

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：32717

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06195

研究課題名（和文）非接触音響探査法の欠陥検知アルゴリズム改善に関する研究

研究課題名（英文）Study on improvement of defect detection algorithm for non-contact acoustic inspection

研究代表者

杉本 和子（Kazuko, Sugimoto）

桐蔭横浜大学・工学（系）研究科（研究院）・研究員（移行）

研究者番号：60642171

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）：コンクリート構造物の内部欠陥（ひび割れ・剥離・空隙）を検出するため、遠隔からの非接触非破壊検査方法を研究した。空中放射音波とレーザドップラ振動計を用いて、現状で、コンクリート表面から深さ10cmまでの内部欠陥を、距離30mから測定可能である。本研究では、振動エネルギー比とスペクトルエントロピーという音響学的特徴量を用いた欠陥検出アルゴリズムを提案した。円形空洞または剥離欠陥を内包したコンクリート壁供試体で検証し、良好な結果を得た。実コンクリート構造物に対応するため、コンクリート健全部の統計的評価を2つの音響学的特徴量を用いた健全部抽出アルゴリズムによって行い、内部欠陥の検出効果を上げた。

研究成果の概要（英文）：In order to detect an internal defect (a crack, a peeling, a cavity) of concrete structures, noncontact non-destructive inspection method from a long distance was studied. Using airborne sound waves and a laser Doppler vibrometer, internal defects up to 10 cm deep from the concrete surface can be measured from a distance of 30 m at present. In this research, we proposed a defect detection algorithm using acoustic features such as vibration energy ratio and spectral entropy. It was verified with a concrete wall specimen containing several circular cavity or peeling defects, and good results were obtained. Furthermore, in order to cope with actual concrete structures, the statistical evaluation of a healthy part of concrete was carried out by healthy-part extraction algorithm using two acoustic feature quantities. Then, the effect to detect internal defects was increased.

研究分野：音響工学，医用工学

キーワード：非接触非破壊検査法 コンクリート内部欠陥検出 振動エネルギー比 スペクトルエントロピー 欠陥検出アルゴリズム コンクリート健全部評価 LRAD レーザドップラ振動計

1. 研究開始当初の背景

近年、笹子トンネル天井板崩落事故でコンクリートの一部が落下したように、コンクリート構造物(トンネル・橋梁・ダム等)の劣化が、日本だけでなくアメリカでも、より深刻な社会問題となっている。その対策として、検査・補修・更新の重要性が認識されている。

コンクリート構造物の欠陥探査には、未だにハンマーを用いた叩き点検が用いられているが、高所検査には足場を必要とし、音を聞き分けるための熟練が必要とされるが人手不足の問題がある。定量的な手法として衝撃弾性波や超音波、電磁波を用いた手法も開発されているが、基本的に探査表面に近づく必要があるため、作業効率に関しては本質的な解決になっていない。一方で赤外線やパルスレーザを用いた手法は遠隔からでも実施可能であるが、前者は周囲の熱環境に結果が左右されやすいこと、後者は駆動に大電力が必要であること及び安全性に問題があることが明らかにされている。

我々は、これまで空中放射音波とレーザドップラ振動計を用いた非接触音響探査法を研究し、遠隔からコンクリート構造物の内部欠陥(浮き・剥離・空隙など)を検出・映像化する方法を検討してきた。そのため、叩き点検を合理化、高精度化する技術として、遠距離からコンクリート浅層の内部欠陥を探査する非接触音響探査法が求められている。

2. 研究の目的

コンクリート内部欠陥を検出するための遠隔からの非接触非破壊検査方法として、欠陥検出アルゴリズムの開発を行う。

3. 研究の方法

非接触音響探査法の基本構成を図1に示す。音源として長距離音響放射装置(LRAD : Long Range Acoustic Device)を使用し、放射された平面波音波によって測定対象面を励振する。励振時の2次元測定面上の振動速度をスキャニング振動計(SLDV : Scanning Laser Doppler Vibrometer)を用いて計測する。もし、コンクリート内部に水平方向のひび割れなど空隙欠陥が存在していたとすると、その欠陥部は健全部に比べ曲げ剛性が低下するため、たわみ振動が生じやすくなっている。本手法では、叩き点検と同じたわみ振動を発生させることにより、コンクリート構造物の表面近くの空洞および剥離欠陥を検出可能である。

今までに計測した主にコンクリート実構造物の振動速度データを検討すると、計測対象の表面状態(反射率・凹凸・汚れ等)に依存して、レーザ戻り光量が減少し、受光漏れに起因すると考えられる光学ノイズが含まれる測定点の存在が判明した。その要因としては、レーザの出力強度、計測対象の低反射特性、乱反射特性、計測距離およびレーザ照射角度などが挙げられる。当初、健全部のエネルギーを基準にした振動エネルギー比を利用して欠陥検出と映像化を行った。しかしながら、

受光漏れによる光学ノイズを原因とする計測不良点の場合も振動エネルギーは大きいため、本来欠陥でない箇所でも反応が出てしまうことがある。一方で受光漏れによる計測不良点と計測された健全部は白色性が強く、ともに高いスペクトルエントロピー値を示す。そこで、従来用いていた振動エネルギー比に加えて信号の白色性を表す特徴量であるスペクトルエントロピー値を組み合わせることで、閾値を適切に選択すれば、欠陥部・健全部・計測不良点の自動判別が可能になる。

様々なコンクリート実構造物に適用させるため、この欠陥検出アルゴリズムを発展させて、コンクリート健全部を統計的に評価し特定する健全部抽出アルゴリズムを考案し、欠陥検出をより可能にした。

4. 研究成果

本研究では、振動エネルギー比に新たにスペクトルエントロピーを組み合わせた欠陥検出アルゴリズムを考案した。計測対象のコンクリートの表面状態(反射率・汚れ・凹凸)に依存して、レーザの戻り光量が減少し、受光漏れに起因する光学ノイズが問題となっていた。光学ノイズの白色性に着目し、スペクトルエントロピーという音響特徴量を導入し、コンクリートの健全部・欠陥部と計測不良点を識別する。これにより、2つの閾値を適切に選択すれば、欠陥部の検出が定量的に可能である。複数の大きさの円形空洞欠陥を内包するコンクリート壁供試体を本予算で作成し、提案したアルゴリズムの効果を検証した。

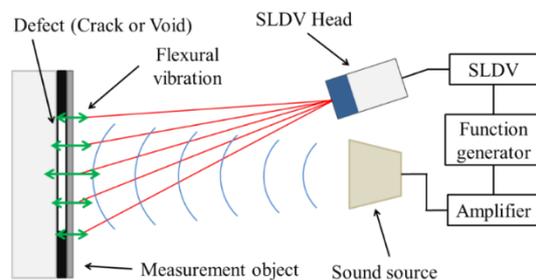


図1 非接触音響探査法の基本構成

その結果、良好な結果が得られ、国内外の学会で報告した。しかしながら、コンクリート実構造物(トンネルや橋梁)に対して、ひび割れ・空隙等の欠陥の形状や大きさは単純ではなく、コンクリートは複合材料のため、経年劣化・骨材・水分量も要因となり、2つの閾値の直線では区切れない場合、即ち、健全部と欠陥部との間のグレーゾーンが存在する。従来、コンクリートの内部欠陥は、打音検査で叩いたときの音の状態を検査者が経験と勘で識別していたが、コンクリート健全部の評価基準は検討されてきていない。そこで、測定領域の2つの音響学的特徴量の分布を統計的に評価し、コンクリート健全部を特定し、欠陥部を検出するアルゴリズムを提案した。

4-1. 欠陥検出アルゴリズム 1

非接触音響探査法で計測されたコンクリート計測面上の 2 次元振動速度データから、次の 2 つの音響学的特徴量を計算する。

(1) 振動エネルギー比

コンクリートの内部欠陥（空洞・ひび割れ・剥離）の検査では、欠陥による共振周波数を振動速度スペクトルで確認することが多いが、欠陥の形状や広さ・深さに依存して共振周波数は変化してしまう。どんな欠陥も一律に評価するため、振動エネルギー比を導入した。欠陥のピークが存在すると思われる周波数帯域で振動速度のパワースペクトルの和を積算し、振動エネルギーに対応する値とみなす。分母に健全部、分子に欠陥部をとり、その比から振動エネルギー比（VER: Vibration Energy Ratio）を、(1)式のように定義する。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \quad (1)$$

ここで、 PSD_{defect} 、 PSD_{health} は欠陥部、健全部のパワースペクトル密度、 f_1 、 f_2 は下限および上限周波数である。計測された健全部の内、振動エネルギーが最も低い値を健全部の基準として計算した。但し、レーザドップラ振動計の共振ピークは計算から除く。

(2) スペクトルエントロピー

計測対象の表面状態（反射率・凹凸等）に依存してレーザ戻り光量が減少し、受光漏れに起因する光学ノイズが生じる。振動速度波形の受光漏れした光学ノイズは、外部雑音により大きな振動振幅として検出される。この光学ノイズの周波数特性が白色雑音に似ていることから、スペクトルエントロピーという信号の白色性を表す特徴量を導入する。これは信号のスペクトルを確率分布と見なし、情報エントロピーを計算するもので、(2)式で表される。

$$H = -\sum_f P_f \log_2 P_f \quad (2)$$

$$P_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f}$$

S_f は測定点での振動速度のパワースペクトルを示す。スペクトルエントロピーは、白色性が強い信号の場合は値が大きくなり、共振ピークが立つ信号のような場合には、値が小さくなる性質がある。

(3) 2 つの音響学的特徴量による欠陥検出アルゴリズム

振動エネルギー比とスペクトルエントロピーという 2 つの音響学的特徴量を組み合わせ、閾値を適切に選択することによって、欠陥部、健全部および計測不良点の識別を行う。

円形空洞欠陥（φ200-80）を埋め込んだコンクリート供試体を用いて実験を行い、欠陥検出アルゴリズムを適用した例を示す。直径 200 mm、25 mm 厚の発砲スチロールをコンクリート表面から空洞欠陥表面までの深さが 80 mm

になるように埋め込んで作製された円形空洞欠陥供試体を用いた。図 2 は、円形空洞欠陥が埋め込まれたコンクリート供試体を正面から CCD カメラで撮影した画像である。

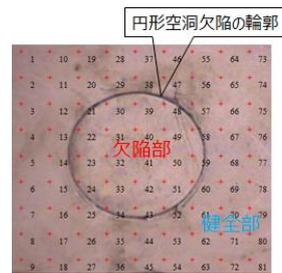


図 2 円形供試体（φ200-80）の CCD 画像

黒い円は、円形欠陥の輪郭と位置を示す。赤色 + は計測点、その右下に計測点番号が表示されている。実験で、音源からコンクリート計測面までの距離は約 5.1 m、レーザドップラ振動計からコンクリート計測面までの距離は約 5.8 m であった。2 つの音響学的特徴量（振動エネルギー比とスペクトルエントロピー）による散布図を図 3 に示す。

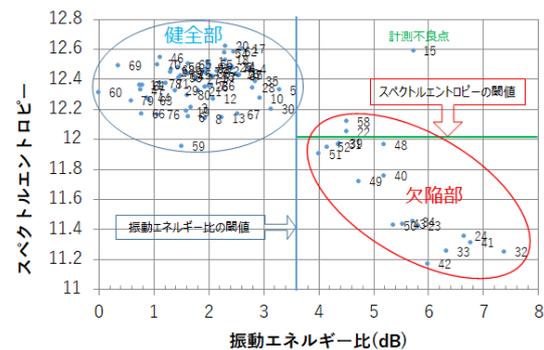


図 3 振動エネルギー vs スペクトルエントロピーの相関図

健全部の測定点は、図の左上に集まり、欠陥部の測定点は右下に点在し、計測不良点は右上に現れている。空洞欠陥の場合は、健全部・欠陥部・計測不良点が明瞭に分離され、2 つの閾値を選択すれば、欠陥部の識別が定量的に可能である。図 4 に円形空洞欠陥の映像化を示す。円内の空洞で明確な振動エネルギーの上昇が見られ、空洞欠陥が検出された。

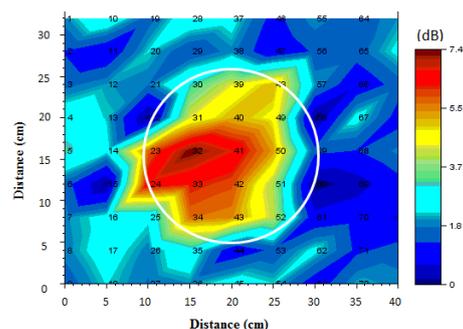


図 4 円形空洞欠陥の映像化

2つの音響学的特徴量の散布図による識別は表-1のように表される。

表-1 健全部・欠陥部・計測不良点の定性的評価

	健全部	欠陥部	計測不良点
振動エネルギー比	低い	高い	高い
スペクトルエントロピー	高い	低い	高い

以上から、図5に示す欠陥検出アルゴリズムが考案された。

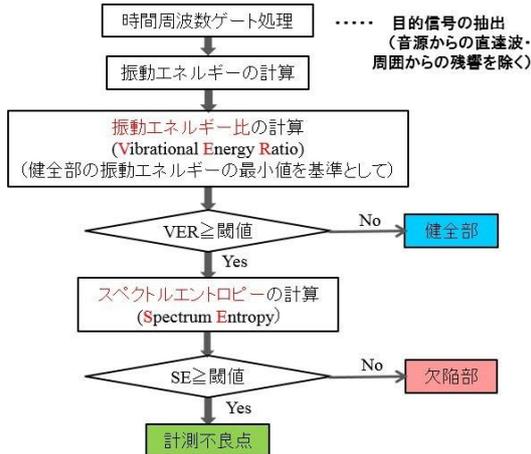


図5 2つの音響学的特徴量を用いた欠陥検出アルゴリズム

4-2. 欠陥検出アルゴリズム 2

コンクリートの空洞欠陥供試体の場合、欠陥部と健全部は、閾値の直線で明確に識別できる。しかしながら、コンクリート実構造物の場合は、欠陥部領域と健全部領域が近接し、剥離やひび割れは空洞に比べて判別の難易度が高く、判別のグレーゾーンが存在する可能性がある。閾値による直線で区切るやり方には限界があり、新たな領域の区切り方と判別基準が必要であった。それらの理由から、実際のコンクリート構造物の内部欠陥の検出を明確に行うには、健全部の定量的評価が重要であると次第に明らかになってきた。

(1) 健全部抽出アルゴリズム

コンクリート健全部は、音波照射加振程度では基本的に極微細にしか振動しないと考えられる。しかしながら、表面状態や内部骨材等の分布状況にも依存するが、(表面の振動状態が)音響学的に等方的かつ均質であるとみなせれば、音響学的特徴量の周りに統計的に自然なばらつきを生むことが予想される。即ち、健全部における音響学的特徴量の分布は正規分布に従うことが予測される。そこで、図6の統計的評価を用いた健全部を抽出するためのアルゴリズムを考案した。ここでは、まず振動エネルギー比の分布について、Q-Q plotで正規分布に従うかを確認し、box plotで正規分布からの外れ値を検出・除去する。この過程をスペクトルエントロピーについても同様に行い、健全部を抽出する。

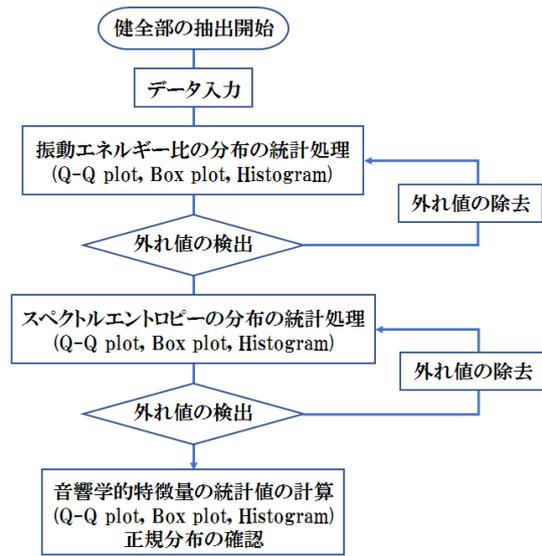
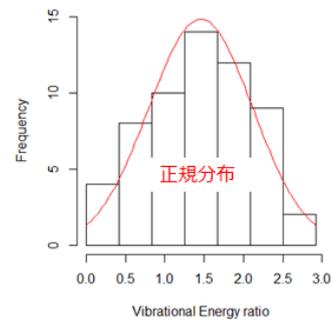


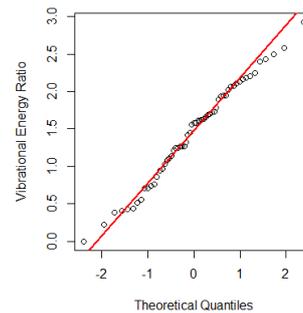
図6 健全部抽出アルゴリズム

(2) コンクリート健全部の統計的評価

コンクリートの健全部抽出アルゴリズムの効果を検証するために、まずコンクリート健全部の2つの音響学的特徴量の分布が正規分布を示すことを検証した。



(a) ヒストグラム



(b) Q-Q plot

図7 コンクリート健全部の統計評価(振動エネルギー比分布)

図2の円形空洞欠陥(φ200, 深さ80mm)に対する測定データの内、中央の円形空洞の外側に位置する測定点はコンクリート健全部と考えられる。その測定点に対して、2つの音響学的特徴量の分布について統計的評価を行った。図7は2つの音響学的特徴量の内、健全部の振動エネルギー比の分布を、(a)ヒスト

グラムと、(b)Q-Q plot で表した図である。ヒストグラムでは正規分布が見られ、Q-Q plot では、測定点の振動エネルギー比の値が直線上に沿って存在するほど、その分布は正規分布に従うので、正規分布が確認できる。シャピロ-ウィルク検定 (Shapiro-Wilk test) による正規性の検定を行い、有意水準を 0.05 とすると、 $W=0.99$, $p\text{-value}=0.7 \geq 0.05$ となり、健全部の振動エネルギー比の分布が正規分布に従うと検証された。また、スペクトルエントロピーの分布についても検討し、同様な傾向が得られた。健全部を特定できれば、欠陥の検出は可能になる。ここで述べた 2 つのアルゴリズムをコンクリート実構造物(橋梁・トンネル)に適用し、コンクリートの内部欠陥を検出した結果は、参考文献 1), 5) に詳しく述べられている。その他、円形空洞欠陥・円形剥離欠陥・遠距離(30m)からの測定結果等、以下に示す国内外の学会や研究会で発表された。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda, K. Katakura, "Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 54, 2015, 07HC15.
 - (2) 杉本和子, 杉本恒美, "SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート非破壊検査—スペクトルエントロピーを用いた探査アルゴリズムに関する検討—", 桐蔭論叢, 査読無, 第 32 号, 2015, pp. 213-219.
 - (3) 杉本和子, 杉本恒美, "空中放射音波を用いたコンクリート構造物のための非接触検査法に関する研究—統計解析によるコンクリート健全部の評価—", 桐蔭論叢, 査読無, 第 34 号, 2016, pp. 149-153.
 - (4) 杉本和子, 杉本恒美, "コンクリート構造物のための非接触音響探査法に関する研究—鉄筋腐食によるコンクリートひび割れの検出—", 桐蔭論叢, 査読無, 第 36 号, 2017, pp. 203-206.
 - (5) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda, A. Kawakami, "Detection of internal defects of concrete structures based on statistical evaluation of healthy part of concrete by the noncontact acoustic inspection method", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 57, 2018, 07LC13.
- ### 〔学会発表〕(計 24 件)
- (1) K. Sugimoto, T. Sugimoto, C. Kuroda, N. Utagawa and K. Katakura, "Study on the algorithm to detect defects by the non-contact acoustic inspection method using vibration energy ratio and spectrum entropy", 2015 International Congress on Ultrasonics (ICU2015), 2015.05.14, Metz, France.
 - (2) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 片倉景義, "非接触音響探査法によるコンクリート表層部の欠陥検出に関する研究—欠陥検出アルゴリズムと強力超音波音源の検討—", 第 5 回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, 2015.8.7, 芝浦工大 豊洲キャンパス.
 - (3) 杉本和子, 杉本恒美, 黒田千歳, 歌川紀之, 片倉景義, "音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—スペクトルエントロピーを用いた欠陥検出アルゴリズムの検討—", 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.9.16, 岡山大学.
 - (4) 河野豊, 西土隆幸, 杉本和子, 杉本恒美, "非接触音響手法による鉄筋腐食ひび割れの検出", 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.9.16, 岡山大学.
 - (5) K. Sugimoto, T. Sugimoto, Y. Kawano and T. Nishido, "The detection of reinforced concrete crack caused by corrosion using non-contact acoustic inspection method", Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2015), 2015.11.6, Epochal Tsukuba International Congress Center.
 - (6) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura, "Study on Non-contact Inspection Method for Concrete Structures using Air-borne Sound Wave, - Evaluation for healthy part of concrete by statistical analysis-", 10th Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2015 (ISBME), 2015.11.14, Toin university of Yokohama.
 - (7) 杉本和子, 杉本恒美, 河野豊, 西土隆幸, "空中放射音波を用いた非接触音響探査法に関する研究, -コンクリート供試体を用いた鉄筋腐食ひび割れの検出および強度分布の推定-", 電子情報通信学会 超音波研究会 (US), 2016.2.29, 東京大学生産技術研究所.
 - (8) 杉本和子, 杉本恒美, 河野豊, 西土隆幸, "コンクリート非破壊計測のための非接触音響探査法に関する研究—鉄筋腐食によるコンクリートひび割れの検出—", 日本音響学会 2016 春季講演会, 2016.3.9, 桐蔭横浜大学.
 - (9) 杉本和子, 杉本恒美, 黒田千歳, 歌川紀之, "非接触音響探査法のための欠陥検出アルゴリズム", 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム, 2016.3.17, 西之表市民会館(種子島).
 - (10) K. Sugimoto, T. Sugimoto, Y. Kawano, T. Nishido, "Study on non-contact acoustic inspection method for concrete structures -detection of cracks due to reinforced corrosion-", The 11th Toin International Symposium on Biomedical Engineering (BME2016), 2016, Toin university of Yokohama.
 - (11) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, K. Katakura, "The non-contact acoustic inspection method for concrete structures using the defect detection algorithm that combined spectrum entropy with vibrational energy ratio", 19th World Conference on

- Non-Destructive Testing 2016 (WCNDT 2016), 2016. 6. 14, Munich, Germany.
- (12) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Kosuge, C. Kuroda, N. Utagawa, “The non-contact acoustic inspection method for concrete structures using the defect detection algorithm based on the statistic evaluation for a healthy part of concrete”, 5th Joint Meeting acoustical society of America and acoustical society of Japan, 2016, Honolulu, Hawaii.
- (13) 杉本和子, 杉本恒美, 千星淳, 黒田千歳, 歌川紀之, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—健全全部評価に関する検討—”, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016. 9. 7, 東北大学.
- (14) 上地樹, 杉本恒美, 杉本和子, 宮本裕輔, 歌川紀之, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—長距離計測に関する検討—”, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016. 9. 7, 東北大学.
- (15) 黒田千歳, 歌川紀之, 阪本泰士, 杉本和子, 杉本恒美, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—超音波音源に関する検討—”, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016. 9. 7, 東北大学.
- (16) 杉本和子, 杉本恒美, 上地樹, 小菅信章, 歌川紀之, “コンクリート非破壊計測のための非接触音響探査法に関する研究—健全全部評価に関する検討—”, 日本音響学会 2017 春季研究発表会, 2017. 3. 15, 明治大学 生田キャンパス.
- (17) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, K. Katakura, “The defect detection algorithm that combined spectrum entropy with vibrational energy ratio for acoustic inspection method”, Acoustics’ 17 Boston, 2017. 6. 28, Boston MA, USA.
- (18) K. Sugimoto, T. Sugimoto, T. Ohdaira, I. Uechi, N. Utagawa, “Extraction of healthy part using two acoustic characteristics for defect detection by non-contact acoustic inspection method”, 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2017. 9. 7, Washington, D. C., USA.
- (19) 杉本和子, 杉本恒美, 歌川紀之, 黒田千歳, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—健全全部評価に関する検討 (II)—”, 土木学会 全国大会 第 72 回年次学術講演会 (平成 29 年度), 2017. 9. 11, 九州大学 伊都キャンパス.
- (20) 杉本和子, 杉本恒美, 歌川紀之, 黒田千歳, “非接触音響探査法によるコンクリート内部欠陥の検出—健全全部の評価—”, 第 38 回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2017. 10. 27, 多賀城市文化センター(宮城).
- (21) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Kosuge, I. Uechi, N. Utagawa, “Study on noncontact inspection method for concrete structures—evaluation of healthy part for an actual

concrete structure - “, The 12th Toin International Symposium on Biomedical Engineering (BME2017), 2017. 11. 11, Toin university of Yokohama.

- (22) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Kosuge, N. Utagawa, “Evaluation of healthy part of concrete using acoustic characteristics for defect detection by non-contact acoustic inspection method”, 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT2017), 2017. 11. 13, Singapore.
- (23) 杉本和子, 杉本恒美, 歌川紀之, 黒田千歳, “空中放射音波を用いた非接触音響探査法に関する研究—健全全部の統計的評価による欠陥検出と映像化—”, 電子情報通信学会 超音波研究会 (US), 2018. 2. 19, 東京都立産業技術研究センター本部.
- (24) 杉本和子, 杉本恒美, 歌川紀之, 黒田千歳, 非接触音響探査法のための欠陥検出アルゴリズム (その 2), 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム, 2018. 3. 16, 愛媛大学 城北キャンパス 南加記念ホール.

【図書】(計 0 件)

【産業財産権】出願状況 (計 2 件)

- (1) 名称: 音波を用いた強度推定方法および強度推定システム
発明者: 杉本恒美, 杉本和子, 河野豊, 西土隆幸
権利者: 桐蔭学園, (株)IHI 検査計測
種類: 特願 2015-216803
出願年月日: 2015. 11. 4, 国内外の別: 国内
- (2) 名称: 音響特徴量の統計的分布を用いた非接触音響探査法のための健全全部の評価抽出
発明者: 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 歌川紀之
権利者: 桐蔭学園, 佐藤工業(株)
種類: 特願 2016-241941
出願年月日: 2016. 12. 14, 国内外の別: 国内

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
杉本 和子 (SUGIMOTO KAZUKO)
桐蔭横浜大学・大学院工学研究科・研究員
研究者番号: 60642171
- (2) 研究分担者
杉本 恒美 (SUGIMOTO TSUNEYOSHI)
桐蔭横浜大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80257427
- (3) 研究協力者
歌川 紀之 (UTAGAWA NORIYUKI)
佐藤工業(株)技術研究所
- (4) 研究協力者
黒田 千歳 (KURODA CHITOSE)
佐藤工業(株)技術研究所
- (5) 研究協力者
上地 樹 (UECHI ITSUKI)
桐蔭横浜大学・大学院工学研究科・研究員
- (6) 研究協力者
小菅 信章 (KOSUGE NOBUAKI)
桐蔭横浜大学・大学院工学研究科・大学院生