

昭和 63 年 度

千葉県非破壊検査研究会 事例発表会

日 時 平成元年 2 月 1 日(水)

13 : 30 ~ 17 : 00

会 場 千葉県機械金属試験場

目 次

微小焦点 X 線装置による拡大の効果について	1
鉄骨溶接部超音波探傷回送実験結果について	9
後乳化性蛍光浸透液における乳化剤の影響について	13
固体内超音波の可視化について	
画像処理による可視化像の改善	17
固体内超音波の可視化解析システムの開発	23
角鋼片の全断面超音波探傷法の開発	25

概 要

ファインセラミックス、複合材料など新素材の開発・普及や電子部品をはじめとする各種部品の微細化・薄肉化が進む中で、従来の検出限界よりも更に小さな欠陥の検出・微細な構造の確認などに、微小焦点X線装置が利用されている。ここでは、微小焦点X線装置による拡大撮影（透視）について、微小焦点X線装置と一般のX線装置とを比較したいくつかの実験結果を紹介する。

1. はじめに

透過写真の像質の改善、識別度の向上を図る方法として、一般のX線装置（焦点寸法 0.3～3.0mm程度）を使用した狭照射野撮影法などの精密撮影法がある。しゃへいマスクや肉厚補償マスクを利用した精密撮影法では更に像質の向上が見られるが、対象とする欠陥の寸法が小さくなるにつれて、通常透過試験に使用されるX線装置では、焦点寸法及び撮影の幾何学的条件による影響で、欠陥像の鮮鋭度や透過写真のコントラストが低下して識別がしにくくなり、しいては検出不能となってしまう。

微小焦点による拡大撮影（透視）は、透過写真のコントラストをあまり低下させずに、像を識別限度以上の大きさに直接拡大する方法で、微小欠陥の検出に適した透過試験法であり、TV装置を組み合わせた微小焦点X線透視システムとしても、品質保証・生産技術の一段として、各方面で利用されている。

以下、微小焦点による拡大撮影について説明する。

2. X線装置と焦点寸法

拡大撮影を適用するに当たり、透過写真のコントラスト、言い換えれば欠陥の識別能・解像力にもっとも影響するのが焦点寸法で、拡大により透過写真の像質を大幅に改善するには、少なくとも $f=0.1$ mm以下の焦点寸法が必要とされている。（図.1）

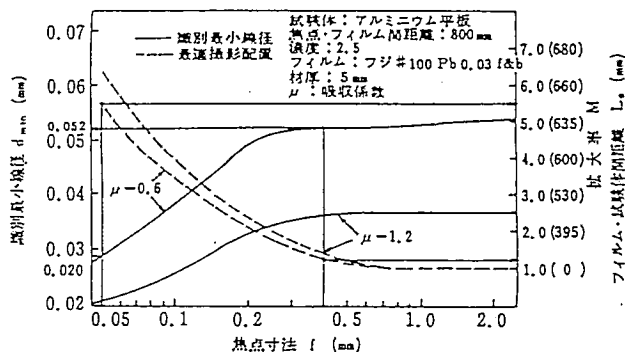


図.1 焦点寸法と識別最小線径の関係¹⁾

現在、工業用（非破壊検査用）に、一般に使用されているX線装置は、焦点寸法により大
 体表1のように分けられ、各々の用途に適用されている。

【表1】X線装置の焦点寸法と用途

	装置形式例	焦点寸法	用途	
	RF-300EGS2 RF-250EGS2 RF-200EGS2	2.5×2.5mm 2.0×2.0mm 2.0×2.0mm	・通常の透過試験に用いる。 ・対象とする欠陥が、比較的大きな場合 TV装置と組合せて、透視に用いる事がある。	・携帯式X線装置
	RF-100GSB	1.0×1.0mm	・金風、電子部品などのTV透視にも利用される。	
	RF-350	1.5×1.5mm	・厚物のTV透視にも用いられる。	・据置式X線装置
小焦点	RF-100F RF-160	0.6×0.6mm 0.5×0.5mm	・薄板溶接部など、通常の撮影法で、より 高い識別度を要求する場合や、TV透視 に多く用いられる。	・据置式X線装置
(スモール フォーカス)	RF-160W	0.4×0.4mm	・FFDが充分にとれない狭い場所や、薄板 溶接部などの透過試験に用いられる。 ・TV装置と組合せて、現場で移動させて、 溶接部の透視に用いる事もある。	・可搬式X線装置
マイクロ フォーカス	WRP-150 (開放形 X線管)	φ0.2mm (ロッドノード形 全周放射)	・細管の円周溶接部を、内部線源法で 撮影するときに用いる。	・可搬式X線装置
	MRS-125 (封入管)	10μm, 45μm	・拡大撮影(透視)により、微小欠陥・微細 構造の検出に用いる。	・可搬式X線装置
	MRS-160 (開放形 X線管)	φ5~50μm	・溶接部や、部品内部の寸法測定に用いら れる。	・据置式X線装置

・装置形式の数字は最大管電圧を示す。例えば、RF-300EGS2は最大管電圧300kV。

表1の小焦点以上のX線装置では、拡大率を上げてゆくと、焦点寸法の影響で幾何学的補
 正係数σが急激に下がり、透過写真のコントラストが低下する為、拡大しても効果がなく、
 幾何学的ボケの増大でかえって識別しにくくなるという事体も起こる。(図.2)

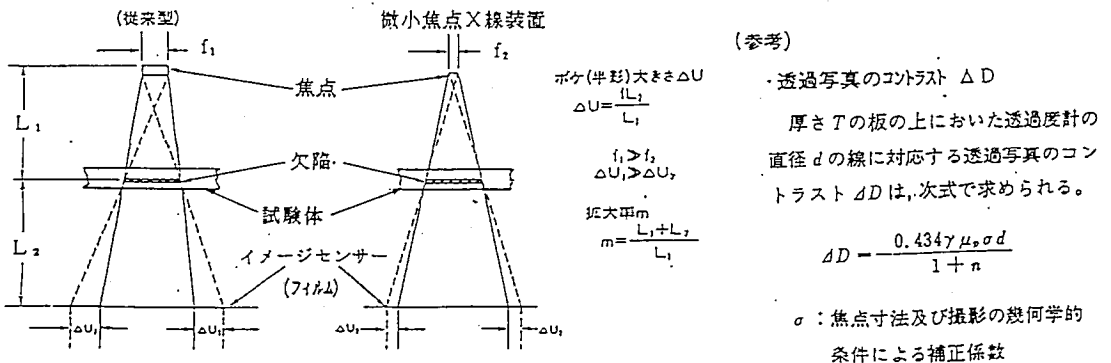


図.2 拡大撮影(透視) 原理比較図

3. 拡大撮影・透視における焦点寸法の影響

3-1 解像力の比較

0.8~20Lp/mmを持つマイクロチャートを用い、各焦点で幾何学的拡大率を変えた時のTVモニタ画面上での解像力を図3に、幾何学的拡大率M=2.5における解像力のTV透視法とフィルム撮影法の比較を表2に示す。(実験値)

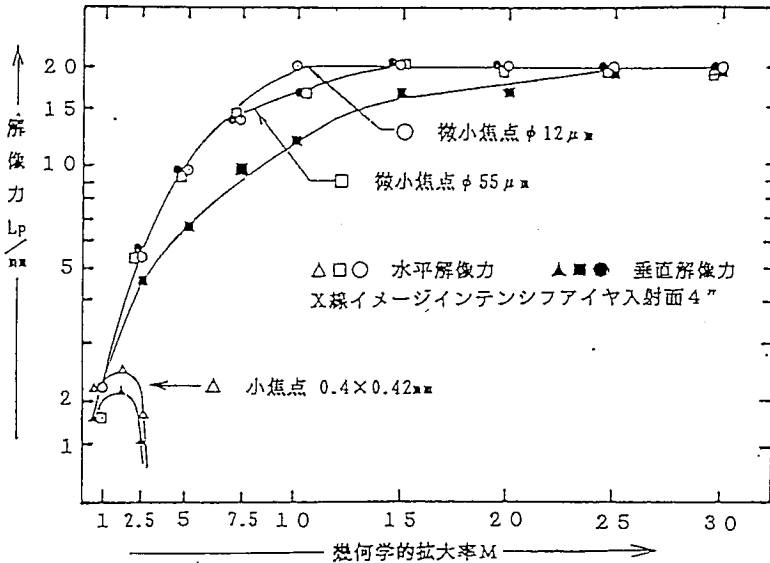


図3. X線テレビ透視方法での焦点の大きさと幾何学的拡大率による解像力測定²⁾

【表2】 透視方法並びに撮影方法で、幾何学的拡大率M=2.5におけるマイクロチャートの解像力識別限界値測定例²⁾

焦点の大きさ	解像力(テレビ透視方法)		解像力(撮影方法)
	水平	垂直	(MTF%)
小焦点 0.4×0.42mm	2.5 Lp/mm	2.2 Lp/mm	3.8 Lp/mm (MTF=5%)
微小焦点 φ 55 µm	5.55 Lp/mm	4.63 Lp/mm	20.0 Lp/mm (MTF=37%)
微小焦点 φ 12 µm	5.55 Lp/mm	4.63 Lp/mm	20.0 Lp/mm (MTF=76%)

注1. 透視方法、X線I I受光面φ100mm、X線管電圧35~40kV、フィルターなし。

注2. 撮影方法における解像力は、MTF値5%が限界。

注3. 微小焦点での撮影方法では、解像力MTF値5%を限界とすると、20.0 Lp/mm以上の解像力を有している。

フィルム:DR-5(KODAK)、X線管電圧40kV、増感紙なし、フィルターなし。

3-2 透過度計識別能

小焦点及び、微小焦点で透視をした時の、ステンレス板上に置いた針金の識別線径について実験した結果を、図4、表3に、また拡大率 $M=30$ での撮影における針金像の濃度分布を図5に示す。

図4では、焦点寸法 $\phi 12\mu\text{m}$ と $\phi 55\mu\text{m}$ とで、材厚 5mm 以外では識別程度に差がないように思われるが、実際は、拡大による像のボケが $\phi 55\mu\text{m}$ の方が大きく、鮮鋭度にかけたコントラストの低い像になっている。

板厚 $0.5\sim 1.0\text{mm}$ で識別線径 $18\mu\text{m}$ 、焦点 $\phi 12\mu\text{m}$ では像コントラスト・鮮鋭度の点でもっと細い線が識別できると考える。

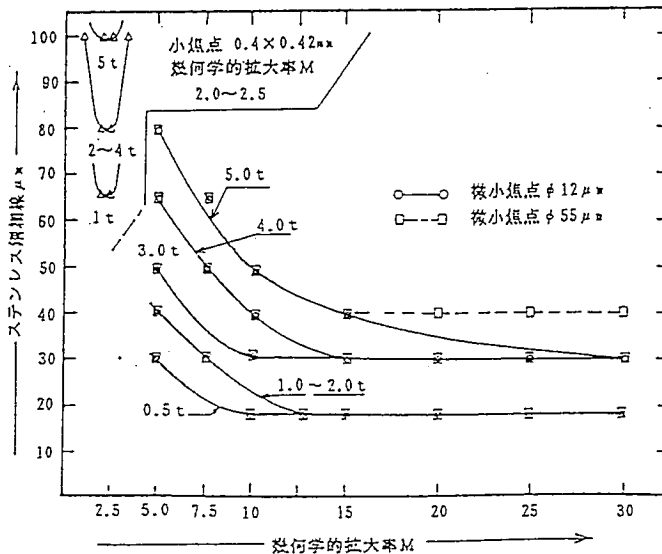


図. 4

微小焦点 $\phi 12\mu\text{m}$ と $\phi 55\mu\text{m}$ での幾何学的拡大率 M と各板厚における識別線径(μm)との関連実験²⁾

拡大透視方法

FID 500mm

X線II ; 4吋

メモリ獲得 ; 256枚

材質 ; ステンレス鋼 SUS 430,

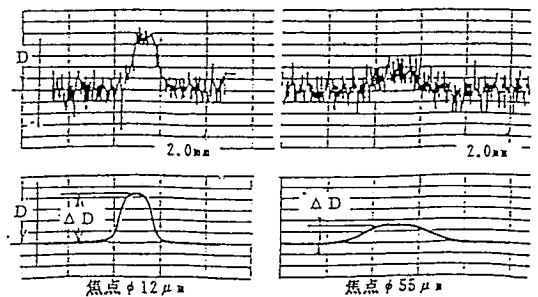
【表3】小焦点透視法での薄板における透過度計の識別能²⁾

注1, 焦点の大きさ : $0.4 \times 0.42\text{mm}$

注2, 幾何学的拡大率 $M=2.5$

板厚 mm	識別線径、直径 mm	
	普通鋼	ステンレス鋼
5	0.08~0.1	0.1
4	0.08	0.1
3	0.08	0.06
2	0.08	0.08
1	0.065	0.065
透過度計	BS 3971 4FE	JISZ3106 S01

図. 5 微小焦点 $\phi 12\mu\text{m}$ と $\phi 55\mu\text{m}$ での幾何学的拡大率 $M=30$ における線径 $50\mu\text{m}$ の像の濃度分布²⁾



(材厚 ; ステンレス鋼 3mm,

86kV 100 μA , フィルム DR-5, 増感紙なし)

3-3 焦点寸法の異ったX線装置による拡大撮影像の比較

焦点寸法の異なるX線装置で、メッシュ、隙間ゲージ、人工割レ試験片を拡大率を変えて撮影したときの透過像の変化を見た。

(写真は、透過写真を密着焼付したもので、
黒白反転している。)

使用X線装置	RF-200EGS2	焦点寸法 2.0×2.0mm
	RF-160	0.5×0.5mm
	MRS-160	φ20μm
FFD	600mm	
試験体	—X線フィルム間距離: L ₂	
フィルム	—フジ#100 増感紙ナシ	

3-3-1 メッシュ (金属製網)

焦点寸法2.0×2.0mmでは、密着撮影以外は、網の目の識別ができなかった。

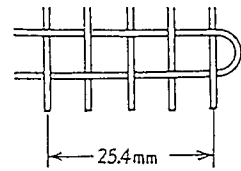
注 メッシュとは網目の大きさを表わす単位で、25.4mm間にある目数をいう。

〔表3〕メッシュの網の目の識別状況

焦点寸法	L ₂	拡大率	150メッシュ	250メッシュ	400メッシュ
2.0×2.0mm	—	1	◎	◎	○
	50mm	1.09	×	×	×
0.5×0.5mm	50	1.09	◎	◎	◎
	100	1.2	◎	◎	○
	150	1.33	○	○	×
φ20μm	500	2	◎	◎	◎

◎ : よく識別 ○ : 識別 × : 識別不可

図. 6 メッシュ (金属製網) の寸法



線の中心から中心においての目数

(参考) 針金中心間距離

400メッシュ 0.06 mm

250メッシュ 0.10 mm

150メッシュ 0.16 mm

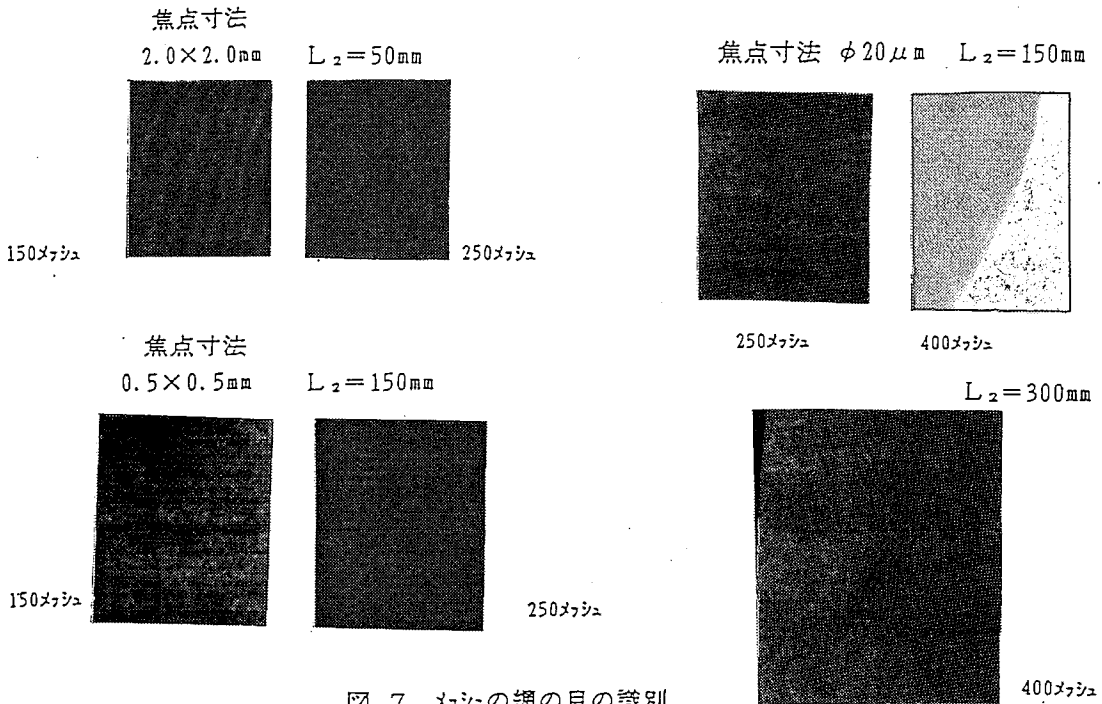


図. 7 メッシュの網の目の識別

3-3-2 隙間ゲージ

- ・ 隙間幅0.01mmまで、どの場合も識別できるが、像の解鋭度は焦点寸法によりかなり差がある。
- ・ 2.0×2.0mmの焦点については、密着撮影 ($L_2=3\text{mm}$) では、ボケはあまり気にならないが、 $L_2=50\text{mm}$ 以上にすると、目立つ。

隙間高さ $h=1.0\text{mm}$
 隙間幅 ①0.08mm ②0.04mm
 ③0.02mm ④0.01mm

図. 8 隙間ゲージの形状

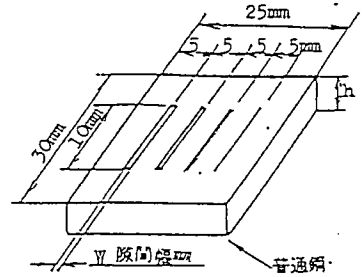
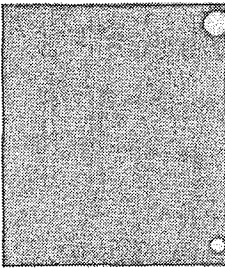


図. 9 隙間ゲージ識別比較

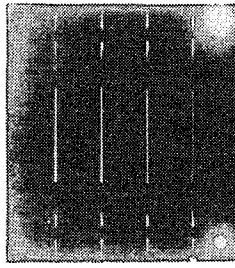
焦点寸法2.0×2.0mm

焦点寸法0.5×0.5mm

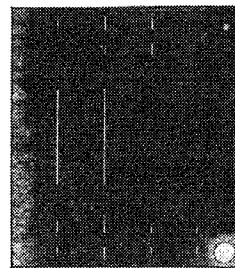
焦点寸法 $\phi 20\mu\text{m}$



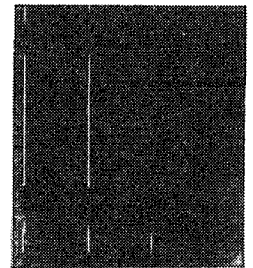
$L_2=150\text{mm}$



$L_2=150\text{mm}$



$L_2=150\text{mm}$



$L_2=300\text{mm}$

3-3-3 人工割レ試験片

- ・ 2.0×2.0mmの焦点でも、 $L_2=150\text{mm}$ で、クラックを識別しているが、焦点寸法によるボケが大きく非常に不鮮明な像である。

図. 10 人工割レ試験片の形状

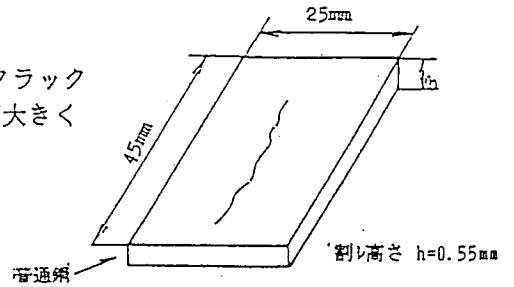
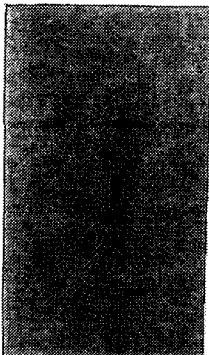


図. 11 人工割レ識別比較

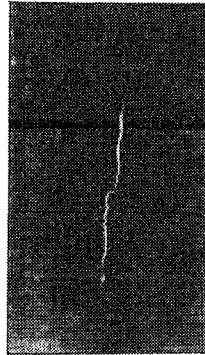
焦点寸法2.0×2.0mm

焦点寸法0.5×0.5mm

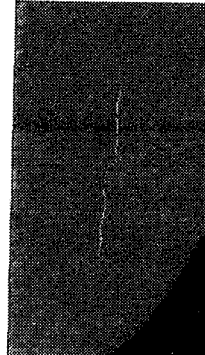
焦点寸法 $\phi 20\mu\text{m}$



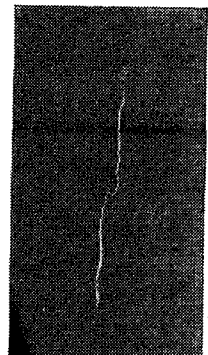
$L_2=150\text{mm}$



$L_2=150\text{mm}$



$L_2=150\text{mm}$



$L_2=300\text{mm}$

4. 微小焦点X線装置による拡大撮影上の注意

- (1) 試験体を焦点に近づけ拡大率を上げてゆくと、試験体の線源側表面と裏面（フィルム側）で拡大率が大きく変わってくる。
 - ① 拡大率の違い、即ち欠陥の識別度が、試験体の表と裏で違ってくる。
 - ・ 拡大率の低い位置にある欠陥が、識別できるような配置をとる必要がある。
 - ・ 試験体に合わせた撮影向きを考慮する。
 - ② 拡大率を大きくすると、試験体内部の位置により、同じ大きさの欠陥であっても、透過写真上の欠陥像の大きさが違ってしまふ。— 欠陥像の大きさの評価。
- (2) 通常撮影では、一つの欠陥として識別されても、拡大すると一つの欠陥の上いくつもの欠陥が重なって識別されることがある。
- (3) 試験体を線源に近づけて撮影することから、通常撮影に比べてX線の入射角度の影響を受け易い。
 - ・ 幅の狭い面状欠陥などの場合、特に注意する必要がある。
 - ・ 試験部への入射角を考慮して、拡大率を決める必要がある。
 - ・ 同じ試験体の検査では、位置設定用の撮影治具を利用するとよい。
- (4) 小さな部品やX線の吸収の差が大きい試験体では、通常撮影のときと同様に、マスクやフィルタを利用する。
 - ・ 試験体の裏面やX線センサ（X線フィルム・イメージインテンシファイヤなど）の入力面にマスクやフィルタを置く。
- (5) 微小焦点X線装置から発生されるX線量は、一般のX線装置に比べてかなり少ない。通常、焦点寸法 $\phi 10\mu\text{m}$ であれば、 10W で、許容負荷は焦点の大きさにほぼ比例する。
 - ・ 焦点—X線センサ（フィルムなど）間距離を必要な拡大率に応じて短くし、撮影時間を短縮する。
 - ・ むやみに小さな焦点にせず、試験体に応じた焦点寸法を使用する。

5. おわりに

微小焦点X線装置による拡大撮影（透視）について、一般のX線装置との比較実験結果を紹介したが、撮影配置や透過写真の具備すべき条件などを具体的に定めたJ I S等の規格が無い現在、撮影法の特徴を充分理解して適用する必要がある。

微小焦点X線装置自体、まだそれ程一般的ではないが、検査の省力化・迅速化や高精度化の要求に沿って、TV装置を組み合わせた微小焦点透視システムと共に、今後各産業に更に普及して行くものと考えられる。

資料・備考

- 1) 放射線透過試験B : 日本非破壊検査協会
- 2) 花田(理学電機欄) : NDI資料 No.10010

鉄骨溶接部超音波探傷回送実験結果について

(協)千葉県鉄骨工業会 熊谷 弘

1. はじめに

鉄骨加工業界において、鉄骨溶接部の品質向上を図るための一方法として、超音波による非破壊試験が広く用いられている。検査技術者の資格として、(社)日本非破壊検査協会(以下 NDI)の超音波技量認定資格および(社)全国鉄構工業連合会(以下 全構連)の鉄骨超音波検査技術者等の資格があり、(協)千葉県鉄骨工業会内でも、これらの有資格者は年々増加している。

しかしながら、せっかく資格を取得していても実際に本人が探傷作業を行う機会は少なく、ほとんどが専門の検査会社に試験を依頼しているのが現状である。その結果、探傷技術の低下をきたしたり、あるいは基本的な探傷操作を忘れてしまう事態が起きている。

(協)千葉県鉄骨工業会ではこれらの点を憂慮して、鉄骨工業会傘下の組合員の超音波検査の技術者を対象にした溶接継手の超音波探傷回送実験と教育を昭和61年度より実施している。

今回は昨年より多くの参加者を集め、また試験片の種類も増やした回送実験を行ったので、その結果について報告する。

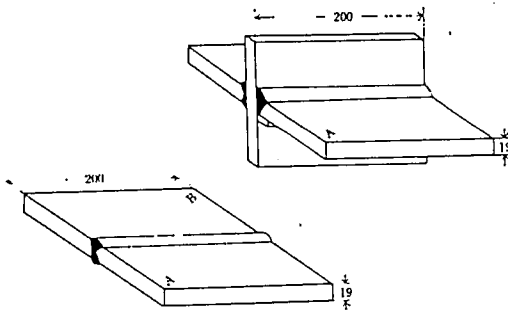


図1 試験体形状

2. 回送実験

2.1 回送実験参加者

本実験に参加した技術者は(協)千葉県鉄骨工業会傘下の鉄骨加工業者の中で、全構連の鉄骨超音波検査技術者および、NDI 超音波2級技術の有資格者を対象とした。

実験参加者は13企業17名で、参加者の氏名、資格取得時期を表1に示す。

2.2 試験片

実験に用いた試験片は、材質SM41A、板厚19mmの突合せ溶接継手および十字継手裏あて金付きで、これらは建築用鉄骨の柱仕口溶接部においてよく用いられる継手形状である。試験片の寸法・形状を図1に示す。

表1 超音波検査技術資格取得時期

番号	NDI 2級	全構連
A	57. 10	59. 08
B	56. 04	59. 08
C	56. 04	59. 08
D	57. 10	60. 06
E	58. 04	61. 10
F	61. 10	62. 04
G	57. 04	61. 10
H	57. 04	62. 04
I	57. 10	62. 04
J	56. 04	61. 10
K	61. 04	62. 04
L	57. 10	62. 01
M	59.10 1級	61. 10
N	56. 10	61. 10
O	60. 10	62. 12
P	56. 10	—
Q	62. 10	—

2.3 探傷方法

実験参加者は回送に先だって機械金属試験場に集合し、JIS Z 2344 -1973（金属材料のバルス反射法による超音波探傷試験方法）により各探傷装置および探触子の性能をチェックした。実験に使用した装置は各参加企業所有の装置であるが、標準試験片（STB-A1, STB-A2）については共通のものを使用した。

探傷装置 T社製14台、M社製 3台

探触子 5Z10×10A70

探傷方法は、日本建築学会の「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説」（以下 建築学会基準）に基づいて行い、突合せ溶接継手では片面両側から、十字継手裏あて金付きについては片面片側から探傷を行い、妨害エコーの判別については、「NDI 202 小委員会の勧告」により行うこととした。

X線透過試験および集束探触子による探傷の結果と対比した。

各試験体の測定項目と記号を図2に示す。

3. 結果および考察

3.1 突合せ溶接試験体

突合せ継手試験体のA面からの超音波探傷による測定データを表2に示す。また、欠陥指示長さおよび欠陥断面位置を図3～図6にそれぞれ示す。

測定データ中のTは集束探触子におけるものである。なお、図7には欠陥の最大エコー高さの得られた位置を示した。図8はX線透過試験により得られたフィルムから測定した欠陥寸法である。

これらの結果から、A面欠陥1およびA面2の欠陥とも測定値のばらつきは、欠陥の左端xの標準偏差 σ_{n-1} は3.2と3.9で、欠陥指示長さも σ_{n-1} は4.3, 4.5で、日頃探傷作業から遠ざかっている実態をうかがい知ることができる。

つぎに、X線によるデータと比べると、欠陥指示長さはやや小さめではあるが全員確実に検出していた。

しかし、中には全構連の資格者であっても建築学会基準にエコー高さ区分線で領域Vの有ることを知らない者や、NDI 2級の資格者で同一欠陥群の評価方法が理解していないケースもあった。

また、欠陥1のエコー高さの領域はⅡ～Ⅴまで

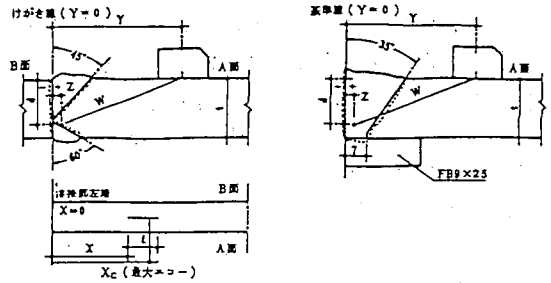


図2 試験体記録記号

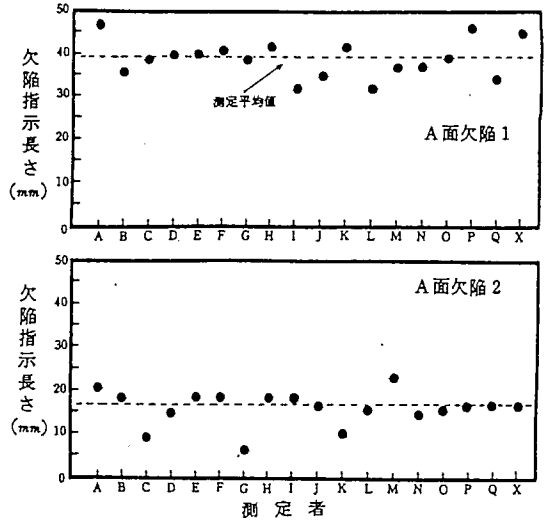


図3 突合せ溶接継手の欠陥指示長さ（A面）

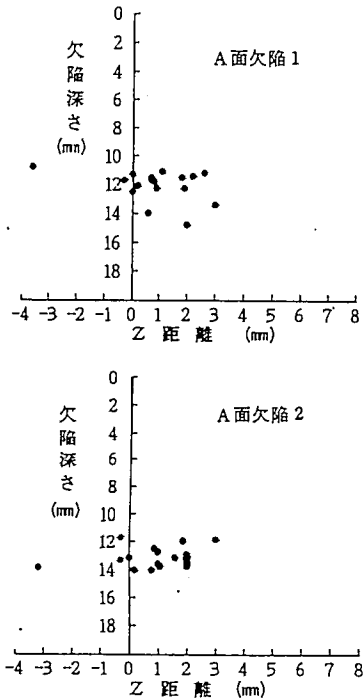


図4 突合せ溶接継手の欠陥断面位置（A面）

幅広く分散したのは、図8の最大エコー高さ位置のからピーク位置が捕らえにくい欠陥であったことが考えられる。しかし、欠陥指示長さが長いにもかかわらず欠陥を検出できなかった者が居たことは重大な問題と言える。

欠陥の断面位置についてはかなり精度の良いデータが得られているが、zの値が平均値とかなりかけ離れたものもある。これらについては、ビーム路程の読み取りかY距離の測定に誤りがあったものと思われる。

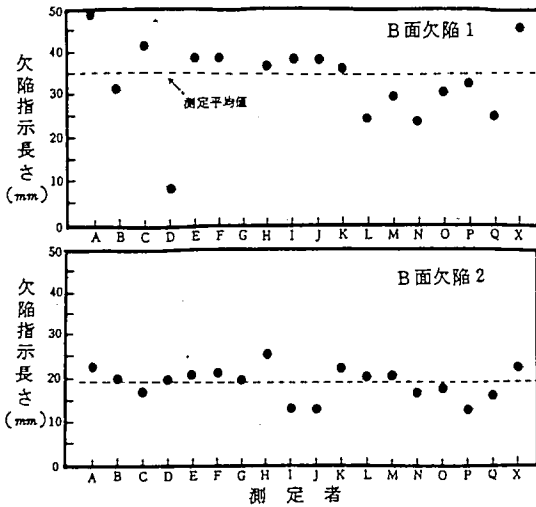


図5 突合せ溶接継手の欠陥指示長さ (B面)

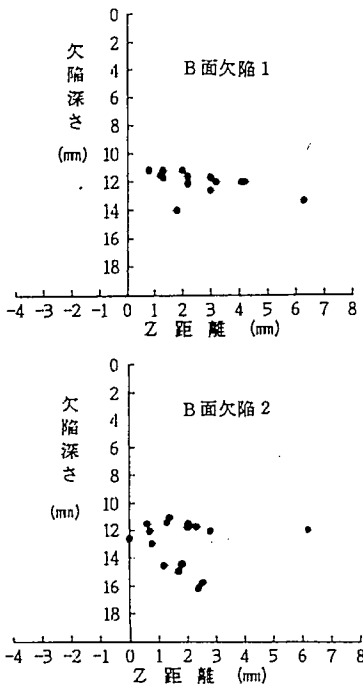


図6 突合せ溶接継手の欠陥断面位置 (B面)

3. 2 裏あて金付き溶接試験体

探傷データを表3に、欠陥指示長さおよび断面位置図を図9、10に示す。

溶込み不良の欠陥については、x, d, z, θ 共に安定した値が得られた。しかし、17名中4名が柱フランジと裏あて金の隙間に発生したたれ込みを欠陥と評価している。これらは全て全構連の超音波検査の有資格者であった。

その原因として、1名はこの欠陥のビーム路程が母材板厚の直射距離内であることから、探傷器の測定範囲の調整を含む探傷の測定の誤りが考えられる。他の3名については、欠陥までのビーム

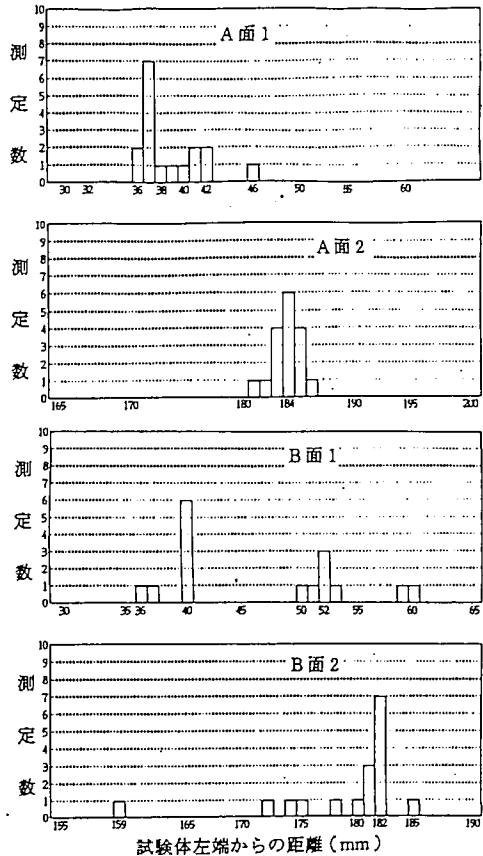


図7 突合せ溶接試験体の欠陥最大エコー検出位置

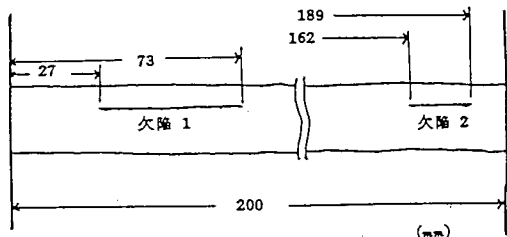


図8 X線透過試験による欠陥寸法

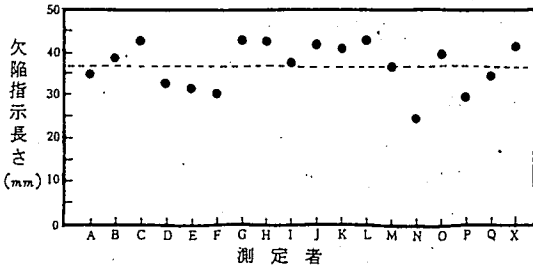


図9 裏あて金付き試験体の欠陥指示長さ

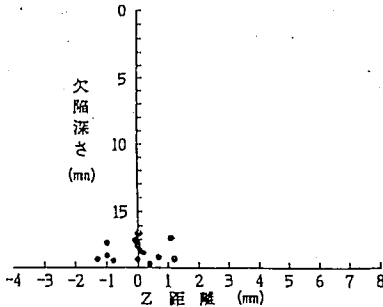


図10 裏あて金付き溶接継手の欠陥断面位置

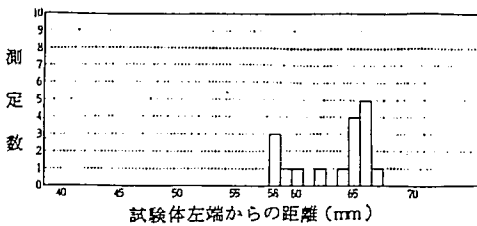


図11 裏あて金付き試験体の欠陥最大エコー検出位置

4. まとめ

今回の回送実験では前回に比較して倍以上の17名の参加者を得、また千葉県機械金属試験場の支援を受け、鉄骨工業会内における超音波検査技術者の実態の有益なデータが得られた。

1. 鉄骨工場における超音波検査技術者の有資格者は、工場内での他の重要なポストに就いていることが多く日常ほとんど探傷は行っていない。
2. 欠陥の検出、測定については、X線の結果と比較しても遜色ない値が得られ、ばらつきも昨年よりは小さくなっている。
3. NDI 2級のみの方資格者の中には欠陥の評価方法についての理解が不足しているケースもあるがしかし、全構連資格者との間には測定精度の差は認められなかった。
4. 裏あて金付き試験体においてたれ込みによる妨害エコーを欠陥と判定した者が4名もいたことは、憂慮すべきことで、工場認定制度の為の資格者に陥りやすい超音波検査技術者に対する指導、教育が必要である。

謝辞

本回送実験に当り、種々のご指導をいただいた千葉県機械金属試験場、白井越朗、立川克美、両氏に深く謝意を表します。

回送実験参加者名(五十音順)

氏名	企業名	氏名	企業名
飯塚 栄一	㈱飯塚鉄工所	高橋 丘	㈱米山鉄工所
石渡 昇	(有)秋元鉄構建設	富岡 雄三	㈱若柴工業
稲田 稔	㈱湊工業所	永井 勉	㈱君津鉄構建設
小野田 啓爾	富二商事(株)	長江 紀之	米山鉄工(株)
熊谷 弘	㈱熊谷鉄工	新田 七雄	井口鉄構(株)
佐藤 浩道	㈱米山鉄工所	藤ヶ崎 修	(有)粉口製作所
郷保 英雄	㈱高野鉄工所	前田 幸生	㈱若柴工業
椎名 英雄	㈱若柴工業	山本 幸徳	㈱瀧上工業
仙波 一清	㈱君津鉄構建設		

路程が計算上の直射の距離を越えたことから直ちに、一回反射法の式 $d=W\cos\theta$ に入れたことである。

探傷に際して常に溶接の断面形状、たれ込み等の妨害エコーの発生を考慮しながら実行しないとこのような重大な過ちをおかすことになる。

たれ込みと欠陥との判定については全構連の資格認定試験でも重要なポイントになっているにもかかわらず、日常超音波探傷業務に携わる機会が少ないことから判断できなかつたものと思われる。

後乳化性蛍光浸透液に於ける乳化剤の影響について

栄進化学株式会社 上村 勝二

福田 裕一

相村 英行

概 要

後乳化性浸透探傷試験に用いられる乳化剤には油性乳化剤と水性乳化剤がある。油性乳化剤については浸透液層に乳化剤が混入（浸透液層に乳化剤が拡散）され、浸透液が水洗可能になる乳化剤の混入率について検討した。

その結果、浸透液層に油性乳化剤が30%～50%混入されることにより水洗が可能になると推定した。

また水性乳化剤の濃度と乳化時間及び表面アラサの関係について検討した。

1. まえがき

蛍光浸透探傷法には、水洗性蛍光浸透探傷法及び溶剤除去性蛍光浸透探傷法があるが、後乳化性蛍光浸透探傷法を採用する主な理由は試験品表面の極めて浅い欠陥（欠陥の深さの割合に欠陥の開口が広い）の検出も可能にするためである。油性乳化剤の作用は浸透液に乳化剤が混入され、水洗を可能にする作用である。この拡散現象によって試験品表面の浸透液層内の乳化剤の濃度が増加するにつれて、浸透液は次第に水洗除去され易くなってきます。浸透液と乳化剤の2種類の液体が接触する場合、その両液体間の拡散速度は接触面積及び両液体の性質によって著しい差があります。

また液体の物理的性質としては粘度が大きい要素であり、粘度が上昇するにつれて拡散速度が減退します。

水性乳化剤を用いた後乳化性浸透探傷試験は油性乳化剤を用いた試験に比べて信頼性が高い。この理由は試験品の表面に付着した浸透液を予備水洗によ

り除去し、薄い均一な浸透液膜にするため、乳化剤の乳化力が弱くとも水洗可能になる、乳化力が弱いので乳化時間の長短の影響が油性乳化剤よりすくないから信頼性が高いといえる。

本稿では、サンドブラスト板を用い、浸透液層に油性乳化剤が混入した比率と水洗性及び乳化時間と水洗性について検討し、またサンドブラストにより表面アラサを変えた試験片を用い水性乳化剤の濃度と乳化時間について検討した結果を報告する。

2. 試料

後乳化性蛍光浸透液	F-5L
油性乳化剤	F-5E (粘度 115cs)
準高感度後乳化性蛍光浸透液	F-5L-SP
油性乳化剤	F-5L-SP (粘度 35cs)
高感度後乳化性蛍光浸透液	F-6A
水性乳化剤	F-6E-W
乾式現像剤	F-5D

3. 実験方法

1) 浸透液層に油性乳化剤の混入

浸透液に油性乳化剤を混入し調整した混液を100メッシュサンドブラスト板に滴下し、45度の角度で1分間ドレンした後水洗装置（水温35℃、水圧2kg/cm²）にて60秒間水洗した後、熱風循環式乾燥器（70℃）にて5分間乾燥した後、乾式現像剤（現像時間5分）で現像した後、ブラックライト（紫外線強度1700μW/cm²）の下で観察した。

混液組成

浸透液	90%	80%	70%	60%	50%	40%
油性乳化剤	10%	20%	30%	40%	50%	60%

2) 油性乳化剤の乳化時間

試験板は、100メッシュサンドブラストを施した302ステンレス板の別々な箇所に浸透液を注ぎ45度の角度で10分間ドレンした後、油性乳化剤を浸透液の部分全部を覆う様に注ぎ、乳化時間10秒、20秒、30秒、40秒、60秒、120秒、180秒経過した後、水洗処理、乾燥処理、現像処理した後、ブラックライト下で観察した。

水洗処理；水温35℃，水圧2Kg/cm²

乾燥処理；熱風循環式乾燥器で70℃にて5分間乾燥

現像時間；5分 紫外線強度；1700μW/cm²

3) 水性乳化剤の濃度と乳化時間及び表面アラサの関係

302ステンレス板のロール面に280，100，60メッシュ サンドブラストを施した試験板に浸透液を塗布し、45度の角度で10分間ドレンした後、予備水洗した後、乳化処理、水洗処理、乾燥処理、現像処理した後、観察した。

浸透時間；10分 予備水洗；水温20℃，水圧2Kg/cm²

乳化処理；濃度 5%， 15%， 30%，

 乳化時間 60秒， 120秒， 300秒

4. 実験結果

1) 浸透液層に油性乳化剤の混入

混液組成		残光程度	
浸透液	乳化剤	F-5L	F-5L-SP
		F-5E	F-5E-SP
90%	10%	××	××
80%	20%	×	××
70%	30%	△	×
60%	40%	○	△
50%	50%	○	○
40%	60%	◎	○

2) 油性乳化剤の乳化時間

乳化時間	残 光 程 度	
	F-5L	F-5L-SP
	F-5E	F-5E-SP
10秒	××	××
20秒	××	××
30秒	×	×
40秒	△	△
60秒	○	○
120秒	○	◎
180秒	◎	◎

3) 水性乳化剤の濃度と乳化時間及び表面アラサの関係

F-6A, F-6E-W

濃度 乳化時間 表面アラサ	5%			15%			30%		
	60	120	300 (秒)	60	120	300 (秒)	60	120	300 (秒)
ロール面	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
280 mesh	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
100 "	×	△	○	△	○	○	△	○	◎
60 "				×	×	△	×	△	○

著しい残光——××, 相当残光有り——×, 若干残光有り——△

殆ど残光なし——○, 残光なし——◎

固体内超音波の可視化について

画像処理による可視化像の改善

宮城工業高等専門学校

○伊達 和博

日本クラウトクレマー・フェルスター㈱

宇田川 義夫

概 要

超音波の可視化像に対して画像処理を施し、超音波像のみの検出を行い、コントラスト増加処理を行うと同時に、探触子や試験片の輪郭線を抽出し、これを加えることによって可視化像の改善を行った。

その結果、可視化の感度が非常に上昇し、50MHzというような高い周波数の超音波や、端部エコーなどの微弱な超音波も明確に可視化出来るようになり、可視化装置の性能を非常に向上させることが出来た。ここでは、行った画像処理法と得られた可視化像を示す。

1. はじめに

固体内超音波の挙動を解析する上で、これを可視化して行う方法は極めて有効である。しかし、これまでの可視化法では、試験片内の残留応力が超音波の可視化像と同時に可視化されるため、それが詳細な超音波の挙動を検討する上での大きな障害になっていた。このような問題に対して、藤懸らは画像処理を行うことが有効であることを示している。¹⁾

本研究では、著者らが提案する超音波の可視化法「光弾性画像合成法」²⁾で得られる可視化像に対して、画像処理を加え、可視化像の改善を行った。すなわち、

1. 入力画像の積算による平均化処理。
2. 残留応力の可視化像の除去。
3. 試験片などの輪郭線の抽出。
4. コントラスト増加処理。

等を行なった。

その結果、非常に良好な可視化像を得ることが出来たと同時に、可視化の感度も飛躍的に上昇し、50MHzというような高い周波数の超音波や、端部エコー、小さい振動子から出る微弱な超音波なども可視化出来るようになった。ここでは、行った画像処理と得られた可視化像について述べる。

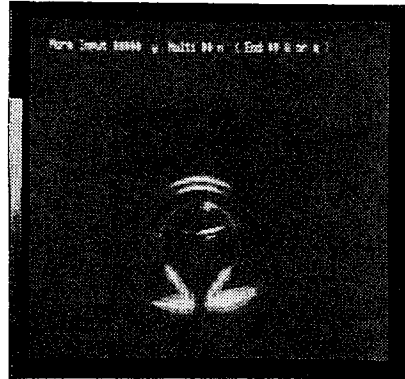
2. 画像処理

用いた超音波の可視化装置と画像処理装置はこれまでのものと同じである。²⁾

光弾性画像合成法では、偏光子の主軸方向の異なる2つの平面偏光画像を合成することによって、主応力差、すなわち音圧に比例する超音波の可視化像を得る。ここでは、それぞれの平面偏光画像を入力する際に平均化処理を行なうとともに、超音波を出さない残留応力だけの像も同じ条件で入力し、それぞれの平面偏光画像間で差をとってから、



(a) 従来の可視化像 (探触子 5 Z 6 N)
(超音波 + 残留応力)



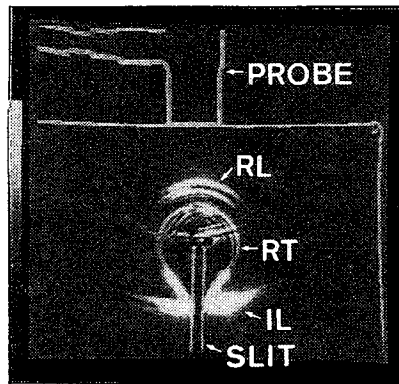
(b) 超音波像のみの抽出

合成画像を作成した。超音波画像から残留応力画像を引く場合には、両者の絶対値の差をとるようにした。これは、例えば圧縮応力の残留応力場に、縦波が入射した際、縦波の圧縮応力の部分は輝度が増加するものの、引張り応力側は逆に輝度が低下するためである。²⁾

図 1 は、5 MHz の垂直探触子 (5 Z 6 N) を用いて、縦波が面状欠陥に平行に入射した場合の欠陥先端付近での反射の様子を示したもので、(a) は画像処理を行わない従来の方法で得た反射波の可視化像であり、(b) は上記の画像処理を行なって得た反射波の可視化像である。これから、(a) では超音波の可視化像が試験片の残留応力と重なって、非常に見にくい画像となっていることがわかる。また、(b) では超音波のみが現れているものの、試験片の輪郭、探触子の位置などが分らないため、全体として、欠陥からの反射波の挙動を知るには、不十分であることが分る。

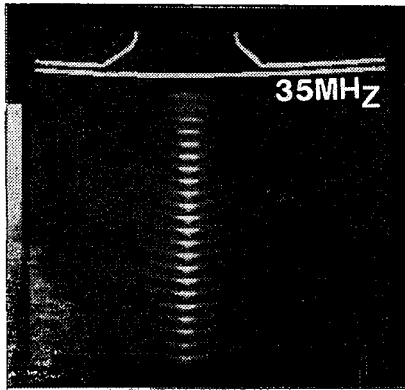
そこでここでは、(b) で得た画像に対して、画像上の輝度を 2 倍 3 倍するコントラスト増加処理を行なうとともに、別に輪郭線の抽出を行ない、それを加えた画像を作成した。これを、(c) に示す。欠陥からの反射である反射縦波 RL や反射横波 RT が明瞭に可視化され、それらと探触子 (PROBE) や欠陥 (SLIT) との関係も分りやすい。これからコントラストを増加させ輪郭線を加えることによって、非常に分りやすい良好な超音波の可視化像が得られる事が分る。

なお、ここでの輪郭線抽出処理は、以下のようにして行なった。

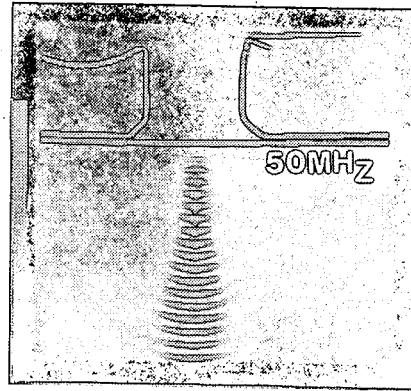


(c) 画像処理を加えた可視化像

図 1 画像処理による可視化像の改善例



(a) 35MHz、焦点距離50mm



(b) 50MHz、焦点距離25mm

図2ポリマーロープから出る縦波の可視化

1. 直交している偏光子と検光子を、 $2\sim 3^\circ$ ずらし、超音波を出さない状態で、画像を入力する。

2. 入力画像に平滑化処理を行ない、それと入力画像の比をとり、その比の画像を作る。

3. 比の画像を判別分析法によって、2値化し輪郭線とする。

このような2値化の処理によって得られる輪郭線の利点は、自動的に2値化できることと、探触子などでは外形線が得られることである。

3. 各種の可視化像

ここでは、このような画像処理によって得られた各種の可視化像の例を示す。

図2は、直径5mmの振動子寸法の点焦点型のポリマーロープから出る縦波を0.2 μ sec間隔で可視化したものを合成したものであり、(a)は35MHzで焦点距離50mm、(b)は50MHzで焦点距離25mmのものである。これから、ポリマーロープから出た縦波が焦点を結んでいく過程や小さい焦点を結んでいることが分り、一方、この可視化法ではこのような非常に高い周波数の超音波も可視化できることが分る。

図3は、振動子寸法6mm、周波数10MHzで、ショックウエアタイプの垂直探触子から出る縦波しと横波Tを示し、このような高い周波数でも縦波の発生に伴って、横波が発生することが分る。

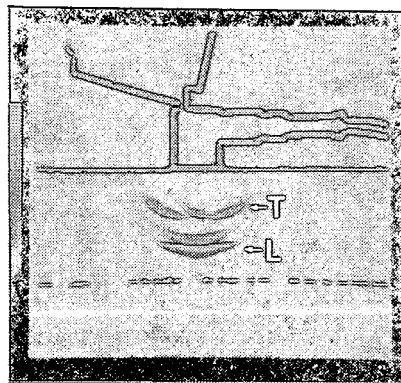
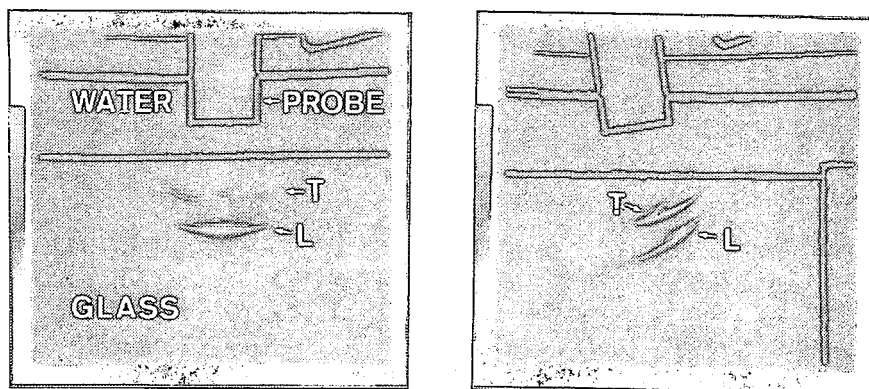


図3垂直探触子からの縦波と横波の発生



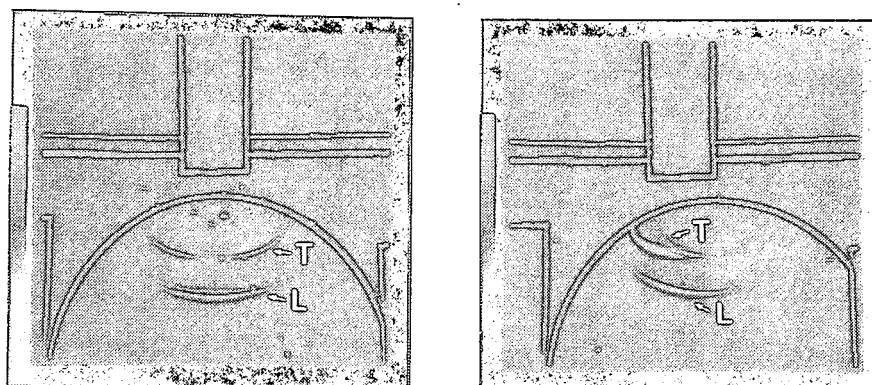
(a) 垂直入射

(b) 斜め入射

図4 水浸法による超音波の入射

図4は、水浸法を示したもので、振動子直径10mmで5MHzの水浸探触子を用いて水中からガラス中に超音波を入射させたものである。(a)は、垂直入射した場合であり、水浸法の場合でも縦波Lの発生にともなって、横波Tも発生していることが分る。(b)は、斜め入射の場合であり、屈折により縦波Lと横波Tが同時に発生していることが分る。

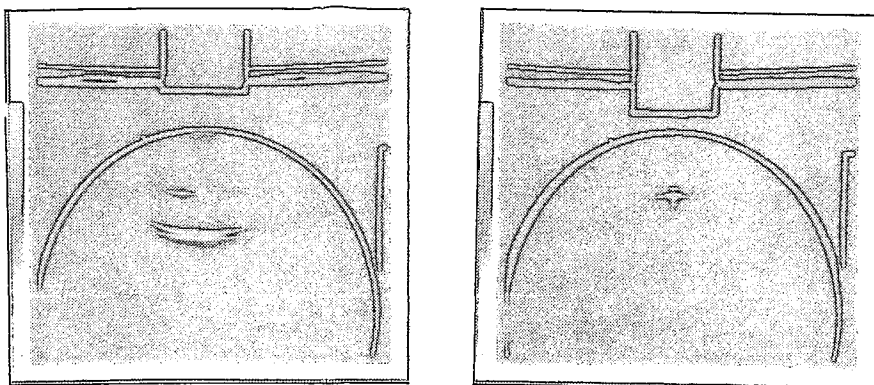
図5、図6は同様な水浸法で円柱試験片に縦波を入射させた場合のものであり、図5は図4と同じ非焦点型探触子を用いた場合のもの、図6は焦点型探触子を用いた場合のものである。図5(a)は、垂直入射の場合で、縦波Lのほかに、その両側に強く横波Tが発生していることが分る。(b)は、斜め入射のものであり、同様に縦波Lと横波Tが発生しているものの、縦波Lの方が屈折角が小さくなっていることが分る。通常の屈折の法則から考えると、縦波の方が屈折角は大きいはずであるから、このような屈折現象は理論的に予想されるものと全く異なった超音波の入射挙動であることが分る。



(a) 垂直入射

(b) 斜め入射

図5 水浸法での円柱試験片への入射（非焦点型水浸探触子）。



(a) 焦点距離100mm

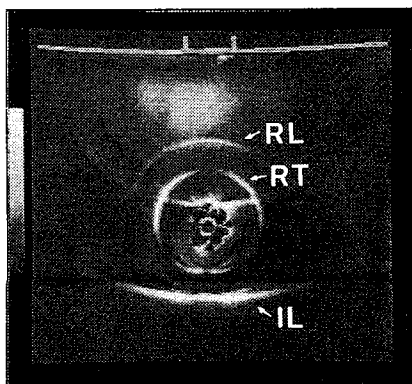
(b) 焦点距離30mm

図6 水浸法での円柱試験片への入射（焦点型水浸探触子）

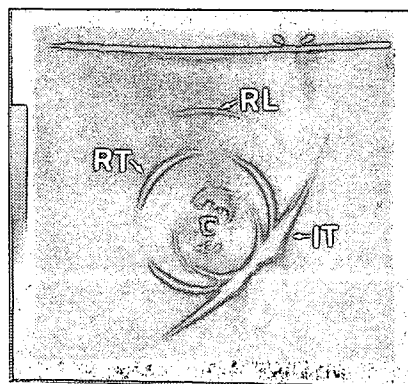
図6(a)は、焦点距離100mmの水浸探触子もの、(b)は30mmのものを用いて垂直入射させたものであり、焦点距離が短くなるに従って、横波の発生が少なく、縦波の幅が細くなっており、円柱型の試験片には、焦点型の探触子が特に有効であることが分る。

図7は、直径3mmの横穴における反射の様子を示したものである。(a)は10MHzで6mm直径の垂直探触子から発生した縦波ILの反射の様子を可視化したものであり、反射縦波RLと反射横波RTを明確に認めることができる。(b)は4Z8×9A45の斜角探触子から発生した横波ITの反射波で、縦波反射波RLと横波反射波RT、さらにその内側に横穴の表面を伝播する回転表面波から発生したハート型の横波が認められる。

図8は、同じ探触子を用いて、面状欠陥の上端に横波ITを入射させた場合の反射波を示したものであり、端部エコーの反射横波RT、欠陥面に沿って伝播する表面波Sなどが、明確に可視化されていることが分る。



(a) 10MHzの縦波



(b) 5MHzの横波

図7 直径3mmの横穴での反射

4. おわりに

これまでの可視化法では、試験片内の残留応力が超音波の可視化像と同時に可視化されるため、詳細な超音波の挙動を検討する上での大きな障害になっていた。本研究では、著者らが提案する超音波の可視化法「光弾性画像合成法」で得られる可視化像に対して、以下の様な各種の画像処理を加え、可視化像の改善を行った。すなわち、

1. 入力画像の積算による平均化処理。
2. 残留応力の可視化像の除去
3. 試験片などの輪郭線の抽出
4. コントラスト増加処理。

その結果、非常に良好な可視化像を得ることが出来たと同時に、可視化の感度も飛躍的に上昇し、これまで試みられなかった50MHzというようなポリマープローブから出る高い周波数の超音波や、端部エコー、小さい振動子から出る微弱な超音波なども明確に可視化することが出来るようになった。

また、この手法を適用して行なった可視化試験では、水浸法の円柱型試験片で、屈折角が横波より縦波の方が小さいという、実用上極めて興味ある結果が得られた。

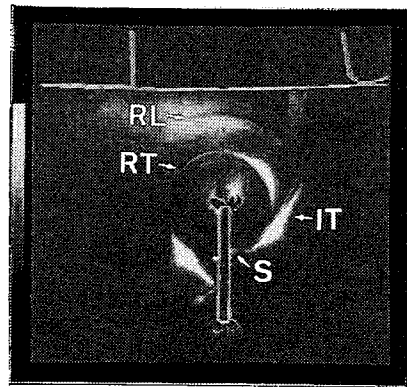


図8 面状欠陥からの横波の反射

—参考文献—

- 1) 藤懸、川島：第1回産業における画像センシング技術シンポジウム予稿集、NDI、1986, pp231
- 2) 伊達、田幡、島田：NDI誌、36,9A,1987, pp.672

固体内超音波の可視化解析システムの開発

Visualizing and Analyzing System for Ultrasonic Wave in Solid

宮城工業高等専門学校 伊達 和博
 日本クラウトクレーマー・フェルスター備 田幡 幸大
 東北大学工学部 島田 平八

1. はじめに

本研究では、著者らが考案した光弾性画像合成法を適用して、固体内超音波を可視化し、可視化像より各種の音圧分布が測定できるシステムを開発した。本システムでは、音圧の絶対値が求められるばかりでなく、縦波の圧縮引張りというような位相に関する情報も得ることができる。

また、本システムが基本的には微小応力測定システムであるため、AE波や衝撃波の伝播挙動の解析や、微小応力測定分野への応用も考えられる。ここでは、システムの概要と、これを用いて得られた結果について述べる。

2. システムの構成

図1は、本研究で開発した固体内超音波の可視化解析システムの構成と、光弾性画像合成法にもとづく音圧測定の流れを示す。

ホストコンピュータであるPC9801では、音圧解析のための主プログラムが走っており、データの取込のためのストロボスコープ、超音波探傷器、ITVカメラなどのコントロールを行うとともに、可視化像からの各種音圧解析ができるようになっている。音圧分布が得られるまでの時間は、1画面当たり平均して1-2分程度である。

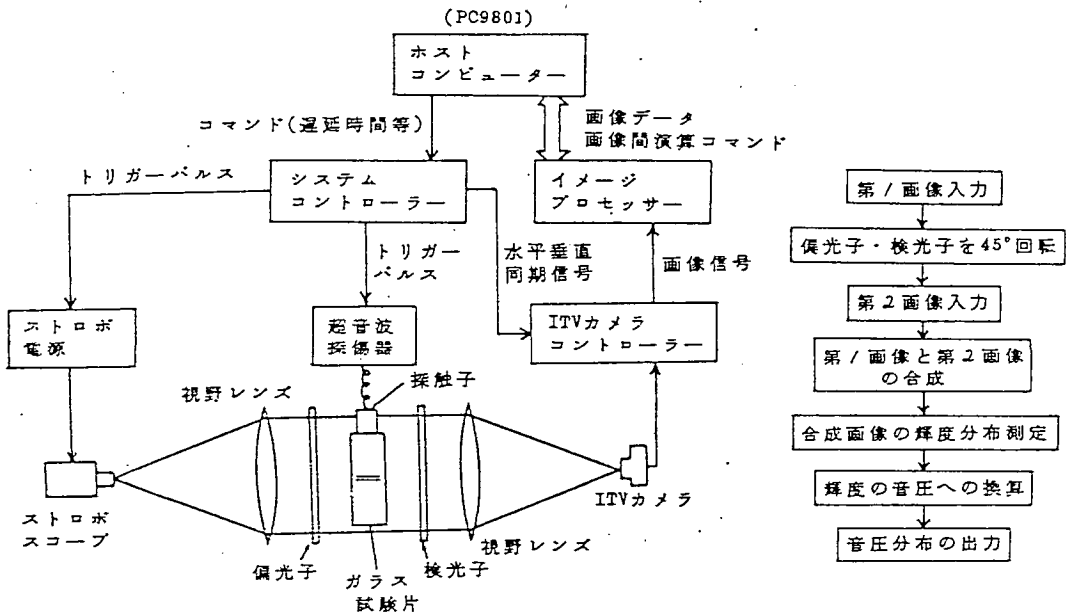


図1 可視化解析システムの構成と音圧測定の流れ

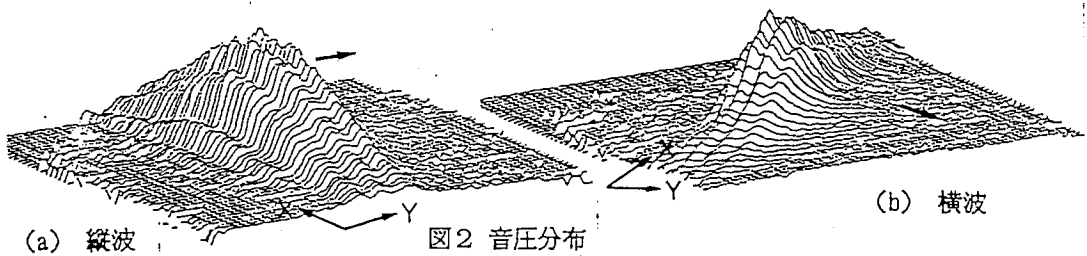


図2 音圧分布

3. 音圧分布の測定結果

図2は、(a)が2MHzで振動子寸法がφ20の垂直探触子、(b)が2MHzで屈折角45°振動子寸法が20*22mmの斜角探触子から放出された縦波と横波の音圧分布を三次元表示したものである。任意の点でのX方向Y方向の音圧分布や、音圧の山の峯に沿った変化を測定することができ、振動波形、波長、6dB down幅なども得ることができる。

図3は、横波の伝播に伴う音圧分布の変化を示したもので、A、B面が試験片の上面であり、B点付近に斜角探触子が置かれている。これから、探触子の距離振幅特性を定量的に評価することができ、音圧最大位置、6dB down位置、波形、周波数などの伝播距離に伴う変化を知ることができる。

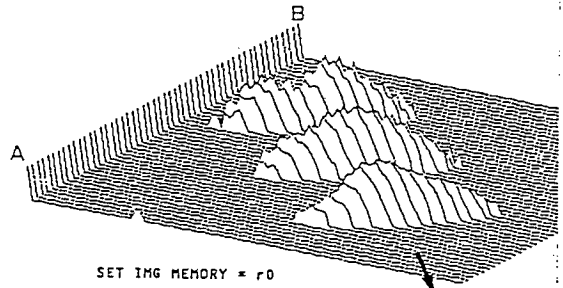


図3 横波の伝播に伴う音圧分布の変化

図4は、このような横波がφ3横穴に入射した際の、横波の反射指向性を調べたもので、横穴を中心として同心円状に広がった横波に、大きな指向性があることがわかる。

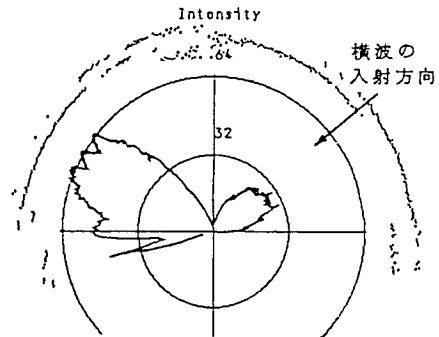


図4 横穴の反射指向性

図5は、垂直探触子から出た縦波の引張り圧縮について調べたものである。可視化像のみでは、音圧の絶対値しか知ることができないが、既知の応力を加え、その時の音圧変化を調べることにより、波動のどの部分が引張りであり圧縮であるかを定めることができる。すなわち、垂直探触子を上から手で押すなどして、圧縮応力を加えた場合には、引張り応力の部分は見かけの音圧が低下し、圧縮応力側は音圧が上昇する。図5の上側の音圧分布はこれを示したもので、圧縮応力を加えることにより、振動波形のピーク1、3、5の音圧が上昇し、2、4が低下している。これより、垂直探触子から出た縦波は、最初圧縮から始まり、引張り、圧縮・

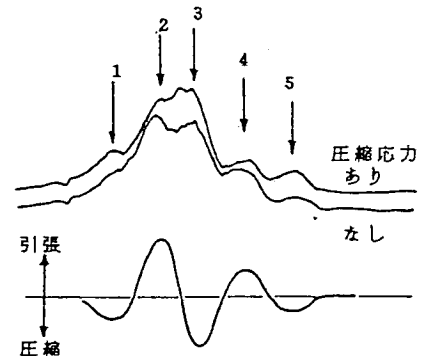


図5 縦波の引張り圧縮挙動

の順に変化していることがわかる。このような手法は、横波にも適用可能であり、これを使って反射による位相変化などの解析にも応用できることがわかる。

角鋼片の全断面探傷法の開発

中瀬 久生

Development of ultrasonic testing covering full section of square steel billet

Hisao NAKASE

Normal type ultrasonic testing is generally being used for inner quality assurance of square steel billets. This method has a flaw that corner and subsurface parts of square steel billets are not able to be tested. Recently, it became indispensable that corner and subsurface parts are tested as well as central part.

This paper reports the development of the diffusion type ultrasonic testing for corner parts which has a wide directive pattern, and surface wave ultrasonic testing for surface part. These two methods were experimented statically and dynamically, and possibility of corner and subsurface quality assurance using these two methods was certified.

By assortment of these methods and ordinary normal type method, ultrasonic testing covering full cross section of square steel billets has been established.

1. 緒 言

現在、当社において角鋼片の超音波探傷装置は、水膜式と局部水浸式が稼働している。これらはいずれも垂直探傷法（分割探傷含む）が適用されており、鋼片断面での探傷カバー率は図1に示すような部分約70%である（図中斜線部）。これはコーナ曲率部と表層部の探傷が垂直探傷法では物理的に困難であること、欠陥が中心部に凝集しやすく過去の検査実績では鋼片中心部約60%を探傷すれば鋼片内部品質が十分保証されていたからである。

しかし、連続鋳造の導入やユーザーニーズの変化により現状の探傷方法では必ずしも十分な保証とはいえない状況になりつつある。特に、線材においては製品での内部探傷が困難なため鋼片でのより確実な保証が求められるようになってきた。

そこで、内部品質保証度を向上させることと、内部品

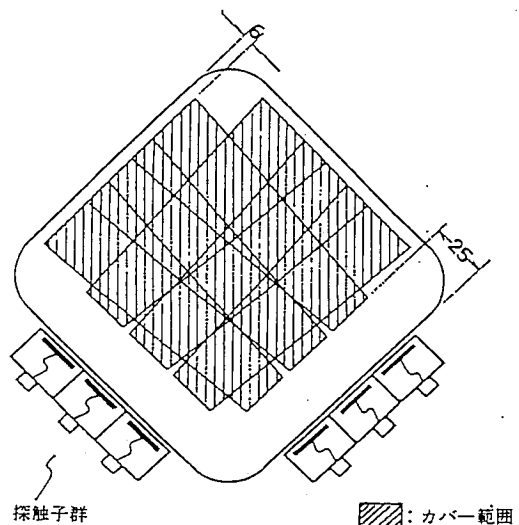


図1 現状の探傷カバー範囲

昭和63年3月14日原稿受付(昭和62年5月22日第2分科会で講演)
大同特殊鋼中央研究所(名古屋市大岡町2-30)
Daido Steel Co., Ltd. Central Research Laboratory

質情報を把握し、製造技術の改善に結びつけることを目的として探傷カバー率を100%にできる探傷法を開発した。

2. コーナ曲率部探傷方法の開発

角鋼片では、コーナ部に曲率をもっており、通常の垂直探傷法では図1でも判るように、コーナ部を探傷する位置に探触子を配置することが物理的に困難である。そこで、このような曲率部の不感帯を探傷可能とする目的で各種方法を検討し、予備実験を重ねた。その結果、振動子に集束法と逆方向に曲率をつけて超音波を拡散させ、かつ入射方向も垂直でなくコーナ方向へ向くように振動子に角度をつけて用いる方法が最も有効であろうという結論に達した。これを集束法に対する逆の使い方であるので、拡散法、拡散型探触子と呼ぶことにした。

以下に拡散型探触子の試作および確性試験の結果について記述する。

2.1.1 拡散型探触子の試作

図2に示すように角鋼片のコーナ部に最も近い平面部に拡散型探触子を置いて反対側コーナ部の45°以上を探傷するための拡散角度 θ_1 は次式により計算できる。

$$\theta_1 \geq \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{D}{2} + \frac{r}{2}}{L - r \left(1 - \frac{1}{2}\right)} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

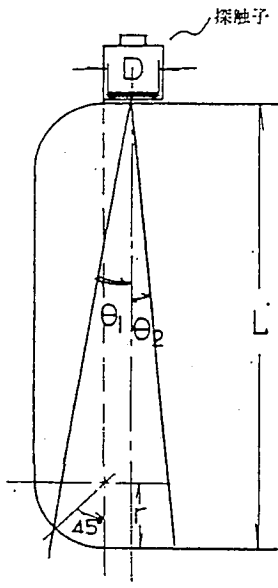


図2 コーナ一部探傷のための拡散角度の考え方

ここで、 L は角鋼片の一辺の長さ(コーナ部含む)、 r はコーナ部曲率半径、 D は探触子直径である。 $D=20$ mm、 $L=150$ mm、 $r=25$ mmとすると、 $\theta_1=11^\circ$ となる。そこで、重複部の余裕をみて、 $\theta_1=14^\circ$ とすることにした。 θ_2 はコーナ部探傷とは関係がないが、後述する(図21)ように垂直探触子と組合わせて100%の探傷カバー率を実現するためある程度以上の値が必要であり、ここでは $\theta_2=7^\circ$ とした。そこで、 $\theta_1=14^\circ$ 、 $\theta_2=7^\circ$ となるような凸面状探触子を試作することにした。曲率と幅の異なる探触子を数種類試作して有効ビーム幅を測定し、所望の拡散角度を持つ探触子を選定した。その結果、曲率半径200mm、幅20mm、中心軸の傾き 5.9° の探触子を選定した。図3にこの探触子とその音場分布を示す。図3に示すようにこの探触子の音場分布は遠距離においても単峰とはならないが谷部の低下が3dB以内であるため検出能に大きな影響はないと考える。

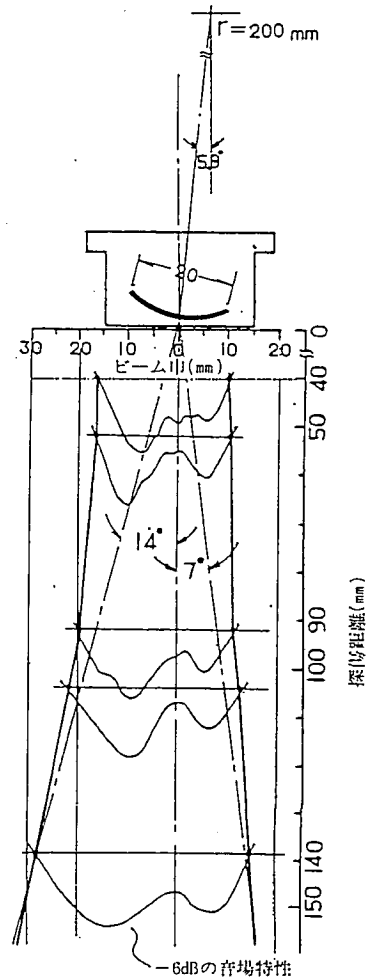


図3 選定した拡散型探触子の有効ビーム巾と拡散角度

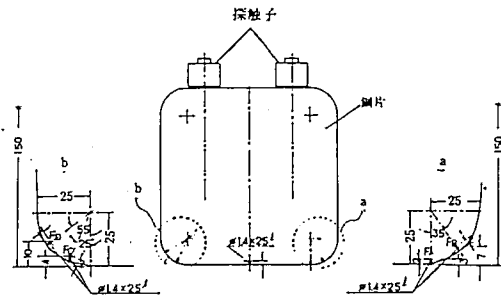


図4 コーナー部人工欠陥試験片

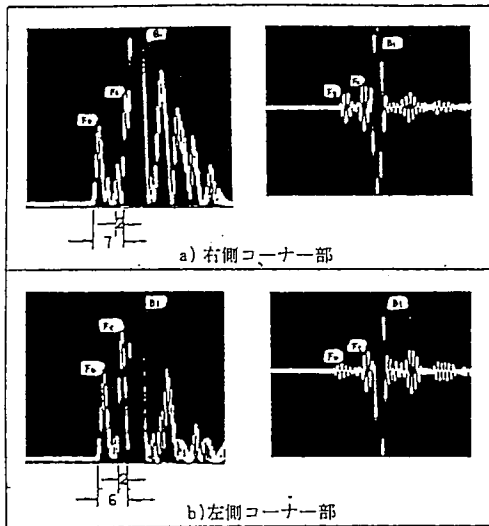


図5 拡散型探触子によるコーナー部欠陥の探傷波形

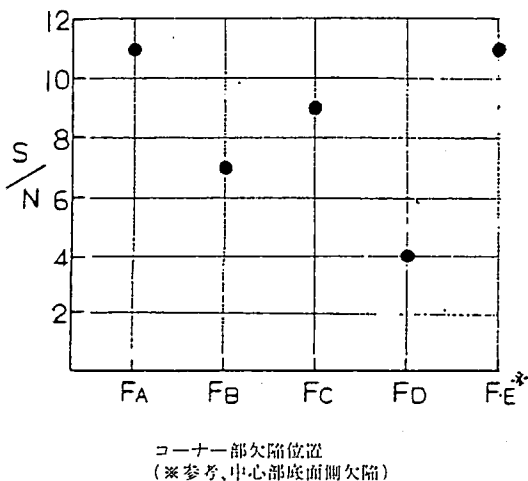


図6 コーナー部欠陥の検出能

2.1.2 人工欠陥サンプルによる確性試験

前項で選定した拡散型探触子を用い、図4に示すコーナー部の人工欠陥により探傷性能を確認した。

試験では、加工された人工欠陥と反対側の面のコーナ近くの平面部に拡散型探触子を水膜を介して配置して探傷した。試験結果の波形(Aスコープ波形)を図5に示す。また、この波形を読み取りまとめた結果が、図6であり十分な検出能力があることが確認できた。

2.2 動的試験

拡散角度 $14^{\circ}-7^{\circ}$ の拡散型探触子がコーナー部探傷に有効であるという結果を得たので、水膜方式による動的試験装置(材料固定-探傷ヘッド走行方式)を試作し動的にその性能確認を行うことにした。

この動的試験に供した試験片を図7に示す。200mm長に切り出した鋼片に、人工欠陥を加工しその両側に1400mmの鋼片を溶接し3mの長さにしたものである。探傷速度は10m/分~60m/分で10m/分ステップで行った。

探傷結果の走査グラフの1例を図8に示す。図8は比較的高速で、現在当社で最も多く適用されている検査速度である40m/分の結果である。

40m/分以外の場合にもほぼ同等の結果が得られた。なお、このときの探傷条件は次の通りである。

探傷周波数; 5 MHz

探傷感度; STB-G V15-2 40%

繰返し周波数; 1000Hz

水膜厚さ; 0.5mm

以上の結果より、コーナー部欠陥検出は、拡散型探触子を図9のように配置すれば、実用的にも可能であるという結論を得た。

3. 表層部探傷方法の開発

垂直探触子による表層部分解能は、探傷周波数によって異なるが、一辺が150mm前後の角鋼片において一般的に用いられている探傷周波数3~5 MHzにおいては2~3 mmであり、この2~3 mmが表層部不感帯とされている。

しかし、この不感帯部にも欠陥が存在する可能性があり、探傷の必要性がある。前章において、拡散型探触子で角鋼片の全周の表層下2 mmより深い部分の探傷が可能という結果が出たので、ここでは鋼片のコーナー部を含む全周の2 mmより浅い部分(表層部)が探傷可能な探傷方法および探触子の開発について記述する。

3.1 試験方法

3.1.1 探傷方法の選定

表層部の探傷方法として、表面波法(レーレー波)とクリーピングウェーブ¹⁾(徐行波)の2種類の方法を考えた。周知のごとく、前者はスネルの法則における横波の

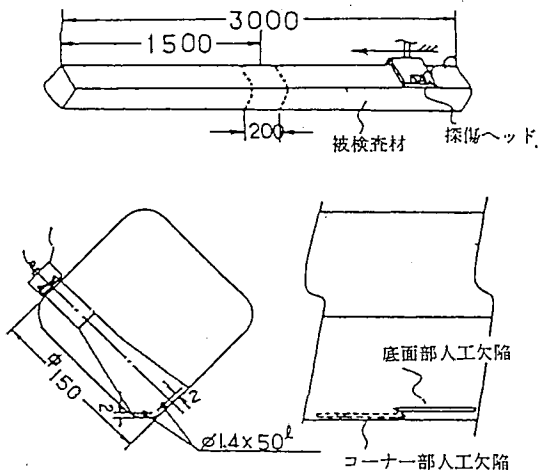


図7 動的試験用人工欠陥試験片

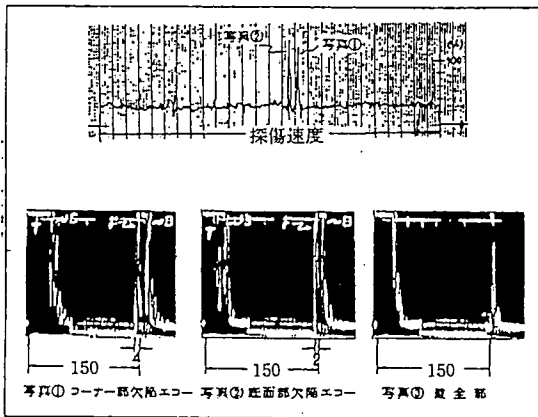


図8 拡散型探触子による動的試験結果

臨界角を利用し、後者は超音波音場のサイドロープの縦波成分を利用する方法で、いずれの波も表層部を伝搬する超音波である。

この2種類とも試験的な報告例はあるもの²⁾の自動探傷としての実用化の実績はないので、実用化することを念頭に置いて両者の優劣を比較した。

なお、欠陥を検出するだけならばこれらの他に斜角法³⁾の適用も考えられるが、欠陥位置が表層部か内部かを弁別する能力が劣ることから、本試験から除外することにした。

表面波のエネルギーは深さ2波長以内に集中し、さらに振幅が最大値の1/2までの範囲を利用するとすれば、0.7波長以内で使用することが適切と思われる⁴⁾。表層部2mmを探傷すべき深さとする、これに適する表面波の周

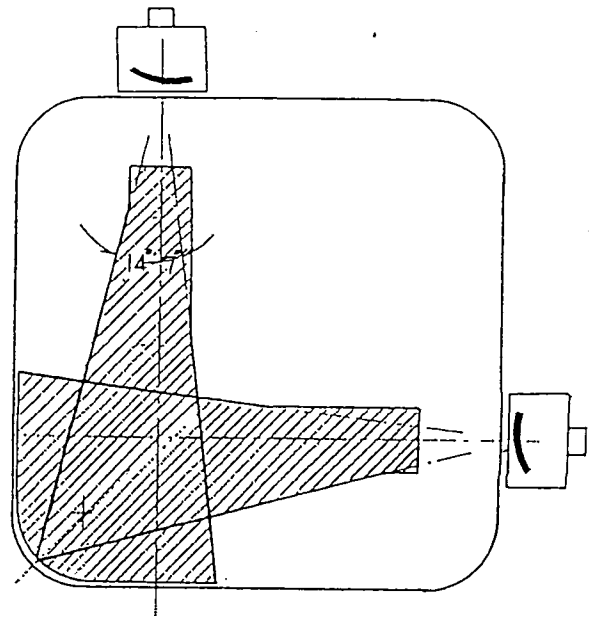


図9 拡散型探触子によるコーナー部探傷方法

波数 f は(2)式で計算できる。

$$f = \frac{C_R}{\lambda} = \frac{2980}{\frac{2}{0.7} \times 10^{-3}} = 1.04 \text{ MHz} \approx 1 \text{ MHz} \quad \dots(2)$$

ここで、 C_R は表面波の音速、 λ は波長である。表面波の発生方法としては楔方式⁵⁾を用いることにした。

また、クリーピングウェーブについては理論的な報告例が少ないが、表面を伝わる縦波ということで縦波の音速5900m/sを考慮し、表面波と同じ波長で試験するために2MHzの周波数を用いることにした。

この二種類の探触子を試作し、検出能を図10に示す試験片を用いて比較した。人工欠陥の深さは1, 2, 2.5mmで、超音波の入射点を移動させることにより、超音波伝搬距離を200mmまで変化させて試験した。

結果をまとめて図11に示す。図11の縦軸は欠陥エコー高さを、横軸は伝搬距離を示し、表面波を実線、クリーピングウェーブを破線で示した。

探傷基準は、深さ1mmの人工欠陥を表面波で伝搬距離100mmの位置で探傷した時のエコー高さを100%に設定した。表面波については、1mm深さの欠陥が最も高いエコーを示し、深くなるほど低下することが判る。しかし、深さ2mmまでは200mmの伝搬距離内において $S/N \geq 5$ で検出できることが確認できた。

一方、クリーピングウェーブについては、欠陥深さ1

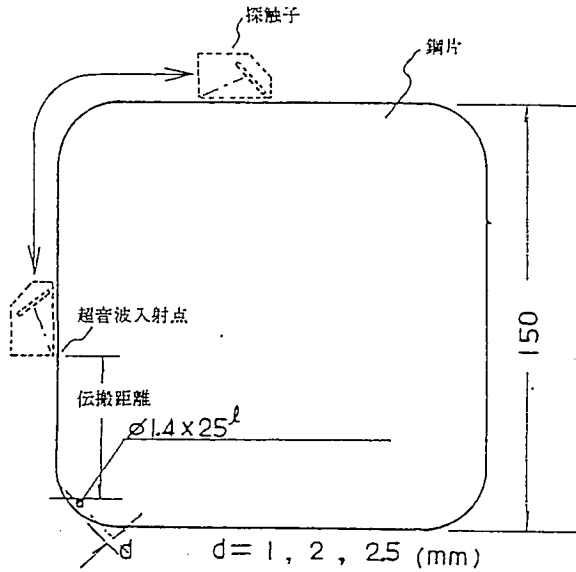


図10 表層部探傷用人工欠陥試験片

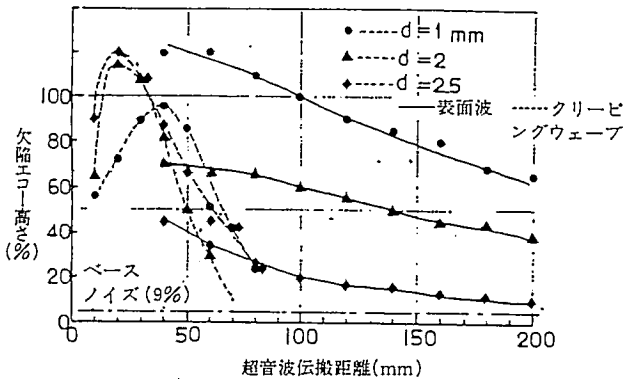


図11 表面波とクリーピングウェーブの伝搬距離と欠陥エコー高さの関係

mmに比べ2 mm, 2.5mmの方が高いエコー高さを示すが伝搬距離は、表面波に比べ80mm ($S/N \geq 5$)と短いことがわかった。

この結果から、実用性を考えると探傷距離の点で表面波の方が適していると判断した。

すなわち、表面波の場合探傷距離200mmが可能となることから、対象鋼片サイズを150mmの正方形とすると全周約600mmとなり、各面に1個の探触子、合計4個の探触子で角鋼片全周の表層部をカバーできる。これに対しクリーピングウェーブの場合は、探傷距離は80mmであるので8個の探触子が必要となる。

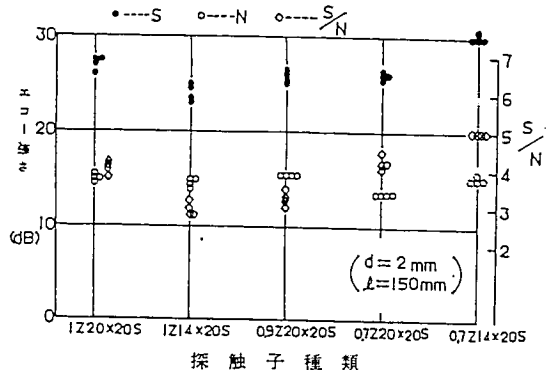


図12 各種表面波探触子の欠陥検出能

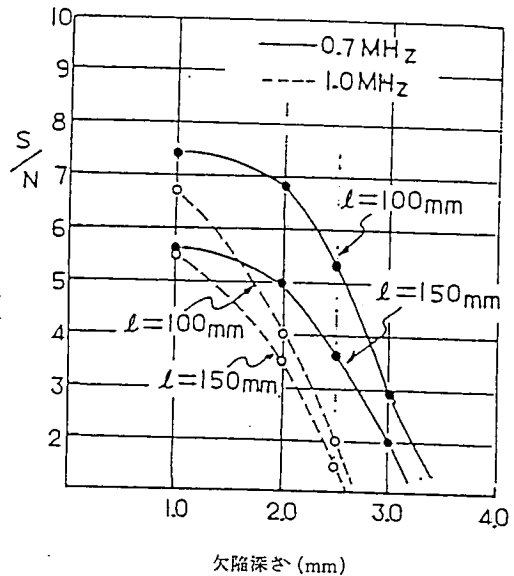


図13 欠陥深さと検出能

以上の結果より、探触子個数の少なくてすむ表面波を採用することにした。

3.1.2 最適表面波探触子の選定

探傷方法として、表面波法を採用することにした。そこで次に表層下2 mmまでを探傷するのに適した探触子を決定するための試験を実施した。周波数および寸法の異なる各種表面波探触子を製作し、人工欠陥により検出能を調査した。結果を図12に示す。

図12は同寸法のサンプル4個をそれぞれ探傷した結果で、各探触子(横軸)のノイズ(○)はほぼ同レベルであるが、欠陥信号(●印)に差があり、 S/N 比(◇印)が最も良いのは、0.7Z14x20S($S/N=5$)探触子であった。

表1 S/N=3となる欠陥深さ

周波数(MHz)	探傷距離(mm)	S/N=3となる欠陥深さ
0.7	100	0.70入 (3.0mm)
	150	0.63入 (2.7mm)
1.0	100	0.78入 (2.3mm)
	150	0.70入 (2.1mm)

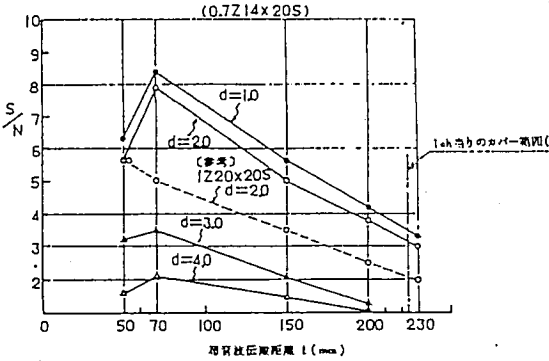


図14 伝搬距離と検出能

3.1.3 欠陥深さと検出能

深さ2mmの人工欠陥のみを対象として0.7Z14×20Sの探触子を選んだので、欠陥深さを変えた時の検出能を調査した。

結果を図13に示す。図13は縦軸にS/N、横軸に表面からの欠陥深さをとって、伝搬距離100mmと150mmについて整理したものである。参考までにIZ20×20Sの結果も示してある。図13の結果によれば、2mmより浅い欠陥はさらにS/N良く検出できることが判る。

一般に表面波でS/N良く探傷できる欠陥深さについては、1波長分とか半波長分とか言われているが、参考までに図13よりS/N=3となる欠陥深さと波長の関係をまとめると表1となる。表1によればS/N=3となる欠陥深さは0.7波長前後であり当初の仮定の妥当性を示している。

3.1.4 伝搬距離と検出能

図14に欠陥深さ別の伝搬距離と検出能の関係を求めた実験の結果を示す。図14から明らかなごとく、欠陥深さが深くなるにつれて検出能が低下している。しかし、筆者らが目的としている表層部2mmにおいては、230mmまでの伝搬距離内でS/N≥3が得られている。また、深さ3mmの欠陥では50~100mmの近距離においてのみS/N≥3で検出されている。このことを利用すれば、オンライン探傷の場合、判定レベルを適切に選べば深さ2mmを

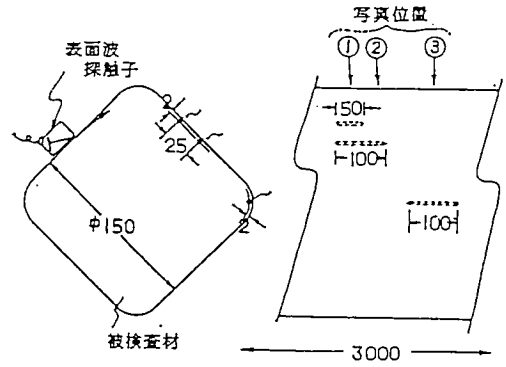


図15 動的試験用人工欠陥試験片

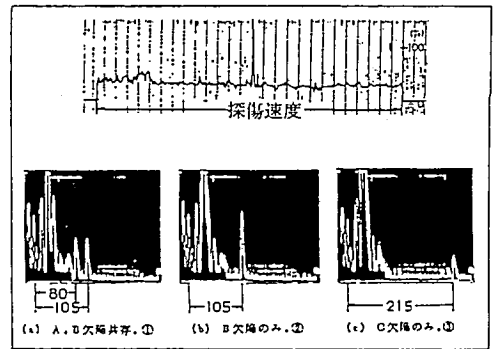


図16 動的試験結果

越える欠陥はほとんど検出しないようにすることが可能になるので、表面波で検出された欠陥は深さ2mm以下の表層部にあると判断して研削などで除去することができる。

3.2 動的試験

試験は、被検査材の曲り、うねりおよび振れなどを考慮して、拡散探傷法と同様に水膜法で行うことにした。また、供試材もコーナ部探傷の時と同様、図15に示すごとく、表皮下2mm位置に人工欠陥を加工し、その両側に1400mmの鋼片を溶接して3m長さの試験片とした。

探傷速度は10m/分~60m/分で10m/分ステップで試験した。1例として探傷速度40m/分の結果を図16に示す。他の探傷速度の場合もほぼ同等の結果が得られた。図16の結果は実用的にも十分な結果と判断した。

4. オンライン自動探傷試験

前章までは、各種探触子の開発に重点をおき、オフライン試験が主体であったのに対し、この章では実用性を確認するため、現場における電気ノイズや、搬送ラインの振動、および水質等の影響をも含んだ状態での検出能

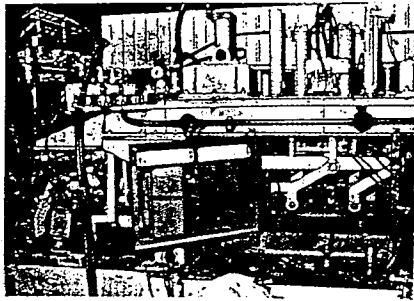
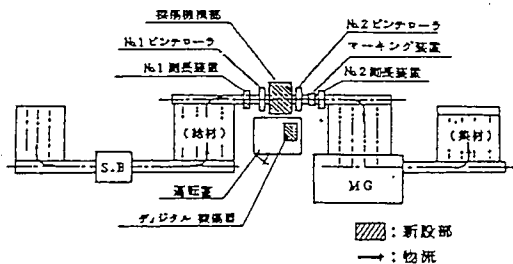


図17 オンライン探傷試験設備の概要

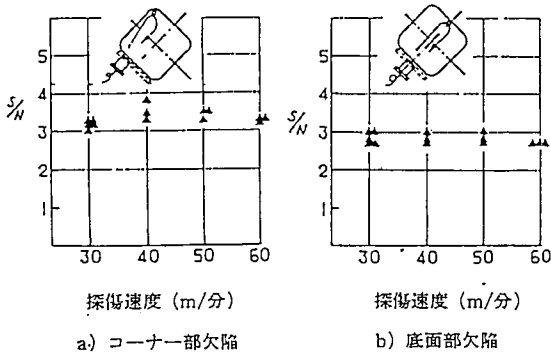


図18 欠陥位置と探傷速度別の欠陥検出能

を調査した結果について記述する。

試験は、図17に示すごとく、既設ラインに試験設備を組込んで、オンライン探傷を実施した。

ライン諸元は、被検査材長さ最大8m、搬送速度0～60m/分可変、そして搬送方式はVローラー方式である。また、後工程に磁粉探傷機が設置されているので、表面欠陥と表層部欠陥の弁別確認が可能である。

4.1 拡散探傷の試験結果

拡散型探触子による探傷法は、現在当社における自動

探傷装置での垂直探傷方法と原理的に同じである。しかし、探傷範囲を表層部2mmまで広げたこと、およびコーナ部の探傷を可能にさせることの点で異なるため、オフライン試験により開発した探触子を用いてその実用性を確認する試験を実施した。

試験は前述のオフライン動的試験の時と同じ方法で加工した長さ6mの人工欠陥付き試験片で実施した。結果を図18に示す。

図18(a)は、探触子をコーナ近傍に配置して、コーナ部45°、表皮下2mmの人工欠陥を探傷した結果を示したものである。図18(b)は、平面部表層下2mm位置の人工欠陥の探傷結果を示したものである。

いずれも探傷チャートから信号とノイズを読みとり、整理したものであるが検出能 $S/N \geq 2.7$ 以上が確保でき実用性能として満足できる値と判断した。

4.2 表面波探傷の試験結果

表面波を用いた表層部探傷の実用化実績はほとんどないため、オンラインでの実用化試験は重要である。

4.2.1 繰返し周波数と検出能

繰返し周波数が高いほどラインスピードが速くでき、また短い疵の検出能が向上する。しかし、高すぎた場合超音波同志がぶつかり合う干渉現象が生じ、結果としてノイズが増えて、検出したい欠陥が検出できないという問題が生じる。したがって、適正な繰返し周波数を選ぶことが実用上重要なポイントの1つとなる。

現在、当社における自動探傷装置では500～1000Hzの繰返し周波数を使用しているが、いずれも垂直探傷だけの実績であって超音波の性質の異なる表面波での実績はない。

したがって、まず表面波での適正な繰返し周波数を把握するための動的試験を実施した。

試験結果を図19に示す。図19から明らかなごとく繰返し周波数が高くなるにつれて検出能(S/N)は低下傾向を示し、1.8kHzを越えると著しく低下することがわかる。これは先にも述べたように、前に共振された表面波が残っていてノイズとなるためと考えられる。被検査材が人工欠陥であることをふまえ、 $S/N \geq 3$ を検出限界とすれば、実用化可能な限界は ≤ 1.8 kHzであるといえる。なお、このときの探傷速度は40m/分で実施した。

4.2.2 探傷速度と検出能

垂直探傷など実用されている探傷において、探傷速度を遅くすればするほど欠陥検出能が向上することは周知のとおりである。しかし、実用化時の検査能率を考慮するとある程度以上の探傷速度が必要である。前述のごとく表面波探傷の実用化実績がないため、探傷速度についてもオンラインでの確認が必要と考え、試験を実施した。試験結果を図20に示す。

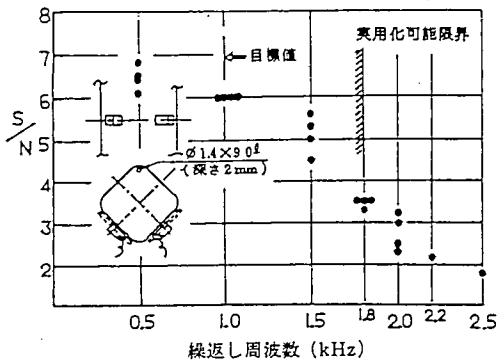


図19 繰返し周波数と欠陥検出能

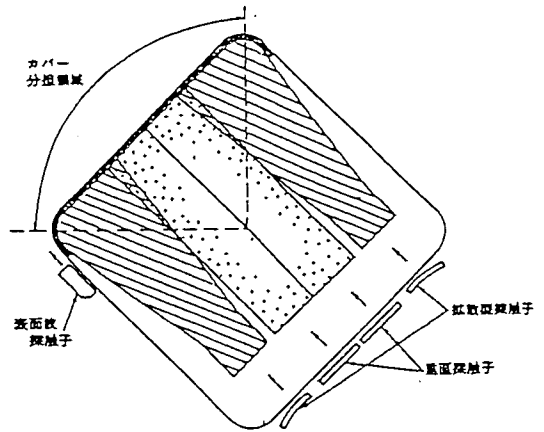
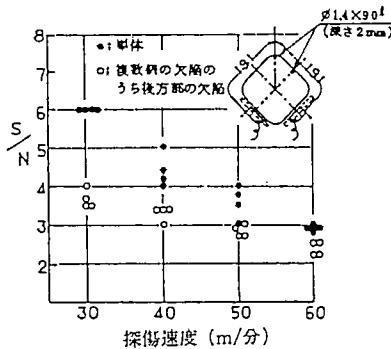
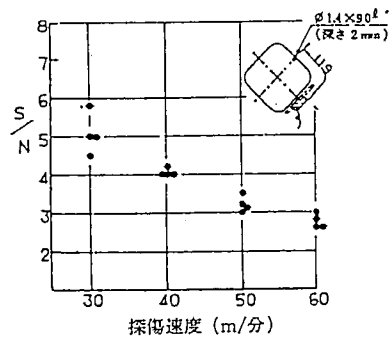


図21 全断面カバー方法 (1面分のみ図示)



(a) コーナ一部欠陥



(b) 平面部欠陥

図20 探傷速度と欠陥検出能

図20の縦軸は検出能 (S/N) で、横軸は探傷速度である。図20(a)はコーナ部の表層部 2mm位置の欠陥を探傷した結果を示したもので、●印はコーナ部に単独で欠陥が存在する場合、○印は欠陥が複数である場合で面部にある同じ深さで同じ寸法の欠陥を探傷した後の超音波エネルギーでコーナ部の欠陥を再度探傷した結果を示したものである。

図20から明らかなごとく、探傷速度が速くなるにつれて、検出能の低下することがわかる。しかし、探傷速度

40mm/分までは $S/N \geq 3$ が確保できている。また同一位置に欠陥が2個存在しても探傷速度40mm/分で検出できることも判明した。

また(b)は、平面部の表層部人工欠陥の探傷結果を示したものであるが、(a)と同傾向を示している。

以上の結果から表面波においても、現在使用されている探傷速度40m/分を実現することは十分可能であることが確認できた。

5. 結 言

角鋼片の全断面超音波探傷法を実現するため、拡散探傷法と表面波法とについて、基礎研究と現場環境下でのオンラインテストを実施した結果、実用性が十分であることが確認できた。

本稿では、実用化実績のない拡散探傷法、表面波法についての試験結果を示したが、図21に示すごとく、この2つの方法と従来の垂直探傷法を組み合わせることにより、角鋼片の探傷カバー率を100%にすることができる。

以上の結果に基づいて、今後は工程材でのオンライン探傷試験を実施し、自然欠陥での検出能を確認して、実用機の導入へと進める予定である。

参 考 文 献

- 1) D. P. Hurst, J. A. G. Temple: Calculation of the velocity of creeping waves and their application to non-destructive testing, Int. J. Pres. Ves. & Piping, 10, (1982)
- 2) 白岩, 山口, 松本, 岡本, 永井, 宮田: 角ビレット表面疵の超音波自動探傷装置の開発, 鉄と鋼, 67(12) S950 (1981)
- 3) 加藤, 宮田, 木戸, 西峰, 松本: 角ビレット全断面超音波探傷, 鉄と鋼, 71(12) S1088 (1985)
- 4) 日本学術振興会編: 超音波探傷法 (日刊工業新聞社) P. 200 ~201