

薄鋼板製造における 内部品質のオンライン計測および検査技術*

川崎製鉄技報
31 (1999) 4, 211-215

State-of-the-art Techniques for Internal Quality Measurements in Steel Sheets Production Processes



高田 一
Hajime Takada

技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員(課長)



三宅 俊英
Toshihide Miyake

水島製鉄所 制御技術部 制御技術室 主査(掛長)



横田 廣幸
Hiroyuki Yokota

千葉製鉄所 制御技術部 制御技術室 主査(掛長)

要旨

本報では、薄鋼板製造プロセスにおける内部品質の計測および検査の最新技術について、特に超音波や磁気を応用した計測・検査技術の具体例を紹介する。(1) 漏洩磁束探傷による内部介在物の検出、(2) 超音波による方向性電磁鋼板の結晶方位計測、(3) 超音波による内部介在物検出、(4) ワークロール表面探傷用高性能プローブ。これらの技術の開発および実用化によって、薄鋼板製造プロセスにおける内部品質の保証および管理に用いられる計測・検査技術の高度化を推進し、製品の材質特性や材質の均一性に対して高度化するユーザーのニーズに添えている。

Synopsis:

In this paper, the state-of-the-art ultrasonic and magnetic measuring techniques developed at Kawasaki Steel and used in the production process of steel sheets are described. Representative examples shown here are as follows: (1) Magnetic flux leakage testing system for the detection of nonmetallic inclusions, (2) Nondestructive orientation measurement for secondary re-crystallized grains in grain-oriented electrical steel by ultrasonic interferometry, (3) Immersion testing method for the detection of nonmetallic inclusions, (4) Surface wave probe for the detection of surface flaws in rolls used in rolling mills. Developments of these techniques and their applications to actual steel sheets production processes have contributed to advance in technologies for quality assurance and control. With the help of these techniques, steel sheet products with advanced and uniform properties are being continuously produced to meet customers' needs.

1 緒言

薄鋼板製品の内部品質や材質特性に対するユーザーの要求は、年々厳しさを増している。背景には、コストダウンを目的とした生産技術の高度化や自動化、また省エネルギーや環境対策を目的とした製造方法の変更などがある。たとえば、自動化した製造工程は製造途中での不良品の発生を嫌うため、内部欠陥などの不良部のない薄鋼板を必要とする。加工方法などの製造方法の変更では、薄鋼板の材質特性の高度化を必要とする場合が多い。鉄鋼メーカーは、ユーザーの求めている現実のニーズに添えるべく、また、ユーザーが将来的に必要とするであろうニーズを見通して、さまざまな高機能の薄鋼板の開発と製造を行っている。同時に、薄鋼板製品の材質特性や均一性に関する品質計測技術についても新規の開発や性能向上が絶えず求められている。川崎製鉄では、こうした要求に添えるべく、さまざまな品質計測機器の開発および設置、計測した情報にもとづく製品の品質保証および品質管理を行ってきた。本論文では、

最新の薄鋼板製造における内部品質の計測技術および機器について、代表的な開発事例を紹介する。

2 漏洩磁束式オンライン介在物探傷装置

2.1 開発の背景

2 ピースのスチール銑をはじめとして、薄鋼板に大きな塑性変形を加えて製造される鋼製の製品は数多い。このとき、内部に非金属介在物(アルミニウムの酸化物など)が存在すると製品に割れや破れが発生するため、内部に非金属介在物がない薄鋼板を製造すること、薄鋼板の全長・全幅にわたり内部の非金属介在物を検出し、品質保証を行うことが必要である。また、凹凸を有する表面欠陥であるガウジ欠陥も不良品の原因になるため、製品の全長・全幅にわたる検出が必要である。

2.2 測定原理と装置構成

先行して行った研究開発の成果^{1,2)}に基づき、千葉製鉄所第1冷間圧延工場に導入した漏洩磁束式オンライン介在物探傷装置の概要

* 平成11年8月5日原稿受付

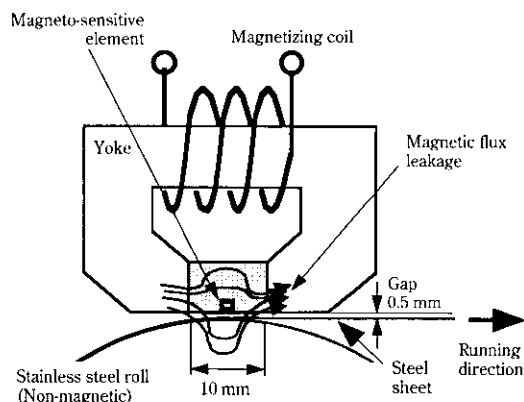


Fig. 1 Schematic geometry of detecting head

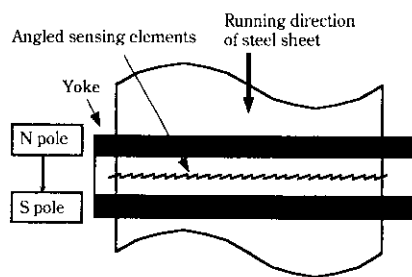


Fig. 2 Schematic geometry of detecting head (top view)

を以下に示す。

Fig. 1 および Fig. 2 に検出原理および検出器の構造を示す。被検査鋼板を励磁したとき、鋼板中の非金属介在物や鋼板表面のガウジ欠陥などの磁気的な不連続があると、鋼板表面近くの空間に磁束が漏洩する。その漏洩磁束を検出器内部に配置した磁気検出素子（検出感度 $0.8 \text{ V}/0.1 \text{ T}$ 、水平磁束を感知）によって検出する。この装置では、鋼板をその移送方向に励磁する直流励磁器と検出器とが鋼板に対して同じ側に配置されており、装置全体がコンパクトにまとまっている。検出素子間の感度低下を防止するために、Fig. 2 に示すように素子を斜めに高密度に配置した。欠陥信号を弁別し、S/N を向上させるために、鋼板の移送速度に応じてカットオフ周波数を変更できるハイパスフィルターなど各種ノイズの消去回路を搭載している。

介在物欠陥は磁気的な不連続部の表面への露出がなく、漏洩磁束の密度が微小であるため、検出器と鋼板とのリフトオフを狭くし、検出感度を上げる必要がある。これに対し、ガウジ欠陥は表面に不連続部が露出しているため、漏洩磁束の密度が比較的高く、介在物検出の場合よりも大きなリフトオフで検査が可能である。そこで、当社の装置は、任意のリフトオフの設定機能と信号処理とを合わせて、介在物欠陥検査とガウジ欠陥検査をオンラインでコイル単位に任意に切り替える構造としている。

また、この装置は、他にも (1) エッジ部までの全面検査可能、(2) ライン速度 700 m/min まで対応可能という特長を有している。

2.3 欠陥検出能

Fig. 3 に介在物欠陥、Fig. 4 にガウジ欠陥の検出例^{2,3)}を示す。介在物欠陥検査の場合は、リフトオフを 0.5 mm にして体積 $5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ の欠陥を、ガウジ検査では、リフトオフを 2.0 mm として体積約 $15 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ の欠陥を検出する能力を有している。

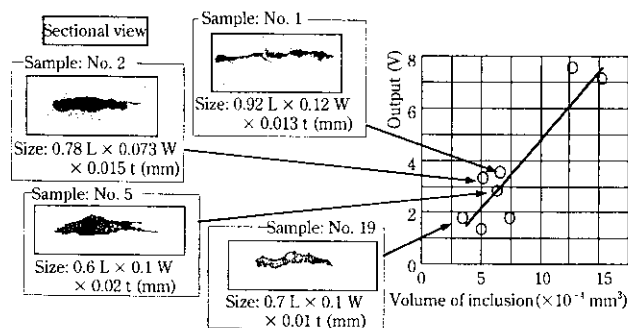


Fig. 3 Detectability of nonmetallic inclusions

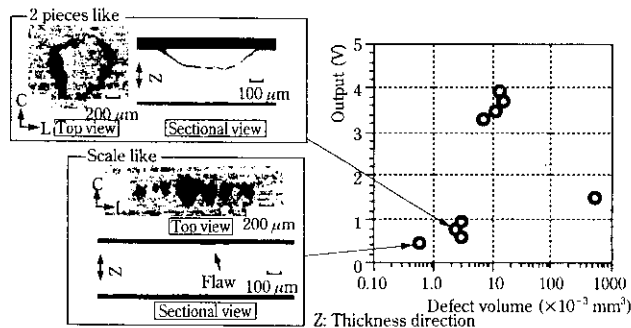


Fig. 4 Detectability of gouge defects

3 方向性電磁鋼板の結晶方位計測装置

3.1 開発の背景

方向性電磁鋼板の磁気特性は2次再結晶粒の方位・粒径により支配され、2次再結晶粒の方位を Goss 方位にそろえることが磁気特性の向上のために重要である。従来、磁気特性の試験にはエプスタイン試験、SST（積み鉄心などの材料について単板で行う磁気特性試験、磁束密度や鉄損を測定）が、結晶方位の測定には X 線回折法が用いられてきたが、いずれの方法も製品から切り出した試験片を対象とした試験法であり、オンラインでの製品特性の連続測定に適用可能な方法が切望されていた。

3.2 測定原理および測定装置の構成

超音波干渉法を用いて2次再結晶粒の方位を測定する技術および装置を開発し、オンラインでの連続測定に実用化した。

鋼の単結晶には弾性に異方性があるため、伝播する方向に依存して超音波の速度が異なる⁴⁾。Goss 方位を向いた結晶粒（以下、正常粒）と Goss 方位からはずれた結晶粒（以下、不良粒）とでは、板厚方向での結晶の向きが異なり、超音波の伝播速度が異なる。したがって、超音波の伝播速度を測定すれば不良粒を識別できるが、ナノ秒以下の高い分解能の時間測定が必要となるため、超音波の鋼板中での多重反射波の干渉を利用する方法を用いた⁵⁾。多重反射波の振幅の観測には Fig. 5 に示す2回透過法、または透過法を用いる。

Fig. 6 は板厚が 0.20 mm のとき、超音波としてパースト状の波動（以下、パースト波）を用い、その周波数を 15.5 MHz 、パースト波のパルス幅を N サイクル（波長の整数倍）として、多重反射波の振幅と超音波伝播速度との関係を数値計算した結果であり、正常粒で多重反射波の振幅が最大になる条件とした。この図から、超

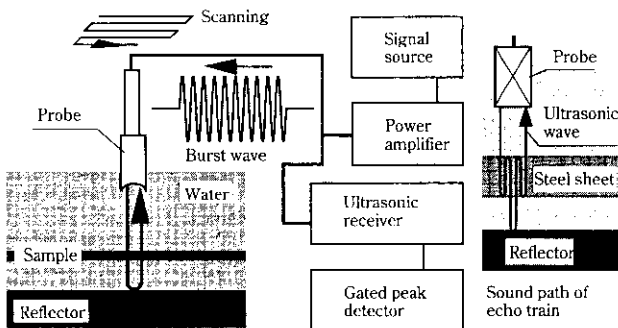


Fig. 5 Block diagram of echo amplitude measurement system

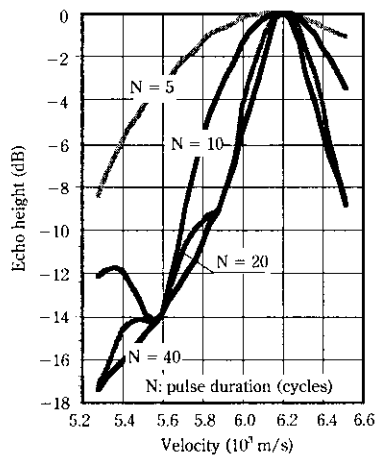


Fig. 6 Relation between echo amplitude and ultrasonic wave velocity in material (calculated)

音波の伝播速度が Goss 方位の結晶とは異なる結晶では多重反射波の振幅が小さくなること、バースト波のパルス幅が長い方が振幅の変化が大きいたことがわかる。このパルス幅は 2 次再結晶の方位の許容範囲から適宜設定する。

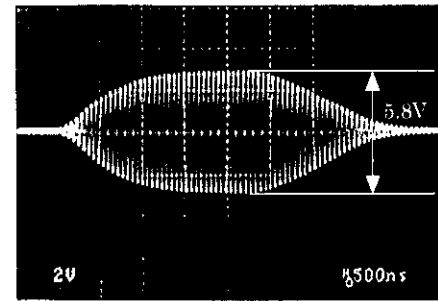
Fig. 5 に測定装置の構成を示す。信号発生器が発生した 20~40 サイクル分の正弦波が連なった電気パルスをパワーアンプで増幅し、超音波プローブに内蔵された超音波振動子に印加することにより、超音波プローブから周波数およびパルス幅が可変の超音波バースト波を送信し、水浸された鋼板からの多重反射信号を受信する。この信号の振幅をゲーテッドピークディテクタで検出することにより、不良粒を識別して検出できる。

3.3 開発結果

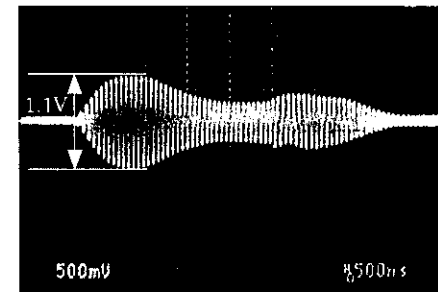
Photo 1 は板厚 0.18 mm の方向性電磁鋼板の正常粒と不良粒について、バースト波のパルス幅を 40 サイクル、周波数を 17 MHz とし 2 回透過波の波形を観測した結果である。正常粒と不良粒との間の 2 回透過波の振幅の比 δ (dB) は、約 14 dB と大きく、不良粒を良好に識別検出できる。

$$\delta = 20 \log_{10} (5.8/1.1) \approx 14 \text{ (dB)} \quad (1)$$

この測定装置は、電磁鋼板工場に設置され、方向性電磁鋼板の品質保証に非常に役立っている。なお、上記原理を利用し、実験室でサンプル板の 2 次再結晶粒の成長を観測する装置も開発した⁹⁾。



(a) Echo train at grain aligned with Goss texture



(b) Echo train at mis-oriented grain

Photo 1 Comparison of waveforms of echo train

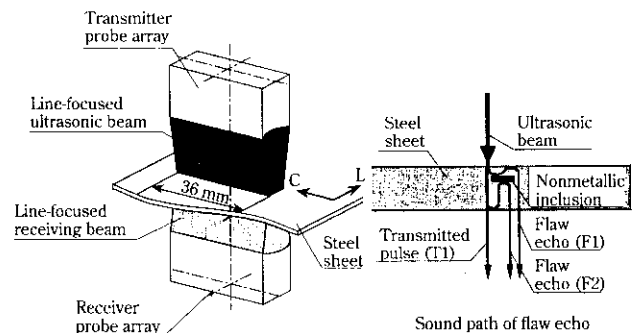


Fig. 7 Schematic geometry of ultrasonic probes

4 超音波ラインセンサによる酸洗板の介在物探傷技術

超音波を用いて、非金属介在物などの鋼板内部欠陥を検出する新しい装置の例を示す。

4.1 従来技術の問題点

従来、超音波による薄鋼板の内部欠陥の検出には、板波探傷⁷⁾、C スキャン超音波探傷⁸⁾などの方法が用いられてきたが、前者は欠陥検出能が低いこと、後者は超音波プローブの 2 次元走査のため、検査時間が長いことなどの欠点を有していた。

4.2 開発技術およびその検出能

開発技術の構成を Fig. 7 に示す⁹⁾。この装置の特徴は、アレイ型送信プローブとアレイ型受信プローブとを鋼板を挟んで対向させ、内部欠陥および鋼板の表面または裏面で各 1 回反射した欠陥反射波をアレイ型受信プローブによってとらえる点にあり、従来の反射法と透過法を組み合わせた構成を有している。この構成に振動子アレイの電子走査技術を組み合わせて、微小な介在物欠陥まで短い検査

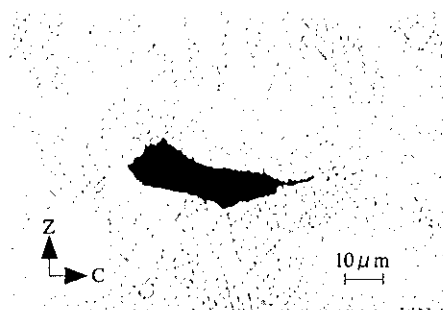


Photo 2 Sectional view of detected internal flaw

時間で検出可能である。**Photo 2**は、上記構成による探傷装置を用いて検出された非金属介在物の断面写真を示しており、 $\phi 50 \mu\text{m}$ 程度の極めて微小な欠陥を検出できる。

この装置は、現在、サンプル板のオフライン探傷装置として用いられており、さらにオンライン探傷適用への高い可能性を有している。

5 広帯域表面波プローブによるロール表面探傷技術

ここでは、薄鋼板の表面品質に直接影響を及ぼす圧延用ワークロールの欠陥の検出装置について述べる。

5.1 従来技術の問題点

圧延に使用されるワークロールは、圧延中に事故が起きた場合に表面にクラックが発生することがあり、放置するとクラックが進展し、ロールが割損したり、表面が一部欠落して圧延材表面にきずが転写されることがある。ワークロールは所定量の圧延に使われた後、砥石により研磨され、表面を平滑に仕上げられ、この後、表面が検査され、クラックが検出されれば、これが除去されるまで研磨が行われる。

高速度工具鋼のロール表面検査には超音波表面波探傷法が用いられてきた^{10, 11)}。しかし、従来の技術には、内部結晶組織、粗面、熱間圧延に用いられたとき表面に生成される多数の微小なヒートクラックなど（以下、集合した微小反射体）から反射波が発生し、相互に干渉しあって大きなノイズとなるため、欠陥検出能が低下したり、さらに、大きなクラックがあるかのような誤検知が発生する問題があった。

5.2 広帯域型表面波プローブの開発

超音波の伝播路に存在する集合した微小反射体からの超音波エコーの高さ P_g は、超音波プローブからの距離を x 、減衰係数を α_0 とすると、(2) 式で表され、パルス波のパルス幅 τ の平方根に比例する¹²⁾。

$$P_g \propto (\alpha_0 \cdot \tau)^{1/2} \cdot \exp(-2\alpha_0 x) / x \dots \dots \dots (2)$$

(2) 式から、超音波のパルス幅を小さくする（プローブを広帯域化する）ほど、 P_g を小さくすることが可能である。欠陥での超音波の反射率はパルス幅に依存しないため、広帯域型プローブを用いた探傷では欠陥からの反射波の S/N が向上し、欠陥検出能が向上する。従来の表面波プローブは表面波送受波強度を高くするため、電気パルス印加によって超音波振動子に生じた振動をそのまま送波に用いており、 τ が長い（波長の数倍、狭帯域）、 P_g が大きくなっていた。

一般に広帯域型プローブでは、超音波振動子に発生した超音波振

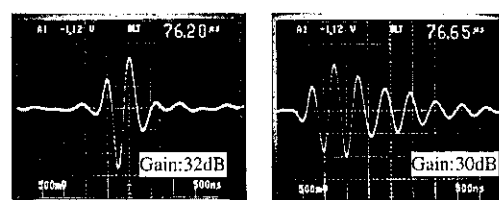
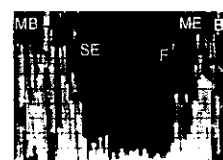
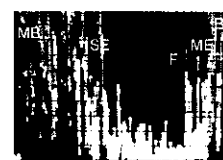


Photo 3 Waveforms of side wall echoes observed



(a) Developed probe (gain: 68 dB)



(b) Conventional probe (gain: 74 dB)

MB: Main bang F: Flaw echo B: Edge echo
SE: Spurious echo in wedge
ME: Mode converted echo

Photo 4 Test results of artificial surface flaws detection

動をダンピング材によって強制的に制動して、振動の持続時間を短くしパルス幅を短くする。したがって、ダンピング材による制動を行わない狭帯域型プローブよりも送受波する超音波の強度が弱くなるため、超音波受信器のゲインを送受波強度の低下に見合う分上げることが必要となり、外來性電気ノイズによる誤検出が発生しやすくなる問題があった。

そこで、次の2つの改良を加えることにより、送受波強度が現状の狭帯域型プローブと同等またはそれ以上の広帯域型表面波プローブを開発した。

5.2.1 材質（振動子材料、樹脂くさび材料）の最適化

振動子材料には厚さ方向の電気機械結合係数が高く（送受波強度が高く）、径方向の電気機械結合係数が低い（雑エコーが出にくい）圧電素子を用いた。くさび材料には、減衰が小さく、音響インピーダンスが高い（振動子からくさび材料への超音波の透過損失が小さい）樹脂を用いた。

5.2.2 入射角の最適化

クサビ材料からロール表面への超音波の入射角 θ_i を (3) 式の Snell の法則に基づいて高速度工具鋼に対して最適化した。

$$C_w / \sin \theta_i = C_R / \sin \theta_t \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 C_w : 樹脂クサビでの超音波の速度、 C_R : 被検体での表面波の速度、 θ_t : 屈折角（表面波の場合は 90° ）である。

5.3 開発したプローブの性能および効果

開発した高感度広帯域型表面波プローブの波形を狭帯域型プローブと対比して、**Photo 3**に示す送受波強度が従来プローブと同等またはそれ以上で、パルス幅が1.5波長のプローブを開発できた。

Photo 4には、厚さ10 mmの高速度工具鋼の板に、長さ0.5 mm、深さ0.2 mmのスリットを放電加工し人工きずとした試験片を、開

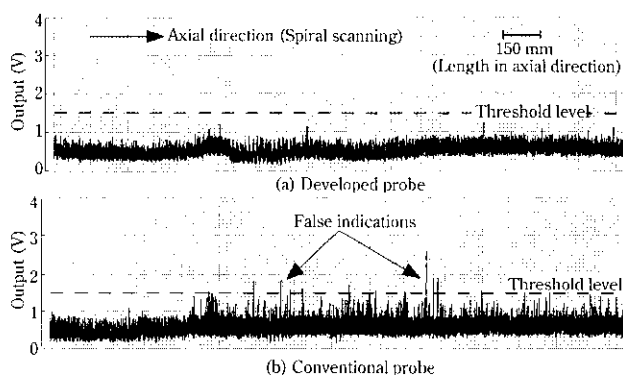


Fig. 8 Comparison between the test result for roll surface with harmless small fire cracks by using the developed probe and that by using the conventional one

発したプローブと従来プローブで探傷した結果を対比して示している（プローブきず間距離：100 mm）。開発プローブを用いると、小さな欠陥も高い S/N で検出できることがわかる。Fig. 8 は、開発プローブと従来プローブとを自動探傷装置に装着し、研磨後の熱間圧延用ワークロールを探傷した結果である。従来プローブでは高

い欠陥指示がみられるが、これは研磨面に残る微小なヒートクラックの集合体を誤検出したものである。これに対し、開発プローブでは欠陥指示はみられず、微小なヒートクラックの集合体の誤検出防止に有効ことがわかる。この結果、誤検出が原因のロール表面の過大な研削の防止が可能となり、千葉製鉄所、水島製鉄所とも 20% 以上ロール原単位が向上した。

このプローブは、熱間圧延用ワークロールに限らず、冷間圧延用ワークロールやバックアップロールの表面検査にも適用可能であり、今後ロール表面検査全般への適用が期待される。

6 結 言

薄鋼板製造における最新の内部品質のオンライン計測および検査技術について、代表的な開発事例を紹介した。今後、さらに薄鋼板の材質特性、均一性に関するユーザーの要求は高度化し、同時に、薄鋼板製造プロセスの高速化、連続化、自動化が進んでいくと予想される。したがって、品質計測技術には一層の性能向上、新しい計測対象への取り組み、効率化などが必要になってくると考えられる。このような状況に対応すべく、現在の品質計測技術の高度化、新たな品質計測技術の開発および実用化に取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- 1) 横田廣幸, 増野豊彦, 白石利明, 林 浩正, 小林 真, 児玉俊文: 「オンライン非金属微小介在物検査装置の開発」, 材料とプロセス, **7**(1994), 1270
- 2) 山本義秀, 横田廣幸, 増野豊彦, 白石利明, 佐藤 覚: "Inclusion and Gouge Detecting System for Tin Plate", 8th Continuous Steel Strip Plating Symposium, (1996)
- 3) 吉村元宏, 横田廣幸, 増野豊彦, 竹澤幸平, 八角忠明: 「薄鋼板内部欠陥検出装置の実用化」, 材料とプロセス, **8**(1995), 365
- 4) M. J. P. Musgrave: "Crystal Acoustics", (1970), 81, [Holden-day, Inc.]
- 5) 高田 一, 浅野一哉, 市川文彦, 三宅俊英, 川原真博, 山下英明: 「超音波による方向性珪素鋼板の方位不良粒の非破壊検出方法の開発」, 材料とプロセス, **10**(1997), 290
- 6) 高田 一, 浅野一哉, 市川文彦, 三宅俊英, 川原真博, 山下英明: 「超音波による珪素鋼板 2 次再結晶粒非破壊計測方法の開発」, 材料とプロセス, **9**(1996)2, 283
- 7) 市川文彦, 丸山英雄, 栗田邦夫, 高橋 暁: 「板波超音波探傷の最適条件の検討とその応用」, 川崎製鉄技報, **18**(1986)2, 192
- 8) 高田 一, 市川文彦, 岡本康司, 緒方貴玄: 「高性能 C スキャン超音波探傷装置 KUSS-130 の開発と応用」, 川崎製鉄技報, **24**(1992)1, 52
- 9) 高田 一, 虎尾 彰, 鎌田征雄, 市川文彦, 白石利明: 「リニアアレイプローブを用いた 2 探水浸法による鋼板の内部介在物の検出方法の基礎開発」, (社)日本非破壊検査協会平成 9 年春季大会講演概要集, (1997), 225
- 10) 安藤好充, 空野博明, 佐野義一: 「表面波超音波探傷法を用いたロール表面疵検出装置」, 材料とプロセス, **5**(1992)2, 515
- 11) 上屋義郎, 大西良弘, 小土井章夫, 白石 馨, 増田健一, 沖本一生: 「ロール表面疵検出用自動超音波探傷装置の適用」, 材料とプロセス, **6**(1993)2, 505
- 12) I. N. Ermolov: NDT Int. Dec., (1976), 275-280