

福岡工業大学 学術機関リポジトリ

SH \square モード電磁超音波探触子を用いた薄鋼板の深絞り性評価方法の研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2021-02-08 キーワード (Ja): キーワード (En): Formability, Lankford value, Lamb wave, Shear horizontal plate wave, Electromagnetic acoustic transducer (EMAT), Cold rolled steel sheet 作成者: 村山, 理一 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/11478/00001621

SH₀モード板波用電磁超音波探触子を用いた薄鋼板の 深絞り性評価方法の研究

村 山 理 一 (工学部・知能機械工学科)

Non-destructive evaluation of formability in thin steel sheets using SH₀-mode plate wave by EMAT

(Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

Abstract

We evaluated the relation between the Lankford value (r -value) and the velocity of cold rolled steel sheets using the fundamental shear horizontal plate wave (SH₀-mode plate wave) and the fundamental symmetrical Lamb wave (S₀-mode Lamb wave) as a function of the propagation angle. The SH₀-mode plate wave at the traveling angle of 45° showed the opposite tendency compared with that of other traveling angles or other ultrasonic modes. Using the velocity equations derived by accounting for texture and cubic crystal anisotropy, we found that the velocity at 45° was strongly influenced by the {100} crystallographic plane compared with that of other ultrasonic conditions.

Next, the measurement accuracy for the formability of cold rolled steel sheets using the S₀-mode Lamb wave and the SH₀-mode plate wave was estimated to find that the evaluation accuracy using the SH₀-mode plate wave became poor as compared with the case of the S₀-mode Lamb wave. For this, the effect of the ultrasonic velocity anisotropy to the propagation direction was the main cause, because the anisotropy of the SH₀-mode plate wave was bigger than that of the S₀-mode Lamb wave. Finally, we confirmed that the evaluation precision could be improved by using the SH₀-mode EMAT with a narrow-width sensor coil to transmit and receive the sharp ultrasonic beam.

Keywords: Formability, Lankford value, Lamb wave, Shear horizontal plate wave, Electromagnetic acoustic transducer (EMAT), Cold rolled steel sheet

1. 序 論

自動車や家電製品の外装板として使われる薄鋼板は、その用途から鋼板内部に傷がなく、曲げ加工をしても割れないという優れた深絞り性が常に要求されている。鋼板内部の傷の有無については、超音波の一種で薄鋼

板の板面に沿って伝播するラム波を使った検査が一般に行われている。この検査法は薄鋼板の幅方向の一端から他端に向かってラム波を伝播させ、伝播する途中で傷が有れば、そこから反射して戻ってくるラム波を受信する方法である。また鋼板の深絞り性 (r 値) についてはラム波を利用した研究が広く普及し⁽¹⁾⁻⁽³⁾、磁わい型 EMAT を使った製造ラインで全長連続測定可能なオンライン r 値計も開発されている⁽⁴⁾。一方、基本 SH モードの板波は原理的に音速が板厚の影響を

受けない点, r 値の評価精度を導出するためにラム波は3方向の伝播方向が必要だが, 2方向で可能であるという利点があげられる。しかしながら, SHモードによる薄鋼板評価研究例はラム波に比較して殆ど無い。そこで本論文では同一のサンプル板を用いてラム波とSHモード板波によるr値評価を試み, その評価精度について検討した。

2. 薄鋼板の深絞り性 (ランクフォード値: r 値) の測定原理

一般的に, 薄鋼板の深絞り性を評価する指標としてランクフォード値が定義されている。ランクフォード値は, 薄鋼板から切り出した引っ張り試験片を15~20%引き延ばし, 前後の引っ張り試験片の幅(w₀, w₁)と厚み(t₀, t₁)の変化比 Ln(w₀/w₁) / Ln(t₀/t₁)として定義され, r値と称されている。また, 圧延方向, 圧延方向から45度方向, 圧延方向から90度方向に切り出した引っ張り試験片から求めたr値を各々のr₀, r₄₅, r₉₀と称し, 特に面内の平均値として平均r値 = (r₀ + 2r₄₅ + r₉₀) が定義され, 薄鋼板の深絞り性指標として最もよく利用されている⁽⁵⁾。

深絞り性が良好な(平均r値が高い)薄鋼板は, その集合組織の内, {111}結晶面が圧延方向にもっとも多く配され, {100}結晶面が圧延方向に極力少なく配されていることがわかっていてる。超音波音速は, 結晶方位に特有の音速を有することがわかっていてる⁴。それ故に平均r値が変動すればそれに伴って超音波音速も変動することが考えられる。

薄鋼板の集合組織は, 多結晶体を構成する個々の単結晶がどの方向にどれだけの量だけ存在するかを定義する結晶方位分布関数(CODF)によって表される。独立変数は, 結晶と薄鋼板各々に規定された直交座標系の間を関係付ける3つのオイラー角によって定義される。またこのCODFはフーリエ展開との類推で, 一般化された級関数によって, 式(1)のように展開できる⁽⁶⁾。

$$W(\xi, \phi, \psi) = \sum_0^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} Z_{lmn}(\xi) \exp(-im\psi) \exp(-in\psi) \tag{1}$$

また, その場合の展開係数W_{lmn}は, 式(2)のように書き表される。

$$W_{lmn} = - \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} W(\xi, \phi, \psi) - Z_{lmn}(\xi) \exp(im\psi) \exp(in\psi) d\xi d\phi d\psi \tag{2}$$

展開係数W_{lmn}は方位分布展開係数(ODCs)と呼ばれる。直交異方性材料で立方晶系の場合, いくつかのODCsは消滅し, 多くの展開係数はお互いに関係付けられる。結局, 独立な展開係数ODCsは, W₀₀₀ = 1 / (4√2π²), W_{4m0} (m = 0, 2, 4) 等となる。CODFは特定の方位の単結晶の重み係数として使われる。多結晶材料の2次弾性定数C_{ij}は単結晶の弾性定数とCODFsの積を全オイラー角にわたって積分することで求めることができる。超音波速度は, これらの異方性材料の2次弾性定数から求めることができる。

基本対称モードのラム波(S₀)の音速依存性は式(3)によって与えられる⁽⁷⁾:

$$\rho V_{S_0}^2(\theta) = V_0^2(1 - \Delta) + 2c_{(S_0)} W_{400} + s_2 W_{420} \cos 2\theta + s_4 W_{440} \cos 4\theta \tag{3}$$

基本対象モードのSH₀板波の音速は式(4)によって与えられる⁽⁷⁾:

$$\rho V_{SH_0}^2(\theta) = \mu + 2C(4\pi^2 \sqrt{2C}/35)(W_{400} - \sqrt{70} W_{440} \cos 4\theta) \tag{4}$$

但し, c: C₁₁ - C₁₂ - 2C₄₄

(立方単結晶の弾性異方性定数)

V₀: {4μ(λ+μ) / ρ(λ+2μ)}^{1/2}

(集合組織の無い場合のラム波の超音波音速)

ρ: 鋼の密度

θ: 板波の圧延方向に対する伝播方向

s₀: {2(2)^{1/2}π²/35} · {3 + 16λ(λ+μ)/(λ+2μ)²}

s₂: {-8(5)^{1/2}π²/35} { (3λ+2μ)/(λ+2μ) }

s₄: 4π² / (35)²

Δ: {λ / (λ+2μ)² (kd)^{2/3}}

(板厚/超音波波長が有限なために発生する音速の補正項)

単結晶及び多結晶体の弾性定数の値は表1に示されて

Table 1 Elastic constants and coefficients of S₀-mode Lamb wave and SH₀-mode plate wave velocity equations

Material	Monocrystal			Polycrystal				
	C11	C12	C44	Theory	λ + 2μ	μ	c	c/μ
α-Fe	232.2	135.6	117.0	Hill	277.0	81.7	136.3	-1.668

いる。一方、表2は主要な結晶面々に対する W_{lmn} の計算結果を示している。{111} 結晶面が存在すると W_{400} は負の値を持ち、{100} 結晶面が存在すると W_{400} は正の値を持つことがわかる。すなわち r 値が高ければ高いほど {111} 結晶面は多くなり、{100} 結晶面は少なくなるため、 W_{400} は負の値が大きくなると考えられる。すなわち {111} 結晶軸密度と W_{400} は良い相関関係をもつと考えられる。

Table 2 Oriental distribution coefficients (ODCs) of some ideal orientations (hkl) [uvw]

	W400	W420	W440
(111)[110]	-0.0209	0	0
(111)[112]	-0.0209	0	0
(110)[001]	-0.0078	-0.0246	0.014
(100)[011]	0.0313	0	-0.0187
(100)[001]	0.313	0	0.0187

式(5)は式(3)から求められた S_0 モードラム波の場合の平均 r 値 (W_{400}) を求める関係式で $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 方向に伝播するラム波の音速から評価できる。SH₀モード板波の場合は式(6)に示したように $\theta=0^\circ, 45^\circ$ 方向に伝播する板波の音速から決定できることを示している (図1)。

$$W_{400} = \{\rho(V_{S_0}^2(0) + 2V_{S_0}^2(45) + V_{S_0}^2(90)) - 4V_0^2(1 - \Delta)\} / 8C(S_0) \quad (5)$$

$$W_{400} = \{\rho(V_{S_0}^2(0) + V_{S_0}^2(45)) - 2\mu\} / 2(2C)(4\pi^2\sqrt{2}C/35) \quad (6)$$

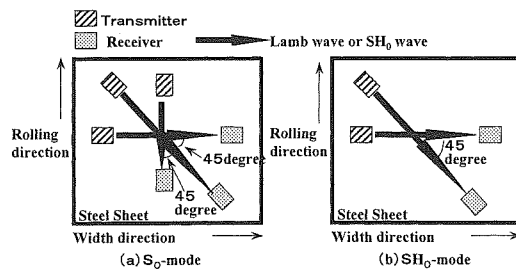


Fig. 1 A way of finding the average r -value using the S_0 -mode Lamb wave velocity at $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ relative to the rolling direction and the SH_0 -mode plate wave velocity at $\theta=0^\circ$ and 45°

3. 電磁超音波探触子の駆動原理⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾

S_0 -モードラム波と SH_0 -モード板波用の電磁超音波探触子の基本的な構成及び基本的な駆動原理を図2-(a),(b)に示す。駆動原理は主に磁わい効果を利用するタイプを利用した。ラム波用の EMAT は、くし形センサコイルとそのセンサコイルを両極で挟み、かつ負荷磁場の方向がラム波の伝播方向になるように配置された電磁石から構成されている。高周波電流がセンサコイルに負荷されると、誘導磁場が静磁場に平行に鋼板表面に発生する。したがって静磁場の方向と平行に複合磁場が発生する。センサコイルのくさび間隔は発生させたいラム波の半波長になるように設定されている。誘導磁場が時間的に周期的に変動するとそれに従って複合磁場も変動し、磁わい量も変動する。この磁わいの周期的な変化が駆動源となってラム波が発生する。また受信側は、伝播してきたラム波による周期的な応力変化が受信子の下で発生し、その結果、透磁率の空間的・周期的な変動が発生し空間的な磁束密度の変動が起こり、電磁誘導によりセンサコイルに誘導電流が流れ、ラム波が検出できる。

SH_0 -モード板波用 EMAT は、くし型センサコイルと SH_0 -モード板波の伝播方向に対して垂直方向で鋼板面に沿った静磁場を負荷できる電磁石から構成される。センサコイル内の導線間の間隔は発生させたい板波波長の半分に設定されている。送信電流がセンサコイルを駆動すると、誘導磁場が静磁場と垂直方向に発生する。その結果誘導磁場と静磁場の複合磁場の方向に、磁わい効果により磁区がひずむ (σ_{xy})。誘導磁場が周期的に力の大きさと向きを変化させる結果、磁区のひずみは周期的に変動し、その結果、式(7)に示すように静磁場の方向に空間的に周期的な力 (f_y) が発生し、この力を駆動源として SH_0 板波が発生する。

$$f_y = \frac{\partial}{\partial x} \sigma_{xy} \quad (7)$$

この力は SH_0 -モード板波の駆動源となる。この応力変化は磁わい効果を通して磁性材料の透磁率変化をもたらす。静磁場下のもとで SH_0 -モード板波による応力変化が鋼板の透磁率を周期的に変化させると結果的に近傍の磁束密度変化をもたらす。その結果、渦電流が鋼板表面に誘起し、電磁誘導作用によりセンサコイルに電流が誘起される。

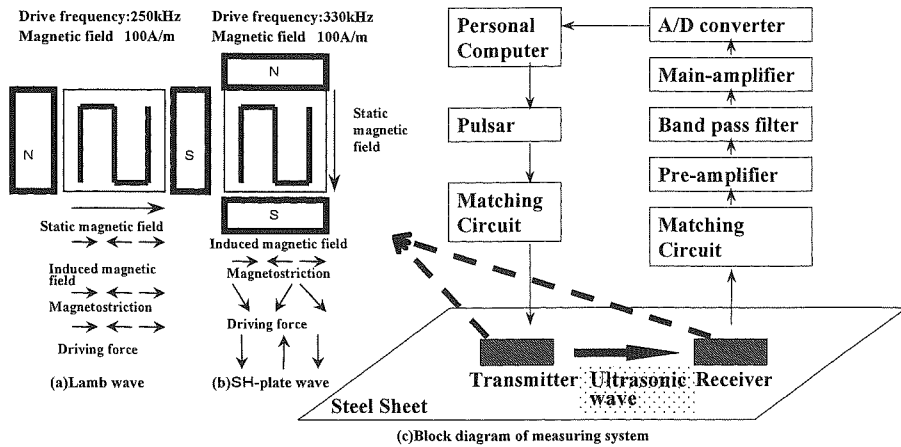


Fig. 2 Block diagram of the electromagnetic acoustic transducer (EMAT) system for the S₀-mode Lamb wave and the SH₀-mode plate wave including arrangement of the sensor coil and electromagnet

4. 試験条件

実験システムを図2-(c)に示す。EMAT用の電磁石は門型形状のものを用いた。センサコイル内の導線間の間隔はラム波の場合10mm, SH₀-モード板波の場合

は6mmとした。この理由は、板厚0.3から2.0mmの範囲で駆動周波数が250kHz前後では、ラム波およびSH₀-モード板波の音速が各々5000m/s, 3200m/sと予想されたため駆動周波数がほぼ同一になるようにした。しかしながら実際の最適駆動周波数はラム波の場合250kHz, SH₀-モード板波の場合320kHzであっ

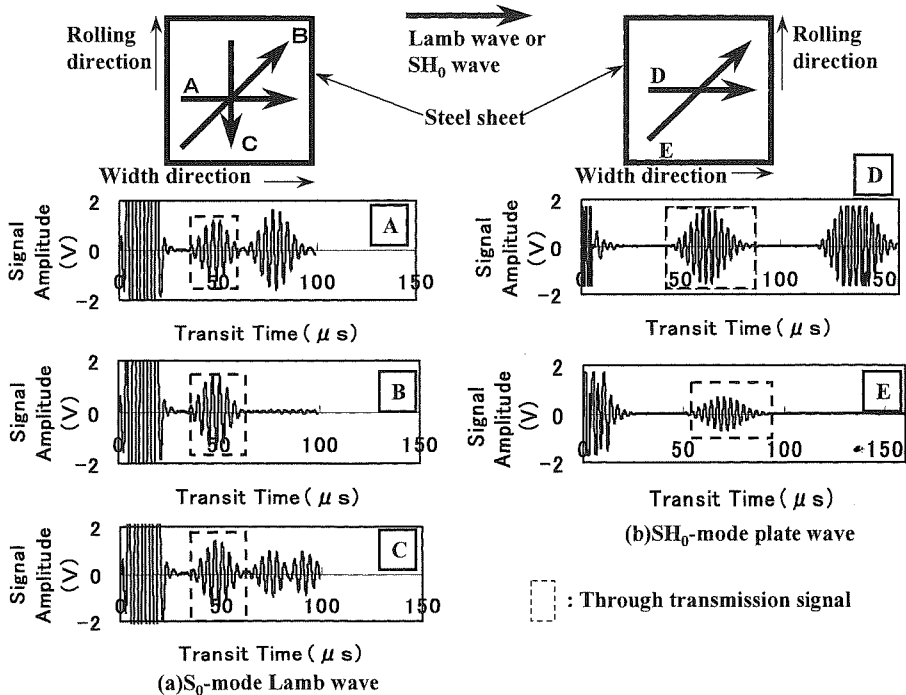


Fig. 3 Display of the typical received signal with 1 mm thick steel sheet : (a)The case of the S₀-mode Lamb wave ; (b)The case of the SH₀-mode plate wave

た。また、センサコイルの幅 (W) は当初30mmに設定した。送受信センサ間の間隔は225mmとした。パルサーは周波数可変タイプで正弦波のバースト波が送信可能である。本実験では6波のバースト波を使用した。A/Dは100MHzのサンプリング速度で8ビットの分解能である。バンドパスフィルターは70KHzから1.3MHzに設定した。

5. 各方向平均伝播時間と平均 r 値との関係

板厚0.3mm~2.0mm, 平均 r 値0.9~2.2の範囲で10枚のサンプル板を用意し固定距離での伝播時間を測定した。Fig.3 (a),(b) にラム波および SH₀-モード板波の受信波形を示す。各々、伝播時間を測定するのに十分な S/N があることが明らかである。

図4 (a)は、圧延方向に対して0度方向, 45度方向, 90度方向に伝播するラム波の伝播時間(T_0 , T_{45} , T_{90}) と平均 r 値との相関を示している。また図4 (b)は同様に0度方向, 45度方向に伝播する SH₀-モード板波の伝播時間 (T_0 , T_{45}) と平均 r 値の相関を示している。ラム波の場合、 T_0 , T_{45} , T_{90} は平均 r 値と負の相関関係を示している。一方 SH₀-モード板波の場合は、 T_0 は平均 r 値と負の相関関係を示すが、 T_{45} は正の相関関係を示している。

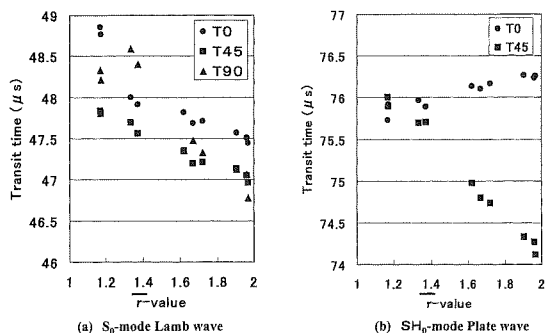


Fig. 4 Correlation of the average r-value and the transit time measured : (a)The correlation between the average r-value and the transit time (T_{s0} (0), T_{s0} (45), and T_{s0} (90)) measured by EMAT for the S₀-mode Lamb wave ; (b)The results for the SH₀-mode plate wave

6. 平均 r 値と各方向伝播時間との関係に関する考察

今回使用したサンプル板の場合の平均 r 値変化と集合組織変化の様子をまとめて表3に示す。表3の結果と表2に示す Hill の原理による弾性定数を用いると、平均 r 値が増加すると、(111) 結晶軸密度は大きく増加し、それに対して (110) と (100) 結晶軸密度は殆ど変化しない。S₀-モードラム波の場合、音速式の右辺の第1項は等方性鋼の場合の音速を示しており常に正の値を示す。第2項から第4項のすべてにかかる係数 d (pV_{s0} は負の値である。第2項の S_0W_{400} は正である。また第3項の S_2W_{420} は負の符号を持つ。第4項の $S_{40}W_{440}$ は正である。また第2項と第3項の係数の絶対値は殆ど同じである。第3項の係数の W_{420} は (110) 結晶軸密度のみに依存するので第3項は一定であると仮定する。第2項は平均 r 値が増加すると常に増加する。第4項はラム波の伝播方向が0度方向と90度方向の場合は増加し、45度方向の場合は減少する。けれども、2項の増加量は4項の場合に比べてはるかに大きい。すなわち、ラム波の場合は、伝播方向がどの場合でも平均 r 値の増加につれて音速が増加すると考えられる。

SH₀-モード板波の場合について同様に検討すると、第3項の係数は第2項の係数に比べて約3倍大きい。すなわち平均 r 値の変化に伴う第3項の変化は無視できない。それゆえに、45度方向と0度方向とは平均 r 値増加に対する変化が逆になる。

Table 3 Specifications of sample sheets (Plate thickness, The averaged r-value, Crystal axis density, Deviation of crystal axis density)

No	Pla Thick-ness	r	Ave (111)	Ave (110)	Ave (100)	Deviation (111)	Deviation (110)	Deviation (100)
1	1.20	1.17	2.32	0.90	1.09	0.11	0.01	0.02
2	1.00	1.17	3.45	0.74	1.04	0.22	0.01	0.03
3	0.60	1.34	5.32	0.53	0.98	0.22	0.02	0.03
4	0.60	1.37	5.16	0.52	0.99	0.28	0.03	0.08
5	1.60	1.62	4.63	0.55	1.99	0.25	0.01	0.04
6	0.60	1.67	6.20	0.44	1.09	0.29	0.00	0.02
7	0.70	1.72	8.25	0.22	1.23	0.21	0.00	0.04
8	0.80	1.91	7.52	0.21	1.38	0.24	0.01	0.07
9	0.70	1.96	7.82	0.25	1.26	0.53	0.01	0.08
10	1.00	1.97	6.51	0.42	1.01	0.53	0.03	0.06

7. 薄鋼板の深絞り性の評価結果

図5はラム波とSH₀-モード板波による薄鋼板の平均r値の評価結果である。図5 (a)は0度, 45度, 90度方向に固定距離間伝播するラム波の伝播時間の平均値と平均r値との相関関係を示しており, 図5 (b)は0度, 45度方向に進むSH₀板波の伝播時間の平均値と平均r値との相関を示している。結果として, ラム波の場合の相関係数は-0.99, SH₀板波の場合は-0.91であった。また平均r値の評価誤差(1標準偏差)はラム波の場合は0.04, SH₀板波の場合は0.13であった。明らかに, SH₀板波を用いた場合, ラム波に比べて平均r値の評価精度が劣る結果が得られた。

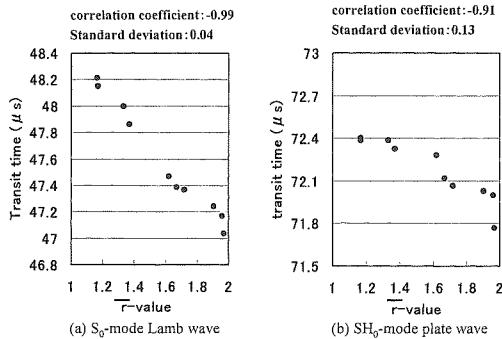


Fig. 5 Correlation of the average r-value and the average transit time : (a)The correlation between the average r-value and the average transit time calculated from the transit time for the S₀-mode Lamb wave ; (b)The results for the SH₀-mode plate wave

8. 平均r値の評価誤差に対する考察

平均r値に対する評価誤差がラム波とSH₀板波では, 明らかにラム波の方が優れているため, その理由について考察した。平均r値を評価する場合には主に3つ誤差要因があると仮定した。

第1の誤差因子は測定回路系の不安定性に関する伝播時間測定誤差である。この誤差因子については, 各EMATセンサを同じサンプル板で同じ測定値に位置においたまま, 同条件で繰り返し伝播時間を測定し, そのばらつきを評価した。

第2の誤差因子は, 薄鋼板内の集合組織のばらつき

に起因するものである。当初は, 薄鋼板内のばらつきの影響がラム波に比べてSH₀板波の方が大きいと考えた。

第3の誤差因子は, 送信子と受信子の幅の影響を考えた。すなわち, 伝播時間は送信子から受信子間の伝播時間を測定しているが, 図6に示すように最短経路(A)のみならず最長経路(B)による信号が受信信号として積算されると考えられる。経路(A)と(B)は伝播距離が異なるがその影響は送受信子間の距離が一定で音速分散性がなければr値が異なっても一定であると考えられる。しかし, 経路(A)と(B)は伝播距離だけでなく伝播方向も異なっている。その場合はr値が異なる板ではその影響度が異なると考えられる。

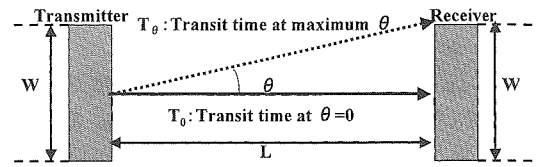


Fig. 6 Configuration of the EMAT system and the concept of the ultrasonic beam spread [$\theta = \tan^{-1}(W/2L)$]

まず伝播時間のばらつきを平均r値のばらつきに換算するため, 図5 (a), (b)からラム波の場合とSH₀板波の場合の平均r値変化に対する伝播時間の変化の割合を評価した。その結果, 平均r値が1から2に変わる間に, 伝播時間はラム波の場合は650ns, SH₀板波の場合は1000nsであった。この結果を基に最初に回路の動作ばらつきの影響を評価した。ラム波の場合は回路の不安定性による計測誤差は4nsとなり, 平均r値に換算して0.004であった。SH₀板波の場合は, 6nsで平均r値に換算して0.01となった。

次に第2と第3の誤差因子についてはまず各サンプル板の代表的な結晶軸密度から各サンプル板の音速の伝播方向依存性を計算した。表3にX線回折法で測定した各サンプル板の主要結晶面強度の平均的な値と測定位置による結晶軸密度のばらつきを示しているが, 各々のサンプル板で数%以内であることがわかる。式(3), (4)のように主要な結晶面の音速分布を表3の結果を基に各々のサンプルの主要結晶軸密度に相当する重み係数を掛け合わせ, 各サンプル板の音速分布とし, 計算した音速分布から求めた平均音速の差をサンプル毎に求めた。その結果, ラム波では, 鋼板集合組織ばらつきの影響による伝播時間の測定誤差は29ns,

平均 r 値に換算して0.029であった。SH₀-モード板波の場合、伝播時間測定誤差は12ns、平均 r 値換算で0.020であった。この結果は、当初の予想と反して、サンプル板内の集合組織のばらつきはSH₀-モード板波の平均 r 値評価誤差が大きい理由にならないことがわかった。

最後にセンサ幅の有限性の影響について評価した。実際にはS₀-モードラム波とSH₀-モード板波の伝播方向に対する音速依存性から、センサ幅と送受信間距離から求めた伝播方向の広がり角(式(8)参照: 今回の測定条件では7.5度)に相当する音速の誤差を各伝播方向毎に評価した。その結果、S₀-モードラム波の場合には29nsで平均 r 値に換算して0.029、SH₀-モード板波の場合には69nsで平均 r 値に換算して0.117になることがわかった。

$$a = \tan^{-1}(W/L) \quad (8)$$

以上の結果をまとめたものを表4に示す。SH₀-モード板波の評価誤差が大きい理由は、伝播方向のあいまいさが伝播時間に対して与える影響が大きいためであることがわかった。

Table 4 Relationship between the error factor and the measurement precision

Item	Transit Time Error		Conversion to r-value	
	S ₀	SH ₀	S ₀	SH ₀
Measurement circuit	4 ns	6 ns	0.004	0.010
Texture	29ns	12ns	0.029	0.020
Ultrasonic Beam	29ns	69ns	0.029	0.117
Total	41ns	70ns	0.041	0.119

9. 狭幅センサの効果

送受信センサの幅を狭くしたSH₀-モード板波用EMATを試作し、その平均 r 値評価精度を検討した。図7(a)はセンサ幅を10mmにした場合の平均 r 値と平均伝播時間との相関性を示しており、S₀-モードラム波の場合と同程度の評価精度が得られることがわかった。また図7(b)は、センサ幅を狭くしていった場合の、平均 r 値評価精度とセンサ幅の関係を示している。センサ幅に反比例して評価精度が向上し、計

算式ともほぼ合致することが示された。

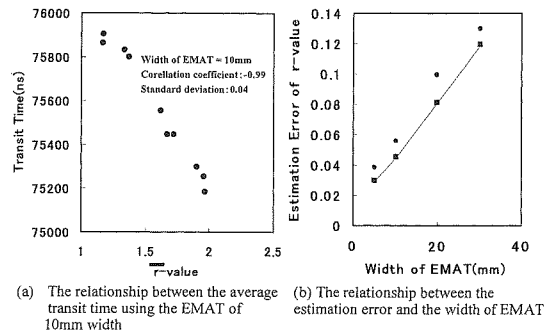


Fig.7 Example of the averaged r-value evaluation for the narrowed sensor: (a)The relationship between the average transit time and the average r-value using the EMAT with a 5 mm sensor coil width; (b)The relationship between the experimental evaluation accuracy of the average r-value and the sensor width for the SH₀-mode plate wave;

10. 結 論

SH₀-モード板波の薄鋼板の深絞り性評価能力をS₀-モードラム波と比較して評価した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) SH₀-モード板波とS₀-モードラム波では、圧延方向に対し45度方向に伝播する場合、伝播時間(音速)と平均 r 値の相関関係が逆になる。解析の結果、SH₀-モード板波では、45度方向に伝播する場合、特にW₄₄₀の影響が強くなることが原因であることがわかった。

(2) 薄鋼板の深絞り性評価に同一サイズの送受信センサを用いた場合、SH₀-モード板波はS₀-モードラム波に比べて評価精度が約2倍悪くなる。各種原因を検討した結果、送受信センサの幅の有限性に起因する超音波伝播方向の不確定性による伝播時間誤差はSH₀-モード板波の方が約10倍悪くなる。また平均 r 値に換算した場合、その誤差は平均 r 値の評価誤差とほぼ一致することが明らかになった。

(3) 実際にSH₀-モード板波用送受信センサの幅を狭くしたところ、平均 r 値の評価精度が向上し、SH₀-モードラム波と同等の評価精度が得られることが明らかになった。

今後、SH₀-モード板波が薄鋼板の平均 r 値評価に積極的に利用されることが期待される。

参 考 文 献

1. C. M. Sayers, D. R. Allen, G. E. Haines, G. G. Proudfoot: Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 320, 1986, pp.187-200
2. E. P. Papadakis et al.: Proceedings of Ultrasonics Symposium 1990, pp.1007-1015
3. A. V. Clark et al.: Research in Nondestructive Evaluation, 2(4), 1990, pp.239-257
4. R. Murayama, K. Fujisawa, H. Fukuoka, and M. Hirao: NDT & E International 29(5), pp.141-146
5. W. T. Lankford, S. C. Snyder and J. A. Bauscher: New criteria for predicting the performance of deep drawing sheets, Trans ASM, 42, 1950, pp.1197-1232
6. R.-J. Roe: Journal of Appl. Phys., 36, 1965, pp.2024-2031
7. M. Hirao and H. Fukuoka: Journal of Acoustical Society of America, 85, 1989, pp.2311-2315
8. R. B. Thompson: IEEE Trans. Sonics Ultrasonics, 4 (SU-20), October, 1973, pp.7-15
9. G. A. Alers: A. Manzanares: Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 9, 1990, pp.1757-1764, Plenum Press
10. T. Yamasaki, M. Hirao, H. Fukuoka: Proceeding of the 1994 Far East Conference on NDT, Taipei, 1994, pp.87-94