

報告 空中からの音波照射加振を用いた非接触音響探査法によるタイル外壁検査

杉本 恒美*1・杉本 和子*2・中川 裕*3・上地 樹*4

要旨：非接触音響探査法は遠距離非接触でコンクリート内部欠陥を探査できる手法であり、音源をドローン等に搭載して空中からの音波照射加振を行うことによりその計測範囲を拡大することが期待できる。今回は、ドローンもしくは高所作業車を用いて軽量の平面音源を空中に配置することにより、タイル外壁を持つ実在の建築物に対する探査実験を実施したので、供試体での結果も含めて、音源を空中配置した場合の実施例について紹介する。

キーワード：音波照射加振，レーザドップラ振動計，非接触音響探査，非破壊検査，外壁タイル検査

1. はじめに

1.1 コンクリート構造物やタイル外壁の点検について

コンクリート構造物や建物外壁タイルの点検は、維持管理の観点から重要であり、国土交通省により定期的な点検が義務付けられている。特に、トンネルや橋梁などインフラを支える各種コンクリート構造物の劣化が問題となっているが、点検方法としては、依然として目視検査や叩き点検が主流となっているのが実情である。目視検査については、車両やドローンに搭載した高精細カメラで代替可能であるが、検査対象面に見える微細なひび割れは確認できても、内部欠陥の有無までは判別できないという問題がある。叩き点検は簡便ではあるものの、打音に含まれる周波数成分を判別するには検査員の経験が必要とされており、少子高齢化の進展に伴い、後任の検査員を育成確保することは容易ではないという状況にある。そのため、点検作業自体の効率化・自動化が今後求められている。これまでに開発されている非破壊検査法としては、インパクトエコー法¹⁾、超音波探査法²⁾、レーザ探査法³⁾、フード付きマイクロホンとインパルスハンマを用いた打音法⁴⁾、壁面接触もしくは吸着型のドローンを用いた方法^{5,6)}などが挙げられるが、これらの方法では、計測機器自体を計測対象面に接触または近接させる必要があり、実際の検査作業の効率化が課題となっている。したがって、従来の叩き点検と同等な検査精度をもつ遠距離非接触検査が可能な検査法の開発が期待されている。

1.2 遠距離からの非破壊検査が可能な手法

10メートル未満の距離から非破壊検査が可能な方法として、ガスガンを用いた圧力波による衝撃探査法⁷⁾や水撃探査法⁸⁾、ストリングシューター、エアガンを用いた方法が提案されている。最初のガスガンの場合、シリ

ンダ内にガス圧が残っていないと加振ができない。コンクリート欠陥検査では、複数点の加振が必要となることから、途中でガスシリンダを交換する必要があるため、連続計測に課題があると言われている。残りの3手法では、実際に屋外で計測を行う場合、風の影響で計測位置が不安定になるほか、真上の計測が困難な場合も考えられる。

一方、赤外線カメラ⁹⁾を用いることで、計測対象表面付近の温度分布を非接触で計測することができる。しかし、この方法は健全部と欠陥部の熱拡散率の差を利用しているため、温度変化の少ないトンネルや橋梁下などではヒータ等で加熱する必要があるほか、日照条件、特に太陽光による温度変化の影響を受けやすいという課題もある。

レーザ照射加振を利用するレーザリモートセンシング法¹⁰⁾も遠隔から欠陥を検出できる方法である。しかし、コンクリートやタイル外壁の場合、融点が金属よりも低いいため、検査箇所が熱ダメージを受け、微破壊されてしまうという課題がある。この熱ダメージを回避するため、レーザ誘起プラズマから発生する衝撃波を利用する方法も提案されている¹¹⁾。しかし、強力なレーザを対象物表面付近に正確に集光する必要があり、集光レンズ自体を計測対象物の近く(10~100cm)に設置する必要があるため、遠距離から振動を励起できないという課題があると思われる。

1.3 音波照射加振を用いた非接触音響探査法

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(NCAI: Non-Contact Acoustic Inspection)法は、遠距離非接触で日照等の影響を一切受けず、検査対象にダメージも全く与えない非破壊検査方法である。従来考案された多くの手法と異なり、このNCAI法では計測対

*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 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 研究員 修士(工学)

*4 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 研究員 修士(工学)

象面を面的に音波加振するという点に特徴がある。

この NCAI 法では、欠陥の共振周波数を含む音波を照射することで欠陥部に曲げ共振現象を発生させ、レーザドップラ振動計 (LDV : Laser Doppler Vibrometer) もしくはスキャニング振動計 (SLDV : Scanning LDV) を用いた遠距離の非接触欠陥検出を実現している。まず、コンクリート供試体の空洞欠陥を 10 m の距離でも検出できることを示した¹²⁾。次に、実用的な欠陥検出性能を向上させるために、シングルトーンバースト (STNB : Single ToNe Burst) 波¹³⁾、時間周波数ゲート¹³⁾、振動エネルギー比¹⁴⁾、スペクトルエントロピー¹⁵⁾を用いた欠陥検出アルゴリズムを開発し、マルチトーンバースト (MTNB : Multi ToNe Burst) 波¹⁶⁾を考案して高速計測を可能とした。続けて、トンネル、高架橋¹⁷⁾、地下空洞¹⁸⁾などの実際のコンクリート構造物での探査実験や、タイル外壁供試体を用いた飛行中のドローンからの音波照射実験^{19,20,21)}も行われている。また、振動速度分布を用いて、内部欠陥による共振と LDV 自体の共振を区別することができる空間スペクトルエントロピー²²⁾や、照射音波に含まれる周波数で振動が引き起こされたかどうかを判定する共振判定処理²³⁾も考案されている。

さらに、NCAI 法による移動計測を実現できないかという要望に応えるために、走査機構を持たないレーザドップラ振動計 (LDV) を複数台用いて NCAI 法による移動計測が可能かどうかの基礎検証実験が行われた。実験結果から、照射波形と計測波形との相関処理を用いることで、低速時 (時速約 2~3 km 程度) における NCAI 法による移動計測の可能性を実証している²⁴⁾。

一方で NCAI 法では、音源を空中に配置しても実施可能であるが、従来は主に供試体を用いた結果しかなかった。今回はタイル外壁を持つ実構造物に対して探査実験を行う機会を得たので、空中からの音波照射加振を用いた NCAI 法による供試体と実構造物のタイル外壁の探査実施例について紹介する。

2. 音源を空中配置した非接触音響探査法の概要

2.1 基本構成

音源を空中配置した場合の非接触音響探査 (NCAI) 法の基本構成図を図-1 に示す。音源はドローンに搭載するか、高所作業車等に取り付けることにより空中に配置することが可能である。音源をドローンに搭載した場合には、自然風の影響により機体が揺動することがあるが、音源の指向性の範囲内 (およそ $\pm 15^\circ$ 以内) に計測位置が含まれていれば、計測自体には問題ないことになる。ただし、音源の指向性の範囲外までドローンが移動してしまった場合には、計測を一時停止して、位置を修正してから、計測を再開させる必要がある。なお、計測対象

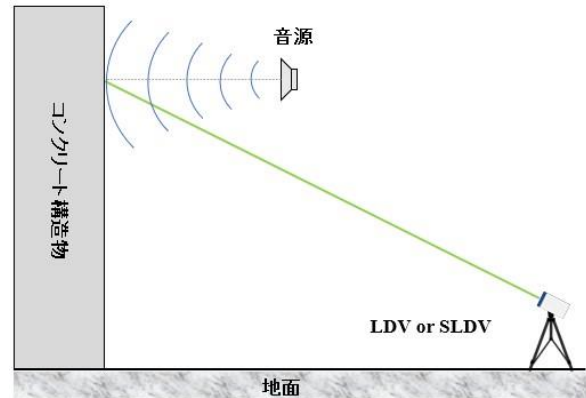


図-1 音源を空中配置した NCAI 法の基本構成

面までの距離については、ドローン本体に取り付けたレーザ距離計のデータも同時に記録しておくことにより、計測時の音源から計測対象面までの距離を把握することも可能である (共振判定処理を適用する場合に利用)。高所作業車に搭載した場合でも、伸縮するアーム先端に取り付けられた作業台が多少揺動することがあるが、音源の指向性の範囲内に計測位置が入っていれば良いので、通常は計測自体を一時停止する必要はない。

2.2 送信波形

通常の NCAI 法では、音源を LDV の近くに配置しているため、反射波が LDV に影響を与えない時間帯で計測することを考慮した無音時間を含むトーンバースト波が用いられている。しかしながら、空中に音源を配置した場合には、計測対象面からの反射波が LDV に与える影響も相対的に小さくなる。そのため、無音時間の無いトーンバースト波を用いることで、極めて高速な探査を行うことが可能となる。無音時間の無い MTNB 波の例を図-2 に示す。この波形は周波数範囲 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 59 ms)。SLDV によるデータの記録時間を約 200ms とすると、この波形では 1 ポイント当たり約 0.26 秒の高速計測ができることになる。

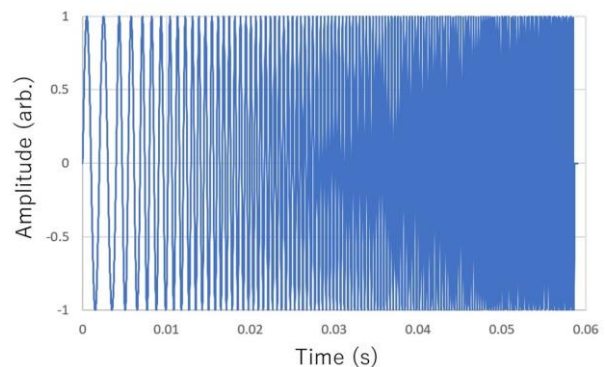


図-2 無音時間の無い MTNB 波の例

2.3 振動エネルギー

実際の内部欠陥の形状は複雑であり、一つの共振周波数だけで振動速度分布を表示すると、欠陥の形状や大きさを見誤る可能性がある。そのため、ある周波数範囲（通常は加振する音波の周波数範囲）の振動速度のパワースペクトルの和を振動エネルギーに相当する値であるとみなして、振動エネルギーもしくは、計測された領域のパワースペクトル密度の最低値を基準とした振動エネルギー比を映像化に使用している。振動エネルギー比の定義を式(1)に示す。

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

ここで、 PSD_{each} は各計測点のパワースペクトル密度を、 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。 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

音源をドローンに搭載した場合には、自然風の影響等により、音源位置が変化することがある。そのため、音源位置が時間変化する場合に、実際に照射した音波の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。音波により加振された想定される時間帯を複数区間に分けて、各区間に送信周波数が含まれているかどうかを調べ、すべての区間に送信周波数が含まれていた場合のみ、受信信号として用いるという手法である。3つの区間に分けた場合の概念図を図-3に示す。この時、波形の時間位置を推定するために、ドローンに搭載された距離計のデータも併用する。

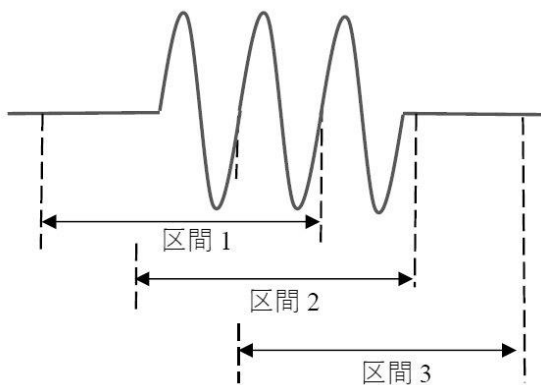


図-3 受信波形分割の概念図 ^{20, 21)}

3. タイル外壁供試体を用いた検証実験

3.1 音源搭載型ドローン

音源を空中配置するために、写真-1に示すような平面音源を搭載したドローンを製作した。機体はDJI社のMatrice 600 Proで、機体下部には平面音源（FPS Corp., 1030M3F1R）に加えて照準用レーザーポインタおよびレーザー距離計が装備されている。音波照射をしながら20分程度の飛行が可能であるほか、加振波形の無線送信およびLDVとの同期計測が可能となっている。



写真-1 音源搭載型ドローンの外観 ^{19, 20, 21)}

3.2 タイル外壁供試体について

検証実験に用いられたタイル外壁供試体（2×1.6×0.2 m）の模擬欠陥配置図を図-4に示す。模擬欠陥としては厚さ0.5 mmのスチレンシートおよび厚さ1 mmの発泡シート+接着テープが用いられた。模擬欠陥の埋設深さはタイル（45×95 mm）表面から約9 mmである。模擬欠陥の大きさは200～50 mm角の4種類であり、上下2段に同じものが配置されている。ただし、50 mm角の模擬欠陥については、共振周波数が10 kHzを超えていたことが判明したため、計測対象外としている。外壁供試体のコンクリート配合表を表-1に示す。



図-4 タイル外壁供試体の模擬欠陥配置図 ^{20, 21)}

表-1 タイル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 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
20	4.5	53.0	45.7	177	334	804	985	3.34

3.3 検証実験結果例

(1) 実験セットアップ

音源搭載型ドローンとタイル外壁供試体を用いた検証実験のセットアップ図を図-5 に示す。タイル外壁供試体は高さ3 mの他のコンクリート供試体の上に配置することにより、ドローンの飛行高度を約4 m程度とした。加振に用いた波形は図-2 に示したものをを用いた。SLDVとしては、PSV-500 Xtra (Polytec GmbH)を使用した。なお、音圧は5 mの距離で約90 dB (Z特性最大値, Z特性とは周波数による重みづけが無いことを意味する), 計測点数は525 (縦21×横25) 点であった (計測時間は137秒)。

(2) 実験結果例

図-6 に振動エネルギー比分布による映像結果例を示す。図より、大きな欠陥は検出できているものの、検出できない欠陥もあることがわかる。この原因は飛行中のドローンの揺動に伴い音源位置も揺動しているためである。そこで、音源位置の揺動を考慮した共振判定処理を適用した場合の振動エネルギー比分布による映像結果例を図-7 に示す。図より、すべての欠陥が検出されるとともにノイズも低減できていることがわかる。

4. 実タイル構造物における外壁検査実験

4.1 音源搭載型ドローンを用いた実験結果例

実タイル構造物における外壁調査実験を兵庫県内の大学校舎の東面にて実施した。実験セットアップを図-8 に示す。この場所では、事前に高所作業車を用いた叩き点検が行われており、欠陥部が発見された4階と5階の間の箇所を計測している。SLDVとしてはPSV-QTec (Polytec GmbH) を使用したが、降雨予報のため、計測機材はレンタカーの車内に配置した。計測時のドローンの飛行高度は約15 m程度で、計測対象面との距離は3 m前後になるように飛行させた。また、打音の周波数解析結果から、加振用音波としては0.1~1.1 kHzのMTNB波が用いられた (パルス幅10 ms, 周波数インターバル50 Hz, 波形全体の時間長さ220 ms)。音圧は3 mの距離で約97 dB (Z特性最大値) で、計測点数は221 (縦13×横17) 点とした (計測時間は8分47秒, 風の影響で音源位置調整を行った際に計測を一時停止した関係上、計測時間が長くなっている)。共振判定処理後の振動エネルギー比分布例を図-9 (白線交点が計測点) に示す。赤破線内が叩き点検で欠陥があると判定された領域であり、その中央部に振動エネルギーが大きい箇所があることがわかる。

4.2 高所作業車からの音波照射加振

同じ大学校舎内の北面の日当たりの良くない箇所でも調査実験を実施した。実験セットアップを図-10 に示す。この場所では、高所作業車の荷台から音波照射加振を行った (音源からの距離は約3.9 m)。加振用音波としては

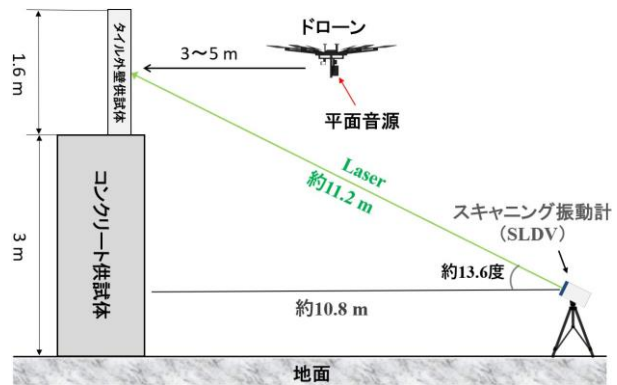


図-5 供試体を用いた検証実験のセットアップ²¹⁾

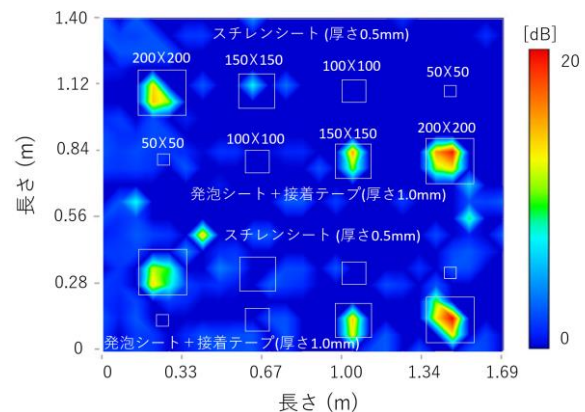


図-6 振動エネルギー比による映像結果例^{19, 20)}

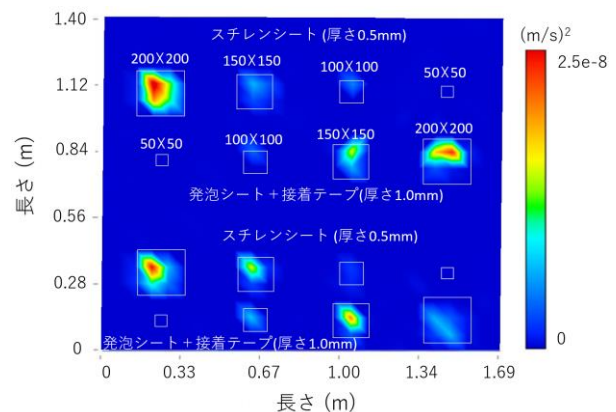


図-7 共振判定処理による映像結果例^{20, 21)}

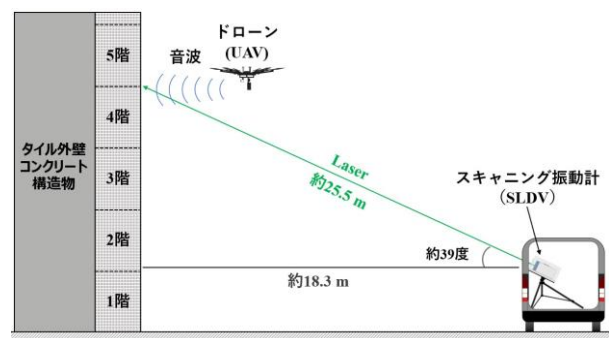


図-8 ドローンを用いた調査実験のセットアップ²¹⁾

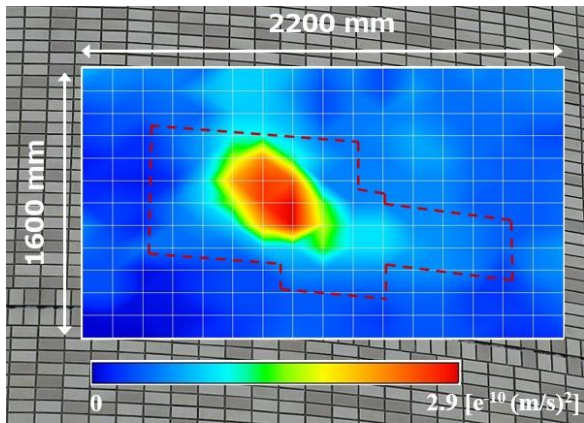


図-9 共振判定処理による映像結果例²¹⁾

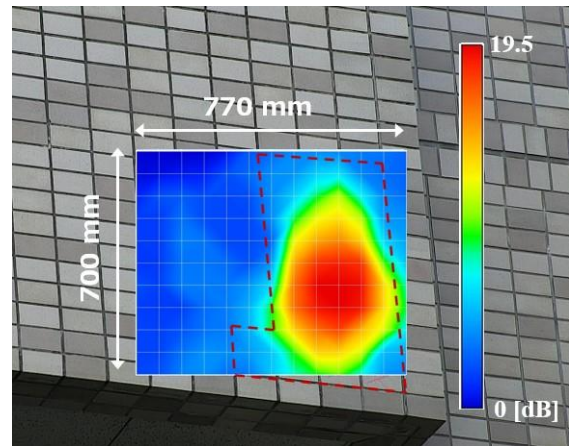


図-11 振動エネルギー比を用いた映像結果例²¹⁾

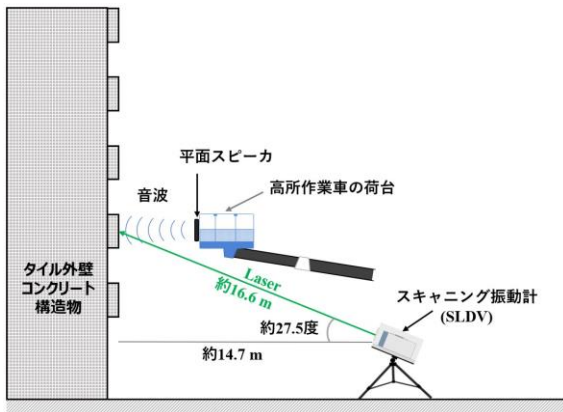


図-10 高所作業車を用いた調査実験のセットアップ²¹⁾

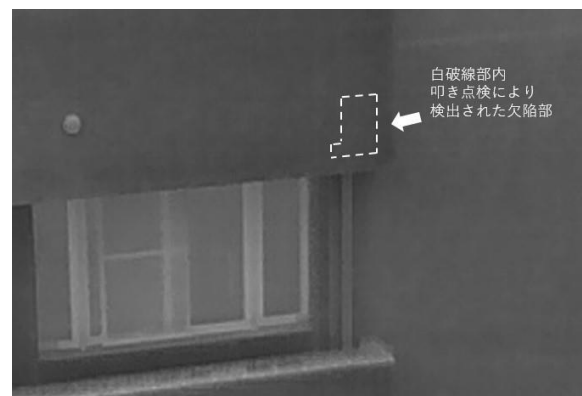


図-12 赤外線カメラによる映像結果例²¹⁾

0.7 ~4.1 kHz の MTNB 波が用いられた（波数は 5 波，波形全体の時間長さ 66 ms）。音圧は 3.9 m の距離で約 86 dB（Z 特性最大値）で，計測点数は 143（縦 11×横 13）点とした（計測時間は 64 秒）。振動エネルギー比分布列を図-11（白線交点が計測点）に示す。赤破線内が叩き点検で欠陥があると判定された領域であり，その中央部に振動エネルギーが大きい箇所が存在していることがわかる。なお，比較のために，赤外線カメラ（Zenmouse H20T，DJI Co., Ltd.）を搭載したドローン（Matrice 300RTK，DJI Co., Ltd.）を用いて得られた映像結果例を図-12 に示す。白破線部内がたたき点検により検出された欠陥箇所であるが，赤外線カメラの映像では明確な反応が得られていないことがわかる。

5. まとめ

音源を空中配置した場合の非接触音響探査（NCAI）法によるタイル外壁供試体および実タイル構造物を用いた探査実験を行った。実験結果から，供試体だけでなく実タイル構造物においても，叩き点検による浮き箇所と振動エネルギーの大きい箇所の位置関係が一致することが確認された。さらに，温度変化の少ない箇所で赤外線カメラでは検出できないような欠陥でも，NCAI 法により

問題なく欠陥検出が可能であることも確認された。将来的にはドローンの進歩により，ペイロードや飛行時間の制約が無くなれば，さらに NCAI 法の計測可能領域が拡大していくことが予測される。そのため，今後も実用化を目指した検討を進める予定である。

謝辞

本研究は，令和 5 年度 兵庫県・NIRO ドローン社会実装促進実証事業の助成を受けた榊T&T 社による実験協力をを受けて実施された。

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) 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
- 3) 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
- 4) 歌川紀之, 御崎哲一 : トンネル覆工コンクリートの診断,-打音法および非接触診断技術-, 日本音響学会誌, Vol.69, No.3, pp.127-132, Mar. 2013
 - 5) S.Seki, K.Sugiura, S.Nakano, M.Watanabe and M Yamada : Development of wall hammering inspection systems using two-wheeled multi-copters, J. Robotics and Mechatronics, Vol.36, No.5, pp.1043-1054, Aug. 2024
 - 6) 菱田聡, 大垣正信, 菱田康, 三輪昌史, 清水俊彦 : 壁面吸着ドローンの開発と活用方法の提案, Technical J. of Advanced Mobility, Vol.4, No.2, pp.2-10, Jan. 2023
 - 7) 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
 - 8) 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
 - 9) 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
 - 10) 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
 - 11) S.Wakata, N.Hosoya, N.Hasegawa and M. Hishikino : Defect detection of concrete in infrastructure based on Rayleigh wave propagation generated by laser- induced plasma shock waves, Int. J. of Mechanical sciences, 218 (2022) 107039, Jan. 2022
 - 12) 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
 - 13) 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
 - 14) 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
 - 15) 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
 - 16) 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
 - 17) 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
 - 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) 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.8172-8179, Sept. 2019
 - 20) 杉本恒美, 中川裕, 杉本和子, 歌川紀之 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1474- 1479, Jul. 2023
 - 21) 杉本恒美 : 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による外壁調査, BELCA NEWS, 188 号, pp.28-34, Jul. 2024
 - 22) 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, Vol.42, No.24(2), 142, Jan. 2022
 - 23) 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
 - 24) T.Sugimoto, Y.Nakagawa, K.Sugimoto, I.Uechi, H.Takagi, N.Utagawa and Y Nihei : Study on movement measurement for internal defects in concrete structures by noncontact acoustic inspection method using correlation processing, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.63, 04SP45, Apr. 2024