

冷間圧延鋼板のオンライン \bar{r} 値(塑性歪み比)測定On-line Measuring Technique for Plastic Strain Ratio (\bar{r} -value)
of Cold-Rolled Steel Sheets

赤木俊夫 ⁽¹⁾ Toshio AKAGI	俵口隆雄 ⁽²⁾ Takao HYOGUCHI	川島捷宏 ⁽³⁾ Katsuhiko KAWASHIMA	吉原敦 ⁽⁴⁾ Atsushi YOSHIWARA
縄田康隆 ⁽⁵⁾ Yasutaka NAWATA	早戸克尚 ⁽⁶⁾ Katsuhisa HAYATO		

抄 録

超音波を用いた非破壊評価の応用技術として、共振電磁超音波法によるオンライン \bar{r} 値測定技術を開発した。これは、通常、鋼板から採取した試験片を用いて測定している \bar{r} 値(冷間圧延鋼板の塑性歪み比)を、電磁超音波トランスデューサを用いて鋼板中に伝播する3種の超音波の板厚共振周波数を測定することにより、オンラインで連続的に評価する技術である。本測定法は、測定精度が高いだけでなく、コンパクトなセンサで非接触測定ができるため現場設置が容易で、また鋼板の振動、温度、張力など外乱の影響を受けにくい特長を持っている。本測定装置は、連続焼鈍ラインに実機導入されており、冷間圧延製品の品質安定化に役立てられている。

Abstract

An on-line \bar{r} -value (plastic strain ratio) measuring technique by the resonance electromagnetic ultrasonic method has been developed as an advanced technique for non-destructive evaluation. With this technique, the press formability of a cold-rolled steel sheet, which normally used to be measured through tensile tests, can be evaluated on line through measuring the resonance frequencies of three kinds of ultrasonic waves propagating in steel sheets, using electromagnetic acoustic transducers. This measuring method is not only of a high accuracy in measuring but also makes non-contact measuring possible with using compact sensors, and therefore an on-line installation is easily attained. Moreover, it has been proved by experiments that the effects of disturbances such as mechanical vibration of steel sheets, temperature, tension and so are negligible for its on-line practical use. A measuring device using this technique has been installed in the actual continuous annealing lines, contributing to stabilizing the quality of cold-rolled steel products.

1. 緒 言

プレス加工して自動車、電気製品などの外板に用いられる冷間圧延(以下、冷延と記す)鋼板では、引張強さなどの機械的強度以外に、プレス成形性、すなわち破断せずに成形できる能力の高さが、材質を定義する重要な要素となる。鋼板が深絞り変形を受けるときの加工性を表す指標として、一般に \bar{r} 値が用いられており、その圧延面内平均の値である \bar{r} 値が高い製品ほど、深絞り性が高く、プレス成形したときに割れ等が生じにくい性質をもつ。現在、 \bar{r} 値は引張試験法(図1参照)や、固有振動法等の破壊的方法によって測定され、製品の品質管理に用いられている。しかし、これらの測定法で

はサンプルの切出しが必要なために、測定に手間や時間がかかることや、製品の一部分しか評価できないといった問題がある。

そこで、サンプルを切り出すことなく、製品のまま迅速に測定を行う手段として、超音波を用いた非破壊的手法により \bar{r} 値を測定する技術の研究開発が進められてきた¹⁻³⁾。筆者らは、まず複数の超音波を鋼板中に伝播させ、その音速異方向性を測定することによって、その場所での面内平均ヤング率 \bar{E} が測定できることを理論的に明らかにするとともに、 \bar{E} と \bar{r} 値の間にある強い相関関係より、精度良く \bar{r} 値を得られることを示した。更に、測定方法として共振電磁超音波法を用いることで、高精度な \bar{r} 値測定技術を確立させ、オン

⁽¹⁾ 技術開発本部 プロセス技術研究所 計測制御研究部
主任研究員

⁽²⁾ 現 (株)日鉄テクノロジー NDI事業部 技術主管

⁽³⁾ 現 東京工科大学 自然・基礎学系 教授 工博

⁽⁴⁾ 君津製鐵所 冷延部

⁽⁵⁾ 君津製鐵所 品質管理部 室長

⁽⁶⁾ 君津製鐵所 生産技術部

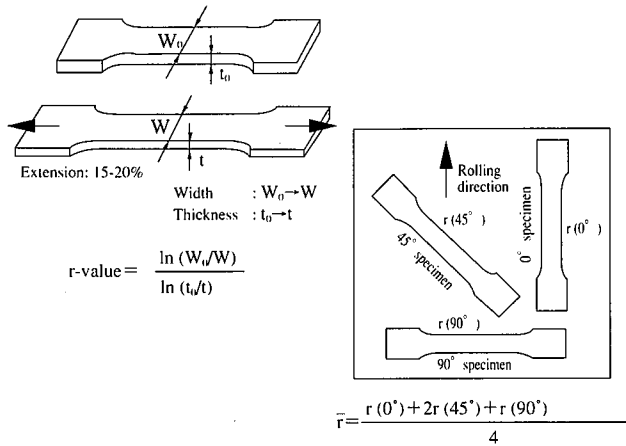


図1 引張試験法によるr値測定

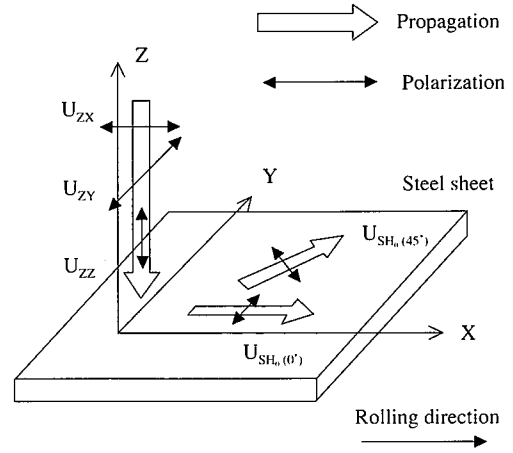


図2 冷延鋼板内を伝播する5種の超音波

ライン測定にも適用できることを示した^{4,5)}。

本報告では、その測定原理、測定方法、性能評価結果を述べ、更にオンライン測定への適用状況について述べる。

2. 測定原理

2.1 超音波計測によるヤング率・r値評価

焼鈍された冷延鋼板は、立方晶をなす鉄の単結晶の集合体と考えられるが、材料軸に対する各結晶方位の分布には偏りがあり、いわゆる集合組織を形成している。この集合組織のつき具合は、その塑性的性質に大きな影響を与え、r値もそれによって強く支配されている。

一方、この集合組織は、鋼板の弾性的性質にも深くかかわっている。集合組織を決定する各結晶の優先方位の度合は、材料軸に対して特定の方位を有する結晶方位の確率を与える結晶方位分布係数によって表される。冷延鋼板のように斜方晶系の対称性を持つ多結晶体試料の場合、3個の低次の結晶方位分布係数 W_{400} 、 W_{420} 、 W_{440} が重要な意味を持ち、この三つの値、及び鉄単結晶の3個の弾性率 C_{11}^0 、 C_{12}^0 、 C_{44}^0 によって、その二次弾性定数をすべて表すことが可能である⁶⁾。ここで C_{11}^0 、 C_{12}^0 、 C_{44}^0 は物理定数と考えられるため、結局、 W_{400} 、 W_{420} 、 W_{440} が鋼板の弾性的性質を決定し、ヤング率もそれにより決定される。

集合組織はまた、鋼板を伝播する超音波にも影響を与え、集合組織による異方性に従い、超音波も速度異方性を示す。

そこで、筆者らは図2に示すような5種の超音波、すなわち、板厚方向(Z方向)に伝播する縦波 U_{ZZ} 、板厚方向に伝播し圧延方向(X方向)に偏波する横波 U_{ZX} 、板厚方向に伝播し幅方向(Y方向)に偏波する横波 U_{ZY} 、及び、2方向に伝播する SH_0 板波を用いて、前3種の超音波の厚み共振周波数の比 K_1 、 K_2 や、後2種の超音波の音速の比 K_3 から、 W_{400} 、 W_{420} 、 W_{440} が求められることを明らかにした。

すなわち、

$$K_1 = \frac{m f_{ZXn}}{n f_{ZXn}}, K_2 = \frac{m f_{ZYn}}{n f_{ZYn}}, K_3 = \frac{V_{SH_0(45)}}{V_{SH_0(0)}} \quad \dots\dots (1)$$

ただし、m、nは任意の次数であり、

f_{ZZm} は縦波超音波 U_{ZZ} のm次厚み共振周波数

f_{ZYn} は幅方向に偏波する横波超音波 U_{ZY} のn次厚み共振周波数

f_{ZXn} は圧延方向に偏波する横波超音波 U_{ZX} のn次厚み共振周波数

$V_{SH_0(0)}$ 、 $V_{SH_0(45)}$ はそれぞれ圧延方向、圧延方向と45°方向へ伝播する SH_0 板波の音速であり、このとき

$$K_P = \frac{K_1^2 + K_2^2}{K_1^2 + K_2^2 + 1}, K_M = \frac{K_1^2 - K_2^2}{K_1^2 + K_2^2 + 1}$$

として、

$$W_{400} = \frac{7}{16\sqrt{2}\pi^2} \left(\frac{5C_{44}^0 + C^0}{C^0} \right) \left[1 - \left(\frac{5C_{11}^0 + 10C_{44}^0}{2C^0 + 10C_{44}^0} \right) K_P \right] \quad \dots\dots (2)$$

$$W_{420} = \frac{-7}{16\sqrt{2}\pi^2} \left(\frac{5C_{44}^0 + C^0}{C^0} \right) \left(\frac{5C_{11}^0 + 10C_{44}^0}{2C^0 + 10C_{44}^0} \right) K_M \quad \dots\dots (3)$$

$$W_{440} = \frac{7}{8\sqrt{35}\pi^2} \left(\frac{5C_{44}^0 + C^0}{C^0} + \frac{4\sqrt{2}\pi^2 W_{400}}{7} \right) \left(1 - \frac{1}{K_3} \right) \quad \dots\dots (4)$$

ただし、 $C^0 = C_{11}^0 - C_{12}^0 - 2C_{44}^0$ である。

前述したごとく、冷延鋼板の9個の弾性率 C_{ij} 、更に圧延面内 θ 方向のヤング率 $E(\theta)$ は、上記の W_{400} 、 W_{420} 、 W_{440} と C_{11}^0 、 C_{12}^0 、 C_{44}^0 で表すことができる。従って、超音波測定によって得られる変数 K_P 、 K_M 、 K_3 及び鉄単結晶の弾性率3個からヤング率 $E(\theta)$ を得られることになる。

$$E(\theta) = \text{Func}_1(W_{400}, W_{420}, W_{440}, C_{11}^0, C_{12}^0, C_{44}^0, \theta)$$

$$= \text{Func}_2(K_P, K_M, K_3, C_{11}^0, C_{12}^0, C_{44}^0, \theta) \quad \dots\dots (5)$$

ところで、超音波測定のうち、2方向に伝播する SH_0 板波の音速比を示す K_3 は、各方向のヤング率 $E(\theta)$ を求める場合には重要であるが、面内平均のヤング率 $\bar{E} = [E(0^\circ) + 2E(45^\circ) + E(90^\circ)]/4$ に対しては、あまり影響を与えない。

多数の冷延鋼板を測定した結果得られた K_1 、 K_2 、 K_3 の範囲で、 K_3 を一定値とした場合の誤差を評価したところ、 \bar{E} の変化は最大で0.05GPa程度であり、非常に小さいことが分かった。

従って、

$$\bar{E} \approx \text{Func}_3(K_P, K_M, C_{11}^0, C_{12}^0, C_{44}^0) \quad \dots\dots (6)$$

ところで、圧延面内平均r値($\bar{r} = [r(0^\circ) + 2r(45^\circ) + r(90^\circ)]/4$)と面内平均ヤング率 \bar{E} との間には強い相関があることが知られており⁷⁾、上記のようにヤング率 \bar{E} が求めれば、実験式、例えば $\bar{r} = a\bar{E}^2 + b\bar{E} + c$ (a、b、cは適当な係数)のような二次式に基づいてr値を得ることができる。

以上のことから、図2の5種の超音波のうち、 K_3 にかかわる SH_0 板波の音速測定は省略して、板厚方向に伝播する3種の超音波の厚み共振周波数測定だけでヤング率 \bar{E} を得ることができ、更に \bar{r} 値を得ることができることが分かる。

3. 測定方法

3.1 共振電磁超音波法

まず、冷延鋼板の板厚方向に伝播する3種類の超音波を発生、検出する原理を図3に従って述べる。

本測定法で用いる電磁超音波トランスデューサー(EMAT)は、電磁石、及びその下に置かれた偏平な円形コイルから構成されている。このトランスデューサーを冷延鋼板付近に置けば、電磁石により鋼板中に磁界が生じる。磁界は鋼板の表面に垂直な成分 B_z と、冷延鋼板の表面に平行かつ放射状に分布する成分 B_r を有している。

このとき、円形コイルに高周波電流を流すと、鋼板中には渦電流 I_ϕ が誘起される。そして、 I_ϕ と B_z の相互作用により鋼板表面に平行かつ放射状に分布する電磁力 F_r が、また、 I_ϕ と B_r との相互作用により鋼板表面に垂直な電磁力 F_z が同時に生じる。電磁力 F_r は圧延方向(X)に平行な成分 F_x と幅方向(Y)の成分 F_y に分けることができる。鋼板中では、 F_z により板厚方向(Z)に伝播する縦波 U_{zz} が発生し、 F_x により圧延方向に偏波し板厚方向に伝播する横波 U_{zx} が発生し、 F_y により幅方向に偏波し板厚方向に伝播する横波 U_{zy} が発生する。こうして発生した超音波は逆の物理過程で検出される。このように一つのトランスデューサーで3種のモードの超音波を同時に発生並びに検出できる。

次に、厚み共振周波数の測定法を述べる。超音波は前述の原理により発生するので、コイルに高周波電流を流した場合、その周波数が次式を満足すれば冷延鋼板中にその厚さ方向に定在波が生じる。

$$f_{zzm} = \frac{m}{2d} V_{zz}, \quad f_{zy n} = \frac{n}{2d} V_{zy}, \quad f_{zx n} = \frac{n}{2d} V_{zx} \quad \dots\dots (7)$$

コイルに流す高周波電流の周波数を変化させながら、前述のような過程に従って、超音波を繰り返し発生、検出し、検出された信号

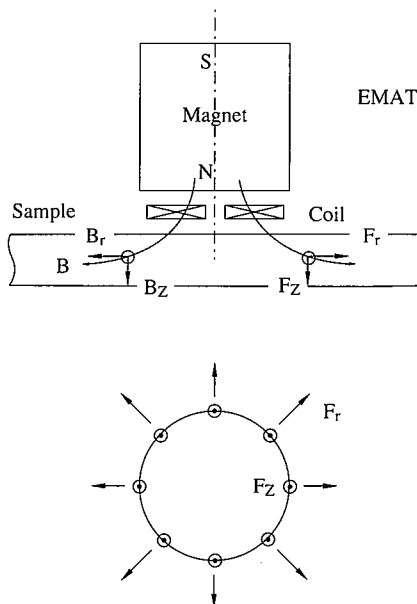


図3 電磁超音波トランスデューサーによる超音波の発生、検出

が極大となるときに周波数を記録することにより、(7)式で表される厚み共振周波数を得ることができる。このような電磁超音波技術を用いた厚み共振周波数測定法を、共振電磁超音波法と呼ぶ。

なお、(7)式において、 d は鋼板の厚みを示しており、測定される共振周波数は、音速変化以外にも、鋼板の厚み変化によっても影響を受けるが、本 \bar{r} 値測定法では、実際には(1)式に示すように共振周波数の比が用いられるため、厚み変化は \bar{r} 値評価には影響を与えない。

図4に、共振電磁超音波法に用いる測定システムの構成図を示す。トランスデューサーの外に、発振器、パワーアンプ、ワイドバンドアンプ、バンドパスフィルタ、AD変換器、マイクロコンピュータ等から構成されている。

また、図5には、この測定システムを使って超音波共振スペクトラムを測定した例を示す。3種の超音波とも複数の共振ピークをもつが、同一種の超音波による共振ピークの間隔はいずれも一定である。縦波共振ピークの間隔は横波のそれぞれの約2倍であることから縦波共振周波数を決定でき、 $f_{zy} < f_{zx}$ の関係から横波2種の共振周波数を決定できる。

本装置によって測定される共振周波数 f_{zz} 、 f_{zy} 、 f_{zx} から、前章で示したようなフローに従い、 \bar{r} 値を求めることができる。

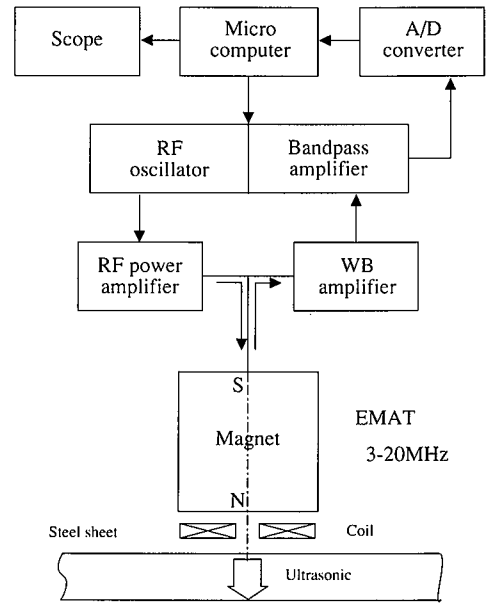


図4 共振電磁超音波測定システムの構成図

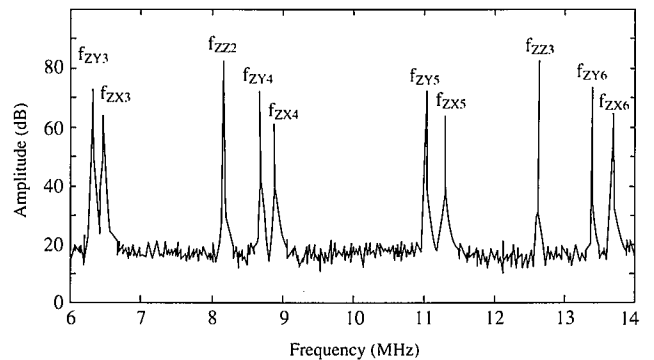


図5 超音波共振スペクトラム

本測定方法の特徴をまとめると以下ようになる。

- 1) 鋼板に対し、非破壊、完全非接触での測定が可能。
- 2) センサが非常にコンパクト(80mm径×60mm高さ)であり、オンラインへの設置も容易。
- 3) 測定量が厚み共振周波数の比であるため、板厚変動などの影響を受けず、安定し、かつ高精度な測定が可能。

4. 性能評価実験

本方法で測定した冷延鋼板の \bar{r} 値の測定精度や、オンライン適用を想定した鋼板温度、鋼板張力、走行速度等の各種要因の影響を調査するために以下の実験を行った。

4.1 サンプル板による測定精度の評価

\bar{r} 値が0.9~1.2程度の低い値を示す一般材から、 \bar{r} 値が1.8~2.2程度の非常に優れた加工性をもつ超深絞り材まで、各種の冷延鋼板サンプル134枚を対象として、測定精度の検証実験を行った。

図6に示しているのは、本技術により測定されたヤング率 \bar{E} と、そのサンプルから切り出した試験片を用いて、引張試験法により測定された \bar{r} 値との相関である。この図から両者の強い相関関係が見て取れるが、更に、この結果を基に本技術により求めたヤング率 \bar{E} から \bar{r} 値を推定する各鋼板共通の実験式(二次式)を最小2乗法により求め、それによって \bar{r} 値を推定し直したところ、その測定誤差は標準偏差 $\sigma < 0.04$ と非常に小さく、本技術の測定精度の高さが確認された。

4.2 鋼板とセンサのギャップ(リフトオフ)と感度

本測定で用いている電磁超音波測定技術の優れた特長の一つが、測定対象となる鋼板に対して、センサを完全非接触状態にして測定が可能である点にある。ここでは、鋼板とセンサの間のギャップ(リフトオフともいう)が、測定感度に与える影響を調べ、どの程度の大きさまでギャップがとれるか確認した。

図7は、板厚0.8mmの鋼板を使い、鋼板とセンサ間を0~5mmの範囲で0.5mmごとに感度(S/N: 信号とノイズの強度比)を測定した結果である。この測定例では、ギャップ3mmまでなら、S/Nが20dB以上あり、十分に測定可能であることが分かるが、実際には鋼板ごとによる感度差なども見越し、ギャップ2mmで測定を行うこととした。

なお、本測定技術においては、測定量は超音波の周波数であり、

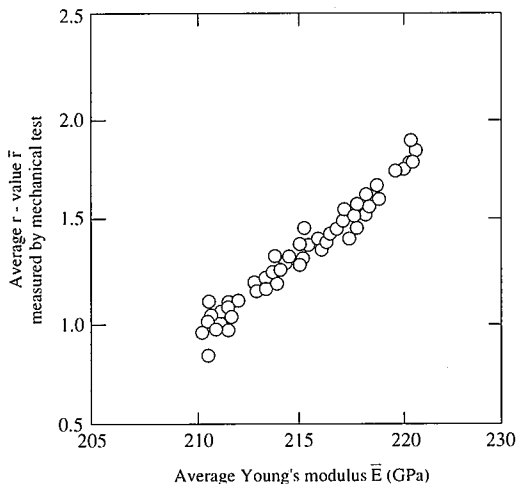


図6 ヤング率測定値 \bar{E} と引張試験法による \bar{r} 値の相関

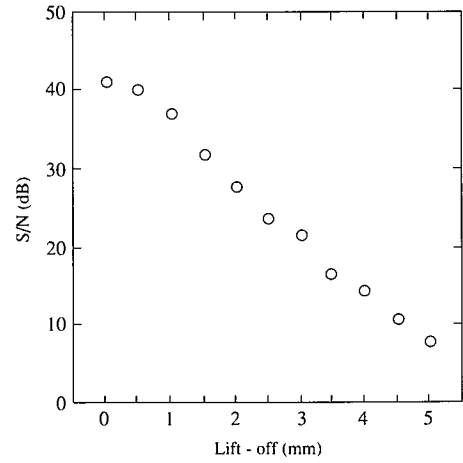


図7 鋼板とセンサ間のギャップと感度

超音波の信号強度は測定値とは直接関係がないため、例えばオンライン測定中に鋼板の振動によりセンサのギャップが変動しても、 \bar{r} 値の測定値自身には影響がなく、またギャップ変動による \bar{r} 値の補正も不要である。

4.3 鋼板温度・張力の測定精度への影響

鋼板を伝わる超音波の音速は、本測定で評価しようとする集合組織の外にも、鋼板の温度や、鋼板にかかる張力の変動によっても影響を受け、共振周波数のずれをもたらす。特にオンライン測定時はそれらが外乱となり、測定精度に悪影響を及ぼすことも考えられるため、実験によりその影響を評価した。

まず、鋼板の温度変化による影響を確認するため、恒温室を用いて冷延鋼板及びセンサを10~80℃の環境下に置き、各温度下での共振周波数を測定するとともに、そのときの見かけのヤング率 \bar{E} を求めた。その結果を図8に示す。温度の上昇に伴う共振周波数変化により、見かけのヤング率は微増するが、その変化率は10℃当り約0.053GPa、 \bar{r} 値換算で0.005程度に過ぎない。

次に、鋼板張力の変化による影響を確認するために、冷延鋼板から圧延方向と平行にJIS 5号引張試験片を切り出し、弾性域内で0~176.4MPaの引張応力をかけて共振周波数を測定し、そのときの見かけのヤング率 \bar{E} を評価した。その結果を図9に示す。応力の増加に伴い、見かけのヤング率は微増するが、変化率は引張応力10MPa当り約0.015GPa、 \bar{r} 値換算で0.001程度であり、通常の作業条件(20MPa以下)では影響は非常に小さい。

以上の結果から、鋼板の温度や、鋼板にかかる張力の変動によって、共振周波数の測定値が変わり、見かけのヤング率、 \bar{r} 値も変化

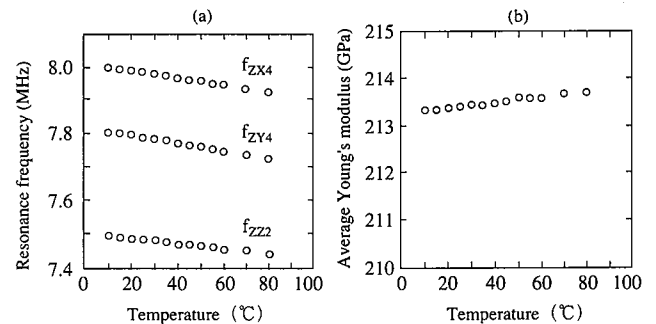


図8 共振周波数、見かけのヤング率に及ぼす温度の影響

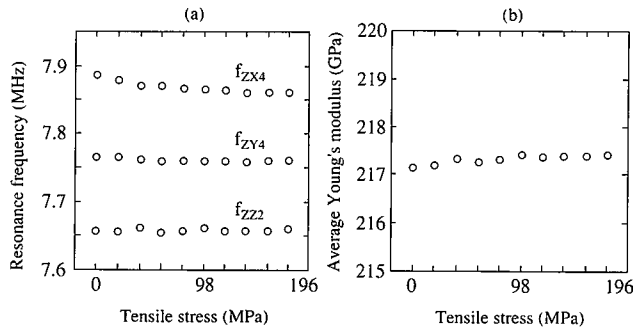


図9 共振周波数, 見かけのヤング率に及ぼす張力の影響

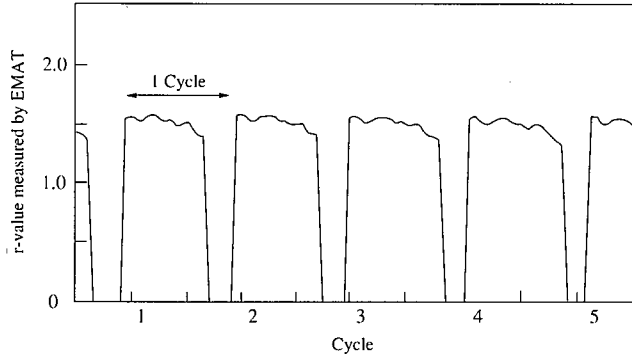


図10 回転試験装置による \bar{r} 値測定

するものの、その変化は非常に小さく、実用上は特に補正などは行わず、無視しても問題ないといえる。これは、本技術においてヤング率、 \bar{r} 値を求める際に、共振周波数自身でなく、その比を用いていることが測定の安定化に寄与しているためと考えられる。

4.4 通板速度の影響

走行中の鋼板への適用性を確認するために、長さ8.5mの冷延鋼板をリング状に張った回転試験装置を用いて、板速度0~2.0m/sの条件で測定した。その結果、板速度2.0m/sにおいても、静止状態と同程度の感度で測定ができることが確認された。図10には、0.33m/sで鋼板を5周分連続測定した結果を示すが、再現性良い測定値が得られている。次に、通板速度を0, 0.33, 0.67, 1.0m/sに変化させ、同一測定位置を繰り返し測定した結果、いずれの速度においても、静止状態で測定した \bar{r} 値と比較してその差は ± 0.004 以内にあり、また、繰り返し測定精度は $\sigma < 0.002$ であり、再現性が極めて良好であることが分かった。

5. オンラインへの適用と評価

前章の実験で示したように、本技術はオンライン測定時に想定される各種外乱の影響を受けにくく、安定した測定が期待できる。そこで、本装置を冷延鋼板の製造現場に設置した。設置したのは新日本製鐵君津製鐵所のNo.2連続焼鈍ラインであり、装置のレイアウトを図11に、また装置仕様を表1に示す。

本装置により、冷延鋼板コイル全長の \bar{r} 値を測定した後、コイルの一部からサンプル試験片をとり、引張試験法による \bar{r} 値測定を行った。同一箇所での両者の値を比較した結果を、深絞り材については図12に、超深絞り材については図13に示す。オンライン測定時においても、本装置で極めて高い測定精度での測定ができることが分か

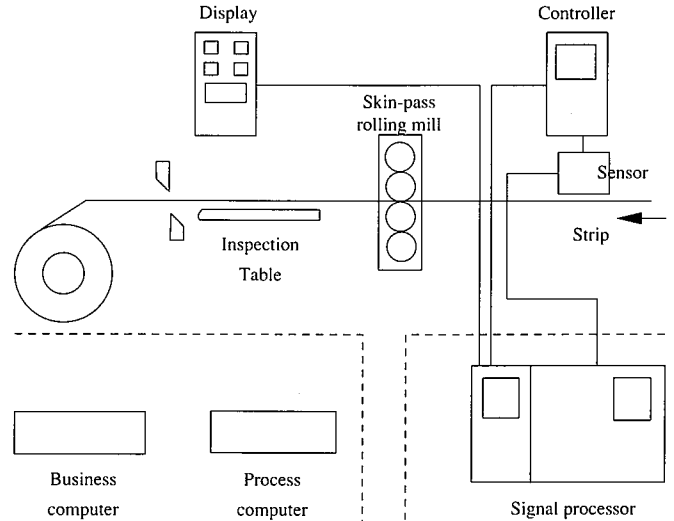


図11 装置レイアウト

表1 装置仕様

\bar{r} -value range	0.9-3.0
Accuracy	$\delta = 0.04$
Measurement pitch	0.4s
Strip thickness	0.3-2.6mm
Line speed	9.7m/s (max)

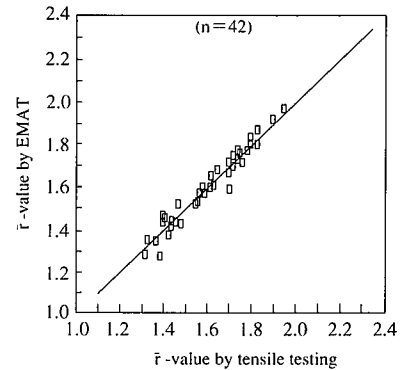


図12 オンライン \bar{r} 値測定結果と引張試験法による \bar{r} 値の相関(深絞り材)

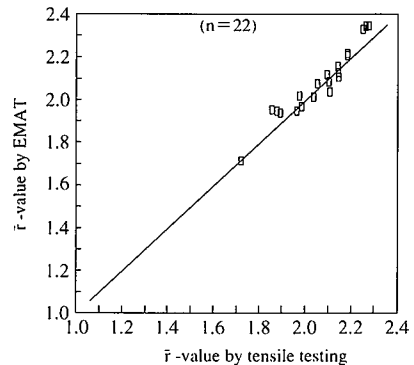


図13 オンライン \bar{r} 値測定結果と引張試験法による \bar{r} 値の相関(超深絞り材)

る。この設置によって、当ラインを流れる全製品コイルに対し、全長に渡る \bar{r} 値測定が可能となった。

6. 結 言

共振電磁超音波法により、非破壊、非接触、クリーンな状態で3種類の超音波の厚み共振周波数を測定し、この測定値と既知の鉄単結晶の3個の弾性率から冷延鋼板のヤング率 E 、 \bar{r} 値をオンライン測定する技術を開発し、冷延薄板製品の品質評価に適用している。

このように非破壊的手法によって、鋼板の品質(機械的性質)を直接、しかも高精度にオンライン評価できるような測定技術は極めて珍しく、画期的な技術であるといつて良い。更に本技術では、非常にコンパクトなセンサを用いているため、測定装置を容易にラインへ設置することができ、また、測定量が超音波の受信強度ではなく、共振周波数の比であるため、原理的な面から、センサと鋼板間のリフトオフ変動、鋼板温度、鋼板張力など、一般にオンライン計測する際に外乱となりがちな環境要因の影響を受けにくく、安定した測定ができることが大きな特長となっている。

連続焼鈍ラインに設置された本測定装置は、現在も順調に稼働しており、品質の安定化、信頼性向上に役立っている。本技術はめっき鋼板へも適用可能なことを確認しており、今後も適用ラインの拡大、プロセス制御など利用技術の拡大が期待される。

参考文献

- 1) Kawashima, K. : J. Acoust. Soc. Am. 87, 681(1990)
- 2) Kawashima, K. : Proc. of Forth Intn. Symp. on Nondestructive Characterization of Materials. 1990, p.483
- 3) 依口隆雄, 赤木俊夫, 川島捷宏 : 材料とプロセス, 4, 1364(1991)
- 4) 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編, 55(518), 2152(1989)
- 5) 赤木俊夫, 依口隆雄, 川島捷宏 : 塑性加工連合講演論文集, 42(1), 221(1991)
- 6) 早戸克尚, 山本一男, 縄田康隆, 水口俊直, 依口隆雄, 赤木俊夫 : 材料とプロセス, 7, 1267(1994)
- 6) Sayers, C. M. : J. Phys. D 15, 2157(1982)
- 7) Stickels, C. A., Mould, P. R. : Metall. Trans.1, 1303(1970)