

冷間圧延における熱起電圧法による 焼付き限界の界面温度の測定

神保 安広*・廣重 毅*²・小豆島 明*²

Measurement of Critical Interfacial Temperature by Means of
the Thermoelectric Method in Cold Sheet Rolling

Yasuhiro JIMBO, Tsuyoshi HIROSHIGE and Akira AZUSHIMA

Synopsis : Temperature at the interface between roll and workpiece in cold sheet rolling is measured by the thermoelectric method. Experiments are carried out using the simulation testing machine of sliding-rolling type on various conditions of roll speed and reduction in thickness. The critical temperature is evaluated by means of investigations on the relation of measured interfacial temperatures to the occurrence of friction pick up. Relation between experimental values and theoretically calculated mean interfacial temperature is examined. The conclusions obtained are as follows; (1) The thermoelectric method is effective for the evaluation of the interfacial temperature in cold sheet rolling. (2) The critical temperature is constant at which a friction pick up occurs from breakage of lubrication film due to frictional heating. (3) Measured temperatures coincide with calculated values.

Key words : interfacial temperature ; measurement ; cold sheet rolling ; friction pick up ; lubrication.

1. 緒言

鋼板の冷間圧延の分野では強圧下、高速の操業条件で発生する焼付きを防止し、生産性のよりいっそうの向上を実現するために圧延用ロールおよび潤滑剤の潤滑特性の改善が要望されている。このための検討として、著者らは実機の冷間圧延に近い相対すべり速度を付与できるすべり圧延タイプの試験機¹⁾を用いて実機に類似したヒートタイプの焼付きを再現する²⁾とともに、焼付き限界における圧延データをもとに理論的に算出した界面温度を尺度としてロール材および潤滑剤の耐焼付き性を定量的に評価してきた³⁻⁵⁾。これらの評価結果からロールと圧延材界面の温度が焼付き限界を決定する最も重要な因子であることが理解できたので界面温度を実際に測定し、焼付き限界の温度を明らかにする必要がある。しかしながら、圧延中のロールと圧延材界面の温度の測定例は少なく^{6,7)}、しかもそれらの測定に用いられた方法には精度的に不十分な点が多い。たとえば、熱電対を圧延出側の鋼板表面に押し付け、得られた測定値をもとに伝熱計算して界面の出口温度を求める方法⁸⁾では測定点から界面の出口までの鋼板表面の境界条件をどの程度に見積もるかによって結果が異なる。また、熱電対をロール内部に固定し、ロールが一回転する間での温度変化を測定して界面におけるロール表面温度を解析する方法⁹⁾では温度

変化の検出が可能で表面にきわめて近い位置に熱電対を装着する必要があり、熱電対自体の熱容量による測定値の誤差および応答性の遅れなどの問題がある。これらの測定方法に共通する最大の欠点は界面温度を直接には測定できないことであり、得られた結果はその推定値にほかならないのである。

界面温度を直接に測定する方法としては接触面自体を熱電対の温接点とし、ゼーベック効果によって生じる起電圧を温度に換算して求める方法(熱起電圧法)が提案されている⁸⁾。潤滑あるいは無潤滑の条件において4球式試験機およびパウデン型試験機などの基礎的試験機を用いた界面温度の測定に適用されており⁹⁻¹²⁾、その信頼性が確認されている¹¹⁾。これまでに冷間圧延を対象とした測定に適用された例はないが、その主な理由はバイパス電流の発生を防ぐために十分な絶縁が測定上必要なことによる。

本研究では実機の界面状況を再現よくシミュレート可能なすべり圧延タイプの評価試験機^{1,2)}に熱起電圧法を適用し、冷間圧延におけるロールと圧延材界面の温度の直接測定を行った。ロール材および圧延材には汎用の5%クロム鋼および低炭素アルミキルド鋼の焼なまし調質材を用いた。鉱油のニート潤滑においてロール速度および圧下率を広範囲に変えて試験して各ロール速度での焼付き限界における界面温度を測定した。また、測定値はArchardの解析方法を発

平成9年9月29日受付 平成10年1月16日受理 (Received on Sep. 29, 1997; Accepted on Jan. 16, 1998)

* 関東特殊製鋼(株)研究開発部 (Research and Development Department, Kanto Special Steel Works, Ltd., 1-3-1 Tsujido-Kandai Fujisawa 251-8556)

* 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University)

展させた界面温度の理論値¹³⁾と比較して両者の相関を調べた。これらの結果を通じて、この測定方法が冷間圧延におけるロールと圧延材界面の温度を正しく評価できる有用な方法であることを明らかにしたので報告する。

2. 温度と起電圧の関係のキャリブレーション

圧延実験に先立ち、Fig. 1の熱電対回路を構成してロールと圧延材の接触面における温度と起電圧の関係を求めた。ロールおよび圧延材には圧延実験で使用するものと同じ材料の5%クロム鋼のリングロールおよび低炭素アルミキルド鋼の焼なまし調質材を用い、両者を点溶接することによって熱電対の温接点を形成した。リングロールにはそれと同じ材料から作製した5%クロム鋼のワイヤーを溶接し、ワイヤーおよび圧延材のそれぞれの銅線との接続部は冷接点を形成するための0°Cの水浴中に浸漬した。それぞれの銅線側の先端は記録計に接続し、分解能10 μ Vの直流電圧の入力に設定した。リングロールを温度管理した油槽内に入れ、十分に保持してリングロールと圧延材の接続部の温度が油槽の温度にほとんど一致した時点で起電圧を測定した。油槽の温度を30°Cから180°Cまでの間で変更し、その間の温度での起電圧を測定してFig. 2の関係を得た。

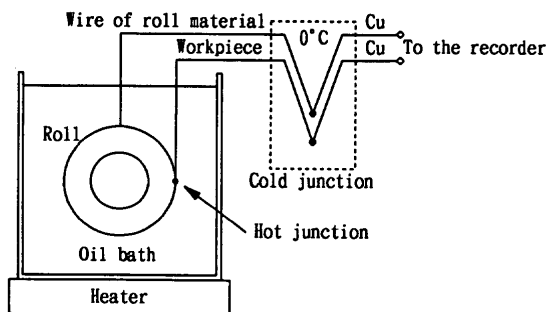


Fig. 1. Schematic diagram of calibration.

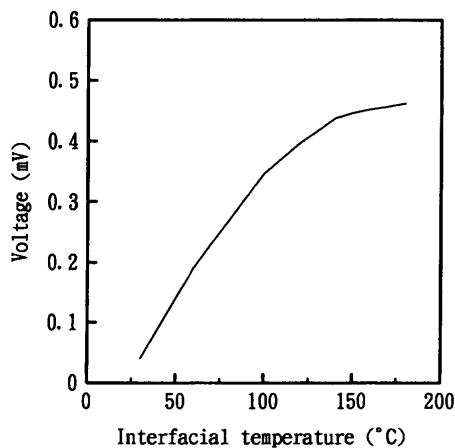


Fig. 2. Calibration curve for measuring the interfacial temperature.

3. 試験装置

圧延実験にはFig. 3に示す潤滑性評価試験機を用い、これに熱起電圧法を適用するためにメインスタンドの上ロールと圧延材界面を熱電対の温接点とするFig. 4の熱電対回路を構成した。上ロールは外径76mm、内径48mm、幅35mmのリングロールとスリーブシャフトから成り、リングロールとスリーブシャフトを絶縁するためにこれらの間に厚み3mmのセラミックリングを装入し、セラミック製のキーを用いて固定した。リングロールの側面にはそれと同じ材質の直径1mmの5%クロム鋼製のワイヤーを溶接し、そのワイヤーを絶縁用チューブで被覆してスリーブシャフトに加工した内孔に通し、先端をスリーブシャフト端に装着したスリップリングに接続した(Fig. 5参照)。つづいて、スリップリングから引き出したワイヤーは銅線に結線して記録計に接続した。ワイヤーと銅線の接続部は冷接点を形成するた

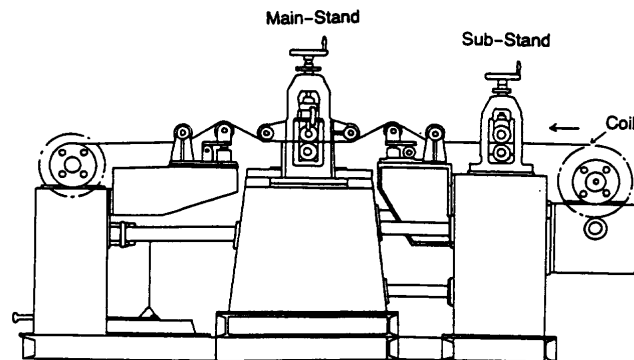


Fig. 3. Side view of the simulation testing machine.

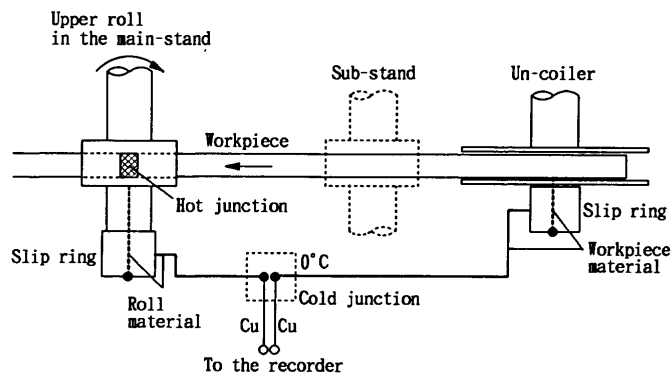


Fig. 4. Schematic diagram of measurement of interfacial temperature.

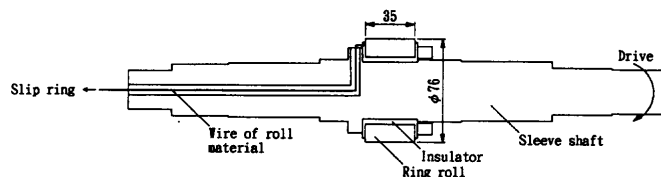


Fig. 5. Schematic representation of the upper roll in the main-stand.

めの0°Cの水浴中に浸漬した。他方の圧延材側は圧延コイルの先端を巻もどしドラムに装着したスリップリングに接続し、そこから圧延材の切り板を用いて引き出してロール側と同様に冷接点浴を経て記録計に接続した。バイパス電流の発生を防ぐためにメインスタンドの下ロールは上ロールと同じ構造としてリングロールとスリーブシャフトを絶縁した。加えて、圧延入側および出側の圧延材搬送ローラーの下面、張力計の下面、ドラムの側面にはプラスチック製のシートを貼り、サブスタンド用上下ロール材にはセラミックを用いて圧延材と試験装置の絶縁を行った。

4. 実験方法

メインスタンドの上ロールと圧延材の速度比を10としたすべり圧延条件で実験した。このためにサブスタンドのロール速度は減速機によりメインスタンドのロール速度の1/10に設定し、メインスタンドの下ロールは従動状態とした。上ロールの速度は24, 48, 72, 107, 143m/minの5条件とし、全ての速度条件において圧延時間は60Sとした。各ロール速度で60Sのすべり圧延を可能とするため、サブスタンドにおいて2%の圧下率で圧延された圧延材をあらかじめメインスタンドに挿入後、実験を開始した。圧延の間では上ロールと圧延材界面の起電圧ならびに摩擦係数を求めるための圧延荷重と上ロール軸のトルクを測定した。また、圧延入側での上ロールおよび圧延材の表面温度として、ロールバイト入口からそれぞれ約90°および約50mmの位置の温度をクロメル・コンスタンタンの熱電対を用いて測定した。各ロール速度での焼付き限界における界面温度を評価するため、同一の速度条件にて焼付きが発生するまで圧下率を段階的に増加させて実験した。焼付き発生の有無は圧延材および上ロールの表面を目視観察して判別した。

圧延材には板厚0.4mm、板幅15mmの低炭素アルミキルド鋼の焼なまし調質材を用いた。メインスタンドでの圧下前のその表面粗さは約0.5 μ mRaであった。ロールは各圧延ごとに#500のエメリー紙で研磨して0.05 μ mRaの表面粗さに管理した。潤滑剤には20°Cでの粘度が80mm²/Sのパラフィン系鉱油をニートで用い、圧延中に上ロールにガーゼで押し付け塗布した。

5. 実験結果

5・1 起電圧の記録

圧延中のロールと圧延材界面の起電圧、左右のロードセルによる圧延荷重および上ロールのトルクの測定記録の一例として、ロール速度24m/min、圧下率3.1%の条件での60S間の記録をFig. 6に示す。ここで圧下率は圧延終了部での板厚を測定して求めた。まず、圧延荷重およびトルクの記録については共通に約5Sごとに繰り返す変動とそれに加

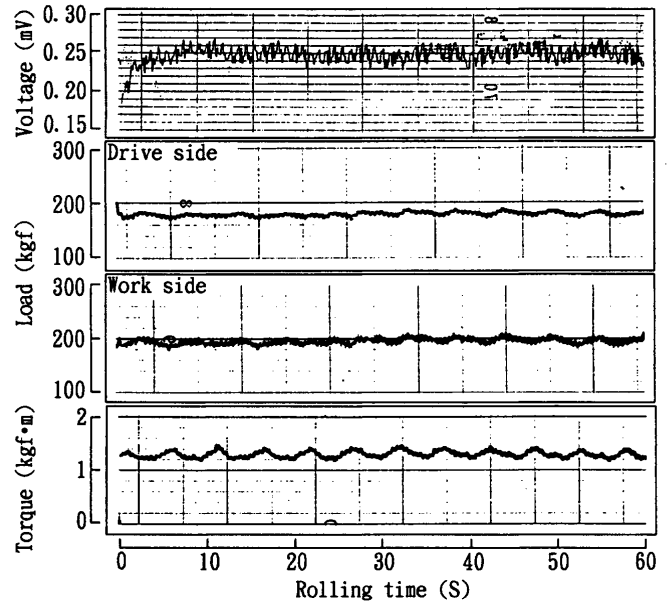


Fig. 6. An example of voltage, load and torque at 3.1% reduction and 24m/min roll speed.

わった約0.5Sの周期の比較的小さな変動が見られた。これらの変動の周期はそれぞれ下ロールの回転周期の6Sおよび上ロールの回転周期の0.6Sに近い。上下ロールは前述したようにリングロール、セラミック製絶縁リングおよびスリーブシャフトから成る3重構造であるため、圧延荷重による偏芯からこれらの変動が発生したのと考えられる。一方、問題の起電圧については圧延荷重およびトルクで見られたものと同様、上ロールの回転の0.6Sの周期に近い変動が顕著に認められ、より大きな周期の変動は比較的少なかった。この起電圧の変動は約±0.01mVであり、Fig. 2のキャリブレーションの結果から温度に換算すると±2°C程度でありあまり大きくなかった。起電圧の読み取り値としては圧延開始から10Sごとにその時点での平均値を採用し、この値から界面温度を求めた。

5・2 界面温度の測定値

全てのロール速度において約3%の圧下率条件での界面温度および摩擦係数の測定結果をFig. 7 (a), (b)に示す。最も低速の24m/minの場合、界面温度は60S間の圧延においてほぼ一定の60°C程度を示した。しかし、より高速の条件では圧延の進行とともに界面温度は上昇する傾向を示し、最も高速の143m/minの条件では圧延開始10Sから60Sの間で約90°Cから105°Cまで上昇した。これらの速度条件では摩擦係数にも同様の上昇が認められ、界面における潤滑状況が経時的に変化する結果を示した。また、同じ圧下率条件において界面温度はロール速度が大きいほど高く、摩擦係数は逆に低下する傾向を示した。

次に、同一のロール速度において圧下率を変化させたときの界面温度および摩擦係数の測定結果をFig. 8 (a), (b)およびFig. 9 (a), (b)に示す。Fig. 8は最も低速の24m/minの結果を表し、Fig. 9は最も高速の143m/minの結果を表す。

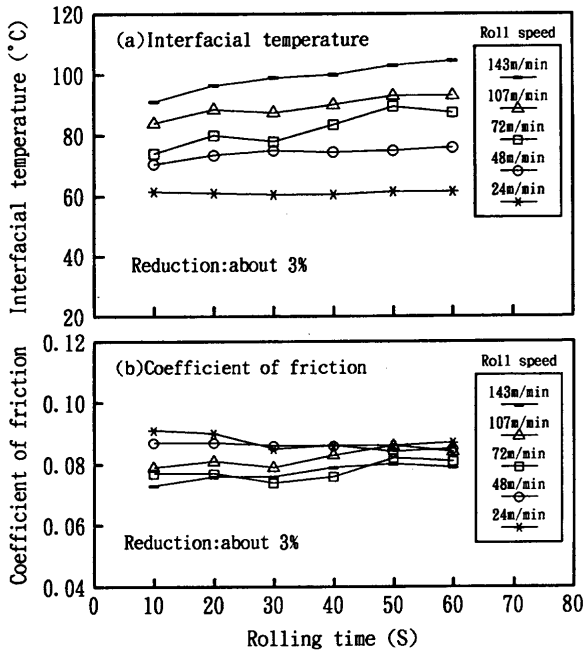


Fig. 7. Variation of interfacial temperature and coefficient of friction with rolling time at about 3% reduction and five levels of roll speed.

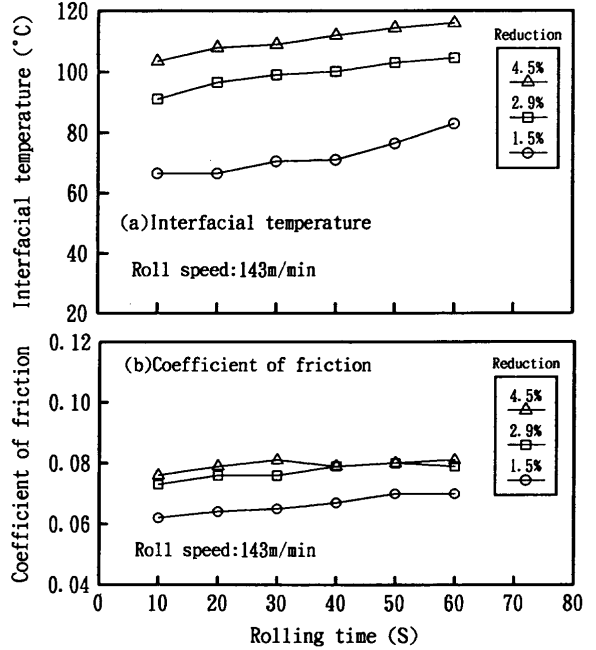


Fig. 9. Variation of interfacial temperature and coefficient of friction with rolling time at 143m/min roll speed and three levels of reduction.

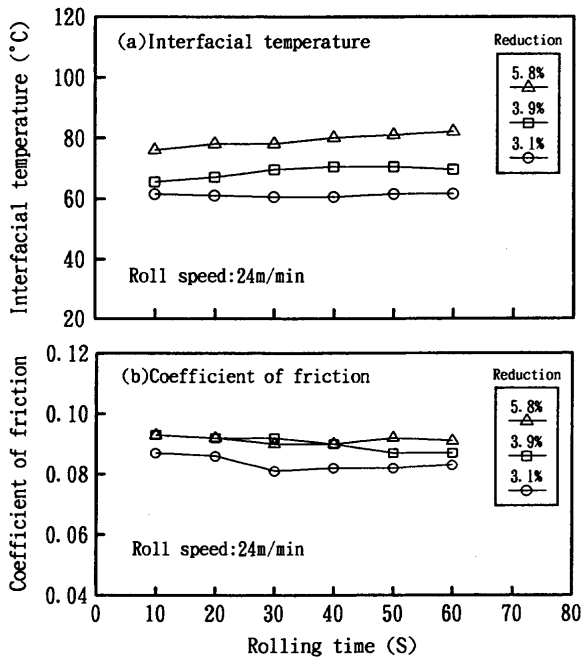


Fig. 8. Variation of interfacial temperature and coefficient of friction with rolling time at 24m/min roll speed and three levels of reduction.

両速度とも圧下率が大きいほど高い界面温度を示した。それぞれのロール速度における界面温度の経時変化の傾向は3種類の圧下率条件で同様であり、24m/minの条件では60S間の圧延においてほとんど一定の値を示し、143m/minの条件では圧延の進行とともに上昇した。一方、摩擦係数はそれぞれのロール速度において界面温度と同様の経時変化を

示したが、圧下率の増加に対する摩擦係数の上昇はしだいに緩やかになる傾向が見られた。

5・3 焼付き限界における界面温度

ロール速度24m/minおよび143m/minの条件において、焼付きが発生するまで圧下率を段階的に上げて実験したときの界面温度の測定結果をFig.10およびFig.11に示す。焼付き発生の有無は圧延材表面を10Sごとの圧延時間に相当する位置で目視観察して判定した。図中で焼付きが発生した実験点は黒く塗りつぶして示した。ロール速度24m/minの場合、焼付きは圧下率7.6%の条件では圧延終了部で、圧下率8.8%の条件では圧延開始40S以降で認められ、143m/minの場合は圧下率5.3%の条件では圧延終了部で、圧下率5.9%の条件では圧延開始40S以降で認められた。なお、両速度の最も高い圧下率の実験では焼付きの発生による圧延荷重およびトルクの変動が非常に大きくなった時点で実験を中止した。それぞれのロール速度において圧下率が異なる条件で焼付き開始時間は相違したが、焼付きが開始した時点での界面温度は24m/minの条件では約90°C、143m/minの条件では約130°Cで圧下率の違いにはあまり影響されず、ほぼ一定の値を示した。この値を焼付き限界における界面温度として評価した。また、限界圧下率は60S間の圧延において焼付きが発生しなかった圧下率と焼付きが発生した圧下率の中間の値で評価した。

そのほかのロール速度でも同様に実験して焼付き限界における界面温度および圧下率を求め、ロール速度との関係でまとめた結果をFig.12に示す。焼付き限界の温度は高速条件ほど高い値を示した。しかし、ロール速度の増加に対す

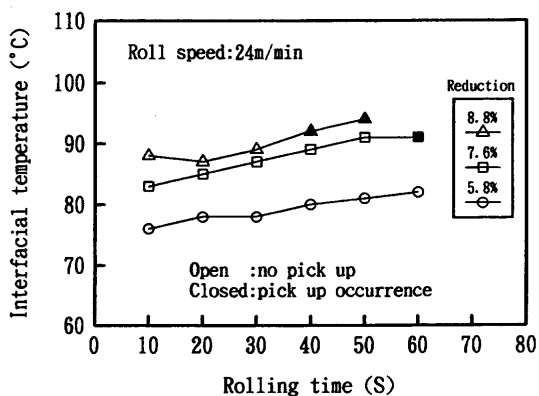


Fig. 10. Interfacial temperature before and after the occurrence of friction pick up at a roll speed of 24m/min.

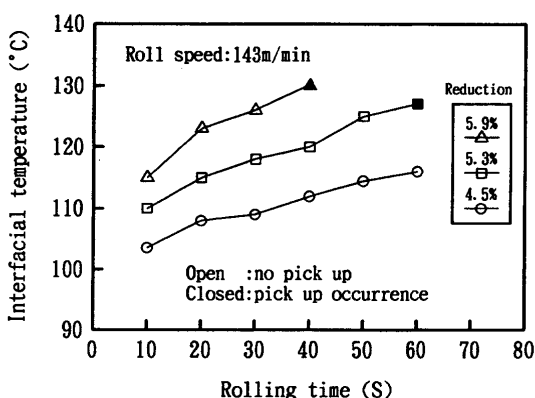


Fig. 11. Interfacial temperature before and after the occurrence of friction pick up at a roll speed of 143m/min.

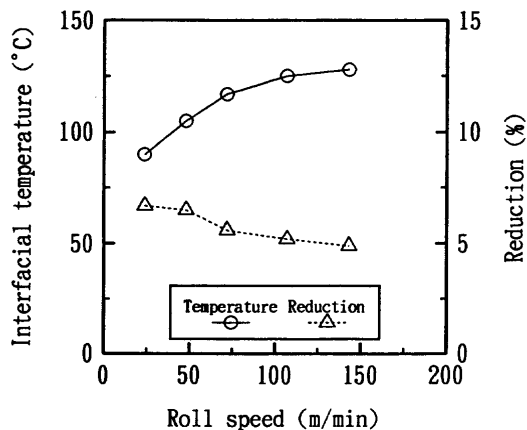


Fig. 12. Limitation line of the occurrence of friction pick up.

るその上昇はしだいに緩やかになり、107m/minと143m/minのロール速度ではあまり大きな差はなかった。一方、限界圧下率は界面温度とは逆に高速条件ほど低い結果を示した。

6. 考察

各ロール速度において焼付き発生前後の界面温度を測定し、焼付き限界における界面温度の速度依存性について評

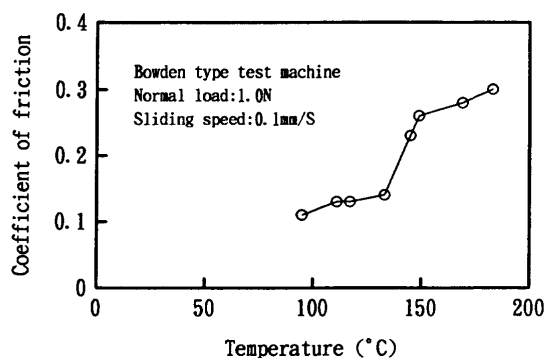


Fig. 13. Dependence of coefficient of friction of the test oil on temperature.

価した結果、実験したロール速度の範囲内で焼付き限界の温度はロール速度の増加とともに約90°Cから130°Cまで上昇することがわかった。しかし、速度の増加に対するその上昇はしだいに緩やかになり、実験条件である107m/minと143m/minでは大きな差は認められなかった。著者らは今回と同じすべり圧延での焼付き発生前後の圧延出側ロール表面温度を熱電対を用いて測定し、焼付き限界におけるその温度はロール速度の増加とともに上昇するが、しだいにその上昇度は小さくなり、約120m/min以上の高速条件ではほぼ一定値となる結果を得ている²⁾。さらに、各速度における焼付きの形態の調査から、約70m/min以下で発生する焼付きは温度の影響をあまり受けない冷間圧接タイプの焼付きであり、100m/minを越える条件での焼付きは実機の冷間圧延で発生する焼付きと類似の熱を原因とする油膜破断により圧延材がロール表面に凝着するヒートタイプの焼付きであることを明らかにしている²⁾。Fig.12の焼付き限界における界面温度の結果はこのロール表面での限界温度の速度に対する傾向とよく一致しており、各速度での焼付きの形態の違いを反映した結果であると理解できる。

さらに、ヒートタイプの焼付きの開始温度である約130°Cの妥当性を確認するため、パウデン型試験機により圧延実験で使用したパラフィン系鉱油の転移温度を測定した。5%クロム鋼と同程度の潤滑特性である⁴⁾SUJ 2の球および圧延材の切り板を用いて接触荷重1N、相対速度0.1mm/Sで一方向にすべらせ、一定となった時点での摩擦係数を評価した。試験温度を約90°Cから180°Cまで変化させて得た結果をFig.13に示す。140°C以上で摩擦係数の急激な上昇が見られ、油性が劣化することが判明した。圧延実験で得られた限界温度はこの温度に近く、妥当な値であることが確認できた。

次に、界面温度の測定値と理論値の相関を調べてみる。Fig. 7に示した各速度における測定結果の代表値として圧延開始60S後のデータをまとめてTable 1に示す。表中の界面温度は起電圧から求めた測定値であり、圧延入側におけるロール表面温度および圧延材表面温度は熱電対を用いて測定した値である。平均入側温度はそれらの表面温度を加えた値の1/2で定義した。また、平均界面温度上昇はArchard

Table 1. Results of measurement and mean temperature rise calculated from Eqn.(1) for each test run.

| Roll speed (m/min) | Reduction (%) | Mean pressure (MPa) | Coefficient of friction | Interfacial temperature (°C) | Inlet temperature (°C) | | | Mean temperature rise (°C) |
|--------------------|---------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|------|------|----------------------------|
| | | | | | Roll | Coil | Mean | |
| 24 | 3.1 | 301 | 0.087 | 61 | 36 | 21 | 28.5 | 27 |
| 48 | 3.1 | 314 | 0.085 | 76 | 52 | 20 | 36 | 39 |
| 72 | 2.6 | 315 | 0.081 | 87 | 45 | 20 | 32.5 | 49 |
| 107 | 3.0 | 315 | 0.084 | 93 | 50 | 20 | 35 | 62 |
| 143 | 2.9 | 308 | 0.079 | 105 | 61 | 23 | 42 | 66 |

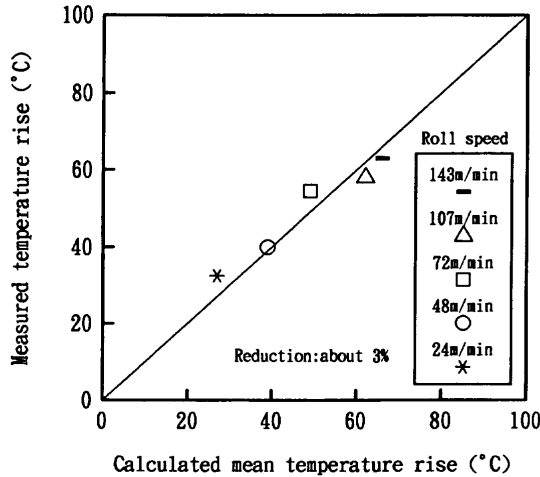


Fig. 14. Comparison of measured temperature rise with calculated mean temperature rise.

の解析方法を発展させたすべり圧延における理論式(1)¹³⁾から算出した。

$$\Delta T_{\text{mean}} = \frac{4L \cdot \mu \cdot P_m \cdot \Delta V}{4.24K_s + 3.76K_r (\Delta V \cdot L / kr)^{0.5}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで μ は摩擦係数、 P_m は平均面圧であり、圧延荷重およびトルクの測定値から求めてTable 1に示した。 L は接触弧長の1/2、 ΔV はロールと圧延材の平均相対速度である。また、 K_s および K_r は圧延材およびロールの熱伝導率でそれぞれ58W/mK、22W/mKを用いた。 kr はロールの温度伝導率で $6.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{S}$ を用いた。

界面温度から平均入側温度を引いた測定値である界面温度上昇の値と(1)式から算出した平均界面温度上昇の理論値を比較した結果をFig.14に示す。実験した条件の範囲において測定値と理論値はよく合致することがわかった。

7. 結言

ロールと圧延材界面を熱電対の温接点とした熱起電圧法を用いて普通鋼の冷間圧延における界面温度を測定した。鉱油のニート潤滑条件においてロール速度および圧下率を広い範囲に変えて実験し、各速度での焼付き限界における界面温度を測定した。また、測定値と実験データから算出した界面温度の理論値を比較して両者の相関を調べて次の結論を得た。

- (1) 熱起電圧法は冷間圧延におけるロールと圧延材界面の温度を精度良く評価できる有用な方法である。
- (2) 焼付き限界における界面温度はロール速度の増加とともに上昇し、ヒートタイプの焼付きが発生する高速条件ではほぼ一定値を示す。
- (3) 測定値は界面温度の理論値とよく合致する。

おわりに、本実験を遂行するにあたりご協力いただいた大同化学工業(株)東京研究所に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 小豆島明：鉄と鋼，74 (1988)，696.
- 2) 小豆島明，喜多良彦，志磨貴司，三橋 勝：鉄と鋼，74 (1988)，1978.
- 3) 小豆島明，喜多良彦：鉄と鋼，76 (1990)，1270.
- 4) 小豆島明，神保安広，金田敏明：鉄と鋼，81 (1995)，64.
- 5) 小豆島明，神保安広：鉄と鋼，81 (1995)，1150.
- 6) 田村裕保，細野弘夫，戸口一男，小林義弘：昭和54年度塑性加工春季講演会，講演論文集，(1979)，387.
- 7) 新山英輔，高見勝巳，奥本武臣，森竜太郎，蜂須幹雄，田中俊章：鉄と鋼，53 (1967)，37.
- 8) F.P.Bowden and D.Tabor，曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，東京，(1961)，209.
- 9) T.N.Mills and A.Cameron：ASLE Trans.，25 (1982)，117.
- 10) R.M.Matveevsky：ASLE Trans.，25 (1982)，483.
- 11) J.H.Shen，C.M.Ettles and H.A.Scarton：Trans. ASME. J.Tribol.，111 (1989)，114.
- 12) O.S.Dinc，C.M.Ettles，S.J.Calabrese and H.A.Scarton：Trans. ASME. J.Tribol.，115 (1993)，78.
- 13) 小豆島明：塑性と加工，29 (1988)，492.