

技術報告

鑄片熱間表面疵自動検査装置の開発

上杉 満昭*・山本 倫久*・坪井 邦夫*
山下 元*²・小森 重喜*²・松村 勝己*³

The Development of a Surface Flaw Inspection System for Hot Continuously Cast Slabs

Mitsuaki UESUGI, Tomohisa YAMAMOTO, Kunio TSUBOI,
Hajime YAMASHITA, Shigeki KOMORI and Katsumi MATSUMURA

Synopsis :

A surface inspection system for hot continuously cast slabs has been developed. The system was designed so as to automatically detect harmful longitudinal cracks, with a width over 0.5 mm and a length over 50 mm, discriminating them from longitudinal dents. The principle of crack detection is based on the fact that a shadow is produced only at a crack by an appropriate lighting condition. Longitudinal cracks are automatically recognized, using an image processing technique, from the image of slab surface obtained by a line scan camera under the lighting condition.

Prototype equipment was manufactured and provided to experiments in order to confirm the performance of the system. On-line experiments showed good results under the good surface condition, namely, the system could inspect harmful longitudinal cracks on the slab surface travelling at a speed of 60 m/min in a real-time manner.

Based on these experimental results, the on-line equipment inspecting longitudinal cracks is now planned to be installed in Fukuyama Works of NKK.

1. 緒 言

近年、連続鑄造と、これに続く一次ミルでは、その一貫歩留りの向上と、エネルギー原単位の低減とを目的として、熱片装入や直接圧延が積極的に志向されている。

このような製造プロセスの直結化にあたっては、連続鑄造工場の操業管理や、上工程の下工程に対するスラブの品質保証の観点から、スラブの表面、表層下および内部に発生する種々の欠陥を、熱間状態でしかもオンラインで自動検査できる装置の開発と実用化が不可欠であると考えられる。

一般に、スラブの欠陥検査は、その欠陥が多岐にわたるため、必ずしも同一の設備でなしとげられる性格のものではなく、それぞれの欠陥の発生部位や物理的性状によつて、それぞれ異なつた検出方式をとらざるをえない。当社では、これらの欠陥のうち、将来にわたつて完全に無くすることが困難であると予想され、かつ圧延時に欠陥が拡大し顕在化する傾向のある縦割れ疵に重点をおいて優先的に開発を行うものとした。

縦割れ疵の検査は、従来から、検査員が目視で行つてきた経緯からもわかるように、ビジュアルな検査が容易であることから、自動疵検査方式の採択にあたっては、非接触でかつ広い面積を同時に検査可能な光学方式によつて疵を検出し、画像処理方式を用いて疵を識別するのが最も有利であると判断し、この方式を採用した。

光学方式を用いたスラブ熱間表面疵検査方式としては、これまでに放射光撮像方式¹⁾²⁾や、片側照明による反射光撮像方式³⁾が提案されているが、当社では、以下のような点を考慮して、両側照明による反射光撮像方式を採用した。

1) 反射光撮像方式の採用

本装置の設備化にあつて設備コストを低減するために、装置をおのおののストランドごとに設置するのではなく、各ストランドのスラブが集合して搬出される温片搬出用のローラテーブル上に据えつけるものとした。したがつて、スラブ表面温度は 700~800°C と比較的低温であり、かつ、温度のばらつきも大きいため、放射光撮像方式に比べて、より安定した測定条件が得られやすい

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 11 日受付 (Received Nov. 11, 1983)

* 日本鋼管(株)システム技術研究所 (Systems & Control Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K. K.)

*³ 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K.)

反射光撮像方式を採用した。

2) 両側照明方式の採用

連続鋳造スラブの表面には、縦割れ疵と類似した無害の表面形状として、縦くぼみが存在する。したがって、縦割れ疵の検出にあたっては、縦割れ疵を縦くぼみと区別して検出する必要がある。本装置では、縦割れ疵に対して、両側から照明する方式を採用することにより、縦くぼみの誤検出を回避した。

本報告では、当社が開発した光学式のスラブ表面疵検査方式の概要と、試作機を用いたオンライン実験結果について報告するとともに、本方式の設備化の計画の概要を紹介する。

2. 連続鋳造スラブ表面疵の性状

連続鋳造スラブの表面には、Fig. 1 に示すように、割れ疵に類似した各種の表面性状が存在している。

これらのうち、スラブの長手方向にのびた表面性状としては、縦割れ疵と縦くぼみとがあり、一方、スラブの幅方向にのびた表面性状としては、コーナー横割れ疵とオッシレーションマークとがある。

これらの性状のうち、圧延後、製品の表面欠陥として害を及ぼす可能性の高い有害な表面性状は、縦割れ疵とコーナー横割れ疵とであり、なかでも、縦割れ疵は、どのような連続鋳造設備においても普遍的に発生し、かつ有害度の高い表面性状であつて、その自動検査が最も強く望まれている疵である。

縦割れ疵は、マクロにみると、無害な表面性状である縦くぼみと類似しており、さらに、Table 1 に示すよう

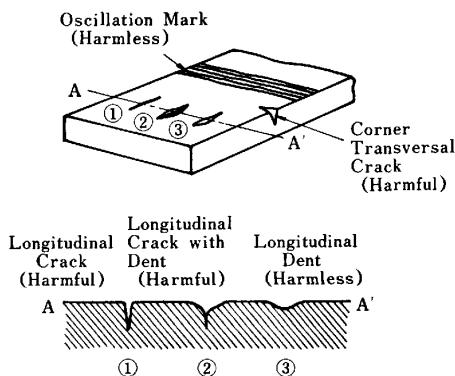


Fig. 1. Surface flaws on CC slab.

Table 1. Relation between dent size and crack generation.

Length of longitudinal dent (l mm)	Ratio of dent with longitudinal crack
50 ≤ l < 100	11.1%
100 ≤ l < 200	21.6%
200 ≤ l < 400	63.6%
400 ≤ l	50.0%

Table 2. Detecting conditions.

Item	Detecting conditions
Coverage	Longitudinal crack wider than 0.5 mm longer than 50 mm [Requirement] Not to detect dents and oscillation marks
Slab surface temperature	700~800°C [Requirement] Not to be affected by radiation from slab surface
Slab travelling speed	60 m/min [Requirement] To permit real-time processing

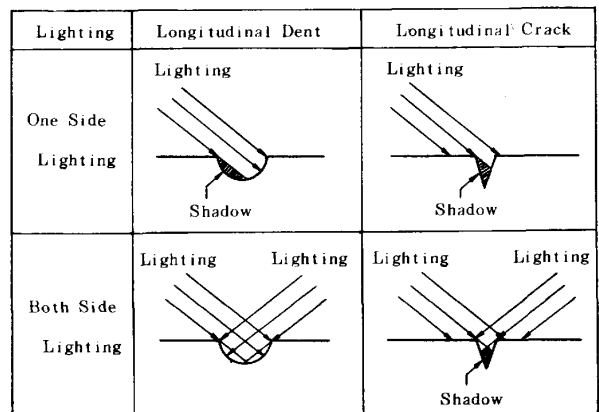


Fig. 2. Principle of flaw detection.

に、縦くぼみ中に縦割れ疵が発生している場合も多い。したがって、縦割れ疵の検出にあたっては、縦割れ疵を縦くぼみと区別して識別できることが肝要であり、自動検出方式の開発に際して、とくにこの点を考慮することが必要である。

以上述べたような縦割れ疵の性状や目視判定による有害疵の検出レベル、さらには設備設置条件などを考慮して、表面疵自動検査装置の開発目標を、Table 2 のように設定した。

3. 検出原理

Fig. 2 に、本方式の検出原理を示す。

この方式は、スラブ表面に外部から適当な角度で光を照射したとき、割れ疵部で照明の影ができることに着目して縦割れ疵を検出する。

照明方法は、縦割れ疵と縦くぼみとの弁別を容易にするために、両側照明法を採用した。すなわち、スラブ表面を片側から照明すると、割れ疵部だけでなくくぼみ部においても影が生じて、これらの弁別が困難であるのに対して、両側照明を用いれば、影は割れ疵部でのみ生じるため、縦割れ疵を縦くぼみと区別して検出することが可能である。

また、照明角度は、スラブから切り出した多数の縦割れ疵サンプルを用いた実験の結果、45° 方向からの照明

が、縦割れ疵と縦くぼみとの弁別性が最もよかつ縦割れ疵部の影が最も鮮明に見えることが明らかとなり、最終的に、45°の角度からの両側照明方式を採用した。

4. 信号処理方式

上記の検出原理を用いてスラブ表面を観察して得られる画像中で、縦割れ疵部は、次のような特徴をもっている。

- 1) 周囲より黒い。
- 2) 幅が狭い。
- 3) 長さが長い。

本信号処理方式は、これらの3つの特徴に着目して、スラブ表面画像の中から有害な縦割れ疵のみを抽出し識別する。

Fig. 3 に、信号処理の概念図を示す。

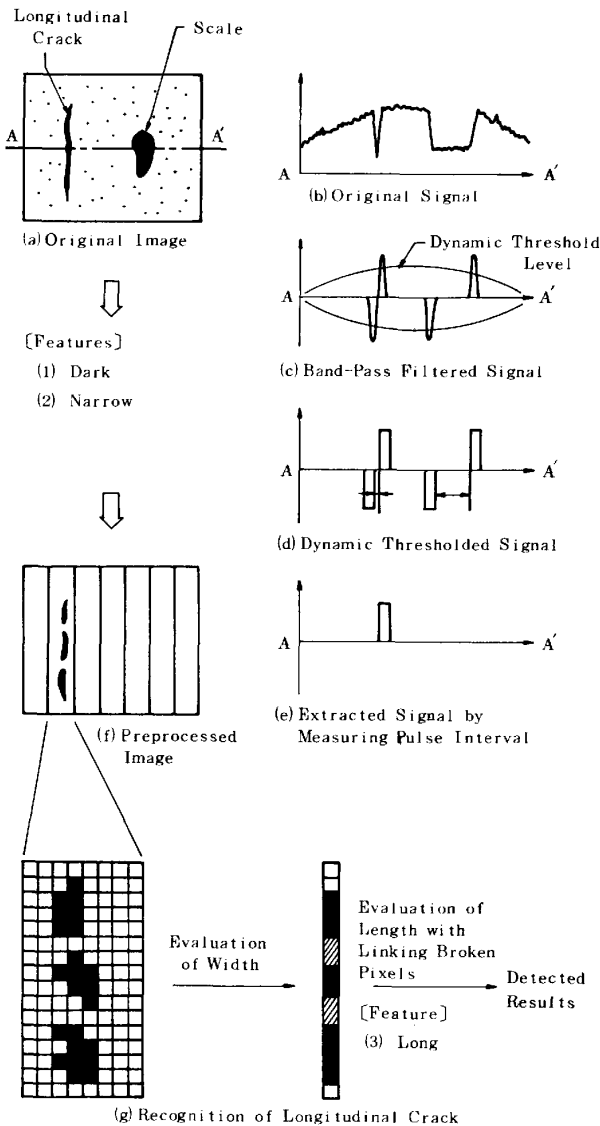


Fig. 3. Signal processing flows.

この処理は大別して、原画像の中から縦割れ疵のみを効率的に抽出する疵抽出処理と、抽出された縦割れ疵の有害性を判定する疵判別処理とからなっている。

疵抽出処理は、上記の縦割れ疵の特徴のうち、1)と2)の特徴に着目した処理であり、縦割れ疵と直交する方向へのバンドパスフィルタリングにより周囲より黒いパターンを強調し、さらにフィルタリングによつて得られる正パルスと負パルスの間隔を測定することによつて幅の狭い信号のみを抽出する。

一方、疵判別処理は、上記の縦割れ疵の特徴のうち、3)の特徴に着目した処理であり、疵幅方向の密度判定と、疵長方向の断点接続を含む判定とからなっている。この処理は、疵抽出処理の結果得られる2値画像に対して施されており、縦割れ疵の方向に沿つて分割された短冊状の領域ごとに処理される。なお、これらの短冊状の領域は、1/2 ずつオーバーラップして設定されており、スラブ表面上を斜めに走る縦割れ疵に対する見落としの確率を小さくしている。

5. 試作設備

以上の検討結果をもとにして、オンライン実験用の疵検査装置を試作した。

Fig. 4 に、試作した装置の検出ヘッドの構成を示す。

照明用の光源は、赤熱したスラブからの放射光と弁別しやすいスペクトルをもつ光源として、超高圧水銀灯を用いており、光源より出た光を、2枚の直交するシリンドリカルレンズ系を用いて帯状の平行光にしたのち、検出ヘッド下部のミラーを介して、スラブ表面上に45°の角度で照射する。

一方、撮像装置としては、1:1の開口比をもつ1024素子のラインスキャンカメラを用いており、スラブ幅方向300mmの視野を観察できるようにセッティングされている。ラインスキャンカメラは、周期1μsのクロックを用いてスキャン周期1msで駆動されている。したがつて、60m/minで走行するスラブに対して、幅方向0.3mm、長手方向1mmの分解能でサンプリング可

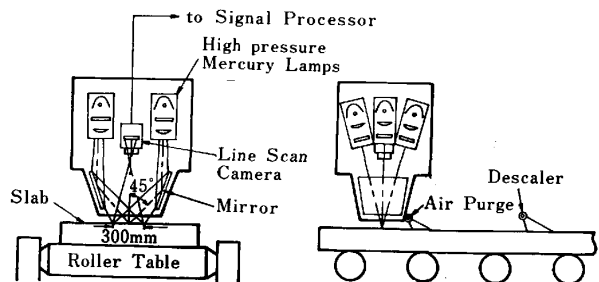


Fig. 4. Configuration of optical section.

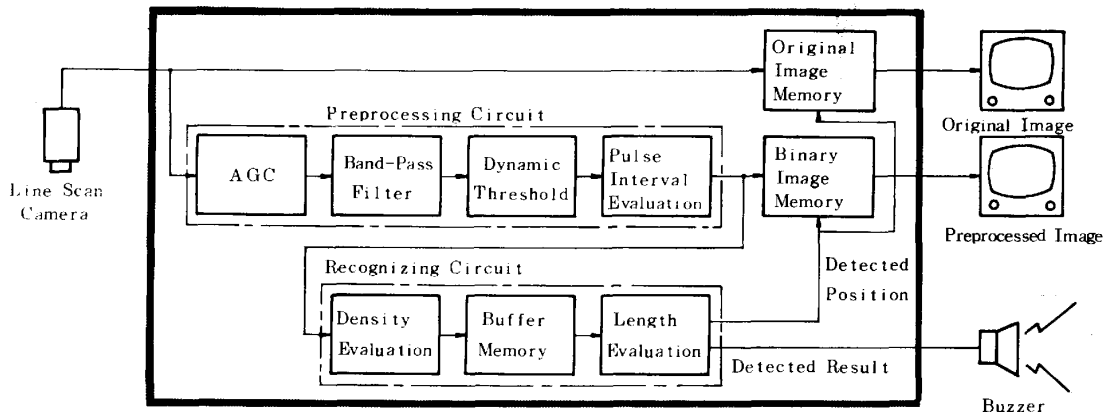


Fig. 5. Configuration of signal processor.

能であり、これによつて幅 0.5 mm、長さ 50 mm 以上の縦割れ疵の識別を可能としている。なお、カメラのレンズには、波長 4300 Å 近傍の光を選択的に透過するフィルタを取り付けて、赤熱スラブ表面からの放射光を遮断しており、表面温度 900°C 以下のスラブからの放射光が、超高压水銀灯による反射光に対して、十分低いレベルに抑えられるようにしている。

本検出ヘッドは、温片搬出用のローラテーブル上に取り付けられている。検査にあつては、あらかじめ、スラブ表面上に付着しているスケールを、150 kgf/cm² の高压水流を噴射するデスクレーを用いて除去する。また、デスクレー時に発生する水蒸気やダストの影響を除くために、検出ヘッド下部には、エアページ機構が設けられており、さらに、検出ヘッド直下でのスラブ表面の温度ゆらぎの影響を抑えるために、検出ヘッド内部は N₂ ガスでページされている。

Fig. 5 に、信号処理装置の構成を示す。

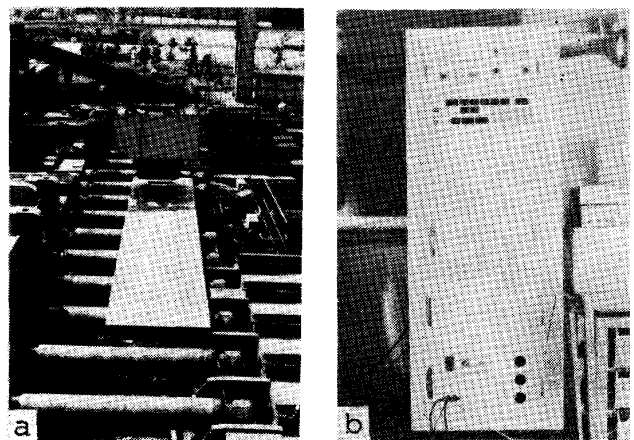
ラインスキャンカメラによつて得られたスラブ幅方向の反射輝度信号は、各スキャンラインごとに疵抽出処理を施されたのち、いつたん、2 値画像メモリに貯えられ、そののち、疵判別処理回路によつて、画面内の縦割れ疵の有無を判別される。疵検出結果は、ブザーによつてオペレータに知らされるとともに、疵検出位置が、スラブ表面画像に重畳して、モニタテレビ上に表示される。

これらの処理回路はすべて、ハードウェアロジックで構成されており、60 m/min で走行するスラブの表面をリアルタイムで全面検査できるよう、1 画面当たり 100 ms 以下の演算時間となるように設計されている。

試作した疵検査装置の外観を、Photo. 1 に示す。

6. 実験結果

本装置の縦割れ疵検出能を確認するために、スラブよ



(a) Optical section

(b) Signal processor

Photo. 1. Appearance of automatic inspection system for cc slabs.

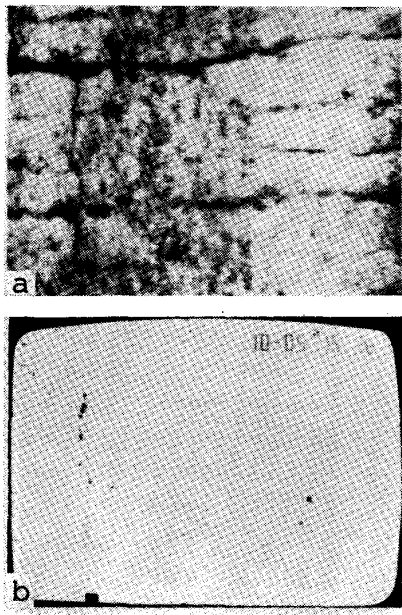
Table 3. Experimental results of cold tests.

No.	Crack width	Crack length	Surface condition	Harmfulness	Detected*
1	0.5-0.7 mm	75 mm	Oscillation mark	Harmful	100%
2	0.5-1.0 mm	85, 40, 140 mm	Flat	Harmful	100%
3	0.5-0.7 mm	130 mm	Flat	Harmful	92%
4	0.7-1.0 mm	150 mm	Flat	Harmful	100%
5	0.3-0.5 mm	70 mm	Dent	Harmless	63%
6	0.2-0.5 mm	50, 40 mm	Dent	Harmless	22%
7	None		Dent	Harmless	0%
8	None		Oscillation mark	Harmless	0%

* Number of tests=20 runs
 [Remarks] The longitudinal crack of sample No.3 runs obliquely on the slab surface.

り切り出した縦割れ疵サンプルを用いて、検出能確認実験を行つた。実験にあつては、サンプル表面のスケールは、あらかじめ酸洗により除去した。Table 3 に検出結果を示す。

この実験の結果、本装置が、基本的な性能として、幅 0.5 mm、長さ 50 mm 以上の縦割れ疵を検出できることが確認された。なお、サンプル No. 3 は、スラブ表面上を斜めに走っている縦割れ疵であり、このような疵に



(a) Original image
(b) Preprocessed image
View field Width : 300mm Length : 200mm
Photo. 2. Example of crack detection.

Table 4. Experimental results of hot tests.

Results	Crack shape after cooling		Remarks
	Length	Width	
Detected	50 mm	0.5-1.0 mm	Crack width became narrower after cooling.
	150 mm	0.3-0.5 mm	
	60 mm	0.3-0.5 mm	
	50 mm	< 0.3 mm	
	50 mm	< 0.3 mm	
	45 mm	< 0.3 mm	
	40 mm	< 0.3 mm	
	30 mm	< 0.3 mm	
	30 mm	< 0.3 mm	
	30 mm	< 0.3 mm	
Misdetected	300 mm	0.5-1.0 mm	Crack was covered by secondary scale.
Overdetected	Noise (at a part of one slab)		Spots of primary scale remained.

Number of slabs : 31 slabs

については、検出能が多少低下する傾向がみられる。

一方、熱間での縦割れ疵検出能を評価するために、疵の発生しやすい条件下で作業を行い、熱間疵検出能確認実験を実施した。対象のスラブはアルミキルド系の鋼種であり、表面温度は 700~750°C であった。検出例を Photo. 2 に、また検出結果を Table 4 にまとめる。

本実験の結果、スラブ表面のデスケーリング状態がよければ、本装置が、仕様どおりの疵検出能を発揮しうることが確認された。しかしながら、スラブ表面に発生したスケールのむけ残りや、デスケーリング後に発生する 2 次スケールが、疵の過検出や見落としの原因となっており、さらに検出能の向上を図るためには、デスケーラの一段の機能向上が必要とされる。なお、Table 4 において、幅 0.5 mm 以下の縦割れ疵が検出されているの

は、熱間で開口していた疵が、冷却後、開口が狭まったものであると考えられる。

7. 今後の計画

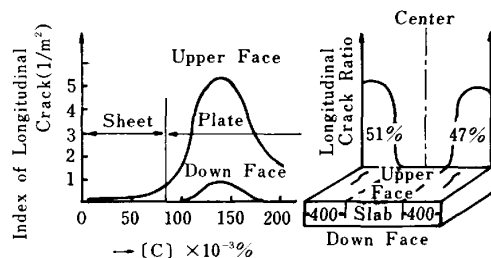
以上述べたような疵検査装置の開発が進められている間、一方で、無欠陥スラブのつくりこみ技術の開発が急速に進展し、疵発生機構の解明や、モールド湯面レベルの制御精度の向上などの成果によつて、現在では、スラブの無手入装入比率は 90% を越えるまでになった。これにともなつて、表面疵自動検査装置に対する要求や機能の制約が大きく変わつてきた。

まず第一に、熱間疵検査に対する要求が、開発当初は鑄造の品質管理を志向するものであつたのに対して、疵発生比率の減少にともなつて、その要求が、圧延工程への無手入装入に対する品質保証を重視するものに変化してきており、より正確な疵検出性能が求められるようになってきた。

第二には、表面疵の発生分布が変化し、品質保証用に限定すれば、スラブ表面の全面検査が不要になつてきた。Fig. 6 に、現在の縦割れ疵発生状況の一例を示す。この図からわかるように、薄板向スラブについては、縦割れ疵は、スラブ上面の両エッジ 400 mm の範囲に集中しており、薄板向スラブの品質保証の観点にたてば、縦割れ疵の検査は、この部分に限定して行えばよいことが判明した。

第三には、直接圧延に対するニーズの増大から、疵検査装置に対する新たな制約条件として、水を使用しないデスケーリング方式の必要性や、高温スラブ (1200°C 以上) の高速搬送 (120 m/min) 下での疵検査の必要性などの条件が課せられるようになってきた。

以上のような状況の変化は、疵検査装置の機能に対する要求としては、より厳しい条件となるものであるが、一方、縦割れ疵の検査範囲が限定されてきた点においては、設備投資が少なくすむ方向であり、これまでに開発してきた疵検査方式をベースとして検討を加えた結果、若干の技術的改良を行えば、十分導入のメリットが



(a) for [C] contents (b) for position (Sheet)

Fig. 6. Distribution of longitudinal crack.

ある設備であると判断し、現在、当社福山製鉄所の薄板向スラブ CC 用に、その実設備化を検討中である。

実設備化にあつての、技術的改良のポイントを以下に示す。

1) デスケーリング機能の向上

水を使用しないデスケーリング方式として、回転ワイヤブラシによるデスケーラを採用する予定である。これによつて、スケール除去効果の向上もあわせて図る。

2) 疵検出機能の向上

疵の見落としや過検出をさらに減少し疵検出能の向上を図ることを目的として、試作機で採用した疵判別機能に加えて、最近めざましい進歩をとげている 2次元高速画像処理演算装置を導入し、ソフトウェアによるさらに上位の疵判別機能を追加する。

8. 結 言

連続鋳造スラブの縦割れ疵検査装置として、光学的な手法を用いた方式を開発した。試作機を用いたオンラインでの検出能確認実験の結果、以下のような結論を得た。

1) 本装置は、スラブの表面状態がよければ、60 m/min で走行する熱間スラブ表面上の幅 0.5 mm、長さ 50 mm 以上の縦割れ疵を実時間で検査することが可能である。

2) 本装置は、縦割れ疵を検出するのに最適な条件を有する両側照明方式を採用したことによつて、縦割れ疵を縦くぼみと区別して検出することが可能である。

3) ただし、本装置の熱間での疵検出能は、スラブの表面状態に依存しており、本装置が十分な能力を発揮するためには、現在の水流噴射方式のデスケーラの機能を上回る性能を有して、鋼種、マシン、鋳造条件などによらずスラブの表面状態を一定に保ちうる新たなデスケーリング技術の開発が必要である。

これらの研究の成果をふまえ、さらには、現在の疵検査に対するニーズと、それに伴う疵検査装置の機能に対する再評価を行つた結果、装置導入のメリットがあると判断し、現在、当社福山製鉄所において、本装置の実設備化を計画中である。

文 献

- 1) 岩崎全良, 木邑信夫, 中井康秀, 西元善郎, 浦本明博, 広瀬 勇: 鉄と鋼, 65 (1979), S 248
- 2) 岩崎全良, 木邑信夫, 中井康秀, 西元善郎, 浦本明博, 広瀬 勇: 鉄と鋼, 65 (1979), S 824
- 3) 橋尾守規, 渡部忠男, 中塚康雄, 相馬正幸, 広島龍夫, 松井健一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 826
- 4) 上杉満昭, 山田健夫, 堀内好浩, 吉野正人, 山下元, 小森重喜, 宮野治夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 138
- 5) 小森重喜, 宮野治夫, 堀内好浩, 吉野正人, 山田健夫, 上杉満昭: 鉄と鋼, 68 (1982), S 164