

蛍光法を用いた直接観察による工具・材料界面の潤滑メカニズムの検証

横浜国立大学 工学部生産工学科

教授 小豆島明

(平成6年度研究開発助成 AF-94015)

キーワード：蛍光法・冷間圧延・入口油膜厚み・トライボロジー

1. 蛍光法によるニート潤滑の検証

1-1 はじめに

冷間圧延において、ロールと材料界面での潤滑油の導入油量や微視的な接触挙動は圧延後の製品の表面性状を管理するために重要である。すでに導入油量については、筆者の一人が提案した熱効果を考慮したレイノルズ方程式を計算することにより定量的解析が行われている¹⁾。また、潤滑油の微視的挙動について引抜きや据込み加工においては、透明なガラスのダイを使用して加工中の潤滑油の微視的挙動の直接観察が可能である²⁾。しかし、圧延加工においてはロールと材料界面を直接観察することは物理的に困難である。

そこで、直接観察に代わる方法として潤滑油に蛍光塗料を添加しトライボロジー因子を変化させて冷間圧延を行い、その材料表面の蛍光顕微鏡による観察と蛍光写真の撮影を行う蛍光法を新たに導入し、圧延加工中の微視的挙動について検討を行った。

1-2 実験装置

1-2-1 広範囲速度可変型冷間圧延装置

実験には著者の一人が開発した広範囲速度可変型冷間圧延機を使用した³⁾。概略図を図1に示す。本体は高さ124mm、幅1922mm、及び奥行き780mm、の寸法をしており、その最高荷重は15tfである。ロール③はSKH51ハイス鋼でロール径76mm、胴長60mm、である。上下のロールは1750rpmまで速度可変の22kwDCモーター④を電磁クラッチ⑤を通して接続され、カムワルツ⑥とジョイント⑦を通じて回転させられる。低速(0~10m/min)の場合は下ロールをカップリング⑧で低速用モーター(500w 速度可変 ACモーター)⑨に接続する。圧延荷重Pの測定にはスクリューとロールチェックとの間の左右のロードセル⑩の出力を動ひずみ径を通して X-t レコーダーにより行う。そのロードセルの定格出力は5tonfあたり300 μ Vである。トルクGの測定はロール軸に貼り付けしたひずみゲージのリード線を軸中央の直径10mmの中空を通してスリップリングに接続し、その出力を動ひずみ計を通して X-t レコーダーにより行う。また、上下ロールの入口部にはステージを設け、供試材の横ずれや、斜めにかみ込まれることを防いでいる。広範囲速度可変が田冷間圧延機の仕様を次に示す。

1-2-2 蛍光顕微鏡

実験に使用した蛍光顕微鏡はオリンパス製の高級システム金属顕微鏡 BX-60M にユニバーサル落射蛍光装置 BX-FLA を設置して使用した。また、蛍光写真撮影のた

表1 圧延機仕様

| | |
|-----------|--|
| ロール材質 | SKH51 |
| ロール寸法 | $\phi 76 \times 60 \text{mm}$ |
| ロール回転数 | ACモーター 4~40rpm DCモーター 5~875rpm |
| 圧延トルク | ACモーター 60kg \cdot m DCモーター 12kg \cdot m |
| 定格出力 | ACモーター 0.75kw DCモーター 22kw |
| 最高圧延荷重 | 5tonf |
| 電磁クラッチ | CLC1225 |
| 電磁クラッチトルク | 65kg \cdot m |

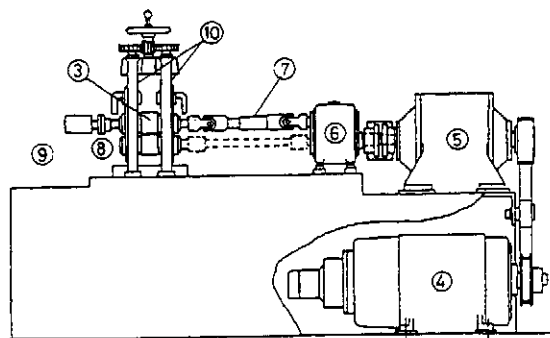


図1 広範囲速度可変型冷間圧延機

めに露出時間を自由に設定できる全自動顕微鏡写真撮影装置 PM-30 も設置した。蛍光物質を含む潤滑油で圧延された供試材を直ちにテーブル上にセットし、ハロゲンランプを照射すると蛍光物質を含んだ潤滑油の部分が青緑色の蛍光色に発色し、金属表面は黒色に観察される。その際、蛍光顕微鏡上に設置した35mmカメラにより一定の露出時間(10s)で蛍光写真の撮影を行った。

1-2-3 蛍光塗料

蛍光塗料にはシラド化学のチオフェン系有機化合物の油性溶液染料 Liquid Ultra Color U を潤滑油のパラフィン系鉱油に2wt%添加して使用した。蛍光塗料はハロゲンランプを照射することにより青緑色に発色して観察される。また、この蛍光塗料は露出時間が長くなると退色する性質があるため圧延後、直ちに直接観察と可能な限り短い露出時間で蛍光写真の撮影を行った。

1-2-4 蛍光塗料の添加量の決定

蛍光塗料の添加量による蛍光写真に及ぼす影響を調査するために蛍光塗料の添加量を潤滑油に対し0.1wt%、0.5wt%、1wt%、2wt%、5wt%の5種類に変化させた。圧延条件は圧延速度10m/min、圧下率10%、潤滑油P-

100 の条件で圧延を行い、10s の一定露出時間で蛍光写真撮影を行った。

それぞれの添加量の蛍光写真の結果は、添加量 0.1wt%、0.5wt% では蛍光写真は発色せず、添加量が少なすぎる事がわかる。また、添加量 1wt% では少し発色するがまだ薄く添加量 2wt% と 5wt% では蛍光写真の蛍光色は同色であった。

そこで、蛍光塗料を必要以上に添加すると微視的な潤滑状況に影響を及ぼす可能性が考えられるため、蛍光色を発色する最適の添加量として 2wt% に決定した。

1.2.5 蛍光写真の露出時間の決定

蛍光写真の露出時間による蛍光写真に及びす影響を調査するために露出時間を 5s、10s、20s、30s、60s の 5 種類に変化させた。圧延条件は圧延速度 10m/min、圧下率 10%、潤滑油 P-100 の条件で圧延を行い、露出時間を変化させて蛍光写真の撮影を行った。

それぞれの露出時間の蛍光写真の結果は、露出時間 5s では露出時間が短すぎて蛍光写真の発色が薄く、露出時間 30s と 60s では逆に露出時間が長すぎて蛍光塗料が退色しはじめることがわかった。露出時間 10s と 20s では蛍光写真の蛍光色は同色であったが、経時変化の影響を避け圧延直後の写真撮影を行うために露出時間を 10s に決定した。

1.2.6 入口油膜厚さ計算方法

入口油膜厚さは以下で述べる、レイノルズ方程式、粘度式を用いる方法により計算した 4)。図 2 に流体潤滑状態のロール・材料間の入口部を示す。

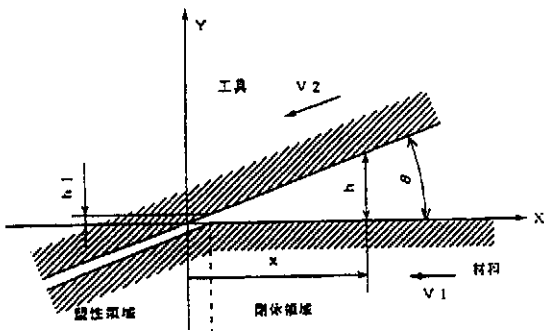


図 2 入口部模式図

入口油膜厚さの計算は次の仮定が成り立つものとして進める。

1. ロールと圧延材料は入口部で剛体である。
2. 材料は潤滑油の圧力が材料の降伏に等しくなったとき降伏する。

計算に用いる式は次の通りである。

$$\frac{dP}{dx} = -6\eta(V_1 + V_2) \left[\frac{h - h_1}{h_3} \right] \quad \text{レイノルズ方程式}$$

$$K \frac{\sigma^2}{\partial y^2} + \eta \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]^2 = 0 \quad \text{エネルギー式}$$

$$\eta = \eta_0 \exp\{\alpha P + \beta(T - T_0) + \gamma PT\} \quad \text{粘度式}$$

P : 圧力
V₁ : 入口部材料速度
h : 油膜厚さ
T : 温度
η₀ : 常温・常圧での粘度
α, β, γ : 粘度の圧力および温度係数

T₀ : 周囲の温度
V₂ : ロール周速
h₁ : 入口油膜厚さ
h : 潤滑油の粘度

K : 潤滑油の熱伝導率 θ : かみ込み角

レイノルズ方程式の境界条件は

$$h = 100 \times h_1 \quad \text{のとき} \quad P = P^*$$

$$h = h_1 \quad \text{のとき} \quad P = P_{\infty}$$

とする。ここで、圧力 P* は油膜厚さが入口油膜厚さの 100 倍になれば、熱的効果の影響を無視してよいとして、レイノルズ方程式から求めた圧力であり、∞ は圧延材料の降伏応力である。

次にエネルギー式の数値解 U は

$$u = \left\{ V_2 + (V_1 - V_2) \frac{h - y}{h} \right\} - \left\{ - \frac{y(h - y)}{2\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right\}$$

を用いる。エネルギー式の境界条件は

$$y = 0 \quad \text{のとき} \quad T = T \cdot \text{mate} = T_0$$

$$y = h \quad \text{のとき} \quad T = T \cdot \text{roll} = T_0$$

とし、積分を行い油膜断面の平均温度 T_m を求める。

次項に入口油膜厚さの計算フローチャートを図 3 に示す。Runge-Kutta 法を用いて、レイノルズ方程式の圧力 P を計算する。簡単にするため、P を計算するための X の増分区分中、潤滑油の平均温度 T は一定とする。入口油膜厚さ h₁ を仮定して、初期値 h = 100 × h₁ 及び P* を設定し、圧力 P₁ 及び温度 T₁ を Runge-Kutta 法と Newton-Raphson 法で求め、油膜厚さ h が h₁ になるまで h₁ を変化させる。

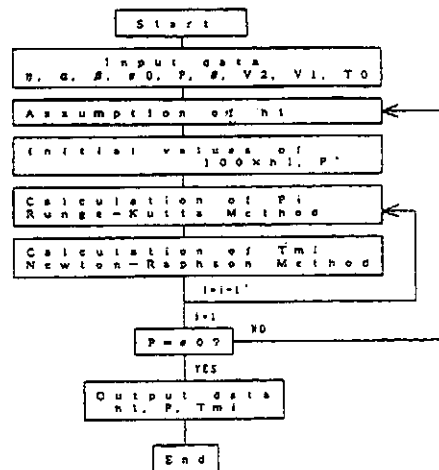


図 3 計算フローチャート

1.3 実験条件

二重潤滑の実験条件を表 2 に示す。ロールには SKH51 ハイス鋼を使用し、エメリー紙による研磨により

Ra を 0.025mm に一定管理した。圧延速度は粘度が 20℃ で 16、80、270、1458cSt の粘度の異なる 4 種類のパラフィン系鉱油にチオフェン系有機化合物の蛍光塗料を 2wt% 添加して、脱脂した供試材にニートで塗布した。圧延は 20℃ で行い、圧延後の供試材は直ちに蛍光顕微鏡による観察と一定露出時間(10s)で蛍光写真の撮影を行った。また、圧延後の供試材は表面光沢測定器により Gs60° の圧延方向と垂直方向の表面光沢の測定を行った。

表 2 ニート潤滑の実験条件

| | |
|-------|-----------------------|
| ロール材質 | SKH51 ハイステル |
| 粗さ | Ra=0.025 μ m |
| 潤滑油 | 16、80、270、1458cSt 20℃ |
| 蛍光塗料 | チオフェン系有機化合物 2wt% |
| 圧延速度 | 10、18、26、48、58m/min |
| 圧下率 | 10、20% |

供試材には 2 種類の表面粗さの異なる SUS430 フェライト系ステンレス鋼をそれぞれ長さ 200mm、幅 20mm に切断し、ヘキサソによる脱脂を行い使用した。それぞれの供試材の表面性状を表 3 に示す。

表 3 供試材の表面性状

| | |
|-------|------------------|
| 材質 | SUS430 ステンレス鋼 |
| 供試材 A | |
| 表面粗さ | Ra=0.040 μ m |
| 寸法 | 0.8×20×200mm |
| 供試材 B | |
| 表面粗さ | Ra=0.240 μ m |
| 寸法 | 0.9×20×200mm |

1.4 実験結果及び考察

ニート潤滑における蛍光写真の結果を各供試材ごとに写真 1 から写真 4 に示す。また、供試材 A について圧延後の供試材の表面光沢測定値を図 4 と図 5 に示す。図 6 と図 7 には表面光沢測定値と入口油膜厚さの関係を示す。また、各圧延条件で熱的效果を考慮したレイノルズ方程式を計算することにより求められた入口油膜厚さの計算結果も蛍光写真の下に示す。

ニート潤滑において、低粘度、低圧延速度で入口油膜厚さが少ないと蛍光写真の潤滑油量も少なく、高粘度、高圧延速度で入口油膜厚さが増加すると蛍光写真の潤滑油量も増加している。このことから熱的效果を考慮したレイノルズ方程式を計算することにより求められた各圧延条件における入口油膜厚さと蛍光写真の潤滑油量を比較すると定性的な関係にあることがわかる。

圧延後の供試材の表面光沢測定値は、低潤滑油粘度、低圧延速度で入口油膜厚さが小さいと高表面光沢であるが、高潤滑油粘度、高圧延速度になると入口油膜厚さが増加し表面光沢は低下している。また、表面光沢と入口油膜厚さの関係は 1 本の曲線で結ばれることから、表面光沢が入口油膜厚さと定量的関係にあることがわかる(5)6)。

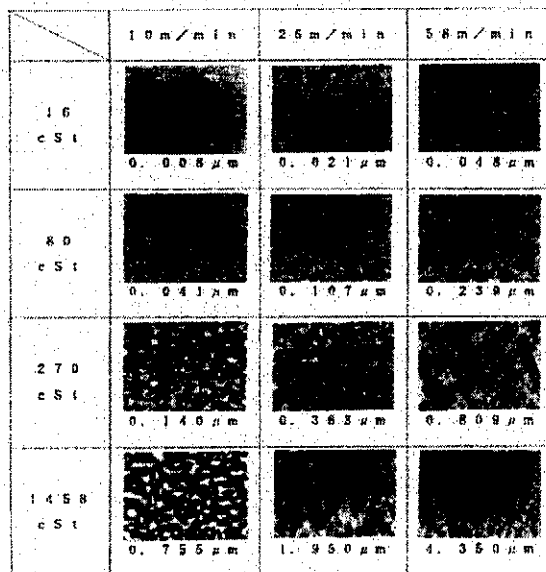


写真 1 供試材 A、圧下率 10% の蛍光写真

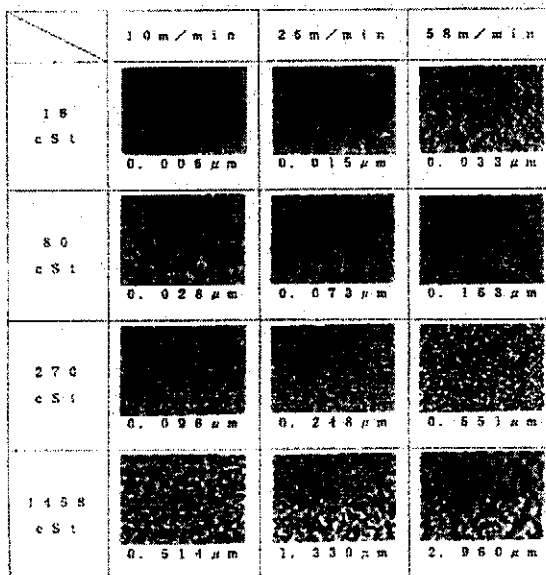


写真 2 供試材 A、圧下率 20% の蛍光写真

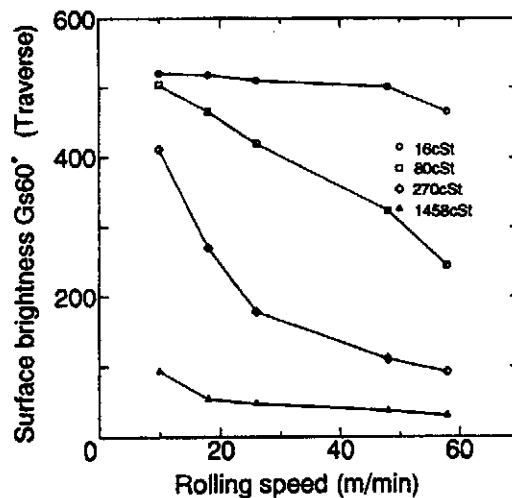


図 4 供試材 A、圧下率 10% の表面光沢

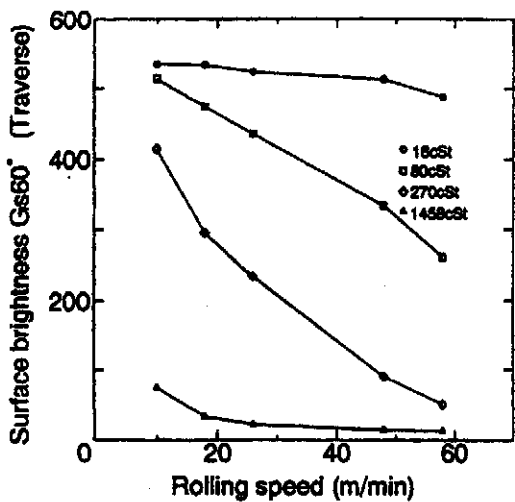


図5 供試材 A、圧下率 20%の表面光沢

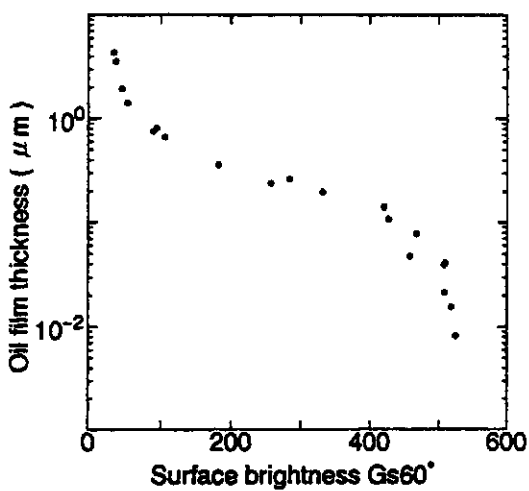


図6 供試材 A、圧下率 10%の表面光沢と入口油膜厚さ

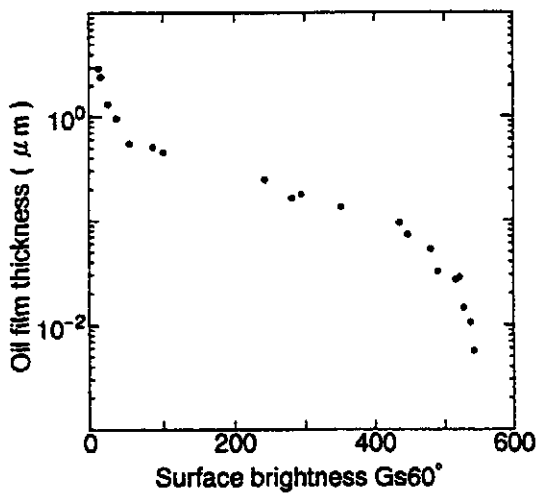


図7 供試材 A、圧下率 20%の表面光沢と入口油膜厚さ

圧下率の影響は圧下率 10%では大きな潤滑油部分が存在しているが、圧下率 20%ではその大きな潤滑油部分が減少していることがわかる。

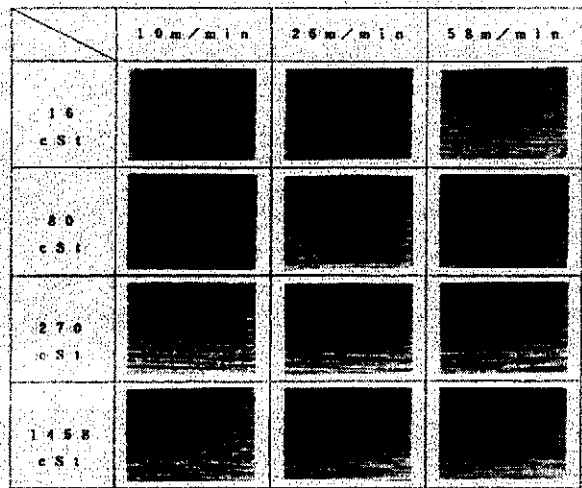


写真3 供試材 B、圧下率 10%の蛍光写真

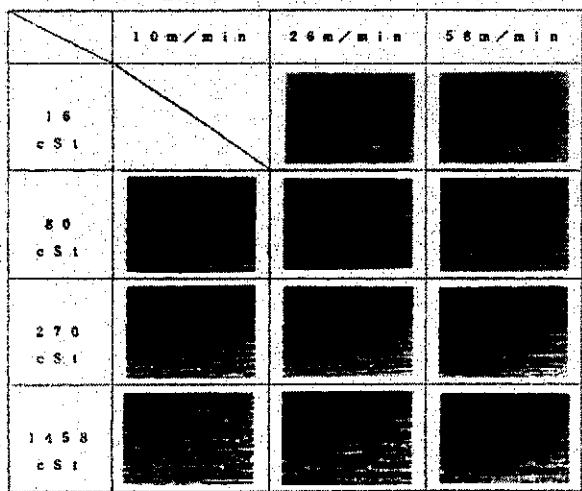


写真4 供試材 B、圧下率 20%の蛍光写真

供試材の表面粗さによる影響は鏡面の供試材 A では潤滑油はランダムな形状をして存在しているが、供試材 B では表面の形状に沿って潤滑油が存在していることがわかる。

1.5 まとめ

圧延加工における微視的な接触状況を検証する方法として蛍光法は有効であることがわかった。また、潤滑油の入口油膜厚さの計算結果と蛍光写真の潤滑油との間には定量的な関係が認められた。