

超音波アレイ探触子を用いたアスファルト舗装内部の映像化

愛媛大学大学院

愛媛大学大学院

西日本高速道路エンジニアリング四国

正会員

○中畑和之, 丸山泰蔵

非会員

武藤健太

正会員

橋爪謙治

1. はじめに

舗装は道路等に使用されており、主としてアスファルト舗装とコンクリート舗装に大別される。アスファルト舗装では、表層と基層にアスファルト混合物が用いられており、重量比で約90%が砂利などの骨材、約5%がフィラーと呼ばれる骨材間の充填剤、残りの約5%がアスファルトで構成される¹⁾。舗装の検査として、現状では路面調査と構造調査が行われている²⁾。表層以下の層が原因でアスファルト混合物が破損している場合、表面にひび割れとなって顕在化することが多く、その段階に至る前に破損の前兆となる微小な損傷を発見することが肝要である。

そこで、本研究では、表層から路盤までの領域に内在する、表面からは可視できない損傷を超音波でイメージングすることを目的とする。アスファルト混合物は多孔質であり、超音波の透過性と損傷映像化の分解能が周波数に対して相反するため、アスファルトに超音波を適用するときに適切な周波数を検討する必要がある。本研究では、複数の圧電素子をアレイ状に配置した低周波探触子の適用を考える。ここでは、共振周波数が75kHzの低周波アレイ探触子用の素子を設計・製作し、これを用いてアスファルト内部の映像化を試みた。映像化手法は、全波形サンプリング処理 (Full waveforms sampling and processing; FSAP) 方式³⁾を採用した。

2. 低周波アレイ探触子

アスファルト舗装は、多孔質であるために、深部に透過可能な周波数の選択が必要である。基礎実験として、アスファルト試験片の超音波透過実験を行った結果、最大100kHzまでは透過していることが確認できた。次に、音場シミュレーション⁴⁾を援用することで、素子のサイズやアレイのピッチ（配置間隔）を決定した。図-1(a)に示すように、素子ピッチが20mm、設計中心周波数を75kHzとして、コンポジット素子のアレイ素子を作成した。検討に使用したアレイ探触子からの放射音場の3次元シミュレーション結果を図-1(b)に示す。ここでは、 $z=0$ における $x-y$ 断面の音場をプロットしたものを示している。図-1(b)は、深さ

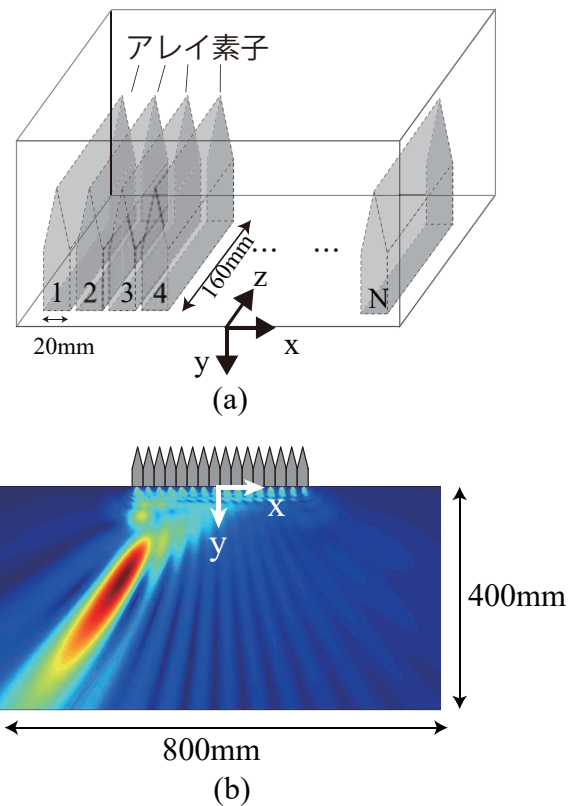


図-1 アレイ素子のサイズと素子配置

200mm, 中心から200mm左側の位置に焦点を設定した場合の結果であり、意図した位置にメインローブが送信されていることがわかる。

3. FSAP 方式による映像化原理

FSAP 方式については論文³⁾で詳細が示されているので、ここでは簡単に原理を述べる。FSAP 方式では、一列に並べた計 N 素子の1つから超音波を送信し、散乱波を各素子で受信する。いま、素子番号 i で送信し、 j で受信したときの時刻歴波形を $M_{ij}(t)$ とする。これを、すべての素子の組み合わせで送受信し、ローカルメモリに保存する。映像化したい領域の画素 $\mathbf{x}[k, l]$ にビームが集束するように、 $M_{ij}(t)$ にディレイ $\Delta t_{kl}^{ij} (i, j = 1, \dots, N)$ を設定して、以下のように加算処理を行う。

$$F(\mathbf{x}[k, l], t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij}(t - \Delta t_{kl}^{ij}) \quad (1)$$

映像化のためには、アレイの中心 $\mathbf{x}^o$ から画素 $\mathbf{x}$ までの距離に相当する伝搬時間 $t = T_{kl}^o (= 2|\mathbf{x} - \mathbf{x}^o|/c)$ の

Key Words: アスファルト舗装, 超音波, アレイ探触子, 全波形サンプリング処理, 音場計算

〒790-8577 愛媛県松山市文京町3 愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻

F の値を抽出する．すなわち， $I(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}[k, l], T_{kl}^o)$ の値を画素上にプロットする．ここで， c は検査対象の音速である．各画素の I の値にカラー or 濃淡をつけて表示することにより，内部構造を画像として出力する．なお，対象がアスファルト材料（表層）だけであれば，上記の FSAP 方式を適用できるが，ここでは路盤以深も対象とするため，各層の縦波音速 c_α を考慮したアルゴリズムに改変した．2つの異なる媒質の界面で，超音波はスネルの法則を満足するように屈折し，一部は反射することを想定して路程を計算した．

4. 映像化の検証結果

高速道路の部分補修に使用している密粒度アスファルト混合物（再生密粒度，最大粒径 13mm）を表層の材料として，舗装のモックアップを作成した．アスファルト混合物は，粗骨材，細骨材，フィラー，瀝青材から成る．瀝青材はストレートアスファルトを使用し，現場配合でアスファルト量は 5.5% とした．表層の厚さはおよそ 100mm とした．路盤として最大粒径が 20mm の普通コンクリートを想定し，路盤の厚さは 300mm とした．図-2(a) に示す試験体 A は，アスファルト混合物とコンクリートの界面に人工欠陥を設けたもので，表層の剥離を想定したものである．一方，図-2(b) に示す供試体 B は，コンクリート内部（界面から下に 150 mm）に人工欠陥を設けたもので，路盤内部の欠陥を想定したものである．人工的な欠陥としてスリット（空隙厚 10 mm）を作製し，このスリットをイメージングする．なお，硬化後のアスファルト混合物の縦波音速は $c_A = 3100$ m/s，コンクリート材料のそれは $c_B = 4300$ m/s であった．

FSAP 方式による映像化範囲は e_1 方向に 300mm， e_2 方向に 500mm の断面とし，分解能は 1mm とした．図-2(a) の右図をみると，アスファルトとコンクリートの界面に高い指示が現れている．これは，アスファルトとコンクリートの音響インピーダンスが異なるために散乱波が生じているためである．また，図-2(b) の右図では，コンクリート内部に設けた人工欠陥が鮮明に映像化されている．また，コンクリートの底面部も検出できていることがわかる．

5. まとめ

本研究では，アスファルト構造物を対象として，縦波超音波を用いた映像化手法について示した．映像化手法として FSAP 方式を採用したが，表層と路盤で音

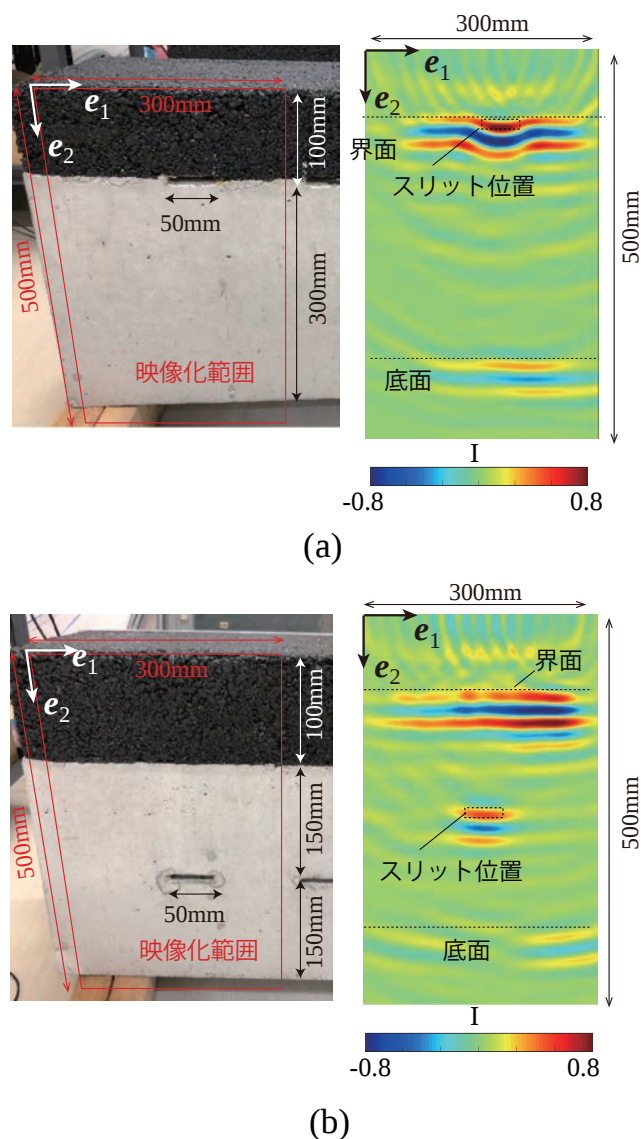


図-2 (a) 試験体 A の映像化結果，(b) 試験体 B の映像化結果

速が大きく異なるため，この層構造を考慮したアルゴリズムへと改良を行った．表層を模擬したアスファルト混合物と路盤を模擬したコンクリートからなる供試体を作製した．この結果，表層と路盤の界面に設けた人工欠陥（スリット）や，路盤内部の欠陥が良好に再構成できた．実道路では本供試体よりも大きな圧力で締め固められているため，界面部での反射波の影響については，実際のアスファルト舗装での検証が望まれる．

参考文献

- 1) 舗装工学編集委員会，舗装工学，土木学会，1995.
- 2) 舗装委員会 舗装設計施工小委員会，舗装点検必携 平成 29 年度版，日本道路協会，2017.
- 3) 中畑和之ら，全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成，非破壊検査，Vol.59, No.6, pp.277-283, 2010.
- 4) Zhao, X. and Gang, T., Nonparaxial multi-Gaussian beam models and measurement models for phased array transducer, *Ultrasonics*, Vol.49, pp.126-130, 2009.