

その場計測を可能とする 高性能ポータブル超音波検査技術

—フェイズドアレイ超音波探傷装置「ESシリーズ」—

High-performance Portable Ultrasonic Flaw Detector for In Situ Measurement

郷 俊匡

Go Toshimasa

渋谷 亮治

Shibuya Ryoji

大貫 和彦

Onuki Katsuhiko

増田 浩

Masuda Hiroshi

種々ある非破壊検査技術の中でも超音波探傷技術は、部材内部の欠陥を検出する手法として、X線技術と並んで広く用いられている。近年、工業界において、その適用性に注目が集まりつつあるフェイズドアレイ探傷法は、1980年代から医療分野で発展した技術であり、1990年代以降には、原子力、鉄鋼、航空機、鉄道車両など、さまざまな産業分野に応用されている。

このような状況の下、株式会社日立パワーソリューションズは、高精度で高機能なフェイズドアレイ超音波探傷装置「ES3500」を純国産技術によって開発し、今回、そのポータブル型である「ES1000」を完成させた。

1. はじめに

フェイズドアレイ超音波探傷装置は、探傷結果を二次元画像で表示できるため、探傷時間の短縮や欠陥サイジング性能向上など従来の超音波探傷装置に比べ優れた性能を有している。近年、その高機能性から、より高い信頼性が求められる原子力や航空機分野へと適用範囲が広がっており、さらに一般市場のニーズも高まってきている。

日立パワーソリューションズは、多くのユーザーのニーズに応える超音波探傷装置を開発・製造してきた。このたび、フェイズドアレイ超音波探傷装置市場で、需要が伸びてきているポータブル型の「ES1000」の開発を完了し、市場への投入を開始した。

「ESシリーズ」は、超音波の周波数が25 MHz以上の高周波領域に対応した「ES5000」と、20 MHz以下の一般的周波数に対応した「ES3500」、今回開発したES3500ポータブル型である「ES1000」のラインアップとなっている。

ここでは、ESシリーズの概要とES1000の開発内容について述べる。

2. 日立フェイズドアレイ超音波探傷装置の概要

2.1 フェイズドアレイ探傷法

フェイズドアレイ探傷法は、従来のシングル探触子による手法とは異なり、複数の小さな超音波振動子(素子)から成るアレイ探触子を用い、各素子の送受信タイミングを電子的にコントロールして探傷する技術である。このタイミングのパターンを変えることで、超音波ビームの向きや、焦点を変えることが可能となる。

送信時の原理図を図1に示す。1つのトリガ信号をそれぞれの素子に分配する際に遅延時間制御を行い、時間差を与える。アレイ探触子から発生する波面は、遅延時間に応じた角度を持った方向へと進む[同図(a)参照]。この遅延時間制御に円弧状の時間差を与えた場合、超音波の波面はある1点に焦点を結ぶことになる[同図(b)参照]。こ

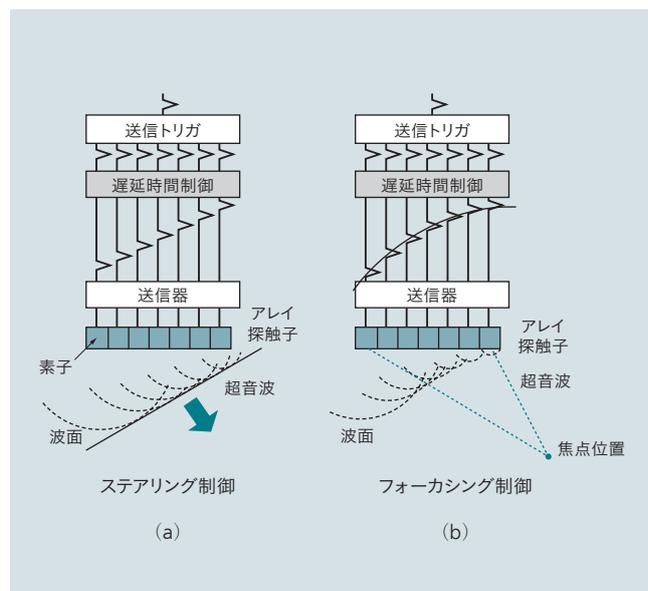


図1 | フェイズドアレイ探傷法の原理

ステアリング制御で超音波の進行方向を、フォーカシング制御で焦点位置を設定する。

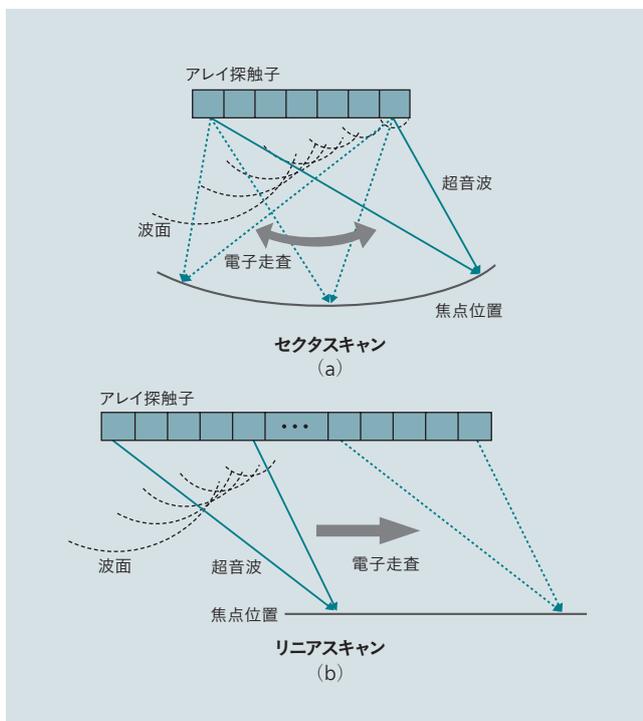


図2 | フェイズドアレイ探傷法の走査パターン

セクタスキャンは超音波ビームを扇形に走査する。リニアスキャンは焦点位置を固定化することで高速に広範囲の検査を行うことができる。

の遅延時間の制御を総称してフォーカルローと呼び、この技術によって試験体内部に存在する欠陥の検出性向上や、欠陥サイジング能力を高めることができる。

また、フェイズドアレイ探傷法における超音波ビームの電子走査方法には、フォーカルローを変えて探傷画像を作

成するセクタスキャンとフォーカルローを固定した状態で振動子の切り替えを線形に行うリニアスキャンの2パターンがある(図2参照)。

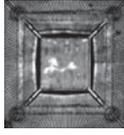
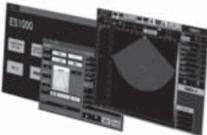
2.2 フェイズドアレイ超音波探傷装置の開発実績

1991年に産業用の1号機として開発された「E320」は、2 MHzと5 MHzの固定周波数であったが、探傷画像が二次元化され、鉄道レールの検査などに適用されていた(図3参照)。その後、2001年に現在のES3500の原型モデルとなる「ES3100」が完成した。ES3100は周波数を1 MHzから10 MHz帯域まで拡大し、同時励振24素子によるフルデジタル電子走査で超音波ビームを形成し、より高精度な検査を可能とした。火力発電用タービンブレードの固定部や鉄道車軸の検査に用いられるようになっている。

次世代のESシリーズは、高周波領域の開発が進められ、2005年には75 MHzまで対応するES5000を投入し、高い周波数領域での探傷が求められる半導体電子部品や薄板鋼板の検査に適用されている。

一方、2008年に開発した、ES3100の後継機であるES3500は、ES5000で培ったコア技術をフィードバックし、従来機よりもさらに機能・性能・システム対応力を高めることで、現在、航空機の主翼梁(はり)材の検査などに適用されている。

ES1000はES3500と同じ周波数帯域に属するが、用途を製造や保守現場の手動検査に最適なポータブル型装置

開発年度	1991	2001	2005(販売中)	2008(販売中)	2013(販売中)
装置名	E320	ES3100	ES5000	ES3500	ES1000
外観					
特徴	アナログ走査, 産業用1号	デジタル走査, 汎用型	高周波, 高分解能	コンパクト型, 高性能	ポータブル型, 高性能
周波数/励振数	2 MHz, 5 MHz/16素子	1 MHz~10 MHz/24素子	25 MHz~75 MHz/32素子	0.5 MHz~20 MHz/32素子	0.5 MHz~10 MHz/16素子
適用例	 <ul style="list-style-type: none"> レール継ぎ目, ボルト穴 ボイラ管台 	 <ul style="list-style-type: none"> タービンダブテイル 車軸(鉄道) グラファイト材 PD認証 	 <ul style="list-style-type: none"> 半導体電子部品 車載用電子デバイス 薄板鋼板 	 <ul style="list-style-type: none"> タービンダブテイル RIPノズル 航空機, 鉄道車両 PD認証 	 <ul style="list-style-type: none"> ショベルアーム 車輪・レール アルミニウム鑄造品

注: 略語説明 PD (Performance Demonstration), RIP (Reactor Internal Pump)

図3 | フェイズドアレイ超音波探傷装置の開発実績

現在のラインアップは、低周波タイプ(ES3500, ES1000)と高周波タイプ(ES5000)となっている。オプション機能の追加、対象製品に合わせた専用カスタマイズ化も可能である。



図4 | ES1000の装置外観と構成

アレイ探触子とシングル探触子に対応したハイブリッド構成とした。



図5 | ES1000の操作例

探傷装置本体のバッテリー駆動化、操作・表示部に汎用タブレットPCを採用し、装置本体から完全に分離した。狭隘(あい)部や電源の取れないスペースでの探傷が容易となった。

(2013年3月完成)である。ES1000の装置外観と構成を図4に、操作例を図5にそれぞれ示す。

3. ES1000の特徴

3.1 装置仕様

ES1000はポータブル性(小型軽量、可搬型、バッテリー駆動)と探傷性能を両立し、さらに普及機としての価格を満足することをめざした。そのため、基となる上位機ES3500に対して、オーバースペックとなりうる仕様の見直しと最適化を重点的に行った。ES3500とES1000の仕様比較を表1に示す。ES1000では同時励振と対応素子数をES3500の半分にしたことを特徴としている。

3.2 ハードウェア開発—ポータブル化と高性能の両立

ES1000では超音波探傷装置の核となる送信、受信および電源の3基板を新規開発し、ES3500と共用化するコン

表1 | ES3500とES1000の仕様比較

研究開発やシステム対応機向けのES3500に対し、ES1000はポータブル型普及機の一般仕様として用途を区別した。

仕様	ES3500	ES1000
同時励振/対応素子数	32/128	16/64
受信帯域 (MHz)	0.5~20	0.5~10
繰り返し周波数 (kHz)	最大20	最大10
パルス電圧 (V)	1~200	40~100
バースト発振	あり	なし
増幅度調整範囲 (dB)	117	80
フォーカロー(点)	4,096	2,048
ダイナミックフォーカス	あり	あり
開口合成	あり	あり
バッテリー駆動時間 (Hr)	なし	5

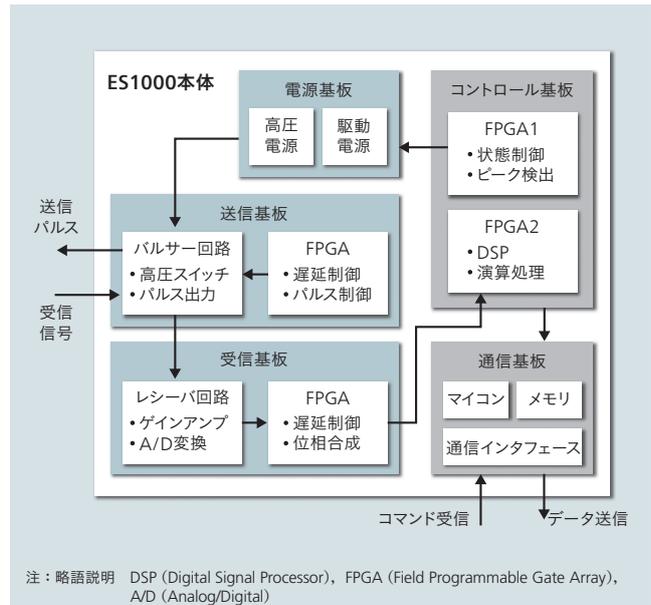


図6 | ES1000の内部構成図

送信基板、受信基板、電源基板はES1000用ポータブル基板として新規開発し、コントロール基板、通信基板はES3500同等の信号処理、機能性を実現するためにファームウェアの変更を実施した。

コントロール基板、通信基板については、ファームウェアの変更のみを実施した。内部構造図を図6に示す。ポータブル化実現のために多回路/チップと入出力系にスイッチを採用し、基板面積の低減化と低消費電力化を図った。

超音波探傷装置は、探触子インピーダンス差による受信信号特性のばらつき、増幅度調整でのダイナミックレンジ、高いSN比(Signal-to-Noise Ratio)などの性能が要求される。

ES1000の受信信号処理では、まず、アナログ信号処理において、急峻(しゅん)な周波数特性を得るため、2段階のアンチエイリアスフィルタを受信基板に実装した。さらに、出力波形ひずみによる不感帯を極力なくするためにAC(Alternating Current)カップリング容量の最適化を行った。

また、デジタル信号処理では、受信周波数に応じてデータサンプリング数を可変させるマルチレートデシメーション処理をコントロール基板FPGA(Field Programmable

Gate Array)2のDSP(Digital Signal Processor)に追加した。この処理の追加により、位相合成後のフィルタ処理を効果的にし、同時励振素子数が少ないES1000でもES3500同等のSN比を確保できるほか、FPGAリソースの節約、演算レート抑制で消費電力の低減効果も期待できる。

ES3500とES1000の受信波形の比較を図7に、ES3500とES1000のSN比の比較を図8にそれぞれ示す。

3.3 ソフトウェア開発—操作性向上と処理速度高速化

ES1000ソフトウェアは、上位機ES3500のアーキテクチャを継承したうえで、ユーザーインターフェースを構築するフロントエンドは操作性向上を、データ通信や画像処理を行うバックエンドは処理速度高速化による機能アップを目標に開発した。ユーザーインターフェースでは、タブレットPC(Personal Computer)の特徴であるタッチパネル操作を意識した画面構成、部品配置とし、フェイズドアレイ

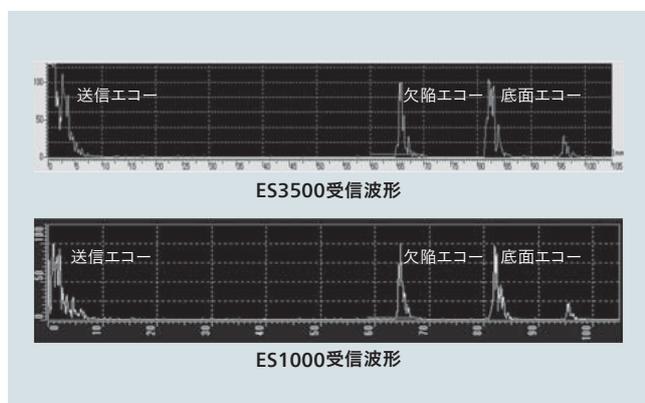


図7 | ES3500とES1000の受信波形比較(横穴付き試験片の探傷結果) 上位機と同等のエコー分解能、時間軸分解能が得られた。

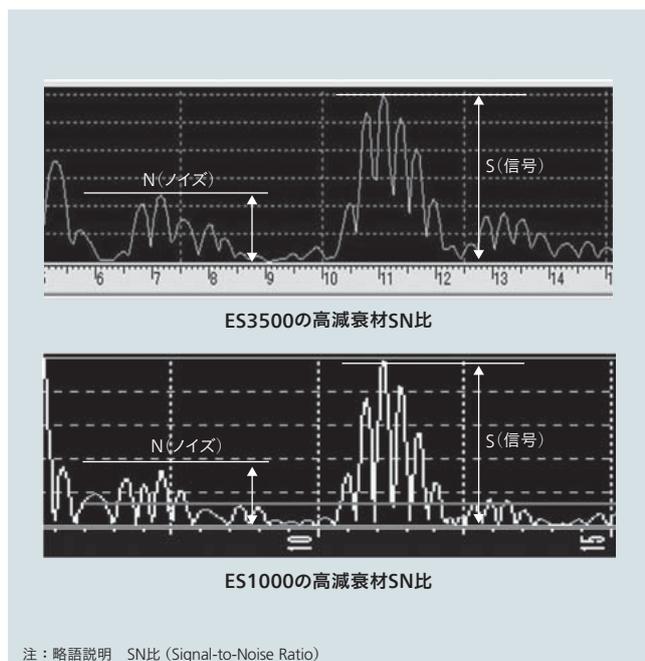


図8 | ES3500とES1000のSN比比較(鋼鑄造試験片の探傷結果) 高減衰材においても上位機と同等のSN比が得られた。

探傷法特有の煩雑な探傷条件セットアップを簡略化した。具体的には、キー入力だけの自動設定や、一度設定した値のインデックス登録・読み出しを実装することで、ビギナーでも直感的に扱える製品とした。ソフトウェア画面例を図9に示す。

処理高速化については、シングルタスク+マルチスレッド+ダブルバッファであったES3500の処理を、マルチタスク+マルチスレッド+共有リングバッファ化し、データ受信から画像表示までの一連のスループットを改善した。これにより、日立オリジナルである開口合成「S-SAFT (Sector-scan Synthetic Aperture Focusing Technique) 処理」を、従来の探傷後のバッチ処理から探傷中にリアルタイム表示することで、検査効率の向上に寄与できた。S-SAFT表示例を図10に示す。

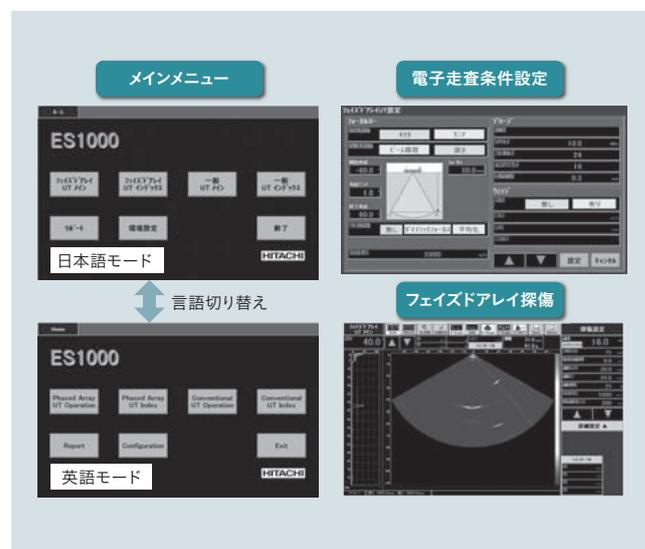
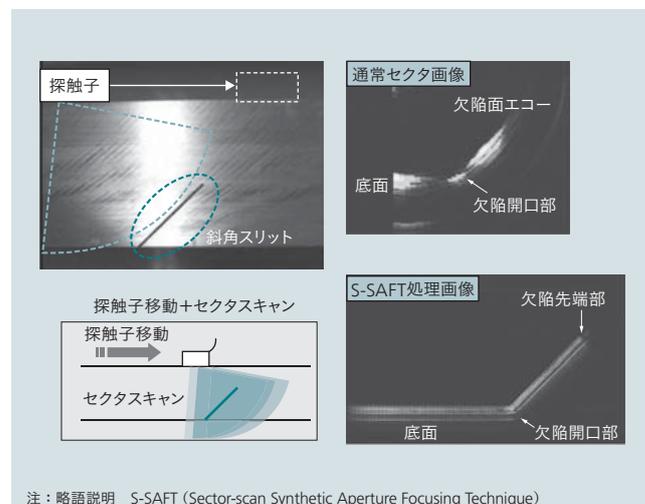


図9 | ES1000のソフトウェア画面

メインメニュー画面で表示言語の切り替え、フェイズドアレイ探傷法と従来方式であるシングル探傷法の切り替えを行う。



注：略語説明 S-SAFT (Sector-scan Synthetic Aperture Focusing Technique)

図10 | S-SAFT表示例

S-SAFTとは探傷画像の識別性向上のために、探触子移送情報によるセクタ画像の合成を行う処理である。

4. フェイズドアレイ超音波探傷装置の適用例

フェイズドアレイ探傷法を適用し、M24ボルトの腐食を模擬したスリットを検査した例(図11参照)、アルミニウム鋳造品の横穴を検査した例(図12参照)、および複雑形状部試験体を検査した例(図13参照)をそれぞれ示す。また、フェイズドアレイ探傷法で鋼鋳造品試験体を検査した例を図14に示す。これは、ダイナミックフォーカスと開口合成「S-SAFT処理」を組み合わせて探傷した例である。

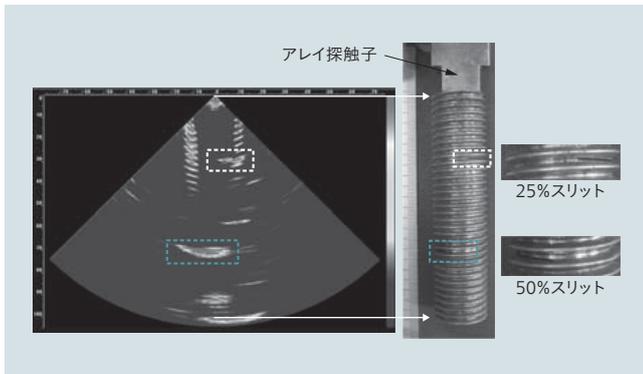


図11 | ボルトの検査例

ES1000を使用し、ボルトのねじ溝にある深さ25%のスリットを検出した例を示す。

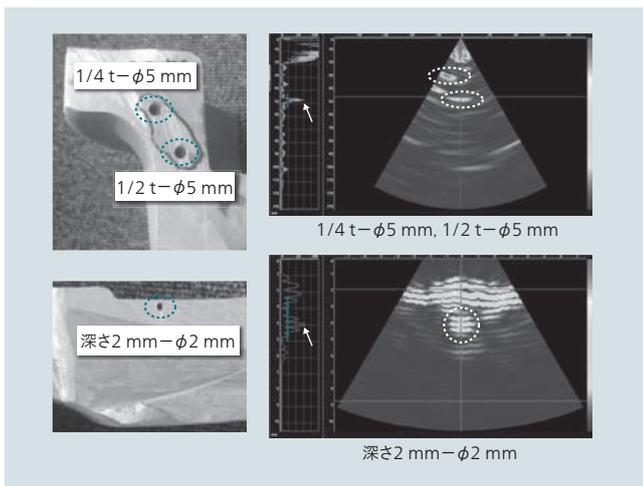


図12 | アルミニウム鋳造品の検査例

ES1000を使用し、超音波が拡散する鋳造品の横穴を検出した例を示す。

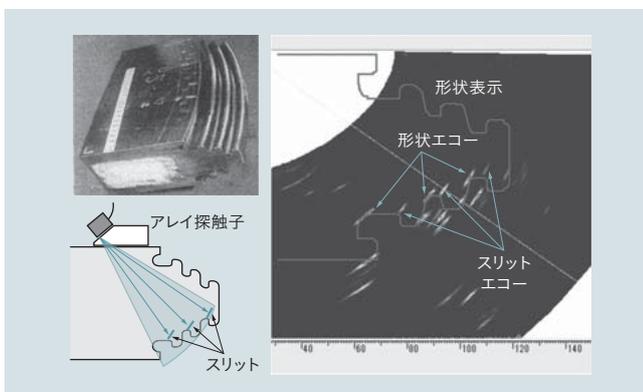


図13 | 複雑形状部の検査例

ES3500を使用し、複雑形状部試験体に付与したスリットを検出した例を示す。探傷画像に形状データを重ね合わせて表示し、欠陥エコーと形状エコーの識別性向上を図る。

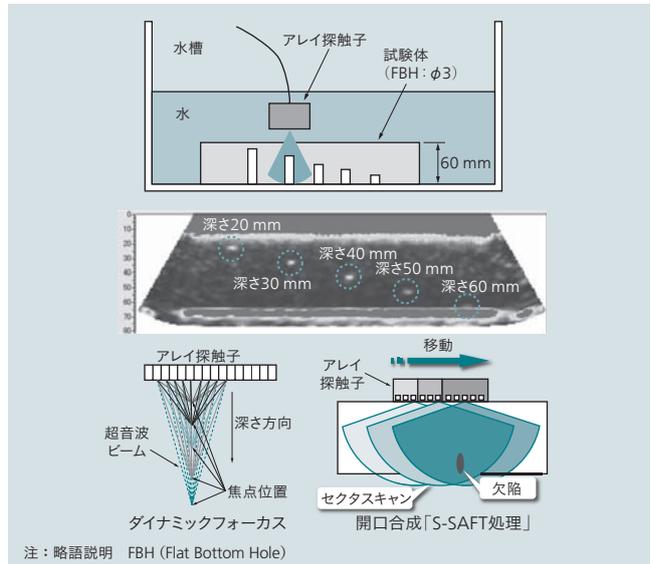


図14 | 鋼鋳造品の検査例

ES3500を使用し、水浸法でダイナミックフォーカス(深さに応じて複数の焦点を設定して行う探傷方法)とS-SAFT(探触子移送情報によるセクタ画像の合成を行う処理)を組み合わせて探傷する。

5. おわりに

ここでは、ESシリーズの概要とES1000の開発内容について述べた。

今後も、高画質化へのさらなる向上、ユーザビリティの向上などを追求して、国内外の電力プラント、鉄道、鉄鋼、建設機械、航空機メーカーおよび非破壊検査会社など多くの分野に向けた高機能なフェイズドアレイ超音波探傷装置を提供していく。

執筆者紹介



郷 俊臣

1994年日立エンジニアリング株式会社入社、株式会社日立パワーソリューションズ エンジニアリング本部 検査エンジニアリング部 所属
現在、超音波探傷装置のソフトウェア設計に従事



大貫 和彦

2000年日立エンジニアリング株式会社入社、株式会社日立パワーソリューションズ エンジニアリング本部 検査エンジニアリング部 所属
現在、超音波探傷装置のハードウェア(電気品)設計に従事



渋谷 亮治

2010年株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービス入社、株式会社日立パワーソリューションズ エンジニアリング本部 検査エンジニアリング部 所属
現在、超音波探傷装置のハードウェア(電気品)設計に従事



増田 浩

2010年株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービス入社、株式会社日立パワーソリューションズ エンジニアリング本部 検査エンジニアリング部 所属
現在、超音波探傷装置のソフトウェア設計に従事