

## 論文

# アルミ熱間圧延における画像処理を用いた ロールコーティング状態のオンマシン推定の試み

立山 尚樹\* 福井 類\*\* 割澤 伸一\*\*

高柳 仁史\*\*\* 藤森 崇起\*\*\*

## Trial of On-Machine Estimation of Roll Coating Condition for Aluminum Hot Rolling Using Image Processing Technology

Naoki TATEYAMA\*, Rui FUKUI\*\*, Shinichi WARISAWA\*\*,

Hitoshi TAKAYANAGI\*\*\* and Takayuki FUJIMORI\*\*\*

(Received on December 27, 2017)

In the hot rolling process of aluminum, a roll coating is formed on the surface of the work roll. The roll coating consists of particles of aluminum, aluminum oxide, and coolant. When the roll coating is thick or nonuniformly distributed, it detaches from the work roll onto the surface of the rolled material, causing surface defects on aluminum products. Therefore, the condition of the roll coating must be properly managed. However, work roll monitoring techniques applicable in the hot and humid environment of the manufacturing process do not yet exist. To develop such monitoring techniques, we focus on the optical changes of the surface of the work roll and process these optical changes quantitatively by extracting image features from work roll images taken by a camera. The features we designed in this work were found to be effective in capturing the trend of optical changes of the work roll surface.

**Key words:** roll coating, roll coating measurement, maintenance management, image feature, blur detection, fuzzy color histogram.

### 1. 緒言

アルミの熱間圧延では、圧延材から生じるアルミの微粉およびその酸化物、クーラントが高温・高圧力で押し付けられ、ワークロール表面に堆積することで、ロールコーティングと呼ばれる薄層が形成される<sup>1)</sup>。ロールコーティングは適切な厚さで分布することで、圧延時にワークロールを圧延材にかみこみやすくさせる効果や、圧延材のワークロールへの焼き付きを防ぐ効果がある。しかし、ロールコーティングは過多や不均一の状態となるとワークロールから剥がれ落ち、製品の外観を大きく損なう表面欠陥を生じさせることがある<sup>2)</sup>。そのためワークロール上のロールコ

ーティング状態を生産工程中で適切に管理して未然に欠陥を防ぐことが重要である。現状では圧延スケジュールの調整や、ロールコーティングをオンマシンで除去するブラシロール<sup>3),4)</sup>を用いることによってロールコーティング状態を制御しているが、これらの手法は製造現場の経験則的なノウハウに拠るところが大きく、直接ロールコーティングの状態を表す指標を測定できていないため欠陥は防ぎきれしていない。そのため、直接ロールコーティング状態を表す指標を測定することが求められるが、そのような指標を測定する計測機器は熱間圧延の高温多湿な環境には不向きである。そのため現状ではロールコーティング状態をオンマシンで測定する技術は未開発である。

間接的にロールコーティング状態を表す指標として光学的特性が考えられる。これはロールコーティング中に含まれる微粒子によって変化する光学現象を捉えるものである。本研究ではワークロールから一定距離離れて計測可能なセンサとしてカメラを用いて画像処理によりオンマシンでロールコーティング状態を測定する。ワークロール画像から

\* 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
Department of Engineering, University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan.

\*\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒227-0882 千葉県柏市柏の葉  
5-1-5 Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo, 5-1-5  
Kashiwanoha Kashiwa-city, Chiba 227-0882, Japan.

\*\*\* (株)UACJ 技術開発研究所 〒455-8670 名古屋市港区千年 3-1-12  
Research & Development Division, UACJ Corporation 3-1-12, Chitose,  
Minato-ku, Nagoya 455-8670, Japan.

ロールコーティング状態に伴う光学的変化を定量的に表現可能な指標として画像特徴を設計し、撮影環境の変化の影響を可能な限り取り除いた実験装置を用いて圧延実験を行い、画像特徴によるロールコーティング状態のオンマシン推定の実現可能性を検証する。

## 2. 画像処理によるロールコーティング状態のオンマシン推定

ロールコーティング状態に関する測定では主に膜厚を測定するのが一般的である。蛍光 X 線法による測定<sup>1), 5), 6)</sup>ではワークロール表面からロールコーティングの一部を取り出す必要があるため、実機でのオンマシン測定には適していない。また、渦電流式膜厚計によるロールコーティングの厚み測定の試み<sup>7)</sup>もあるが、現時点で未開発である。以上から現時点ではオンマシンで膜厚を測定することは困難であると言える。

膜厚以外にロールコーティングの状態を表す指標として光学的特性がある。ワークロールはロールコーティングが堆積していくことで表面が白く濁っていく。圧延材製造現場の熟練作業員はワークロール表面を見ることで経験的な感覚からロールコーティングの状態を推定でき、「ギラついた状態」などと官能表現する。

このようなワークロール表面での光学的変化は Fig. 1 に示すモデルで説明される。ロールコーティングが薄い状態(A1)では表面にロールコーティングを形成する微粒子が少ない状態で、ロールコーティングが厚い状態(B1)はこの微粒子が多い状態であると言える<sup>8), 9)</sup>。微粒子が増えると(B1)(1)のようにワークロール表面での乱反射が増大し、(A1)(3)で示すように観測される照明の直接反射光が減少する。また、直接反射光が減少し、乱反射が生じるロールコーティング中の微粒子が増えることで、(B1)(2)で示すように圧延機周辺の光が微粒子表面で反射して観測される。これらの変化はワークロール画像の(A2)から(B2)の変化で確認することができる。画像中央の帯状の白い部分は照明光が鏡面反射し、カメラの CMOS 素子が検出可能な光量の限度を超えて入ったために生じるもので、白飛びと呼ばれる。乱反射光が増大すると(A2)(1)に示すワークロール中央部の照明による白飛び部分の境界が“ぼける”。(B2)(2)で示す部分では、圧延機の塗装色の“映り込み”が生じる。そして直接反射光が減少すると(B2)(3)で示すワークロール下部へのワークロール手前に設置されたコブルガードの“映り込み”が減少する。圧延製造現場の熟練作業員はこのような光学的変化を捉えていると考えられることから、“ぼけ”と“映り込み”に着目した特徴量を設計する。

ワークロール表面の光学的特性に着目した研究として、阿部ら<sup>10)</sup>はチタンの冷間圧延におけるロールコーティングの光学的変化を光沢度の減少として捉えている。しかし、ワークロールに密着して測定する光沢計は実機の高湿多湿環境には適さない。

そこで本研究ではロールコーティング状態の変化に伴う光学的変化を捉えるため、ワークロールから一定距離離れて計測可能なカメラを用いてワークロールの画像を取得し、光学的変化を表す指標として画像特徴を設計することでロールコーティング状態の変化を定量的に扱うことのできる

手法を開発することを目指す。

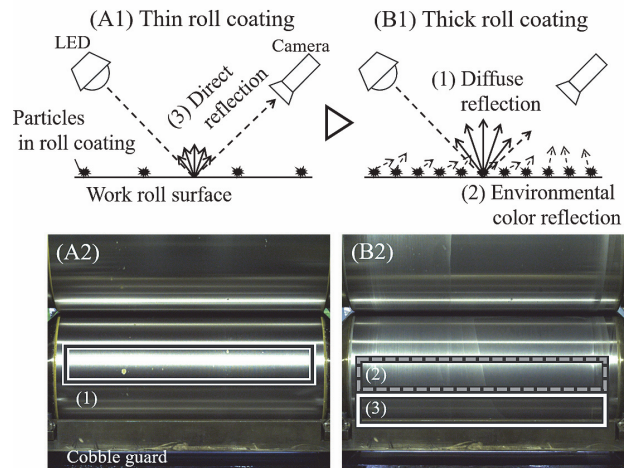


Fig. 1 Optical model of the work roll surface and changes in the work roll surface images

## 3. ロールコーティング状態を表す画像特徴の設計

### 3.1 ぼけ幅を表す特徴量の設計

前節で示したようなワークロールの白飛び部分の境界がぼけていく現象は、画像データではその周辺での輝度値変化が緩やかになることに対応している。本研究では画像のぼけ量を定量的に扱うため、Joshi ら<sup>11)</sup>の定義したぼけ幅の値を用いる。ぼけ幅の計算は次のとおりである。Fig. 2 に示すように白飛び部分の境界と垂直な方向に輝度値を取り出し、輝度値の最大値と最小値の点を特定する。その最大と最小の値の間の 10% と 90% の値を持つ位置の間のピクセル数をぼけ幅と定義する。

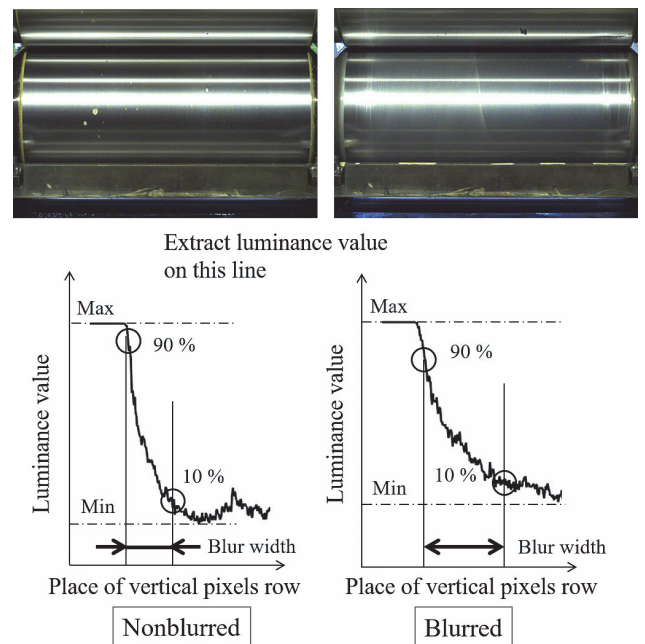


Fig. 2 Calculation method of blur width

境界線がぼけていない状態(Fig. 2 Non-blurred)とぼけた状態(Fig. 2 Blurred)の輝度値の分布を比較すると上の手法

で算出されるぼけ幅はぼけた状態の方が大きくなっていることがわかる。本研究では Fig. 2 のワークロール画像の四角内のぼけ幅を計算する対象とし、この範囲の全ピクセル列それぞれからぼけ幅を算出し、その平均値を画像一枚当たりのワークロールのぼけ幅を表す特徴量とした。

### 3.2 ワークロールへの映り込みを表す特徴量の設計

ワークロールには周辺の光が映り込む。前節で示したように、直接反射光の減少により、ワークロール手前に設置されたコブルガードの映り込みが減少し、乱反射が起こる微粒子が増加することにより圧延機の塗装色が映り込む。これらの変化はワークロールに映り込む色成分の増減に対応しており、画像中の解析対象範囲で色ごとのヒストグラムを作成した際に、特定の色に対応するヒストグラムのビンに割り当てられるピクセル数の増減が確認できる。本研究ではヒストグラム作成手法に Fuzzy color histogram<sup>12)</sup> を用いた。通常の色ヒストグラム化手法では各ビンには特定の範囲の画素値を持つ画素のみを数えるため、ノイズによる画素値の変動が生じると割り当てられるビン自体が変化してしまう。一方で Fuzzy color histogram は各ビンに対応する画素値に近いほど大きい重み付けをつけて数えるため、ノイズによる画素値の変動が生じても本来割り当てられるべきビンへの割り当て量は小さくなるものの 0 にはなりづらいため、ノイズに頑健となる。

本研究におけるヒストグラム作成の流れは Fig. 3 のとおりである<sup>13)</sup>。画像中の解析範囲の画素値(RGB 値、各 0 ~ 255)を CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間に変換し、 $a^*$ 、 $b^*$ を抽出して $a^*$ 、 $b^*$ 平面に散布図を作り、代表点の近さに応じた重み付けでヒストグラムを作成する。この代表点は(R, G, B)=(16*i*, 16*j*, 16*k*)、(*i*, *j*, *k*=0, 1, 2, ..., 15) 4096 点を CIE 1976  $L^*a^*b^*$ 色空間に変換し、 $a^*$ 、 $b^*$ を抽出して $a^*$ 、 $b^*$ 平面に散布図を作ったものを 64 領域に均等に分割したときの点である。

本研究では、圧延機の塗装色の映り込みの増加を Fig. 1(B2)(2)で示す範囲で、コブルガードの映り込みの減少を Fig. 1(B2)(3)で示す範囲で捉え、それぞれの範囲で上の手法により Fuzzy color histogram を作成し、対象とする色成分と近い色成分に該当するヒストグラムのビンへの割り当て数を映り込みの色成分を表す画像特徴として定義した。

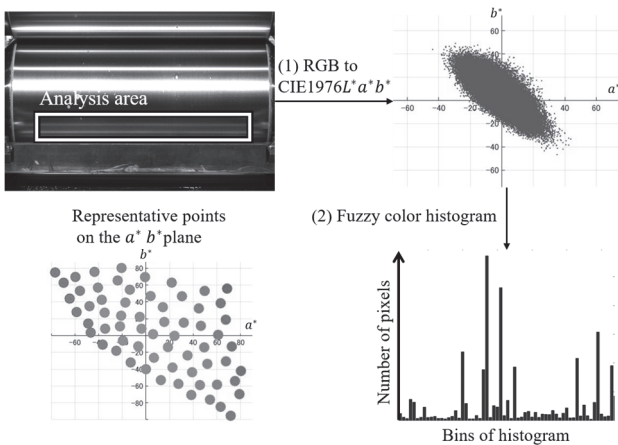


Fig. 3 Extraction of fuzzy color histogram from the analysis area of image

## 4. 実験装置の設計

本実験では UACJ 技術開発研究所内の試験圧延機「TR300」(ワークロール径 325 mm)<sup>14)</sup>を使用した。

圧延機が設置された建屋ではガラス越しに太陽光が射するため照明条件が一定とならない。本研究で注目した画像特徴はワークロール表面における直接反射光と乱反射の増減をみるものため、照明条件が大きく影響することが懸念される。そこで、照明条件を一定にするために太陽光を遮断可能な、Fig. 4 に示すような圧延機全体を囲える覆いを設置した。覆いはカーテン状になっており、圧延時は開けて作業を行うことができるようになっている。

ワークロールを撮影するカメラは IDS の UI-3080CP-C-HQ Rev.2, レンズは興和光学の LM35JC5M2 を使い、ワークロール軸方向全体を撮影した。撮影時のカメラのゲインなどのパラメータは撮影開始時にオートセットしたものを実験を通して固定して使用した。照明は幅 980 mm の MISUMI の LEDSC980-W を使用し、ワークロール幅全体を一様に照らせるようにした。

カメラと照明用 LED は Fig. 5 のような位置関係となっており、撮影した画像にはワークロールだけでなく、ワークロールを押さえつけるバックアップロールが上部に、コブルガードが下部に映り込んでいる。このときの被写界深度は 700 mm 程度のため曲面になっているワークロール全体をピントがぼけることなく撮影することが可能である。

ロールコーティング状態の変化を観察する上で、ワークロールの同じ位置を撮影することが重要である。本研究ではワークロール側面に自作のエンコーダを設置して同位置の画像を取得できるようにした。撮影はワークロールの回転角 90 度ごとに取得し、1 周当たり 4 か所で行った。

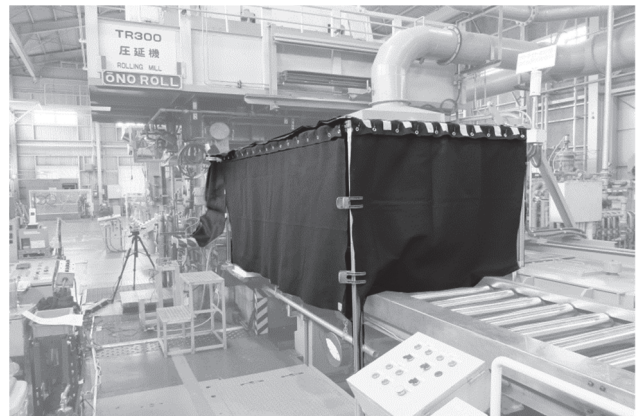


Fig. 4 Cover above rolling mill

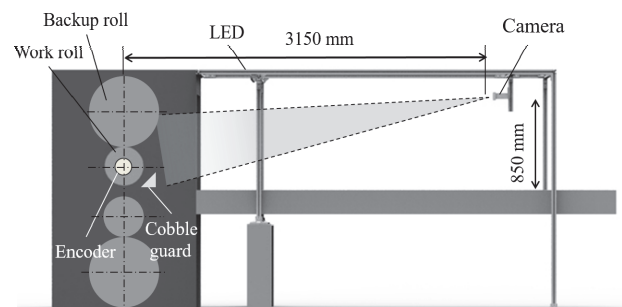


Fig. 5 Arrangement inside cover

## 5. 実験 1：ロールコーティング増加に伴う 光学的特性観察実験

### 5.1 実験目的・実験条件

本実験は 2016 年 12 月に行った。

この実験では圧延によりロールコーティングが増加した時の光学的変化と設計した特徴量の関係性を明らかにすることを目的とする。

実験で使用したワークロールは研磨直後のもので、初期状態でロールコーティングはなかった。圧延材は 15 枚使用し、圧延距離 330 m の圧延を行った。圧延条件は Table 1 のとおりである。ただし圧延機の送り装置の都合により仕上げ板厚が 20 mm と厚く、通常の圧延と比較すると各圧延材の圧延距離が短い。

各圧延材はリバース圧延で 21 ~ 23 パス行い、各圧延での压下量は 4 ~ 7 mm とした。ロールコーティングがより増加しやすいワークロール状態にするためにクーラントは各圧延の開始時のみ使用し、圧延実験中はドライの状態で行った。撮影は各圧延材で 7 回ずつ行い、撮影ごとにワークロールの高さを同じ撮影位置まで移動させた。

ワークロールにはクーラント汚れがあるため、撮影時はエアブローでクーラントを吹き飛ばした。

Table 1 Rolling conditions of experiment 1

Rolled material	Pure aluminum (99.7% Al)
Initial size	W550 × L380 × t 165 mm
Initial temperature	500 °C
Final thickness	20 mm
Number of rolled samples	15
Thickness reduction	4~7 mm / pass
Number of acquired images	7

### 5.2 実験結果

撮影した画像の変化は Fig. 6 の総圧延距離 0 ~ 330 m の範囲の(1)~(3)のとおりで、(1')はぼけ幅の分布、(2')は圧延機の塗装色の映り込みに対応する色成分を持つピクセルの分布(白)の一部、(3')はコブルガードの映り込みに対応する色成分を持つピクセルの分布(白)の一部を表している。ここで切り出されている部分はワークロール画像のうちバックアップロールより下部、コブルガードより上部の範囲の一部である。Fig. 6 からわかるように (1)における白飛び部分の境界はぼけていき、(3)におけるワークロール下部のコブルガードの映り込みは減少していることがわかる。また、(2)においては圧延機の塗装色である、緑色成分が増加している。しかし、圧延距離 125 m を超えるとこれらの変化は視覚的に捉えづらくなっている。また、特徴量に注目すると、圧延距離 125 m までで(1')ではぼけ幅が広くなり、(2')では圧延機の塗装色に対応するピクセルが増加し、(3')ではコブルガードの映り込みに対応するピクセルが減少している。

本実験ではクーラント汚れを避けるため、3 章で述べた光学的変化が起こる範囲のうちクーラント汚れが比較的少

ないワークロールの左半分を解析対象とした。圧延距離に対する各特徴量の変化はぼけ幅は Fig. 7、圧延機の塗装色の映り込みは Fig. 8、コブルガードの映り込みは Fig. 9 の Experiment 1 に示す。これらの変化からわかるように、圧延距離 125 m 付近まではぼけ幅と圧延機の映り込みを表す特徴量は増加傾向、コブルガードの映り込みを表す特徴量は減少傾向になっており、それ以上の圧延距離では変化が小さくなっている。これらの特徴量の変化は実際のワークロール画像の光学的変化に対応していることから、設計した画像特徴量は光学的変化の傾向を捉えるのに適切であると言える。

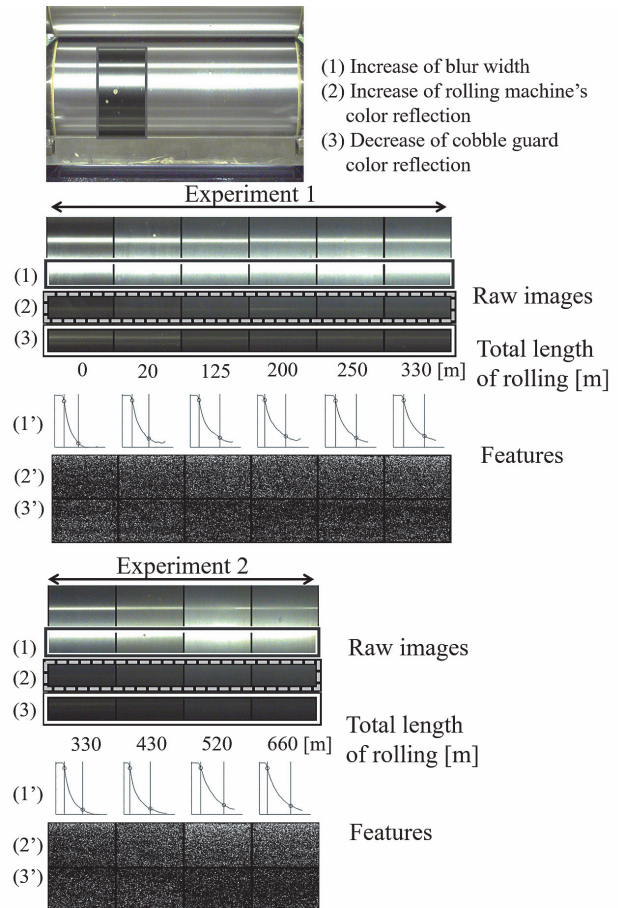


Fig. 6 Optical change on work roll surface

また、図中の○と×はそれぞれ各圧延材の圧延開始時と終了時を示しており、1 枚の圧延材で一定の周期があることがわかる。これはおもにクーラントの蒸発に起因すると考えられる。圧延開始時はクーラントがワークロール表面に潤沢に存在することで表面は光沢を帯び、直接反射光が相対的に強まるので、中央の反射光の境界線ははっきりとし、圧延機の色は映り込みにくくなり、コブルガードは映り込みやすくなる。この圧延材ごとに生じる光学的変化も画像特徴量の変化に現れていると言える。

圧延距離 125 m 以降でワークロールの光学的変化が起こらなかった理由として、ロールコーティング自体が増えていなかった、もしくは、ロールコーティングは増えているが、光学的変化が飽和していたかのどちらかが考えられる。しかし本実験だけでこれを結論付けることは難しい。その

ため追実験として、ロールコーティングが増えやすい条件で圧延を行うことで、光学的変化がこの後も生じるかを明らかにする必要がある。

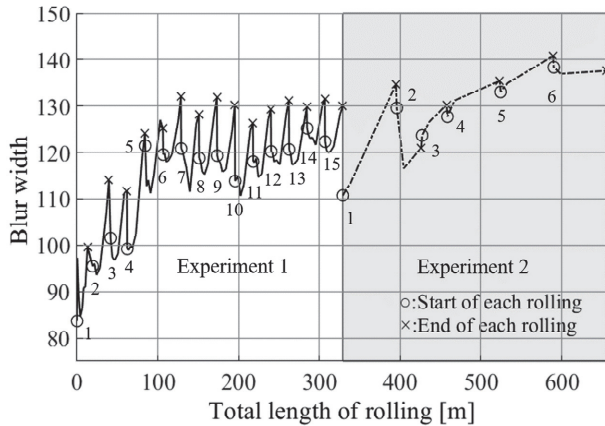


Fig. 7 Change in image feature of blur width

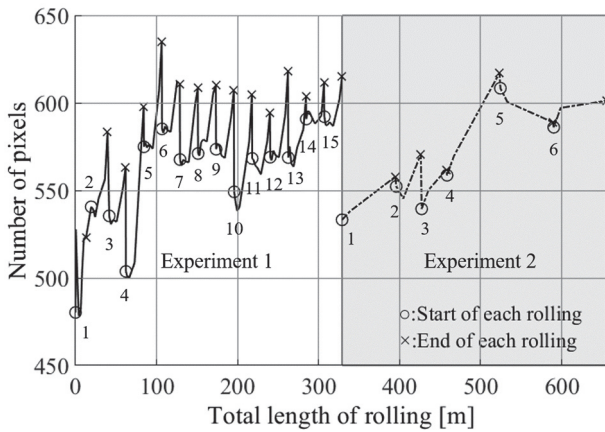


Fig. 8 Change in image feature of rolling mill's paint color

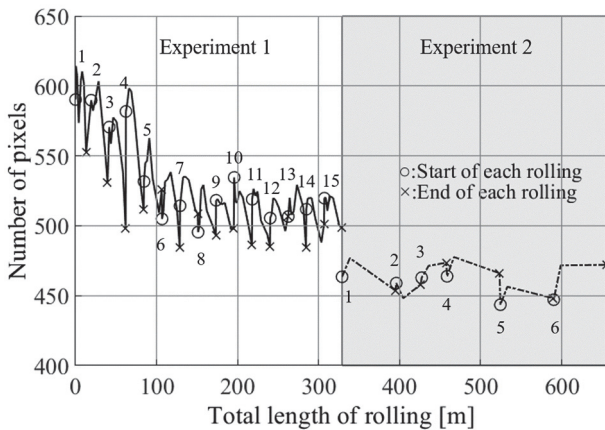


Fig. 9 Change in image feature of cobble guard color

## 6. 実験2：圧延条件変更による光学的特性変化の観察実験

### 6.1 実験目的・実験条件

本実験は2017年3月に行った。ワークロールは実験1で使用したものを3か月間未使用の状態で保管したものを使

用した。

この実験では1回目の実験により光学的変化が生じなくなった状態から圧延条件を変えることで、よりロールコーティングを増加させ、光学的変化を生じさせられるかを検証する。ロールコーティングを増加させるため、圧延材1枚当たりの圧延距離を伸ばし、初期温度を上げた<sup>15)</sup>。圧延条件はTable 2のとおりである。

実験では圧延材を6枚使用した。圧延距離を伸ばすため、圧下量を小さくし多数回ワークロールと圧延材が触れるようにした。各圧延材での圧下量は板厚60mmまででは10mm、その後は1,4~6枚目の圧延材では3mm圧下、2,3枚目の圧延材では10mm圧下とした。1枚当たりの圧延距離は1,4,5,6枚目では約90m、2,3枚目では約30mである。1回目の実験と2回目の実験を合わせると圧延距離は計約660mとなる。

また、撮影時の温度低下をなるべく防ぐため、各圧延材での撮影は3回にとどめた。

撮影時のワークロールの高さ、カメラのパラメータ、撮影時にクーラントを飛ばすためのエアブローは1回目の実験と同じ条件である。

Table 2 Rolling conditions of experiment 2

Rolled material	Pure aluminum (99.7% Al)
Initial size	W550 × L380 × t 165 mm
Initial temperature	550 °C
Final thickness	5 mm
Number of rolled samples	6
Thickness reduction	3 or 10 mm / pass
Number of acquired images	3

### 6.2 実験結果

撮影した画像の変化はFig. 6の総圧延距離330~660mの範囲のとおりである。一回目の実験終了時と比較して若干画像が暗くなっているのは照明用LEDの出力が低下してしまったためである。

実験2で取得した画像からわかるように、実験開始時に比べてFig. 6(1)における白飛び部分の境界付近はぼけている。これはロールコーティングがさらに増加していることを示唆している。しかし、ワークロール下部を見ると、Fig. 6(3)におけるコブルガードの映り込みは圧延距離430m付近から見えなくなっている。また、Fig. 6(2)における圧延機の塗装色の映り込みの変化は小さかった。1枚あたりの圧延距離を大幅に伸ばしたことで実験1よりも1枚あたりの圧延終了時のワークロール表面の潤滑状態は悪くなっていた。これがロールコーティングの増加に大きく寄与していたと考えられる。

本実験でも実験1と同様にクーラント汚れが比較的少ないワークロール左半分を解析対象とした。圧延距離に対する画像特徴量の変化はぼけ幅はFig. 7、圧延機の塗装色の映り込みはFig. 8、コブルガードの映り込みはFig. 9のExperiment 2に示す。照明用LEDの出力が下がったことにより、ぼけ幅が小さくなり、光の映り込みが減少するため、

3 つの特徴量で実験 2 開始時は実験 1 終了時と比べ低い値となっている。

ぼけ幅の特徴量は全体的に増加傾向にある。これは視認したロールコーティングの増加傾向と一致する。

一方圧延機の塗装色の映り込みを表す特徴量では圧延材 4 枚目で増加はするが、そのほかでは実験 1 と異なり増加傾向がなかった。また、コブルガードの映り込みを表す特徴量は実験 1 と異なり、減少傾向がなくなった。

このように実験 1 と異なる増減の傾向となったことには圧延材初期温度を高くしたことによるクーラントの焦げ付きが理由として考えられる。

圧延材初期温度を高くしたことによるクーラントの焦げ付きは、主に色の特徴量に影響を与えたと考えられる。この焦げ付きはエアブローでは除去できなかったものである。クーラントの焦げ付きは黄色みを帯びているため、CIE 1976  $L^*a^*b^*$  の色空間ではコブルガードの色、圧延機の塗装色の近くに位置する。Fig. 10 はクーラントの焦げ付きがあるワークロール画像(上側)と圧延機の塗装色の映り込みに対応する色成分を持つピクセルの分布(下側、白色)である。これが示すようにクーラントの焦げ付きがあるとその部分は表面の反射状態にかかわらず、注目するヒストグラムのビンに含まれてしまうため、特徴量に影響する。圧延材 4 枚目での圧延機の塗装色の急激な増加はこれによるものと考えられる。

また、クーラントの焦げ付きがぼけ幅の特徴量に影響が少なかったのは、Fig. 10 の黒枠内のように、クーラントの焦げ付きは縦筋状に分布しており、ぼけ幅を計算する範囲では局所的にしか影響しないためと考えられる。

以上の結果からロールコーティングの光学的特性観察実験では、(1)照明出力を統一すること、(2)クーラントの焦げ付きを抑えるために圧延材初期温度は高くしすぎないこと、(3)クーラント焦げ付きの色成分から  $a^*$ 、 $b^*$  が遠い色成分を持つ物体を圧延機周辺に置くことでワークロールにその色を映り込ませ、クーラント汚れの状態に影響を受けづらい色の特徴量を用いることが重要であると言える。

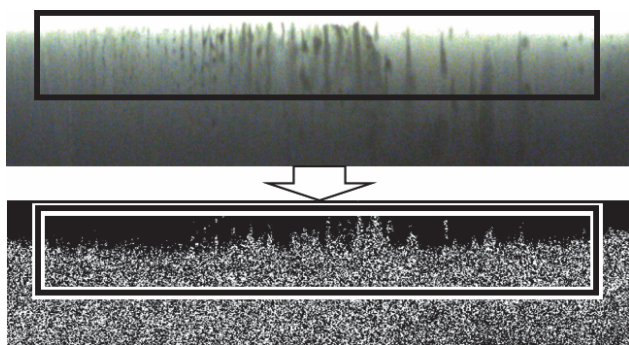


Fig. 10 (Upper) Area with burnt coolant  
(Lower) White pixels belong to the bin of rolling mill's paint color

## 7. 結 言

本研究では熱間圧延における画像処理技術を用いたロールコーティング状態のオンマシン推定手法の開発の試みを行った。照明条件を統一した環境で行ったロールコーティング撮影実験により得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 圧延に伴う乱反射光の増加と直接反射光の減少、ロールコーティング中の微粒子における環境光の反射に着目した、ぼけ幅の特徴量と、ワークロールへの圧延機の塗装色の映り込みとコブルガードの映り込みの色成分を表す特徴量はロールコーティングによる光学的变化を捉えることができる。
- (2) 圧延材温度上昇によるクーラントの焦げ付きが生じると、色の映り込みを表す特徴量は大きな影響を受ける。その影響を少なくするためには圧延材の初期温度を高くしすぎないことや、クーラントの焦げ付きとは異なる色成分をもつ物体をワークロールに映り込ませるなどの工夫が必要である。

本研究ではロールコーティングに起因する表面欠陥を生じさせることはできていないため、欠陥を未然に防ぐための技術の開発は行えていない。将来的には光学的变化と欠陥発生との関係性を明らかにしていく必要があり、そのためには圧延距離を更に伸ばし、表面欠陥を生じさせる実験を行う必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) Ito, T. : Jpn. Inst. Light Met. Research Meeting Report, **24** (1991).
- 2) Matsui, K. : J. Jpn. Inst. Light Met., **40-2** (1990), 156-168.
- 3) Kadoyama, T. : Jpn. Inst. Light Met. Research Meeting Report, **41** (2001).
- 4) Suzuki, M. : J. Jpn. Inst. Light Met., **31-11** (1981), 739-747.
- 5) Matsumura, M. : Proc. 116th Jpn. Spring Conf. Inst. Light Met., (2009), 191-192.
- 6) Watanabe, T. : Sumitomo Light Met. Tech. Rep., **52-1** (2011), 95-100.
- 7) Hishikawa, S. : Jpn. Inst. Light Met. Research Meeting Report, **50** (2007).
- 8) Suzuki, M. : J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **14-149** (1973), 455-463.
- 9) Yoshida, T. : J. Jpn. Soc. Lubr. Eng., **30-6** (1985), 438-444.
- 10) Abe, K. : Proc. 2014 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2014), 189-190.
- 11) Han, J. : In Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, (2008), DOI:10.1109/CVPR.2008.4587834.
- 12) Konstantinidis, K. : Optics Communications, **248** (2005), 375-386.
- 13) Han, J. : IEEE Transactions on Image Processing, **11-8** (2002), 944-952.
- 14) Miyaji, K. : Sumitomo Light Met. Tech. Rep., **33-4** (1992), 47-57.
- 15) Yoshida, T. : J. Jpn. Soc. Lubr. Eng., **33-10** (1988), 733-739.