

# 酸洗ヘゲ検出センサの検出性能向上技術の開発

## Improvement Detection Performance of Pickling Scab Sensor

重藤 祐輔 SHIGEFUJI Yusuke JFE スチール DX 戦略本部 スマートファクトリー推進部 自動化室

### 要旨

JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）冷間圧延工場には、圧延中の板破断の原因となる鋼板表面の疵（ヘゲや耳割れ）を検出する表面検査装置（ヘゲ検出センサ）がある。この装置が疵を検出するとラインを停止してオペレーターが処理を行う。しかし過検出（疵がないにもかかわらず疵ありと判定）による処理不要の停止が全体の35%発生しており、過検出の抑制が求められていた。今回、機械学習による欠陥判定ロジックを開発し、過検出を50%低減することに成功したため、その概要を報告する。

### Abstract:

At JFE Steel (Kurashiki District) Cold Rolling Mill, a surface inspection device (scab detection sensor) to detect defects (scab/cracked edge) on the surface of steel sheets that cause sheet breakage during rolling has been installed. When this device detects defects, the line is stopped and treatment is performed. However, unnecessary stops due to over-detection (judged to have defects even though there are no defects) occur in 35% of the total number of detections, and suppression of over-detection was required. This time, we have developed a defect judgment logic using machine learning and achieved a 50% reduction in over-detection. Here, we report the outline of this development.

## 1. はじめに

JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）冷延工場の No.1 冷間圧延機（No.1 Tandem Cold Mill: 1TCM）は、No.2 酸洗ライン（No.2 Pickling Line: 2PL）と連続するライン（2PL-1TCM）である。No.2 酸洗ラインの出側には、No.1 冷間圧延機による圧延時の板破断要因となる鋼板表面の疵（ヘゲや耳割れ）を検出するための表面検査装置（ヘゲ検出センサ）がある。この装置が疵を検出した際には、ラインを停止し、オペレーターが処理（目視点検、疵の除去、マーキング、圧延機での減速圧延・空通し）を行う。しかし、ヘゲ検出センサの過検出による処置不要の停止が検出数全体の35%に占めており、生産能力低下の要因となっている。

このことから、不要な停止を削減するために、ヘゲ検出センサの過検出の削減が求められている。今回、ヘゲ検出センサの過検出削減による生産能力向上を目的に、機械学習を適用した新しい疵判定ロジックを開発した。

本稿では、ヘゲ検出センサの概要、開発した疵判定ロジックおよびその立ち上げ状況について報告する。

## 2. 冷延工場 2PL-1TCM の概要

JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）冷延工場の 2PL-

1TCM は、酸洗槽で熱延鋼板表面のスケール（酸化鉄）を除去した後、圧延機で目標の板厚に仕上げ、次工程に鋼板を供給する。

本稿で対象とするヘゲ検出センサは、圧延時の板破断防止を目的に No.2 酸洗ラインの酸洗槽出側のブライドルロール上面に設置されており、鋼板表面の探傷を行う当社の ONLY1 センサである。疵を検出した際には、自動でラインを停止し、オペレーターが処置（目視点検、疵の除去、マーキング、圧延機での減速圧延・空通し）を行う。

2PL-1TCM のライン概要を図 1 に示す。

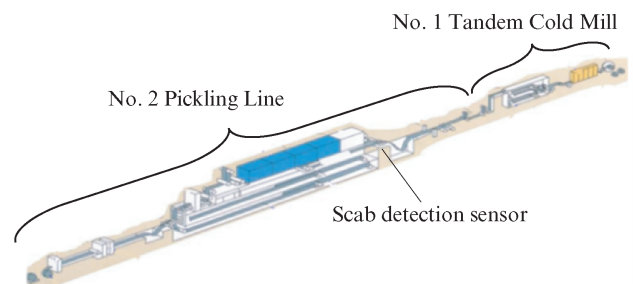


図 1 2PL-1TCM のライン概要  
Fig. 1 Overview of 2PL-1TCM

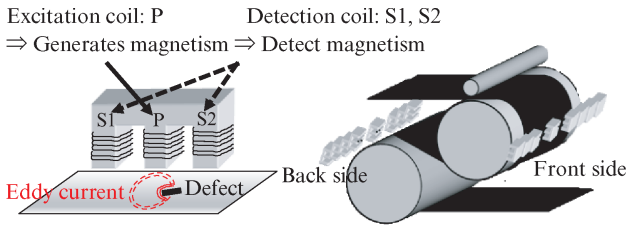


図2 ヘゲ検出センサの概要

Fig. 2 Outline of scab detection sensor

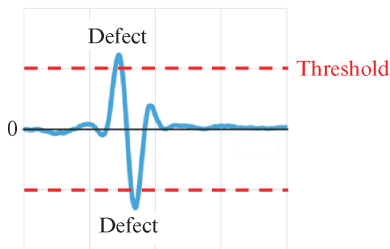


図3 ヘゲ検出センサの出力信号と疵

Fig. 3 Output signal and defects of scab detection sensor

### 3. ヘゲ検出センサの原理と課題

#### 3.1 ヘゲ検出センサの原理<sup>1,2)</sup>

ヘゲ検出センサは渦流式の磁気探傷装置であり、励磁コイルで鋼板表面を励磁し、発生した渦電流の変化を検出することで探傷を行う。鋼板表面に疵が存在すると、鋼板表面の渦電流の大きさと分布が変化し、渦流探傷装置はこの変化を捉えることで疵を検出する。

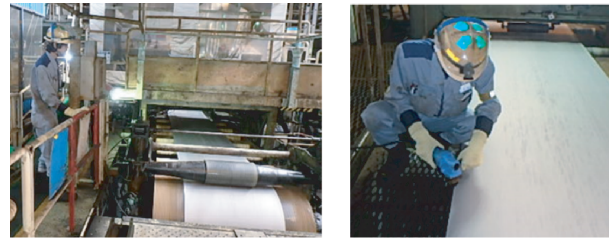
検出器はE型になっており、磁束を発生させる励磁コイルPと磁束の変化を検出する2つの検出コイルS1, S2で構成され、渦流探傷装置は2つの検出コイルS1, S2の差分を出力することで、鋼板-センサ間の距離変動の影響を抑制している。この検出器を幅方向に並べることで鋼板表裏面の全幅・全長の探傷を行う。

ヘゲ検出センサによる表面探傷では、鋼板に疵がない時は、検出コイルの出力はほぼ0[V]となるが、疵が検出器直下を通過した際、検出コイルは数[V]程度の出力を生じる。この出力にしきい値を設けることで、疵を判定する。

ヘゲ検出センサの概略図を図2に、ヘゲ検出センサの信号出力と疵判定の概略図を図3に示す。

#### 3.2 操業におけるヘゲ検出センサの運用と課題

ヘゲ検出センサが疵を検出した際には、No.1冷間圧延機での板破断防止のために、ラインを自動で停止し、検査場でオペレーターが鋼板表面の目視点検を行う。この点検の結果、圧延機で板破断の恐れがある疵（ヘゲや耳割れ）と



(a) Visual inspection

(b) Removal of defects

写真1 オペレーターによる目視点検・手入れ

Photo 1 Visual inspection and removal of defects by operator

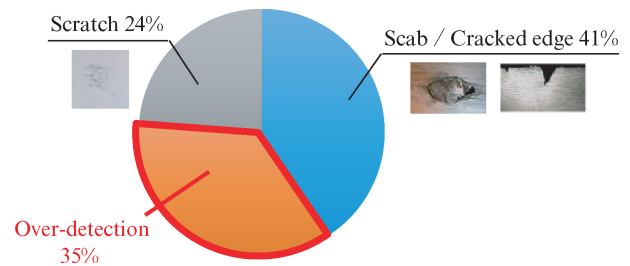


図4 ヘゲ検出センサの検出割合

Fig. 4 Ratio of detection by scab detection sensor

判断された場合は、オペレーターが処置（目視点検、疵の除去、マーキング、圧延機での減速圧延・空通し）を行う。このヘゲ検出センサの過検出により、不要なライン停止や目視点検作業が発生し、減産の要因となっている。

オペレーターによる目視点検・手入れの様子を写真1に、ヘゲ検出センサの検出割合を図4に示す。

### 4. 過検出対策ロジックの開発

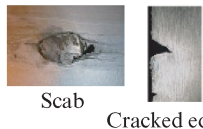
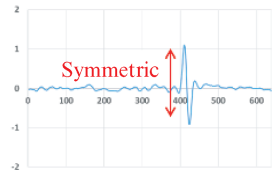

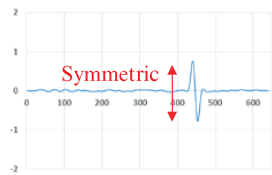

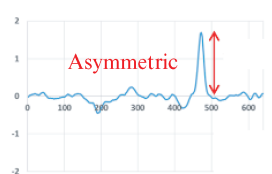
#### 4.1 過検出の要因と対策

過検出の要因は、主に鋼板とセンサ間の距離変動（①鋼板の形状不良、②通板中の鋼板の波打ち）によるものであり、他社では渦流探傷機とカメラを組合せたセンサで、過検出を削減する手法が適用されている。

過検出対策としては、ハード面（センサによる鋼板の形状不良や波打ちの検出）あるいは、ソフト面（センサ出力から疵と過検出を識別）での対策が挙げられる。ハード面での対策は過検出をゼロにできる可能性があるが、コストが高く、費用対効果が小さい。それに対して、ソフト面での対策は、すべての過検出を削減できないが、開発費を抑えられ、費用対効果が大きい。以上の理由から、費用対効果の大きいソフト面での対策を実行することとした。

ヘゲ検出センサの出力信号を調査した結果、鋼板の波打ちにより、通常は正負両方向に出力されるはずの波形が、片側のみ波形が出力されるパターン（以下、過検出（片側））が過検出の30%で観測された。この波形パターンの違

表1 疵の特徴とへげ検出センサの出力波形  
Table 1 Characteristics of defects and output waveform of scab detection sensor

Type	Figure / image	Sensor output	Countermeasure
Scab / Cracked edge	 <p>Scab Cracked edge</p>	 <p>Symmetric</p>	
Over-detection	<p>Out of shape (70%)</p>  <p>Cross-sectional shape (image)</p>	 <p>Symmetric</p>	<p><u>Hardware improvements (sensor development)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Cost : Large</li> <li>•Target: Out of shape Swelling</li> <li>•Production period: Long</li> </ul>
	<p>Swelling (30%)</p>  <p>Cross-sectional shape (image)</p>	 <p>Asymmetric</p>	<p><u>Software improvements (logic development)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Cost : Small</li> <li>•Target: Swelling</li> <li>•Production period: Short</li> </ul>

いに着目し、機械学習を用いて過検出（片側）を識別する新ロジックを開発した。疵の特徴とへげ検出センサの出力波形を表1に示す。

#### 4.2 機械学習手法の選定

機械学習は、出力値によって『分類（データの識別）』と『回帰（数値の予測）』に分けられるが、今回は過検出の識別を行うため、『分類』に適合する手法を用いた。この『分類』の中にも、『ディープラーニング』、『決定木』、『回帰分析』等の手法があり、精度が高くなるほどモデル式は複雑になる。今回は、①モデル式が分かりやすく、モデル式と物理量を照らし合わせて評価できること、②調整が容易におこなえること、という観点から手法を選定した。

『ディープラーニング』は、特徴量の選定が不要で予測精度が高いことからさまざまな分野で適用されているが、モデルがブラックボックスであり、誤識別などの不具合が生じた場合の原因究明が困難である。また、『決定木』は、モデル出力値が『クラス』であり、調整の際には、分岐条件ごとにしきい値の見直しが必要となる。本件では、①モデル式と特徴量の関係が分かりやすく、モデル出力値と物理量・波形を照らし合わせての解析が可能、②モデル出力値が『数値』であるため、出力に対するしきい値のみで調整可能、③実用可能なレベルの精度を有していることから、『ロジスティック回帰分析』を選定した。

機械学習手法の比較を表2に示す。

#### 4.3 特徴量の選定と学習モデルの評価

##### 4.3.1 評価関数 ((1) 式)

ロジスティック回帰分析では波形データの形状を識別できないため、過検出を識別するためには、疵と過検出（片側）の波形の違いを特徴量（数値）として表現する必要がある。疵と過検出（片側）には、①疵はX軸に線対称な出力波形を有するのに対し、過検出（片側）は片側のみの出力波形を有する、②信号レベルは疵が過検出よりも高い、といった特徴があることから、出力波形の違いを数値化する評価関数  $E(x)$  を考案し、信号レベルとともに特徴量とすることで過検出の識別を試みた。

評価関数  $E(x)$  は、疵（正負対象な波形）の場合に増加し、過検出（片側のみの波形）の場合は0となるように設計した。この評価関数は、へげ検出センサの出力値  $E(x)$  のピークピーク値 ( $E_{pp}(x)$ ) と、正負対象に出力している場合は大きくなり、片側のみの波形の場合は0に近づく対称性を評価する項である  $\exp\{-|f(x)+f(x+k)|\}$  を掛け合わせることで疵と過検出（片側）の波形形状の違いを数値として評価できる。

##### 4.3.2 ロジスティック回帰モデル ((2) 式)

上記の結果、評価関数と出力レベルを特徴量として作成したロジスティック回帰モデルは、評価関数および出力レベルが増加すると出力が1（疵）に近づき、減少すると0（過検出）に近づくことから、物理量に見合ったモデルが作成できたと考える。

表 2 機械学習手法の比較<sup>3)</sup>

Table 2 Comparison of machine learning methods


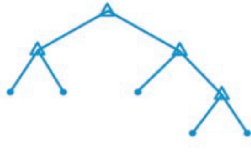

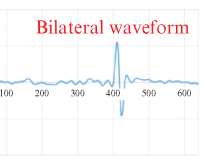
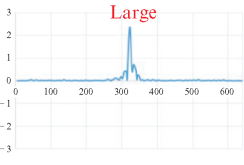
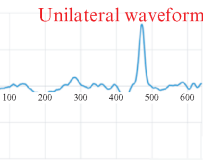
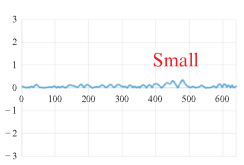
Methods	Deep learning		Decision tree		Logistic regression analysis		
Figure							
Property	Model equation	Black box	Understandable		Understandable		
	Number of threshold	Black box	Multiple thresholds (Number of branches)		1 Threshold		
	Output format	Class	Class		Numerical value		
Evaluation	Clarity of model equation	Black box	1	Understandable relationship with property	5	Understandable relationship with property	5
	Ease of adjustment	Number of layers, weight adjustment	1	Threshold for each branch condition	3	Threshold for output	5
	Accuracy	High	5	Medium	5	Low (Level of usability)	5
Total			7		13		15

表 3 ヘゲ検出センサ出力と評価関数

Table 3 Scab detection sensor output and evaluation function

	Sensor output	Evaluation function
Scab / Cracked edge		
Over-detection		

$$E(x) = |f(x) - f(x+k)| \times \exp[-|f(x) + f(x+k)|] \dots (1)$$

$$q(x) = \frac{1}{1 + e^{-y}} \dots (2)$$

$$y = -4.179 + 3.746x_1 + 0.247x_2$$

$x_1$ : 評価関数出力値

$x_2$ : 検出レベル

学習データ数: 疵: 60、過検出 (片側): 20

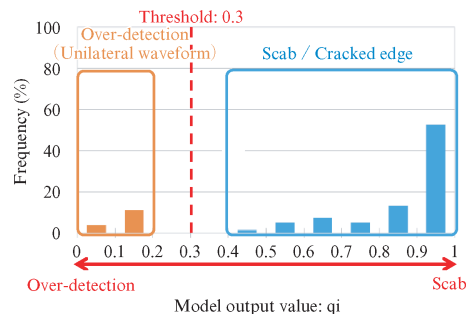


図 5 モデル出力値の分布 (シミュレーション結果)

Fig. 5 Model output value distribution (Simulation results)

### 4.3.3 シミュレーション結果

上記で作成したモデルをサンプルに適用した結果、回帰モデルの出力値は、疵は 0.4 以上、過検出は 0.2 未満であり、しきい値を 0.3 とすることで過検出を識別できることを確認した。

ヘゲ検出センサ出力と評価関数出力を表 3 に、オフラインシミュレーション結果を図 5 に示す。

## 5. 立上げ状況

オフライン検証で新ロジックの有効性が確認できたため、2018 年 10 月から運用を開始した。立ち上げ後 1 か月間の運

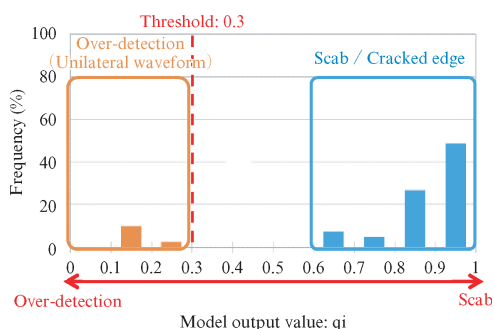


図6 新ロジック立上げ後のモデル出力値の分布

Fig. 6 Model output value distribution after launching new logic

用実績では、過検出を50%（24%→12%）削減できており、過検出（片側）判定時に圧延機で破断が発生していないことから、新ロジックの有効性を確認でき、生産能力向上を実現できた。

新ロジック立上げ後のモデル出力値の分布を図6、新ロジック立上げ後の検出結果を図7に示す。

## 6. おわりに

JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）冷延工場のNo.2 酸洗ラインの表面検査装置（へげ検出センサ）の過検出による減産削減を目的に、新しい疵判定ロジックを提案し、以下の結果を得た。

- ①機械学習手法としてロジスティック回帰分析を選定
- ②過検出の信号出力の特徴を数値化する評価関数を提案

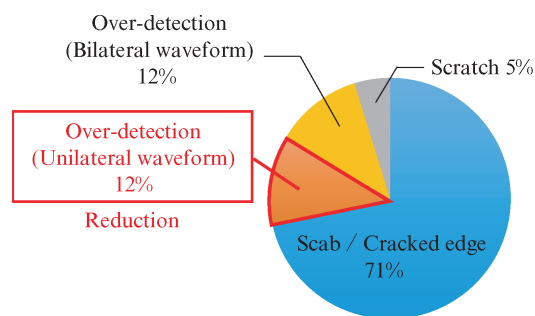


図7 新ロジック立上げ後の検出結果

Fig. 7 Result of new model

③提案した判定ロジックにより過検出を50%削減し、生産能力の向上を実現

2018年10月に新ロジックを立上げ、生産能力向上に寄与している。今後は、へげ検出センサと他方式のセンサ（距離計・カメラ等）を組み合わせた新しいセンサ方式を検討し、さらなる過検出の削減をめざす。

### 参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会. 非破壊検査シリーズ 渦流探傷試験Ⅱ. 1995. 156p.
- 2) 株式会社神戸製鋼所:「表面欠陥検査装置」. 特開 2015-125115, 2015. 7. 6. 15p.
- 3) マイケル J. A. ベリー, ゴードン・リノフ. データマイニング手法. 海文堂出版, 1999, 329p.
- 4) 重藤祐輔, 岩田輝久. 酸洗へげ検出センサの検出性能向上技術の開発. 電気学会研究会資料, 産業応用部門ものづくり研究会, 2022, MZK22009, p. 13-17.

本稿は、主執筆者が同じく執筆した参考文献4)の論文の一部表現を変更して転載しております。