

# 論文 強力超音波音源を用いたコンクリート非破壊検査のための非接触音響探査法の検討

杉本 恒美\*1・杉本 和子\*2・歌川 紀之\*3・片倉 景義\*4

**要旨:** コンクリート表面近くの内部に存在する空洞やひび割れを 5m 程度以上の遠距離から検出することができ非接触音響探査法について検討を行っている。検出原理としては強い指向性を持つ高音圧の空中放射音波により、欠陥部に叩き点検と同じたわみ共振を発生させ、その振動速度をレーザドップラ振動計で計測するというものである。従来の長距離音響発生装置で問題となっていた、周囲環境騒音と計測時の角度依存性を改善するために強力超音波音源の製作を行い、その有用性を明らかにした。

**キーワード:** 非接触音響探査, 長距離音響発生装置, 強力超音波音源, 角度依存性, 周囲環境騒音

## 1. はじめに

我が国の高度成長期に構築されたコンクリート構造物の多くはすでに建築後半世紀近く経過しており、点検補修の必要がある。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は、すでに様々な手法が開発されている。しかしながら、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リモートセンシング法<sup>1)</sup>があげられるが、前者は環境条件に依存すること、後者は大出力のレーザ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。また一方で、衝撃波<sup>2)</sup>や空中放射音波<sup>3,4)</sup>を振源とし、レーザドップラ振動計により計測を行う手法も提案されてきたが、実際に 5m 程度以上の遠距離で安定的な計測が実現できていなかった。しかしながら、本研究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実験的に明らかにしている<sup>5-14,16)</sup>。しかしながら、長距離音響放射装置は高い指向性を有するものの(1kHz で±15 度)、距離を離せ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った。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できるが、角度がつくと効率が落ちてしまうことも判

明している。

そこで、本論文では周囲環境騒音と計測時の角度依存性を改善するために、強力超音波音源の製作を実際に行い、LRAD と同様なコンクリート構造物の非破壊検査に用いることが可能かどうか、周囲環境騒音が低減するかどうか、そして計測時の角度依存性が改善されるかどうかについての検討を行った。

## 2. 非接触音響探査法としての 2 つの構成法について

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

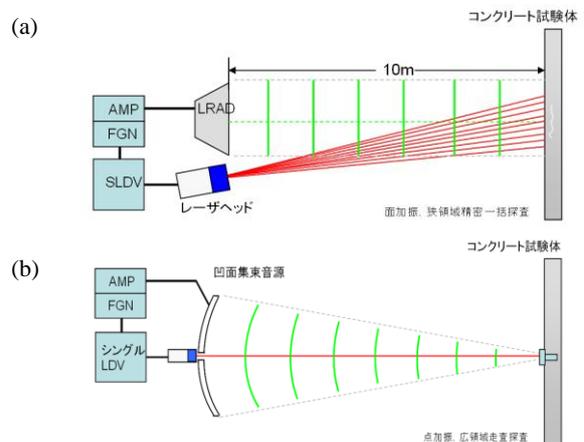


図-1 非接触音響探査の構成法

(a) 狭領域精密探査, (b) 広領域走査探査

### 2.1 狭領域精密探査

図-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。

\*1 桐蔭横浜大学大学院・工学研究科教授 工博 (正会員)

\*2 桐蔭横浜大学大学院・工学研究科研究員 工博 (非会員)

\*3 佐藤工業(株)技術研究所・上席研究員 工博 (正会員)

\*4 明篤技研・代表 工博 (非会員)

## 2.2 広領域走査探査

図-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、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。

## 2.4 探査が可能な欠陥と計測時間について

本手法で探査が可能な欠陥は、空中放射音波によりたわみ共振が発生するような対象物表面近くに存在する空洞欠陥および亀裂欠陥である<sup>14)</sup>。また、SLDVを用いた場合の計測時間は例えば、音波の送信時間を約2秒、アベレージ回数を5回、計測ポイント数を50ポイントとすれば、約8分程度である。計測面積は5mの離隔であれば1m<sup>2</sup>程度である。強力超音波音源の場合は試作機であり、現状では手動走査になるため、SLDVの2倍程度の時間が必要となると思われる。しかしながら、後述のように音源の角度依存性が改善するため、計測可能面積はSLDV+LRADよりも広がるのが期待できる。

## 3. 音源の入射角依存性に関する理論的検討<sup>15,17)</sup>

### 3.1 LRAD音源の場合

従来用いていた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、ほぼ一般的な平面音波の入射を考えれば良い。入射音波の励振効果は、対象面に関する入射音圧 $p(x)$ 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。図-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 $\theta_L$ とすると

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

となり、 $\theta_L$ は欠陥径 $A$ の関数となる。ここで $\lambda$ は音波の波長である。(1)式より、欠陥径 $A$ が大きくなると $\theta_L$ 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 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、図-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 $\theta_H$ とすると、

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

となり、 $\theta_H$ は欠陥径 $A$ とは無関係となる。

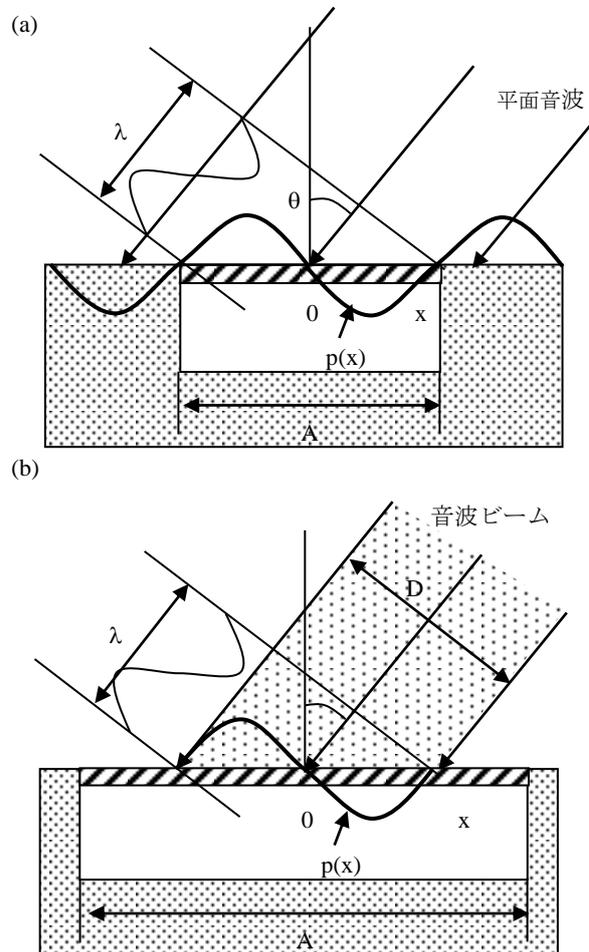


図-2 音波の入射と駆動力について

(a)平面音波の場合、(b)狭い音波ビームの場合ここで、(2)式は超音波ビームにより駆動される径( $D/\cos \theta$ )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限界状況は図-3となる。したがって、

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

の条件により制限される。ここで、 $A \sin\theta = \lambda$  であることから

$$D < A \cos\theta = (1/\lambda)\cos\theta/\sin\theta = (1/\lambda)\tan\theta \quad (4)$$

である。従って

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

となる。

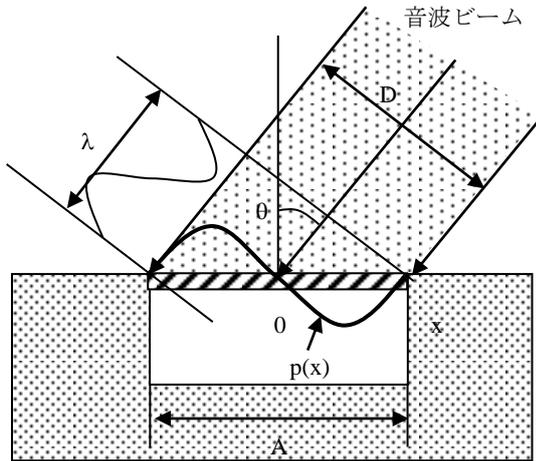


図-3 超音波ビーム入射条件の適用限界

### 3.3 許容入射角の比較

前述の関係をまとめると図-4となる。ここで、実線が本方式の許容入射角であり、破線が各欠陥径 A に対応する従来方式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、元来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、欠陥径 A が大きい、あるいは、加振周波数が高い領域において、入射角度許容度を従来方式に比して大幅に改善することがわかる。

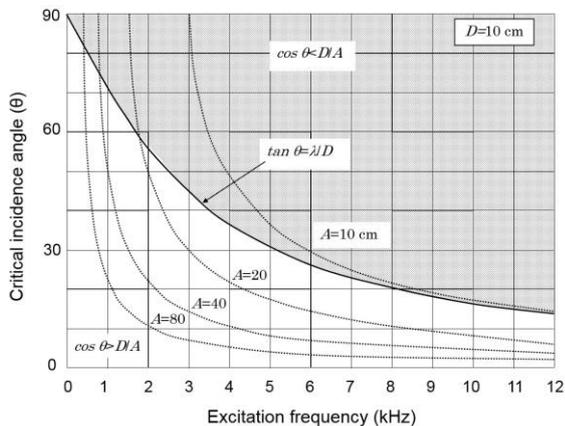


図-4 限界入射角度と加振周波数の関係

## 4. 強力超音波音源を用いた実験的検討<sup>15,17)</sup>

### 4.1 製作した強力超音波音源の概要

実用的な距離 (5m) での探查性能を有する直径 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総数約 3200 個)。また、シングルポイントレーザと強力超音波音源を用いた点加振による広領域走査探查を実現するために、中心軸上にレーザ光を通過させるための穴(20mmφ)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 (図-5 参照)。

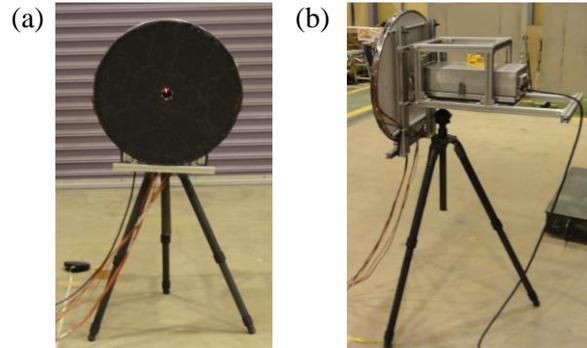


図-5 製作した強力超音波音源

(a) 正面図, (b) 側面図

### 4.2 超音波の音圧分布について

直径 60cm、曲率半径 5m の円形凹面送波器により、波長 8mm の超音波 (約 40kHz) を送波する場合に形成される音圧分布の理論値<sup>18)</sup>を 図-6(a) に示す。図より、軸上音圧は曲率半径に対応する距離 5m 近傍で最大値を示す。

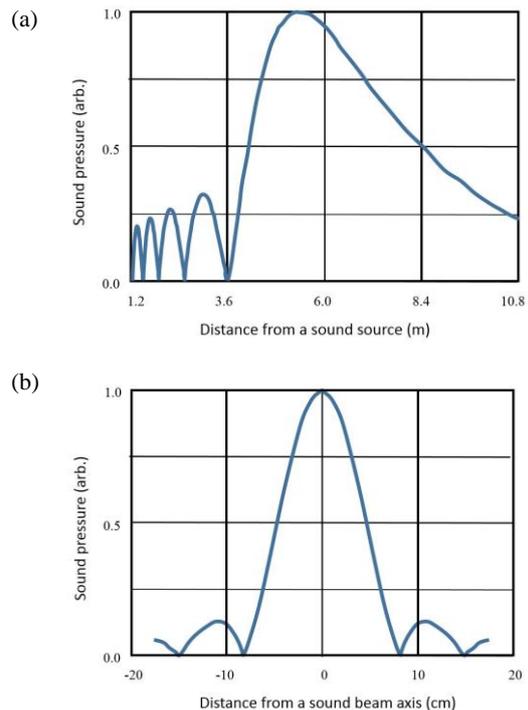


図-6 音圧分布の理論値, (a) 軸上, (b) 焦点面上

また、焦点面上の音圧分布の理論値を図-6(b)に示す。図より、中心から約 8cm の位置にて 0 となり半値幅は約 10cm となる。

次に製作した超音波音源を用いて、搬送波である 40.35 kHz の音圧分布特性を 100 kHz まで感度を持つ計測マイクロフォンを用いて計測した。軸方向の計測結果を図-7(a)に示す。軸上では音源近傍で音圧が特に強く、5 m 付近で再度ピークが見られる。5 m 地点の方位音圧分布を図-7(b)に示す。中心軸である 0 cm の地点のピーク音圧に対し、+8 cm でおおよそ 6dB 程度低下していることから、超音波のビーム幅は約 16cm 程度であると推測できる。なお、理論値と実測値の違いは主に、室内計測による反射波および残響波による影響と、凹面部分の加工精度に依存する焦点位置のずれによるものと思われる。

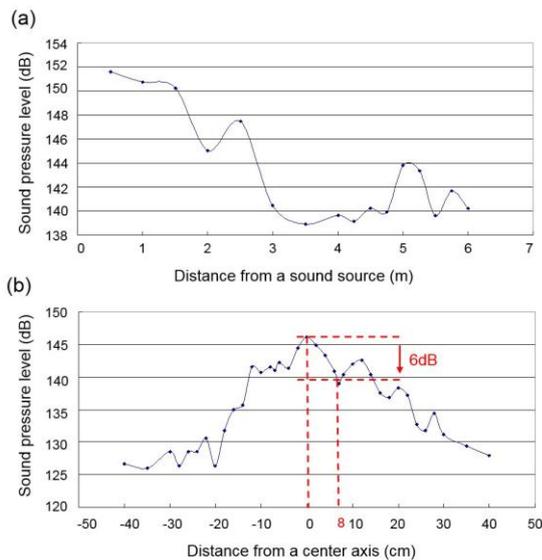


図-7 搬送波の音圧分布, (a)軸上, (b)焦点面上

#### 4.2 可聴音の音圧分布と指向性の比較について

強力超音波音源における可聴域帯の音圧分布特性を 10 kHz 以下に感度を持つ計測マイクロフォンを用いて計測した。軸方向の計測結果を図-8(a)に示す。1 kHz では 4 m 地点, 2 kHz では 3 m 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 5 m 地点での方位方向音圧分布を図-8(b)に示す。図よりピーク音圧に対し、おおよそ 6dB 程低下している可聴音のビーム幅は約 16cm 程度であることがわかる。さらに、この計測結果から、最大値約 120dB(SPL re 20  $\mu$ Pa)の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することができる。

続いて、音源から 5m 離れた距離にコンクリート供試体(2x1.5x0.3m<sup>3</sup>)<sup>14)</sup>を正対させた時の音圧分布を精密騒音計により計測した(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 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。図-9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最大で 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て取ることができる。なお、使用したコンクリート供試体の配合表を表-1に示す。

表-1 供試体に用いたコンクリートの配合

Gmax(mm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	水(kg/m <sup>3</sup> )
20	4.5	49.5	42.9	162
セメント(kg/m <sup>3</sup> )	細骨材(kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材(kg/m <sup>3</sup> )	混和剤(kg/m <sup>3</sup> )	
327	786	1061	3.270	

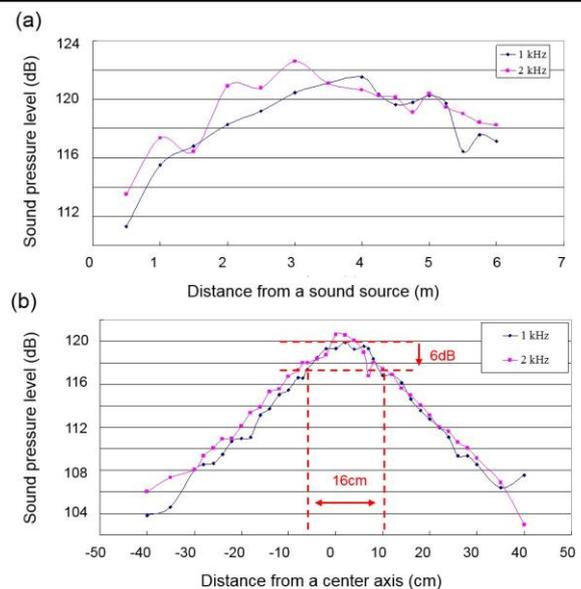


図-8 可聴音の音圧分布, (a)軸上, (b)焦点面上

#### 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行った。前節と同じコンクリート供試体<sup>14)</sup>に埋設されている空洞欠陥を模擬した円形欠陥部(深さ 80 mm の位置に  $\phi$ 300mm, 25mm 厚の発泡スチロールが埋設)と健全部に対して 500Hz から 7000Hz のトーンバースト波<sup>10,13,14)</sup>を使用して探査実験を行った。欠陥部上で健全部上の振動速度スペクトルを図-10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<sup>16)</sup>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。

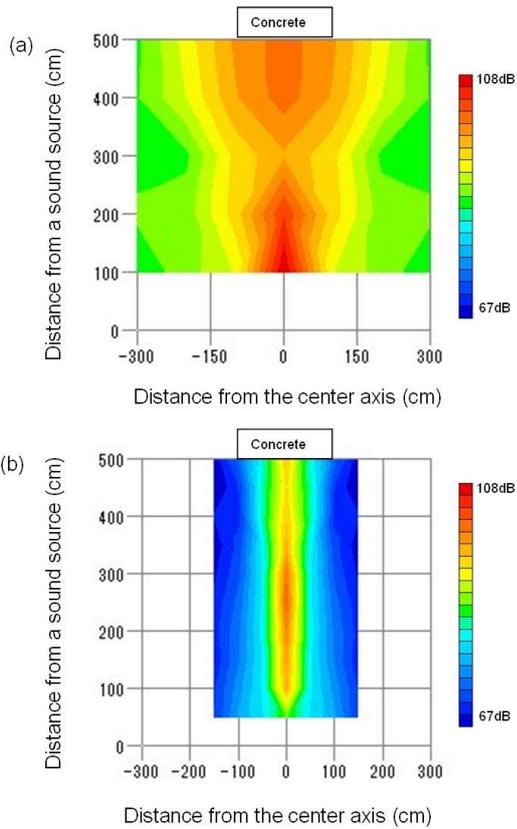


図-9 音圧分布の計測結果  
(a) LRAD, (b) 超音波音源

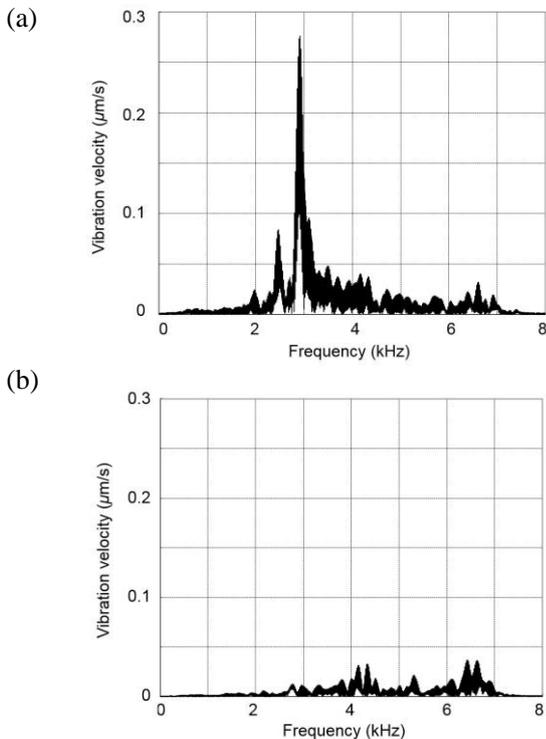


図-10 振動速度スペクトルの比較  
(a) 欠陥部上, (b) 健全部

#### 4.4 角度依存性の検討

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(2x1.5x0.3m<sup>3</sup>)<sup>14)</sup>を用いた実験を行った。実験セットアップ図を図-11に示す。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。実験結果を図-12に示す。縦軸は $\theta=0$ 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。これは図-4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。

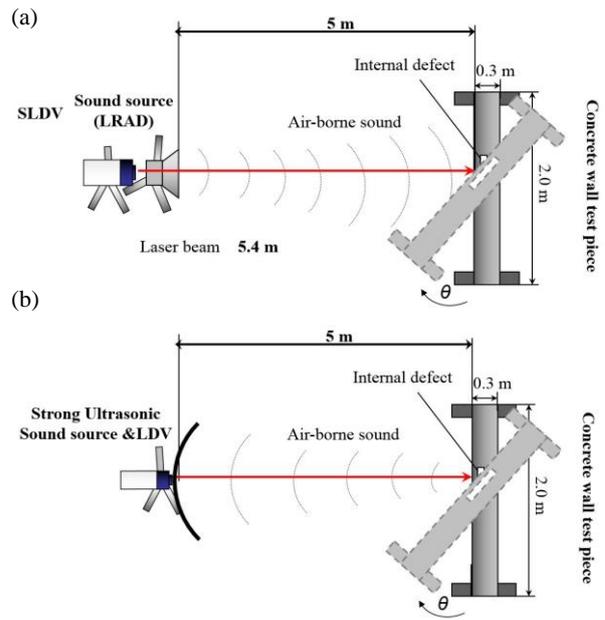


図-11 角度依存性検討用の実験セットアップ  
(a) SLDV+LRAD, (b) LDV+強力超音波音源

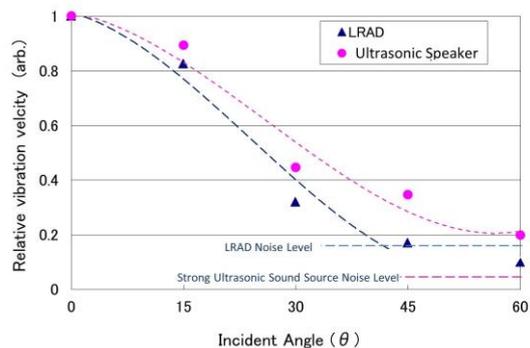


図-12 角度依存性の実験結果

## 5. まとめ

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」の助成を受けて行われたものである。

## 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, 2012.10
- 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.1787-1792, 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, 2011.10
- 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, 2011.11
- 7) 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, 2012.5
- 8) 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, 2013.5

- 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, 2013.7
- 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 International Ultrasonic Symposium, pp1303-1306, 2013.7
- 11) 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-, 土木学会土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, pp173-174, 2013.9
- 12) 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, 2014.7
- 13) 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-, 土木学会土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69, pp959-960, 2014.9
- 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, Vol.36, No.1, pp.2062-2067,2014.7
- 15) 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, 2014.10
- 16) 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.137-142,2014.11
- 17) 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, 2014.12
- 18) H.T.O'Neil : Theory of Focusing Radiators, J. Acoust. Soc. Am, 21, pp.516-526, 1949.9