

クランクスローの自動超音波探傷装置

和佐 泰宏*・岡本 陽*

Automatic Ultrasonic Inspection System for Crank Throw

Yasuhiro WASA and Akira OKAMOTO

Synopsis : An automatic ultrasonic inspection system for crank throws of built-up type crankshaft has been developed. Several kinds of UT-probe for each part of throw are used to detect faults in important area. Probe scanning technology with proper contact force and noise eliminate technology are newly developed, so that the stable inspections for all types of throws are realized.

Key words: ultrasonic inspection; crankshaft; throw; contact force.

1. はじめに

船舶エンジンに用いられるクランク軸は、長期間の繰り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される必要がある。組立型クランク軸は、複数のジャーナル部とスローと呼ばれる偏心部を焼きばめて造られる (Fig. 1 参照)。このうちスローは、高生産性の観点から鋳造法で造られる場合があり、独自の製造技術で品質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る。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いたのに対し、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、応力がピンの内股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、手探傷した場合、長時間を要するとともにフィレットなどの3次元曲面部位では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。

2. 装置概要

2.1 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 Fig. 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。ここ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

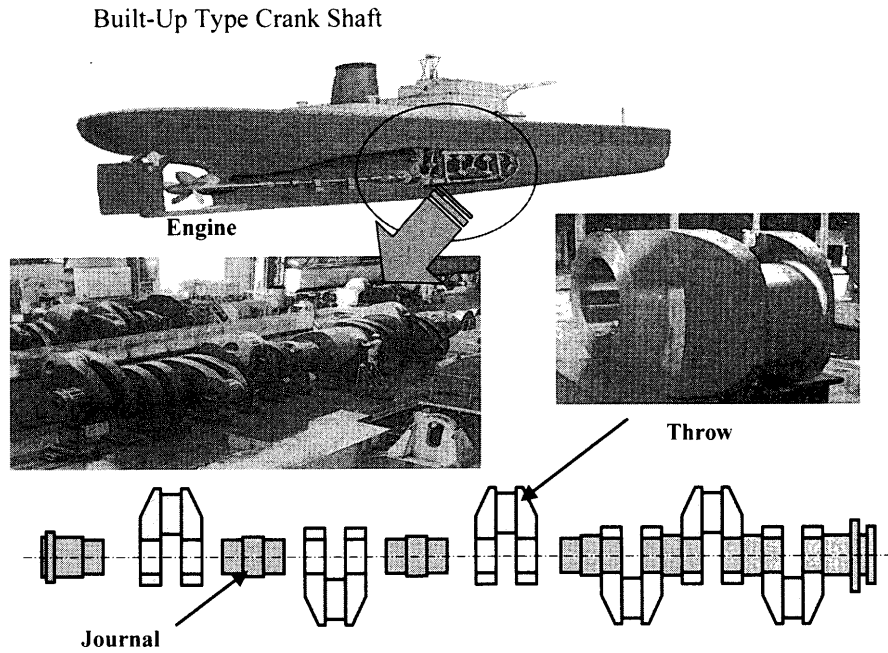


Fig. 1. Built-up type crank shaft and throw.

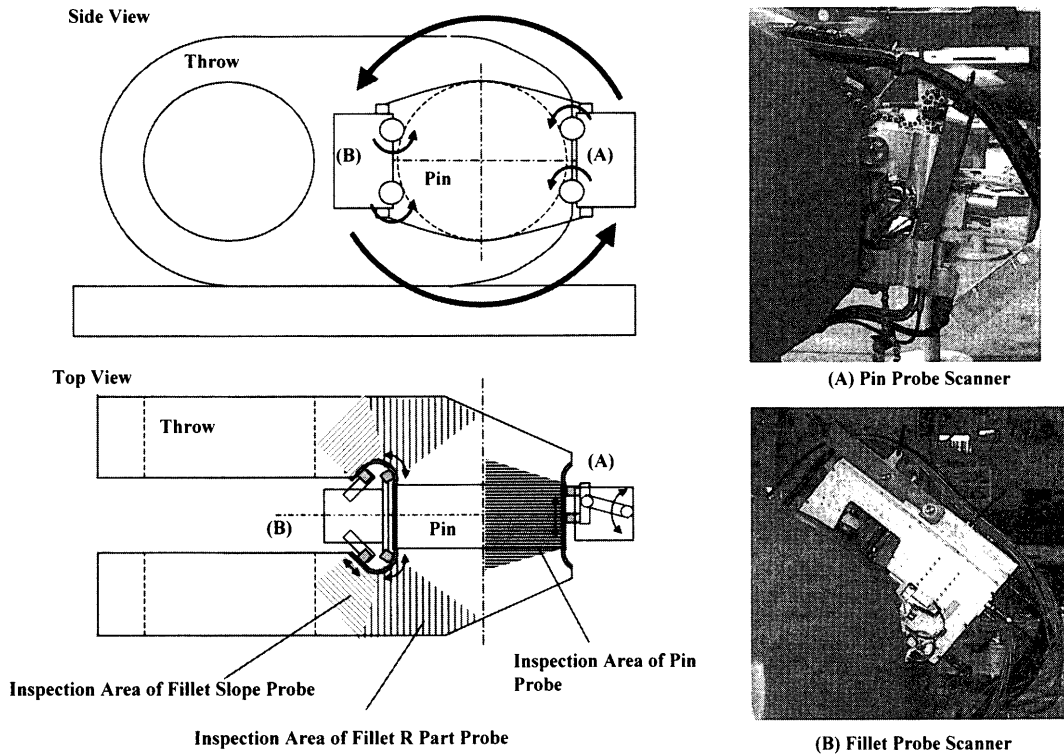


Fig. 2. Throw UT scanning system.

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。

2.2 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、Fig. 2に示したような2台から構成され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なっている。これら2台の走査機構はローラー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

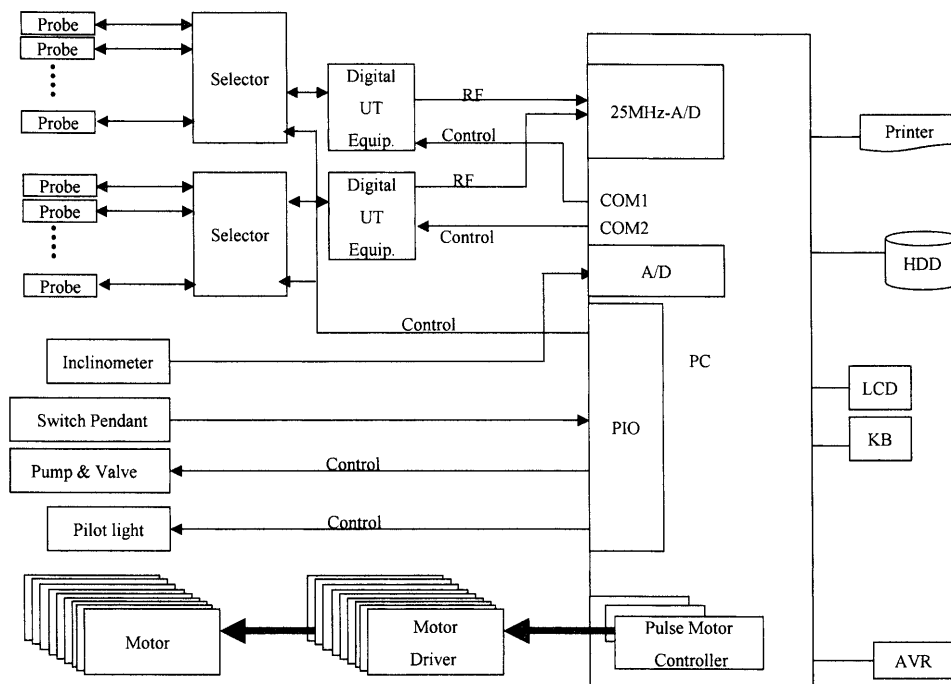


Fig. 3. System diagram of throw UT inspection.

る。探傷対象種に応じて、ローラー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、事前に段取り替えを行うことで対応している。

2.3 システム構成

Fig. 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、切り替え器で選択された後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パルサー・レーザバとして使用しており、レーザバ出力の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信号を取り込み、欠陥判定、カップリングチェックを行う。

その他、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、探傷結果表示なども行う。

主要な装置仕様をTable 1に示す。

3. 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。

Table 1. Specification of throw UT inspection system.

Item	Specification	
Throw Size	Big Type	Small Type
Pin Width (mm)	220 - 420	185 - 270
Pin Diameter (mm)	670 - 1100	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)

3.1 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り合い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共に、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 ± 1 mm)が実現できる。

傾斜計では、相互に直交配置させた振り子方式傾斜計($\pm 60^\circ$ 測定範囲)を4個用い、360°の全範囲を計測できるように取り付け、校正による補間曲線適用で 0.1° の高分解能を実現した。

3.2 探触子カップリングを適正に保つ首振り走査制御

Fig. 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

な首振り機構を採用した。首振り走査とともに、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し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り走査中常時行われ、首振り角によらず、常に適正な押さえ圧を実現する。これにより、ワーク寸法公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。

3.3 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。

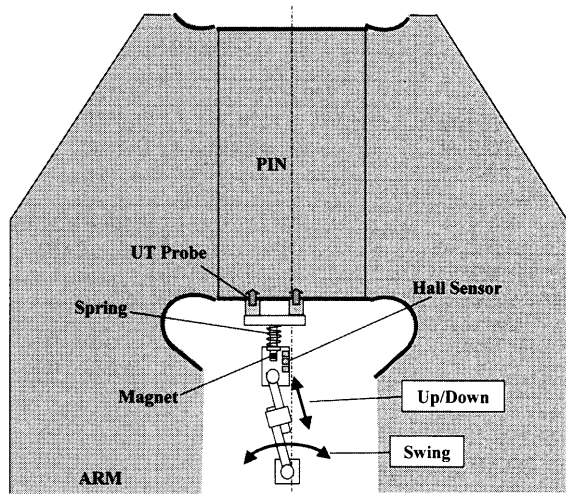


Fig. 4. Scanning mechanism on throw pin surface.

Fig. 5に示すように、短い繰り返し周期Tで超音波パルスを送信し、隣り合った2送信分の受信信号波形を連続して取り込む。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。Fig.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、繰り返し周期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、超音波送信繰り返し周期（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。

3.4 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ノイズ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り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

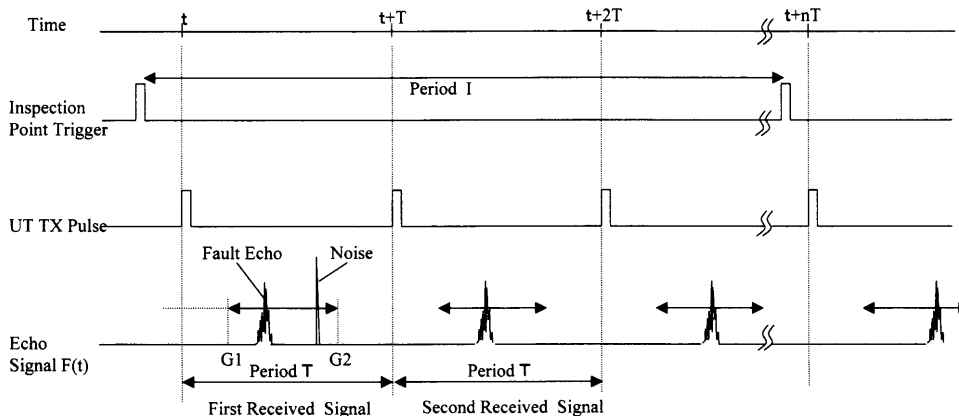


Fig. 5. Time chart of UT inspection and noise elimination principle.

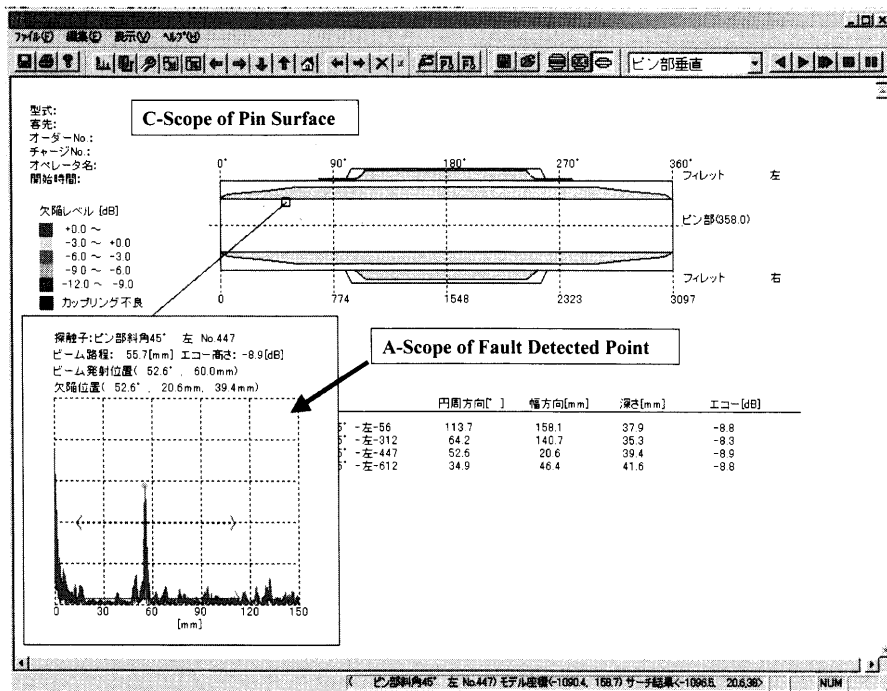


Fig. 6. Example computer screen of crank throw automatic ultrasonic inspection.

にも活用できる。

3.5 探傷感度校正

探触子およびシユ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校正を行っている。

4. 探傷結果例

大型スロー探傷装置でテスト的に高感度探傷を行った結果の一例を、Fig. 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。

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。この場合、探傷走査点ごとの表示も可能であるし、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なっている。

本装置の探傷性能を評価するために、2 mm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Fig. 7に示す。垂直は25 mm以上の深部に有効で、70度斜角は

Φ2mm Flat Bottom Hole Detection Result

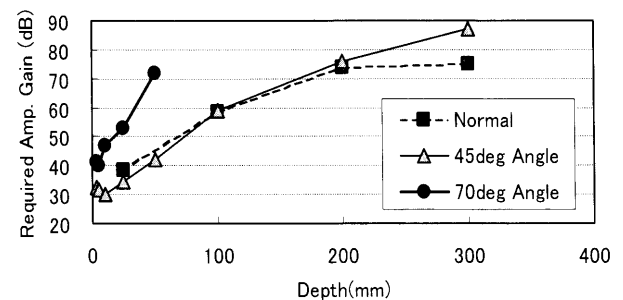


Fig. 7. Flat bottom hole detection result by 3 type probes for throw.

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3 dB以下の差異で一致していることを確認している。

直径700 mm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4 mm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。

5. おわりに

組立型クランク軸のスローのピン周辺部を高速で自動探傷するスロー自動探傷装置を開発し、全数適用を行っている。複数の探触子を組み合わせ、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、ユーザーインター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。

今後、他部品・製品に対しても従来手動で行っていた超音波探傷の自動化を推し進め、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。

文 献

- 1) 超音波探傷試験II, 日本非破壊検査協会, 東京, (2001), 138.
- 2) 鋼板の超音波探傷法, 日本鉄鋼協会, 東京, (1999), 47.
- 3) 継目無鋼管の超音波探傷法, 日本鉄鋼協会, 東京, (2004), 28.
- 4) Y.Iizuka, R.Okuno, A.Nagamune and K.Nishifuji: *J. JSNDI*, **44** (1995), 814.
- 5) Y.Iizuka, Y.Nakajima, T.Matsuoka, N.Oono and A.Murayama: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 957.
- 6) T.Masuda, K.Ito, H.Miyata, K.Tuchiya and T.Yahata: H7年超音波による非破壊評価シンポジウム, 日本非破壊検査協会, 東京, (1995), 183.