

# 解説

## 受賞技術 - 43

# ツイン投光差分方式表面検査装置

## Surface Inspection System Using by Twin-illumination and Subtraction Technique

JFE スチール (株) スチール研究所  
サイバーフィジカルシステム研究開発部  
主任研究員

大野 紘明  
Hiroaki Ono

JFE スチール (株) 東日本製鉄所  
京浜地区 厚板部 厚板技術室  
主任部員

楯 真沙美  
Masami Tate

JFE スチール (株) 知多製造所  
企画部企画室  
主任部員

小川 晃弘  
Akihiro Ogawa

JFE スチール (株) 本社  
データサイエンスプロジェクト部  
主任部員

飯島 慶次  
Yoshitsugu Iijima

JFE スチール (株) 知多製造所  
企画部設備技術室  
主任部員

山崎 孝博  
Takahiro Yamasaki

## 1 はじめに

鉄鋼製品における表面検査は、品質保証の観点で非常に重要である。表面検査は一般的にカメラによる光学的手法が用いられており、薄板製造ラインでは様々な工夫による表面検査技術が確立されオンラインでの検査自動化が進んでいる<sup>1,3)</sup>。例えば、薄板の連続めっきラインや連続焼鈍ラインでは、ラインカメラとライン光源を利用した表面検査装置で欠陥を自動検出し、欠陥部をマーキングして出荷することで品質を保証している<sup>2)</sup>。

その一方で、建造物やエネルギー輸送用配管などに用いられる鋼材（鋼管や厚板など）の製造ラインでは、長い間、検査員による目視検査が主流であった。表面検査の自動化が進まなかった理由は、「鋼材表面にある模様と見つけたい欠陥の区別が難しい」という点にある。鋼材は、その表面を不均一な厚みをもつ黒皮と呼ばれる酸化膜で覆われている。薄板では酸洗と呼ばれる工程で化学洗浄処理により黒皮が除去されて表面肌が均一化されるため、画像検査時の欠陥検出に影響しないが、鋼材では酸洗工程が無く黒皮は付着したままである。そのため、図1に示すように画像上では、欠陥なのか黒皮による模様なのかが判別できない。また、黒皮が付着したまま出荷される鋼管や厚板への検査装置導入は、①製造ライン搬送時における振動が大きい、②表面温度が高い、といった

環境エンジニアリングのハードルも高く、自動化を困難にしていた。

しかしながら、鋼材の製造ラインにおける目視検査は過酷な作業であることから自動化が強く望まれていた。また、自動化されることで検査員ごとの検査能力のバラツキを解消し、安定した欠陥検出性能を期待できる。したがって、黒皮鋼材の自動表面検査は強いニーズがありながらも、いまだ実現できていない永遠の課題であった。

本稿では、鋼材の自動表面検査を実現した新しい画像式表面検査技術として、一般財団法人機械振興協会 第55回機械振興賞（機械振興協会会長賞）を受賞した「ツイン投光差分方式表面検査装置」の内容を紹介する。

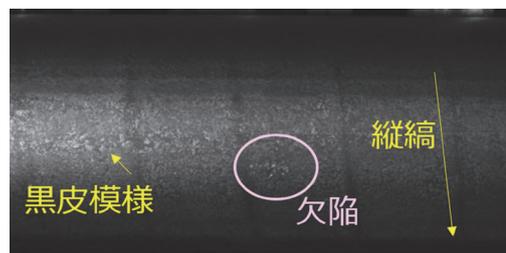


図1 黒皮鋼材の鋼管表面における凹凸欠陥と模様  
(Online version in color.)

## 2 ツイン投光差分方式による表面検査

### 2.1 ツイン投光差分方式の原理

筆者らは鋼材の表面において、欠陥と無害な部位との違いを観察した知見から、欠陥の多くは凹凸を持つ形状であるのに対して、画像には模様として映るが欠陥ではない部位の多くは平らであることに着目し、凹凸欠陥と無害な部位を弁別する「ツイン投光差分方式」を考案した。本方式の模式図を図2に示す。鋼材表面に対し光源を用いて右から光を照射したときと左から光を照射したときでは、無害な部位の形状は平らであるため光源方向による撮像画像に違いは見られない。一方、欠陥部の形状は凹凸を持つ形状であるため、光源方向により陰影のつき方が異なる。そこで両画像の差分を計算することにより、陰影の違いのない無害な部位の模様が消え、欠陥部の模様が強調される。なお、本検査による対象欠陥は図2の欠陥に示すような開口性かつ凹形状の欠陥とした。

図3に、実際凹欠陥をもつ鋼材試験片にツイン投光差分方式を適用した事例を示す。試験片の凹欠陥は実製造ラインで発生したものであり、表面には黒皮による模様と欠陥部位を取り囲むようにペイントがされている。図3左側に位置する画像は試験片に対して左45度一方から光を照射してその反射光を受光して得られた画像であり、この画像から欠陥部のみを識別することは難しい。一方、右側からも光を照射してその反射光を受光した画像を撮像し、両画像間で差分処理を実施して得られた画像を、図3右側に示す。黒皮起因の模様が相殺され、凹形状の陰影部のみを明瞭に浮かび上がらせることができている。このように、ツイン投光差分方式により、無害な黒皮の模様を誤検知することなく凹欠陥のみを検出することができる。

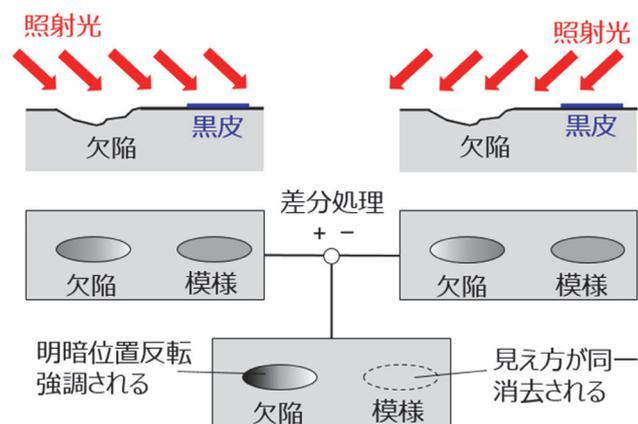


図2 ツイン投光差分方式の原理 (Online version in color.)

### 2.2 搬送ライン適用のための高速撮像技術

前述のツイン投光差分方式を製造ラインへ適用するための課題と、それを解決するために必要な高速撮像技術について述べる。本方式は、対象に対して一方から光を照射し撮像した画像と、もう一方から光を照射し撮像した画像を、ほんのわずかな画素単位の位置ずれを発生させることなく別々に取得することが必要である。検査対象となる黒皮鋼材の全表面を効率よく検査するためには、製造工程の搬送ライン上にカメラを固定し、搬送される鋼材をスキャンしながら検査することが望ましい。しかしながら、搬送中の検査対象に対し単純に光源の照射を切り替えて2回撮像すると、得られた2枚の画像において検査対象の位置がずれてしまう。差分処理は画素単位で行われるため、異なる位置に対応する画素間で差分を取ってしまうと、黒皮による模様を相殺することができず、ツイン投光差分方式の効果を発揮できない。例えば、検査対象の位置を合わせるために平行移動などの画像処理を用いる方法なども考えられるが、画像内においてレンズ収差によるわずかな歪みや対象速度変化による移動量のばらつきなどが差分処理に影響する可能性があった。

そこで、2台の非常に照射時間が短い光源（フラッシュ光源など）と瞬時に2回撮像可能なカメラを用いる高速撮像技術を開発した（図4）。まず、フラッシュ光源を発光させ、そのタイミングに合わせて撮像する。撮像が完了した瞬間、さらに連続してもう一台のフラッシュ光源を発光させ同一のカメラで撮像する。すなわち、図4に示したタイミングチャートのように照射方向の異なる2組の光学系の撮像を100  $\mu$  sec以下の遅延で実施することで、移動中の対象に対しても位置ずれを画素単位以下に抑えることに成功した。なおフラッシュ光源を用いることにより、光量を確保しつつ瞬時に照射して撮像するため、搬送中に発生する上下方向の鋼材振動影響も除去できるといった利点もある。

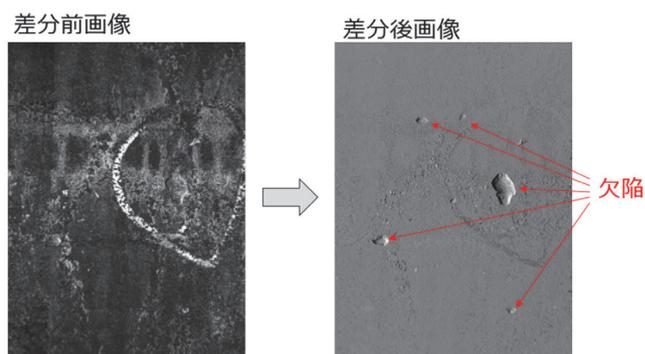


図3 ツイン投光差分方式の黒皮鋼材適用例 (Online version in color.)



図4 フラッシュ光源を用いた高速撮像技術 (Online version in color.)

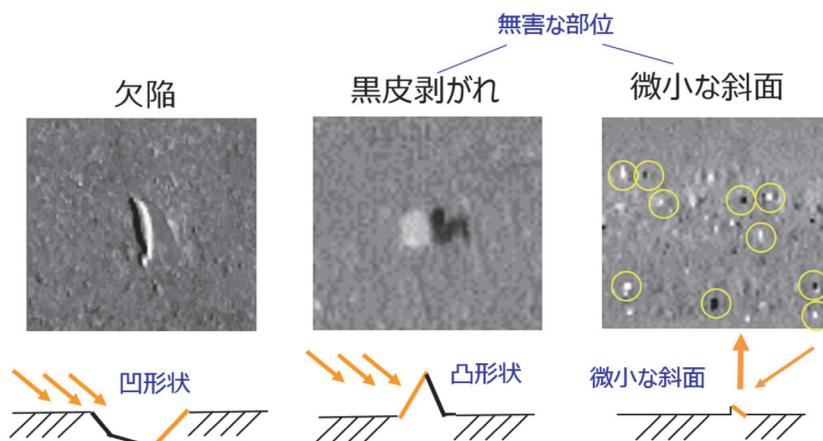


図5 欠陥と無害部位の画像における形状と見え方の違い (Online version in color.)

### 2.3 明暗パターンを用いた凹凸判定技術

ツイン投光差分方式の狙いは平らな面による模様を相殺し、凹凸部分の模様のみ抽出することである。しかしながら、前述の高速撮像技術を用いた検査装置を製造ラインに設置して検証を進める中で、品質上問題のないわずかな黒皮剥がれや微小斜面に関しても、2方向からの照射により見え方が異なるため、差分により除去されないといった例が存在した。凹形状の欠陥、凸形状のわずかな黒皮剥がれ、斜面が正反射条件となった微小な斜面の差分画像と特徴を図5に示す。観察の結果、凹形状の欠陥部位と凸形状の部位は独特の明暗パターンが発生し、明部と暗部の位置関係が逆転することが判明した。また、欠陥でない微小な斜面が偶然正反射条件となることにより明または暗の微小な点状になる現象も確認された。したがって、画像処理により明暗パターンを検出することによって、凹形状と凸形状の部位を区別して検出できるようになり、単純な閾値のみによる検出と比較して、無害な部位の検出を著しく低減することに成功した<sup>5)</sup>。

明暗パターン検出処理を導入した結果、凸形状を表すパターンや微小面に起因する部位の大多数は区別されたもの

の、図6の右側に示すような一部の無害な部位が図6の左側に示す実際に品質に影響を及ぼす欠陥と同様に検出された。このような無害な部位の多くは、表面に差分で除去しきれない黒皮剥がれ等やコントラストが強い模様が残りに、さらに偶発的に隣り合うことで発生した明暗パターンが原因であった。欠陥と無害な部位の画像を比較すると、それぞれ特徴があり、ある程度目視で弁別可能である。そこで、通常の表面検査装置でよく用いられている面積、幅、長さなどの数値を画像から算出し、これらの特徴量を用いた二分決定木識別機による機械学習を適用することで、欠陥のみ抽出し検出性能を高めた<sup>6)</sup>。

## 3 継目無鋼管への適用事例

継目無鋼管の製造ラインにツイン投光差分方式を用いた表面検査装置の適用事例を紹介する。本事例で対象とする継目無鋼管の表面欠陥とは、主に製品の製造工程において表面に発生する深さを持つ凹みをもったキズである。欠陥が発生すると、手入れ工程や保証肉厚を維持できない不合格品が発生

し、直行率や歩留まりを低下させる。検出対象としている表面欠陥は圧延ロールや搬送ロールの焼きつき等であり発生原因を修正しない限り、連続的に発生する場合が多い。したがって、欠陥の発見が遅れると不合格品の大量発生につながるため、圧延直後（表面温度は800度程度）における欠陥の早期発見は非常に重要である。そこで、発生した欠陥の情報を早期に検査員にガイダンスすることで発生原因を取り除くことを目的として、表面検査装置を継目無鋼管の圧延直後の位置に設置した。

継目無鋼管に適用するために設置した表面検査装置の光学系を図7に示す。まず継目無鋼管の搬送方式には、主に周方向に転がりながら搬送される横パスと、ロールにより長手方向に搬送される縦パスが存在する。横パス中の継目無鋼管外面全面を検査するためには、長手方向にカメラを必要台数並べる必要があり、設備コストが増大する。そのため、縦パス中の鋼管に対して全周を抜けなく視野で覆うようにカメラと光源を配置した。長手方向に視野をラップさせながらスキャンするように撮像することで、外面全面を低コストで検査す

ることができる。実際には周方向を3分割しそれぞれの領域を上流・下流から照射して差分処理を行った。なお、熱間での検査であるため、カメラの前に赤外カットフィルタを設置することにより、鋼管自体から発せられる自発光成分を除去し、フラッシュ光源の反射光のみ受光するようにした。

本検査装置を用いた欠陥の発生情報のガイダンスにより、継目無鋼管外面に発生する連続性の欠陥を長期間にわたって抑止し、考案方式を用いた表面検査装置が不合格品の大量発生防止に有効であった。

## 4 厚板への適用事例

板材である厚板向け表面検査装置を開発し<sup>7,8)</sup>、実製造に適用した事例を紹介する。表面検査の目的は、検出した欠陥情報を目視検査前あるいは目視検査中の検査員へガイダンスすることで欠陥の流出を防ぐことである。そのため、欠陥を確実に検出することが重要であり、ガイダンスとして運用できるように様々な工夫を行った。

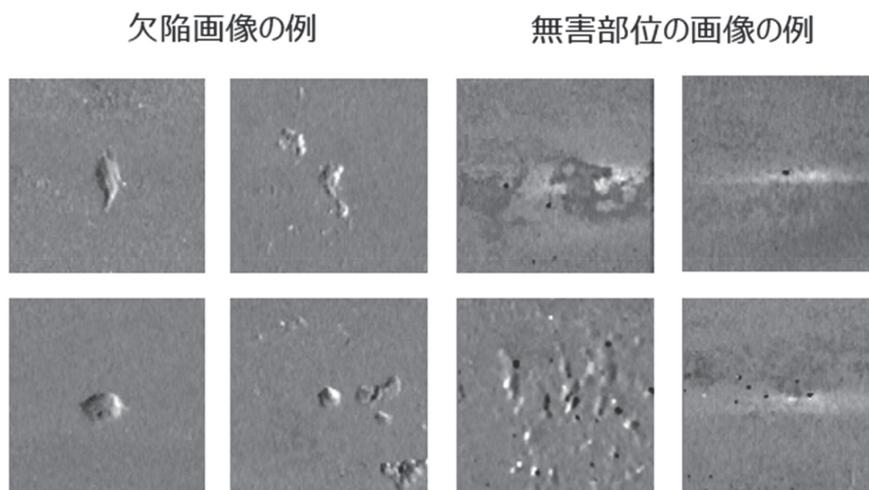


図6 凹欠陥と同じ明暗パターンを持つ欠陥画像と無害部位の画像の例

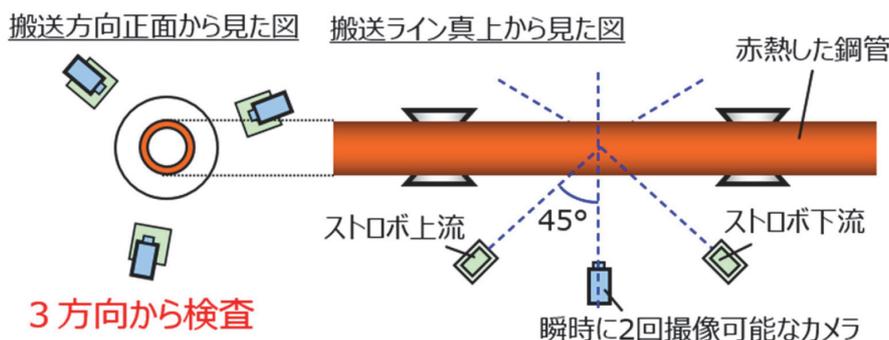


図7 ツイン投光差分方式を用いた鋼管表面検査装置 (Online version in color.)

まず、検査対象は冷間状態の厚板であり、3章に記述した赤熱した鋼管への適用事例と比較して光学設計の自由度が高いため、厚板に最適な光学系を検討した。その結果、照射角を70度付近とし、なおかつ2方向の照射を光軸に対して対称とする条件で適用することで欠陥検出性能が高まることが判明した。さらに厚板で発生する欠陥の中には細長い欠陥もあり、様々な方向に発生するため、偶発的に照射方向と欠陥の長軸方向が一致してしまうと画像上で見えなくなる懸念がある。そのため、幅方向・長手方向の2組のツイン投光差分方式を用いることで、細長い欠陥であっても幅・長手のどちらかの差分画像では検出できるよう工夫した。

厚板用として設計した表面検査装置の光学系を図8に示す。片面約5 m幅に対してカメラを幅方向に並べ全幅を撮像できるようにした。各カメラにつき4台の光源を鋼板進行方向の上流側、下流側、鋼板幅方向のエッジ側、もう一方のエッジ側となるように配置した。1台のカメラに対して上流側光源と下流側光源とで2枚の画像を撮像して長手方向の差分画像を取得し、その後同様に幅方向の差分画像を取得する設計とした。一連の撮像を鋼板の搬送に合わせて繰り返し実施することで、幅方向と長手方向の2組のツイン投光差分方式を鋼板全面に対し適用し、全ての向きの欠陥を精度よく検査することが可能となった。

開発した表面検査装置を実際の厚板製造ラインに導入し、検出した欠陥の情報を検査員へガイダンスすることで、検出した欠陥と目視検査で見つかった欠陥をつき合わせて検出性能を評価した。ガイダンスは欠陥の発生状況のマップ化と検出した欠陥の拡大画像表示機能を組み合わせることで、検査員が直感的に欠陥の形状と発生位置を判断できるようにした。表面検査装置、目視検査で見つかった欠陥については、手入れ場など静的な環境で3D スキャナやデプスゲージなどを用いて欠陥形状を計測して、実際に欠陥であったかどうかを確認するつき合わせも実施した。長期間にわたる検証の結果、目視検査前のガイダンスによる運用が成立する程度に無害な部位の誤検知を抑制した条件で、全ての欠陥を検出することができた。本検証により、検査員へのガイダンスによる運用を前提とした表面検査装置として十分な検出性能を持ち、欠陥の流出防止に活用できる見込みを得た。

## 5 まとめ

従来方式では困難であった黒皮鋼材が持つ表面模様の課題に対し、全く新しい光学的検査技術であるツイン投光差分方

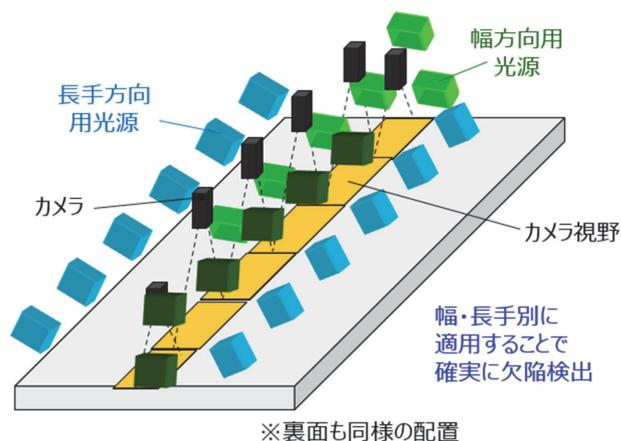


図8 ツイン投光差分方式を用いた厚板表面検査装置 (Online version in color.)

式を提案した。本方式を用いた表面検査装置を赤熱した鋼管や厚板の製造ラインに導入し、それぞれの目的を満たすのに十分な検出性能を持つことが検証された上で工程運用されている。本成果は表面欠陥のある製品の流出を防ぐことにより安心安全な黒皮鋼材の安定供給につながり、社会基盤そのものの信頼性向上に貢献している。

## 参考文献

- 1) 「光学的表面欠陥検査」, 鉄鋼便覧, 第5版, 第5巻, 日本鉄鋼協会編, 東京, レタープレス (株), (2014), 81.
- 2) 風間彰, 杉浦寛幸, 大重貴彦, 猪股雅一, 上杉満昭, 田口昇: 鉄と鋼, 90 (2004) 11, 870.
- 3) T. Oshige: Trans. Soc. Instrum. Control Eng., 55 (2016) 3, 228.
- 4) 大野紘明, 小川晃弘, 山崎孝博, 腰原敬弘, 児玉俊文, 飯塚幸理, 大重貴彦: 鉄と鋼, 104 (2018) 1, 11.
- 5) 大野紘明, 小川晃弘, 山崎孝博, 飯塚幸理, 大重貴彦: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 775, CD-ROM.
- 6) 大野紘明, 大重貴彦: 第35回SICEセンシングフォーラム予稿, (2018), 1C1-1.
- 7) 大野紘明, 大重貴彦, 楯真沙美: CAMP-ISIJ, 33 (2020) 1, 112, CD-ROM.
- 8) 大野紘明, 楯真沙美, 飯島慶次, 大重貴彦: 計測自動制御学会論文集, 59 (2023) 8, 362.

(2023年11月28日受付)