熱延潤滑における油膜挙動解明への 数値解析によるアプローチ

松原 行宏^{1)*}・平瀬 欣弘²⁾・蛭田 敏樹²⁾・高嶋 由紀雄¹⁾・壁矢 和久¹⁾

Approach to Clarification of Oil Film Behavior in Hot Rolling by Numerical Analysis

Yukihiro MATSUBARA, Yoshihiro HIRASE, Toshiki HIRUTA, Yukio TAKASHIMA and Kazuhisa KABEYA

Synopsis : In hot rolling, lubrication oil plays an important role in reducing rolling force and protecting the work roll surface. However, the oil behavior in hot rolling has not been clarified sufficiently. In this work, a numerical analysis of the introduced oil film was attempted. There are no previous reports on numerical analysis of hot rolling lubrication. The analytical results of the introduced oil film thickness showed a good correlation with the experimental results. The numerical analysis of hot rolling lubrication clarified the following points: The introduced oil film did not become saturated even if the oil film thickness increased. The reason for this phenomenon is thought to be because the oil viscosity remains high on the work roll side. It was also found that the gradient of the oil velocity in the thickness direction is not constant and changes greatly on the strip side.

Key words : hot rolling; lubrication; oil film; numerical analysis.

1. 緒言

薄鋼板の熱間圧延においては、圧延荷重低減による電力原単位の向上、ロール面荒れ防止、あるいは、鋼板表面品質改善を目的に、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⁾。近年、高張力鋼板の製造など、熱延潤滑に対する期待はますます大きくなりつつある。しかしながら、熱間圧延では、潤滑油の燃焼、鋼板表面の酸化皮膜の変形を伴うため、現象が非常に複雑である。冷間圧延では、圧延条件から導入油量を解析的に推定する手法が提案されている²⁻⁴⁾のに対し、熱延潤滑に関する研究事例⁵⁻⁷⁾が少なく、ロールバイトでの圧延油の挙動など全く解明されていない。

これに対し、著者らは、高温加熱時に酸化皮膜が生成し難いSUS316鋼を用い、また、表面を鏡面に研磨した鋼板とワークロールを用いた熱延実験を行った⁸⁾。圧延後のワークロールに残存した油量を秤量することにより、ロールバイトに導入された油量を推定し、鋼板表面のオイルピット発生挙動を観察した。熱間圧延では、高温の鋼板と接触するため油膜温度が上昇、油膜粘度が低下するため、導入油量は低下すると考えられたが、冷間圧延と同程度の導入油量が確認された。特に、入側油量の増加とともに、導入油量も増加する傾向が確認され、冷間圧延とは異なる挙動が

確認された。また、冷間圧延のような明瞭なオイルピットが形成されないなど、ロールバイトでの圧延油の挙動を十分に説明することができていない。

これまで、熱間圧延における、ロールバイト入側での油膜の温度分布や速度分布に関する研究事例は報告されていない。そこで、本研究では、熱間圧延におけるロールバイトでの圧延油挙動を明確にすることを目的に、数値解析による、ロールバイト入側での圧延油の挙動解析を行い、油膜の温度分布や速度分布、さらには、導入油量の推定を試みた。

2. 解析方法

本解析の目的は、Fig.1に示すように、熱間圧延において、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)を解析的に求めることである。この際、ワークロールに付着した初期油膜厚みを0.1, 1.0, 10 μm の3水準で変更した。ワークロール径、板厚などの圧延条件は、Table 1に示すように、前報⁸⁾で示した圧延実験と同じ条件に設定した。

Fig.2に解析のフローチャートを示す。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

平成28年3月31日受付 平成28年4月18日受理 (Received on Mar. 31, 2016 ; Accepted on Apr. 18, 2016)

1) JFEスチール(株)スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, Kawasaki-cho 1-chome Mizushima Kurashiki 712-8511)

2) JFEテクノリサーチ(株) (JFE Techno-Research Corporation)

* Corresponding author : E-mail : yu-matsubara@jfe-steel.co.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2016-026>

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るものとする。

2・1 油膜温度解析

熱間圧延における油膜の温度計算手法について述べる。解析は、Abaqus Standard 6.14-1を用いた動的陰解法とした。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。

Fig.3に本温度解析の解析メッシュ例を、初期油膜厚み1.0 μmの場合について示す。ワークロール厚を100 μm（メッシュ厚1～10 μmで29分割）、油膜厚を1.0 μm（メ

Fig. 1. Schematic illustration of a numerical analysis in this study. (Online version in color.)

Fig. 2. Flow chart of the numerical analysis in this study.

Table 1. Analysis conditions.

mill	2Hi ϕ 340 mm
work piece size	2 mm ^t × 100 mm ^w
rolling velocity	50 m/min.
reduction	6.0%
oil viscosity	110 mm ² /sec.
rolling temp.	973 K

ッシュ厚0.01～0.04 μmで46分割)、鋼板厚を100 μm（メッシュ厚1～10 μmで29分割）とした。ワークロールと油膜の初期温度を298 K、鋼板の初期温度を973 Kとし、ワークロール上面の温度を298 K、鋼板下面の温度を973 Kに固定した。油の加工発熱や燃焼などは考慮することなく、(1)式による油膜界面の熱伝達、(2)式による鋼板や油膜内部の熱伝導のみを考慮し、後述のようにして決定した接触時間後における油膜の温度分布を計算した。

$$Q = \alpha (\theta_w - \theta_o) = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、θは温度 (K)、yは位置 (m)、tは時間 (sec.)、λは熱伝導率 (W/m K)、Cpは比熱 (J/kg K)、ρは密度 (kg/m³)、αは熱伝達係数 (W/m² K)、θwは鋼板界面温度、θoは油膜界面温度である。Table 2に各要素の物性値を示す。油の比熱は、温度θ (K) に依存するよう設定した。また、油膜と鋼板の熱移動は、接触熱伝達を考え、熱伝達係数を、油膜厚が1.0 μmの場合に60 kW/m² Kとし、熱伝達係数は油膜厚みに逆比例すると仮定した。Fig.4にロールバイト入側近傍を模式的に示すように、初期油膜厚みと入側油膜厚みを設定すると、ロール半径Rから油膜長さLを(3)式のように近似でき、ロール速度から、接触時間を求めた。

$$L = \sqrt{R^2 - (R - (t_0 - t_1))^2} \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 3. Divided elements in the case of t₀=1.0 μm.

Table 2. Thermophysical property values in this analysis.

	thermal conductivity (W/m K)	specific heat (kJ/kg K)
oil	0.16	0.0012 × T + 1.2
strip	25	0.8
work roll	50	0.4

2・2 油膜流体解析

油膜の流体解析の手法について述べる。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。(4)式に示す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、(5)式に示す連続の式、および、(6)式に示すエネルギー方程式を連成して解析を行った^{9,10)}。

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho v dV + \int_S \rho v \otimes (v - v_m) \cdot n dS = - \int_V \nabla p dV + \int_S \tau \cdot n dS + \int_V f dV \quad (4)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho C_p \theta dV + \int_S \rho C_p \theta (v - v_m) \cdot n dS = \int_V r dV - \int_V q \cdot n dS \quad (6)$$

ここで、 S ；表面領域、 V ； S を持つ任意の検査体積、 n ； S の外向き法線、 p ；圧力、 v ；速度ベクトル、 v_m ；移動メッシュの速度、 f ；物体力（自然対流による浮力）、 τ ；粘性せん断応力、 q ；熱伝導による熱移動、 r ；外部から物体に供給される単位体積あたりの熱である。

油膜を厚み方向に8分割した。長手方向は、例えば、初期油膜厚みが1.0 μm 、入側油膜厚みが0.25 μm の条件では、505分割し、総要素数は4040要素である。座標系は、Fig.4に示したように、ロールの半径方向をY方向、油膜圧力が鋼板の降伏応力に到達する位置の円周方向接線方向をX方向とした。噛み込み部の鋼板と油膜下面は直線近似した。油膜は非圧縮性、ニュートン粘性とした。

油膜の初期温度を293 Kとした。油膜上下面の温度境界条件として、2・1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、Fig.5に示す、各温度での粘度測定結果を近似・外挿して、(7)式により決定した。流体解析の

Fig. 4. Enlarged view of the analysis area. (Online version in color.)

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 (833 mm/sec.) 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 (783 mm/sec.) を与え、入側油膜位置の圧力を求めた。

$$\eta = 2020 \times \exp(-0.407 \times (\theta - 273)^{0.534}) \quad (7)$$

3. 解析結果

3・1 温度解析結果

Fig.6に初期油膜厚みを変更した際の、ロールバイト入側での油膜温度分布を示す。初期油膜厚みが10, 1.0, 0.1 μm のそれぞれにおいて、入側油膜厚みを0.39, 0.25, 0.085 μm とした場合の結果である。油膜が厚いほど、油膜の平均温度が低く、油膜内の厚み方向温度勾配も大きい。本解析のような、非常に短い時間における、油膜と鋼板間の熱伝達係数を実験的に求めることは容易ではない。本解析に用いた熱伝達係数は、十分に根拠のある値ではないが、油膜の温度分布、油膜厚みによる温度分布の変化は定性的に妥当なものであると考える。

Fig.7に初期油膜厚みが1.0 μm 、入側油膜厚みが0.25 μm

Fig. 5. Temperature - viscosity curve of oil to be used in the experiments.

Fig. 6. Temperature distribution on thickness direction on each conditions. (Online version in color.)

の場合における、油膜上下界面の温度変化を示す。油膜温度の時間変化を長手方向に換算したものである。鋼板と接触している側の油膜温度は、接触直後に急激に上昇している。この油膜界面温度の解析結果を流体解析の境界条件とした。

3・2 流体解析結果

Fig.8に初期油膜厚みを $1.0\ \mu\text{m}$ 、入側油膜厚みを $0.25\ \mu\text{m}$ とした条件における、ロールバイト近傍長手方向における油膜圧力の変化を示す。ロールバイトに近づき、油膜が薄くなるほど圧力が高くなるのが分かる。これは、先細りの空間に速度を持った油が導かれることによって圧力を生じるくさび効果とロールと鋼板に狭圧されることによって圧力が上昇する絞り効果によるものである。Fig.9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。本解析では、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る。すなわち、 700°C のSUS316鋼板の降伏応力は $61\ \text{MPa}$ 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 $0.25\ \mu\text{m}$ と決定される。

Fig.10に初期油膜厚みが $1.0\ \mu\text{m}$ 、入側油膜厚みが $0.25\ \mu\text{m}$

Fig. 7. Analysis results of temperature change ($t_0=1.0\ \mu\text{m}$, $t_1=0.25\ \mu\text{m}$).

Fig. 8. Change of oil film pressure in the case of $t_0=1.0\ \mu\text{m}$, $t_1=0.25\ \mu\text{m}$.

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。Fig.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様子が分かる。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。

初期油膜厚みが $0.1\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ の場合についても、同様に入側油膜厚みと油膜圧力の関係を求めた。Fig.12に結果を示すように、初期油膜厚みと導入油膜厚みの関係が得られた。Fig.13に前報で示した圧延実験での測定結果⁸⁾と併せて示す。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る。

4. 考察

Fig.14に初期油膜厚みを変更した場合における、ロールバイトに導入される際の油膜の厚み方向動粘度分布を示す。初期油膜が厚いほど、ロールと接触している側の動粘度が高いことが分かる。冷間圧延では、初期油膜が厚くなくても、ロールバイトに引き込まれる油量は飽和する¹¹⁾ことが知られている。これに対し、熱間圧延では、初期油膜が厚くなると、油の粘度が高くなるため、油の高粘度化の効果により、ロールバイトに引き込まれる油量は飽和することなく、増加するようである。

冷間圧延の場合と比較するために、冷間圧延を模擬した同様の解析を行った。冷間圧延の解析では、油の温度を $293\ \text{K}$ 一定、鋼板の $293\ \text{K}$ での降伏応力を $215\ \text{MPa}$ として、初期油膜厚み $1.0\ \mu\text{m}$ の場合について、同様の解析を行った。Fig.15に油膜圧力の変化を示すように、入側油膜厚み

Fig. 9. Relationship between oil film thickness and oil film pressure.

を $0.36\ \mu\text{m}$ とした場合、油膜圧力が $215\ \text{MPa}$ に達した。

Fig.16に冷間圧延におけるロールバイト近傍での油膜の速度分布を示す。Fig.10に示した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

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

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

Fig. 16. Analysis results of oil velocity distribution in cold rolling ($t_0=1.0\ \mu\text{m}$, $t_1=0.36\ \mu\text{m}$).

Fig. 12. Relationship between oil film thickness and oil film pressure. (a) $t_1=10\ \mu\text{m}$, (b) $t_1=0.1\ \mu\text{m}$

Fig. 13. Comparison between experimental results and calculation result.

Fig. 14. Oil viscosity distribution on thickness direction on each conditions. (Online version in color.)

Fig. 15. Change of oil film pressure of cold rolling ($t_0=1.0\ \mu\text{m}$, $t_1=0.36\ \mu\text{m}$).

影響していると推定される。Fig.17に油膜圧力が降伏応力に達した際の、厚み方向の速度分布を比較して示す。冷間圧延では、厚み方向で速度勾配が均一であるのに対し、熱間圧延では、速度勾配が大きく変化し、鋼板と接触している側で速度差が大きくなっていることが分かる。

以上の解析結果から、熱間圧延では、ロールバイトにおいて、油膜の速度勾配は一定ではなく、鋼板側で速度勾配が大きく変化していることを明らかにした。

5. まとめ

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行い、以下の結果を得た。

- (1) 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た。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する傾向を示した。
- (2) 熱間圧延では、初期油膜が厚いと、ロールと接触している側の油膜粘度は高いまとなる。このため、初期

Fig. 17. Oil velocity comparison between hot and cold rolling. (Online version in color.)

油膜が厚い場合も、ロールバイトに導入される油量は飽和することなく増加すると考えられる。

- (3) 熱間圧延では、ロールバイトにおいて、油膜厚み方向で速度勾配が一定ではない。鋼板と接触している側で油の動粘度が小さくなり、速度勾配が大きく変化する。

文 献

- 1) 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), 211.
- 2) 板圧延の理論と実際, 日本鉄鋼協会, 東京, (1984), 201.
- 3) A.Azushima, J.Kihara and I.Gokyu: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **19**(1978), 958.
- 4) A.Azushima, K.Noro and Y.Iyanagi: *Tribologist*, **34**(1989), 879.
- 5) T.Hiruta and T.Katsumura: *CAMP-ISIJ*, **19**(2006), 991.
- 6) A.Azushima, W.D.Xue and Y.Yoshida: *Tetsu-to-Hagané*, **93**(2007), 681.
- 7) A.Azushima, W.D.Xue and Y.Yoshida: *Ann. CIRP*, **56**(2007), 297.
- 8) Y.Matsubara, T.Hiruta and Y.Kimura: *Tetsu-to-Hagané*, **100**(2014), 346.
- 9) Abaqus 6.13 User's Guide Volume II Analysis: DASSAULT SYSTEMS, Vélzy-Villacoublay, France, (2013), 6.6.2.
- 10) J.H.Ferziger and M.Peric: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, (1997).
- 11) N.Fujita and Y.Kimura: *Tetsu-to-Hagané*, **97**(2011), 532.