

電磁超音波による 冷延鋼板のオンライン $\bar{r}$ 値計の開発

藤沢 和夫*・村山 理一*・山本 芙美夫*²・田谷 耕一*²・福岡 秀和*³・平尾 雅彦*³

Development of On-Line $\bar{r}$ -value Measurement System
for Cold-rolled Steel Sheets by Using Electromagnetic Acoustic Transducer

Kazuo FUJISAWA, Riichi MURAYAMA, Fumio YAMAMOTO, Koichi TAYA, Hidekazu FUKUOKA and Masahiko HIRAO

Synopsis : An on-line measurement system of $\bar{r}$ -value for cold-rolled steel sheets was developed by measuring the average propagation time of low frequency S_0 mode Lamb wave. In this paper, the principle of nondestructive $\bar{r}$ -value measurement and results of the various experiments are described. In the first experiment, we investigated characteristics of various kinds of EMATs (Electromagnetic Acoustic Transducers) in order to select the optimum EMAT type for on-line measurement. As a results, we developed the on-line measurement system using magnetostrictive type EMATs which measures the $\bar{r}$ -value with a 3mm gap between the sensor case and the steel sheet. The capability for estimating texture and for measuring $\bar{r}$ -value was investigated by using a lot of samples. After this analysis, we investigated the effects of measuring conditions such as sheet traveling speed, the sheet temperature and the sensor gap on the measurement accuracy. The on-line test was also done in the continuous annealing line by using test and product coils. Finally it was confirmed that applying this system, the $\bar{r}$ -value can be measured continuously in the production line with the accuracy of $3\sigma=0.2$.

Key words : cold rolled product ; low carbon steel ; plate ; texture ; formability ; measurement ; quality control ; sensor ; ultrasonic ; EMAT.

1. 緒言

自動車や冷蔵庫等の外装板に用いられる深絞り用冷延鋼板はプレス加工時の破断等が起きにくい様な集合組織を発生させる様に圧延条件や熱処理条件が調整される。

このように深絞り性は重要でありその指標の1つとしてJIS規格で定義された r 値が用いられる。これは切り出した引っ張り試験片の長さ方向に15~20%の塑性歪を与えた時の幅方向と厚さ方向の塑性歪比(塑性異方性)として定義されている。しかしこの方法は破壊測定であるので部分的な評価とならざるを得ない。

r 値を求める他の方法としては電磁気力を用い短冊型試験片を共振させ共振周波数より求めたヤング率から r 値を求める共振法¹⁾(JIS G 6135-1986)があるが、試験片を切り出す必要があり破壊試験である。

非破壊評価法としては集合組織をX線回折を用いて計測する方法が開発されている²⁾が、簡便性、汎用性、迅速性に疑問が残る。

ところで集合組織は弾性異方性も発生させ、それは音速

の異方性の計測により求める事ができる。そこで近年音速計測を利用した集合組織評価やそれを利用した $\bar{r}$ 値評価の研究が行われてきた^{3)~10)}。我々もその対応について実験的あるいは理論的に調査してきた^{7)~10)}。

その結果連続焼鈍ラインでのオンライン $\bar{r}$ 値測定の可能性を得たので電磁超音波探触子(EMAT-Electro Magnetic Acoustic Transducer)を用いた装置の開発に取り組み、オンライン全長連続 $\bar{r}$ 値計測装置の開発に成功した^{8)~10)}。

本論文ではその測定原理、各種タイプのEMATの基礎特性の比較について述べ、最終的に使用した磁歪型EMATを用いて試作した試験装置の概要、基礎テスト結果及びオンラインでの評価テスト結果及びその考察について述べる。

2. 超音波法による $\bar{r}$ 値測定の原理

2・1 塑性異方性(r 値)と集合組織との関連

鋼板の塑性異方性(r 値)はその集合組織に強く依存する。定性的には鋼板面に平行に $\{111\}$ 結晶面が多く並ぶ程、 $\{100\}$ 結晶面が少ない程 r 値が高い¹¹⁾。

平成4年11月4日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Nov. 4, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993)

* 住友金属工業(株)システムエンジニアリング事業本部 (System Engineering Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660)

* 2 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 3 大阪大学基礎工学部 (Faculty of Engineering Science, Osaka University)

集合組織を定量的に表すには結晶方位分布関数 $W(\xi, \varphi, \phi)$ が用いられる。Euler角 φ, θ, ϕ ($\xi = \cos \theta$) は圧延板の場合、圧延方向、幅方向、板厚方向に固定した直交座標系 (xyz) に対する結晶に固定された3つの直交座標系 (XYZ) の関係を表し、 W は φ, θ, ϕ で表される方位をもつ結晶の存在確率を与える。この結晶方位分布関数を球面調和関数で展開すると次のようになる¹²⁾¹³⁾。

$$W(\xi, \varphi, \phi) = \sum \sum \sum W_{lmn} Z_{lmn}(\xi) \exp(-im\varphi) \exp(-in\phi) \dots\dots\dots (1)$$

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

(1)式で W_{lmn} は方位分布係数と呼ばれる。圧延鋼板の様に集合組織が直交異方性(x-y面, y-z面, z-x面に対し集合組織が対称)を示し且つその構成要素の単結晶が立方晶の場合には W_{lmn} は次の性質を示す事が知られている。

- ① W_{lmn} の l と m は偶数で、且つ n は4の倍数
- ② $W_{lmn} = W_{\bar{l}m\bar{n}} = W_{l\bar{m}n} = W_{lm\bar{n}}$ (ただし $\bar{m} = -m$)
- ③ $W_{000} = 1 / (4\sqrt{2}\pi^2)$, $W_{200} = 0$
 $W_{400} = 5W_{400} / \sqrt{70}$

一方 r 値と W_{lmn} の関係については理論的あるいは実験的に多くの研究がなされており、 W_{400} と r 値が良く対応する事が分かってきた⁷⁾。なお r 値は圧延方向に対し $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ で計測された r 値(r_0, r_{45}, r_{90})の平均値($\bar{r} = (r_0 + 2 \times r_{45} + r_{90}) / 4$)である。

2・2 弾性異方性と集合組織

集合組織を有する多結晶体の2次弾性定数 C_{ij} は結晶方位分布関数を重み関数として各方位の単結晶の弾性定数を平均して得られる。平均の方法としてReuss, Voight, Hillの方法があるが、どの方法においても立方晶からなる直交異方性材の場合には次の関係が成立する¹⁴⁾¹⁵⁾。

① C_{ij} は $C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66}, C_{12} = C_{21}, C_{13} = C_{31}, C_{23} = C_{32}$ が0でなく他の要素は0である。

②上記 C_{ij} はお互いに独立ではなく、3つの独立した変数 $W_{400}, W_{420}, W_{440}$ を用いて表される。即ち弾性異方性は集合組織を表す方位分布係数のうち3つの係数のみで表される。

2・3 r 値と対応する W_{400} の音速からの算出方法

r 値と対応の良い W_{400} を求める方法としては次の様な方法がある。1つは板厚方向に伝播する縦波、または横波(正確には圧延方向に偏波した横波と圧延直交方向に偏波した横波の平均音速)の音速から求める方法であり⁷⁾、1つは縦波と横波(平均音速)の音速比より求める方法である⁷⁾。他の1つは S_0 モードの板波の音速あるいは音速と対応する固定長を伝播する S_0 モードの伝播時間から求める方法である⁸⁾。本開発では最後の方法を用いている。

すなわち集合組織を有する厚さ $2d$ 、密度 ρ の冷延鋼板の圧延方向から角度 θ 方向に長さ L の距離を伝搬する S_0 モードの板波の伝播時間は(2)式で表される⁸⁾。

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

ここで $V_0 = \{4\mu(\lambda + \mu) / (\lambda + 2\mu)\rho\}^{1/2}$ は集合組織及び音速の分散効果が無い場合の S_0 モードの音速を示し、 $\delta = \{\lambda / (\lambda + 2\mu)\}^2 (kd)^2 / 3$ は板厚による音速の分散効果を表す。尚 $S_0 \sim S_4$ は下式で表される。

$$\begin{aligned} S_0 &= (2\sqrt{2}\pi^2/35) \{3 + 16\lambda(\lambda + \mu) / (\lambda + 2\mu)^2\} \\ S_2 &= - (8\sqrt{5}\pi^2/35) (3\lambda + 2\mu) / (\lambda + 2\mu) \\ S_4 &= 4\pi^2 / \sqrt{35} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

(1)式よりを圧延方向に対して $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 方向に伝搬させた S_0 モード板波の平均伝搬時間 $\langle Tc \rangle = \{T(0) + 2T(45) + T(90)\} / 4$ は W_{400} のみを含む下式となる。

$$\langle Tc \rangle = (L/V_0) \{1 + \delta/2 - (c/\rho V_0^2) (S_0 W_{400})\} + \tau \dots\dots\dots (4)$$

3. オンライン測定用EMATの開発

3・1 オンライン用センサとしての要求性能

2で述べた原理にもとづきオンラインで r 値を測定するセンサに要求される性能としては以下のものがある。

- (1) S_0 モード板波の高精度な伝搬時間測定が可能
- (2)非接触で且つ高感度である事
- (3)長期的に安定して測定でき、調整が容易な事

まず上記性能を満足するセンサとしては電磁超音波探触子(EMAT)が最適であると判断した。なぜなら(4)式での音速の分散が比較的小さな低周波 S_0 モード板波の送受信が非接触で可能であり、センサと冷延鋼板とのギャップによる伝播時間測定変化が接触媒質を用いる方式に比べて格段に小さい⁹⁾からである。

3・2 各種EMATの性能比較

強磁性体にEMATを適用した場合超音波はローレンツ力及び磁歪効果により送信でき、それぞれの逆作用により受信できる。 S_0 モード板波を低周波数領域(非分散領域)で利用する場合その振動成分は主に鋼板表面及び伝播方向に平行である事が分かっている。

そこでローレンツ力による場合には鋼板に垂直なバイアス磁場と板波伝播方向に垂直で板波半波長毎に向きが反転する誘導電流により鋼板表面に平行で半波長毎に向きが 180° 度反転する力を発生させ板波を送信できる。(Fig. 1(A)参照)

一方磁歪効果による場合には鋼板表面に平行で半波長毎に歪の向きが反転する様に交流磁場を与える事によって所定の板波を送信することができる。但し、一般に鋼板の磁歪効果はバイアス静磁場により異なる¹⁶⁾。(Fig. 1(B), (C)参照)

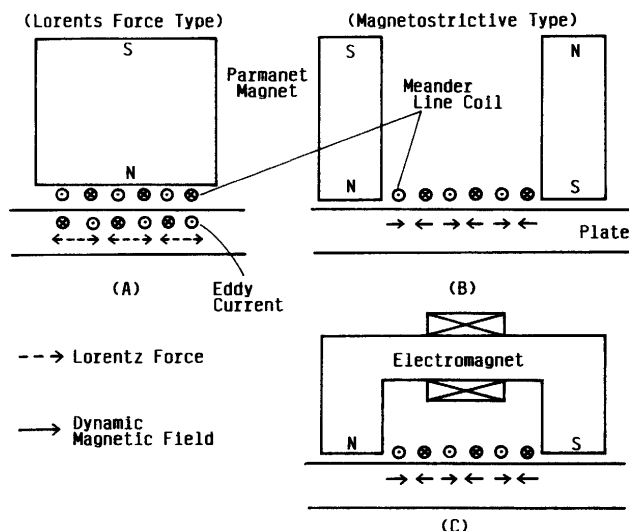


Fig. 1. Comparison among various kinds of EMATs.

そこで上記2つの発生方式を比較検討し3・1に述べた(3)(4)の目標を満足できるかどうか下記の3タイプ(Fig. 1)のEMATについて調査した⁹⁾¹⁰⁾。

A. 永久磁石を用い主に静磁場を垂直にかけローレンツ力による S_0 波の送受信を狙ったEMAT (A型)

B. 永久磁石を用い主に静磁場を平行にかけ磁歪による S_0 波の送受信を狙ったEMAT (B型)

C. 電磁石を用いた磁歪型EMAT (C型)

なお送受信コイルには間隔が $\lambda/2$ の共通のmeanderコイルを用いた。送信コイルにはトーンバースト信号電流を流して駆動し、受信は比較的広帯域のアンプと狭帯域のバンドパスフィルタにより行い受信した波形をA/D変換してCPUに取り込み基本特性を比較した。なおサンプルには 450×450 mmに切り出し板厚が0.8~2.5 mmの低炭素鋼冷延鋼板を用いた。

3・3 各タイプのEMATの性能比較結果

3・3・1 駆動周波数と受信エコー強度の関係

A型EMATを用いて駆動周波数を変化した時の受信エコー強度とギャップとの関係について調査した。その結果をFig. 2に示す。低周波数の方がギャップの影響が少なかった。板厚による速度分散の影響も低周波数の方が小さいことから、オンライン計測装置には280 kHzを用いた。また以下の実験でも記述のないのはこの周波数を使用した。

3・3・2 板厚と受信エコー強度の関係

Fig. 3はギャップが5 mm一定の場合、板厚変化に対して3種類のEMATがどのような受信感度を持つか比較した結果である。ローレンツ型EMATでは板厚の厚いところで十分な感度が得られず、目標を達成できなかった。一方磁歪型EMATは板厚の広い範囲で感度が高く特にCタイプのEMATで励磁電流を調整すれば、オンライン測定に必要な仕様全板厚で十分な感度が得られる事が分かった。

3・3・3 磁歪型EMATの特性

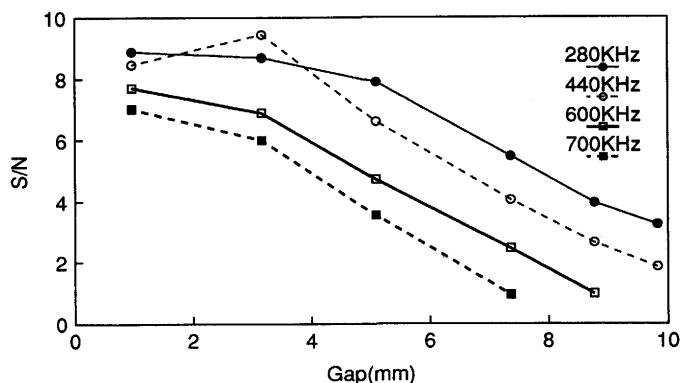


Fig. 2. Relation between gap and signal amplitude at various frequencies.

- : Lorentz Force with Permanent-magnet (Type A)
- △ : Magnetostrictive with Permanent-magnet (Type B)
- : Magnetostrictive with Electromagnet (Type C) (Magnetizing current is varied)

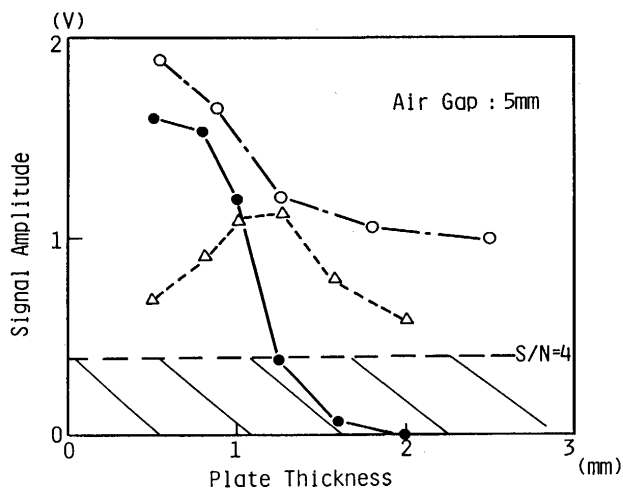


Fig. 3. Comparison of sensitivities in various kinds of EMATs.

Fig. 4は板厚に関する感度特性が最適であった電磁石方式磁歪型EMAT (C型)の受信側の条件を一定として送信側の励磁電流を変化した時の S_0 モード板波の信号振幅及び信号位相を示した1例である。3つの領域a, b, cが観察された。Thompson等がすでに報告しているように¹⁶⁾, 領域a, bではヒステリシスが観察されたが、領域cでは顕著なヒステリシスは観察されなかった。また領域bと領域a, cとは信号の位相がほぼ180度異なっていた。受信側のEMATの励磁電流を変化した時の特性もほぼ同様の特性を示したが、領域aはほとんど認められなかった。

板厚が変化した時、各領域の発生する励磁電流値は変化した。磁極間中央での板面平行方向の磁束密度はほぼ一定値を示した。例えば領域cでピーク値を示す磁束密度は送受信とも板厚に関わらず約1.6 Tであった。なお磁束密度は鋼板に2箇所貫通穴を加工し、そこにさぐりコイルを巻いて計測した。

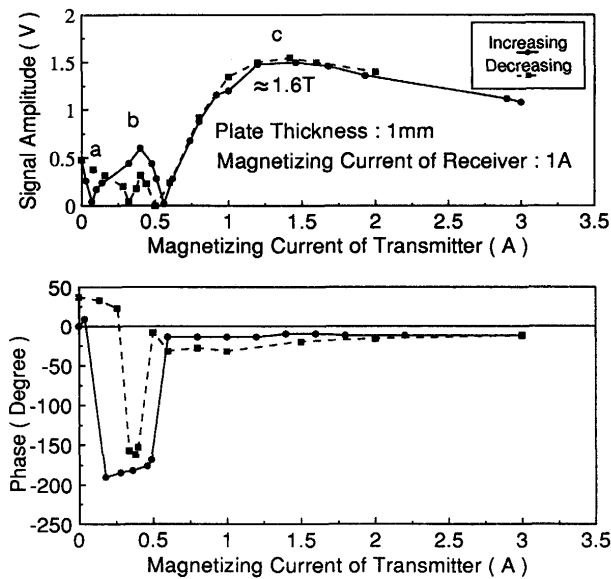


Fig. 4. Characteristic of magnetostrictive type EMAT as a transmitter.

Table 1. Comparison of 3 types of EMATs ability.

EMAT type	Lorentz			Magnetostrictive		
Item	A			B		
Max. Thickness (5mm Gap)	1.2mm			1.6mm		
Max. Gap (2mm thickness)	3mm			4mm		
Sensitivity	impossible			impossible		
Change	impossible			impossible		
Passage of Sheet	good			not so good		
Maintenance	difficult			difficult		
Overall Evaluation	△			○		

なお計測では信号の安定性および後述する感度の点より電磁石方式磁歪型EMATのc領域を使用した。

3.3.4 総合評価

Table 1に各タイプのEMATの総合的な性能比較評価結果を示す。受信感度、インラインで使用する場合の利便性とも、Cタイプが優れている事が判明した。

4. 基礎評価試験結果

上記検討結果を基に採用した磁歪型EMATを用いて基礎特性を調査した。

4.1 板波伝搬方向と板波伝搬時間の関係

450×450mmに切り出した板厚約0.8mmの低炭素鋼冷延鋼板サンプルを用い送受信のEMAT間の距離を固定し（コイル先端間距離150mm）、圧延方向に対するS₀モード板波の伝播方向を変化させて伝播時間を測定した。伝播時間測定は、受信波の特定部分に計測ゲートを設定し、送信（トリガ）からそのゲート間で信号が+から-に0をクロスするまでの時間を測定する事により行った（0クロス法）。Fig.

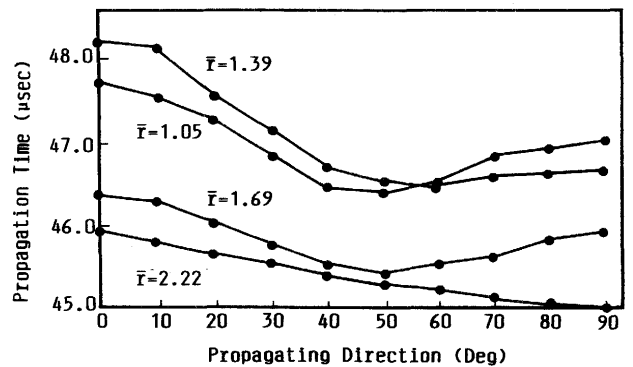


Fig. 5. Relation between propagation time and propagating direction.

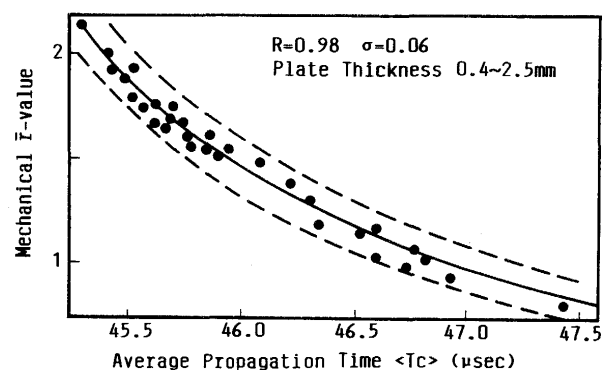


Fig. 6. Relation between $\bar{r}$ -value and average propagation time.

5に代表的サンプルでの結果を示すが(2)式に対応して45度、90度に変極点が存在し理論と良く一致している事が分かる。

4.2 機械試験 $\bar{r}$ 値と平均伝搬時間の関係

圧延方向に対して0°、45°、90°方向の伝播時間を測定し、平均伝播時間<Tc>を計算し、機械試験 $\bar{r}$ 値との対応を調査した。サンプルには板厚が0.4~2.5mmの低炭素鋼冷延鋼板を使用した。

Fig. 6にその結果を示すが相関係数 $R=0.98$ 、 $1\sigma=0.06$ と非常に良い対応が得られた。

4.3 破壊及び非破壊測定 $\bar{r}$ 値と集合組織との関係

いくつかの製造ラインからサンプル(450×450)を採取して平均伝播時間を測定し、Fig. 6の伝播時間と $\bar{r}$ 値との関係を表す校正曲線を用いて $\bar{r}$ 値を評価した。その後切り出したサンプルのX線回折によりND//<111>及びND//<100>軸密度を計測した。さらに機械試験 $\bar{r}$ 値を計測した。Fig. 7(a)は $\bar{r}$ 値に最も関係深い<111>軸密度、<100>軸密度と機械試験 $\bar{r}$ 値との関係を示す。各々対応関係が存在するが大きく2つのグループに分かれている。Fig. 7(b)は同一サンプルの非破壊測定 $\bar{r}$ 値と機械試験 $\bar{r}$ 値との関係を示す。2つのグループが非破壊測定値でも少し分かれる事が分かったが、製造ラインを固定した場合には精度が向上できる事も確認した。そこでオンライン測定はまず1つのラインを対象としそこから切り出したサンプルを用いて校正することとした。

5. 冷延鋼板オンライン $\bar{r}$ 値測定装置による実験

5.1 オンライン $\bar{r}$ 値測定装置

上記で開発したEMATを用いてオンライン $\bar{r}$ 値測定装置を試作開発し連続焼鈍ラインでの適用試験を実施した。その全体構成図をFig. 8に示す。3方向 (0° , 45° , 90°) に3対のEMATを配置したEMATブロックをライン鋼板上に門型フレームからギャップ 3 mm (送受信コイルから 5 mm) で固定し、同一の電磁石配置の電磁石ブロックをライン鋼板下より門型フレームから同一ギャップで固定した。このような構造にしたのは電磁石の上下の吸引力をバランスさせるためと磁場を効率良く与えるためである。なお2つのブロックの前後にはピンチローラを固定してギャップを一定に保持するようにした。これらのブロックはコイル間の溶接継ぎ目が通過する際には上下に自動的に退避させた。

各方向の伝播時間は0クロス法にて測定し、それらから平均伝播時間をCPUにて計算し $\bar{r}$ 値に変換した。結果はチャートレコーダに記録するとともにプロセスコンピュータにも伝送した。プロセスコンピュータからのデータは、後述する補正に使用した。仕様のまとめをTable 2に示す。本装置の特徴をまとめると、以下の様になる。

- (1) 磁歪型EMATを用いた非接触オンライン測定装置 (ギャップ: センサカバー面から 3 mm)
- (2) 1 測定点を20msec毎に出力 (1 伝搬方向を 5 msecで計測) する連続測定装置
- (3) コイル・コイル間の溶接部を除いて全長測定可能
- (4) 簡便な機構 (水冷却等不要) で長期連続使用可能

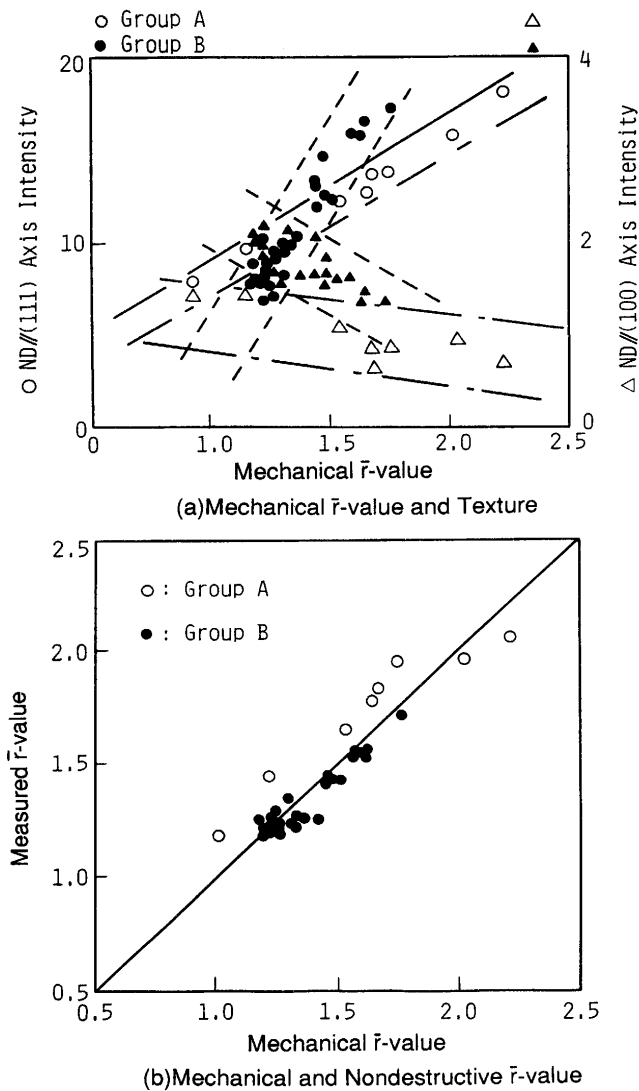


Fig. 7. Mechanical and measured $\bar{r}$ -value and texture.

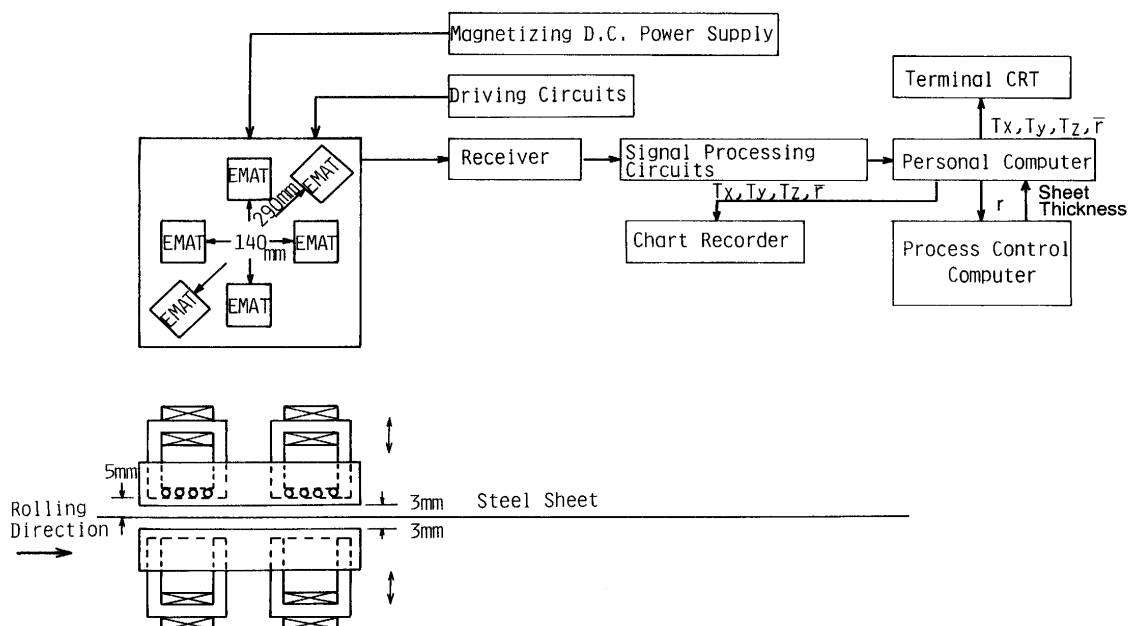


Fig. 8. Block diagram of on-line measurement system.

Table 2. Specification of on-line $\bar{r}$ -value measurement system.

Item	Specification
Sensor	Magnetostrictive type EMATs with electromagnet
No. of Sensors	3 pairs of sensors (0,45,90 degrees to RD)
Driving Signal	Tone burst pulse of 280kHz in frequency
Measuring Time	5msec/ch and 20msec/data
Operating Form	Continuous measurement in a production line
Line Speed	Up to 300m/min
Sheet Thickness	Up to 2mm
Target Accuracy	Less than 0.2 (3σ)

5・2 測定精度への影響要因

5・2・1 オフライン試験

測定精度への影響要因とその補正方法の検討を実施した。まず計測器としての測定精度を確認するため同一測定点で繰り返し測定（1000回）を行い測定値のばらつきを調査した。 $\bar{r}$ 値換算のばらつき $\sigma=0.003$ であり十分な伝播時間測定精度を有する事を確認した。

適用ラインでは無張力状態から最大20MPaの張力変化があるため、サンプル板に張力変化を与えその影響も調査しその影響は無視できる事を確認した。

さらにはサンプル板を加熱して板温度の影響及びギャップを変化しての影響について実際に確認した。その結果を

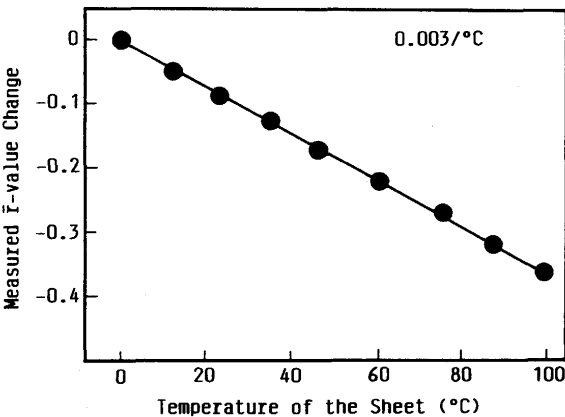


Fig. 9. Effect of sheet temperature on $\bar{r}$ -value measurement.

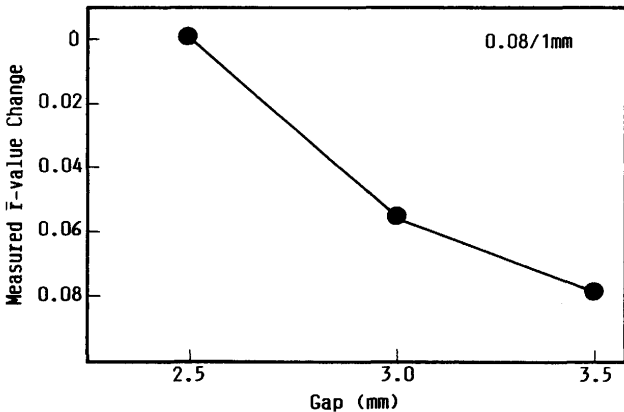


Fig. 10. Effect of gap on $\bar{r}$ -value measurement.

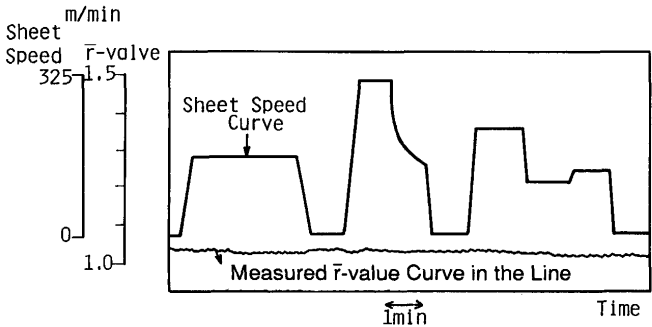


Fig. 11. Effect of sheet speed on $\bar{r}$ -value measurement.

Fig. 9, Fig. 10に示す。これらの影響は無視できない事が分かった。

板厚変化による速度分散の影響については(3)式よりの評価及び実験より無視できないと考えた。

以上の結果よりプロセスコンピュータから得た公称板厚値および温度計測値及びレーザ距離計により測定したギャップ値を補正に用いた。

5・2・2 オンライン試験

ライン速度の影響を見るためにオンラインで静止状態から最大325m/minまで、ライン速度を変えて測定値の変動を確認した (Fig. 11) が有意な変動は見られなかったので補正は実施しなかった。

6. 総合オンライン試験

6・1 テストコイルによる評価テスト結果

テストコイルを用いて焼鈍条件を変化し、 $\bar{r}$ 値計で測定した後、テストコイルを細かく分割して機械試験 $\bar{r}$ 値を求め測定精度を評価した。結果をFig. 12に示すがプロフィールとしても正しく再現できており測定精度も $3\sigma=0.12$ と良好な対応が得られた。

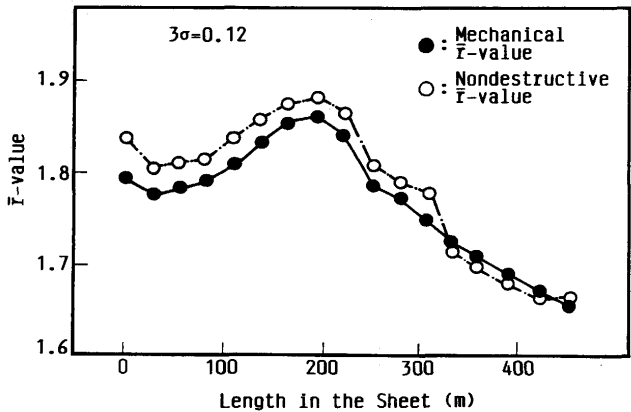


Fig. 12. An example of on-line measurement of test coils.

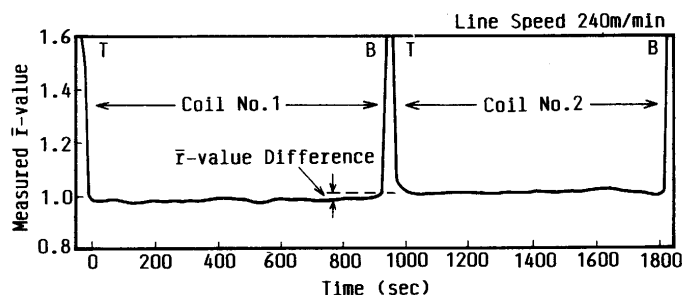


Fig. 13. An example of on-line measurement of products.

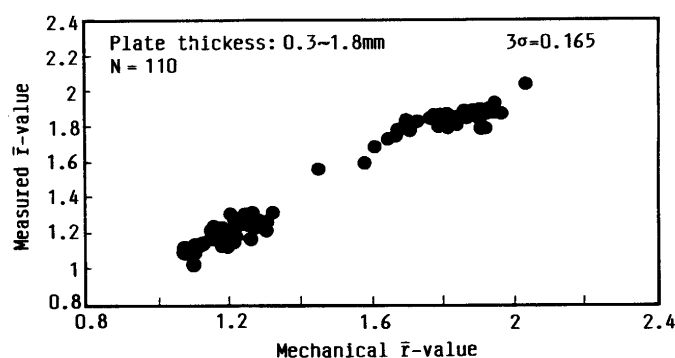


Fig. 14. Relation between nondestructive and mechanical $\bar{r}$ -value.

6・2 製品コイルによる測定例

Fig. 13に製品コイルの測定チャート例を示すが全長に亘り安定して測定できており、コイルが変わると $\bar{r}$ 値に変化が見られる事も確認できる。

Fig. 14に測定した製品コイルのいくつかをサンプリングし機械試験 $\bar{r}$ 値と比較評価を行った結果を示す。 $3\sigma=0.165$ と良好な結果が得られ、十分製品をオンラインで測定できる事が分かった。

7. 考察

7・1 ローレンツ型EMATと磁歪型EMATの比較

Fig. 15は電磁石方式でFig. 14と同様のローレンツ型EMATを試作し受信側の条件を一定として送信側の励磁電流を変化した時の信号振幅を示した1例である。励磁電流が0でも送信が行われており、これは原理より磁歪によるものと考えられる。感度は一旦低下した後増加するが、これはローレンツ力による送信が増加している事を示している。しかしその後飽和傾向を呈しており、これは鋼板の厚さが磁極の大きさに対して小さいため垂直方向の磁場が飽和する（磁場計測により確認）ためと考えられる。

一方磁歪型EMATでは、Fig. 4に示す最高感度を示す板表面に平行な磁場1.6Tが比較的容易に得られる。これが冷延鋼板の様な板厚の小さい材料に対して磁歪型EMATが有効な理由と考えられる。

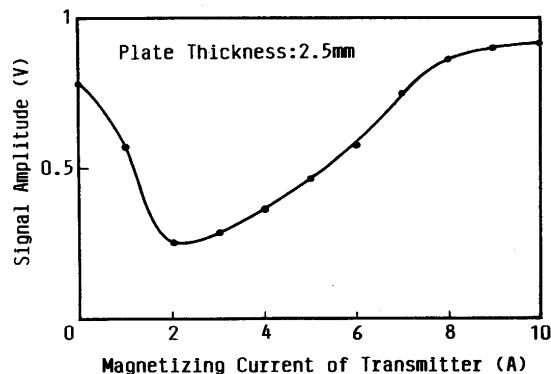


Fig. 15. Characteristic of Lorentz type EMAT as a transmitter.

Table 3. Effects of measurement conditions on on-line measurement accuracy.

Factor	Observed Variation (3σ)	Variation after Compensation (3σ)
Short-term Repeatability	0.003	0.003
Long-term Repeatability	0.007	0.007
Gap*	0.08/1mm	0.008/0.1mm
Sheet Thickness*	0.15/2mm	0.008/0.1mm
Tension	0.001/10MPa	0.002/20MPa
Temperature*	0.003/1°C	0.015/5°C
Total		0.021

* Those conditions were used for compensation

7・2 測定影響因子と測定精度の関係

5・2に述べた測定影響因子について測定結果にどれぐらい影響を与えるか評価した。例えば張力については適用ラインの考えられる最大変化量が20MPaであるためそれに対する計測値の影響量を0.002とした。またギャップは1mmあたり計測値を0.08変化させるが距離センサによりギャップ変化による計測値変化を補正しているため、そのギャップ測定精度が0.1mmである事からギャップの影響量を0.008とした。他の項目についても同様である。

以上の考え方よりまとめたものがTable 3である。総合評価した計測器上の影響量は0.021となりオンラインで得られる評価精度 $\sigma=0.055$ (Fig. 14) に比し十分な測定精度である事が分かった。

8. 結言

冷延鋼板の $\bar{r}$ 値をオンラインで測定する事を目標に磁歪型EMAT及びそれを用いたオンライン $\bar{r}$ 値測定装置を開発し以下の知見を得た。

1. S_0 モード板波の各伝搬方向の伝搬時間は立方晶からなる直交異方性材料の理論的伝播時間と良く対応する。
2. S_0 モード板波の3方向（圧延方向に対して0°, 45°, 90°）の平均伝搬時間は機械試験 $\bar{r}$ 値と良く対応した。
3. 磁歪型EMATの感度は送受信とも板表面に平行な磁

束密度がほぼ1.6Tで最大を示し、冷延鋼板に対してはローレンツ型に比べ高感度であった。

4. 板厚、ギャップ、温度等の補正を行えばオンラインで精度 $3\sigma=0.165$ が得られた。

5. 測定値に影響を与える要因についても検討したが、現状の目標精度の1/3程度であり測定器精度として十分な事を確認した。

今後は本装置のメッキ鋼板等への技術拡大に努めていくとともに実用化を進めたい。

文 献

- 1) P.R.Mould and T.E.Johnson, Jr : Sheet Metal Industries, **50** (1973), p.328
- 2) W.Bottcher and H.J.Kopineck : Stahl und Eisen, **105** (1985), p.509
- 3) A.V.Clark, R.C.Reno, R.B.Thompson, J.F.Smith, G.V.Blessing, R.J.Fields, P.P.Delsanto and R.B.Migmogna : Ultrasonics, **26** (1988), p.189

- 4) K.Sakata, D.Daniel, J.J.Jonas and J.F.Bussiere : Metall. Trans., **21A** (1990), p.697
- 5) O.Cassier, C.Donadille and B.Bacroix : Review of Progress in Quantitative N.D.E., San Diego, CA, July 31-Aug. 5, (1988), p.2189
- 6) K.Kawashima : J.Acoust. Soc. Am., **87** (1990), p.681
- 7) 平尾雅彦, 原 規彰, 福岡秀和, 藤沢和夫 : 日本機械学会論文集 A, **54** (1988), p.1814
- 8) 平尾雅彦, 豊島 滋, 福岡秀和, 藤沢和夫, 村山理一 : 日本機械学会論文集A, **55** (1989), p.2152
- 9) R.Murayama, K.Fujisawa, H.Fukuoka and M.Hirao : IEEE Ultrasonic Symposium Vol.2, (1989), p.1159
- 10) K.Fujisawa, R.Murayama, H.Fukuoka and M.Hirao : Proc. of 5th Int. symp. on Nondestructive Chracterization of Materials, (1991), p.623
- 11) 岡本豊彦, 白岩俊男, 福田 実 : 住友金属, **14** (1962), p.211
- 12) R.J.Roe : J.Appl. Phys., **36** (1965), p.2024
- 13) R.J.Roe : J.Appl. Phys., **37** (1966), p.2069
- 14) C.M.Sayers : J.Phys. D ; Appl. Phys., **15** (1982), p.2157
- 15) M.Hirao, K.Aoki and H.Fukuoka : J.Acoust. Soc. Am., **81** (1987), p.1434
- 16) R.B.Thompson : J. Appl. Phys., **48** (1977), p.4942