

Title	超音波による冷延鋼板集合組織の非破壊評価 : 塑性ひずみ比と超音波極点図
Author(s)	平尾, 雅彦; 原, 規彰; 福岡, 秀和 他
Citation	日本機械学会論文集A編. 1988, 54(505), p. 1814-1820
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/3136">https://hdl.handle.net/11094/3136</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 超音波による冷延鋼板集合組織の非破壊評価\*

(塑性ひずみ比と超音波極点図)

平尾雅彦\*<sup>1</sup>, 原規彰\*<sup>2</sup>  
福岡秀和\*<sup>1</sup>, 藤沢和夫\*<sup>3</sup>

### A Nondestructive Evaluation of Texture in Cold-Rolled Steel Sheets using Ultrasonics (Plastic Strain Ratio and Ultrasonic Pole Figure)

Masahiko HIRAO, Noriaki HARA,  
Hidekazu FUKUOKA, and Kazuo FUJISAWA

An ultrasonic method is presented for the nondestructive evaluation of texture in cold-rolled steel sheets. Three 4-th order orientation distribution coefficients are determined from the propagation velocities of longitudinal and shear waves, and SH<sub>0</sub> plate mode. A simple rule of mixture allows the estimation for the concentration of crystallite orientation around the principal components of the rolling recrystallization texture. The concentration is then used to predict the plastic strain ratio (*r*-value) and to draw the ultrasonic pole figures; both show good correspondence with the conventional methods. Practically important is the correlation between the average *r*-value and the longitudinal/shear wave velocity ratio, which is explained by the dominant concentration on {111} components.

**Key Words:** Material Testing, Ultrasonics, Cold-Rolled Steel Sheets, Texture, *r*-Value, Pole Figure

#### 1. 緒 言

構造用金属材料は多結晶体である。それを構成する個々の結晶粒内は言うまでもなく単結晶体であり、規則的な格子配列のため強い異方性を示す。結晶粒の配向が統計的に完全なランダムでなく、いわゆる集合組織が存在する場合、これらの集合体である多結晶金属は巨視的にも等方体ではなく弱いながらも物理的・機械的性質に異方性を呈する。この異方性は集合組織が定量的に記述されれば解析的に求めることができる。逆に、実験的に観測される異方性は集合組織の情報を含んでいるため、これを利用してx線回折法以外の手段で集合組織を推定または評価する方法が試されつつある。

本報では、低炭素冷間圧延鋼板内を伝ばする超音波速度を測定することにより、その塑性ひずみ比(Lankfordの*r*値<sup>(1)</sup>)と極点図(超音波極点図と呼ばれる)とを非破壊的に評価する方法について調べた。冷延鋼

板は自動車や家電製品の外装などに用いられるため高いプレス成形性が要求される。*r*値は通常、板状試験片に15~20%の単純引張変形を与え、変形前後の板厚と幅(それぞれ $t_0, t, w_0, w$ とする)を測定することにより $r = \ln(w_0/w) / \ln(t_0/t)$ で得られる。*r*値の大きい鋼板では板厚方向より板の面内方向に変形が生じやすく深絞り加工などに好ましい。そのため*r*値は冷延鋼板の重要な検査項目になっている。圧延方向、幅方向、および45°方向の*r*値をそれぞれ $r_0, r_{90}, r_{45}$ とすると平均値 $\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$ が深絞り性の指標である。ただし、異方性 $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2$ が大きいと「耳」が発生し好ましくない。

引張試験による*r*値の測定には多大の時間と労力を要するため、また破壊的測定であるため、簡便法が望まれている。この目的には固有振動を利用して得たヤング率と*r*値との間の相関関係を用いる共振法<sup>(2)(3)</sup>が考えられている(JIS G 3135-1986)<sup>(3)</sup>が、やはり定格の試験片(許容寸法誤差0.025 mm)を作製する必要があるなど、非破壊法としては用いにくい面がある。さらに、x線回折法で測定された極点図に基づいて*r*値を推定する方法も種々考えられている<sup>(4)</sup>。しかし圧延材では一般に製造中の不均一な塑性変形や冷却速度に起因して主に板厚方向に集合組織が変化してい

\* 昭和63年3月30日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月25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〔現在 関西電力(株)〕。

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

る。よって表面下数十  $\mu\text{m}$  の集合組織に対応する極点図から全板厚の塑性異方性を代表する  $r$  値を推定することは妥当とは考えにくい。本報の超音波法は試験片については平滑だけが要求される。板厚の測定を要しないなど非破壊測定法として利用しやすく、また全板厚にわたる平均の集合組織を評価できる利点を持つ。

以下では、まず集合組織を一義的に記述す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(方位分布係数と呼ばれる)と超音波伝ば速度との関係について概説する。つぎに、この方位分布係数を超音波速度から求めるシングアラウンド法による実験方法とその結果について述べる。集合組織解析のため低炭素鋼板の圧延再結晶集合組織に代表的な有限個の優先方位成分への集積度を混合則を用いて近似的に求める。この結果から、超音波極点図と称される近似的な極点図を作製し  $x$  線回折による極点図と比較する。 $r$  値の推定値も引張試験による実測値と比較する。超音波速度は一般に集合組織だけでなく結晶粒度や形状、含有合金元素、さらには転位などの格子欠陥にも影響されると考えられるが、本報では考慮しない。また冷延鋼板の圧延再結晶集合組織そのものを議論することは目的ではなく、それによって生じる弾性異方性(超音波速度)と塑性異方性( $r$  値)とを関連付けることに主眼を置く。

## 2. 集合組織と超音波速度

$x$  線回折法などで得られる極点図から多結晶体を構成する結晶粒の方位分布を定量的に記述するための一つの方法として級数展開法が Bunge<sup>(6)</sup>と Roe<sup>(6)(7)</sup>によって確立されている。Sayers<sup>(8)</sup>はこの級数展開法と Voigt 近似に従って巨視的な直交異方性を示す圧延材の弾性定数を立方晶金属の場合について導いている。Reuss 近似による同様の計算は Hirao ら<sup>(9)</sup>によって行われ、Voigt 近似との平均(Hill 近似)を用いてアルミニウム合金 7075-T 651 圧延板の超音波極点図を得ている。本報でもこの Hill 平均を使用する。

集合組織は結晶方位分布関数,  $w(\xi, \psi, \phi)$ , によって表されるとする。 $\psi, \theta, \phi$  ( $\xi = \cos \theta$ ) は Euler 角で圧延材の圧延方向 (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内の三つの直交した [100] 方位を定める。十分多数の結晶粒を含む多結晶体において結晶方位が  $(\psi, \theta, \phi)$  と  $(\psi + d\psi, \theta + d\theta, \phi + d\phi)$  の間にある結晶粒の体積の全体積に対する割合(確率密度)が  $w(\xi, \psi, \phi)d\xi d\psi d\phi$  で与えられることになる。すべての可能な方位についてこの確率密度を

積分すれば 1 となる。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 w(\xi, \psi, \phi) d\xi d\psi d\phi = 1 \dots\dots\dots (1)$$

級数展開法ではこの  $w(\xi, \psi, \phi)$  を一般化された Legendre の倍関数  $Z_{lmn}(\xi)$  で展開する。

$$w(\xi, \psi, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} Z_{lmn}(\xi) \cdot \exp(-im\psi) \exp(-in\phi) \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $W_{lmn}$  は方位分布係数と呼ばれる展開係数で結晶方位分布関数から

$$W_{lmn} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 w(\xi, \psi, \phi) Z_{lmn}(\xi) \cdot \exp(im\psi) \exp(in\phi) d\xi d\psi d\phi \dots\dots\dots (3)$$

によって与えられる。立方晶金属の圧延材では結晶自身の対称性と巨視的な直交異方性を考慮すると  $W_{lmn}$  のうち多くは零となり、残りも互いに一次従属の関係にあることが示される。すなわち、(1)  $W_{lmn}$  は実数で、 $l, m$  が偶数かつ  $n$  が 4 の倍数の場合以外は零、(2)  $W_{lmn} = W_{l\bar{m}\bar{n}} = W_{lm\bar{n}} = W_{l\bar{m}n}$  (ただし  $\bar{m} = -m$ )、(3)  $W_{000} = 1/(4\pi^2\sqrt{2})$ ,  $W_{2m0} = 0$ ,  $W_{4m4} = (4/\sqrt{70})W_{4m0}, \dots$  の性質を持つ。 $W_{000}$  の値は正規化条件(1)より得られる。

多結晶体の巨視的弾性定数  $\bar{C}_{ij}$  は単結晶の弾性定数  $C_{ij}$  と方位分布係数  $W_{lmn}$  よりつぎの手順で計算される。まず、 $C_{ij}$  を試料座標系  $O-X_1X_2X_3$  (それぞれ RD, TD, ND に対応する) に座標変換する。変換テンソルは Euler 角  $\psi, \theta, \phi$  で書ける。 $\bar{C}_{ij}$  はこの座標変換された単結晶弾性定数に  $w(\xi, \psi, \phi)$  を重み関数として乗じ、Euler 角の全領域で積分するという平均操作によって得られる。以上は Voigt 近似に沿った計算法である。Reuss 近似ではこの  $C_{ij}$  の代わりに弾性コンプライアンス  $S_{ij}$  を  $w$  を重み関数として同様に平均し、その結果を弾性定数に変換すればよい。Hill<sup>(10)</sup>は Voigt 平均と Reuss 平均が真値のそれぞれ上限と下限を与えることを等方体の場合に示している。これに従いここでは両者の相乗平均をとり Hill 平均とした。いずれの平均法でも得られた  $\bar{C}_{ij}$  は三つの独立な単結晶弾性定数 ( $C_{11}, C_{12}, C_{44}$ ) と集合組織を反映する  $W_{4m0}$  ( $m = 0, 2, 4$ ) の三つの独立な方位分布係数を含み、斜方晶系に属する対称性を持つ。この結果、立方晶の圧延材料では集合組織はこれら三つの方位分布係数を通じてのみ多結晶弾性定数に、したがって超音波伝ば速度に影響することになる。

超音波速度はこの  $\bar{C}_{ij}$  を運動方程式に代入し、必要なら境界条件を考慮して解くことにより導かれる。冷延鋼板の板厚にわたる平均的な集合組織を調べる目的から本報の実験で用いる超音波は ND 方向に伝わる

縦波, 同じく ND 方向に伝ばし RD 方向と TD 方向に偏向した横波, および圧延面内を伝ばし偏向方向も圧延面内にある SH<sub>0</sub> 板波モードとする. これらの伝ば速度は W<sub>4m0</sub> (m=0, 2, 4) を用いてそれぞれ次式のように書ける<sup>(8)(9)(11)(12)(13)</sup>.

$$\left. \begin{aligned} \rho V_{33}^2 &= \lambda + 2\mu + (32\pi^2\sqrt{2}/35)cW_{400} \\ \rho V_{31}^2 &= \mu - (16\pi^2\sqrt{2}/35)c(W_{400} - \sqrt{5/2}W_{420}) \\ \rho V_{32}^2 &= \mu - (16\pi^2\sqrt{2}/35)c(W_{400} + \sqrt{5/2}W_{420}) \\ \rho V_{SH}^2(\gamma) &= \mu + (4\pi^2\sqrt{2}/35)c(W_{400} - \sqrt{70}W_{440}\cos 4\gamma) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

ここで, ρ は密度, 伝ば速度 V<sub>IJ</sub> の添字 I は伝ば方向, J は偏向方向を, また γ は圧延方向からの角度で SH<sub>0</sub> 板波の伝ば方向を示す. ラメの定数 (λ, μ) と異方性因子 c は α-Fe 単結晶の弾性定数 C<sub>IJ</sub><sup>(14)</sup> から Voigt-Reuss-Hill 平均<sup>(9)</sup> により λ+2μ=277.02 GPa, μ=81.70 GPa, c=-136.30 GPa と算出できる.

結晶粒の配向が完全にランダムなとき, 方位分布係数はすべて零となり巨視的弾性定数 C̄<sub>IJ</sub> は λ と μ だけで表現できる等方位の弾性定数に帰着する. 線材のように繊維集合組織を有する材料では W<sub>400</sub> のみが零でない. 圧延集合組織については一般に三つの W<sub>4m0</sub> はいずれも有意な値を持つ.

本報では, W<sub>400</sub> を縦波と横波速度の比 κ (= V<sub>33</sub>/V<sub>av</sub>) から, W<sub>420</sub> は横波速度の複屈折量 α [(V<sub>31</sub>-V<sub>32</sub>)/V<sub>av}] から, また W<sub>440</sub> の値は SH<sub>0</sub> 波速度の面内異方性から求める. ここで V<sub>av</sub>=(V<sub>31</sub>+V<sub>32</sub>)/2 である. 式(4)から κ と α は W<sub>4m0</sub> の二次以上の項を無視する近似により</sub>

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\mu}} \left[ 1 + \frac{\lambda+4\mu}{\mu(\lambda+2\mu)} \frac{8\sqrt{2}c}{35} \pi^2 W_{400} \right] \\ \alpha &= \frac{16c\pi^2}{7\sqrt{5}\mu} W_{420} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

と書ける.

すでに述べたように, l=6 以上の方位分布係数は超音波速度に本質的に含まれない. 一方, x 線や中性子の回折を利用して測定される極点図を解析すればこれら高次の方位分布係数を求めることができる. この点において超音波法は簡便・非破壊的ではあるがあくまで近似的な方法である. 塑性異方性はやはり l=6 以上の方位分布係数にも依存するが, 四次の係数が支配的であることを Bunge<sup>(5)</sup> や Davies ら<sup>(15)</sup> が示している. これにより, 超音波あるいはヤング率を通じて測定される弾性異方性から r 値を求める可能性が裏付けられたことになる.

### 3. 実験方法と試料

実験に使用した冷延鋼板 11 枚の化学組成を表 1 に示す. 極低炭素 Ti 添加鋼板の試料 No. 1 以外はすべて低炭素または極低炭素 Al キルド鋼板である. 板厚さ 0.677~0.902 mm の範囲である. これらの鋼板は, 熱間圧延-酸洗-冷間圧延-焼鈍-調質圧延の工程で製造されている. 圧延および焼鈍条件は各試料異なる. 調質圧延の結果, 鋼板表面は十分平滑かつなめらかで, 超音波および x 線回折測定のための表面研磨は不要であった. ただし, コイルに巻き取られていたためわずかに湾曲しており, 30 cm 角に切り出し定盤に磁石で固定して測定に供した.

超音波の伝ば時間はシングア라운드音速測定装置 (UVM-2, 超音波工業製) を用いて測定した. 使用した超音波探触子の共振周波数は縦波用は 30 MHz, 横波用は 10 MHz である. これらの探触子 (いずれも PANAMETRICS 製) は高周波数・広帯域であるとともに, 前面にポリスチレンの遅延材を有し薄鋼板の音速測定に適している. すなわち, 試料面から反射した遅延信号の間に試料内で多重反射した超音波信号が多数受信できそれらのうち適当な二つの信号 (本実験では第 2, 第 6 反射波) を選び, その到達時間差を記録した. SH<sub>0</sub> 板波の音速測定にはアクリル棒の両端面を

表 1 試料の化学組成 (wt %) と板厚

TP No.	t (mm)	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ti
1	0.902	0.0050	0.016	0.27	0.014	0.0130	0.006	0.0044	0.058
2	0.780	0.0020	0.011	0.21	0.013	0.0080	0.043	0.0064	0.002
3	0.882	0.0410	0.008	0.13	0.011	0.0080	0.028	0.0021	0.002
4	0.682	0.04	0.01	0.15	0.018	0.007	0.030	0.0020	—
5	0.775								
6	0.788								
7	0.677	0.05	0.01	0.24	0.020	0.007	0.045	0.0050	—
8	0.680								
9	0.802								
10	0.882								
11	0.797	0.002	0.01	0.15	0.018	0.008	0.065	0.0020	—

表 2 方位分布係数と塑性ひずみ比の測定結果

TP No.	$\kappa$	$\alpha$ (%)	$W_{400}$	$W_{420}$	$W_{440}$	$\bar{r}$	$\Delta r$
1	2.102	4.15	-0.01671	-0.00248	0.00075	2.52	0.58
2	2.047	1.84	-0.01326	-0.00110	0.00175	2.06	0.94
3	1.957	2.03	-0.00740	-0.00121	0.00199	1.31	0.60
4	1.912	2.50	-0.00456	-0.00149	0.00195	1.15	0.47
5	1.894	2.60	-0.00336	-0.00155	0.00236	1.04	0.54
6	1.955	2.69	-0.00731	-0.00161	0.00176	1.31	0.53
7	1.956	2.87	-0.00739	-0.00171	0.00102	1.37	0.27
8	2.027	1.67	-0.01191	-0.00100	0.00188	1.71	0.60
9	2.053	1.65	-0.01357	-0.00098	0.00179	1.89	0.42
10	2.037	1.81	-0.01258	-0.00108	0.00193	1.68	0.75
11	2.040	2.05	-0.01276	-0.00123	0.00131	1.89	0.94

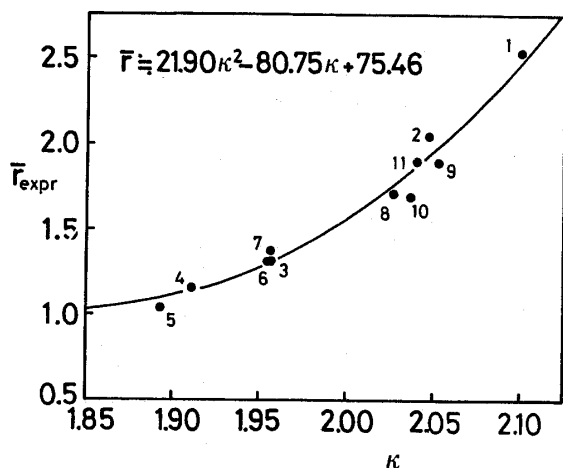


図 1 縦波/横波速度比  $\kappa$  と  $\bar{r}$  値の関係

26.5°の斜面上に加工し、その斜面上に5mm×10mmで共振周波数2MHzの横波用PZT素子をはり送受信一体形の探触子を作製した。SH<sub>0</sub>板波の伝ば距離は74mmである。この探触子をその中心まわりにRDからTDまで5°ずつ回転させて得た測定値からフーリエ展開によって定数項とcos4 $\gamma$ 成分の係数を求めた。後者がW<sub>400</sub>に比例する。

r値測定のため、JIS5号引張試験片をRD、TD、および45°方向よりそれぞれ2枚ずつ切り出し20%の伸びを与えた。このr値測定結果を超音波実験から得られたW<sub>400</sub>とともに表2にまとめた。特にr値と縦波/横波速度比 $\kappa$ との間に良い相関が認められたので図1に示す。北川ら<sup>(16)</sup>は同様の冷延鋼板につき縦波速度V<sub>33</sub>とr値の間の相関を報告している。この傾向は本実験でも確認された。さらに、横波平均速度V<sub>av</sub>とr値も同様の相関を示した。しかし、これらの測定には高精度の板厚測定を要するため、実用上発展性が乏しいとして本報では割愛した。式(4)と式(5)によりV<sub>33</sub>、V<sub>av</sub>、そしてこれらの比 $\kappa$ はいずれも方位分布係数W<sub>400</sub>のみに依存することから、W<sub>400</sub>とr値との密接な関係が上の観測結果の原因であることが推測される。

#### 4. 集合組織の非破壊評価

冷延鋼板の集合組織は化学組成、冷間圧延率、さらに焼鈍条件によって複雑に変化するため望ましい材料特性が得られるようこれら支配因子が制御される。塑性異方性も集合組織に強く依存する。すなわち、{111}結晶面が圧延面内に多く配向しているほど、逆に{100}面が少ないほど大きいr値と小さい $\Delta r$ 値を持つ冷延鋼板になることが知られている<sup>(4)</sup>。

図1に示すようにr値と $\kappa$ 値は最小二乗近似による二次回帰式

$$\bar{r} = 21.90\kappa^2 - 80.75\kappa + 75.46 \dots\dots\dots (6)$$

で関係付けられる。相関係数は0.965であった。この回帰式による計算値と実測値の差異は試料No.10の0.17が最大で他の試料ではほとんど0.1以内である。したがって、つぎに述べる集合組織の解析によるまでもなく $\kappa$ 値の測定から直接かつ簡便にr値が評価できる。

4.1 主要優先方位成分の体積分率 まず、超音波法で測定された方位分布係数(表2)を利用し、混合則を仮定して冷延鋼板集合組織の各主要方位成分の体積分率を推定する。つまり、W<sub>400</sub>の測定値は(主要成分のW<sub>400</sub>)×(その成分の体積分率)の総和とする。考慮する方位成分は冷延鋼板の圧延再結晶集合組織に代表的な{111}<110>、{111}<112̄>、{110}<001>、{100}<011>、{100}<001>の5成分である<sup>(4)</sup>。個々の優先方位を持つ単結晶の方位分布係数を求めるには、結晶方位分布関数w( $\xi, \psi, \phi$ )を24組の等価なEuler角( $\psi, \theta, \phi$ )でのみ零以外の値をとるデルタ関数の和で表し、式(3)に代入して積分する。その結果を表3に示す。これによると{111}<110̄>成分と{111}<112̄>成分のW<sub>400</sub>は等しい。{111}<uvw>はすべて同じW<sub>400</sub>になるため、超音波測定からは全{111}方位の体積分率A<sub>111</sub>が得られる。{110}<001>成分の体積分率はA<sub>110</sub>とする。{100}成分については、その体積分率A<sub>100</sub>が

表 3 主要方位成分の方向分布係数と塑性ひずみ比

component	$W_{400}$	$W_{420}$	$W_{440}$	$W_{600}$	$W_{620}$	$W_{640}$	$W_{660}$	$q_0$	$q_{45}$	$q_{90}$
(111)[110]	-0.0209	0	0	0.0144	0	0	-0.0091	0.69	0.78	0.81
(111)[112]	-0.0209	0	0	0.0144	0	0	0.0091	0.81	0.78	0.69
(110)[001]	-0.0078	-0.0248	0.0141	-0.0131	0.0155	0.0094	0.0077	0.50	0.27	1.00
(100)[011]	0.0313	0	-0.0184	0.0081	0	0.0151	0	0	0.50	0
(100)[001]	0.0313	0	0.0184	0.0027	0	-0.0076	0	0.50	0	0.50

$$(q=r/(1+r))$$

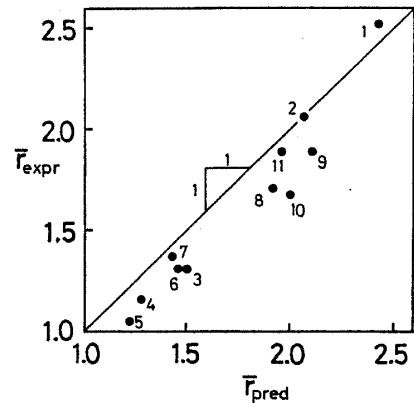
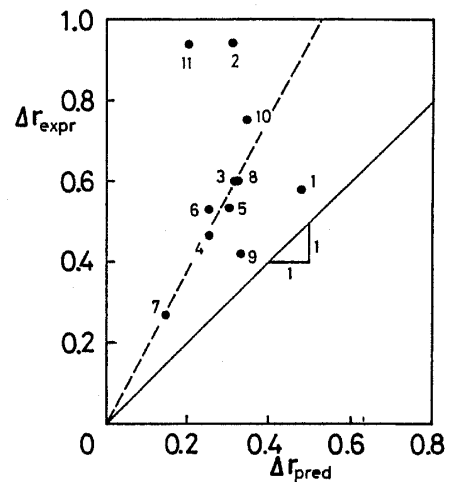
正值となるように試料 No. 1 では {100} <011>, その他では {100} <001> 方位を代表方位成分とした。

いずれの試料でも  $A_{111} \gg A_{110}, A_{100}$  となり, {111} 集合組織が支配的で, {111} 繊維集合組織に近いことが示された。  $A_{111}$  は試料 No. 1 で最大値 (0.812), 試料 No. 5 で最小値 (0.257) をとった。  $A_{110}$  は 0.040~0.096  $A_{100}$  は 0.002~0.079 の範囲であった。

**4.2 塑性ひずみ比** 求めた体積分率と単結晶体の塑性ひずみ比の積を全成分にわたって加え合わせ  $r$  値の推定値とした。 bcc 単結晶体の  $r$  値には岡本ら<sup>(4)(17)</sup>の計算結果を適用した (表 3)。 bcc 金属ではすべり方向が <111> 方向のすべり系が 48 個存在するが, それらのうち分解せん断応力が最大の 5 すべり系による変形モデルで計算された結果である。表 3 中, {110} <001> 成分の  $r_{90}$  が無限大になるため  $r$  値の代わりに  $q [=r/(1+r)]$  を用いた。 {111}, {110}, {100} 方位の順に  $\bar{q}$  値が (したがって  $\bar{r}$  値も) 小さく, またこの順に  $W_{400}$  が大きいことがわかる。これは  $\bar{r}$ - $x$  の間の相関関係 (図 1) を定性的に根拠付けている。一方,  $W_{420}$  は {110} <001> 成分でのみ零でなく, 同時にこの成分の  $\Delta r$  が最も大きいことから横波の速度異方性 ( $\alpha$  値) が  $\Delta r$  の良い指標となることが予測されるが, 表 2 の実験結果を見るかぎり両者の間に明らかな相関関係はない。

この方法による推定結果を実測値  $r_{\text{expr}}$  に対し  $r_{\text{pred}}$  と呼ぶ。このとき  $(1-\sum A)$  をランダムな方位を持つ結晶粒の体積分率と考え,  $q=0.5$  を乗じて総和に加えた。  $\bar{r}_{\text{expr}}$  と  $\bar{r}_{\text{pred}}$  の対応は図 2 に見られるように良好で, この点では超音波による  $\bar{r}$  値非破壊評価の可能性が示されたことになる。しかしながら, 図 3 に示したように  $\Delta r_{\text{expr}}$  と  $\Delta r_{\text{pred}}$  には大きな相違が見られ,  $\Delta r$  を過小に推定する結果となった。その原因としては (1) 隣接結晶粒間の拘束の影響を無視している, (2) 優先方位成分への集積度は把握されているものの, それらを中心とする方位分散は考えられていない, (3) 混合則モデルに用いた方位成分数が不十分である, などが考えられ, 今後改善する余地を残している。

**4.3 超音波極点図**<sup>(8)(9)(18)</sup> 集合組織は極点図に基づいて解析されるのが普通である。多結晶体に含ま

図 2  $\bar{r}$  値の推定値と実測値の比較図 3  $\Delta r$  値の推定値と実測値の比較

れる結晶粒の {hkl} 結晶面の法線の分布を単位球面上に投影し, これを赤道面にステレオ投影して規格化したものが (hkl) 極点図である。その測定には x 線回折法が多く利用されるが, その浸透はごく薄い表面層に限られるため, 板厚全体の平均的な集合組織を調べるには中性子回折が使用される。超音波極点図はしたがって中性子回折による極点図と比較されるべきであるが, ここでは簡単のため Schulz 反射法による x 線回折で得られた極点図と対比する。

極点図と結晶方位分布関数との関係は Roe<sup>(6)</sup> によって明らかにされている。規格化された極密度  $q(\xi, \eta)$  ( $\xi = \cos \chi$ ;  $\chi, \eta$  は試料座標系における天頂角と方位

5. 結 言

超音波伝ば速度の測定によって冷延鋼板の圧延再結晶集合組織を非破壊的に評価する可能性について調べた。伝ば速度と結晶方位分布関数の関係を利用して四次の方位分布係数を、さらに混合則を仮定して主要方位成分の体積分率を順次求め、最終結果として塑性ひずみ比( $r$ 値)の推定値と超音波極点図を得た。平均 $r$ 値( $\bar{r}$ 値)の推定値は実測値と良い一致を示した。特に、実用上有用な結果は縦波/横波速度比( $x$ 値)と $\bar{r}$ の高い相関関係で、これは $\{111\}$ 方位への強い集積に起因する。一方、 $r$ 値の異方性( $\Delta r$ )については両者の間に相違が見られ、過小に推定する結果となった。超音波極点図も近似的ながら $\{111\}$ 方位を中心とする極密度分布を描出し、従来の $x$ 線極点図とも良い対応を示した。以上の結果から冷延鋼板集合組織のオンライン検査への発展が期待される。

終わりに、 $r$ 値の測定結果、極点図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式会社の関係各位に謝意を表します。また、実験に協力していただいた本学学生 田中直広氏に感謝します。

文 献

- (1) Lankford, W. T., ほか 2 名, *Trans. ASM*, **42** (1950), 1197.
- (2) Stickels, C. A. and Mould, P. R., *Metall. Trans.*, **1** (1970), 1303.
- (3) Mould, P. R. and Stickels, C. A., *Sheet Met. Ind.*, **50** (1973), 328.
- (4) 長島, 集合組織, (昭 59), 丸善.
- (5) Bunge, H. -J., *Texture Analysis in Materials Science*, (1982), Butterworths.
- (6) Roe, R. -J., *J. Appl. Phys.*, **36** (1965), 2024.
- (7) Roe, R. -J., *J. Appl. Phys.*, **37** (1966), 2069.
- (8) Sayers, C. M., *J. Phys. D.*, **15** (1982), 2157.
- (9) Hirao, M., ほか 2 名, *J. Acoust. Soc. Am.*, **81** (1987), 1434.
- (10) Hill, R., *Proc. R. Soc. London*, **65** (1952), 349.
- (11) Allen, D. R., ほか 2 名, *Ultrasonics*, **23** (1985), 215.
- (12) Lee, S. S., ほか 2 名, *Formability and Metallurgical Structure*, (1987), 177, AIME.
- (13) Clark, A. V., ほか 8 名, *Review of Progress in Quantitative NDE*, **6** (1987), 1515, Plenum.
- (14) Dever, D. J., *J. Appl. Phys.*, **43** (1972), 3293.
- (15) Davies, G. J., ほか 2 名, *Metall. Trans.*, **3** (1972), 1627.
- (16) 北川・ほか 2 名, 材料, **30** (昭 56), 496.
- (17) 岡本・ほか 2 名, 住友金属, **14** (昭 37), 211.
- (18) Smith, J. F., ほか 5 名, *Review of Progress in Quantitative NDE*, **6** (1987), 1541, Plenum.
- (19) Hirao, M. and Hara, N., *Appl. Phys. Letters*, **50** (1987), 1411.

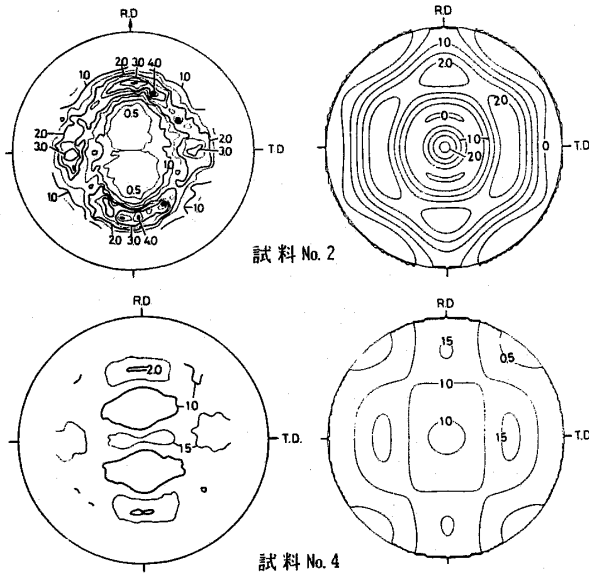


図 4  $x$ 線法(左)と超音波法(右)による(100)極点図

角)は

$$q(\zeta, \eta) = \frac{1}{4\pi} + \sum_{l=4}^{\infty} \left[ S_l \sum_{m=0}^l P_l^m(\zeta) W_{l m 0} \cos m\eta \right] \dots\dots\dots (7)$$

のように書ける。 $P_l^m(\zeta)$ は Legendre 関数であり、 $S_l$ は極点図の種類による定数である。等方位ではすべての方位分布係数が零、よって $q(\zeta, \eta) = 1/4\pi$ がランダムな配向に対応する。

超音波法では測定できない $W_{6 m 0}$  ( $m=0, 2, 4, 6$ )を4・2節で $r$ 値を推定したのと同じ混合則を用いて求め、 $W_{4 m 0}$ の実測値(表2)とともに式(7)に代入して図4の超音波極点図を得た。 $W_{6 m 0}$ の推定には $\{111\}$ 方位成分のうち $\{111\} \langle 11\bar{2} \rangle$ の $W_{6 m 0}$ を使った。 $x$ 線極点図と比較すると、第1に超音波極点図では微細な極密度分布が欠落し高次の方位分布係数を省略した影響が認められる。しかし、 $\{111\}$ 方位が主成分であること、またこの方位への相対的な集積の強さなど集合組織の概略は超音波極点図に表現されている。両者の相違の一原因は $x$ 線では表面下数十 $\mu\text{m}$ の、超音波では全板厚の集合組織を観察していることである。レイリー表面波の面内異方性からアルミニウム合金圧延板の表面集合組織を測定した例<sup>(19)</sup>では両者の良い一致が得られている。

## 討 論

〔質問〕 北川 孟〔豊橋技術科学大学〕

(1) X線回折法で得られる情報は、ご指摘のように表面層に限定される。しかし、従来冷延鋼板の集合組織は実用上板厚方向で一定とみなし結晶方位依存性をもつ諸特性の向上が現実的に計られてきた(冷延ケイ素鋼板の磁気特性のような構造敏感な特性も、この方法で得られた集合組織と対応して解析されてきた)。また板厚方向集合組織が平均化される測定方法と従来の方法と比較しても、冷延鋼板では、結果はよく一致する(付1)。表面層の回折情報から得られた逆極点図(特に、ND//<111>軸密度)と $r$ 値との間に相関関係があることは数多く実証されている。

X線極点図と超音波極点図の相違を表面層の影響とする結論は、納得できかねるが、いかがか。

(2) 以前はよく材料特性を特殊な数個の優先方位で代表させて解析してきたが、冷延鋼板においても分散方位の影響が無視できず、現在は通常結晶方位分布関数を用いた解析がなされている(付2)。1818ページにもご指摘のように(ii)、(iii)を考慮されたいかがか。両方法とも、(i)の影響は残ると考えられるが。

〔回答〕 (1) 本報で述べた超音波法の特徴は、圧延材の板厚方向に平均した集合組織とこれに起因する $r$ 値のような材料異方性を評価できる点にある。したがって、集合組織が板厚方向に大きく変化する厚板や熱延鋼板にも適用できる。冷延鋼板においても一般に弱い集合組織の分布は存在し、これを一定とみなす考え方は近似的に成り立つと思われる。

X線極点図と超音波極点図の相違の主な原因は、本文にもあるとおり、超音波極点図が低次の方位分布係数から構成されていることである。これに比較し表面層の影響は小さいと考えられる。

(2) 超音波速度は3個の方位分布係数だけに依存するため、混合則で考慮できる優先方位は3個に限られる。本報では11枚の異なる冷延鋼板の集合組織をすべて一組の優先方位成分で表現することが試みられたが、次のステップとして個々の化学組成や履歴に特徴的な優先方位成分で代表させることが考えられる。

〔質問〕 荒居 善雄〔東京工業大学〕

(1) 縦波速度および横波速度から式(4)を用いてそれぞれ $W_{400}$ を算出した場合、それらは一致するか。

(2) 本手法を音弾性応力測定法に応用する場合、巨視的弾性係数を導出する際の近似法として、Hill近似を用いて良いか。

〔回答〕 (1) 速度測定に誤差がない場合でも一般には一致しないと思われる。縦波速度には $\lambda+2\mu$ が、横波速度には $\mu$ が等方体成分として含まれる。これらは速度を大部分決定し、集合組織の寄与はごくわずかである。 $W_{400}$ を超音波速度から算出するには、 $\lambda+2\mu$ と $\mu$ の信頼できる値が要求されるが、含有合金元素、結晶粒度、格子欠陥…の微視構造を考慮した計算法は現状では見当たらないようである。

(2) どのような音弾性法を想定してこのご質問か不明であるが、例えば複屈折法のような速度差を利用する方法では、どの近似法でも結果に大差はない。他方、速度の値そのものを考える音弾性法では、質問(1)に対する回答でも述べたように、 $\lambda+2\mu$ と $\mu$ に対する近似値と真値の差による影響を免がれることはできない。

(付1) 例えば、北川孟ほか、日本金属学会誌、47-9(昭58)、781。

(付2) 例えば、H. KITAGAWA et al., *Trans. ISIJ*, 22-6 (1982), 424。