

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.18 (1986) No.2

水浸超音波探傷装置

Ultrasonic Immersion Testing System

緒方 貴玄(Takaharu Ogata) 川村 紘一(Koichi Kawamura) 丸山 英雄(Hideo Maruyama) 今中 拓一(Takuichi Imanaka) 宇野 義雄(Yoshio Uno) 安藤 昌司(Shouji Ando)

要旨：

川崎製鉄(株)と川鉄計量器(株)が開発、製作してきた水浸走査型超音波探傷装置は、その高感度探傷器の採用、高精度 6 軸走査機構および μ -CPU による高級なデータ処理を特長としている。これにより、欠陥の 2 次元マッピング記録のみならず、B スコープ記録、欠陥面積率の算出と記録、立体 3 次元表示などのコンピュータグラフィック処理が可能である。さらに、この装置を利用した事例として水素誘起割れ試験における顕微鏡観察の代替利用、ステンレスオーバーレイ溶接部の剥離割れ感受性の予知、極薄鋼板の微細介在物探傷のための新しい試み、さらにハニカム材などの複合新素材に対する取り組みについて述べた。

Synopsis：

The immersion type ultrasonic scanning flaw detection system, developed and manufactured by Kawasaki Steel Corp. and Kawatetsu Instruments Co., Ltd., features the use of a high-sensitivity flaw detector, precision six-axis scanning mechanism and sophisticated data processing by microcomputer. For the data processing, the system was started with a conventional two-dimensional map recording of flaws, and has now grown into sophisticated computer graphic processing, including B-scope recording, computation and recording of the flaw ratio to the total area and three-dimensional display of flaws. This paper discusses some examples of its application, including: (1) substitution of a microscope for visual examination in the hydrogen induced cracking test; (2) prediction of susceptibility to disbanding of stainless steel overlay welds; (3) a new approach to detection of non-metallic micro-inclusions in ultra-thin steel strips; and (3) attempts to use this system for testing new composite materials such as honeycomb materials.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Ultrasonic Immersion Testing System



緒方 貴玄

Takaharu Ogata

本社 計量器技術センター 主査(課長補)



川村 絃一

Koichi Kawamura

本社 計量器技術センター 主査(課長)



丸山 英雄

Hideo Maruyama

本社 計量器技術センター 主査(課長)



今中 拓一

Takuichi Imanaka

技術研究所 水島研究部第2研究室 主任研究員(課長)・工博



宇野 義雄

Yoshio Uno

水島製鉄所 電気計装技術室 主査(課長)



安藤 昌司

Shouji Ando

川鉄計量器(株) 営業部 主任部員(副部長)

1 緒 言

超音波探傷法は、X線やγ線に比べて、特別な防護措置を必要としない非破壊試験法として発展をとげて来た。その一般的な使用方法は、探触子と呼ばれる電気音響変換素子を水、油などの音響結合剤を介して、被検体に押し付けるだけで良く、探傷結果は、即座に探傷器のCRT画面に現われる。従って、どんな場所でも手軽に探傷操作を行えるといった点も特徴の1つである。半面その再現性と確度は操作員の技量に依存するところが多く、客観的な記録が残らないなどの大きな欠点をも併せ持っている。

鉄鋼業における非破壊試験の利用法は大きく次の3つに分けられる。すなわち、品質保証のための検査、および設備などの保守検査と品質管理を目的とした試験であり、このうち一番多く利用されているのが品質保証である。この場合には、規格などに定められた箇所を決められた条件で探傷を行い、ある限度以上の信号指示があった場合、その被検体は不適格品として取り除かれる。従って、自動化もやり易く、厚鋼板や鋼管を対象とした自動探傷装置として、開発発展してきた。

要旨

川崎製鉄(株)と川鉄計量器(株)が開発、製作してきた水浸走査型超音波探傷装置は、その高感度探傷器の採用、高精度6軸走査機構およびμ-CPUによる高級なデータ処理を特長としている。これにより、欠陥の2次元マッピング記録のみならず、Bスコープ記録、欠陥面積率の算出と記録、立体3次元表示などのコンピュータグラフィック処理が可能である。さらに、この装置を利用した事例として水素誘起割れ試験における顕微鏡観察の代替利用、ステンレスオーバーレイ溶接部の剝離割れ感受性の予知、極薄鋼板の微細介在物探傷のための新しい試み、さらにハニカム材などの複合新素材に対する取り組みについて述べた。

Synopsis:

The immersion type ultrasonic scanning flaw detection system, developed and manufactured by Kawasaki Steel Corp. and Kawatetsu Instruments Co., Ltd., features the use of a high-sensitivity flaw detector, precision six-axis scanning mechanism and sophisticated data processing by microcomputer. For the data processing, the system was started with a conventional two-dimensional map recording of flaws, and has now grown into sophisticated computer graphic processing, including B-scope recording, computation and recording of the flaw ratio to the total area and three-dimensional display of flaws. This paper discusses some examples of its application, including: (1) substitution of a microscope for visual examination in the hydrogen induced cracking test; (2) prediction of susceptibility to disbonding of stainless steel overlay welds; (3) a new approach to detection of non-metallic micro-inclusions in ultra-thin steel strips; and (3) attempts to use this system for testing new composite materials such as honeycomb materials.

これらの検査は言わば抜き取り試験であり、全体積の情報採集を目的としたものではない点に留意する必要がある。一方品質管理のための試験においては、全域の情報を把握することが望ましい。人手によって、全体積の超音波探傷を実施することは、音響結合の不安定さや探触子走査間隔の不確実さのために、不可能と言えるだろう。この点を可能にしたのが、水浸方式の走査型超音波探傷装置(以下Cスキャン装置という)で、試験片全体にわたる精密な走査探傷を目的に開発されたものである。

当社においては、1974年に、半成品の介在物評価を目的として技術研究所に、米国A社製の装置を導入したのが、本方式採用の始まりである。当初の目的であったCCスラブの段割り試験の代替には、内部鑄造組織に起因するノイズのために成功しなかった。しかし、当時UOE鋼管の素材である厚板が、造塊材からCC材への切換え時期にあり、CC材特有の肉厚中央の介在物評価には、大きな威力を発揮した。また、熱延鋼板では、ERW鋼管の代表的欠陥の1つであるフッククラックの因となる板エッジ部の介在物検出に

* 昭和61年2月18日原稿受付

も役立ち、いずれも連铸鋼材の介在物の低減に貢献した。

さらに、耐水素誘起割れ鋼板の開発には、顕微鏡観察に代わる迅速かつ非破壊および定量評価の方法として確立されたことによって研究分野のみならず、インフィールドの検査部門においても有効な手段として、水島製鉄所、千葉製鉄所への導入が開始された。

1977年、水島製鉄所への同装置導入に際しては、従来のものでは以下の問題があったので、川崎製鉄と川鉄計量器との共同開発にふみきった¹⁾。

- (1) メンテナンス性の向上
- (2) 改造グレードアップに対するフレキシブルな対応
- (3) コストパフォーマンス

さらに、技術的には当時使用が開始されはじめていた広帯域探触子の採用、さらにこの広帯域探触子が接続可能であり、当時発売が始まり、超音波探傷器として最高の性能を有すると評価された米国ソニック社製のマークⅢで構築してみたいという要望が主な点であった。ソニック社製のマークⅢと広帯域探触子および精密走査機構と水浸タンクという組合せは、現在も維持されており、高いレベルの性能を保持している。

本論文では、今回開発した水浸超音波探傷装置の走査制御機構およびデータ処理技術の発展経過について述べるとともに、それらの応用例や最近の話題について紹介する。

2 装置の概要

2.1 装置の原理

Cスキャン装置は

- (1) 水の超音波吸収損失が少ないため高周波化が可能
- (2) 音響レンズで焦点化できる
- (3) 音響結合が安定
- (4) 高精度走査
- (5) 記録が明確

などの特徴を持つ。これらの特徴を生かして、広帯域で焦点化を施した水浸型の探触子とそれらを走査するスキャンニング機構、広帯域な探傷装置、十分な水距離がとれ被検体を水浸させる水槽、高速度・高精度記録装置およびこれらをコントロールする制御装置によって構成される。

原理図を Fig. 1 に示す。Cスキャン装置は、被検体表面から一定距離に保たれ、平面的に走査する探触子が被検材表面をくまなく走査し、欠陥検出を行うと同時に、探触子の動きに同期した記録システムによって欠陥を記録し、2次元的な欠陥の分布図を得るものである。Photo 1 に装置全影写真、Fig. 2 に全体構成図、Fig. 3 にブロックダイアグラムを示す。

CRT およびキーボードにより対話的に設定された走査条件に基づき、走査制御信号が走査駆動ユニットに伝えられ、自動動作をコントロールする。走査の一時停止、開始などの手動操作は水槽上のキャリッジ前面のパネル面にあるスイッチ類により行うことができる。

走査機構に同期して探触子および探傷器より得られた探傷信号は、記録計に導かれると同時に、欠陥面積率などの統計処理や、データ保存のためにフロッピーディスクへの格納、および CRT への画像表示などに供される。

2.2 装置の特長と仕様

1977年水島製鉄所検査課向けに製作して以来、KUSS シリーズ

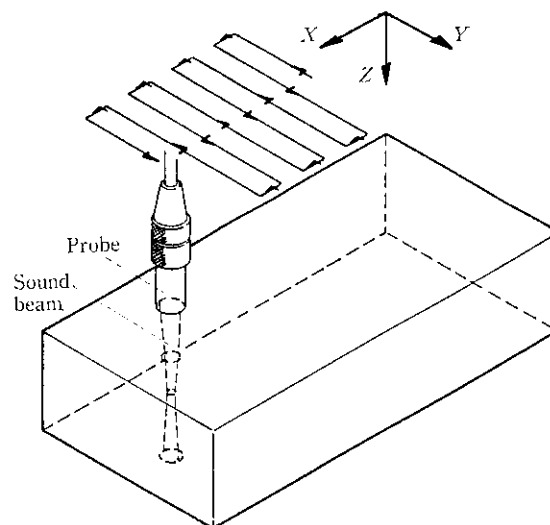


Fig. 1 Schematic representation of C-scan method

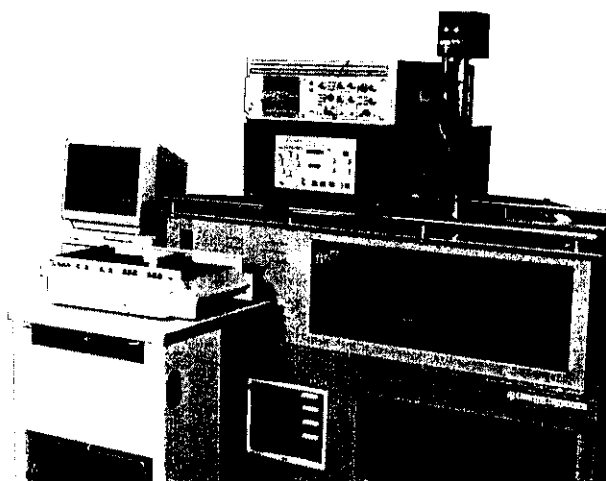


Photo 1 General view of C-scan system

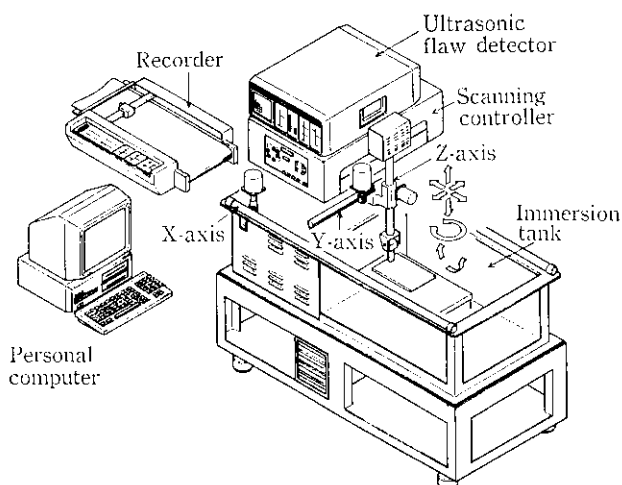


Fig. 2 General composition of the system

として、1984年までに20数台の水浸探傷装置を製作した¹⁾。これらはユーザーニーズにこたえて漸次改良を加えてきた。次々に行ってきた改良点は大きく分けて、制御系、駆動軸、マニピュレータお

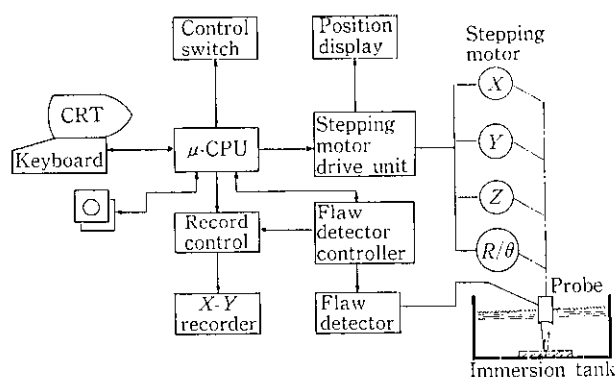


Fig. 3 Block diagram of C-scan system

およびデータ処理である。制御系は1号機がすべてワイヤードロジックでX-Yの走査のみに限定されていた。2号機以降はマイコン制御を取り入れ、使用初期のものはワンボードマイコン、最近の機種は16ビットパソコンで、制御およびデータ処理を受け持っている。

走査軸は、平面走査のX-Y2軸制御駆動に垂直Z軸を加え、さらにオプションとして、ターンテーブル回転も可能である。また、マニピュレータは手動のゴニオメータタイプから傾斜角と方位角をパルスモーターで駆動する方式へと進展してきた。これは円筒形の軸対称物体をNC的な動きで自動走査する目的で開発したものであり、制御用パソコンに数式モデルによる各軸の移動量を演算させ、曲率を有する被検体の探傷を可能としている。

データ処理は、1号機はX-YのCスコープ記録すなわち欠陥の平面的投影記録のみであった。2号機以降のマイコン制御の導入にともない、Bスコープ図形の記録、欠陥面積率演算などに加え、さらにコンピュータグラフィック処理による、ユニークな3次元画像表示機能を実現している。

現在のCスキャン装置の仕様をTable 1に示す。各部の特長は以下の通りである。

2.2.1 超音波探傷器 (MARK-III)

米国SONIC社製で広帯域、高分解能の送受信部およびフローアンプを有し、広帯域焦点型探触子との組み合わせにより被検材中の数10μm程度の割れ、介在物などの欠陥が検出可能である。

2.2.2 走査制御部

基本走査軸であるX, Y, Zの3軸タイプと、マニピュレータを電動制御とした5軸タイプがある。さらに、円筒形、丸棒などの回転機構であるターンテーブル、チャック回転、ターニングローラをオプション軸として有し、あらゆる被検体の形状に対応できる。走査機構はパルスモーターを駆動源として、ラックビニオン機構を主構造とし

(1) 大型水槽においても0.1mm単位の精密な位置精度の確保

(2) 最大300mm/sの高速走査(Y軸)

を可能としている。走査制御は16ビットパソコンを用いたCPU処理で行われている。単純な2軸駆動の走査以外に、X-Zおよびターンテーブル軸を組合せた円錐形状の走査等の3~6軸を組合せた走査ができる。

2.2.3 データ処理部

(1) 水距離表示

焦点型探触子を使用するこの種の探傷システムにおいては、探触子前面から被検材表面までの水距離は重要な情報である。操作パネル面にデジタル表示して操作性を高めている。

(2) Bスコープ記録

リアルタイムで得られるAスコープでは、欠陥から得られるエ

Table 1 General specifications of KUSS series C-scan system

Designation		Models	KUSS-10 series	KUSS-20 series
Scanning axes			3 axes type	5 axes type
Controlled axes			X, Y, and Z	X, Y, Z, R and θ
Manipulator			Manual $\pm 30^\circ$	Motor operated. $R=0^\circ$ to 370° $\theta=-15^\circ$ to 70°
Scanning controller	X-scanner	Scanning stroke Index pitch Position reproducibility	10 to 700 mm 0.1 to 9.9 mm 0.1 mm	
	Y-scanner	Scanning stroke Scanning speed Position reproducibility	± 50 to ± 175 mm 300 mm/s (max.) 0.1 mm	
	Z-scanner	Scanning stroke Index pitch Position reproducibility	10 to 800 mm 0.1 to 9.9 mm 0.1 mm	
Optional mechanism	Turn table	Material O.D. Load bearing capacity	60 to 800 mm ϕ 50 kg	
	Rotating chuck	Material O.D. Load bearing capacity	20 to 400 mm ϕ 50 kg	
	Turning roller	Material O.D. Load bearing capacity	60 to 400 mm ϕ 100 kg	
Immersion tank (Effective scanning area)			A: $600^L \times 300^W \times 300^D$ mm B: $700^L \times 350^W \times 300^D$ mm C: $800^L \times 600^W \times 600^D$ mm D: $3\,000^L \times 2\,000^W \times 800^D$ mm	
Data processor			• C-scope recording • Digital display of water path between probe and material surface • Computation and display of flaw area ratio	
Recorder	Chart size		A3 (roll)	
	Scale		5/1, 2/1, 1/1, 1/2, 1/5 (desired enlargement and reduction also possible)	
Flaw detector (Model MARK-III)	Recording		Electrosensitive system	
	Frequency range		1 to 25 MHz	
	ATT. coverage		47 dB	
	Gain		80 dB	
	Pulse repeat frequency		250, 500, 1 k, 2k, 5 kHz, external	
		CRT size	120 $\times$ 100 mm	

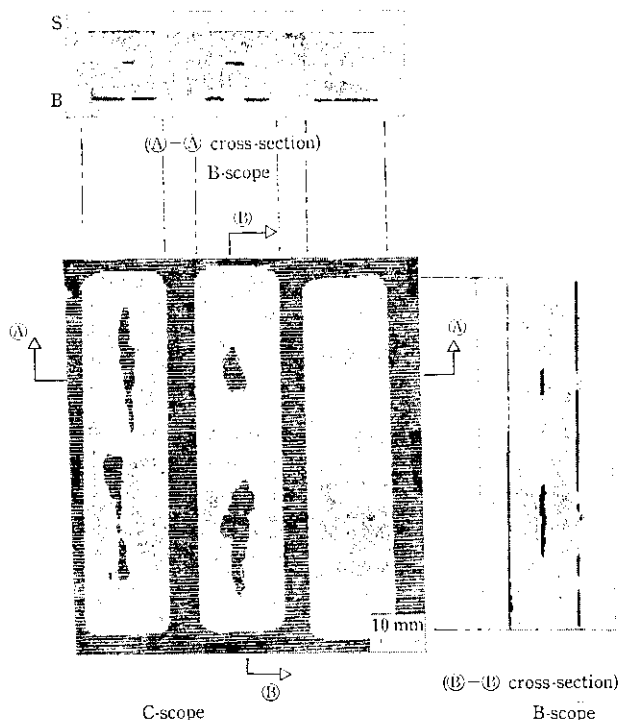


Fig. 4 Example of C-scope and B-scope of HIC specimens

コー高さのみならず欠陥の深さ位置情報をも時間軸情報として得ることができる。この位置情報を得るために、被検材の一線上を繰り返し走査し、1走査ごとに細く絞った欠陥ゲートを時間軸方向に移動することによって、Bスコープ図形、すなわち断面方向図形を得ることができる。このようにして得たBスコープを Fig. 4 に示す。従来Bスコープは計算機処理もしくは、ハード構成によって残像型 CRT 上に得られていたものであるが、本装置のようにCスコープと同様に記録計に記録されるものは他に例を見ない。被検材の厚さ方向に 0.2 mm の分解能で欠陥の位置を記録でき、欠陥部位を正確に把握できる。

(3) 深度別濃淡記録

Bスコープほどに詳しい深さ情報を必要としないで、例えば CC 材欠陥の検出のように、板厚の表層か、中心部かを識別することを目的とする機能である。これは 2つの欠陥ゲートを組合せ、論理演算処理を行い、Cスコープ記録上に濃淡で区別して記録する。この記録例を Fig. 5 に示す。本図は圧延のトップ部からサンプリングした材料に水素誘起割れを生じさせて探傷したものである。濃く記録されている部分が板厚中央部に存在する割れを示し、薄く記録された部分がその他の部位での割れであることを示している。

(4) 欠陥面積率の表示および記録

有効な探傷領域内の平面投影欠陥の面積比率を算出し、表示および記録することによって欠陥の視覚による評価に加え、定量的評価が可能である。欠陥記録上への同時印字記録例を Fig. 6 に示す。

(5) 探傷データのプロッシーシートへの永久記録機能

探傷走査中に検出した欠陥の位置座標、欠陥エコー高さおよびアラームの ON/OFF をデータとしてプロッシーシートへ書き込むことができる。

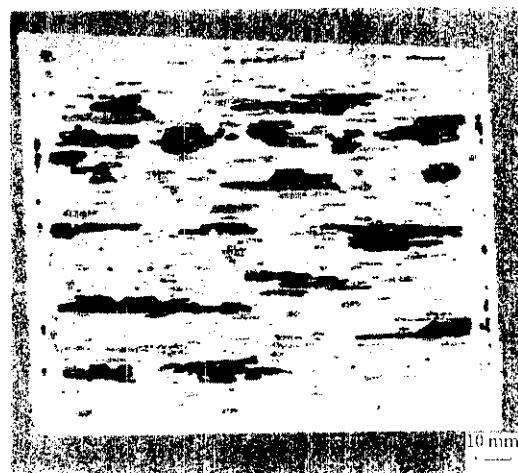


Fig. 5 Example of gray scale recording

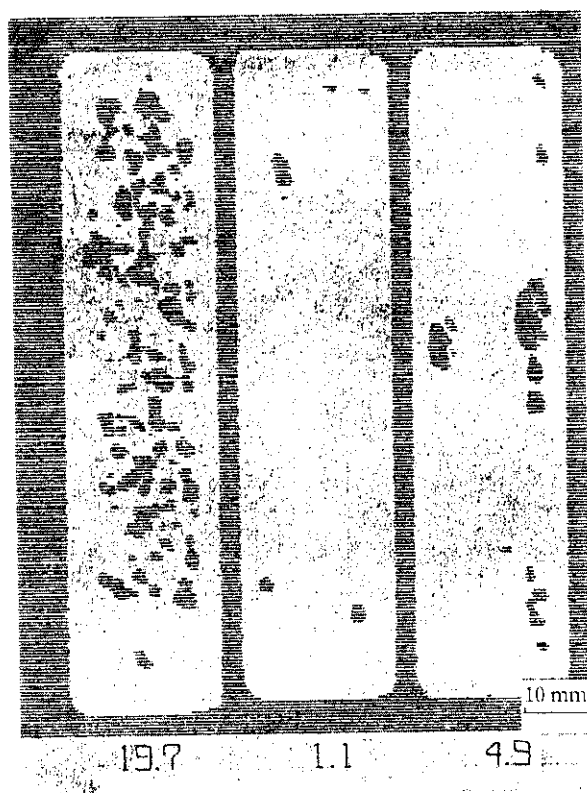


Fig. 6 Example records of flaw patterns with flaw ratio value printed

(6) 3次元表示機能

本機能は KUSS シリーズ超音波探傷装置にオプションとして付加することを目的とした欠陥の 3次元表示装置である。その機能と特長は以下のとおりである。

- 通常の自動走査探傷中に走査機構および探傷器と同期してデータサンプリングし、X, Y, Z (ここでの Z 軸は被検体の厚さ) の 3軸とも最大 200 点、即ち 8×10^6 点の情報を記録できる。
- 収集データはフロッピーシートに記録させ、随時読出し、表示が可能である。
- キーボードの設定により任意角度からの立体表示が得られ欠陥を多角的に解析できる。
- さらに、この立体図形に内部欠陥の投影図形を同時に表示

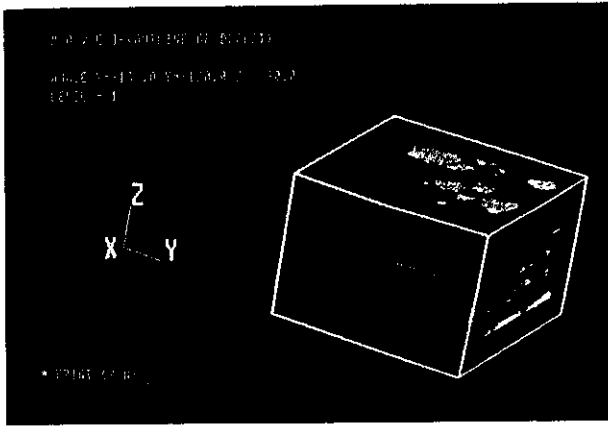


Photo 2 Example of isometric display with two-dimensional top and side views for ready identification of the three-dimensional distribution of flaw

する機能を有している。

- (e) 欠陥エコーレベルを7レベルに分類して、色分け表示をすることができる。
- (f) X, Y, Z 軸の任意の軸の断面の B スコープ表示および欠陥面積率を得ることができる。

本機能により探傷、収録および表示された例を **Photo 2** に示す。本例では、中央部に群在するのが、内部欠陥の 3 次元立体像であり、上辺にはその上面投影図、右辺はその側面投影図を表わしている。被験材は SS 材に SUS 材をオーバーレイした材料であり溶着部に割れを誘起させたものである。溶着部に存在する割れ欠陥および SS 材中に点在する欠陥を区別して認識でき、割れ欠陥部の観察評価と同時に、母材である SS 材への割れの進展状況の調査に使われている。

3 本装置の代表的応用例

3.1 水素誘起割れ試験への適用²⁾

ラインパイプ用鋼では、硫化水素を含む環境下における母材部の水素誘起割れ (HIC) と周溶接部の硫化物応力腐食割れ (SSCC) とが重要課題である。HIC は、鋼管内表面で Fe と H_2S が反応して発生した水素原子が鋼中に侵入して誘起する割れである。この HIC に対する鋼材の感受性評価の方法、すなわち HIC 試験に、この水浸式超音波探傷装置が極めて有効に適用されている。

HIC 試験の方法としてはいわゆる BP 試験が従来広く行われていた。これは鋼材試験片を **Table 2** に示す標準条件に 96 時間置き、しかる後、圧延方向に直角な C 方向断面を複数個切り出して観察断面とし、これを顕微鏡観察する方法である。この方法は検鏡のための試料準備と作業とに大きな時間と労力を要し、また観察断面自体が本質的にサンプリングという不確実要素を持っている。96 時間浸漬後の観察を、C スキャン装置により探傷記録する C スキャン UT 法は下記のような種々の利点を持っている。

- (1) 試験片全面の HIC 進展範囲を 2 次元像として検出する。
- (2) HIC 割れ面積率を自動的に算出できる。
- (3) 直線状と階段状の割れの区別ができる。
- (4) 試験所要時間が極めて短い。
- (5) 非破壊的であり、割れの進展状況の継続的観測も可能である。

Table 2 HIC test procedure

Item	Condition
Test solution	Synthetic sea water (ASTM D1141)
Temperature	$25 \pm 3^\circ\text{C}$
H_2S concentration	2 300 — 3 500 ppm
pH	5.1 — 5.4
Test period	96 h

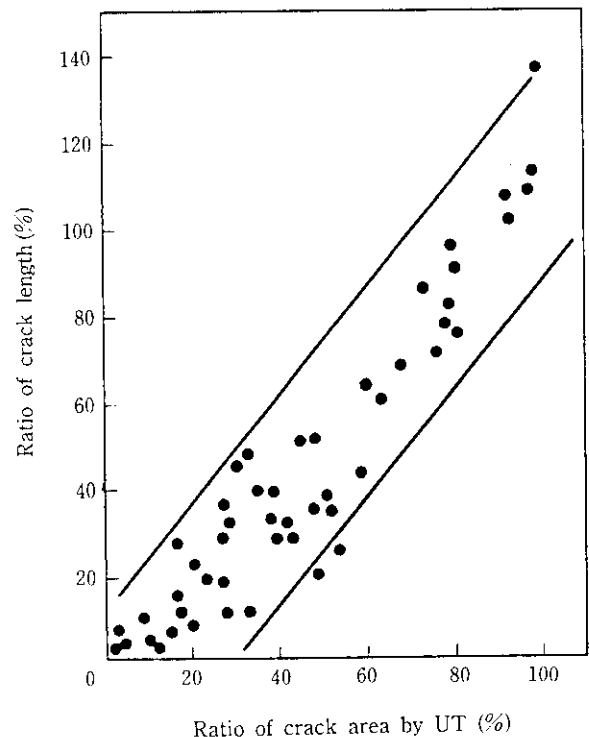


Fig. 7 Relation between ratio of crack length in cross sections of specimen obtained by microscope and ratio of crack area obtained by UT

Fig. 7 に検鏡法による割れの長さ (%) と C スキャン UT 法による割れ面積率 (%) の関係を示す。良い相関が認められ、等価の試験であることがわかる。**Fig. 8** に HIC の進展挙動の継続的観測結果を示す。試験片は特別な試験水槽に入れられ、片面が H_2S 飽和の人工海水に接し、もう一方の面が、C スキャン UT 用の通常水に接した状態として観測が行われた。浸漬前に皆無だった欠陥 (割れ) が目を迫って発生し、進展していく様子が明瞭な 2 次元像として捉えられている。これは、この測定が非破壊的である故の成果であって、割れの進展挙動の研究に大きな武器を提供した。他に、C スキャン UT 法の割れ面積率 (%) に関しては、20% が 1 つの限界値で 20% より大ならば階段状割れが発生しているというデータも得られている。

当社では、上記のデータと長所により、C スキャン UT 法をすでに製鉄所での工程的な HIC 試験の観察手段として採用し、順調に運用を続けている。

3.2 オーバーレイ溶接部の剝離割れ現象解析^{3,4)}

高温高圧水素環境下で使用される石油精製用直接脱硫塔の内面

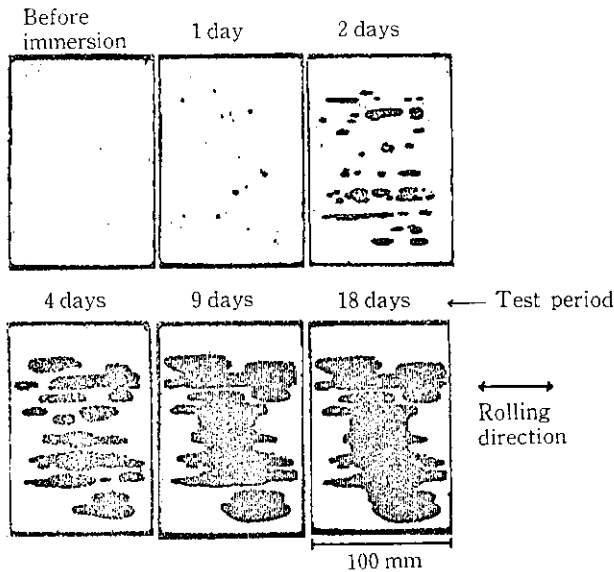


Fig. 8 Propagation behavior of hydrogen induced cracks observed by immersion one side of the specimen in the synthetic sea water saturated with H_2S and detecting cracks from the other side by the C-scan UT

に、耐久性を考慮して溶接されるオーステナイト系ステンレス鋼と母材境界面に、剝離割れ (Disbonding) が発見されることがあった。この剝離割れは、操業中に容器内壁の肉盛溶接部から、容器内壁内に吸蔵された水素が、大きく関与しており、とくに母材と溶接金属の境界において、シャットダウン時に起る水素の異常集積と残留応力とによって、剝離割れが誘発されると考えられる。

この剝離割れは、装置の使用環境が高温高压水素雰囲気ということもあって、大きな爆発事故の原因になる可能性があり、剝離割れの抑止および、剝離割れの検知技術の確立は重要である。

Cスキャン装置によって、検出された剝離割れ部分を切断して組織観察してみると、剝離割れは、母材と溶接金属との境界部に溶接後熱処理 (Post weld heat treatment, PWHT) 時に、溶接線に沿って帯状に形成された炭化物析出層を起点として、発生している場合が多い。また、溶接金属側に観察される、母材の旧オーステナイト粒に対してエピタキシャルに成長したように見える粗大オーステナイト粒に沿って、剝離割れが伝播しているのがしばしば観察される。(Photo 3 参照)

この剝離割れに対して、例えばオーステナイト粗粒の割れが起り易い箇所または組織を予め非破壊的に検知することが出来れば、危険予知およびその対策を講じることが可能である。

Fig. 9 の Nontreat 材は、高温高压水素処理を施さない状態の試験片 (SR 処理を施したままの試験片) を、2 種類の検出感度で測定した C スコープ記録を示す。図の下側に検出感度として示した C スコープ記録は、検出感度を定量的に見るために行ったもので、試験材と同じ条件でオーバーレイを施した試験材の溶接境界面に、オーバーレイ部側から開けた平底ドリル穴 (人工欠陥) を探傷した結果である。B は A より更に 17 dB 感度を上げて測定したものである。図より分かるように、感度 B では、或るイメージが出現する。このイメージは検鏡の結果、溶接部の粗粒存在域および、溶接境界面の不規則な箇所に対応していることが分かった。ここではこれを擬欠陥と名付けることにする。

このような、擬欠陥が存在する試験片を、水素分圧 150 kgf/cm^2 温度 455°C のオートクレーブに装入し、48 時間保持した後、空気

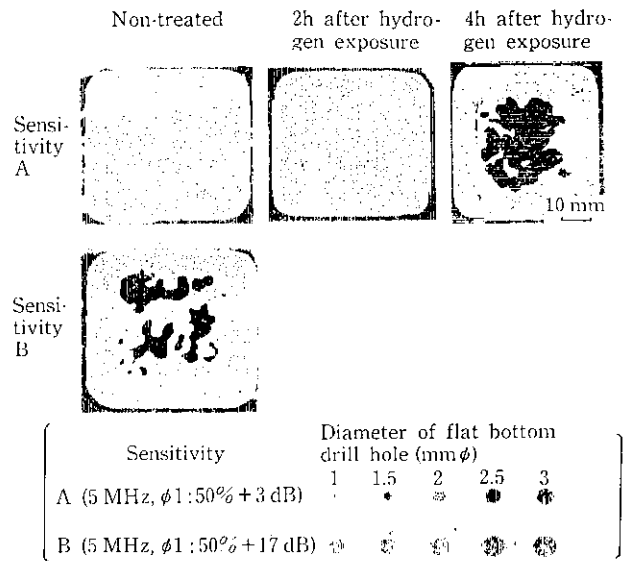


Fig. 9 Influence of suspicious flaw and disbonding

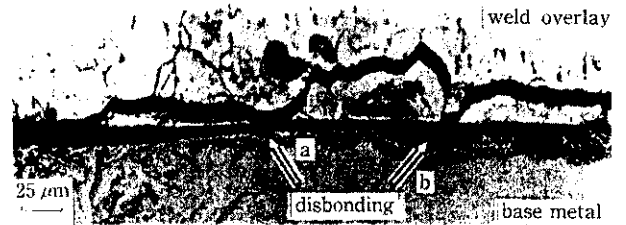


Photo 3 Microstructure and disbonding observed in the transition zone between overlay weld metal of type 308 stainless steel and base metal of $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ steel

中に 24 時間放冷後、再度感度 A で探傷した結果を Nontreat 材の右に対比的に示す。2 h, 4 h は取出し後の時間を意味している。Photo 3 は、4 h 後に検出された欠陥部の断面写真である。これより、Fig. 9 の探傷結果は、剝離割れによることが明らかである。また、Fig. 9 の Nontreat 材のイメージと、剝離割れによるイメージを対比して気付くことは、剝離割れは擬欠陥に相当する箇所から形成されていることで、剝離割れと擬欠陥との間に、或る種の相関関係が存在することが推察される。Fig. 10 は、オーステナイト粗粒の生成率が、溶着金属中の δ -ferrite (Delong Schaeffer 線図のオーステナイトとマルテンサイトの境界線上の δ -ferrite 量) に依存し、 δ -ferrite 量が 5% 以上になると、オーステナイト粗粒の生成が抑止されるという知見をもとに、 δ -ferrite 量を、種々変えて作成した試験片について、オートクレーブを用いて、剝離割れ試験を行い、Cスキャン UT 法によって、その剝離割れ感受性と擬欠陥との対応を求めたものである。図は明らかに、擬欠陥の面積率の多いものほど剝離割れ感受性が高いことを示している。

このように、PWHT 直後の剝離割れ感受性を予知し得る可能性が Cスキャン装置を用いた試験によって見出された。

3.3 薄鋼板の探傷⁹⁾

薄鋼板などの板厚の小さな材料の欠陥検出には、一般の Cスキャン UT 法で使用されるパルス反射法は不都合なことが多い。即ち、被検体表面での反射エコー (表面エコー) の残響のため、表面直下の欠陥が識別できないためである。このような時に、エコーロス法

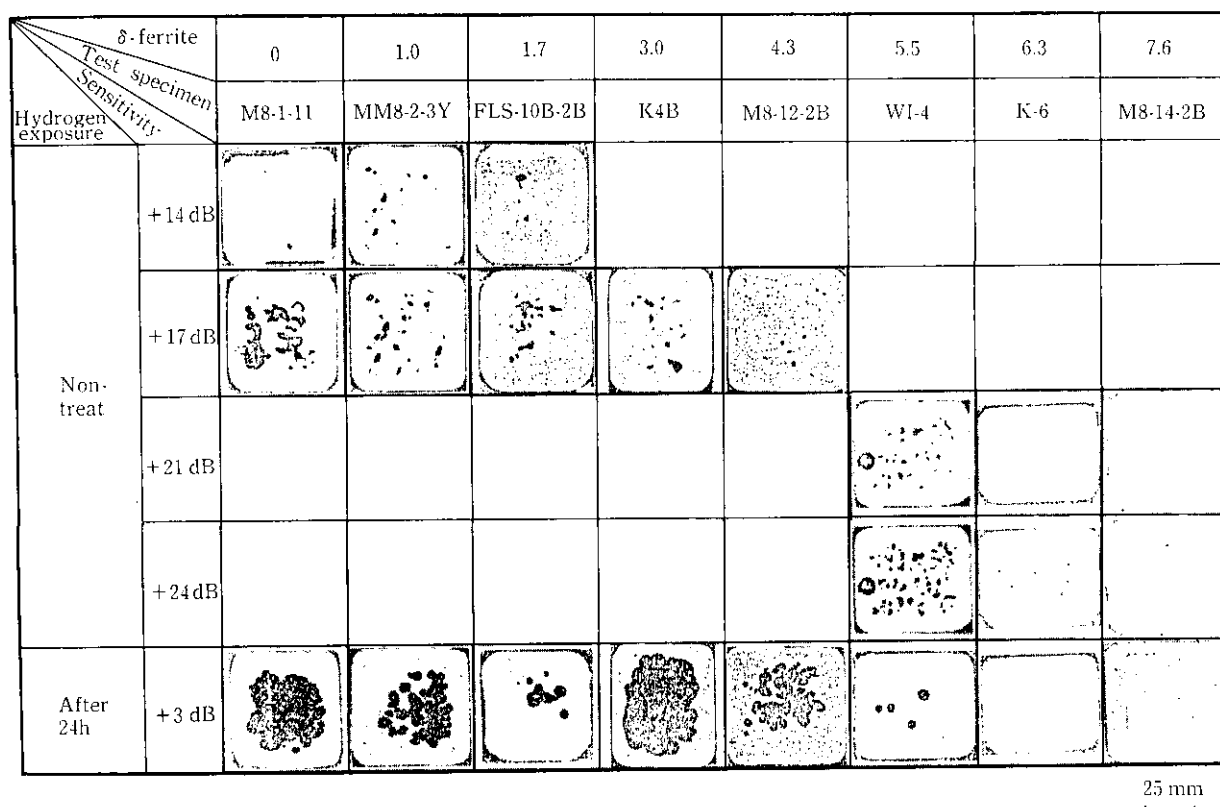
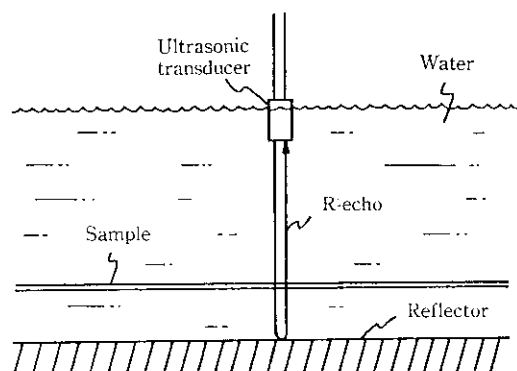
Fig. 10 Influence of δ -ferrite content in weld metal upon disbonding

Fig. 11 Schematic of double-sound transmission immersion test

と呼ばれる、裏面反射エコーのレベル観察の方法がある。超音波の伝搬経路中に欠陥が存在すれば、そこでの散乱や吸収などのために、裏面に到達するエネルギーが減少し、結果的にここで反射して受信される裏面エコーのレベルは、正常部に比して減衰するので、このエコーレベルを観察することによって、薄鋼板の欠陥を検出しようとする方法であり、有効な探傷方法の1つである。しかし、欠陥からの反射エコーを直接捕えようとする方法に比して、裏面の微小キズや、板の傾斜、曲がり、反りなどの影響を受けやすいという欠点を有しているため、表裏面が清浄で、平坦な形状の被検材に限られることから、厚鋼板への適用ほど十分にはCスキャン装置が用いられていなかった。この欠点をカバーするためには、二重音響透過法 (Double sound transmission) と呼ばれる方法が有効である。

二重音響透過法の原理図を Fig. 11 に示す。超音波探触子により送信された超音波のうち、被検材背面の反射板で反射されることにより被検体を2回透過するエコー (Rエコー) に注目し、欠陥部で

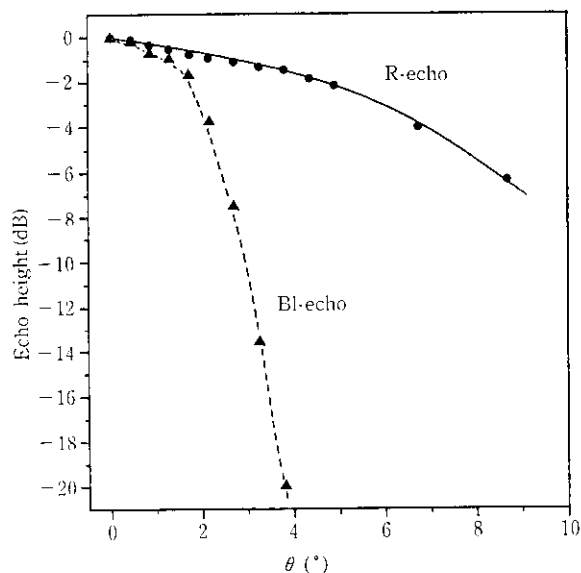


Fig. 12 Relation between echo height and inclination angle of sample

は、欠陥による超音波の散乱および吸収が往復にわたっておくるため、正常部に比して反射エコーが大きく減衰することを利用するものである。筆者らは、板厚 20 mm の SUS 304 系ステンレス鋼板の鏡面仕上げ材を反射板として利用している。

前述した如く、透過法でありながら、1つの探触子で通常のCスキャン装置をそのまま利用できる。さらに一般的透過法と同じく被検材の曲がり、反りに影響され難いという特長を有している。Fig. 12 に鋼板被検材と超音波ビームの傾きに対する第1裏面エコー

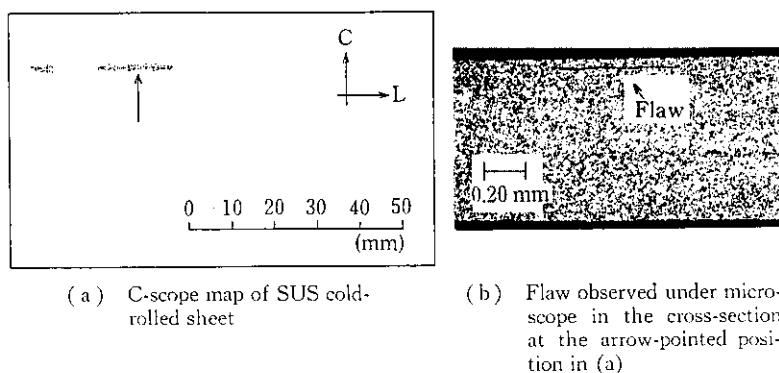


Fig. 13 Example of double-sound transmission UT

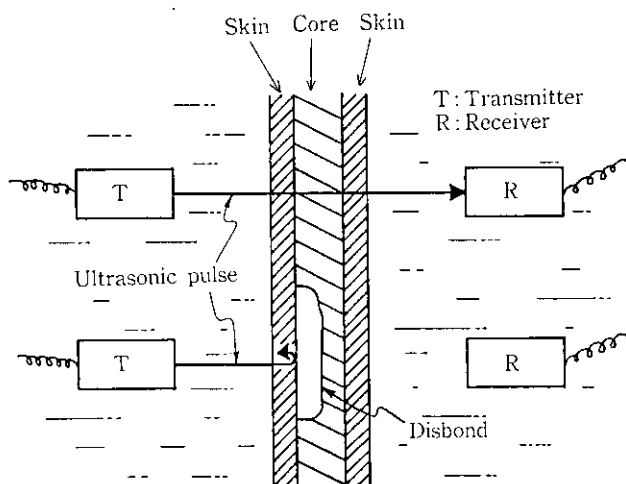


Fig. 14 Schematic of through-transmission method for honeycomb structure

(B1 エコー) および、Rエコーのレベル変化特性を示す。これによると、B1 エコーは、 2° 以上で急激に減衰し、パルス反射法の限界を示すものである。

Fig. 13 に薄鋼板の探傷例を示す。板厚 0.69 mm の SUS 430 系ステンレス冷延鋼板の介在物欠陥の探傷例と、そのマイクロ写真である。これは正常部より 4.5 dB 以上の R エコー減衰を欠陥として記録したものである。

3.4 新素材の探傷

水浸方式の走査型超音波探傷技術は、鋼材をはじめとする金属の内部および、溶接部探傷以外に、最近、我が国においても新素材、新機能材料の内部欠陥や接着部の欠陥検出などにも使われはじめてきている⁹⁾。軽量ながら高強度の構造材であり航空機の部材として用いられるようになったハニカム材の品質評価への適用が、その一例としてあげられる。ハニカム構造材は、FRP などの表面材の間にハニカム状コア材をはさんだ構造であり、表面材の積層間欠陥、表面材とコア材の接着剝離、およびコア材の亀裂損傷が主な欠陥である。これらの欠陥に対し精密自動探傷を目的として、メカニズムを含めた探傷技術の開発を進めている。その構造からパルス反射法による探傷は全要求を満足し得ないので、Fig. 14 に示すように、2つの探触子間に被検体を配置し、一方を送信、他方を受信用として用いることによって、被検体中を透過した超音波エネルギー強度により欠陥を検出する、いわゆる透過法が有効である。実際には、Photo 4 のように、探触子前面に水噴出用の水ジェットノズルを

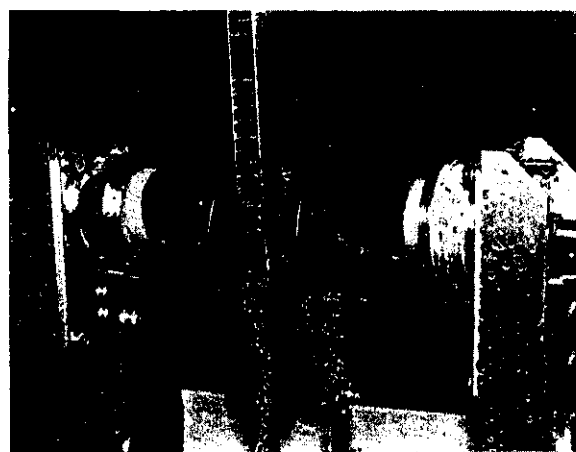


Photo 4 Through-transmission UT by double water squirters

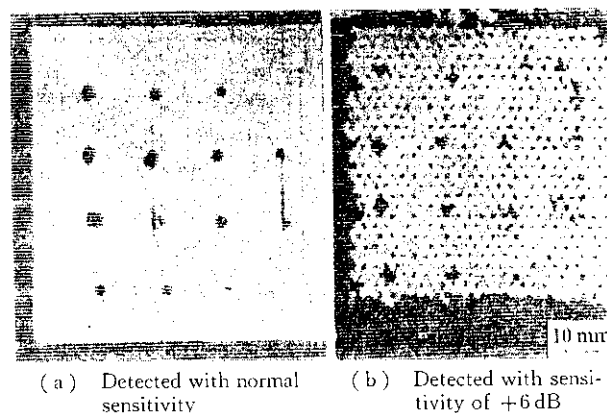


Fig. 15 C-scope records for honeycomb structure (CFRP skins and NOMEX core)

設け、この噴流水によって被検体との音響カップリングを図っている。これら一対の探触子を含んだ水ジェットノズルを、被検材表面に沿って走査することによって得た欠陥記録を Fig. 15 に示す。被検材は、表面と裏面が CFRP (Carbon-FRP) で、ノーマックスコア材を間にはさんだサンプルに、人工欠陥を埋め込んだものである。(a) は通常感度で、(b) は (a) より約 6 dB 感度を高めることによって、ハニカム構造を意識的にイメージさせたものである。このハニカム材用の C スキャン装置は現在開発中である。また、セラミックス、CFRP、FRM (Fiber reinforced metal) などの探傷についても、数 10 μ m 程度までの欠陥検出に対する、本装置の有効性はすでに確認され、数社のユーザーにおいて実用されている。

4 結 言

川崎製鉄と川鉄計量器で共同開発した水浸走査型超音波探傷システムについて紹介した。

- (1) 本装置は高感度探傷器の採用、高精度 6 軸走査機構および μ -CPU による高度なデータ処理機構を持つ。
- (2) 機能としては、欠陥の単純な 2 次元マップ記録のみならず、B スコープ記録、欠陥面積率の算出と記録、立体 3 次元表示などのコンピュータグラフィック処理機能を持つ。
- (3) 本装置は、水素誘起割れ試験における割れの検出、ステンレスオーバーレイの剝離割れの検出、および極薄鋼板の微細非金属介在物の検出に適用されており、良い成果が得られている。

水浸方式の走査型超音波探傷技術は鋼材をはじめとする金属材料の内部欠陥の検出装置として、研究用から品質保証試験用、有害欠陥発生防止のための生産手段へのフィードバック用まで、その技術はほぼ確立され実用に供されている。また最近では、航空機用部材であるハニカム材をはじめとする新素材、新機能材料の内部欠陥検出に使われはじめている。装置としてはファインセラミック中の微細欠陥の検出のように高感度、より精密走査を要求され、また航空機部材などを対象として大形化、走査の複雑化の方向に進むものと思われる。このように種々の材質、形状に応じた超音波探傷法と、自由曲面の微細制御技術、および検出欠陥の有害性評価に裏打ちされたデータ処理技術の開発発展に今後とも積極的に取り組みを続けたい。

参 考 文 献

- 1) 宇野義雄, 永倉義之, 森田博之, 松本延雄, 川村紘一, 丸山英雄: 「高感度水浸 C スキャン超音波探傷装置」, 川崎製鉄技報, **12** (1980) 2, 115
- 2) Y. Nakai, H. Kurahashi, T. Emi, O. Haida: "Development of Steels Resistant to Hydrogen Induced Cracking in Wet Hydrogen Sulfide Environment", *Trans. ISIJ*, **19** (1979) 7, 401
- 3) 今中拓一, 下村順一, 中野昭三郎, 安田功一: 「Cr-Mo 鋼の水素侵食とオーバーレイ剝離現象」, 川崎製鉄技報, **17** (1985) 1, 84-92
- 4) 坪井潤一郎, 今中拓一, 中野昭三郎, 安田功一: 「耐剝離割れにすぐれたステンレス肉盛溶接金属の開発」, 鉄と鋼, **70** (1984) 5, S 669
- 5) 高田 一, 丸山英雄: 「反射板式透過型 C スキャン超音波探傷」, 鉄と鋼, **71** (1985) 4, S 400
- 6) D. J. Hagemair: "Ultrasonic Inspection of Carbon-Epoxy Composites", *Materials Evaluation*, **43** (1985) 5, 547