

# 新たに開発した冷間圧延油用潤滑試験機の有効性

小豆島明\*・喜多良彦\*<sup>2</sup>・志磨貴司\*<sup>3</sup>・三橋 勝\*<sup>4</sup>

## On the Ability of Simulation Testing Machine for Lubricant in Cold Rolling Developed Newly

Akira AZUSHIMA, Yoshihiko KITA, Takashi SHIMA and Masaru MITSUHASHI

### Synopsis :

The purpose of this study is to obtain a better understanding of the possibility of using the newly developed simulation testing machine by the author in order to evaluate the lubricity and the anti-seizure property of lubricant in cold sheet rolling. The friction coefficient used for evaluating the lubricity of lubricant is given by,

$$\mu = T/P + \alpha$$

where  $T$  is the back tension,  $P$  the rolling load and  $\alpha$  the contact angle. It is possible to evaluate the friction coefficient in operation mill by the simulation testing machine, based on the evaluation of the friction coefficients obtained by the different testing machines.

The surface of the upper roll and the rolled workpiece were inspected after rolling with emulsion oil of tallow. In the simulation testing machine, the friction pick up could be reproduced. It was confirmed that the friction pick up was the same as that occurred in actual mill. The anti-seizure property of lubricant could be simulated from the limitation lines of friction pick up obtained by the simulation testing machine.

**Key words :** cold rolling ; lubricant ; lubricity ; anti-seizure property ; coefficient of friction ; pick up ; evaluation.

## 1. 緒 言

冷間圧延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付き性が優れていることは、圧延操業を安定して行うための必要な条件の一つである。最近のように、圧延速度が高速化し、1パスあたりの圧下率が大きくなることにより、潤滑性（この尺度として摩擦係数を用いる）の速度依存性及び圧延加工品表面の焼付き傷の発生の尺度となる耐焼付き性を明らかにする必要があるが生じている。

それぞれの評価は、前報において述べたように振り子式試験機のような基礎的試験機や潤滑シミュレーターでは困難なことが多く、工場に設置されている実機を用いて行われることが多い<sup>1)2)</sup>。この場合には、汎用性の問題点や多額の費用を必要とする問題点を持つているた

め、実験室レベルの新しい潤滑試験機による評価が必要とされている。

本研究は、前報<sup>3)</sup>において新たに開発した潤滑試験機が冷間圧延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付き性の評価に用いられる可能性について検討するものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 潤滑性

潤滑性を評価する尺度として、摩擦係数を用いた。前報<sup>3)</sup>で報告した潤滑試験機により摩擦係数を求める方法を簡単に説明する。Fig. 1に潤滑試験機の側面図を示す。①の圧延機の上ロールを研磨・脱脂し、試験コイルをFig. 1のようにセットする。①及び②の圧延機の圧下スクリュウでロールをコイル材料に押し込む。つづい

昭和 59 年 4 月・10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 5 月 11 日受付 (Received May 11, 1987)

\* 横浜国立大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

\*2 大同化学工業(株)技術研究所 (Technical Research Laboratory, Daido Chemical Industry Co., Ltd.)

\*3 横浜国立大学工学部 (現:川崎重工業(株)) (Faculty of Engineering, Yokohama National University, Now Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

\*4 横浜国立大学工学部 (現:日産自動車(株)) (Faculty of Engineering, Yokohama National University, Now Nissan Motor Co., Ltd.)

て、モーターを所定の回転数で回転させておき、電磁クラッチを入れることにより、①の圧延機の上ロール及び②の圧延機の上・下ロールを回転させる。そのとき、①の圧延機の下ロールは下部ジョイントをとりはずしてあ

るので従動状態となる。この結果、試験コイルはほぼ②の圧延機のロール速度で移動し、①の圧延機の上ロールはその約 10 倍の速度で回転することになる。

試験潤滑油は、ニートの場合上ロールにガーゼで押し付け塗布し、エマルションの場合上ロール入側へノズル噴射する。

圧延荷重  $P$  は③のロードセル、張力  $T$  は④のロードセルにより、最初の試験コイルをセットした圧延機間のコイル長さ 80 cm の間で測定した。それぞれの値の読み取りは、ほぼ一定になったところで行った。摩擦係数は、前報<sup>3)</sup>より、

$$\mu = T / P + \alpha \dots\dots\dots (1)$$

を用いて求めた。ここで、 $\alpha$  はかみ込み角である。この摩擦係数値により、各種潤滑油の潤滑性の評価を行った。

潤滑試験機による潤滑性の評価の可能性を調べるため、基礎的試験機及び実機において摩擦係数の差の明らかな 3 種類の基油 (No. 1 鉱物油, No. 2 合成エステル及び No. 3 牛脂: 摩擦係数の値の大小  $No. 1 > No. 2 > No. 3$ ) を潤滑油として用いた<sup>4)5)</sup>。それぞれの化学成分及び性質を Table 1 に示す。実機における供給方法と同じくエマルション潤滑とした。エマルション潤滑を行うための給油装置の概略図を Fig. 2 に示す。ミキサーで作成したエマルションは、ギヤポンプを通して、毎分 1 l の量を噴霧した。エマルションは、3% 濃度で 55°C に保温し、循環使用した。

つづいて、著者の一人らの以前の研究<sup>6)</sup>で基礎的試験機 (振り子式試験機) による摩擦係数及び実機に対応する圧延機での摩擦係数のそれぞれの値が求められている 3 種類の潤滑油 (No. 1 パラフィン系基油, No. 4 同基油 + 10% オレイン酸及び No. 5 同基油 + 2% ZnDTP) を用いて、潤滑試験機で評価を行った。それぞれの化学成分及び性質を同じく Table 1 に示す。実験は室温で

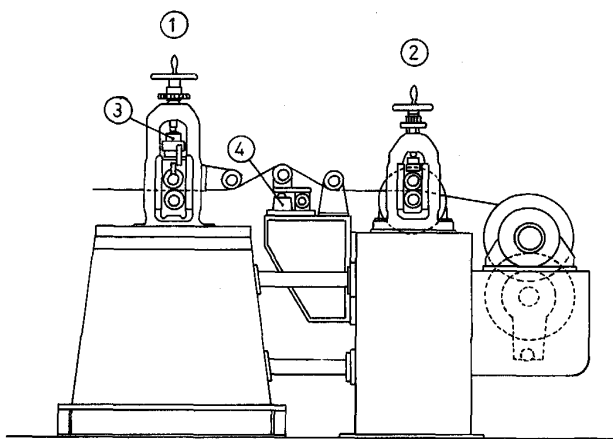


Fig. 1. Side view of the new simulation testing machine.

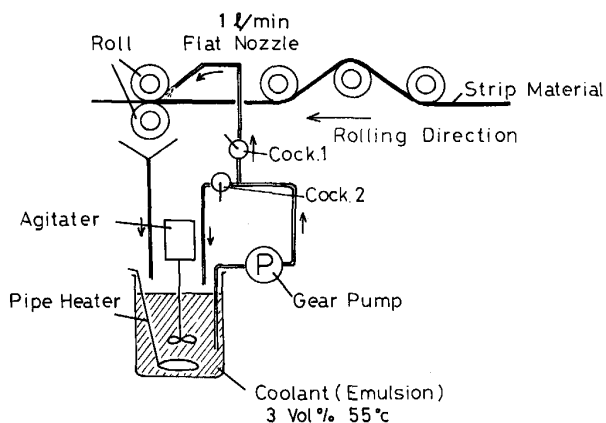


Fig. 2. Schematic diagram for applying the emulsion oil.

Table 1. Compositions and viscosity of lubricant used.

No.	Base oil	Additive	Composition ratio (wt%) (base oil : additive : emulsifier)	Viscosity (cSt : 50°C)
1	Mineral oil	—	95 : 0 : 5	7.1
2	Synthetic ester	—	95 : 0 : 5	6.8
3	Tallow	—	95 : 0 : 5	30.5
4	Mineral oil	Oleic acid	85 : 10 : 5	7.8
5	Mineral oil	Zn DTP	93 : 2 : 5	7.3

Table 2. Compositions and properties of commercial oils used.

No.	Composition (%)						Properties	
	Mineral oil	Ester	Oilness agent	EP-agent	Emulsifier	Another additive	Viscosity (50°C : cSt)	Saponification value (mg KOH/g)
A	62	23	1.5	0.5	3.0	10.0	9.7	49
B	44	48	1.5	—	1.5	5.0	11.7	90
C	32	45	10.0	2.0	6.0	5.0	41.5	112

行い、潤滑油は以前の実験と同じくするためニートで上ロールに塗布した。

更に、実際に用いられている3種類の市販油 A, B 及び C を評価潤滑油として、その潤滑性を潤滑試験機で調べた。これらの市販油は、普通鋼のそれぞれ異なつた5タンデムミルによる薄板圧延に用いられておりその実作業における、ほぼ同じパススケジュールでの最高圧延速度で潤滑性能を間接的に評価すると、潤滑性能としては C が最もすぐれており次に B であり、A が最も悪い。それぞれの化学成分及び性質を Table 2 に示す。実機と同じく、エマルジョン潤滑として用い、3% 濃度で 55°C に保温して、循環使用した。

試験コイル材料には、板厚 0.4 mm、幅 15 mm の低炭素リムド鋼の焼なまし調質材を用いた。その降伏応力は 18 kgf/mm<sup>2</sup> であり、コイル表面はブライト仕上げで、表面粗さは  $R_{max}$  0.5  $\mu$ m であつた。

実験条件は、押込み荷重を 600 kgf と一定にし、上ロール回転数を 50, 100, 150, 200, 250 及び 500 rpm の6段階まで変化させた。このときのコイルの圧下率は5%で、上ロール速度は 12, 24, 36, 48, 60 及び 120 m/min である。実験の前に上ロールを No. 500 のエメリ紙で研磨し、ベンジンで脱脂し、同一条件において各5回の実験を行った。荷重  $P$  及び張力  $T$  は、ロードセルの出力を動ひずみ計に通して、x-t レコーダーに記録させた。

## 2.2 耐焼付き性

耐焼付き性を評価する尺度として、焼付きを発生した加工条件(圧延速度及び圧下率)を用いた。実験方法は、2.1 で説明した潤滑性評価の場合と同じである。ただ、加工条件を苛酷にして焼付きを発生させるだけである。焼付き発生には、圧下率を一定にしてロール速度を増加させるか、ロール速度を一定にして圧下率を増加させるかの二つの方法がある。焼付きの発生は、張力の変化の測定及び上ロール、試験コイル表面の目視観察により行つた。

耐焼付き性を評価する前、潤滑試験機により発生した焼付き傷の形態と実機における焼付き傷の形態を対応させる実験を行った。この際、潤滑油として牛脂に5%乳化剤を添加した油を用いた。

つづいて、Table 2 に示した潤滑性能の順位のわかつている3種類の市販油 A, B 及び C を用いて、潤滑試験機の耐焼付き性の評価の可能性を調べた。

これらの潤滑油は、実機と同じく3%濃度のエマルジョン潤滑とし、55°C に保温し、毎分11の量を上ロールとコイルの間に噴霧し、循環使用した。実験条件は、上ロール速度を 12, 36, 60, 90, 120, 150 及び 180 m/min

の各段階に一定にして、圧下率を3%から焼付きが発生するまで段階的に増加させた。各実験ごとに、上ロール表面を No. 500 エメリ紙で研磨し、ベンジンで脱脂した。実験後に、張力変化の測定及びコイル、ロール表面を脱脂し、焼付きの発生の有無の目視観察を行つた。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 潤滑性

Fig. 3 に Table 1 の No. 1, No. 2 及び No. 3 の3種類の基油の摩擦係数とロール速度との関係を示す。摩擦係数は、ロール速度とともに減少するが、鉱物油は大きく減少し、ロール速度 60 m/min で焼付きを発生した。合成エステル及び牛脂はゆるやかに減少している。摩擦係数は、各ロール速度とも鉱物油、合成エステル、牛脂の順に低くなつており、この順位は以前の筆者の一人<sup>1)</sup>の振り子式試験機及び実験室用圧延機で得られた摩擦係数の順位に一致し、また実機で得られた潤滑性能の順位とも一致している。この試験機を用いると、従来の摩擦係数の定性的な評価のみならず、定量的な評価も可能となろう。この段階で潤滑試験機が基油間の潤滑性の評価の可能なことがわかつた。各ロール速度において順位が変わらないことは、摩擦界面での相対すべり速度が変化しても基油間の摩擦係数の差に与える影響の少ないことを示している。このことから、相対すべり速度の低い試験機においても、この場合には実機と同じ潤滑性の評価が得られることがわかる。

Fig. 4 に No. 1, 4, 5 の添加剤の異なる潤滑油の摩擦係数とロール速度との関係を示す。参考のために、振り子式試験機による摩擦係数及び圧延機による摩擦係数を

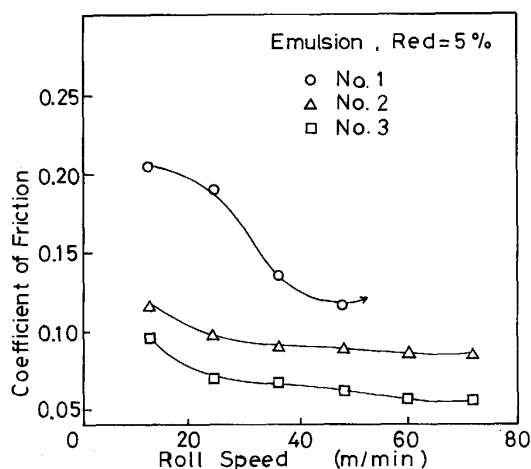


Fig. 3. Coefficient of friction for roll speed at a rolling reduction of 5% using emulsion oils of No. 1, No. 2 and No. 3.

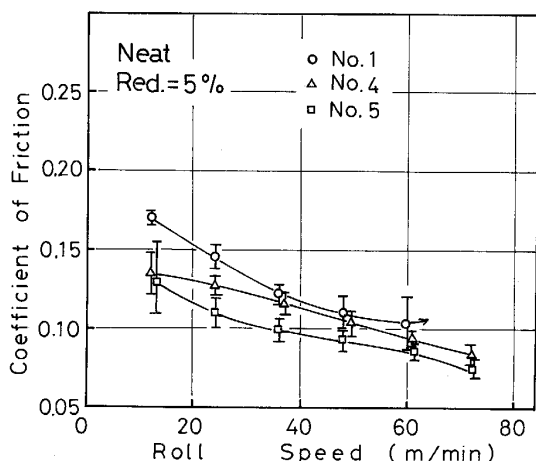


Fig. 4. Coefficient of friction for roll speed at a rolling reduction of 5% using neat oils of No. 1, No. 2 and No. 3.

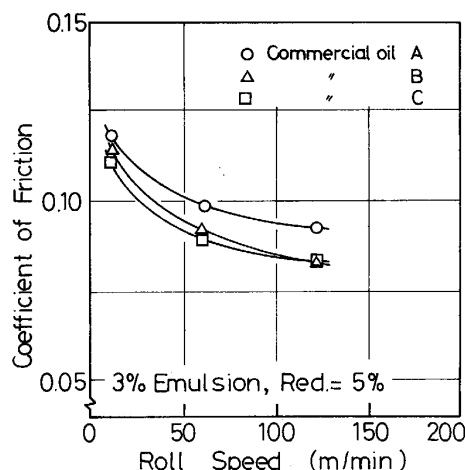


Fig. 5. Coefficient of friction for roll speed at a rolling reduction of 5% using emulsion oils of A, B and C.

Table 3. Coefficient of friction measured by means of the Soda pendulum type testing machine and rolling mill.

Lubricants	Coefficient of friction measured by the Soda pendulum type machine	Coefficient of friction measured by rolling (V=800 m/min, r=20%)
No. 1 oil	0.16	0.04
No. 4 oil	0.10	0.04
No. 5 oil	0.14	0.03

Table 3 に示す<sup>6)</sup>。振り子式試験は、室温 (25°C)、負荷荷重 300 gf で行つた。圧延試験は、圧延速度 800 m/min、圧下率 20% で行つた。油性向上剤オレイン酸を添加した No. 4 油では、低ロール速度で振り子式試験機で得られた摩擦係数と同様に、基油、(No. 1 油) との差は大きい、ロール速度が増加すると、圧延で得られた摩擦係数のようにその差が小さくなつていく。

ZnDTP を添加した No. 5 油では、高ロール速度域で最も低い摩擦係数の値となつた。これは、基礎的試験機の結果とは異なり圧延機の結果に等しい。このことは、基礎的試験機により実作業時の摩擦係数を評価することが困難なことを示している。

オレイン酸の添加効果が速度が増加するにつれて無くなる原因は、油性向上剤のオレイン酸の境界膜が界面温度の上昇により、その機能を無くするためと考えられる。ZnDTP の添加効果が潤滑試験機で現れた原因は次のように考えられる。振り子式試験機の摩擦面は、弾性的であり、面積も小さいのに比べ、潤滑試験機の摩擦面は、コイル材料が塑性変形することによりかなり大きな面積を持つ新生面が現れる。そして、その新生面と ZnDTP との反応、摩擦面温度の上昇による ZnDTP の化学反

応が起こる原因が考えられる。

これらの結果から、添加剤を含む潤滑油では、この潤滑試験機のようにできるだけ実機の界面状況に対応した試験機で摩擦係数を求めなければならないことが理解できる。これは、開発した潤滑試験機の潤滑条件因子が、基礎的試験機や他の潤滑試験機に比べ、(1)材料の塑性変形による新生面の露出、(2)広い接触面積、(3)接触面での相対すべり速度、(4)幾何学形状の相似性などの点で、実機の条件に近いことにより、より優れた評価を可能としたものと思われる。

更に、実機において潤滑性能がわかっている 3 種類の市販油 A, B, C の潤滑試験機による摩擦係数とロール速度との関係を Fig. 5 に示す。実作業におけるロールと材料間の相対すべり速度に対応するロール速度での 3 種類の市販油の摩擦係数の順位は、実機の潤滑性能の順位とはほぼ同じ結果が得られた。

これらの結果から、この潤滑試験機を用いることにより実機での圧延油の潤滑性評価が可能となろう。

### 3.2 耐焼付き性

潤滑試験機における焼付き傷の形態及びその判定を明らかにするために、牛脂の 3% エマルジョンを用いてロール速度、圧下率の加工条件を変化させたときの張力の時間変化及びコイル表面の観察結果を Fig. 6, 7, 8 に示す。Fig. 6 は低速、低圧下率、Fig. 7 は低速、高圧下率及び Fig. 8 は高速、中圧下率での摩擦係数と圧延距離の関係及び特定の圧延距離でのコイル表面の顕微鏡写真である。

Fig. 6 の摩擦係数は、圧延距離に対して一定であり、①、②及び③の圧延距離における表面写真もほとんど変

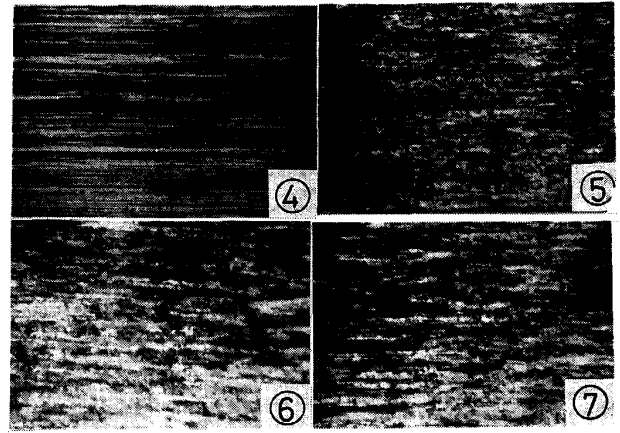
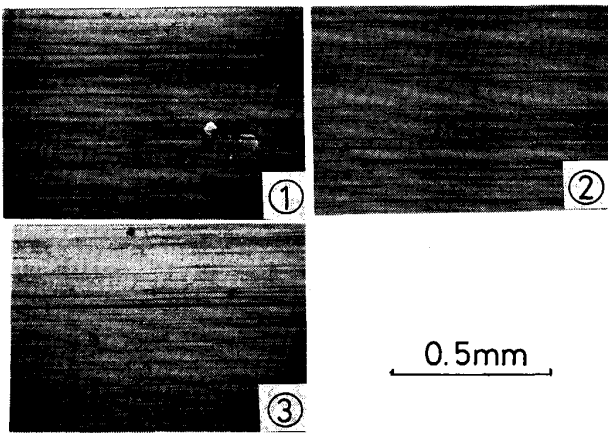
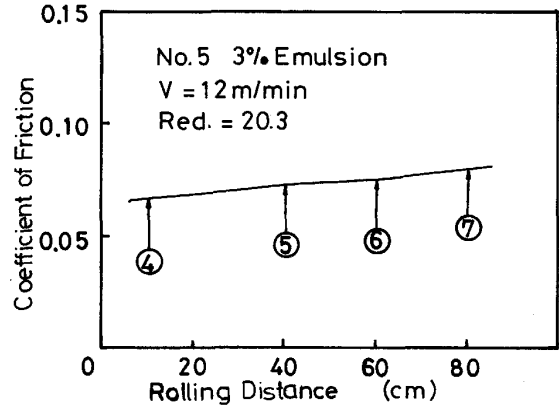
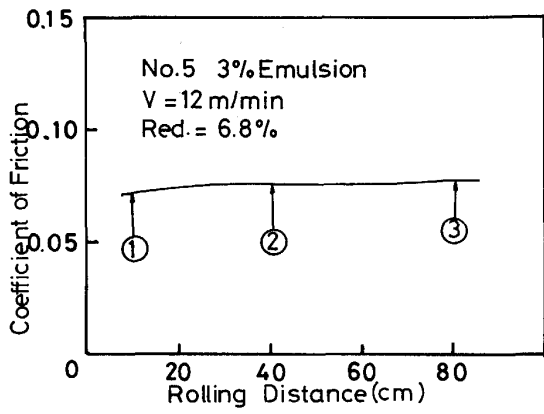
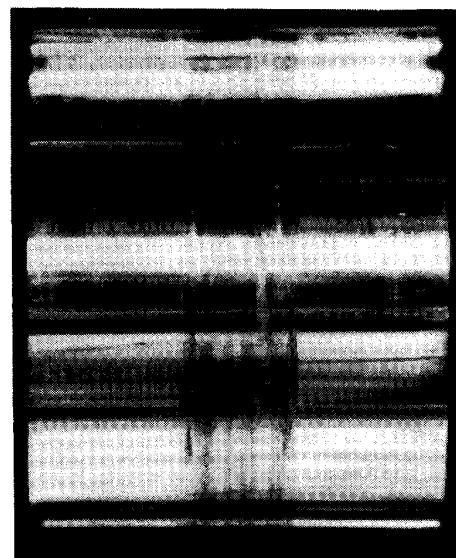
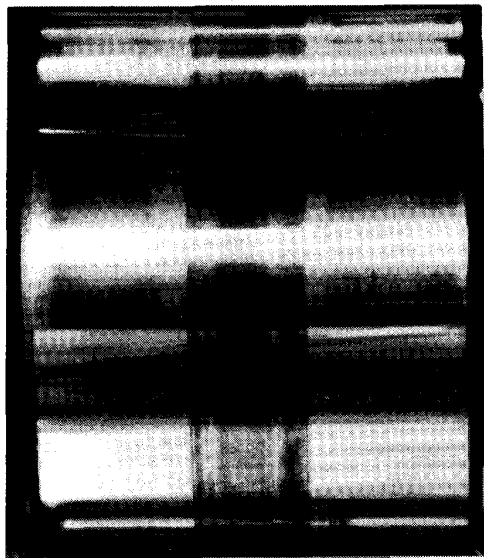


Fig. 6. Coefficient of friction for rolling distance and photographs at a roll speed of 12 m/min at a rolling reduction of 6.8% using 3% emulsion oil of No. 3.

Fig. 7. Coefficient of friction for rolling distance and photographs at a roll speed of 12 m/min at a rolling reduction of 20.3% using 3% emulsion oil of No. 3.



(a) lower roll speeds (b) higher roll speeds

Photo. 1. Photographs of the upper roll surface after rolling.

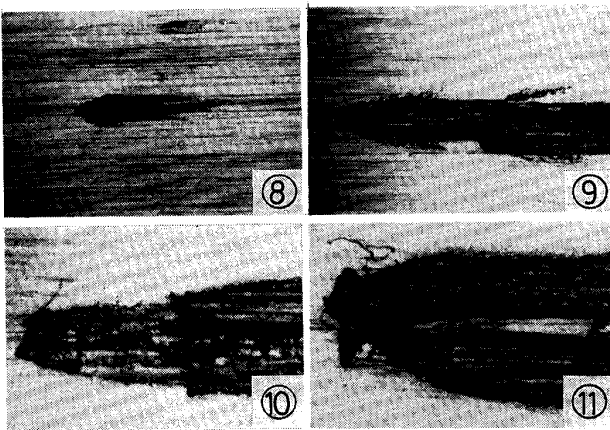
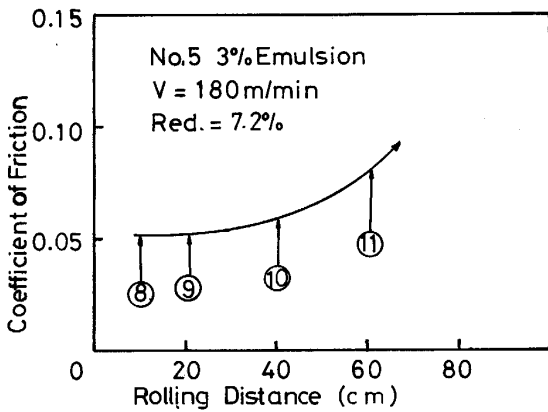


Fig. 8. Coefficient of friction for rolling distance and photographs at a roll speed of 180 m/min at a rolling reduction of 7.2% using 3% emulsion oil of No. 3.

化はなく、ロール研磨凹凸の条痕が観察されるだけである。

Fig. 7 の摩擦係数は、圧延距離とともにほぼ直線的に増加している。④の圧延距離で焼付きを発生し、⑤、⑥、⑦と圧延距離の増加とともに焼付き面積が増加した。④の写真は、焼付きを発生した箇所である。⑤、⑥及び⑦の写真は、焼付いた箇所であり、その表面は圧延距離とともにあまり大きく変化していない。局所的な表面状態の変化が大きくないのに摩擦係数が増加していくのは、焼付いた面積が圧延距離とともに増加しているためである。

Fig. 8 の摩擦係数は、焼付きが成長するにつれて急

激に増加している。⑧の圧延距離で写真に示す焼付きが発生し、⑨、⑩、⑪と圧延距離の増加とともに焼付きが成長していく様子が写真からわかる。

Fig. 7, 8 の写真からコイル表面の焼付き傷の形態が低速と高速で異なることが観察される。これらの条件での上ロールの表面状態も大きく異なることが考えられる。Fig. 7 及び Fig. 8 と同じ条件の圧延後の上ロール表面の脱脂後の写真を Photo. 1 に示す。低速度、高圧下率の場合、ロール表面は黒つぶくなり、荒れているが凝着物は観察されない。一方、高速度、中圧下率の場合には明瞭な凝着物が観察される。

実機における材料表面に生ずる焼付き傷の形態は、Fig. 8 の焼付き傷と類似しており、実機のロール表面には凝着物が当然発生している。その観点からすると、潤滑試験機の高ロール速度での焼付きが実機で発生するヒートスクラッチなどと呼ばれている焼付きに対応すると考えられる。この点については後で詳しく検討する。

これらの結果から、焼付き発生の判定基準を Table 4 のように決めた。完全に焼付いた状態 (×印) は、圧延後のコイル表面には大きな焼付き傷が観察され、上ロール表面にコイル材料の凝着物が付着しているか、明瞭な荒れが観察される。焼付きが発生しはじめた状態 (△印) は、コイル表面の目視観察から小さな傷が観察されるが、上ロール表面は脱脂後、凝着物はなく、荒れはほとんど観察されない。焼付きの無い状態 (○印) は、コイル表面の傷及び上ロール表面での凝着物、荒れは観察されない。

この判定基準をもとに、各ロール速度に一定とし、圧下率を変化させて焼付きを発生させたときの結果を Fig. 9 に示す。焼付き発生の無い領域 A (○印) と完全に焼付いた領域 C (×印) の間に、△印の遷移領域 B がかなり存在することがわかる。そこで、焼付き限界として、A と B の境界を焼付き限界線 I、B と C の境界を焼付き限界線 II とした。各種潤滑油における耐焼付き性の評価は、焼付き限界線 I を求め、その比較により行うことにする。

Fig. 9 の焼付き領域 C の低速域での C-I と実機での焼付きに対応する高速域での C-II における焼付き形態の差について考察することにする。そのため、各加工条

Table 4. Visible assessment of the friction pick up.

Evaluation (mark)	External appearance of workpiece surface	External appearance of upper roll surface	Change of back tension
○	No defect	No adhesion	Constant
△	Small defect	No adhesion	Constant or slow increase
×	Large defect	Roughening or adhesion	Increase

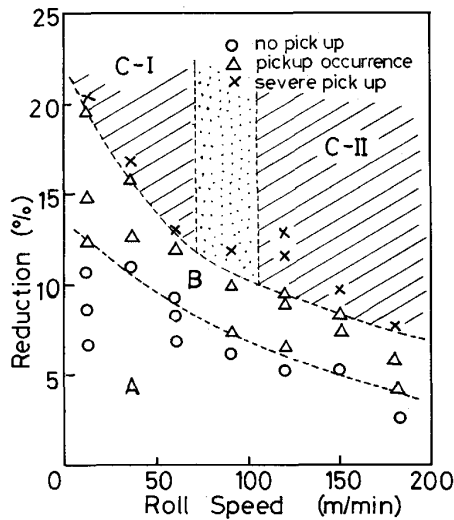


Fig. 9. Limit conditions of friction pick up measured by the visible assessment.

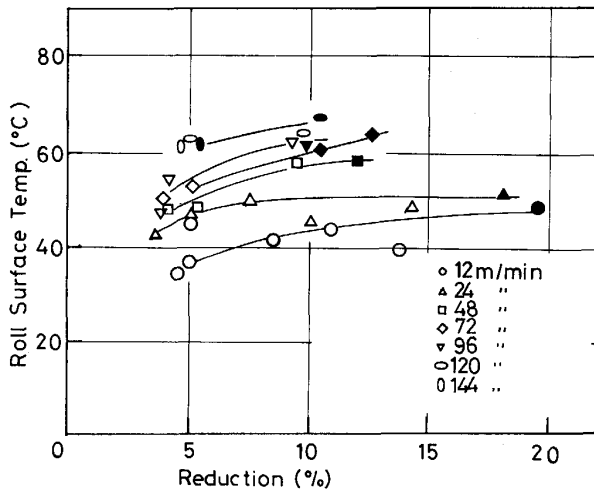


Fig. 10. Roll surface temperature for reduction at various roll speeds.

件で圧延中の上ロール表面の温度測定を行った。この結果を Fig. 10 に示す。温度測定には、外径 0.5 mm のステンレス管で保護された径 0.1 mm のアルメル・クロメル熱電対を用いた。熱電対は、キャリブレーションを行い規定の熱起電力が得られることを確認した。この熱電対先端を上ロール出口側表面に接触させ、温度測定を行った。

上ロール表面温度は、各ロール速度において圧下率の増加とともに上昇し、その上昇度はロール速度が増加するほど大きい。次に、焼付き限界線 I 近傍での測定温度を各ロール速度で比較する（そのときの実験点は黒く塗りつぶした）。低速の焼付き形態を示した 12, 24, 48 及び 72 m/min におけるロール表面温度は 45, 50, 55 及び

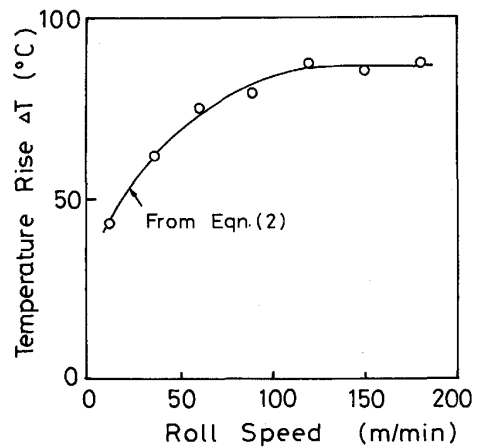


Fig. 11. Temperature rise calculated from Eqn. (2) for roll speed.

57°C と異なっており、ロール速度とともに高くなっている。一方、高速の焼付き形態を示した 120 及び 144 m/min では、60°C とほぼ一定の値になっている。

この結果から、高速の焼付き形態では摩擦面がある一定温度になると、熱を原因とする油膜破断が起り、コイル材料がロール表面に凝着することによるヒートタイプの焼付きが発生しているものと考えられる。一方、低速では摩擦面温度にはあまり影響を受けず、冷間圧接メカニズムによる焼付きが発生していると考えられる<sup>7)</sup>。

更に、摩擦面温度を定量的に示すため、ARCHARD モデルで計算した<sup>8)</sup>。幅 2l の帯状の凸部を持った個体 A が、固定している個体 B の上を速度 V ですべるとき、摩擦面での温度上昇 ΔT は

$$\Delta T = \frac{4\mu l p_m V}{J} \cdot \frac{1}{4.24 K_B + 3.76 K_A \left(\frac{V \cdot l}{\alpha_A}\right)^{1/2}} \dots (2)$$

で表される。ここで、μ は摩擦係数、p<sub>m</sub> は平均圧力、K<sub>A</sub>, K<sub>B</sub> は個体 A, B の熱伝導率、α<sub>A</sub> は個体 A の温度伝導率、J は仕事当量である。ロールを個体 A、コイル材料を個体 B と近似し、Fig. 9 に示した焼付き限界線 II (△/× 境界) に最も近い C (焼付き) 領域での各ロール速度 V の実験点の摩擦係数 μ、面圧 p<sub>m</sub>、接触弧長 2l の各データを (2) 式に代入して摩擦面温度上昇 ΔT を計算した。この結果を Fig. 11 に示す。

焼付きを発生するときの温度上昇は、ロール速度とともに上昇するが、ロール速度 120 m/min 以上ではほぼ一定の値 80°C 得られた。120 m/min 以上の摩擦面温度としては、Fig. 11 からほぼ一定の摩擦面温度上昇の 80°C に、ロール及びコイル表面温度の約 60°C を加え

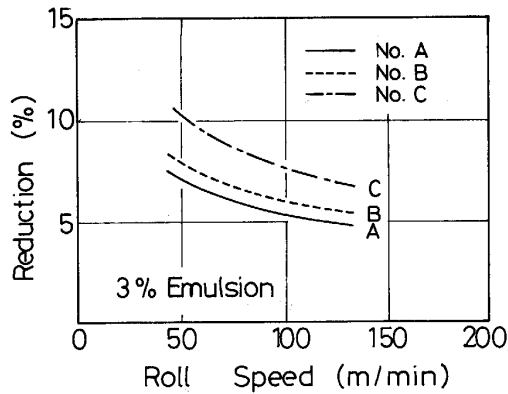


Fig. 12. Limit conditions of friction pick up of commercial oils of A, B and C.

た、ほぼ一定の約 140°C の値が得られる。この温度は、潤滑油が油性を無くす転移温度に一致しており、この温度で界面において油膜破断を発生し、ロール表面にコイル材料が凝着することになることが考えられる。このことは、実機で発生する焼付きも、熱を原因とする凝着メカニズムによるとされているので、潤滑試験機によつて焼付きをシミュレートできることを示しており、潤滑油の耐焼付き性の評価も可能となる。

そこで、潤滑性能の順位のわかっている 3 種類の市販油 A, B, C の評価を潤滑試験機を用いて行つた焼付き限界線 I の結果を Fig. 12 に示す。実機で得られている潤滑特性の評価の順位と同様、A, B, C の順に耐焼付き性が優れている評価が得られた。

これらのことから新たに開発した潤滑試験機は、これ

まで基礎的試験機や潤滑試験機において困難とされていた焼付きの再現及び耐焼付き性の評価が可能となろう。

#### 4. 結 言

新たに開発した潤滑試験機を用いて、潤滑性の評価及び耐焼付き性の評価の可能性について検討し、次の結論を得た。

(1) 潤滑試験機は、実機の界面状況をできるだけシミュレートしており、実操業での摩擦係数を評価することが可能となつた。

(2) 潤滑試験機により焼付きが再現でき、その形態が実機と同じであることが確認でき、耐焼付き性を評価することが可能となつた。

今後、この潤滑試験機は優れた圧延油の開発のために有効なデータを与えることが期待できる。

おわりに、本実験に御協力いただいた当時横浜国立大学工学部学生高石敏充君に深く感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 小豆島明: 日本機械学会誌, 84 (1981), p. 1205
- 2) 小豆島明: 日本塑性加工学会第 93 回シンポジウムテキスト (1984), p. 11
- 3) 小豆島明: 鉄と鋼, 74 (1988), p. 696
- 4) 間瀬俊朗, 山本秀男, 西野隆夫: 潤滑, 27 (1982), p. 552
- 5) 伊東紘一, 北村邦雄: 同上, p. 559
- 6) 小豆島明, 宮川松男: 塑性と加工, 25 (1984), p. 915
- 7) 水野高爾: 日本塑性加工学会第 38 回塑性加工学講座 (トライボロジーコース) テキスト (1984), p. 1
- 8) J. F. ARCHARD: Wear, 2 (1958/59), p. 438