

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 1 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560567

研究課題名(和文) 土木構造物の損傷から生じるAE波を利用した損傷可視化トモグラフィ

研究課題名(英文) Damage visualization with AE tomography using AE sources from damage areas in infrastructures

研究代表者

塩谷 智基 (Shiotani, Tomoki)

京都大学・経営学研究科・准教授

研究者番号：40443642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：AE計測とトモグラフィ計測を併せ持つAEトモグラフィ手法を提案し、AE源探査方法の改良と特定されたAE源に基づく速度構造の推定手法についてのアルゴリズム構築を行い、提案アルゴリズムに基づき、二次元AEトモグラフィプログラムを作成し、実際のRC破壊実験より得られるAE源を利用して手法の検証を行うとともに高速鉄道高架橋コンクリート床版の損傷位置の可視化に適用した。その結果、本AEトモグラフィにより材料あるいは構造物内部の劣化や損傷が合理的に可視化できることが明らかとなった。今後、本成果の3次元化および、速度分散性を有する板材への適用を念頭にプログラムの高度化を実施する予定である。

研究成果の概要(英文)：The researcher in charge of this project had proposed the AE tomography (AET) technique, combining the AE method and the Tomography technique. In the AET, two principal concepts had been introduced: the improvement of AE source location technique and the estimation technique of velocity distribution based on the AE sources. Then in consideration with these two principals two-dimensional AE tomography program has been established. And the AET has been applied RC plate fracture tests in laboratory, followed by the in-situ investigation of deteriorated concrete deck of high speed railway. Through these applications it was clarified that AET had a great potential to reasonably visualize the damage in the materials or structures. In the next step, the program will be improved to be able to implement 3-dimensional applications. And further modification will be made to correspond to plate structures having velocity dispersion.

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

科研費の分科・細目：維持管理工学

キーワード：アコースティック・エミッション トモグラフィ 劣化診断 AEトモグラフィ 定量的損傷評価 予防保全 アセットマネジメント

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 高度成長期に集中的に建設された我が国のインフラ構造物は更新の時期を迎えているものの、近年の少子化などによる収支減で可能な限り少ない投資で延命化を図らざるを得ない状況にある。延命化を図る上で重要となるのは、構造物の健全性の定量的診断と、それを利用した LCC 算定、ならびに補修方法・時期の決定といえる。これまで上記、とりわけ変状を早期から診断できる検査法は少なく、主に大規模な変状が確認された後の対処療法が中心であった。

(2) 研究実施者は初期の微視的損傷から診断できる、アコースティック・エミッション(以下、AE とする)に着目し、岩盤斜面、組積構造物、橋梁下部構造物、コンクリート構造物、橋梁などの土木構造物の安定性/健全性評価に AE 法が有効であることを明らかにしてきた。

(3) 一方実務面で、AE を利用した損傷指標は、工学的判断を下す上で一般に用いられる物理量や力学的値との明確な関係を見いだすまでには至っておらず、材料の品質評価に利用される弾性波のモードやパラメータを別途計測(加えてトモグラフィ法)を用いて可視化することが必要不可欠な状況にある。そこで研究実施者らは 2 つの弾性波法(AE など能動的な方法、超音波透過など受動的な方法)を組合せて試験を実施し、損傷度の上昇とともに AE が数多く得られ、AE が生じる範囲や箇所での弾性波速度が低いこと、これらを利用することで損傷の定量的評価が可能となることなどを明らかにしてきた。これらの組み合わせが損傷評価に有効であることは自明であるが、実際に構造物で実現しようとする場合、数多くの AE センサを設置した AE 計測、そして AE 計測後に、対象物を囲むように取り付けたセンサを利用した繰り返しの弾性波励起・検出が必要となり、試験に伴う時間、費用に課題を残していた。そこで、申請研究では、地球内部の構造が地震を震源として可視化できるのと同様に、AE 計測を通じて得られる AE 源(震源)の物理的特性を逆解析処理により同定し、その震源パラメータに基づき各 AE センサまでの到達経路を探索、トモグラフィ処理により内部の速度構造や弾性波減衰特性を推定する。そして、最終的に得られた AE 損傷パラメータ、AE 源の集中度、そして本研究を通じて「新たに得られる速度構造や減衰特性構造」などを利用して対象構造物内部の損傷を合理的に可視化(定量化)し、土木構造物の限られた予算下での延命化に貢献しようとするものである。

## 2. 研究の目的

(1) AE 震源の探査方法および、損傷に有効な弾性波パラメータに関する研究: 従来 AE 震

源(以下 AE 源とする)の決定には対象物を伝播する弾性波の内、最も速い縦波(P 波)が利用されてきた。しかし、P 波のエネルギーは小さく、さらに本研究が対象とする損傷した試験体や構造物では、その内部を伝播した弾性波の P 波初動を精度良くとらえることは困難といえ、S 波や表面波などを利用した AE 源の決定が必用となる。本研究では、AE 源決定に有効な弾性波のモードを明らかにするとともに、損傷の存在を考慮した AE 源の決定方法について検討する。さらに損傷の規模に敏感な弾性波パラメータを得られる弾性波の周波数特性とともに検討し、「損傷構造物の AE 源探査手法」「損傷規模に応じた弾性波パラメータ」を明らかにする。

(2) AE 震源を利用したトモグラフィ手法の確立: (1)により得られた AE 源の種々のパラメータ(発生時間、位置、規模)と、設置した複数の AE センサで得られた当該 AE 源に対応した種々のパラメータを用いて、計測対象材料/構造物の内部構造を弾性波速度構造、エネルギー減衰構造により可視化できる技術を確立する。これらの弾性波パラメータは間接的に材料の物性(剛性)を反映していることから、これらを利用して構造物内部の健全性が可視化、評価可能となる。さらに従来の AE 計測での成果(例えば AE 源位置の分布の時間毎のプロット)を加えることで、逐次進行する破壊(損傷)についても評価可能となる。

## 3. 研究の方法

(1) 実務に即した AE 源探査方法の改良と推定された AE 源を利用したトモグラフィ技術に関する研究: 従来 AE 源の決定には対象物を伝播する弾性波の内、最も速い縦波(P 波)が利用される。しかし、P 波のエネルギーは小さく、損傷を有する試験体を伝播した弾性波の P 波初動到達をとらえることは困難で別の波のモードを利用した AE 源の決定が必用となる。ここでは、AE 源決定に有効な弾性波のモードを明らかにするとともに、ある程度損傷を見越した AE 源の決定方法について検討する。そして、新たな手法により同定された AE 源位置と、そのパラメータ(発生時間、発生位置、規模など)、そして各センサでの同パラメータ値を用いて対象材料内部の損傷位置や分布を定量化(可視化)する。

(2) 実構造物の AE 計測で得られたデータに(1)で構築した方法論を適用し、別途得ている弾性波トモグラフィ結果と比較検討し、AE トモグラフィ成果を検証する。このように既往の実構造物での原位置データに本手法を適用し手法の工学的有用性を確認する。

#### 4. 研究成果

(1) AE トモグラフィでは、AE 源の推定方法の見直しから実施した。本 AE 源の推定手法は、従来の手法とは異なり、不均一性を有する弾性波速度分布の影響を考慮した波線追跡に基づいて AE 位置標定を実施する。また、AE 位置標定の精度を向上させるため、AE 源位置の候補には、メッシュの節点のみではなく、各セル中に設置された波線の中継点を追加し、より高精度な AE 位置標定を実現している。

(2) 波線追跡を用いた位置標定手法：図 1 に AE トモグラフィを行う際の新たなアプローチとして考案した、波線追跡（レイトレーシング）を用いた位置標定手法の概要を示す。図中の○は受信点（センサ）を示し、トモグラフィにおける三角形要素を破線で示した。図に示す通り受信点  $j$  から他の全ての節点  $i$  に対し波線追跡を行い、各節点への理論走時  $T_{ji}$  を算出する。 $T_{ji}$  と受信点  $j$  における初動走時  $T_j$  の差より潜在的な推定発信時間を得る。これを受信数  $N$  に対しそれぞれ行い、最終的に以下のような式(1)及び式(2)により求めた推定発信時間の分散が最少となる節点を発信源とする ( $T_{mi}$  は節点  $i$  における各推定発信時間の平均値、 $\sigma_i$  は節点  $i$  における推定発信時間の分散である)。また、決定された発信点における発信時間を  $T_{mi}$  とする。

$$T_{mi} = \frac{\sum_j (T_{ji} - T_j)}{N} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{\sum_j (T_{ji} - T_j - T_{mi})^2}{N} \quad (2)$$

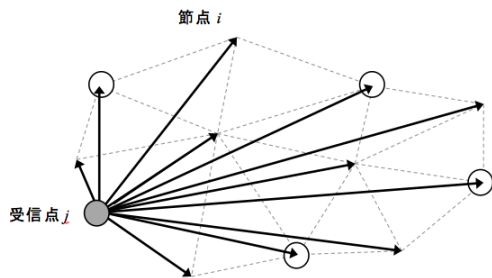


図 1 波線追跡を用いた発信源推定の概要

ここで、図 1 においては便宜上発信源から受信点への波線を直線として表現しているが、実際には面内における速度構造の不均一性を考慮した解析となっており、発信点から受信点までの波線は、一般には直線ではなく図 2 のような折れ線となる。

以上より、従来手法とは異なり、材料における伝播速度の不均一性を反映した発信源を得ることができるが、発信点の候補を節点としているため、このままでは、AE 位置標定をする際の最小分解能がセルの大きさとなる。

また、セル内において弾性波速度を一定としているため、セルの大きさは、波線追跡の分解能ともなる。このため、AE 位置標定および、波線追跡の分解能を向上させるためには、対象断面をより小さなセルで分割し、より細かなメッシュを作成するが、セルの数が增加することによって、同定対象となる自由度が増加するため、弾性波速度分布の推定がより困難となる。そこで、同定対象の自由度を増加させずに AE 位置標定と波線追跡の分解能を向上させるために、図 3 に示すように、中継点をセル内に設置することによって、波線追跡、発信位置標定の分解能を任意に制御できるようにした。

中継点は、有限要素法で一般的に使われている内挿関数によって、写像されたセル中に均一な分布を目指して配置される。例えば、セルが四角形の場合には、図 4(a)のセル座標系から図 4(b)の全体座標系に写像されているため、セル座標系において均一に配置された中継点が、その写像に基づいて全体座標系に写像される。このため、全体座標系におけるセルのゆがみが小さく、大きさが均一に近い場合には、中継点もより均一に配置される。このため、本手法を適用する場合には、中継点を均一な密度で配置するためには、対象の断面をゆがみの少ないセルで分割することが望ましい。

このように中継点を設置することで、図-5 のような波線経路が選択されることとなるため、より高精度に波線経路の推定をすることが可能になる。また、この中継点を潜在的な発信点として取り扱うことによって、セル数を増加させずに発信点標定の精度を向上させることが可能となる。なお、受信点における弾性波の到達時刻は、決定された発信点より波線追跡を実施し、推定された発信時刻に発信点から受信点までの走時を加えることによって求めることができる。これにより、発信点の情報が決定されたため、弾性波速度分布の推定については、一般に弾性波トモグラフィで採用されている手法を利用することが可能となる。

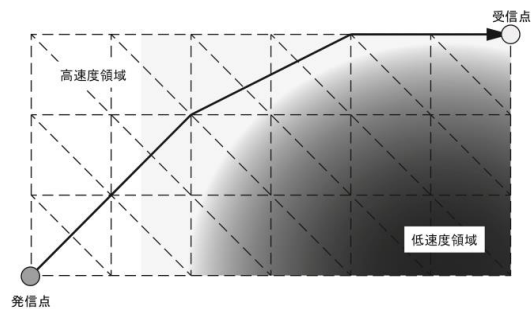


図 2 不均一伝播速度場における波線例

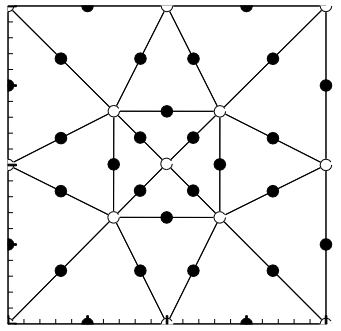


図3 中継点の設置例 (○節点, ●中継点)

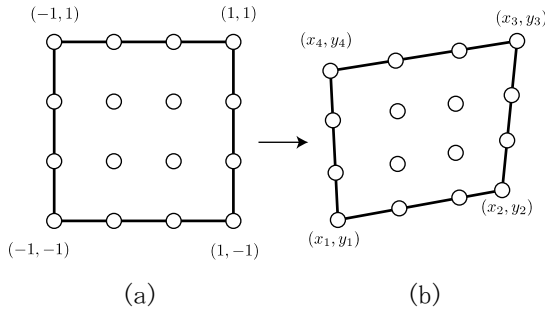


図4 中継点セル座標から全体座標への写像

### (3) 速度モデルの修正手法

各要素での速度モデルの修正には、同時反復法 (SIRT) によって実施した。同時反復法では、理論走時と観測走時との走時残差を波線が通過したセルの長さに応じて振分け、セルのスローネス (速度の逆数)  $S$  の補正量を式 (3) によって求める。

$$\Delta S_i = \sum_j \frac{\Delta T_j l_{ij}}{L_j} / \sum_j l_{ij} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta S_i$  はセル  $i$  のスローネス補正量、 $\Delta T_j$  は  $j$  観測点 (センサ) における観測到達時間と理論到達時間の差、 $L_j$  は  $j$  観測点までの波線経路長、そして  $l_{ij}$  は  $j$  観測点のセル  $i$  における波線経路長を示す。この  $\Delta S_i$  によって各セルの弾性波速度を更新し、その更新された速度場において再度発信点の推定を実施し、その結果に基づいて弾性波トモグラフィを実施するという手続きを繰り返すことによって、最終的な発信点情報と弾性波速度分布を得ることができる。なお、弾性波速度分布については、境界条件の不足から、AE 源のみによって弾性波速度分布を求めた場合には、その相対的な関係のみが有意であり、その弾性波速度分布が定量的に正しいことを保証できない。このため、弾性波速度分布を定量的に求めたい場合には、予備試験等によって発信点情報を有する観測データを取得しておき、それを AE 源と同時に観測値として利用する必要がある。

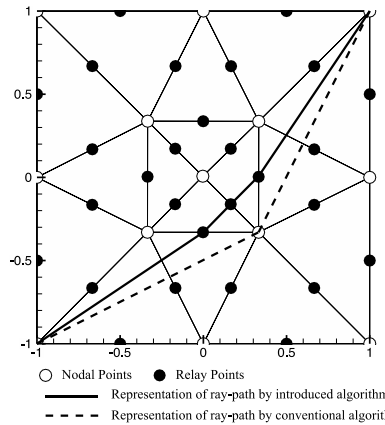


図5 中継点の設置による波線経路の変化

(4) 高速鉄道高架橋コンクリート床版への適用: AET 適用対象とした構造物は、実際に打音検査により補修を必用とする内部空隙が推定された高速道路鉄道の高架橋コンクリート床版である。ここでは、鉄道車両による交通荷重でいわゆる打音などで判断できる空隙などから二次 AE が励起できるか、また、励起できるとしても二次 AE とは無関係な他に由来する AE と識別できるか、このような原位置計測に重要となる事項について検討した。

二次 AE による AET 解析結果を図 6 に示す。図中の青点は繰返し計算初期の位置標定点 (既往の AE 位置標定アルゴリズム、つまり領域内速度一定としたときの標定点)、赤点は AET 解析により最終的に得られた位置標定点である。最終的な位置標定点は、対象領域内に分散され、定めた各セルを通過する波線密度に差異が小さいことが推察される。つまり、各セルの解析精度はほぼ同程度であると考えられる。ここで、打音および、表面波トモグラフィ解析結果と比較すると、AET でも他の手法と同様に中央、中央下部および、右下の損傷領域が低速度帯として特定されている。さらに、他の手法で確認できなかった右上の領域で、AET では低速度領域を示した。他手法が浅層の情報に限って検知できる手法であることから、AET ではそれ以深の領域からの損傷をとらえられた可能性が示唆された。

ここで AET の解析精度は、解析に供する AE イベント数の大小ではなく位置標定点が精度よく得られる AE イベントを用いることが重要となる。そこで改めて用いる AE 波形を目視により見直した。その結果、鉄道振動による AE 波形とも二次 AE とも解釈できる AE 波形 (継続的信号であり、AE 初動が不明瞭で誤標定を生じる可能性が高い) が存在していた。そこで、それらの AE 波形を除去し再度 AET 解析を実施した。図 7 に解析結果を示す。同図より、一部 AE 源が減少しは波線密度が低下したセルも認められるが図中央、中央下部および、右上の損傷領域が明瞭に低速度帯として評価可能となった。以上に示したように AET 解析では、AE 源の位置標定精度が解析

結果に大きく影響し、数少なくとも精度の良い AE 源を用いることが合理的な損傷領域評価に肝要であることが改めて認識された。

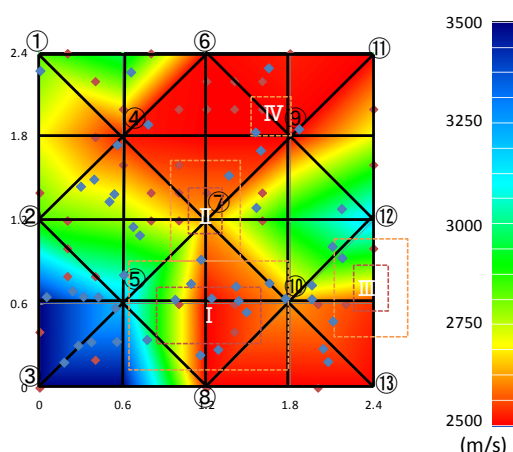


図 6 7 kHz 以上の卓越周波数を有する AE 源を利用した AET 解析結果

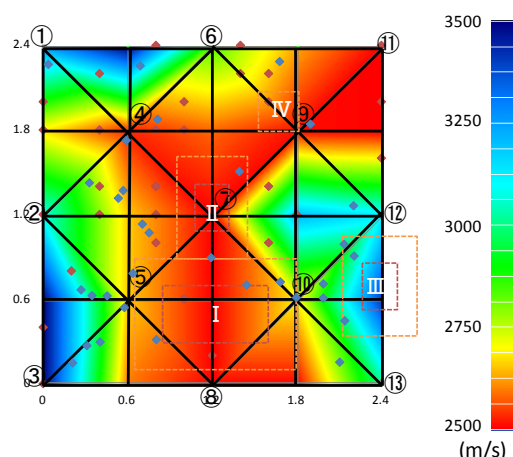


図 7 図 6 の条件に加え目視で抽出した二次 AE を利用した AET 解析結果

以上、内部損傷から誘発される AE 源 (二次 AE) を利用した AE トモグラフィ法について、その計算・計測概念を示すとともに損傷が推定され補修される前の鉄道高架橋のコンクリート床版に本 AET 手法を適用した。その結果、鉄道振動により既存損傷から二次 AE の励起が可能であり、バックグラウンドや鉄道振動に起因した AE 活動を取り除くことで AET 解析により損傷位置が可視化可能となることが明らかとなった。また、明瞭に識別ができなかった AE 源も目視により取り除くことで、精度の良い AET 解析結果を得ることができた。今後 AET 手法の三次元への拡張を進めるとともに、さらに様々な材料、構造物に適用し、手法の有用性を検証する予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Iwamoto, K., T. Shiotani, Y. Kobayashi and S. Momoki, Application of AE Tomography for fracture visualization of rock material, JSNDI, Progress in Acoustic Emission XVI, 査読有, 2012, 193-198.
- ② 高田雄大, 塩谷智基, 大津宏康: 弾性波の周波数応答特性による不均質材料の損傷評価指標に関する研究, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 12 巻, 査読有, 2012, 363-368.
- ③ Shiotani, T., Y. Takada, T. Watanabe and H. Ohtsu, Damage evaluation of heterogeneous materials by Q-value analysis of AE waveforms, JSNDI, Progress in Acoustic Emission XVI, 査読有, 2012, 1-6.
- ④ Chai, H.K., D.G. Aggelis, S. Momoki, Y. Kobayashi and T. Shiotani, Tomographic reconstruction of concrete using attenuation of ultrasound, NDT & E International 44, 査読有, 2011, 206-215.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Kobayashi, Y and T. Shiotani, Seismic tomography with estimation of source location for concrete structures, Engineering Technics Press, Structural Faults and Repair 2012, 14th International Conference and Exhibition, CD-ROM, 2012.
- ② 奥出信博, 塩谷智基, 小林義和, 桃木昌平: AE を用いたコンクリート構造物の新しい損傷評価手法の試み, JSNDI, アコースティック・エミッション部会, 講演会資料 AE-00018, pp. 13-20, 2012.
- ③ Takada, Y, T. Shiotani and H. Ohtsu, Damage evaluation of inhomogeneous materials by frequency response characteristics of elastic wave, EIT & JSCE, Proceedings of EIT-JSCE Symposium on International Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries 2012, pp. 114-117, 2012.
- ④ Shiotani, T., Recent advances of AE technology for damage assessment in infrastructures, Proceeding of 30th European Conference on Acoustic Emission and 7th International Conference on Acoustic Emission, CD-ROM, 2012.
- ⑤ 塩谷智基, 奥出信博, 桃木昌平, 小林義

和：AE トモグラフィによるインフラ構造物の健全性評価手法の提案，日本非破壊検査協会，第18回AE総合コンファレンス論文集，pp. 39-42，2011.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塩谷 智基 (SHIOTANI, Tomoki)  
京都大学・経営管理研究部・准教授  
研究者番号：40443642

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：