

技術資料



Technical Paper

光学式による熱間鋼材表面きず検査技術の開発

渡邊裕之*¹, 高橋信幸*¹, 池内宏太*²

Developments of Surface Inspection Technique using Optical Devices for Hot Flat Bars

Hiroshi Watanabe, Nobuyuki Takahashi, and Kota Ikeuchi

Synopsis

Optical inspection methods using CCD(Charge Coupled Device) camera and light source are normally used for inspection of flat surface. These methods, however, are hardly used for hot steels, nearly 1000 °C, because of the radiation of light and heat from the steel surfaces.

The inspection technique for hot flat bars has been developed by using a metal halide lamp. The beam of the light is straightened by using two orthogonal cylindrical lenses. The angle of the lightening up is within five degrees from parallel to the bar surface. This report shows the availability of the technique for detecting flaws, which depths are deeper than 0.2 mm, caused by rolling processes.

1. 緒 言

CCD カメラを用いて画像処理により長尺材の表面きずや異物付着を検査する技術は、鉄鋼メーカーに限らず製紙メーカーや樹脂メーカーなど産業界で広く利用されている。大同特殊鋼(株) (以下、当社という)でも帯鋼の表面検査に光学式検査装置が導入されており、不良材流出防止に寄与している¹⁾。

しかし、市販されている検査装置は、検査対象の温度が常温から高くても数百度程度の場合のみに利用され、1000 °C 近い温度で圧延される鋼材の表面きず検査に適用できるものはほとんどない。製鉄ラインへの適用事例でも、レーザ回折パターンマスク方式を含めると酸洗鋼板ラインや塗装ラインなど冷間での検査に適用した報告は多々あるが^{2)~6)}、熱間では鋳片の検査への適用報告などが数例あるだけである^{7),8)}。

当社の平角圧延ラインでは、加熱炉から抽出した鋼片を粗圧延、中間圧延、仕上げ圧延の各工程で圧延し、冷却前に切断、段積みされて、次工程へ送られる。万が一、圧延

ロールや搬送ローラにきずがあると、その後圧延される鋼材すべてにきずが転写され、最悪の場合、大量の不良材が発生させることになってしまう。

不良材発生防止のためには、圧延直後のできる限り早い段階で鋼材表面の異常を検出して対策することが重要であるが、オペレータの目視検査に頼らざるを得ないのが現状であり、かつ、きずが転写されやすい圧延材の下面の検査は実質困難であるため、目視に代わる熱間でのきず検査技術の開発が望まれている。

当社では、平角材圧延工程で発生する表面きずの早期検出を目的として CCD カメラを用いた画像処理による検査方法を研究開発してきた。平角材は、後工程で表面加工されることなく出荷されるため、厳しい品質管理が求められている。ここでは、0.2 mm 前後の非常に浅いきずを熱間で検出するために試作検討した光学式表面きず検査装置の開発内容を報告する。

2. 開発目標

開発目標を Table 1 に示す。検出対象は、かききずや

2006 年 5 月 15 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)星崎工場 (Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

Table 1. Target specifications for the development.

Item	Specification
Width	50 ~ 470 mm
Thickness	10 ~ 125 mm
Objective defect size	Depth \geq 0.2 mm
Kind of defect	Roll crack, Scratch
Traveling speed	~ 4.5 m/sec.
Temperature	700 ~ 900 °C

ロールマークといった設備起因のきずで、発見が遅れると不良材が大量発生する危険性のあるきずを早期に発見することを目的としている。ちなみに、ヘゲきずやワレきずなど素材起因のきずについては、冷却後の整備検査ラインに設置されているマルチチャンネル渦流探傷装置⁹⁾で検査している。

3. 検出原理

一般的に、光学式の表面きず検査は、Fig.1 のように被検査材に外部から光を照射したときに、きず部が周囲と比較して明暗となるのを、CCD カメラで撮影して画像処理により識別することによって行われる。従って、被検査材から離れたところに光源とカメラを設置して、遠方から非接触で検査できるのが特徴である。ところが熱間材は、冷間材に比べて材料自身からの輻射エネルギーが大きいため、CCD カメラで受光したときに、輻射によって材料自身から発せられる自発光の影響を無視できなくなる。この対策としては、自発光より高輝度の光を外部から照射する方法、さらには、自発光の波長が長波長側の赤外領域にピークをもつことから¹⁰⁾、400 ~ 500 nm 以下の短波長の光を照射し、短波長通過フィルタを通して CCD カメラで撮影することで、照射した光のみを通過させ自発光を遮断する方法がある。

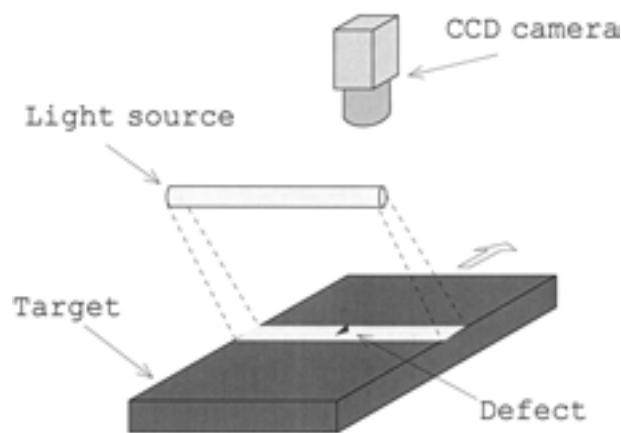


Fig.1. Principles of optical inspection using a CCD camera and a light source.

4. 検査機器の選定

4. 1 光源の選定

鋼材に光を照射するための光源の種類について検討した。比較検討したのは、LED 光源、レーザ光源、ハロゲン光源、およびメタルハライド光源の4種類である。LED 光源は、波長選択性に優れているが、熱間材に対しては光量不足であり、レーザ光源も波長選択性に優れているが、表面性状の影響を受け易いといった課題がある。ハロゲン光源とメタルハライド光源では、Fig.2 に示すように、後者はより高輝度で、短波長側にもピークが存在することから自発光の影響を受けにくい¹¹⁾。以上の結果から、熱間材に照射する光源として、メタルハライド光源を選定した。

4. 2 カメラの選定

CCD カメラは、連続して通材される鋼材を固定したカメラで撮影することから、板幅方向の1ライン上を高速でスキャン可能なラインセンサタイプを採用した。選択したカメラの諸元を Table 2 に示す。カメラ選択にあたっては、画素数、感度、走査速度などを比較し、高速、高感度カメラを選択した。また、レンズには、自発光をカットする目的で約 400 nm 以下の波長のみを透過させる短波長透過フィルタを取り付けた。

Table 2. Specifications of CCD camera used for test.

Item	Specification
Resolution	2048 pixel
Line rate	4737 scan/sec.
Data rate	5-10 MHz
Sensibility	625 V/lx.sec

4. 3 照射方法とライトガイドの選定

シート状の被検査材を検査するための光学式検査装置のほとんどは、シートの全幅を均一に照射するため、Fig.1 のように蛍光灯など棒状の光源をシートと平行で幅方向に配置している。しかし、この方法では、Fig.3(a) のように異物付着やシャープなきずを検出することは可能であるが、Fig.3(b) のように浅く凹みのような長手方向きずに対しては、照射した光がきずの内部まで入り込んで周囲との明暗がつかず検出が困難となる。そこで、Fig.4 のように光源を被検査材の側面側に配置し、光を板幅方向に照射する方法を試みた。ただし、この場合、光源を配置した側と反対側では光源からの距離が異なるため幅方向に照射ムラが発生し、きずの位置によって検出性能に差が生じてしまう可能性がある。

材料へ照射する方法としては、Fig.5(a) のようにメタル

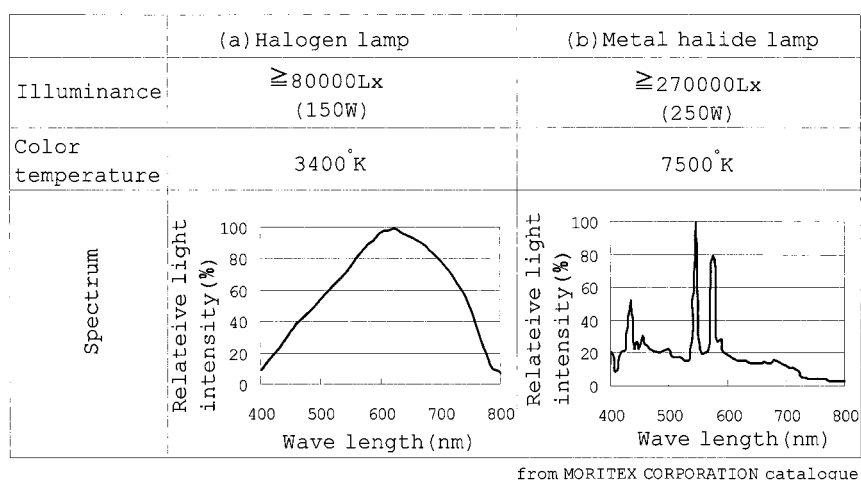


Fig.2. Comparison between a halogen lamp and a metal halide lamp.

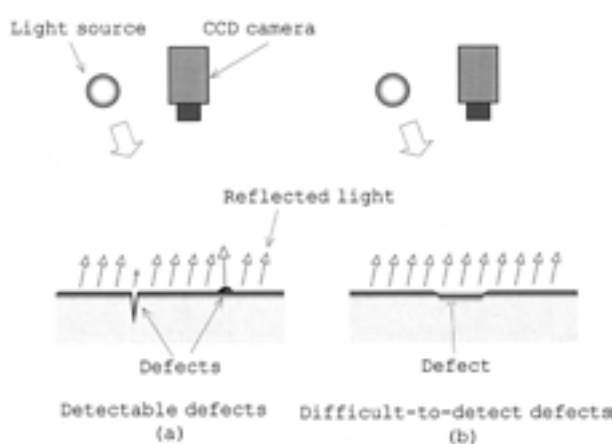


Fig.3. Examples of detectable defects and difficult-to-detect defects by conventional inspection method.

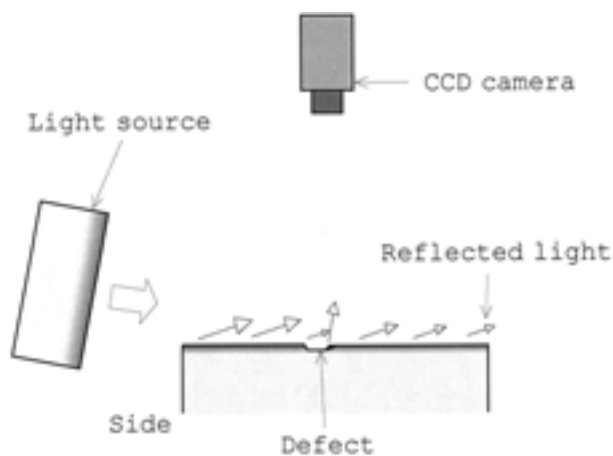


Fig.4. Idea to detect shallow scratch by lightening up from a sideways of the bar.

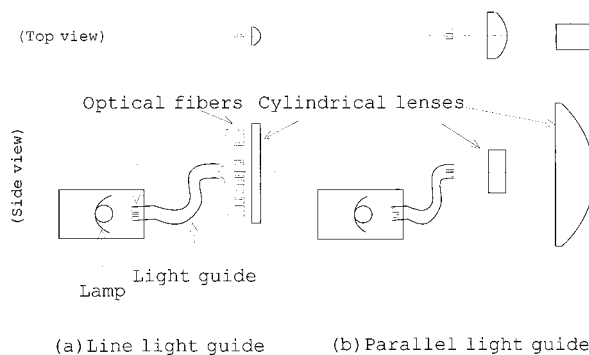


Fig.5. Structures of a line light guide and a parallel light guide.

ハライド光源本体から光ファイバーで導光してライン状の光を生成することのできるラインライトガイドと呼ばれるガイドにより、側面側から光を照射する方法、および、ラインライトガイドを用いるより平行度の高い光を生成する方法として、Fig.5(b)のように光ファイバー束で導光した光を直交配置したシリンドリカルレンズ2枚で集光するガイドを用いる方法を検討した。このガイドを利用した場合は、完全な平行光ではないが、ラインライトガイドに比べて平行度が高く材料側面側からの照射でも、鋼材の光源側と反対側で光量変化が少ないことを確認した。その比較結果は、次章で示す。またここでは、今後このガイドのことを平行光ガイドと呼ぶことにする。

5. 検出性能の調査

5. 1 テスト方法

熱間での検査性能を調査するため、人工欠陥サンプルを製作し、加熱炉で加熱して探傷テストを実施した。人工欠陥サンプルは、スケール発生が少ない SUS316 で製作し、

板材表面には Fig.6 に示す深さ 0.2 mm、長さ 50 mm の角溝、V 溝、U 溝といった同一深さで形状の異なる 3 種類の溝と縦穴を加工して、きず形状の影響を確認した。また、各人工欠陥は、同一形状、同一深さの欠陥を板幅方向に間隔 100 mm で 2 箇所加工し、光源からの距離による影響を調査した。

なお、熱間材のテストは、人工欠陥サンプルを加熱炉で約 1000 °C まで加熱した後、炉前に設置したテスト治具に引き出して手でサンプルを前後させる方法で実施した。

5. 2 照射条件の調査

まず、サンプルを加熱する前に、冷間にて光の照射角度などのテスト条件について調査した。CCD カメラと光源（ガイド）の配置を Fig.7 に示し、以下で説明するガイドの角度変化と上下移動の方向については図示のとおりとする。

照射角度の調査結果では、Fig.8 に示すようにラインラ

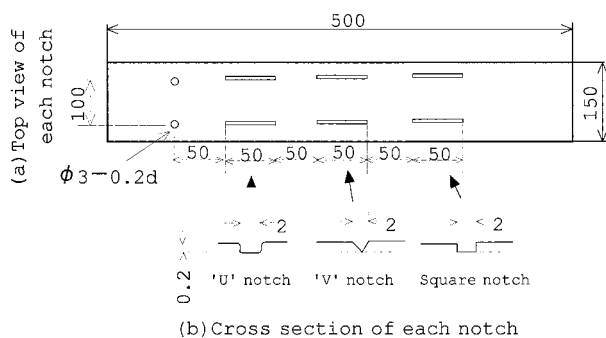


Fig.6. Design of test piece worked artificial notches and holes.

イトガイドでは角度変化の影響が小さいのに対し、平行光ガイドの場合は、材料表面と光軸とのなす角が大きくなるほどきず信号値が高くなる。ただし、角度が大きくなると、きず信号に比べて鋼材肌からの反射によるベース輝度の上昇率がさらに大きくなるため、きず検出の目安となるきず信号とベース輝度との比 (S/N 比) は角度が大きくなるほど低下してしまうことを確認した。さらに、ラインライトガイドの場合は、マイナス側の方が S/N 比が高くなることが判明した。

次にガイドからの距離の影響について調査した。Fig.7 に示すようにガイドに近い方のきず信号値を“Near”，遠い方のきず信号値を“Far”と表し、V 溝での Far/Near 比で評価した。従って、Far/Near 比が 1 に近いほど、距離に

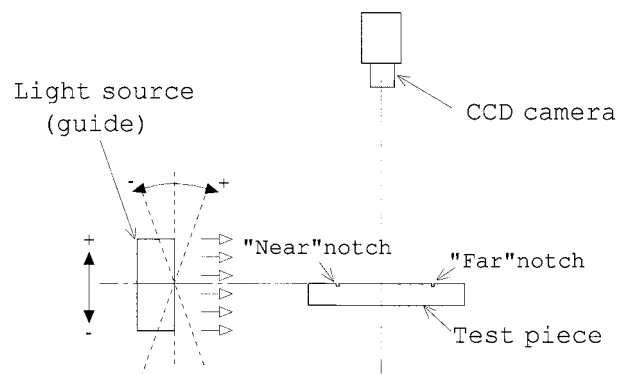


Fig.7. Test condition to investigate the lightening angle, the lightening height and so on.

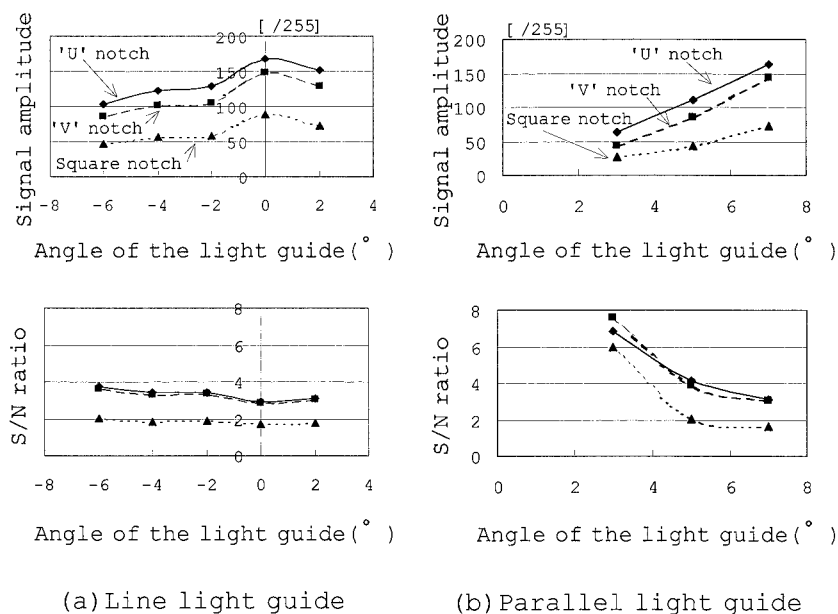


Fig.8. Relationship between the lightening angle and the signal and signal-to-noise (S/N) ratio of the notches in each light guide.

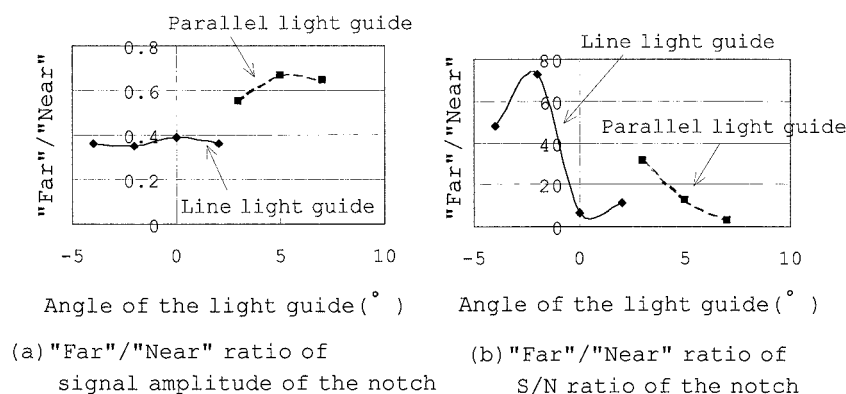


Fig.9. Influence of distance from the light guide in each one.

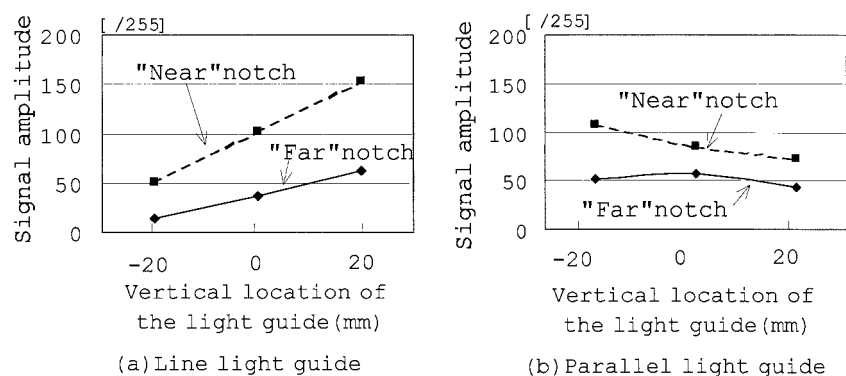


Fig.10. Influence of shifting height of the light guide in each one.

よる影響が小さいといえる。その結果、Fig.9(a)に示すようにラインライトガイドのFar/Near比が0.4であるのに対して平行光ガイドは0.65となり、また、Fig.9(b)のS/N比に対するFar/Near比も、平行光ガイドの方がガイドからの距離による変化が小さいことから、板幅方向に対する検出能の安定性は、より平行度の高い平行光ガイドにおいて得られることを確認した。

さらに、鋼材表面とガイドとの上下方向の位置関係による光量変化についても調査した。鋼材表面とガイドの中心が一致する高さを基準とし、 ± 20 mm 昇降させてきず信号への影響を比較した。その結果、Fig.10に示すようにラインライトガイドは、上下の位置関係の影響を受けやすく、高さの変化できず信号が大きく変動するが、平行光ガイドは、高さ変化の影響を受けにくいことを確認した。

これらの結果から、熱間テストでの照射条件として、照射角度をラインライトガイドは -6° 、平行光源は 4° と決め、また、鋼材表面と光源中心が一致するように光源高さを調節して熱間テストを実施した。

5.3 熱間テスト

熱間テストでは、人工欠陥サンプルを加熱炉で約 1000°C に加熱後、空冷させながら約 100°C ごとに探傷して画像を採取していった。また、比較のため加熱前後の常温での画像、およびガイドから光を照射せず、自発光のみの画像も採取した。それらの画像をFig.11に示す。

900°C では、自発光の影響で明るくなってはいるが、光を照射することできずが識別できている。また、 800°C 以下では、自発光がほとんどカットされており、きず部の明暗がはっきりと認識できる。とくに平行光ガイドは、ライトガイドに比べて光源側と反対側のきずが同レベルで視認できている。

5.4 信号処理

光源の最適化によって側面照射の課題である板幅方向の輝度ムラを低減する照射方法および条件を見出したが、傾斜ゼロとすることは難しく、また、自発光によって、ベース輝度も板幅方向で変化するため、取得した画像のままでは自動判定することが難しい。そこで、取得した画像データに対して板幅方向にバンドパスフィルタを適用す

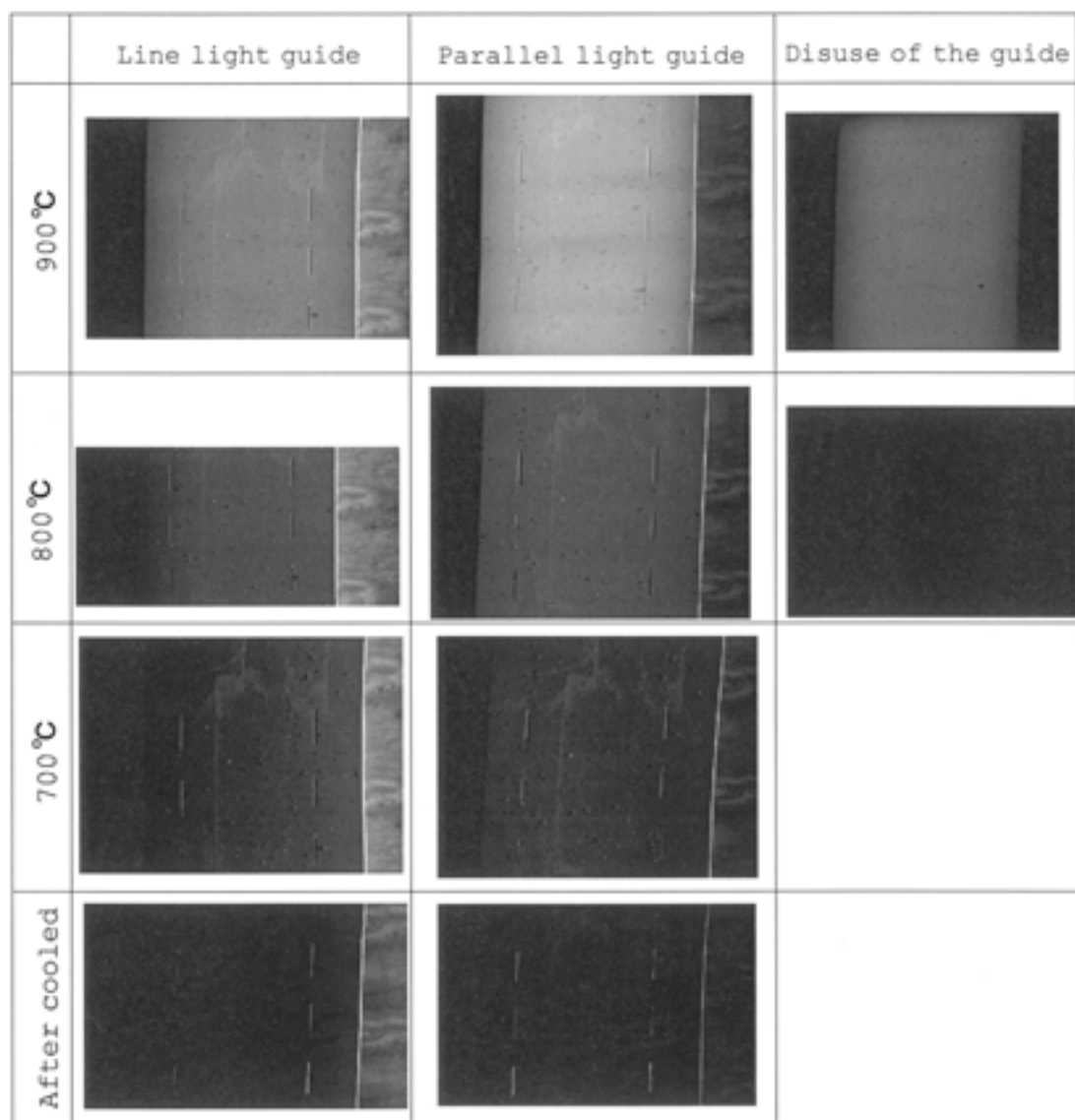


Fig.11. Images of the test piece from heated to 900℃ to after cooled in each light guide and disuse of it.

ること、きず部位の急峻な変化のみを抽出し、自発光や光量ムラのようなきずに比べて緩やかな変化を低減してS/Nを改善することを検討した。Fig.12に熱間、および冷間での取得画像にバンドパスフィルタ処理した結果を示す。この結果からは、フィルタ処理によって各きずが良好に検出できていることを確認できる。

900℃と常温における信号処理後の各きずの信号をFig.13に示す。常温に比べて熱間でのS/N比が低下しているのは、自発光によりベース輝度が上昇しているためである。また、きず形状の影響については、同一深さのV溝、U溝に比べて角溝の信号値が小さいことを確認した。この理由としては、V溝、U溝に比べて角溝のエッジがシャ-

ブであるため、反射面積が少ないことによると推定される。ただし、このグラフからは、900℃においてもすべてのきずが、 $S/N \geq 3$ 以上で検出できている。

6. 現場テスト

今までの調査結果をもとに現場テスト機を製作して当社の平角圧延ラインに設置し、圧延材の画像を採取した。現場テスト機は、圧延情報をもとに材料厚みに合わせてCCDカメラとライトガイドを自動昇降させて検査条件が一定となるようにした。

圧延材は、通材時に搬送ライン上で蛇行することがある。このとき、撮影した画像上では鋼材や鋼材表面のきず

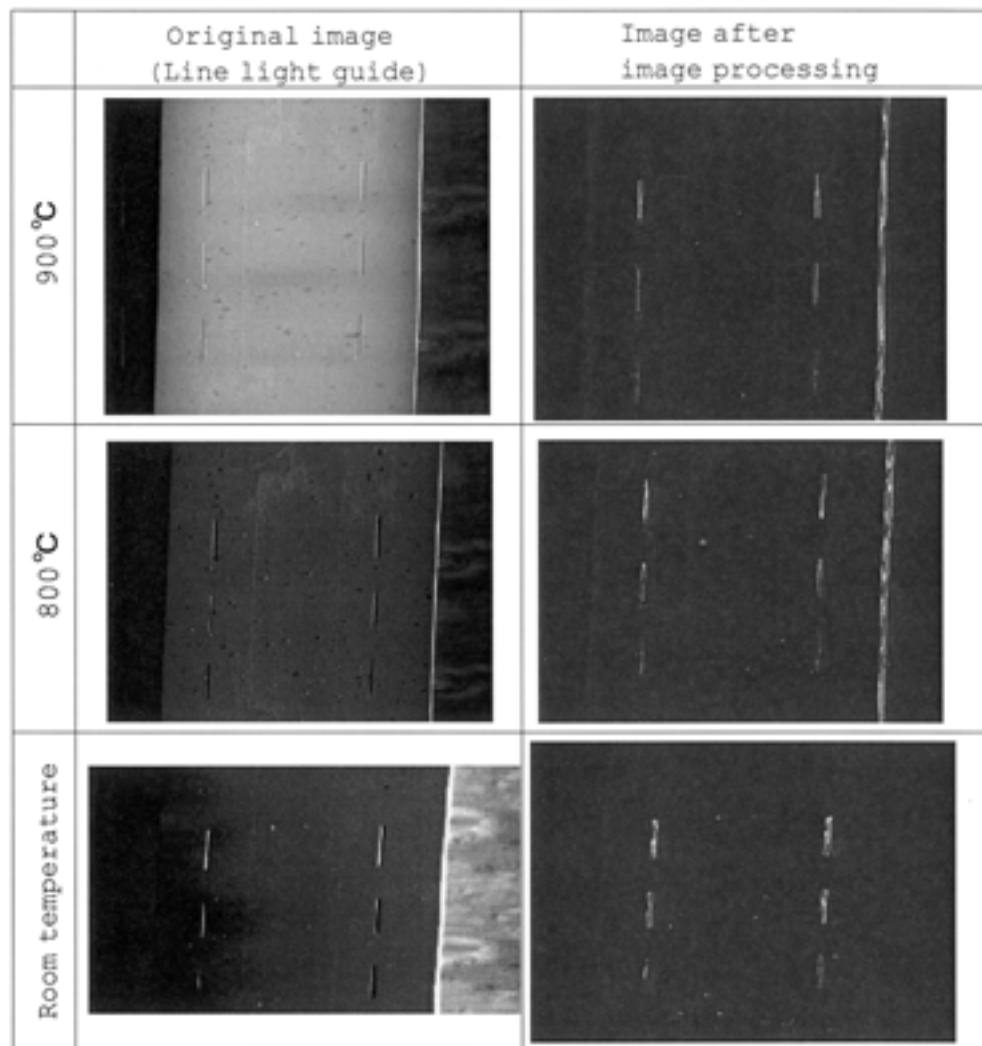


Fig.12. Results of image processing applied to the image of the hot sample.

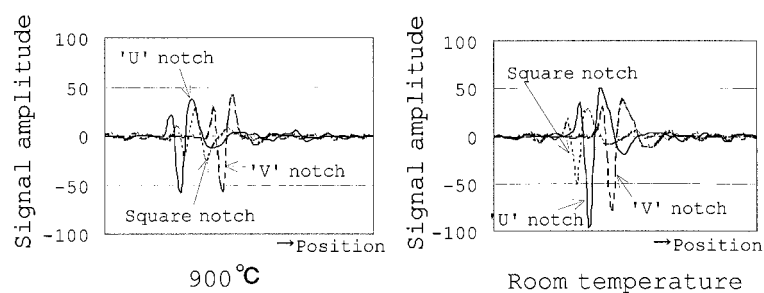


Fig.13. Comparison of notch signals after image processing between heated to 900 °C and after cooled.

が歪んだように見える。きず判定方法として、板幅方向にバンドパスフィルタ処理した後、長手方向の連続性をチェックすることによって、ノイズ除去する処理が有効であるが、歪んだ像に対してそのまま適用すると、かききず

のような直線状のきずが曲線として認識される可能性がある。現場テストで撮影した画像をもとに検討した結果、側面からの照射の場合は、鋼材のエッジ位置が検出可能であるため、エッジ信号によって蛇行を補正することで、か

ききずのような直線状のきずを正確に判定できる見込みを得た。

7. 結 言

本報告では、熱間圧延される平角材の設備起因のきずをより早く検出するため開発を進めている熱間での光学式表面きず検査装置について紹介した。設備起因のきずは、開口した比較的浅いきずであるため、圧延材の側面方向から 5° 以下の浅い角度で平行光ガイドにより光を照射する方法が有効であることを確認した。

人工欠陥サンプルでの熱間テスト、および現場テスト機による調査の結果、目的とした深さ0.2 mm程度の浅いきずを検出できる見込みを得た。なお、現場テストについては、現在も継続中であり、実用化に向けた開発を推進中である。

(文 献)

- 1) 高橋哲生, 田代慎太郎: 電気製鋼, 71(2000), 237.
- 2) 奥野 眞, 虎尾彰, 戸村寧男, 辻本雅巳, 大井啓二:
CAMP-ISIJ, 12(1999), 286.
- 3) 羽田野勇治, 畠中信夫, 古手川純一: CAMP-ISIJ, 12
(1999), 287.
- 4) 設楽英太郎, 小出正人, 田中和信, 大槻桂三, 田中薫, 福
高善己: CAMP-ISIJ, 12(1999), 285.
- 5) 竹腰篤尚, 狩野久宣, 前田孝三, 櫛田靖夫, 岩永賢一:
NKK技報, 152(1995), 50.
- 6) 横山廣一, 石原道章: 非破壊検査, 46(1997), 481.
- 7) 上杉満昭, 山本倫久, 坪井邦夫, 山下元, 小森重喜, 松村
勝己: 鉄と鋼, 70(1984), 1188.
- 8) 岩崎全良, 中井康秀, 西元善郎, 辻邦夫, 広瀬勇, 小林章:
鉄と鋼, 70(1984), 1194.
- 9) 渡邊裕之, 富松正宏, 磯部伸一: 第8回表面探傷シンポジ
ウム講演論文集, (2005), 117.
- 10) (社)計測自動制御学会“温度計測部会”編: 新編温度計
測, (1992), 187.
- 11) 株式会社モリテックス 総合カタログ.