ラム波用電磁超音波探触子を用いたステンレス鋼板の r 値評価[†]

村 山 理 一*

Evaluation of r -Value of Stainless Steel Sheets with Electromagnetic Acoustic Transducer

by

Riichi MURAYAMA*

A Lamb wave-mode electromagnetic acoustic transducer (EMAT) which makes use of the Lorenz force and magnetostrictive effect is produced as a device to evaluate the r -value of stainless steel sheet. Correlation between fundamental characteristics of this device and r -value obtained from uniaxial tensile test is examined for stainless steel and low carbon steel sheets. It is confirmed that the use of this device enables the evaluation of the r -values of ferrite stainless and austenite stainless steel sheets as well as low carbon steel sheets. It is also shown that the value of Δr which gives the planar anisotropy of a sheet can be evaluated in good accuracy for the stainless steel sheets than for the low carbon steel sheet.

Key words : Electromagnetic transducer, Stainless sheet, Lankford-value (r -value), Δr -value, Lamb wave, Ultrasonic velocity

1 緒 論

ステンレス鋼板は、電気製品や家庭用品等の外装板等に広く利用されており、その加工時には深絞り性の良さが強く要望されている。従来、超音波音速測定法を利用した低炭素鋼板の深絞り性を評価する平均 r 値評価方法が、複数の研究機関で研究開発されてきた。^{1), 2)} しかしステンレス鋼板は低炭素鋼板と異なり、磁性材と非磁性材が製造されており、またその集合組織も異なった構造をしている。そこで、ステンレス鋼板の深絞り性評価方法について検討を実施した。

2 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。³⁾ ランクフォード値あるいは塑性ひずみ比 r 値の定義は、板幅方向ひずみと板厚方向ひずみの比 $\ln(w_1/w_0)/\ln(t_1/t_0)$ として定義されている (w_0, w_1 は変形前後の引張試験片の幅, t_0, t_1 は変形前後の引張試験片の厚)。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張試験片から求めた r 値を各々 r_0, r_{45}, r_{90} と称し、特に面内の平均的な r 値として平均 r 値 $= (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$ 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。また r 値の板面内異方性を表す指標として Δr 値がある。この Δr 値は、深絞りカップの耳の発生と関係する指標であり、 $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2$ として定義されている。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向され、{100} 結晶面が圧延方向に極力少なく配向されている。⁴⁾ 超音波音速は、結晶方位に特有の音速を有する。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づける 3 つのオイラー角 ($\xi = \cos\theta, \phi, \psi$) 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。⁵⁾

$$W(\xi, \phi, \psi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} W_{\lambda mn} Z_{\lambda mn}(\xi) \exp(-im\psi) \exp(-in\phi) \quad (1)$$

また、その場合の展開係数 $W_{\lambda mn}$ は、式 (2) のように書き表される。

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

展開係数 $W_{\lambda mn}$ は方位分布展開係数 (ODC_s) 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 ODC_s は消滅し、多くの展開係数はお互いに関係づけられる。結局、独立な展開係数 ODC_s は、 $W_{000} = 1/(4\sqrt{2}\pi^2)$, W_{4m0} ($m = 0, 2, 4$) 等となる。CODF は特定方位の単結晶の重み係数として使われる。そして集合組織をもつ材料の巨視的な性質を得るために全オイラー角にわたって積分することで得られ、最低次元の ODC_s の W_{000} は等方的な性質を規定し、他の ODC_s は異方性を規定する。多結晶材料の 2 次弾性定数 C_{ij} は単結晶の弾性定数と CODF 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 (S_0) 音速依存性は式 (3) によって与えられる。⁶⁾

† 原稿受理 平成 12 年 6 月 8 日 Received June 8, 2000

* 正 会 員 福岡工業大学工学部知能機械工学科 〒811-0295 福岡市東区和白東, Dept. of Intelligent Mech. Eng. Fukuoka Inst. of Tech. Higashi-ku, Fukuoka, 811-0295

$$\rho V_{So}^2 = V_{So}^2(1 - \Delta) + 2c[K_0 W_{400} + K_2 W_{420} \cos 2\theta + K_4 W_{440} \cos 4\theta] \quad (3)$$

ここで

c ($= C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$): 立方単結晶の弾性異方性定数, V_0 ($= \{4\mu(\lambda + \mu)/\rho(\lambda + 2\mu)\}^{1/2}$): 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ば方向,

K_0 : $\{2(2)^{1/2}\pi^2/35\} \cdot \{3 + 16\lambda(\lambda + \mu)/(\lambda + 2\mu)^2\}$,

K_2 : $\{-8(5)^{1/2}\pi^2/35\} \cdot \{3\lambda + 2\mu/(\lambda + 2\mu)\}$,

K_4 : $4\pi^2/(35)^2$

Δ ($= \{\lambda/(\lambda + 2\mu)^2(kt)^{2/3}\}$): 板厚/超音波波長が有限なために発生する音速の補正項

k : 波数,

t : 板厚,

λ, μ : ラメの弾性定数

である.

一方, Table I 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. (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.⁹⁾

式 (4) 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 $\theta = 0, 45, 90$ 度方向に伝ばするラム波の音速から評価できる (Fig. 1).

$$W_{400} = \left\{ \rho(V_{So}^2(0) + 2V_{So}^2(45) + V_{So}^2(90)) - 4V_0^2(1 - \Delta) \right\} / (8CK_0) \quad (4)$$

式 (4) を近似して, 実際の平均 r 値との比較は式 (5) を利用した.

$$\text{Averaged } r\text{-value} \propto A(V_{So}(0) + 2V_{So}(45) + V_{So}(90)) / 4 + B \quad (5)$$

また, Δr 値は面内の塑性異方性を表していると考えられることから, ラム波音速についても面内の音速異方性が Δr 値の評価指標になると考え, 式 (6) の評価式を用いる事とした.

$$\Delta r = A \cdot (V_{So}(0) - 2V_{So}(45) + V_{So}(90)) / 2 + B \quad (6)$$

3 試験装置の概要

我々は, 従来低炭素鋼を対象とした深絞り性評価用板波探触子として磁わい効果を利用した電磁超音波探触子

Table I. Relationship between main crystal plane and ODCs.

	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]	0.0313	0	0.0187

Fig. 1. r-value measuring method using Lamb wave.

を用いてきた. その理由の第1は音速に対応した伝ば時間を精度良く測定するためには接触媒質を用いる電磁超音波探触子が必須であった. 次に電磁超音波探触子としてはローレンツ力を利用するタイプが通常は利用されてきたが, 使いやすさおよび感度の点で不十分であった. そこで比較的低磁場で十分な感度が得られる磁わい型板波用電磁超音波探触子を利用していた. しかしながら, ステンレス鋼板の場合は, フェライト系およびオーステナイト系ステンレス鋼板が存在するため, 両者に対応可能なタイプとして磁わい型電磁超音波探触子, およびローレンツ型電磁超音波探触子を切り替え使用可能なセンサを試作し, 評価試験に適用した. また, すべての鋼板をローレンツ型電磁超音波探触子で評価するという考え方もあるが, その場合は常に電磁超音波探触子を構成する電磁石を高負荷で駆動することになり, 将来的な実用性に欠ける使い方と判断した.

3・1 電磁超音波探触子用電磁石の検討

Fig. 2 に発生するラム波の振動成分の計算結果を示す.⁷⁾ 板厚 0.3 ~ 2.0mm の範囲で駆動周波数 250KHz を用いると, ラム波の振動成分のうち板面に沿った縦波成分は, 板面に直交する横波成分の 20 倍 ~ 100 倍となる. すなわち, 試作する電磁超音波探触子は発生させるラム波の半波長毎に板面に沿った方向に周期的な力を与える構造が必要になる.

Fig. 2. Relationship between the ratio of oscillation components for Lamb wave and driving frequency.

この点を考慮して、ローレンツ型および磁わい型電磁超音波探触子の基本的な駆動原理を述べる^{8),9)}

Fig. 3 (a) の EMAT の場合は、銅板が静磁場によってひずむ磁わい効果を主に利用しており、銅板に距離的に周期的な誘導磁場を付加すると、その周期に同期して、金属材料の磁わいの大きさは変化する。この磁わいの大きさの周期的変動が、超音波振動に変換される。金属材料で発生する磁わい変化率は、静磁場によって増減するため、周期的なひずみ変化の最大値を与える静磁場を与えることが、高い受信信号強度を得るために必要である。また、伝ばしてきたラム波により銅板表面に応力分布が発生し、この応力分布によって銅板表面に透磁率分布が生じる。この透磁率変化により磁束密度変化が起こり、電磁誘導現象から銅板表面近傍に配置されたセンサコイル導線内に微小電圧が誘起される。この誘起電圧を検出してラム波の受信が可能になる。Fig. 3 (b) の EMAT の場合は、ローレンツ力を主に利用したもので、銅板表面に与えた静磁場と空間的に周期的な渦電流との相互作用で発生する周期的なローレンツ力がラム波発生駆動力となっており、原理上、静磁場の強度が強いほど大きな出力が得られる。

試作したステンレス用電磁超音波探触子は、Fig. 4 に示すようにローレンツ型、磁わい型電磁超音波探触子が兼用できるように、ローレンツ用としてバイアス用電磁

Fig. 3. Driving mechanism of Lamb wave using EMAT.

Fig. 4. Trial EMAT for ferrite and austenite stainless steel sheets.

石の磁極直下にセンサコイルを配置し、磁わい型用として両磁極間にセンサコイルを配置した。この場合の電磁石仕様は、磁極直下で鉛直方向の磁束密度が1テスラ以上必要で、磁極間では水平方向の磁束密度が0.1テスラ以下で良い。

3・2 評価試験システム

Fig. 5 に試作した評価試験システムを示す。ローレンツ型と磁わい型を切り替え使用可能のように、センサコイルは、送信用・受信用共に切り替え駆動できるように構成した。受信回路は、種々の種類の銅板により受信信号強度が大きく変化することが予想されたため、受信信号の平均化機能を付加した。また受信信号からは、ゼロクロス法を利用して伝ば時間を評価する構成とした。

4 評価試験

フェライト系ステンレス鋼板(～2mm)、オーステナイト系ステンレス鋼板(～2mm) および比較のために用意した低炭素鋼板(～2mm) について評価試験を実施した。評価試験は最初に試作した電磁超音波探触子の駆動条件を求めるために磁化電流と受信信号強度を評価した。次に各サンプルの主要結晶方位と r 値の調査結果を整理し、最後に本評価システムによる各種伝ば時間と各種 r 値との相関関係を評価した。

4・1 駆動磁化電流の検討

電磁石を駆動する磁化電流について、板厚1mmのサンプル板を例にして調査した。得られた結果をFig. 6に示す。Fig. 6中縦軸の信号強度は、電気信号ノイズレベルに対する比として表した。低炭素鋼板については、磁化電流約4Aで受信信号強度は最大になり、伝ば方向が圧延方向に対して0, 45, 90度と共に、ほぼ同じ強度になっている。それに対してフェライト系ステンレス鋼板の場合は、受信信号強度は磁化電流約1Aで最大値を示し、かつ伝ば方向によって信号強度が4倍以上変化することがわかった。またオーステナイト系ステンレス鋼板の場合は、ローレンツ型電磁超音波探触子を利用しており、原理上は磁化電流の2乗に受信信号強度が比例するためであるが、磁化電源の磁化性能の上限である磁化電流10Aまでほぼ単調に受信信号強度は増加した。また伝ば方向依存性は、フェライト系ステンレス鋼板と同様に

Fig. 5. Block circuit diagram for trial EMAT.

Fig. 6. Relationship between received signal amplitude and magnetic current of electromagnet for EMAT.

顕著であり、圧延方向 45 度と他方向は約 2 倍の受信信号強度差があった。低炭素鋼板とステンレス鋼板との相違は、ステンレス鋼板の場合は、結晶粒の整列度が高い（異方性が強い）ためと推定される。この為、ステンレス鋼板の測定時は、受信信号が十分な S/N が取れるように平均化処理した後、どの伝ば方向も同じ信号高さになるように増幅度を調整して伝ば時間測定を実施した。

4・2 板厚と受信信号強度の関係

Fig. 7 に板厚に対する受信信号強度の関係について、フェライト系ステンレス鋼板、オーステナイト系ステンレス鋼板、低炭素鋼板各々検討した結果について示す。Fig. 7 中の縦軸は Fig. 6 と同様の定義である。板厚の増加に対して、すべての材質で受信信号強度は減少して行くが、どの種類の鋼板の場合も伝ば時間測定に十分な S/N が得られることがわかった。

4・3 主要結晶面と平均 r 値および Δr 値の関係

Fig. 8, 9 に低炭素鋼板、フェライト系ステンレス鋼板、オーステナイト系ステンレス鋼板について主要結晶面と平均 r 値および Δr 値の関係を示す。(111) 結晶面については、フェライト系ステンレス鋼板は同じ平均 r 値に対して、低炭素鋼板よりも約 3 倍高いことがわかった。またオーステナイト系ステンレス鋼板は低炭素鋼板よりも 1 桁近く少なく、かつ (111) 結晶面と平均 r 値の傾向が逆であることがわかった。各々の相互相関係数 G_{xy} を求めると、フェライト鋼は 0.88、オーステナイト鋼は -0.86、低炭素鋼は 0.91 という結果が得られた。

次に (110) 結晶面と Δr 値の相関関係について調べた。

Fig. 7. Relationship between the plate thickness and the signal amplitude.

Fig. 8. Relationship between (111) crystal axis density and average r -value.

Fig. 9. Relationship between (110) crystal axis density and Δr -value.

この理由は、主要結晶方位のうち、(111)、(100) 結晶方位が平均 r 値と明確な相関が有ることが知られているため、 Δr 値については (110) 結晶方位の寄与が大きいと推定したためである。各種サンプル板毎に相互相関係数 G_{xy} を求めるとフェライト系ステンレス鋼板は 0.89、オーステナイト系ステンレス鋼板は 0.84、低炭素鋼板は 0.64 であった。フェライト系ステンレス鋼板は Δr 値に対して、低炭素鋼板よりも相関性が高い結果が得られた。またオーステナイト系ステンレス鋼板もフェライト系ステンレス鋼板と同様に良い相関性がみられた。この結果は、(110) 結晶面が Δr 値と良い相関性があり、かつ低炭素鋼板よりもステンレス鋼板の場合に、ラム波音速による評価が良い結果が得られることを期待できる結果であった。

4・4 伝ば時間と r 値の関係

Fig. 10, 11 に低炭素鋼板、フェライト系ステンレス鋼板、オーステナイト系ステンレス鋼板について主要結晶面と平均 r 値および Δr 値の関係を示す。

まず平均伝ば時間については、フェライト系ステンレス鋼板と低炭素鋼板の伝ば時間の相関性はほぼ同等である。それに対してオーステナイト系ステンレス鋼板は逆の傾向を示している。これは、(111) 結晶面と平均 r 値の傾向が逆であったことから予想された結果である。

Fig. 10. Relationship between average transit time and average r -value.

Fig. 11. Relationship between the difference of the transit time for each traveling direction and Δr -value.

またフェライト系ステンレス鋼板の音速変化がもっとも大きいのも (111) 結晶面詰度がもっとも大きいことが原因であると考えられる。

なお、評価誤差 σ (1 標準偏差) はフェライト系ステンレス鋼板が 0.068, オーステナイト系ステンレス鋼板が 0.054, 低炭素鋼が 0.059 であった。

次に伝ば時間の伝ば方向による異方性と Δr 値との関係は、フェライト系ステンレス鋼板、オーステナイト系

ステンレス鋼板共に Δr 値に対して、低炭素鋼板よりも相関性が高い傾向がみられた。この結果も、(110) 結晶方位密度と Δr 値の相関関係から予測できた結果であった。評価誤差 σ はフェライト系ステンレス鋼板が 0.05, オーステナイト系ステンレス鋼板が 0.12, 低炭素鋼が 0.15 であった。

5 結 言

ステンレス鋼板の r 値評価を目的として、ローレンツ力、磁わい効果を切り替え駆動可能で、高精度伝ば時間測定ができるラム波用電磁超音波探触子を試作した。基本的な性能評価試験の結果、両ステンレス鋼板に対して十分な性能を有することを確認した。ステンレス鋼板の平均 r 値、 Δr 値評価試験を行った結果、平均 r 値については、低炭素鋼板と同等の評価精度が得られることがわかった。また Δr 値は (110) 結晶方位と相関性が強く、特にステンレス鋼板でその傾向は顕著な為、低炭素鋼板よりもステンレス鋼板は高精度な評価が可能であるという結果を得た。

参 考 文 献

- 1) C. M. Sayers, Appl. Phys., **15**, 2157 (1982).
- 2) R. Murayama, K. Fujisawa, H. Fukuoka and M. Hirao, NDT & E International, **29**, 141 (1996).
- 3) W. T. Lankford, S. C. Snyder and J. A. Bauscher, Trans ASM, **42**, 1197 (1950).
- 4) 小山一夫, 杉村義一, 佐柳志郎, 松津信彦, 木野信幸, 金属学会会報, **31**, 535 (1992).
- 5) C. M. Sayers, Appl Phys, **15**, 2157 (1987).
- 6) M. Hirao, N. Hara, H. Fukuoka and K. Fujisawa, Journal of American Acoustic Society, **84**, 667 (1988).
- 7) I. A. Viktorov, "Rayleigh and Lamb Waves", p.67 (1967) Plenum Press.
- 8) R. B. Thompson, IEEE Trans. Sonics Ultrasonics, **SU-20**, 7 (1973).
- 9) G. A. Alers and A. Manzanarez, Review of progress in QNDE, **9**, 1757 (1990).