

(論文)

鑄鍛鋼品向け自動超音波探傷装置

Automatic Ultrasonic Inspection System for Steel Castings and Forgings



岡本 陽*
Akira Okamoto



和佐泰宏*
Yasuhiro Wasa



鈴木紀生**
Norio Suzuki



山路鉄生***
Tetsuo Yamaji

Stable inspections are needed to guarantee internal quality of steel castings and forgings, such as crankthrows for a built-up type crankshaft in a marine vessel engine and rolls for rolling. An automatic ultrasonic inspection system for throws and rolls have been developed. Probe scanning technology with proper contact force and noise elimination technology from an echo signal have been newly developed. As a result, the defect inspection stabilized for a short time has become possible.

まえがき = 船用エンジンに用いられる組立型クランク軸や圧延用ロールなどの鑄鍛鋼品は、内部品質を保証する安定した検査が求められており、このニーズに対応すべく、鑄鍛鋼品(クランクスロー、圧延用ロール)を対象とした自動超音波探傷装置を開発し、短時間で安定した探傷検査と検査結果の記録が可能となった。本稿では、この自動超音波探傷装置について報告する。

1. スロー自動超音波探傷装置

船用エンジンに用いられるクランク軸は、長期間の繰返し荷重に耐える必要があるため、表面および内部の品質は厳しく管理する必要がある。組立型クランク軸は、複数のジャーナル部とクランクスロー(以下、スロー)と呼ばれる偏心部を焼ばめして造られる(図1)。このうちスローは、高生産性の観点から鑄造で造られる場合があり、独自の製造技術で品質のレベルアップを実施しているが、重要部位の内部品質を保証する安定した検査が求められていた。このニーズに対応するため、従来手動

による超音波探傷を行ってきたが、スロー自動超音波探傷装置を開発し、小型から大型にわたる全機種に適用可能とした。

スローはピンと呼ばれる円柱部とその周囲のフィレット部およびそれを挟み込む2つのアーム部から構成され、その独自の形状のため、応力がピンフィレット部周辺の狭隘部に集中する。従って、ピン周辺は詳細な探傷が必要であるが、手動探傷する場合は長時間を要するとともに、フィレットなどの3次元曲面部位での安定探傷には熟練者が必要である。今回開発した自動探傷装置の適用により、重要部位を安定かつ短時間に探傷することが可能となった。

1.1 装置概要

1.1.1 探傷方法

内部欠陥を探傷する手法としては、超音波探傷法が広く適用されてきており¹⁾、鋼材部門ではその形状に応じて詳細に手法が規定されているものもある²⁾³⁾。

スローに対しても従来手動探傷を実施してきたが、より高品質の検査を実施すべく、スローピン周辺を図2に示す3領域に分割して、各部ごとに専用の探触子を用いて探傷することとした。

1) ピン平行部

円柱部の表面であり、表層近傍は斜角探触子、深部は垂直探触子を用いて探傷する。斜角探触子は、ピン平行部の両側にあるフィレットとの境界近傍領域も併せて探傷する。

各探触子は、ピン軸方向に往復走査され、1走査ごとに、周方向に一定ピッチで移動する。ピン走査機構がピンまわりを1周すると、ピン平行部の全領域を探傷できることになる。

2) フィレットR部

ピン平行部の両側には、凹形状の3次元曲面のフィレ

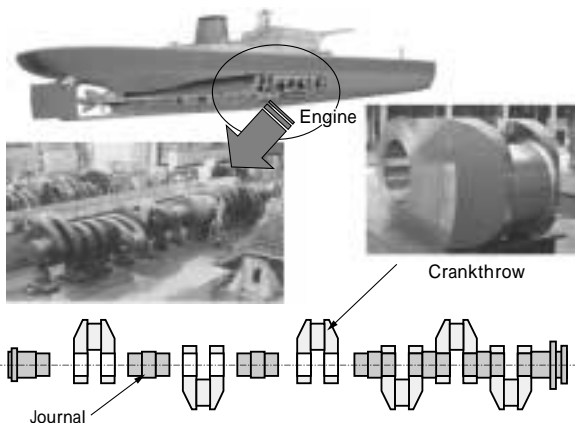


図1 組立型クランク軸とクランクスロー
Fig. 1 Built-up type crankshaft and crankthrow

*技術開発本部 生産システム研究所 **神鋼検査サービス㈱ 開発部 ***鉄鋼部門 鑄鍛鋼事業部 技術部

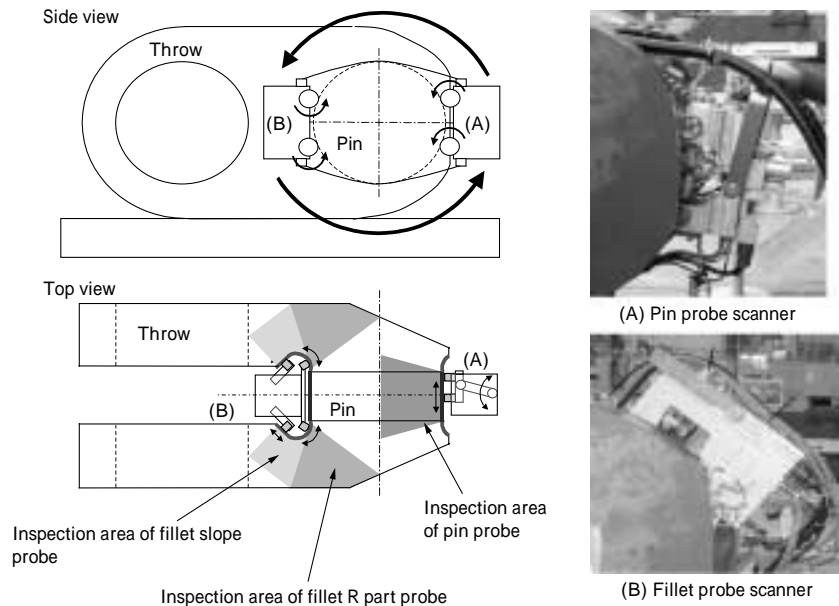


図2 スロー自動超音波探傷の走査装置
Fig. 2 Scanning system of throw automatic ultrasonic inspection

ットR部がある。この部位の探傷では、R部曲面に沿うような凸R曲面を有するシューを付加した斜角探触子を用いる。探触子のシューがフィレットR部に沿うように回転走査する。回転走査の中心が、対象フィレットRの中心位置にくるように走査機構には上下・左右の位置調整機能も有する。回転走査はフィレットR部の全域をカバーするように往復運動を行い、1回転走査が終了するごとに、周方向に一定ピッチで移動する。フィレット走査機構がピンまわりを1周すると、フィレットR部の一定深さまでの全領域を探傷できることになる。フィレットR部の走査幅は周方向位置により異なるので、回転走査範囲は品種ごとにあらかじめ教示された範囲をプレーバック方式で決定することとした。

3) フィレット傾斜部

フィレットR部のさらに外側には、直線形状のフィレット傾斜部がある。この部位の探傷も左右それぞれ専用の斜角探触子2個で行う。フィレット傾斜部の幅に応じてプレーバック方式で直線走査を行い、1走査終了ごとに周方向に一定ピッチで移動する。

1.1.2 走査機構

上記、複数個の探触子を狭いスローピン周辺に配置し、効率よく探傷走査するために、図2に示すような2台で構成する走査機構を開発した。(A)ピン走査機構では、ピン平行部での垂直、斜角の探触子をピン軸方向に走査する機構である。(B)フィレット走査機構は、フィレットR部の回転走査およびフィレット傾斜部の直線往復走査を行う機構としている。これら2台の走査機構はローラチェーンで結合され、ピンを挟んで180°対向した位置に固定され、自走式でピン周りを回転しながら探傷走査を行う。

スローには種々の大きさのものがあり、たとえばピン直径で560～1100mmの範囲で製作されている。これらを大型、小型の2種類の走査機構でカバーするようにしている。探傷対象種に応じて、ローラチェーンの長さ調

整、フィレットR部走査のアーム調整などが必要であり、事前に段取替を行うことで対応している。独自の工夫で段取替に要する時間は約0.25～0.5h程度と、非常に高効率での検査が実施できる体制を構築できた。

1.1.3 システム構成

図3に示すように、探傷システムはすべて、FAパソコンで制御されている。走査用モータは、モータコントローラボードを介して多軸同時制御され、探触子走査を実現する。

複数の探触子は左右2グループに分かれ、切替器で選択された後2台のデジタル超音波探傷装置に入力される。ここでのデジタル超音波探傷器は外部制御可能なバルサレーバとして使用しており、レーバ出力のRF信号はパソコンに搭載された高速ADボード(25MHz)に入力される。高速ADボードでは、走査中に探触子が探傷位置にくるたびにRF信号を取込み、欠陥判定、カップリングチェックを行う。

そのほかパソコンは、走査機構に搭載された傾斜計出力の入力や接触媒質(マシン油)供給ポンプの制御、探

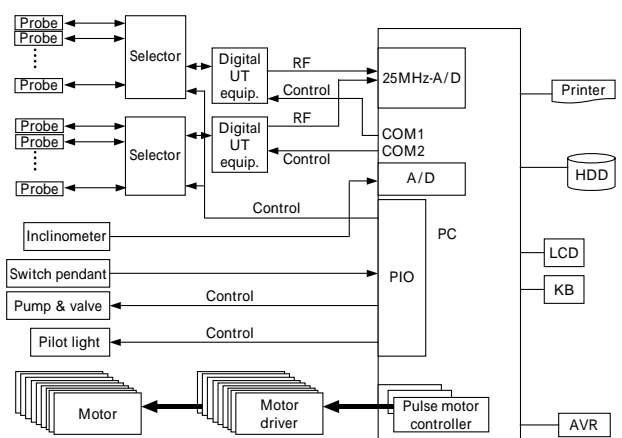


図3 スロー自動超音波探傷装置のシステム構成
Fig. 3 System diagram of throw automatic ultrasonic inspection

表 1 スロー自動超音波探傷装置仕様

Item		Specification	
Throw size	Big type	Small type	
Pin width (mm)	220 - 420	185 - 270	
Pin diameter (mm)	670 - 1 100	560 - 678	
Inspection method	Pulse reflection method		
Pulsar repetition	1kHz		
Pulse pitch	4mm		
Probe	Pin	Normal and angle	
	Fillet	Angle	
Coupling liquid	Machine oil		
Coupling check	B1 echo detection		
Detectability	Reference - 12dB		
Inspection time	Big type	Small type	
	90min (Typical)	60min (Typical)	

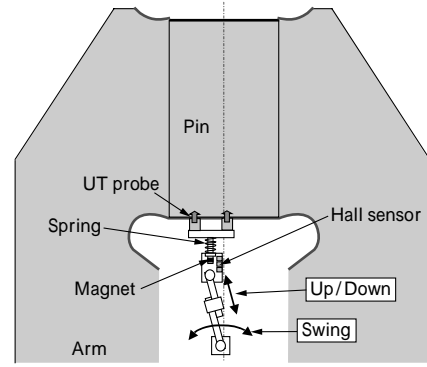


図 4 スローピン部表面の走査機構

Fig. 4 Scanning mechanism on throw pin surface

傷結果表示なども行う。

主要な装置仕様を表 1 に示す。

1.2 安定探傷技術

自動探傷装置では、安定した探傷を確保する必要がある。そのための種々の探傷技術が提案されているが、本装置においては有用な既提案技術を採用するだけでなく、スロー特有の複雑形状に対する安定走査機構や、生産現場に適したノイズ弁別技術を新規に開発した。

1.2.1 狭いピン周辺での安定走査

ピン走査機構とフィレット走査機構を、ピン部を挟んで互いに釣合状態に配置することで、小型モータでもピン部円周方向の移動を可能とするとともに、互いに干渉することなくピン部とフィレット部の同時探傷が可能となった。スローのピン軸を水平方向に設置し、台車内に全方向 (360°) 傾斜計を配置することで、接触媒質などに起因する車輪スリップの影響をうけず、高精度なピンの周方向位置検出 (精度 ± 1mm) が実現できる。傾斜計では、相互に直交配置させた振り方式傾斜計 (± 60° 測定範囲) を 4 個用い、360° の全範囲を計測できるように取付け、校正による補間曲線適用で 0.1° の高分解能を実現した。

1.2.2 探触子カップリングを適正に保つ首振走査制御

図 4 に示すように、ピン平行部の走査機能には、多様なピン幅に対応できかつスロー内の狭い領域でも実現可能な首振機構を採用した。首振走査とともに、探触子カップリング (押さえ圧) を適正に保つため、モータによる昇降機構を採用した。探触子が被検査面に押当てられた際の押さえばねの縮み量を、小型永久磁石と 3 個のホールセンサからなる変位センサでモニタし、永久磁石が中央のホールセンサの位置になるように昇降モータをリアルタイム制御する。この制御は 1 ~ 2 秒周期のピンの首振走査中常時行われ、首振角によらず、常に適正な押さえ圧を実現する。これにより、ワーク寸法機差や探触子磨耗に起因する探触子カップリング不良を低減できる。

1.2.3 外乱ノイズ弁別

生産現場の溶接や溶解などの工程では、大電流に起因するパルス状ノイズが発生し、微弱な超音波エコー信号に重畳されて外乱ノイズとなる場合がある。これらに対しては種々の手法が提案されているが^(4),5)、ここでは、このような外乱ノイズと検出すべき欠陥エコーを高精度に

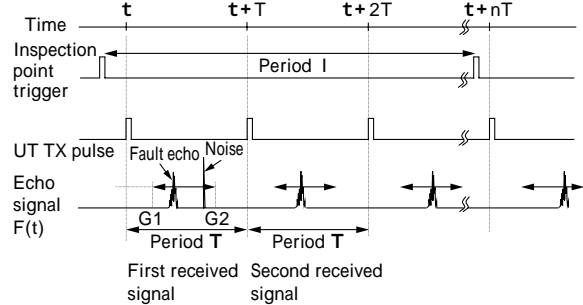


図 5 超音波探傷タイムチャートとノイズ弁別の原理

Fig. 5 Time chart of ultrasonic inspection and noise elimination principle

自動弁別する簡易なアルゴリズムを適用した。すなわち、外乱ノイズは、超音波送信パルスとは非同期であるのに対し、検出すべき欠陥エコーは送信パルスと完全に同期していることを利用する。

図 5 に示すように、短い繰返し周期 T で超音波パルスを送信し、隣合った 2 送信分の受信信号波形を連続して取込む。2 送信分の受信信号間で、送信パルスに同期した欠陥エコーは、送信パルスからの時間が同じであるのに対し、外乱ノイズはどちらかの受信信号の監視域 (ゲート) 内には存在しなかったり、送信パルスからの時間差が異なったりするので、両者を弁別することが可能となる。図 5 の例では、最初の受信信号波形においてゲート内にしきい値以上の欠陥エコーとノイズの 2 つが観測されているが、2 回目の受信信号波形においては欠陥エコーのみが観測され、繰返し周期 T に非同期の外乱ノイズは観測されない。2 送信分のエコー波形を連続取得し、エコーの送信パルスからの時間差を比較して、ノイズかどうかを判断するという簡易なアルゴリズムで外乱ノイズの弁別が可能となった。

なお、超音波送信繰返し周期 (ここでは 1kHz) は、探触子走査機構より発する探傷点位置到達信号の時間周期 I (100Hz 以下) よりも十分に小さく、2 送信分の間での探触子移動距離が無視できるレベルで、欠陥エコーがほぼ同じであることが必要である。

1.2.4 カップリングチェック

探触子とワークの間には、接触媒質としてマシン油を常時供給してカップリングを確保できるようになっているが、適正な探傷感度が維持できているかというカップリングチェックが必要になる。カップリングチェックには従来採用されている一般的な手法⁽⁶⁾を採用した。すな

わちピン平行部の垂直探触子では底面エコーのレベル監視を用い、その他の斜角探触子においては、材料粒界からの林状エコーの有無によるカップリングチェックを行っている。

欠陥判定およびカップリングチェックは、高速ADを通してパソコンに取込んだすべての探傷データに対して行っている。何らかの理由でカップリング不良が発生した場合には、その旨のアラーム表示がなされ、再探傷を行うことになる。また、欠陥エコーのAスコープデータをすべて記録していることで、後でコンピュータ上での欠陥評価にも活用できる。

1.2.5 探傷感度校正

探触子およびシューなどの経年劣化による感度変化を校正するため、手動探傷と同じく、標準試験片または平板、円筒内面に施した平底穴の人工欠陥を用いた試験片にて定期的に校正を行っている。

1.3 探傷結果例

大型スロー探傷装置でテスト的に通常の探傷感度より高感度で探傷を行った結果の一例を、図6に示す。上部には、スローピン周辺の表面展開図上に欠陥候補がエコー強度レベルにより色別された点で表示されている(Cスコープ表示)。図で、横方向はピン周方向角度(傾斜計で測定)、縦方向はピン軸方向である。ピン平行部が中央、その両側にフィレットR部、その両側にフィレット傾斜部が配置される。この図には、複数探触子の探傷結果がまとめて表示されている。任意の点をクリックすると、その点での探傷結果としてのAスコープが表示される。同様に深さ方向の欠陥潜在範囲を容易に表示するBスコープ表示(図7)も可能である。

また、検出された欠陥候補は一覧表としてリスト表示される。この表示は、探傷走査点ごとの表示も可能であり、近接した欠陥候補をまとめてグループ化し、欠陥サイズを評価項目とした表示も可能としている。

本装置の探傷性能を評価するために、2mm径の平底穴で評価した。垂直、45度斜角、70度斜角の各探触子で深さの異なる平底穴を検出し、同じエコーレベル(80%表示)になるために必要なアンプゲインを計測した。結果を図8に示す。垂直は25mm以上の深部に有効で、70度斜角は表層付近、45度斜角は両方に感度を有する。なお、同一部位を複数回探傷したときのエコー・位置検出の再現性は3dB以下の差異で一致していることを確認している。

1.4 適用効果

手動探傷では、一定レベル以上の合格欠陥の全記録を残すことは、長時間を要するためできていなかったが、本装置適用により、上記合格欠陥の自動記録が可能になり、探傷結果を製造部門へフィードバックすることで、スローの品質向上に大きく役立っている。

大型スロー探傷装置でテスト的に通常の探傷感度より高感度で直径700mm程度のスローピン周辺を手動探傷する場合、記録も含め数日を要していたのに対し、スロー自動探傷装置で4mmピッチ走査する場合、約1.5時間で完了することができる。

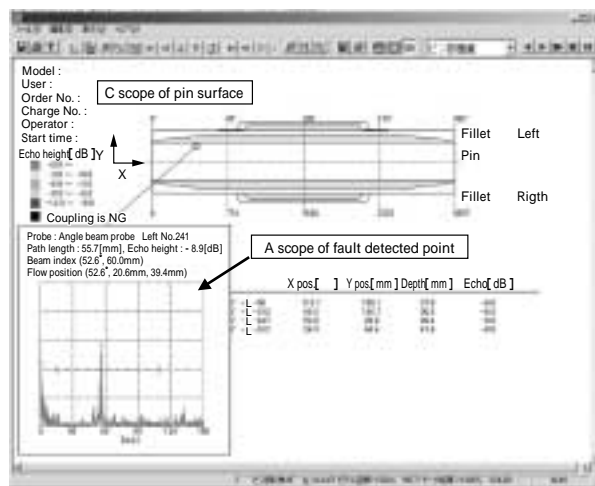


図6 スローの探傷結果例(Cスコープ)

Fig. 6 Example computer screen of throw automatic ultrasonic inspection (C scope)

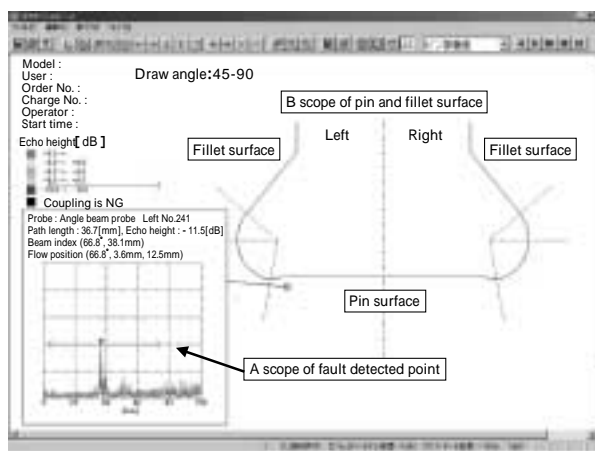


図7 スローの探傷結果例(Bスコープ)

Fig. 7 Example computer screen of throw automatic ultrasonic inspection (B scope)

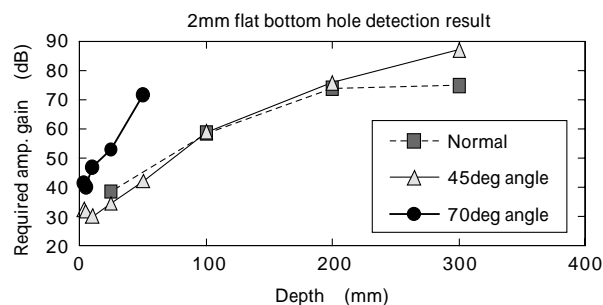


図8 スロー自動超音波探傷装置に使用されている3種類探触子のFBH検出結果

Fig. 8 Flat bottom hole detection result by 3 type probes for throw automatic ultrasonic inspection system

2. ロール自動超音波探傷装置

鉄鋼や非鉄金属などの生産ラインで使用される圧延用ロール(バックアップロール, ワークロール, 写真1を参照)は、圧延および研磨加工を繰返して使用されるので、表層および内部の品質は非常に重要である。従来は手動による超音波探傷を行ってきたが、全面探傷には長時間を要し、探傷走査・監視を確実に実施するには検査



写真1 ロール(ワークロール)
Photo 1 Roll (work roll)

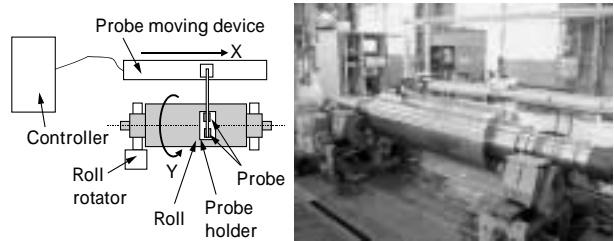


図9 ロール自動超音波探傷装置の外観
Fig. 9 Roll automatic ultrasonic inspection system

表2 ロール自動超音波探傷装置の仕様

Table 2 Specification of roll automatic ultrasonic inspection system

Item	Specification	
Roll diameter (mm)	165 - 1 350	
Roll length (mm)	750 - 3 900	
Detect territory	Surface ~ 40mm	40mm ~ Roll core
Inspection method	Pulse reflection method	
Probe	Angle	Normal
Pulser repetition	1kHz	60Hz
Inspection pitch	1 × 2mm	4 × 4mm
Coupling liquid	Machine oil	
Coupling check	Grass echo detection	B1 echo detection
Detectability	Reference - 12dB	
Inspection time	4.5 hour (Roll size 560 × 1 600)	

員の熟練度を要する。そこで、手動探傷より短時間で安定検査・結果の記録ができるように、自動超音波探傷装置を開発した。

2.1 ロール自動超音波探傷装置の概要

開発したロール自動探傷装置の仕様を表2に示し、自動超音波探傷装置でロールを探傷している外観を図9に示す。探傷走査は、被検査材であるロールを回転装置に搭載し、回転ローラにより回転させ、探触子ホルダを探触子送り装置に取付け、送り装置を一定速度でロール軸方向に移動することで、スパイラル状に全面探傷を行う。探触子ホルダには、ロール表層付近を探傷する45°斜角探触子と、ロール中心まで探傷する垂直探触子の2個を装着しており、ロールの表層部から中心までの全域を探傷可能としている。

ロールの回転は、ロールに取付けた棒ドグがフォトインタラプタを横切ることによりモニタリングしている。制御装置内には、パソコン、モニター、プリンタ、デジタル超音波探傷装置などがあり、パソコンがすべてを制御する。スロー自動超音波探傷装置と同様に、デジタル超音波探傷装置は、外部制御可能なバルサレシーバとして使用しており、レシーバ出力のRF信号はパソコンに搭載

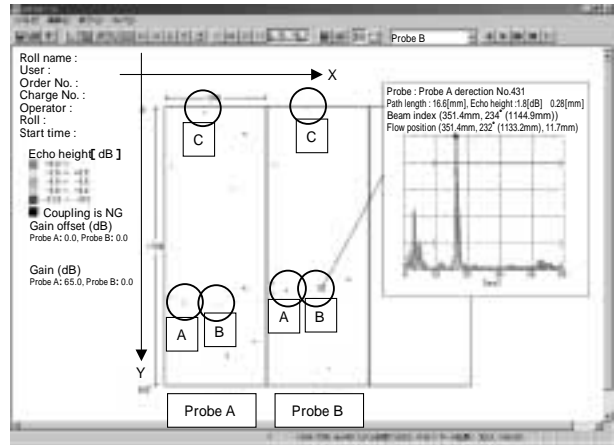


図10 ロール自動探傷結果例

Fig.10 Example computer screen of roll automatic ultrasonic inspection system

された高速ADボード(25MHz)に入力される。高速ADボードでは、走査中に探触子が探傷位置にくるたびにRF信号を取込み、パソコンが欠陥判定、カップリングチェックを行う。

微小欠陥までも自動で探傷しようとするとう電気ノイズなどの誤検出が問題となるので、この場合にも前述の外乱ノイズ弁別アルゴリズムを搭載して、安定した探傷を実現している。

2.2 適用結果

欠陥内在のテストロールを対象に、ロール自動超音波探傷装置で検査した結果例(Cスコープ表示)を図10に示す。図中のロール展開図は、横方向はロール軸方向(X)、縦方向は円周方向(Y)を表し、探触子ごとに表示している。任意の検出点をクリックすると、その点での探傷結果(検出エコーレベル、検出深さ)とAスコープが表示される。

また、同じロールを対象に、手動で精密探傷した結果との比較を表3に示す。表中のProbe A, Probe Bは同一の斜角探触子であり、ビーム入射方向が異なる。通常、

表3 手動探傷と自動超音波探傷装置との比較

Table 3 Difference between manual UT and automatic UT system

No.	Position of defect		Probe A				Probe B				Difference between manual and automatic UT (dB)
			Automatic UT system		Manual UT		Automatic UT system		Manual UT		
	Depth (mm)	X (mm)	Echo (dB)	FBH size (mm)	Echo (dB)	FBH size (mm)	Echo (dB)	FBH size (mm)	Echo (dB)	FBH size (mm)	
A	19	130	- 3.2	0.21	- 1.2	0.23	3.0	0.30	2.7	0.29	2
B	11	353	- 4.8	0.19	- 2.5	0.22	3.1	0.30	4.8	0.33	2.3
C	14	262	- 1.0	0.24	- 1.2	0.23	3.9	0.31	6.0	0.35	2.1

欠陥を異なる2方向から探傷し評価・判定を行っており、経験的には欠陥形状により、最大エコーが最大6dB程度異なっている。今回の実験データも同一の斜角探触子を複数ビーム入射方向で検査している。手動探傷との比較において、エコー・位置検出の差異は2dB程度であり、手動精密探傷とほぼ同程度の検出精度が得られていることが分かる。

2.3 適用による効果

本装置適用により、検査時間については、例えば直径560×長さ1600mmサイズのロールでは、約4.5時間で探傷が完了し、全面手動精密探傷した場合と検査時間は変わらないが、検査（探傷走査・記録）は全自動であり検査員の拘束時間は圧倒的に短くなっている。また、自動探傷することで、安定した検査が可能となり検査品質も向上し、また設定した検出レベルをこえるインディケーションの探傷波形は容易に取込み可能であり、製品の品質レベルの把握が可能で製品の品質改善への有効な手段が整備できた。

むすび＝組立型クランク軸スローのピン周辺部（非常に狭い領域）を高速で自動探傷するスロー自動超音波探傷装置や、圧延用ロールの表層および内部を自動探傷する

ロール自動超音波探傷装置を開発し、スローおよびロールの全数に適用している。両装置とも全自動の検査（探傷走査・記録）が可能である。また、複数の探触子を組合わせ、自動探傷に必要な部位の全域を高速探傷できる走査機構、その制御ソフト、探傷エコーのノイズ弁別、ユーザインタフェースなどの技術を開発し、安定した探傷技術を確立した。さらに、複数の探触子で検出した探傷データを被検材の部位ごとに評価・解析が可能であり、製品の品質データが採取でき、製品品質をフィードバックして安定した製品作りに貢献できると自負している。また、検査技術としては、他部品・製品に対しても従来手動探傷で行っていた超音波探傷の自動化を推進し、検査の効率化、検査品質の向上・定量化を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験，東京（2001）p.138.
- 2) 日本鉄鋼協会：鋼板の超音波探傷法，東京（1999）p.47.
- 3) 日本鉄鋼協会：継目無鋼管の超音波探傷法，東京（2004）p.28.
- 4) Y. Iizuka et al. : J. JSNDI, 44 (1995) p.814.
- 5) Y. Iizuka et al. : CAMP-ISIJ, 11 (1998) p.957.
- 6) T. Masuda et al. : H7年超音波による非破壊評価シンポジウム，非破壊検査協会，東京（1995）p.183.