

高周波超音波探傷による鋼中介在物の評価技術の開発

加藤 恵之*1・竹本 省一*2・佐藤 海広*1・塗 嘉夫*3

Development of Evaluation Technique of Non-metallic Inclusions
in Steel by High-Frequency-Ultrasonic Detection
Yoshiyuki Kato, Shoichi Takemoto, Kaiko Sato and Yoshio Nuri

Synopsis: Development of evaluation method of medium-size of nonmetallic inclusions is one of important subjects in iron and steel materials engineering. Automatic evaluation of inclusions by the ultrasonic method was examined about steel grades. The fundamental characteristics, e.g. detectability of inclusions, were examined by focal-type high-frequency ultrasonic probe of 50-125 MHz. In this ultrasonic method the inspection weight was 1g to several tens g per specimen, and the object of the evaluation was mainly the medium-size inclusions which size was 20-200 μm .

- ・ Evaluation of medium-size inclusions used to be difficult, but it became possible by the application of this ultrasonic method of higher-frequency focusing probe. Detecting limit of inclusions by this ultrasonic probe was confirmed that it was almost equal to 1/4 of a wavelength.
- ・ Since echo amplitude falls as a defect deviates from the focus position, the revision of echo amplitude is necessary for both axial and radial directions. It is possible to correct the axial deviation by a quadratic equation. However correction of the radial one requires narrow scanning pitch measurement, because of the difficulty to located individual defect.
- ・ Heat-treatment condition of a sample has an influence on echo amplitude. Discrimination between voids and inclusions is possible by the analysis of wave form.

Key words: non-metallic inclusion; UST; echo amplitude; acoustic impedance; SUJ2; focusing probe.

1. 緒言

自動車の低燃費化，軽量化の問題は，高強度材の開発，耐疲労寿命の改善へと展開し，結果として材料設計における材料の強度アップにつながった。鋼中の大型介在物量が激減し鋼材の清浄度は著しく向上したものの，依然として中大型の介在物に起因する疲労破壊は解決すべき重要課題であり改めて注目をされてきている¹⁾。ところが疲労破壊につながるといわれる鋼材の介在物の大きさ，およびその分布を知る上で，現在の評価法は必ずしも十分な情報を与えるものとは言えない²⁾。光学顕微鏡法は介在物の標準評価法³⁻⁶⁾として使われているが，被検面積の小さいことから大型介在物の出現を十分予測できない。また一方では，大型介在物やかみ込み物の検査に適用されるUST法は，逆に探触子の検出能の問題から，小型介在物の評価には不向

きである。Fig.1^{3, 7-10)}に示すように，これらの評価方法によってカバーされない中間領域，すなわち径20 - 200 μm の中型介在物に対する試験評価・保証方法は十分に確立されているとは言い難い。そこで，より検出能の高い探触子を用いることにより介在物の粒径分布の迅速評価技術と中大型介在物の定量的検出評価法を検討した。

近代超音波技術の発展に貢献したのはLangevanである。彼は1917年に水晶振動子を用いてはじめて実用的な超音波発信器の試作に成功した。その後，第2次大戦中のレーダーの開発研究からパルスの技術が応用されソナーなどに超音波の用途が広がった¹²⁾。戦後はファインセラミックス (Fine ceramics) の出現により優れた圧電材料が開発され探傷装置 (振動子) が高性能化されている¹³⁾。

鉄鋼業においては，超音波技術は製造ラインの品質管理用として適用され自動探傷装置の開発が行われてきた¹¹⁻¹³⁾。

*1 技術研究所 プロセス開発グループ

*2 技術管理部 条鋼管理第1グループ

*3 技術研究所 プロセス開発グループ，工博

超音波探傷技術と介在物評価のかかわりは、1958年ごろにはすでにアメリカ、ヨーロッパで始まっており、軸受鋼において非金属介在物の大きさ、位置、形態と寿命の関係の研究が行われている¹⁴⁾。1965-1970年にアメリカでは大学や鉄鋼、自動車、ベアリングメーカーなどの研究機関を中心としてASTM委員会 E4のもとで5-10MHzの周波数を中心に介在物評価法の研究が精力的にすすめられた¹⁵⁻¹⁹⁾。Bastienは鋼材の検査に対する超音波探傷法の役割について、超音波法は種々の制約はあるも欠陥の探知と位置決めにはよい結果をもたらすが、欠陥の大きさを決めるには正確さに欠けると述べていることは注目される²⁰⁾。

その後はより高い周波数の探触子の製造が困難であったこと、高周波超音波法は周波数が高くなるにつれて鋼材内部における減衰が大きくなり浸透できる深さが浅くなるなどの理由から、超音波技術を利用した革新的な進展は見られていない²¹⁻²⁸⁾。

50MHz以上の探触子を用いた例として松崎ら²⁹⁾、村井ら³⁰⁾が鋼の超音波検査において、気泡とアルミナ介在物の反射パルスの位相が180度異なること、すなわち気泡からの反射波形が逆転することから気泡と介在物が超音波により識別できることを報告している。

一方、高周波探触子についてはポリマー技術の進歩により、振動子を薄くし曲率半径を小さくした探触子の製造が可能になった³¹⁻³³⁾。しかし、過去の介在物の評価研究の中では超音波ビーム径が介在物径より圧倒的に大きいことから鋼中介在物の大きさを評価した記述はほとんど見られない。

そこで、著者らは超音波反射強度と欠陥径の関係を求めることを目的として、新しく検出能の高い超音波探触子、すなわち「浸漬型 + 焦点型 + 高周波探触子 (50 - 125MHz)」を導入した。

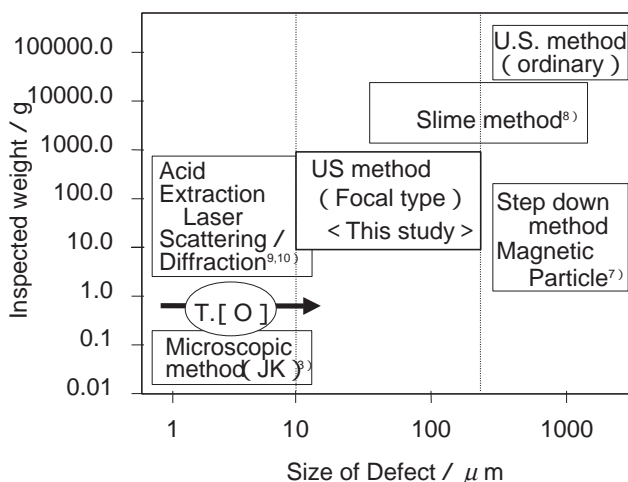


Fig. 1. Relationship between size of defects and measurement methods.

2. 実験方法

2.1 超音波探傷装置

実験に使用した超音波探傷装置は高周波探傷器を使用し、反射エコー強度と位相を複合評価する機能を備え、介在物と空孔との識別が可能である。またこの高周波探傷器は1.5~150MHzの広い周波数帯域と、高精度の7軸スキャナ装置を備え、平面、側面、円柱、円筒、円錐、球面およびこれらを組合せた走査が可能である。表示画像は平面 (Cスコープ) および側面 (Bスコープ) カラー表示され (Fig.2), 測定結果はファイルに保存が可能である。最小走査ピッチは0.005mmで、超音波探触子は水浸型 焦点型、周波数は50,80,100,125MHzを使用した。Fig.3, Fig.4および Table 1に測定条件を示す。

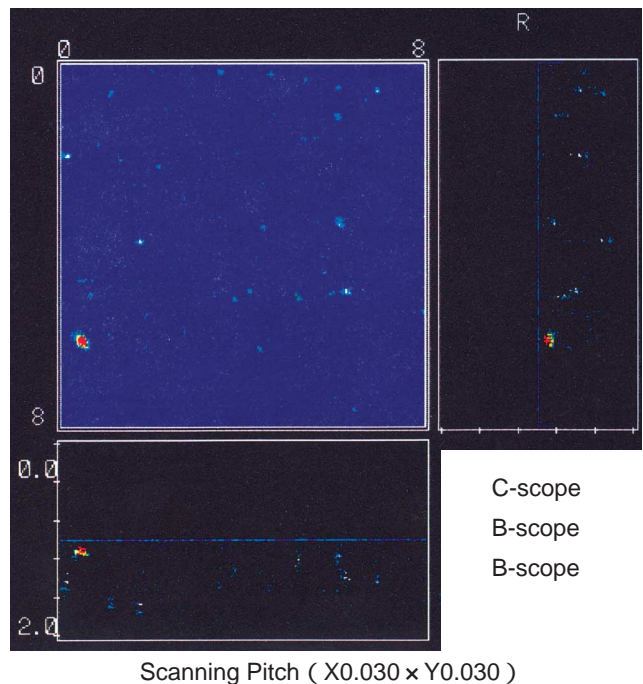


Fig. 2. C-scope and B-scope color image in ultrasonic testing.

Table1. Condition of ultrasonic detection

Frequency (MHz)	50	80	100	125
Focal Point in Water (mm)			12.5	
Water Path (mm)			6.5	
Dead Zone (mm)		0	0.5	
Gate Range Below Surface (mm)	1.0	2.0 or 1.0	1.5	
Focal point Below Surface (mm)		1.5		
< Detectability > *1)				
1 / 2 Wavelength (μ m)	59	37	30	24
1 / 4 Wavelength (μ m)	30	18	15	12

*1) Wavelength = Sound velocity / Frequency (Hz) × 10⁶
(Sound velocity = 5900m / sec in steel)

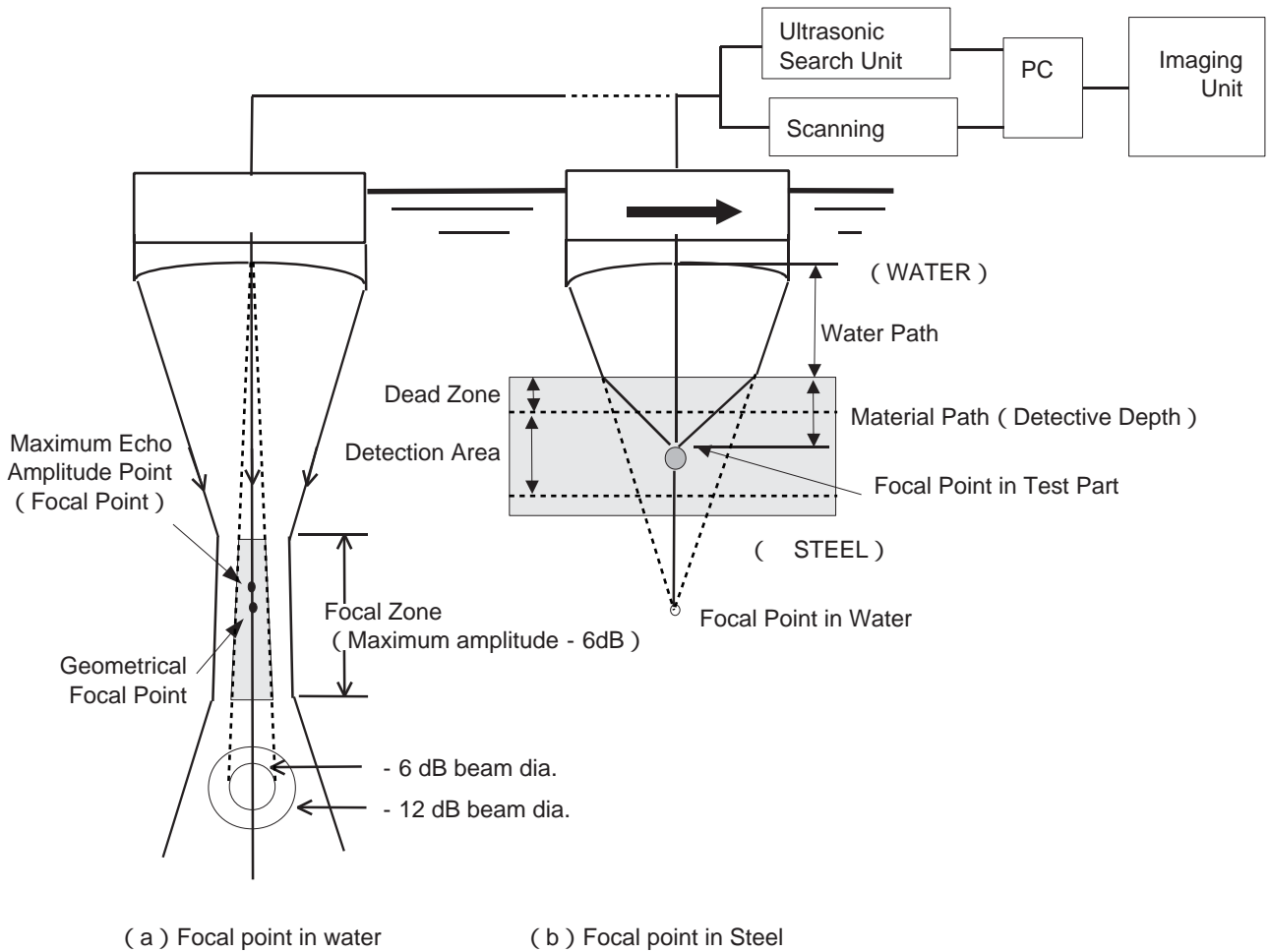


Fig. 3. Focal length of an immersion transducer

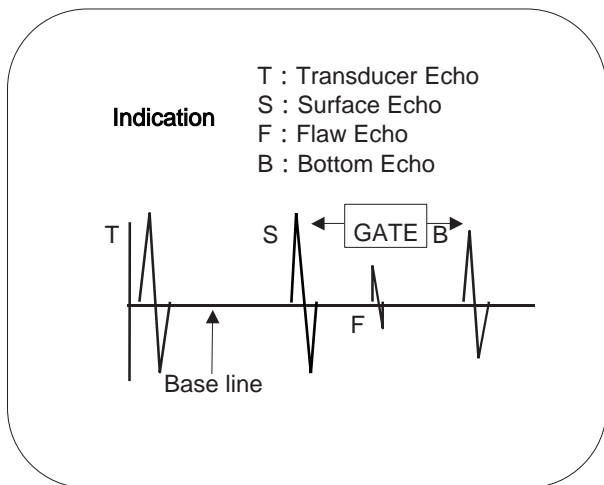


Fig. 4. The oscilloscope indications of (T), (S), (F), (B) - Echo and the gate position .

2・2 高周波超音波試験用の基準試験片の作成と探触子基本特性の調査

2・2・1 人工基準試験片の作成

鋼中の介在物の大きさを評価するためには欠陥の大きさ既知の基準試験片が必要であり，走査ピッチの決定のため

に鋼中の焦点位置におけるビーム直径の測定が必要である。
 ところが微小欠陥を評価するための $\phi 10-100 \mu m$ の基準試験片（以下，基準試験片Sとする）の製造技術は開発されていないため人工的に作成する必要があった。種々検討の結果，鋼線径と反射波強度の相関すなわち，微小欠陥の径に対する依存性を求めるため「熱硬化性樹脂材料」の中に欠陥径既知の材料として「鋼線」を埋め込んだ人工の基準試験片Sを作成しビーム径の測定に適用した。鋼線の直径は10, 25, 50および100 μm とし，長さは各々10mmとした。埋め込み位置は表面から鋼線の上端までの距離dを1.5mmとした（Fig.5）。

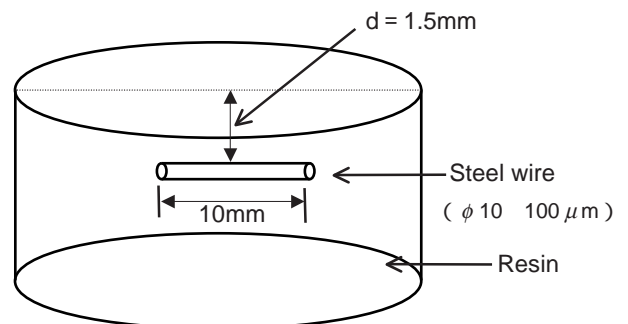


Fig. 5. Standard test pieces ' s ' (Steel wire buried in resin.)

水浸法による超音波測定の場合、鋼中探傷深さ（MP）は（1）式で示したSnellの法則^{34）}により決定される。ここで、水中焦点距離（F）、水距離（WP）、試験片中の音速（ C_{tm} ）、水中の音速（ C_w ）とし、この式は鋼中のおおよその焦点位置を求めるのに使われる。

$$MP = (F - WP) \cdot (C_w / C_{tm}) \quad (1)$$

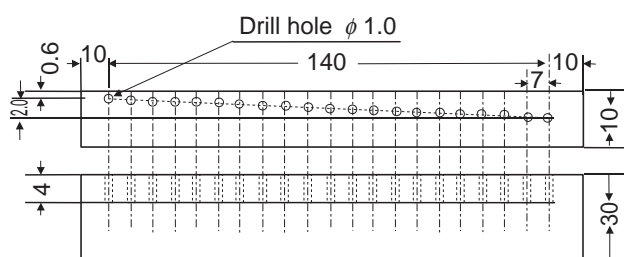
これを参考に試験片中のMPと鋼材の実最高反射強度の位置（実焦点）の関係を求めた。

2・2・3 基準試験片Sによる焦点位置での「半径方向の反射強度の分布」とビーム直径の測定

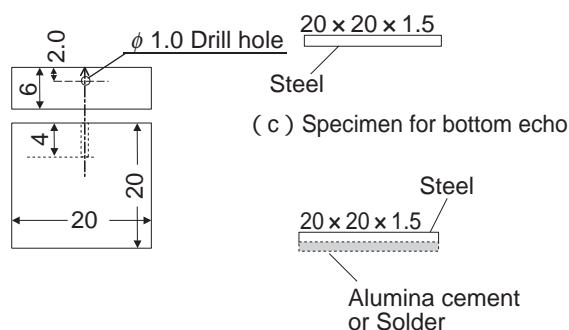
上記4種の樹脂詰め基準試験片Sを用いて各探触子の焦点位置における反射波のビーム特性の測定を行った。反射波強度の測定は、まず鋼線の真上で最高反射強度を示す位置を求め、この位置を探触子の中心軸とし、基準試験片Sの鋼線の上を横切って直角な方向に走査を行った。走査ピッチは装置の最小値である5 μ mピッチとした。このようにして得られた反射波強度分布曲線から「最高反射波強度 - 6dB」、すなわち反射波強度の半減する位置のビーム幅をビーム径として求めた^{9）}。

2・2・4 焦点位置の近傍における「軸方向の反射波強度分布」

また、焦点ゾーンにおける軸方向も反射波強度は低下（減衰）する。反射波強度に対する補正は従来より距離振幅補正（Distance Amplitude Correction）と呼ばれているものである。Fig.6（a）に示すように4本の鋼製四角柱、10 × 30 × 160を平面研磨し測定面に平行に ϕ 1.0mm × 深さ4mm × 20個のドリル穴（横穴）をあけた。測定面からドリル



(a) Specimen for the curve of distance amplitude correction



(b) Specimen for ϕ 1 flaw echo (d) Specimen for bottom echo

Fig. 6. Standard blocks for distance amplitude correction.

ル穴上端までの距離を0.1から2.0mmまで深さ0.1mmピッチ、穴の間隔は探触子の振動子直径（最大5mm）より大きい7mmとしドリル穿孔を行った。これらの4個の試験片を使用し、代表的な熱処理条件である焼入焼戻し（QT）、球状化焼なまし（A）、焼ならし（N）処理を行い、鍛造仕上り（As Forged）と比較した。測定は焦点位置を探傷ゲートの中央にセットし、それぞれの穴の直上に探触子を移動し軸方向の反射波強度分布を測定した。

注）QT：Quench - Tempered, A: Annealed, N: Normalizedのそれぞれ略号。

2・3 熱処理条件の補正方法および表面粗さの影響の調査

2・3・1 超音波探傷に及ぼす熱処理条件の補正方法
反射波強度の減衰は熱処理組織に著しく敏感であるとされ、一般に水冷材の場合、減衰は最も小さく、油冷 空冷 炉冷の順に冷却速度が遅くなるにつれ減衰は大きくなると言われている^{35）}。ここで四つの熱処理条件（QT、A、N、およびAs Forged）について次の2種類の試験片について反射強度の調査を行った。まず、Fig.6（b）に示す試験片について表面から2mmの深さ、すなわちドリル穴上端まで1.5mmの人工欠陥がセットされ、次にFig.6（c）に示す厚さ1.5mmの薄板試験片についてそれぞれに同じ熱処理を行い、人工欠陥および底面からの反射波強度、結晶粒度（Gs）等の比較調査を行った。いずれも試験に使用した探触子の焦点位置を欠陥の上端あるいは底面（反射面）にセットし、最大反射強度を得られるようにした。試験材は同一鋼種、同一部位から切り出し、以下の試料調整を行った。

- ・20W × 20L × 6T 深さ2.0mmに ϕ 1.0ドリル穿孔 熱処理 研磨 UST（ドリル穴からの欠陥波調査）
- ・20W × 20L × 1.5T 熱処理 研磨 UST（底面波調査）

2・3・2 表面粗さの影響の調査

表面粗さについては水浸法は影響を受けにくいとされている^{36）}が供試材の表面状態も種々のものがあり、とくに表面波の飛び込みの影響に注目した。0.4 ~ 12.8 μ mの表面粗度の試験片（ $R_y = R_{max}$ ）について調査を行った^{37）}。表面粗度の測定はJIS B 0601（1994）にしたがって実施した。

2・4 反射波強度と酸溶解抽出による介在物直径との関係調査

ピレット（ ϕ 167）を ϕ 65に鍛造した後、外周と中心の間のD/4位置から試料1（20 × 80 × 8）を切出し、焼入処理後、研磨を行った（Fig.7）。試料1についてまず光学顕微鏡式の画像解析装置（QTM）による介在物の試験判定を行い粒径分布を測定した。そして、超音波探傷試験のためにASTM Steel Block：STB-010の ϕ 0.4mm平底穴の標準試験片^{38）}により感度校正を行なった。次に試料1から超音波検査試料として複数の小片（10 × 20 × 8mm³、試料2）を切出し超音波試験を行なった。超音波による探傷体積は10 × 20 × 0.46 = 98mm³（3個 = 294mm³）である。反射波高が検出されたすべての介在物について、それぞれの介在物の真上に

探触子を移動しオシロスコープ上から反射波強度と欠陥の位置（深さ）を求めた。次に、介在物抽出のため温硫酸法でこの試験片を酸溶解し、抽出した介在物を $\phi 8 \mu\text{m}$ メッシュのフィルターでろ過し、さらにフィルター上でその残渣をAu蒸着し、50倍でSEM観察を実施した。そしてその介在物の写真撮影を行い、 $10 \mu\text{m}$ 以上の介在物について直径と個数を測定した。一方、酸溶解の介在物個数のカウントは少なくとも超音波探傷で検出した個数の評価が必要で、抽出総個数を考慮し粒径 $10 \mu\text{m}$ 以上の介在物個数を調査した。

2.5 気泡界面およびアルミナ介在物界面からの反射波形および反射波強度調査

欠陥の検出における超音波探傷法の一つの弱点は、空洞と介在物の識別が難しいことである。村井ら³⁰⁾は、焦点型探触子の反射波形について指標を提案し、正の反射波強度をP、負の反射波強度をNとしたとき、その比 $\{P/A = P / (P + N)\}$ により介在物 (Al_2O_3) と気泡の識別が可能であるとされている。

実験は、Fig.6 (d) に示すように厚さ1.5mmの焼入れした鋼の薄板裏面に、音響インピーダンスの異なる空気と水、また模擬介在物として鋼とハンダ、またはキャストブル耐火物（アルミナ+セメント）の接している無限平面状態を想定して試験片を作成し、反対側の面から超音波を入射し、板底面からの反射波強度、波形の反転有無およびP/A値を調査した。

3. 実験結果

3.1 焦点型高周波探触子の検出能と探傷条件の決定

3.1.1 人工基準試験片Sによる反射波強度と欠陥直径の相関関係

樹脂中に埋め込んだ径の既知の鋼線（基準試験片S）から得られた最高反射波強度から、各探触子の欠陥径と反射波強度の関係をまとめた (Fig.8-1)。 $\phi 50 \mu\text{m}$ 以下の鋼線

径と反射波強度の間には比例関係が認められた。 $\phi 100 \mu\text{m}$ の鋼線の反射波形と $\phi 100 \mu\text{m}$ 以下の波径はFig.8-2 (a), (b) に示すように異なっており、 $\phi 100 \mu\text{m}$ の場合は反射波強度が強く樹脂表面で反射して再入射する強度の大きい超音波が認められた。鋼線と試料表面との間で多重反射が生

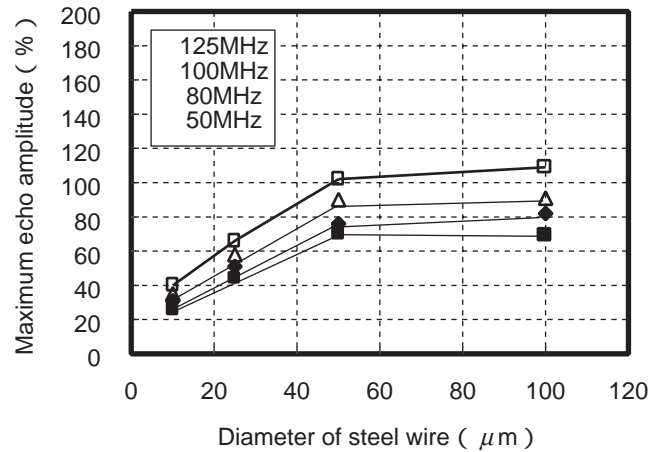
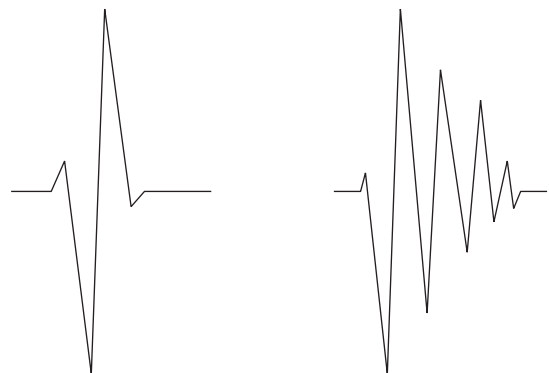


Fig. 8-1. Relationship between flaw echo amplitude and flaw diameter of the steel wire in resin.



(a) Flaw diameter < $100 \mu\text{m}$ (b) Flaw Diameter = $100 \mu\text{m}$

Fig. 8-2. Wave form of flaw echo.

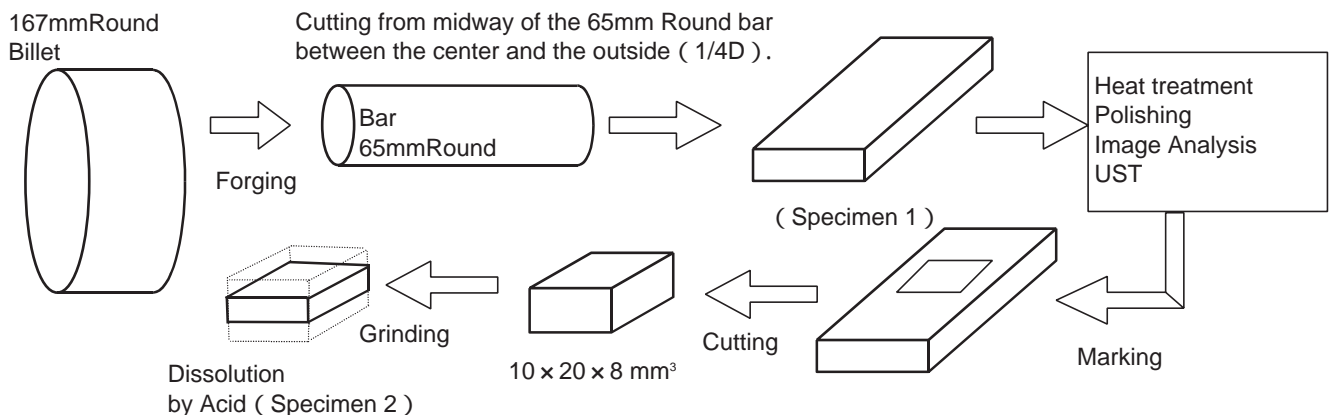


Fig. 7. Specimen preparation for acid extraction.

じ、繰り返し反射が行われており、ある一定の大きさ以上の欠陥では大きさに関わらず多重反射により反射波強度が一定値に近づくものと考えられる。欠陥の形状はたとえば無限平面に近いもの、長円柱、球形などがあり、各々形状に対応した欠陥反射率が報告されている²³⁾。

3・1・2 鋼中焦点位置と適正ゲート位置

Fig.9に水距離（探触子から試験片間の距離）と鋼中焦点位置の関係を示す。鋼中焦点の移動距離は表面から深さ3mmまでの距離である。式（1）の関係に対して最大反射波高値を示す位置は探触子側にずれていることがわかった。この音響上の最大反射波強度を示す位置が実焦点として取り扱われる。

また表面近傍に不感帯がある。水中焦点距離PF = 12.5mmの探触子の場合、表面エコーの分離による不感帯領域は表面から0.5mmの深さにまで達し、さらに水距離が小さくなる（すなわち鋼中焦点位置が深くなる）と分離した波形のピークがゲートの範囲内に入り、しきい値より大きい場合、画面全面に欠陥信号が表示され測定不能となる。この場合感度を下げるか、あるいはゲート位置を表面から後へ離して外乱の侵入を防ぐ必要がある。表面エコーの分

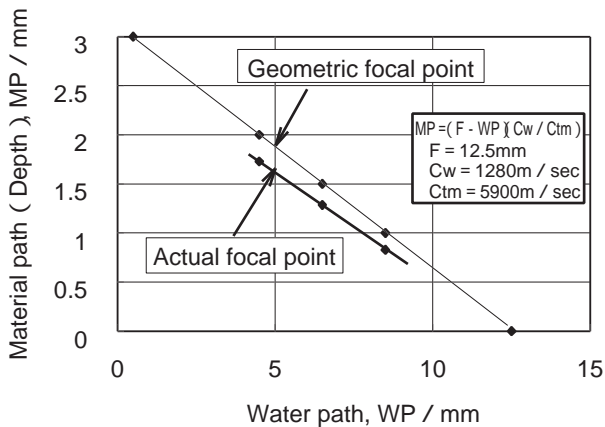


Fig. 9. Relationship between geometrical focal position (Equation (1)) and actual acoustic focal position .

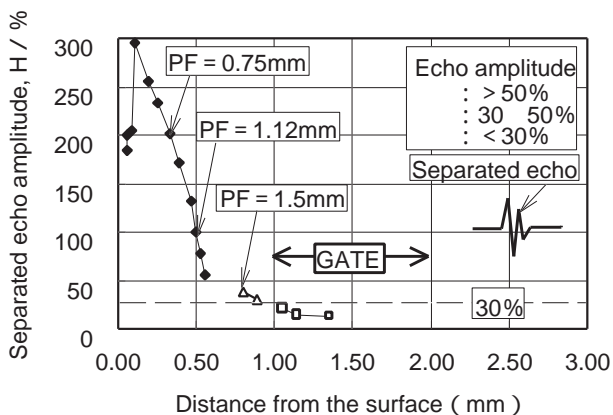


Fig. 10. Appearance of separated echo from surface multiple echo in near field and gate position (100MHz probe) .

離波形は試料表面と欠陥の間の多重反射によって生成された疑似欠陥エコーと考えられるが水距離により疑似欠陥反射波強度及びその位置は変化する。Fig.10は分離エコーの影響を抑えるためにその反射波強度が30%以下となる位置、すなわちゲートの位置は始点を表面からの距離1.0mmの位置とし2.0mmを終点とする幅1.0mmの範囲に設定されていることを示す。

3・1・3 焦点位置における「半径方向」の反射波強度分布と探傷ビーム直径

鉄線を樹脂に埋めた基準試験片Sを用いて、探触子の半径方向の移動距離と反射波強度との関係を調査した結果をFig.11に示す。横軸の零点は欠陥の真上に探触子が位置していることを示し、欠陥の中央から離れるに従い反射波強度は徐々に低下する。

ビーム径は「最高強度 - 6dB」の範囲、すなわち反射波強度が低下し半減する位置のビームの直径である³⁷⁾。各々の探触子についてビーム径を求めた結果をTable 2に示す。ビーム径はおおよそ150 μmである。ここで100MHzの探触子を用い、樹脂埋め試験片の鋼線の直径10 μmの場合、ビーム径はおおよそ0.135mmである。ビーム径より小さい値に走査ピッチをセットすることにより走査する領域はビーム径によってカバーされる。ところがここで探触子の軸心からわずかに0.068mmずれた位置で、反射波強度は半減することになり、反射波強度を基準にして介在物径を求める場合、この反射波強度の低下が問題となる。

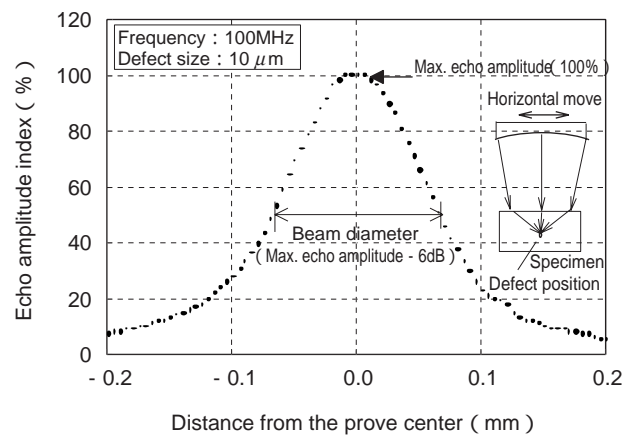


Fig. 11. Relations between echo amplitude and defect position . (Parameter : 100MHz, flaw diameter = 10 μm)

Table2. Beam diameter (maximum amplitude - 6dB) .

Defect Size (μ m)	Frequency (MHz)			
	50	80	100	125
10	0.150	0.125	0.135	0.145
25	0.169	0.134	0.145	0.155
50	0.147	0.136	0.145	0.150
100	0.165	0.144	0.150	0.152

3・1・4 焦点位置の近傍における「軸方向」の反射波強度分布と熱処理の影響

軸方向の介在物の位置はビーム路程から求められる。Fig.12に示すように、焦点型探触子の場合、その欠陥位置が焦点位置から軸方向前後に離れるにしたがって反射波強度が低下する。さらに熱処理条件が反射波強度に影響を及ぼすことを示している。熱処理条件の影響は大きく、反射波強度はQT材→A材→N材→As Forged材の順に低下の度合いが大きくなる。欠陥反射波強度はQT材が最も高い。熱処理条件の差による反射波強度への影響も補正が必要である。

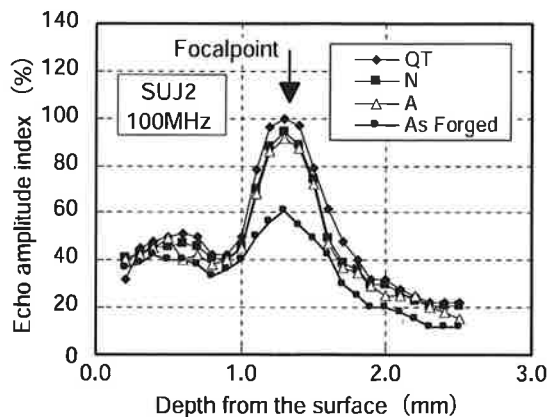


Fig. 12. Relationship between echo amplitude and heat treatment condition.

3・2 材料特性(熱処理組織の影響)の補正および表面粗さの影響

通常超音波探傷においては標準試験片による校正が行われるが材料中の欠陥からの反射波強度は熱処理組織によって影響を受ける。これを補正するため二つの方法を用いた。ここではFig.6 (b) に示す試験片により表面から1.5mmの位置におけるφ1.0のドリル穴からの反射波強度と、もう一方はFig.6 (c) に示す厚さ1.5mmの薄板の底面反射波強度に

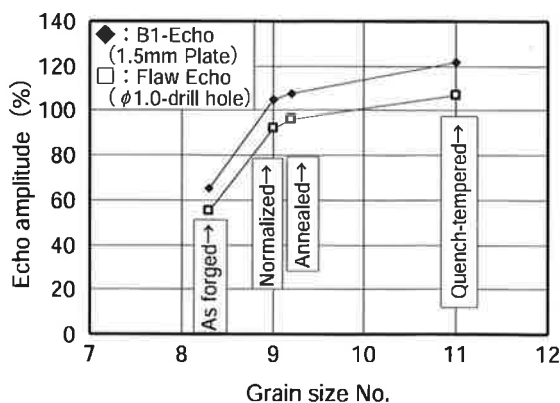


Fig. 13. Relationship between echo amplitude of B1-echo and flaw echo (φ1.0 drill hole).

より熱処理条件の影響の調査を行った。Fig.13に示すように、横穴欠陥からと薄板底面からの二つの反射波強度の間に相関が認められる。鋼の熱処理条件による反射強度の変動補正は、基準とする被試験材の材料特性、試験条件(厚さ1.5mmの基準底面波強度を定める)を基に反射波強度を補正することができる。軸受鋼(SUJ2)の調査結果では熱処理区分QT材はもっとも減衰が少ないことからこの熱処理条件QTを基準とすることが望ましい。

表面粗さの影響については、Fig.14に示すようにSUJ2のQT材について $R_y (=R_{max}) \leq 5.0 \mu m$ でS-Echoの飛び込みは押さえられた。

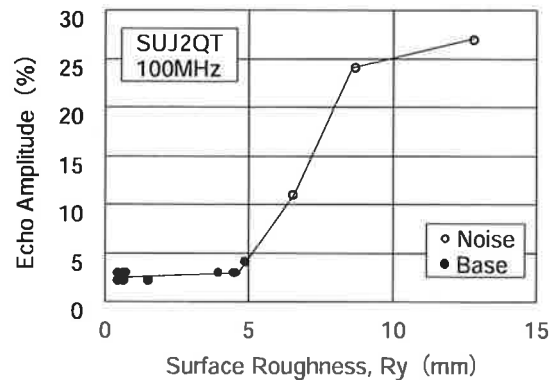


Fig. 14. Relationship between surface roughness and echo amplitude.

3・3 反射波強度と欠陥径の関係

鋼中欠陥(介在物)の径とこの欠陥から得られた反射波強度について、個々の欠陥位置(軸方向)について後述の(8)式による減衰の補正を行った。得られた反射波強度と酸溶解抽出により確認した介在物の径との関係をFig.15に示す(100MHz)。50μm以上の介在物で回帰線から離れている点があるが、ここでは比較的良好な相関が得られた。また、上記と異なる試料について超音波反射波強度(距離補正済)と追込み研磨による検出介在物径の関係を調査し、Fig.15に白丸「○」で追加した。

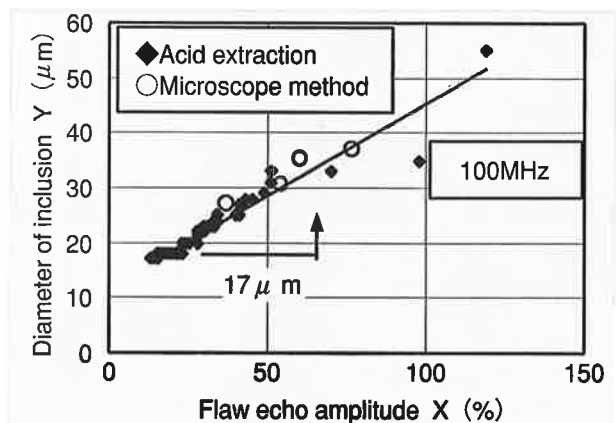


Fig. 15. Relationship between flaw echo amplitude and inclusion diameter.

3・4 実鋼試料の超音波反射欠陥波の強度分布と検出限界
 超音波探傷結果と酸溶解抽出結果について介在物径の大きなものから順に対応させて考えた。Fig.16に酸溶解で抽出した介在物の総個数について粒径分布を求め、一方超音波探傷で求められた欠陥個数分について粒径分布図の大きな径のものから順に個数を数え、超音波検出個数の終点になったところを検出限界 (a) とした。これにより、100MHz探触子の検出限界を17 μmと推定した。同様にして50MHz、125MHzの検出限界はそれぞれ25 μm、12 μmと推定した。これらの検出限界はほぼ波長の1/4の値であった。

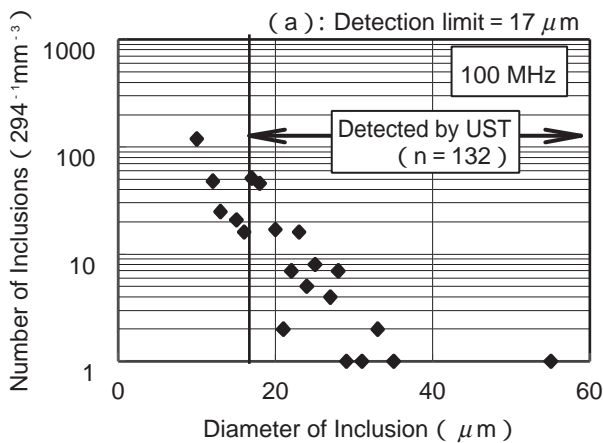
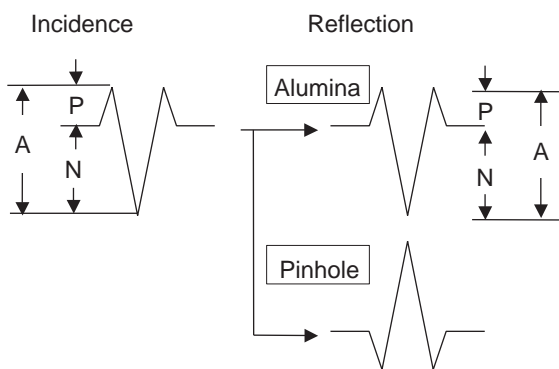


Fig. 16. Number of inclusion extracted by acid. Line (a) shows minimum size of inclusion detected by UST.

3・5 気泡と介在物の反射波の位相の反転と反射波強度
 焦点型探触子は空洞からの反射波の位相が180度反転する³⁰⁾ことが知られている。



P : Positive echo amplitude (%)
 N : Negative echo amplitude (%)
 A = P + N
 Discrimination between inclusions and pinholes by P / A value .
 here,
 P / A = 0.3 ~ 0.45... Inclusion
 P / A = 0.6 ~ 0.7... Pinhole

Fig. 17. Discrimination between inclusions and pinholes (MURAI-Processing) .

反射波形および反射強度から正の反射波強度をP、負の反射波強度をNとしたとき、介在物 (Al₂O₃) と気泡の識別を行うため、その比 { P/A = P / (P+N) } を求めた (Fig.17)。Table 3に示すように空気、水の場合に実際にオシロスコープ上で波形の反転が認められ、気泡性欠陥と介在物性欠陥の識別に有効であることを確認した。(P/A=0.6-0.7で波形反転する。) また空気および水界面からの反射波強度は同じ大きさの介在物からの反射波と比較したとき約2倍の強度を示す。P/Aの値については測定部位 (形状) によりバラツキが生じることが認められており、さらに介在物と空洞の共存については今後の検討課題としたい。

Table3. Acoustic impedance and measurement result.

Materials	Acoustic Impedance Z[10 ⁶ kg / (m ² s)]	Measurement Results	
		Flaw Echo Amplitude (%)	P / A
steel	46.4		
Air	0.0004	106	0.64*
Water	1.5	99	0.65*
Solder	25	44	0.45
Alumina	43		
(Alumina Cement)		59	0.44

* : P / A = 0.6 - 0.7 : Wave pulse phase is reversed

4 . 考察

4・1 反射波強度と欠陥径の関係

4・1・1 欠陥径の基本計算式

介在物粒径分布の自動評価システムにおける反射波強度から欠陥 (介在物、気泡) 径を求める計算は、微小欠陥 (約100 μm以下) の場合と大型欠陥の場合に分けて (2) 式および (5) 式で説明される。

(1) 微小欠陥径Di (欠陥径100 μm以下) の計算式

微小欠陥の場合の基本計算式は個々の探触子について、

$$D_i = \zeta (F) \tag{2}$$

$$F = \theta (d, z, p)$$

ここで、F : 反射波強度 (%)

さらに、反射波強度の補正条件として

d : 焦点位置 (mm)

z : 欠陥位置 (mm)

p : 材料特性補正係数

また、データ選択条件として探傷ピッチ (Sc)、および介在物・気泡分離指標 (P/A) が必要である。通常問題とする中小の介在物はビーム径 (Table 3) より圧倒的に小さく、イメージ画像あるいは実測径としてとらえることができない。そこで反射波強度から欠陥径を求める関係式を導くことを課題とした。

Fig.18に示すように、100 μm以下のアルミナ系介在物の反射波強度Fi (%)と欠陥径Di (μm)の関係は次の(3)式で求められる。

$$D_i = 0.34 \times F_i + 11.85 \quad (3)$$

また反射波強度Fv (%)と空洞欠陥径Dv (μm)の関係は同じFig.18に示すように次式(4)で表される。

$$D_v = 0.15 \times F_v + 6.74 \quad (4)$$

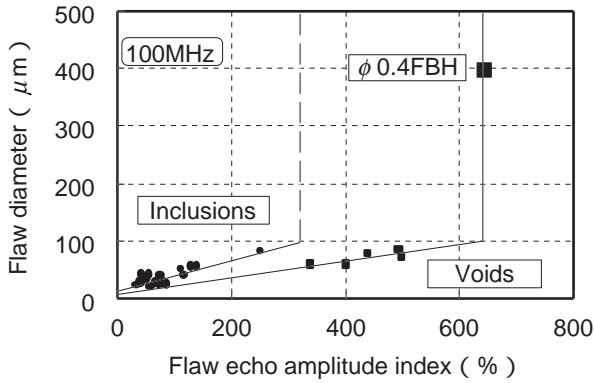


Fig. 18. Relationship between flaw echo amplitude and flaw size in steel .

(2) 大きな欠陥の計算式

Fig.19.に鋼中の欠陥探傷におけるビームのX軸方向の移動距離と検出欠陥粒径の関係を示す。ビーム径が欠陥に接する点Bを始点とし、欠陥を横切ってX軸方向に移動し、ビームが欠陥から離れる点Cを終点とする。ここで、ビーム中心は点Aから点Bに移動し距離ADが画像上に表示される検出欠陥サイズがDiである。ビーム径Bm (μm)より大きな欠陥に対しての粒径df (μm)の評価は画像表示による検出欠陥サイズDi (μm)から式(5)により求めることができる。

$$d_f = D_i - B_m \quad (5)$$

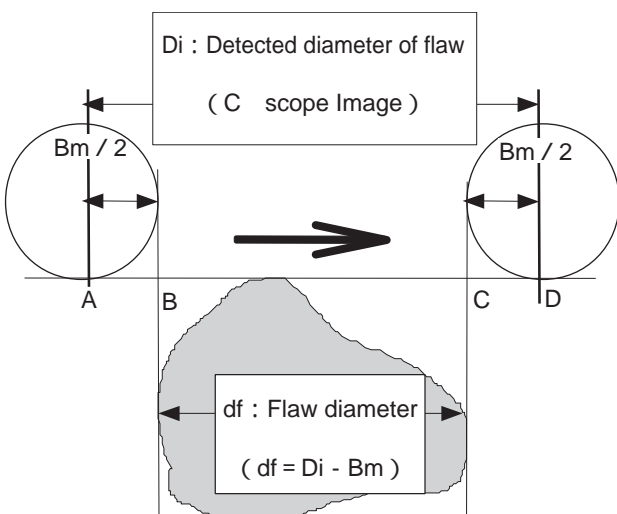


Fig. 19. Measurement of a large size flaw .

ここで、df : 大きな欠陥の粒径 (μm)

Di : 画像表示による検出欠陥サイズ (μm)

Bm : ビーム径 (μm)

である。

また、欠陥がビーム径(ここでは約100 μm)以上の場合は反射波強度はほぼ無限平面からの反射強度に近づき欠陥径と反射波強度の関係がなくなる。100 μm以上は推定ができないので無限薄板平面の底面反射波強度B1(一定値)をセットした(鉄 空気, 鉄-アルミナ)。Table.3に示すようにAl₂O₃からの底面波強度B1は空気界面の約1/2である(Fig.19)。

4・1・2 「軸方向」の反射波強度の減衰の補正

軸方向の反射波強度の低下について近似式で補正ができないか検討を行った。

Fig.20に今回の実験結果の一例を示す。基準となるQT材について50 125MHz探触子の焦点位置からの軸方向のずれによる反射波強度Fの低下は、今回使用した探触子の例として、次の二次式(6)により近似的に補正ができることが分かった。周波数f (MHz), 軸方向焦点位置からのずれd (焦点位置:入射面より1.5mm), 係数a, ただし、|d| 0.3mmとして、

$$F = 1 + a \times d^2 \dots \dots \dots (6)$$

を得る。近似的にはFig.20のようにF = c + bd + ad²で表わされるが一般的に(6)式の適用で補正を行う。

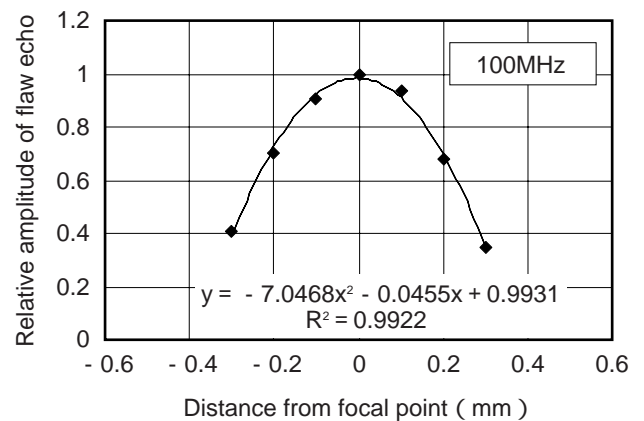


Fig. 20. Relationship between the distance from focal point and flaw echo amplitude .

4・1・3 「半径方向」のずれによる反射波強度の低下の補正と探傷ピッチ

焦点位置における半径方向(x,y)の反射波強度の低下については、介在物が探触子の真下に位置するときは補正の必要はない。ところが探傷走査においてある走査ピッチで探傷する場合、介在物は必ずしも探触子の真下に来ない。介在物の位置が探触子の軸心から半径方向に少しでもずれると反射波強度は低下する(Fig.21)。探触子からの距離が

大きいと反射強度の低下となり、連続的に探傷を行う場合反射波強度のばらつきの大きな要因となる。したがって介在物の位置座標 (x, y) を特定できない限り、探傷ピッチを狭めて減衰を最小限に抑える以外にないと考えられる。Fig.15に示す回帰直線の傾き (式 (4)) からおよそ反射波強度 3%の変動は介在物径 1 μmの変動に対応する。μmオーダーの介在物径精度が要求される場合、最高反射強度に対する反射強度の低下の許容幅は3%以内にすべきである。Fig.21に示すように反射強度の変動3%は探触子中心からのずれ約10 μmに相当するが、走査ピッチは安全をみて10 μm以下とすることが望ましい。したがって第一段階走査 (粗探傷) は探傷ピッチを大きくして広範囲に介在物を求め、第二段階走査 (精密探傷) は粗探傷で求めた介在物近傍で探傷ピッチを10 μm以下とした二段階走査が粒径分布評価に適する。

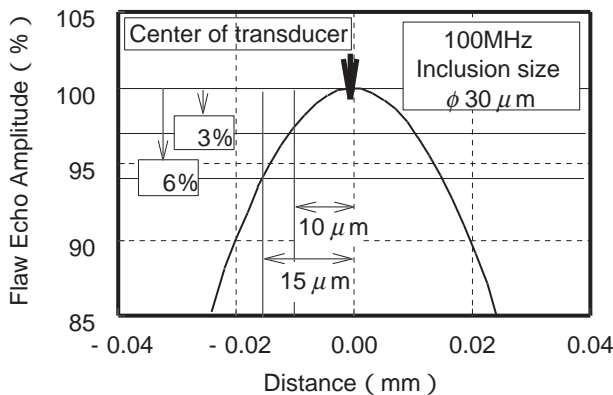


Fig. 21. An example of echo from an inclusion in steel.

4・2 微小欠陥反射強度と欠陥径 (100 μm以下) の推定

4・2・1 試験体側からみた見かけの振動子の位置

焦点型垂直探触子について反射強度と欠陥の関係は仙田ら²²⁾が試験体中からみた等価な音場特性を検討している。Fig.22に示すように微小振動子dAから媒質1 (エポキシ樹脂)、媒質2 (鋼) を経て微小反射源dSに入射する超音波は媒質1と媒質2 (試験体) の境界面においてスネルの法則を満たしている。

試験体中からみた見かけの振動子の位置を求める。すなわち試験体の中に振動子を取り込んだ状態を想定すれば界面での反射, 透過を考えなくてよいことになる。見かけの振動子の位置は振動子の中心Cから角度 i の方向に伝わり点Aで屈折してBの方向へ伝わる超音波を考えると、中心軸との交点C₀が見かけの振動子位置である。振動子と試験体との距離をLw、見かけの振動子と試験体との距離をLw'、水中音速、試験体中の音速をそれぞれCw,Ctとすると、OA = Lw · tan i = Lw' · tan θであるから、

$$\begin{aligned} Lw' / Lw &= (\sin i / \sin \theta) \cdot (\cos \theta / \cos i) \\ &= (Cw / Ct) \cdot (\cos \theta / \cos i) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、中心軸に沿って伝わる超音波を考えるとi = 0であり見かけの振動子と試験体との距離は、

$$Lw' = (Cw / Ct) \cdot Lw \quad (8)$$

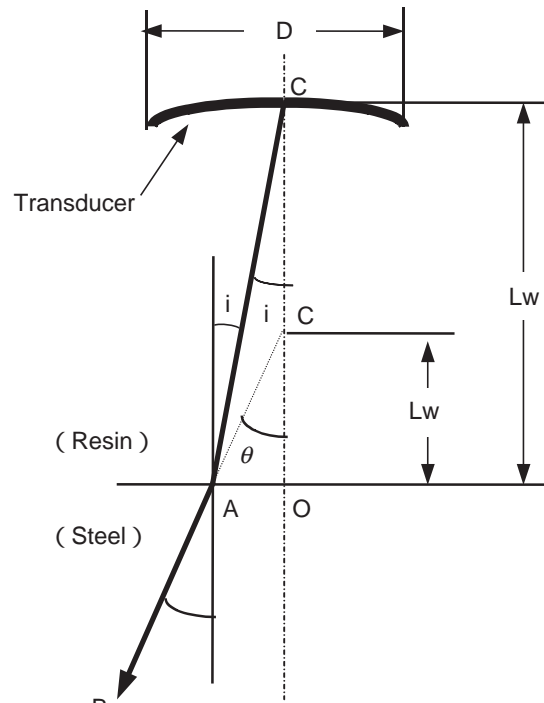


Fig. 22. Position of virtual transducer.

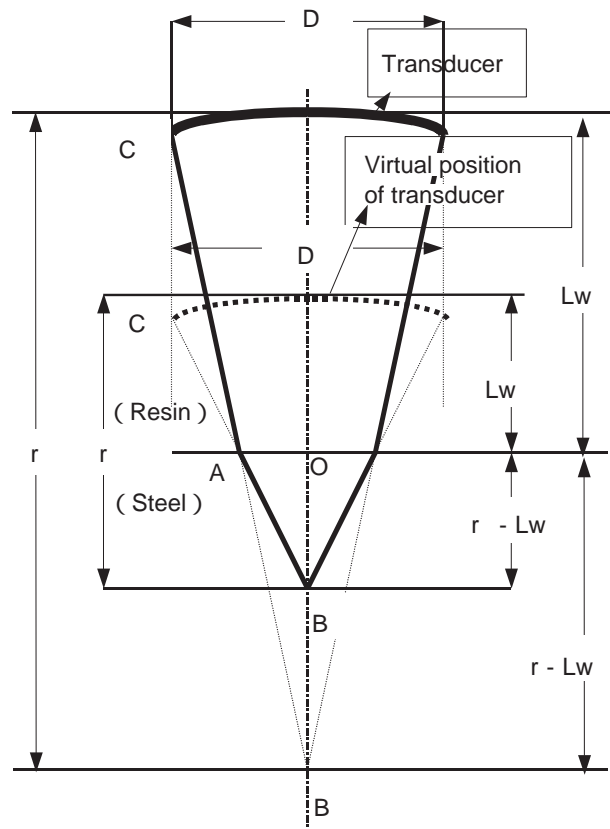


Fig. 23. Radius of curvature at virtual position of transducer .

また、等価なみかけの振動子位置はFig.23に示すように半径r'を考え、振動子の端点Cから出発した超音波の経路を考え、 $r \gg D$ (すなわち $i \approx 0$) とおくことによって、

$$r' = (Cw/Ct) \cdot r \quad (9)$$

振動子の直径、見かけの振動子の直径をそれぞれD, D' とするとFig.23から $D/2 = r \cdot \sin i$, $D'/2 = r' \cdot \sin \theta$ であるから、 $D = D'$ となり、振動子の寸法は変わらない。これにより試験体の中の欠陥からみて同一試験体に振動子を貼り付けた形となり、水-樹脂の界面の取り扱いが不要となることから、樹脂中の鋼線からの反射の問題として単純に取り扱うことができる。

Table4. Acoustic impedance

Acoustic impedance	
Air	0.0004
Water	1.48
Resin	3.2
Iron wire	45.8
Steel	45.3
Al ₂ O ₃ Inclusion	40.0

Table5. Reflection coefficient of sound pressure .

Medium 1	Medium 2	r_{12} or (r_{23})
Water	Resin	0.36
Resin	Iron wire	(0.87)
Water	Steel	0.94
Steel	Al ₂ O ₃ inclusion	(0.062)
Steel	Air (Void)	(1.0)

4・2・2 樹脂(エポキシ樹脂)-鉄線から鋼-Al₂O₃系介在物へ反射波強度の換算(長円柱)

振動子の送受信面と欠陥の反射面が振動子の中心軸、すなわちビーム中心軸上で距離Lだけ離れて対向している場合、欠陥による反射波の平均受信音圧P_Rは、次の(10)式のように表すことができる²³⁾。

$$P_R = \sigma \cdot \gamma_G \cdot P_L' = \sigma \cdot \gamma_G \cdot \gamma_I \cdot P_L \quad (10)$$

ここで、P_L : 欠陥の反射面の中心に入射する超音波の音圧

P_L' : 欠陥の反射面の中心で反射された直後の超音波の音圧

γ_I : 欠陥の界面反射能率

γ_G : 欠陥の形状反射能率 ($\gamma_G = P_R / P_L'$)

... 欠陥の形状、大きさ、欠陥から振動子までの距離によって決まる係数

σ : 受信音圧の補正係数

反射面が滑らかな欠陥では、界面反射能率 γ_I は欠陥反射面における超音波の音圧反射率に等しい。しかし反射面が粗い欠陥では超音波が反射面で散乱されるため、音圧反射

率よりさらに小さな値となる。ここでは表面が滑らかな欠陥と仮定し、超音波ビームに対し垂直な反射面を有する欠陥では $\gamma_I = 1$ と見なすことができる。欠陥の形状反射能率は $\gamma_G = P_R / P_L'$ で定義されているので、 $\gamma_I = 1$ のとき $\gamma_G = P_R / P_L'$ となる。したがって欠陥エコー高さは主として、 γ_G , P_L に依存する。

エネルギー反射率からみると、媒質1を伝播し垂直に媒質2に入射する音圧P_Lの超音波が、境界面で反射する音圧をP_L'とすると音圧反射率 γ_I は次式(11)で表される³³⁾。

$$\gamma_I = P_L' / P_L = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \quad (11)$$

ここで、Zは密度と音速の積である音響インピーダンス、添え字は各材質を表す。

オシロスコープ上に現れる反射波強度(波高)は音圧に比例した電圧であり、エネルギーの平方根に比例した値となる。欠陥反射強度はTable 4, Table 5, Fig.24およびFig.25に示すように前項の見かけの振動子の位置から媒質1(エポ

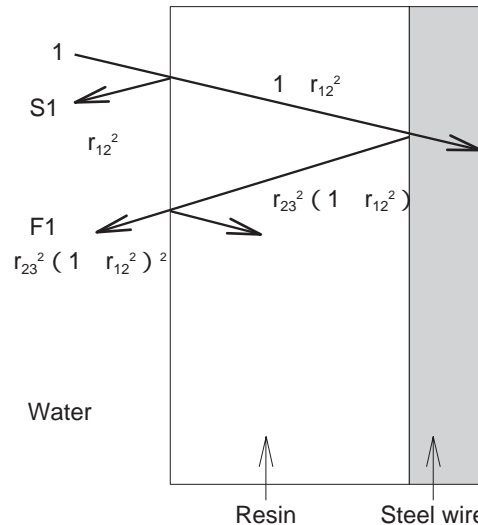


Fig. 24. Energy reflection coefficient of normal beam incident .

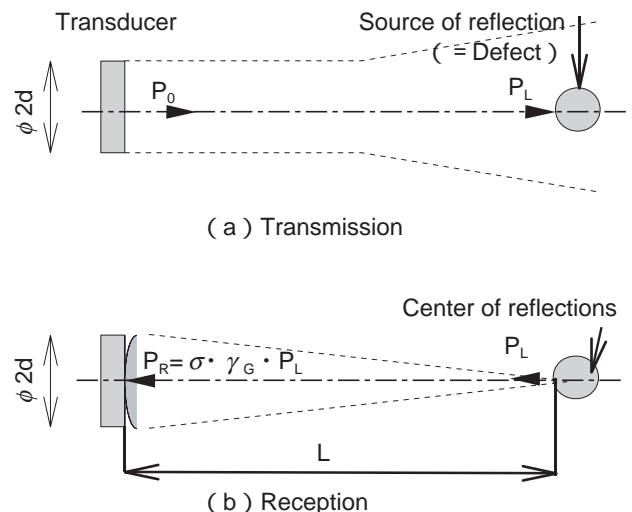


Fig. 25. Schematic diagram of normal detection

キシ樹脂) 媒質2(鉄線)の音圧反射率S1(表面反射率)を求めればよい。

音圧反射率から入射1に対し、

- ・エポキシ樹脂 - 鉄線の場合: S1 = 0.87の反射がある。
- ・鋼 - Al₂O₃系介在物の場合: S1 = 0.062の反射がある。
- ・鋼 - 空気(ポイド)の場合: S1 = 0.999の反射がある。

したがって、鋼-Al₂O₃系介在物の欠陥反射強度は同一欠陥形状(ここでは長円柱)であれば、樹脂-鉄線の場合の(0.062/0.87 =)約1/14である。一方Fig.26に示すように、実鋼におけるAl₂O₃介在物の反射強度から欠陥径 φ 25 μm(介在物)の反射強度をみると、これよりさらに10-12dB(約1/4)ほど低いことが示されている。樹脂-鉄線(長円柱欠陥)から反射率を求めた反射強度と実鋼における鋼-Al₂O₃系介在物(球状欠陥)の欠陥反射強度の差は欠陥形状の差と考えられ、球状欠陥の方が長円柱に比べ反射強度が低いことによるものと考えられる。

また鋼-空気(ポイド)の場合、音圧反射率の比は逆に(0.999/0.87 =)1.15(1.2dBアップ)と大きい値を示す。ここで前述の形状欠陥の差(-12dB)を取り込むと実鋼におけるポイドグループの上限近くに反射強度の予測値が求められる。したがって、微小欠陥(10-100 μm)について欠陥径が既知であれば、媒質1、媒質2の各音響インピーダンスおよび音圧反射率から反射強度が求められることになり、およその反射波強度-欠陥径の関係式(検量線)が

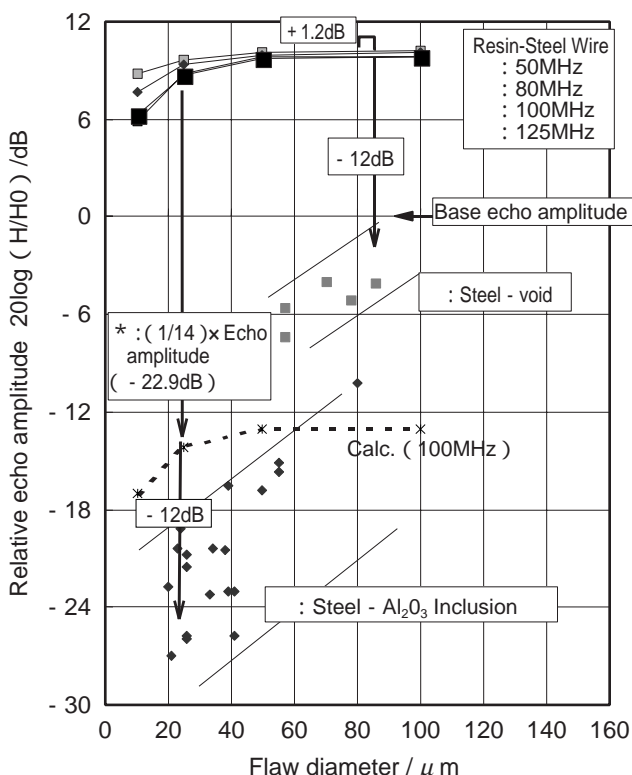


Fig. 26. Relationship between flaw diameter and echo amplitude of some defects. (Conversion of echo amplitude by acoustic impedance from epoxy resin-steelwire to steel-Al₂O₃ inclusion and steel-void)

求められることが見出された。

4・3 介在物の粒径分布

[酸溶解抽出法および光学顕微鏡の画像解析評価法による非金属介在物径の対比]

DeHoffの式(12)は二次元分布を三次元分布に換算するものである。画像解析の粒径分布(二次元)はDeHoff²⁸⁾の式(12)より換算し、単位体積中の介在物個数(×1000/mm³)を求めることができる。

$$NV = NA/dV = (2/\pi) \cdot (NA/dA) \quad (12)$$

ここで、NV: 単位体積中の介在物個数 (n/mm³)

dV: 3次元的な介在物粒径 (mm)

NA: 単位面積中の介在物個数 (n/mm²)

dA: 研磨面上の平均粒径 (mm)

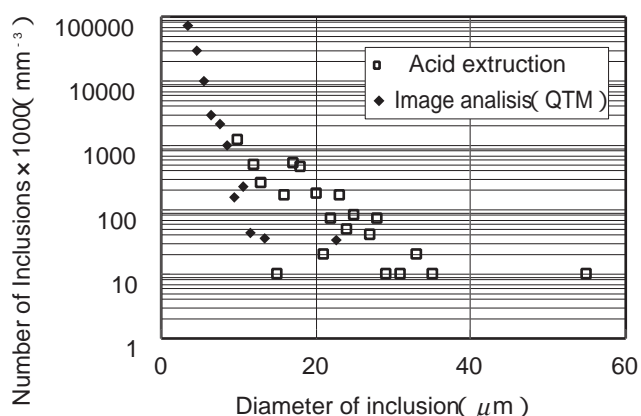


Fig. 27. Comparison of the distribution of inclusion diameter between by Quantitative Television Microscope method (a) and Acid Extraction-SEM method (b).

画像解析による粒径分布と酸抽出による粒径分布を同一図にプロットした結果をFig.27に示す。顕微鏡観察で検出されていない介在物径に関しては予測ができないが、画像解析の結果を三次元に換算した分布は酸溶解の粒径分布と比べるとわずかに左寄りの分布になっているも、画像解析データと酸溶解データはお互いにほぼ同じ分布である。

4・4 探傷のフロー

高周波超音波法の介在物評価へ適用は迅速測定(自動評価)と中型介在物の評価技術の確立が目的である。今回の一連の調査で確立した高周波超音波探傷法(粗探傷 精密探傷の二段階探傷)の標準的フローをFig.28に示す。

5. 結言

中型介在物(径20 数100 μm)を対象とした、高周波超音波探傷法(50-125MHz)による新しい介在物粒径評価法を見出した。

【検出能力】

- ・径20-100 μmの範囲で介在物径と反射波強度の間に相関

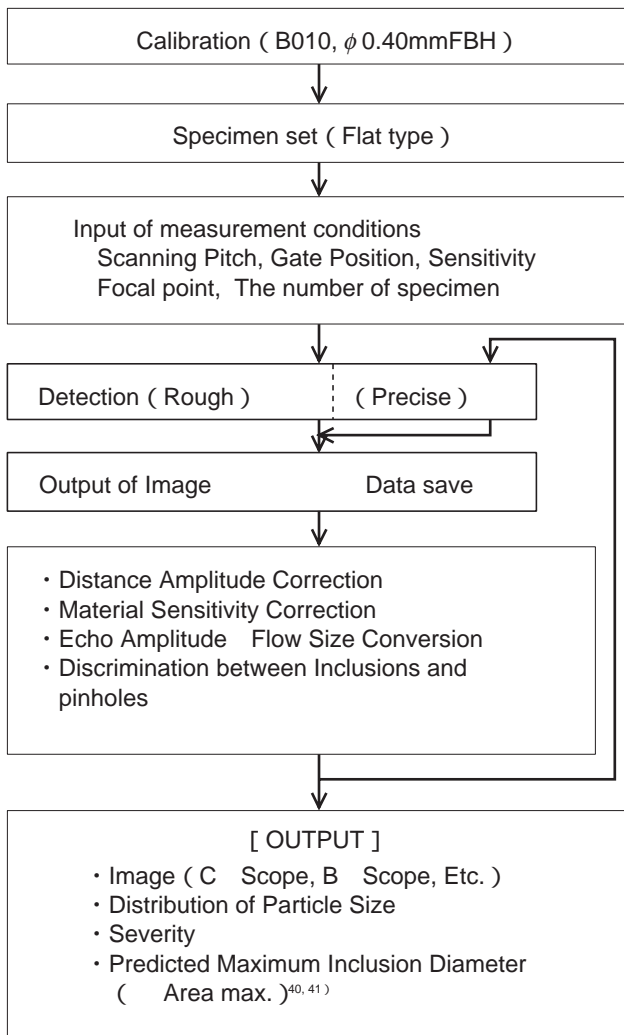


Fig. 28. Testing procedure.

があり、反射波強度による粒状介在物径の評価が可能であることが明らかになった。

- 焦点型高周波超音波探傷 (PF=12.5mm) の検出限界はほぼ波長の1/4の値である。
- 媒質1 (透過体) , 媒質2 (欠陥・反射体) としたときそれぞれの音響インピーダンス、音圧反射率のデータベースから任意の材質中の欠陥の反射強度が求められることを見出した。樹脂中 - 鋼線 (10-50 μ m) の間の反射波強度から鋼中 Al_2O_3 系介在物、鋼中 - ミクロボイド (空孔) の反射強度が求められる。

【反射強度の減衰補正】

- 超音波の焦点位置近傍における減衰補正として、軸方向の距離振幅補正は二次式で行う。半径方向の補正は走査ピッチを狭くして10 μ m以下にすることにより減衰の影響を最小限にとどめることができることを見出した。熱処理条件の影響も大きく無視できないので反射波強度の補正が必要である。
- 気泡と介在物の反射波について気泡は波形が反転することが確認され、また気泡からの反射波強度は介在物の2

倍でありこの二つの条件から気泡を分離評価することができることが確認された。

【自動処理システム】

- 上記の知見により粒径分布の自動評価、評価精度向上のため粗探傷 精密探傷の二段階走査方式により、反射波強度から欠陥径を自動評価する一連の迅速、大体積の評価システムを確立した。

文 献

- 1) Y.Murakami: CAMP-ISIJ, 4 (1991) , 1174.
- 2) Y.Murakami and T.Toriyama: Tetsu-to-Hagané, 79 (1993) , 1380.
- 3) ASTM E45: Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.01. (1998) .
- 4) DIN50602: September, (1985) .
- 5) JIS Z 0555: JIS Handbook Ferrous Materials & Metallurgy (1999) .
- 6) Annual Book of ASTM Standards, Section3, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Vol. 03.03 ; Nondestructive testing. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- 7) ASTM E45: Magnetic Particle Method, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. (1998) .
- 8) H. Hoff and H. Lessing: Stahl und Eisen, 76 (1956) , 1442.
- 9) Y. Yuhara and T. Suzuki : Readout, No.4, (1992) , 30.
- 10) J. Chino, K. Sugimoto, M. Nagata, H. Yoshikawa, T. Kubo and I. Ibuki: CAMP-ISIJ, 4 (1991) , 1428.
- 11) W. T. Lankford, Jr, N. L. Samways, R. F. Craven and H.E. McGannon: The making, shaping and treating of steel 10th Edition, US Steel, (1985) , 1453.
- 12) K.Takagi: NDI Handbook (Binran) , Maruzen, (1999) , 2.
- 13) K. Honda: NHK BOOKs, No.710, Tokyo (1994) , 21.
- 14) W. W. Bayre and J. A. Erickson: ASTM Proceedings, June (1965) .
- 15) W. W. Bayre and D. D. McCormack: Materials Evaluation, February (1970) , 25.
- 16) R.N. Cressman and A. J. Plante: Blast Furnace and Steel Plant, March (1969) , 232.
- 17) J. B Morgan: Materials Evaluation, June (1970) , 121.
- 18) S. S. Daniel and R. A. Rege: J. of Metals, July (1971) , 26.
- 19) W. H. Burr: ASTM STP 575, (1975) , 178.
- 20) P. Bastien: NDI International. December (1977) , 297.
- 21) G. Canella, F. Monti, L. Pedicelli and A.L. ' Erede: NDT INTERNATIONAL, 16 (1983) , 151.
- 22) T. Senda, S. Hirose, H. Urugaki, H. Aoki, K. Kubo and H. Harimoto : J. of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 32 (1983) , 734.
- 23) S. Hirose, H. Urugaki and T. Senda : J. of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 36 (1987) , 881.
- 24) S. Satonaka, I. Tatsukawa and M. Yamamoto : Quarterly J. of the Japanese Welding Society, 3 (1985) , 875.
- 25) N. Ishikawa and T. Fujimori : Tetsu-to-Hagané, 71 (1985) , 242 .
- 26) J. D. Stover, R. V. Colarik and D. M. Keener: Proceedings of the 31st Mechanical Working and Steel Proceeding Conference, ISS-AIME, October

- (1989) , 431.
- 27) Peter Glaws : Japan-US Joint Seminar, (1996) , 35.
- 28) J.Hering: HTM, 54 (1999) , 259.
- 29) T. Matsuzaki, H. Tanaka, H. Nakamura, K. Uchino, and H. Kobayashi : CAMP-
ISIJ, 5 (1992) , 290.
- 30) J. Murai, T. Ida and T. Shiraiwa : J. of the Japanese Society for Non-
Destructive Inspection, 47 (1998) .
- 31) Fujimori: Electronics Books -Application of Ultrasonic Technique-, Akiba-
Shuppan, (1986) , 26.
- 32) Unpublished work, Kraut Kramer, (1989) .
- 33) New NDI Technical Handbook : Nikkan Kogyo Shimbun, Tokyo, (1992) ,
234.
- 34) Ultrasonic Technical Handbook : Nikkan Kogyo Shimbun, Tokyo, (1996) ,
25.
- 35) S.Kasori: The ultrasonic wave and its application, Denpa—jikken-sha,Tokyo,
(1970) , 54.
- 36) NDI Technical Handbook : Nikkan Kogyo Shimbun, Tokyo, (1978) , 402.
- 37) JIS B 0601 (1994) : JIS Handbook.
- 38) ASTM E127 : Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.03, (1995) .
- 39) R.T.DeHoff and F.N.Rhines : Quantitative Microscopy, McGraw-Hill,
(1968) , 128.
- 40) Y.Murakami : Metal Fatigue - Effects of Small Defects and Nonmetallic
Inclusions, Yokendo, Tokyo, (1993) , 233.
- 41) E.J.Gumbel : Statistics of Extremes, (1957) .

