位置標定と損傷状況の空間分布を同時に得ることが可能となるため、異方性材料を利用した構造物の状況を空間的に把握することが可能となり、その構造物の効率的な維持管理計画の策定が可能になることが予想される。

3. 研究の方法

AE トモグラフィ法は、受信点における弾性波の到達時刻のみから弾性波速度分布を同定する手法である。図-1 に AE トモグラフィ法の概略のフローチャートを示す。一般的な弾性波トモグラフィでは、対象となる信号は打撃等によって生じた人工的な弾性波であり、その発信位置と発信時刻は既知である。しかし、対象を AE とした場合、受信点における弾性波の到達時刻は観測されるものの、その発信位置と発信時刻は未知である。このため、AE トモグラフィ法では、AE 試験で用いられる位置標法によって、AE の発信位置と発信時刻を推定し、それらの情報を既知の情報とすることによって弾性波トモグラフィ法のアルゴリズムを適用していくことが特徴となっている。このため、AE トモグラフィ法の第一段階では、与えられた弾性波速度分布において AE の位置標定を実施するが、本研究における AE の位置標定では、弾性波速度分布の不均一性と

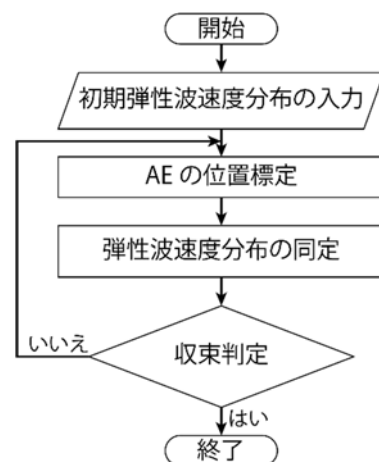


図-1 AE トモグラフィ法のアルゴリズム

弾性波速度の異方性を適切に考慮するために、これらを考慮した波線追跡に基づいて実施される。この波線追跡法では、図-2のように解析対象断面は三角形セルもしくは四角形セルによってメッシュ分割し、波線をメッシュの節点及び波線経路の再現性を向上させるために設けられた中継点を通過する折線として近似する。この際に、各セルにおける弾性波速度を一定とすると、ある節点間の走時は、次式のように示される。

$$T_{ij} = \sum S_k(\theta_k) \ell_{ijk} \quad (1)$$

ここで、 $T_{ij}$  は節点*i*と節点*j*の間に設定された波線経路での走時であり、 $\ell_{ijk}$ はその波線のセル*k*上での波線長、 $S_k(\theta)$ はセル*k*における弾性波速度の逆数であるスローネスであり、 $\theta_k$ はセル*k*における波線の参照軸からの相対角度である。本研究では、このように、このスローネスを波線の角度の関数として与えることによって材料の速度異方性を考慮することを可能にしている。波線の角度の変化に対するスローネスの変化については、図-3のようなスローネスプロファイルを利用することによって実現した。このスローネスプロファイルでは、設定された参照軸の方向から、任意の相対角におけるスローネスを任意の数だけ与えることが可能である。

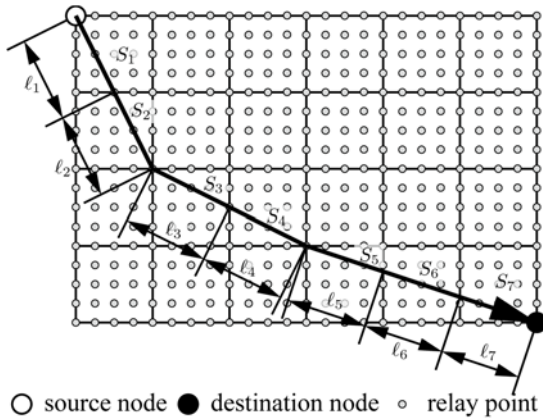


図-2 波線経路例

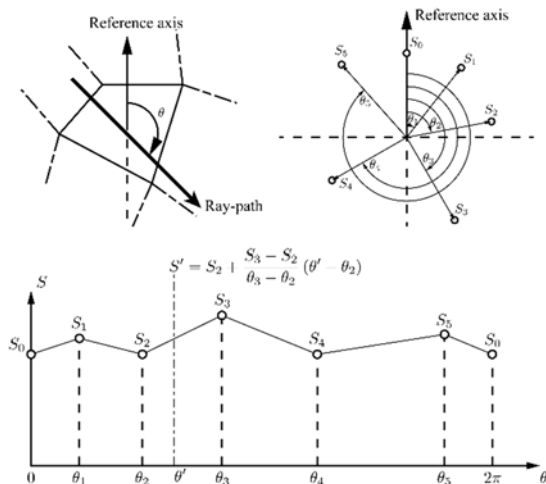


図-3 スローネスプロファイル

け与えることが可能である。また、スローネスを求めたい方向が予めスローネスを与えられていない方向であった場合には、近傍のスローネスが与えられている方向の情報を利用して、内挿することによってその方向におけるスローネスを算出する。実際の波線追跡では、AE トモグラフィ法であれば節点*i*と節点*j*の間での初動走時が必要となるため、節点*i*と節点*j*の間での全ての波線を考慮し、ダイクストラ法等によって式(1)によって算出された走時が最も小さくなる波線経路を選択する。この材料の異方性を考慮した波線追跡法に基づく AE の位置標定法については、対象に設置されているセンサーが存在する点から対象領域の節点及び中継点に対して波線追跡を行うことによってそれぞれの間の初動走時を求めた後、次式の潜在発信時刻を算出することによって行う。

$$P_{ijk} = A_{ij} - T_{jk} \quad (2)$$

ここで、 $P_{ijk}$ はイベント*i*における節点*j*での弾性波の到達時刻から推定した点*k*から弾性波が発信された場合の発信時刻であり、 $A_{ij}$ はイベント*i*における節点*j*での弾性波の到達時刻、 $T_{jk}$ は、材料の異方性を考慮した波線追跡法によって算出した点*j*と点*k*間の初動走時である。このため、対象領域に*n*個のセンサーが設置されていた場合には、それぞれの点が*n*個の潜在発信時刻を有することになる。この*n*個の潜在発信時刻は、弾性波速度の分布が実際の分布と一致し、尚且つ波線経路が厳密に再現されていれば発信点において同一の値となるが、実際には弾性波速度分布と波線経路の再現が解析コストの制限により不十分であることから、一般的にはこのような点は存在しない。このため、本研究では、従来の AET と同様に*n*個の潜在発信時刻の分散が最小となる点を発信点として採用することとした。また、その際の発信時刻としては、発信点として判定された点においては、理想的な状況では*n*個の潜在発信時刻が同一になることに鑑み、発信点として判定された点における*n*個の潜在発信時刻の平均値とした。

本研究では、この標定された弾性波の発信位置と発信時刻を用いて、弾性波速度分布の同定を行う。一般的な弾性波速度トモグラフィ法では、弾性波速度分布を一般的な逆解析法によって同定するために、次式のような観測方程式を利用する。

$$\{T_i\} = [\ell_{ij}]\{S_j\} \quad (3)$$

ただし、

$$\{T_i\} = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_m]^T \quad (4)$$

$$\{S_j\} = [S_1 \ S_2 \ \dots \ S_n]^T \quad (5)$$

$$\{\ell_{ij}\} = \begin{bmatrix} \ell_{11} & \ell_{12} & \dots & \ell_{1n} \\ \ell_{21} & \ell_{22} & \dots & \ell_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ell_{m1} & \ell_{m2} & \dots & \ell_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

であり、 $T_i$ はユニークな番号*i*が割り当てられた観測された初動走時であり、 $\ell_{ij}$ は既知の発信点から $T_i$ が観測された点までの波線経路のセル*j*中の長さ、 $S_j$ がセル*j*におけるスローネスである。ここで、AETにおいては、発信位置や発信時刻の発信情報が観測されていないため、この観測方程式をそのまま利用することはできないことから、材料の異方性を考慮した位置標定法によって同定された発信位置と発信時刻を利用し、さらに式(1)によって、観測方程式を次式のように定める。

$$\{A_i\} - \{E_i\} = [\ell_{ij}]\{S_j\} \quad (7)$$

ただし、

$$\{A_i\} = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_m]^T \quad (8)$$

$$\{E_i\} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_m]^T \quad (9)$$

$$\{S_j\} = [S_1 \ S_2 \ \dots \ S_n]^T \quad (10)$$

$$\{\ell_{ij}c_{ij}\} = \begin{bmatrix} \ell_{11}c_{11} & \dots & \ell_{1n}c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ell_{m1}c_{m1} & \dots & \ell_{mn}c_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

であり、 $A_i$ はユニークな番号*i*が割り当てられた観測された初動走時、 $E_i$ は $A_i$ に対応した推定された発信時刻、 $\ell_{ij}$ は $A_i$ に対応した推定された発信点から $A_i$ が観測された点までの波線経路のセル*j*中の長さ、 $c_{ij}$ はセル*j*における $\ell_{ij}$ の方向に対応したスローネスとセル*j*における最大スローネスの比、 $S_j$ がセル*j*におけるスローネスの最大値になっている。この観測方程式に基づき、本研究では各セルにおける最大スローネスのベクトルである $\{S_j\}$ を逆解析手法を用いて同定することとした。このため、本研究では、異方性を考慮した弾性波速度分布の同定において、損傷によって異方性が変化することを考慮していない。しかし、損傷が生じたセルは最大スローネスが大きくなることからそのセルが波線経路からはずれ、隣接するセルを通過することを想定しているため、問題にはならないと考えた。

#### 4. 研究成果

開発された材料の異方性を考慮した AET に対し、図-4 のようなモデルによって、その妥当性の検証を行った。図-4 に示されるように、検証に使われるモデルは一辺が 10m の正方形であり、オレンジ色の領域と青色の領域で構成されている。オレンジ色と青色の領域においては、鉛直方向と水平方向の弾性波速度が 10:1 になるような弾性波速度異方性が設定されており、鉛直方向の弾性波速度を、それぞれの領域で 4000m/s と 3000m/s とした。これは、オレンジ色の領域と青色の領域が、それ

ぞれ健全な領域と不健全な領域を表わしている。この断面内において、ランダムな位置に 200 個で AE が発生したと仮定し、それぞれの点から図-4 の弾性波速度分布上において波線追跡を受信点まで実施し、その初動走時を弾性波の到達時刻として採用した。受信点は断面の頂点の 4 箇所に設置されているとし、異方性を組み込んだケースと異方性を組込まないケースにおいて、初期条件として、鉛直方向の弾性波速度を 4000m/s とした均一な弾性波速度分布を与えた。図-5 と図-6 に、弾性波速度分布の同定において、異方性を考慮した場合としない場合での同定結果を示す。図-5 によれば、弾性波速度の異方性を考慮して同定された弾性波速度分布は、図-4 で示される弾性波速度分布と同様の傾向を示しており、

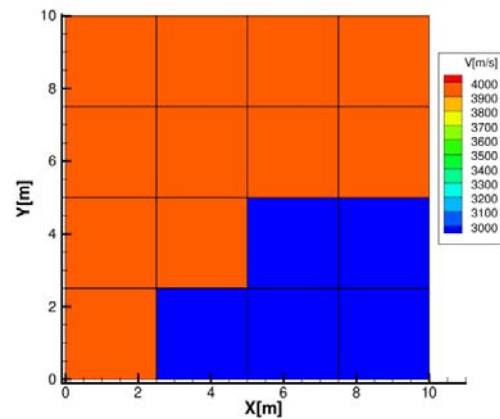


図-4 検証用モデル

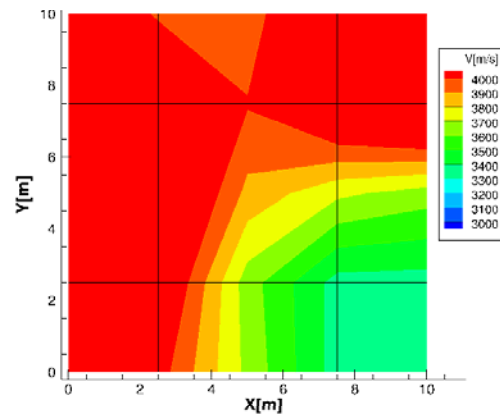


図-5 異方性を考慮した同定結果

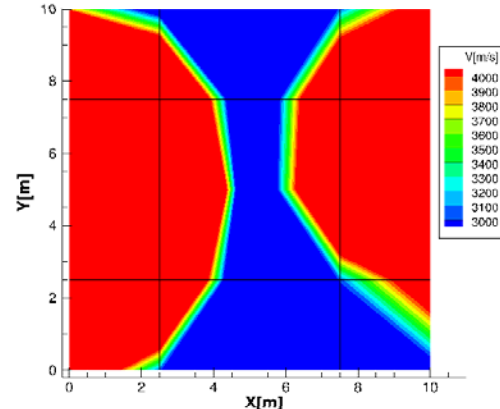


図-6 異方性を考慮しなかった同定結果

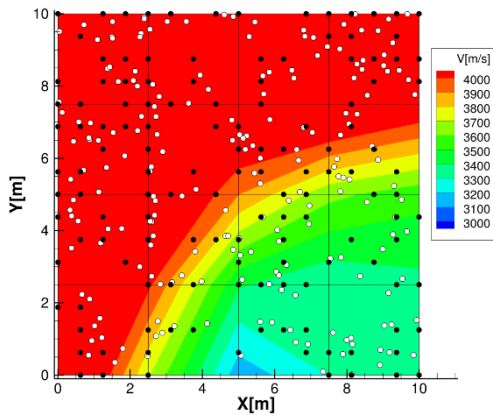


図-7 速度比が 10:7 の場合の同定結果

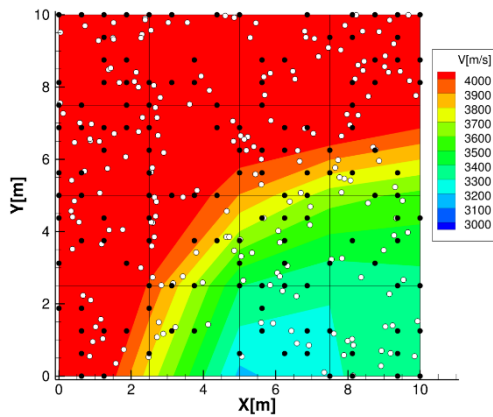


図-8 速度比が 10:5 の場合の同定結果

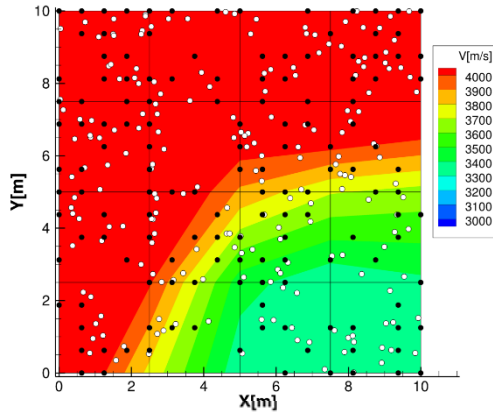


図-9 速度比が 10:3 の場合の同定結果

同定された弾性波速度分布は、定性的には真値と一致していることがわかる。一方、異方性を考慮しないで同定された弾性波速度分布は、図-6に示されるように真値とは傾向も異なっており、これらの結果から、本研究で提案された手法は、異方性を持つ材料に対しても、定性的に弾性波速度分布を同定しうることが示され、想定通りの性能を有していることが明らかとなった。

また、提案した手法の更なる性能の確認のために、異なる異方特性を有するモデルに対して弾性波速度分布の同定を行った。対象となるモデルは図-4のモデルと同一であるが、異方性の程度を 10:7、10:5、10:3 と変化させ、それぞれについて速度比が 10:1 の場合と同様に受信点での弾性波の到達時刻を算出し、それを用いて弾性波速度分布の同定を実施し

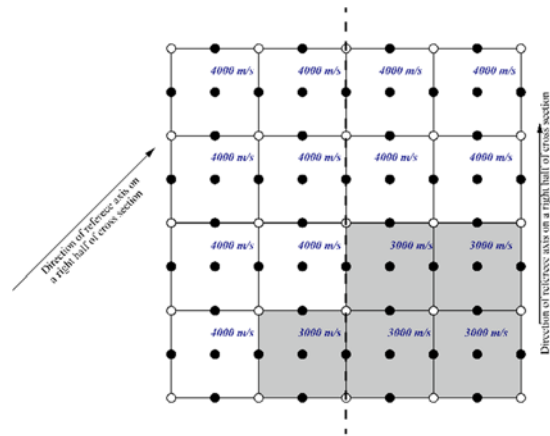


図-10 断面中に異なる参照軸方向を有するモデル

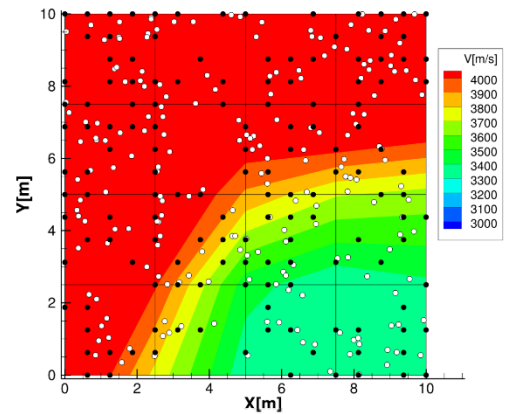


図-11 異なる参照軸方向を有するモデルの同定結果

た。図-7 から図-9 に速度比が 10:7、10:5、10:3 の場合の弾性波速度分布の同定結果を示す。なお、図中の黒丸と白丸は、それぞれ同定された弾性波の発信位置と真の弾性波の発信位置である。これらの図によれば、総じて同定された弾性波速度分布は真の弾性波速度分布と同様の傾向を示しており、異方性の程度が変化しても、提案法は弾性波速度分布を適正に同定しうることが明らかとなった。また、弾性波の発信位置についても、比較的良好に同定されていることがわかる。黒丸と白丸がずれているのは、中継点の設置密度に起因する位置標定の分解能によるものであるため、これは現状ではやむを得ないものである。これを改善するためには、中継点をより密に設置することも考えられるが、この場合には計算に必要なメモリと時間を大幅に増やすことになるため、この点については今後の改善が望まれる。更に、図-10のように、対象領域の中央を境に、左右で参照軸の方向が異なる場合についても、弾性波速度の分布の同定を試みた。この例では、最大速度の分布は図-4のモデルと同一であるが、対象領域の左半分では参照軸が鉛直上向きから時計回りに45°の方向であり、右半分では鉛直上向きの方向である。このため、左半分では鉛直上向きから時計回りに45°の方向で速度が最大となり、それに直交する方向で速度が最小とな

る。ただし、最大速度と最小速度の比は10:1とした。このモデルにおいて、他の例と同様にセンサーにおける弾性波の到達時刻を波線追跡により算出し、それを観測値として弾性波速度分布の同定を行った。図-11にこのモデルにおける弾性波速度分布の同定結果を示す。なお、この図においても、黒丸と白丸は図-7から図-9と同様に、同定された弾性波の発信位置と真の弾性波の発信位置を示している。このモデルにおいても、同定された弾性波速度分布は適切であり、弾性波の発信位置についても良好に同定されていることがわかる。これらの結果により、本研究で開発された手法は、材料の異方性を適切に考慮しつつ、弾性波速度分布を適切に同定する機能を有していることが分かった。

#### <引用文献>

- [1] Schubert, F., Basic Principles of Acoustic Emission Tomography, Journal of Acoustic Emission, Volume 22, 2004, 147-158
- [2] Kobayashi Y., Shiotani T., Computerized AE Tomography, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 239-MCM, Springer, 2016, pp. 47-68

#### 5. 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計 5件)

- ① Kobayashi Y., Oda K., Tamura Y., Fuse T., Shiotani T., Source location algorithm with controlled resolution based on ray-trace technique, Proceedings of Second International RILEM/CONST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures, 査読有, 2017, 161-166
- ② Kobayashi Y., Shiotani T., Three-dimensional Q-Value AE-Tomography and its verification on numerical investigations, Proceedings of IAES-23 & IIIAE 2016 Kyoto & ICAE-8, 査読有, 2016
- ③ Kobayashi Y., Shiotani T., Two-dimensional Q-Value AE-Tomography and its verification on numerical investigations, Proceedings of 32nd Conference of the European Working Group on Acoustic Emission, 査読有, 2016
- ④ Kobayashi Y., Shiotani T., Two-dimensional AE-Tomography based on ray-trace technique for anisotropic materials, Emerging Technologies in

Non-Destructive Testing VI, 査読有, 2015, 41-47

- ⑤ Kobayashi Y., Shiotani T., Verification of Composite AE-Tomography on Varying Anisotropy of Elastic Wave Velocity, Proceedings of The 7th Asia and Pacific Young Researchers and Graduates Symposium, 査読有, 2015, 474-482

##### 〔学会発表〕(計 4件)

- ① Kobayashi Y., Shiotani T., AE-Tomography for identifying Q-Value and elastic wave velocity distributions, 58th meeting of ACOUSTIC EMISSION WORKGROUP, 2016
- ② 小林 義和, 塩谷 智基, 異方性材料を対象としたAE トモグラフィにおける速度異方性の影響, 非破壊検査協会・第20回AE総合コンファレンス, 2015
- ③ 小林 義和, 塩谷 智基, 異方性材料を対象としたAE トモグラフィ法の開発, 土木学会・第70回年次学術講演会, 2015
- ④ Kobayashi Y., Shiotani T., Two-dimensional elastic wave velocity tomography and AE-Tomography for anisotropic materials, 57th meeting of ACOUSTIC EMISSION WORKGROUP, 2015

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小林 義和 (KOBAYASHI, Yoshikazu)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20339253

##### (2) 研究分担者

小田 憲一 (ODA, Kenichi)  
日本大学・理工学部・助教  
研究者番号: 70632298

塩谷 智基 (SHIOTANI, Tomoki)  
京都大学大学院・工学系研究科・特定教授  
研究者番号: 40443642

桃木 昌平 (MOMOKI, Shohei)  
飛鳥建設株式会社・技術研究所・研究員  
研究者番号: 80463579  
(平成28年に削除)

##### (3) 研究協力者

CHAI Hwa-Kian