

## 論 文

## 角鋼片表面疵の自動超音波探傷

山口 久雄\*・松原 紀之\*・藤沢 和夫\*・松本 重明\*

## Automatic Ultrasonic Inspection for Surface Flaws of Square Billets

Hisao YAMAGUCHI, Noriyuki MATSUBARA, Kazuo FUJISAWA  
and Shigeaki MATSUMOTO

## Synopsis:

The new automatic ultrasonic inspection system using the surface wave technique has been developed for the detection of surface and sub-surface flaws of square billets. The high speed and reliable inspection is performed with this system. This paper describes the basic and on-line experimental results of the technique and the outline of the system. The system has been installed at Kokura Steel Works of Sumitomo Metal Industries Ltd.

The following results are obtained from the experiments.

- (1) More than 95 percent natural surface defects deeper than 0.5 mm can be detected.
- (2) It is observed experimentally that the sub-surface flaw of  $1.5\lambda$  ( $\lambda$ : wave length) in depth from the surface can be detected by the surface wave technique.

## 1. 緒 言

近年、高級線材、棒鋼等の圧延製品に対するユーザの品質要求水準が非常に高くなつており、これに対処すべく製鋼、圧延にいたる各工程で品質向上の努力がなされている。このような圧延製品の品質要求水準の高度化に伴い、鋼片も高い品質水準が要求される。つまり鋼片内部に存在する欠陥のみならず、表面及び表面直下の浅い部分に存在する欠陥についても、厳しい検査が要求されているのが実情である。特に表面直下欠陥の検査要求は連続鋳造法が広く採用されるようになったことから増加している。

著者らは、鋼片の外表面を含む全体積の品質保証法につき超音波を用いた方法を検討し、垂直探傷及び表面波探傷を組み合わせた方法を実用化した。本報告では、表面波探傷法を適用した鋼片検査の基礎検討結果及びその自動探傷設備の概要について述べる。またその有効性について若干の考察を行う。

## 2. 従来の鋼片の超音波探傷方法及び最近の動向

## 2.1 従来の方法とその問題点

従来から行われている角鋼片の超音波探傷法を Fig. 1 に示す。鞍形のならい装置（探触子追従機構）を用い、

隣接する面に配置した垂直探触子から角鋼片内部に垂直に超音波（たて波）を入射して欠陥を検出していた。この方法では、角鋼片の中央部に存在する欠陥は探傷できるが、角鋼片の表面及び表面直下に存在する欠陥は、送信パルスの時間的広がり（不感帯）のために探傷できなかった。

## 2.2 最近の動向

最近は前述のように製造プロセスの連続化、合理化のために連続鋳造で製造される角鋼片が増加したこと、および角鋼片の全断面品質保証の要求が増えたことから Fig. 2 に示すように、パルス幅の狭い高分解能形垂直探触子または二分型探触子を複数個並べて探傷する方式が採用されている。しかし、この方法でも表層部数 mm の範囲は未探傷域となること及び角部の探傷ができないという問題点があつた。

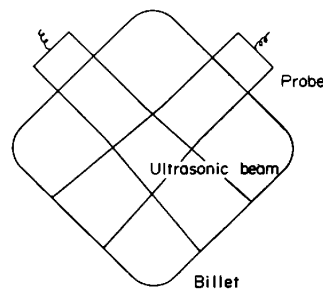


Fig. 1. Usual ultrasonic testing method for billet.

昭和 56 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 16 日受付 (Received Nov. 16, 1983)

\* 住友金属工業(株)制御技術センター (Instrumentation and Control Technology Center, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

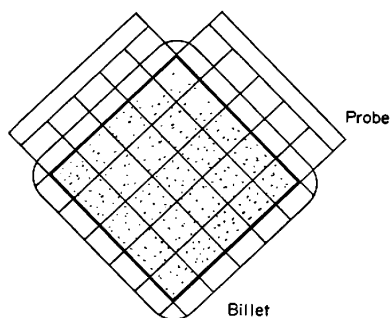


Fig. 2. Recent ultrasonic testing method for billet.

### 3. 実用化した角鋼片の表面波探傷方法

#### 3.1 表面波の発生方法

表面波は、一般に音速の遅い媒質中よりたて波超音波を斜めに材料表面に入射し、表面上の同位相点の間隔を表面波波長と等しくすることによつて発生できる。つまり入射角度  $i$  を次式のように選ぶことによつて発生できる。

$$\sin i = \lambda_L / \lambda_R = C_L / C_R \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\lambda_L, C_L$  は入射媒質中のたて波の波長及び音速を示し、 $\lambda_R, C_R$  は材料の表面波の波長及び音速を示している。

実際の探傷では媒質として、水あるいはアクリル樹脂が使用される。アクリル樹脂を使用する方式は高速の探傷では接触が不安定となる等の欠点から余り実用化されていない。水を使用する方式としては水浸法もしくはタイヤ探触子による方法が使用されている。しかし水浸法では表面波エネルギーが水に吸収されるため遠距離の探

傷はできない。

そこで我々は、Fig. 3 に示すタイヤ探触子を使用する方法について検討した。

#### 3.2 基礎実験

##### 3.2.1 表面波の伝播減衰

今まで半製品及び製品の検査に表面波が実用化された例はそれほど多くない<sup>1)2)</sup>。特にビレット等の粗面に適用した例は少ない。そこでまず、コーナの影響を含む表面波の伝播減衰について調査した。周波数としては、予備実験の結果より 2.25 MHz は減衰が大きく使用できないことがわかつたので 1 MHz を使用した。

Fig. 4 は  $\phi 115$  mm の角鋼片 4 面に加工した放電加工スリット疵 ( $0.5 \text{ mm}^d \times 100 \text{ mm}^l$ ) に対し、4 の面にタイヤ探触子を設置し、時計方向に表面波を伝播させて探傷した時の A スコープ像と各スリット疵及びコーナのエコー高さをプロットしたグラフを示している。表面波はコーナ部を回り込み伝播して各人工欠陥を非常に S-

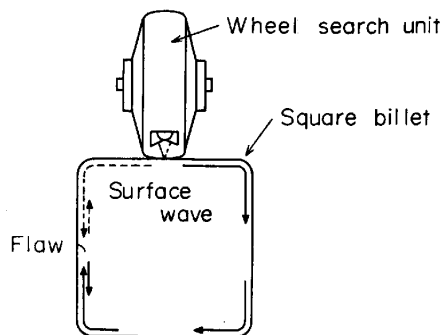
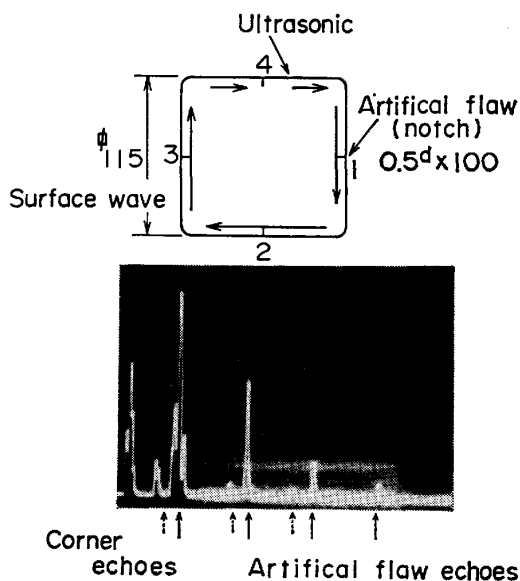


Fig. 3. Surface wave method using a wheel search unit.



Frequency: 1 MHz

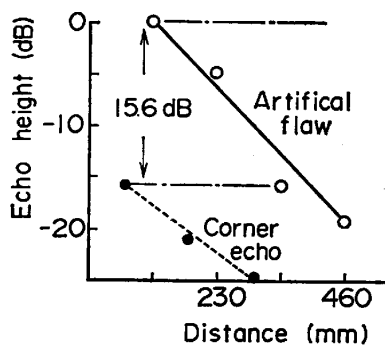


Fig. 4. Artificial flaw echoes and corner echoes.

N 比よく検出していることがわかる。特に外表面を一周してタイヤ探触子踏面にある人工欠陥も検出可能であることがわかる。しかし、コーナエコーもわずかではあるが出現し、入射点から遠距離ほど疵エコーとコーナエコーとの差が小さくなるので、一探触子あたりの探傷範囲は、4の面にタイヤ探触子を置いた場合1, 2の2面としている。この範囲での疵エコーとコーナエコーとの差は約 16 dB 程度あり探傷上問題はない。

次に角鋼片の各材質別における表面波の伝播状況を先の実験と同一寸法の人工欠陥を使用して調査した。鋼片はすべてショットブラスト仕上げ面とし、ホットスカーフ面のスラブとの比較も行った。結果を Fig. 5 に示す。なお図中①は単独人工欠陥の場合、②は一面に2条の人工欠陥を加工し、入射点から遠い方の探傷結果であり、隣接する人工欠陥の影響(減衰)を示している。この結果よりショットブラスト面の鋼片の減衰率は、ホットスカーフのスラブのそれより大きくなることがあり、また材質により異なることがわかった。そこで後述するように材質別に減衰の距離補償を行うようにした。

### 3.2.2 探触子の追従性

オンライン探傷に適用するには、タイヤ探触子を材料に追従させる精度と欠陥検出能の関係を調査しておく必要がある。そこでオンラインでのタイヤ探触子の追従不良を想定して Fig. 6 に示すように入射角、ビームの振

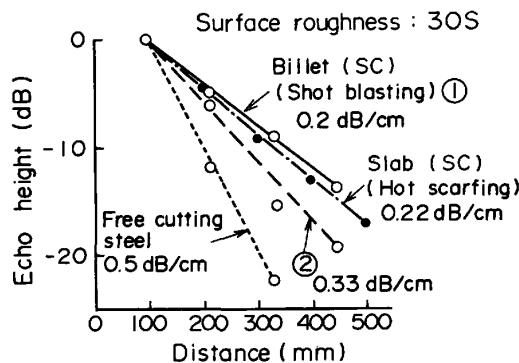


Fig. 5. Attenuation of surface wave on various materials.

れ角を微小に変化させてエコー高さの変化を調査した。図からエコー高さを基準の 1/2 すなわち -6 dB の範囲内におさえるためには両者とも約 2~3 度の範囲でタイヤの追従を行う必要のあることがわかった。

### 3.2.3 表面波による欠陥検出能及び伝播深さ

鋼片より切り出した試験片に、表面及び裏面より深さを変えて放電加工ノッチを施し、探傷周波数 1 MHz でそれら欠陥の検出性を調査した。試験片の形状及び調査結果を Fig. 7 に示す。表面から加工した人工欠陥の場合疵深さとエコー高さはよく比例している。また裏面より加工した人工欠陥についての結果より、表面波では外表面に存在する疵だけでなく表面直下にかくれた疵の検出も可能であることがわかる。たとえば標準欠陥検出レベル (0.5 mm<sup>d</sup> × 20 mm<sup>l</sup> スリット疵) に対し -8 dB のところにしきい値を設定すれば、表面下 4~5 mm に位置する欠陥も検出できることがわかる。この深さは周波数 1 MHz の場合、約 1.5 λ に相当している。

## 4. 設備の概要及び探傷結果

基礎検討結果をもとに、タイヤ探触子による表面波探傷設備を当社小倉製鉄所に設置し、自然欠陥検出能等につき調査した。

### 4.1 探傷設備レイアウト

小倉製鉄所の鋼片検査ラインに設置した設備のレイアウトを Fig. 8 に示す。前工程で垂直探傷により内質検査の完了した角鋼片はVローラテーブルで、表面波探傷システムに搬送される。途中、スケール除去及び水散布(接触媒質用)がなされ、タイヤ探触子で探傷される。検出された疵部はその後マーキングされ搬出される。タイヤ探触子の鋼片への追従は、タイヤ探触子前後に配したガイドロールにより行っている。搬送速度は 20 m/min である。Table 1 に設備の主な仕様を示す。

### 4.2 各探傷設備の特徴

#### 4.2.1 複合タイヤ探触子

今回使用したタイヤ探触子は、外形寸法 φ 230 mm ×

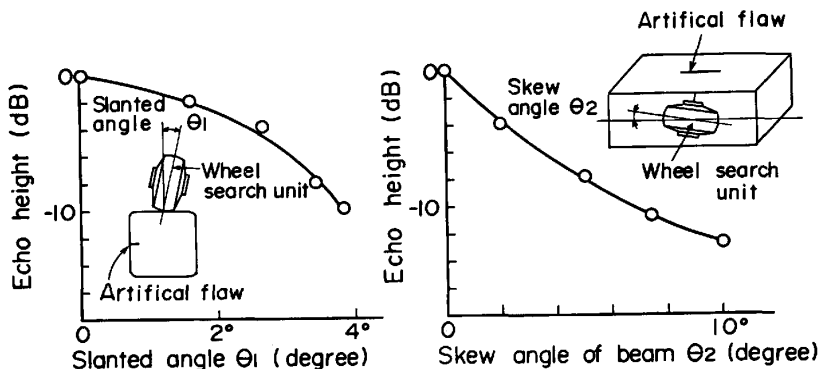


Fig. 6. The change of echo height due to the change of slanted angle and skew angle of wheel search unit.

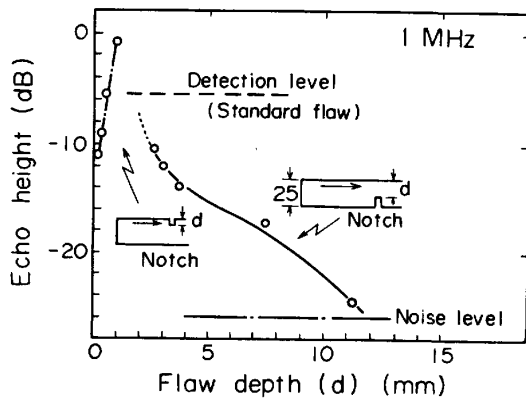


Fig. 7. Detectability of artificial flaws.

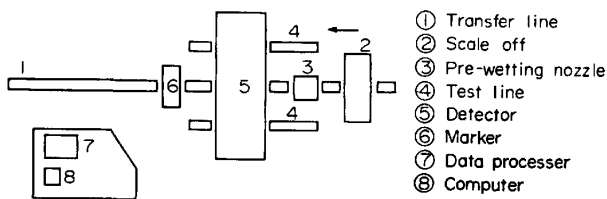


Fig. 8. Layout of the system.

Table 1. Specifications.

Object	Size : $\phi 125$ mm x 17 m length Surface condition : Shot brasting Corner size : 18 mm radius
Transfer table	Roller : V shape roller Speed : 20 m/min
Inspection method	Method : Surface wave Testing frequency : 1 MHz Couplant : Water Number of wheel search units : Two Number of probes : Four (surface wave) : Two (coupling check)
Marking	Number of guns : Twenty

100 mm<sup>w</sup> であり、その中に 25 mm×25 mm の表面波用振動子 2 枚と  $\phi 10$  mm の垂直探傷用振動子 1 枚を内蔵している。角鋼片上下 2 面に 2 個のタイヤ探触子を配置し、各タイヤ探触子の 2 個の表面波振動子により伝播方向の異なる表面波を発生する。すなわち 4 個の表面波振動子により角鋼片全周にわたり両側探傷を行い疵検出率の向上を計っている。なお各振動子の検出範囲を Fig. 9 に示すように分割している。

垂直探傷用振動子はタイヤ探触子の接触状況すなわち接触媒質 (水) の供給状況のチェックを行うためのもので、異常の場合オペレータに警報を発し知らせる。またタイヤ材質には、種々検討した結果エチレンプロピレンゴムを採用した。この材質は耐熱、耐寒及び電気的特性に優れている。

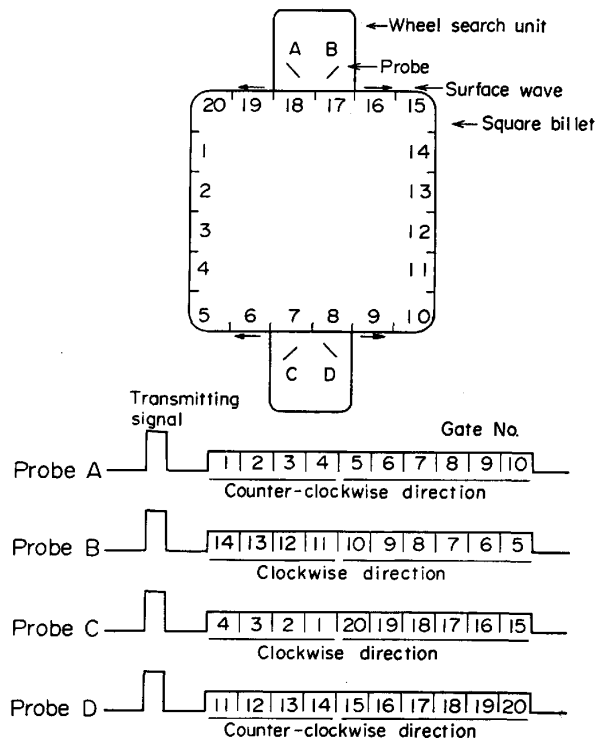


Fig. 9. The surface positions corresponding to signal gates.

#### 4.2.2 タイヤ探触子追従機構

角鋼片両端部の未探傷部を極力短くするため角鋼片搬入と同時に上下より探触子を降下、押圧する。ガイドローラにより角鋼片の曲がり (中央部  $\pm 10$  mm/m、鼻曲がり 25 mm/180 mm) に追従するようになっている。タイヤ探触子の押圧量が常に 8 mm となるように設定されており、その追従精度は  $\pm 3$  mm である。なお Fig. 6 に示した入射角及び捩れ角は最大 2° 以内の変動となることも確認した。

#### 4.2.3 マーキング装置

Fig. 9 で示したように 20 のゾーンに分割しており、それぞれについてマーキングガンが設置されている。マーキングガンは鋼片の曲がりには追従して欠陥を検出したゾーンのみでマーキングするようになっている。

#### 4.2.4 自動感度校正

感度校正用ラインを新設し、記憶演算機能を有した探傷器の採用により人工欠陥材を 2~3 回搬送すれば、4 個の表面波探傷用振動子の感度調整は終了する。

#### 4.2.5 距離振幅補償 (DAC) 回路

Fig. 5 に示したように角鋼片材質により表面波の減衰率が変化するので、本システムではパターンプリセット形のデジタル DAC を採用し、鋼種ごとに DAC 曲線を設定している。デジタル DAC は各振動子に対し、送信波より Amm の所から Bmm の探傷範囲を 10

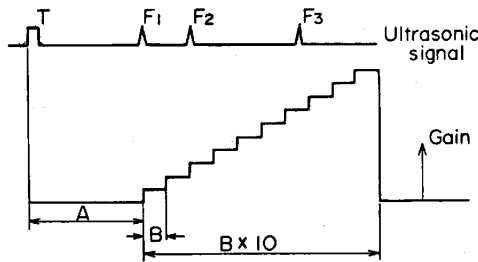


Fig. 10. The adopted digital DAC (Distance Amplitude Compensation).

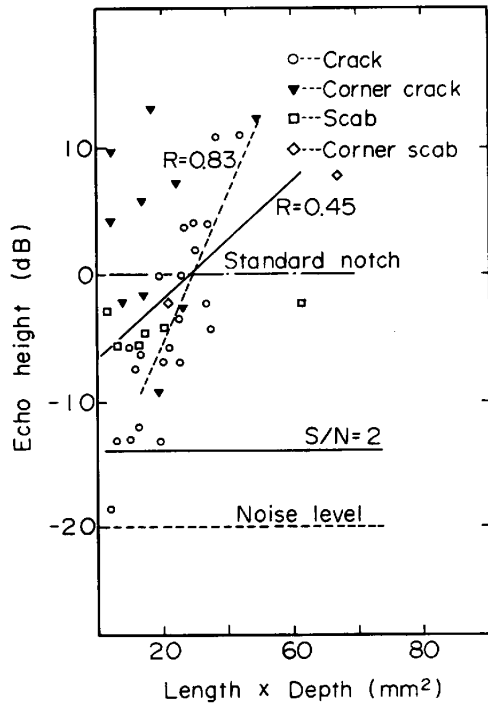


Fig. 11. Inspection results of square billets.

分割した各区分に対する感度を 100 段階のデジタルスイッチにより設定される。なお各振動子に対する各区分は Fig. 9 に示したゲートのおのおのに対応している。デジタル DAC の模式図を Fig. 10 に示す。

4.2.6 自然疵の検出能

Fig. 11 にある時期検出した疵の面積 (疵深さ×疵長さ) とエコー高さとの関係を示す。図より疵面積の増加に伴い、ほぼエコー高さも高くなるのがわかる。特に割れ疵に関しては両者の間に良い相関関係 ( $R=0.8$ ) がある。またある期間の自然疵の検出率を疵深さ別に調査した結果、疵深さ 0.5 mm 以上では、ほぼ 95% 以上の高い検出率を有していた。また鋼片コーナ部の検出率は 98% と非常に良好であることもわかった。

4.2.7 両側探傷の効果

本システムでは、Fig. 9 に示したように外表面を全周にわたり両側から探傷している。つまり各ゲート範囲は必ず 2 方向から探傷されている。この効果をみるため

に、正方向探傷に対応するゲート群の疵検出率及び逆方向探傷に対応するゲート群の疵検出率及び両者を合わせた場合の疵検出率を調査した。その結果両側探傷による疵検出率の向上は約 10% であることがわかった。

5. 考 察

5.1 欠陥深さとエコー高さとの関係

Fig. 7 の結果は欠陥深さとエコー高さとの比例関係にあることを示している。表面波の欠陥での反射、透過については、福岡他<sup>3)</sup>、BOND 他<sup>4)</sup>らが差分法を用いて解析的に無限長のクラックあるいは階段面の場合の反射率及び透過率を計算している。それらによれば、ほぼ深さ  $0.5 \lambda$  までは深さに比例して反射率が増加している。

本装置では、探傷周波数として 1 MHz を使用しており、 $0.5 \lambda$  に相当する 1.5 mm まではほぼ正比例の関係が成立すると考えられ、実際に発生する疵の深さもほとんどのものが 1.5 mm 以内であり探傷上も十分であることがわかる。

なお、表面波を使用して欠陥深さを精密に測定する方法としては、表面波が開口欠陥に沿って伝播する時間遅れを測定する方法<sup>5)</sup> あるいは欠陥先端でのモード変換による横波を利用する方法<sup>6)</sup> 等が提案されている。しかしこれらの方法は原子力を初めとするプラント検査等には有効と思われるが、データ処理にやや時間を要すること、また高度なデータ処理装置が必要であることから本目的のような生産ラインでの適用は困難である。

従来エコー高さによる欠陥深さ推定が敬遠されてきた理由の 1 つには、探触子の材料への接触状況あるいは伝播面での水油等による減衰状況の変化によりエコー高さが不安定となることがあげられる。しかし本システムではこの問題を材料との追従性が非常に良好なタイヤ探触子の採用によつて克服している。

Fig. 12 にはタイヤ探触子の押圧量変化による標準欠

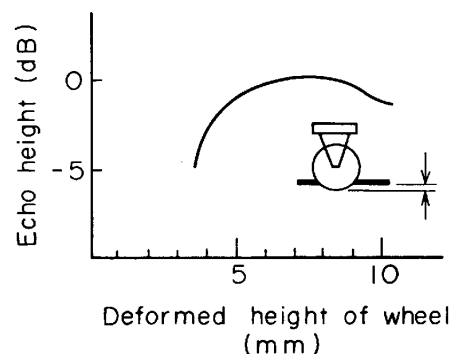


Fig. 12. The relation between echo height and depressed height of wheel.

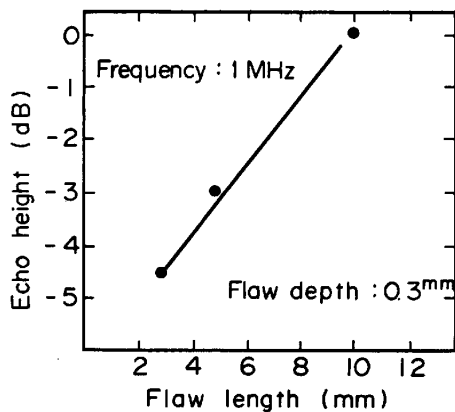


Fig. 13. The relation between echo height and artificial flaw length.

陥からのエコー高さの変化を示している。本システムの押圧設定値 8 mm を中心とした  $\pm 3$  mm の変動に対するエコー高さの変動は  $-2$  dB 程度であり、非常に追従性の良いことがわかる。

### 5.2 欠陥長さとの関係

Fig. 11 の結果は、自然疵（特に割れ疵）について欠陥面積（欠陥深さ×欠陥長さ）とエコー高さとの間に良好な相関関係があることを示している。これを確認するために、深さを一定とし長さを変化した人工欠陥を用いてエコー高さとの関係を実験により求めた。結果を Fig. 13 に示す。欠陥長さの増大に従いエコー高さは増加している。これは表面波の指向性にもとづくビームの拡がりのためと理解できる。

以上のことより、欠陥面積とエコー高さにより相関のあることが理解できる。

### 5.3 両側探傷の効果

本システムでは既に述べたように全周にわたり両側探傷を行い、片側探傷に比し欠陥検出能を約 10% 向上している。これは主として次の理由にもとづくと考えられる。すなわち、Fig. 5 に示してあるように欠陥が複数個存在する場合には、遠い側の欠陥は伝播途中に存在する欠陥によつて表面波が減衰するため検出しにくくなる。この場合反対側から探傷することによつて、先の遠い側の欠陥検出能も向上する。

### 5.4 他方式との比較

角鋼片の表面検査は、従来から磁粉探傷を主体に実施されている。たとえば、角鋼片を搬送ライン上で磁化し

磁粉液を散布した後、磁粉模様をライン両側から観察する官能的な検査方式がある。この方式の場合

(1) 一般に行われている V 字形ローラによる角鋼片搬送方式では、下部コーナの検査が不可能であり、かつ、他コーナについても検出能が劣る。

(2) 鋼片送り速度により、面部の疵でも見落とす等検査の安定化に乏しい。

(3) 疵の定量判定ができない。

といった問題がある。

本報告の表面波を用いた自動探傷装置では、コーナおよび面部ともに検査可能であり、上記検査方式と比較し、より定量的、かつ安定した検査が可能である。さらに、検査結果の自動記録、良品、不良品の自動弁別、及び、これら情報の上工程への早期フィード・バックによる粗材品質向上等が期待できる。

## 6. 結 言

使用用途の厳しい冷鍛用あるいは高級高炭素鋼線材等に対する表面品質（表面疵、表面直下疵）に対する要求は非常に高度なものとなつてきている。今回、タイヤ探触子を用いた表面波探傷による角鋼片表面近傍の新しい品質保証技術を確立した結果

(1) 外表面の深さ 0.5 mm 以上の自然疵については 95% 以上の検出率を有する。

(2) また、欠陥面積とエコー高さの間には比較的良好な相関関係があり従来の検査方法に比較し、より定量的かつ安定した検査が可能となつた。

(3) さらに、非常に良好なコーナ部の欠陥検出率を有する。（約 98%）

(4) 表面波の伝播深さを測定した結果  $-8$  dB の範囲では約  $1.5\lambda$ （波長）の深さの欠陥検出可能なことがわかつた。

## 文 献

- 1) 中西章人, 山嶋一剛, 岩崎邦彦, 白岩俊男, 山口久雄: 住友金属, 24 (1972), p. 113
- 2) 白岩俊男, 山口久雄, 松本重明, 中西章人, 成合靖正, 伊藤英明: 鉄と鋼, 63 (1977), S 701
- 3) M. HIRANO, H. FUKUOKA and Y. MIURA: J. Acoust. Soc. America, 72 (1982), p. 602
- 4) L. J. BOND: Ultrasonics, 17 (1979), p. 71
- 5) P. A. DOYLE and C. M. SCALA: Ultrasonics, 16 (1978), p. 164