

熱間スラブ表面疵検出技術

技術報告

岩井邦夫*・大内俊郎*

On-line Inspection Techniques for Surface Detects of Hot Slabs

Kunio IWAI and Toshiro ŌUCHI

Synopsis:

The steel industry has recently started the directly-linked steelmaking-rolling process in order to save energy. One of the techniques supporting this process is the hot slab surface flaw detection. Various methods have been developed to satisfy this need. So far, the optical method, eddy current one, and induction-heating one have been commercialized and are contributing to quality assurance of the continuously cast slabs in steel industry.

This paper presents the characteristic features of each method and also the detail of the induction-heating surface-flaw inspection system developed by Nippon Steel Corporation.

1. 緒言

鉄鋼業においては、省資源、省エネルギー、プロセスの効率化等の観点から、鉄鋼生産工程の直結化、連続化が盛んに推進されている。その代表的な例が、熱間鑄片を冷却することなく圧延工程に直送する、いわゆる連鑄-圧延直結プロセスである。この直結プロセスを実現するためには、幾多の技術的課題があり、主なものは、無欠陥鑄片製造技術、高温鑄片製造および搬送技術、品質保証技術等である。品質保証技術については、オンライン熱間表面疵検出技術が重要な位置を占めており、鉄鋼各社で、レーザ方式、渦流方式、誘導加熱方式等各種方式が盛んに研究開発され、その一部は実用化されている。

本報告では、これら各種のスラブ表面疵検出装置について、その原理、特徴等を簡単に述べ、さらに、当社で実用化されている誘導加熱式スラブ表面疵検出装置について、詳しく紹介する。

2. オンライン表面疵検出の必要性

おのおのの製造工程で、確実な品質保証を行うために必要な計測技術としては、設備・操業の状態を把握するためのプロセス計測と、生産物の性状を直接把握するための品質計測がある。従来は、主として、前者の計測情報を品質特性に関連づけて、当該工程における保証を行っていた。しかし、高品質、低コストを目的とした品質保証を確立するためには、前者をサポートする後者の導入が強く要請されるようになった。特に、工程の連続化、直結化における品質保証には、この品質計測が重要

な位置を占めている。

連鑄-圧延直結プロセスにおいては、連続鑄造されたスラブは、冷却されることなく高温状態で次工程に直送される。このため、スラブ表面疵検査は、例外なく高温雰囲気下で行われることになる。しかも、連鑄スラブの表面疵は、分塊スラブのそれとは異なり、ヘアークラック程度の有害な微細欠陥が大半を占めることからして、従来の検査員による目視検査方式では検出が不可能である。従つて、製造工程内の品質保証用情報として必要とされている高信頼性、迅速性の要求を満たすためには、目視検査方式に代わるオンライン表面疵検出装置の適用が必要となる。このオンライン検出が実用化されると、高精度かつ迅速な表面疵情報は、上工程にフィードバックされ、多量の表面欠陥材の発生を防止するのに利用される。また、本情報は、次工程のマシンスカーフアーにフィードフォワードされ、欠陥の除去を行うことにより、圧延工程へ正常なスラブを供給することが可能になる。このように、鉄鋼プロセスのなかで最も重要なポイントであるスラブ段階で、その表面品質を厳格に検査することは、前後工程の品質管理に、ひいては、ユーザーに対する製品の品質保証に大いに貢献するものである。

3. 各種熱間スラブ表面疵検出装置

3.1 熱間スラブ表面疵検出装置の分類

連鑄スラブは、従来の分塊スラブや、後工程の圧延鋼板とは異なり、その表面性状は、オキシレーションマークやスケールの付着等があり、そのなかに微小有害欠陥が存在しているのが普通である。従つて、連鑄スラブに

昭和 58 年 12 月 12 日受付 (Received Dec. 12, 1983)

* 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp., 1 Nishinosu Oita 870)

Table 1. Typical surface inspection methods of hot slab.

Methods	Sensors	S-N improvement methods previous to flaw detection		Methods	
		Yes	No		
Optical methods	TV-methods	ITV camera	○	○	Stroboscope methods Mercury lamp methods
		Linear-array camera	○	○	Mercury lamp methods
	Laser methods	Photomultiplier	○	○	Ar-laser He-Ne-laser
		Photograph film	○	○	Ar-laser He-Ne-laser
Temperature measuring methods	Pyrometer	○	○	Induction heating methods	
Electromagnetic methods	Eddy current methods	Coil	○	○	D.C. magnetization
	Electromagnetic ultrasonic methods	Coil	○	○	

おける欠陥検出に対しては、種々の方法、くふうがこらされている。これらの方法については、疵検出センサ面から大別すると、①光を利用する方法、②温度を利用する方法、③電磁気を利用する方法、の三通りに分けられ、さらに、疵顕在化(疵の検出感度を上げる)のための前処理の有無、その方法等により細分化される。これらについて、国内外で研究開発、または、実用化されている方法をまとめると、Table 1 のようになり、以下にその個々についての原理、および特徴等を簡単に述べる。

3.2 各種の方式

3.2.1 光学的方法

本方法は、さらに、①ITV 方式、②レーザ方式、③写真方式とに分けられる。

(1) ITV 方式

本方式は、スラブ表面の自発光を取り込み、疵部と健全部との輝度差から疵を検出する方法と、スラブ表面に外部光を投光することにより、疵部の陰影を強調し、健全部との陰影の差から疵を検出する方法の二通りがあるが、S-N 比の高い後者が主に実用に供されている。検出用のカメラは、撮像管と CCD 等の固体素子を使用する場合がある。最近では後者の方が、長寿命、低残像、画像の歪みがない等の理由により多く使用され始めている。本方式の一例として、Fig. 1 に概略を示す¹⁾。

本方式の特徴は、非接触であるため、高速探傷が可能であり、かつ、高稼働率が維持できるが、その反面、0.5 mm 程度以上の開口幅をもつた大きな疵しか検出できない。

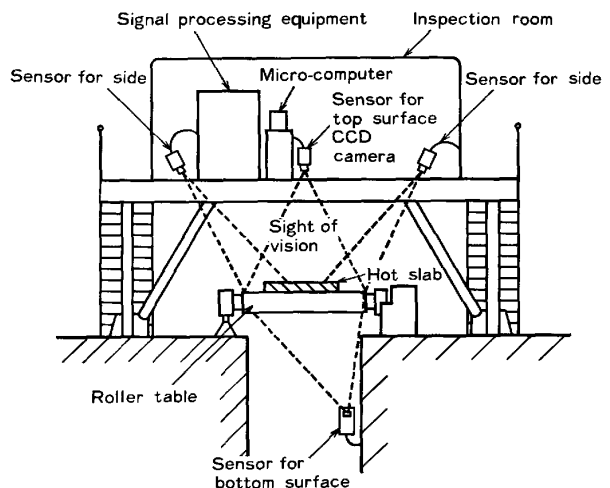


Fig. 1. Schematic diagram of CCD camera inspection system¹⁾.

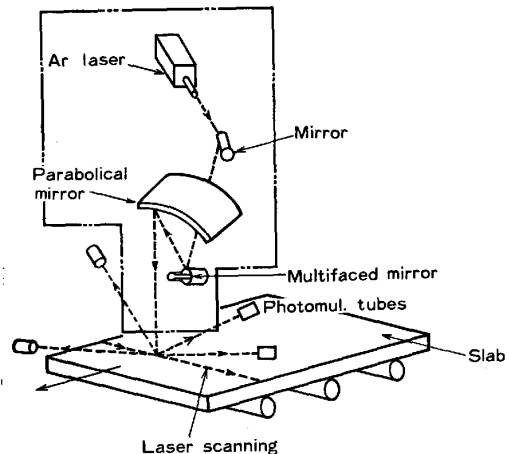


Fig. 2. Schematic diagram of laser scanning inspection system¹⁾.

(2) レーザ方式

本方式は、スラブの表面を微小スポットを有するレーザ光で照射し、その反射光の強弱を光電子増倍管で検出する。さらに、特殊なフィルタを用いて、反射光の回折パターンを検出し、疵種類を認識することが可能である。また、検出端として、写真や ITV で撮影する方法も行われている。レーザ光としては、一般に、アルゴンレーザや、ヘリウムネオンレーザが使用されている。

本方式の特徴は、非接触であるため、ITV 方式と同様に、高速探傷、高稼働率維持が可能であるが、微小スポットによる検出とは言え、0.4 mm 程度以上の開口幅をもつた疵しか検出できない。本方式の一例を、Fig. 2 に示す¹⁾。

(3) 写真方式

本方式は、スラブ面上をフィルムで連続的に撮影し、迅速現象によつてネガフィルムを作成し、そのフィルムをプロジェクターにより投影して、人間が監視し疵判定

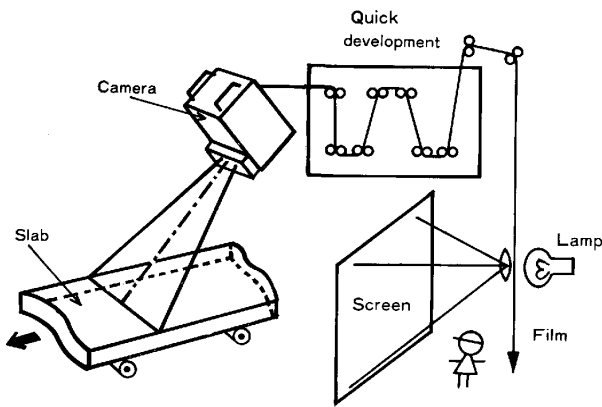


Fig. 3. Schematic diagram of photograph system.

を行う。スラブ面上を直接 ITV カメラで撮るよりは、フィルムと ITV との分解能の差から、フィルムの方が鮮明な画像が得られる。

本方式の特徴は、レーザ方式と同様に 0.4 mm 程度以上の開口幅をもつた疵しか検出できない。また、疵判定までを含んだ完全自動化は困難と考えられる。本方式の一例を、Fig. 3 に示す。

3.2.2 温度検出方法

(1) 温度計方式

本方式は、スラブ面上を微小スポットを有する放射温度計で走査し、その温度の変化から疵を検出する方法である。放射温度計は、スラブ面上からの放射エネルギーの波長分布を考慮して、赤外線温度計が使用されている。

本方式も顕在化が有る場合と無い場合があり、前者の代表的な例が、後述する誘導加熱による「熱間スラブ表面疵検出装置 (UKS)」である。後者の顕在化の無い場合は、一般的には、測定視野の大きさ程度の開口幅をもつた疵以上しか検出できない。

3.2.3 電磁気的方法

(1) 渦流方式

本方式は、コイル直下のスラブ表面を走査し、2次磁界によるインピーダンスの変化分を疵として検出する方法である。前述の光学的方法は、開口幅をもつた疵しか検出できないなど検出能に限界があつたため、本方式が開発された。

本方式の特徴は、開口幅をもたなくとも 2 mm 程度以上の深さをもつた疵の検出が可能である。しかし、そのためには高性能のコイルの開発、スラブとコイルのギャップ (リフトオフ) を一定に保持するための追従機構の開発が必要である。本方式の一例を、Fig. 4 に示す¹⁾。

(2) 電磁超音波方式

表面波の発生は、スラブの表面におかれたコイルに高

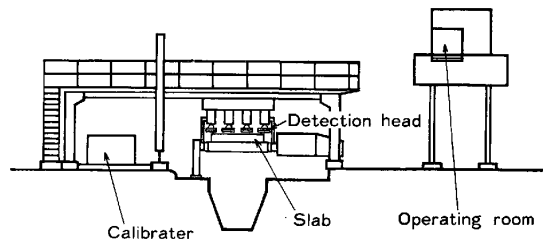


Fig. 4. Detecting head arrangement of eddy current system¹⁾.

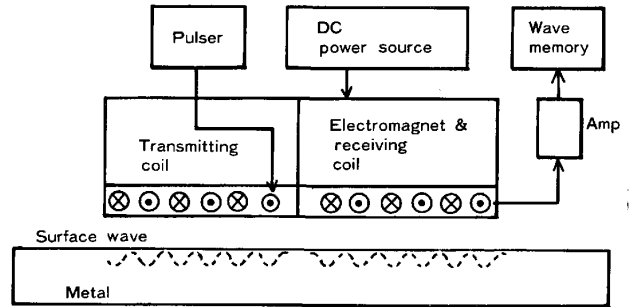


Fig. 5. Schematic diagram of electromagnetic-ultrasonic testing apparatus²⁾.

周波電流を流したときに誘起される渦電流と磁界の相互作用により生じる。表面波の検出は、逆に欠陥から反射した表面波と磁界の相互作用により行われる。

本方式の特徴は、一つのプローブで広い面積をカバーでき、特に、コーナー部の探傷に有利である。現在、本方式は、冷間スラブで開発が開始されているが、今後、熱間へと研究範囲が拡大されると思われる。しかし、本方式の検出端の追従方法は、他方式以上に厳密さが要求される。表面波発生の一例を、Fig. 5 に示す²⁾。

4. 誘導加熱式熱間スラブ表面疵検出装置

4.1 経緯

当社では、分塊スラブ用に種々の表面疵検出装置の開発、実用化が進められてきた。しかし、これらは連铸スラブ用には適用できなかつた。その理由は、連铸スラブは分塊スラブとは異なつた表面状態にあるとともに、表面疵の種類、発生状況も異なつているためである。すなわち、連铸スラブは、分塊スラブに比して凹凸等が多い表面状態のなかに微小疵が点在している。このような状態での疵検出には、疵部分のみを顕在化するための手段と、その顕在化した疵を的確に検出するためのセンサの開発、実用化が必要になる。このような観点から、基礎的研究を広畑製鉄所で、実機化を大分製鉄所で行つて開発されたのが本装置であり、当社ではこれを「UKS」(U-doh Kanetsu Slab tester) と称している。

4.2 UKS の原理

UKS は、誘導加熱によつてスラブ表層部を瞬間的に

加熱昇温させる。表層部に渦電流を妨げる疵がなければ、表層部は一様に昇温するが、疵がある場合には、渦電流の迂回が長さ・深さ方向に起こり、電流集中を引き起こす。この結果、疵なし部に比してスポット状の昇温部が発生する。昇温部と疵なし部との温度差 ($\Delta\theta$) を微小視野温度計により测温し、温度変化のある部分を疵として取り出す。UKS の原理³⁾を、Fig. 6 に示す。

4.3 UKS システム構成

本システムは、①インパクトクーラー；1式、②做い装置；4式、③高周波誘導加熱装置；4式、④赤外線温度計および信号処理装置；4式、⑤情報処理装置；1式等から構成されている。UKS の構成を、Fig. 7 に、主仕様を、Table 2 に示す。以下に各構成要素別に概説する。

4.3.1 インパクトクーラー

本装置は、二つの目的を有している。すなわち、①誘導加熱効率を上げるために、非磁性域にある表層部をキューリー点以下に冷却し強磁性域に入れる。②表面のスケール等附着物を除去することである。このために、多数のノズルが配置され、3 kg/cm² の低圧水で冷却を、

80 kg/cm² の高圧水でデスクーリングを行つている。本装置は、特に、冷却に関しては特別なくふうがなされている。すなわち、①表面温度のみを下げて、平均温度は可能な限り下げないために、2~3 m³/m²·min の高水量密度による急速冷却を行つている。②均一冷却を行うために、インパクトクーラーの前段ほど強力冷却を行つている。なお、本装置によるスラブの平均温度低下は、UKS 探傷後で 1000°C に対し約 40°C、圧延加熱炉入側で 850°C に対し約 25°C である。

4.3.2 做い装置

本装置は、誘導加熱用コイルと赤外線温度計をスラブ表面と一定の間隔で做わせるためのものである。特に前者は、誘導加熱効率を上げるために、その間隔は 4 mm 程度に維持する必要がある。このために、コイルと連結したタッチロールがシリンダーでスラブ表面に押し付けられて、スラブの上下運動にも追従する構造となつている。

Table 2. Main specification of UKS.

No.	Item	Q'ty	Main specifications
1	Impact cooler	1 Set	Descaler ; 80 kg/cm ² Cooler ; 3 kg/cm ² , volume ; 60 m ³ /min. (Max)
2	Following device	4 Units	Method ; Air spring cushion
3	H-F-induction heating device	4 Units	Output ; 320 kW, Frequency ; 135 kHz Heating coil ; Flat type
4	Infrared pyrometer device	4 Units	Instantaneous field of view ; 1 m rad NETD ; 1.5°C, Scanning speed ; 80 Hz Automatic focus correction
5	Mini. computer	1 Set	Main memory ; 248 KB (IC memory) Input/output ; T/W, L/P, CRT, etc.
6	Sequencer	1 Set	Main memory ; 48 KB
7	Auxiliary equipment	1 Set	Slab edge position detector(2 units) Pyrometer (1 unit), Speed meter (1 unit)

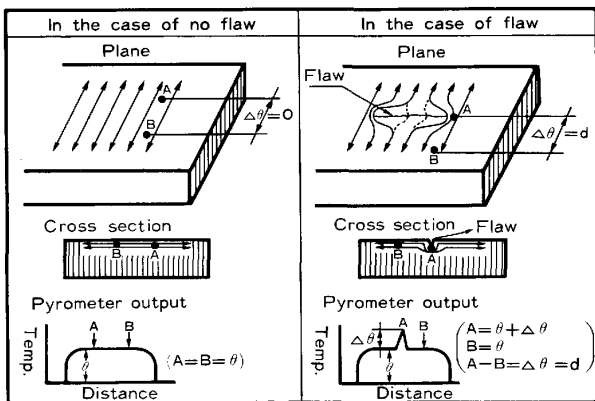


Fig. 6. Principle of UKS³⁾.

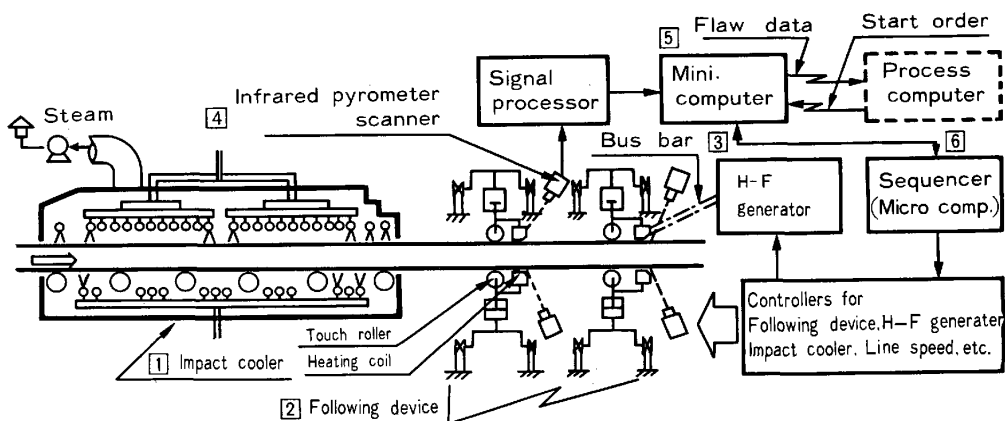


Fig. 7. Schematic diagram of UKS system.

4.3.3 誘導加熱装置

本装置は、表面近傍の疵を顕在化させるために、高周波電力を発生する電子管式高周波電源と、スラブに磁束を集中、投入する加熱コイルと、その他保護装置から成っている。

高周波電流は、顕在化の効率を上げるため、その浸透深さを浅くし、表層部のみを加熱する。これに使用されている高周波電源は、100~150 kHz、250~300 kW/式の出力である。高周波電源としては、サイリスタインバーター方式と電子管方式があるが、前者は、50 kHzが上限であるため、後者の電子管式を採用した。

加熱コイルは、スラブ幅方向に細い線状に磁束を集中させ、そこでの極部昇温を高めることを目的として開発された。また、このコイルは、高電圧・高電流・高周波のため、コイル内部の発熱も大きく、さらに外部からの輻射熱も大きいため、コイル鉄芯、絶縁物および耐火物の選択が重要である。

4.3.4 赤外線温度計および信号処理装置

本装置は、疵昇温を含む表面温度を検出する赤外線温度計と、疵信号を抽出する信号処理装置から構成されている。

赤外線温度計は、疵部に発生するスポット状の昇温を検出するために、それ以下の小さい視野径を有している。本温度計は、スラブ幅方向に走査する時に光路長の差が生じ、それにより視野径が変化する。この視野径を一定に保つために、幅方向走査に同期した光学系自動焦点補正機構を設けている。感温センサは、出力の大きいCd·Hg·Teを使用しており、温度分解能⁴⁾(NETD: Noise Equivalent Temperature Difference)は、1.5 °C、瞬時視野は、1 ミリラジアンである。

信号処理装置は、高速A/D変換後レーダの信号処理にも良く用いられているCFAR (Constant False Alarm Rate)回路⁵⁾を使用し、疵以外の低周波の背景雑音を除去し、高周波の疵信号のみを取り出すものである。

4.3.5 情報処理装置

本装置は、信号処理装置から伝送されてくる疵信号を収集し、疵レベルの判定、疵面積率の計算、疵マップの作成および後述する疵種類認識等の情報処理を行うとともに、上位のプロセスコンピュータに、その結果を伝送している。

4.4 表面疵の検出性能

4.4.1 疵検出レベル

UKS 探傷は、スラブ表面が健全でも昇温検出値($\Delta\theta$)が生じる。これは、スラブ表面の冷却むら、スケール付着および凹凸等の原因により発生するため雑音と

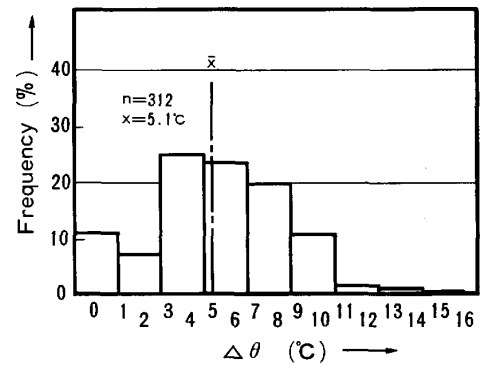


Fig. 8. Noise distribution in UKS.

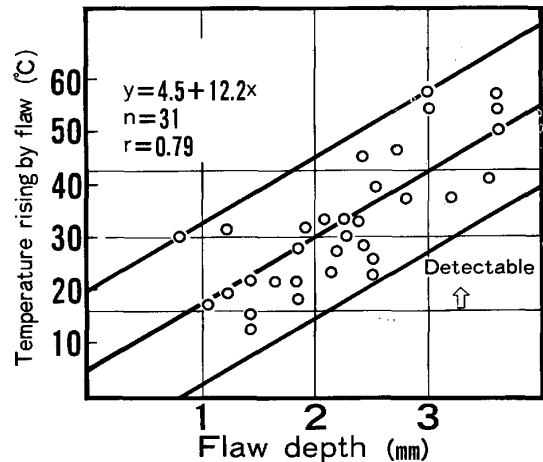


Fig. 9. Detectability for longitudinal cracks on as cast slabs.

なる。この雑音レベルが大きければ、それだけ疵検出能が低下するため、できるだけ小さくする必要がある。UKS による健全部の探傷結果を、Fig. 8 に示す。この結果から、雑音レベルの平均値は 5°C、最大値は 15°C となる。従つて、誤検出を無くすためには、疵検出レベルは 16°C 以上に設定する必要がある。

4.4.2 疵検出能

UKS で探傷し、疵部の昇温検出値が得られたスラブをオフラインし、冷却後、その疵部をグラインダーで削り、疵深さを計測した結果を、Fig. 9 に示す。この図からもわかるように、疵はさまざまな形状をもっているため、同じ疵深さに対しても、昇温検出値は $\pm 15^\circ\text{C}$ の変動幅をもっている。従つて、前述の疵検出レベルを 16°C に設定した場合、縦割れの検出能は、1 mm 深さで約 50%、2 mm 深さ以上で 100% となる。UKS は、Fig. 6 の原理で示すように、スラブ幅方向に渦電流を流すために、スラブ長さ方向に発生する縦割れは渦電流と直交する。このため、縦割れは、検出に十分な電流集中が起こり、1~2 mm 深さの微小疵まで検出が可能となる。一般に、1 mm 深さ程度の疵は、後工程の圧延で

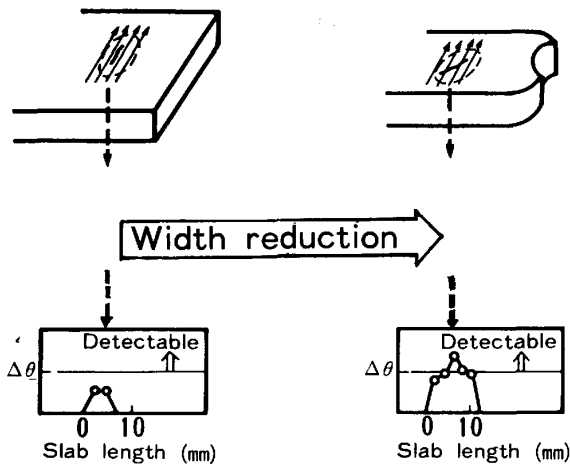


Fig. 10. Increase of transverse cracks detect ability by width reduction.

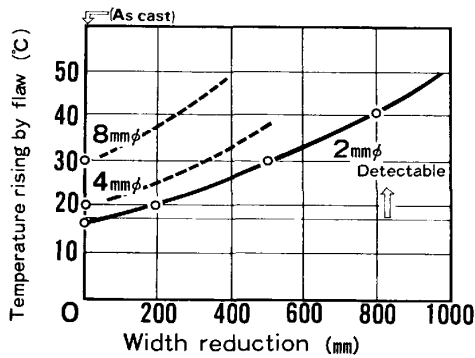


Fig. 11. Detectability for pin-holes on as cast and width reduction slabs.

減少してしまう場合が多く、残存していても無害疵となる。

4.4.3 幅圧下による検出能の向上

横割れは、その発生方向が渦電流の方向と平行であるため、疵部の昇温検出値が小さく、検出は困難となる。しかし、Fig. 10 に示すように、幅方向に圧下することにより、横割れ方向と渦電流方向がしだいに交錯するようになるため、疵部の昇温検出値は大きくなり検出能は向上する。UKS は、スラブ幅圧下プロセス直後に設置されているため、これによる疵顕在化特徴が十分に生かされている。ピンホールは、一般的に円錐形になっており、渦電流の集中は少なく、従つて、疵部の昇温検出値は小さいため、直径 4mm 程度の大きなものしか検出されない。しかし、Fig. 11 に示すように、幅方向に圧下することにより、直径 2mm 程度のピンホールも検出されるようになる⁵⁾。

4.4.4 疵種類認識

疵検出装置では、疵種類の認識が重要であり、それによつて有害の程度や、溶剤手入れの要否を決めることになる。

この疵種類認識法として、まずスラブ面上を小ブロック (50 mm × 50 mm) に細分化し、このブロック内の最大昇温検出値に対して、一定の域値を用いて疵の有無を二値化し、その疵有りのブロックの連続性から、連続疵、または単独疵に大別する。次に連続疵は、その発生方向、形状からパターン認識し、縦割れ、横割れ等を推定し、また、単独疵は、その発生位置、鋼種等による経験則から、ピンホール、介在物等を推定する。さらに、これらの推定疵は、連铸からの異常情報、例えば、ノズル詰まり、モールド湯面変動、パウダー異常等により合理性チェックを行い、最終的に疵種類が決定される。この基本的な考え方を、Fig. 12 に示す。この疵種類認識ロジックによれば、連続疵は 70~80%、単独疵は 20~30% の判明率⁶⁾ であるため、今後、本ロジックの改善が必要である。

4.5 UKS の実施状況

当初、UKS は、次のような諸トラブル、すなわち、疵信号ラインに誘導加熱に使用されている高電圧・高電流によるノイズがのる現象、加熱コイルの自己発熱やスラブ輻射熱による破損、および赤外線温度計の自動焦点補正機構の不良等が多発した。しかし、その都度、次のような諸対策、すなわち、シールドやアース強化によるノイズ防止、コイル鉄芯の形状変更による自己発熱の軽減や耐火物の改良による耐熱性強化、および自動焦点補正機構の磨耗の除去等を行つた結果、現在では、95% 以上の高稼働率を維持し有効に活用されている。

次に、UKS による実用上でのスラブの合否判定例を示す。疵の発生しやすい操業条件下で铸造されたスラブ数百本を UKS で探傷し、そのうち、疵有りと判定されたスラブ 21 本と、疵無しと判定されたスラブのうち 12 本の合計 33 本について、冷間目視検査との比較を行つた。その結果を、Table 3 に示す。冷間目視を基準とすることは、必ずしも正しいとは言えないが、これを一つ

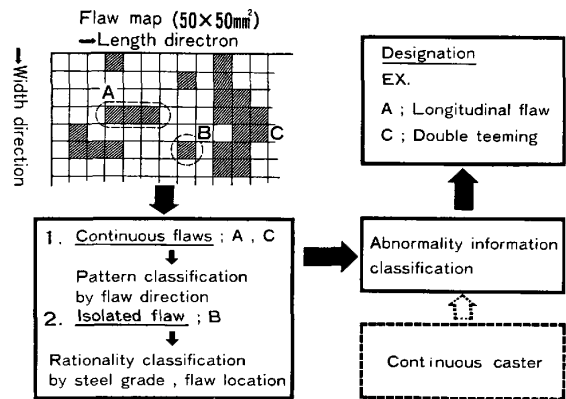


Fig. 12. An example of estimation of flaw type.

Table 3. Relation of flaw detection between UKS and visual inspection.

		Visual inspection results for cold slabs		Performance of UKS	
		Flaws	No-flaw	Delection rate	
UKS	Flaws	16slabs	5	$= \frac{16}{16} = 100\%$	
	No-flow	0	12	Rate of miss detection $= \frac{0}{16} = 0\%$	Over detection rate $= \frac{5}{16} = 33\%$

の尺度と考えるならば、検出率は 100%、見逃し率は 0%、過検出率は 33% となる。また、UKS で疵有り、冷間目視で疵無しと判定したスラブについて、表面の段削りを行い詳細にチェックした結果、そのスラブには疵が存在していることが判明した。これは、UKS が表面下 1 mm 程度のところに存在する内部疵も検出するためである。この例からもわかるように、UKS は従来の冷間目視と同等、またはそれ以上の検出能を有して使用されている。

一般的に、品質保証計測装置の効果は、設置以前の品質、歩留りおよび省エネルギーの水準によつてかわる。これら水準が高い当所においても、UKS の本格的な使用により、直行率向上による温度上昇分からインパクトクーラーによる温度低下分を差し引いた省エネルギーに限定しても、年間数億円の効果を生じている。

4.6 今後の課題

連铸スラブを圧延加熱炉へ熱間で搬入する直行プロセスでは、UKS の実用化により、スラブ表面品質の管理と保証の水準は大いに向上したが、まだ改善すべき点も

多い。今後、検討すべき主な項目を次に挙げる。

- ①疵深さと昇温検出値とのばらつきの減少。
- ②単独発生疵を主体とした疵種類認識レベルの向上。
- ③疵の有害性、無害性の明確化による UKS 疵判定設定値の最適化。

5. 結 言

熱間スラブ表面疵検出装置について、各種方式の原理、特徴等の概要および代表例として、誘導加熱式の詳細を報告した。これらの表面疵検出技術は、分塊スラブ対象にはかなり以前から開発、実用化がなされていたが、連铸スラブ対象には精度的に不満足なものが多く、そのため、新たな研究開発が必要となつた。最近、誘導加熱方式や渦流方式がようやく要求精度を満足して実用化され始めたが、信頼性、および利用方法等において改善すべき課題も多い。今後、関係者のいつそうの努力が望まれる。

文 献

- 1) M. NAKAKURA: IISI/TECHCO/15 (1983), Technical Exchange Session at Brussels, Belgium
- 2) 藤懸洋一, 葉山 聡, 川島捷宏: 非破壊検査, 32 (1983), p. 758
- 3) 田藤競則, 福山 勝, 江頭武二, 大橋徹郎: 鉄と鋼, 66 (1980), S 844
- 4) 北村慎一, 吉田隆造, 吉村恒彦: FUJITU, 33 (1982) p. 517
- 5) 射手由雄, 早野 成, 大内俊郎, 岩井邦夫, 中村良昭, 高村 勝: 鉄と鋼, 68 (1982), S 166
- 6) 岩井邦夫, 福山 勝: 計測技術, 11 (1983), p. 175