

# 論文 連続引抜圧延法による鋼板の冷間圧延油の評価

木 原 諄 二\*

## An Evaluation Method of the Lubricity of Rolling Oils for Cold Strip Mill

Junji KIHARA

### Synopsis :

A passive mill which was made originally for testing lubricants in aluminum cold rolling is reformed to a more powerful one suitable to the tester of lubricants in cold rolling of steel strips. In the tester, tribological conditions, i.e., rolling load, circumferential velocity of roll, exit strip velocity and so on can be varied independently. With use of the tester, are tested five sorts of lubricants modelling the actual lubricants in practice. After the course of experiments, it is found that almost all lubrication properties in practice are able to be reproduced in the tester, and the classification of grade of each lubricant is easy with use of the tester.

### 1. はじめに

低炭素鋼板の冷間圧延における潤滑は、(1)加工動力の低減、(2)ロール表面性状の維持、(3)製品表面性状の管理などの面で、重要視されるべきである。とくに近年、圧延速度の増大、ゲージ厚の減少に伴う高圧下力など、焼付きなど疵発生の問題との関連でより深く研究することが求められている。

筆者は、実験室において低炭素鋼板の冷間圧延における潤滑の研究を行うため、高速圧延機を設置して、冷間圧延における摩擦係数の評価、焼付き疵の再現及び潤滑剤の境界潤滑性の役割などについて一連の研究を行つて来た<sup>1)2)</sup>。筆者は、短い単板による圧延実験では、速度条件では現場の圧延条件を再現することができても、定常的な条件を再現するためには、かなり長大な試料を圧延しつづけることが必要であるという見地から、小型の高速ロール引き抜き装置(以下パッシブミルと呼ぶ)を考案製作し、アルミニウムストリップの冷間圧延の再現について研究し、単板による研究以上の成果が上がることを確認した<sup>3)</sup>。しかし、当初の装置は、速度が1000 m/minの一速だけで圧下力が計測できず、また、引き抜き力の容量も小さい構造であつたために、低炭素鋼の冷間圧延潤滑試験装置として使用することができなかつた。

今回、筆者はパッシブミルにいくつかの改造を施し、低炭素鋼の冷間圧延潤滑試験装置として使用できるようにし、冷間圧延潤滑試験装置として具備しなければならない条件をどこまで満たしているかを検討したので報告

する。

### 2. 潤滑試験機としての評価について

一般の潤滑試験ではその試験固有の指標を潤滑油の成績評価、潤滑システムの成績評価及び工具や材料の潤滑に対する適性評価の基準としている。しかし、圧延潤滑をめぐる潤滑油の評価、潤滑システムの評価、ロール材の評価に関しては、実機における潤滑状況にある程度試験機においてモデル化し得る試験装置を考案した上で行うべきである。1章で述べたように、圧延機を圧延潤滑試験機として用いたとしても、圧延状況の定常性といった問題に関して十分実機における圧延状況をモデル化することはできない。また、実機における圧延状況自体も多様である。タンデムフィニッシャーの各スタンドをとつてみても、ハードウェアの条件も異なり、また最終スタンドのようにミルクリー性を考慮して温水のみ供給というような潤滑状況の場合もある。研究する側としては、このような幅の広い圧延潤滑状況をモデル化し得る試験機をつくり、その試験結果から潤滑状況を評価する指標も探り出せるような手段を得るように努力することが必要である。その意味で、本研究ではパッシブミルはそのような可能性をもっているか否かを検討しているのである。

次に潤滑試験における評価をめぐる問題点には、たとえば、潤滑剤の圧延性を実機に適用する前に調査するという例を挙げて述べると、次のようなことが言える。例えば、ある試験法では鉱油のみの潤滑剤と、十分な種類と量の添加剤を含んだ油との間に際立つた成績の

昭和 58 年 2 月 22 日受付 (Received Feb. 22, 1983)

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

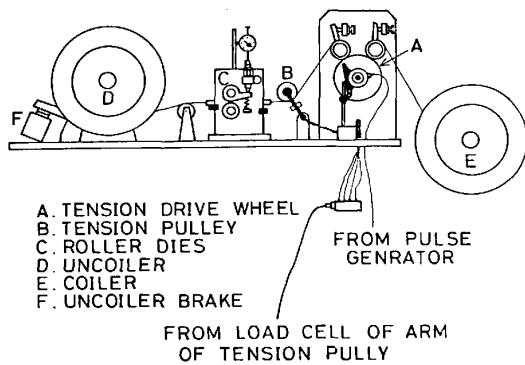


Fig. 1. A schematical representation of the passive mill.

差は出るが、実機での使用実績が微妙に異なる二種の油の差を見出すことができないということもある。試験の条件が厳しすぎても、逆にゆるすぎても、すべての油の成績に差を見出すことができない。そこで、試験機は、試験条件の厳しさを実際の圧延条件をモデルにして変化させることができ、また、その試験条件に、各潤滑剤がどのような成績をあげるかという全体的な変化の中から各潤滑剤の特性や特長をとらえることのできるものが望ましい。

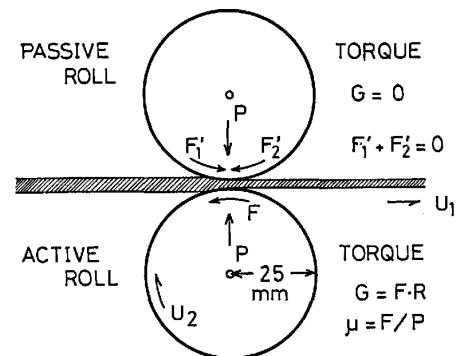
本研究の対象であるパッシブミルが上に述べたような試験機であるか否かは、いくつかの潤滑特性の異なる潤滑剤による試験を行って、確かめる必要がある。

### 3. パッシブミルの改造の要点

改造前のパッシブミルは、その概念図を Fig. 1 に示す<sup>3)</sup>。主として、アンコイラーとコイラーとを備えた、カム圧下機構を有するローラーダイスとみなすことができる。ローラーダイスとコイラーとの間に張力測定機構および引き抜き力追加機構を有している。アンコイラーとコイラーには、内径 200 mm、外径 400 mm、幅 15 mm のリボン状ストリップのコイルを装入することができる。ストリップの板厚を  $t$  mm とすると (94.2 m/t) m の長さのコイルとなる。張力の測定は、ストリップの方を 120° 変更するとき、この方向変更の角を二等分する方向で変更点を支持するのに必要な荷重がストリップに作用する張力に等しいことを利用して、方向変換プーリー (Fig. 1. B) を介して同プーリーの支持部にかかる張力によりモニターする。引き抜き力は約 3/4 回転だけ直径 200 mm の駆動プーリーに巻き付け、プーリーと材料との摩擦力によつて材料を引き抜くことになっている。コイラーはプーリーとスリップ機構を介して連動し、ストリップの装入する速度と同調して巻き取りをつづけるようにした。動力は 30 kW の誘導電動機で駆動

プーリーに直結でプーリーを周速 1000 m/min で回転させる。引き抜き速度は 1000 m/min で、圧下はカム機構による圧下量で制御した。

以上の仕様のパッシブミルはアルミニウム、アルミニウム合金の冷間圧延潤滑の実機対応実験には満足できる結果を与え得たが<sup>3)</sup>、鋼板の冷間圧延潤滑に対してはいくつかの難点があつた。アルミニウムの実験において実験開始時と終了時とでは数%の圧下率の増大が認められ、これはロールの熱膨張と結論された。鋼板の場合、熱の発生がより大きいことが予想されたので、圧下機構を圧下力一定になるように油圧ジャッキによる方法に変更した。次に、圧延速度を実機対応させる件について検討したところ、実機圧延条件における圧延速度は、温度、流入油量を支配し、また圧延の動力学に基づいて入側の後進相対速度を支配する。従来 of 圧延潤滑の研究報告を集録し検討した結果<sup>2)</sup>、実験室において流入油量とロールと材料との間の相対すべり速度との二つの因子の役割を検討するためには、引き抜き速度を可変にすること及び、Fig. 2 に示すように下ロールと材料との相対速度を可変にすることの二つが必要であると判断して、改造を行つた。すなわち、下ローラーを駆動ロールにし、トルク測定装置を介して、リングコーンモーターにより一定速で回転させ、出側における板とロールとの間の相対速度を可変にした。次に、引き抜き速度を可変にするため、容量 18 kW のトランジスタインバータを電源に使用し電動機の回転数を 150 rpm~1500 rpm の間可変とし、更に電動機と駆動プーリー (Fig. 1. A) の軸との間に 1 対 1 及び 1 対 3 のメカニカルクラッチを入れて、33.3 m/min~1000 m/min の引き抜き速度を無



Material of the Rolls : Fe-Cr-Mo  
 Cr : 2.5%  
 Mo : 0.5%  
 C : 1.0%  
 HS = 90

$F, F'_1$  &  $F'_2$  : Frictional source  $F$  : Rolling load  
 $R$  : Radius of the roll,  $G$  : Rolling torque  
 $\mu$  : Frictional coefficient,  $U_1 > U_2$

Fig. 2. A schematical representation of the relation between a drawing speed  $U_1$  and a rolling speed  $U_2$ .

段変速で得られるようにした。この結果、下ロールに逆トルクが発生し、引き抜き負荷が改造前より上昇する可能性が生じたので、駆動プーリーを二連化し、さらに、コイラーを駆動プーリーの軸から電磁パウダークラッチを介して連動するようにして、引き抜き力の容量を大きくした。なお、駆動プーリーの材料との接触面には硬質ゴムを張つて、このプーリーにおけるすべり疵の発生を防止するようにした。この結果、本試験機による圧延速度及び出側における板と下ロールとの相対速度の試験範囲は Fig. 3 に示すものとなつた。また下ロールに作用するトルクの測定から、下ロールが完全に接触弧全長にわたつて板より遅れる条件の下では、平均摩擦係数が、Fig. 2 によつて示されるごとく求められる。すなわち、接触角の余弦をほぼ1と仮定して

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

$\mu$  : 摩擦係数,  $G$  : 下ロールトルク,  $P$  : 圧下力,  
 $R$  : 下ロールの半径

4. 試験に使用した潤滑剤について

現在、実機で使用されている鉱油系の潤滑剤のモデルとして5種類の潤滑剤を作製した。その成分を Table 1 に示す。 $\alpha$  はパラフィン系鉱油を乳化するもの、 $\beta$  から  $\delta$  は Table 1 に示すようにオレイン酸及びトリオクチルホスフェートを添加したもの、 $\epsilon$  は基油に  $\alpha$  より  $37.8^\circ\text{C}$  粘度は低い粘度の温度指数の大きい合成エステルであるオクチルステアレートを用いオレイン酸とトリオクチルホスフェートを添加したものである。

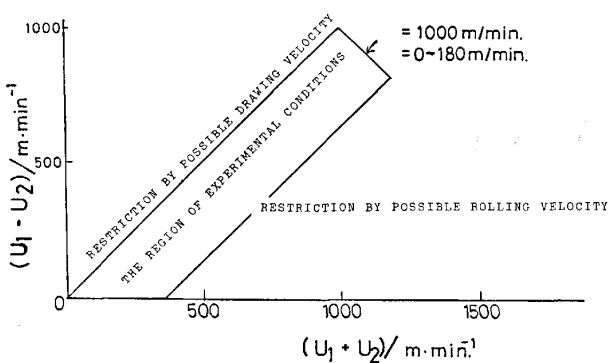


Fig. 3. The region where one can find a experimental condition.

Table 1. The composition of lubricants (% : wt%).

spec.	comp.	Base Oil	Additive 1	Additive 2	Emulsifier
$\alpha$		Paraffinic Oil*	—	—	9 Oxiethylene Nonionyl
$\beta$		"	Oleic Acid 5%	—	Phenyl·Ether
$\gamma$		"	—	3 Octyl·Phosphate 5%	5%
$\delta$		"	Oleic Acid 5%	"	"
$\epsilon$		Octyl Stearate**	"	"	"

\* 30 cSt at  $37.8^\circ\text{C}$  \*\* 12.8 cSt at  $37.8^\circ\text{C}$

用いたりん酸エステルはフルエステルである。フルエステルは焼付き、すなわちフリクションピックアップの生ずるような場合にはアクティブホスフェートと同様に効果のあることが知られている<sup>4)</sup>ので、潤滑剤を実際に活用する場合の保守や状態の管理を含めて問題のないフルエステルであるトリオクチルホスフェートを選択した。

乳化剤は非イオン系のノニルフェニルエーテルで、これは分子中の連鎖する-(CHOH)-鎖の数の大小によつて乳化保持力が変化する。本試験においては乳化粒子径が  $60^\circ\text{C}$  で  $2\mu$  となるように-(CHOH)-鎖の長さが9単位のものを選んだ。硬い乳化状況をねらい流入油量を絞り、潤滑剤の境界潤滑特性が試験結果に反映されるようにした。またこの乳化剤の境界潤滑性はほとんど無視し得る。またたとえそれが存在し得たとしても、オレイン酸やホスフェートの境界潤滑性に比して十分小さく無視し得る<sup>4)</sup>。

5. 実験方法

5.1 潤滑剤の供給

潤滑剤は5 lのステンレス製のフラスコ中に2 wt%の濃度になるよう、3 lの水道水と混合され、投げこみヒーターと100Wのスタラーによつて  $60^\circ\text{C}$  に保ち攪拌される。これを3 l/minのギアポンプで送り出し、途中9:1に分流して、9割はフラスコに直接還流させ、残りの1割が下ロールとストリップとの入側に供給される。

いくつかの予備実験により、下ロールとストリップへの供給量が1 l/min以上になると冷却が十分行われ、この場合はストリップの単位面積当たりの供給クーラント量としても、現場の状況を一桁以上上回ることもあり、焼付きのような潤滑欠陥がほとんど生じないことが確かめられたので、上述のような分流を行つて供給クーラント量として適切な大きさに制御した。また、プレートアウトなどの面で供給クーラント量が大きくなると、潤滑が流体潤滑的になつて、とくに潤滑剤の化学的性質が潤滑状況に反映する境界潤滑条件を実現できなくなるので、この潤滑剤の供給量の制御は重要である。

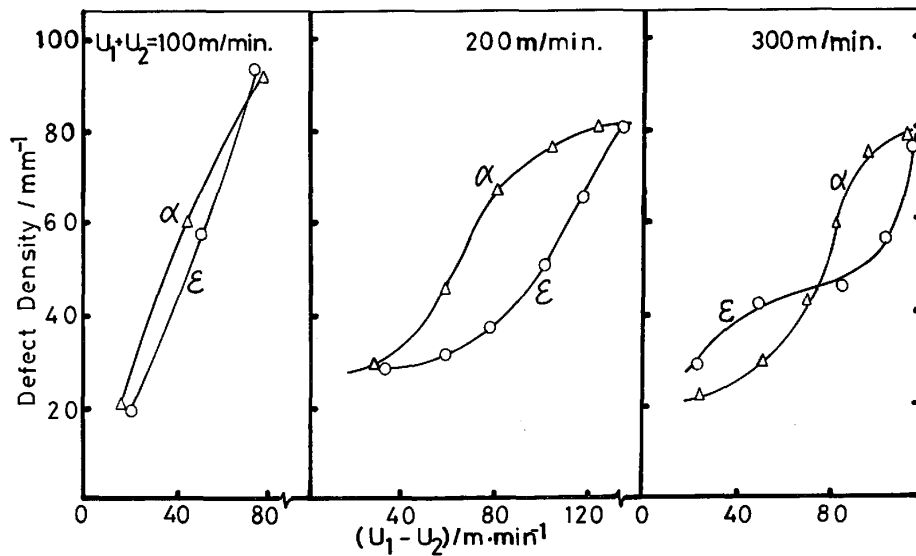


Fig. 4. The defect density, which is the number of defects per unit length across the width, and the testing conditions.

### 5.2 測定

圧延荷重は圧下装置の油圧ジャッキで設定し、すべての実験において2.5 tonfとなるようにし、それをパッシブミルのロードセルでモニターした。下ロールにかかるトルクは駆動軸に設けたトルクメータにより測定した。引き抜き力はストリップの方向変換プーリーの支持腕につけたロードセルにより測定した。

圧延したストリップをコイルから採取し、倍率150の光学顕微鏡下で、板幅方向の単位長さ当たり、圧延方向に走るマークが何個存在するかを、3 mmにわたる計測を5回行いその結果を平均して求めることとした。このマークがロール表面のプリントによるのか、焼け疵によるのかは識別せず、すべてを勘定した。

## 6. 実験

### 6.1 試験条件と試験結果について

下ロールの材質と硬度は Fig. 2 の右の部分に示した。下ロールの表面は #600 のエメリーペーパーで研磨し、最大粗さで  $0.4 \mu$  とし、圧延する材料の表面はいわゆるブライト仕上げであった。圧延材は SPCC 焼鈍材である。

圧延条件は荷重 2.5 tonf、引き抜き速度  $U_1$  と下ロールの周速  $U_2$  との和が 100 m/min、200 m/min 及び 300 m/min の三水準で、 $U_1 - U_2$  の大きさをそれぞれ数段階変化させることとした。すなわち、流体潤滑理論に基づけば<sup>2)</sup>  $U_1 + U_2$  の値が大であるほど、この速度範囲では流入油量が増大し、一方、摩擦発熱などの面から言えば  $U_1 - U_2$  が大であるほど潤滑条件が過酷になる。

この実験の目的は潤滑剤として最も単純な  $\alpha$  と、潤滑剤の境界潤滑性から見てかなりぜい沢な組成である  $\epsilon$  とを試験し、パッシブミルによる潤滑性評価のいわば分解能を検討し、さらに上に述べた  $U_1 + U_2$  値と  $U_1 - U_2$  値の潤滑特性への影響について調べることである。

Fig. 4 に  $U_1 + U_2$  を3段階変化させ、 $U_1 - U_2$  を大きくしていった時、単位長さ当たりの欠陥発生数がどのように変化するかを示す。 $U_1 + U_2$  が 100 m/min の時は、 $\alpha$  と  $\epsilon$  との間にほとんど相異が現れていない。これは、試験条件が苛酷すぎるというケースに当てはまると思われる。また  $\alpha$  にとっては流入油量が小さく、かつ  $\alpha$  には金属と反応して潤滑膜を形成する添加剤がないので境界潤滑性に乏しく欠陥発生が  $U_1 - U_2$  の増大とともに急に生じはじめるのであり、 $\epsilon$  にとっては  $\alpha$  より粘度が低いことさらに流入油量が小さくなるため、添加剤もロールギャップに入らず潤滑に関与できなかつたともいうことができる。本機を使用することにより潤滑剤の粘性と境界潤滑性を考慮することと併せて、潤滑機構に立脚した検討をなし得るといえる。

$U_1 + U_2$  が 200 m/min になると、 $\alpha$  と  $\epsilon$  との潤滑挙動の優劣がはつきり現れて来る。すなわち、 $\epsilon$  は欠陥発生が大きくなる  $U_1 - U_2$  値が  $\alpha$  に比べてかなり大きくなることから分かる。このような条件では少なくとも  $\alpha$  と  $\epsilon$  の二つの潤滑剤の性能を分別することができる。

$U_1 + U_2$  が 300 m/min になると  $U_1 - U_2$  が小さい場合  $\alpha$  の方が欠陥発生が少ないことが分かる。そして、 $U_1 - U_2$  が増大するにつれて、 $\alpha$  の欠陥発生が大きくなり、ついに  $\epsilon$  を抜いてしまう。これは、 $\alpha$  の方が粘度が

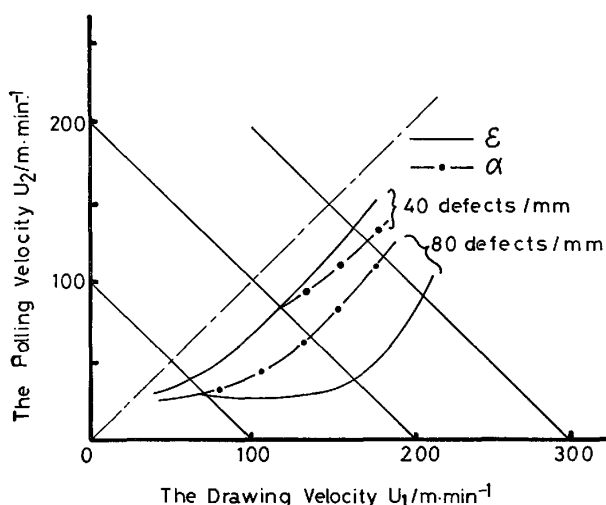


Fig. 5. The equi-density lines of defects for  $\alpha$  &  $\epsilon$  lubricants in  $U_1-U_2$  Plane.

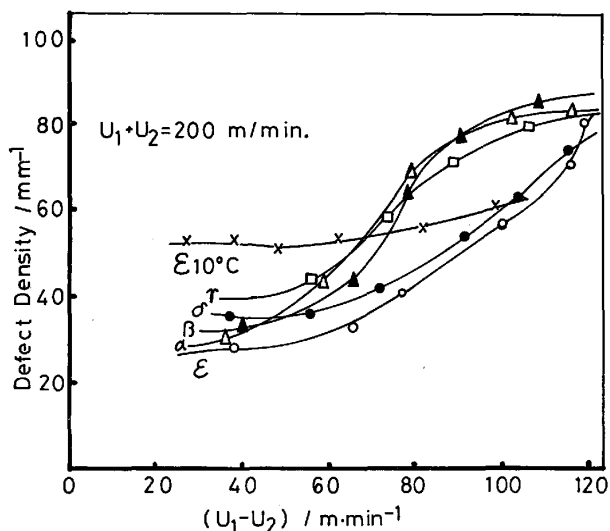


Fig. 6. The lubrication behaviors of the tested lubricants at  $(U_1+U_2)=200$  m/min and  $60^\circ\text{C}$  of the emulsion temperature except for  $\epsilon$   $10^\circ\text{C}$ .

大きいために  $\epsilon$  に比し  $U_1+U_2$  が  $300$  m/min で流体潤滑状況に近くなるのでロールと板との接触面における固体接触の頻度が少なくなることによる。しかし、 $U_1-U_2$  が大きくなると摩擦条件が苛酷になり接触において欠陥が発生する確率が上がるため、結果として接触頻度は少なくとも欠陥発生数が大きくなるのである。それに反して粘度の低い  $\epsilon$  は流入油量が小さいため固体接触の頻度が大きく  $U_1-U_2$  が小さくてもある程度の欠陥が発生するが、固体接触において欠陥の発生する確率が小さいので、また  $U_1-U_2$  が大きくなつてもそれが大きくなるので、結果として欠陥発生数の増大が抑えられるのである。

次に以上の結果を Fig. 5 に  $U_1$  と  $U_2$  とをそれぞれ

横軸と縦軸とにとり、欠陥発生数を書き込むマップとして示してみた。欠陥発生数  $40/\text{mm}$  と  $80/\text{mm}$  の線で囲まれる面積は、 $\alpha$  に比し  $\epsilon$  が大きいことは上の結果からも当然である。この欠陥発生数  $40/\text{mm}$  というのは  $\alpha$  と  $\epsilon$  とであまり違いはなく、また、 $U_1+U_2=200$  m/min と  $U_1+U_2=300$  m/min における  $\epsilon$  の場合の立ち上がり前の欠陥発生数のレベルである。これは測定において視野に認められる圧延方向のすじは何であれ種類を識別することなく数えることにしたので、ロールの突起やゴミによる単なる引つかき疵によるものも数えていると思われる、いわば測定値のグラウンドレベルと評価し得るものと考えることができる。

以上を要するに、本パンプミルによる潤滑特性の試験においては、評価は  $200$  m/min 以上の  $U_1+U_2$  を設定し  $U_1-U_2$  に対する欠陥発生状況により特性を判定するか、 $U_1$  と  $U_2$  とを縦軸及び横軸にとつたマップ上で欠陥発生数の等高線の広がりから判定することも良いといえる。また、本節で述べたところからわかるように、潤滑油の挙動に関しては実機をうまくシミュレートしていると考えることができる。

## 6.2 潤滑剤の潤滑特性の比較について

前節の結果を基礎にして、Table 1 に示した 5 種の潤滑剤の試験を行つた。試験法は  $U_1+U_2=200$  m/min とし  $U_1-U_2$  に対して欠陥発生数がどのように変化するかを調べる方法に拠つた。なお、攪拌槽におけるエマルジョンの温度は  $60^\circ\text{C}$  としたが、 $\epsilon$  については 1 シリーズの実験を手違いで  $10^\circ\text{C}$  で行つたので、この潤滑剤については  $10^\circ\text{C}$  と  $60^\circ\text{C}$  のデータを得ることができた。そのため、潤滑剤の潤滑挙動について参考となるべき情報を得ることができた。Fig. 6 に  $\alpha$  から  $\epsilon$  の各潤滑剤に関して得た欠陥発生数と  $U_1-U_2$  との関係を示す。この場合は、 $\alpha$  から  $\gamma$  までの 3 種の油については優劣はみとめられなかつた。 $\alpha$  に、脂肪酸とホスフェートの両方を添加した場合にのみ、 $\epsilon$  と同等の潤滑性能が得られることがわかつた。

脂肪酸とホスフェートを同時に添加すると、脂肪酸によつてホスフェートの添加効果がおおわれてしまうという問題も報告されている<sup>2)</sup>。しかし、そのその場合は板温が高く、また、材料の変形抵抗も大きい場合であり、本試験はそれと比べてかなり緩やかな圧延のケースにあたると考えられる。さらに、添加した脂肪酸であるオレイン酸は鉄鋼の圧延においてはそれ程強力な油性向上剤ではない<sup>2)</sup>。またホスフェートもフルエステルであるので活性が小さく、したがつてオレイン酸と併用されて始めて効果があらわれたと考えられる。本試験機により、

添加剤の添加効果に対して幅広い条件をセットすれば、実機に対応する潤滑挙動をシミュレートすることができる。

10°C の  $\varepsilon$  のエマルジョンによる潤滑においては、欠陥発生数が  $U_1-U_2$  の小さい時から多くなつたが、途中で  $\alpha$  から  $\gamma$  までの潤滑剤の欠陥発生数を下回り、 $\varepsilon$  と  $\delta$  の欠陥発生数のクリティカルなレベルで  $\varepsilon$  と  $\delta$  の 60°C の場合と一致した。これは低温のためプレートアウト性が悪く、供給油量が少ないため、固体接触点が多くなつたために、はじめからロールマークが多く転写されたものと思われる。しかし、潤滑剤のエマルジョンの温度が低いため焼付きは起こり難く、 $U_1-U_2$  が大きくなつても欠陥発生数はほとんど増加しなかつたものと考えることができる。

## 7. ま と め

パッシブミルを鋼板の冷間圧延潤滑の試験をすることができるように改良した。本試験機を使用して、潤滑特性の異なる潤滑剤を試験したところ、実機と対応して潤

滑状況とモデル化できることを示すような試験結果を得た。

今後、実機における潤滑状況をよく調査し、潤滑条件について詳細な検討を加えた結果に基づいて、本機により各種潤滑剤の潤滑性能の比較試験、ロール材質の試験さらにロール摩耗と圧延板材の材質との関係の調査などを行うことができる。

おわりに、本研究を行うに当たり、潤滑油供試剤を供与された花王石鹼和歌山研究所永森弘之博士に感謝の意を表したい。また実験に協力された吉田健氏(現新日鉄)に感謝の意を表する。

## 文 献

- 1) 五弓勇雄, 木原諄二, 小豆島明: 塑性と加工, 14 (1973), p. 12
- 2) 木原諄二: 第66・67回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編), p. 115
- 3) J. KIHARA: J. Fac. of Eng., The Univ. of Tokyo, vol. XXXIV (1978), p. 579
- 4) 木原諄二, 川中秀夫, 永森弘之, 松田弘之: 塑性と加工, 20 (1979), p. 323