

高性能 C スキャン超音波探傷装置 KUSS-130 の開発と応用*

川崎製鉄技報
24 (1992) 1, 52-57

Development and Application of Ultrasonic C-Scan Test System with High Resolution, KUSS-130



高田 一
Hajime Takada
技術研究本部 加工・制御研究センター 主任
研究員(掛長)



市川 文彦
Fumihiko Ichikawa
技術研究本部 加工・制御研究センター 主任
研究員(課長)



岡本 康司
Yasushi Okamoto
川鉄アドバンテック(株)
技術部 主査



緒方 貴玄
Takaharu Ogata
川鉄アドバンテック(株)
技術部 主査(課長)

要旨

鉄鋼製品および新素材の開発において、試作品の品質を詳細に評価し、品質の作り込みに役立てることを目的として、超音波送受信子の走査の高精度化(位置決め精度 10 μm) および超音波の高周波数化(~ 100 MHz)による分解能の向上を図ったCスキャン超音波探傷装置を開発した。円筒状欠陥を模擬して、窒化珪素中に埋め込んだ直径 10 μm のタングステンワイヤが検出可能であり、高検出能を有している。銅板接合セラミックス基板の銅板とセラミックスとの接合不良、薄鋼板のスポット溶接部の接合不良、制振鋼板の樹脂と鋼板との接合不良および炭素繊維複合材の層間剝離の検出などに適用し、良好な結果が得られた。

Synopsis:

The development of new steel products and new materials requires a detailed evaluation of the quality of trial products as a basis for selecting the optimal production method for commercial use. An ultrasonic C-scan test system was developed for this purpose. The system uses ultrasonic waves up to 100 MHz in frequency and scans the transducer with high position-reproducibility to achieve very high resolution. The system is capable of detecting a tungsten wire 10 μm in diameter buried in a silicon nitride body to simulate a cylindrical flaw. Examples of the detection of internal flaws include (1) disbonding between copper and ceramic material in metallized ceramic substrate, (2) disbonding of spot-welds in steel sheet, (3) disbonding between steel and resin in steel-resin-steel anti-vibration composites, and (4) delaminations in carbon fiber composites.

1 結 言

近年、当社において鉄鋼製品の開発に加え、ファインセラミックス、複合材料などの新素材の開発も盛んに行われている。これら新材料の製造方法を確立するために、また、品質を向上させるため、試作した素材および製品の品質を詳細に非破壊評価できる技術開発の重要度が高まっている。クラック、ポイド、接合不良など材料内部のきずの検出には、超音波探傷法が最もよく用いられている。超音波探傷法を応用し、材料内部のきずの検査を検出能高く詳細に行うことのできるCスキャン超音波探傷装置は、新規の材料・製品開発において欠くことのできない装置となりつつある。

当社では、従来から鉄鋼材料の品質評価に積極的にCスキャン超音波探傷装置を活用してきた¹⁾。今回、ファインセラミックスなどの探傷において必要とされる、微小なきずに対する高い検出能を確

保するため、超音波測定における空間分解能、超音波探傷走査機構の精度、データ表示などの機能を強化した装置を開発し、新素材および鉄鋼材料の品質評価に活用し良好な結果を得た。

本報では、今回開発した高性能Cスキャン超音波探傷装置 KUSS-130 の概要と応用例について紹介する。

2 装置の概要

2.1 超音波探傷法

超音波探傷法は、よく知られているとおり、パルス状の超音波を被検査材料の内部に送信し、健全部ときず部との音響インピーダンスの相違による超音波伝播の乱れを検出する方法である。音響インピーダンスは密度と超音波伝播速度との積で表される。超音波Cスキャン探傷²⁾では、検査する物体を水に浸漬し、この表面に垂直に

* 平成3年9月24日原稿受付

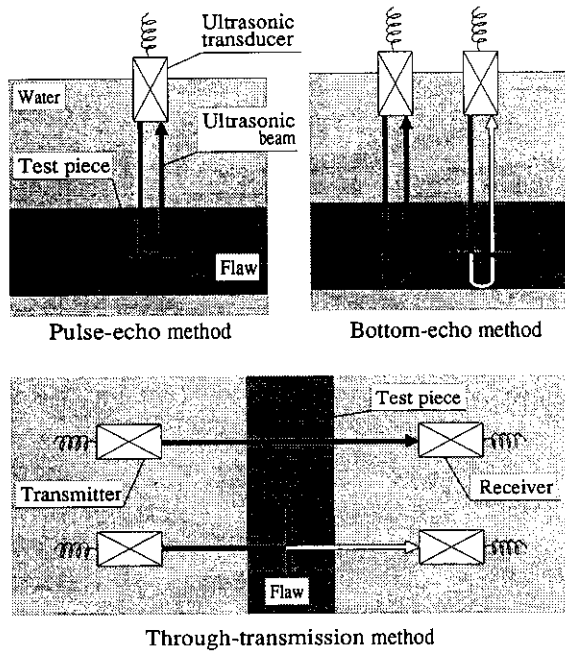


Fig. 1 Schematic of flaw detection methods

縦波を送信してきずの検出を行うことが多いが、これには Fig. 1 に示す3種類の探傷方法がある。パルス反射法はきずから反射する超音波パルスをとらえて探傷を行う方法であり、透過法は物体を透過する超音波パルスがきずの部分で反射または散乱され、この部分で透過波の振幅が小さくなることを利用して探傷を行う方法である。底面エコー法はパルス反射法と透過法との中間の性質を持ち、きずがない場合一定の大きさである底面からの反射波の振幅が、きずの部分では反射または散乱によって小さくなることを利用して探傷を行う方法である。

2.2 装置の原理

検査する材料を水に浸漬し、超音波を送受信してきずの検出を行うCスキャン超音波探傷装置は、Fig. 2 に示すように焦点型の水浸超音波送受信子、これを走査する走査機構、測定水槽、超音波探傷器、測定データ収集記録装置および制御装置から構成されている。この装置は、

- (1) 水での吸収損失が少ないため、高周波数の超音波を利用して分解能の高い測定が可能。
- (2) 音響レンズを利用して超音波ビームを集束させることが可能。
- (3) 超音波送受信子と検査する物体との音響結合の効率が安定。
- (4) 超音波送受信子を機械的に高精度に走査することが可能。
- (5) 測定データの収集、処理および記録を自動で行う。

などの特徴を持ち、最も高いきず検出能を有する超音波探傷装置であり、信頼性の高い装置である。

Cスキャン超音波探傷の原理を Fig. 3 に示す。検査する物体の表面から一定の距離に保持された超音波送受信子が、検査する物体の表面をくまなく平面的に走査し、きずの検出を行うと同時に、超音波送受信子の動きに機械的に連動した記録システムによりきずの有無を記録し、二次元的なきずの分布図を得る。最近では、マイクロコンピュータにより、超音波送受信子の位置情報および超音波測定系からのきずの有無の情報を収集し、二次元的なきずの分布図を作成する方式をとっている。

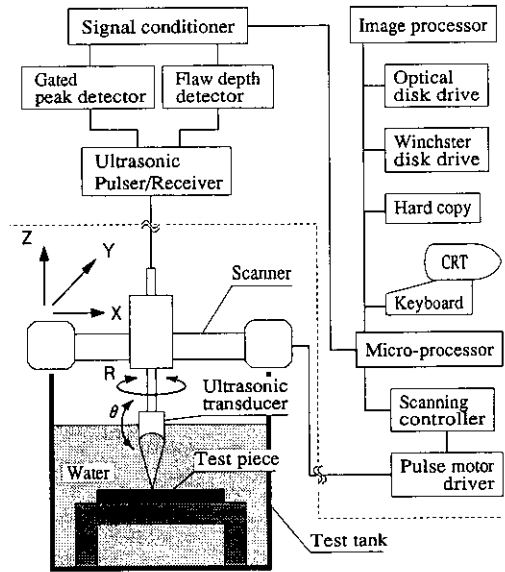


Fig. 2 Block diagram of developed C-scan system

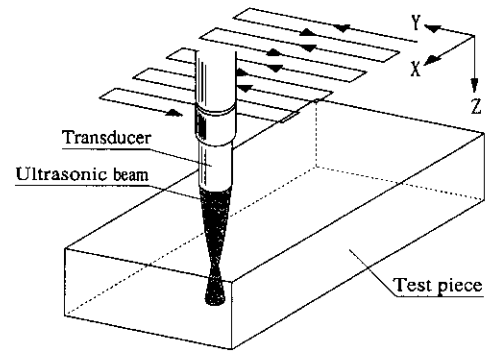


Fig. 3 Schematic of ultrasonic C-scan testing

2.3 開発した装置の特徴と仕様

高いきず検出能を確保するため、使用する超音波の周波数の上限の向上 (~100 MHz)、超音波送受信子の走査ピッチの微小化 (±10 μm)、および超音波送受信子走査装置の機械部の高精度化を主眼として装置を開発した。

開発した装置 KUSS-130 の概略の構成を Fig. 2 に、仕様を Table 1 に、外観を Photo 1 に示す。

超音波送受信子の走査および超音波探傷データの収集・表示のすべてを1台のマイクロコンピュータが制御していることがこの装置の構成の特徴である。各種探傷条件はCRTおよびキーボードにより対話的に設定され、これに基づき、マイクロコンピュータから走査制御信号がI/Oボードを介して、走査制御ユニットに送られ、自動走査が行われる。走査に同期して超音波送受信子および超音波探傷器により得られた超音波信号がピーク値検出回路およびきず深さ検出回路に送られ、反射エコー高さおよびきず深さが検出され、これがI/Oボードを介してマイクロコンピュータに送られ、探傷データが収集される。このデータはハードディスクに格納されるとともに、加工されて、CスコープがリアルタイムにカラーCRTに表示される。一連の探傷の終了後Cスコープはハードコピー装置にてコピーされる。また、ハードディスクに格納された探傷データは、追

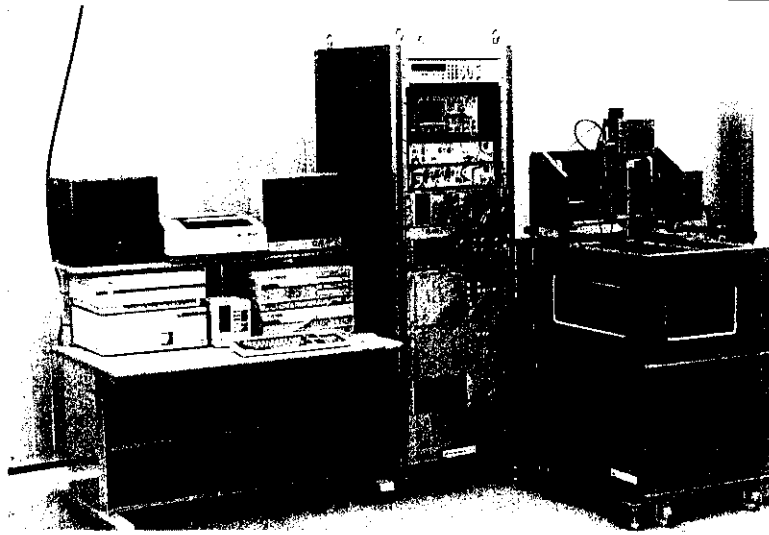


Photo 1 View of developed C-scan test system

Table 1 Specifications of developed C-scan system

Ultrasonic instrument	
Frequency range	1 to 100 MHz
Controllable axes	X, Y, Z, R, and θ
X-scanner	
Stroke	400 mm
Step increments	0.005 mm (min)
Position reproducibility	± 0.01 mm/100 mm
Y-scanner	
Stroke	300 mm
Step increments	0.005 mm (min)
Position reproducibility	± 0.01 mm/100 mm
Z-scanner	
Stroke	200 mm
Step increments	0.005 mm (min)
Position reproducibility	± 0.01 mm/100 mm
Manipulator	
Type	Motor operated
Range (R)	0° to 370°
Range (θ)	-25° to 105°
Turn table	
Material O.D.	≤ 100 mm ϕ
Rotation increments	0.01°
Flaw depth measurement	
Range	0 to 409.5 mm (in steel)
Resolution	0.1 mm (in steel)
Micro-computer	
Processor	Intel 80286 (10 MHz)
User's memory	640 K bytes
OS	MS-DOS
Real-time data output	
Monochromatic C-scope	16—100 steps gray scale
Color C-scope	16—100 pseud-color
Hard copy size	A4 (roll)
Image processor	
Image memory	$512 \times 512 \times 8$ bit $\times 3$ plane
Processor	μ PD7281 ($\times 2$)

Table 2 Specifications of ultrasonic instruments

Item \ No.	1	2	3
Maker	SONIC	Metrotek	Panametrics
Model	FTS mark III	MP215 Pulser MR106 Receiver MD702 Gated Peak Detector	5601 Pulser/ Receiver 5608 Gated Peak Detector
Receiver frequency range (MHz)	1 to 20	1 to 60	1 to 100
Peak detector frequency range (MHz)	1 to 20	1 to 22	1 to 100
Gain (dB)	80	60 (adjustable)	47
Attenuation coverage (dB)	47		69
Repetition rate	250 Hz to 5 kHz (5 steps), and external	100 Hz to 10 kHz (variable), and external	200 Hz to 10 kHz (6 steps), and external

記型光ディスクに転送されて、半永久的に保存される。

2.3.1 超音波探傷器および超音波送受信子

開発した装置には Table 2 に示す米国 3 社の超音波探傷器が備えられており、測定対象により適宜選択を行い使用する。

SONIC 社製 Mark III は、高感度を必要とする鉄鋼材料などの水との音響インピーダンスの差異の大きな材料および超音波の散乱減衰の大きな複合材料の探傷に使用している。Panametrics 社製装置は 100 MHz までの高周波数の超音波を用いて高分解能の探傷が可能であり、ファイセラミックスなどの微小なきずの検出を必要とする材料の探傷に使用している。Metrotek 社製装置は中間的な使用方法をとっている。これらの超音波探傷器はいずれも広帯域であり、超音波送受信子も広帯域型のものを使用している。

2.3.2 走査制御部

走査制御の可能な軸は、Fig. 2 に示した直線走査の X, Y, Z 軸およびマニピュレータの回転の R, θ 軸の合計 5 軸であり、円筒状の物体の探傷を容易とするため、ターンテーブルも有している。数 10 μ m の微小なきずの検出に対応するため、それぞれの軸は Table

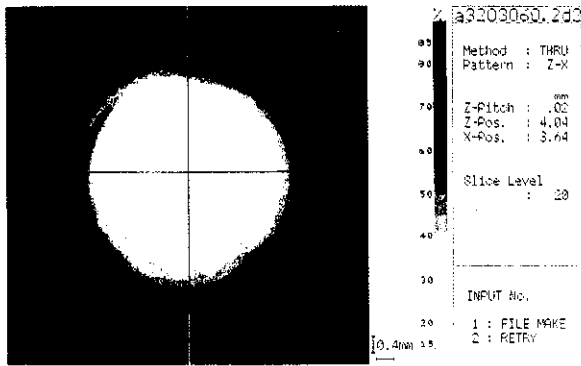


Fig. 4 Transducer position indication on C-scope by cross-hair cursor in manual scanning

1 に示す高い走査精度を有しているが、特に X, Y, Z の 3 軸は、精密加工を施されたボールねじをパルスモータ駆動することによって、100 mm に対して ±10 μm の位置決め精度と、高い走査精度を有している。また、マニピュレータの回転の R, θ 軸を加え、あらかじめ与えられている形状データをもとに超音波送受信子走査を数値制御することにより、任意の形状の物体表面に超音波送受信子を行わせて探傷を行うことも可能である。

また、探傷試験終了後にきずが検出された位置に超音波送受信子をマニュアル走査して超音波の波形観測を行う作業等の便宜を図るため、Fig. 4 に示すようにマニュアル走査における超音波送受信子位置を C スコープ上にカーソルにて表示する機能も備えている。これは、超音波送受信子の走査、超音波探傷データの収集表示すべてを 1 台のマイクロコンピュータが制御していることによりはじめて可能となった。

2.3.3 データ処理

超音波送受信子の走査に同期して、マイクロコンピュータに採取される測定データは、きずからの反射エコー高さおよびきずまでのビーム路程であり、各測定点につき、それぞれ 1 バイト計 2 バイトのデータがハードディスクに記録され、再現可能に保存される。エコー高さデータは、超音波探傷器のエコー高さ検出回路から出力される探傷ゲート内の反射エコー高さを適宜増幅して用いている。きず深さデータは専用のきず深さ測定回路にビデオ信号、ゲートマーク信号などを入力して求めている。探傷試験中にはリアルタイムに、エコー高さデータに基づき、カラー 16~100 色あるいはモノクロ 16~100 階調にて表現された C スコープが表示される。

探傷結果の表示出力にはこの他、Table 3 に示す各種の表示モードがあり、これらは探傷試験が終了した後、ハードディスクに格納された測定データを読み出して作成され、表示される。C スコープ II はエコー高さのかわりにきず深さによって層別を行ったきず深さの二次元分布図、B_x スコープは Y 方向の指定位置における X 方向に平行な断面でのきず位置を示す断面図、B_y スコープは X 方向の指定位置における Y 方向に平行な断面でのきず位置を示す断面図であり、ST スコープは一つの断面図内にすべてのきずの位置を投影したものである。

また、測定データを画像データとして画像処理装置に送り、画像処理の強調技術を用いて、エコー高さの低い微小なきずを画像上で顕在化させることも可能である。

2.3.4 走査精度の検証

Fig. 5 は超音波送受信子の走査精度の検証を行うため、水中の細径のタングステンワイヤを、周波数 50 MHz の焦点型超音波送受信子を用いて、パルス反射法により検出した結果を示しており、反

Table 3 Flaw recording functions of developed system

C-scope I	C-scan recording in gray scale or pseud-color according to flaw echo height
C-scope II	C-scan recording in gray scale or pseud-color according to flaw depth
B-scope	Flaw recording of a given cross-section
	B _x -scope B _y -scope
ST-scope	See-through view from one side face
Three-dimensional flaw display	Three dimensional view of flaws from a given direction
Flaw rating	Computation and display of flaw area ratio

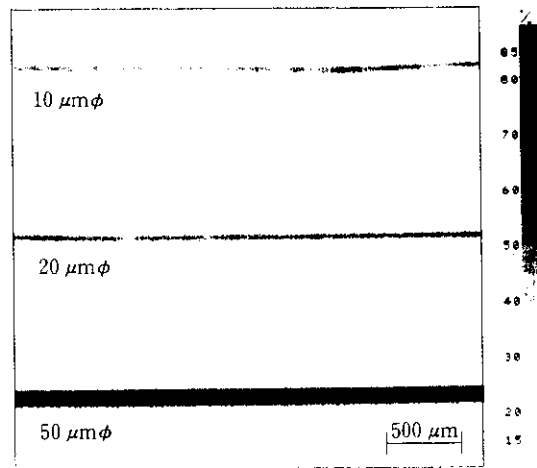


Fig. 5 C-scan recording for tungsten wires in water

射エコー高さをモノクロ 16 階調にて表現している。測定ピッチは最小の 10 μm であり、4×4 mm の大きさの領域の測定結果である。検出されているワイヤの端にずれは認められず、走査機構部が十分な精度を有していることが確認された。

3 応用例

3.1 ファインセラミックス中の人工きずの検出結果

ファインセラミックスは耐熱性、耐摩耗性、耐食性などに従来の金属材料には無い優れた性質を持ち、さまざまな分野への適用が期待されている新素材である。しかし、金属材料に比べ脆い欠点を持ち、数 10 μm のきずも問題とされ、きずの検査にも高い検出能が求められている材料である。今回、窒化珪素とジルコニアについて内部に細径のタングステンワイヤを人工きずとして埋め込んで焼結した試験片を作成し、探傷試験を実施した。

Fig. 6 は窒化珪素の深さ 1 mm の位置に埋め込んだタングステンワイヤを周波数 50 MHz の焦点型超音波送受信子を用いてパルス反射法で検出した結果をモノクロ 100 階調で示している。直径 10 μm のタングステンワイヤもほぼ検出できている。窒化珪素中では超音波（縦波）の速度が 10 000 m/s 以上と通常の鉄鋼材料中で

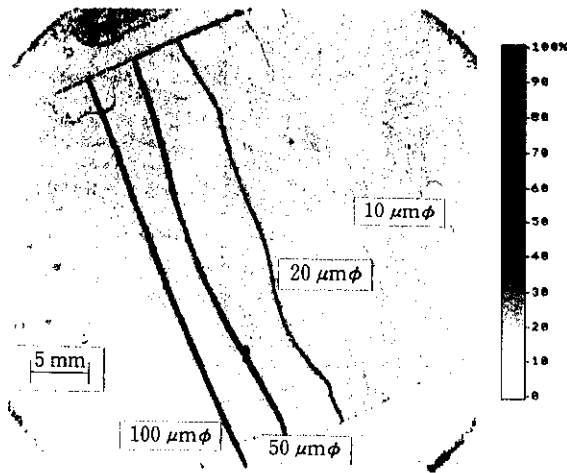


Fig. 6 C-scan recording for tungsten wires in silicon nitride

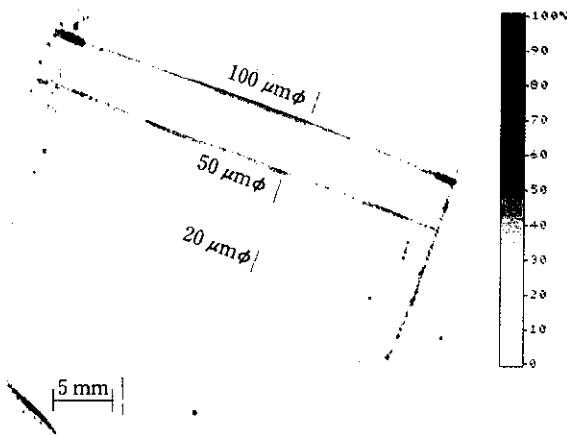


Fig. 7 C-scan recording for tungsten wires in zirconia

の速度 5950 m/s に比べ 2 倍近く大きく、超音波の波長も約 2 倍となるため、きず検出能の低下が懸念されたが、Fig. 6 の結果から、窒化珪素に対して、今回開発した装置が高いきず検出能を有していることが確認された。

Fig. 7 はジルコニアの深さ 1 mm の位置に埋め込んだタングステンワイヤを周波数 50 MHz の焦点型超音波送受信子を用いてパルス反射法で検出した結果を示している。直径 20 μm までのタングステンワイヤが検出されているが、直径 10 μm のワイヤは検出されていない。これは、ワイヤが埋め込み時にたわみ、超音波の入射方向に対し斜めとなったためと推定される。

3.2 銅板接合セラミックス基板の接合状態の評価

ファインセラミックスの中には、前述した特長の他に、高い絶縁性と熱伝導性を兼ね備えたものもあり、これらは高い放熱性が必要なパワーエレクトロニクスおよび LSI などの回路基板としての適用が進められている。この場合、セラミックス基板には銅板が接合されることが多いが、セラミックス基板と銅板との接合不良は、

- (1) 銅板の剥がれまたは剥離
- (2) 銅板とセラミックス基板との熱膨張率の差異による銅板のふくれ

の原因となって有害である。

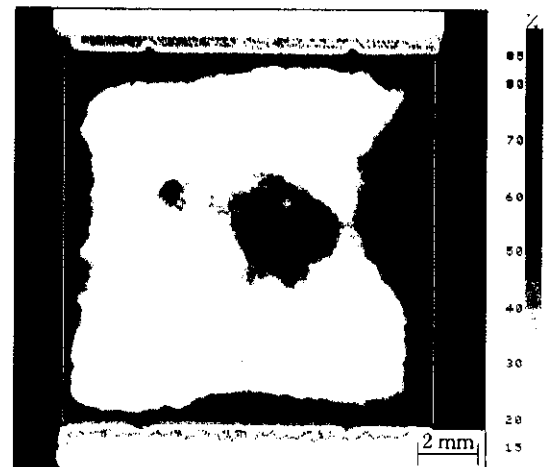


Fig. 8 C-scan recording for disbonding between ceramics and copper of metalized ceramic substrate

Fig. 8 は、全厚約 0.9 mm の銅板接合セラミックス基板と銅板との界面での接合状態を、周波数 25 MHz の焦点型超音波送受信子を用い、透過法により測定した結果を示している。

接合が良好になされている部分では、一定の振幅の超音波の透過波が観察されるが、接合不良の部分では、これによって超音波が反射または散乱され、透過波の振幅が小さくなることを利用して接合不良を検出する。測定結果は透過波の振幅をモノクロの階調をつけて表現しており、黒い部分ほど透過波の振幅が小さいことを示している。反転表示されている枠の内部が銅板の存在する部分であり、枠内で黒く記録されている部分が、接合不良および剥離が生じている部分である。この検出結果は切断面の顕微鏡観察によるきず検出結果とよく対応していることが確認され、現在、接合不良の有力な検出手段として用いられている。

3.3 薄板スポット溶接部の接合状態の評価

薄鋼板の代表的な需要先である自動車製造ラインにおいて、プレス成形した薄鋼板によるボディの組み立てには、スポット溶接が多用される。このため、スポット溶接性の良好な鋼板を製造すること、製造した鋼板のスポット溶接性を評価することは生産者にとって重要な事項である。また、スポット溶接の条件を最適化するためにも、スポット溶接部の接合状態を詳細に評価することが必要である。

Fig. 9 は、接合不良が生じやすい条件にて溶接した板厚 1 mm の 2 枚の薄鋼板のスポット溶接部の接合状態を、周波数 25 MHz の焦点型超音波送受信子を用い、透過法の構成にて検出した結果を示している。接合不良の検出原理は銅板接合セラミックス基板の場合と同一である。円形の超音波の透過性の良い部分がスポット溶接部であり、中央に黒く示されているものが接合不良である。

3.4 制振鋼板の接合状態の評価

制振鋼板は、2 枚の鋼板の間に樹脂を挟み込んだ構造を持つ、振動減衰特性に優れた鋼板であり、近年、洗濯機などの家電製品を中心に需要が広がり、自動車、事務機器、建材への適用も進められている。制振鋼板の制振特性には、

- (1) 挟み込まれた樹脂の厚さ
- (2) 樹脂と鋼板との接合状態

が大きく影響する。このため、樹脂と鋼板との接合を良好とするこ

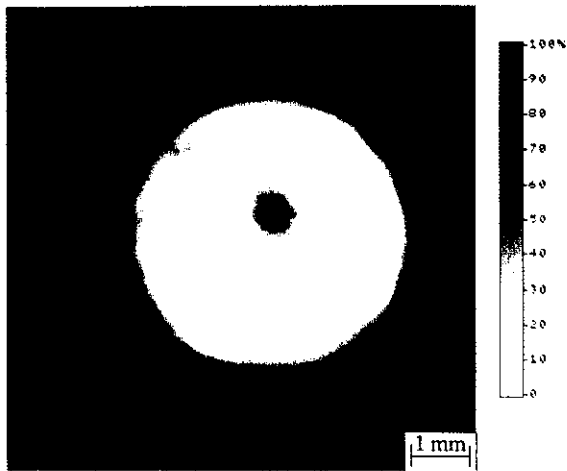


Fig. 9 C-scan recording for disbonding of spot welded joint

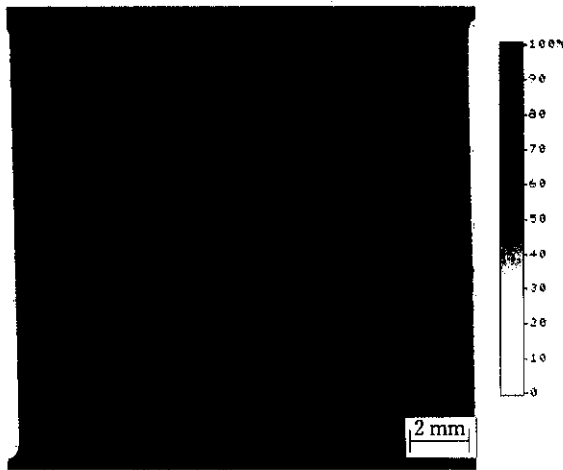


Fig. 10 C-scan recording for disbonding between steel sheet and resin of steel-resin-steel composite sheet

とが制振鋼板の製造において重要な事項である。

Fig. 10 は、接合の際に十分に脱気を行わなかった全厚 1 mm の制振鋼板の樹脂と鋼板との接合状態を、周波数 25 MHz の焦点型超音波送受信子を用い、透過法の構成にて検出した結果を示している。接合不良の検出原理は前述の二例と同一である。黒く点状およびこれが連なって検出されている部分が空気の巻き込みによって接合がなされなかった部分である。

3.5 炭素繊維複合材料の層間剝離の検出

繊維強化複合材料は、軽量ながら、高強度および高剛性である特長を生かし、航空機などへの適用が進んでいる。この一つに炭素繊維複合材料が挙げられるが、この複合材は、炭素繊維の織布を積層して作られているため、積層間の剝離が強度低下をもたらす有害なきずとなる。

Fig. 11 はこの材料（板厚約 3 mm）でのきずの検出能を把握するため、層間にフィルムを挟み込むことによって作成した、大きさ 3×3 mm の、深さ位置の異なる多数の人工きずを透過法にて検出した結果を示している。炭素繊維複合材料は一般の金属材料に比べ構造が粗いため、超音波の散乱減衰が大きく、超音波の周波数を 2 MHz まで下げることによって測定が可能となった。一般に焦点位置での超音波ビーム径 d は、超音波の波長を λ 、超音波振動子の

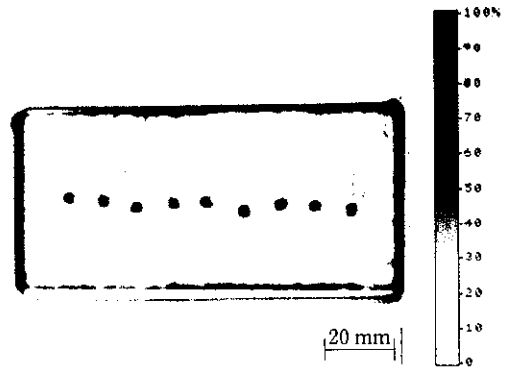


Fig. 11 C-scan recording for artificial delaminations of carbon fiber composite

径を D 、焦点距離を F としたとき、(1)式で表すことができる³⁾。

$$d = \lambda F / D \dots \dots \dots (1)$$

超音波の波長 λ は超音波の周波数に反比例するため、周波数を下げると超音波ビーム径が大きくなり、分解能が低下するが、振動子径が 1.125 in、水中焦点距離が 2 in の超音波送受信子を用いて F/D を小さくすることにより、焦点位置での超音波ビーム径を小さくし、焦点が材料に合う条件で探傷を行った結果、高い分解能が確保されている。

4 結 言

鉄鋼製品および新素材の開発において、製品の品質を詳細評価し、品質の作り込みに役立てることを目的として、きず検出能を強化した C スキャン超音波探傷装置 KUSS-130 を開発した。

- (1) 本探傷装置は、超音波送受信子の走査の高精度化（位置決め精度 $\pm 10 \mu\text{m}$ ）と、探傷に使用する超音波の高周波数化（ $\sim 100 \text{ MHz}$ ）による空間分解能の向上とをあわせて、きず検出能の強化を図った。
- (2) 円筒状欠陥を模擬して窒化珪素中に埋め込んだ直径 $10 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤをパルス反射法の構成にて検出することができ、高い検出能を有することが実証された。
- (3) 現在まで、銅板接合セラミックス基板の銅板とセラミックスとの接合不良、薄鋼板のスポット溶接部の接合不良、制振鋼板の樹脂と鋼板との接合不良および炭素繊維複合材の層間剝離の透過法による検出などに適用して、良好な結果が得られた。

今後は、適用する品種をさらに拡大するとともに、探傷ニーズの増加が見込まれる任意の形状を有する物体の探傷にも対応するため、現在の方法に改良を加え、超音波送受信子を精度高く物体の表面に做わせ、かつ、効率良く探傷を行う機構を完成させたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 緒方賢玄, 川村絨一, 丸山英雄, 今中拓一, 宇野義雄, 安藤昌司: 「水浸超音波探傷装置」, 川崎製鉄技報, 18 (1986) 2, 199-207
- 2) J. Krautkraemer and H. Krautkraemer: "Ultrasonic Testing of Materials", (1990), 185, [Springer-Verlag, Berlin]
- 3) A. M. Touffait, M. T. Destribats, M. Roule, and R. Saglio: "The Use of Focused Probes for Detection Imaging, and Sizing of Flaws", Proc. 1st Int. Symp. Ultrasonic Materials Characterization, Gaithersburg, Md. (USA), June (1978)