

超音波干渉法による薄鋼板の 音速 2 次元分布の迅速測定システム

市川 文彦*・高田 一*・浅野 一哉*・定広 健一*

A Sound Velocity Measurement System for Thin Steel Sheet Based on Ultrasonic Interferometry

Fumihiko ICHIKAWA, Hajime TAKADA, Kazuya ASANO and Kenichi SADAHIRO

Synopsis : A measurement system has been developed in which the sound velocity of thin steel sheet is measured quickly and displayed as a two-dimensional distribution. In the system the velocity is obtained from the peak amplitude of ultrasonic wave (multiple interfered echo reflected from the specimen). This system is characterized by the use of ultrasonic tone burst wave being transmitted through specimen to eliminate the disturbance of the first surface echo. This measurement system was applied to the observation of the growth of secondary recrystallized grain in grain-oriented electrical steel sheet. The results were as follows.

- 1) The amplitude of multiple echo increases with the number of burst waves up to about 50 waves.
- 2) The relation between the amplitude of multiple echo and the sound velocity shows a typical resonance curve in which half-width is about 450m/s and the maximum inclination is 0.34% per 1m/s.
- 3) The two-dimensional display of the secondary recrystallized structure by the ultrasonic wave method shows a good agreement with that by the conventional macro-etching technique.
- 4) This ultrasonic wave method is applicable for the observation of the growth of secondary recrystallized grain in grain-oriented electrical steel sheet.

Key words : measurement ; nondestructive inspection ; crystal structure ; ultrasonic ; sound velocity ; interferometry.

1. 緒言

薄鋼板は種々の工業製品の素材として用いられ、その目的に応じて、機械的強度、加工性、電磁的特性などの様々な特性が要求される。近年、その性能向上への要求はますます高くなっている。その中で電気変圧器のコアなどに使用される方向性電磁鋼板は、特に優れた電磁気特性が要求されるが、最近の環境問題などに関連し、省エネルギー、省資源の目的で、エネルギー変換効率を上げるため更なる特性の向上が求められている。電磁鋼板は圧延方向の磁束密度を大きくすること、鉄損を小さくすることが要求され、そのための改良が鋭意行われている。このような要求特性を向上させるために、多結晶体である鋼板の結晶構造(マイクロ組織)を制御して製造されている。圧延方向の磁束密度を大きくするためには、鉄の磁化容易方位である[100]結晶方位を圧延方向に向ければよいことが知られており、方向性電磁鋼板では、合金成分、圧延条件、熱処理条件など製造工程をきめ細かく制御して、ゴス集合組織((110)[001]方位)を鋼板に持たせることで製造される¹⁾。これらの製品の製造においては、検査や研究目的で、製品のサンプルを採取し、結晶を観察することが行われるが、従来の方法としては、

①マクロエッチング法²⁾、②シンクロトロン放射によるX線回折法³⁾が用いられてきた。前者は、酸やアルカリを用いて表面の酸化皮膜を取り除くとともに、結晶の方位によってエッチングのされかたが異なることを利用して、結晶粒を目視で観察するものであり、完全な破壊試験である。一方後者は強力なX線の回折を利用して酸化膜などの皮膜がついたまま結晶粒を観察するもので、非破壊的であるが、観察できる範囲は3mm角であり、試料作成のため製品から切り出す必要がある。いずれも、インラインでの迅速測定などの目的には適用できない方法である。一方、筆者らは音速測定法による結晶粒観察方法を提案するものであるが、従来の音速測定法としては、①鋼板の厚み共振周波数から音速を求める連続波共振法⁴⁾、②エコーの往復時間から音速を求めるパルス反射法⁵⁾、③鋼板の多重エコー波形のFFT(Fast Fourier Transform)解析から音速を求めるFFT法^{6,7)}があげられる。しかし、①の方法は周波数掃引に時間を要し、②の方法は現状の一般的な計測装置では、電磁鋼板のように板厚が0.3mm程度以下の場合エコーが重なりあって測定できなくなる、③の方法は、②の問題はないが、FFT計算に多少なり時間を要する問題がある。筆者らは、電磁鋼板の結晶粒観察への応用を目的にして、前述の問題を解決する

平成8年11月11日受付 平成9年3月7日受理 (Received on Nov. 11, 1996; Accepted on Mar. 7, 1997)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

ため、超音波バースト波を用いて超音波の干渉を安定に起こさせ、干渉の大きさから音速を検出する方法および測定システムを開発した。本論文では、本測定法の原理、これを実現する測定システムの構築および電磁鋼板結晶粒測定への適用結果について報告する。

2. 測定原理および装置

2.1 結晶方位と縦波音速の関係

結晶構造および弾性係数が分かっている材料では任意の結晶方位の音速を計算できる⁸⁾。鉄の場合結晶構造は立方対称で、弾性スティフネスは c_{11} , c_{12} , c_{44} の3つが独立である。鉄の代表的値⁹⁾である $c_{11}=2.33 \times 10^{11}$ N/m, $c_{12}=1.39 \times 10^{11}$ N/m, $c_{44}=1.16 \times 10^{11}$ N/mを用いて縦波の音速の計算を実行すると、結晶方位と音速の関係はFig. 1に示すような結果が得られる。図ではステレオ投影表示で示したが、例えば[100], [110], [111]方向の音速はそれぞれ5600, 6200, 6500 m/sで、方位によりかなり音速が違い、音速を測定することにより、結晶方位の推定が可能であることが分かる。

2.2 音速の測定方法

一般にパルス反射法による音速の測定には、弾性波の伝

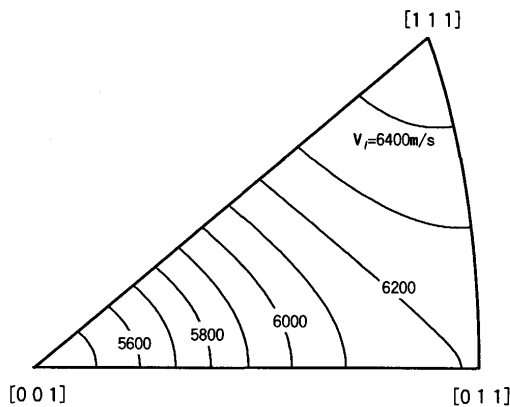


Fig. 1. Expression of longitudinal sound velocity (V_l) of Fe on the stereographic projection of crystal orientation.

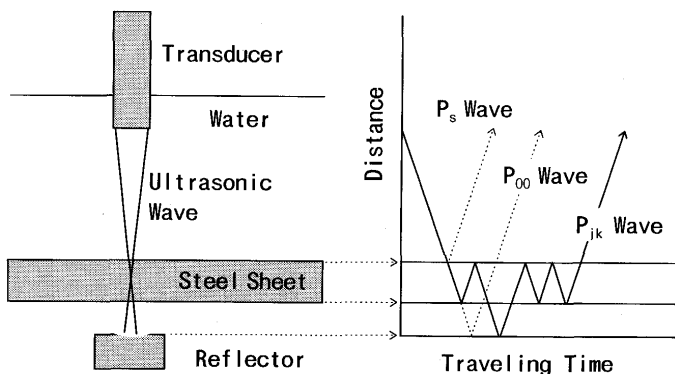


Fig. 2. Schematic representation of interference of ultrasonic multiple echo for thin steel sheet.

搬距離と伝搬時間が必要であり、板厚方向の音速測定には、板厚とその伝搬時間を測定する。本対象鋼板の板厚を0.22 mmとすると、弾性波が伝わる時間は約35nsで、1%の音速変化を検出するには0.35nsの時間測定分解能を持った測定装置と、超音波の反射エコーが重ならないために、広帯域で高性能な超音波探触子が必要であり、かなり困難な測定となる。そこで、以下に示すように音速の変化をバースト超音波(正弦波が数十波連なった帯状のパルス波)による干渉の大きさの変化で検出する方法を考案した¹⁰⁾。即ち、バースト波をFig. 2のように薄鋼板に打ち込むと、鋼板の表面および裏面から反射する超音波が干渉する。超音波が干渉して共振する条件は、超音波の周波数を f , 音速を V , 鋼板板厚を d とすると、(1)式で表される。

$$d = \frac{nV}{2f} \dots \dots \dots (1)$$

ここで n は整数である。

電磁鋼板の二次再結晶粒は前述したようにゴス方位をとるから、板厚方向の音速はほぼ6200m/sとなる。したがって、鋼板板厚を0.22mmとすると、超音波の共振周波数は14.09 MHzとなる。逆に、超音波の周波数を14.09MHzに固定し、板厚が0.22mmと一定であれば、超音波の干渉波の大きさから音速が測定でき、測定している部位の結晶粒の方位が推定できる。ここでバースト波と透過波を用いる理由を説明する。鋼と水の音響インピーダンスの差が大きいため、鋼板表面での反射波(Fig. 2で示す P_s Wave)の強度が強くなり、干渉波形の検出を妨害する。そこで、連続波でなくバースト波にするとともに透過方式とすることにより、遅れて観測される干渉透過波を分離検出する。

2.3 音速と干渉の大きさとの関係

Fig. 2に示すように、探触子から送信し、反射板で反射し、鋼板を2回透過した超音波を同じ探触子で受信させる場合を考える。このとき往きに j 回、返りに k 回鋼板表裏面で多重反射した波の音圧を $p_{j,k}(t)$ とすると、 $p_{j,k}(t)$ は(2)~(4)式で表せる。式の導出に当たっては、伝搬に伴った波形の歪みは無視でき、減衰は指数関数的減衰が支配的であり、拡散による減衰は考えないと仮定した。

$$p_{j,k}(t) = r^2 e^{-2ad} p_{j-1,k}(t - \frac{2d}{v}) = r^2 e^{-2ad} p_{j,k-1}(t - \frac{2d}{v}) \dots \dots \dots (2)$$

$$p_{0,0}(t) = r' (1 - r^2)^2 e^{-2(ad+a'h)} p_i(t - 2(\frac{h}{v'} + \frac{d}{v})) \dots (3)$$

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad r' = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1} \dots \dots \dots (4)$$

ここに $Z_1 = \rho'v'$, $Z_2 = \rho v$, $Z_3 = \rho''v''$, $h = h_1 + h_2$, また、 v, v', v'' はそれぞれ鋼板、水および反射板の音速、 ρ, ρ', ρ'' はそれぞれ鋼板、水、反射板の密度、 a, a' はそれぞれ鋼

板中および水中の超音波減衰率, d は鋼板の厚み, h_1, h_2 はそれぞれ探触子と鋼板および鋼板と反射板との距離, $p_i(t)$ は入射超音波の音圧である。

このとき観測される超音波の音圧 $p_o(t)$ は, (5)式で表せる。

$$p_o(t) = \sum_{j,k=0}^{\infty} p_{j,k}(t) \dots\dots\dots (5)$$

また, 入射波 $p_i(t)$ は正弦波バースト波として(6)式で与えられる。

$$p_i(t) = \left. \begin{aligned} &A \sin 2\pi f t : 0 \leq t \leq m/f \\ &= 0 : \text{上記以外} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで f は超音波の周波数, m はバースト波の正弦波の持続長さすなわち波の数を表す。なお, 透過干渉波を鋼板表面反射波と重ならずに出検する条件から, m の上限は(7)式で与えられる。

$$m < 2f \left(\frac{h}{v'} + \frac{d}{v} \right) \dots\dots\dots (7)$$

いま, $f=14.09\text{MHz}$, $d=0.22\text{mm}$, $h=20\text{mm}$, $a=2\text{m}^{-1}$, $a'=0$, $v=v''=6200\text{m/s}$, $v'=1500\text{m/s}$ としたときのバースト波の波の数 m と干渉の大きさとの関係を計算した結果をFig. 3に示す。ここで干渉の大きさとしては, $p_o(t)$ の最大振幅値 P_{\max} を採用し, $m=200$ の P_{\max} の値で規格化した。図より, 干渉の大きさは m とともに増加するが $m=50$ 位で飽和することがわかる。また図では $v=5900\text{m/s}$ での計算結果も示したが, 非共振条件になるので m を大きくしても P_{\max} は増加しないことが分かる。次に, P_{\max} と音速との関係を $m=40$ の条件で計算した結果をFig. 4に示す。この図では $v=6200\text{m/s}$ のときの P_{\max} の値で規格して示してあるが, 典型的な共鳴曲線のグラフが得られ, その半値幅は約 300m/s であることが分かる。この図から, $p_o(t)$ の最大値 P_{\max} を計測することにより音速を推定できることがわかる。

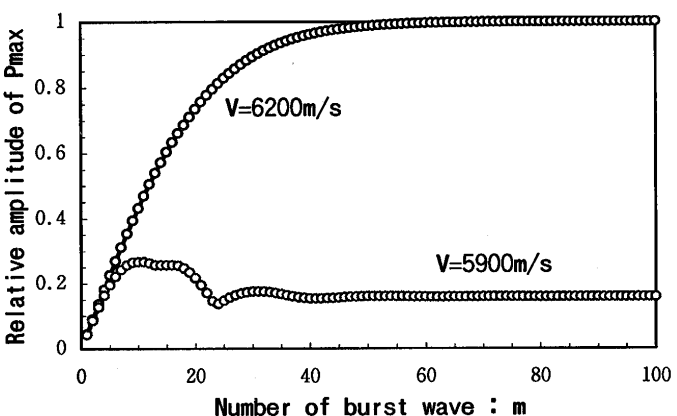


Fig. 3. Relation between duration of burst wave and amplitude of P_{\max} calculated by equation (2) ~ (6).

2・4 二次再結晶の二次元分布測定装置

2・4・1 超音波干渉測定装置

今回開発した超音波干渉測定装置のブロック図をFig. 5に示す。ファンクションジェネレータは同期信号発生器のバーストに同期して, 与えられた周波数と波数の正弦波のバースト波を発生する。RFパワーアンプライアはバースト波を振幅150V前後に増幅し, 超音波探触子に出力する。鋼

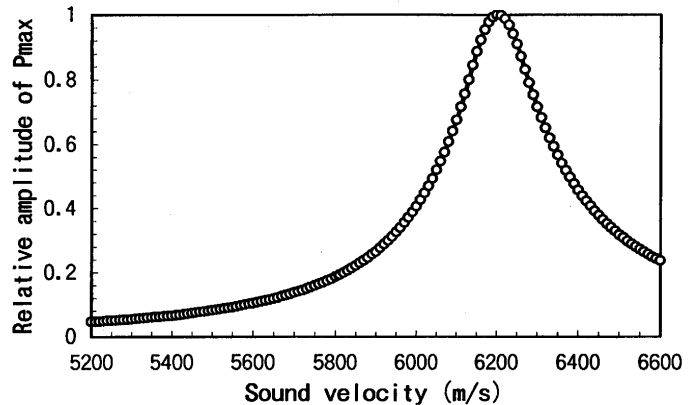


Fig. 4. Relation between sound velocity and amplitude of P_{\max} calculated in condition of $d=0.22\text{mm}$, $f=14.09\text{MHz}$, $m=40$.

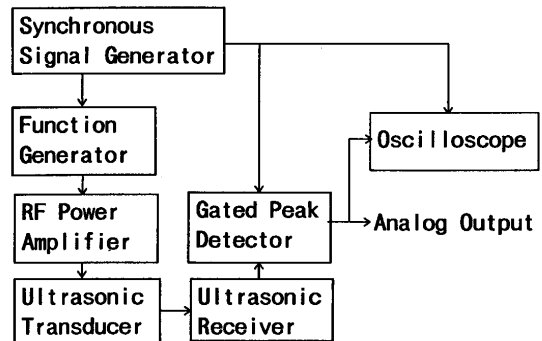


Fig. 5. Block diagram of ultrasonic interferometric measurement apparatus.

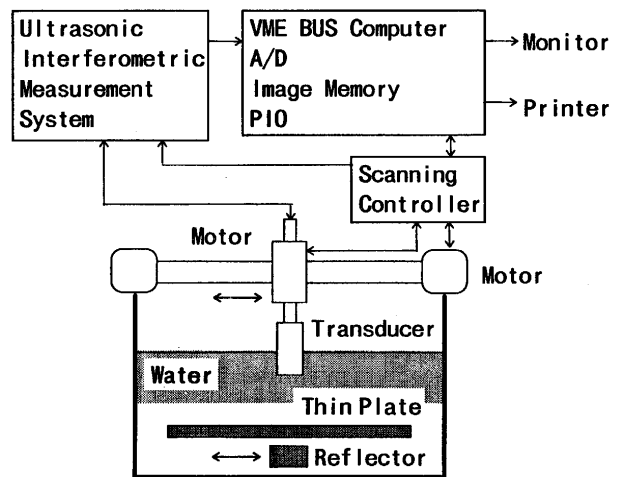


Fig. 6. Schematic diagram of 2-dimensional measurement system.

板で干渉したバースト状超音波は超音波受信器で増幅され、ゲートッドピークデテクタにより、ある設定した時間範囲内のバースト信号の最大値が検出される。この最大値が干渉の大きさ P_{max} を表す。本測定装置は、アナログ回路で構成されており、測定周期は超音波の送受信回路の繰り返し周波数で決定されるが、毎秒10,000回の測定が可能である。

2.4.2 二次再結晶の二次元分布表示装置

プローブを二次元に走査し、0.1mm移動毎に超音波を打ち込み、各点で干渉の大きさを測定するとともにその大きさを256階調に変換し、濃淡画像として二次元表示する。今回開発した全体のシステムのブロック図をFig. 6に、また仕様をTable 1に示す。

3. 実験および結果

3.1 基礎実験

3.1.1 バースト波数と干渉波形振幅との関係

本開発装置を用いてバースト波数と干渉波形振幅との関係を測定した。Fig. 7に励振バースト波形と二重透過後の干渉波形の例を示す。試料板厚0.22mm, 周波数14.2MHzの

条件で励振バースト波数を1から順次増加させ干渉波形の振幅との関係を測定した結果をFig. 8に示す。図では同時に計算によるシミュレーション結果も示した。シミュレーションでは、実験と同じ板厚、周波数条件の他に、後述する実験から推定される音速6210m/sを用いた。干渉波形の振幅はバースト波数とともに増加するが、波数が50位のところでほぼ飽和すること、計算によるシミュレーションとも合うことが確認できる。

3.1.2 共鳴曲線の測定

二次再結晶を部分的に成長させた試料(板厚0.22mm)を

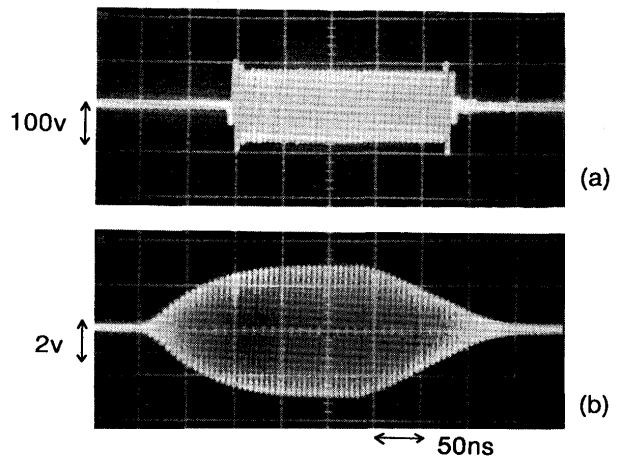


Fig. 7. Example of ultrasonic burst wave form. (a) exciting wave ($m=40$) (b) interfered wave of multiple echo.

Table 1. Equipment specification of the developed system.

Ultrasonic interferometric measurement system	Function generator	Frequency range:0.3~35MHz Amplitude Modulation
	RF power amp.	Frequency range:0.3~35MHz Power output:150 watts
	Receiver	Frequency range:0~50MHz Gain:60dB
	Gated peak detector	Delay time:0.2~800 μ s Gate width:0.1~800 μ s
	Transducer	Center frequency:25MHz Point focus type Focus range:1 inch
Image processing system	VME BUS computer	MPU:68000, 2MBRAM
	Image memory	512x480x4Frame
	A/D	0~5V, 12bit
	PIO	16 channel
Mechanical scanning system	Scanning stroke	X:400mm, Y:300mm, Z:200mm
	Step increments	X, Y, Z:5 μ m

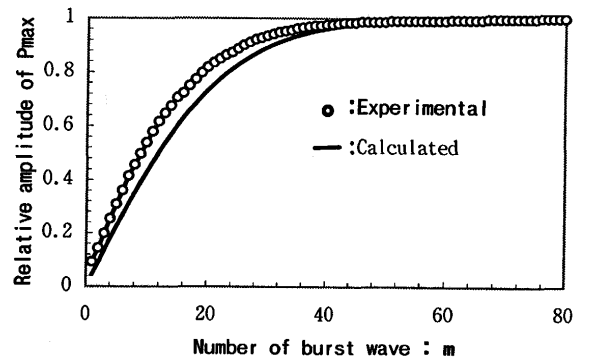


Fig. 8. Comparison of experimental result and calculation on a relation between duration of burst wave and amplitude of P_{max} .

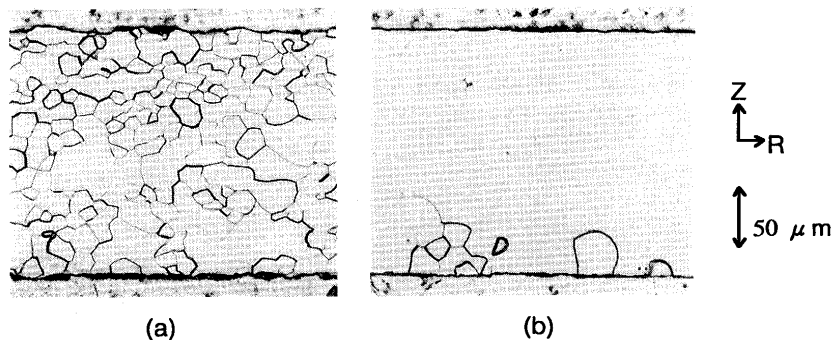


Fig. 9. Microscope image of primary recrystallized part (a) and secondary recrystallized part (b).

用いて、本開発装置を用いて共鳴曲線を測定した。Fig. 9に、用いた試料のL方向断面をエッチングした顕微鏡写真の例を示す。未再結晶部分は細かい多結晶体であり、二次再結晶部分は、板厚方向に貫いた大きな結晶になっているのが分かる。本試料を用いて超音波の周波数を変化させて、干渉のおおきさを測定した結果をFig.10に示す。二次再結晶部および未再結晶部ともにきれいな共鳴曲線が得られている。しかし同じ板厚にもかかわらず、共振周波数が異なり、音速に差があることが分かる。この共振周波数を用い(1)式

により音速を算出してみると、二次再結晶部で6210m/s、未再結晶部で5820m/sが得られる。これらの数値は、理論値のゴス方位の音速6200m/s、鉄鋼材料の多結晶体の平均音速5900m/sに近い値である。

3・2 二次再結晶分布の測定

二次再結晶を部分的に成長させた試料を対象に、本装置を用いて二次再結晶分布の二次元表示を試みた。Fig.11にその結果を従来法であるマクロエッチングによる表示と比較して示す。超音波法では、音速6210m/sで共振するように設定し、測定データがある閾値で二値化して図示しており、黒い部分が6210m/sに近い部分に対応する。両者は良く一致していることがわかる。次に、本測定方法を応用して二次再結晶化過程を測定した結果をFig.12に示す。すなわち、二次再結晶化は、未再結晶試料をある温度(ここでは870°C)で焼鈍させることで行うが、Fig.12では各焼鈍時間ごとの二次再結晶分布を表示したものである。焼鈍時間とともに、二次再結晶化が進んでいく様子が良く分かる。

Fig.13には、別の試料で二次再結晶化が完了した試料についての測定結果を示す。この測定では6200m/s近傍で dP_{max}/dv が最大になる条件(この場合、 $f=14.5\text{MHz}$)で測定を行っている。この図では、干渉の大きさをグレイレベルで表現し、いわゆる画像として表示した。図では同時に、マクロエッチングによる観測例(写真)も示した。超音波による画

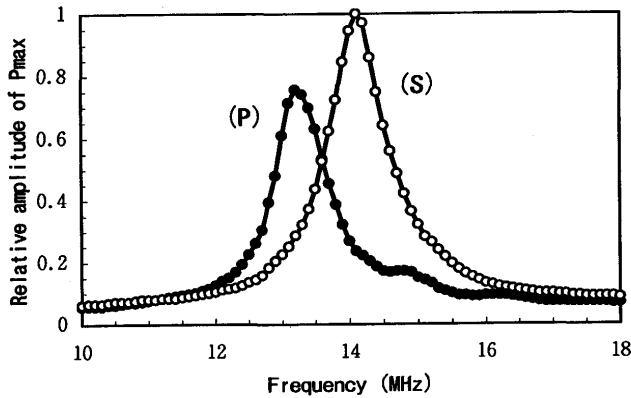


Fig. 10. Resonance curve obtained by experiment, (P) : primary recrystallized part, (S) : secondary recrystallized part.

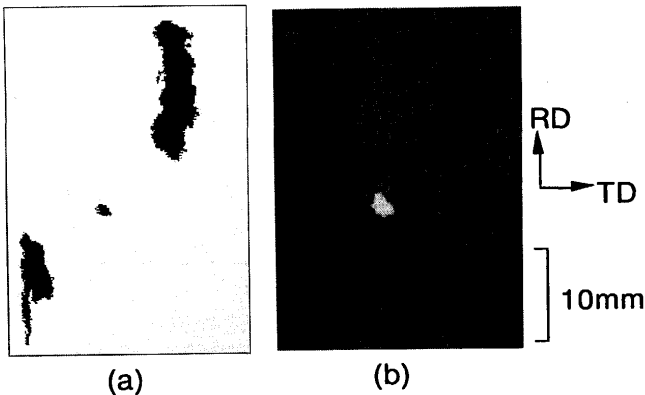


Fig. 11. Secondary recrystallized structure image obtained by the ultrasonic method (a) and those by the conventional macro-etching technique (b).

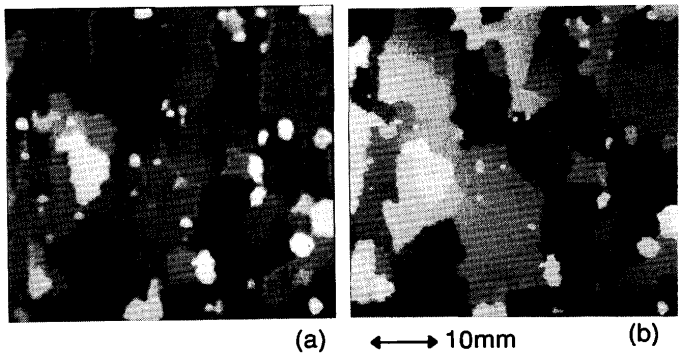


Fig. 13. Gray level image of secondary recrystallized structure obtained by the ultrasonic method (a) and by the conventional macro-etching technique (b).

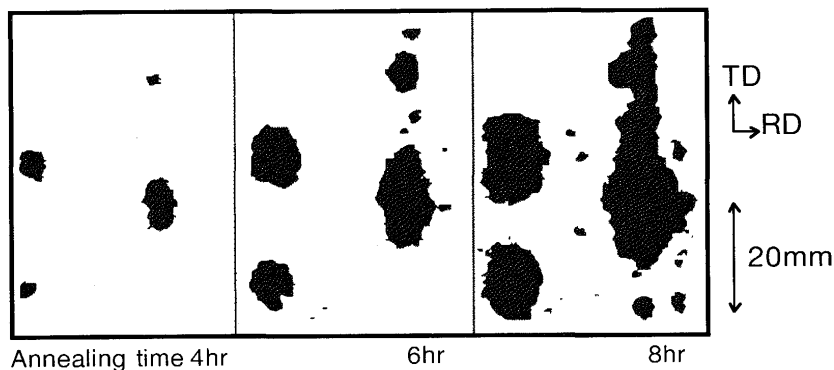


Fig. 12. Secondary recrystallized behavior at 870°C observed by the ultrasonic wave method.

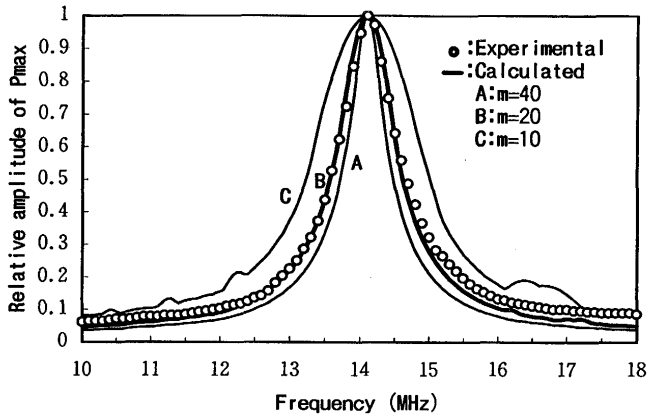


Fig. 14. Comparison of resonance curve obtained by experiment and by calculation.

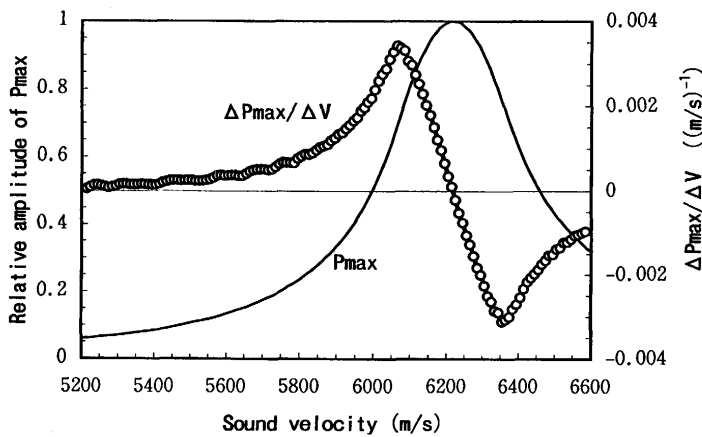


Fig. 15. Resonance curve and its differentiation calculated in condition of $d=0.22\text{mm}$, $f=14.11\text{MHz}$, $m=20$.

像から、二次再結晶した各結晶粒は、ゴス方位に近いが、その方位にわずかなばらつきがあるため濃淡が生じ、結晶粒が観測できることがわかる。また、超音波の画像とマクロエッチングによる像は、良く対応しており、本方法によって従来法のマクロエッチング法を代替できることが分かる。

4. 考察

4.1 音速変化検出感度の検討

今回開発した手法は均一な板厚の試料中の板厚方向音速の面内分布の測定に適している方法である。ここでは音速変化の検出能の最大感度について検討する。実験でもわかるように、種々の音速を持つ試料の作製は難しく、実験的に音速変化測定の最大感度を求めることは、困難である。そこで計算によるシミュレーション条件を実験結果に合わせ、シミュレーションにより検討する。Fig.14は、Fig.10の二次再結晶部の共鳴曲線とバースト波数をパラメータとして計算した共鳴曲線を比較したものであるが、実験値のバ

ースト波数 $m=40$ に対して計算値では $m=20$ が最も良く合致する。これは、計算では超音波の幾何学的拡散の干渉への影響を考慮できていないため、実際よりも干渉を大きく見積もっているためと解釈できる。そこで、実験と最も良く合う $m=20$ を用いて音速と P_{\max} の関係を計算した。Fig.15にその結果および P_{\max} の音速微分値を示した。この結果から変化の大きいところでは、共鳴曲線の最大値を100として $0.37\%/m/s$ の感度で音速の変化を検出できることが期待される。

5. 結言

超音波バースト波を薄鋼板に打ち込み、鋼板の表裏面で生じる多重エコーを干渉させ、この干渉の大きさから鋼板を伝搬する弾性波の速度を検出する方法を提案し、音速の二次元分布表示装置を開発した。本装置を電磁鋼板の結晶方位と音速との関係の解析へ応用し、以下の結果を得た。

- (1) 鋼板の音速は結晶方位とともに変化し、変化の大きさは平均音速に比べて最大10.2%である。
- (2) 多重エコーの干渉の大きさは超音波バースト波の波数とともに増加するが、波数50程度で飽和する。
- (3) 干渉の大きさと音速の関係は、共鳴曲線を描くがその半値幅は約300m/s、変化割合は、最大で $0.37\%/m/s$ である。

(4) 干渉の大きさの鋼板面内分布表示は、マクロエッチング法による観察結果と良く一致する。

以上により、本測定法により電磁鋼板などの二次再結晶粒の非破壊計測が可能であることが分かった。

本方法では、 P_{\max} と音速の関係が1対1には対応していないこと、さらにある方向の縦波の音速が分かっても、結晶の方位は一義的に決定できない問題が残っている。厳密な音速の決定および音速からの厳密な結晶方位決定については、本研究の今後の課題としたい。

本測定法は、10,000回/sの薄板などの材料の音速測定が可能であり、今後薄鋼板などの製造プロセスでの製品品質のオンラインあるいはインライン測定などの応用が考えられる。

文 献

- 1) 第3版鉄鋼便覧I, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1981), 480.
- 2) 的場伊三夫, 光法弘視, 後藤公道: 川崎製鉄技報, 5(1973)4, 447.
- 3) 川崎宏一, 松尾宗次, 牛神義行, 河田 洋: 鉄と鋼, 77 (1991), 2044.
- 4) 小久保旭, 高木堅志朗: 日本音響学会誌, 46 (1990)12, 470.
- 5) 新非破壊検査便覧, 日本非破壊検査協会編, (1992), 267.
- 6) 本庄克彦, 須藤住一, 増田順一: 非破壊検査, 41 (1992)1, 11.
- 7) 飯塚幸理, 長棟章生: 計測自動制御学会論文集, 31 (1995)2, 150.
- 8) M.J.P. Musgrave: Crystal Acoustics, Holden-Day Inc, London, (1970).
- 9) H.B.Huntington: Solid State Phys., 7 (1958), 213.
- 10) 市川文彦, 高田 一, 浅野一哉: 特公平, 7-1255 (1995).