

© 1988 ISIJ

論 文

連続引抜型圧延機による冷間圧延特性
および温度上昇栞田 俊緑*・木原 諄二*²・相澤 龍彦*²Mechanical and Thermal Characteristics in Cold Rolling
by Using Drawing Type Rolling Mill

Shunroku SUKUMODA, Junzi KIHARA and Tatsuhiko AIZAWA

Synopsis :

Mechanical and thermal characteristics in cold rolling have been evaluated as the first step of lubrication study. Through experimental and theoretical works, the following conclusions have been obtained.

(1) Pressure distribution was calculated by using the theory of differential work-roll rolling. The relation between the neutralpoint in the lower work roll and the rolling torque was obtained. Based on the computed results, the applicability of the equation of a practical friction coefficient $\mu = \tau / (R \cdot P)$ was made clear.

(2) With respect to the temperature rise of strip and roll surface, the measured data by contact thermocouple method was in good agreement with the calculated results by plastic and frictional works in the absence of heat transfer between roll and strip.

(3) Multi-thermocouple method was developed to investigate the temperature distribution in the roll. With the aid of boundary element method, this sensor could provide reliable estimation of temperature rise at the interface between roll and strip.

Key words : cold rolling ; lubrication ; mechanical and thermal characteristics ; temperature rise estimation ; contact thermocouple method ; multi-thermocouple method ; boundary element method.

1. 緒 言

冷間圧延における潤滑の目的にはロール摩耗の防止、焼付き防止、板の表面性状の制御などがある。特に表面性状に関しては冷間圧延後の鋼板表面の光沢性を高めるために、ロール表面粗さを小さくするとともに接触弧内への油の導入量を少なくすることが必要となる¹⁾。油の導入量の低下は工具と材料の接触において潤滑状態の低下をもたらし、板およびロールの温度上昇を招く。このような高温・高圧状態によつて局所的な油膜の破断から工具と材料が焼き付いたヒートストリークにより、ロールと鋼板表面の光沢性を著しく低下させる場合がある²⁾³⁾。そこで潤滑性を検討する際にはヒートストリークについても評価が求められるとともに、これらの環境要因である圧延圧力および温度上昇を定量的に知ることが問題の解決および油膜の挙動に関する検討に対して欠かせない情報であると考えられる^{8)~17)}。

筆者らはこれまで潤滑性評価試験機として連続引抜型圧延機を使用してきた^{18)~21)}。これは高すべり速度・長時間の圧延が可能であり、ロールの温度上昇を含めた潤滑性の評価に適している。そこで本試験機の圧延中における圧力分布及び温度上昇に関する検討を行った。本試験機は上・下ロールの周速が異なるため、異周速圧延理論を用いて圧力分布を推定し、圧延特性に関する検討を行った。

ロール及び板の温度上昇は接触熱電対を用いることにより実測した。そして板の温度上昇を塑性変形仕事および摩擦仕事から計算し実測値と比較検討した。また、熱電対をロール内部に埋め込むことにより、内部の温度上昇を実測した。ロール表面温度はこの結果を用いて、軸方向を無視した2次元定常モデルの温度を境界要素法(以下BEMと称す)により推定し、接触熱電対による結果と比較検討した。

その結果、本試験機により潤滑性の評価を行う上での

昭和62年12月21日受付 (Received Dec. 21, 1987)

* 東京大学工学部 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113)

*² 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo)

重要な圧延および温度上昇に関する特性を明らかにするとともに、温度上昇の計測法を確立したので報告する。

2. 実験方法

2.1 連続引抜型圧延機

実験に使用した連続引抜型圧延機の概略を Fig. 1 に示す。上ロールはアイドルとなっており、下ロールのみが駆動されている。材料の速度は前方張力により、任意の速度での引抜圧延が可能である。そこで下ロール周速との相対すべり速度を実機に相当する条件に設定し、潤滑性を評価できる。ここで、下ロールの接触弧内に中立点が存在せず、材料を制動する方向に摩擦力 F が働くとすれば、摩擦係数はトルクから求めることができる¹⁸⁾。

$$\mu = \tau / (P \cdot R) \dots\dots\dots (1)$$

なお、速度によつて表されるパラメーターとして、すべり率 s を次式によつて定義することにした。

$$s = (U_2 - U_0) / U_2 \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

ロールは直径 50 mm, 胴長 40 mm で材質は SUJ である。

2.2 板およびロールの温度上昇の計測方法

2.2.1 温度計測 A 接触熱電対による計測

板およびロール面に熱電対を接触させることにより温度を計測した。Fig. 1 にこの状態を示す。熱電対を板の小片にはんだ付けし軽くばねで接触させた。板、ロー

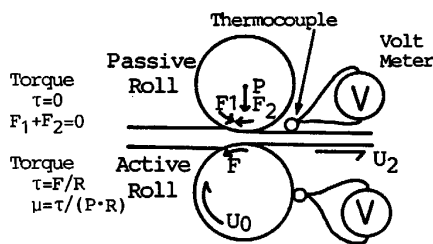


Fig. 1. Schematic view of the apparatus for rolling and measurement.

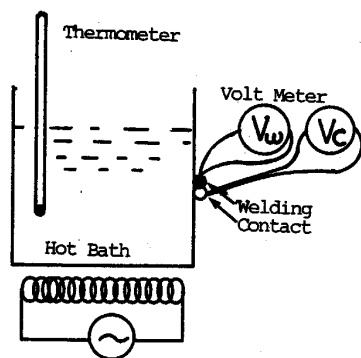


Fig. 2. Schematic view of experimental procedure for comparison of two measurement systems.

ル表面に接触させた位置は変形域から、それぞれ約 20 mm, 90°であつた。熱電対は銅-コンスタンタン線を用いた。ここで、接触点において摩擦による温度上昇が考えられるが、回転中のロールに接触した状態で 5 min 計測したところほとんど温度上昇はなかつた³³⁾。

補足実験(a) 接触熱抵抗の補正: 接触させて用いる場合には接触熱抵抗がある。そこで、Fig. 2 に示すようにホットバスの側面にはんだ付けした熱電対の起電力 V_w と接触熱電対との起電力 V_c を比較した。ここでは板とロールに接触させた熱電対それぞれについて同様な補足実験を行い計測結果を補正した。

補足実験(b) 溶着熱電対による計測: 厚さ 1 mm の短冊板の側面に熱電対を溶着させ、板の温度上昇を計測し、計算値との比較を行った。圧延速度 U_0 は 25.8 m/min とした。

2.2.2 温度計測 B 埋込み熱電対によるロールの温度計測

熱電対をロールに埋め込むことにより温度上昇を計測した。その概略を Fig. 3 に示す。下ロールに直径 1 mm の穴を内側から半径方向に表面から 2 mm の位置まで放電加工した。また、ロール軸を延長し、スリップリングを取り付けた。ロールおよびロール軸は SKD を用いている。計測法は T_1 , T_2 および T_3 の各点にコンスタンタン線をパーカッション・ウェルダーにより溶着させ、他端をスリップリングに接続した。これによつて I. C. (鉄-コンスタンタン) 熱電対が構成されることになる。ここで T_1 , T_2 はそれぞれロール表面から 2 mm, 10 mm の位置にある。ここで、 T_3 はロールから約 150 mm 離れた位置にあり、初期温度とほとんど変わらないとすれば、 T_3 に対する T_1 , T_2 間の電位差が T_1 , T_2 における熱起電力となり、各点の温度上昇を計測できる。なお、この方法では環境系のノイズを拾う可能性がある。そこで C. C. (銅-コンスタンタン) 熱電対をエナメル塗料で絶縁し、エポキシ系樹脂で接着したものによつて、同様の実験を行った。これらの出力は x-t レコーダーで記録した。なお、これらの実験では温度上昇のみに注目し、

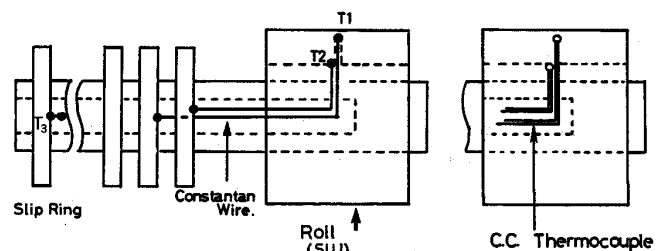


Fig. 3. Illustration of a sensor for temperature measurement installed to rolls.

Table 1. Experimental condition.

Number of rolling condition	Rolling force (kgf)	Slip rate (%)	Drawing speed (m/min)	Lower roll speed (m/min)	Measurement methods of temperature rise
A	500-1400	17	31.0	25.8	Contacted thermocouple
B	1070	4-21	31.0-31.8	24.7-30.5	
C	770-910	24-48	24.1-36.4	17.6-22.0	Contacted thermocouple and welded thermocouple in roll

熱電対の零接点は省略した。

2.3 圧延実験

本試験機の圧延条件とトルクとの関係を明らかにするため、圧下率およびすべり率を変化させ、その影響を調べた。これらを Table 1 に示す。圧延材料は低炭素キルド鋼を使用した。板厚 0.32 mm, 板幅 15 mm であった。潤滑油はパラフィン系鉱物油 (15 cSt/27°C) を用いて、ニート潤滑を行った。

①圧延実験A：実験条件は、すべり率を一定条件として圧下率を変化させた。

②圧延実験B：圧延荷重を一定としすべり率を変化させた。

圧延実験 A, B ともに、温度計測 A により、板およびロール表面の温度上昇を計測した。圧延時間は板が定常に達したことが十分確認できることを目安として 4 min 程度とした。ロール表面粗さは、最大高さ約 2.5 μm であった。

③圧延実験C：圧下率およびすべり率を変化させた。温度計測 A により板およびロール表面の温度を計測するとともに、温度計測 B によりロール内部の温度計測をした。圧延時間はロールの温度が定常に達したことが確認できることを基準として、8 min 程度とした。これは本試験機の最長圧延時間でもある。ここで用いたロール表面粗さは最大高さ約 0.96 μm であった。

3. 圧力分布および温度上昇の推定

3.1 圧延圧力分布

連続引拔型圧延機の摩擦状態を Fig. 4 に示す。上ロールはアイドルリングであるため、中立点は接触弧のほぼ中央にあることが予想される。また、下ロールの中立点は上ロールの中立点よりも入側か、あるいは接触弧の外側にある。この位置は下ロール周速、引拔速度および圧下率に依存し変化する。

ここでは下ロールと板との中立点が接触弧中に存在する場合を考える。そして、これらの摩擦状態を三つの領域に区別して取り扱うこととする。

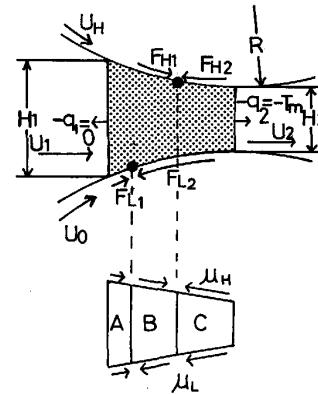


Fig. 4. Illustration of the location of neutral points of the rolls.

力学的取扱いは塩崎らの理論によつて行うが²⁶⁾ここでは本研究に必要な部分を紹介するにとどめる。圧延圧力の計算にはカルマンの式を用いた。分割を 50 とし、その領域ごとに RUNGE-KUTTA による積分法を使つて計算した。

領域 A および C は次式によつて与えられる。

$$d(h \cdot q/2) = p \{ \tan \phi \pm (\mu_L + \mu_H)/2 \} dx \dots (3)$$

領域 A は符号が-、領域 C は符号が+である。μ_L は低速側ロール (本試験機では下ロール), μ_H は高速側ロールの摩擦係数である。この場合の降伏条件式は PRANDTL の解から、

$$p - q = k(1/m \cdot \sin^{-1} m + \sqrt{1 - m^2}) \dots (4)$$

ここで、m は次式で与えられる。

$$m = (\mu_L + \mu_H) p / (2k) \dots (5)$$

領域 B は次式によつて与えられる。

$$d(h \cdot q/2) = p \{ \tan \phi + (\mu_L - \mu_H)/2 \} dx \dots (6)$$

降伏条件式は塩崎らの提案する式(7)を用いた³⁴⁾。

$$p - q = k(1 + \sqrt{1 - m^2}) \dots (7)$$

鋼の変形抵抗は、ひずみ速度を考慮した動的変形抵抗を用いた²⁷⁾。

$$2k = 28.4(1 + 25.5 \epsilon)^{0.397} + e^{6.5} (\epsilon / \epsilon_0)^{k_w T_a} \dots (8)$$

これらの式を用いて次の手順で計算を行う。まず、下ロールの中立点は材料の体積一定則によつて求め、領域 A または B の圧力分布は入側での水平応力を q₁=0 とし計算した。次に、領域 C の圧力分布は q₂=-T_m (前方張力) として計算した。なお、摩擦係数は低圧下率 (8% 以下) の圧延実験によつて得られた値をすべての圧下率での計算に用い、μ_L=0.12, μ_H=0.134 とした。

3.2 板の温度上昇

圧延による板の温度上昇は、塑性変形仕事 W_p および摩擦仕事 W_f から計算することができる²⁸⁾²⁹⁾。

$$W_p = \int_0^\varepsilon K_f(\varepsilon) d\varepsilon \dots\dots\dots (9)$$

$$W_f = 2 \cdot \mu / (\cos \phi_n \cdot \omega \cdot h_n) \int_{\phi_0}^0 p(\phi) V_r d\phi \dots\dots (10)$$

ここで V_r は板とロールのすべり速度である。上ロールおよび下ロールにおける板とのすべり速度はそれぞれ個々に計算した。式(10)の摩擦係数 μ は上ロールおよび下ロールにおいて、それぞれ $\mu = \mu_H, \mu = \mu_L$ とした。ここで、 W_p はそのほとんどが板の発熱として働き、 W_f はロールと板に等しく熱が分散するとすれば、それぞれ 95%、50% が寄与すると仮定できる。そこで ΔT は次式で与えられる³⁰⁾。

$$\Delta T = 1 / (\rho \cdot c \cdot J) \cdot (0.95 \cdot W_p + 0.5 \cdot W_f) \dots\dots (11)$$

3.3 ロール表面の温度上昇

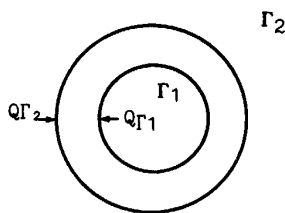
解析モデルは2次元定常問題とし、BEMによりロール表面の温度上昇を計算した。ロールの半径方向の断面における円周方向の温度分布を考える。この概念図を Fig. 5 に示す。境界条件は境界面 Γ_1 での温度 T_{r1} は既知とし、熱流束 Q_{r1} は未知とした。境界面 Γ_2 では温度 T_{r2} 、熱流束 Q_{r2} ともに未知の関数として取り扱う。ここでは方程式の数が不足するため、ロール内部（表面から 2 mm）の温度分布を計測して式を補った。温度を T とおくと熱伝導方程式は式(12)で表される。

$$\nabla^2 T = 0 \dots\dots\dots (12)$$

ここで温度 T は温度上昇と室温との和である。式(12)の基本解、離散化および係数の算定に関しては詳細を省略し、他の文献に譲る³⁵⁾³⁶⁾。ここでは、解析に用いた BEM のマトリックス表示だけを紹介すると、式(12)は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} -H_{r1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{r1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{r2}, -G_{r2}, -G_{r1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{r2} \\ Q_{r2} \\ Q_{r1} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

ロール内部の温度 T_{INTE} を表す式は式(14)によつて表される。



Γ_2 : Roll surface T_{r2} : Unknown Q_{r2} : Unknown
 Γ_1 : $R = 10$ mm T_{r1} : Known $Q_{r1} = k \frac{\partial T}{\partial n}$ Unknown

Fig. 5. Geometric configuration in temperature analysis of a roll.

$$\begin{Bmatrix} T_{INTE} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{r2}, D_{r1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_{r2} \\ Q_{r1} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{r2}, S_{r1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{r2} \\ T_{r1} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

よつて、式(13)、(14)により、式(15)が得られ、 T_{r2} 、 Q_{r1} および Q_{r2} を求めることができる。

$$\begin{Bmatrix} -H_{r1} \cdot T_{r1} \\ T_{INTE} - S_{r1} \cdot T_{r1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{r2}, -G_{r1}, -G_{r2} \\ S_{r2}, D_{r1}, D_{r2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{r2} \\ Q_{r1} \\ Q_{r2} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

Γ_1 は 10 等分割し、 Γ_2 は 24 分割した。ここでは一定要素で計算を行った。

4. 実験および計算結果

4.1 圧延実験および圧延圧力の計算結果

Fig. 6 に圧延実験 A により得られた荷重とトルクをロール半径で除した摩擦力との関係を示す。計算値は $F_{L2} - F_{L1}$ として求めた。各点の傍らに付記した値は圧下率 (%) である。荷重が約 1 000 kgf 以下 (圧下率 12% 以下) において、原点と交差する直線と重なっている。この直線の傾きは式(1)により求められる摩擦係数を示す。しかし、荷重が増加し、圧下率が高くなるに従つて、この直線からそれ、減少する傾向を示している。計算値も実測値と同様な傾向を示している。

Fig. 7 に圧延実験 B のすべり率と摩擦力の関係を示

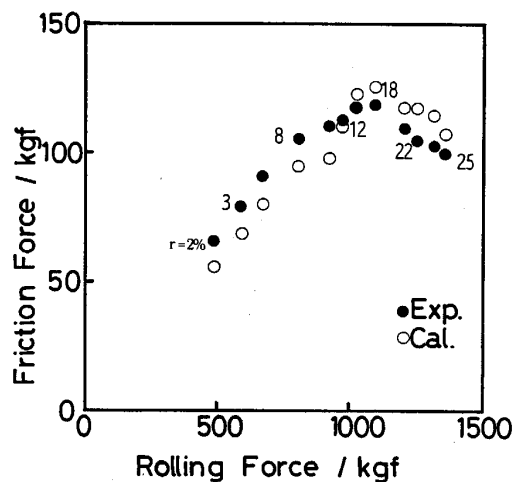


Fig. 6. Comparison of the experimental and the calculated results in rolling force vs. friction force relation.

す。すべり率が高くなるにしたがって摩擦力も高くなっている。

Fig. 8, 9 にそれぞれ圧延実験 A, B の解析により得られた圧力分布の例を示す。図の横軸は接触角を無次元表示したものである。これから、圧下率が高いときほど、また、すべり率が低いときほど、領域 A の割合が広がる

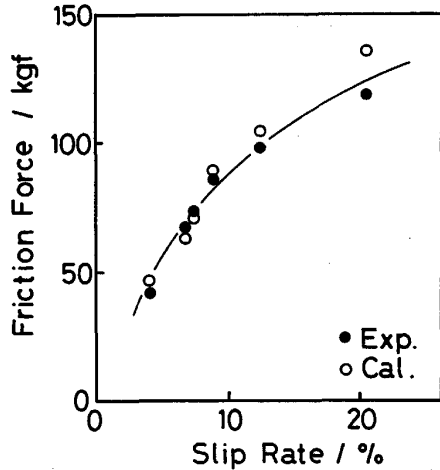


Fig. 7. Effect of the slip rate on friction force.

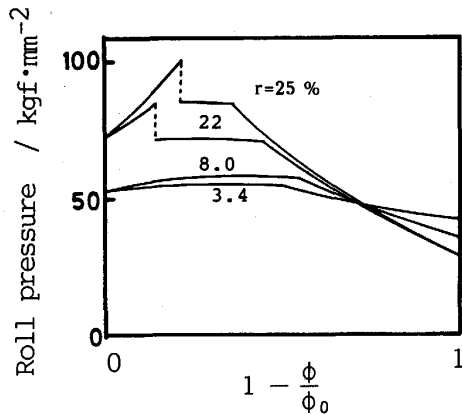


Fig. 8. Sensitivity of reduction to rolling pressure distribution.

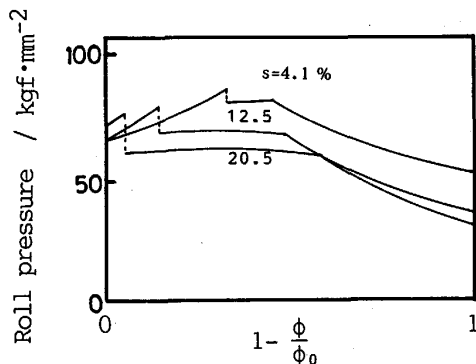


Fig. 9. Sensitivity of slip rate to rolling pressure distribution.

ことが分かる。ここで、圧延実験 A, B についての加重、摩擦力の計算精度はそれぞれ、±15%, ±20% であつた。

4.2 材料およびロールの温度上昇

補足実験(a)の結果を Fig. 10 に示す。これから両接点ともに一つの直線上にのつており、 V_w と V_c の関係は次式で表される。

$$V_w = 1.28 \times V_c \dots\dots\dots (16)$$

そこで、この式により V_w を推定し、温度計測 A の結果を整理することとした。

Fig. 11 に圧延実験 C の温度上昇と時間との関係を示す。板およびロール表面温度は接触熱電対による計測結果を示す。 T_1, T_2 はそれぞれ Fig. 3 の T_1, T_2 であり、ロール表面から 2 mm, 10 mm の位置にある。この図から板に接触させた接点は約 60 s 後には定常に達していることが分かる。ロール表面温度は板の温度上昇より遅れてなだらかに上昇している。Fig. 12 に板の温度上昇に対するロール表面および T_1 の温度上昇との関係を示す。これは約 8 min 後のデータを基にまとめたものである。この図から、構成した熱電対による差はなく、ロー

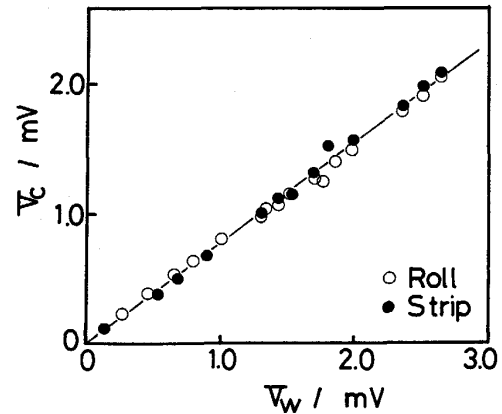


Fig. 10. Correlation between the measured data, V_w and V_c .

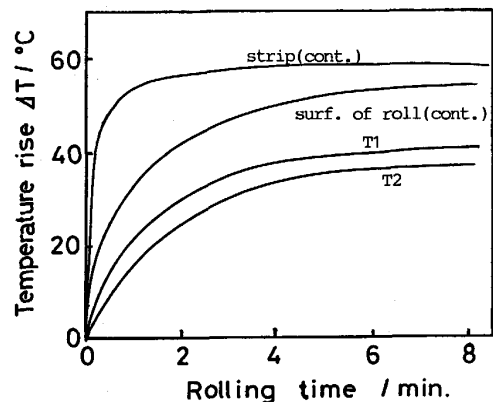


Fig. 11. Time transient of temperature rise in rolling.

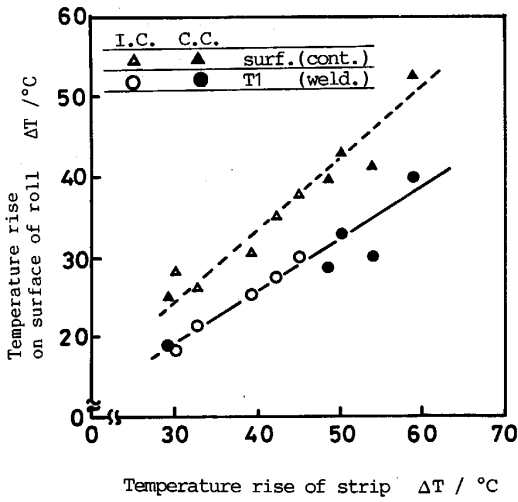


Fig. 12. Effect of temperature rise of strip on temperature rise at roll surface and internal point.

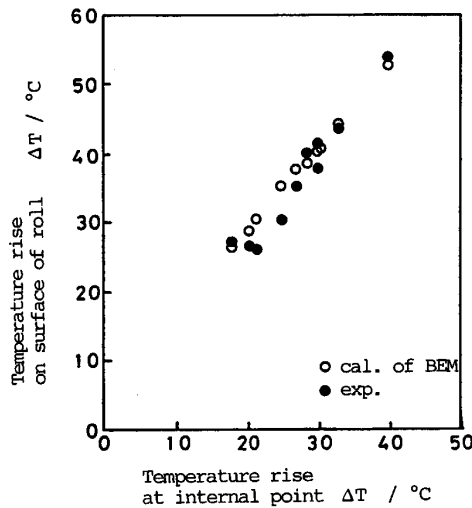


Fig. 13. Comparison of the experimental and the calculated results for temperature rise on roll surface.

ル表面温度は板の温度上昇にともない直線的に上昇していることが分かる。Fig. 13 に接触法および計算によつて求められたロール表面の温度上昇と T_1 の温度上昇との関係を示す。この場合も直線関係にある。接触法及びBEMにより推定される結果がよく一致していることがわかる。

5. 考 察

5.1 連続引抜型圧延機の圧延特性

圧延実験Aの実験および圧力分布の推定結果から摩擦係数を求める式(1)の適用範囲が限定されることがわかる。これは下ロール内に中立点が存在することにより領域Aの摩擦力がロールを駆動する方向に働くためトルク

が低下することを実験および計算結果から確認できる。材料の体積一定則を考慮すれば、引抜速度 U_2 と圧下率 r から U_1 を求めることができる。

$$U_1 = (1 - r/100) U_2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

これを変形すると

$$r/100 = (U_2 - U_1) / U_2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる。 $U_0 = U_1$ であれば中立点はかみ込み点にある。下ロールの接触弧内に中立点を生じさせないための圧下率と速度の条件は次式を満たす範囲になければならない。

$$r < (U_2 - U_0) / U_2 \times 100 \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで、式(19)の右辺は式(2)で定義したすべり率である。すなわち、

$$r < s \quad \dots\dots\dots (20)$$

であれば式(1)を用いて摩擦係数を求めることができる。Fig. 6 の結果は摩擦力が圧下率 18% 付近で減少するが、この圧延実験Aにおけるすべり率は 17% である。この傾向は式(20)による評価とよく対応している。

一般的には、圧延時の摩擦係数は先進率または荷重の値から BLAND & FORD の式を使つて求められることが多い。しかし、先進率法と荷重法との値は一致することはなく、これには解析上の誤差が存在するといわれている²⁹⁾。本試験機は $r < s$ ではこれに関わりなく摩擦係数 μ を推定できる。 $r > s$ では荷重法で摩擦係数を求めればよい。

Fig. 7 はすべり率の増加にともない摩擦力も大きくなっている。これは下ロールを駆動する方向に働く領域Aの摩擦力の大小に起因することは Fig. 9 により明らかである。異周速圧延では異速比を大きくした場合にはトルクが一定値に収れんすることが示されている³¹⁾。ここで中立点が存在せず、加重が一定であれば下ロールの摩擦力は異周速圧延と同様に一定値を示すものと考えられる。また、ここでは図示しないが、圧延実験Bではすべり率の増加に伴い圧下率および引抜張力が大きくなっていた。これらは異周速圧延において、異速比を増加させた時の傾向に一致している³¹⁾。そこで本試験機の圧延特性を異周速圧延理論を用いて説明することは妥当であるといえる。

5.2 温度上昇

5.2.1 計測方法の検討

Fig. 13 では、溶着熱電対による計測値を基にした解析値と接触熱電対による実測値がよい一致を示している。Fig. 14 に圧延実験A, Bにおける板の温度上昇の実測値と計算値との比較を示す。実測値は接触熱電対(100 s 後)および補足実験(b)による結果である。溶

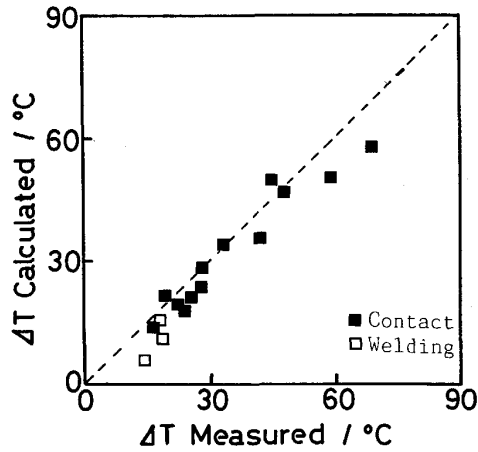


Fig. 14. Comparison of the calculated and the measured temperature rises of strip.

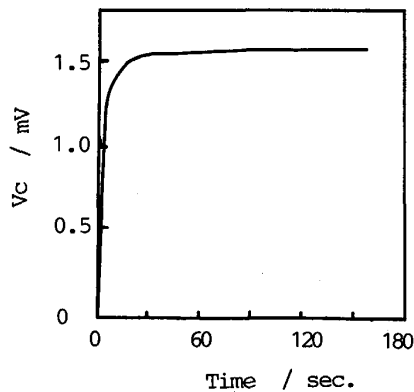


Fig. 15. Time transient of V_c .

着熱電対と接触熱電対および計算値とのよい対応が得られている。溶着熱電対による温度計測は一般に信頼性は高い。そこで Fig. 13, 14 から、式(16)による接触熱電対の補性が妥当であるといえる。

5.2.2 材料およびロールの温度上昇パターンの比較

ホット・パスへの接触による接触熱電対の出力パターンを Fig. 15 に示す。これから接点が定常に達する時間は約 60 s であることが分かる。Fig. 11 と Fig. 15 から、熱電対の温度が定常に達するパターンと板に接触した熱電対の出力パターンとにほとんど差はないことがわかる。これは板の温度上昇は圧延開始直後からほぼ一定値であることを示している。また、Fig. 11 から板およびロールの温度変化は独立であり、熱伝達がほとんど無いと考えられる³²⁾。また、熱伝達を無視した計算結果が実測値とよい一致を示したことはこのことを裏付けていると言える。

5.2.3 板の発熱因子

Fig. 16 に圧下率およびすべり率により支配される温度上昇の等高線を示す。これは圧延実験 A の計測データ

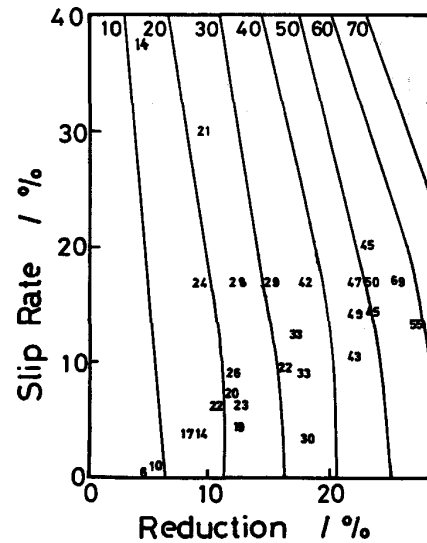


Fig. 16. Diagram of temperature rise of strip in slip rate and reduction.

を基に、速度 U_0 のみを変化させて計算した結果から作図したものである。参考のために、圧延実験 A, B の実測値をプロットした。また、圧延実験 A, B および C の実測値をもとに、圧下率およびすべり率をパラメータとする重回帰分析を行った。

$$\Delta T = 2.1 \cdot r(\%) + 0.56 \cdot s(\%) - 6.7 \quad \dots\dots (21)$$

重相関係数は 0.89 であった。これらの結果から板の温度上昇は塑性変形発熱が主要要因であることがわかる。

5.2.4 ロール表面の温度上昇

Fig. 3 に示した T_1 の計測結果にはロールの回転に伴う温度サイクルはなかつた。これは高速で回転するロールの円周方向における温度変化が小さいものと考えられる。本試験条件ではニート潤滑であった。そのため、ロールに付着した潤滑油が放熱を抑えたこと、あるいは圧延により潤滑油の粘性消散が発生し、一周する間にロールに熱を供給したため温度変化がなかつたということが考えられる。今後、接触域における温度変化に関してはさらに検討が必要である。

6. 結 言

連続引抜型圧延機による圧延実験および計算結果から次のことが分かった。

- (1) 異周速圧延理論を用いて、連続引抜型圧延機の圧延特性を検討した。
- (2) 式(1)による摩擦係数の計算の適用範囲は、 $r < s$ を満たす領域である。
- (3) 板およびロールの温度上昇を接触熱電対の出力を補正することによつて計測した。そして、ロールと材料

間の熱伝導を無視して取り扱えることが分かった。

(4) 塑性変形仕事および摩擦仕事から板の温度上昇の計算を行い、ほぼ、一致した結果が得られた。また、板の主要な発熱因子は塑性変形発熱であると考えられる。

(5) 板とロールとは熱的に絶縁されているので、ロールは摩擦仕事による発熱により温度上昇するものと考えられる。

(6) ロールに熱電対を埋め込み、ロール内の温度上昇を計測した。この結果を用いて2次元定常問題の解析モデルにより、ロール表面の温度上昇を推定した。これは接触法による実測値と一致した。

(7) 本研究によつて連続引抜型圧延機の圧延特性と材料およびロールの熱的特性を明らかにした。今後、本研究の結果をもとに圧延潤滑の検討を行うのに連続引抜型圧延機を活用する予定である。

記号

τ : トルク, P : 荷重, R : ロール半径, U_2 : 引抜速度 (出側板速度), U_0 : 下ロール周速, H_1 : 入側板厚, H_2 : 出側板厚, h : 板厚, h_n : 中立点の板厚, U : 接触弧内の材料の速度, U_1 : 入側板速度, U_n : 中立点の板速度, μ_H : 上ロールの摩擦係数, μ_L : 下ロールの摩擦係数, q_1 : 入側水平応力, q_2 : 出側水平応力, F_{H1} : 上ロールの入側摩擦力, F_{H2} : 上ロールの出側摩擦力, F_{L1} : 下ロールの入側摩擦力, F_{L2} : 下ロールの出側摩擦力, p : 圧延垂直圧力, q : 水平応力 (圧縮が正), $2k, K_f(\epsilon)$: 2次元変形抵抗, ϵ : 真ひずみ, $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度, ϵ_0 : 前指数係数, k_w : ボルツマン定数, T_a : 板の絶対温度, m : せん断力係数, ϕ : 任意点のロール角, ϕ_0 : 噛み込み角, ϕ_n : 中立角, x : 任意点の水平座標, ω : ロール角速度, ρ : 材料密度 ($7.86 \cdot 10^{-6} \text{ kgf/mm}^{-3}$), C : 材料比熱 ($110 \text{ cal} \cdot \text{kgf}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), J : 熱の仕事当量 ($427 \text{ kgf} \cdot \text{mm} \cdot \text{cal}^{-1}$), T_{r1}, T_{r2} : 境界 Γ_1, Γ_2 における温度, Q_{r1}, Q_{r2} : Γ_1, Γ_2 における熱流束, H_{r1}, H_{r2} : Γ_1, Γ_2 における温度の係数マトリックス, G_{r1}, G_{r2} : Γ_1, Γ_2 における熱流束の係数マトリックス, T_{INTE} : 内点の温度, S_{r1}, S_{r2} : 内点と Γ_1, Γ_2 における温度の係数マトリックス, D_{r1}, D_{r2} : 内点と Γ_1, Γ_2 における熱流束の係数マトリックス

文 献

- 1) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴: 昭和 62 年度塑性加工春季講演会論文集 (1987), p. 115
- 2) 小野寺健次, 志渡誠一, 泊 康則: 昭和 62 年度塑性加工春季講演会論文集 (1987), p. 107
- 3) 田村裕保, 細野弘夫, 戸口一男, 小森義弘: 昭和 54 年度

- 塑性加工春季講演 22 論文集 (1979), p. 387
- 4) 小倉茂稔: 塑性と加工, 27 (1986), p. 526
- 5) 北村邦雄, 鎌田征雄, 中川吉左衛門, 青木芳雄, 松田 修, 坂上武雄: 鉄と鋼, 65 (1979), A45
- 6) 鎌田征雄, 北村邦雄, 北浜正法, 片岡健二, 中川吉左衛門, 青木茂雄, 松田 修, 吉田昭茂: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2152
- 7) 鎌田征雄, 北村邦雄, 北浜正法: 潤滑, 30 (1985), p. 116
- 8) 伊東紘一, 北村邦雄: 潤滑, 27 (1982), p. 559
- 9) 細野弘夫: 潤滑, 27 (1982), p. 588
- 10) 島 進: 潤滑, 30 (1985), p. 123
- 11) 木村好次: 潤滑, 30 (1985), p. 89
- 12) 河合 望, 堂田邦明: 潤滑, 30 (1985), p. 96
- 13) 工藤英明: 潤滑, 30 (1985), p. 101
- 14) 木村好次, 岡田和三: 潤滑, 30 (1985), p. 282
- 15) 島 進, 山本憲隆: 塑性と加工, 28 (1987), p. 245
- 16) 山本憲隆, 島 進: 第 38 回塑性加工連合講演会論文集 (1987), p. 249
- 17) 中島浩衛, 井浦輝生, 浜渦修一: 昭和 61 年度塑性加工春季講演会論文集 (1973), p. 41
- 18) 木原諄二: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2024
- 19) 木原諄二, 栢田俊緑, 萬羽昭夫: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 528
- 20) J. KIHARA: J. Faculty Eng., The University of Tokyo (B), XXXIV (1978) 3, p. 579
- 21) J. KIHARA, K. NAKAMURA, K. DOHYA and S. SUKUMODA: Advanced Technol. Plasticity, 1 (1984), p. 102
- 22) 水野高爾, 澤田知宏, 武山幹根: 昭和 61 年度塑性加工春季講演会論文集 (1986), p. 183
- 23) 吉川勝幸: 昭和 62 年度塑性加工春季講演会論文集 (1987), p. 273
- 24) 小豆島明, 喜多良彦, 橋山 清: 昭和 61 年度塑性加工春季講演会論文集 (1986), p. 155
- 25) 柳 謙一, 橋本律男, 守屋胸男, 川並高雄, 大矢 清, 土井公明: 昭和 61 年度塑性加工春季講演会論文集 (1985), p. 21
- 26) 塩崎宏行, 三上昌夫: 塑性と加工, 24 (1983), p. 25
- 27) T. ARIMURA, M. KAMATA and J. KIHARA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 11 (1971), p. 659
- 28) 八田夏夫, 小門純一: 塑性と加工, 21 (1980), p. 59
- 29) 板圧延の理論と実際 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 207
- 30) 安富清次郎, 萩原文男, 八木政太郎, 益田静三, 佐藤太紀, 新井 宏: 塑性と加工, 27 (1986), p. 820
- 31) 塩崎宏行, 新谷定彦, 三上昌夫, 小田誠二: 塑性と加工, 23 (1982), p. 1080
- 32) 松本紘美, 菊間敏夫, 中島浩衛: 第 29 回塑性加工連合講演会論文集 (1978), p. 139
- 33) 小林 勝, 野沢悠夫: 塑性と加工, 9 (1968), p. 382
- 34) 塩崎宏行, 神馬 敬, 三上昌夫, 水谷有宏: 塑性と加工, 23 (1982), p. 714
- 35) C. A. プレビア: 境界要素法入門 (1982) [培風館]
- 36) 戸川隼人, 下関正義: パソコンによる境界要素法入門 (1983) [サイエンス社]