

熱間圧延ロールのトータル品質計測技術

Quality Measurement Techniques for Hot-Rolling-Mill Rolls

高田 一 TAKADA Hajime JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(副部長)
山本 克史 YAMAMOTO Katsushi JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区) 制御部熱延制御室 統括マネージャー(副課長)
平岡 久 HIRAOKA Hisashi JFE スチール 知多製造所 製造部鑄造技術室長

要旨

熱間圧延におけるワークロールのトラブル防止, および良好な製品表面品質の維持を目的として, 広帯域表面波を用いてワークロールの表面きずを S/N 高く検出し, その検出結果を表現力高く表示できる技術, および大口径集束プローブと開口合成に基づくイメージングとによって内部欠陥を仔細に映像化して評価できる技術を開発した。これら技術によって, ワークロールの品質をトータルに評価・管理することが可能となった。これら技術は, 表面の健全化による製品品質向上および表面・内部欠陥が原因となって発生するロールトラブル防止に大きく貢献している。

Abstract:

This paper describes the state-of-the-art nondestructive testing techniques developed at JFE Steel and applied to work rolls for the hot-rolling finishing mill. Some examples shown here are as follows: (1) High resolution ultrasonic detection of internal flaws in deep positions by a combination of the focused beam testing method with the synthetic aperture technique, (2) surface flaw detection with high signal-to-noise ratio by using a newly developed heavy damped surface wave probe, and (3) an intelligible display technique in mapping detected flaws in surface testing. The development of these techniques has made it possible to evaluate the soundness of the work roll thoroughly, and their applications to actual production processes have contributed to prevent work-roll troubles caused by internal and surface flaws and to keep the steel sheet in good surface quality.

1. はじめに

薄板の熱間圧延に用いられるワークロールの内部には供用中に高い繰り返し応力が発生する。表面きずが発生したワークロールを継続して使用すると, 表面きずが上記繰り返し応力によって大きなクラックへと成長するため, ロールが割損する, あるいは, ロール表面が欠け落ちるトラブルが発生する。ワークロールは圧延により摩耗したり, 表面が荒れたりするため, 所定量の圧延に使われた後, 砥石による研磨によって表面を平滑に仕上げられ, この後, 表面きずがないか非破壊検査される。表面きずが検出されれば, これが除去されるまで研磨が行われる。また, 高い繰り返し応力によってワークロールの微小な内部欠陥から微小クラックが発生し, これが大きなクラックへ成長することもある。

熱間圧延をワークロールのトラブルなしに操業するため, 製品の表面品質を良好に維持するためには, 表面きずを確実に検出して除去すること, 内部欠陥がないワークロール

を用いることが重要である。このため, 超音波を用いてワークロールの表面および内部を仔細に評価できる技術を開発してきた。本稿では, この概要を紹介する。

2. ロール内部欠陥検出技術

熱間圧延用ワークロールは, 一般的に, 被圧延材と接触する外層(厚さは最大約 80 mm), および外層の内側にあって駆動軸に連結される内層からなる。内部欠陥の精査が必要なのは外層表面から内・外層の境界までである。また, 繰り返し応力によって内部欠陥から発生した微小クラックが大きなクラックへ成長するか否かは, 内部欠陥の形態や分布に依存する。したがって, 最大 80 mm の深さにある微小内部欠陥の形態や分布まで検出できる能力が検出手段に求められる。現在, 下記技術を開発し, ロール内部欠陥検出に適用している。

2.1 深い位置への焦点形成方法

微小欠陥の検出に優れた従来技術として水浸集束ビーム

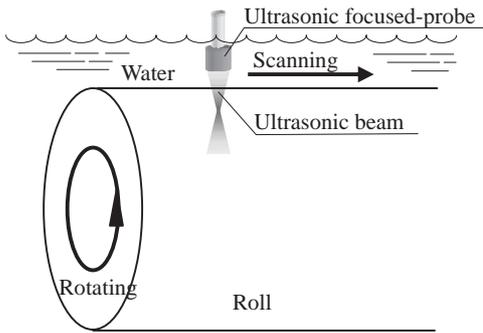


Fig. 1 Roll internal testing using ultrasonic focused probe

探傷があげられる。たとえば、Fig. 1 に示すように、ロール内部へ超音波を送受波できるように集束型プローブを設置し、水浸されたロールを回転させながら、集束型プローブをロール軸方向へ送ることにより、ロール内部探傷が可能である。しかし、一般的な水浸集束ビーム探傷には以下の問題がある。

超音波の波長を λ としたとき、直径 D の円板である超音波振動子の近距離音場限界距離 x_0 は下式(1) で表される¹⁾。

$$x_0 = D^2/4\lambda \dots\dots\dots (1)$$

近距離音場限界距離とは振動子の個々の要素点から放射された超音波の位相がほぼ揃い、レンズなどで集束を行わなくても位相が合ってしまう距離（自然焦点）である。したがって、集束ビームの焦点は近距離音場限界距離 x_0 よりもプローブに近い位置に設定しないと、十分な集束効果が得られない。実用的には集束ビームの焦点距離 F は $x_0/2$ よりも短くする必要がある。ロールなどの大型材料の超音波探傷では、結晶粒界での散乱による減衰を小さくするため、超音波周波数は 1~2 MHz が適切である。この周波数範囲の一般的な集束型プローブの振動子直径 D は大きくても 30 mm であり、 x_0 は水中では約 300 mm 以下（2 MHz の場合）、鋼中では 75 mm 以下である（ロール外層の材質は鋼に近いものが多い）。したがって、鋼の深さ 80 mm の位置への焦点形成は不可能である。

そこで、(1)式を参考に、幾何学的な考察を行った結果、振動子直径を大きくすることが有効であると結論されたので、電気インピーダンスが低くなり過ぎない圧電振動子を用いて振動子直径 50 mm~75 mm の大口径集束型プローブを製作した。たとえば、周波数 2 MHz、振動子直径 50 mm のプローブは、 x_0 が水中約 830 mm 以上、鋼中約 200 mm 以上であるので、鋼の深さ 80 mm の位置に焦点を形成することが可能である。

周波数 2 MHz、振動子直径 50 mm の集束型プローブを用いて焦点位置を深さ 80 mm に設定して、深さ 80 mm の位置に $\phi 1$ mm の平底穴を加工した鋼製ブロックをロールに嵌め込んで探傷した結果を Fig. 2 に示す。 $\phi 1$ mm の平底

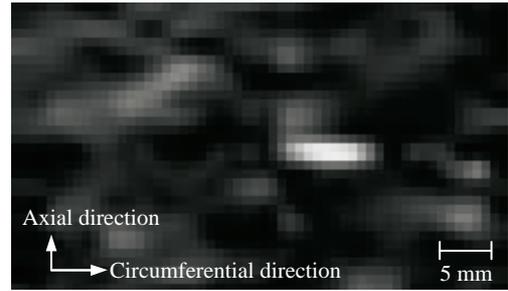


Fig. 2 C-scan image of a flat-bottom hole 1 mm in diameter and 80 mm in depth

穴を余裕をもって検出できることが確認された。しかし、焦点位置でのビーム径に限界があること、円柱形状の物体では、円周方向断面での焦点位置と軸方向断面での焦点位置との間にずれが生じるために、欠陥映像がぼんやりとし、かつ、歪んでいる。

2.2 高分解能探傷方法

大口径集束型プローブを用いた探傷のみでは内部欠陥の仔細な映像化が難しいことが判明したため、さらに分解能を向上させる方法を検討した。この結果、水浸集束ビーム探傷によって得られたエコー信号と開口合成法に基づくイメージングとを組み合わせることで高分解能を達成する方法（以下、SwiFT, synthetic aperture technique with immersion focused transducer）を確立した²⁾。この方法の概要を以下に示す。下記探傷および信号処理終了後のカウンター $C_{k,l}$ の内容が $PF_{k,l}$ がエコー源である確からしさ（欠陥像）となる。

- (1) 欠陥検出を行う深さ位置に集束ビームの焦点を設定
- (2) 超音波プローブを二次元走査し（Fig. 1, Fig. 3 参照）、被検体表面の各位置 $P_{i,j}$ でエコーデータ記録。表面反射波との時間差からエコーのビーム路程 $W_{i,j}$ 計算
- (3) 欠陥が存在すると推定される深さ位置 d を算出。深さ d の平面に 2 次元のアドレス $PF_{k,l}$ を設定（Fig. 3 参照）
- (4) $P_{i,j}$ につき $PF_{k,l}$ の各位置との距離 L 算出。 $L = W_{i,j}$ であれば、 $PF_{k,l}$ に設けたカウンター $C_{k,l}$ に 1 を加算
- (5) すべての $P_{i,j}$ について上記を実行

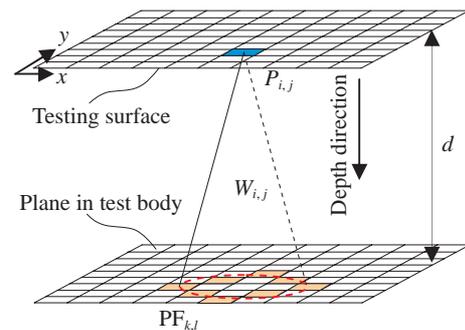


Fig. 3 Flaw image reconstruction method based on synthetic aperture method

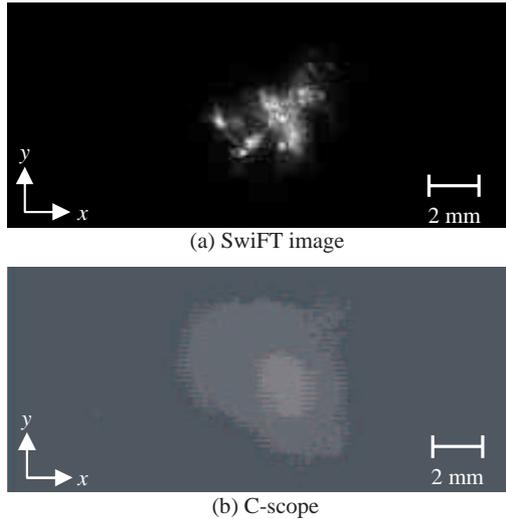


Fig.4 Comparison between SwiFT image and C-scope

2.3 高分解能探傷方法によるサンプル探傷結果

castingによって製作された鋼製厚肉材からサンプルを切り出し、深さ約 80 mm の位置にある内部欠陥の探傷を行った。集束型プローブとして周波数 2 MHz, 振動子直径 50 mm を用い、深さ 80 mm の位置に焦点を設定した。通常の C スキャン探傷によって得られた C スコープ（エコー振幅に応じて輝度変調表示）と本探傷法によって得られた欠陥像（エコー源である確からしさに応じて輝度変調表示）とを対比して Fig. 4 に示す。本探傷法によって圧倒的に高い分解能が得られる。また、切断試験結果とも良い一致がみられた。

3. 広帯域表面波を用いたロール表面探傷技術

3.1 従来技術と開発の背景

熱間圧延に多用されている高速度工具鋼（ハイス鋼）のワークロール表面検査には表面波探傷法が用いられている³⁻⁶。Fig. 5 に示すように表面波探触子を用い、圧延ロール（以下、試験体）の回転方向とは逆方向に表面波を送波して、表面きずからの反射波を受波しつつ、表面波探触子

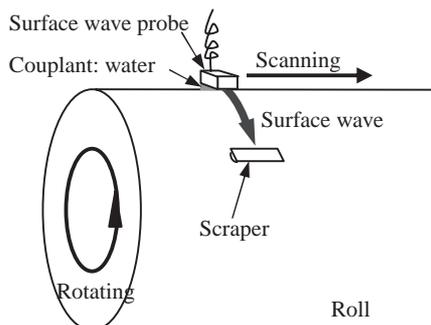


Fig.5 Roll surface testing by use of surface waves

を試験体軸方向に走査する（以下、Helical scanning）ことにより、試験体全表面の検査が可能である。表面波探触子と試験体との音響結合にはギャップ水浸法が用いられている⁷。

しかし、従来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）から微小な後方散乱波が発生し、相互の干渉によって大きなノイズとなるため、S/Nが不足して、表面きずを検出できない場合がある問題、表面きずがない部分から大きな散乱波が発生して誤検知が発生する問題があった。

3.2 広帯域表面波探触子の開発

超音波の伝搬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、超音波探触子からの距離を x , 減衰係数を α_0 とすると、(1)式で表され、パルス波のパルス幅 τ の平方根に比例する⁸。

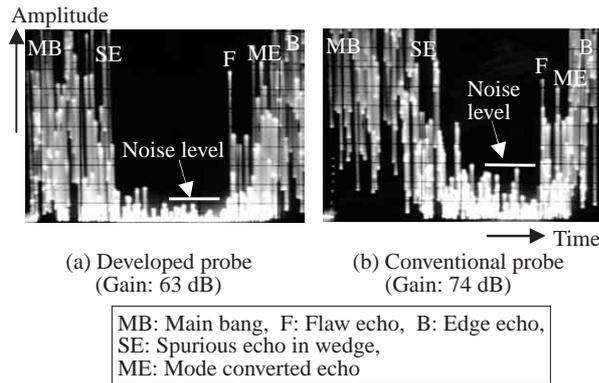
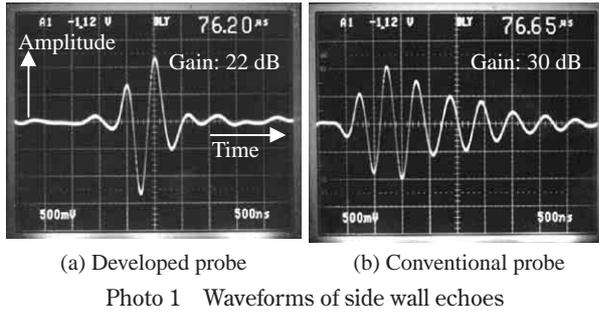
$$P_g = \sqrt{\alpha_0 \cdot \tau} \cdot \exp(-2\alpha_0 x) / x \dots\dots\dots (2)$$

(2)式から、超音波のパルス幅 τ を小さくする（周波数帯域を広くする）ほど、 P_g を小さくすることが可能である。単独のきずでの超音波の反射率はパルス幅に依存しないため、広帯域探触子を用いた探傷ではきずからの反射波の S/N が向上し、欠陥検出能が向上する。従来の表面波探触子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、パルス幅 τ が長い（波長の数倍、狭帯域）、 P_g が大きくなっていった。

一般に、広帯域探触子は、超音波振動子の振動をダンピング材によって制動することにより、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探触子よりも、送受波する超音波の強度が弱くなって、超音波受信器のゲインを強度低下に見合う分上げることが必要となり、外来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、下記 2 つの改良によって、送受波強度が従来の狭帯域探触子以上の広帯域表面波探触子を開発した。

- (1) 材質（振動子材料、樹脂くさび材料）の最適化
振動子として縦方向の電気～機械結合係数が高く（送受波強度が高い）、径方向の前記係数が低い（雑振動が小さい）圧電素子を用いた。くさび材料は、減衰が小さく、振動子との音響インピーダンスのマッチングがよい樹脂を用いた。
- (2) 超音波入射角 θ_i の最適化
樹脂くさびからロール表面への入射角 θ_i を Snell の法則をもとに高速度工具鋼での表面波速度に対して最適化した。



3.3 開発した探触子の性能および効果

開発した高感度広帯域表面波探触子の波形を従来の狭帯域探触子と対比して、Photo 1 に示す。送受波強度が従来探触子より 8 dB 以上高い、周波数 2 MHz、パルス幅が約 1.5 波長の探触子を開発できた⁹⁾。

Photo 2 は、厚さ 10 mm の高速度工具鋼の板に放電加工された長さ 0.5 mm、深さ 0.2 mm の人工きずを開発探触子と従来探触子で探傷した結果を対比して示している（探触子～きず間距離：100 mm）。開発探触子の方が 10 dB 程度 S/N が高い。人工きずを用いた探傷実験の結果、断面積（表面波の進行方向に対し、垂直な面の面積）が 0.06 mm² のきずを 10 dB 以上の S/N で検出可能なことが判明した。従来探触子では、断面積が 0.2 mm² のきずが検出限界とされていたので、従来よりも 1/3 の断面積のきずを検出することができる。

Fig. 6 は開発探触子と従来探触子とを自動探傷装置に装着し、圧延中にクラックが生成されたロールを探傷した結果を対比して示している。クラックからの反射波の高さが同等であるのに対し、ノイズレベルは開発探触子の方がはるかに低く、S/N よくクラックを検出できることが分かる。

4. 探傷結果の表示方法の改良

ロールトラブルを防止するには、探傷結果を利用しやすい形で、かつ、表現力高く表示することも重要である。探傷結果表示の高性能化についても検討を行った。

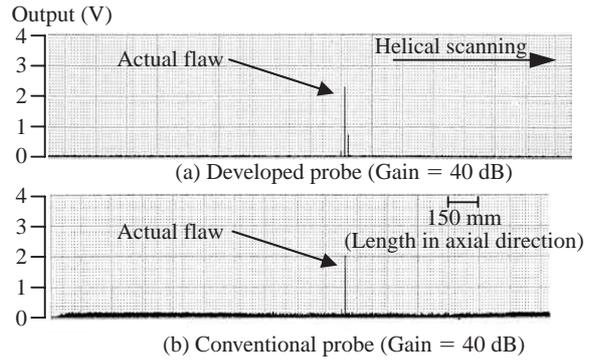


Fig. 6 Comparison of the test results of roll with an actual surface flaw 7 mm in length (inclined shape)

4.1 従来の探傷結果表示方法とその問題点

従来のロール表面探傷結果の表示方法として、探傷装置から出力されるきず信号の大きさに比例するアナログ電圧を単にレコーダ記録する方法（以下、アナログチャート式表示）、探傷時にきず信号の大きさを探傷位置に関連付けて収集・記録し、きず信号を検出した位置をロール展開図上に表示する方法（以下、しきい値比較式マップ表示）がある。

アナログチャート式の探傷結果の表示例を Fig. 7(a) に、しきい値比較式マップ表示の例を Fig. 7(b) に示す。Fig. 7

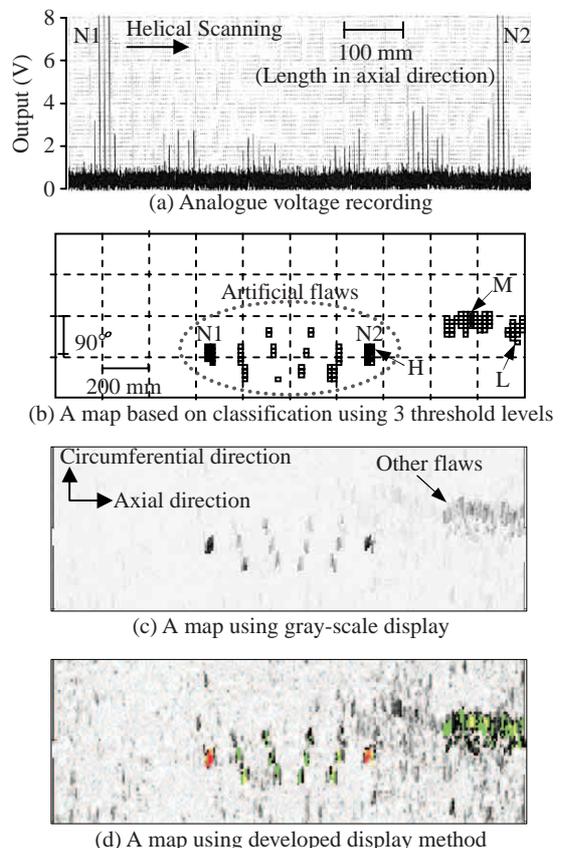


Fig. 7 Comparison between a map using developed display method and maps using conventional display method

は人工きず入りロールを表面波を用いて探傷した結果である。Fig. 7(b) ではきず信号の大きさに3個のしきい値 ($L, M, H, L < M < H$)を設定し、信号の大きさがしきい値 L 以上 M 未満のきずを L 欠陥、 M 以上 H 未満のきずを M 欠陥、 H 以上のきずを H 欠陥として分類表示している。

しきい値比較式マップ表示には、きず位置の把握が容易である利点としきい値以下の微小レベルの表面きずを表示できない欠点がある。アナログチャート式表示には、きず位置の把握が簡単ではない欠点と微小レベル表面きずの存在を確認できる利点がある。なお、しきい値比較式マップ表示において、しきい値 L をむやみに低くすると、場合によっては、電気ノイズ、結晶組織や表面粗さに起因する林状エコー、およびこれらが重畳されたノイズを誤検出するおそれがある。

また、Cスコープ表示法のように、信号のレベルに応じて濃淡や色をつける方法も考えられる。しかし、ロール表面探傷の場合には、信号レベルが所定値以上のきずが検出された場合、きず取り研磨を行う必要があるため、信号レベルが所定値以上か否かを明確に表示する必要がある。一般的なCスコープ表示法では、信号のレベルの把握があまり簡単ではないので、この表示法の採用は難しい。

4.2 表示方法の検討

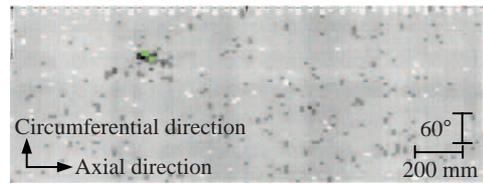
上述した2つの表示方法の利点を合わせ持つ表示方法として、以下の表示方法を考案した¹⁰⁾。すなわち、グレーと通常の色(赤, 緑, 青)のようなまったく色合いの異なる色を組み合わせて表示に用いると直感的に違いを識別しやすいことに着目して、しきい値 L 以下のレベルの信号をそのレベルに応じてグレースケールで表示し、しきい値 L 以上の信号を明るい色で表示することにした(以下、詳細表示法)。Fig. 8 にしきい値比較式マップ表示と詳細表示法の違いを示す。

4.3 探傷結果表示の比較

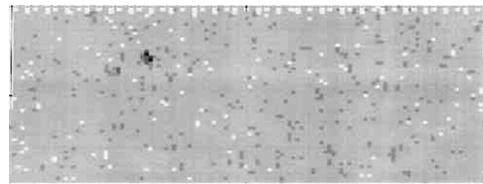
Fig. 7(b)~(d) に人工きず入りロールの表面波探傷結果をしきい値比較式マップ表示法、64階調の多階調表示法(参考)、および詳細表示法で表示した結果を対比して示す。しきい値比較式マップ表示法では、人工きずのうち信号レベルが小さい部分が表示されない。多階調表示は、低いレベルの信号間のコントラストが低く、判別が難しい。これらに対し、詳細表示法はしきい値 L に満たない低レベル信



Fig. 8 Comparison of displaying method of signal amplitude



(a) Map after first grinding



(b) Map after second grinding

Fig. 9 Change in surface testing results in the process of surface grinding

号もコントラスト高く表示でき、そのレベルの把握も比較的容易である。

4.4 探傷結果表示の実例

Fig. 9 は研磨による探傷結果の変化を詳細表示法によって表示している。Fig. 9(a) は、ロールが仕上圧延スタンドから引き出され、1回目の研磨が終了した後の探傷結果である。しきい値 L 以上の信号レベルの表面きずが検出されたため、再研磨が実施された。Fig. 9(b) では、再研磨によってしきい値 L 以上の信号レベルの表面きずはなくなったものの、濃いグレーのきず指示が同一の場所に残っている。きずが予想外に深かったと推定される。このような研磨残りの表面きずは、ロールトラブルの原因となる可能性がある。従来のしきい値比較式マップ表示では、再研磨後に残った表面きずは表示されなかった。このように詳細表示法によって、しきい値に達しない微小な信号レベルの表面きずであっても、そのレベルや位置を明瞭にとらえることができる。

5. おわりに

広帯域表面波を用いてワークロールの表面きずを S/N 高く検出し、探傷結果を表現力高く表示できる技術、および大口徑集束プローブと開口合成に基づくイメージングとによって内部欠陥を仔細に映像化して評価できる技術を開発した。これら技術は、ワークロール品質のトータル評価技術として活用され、表面品質向上、表面・内部欠陥が原因となって発生するロールトラブルの防止に大きく貢献している。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会編. 超音波探傷試験Ⅲ. 東京, 日本非破壊検査協会, 2001, p. 57.
- 2) Takada, H.; Hiraoka, H.; Yamashita, Y. CAMP-ISIJ. vol. 18, 2005, p. 337.
- 3) Ando, Y.; Sorano, H.; Sano, Y. CAMP-ISIJ. vol. 5, 1992, p. 515.

- 4) Ekusa, T.; Komiya, T.; Yonezawa, Y.; Ohniwa, A.; Murai, J. CAMP-ISIJ. vol. 7, 1994, p. 358.
- 5) Tsuchiya, Y.; Ohnishi, R.; Kodoi, A.; Shiraiishi, K.; Masuda, K.; Okimoto, K. CAMP-ISIJ. vol. 6, 1993, p. 505.
- 6) Sorano, H.; Morino, Y.; Sano, Y. CAMP-ISIJ. vol. 9, 1996, p. 984.
- 7) 日本クラウトクレマー。特開平 7-294493.
- 8) Ermolov, I.N. Ultrasonic inspection of materials with coarse grain anisotropic structures. NDT int. vol. 9, no. 6, 1976-12, p. 275-280.
- 9) Takada, H.; Torao, A.; Yarita, I.; Sugimoto, R.; Ogawa, H.; Morii, T.; Sato, A.; Akazawa, H. CAMP-ISIJ. vol. 12, 1999, p. 897.
- 10) Yamamoto, K.; Maeda, I.; Sugimoto, R.; Takada, H. CAMP-ISIJ. vol. 13, 2000, p. 1044.



高田 一



山本 克史



平岡 久