

画像認識を活用したビレット表面疵判定とホットスカーフ溶剤量の削減

Detection of Surface Defects on Billets Using Image Recognition and Reduction of Hot Scarfing Removal

高木 健太 TAKAGI Kenta JFE スチール 棒線事業部 仙台製造所 棒線部 棒線技術室 主任部員

要旨

画像認識 AI を用いて、ビレットの磁粉探傷画像から疵の種類を自動で判定するシステムを導入した。AI モデルによる判定の後に決定木による再判定を行うことで判定精度が向上した。このシステムを用いて、ホットスカーフ溶剤量変更前後でビレット表面に発生する疵の変化を調査したところ、溶剤量を削減することで、一部鋼種でヘゲ疵の減少が認められた。すなわち、素材性の疵を除去しつつヘゲ疵の発生を抑制できる最適な溶剤量が鋼種ごとに存在しており、その評価のためには疵種類別の評価が必要であるため、今回開発したシステムのさらなる活用が期待される。

Abstract:

JFE Steel has introduced a system that uses image recognition AI to automatically detect the type of defect from the magnetic particle testing images of billets. The accuracy of the detection was improved by performing re-evaluation using a decision tree following the detection by the AI. Using this system, the changes in defects on the surface of billets before and after changing the hot scarfing removal is investigated. As a result, decrease in scab was observed in some steel grades by reducing the hot scarfing removal. Therefore, there is an optimal removal for each steel grade that can remove material defects while suppressing scabs. To evaluate this, it is necessary to evaluate the defects by type, and further utilization of this system is expected.

1. はじめに

鋳片の表面には割れ疵、表層下介在物などの有害な表面欠陥が存在しており、また、加熱過程で表面脱炭層が生じることもある。鋼片工場ではこれらの欠陥をホットスカーフによって除去している。

ホットスカーフは分塊圧延機の後面に配置され、鋼片（ビレット）の上下面および両側面を同時に溶剤することで表面欠陥を除去している。ホットスカーフは、未実施の場合と比べ表面欠陥の大幅な低減が期待でき、鋼片精整における疵取能率の向上や、欠陥が表層深くまで残存することによる格落リスクの低減を図れる。ホットスカーフの溶剤量は溶剤中のビレットの搬送速度を調整することで制御しており、割れ感受性の高さ（素材性疵の発生しやすさ）などを鑑みて、鋼種ごとに溶剤量が定められている。ホットスカーフはビレット全面を一様に溶剤できるため生産性に優れるが、欠陥の有無にかかわらず全面を溶剤するため歩留ロスが大きいという欠点がある。したがって、ホットスカーフ溶剤量を適正化することは歩留改善に大きく寄与する。

本検討の目的は、ビレット表面疵の削減のためホットスカーフ溶剤量を適正化することである。溶剤量を適正化するにあたっては、ホットスカーフ以前の工程で発生する有害な表面疵を除去できているかを見定める必要がある。ビレット表面疵の評価には、磁粉探傷や漏洩磁束探傷などの疵検査手法が一般的に用いられており、疵の有無を自動で判定する機能を有する設備もあるが、JFE スチール仙台製造所では、疵の種類までは自動で判定できない。したがって、割れ疵のようなホットスカーフ以前に発生した疵（ホットスカーフで除去可能な疵）とヘゲ疵のようなホットスカーフ以降の工程で発生しうる疵を区別できず、スカーフ条件を変更した際のビレット品質の評価を困難にしている。前述の課題を解決すべく、画像認識技術を用いて、磁粉探傷画像から表面疵の種類を自動で判定するビレット表面疵判定システムを導入した。本稿では、システム概要とそれを用いたホットスカーフ溶剤量の削減について述べる。

2. ビレット表面疵判定システム

表面疵種類の自動判定を行うにあたり、本稿では人工知能（AI）を用いた画像認識に着目した。AI を用いた画像認

2024 年 8 月 28 日受付

識では、データから特徴を自動で機械学習することで未知のデータに対しても推論が可能である。ビレットに発生する表面疵は、種類が同じでも形状が異なる場合がほとんどであるが、AIであれば多少の違いにも対応できる。本章では、画像認識のうち、1つの画像から複数のオブジェクトを検出できる物体検出のAIモデルを作成することで、表面疵種類の判定を自動化させた内容について述べる。仙台製造所鋼片精整工場の磁粉探傷装置では、オンラインで磁粉探傷を行いながらビレット全面および全長の画像を撮影しており、ここで撮影した画像をモデル作成時の学習データおよび検証用データとして用いた。

2.1 表面疵判定モデルの作成

2.1.1 モデル作成条件

判定対象である疵種類は、線状疵 (Sliver), 縦割れ (Longitudinal crack), 亀甲割れ (Star crack), ヘゲ疵 (Scab), ササクレ (Lateral crack), シワ疵 (Wrinkle) の6種類とした。代表的な疵形態の模式図を図1に示す。すべての疵種類合計で487枚(989オブジェクト)の画像を学習データとした。モデルには畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を用いた。CNNベースの代表的なアルゴリズムにはFaster R-CNN¹⁾, SSD²⁾ およびYOLO³⁾ があり、上記の順番で検出精度が高く処理速度が遅い。磁粉探傷装置の通材ピッチからFaster R-CNNでも処理速度は十分であると判断し、最も高い精度を期待できるFaster R-CNNをアルゴリズムとして選定した。

当初作成したモデルでは、線状疵、縦割れ、亀甲割れを互いに誤って判定しているケースが散見された。これは上記3種の疵は形状が似ている場合があるためと考えられる。AIの物体検出モデルは判定基準がブラックボックスであり、疵画像からどのような特徴量を抽出して判定しているのか説明不可能であるため、形状が似た疵の判定精度を向上させるために効果的な学習方法を定めるのが困難である。そこでAIとは異なる方法で疵の再分類を行うことを検討し、再分類の判定基準としてAIの検出領域形状に着目した。Faster R-CNNによる物体検出では検出対象は矩形領域で検出される。この矩形領域の幅、高さ、面積、アスペクト比(高さ

幅の比)それぞれの分布は図2のように疵種類ごとに異なっている。本稿では、この分布の違いを利用して決定木分析による再分類モデルを作成し、AI判定の後処理として決定木分析による再判定を行うことでモデル精度の向上を図った。決定木分析のアルゴリズムには、2分岐であり結果の理解が比較的容易なCART (Classification and Regression Trees) を用いた。

2.1.2 モデル精度の検証

作成したモデルの精度を検証するため、交差検証を実施した。交差検証は、学習データを任意の数のデータセットに分割し、モデル作成に使用するデータセットと検証に使用するデータセットの組み合わせを変更しながらモデルの検証を行うことでモデルの汎化性能(未知のデータに対する識別能力)を評価する手法である。疵種類ごとの画像枚数が同程度となるよう学習データを5つのデータセットに分割し、そのうち4つを学習データ、1つを検証データとする5パターンの組み合わせで交差検証を行い、検出精度を評価した。評価指標には、機械学習モデルの精度評価で一般的に使用されている適合率 (precision) と再現率 (recall) を用いた⁴⁾。適合率は誤検出(疑陽性)の少なさ、再現率は見逃し(偽陰性)の少なさを示している。交差検証の結果を図3

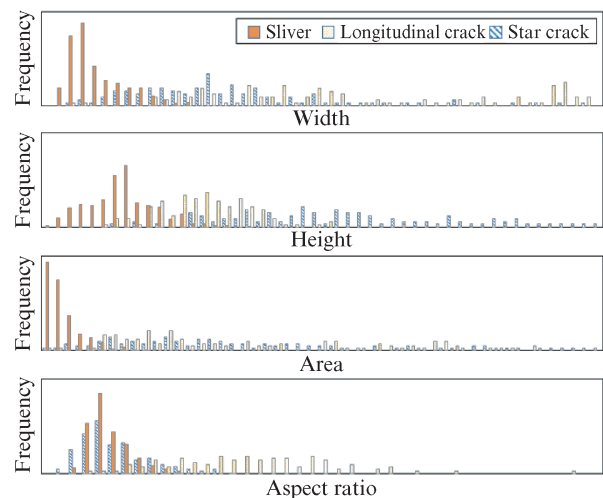


図2 検出領域の特徴量ヒストグラム

Fig. 2 Histogram of features from detection box

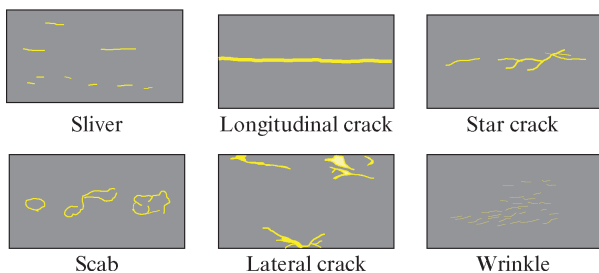


図1 磁粉探傷でのビレット表面疵模式図

Fig. 1 Conceptual diagram of cracks in MT

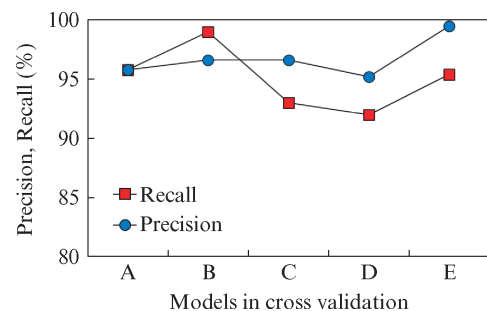


図3 交差検証におけるモデル精度

Fig. 3 Precision and recall in cross validation

に示す。横軸のモデル A から E は交差検証を実施した 5 つのパターンであり、検出の確信度 (confidence) が 0.6 以上のものを評価対象としている。すべてのパターンにおいて、適合率と再現率は 90% を上回っており良好な検出精度であることが示された。また、モデル間の差異も小さく汎化性能の高いモデルであるといえる。

2.2 実操業への導入

前節で作成したモデルを用いて、ビレットの表面疵種類を自動判定するシステムを導入した。磁粉探傷装置で撮影したビレット表面画像に対して、疵判定モデルを搭載した端末で疵種類の自動判定を行っている。判定結果はテキストデータや疵発生箇所のマップ表示として表示することでビレット品質の解析に活用できる。これらのデータはホットスカーフ溶削量の評価のみならず、表面疵の原因究明および疵種類に応じた対策立案に活用する。

3. ホットスカーフ溶削量の適正化

本章では、ホットスカーフの溶削量がビレットの表面品質に与える影響を調査するために実施した溶削量削減試験について述べる。品質評価には、2 章で述べたビレット表面疵判定システムによる解析結果を用いた。

3.1 ホットスカーフ溶削量削減試験

3.1.1 試験対象

ホットスカーフ溶削量の削減試験は SCM435, SCr440, SUP9, CC12C14 (クリーンカットクロム快削鋼)^{5,7)} の 4 鋼種を対象に実施した。試験対象の 4 鋼種について、ホットスカーフ溶削量を 30% 低下させ鋼片圧延を行い、ビレットで品質評価を行った。

3.1.2 試験結果

ビレットの表面品質について、現行のホットスカーフ水準における過去実績と溶削量を低下させた試験結果の比較を図 4 に示す。すべての鋼種で、ホットスカーフ以前に発生する疵 (ホットスカーフでビレットへの残存を低減可能な疵) である線状疵、縦割れ、亀甲割れ、ササクレの数は現行水準と試験水準で大きな差は見られなかった。このことから、今回の試験対象鋼種については、試験水準まで溶削量を削減してもビレット表面品質には影響を与えないといえる。ただし、ビレットの割れ感受性の高さは鋼種によって異なるため、成分系の異なる鋼種に展開する場合は精査が必要である。

一方、CC12C14 において試験条件でヘゲ疵が半減しており (図 4 中 (d)), t 検定による p 値は 4.9×10^{-6} と高い確率で有意差が認められた。このことから、ホットスカーフの溶削量が多くなるとかえってビレットの表面疵を増加させる可能性があることが示唆された。これは、溶削量が多くなる

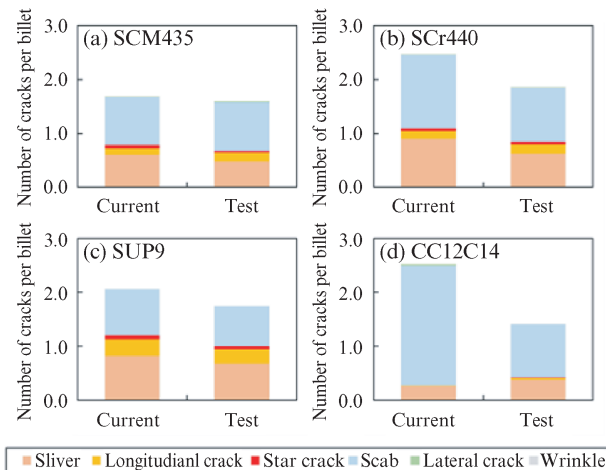


図 4 溶削量によるビレット疵の比較

Fig. 4 Cracks occurred in current and test condition

と、スプラッシュの飛散が増加しビレット表面に付着するリスクが増大することや、溶削ムラが大きくなり溶削後ビレットの表面性状が悪化することが要因として考えられる。

3.2 溶削後ビレットの表面性状評価

前節の試験結果より、溶削量が多くなるとビレットの表面性状を悪化させる可能性があることが示唆された。そこで、溶削量と表面性状の関係を調査するため、ホットスカーフ出側で仕上圧延前のビレット中間断面サイズの C 断面スライスサンプルを採取し、ホットスカーフ溶削量別で中間断面の表面プロファイルを比較した。中間断面の表面プロファイルを図 5 に示す。サンプルは同一チャージ同一ストランドで連続製造され同じタイミングで圧延した鋼片から採取した。溶削量は水準 1 から水準 4 の 4 種類とし、溶削量の少ない順に 1, 2, 3, 4 とした。

図 5 が示すとおり、溶削後のビレット表面には凹凸が発生していることが分かる。ビレット各面プロファイルの凹凸部分について、2 つの凸部の高さをそれぞれ d_1 , d_2 、凸部間の幅を w とし、表面粗さ指数 R を $(d_1 + d_2)/2w$ と定義し、

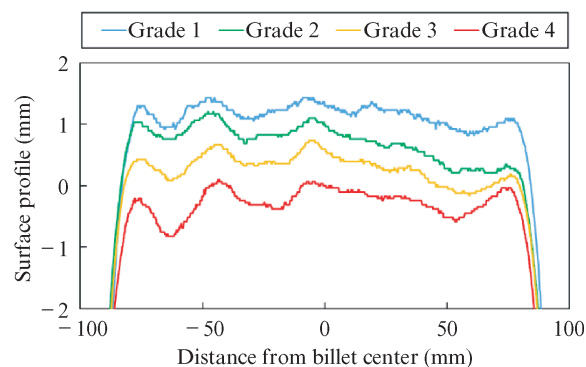


図 5 溶削後のビレット表面プロファイル

Fig. 5 Surface profile of billets after hot scarfing

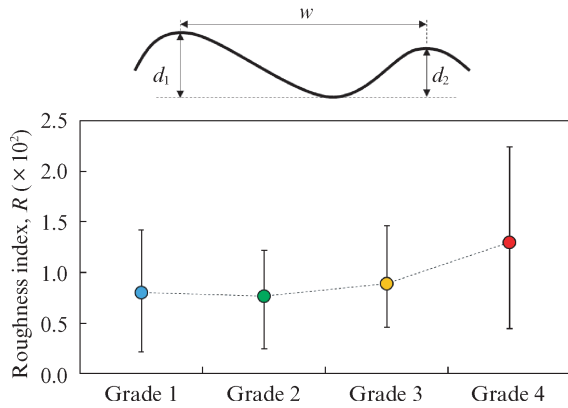


図6 溶剤量と表面粗さの関係

Fig. 6 Hot scarfing grade and roughness of billet surface

各面の表面粗さ指数を測定した。水準別の表面粗さ指数の測定結果を図6に示す。図6において、各プロットはビレット4面の表面粗さ指数の平均値、エラーバーは各水準における最大値と最小値を示している。溶剤量が水準4から水準2と減少するにつれて表面粗さ指標は低下した。このことから、ホットスカーフの溶剤量が多いほど溶剤後のビレット表面は凹凸（溶剤ムラ）が激しく、ヘゲ疵に加えてホットスカーフ以後の仕上圧延工程で表面凹凸に起因する疵が発生するリスクが高いといえる。前節の試験結果でも、CC12C14を除く3鋼種で、試験条件で線状疵は減少しており、これらの一部は溶剤後表面の凹凸に起因する疵である可能性がある。

3.3 表層介在物の評価

casting時のオシレーションに伴い初期凝固シェルが溶鋼側に大きく曲がることでブルーム表層下には爪状凝固組織（以下、爪）が形成されることがあり、その爪の内側に介在物や気泡が捕捉されるとブルーム表層に欠陥を生じることがある。したがって、ホットスカーフで表層部の爪を溶剤により除去することはビレットの表面欠陥を低減する上で重要である。

文献では、ブルーム表層下に形成される爪は鋼中炭素濃度の低下に伴い深くなり、極低炭素鋼で特に深くなることが報告されている⁸⁾。JFE スチール仙台製造所で製造されたブルームの爪深さを現品のマクロ画像から実測したところ、中炭素鋼であるSMnV440H（C: 0.40 wt%）に比べて、低炭素鋼であるSAE1006K（C: 0.06 wt%）では爪深さの平均が1.5倍、最大深さは2倍と文献と同様に低炭素鋼でより深い爪の存在が確認された。すなわち、ホットスカーフにより爪を

除去するためには、低炭素鋼においてより多くの溶剤量が必要であるといえる。ただし、爪の深さは casting速度等の casting条件も影響すると考えられるため、炭素濃度以外の要素も考慮する必要がある。

4. おわりに

- (1) ビレットの磁粉探傷画像から疵種類を自動で判定する画像認識AIモデルを開発した。AIモデルによる判定の後に決定木による再判定を行うことで判定精度が向上した。
- (2) 開発したモデルを用いてホットスカーフ溶剤量の削減前後でビレットに発生する疵種類の評価を実施したところ、以下の知見が得られた。
 - (a) 溶剤量を削減することで、一部鋼種でヘゲ疵の減少が認められた。溶剤量を削減したことで溶剤時のスプラッシュの飛散が低減されたためだと考えられる。
 - (b) 溶剤量が少ないほど溶剤後のビレット表面の凹凸は小さくなり、良好な表面性状が得られた。
 - (c) 低炭素鋼では、ブルーム表層下に爪状凝固組織が深く形成されるため、溶剤量を決定する上で考慮が必要である。
- (3) 上記知見をもとに、現時点で、12鋼種について溶剤量を30%削減した。

参考文献

- 1) Ren, S.; He, K.; Girshick, R.; Sun, J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017, vol. 39, no. 6, p. 1137–1149.
- 2) Liu, W.; Anguelov, D.; Erhan, D.; Szegedy, C.; Reed, S.; Fu, C.; Berg, A. C. SSD: Single Shot MultiBox Detector. *European Conference on Computer Vision*. 2016, p. 21–37.
- 3) Redmon, J.; Divvala, S.; Girshick, R.; Farhadi, A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016, p. 779–788.
- 4) Powers, D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*. 2011, vol. 2, no. 1, p. 37–63.
- 5) 岩本隆, 村上俊之. 自動車ギア・バルブ部品用棒鋼・線材一環境に優しいPbフリー快削鋼一. *JFE 技報*. 2004, no. 4, p. 64–69.
- 6) 村上俊之, 白神哲夫, 三瓶哲也, 及川勝成, 石田清仁. 計算状態図を活用した硫化物形態制御型 AISI12L14 代替鉛フリー低炭素硫黄快削鋼. までりあ. 2004, vol. 43, no. 2, p. 136–138.
- 7) 村上俊之, 富田邦和, 白神哲夫. AISI12L14 代替非鉛快削鋼の開発. *JFE 技報*. 2009, no. 23, p. 17–23.
- 8) Yamamura, H.; Mizukami, Y.; Misawa, K. Formation of a Solidified Hook-like Structure at the Subsurface in Ultra Low Carbon Steel. *ISIJ International*. 1996, vol. 36, p. S223–S226.