

論文 非接触音響探査法のための空間スペクトルエントロピーによる共振識別に関する理論と実験

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。従来は LDV の共振については経験的な識別を行っていたが、面的に得られる振動速度スペクトル分布を利用した空間スペクトルエントロピー（SSE）を用いることで、LDV と内部欠陥部の共振周波数の識別が可能であることが明らかになった。なぜ欠陥部と LDV の共振が SSE により識別できるのかを説明するため、SSE の理論的な解析とコンクリート供試体を用いた実験的な検証を行うことによりその理由を明らかにし、実際のコンクリート構造物における欠陥箇所の抽出に有用であることを示した。

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検査には、主にハンマーを用いた叩き点検が用いられているが、高所検査時には足場を必要とするため、長距離からの非接触で実施可能な非破壊検査法の開発が期待されている。遠距離から非接触でコンクリート表層にある内部欠陥を検出可能な手法としては、赤外線カメラを使用する方法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が開発されている。しかしながら、赤外線カメラを用いた手法では、温度変化の少ないトンネルの天井部等の検査には適しておらず、屋外では日照の影響を受けるという問題点がある。また、パルスレーザを用いた手法は複数の高出力レーザを使用することによる危険性が問題点として指摘されている。

そのため、著者らは音波照射加振と高感度レーザドップラ振動計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された模擬空洞欠陥を 5 m 以上の距離から検査できること、および検出原理（欠陥部のたわみ共振）を明らかにした。さらに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、振動エネルギー比とスペクトルエントロピー(SE: Spectral Entropy)を用いた欠陥検出アルゴリズムおよび高速測定を可能にするマルチトーンバースト波リ等を考案している。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、高架橋床版、および吹付けコンクリート面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ほぼ同等の欠陥検出が遠距離から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。

一方で、高感度のレーザドップラ振動計(LDV : Laser Doppler Vibrometer)が計測時に高音圧場の影響を受け、LDV 内部部品に起因した共振現象が発生する場合、コンクリートの内部欠陥に起因する共振現象との識別が難しくなることがある。そこで、この問題を解決するために、面的な振動速度分布から計算される空間スペクトルエントロピー(SSE : Spatial Spectral Entropy)が考案された^{2,3)}。この SSE を用いれば、LDV と内部欠陥の共振周波数の識別が可能である。なぜ欠陥部と LDV の共振が SSE により識別できるのかを明らかにするため、今回はこの SSE 解析を用いた共振識別に関する理論解析³⁾ およびコンクリート供試体を用いた実験的検証を行った。さらに LDV の共振が問題とならない場合でも、SSE 解析により欠陥部の抽出が可能であることを示すため、既設の揚水発電所の地下空洞天井部における吹付けコンクリート表層を用いた検証実験の結果について述べる。

2. 空間スペクトルエントロピーの原理

2.1 SSE の基本原理

SE とは、信号の白色度を表す特徴量で、音声分析等で用いられている。すなわち SE は、白色雑音のようにスペクトルが一様な信号では高い値をとり、音声信号のようにスペクトルが一様ではない信号では低い値をとる性質を持っている。NCAI 法では、図-1 に示すように、面的な振動速度スペクトルを使用する。図では、測定点における振動速度スペクトルの例が描かれており、本手法では信号スペクトル自体を確率分布とみなして、情報エントロピーを算出する。ここで、全計測点の振動速度スペクトルを周波数毎の信号スペクトルとして取り扱い、

*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）

それぞれ SE 値を算出することを考える。LDV の共振周波数の場合は、全計測点の信号スペクトルに影響が出るために白色性が高くなり、欠陥部の共振周波数の場合は一部の計測点のみ信号スペクトルが大きくなるために白色性が低くなることが予測される。このような、周波数毎の実空間に拡張された SE を、空間スペクトルエントロピー(SSE)と呼び、式(1)のように定義することができる。

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

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

ここで、 $H_{SSE}(f)$ は周波数 f の関数として表された空間スペクトルエントロピーである。二次元測定面における格子測定点 $r(x,y)$ は、配列 $r_{i,j}$ ($i = 1, m; j = 1, n$) として表される。 $S_{i,j}(f)$ は、測定点 $r_{i,j}$ で測定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空間周波数 f [Hz] 成分である。 $P_{i,j}(f)$ は、測定点 $r_{i,j}$ におけるパワースペクトルの空間周波数 f [Hz] 成分が測定平面内に存在する確率である。したがって、 $H_{SSE}(f)$ は、全測定点における振動速度スペクトルの周波数 f [Hz] 成分毎について算出された情報エントロピーを示す。

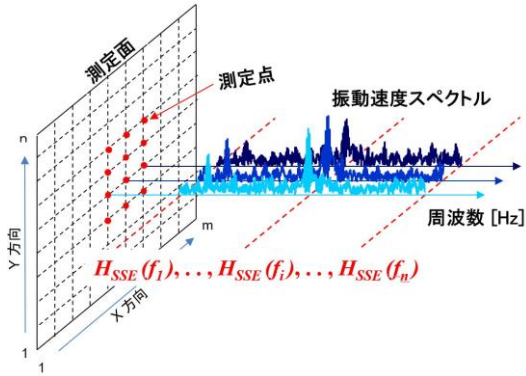


図-1 空間スペクトルエントロピー概念図

2.2 SSEに関する理論的考察

LDV の共振周波数で SSE 値が増加し、内部欠陥による共振周波数で SSE 値が減少する理由を明らかにするために、振動速度スペクトルの周波数 f 成分の実空間分布が、ガウス分布である場合について考察する。周波数 f 成分の振動速度スペクトル S_f の実空間分布が、式(2)で示されるような平均 μ 、分散 σ^2 の 1 次元ガウス分布で表されるとする。

$$S_f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (a \leq S_f \leq b) \quad (2)$$

ここで、測定点番号を i 、測定格子上の点を r_i ($i = 1, n$)

とする。 $[a, b]$ は、測定面内における振動速度スペクトルの周波数 f の存在範囲である。通常、測定点は 2 次元的に存在しているが、ここでは測定点を 1 次元配列として扱う。振動速度のパワースペクトルの周波数 f 成分の確率密度関数は式(3)で表される。

$$P(S_f) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(S_f-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \right]^2$$

$$P(S_f) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(S_f-\mu)^2}{\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

シャノンの情報エントロピーの式に基づく、測定面内の振動速度スペクトルの周波数 f 成分の空間スペクトルエントロピーは、

$$H_{SSE} = \int_{-\infty}^{\infty} P(S_f) \log_2 \frac{1}{P(S_f)} dS_f \quad (4)$$

と表される。式(4)に式(3)を代入すれば、

$$H_{SSE} = - \int_{-\infty}^{\infty} P(S_f) \log_2 \left[2\pi\sigma^2 \exp\left\{\frac{(S_f-\mu)^2}{\sigma^2}\right\} \right] dS_f \quad (5)$$

となる。したがって、式を変形すると、

$$H_{SSE} = \log_2(2\pi\sigma^2) \int_{-\infty}^{\infty} P(S_f) dS_f + \frac{\log_2 e}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} P(S_f)(S_f-\mu)^2 dS_f \quad (6)$$

となる。確率密度関数の定義は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(S_f) dS_f = 1$$

であり、分散の定義は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(S_f)(S_f-\mu)^2 dS_f = \sigma^2$$

であるから、

$$H_{SSE} = \log_2(2\pi\sigma^2) + \log_2 e \quad (7)$$

$$H_{SSE} = \log_2(2\pi e\sigma^2) \quad (8)$$

と表すことができる。ここで、エドウィン・トンプソン・ジェインズ (Edwin Thompson Jaynes) の最大エントロピー原理 (Principle of maximum entropy)⁴⁾ によれば、エントロピーを最大にする分布はガウス分布で、最大値は、

$$H_{SSE} \leq \log_2 \sqrt{2\pi e\sigma^2} \quad (9)$$

で表される。ここではパワースペクトルの確率密度関数の例として、ガウス分布の 2 乗を用いており、(8)式で表される。SSE の値が何故レーザヘッドの共振周波数で大きくなるのか？という疑問に対して、もし LDV の共振周波数における振動速度スペクトルの実空間分布がガウス分布であれば、最大値を取るといえる。さらに、同じガウス分布であっても、分散の値が大きいほど、SSE の値が大きくなるといえる。

3. コンクリート供試体を用いた検証実験

3.1 実験セットアップ

コンクリート供試体 ($2.0 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}^3$, 表-1 に配合表を示す) を用いた検証実験のセットアップを図-2 に示す。音源としては長距離音響発生装置 (LRAD: Long Range Acoustic Device, LRAD Corp.; LRAD-300X), LDV としては走査型レーザドップラ振動計 (SLDV: Scanning LDV, Polytec Corp., PSV-500Xtra) を用いた。LRAD からの音波照射加振によりコンクリート測定面を面的に加振し, SLDV により面的な振動速度分布を測定する。測定対象面が音波で振動している時間帯にのみ時間ゲートをかけ, 次に加振周波数に応じて周波数ゲートをかけることで, 加振周波数と異なる外部ノイズの影響を低減する。この時間-周波数ゲート処理を行った後, SSE 値を算出した。計測対象は円形空洞欠陥であり, 発泡スチロール (直径 200 mm, 厚さ 25 mm) がコンクリート表面から深さ 60 mm の位置に埋設されているものを使用した。実験時の LRAD および SLDV から測定面までの距離はそれぞれ 5.0 m および 7.7 m であった。加振用音波としては, 欠陥のたわみ共振周波数を含むように, 周波数範囲 2~6 kHz, パルス幅 3 ms, パルス間隔 50ms のシングルトーンパースト波を用いた (波形全体の時間長さは 1050 ms)。また, 測定点数は 121 点 (11×11 , 縦横とも 3.7cm 間隔), 加算平均数は 5 回とした。なお, 測定時の気温は 24 度, コンクリート表面の音圧は約 100 dB (Z 特性最大値) であった。

3.2 実験結果

図-3 に, 円形空洞欠陥の中心で測定された振動速度スペクトルおよび SSE 解析結果を示す。図-3(a) の振動速度スペクトルだけでは SLDV の共振と欠陥部による共振

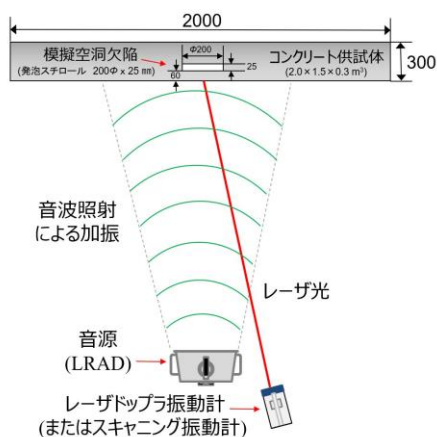
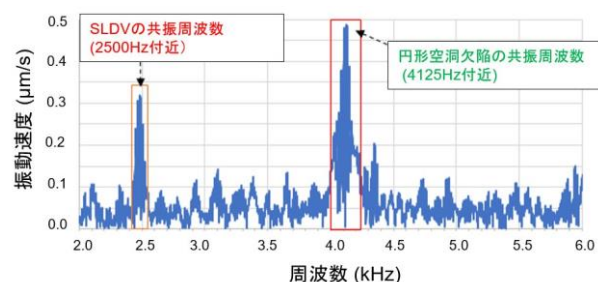


図-2 非接触音響探査法の実験セットアップ

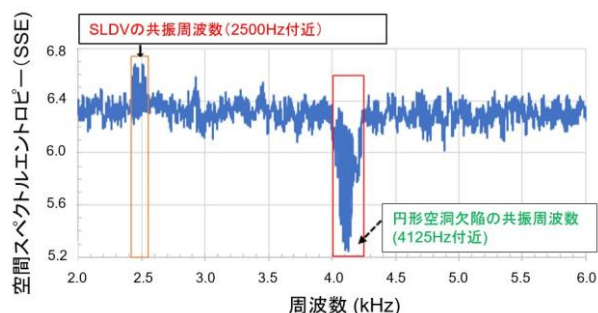
の区別はできないが, 図-3(b) の SSE 解析結果からは, SLDV の共振周波数で SSE の値が増加し, コンクリートの内部欠陥, すなわち円形空洞欠陥による共振周波数では, SSE の値は減少しており明確に識別できることがわかる。この時, SLDV の共振周波数では, 全ての測定点で共振ピークが検出されるため, SSE の値が大きくなることが理解できる。この事実, スペクトルエントロピーが信号の白色性に対して大きな値をとるという性質に基づいている。逆に, 内部欠陥の特定の共振周波数に着目すると, 複数の測定点で同じ共振周波数が現れることは稀であり, SSE の値が小さくなることになる。

3.3 振動速度スペクトルの空間分布を用いた検証

SSE の値が変動する要因を明らかにするために, 測定面 (実空間) における各周波数の振動速度スペクトルの分布について検討した。図-4(a) は SLDV レーザヘッドの共振周波数における振動速度スペクトルの実空間分布を, 図-4(b) は共振ピークが存在しない周波数における振動速度スペクトルの実空間分布例を, 図-4(c) は円形空洞欠陥の共振周波数における振動速度スペクトルの実空間分布をそれぞれ示している。図より欠陥部の振動速度スペクトルの実空間分布が明確なピークを持つことは一目瞭然であるが, それ以外の 2 つの分布における差



(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

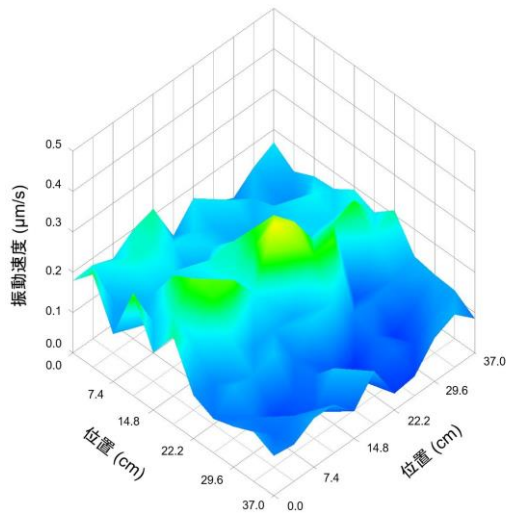
図-3 SSE による共振周波数の識別例

表-1 コンクリート供試体に用いられたコンクリートの配合

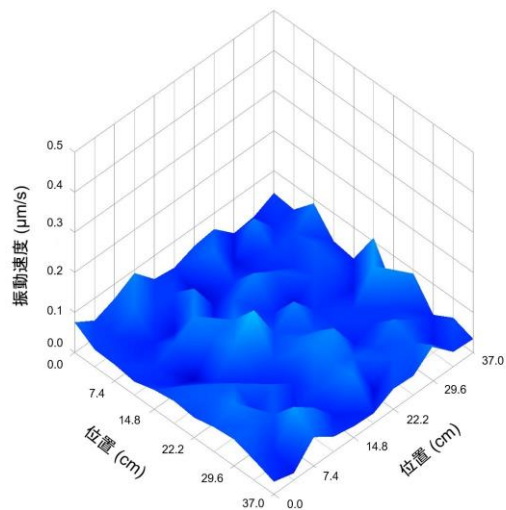
Gmax (mm)	Air (%)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	4.5	8	49.5	42.9	162	327	786	1061	3.270

は少しわかりにくい。そこで、全測定点における振動速度スペクトルの特定周波数成分の頻度分布（ヒストグラム）を一次元データとして統計解析を行った。図-5(a)にSLDVのレーザヘッドの共振周波数、図-5(b)に共振ピー

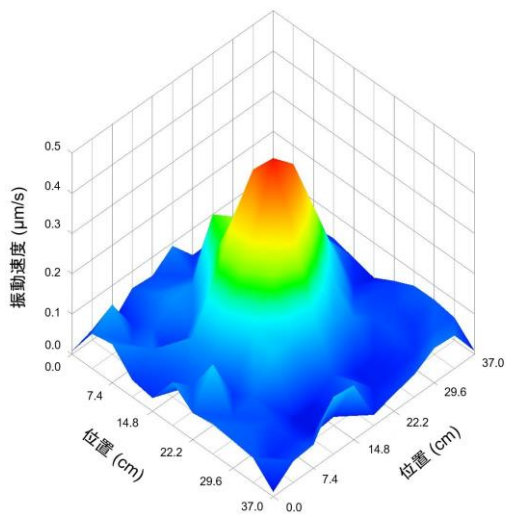
クが存在しない周波数、図-5(c)に円形欠陥の共振周波数における振動速度スペクトルのヒストグラム例を示す。図中の赤曲線は正規分布フィッティングを試みた結果を示している。図-5(a)の場合、Shapiro-Wilk 正規性検定結果 ($W=0.98$, p 値=0.098) から、正規分布を示しているこ



(a) SLDV の共振周波数 (2484.76Hz)

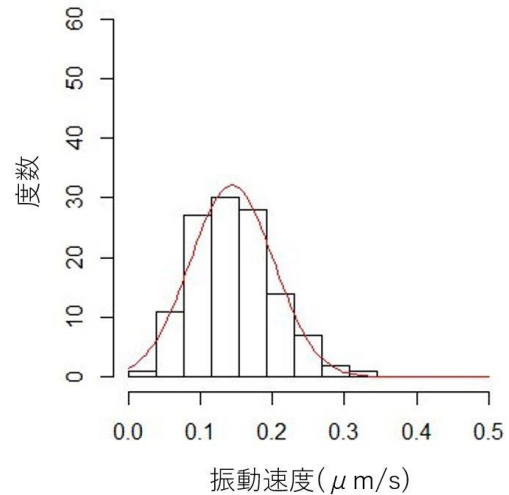


(b) 共振ピークが存在しない周波数 (3300.29Hz)

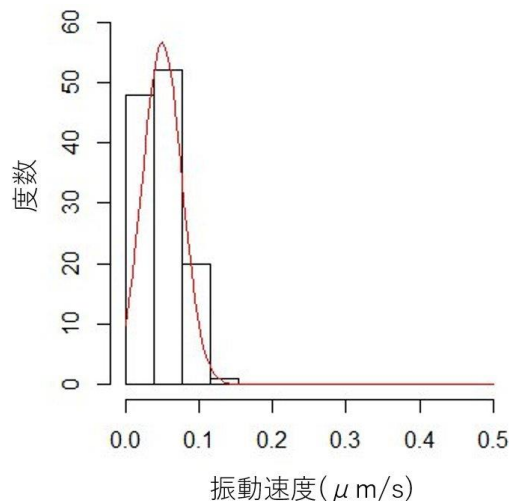


(c) 欠陥部の共振周波数 (4127.6Hz)

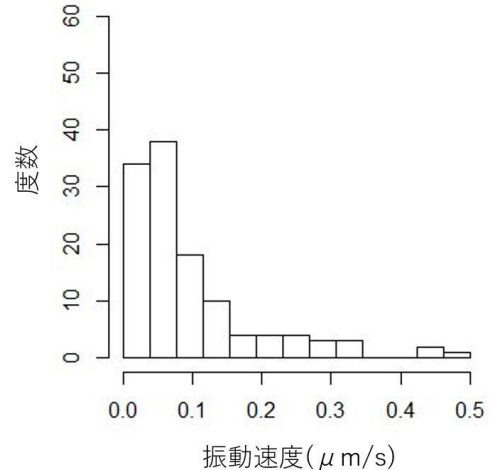
図-4 振動速度スペクトル成分の空間分布図



(a) SLDV の共振周波数 (2484.76Hz)



(b) 共振ピークが存在しない周波数 (3300.29Hz)



(c) 欠陥部の共振周波数 (4127.6Hz)

図-5 振動速度スペクトル成分のヒストグラム

とがわかる（平均は 0.144，標準偏差は 0.058）。図-5(b)の場合、Shapiro-Wilk 正規性検定の結果 ($W=0.96$, p 値 = 0.003) から、正規分布とは言えないものであることがわかる。図-5(c)では、内部欠陥の共振ピークの外れ値が見られており正規分布とは言えない。以上の結果より、SLDV のレーザヘッドの共振周波数では、振動速度スペクトルの実空間分布が正規分布を示していることから、SSE の値が高くなることになる。また、特別な共振ピークが存在しない周波数では、振動速度スペクトルの実空間分布は正規分布とは言えないため、SSE の値としては正規分布を示すものよりは小さくなる。結果的に SSE の値は、レーザヘッドの共振周波数では高くなり、共振周波数が存在しない周波数では中間値となり、内部欠陥の共振周波数では低くなるということになる。

4. 地下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

実空洞での検証実験は、葛野川発電所（東京電力リニューアブルパワー）の地下空洞において実施した。この空洞は最大断面部で高さ 54 m，幅 34 m，断面積 1,500 m² の卵型空洞で、施工後約 25 年が経過しているが、空洞周辺岩盤の挙動はほぼ収束し安定している。実験箇所は天井部において吹付けコンクリート表層に局所的な浮きが確認されている箇所を選定した。実験対象の吹付けコンクリートの厚さは 32cm(8cm×4 層)で、鋼繊維補強(SFRC)仕様のものが用いられている（表-2 に配合表を示す，第 3 層のみプレーン配合）。実験セットアップを図-6 に示す。実験時の LRAD および SLDV から測定面までの距離はそれぞれ，2.9 m および 7.3 m であった（発電所の屋根部から計測）。加振波形としては周波数範囲 300~2000 Hz，パルス幅 5 ms，パルス間隔 30 ms のマルチトーンバースト波を用いた（波形全体の時間長さは 270 ms）。加算平均数は 5 回とした。なお、音圧は約 110 dB（Z 特性最大値，音源から 1m），気温 22.9 度であった。

4.2 実験結果

図-7(a)に測定面の CCD カメラ画像を示す。+ は LDV による測定位置を，その上側の数字は測定点番号を示し

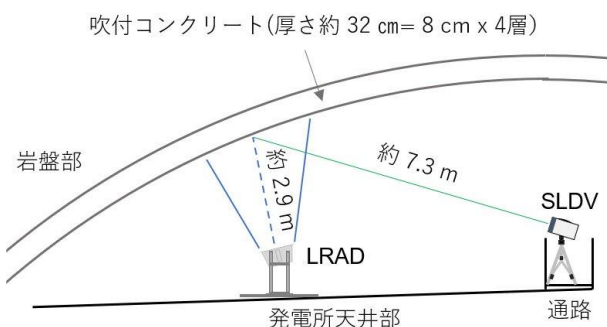
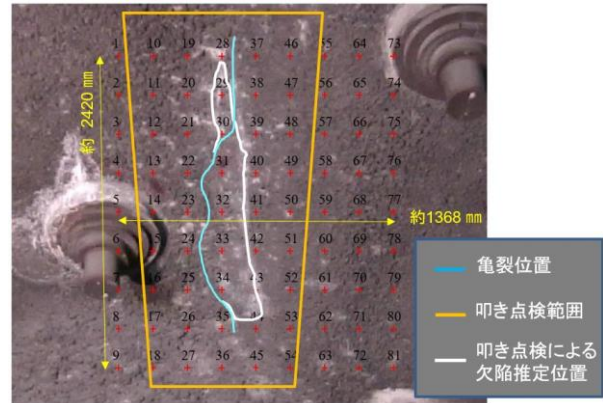
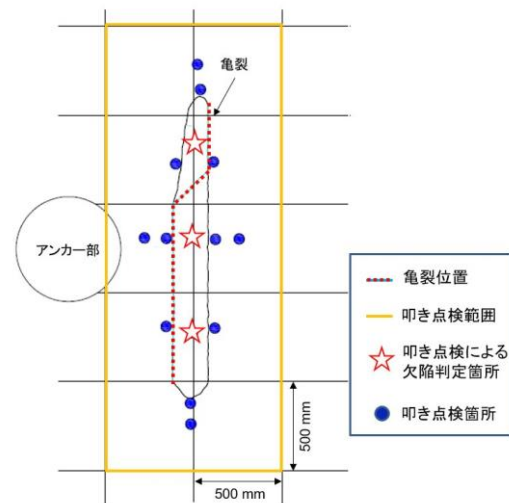


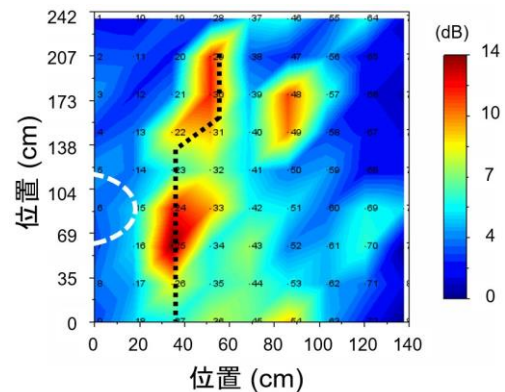
図-6 地下空洞天井部における実験セットアップ



(a) 測定面の CCD カメラ画像



(b) 叩き点検結果



(c) 振動エネルギー比分布（300-2000Hz）

図-7 計測エリアと実験結果例

ている。測定点数は 81 点（9×9，測定エリア中心付近の測定間隔は縦 17.2 cm × 横 17.1 cm，ただし測定面が斜めになっているため，実際の測定面上ではレーザからの距離に応じて変化する）。白い囲み線は叩き点検により判明した欠陥部（浮き）の推定範囲を示している。また，亀裂（水色線で表示）が縦方向に見られる。図-7(b)は叩き点検結果であり，☆は欠陥と判定された箇所，●は健全と判断された箇所を示しており，亀裂に沿って細長い

欠陥が検出されている。これに対して,NCAI 法による振動エネルギー比分布を図-7(c)に示す。なお,今回はSLDVと LRAD の位置が離れていたため,レーザ側の共振はあまり問題とならなかった。黒点線は亀裂のおよその位置を示している。浮きの部分や亀裂の近傍に振動エネルギーの高い箇所が存在しており,叩き点検結果とよく一致している。なお,亀裂右側の反応は目視できる亀裂部から少し離れていたため,叩き点検の結果には反映されていない。図の左側の白破線は,アンカー部の位置と大きさを示している。さらに図-8にSSE解析結果を示す(図中のMは中央値(Median), σ は標準偏差)。3.3節よりSSE値が下がる周波数帯域は,欠陥部である可能性が高いため,ここでは中央値を基準として,中央値以下のSSE値

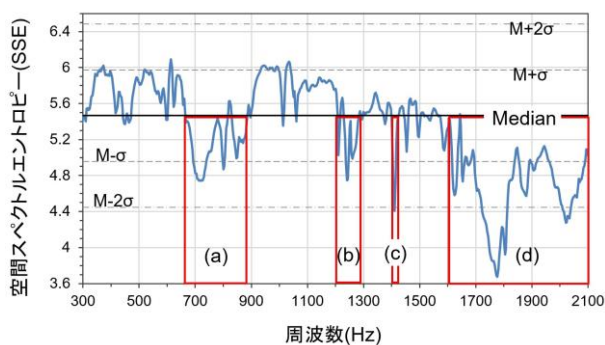


図-8 SSE 解析結果例

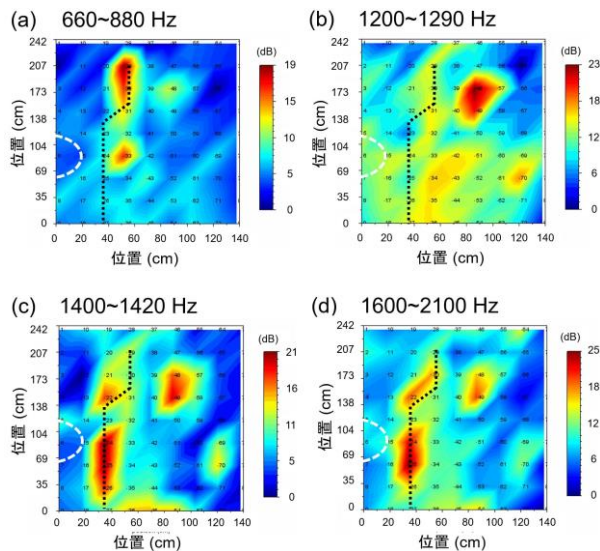


図-9 周波数帯域毎の振動エネルギー比分布例

(a) 660~880 Hz, (b) 1200~1290 Hz,
(c) 1400~1420 Hz, (d) 1600~2100 Hz

の領域を赤枠で表示した。図より,この欠陥は周波数帯域の異なる複数欠陥により構成されている可能性があることが分かる。図-9にSSE解析により分離された周波数帯域毎の振動エネルギー比分布例を示す。周波数帯域毎に振動エネルギー比の高い箇所が異なっており,複数の欠陥が複雑に組み合わされて構成されていることがわかる。なお,振動エネルギー比の高い箇所は,叩き点検結果ともほぼ一致するために内部欠陥であると考えられるが,閾値を用いた同定については模擬欠陥を含んだ吹付コンクリートによる供試体による検証が必要である。

5. まとめ

SSE解析により,LDVの共振と欠陥部の共振が識別できることを理論的検討およびコンクリート供試体を用いた検討により明らかにした。また,実際の地下空洞天井部における吹付けコンクリート表層部の局所的な浮き箇所に対してNCAI法を用いた実験を行い,叩き点検結果とほぼ一致した結果が得られること,およびSSE解析を用いることで,この欠陥が周波数帯域の異なる複数の欠陥により構成されていることを明らかにした。

参考文献

- 1) 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
- 2) 杉本恒美, 杉本和子, 森岡宏之, 歌川紀之: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, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1594-1599, 2020
- 3) 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, SGGB15, 2019
- 4) E.T.Jaynes.:Information Theory and Statistical Mechanics, *Phys. Rev.*, Vol. 106, pp.620-630, 1957

表-2 地下大空洞に用いられた吹付けコンクリートの配合

仕様	Gmax (mm)	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	急結剤 A
SFRC	15	63	65	240	380	1058	569	80	23.0
プレーン	15	63	65	222	350	1079	581	—	17.5