コンクリート内部を高精度に3次元観測可能な超音波アレイセンサの開発

Development of an Ultrasonic Array Sensor Capable of 3-Dimensional Observation about the Inside of Concrete with High Accuracy

秋　池　孝　則　Takanori Akiike
島　田　　　尚　Takashi Shimada
山　極　昭　成　Akinari Yamagiwa
大　西　喬　之　Takayuki Onishi

要　旨

高度経済成長期に建設された橋梁などの多くはコンクリート構造物の老朽化が進んでおり，構造物を破壊することなく内部の状態を効率的に観測することが求められている。当社では超音波技術を活用し，コンクリート内部を高い精度で3次元観測可能な超音波アレイセンサを開発した。3次元観測を行うためには，アレイ化に伴う高速な信号処理によるビームフォーミングとS/Nの良い超音波プローブを開発する必要があった。信号処理についてはFull waveforms sampling and processing（FSAP）及び当社独自の高精度化処理を，プローブについては多孔質材及び高減衰バッキング材の技術を組み合わせることで，コンクリート内部の画像の高精度化を実現した。今後は空洞検知に優れる超音波方式と鉄筋検知に優れる電磁波レーダ方式を融合させ，インフラ構造物の効率的なメンテナンスを実現し，さらなる社会貢献をめざす。

Abstract

Many concrete structures such as bridges constructed during the period of high economic growth are aging, and observing the internal conditions efficiently without destroying the structure is demanded. JRC has developed an ultrasonic array sensor capable of 3-dimensional observation for the inside of concrete in high accuracy using ultrasonic technology. In order to perform 3-dimensional observation, it was necessary to develop beamforming by high-speed signal processing associated with arraying, and ultrasonic probe with good S/N. In signal processing, by combining Full waveforms sampling and processing (FSAP), and JRC's own high-accuracy processing, and the technology of porous materials and high-attenuation backing materials for probes, JRC has realized high-accuracy of images inside concrete. In the future, by combining the ultrasonic method, which excels in cavity detection, and the electromagnetic wave radar method, which excels in reinforcing bar detection, JRC will realize efficient maintenance of infrastructure construction and aim for further social contribution.

1. まえがき

日本の高度経済成長期からおよそ50年が経過し，多くのインフラ構造物の老朽化が問題視され，その維持管理が求められている。維持管理は，非破壊検査による点検が通常であり，専門技術者が目視や打音により官能的に判断している。今後，より定量的な評価の手法の確立や維持管理の省力化が課題である。

これらの要求に答えるため，当社ではコンクリートの内部構造を3次元で観測可能な超音波アレイセンサとその信号処理技術を開発した。センサは，コンクリートの劣化により生じる空洞検知に優れる超音波プローブを採用し，探査面に装置を置いて測定するだけで非破壊で検査できる。

本稿では，超音波アレイセンサとその信号処理技術の概要とその特長を述べ，シミュレーションデータと供試体での実測データの検証結果を報告する。

2. 超音波アレイセンサの概要

超音波アレイセンサは，多数の超音波プローブから得られた受信信号に遅延処理を行い，任意の画素に集束ビームを作成する，いわゆるビームフォーミング手法により3次元の位置を即時に計測するマトリクスアレイ装置である。本装置は，簡単な操作で，コンクリート内の欠陥（空洞や空隙）を早期検知することができる。本節では，当社が試作した超音波アレイセンサのシステム概要と仕様について説明する。

2.1　システム概要

超音波アレイセンサのシステムは，図1に示すようにセンサ部と信号処理部によって構成される。

図1　超音波アレイセンサシステムの構成
Fig.1　Configuration of Ultrasonic Array Sensor System

(1)　超音波プローブ技術

センサ部は，超音波プローブを2次元で配置している。表1に超音波と電磁波の散乱特性を示す。超音波は空洞・空隙で完全反射するため，空洞探知性能が高い。

表1　超音波と電磁波の散乱特性
Table 1　Scattering Characteristics of Ultrasonic Wave and Electromagnetic Wave

	超音波	電磁波
空洞・空隙	散乱大	散乱小
鉄筋	散乱小	散乱大
水分	散乱小	散乱大
骨材	減衰	減衰

超音波を用いた近距離探査では振動子の残響が多いとターゲットからの受信信号が埋もれてしまう。残響の影響を低減させるためには，広帯域の振動子が必要となる。コンクリート探査に有効な周波数は数十～数百 kHz と低く，従来使用されていたバルク型PZT振動子において困難であった広帯域化が課題とされた。広帯域化の課題を受け，本開発では，超音波プローブのマトリクスアレイにポーラス（多孔質）PZT振動子を採用した。図2に多孔質圧電材の構造を示す。多孔質圧電材は，セラミックスの中に空孔を均一に分散させた複合構造で，バルク型PZT振動子に比べて外力により変形し易い。このため，特に受信感度が優れるという長所をもつ。ポーラスPZT振動子は機械的Q値が低く広帯域であり，発射信号のパルス幅を小さくできるため，近距離探査における残響を低減することができる。

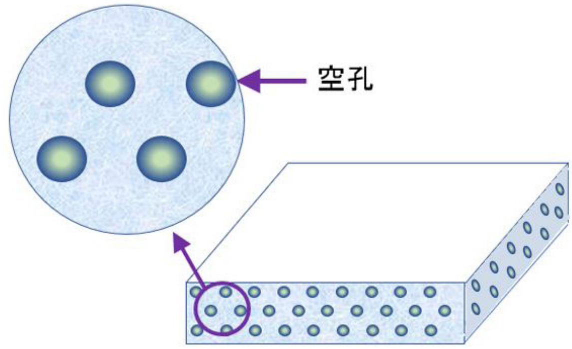


図2　多孔質圧電材の構造
Fig.2　Structure of Porous Piezoelectric Material

超音波プローブの残響を低減するためには，高減衰のバッキング材（不要な超音波を減衰させる抑振材料）の開発が必須である。このため，バッキング材として当社独自の高減衰材料を開発して採用することにより，残響低減を実現した。

また，従来，プローブとコンクリートとの接触面は接触媒質としてカップリングジェルを使用しているため，塗布や清掃作業などにより作業性が低下していた。このため，横波プローブ技術を開発することでカップリングジェル等を使用しないドライカップリングを実現した。

(2)　FSAP信号処理

信号処理部は，Full waveforms sampling and processing（FSAP）方式を採用している[1]。これは複数の超音波プローブ信号に対しビームフォーミングを行うもので，S/N の改善に貢献する。コンクリート構造物を超音波探査する際，コンクリートを構成する骨材で反射する超音波信号がノイズとなり，測定を困難にしている。その課題を解決するため，FSAP方式を用いることで，骨材からの反射波信号を抑圧した。一方で，FSAPにおける3次元データの生成には膨大なデータ処理が必要となり，特にビームフォーミングの処理量は，画像化する3次元空間サイズに大きく左右される。ビームフォーミングにはGPUによる並列計算を導入して高速化を図っている。

(3)　超音波伝搬速度推定処理

FSAP方式で，任意の位置にビームフォーミングを行うためにはコンクリート内の音速を推定する必要がある。
本装置では，音速は自動推定するため，ユーザが手動で設定する必要はない。

2.2 システム仕様

超音波アレイセンサの仕様を表2に示す。アレイセンサの素子数はそれぞれ64（16×4）素子，128（16×8）素子であり，演算路程数はそれぞれ4032通り，16,256通りである。演算路程数とは送受信素子の全組み合わせから同一素子の送受信数を減算したものである。探査可能な深度の上限は200 mm程度であり，画像表示は3次元，2次元，1次元のいずれも可能である。またGPUの採用により，観測された画像は1秒程度で表示される。

表2　超音波アレイセンサの仕様
Table 2　Specifications of Ultrasonic Array Sensor

項目	仕様	
センサ種類	超音波	
振動モード	縦波	横波
送信周波数	200 kHz	125 kHz
接触媒質	要	不要
素子数	64(16×4)素子	128(16×8)素子
演算路程数	4032通り	16,256通り
深度上限値	200 mm程度	
画像表示	3次元，2次元，1次元	
演算時間	1秒程度	
寸法	250(W)×150(H)×250(D) mm	

3. 超音波プローブ技術

図3にポーラスPZT振動子を用いたマトリクスアレイ用超音波プローブの外観を示す。

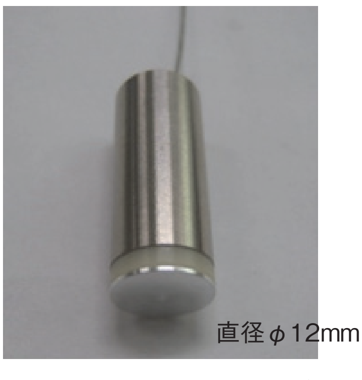


図3　ポーラスPZT振動子を用いた超音波プローブ
Fig.3　Ultrasonic Probe using Porous PZT Transducer

図4にABS樹脂供試体をポーラスPZT 振動子で測定した際の受信信号を示す。広帯域な受信信号が得られており，従来のバルク型PZT振動子と比較して，短いパルス幅を実現している。

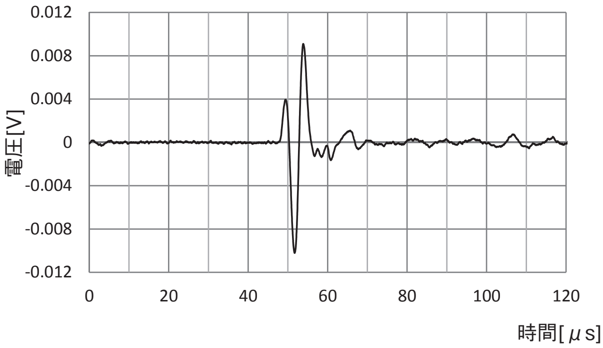


図4　ポーラスPZT振動子で測定した受信信号
Fig.4　Received Signal Measured with Porous PZT Transducer

4. FSAP信号処理

4.1 信号処理概要

本装置では，信号処理にFSAP方式を採用している[(1)]。FSAP方式は，超音波プローブのすべての素子の組み合わせで得られる信号を保存しておいて，コンピュータ上で時間遅延を考慮して集束ビームを作成する手法である。元の信号がメモリに保存されるため，計測後もビームフォーミング処理や周波数フィルタ（Wiener filter等）を用いた波形処理による分解能向上を図ることが可能である。

図5に示すように，素子iから超音波を送信し，素子jで受信した信号$S_{ij}(t)$をSignal matrix（波形記憶マトリクス）に保存する。送信する素子と受信する素子を変えることにより，$N\times N$通りの送受信の組み合わせの信号が記録される。その後，各々の画素にビームが集束するよう，各々の送受信信号に遅延制御を行い，集束ビーム$F\,(x[k,l,m],t)$を合成する。$F\,(x[k,l,m],t)$は，式(1)で計算される。

$$F\,(x[k,l,m],t)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}S_{ij}\left(t-\Delta t_{klm}^{ij}\right) \tag{1}$$

集束ビームから路程に相当する振幅を抽出することにより，画像化を行う。

超音波プローブで受信される信号には，プローブの周波数特性や装置の周波数特性に起因する波形歪み，装置内の電気回路で生じるノイズ等も含まれており，受信信号をそのまま画像化しても高精度な画像が得られない。この課題を解決するため，式(2)に示すように，Wiener filterを用いて空洞部からの散乱成分のみを抽出している。

$$\frac{S_{ij}(\omega)}{S^{\mathrm{ref}}(\omega)}=\frac{S_{ij}(\omega)S^{\mathrm{ref}}(\omega)^{*}}{|S^{\mathrm{ref}}(\omega)|^{2}+\varepsilon^{2}\max\{|S^{\mathrm{ref}}(\omega)|^{2}\}} \tag{2}$$

「ω：周波数域　＊：複素共役　S^{ref}：参照信号　ε：フィルタパラメータ」。

FSAP方式では，信号の送受信を1素子ずつにより行い，これらの信号をビームフォーミングするために処理に膨大な時間がかかっていたが，演算性能の向上が近年著しいGPUを用いることにより短時間で処理することが可能となった。

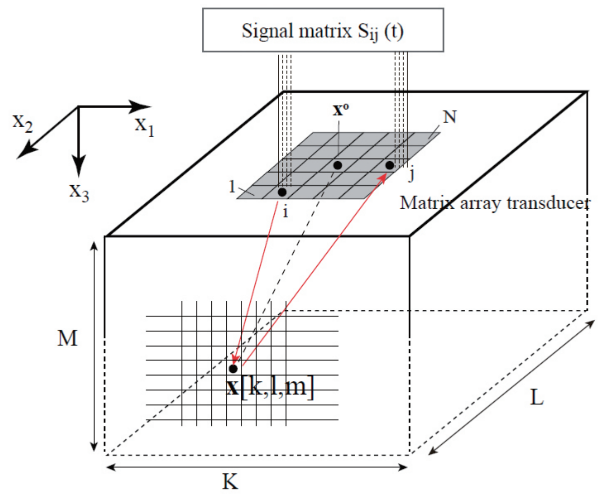


図5　N素子で構成される超音波マトリクスセンサの模式図[1]
Fig.5　Schematic of Ultrasonic Matrix Sensor with N Elements

4.2　処理高速化の検証

処理高速化の検証結果として，図6にGPUとCPUによるビームフォーミング計算処理時間の比較データを示す。CPU計算は画素数が増加すると，ほぼ線形に計算時間が増加するが，GPU計算はほとんど変化しないことを確認できた。

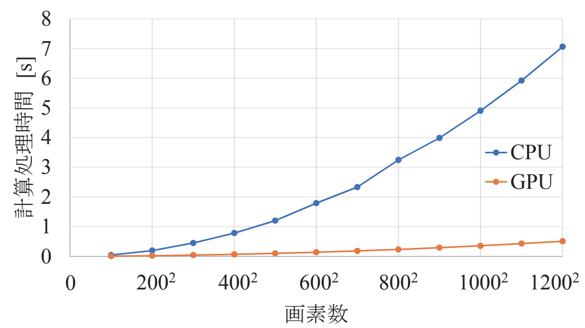


図6　GPUとCPUによるビームフォーミング計算処理時間の比較
Fig.6　Comparison of Beamforming Calculation Time by GPU and CPU

一例として，解像度2.5 mm，200×200×200 mm空間，素子数256（16×16）chマトリクスアレイの場合のメモリアクセス回数は図4のパラメータを用いて記述すると，式(3)で示される通り，膨大となるが，GPUの並列処理を用いることで高速化が可能となる。

$$
\begin{aligned}
&K \times L \times M \times N^2 \\
&= 81 \times 81 \times 81 \times 256 \times 256 \\
&= 34{,}828{,}517{,}376
\end{aligned}
\quad (3)
$$

表3は，256 chで200×200×200 mm空間を2.5 mmと5.0 mmの解像度で画像化した場合の3次元画像生成時間をGPUとCPUとで比較した結果を示す。解像度5.0 mmにおける3次元画像生成時間の両者の差は50倍以上である。

表3　GPUとCPUによる3次元画像生成時間の比較
Table 3　Comparison of 3-Dimensional Image Generation Time by GPU and CPU

	3次元画像生成時間（200×200×200 mmの空間）	
	解像度2.5 mm	解像度5.0 mm
CPU処理	428秒	55秒
GPU処理※	8秒	1秒

※）この数値は平成26年度愛媛大学との共同研究結果のものです。

5.　超音波伝搬速度推定処理

FSAP方式において，明瞭な画像を得るためにはコンクリート内を伝搬する音速の正確な値が必要である。そのため，コンクリート中の音速を推定するにあたっては±4%の推定精度が目標となる。本装置では図7に示す方法[2]で音速を推定している。これは「底面反射波」を利用する手法であるが，波の振幅の大小ではなく波の伝搬特性を用いており，底面反射波が弱い場合でも精度の高い音速推定が可能となる。処理方法はまず，図7(a)のように波形整形処理された信号を素子間距離ごとに並べる。次に，図7(b)のように各信号の極大値の時刻を取り出して列挙する。この「素子間距離と極大値時刻」グラフの曲線には，波の経路の違いが特徴として現れる。底面反射波のピークは波形の最大値ではなくても極大値である可能性は高いため，極大値の時刻を列挙して特徴的な曲線を探索する。すなわち，「素子間距離と極大値時刻」グラフからフィッティングで底面反射波の伝搬を見つける。そして，その曲線から音速推定値を得る。この方法は，図7(c)に示すように，底面反射波の到達時間は音速と反射深さに依存した双曲線を示すことを利用したものである。

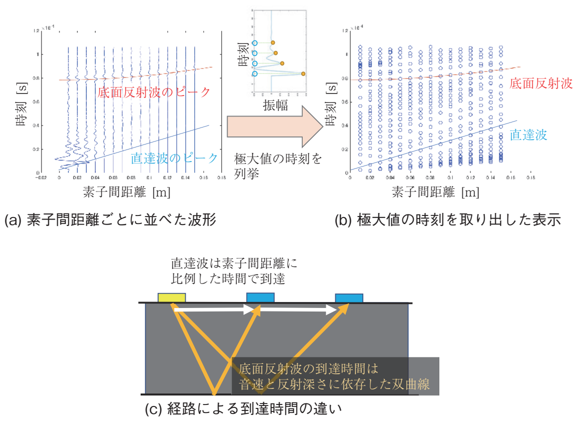


図7　超音波伝搬速度推定処理の概要
Fig.7　Outline of Ultrasonic Propagation Velocity Estimation Processing

6. 検証実験

超音波シミュレーションデータによる評価及びコンクリート供試体を用いた実測データによる評価を実施した。両評価における共通条件を表4に示す。

表4 「シミュレーションデータによる評価」と「実測データによる評価」の共通条件
Table 4 Common Conditions of Evaluation by Simulation Data and Actual Measurement Data

条件	値
コンクリート縦波音速	4000 m/s
ターゲット種類	空洞
ターゲット直径	10 mm
ターゲット深度	100 mm

6.1 シミュレーション評価

図8に超音波シミュレーションモデルを示す。コンクリートのモデルには空洞以外に骨材や気泡などを配置し，6.2 実測評価のコンクリート供試体を模した。

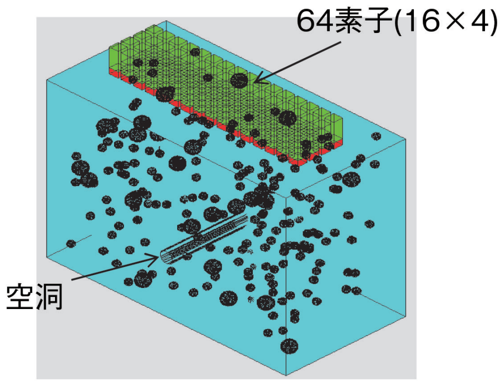


図8 超音波シミュレーションモデル
Fig.8 Ultrasonic Simulation Model

図9にシミュレーションデータの3次元解析結果を示す。エコー画像により，空洞の位置と形状が鮮明に識別できる。なお，空洞部分以外のエコー画像は気泡からの反射によるものである。

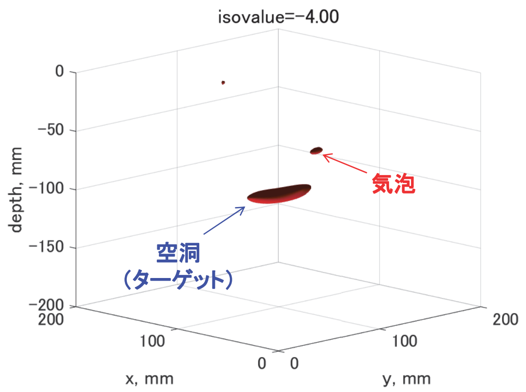
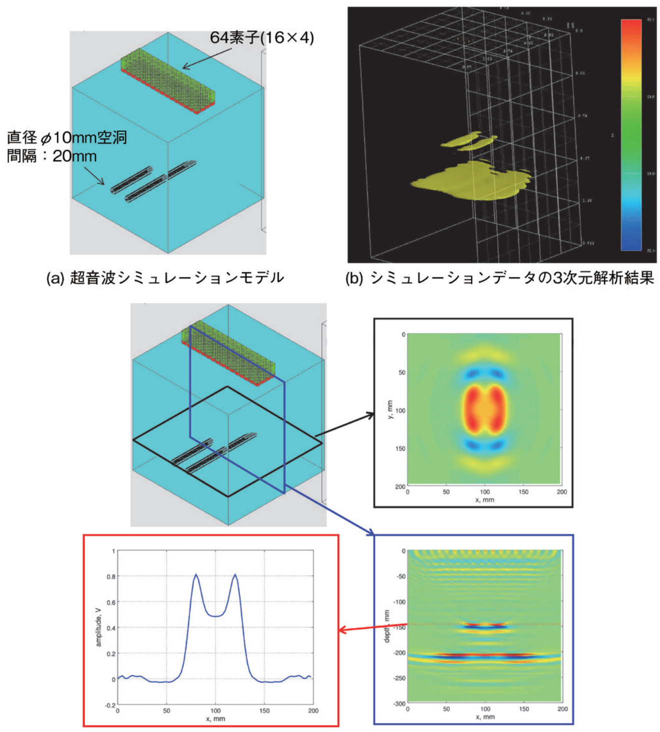


図9 シミュレーションデータの3次元解析結果
Fig.9 3-Dimensional Analysis Result of Simulation Data

6.1.1 水平方向分解能の検証

水平方向分解能の検証結果を図10に示す。図10(a)は直径10 mmの空洞が水平方向に間隔20 mmで配置されている欠陥モデルである。図10(b)は3次元解析結果である。水平方向の間隔が20 mmの空洞が明瞭に識別できる。図10(c)は2次元解析結果である。右下の画像は空洞を含む水平方向の断面図を示している。左下のグラフは断面図の赤色の点線上の値を抽出してグラフ化したものである。この図からも2つの空洞が鮮明に識別できていることが示されている。



(c) シミュレーションデータの2次元解析結果

図10 水平方向分解能の検証結果
Fig.10 Verification Result of Horizontal Direction Resolution

6.2　実測評価

図11にコンクリート供試体の測定の様子を示す。

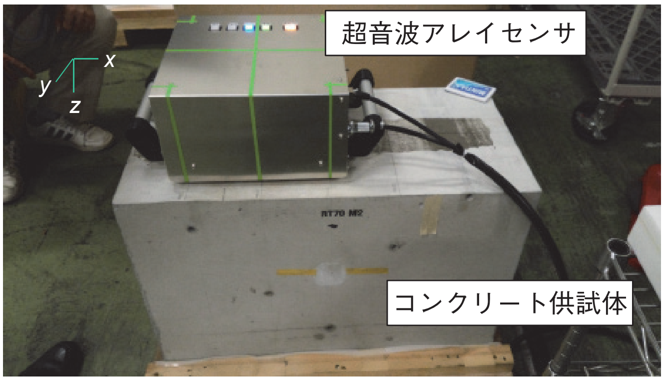


図11　コンクリート供試体の測定の様子
Fig.11　Measurement Situation of Concrete Specimen

図12に実測データの3次元解析結果を示す。超音波アレイセンサの中心がターゲットの中心に来るようにアレイセンサを設置した。シミュレーションデータの3次元解析結果（図9）と同様，実測データにおいても空洞の形状が明確に画像化されており，シミュレーション結果と同等に実機での有効性を確認した。なお，空洞部分以外のエコー画像は気泡からの反射によるものであると考えられる。

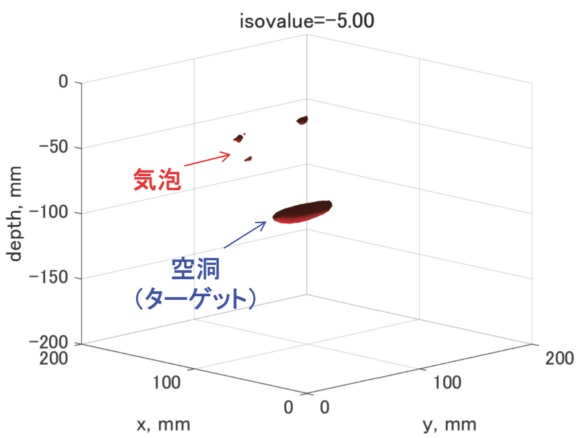
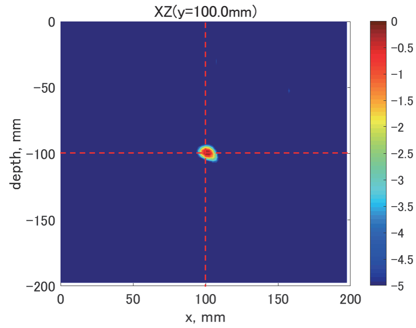
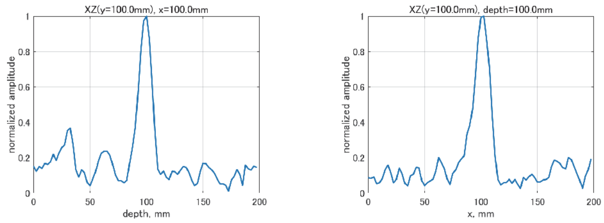


図12　実測データの3次元解析結果
Fig.12　3-Dimensional Analysis Result of Actual Measurement Data

図13に実測データの2次元解析結果を示す。グラフは空洞位置の1次元解析結果である。本図においても空洞が識別できていることが示されている。



（a）2次元画像



（b）振幅信号（深度方向）　　（c）振幅信号（x方向）

図13　実測データの2次元解析結果
Fig.13　2-Dimensional Analysis Result of Actual Measurement Data

7.　あとがき

当社の超音波技術とFSAP方式の信号処理を組み合わせ，コンクリート内部を高精度で3次元観測を行うことが可能な超音波アレイセンサを実現した。空洞検知能力が高い超音波を用いることにより，コンクリート内部の劣化を早期に検知することが可能である。また，コンクリート内部の劣化は鉄筋部位で発生することが多いため，鉄筋検知能力に優れる電磁波レーダ(3)(4)と融合させることで，インフラ構造物の効率的なメンテナンスが実現できる。今後フィールド試験を行い，実際の劣化に関するモデル作成や，AI技術等の活用により，より定量的な評価の手法の確立や維持管理の省力化を目指す。

謝辞

信号処理技術開発は，愛媛大学の中畑和之教授と共同で実施致しました。本内容は平成26年度愛媛大学との共同研究結果となります。超音波プローブ開発は，グループシナジー効果を発揮するために，日清紡ホールディングス，上田日本無線と共同で実施致しました。本装置の開発にあたりご指導，ご協力いただいた関係各位に感謝致します。

特許出願：5件

技術論文

参考文献

(1)　中畑和之，堀口貴志，“GPU計算を実装した全波形サンプリング処理方式による内部欠陥の三次元超音波映像化”，日本機械学会論文集，Vol. 81，No. 832 (2015)，p. 15-00471.

(2)　秋池孝則，後藤貴宏，“埋設物探査装置および埋設物探査用音速推定方法”，特願2018-207021

(3)　製品紹介“新型ハンディサーチ NJJ-200”，日本無線技報，No. 65，2014，pp. 33.

(4)　飯田洋志，大倉禎人，戸来仁，石井武，“RCレーダー NJJ-95A ハンディサーチ”，日本無線技報，No. 48，2005，pp. 65-68.

用　語　一　覧

FSAP: Full waveforms sampling and processing
（全波形サンプリング処理）

GPU: Graphics Processing Unit
（画像処理装置）

PZT: Lead Zirconate Titanate
（チタン酸ジルコン酸鉛）

AI: Artificial Intelligence
（人工知能）