

超音波プローブアレイを用いた薄鋼板の オンライン内部探傷技術

高田 一*・山崎 拓也*²・戸村 寧男*²・運崎 秀明*³
佐々木 聡洋*²・荒谷 誠*²

An On-line Detection Technique for Internal Flaws in As-hot-rolled Steel Strip Using Ultrasonic Probe Array

Hajime TAKADA, Takuya YAMASAKI, Yasuo TOMURA, Hideaki UNZAKI,
Toshihiro SASAKI and Makoto ARATANI

Synopsis : A new ultrasonic immersion testing method for the detection of internal flaws in a running steel strip has been developed. It consists of a transmitting probe array and a receiving probe array arranged face-to-face on opposite sides of the strip in water, and two flaw echoes given as follows are received by the receiving probe array.

- (1) Flaw echo reflected first at a internal flaw and next at the surface wall of the strip.
- (2) Flaw echo reflected first at the back wall of the strip and next at a internal flaw.

A linear area in the strip can be tested within a cycle of ultrasonic pulse repetition by integrating transmission of line-focused ultrasonic beam (25 MHz in frequency) using all elements in the transmitting probe array at once with parallel processing of signals received by the receiving probe array.

In succession, an ultrasonic detecting system has been installed in No. 6 Pickling Line at JFE Steel Chiba District. Steel strip being tested is immersed in water by using 6 additional deflector rolls. The transmitting probe array and the receiving probe array cover whole width of the strip so that testing of whole volume of the strip is realized. It is confirmed that an inclusion with $5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ in minimum volume can be detected with signal-to-noise ratio in the range of 9–10 dB. The system is being used for the evaluation of commercial products without trouble, and very useful for internal quality control and assurance in the production line.

Key words: internal flaws; non-metallic inclusion; probe array; line-focused beam; steel strip.

1. 緒言

薄鋼板の代表的な内部欠陥としてアルミニウムやカルシウムの酸化物を主な成分とする非金属介在物（以下、介在物）があげられる。これら介在物が存在する部位に大きな塑性変形が加えられると割れや破損が発生するため、ユーザーの製造工程において深絞りや絞りしごき成形などを加えられる薄鋼板は、板波探傷¹⁾や漏洩磁束探傷^{2,3)}によって介在物検査されてから出荷されている。なお、漏洩磁束探傷の適用先は缶の素材となる冷延鋼板の出荷検査²⁾に限られている。

最近、省資源・軽量化を目的とする鋼板の薄肉化、環境対策を目的とした塑性加工方法の変更により、有害な介在物のサイズは微小化してきており、薄鋼板の介在物検査手段には、従来の漏洩磁束探傷や板波探傷よりも高い検出能が必要となってきた。一方、薄鋼板を製造する側からは、介在物検査の結果に応じて薄鋼板の用途を変更して歩留ま

りを向上させるため、精度の良い介在物検査を冷間圧延の前に行いたいというニーズがある。

従来の板波探傷の欠陥検出能を向上させるため、著者らは過去に、板波探傷によって得られる信号をBスコープ表示することにより、欠陥の識別性を向上させることを提案した⁴⁾。しかし、板波探傷は欠陥検出能が低い欠点があるため、微小な介在物欠陥の検出への適用は難しかった。また、サンプルの中の微小な内部欠陥の検出には超音波集束ビームを用いたCスキャン超音波探傷方法が用いられてきた⁵⁾。この方法では、超音波ビームを音響レンズや球面振動子等によって点状に集束させる（以下、集束ビーム法）ことにより、高い欠陥検出能が得られる。しかし、上述のビーム（以下、スポットフォーカスビーム）の焦点寸法が極めて小さいことから、超音波ビームの2次元走査によってサンプル全体を検査するため、時間がかかる問題があった。この集束ビーム法を走行する鋼板のオンライン探傷に用いるのは、鋼板の幅方向に沿って、上記焦点を隙間無く

平成16年3月4日受付 平成16年6月22日受理 (Received on Mar. 4, 2004; Accepted on June 22, 2004)

* JFE技研 (株) 計測制御研究部 (Instrument and Control Engineering Dept., JFE R&D Corp., 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210-0855)

* 2 JFEスチール (株) 東日本製鉄所 (Chiba District, East Japan Works, JFE Steel Corp.)

* 3 JFE電制 (株) エンジニアリングセンター (Engineering Center, JFE Electrical & Control Systems, Inc.)

並べる必要から膨大な数の超音波プローブが必要となるため、現実的ではない問題がある。集束ビーム法の検査に時間がかかる問題の解決に向けた取り組みとして、超音波フェイズドアレイ⁶⁾を用いて電子的に集束させた超音波ビームを高速に電子走査する方法（以下、電子スキャン法）が提案されている^{7,8)}。しかし、電子的なビーム走査にもある程度の時間が必要であるため、走行する鋼板のオンライン探傷への適用は難しかった。集束ビーム法によって得られる高検出能をオンライン探傷において実現することが、この分野の技術者の夢になっていた。

このような事情に鑑み、既に報告したリニアアレイプローブと電子スキャンとを組み合わせた二探触子による探傷法⁹⁾をさらに発展させ、冷間圧延前の薄鋼板のオンライン探傷に適した検出能の高い水浸超音波探傷法（以下、超音波ラインセンサによる探傷方法）を開発し¹⁰⁾、JFEスチール（株）東日本製鉄所千葉地区第一冷間圧延工場の酸洗ライン（以下、6PIC）に実用装置を設置した¹¹⁾のでその概要を紹介する。

2. 超音波ラインセンサによる探傷方法とその特長

Fig. 1 に超音波ラインセンサによる探傷方法の概要を示す。リニアアレイプローブからなる送波プローブおよび受波プローブを被検材を挟んで対向させて配置する。送波プローブからラインフォーカス（線集束）超音波ビーム（周波数：25 MHz）を被検材に向けて送波し、介在物欠陥および被検材の表面または裏面で各1回反射した欠陥反射波を受波プローブによって収集する。受波プローブの各エレメントが受波した信号を同時処理することにより、一定幅Wの線状の領域を1回の超音波送受波で探傷することができ、鋼板の搬送ラインなどにおける連続探傷に適用可能である。

2.1 介在物欠陥からのエコーの振幅

上記の超音波ラインセンサによる探傷方法は、ラインフォーカスビームを用いて、スポットフォーカス（点集束）ビームを用いた集束ビーム法と同等の欠陥検出能を得る探傷方法である。ラインフォーカスビームとスポットフォーカスビームとの違いをFig. 2に示す。

しかし、ラインフォーカスビームを用いた探傷方法はスポットフォーカスビームを用いた探傷方法に比べて、超音波ビームの集束度が低いため、欠陥検出能が低いことが常識となっている。ここで、超音波ラインセンサによる探傷方法によって高い欠陥検出能を得ることができる理由を説明する。以下では、説明を簡潔にするため、水から鋼への超音波の入射における通過率や鋼から水への超音波の入射における通過率を1とする。

まず、スポットフォーカスビームとラインフォーカス

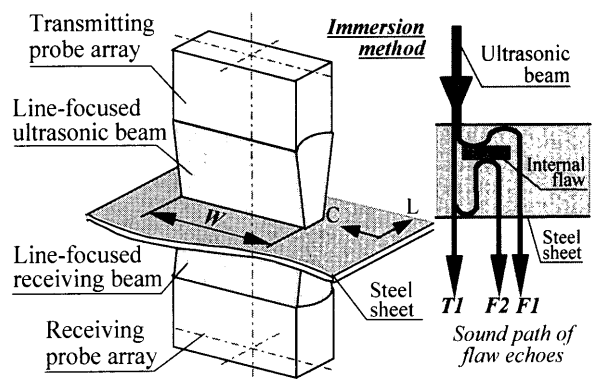


Fig. 1. Schematic geometry of ultrasonic probes. T1: Transmitted wave. F1, F2: Flaw echo.

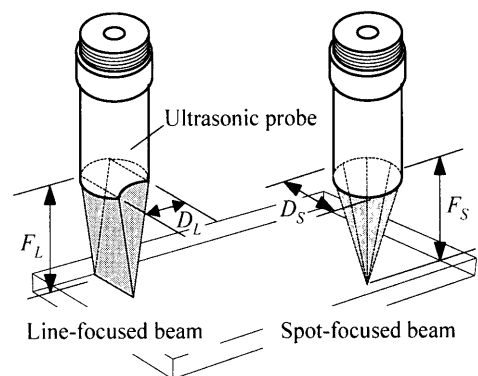


Fig. 2. Focused ultrasonic beam.

ビームとを用いて、焦点の位置にある欠陥をパルスエコー法によって検出することを考える。スポットフォーカスビームのビームの中心軸上での音圧 P_S は、 F_S を焦点距離、 x を点集束探触子からの距離、 P_{0S} を送信音圧としたとき、下式(1)によって表される¹²⁾。

$$P_S/P_{0S} = 2 \sin\{(\pi/2) \cdot J_S \cdot (F_S/x) \cdot (1-x/F_S)\} / (1-x/F_S) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $x=F_S$ のときの音圧 P_{SF} は、

$$P_{SF}/P_{0S} = \pi \cdot J_S \dots \dots \dots (2)$$

である。ここで、 J_S は集束係数と呼ばれ、次式によって定義される。

$$J_S = D_S^2 / 4 \cdot \lambda \cdot F_S \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 λ は波長、 D_S は振動子の直径である。

一方、ラインフォーカスビームの音場について詳しく示した文献は見当たらない。そこで、(1)式および円筒面におけるレンズ効果を示した文献¹³⁾を参考にすると、中心軸上での音圧 P_L は、 F_L を焦点距離、 P_{0L} を送信音圧とし、ラインフォーカスビームの場合の集束係数を J_L としたとき、下式によって近似できると考えられる。

$$P_L/P_{0L} = \sqrt{2 \sin\{(\pi/2) \cdot J_L \cdot (F_L/x) \cdot (1-x/F_L)\} / (1-x/F_L)} \dots \dots \dots (4)$$

$$J_L = D_L^2 / 4 \cdot \lambda \cdot F_L \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 $x = F_L$ のときの音圧 P_{LF} は、下式(6)のとおりである。

$$P_{LF} / P_{0L} = \sqrt{\pi \cdot J_L} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 D_L は振動子の開口径である。なお、ラインフォーカスビームによる欠陥エコー高さの向上の程度をデシベル(dB)表示すると、スポットフォーカスビームを用いた場合の3/4という文献¹⁴⁾もあるので、上記取扱いがラインフォーカスビームの焦点での音圧を過大評価していることはないと考えられる。

次に、これらの集束ビームが焦点位置にある介在物欠陥に入射して生成される反射波(欠陥エコー)の高さについて考える。周波数25MHzの超音波を用いて薄鋼板の介在物欠陥を検出するとしたとき、鋼中での超音波の波長は約240 μm である。これに対し、検出すべき介在物欠陥の寸法は概ね100 μm 以下であるので、超音波の反射源のサイズは波長の1/2以下と極めて小さい。したがって、介在物欠陥の反射面に入射する超音波の音圧は介在物欠陥全体において、 P_{SF} または P_{LF} に等しいと考えることができる。ここで、微小な介在物が円形をしていると仮定すると、集束ビームが入射して生成される反射波は、小さな円形振動子が超音波を送波しているのと同等と考えることができる。なお、説明を簡単にするため、欠陥での超音波の音圧反射率を1と仮定する。このとき、スポットフォーカスビームおよびラインフォーカスビームによって生成される介在物欠陥からのエコーの音圧 P_{SE} および P_{LE} は、式(7)および(8)のように表される¹⁵⁾。 d は円形の介在物欠陥の直径である。

$$\begin{aligned} P_{SE} / P_{0S} &= 2 \cdot P_{SF} \cdot \sin\{(\pi d^2) / (8 \cdot \lambda \cdot F_S)\} \\ &= 2 \cdot \pi \cdot J_S \cdot \sin\{(\pi d^2) / (8 \cdot \lambda \cdot F_S)\} \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{LE} / P_{0L} &= 2 \cdot P_{LF} \cdot \sin\{(\pi d^2) / (8 \cdot \lambda \cdot F_L)\} \\ &= 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot J_L} \cdot \sin\{(\pi d^2) / (8 \cdot \lambda \cdot F_L)\} \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ここで、送信音圧 P_{0S} は超音波が伝搬する媒質の音響インピーダンスと振動子の振動速度との積であらわされ¹⁶⁾、 P_{0L} も同様である。よって、スポットフォーカスビームおよびラインフォーカスビームをそれぞれ送受波するプローブに内蔵された超音波振動子の材質や電気的な駆動条件が等価であれば、 P_{0S} と P_{0L} が等しいと考えることができる。よって、焦点距離 F_L が F_S に等しく、さらに D_L が D_S と同じ大きさであるとし、同じ周波数のプローブを用いる場合、 $J_L = J_S$ であるため、介在物欠陥からのエコーの音圧の比は下式(9)のとおりとなる。

$$P_{LE} / P_{SE} = 1 / \sqrt{\pi \cdot J_S} \dots \dots \dots (9)$$

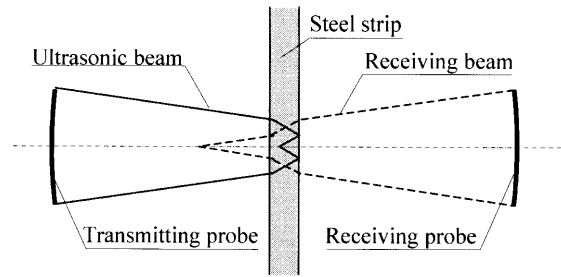


Fig. 3. Positional relationship between transmitting ultrasonic beam and receiving beam.

集束係数 J_S は1よりかなり大きな値となるため、周波数や振動子開口径が同じ仕様のプローブを用いる限り、この音圧の違いを埋めることはできない。

そこで、超音波ラインセンサによる探傷方法では次の二つの工夫を加えることによって、介在物欠陥からのエコーの音圧が向上するようにした。

(a) 振動子の材質を厳選することによって、送信音圧を低下させることなく、振動子の開口径 D_{LU} を上記の D_L および D_S のほぼ2倍とし、集束係数が高まるようにした。

(b) Fig. 3にこの探傷法における送波ビームと受波ビームとの位置関係を示す。送波ビームをほぼ介在物欠陥にて集束させること、受波ビームの焦点よりも受波プローブ寄りに介在物欠陥を位置させることが要点である。これは、(8)式に表されるとおり、球面波として拡がる欠陥エコーをなるべく拡散の小さいうちに受波しようとする考えである。Fig. 3では、受波プローブと介在物欠陥との距離を焦点距離の約2/3としている。なお、これは送波プローブと受波プローブとを対向させて配置していることの第1の利点である。

上記(a)の工夫によって、超音波ラインセンサによる探傷法における中心軸上の $x = F_L$ における音圧 P_{LU} は、 P_{0U} を送信音圧としたとき、下式(10)によって近似される。

$$P_{LU} / P_{0U} = \sqrt{\pi \cdot J_{LU}} = \sqrt{\pi \cdot 4 \cdot J_L} = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot J_L} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $D_{LU} = 2 \cdot D_L$ であるので、集束係数 J_{LU} は下記のとおり表される。

$$J_{LU} = D_{LU}^2 / 4 \cdot \lambda \cdot F_L = 4 \cdot D_L^2 / 4 \cdot \lambda \cdot F_L = 4 \cdot J_L \dots \dots \dots (11)$$

なお、上記(a)に述べたとおり、

$$P_{0U} = P_{0L} \dots \dots \dots (12)$$

である。

さらに、上記(b)の工夫を加えると、超音波ラインセンサによる探傷法における介在物欠陥からのエコーの音圧 P_{UE} は式(13)のように表される。

$$\begin{aligned} P_{UE} / P_{0U} &= 2 \cdot P_{LU} \cdot \sin\{(\pi d^2) / (8 \cdot \lambda \cdot (2/3) \cdot F_L)\} \\ &= 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot J_L} \cdot \sin\{(3/2) \cdot (\pi d^2) / 8 \cdot \lambda \cdot F_L\} \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

ここで、 $(\pi d^2)/8 \cdot \lambda \cdot F_L$ は 0 に近い小さな値であるので、 P_{UE}/P_{OU} は下式 (14) のように近似することができる。

$$P_{UE}/P_{OU} \cong 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot J_L} \cdot (3/2) \cdot \sin\{(\pi d^2)/8 \cdot \lambda \cdot F_L\} = 3 \cdot P_{LE}/P_{OL} \dots \dots \dots (14)$$

よって、式 (12) および (14) から、上記 (a) および (b) の工夫を加えた後の介在物欠陥からのエコーの音圧 P_{UE} は、通常のラインフォーカスビームによって生成される介在物欠陥からのエコー音圧 P_{LE} の約3倍の大きさである。即ち、約10dBエコーの音圧を高めることができる。

例えば、スポットフォーカスビームを送受波するプローブの仕様を25MHz、振動子径：6.35mm、焦点距離38mmとし、ラインフォーカスビームを送受波するプローブ（超音波ラインセンサによる探傷方法に用いるプローブ）の仕様が焦点の形状および振動子開口径を除き上記と同等であるとして比較すると、式 (15) のとおりとなる。式 (15) において、0.81は-1.9dB程度と無視しうる程度の違いである。即ち、上記 (a) および (b) の工夫を行うことによって、ラインフォーカスビームを用いても、スポットフォーカスビームを用いたのと同様のエコー高さにて欠陥エコーを検出できる。

$$P_{UE}/P_{SE} \cong 3 \cdot (P_{LE}/P_{OL}) / (P_{SE}/P_{OS}) = 3 \cdot P_{LE}/P_{SE} = 3 / \sqrt{\pi \cdot J_S} \cong 0.81 \dots \dots \dots (15)$$

なお、市販されている25MHz点集束プローブのうち、圧電セラミックスと音響レンズを用いたものは、実効周波数が25MHzよりも低いものが多い。この場合には、集束係数 J_S は上記計算例よりも小さな値となるので、これらのプローブを用いた探傷と比較すると、超音波ラインセンサによる探傷法のほうが欠陥エコーの音圧が高くなる場合がある。

また、欠陥エコーの音圧をさらに高める方法として、受波プローブと欠陥との距離をさらに小さくすることも考えられる。これは、下記二つの理由から好ましくないものと考えられる。

(1) 欠陥が受波ビーム近距離音場の干渉の著しい領域に位置するようになり、この影響を受けて、受波プローブに受波される欠陥エコーの振幅が低下することがあると予想される。

(2) オンライン探傷において、受波プローブと薄鋼板が接触事故を起こす可能性が高くなる。

2.2 超音波ラインセンサによる探傷法の特長

この探傷方法の他の特長として、表面直下不感帯が原理的には発生しないことがあげられる。送波プローブと受波プローブが鋼板の同じ側の面に配置されて実施される通常のパルスエコー法による探傷では、超音波ビームの鋼板への入射において、鋼板の表面から大振幅の表面反射波が発

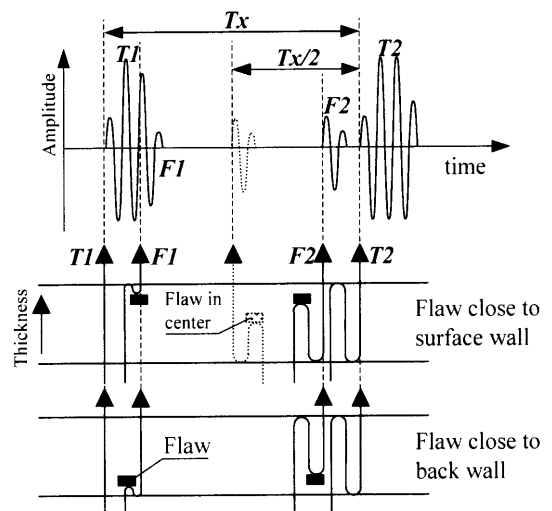


Fig. 4. Relation between position of echoes in A-scope display (RF) and flaw position in thickness direction. F1 superposed upon T1.

生し、この残響がしばらく持続する。このため、表面直下の欠陥からの反射波はこの残響と重なって識別検出できず、表面直下いわゆる不感帯が発生する。超音波ラインセンサによる探傷方法ではFig. 1の通り、F1, F2（ビーム路程が長い方をF2）の2通りの欠陥反射波が受波される。受波信号波形と欠陥深さ（表面または裏面の近い方の面からの深さ）との関係をFig. 4に示す。欠陥反射波 F1は、欠陥が表面または裏面の直下にある場合には、最初に受波される大振幅の透過波 T1の残響と重なって識別検出が困難である。これに対して、欠陥反射波 F2は透過波 T1の受波から $Tx/2$ の時間を経過した以後に受波されるので、透過波 T1の残響とは重ならない。また、欠陥反射波 F2は、欠陥が表面または裏面に近いほど受波タイミングが透過波 T2に近付くが、透過波 T1の残響が終了してから透過波 T2が受波されるまでは欠陥反射波の識別を妨害する干渉波はないので、識別検出できる。したがって、この探傷方法では表面直下の不感帯が原理的には存在しない。ただし、電気信号処理により最小 $30 \mu\text{m}$ の不感帯が発生する。上記は送波プローブと受波プローブとを対向させて配置していることの第2の利点である。

3. オフライン欠陥検出能の評価

酸洗板サンプル（板厚：2.0~2.6mm）を数多く用いて、実験室において探傷試験を行い、超音波ラインセンサによる探傷方法の検出能を調査した。10dB以上のS/Nで検出できた介在物欠陥の幅と長さとの関係をFig. 5に示す。検出した欠陥の断面写真の代表例も合わせてFig. 5に示す。長さ $60 \times$ 幅 $30 \mu\text{m}$ 以上の大きさの介在物欠陥を検出可能であった。介在物欠陥の長さおよび幅はCスキャン超音波探傷装置（周波数50MHz）を用いて測定した。欠陥幅の測

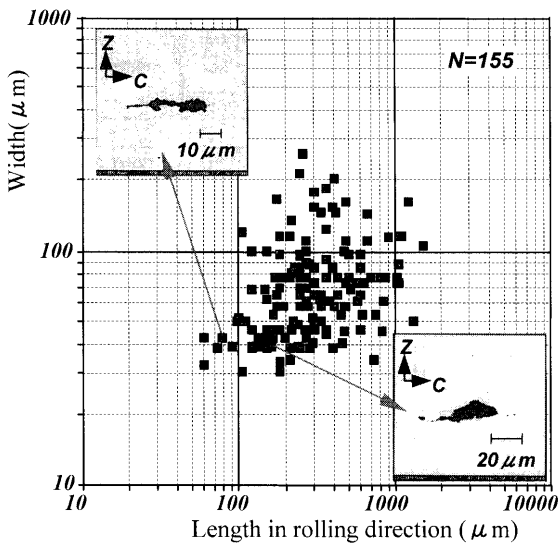


Fig. 5. Relation between width and length of flaws detected with signal-to-noise ratio above 10 dB.

定では、予めCスキャン超音波探傷で測定した欠陥幅と顕微鏡観察で測定した真の欠陥幅との関係を求めておき、校正を行った。複数の介在物欠陥について断面の顕微鏡観察により介在物の厚さを測定し、長さおよび幅の測定結果と合せ、欠陥体積を算出した結果、体積 $5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ 以上の介在物欠陥を10 dB以上のS/Nで検出できることが判明した。なお、本探傷方法においても、一般の超音波探傷試験と同様に、エコー高さと介在物欠陥の面積との間に相関が認められた。したがって、上記結果はS/Nが10 dB以上となるエコー高さを示す欠陥の面積の目安が $60 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ であることを示している。

Fig. 6は酸洗による表面の酸化皮膜（スケール）除去の前後で同一の介在物欠陥サンプルをオフライン探傷し、欠陥エコーのS/Nの差異を調べた結果である。欠陥エコーのS/Nは同等であり、酸化皮膜の有無に関係なく同等の欠陥検出能で探傷できること、検出能の面では、酸洗ラインへの探傷装置の設置に関して位置に制約がないことが判明した。

4. 実用装置の開発と生産ラインへの設置

鋼板の搬送ラインにおいて気泡の影響なく介在物探傷を行うための水浸機構の研究開発¹⁷⁾を経て、本探傷法を用いた内部欠陥探傷装置（以下、開発装置、または、探傷装置）を開発し、東日本製鉄所千葉地区6PICに設置した。

Fig. 7に示すように酸洗槽入側において6本のデフレクタロールを用いて鋼板のパスを変更し、移送される鋼板を水槽に浸漬させるようにした。1つの送波プローブとこれに対向配置される受波プローブを1つの測定ヘッドと称することとすると、測定ヘッドを交互に千鳥掛に配置させることにより、鋼板全幅を連続探傷可能とした。この装置で

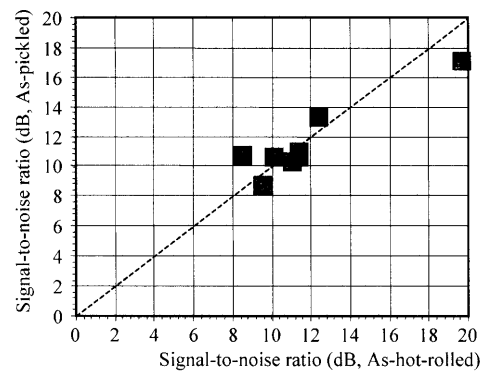


Fig. 6. Change in signal-to-noise ratio by pickling.

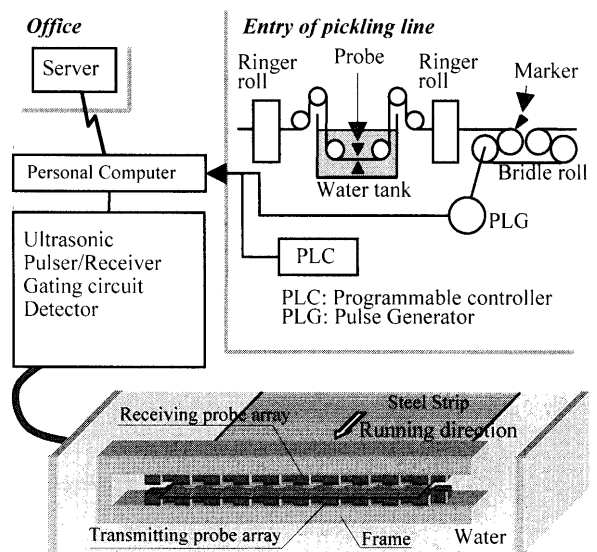


Fig. 7. Schematic geometry of detecting head and block diagram of detecting system.

は超音波の送受信回路と送波および受波プローブに内蔵された超音波振動子との電気インピーダンスを正確に整合させることにより、超音波送受波信号への伝送ケーブルの影響を排除した。また、メンテナンスを容易にするため、測定ヘッドを取り付けるフレームの形状をカタカナのコの字形として、いつでもライン外へ引き出せるようにした。欠陥検出能を検証するためのサンプル採取の便宜を図るため、欠陥を検出した位置にマーキングを行う装置を水槽出側に設置した。

探傷装置は上位コンピュータから伝送されるコイル情報に従って各種探傷条件を設定し、探傷動作を行う。ここで、コイルとは熱間圧延によりほぼ一方向に薄く引き伸ばされた鋼板をコイル状に巻いたものである。また、探傷装置は、上記動作中、探傷データの収集、集約を行い、その後、コイルの合否判定を行い、結果を上位コンピュータに返すようになっている。欠陥マップを作成するための詳細な探傷データはローカルエリアネットワークを介して、操業部署の事務所にあるサーバーに送付される。

感度校正はオフライン位置で試験片を用いて行ってい

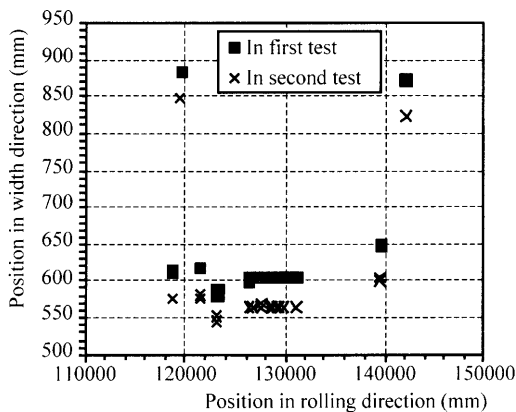


Fig. 8. Comparison of flaw indications between two tests using the same coil.

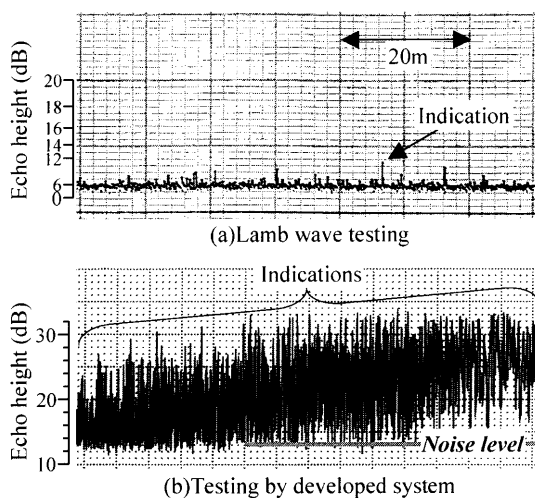


Fig. 9. Comparison of flaw indications between Lamb wave testing and testing by the developed system.

る。通常は Fig. 1 に示した透過波 T1 の振幅を計測し、この振幅が所定の範囲に収まるようにゲインを調整するようにしている。その他、人工きずからのエコー高さを測定して感度校正を行うこともできる。

5. オンライン探傷における欠陥検出能の検証

5.1 再現性の確認

Fig. 8 は探傷結果再現性の確認のため、同一の薄鋼板コイルを2回、開発装置に通して探傷し、欠陥指示およびその位置を比較した結果である。2回目の探傷結果を1回目とは約 50 mm 幅方向にずらして表示している。板幅方向、長手方向共に同一場所で内部欠陥を検出しており、探傷結果の再現性を確認できた。

5.2 板波探傷との欠陥検出能の比較

Fig. 9 は同一のテストコイルを板波探傷装置と開発装置とを用いてオンライン探傷して、欠陥検出能を比較した結果である。板波探傷ではタイヤ型探触子を用いて板波の送受波を行った。試験周波数は 2.25 MHz、用いたモードは A_0S_0 モードである。テストコイルとして、製鋼工程にお

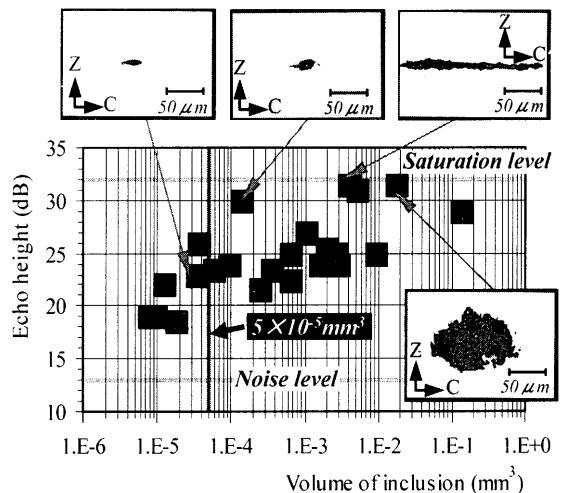


Fig. 10. Relation between echo height and volume of detected non-metallic inclusions.

る操業トラブルによって数多くの微小介在物欠陥が生成されたコイルを用いた。Fig. 9 の結果はコイルの長手（圧延）方向に沿ったエコー高さの走査グラフである。開発装置ではエコー高さ出力が基準値に対するデシベル (dB) 値である。板波探傷装置はエコー高さ出力がリニアであったので、エコー高さ 10% に相当する出力を 0 dB として、縦軸に dB 表示の目盛を表示した。それぞれの探傷におけるノイズレベルは、板波探傷では、図中に示した目盛で約 6 dB のレベルであり、開発装置による探傷では図中の目盛で約 13 dB のレベルであった。板波探傷では S/N が 4~6 dB の低い欠陥指示がいくつかみられるだけなのに対し、開発装置による探傷結果では、全長にわたって無数の高い欠陥指示が記録されていて、ノイズレベルの確認が難しいほどである。このテストの結果、開発装置は板波探傷装置と比べ、はるかに高い欠陥検出能を有していることが明らかになった。

5.3 欠陥検出能の検証

オンライン探傷における開発装置の欠陥検出能を下記の手順によって検証した。

- ① オンライン探傷により欠陥を検出し、検出位置にマーキングする。マーキング部分のサンプルを採取する。
- ② 採取サンプルを超音波ラインセンサによる探傷法によりオフライン探傷し、欠陥位置を特定する。
- ③ C スキャン探傷（周波数: 50~200 MHz）により検出した欠陥の長さ L および幅 W を測定する。
- ④ 超音波映像から切断位置を決定し、欠陥を切断する。
- ⑤ 断面観察により欠陥の厚さ T_f を測定し、欠陥幅 W を確認した上で、欠陥体積 V を算出する ($V=L \times W \times T_f$)。

Fig. 10 に上記手順により採取した欠陥のオンライン探傷におけるエコー高さと欠陥体積との関係を代表的な介在物欠陥の断面写真とともに示す。体積 $5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ （直径約 50 μm 相当）の微小介在物欠陥を S/N 約 10 dB で検出でき

ることを確認した。実験室でのサンプル板探傷試験で確認した欠陥検出能をオンライン探傷で実現できている。また、従来の板波探傷では体積 $3 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ の介在物欠陥のオンライン検出が限界とされている¹⁸⁾ので、開発装置は板波探傷より2桁以上体積の小さな欠陥を検出できる。なお、原因が特定され対策を行った誤検出や少数の表面きずの検出例を除けば、サンプル採取による断面観察の結果、マーキングした位置に介在物欠陥がない誤検出は1例もなかった。

6. 結言

リニアアレイプローブからなる送波プローブおよび受波プローブを被検材を挟んで対向させて配置して、送波プローブからラインフォーカス超音波ビームを被検材に向けて送波し、介在物欠陥および被検材の表面または裏面で各1回反射した欠陥反射波を受波プローブにより収集することによって、一定の幅の線状領域に存在する薄鋼板の微小な介在物欠陥を1度の超音波送受波で検出することが可能な超音波ラインセンサによる探傷方法を開発した。この探傷方法はラインフォーカスビームを用いているにもかかわらず、スポットフォーカスビームを用いた集束ビーム法と同等の高い欠陥検出能を有している。

実験室における検出能評価、水浸探傷機構の研究開発を経て、実用装置を開発し、東日本製鉄所千葉地区6PICに設置した。オンラインテストの結果、再現性良く探傷が可能なこと、体積 $5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ の微小な介在物欠陥を検出できることが確認され、優れた欠陥検出能を有していることが実証された。本装置は、現在、鋼板の内部品質保証に役

立てられている。

今後も超音波ラインセンサによる探傷法を様々な対象に適用してゆく予定である。

文 献

- 1) M.Koshino, T.Nonaka, H.Okubo, J.Suzuki and K.Esaki: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 361.
- 2) H.Yokota, Y.Mashino, T.Siraishi, H.Hayashi, M.Kobayashi and T.Kodama: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1270.
- 3) K.Iwanaga, K.Maeda, A.Nagamune, M.Hohisa, H.Kato and J.Yotsutsuji: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1036.
- 4) H.Takada, T.Siraishi and F.Ichikawa: *Proc. of JSNDI Fall Conference 1995*, (1995), 31.
- 5) H.Takada, F.Ichikawa, Y.Okamoto and T.Ogata: *Proc. of 3rd Japan International SAMPE Symposium, Japan Chapter of SAMPE, Tokyo*, (1993), 2305.
- 6) H.Takada: *J. JSNDI*, **52** (2003), 105.
- 7) Y.Takishita, A.Iwasaki, S.Sasaki, J.Kubota, Y.Musha and H.Okada: *Proc. of JSNDI Spring Conference 1991*, (1991), 31.
- 8) Y.Takishita, H.Kino, S.Yamaguchi, A.Iwasaki, N.Yamamoto and S.Miwa: *Proc. of JSNDI Fall Conference 1994*, (1994), 61.
- 9) H.Takada, A.Torao, I.Yarita, F.Ichikawa and T.Siraishi: *Proc. of JSNDI Spring Conference 1997*, (1997), 225.
- 10) H.Takada, A.Torao, T.Yamasaki, H.Unzaki, T.Sasaki, M.Aratani and T.Kobashi: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 243.
- 11) T.Yamasaki, H.Unzaki, Y.Tomura, T.Sasaki, T.Kobashi, M.Aratani and H.Takada: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 244.
- 12) 超音波探傷試験III, 日本非破壊検査協会編, 東京, (2001), 47.
- 13) 超音波探傷法, 日本学術振興会製鋼第19委員会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1974), 85.
- 14) *Ultrasonic Transducers Catalogue*, Panametrics Inc., Waltham, MA, (1999), 38.
- 15) 超音波探傷試験III, 日本非破壊検査協会編, 東京, (2001), 57.
- 16) 超音波探傷法, 日本学術振興会製鋼第19委員会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1974), 22.
- 17) H.Takada, T.Sasaki, M.Iri, M.Aratani, H.Kuguminato, H.Miyake, M.Shimizu, S.Okada and Y.Tomura: *United States Patent*, (2001), US 6266983 B1.
- 18) F.Ichikawa, H.Maruyama, K.Kurita and S.Takahashi: *Kawasaki Steel Giho*, **18** (1986), 192.