

## 論文 外壁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

杉本 恒美\*1・杉本 和子\*2・上地 樹\*3・歌川 紀之\*4

**要旨**：非接触音響検査法は、5m以上の離隔からでも叩き点検と同程度の欠陥検出が可能な優れた方法であるが、音源から見た際の測定対象面の角度が大きくなると、叩き点検と同じたわみ共振を生じにくくなるという問題がある。一方、近年普及しつつある無人航空機(UAV)に音源そのものを搭載すると、音源を測定対象面に正対させることが可能となり、この角度依存性問題の解決が期待できる。また、音源とレーザドップラ振動計の距離が離れるほど反射波による影響が低下してS/N比が向上するために、高速測定も期待できる。そこで本研究では音源搭載型 UAV を用いた非接触音響検査法による外壁検査についての基礎検討を行った。

**キーワード**：無人航空機, レーザドップラ振動計, 非接触音響探査, 非破壊検査, 外壁検査

## 1. はじめに

## 1.1 背景

日本では、10年以上前に建設された建物の全面をハンマー法等による検査が国土交通省により義務化されているが、一時的な足場などのコスト負担が大きいため現実的ではないことが指摘されている。定量的な非破壊検査法としては、打音法<sup>1)</sup>、インパクトエコー法<sup>2-3)</sup>、超音波パルス法<sup>4)</sup>、電磁波レーダ探査法<sup>5)</sup>が既に開発されている。しかしながら、これらの手法は基本的に検査表面に接触もしくはほとんど接触させる必要があるため、仮設足場が必要となる状況は変わらず、ハンマー法を超える作業性の改善は望めない。そのため、遠距離非接触の探査法の開発が求められている。

## 1.2 遠距離非接触の探査方法

遠距離非接触の探査法として、ガスガンを用いた圧力波による衝撃探査法<sup>6)</sup>や水鉄砲を用いた水撃探査法<sup>7)</sup>が提案されている。しかし、前者は連続計測に難があり、後者には大量の水を必要とするという問題がある。一方で赤外線カメラを用いれば、非接触で対象面の温度分布を計測することが可能である<sup>8)</sup>。しかし、温度変化の少ないトンネル内では、検出時にヒーター等の加熱が必要となるため、高い天井の探査には適していない。また、測定結果はあくまでも表面近傍の温度変化による影響のみを示しているため、原理的にハンマー法の代替方法としては不十分と思われる。また、レーザ照射加振を用いたレーザ超音波法<sup>9)</sup>も遠隔から欠陥を探査できる手法であり、特に融点の高い金属の検査に適していると思われる。しかし、コンクリートの場合には融点が低いため、表面を破壊してしまわないように極短時間のレーザ照射加振しかできない。そのため、大電力に見合った有効な振動エネルギーを加えることが出来ないという欠点があ

る。また、大出力のレーザを複数使用することによる安全性の問題点も指摘されている。なお、近年、非接触の空中超音波を用いた探査も提案されており、超音波をフォーカスすることにより、極めて高い音圧を発生可能である<sup>10)</sup>。しかしながら、一般的に空気中の伝搬減衰が大きいため、実際のコンクリート構造物に対して現実的に用いることは困難であると思われる。

## 1.3 音波照射加振を用いた非接触音響探査法

そのため、我々は音波照射加振によるたわみ共振をレーザドップラ振動計(LDV)で検出するという非接触音響探査法を提案し、5m以上の遠方からでもコンクリート供試体内にある空洞欠陥を検出できることを示した<sup>11)</sup>。その後、実用上の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波<sup>12)</sup>、振動エネルギー比<sup>13-15)</sup>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<sup>16)</sup>などを考案した。さらに高速な計測を可能とするマルチトーンバースト波<sup>17-18)</sup>や欠陥とLDVのヘッド共振を分離検出するための空間スペクトルエントロピーなども考案し、実際の鉄道トンネル、30mを超える高架橋および凹凸の激しい吹き付けコンクリート部などで打音と同等の欠陥検出が行えることを示してきた<sup>19-20)</sup>。しかしながら、本手法の問題点としてはたわみ共振を用いるために音源の角度依存性や環境騒音があった。

一方で、近年、複数のロータを持つ無人航空機(UAV)いわゆるドローンが空撮目的で利用できるようになってきた<sup>21)</sup>。すでに表面から確認できる亀裂検査等には用いられている。そのため、コンクリート等の内部欠陥に関してもハンマーを搭載した UAV を用いた検討が盛んに行われている<sup>22)</sup>。しかしながら、UAV 自体を建築物に近接もしくは接触させて打撃するために、打撃音収録時に様々なノイズも同時に収録してしまうことになる。その

\*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 客員研究員 博士(工学)

\*3 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 客員研究員

\*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)

ため、探査自体は可能であるものの極めて S/N 比の低い計測結果しか得られないという問題があると思われる。

非接触音響探査法では角度依存性や環境騒音が問題となっていたが、実はこれらは音源に起因する問題である。ところが、UAV に音源自体を搭載して、計測対象物の近くから音波照射できれば、これらの問題は解消してしまうことが想定される。さらに、LDV の計測可能限界までの遠隔まで本手法の適用領域を拡大できるとともに、LDV と音源の位置が離れることで、LDV ヘッドの共振問題も解消するために、極めて高速な計測が可能になることが期待できる。したがって、本論文では、UAV に市販音源を搭載することにより、従来の非接触音響探査法の問題点を解消し、外壁検査に用いることができるかどうかについての基礎検討結果について述べる。

## 2. 使用した音源搭載型 UAV と外壁供試体について

### 2.1 音源搭載型 UAV (試作機)

図-1 に音源搭載型 UAV (試作品) の外観写真を示す。本体は DJI 社の Matrice 600 Pro で、UAV 本体の裏面に平面音源 (FPS Corp., 1030M3F1R)、照準用レーザーポインター、レーザ距離計が装備されている。UAV 自体の重さは約 10 kg で、音源とアンプを搭載した上で約 20 分間の飛行が可能である。また、音響照射加振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。



図-1 音源搭載型 UAV の外観写真

### 2.2 タイル張り外壁供試体

UAV を用いた外壁検査の検証実験のために、タイル張りの外壁標本 ( $2 \times 1.0 \times 0.2 \text{ m}^3 + 2 \times 0.6 \times 0.6 \text{ m}^3$ ) を作製した。コンクリート部の配合表を表-1 に示す。柱部を模擬しているために下側部分が厚くなっている。重さは約 2.6 トンであるため、本体の底面には車輪が取り付け

られている。試験体に埋設された模擬欠陥シートの配置図を図-2 に示す。厚さ 0.5 mm の種々のサイズのステンシート及び厚さ 1 mm の発泡シートを模擬亀裂として使用した。コンクリート基材からタイルの上面までの厚さが 10 mm であると仮定すると、シートの埋設深さはタイル表面から約 9 mm である。一枚のタイルのサイズは、約  $45 \times 95 \text{ mm}^2$  である。上下 2 段に同じシミュレーション欠陥が付いている。違いは、コンクリート壁の厚さである。上部の 2 列は約 0.2 m の厚さで、下部の 2 列はコンクリート壁に約 0.6 m の厚さの柱を模してある。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。

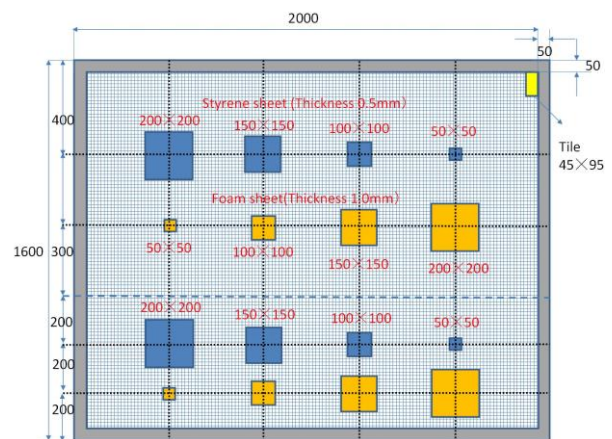


図-2 タイル張り外壁供試体の模擬欠陥シート配置図

### 2.3 振動エネルギー比

実際の構造物内部に発生する欠陥は複雑な形状をしていることが多く、複数の共振ピークを持つ場合がある。そのような場合には、単一の共振周波数のみを映像化しては欠陥規模を明らかにすることができない。そこで、ある周波数範囲で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対応する値であるとして振動エネルギー比 (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、 $f_1$  および  $f_2$  は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健全部中で振動エネルギーが最も低い値を  $PSD_{health}$  として計算する。

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 (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				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

### 3. 音波照射実験について

音源搭載型 UAV からの音波照射による非接触音響探査法の有効性を確認するために外壁供試体を用いて以下の3つの実験が行われた。

実験 A：模擬欠陥に音源を正対させ音波照射した場合。

実験 B：外壁供試体の中央部に音波照射した場合。

実験 C：実際に UAV を飛行中に音波照射した場合。

#### 3.1 実験 A

##### (1) 実験セットアップ

最初に、模擬欠陥位置に音源を正対させた状態での検証実験を行った。そのため、実際には UAV は飛行させず、運搬車両の後部に搭載した状態とした。外壁供試体の上側 2 列の模擬欠陥 8 個（欠陥規模  $50 \times 50 \sim 200 \times 200 \text{ mm}^2$ ）に対して音波照射実験を実施した。検証実験における実験セットアップ図を図-3 に示す。外壁供試体までの距離は 1.6~1.7 m 程度であった。計測用スキャニング振動計 (SLDV : Polytec Corp., PSV-500 Xtra) は斜めに約  $38 \sim 55^\circ$  程度の角度および約 2.4~3.4 m の距離で振動計測を行った。運搬車両の後部が供試体近くにあったために、欠陥位置により SLDV は計測しやすい位置に移動させて計測した。そのため、SLDV と供試体までの距離は約 2.4~3.4 m、レーザ入射角度は垂直入射を 0 度とすると、約  $38 \sim 55^\circ$  程度であった。ここで音波照射加振に使用した波形はシングルトーンバースト (STNB:Single ToNe Burst) 波で、対象欠陥のたわみ共振周波数に合わせるために、2 種類の波形を作成して使用した。一つ目の波形は欠陥のサイズが  $100 \times 100 \sim 200 \times 200 \text{ mm}^2$  の時に使用し、周波数範囲は 0.5~4 kHz であった。二つ目の波形は欠陥のサイズが  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  の時に使用し、周波数範囲は 9~13 kHz であった。どちらの波形もパルス幅 5 ms (帯域幅 200Hz) としたため、加振周波数範囲内で見落としのない測定を行うために、バースト波の周波数は離散的に 100 Hz 毎に変化させた。バースト波の送信間隔 (インターバル時間) は 15 ms としている。加振時の音圧は計測対象面で約 95 dB 程度 (Z 特性の最大値) に設定した。

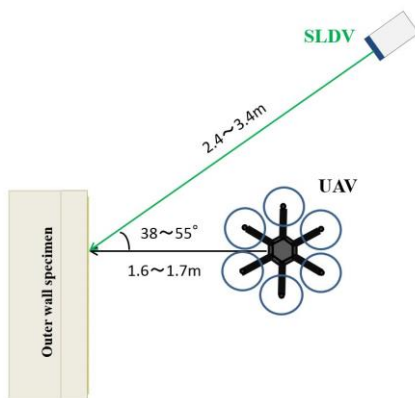


図-3 模擬欠陥に音源を正対させた場合の配置図

#### (2) 実験結果

使用した周波数帯域での振動エネルギー比による結果例を図-4 に示す。振動エネルギー比を計算する際の周波数範囲は、送信波形に合わせて欠陥のサイズが  $100 \times 100 \sim 200 \times 200 \text{ mm}^2$  の時は 0.5~4 kHz,  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  の時は 9~13 kHz としている。計測ポイント数は 121 (縦 11 × 横 11) 点とし、欠陥部より一回り大きい程度の大きさを計測範囲として、計測点を縦横等間隔で配置した (欠陥位置については図-2 参照)。加算平均 5 回時で計測時間は約 9 分 11 秒程度であった。この図より、欠陥サイズ  $50 \times 50 \sim 200 \times 200 \text{ mm}^2$  のすべてが検出されていることがわかる。このうち  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  の欠陥はたわみ共振周波数が 10 kHz 以上と高いため、通常のハンマー法で発見することは困難な欠陥である。

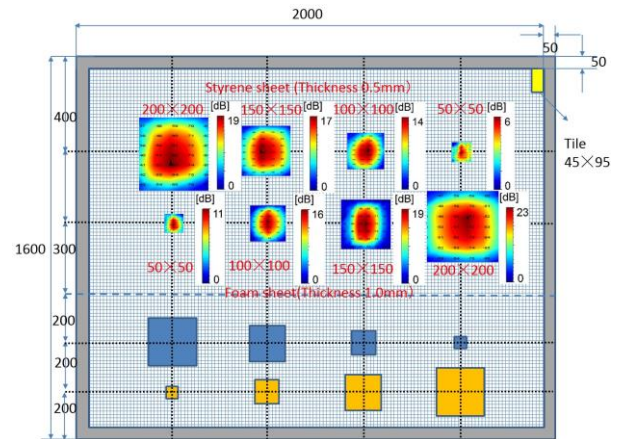


図-4 振動エネルギー比を用いた実験結果

#### 3.2 実験 B

実際の UAV 飛行時には、風等の影響により機体が揺動することが予想される。しかしながら、音波照射加振の場合には、機体が揺れて欠陥位置に正確に正対できない状態であったとしても、音源の指向性の範囲に入っていれば、加振できるために計測自体は可能と思われる。そこで、次に外壁供試体の中央部に音波を照射した場合の検証実験を実施した。なお、角度依存性が問題となるのは垂直入射を  $0^\circ$  としたとき  $30^\circ$  以上の角度が付いたときであり、供試体の中央に音源を配置した場合、供試体の端部では  $20^\circ$  以内の角度しかつかないため、角度依存性の問題も発生しないことが予測される。

##### (1) 平面音源の指向特性について

最初に音源の指向特性を確認するために UAV に搭載した平面音源の音圧分布について調べた。実験セットアップを図-5 に示す。音源を高さ 1.5 m の位置にリフターで保持して、外壁供試体に対して 4 m の距離から音波を送信した。送信音波は 0.5~4 kHz の STNB 波である (前節で使用した波形)。マイクロホン (小野測器 MI4400) を音源と同じ高さで移動させて、供試体の前面を面的に



計測した ( $3 \times 4 \text{ m}^2$ )。瞬時音圧 (平均値) に換算した結果を図-6 に示す (図中の白線交点が計測位置)。図より、水平方向では、4 m の距離でもほぼ供試体全面に音波が当たっていることが分かる。

## (2) 実験セットアップ

図-7 に外壁供試体の中央部に音源を配置した状況を示す写真である。室内実験のため、UAV は台の上におき、

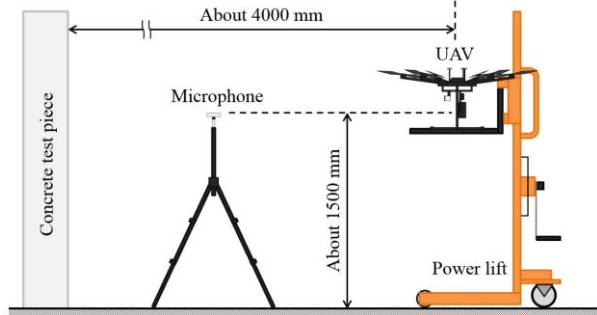


図-5 音圧分布計測実験のセットアップ図

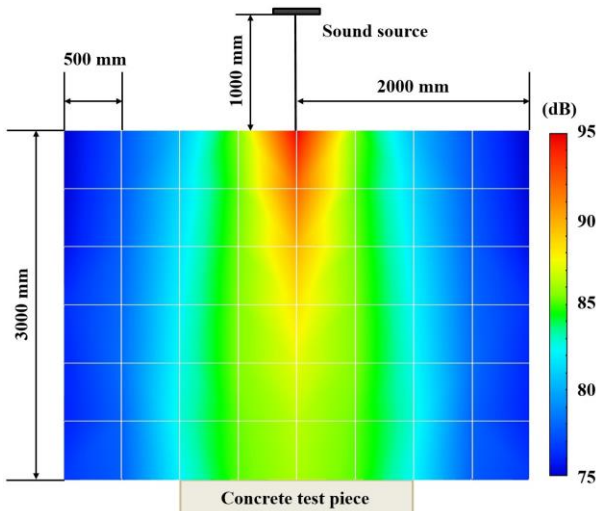


図-6 平面音源の音圧分布計測結果 (水平方向)

音源と供試体間の距離は約 3 m とした。計測用スキャニング振動計 (Polytec Corp., PSV-500 Xtra) と供試体間の距離は約 4.3 m で音源のやや斜め後方に配置した。スキャンエリアサイズは約  $1.30 \times 1.53 \text{ m}^2$  の領域を約 45 mm 間隔で、計測ポイント数は 1015 ( $29 \times 35$ ) 点とした。広いスキャンエリアを高速に計測するために、照射用音波としては周波数範囲 0.3~4 kHz のマルチトーンバースト波を使用した。この波形にはパルス幅 5 ms で 100 Hz 毎に変化させた 38 周波数が含まれており、波形全体の時間長さは約 197 ms であった。供試体の前面をより高速にスキャンするため、波形の送信間隔 (200 ms) を波形の全体長さより少しだけ長めとすることで一回の送波で全周波数を送り出すとともに平均処理は行わなかった。なお、音圧は計測対象面で 95 dB (Z 特性の最大値) となるように設定し、計測時間は約 7 分であった (1 ポイント当た

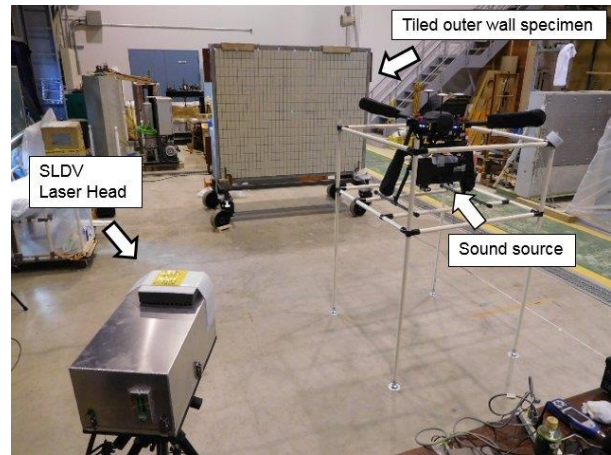


図-7 外壁供試体中央部に音波照射した場合の写真

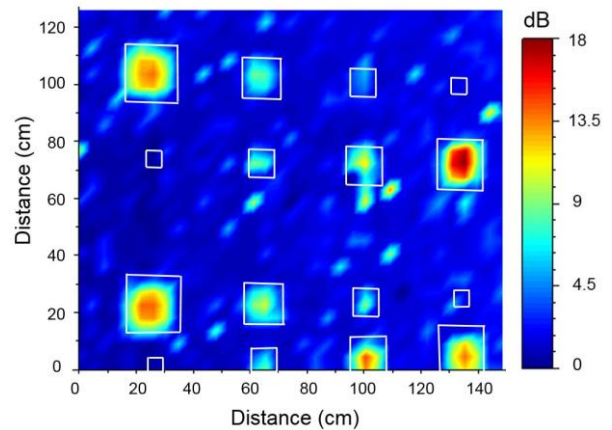


図-8 振動エネルギー比を用いた実験結果

り約 0.4 秒)。

## (3) 実験結果

図-8 に 0.3~4 kHz の範囲で積分した振動エネルギー比分布図を示す。白枠は欠陥位置と大きさを示している。送信周波数範囲の関係で、共振周波数の高い  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  は検出されていないが、それ以外の欠陥はほぼ検出されていることがわかる。ノイズがやや目立つ理由は、アベレージ無という条件に加えて、閉鎖環境でレーザーヘッドと音源の位置が離れておらず、供試体からの反射音および周囲からの多重反射音の影響を受けたものと思われる。

## 3.3 実験 C

### (1) 実験セットアップ

最後に音源搭載型 UAV を実際に屋外で飛行させ、外壁供試体を探査する実験が実施された。実験セットアップ図を図-9 に示す。図に示すように UAV は供試体に正対させるように飛行させた。また、LDV は反射音の影響を避けるために、斜め後方約 3.8m の位置に配置した。飛行させた高さは供試体の台車を含めた高さに合わせて 2 m 程度とし、音源と供試体間は約 2~3 m 程度となるようにした。この距離があいまいな理由は、大型 UAV の

場合、2 m ぐらいの低空では、自身のロータが巻き起こす風が地面に当たって戻ってくる影響で UAV 自体が揺動してしまうためである。また、図のように音圧の強い音軸上から離れて LDV を設置した場合には、反射波によるレーザヘッドの共振現象は原理的に発生しない。さらに、屋外実験により、周囲からの多重反射音等の影響も無い状況であれば、S/N 比も向上していることが期待できる。そのため、前節よりもさらに高速の計測が可能かどうかを確認するために、パルス幅を 3 ms と短くしたマルチトーンバースト波を用いた。周波数範囲も高速化のために若干短くして 0.5~4 kHz とした。この波形には帯域幅を考慮して 200 Hz 毎に変化させた 19 周波数が含まれており、波形全体の時間長さは約 59 ms であった。そのため、波形の送信間隔は約 60 ms とし、ほぼ連続照射に近い条件で送波し、平均処理も行わなかった。また、音圧は計測対象面で約 90~95 dB (Z 特性の最大値) 程度であった。

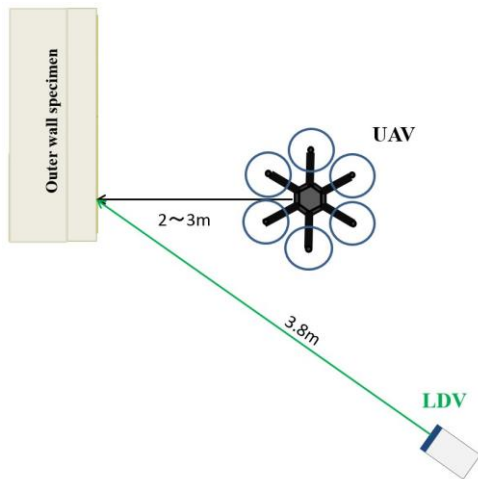


図-9 UAV 飛行時の機材配置図

## (2) 実験結果

飛行時の実験風景を図-10 に示す。測定対象は供試体左上に配置された 200×200 mm<sup>2</sup> のスチレンシートである。計測ポイント数は 81 (縦 9×横 9) 点としたため、計測時間は 21 秒であった。これは 1 ポイント当たり約 0.26 秒で計測が実施できたことを意味している。スキャンピッチは縦横約 38 mm である。振動エネルギー比(積分範囲 0.5~4 kHz)による映像結果例を図-11 に示す。図中の白線交点は計測点を白太枠は欠陥部の大きさと位置を示す。図より、実験中に UAV 自体は多少揺動したものの、音波照射が短時間であっても音源の指向性の範囲に入っていれば、欠陥検出は可能であることが確認できた。他の欠陥部も同様に検出可能であると思われるが、2 m という低い高度では UAV 自体が巻き起こす風の影響により、機体が不安定な挙動を示したため、安全を考慮して、それ以降の実験を中止した。

## 4. まとめと今後の課題

平面音源を搭載した UAV と亀裂欠陥を模した薄いシートで埋められたタイル張りの外壁供試体を製作し、UAV からの音響照射加振を用いて外壁を検査できるかどうかを調べるための基礎実験を行った。実験結果から、UAV に搭載可能な小型の音源であっても、たわみ共振を利用した非接触音響探査法により外壁タイル下の亀裂欠陥の検出が可能であることが明らかにされた。また、風等の影響により UAV 自体が揺動しても、音源の指向性の範囲内であれば欠陥を検出できることも確認された。特に音源と高感度 LDV の位置を離すことが可能なため、レーザヘッドの共振の影響を回避することができ、極めて高速な測定が可能であることも判明した。

今後は機体を安定させるために飛行高度を上げた場合の検討が行われる予定である。実際の外壁検査にこの方法を使用するためには、GPS から独立した自律飛行や LDV と協調した自動測定など、克服すべき多くの問題が残されている。そのため、今後もこの手法の実用化を検討していく予定である。



図-10 UAV 飛行時の実験風景

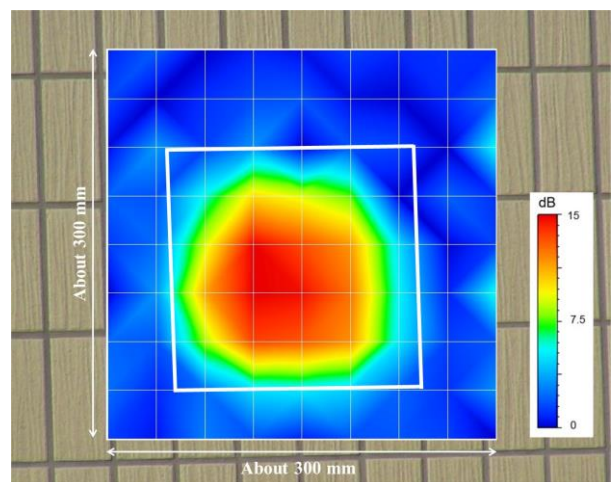


図-11 振動エネルギー比を用いた実験結果

謝辞 本研究は平成 29-30 年度の国土交通省、建設技術研究開発補助金による助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 歌川紀之, 御崎哲一, : トンネル覆工コンクリート診断, - 打音法及び非接触診断技術 -, 日本音響学会誌 **69** (3), pp.127-132, 2013
- 2) C.Cheng and M.J.Sansalone : The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies. *Mater. Struct.* **26**, pp.274-285, 1993
- 3) M.J.Sansalone and W.B.Streett : Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Impact-Echo Bullbrier Press, Jersey Shore, PA, USA, 1997
- 4) 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.* **55**, 07KC06, 2016
- 5) S.Tanaka : Detection of Cracks and Air-gaps in Reinforced Concrete Structures Using an Electromagnetic Wave (Radar), *Transactions of SICE*, **43** (9), pp. 716-724, 2007
- 6) 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.* **35**, pp.399-406, 2002
- 7) K. Mori, S.Tokuomi : Nondestructive testing method for concrete structures by using water jet, Proc. JSME/ASME 2017 Int. Conf. Mater. Processing, ICMP2017-4392, 2017
- 8) 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
- 9) 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 **61** (10), pp519-524, 2012.10
- 10) A.Osumi, M.Ogita, K.Okitsu, and Y.Ito : Detection of crack in a shallow layer of mortar by using a harmonic component of very high intensity aerial ultrasonic waves, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 07JC12, 2017
- 11) 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.*, **52**, 07HC12, 2013
- 12) 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, 2013
- 13) 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.*, **53**, 07KC15, 2014
- 14) 杉本恒美, 赤松亮, 歌川紀之, 片倉景義 : コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法, コンクリート工学年次論文集, **36**, pp.2062-2067, 2014
- 15) 杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義 : コンクリート構造物非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.137-142, 2014
- 16) 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.*, **54**, 07HC15, 2015
- 17) 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, **38**, pp.2103-2108, 2016
- 18) Tsuneyoshi Sugimoto, Kazuko Sugimoto, Noriyuki Utagawa, Kageyoshi Katakura : High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 07JC10, 2017
- 19) 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, **39**, pp.1849-1854, 2017
- 20) 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, 2017
- 21) R. Dunford, K. Michel, M. Gagnage, H. Piegay, and M. L. Tremelo : Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest, *Int. J. Remote Sens.*, **30** pp.4915-4935, 2009
- 22) 野波健蔵 : ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線, 情報管理, **59** (11), pp755-763, 2017