

論文 空間スペクトルエントロピーによる共振周波数識別を用いた非接触音響探査法による欠陥検出

杉本 恒美*1・杉本 和子*2・森岡 宏之*3・歌川 紀之*4

要旨：音波照射加振とレーザドップラ振動計（LDV）を用いた非接触音響探査法では、遠隔からコンクリート内部欠陥の検出が可能である。しかし、従来は内部欠陥と LDV の共振については経験的な識別を行っていた。この共振現象の識別のために、スペクトルの白色度合いの評価に使用されるスペクトルエントロピーを測定面の 2 次元空間に拡張した空間スペクトルエントロピー（SSE）を考案した。SSE により、内部欠陥と LDV による共振を識別できるだけでなく、欠陥部のより明瞭な映像化が可能となる。コンクリート供試体及び実構造物を用いた SSE による基礎検証実験の結果、欠陥部を明瞭に映像化できることが明らかになった。

キーワード：スペクトルエントロピー、レーザドップラ振動計、非接触音響探査、非破壊検査、共振周波数

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化は、トンネルや高架橋などの社会インフラにおいて深刻な問題となっている。特に高所での点検は費用と手間がかかるために、遠距離から非接触で計測できる効率的な点検手法の開発が期待されている。実際に遠距離から非接触でコンクリート表層にある欠陥を検出できる手法としては、赤外線カメラを使用する方法¹⁾やパルスレーザ加振を用いたレーザリモートセンシング法²⁾などが開発されている。しかしながら、赤外線カメラを用いた方法では、温度変化が少ないトンネルや地下空洞の天井部等では、検査時にヒーター等による加熱を必要とするために、高所での適用は困難であると思われる。また、パルスレーザ加振を用いた手法は、金属面の検査には非常に優れた手法であるが、コンクリート等の融点が高い計測対象物の場合には、表面溶融を防ぐために極めて短時間の照射しかできずエネルギー効率が低いことや、複数の高出力レーザを使用することによる安全性などが問題点として指摘されている。

以上のことから、著者らは安全でかつ遠距離非接触で計測できる手法として、音波照射加振とレーザドップラ振動計（LDV: Laser Doppler Vibrometer）を用いた非接触音響探査（NCAI: Non-Contact Acoustic Inspection）法を提案し、コンクリート供試体に埋設した模擬空洞欠陥を 5 m 以上の距離から検出できることを明らかにした³⁾。さらに、実用的な欠陥検出性能を高めるために、シングルトーンバースト波⁴⁾、振動エネルギー比⁵⁾、および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⁶⁾および高速測定を可能にするマルチトーンバースト波⁷⁻⁸⁾を考案している。実際のコンクリート構造物においても、

鉄道や国道トンネル、30 m を超える高架橋⁹⁻¹⁰⁾、および不陸な表面を持つ吹付けコンクリート面¹¹⁻¹²⁾等において検証実験を実施し、叩き点検結果と比較した上ではほぼ同等の欠陥検出が遠距離非接触でも可能であることを明らかにしている。また、音源を無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)に搭載することにより、建築物の外壁タイルの点検等にも応用できることも明らかにしている¹³⁾。

一方で、高感度の LDV が計測時に高音圧場の影響を受けると、LDV 内部部品に起因した共振現象が発生するために、コンクリートの内部欠陥で発生する共振現象との識別が難しくなることがある。通常、このような LDV の共振周波数は使用機種固有のものであるために、経験的な識別が可能であるが、地下空洞のような閉鎖空間で遠距離計測を行った場合には、非常に強い残響音の影響により普段は影響が表れないような周波数帯域においても LDV の共振現象が発生する可能性がある。そこで、LDV と内部欠陥による共振周波数を識別するために、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を計測面上の 2 次元空間に拡張した空間スペクトルエントロピー(SSE: Spatial Spectral Entropy)を新たに考案した¹⁴⁾。この SSE を用いた解析により、LDV と内部欠陥による共振周波数帯域の自動識別が可能となるため、欠陥部のより明瞭な映像化が可能となる。本稿では、NCAI 法を用いて、コンクリート供試体を用いた場合と、既設の揚水発電所の地下大空洞天井部における吹付けコンクリート表層欠陥箇所を 20 m 以上の離隔から探査した場合の実験データに SSE を適用した例について説明する。

*1 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科教授 博士（工学）（正会員）

*2 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 研究員 博士（工学）

*3 東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット 土木・建築統括室 スペシャリスト 博士（工学）

*4 佐藤工業株式会社 技術研究所 上席研究員 博士（工学）（正会員）

2. 探査原理と空間スペクトルエントロピー

2.1 NCAI 法の探査原理

(1) 基本セットアップ

NCAI 法の基本セットアップを図-1 に示す。音源から放射された指向性の強い空中音波により、コンクリート表面に振動エネルギーを与え、面的な振動速度分布を LDV もしくはスキヤニング振動計 (SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer) により測定するという手法である。この時もし、測定表面付近の内部に、水平方向の浮き・剥離が存在すると、その欠陥部上は、曲げ剛性が低下しているためにたわみ共振が発生しやすくなっている。共振現象を利用するために、音波のような極めて弱い加振力であっても、叩き点検と同じたわみ振動を発生させることができ、欠陥検出が可能となる。

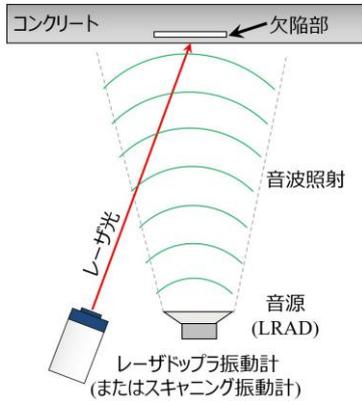


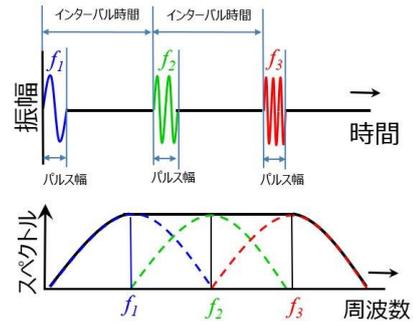
図-1 音波照射加振とレーザードップラ振動計を用いた非接触音響探査法の基本セットアップ

(2) 加振波形

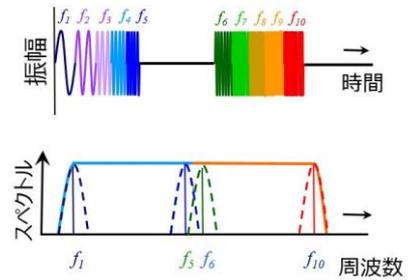
NCAI 法は欠陥部のたわみ共振を利用した手法であるため、欠陥部の共振周波数を含んだ音波を照射する必要がある。しかしながら、欠陥部の共振周波数は未知であるため、本手法では必要な周波数帯域をカバーすることができるトーンバースト波を加振波形として用いている。図-2 に示すように 1 回の送波で、1 つの周波数帯域を持つバースト波を送波する波形をシングルトーンバースト (STNB: Single ToNe Burst) 波、複数の周波数帯域を持つバースト波を送波する波形をマルチトーンバースト (MTNB: Multi ToNe Burst) 波と呼称して区別している。

(3) 振動エネルギー比 (VER)

実際のコンクリート構造物内で発生する欠陥は複雑な形状をしており、複数の共振ピークを持っている場合がある。その場合には、特定の周波数のみの映像化を行っているのは、欠陥規模を明らかにすることはできない。振動速度のパワースペクトルのある周波数範囲内での積分値を振動エネルギー比 (VER: Vibration Energy Ratio) として(1)式のように定義して欠陥部の映像化に使用している。



(a) シングルトーンバースト (STNB) 波



(b) マルチトーンバースト (MTNB) 波

図-2 加振用のトーンバースト波の概形

$$[VER]_{dB} = 10 \log_2 \left(\frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \right) \quad (1)$$

ここで、 PSD_{defect} 、 PSD_{health} はそれぞれ欠陥部、健全部のパワースペクトル密度 (PSD: Power Spectral Density)、 f_1 および f_2 は積分時の下限および上限周波数である。実際の構造物では健全部でも若干のばらつきがあることが考えられるが、ここでは計測された振動エネルギーの最低値を PSD_{health} として計算している。

(4) スペクトルエントロピー (SE)

計測対象面の汚れや凹凸の影響で、LDV の戻り光が減少すると、受光漏れに起因する光学ノイズが発生する場合がある¹⁵⁾。この光学ノイズは白色ノイズに近い特性を示すために、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 (SE: Spectral Entropy) を用いれば識別できる。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したもので、次式で定義される。

$$H_{SE} = - \sum_f p_f \log_2 p_f, \quad p_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f} \quad (2)$$

ここで、 S_f は測定点での振動速度のパワースペクトル、 p_f はある計測点における振動速度スペクトル中の周波数成分 f [Hz] の存在確率である。 H_{SE} はスペクトルが均一な白色信号では高い値となる。この SE と VER という 2 つの音響特徴量を組み合わせ、閾値を適切に選択できれば、欠陥部、健全部および計測不良点の識別が可能となる (表-1 参照)。

表-1 健全部・欠陥部・計測不良点の識別

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

2.2 空間スペクトルエントロピー (SSE)

NCAI法では高感度LDVの近くで大音圧を発生する音源を使用するため、LDV内部部品に起因した共振現象が発生することがある。欠陥検出のためには、このLDVの共振とコンクリート内部欠陥の共振を識別する必要があるが、従来は経験に基づいた識別を行っており、適切と思われる積分周波数帯の調整を行っていた。しかしながら、橋梁下のような開放空間とは異なり、地下空洞のような閉鎖空間で遠距離計測を行った場合には、非常に強い残響音の影響により普段は影響が表れないような周波数帯域にもLDVの共振現象が発生することが明らかになった。このことは、LDVと内部欠陥による共振周波数を経験によらず識別する必要があることを示している。

NCAI法では、内部欠陥の映像化のために、面的な振動速度分布をLDVにより計測している。LDV内部部品が共振現象を起こした場合、その周波数帯域では測定位置とは関係なく振動速度スペクトル成分が大きくなるため、面的にみるとような分布になることが想定される(面的な白色性が高い)。次に欠陥部のたわみ共振周波数では、欠陥部周辺の測定点でのみ振動速度スペクトルが大きくなるため、面的にみると白色性が低いことになる。この面的な振動速度スペクトルの特性を利用することにより、LDVと欠陥部と共振の識別が可能となる。すなわち、信号の白色性を判定するSEの概念を、計測面上の2次元空間に拡張して、測定面上の2次元的な振動速度スペクトル分布の各周波数に対してSEを適用するという空間スペクトルエントロピー(SSE:Spatial Spectral Entropy)を新たに考案した。図-3にSSEの概念図を示す。図では測定点の振動速度スペクトルの例が、各測定点から測定面に垂直な方向へ表示されている。全計測点の周波数 f 毎

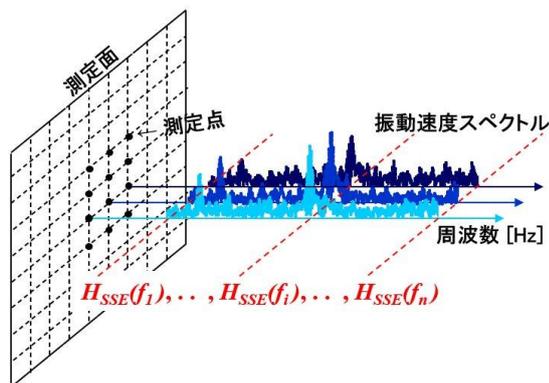


図-3 空間スペクトルエントロピー概念図

のSEを算出することにより、SSEを求めることができる。(3)式にSSEの定義式を示す。

$$H_{SSE}(f) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{i,j}(f) \log_2 P_{i,j}(f)$$

$$P_{i,j}(f) = \frac{S_{i,j}(f)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{i,j}(f)} \quad (3)$$

ここで、 $H_{SSE}(f)$ は、実空間に拡張されたスペクトルエントロピー(周波数 f の関数)である。例えば、2次元の計測空間を考えた場合、計測点 $r(x,y)$ は、2次元面の格子点の配列 $r_{i,j}$ ($i=1,m; j=1,n$)で表される。 $S_{i,j}(f)$ は、計測点 $r_{i,j}$ で計測された信号を離散フーリエ変換して得られるパワースペクトルの周波数成分 f [Hz]である。 $P_{i,j}(f)$ は、計測点 $r_{i,j}$ におけるパワースペクトルの周波数成分 f [Hz]が、計測面内で存在する確率である。ゆえに、 $H_{SSE}(f)$ は、測定空間内の全ての観測点で計測された信号のパワースペクトルの周波数成分について計算された情報エントロピーを示す(以下、 $H_{SSE}(f)$ 値をSSE値と記載)。

すなわち、SSE値は一つの測定面に対して、一つの周波数スペクトルとして求められることになる。具体的に欠陥部の共振周波数では、SSE値が小さくなり、LDVの共振周波数では、SSE値が大きくなる。健全部はその中間値での変動となるため、欠陥などの共振周波数と健全部のSSE値では有意な差が生じる。すなわちSSEでは、LDVのレーザヘッドの共振周波数だけでなく、内部欠陥の共振周波数も同時に識別することができる。

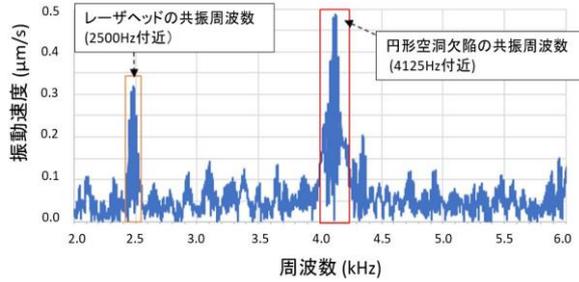
3. コンクリート供試体を用いた適用例

3.1 実験セットアップ

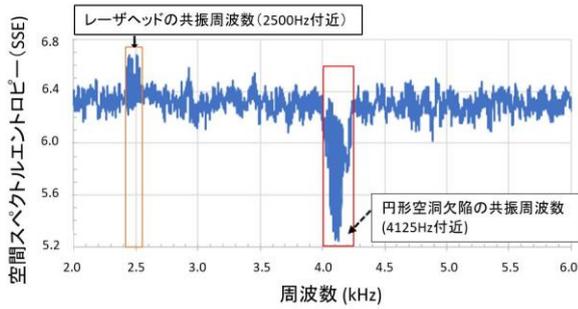
円形空洞欠陥(発泡スチロール:直径200mm,厚さ25mm)を表面から深さ60mmに埋め込んだコンクリート供試体(2×2×0.3m³)を用いて、SSEによる共振周波数の識別が可能かどうかについての基礎検証実験を行った(供試体の配合表を表-2に示す)。音源(LRAD-300X, LRAD Corp.)およびSLDV(PSV-500Xtra, Polytec Corp.)と供試体間の距離はそれぞれ5.0m, および7.7mとした。加振波形はSTNB波(周波数範囲2000~6000Hz, パルス幅3ms, インターパルスタイム50ms)を用い、アベレージ回数5回、測定点数121(11×11)点、測定間隔は縦横共に約3.7cmとした。なお、コンクリート表面近くの音圧は約100dB(Z特性最大値)である。

3.2 SSE解析結果

空洞欠陥の中心部で計測された振動速度スペクトルを図-4(a)に示す。図より2500Hzと4125Hz付近に共振ピークが存在する。次に全計測点を使用したSSEによる解析結果を図-4(b)に示す。2500Hz付近ではSSE値が大きくなっており、LDVの共振であることがわかる。また、



(a) 円形空洞欠陥中心の振動速度スペクトル



(b) 全計測点を使用した SSE の解析結果

図-4 SSE による共振周波数の識別例

4125 Hz 付近では SSE 値が小さくなっており、これは欠陥部の共振であることがわかる。このように、2つの異なる共振現象を SSE によって識別して検出可能である。

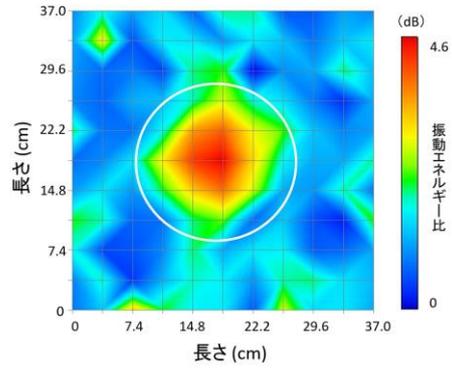
3.3 欠陥部の映像結果例

図-5 に振動エネルギー比を用いた欠陥部の映像結果例を示す。(a)は加振周波数範囲に合わせて積分範囲を2000-6000 Hzとした場合で、(b)は SSE 解析を参考に、積分範囲を4000-4250Hzに調整したものである。図より、SSE 解析を参考に積分範囲を調整したものが、より欠陥規模が忠実に再現されていることがわかる。このことにより SSE 解析を効果的に用いれば、内部欠陥の共振周波数を利用することにより、欠陥に起因する周波数のみを選択的に映像化することができ、様々な原因のノイズの影響を排除できる可能性があることがわかる。

4. 地下大空洞天井部の吹付けコンクリートでの適用例

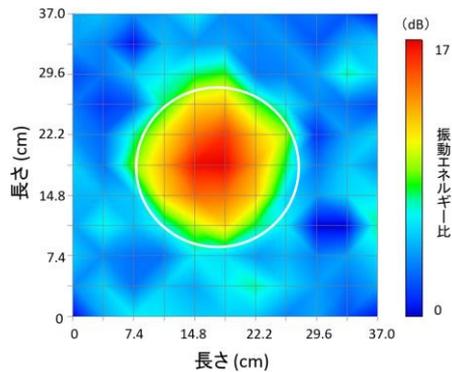
4.1 実験セットアップ

神流川発電所における地下大空洞天井部の吹付けコンクリート表層部にある欠陥部に対して、NCAI 法を用いた探査実験を行った。この空洞部は最大断面部で高さ 51.4 m、幅 33 m、断面積 1,500 m² の卵型空洞である。実験対象の吹付けコンクリートは厚さ 32cm(8cm×4層)で、



1.

(a) 積分範囲 2000-6000 Hz



2.

(b) 積分範囲 4000-4250 Hz

図-5 振動エネルギー比分布図
(白線部が欠陥部の大きさと位置を示す)

施工後約 20 年が経過しているものである。なお、この場所における吹付けコンクリートは鋼繊維補強 (SFRC) を行った高強度仕様 (設計基準強度 $\sigma_{ck} = 36 \text{ N/mm}^2$) となっている (表-3 に配合表を示す)。天井部の点検は、通常は天井部クレーンを利用した叩き点検で行われている。発電機上部のフロア盤から天井部までは 20m 以上の距離があるため、もし、NCAI 法により遠隔から欠陥探査が可能になれば、点検業務の省力化が実現できることになる。実験セットアップ図を図-6 および機材の配置状況を図-7 に示す。図に示すように、計測対象面から加振音源 (LRAD-300X) までは約 25 m、SLDV (PSV-500 Xtra) までは約 26 m の距離に配置した。なお、加振力を増加させるために同型の音源 2 台を同時使用している。また、この地下空洞内部は完全な閉鎖空間であり、残響による影響も極めて大きいことから、図-8 に示すような LDV に対する防音・防振対策を施して、周囲からの音波や振動の低減を図っている。計測範囲図を図-9 に示す (白線内は事前の叩き点検により検出された欠陥部)。計測ポイ

表-2 コンクリート供試体に用いられたコンクリートの配合

Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	4.5	49.5	42.9	162	327	786	1061	3.270

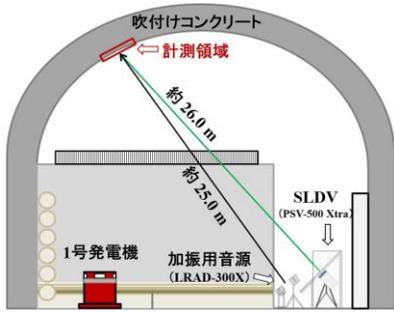


図-6 地下空洞内における実験セットアップ



図-7 実際の計測機材の配置状況

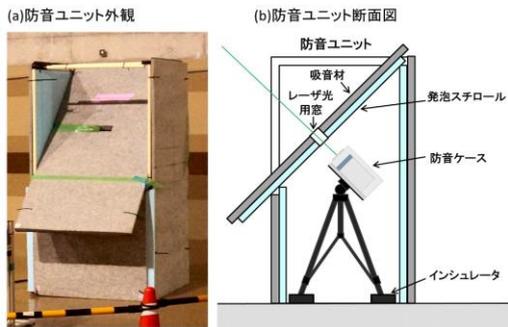


図-8 地下空洞内における防音・防振対策

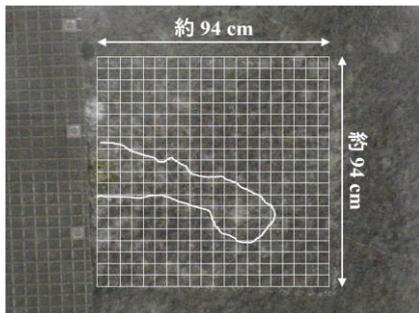


図-9 計測領域の測定点

(白線内は事前の叩き点検により検出された欠陥範囲)

ント数は 21×21 の計 441 ポイントである (縦横約 0.94×0.94 m²)。加振用の波形としては周波数範囲 300～4400 Hz の MTNB 波を用いた (パルス長さ 5 ms, インターバル 150 ms, 全体の波形長さ 450 ms)。アベレージ回数は 5 回で計測時間は約 25 分であった。また, 約 25 m 先の測定対象面で 100 dB(2Pa)程度の音圧としたが, この時の音源から約 1 m の距離での音圧は約 129.5 dB (Z 特性の最大値, 音源 1 台を使用時)であった。

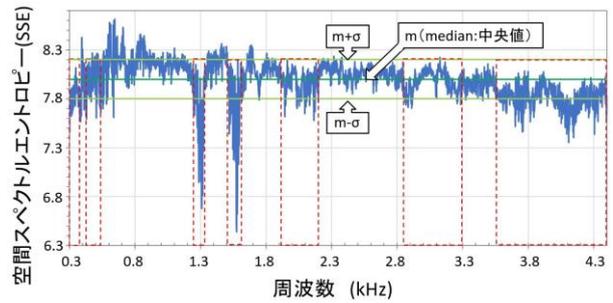


図-10 全計測点を使用した SSE の解析結果 (点線領域内が欠陥と思われる共振周波数帯)

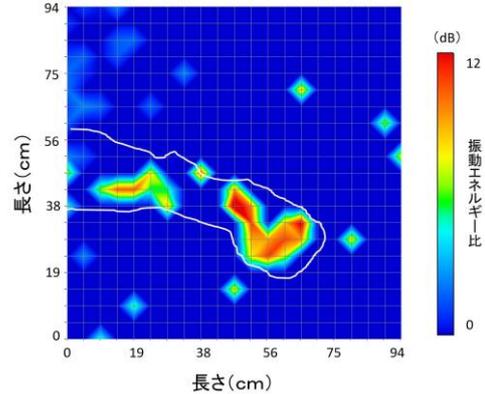


図-11 NCAI 法による振動エネルギー比表示 (SSE により識別された欠陥部の共振周波数帯を使用, 白線内は事前の叩き点検により検出された欠陥範囲)

4.2 SSE による共振周波数の識別

全計測点を使用した SSE の解析結果を図-10 に示す。図より, 1300 Hz および 1600 Hz 付近に欠陥部と思われる共振周波数のピークが存在することがわかる (SSE では, 値が下がる場合が欠陥部の共振であることを示す)。ところが, それ以外にも広い帯域にわたって, SSE 値が下がる箇所が何ヶ所か存在していることが見て取れる。これは, この計測領域には, 欠陥規模の異なる複数の欠陥が存在していることを示している。

そこで, SSE を利用して欠陥部の共振周波数を識別することを考え, SSE 値の中央値(median)を m , 標準偏差を σ とする。ここではコンクリート健全部の SSE 値の分布は正規分布を示すと仮定して, その変動幅を $m \pm \sigma$ と評価する。すなわち, SSE 値が $m + \sigma$ を大きく上回る場合にはレーザーヘッドの共振, $m - \sigma$ を下回る領域が連続した場合には欠陥部の共振と見なすことができると思われる。そこで今回は, 基本的に $m - \sigma$ を下回る部分を含み, かつ $m + \sigma$ を上回る部分を含まない周波数領域を欠陥部の共振周波数帯域とした (図-10 の赤点線部内)。この SSE により識別された欠陥部の共振周波数帯域を振動エネルギー比により映像化した例を図-11 に示す。図中の白線内は事前の叩き点検により検出された欠陥範囲であり, SSE により検出された大きな欠陥部はほぼ白線内に集中している

表-3 地下大空洞に用いられたコンクリートの配合

	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	スチール ファイバ ー E	混和剤 A
SFRC	15	18	58.2	69	221	380	1187	537	80	5.20
プレーン	15	12	58.3	65	204	350	1179	641	—	3.15

ことがわかる。

5. まとめ

非接触音響探査法において、コンクリートの内部欠陥の共振と高感度の LDV 自体の共振を自動的に検出することが可能な空間スペクトルエントロピー(SSE:Spatial Spectral Entropy)を考案した。コンクリート供試体と実際のコンクリート構造物である地下大空洞天井部の吹付けコンクリートに対して基礎検証実験を実施したところ、LDV の共振を明確に識別できるだけでなく、内部欠陥の共振周波数帯域を利用することで、より明瞭な欠陥部の検出が行えることが明らかになった。

参考文献

- 1) M. R. Clark, D. M. McCann and M. C. Forde : Application of Infrared Thermography to the Non-Destructive Testing of Concrete and Masonry Bridges, NDT&E International, 36(4), pp. 265-275, 2003
- 2) Y.Shimada, O.Kotyayev : Industrial Application Laser Remote Sens. Sharjah, United Arab Emirates, Bentham Science Publishers, Chap.9, 2012
- 3) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : Proposal of non-contact inspection method for concrete structures, using high-power directional sound source and scanning laser Doppler vibrometer, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, 07HC12, 2013
- 4) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : Study on non-contact acoustic imaging method for concrete structures - Improvement of signal-to-noise ratio by using tone burst wave method, Proc. IEEE Int. Ultrasonic Symp. 2013, pp.1303-1306, 2013
- 5) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa : Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 53, 07KC15, 2014
- 6) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda, K.Katakura : Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, 2015
- 7) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 片倉景義 : マルチトーンバースト波を用いた高速非接触音響探査法の検討, コンクリート工学会年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2103-2108, 2016
- 8) T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 56, 07JC10, 2017
- 9) 杉本恒美, 杉本和子, 川上明彦, 歌川紀之, “遠距離音波照射加振を用いた非接触探査法の欠陥検出アルゴリズム”, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1849-1854, 2017
- 10) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 川上明彦: インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法,-マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証-, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.149-154, 2017
- 11) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 黒田千歳, 金子岳夫, 森岡宏之, 志岐仁成, 中川貴之 : 地下大空洞内の吹付けコンクリートに対する非接触音響探査法の適用性検討, トンネル工学報告集, 第 27 巻, I-8, pp.1-6, 2017
- 12) 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 森岡宏之 : 非接触音響探査法による吹付けコンクリートにおける欠陥検出, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1707- 1712, 2018
- 13) 杉本恒美, 杉本和子, 上地樹, 歌川紀之, “外壁検査検査のための音源搭載型 UAV を用いた高速非接触音響探査法”, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1901-1906, 2019
- 14) K.Sugimoto, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda : Detection of resonance frequency of both the internal defects of concrete and the laser head of a laser Doppler vibrometer by spatial spectral entropy for noncontact acoustic inspection, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.58, SGB15, 2019
- 15) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和弘 : 局所的な振動特性に着目したコンクリート構造物の空陥検出, 土木学会論文集 No.690/V-53, pp.121-132, 2001