

蛍光法による冷間圧延材料表面上の油膜計測 による潤滑挙動の解明

小豆島 明*・夏井 大*²・稲垣 訓*³・菅井 哲也*³

Explanation of Lubrication Behavior by means of Oil Film Measurement on Rolled Sheet Surface Measured by Fluorescence Method

Akira AZUSHIMA, Masaru NATSUI, Satoshi INAGAKI and Tetsuya SUGAI

Synopsis : The photographs of workpiece surface illuminated with the UV light after rolling are taken by means of a fluorescence microscope with a camera. The workpieces having a smooth surface and a random rough surface are used in the experiments. The rolling tests are carried out changing rolling speed and viscosity of lubricant. The rolling oil containing some amount of fluorescence dye is used as a lubricant. The bright area is characterized by the lubricant pocket and the dark area by the asperity contact. From these photographs, the lubrication mechanism can be understood qualitatively. From the relationship between surface roughnesses of workpiece and roll, and inlet oil film thickness, the lubrication regime can be classified into the four regions which are the hydrodynamic lubrication, the hydrodynamic-boundary lubrication, the hydrodynamic-hydrostatic-boundary lubrication and the hydrostatic-boundary lubrication.

Moreover, the visual light intensity produced by the fluorescence phenomena is measured by means of a fluorescence microscope with an ultra high sensitive CCD camera and an image processor. From the relationship between light intensity and oil film thickness, the oil film thickness distribution on the workpiece surface can be measured quantitatively.

Key words : cold rolling; tribology; oil film thickness; fluorescence method.

1. 緒言

冷間圧延において、ロールと材料界面に介在する圧延油の挙動は摩擦係数や圧延後の製品の表面性状に大きな影響を与えるため、その挙動を定量的に理解することが必要である。ロールと材料界面に介在する圧延油量は、導入油膜をレイノルズ方程式より計算することにより、これまでの研究から精度良く求められる¹⁻³⁾。しかしながら、入口部で導入された圧延油がロールと材料界面でどのように材料の表面凹凸に対応したマイクロスケールで挙動しているかについては定量的に把握されておらず、圧延後の材料の表面形態から界面での圧延油挙動を定性的にモデル化されているにすぎない⁴⁻⁶⁾。

塑性加工界面における潤滑油のマイクロ挙動を定量的に把握するためには、筆者の一人ら⁷⁾が報告している透明な工具を使用して加工中の界面の潤滑油のマイクロ挙動を直接観察を行うことが最も有効的な方法であろう。冷間圧延加工においても直接観察法が試みられているものの⁸⁾、透明な工具であるロールが回転するために直接観察することが難しいこともあり、引抜き加工⁹⁾や鍛造加工¹⁰⁾における界面の直接観察のように定量的に有効な結果が得られていない。

そのような状況から、現状ではロールと材料界面での圧延油のマイクロ挙動をできるだけ定量的に理解するための可能な一つ的手段としては、入口部で導入された圧延油が塑性接触域を経てどのように圧延後の材料表面上に存在しているかについて、マイクロスケールでの油膜の面内分布および厚み分布の定量的なデータを得ることが考えられる。

そこで、本研究の目的は直接観察に代わる方法として蛍光染料を添加した圧延油を用いて圧延を行い、圧延後の材料表面にUV光を照射して材料表面上に存在する圧延油に蛍光現象を発生させ、その蛍光現象により生じた可視光線を顕微鏡を通して撮影する蛍光法¹¹⁾を採用し、マイクロスケールでの圧延油の面内分布および厚み分布の定量的なデータを得る方法としての有効性を検討するものである。最初は、蛍光染料を添加した圧延油を用いて各種圧延条件を変化させ冷間圧延を行い、蛍光顕微鏡に取り付けたカメラによる圧延後の材料表面の写真撮影により材料表面上に付着している圧延油のマイクロスケールでの面内分布について、定量データの測定が可能かどうかについて検討した。そして、得られた結果からロールと材料界面での潤滑メカニズムについて考察を行った。つづいて、蛍光顕微鏡に超高度感度CCDカメラを取付け、さらにその映像を画像処理するための装置を設置し、得られた材料表面上の映像写真

平成12年5月10日受付 平成12年8月14日受理 (Received on May 10, 2000; Accepted on Aug. 14, 2000)

* 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240-8501)

* 2 横浜国立大学工学部 (現: 横河ジョンソンコントロールズ (株)) (Faculty of Engineering, Yokohama National University, now Yokogawa Johnson Controls Corp.)

* 3 大同化学工業 (株) 技術研究所 (Technical Research Laboratory, Daido Chemical Industry Co., Ltd.)

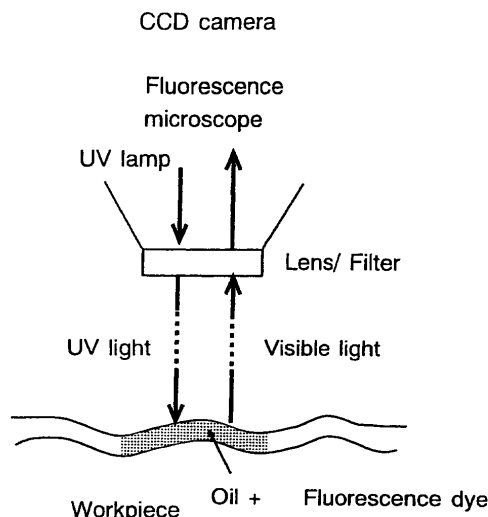


Fig. 1. Schematic representation of conventional fluorescence method.

から油膜の厚み分布の定量的測定の可能性について検討した。

2. 蛍光写真による材料表面上の圧延油の面内分布の測定

2.1 実験方法

蛍光法の概念図を Fig. 1 に示す。金属表面上に付着した蛍光染料を添加した潤滑油に蛍光顕微鏡から UV 光を照射すると蛍光現象を発生する。その蛍光現象により生じた可視光線を蛍光顕微鏡に取付けた 35 mm カメラで撮影するものである。

具体的には、16, 80 および 270 cSt (20°C) の 3 種類の粘度をもったパラフィン系鉱油にそれぞれ蛍光染料として 2wt% のチオフェン系有機化合物を添加した圧延油で冷間圧延を行った。圧延後の圧延油の付着した材料表面上に蛍光顕微鏡の落射式水銀ランプにより出た UV 光を照射すると、圧延油の部分が青緑色に発色して目視観察できる。また同時に、35 mm カメラにより感度 400 のフィルムを用い、撮影倍率 50 倍、露出時間 10 秒の一定条件で蛍光写真を撮影した。

圧延実験には広範囲速度可変型冷間圧延機¹²⁾を使用した。圧延機は二段で、上・下ロールは直径 76 mm、胴長 60 mm の SKH51 製である。ロール表面は 2000 番研磨紙で磨いて、表面粗さ $0.025 \mu\text{m Ra}$ のほぼ一定の鏡面に管理した。圧延速度は、10, 18, 26, 48, および 58 m/min の 5 種類変化させ、圧下率は 20% と一定とした。

供試材は、板厚 0.8 mm の表面粗さ $0.04 \mu\text{m Ra}$ の鏡面のステンレス鋼板 A およびその板材に引張試験により 18% までひずみを加えて、表面にランダムな凹凸を作製したステンレス鋼板 B を用いた。それぞれの寸法は板幅 25 mm、長さ 200 mm の短冊形とした。試験片表面はヘキサで脱

脂し、チオフェン系有機化合物を 2wt% で添加した各種パラフィン系鉱油をそのまま十分量塗布した。圧延後、材料表面の蛍光写真を撮影すると同時にグロスメータによる圧延方向と垂直方向の表面光沢 Gs60 および触針式表面粗さ計による表面粗さも測定した。

圧延実験に前もって、蛍光染料の添加量を決めるために 0.1, 0.5, 1, 2 および 5 wt% と添加量を変えて 270 cSt (20°C) のパラフィン系鉱油を用いて圧延速度 10 m/min, 圧下率 10% で圧延を行った後、露出時間を 10 s と一定にして材料表面の蛍光写真撮影を行った¹³⁾。その結果から添加量が少なすぎると発色せず、反対に多すぎると潤滑性に影響を及ぼす可能性も考えられるので写真撮影可能な最適値として 2 wt% とした。次に、蛍光写真撮影のための露出時間を決めるために蛍光染料の添加量を 2 wt% と一定にして、5, 10, 20, 30 および 60 s と段階的に露出時間を変化させて、上記と同じ条件で圧延を行った後の材料表面の蛍光写真撮影を行った。その結果から露出時間が短かすぎると蛍光写真の発色が薄く、露出時間が長すぎると蛍光染料からの発色が退色しはじめる¹³⁾ので、経時変化の影響を避け可能な限り短時間の 10 s とした。

2.2 実験結果および考察

Fig. 2 に 3 種類の粘度の圧延油を用い圧延速度 10, 26 および 58 m/min, 圧下率 20% で圧延したステンレス鋼板 A の材料表面の蛍光写真を示す。明るい領域は圧延油が付着している部分で、暗い領域は圧延油が非常に薄い状態で付着している部分である。圧延速度および圧延油の粘度が増加するほど明るい領域が増加し、ほぼ全面が圧延油で覆われるようになっている様子が観察される。一方、圧延速度および圧延油粘度が低下すると蛍光写真の明るい領域が点在し、その発光色が退色している様子が観察され、入口部で一樣に導入された圧延油が塑性域の入側から出側に向かって局在化し、オイルピットを形成していることが観察できる。この点在している明るい領域が材料表面のオイルピットの凹部としてこれまで測定されている場所および暗い領域がロールと材料の接触界面で境界接触しているとしてこれまで測定されている場所¹⁴⁾と一致している。

圧延後の材料表面の光沢および表面粗さを測定し、Fig. 2 に示す蛍光写真の結果と比較した。Fig. 3 に表面光沢と圧延速度の関係および Fig. 4 に表面粗さと圧延速度の関係を示す。表面光沢および表面粗さの値は幅方向に 3 点測定した平均値である。以前の報告⁶⁾と同様、本実験の圧延速度の範囲においていずれの圧延油においても表面光沢は圧延速度の増加に伴って低下し、圧延油の粘度の高いほど低下の割合が大きくなっている。一方、表面粗さは表面光沢と圧延速度の関係とは逆に圧延速度の増加に伴って表面粗さは大きくなり、粘度が高いほど増加の割合が大きくなっている。

実験結果から得られた入口油膜厚みと表面光沢の関係を

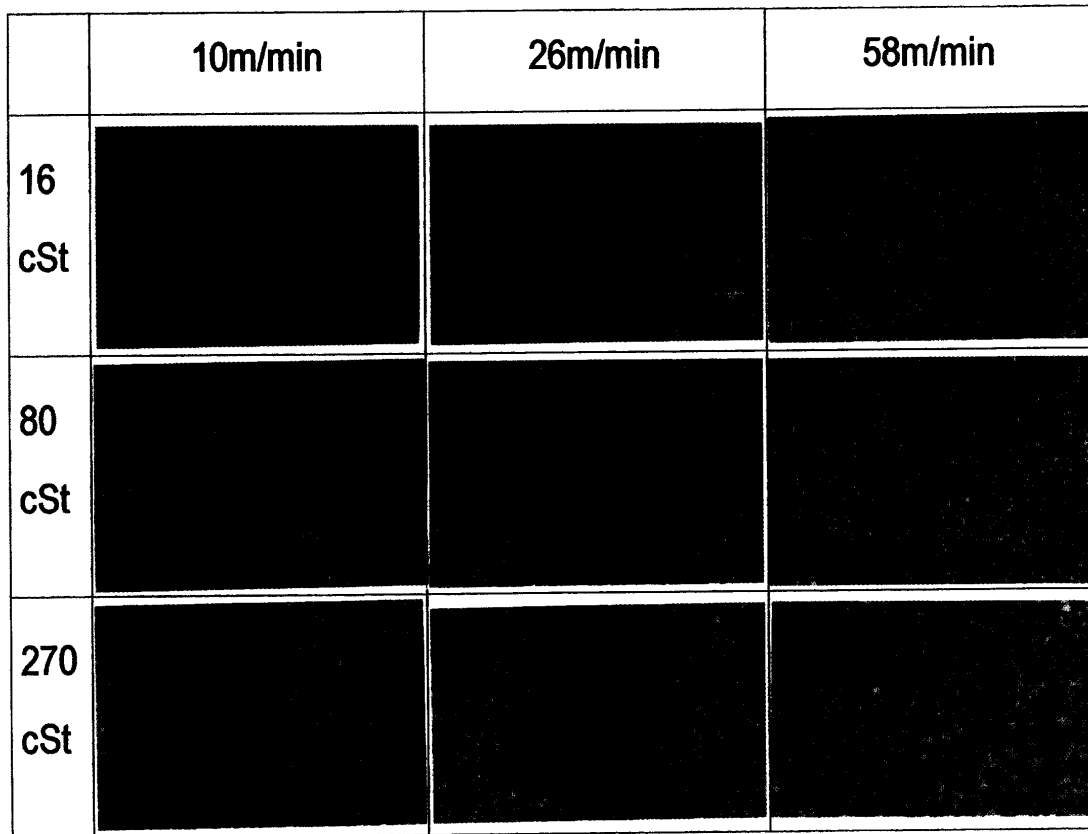


Fig. 2. Photographs of rolled workpiece surface illuminated with UV light for specimens of stainless steel A with smooth surface.

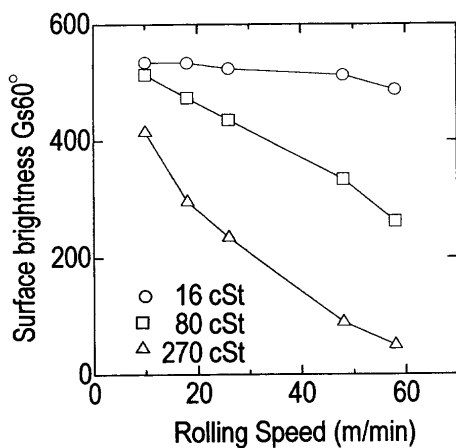


Fig. 3. Relationship between surface brightness and rolling speed for specimens of stainless steel A with smooth surface.

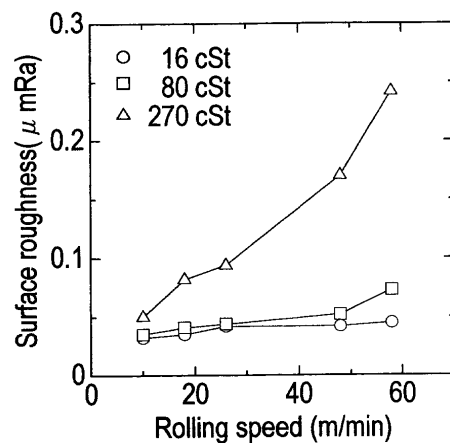


Fig. 4. Relationship between surface roughness and rolling speed for specimens of stainless steel A with smooth surface.

Fig. 5に示す。ここでの入口油膜厚みは、熱的影響を考慮に入れたレイノルズ方程式¹⁵⁾から計算された。材料の降伏応力は、引張試験により311 MPaの値を得た。

以前の報告⁶⁾で、圧延後のトライボロジー結果である材料表面の表面光沢が入口油膜厚みと非常に強い相関関係があることが示されている。本実験においても、ロールと圧延前の材料表面がともに鏡面であるので表面光沢と入口油膜厚みの関係はFig. 5に示すようにStribeck線図と同様一本の曲線で表すことができる。これらの入口油膜厚みと表面光沢の関係から接触界面での潤滑メカニズムを推定する

としても、以前の報告⁶⁾と同様領域(I)の油膜厚みの範囲

$$h > \frac{R_{\max}^{\text{材料}} + R_{\max}^{\text{ロール}}}{2} \dots\dots\dots(1)$$

で流体潤滑メカニズム、領域(III)の油膜厚みの範囲

$$h < \frac{R_a^{\text{材料}} + R_a^{\text{ロール}}}{2} \dots\dots\dots(2)$$

で境界潤滑メカニズム、(1)と(2)式の間の油膜厚みの範囲(II)で混合潤滑メカニズムという三つの潤滑形態で大ま

かに分類できることが示されるだけである。ここで、 $R_{max}^{材料}$ は圧延により自由変形した後の材料の最大粗さ、および $R_a^{材料}$ は圧延前の材料の中心線平均粗さ並びに $R_{max}^{ロール}$ および $R_a^{ロール}$ は圧延前のロールの最大粗さおよび中心線平均粗さである。Fig. 2の蛍光写真の圧延油粘度 270 cSt, 圧延速度 58 m/minの圧延条件では(I)の流体潤滑メカニズム並びに圧延油粘度 16 cSt, 圧延速度 10 および 26 m/minの圧延条件では(III)の境界潤滑メカニズムにそれぞれ対応している。

それに対して、Fig. 2の蛍光写真から領域(II)の混合潤滑状態においては、境界接触部の暗い領域が孤立しており、

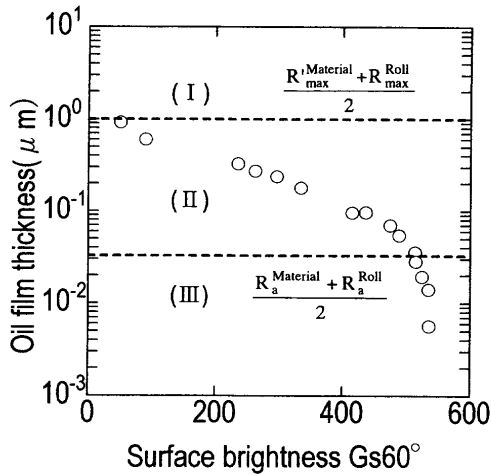


Fig. 5. Relationship between oil film thickness and surface brightness for specimens of stainless steel A with smooth surface.

油膜厚みが減少するに伴い孤立した境界接触部の数およびそれぞれの面積が増加している。圧延油が存在する明るい領域は材料表面上に連続して存在し、油膜厚みの減少に伴いその面積が減少している様子が観察される。この測定結果から、この油膜厚みの範囲では動的流体潤滑と境界潤滑とが混在する混合潤滑メカニズムを呈していることがわかる。

また、以前の報告⁶⁾で境界潤滑と分類していた領域(III)が蛍光写真の観察から境界潤滑が優勢な混合潤滑メカニズムであることが理解できる。すなわち、(2)式の油膜厚み (0.032 μm)以下になると孤立していた境界接触部が連結し、その面積を増加させ圧延油が存在する明るい領域が孤立していく様子が蛍光写真から観察できる。このことは、圧延油が材料表面凹部にトラップされ、その圧延油に静水圧が発生する静圧流体潤滑を呈していることを示している。この油膜厚みの範囲での潤滑メカニズムは、動圧流体潤滑、静圧流体潤滑および境界潤滑が混在した潤滑域を呈している。更に油膜厚みが低下すると動的流体潤滑の領域はなくなり、潤滑メカニズムは静圧流体潤滑および境界潤滑の混在した潤滑形態を呈する。その際の潤滑領域の比率はロールと材料の表面粗さによって決まり、両者の表面粗さが小さいときは境界潤滑領域がほとんどの部分を示め、ロール表面が鏡面のとき材料の表面粗さが増加するに伴い静圧流体潤滑の領域が増加する。

ロールが鏡面で引張り試験によりランダムな表面凹凸を

	10m/min	26m/min	58m/min
16 cSt			
80 cSt			
270 cSt			

Fig. 6. Photographs of rolled workpiece surface illuminated with UV light for specimens of stainless steel B with rough surface.

持つステンレス鋼板Bを圧延したときの蛍光写真を Fig. 6 に示す。圧延はステンレス鋼板Bを3種類の粘度の圧延油を用い、圧延速度10, 26, および58 m/min, 圧下率20%で行った。この圧延条件の範囲では、Fig. 2の蛍光写真とは非常に異なり、圧延油粘度270 cSt, 圧延速度26および58 m/minの圧延条件の写真を除いては大きな差が認められず、静圧流体潤滑と境界潤滑とが混在した潤滑形態を示している。この圧延条件においてほとんどの油膜厚みは領域(III)の範囲となり、Fig. 2の蛍光写真の実験結果を基にして行った考察がこの実験結果により検証される。

このように、圧延後の材料表面の蛍光写真による圧延油の面内分布からこれまで推定の域であった冷間圧延の接触界面でのマイクロ接触モデルが、半定量的に明らかになった。

3. 画像処理蛍光法による圧延後の材料表面の油膜厚み分布の計測

3.1 画像処理蛍光法による油膜厚み測定

蛍光顕微鏡で得られた蛍光映像を取込み、画像処理するために蛍光顕微鏡に超高感度 CCD カメラを取付け、画像処理ボードを搭載したパーソナルコンピュータに接続した。蛍光画像を超高感度 CCD カメラを通してパーソナルコンピュータに画像として取込みデータ処理を行う。蛍光顕微鏡の対物レンズの倍率が5倍であるので、測定領域は1.8×1.8 mmの範囲である。

超高感度 CCD カメラは、露光時間を変化させることにより広範囲の測定が可能となっている。また、画像をモノクロで取込み、画像処理ボードは1024×1024ドットの画像データを4096段階で画像処理ボード内のメモリ上に取込むことができる。

蛍光映像からの反射光強度と油膜の関係を求める実験を行った。実験には圧延油として1 wt% チオフェン系有機化合物を添加した粘度1460 cSt (20°C) で密度0.9 g/cm³ のパラフィン系鉱油を用いた。この圧延油をヘキサンで脱脂したスライドガラスの上に滴下し、その上にもう1枚のスライドガラスを重ねた。この際、横からはみ出た油はガーゼでふき取った。この2枚のスライドガラスを蛍光顕微鏡のステージの上に載せ、反射光強度(0~4095)を測定した。そのときの露光時間は11 msecとした。あらかじめ2枚のスライドガラスの寸法および重さが測定されているので、圧延油をはさんだときの重さを測定することにより油膜厚みを求めることができる。各油膜厚みに対応する反射光強度の読み取り値は、測定値の全ピクセル(1024×1024)の平均値とした。Fig. 7に反射光強度と油膜厚みの関係を実線で示す。反射光強度は油膜厚みの増加とともに直線的に増加している。反射光強度に及ぼすスライドガラスの影響を除去した反射光強度分布と油膜厚みの関係を Fig. 7に破線で示す。

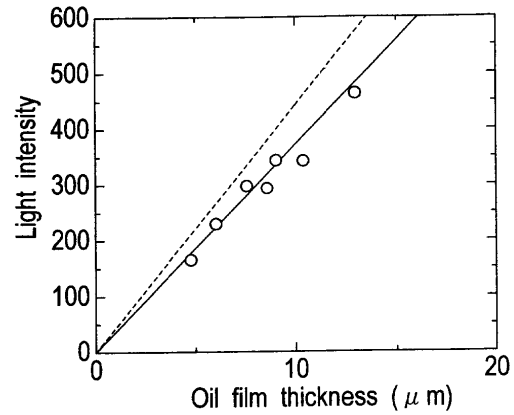


Fig. 7. Relationship between light intensity and oil film thickness.

す。この破線の傾きから得られた油膜厚み1 μmあたりの反射光強度44.3の較正值を用いて、圧延板の材料表面上の油膜厚み分布の計測を行うことができる。

3.2 実験方法

前節3.1と同様の圧延油を供給して圧延を行い、圧延後の材料表面に付着した圧延油の油膜厚み分布の計測を行うための実験を行った。

圧延実験には、2.1節と同じ広範囲速度可変型圧延機を使用した。ロール表面は前と同様2000番研磨紙で研磨して、0.025 μmRaのほぼ一定の鏡面に管理した。圧延速度は26, 43および81 m/minの3種類変化させ圧下率は18%と一定にした。供試材は表面粗さ0.07 μmRaのSUS430コイル材で、板厚0.4 mm, 板幅20 mm, 長さ400 mmの短冊形を用いた。試験片表面はヘキサンで脱脂し、圧延油をそのまま十分塗布した。圧延後、材料表面の油膜厚み分布を画像処理装置を用いて計測した。この際、適度の反射光強度値を得るために超高感度 CCD カメラは露光時間11 msとして画像データをパーソナルコンピュータに取り込んだ。

3.3 実験結果および考察

26, 43および81 m/minの3種類の圧延速度で圧延した後の材料表面の蛍光画像の画像処理により得られた幅方向の反射光強度分布を Fig. 8に示す。Fig. 8の反射光強度分布より圧延速度の増加とともに圧延後の材料表面上の油膜が増加していることおよび入口部で導入された圧延油のトラップされた凹部の深さが大きくなっていることが理解できる。これまで圧延後の材料表面上の油膜分布について定性的にしか理解されなかったが、Fig. 8の反射光強度分布よりの反射光強度分布と油膜厚みの関係を用いて圧延油の油膜の厚さ分布を定量的に理解できるようになる。そこで、Fig. 7の較正值を用いて測定した強度分布を油膜厚みに変換し、その油膜厚み分布より1.8×1.8 mmの3次元の測定領域の平均油膜厚さを求めた。計測された平均油膜厚みは、圧延速度26, 43および81 m/minで0.81, 1.07および1.45 μmの値が得られた。

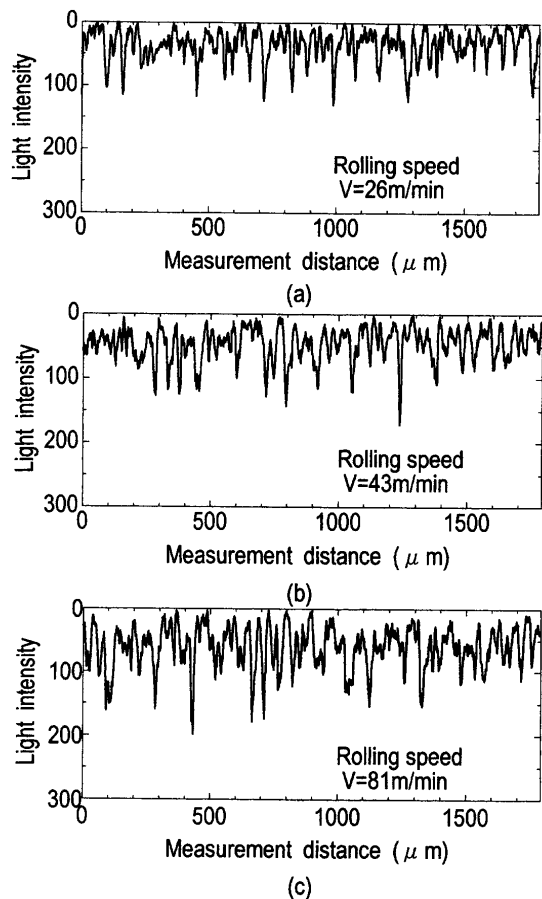


Fig. 8. Distribution of visible light intensity in width direction.

今後は、この測定された材料表面上の油膜厚みとロール・材料間の入口油膜厚みとの関係を明確にすることにより定量的な潤滑メカニズムの解明が可能となろう。

4. 結言

蛍光染料を添加した圧延油を用いて各種圧延油条件を変化させた冷間圧延を行い、圧延後の材料表面にUV光を照射して材料表面上に存在する圧延油に蛍光現象を発生させ、蛍光顕微鏡を取り付けたカメラを用い材料表面の写真撮影により圧延油の材料表面上のミクروسケールの面内分

布を示す蛍光写真を得た。その結果より以下の結論を得た。

(1) 蛍光写真の結果よりロールと材料接触面の潤滑メカニズムの形態により定量的に分類でき、従来流体潤滑と境界潤滑が混在する混合潤滑とされていた領域において、ロールおよび材料表面の表面粗さ並びに入口油膜厚みの関係から動圧流体潤滑および境界潤滑が混在する領域、動圧流体潤滑、静圧流体潤滑および境界潤滑とが混在する領域そして静圧流体潤滑と境界潤滑が混在する領域に定量的に分類することができた。

(2) 蛍光顕微鏡に超高感度CCDカメラを取り付け、その映像を画像処理する画像処理蛍光法を用いて、圧延後の材料表面上の油膜厚さ分布の計測を行った。その結果から、定量的に圧延後の材料表面上の油膜厚みが計測できることを確認できた。

おわりに、本研究を遂行するにあたり実験に御協力いただいた当時横浜国立大学学部生であった大塚憲司氏と北口篤氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) W.R.D.Wilson and S.M.Mashdavian: *Trans. ASME, Series F*, **96** (1974), 572.
- 2) T.A.Dow, J.W.Kannel and S.S.Bupara: *Trans. ASME, Series F*, **97** (1975), 4.
- 3) A.Azushima, R.Kihara and I.Gokuyu: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **19** (1978), 958.
- 4) A.Azushima, R.Kihara and I.Gokuyu: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **18** (1977), 337.
- 5) T.Sakai, Y.Saito, S.Okamoto and K.Kato: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **19** (1978), 972.
- 6) A.Azushima, K.Noro, Y.Iyanagi and H.Degawa: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 576.
- 7) A.Azushima, M.Tsubouti, H.Kudo, N.Ishida and R. Minemura: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **30** (1989), 1631.
- 8) 池 浩, 辻 邦夫, 高瀬 誠: 第48回塑性加工連合講演会講演論文集, (1997), 315.
- 9) A.Azushima: *Ann. CIRP*, **44** (1995), 209.
- 10) A.Azushima, S.Yoneyama, T.Yamaguchi and H.Kudo: *Ann. CIRP*, **45** (1996), 205.
- 11) A.E.Smart and R.A.J.Ford: *Wear*, **29** (1974), 41.
- 12) A.Azushima: *Tetsu-to-Hagané*, **94** (1988), 696.
- 13) 小豆島明, 菅井哲也, 夏井 大: 第46回塑性加工連合講演会講演論文集, (1995), 313.
- 14) A.Azushima, J.Miyamoto and H.Kudo: *Ann. CIRP*, **47** (1998), 479.
- 15) A.Azushima: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 737.