

# 熱間板圧延のトライボロジー特性評価

横浜国立大学 工学部 生産工学科  
助手 青木孝史朗  
(平成7年度奨励研究助成 AF-95039)

キーワード：熱間圧延、摩擦係数、すべり圧延

## 1. 研究の目的と背景

鋼板の熱間圧延では生産性の向上のために、より苛酷な使用条件に耐えうるロールの開発および潤滑油の開発が行われている。その開発されたロールに関しては耐摩耗性、潤滑油に関しては潤滑性の評価が行われている。耐摩耗性の評価はほぼ定量的に行われている<sup>1)</sup>のに対し、潤滑性の評価はチムケン試験機のような基礎的な試験機による方法、加工状態を模擬的に再現した試験機による方法などにより行われている。しかし基礎的な試験機による方法では塑性変形による新生面の露出、大きな接触面を伴う界面での潤滑油挙動の評価が難しく、また模擬的な試験紙による方法では塑性変形させた接触面で単に相対すべりが生じているだけで、実機相当の相対すべり量などの再現が難しい。この様に実機に対応した定量的な評価は今のところ困難であるため、実機において潤滑性の評価を行わざるを得ないが、その評価結果を他の実機に適用することは難しく、更にコスト的にも限界があるので、現実的には容易でない状況にある。

近年、耐摩耗性に優れたハイスロールが広く使用される状況<sup>2)</sup>の中で、圧延荷重が高い、鋼板表面にスケール疵が発生しやすいなどの、ハイスロール特有のトライボロジー問題が生じている。これらの問題を解決するため、二、三の潤滑油が開発されており<sup>3-5)</sup>、それらの潤滑性の評価が従来の方法で行われている<sup>6)</sup>。その方法では定量的に精度良く評価することは難しく、実験室用小型圧延機による潤滑性評価<sup>7,8)</sup>も行われているが、実機相当の潤滑状態が再現されているか注意しなければならない。この様に実機相当の潤滑状態を再現可能にし、より容易に潤滑性の評価可能な評価試験機の開発が必要であろうと考えられる。

そこで、助成者は実験室レベルで熱間圧延のシミュレーションする事を目的に、熱間圧延型潤滑性評価試験機を開発した。その試験機の開発過程、ならびに本試験機を用いて鉱油及び各種添加剤を加えた圧延油の潤滑性

の評価を行い、評価試験機の特性を調べた。

## 2. 評価試験機の概要

今回開発した熱間圧延型潤滑性評価試験機は助成者所属の研究室にて開発された冷間圧延型潤滑性評価試験機<sup>9)</sup>を改造したものである。この試験機は小型ながら実機と同等の相対すべり速度が得られ、加工中の摩擦係数も容易に求められるという特徴を有している。評価試験機の基本的な仕様は図1に示すように、メインとサブの2つのスタンドからなる2タンデム圧延機である。この試験機にコイル試験材を加熱するため、メインスタンドとサブスタンドの間(820mm)に赤外線

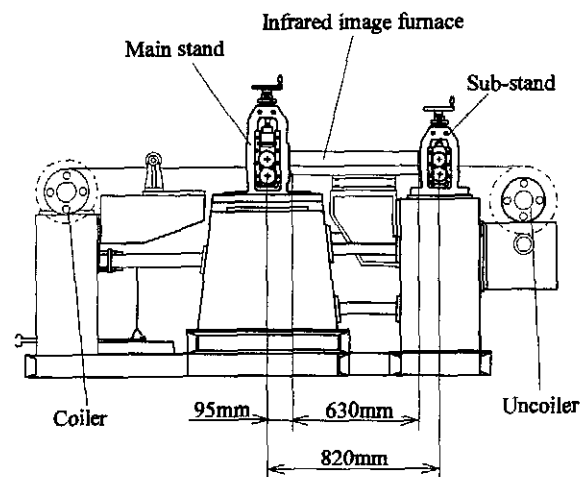


図1 熱間圧延用潤滑性評価試験機(模式図)

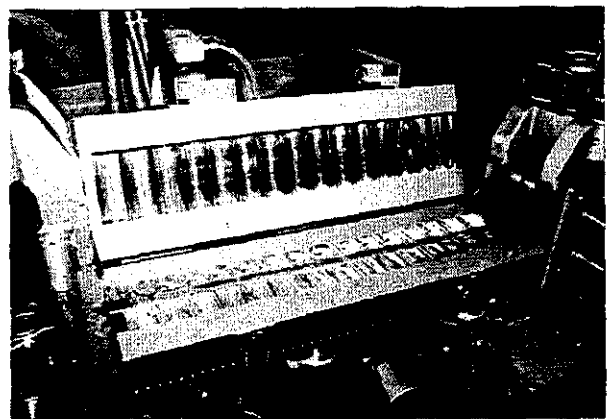


図2 赤外線瞬間加熱炉(開放状態)

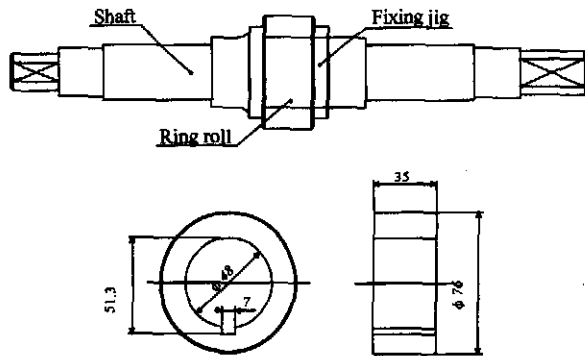


図3 評価用リングロール (模式図)

瞬間加熱炉(630mm)を新たに設置した。図2に示すように、この瞬間加熱炉は赤外線ランプを上下に15本ずつ計30本配置している。ランプ1本の仕様は100V、1000Wであり、炉全体としての定格は200V、30kWである。30本のランプは10本ずつ入側、中央、出側の3つの部分に分割して結線されており、炉内温度の制御は、それぞれの部分に通電する電流を手動で設定して行うことができる。炉内には雰囲気ガスであるアルゴンガスを導入し、赤外線ランプを保護すると同時に供試材の酸化を防止している。また炉出口には、供試材を囲むように断熱材を配置した固定ハウジングを有する遮蔽板を設置し、供試材の空冷による温度低下と、潤滑油が炉内へ侵入することを防止している。さらに圧延後の供試材を空冷による冷却を行うためにメインスタンドとコイラー間に送風機を設置した。

メインスタンドに装着される評価ロールには、種々のロール材質を評価できるように、図3に示すように取り外し可能なリングロールを用いた。リングロールの寸法は外径76mm、内径48mm、幅35mmである。サブスタンドのロールは外径70mm、幅60mmの軸付きロールである。

潤滑性の評価は、すべり圧延により測定された圧延荷重とトルクにより求められる摩擦係数によって行う。この圧延方法は、サブスタンドの圧延により供試材の速度を制御し、メインスタンドの上ロールが供試材の約10倍の周速で回転し、供試材上をすべりながら圧延するものである。この時の下ロールは従動状態である。実験中に測定される圧延荷重 $P$ 、上ロールのトルク $G$ によって摩擦係数 $\mu$ は $\mu=G/PR$ によって導出される。ここで、 $R$ はロール扁平を考慮に入れたロール半径である。すべり圧延ではトルクと対応する後方張力が作用するので、その後方張力が大きければ

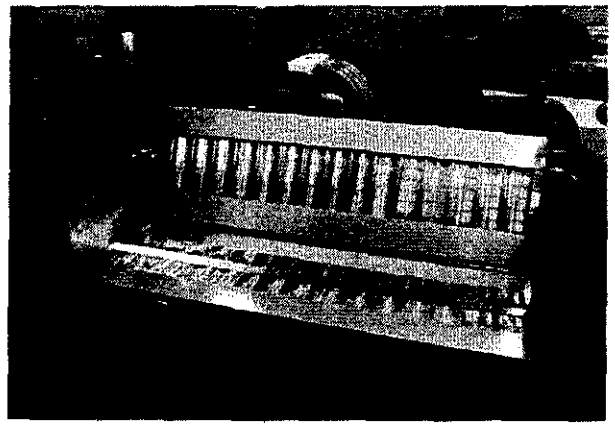


図4 加熱中に瞬間加熱炉を開放した状態

れば供試材は伸び、破断する。そのため、本試験機の供試材の断面積はハンドリング可能な限り、できるだけ大きくし、板幅20mm、板厚2.0mmとした。材質はSPHCである。

### 3. 評価試験機としての評価

#### 3.1 温度特性

供試材はサブスタンドで圧延され、炉に入後、徐々に加熱され、炉出口で最高温度に達する。図4は昇温中に炉を開放した時の炉内の写真である。炉出口で最高温度に達した供試材はロール位置まで到達する間に、その温度は炉出口最高温度から低下する。供試材の温度変化は、炉の通電電流および圧延速度により変化することになるので、瞬間加熱炉によって加熱される供試材の温度変化を測定した。

サブスタンドと炉入口間の位置にある供試材表面にアルメル-クロメル熱電対をスポット溶接し、サブスタンドで0.2%圧下し、板速度を10mm/sから18mm/sと変化させた。炉へ通電する全電流は90から135Aと変化させて、供試材が炉内を通過させた際の熱起電力

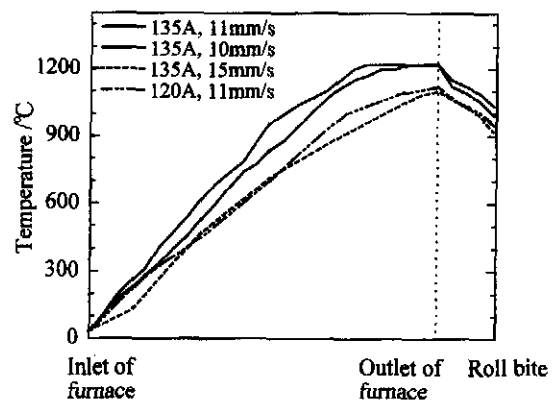


図5 熱間圧延中における供試材温度変化

表 1 熱間圧延時における供試材温度変化

Furnace current	Strip speed			
	10 mm/s	11 mm/s	15 mm/s	18 mm/s
90A	-	800	-	-
		700		
105A	1090	1070	-	-
	880	950		
120A	1180	1120	-	-
	1000	950		
135A	1220	1220	1100	840
	990	1030	920	820

を測定した。その代表的な温度測定結果を図5に示す。また全測定結果を表1に示す。圧延速度が遅い場合、供試材は十分に加熱されるが、炉出口からロール位置まで移動する間に空冷されロール位置での温度は低くなった。また圧延速度が速い場合は加熱時間が短いため十分に加熱されずロール位置での温度は低くなった。この結果から最も高温な加熱温度が得られる条件は通電電流 135A、圧延速度 11mm/s であり、加熱炉を通過することによって 1030℃ に達することが分かった。

次にメインスタンドにおいて圧延される供試材のロールバイト位置での温度を、移動する供試材表面に熱電対を接触させて測定した。昇温条件は最高温度が得られる通電電流 135A、圧延速度 11mm/s とした。図6に結果を示す。供試材の温度は圧延開始後から圧延距離 500mm の間に 600℃ まで加熱され、500mm 以降では 600℃ から緩やかに上昇し、1000mm 以降 750℃ で安定している。熱電対をスポット溶接して測定した場合よりも測定値が低くなったが、これは供試材表面に酸化被膜が生成し、加えて熱電対を供試材の表面上を滑らせたため、熱電対と供試材表面との接触が不十分だったためと考えられる。

図5において供試材の移動距離は約 800mm であり、これを図6に当てはめると熱電対を

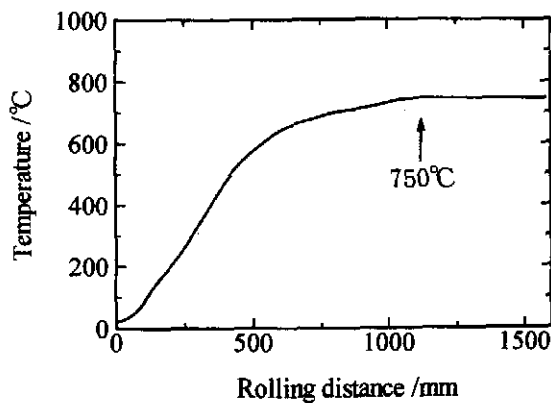


図 6 ロールバイト位置における供試材表面温度の変化

スポット溶接して測定した温度は、到達温度の約 9 割程度ということになる。温度測定の精度を考慮すると、実際の供試材温度は熱電対をスポット溶接して測定した結果よりも、100℃ 程度上昇することはあっても下がることはなく、この温度値を本評価方法の加工温度としてみなせると考えられる。

以上の温度測定結果から通電電流 135A、圧延速度 11mm/s、すべり圧延距離 1000mm 以上という条件で熱間圧延可能な供試材をロールバイトに噛み込ませる事が可能となった。

### 3.2 潤滑性評価試験としての評価

潤滑性評価試験機としての性能を評価するため、すべり圧延時における摩擦係数測定の再現性の確認を行った。すべり圧延の速度比（評価ロール周速：サブスタンドロール周速）は 10:1 とした。評価ロール材質にはハイスを使用した。化学組成および硬度を表2に示す。ロールは実験毎に 400 番のエメリー紙によって研磨し、表面粗さ Ra を 0.1μm に整えた。供試材には板幅 20mm、板厚 2mm の SPHC のコイル材を用い、圧延温度を 1030℃ とした。潤滑油には市販の熱間圧延油を用い、ニートで評価ロールに直接滴下給油した。圧延条件は圧延速度 11mm/s、圧延距離 1600mm、目標圧下率を 3.5% とし同一条件下で摩擦係数の測定を行った。

すべり圧延時における摩擦係数の変化の内、5 例を図7に、圧延後の供試材板厚から測定した圧下率の変化の 1 例を図8に示す。

圧下率は圧延距離 500mm まではわずかに増加、その後、徐々に増加し、1000mm 以降で目標圧下率に達し、ほぼ一定となった。図6の温度変化と併せて考えると、圧延距離 500mm までは供試材の温度が低いために加工硬化

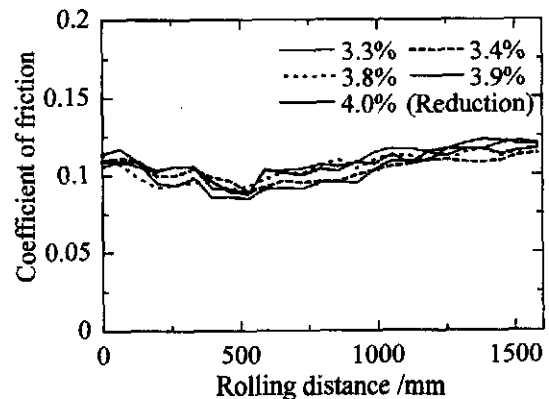


図 7 熱間圧延時に得られた摩擦係数の再現性確認

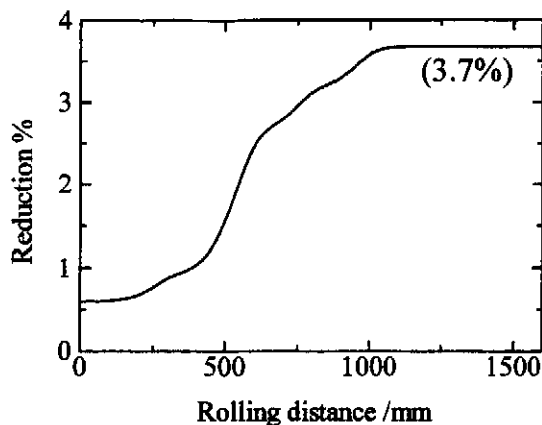


図8 熱間圧延時における供試材の圧下率変化

が生じ、そのため圧下率も目標としていた圧下率よりも低い値となったと考えられる。今回の評価方法では、圧延距離 1000mm 以降で得られる圧下率を実験により得られた圧下率とした。同一条件下で実験を行った場合の圧下率のばらつきは±0.5%であった。

摩擦係数の変化は圧延開始直後から圧延距離 500mm までは徐々に減少し、500mm 以降ではわずかに増加、温度が定常となる圧延距離 1000mm 以降ではほぼ一定となるという傾向を示した。1000mm までは温度、圧下率ともに変化していたため不安定な圧延状態だったが、1000mm 以降では定常状態となり摩擦係数も一定値が得られるようになったと考えられる。同一条件下における摩擦係数のばらつきは±0.007 の範囲内であり摩擦係数測定の再現性は確認できたと判断した。

また、本圧延条件において、圧延後のロール表面に黒皮が発生するといった変化は認められなかった。この理由を調査するため、サブスタンド側に設置してある減速機を標準の 10:1 から 87:1 へ変更し、評価ロールが供試材の 87 倍の周速度で回転する様に改造した。この状態で前述と同様の実験を行ったが、減速機変更前と同様、黒皮の生成は確認できなかった。これらの結果から、評価ロールに黒皮が生成しなかったのは、評価ロールが圧延中に供試材上をすべることによって、ロール表面上を研削するような効果が生じたためではないかと考えられる。

以上の結果から新たに開発した熱間圧延型潤滑性評価試験機において、幅 20mm、厚さ 2mm の SPHC を用い、通電電流 135A、圧延速度 11mm/s、圧延距離 1000mm 以上という条件下で、温度 1030℃ における圧延油の潤滑性を、熱間

表2 評価用ロール材の化学組成及び硬度

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Fe	Hardness HRC
High Speed Steel	1.75	1.0	0.6	-	4.0	1.8	3.0	3.8	bal	57.5
High-Cr Cast	2.7	0.6	0.8	1.0	17	1.5	0.2	-	bal	51

(wt%)

すべり圧延による摩擦係数測定によって評価可能であることがわかった。

#### 4. 圧延油の潤滑性評価

##### 4.1 実験条件

この評価試験機を用い、各種圧延油の潤滑性を摩擦係数により評価可能か、検証実験を行った。用いた圧延油は基油としたパラフィン系鉱油 (40cSt:40℃) 単体 (a)、基油にオレイン酸 (b)、基油にダイマー酸 (c)、基油に S-P 系化合物 (d) および基油にジアルキルジチオリン酸亜鉛 (ZnDTP) (e) をそれぞれ 5wt% 添加した 5 種類である。潤滑方法はニートで行った。評価ロールにはハイスロールおよび高クロム鑄鉄ロールを用いた。表 2 にロール材質の化学組成を示す。ロール表面粗さ Ra は各試験毎に 0.1μm に整えた。供試材には板幅 20mm、板厚 2mm の SPHC のコイル材を用い、圧延温度を 1030℃、圧延速度 11mm/s、圧延距離 1600mm、目標圧下率を 3.5% とした。同条件で試験を 3 回以上行い、結果の再現性を確認した。

##### 4.2 結果および考察

ハイスおよび高クロム鑄鉄ロールを用いた時の摩擦係数変化の代表的な結果を圧延油別に図 9(a)~(e) に示す。

基油 (a) 及び油性向上剤を添加した圧延油 (b, c) を用いた場合、ハイスロール、高クロム鑄鉄ロールともに圧延距離 1000mm 以降の熱間域に到達する前に摩擦係数が急激に増加したため実験を中止した。これは評価ロールのトルク上昇に伴い、供試材が破断する可能性があったためである。油性向上剤は摩擦金属表面に吸着膜を形成し摩擦を低減させるものであるが、吸着膜を形成する吸着分子は摩擦面の温度上昇によって脱着されやすくなる<sup>10,11)</sup>。そのため本実験条件では油性向上剤の添加効果が見られず、潤滑性評価は不可能であったと考えられる。

極圧添加剤である S-P 系化合物を添加した圧延油 (d) では、高クロム鑄鉄ロールを用い

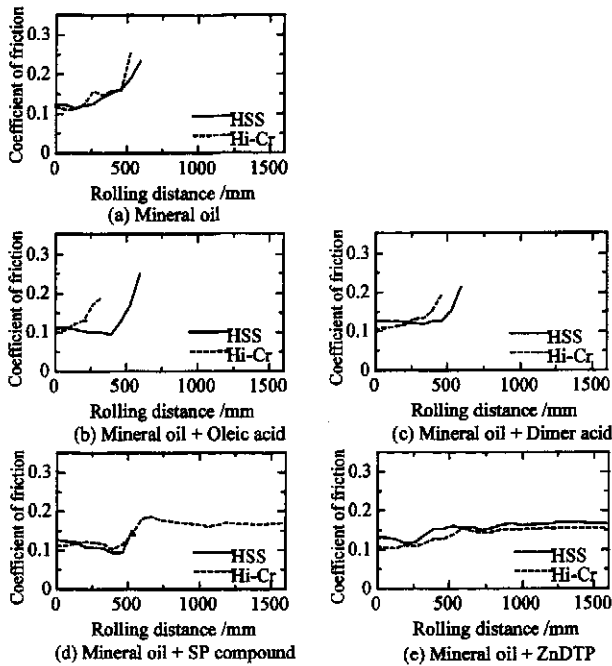


図9 熱間圧延時の摩擦係数変化

た場合、熱間域での評価が可能であったが、ハイスロールを用いた場合、圧延距離500mm付近で評価ロールが供試材上で滑りにくくなり、回転トルクが急激に増加したため実験を中止した。図9(d)における摩擦係数変化では0.15までの値を示しているが、上記の現象が生じた場合、測定データがぼらついてしまったためグラフ上では表記していない。ZnDTPを添加した圧延油(e)では両ロールで、熱間域まで評価が可能であった。極圧添加剤は摩擦面の金属表面と添加剤が化学反応し、摩擦面に被膜を形成して摩擦を低減させる効果を有する<sup>11)</sup>。圧延距離1000mm以降の熱間域で安定した摩擦係数が得られたのは、この効果が現れた結果であるが、ハイスロールと圧延油(d)を組み合わせた場合は、すべり圧延に耐えうる被膜形成に至らなかったと考えられる。

以上、本試験機によって得られた各圧延油の摩擦係数の変化には各種添加剤による効果が現れており、潤滑性の評価が可能であることを示している。

今回の実験で用いた加工条件は、圧延速度も遅く、実機の圧延状態再現には至っていないと考えられる。今後、ウォータ・インジェクション給油を可能にする等の改良を行うと共に実験手法の検討を試み、実機の潤滑状態により近づけて実験を行う必要がある。

## 5. おわりに

冷間圧延型潤滑性評価試験を改良し、実験室用の熱間圧延型潤滑性評価試験機を開発した。評価試験機としての性能を調べ、以下のような結果を得た。

1. この評価試験機では幅20mm、厚さ2mmのSPHCを用い、加工温度1030℃の熱間圧延において摩擦係数による潤滑性が評価可能である。
2. 圧延油に加えた添加剤の効果が確認できた。すなわち圧延油として鉱油のみ、油性向上剤を添加した油を使用した場合、摩擦係数は急激に上昇し、熱間域での圧延は行えず、極圧添加剤を添加した油を用いた場合は潤滑性評価が可能であった。

最後に、本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成によって行われた。財団に対し深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 阿高松雄, 加藤治, 升田貞和, 後藤邦男, 栗田俊哉, 大畑拓己, 枝松邦明: ホットストリップミル用ロール材質に関する文献調査(圧延ロール研究部会), 日本鉄鋼協会編, 東京, (1993), 57.
- 2) 例えば T. Ito, N. Kanayama, Y. Masuda, T. Kawakami: CAMP-ISIJ, 9(1996), 964.
- 3) K. Goto, K. Masui, T. Shibahara: CAMP-ISIJ, 7(1994), 1365.
- 4) 日比徹, 池田治朗: 熱延潤滑圧延の現状と今後の課題 日本鉄鋼協会シンポジウムテキスト, (1997), 32.
- 5) 木原直樹, 伊原肇: 同上, 36.
- 6) M. Otsuka, T. Shimazaki: Journal of Japanese Society of Tribologists, 39(1993), 345.
- 7) 佐々木保: 熱延潤滑圧延の現状と今後の課題 日本鉄鋼協会シンポジウムテキスト, (1997), 32.
- 8) 今井敏夫, 金城昌平: 同上, 32.
- 9) A. Azushima: Tetsu-to-Hagane, 74(1988), 696.
- 10) M. Hoshino: Journal of Japanese Society of Lubrication Engineers, 29(1984), 91.
- 11) 改訂版潤滑ハンドブック, 日本潤滑学会編, 養賢堂, 東京, (1987), 278.