

熱延潤滑におけるロールバイトでの油膜挙動について

Consideration of Oil Behavior in Hot Rolling Lubrication

松原 行宏 MATSUBARA Yukihiko JFE スチール スチール研究所 研究企画部 主任部員 (副部長)
木村 幸雄 KIMURA Yukio JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
壁矢 和久 KABEYA Kazuhisa JFE スチール スチール研究所 研究企画部長 (理事)・博士 (工学)

要旨

圧延荷重低減による電力原単位向上及び焼き付き防止など鋼板表面品質向上の観点から、熱間圧延における潤滑の役割は重要である。しかし、熱延潤滑における潤滑機構やロールバイトでの潤滑油挙動に関する研究例は少なく、冷延潤滑に比べ不明な点が多い。本研究では、冷延潤滑と比較した基礎的な圧延実験や数値シミュレーションにより、熱延潤滑における潤滑油の挙動を調査した。熱延潤滑は、冷延潤滑と異なり、明瞭なオイルピットは形成されず、ロールバイトに導入される油量がある値を超えると、それ以上油量が増加しても摩擦係数は低下しない。熱間圧延の場合、ロールバイト厚み方向で油膜の粘度差が著しく大きくなることが影響していると推定される。

Abstract:

In hot rolling, lubrication between work roll and strip plays an important role in reducing rolling force and protecting the work roll surface. However, the tribological behavior in hot rolling has not been clarified sufficiently in comparison with that in cold rolling. In this work, lubrication oil behavior in hot rolling was investigated by rolling test and numerical analysis. In hot rolling, the coefficient of friction is reduced adequately with a small amount of oil. If the amount of oil is increased, a few small oil-pits will form, but no further decrease in the coefficient of friction will be achieved. It's though that the large variation of oil viscosity in film thickness direction affected the oil behavior.

1. はじめに

薄鋼板の熱・冷間圧延においては、圧延荷重低減による電力原単位向上、あるいは、肌荒れや焼き付きなどの表面欠陥防止を目的に、ロールバイトに潤滑油を供給しながら圧延することが一般的である^{1,2)}。近年、高張力鋼板の製造、鋼板の薄物化など、圧延潤滑に対する要求はますます厳しくなりつつある。冷間圧延では、潤滑機構に関する研究例は多く、圧延条件から導入油量を解析的に推定する手法が提案^{3,4)}され、また、鋼板表面のオイルピット観察などから導入油量の推定⁵⁾が試みられている。これにより、導入油量の増加とともにオイルピットが増加し、摩擦係数が低下することが知られており、これらの知見は、薄鋼板の工業生産における潤滑制御に展開^{6,7)}されている。これに対し、熱間圧延では、潤滑油の燃焼、鋼板表面の酸化スケールの破壊を伴うなど、現象が非常に複雑であり、熱延潤滑に関する研究事例⁸⁻¹⁰⁾は少ない。このため、ロールバイトでの圧延油の挙動など不明な点が多く、冷間圧延に比べると、潤滑を制御しているとは言い難い。

本報では、熱延潤滑における導入油量の影響やオイルピットの形成に関して冷延潤滑の場合と比較した実験結果、及

び、伝熱を含む油膜の流体解析に基づくロールバイトでの油膜挙動の推定について述べる。

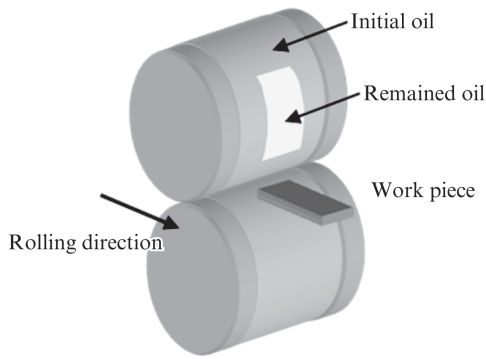
2. 熱延潤滑と冷延潤滑への油膜厚みの影響

本項では、熱間圧延後のワークロールに残存した潤滑油の重量を秤量することにより、ロールバイトに引き込まれ、潤滑に寄与した油量を推定した¹¹⁾。また、鏡面に研磨されたワークロールで、鏡面に研磨された、スケールが生成し難い供試材を圧延することにより、圧延時に発生するオイルピットを観察し、潤滑機構との関係を議論する。

2.1 実験方法

ワークロールは、直径 340 mm のハイスロールであり、Crめつき後研磨することにより 0.02 μmRa 以下の鏡面に仕上げた。供試材には、2 mm 厚×100 mm 幅の SUS316 耐熱鋼を用い、表面を 0.02 μmRa 以下まで鏡面研磨した。熱間圧延時にスケールが発生し難いこと、また、熱間から冷間圧延の温度範囲において γ 単相であることから、SUS316 耐熱鋼を用いた。

圧延条件は、ワークロール回転速度を 50 mpm、圧下率を 6%前後で一定とし、熱間、および、冷間圧延を行い、両者を比較した。熱間圧延では、313 K で動粘度が 110 mm^2/sec

図1 油量測定方法の概要¹¹⁾Fig. 1 Schematic illustration of experimental procedure¹¹⁾

の潤滑油を用いて、1173 Kで20 min. 間加熱した後、973 K程度で圧延を行った。冷間圧延では、313 Kで動粘度が38 mm²/secの潤滑油を用いて、室温で圧延を行った。図1にワークロール残存油量の測定方法を模式的に示す。本実験では、ロールバイトの油膜厚みを変化させるため、ワークロールへの塗油量を、0 mg/m²から最大52900 mg/m²の間で7~8水準変化させて塗油した。圧延後のワークロールに残存した潤滑油量を測定した。残存油量は、ワークロールに塗油された油量のうち、ロールバイトに引き込まれ、かつ、燃焼することなく、ワークロールに残存した油量であるので、少なくとも、圧延時にロールバイトに存在し、潤滑に寄与した潤滑油の量と言える。残存油量の測定は、圧延後のワークロールで、圧延材と接触した部分のうち、80 mm幅×250 mm長さの面積部分をノルマルヘキサンで十分に脱脂し、ソックスレー抽出により、油量を秤量して求めた。また、ワークロールへの初期塗油量は圧延材と接触しなかった部分から、板残存油量は圧延後の鋼板表面から、それぞれ、同様に測定した。得られた鋼板表面について、レーザ顕微鏡を用いてオイルピット発生状況を観察した。

2.2 実験結果

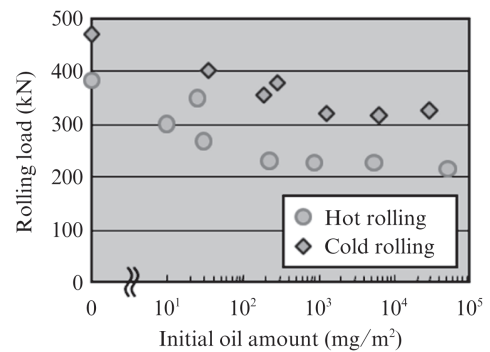
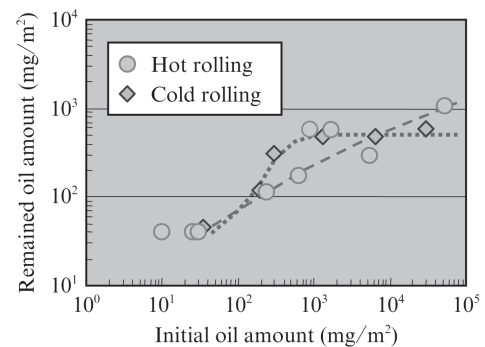
図2にワークロールへの塗油量を変化させた場合の、圧延荷重の変化を冷間と熱間圧延で比較して示す。冷間、熱間圧延のいずれの場合も、塗油量とともに圧延荷重は低下し、ある一定の塗油量を超えると、圧延荷重は一定になる傾向にある。図3にワークロールへの塗油量を変化させた場合の、ロール残存油量の変化を示す。冷間圧延では、塗油量の増加とともに残存油量も増加し、塗油量が1000 mg/m²を超えると、残存油量は一定になる。冷間圧延では、ロールバイトに引き込まれる油量は、ロール径、圧延速度などの圧延条件から推定でき、塗油量が多くなると、ロールバイトに引き込まれる油量が飽和することが知られており^{12,13)}、本実験結果もその傾向を示している。一方、熱間圧延においては、本実験の範囲においては、塗油量の増加とともに残存油量も増加する傾向が確認された。このこと

から、熱間圧延と冷間圧延では、ロールバイトへの潤滑油の導入機構が異なっている可能性が考えられる。

各圧延条件での摩擦係数を逆算した。変形抵抗を温度、ひずみ、ひずみ速度で定式化することは可能であるが、板厚方向での温度分布、ひずみ速度分布が大きいと、逆に計算精度に問題があると考えられる。そこで、熱間圧延では、無潤滑時の摩擦係数が0.35になるように、平均変形抵抗を333 MPaに、冷間圧延では、無潤滑時の摩擦係数が0.20になるように、平均変形抵抗を545 MPaに仮定し、潤滑油量を変更した各条件では、上記の平均変形抵抗と圧延実績から摩擦係数を逆算した。図4に残存油量と逆算摩擦係数の関係を示す。冷間圧延では、油量の増加とともに摩擦係数が単調に低下する傾向が確認され、流体潤滑領域の拡大による摩擦係数の低下と考えられる。一方、熱間圧延では、150 mg/m²程度までは摩擦係数が低下するものの、それ以上に油量が増加しても摩擦係数は一定のままである。

2.3 考察

以上のように、熱間圧延と冷間圧延では、潤滑挙動が異なる傾向が確認された。この挙動の相違を考察するため、圧延された鋼板表面のオイルピットの観察を試みた。図5に各件で圧延された鋼板表面を3次元的に観察した結果を示す。冷間、熱間圧延いずれの場合も、塗油量0 mg/m²の

図2 圧延荷重に及ぼす塗油の影響¹¹⁾Fig. 2 Effect of initial oil amount on rolling load¹¹⁾図3 塗油量と残存油量関係¹¹⁾Fig. 3 Relationship between initial and remained oil amount¹¹⁾

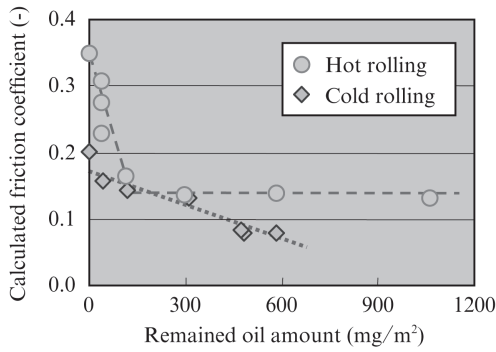


図4 残存油量と摩擦係数の関係¹¹⁾

Fig. 4 Relationship between remained oil amount and calculated coefficient of friction¹¹⁾

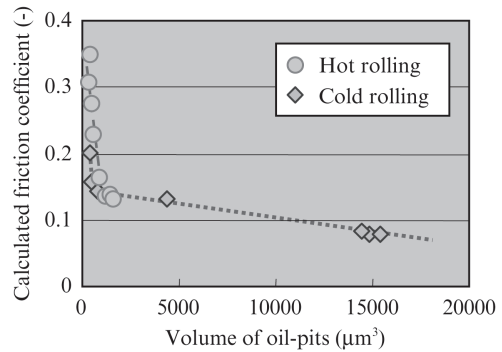


図6 オイルピット体積と摩擦係数の関係¹¹⁾

Fig. 6 Relationship between volume of oil-pits and calculated coefficient of friction¹¹⁾

場合、鋼板表面はほぼ平滑である。塗油量が多くなると、冷間圧延では、オイルピットが顕著に観察され、残存油量 490 mg/m^2 の条件で、明瞭なオイルピットが多数観察されるのに対し、熱間圧延では、残存油量 1060 mg/m^2 と、冷間圧延の2倍以上の油量がワークロールに残存する条件においても、微小なオイルピットがごく少数観察される程度である。

図5に示したレーザ顕微鏡観察の高さデータからオイルピット体積を算出し¹¹⁾、定量的に比較した。図6にオイルピット体積と逆算摩擦係数の関係を示す。冷間圧延では、オイルピット体積の増加とともに摩擦係数が低下する。熱間圧延では、図4に、残存油量が増加しても摩擦係数が低下し

ないことを示したが、オイルピット体積が増加しないため、摩擦係数が低下しないことが示唆される。

3. ロールバイトでの油膜挙動の数値解析

以上のように、熱延潤滑と冷延潤滑で潤滑機構が異なることが推定された。また、ロールバイト内で十分な油量があるにも関わらず、熱延潤滑では、オイルピットが形成され難いことが確認された。本項では、この原因を類推するために、ロールバイト入側での油膜の温度分布や速度分布を数値解析により求め¹⁴⁾、ロールバイトでの油膜挙動を熱延と冷延で比較する。

3.1 解析方法

本解析では、図7に示すように、ワークロール表面に付着した初期油膜厚み (t_0) に対し、ロールバイトに導入される油量厚み、すなわち、ロールバイト入側で鋼板が降伏する地点での油膜厚み (t_1) を解析的に求め、この時の油膜厚みにおける、油膜の温度分布や速度分布を比較した。

ワークロールの初期油膜厚みを $0.1, 1.0, 10 \mu\text{m}$ の3水準とした。ワークロール径、板厚などの圧延条件は、前節で示した圧延実験と同じ条件に設定した。初期油膜厚みに対し、入側油膜厚みを設定し、油膜温度の計算、油膜圧力の計算を行い、油膜圧力が降伏応力と等しくなる入側油膜厚みを求め、それを導入油膜厚みと考えた。

油膜の温解析は、Abaqus Standard 6.14-1 を用いた動的陰解法を用いた。ワークロール表面の油膜が、高温の鋼板に接触してから、ロールバイト入側で油膜圧力が降伏応力に達するまでの時間における、油膜の厚み方向温度分布の時間変化を計算するものである。

油膜の流体解析は、ロールバイト入口に解析範囲を限定し、Abaqus CFD 6.14 を用いた、2次元の伝熱を含む流体解析とした。粘性を考慮したナビエ・ストークス方程式の積分形式の運動方程式、連続の式、エネルギー方程式を連成して解析を行った^{15, 16)}。油膜の初期温度を 293 K とした。油

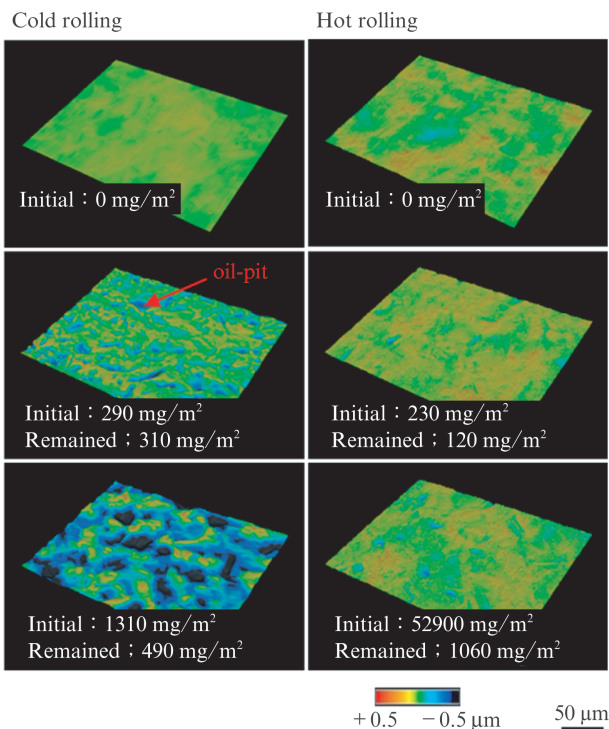


図5 圧延板表面のオイルピット観察結果¹¹⁾

Fig. 5 Comparison of sheet surface by 3D observation between hot and cold rolling¹¹⁾

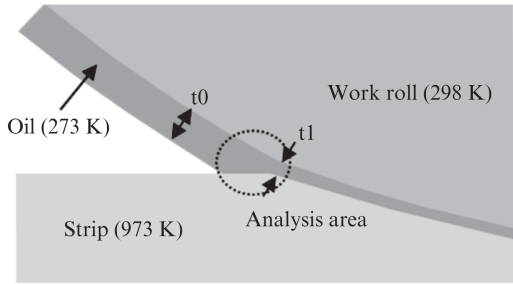


図7 油膜解析の模式図¹⁴⁾

Fig. 7 Schematic illustration of a numerical analysis in this study¹⁴⁾

膜上下面の温度境界条件として、上記温度解析にて計算した、油膜温度の時間変化を長手方向の温度条件として用いた。本来、油膜上下面の境界条件を設定するのではなく、流体解析とロールや鋼板と油膜の温度解析を連成させて解くことが好ましいが、解析が複雑で困難であるため、本解析では上述のように境界条件を設定した。粘度は、各温度での粘度測定結果を近似・外挿して用いた。油膜上下面の温度速度境界条件は、初期油膜位置の表面端の圧力を0とし、ロールと接触している油膜上面はロール速度のX方向、Y方向成分を位置に応じて与え、鋼板と接触している油膜下面は鋼板速度を与えた。解析の詳細は既報¹⁴⁾を参照されたい。

3.2 解析結果

図8に初期油膜厚みを $1.0\mu\text{m}$ とし、入側油膜厚みを変化させた場合の、ロールバイト入側での油膜圧力の変化を示す。油膜厚みが薄くなるほど、油膜圧力が大きくなるのが分かる。油膜圧力が降伏応力に達した際の油膜厚みが、ロールバイトに導入される油膜厚みと考え、973 KのSUS316鋼板の降伏応力は61 MPaであるので、初期油膜厚みが $1.0\mu\text{m}$ の場合、ロールバイト油膜厚みは $0.25\mu\text{m}$ と推定される。

初期油膜厚みが $0.1\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ の場合についても、同様に導入油膜厚みを求め、図9に図3で示した圧延実験での残存油量測定結果と比較して示す。本手法で得られた数値解析結果は、圧延実績と概ね一致する傾向であることを確認できた。これより、本解析手法は、熱間圧延時のロールバイトでの潤滑油の挙動を議論することができる、有効な数値解析モデルであると考えられる。

図10に初期油膜厚みが $1.0\mu\text{m}$ 、入側油膜厚みが $0.25\mu\text{m}$ の条件における、流体解析結果から得られた油膜の温度分布を示す。ロールバイトに近づくとともに油膜温度は上昇し、高温の鋼板と接触している側の油膜温度が高い様子が分かる。図11に同様の条件における、ロールバイト近傍での油膜の速度分布を示す。ロールと接触する側、すなわち、油温度が低く、油粘度が高い側ほど、ロールバイトに流入し易い。また、油膜の厚み中央部では、速度が負、すなわち、油が圧延方向と反対側に押し出される結果が得られた。

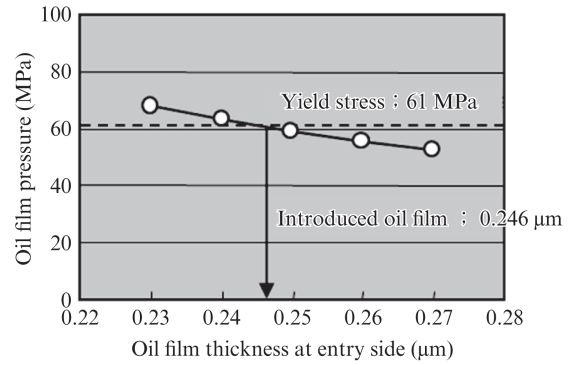


図8 入側油膜厚と油膜圧力の関係¹⁴⁾

Fig. 8 Relationship between oil film thickness and oil film pressure¹⁴⁾

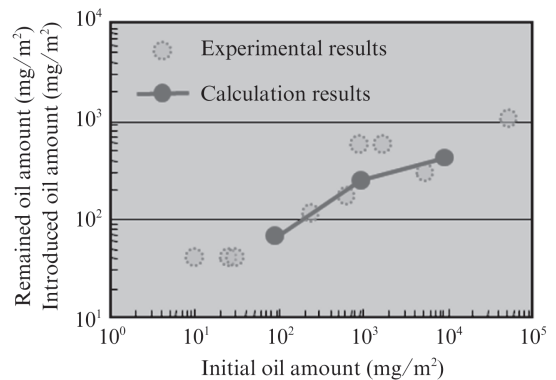


図9 導入油量の実験結果と計算結果の比較¹⁴⁾

Fig. 9 Comparison between experimental results and calculation result¹⁴⁾

比較として、冷間圧延に関しても同様の解析を行った。冷間圧延の解析では、油膜の温度を293 K一定として、初期油膜厚み $1.0\mu\text{m}$ の場合について、解析を行った。入側油膜厚みを $0.36\mu\text{m}$ とした場合、油膜圧力が293 Kの鋼板の降伏応力を215 MPaに達した。図12にこの際の油膜速度分布を示す。熱間圧延の場合と比較すると、熱間圧延では、速度勾配が急であることが分かる。これは、熱間圧延の方が、油膜の粘度分布が大きいことが影響していると推定される。

3.3 熱延潤滑と冷延潤滑における潤滑油挙動の比較

直径340 mmのワークロールで板厚2.0 mmの鋼板をロール回転速度833 mm/sec. (50 mpm)、圧下率10%の条件において、圧延温度を298 Kと973 Kの2水準で、ロールバイト入口における、厚さ方向の油膜速度分布を計算した¹⁷⁾。図13に厚さ方向の油膜速度分布を各温度で比較して示す。冷延相当の298 Kの場合、厚み方向で油膜の速度勾配は一定であるのに対し、熱延相当の973 Kでは鋼板と接触する側で速度勾配が急峻になる。298 Kの場合、鋼板温度と初期油膜温度が同じであるため、油膜の温度は一定であるのに対し、973 Kの場合、低温のワークロールと接触する側の油

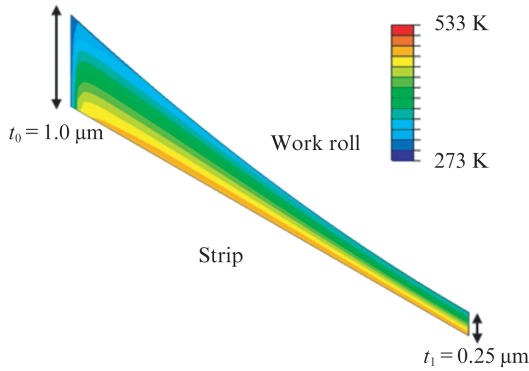


図 10 ロールバイト入側での油膜温度分布 ($t_0=1.0\mu\text{m}$, $t_1=0.25\mu\text{m}$)¹⁴⁾

Fig. 10 Analysis results of temperature distribution ($t_0 = 1.0 \mu\text{m}$, $t_1 = 0.25 \mu\text{m}$)¹⁴⁾

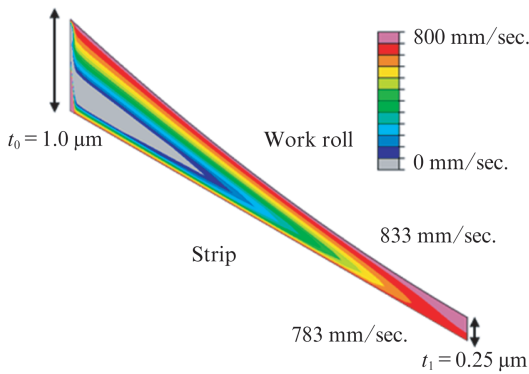


図 11 ロールバイト入側での油膜速度分布 ($t_0=1.0\mu\text{m}$, $t_1=0.25\mu\text{m}$)¹⁴⁾

Fig. 11 Analysis results of oil velocity distribution ($t_0 = 1.0 \mu\text{m}$, $t_1 = 0.25 \mu\text{m}$)¹⁴⁾

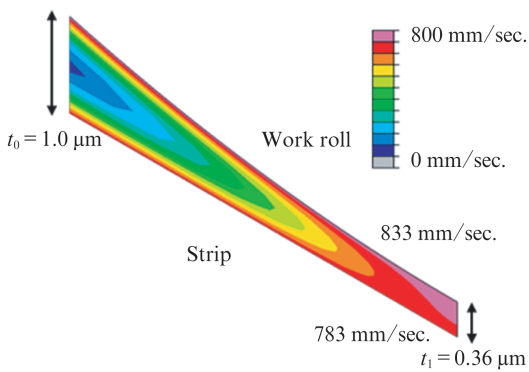


図 12 冷延潤滑におけるロールバイト入側での油膜速度分布 ($t_0=1.0\mu\text{m}$, $t_1=0.36\mu\text{m}$)¹⁴⁾

Fig. 12 Analysis results of oil velocity distribution in cold rolling ($t_0 = 1.0 \mu\text{m}$, $t_1 = 0.36 \mu\text{m}$)¹⁴⁾

膜は動粘度が高いままであるが、高温の鋼板と接触する側の油膜のみ温度が上昇して動粘度が低下し、流動し易くなったためと考える。

図 14 に模式的に示すようなロールバイト内での潤滑油の

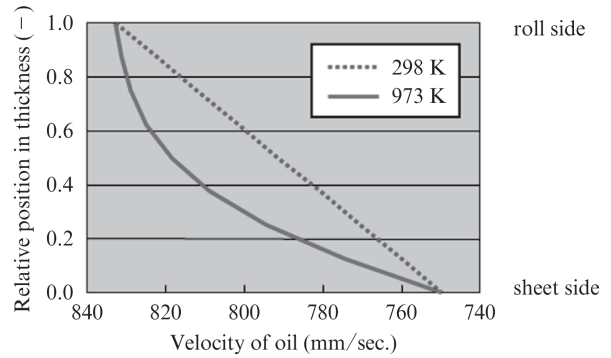


図 13 油膜速度分布の比較¹⁷⁾

Fig. 13 Comparison of oil velocity at the entry side at different rolling temperatures¹⁷⁾

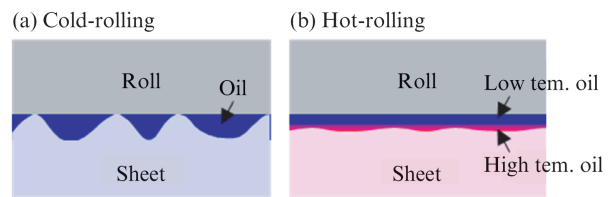


図 14 熱延潤滑、冷延潤滑における潤滑油挙動の模式図¹⁷⁾

Fig. 14 Schematic illustration of the oil behavior on cold and hot rolling lubrication¹⁷⁾

挙動とオイルピットの形成を考える。Ohnuki らは、冷延潤滑において、流体潤滑の比率が高い場合、表面は自由変形の状態を示すと報告¹⁸⁾しており、冷延潤滑では厚さ方向で油膜速度勾配は一定であり、鋼板の自由変形による凹凸化が油膜の厚みに制限されつつオイルピットが形成されると考える。一方、熱延潤滑の場合、鋼板と接触している側の油膜のみ速度勾配が大きく、この範囲のみ油膜が流動し易いと言える。このため、油膜の厚み全域で鋼板が凹凸化するのではなく、油膜が流動し易い限られた厚み範囲内でのみ、鋼板が凹凸化して小さいオイルピットが形成されると考える。動粘度が低くワークロールと同じ速度で流動（移動）する油膜は、鋼板の自由変形による凹凸化を制限していると言い換えることもできる。図 4 において、熱延潤滑では、ロールバイトの油膜厚がある値より大きくなっても摩擦係数は低下しないことを示したが、油膜厚が増しても、ワークロールと接触している側の油膜は、ロールとほぼ同じ速度で流動（移動）するため、流体的な潤滑にほとんど寄与しないと考えられる。

4. おわりに

0.02 μmRa 以下に研磨したワークロールと鋼板を用いた圧延実験において、圧延後のワークロール表面に残存した油量を秤量し、さらに、鋼板表面のオイルピットを観察することにより、熱間圧延時の潤滑挙動を冷間圧延の場合と比較

した。冷間圧延では、ワークロール残存油量の増加とともに、摩擦係数は低下するのに対し、熱間圧延では、 150 mg/m^2 程度の少ない油量で摩擦係数は十分に低下し、それ以上に油量が増加しても、摩擦係数は低下しない。また、冷間圧延では、 500 mg/m^2 程度の導入油量で明瞭なオイルピットが観察されるのに対し、熱間圧延では、 1000 mg/m^2 を超えても、極めて小さいオイルピットが観察されるのみである。このように、熱間圧延では、冷間圧延とは異なる潤滑機構が確認された。

熱間圧延におけるロールバイトでの圧延油挙動を議論するため、ロールバイト入側での圧延油挙動の数値解析を試みた。伝熱を考慮した流体解析の結果、導入油膜厚みは、初期油膜厚みとともに増加し、この解析結果は、熱間圧延実験で得られた測定結果と概ね一致した。熱延潤滑では、ワークロールと鋼板の間で、油膜の温度差に起因する動粘度差が大きくなり、高温の鋼板と接触している側の油膜のみ動粘度が小さくなる。動粘度の小さい油膜のみが優先的に流動して潤滑に寄与し、その限られた厚み範囲内で鋼板が凹凸化してオイルピットが形成されると推定される。

参考文献

- 1) 鎌田征雄, 小豆島明, 池田章, 山田廣志, 剣持一仁. 日本鉄鋼協会圧延理論部会第100回記念シンポジウム. 日本鉄鋼協会, 東京, 1994, p. 211.
- 2) 阿高松男, 井上剛. 第148回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 東京, 1993, p. 19.
- 3) 小豆島明, 木原諄二, 五弓勇雄. 塑性と加工. 1978, vol. 19, p. 958.
- 4) 鎌田征雄, 伊藤紘一. 板圧延の理論と実際. 日本鉄鋼協会, 東京, 1984, p. 201.
- 5) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴. トライボロジスト. 1989, vol. 34, p. 879.
- 6) 木村幸雄, 藤田昇輝, 松原行宏, 小林宏爾, 天沼陽介, 吉岡修, 曾谷保博. 塑性と加工. 2017, vol. 55, p. 346.
- 7) 藤田昇輝, 木村幸雄, 松原行宏, 小林宏爾, 天沼陽介, 吉岡修, 曾谷保博. 塑性と加工. 2014, vol. 55, p. 445.
- 8) 蛭田敏樹, 勝村龍郎. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, p. 991.
- 9) 小豆島明, 薛衛東, 吉田良明. 鉄と鋼. 93(2007), 681.
- 10) Azushima, A.; Xue, W. D.; Yoshida, Y. CIRP Ann. 2007, vol. 56, p. 297.
- 11) 松原行宏, 蛭田敏樹, 木村幸雄. 鉄と鋼. 2017, vol. 100, p. 346.
- 12) Azushima, A. Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. 1978, Series3, vol. 44, p. 332.
- 13) 藤田昇輝, 木村幸雄. 鉄と鋼. 2011, vol. 97, p. 532.
- 14) 松原行宏, 平瀬欣弘, 蛭田敏樹, 高嶋由紀雄, 壁矢和久. 鉄と鋼. 2016, vol. 102, p. 459.
- 15) Abaqus 6.13 User's Guide Volume II Analysis: DASSAULT SYSTEMS, Velizy-Villacoublay, France. 2013, p. 662.
- 16) Ferziger, J. H.; Peric, M. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer. 1997.
- 17) 松原行宏, 木村幸雄. 鉄と鋼. 2017, vol. 103, p. 534.
- 18) 大貫輝, 安富清治郎, 外山晴二, 橋口幸生, 泊康則, 園田栄, 広中清一郎. トライボロジスト. 1990, vol. 35, p. 845.



松原 行宏



木村 幸雄



壁矢 和久