

(論文)

## 鋼片磁粉探傷の高精度化

小川岳夫\*・和佐泰宏\*・赤松 勝\*・岡本 陽\*・宮本 均\*\*・田中 浩信\*\*\*

\*技術開発本部・生産技術研究所 \*\*鉄鋼カンパニー・神戸製鉄所・糸鋼圧延部 \*\*\*鉄鋼カンパニー・加古川製鉄所・厚板・線材部

### Improvement of Magnetic Particle Testing System for Steel Billets

Takeo Ogawa・Yasuhiro Wasa・Masaru Akamatsu・Akira Okamoto・Hitoshi Miyamoto・Hironobu Tanaka

At Kobe Steel, steel billets for rod or bar are conditioned after automatic and manual surface flaw inspections utilizing fluorescent magnetic particle testing. The automatic inspection technique was improved recently. Improvement was achieved through optimizing magnetic particle fluid conditions, and the magnetizing and UV lighting used to clarify flaw. Moreover, the flaw images captured by line scan cameras were clarified through two types of filtering and noise removal. It was confirmed that surface flaws larger than 0.2mm in depth and 5mm in length could be detected at factory tests.

まえがき = 線材・棒鋼の表面きず品質管理において鋼片での探傷ときず除去は重要である。当社では自動および目視の磁粉探傷、超音波探傷の実施により、表面近傍まで含めた十分な探傷をおこない、きず取りをおこなっている。ますます厳格化するユーザの表面きず品質要求に対応するとともに、生産性向上や検査コストの低減のためには、自動磁粉探傷の精度向上をおこない、自動化率を高める必要がある。今回、自動磁粉探傷の技術開発により、きず検出対象を現行の深さ 0.3×長さ 10mm 以上から、0.3×5mm 以上へ改善できることを確認し、さらに 0.2×5mm 以上の検出への目途をえた。以下に概要を示す。

#### 1. 現状の鋼片きず見・きず取り

現在当社の鋼片加工工場では、第1図に示すような、角鋼片を対象とする自動磁粉探傷装置が稼働している<sup>1)</sup>。

ショットブラストによりスケールオフされ、25m/minで搬送される鋼片に、蛍光磁粉液が散布される。同鋼片は4極極間マグネットによる回転磁界で走間磁化され、表面きず部に漏洩磁束が生じ、蛍光磁粉が付着する。蛍光磁粉は、鋼片揺動への追従機構に搭載した紫外光源の照明光により可視の蛍光を発生し、エリアカメラできず画像として撮像される。きず画像は、画像処理装置にてフィールドレート(1/60s)で差分処理、縮退処理、線分抽出処理を実行され、きず部が抽出される。鋼片の4面4コーナーで抽出・判定されたきず情報はデータ処理装置

でマップ作成され、鋼片へのマーキング情報、あるいは後段のきず取り工程へのきず位置情報として伝送される。

きず取り工程では、きずマップにしたがい、これらのきずが切削除去される。

#### 2. 検出精度改善の方針

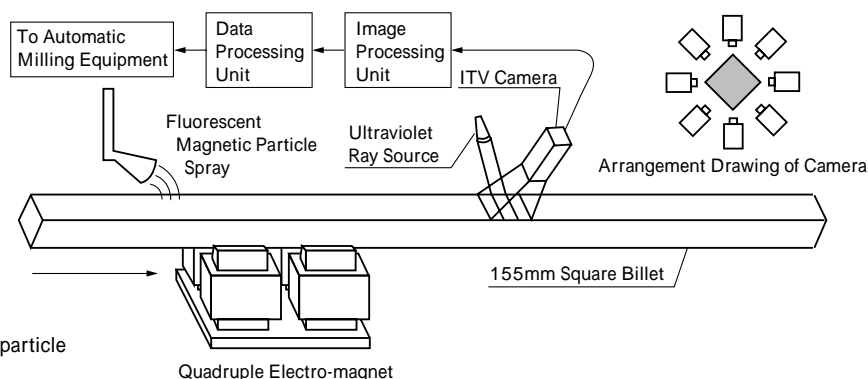
今回の開発にあたり、現行装置の問題を整理した結果、

- 微小きずの輝度向上によるきず画像の明確化
- きず画像の分解能向上
- 微小きずに対応したきず判定の画像処理方法の開発などが必要であると判断した。そのため、磁粉液の散布法、画像取得法、画像処理法など、現行の自動探傷装置を全般的に見直すことにした。今回、目標性能として、目視探傷との対比から 0.3×5mm 以上のきずを 100% 検出、誤検出率を検出きずの 10% 以下に設定した。

##### 2.1 鋼片表面きずへの磁粉凝集の改善

微小きずの輝度向上には、きず開口部への磁粉凝集状態の改善が必要である。磁粉凝集の影響因子として、磁粉種、磁粉液濃度、磁粉液量、磁粉液流速、鋼片の磁化レベル、有効磁化時間などが考えられる。ここでは第2図に示すようなきずへの凝集に対して影響の大きい項目について、ラボ実験を含めた検討結果を示す。

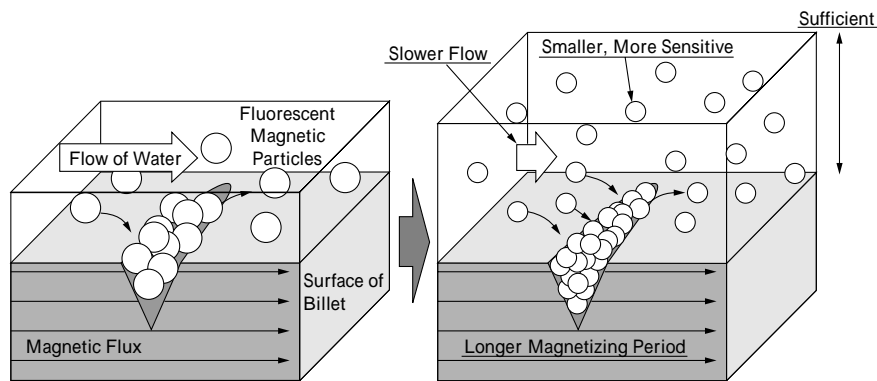
現行自動装置では、主として誤検出低減の観点から、一般鋼材探傷用磁粉を採用している。これに対して粒子径がより微細で磁気感度の高い精密探傷用磁粉が利用可能か検討するため、両者で凝集度合の比較実験をおこな



第1図 現行の自動磁粉探傷装置

Fig. 1 Current automatic magnetic particle inspection system

第2図 きずへの磁粉凝集状況の改善  
Fig. 2 Improvement of magnetic particles condensation onto flaws



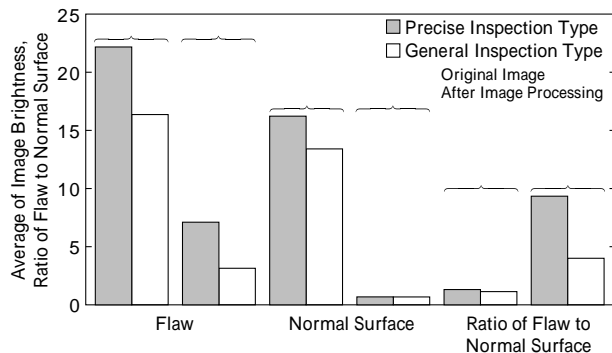
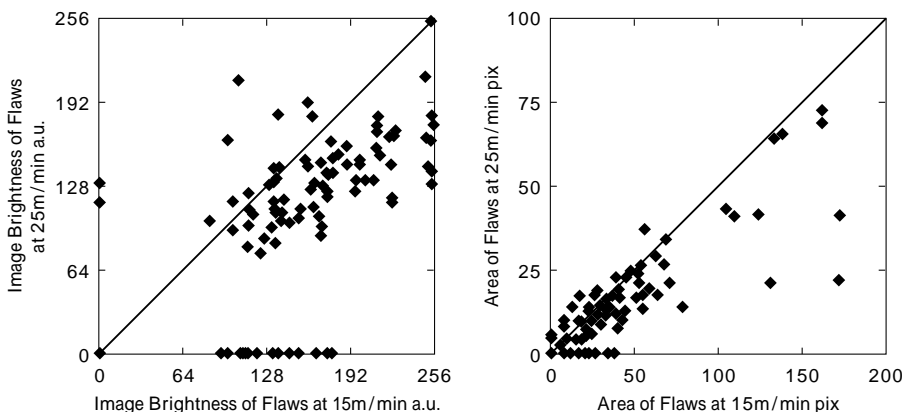
った。精密探傷用磁粉では、きず輝度の向上効果が認められたが、同時に地肌部の輝度も向上した。しかし後述する画像処理の結果、きずと周辺地肌部とのS/Nに顕著な改善が認められ(第3図)、誤検出の増加を抑制しながら検出精度を向上できると判断した。

また、きず周辺への磁粉供給状態の適正化についても検討した。きずへの磁粉凝集状態の改善には、きず周辺への十分な磁粉の供給が必要であり、走間散布である現行装置では、散布量の増加により実現される。いっぽうでこれは、余剰磁粉や磁粉液の流れによるきず部磁粉脱落の増大にもつながる。鋼片試験片をもちい、磁粉液散布ノズルからの散布量(流速にも関係)とノズルの移動速度を変え、最終的なきず輝度を調べるラボ実験をおこなった結果、磁粉液量を表面膜厚として整理すると(第4図)、現状よりも20~30%のきず輝度向上が可能であること、一定量以上散布してもきず輝度は飽和して変化しないことが明確になった。

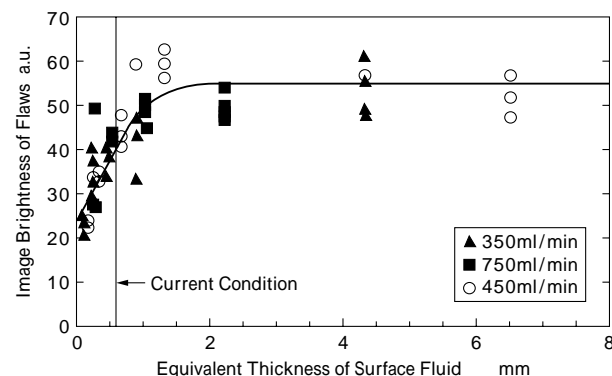
ここで問題は磁化時間との関係である。現行装置では、磁化時間は4極極間マグネット上の通過時間となるが、この時間内に磁粉凝集が完了し、表面での磁粉液流れがおさまらないと、上記のきず輝度向上作用を十分に実現できない。複数の実鋼片で、通材速度の減速で等価的に磁化時間を延長し、きず部磁粉の変化を調べた結果、磁化時間延長によるきず輝度の増加がまだ可能であり(第5図左)、さらに凝集面積が増加すること(同図右)も確認した。面積増加は断続的であったがきず部磁粉が連続的になったため、きずがより明確化されたことになる。なお地肌について、顕著な輝度変化は認められなかった。

以上のとおり、磁粉液散布法の見直しにより、きず全体の輝度が向上し、より微小なきずまで検出できるようになった。

第5図 磁化時間の延長によるきず輝度および面積の改善  
Fig. 5 Improvement of image brightness and area of flaws by lengthening available period to magnetize



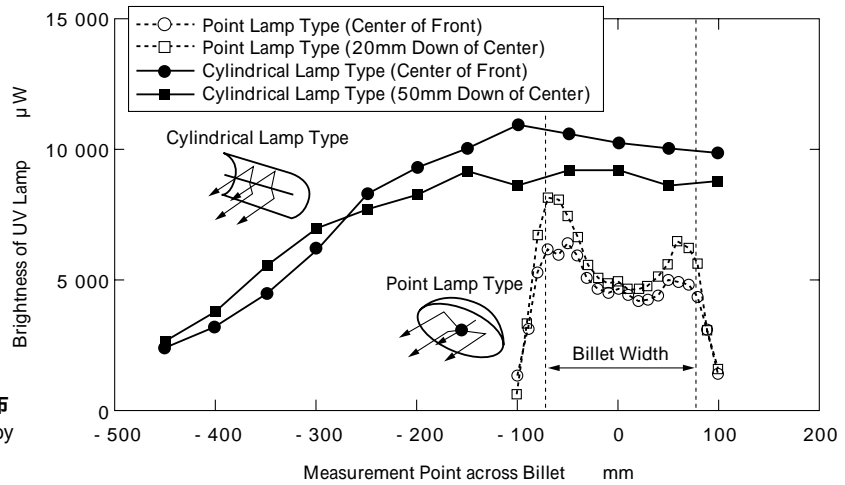
第3図 磁粉種によるきず輝度、地肌輝度、S/Nの違い  
Fig. 3 Differences of image brightness of flaw or normal surface, and ratio of them between two types of magnetic particles



第4図 きず輝度と磁粉液散布による表面膜厚の関係  
Fig. 4 Relation between image brightness of flaws and equivalent surface thickness of sprayed magnetic fluid

## 2.2 紫外光照明

きず輝度の向上には、紫外光照明の改善も必要である。その際、材面上での照度増大とばらつき抑制とを両立させる必要がある。現在は、鋼片揺動に対する追従機構に搭載する都合などから、点状ランプをもちいた小型照明を採用している。これを高輝度化するには、ランプの



第6図 2種類の紫外照明の照度分布  
Fig. 6 Brightness patterns lighted by two types of UV light sources

大型化や集光板の変更などが必要となるが、鋼片上の照度分布を平坦にするのが難しく、鋼片面内の探傷精度を一定に保つ観点でも問題があった。

そこで現行の紫外照明に変わる、管状ランプをもちいた新型紫外光照明を検討し、照度の向上を試みた結果、約2倍の照度向上と照度分布の平坦化を達成した(第6図)。照度向上はきず輝度の改善だけでなく、カメラレンズの絞り値変更による被写界深度改善にもつながり、ピンぼけのないシャープな画像取得も可能にする。そして追従機構の追従精度も軽減でき、設備上の制約を減らすことができる。

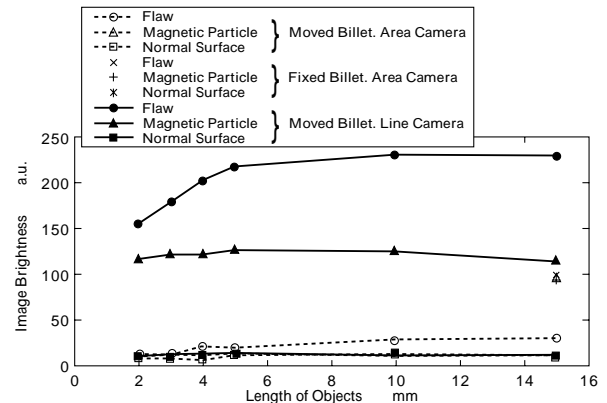
### 2.3 撮像装置

撮像系に関する検討の結果、現行のエリアカメラから、高感度のラインカメラへの変更が望ましいと判断した。

微小きずの検出には、感度と分解能の向上が必要である。エリアカメラの場合、映像信号規格NTSCの関係上、画素数は500×500画素程度に制限される。さらに、画像取得周期の間に鋼片が移動することによる像流れの問題もある。像流れは電子シャッター付カメラの採用で対処可能ではあるが、撮像感度の低下を生じ、暗い微小きずを撮像できない。これに対し、ラインカメラは1ラインあたりの画素数が多く、画素の感度もエリアカメラにくらべて高くできる。像流れに関する走査時間も、エリアカメラにくらべ高速化が可能であり、選択自由度も高い。

第7図に現行のエリアカメラと高感度ラインカメラによる、きずの画像評価結果を示す。長さを複数変えた割れきずおよび磁粉ノイズ(正常地肌に残る1mm程度の小塊状余剰磁粉)が付着した試験片を、静止あるいは25m/minで移動させながら撮像した。エリアカメラでは1/125sの電子シャッターを動作させ、ラインカメラの走査時間は像流れがエリアカメラの走査線間隔と同等になるようにした。またラインカメラは、画素上の磁粉ノイズ像よりも長辺が長い長方形画素のものをもちいた。長方形画素は、走査時間中の像流れ分に対する信号蓄積、画素形状にともなう空間平均化作用による磁粉ノイズ信号の低減や線状きずでの信号強調などの効果がある。

エリアカメラは、シャッター動作の影響もあり、全体的に画像輝度が低い。これに対してラインカメラは、画像



第7図 エリアカメラとラインカメラでの画像輝度の変化  
Fig. 7 Difference of image brightness between the area camera and the line camera

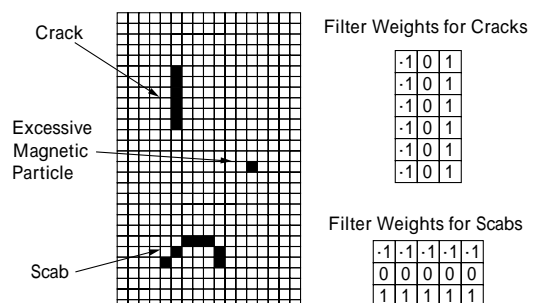
輝度が高く、とくに5mm以上できずと磁粉ノイズを明確に分離可能である。

また、ラインカメラの画像分解能は、鋼片幅方向でエリアカメラの約4倍に向上し、画像も明瞭で、ラインカメラによる高輝度・高分解能化を確認することができた。

### 2.4 鋼片表面きず候補の判定アルゴリズム

ラインカメラによるきず画像の分解能向上を有効活用する、きず判定の新アルゴリズムを開発した。鋼片で問題となるきずには鋼片長手方向に伸びた割れきず、円形や幅方向に長い不定形のへげきず、折込みきずなどがあり、線材・棒鋼の用途、加工工程に応じてそれぞれ異なる有害性をもっている。これらを確実に検出すると同時に、磁粉ノイズや油汚れなどのきずではない発光部画像を抑制・排除するきず判定アルゴリズムが要求される。

ラインカメラによる実鋼片の画像収集と画像的特徴を検討した結果、第8図に示すような、きずを選択的に



第8図 きずの形状にあわせた2種のフィルタ  
Fig. 8 Two types of filter weights optimized for flaw shape

強調する2種のフィルタ処理を並列して適用することにした。鋼片移動方向を上向きとすると、割れきずは縦線状に、へげきずや折込みきずは、ラインカメラの走査が広いための上下圧縮もあり、上下につぶれた曲線状になる。また磁粉ノイズは点状に、油污れなどは周辺がぼやけた不定形領域状になる。2種のフィルタは縦方向と横方向のそれぞれで、輪郭エッジ強調、積算による連続部強調という、ノイズを抑えてきずを選択的に強調する作用がある。フィルタ加重値(1, -1)の連続個数や値の多少の増減は、カメラの光学倍率や走査速度により最適値が変わるため、実きず画像の評価により決める。

次に、フィルタ後の2種画像それぞれに対して、所定しきい値での2値化ラベリングをおこない、各ラベルの最大輝度とラベル面積という特徴量を抽出する。そして両者の積をしきい値で正規化した評価値を算出する。積をもちいるのは、上記フィルタによる選択的強調の程度と、きず形状の連続程度の両者をあわせて評価するためであり、正規化はしきい値変更の影響を抑制するためである。

評価値が所定のしきい値を越えたものを、2種のフィルタ処理後のきず候補として抽出する。

きず種が異なる複数の実きず画像に対して、磁粉ノイズなどとの評価値比較によるフィルタ加重係数の最適化検討をおこない、後述する実ライン実験用の加重係数を求めた。0.2×5mm付近の微小きずについて、磁粉ノイズに対する評価値比を求めた例を第9図に示す。きず種に応じ、2種のフィルタ処理のそれぞれで良好なS/Nを実現できた。

### 2.5 磁粉ノイズの除去

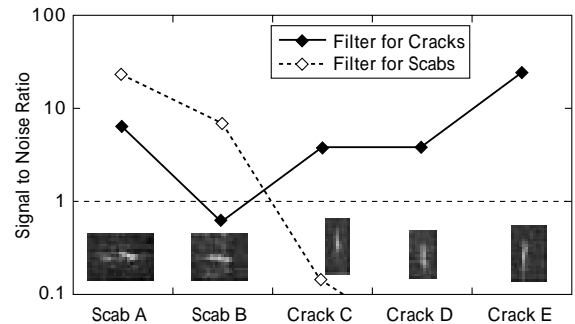
評価値での判定により、おおむねきず識別は達成されるが、微小きず検出では若干の磁粉ノイズ混入(誤検出)が避けられない。そこで、磁粉ノイズの特徴、すなわち点状で連続性がなく、非常に輝度が高いことに着目した磁粉ノイズラベルの除去をおこなうことにした。最終のきず判定までの全体処理フローを第10図に示す。

磁粉ノイズ除去では、上記フィルタ処理前の画像に対して高いしきい値での2値化ラベリング処理をおこない、明るく点状のラベルだけをノイズ候補として抽出する。次に、ノイズ候補とフィルタ処理後のきず候補とを比較する。きずはその連続的形状から、フィルタ処理後ラベルの長さが磁粉ノイズにくらべて長くなる。そこでノイズ候補で予想されるフィルタ処理後ラベルの形状と、きず候補の形状が一致した場合に、これを磁粉ノイズと判断し、きず候補から除去する。前節のきず候補抽出でのパラメータ調整だけでは、磁粉ノイズとともに微小きずも落ちてしまうが、この方法により磁粉ノイズを選択的に除去可能となる。

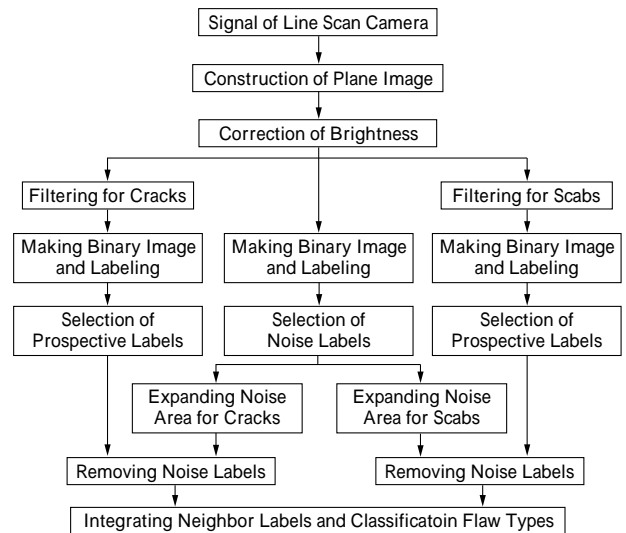
2種のフィルタ処理画像のそれぞれでノイズ除去されたきず候補に対して、隣接ラベルとの統合をおこない、最終のきず判定結果とする。

### 3. 実ラインにおける検証実験

一連の改善効果を確認するため、現行の自動探傷装置



第9図 2種のフィルタ処理後での微小きずと磁粉ノイズの評価値比  
Fig. 9 Ratio of estimated values of small flaws and magnetic particle noise after two types of filtering



第10図 きず判定の画像処理フロー  
Fig. 10 Flow diagram of image processing to detect flaws

第1表 実ライン実験による探傷精度の評価結果

Table 1 Result of the flaw inspection test in the factory

Total Number of Billets	Minimum Depth of Flaws mm	Minimum Length of Flaws mm	*1 Total Number of Flaws	*2 Total Number of Detected Flaws	Detecting Rate %
	0.2	5	290	283	
20	0.3	5	114	114	100

\*1 Detected by manual inspection

\*2 Detected by automatic inspection

にラインカメラなどを併設し、実鋼片での探傷実験をおこなった結果を第1表に示す。

0.3×5mm以上のきずで100%、0.2×5mm以上でも98%と非常に良い性能を確認した。また誤検出も、現行装置と同レベルで操業上問題はなく、磁粉ノイズへの誤検出防止機能などが有効に作用することを確認した。

むすび = 微小きずの輝度向上や、微小きずに合わせた画像処理法の確立により自動探傷装置の精度向上の目途をえることができた。さらなる検出精度の向上や誤検出の低減に継続して取り組んでいく方針である。今回えられた成果のいくつかは現行の自動探傷装置へも適用可能であり、設備全体の更新も視野に入れながら、適宜活用していく。

### 参考文献

1) 小塚和泉ほか: 鉄と鋼, Vol.79, No.7, (1993) p.847.