

## 電磁超音波法による冷延鋼板成形性の非破壊評価\*

平尾 雅彦<sup>\*1</sup>, 豊島 滋<sup>\*2</sup>, 福岡 秀和<sup>\*1</sup>  
藤沢 和夫<sup>\*3</sup>, 村山 理一<sup>\*3</sup>Nondestructive Evaluation of the Formability of Cold-Rolled Steel Sheets  
Using Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs)Masahiko HIRAO, Sigeru TOYOSIMA, Hidekazu FUKUOKA,  
Kazuo FUJISAWA, and Riiti MURAYAMA

An ultrasonic technique for determining the  $r$ -value in cold-rolled steel sheets is developed. The theory is reviewed for the interrelation between the velocity anisotropy of guided modes along the sheets and the texture (or preferred orientation), which is defined by the orientation distribution coefficients. The electromagnetic acoustic transducers, fabricated with permanent magnets and meanderline coils, allow the quick and easy measurement of transit time of the lowest symmetric ( $S_0$ ) mode. The in-plane average of the transit times shows a close correlation with both the  $\bar{r}$ -value and  $\{111\}$  pole intensity obtained through X-ray diffraction experiments.

**Key Words:** Material Testing, Formability, Anisotropy, Ultrasonics, Cold-Rolled Steel Sheets, Texture,  $r$ -Value, Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs)

## 1. 緒 言

冷延鋼板はプレス加工によって成形されるため、良好な加工性が要求される材料である。この薄鋼板の材質は等方的である必要はない。むしろ板厚方向より板の面内に変形しやすいほうが薄くなりやすく、深絞り加工などに適している。この塑性異方性は主として集合組織に起因し、Lankfordら<sup>(1)</sup>によって提案された塑性ひずみ比 ( $r$  値) によって特徴づけられる。特に、その面内平均値 ( $\bar{r}$  値) は集合組織に直接依存している。圧延面に平行に  $\{111\}$  面が強く発達しているほど、逆に  $\{100\}$  面は少ないほど、高  $\bar{r}$  値となり、加工性の優れた鋼板であることを示す<sup>(2)</sup>。目標とする  $\bar{r}$  値を得るため冷延鋼板の製造過程において、鋼の化学組成、圧延および熱処理条件を通じて集合組織が綿密に行われている。

$r$  値の検査方法として現状では引張試験が用いられている。鋼板の圧延方向、これに  $45^\circ$  と  $90^\circ$  の計 3 方

向から引張試験片を切り出して 15~20% の伸びを与え、伸びと幅縮み量から  $r$  値を求める方法である。3 方向の  $r$  値を  $r_0, r_{45}, r_{90}$  とすると、 $\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$  である。より簡便な試験方法としては、短冊形試験片の固有振動数と  $\bar{r}$  値との間の相関関係を利用する固有振動法 (JIS G 3135-1986) がある。しかし、この方法も定格の試験片を必要とし、やはり破壊的な抜き検査法である。

超音波の伝ば速度も集合組織を反映して変化し、異方性を示す<sup>(3)(4)</sup>。この現象を利用した集合組織の非破壊評価が近年注目されている。前報<sup>(5)</sup>では超音波 (体積波と  $SH_0$  板波モード) を用いて冷延鋼板における圧延再結晶集合組織の評価が可能なること、また鋼板の板厚方向に伝ばする縦波と横波の速度比 ( $x$  値) から  $\bar{r}$  を十分な精度で非破壊測定できることが示された。固有振動法と超音波法とは弾性異方性から間接的に  $\bar{r}$  値を測定する点において共通している。

本報では、電磁超音波探触子 (Electro-Magnetic Acoustic Transducers: 以下 EMAT と略す<sup>(6)(7)</sup>) によって薄鋼板を伝わる超音波 (Lamb 波) の伝ば時間を測定し、 $\bar{r}$  値との関連について理論的・実験的に調べる。EMAT とはコイルと永久磁石 (または電磁石) から構成される超音波探触子である。金属表面に置かれ

\* 平成元年 4 月 5 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 9 月 21 日。

\*<sup>1</sup> 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町 1-1)。

\*<sup>2</sup> 大阪大学大学院。

\*<sup>3</sup> 住友金属工業(株)システムエンジニアリング事業本部 (〒660 尼崎市西長洲本通 1-3)。

たコイルに高周波電流を流すと金属の表面に渦電流が誘起される。超音波は、この渦電流と磁界との相互作用によって発生するローレンツ力が波源となって励起され、また逆の過程で検出される。このように EMAT を用いると電磁結合によって直接導電体中に超音波を送受信できるため、圧延中の鋼板に対する非接触の超音波測定が可能となる。冷延鋼板の製造工程における  $\bar{r}$  値のオンライン計測にはこの EMAT を用いた超音波板波法が最も有望と思われる<sup>(8)(9)</sup>。

2. 集合組織と弾性定数の関係

Roe<sup>(10)</sup> と Bunge<sup>(11)</sup> が導入した級数展開法によれば、多結晶体の集合組織は結晶方位分布関数、 $w(\xi, \psi, \phi)$ 、によって定量的に記述される。 $w$  は圧延板の圧延方向 (RD), 幅方向 (TD), 板厚方向 (ND) からなる直交座標系に対し、結晶粒の三つの直交する  $\langle 100 \rangle$  軸が Euler 角  $\psi, \theta, \phi(\xi = \cos \theta)$  で表される方位をもつ確率密度を与える。結晶方位分布関数を球面調和関数で展開した際の展開係数を方位分布係数と呼ぶ。

$$w(\xi, \psi, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} Z_{lmn}(\xi) \times \exp(-im\psi) \exp(-in\phi) \dots\dots\dots (1)$$

$Z_{lmn}(\xi)$  は一般化された Legendre の陪関数である。

多結晶体の 2 次弾性定数  $\bar{C}_{ij}$  は結晶方位分布関数を重み関数として単結晶の 2 次弾性定数  $C_{ij}$  を Voigt-Reuss-Hill 平均して得られる<sup>(3)(4)</sup>。巨視的な直交異方性 (圧延集合組織) を仮定すれば、立方晶金属の場合  $\bar{C}_{ij}$  は集合組織の情報としては三つの独立な 4 次の方位分布係数  $W_{4m0}(m=0, 2, 4)$  だけ含み、次に示す斜方晶系に属する対称性を持つ。

$$\begin{aligned} \bar{C}_{11} &= \lambda + 2\mu - 2c\delta_1, & \bar{C}_{22} &= \lambda + 2\mu - 2c\delta_2 \\ \bar{C}_{33} &= \lambda + 2\mu - 2c\delta_3 \\ \bar{C}_{44} &= \mu + c\delta_4, & \bar{C}_{55} &= \mu + c\delta_5, & \bar{C}_{66} &= \mu + c\delta_6 \\ \bar{C}_{23} &= \lambda + c\delta_4, & \bar{C}_{31} &= \lambda + c\delta_5, & \bar{C}_{12} &= \lambda + c\delta_6 \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \delta_1 &= -(6\pi^2\sqrt{2}/35)[W_{400} - (2\sqrt{10}/3)W_{420} + (\sqrt{70}/3)W_{440}] \\ \delta_2 &= -(6\pi^2\sqrt{2}/35)[W_{400} + (2\sqrt{10}/3)W_{420} + (\sqrt{70}/3)W_{440}] \\ \delta_3 &= -(16\pi^2\sqrt{2}/35)W_{400} \\ \delta_4 &= -(16\pi^2\sqrt{2}/35)[W_{400} + (\sqrt{5}/2)W_{420}] \\ \delta_5 &= -(16\pi^2\sqrt{2}/35)[W_{400} - (\sqrt{5}/2)W_{420}] \\ \delta_6 &= (4\pi^2\sqrt{2}/35)(W_{400} - \sqrt{70}W_{440}) \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

座標系は図 1 のように  $x_1=RD, x_2=TD, x_3=ND$  と

した。Lamé の定数、 $\lambda$  と  $\mu$ 、および異方性因子  $c$  は単結晶弾性定数を平均して求められる ( $\alpha$ -Fe 単結晶の弾性定数  $C_{ij}$ <sup>(12)</sup> から、 $\lambda+2\mu=277.02$  GPa,  $\mu=81.70$  GPa,  $c=-136.30$  GPa と算出できる)。[ $\bar{C}$ ] の各成分は、 $\lambda$  と  $\mu$  からなる第一項の等方性部分と  $W_{4m0}$  の線形結合である  $\delta_l$  の異方性部分の和となっている。 $W_{4m0}$  の代表的な大きさを  $\epsilon$  で表すと、 $\epsilon$  はたかだか  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  であるため、強い集合組織を持つ金属材料でも弾性定数の異方性部分は等方性部分に比べてわずかである。これに伴い、超音波速度の異方性も弱く、 $W_{4m0}$  の測定には高い精度が必要となる。

超音波にはいくつかのモードがあり、対象物によって測定に用いるモードを選択できる。各モードの伝ば速度は密度と式(2)の  $\bar{C}_{ij}$  から計算する。いずれの場合も、伝ば速度は集合組織には方位分布係数  $W_{4m0}(m=0, 2, 4)$  を通じて依存し、これらによって決定される異方性を示す。本研究の目的は、前報<sup>(5)</sup>での体積波(縦波、横波)による成果を発展させて、板波伝ば速度と方位分布係数の関係から集合組織を評価し、これに起因する  $\bar{r}$  値を測定することである。板波 (Lamb 波) を使用するの、EMAT によって薄鋼板 (板厚 1 mm 以下) 中の体積波伝ば速度を測定することが現状では困難であることによる。

本報ではまず、薄板の面内任意の方向に伝わる板波の位相速度を与える分散関係式を導く。その準備のため座標系  $O-x_1x_2x_3$  を  $x_3$  軸まわりに角度  $\gamma$  だけ回転させ (図 1 参照)、新しい座標系  $O-X_1X_2X_3 (X_3=x_3)$  に関する弾性定数  $\tilde{C}_{ij}$  を Bond の座標変換公式<sup>(13)</sup>に従って求めておく。その結果は、 $\tilde{C}_{ij}$  は  $\bar{C}_{ij}$  を表す式(2)で  $W_{420}$  の項に  $\cos 2\gamma$  を、 $W_{440}$  の項に  $\cos 4\gamma$  を乗じることによって得られる。 $\tilde{C}_{33}=\bar{C}_{33}$  である。また、次の 4 成分も一般に零でなく、全体として単斜晶系の対称性を呈する。

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{16} &= (8\sqrt{2}c\pi^2/35)[(\sqrt{5}/2)W_{420} \sin 2\gamma \\ &\quad - (\sqrt{70}/2)W_{440} \sin 4\gamma] \end{aligned}$$

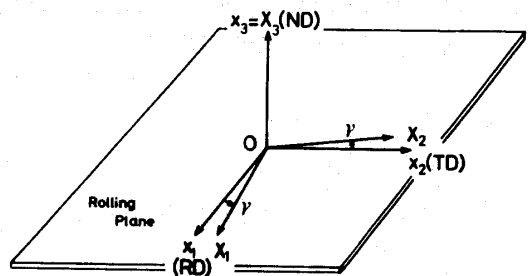


図 1 試料座標系。板波は  $X_1$  方向に伝ばする。

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{26} = & -(8\sqrt{2}c\pi^2/35)[(\sqrt{5}/2)W_{420} \sin 2\gamma \\ & + (\sqrt{70}/2)W_{440} \sin 4\gamma] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\tilde{C}_{36} = \tilde{C}_{45} = -(16\sqrt{5}c\pi^2/35)W_{420}\sin 2\gamma$$

3. 板波の分散関係式<sup>(14)(15)</sup>

集合組織を有する厚さ  $2d$  の弾性板の  $X_1$  方向に伝ばする板波の分散関係式を導く。波動による粒子変位を  $u(X_1, X_3, t)$  とすれば、 $u$  は運動方程式

$$\rho \ddot{u}_K = \tilde{C}_{KLMN}(\partial^2 u_M / \partial X_L \partial X_N) \quad \dots\dots\dots(5)$$

( $K=1, 2, 3$ ) と境界条件

$$X_3 = \pm d \text{ で } (\partial u_i / \partial X_j + \partial u_j / \partial X_i) \tilde{C}_{3KIJ} = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

を満足しなければならない。ただし弾性定数の表示については、指標四つのテンソル表示と指標二つの短縮表示を適宜使用している。式(4)の弾性定数成分が  $\gamma = 0, \pi/2$  以外では零でないため、一般に P-SV 振動 ( $u_1$  と  $u_3$ ) と SH 振動 ( $u_2$ ) は連成する。

しかし、連成項の大きさが  $O(\epsilon)$  であることを考慮すれば、 $\epsilon$  に関する第一近似の範囲内で等方弾性板の場合<sup>(16)</sup>と同様に P-SV 振動 ( $u_1$  と  $u_3$ ) と SH 振動 ( $u_2$ ) を分離して取扱うことができる。まず、式(5)、(6)の解を次の形に仮定する。

$$u = U(X_1, X_3, t) + \epsilon U'(X_1, X_3, t) + O(\epsilon^2) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$\epsilon=0$  の時の基本解  $U$  はすべての方位分布係数が零、つまり等方体に対する解であり、 $\epsilon U'$  は集合組織が存在するために生じる微小な摂動解である。P-SV 振動の摂動解を求めるには、 $U_1$  と  $U_3$  の既知の解と  $U_2=0$  を式(5)、(6)に代入し、 $O(\epsilon)$  の項から  $U'$  を支配する方程式を得る。この時、 $\gamma \neq 0, \pi/2$  なら  $U'_2 \neq 0$  であるが、 $U'_2$  は  $U'_1$  と  $U'_3$  には無関係である。すなわち  $U'_1$  と  $U'_3$  を求めるには最初から  $u_2=0$  とできる。逆に、SH 振動の場合は、 $u_1=u_3=0$  と置いて  $U'_2$  を導くことができる。

結局、弱い直交異方性を持つ弾性板に拡張された P-SV モード板波の分散関係式 (Rayleigh-Lamb 周波数方程式) は位相速度  $V$ 、波数  $k$ 、任意の  $\gamma$  に対し

$$\tan(m_a k d) / \tan(m_b k d) = [G_b H_a / G_a H_b]^{\pm 1} \quad \dots\dots\dots(8)$$

の形で得られる。ここで

$$\begin{aligned} G_I &= \tilde{C}_{11} - \tilde{C}_{13} m_I^2 - z \\ H_I &= [\tilde{C}_{13}(\tilde{C}_{13} + \tilde{C}_{55}) - \tilde{C}_{33}(\tilde{C}_{11} + \tilde{C}_{55} m_I^2 - z)] m_I \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$z = \rho V^2$ ,  $m_I^2 (I = a, b)$  は 4 次方程式

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{33} \tilde{C}_{55} m^4 - [\tilde{C}_{33}(z - \tilde{C}_{11}) + \tilde{C}_{55}(z - \tilde{C}_{55}) \\ + (\tilde{C}_{13} + \tilde{C}_{55})^2] m^2 + (z - \tilde{C}_{11})(z - \tilde{C}_{55}) = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(10)$$

の根である。式(8)の(+)と(-)はそれぞれ板の中立面 ( $X_3=0$ ) に関して対称および反対称な振動様式のモードであることを示す。式(9)、(10)において、 $[\tilde{C}]$  の各成分は  $\cos 2\gamma$  と  $\cos 4\gamma$  を通じて伝ば方向に依存する。このことから、すべての板波モードの速度異方性は独立な 2 回および 4 回回転対称性を持っていることがわかる。 $W_{400}$  は面内等方的な速度変化を引き起こす。 $W_{4m0}$  が与えられていれば、式(8)~(10)から位相速度  $V$  が  $kd$  と  $\gamma$  の関数として数値的に計算できる。なお、SH 板波モードの位相速度  $V$  は簡単に

$$\rho V^2 = \tilde{C}_{66} + \tilde{C}_{44}(n\pi/2kd)^2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

で与えられる ( $n$ : 整数)。

後に述べる実験では比較的低周波数の基本対称 ( $S_0$ ) モードを使用する。その位相速度  $V_{S0}$  は符号(+)の式(8)以下に  $kd \rightarrow 0$  の近似を使用して

$$\rho V_{S0}^2 = (\tilde{C}_{11} - \tilde{C}_{13}^2 / \tilde{C}_{33}) [1 - (kd)^2 \tilde{C}_{13}^2 / 3 \tilde{C}_{33}^2] \quad \dots\dots\dots(12)$$

あるいは、さらに変形して

$$\begin{aligned} V_{S0}(\gamma) = & V_0 \sqrt{1 - \delta} + (c/\rho V_0)(s_0 W_{400} \\ & + s_2 W_{420} \cos 2\gamma + s_4 W_{440} \cos 4\gamma) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。ここで、 $\delta = [\lambda/(\lambda+2\mu)]^2 (kd)^2 / 3$  は分散効果を表し、 $V_0 = \sqrt{4\mu(\lambda+\mu)/\rho(\lambda+2\mu)}$  は  $kd \rightarrow 0$  の極限における等方性弾性板での  $S_0$  モード伝ば速度を表す。鉄では  $V_0 = 5.418$  km/s である。係数  $s_0$  と  $s_2$  はポアソン比と  $\delta$  に依存するが、 $s_4$  は定数である。 $W_{4m0}$  と  $\delta$  がともに微小量であることを考慮すると、式(13)で両者の積が 2 次の微小量となるため、 $s_0$  と  $s_2$  の  $\delta$  依存性は実際上無視できる。この時、

$$\begin{aligned} s_0 &= (2\sqrt{2}\pi^2/35)\{3 + 16\lambda(\lambda+\mu)/(\lambda+2\mu)^2\} \\ s_2 &= -(8\sqrt{5}\pi^2/35)(3\lambda+2\mu)/(\lambda+2\mu) \\ s_4 &= 4\pi^2/\sqrt{35} = 6.673 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(14)$$

鉄については  $s_0 = 6.083$ ,  $s_2 = -9.183$  の値をとる。 $kd = 0$  の時の  $V_{S0}(\gamma)$  は Thompson ら<sup>(17)</sup> によって導出されている。

4. EMAT による測定方法

製造条件の異なる市販の冷延鋼板 11 枚を電磁超音波探触子 (EMAT) による  $S_0$  モードの実験に使用した。No. 1 の極低炭素 Ti 添加鋼板を除き、No. 2~11 の 10 枚は低炭素または極低炭素 Al キルド鋼板である。これらの試料鋼板は {111} 方位成分を中心とした

さまざまな強度の圧延再結晶集合組織を有する。試料鋼板は前報の実験で用いたものと同じであるので、化学組成、極点図などの詳細については前報<sup>(5)</sup>を参照されたい。ただし、No. 1~3の試料は同等の工程によって製造された別の鋼板であるため、 $r$  値等は再度測定した。寸法はいずれも 30 cm 角、板厚は 0.677~0.901 mm の範囲である。

EMAT による実験装置の概略を図 2 に示す。測定原理は音弾性応力測定に採用された Time-Interval Averaging<sup>(18)</sup> と呼ばれる方式である。シンセサイザから発生した単色波 6 周期を搬送波とするバースト電流で送信用 EMAT を駆動し、試料鋼板中に  $S_0$  モードの板波を伝ばさせる。バースト電流発生と同時に START 信号をカウンタに送り、計時を開始させる。カウンタは STOP 信号が入力されるまで基準周波数 100 MHz のクロックで時間を刻み続ける。試料を伝わった板波は受信信用 EMAT によって電気信号に変換され、のち増幅される。コンパレータはこの受信波形を (0, +5 V) のく形波列に整流変換する。このデジタル信号から一つのく形波 (本実験では第 7 波) をゲートによって取り出し、その立ち上がりに同期した STOP 信号をカウンタに送って、計時を停止させる。カウンタには板波伝ば時間と測定系固有の遅れ時間 ( $\tau$  とする) の和の  $10^3$  回にわたる平均が表示される。この測定方法は、受信信号を離散化することと多数回の時間間隔を平均することによって EMAT 固有の低い S/N 比を補い、 $S_0$  モード伝ば時間の高精度の測定を可能にした。

搬送周波数は 0.7 MHz に選んだ。この時、 $\delta$  は  $10^{-3}$  のオーダーで、 $\epsilon$  と同程度あるいはこれより大きい。この周波数は高次モードの遮断周波数より十分小さく、 $S_0$  モードと  $A_0$  (基本反対称) モードだけが伝ばできる。しかし、この帯域での  $A_0$  モード伝ば速度は非常に遅いため、 $S_0$  モードの測定の障害になることはない。

$S_0$  モード用 EMAT の構造を図 3 に示す。バイアス静磁界を与える永久磁石には Nd-Fe-B 系の NEOMAX ( $2 \times 3 \times 5 \text{ cm}^3$ : 住友特殊金属(株)製造) を使用した。3 cm の方向に磁化している。コイルの形状は Meanderline<sup>(6)(7)(19)</sup> と呼ばれるものである。これは平行な線 (本実験では 11 本) から構成され、交互に逆方向の高周波電流が流れる。発生するローレンツ力も互いに逆向きであるため、試料面内には平行線に垂直な方向に疎密波が発生する。この時、線の間隔が半波長に一致すると最も効率よく  $S_0$  波に変換される。図 3 の  $\Lambda$  は  $S_0$  波の波長で、[予測される  $V_{S_0}$  の値 (5.6 km/s)]  $\div$  [搬送周波数 (0.7 MHz)] から  $\Lambda = 8 \text{ mm}$  と

決めた。コイルの巻数は 6 とした。同形の二つの送受信信用 EMAT は中心間距離 145 mm に固定した。

5.  $S_0$  波伝ば時間の集合組織依存性

本測定方法では、 $T(\gamma) \equiv L/V_{S_0}(\gamma) + \tau$  がカウンタに表示される。 $L$  は  $S_0$  波の伝ば距離である。式(13)の右辺で  $V_0$  以外の項は微小量であるから

$$T(\gamma) = (L/V_0)[1 + \delta/2 - (c/\rho V_0^2)(S_0 W_{400} + S_2 W_{420} \cos 2\gamma + S_4 W_{440} \cos 4\gamma)] + \tau \dots (15)$$

が成り立つ。この  $T(\gamma)$  は  $S_0$  モード伝ば時間に対する集合組織と分散効果の影響をとともに第一近似内で考慮していることになる。

代表的な  $T(\gamma)$  の測定結果を図 4 に示す。図中の曲線は圧延方向を起点に  $10^\circ$  ごとの測定点から式(15)の関数形を仮定して最小二乗近似で得たものである。曲線と測定点との一致は  $T(\gamma)$  の変化が理論的に導かれた通り、定数、 $\cos 2\gamma$ ,  $\cos 4\gamma$  の 3 成分のみから構成されていることを示す。この近似曲線に含まれる  $\cos 2\gamma$  と  $\cos 4\gamma$  の係数はそれぞれ  $W_{420}$  と  $W_{440}$  に比例する。この方法で求めた方位分布係数を横波複屈折量から求めた  $W_{420}$  と  $SH_0$  モード板波の異方性から求めた  $W_{440}$  に比較したところ<sup>(5)</sup>、差異は両者とも  $5 \times 10^{-4}$  以下であった (簡便法として、 $\gamma = 0, \pi/4, \pi/2$  の 3 方向の  $T(\gamma)$  から上の 3 成分の係数を求めることができる。ここでは精度向上の目的から各鋼板 10 点の測定値を

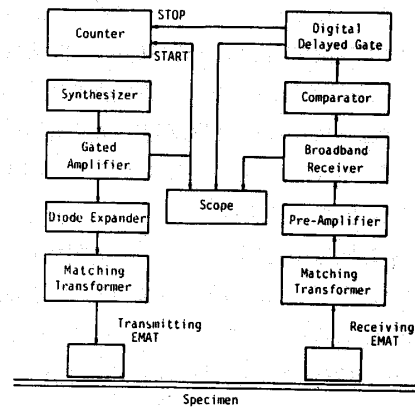


図 2 Time-Interval Averaging 法による測定系

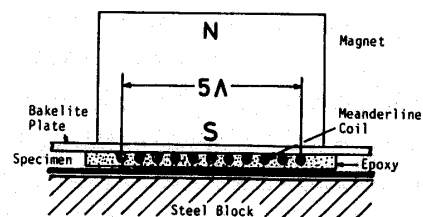


図 3  $S_0$  モード用電磁超音波探触子 (EMAT) の構造

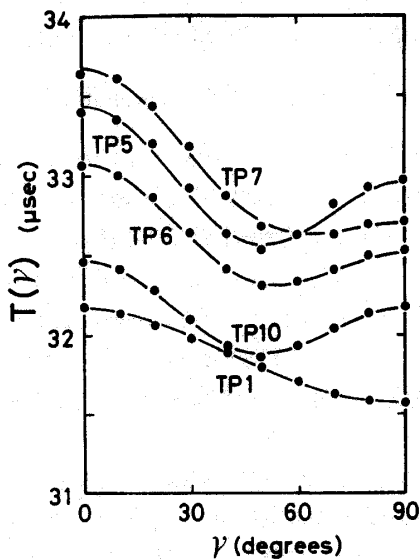


図4 S<sub>0</sub>波伝ば時間 T(γ) の測定例

使用した.)

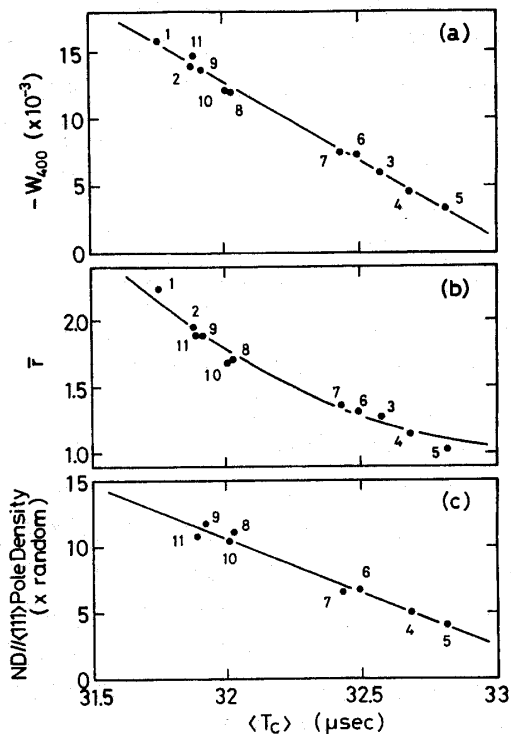
残る定数成分 (〈T〉とする) は圧延面内の平均伝ば時間に相当する。〈T〉から板厚によって異なる δ を補正すれば、W<sub>400</sub> だけを反映した平均伝ば時間

$$\langle T_c \rangle = (L/V_0) [1 - (c/\rho V_0^2) S_0 W_{400}] + \tau \dots (16)$$

を得る。L/V<sub>0</sub> と τ の値を必要な精度で求められないため、W<sub>400</sub> をさらに分離することは困難である。分散項 δ (~10<sup>-3</sup>) に対する補正量は 57~100 ns、〈T<sub>c</sub>〉の測定精度 (ばらつき) は 20 ns 以下であった。

図5 (a) に見られるように、11 枚の冷延鋼板について 〈T<sub>c</sub>〉は W<sub>400</sub> に比例し、式(16)の解析結果を実証している。この比較には、縦波/横波速度比 (x 値)<sup>(5)</sup> から求めた W<sub>400</sub> を使った。回帰直線 (相関係数 0.996) の傾きと W<sub>400</sub> = 0 での 〈T<sub>c</sub>〉の値より、L = 130.3 mm、τ = 9.047 μs と推定できる。

塑性異方性は集合組織によって支配されるが、冷延鋼板の場合とりわけ r 値が方位分布係数 W<sub>400</sub> と高い相関関係にあることが知られている<sup>(5)</sup>。W<sub>400</sub> に比例する 〈T<sub>c</sub>〉と JIS 5 号引張試験片を用いて求めた r 値の関連を図5 (b) に示す。このように 〈T<sub>c</sub>〉と r 値が明瞭な相関を示すことは定性的には次の代表的な三つの方位成分を用いて説明できる。鋼板面に平行な {111}, {110}, {100} 方位成分はこの順に r 値を高める<sup>(2)(20)</sup>。個々の成分の W<sub>400</sub> の値は結晶方位分布関数をデルタ関数の和で表現し、式(1)の逆変換に相当する積分を行って求められる<sup>(5)</sup>。その結果は {111}, {110}, {100} 成分の順に W<sub>400</sub> は (正負を含めて) 小さい値をとる。すなわち r 値と W<sub>400</sub> はほぼ反比例の関係にある。図5 (c) に 〈T<sub>c</sub>〉と X 線回折により測定された ND∥{111} 軸密度との関係を示す。



(a) 方位分布係数 W<sub>400</sub><sup>(5)</sup>  
 (b) 引張試験で測定した平均塑性ひずみ比 (r 値)  
 (c) X線回折による ND∥{111} 軸密度 (軸密度 1 はランダムな方位分布に相当する)

図5 補正された平均伝ば時間 〈T<sub>c</sub>〉と集合組織との関係. 数字は試料番号を示す。

軸密度の関係を示す。各試料での回折強度を無方向性試料での強度で規格化した値である。〈T<sub>c</sub>〉の {111} 方位強度への依存性は上の説明を裏づけ、塑性異方性と弾性異方性がともに集合組織に由来することを示している。

## 6. 結 言

冷延鋼板における圧延再結晶集合組織と超音波板波伝ば時間との関連について理論的・実験的に調べた。まず、方位分布係数 W<sub>4m0</sub> (m = 0, 2, 4) を含む多結晶体の弾性定数を用いて、集合組織を有する弾性板に拡張された板波の分散関係式を導いた。その特別な場合として、低周波数域での S<sub>0</sub> モード位相速度と方位分布係数の間の関係式を求め、分散効果の補正と実験結果の解釈に使用した。解析的に予測されたとおり、伝ば時間の測定値は W<sub>400</sub> に比例する面内等方的な変化と W<sub>420</sub> と W<sub>440</sub> で支配される異方性を示した。破壊的な集合組織評価法と対比したところ、平均伝ば時間 〈T<sub>c</sub>〉が r 値と ND∥{111} 軸密度の両者と密接に関係している実験結果が得られた。〈T<sub>c</sub>〉は方位分布係数

$W_{400}$  に比例することから、超音波板波の実験によって  $r$  値と  $W_{400}$  の間の高い相関が再確認されたことになる。以上の結果が、 $r=1.03\sim 2.24$  の広い範囲の異なる鋼種について得られたことは意義深いことと考える。

実験には非接触で  $S_0$  モードを送受信できる電磁超音波探触子 (EMAT) を使用した。EMAT による超音波法が冷延鋼板の集合組織 (特に  $r$  値) の簡便かつ迅速な非破壊評価に使用できることが明らかになり、集合組織オンライン計測への実用化が期待される。

終わりに、 $r$  値の測定結果、X線測定データとともに試料の冷延鋼板を提供していただいた住友金属工業 (株) の関係各位に謝意を表す。測定装置のうち、デジタルゲートは Dr. D. V. Mitrovic (ベオグラード大学) の、コンパレータは本学村上芳則助教授と山崎友裕氏の設計製作による。ここにお礼申し上げる。

## 文 献

- (1) Lankford, W. T., ほか 2 名, *Trans. ASM*, 42 (1950), 1197.
- (2) 長島, 集合組織, (1984), 丸善.
- (3) Sayers, C. M., *J. Phys.*, D, 15 (1982), 2157.

- (4) Hirao, M., ほか 2 名, *J. Acoust. Soc. Am.*, 81 (1987), 1434.
- (5) 平尾・ほか 3 名, 機論, 54-505, A (1988), 1814.
- (6) 川島, 非破壊検査, 34 (1985), 796.
- (7) Maxfield, B. W., ほか 2 名, *Mater. Eval.*, 45 (1987), 1166.
- (8) Clark, Jr., A. V., *MRS Bull.*, 13 (1988), 40.
- (9) Thompson, R. B., ほか 3 名, submitted to *Met. Trans.*
- (10) Roe, R. J., *J. Appl. Phys.*, 36 (1965), 2024.
- (11) Bunge, H. J., *Texture Analysis in Materials Science*, (1982), Butterworths.
- (12) Dever, D. J., *J. Appl. Phys.*, 43 (1972), 3293.
- (13) Auld, B. A., *Acoustic Fields and Waves in Solids*, (1973), Chap. 3, Wiley-Interscience.
- (14) Hirao, M. and Fukuoka, H. (McCarthy, M. F. and Hayes, M. 編), *Proc. IUTAM Symp. on ELASTIC WAVE PROPAGATION*, Elsevier-NorthHolland, (1989), 75.
- (15) Hirao, M. and Fukuoka, H., *J. Acoust. Soc. Am.*, in print.
- (16) Achenbach, J. D., *Wave Propagation in Elastic Solids*, (1973), Elsevier-NorthHolland.
- (17) Thompson, R. B., ほか 2 名, *Ultrasonics*, 25 (1987), 133.
- (18) Clark, Jr., A. V., ほか 3 名, *Ultrasonics*, 24 (1986), 281.
- (19) Thompson, R. B., *IEEE Trans.*, SU-20 (1973), 340.
- (20) 岡本・ほか 2 名, 住友金属, 14 (1962), 211.

## 討 論

〔質問〕 北川 孟 (豊橋技術科学大学)

(1) 測定法について:

① EMAT センサと試料との距離はどのくらいか。

② Lamb 波による冷間測定の場合、タイヤ形探触子等他の接触形センサと比較しての利点はなにか (EMAT センサは非接触で、熱間測定には利点があると考えられるが)。

(2) 測定材について:

① 試料 No. 1 の  $ND // \langle 111 \rangle$  軸密度はどのくらいか。

② 板面に平行な  $\{111\}$  方位は、比較的  $r$  値が大きかつその面内異方性が小さいのが特徴である。しかし  $\{111\} \langle uvw \rangle$  方位単結晶の  $r$  値は、実測値や理論値からたかだか 2.5 以下である。本論文の手法のように試料 3 方向の  $r$  値から  $r$  値を求めそれを改善する場合 (通常行われる方法であるが),  $r$  値が  $\infty$  である  $\{110\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  方位成分等面内異方性は大きいが特定方向の  $r$  値が大きい方位が 3 方向に寄与するような集合組織を発達させるようである。図 4 の試料 TP 1 (これが試料 No. 1 であるとして) だけが他の試料と面内異方性が異なる点からも集合組織が違うものと考えら

れるが、見解はいかがか。

〔回答〕 (1) 測定法について:

① 本報の実験は EMAT を試料面に接触させて行った。ただし、コイルと試料とは保護用のエポキシ材によって 0.8 mm だけ隔っている。EMAT の励起電力にもよるが、最大数 mm のリフトオフが可能である。

② 主として鋼板の探傷に使用されているタイヤ形探触子は以下の理由から集合組織測定には用いにくい;

(i) タイヤの変形による伝ば距離の変化や試料面とタイヤ間の油による接触状態の変動が大きく、十分な精度が得られない。

(ii) タイヤ形探触子は圧延中の鋼板の幅方向に伝わる板波の送受信に使用されているが、他の伝ば方向のものは開発が必要である。

(iii) タイヤ内の残存エコーのため、20 cm 程度の不感帯が存在する。一方、EMAT の不感帯は 10 cm 以下である。

(2) 測定材について:

① 試料 No. 1 の  $ND // \langle 111 \rangle$  軸密度は 10.2 が測定されている。

② 試料 No. 1 (Ti 添加鋼) は二つの点で特徴的である。第一は、全試料のうち最も  $T_c$  が (したがって  $W_{400}$  も) 小さく、同時に  $r$  値が最大である点である。第二に、前報<sup>(5)</sup>にも示したとおり  $W_{420}$  は負の大きい値をとるため、図 4 において  $T(\gamma)$  が  $\gamma=0^\circ$  から  $90^\circ$  へと単調に減少していることである。この第二の特徴は  $\{111\}\langle uvw \rangle$  方位を主成分とする考え方とは矛盾する。従来の研究により、Ti を添加すれば  $\{554\}\langle 22\bar{5} \rangle$  成分の発達が進められることが知られている<sup>(2)</sup>。この

方位成分については、 $W_{400}=-0.01993$ ,  $W_{420}=-0.00512$ ,  $W_{440}=0.00352$  が計算でき、また  $\{111\}$  方位と同等の高い  $r$  値を有する。したがって、 $\{554\}\langle 22\bar{5} \rangle$  方位 (あるいは  $\{111\}\langle uvw \rangle + \{554\}\langle 22\bar{5} \rangle$ ) を主成分とすれば、上の二つの特徴は説明できる。なお、 $ND // \langle 110 \rangle$  軸密度を測定したところ、試料 No. 1 では  $10^{-3}$  程度で他の試料 ( $10^{-1} \sim 10^{-2}$ ) より小さく、 $\{110\}$  方位への集積は弱い。