

---

板波超音波探傷の最適条件の検討とその応用

Study on Optimum Conditions for Lamb Wave Ultrasonic Testing and Its Application to Product Line

市川 文彦(Fumihiko Ichikawa) 栗田 邦夫(Kunio Kurita) 丸山 英雄(Hideo Maruyama) 高橋 暁(Satoru Takahashi)

---

要旨：

板波の伝播にともなう鋼板の表面変位と板波の送受信信号の強さとの関係、および群速度分散の大きさと反射エコーの半値幅との関係について、理論的に考案し、実験的に補足した。また、板波探傷法の欠陥検出能については、実験的に調査した。この結果、 $0 < fd < 10$  (MHz $\cdot$ mm)の範囲では8つの領域において探傷に適すると思われる板波を見出した。得られた知見をもとに、従来の問題点を解消し、改良型の板波探傷装置を開発した。主な特徴は、広帯域探触子を使うこと、探傷周波数を可変としたこと、マイコンを利用し、探触子の入射角、探傷周波数を自動設定し、0から6mmの範囲においてどの板厚でも最適な板波で自動探傷できるようにしたことである。

---

Synopsis：

The relation between the displacement of the plate during propagation of Lamb waves and detected signal intensity of Lamb waves was considered theoretically and experimentally. The relation between the magnitude of group velocity dispersion and the half width of pulse echo was also considered similarly. And defect detectabilities of Lamb waves were investigated experimentally. In the range of  $0 < fd$  (the product of frequency and thickness) (10 (MHz $\cdot$ mm), 8 Lamb waves were estimated to be useful for ultrasonic testing. Based on these information obtained, improved Lamb wave testing equipment was developed. Having a wide-band transducer, it can change the test frequency and automatically set the incident angle of transducer to generate the Lamb wave of the optimum mode for enabling testing of various thickness plates by  $\mu$ -processor.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

## Study on Optimum Conditions for Lamb Wave Ultrasonic Testing and Its Application to Product Line



市川 文彦  
Fumihiko Ichikawa  
鉄鋼研究所 計測制御  
研究部 主任研究員(課  
長補)



栗田 邦夫  
Kunio Kurita  
鉄鋼研究所 計測制御  
研究部 部長



丸山 英雄  
Hideo Maruyama  
本社 計量器技術セン  
ター 主査(課長)



高橋 暁  
Satoru Takahashi  
千葉製鉄所 設備技術  
部電気計装技術室 主  
査(課長補)

### 要旨

板波の伝播にともなう鋼板の表面変位と板波の送受信信号の強さとの関係、および群速度分散の大きさと反射エコーの半値幅との関係について、理論的に考察し、実験的に補足した。また、板波探傷法の欠陥検出能については、実験的に調査した。この結果、 $0 < fd \leq 10$  (MHz・mm) の範囲では 8 つの領域において探傷に適すると思われる板波を見出した。得られた知見をもとに、従来の問題点を解消し、改良型の板波探傷装置を開発した。主な特徴は、広帯域探触子を使うこと、探傷周波数を可変としたこと、マイコンを利用し、探触子の入射角、探傷周波数を自動設定し、0 から 6 mm の範囲においてどの板厚でも最適な板波で自動探傷できるようにしたことである。

### Synopsis:

The relation between the displacement of the plate during propagation of Lamb waves and detected signal intensity of Lamb waves was considered theoretically and experimentally. The relation between the magnitude of group velocity dispersion and the half width of pulse echo was also considered similarly. And defect detectabilities of Lamb waves were investigated experimentally. In the range of  $0 < fd$  (the product of frequency and thickness)  $\leq 10$  (MHz・mm), 8 Lamb waves were estimated to be useful for ultrasonic testing. Based on these information obtained, improved Lamb wave testing equipment was developed. Having a wide-band transducer, it can change the test frequency and automatically set the incident angle of transducer to generate the Lamb wave of the optimum mode for enabling testing of various thickness plates by  $\mu$ -processor.

## 1 緒 言

超音波板波は比較的薄い固体平面層内を平面に沿って伝播する弾性波である。この板波を超音波探傷に利用すると、単一の探触子によって、鋼帯断面の全域にわたって検査ができ、鋼帯の圧延方向に関する一次元の走査で、鋼帯の全面検査が可能になり、オンライン探傷に適している。この理由により、超音波板波探傷法は薄鋼帯を対象に圧延工程に導入され、品質管理の一方法として、鉄鋼各社で利用されている。しかし、板波は通常の超音波探傷に使われているたて波や横波と異なり、種々の振動様式(モード)、音速が周波数によって変化する速度分散、さらに板厚方向について変位分布が異なるなどの特異な性質を持っており、その全容は完全には解明されていない。このため、板波探傷が最適な条件下で適用されているとはいえないのが現状である。一方、近年製品品質への要求は一層厳しくなっており、より小さな欠陥を検出するため、板波探傷の欠陥検出の性能向上の必要性が生じている。これらの問題および要求に

対処するため、板波の基本的な性質をさらに解明し、最適な条件下での探傷性能を把握しておくことが重要な課題であると考えられる。

本研究は、このような状況に対応して、実用的な観点から、理論的な検討を行い、理論計算結果を確認する実験と欠陥検出能に関する実験から、板波探傷の最適条件について考察を加え、その応用を図ったものである。

## 2 板波の基本的性質

板波については、種々の解析が試みられ<sup>1)2)</sup>、以下の基本的な特徴が一般に知られている。

(1) 多くの振動様式(モード)が存在し、その数は周波数と板厚の積(以下  $fd$  と略す)によって変化する。モードは振動の対称性によって 2 つのグループに分けられ、それぞれ斜対称モード ( $A_0, A_1, A_2, \dots$ ) および対称モード ( $S_0, S_1, S_2, \dots$ ) が

\* 昭和61年1月24日原稿受付

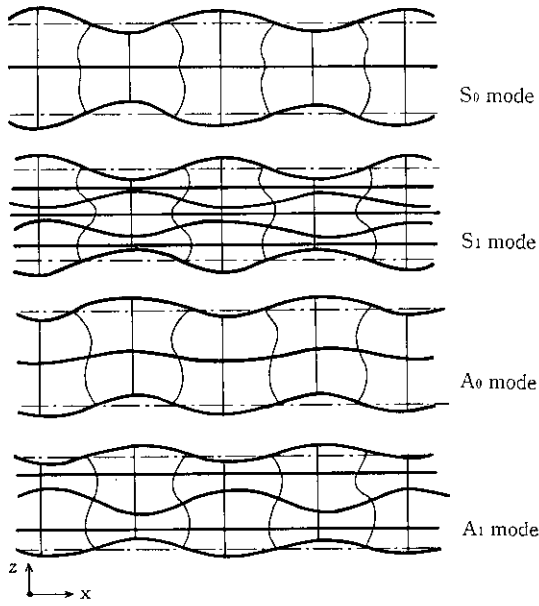


Fig. 1 Schematic illustration of the deformation of the plate during propagation of each waves at  $fd=6.3$  MHz·mm

ある。ここに添数字は振動の次数を表わす。Fig. 1 に  $fd=6.3$  (MHz·mm) における各モードの振動のようすを模式的に示す。

- (2) 各モードの板波は、Fig. 2 に示すような可変角探触子で送信受信することができ、探触子の角度と励振されるモードは、Fig. 3 に示すように  $fd$  の関数となる。
- (3) 板波の位相速度はモードによって異なるとともに、Fig. 4 の

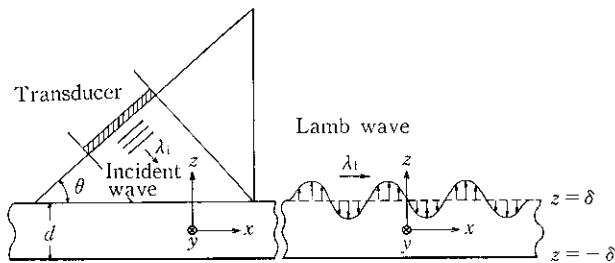


Fig. 2 Excitation and reception of Lamb waves in wedge method

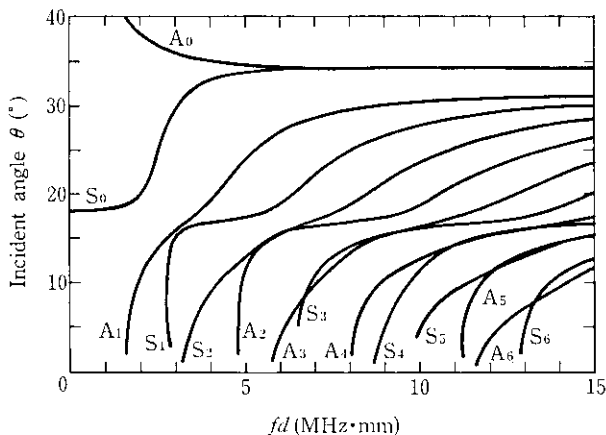


Fig. 3 Relation between incident angle of transducer and  $fd$  to excite and receive Lamb waves

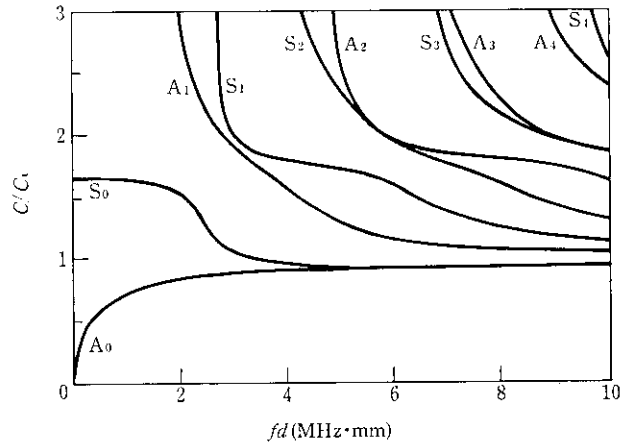


Fig. 4 Relation between phase velocity and  $fd$  for each mode of Lamb wave ( $C_1$ : velocity of shear wave)

ように  $fd$  にも依存する。すなわち、位相速度は速度分散する。

- (4) 位相速度分散により、群速度が存在し、群速度も  $fd$  に依存する。
- (5) 板波は平面被導波となるので、その距離振幅特性は (1) 式で表わされる<sup>2)</sup>。

$$P = P_0 \exp(-\alpha x) / \sqrt{x} \dots \dots \dots (1)$$

ここに

- $P$ : 音圧
- $\alpha$ : 減衰定数
- $x$ : 伝播距離
- $P_0$ : 定数

- (6) 板波の板端面または欠陥からの反射では、そこでの境界条件を満たすため、モード変換がおり、入射したモード以外のモードも反射してくる場合がある<sup>3,4)</sup>。

以上、これまで知られている板波の基本的な性質について示したが、実際に板波を使って超音波探傷を行おうとすると、

- (1)  $fd$  値によって励振または検出しにくいモードがある。
- (2) エコー波形の鋭さが、モード、 $fd$  値によって大きく異なる。
- (3) 送信の中心周波数と異なった周波数のエコー波形が観測される。

など複雑な様子を示す。これらは、探傷の際のモード設定時の誤りや最適モードを見出す場合など実用に際して障害となる。次節以降で、これら (1), (2), (3) の現象を理論的に解明することを試み、超音波板波の探傷最適条件について検討を加える。

### 3 理論的検討

#### 3.1 板波の表面変位と送受信信号強度

板波は、Fig. 2 に示したように可変角探触子で発生させ、検出するのが一般的である。いま、音響結合体の超音波の波長を  $\lambda_1$ 、板波の波長を  $\lambda$ 、可変角探触子の角度を  $\theta$  とするとき、これらの変数が (2) 式の関係を満たすとき、板波は最も効率良く送受信される<sup>2)</sup>。

$$\lambda_1 = \lambda \sin \theta \dots \dots \dots (2)$$

この関係を、各々の板波モードについて、 $fd$  の関係として図示したのが Fig. 3 である。しかし、これは板波を効率よく送受信す

るための必要な条件ではあるが十分条件ではない。超音波振動子と試料の間の音響結合体が水、油などの液体の場合、その性質上、試料表面に垂直な変位が有効に作用するから、板波の板表面での粒子変位の板厚方向成分 (Z 成分) が小さい場合、超音波振動子と試料間の音響的作用は小さくなる。このことは、特に板波のエコー波を受信するとき問題となり、板表面での粒子変位の Z 成分が小さいモードの板波は受信することが困難であると考えられる。そこで、Fig. 2 に示される厚さ  $d$  の鋼板の X 方向に伝播する板波の変位分布を弾性力学的解析により求めてみる。スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルを導入し、鋼板の表裏面が自由端であるという境界条件を満足するポテンシャルを求める。板波によって鋼板内に生じる変位と応力は、これらのポテンシャルによって表現できる。板波の各モードでの変位ベクトル ( $U, W$ ) の各成分を表わす式を (3) 式に示す。

対称モードの場合、

$$\left. \begin{aligned} U &= \alpha k_s \left( \frac{\cosh q_s z}{\sinh q_s \delta} - \frac{2q_s s_s}{k_s^2 + s_s^2} \times \frac{\cosh s_s z}{\sinh s_s \delta} \right) \\ &\quad \times \exp \left[ i \left( k_s x - \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \\ W &= -\alpha q_s \left( \frac{\sinh q_s z}{\sinh q_s \delta} - \frac{2k_s^2}{k_s^2 + s_s^2} \times \frac{\sinh s_s z}{\sinh s_s \delta} \right) \\ &\quad \times \exp [i(k_s x - \omega t)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3a)$$

斜対称モードの場合、

$$\left. \begin{aligned} U &= \beta k_a \left( \frac{\sinh q_a z}{\cosh q_a \delta} - \frac{2q_a s_a}{k_a^2 + s_a^2} \times \frac{\sinh s_a z}{\cosh s_a \delta} \right) \\ &\quad \times \exp \left[ i \left( k_a x - \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \\ W &= -\beta q_a \left( \frac{\cosh q_a z}{\cosh q_a \delta} - \frac{2k_a^2}{k_a^2 + s_a^2} \times \frac{\cosh s_a z}{\cosh s_a \delta} \right) \\ &\quad \times \exp [i(k_a x - \omega t)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3b)$$

ここに、

$$\begin{aligned} d &= 2\delta \\ q_{s,a}^2 &= k_{s,a}^2 - k_1^2 \\ s_{s,a}^2 &= k_{s,a}^2 - k_i^2 \end{aligned}$$

- $x$ : 板波進行方向座標
- $z$ : 板厚方向座標
- $\omega$ : 板波の角周波数
- $k_{s,a}$ : 板波各モードの波数ベクトルの大きさ
- $k_1$ : 鋼板たて波の波数ベクトルの大きさ
- $k_i$ : 鋼板横波の波数ベクトルの大きさ
- $\delta$ : 板厚の 1/2
- $s, a$ : それぞれ対称, 斜対称モードを表わす添字
- $U, W$ : それぞれ変位ベクトルの  $x, z$  成分
- $\alpha, \beta$ : 比例定数

ここで、鋼板表面での変位ベクトルの  $z$  成分の大きさを表わす指標として、(4) 式で表わされるパラメータ  $W_0$  を導入する。

$$W_0 = \frac{[W]_{z=\delta}}{\sqrt{\int_{-\delta}^{\delta} (U^2 + W^2) dz}} \dots\dots\dots (4)$$

鋼板の弾性パラメータとして、ポアソン比=0.28, ずれ弾性率=  $8.03 \times 10^{10}$  (N/m<sup>2</sup>), 密度=  $7.8 \times 10^3$  (kg/m<sup>3</sup>) としたときの各モードについて、 $W_0$  と  $fd$  との関係をも (3), (4) 式を使って計算した結果を Fig. 5 に示す。 $W_0$  がモードや  $fd$  によって大きく変化していることがわかる。この  $W_0$  は、板波を音響結合体として液体を使用した可変角探触子などで送受信するとき、板波の送受信の容易性の指標となることが考えられる。すなわち、Fig. 5 で  $W_0$  が

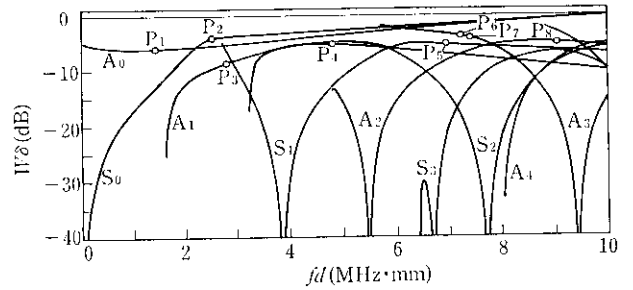


Fig. 5 Relation between  $W_0$  and  $fd$  for each mode of Lamb wave

比較的大きなモードの板波は、感度の良い送受信ができ、 $W_0$  が小さなものは、ほとんど送受信できないことが考えられる。

### 3.2 群速度分散とエコー波形の尖鋭性

板波の位相速度は板波の各ポテンシャルを求めるときに得られる特性方程式を計算機で数値的に解くことによって得られる。群速度  $C_g$  は、(5) 式の関係を使い、位相速度  $C$  から求めることができる<sup>1,9)</sup>。

$$C = C_g \left( 1 - \frac{f}{C} \frac{\partial C}{\partial f} \right) \dots\dots\dots (5)$$

但し

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

群速度  $C_g$  のパルス波が距離  $l$  を伝播する時間を  $t$ 、パルス波の中心周波数が  $f_0$ 、その周波数領域での拡がりの半値幅を  $\Delta f$ 、 $\Delta f$  による  $t$  の拡がりを  $\Delta t$  とすれば、 $\Delta t$  はエコー波形の半値幅を表し、

$$\begin{aligned} \Delta t &= A_0 \left[ \frac{\partial t}{\partial f} \right]_{f=f_0} \times \Delta f \\ &= A_0 \Delta f \left[ \frac{\partial C_g}{\partial f} / C_g^2 \right]_{f=f_0} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$A_0$ : 比例定数

となる。そこで、(7) 式で表されるパラメータ  $D_g$  を導入すれば、 $D_g$  は、群速度分散によって影響を受けるエコー波形の鋭さに密接な関係を持つパラメータになる。

$$D_g = \frac{\partial}{\partial (fd)} \left( \frac{C_g}{C_i} \right) / \left( \frac{C_g}{C_i} \right)^2 \dots\dots\dots (7)$$

$C_i$ : 試料の横波速度

板波の各モードについて、 $D_g$  と  $fd$  との関係特性方程式の数値解および (5), (7) 式を使って計算した結果を Fig. 6 に示す。 $D_g$  は、モード、 $fd$  値によって複雑に変化することがわかり、 $D_g$  が零に近いところでは、そのモードの板波は、速度分散の影響を

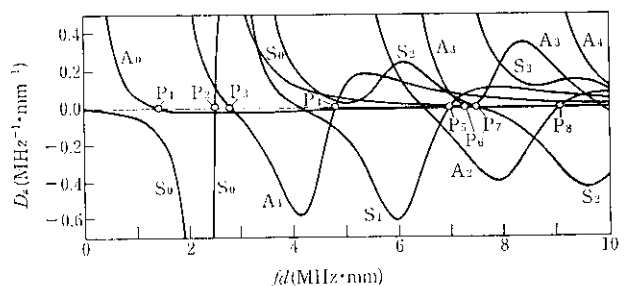


Fig. 6 Relation between  $D_g$  and  $fd$  for each mode of Lamb wave

まり受けず、励振時の波形を保ち、鋭いエコー波形が得られることが推定される。

## 4 実験的検討

### 4.1 実験装置

今回用いた実験装置のブロック図を Fig. 7 に示す。関数発生器により、送信波の中心周波数を任意に設定し、パルス発振器により、送信波のパルス幅を任意に変えることができる。探触子は 2.25 MHz のタイヤ型可変角探触子であるが、帯域幅の広いものを利用した。また、試料としては、低炭素鋼の熱延鋼板および冷延鋼板を使用した。

以上の実験系を用いて、送信周波数および板厚を変化させることにより、 $fd$  値を変化させ、各  $fd$  値における板波の諸特性を調査し、理論計算との比較を行った。

### 4.2 送受信の容易な板波モード

厚みが 4 mm の鋼板に対し、探触子の励振周波数を 1.8~2.3

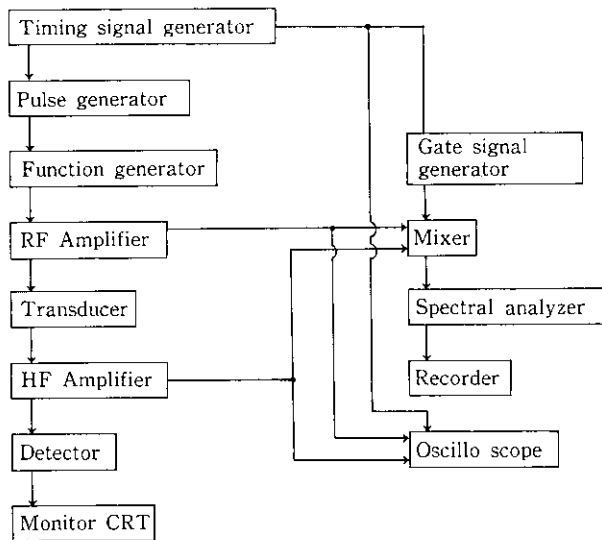


Fig. 7 Block diagram of experiment system for Lamb wave ultrasonic testing

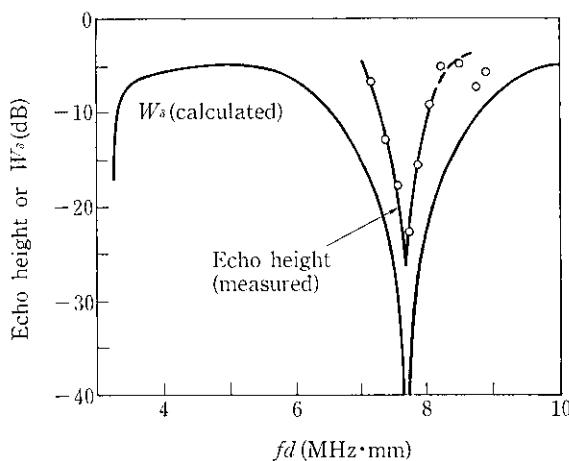


Fig. 8 Comparison between echo height from plate edge and calculated  $W_s$

MHz の間で変化させて、 $fd$  値で 7.2~9.2 (MHz·mm) の  $S_2$  モードの板波を発生させ、鋼板端面での反射エコー高さを測定した。Fig. 8 にその結果を示す。同図には (4) 式で計算した  $W_s$  の値も示してある。本実験で使用した探触子は、公称 2.25 MHz になっており、その周波数特性はフラットではないので、超音波の送受信効率はこの図のみで、定量的には比較できないが、 $W_s$  値が小さいところでは、エコー高さも小さくなっていること、探触子の周波数特性が悪い周波数 (2.25 MHz から離れている周波数) のところでも  $W_s$  値が大きくとエコーも大きくなっていることから、 $W_s$  値とエコーの大きさには良い相関があると考えられる。実験では、端面エコーの強度を測定しているため、端面で反射するときのモード変換を考慮する必要があるが、他のモードに対しても、 $W_s$  値の小さいところでは、端面エコーは観測されないか、小さいことが確認できた。このことから、少なくとも  $W_s$  値の小さい板波は、タイヤ型可変角探触子では検出が困難であることが実験的にも明らかになった。

### 4.3 エコー波形の尖鋭性

厚みが 3.2 mm の鋼板に対して、探触子の励振周波数を 1.7~2.2 (MHz) の間で変化させて、 $fd$  値で 5.6~7.2 (MHz·mm) の  $S_1$  モードの板波を発生させ、鋼板端面エコー波形をオシロスコープで観測した。Fig. 9 に (7) 式で計算した  $D_g$  とエコー波形の半値幅  $\Delta t$  との関係を示した。 $D_g$  が零に近いところでは、半値幅  $\Delta t$  も小さく、鋭いエコー波形が得られている。 $D_g$  が大きいところでは、 $D_g$  と  $\Delta t$  に比例関係は得られていないが、いずれも幅広い鈍ったエコー波形となっている。他のモードでも、同様の実験をしたが、 $D_g$  が零に近い値のモードのところでも鋭いエコー波形が観測できている。以上の実験から、少なくとも、 $D_g$  が零に近い値のモードでは、鋭いエコー波形が得られることを実験的にも確認できた。

### 4.4 送信周波数と異なる周波数のエコー波

厚みが 3.2 mm の鋼板に対して、送信パルスの中心周波数を 1.8~2.4 (MHz) の間で変化させ、端面エコーを観測した。このとき、いずれの送信周波数においても、探触子角度 11 度付近で、中心周波数 2.3 MHz の鋭いエコー波形を検出する。このエコー波は、探触子の角度と  $fd$  値から、 $fd=7.3$  の  $A_0$  モードの板波であることがわかる。そこで、この実験では、送信パルスについては、周波数解析装置を用いて、2.3 MHz の成分の大きさを測定し、端面エ

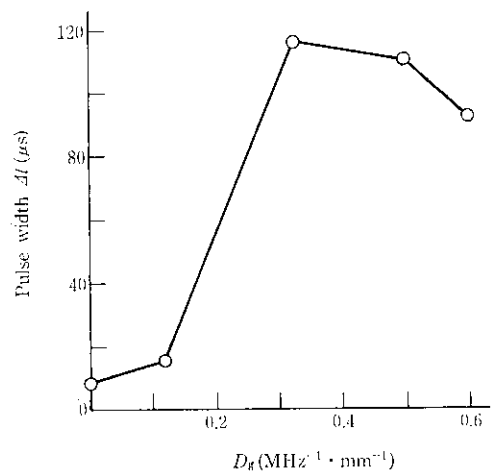


Fig. 9 Comparison between pulse width of edge echo and calculated  $D_g$

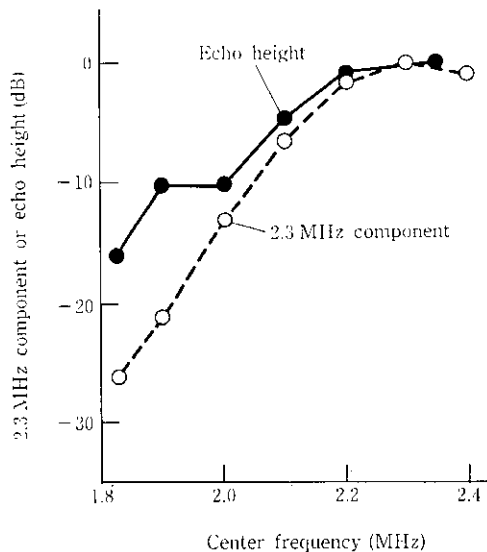


Fig. 10 Comparison between edge echo height of  $P_7$  wave and 2.3 MHz component of exciting pulse when center frequency of exciting pulse is varied

コー波については、そのときのエコー高さを測定した。Fig. 10に、送信パルスの中心周波数と2.3 MHz成分の大きさおよび端面エコー高さの関係を示した。2.3 MHz成分の大きさと端面エコー高さには良い相関がある。この実験結果から、送信波がパルス波であり周波数成分に拡がりを持つこと、この結果、この周波数成分に応じた板波が励振されること、このうち  $D_g$  が零に近く、 $W_0$  が大きな値を持つ板波は、波形のくずれがなく、探触子によって効率良く検出されるので、送信の中心周波数がずれていても十分な強度で観測されると解釈できることがわかった。

4.5 探傷に適するモードと欠陥検出能

探傷に適する板波のモードの条件としては、

- (1) 送受信効率が良く、充分大きな強度のエコー波が得られること
  - (2) エコー波形が鋭く、時間分解能が高いこと
  - (3) 欠陥検出能が良いこと
- の3つが大きな要素としてあげられる。

(1), (2) を満たす板波は、これまでの実験と考慮により、理論計算により、 $W_0$  と  $D_g$  の値を調べることによって探すことができる。ここでは、 $W_0$  値が、 $S_0$  モードの  $fd=10$  (MHz $\cdot$ mm) における  $W_0$  値の10%以上の大きさを持つこと、 $D_g$  値が絶対値で0.15以下であることを目安として、(1)と(2)の条件を満たすと思われる板波モードを  $0 < fd \leq 10$  (MHz $\cdot$ mm) の間で求めた。結果を Fig. 11 のモード・探触子角度グラフに実線で示した。このなかで特に  $D_g$  が零であるところは8点あり、最も鋭いエコー波形が期待される。ここでは、これら8点の板波を  $P_i$  板波 ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) と呼ぶことにし、注目する。この8点の板波の諸特性を Table 1 に示した。

次に、探傷に適する板波の3番目の条件である欠陥検出能については実験的に検討した。鋼板内部に欠陥(主に介在物)を持つサンプルを工程品から採集し、Cスキャン探傷機により、欠陥位置を確認したのち、各板波モードによる探傷波形を比較した。Photo 1 に  $fd=4.81$  (MHz $\cdot$ mm) での各モードの探傷波形の例を示す。 $P_4$  板波に相当する  $A_1$  モードの探傷波形は、他のモードと比較して、欠

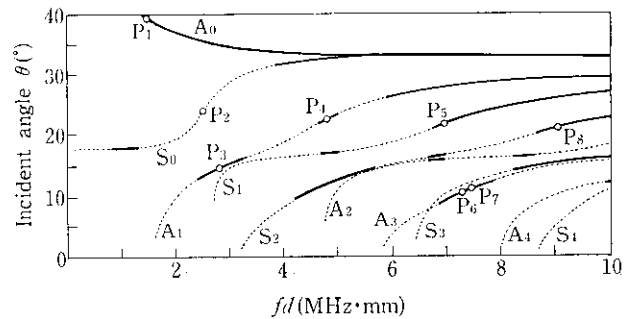


Fig. 11 Display of Lamb waves estimated to be good for ultrasonic testing (solid-lines satisfy  $W_0 > -20$  dB and  $|D_g| < 0.15$  MHz $^{-1}\cdot$ mm $^{-1}$ , point  $P_i$  satisfy  $W_0 > -20$  dB and  $|D_g|=0$  MHz $^{-1}\cdot$ mm $^{-1}$ )

Table 1 Characteristics of  $P_i$  Lamb waves

$P_i$	$fd$ (MHz $\cdot$ mm)	mode	$C/C_t$	$C_g/C_t$	$W_0$ (dB)
$P_1$	1.42	$A_0$	0.79	1.01	-6.0
$P_2$	2.52	$S_0$	1.23	0.54	-4.0
$P_3$	2.80	$A_1$	2.00	1.18	-8.5
$P_4$	4.81	$A_1$	1.33	0.69	-5.1
$P_5$	6.97	$S_1$	1.38	0.70	-5.2
$P_6$	7.26	$A_3$	2.80	0.78	-3.8
$P_7$	7.44	$A_3$	2.60	0.78	-3.9
$P_8$	9.09	$A_2$	1.40	0.71	-5.1

$C$ : phase velocity of Lamb wave  
 $C_g$ : group velocity of Lamb wave

陥エコー波形が鋭く、欠陥をSN比良く明瞭に検出していることがわかる。このようにして、 $P_1, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$  の各板波について、N数は少ないが、欠陥検出能の優位性を確認した。

次に、板波の定量的な欠陥検出能をみるため、 $P_6, P_7$  板波に相当する、 $fd=7.4$  の  $A_3$  モードについて、欠陥エコー高さと欠陥の大きさの関係について調査した。調査方法は、工程品から採集したサンプル板の欠陥位置を超音波Cスキャン探傷により高精度に同定し、その欠陥を板波で再度探傷する方法をとり、欠陥の大きさについては、長さ(圧延方向寸法)はCスキャン探傷の結果より、また、幅(板幅方向寸法)および厚み(板厚方向寸法)については、圧延方向に垂直な断面を光学顕微鏡で観察することにより決定した。板波の欠陥エコー高さと欠陥の大きさ(体積)の関係を Fig. 12 に示した。図で、欠陥エコー高さとしては、一定距離の鋼板端面エコー高さを  $B$  とし、欠陥エコー高さ  $F$  と  $B$  の比  $F/B$  を用い、欠陥エコー高さについては、距離振幅特性を考慮した。結晶組織などに起因する雑エコーの高さは  $F/B$  で -53 dB である。検出限界としてSN比2をとると、欠陥検出の Threshold レベルは -47 dB であり、このときの欠陥の大きさは、体積で  $0.034$  mm $^3$  程度である。すなわち、スラブ段階で直径  $400 \mu\text{m}$  の介在物が、熱延または冷延工程で圧延方向に延ばされ、板波探傷の検出限界として検出されたとみることができる。なお、本実験で対象となった欠陥は、ほとんどが、鋼板の板厚方向  $1/4$  から表面の間に存在したもので、板波の変位分布が板厚方向で一様でない特徴を考えると、この欠陥検出能は一応の目安とすべきである。

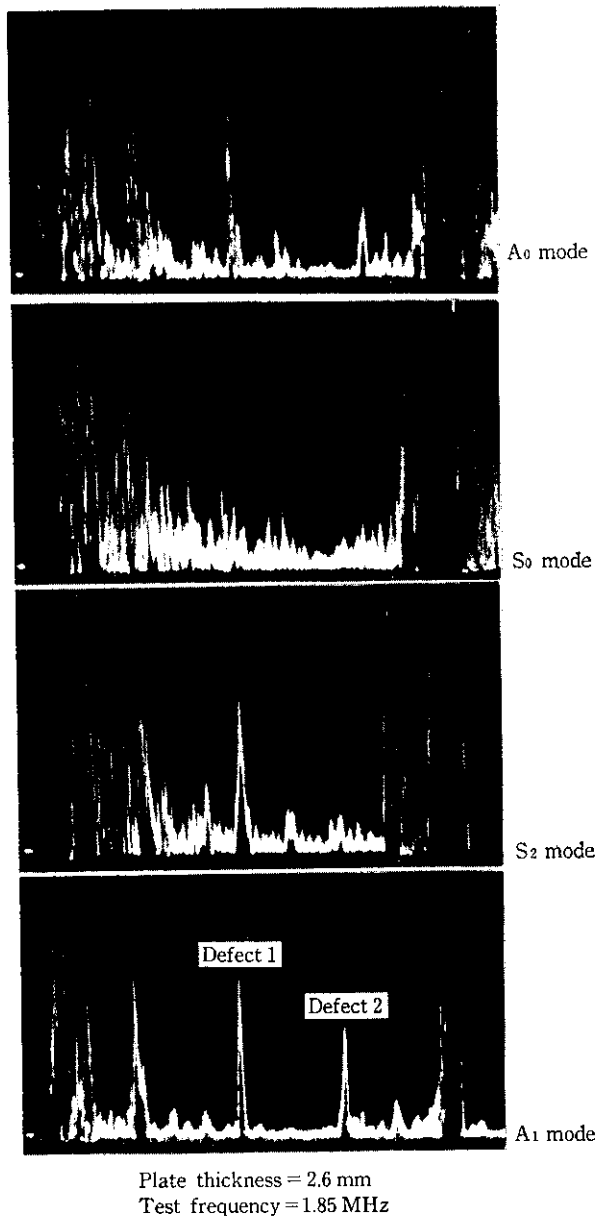


Photo 1 A-scope of each Lamb wave mode during testing a sheet which contains defects (Plate thickness=2.6 mm, test frequency=1.8 MHz, A<sub>1</sub> mode is P<sub>4</sub> wave in this case, and detects defects more clearly than other modes)

## 5 改良型板波探傷装置の開発

これまで、板波の特性について、理論的、実験的に明らかにしてきた。得られた知見をもとに、従来の板波探傷機の問題点を明らかにし、板波探傷機の改良型を開発したので<sup>9)</sup>、その概要を次に述べる。

### 5.1 従来型板波探傷機の問題点

従来の板波探傷機の問題点を次に列挙する。

- (1) 探傷周波数が一定であり、被検査材の板厚によって、適当な板波モードが使えない場合がある。例えば、探傷周波数 2.25 MHz、板厚 1.6 mm の場合、 $fd=3.6$  (MHz $\cdot$ mm) となり、Fig. 11 でわかるように、モード選択の余地は A<sub>0</sub> モードのみ

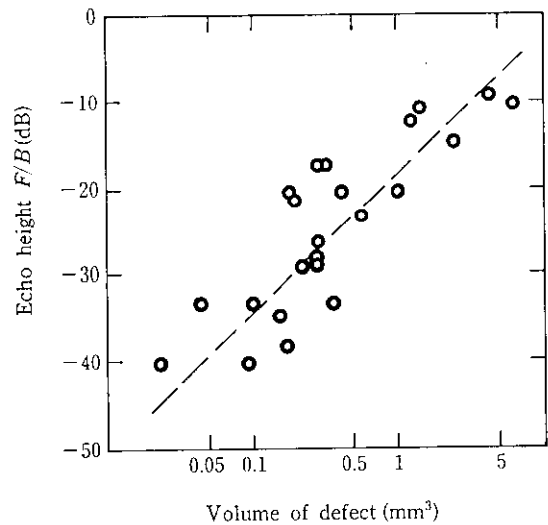


Fig. 12 Relation between defect echo height and volume of defect which are detected using P<sub>7</sub> wave (Defects are inclusions which exist between surface and quarter of thickness in depth)

である。

- (2) 従来のタイヤ型探触子は、角度の設定が 0~35° になっており、P<sub>1</sub> 板波 (励振角度 39°) を使えるようになっていない。
- (3) 送信の中心周波数と異なる板波モードが存在し、現場でのモード設定、確認に誤りをする可能性がある。
- (4) 連続ラインでは、コイル継目で板厚が変わり、板波モードの迅速設定変更が必要である。

### 5.2 改良型板波探傷装置

以上の従来型の問題点を解消するため、前章で得られた知見を有効に活用し以下の機能を有する板波探傷装置を開発した。

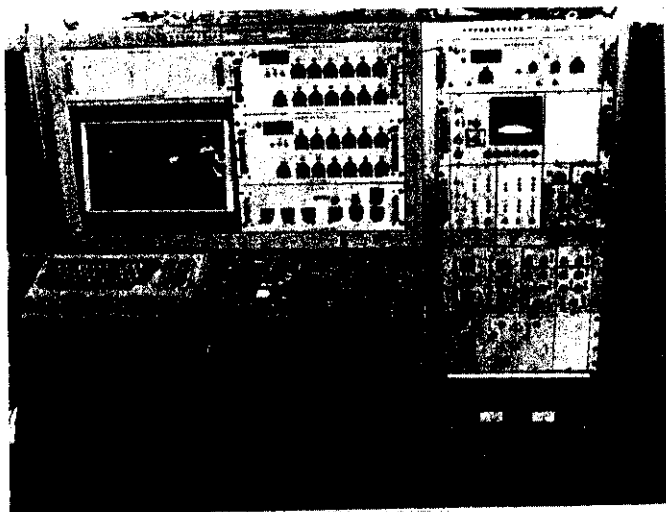
- (1) 探傷周波数を 1.7~2.5 MHz まで可変にした。
- (2) 探触子として、広帯域な周波数特性を持つ探触子を採用した。
- (3) 探触子の入射角の可変範囲を 0~40° とした。
- (4) 各板厚毎に最適と思われるモード (P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub> 板波) を設定した。
- (5) 各板厚毎に探触子の入射角および探傷周波数をマイコンで自動設定する機能をもたせ、どんな板厚でも最適モードで自動探傷できるようにした。

上記特長を持つ探傷装置の外観を Photo 2 に示す。本装置により、特性の優れた、P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub> の板波を効率よく送受信して使用することによる欠陥検出能の向上とともに自動化によるオペレータの作業の負荷軽減によるミスの減少などにより板波探傷の信頼性の向上が図れた。

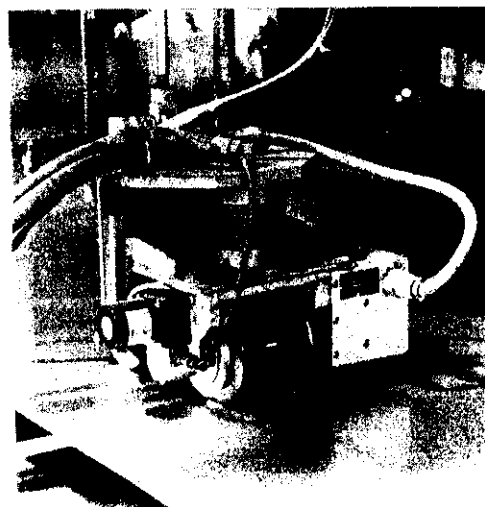
## 6 結 論

可変探触子を用いて、板波探傷を行う場合の板波の諸特性を理論的、実験的に検討、調査し以下の知見を得た。

- (1) 板波の各モードについて、板表面での粒子変位の板厚方向成分の大きさは、 $fd$  値によって様々に変化し、この変位成分の大きさが小さい板波は、音響結合体として水、油などの液体を用いる探触子で送受信するのは難しい。



Outward form of equipment



Transducer for on-line testing

Photo 2 Developed equipment for Lamb wave ultrasonic testing installed in cold rolled sheet repairing line

- (2) 群速度の周波数分散の大きさも、各モードとも  $fd$  値によって大きく変化するが、群速度の周波数微分値  $D_g$  が零となる板波は鋭いエコー波形が得られる。
- (3) 板表面で粒子変位の板厚方向成分が大きく、群速度の周波数微分の絶対値が小さい条件を満たすモードおよび  $fd$  値を数値計算により求めた。このうち、特に群速度の周波数微分値が零になる板波が  $0 < fd \leq 10$  (MHz $\cdot$ mm) の範囲で8点 ( $P_1$ ,  $P_2$ , ...  $P_8$  波と称した) あることを明らかにした。
- (4) これら、8点の板波は、板波方向  $1/4$  から表面の間に位置する欠陥に対し、他モードよりも検出感度が高い。
- (5) 板波の欠陥検出能は、励振周波数が約 2 MHz の場合、欠陥の体積にして  $0.034 \text{ mm}^3$  (製鋼時の介在物に換算して、直径約  $400 \mu\text{m}$ ) と考えられる。しかし、板波は変位分布が板厚方向によって異なり、検出能は欠陥の位置によって一定ではないの

で、1つの参考値としてみるべきである。

次に、上記8点の板波を探傷の最適モードとみなし、広範囲の板厚に対し、これらの板波を有効に使えるように設計したマイコン内蔵型板波探傷装置を開発し、現場に適用した。

従来、板波探傷法は、板波に多数のモードが存在し、適用の自由度が大きく、最適モードに関する調査が煩雑で、適用方法は必ずしも明確にはなっていなかった。本研究により、理論的、実験的に探傷に適する板波モードを検討し、適用の自由度をある程度絞り込むことができ、見通しを良くすることができた。しかし、板波の性質上、変位分布が板厚方向で異なるため、欠陥位置による検出感度の変化は避けられず、理想的には複数のモードで探傷することができれば更に有効であると思われ、液体を必要としない板波用トランスデューサの開発を含め今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) I. A. Viktorov: "Rayleigh and Lamb Waves", (1967), [Plenum Press, New York]
- 2) 山内二郎: 「超音波探傷の理論と基礎に関する研究報告書」, (1974), 132, [日本学術振興会]
- 3) P. J. Torvik: *J. Acoust. Soc. Am.*, 41 (1967) 2, 346-353
- 4) 尾上守夫, 宇田川建志: 非破壊検査, 18 (1969) 8, 360
- 5) 尾上守夫, 上野 立: 非破壊検査, 18 (1969) 8, 361
- 6) 日本鉄鋼協会共同研究会計測制御部会: 第77回計測部会資料, 計77-5-2, (1981), 私信