

強力超音波音源を用いた コンクリート非破壊検査に関する検討

Study on the Non-destructive Inspection Method for Concrete Structures
by using a Strong Ultrasonic Sound Source

杉本 恒美、杉本 和子

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

(2015年3月20日 受理)

1. はじめに

コンクリート構造物表面付近に存在するクラックや劣化の程度を調査する方法としては、現在でもその簡便さを理由に叩き点検が主に用いられている。しかしながら、耳で音を聞いて判断する手法であるために検査者の経験と勘に左右される。定量的な手法として超音波や電磁波など様々な手法が開発されているものの、これらの調査方法の多くは検査対象物に接触もしくは極めて接近して使用する必要があるために、足場や高所作業車を必要とするという問題点がある。実際に5m以上の非接触で実施できる非破壊検査法としては赤外線法とレーザーリモートセンシング法¹⁾があげられるが、前者は環境条件に依存すること、後者は高出力のレーザーが必要となり安全性の面に不安があることが問題となっており、従来の打音法の代替手法とはならないことが指摘されている。

一方、衝撃波²⁾や空中放射音波^{3,4)}を振源とし、レーザードップラ振動計によりコンクリート表面部の振動を計測する手法も検討され

てきたが、実際に5m以上の遠距離から安定した計測は実現できていなかった。そこで、本研究室では高音圧と強い指向性を発生できる長距離音響放射装置(LRAD: Long Range Acoustic Device)を用いた非接触音響探査法の検討を行い、実際に5m以上の離隔であっても、安定的に通常の打音検査とほぼ同程度の検出精度を有することを、コンクリート供試体および実コンクリート構造物等を用いて実験的に明らかにしてきている⁵⁻²⁰⁾。

長距離音響放射装置は、通常のラウドスピーカと比較して高い指向性を有してはいるものの(1kHzで±15度)、計測距離が長くなればそれだけ騒音域も広がってしまうために、民家の近隣では使用しにくいという問題点がある。また、平面波を用いた加振では、対象物の正面から駆動した場合にはきわめて効率的に欠陥部上でたわみ共振を発生させることが可能であるが、入射角度が大きくなるに従い、面加振の条件からはずれてしまい、たわみ共振の発生効率が落ちてしまうため、計測時の入射角度に制約があるという問題点がある。

Tsuneyoshi SUGIMOTO and Kazuko SUGIMOTO

Graduate school of engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan.

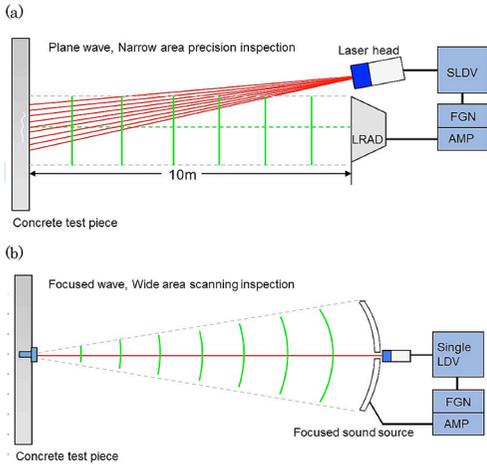


Fig.1 非接触音響探査法の2つの構成構成法
(a) 狭領域精密探査、(b) 広領域走査探査

しかしながら、音源として集束型の強力超音波音源を用いれば、計測時の周囲環境騒音と計測時の入射角度制限を同時に改善できる可能性があると思われる。そこで、今回は、強力超音波音源を実際に製作してこれらの問題点が改善するかどうかの検討を行った。

2. 非接触音響探査法の構成法

遠距離でも使用できる非接触音響探査法としては、Fig.1 に示すような2つの構成法が考えられる。

2.1. 狭領域精密探査

Fig.1 (a) は長距離音響放射装置であるLRADの音響特性が持つ面的な加振能力とスキャンニング振動計 (SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer) の2次元的なスキャン性能を生かして組み合わせた従来の構成法である。比較的狭い領域を精密に探査するのに適している。

2.2. 広領域走査探査

Fig.1 (b) はシングルポイント用レーザドップラ振動計 (LDV) と強力超音波音源 (集束音源) を組み合わせて1点のみを計測する広領域走査探査という新しい構成法である。

この場合には平面加振を加えるLRADに対して、点加振に近い状況にすることで、計測時の角度依存性が改善すると同時に、周囲への環境騒音も改善することが予想される。

2.3. 強力超音波音源について

本手法は、叩き点検と同じたわみ共振を用いた欠陥検出手法である。通常、コンクリート欠陥部のたわみ共振周波数は、ハンマーで人が音を聞き分けることができることからわかるとおり可聴域である。したがって強力な超音波周波数の音波を送信したとしても、共振周波数を利用しない強制加振となってしまうため、5m以上の遠距離ではきわめて非効率である。ところが、空気中の非線形形を利用し送信の超音波を搬送波として用いた変調を加えることにより、超音波の高い指向性を維持したまま、遠方に可聴音を発生可能であることが知られている (パラメトリック・スピーカ)。非接触音響探査法の第2の構成法である広領域走査探査では、この特性を生かした強力超音波音源を新たに製作して使用する。

3. 音源の入射角依存性に関する理論的検討²⁰⁾

3.1 LRAD音源の場合

従来、音源として使用していたLRAD音源は、市販の音源としては指向性が高い方ではあるが、それでも5m以上の離隔となれば1m以上の広いビーム幅 (高音圧領域) となる。通常、コンクリート表面近くの欠陥部の大きさ (直径) はそれよりも小さいと仮定すると、ほぼ一樣な平面音波の入射を考えれば良いことになる。入射音波の励振効果は、対象面に関する入射音圧の面積分に比例するため、傾斜入射により対象面上の入射音圧に一周期の位相差が生じると、平均値が消滅し駆動されなくなる。Fig.2 (a) に示すように広いビームによる駆動の場合において、平均値が消滅し駆動されなくなる入射角を θ_L とすると、

$$A \sin \theta_L = \lambda \quad (1)$$

となり、 θ_L は欠陥径 A の関数となる。ここで λ は音波の波長である。(1) 式より、欠陥径 A が大きくなると θ_L が小さくなり、高周波駆動において、特に入射角の制限が極度に厳しくなることが予想できる。

3.2. 集束超音波音源の場合

超音波音源の場合は、集束することによりビーム幅を極端に小さくすることが可能である。したがって、Fig.2 (b) に示すようなビーム幅 D が欠陥径 A よりも小さい場合を仮定する。この場合に平均値が消滅し駆動されなくなる入射角を θ_H とすると、

$$D \tan \theta_H = \lambda \quad (2)$$

となり、 θ_H は欠陥径 A とは無関係となる。

ここで、(2) 式は超音波ビームにより駆動される径 ($D/\cos \theta_H$) が欠陥径 A よりも狭い場合が条件であることから、この条件の成立するのは、

$$D/\cos \theta_H < A \quad (3)$$

の条件により制限される。ここで、超音波ビームにより駆動される径が欠陥径 A と等しくなる限界条件では $A \sin \theta_H = \lambda$ であることから、

$$D < A \cos \theta_H = (l/\lambda) \cos \theta_H / \sin \theta_H = (l/\lambda) / \tan \theta_H \quad (4)$$

である。従って、

$$D \tan \theta_H < \lambda \quad (5)$$

となる。

3.3. 許容入射角の比較

前述の関係をまとめると Fig.3 となる。ここで、実線が超音波音源の許容入射角であり、破線が各欠陥径 A に対応する平面音波 (LRAD) による許容入射角である。また、図における網掛け部分は、狭ビーム照射の効果が存在しない領域であるが、この領域は、欠陥径 A が小さいため、許容入射角が広い領域であり、元來入射角制限が問題とならない領域である。一方、超音波音源による狭ビーム照射による場合は、図に見られるように、従来方式において入射角度許容度が低下する、

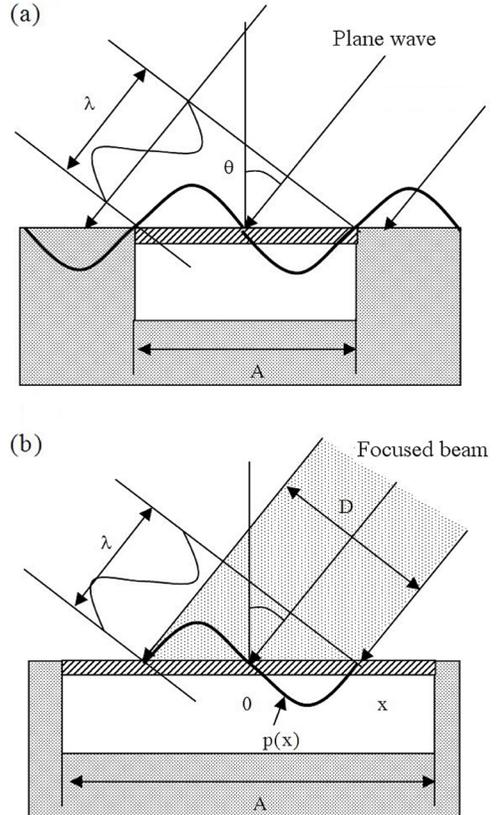


Fig.2 入射角度と音波による駆動力
(a) 平面波の場合、(b) 狭い音波ビームの場合

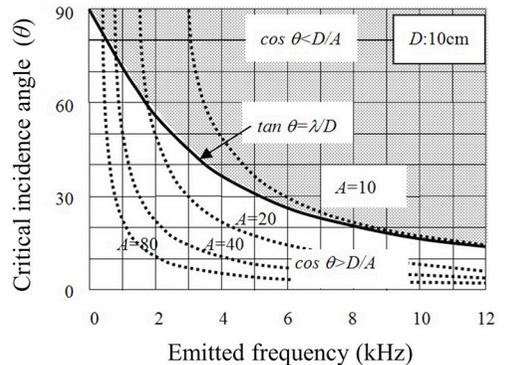


Fig.3 入射角と送信周波数

欠陥径 A が大きい、もしくは加振周波数が高い領域において、従来方式と比べて許容入射角度が大幅に改善することがわかる。

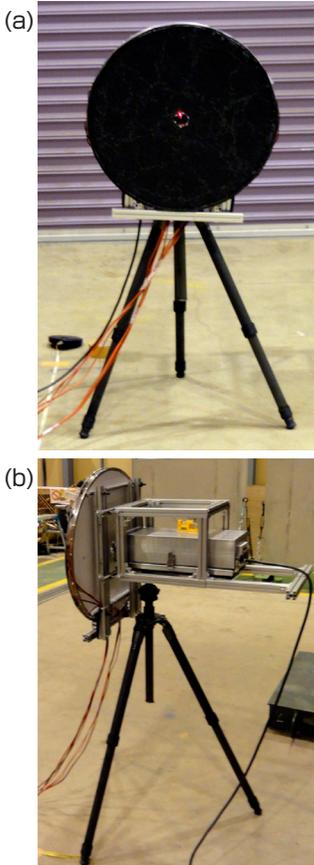


Fig.4 製作した強力超音波音源。(a) 正面図、(b) 側面図

4. 強力超音波音源を用いた実験

4.1. 製作した強力超音波音源の概要

実用的な距離（5m）での探査性能を有する直径600mm、焦点距離5mの強力超音波音源の製作をおこなった（使用した超音波素子〔共振40kHz〕の総数は約3200個）。また、シングルポイントレーザ（Polytec Corp. OFV-505）と強力超音波音源を用いた点加振による広領域走査探査を実現するために、中心軸上にレーザ光を通過させるための穴（20mm φ）を開けて音源の向きを変化させてもレーザの焦点と音圧の焦点が一致するように工夫した（Fig.4 参照）。

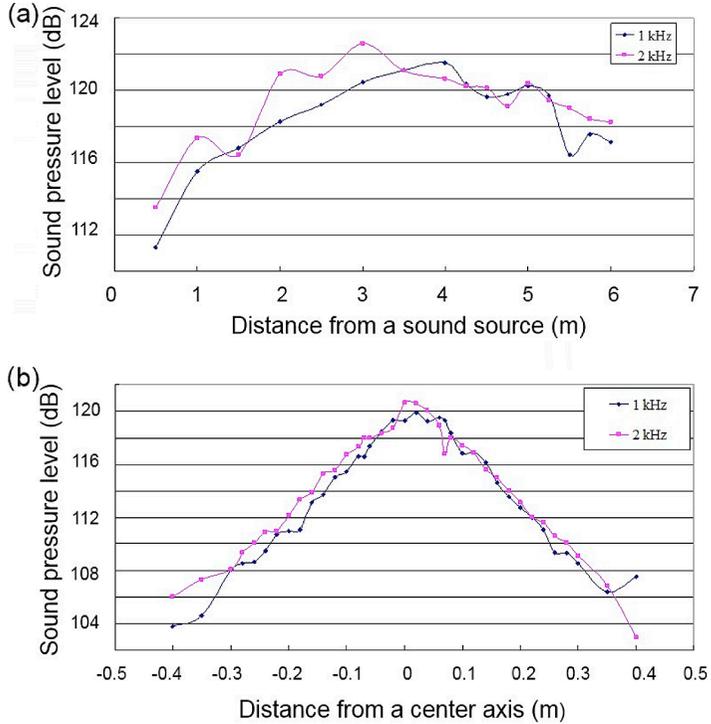


Fig.5 可聴音の音圧分布。(a) 軸方向、(b) 焦点面

4.2. 可聴音の音圧分布と指向性の比較

強力超音波音源における可聴域帯の音圧分布特性を10kHz以下に感度を持つ計測マイクロフォン（小野測器、MI-1432）を用いて計測した。軸方向の計測結果を Fig.5 (a) に示す。1kHzでは4m地点、2kHzでは3m地点とそれぞれ異なった位置で最大ピークが見られる。また焦点領域である5m地点での方位方向音圧分布を Fig.5 (b) に示す。中心軸である0cmの地点のピーク音圧に対し、±16cmでおおよそ半値に低下していることがわかる。この計測結果から、最大値約120dB（SPL re 20 μPa）の所望駆動音圧が形成され、音響放射圧駆動の特徴である、周波数に依存しない特性も確認された。

続いて、音源から5m離れた距離にコンクリート供試体（2×1.5×0.3m³）を正対させた時の音圧分布を精密騒音計（RION NL-52）により計測した（10秒間の最大音圧値を記録）。送信音波としては1kHzの正弦波

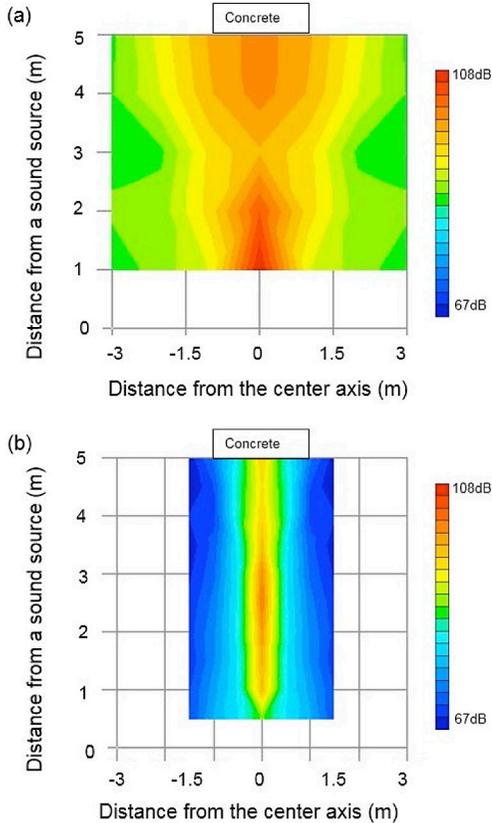


Fig.6 騒音計による音圧分布の計測結果
(a) LRAD、(b) 強力超音波音源

9波 (9ms) をインターバル 100ms でバースト駆動したものを用いた。Fig.6 に音源として LRAD および製作した超音波音源を用いた場合の音源とコンクリート供試体間の音圧分布の計測結果を示す (どちらもコンクリート表面上で 100dB 程度になるように音圧を調整)。図より、LRAD 音源の場合には音軸の側面から 3m 離れても 80dB 近い音圧が発生しているが、超音波音源の場合には半分の 1.5m も離れば 70dB 以下の騒音値となり、きわめて静かであることが確認できる。また音波の指向性の違いもこの図から明確に見取ることができる。

4.3. コンクリート供試体での探査実験

製作した強力超音波音源を用いて、実際に 5m の遠隔から探査が行えるかどうか実験を

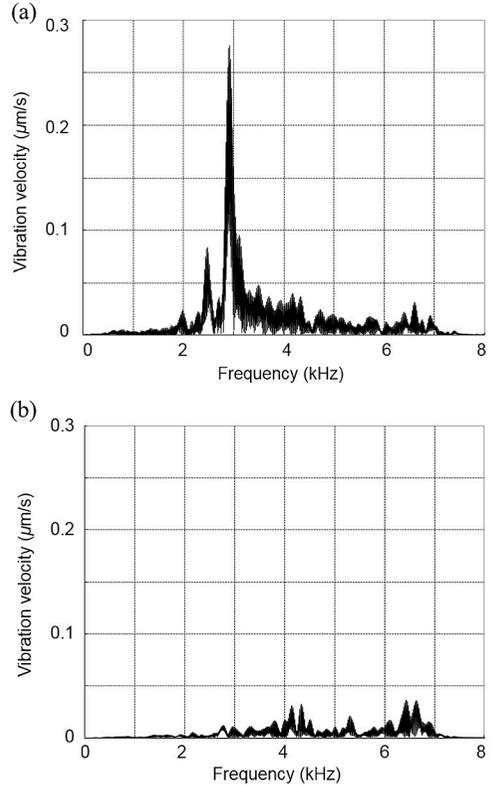


Fig.7 振動速度スペクトル
(a) 欠陥部、(b) 健全部

行った。コンクリート供試体 ($2 \times 1.5 \times 0.3\text{m}^3$) に埋設された円形欠陥部 ($\phi 300\text{mm}$ 、深さ 80mm) と健全部に対して 500Hz から 7000Hz のトーンバースト波^{16,17,19)} を使用して探査実験を行った。欠陥部上および健全部上の振動速度スペクトルを Fig.7 に示す。図より、LRAD 同様に明確な共振ピークが観測できることがわかる。また同時に、従来用いていた SLDV のレーザヘッドに内蔵されるガルバノミラーの共振の影響による 1kHz 以下の振動速度のピークも出現しなくなり、1kHz 以下の低周波領域も計測範囲になっていることがわかる。

4.3. 入射角依存性の検討

計測時の角度依存性を検討するために、コンクリート供試体 ($2 \times 1.5 \times 0.3\text{m}^3$) を用い

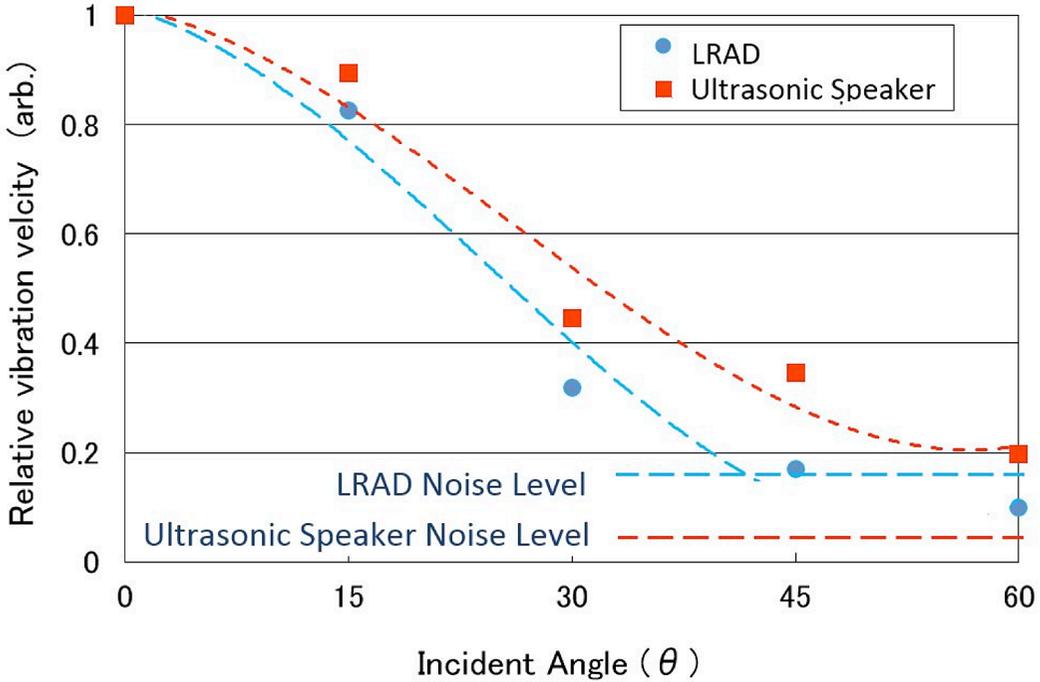


Fig.8 角度依存性の実験結果 (丸：LRAD、四角：超音波音源)

た実験を行った。音源と供試体との距離は5mとし、供試体を回転させることにより計測面との角度を変化させた。計測対象の欠陥部は300φ、深さ60mmの円形欠陥(25mm厚の発泡スチロール)である。送信音波としては、LRADでは500-7100Hzのトーンバースト波(各周波数の持続時間3ms、周波数増分200Hz、インターバル100ms)を、超音波音源では2100Hzのバースト波9波(持続時間3ms、インターバル100ms)を用いた。実験結果をFig.8に示す。縦軸は最大値で規格化した欠陥中心部での振動速度である。図より、角度が15度程度と浅い場合にはLRAD音源と超音波音源に大差は無いが、30度を超えると明確な差が付き超音波音源により角度依存性が改善されることが確認できる。これはFig.3に示した入射限界角の理論値とほぼ同じ傾向を示していると思われる。

5. まとめと今後の課題

製作した強力超音波音源は5mの距離でも、コンクリートの非破壊探査に必要な音圧を発生できることが明らかになった。またLRAD音源と比べると、指向性が非常に鋭いことから、騒音範囲も極めて狭いことが実証された。さらに計測時の角度依存性も改善されるほか、LDV自体の共振の影響も無くなり、従来計測困難であった低周波域も計測可能な範囲となることが明らかになったことから、今後、非接触音響探査法の音源として非常に重要な位置を占めていくことが予想される。

謝辞

本研究は平成22-25年度の国土交通省道路政策の質の向上に資する技術研究開発の助成を受けたものである。

【参考文献】

- [1] 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, Oct.2012.
- [2] 森和也, Andrea SPAGNOLI, 村上敬宣, 鳥越一平, “コンクリート構造物の圧力波を用いた新しい非接触非破壊検査法”, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.1, pp.1473-1478, 2002.
- [3] 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隙検出”, 土木学会論文集, No.690, pp.121-132, 2001.
- [4] 森和也, 鳥越一平, 百崎敦彦, 岩本達也, “周波数スイープ音波を用いた壁面加振によるコンクリート構造物の非破壊検査”, 日本機械学会論文集, 72 巻, 723 号, pp.178-1792, 2006.
- [5] T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and S.Tusjino, “Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Non Destructive Inspection using SLDV and LRAD”, Proc. IEEE International Ultrasonic Symposium, pp.744-747, Oct.2011.
- [6] T.Sugimoto, H.Kawasaki N.Utagawa and S.Tusjino, “Study on the Inspection for Shallow Area under Concrete Surface using Air-coupled Sound Wave”, Proc. of the 10th SEGJ International symposium, pp.84-87, Nov.2011.
- [7] T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and S.Tusjino : Non Contact Acoustic Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD, Proc. Acoustics 2012 Nantes, pp.835-839, Apr.2012.
- [8] T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and S.Tusjino : Non Contact Long Distance Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD, J. Acoust. Soc. Am, 131 (4): p.3462, Mar.2012.
- [9] R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa and K.Katakura, “Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Concrete Defect Detection, — Study on the Defect Defection using the Realistic Crack Model and the Angle Dependence”, IEEE International Ultrasonic Symposium Abstract book, pp94-95, Oct.2012.
- [10] 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義, “SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート表層部の欠陥映像化に関する研究, — 剥離欠陥検出の検討—”, 信学技報 US2012-111, No.437, pp.1-6, Feb.2013.
- [11] T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and K.Katakura, “Study on non contact acoustic imaging using the realistic crack model”, Proc. 2013 International Congress on Ultrasonics (ICU2013), pp.408-413, Mar.2013.
- [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, 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 International Ultrasonic Symposium, pp1303-1306, Jul.2013.
- [14] 杉本恒美, 赤松亮, 歌川紀之, 片倉景義, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—(1) 検出可能な欠陥の大きさおよび深さに関する検討—”, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, pp173-174, Sep.2013.
- [15] K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto and N.Utagawa, “Study on detectable size and depth of defects in noncontact acous-

- tic inspection method”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC15, Jul.2014.
- [16] 杉本恒美, 赤松亮, 上地樹, 歌川紀之, 片倉景義, “音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—(2) トーンバースト波とゲート処理を用いた S/N 比の改善—”, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69, pp959-960, Sep.2014.
- [17] 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, Vol.36, No.1, pp.2062-2067, Jul.2014.
- [18] 杉本恒美, 上地樹, 杉本和子, 歌川紀之, 片倉景義, “非破壊検査のための非接触音響探査法に関する研究—強力超音波音源を用いた欠陥検出についての検討—”, 物理探査学会第 131 回学術講演会講演論文集 pp.190-191, Oct.2014.
- [19] 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, Nov.2014.
- [20] T.Sugimoto, R.Akamatsu, I.Uechi, K.Sugimoto, N.Utagawa, and K.Katakura, “Basic Study about the Long Distance Non-Contact Acoustic Inspection Method using a Strong Ultrasonic Sound Source”, Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35, pp.253-254, Dec.2014.