

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成 果 報 告 レ ポ ー ト
No. 22-3

研究テーマ

非破壊検査のための非接触音響探査法
についての研究開発

研究代表者：桐蔭横浜大学・大学院教授
共同研究者：佐藤工業㈱技術研究所・上席研究員
明篤技研 代表

杉本 恒美
歌川 紀之
片倉 景義

平成26年7月

新道路技術会議

目次

研究概要（様式3）	1
第1章 はじめに	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	4
1.3 分担研究者について	4
1.4 本報告レポートの構成について	4
第2章 非接触音響探査法の計測原理	6
2.1 欠陥検出の基本原則	6
2.2 非接触音響探査法の概要	7
2.3 長距離音響放射装置（LRAD 音源）	7
2.4 非接触音響探査法としての2つの構成法	8
2.5 強力超音波音源について	8
2.6 トーンバースト波を用いたS/N比の改善	17
第3章 コンクリート供試体を用いた各種検証時実験	20
3.1 円形供試体について	20
3.2 はく離欠陥検出の検討	21
3.3 送信波形の工夫による測定感度の向上	23
3.4 振動エネルギー比を用いた欠陥検出	24
3.5 アンカーボルト供試体を用いた探査実験	25
3.6 アスファルト供試体を用いた探査実験	27
第4章 実コンクリート構造物を用いた検証実験	30
4.1 N2U-Bridgeでの探査結果	30
4.2 北陸自動車道における探査実験	32
4.3 高島トンネル（国道1号線、横浜）	37
4.4 測定条件の検討	41
第5章 強力超音波音源を用いた欠陥検出能力	45
5.1 強力超音波音源について	45
5.2 音圧分布の検討	46
5.3 コンクリート供試体での探査実験	47
第6章 結論	48
6.1 本研究により得られた成果	49

6. 2 今後の課題	49
謝辞	50
参考文献	50

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 22 年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.22-3	非破壊検査のための非接触音響探査法 についての研究開発	桐蔭横浜大学・大学院 教授 杉本 恒美

打音法では点検作業に足場や高所作業車が必要となるような場所、例えばトンネルや橋梁における打音法の代替となるような手法を実現するため、強い音響振動を発生する長距離音響発生装置(LRAD)と高感度のスキャニング振動計(SLDV)を組み合わせた非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法を研究目的として、その基本特性および適用条件等を明らかにするためにコンクリート供試体および実構造物での探査実験を実施する研究開発。

1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

近年、地表面やコンクリート表面等屋外で 2 次元振動計測が可能な高感度のスキャニング振動計(SLDV:Scanning Laser Doppler Vibrometer)や通常のラウドスピーカと異なり 100dB 以上の音圧を 10メートル以上離れた場所でも発生できる長距離音響発生装置(LRAD; Long Range Acoustic Device)が開発された。そのため、被測定物から 10メートル以上離れた位置において、非接触で非破壊計測が行える可能性が予測される状況になってきた。したがって、本研究の目的は、高感度のスキャニング振動計と長距離音響発生装置を組み合わせた制御により、非接触・広域の音響探査システムを構築し、主としてコンクリート構造物を対象とした非破壊検査用非接触音響探査システムの実用化を図ることである。

2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

FS 評価試験の結果から、非接触音響探査法が遠距離からでもコンクリート内部の空洞欠陥を探査可能であることが明らかになった。そのため、本研究においてはコンクリート構造物の欠陥に関する基礎調査を行い、調査すべき試験体として剥離試験体および円形試験体がリストアップされた。その上で検討項目としては(1)欠陥検知アルゴリズムの改善検討、(2)レーザドップラ振動計を用いた計測高精度・高速化に関する検討、(3)大音圧音源を用いた遠距離音場制御に関する検討、(4)コンクリート供試体の製作および実地調査実験などを実施した。

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

(1)送信波形の工夫による測定感度、計測速度の向上

空中放射音波とレーザ光の伝搬速度の差を利用したトーンバースト波を利用することにより、15dB 以上の感度改善を行うことができた。このことは同時に、アベリッジ回数を減らせるという意味で計測速度の改善を意味している (Fig.1 参照)。

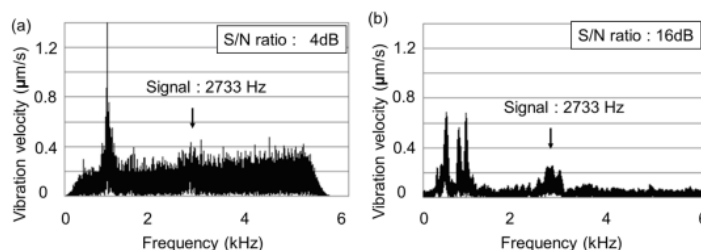


Fig.1. Vibration velocity spectra on the damaged part. (a) chirp wave, (b) Tone burst wave with time gate.

(2)振動エネルギー比による欠陥判定アルゴリズム

欠陥部があるときのみ、振動速度スペクトルに分布(すなわち振動エネルギー)が生じており、必ずしも単一のスペクトルピークを持つとは限らないことから、振動エネルギー比を用いた欠陥判定アルゴリズムを導入した。コンクリート供試体の計測データから健全値との閾値は 3.6dB 前後であると仮定し、実コンクリート構造物に適用してたたき点検法と比較したところ、ほぼ類似した良好な結果を得ることができた(Fig.2 参照)。

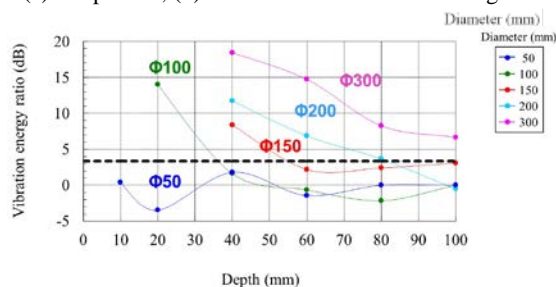


Fig.2. Vibration energy ratio between the defective and healthy part.

(3) 強力超音波音源による角度依存性の改善

LRAD 音源を音源として用いた場合、良好な計測結果を得るためには対象の大きさとたわみ共振周波数にも依存するが ± 30 度以内で対象物に照射する必要があった。しかしながら、強力超音波音源を用いることにより角度依存性は倍の ± 60 度程度まで改善することが明らかになり、LDV 計測と合わせて、非常に計測範囲の広い手法となることが判明した(Fig.3 参照)。また副産物として、指向性も向上するため騒音問題も解決することが予測される。

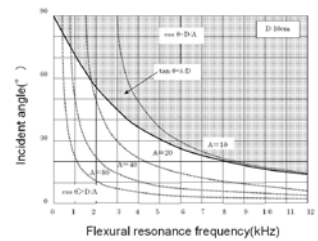


Fig.3. Angular dependence of parametric speaker.

(4) コンクリート供試体および実構造物を用いた探査実験

円形供試体を用いた実験結果 (離隔 5m) より、探査可能な欠陥の大きさと深さは通常のたたき点検によるものとほぼ同等であることが確認された。また、割裂供試体を用いた実験結果 (離隔 5m) より、亀裂幅が 0mm でも音響探査法では探査可能であることが確認された。さらに実コンクリート構造物を用いた探査実験も北陸自動車道、N2U-Bridge 等複数個所で実施し、屋外でも通常のたたき点検による結果と遜色が無いことが明らかにされた(Fig.4 参照)。

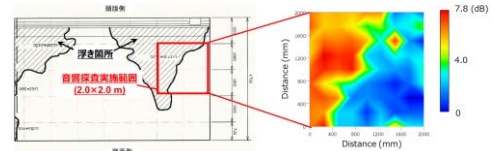


Fig.4. Experimental results. (a) Hammer method (slash part :float), (b) Non contact acoustic inspection method using vibration energy ratio.

(5) まとめ

以上より、非接触音響探査法は遠距離から従来の打音法と同程度の精度での探査を行うことが可能であることが実証された。騒音問題、測定速度など実用化に向けて改善すべき点はあるものの、いずれも解決可能な問題であり、本手法による実用システムは近い将来実現すると思われる。

4. 主な発表論文 (研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

- (1) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino, "Non Contact Acoustic Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD", Acoustics 2012 Nantes, Proceedings pp.835-839, 2012.04.24
- (2) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino, "Non Contact Long Distance Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD", Acoustics 2012 Hong Kong, Proceedings 6pages, 2012.05.17
- (3) 赤松亮、杉本恒美、歌川紀之、辻野修一、長距離音響発生装置を用いた非接触欠陥検出法の検討、コンクリート構造物の非破壊検査、Vol.4, pp.31-36 (2012.08)
- (4) Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi Sugimoto, Noriyuki Utagawa, and Kageyoshi 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 (2013.07)
- (5) Kageyoshi Katakura, Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi Sugimoto, and Noriyuki Utagawa, "Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC15 (2014.07)

5. 今後の展望 (研究成果の活用や発展性、今後の課題等)

コンクリート構造物に対する遠距離からの非接触による非破壊検査法の早急な開発が点検現場のみならず世間一般から要求される時代になってきている。今回の研究結果より、非接触音響探査法は起こしている振動現象が叩き点検と同じたわみ振動であり、5m以上の離隔でも叩き点検と同程度の欠陥探査精度を持っていることが明らかになった。したがって、本手法は遠距離非接触での非破壊探査という基本的な要求性能を満たせるだけでなく真の意味で叩き点検を代替できる手法であることが期待できる。実用システムを構築するに当たっては、騒音問題や計測速度等の改善を行う必要があるものの、解決不可能な問題では無いため、実現の可能性は極めて高いと言える。

6. 道路政策の質の向上への寄与 (研究成果の実務への反映見込み等)

本方式がシステムとして実用化されれば道路や橋梁などの公共コンクリート構造物の日常点検や定期点検の効率化と調査精度の向上に寄与するとともに、公共交通の安全性確保に大きく貢献できる。また、従来点検が困難であった高所作業や危険作業、交通ルートの変更などを余儀なくされる点検作業等においても、遠隔操作による計測が可能となり、安全・防災面において我が国ばかりでなく全世界的に大きな変革をもたらすことが期待される。

7. ホームページ等 (関連ウェブサイト等)

<http://www.cc.toin.ac.jp/sc/sugimoto/>

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

我が国の高度成長期以降を通じて、数多くのコンクリート構造物（トンネル、橋梁等）が構築されてきた。しかしながら、構築されて30～40年以上の年数が経過し検査が必要となっている構造物も少なくないというのが実情であると思われる。コンクリート構造物表面のクラックや劣化の程度を調査する方法は、画像処理法、レーダ法、打音法など様々な手法が開発され、要求される調査精度に応じて使い分けられている。具体的に実際に検査に用いられることが多いのはたたき点検法もしくは打音法とよばれる直接対象物表面をハンマー等でたたいて、その際に発生する音を聞き分けるか解析することにより識別する方法である。この手法が選択される主な理由は主に簡便でコストも大してかからないことであるが、その反面、操作者の経験と勘に依存するところも多く熟練を必要とするという問題点を本質的に抱えている。さらに1日で作業できる検査可能面積もそれほど大きくないために、全国にあるコンクリート構造物のごく一部しか検査できていないというのが実情であると思われる。他の調査方法も基本的には同様で、対象物に接触もしくは極めて接近する必要がある、測定に時間がかかること、道路交通の妨げになること、足場や台車による高所作業を必要とすること等の問題点を持っている。したがって、交通容量の確保や危険防止の面から、対象物から離れた位置からの非接触探査法が必要とされているのである。

この観点から、レーザドップラ振動計を用いた非接触計測法は様々な提案が過去になされてきている。特にパルスレーザを振源とする欠陥

探傷技術は点加振が実現できるため、打音検査と比較しやすく期待されており、既に5m程度の離隔での計測には成功していることが報告されている¹⁻¹⁰⁾。しかしながら、駆動に大電力を必要とするため、電力の供給が不十分な場所では実施困難であるという問題点がある。

ところが、近年、通常のラウドスピーカに比べると遠距離でも高音圧を維持することができる長距離音響発生装置(LRAD; Long Range Acoustic Device)が米国で開発され、この装置とコンクリート表面でも2次元振動計測が可能な高感度のスキヤニング振動計(SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer)を組み合わせることにより、被測定物から離れた位置において、非接触で振動を計測することが可能になった。特にLRADは10m以上の離隔でも100dBを超える音圧を発生できることから、被測定物から10メートル以上離れた位置において、非接触で非破壊計測が行える可能性が予測される状況になってきた。

一方、本研究室（桐蔭横浜大学大学院・工学研究科・杉本研究室）では音響振動とSLDVを組み合わせて極浅層地中探査法の検討を行っていた。これは2000年頃から世界的に問題となった対人地雷の探査要求に端を発しており、米国ではミシシッピ大学のサバティエ博士らが初期型のSLDVとラウドスピーカを用いた音響振動加振法の研究を行い、対戦車地雷等の検知に応用できることを既に示していた¹¹⁾。その後、2007年になってSLDVが導入されたこともあり、本研究室でも実験室内の砂槽および屋外の休耕地等で、小型のプラスチック容器を対象にして超磁歪振動子を振源とした場合および平面スピーカを用いた場合に検出できること¹²⁻¹⁷⁾、

応答周波数帯により埋設物の識別に用いることができること¹⁸⁻²¹⁾、最適周波数帯を用いることで映像を改善できること²²⁻²⁸⁾ および位相差を用いることで輪郭抽出が行える可能性があること²⁹⁻³²⁾などを示してきた。また、平成21年度のJSTシーズ発掘試験A”長距離音響発生装置を用いた極浅層地中探査システムの開発と応用“に採択されたことにより、LRADシリーズの中では最も小型のLRAD (LRAD-100X) を使用した探査実験が可能となった。実際に空洞欠陥を模したコンクリート試験体での探査実験を厚木にあるSK社にて開始し、周波数帯が異なるものの地中と同様な現象が発生することを確認した³³⁾。その後、今回の委託研究である”道路政策の質の向上に資する技術研究開発“に平成22年度のFS研究”非破壊計測のための非接触音響探査法についての研究開発“として採択され、10mの離隔から50mmの深さにある面状の欠陥の検出ができることを実験的に明らかにした³⁴⁻⁴¹⁾。さらに平成23-25年度は本研究として採択され、以下の事項を明らかにした⁴²⁻⁵⁵⁾。

- ・割裂試験用の円柱テストピースのひび割れ幅を調整したモデルを使用することにより、実際に近い薄い剥離部をもつコンクリート供試体の製作が行えることが明らかにした。
- ・0.5mm程度の剥離であっても表面から25mm程度であれば、非接触で検出可能であること。
- ・レーザーヘッドにおける-10dBの防振対策により、従来同様の計測を、1/10の音響出力(音圧100dB)により実現可能とした。
- ・音場分布や照射角度変更時の振幅変化は数値計算結果と良く一致すること。
- ・欠陥部の一辺の長さに対して、その3分の1程度スキャン密度が必要であること。
- ・音響探査法によるスペクトル形状は打音法による計測結果と同様な傾向があること。
- ・実際に浮きや剥離のある円柱型供試体を用いた音響探査実験を行い、非接触での欠陥探査が可能であることを確認した。
- ・2個のLRAD音源を用いた長距離音響制御により、中心軸上音圧を5dB以上軽減できることを確認した。
- ・複数要素音源(強力超音波音源)を使用すれば加振領域±3cm程度の点加振に近い計測が実現でき、かつ周囲環境へ与える騒音放射も10dB(1/10倍)程度低下すること(2kHz送信時、離隔1mで中心軸から1m離れた地点での比較)を明らかにした。
- ・トーンバースト波に時間的なゲート処理を加えることで、従来のChirp波よりも感度が

約15dB(計測速度にして約30倍)程度向上できることが判明した。

- ・たわみ共振を利用した計測のため、検出される共振周波数は埋設物の深さに比例し、平面規模(直径)の2乗に反比例し、亀裂幅はたとえ0mmであっても検出可能であること。
- ・振動エネルギー比により、欠陥深さの推定が行える可能性があること。
- ・実構造物(切り出し試験体)を用いた探査結果より、マイクロホンを用いた打音法とほぼ同様な位置に欠陥が検出できること
- ・LRADを用いた面加振の場合には、表面に凹凸のある法面でも計測可能であること。
- ・レーザーを用いた振動計測は精密である反面、風等による振動には弱いこと。

1.2 研究の目的

前節に述べたようにコンクリート構造物に対する遠距離からの非接触による非破壊検査法の開発が現場から要求されており、同時に近年開発されたSLDVとLRADを組み合わせることでその要求性能を満たせる可能性があることが昨年度のFS研究等の結果から明らかになった。したがって本研究の目的は、高感度のスキヤニング振動計と長距離音響発生装置を組み合わせた制御により、非接触・広域の音響探査システムを構築し、主としてコンクリート構造物を対象とした非破壊検査用非接触音響探査システムの実用化を図ることである。

1.3 分担研究者について

本研究の平成25年度の分担研究者は以下の2名である。

- ・佐藤工業(株)技術研究所・上席研究員
歌川 紀之
- ・技術コンサルタント 明篤技研代表
片倉 景義

佐藤工業(株)の歌川氏は非接触音響探査法とマイクロホンを用いた打音法による結果の比較解析を行い、本手法における欠陥探知アルゴリズムの検討を担当する。

1.4 本成果報告レポートの構成について

本レポートの構成は以下のようになっている。第1章で本研究の背景および目的について述べる。

第2章で非接触音響探査法の計測原理、SLDVとLRADを用いたいわゆる狭領域精密探査と強力超音波音源とシングルポイント用LDVを用

いた広領域走査探査および Tone Burst 波を用いた場合のタイムゲートと周波数ゲートを用いた場合の感度改善について述べる。

第3章では実構造物および各種供試体を用いた場合の実験結果例、壁面の状態等の測定条件に関する検討および残響が多い場合の ToneBurst 送信法の改善策について述べる。

第4章では強力超音波音源の特性について述べる。

第5章ではアンカーボルト供試体を用いた場合の実験結果例について述べる。

第6章では計測アルゴリズムに関する検討として、振動エネルギー比による欠陥評価に関して、円形欠陥モデルを用いた場合の打音法と非接触音響探査法の比較と FEM による解析結果例、および実構造物での検討結果について述べる。

第7章では結論として本年度の研究により得られた成果および今後の課題について述べる。

また、参考のために付録として、LDV のレーザ通過口径による受光感度の影響、ハンマリング試験結果、北陸自動車道実構造物探査実験 (1)RC 床版スペクトルおよびシングルポイント LDV 用の防振ケース設計図等について掲載した。

第2章 非接触音響探査法の計測原理

2.1 欠陥検出の基本原則

Fig.2.1に示すようにコンクリート構造物の表面近傍に空洞欠陥もしくは亀裂がコンクリート面に対して水平かつ平面的に存在していた場合、その欠陥上で板状の構造が構成される。この場合、ハンマーによる叩き点検を実施するとこの板状の部分は構造物からはく離れた板は振動板のように働くことになる。この時、2種類の振動が発生する。

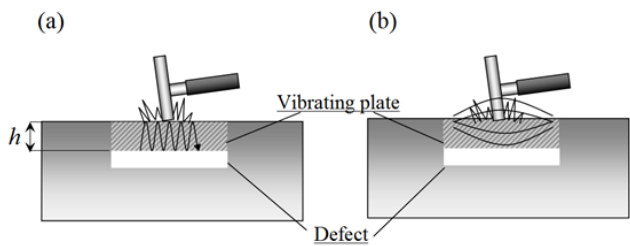


Fig. 2.1 Vibration pattern of the defective part (a) Longitudinal mode, (b) Bending mode.

一つはコンクリート表面と空隙までの厚み方向で生じた定在波による縦振動である。縦振動の固有振動数 f_L は以下の(2.1)式で表される。

$$f_L = \frac{c}{2h} \quad (2.1)$$

ここで h はコンクリートから欠陥までの深さ、 c はコンクリート中の縦波速度である。一般的に、コンクリートの音速は3000-4000 m/sであり、欠陥までの深さを10-100 mmとすると縦振動の固有振動数 f_L は15-200 kHzとなり、ほぼ可聴域外である事がわかる。

もう一つはたわみ振動である。たわみ振動は欠陥部が太鼓のように振動する振動パターンである。簡単のため、はく離部を単純支持された円板と近似すると、その一次の固有振動数 f_{fr} は以下の(2.2)式で表される。

$$f_{fr} = \frac{4.98}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (2.2)$$

ここで、 h はコンクリートから欠陥までの深さ、 a は半径、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 ρ は密度である。(2.1.2)式より、固有振動数は欠陥の深さに比例し、半径の二乗に反比例することがわかる。単純支持円板の一次固有振動数の計算をFig. 2.2に示す。コンクリートの物性値としてはヤング率35Gpa、密度2400kg/m³ およびポアソン比0.2のものを用いた。図から、ここで示す平面規模および深さを持つ欠陥の固有振動数は概ね可聴域内であることがわかる。一般に、たわみ振動の固有振動数は縦振動より低く振幅が大きいので、たわみ振動が励振可能な水平方向の空洞あるいはひび割れの欠陥検出においては、たわみ振動を利用した方が有利となる。逆に垂直方向のひび割れの場合には、検出は困難となる。非接触音響探査法の場合も叩き点検やマイクを併用する打音点検と同様にたわみ振動を利用した検査になる。

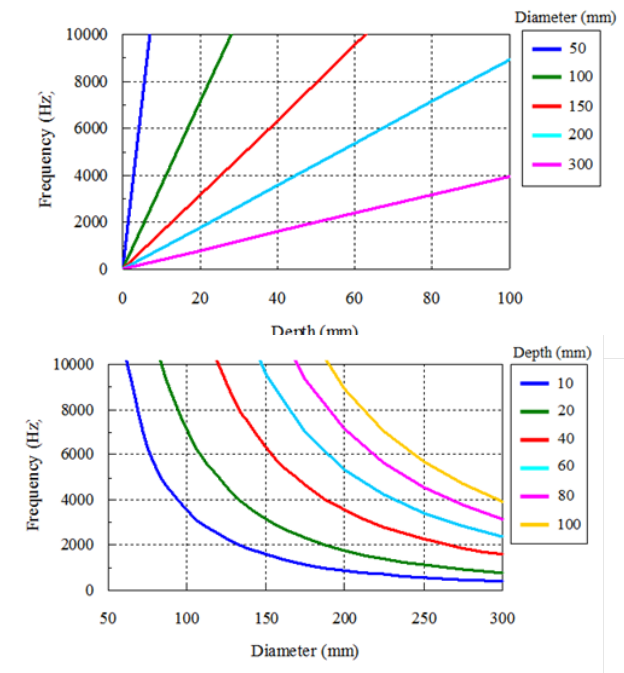


Fig. 2.2 First natural frequencies of simply supported circular plates. (a) Frequency vs. depth, (b) frequency vs. diameter

2.2 非接触音響探査法の概要

非接触音響探査法の概要図を Fig. 2.3 に示す。音源から発した平面波音波により対象壁面を励振する。励振時の壁面上の振動を LDV(Laser Doppler Vibrometer)により光学的に検出し、欠陥部と健全部の振動特性の違いから欠陥を検出する。LDV はレーザ光を移動物体に照射し、その参照光と反射光の位相差 $\Delta\theta$ から以下の(2.3)式を用いて速度を検出する光学式干渉計である。

$$\Delta\theta = \frac{4\pi}{\lambda} V \quad (2.3)$$

ここで、 t は時間、 V は移動物体の速度、 λ はレーザ光の波長である。本研究ではスキャンニング機構を備えた LDV である SLDV(Scanning Laser Doppler Vibrometer)を用いる。SLDV (Polytec Corp., PSV400-H4)のスペックを Table 2.1 に示す。平面音波による面的な加振と SLDV による二次元的な計測を組み合わせる事で効率的な探査が可能であり、既往の研究では地雷探査などに応用されている。

欠陥検出を行う場合、欠陥部の固有振動数で共振させるのが最も効率的である。そのため、Fig. 2.4に示すホワイトノイズ、あるいは広い帯域を持ったスイープ波を加振に用いていた。一般的に音波は高い周波数ほど減衰が激しいことから、非可聴域に存在し信号強度の弱い縦振動の固有周期を共振させるのは困難であると思われる。そのため、音響加振を用いる本探査法においては、可聴域で固有振動数を持ち信号強度の強いたわみ振動を利用した探査を行う。

2.3 長距離音響放射装置 (LRAD音源)

音響加振を用いる場合の問題点として、音波の空気中での減衰が激しいことが挙げられる。過去の研究において、コンクリートの欠陥を励振する場合、100 dB程度の高音圧が必要であることがわかっている。市販のラウドスピーカや平面スピーカを用いた場合、5 m以上の実用的な距離で、そのような高音圧を維持する事は難しい。したがって本研究ではLRAD(Long Range Acoustic Device: 長距離音響発生装置)を強力音源として用いる。LRADは近年米国で開発されたスピーカであり、主にバードストライク対策等に用いられている特殊音源である。

(1) LRAD300Xの周波数特性

Fig. 2.5にLRAD 300-Xの周波数特性を示す。図から、1000-5000 Hzの範囲で-6 dBのフラットな

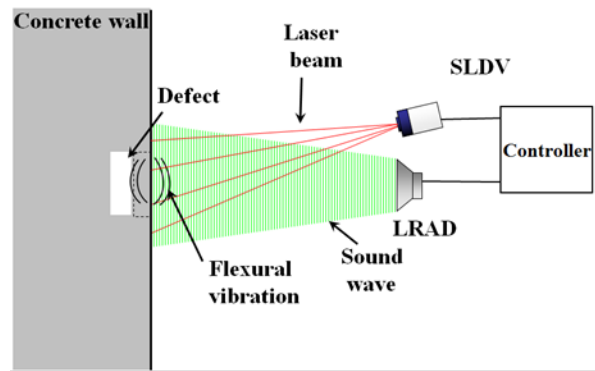


Fig. 2.3 Fundamental concept of non-contact acoustic inspection method.

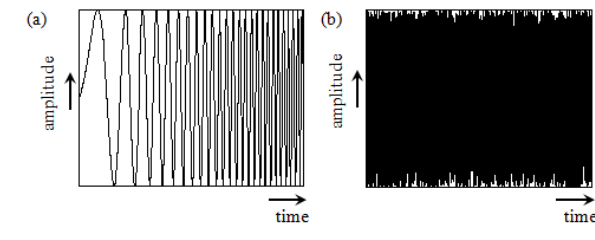


Fig. 2.4 Example waveform of chirp wave and white noise.(a) Chirp wave, (b) White noise

Table 2.1 Specification of the SLDV(Polytec Corp., PSV-400-H4)

Item	Specification
Bandwidth	0 ~ 80 kHz
Velocity range	0.01 $\mu\text{m/s}$ ~ 10 m/s
Measurement distance	> 0.4 m
Laser source	633 nm (Red)
Laser safety standard	Class 2, HeNe laser, 1 mW, eye-safe



Photo. 2.1 SLDV (Polytec Corp., PSV400-H4) & LRAD(LRAD Corp., LRAD-300X)

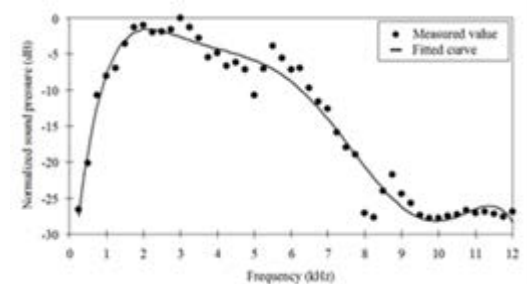


Fig. 2.5 Frequency characteristics of LRAD 300-X 特性を持っていることがわかる。加えて、一般

に用いられる検査用ハンマの加振周波数の範囲も5000 Hz以下であることから、本研究でも5000 Hz以下の周波数帯を用いる。LRAD 300-Xは1000-5000 Hzの周波数範囲で、音源から1 m地点において130-140 dBの高音圧を出力することが出来る。

(2) LRAD300Xの軸上音圧分布

Fig. 2.6に軸上の音圧分布を示す。黒点はマイクロホンによる計測値であり、実線は遠距離音場における球面拡散減衰の理論値である。計測値も理論値と同様に距離の二乗に反比例した低下を示している。5 mより先で見られるばらつきは、半無響室での計測であったため、床面反射の影響であると思われる。図から、20 m遠方で-30 dB程度の減衰が見られる。したがって、LRADを用いた場合、20 m遠方においても100-110 dBと加振に十分な音圧を維持出来る事を確認出来る

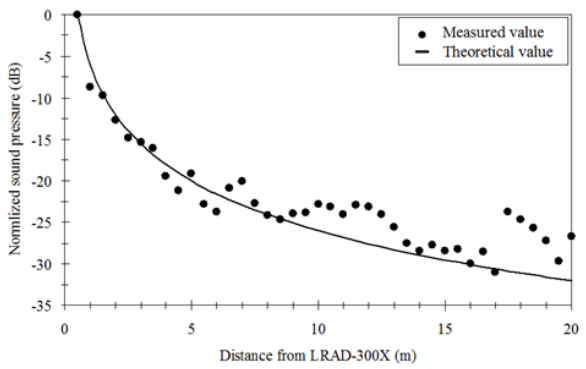


Fig. 2. 6 Frequency characteristics of LRAD 300-X.

(3) LRAD300Xの指向特性

LRAD300Xは矩形形状で、300×600 mmの口径を持ったスピーカである。音源の指向性は口径の形状および大きさ、送信周波数に依存する。1 kHz 正弦波送信時のLRADの方位方向の指向特性をFig.2.7に示す。図のように、-3 dBを閾値とすると方位方向の指向角は±15 dB程度であることがわかる。

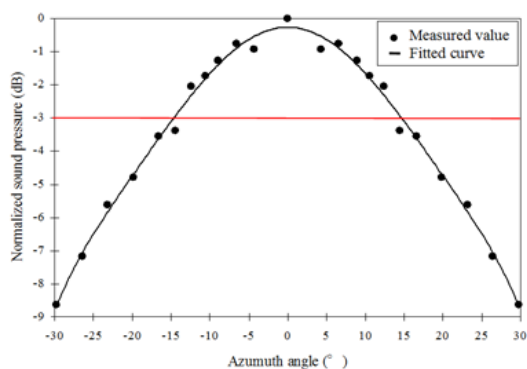


Fig. 2.7 Azimuth directivity of LRAD 300X

2.4 非接触音響探査法としての2つの構成法

(1) SLDVとLRADを用いた狭領域精密探査

前節までに紹介した手法はSLDVとLRADを用いたいわゆる狭領域精密探査に相当するものである(Fig.2.8参照)。この場合はLRADの音響特性の持つ面的な加振能力とSLDVの二次元的なスキャン性能を生かして比較的狭い領域の探査を精密に行うのに適している。ただし、SLDVによる二次元的なスキャン性能は静止した状態でレーザー光のアライメントをとる必要があるため、移動計測には適していない。

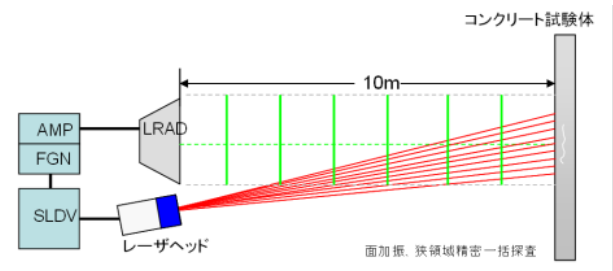


Fig. 2.8 SLDVとLRADを用いた狭領域精密一括探査

(2) 集束音源とシングルポイント用LDVを用いた広領域走査探査

非接触音響探査法としてはシングルポイント用LDVと強力超音波音源(集束音源)を組み合わせることで1点のみを計測する広領域走査探査という構成も考えられる(Fig.2.9参照)。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移動計測に適した構成となる。また、音源の中心部からレーザー光を送受信できるように構成すれば、音波とレーザー光を共焦点とすることができ、実用上も極めて便利になることが予想される。

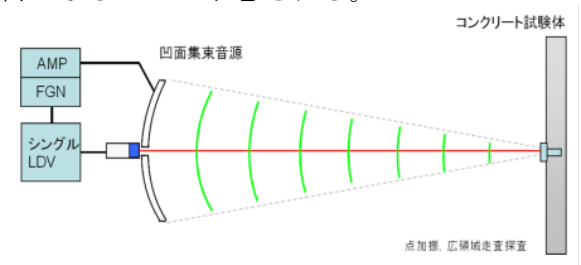


Fig. 2.9 集束音源とシングルポイント用LDVを広領域走査探査

2.5 強力超音波音源について

(1) 計測の概要

以下、強力超音波音源(集束音源)とシングルポイント用LDVを用いた広領域走査探査を

実現するための最適な実現形態について説明する。本構成は、限局した空間に強力な超音波音場を形成し、当該強力超音波により、対象位置近傍のみに形成される音響放射圧により対称物を加振し、励振された対象物の振動を、遠方において、光学的に検出する検査手法に関するものであり、Fig.2.10 に示す本構成による全体構成により、本構成の基本動作を説明する。

Fig.2.10 の全体構成において、超音波加振凹面音源 1 2 は、超音波制御部 1 3 により制御され、加振超音波 1 4 を放射する。

この、加振超音波 1 4 が形成する超音波音圧 p_H は、媒質の非線形効果により、加振領域 1 5 内に位置する対象物 3 の表面部分に音響放射圧 p_L を発生し、この音響放射圧 p_L により対象物 3 を加振する。

この、加振超音波 1 4 による超音波音圧 p_H と、加振領域 1 5 に形成される音響放射圧 p_L との関係は、 ρ を媒質（この場合には空気）の密度、 c を媒質（この場合には空気）中の音速として次式となる。

$$p_L = p_H^2 / (2\rho c^2)$$

この関係は 2 次であり、加振超音波 1 4 による超音波音圧 p_H が小さくなると、加振領域 1 5 に形成される音響放射圧 p_L は急速に減衰し、実質的には消滅する。

概略の音圧値を実例として示すと、 p_H : 3000 Pa（パスカル：ニュートン/m²）においては p_L : 100 Pa（134 dB-SPL）、 p_H : 300 Pa においては p_L : 1 Pa（94 dB-SPL）と低下する、さらに、 p_H : 30 Pa においては p_L : 0.01 Pa（54 dB-SPL）となり、 p_H が 30 Pa 以下の超音波による音響放射圧 p_L による対象物 3 の加振は事実上不可能となる。

従って、本構成による音響放射圧による加振は、超音波音圧 p_H が 30 Pa 以上の強力超音波を使用することにより、始めて好適に実現される。

本構成においては、音響放射圧による加振された欠陥部 4 の振動状況を、光学検出系 5 による計測用光線 2 5 により検出し、処理部 7 により欠陥 6 の有無を判定し判定結果 9 として出力する。

Fig.2.10 の構成例における超音波加振凹面音源 1 2 は、多数の微小超音波振動子 1 7 を凹面形状 1 8 に配置し、共通の駆動信号を印加することにより、凹面状波面 1 9 を送出し、焦点位置 F に超音波を収束させる。ここで、Fig.2.10 の構成における超音波加振凹面音源 1 2 および光

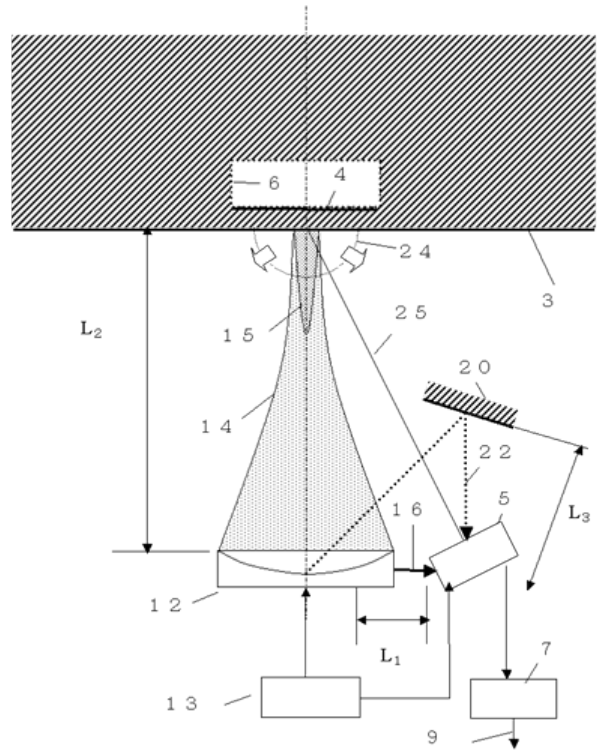


Fig. 2.10 シングルポイント用LDVを用いた広領域走査探査の概要

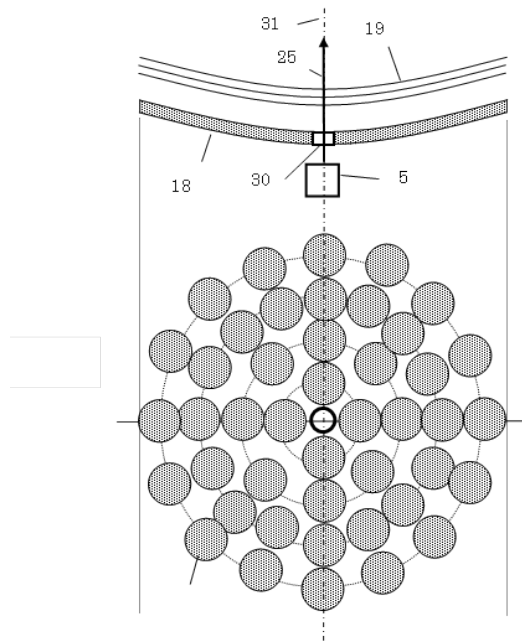


Fig. 2.11 シングルポイント用LDVを用いた広領域走査探査の概要

学検出系 5 の配置をFig.2.11 とする構成につき説明する。

ここで、Fig.2.11 の構成においては、超音波加振凹面音源 1 2 の中央に、計測用光線 2 5 の通過孔 3 0 を形成し、超音波加振凹面音源 1 2 の後方に、光学検出系 5 を配置する。

ここで、計測用光線 2 5 を、中心軸 3 1 上に配置すると、計測用光線 2 5 が加振領域 1 5 を必ず通過することとなる。

このような構成によると、超音波加振凹面音源 1 2 の後方に、光学検出系 5 を配置することにより、光学検出系 5 は、凹面状波面 1 9 の妨害振動を受けないこととなり、高精度の計測が可能となる。

(2) 有限振幅音波理論とコンクリート境界面駆動力

・有限振幅音波理論

運動の式は

$$\partial p / \partial x = -\rho \, du / dt = -\rho \, (\partial u / \partial t + u \, \partial u / \partial x)$$

あるいは

$$\nabla p = -\rho \, \{ \partial u / \partial t + (u \cdot \nabla) u \}$$

である。この関係において、粒子速度 u は、入射音波により変化し、密度 ρ も入射音波により微量変化する。これらのそれぞれを正弦波状の変化としても、それらの積により形成される媒質に作用する圧力 p は、正弦波の 2 乗成分を有することとなる。以下に、無限小振幅を仮定する無限小振幅音波理論を、高次項まで拡張することにより、時間平均値が 0 とならない音波による圧力を導出する。運動の式

$$\nabla p = -\rho \, \{ \partial u / \partial t + (u \cdot \nabla) u \}$$

において、音波の存在による密度あるいは圧力の変化分を ρ' 、 p' として

$$\rho = \rho_0 + \rho'$$

$$p = p_0 + p'$$

と表記する。また、圧力の変化分 p' は、線形成分 p_1 と 2 次の微小成分 p_2 により

$$p' = p_1 + p_2$$

と表記され、粒子速度 u は、線形成分 u_1 と 2 次の微小成分 u_2 により

$$u = u_1 + u_2$$

と表記されるものである。ここで、 u_2 は更に、直流成分音圧 u_D と 2 倍の周波数を有する高調波成分音圧 u_A により成り立ち

$$u_2 = u_D + u_A$$

となる。このような変化分 ρ' 、 p' により表記すると、運動の式は

$$\nabla p = \nabla p' = -(\rho_0 + \rho') \, \{ \partial u / \partial t + (u \cdot \nabla) u \}$$

となる。ここで、ベクトルの微分公式から

$$(u \cdot \nabla) u = (1/2) \nabla u^2 - u \, \nabla \cdot u$$

であり、渦なしを仮定すると $\nabla \cdot u = 0$ であり

$$\nabla p' = -(\rho_0 + \rho') \, \{ \partial u / \partial t + (u \cdot \nabla) u \}$$

$$= -(\rho_0 + \rho') \, \{ \partial u / \partial t + (1/2) \nabla u^2 \}$$

$$= -\rho_0 \, \partial u / \partial t - \rho' \, \partial u / \partial t - (\rho_0 / 2) \nabla u^2 - (\rho' / 2) \nabla u^2$$

となる。ここで、微小項 $(\rho' / 2) \nabla u^2$ を無視することにより (右記参照)、

$$\nabla p' = -\rho_0 \, \partial u / \partial t - \rho' \, \partial u / \partial t - (\rho_0 / 2) \nabla u^2 - (\rho' / 2) \nabla u^2$$

$$\approx -\rho_0 \, \partial u / \partial t - \rho' \, \partial u / \partial t - (\rho_0 / 2) \nabla u^2$$

となる。ここで、右辺第 2 項である $\rho' \partial u / \partial t$ は、運動の式から

$$\rho' \partial u / \partial t = -(\rho' / \rho) \nabla p - \rho' (u \cdot \nabla) u$$

であり、 $(u \cdot \nabla) u$ を同様に变形すると

$$\rho' \partial u / \partial t = -(\rho' / \rho) \nabla p - \rho' (u \cdot \nabla) u = -(\rho' / \rho) \nabla p - (\rho' / 2) \nabla u^2 \approx -(\rho' / \rho_0) \nabla p - (\rho' / 2) \nabla u^2$$

となる。

ここで、音速を c とすると

$$c^2 = \partial p / \partial \rho = c^2$$

となることから

$$\rho' \partial u / \partial t \approx -(\rho' / \rho_0) \nabla p - (\rho' / 2) \nabla u^2$$

$$= -(\rho' / c^2) (1 / \rho_0) \nabla p' - (\rho' / 2) \nabla u^2 = -1 / (2 \rho_0 c^2) \nabla p'^2 - (\rho' / 2) \nabla u^2$$

となる。この関係から、 $\rho' \partial u / \partial t$ を消去すると、

$\nabla p'$ は

$$\nabla p' \approx -\rho_0 \, \partial u / \partial t - \rho' \, \partial u / \partial t - (\rho_0 / 2) \nabla u^2$$

$$\approx -\rho_0 \, \partial u / \partial t + 1 / (2 \rho_0 c^2) \nabla p'^2 + (\rho' / 2) \nabla u^2 - (\rho_0 / 2) \nabla u^2$$

となる。ここで、微小項である右辺第 2 項を無視することにより

$$\nabla p' \approx -\rho_0 \, \partial u / \partial t + 1 / (2 \rho_0 c^2) \nabla p'^2 - (\rho_0 / 2) \nabla u^2$$

となる。ここで、 $-\rho_0 \partial u / \partial t$ は u が小さい場合における音圧 p_1 により $-\rho_0 \partial u / \partial t = \nabla p_1$ となることから

$$\nabla p' \approx \nabla p_1 + 1 / (2 \rho_0 c^2) \nabla p'^2 - (\rho_0 / 2) \nabla u^2$$

となる。ここで、この両辺を体積積分することにより、勾配に対する体積積分公式から、表面

における外向き法線ベクトルを \mathbf{n} として

$$\iiint_V \nabla p' \, dV = \iint_{S_0} p' \, \mathbf{n} \, dS$$

であり

$$\iiint_V \nabla p' \, dV = \iint_{S_0} p' \, \mathbf{n} \, dS = \iint_{S_0} \{ \nabla p_1 + 1 / (2 \rho_0 c^2) \nabla p'^2 - (\rho_0 / 2) \nabla u^2 \} \, \mathbf{n} \, dS$$

となる。このように、勾配の体積積分は、積分

領域表面 S_0 に垂直なベクトル $\mathbf{p}' \mathbf{n}$ の面積積分となる。ここで、 \mathbf{p}' は音波による圧力であり、境界表面に垂直に作用する。この、境界表面の全面積に作用する垂直圧力の全積分量を \mathbf{F}_n とすると

$$\mathbf{F}_n = \iint_{S_0} p' \, \mathbf{n} \, dS \approx \iint_{S_0} \{ p_1 + 1 / (2 \rho_0 c^2) p'^2 - (\rho_0 / 2) u^2 \} \, \mathbf{n} \, dS$$

となる。この \mathbf{F}_n が、境界面 S_0 において、媒質粒子に垂直に作用する、2 次の微小項までを考慮した音圧である。この \mathbf{F}_n は、一様媒体中の境界面 S_0 において、音波伝搬媒体自体に作用する音

圧である。

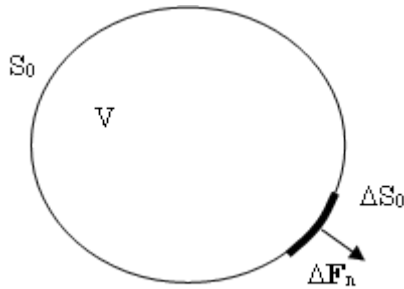


Fig.2.12 音波伝搬媒質に作用する音圧

・音圧の時間平均による圧力(時間平均音圧)
境界面 S_0 において、音波伝搬媒体自体に作用する音圧 \mathbf{F}_n は、入射音波の音圧 p_1 を含めて
$$\mathbf{F}_n = \iint_{S_0} p' \mathbf{n} dS \approx \iint_{S_0} \{ p_1 + 1/(2\rho_0 c^2) p'^2 - (\rho_0/2) u^2 \} \mathbf{n} dS$$

である。この式における、両辺の時間平均を取ると、正弦波である入射音波 p_1 による項は消滅し、 $\langle \rangle$ を時間平均として表すと

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{nt} &= \langle \mathbf{F}_n \rangle \approx \iint_{S_0} \{ p_1 + 1/(2\rho_0 c^2) p'^2 - (\rho_0/2) u^2 \} \mathbf{n} dS \\ &\approx \iint_{S_0} \{ 1/(2\rho_0 c^2) p'^2 - (\rho_0/2) u^2 \} \mathbf{n} dS \\ &= \iint_{S_0} \{ 1/(2\rho_0 c^2) \langle p'^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u^2 \rangle \} \mathbf{n} dS \\ &\approx \iint_{S_0} \{ 1/(2\rho_0 c^2) \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \} \mathbf{n} dS \end{aligned}$$

となる。このように、時間平均処理により消滅しない力 \mathbf{F}_{nt} が存在し、この時間平均力 \mathbf{F}_{nt} が境界面 S_0 に存在する音波伝搬媒体に作用する音響放射力である。ここで、平面進行波の場合には

$$p_1 = u_1 z = u_1 (\rho_0 c)$$

から
 $\mathbf{F}_{nt} \approx 0$ となる。

・対象物表面に発生する駆動圧(音響放射圧)
自由空間でなく、対象とする物体が存在する場合に、物体表面に形成される音響駆動力を求める。対象物体を運動物体とすると、物体表面 $S(t)$ に発生する音響駆動力 \mathbf{F} は、音圧により音波伝搬媒体表面 S_0 に発生する力 \mathbf{F}_n に、運動により発生する力 \mathbf{F}_m が加算されることになり

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_m$$

となる。ここで、 \mathbf{F}_n は、すでに求めたように
$$\mathbf{F}_n = \iint_{S_0} \{ p_1 + 1/(2\rho_0 c^2) p'^2 - (\rho_0/2) u^2 \} \mathbf{n} dS$$

であり、境界面に垂直な力である。以下に、運動による力 \mathbf{F}_m を求める。運動による力 \mathbf{F}_m は、運動の法則から、運動量 \mathbf{Q} の単位時間当たりの

増加量であり

$$\mathbf{F}_m = d\mathbf{Q}/dt$$

である。ここで、境界面の運動速度 \mathbf{u}_s は、境界面の連続条件から、境界面位置における粒子速度を \mathbf{u} として

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_n = \mathbf{u} \cos\theta$$

である。ここで、 \mathbf{u}_n は境界面運動速度の法線方向成分である。従って、時間 Δt あたりに境界面が移動する距離 ΔL は

$$\Delta L = \mathbf{u}_s \Delta t = \mathbf{u} \cos\theta \Delta t$$

である。

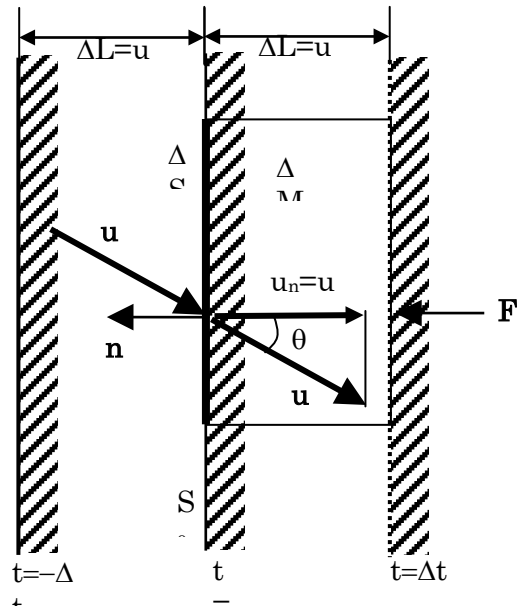


Fig.2.13 境界運動による運動量の導出

従って、微小面積 ΔS 、時間 Δt あたりの中性位置 S_0 からの増加質量 ΔM は

$$\Delta M = \rho_0 \Delta S \Delta L = \rho_0 \Delta S \mathbf{u} \cos\theta \Delta t$$

となる。従って、物体面が ΔL だけ移動することによる微小面積 ΔS 、時間 Δt 当りの運動量増加 \mathbf{Q}' は、A-B 間に存在する媒体の運動速度は \mathbf{u} である (\mathbf{u}_n ではない) ことから

$$\mathbf{Q}' = \Delta M \mathbf{u} = \rho_0 \Delta S \mathbf{u} \mathbf{u} \cos\theta \Delta t$$

である。従って、境界面全面に関する運動量の変化 \mathbf{Q} は、境界面の全体面積 S_0 につき積分することにより、時間 Δt 当り

$$\Delta \mathbf{Q} = \iint_{S_0} \mathbf{Q}' = \iint_{S_0} \Delta M \mathbf{u} = \iint_{S_0} \rho_0 \mathbf{u} \mathbf{u} \cos\theta \Delta t dS$$

となる。従って、単位時間当りの運動量変化である、運動による力 \mathbf{F}_m は、微分表示することにより

$$\mathbf{F}_m = \Delta \mathbf{Q} / \Delta t = d\mathbf{Q} / dt = \iint_{S_0} \rho_0 \mathbf{u} \mathbf{u} \cos\theta dS = \iint_{S_0} \rho_0 \mathbf{u} \mathbf{u}_n dS$$

となる。この力 \mathbf{F}_m は粒子速度 \mathbf{u} の方向を向いた力である。この関係から、運動する物体表面

$$\mathbf{F} \approx \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_m \approx \iint_{S_0} \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} p^2 - (\rho_0/2) u^2 \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \mathbf{u} u_n dS$$

となる。この式における、両辺の時間平均を取ると、正弦波である p_1 による項は消滅し、 $\langle \rangle$ を時間平均として表すと

$$\mathbf{F}_t = \langle \mathbf{F} \rangle \approx \iint_{S_0} \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} p_1^2 - (\rho_0/2) u_1^2 \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle dS$$

$$\begin{aligned} &\approx \iint_{S_0} \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle dS \\ &= \iint_{S_0} \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u} u_n \rangle dS \\ &\approx \iint_{S_0} \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle dS \end{aligned}$$

となる。このように、時間平均処理により消滅しない力 \mathbf{F}_t が存在し、この時間平均力 \mathbf{F}_t が、速度ベクトル \mathbf{u}_1 で運動する運動物体の表面全体に作用する音響放射力である。ここで、 u_{1n} は速度ベクトル \mathbf{u}_1 の境界面法線 (\mathbf{n}) 方向成分の大きさである。

・境界面の状況と発生する音響放射圧（直接計算による方法）

ここでは最初に直接計算による方法を用いて、進行波音場に想定した透明境界面に対する音響放射圧について考える。Fig.2.14 における、位置 0 に、音響的に透明な仮想的観測面 X を想定する。このような観測条件においては、反射波は発生しないため、観測面 X において観測される放射圧は、静止観測位置における音響放射圧に相当する。このような観測面 X における音圧 p_x および粒子速度 u_x は、入射音波そのもので

$$\begin{aligned} u_1 &= u_0 \sin(\omega t - kx) \\ p_1 &= p_0 \sin(\omega t - kx) = u_1 z_0 = u_1 \rho_0 c \end{aligned}$$

となる。ここで、音響放射力は \mathbf{F}_t

$$\mathbf{F}_t \approx \iint_{S_0} \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle dS$$

であることから、進行波音場における、単位面積当たりの音響放射力である音響放射圧 P_P は $P_P = F_t/S_0 \approx (1/S_0) \iint_{S_0} \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle dS$

$$= \left| \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle \right|$$

ここで $||$ は観測面に関する平均を示す。ま

た、平面波においては $p_1 = u_1 \rho_0 c$ から、 $1/(2\rho_0 c^2) p_1^2 = (\rho_0/2) u_1^2$ である。従って $P_P = F_t/S_0 \approx \left| \left\{ (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle \right| = \left| \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle \right| = \left| \rho_0 \langle |\mathbf{u}_1|^2 \rangle \cos\theta \right|$ であり、粒子速度 \mathbf{u}_1 の方向を向いた力である。ここで、 θ は進行波波面と観測面の傾斜角である。

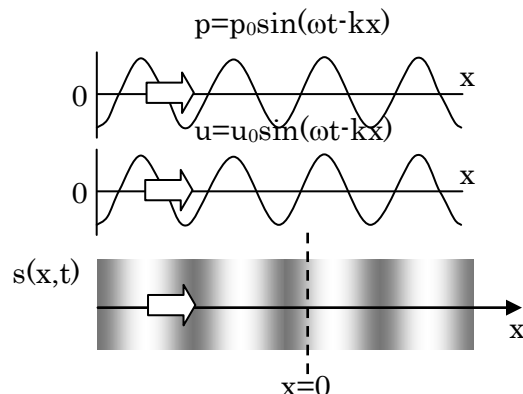


Fig.2.14 進行波音場

次に Fig.2.15 における位置 0 に、音響的に透明な仮想的観測面 X を想定する。このような観測条件においては、反射波は発生しないため、観測面 X において観測される放射圧は、静止観測位置における音響放射圧に相当する。このような観測面 X における音圧 p_x および粒子速度 u_x は、入射音波そのもので

$$\begin{aligned} u_1 &= u_0 \sin(\omega t - kx) \\ p_1 &= p_0 \sin(\omega t - kx) = u_x z_0 \end{aligned}$$

となる。この音場は進行波の場合と同一であることから、無反射吸収面に作用する音響放射圧 P_A も同様に $P_A = \left| \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 u_{1n} \rangle \right| = \left| \rho_0 \langle |\mathbf{u}_1|^2 \rangle \cos\theta \right|$ であり、粒子速度 \mathbf{u}_1 の方向を向いた力である。ここで、 θ は進行波波面と観測面の傾斜角である。

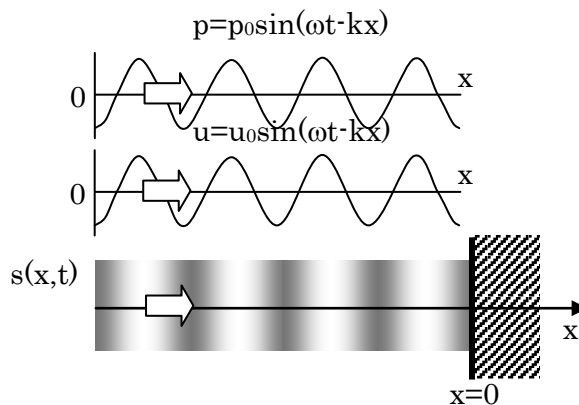


Fig.2.15 無反射完全吸収面

ig.2.16(a)における、位置 0 に、不動の観測面 X を想定する。このような観測条件における音圧分布は、完全反射により同位相の反射波 $p_{RH}(x,t)$ が逆方向に伝搬することから

$$p_H(x,t) = p(x,t) + p_{RH}(x,t) = p(x,t) + p(-x,t) \\ = p_0 \{ \sin(\omega t - kx) + \sin(\omega t + kx) \}$$

$$u_H(x,t) = u(x,t) + u_{RH}(x,t) = u(x,t) - u(-x,t) \\ = u_0 \{ \sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx) \}$$

である。ここで、個々の波動成分は、それぞれ平面進行波であることから

$$p_1 = u_1 \rho_0 c$$

となる。ここで、停止境界面における、単位面積当たりの単位面積当たりの音響放射力である音響放射圧 P_{FIX} は、界面において粒子速度が 0 であることから $u_1 = 0$ であり

$$P_{FIX} = \left| \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} \right. \\ \left. + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_{1n} \rangle \right|$$

$$= \left| \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} \right|$$

ここで、完全反射の場合には界面の音圧が $2p_1$ となっていることから、完全反射体における放射圧 P_R は

$$P_{RX} = \left| \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle (2p_1)^2 \rangle \right\} \mathbf{n} \right|$$

$$= \left| \left\{ \frac{2}{\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} \right|$$

ここで、 $p_1 = u_1 \rho_0 c$ から、 $2/(\rho_0 c^2) p_1^2 = 2\rho_0 u_1^2$ である。従って

$$P_{RX} = \left| \left\{ 2\rho_0 \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} \right|$$

となる。このように、固定完全反射境界面への垂直入射における放射圧は、無反射完全吸収面への垂直入射における放射圧 (P_A , $\theta=0$) の 2 倍となる。

Fig.2.17 における、位置 0 に、自由な観測面 X を想定する。このような観測条件における音圧分布は、完全反射により逆位相の反射波 $p_{RH}(x,t)$ が逆方向に伝搬することから

$$p_F(x,t) = p(x,t) + p_{RF}(x,t) \\ = p(x,t) - p(-x,t)$$

$$= p_0 \{ \sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx) \}$$

$$u_F(x,t) = u(x,t) - u_{RF}(x,t)$$

$$= u(x,t) + u(-x,t)$$

$$= u_0 \{ \sin(\omega t - kx) + \sin(\omega t + kx) \}$$

となる。ここで、自由境界面における、単位面積当たりの単位面積当たりの音響放射力である音響放射圧 P_{FRE} は、界面において音圧が 0 であることから $p_1 = 0$ であり

$$P_{FIX} = \left| \left\{ \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p_1^2 \rangle - (\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_{1n} \rangle \right|$$

$$= \left| \left\{ -(\rho_0/2) \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_{1n} \rangle \right|$$

ここで、自由反射音場における、単位面積当たりの単位面積当たりの音響放射力である音響放射圧 P_{RF} は、垂直入射とすると、界面において粒子速度が 2 倍であることから $u_1 = 2u$ であり

$$P_{RF} = \left| \left\{ -(\rho_0/2) \langle (2u_1)^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle 4\mathbf{u}_1 \mathbf{u}_{1n} \rangle \right|$$

$$= \left| \left\{ -2\rho_0 \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} + \rho_0 \langle 4\mathbf{u}_1 \mathbf{u}_{1n} \rangle \right|$$

となる。この P_{RF} は、入射角に依存する力である。ここで、垂直入射とすると、 \mathbf{n} と \mathbf{u}_1 の方向が一致することから

$$P_{RFn} = \left| \left\{ 2\rho_0 \langle u_1^2 \rangle \right\} \mathbf{n} \right|$$

となる。このように、自由完全反射境界面への垂直入射における放射圧 P_{RFn} も、吸収面の放射圧の 2 倍となる。

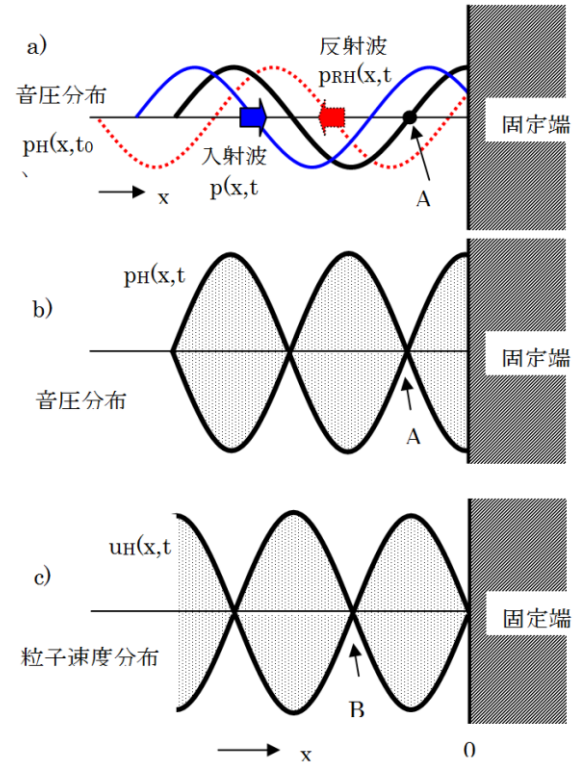
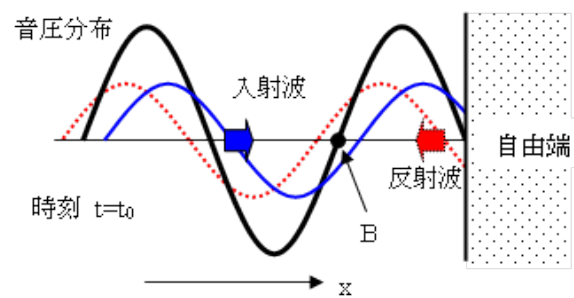


Fig.2.16 固定完全反射面での音響放射圧



ig.2.17 自由完全反射面での音響放射圧

次に平均エネルギー密度による評価を考える。音波を 1 次元平面進行波とすると、音圧 p および粒子速度 u は

$$u = u_0 \sin(\omega t - kX)$$

$$p = p_0 \sin(\omega t - kX) = u z_0$$

となる。このような 1 次元平面進行波においては、単位時間に単位面積を通過するエネルギー量 (単位面積当たりの通過パワー: パワー密度) である音波強度が定義できる。この音波強度を

I は、音圧の瞬時値を p とし、粒子速度の瞬時値を u とすると

$$I = pu = zu^2 = p^2/z$$

であり、音圧の瞬時値 p と粒子速度の瞬時値 u の積あるいは、それぞれの2乗により与えられる。ここで、 $z(\rho c, \rho$: 密度、 c : 音速)は伝搬媒質の固有音響インピーダンスであり、音波強度 I の単位は $[W/m^2 = J/(s \cdot m^2)]$ となる。ここで、音波強度の時間平均値は、 $\langle \rangle$ を時間平均処理として

$$\langle I \rangle = \langle pu \rangle = z_0 \langle u^2 \rangle = \langle p^2 \rangle / z_0 = (1/2) \rho c u_0^2 = (1/2) p_0^2 / (\rho c)$$

となる。ここで、音速が c であることから、音波強度 I (単位時間に単位面積を通過するエネルギー量である) は、単位断面積で長さ $c[m]$ の立体中に分布する、音波の総エネルギーに相当する。したがって、単位体積当りの平均エネルギー量 (エネルギー密度) を $E [J/m^3]$ とすると $E c = \langle I \rangle$ であり

$$E = \langle I \rangle / c$$

$$= \rho \langle u^2 \rangle = (\rho/2) u_0^2$$

$$= \langle p^2 \rangle / (\rho c^2) = (1/2) p_0^2 / (\rho c^2)$$

$$[J/(s \cdot m^2)(s/m) = J/m^3]$$

となる。このようなエネルギー密度 E は、平面進行波に対して定義される。また、エネルギー密度 E の単位は $[J/m^3 = Nm/m^3 = N/m^2 = Pa$ (パスカル)] であり、単位面積当りの力は圧力であることから、エネルギー密度 E は圧力の次元を有している。

面進行波に関してはエネルギー密度が定義可能である。音場を平面進行波に分解可能であれば、音響放射圧をエネルギー密度により表現可能となる。

平面進行波の場合には

$$p_1 = u_1 z = u_1 (\rho_0 c)$$

から

$$E = \rho_0 \langle |u_1|^2 \rangle$$

となる。一方、平面進行波の場合における仮想境界面に対する音響放射圧 P_P は、入射角を θ とし、境界面の単位面積当り

$$P_P = F_t / S_0 = | \rho_0 \langle u_{1n} | u_1 | \rangle | = | \rho_0 \langle u_1 u_1 \rangle \cos \theta |$$

と与えられる。従って、エネルギー密度 E により

$$P_P = | \rho_0 \langle u_1 u_1 \rangle \cos \theta | = E \cos \theta$$

となる。この式に示された通り、音響放射圧 P_P は、粒子速度 u_1 の方向を向いた力である。このように、単一の平面進行波により形成される音響放射圧 P_P がエネルギー密度 E と入射角のみにより、 $E \cos \theta$ として与えられる。

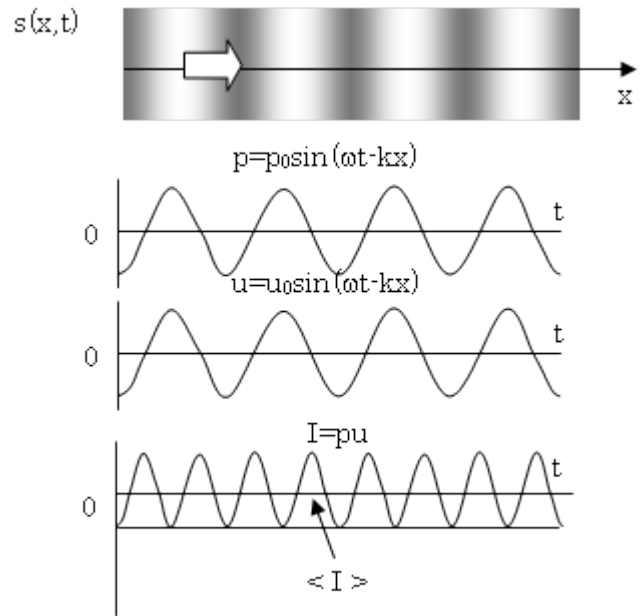


Fig.2.18 平均エネルギー密度による評価

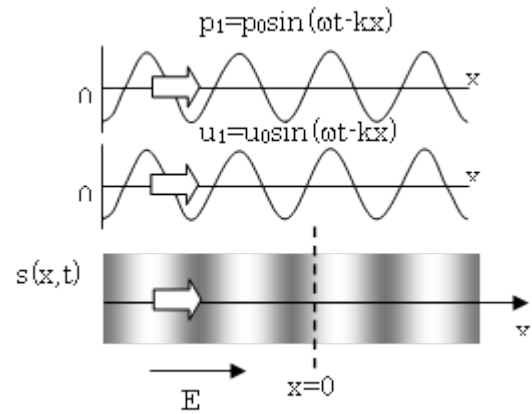


Fig.2.19 仮想境界面に対する音響放射圧

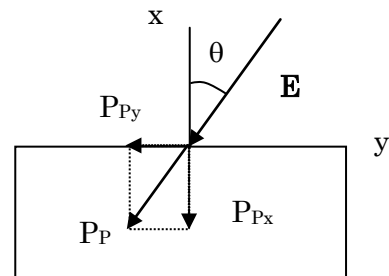


Fig.2.20 仮想境界面に対する音響放射圧

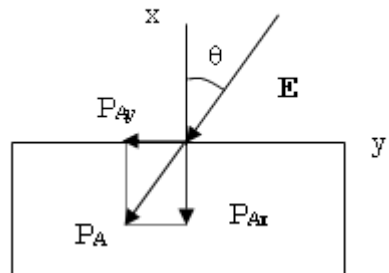


Fig.2.21 無反射完全吸収面上の音響放射圧

従って、入射音波を個々の平面進行波に分解できる場合には、個々の平面進行波による音響放射圧を加算することにより全体の音響放射圧を算定出来ることとなる。平面進行波による音響放射圧 P_P は、粒子速度 \mathbf{u}_1 の方向を向いた力であることから、音響放射圧 P_P による、面と垂直な方向に作用する音響放射圧成分 P_{Px} は

$$P_{Px} = P_P \cos\theta = E \cos^2\theta$$

また、面と平行な方向に関しては

$$P_{Py} = P_P \sin\theta = E \cos\theta \sin\theta$$

として求まる。ここで、 P_P は平面進行波の音響放射圧であり

$$P_P = \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1 \rangle \cos\theta = E \cos\theta$$

である。

次に無反射完全吸収面における音響放射圧について考える。無反射完全吸収面においては、反射波は発生しないため、単一平面進行波が入射する状況における音響放射圧と同一の音響放射圧が発生する。従って、無反射吸収面に作用する音響放射圧 P_A も同様に

$$P_A = P_P \cos\theta = E \cos\theta$$

となる。また、面と垂直な方向に作用する音響放射圧成分 P_{Ax} は

$$P_{Ax} = P_P \cos\theta = E \cos^2\theta$$

また、面と平行な方向に関しては

$$P_{Ay} = P_A \sin\theta = E \cos\theta \sin\theta$$

として、同一の値となる。ここで、 θ は境界面への入射角である。ここで、 P_P は平面進行波の音響放射圧であり

$$P_P = \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1 \rangle \cos\theta = E \cos\theta$$

である。

固定完全反射面においては同一振幅の反射音波が発生するため、面と垂直な方向に作用する音響放射圧成分 P_{0x} は、入射波による P_{Ix} と、は反射波による P_{Rx} とにより

$$P_{0x} = P_{Ix} + P_{Rx}$$

ここで

$$P_{Ix} = P_{Rx} = P_P \cos\theta = E \cos^2\theta$$

従って

$$P_{0x} = P_{Ix} + P_{Rx} = 2E \cos^2\theta$$

となる。このように、平均エネルギー密度による計算によっても、固定完全反射面における音響放射圧は、無反射完全吸収面における音響放射圧の2倍となる。一方、面と平行な方向成分に関しては、両者が相殺され発生しない。ここで、 P_P は平面進行波の音響放射圧であり

$$P_P = \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1 \rangle \cos\theta = E \cos\theta$$

である。この音響放射圧が、傾斜入射において、コンクリート表面に発生する音響駆動力である。

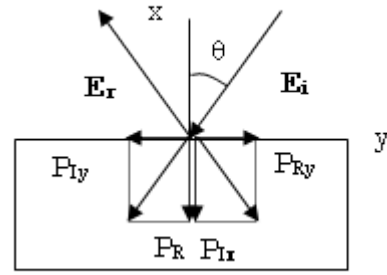


Fig.2.22 固定完全反射面における音響放射圧

自由完全反射面においても、同一振幅の反射音波が発生するため、音響放射圧は、固定完全反射面における音響放射圧と一致する。自由完全反射面と垂直な方向に作用する音響放射圧成分 P_{Ix} は、入射波による P_{Ix} と、は反射波による P_{Rx} とにより

$$P_{Ix} = P_{Ix} + P_{Rx}$$

$$P_{Ix} = P_{Rx} = P_P \cos\theta = E \cos^2\theta$$

従って

$$P_{Ix} = P_{Ix} + P_{Rx} = 2E \cos^2\theta$$

となる。このように、平均エネルギー密度による計算によっても、自由完全反射面における音響放射圧は、無反射完全吸収面における音響放射圧の2倍となる。ここで、 P_P は平面進行波の音響放射圧であり

$$P_P = \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1 \rangle \cos\theta = E \cos\theta$$

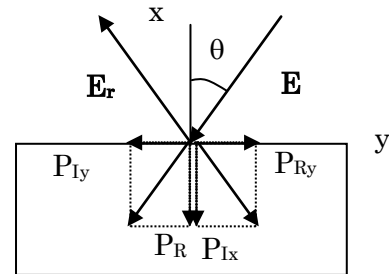


Fig.2.23 自由完全反射面における音響放射圧

斜め入射透過面においては同一振幅の反射音波と屈折した透過波が発生するため、面と垂直な方向に作用する音響放射圧成分 P_{0x} は、入射波による P_{Ix} と、反射波による P_{Rx} の他に、透過波による P_{Tx} が存在し

$$P_{0x} = P_{Ix} + P_{Rx} - P_{Tx}$$

ここで、 θ を入射及び反射角、 ϕ を透過波の入射角とし、それぞれの成分が有するエネルギー密度を E_I, E_R, E_T 、それぞれの放射力を P_{PI}, P_{PR}, P_{PT} とすると

$$P_{Ix} = P_{PI} \cos\theta = E_I \cos^2\theta$$

$$P_{Rx} = P_{PR} \cos \theta = E_R \cos^2 \theta$$

$$P_{Tx} = P_{PT} \cos \theta = E_T \cos^2 \theta$$

である。従って、境界面へ作用する音響放射圧の法線方向成分 P_{0x} は

$$P_{0x} = P_{Ix} + P_{Rx} + P_{Tx} = (E_I + E_R) \cos^2 \theta - E_T \cos^2 \theta$$

となる。ここで、 $P_{P\alpha}$ は各平面進行波成分による個々の音響放射圧成分であり

$$P_{P\alpha} = \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{u}_{1\alpha} \mathbf{u}_{1\alpha} \rangle \cos \theta = E_\alpha \cos \theta$$

である。

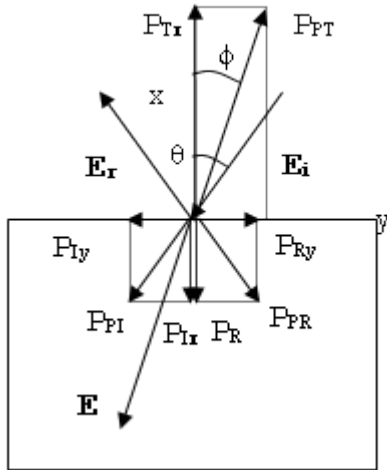


Fig.2.24 斜め入射透過面における音響放射圧

(3) 境界面の状況と発生する音響放射圧

・ 直流放射圧の入射角依存性

固定完全反射面においては同一振幅の反射音波が発生するため、面と垂直な方向に作用する音響放射圧成分 P_{0x} は、入射波による P_{Ix} と、は反射波による P_{Rx} とにより

$$P_{0x} = P_{Ix} + P_{Rx}$$

ここで

$$P_{Ix} = P_{Rx} = P_P \cos \theta = E \cos^2 \theta$$

従って

$$P_{0x} = P_{Ix} + P_{Rx} = 2E \cos^2 \theta$$

となる。一方、面と平行な方向成分に関しては、両者が相殺され発生しない。ここで、 P_P は平面進行波の音響放射圧であり

$$P_P = \frac{1}{2} \rho_0 \langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1 \rangle \cos \theta = E \cos \theta$$

である。この音響放射圧が、角度 θ にて、コンクリート表面に入射する音波により形成される音響駆動力である。この関係から、45度方向の入射において半減する、広い許容入射角を有することとなり、直流成分の音響放射圧に関しては、入射角依存性をほぼ無視することが出来る。

・ 交流駆動放射圧の入射角依存性

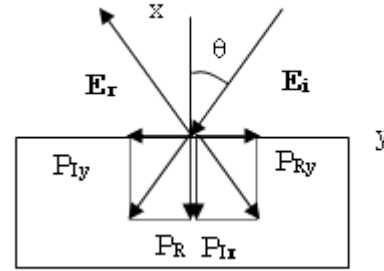


Fig.2.25 直流放射圧の入射角依存性

交流駆動力に関しては位相差による打ち消し効果が発生し、入射角に強い制限が加わる。以下に、交流駆動における限界入射角につき検討する。

一様振動モードを仮定すると、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。従って、Fig.2.26 に示すように、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。

ここで、欠陥径を A 、波長を λ 、超音波ビーム幅を D (通常は直径 10 cm 程度) とし、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、Fig.2.26 の関係から

$$D \tan \theta_H = \lambda$$

となり、 θ_H は欠陥径 A とは無関係となる。一方、従来方式における、広いビーム (通常は直径 3 m 程度) による駆動の場合においては、Fig.2.27 の状況となる。この関係から、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

$$A \sin \theta_L = \lambda$$

となり、 θ_L は欠陥径 A の関数となる。この関係から、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。

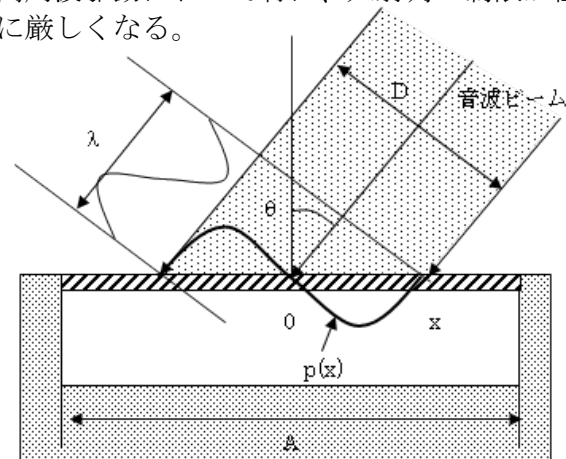


Fig.2.26 狭ビーム音波入射と駆動力

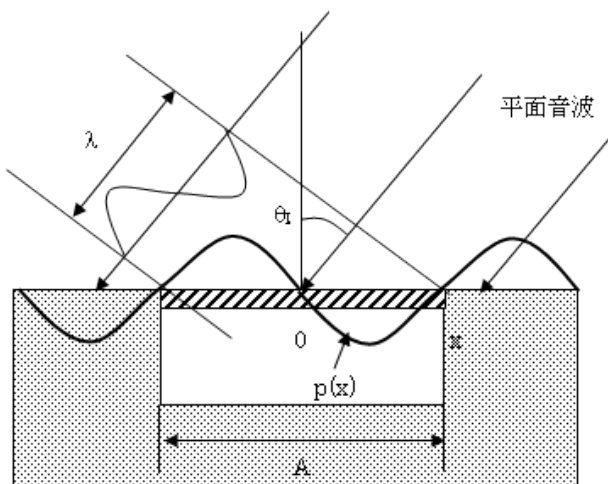


Fig. 2.27 一様音波入射と駆動力

・狭ビーム音波入射の適用限界条件

ここで、Fig.2.25 の関係は、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 Fig.2.28 となる。Fig.2.28 の条件は、一般的な角度 θ に関して

$$D/\cos\theta < A$$

あるいは

$$D < A \cos\theta$$

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

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

である。従って

$$D \tan\theta_H < \lambda$$

であり、Fig.2.27 における関係と一致する。

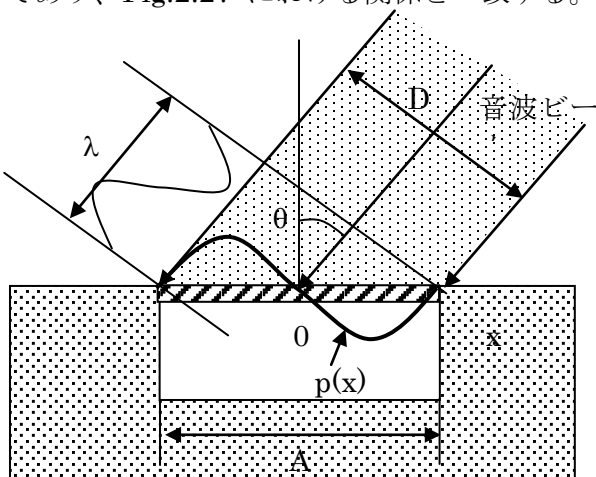


Fig.2.28 狭ビーム音波入射条件の適用限界

したがって、図の限界角 θ_H を与える特性が適用可能領域の境界と一致する。

・本方式と従来方式による許容入射角の比較

以上の関係をまとめると Fig.2.29 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、Fig.2.29 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、超音波放射圧による狭ビーム照射による本方式は、Fig.2.29 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となる。

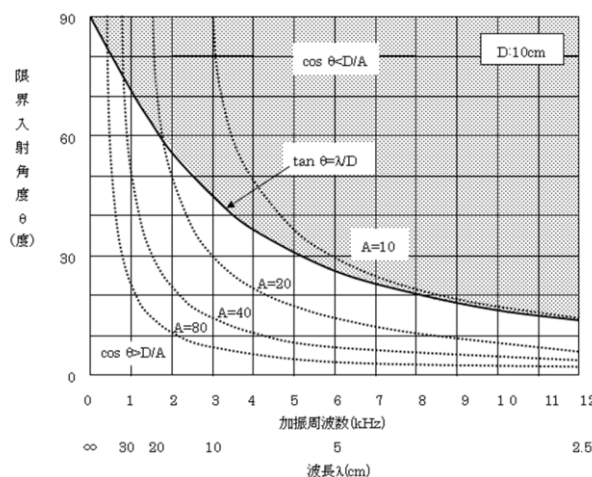


Fig.2.29 音響放射圧駆動と低周波音波駆動法における限界入射角

D : 超音波照射径,10cm. A : 対象欠陥径(cm)

2.6 トーンバースト波を用いたS/N比の改善⁵⁶⁾

(1) 従来のチャープ波を用いた場合の問題点

従来法の基本構成を Fig. 2.30 に示す。レーザ計測の光学ノイズの要因として、レーザヘッド自体が振動してしまう事が挙げられる。音響加振でチャープ波を用いる場合、音源からの直達波および対象面からの反射波成分によりレーザヘッドが振動してしまうという問題点がある。これらの振動は光学ノイズとなり、レーザの検出感度を低下させる原因となる。音源からの直達波および対象面からの反射波成分に起因する。2.1 節で述べたように、本手法では欠陥部のたわみ振動を励振し、その信号を検出する。したがって、たわみ振動の信号は欠陥の平面規模が小さいほど、あるいは深くなるほど小さくなる。信号を強くするには音圧を上げるか、あるいは加振時間を長くする必要がある。しかしながらこれらの方法では結果的にレーザヘッド自体も振動させられてしまう。

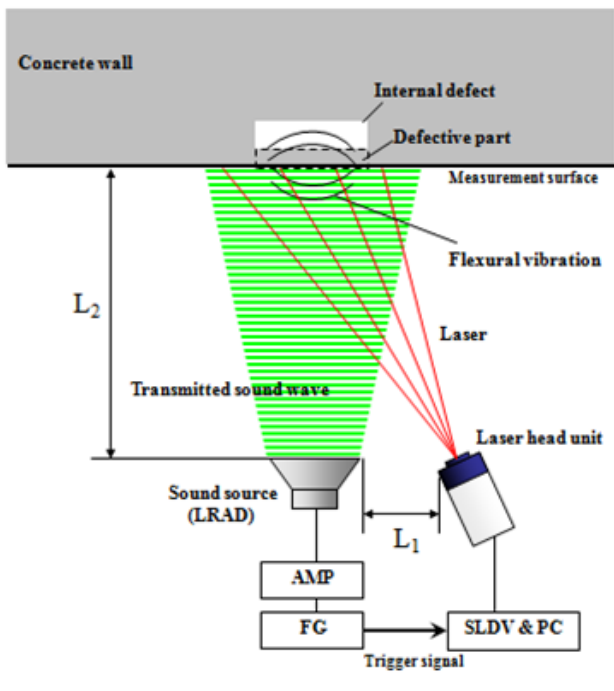


Fig.2.30 Fundamental configuration of our previous method.

(2) 音波とレーザーの伝搬速度差を用いた時間分離

Figure 2.31 に直達波および反射波の悪影響を取り除く構成例を示す。ここで、信号 s_n はパルス列である。このパルスは欠陥部の共振周波数成分を含み、時間間隔 T_0 で繰り返されるものとする。対象面の振動は SLDV により計測信号 r_n として検出される。この計測信号 r_n は主に直達波によるノイズ信号 r_{nA} 、欠陥部の目的信号 r_{nB} および反射波によるノイズ信号 r_{nC} により構成される。空気中の音速を c とすると、各信号 r_{1a} , r_{1b} および r_{1c} はそれぞれ L_1/c , L_2/c および $2L_1/c$ となる。目的信号 r_{1B} の出現時間は反射波の振動ノイズ r_{1C} の半分の時間であり、これらの信号は時間的に分離可能である。目的信号 r_{nB} および 振動ノイズ r_{nA} は式 (2.4) で示される時間的条件を満足する事で分離可能である。

$$\frac{L_1}{c} + T_1 < \frac{L_2}{c} \quad (2.4)$$

ここで、目的信号の持続時間 T_2 は目的信号の帯域幅の逆数により与えられる。我々の過去の研究において、通常、コンクリートのはく離欠陥の場合この持続時間 T_2 は 10 ms 程度であることがわかっている。したがって、 r_{nB} と r_{nC} を時間的に分離するため、式 (2.5) の時間的条件もまた必要になる。

$$\frac{L_2}{c} + T_2 < \frac{2L_2}{c} \quad (2.5)$$

加えて、各送波の独立性を保つため、(2.6)式を満足させるインターバル時間 T_0 も必要となる。

$$\frac{2L_2}{c} < T_0 \quad (2.6)$$

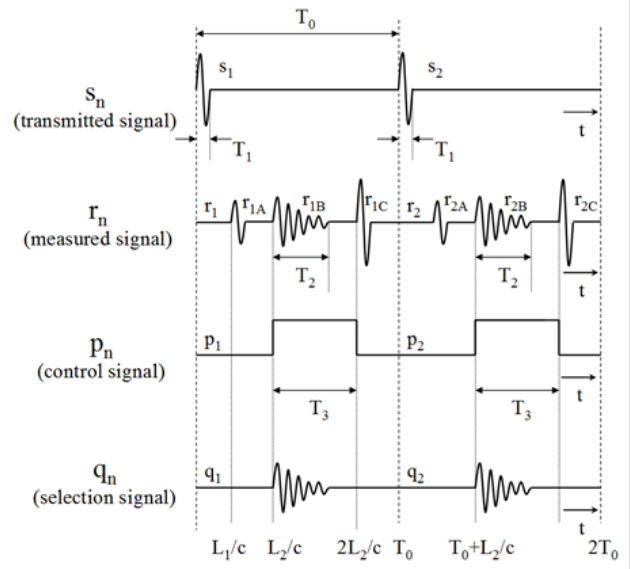


Fig.2.31 Configuration example to eliminate harmful of direct and reflected wave.

この時間分離法において、上記3つの時間的条件を満足させる必要がある。そして目的信号は制御信号 p_n により分離抽出される。制御信号 p_n は時間幅 T_3 のゲート信号により構成される。 T_3 の開始時間および終了時間はそれぞれ L_2/c および $2L_2/c$ である。距離 L_1 および L_2 はレーザー距計等により事前に把握可能である。この制御信号を用いることで、不必要なノイズ信号が除去される。

(3) 広帯域トーンバースト波送波法

実際の検査において、欠陥部の固有振動数は不明である。したがって、送信音波の持つ周波数成分が欠陥部の固有振動数の帯域外であった場合加振することは出来ない。このような理由から、広帯域トーンバースト波送波法を提案する。提案手法ではFig.2.32に示すように各々異なった中心周波数を有するパルス波を逐次的に送信することで広帯域の周波数成分を得る。各送信パルスの帯域幅 W_s はパルスの持続時間 T_1 により与えられる。また、送信パルスは特定周波数成分が強勢であり、それぞれ不足した周

波数成分は送信パルス間の周波数成分をオーバーラップさせる事で満足させる。このような送波方法と前節で述べた時間分離法を組み合わせることで、高精度かつ見落としのない欠陥検出が可能となる。

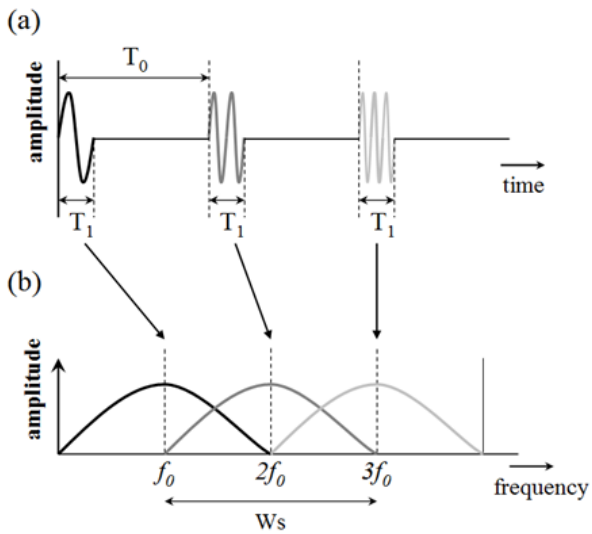


Fig. 2.32 Example of multi frequency tone burst transmission method.

(4) 広帯域トーンバースト波を用いた残響ノイズの除去

音響加振法を閉鎖空間へ適用する場合、音源からの直達波および対象面からの反射波のみでなく、周囲構造物からの反射波(残響)もレーザーヘッドに入射する。この残響による振動もまた光学ノイズとなり、検出精度を低下させる要因となる。このような問題に対し、時間分離法に加え時間-周波数分離法を適用する。Fig. 2.33に残響によるノイズ信号を取り除く時間-周波数分離法の構成例を示す。残響によるノイズ信号は図中 q_{2B} および q_{3B} として検出される。このように、ノイズによる残響信号は各送波に対し遅れた周期で現れ、時間ゲートでは取り除く事が出来ない。しかしながら、ノイズ信号の周波数特性 q_{nB} は送信信号 s_n の周波数特性と異なる。提案手法では周波数制御信号 p_{Fn} により目的信号 q_{Fn} を取得する。周波数制御信号 p_{Fn} の帯域幅はパルスの各送信周期に同期して変化し、各送波の目的の周波数帯域のみを抽出する。このように、時間-周波数分離法を用いることで、より残響によるノイズ信号 q_{nB} は除去され、より高精度な欠陥検出が可能となる。

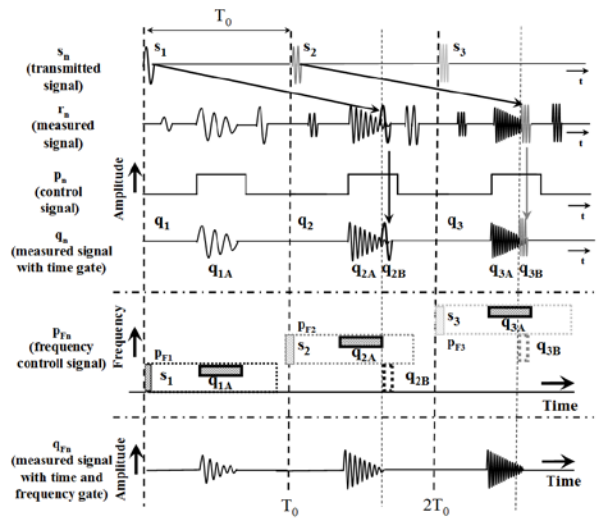


Fig. 2.33 Configuration example to eliminate harmful of reverberation.

第3章 コンクリート供試体を用いた各種検証実験

3.1 円形供試体について

非接触音響探査法を用いた各種検証実験を実施するために、埋設深さと直径を変化させた円形欠陥モデル（発泡スチロール25mm厚）を埋設したコンクリート供試体（ $2 \times 1.5 \times 0.3 \text{m}^3$ ）を製作した。配置図および写真をFig.5-1(a)および(b)に示す。円形発泡スチロールの直径および深さは直径50mmのものが深さ10、20、40及び60mmに、直径100mmのものが深さ20、40、60、80mmに直径150、200および300mmのものが深さ40、60、80、100mmの位置に埋設されている。

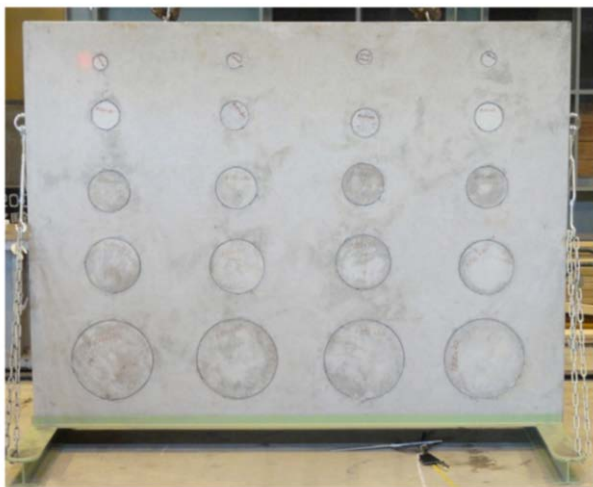
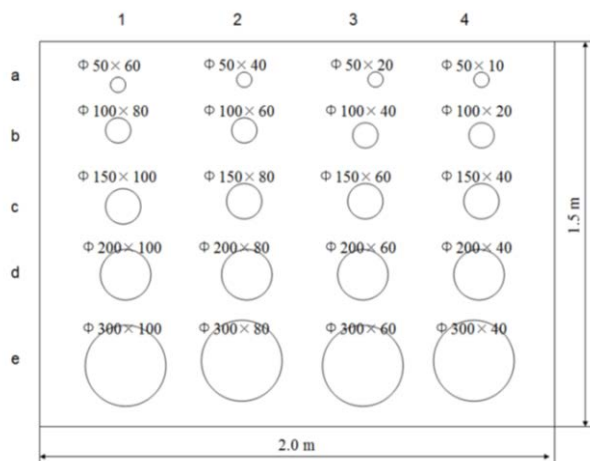


Fig.3.1 コンクリート供試体の配置図, 円形欠

(1) 叩き点検法との比較

実験セットアップ図を図.1に示す。コンクリート供試体とLRAD(LRAD 300X, LRAD Corp.)との距離は5mとして正対させ、SLDV(PSV400-H4, Polytec Co. Ltd.)はLRADのやや後方に配置した。出力した音圧は供試体表面付近で約100dB程度とした。探査手順としては、欠陥部中心と周辺の健全部の2点を設定する。次に周波数を500Hzから8kHz程度まで変化させた短いパルス波により、欠陥部と健全部とを比較して卓越したたわみ共振周波数帯が検出されるかどうかを調べる。卓越したたわみ共振周波数帯が検出された場合には、さらに周波数を微調整して欠陥部のたわみ共振周波数を検出する。

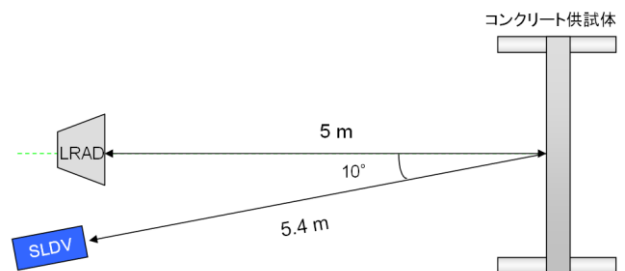


Fig.3.2 実験セットアップ

円形欠陥モデルを用いた場合の探査結果をTable 3.1に示す。上段は叩き点検法による検出の可否(3名でブラインドテストを行い、○は検出可能、△は判定が分かれるもの、×: 検出不可)、下段は本手法による検出の可否(○は検出可能、かつSLDVの共振ピーク以上の共振ピークを検出した場合で、その共振周波数を表示、△はSLDVの共振ピークと同程度以下のピークを検出した場合、×: 検出不可を示す)を示している。表より、両手法ともに加振方法に違いがあるにも関わらず同様な探査性能を示しており、反応を示す共振周波数は深さに比例し(例: 直径300mm)、直径の2乗に反比例していることがわかる(例: 深さ40mm)。現状のLRADの周波数

特性が10kHzあたりから低下することおよびデータ容量の観点からSLDVのサンプリング周波数を16.38kHzとしていることなどから、φ100で深さ20 mm程度が計測限界であるというのは、想定されるたわみ共振周波数が10kHz近くになることが想定されることから、ほぼ妥当な結果であると思われる。

Table.3.1 円形欠陥モデルを用いた探査結果例 (上段：叩き点検法、下段：本手法)

	深さ100	深さ80	深さ60	深さ40	深さ20	深さ10
Φ50	—	—	△	△	×	×
Φ100	—	×	×	×	△	—
Φ150	×	×	△	△	—	—
Φ200	×	×	○	○	—	—
Φ300	○	○	○	○	—	—

(上段：叩き点検法 ○：検出可能、△：判定が分かれるもの、×：検出不可)

(下段：非接触音響探査法 ○：検出可能、SLDVの共振ピーク以上の共振ピークを検出 △：SLDVの共振ピークと同程度以下のピークを検出した場合、×：検出不可)

また、この表から、叩き点検では検出できないものも本手法で検出できる可能性があることがわかる(直径200、深さ100及び80mm)。

(2) FEM解析による結果との比較

周辺を単純支持(並進変位のみ拘束し、回転自由)したシェル(板)要素によるFEM解析の結果と実験値との比較を行った。計算結果例をFig.3.3~Fig.3.4に示す。

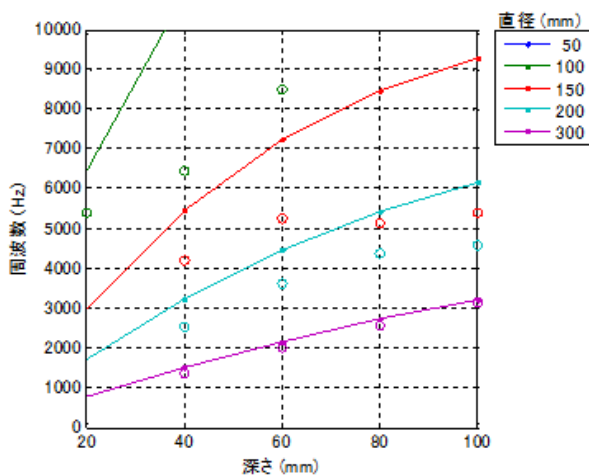


Fig.3.3 周波数 vs. 欠陥深さ (○印は実験結果より得られた共振周波数)

り得られた共振周波数)

直径300mmの円形欠陥は、周辺を単純支持した円板の固有振動数にほぼ等しい結果となったが、それよりも小さな欠陥はシェル要素によるモデル化とは合わない結果となった。これは、欠陥部の直径が大きくなると、欠陥部周辺の回転変位が拘束されることで、FEM解析の仮定である回転変位が自由という条件と合わなくなるためと考えられる。

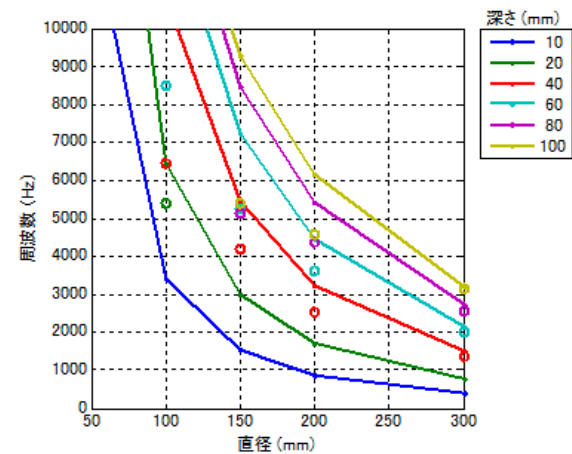


Fig.3.4 周波数 vs. 欠陥直径 (○印は実験結果より得られた共振周波数)

3.3 はく離欠陥検出の検討

非接触音響探査の探査原理は、コンクリート表層部のたわみ共振によるものであるため、表層部にわずかな空気層があれば板振動を生じさせることが可能である。そのため、欠陥の検出精度はその間隙幅には依存しないということが想定される。したがって、従来は空洞欠陥を模擬するため、厚さ25mmの発泡スチロールを埋設したコンクリート供試体を用いた探査実験を行ってきたが、今回は実際のコンクリート構造物に存在するような亀裂や剥離を、探査原理どおりに本手法で検出できるかどうかを検証するために剥離欠陥を模擬した供試体を製作して探査実験を行った。

(1) 実験セットアップ

実験セットアップはFig.3.2と同じである。すなわち音源と供試体間の距離は5 mとし、音源の位置と高さはコンクリート供試体に埋設した各欠陥位置に対し、正対させるようセットアップした。そのため、SLDVはLRADからの直接波の影響をさけるためにやや斜め後方に設置した。送振波形は0.5-7 kHz程度周波数帯域を持

った探査用のトーンバースト波を用いた。出力した音圧はコンクリート表面付近で100 dB程度であり、これは騒音計を用いて調整している。

(2) 供試体製作方法

剝離欠陥モデルは壁型供試体(150×200×30 cm³)にひび割れを有した小型供試体(以下ひび割れモデル)を埋設することで再現した。ひび割れモデルの製作手順を以下に示す(Fig.3.5 参照)。

- ①円柱状コンクリートピース(φ100×200 mm)を割裂引張強度試験により2つに割裂させる。
- ②測定面側をフラットにするため、割裂させたピースのうち一つを半分にカットする。
- ③割裂させた二つの供試体間に金属スペーサを挿入することで間幅を調整。
- ④エポキシ接着剤を亀裂部周囲に塗布。供試体の固定とともに、後に流し込むコンクリートの侵入を防ぐ。

埋設したひび割れモデルは4種類で、内3種類それぞれ間隙幅が異なる。この時調整した間隙幅は1.0 mm、0.5 mm および0 mm である。0 mm のものは割裂後にスペーサなどを挿入せずに再度固定したものである。残りの1つは空洞の代わりとして厚さ25mmの発泡スチロールを挿入したものである。埋設後の各試料のひび割れの深さは25 mm程度、欠陥寸法は100×200 mm²となる。加えてφ150×300 mmの円柱状テストピースを用いて製作したはく離モデルもそれぞれ4種類上記の手順により用意した。この試料のひび割れ深さは50 mm、欠陥寸法は150×300 mm²である。これらの試料を埋設したコンクリート供試体(200×150×30 cm³)を製作して実験に使用した。

(3) 探査結果

欠陥部(埋設位置の中心)と、その周辺の健全全部上の振動速度スペクトルを比較したものをFig.3.7に示す。(a)は深さ25 mm、欠陥寸法100×200 mm²のものである。図中の発泡スチロールおよび間隙幅1.0 mmでは3.5 kHz周辺で明確な応答が見られる。0.5 mmと0 mmにおいてもピークが確認出来るが、発泡スチロールと間隙幅1.0 mmのものに比べると振幅が小さい。これは設定間隙幅が狭くなったため、割裂したテストピース間の接触面積が増加していることが影響していると考えられる。(b)は深さ50 mm、欠陥寸法は150×300 mm²の結果である。(a)と比べると欠陥自体が深いため、全体的な振幅は小さいが、(a)と同様に間隙幅0 mmのものであってもピークを確認することが出来る。

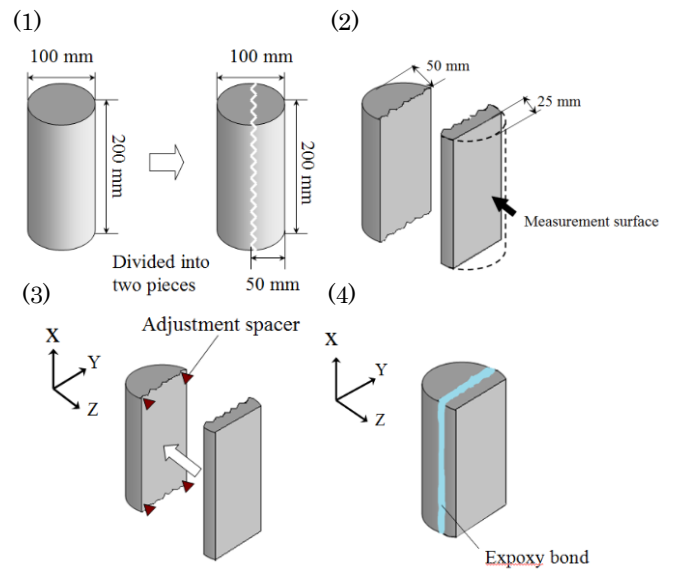


Fig.3.5 割裂欠陥モデルの作成方法

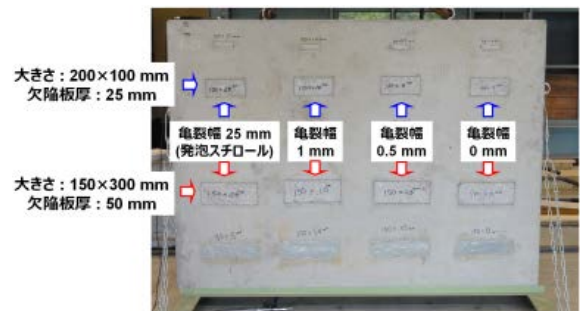


Fig.3.6 割裂欠陥モデルを埋設したコンクリート供試体の外観図 (200×150×30 cm³)

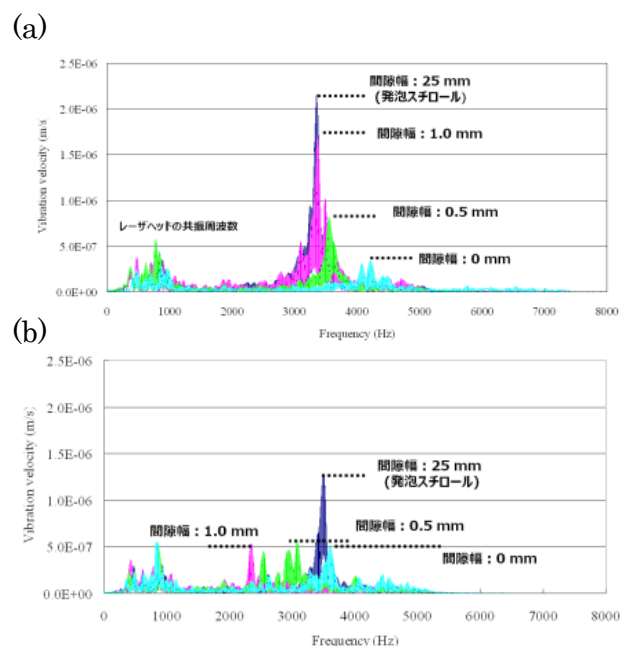


Fig.3.7 各欠陥試料上での振動速度スペクトル

- (a) 深さ 25 mm, 欠陥寸法 100×200 mm²,
- (b) 深さ 50 mm, 欠陥寸法 150×300 mm².

これらの結果から、ここで示すはく離欠陥の広さと深さであれば、間隙幅が0mmであっても、欠陥の有無については探査できることが分かった。なお、両グラフともに1 kHzで見られるピークはSLDVレーザヘッド自体の共振周波数である。また、Fig.3.8に間隙幅0mm、深さ50 mm、欠陥寸法150×300 mm²の割裂試験体に対する非接触音響探査法による探査結果例を示す。図より間隙幅0mmであってもわずかな空気層があれば本手法により検出可能であることがわかる。

3.4 送信波形の工夫による測定感度の向上

(1) 従来法の問題点

実際の欠陥の共振周波数は不明であり、その応答を検出するためには広帯域を含んだ音波を使用する必要がある。従来法では、探査用波形として持続時間2s、500-5000 Hzの広帯域のLinear up chirp波を用いていた。欠陥部上の目的信号を強くするためには音圧を上げるか、あるいは波形の持続時間を長くする必要があるが、その場合、レーザヘッドも同じ分振動してしまうという問題点があった。しかしながら、レーザヘッドに悪影響を及ぼす主成分は音源からの直達波および対象面からの反射波であるため、音波とレーザ光の伝搬速度の違いを考慮すれば、短いパルス波を使用すれば、時間的に分離可能であり、ヘッドの振動問題を回避することが可能である。そこで、ここではトーンバースト波を用いた場合の測定感度および計測速度の向上について検討する。

(2) 広帯域トーンバースト波の送信法

実際の欠陥の共振周波数は不明であり、その応答を検出するためには広帯域を含んだ音波を使用する必要がある。そこで、広帯域トーンバースト波を使用する。この方法では Fig. 2.32 に示すように異なった中心周波数を有するパルス波を逐次的に送信することで広帯域の周波数成分を得る。各送信パルスの帯域幅 W はパルスの持続時間 T_1 により与えられる。また、送信パルスは特定周波数成分が強勢であり、それぞれ不足した周波数成分は送信パルス間の周波数成分を重畳させる事で満足させる。

実際の計測に用いる使用した広帯域トーンバースト波をFig.3.9に示す。各パルス幅3 ms (Bandwidth: 330 Hz)で、パルス間インターバルは100 msである。各パルスの中心周波数は500-5100 Hzの範囲で200 Hzずつ変調し、全体で170-5430 Hz程度の周波数成分を有している。

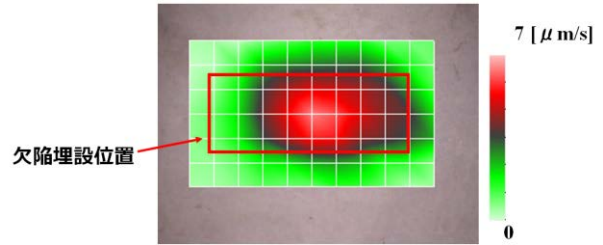


Fig.3.8 間隙幅 0mm の映像化結果例, 映像化周波数:3572 Hz, スキャンポイント数 77 (7x11)

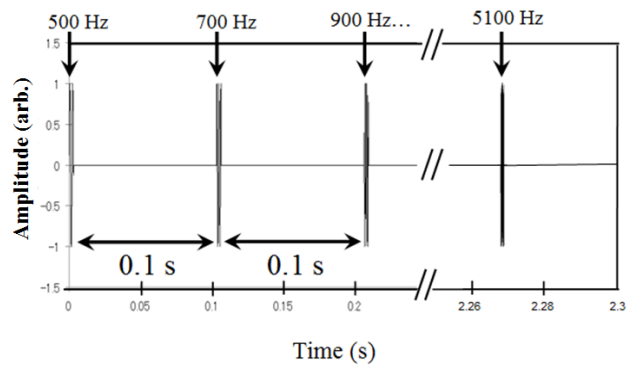


Fig. 3.9 Actually formed multi frequency tone burst wave.

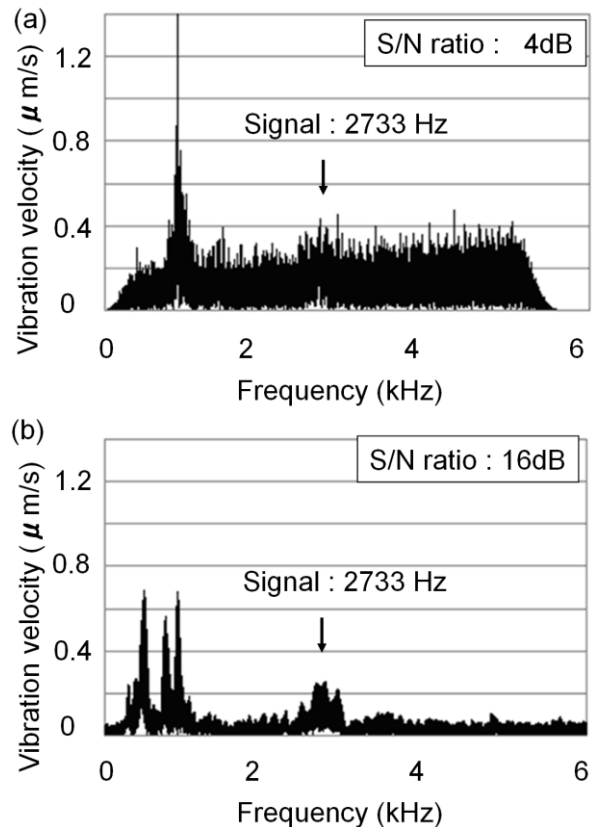


Fig. 3.10 Vibration velocity spectra on the damaged part. (a) chirp wave (Duration : 2s, Bandwidth : 500-5000 Hz), (b) Tone burst wave (Bandwidth : 170-5430 Hz) with time gate.

(3) コンクリート供試体を用いた検証実験

壁型コンクリート供試体(1.5×2.0×0.3 m³)内の深さ75mmに埋設された欠陥(発泡スチロール板(300×300×25 mm)を用いて検証実験を行った。実験セットアップ図はFig. 3.2と同じである。すなわち音源から対象面およびレーザーヘッドから対象面までの距離は5 mおよび5.4 mであり、計測点は欠陥部の中心部の1点のみである。計測された欠陥部上の時間ゲート適応後の振動速度スペクトル例をFig. 3.10に示す。従来の従来法では光学系の振動ノイズが取り除くことができなかつたため、S/N比4 dBであるのに対し、今回の提案手法では16 dBと、従来法に比べ12dBの改善が行われたことがわかる。S/N比の改善は、信号取得時のアベレージ回数の減少が可能であることを意味しており、すなわち計測速度の改善をも同時に意味している。

3.5 振動エネルギー比を用いた欠陥検出

(1) 振動エネルギー比の定義

非接触音響探査法と打音法では検出される周波数帯はほぼ同じであることから、同様な欠陥部のたわみ共振現象を観測していることは明らかである。したがって、同様な計測アルゴリズムが適用できる可能性が高いと思われる。一方、すでにマイクロホンを用いた打音法では、打撃力振幅値で打撃音振幅値を正規化する、いわゆる振幅値比を用いることで欠陥の深さや部材の厚さの定量的な評価が行われている¹³⁾。非接触音響探査法での計測値はあくまでもレーザードップラ振動計による振動速度のみになるため、単純に同じアルゴリズムを適用することは出来ないが、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考え、欠陥部と健全部には明確な差が生じていることが考えられる。そこで、振動エネルギー比(VER : Vibration Energy Ratio)を下式のように定義する。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \quad (3.1)$$

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。

(2) 振動エネルギー比による欠陥検出

実際に昨年度の円形欠陥モデル供試体の場合に、振動エネルギー比を適用した結果をFig.3.11に示す(現状では1 kHz以下に存在するSLDVの共振周波数のノイズが完全に取り切ることが出来ないため、ここでは f_1 を1.35 Hz、 f_2 を8 kHzとしている)。図より半径がそれなりの大きさ(200φ~300φ)であれば、広い範囲(40mm~100mm)で、振動エネルギー比と欠陥深さが反比例していることがわかる。この事実は振動エネルギー比により欠陥深さが推定できる可能性があることを示している

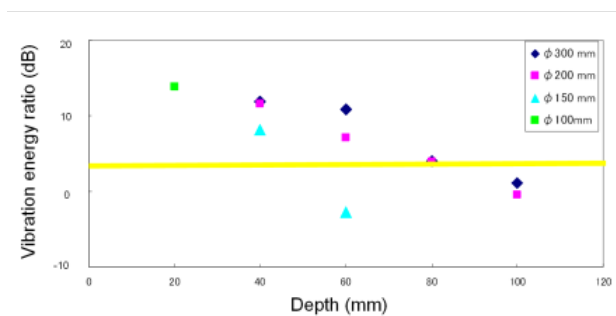


Fig. 3.11 円形欠陥モデル供試体の実験結果に振動エネルギー比を適用した場合

Fig.3.12 に健全部同士の振動エネルギー比を示す。健全部同士のエネルギー比の計算は、昨年度製作した円形欠陥モデル供試体中の8点で計測された健全部のデータのすべての組み合わせで行った。これら健全部同士の振動エネルギー比のばらつきの上限と下限である±3.6 dBを欠陥判定の閾値とすると、φ200 mmでは80 mm程度の深さまで検出可能であることがわかる(Fig.3.11の黄線が閾値である3.6dBを示す)。

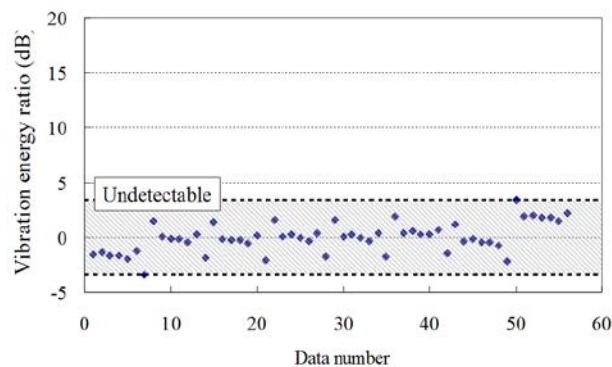


Fig. 3.12 健全部の振動エネルギー比(昨年度製作した円形供試体)

(3) 欠陥検知アルゴリズムのまとめ

非接触音響探査法の基本構成法であるLRADとSLDVを用いた狭領域精密探査法と、強力超音波音源とシングルポイント用LDVを用いた広領域走査探査法について紹介した。LRADを用いた場合は面加振となるため、測定対象物に多少の凹凸が存在しても計測可能であるが、音波の入射角度許容限界が狭く、なるべく対象物に正対させる必要がある。一方で焦点をもつような強力超音波音源の場合には、LRADの数倍程度は入射角度許容限界が広がるというメリットがある（ただし凹凸の影響は受け易い）。また、トーンバースト波にゲート処理を加えることで、S/N比の改善が行われた（このことは計測速度の向上に反映する）。さらに振動エネルギー比を用いた欠陥深さ評価に閾値を用いることで欠陥検出の可能性を示した。

3.6 アンカーボルト供試体を用いた探査実験

平成24年12月の笹子トンネルの天井板崩落事故に伴い、アンカーボルトの非破壊検査の要求が強まっているために、本研究でも不良アンカーボルトを模擬した供試体を作成して、非接触音響探査法でも探査が可能かどうかについて検討した。

(1) アンカーボルト供試体について

音響探査ボルト供試体の完成後の写真をFig.3.13に示す。壁型のコンクリート供試体内に複数本のボルトが埋設されている。ボルトの長さは200, 300, 370 mmで、Fig.3.14に示すようにそれぞれ接着剤により異なる充填率で埋設されている。Table 3.2に各アンカーボルトの概要を示す。



Fig.3.13 アンカーボルト供試体の外観

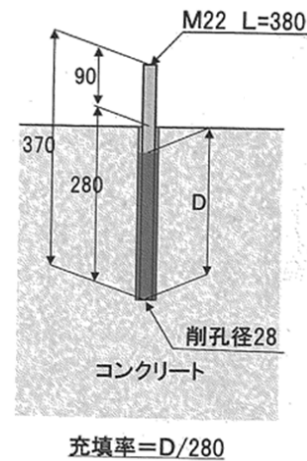


Fig.3.14 ボルト試料仕様

Table 3.2 アンカーボルト概要

	径-長さ-削孔長 (径)	接着 剤 100%	接着 剤 78%	接着 剤 55%	接着 剤 0%	
笹子 トン ネル)	M16-200-130(19)	2	2	2	-	6
	M16-300-130(19)	2	2	2	-	6
	M16-370-130(19)	2	2	2	-	6
土研	M22-370-280(28)	2	2	2	1	7
合計						25

(2) 周波数応答特性

・実験セットアップ

Table 3.2に示す試料の中で、ボルトの露出部が特に長いM16-370-130(19)を対象に探査実験を行った。M16-370-130(19)は充填率100%、78%および55%の物がそれぞれ2本ずつ供試体に埋設されている。Fig.3.15に実験セットアップ図(上面図)を示す。音源であるLRAD(LRAD Corp., LRAD 300X)とコンクリート供試体までの距離は5 mである。LRADを各試料の測定毎に正対させ、トーンバースト波によりボルトを加振する。トーンバーストの設定をTable 3.3に示す。ボルト先端部の振動速度をSLDV(Polytec Corp., PSV-400-H8)により計測する。この時サンプリング周波数16.38 kHz、サンプリング時間3.5 s、1点毎の加算平均回数10回とした。

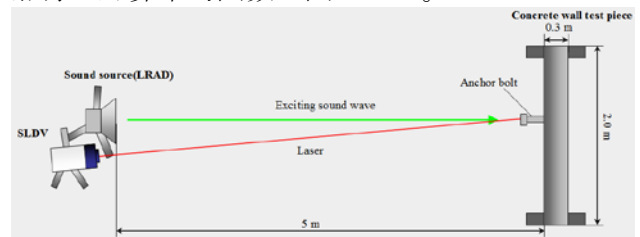


Fig. 3.15 実験セットアップ(上面図)

Table 3.3 探査用トーンバースト波設定

パルス持続時間	3 ms (BW : 330 Hz)
周波数変調インターバル	200 Hz
開始-終了周波数	500-7100 Hz
パルス間インターバル	100 ms

・実験結果

SLDVにより計測されたボルト先端部の振動速度のFFT結果をFig. 3.16に示す。(a)、(b)は充填率100%、(c)、(d)は78%、(e)、(f)は51%のそれぞれ結果である。(a)-(d)の100-78%までの結果を見ると、全て2800 Hz周辺で明確なピークが見られる。(e)および(f)の55%の結果ではピークらしき物が見られない。Fig. 3.17に各試料振動エネルギーを計算した結果を示す。今回のセットアップ(正対させた面的な音圧加振)では(a)-(d)で2800 Hz周辺のピークが卓越しているが、実際には棒のたわみ振動の固有振動数はSLDVの固有振動数が含まれる1 kHz以下にも存在すると思われる。従って積分の範囲は全帯域とした。グラフから、充填率が低くなるほど振動エネルギーが低くなる傾向が確認出来る。

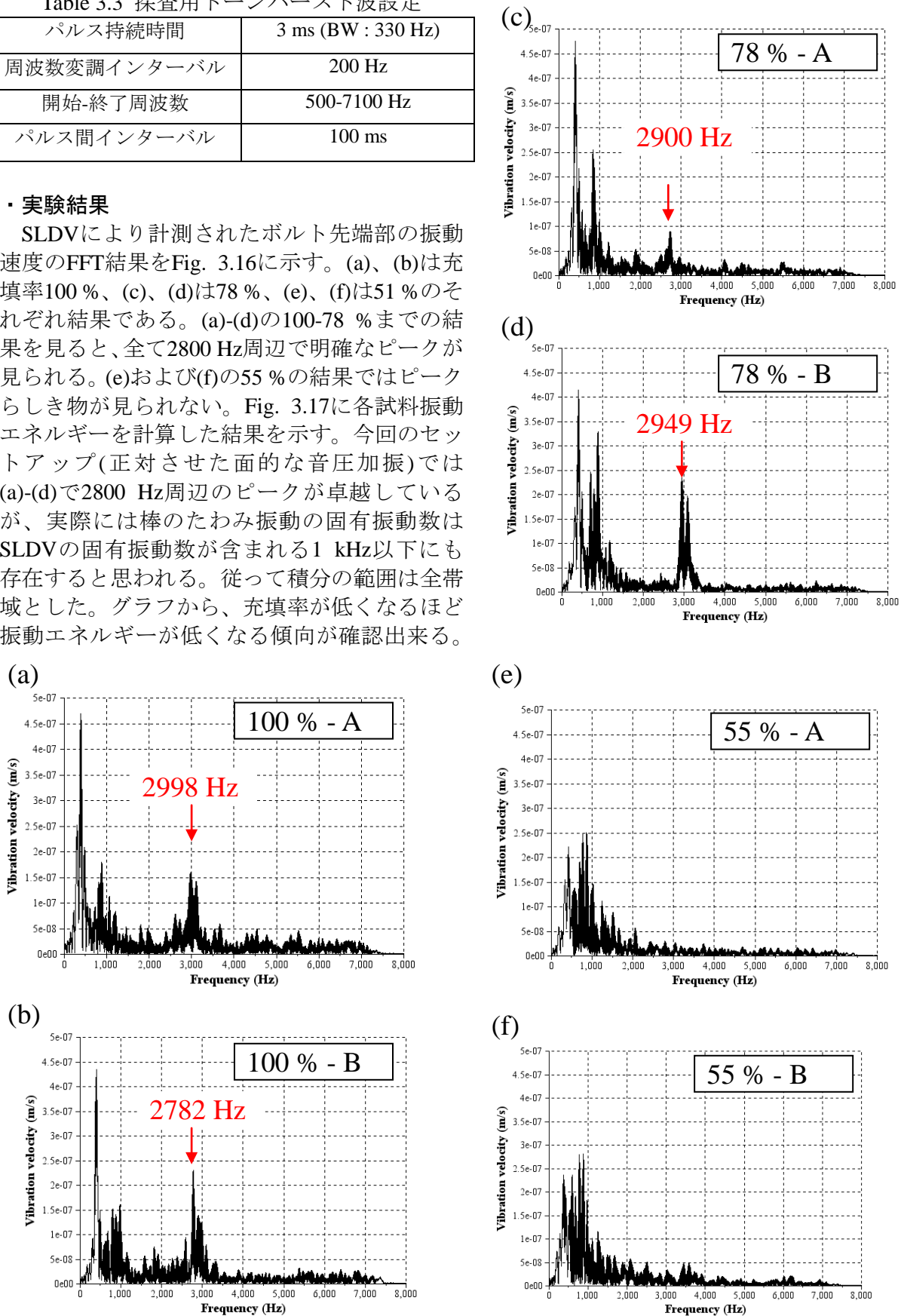


Fig. 3.16 FFT 結果 (a) 充填率 100%-A, (b) 充填率 100%-B, (c) 充填率 78%-A, (d) 充填率 78%-B, (e) 充填率 51%-A, (f) 充填率 55%-B

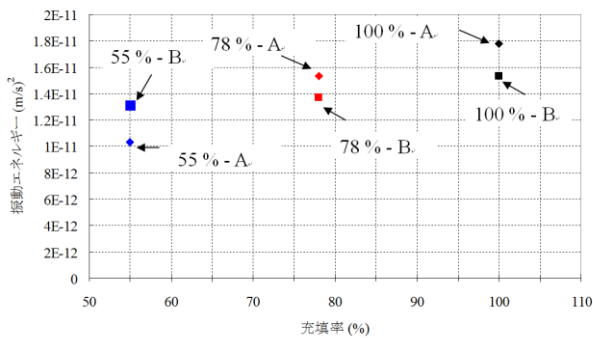


Fig. 3.17 各試料の振動エネルギー

(3) ハンマー加振+SLDVによる計測

比較用としてインパルスハンマー(ONO SOKKI, GK-3100)による加振+SLDVによる計測も実施した。計測時にはSLDVを各ボルト試料の先端部に正対させ、ハンマーによる加振時の振動速度を計測した。この時SLDVと供試体間の距離は3m程度である。加振方法は以下に示す3パターンである。

- ・ナット先端部を縦方向(長手方向)に打撃
- ・ナット先端部を横方向から打撃
- ・ボルト近くのコンクリート面を打撃(ボルトから10cm程度離れた位置)

計測されたボルトの振動速度データは測定毎に同時に記録されるインパルスハンマーの力センサ部の加力値で除する事で規格化した。打撃3種類で得られたこれらの波形のエネルギーをFig. 3.18に示す。ばらつきが激しく、音響探査のように充填率に比例した変化が見られない。これは打撃時に安定して一定の方向に叩くのが難しかった事が理由として考えられる。

(4) まとめ

ボルト供試体の基礎検討としてLRAD+SLDVおよびハンマリング+SLDVによるボルトの振動計測を行った。LRADによる加振を用いた場合、エネルギーによる評価より、充填率に比例する傾向が見られた。ハンマリングによる加振の場合、観測される周波数ピークがボルトの叩き方により異なる傾向が見られた。一方でハンマリングのエネルギーによる評価は、音響探査に比べばらつき傾向が見られた。ばらついた理由としては、叩く際の角度や強度によるものと思われる、エネルギーによる評価においては再現性のある音響加振の方が有利であると思われ

る。

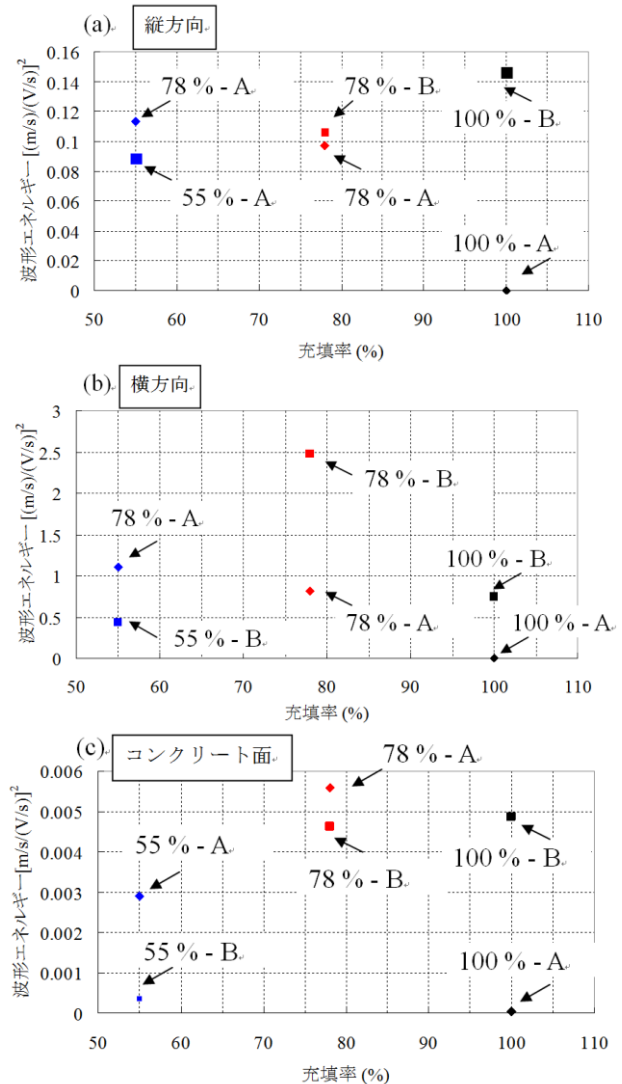


Fig. 3.18 叩き方別の振動エネルギー比較
(a) 縦方向, (b) 横方向, (c) コンクリート面

3.7 アスファルト供試体を用いた探査実験

アスファルト舗装下のコンクリート床版内部の欠陥(空洞、剥離)が検出できるかどうかについての検討を行った。

(1) 実験セットアップ

本実験で使用する供試体はアスファルト舗装下のRC(Reinforced Concrete)床版中に生じた分離化、水平剥離および脆弱化等を模擬したものである。900×900×200mmの大きさの各コンクリート供試体には、空隙の代わりにろ紙(400×400×1mm)等が埋設されている。具体的な供試体のスペックと平面図をTable 3.4およびFig.3.19に示す。

Table 3.4 アスファルト供試体

欠陥種類	欠陥深さ (mm)	欠陥材料
分離化	75	ろ紙
水平剥離	105	ろ紙+ビニール
	155	ろ紙+ビニール
脆弱化	75-105	細骨材+粗骨材
	75-155	細骨材+粗骨材

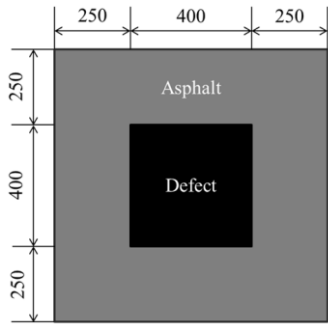


Fig. 3.19 アスファルト供試体の平面図

各供試体には厚さ75 mmのアスファルトが舗装されている。このアスファルト舗装面から、床版中の欠陥検出が行えるか検討した。供試体を短時間で計測するために、共振周波数はハンマリング(ハンマ加振+レーザ計測)による計測した。非接触音響探査法による実験セットアップ図をFig. 3.20に示す。音源であるLRAD (LRAD Corp., LRAD-300X) と対象面の距離は1 m、レーザヘッドから対象面までの距離は1.2 mである。使用した波形は、共振周波数のバースト波である。

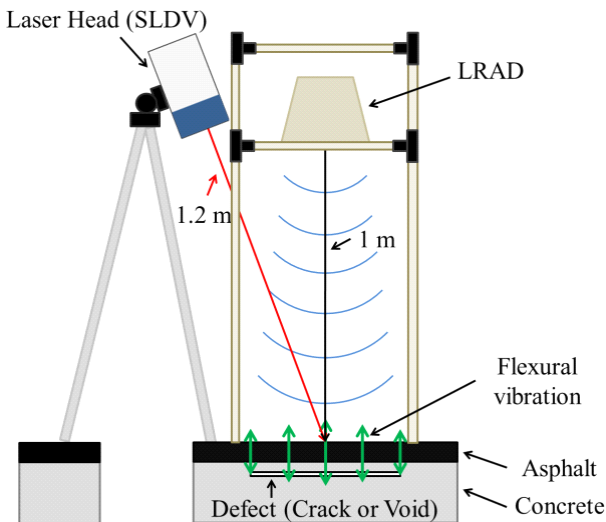


Fig. 3.20 アスファルト供試体を用いた場合の実験セットアップ

計測範囲は 500mmx500mm で、計測ポイント数は 121 ポイント (11x11) である (Fig.3.21 参照)。

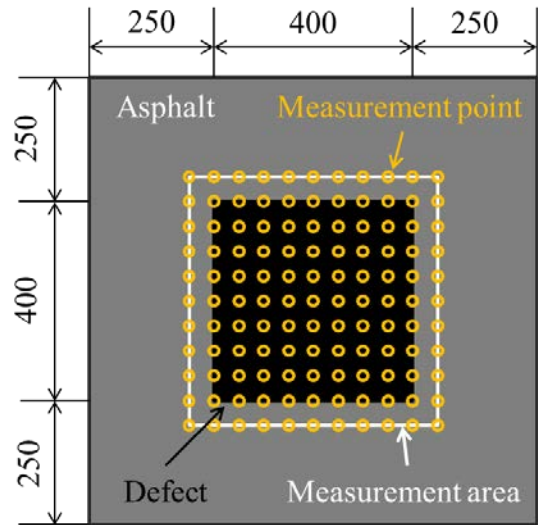


Fig. 3.21 アスファルト供試体の計測範囲

(2) 実験結果

以下に各供試体の実験結果例を示す。実験結果より、アスファルト舗装面からでも剥離欠陥検出が行える事を確認した。

- ・分離化 欠陥深さ 75mm・・・1500Hz のバースト 4 波を送信

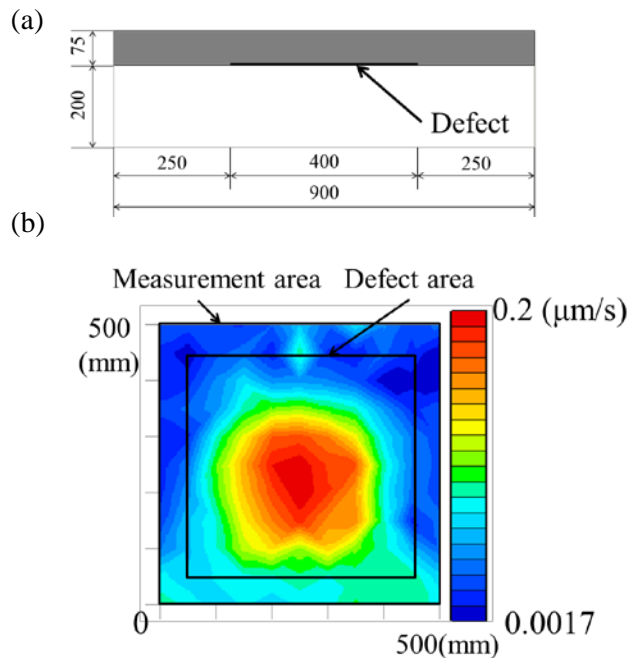


Fig. 3.22 分離化 (欠陥深さ 75mm) の結果例 (a)側面図、(b) 映像結果 (1536Hz) Defect:ろ紙(400×400×1 mm)

・水平剥離 欠陥深さ 105mm・・・1500Hz のバースト 4 波を送信

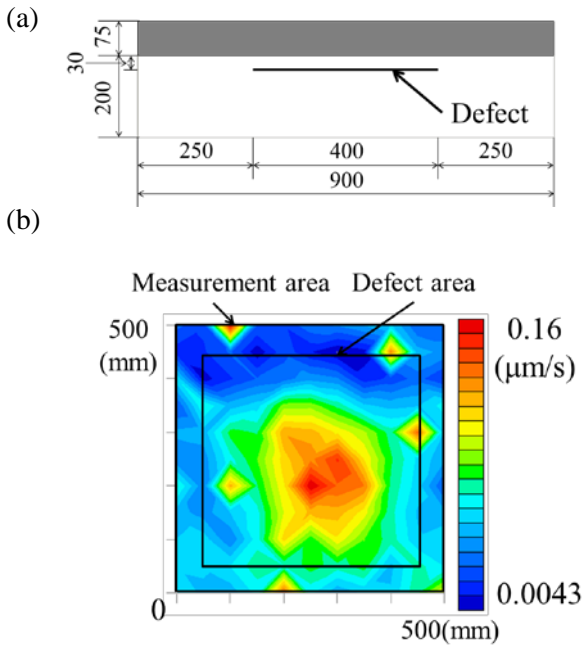


Fig. 3.23 水平剥離（欠陥深さ 105mm）の結果例 (a)側面図、(b) 映像結果 (1466Hz)
Defect:ろ紙(400×400×1 mm)+ビニール

・水平剥離 欠陥深さ 155mm・・・2300Hz のバースト 6 波を送信

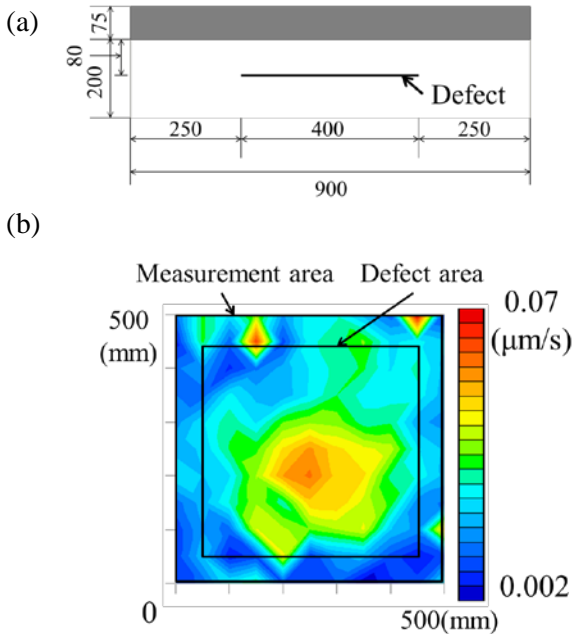


Fig. 3.24 水平剥離（欠陥深さ 155mm）の結果

例 (a)側面図、(b) 映像結果 (2296Hz)
Defect:ろ紙(400×400×1 mm)

・脆弱化 欠陥深さ 75-105mm・・・1000Hz のバースト 3 波を送信

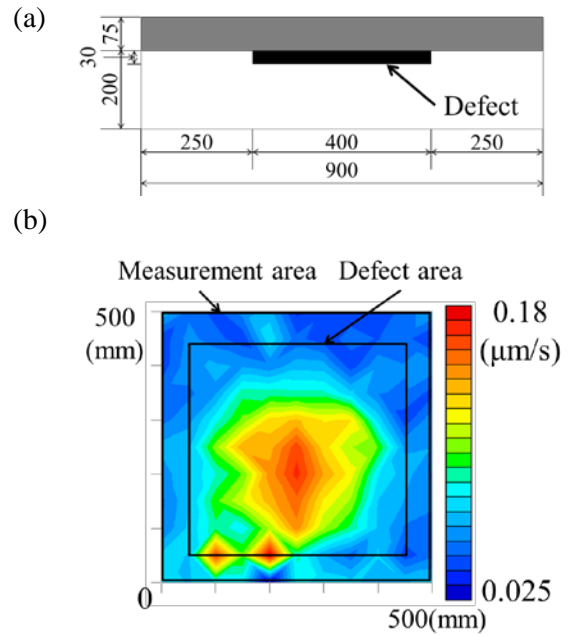


Fig. 3.25 脆弱化（欠陥深さ 75-105mm）の結果例 (a)側面図、(b) 映像結果 (1080Hz)
Defect:細骨材+粗骨材

・脆弱化 欠陥深さ 75-155mm・・・1000Hz のバースト 3 波を送信

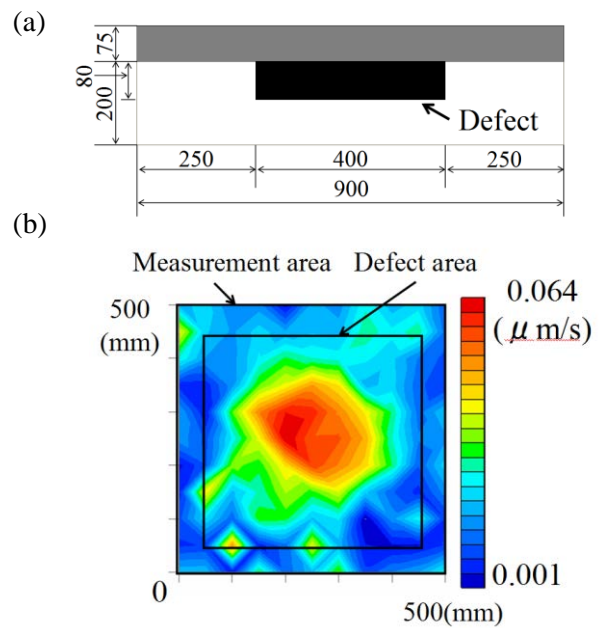


Fig. 3.26 脆弱化（欠陥深さ 75-155mm）の結

Fig. 4.3 スキャンエリア設定例
(赤点：スキャンポイント)

探査に用いた波形はトーンバースト波である。トーンバースト波の各設定事項をTable 4. 1に示す。出力時の音圧は100 dB程度である。加算平均回数は1点につき20回とした。計測時の実際の写真をFig. 4.4に示す。

Table 3.1 探査用トーンバースト波設定

パルス持続時間	3 ms (BW : 330 Hz)
周波数変調インターバル	200 Hz
開始-終了周波数	1500-6500 Hz
パルス間インターバル	50 ms

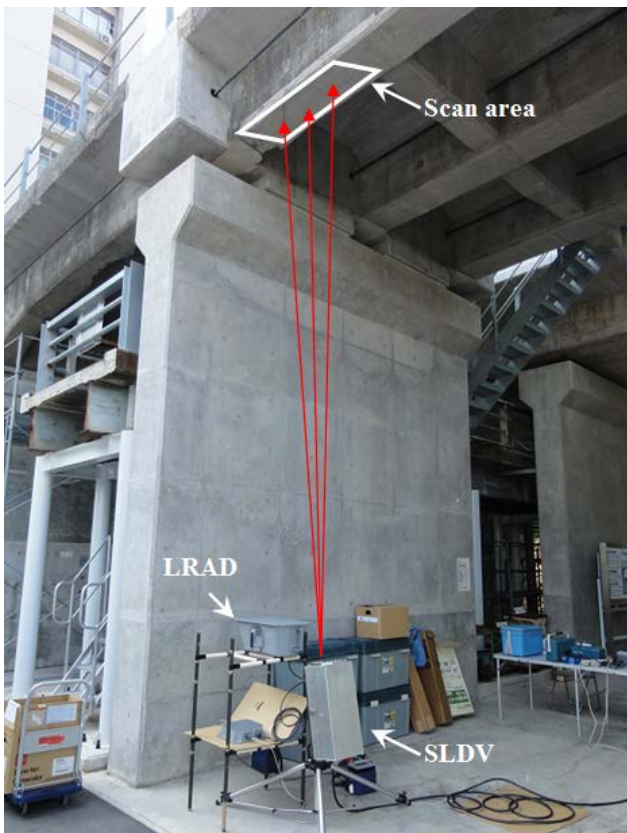


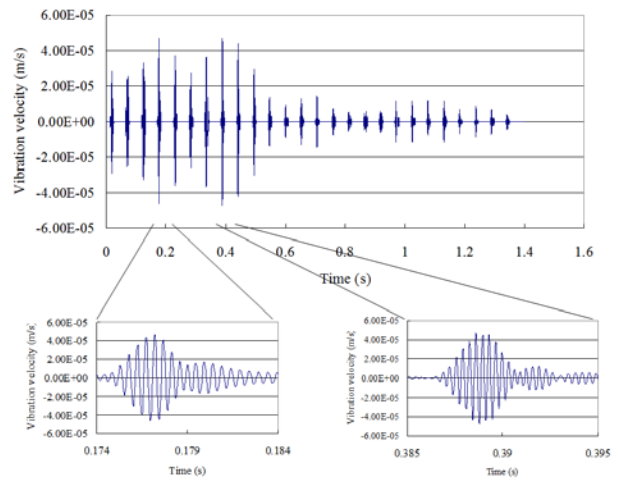
Fig. 4.4 実験風景

(3) 検出結果の評価方法について

SLDVにより検出された受信波形は時間ゲートおよび時間周波数ゲート処理を施す。今回の実験で実際に計測された振動速度波形を各ゲート処理後の時系列波形およびそのFFT結果をFig. 4.5に示す。図のように実構造物中の欠陥から検出されるスペクトル中の応答帯域はブロードなものである。これは欠陥箇所の振動モードが複雑であるためと思われる。そのため、検

出されるピークの単一周波数による振動速度分布でなく、振動エネルギーによる評価を行った。振動エネルギーは振幅スペクトルの二乗積分である。

(a)



(b)

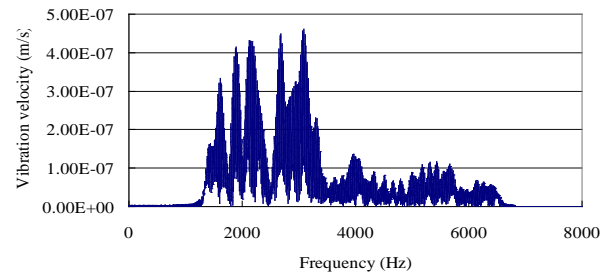


Fig. 4.5 実際の欠陥信号の例 (a) 時系列波形, (b) 振動速度スペクトル

(4) 探査結果について

計測した振動速度波形は時間および時間周波数ゲートによる信号抽出後、振動エネルギーを計算する。エネルギーはSLDVの共振周波数を避けるため、振動速度スペクトル上で積分して計算する。この時の下限周波数は1350 Hz、上限周波数は8192 Hzとした。全ポイントの振動エネルギーをFig. 4.6(a)、円形供試体上における健全部上の振動エネルギーをFig.4.6 (b)に示す。Figure 4.6(a)中赤点線は、Fig. 4.6(b)中の平均値(2.8E-12 m/s)であり、Fig. 4.6(a)中の最小振動エネルギー値データと概ね近い値を示している。この最小の点を健全部とし、これを基準とした振動エネルギー比分布を Fig. 3.7 に示す。ここで、振動エネルギー比 4 dB(≒3.6 dB)を欠陥判定の閾値とすると計測範囲ほぼ全体が不良部であると判定出来る。測定箇所の側面部では、目視で明らかに確認出来るひび割れが数多く存在する。ひび割れ箇所を Fig. 4.7 中の緑線、およそその測定エリアを赤線に示す。このよう

に、対象構造物中には水平ひび割れが全体的に生じている事が予想される。

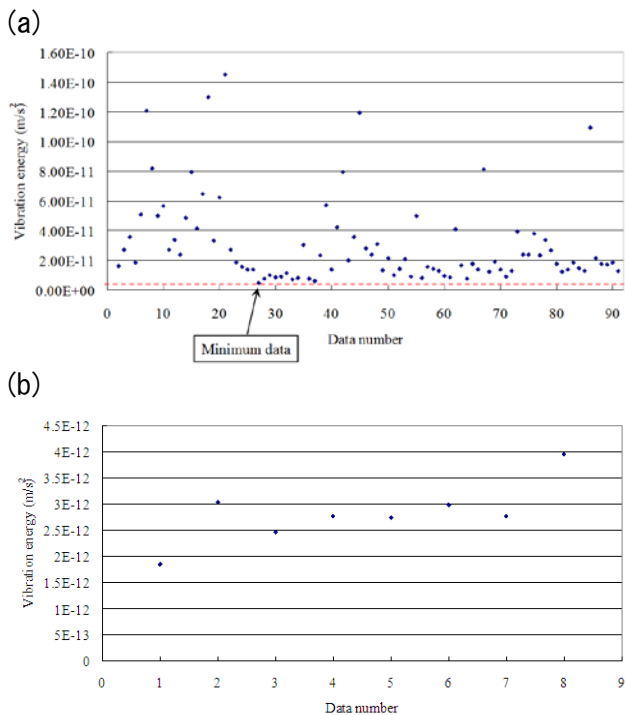


Fig. 4.6 Measured vibration energy.
(a) Measured point in this experiment,
(b) healthy part on concrete wall test piece.

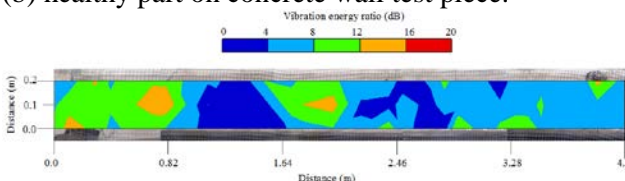


Fig.4.7 Measured vibration energy ratio distribution.



Fig. 4.8 Side view of inspected structure. Green line : position of visible cracks, red line : measured.

4.2 北陸自動車道における探査実験

北陸自動車道にある実構造物を対象とした探査実験を行った。対象構造物は以下の3つである。(1) RC床版、(2) PC箱桁、(3) ボックスカルバート。なお、北陸自動車道および近隣の道路自体には特に交通規制等はかけていない状況で計測を行っている。

(1) RC床版

・実験セットアップ

探査対象としたRC床版のある橋梁の外観をPhoto.4.1 (a)に示す。実験日は特に車両規制等はなく、トラック等が走行している状態で行った。探査対象としたのは塩害が特に進展していると思われる海側のRC床版[Photo. 3.1(a) 中奥側]で、床版はPhoto.3.1 (b)に示すよう下面側から計測した。1回の測定規模は60×60 cm程度とし、これを延長方向に繰り返し、合計9エリア測定を行った。1エリアのスキャンポイント数は6×5ポイントである。音源から対象面までの距離 L_1 、SLDVから対象面までの距離 L_2 は2mおよび2.2 mである。送信波形は広帯域トーンバースト波で、各設定をTable 4.1に示す。点数が多いため、測定速度の効率を考慮しパルス間インターバルは50 msと通常の半分を設定した。出力時の音圧は100 dB程度である。加算平均回数は1点につき10回とした。対象面までは3 mと、簡便な足場があれば手の届く高さであったため、この時マイクロホンを用いた打音法⁵⁷⁾による計測も比較用に実施した。



Photo. 4.1 実験風景 (a) 外観 (b) セットアップ

Table 4.1 探査用トーンバースト波設定

パルス持続時間	3 ms (BW : 330 Hz)
周波数変調インターバル	200 Hz
開始-終了周波数	500-5100 Hz
パルス間インターバル	50 ms

・RC床版での実験結果

Fig. 4.9に探査結果を示す。音響探査法の結果は振動エネルギー比による評価を行った。基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。Fig.4.9 (a) は音響探査法によるエネルギー比分布、Fig.4.9 (b)は打音法による厚さ分布である。Fig. 4.9 (a) 中のエネルギー比の高い位置とFig. 4.9 (b)の薄く判定された位置を比較すると、概ね位置関係が合致している事がわかる。

である

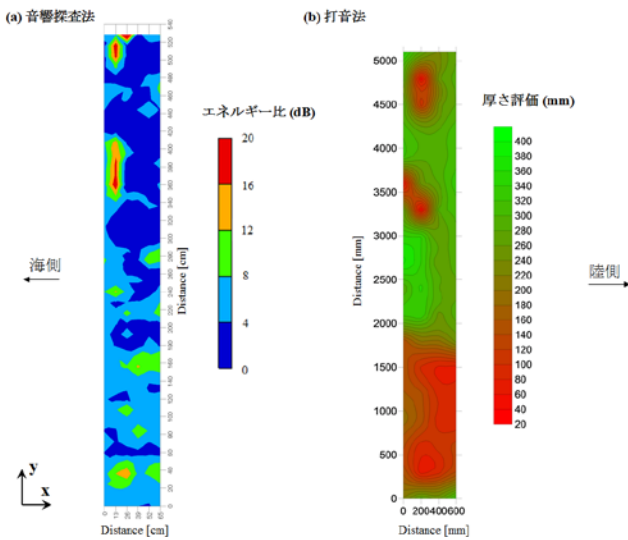


Fig. 4.9 RC床版の探查結果例 (a)音響探査法 エネルギー比分布, (b)打音法 厚さ分布

Fig. 4.10に測定された各点の振動エネルギーを示す。図中赤点線は供試体中健全部上の振動エネルギーの平均値(Fig. 4.6 (b)参照)である。これら各点の振動エネルギーのデータを用いて振動エネルギー比による評価を行った。基準となる健全部のデータは、今回測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた

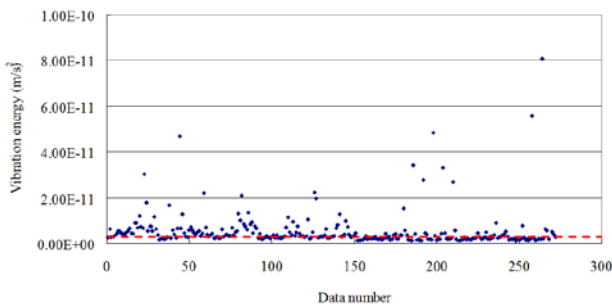


Fig. 4.10 Measured vibration energy value (RC slab).

(2) ボックスカルバート

北陸自動車道の実構造物を対象とした探查実験の内のボックスカルバートの探查結果について述べる。探查対象としたボックスカルバート(金沢西87)をPhoto. 4.2に示す。探查対象としたのは塩害が特に進展していると思われる米原側(Photo. 4.2中右側)海側の側壁および天井



Photo. 4.2 実験風景 (側壁部探查時)

叩き点検による事前調査結果をFig. 4.11に示す。図中に示された地表面から高さ1.7 mの赤枠のエリアを対象とした。1回の測定規模は1.0×1.0 cm程度とし、4エリアに分け測定した。1エリアのスキャンポイント数は5×5ポイントである。音源から対象面までの距離は4 m程度である。床および天井面反射による干渉を抑えるため、床面から音源の高さは2 mと設定した。SLDVのレーザヘッド位置も同様な距離、高さに設定し、良好な受光感度を得るため、各測定エリアに対し正対させている。送信波形は広帯域トーンバースト波で、各設定をTable 4.2に示す。出力時の音圧は100 dB程度である。加算平均回数は1点につき10回とした。また、この時打音法による計測も比較用に実施した。

Table 4.2 探查用トーンバースト波設定

パルス持続時間	3 ms (BW : 330 Hz)
周波数変調インターバル	200 Hz
開始-終了周波数	500-5100 Hz
パルス間インターバル	50 ms

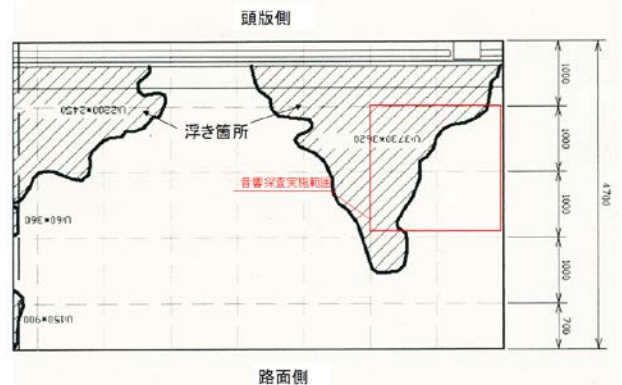


Fig. 4.11 米原側側壁，叩き点検による調査結果
(斜線部：浮き)

・音響探査法による探査結果

Fig. 4.12に各点の振動エネルギーを示す。図中赤点線は供試体中健全部上の振動エネルギーの平均値(Fig. 4.6 (b)参照)である。赤線の値(2.8 E-12 m/s)に対し、最小のエネルギーは6.9 E-12 m/sと2倍以上の値を示している。打音法により健全部と判定された箇所も含んだ計測であることから、全点が不良部ではないと思われる。これは測定環境がボックスカルバートのように、コンクリート壁面で囲まれた空間であるため残響による影響でノイズレベルが増加してしまっている事が原因と思われる。この残響による影響はパルス間インターバルを増加させ、緩和時間を設けるか、あるいはトーンバーストの送波方法を改良することでより抑えられると思われる。

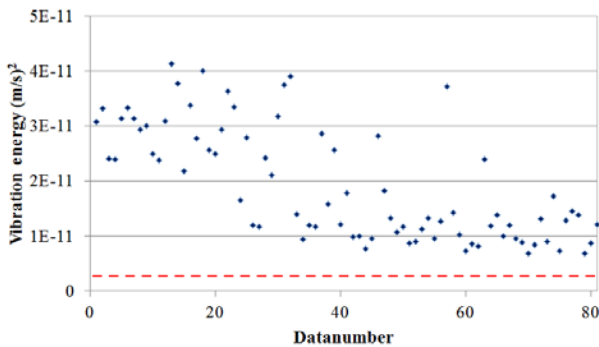


Fig. 4.12 Measured vibration energy (boxculvert wall part).

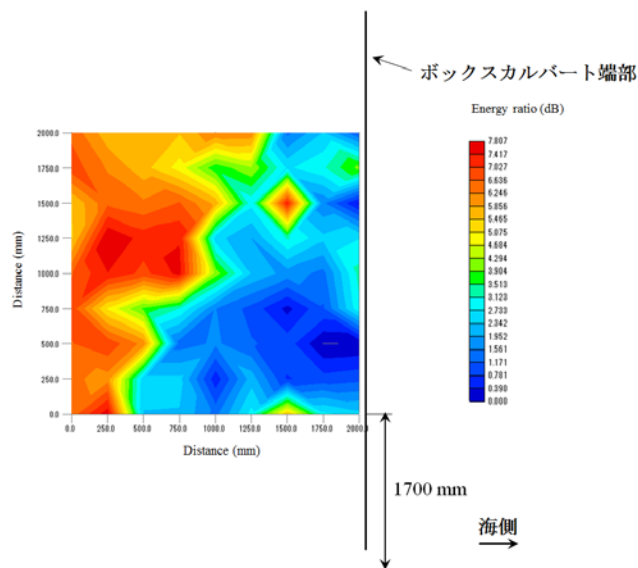


Fig. 4.13 音響探査結果 エネルギー比分布

図から、海側に比べ、陸側の側壁の方が高いエ

ネルギー比を示している。健全部とのエネルギー比4 dBを欠陥判定の閾値とすると、図中の左半分はほぼ欠陥部と判定される。叩き点検において浮きと判定された部位と音響探査法によりエネルギー比率が高く判定された部位は非常に近く、音響探査法の探査精度は叩き点検と近い性能を有している事が確認出来る。

・打音法による探査結果

Fig. 4.14に打音法の探査結果を示す。ここで、Fig. 4.13のエネルギー比分布中の白枠と、Fig. 4.14の厚さ評価分布中の白枠は同じ位置である。両者を比較すると、Fig. 4.13のエネルギー比の高い部位と、Fig. 4.14の厚さ評価で薄く判定された部分は、概ね合致している。

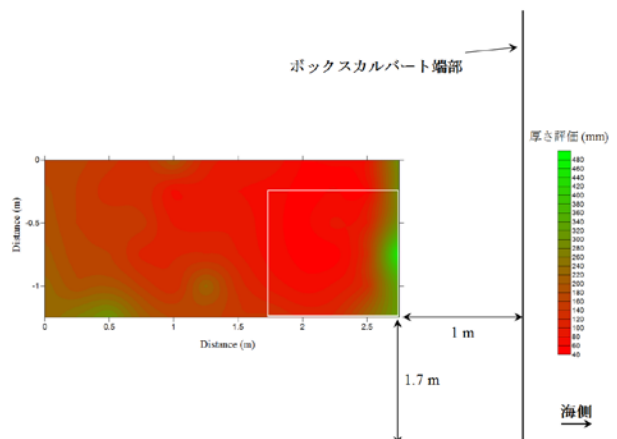


Fig. 4.14 打音法の探査結果

・天井部の探査結果

叩き点検による事前調査結果をFig. 4.15に示す。Fig. 4.15 (a)に示す浮きが多いたる海側、米原側の天井部を探査対象とした。1回の測定規模は0.8×1.0 m程度とし、合計6エリアに分けて。1エリアのスキャンポイント数は5×5ポイントである。音源から対象面までの距離は4 m程度である。送信波形は広帯域トーンバースト波で、各設定はTable 3.2と同様であるが、残響の影響を考慮し、パルス間インターバルは100 msと倍に設定している。出力時の音圧は100 dB程度である。加算平均回数は1点につき10回とした。同様なセットアップで、Fig. 4.15 (b)に示す比較的欠陥の少ないと判定されたボックスカルバート内側、新潟側の天井部も探査を行った。1.0×1.0 m程度の範囲を4×4ポイント計測した。

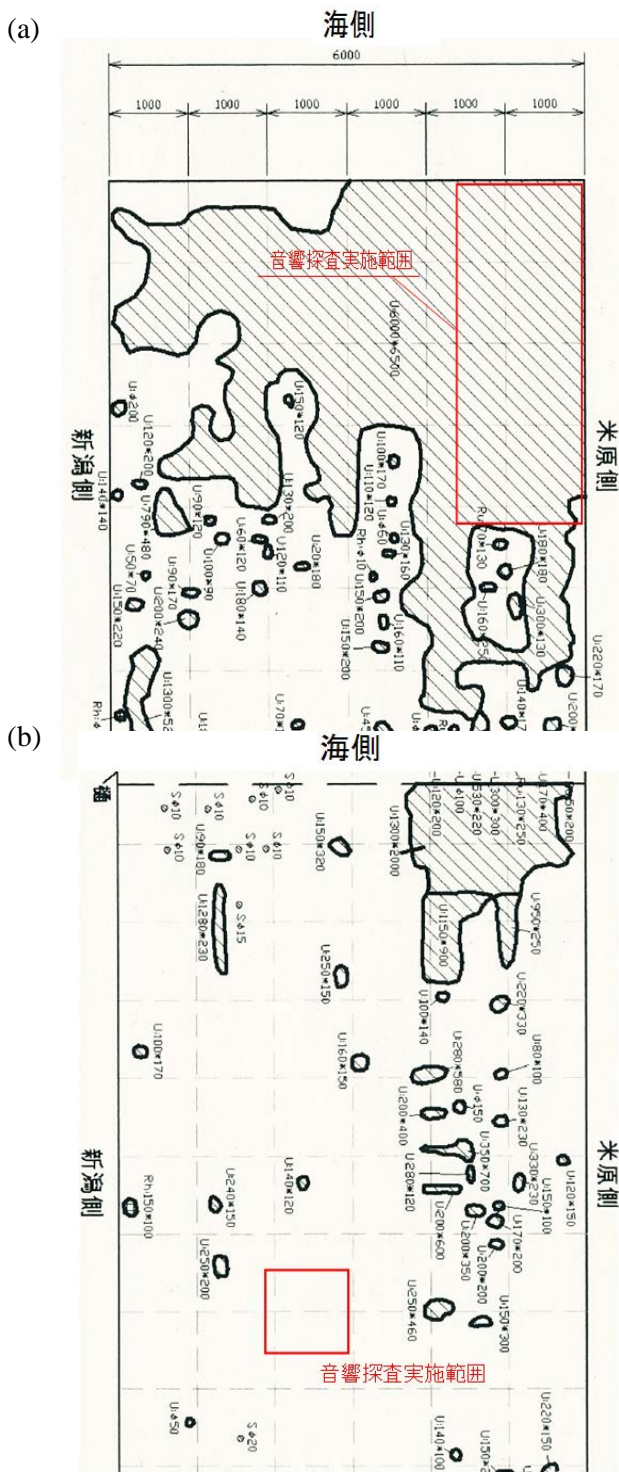


Fig. 4.15 叩き点検による調査結果(斜線部：浮き) (a) 欠陥部(海、米原側天井部), (b) 健全部 (内側、新潟側天井部)

Figure 4.16(a)に欠陥部天井部の各測定点の振動エネルギーを示す。Figure 4.16 (a)中、矢印に示すエネルギーの非常に高い特異点が数か所見られた。このような高い振動エネルギーが観測される箇所はPhoto.4.3に示す天井部のように漏水と思われる箇所である。一方、Fig. 4.16(b)は最小のエネルギー値に合わせたスケールであり、赤点線は供試体中健全部上の振動エネルギーの平均値(Fig. 4.6 (b)参照)である。Figure 4.13の側壁部のエネルギーに比べ、パルス間のインターバルを長くしたことによりノイズレベルが比較的安定していることがわかる。

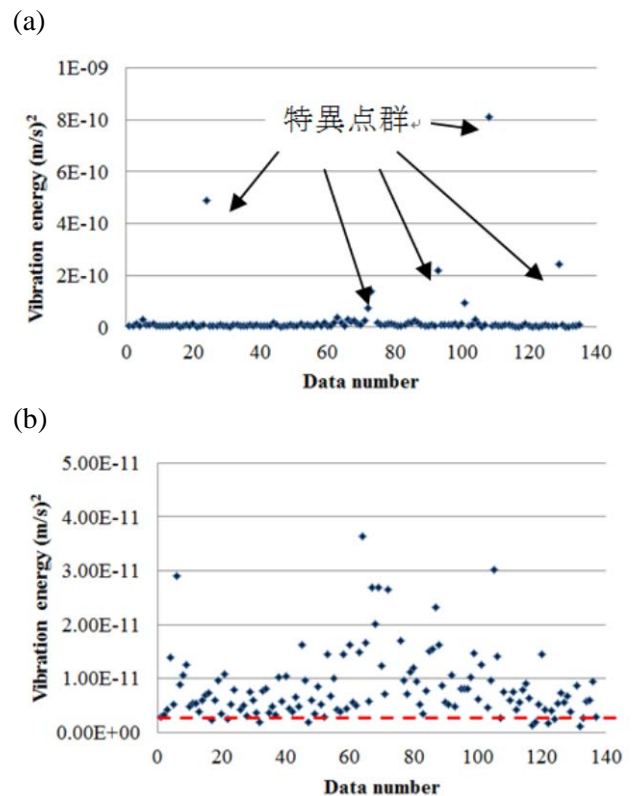


Fig. 4.16 Measured vibration energy (boxculvert, defective ceiling).

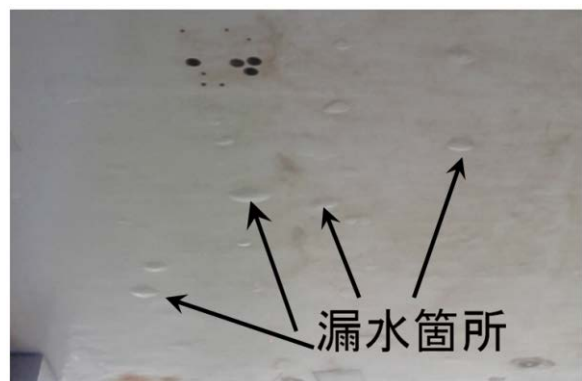


Photo. 4.3 Boxculvert (defective ceiling)

次にこれらを振動エネルギー比による評価を行った。測定された全スキャンデータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を基準の健全部とした振動エネルギー比分布をFig.4.17に示す。健全部とのエネルギー比4 dBを欠陥判定の閾値とすると、音響探査法においても図中のほぼ全域が損傷部と判定される。一方、Fig. 4.18は叩き点検において健全と判定された部位の振動エネルギー比分布であり、振動エネルギー比はほぼ閾値(4 dB)以下であり健全であると判定される。

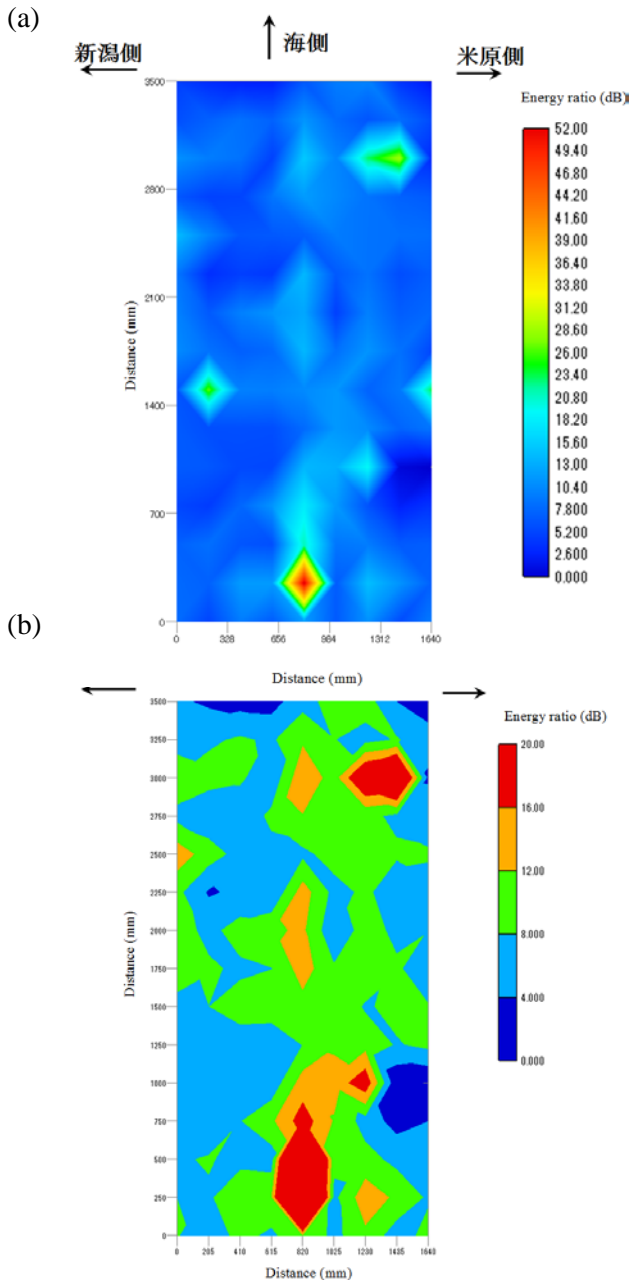


Fig. 4.17 欠陥部(海、米原側天井部) 探査結果

エネルギー比分布 (a) 最大値 52 dB, 高階調, (b) 最大値 20 dB 低階調

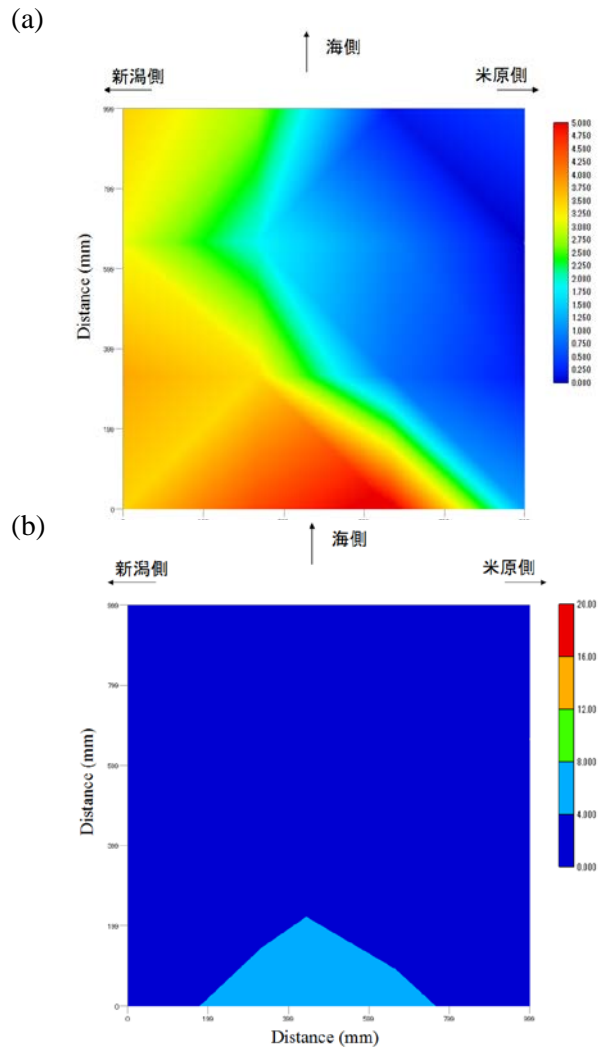


Fig. 4.18 健全部(内側、新潟側天井部) 探査結果 エネルギー比分布 (a) 最大値 5 dB, 高階調, (b) 最大値 20 dB 低階調

(3) PC桁橋

・実験セットアップ

探査対象としたPC箱桁橋をPhoto.4.4に示す。叩き点検による事前調査より、浮きがあると認められた天井箇所である。叩き点検による事前調査結果および音響探査を実施した範囲をFig. 4.19に示す。



Photo. 4.4 PC箱桁橋探査時のセットアップ

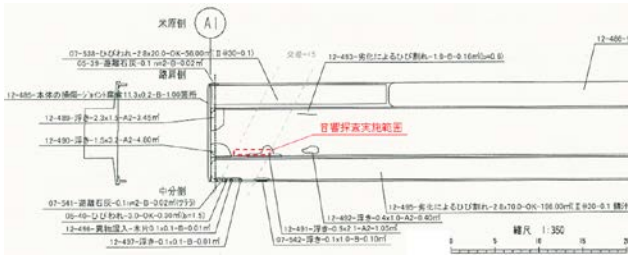


Fig. 4.19 叩き点検による事前調査結果および音響探査の実施範囲

1回の測定規模は1.0×1.0 cm程度とし、合計4エリア測定を行った。1エリアのスキャンポイント数は7×5ポイントで総スキャンポイント数は140ポイントである。音源から対象面までの距離は3 m程度である。SLDVのレーザヘッド位置も同様な距離、高さに設定し、良好な受光感度を得るため、各測定エリアに対し正対させている。送信波形は広帯域トーンバースト波で、各設定をTable 4.3に示す。出力時の音圧は100 dB程度である。加算平均回数は1点につき10回とした。

Table 4.3 探査用トーンバースト波設定

パルス持続時間	3 ms (BW : 330 Hz)
周波数変調インターバル	200 Hz
開始-終了周波数	500-5100 Hz
パルス間インターバル	50 ms

・実験結果

Figure 4.20に各点の振動エネルギーを示す。図中赤点線は供試体中健全全部上の振動エネルギーの平均値(Fig. 4.6 (b)参照)である。これら各点の振動エネルギーのデータを用いて振動エネルギー比による評価を行った。基準となる健全全部のデータは、今回測定された全スキャンデ

ータの中から、最も振動エネルギーが小さい物を用いた。

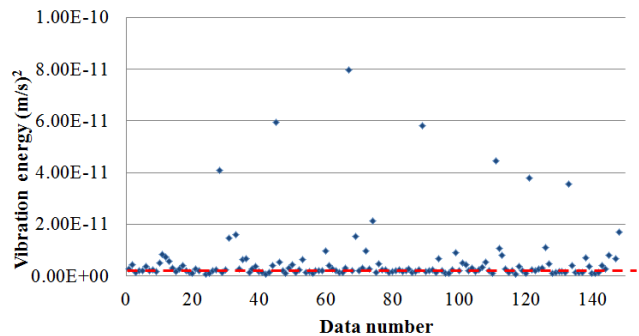
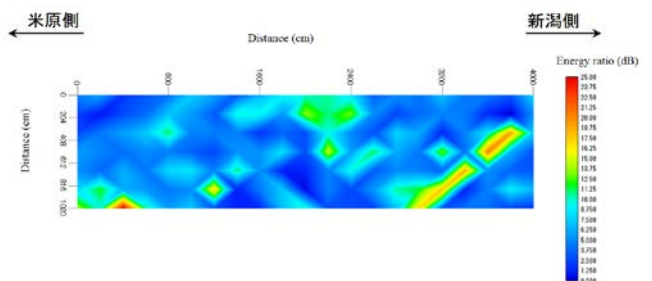


Fig. 4.20 Measured vibration energy (PC box girder bridge).

Figure 4.21に振動エネルギー比分布を示す。Figure 4.19の叩き点検の事前調査結果と比較すると、浮きと認められた箇所と同様な箇所が高いエネルギー比を示していることがわかる。

(a)



(b)

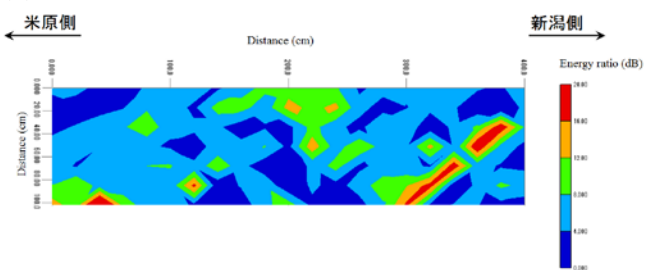


Fig. 4.21 音響探査結果, エネルギー比分布
(a) 最大値 25 dB, 高階調,
(b) 最大値 20 dB, 低階調

4.3 高島トンネル (国道1号線、横浜)

(1) 実験概要

横浜の国道1号線の高島トンネルにて探査実験を実施した。探査を実施したのは天井部2箇所と、側壁部1箇所の計3箇所である。実施日は下り線を車両規制し、TK社およびKC社による点検(ボックスカルバートの側壁、天井面および電気設備等の点検)が行われた。Photo. 4.5に高所作業車による打音点検の実施風景および欠陥と判定された箇所の例を示す。打音検査により浮きと判定された箇所について数か所探査を行った。探査したのは天井部2箇所と、側壁部1箇所の計3箇所である(Fig. 4.22参照)。

(a)



(b)



Photo. 4.5 Hammering test in Takashima tunnel. (a) image of high-place work, (b) defective part.

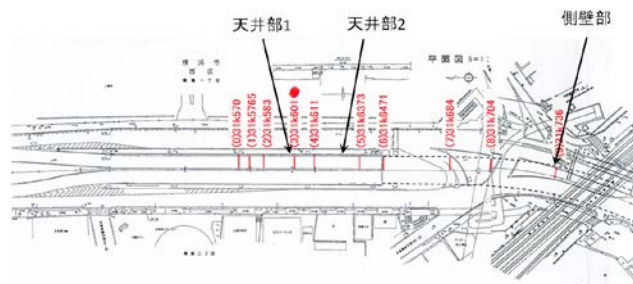


Fig. 4.22 Experimental field in Takashima tunnel.

(2) 天井部1 (トンネル入り口付近)

天井部(入口から25 m地点)の2つの浮き箇所を対象に探査を行った。実験風景をPhoto.4.6に示す。LRADから対象面およびSLDVから対象面までの距離は4.3 mおよび4.6 mである。使用した波形は広帯域トーンバースト波であり、設定はTable 4.2と同様であるが、残響の影響を考慮し、パルス間インターバルは100 msに設定した。各浮き箇所のスキャンポイントの設定をPhoto.4.7に示す。図の様に、スキャンエリアは打音検査で浮きと判定された箇所(図中赤枠)にかかる形でそれぞれ計30ポイント程度設定した。またこのとき、比較用として打音法による試験も高所作業用車を用いて実施した。

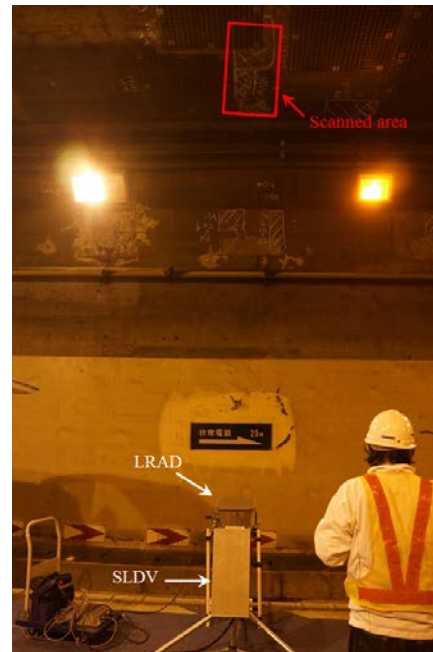


Photo. 4.6 Experimental setup for ceiling part 1 (Takashima tunnel).

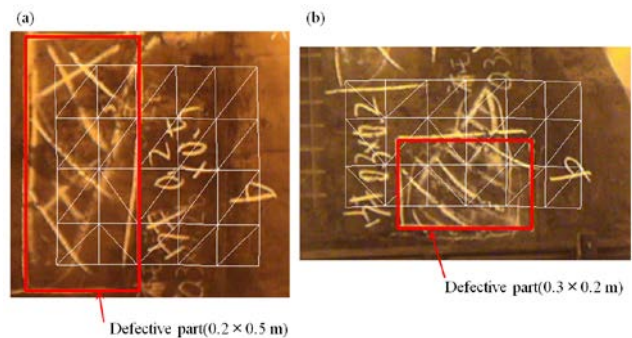


Photo.4.7 scanned area (a) defective part(0.2×0.5 m), (b) defective part(0.3×0.2 m)

浮き(0.2×0.5 m)探査時の各点の振動エネルギーをFig. 3.22に示す。Figure 4.23 (a)は縦軸を最大スケール、Figure 4.23 (b)中赤点線はFigure 4.23(b)に示す赤点線は、Fig. 4.6(b)での

平均値($2.8E-12$ m/s)を表している。Figure 4.24に最小のエネルギー値を基準とした振動エネルギー比分布を示す。図中、白枠は打音検査で浮きと判定された箇所である。分布中の上側の2点で健全点(測定点中エネルギーの低かった部位)に比べ非常に強い応答が見られた。一方、Fig. 3.23中白枠内において、打音法により5回計測した厚さ評価の平均は307 mmと、概ね健全であると判定された。音響探査法において特に高いエネルギー比を示した上部の数点は浮き面積が小さいため、ハンマーで正確に叩くのが困難であったと思われる。

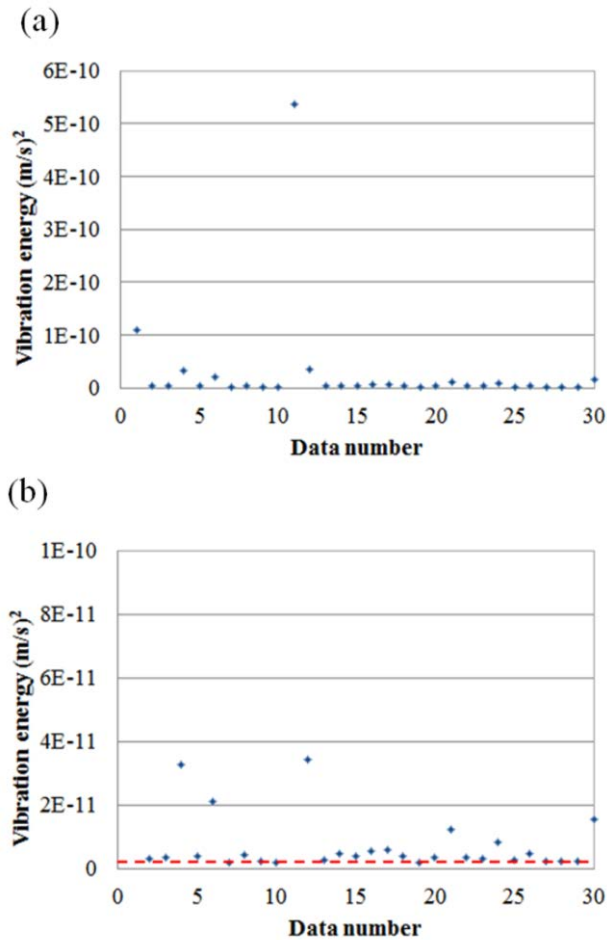


Fig. 4.23 Measured vibration energy (Takashima tunnel, defect(0.2×0.5 m) in ceiling part). (a) Maximum scale, (b) reduced scale.

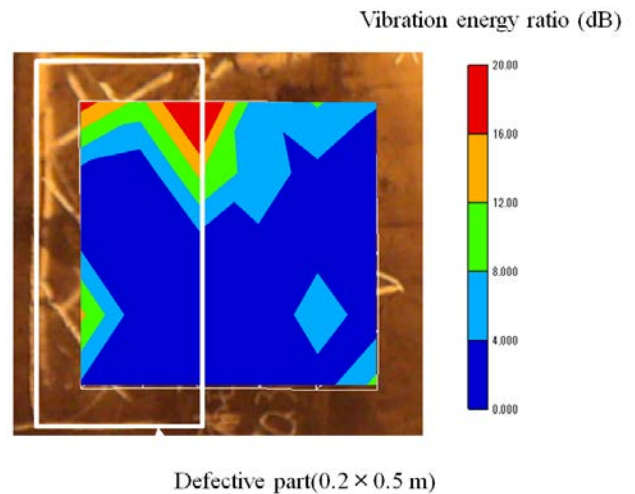
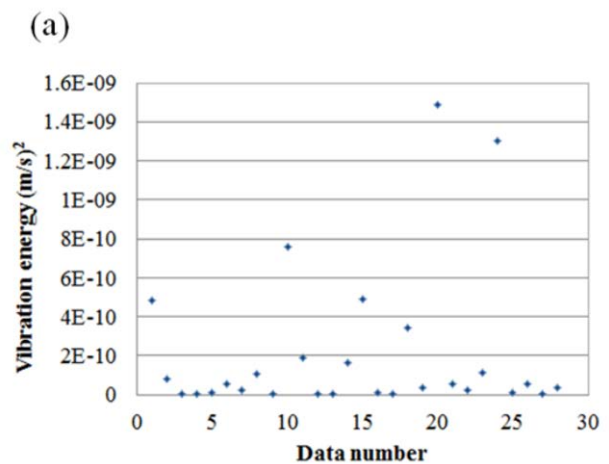


Fig. 4.24 Vibration energy ratio distribution. (Takashima tunnel, defect(0.2×0.5 m) in ceiling part).

次に浮き(0.3×0.2 m)探査時の各点の振動エネルギーをFig. 4.25に示す。Figure 4.25 (a)は縦軸を最大スケール、(b)はスケールを縮小した図である。Figure 4.25 (b)での赤点線はFig.4.6(a)中の平均値($2.8E-12$ m/s)を示している。Figure 4.26に最小のエネルギー値を基準とした振動エネルギー比分布を示す。図中、白枠は打音検査で浮きと判定された箇所であり、その部位を中心とした非常に強いエネルギー比分布が見て取れる。ここでの打音法の厚さ評価(6回平均)の結果は59 mmと不良部であると判定され、音響探査の結果と符号する



(b)

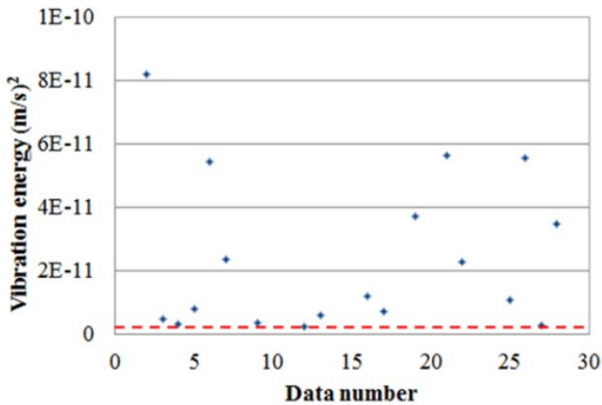


Fig. 4.25 Measured vibration energy (Takashima tunnel, defect (0.3×0.2 m) in ceiling part). (a) Maximum scale, (b) reduced scale.

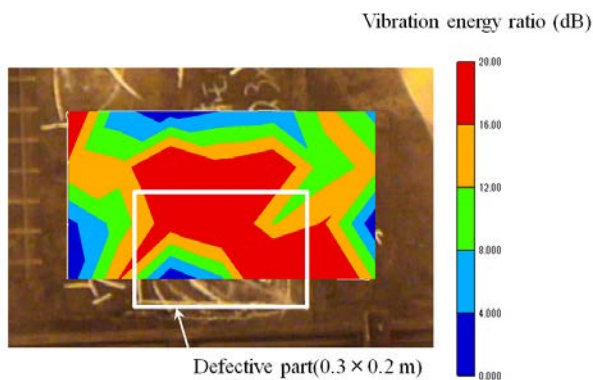


Fig. 4.26 Vibration energy ratio distribution. (Takashima tunnel, defect(0.3×0.2m) in ceiling part.)

(3) 天井部2

天井部の浮き箇所(トンネル入口から~地点)を対象に探査を行った。対象は0.6 m角と大き目の浮きであり、各浮き箇所のスキャンポイントの設定をPhoto.4.8に示す。図の様に、スキャンエリアは打音検査で浮きと判定された箇所(図中赤枠)にかかる形でそれぞれ36ポイント設定した。その他セットアップは前節と同様である。

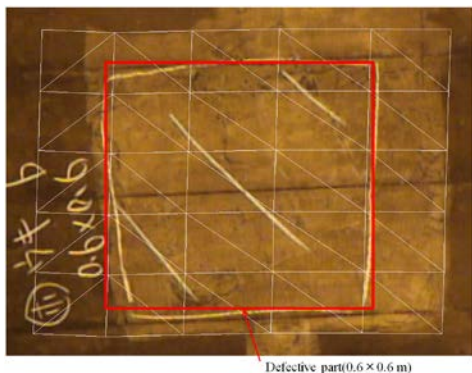


Photo.4.8 Scanned area, defective part(0.6×0.6 m).

おける白枠は浮きと判定されたマーキング部分であり、丁度枠内で高いエネルギー比を示していることがわかる

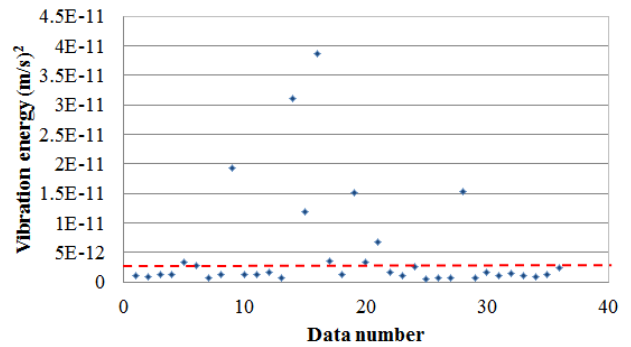


Fig. 4.27 Measured vibration energy. (Takashima tunnel, defect(0.6×0.6 m) in ceiling part).

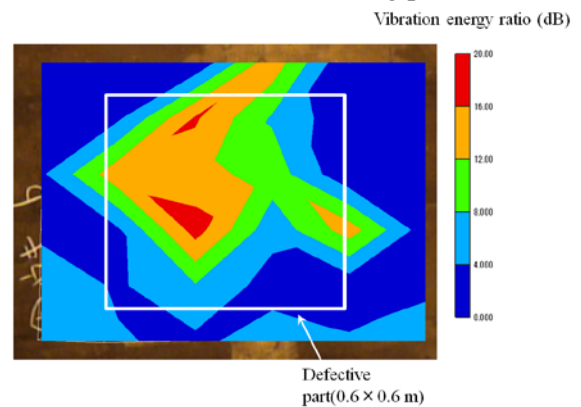


Fig. 4.28 Vibration energy ratio distribution. (Takashima tunnel, defect(0.6×0.6 m) in ceiling part.)

(4) 側壁部

側壁部の浮き箇所を対象とした探査を行った。Photo.4.9にセットアップ図を示す。図のように、LRADとSLDVはそれぞれ三脚で高さを調整し、対象箇所に平行させるよう配置した。LRADから対象面およびSLDVから対象面までの距離はそれぞれ3 m程度である。浮きと判定された箇所のマーキングの規模は1.0×0.3 mと比較的大きかったため、1回の測定エリアの大きさは0.4×0.55 m程度(各エリアのスキャンポイント総数36)とし、左右に2回分けて測定を行った。その他セットアップは前節と同様である。またこの時、比較用に打音法による測定も実施した。打音法による測定点はPhoto.4.10に示すように、欠陥部左端部、中央部、右端部および健全部の4点とし、各点について5回計測を行った

Figure 4.27に各点の振動エネルギー、Fig. 4.28に振動エネルギー比の分布図を示す。Fig. 4.28に



Photo.4.9 Experimental setup for side wall in Takashima tunnel.

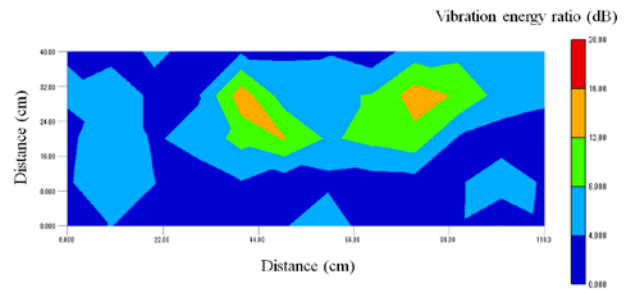


Fig. 4.30 Vibration energy ratio distribution for side wall in Takashima tunnel.

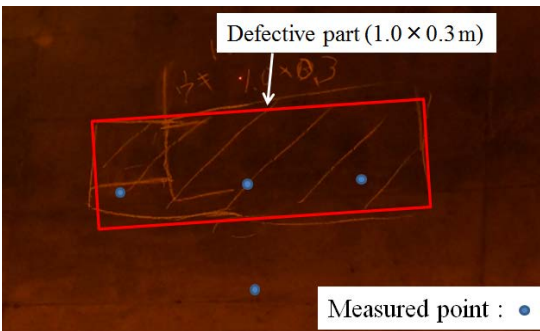


Photo. 4.10 Measured points by impact echo method for side wall in Takashima tunnel.

Table 4.4 Evaluated thickness by impact echo method.

Measured position	Evaluated thickness (mm)
Right(defect)	63
Center(defect)	39.6
Left(defect)	71.2
Health	227.8

Figure 4.29に各点の振動エネルギー、Fig. 4.30に最小エネルギーを基準とした振動エネルギー比分布を示す。Fig. 4.30中白枠は浮きと判定されたマーキング部分であり、枠内中央付近で高いエネルギー比を示していることがわかる。打音法による各点の厚さ評価をTable 4.4に示す。ここでの厚さ評価値は5回の計測結果の平均である。中央ほど部材厚は薄く判定され、音響探査の結果と良く符号する。

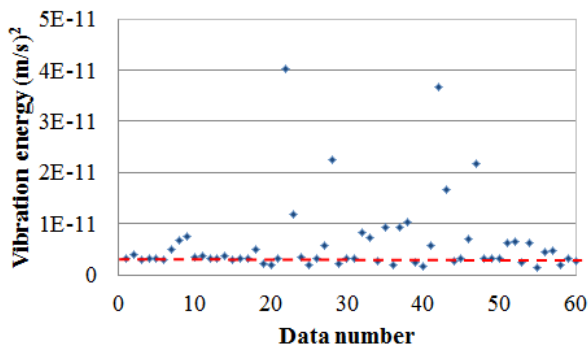


Fig. 4.29 Measured vibration energy side wall in Takashima tunnel.

4.4 測定条件の検討

(1) 対象表面の濡れの影響について

表面が水で濡れた状態が音響探査の検出精度に及ぼす影響について検討した。直径 300 mm、深さ 60 mm の円形空洞欠陥試料を対象に、水の散布量を変化させた状態でそれぞれ探査を行った。音源から供試体の距離は 5 m 程度。1 ポイント辺り 10 回の加算平均を施した。出力した波形は広帯域トーンバースト波(500-5100 Hz)で、音圧は 100 dB である。計測結果は時間および時間・周波数ゲート後、振幅スペクトルより S/N 比を算出する。予めこの供試体(φ 300, d60)の固有振動数は 2~3 kHz 周辺にある事がわかっているため、その帯域内の最大ピーク±5 Hz の平均振幅を信号強度とし、3500-5000 Hz までの帯域の平均振幅を雑音強度とする。

・霧吹きによる水の散布

霧吹きを用いて水を散布した状態で計測を行った。0 cc, 50 cc, 100 cc, 150 cc と4段階で、0 cc の状態を基準として50 ccずつ散布量を増やしていった。散布範囲はFig. 4.31に示す欠陥部を中心とした450 mm角程度の範囲である。スキャンポイントは欠陥部の中心と、欠陥部外の健全部である(両者水の散布範囲内)。Fig. 4.32に各段階で計測した欠陥部中心の振動速度スペクト

ルを示す。2400 Hz周辺で見られるのが欠陥試料の基本モードであると思われ、この振幅を信号として四者を比較する。(a)の0 ccの状態では信号が一番強く、散布量が増えるに従い振動振幅が低下している事が分かる。レーザの受光感度自体は良好であり各計測結果のノイズレベル自体には大差が無い。従って、霧吹きにより形成された水膜により音波による加振力が弱くなっていることが予想される。しかしながらここで示す試料に関しては150 cc程度水を散布した状態では振動振幅は低下するものの、信号の検出自体は問題なく行えた。

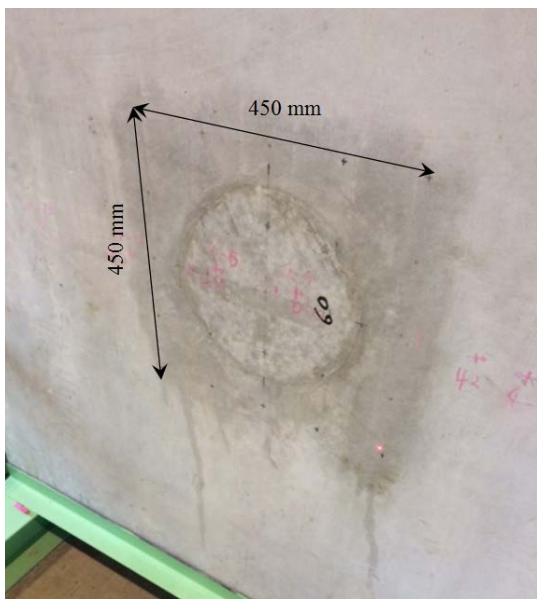


Fig. 4.31 霧吹きによる水の散布範囲

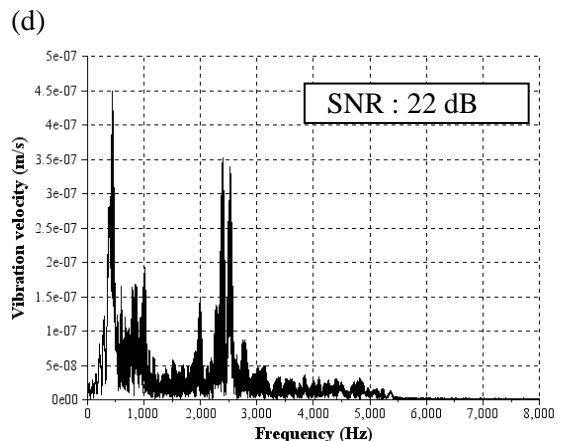
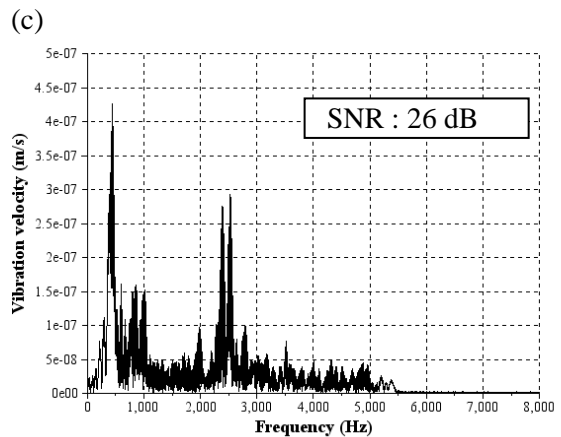
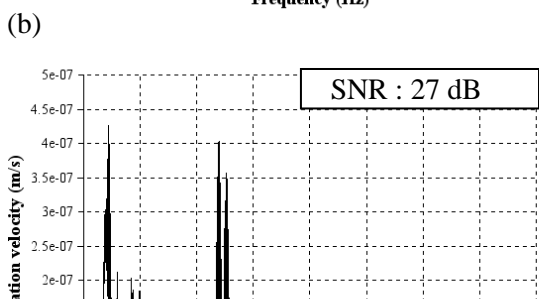
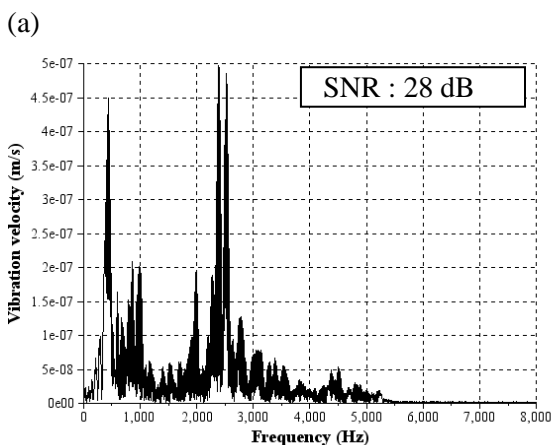


Fig. 4.32 霧吹きによる水散布時の欠陥部中心の振動速度スペクトル。

(a) 0 cc, (b) 50 cc, (c) 100 cc, (d) 150 cc.

・ホースによる流水

壁面に常に水が流れているような状態を想定し、供試体上部からホースから水をかけ流した状態での計測を行った。計測時間の2分間、欠陥部がかかる形で1000 mm程度の範囲(Fig. 4.33 参照)を流し続けた。流した水の総水量は3292 mlである。Fig. 4.34に欠陥部中心の振動速度スペクトルを示す。Fig. 4.34(a)は流水中、Fig. 4.34(b)は流水直後(流水停止後)、Fig. 4.34(c)は流水停止後2.5h経過したときに計測したものである。流水中はレーザ自体の受光自体が出来ず、欠陥部健全部における計測点共に計測不能であった。流水停止後は信号自体の検出は可能であるが、SNRが18



dB と Fig. 4.32(a)0 cc の 28 dB に比べ 10 dB の大きな SNR の低下が見られた。2.5 h 経過後の結果では、21 dB と Fig. 4.32(d) 150 cc と同程度の SNR に戻っている。

SNR : 18 dB

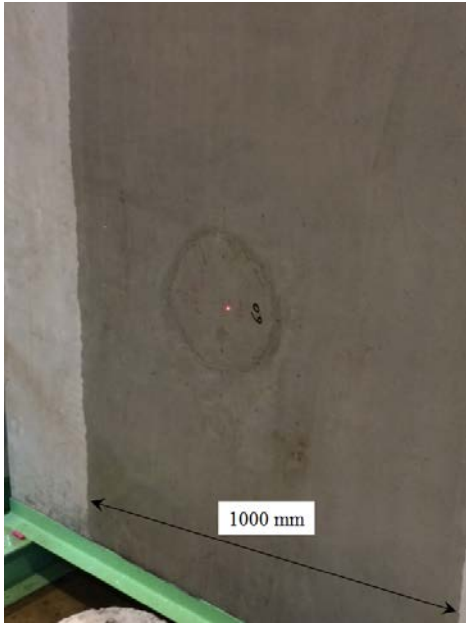


Fig. 4.33 ホースによる水の流水範囲

(c)

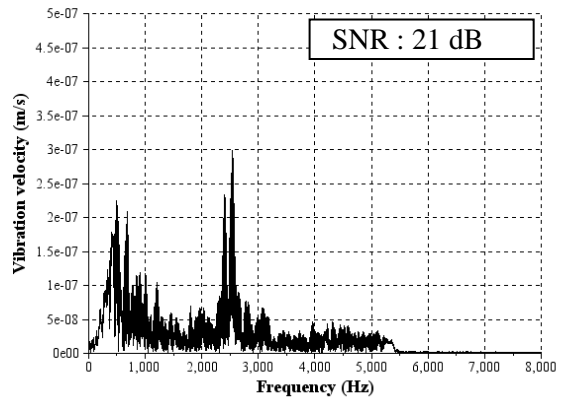
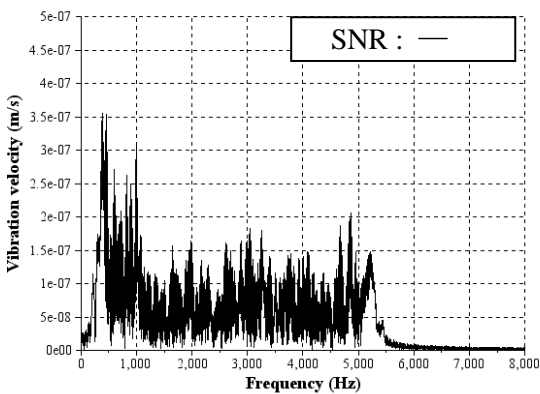


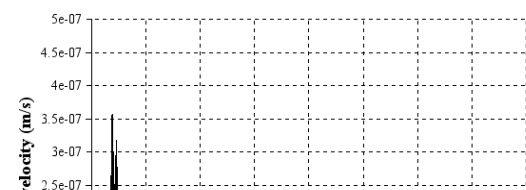
Fig. 4.34 流水時の欠陥部中心の振動速度スペクトル.

(a) 流水中, (b) 流水直後, (c) 流水後 2.5h 経過

(a)



(b)



(2) 風の影響について

北陸自動車道での実験では Fig.4.35 に示すような風向風速計（㈱日本エレクトリック・イルスルメント、WS-BN6）も使用して、計測現場付近の風速による影響についても検討した。RC 床版の実験時には平均で 1.14m/s と微風でこと、レッドを上するためを低く構となどか



約
あつた
一ザへ
向きに
に三脚
えたこ
らほと

んど計測には影響がなかった。ボックスカルバートの実験時には午前中に海風の影響のせい、平均1.87m/sの風を観測した。このときは側壁の高い位置を計測するために三脚を高くして使用していたことおよびボックスカルバート内部での音の残響の影響もあり、レーザーヘッドの振動の影響と思われるノイズレベルの増加が確認された。しかしながら、ゲート処理後の結果を見ると打音点検とほぼ同等の結果が得られており、計測自体は特に問題なく実施可能であることが判明した。なお午後は一転して風が弱くなり、平均0.63m/sとなった。最後にPC桁橋の実験時には海に近い場所での実験であったこともあり平均で3.28m/sを観測した。しかしながら、実験時にはレーザーヘッドを上向きにするために三脚を低く構えたこともあり、風速の影響はあまり受けなかった。以上の計測結果から、実験時に平均で3m/s程度以下の風速であれば、計測にはほとんど影響がないことを確認した。しかしながら、レーザーヘッドの計測位置を高くするために三脚を伸ばすと影響は風の影響を受けやすくなるため、実用の観点から見るとレーザーヘッド部にはなんらかの防風対策は必要であると思われる。

において計測できなかったという事例は実際には一例もなく、あまり表面の状態にはよらずに計測可能であると思われる。ただし、表面に穴が多数空いているような状況では、レーザー光による計測が影響を受ける可能性があり、今後検討する予定である。

(4) LDVを用いた計測距離の限界について

LDVで検出される欠陥部の信号がノイズレベルより大きいことが必要になるので、現状のレーザー出力（安全のため1mW）では5m程度以内からの計測が望ましいと思われる。ただし、赤外光を用いた高出力（10mW）の高感度LDVを使用すれば、計測距離の限界は音響側だけになり、将来的には20mを超える計測が可能になる可能性がある。

Fig.4.35 風向風速計

(3) 計測対象物の壁面状態等の影響について

吹き付けトンネル内での実験結果より、LRADを音源として用いた場合には、面的な加振になるため、測定物の表面に明らかな凹凸があっても特に問題なく計測可能であることが判明している。また、LDVを用いた振動速度計測を行っているために、反射散乱光が全く戻ってこない状況では計測できないことになるが、今までに実施した現地および供試体等の実験

5.1 強力超音波音源について

(1) 概要

非接触音響探査法の音源として使用するために、直径600mm、焦点距離5mの強力超音波音源の試作をおこなった（超音波素子総数約3200個）。また、SLDVとLRADを用いた面加振による狭領域一括精密探査に対して、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(20mmφ)を開けた（Fig.5.1(a)参照）。音源の後ろにはシングルポイントレーザを載せる架台を設けて、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ている（Fig.5.1(b)参照）。さらに、この音波放射部は、三脚上に搭載し、任意の方向を旋回計測可能としている（Fig.5.1(b)参照）。この旋回計測における利便性の為に、この音波放射部は、後方に長い操作アームを具備可能としている。シングルポイント用LDVとしてはPolytec Japan社のOFV-505を用いた。なお、振動の影響を極力避けるために防振ケースをとりつけて使用している。

(a)

(b)

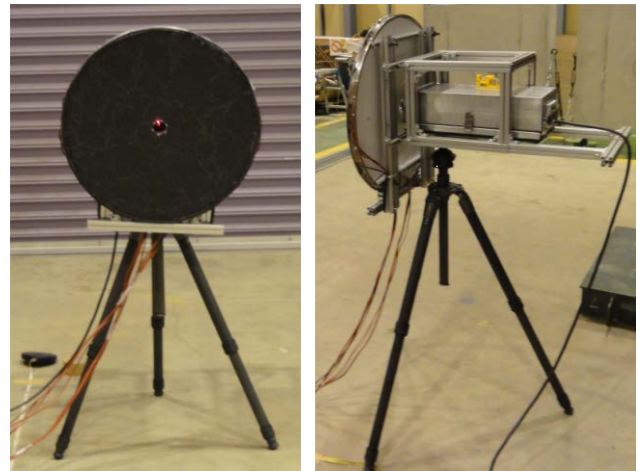


Fig.5.1 大型強力超音波音源（600mmφ、焦点距離5m）(a)正面図、(b)斜め後ろからの図

第5章 強力超音波音源を用いた欠陥検出能力

(2) 駆動回路部

今回試作した遠距離用強力超音波音源の駆動回路部は

- 外形：130 x 430 x 350 (cm)
- 駆動周波数：40 kHz
- 駆動電圧：24 V_{p-p}
- 分割チャンネル数：8
- 出力インピーダンス：各1 Ω

である。

駆動回路部は、前面パネルの共通/任意駆動信号選択スイッチ (Common/AUX DRIVE SIG. SELECT) を共通側 (Common) とすることにより、共通信号源 (COMMON SIGNAL SOURCE) からの信号が各分割チャンネルに印加されるように構成されている。従って、全てのスイッチを共通側 (Common) とすることにより、全ての分割チャンネルに同一の駆動信号を供給することができる。



Fig.5.2 駆動回路外観

5.2 音圧分布の検討

(1) 理論値

直径 60cm, 曲率半径 5m の円形凹面送波器により、波長 8mm の超音波を送波する場合に形成される音圧分布の理論値を Fig.5.4 に、方位方向の音圧分布の理論値を Fig.5.5 に示す。

Fig.5.4 より、軸上の音圧は、曲率半径に対応する距離 5m 近傍に最大値を示すこととなる。また Fig.5.5 より方位方向の音圧分布は、中心か

ら約 8cm の位置にて 0 となり、半値幅は約 10cm である。

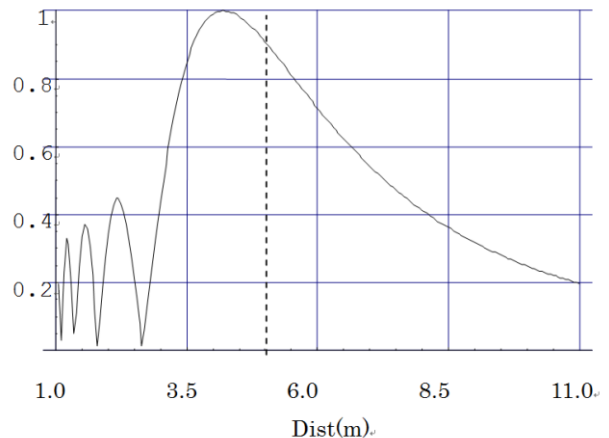


Fig.5.4 距離方向音圧分布 (理論値)

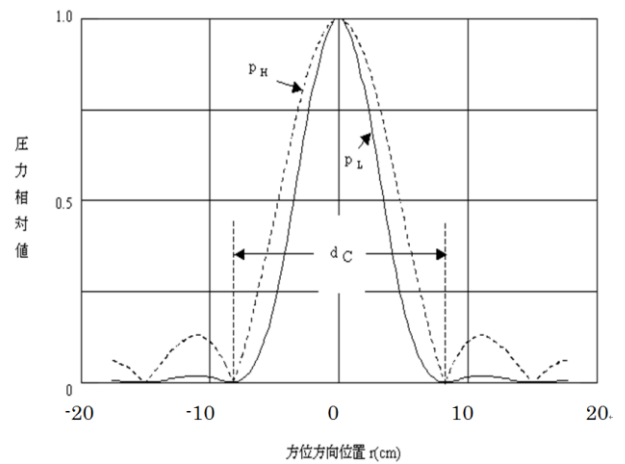


Fig.5.5 方位方向音圧分布 (理論値)

(2) 搬送波 (40.35kHz) の音圧分布

超音波音源の搬送波周波数である 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 (株アコー, TYPE4156N) を用いて計測した。音源駆動回路の Int. CLK. Gen. は OFF として、FG から 40.35 kHz のパルス波 (Duty 50%) を 3 V_{0-p}、4 ms (161 cycle) の持続で印加した。マイクロフォンで取り込んだ波形はオシロを用いて V_{pp} の最大値を読み取りプロットした。また付属アンプによる電圧増幅はしていない (0 dB 設定)。軸方向の計測結果を Fig. 5.6 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 Fig. 5.7 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 でおよそ半値に低下していることがわかる

(a)

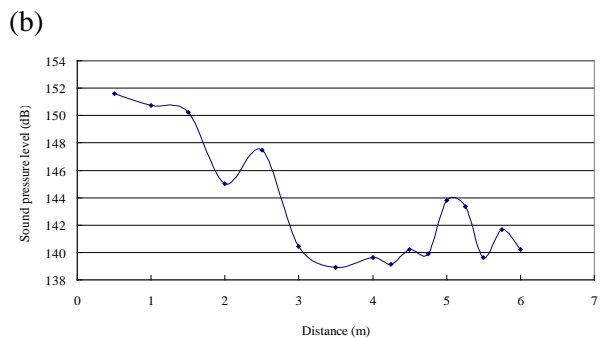
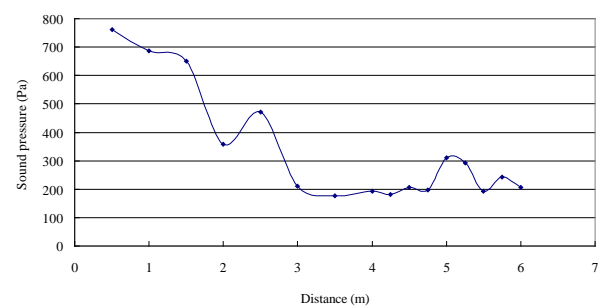


Fig.5.6 40.35 kHz, 軸方向音圧分布,
(a) 音圧, (b) SPL re 20 μ Pa.

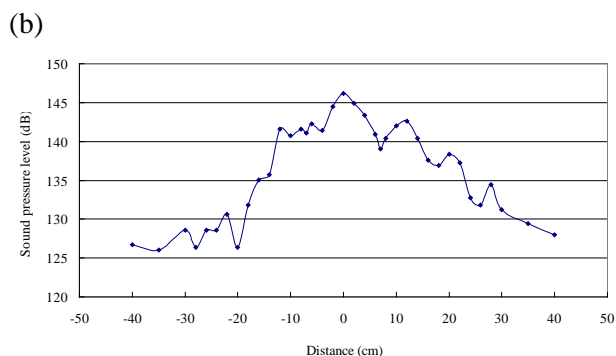
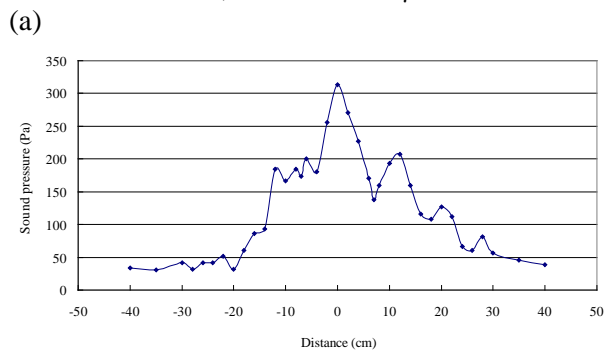


Fig.5.7 40.35 kHz, 5m 地点での方位方向音圧分布, (a) 音圧, (b) SPL re 20 μ Pa

(3) 可聴音 (1&2kHz) の音圧分布

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(小野測器, MI-1432)を用いて計測した。音源駆動回路のInt. CLK. Gen.をONとして、FGから1 kHzおよび2 kHzのパルス波(Duty 50%)を3 V_{0-p} 、4 msの持続で印加した。マイクロフォンで取り込んだ波形はSLDVのデータロガーを用いてV_{pp}の最大値を読み取りプロットした。こ

の時、各中心周波数に対し ± 250 Hzのバンドパスフィルタをかけている。軸方向の計測結果をFig. 5.8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。

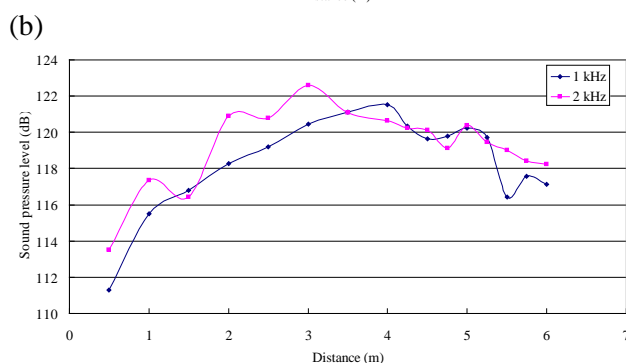
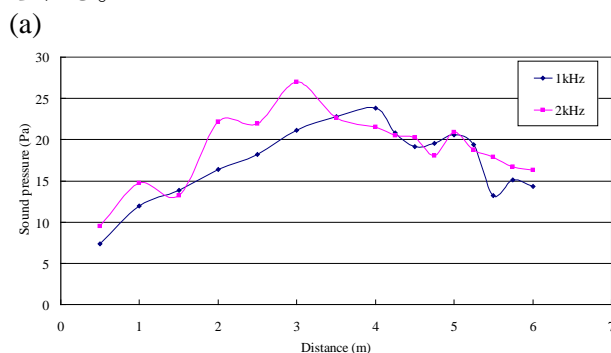
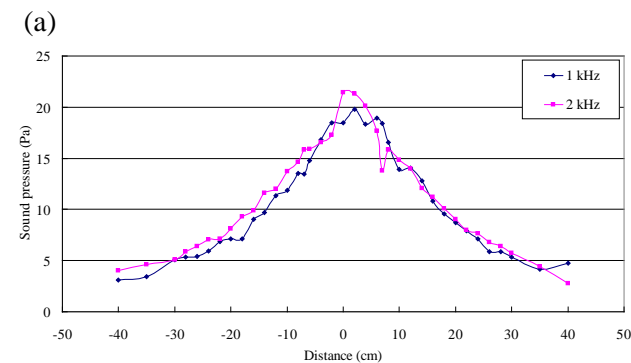


Fig.5.8 可聴音, 軸上音圧分布,
(a) 音圧, (b) SPL re 20 μ Pa

一方、両者5 m地点で再度ピークが見られる。5 m地点での方位音圧分布をFig. 5.9に示す。中心軸である0 cmの地点のピーク音圧に対し、 ± 16 cm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。照射域は ± 16 cmであり、予定より広がっているが、充分狭い領域に局限されている。



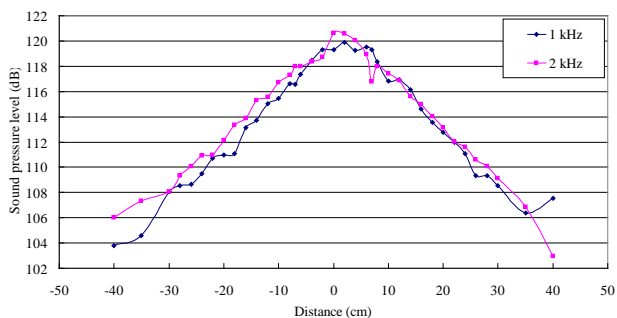


Fig.5.9 可聴音, 5 m 地点での方位方向音圧分布, (a) 音圧, (b) SPL re 20 μ Pa.

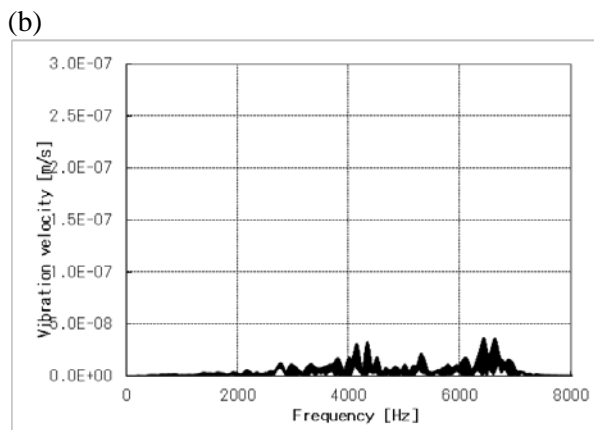


Fig.5.11 振動速度スペクトル (a) 欠陥部上、(b)健全部上

5.3 コンクリート供試験体での探査実験

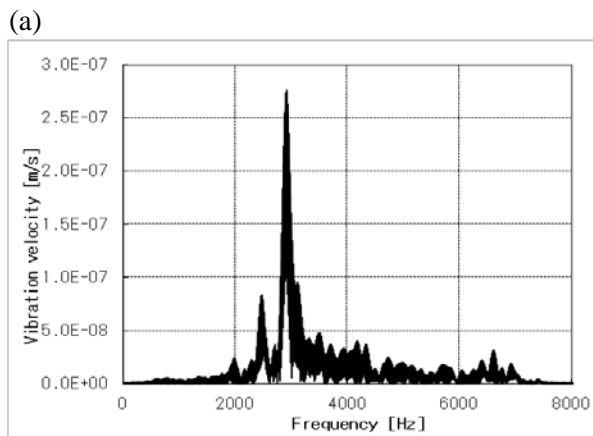
試作した強力超音波音源を用いて、実際に5mの遠隔から探査が行えるかどうか実験を行った。実験セットアップ図をFig.5.10に示す。円形欠陥部 (ϕ 300mm、深さ80 mm) と健全部に対して500Hzから7000Hzのトーンバースト波を使用して探査実験を行った。欠陥部上で健全部上の振動速度スペクトルをFig.5.11に示す。図より、LRAD同様に明確な共振ピークが観測できることがわかる。



Fig.5.10 強力超音波音源によるコンクリート欠陥探査実

5.4 強力超音波音源のまとめ

試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十分な音圧を発生できることが明らかになった。製作精度の問題から指向性はやや甘く、5mの距離で30cm程度になっているが、今後、位相制御等を行えばさらに点加振に近い状況を実現できる可能性がある。LRAD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く、かつ角度依存性もLDVと同様であることから、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。



- ・ N2U-Bridge、北陸自動車道等の実構造物での探査実験を行い、本手法が実際の構造物（RCT 桁橋、RC 床版、ボックスカルバートおよび PC 桁橋）において、従来の打音法と同様な非破壊検査を非接触の遠隔からでも実施できることを明らかにした。
- ・ 打音法による振幅値比を用いた欠陥深さ評価と比較することによりエネルギー比による欠陥検知アルゴリズムが有効であることが確認された。
- ・ 大型の強力超音波音源を試作し、シングルポイント LDV と組み合わせることで 5m の離隔で SLDV と LRAD と同様な探査が行えることを明らかにした。
- ・ 振動エネルギー比を用いた欠陥検知アルゴリズムの検討を行い、打音法ともよく一致する結果が得られた。
- ・ 本手法の測定条件としては以下のことがあげられる。
 - (1)LRAD を音源として用いた場合は、欠陥の平面的な規模とたわみ共振周波数に依存するが、面的な加振を実現するために、なるべく測定対象面に正対させて使用するのが望ましく、やむを得ず角度をつける場合でも 30 度以内に収めたほうが良い。また、面的な加振となるので、測定対象面の凹凸は受けにくい。
 - (2)強力超音波音源を音源として用いた場合には点加振に近い場合、LRAD に比べると理論上は数倍程度の角度がついても計測が可能である。（ただし、レーザーも同様であるが、測定表面の凹凸の影響は受け易くなる）。
 - (3)測定表面の濡れによる影響は少ない（ただし、測定対象面に水が流れている状況を除く）。
 - (4) 平均で 3m/s 程度以下の風速であれば、計測にはほとんど影響がないことを実験的に確認した。しかしながら SLDV、

第6章 結論

6.1 本研究により得られた成果
本研究により得られた成果を以下に列挙する。

シングルポイント用 LDV とともに高感度な計測計であるがために、レーザーヘッド

(レーザ送受信)部が振動するとノイズレベルが増加してしまい良好な計測が困難となることが予想される。したがって屋外では特に風の影響を受けやすいため、風の強い場所ではレーザヘッド部に対する防振・防風対策が必要となると思われる。

6.2 今後の課題

本研究での研究結果より、提案手法が非接触遠隔からでも従来のたたき点検に代わりとして実構造物にたいして使用できることが確認されたが、その実用化に当たっては以下のような改善課題があることも明らかになった。

(1)アンカーボルト供試体の検討・・・今回試作したアンカーボルト供試体による実験結果にはばらつきがあり、そのままでは検査には使用できないことが明らかになった。しかしながら、これはボルト自体の共振周波数が10kHz以上と高いのに対して実際の送信周波数がコンクリート構造物中の欠陥を想定した数kHz以下の周波数であったことが原因であると思われるため、より高い周波数での評価実験が必要であると思われる。実際に電磁誘導法による手法⁵⁸⁾では10kHz程度の加振で良い結果が出ている。強力超音波音源であれば、加振周波数はもう少しあげられるので、今後検討予定である。

(2)移動計測に対する対応検討・・・現状では三脚を使用しての計測のため、連続的な移動計測には対応できていない。しかしながら、強力超音波音源とシングルポイント用LDVを組み合わせた場合の広領域走査探査であれば可能性が高いと思われるので今後検討予定である。

これらの改善課題を検討しつつ、従来の近接して実施されてきた叩き点検法や打音検査法の代わりに、「遠距離からコンクリート構造物の表層欠陥(浮きや空洞)を検出するための一次スクリーニング用非破壊音響探査システムの開発」を最終目標として研究開発を今後も継続していく予定である。Fig.6.1 に将来の実現イメージ図を示す。

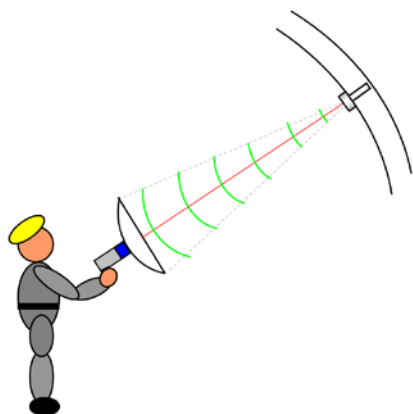


Fig.6.1 本手法の将来の実現イメージ図

謝辞

本研究を行うにあたっては多くの方にお世話になりました。最初に諸事にわたりアドバイスをいただいた国土技術政策総合研究所、道路研究部 道路構造物管理研究室室長の玉越隆史氏および主任研究官の大城温氏に深謝いたします。現地実験にあたり、N2U-Bridgeを快くお貸しいただいた名古屋大学の中村光教授およびN社の和田孝幸氏、厚さ0.5 mmのポリエチレンシートを用いた剥離供試体を提供していただいたTC社の伊藤環氏、北陸自動車道の実験場所の提供および打音検査結果の提供に協力していただいたN社の森山守氏、アスファルト供試体を実験対象として提供して頂いた金沢工業大学の木村定雄教授と打音試験結果を提供して頂いた杉山弘晃君、空洞欠陥とジャンカ供試体を提供していただいたC社の國川正勝氏、加納淳郎氏、および横浜の高島トンネルにおける実験の手配をしていただいた横浜国道事務所の羽澤栄一氏、川渕新司氏、同じく高島トンネルの実験において夜間作業の間、我々の作業を見守っていただいたTS社の土木田誠氏に感謝いたします。最後に実験に協力してくれた桐蔭横浜大学工学研究科修士2年生の赤松亮君、修士1年生の上地樹君ならびに医用工学部臨床工学科4年生の岡崎雄馬君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 島田他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術の検討・開発、-(1)レーザー自動探傷装置の概要”、土木学会第 65 回年次学術講演会予稿集 pp327-328 (2010.9)
- 2) 大村他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術の検討・開発、-(2)欠陥検出アルゴリズムの概要”、土木学会第 65 回年次学術講演会予稿集 pp325-326 (2010.9)
- 3) 御崎他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術の検討・開発、-(3)実用化における問題点抽出および試験報告”、土木学会第 65 回年次学術講演会予稿集 pp323-324 (2010.9)
- 4) 島田他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術の検討・開発、-(1) レーザーリモートセンシング装置の概要”、土木学会第 66 回年次学術講演会予稿集 pp491-492 (2011.9)
- 5) 大村他 “レーザーリモートセンシングを用いたコン

- クリート欠陥探傷技術の検討・開発,-(2)コンクリート欠陥検知・健全度判定アルゴリズムの構築-、土木学会第66回年次学術講演会予稿集 pp493-494 (2011.9)
- 6) 御崎他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術の検討・開発,-(3)振動低減手法の確立および試験報告-”、土木学会第66回年次学術講演会予稿集 pp495-496(2011.9)
- 7) 御崎他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術,-(1)シグナル/ノイズ比の向上-”、土木学会第67回年次学術講演会予稿集 pp529-530 (2012.9)
- 8) 江原他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術,-(2)欠陥検出アルゴリズム-”、土木学会第67回年次学術講演会予稿集 pp531-532 (2012.9)
- 9) 島田他 “レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート欠陥探傷技術,-(3)レーザーリモートセンシング装置の概要-”、土木学会第67回年次学術講演会予稿集 pp533-534 (2012.9)
- 10) 島田他, “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)
- 11) J. M. Sabatier and N. Xiang, “An Investigation of Acoustic-to-Seismic Coupling to Detect Buried Antitank Landmines”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Vol.39, pp.1146 – 1154 (2001)
- 12) 阿部、杉本, “SLDVを用いた極浅層地中映像化に関する研究”, 音響春季講演予稿集, 3-9-3, pp1413-1416, (2008.3)
- 13) 阿部、杉本, “SLDVを用いた極浅層地中探査法の研究”, 日本文化財探査学会第11回大会予稿集, pp5-6, (2008.6)
- 14) 阿部、杉本, “SLDVを用いた極浅層地中映像化に関する研究, -空中放射音波と弾性波振動を用いた場合の検討-”, 信学技報, Vol.108, No436, PP13-16, (2009.2)
- 15) T.Abe and T. Sugimoto, “Extremely Shallow Underground Imaging Using Scanning Laser Doppler Vibrometer”, Jpn. J. Appl. Phys. 48, pp.07GC07 pp1-3 (2009.7)
- 16) 阿部、杉本, “SLDVを用いた極浅層地中探査法の研究”, 文化財と探査, 11-1, pp8-14, (2009.8)
- 17) 杉本, “音波による遺跡探査・地雷探査システム”, 計測と制御, Vol.49, No.1, pp45-50, (2010.1)
- 18) 阿部、杉本, SLDVを用いた極浅層地中映像化に関する研究, -埋設物の検出に関する検討-, 電子情報通信学会技術研究報告, US109-425, pp1-14, (2010.2)
- 19) 阿部、杉本, ”SLDVを用いた極浅層地中探査法の研究, -埋設物の識別に関する検討-”, 文化財と探査, 11-2, pp33-38, (2010.6)
- 20) 阿部、杉本, ”空中放射音波による極浅層地中映像化, -応答周波数帯を用いた埋設物の識別に関する検討-”, 阿部冬真、杉本恒美、超音波 TECHNO, Vol.22, No.3, PP26-30, (2010.6)
- 21) T.Abe and T. Sugimoto, “Distinguishing Buried Objects in Extremely Shallow Underground by Frequency Response Using Scanning Laser Doppler Vibrometer”, Jpn. J. Appl. Phys. 49, 07HC15, pp1-4 (2010.7)
- 22) 音波を用いた探知方法,非接触音響探知システム,そのシステムで用いるプログラム,およびそのプログラムを記録した記録媒体, 特願 2010-120901 号, 発明者:杉本恒美, 阿部冬真, 出願人:学校法人桐蔭学園, 佐藤工業㈱ (2010.5)
- 23) T. Sugimoto and T.Abe, ” Non contact acoustic imaging method in the extremely shallow underground using optimum frequency range method by SLDV”, Proc. of The 20th International Congress on Acoustics (ICA 2010), P111 4pages, (2010.8)
- 24) 杉本、阿部, “SLDVを用いた極浅層地中映像化に関する研究 (VI) -最適応答周波数帯を用いた映像構成法-”, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 査読無, 1-4-4, pp1421-1424, (2010.9)
- 25) 杉本、阿部, “空中放射音波を用いた極浅層地中映像化に関する研究, -最適応答周波数帯による埋設物識別-”, 物理探査学会 第123回講演論文集, pp158-159, (2010.9)
- 26) T. Sugimoto and T.Abe, “Extremely shallow underground imaging using optimum frequency range method”, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.128, No.4, Pt.2 of 2, 3aSP12, P2381 (2010.11)
- 27) 杉本、阿部, SLDVを用いた極浅層地中探査法の研究, -最適応答周波数帯を用いた映像化法-, 文化財と探査, 12-1, pp21-29, (2010.12)
- 28) T. Sugimoto and T.Abe, “Buried object detection method using optimum frequency range in extremely shallow underground”, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 07HC18 (2011.7)
- 29) 音波を用いた探知方法,非接触音響探知システム,そのシステムで用いるプログラム,およびそのプログラムを記録した記録媒体, 特願 2010-186206 号, 発明者:杉本恒美, 阿部冬真, 出願人:学校法人桐蔭学園, 佐藤工業㈱ (2010.8)
- 30) 杉本、阿部, “SLDVを用いた極浅層地中映像化に関する研究, -位相差を用いた埋設物の検出-”, 文化財と探査, Vol.12 No.1&2 pp30-39, (2010.12)
- 31) 杉本、阿部, ”SLDVを用いた極浅層地中映像化に関する研究 (VII) -位相差を用いた埋設物の検出法-”, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 3-1-4, p.104, pp.1385-1388, (2011.9)
- 32) T.Sugimoto and T.Abe, “Non Contact Acoustic Contour Imaging Method using Phase Difference in Extremely Shallow Underground”, J. Energy and Power Engineering, Vol.6, pp.2010-2017, (2012)
- 33) 赤松亮、杉本恒美, ”SLDVとLRADを用いた非破壊探査のための非接触音響映像法に関する研究”, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 3-8-7, p.134, pp.1569-1570, (2011.3)
- 34) 音波を用いた探知方法,非接触音響探知システム,そのシステムで用いるプログラム,およびそのプログラムを記録した記録媒体, 特願 2011-164004 号, 発明者:杉本恒美, 阿部冬真, 赤松亮, 歌川紀之, 出願人:学校法人桐蔭学園, 佐藤工業㈱ (2011.7)
- 35) N.Utagawa, Ryo Akamatsu and T.Sugimoto, “Health survey of concrete in urban infrastructures by non contact acoustic imaging method”, Proc. of the 10th International symposium on new technologies for urban safety of mega cities in asia (USMCA2011), Session 7, P104, 4pages, Chaing mai, Thailand, (2011.10)
- 36) T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and S.Tsujino, “Study on non contact acoustic imaging method for non destructive inspection using SLDV and LRAD”, IEEE International Ultrasonic Symposium 2011, P2B-1(13:00-16:30), Caribe Royale, Orland, Florida (2011.10) pp.744-747.
- 37) Ryo Akamatsu, T.Sugimoto, H.Kawasaki, N.Utagawa and S.Tsujino, “Study on the Inspection for Shallow Area under Concrete Surface using

- Air-coupled Sound Wave”, Proc. of the 10th SEGJ International symposium, -Imaging and Interpretation-, Poster Session, P05, pp.84-87, 2011.11.20, Kyoto
- 38) 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之, 辻野修一, SLDVとLRADを用いた非破壊探査のための非接触音響映像法に関する研究, -遠距離コンクリート探傷検査としての実用可能性に関する検討-, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1-5-3, p.13, pp.1415-1416, (2012.3)
- 39) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino, “Non Contact Acoustic Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD”, Acoustics 2012 Nantes, Proceedings pp.835-839, 2012.04.24
- 40) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino, “Non Contact Long Distance Exploration Method for Concrete using SLDV and LRAD”, Acoustics 2012 Hong Kong, Proceedings 6pages, 2012.05.17
- 41) 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之, 辻野修一, “SLDV と空中放射音波を用いた非接触欠陥検出法に関する研究”, 日本非破壊検査協会平成 24 年度春季講演大会, 講演概要集, pp.81-84, 2012.05.22
- 42) 杉本恒美, 赤松亮, 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, -遠距離からのコンクリート浅層内部欠陥検出に関する検討-”, 物理探査学会第 126 回学術講演会 講演論文集 p56-57, 2012.05.29
- 43) 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之, 辻野修一, “長距離音響発生装置を用いた非接触欠陥検出法の検討”, コンクリート構造物の非破壊検査, Vol.4, pp.31-36 (2012.8)
- 44) 歌川紀之, 片倉景義, 赤松亮, 杉本恒美, “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, -打音法との比較-”, 土木学会第 67 回年次講演会 講演論文集 V-029, p57-58, 2012.09.06
- 45) 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, -遠距離からの探査能力に関する基礎検討”, 土木学会第 67 回年次講演会 講演論文集, V-030, p59-60, 2012.09.06
- 46) 赤松亮, 杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義, “コンクリート非破壊検査のための非接触音響映像法に関する研究, -振動速度スペクトルを用いた欠陥検出法の基礎的検討-”, 音響秋季講義集, 2-6-12, pp1489-1490, 2012.9.20
- 47) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, 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 2012, Abstract Book, 4C-2, pp94-95, 2012.10.08, Dresden
- 48) 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 -”, アコースティック・イメージング研究会, 信学技報 US2012-111, No.437, pp.1-6, (2013.2)
- 49) Tsuneyoshi Sugimoto, Ryo Akamatsu, Noriyuki Utagawa, Kageyoshi Katakura, “Study on non contact acoustic imaging using the realistic crack model”, Proc. 2013 International Congress on Ultrasonics (ICU2013) pp.408-413, 2013.05.04,
- 50) Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi.Sugimoto, Noriyuki Utagawa, and Kageyoshi 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, 査読有, (2013.7)
- 51) Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi Sugimoto, Noriyuki Utagawa, Kageyoshi Katakura, “Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Concrete Structures - Improvement of Signal-to-noise Ratio by using Tone Burst Wave Method -”, Proc. of IEEE Ultrasonic Symposium, pp1303-1306, 2012.07.24, Prague, Czech Republic
- 52) 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-”, 土木学会平成 25 年度全国大会講演概要集 VI-087, pp173-174, 査読無, (2013.9)
- 53) 北川真也, 赤松亮, 杉本恒美, 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) 隙間が異なるはく離欠陥の検出に関する検討-”, 土木学会平成 25 年度全国大会講演概要集, VI-085, pp169-170, 査読無, (2013.9)
- 54) 歌川紀之, 片倉景義, 赤松亮, 杉本恒美, “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, -(3) 音響探査法に用いる探査アルゴリズムの検討-”, 土木学会平成 25 年度全国大会講演概要集 VI-084, pp167-168, 査読無, (2013.9)
- 55) T.Sugimoto, R.Akamatsu, N.Utagawa and K.Katakura, “Non Contact Acoustic Inspection Method using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer”, The souveinir book of Asian Pacific Conference on Non-Destructive Testing 2013 (APCNDT2013), pp150-151, 2013.11.21, Mumbai, India
- 56) 非接触音響検査装置および非接触音響検査方法, 特願 2012-258888 号, 発明者:杉本恒美, 歌川紀之, 片倉景義, 出願人:学校法人桐蔭学園, 佐藤工業(株) (2012.11)
- 57) 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-, 歌川則之, 御崎哲一, 日本音響学会誌 69 巻 3 号, pp127-132, (2013.3)
- 58) 電磁バルス法に基づくアンカーボルト固着部の健全度評価に関する実験的検討, 宮田弘和, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 長岡康之, 三輪秀雄, 高鍋雅則, 木村貴圭, 西上康平, 劉軒, 田中克則, 日本非破壊検査協会 平成25年度秋季講演大会講演概要集, pp33-36, (2013.11)