

超音波による鋼中のアルミナ 非金属介在物と空孔の弁別検出

村井 純一 井田 隆志 白岩 俊男

超音波による鋼中のアルミナ 非金属介在物と空孔の弁別検出

村井 純一* 井田 隆志* 白岩 俊男*

キーワード 超音波探傷試験, 非金属介在物, 反射率, 位相変化, 集束探触子, 位相測定
Detection of Alumina Non-metallic Inclusion and Void in Steel by Ultrasonic Testing Method

Junichi MURAI, Takashi IDA and Toshio SHIRAIWA

Abstract

Detection of alumina non-metallic inclusions and voids in steel have been studied theoretically and experimentally by the ultrasonic testing method using a focussing transducer with high frequency and short pulse characteristics.

The reflectivity and phase change of ultrasonic wave at the boundary of steel and alumina were investigated by calculating for inclined incidence corresponding to the focussing beam. The results showed that the phase of reflected pulse from alumina is -180 degrees for normal incidence, but this changes to 0 degree with increase of incident angle then it again decreases over the critical angle of total reflection of longitudinal wave. In contrast, the phase of echo pulse from a void is always -180 degrees regardless of the incident angle. From this result, it is concluded that the echo pulses from alumina inclusions and voids are distinguished by their Phases, when the proper incident angle is used. The methods of measuring phase and experimental results of as cast steel slabs are also reported.

Key Words Ultrasonic testing, Non-metallic inclusion, Reflectivity, Phase change, Focussing transducer, Phase measurement

1. 結論

最近の超音波探傷法の進捗は著しく、特に高周波でかつ集束型の探触子による高感度探傷技術を使用すれば鋼中の微小な非金属介在物の検出も可能である。この方法では材料内部の検査が可能であり、この点では光学顕微鏡検査よりも優れていると言える。また、反射パルスの位相（渡形）を解析すれば、反射体の音響インピーダンスからある程度反射体の材質の推定が可能である。松崎ら¹⁾は鋼の超音波検査において、気泡とアルミナの反射パルスの位相が 180 度異なること、即ち両者の形状が逆転していることから、気泡とアルミナの弁別が可能なることを実験により報告している。しかし、従来使用されてきた平面探触子を使用した垂直探傷法の理論ではこの現象は説明できない。著者らは松崎ら¹⁾の測定で集束型探触子が

使用された点に着目し、斜め入射の場合の鋼とアルミナの塊界面における音波の反射率と位相変化を計算により求め、松崎らの報告の可能性を理論的に立証した。また超音波パルスの位相の潮定法と実際の測定結果も併せて報告する。

2. 垂直入射時の固体境界面における超音波の反射

一般の超音波検査の教科書では、固体境界面における反射波の反射率と位相変化については垂直入射の場合のみを説明している。

第一固体媒質の音響インピーダンスを Z_1 、第二固体媒質の音響インピーダンスを Z_2 とすると、その境界における反射率 R は

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \dots\dots\dots(1)$$

原稿受付：平成9年8月8日

*日本クラウトクレーマー(株) (東大阪市角田1-9-29)

Krautkramer Japan Co., Ltd.

であり、 $Z_1 > Z_2$ の場合には、 $R < 0$ 即ち位相が反転もしくは 180 度変化することを示している。具体的には Fig.1 の(a)に示すパルスを入射した場合、逆転した(c)の形状のパルスが反射される。

Table 1²⁾に鋼、アルミナ、空孔の音響インピーダンスを示す。この文献によればアルミナの数値はかなりの幅があるがおそらく焼結体から単結晶までの値と考えられる。

一般に焼結体では焼結温度が低いと、音速は低下する。網中の非金属介在物のアルミナは単結晶または粗大結晶粒と考えてよい。単結晶では結晶の方位により音速が異なるが、ここでは一応その最大値を採用した。また、空孔の値は空気の値である。Table 1 によればアルミナと空孔の音響インピーダンスは共に網の音響インピーダンスより小であり、それらからの反射波は共に反転していることになる。松崎ら¹⁾の報告ではアルミナからの反射波は反転しておらず矛盾する。

しかし、以上の検討は飽くまで超音波が界面に垂直に入射する条件下での計算である。最近の超音波探傷では、非金属介在物のような微小体の検出には、検出感度の向上のため集束型の球面探触子を使用する。即ち超音波の入射角が 0 度(垂直入射)以外の広がりを持つ。したがって一般の入射角に対する反射を検討しなければ

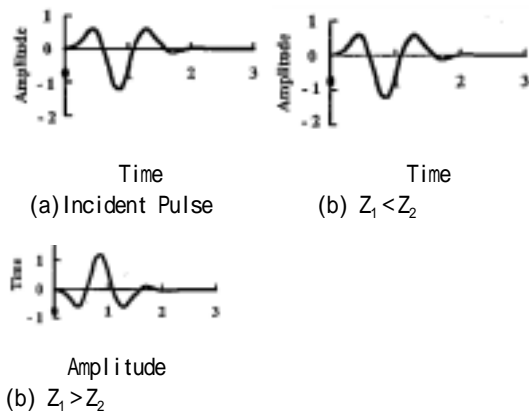


Fig.1 Shapes of incident and reflected waves

Table 1 Acoustic impedance²⁾

Material	Acoustic impedance 10 ⁶ Kg/m ² s	Velocity Km/s	Density Kg/cm ³
Steel	45	5.9	7.7
Alumina	43(32to43)	11(9to11)	3.95(3.6to3.95)
Void(Air)	0.0004	0.34	0.0013

ならないが、鋼とアルミナ境界面の一般的な反射率の報告は無いので、新たにその算出を行った。

3. 斜め入射時の固体境界面に虫ける超音波の反射

3.1 固体間境界面における超音波の反射の一般解

固体間境界面には二種類の境界面が考えられる。一つは薄い潤滑剤が介在する液体接触であり、境界面に垂直な位置の移動と力のみが伝わる。第二は完全に結合した団体接触であり境界面に垂直、及び平行な移動と力が伝わる。液体接触は超音波検査の探触子と非検査体の間に見られるもので、研究例や計算例が多い。その解析計算式も報告³⁾されている。

鋼中の非金属介在物の境界は固体接触と考えられるが、団体接触境界面では音波の連続条件が 4 元の連立方程式になり、解析解は非常に複雑になり、著者の知る限りでは報告されていない。しかし、条件式は比較的簡単であり、計算機で解が求められる。この条件式を与えている文献も少ないが、文献⁴⁾に一部の式が、また、それに引用された井元⁵⁾の報告に全記述があるが、一部にミスプリントと思われる点もあり、文献⁴⁾⁵⁾に従って波動の基礎式から導出した。

Fig.2 に示すように境界面に縦波が入射したとき、反射縦波、反射横波、屈折(透過)縦波、屈折(透過)横波の 4 個の波が発生するが、これらの 5 個の波の境界面における振動の連続条件として次式が得られる。反射率、透過率は各波の振幅比として得られる。また、式中の記号は Table2 に示してある。

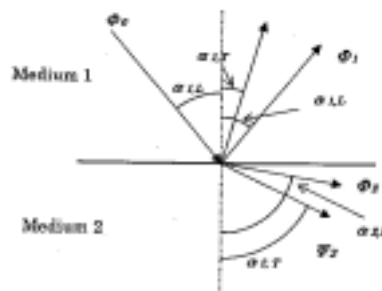


Fig.2 Reflection and refraction waves produced by an incident longitudinal wave in two mediums

Table 2 Notations in equations and figures

ϕ_0 : Incident L - wave.	$\alpha_{1,L}$: Incident angle.
ϕ_1 : Reflected L - wave	$\alpha_{1,L}$: Reflection angle of L - wave
ψ_1 : Reflected T - wave	$\alpha_{1,T}$: Reflection angle of T - wave.
ϕ_2 : Reflected L - wave	$\alpha_{2,L}$: Refraction angle of L - wave.
ψ_2 : Reflected T - wave	$\alpha_{2,T}$: Refraction angle of T - wave.
R_L : Reflection coefficient of Incident L - wave as L - wave.	
R_T : Reflection coefficient of Incident L - wave as T - wave.	
D_L : Transmission coefficient of Incident L - wave as L - wave.	
D_T : Transmission coefficient of Incident L - wave as T - wave.	
$C_{1,L}$: Velocity of L - wave in medium 1.	
$C_{1,T}$: Velocity of T - wave in medium1.	
$C_{2,L}$: Velocity of L - wave in medium2.	
$C_{2,T}$: Velocity of T - wave in medium2.	
ρ_1 : Density of medium 1.	μ_1 : Shear modulus of medium 1.
ρ_2 : Density of medium2.	μ_2 : Shear modulus of medium 2.
θ_c : Critical angle for total reflection of L - wave from steel to alumina.	
θ_1 : Incident angle at which the phase of echo changes from 180 degrees to 0 degree at steel - alumina boundary.	
ω : Angle between central axis of sonic flux and normal of reflection boundary.	
θ_w : Incident angle from water to steel.	
θ_s : Incident angle from steel to alumina.	
L - wave: Longitudinal wave. T - wave: Transverse wave.	

$$R_L - \varepsilon_1 R_T - D_L - \varepsilon_2 D_T = -1 \dots\dots\dots(2a)$$

$$\delta_1 R_L + R_T + \delta_2 D_L - D_T = \delta_1 \dots\dots\dots(2b)$$

$$(\varepsilon_1^2 - 1)R_L - 2\varepsilon_1 R_T + \frac{\mu_2}{\mu_1}(\varepsilon_2^2 - 1)D_L \dots\dots\dots(2c)$$

$$- \frac{2\mu_2}{\mu_1} \varepsilon_2 D_T = (\varepsilon_1^2 - 1)$$

$$2\delta_1 R_L - (\varepsilon_1^2 - 1)R_T + \frac{2\mu_2}{\mu_1} \delta_2 D_L \dots\dots\dots(2d)$$

$$+ \frac{\mu_2}{\mu_1} (\varepsilon_2^2 - 1)D_T = 2\delta_1$$

ここで

$$\delta_1 = \cot \alpha_{1,L}, \delta_2 = \cot \alpha_{2,L} \dots\dots\dots(2e)$$

$$\varepsilon_1 = \cot \alpha_{1,T}, \varepsilon_2 = \cot \alpha_{2,T}$$

$$C_{1,T}^2 = \frac{\mu_1}{\rho_1}, C_{2,T}^2 = \frac{\mu_2}{\rho_2} \dots\dots\dots(2f)$$

である。

式(2b)の右辺の δ が併元の式5)では2になっている。また $\delta_1, \delta_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ の

符号が併元の式とは逆符号になっているが、これは座標系に対し超音波の入射方向が併元とは逆向きのためで、式(2a)...(2f)の解には影響しない。

また各入射角, 反射角, 屈折角の間には次の関係 (Snell の法則) がある。

$$\frac{\sin \alpha_{1,L}}{C_{1,L}} = \frac{\sin \alpha_{1,T}}{C_{1,T}} = \frac{\sin \alpha_{2,L}}{C_{2,L}} = \frac{\sin \alpha_{2,T}}{C_{2,T}} \dots\dots\dots(3)$$

式(2), (3)の計算で $C_{1,L} < C_{2,L}$

$$\frac{C_{2,L}}{C_{1,L}} \sin \alpha_{1,L} > 1 \dots\dots\dots(4)$$

の場合がある。これは入射縦波が全反射する条件で透過縦波は存在しない。このときは

$$\alpha_{2,L} = i\gamma \text{ と置き,}$$

$$\sin i\gamma = i \sinh \gamma, \cos i\gamma = \cosh \gamma \dots\dots\dots(5)$$

の関係を使い、式(2), (3)で複素数計算を行う。それぞれの渡の反射率は複素数となり、その絶対値と位相は次式で与えられる。

$$|R| = (R_{\text{real}}^2 + R_{\text{imag}}^2)^{1/2}, \Gamma = \tan^{-1} \frac{R_{\text{imag}}}{R_{\text{real}}} \dots\dots(6)$$

透過率についてもどうようである。

3.2 鋼とアルミナとの境界面における反射の計算結果

前章の条件式を使用し、鋼よりアルミナに縦波が入射したとき、縦波として反射する反射率と、そのときの位相を求めた結果を Fig.3 と Fig.4 に示す。非金属介在物の検査は、通常被試験材を水中に置く水浸法が使用されるので、入射超音波は Fig.5 に示されるように鋼表面で屈折が生じた後アルミナに入射する。したがって、Fig.3 と Fig.4 では水から鋼への入射角と鋼よりアルミナへの入射角を横軸にとっている。

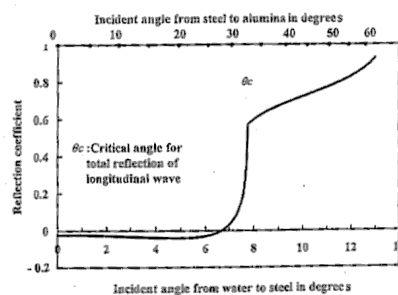


Fig.3 Relation between reflection coefficient of reflected longitudinal wave and the incident angle of longitudinal wave at steel-alumina boundary

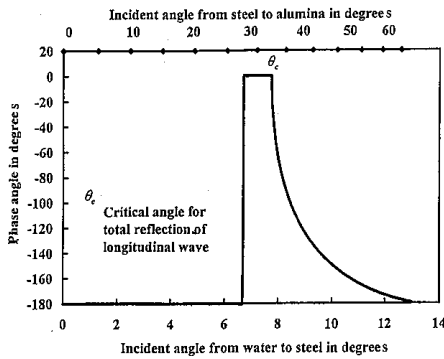


Fig.4
Relation between phase change of reflected longitudinal wave and the incident angle of longitudinal wave at steel-alumina boundary

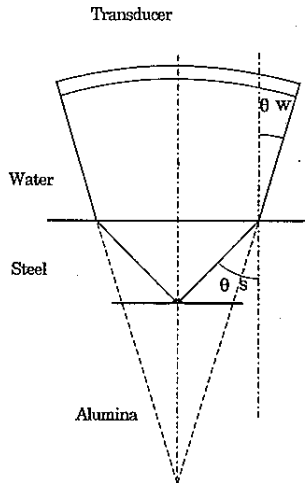


Fig.5
Wave propagation path in immersion testing

Fig.3より反射率は垂直入射,即ち入射角が0度のときマイナスであり,垂直入射の理論と一致する。入射角が増え, θ_c を超えると R はプラス値となる。これに対応して Fig.4 の位相は入射角が θ_c より小では -180 度, これを超えれば 0 度となる。

θ_c は鋼よりアルミナに入射した縦波の全反射の臨界角であり, この角度以上の入射角では透過縦波は無く, 反射率も絶対値で表される。それに対応して 0 度と 180 度以外の位相角の概念が生ずるが, Fig.4 に示すように臨界角以上で位相は連続的にマイナス側に増加する。

臨界角以上における 0 度と 180 度の中間の位相がパルスの形状に与える影響は次のように考えればよい。もし波が連続波であれば位相の変化は単に波のずれになり, 波の形状は変わらない。しかしパルスの場合は位相によりその形が変化する。その求め方は入射パルスをフーリエ展開し, その成分の波に位相変化を与え, それ

らを再加算すればよい。Fig.1 に示されるパルスに位相変化を与えると, 位相が 0 度から増加するに従い, プラス振幅とマイナス振幅の差が減少し ± 90 度の位相で両者が等しくなり, 90 度を超えるとプラス振幅がマイナス振幅より大になり, ± 180 度で完全にパルスの形が反転する。Fig.6 に位相の変化に伴うパルスの形状の変化を示す。以上のことから臨界角以上でも位相の変化が ± 90 度以下であれば Fig.1 の入射波の場合マイナス携幅がプラス振幅より大きい反射波が得られることが解る。

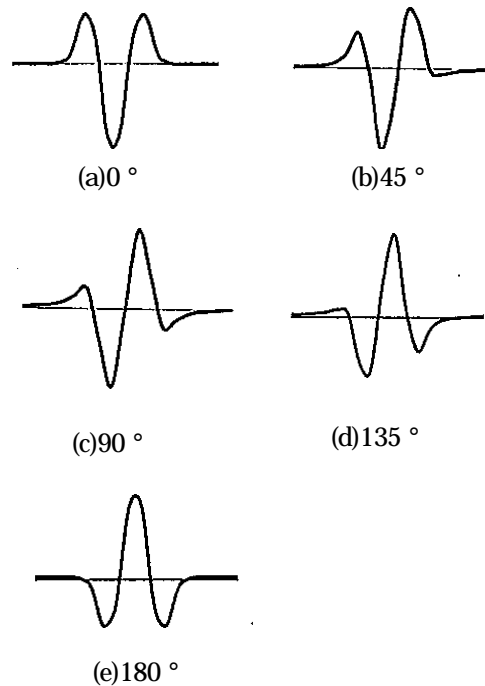


Fig.6
Change of pulse shape due to phase shift from 0 to 180 degrees

以上をまとめると, 網中のアルミナに超音波を入射するとき 適当な入射角を選べば正転(反転しない)反射波が得られると言える。

通常の球面探触子を使用すると, 入射角が 0 度から探触子の大きさで決まる最大値までの入射角の波が含まれる。そのとき, 探触子に受信される波はそれらの総和である。例として入射角が 0 度から臨界角まで広がる場合を考え, Fig.3 の反射率に入射角 θ を発射する探触子の面積微分 $\sin d$ を掛けて積分した結果はプラス値であることが解った。即ち,

球面探触子でも適当な大きさであれば、アルミナからプラスの反射が得られると言える。

3.3 網と空孔との境界面における反射

反射率を与える式は Krautkramer³⁾の著書にある。また反射率(自由境界としての)の絶対値のグラフも記載してある。この式の計算を行うと反射率はすべての入射角に対してマイナスであり、鋼中の空孔からの反射液はすべて位相が反転していることが解った。

4. 実験

4.1 位相の測定法

本論文の測定法 6) では Fig.1 の形状のプラスとマイナス側の振幅が異なるパルスを使用している。このパルスは Fig.6 に示されるように位相の変化とともに、パルスの形状も変化する。このパルスのプラス側の振幅 V_+ とマイナス側の振幅 V_- の相対値を測定すれば、パルスの位相を推定できる。具体的には

$$p = \frac{V_+}{V_+ + V_-} \dots\dots\dots(7)$$

を各パルスについて求め、 p より位相を判定する。

著者の場合、 V_+ と V_- の比を 7/3 とした Fig.1 の波形の短パルスを使用しており、入射波(正反射のパルス)では p 値は 0.3、位相が 180 度変化したパルスでは、 p 値は 0.7 となる。

4.2 測定法と測定結果

測定条件を以下に示す。

- 探触子 50MHz, ポリマー探触子:
集束型球面探触子, 球面の半径:
12.5mm
開口角: 11.3 度×2
- 探傷器 高周波用高感度探傷器 HIS
- 走査装置 三次元機械走査
走査ピッチ: 10 μm
- 試験材 低炭素アルミキルド鋼連続铸造スラブ

測定結果の一例を Fig.7 に示す。Fig.7(a)は 9mm×9mm の走査像でありエコー強度をカラー表示してある。(b) (c)は式(7)の p 値をカラー表示した図である。即ちエコーの位相を示す。水色はアルミナ系非金属介在物を、赤色は空孔を示す。(b) (c)には図中のカーソル線の交点の A スコープ俊を付置してあるが、波形の反転しそいることが解る。

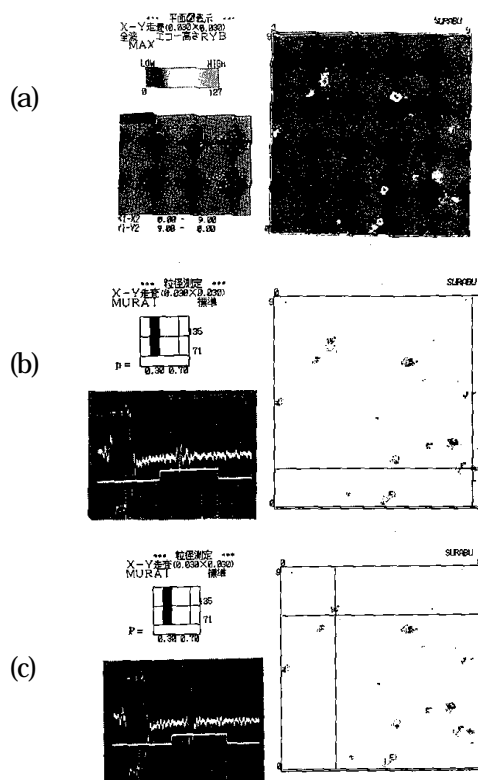


Fig.7
C-scope color image in ultrasonic testing for a low carbon Al-killed slab obtained buy continuous casting
(a) Intensity of echo in ultrasonic testing
(b) Phase of echo in ultrasonic testing where blue color shows alumina inclusion and red color shows void in steel. A-scope image is an echo from the intersection of cursor lines
(c) C-scope is same as (b).A-scope image is an echo from a void at the intersection of cursor lines

5. 検討

5.1 計算の妥当性

電子計算機の計算ではプログラム等から発生する計算の誤りを摘出するのは困難な場合が多い。本研究では式(2)で与えられる反射及び透過の四つの波のエネルギーの流れの総和が入射波のエネルギーの流れに等しくなることを用いて検証した。各波のエネルギーの流れは入射波の音圧振幅を 1 とすると、例えば反射縦波のエネルギー流れは $p1 \times 1 \times RL$ で与えられる。また固体結合境界面の計算実例として、アクリルと鋼の境界の往復透過率が Krautkramer³⁾により報告されているので、それと照合して良い一致を見ている。

5.2 理論の仮定の妥当性

また本研究ではある入射角で入射した超音波の反射率と位相を求めているが、実験との対応を考えると幾つかの問題点がある。第一は界面の法線と中心軸とのなす角度である。中心軸と法線が平行であれば、本論文の計算はそのまま成立し問題は無いが、平行でない場合は反射波の一部のみが受信される。また入射角は補正しなければならない。Fig.8 に示すように法線と中心軸とのなす角度を ω 、入射音波と中心軸のなす角度を θ とすると、実際の入射角 T は $T = \theta - \omega$ となる。受信できる条件は $\theta < \theta_{max}$ で与えられる。ある θ に対して送受信に寄与する探触子の面積は近似的に

$$\pi R^2 \sin^2(\theta_{max} - \omega) \dots \dots \dots (8)$$

となる。例えば θ_{max} を 11.3 度とすると、 $\theta > 11.3$ 度では反射エコーは受信されない。また、

θ が約 3.5 度で受信強度への寄与は振動子両全体の 1/2 になる。即ち傾斜面の寄与は非常に少ないと言え、非金属介在物のような粒状の物体からの反射は入射超音波束の中心軸に垂直の面からの反射が主となりその周囲の傾斜部の反射がそれを囲むと考えられる。

第二には超音波束はその周波数で与えられる幅を持っており、本実験の探触子では半価幅で約 $100 \times 10^{-6}m$ である。この幅内での反射に本論文で扱った平面波の計算が成立するか否かである。しかし、各反射点に入射する波は探触子面の各点からの球面波、部分的には平面波と考えてよい波の合成であるので、その成分波に対し

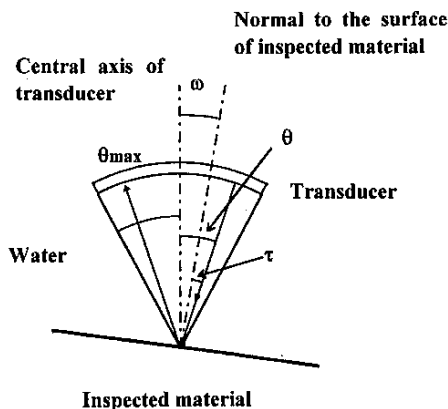


Fig.8
Receiving of a reflected pulse from an inclined boundary by a spherical transducer. Receiving area decreases as inclined angle increases

て本論文の計算は成立すると考えてよい。最終的には反射体の形状を仮定して、超音波束の各点に対する反射を計算すればよいが、今後の課題に残したい。

6. 結論

- (1) 固体結合境界面における超音波の反射と透過の境界条件式を求め、鋼とアルミナの境界面における反射率と位相を入射角に対して計算で求めた。その結果垂直入射では位相が反転するが、入射角により位相の反転しない領域のあることが解った。
- (2) 球面探触子においてもその開口角を適当に選べば積分された受信波の位相は反転しない。
- (3) 網中の空孔からの反射波の位相は入射角に関係せず常に反転しているので、球面探触子を使用することにより網中のアルミナ非金属介在物と空孔の反射波を弁別できる。
- (4) 超音波の反射パルスの位相の測定法とアルミキルド鋼の連続鋳造スラブの非金属介在物の超音波による検出と空孔との弁別の例を述べた。

本方法が非金属介在物の検査、清浄度の測定の合理化に役立つことを期待する。

参考文献

- 1) 松崎 健, 田中 久, 中村博巳, 内野 董, 小林日登志: 超音波探傷法による連続鋳片内の微少介在物検出方法, CAMP - ISIJ, 5, p.290, (1992) 松崎 健, 桑野清吾, 中村博巳: 超音波探傷法を使った清浄性評価技術, CAMP - ISIJ, 5, p.1236, (1992)
- 2) J. Krautkramer and K. Knutkramer: Ultrasonic testing of Materials. 4th edition, Springer Verlag, Berlin, Heiderberg, Newyork, London, Paris, Tokyo, HongKong, Barelona, p.561, (1990)
- 3) J. Krautkramer and K. Krautkramer: Ultrasonic testing of Materials. 4th edition, Springer Verlag, Berlin, Heiderberg, Newyork, London, Paris, Tokyo, HongKong, Barcelona, p.562, (1990)
- 4) 超音波探傷法 第3版, 日本学術振興会編, 日刊工業新聞, 東京, p.706, (1977)
- 5) 井元艦二: 超音波の反射屈折の計算, 電気試験所彙報, 16 (2), pp.540-554, (1952)
- 6) 村井純一, 品川議夫, 松村俊昭, 荒木久仁: 超音波検査方法及び装置, 公開特許公報, 平3-102258, (1991)
- 7) J. Murai, H. Hiraga and T. Shiraiwa: Phase identification of Echo Pulse and Detection of Non-metallic inclusion in Metals, Proceedings of The 1994 Far East Conference on NDT and ROCSNT Ninth Annual Conference, Taipei, Taiwan, ROC, pp.331-337, (1994)

協会だより

放射線分科会(平成9年度第3回)報告

期 日：平成10年3月11日
幹事会 10:30～12:00
分科会 13:00～15:40
見学会 15:50～16:30
会 場：セキテクノトロン(株)

平成9年度第3回の放射線分科会が、東京都江東区の上記会場で開催された。分科会の前に幹事会が開催され、平成10年度の主査選出選挙が行われ(財)ファインセラミックスセンターの池田 泰氏が選出された。

研究発表は5件で、参加者は36名で活発な討議が行われた。また、分科会の終了後に見学会が行われた。

研究発表

1. SEICD D35 形放射線透過写真観察器について

(株)精光社 橋本雄二, 高山勝志, 森 隆
JIS Z 4561 で分類されている 30,000CD/m²以上の明るさを持つ観察器 D35 形の新型観察器を開発した。光源には写真電球リフレクターランプ500W を選択し連続点灯100時間が定格寿命で、また使用中の湿度上昇も JIS の規格内であることを確認した。

2. 液体マスク適用によるファインセラミックスのX線透過試験

(財)ファインセラミックスセンター
水田安俊, 恩田勝弘, 池田 泰
ファインセラミックス内の欠陥検出を向上させるために、イメージインテンシファイアを用いた差分画像処理装置法の実相化を困っているが、この方法はノイズに障れているわずかな信号を捉えるため、試験体の材厚差も画像に現れてくるので画像強調が制約され検出度が抑えられていた。そのため液体を使用した肉厚補正マスクを製作、透視とフィルム撮影の両実験を行い補正効果による検出性向上を確認した。

3. EGS4 によるフィルム - 増感紙の解析

大阪産業大学工学部 小林信雄
1.33MeV, 1.17MeV の 線を使用し増感紙の材質を Pb, Cu, Fe としたときの X 線フィルムに入射するエネルギーを EGS4 を用いて解析した結果、増感効果はフィルムに到達する電子のエネルギーの線量により決定されることが判明した。その結果、Pb は感度が高いが、鮮鋭度は劣り、Cu, Fe は Pb の特性と逆になるので、作業目的によって増感紙の材質を選択することが必要である。

4. コバルト 60 線源用増感スクリーンの比較研究(第2報)

ISO 5579 では、コバルト 60 用の増感紙は Fe, Cu を規定しているが、日本では Pb が一般的であり、このままで ISO 5579 が最終承認されれば日本側が全面見直しが必要になるので Pb の材厚を変化させて Cu, Fe との比較実験を行い Pb も追加しても良い結果が得られた

5. 高エネルギーX線用増感スクリーンの比較研究

京都大学原子炉実験所 岡本賢一
特別研究委員会グループ
高エネルギー用各種スクリーンの比較研究を実施するにあたり、ISO 1027-1983 の改正案である BSEN462-2:1994 の有孔計透過度計の試作を行った。今回は Fe 材を用いて、H5, H9, H13 の種類のを3組試作したが、H5 の薄い部分に細孔を加工するのは困難であった。

見学会

セキテクノトロン(株)の機器展示コーナーを見学し、最先端の半導体製造装置、電子部品計測器、理化学機器の説明を受けながら見学をした。

(文責：協会便り担当委員会委員 相田健二)

連載 エチレン装置の分解炉管内面側に生じる浸炭層の検出

(a) 新炭層がある場合	() 内面で反射させる		
	() 境界線で反射させる		
(b) 浸炭層がない場合	() 内面で反射させる		
	() 仮想境界面で反射させる		
		探触子の固定位置	表示器上の図形

図2 V透過による検出の原理と表示器上の図形(本文 482 ページ参照)

論文 超音波による鋼中のアルミナ非金属介在物と空孔の弁別検出

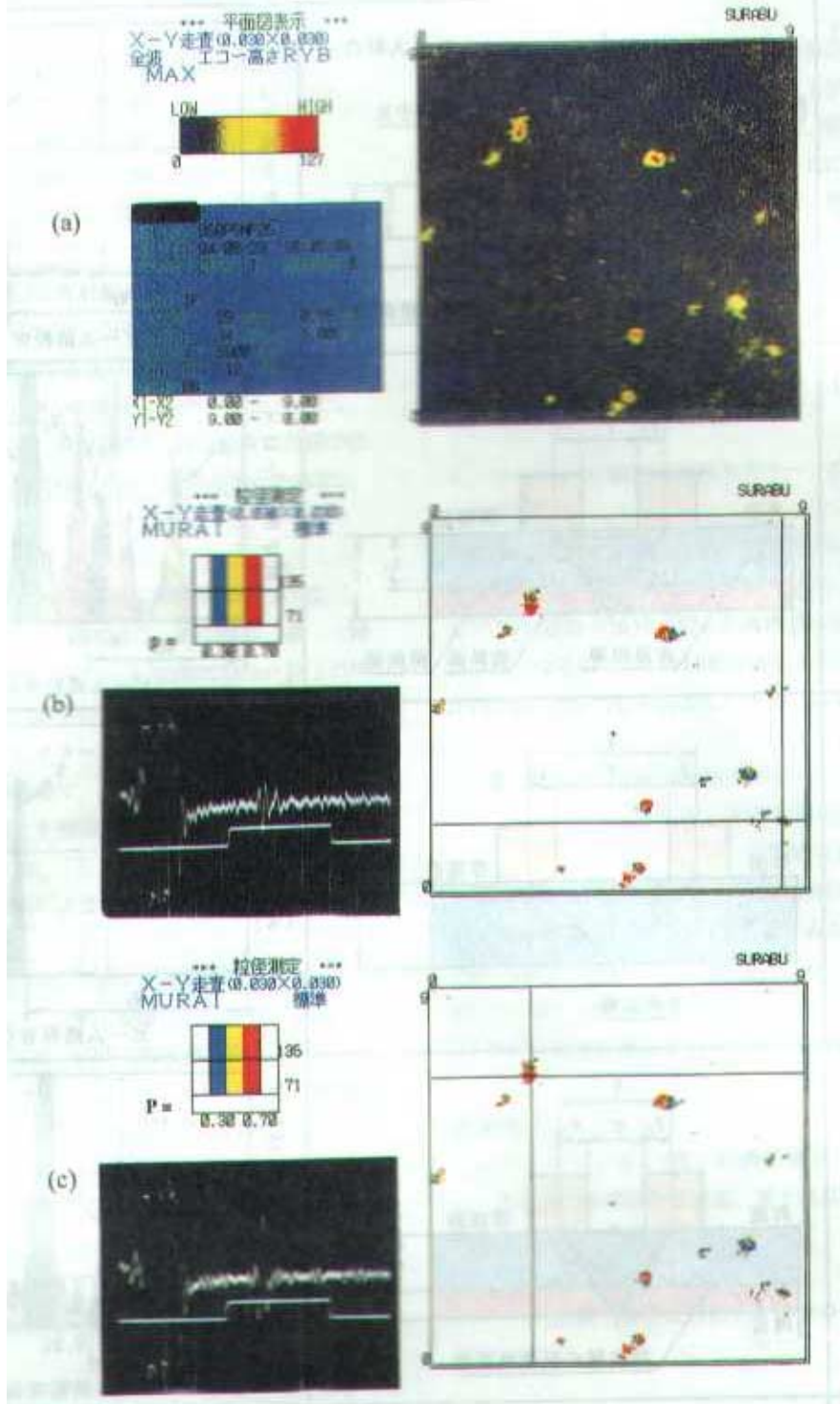


Fig.7

C-scope color image in ultrasonic testing for a low carbon Al-killed slab obtained by continuous casting (a)Intensity of echo in ultrasonic testing, (b)Phase of echo in ultrasonic testing where blue color shows alumina inclusion and red color shows void in steel. A-scope image is an echo from an inclusion at the intersection of cursor lines, (c)C-scope is same as (b).A-scope image is an echo from a void at the intersection of cursor lines (本文502ページ参照)