

## 論 文

## 熱間圧延摩耗試験機におけるロール摩耗

木原 諄二\*・銅屋 公一\*<sup>2</sup>・中村 一元\*<sup>3</sup>  
吉原 達夫\*<sup>4</sup>・佐野 義一\*<sup>5</sup>

## Roll Wear in Hot Strip Test Mill

Junji KIHARA, Koichi DOYA, Kazumoto NAKAMURA,  
Tatsuo YOSHIHARA, and Yoshikazu SANO

## Synopsis:

A small laboratory scale hot strip test mill was developed for the purpose of studying the roll wear in a hot strip mill. Using the test mill, various phenomena observed in production mills were reproduced. They were wear patterns, cracks, cat-ear wear, black film, effects of oil lubrication, and so on. The phenomena in the test mill were compared with those in production mills and utility of the test mill was discussed.

Using the test mill, anti-wear properties of mineral oils and fatty acids were estimated. It was found that some mineral oils increased the roll wear. It was also found that stearic acid in a mineral oil had an excellent anti-wear property. The relation between anti-wear properties and lubricity was discussed. The different effects of fatty acids on the roll wear were considered to come from the enlargement of difference of their lubricity due to very long rolling length.

## 1. 緒 言

鋼の熱間圧延技術は多大の進歩をとげてきたが、ロール及び圧延材の間のトライボロジーに関する改善はいまだ十分とはいえない。そのためロールの肌荒れ及び摩耗が生じ、良好な表面の圧延材を生産するうえの問題となつている。さらに摩耗の増加はロール原単位を低下させ、操業上・経済上の問題ともなつている。

熱間圧延潤滑は、圧延動力の低減をもたらすとともにロールの肌荒れと摩耗を防止するために考えられ、近年各種の熱間圧延油が使用されるようになってきた。

しかしながら、熱間圧延におけるロールの肌荒れと摩耗については、実機テストの数が少ないこと、実機の現象を再現できる試験機が少ないことにより、基礎データが不足しており、未解決の問題が多い。実機テストの数が少ない原因は、実機テストを行う場合、多量の圧延油・圧延材及び多大の時間を必要とするうえ、もし失敗した場合の被害が甚大であると予想されるためである。

実機の摩耗状態をシュミレートする試験機がほとんど

なかつたことにより、実機の摩耗状態と使用圧延油の性状・組成との関係が不明で圧延油の開発は手さぐりで行われている現状である。

著者らは、実機の 10 分の 1 の大きさの熱間圧延摩耗試験機を開発し、実機における種々の現象を再現し、圧延油の性能に関するいくつかの重要な知見を得たので報告する<sup>2)</sup>。

## 2. 試験機に必要な性能

実機におけるロールの肌荒れ及び摩耗の現象を再現するために、試験機が満たすべきいくつかの条件がある。それらのうち重要な点のいくつかを以下に示す。

1. 圧延温度の相似、2. 圧延圧力の相似、3. 新生面の比率すなわち圧下率の相似、4. ロール表面のヒートサイクルの相似、5. 流入油膜厚さの相似などである。

1 については、圧延材を実機相当温度まで加熱すること及びロール径・圧延材厚さ・圧延速度の比を同じにすることによつて相似性を満たすことができる。2 については、実機と同じ圧延圧力をかけることができるように

昭和 57 年 6 月 28 日受付 (Received June 28, 1982)

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

\*<sup>2</sup> 昭和石油(株)中央技術研究所 (Central Technical Research Laboratory, Showa Oil Co. Ltd.)

\*<sup>3</sup> 昭和石油(株)中央技術研究所 工博 (Central Technical Research Laboratory, Showa Oil Co. Ltd., 123-1 Shimokawairi Atsugi 243-02)

\*<sup>4</sup> 日立金属(株)本社 (Hitachi Metals Ltd.)

\*<sup>5</sup> 日立金属(株)若松工場 (Wakamatsu Works, Hitachi Metals Ltd.)

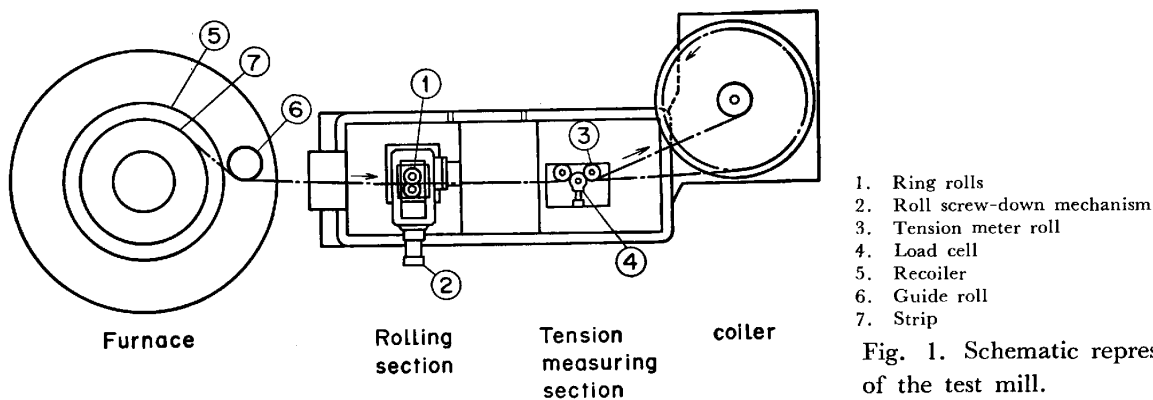


Fig. 1. Schematic representation of the test mill.

Table 1. Specification of the test mill.

Furnace	Rapid heating furnace (non-oxidizing atmosphere driven by pre-mixed gas) Size 1 100 mm $\phi$ ×540 mmH Max. Temp. 1 200°C Heating speed $\leq 1$ K/s
Rolling mill	Vertical 2-Hi rolling mill Roll 70 mm $\phi$ (40 mm $\phi$ )×40 mmH Max. rolling speed 200 m/min Max. roll force 6 tonf ( $5.88 \times 10^4$ N)
Strip	Low carbon steel JIS G 3141 SPCC (Corresponding to DIN 1624-1954 and ASTM 109-65) 0.7 mm×17 mm×250 m~550 m

油圧圧下装置を設計し、ロール径と圧延材厚さの比を実機と同じにすることによって相似性を満たすことができる。3については、30% 近くの圧下率が達成できる能力を与えなければならないし、そのことによって相似性が満足される。4については、連続圧延であること、ロール径・圧延材厚さ・圧延速度の比を実機と同じにすることにより相似性が満たされる。5については、実機相当のウォーターインジェクション(ダイレクト)給油方式を採用することにより相似性を満たすことができる。

以上のような考察のもとに次節に述べるような熱間圧延摩耗試験機を試作した。

### 3. 熱間圧延摩耗試験機の概要

#### 3.1 一般的仕様

本熱間圧延摩耗試験機の仕様を Table 1 に示す。また略図を Fig. 1 に示す。

#### 3.2 本試験機の特徴

本試験機は実機を 1/10 の大きさにしたものが基本となっている。実機の 1/10 の大きさにしたのは、ロール径、圧延材厚さ、圧延速度である。実機と異なるのは、ロールがスリーブとアーバーからなる複合ロールで、縦型の 2 段圧延機であること、スタート時圧延材が常温の

状態でロールに噛み込まれていること、圧延された材料を巻き取る装置があり常に前方張力がかかっていることなどである。実機と同一にできるのは、平均圧延圧力、圧延材温度などである。

本試験機ではスリーブの脱着が容易であり、任意の圧延長さの時点でロール表面の摩耗状態を検討でき、ロールの再使用も可能である。

また 1 回の実験で約 500 m の材料を圧延することができ 1 日で  $2 \sim 3 \times 10^3$  m の圧延が可能である。

本試験機は 1/10 の大きさのため量的に考えると、実機における 1/1 000 の材料消費により実験が可能である。

さらに、本試験機は鋼の熱間摩耗試験機として開発したが、冷間圧延、他金属の圧延の摩耗試験機としても採用可能である。

## 4. 実験方法

#### 4.1 圧延材料

実験に使用した圧延材料は冷間圧延低炭素鋼板であり厚さ 0.7 mm、幅 17 mm、長さ 250~550 m のものを内径 300 mm のコイルにしたものである。

#### 4.2 ロールスリーブ

ロールスリーブはチルド、グレン、アダマイトを使用した。

チルド材はグレン材を作るため試作したものであるが、小型のためグレンにならずチルドになったものである。

グレン材は実機より切り出したものであり、スリーブの軸方向が実機ロールの半径方向になっている。

アダマイト材も実機よりグレン材と同様の方法で切り出して製作した。

#### 4.3 実験条件

熱間圧延仕上げ後段をシュミレートした標準条件を、Table 2 に示す。黒皮の生成を試みた実験条件を Table

Table 2. Standard experimental conditions.

Roll force	4 tonf
Rolling speed	170 m/min
Temp. of Strip in the furnace	920~930°C
Cooling method of rolls	water jet (11 kgf/cm <sup>2</sup> , 3.8 l/min·roll)
Roll	Chilled roll or Grain roll

Table 3. Experimental conditions to make black film.

Roll force	2 tonf
Rolling Speed	127 m/min
Temp. of Strip in the furnace	1 030°C
Cooling method of rolls	water jet
Roll	Adamite roll

3 に示す。

4.4 摩耗量の評価

ロールの摩耗量を評価するために、“平均摩耗深さ”を以下のように定義した。ロール表面のプロフィールを表面粗さ測定器にて測定し断面積を求め、板道幅を 20mm と仮定し平均の深さを求める。ロール表面 8ヶ所の平均の深さから平均摩耗深さを求める。式を以下に示す。

$$\text{平均摩耗深さ}(\mu) = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{(\text{ロール摩耗断面積})_i}{(\text{板道幅})_i} \right\} / N$$

N=8, 板道幅=20 mm

5. 実験結果

5.1 実機での諸現象の再現実験

標準実験条件下で行った 800 m 圧延後のグレンロール表面のプロフィールを Fig. 2 に示す。

圧延長さによるチルドロールの表面プロフィールの変化を Fig. 3 に示す。その時の圧延長さと平均摩耗深さとの関係を Fig. 4 に示す。摩耗量は圧延長さに比例して増加している。Fig. 4 におけるデータは、チルドロールは同一ロールを連続して使用したものであり、グレンロールは個別のロールを使用したものである。

Photo. 1 に 600 m 圧延後のチルドロールの表面写真を示す。

Photo. 2 に標準実験条件下で 3 500 m 圧延後のグレンロールの表面写真を示す。Photo. 3 にその断面写真を示す。縦割れ、横割れがグラファイトを起点にして発生している。

Photo. 4 に 400 m 圧延後のグレンロール表面に発生したヒートクラックのレプリカ写真を示す。

5.2 各種因子のロール摩耗に対する影響の調査

Fig. 5 にチルドロールの使用履歴に対する圧延長さ 1 000 m 当たりの平均摩耗深さを示す。使用圧延長さが

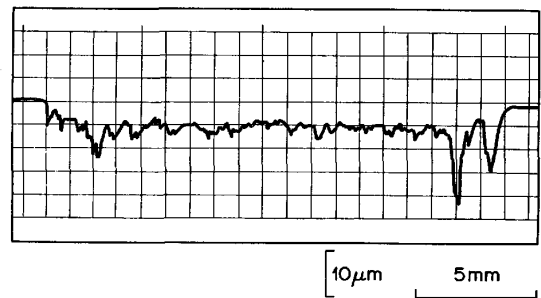
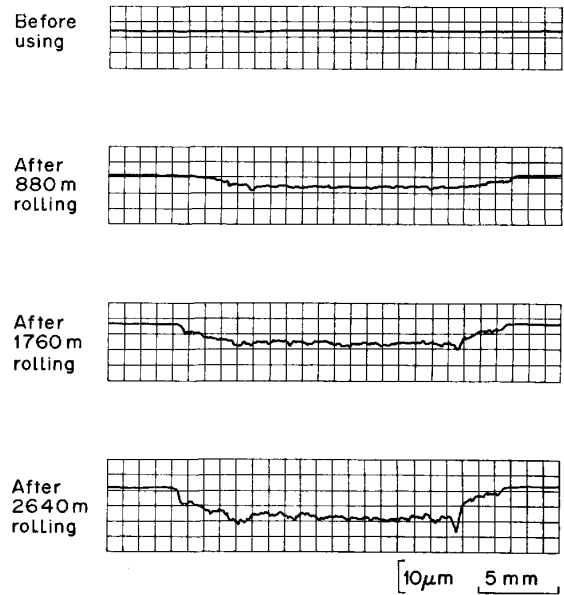


Fig. 2. Typical wear profile of the roll after 800m rolling. (draft 30%)



Experimental conditions roll force 4tonf Temp. of the strip in the furnace 920°C rolling speed 170m/min draft 28±2%

Fig. 3. Increase of roll wear with rolling length.

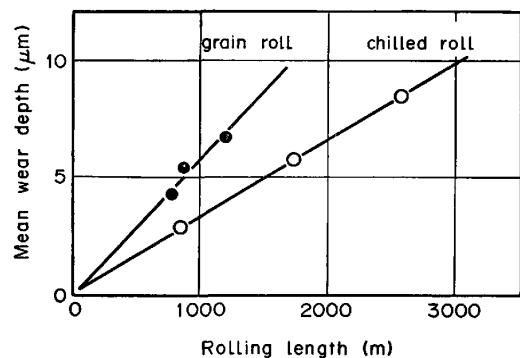


Fig. 4. Relation between roll wear and rolling length.

増えるとともに摩耗量が直線的に減少している。

Fig. 6 にグレンロールの使用履歴に対する圧延長さ 1 000 m 当たりの平均摩耗深さを示す。実験誤差を考慮すると履歴の影響はないと思われる。またロールのロットによる差もなかつた。一方それに対して圧延材のロット

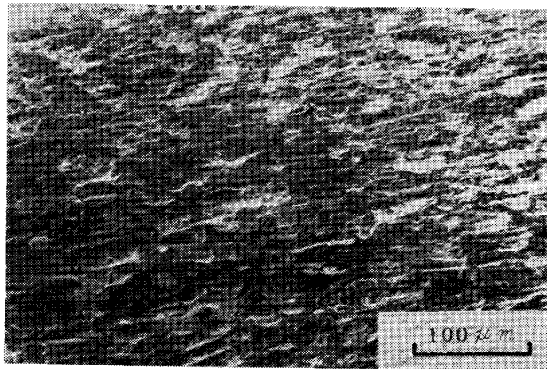


Photo. 1. Photograph of the surface of chilled roll after 600m rolling. (Roll force 1-2t)

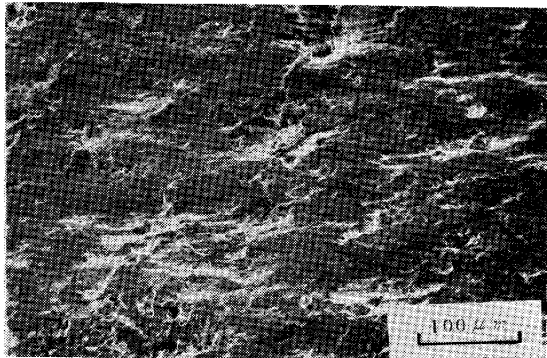


Photo. 2. Photograph of the surface of grain roll after 3500m rolling.

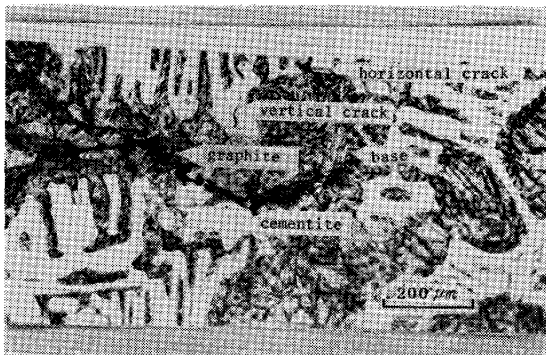


Photo. 3. Photograph of the cross sectional view of grain roll after 3500m rolling.



Roll force 3.3 tonf  
 Rolling speed 170m/min.  
 Rolling length 400m  
 Temp. of strip 930°C

Photo. 4. Heat crack.

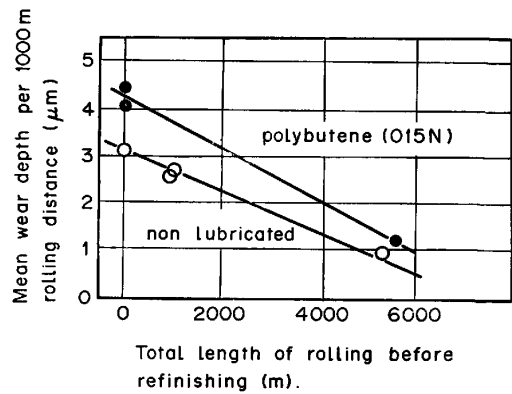


Fig. 5. Influence of past use of chilled roll to roll wear.

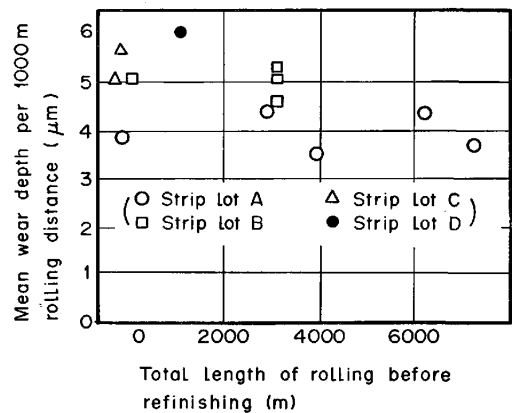


Fig. 6. Influence of past use of grain roll to roll wear.

トにより摩耗深さが層別され、影響があると思われる。

### 5.3 黒皮生成実験

Photo. 5~Photo. 8 に黒皮の生成を目的とした実験後のロール表面写真を示す。アダマイトロールにおいては、冷却水量が 4.6 l/min·roll のときには黒皮は生成せず、3.8 l/min·roll では生成し、2.5 l/min·roll により厚い黒皮が生成する。またグレンロールにおいても、3.8 l/min·roll の条件下で黒皮が生成した。

前述の黒皮のX線回折分析の結果を Fig. 7 に示す。実機の黒皮がマグネタイト (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) であるのに対して、本試験機の黒皮はウスタイト (FeO) が主であつた。

### 5.4 油潤滑

#### 5.4.1 ポリブデン

Fig. 8 にチルドロールにおいて各種ポリブデンを使用したときの摩耗量の変化を示す。また Table 4 に使用したポリブデンの性状を示す。

#### 5.4.2 鉱油

使用した鉱油の一般性状を Table 5 に示す。Table 6 に水のみの潤滑剤無しにおけるロール摩耗に対する鉱油を用いた場合の摩耗量減少率を示す。値が負になつてい

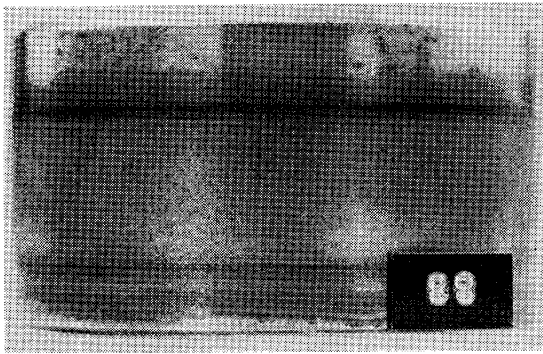


Photo. 5. Photograph of the surface of adamite roll. (Cooling water 4.6 l/min-roll)

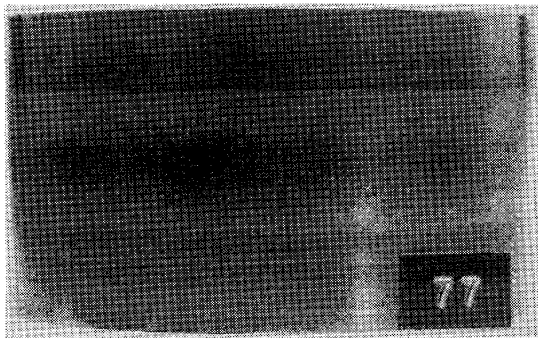


Photo. 6. Photograph of the surface of adamite roll. (Cooling water 3.8 l/min-roll)



Photo. 7. Photograph of the surface of adamite roll. (Cooling water 2.5 l/min-roll)

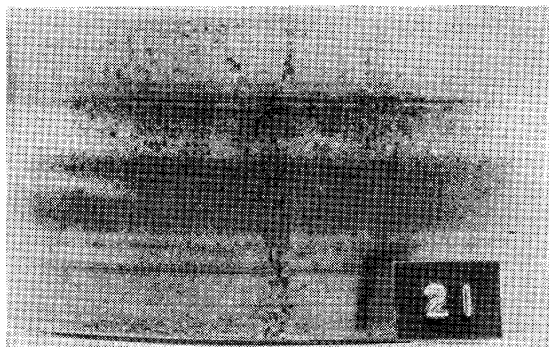


Photo. 8. Photograph of the surface of grain roll. (Cooling water 3.8 l/min-roll)

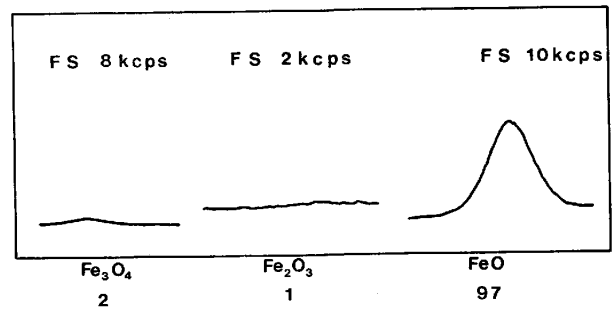
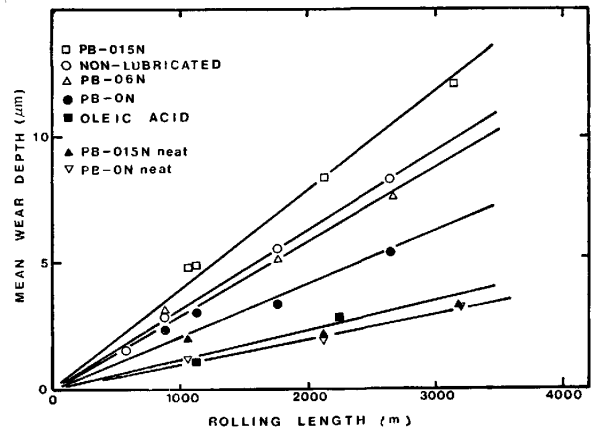


Fig. 7. X ray diffraction of black film on a test roll.



Emulsion 0.81/min roll  
Oil concentration 1.0±0.2wt%

Fig. 8. Effect of polybutene on roll wear.

Table 4. Properties of Polybutenes.

	PB-0N	PB-06N	PB-015N
mean molecular weight	370	430	580
VIS cSt (98.9°C)	4.8	10	35
(37.8°C)	35	120	860

るものは水のみの潤滑剤無しの時より摩耗量が増えていることを示す。

エッジ部の摩耗と中央部の摩耗の評価は Fig. 9 に示すように、板道端より内側 5.4 mm をエッジ部とし残りを中央部と仮定し、それぞれの平均摩耗深さを求めたものである。エッジ部を 5.4 mm 幅と仮定したことは理論的根拠はない。本試験機の大部分の摩耗プロフィールからみて、この程度をエッジ部と仮定した。

5.4.3 脂肪酸

ロール摩耗に対するオレイン酸の添加効果を Fig. 10 に示す。Oil D の平均摩耗深さを基準とし、オレイン酸の添加量に対し摩耗の減少率を示したものである。

飽和脂肪酸の炭素数の違いによるロール摩耗減少率の変化を Fig. 11 に示す。炭素数 18 のステアリン酸が一番効果がある。

炭素数 18 の脂肪酸の飽和度の違いによるロール摩耗

減少率を Fig. 12 に示す. やはりステアリン酸が最も効果がある.

Table 5. Properties of mineral oils.

Oils	A	B	C	D	E	F	
Viscosity mm <sup>2</sup> /s	(40°C)	24.89	481.4	100.4	99.69	80.91	59.44
	(100°C)	4.667	32.04	11.41	11.29	6.931	8.058
Viscosity Index	103	98	100	99	-18	102	

Table 6. Effect of mineral oils to roll wear.

Oils	A	B	C	D	E	F	
Reduction of mean wear depth (%)	Exp 1 Total	15	11	-21	-2	1	-
	Edge	5	0	-19	9	9	-
	Center	33	52	-37	-33	-15	-
Exp 2 Total	-	-	-54	-34	-	-14	-
	Edge	-	-	-17	-11	-	-28
	Center	-	-	-140	-60	-	-110

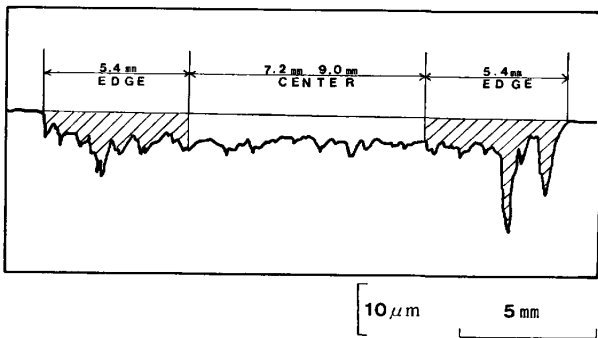
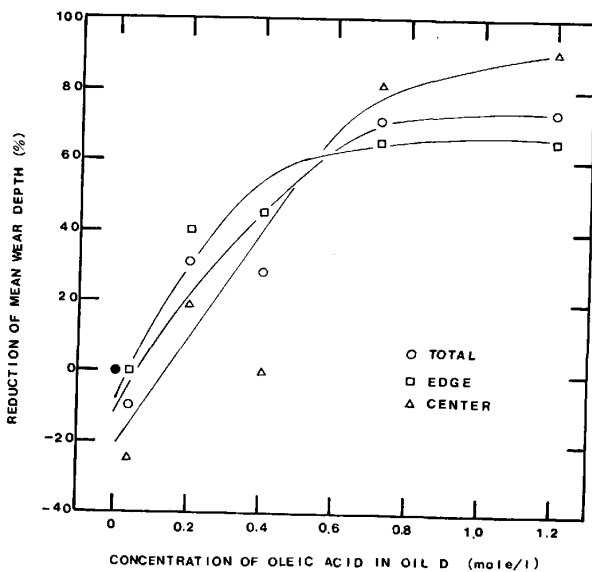
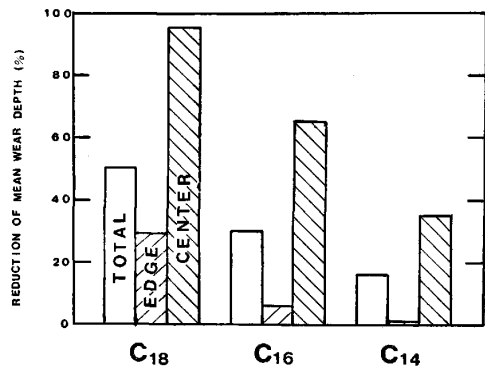


Fig. 9. Definition of Edge wear and Central wear.



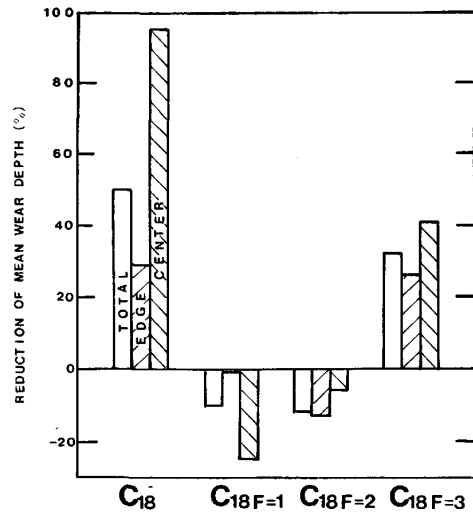
Emulsion 0.8 l/min roll  
Oil concentration 1.0±0.2wt%

Fig. 10. Effect of Oleic acid on roll wear.



Emulsion 0.8 l/min roll  
Oil concentration 1.0±0.2wt%

Fig. 11. Effect of saturated Fatty acid on roll wear.



Emulsion 0.8 l/min roll  
Oil concentration 1.0±0.2wt%

Fig. 12. Relation between roll wear and saturation of C<sub>18</sub>-acid.

## 6. 考 察

### 6.1 実機における諸現象の再現について

Photo. 9 に実機の F<sub>5</sub> スタンド (6 タンデムミル) のロール表面写真を示し, Photo. 10 に実機の F<sub>7</sub> スタンド (7 タンデムミル) のロール表面写真を示す. Photo. 2 に示されている表面状態は Photo. 9, Photo. 10 の両方の特徴を持っている. これから本試験におけるグレンロール表面の摩耗状態は実機仕上げ後段スタンドと最終スタンドの両方の特徴を再現していると考えられる.

Photo. 3 に示した本試験で使用したグレンロールの断面写真において縦割れ, 横割れがグラファイトを起点として発生しているのが見られる. これらのことは実機においても観察されることである. ただし, 割れの長さ, 密度は実機の割れと比較すると短かくかつ薄い. これはスケールダウンのためと思われる.



Photo. 9. Photograph of the surface of grain roll of F5 stand in a production mill.

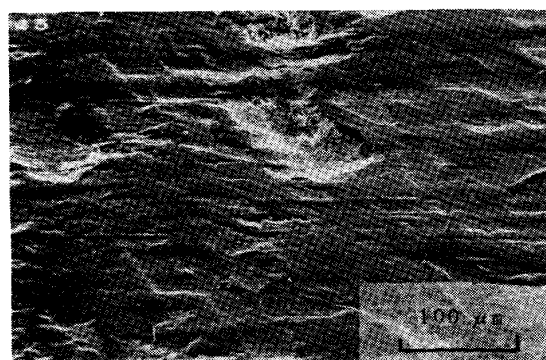


Photo. 10. Photograph of the surface of grain roll of F7 stand in a production mill.

Fig. 2 に示した摩耗プロファイルは実機のプロファイル<sup>3)</sup>と良く類似しており、特にキャッツイヤーと呼ばれるエッジ摩耗は良く再現されている。

Fig. 3, Fig. 4 に示すように、標準条件下での本試験におけるロール摩耗は、圧延長さの増加に対応して直線的に増えている。ただし、黒皮が付着するときには摩耗量が減少し、直線性が成立しない。圧延長さに比例して摩耗量が増えることは、実機仕上げ後段におけるグレンロールの摩耗現象に対応している。

### 6.2 ロール使用履歴のロール摩耗に対する影響

Fig. 5 に示したように、チルドロールにおいては使用圧延長さが増えるとともに摩耗量が減少する。このことは、ロールが使用されることによつて再研磨ロールの表面になんらかの硬化がおこることによるものと思われるが、本研究ではより深くは検討しなかつた。

一方、Fig. 6 に示すように、グレンロールにおいては履歴の影響はないと思われる。

### 6.3 圧延材のロール摩耗に対する影響

Fig. 6 に示すように、グレンロールにおいては材料のロットにより摩耗量が影響を受ける。これは材料の材質による違いと思われる。

圧延材の一部を分析した結果、リムド鋼とアルミキルド鋼の両方があり、リムド鋼に対応する実験での摩耗量が多い。このことは冷間圧延においてアルミキルド鋼を圧延した場合、ロール表面粗度は摩滅しやすいが、摩耗量は小さい現象<sup>4)</sup>と対応している。

### 6.4 本試験における黒皮について

Fig. 7 に示すように、本試験で生成する黒皮はウスタイトであり、実機におけるマグネタイトとは異なる。

本試験において圧延中のロール表面温度を測定することはできない。実験終了後のロール表面温度を測定したところ 50~60°C であり、内部への蓄熱もなかつた。冷却水を絞る、ロール表面温度を上昇させる試みを行っているが、マグネタイトの生成には成功していない。今後の検討課題と考える。

### 6.5 油潤滑におけるロール摩耗

#### 6.5.1 ポリブデンのロール摩耗に対する影響

ポリブデンの各種粘度のものを用いての試験におけるロール摩耗は Fig. 8 に示すように高粘度のものほど摩耗量が多いという結果になつている。このことは他分野の摩耗と粘度の関係とは逆の結果を与えているが、現在この現象を説明することはできない。

#### 6.5.2 鉱油のロール摩耗に対する影響

Table 6 における Exp 1 と Exp 2 では圧延材のロットが異なる。Exp 1 と Exp 2 での同一油種での摩耗低減率の違いは材料ロットの違いによるものと考えている。

Exp 1 の結果から考えると、40°C での動粘度が約 25 mm<sup>2</sup>/s と約 500 mm<sup>2</sup>/s のものが効果があり、約 100 mm<sup>2</sup>/s のものは効果がないように思える。また Oil D と Oil E の比較より粘度指数の差による違いはないと考えられる。前出のポリブデンの場合と同じく、各種鉱油のロール摩耗に対する影響についてもさらに検討を加える必要がある。

#### 6.5.3 脂肪酸のロール摩耗に対する影響

Fig. 10 に示したように、オレイン酸の効果は約 0.7 mol/l (約 20 wt%) で飽和に達する。またエッジ部がより早く飽和に達し、中央部はほぼ摩耗量 0 まで減少する。摩耗量が飽和に達することは、木原らの報告<sup>5)</sup>において圧延動力の低減率にて潤滑特性を検討する場合にも見られ、脂肪酸の種類は異なるが、10~20 wt% の添加量で飽和に達している。これから熱間圧延の場合、脂肪酸の潤滑効果と減摩効果とは対応していると考えられる。

ロール摩耗に対する飽和脂肪酸の炭素鎖の長さの影響と、同一炭素鎖における飽和度の影響は、木原らの実験<sup>5)</sup>

† 組織的变化、硬度変化については今後検討する予定である。

とは一致しているかどうかは決められず、添加濃度などの違いもあり直接比較できるかどうか検討する必要がある。

しかし、次のように考えると両方の実験結果は矛盾しない。木原の行った潤滑特性評価の実験は圧延長さが短く、本試験ではそれに比較すると  $10^4$  倍の長さである。従って潤滑特性で測定された微少な差が本試験では拡大されて出てきていると考えることは可能である。

いずれにしても、さらに潤滑特性と耐摩耗性の関係を調べるためさらに検討を加える必要がある。

## 7. 結 言

(1) 本試験機は実機の現象を十分再現しており、熱間圧延のシュミレーターとして有効である。

(2) 再現された現象は、ロール表面下の横割れ、縦割れヒートクラック、ロール表面の摩耗状態、摩耗プロフィール（特にエッジ摩耗）などである。

(3) 本試験機は各種鉱油、添加剤の耐摩耗性を検討する一手段と考えられ、熱間圧延油の開発に有効と考えられる。

おわりに、本研究に関して有益な御助言をいただきました日立金属(株)の末永充工学博士に深謝致します。また、この実験を続けるにあたって激励と有益な御助言をいただきました、昭和石油(株)中央技術研究所所長木下真澄工学博士に深謝致します。

## 文 献

- 1) 大貫 輝, 蓮香 要, 加藤 治, 中島浩衛: 鉄と鋼, 65 (1979) 11, p. 275
- 2) 木原諄二, 銅屋公一, 中村一元, 末永 充, 佐野義一: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, p. 379  
木原諄二, 銅屋公一, 中村一元: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, p. 381, 67 (1981) 12, p. 428, 68 (1982) 5, p. 49  
J. KIHARA, K. NAKAMURA, K. DOYA, and M. SUENAGA: Preprint for 3rd International Colloquium at Eesleingen West Germory (1982) 55, p. 1
- 3) B. WALKER, T. THOMAS, and I. EARNSHAW: Proc. Int. Conference on Steel Rolleng Vol. 2, 279 (1978)
- 4) 鉦本 紘, 神馬照正, 岩藤秀一, 岡見雄二: 圧延潤滑シンポジウム予稿集 (1982), p. 14
- 5) J. KIHARA, K. WATABE, K. DOYA, and T. WATANABE: Trans. ISIJ, 18 (1978), p. 166