

報告 UAVからの音波照射加振による高速・高精度な欠陥検出に関する検討

杉本 恒美*1・中川 裕*2・杉本 和子*3・歌川 紀之*4

要旨: UAVからの音波照射加振とレーザドップラ振動計を用いた非接触音響探査法では、音源位置が揺動するものの、時間周波数ゲートに共振判定処理を加えることにより高精度な欠陥探査が可能である。しかしながら、共振判定処理において音源位置の想定移動範囲が大きい場合には、計算負荷が重いという問題があった。そのため、送信した周波数帯域毎に送信波形とレーザドップラ振動計により得られた振動速度波形の相互相関処理を考案した。検討結果から、高速かつ高精度な欠陥検出が可能であることが明らかになった。

キーワード: 音波照射加振, レーザドップラ振動計, 相関処理, 非接触音響探査, 非破壊検査

1. はじめに

コンクリート構造物の内部欠陥検査には、主としてハンマーを用いた叩き点検が用いられている。しかしながら、少子高齢化の進行に伴い、熟練の叩き点検作業者の不足が懸念されているために、点検作業の自動化や機械化が期待されている。既に様々な手法¹⁻⁴⁾が開発されているが、多くは計測対象面に計測機材を近づける必要があり、作業の効率化が期待できないために、遠隔から非接触で実施できる非破壊検査法の開発が望まれている。遠隔から実施できる手法として、ガスガン⁵⁾やウォーターガン⁶⁾を用いた手法が検討されたが、実用化には至っていない。また、赤外線カメラ⁷⁾やパルスレーザ加振⁸⁾を用いた手法はすでに開発されているが、前者は温度変化の少ない場所、例えばトンネル天井部等の検査には適しておらず、後者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)法に関する検討を行ってきた。最初に、コンクリート供試体に埋設された模擬空洞欠陥を5m以上の距離から検出できること、および検出原理を明らかにした⁹⁾。さらに、シングルトーンバースト(STNB: Single ToNe Burst)波¹⁰⁾、振動エネルギー比(VER: Vibrational Energy Ratio)¹¹⁾と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¹²⁾および高速測定を可能にするマルチトーンバースト(MTNB: Multi ToNe Burst)波¹³⁾等を考案している。また、反射波の影響により発生するレーザドップラ振動計(LDV: Laser Doppler Vibrometer)自体の共振現象と、コンクリート内部欠陥に起因する共振現象を識別するための空間スペクトルエントロピー(SSE: Spatial Spectral Entropy)も考案された¹⁴⁻¹⁵⁾。

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、30m以上の離隔の高架橋床版¹⁶⁾、および地下大空洞内の表面が不陸の吹付けコンクリート面¹⁷⁻¹⁸⁾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。さらに、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¹⁹⁻²⁰⁾。しかしながら、音源搭載型UAV自体が自然風の影響により揺動した場合には、従来の時間周波数ゲートでは欠陥検出に失敗することがあった。そのため、加振周波数で振動しているかどうかを判定する共振判定処理²¹⁾が考案されたが、UAVの想定移動範囲に応じて計算負荷が高くなるという問題があった。そこで、今回は、送信波形であるトーンバースト波とLDVで測定された振動速度波形の相互相関をとる方法について検討を行った。

2. 非接触音響探査法の概要

2.1 探査原理と基本セットアップ

非接触音響探査法の基本構成を図-1に示す。音源からの音波により測定対象壁面に振動エネルギーを与えて、欠陥部上のたわみ共振振動を励振する手法である。映像化は励振時の壁面上の振動速度をLDVもしくはスキャニングLDV(SLDV: Scanning LDV)を使用して2次元的な振動速度分布を計測することにより行われる。薄い円板の場合、周辺単純支持のたわみ共振周波数の理論式²²⁻²³⁾は式(1)のように表せる(*係数はポアソン比が0.2の時)。

$$\frac{4.783^* h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

*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 修士(工学)

*3 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 研究員 博士(工学)

*4 佐藤工業株式会社 技術センターSOU 上席研究員 博士(工学) (正会員)

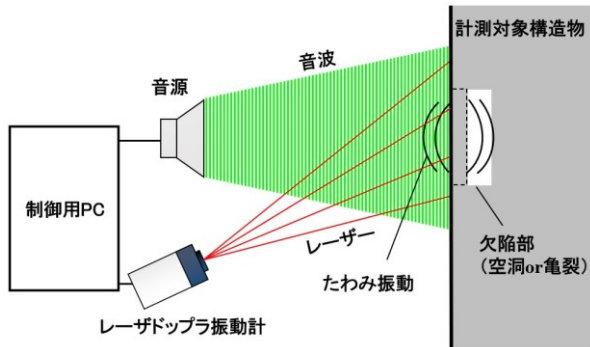


図-1 NCAI 法の基本セットアップ

ここで、 a と h は欠陥部の半径と深さ、 E 、 ρ 及び ν はそれぞれコンクリートのヤング率、密度及びポアソン比である。

2.2 送信波形

本手法では欠陥部のたわみ共振を利用しているため、その共振周波数を含んだ音波を送波する必要がある。固定音源の場合には、計測対象からの反射音波の影響を高感度 LDV が受けることを考慮して無音のインターバル時間を挿入した送信波形を用いている。しかしながら、音源搭載型 UAV を用いる場合に、音源位置と LDV の位置が大きく離れる場合には、そのような考慮は不要となる。すなわち、図-2 に示すような無音時間のない連続した MTNB 波を加振波形として用いることが可能になる。通常はこの送信波形に対して、時間周波数ゲートを組み合わせることで、固定音源の場合には外部ノイズの影響を受けにくい計測が可能である。しかしながら、音源が移動した場合、想定した時間ゲート外の信号については正しく処理できないことになる。

2.3 振動エネルギー

実際の欠陥部では、複数のスペクトルピークが観測されることがある。そのため、単一の周波数による映像化では、欠陥の位置と規模を見誤る可能性がある。そのため、加振周波数範囲内の振動速度のパワースペクトルの積分値を振動エネルギーとして映像化に用いている。得られた振動エネルギーの最低値を健全部の基準とした場合、振動エネルギー比(VER)は式(2)のように定義できる。

$$[VER]_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{each}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{min}) df} \quad (2)$$

ここで、 PSD_{each} は各計測点のパワースペクトル密度、 PSD_{min} は計測されたパワースペクトル密度の最低値である。また f_1 及び f_2 は積分の下限及び上限周波数である。

2.4 共振判定処理²¹⁾

NCAI 法で、通常用いられていた時間周波数ゲートは音源が移動することは考慮されていなかった。そのため、

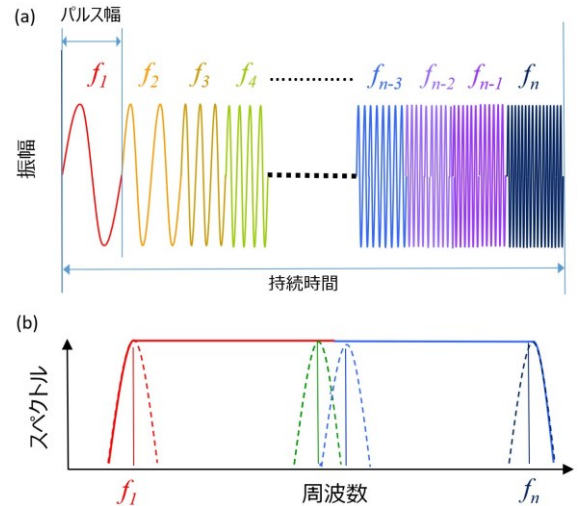


図-2 MTNB (マルチトーンバースト) 波形例

(a) 時間領域、(b) 周波数領域

UAV からの音波照射時のように音源位置が変化する場合に、実際に送信音波に含まれている周波数で振動したかどうかを判定する共振判定処理が考案された。この処理では、実際の計測データには突発的なノイズが入ることもあるために、図-3 のように音波で励振されたと思われる時間帯の時間波形を3つの区間に分割した場合を考える。送信音波により共振していない場合には、スペクトルピークが周波数帯域内に発生する確率が低下することになるが、周期信号を含まないノイズは1つの区画だけで判定すると、まれにはあるが帯域内にスペクトルピークが現れる場合があるため、複数区間で判定することにより、誤検出を防ぐ必要がある。そこで各区画内において、送信周波数と同じ帯域に共振ピークが存在するかどうかを調べ、3つ全ての帯域内にスペクトルピークが存在する場合のみ、送信波により共振したと判定して、帯域内の成分を残し、それ以外の場合はゼロとした(今回はパルス幅 3ms の波形を用いているので、各区画を 1ms 毎ずらして計算)。共振判定処理とは、このような判定処理を音源の移動を考慮して拡大された時間ゲート内で、適切な時間間隔で繰り返して、加振された周波数で振動した時間領域があるかどうかを探す手法である。この手法では、加振音波の周波数で振動した計測データ

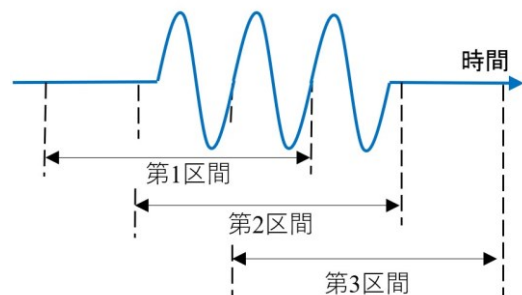


図-3 共振判定処理時の波形3分割イメージ



図-4 外壁供試体の模擬欠陥配置図

のみを映像化に使用することになるため、音源が移動していない場合であっても、欠陥部の明瞭な検出にも有効に用いることが可能である。ただし、音源位置の想定移動範囲が大きいと計算負荷も重くなるという問題もある。

2.5 音波照射波形との相関処理

共振判定処理よりも計算負荷が軽い方法として、周波数を時間的に離散変化させている送信波形であるトーンバースト波との相互相関をとる手法が有効かどうかの検討を行った。共振振動が発生した周波数帯域を検出するために、トーンバースト波形の全体を使うのではなく、送信した周波数帯域毎のバースト波形と LDV により得られた振動速度波形の相互相関処理を行い、周波数帯域毎に得られた相関値の最大値を、その計測点の値として表示するという処理方法を考案した。この方法では、送信音波により加振された周波数で振動した時間帯を探さないため、共振判定処理よりは高速に処理できる可能性がある。ただし、表示値は周波数帯域毎に計算された相関値の最大値となるため、振動エネルギーの場合と異なり、最大の相関値を示した特定の周波数帯域のみが結果に反映されることになる。

3. タイル外壁供試体を用いた実験

3.1 外壁供試体

UAV を用いた外壁検査の検証実験のために、タイル張りの外壁供試体 ($2 \times 1.6 \times 0.2 \text{ m}^3$) を用いた。コンクリート部の配合表を表-1 に示す。供試体に埋設された模擬欠陥シートの配置図を図-4 に示す。種々のサイズの厚さ 0.5 mm のステンレスシート及び厚さ 1 mm の発泡シ-



写真-1 音源搭載型 UAV の外観写真

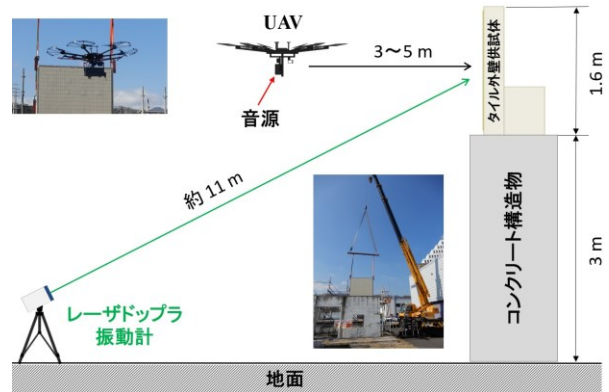


図-5 タイル外壁供試体を用いた実験セットアップ

ト+接着テープが模擬亀裂欠陥として使用された。一枚のタイルのサイズは、約 $45 \times 95 \text{ mm}^2$ であり、シートの埋設位置はタイル表面から約 9 mm 程度である（貼付モルタルもしくは下地モルタル部での剥離を想定）。なお、上下 2 段に同じ模擬欠陥が配置されており、違いはコンクリート壁の厚さとなっている。上部の 2 列は約 0.2 m の厚さで、下部の 2 列は約 0.6 m の厚さとなっている。ただし、この厚さの違いは特に実験結果には影響しなかった。

3.2 音源搭載型 UAV について

実験で用いた音源搭載型 UAV (DJI Corp., Matrice 600 Pro) の下面には音源 (FPS Corp., 1030M3F1R)、照準用レーザーポインター、レーザ距離計等が装備されている (写真-1 参照)。UAV 自体の重さは約 10 kg で、約 20 分間の飛行が可能である。また、音波照射加振用の波形は無線通信により送信することができ、LDV 側の測定と同期させることができる。

3.3 実験セットアップ

図-5 に示すように大型クレーン車を用いて外壁供試体を他のコンクリート供試体 (高さ 3 m) に吊り上げて配置した状態で、飛行中の UAV からの音波照射加振実験を行った。音波照射加振に用いた波形は周波数範囲

表-1 外壁供試体のコンクリートの配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	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	53.0	45.7	177	334	804	985	3.34

0.5~4 kHz の MTNB 波である (パルス幅 3 ms, 周波数インターバル 200 Hz, 波形全体の時間長さ 60 ms)。振動速度分布の計測には SLDV (Polytec GmbH, PSV-500-Xtra) を用いた。なお、音圧は 5 m の距離で約 90 dB (Z 特性の最大値) とし、高速計測を実現するために加算平均処理は行わなかった。ただし、50 mm 角の模擬欠陥については、共振周波数が 10 kHz を超えており、叩き点検でも判別困難であったために、今回の加振周波数範囲には含めず計測対象外としている (計測については、50 mm 角の模擬欠陥部位置も含めて全面スキャンしている)。

3.4 振動エネルギー比による欠陥検出結果

周波数範囲 0.9~4 kHz の振動エネルギー比分布例を図-6 に示す。測定領域の大きさは約 1.4×1.7 m² であり、測定点の総数は 525 (縦 21×横 25) 点である (測定間隔は縦横とも約 70 mm, 計測時間は約 132 秒)。ここで、測定間隔は 100mm 角の欠陥を検出できるように設定している。この図から、UAV が風の影響で揺動していた場合でも、大きな欠陥は検出できることがわかる。しかしながら、小さな欠陥については検出できていないことも見て取れる。この検出精度の低下原因は、風の影響による飛行中の UAV の揺動によるものであることが想定される。すなわち、通常の時間周

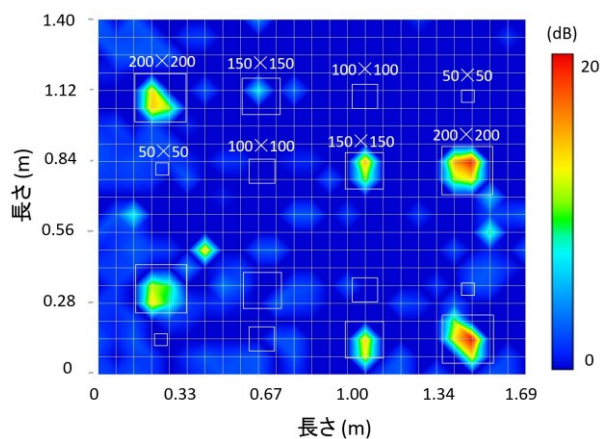


図-6 振動エネルギー比による欠陥検出結果例

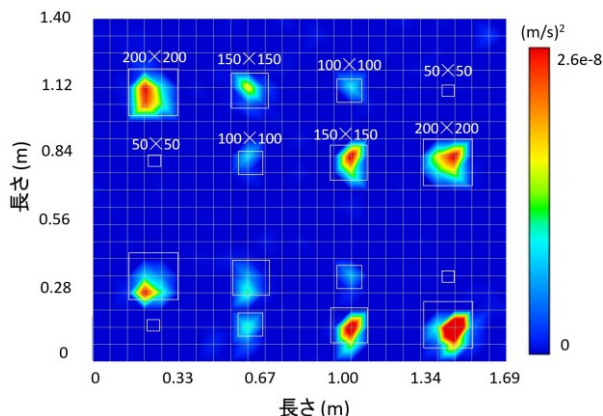


図-7 共振判定処理による欠陥検出結果例

波数ゲートでは、音源の移動を考慮していないため、時間ゲート外の信号を正しく処理できていない場合があるということを意味していると思われる。

4. 信号処理による欠陥検出精度の改善

4.1 共振判定処理による欠陥検出結果

測定対象面から音源の移動範囲が 3~5 m であると仮定して計算した場合の共振判定処理による振動エネルギー分布例を図-7 に示す (拡張された時間ゲート内での計算の時間間隔は、検出精度を重視して 0.5 ms 毎としている)。図より音源が移動したとしても、共振振動自体は、LDV により計測されているため、共振判定処理を行うことで検出精度の高い欠陥検出ができることがわかる。しかしながら、この共振判定処理では、想定する音源の移動範囲に依存して計算負荷が重くなるという問題点がある。

4.2 相互相関処理による欠陥検出結果

送信した周波数帯域毎に送信波形と LDV から得られた振動速度波形の相互相関処理により、得られた相関値の最大値を表示した結果例を図-8 (a) に示す。相関値で

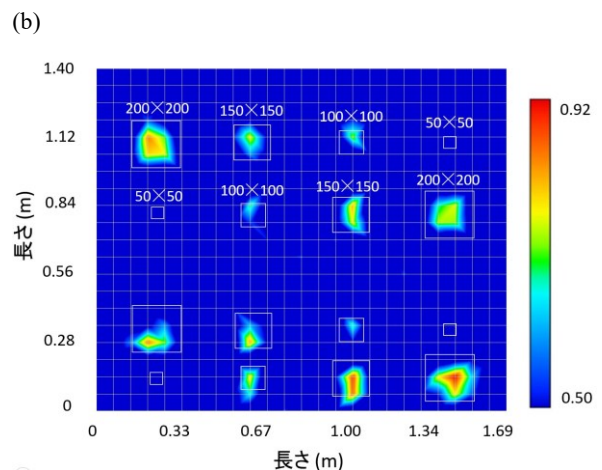
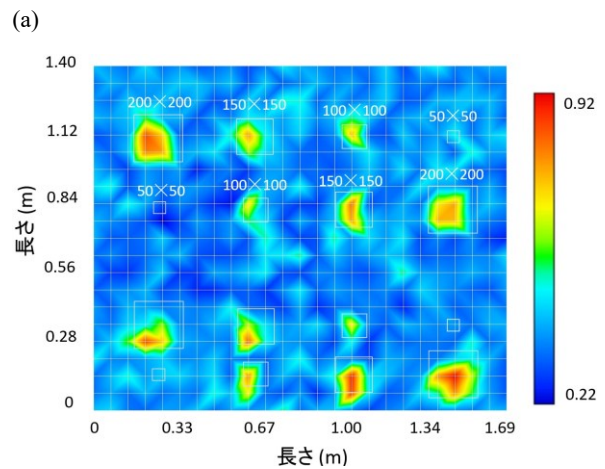


図-8 相関処理による欠陥検出結果、(a) 相関値の表示幅 0.22~0.92, (b) 相関値の表示幅 0.50~0.92。

あるため、健全部であってもノイズ成分があるために相関値は0にはならないが、すべての欠陥が検出されていることがわかる。そこで、相関値が高い箇所だけを抽出するために、相関値の表示幅を 0.5~0.92 に変更した場合を図-8 (b) に示す。共振判定処理と同じく、すべての欠陥が明確に検出されていることがわかる。

4.3 計算時間の比較

表-2 に各手法による映像結果算出のための計算時間の比較結果を示す。Case 1 は従来の時間周波数ゲートを用いた積分処理（振動エネルギー比の算出）、Case 2 は共振判定処理、Case 3 は周波数帯域毎の相互相関処理による計算時間である。表より相互相関処理(Case 3)が共振判定処理(Case 2)よりも約 5.6 倍程度高速であることがわかる。一方で、従来の時間周波数ゲートを用いた積分処理(Case 1)の方が、相互相関処理(Case 3)よりも約 2.7 倍程度高速ではある。欠陥の検出精度は Case 3 の方が高いこと、および、音源固定時の実験¹⁹⁾では Case 1 でも全欠陥の検出が出来ていたことから、音源移動の有無により処理方法の選択する必要があると思われる。なお、比較用に用いた計算環境は Windows 10 (21H1, Core i9 10900K (3.7 GHz), Memory 32Gbyte)上の Scilab 6.1.1 である。

表-2. 計算時間の比較.

Case 1: 時間周波数ゲートを用いた積分処理, Case 2: 共振判定処理, Case 3: 周波数帯域毎の相互相関処理

	Case 1	Case 2	Case 3
計算時間(秒)	16.2	248.3	43.9

5. 実際のタイル外壁構造物での実施例

実際のタイル外壁をもつ構造物（民間マンション）において、UAV からの音波照射加振による欠陥探査が可能かどうかを確認するための試行実験を行った。実験セットアップを図-9 に示す。音源搭載型 UAV, SLDV および送信波形は 3 章で示したものと同一ものを用いた。スキャンエリア図および周波数帯域毎の相互相関処理結果例を図-10 に示す（測定間隔は約 80~90 mm 程度）。図より、1 階と 2 階の間の計測エリア (P1) において、1 箇

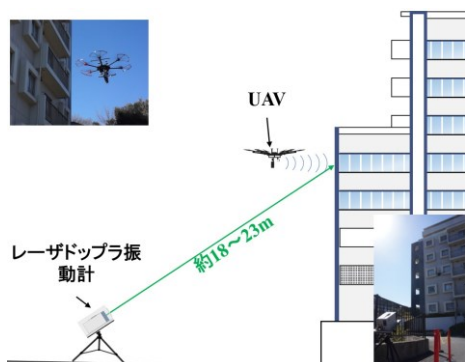


図-9 実構造物での検証実験セットアップ

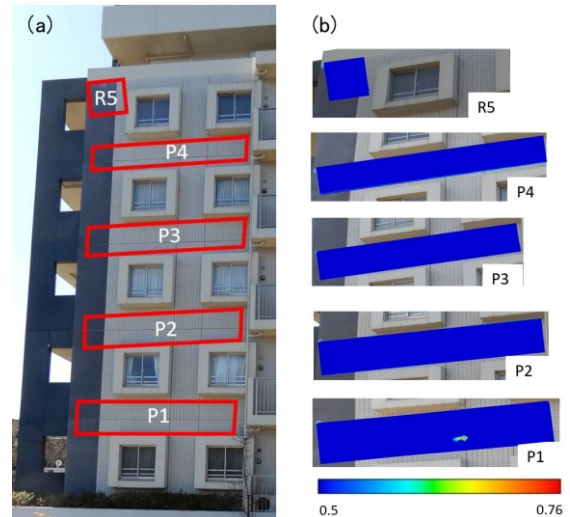


図-10 実際のタイル外壁構造物での実験結果

(a) 計測位置, (b) 相関処理による探査結果例

所だけ加振音波と相関の高い部分が存在することが確認でき、実構造物においても本手法が有効である可能性が高いことが明らかになった。なお、この建物では全面補修が計画されており、その際に足場を組んだ上での点検および補修が予定されている。

6. まとめ

飛行中の UAV からの音波照射加振を利用した NCAI 法により、タイル外壁の欠陥探査における欠陥検出精度と計算時間に関する比較検討を行った。従来の時間周波数ゲートでは時間ゲート外の信号については正しく処理できないため、UAV の揺動による音源位置の変化には対応できないという問題があった。そのため、実際に送信音波により加振されたかどうか判定する共振判定処理が考案され、音源位置が変動しても高精度な欠陥検出ができることが明らかになったが、音源の想定移動範囲に依存して計算負荷が重くなるという問題があった。そこで、より計算負荷が軽い方法として、送信した周波数帯域毎のバースト波形と LDV の振動速度波形との相互相関をとる手法の検討が行われた。検討結果から、相互相関を用いた手法では、共振判定処理と同様に高精度な欠陥検出が可能であり、かつ共振判定処理よりも約 5.6 倍高速な計算処理が行えることが明らかになった。今後は実用化に向けた検討を実施予定である。

参考文献

- 1) C.Cheng and M.J.Sansalone : The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies. *Mater. Struct.*, Vol.26, pp.274-285, Jun. 1993
- 2) M.J.Sansalone and W.B.Streett : Nondestructive

- Evaluation of Concrete and Masonry, Impact-Echo Bullbrier Press, Jersey Shore, PA, USA, 1997
- 3) R. Miyamoto, K. Mizutani, T. Ebihara, and N. Wakatsuki : Effect of mode conversion of defect detection and size estimation in billet from time-of-flight profile by ultrasonic transmission method, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.55, 07KC06, Jun. 2016
 - 4) S.Tanaka : Detection of Cracks and Air-gaps in Reinforced Concrete Structures Using an Electromagnetic Wave (Radar), *Transactions of SICE*, Vol.43 (9), pp. 716-724, Sept. 2007
 - 5) K. Mori, A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo, and I. Torigoe : A new non-contacting non destructive testing method for defect detection in concrete, *NDT&E Int.* Vol.35, pp.399-406, Sept. 2002
 - 6) K. Mori, S.Tokuomi : Nondestructive testing method for concrete structures by using water jet, *Proc. JSME/ASME 2017 Int. Conf. Mater. Processing, ICMP2017-4392*, Jun. 2017
 - 7) 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*, Vol. 36(4), pp. 265-275, Jun. 2003
 - 8) 島田義則,コチャエフ オレグ,篠田昌弘,御崎哲一,高橋康将,瀧浪秀元 : レーザを用いたコンクリート欠陥検出の進展, 非破壊検査 Vol.61(10), pp519-524, Oct. 2012
 - 9) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa and 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, Jul. 2013
 - 10) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa and 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 IUS.*, pp.1303-1306, Jul. 2013
 - 11) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto and N.Utagawa : Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, 07KC15, Jun. 2014
 - 12) 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, Jun. 2015
 - 13) 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, Jun. 2017
 - 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, SGG15, Jul. 2019
 - 15) K.Sugimoto and T.Sugimoto : Detection of internal defects in concrete and evaluation of a healthy part of concrete by noncontact acoustic inspection using normalized spectral entropy and normalized SSE, *Entropy* 2022, Vol.42, No.24(2), 142, Jan. 2022
 - 16) 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, Jun. 2017
 - 17) 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*, 27, I-8, pp.1-10, Nov. 2017
 - 18) 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, Jun. 2018
 - 19) 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.41, No.1, pp.1901-1906, Jul. 2019
 - 20) T. Sugimoto, K. Sugimoto, I. Uechi, N. Utagawa, and C. Kuroda : Outer wall inspection by noncontact acoustic inspection method using sound source mounted type UAV, *Proc. Int. Congress on Acoustics (2019 ICA)*, pp.8188-8195, Sept. 2019
 - 21) Y.Nakagawa, T.Sugimoto, K.Sugimoto, and I.Uechi : Research on improvement of defect detection accuracy by resonance judgment for noncontact acoustic inspection method by acoustic irradiation induced vibration, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.61, SG1035, Apr. 2022
 - 22) A.W.Leissa : *Vibration of plates*, NASA, SP-160, U.S. Government Printing Office, Washington DC, p.9, 1964.
 - 23) 日本機械学会編, *機械実用便覧(改訂第7版)*, p.102, 2016.