

塑性加工用潤滑剤評価試験機の
実用化に関する研究

(課題番号：59850026)

昭和60年度科学研究費補助金（試験研究(1)）

研究成果報告書

昭和61年 3月

研究代表者 小豆島 明

2302752 (横浜国立大学 工学部)

横浜国立大学



531.8
AZ

はしがき

塑性加工用潤滑剤は、高圧下、高温、高すべり速度及び塑性変形を受け処女面を露出する状況で使用される場合が多く、この条件下で使用に耐え得る優れた潤滑剤の開発が望まれている。現在、塑性加工用潤滑剤の評価には、実機が用いられているが、それぞれ個別の機械及び加工方法などに応じたデータの比較評価のみである。研究代表者は、一般的かつ統一的に実験室的試験機によって塑性加工用潤滑剤を評価する方法を開発するため、塑性加工用潤滑剤評価試験機を試作し、工具と材料界面での潤滑剤の物理現象の基礎的な解明を行なう実験を行なっている。本研究は、この試験機から得られた基礎的な実験結果を土台にして、実際の加工をシミュレートできるために張力付加装置を加え、実際の現場で用いられている塑性加工用潤滑剤を、この試験機により評価し得ることを確かめ、試験機の実用化を行なうことを目的としている。

本報告書は、3章から構成されている。第1章は、塑性加工用潤滑剤評価試験機の試作とその性能評価について述べ、第2章では、実際に冷間圧延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付き性の性能評価の方法につき述べる。第3章では、評価試験機の改良と実用化について述べる。

研究組織

研究代表者：小豆島 明（横浜国立大学工学部助教授）
研究分担者：工藤 英明（横浜国立大学工学部教授）
坪内 昌生（横浜国立大学工学部助手）
平井 亀雄（大同化学工業（株）
奈良生産技術事業所所長）
武内 正光（大東製作所専務）

研究経費

昭和59年度	6800千円
昭和60年度	1000千円
計	7800千円

2302752
横浜国立大学

研究発表

(2) 口頭発表

- 1) 小豆島明, 喜多良彦, 評価試験機による冷間圧延用潤滑油の耐焼付き性の評価方法, 日本鉄鋼協会第108 回講演大会
1984年10月10日
- 2) 小豆島明, 喜多良彦, 高石敏充, 各種添加剤を含む牛脂ベースの潤滑油の性能評価, 日本鉄鋼協会第108 回講演大会
1984年10月10日
- 3) 小豆島明, 喜多良彦, 高石敏充, 田中政輔, 市販冷間圧延用潤滑油の性能評価, 日本鉄鋼協会第109 回講演大会
1984年 4月 1日
- 4) 小豆島明, 喜多良彦, 高石敏充, 焼付きに及ぼす加工・潤滑因子の影響, 昭60春塑加講演会, 1985年 5月23日
- 5) 小豆島明, 他4名, 評価試験機の改良及び耐ロール摩耗性の評価, 日本鉄鋼協会第110 回講演大会, 1985年10月 5日
- 6) 小豆島明, 喜多良彦, 牛脂エマルションの性能評価
第36回塑性連講演会, 1985年10月 6日

研究成果

1. 塑性加工（冷間圧延）用潤滑剤評価試験機の性能

1. 1 はじめに

冷間圧延におけるロールと材料界面の潤滑は、加工力の低減、製品表面の品質管理からも重要な問題となっている。この生産性及び品質の向上のために、優れた潤滑油の開発が試みられている。冷延用潤滑油は、ロールと材料界面において材料が塑性変形することによって新生面を露出し、その接触面積も非常に大きく、高い面圧、高いすべり速度及び高い温度という苛酷な状況下での使用に耐えなければならぬ。更に、最近では加工速度、圧下率の上昇に伴う界面温度の増加により、焼付きが発生することも多く、この開発を困難にしている。

優れた潤滑油を開発するため、その潤滑油を総合的、統一的に評価することが必要である。冷間圧延に限らず、一般に加工プロセスにおける潤滑油の評価には、次の三つの方法が用いられている。一つは、振り子式試験機、4球式試験機、チムケン試験機など、単純化された基礎的試験機による方法、二つめは実際の加工プロセスに近い界面状況を模擬した模擬的試験機による方法、最後は実機による方法である。

冷延用潤滑油の評価には、従来基礎的試験機により得られた摩擦係数、耐荷重能などの値が用いられてきた。しかし、各種基礎的試験機の間的相关関係は明確ではなく、潤滑油の評価を統一的に行なうことができず、更に実機で得られた値とは一致しないことも多く認められた。そのような評価の問題点を少なくするため、実際には工場に設置されている実機を用いて評価する方法が、結局のところ優先されて用いられている現状にある。この場合には、評価に使用した圧延機では満足した結果が得られるが、他の圧延機にこの結果を適用することができない汎用性の問題点及び評価のために多額の費用を必要とする問題点などが生じている。そこで、潤滑油の統一的な評価を可能にする模擬的試験機（評価試験機、シミュレータ）の開発が望まれている。

本章では、冷延用潤滑油の性能評価のための評価試験機の開発にあたり、設計のために必要な条件について考察し、試作した評価試験機の構造及びその性能について述べるものである。

1. 2 評価試験機の設計のための予備考察

冷間圧延のロールと材料界面における潤滑因子は数多くある。潤滑油の性能評価のための試験機を開発する場合、これら全ての条件因子を実機に一致させることは不可能である。一般に、シミュレーション試験の場合には、条件因子のうち重要でない因子を無視しても、かなり有用な知識が得られることが報告されている。そのため、過去の研究結果などを考察して重要でない潤滑条件因子を切り捨て、重要な因子だけに注目して評価試験機の設計を行なった。

また、冷延用潤滑油の性能評価と言っても数多くあり、どの性能を評価するのかという目的を明確にする必要がある。ここでは、冷延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付性に限って、評価試験機設計のために考慮しなければならない潤滑条件因子について考えることにする。

摩擦係数による潤滑性の評価として、佐伯らは振り子式試験機による摩擦係数が境界潤滑性のかかなり優勢な低速の強圧下圧延における摩擦係数の評価に使用できることを示した。筆者らは、高速になり流体潤滑性が優勢になると、振り子式試験機の摩擦係数では評価できないことを示した。このことから、振り子式試験機のような基礎的試験機で得られる摩擦係数は、境界潤滑性が優勢な圧延条件では相関を持つが、流体潤滑が混在した条件では相関の無くなることが考えられる。そのため、摩擦係数を求める多くの研究には、実機もしくは実機に近い圧延速度が可能な圧延試験機が用いられることになった。

これらの研究結果から、摩擦係数により潤滑性を評価するためには、ロールと材料界面での潤滑条件因子として、次の因子が重要と考えられる。

- (1) 幾何学形状の相似性
- (2) 材料の塑性変形による新生面の露出
- (3) 広い接触面積
- (4) 接触面での相対すべり速度
- (5) 入口部での導入油量
- (6) 加工度

つづいて、耐焼付性評価として、各種基礎的試験機において温度条件などをコントロールすることにより焼き付きを発生させると、実機での耐焼付性と良い相関のあることが示された。また、低速圧延機を用いても、材料コイル温度を上昇させることにより焼き付きを発生させることが可能となり、焼付き発生と出口コイル表面温度との間に相

関性が認められた。

これらの研究結果から、耐焼き付性の評価には、ロールと材料界面での加工面温度が最も重要な因子であることがわかる。そのことから、加工面温度に影響を与える相対すべり速度、摩擦力及びすべり距離（接触弧長）の潤滑条件因子に注意を払わなければならない。

冷延用潤滑油の性能評価のために、上記の重要な潤滑条件因子に注目して評価試験機の試作を行なった。

1.3 評価試験機の試作

試作する評価試験機としては、次の条件を満足していなければならない。

- (1) 実機におけるロールと材料の界面状況をできるだけ再現すること。
- (2) 試作機が小型、安価であること。
- (3) 作業性が容易であり、実験コストが安価であること。
- (4) 実験の再現性が良いこと。

これらの条件の内(1)は、前の1.2で考察した重要な潤滑条件因子を満足させることにより可能となる。幾何学形状の相似性を満足させる試験機としては、圧延機と同じく2円筒のロールで板材料を塑性変形させるタイプを考えねばならない。ロールと材料界面での相対すべり速度を実機と一致させることが、この試験機の試作にあたり最大の問題点である。通常の圧延機タイプであれば、実機と同じ圧延速度が必要となり、実験室用に製作するにしても(2)の条件を満足しなくなる。そこで、後方張力を付加することにより、材料速度をできるだけロール速度に比べて遅くして圧延することにより、界面での相対すべり速度を大きくして、実機と一致させることを考えた。

Fig.1.1にこのことを具体化したロール間げきの模式図を示す。

Fig1.1.(a)は、材料を固定しているため試験機としては簡単に製作できるが、これでは最初に材料を塑性変形させただけで、ロール回転時には弾性接触状態にあるという問題が生じる。そこで、できるだけ実機の界面状況に近づけるため、Fig.1.1(b)のようにロール回転時も材料が同時に塑性変形するように、材料をロール速度に比べて低速度で移動させるようにした。具体的には、材料速度 V_1 をロール周速 V_r の $1/10$ とした。そのため、実機と同じ相対すべり速度を得るためのロール速度は、実機の約 $1/10$ で良く、試験機を小型で、安価にすること

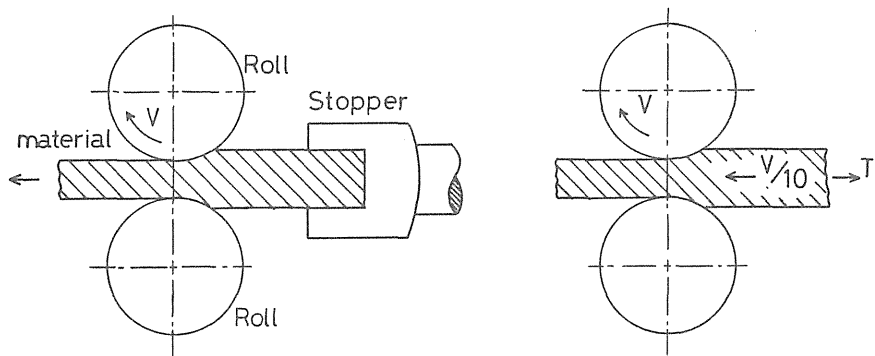


Fig.1.1 ロール間げきの模式図.

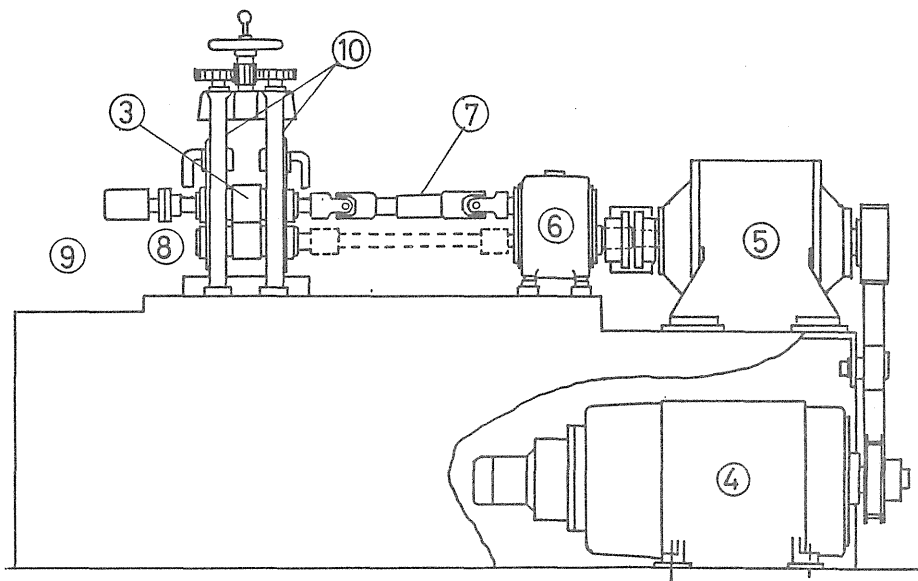


Fig.1.2 評価試験機本体の正面図

が可能となる。その結果として、実験コイルの長さも少なくともすみ、(3)の条件の実験コストも安価にすることができる。

試作する評価試験機としては、Fig.1.1(b)のロールと材料間の状況を具現でき、ロール速度、圧下率を広範囲に変化させることが可能になるなら、性能評価のための重要な潤滑条件因子をかなり満足させるものとなる。

1.4 試作した評価試験機

1.4.1 概略

評価試験機は、本体の2段圧延機①と材料コイルの移動速度をコントロールするための材料移動制御圧延機②から成っている。その本体の正面図をFig.1.2に示す。本体は、高さ1240mm、幅1922mm及び奥行き780mmの寸法をしており、その容量は15tonfである。ロール③は、SUJ-2高炭素クロム鋼で、ロール径76mm、胴長60mmである。上下ロールは、1750rpmまで速度可変の22kWDCモータ④を電磁クラッチ⑤を通して接続され、カムワルツ⑥とジョイント⑦を通じて回転させられる。ロール回転の立ち上がり速度を高めるため、電磁クラッチには8倍コンデンサ過励磁制御器が使用されている。ジョイントの下部を取り除くと、上ロールだけが回転する。その状態で、下ロールをカップリング⑧で低速用モータ(750w速度可変ACモータ)⑨に接続すると、上下ロールは異周速で回転することができる。圧延荷重は、スクリュートロールチャックとの間の左右のロードセル⑩により測定する。

この本体の圧延機は、上ロールが1回転すると荷重が除荷できる装置を持っている。この機構は、Fig.1.3に示すハウジング部のロールチャックとロードセルの間に挿入されたロードオフレバーとロール軸に取り付けられたハンマ・ピンにより達成できる。最初に、Fig.3に示すようにロードオフレバーとハンマ・ピンの位置をセットして、試験材料に圧下を加える。つづいて、モータを所定の回転数で回転させておき、電磁クラッチを接続する。上ロール軸にセットしたハンマ・ピンが1回転後、ロードオフレバーをたたき、その回転部が回転し、上ロール及びチャックが上昇することにより、荷重が除かれる。このように上ロールを荷重下で1回転だけ回転することができる。

つぎに、材料移動制御圧延機をも含めた平面図及び側面図をFig.1.4、Fig.1.5に示す。材料移動制御圧延機は、高さ1200mm、幅1100mm及び奥行き1100mmの外形をしており、その容量は5tonfである。ロー

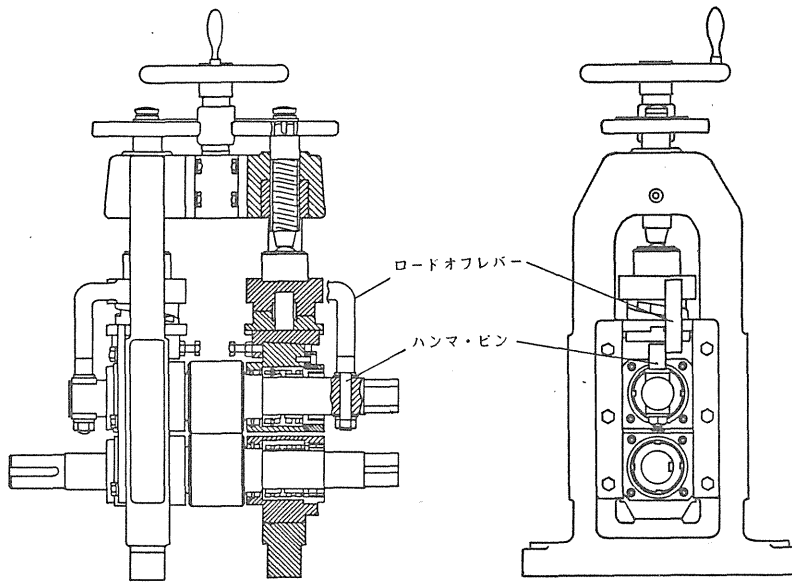


Fig.1.3 本体圧延機の詳細図

Table 1.1 評価試験機の仕様

主 ス タ ン ド	高速用DC モーター	馬力 回転数	2.2 kw 0 ~ 1750 rpm
	電磁クラッチ	8倍コンデンサ過励磁制御器	
	主ロールの 減速比	1 : 1, 1 : 1/2, 1 : 1/3	
	主圧延機	ロール寸法 ロール材質 ロール周速 圧延荷重	76 mm ϕ \times 60 mm S U J - 2, Hs = 90up 0 ~ 420 m/min 1.5 tf Max.
副 ス タ ン ド	バイエル変速 機付モーター	馬力 回転数	0.75 kw 3 ~ 35 rpm
	減速比	タイミングプーリー 減速機	1 : 1, 1 : 1/3 1 : 1/10
	副圧延機	ロール寸法 ロール材質 ロール周速 圧延荷重	70 mm ϕ \times 60 mm S U J - 2, Hs = 90up 0 ~ 42 m/min 5 tf Max.
	張力付加装置	方式 巻出しドラム	トルクリミッター 200 mm ϕ \times 60 mm

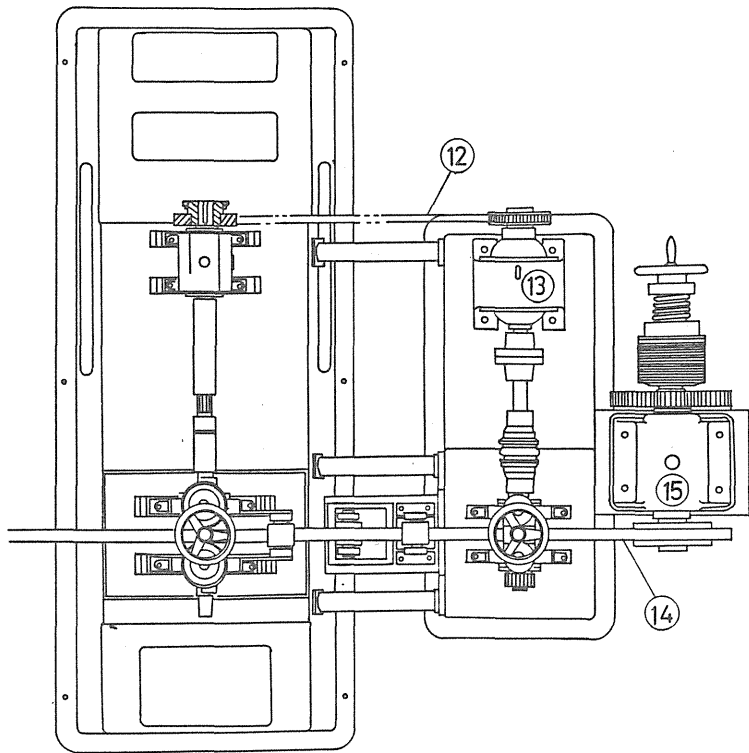


Fig.1.4 評価試験機の平面図

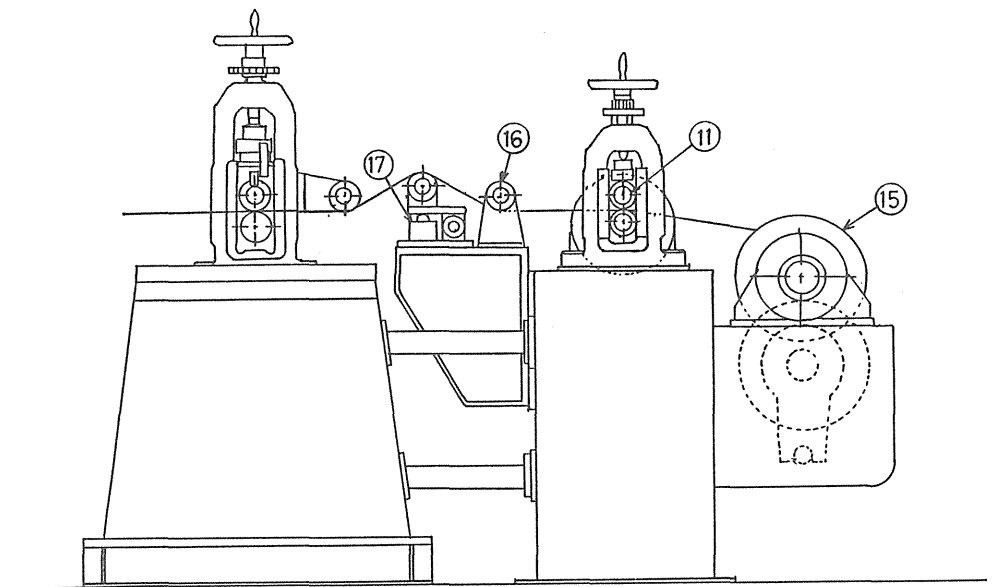


Fig.1.5 評価試験機の側面図

ル⑩はSUJ-2で、ロール径70mm、胴長60mmである。上下ロールは、本体のモータ②からタイミングベルト⑫を用いて回転させる。ロールの回転速度は、プーリとロール間に挿入した減速機⑬により本体のロールの1/10となる。材料コイル⑭は、トルクリミタにより張力制御が可能なアンコイラ⑮より Fig.1.5に示すようにセットされ、材料移動制御圧延機及び本体の圧延機で圧延される。両圧延機間でコイルに作用する張力は、テンションローラ部⑯に挿入したロードセル⑰により測定する。この評価試験機の使用を Table1.1 に示す。

1.4.2 運転操作

本体の圧延機の上ロールを研磨・脱脂し、Fig.1.5に示すように材料コイルをセットする。他のロールも脱脂状態にしておく、②の圧延機の圧下スクリュでロールを適量コイルに押し込み、ついで①の圧延機に於いても圧下スクリュで所定の圧下量を得るためロールをコイルに押し込む。つづいて、④のモータ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、③の上ロール及び⑩の上下ロールを回転させる。このとき③の下ロールは下部ジョイントを取り外しておき、従動状態にある。この結果、材料コイルはほぼ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。

潤滑油は、ニートの場合本体の圧延機の上ロールにガーゼで押しつけ塗布し、エマルジョンの場合上ロールとコイル間の入側へノズルで噴射する。この場合、材料コイルの実験距離は、①と②の圧延機あいだのコイル長さ80cmである。コイルの実験距離を長くするには、あらかじめ②の圧延機で所定の圧下率で圧延させた後、Fig.1.5のようにセットして圧延することにより成し遂げられる。

圧延荷重 P 及び張力 T の測定は、⑩、⑰のロードセル（東京測器製）の出力を動ひずみ計を通してX-tレコーダにより行なった。トルク G の測定は、Fig.1.6に示すようにロール軸に貼付したひずみゲージのリード線を軸中央の直径10mmの中空を通してスリップリングに接続し、その出力を動ひずみ計を通してX-tレコーダにより行なった。Fig.1.7にトルク出力の較正直線を示す。

1.5 摩擦係数測定の実験

1.5.1 摩擦係数の算出

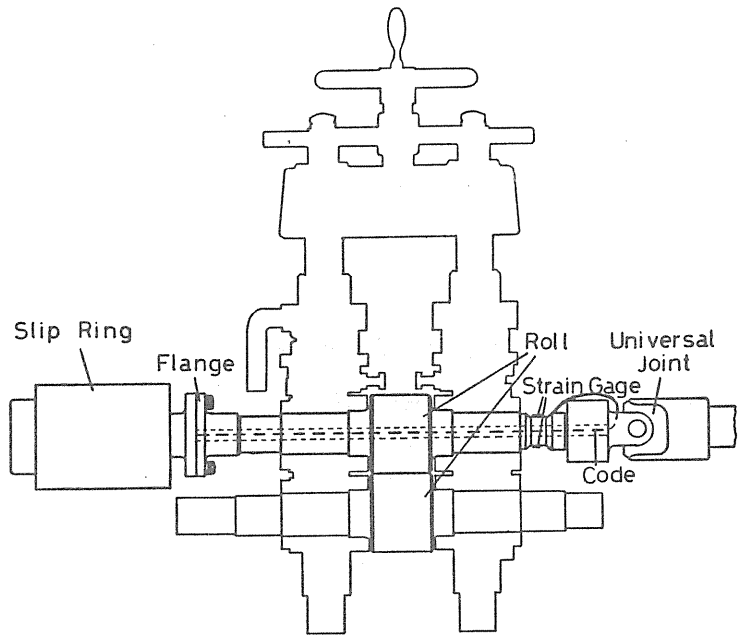


Fig.1.6 トルク測定用システム

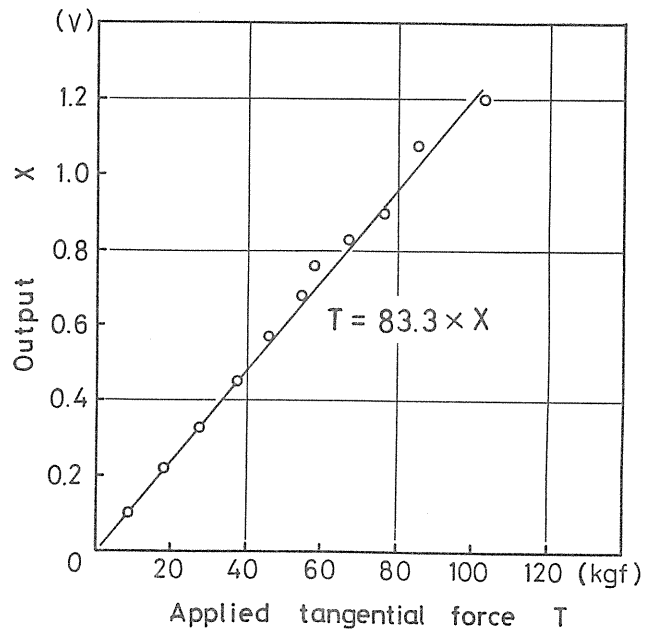


Fig.1.7 トルク出力の較正直線

Fig.1.8にロール間げきの摸式図を示す。上ロールは材料よりも速くすべり，下ロールは従動状態になっている。今，上，下ロールにかかる荷重をPとし，圧力分布pが一定であると仮定すると，水平方向の力の釣り合い式は

$$T = \int_0^\alpha p(-\sin\theta + \mu_1 \cos\theta) R d\theta + \int_0^{\alpha_n} p(-\sin\theta - \mu_2 \cos\theta) R d\theta + \int_{\alpha_n}^\alpha p(-\sin\theta + \mu_2 \cos\theta) R d\theta \quad (1)$$

となる。ここで， α_n は中立角，Rはロール半径である。下ロールが従動状態にあるので， $G_2 = 0$ となり， $\alpha_n = \alpha / 2$ が得られる。

第1次近似として摩擦係数 μ をもとめるとき， $\alpha \ll 1$ とすると，

$$-\int_0^{\frac{\alpha}{2}} \mu_2 p \cos\theta R d\theta + \int_{\frac{\alpha}{2}}^\alpha \mu_2 p \cos\theta R d\theta = 0$$

が成り立ち，(1)式は

$$T = \mu_1 p R \sin\alpha - 2pR(1 - \cos\alpha) \quad (2)$$

となる。同じく， $\alpha \ll 1$ より $\sin\alpha = \alpha$ ， $\cos\alpha = 1$ を用いて，

$$T = \alpha \mu_1 p R \quad (3)$$

が得られる。

$$P = \int_0^\alpha p R d\theta = \alpha p R \quad (4)$$

より，(3)式，(4)式から摩擦係数 μ_1 は

$$\mu_1 = \frac{T}{P} \quad (5)$$

として得られる。

1.5.2 摩擦係数 μ の測定と再現性

実験用コイルは，板厚0.4mm，幅15mmの低炭素リムド鋼の焼なまし調質材で，降伏応力は18kgf/mmである。コイル表面はブライト仕上げで，表面粗さ $R_{max} 0.5\mu m$ である。実験に際し，本体圧延機の上のロール回転数は，50,100,150,200,250及び300 rpmの6段階に変化させ，圧下率は3%と一定にした。上ロールは，1回の実験ごとにNo.500研摩紙で研摩後，ベンジンで脱脂した。使用した潤滑油は，粘度20cSt(25℃)のパラフィン系基油で，潤滑油の供給はニートで上ロールにガーゼで塗布した。再現性の検討のため，同一条件で5回以上の実験

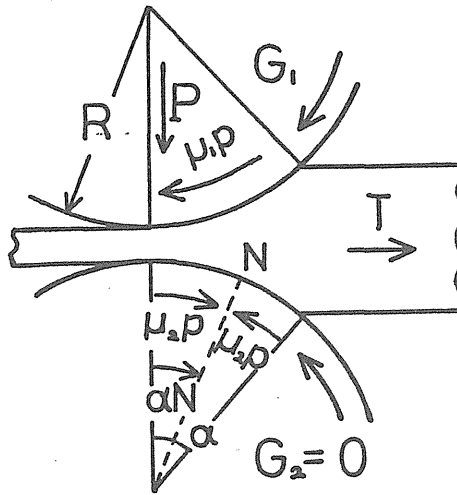


Fig.1.8 ロール間げき模式図

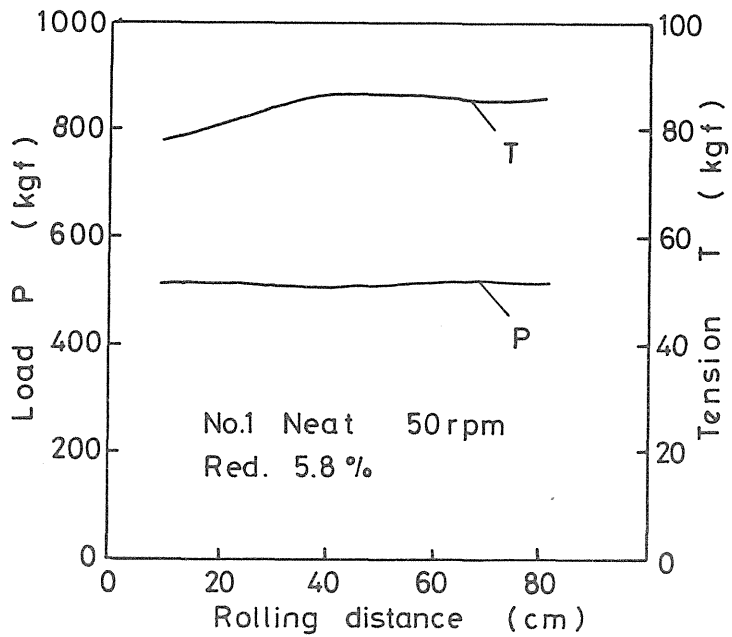


Fig.1.9 荷重及び張力の変化

を行なった。

Fig.1.9 に材料コイルを80cm移動（圧延）させたときの荷重P及び張力Tの測定結果の一例を示す。圧延荷重は、圧延中ほぼ一定であったが、張力は圧延距離20～30cmまでは増加傾向にあり、30cmを超えてほぼ一定となった。圧延荷重及び張力の読み取り値としては、一定となったところの値を採用した。

Fig.1.10 に摩擦係数（ $\mu = T/P$ ）と圧延距離との関係を示す。ロール回転数が50及び250rpmの結果を示す。実験は、各条件で5回行ない、白丸がその平均値であり、縦線分の長さが実験値の範囲を示す。ロール回転数50rpmでは、圧延距離30cmまでは摩擦係数は上昇し、その値のバラツキも大きい。圧延距離30cmを超えると一定になり、バラツキも小さくなった。ロール回転数250rpmにおいても、圧延距離の最初の部分で摩擦係数は上昇するが、回転数50rpmに比べて早い時期に一定になった。

Fig.1.11に摩擦係数とロール回転数との関係及び摩擦係数のバラツキの程度を示す。摩擦係数はロール回転数の増加につれて減少した。そのバラツキは、摩擦係数がロール回転数に対して大きな変化を示す範囲で大きく、この原因は実験条件の小さな設定差によっても摩擦係数変動することによる。また、ロール回転数300rpmでバラツキが大きいのは、ロールと材料界面で焼付きが発生したためである。

これらの結果から、摩擦係数のバラツキは特別な条件を除けば±5%以内であり、評価試験機として重要な再現性に優れていることが確認された。

1.5.3 摩擦係数（ T/P ）の検討

測定した圧延荷重P及び張力Tから得られた摩擦係数（ T/P ）と上ロールと材料界面での摩擦係数 μ との関係について検討する。そのため、Fig.1.6に示したロール軸に貼付したひずみゲージによりトルク G_t を測定し、張力と比較した。Fig.1.12 にトルクによる接線力（ G_t/R ）と張力との関係を示す。実験は、同じく粘度20cSt（25℃）のパラフィン系基油をニートで用い、圧下率を3、5及び7%に一定とし、それぞれの圧下率に於いてロール回転数を50～300rpmまで変化させて行なった。各実験条件で圧延荷重P、張力T及びトルク G_t を測定した。Fig.1.12より、張力に比ベトルクによる接線力は大きく測定され、圧下率が大きくなるとその差も大きくなっている。第1近

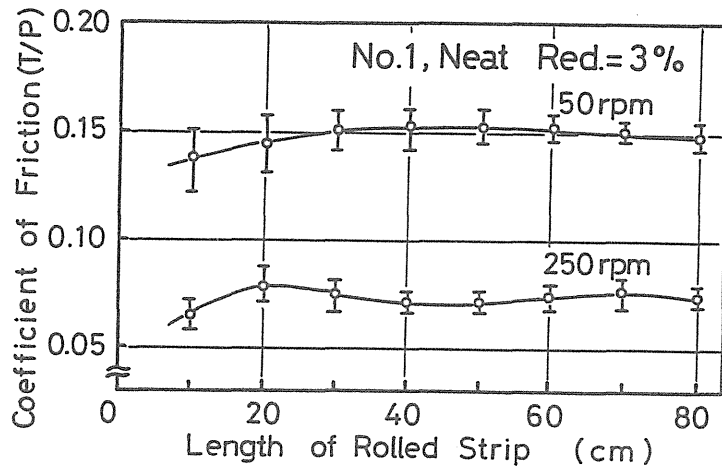


Fig.1.10 摩擦係数の変化

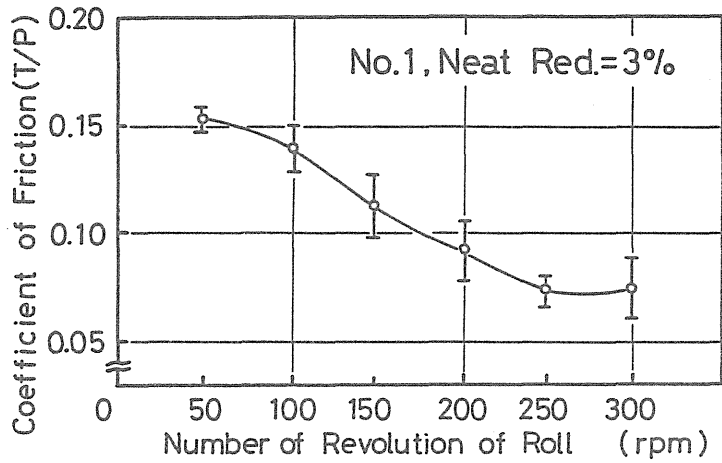


Fig.1.11 摩擦係数とロール回転数の関係

似て摩擦係数を導出したのと同じく、 $\alpha \ll 1$ とすると、トルク G_1 は

$$G_1 = \int_0^\alpha R \mu_1 p R d\theta = \alpha \mu_1 p R^2 \quad (6)$$

となり、(4)式より

$$T = \frac{G_1}{R} \quad (7)$$

の関係が得られる。しかし、Fig.1.12の実験結果より

$$T < \frac{G_1}{R} \quad (8)$$

が得られたので、第1近似による摩擦係数を求めることには問題となつた。

そこで、圧延荷重 P が張力 T に及ぼす影響を考慮することにした。(2)式の右辺の第2項に $(1 - \cos \alpha) = \alpha^2/2$ を代入することにより、(3)式は

$$T = \alpha p R (\mu_1 - \alpha) \quad (9)$$

となり、摩擦係数 μ は

$$\mu_1 = \frac{T}{p} + \alpha \quad (10)$$

となる。

この補正を行なった結果を Fig.1.13 に示す。この図から、補正した接線力は張力にかなり一致し、上ロールと材料界面での摩擦係数 μ_1 は、 T/P にかみ込み角 α を補正した値を用いればよいことがわかつた。

1.6 まとめ

冷延用潤滑油の性能評価が可能な評価試験機の開発を行なった。この新しく開発した評価試験機から得られた摩擦係数の再現性は良く、この試験機を性能評価に使用できることがわかつた。

次章で、冷延用潤滑油の潤滑性、耐焼き付性性能評価のための、この試験機による評価方法の検討を行なう。

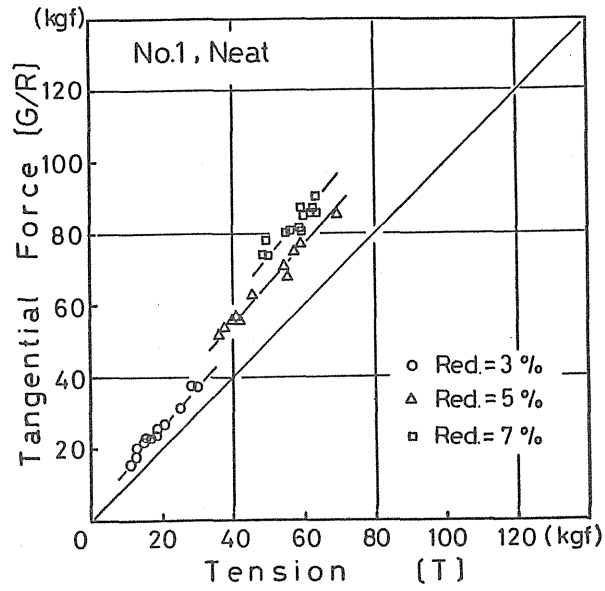


Fig.1.12 トルクによる接線力と張力の関係

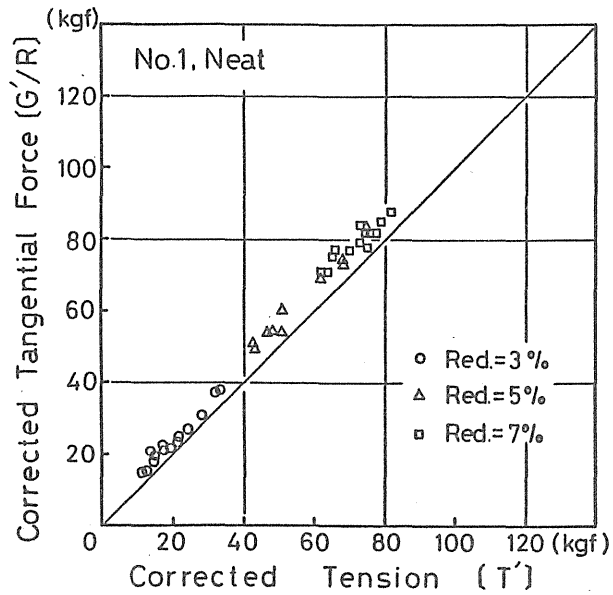


Fig.1.13 補正した接線力と張力との関係

2. 冷間圧延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付き性の評価

2. 1 はじめに

冷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な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尺度となる耐焼付き性を明らかにする必要が生じている。

冷延用潤滑油の摩擦係数の速度依存性及び耐焼付き性の評価には、基礎的試験機を用いるよりも実際に工場に設置されている実機を用いて行なわれている現状にある。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っているため、統一的に評価が可能な試験機による方法が必要とされている。本章は、前章において説明した新たに開発した評価試験機による、冷延用潤滑油の潤滑性及び耐焼付き性の評価方法を求める実験を行なった結果を述べる。

2. 2 評価方法

2. 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。前章説明した評価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.2.1に評価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.2.1のようにセットする。①及び②の圧延機の圧下スクリーンでロールをコイル材料に押し込む。つづいて、モータ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取り外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つけ塗布し、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、最初に試験コイルをセットした圧延期間のコイル長さ80cm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なった。

摩擦係数 μ は、前章より

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

を用いて求めた。ここで、 α 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なう。

2. 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、2.2.1 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。焼付きの発生には、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なう。耐焼付き性の評価には、焼付きの無い状態（○印）、焼付きが発生しはじめた状態（△印）及び完全に焼付いた状態（×印）の三つの表示を用いる。各加工条件による結果を、縦軸に圧下率、横軸にロール速度の図中表示して、焼付き限界線を求め、各種潤滑油の耐焼付き性の評価を行なう。

2. 3 実験方法

2. 3. 1 潤滑性

添加剤の影響を調べるため、鉱物油（パラフィン系基油）及びその基油に10%オレイン酸、2%ZnDTP を添加した油を潤滑油として用いた。3種類の潤滑油の粘度は25℃で20cSt と一定にした。それぞれの化学成分及び性質をTable 2.1 に示す。実験は室温（25℃）で行ない、潤滑油はニートで上ロールに塗布した。

つづいて、基油の差を調べるため、鉱物油（パラフィン系基油）、合成エステル及び牛脂を潤滑油として用いた。それぞれの化学成分及び性質を同じくTable 2.1 に示す。エマルション潤滑として用いるため、5%乳化剤が添加されている。エマルション潤滑を行なうため Fig.2.2 に示す給油装置を用いた。ミキサーで作成したエマルションは、ギアポンプを用いて、上ロールとコイルの間にフラットノズルを通して、毎分1 lの量を噴霧した。エマルションは、3%濃度で55℃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15mmの低炭素リムド鋼の焼な

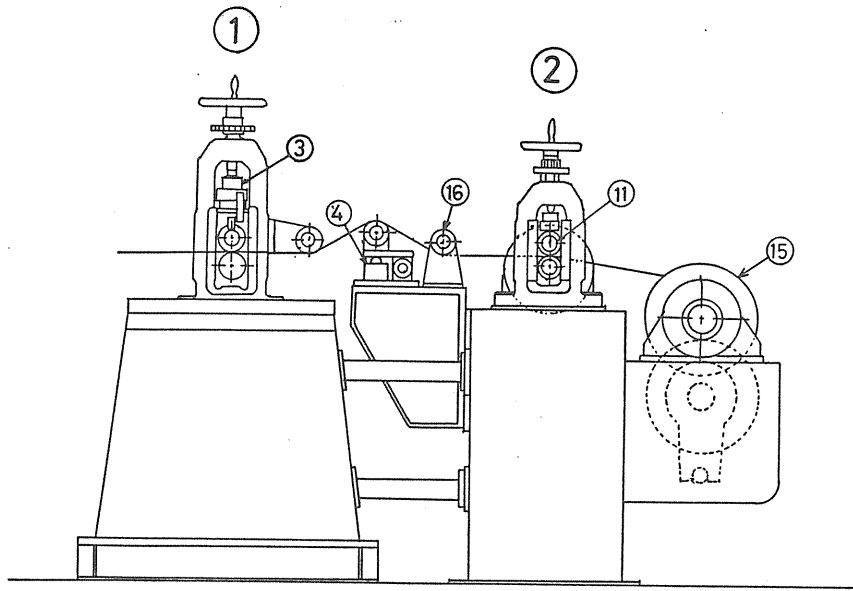


Fig.2.1 評価試験機の側面図

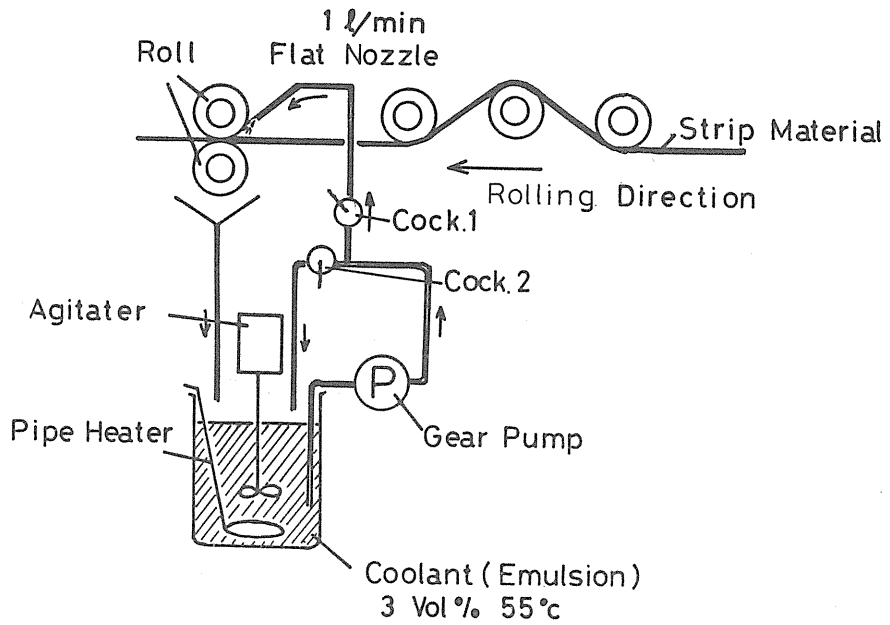


Fig.2.2 エマルション給油装置

まし調質材を用いた。その降伏応力は $18\text{kgf}/\text{mm}^2$ であり、コイル表面はブライト仕上げで、表面粗さは $R_{\text{max}}0.5\ \mu\text{m}$ であった。

実験条件は、押し込み荷重を 600kgf と一定にし、上ロール回転数を $50, 100, 150, 200$ 及び 250rpm の5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 $12, 24, 36, 48$ 及び $60\text{m}/\text{min}$ である。上ロールをNo.500のエメリ紙で研磨し、ベンジンで脱脂し、同一条件に於いて各5回の実験を行なった。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-Yレコーダに記録させた。

2.3.2 耐焼付き性

牛脂に 5% 乳化剤を添加した油を潤滑油として用いた。 3% 濃度のエマルションは、 55°C に保温され、毎分 $1\ \text{l}$ の量を上ロールとコイルの間に噴霧し、循環使用した。試験コイル材料は、潤滑性評価のときと同じ低炭素リムド鋼の焼なまし調質材を用いた。

実験条件は、上ロール速度を $12, 36, 60, 90, 120, 150$ 及び $180\text{m}/\text{min}$ 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なった。

2.4 実験結果及び考察

2.4.1 潤滑性

Fig.2.3 にTable 2.1 のNo.1~3の油をニートで潤滑し、圧下率を 5% と一定で実験したときの摩擦係数とロール速度との関係を示す。各点は、5回の実験値の平均である。各潤滑油ともロール速度が増加するにつれて摩擦係数は減少し、速度依存性を示している。

添加剤の影響として、油性向上剤オレイン酸を添加したNo.2油では、低ロール速度で基油（No.1油）との摩擦係数の差は大きい。高ロール速度になるにつれてその差は小さくなっている。ZnDTPを添加したNo.3油では、低、高ロール速度においても基油との摩擦係数の差は大きく、高ロール速度域で最も低い摩擦係数の値となった。また、このNo.3油の摩擦係数の速度依存性は、段階的に変化しており、添加したZnDTPが段階的に反応を起していると考えられる。これらの結果のように摩擦係数が速度に依存し、その依存性も各種潤滑油によって大きく異なることは、実操業時の潤滑性を評価するためには、この界

Table 2.1 使用した潤滑油

No.	基油	添加剤	配合比 重量比	粘度 50°CcSt
1	鉱物油		95: 0: 5	7.1
2	鉱物油	オレイン酸	85:10: 5	7.8
3	鉱物油	ZnDTP	93: 2: 5	7.3
4	合成エステル		95: 0: 5	6.8
5	牛脂		95: 0: 5	30.5

注) 配合比は基油：添加剤：乳化剤の順である。

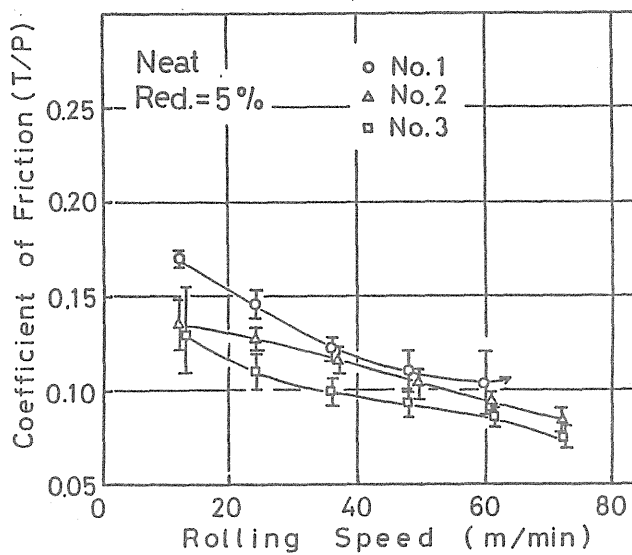


Fig.2.3 摩擦係数とロール速度の関係

面状況に対応した条件で評価できる試験機を用いる必要のあることを示している。

そこで、3種類の潤滑油の振り子試験機による摩擦係数をTable 2.2 に、パウデン試験機による摩擦係数とすべり回数との関係をFig.2.4 に示す。振り子試験は、室温（25℃）、負荷荷重 300gf（最大ヘルツ圧力：111kgf/mm）で行なった。パウデン試験は、50℃、負荷荷重 1 Kgf で行なった。

Fig.2.3 で得られた摩擦係数は、振り子試験機及びパウデン試験機で得られた摩擦係数とは異なっている。オレイン酸を添加したNo.2油は、低ロール速度では振り子試験機及びパウデン試験機の結果と同様添加による摩擦係数の低下が見られるが、高ロール速度になると摩擦係数の低下は見られない。ZnDTP を添加したNo.3油は、実験を行なった速度範囲に於いて摩擦係数が基油よりも低下しており、基礎的試験機の結果とは異なり大きな添加効果を示している。これらの差は、従来から言われているように基礎的試験機により実操業時の摩擦係数を評価できないことを示している。

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、その効果無くすためと考えられる。

ZnDTP の添加効果が評価試験機で表われた原因は次のように考えられる。振り子試験機及びパウデン試験機での摩擦面は、弾性的であり、その面積も小さいのに比べ、評価試験機の摩擦面では、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われる。この新生面とZnDTP との反応、摩擦面温度の上昇によるZnDTP の化学反応などが起こるため、添加効果が現われたと考えられる。その際、摩擦係数の速度依存性が段階状になるのは、ZnDTP の境界膜として作用する機構が摩擦面の特性及び温度により段階的に現われるからである。その機構として

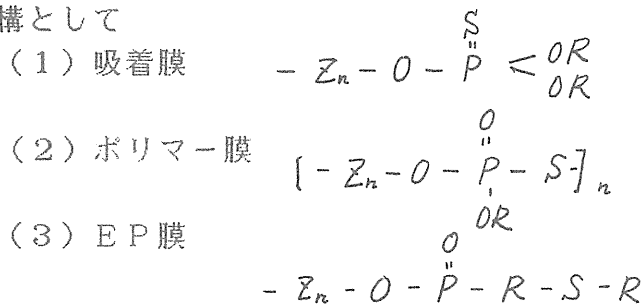


Table 2.2 振り子式試験機による摩擦係数

No.	LUBRICANTS	COEFFICIENT OF FRICTION*
1	PARAFFINIC BASE OIL	0.16
2	PARAFFINIC BASE OIL +10wt% OLEIC ACID	0.10
3	PARAFFINIC BASE OIL + 2 wt % Zn DTP	0.14

* Coefficients of friction were measured by the Soda pendulum type machine.

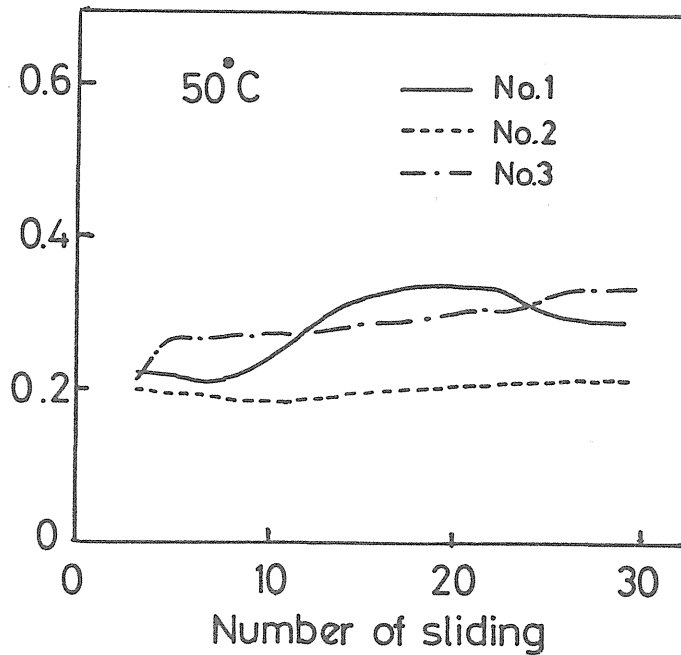


Fig. 2.4 バウデン試験機による摩擦係数とすべり回数との関係

の3段階が考えられている。Fig.2.3の摩擦係数の段階的変化は、後で述べる摩擦面温度から推察すると、ポリマー膜からEP膜への変化に対応することが考えられる。

これらの結果から、添加剤を含む潤滑油では、この評価試験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た。

次に、Table.2.1のNo.1, No.4及びNo.5の3種類の基油の摩擦係数とロール速度との関係をFig.2.5に示す。この実験での潤滑には、55℃、3%エマルジョンを用いた。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60m/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、鉱物油は大きく減少し、ロール速度60m/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、鉱物油、合成エステル、牛脂の順に低くなっており、この順位は基礎的試験機で得られた結果と一致している。

2.4.2 耐焼付き性

Fig.2.6にロール速度、圧下率の加工条件を変化させたときの張力の時間（圧延距離）変化の模式図を示す。潤滑油として牛脂の3%エマルジョンを用いた。ロール速度が低い場合、低圧下率で張力は圧延距離に対して一定であるが、高圧下率になると張力は圧延距離とともに増加した。高圧下率で焼付きが発生しても、その後の張力の増加率には大きな変化は見られなかった。ロール速度が高い場合、焼付きが発生すると張力の急激な増加が見られた。

これらの代表的な実験結果をFig.2.7, Fig.2.8及びFig.2.9に示す。Fig.2.7は低速、低圧下率、Fig.2.8は低速、高圧下率及びFig.2.9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のコイル表面の金属顕微鏡写真である。

Fig.2.7はFig.2.6のAの条件に相当し、摩擦係数は圧延距離に対して一定であり、①、②及び③の圧延距離に於ける表面写真もほとんど変化はなく、ロール研磨凹凸の条痕が観察されるだけである。

Fig.2.8はCの条件に相当し、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。①の圧延距離で焼付きを発生し、②、③、④と圧延距離の増加とともに焼付き面積が増加した。①の写真は、焼付きを発生した箇所である。②、③及び④の写真は、焼付いた箇所であり、

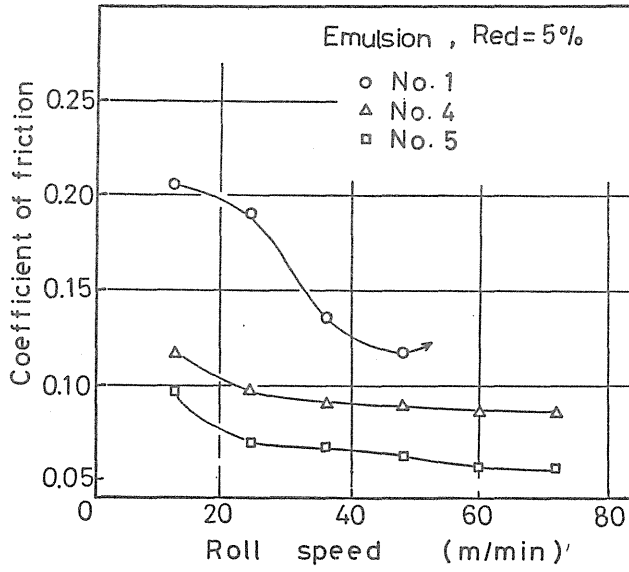


Fig.2.5 摩擦係数とロール速度の関係

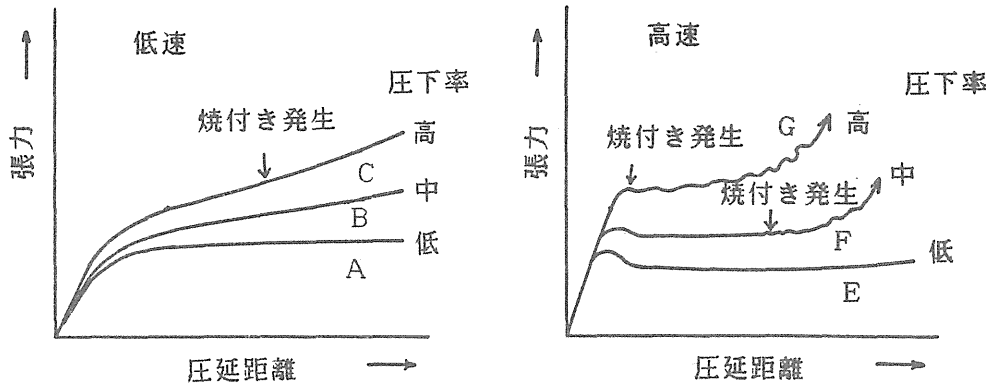
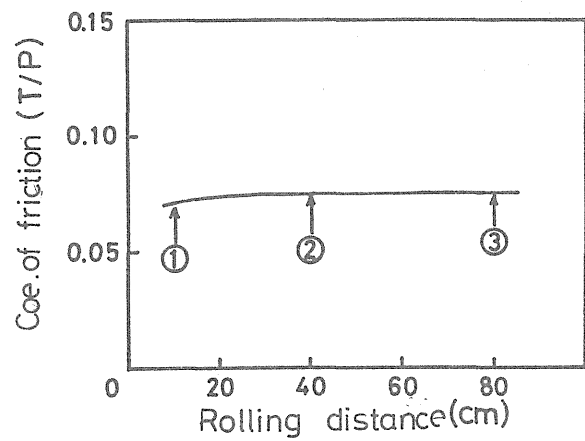


Fig.2.6 各種条件下における張力の経時変化



3% Emulsion
VR = 12m/min
Red = 6.8%

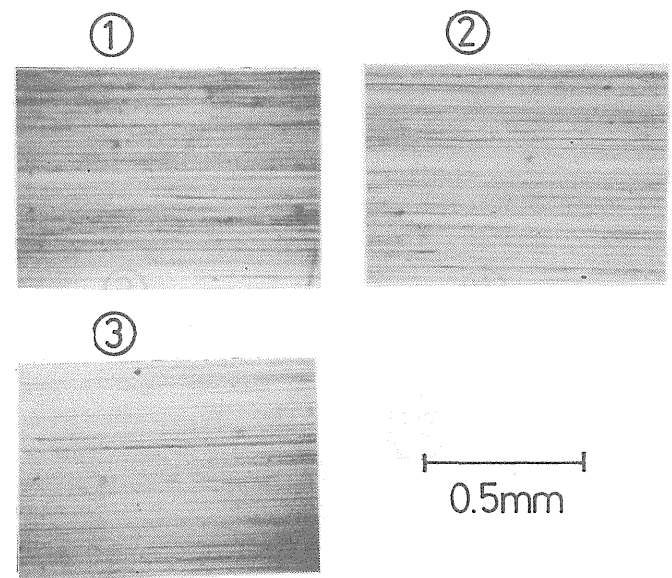
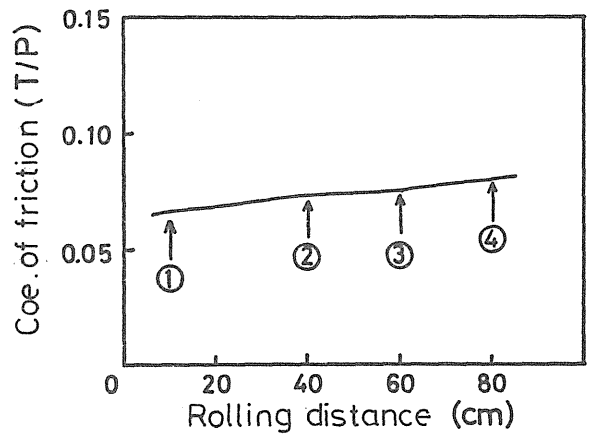


Fig.2.7 低速，低圧下率での摩擦係数と圧延距離の関係及び
コイル表面の金属顕微鏡写真



3% Emulsion
VR = 12 m/min
Red = 20.3%

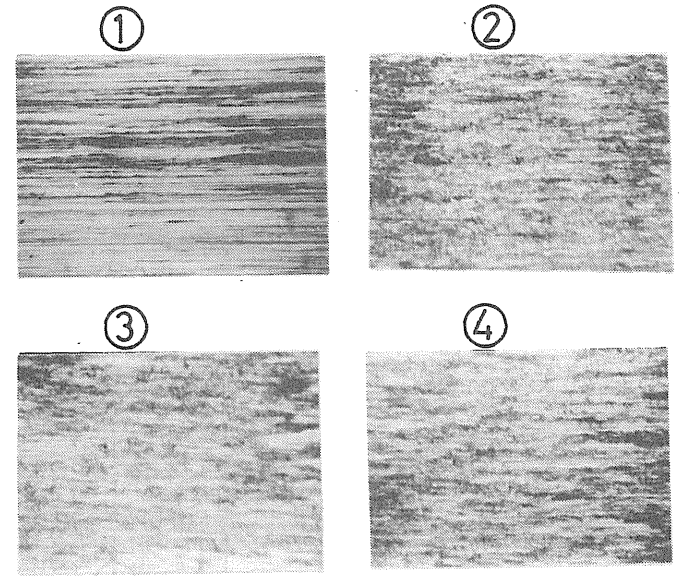
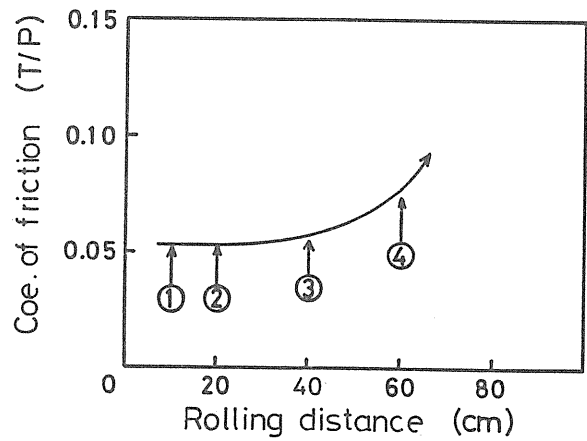


Fig.2.8 低速，高圧下率での摩擦係数と圧延距離の関係及び
コイル表面の金属顕微鏡写真



3% Emulsion
VR = 180m/min
Red = 7.2%

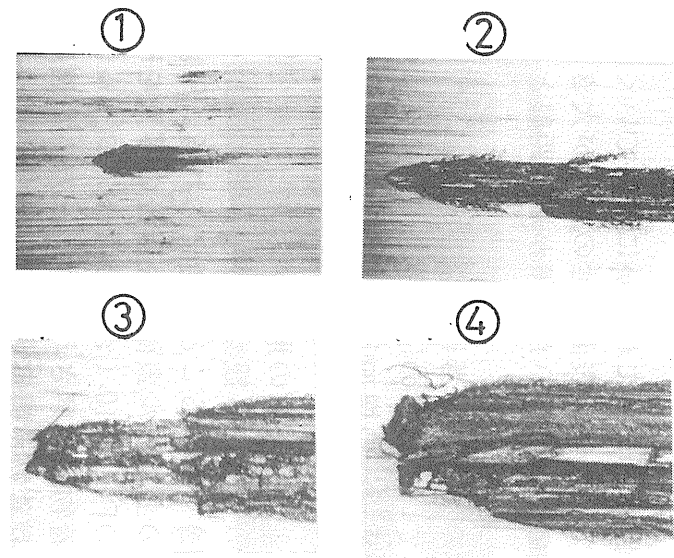


Fig.2.9 高速，中压下率での摩擦係数と圧延距離の関係及び
コイル表面の金属顕微鏡写真

その表面は圧延距離とともにわずかに荒れていくが、その状態はあまり大きく変化していない。表面状態の変化が大き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.2.9 はFの条件に相当し、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。①の圧延距離で写真に示す焼付きが発生し、②、③、④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。

圧延後のコイル表面の傷の形態が低速と高速で異なることがFig.2.8 及びFig.2.9 の写真から観察できる。この差から圧延後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.2.8 及びFig.2.9 の条件の圧延後の上ロール表面の脱脂後の写真をFig.2.10に示す。低速度、高圧下率のFig.2.10 (a)の場合、ロール表面は黒っぽくなり、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(b)の場合、明瞭な凝着物が観察される。

これらの結果から、焼付き発生 の判定基準 (○, △及び×印) をTable 2.3 のように決めた。完全に焼きついた状態 (×印) は、張力が急激に増加し、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が、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、圧延中の張力がゆるやかに増加し、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、凝着物は無く、荒れはほとんど観察されない。焼付きの無い状態 (○印) は、張力の増加は無く、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、圧下率を変化させたときの焼付きの判定を行なった。この結果をFig.2.11に示す。焼付きの発生 の無い領域A (○印) と完全に焼きついた領域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、その比較により行なう。

つぎに、Fig.2.11の焼付き領域Cの低速での領域C-Iと高速での焼付きC-IIにおける焼付き形態の差異について考察する。一般に、焼付きメカニズムは低速の場合冷間圧接メカニズム、高速の場合熱による凝着メカニズムと考えられている。

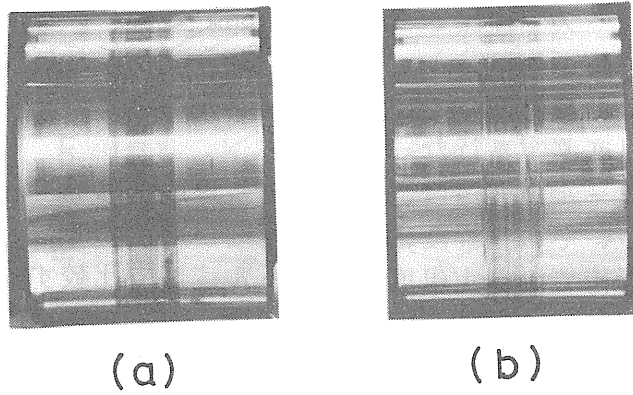


Fig.2.10 試験後の上ロールの表面写真

Table 2.3 焼付きの判定基準

評価 (記号)	試験片 外観 (目視)	上ロール 外観 (目視)	張力のチャート の変化
○	傷無し	凝着物無し	一定
△	小さな傷有り	凝着物無し	一定又はやや上昇
×	明瞭な傷有り	明瞭な荒れ又は凝着物有り	急激な上昇

そこで、各加工条件で圧延中の上ロール表面の温度測定を行なった。この結果をFig.2.12に示す。温度測定には、外径0.5mm のステンレス管のシースで保護された。径0.5mm 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な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、温度測定を行なった。

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。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。低速の焼付き形態を示した12,36 及び60m/min では、ロール表面温度は45,50,55℃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90,120及び150m/minでは、60℃とほぼ一定の値となっている。

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こり、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ないで、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ることができる。

更に、摩擦面温度を定量化にするため、Archard モデルを用いて計算した。幅2lの帯状の凸部を持った固体Aが、固定している固体Bの上を速度Vですべるとき、摩擦面での温度上昇 ΔT は

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

で現わされる。ここで、 μ は摩擦係数、 p_m は平均圧力、 K_A, K_B は固体A、Bの熱伝動率、 K_A は固体Aの熱伝導係数、 J は仕事当量である。ロールを固体A、コイル材料を固体Bと近似し、Fig.2.11に示した焼付き限界線 I 近傍での実験点の温度上昇を計算した。

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90m/min 以上ではほぼ一定の値が得られた。エマルション温度、上ロール及びコイル表面温度を考慮すると、90m/min 以上の焼付きを発生した摩擦面温度として180℃が得られた。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。

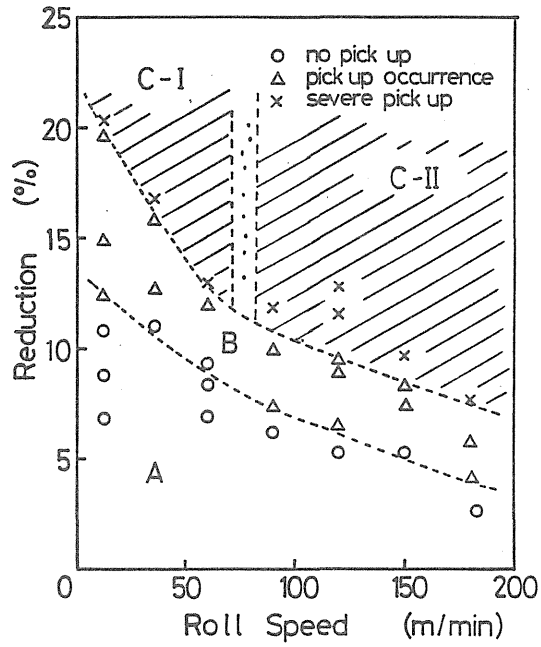


Fig.2.11 種々の加工条件下での焼付き発生状態

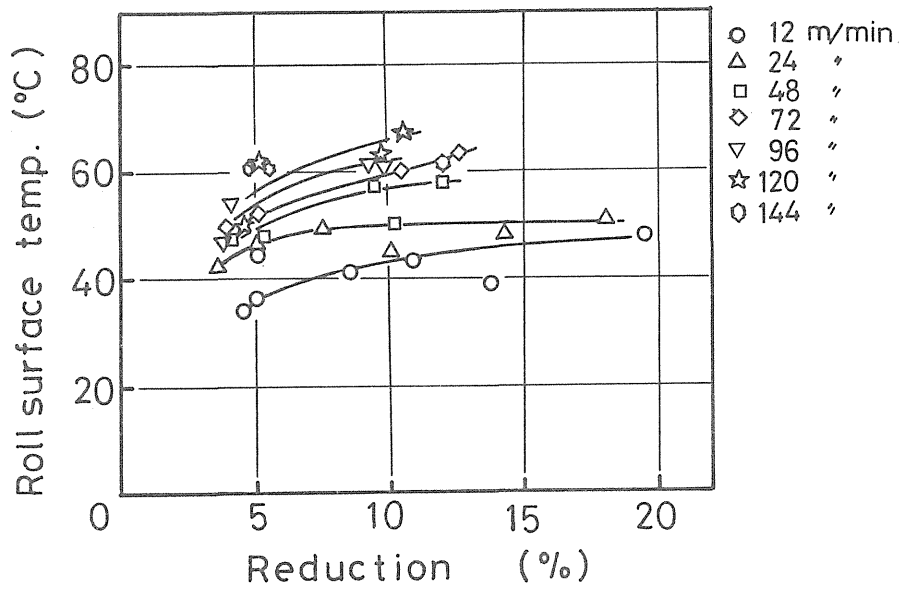


Fig.2.12 上ロール表面の測定温度

冷間圧延の実機で発生するヒートスクラッチ、ヒートストリーク、フリクションピックアップと呼ばれている焼付きも、熱を原因とする凝着メカニズムによるもので、界面温度がある一定温度を超えると発生することが理解できる。ロール速度60m/min以下では、潤滑油の転移温度より低い摩擦面温度でも焼付きを発生しており、冷間圧接メカニズムによる焼付きと言える。

2.5 まとめ

新たに開発した冷延用潤滑油評価試験機を用い、摩擦係数による潤滑性の評価及び耐焼付き性の評価について検討し、次の結論を得た。

(1) 潤滑性を評価するための摩擦係数には大きな速度依存性があり、実操業での摩擦係数を評価するためには、実機の界面状況に対応する条件が可能な試験機で行なう必要がある。

(2) 評価試験機により焼付き限界の加工条件を明らかにすることができた。発生した焼付きには二つの形態があり、低速では冷間圧接メカニズム、高速では凝着メカニズムによることがわかった。また、高速での焼付きは摩擦界面温度がある一定温度を超えると生じた。

3. 評価試験機の改造と耐ロール摩耗性の評価

3. 1 はじめに

最近の冷間圧延は、高速強圧下化、高負荷、連続化の傾向にあり、圧延用ロールの性能向上が望まれている。特に、アルミキルド連鑄材の圧延により生じるロールの表面粗さの早期低下現象についての問題がクローズアップされてきている。そこで、冷間圧延用ロールの摩耗について研究するために、開発した評価試験機の改造を行なった。本章では、試験機の改造とこの試験機による耐ロール摩耗性の評価について述べる。

3. 2 評価試験機の改造

従来の潤滑性及び耐焼付き性の評価方法においては主スタンドで圧延される材料長さは80cmであったが、Fig.3.1 に示す様な本体圧延機の前方に巻取り部を増設することにより、連続100mのコイル圧延が可能となった。Fig.3.2 に全体の平面図を示す。巻取り部⑯は、22KWACモーター⑰によりトルク制御され、最大巻取り張力200kgfが可能である。またそのときの最大巻取り速度は500m/minである。張力は、ロードセル⑱により測定される。

3. 3 耐ロール摩耗性の評価方法

3. 3. 1 評価試験方法

主スタンドの上ロールを研磨、脱脂し、試験コイルをFig.3.1 のようにセットする。副スタンドで圧延されたコイルが、さらに主スタンドで所定の圧下を受け、コイラーに巻取られる。副スタンドの上下ロール速度は、主スタンドの上ロール速度の1/10であるので、主スタンドではコイル速度の10倍で上ロールが回転することになる。下ロールは従動状態にある。試験潤滑油は、エマルションの場合上ロール入側へノズル噴射する。主スタンドでの圧下率、上ロール速度を変化させ圧延を行なう。所定のコイル長さ圧延後、上ロールを取り外し、その表面プロフィールを触針式表面粗さ計で測定し、プロフィールの変化よりロール摩耗を調べる。

3. 3. 2 実験方法

試験用コイルは板厚0.4mm、板幅15mmの低炭素アルミキルド銅である。上ロールの材質はSUJ-2で、No.240のエメリー紙で研磨した。圧

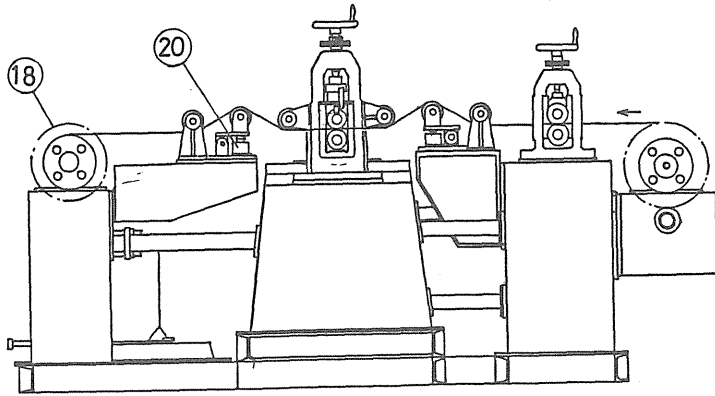


Fig.3.1 改造した評価試験機の側面図

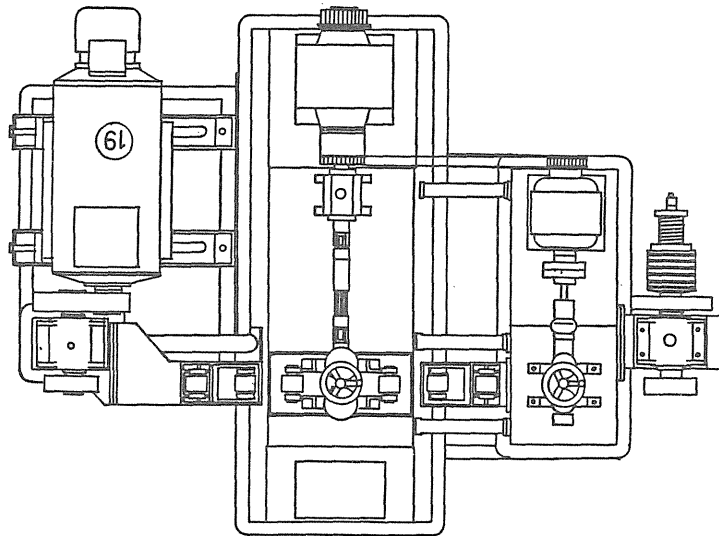


Fig.3.2 改造した評価試験機の平面図

下率5%，上ロール速度60m/minで所定のコイル長さまで圧延した。試験潤滑油は、3%，55℃の牛脂エマルジョンで、1L/min給油した。

3.3.3 実験結果

試験コイル長さ0,300,1000m圧延後の上ロール表面のプロフィールをFig.3.3に示す。プロフィールは上ロール表面の同じ箇所を注意深く測定した。コイル長さの約10倍の長さが上ロールの走行距離になる。1km圧延後、上ロールは約 R_{max} 0.1 μm 減少した。その詳細をFig.3.4に示す。その結果から、走行距離を増加させることにより、実機でのロール摩耗を検討することができる。

3.4 まとめ

評価試験機に巻取り部を増設することにより、連続のコイル圧延が可能となり、試験機の実用化が可能となった。

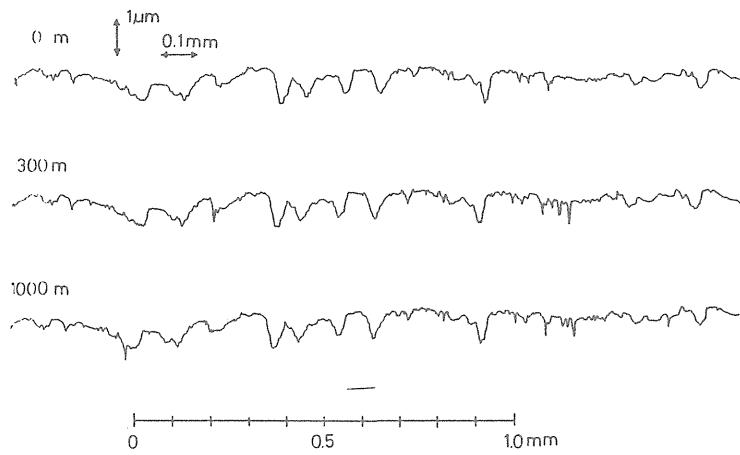


Fig.3.3 試験後の上ロール表面のプロフィール

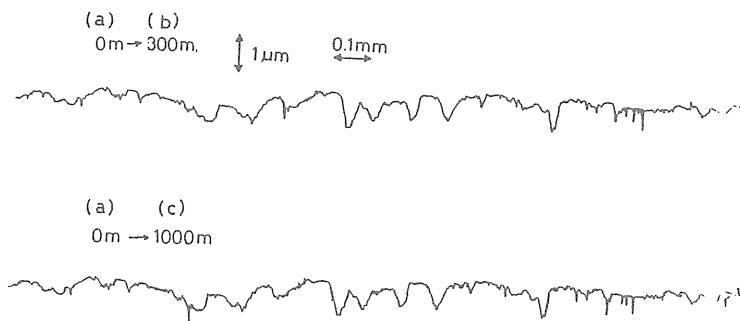


Fig.3.4 プロフィールの詳細図

参考資料

- 1) 曾田範宗：日本機械学会誌，62-489(1959),146.
- 2) 河合望，中村保：塑性と加工，11-118(1970),798.
- 3) 河合望：同上，20-227(1979),1055.
- 4) 小豆島明：日本機械学会誌，84-756(1981),1205.
- 5) 木原諄二：鉄と鋼，69-16(1983),2024.
- 6) 工藤英明，曾田長一郎：塑性と加工，13-141(1972),729.
- 7) 佐伯邦夫，橋本有司：同上，6-55(1965),439.
- 8) 小豆島明，宮川松男：同上，25-285(1984),915.
- 9) 岡本豊彦，河野輝雄，永井博司：22回塑加連講論，(1971),25.
- 10) 鏑田征雄，磯辺邦夫，中川吉左衛門：23回塑加連講論，(1972) 355.
- 11) 五弓勇雄，木原諄二，小豆島明：塑性と加工，15-160(1974), 400.
- 12) 中島浩衛，柴田嘉基，上堀雄司：昭51春塑加連講論，(1976), 29.
- 13) 左海哲夫，齊藤好弘，加藤健三：塑性と加工，19-214(1978), 972.
- 14) 間瀬俊郎，山本秀男，西野隆夫：潤滑，27-8(1982),552.
- 15) 伊藤紘一，北村邦雄：同上，27-8(1982),559.
- 16) 田村裕保，細野弘夫，戸口一男，小林義弘：昭54春塑加講論，(1979),387.
- 17) 広瀬敏光，飯野光明，藤原辰夫，金森英夫，衣松余香，原重雄，中村真三：30回塑加連講論，(1979),61.
- 18) 鉄鋼材料の摩耗部会編，”鉄鋼材料の摩耗”(1984)，日本鉄鋼協会