



K. Aoki

熱間板圧延用トライボロジー特性評価試験機の開発

青木 孝史朗*

1. はじめに

熱間圧延潤滑のメカニズムについての理論的解明は未だ明らかでない面が多いが、一般的にはロール表面に付着した油のうち一部は燃焼しガスまたは灰分主体の燃焼生成物となり、他の一部は不燃焼の吸着膜のままロール接触弧内に引き込まれ、接触時間が0.01秒以下という短時間であるため潤滑効果が維持できると考えられている。具体的には、ワークロール表面に付着した油膜が表面温度100～200℃、ロールと表面温度800～1000℃の被圧延材の間に導入され、その結果からロール表面温度は上昇し、被圧延材の表面温度は降下することになる。この様な条件の中でロール・材料間に導入される油膜の温度は、入口部分でロール表面温度に近く、出口に向かって上昇し、被圧延材の出口での表面温度に近づいているものと考えられる。油膜平均温度の定量的な値としては、入口におけるロール表面温度と被圧延材の表面温度を加えた値を半分とした500℃前後と考えられる。以上の様な油膜温度に対して200～300℃までの流体潤滑効果を維持できる鉱油および油脂並びに半固体潤滑効果を有するグリースおよびエステルをベース油として、300～400℃まで化成被膜潤滑効果のある極圧剤、および500℃以上まで固体潤滑効果のある固体潤滑剤が添加剤としてブレンドされた熱間圧延油がこれまで数多く設計された。

これら潤滑剤の潤滑性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、また模擬的な試験機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

量などの再現は難しい。この様に定量的な評価は困難であるため、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。そのため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望まれる状況となっている。

そこで筆者らは実験室レベルで熱間圧延のシミュレーションを可能とする事を目的に、熱間板圧延用トライボロジー特性評価試験機の開発を試みた。本報ではその評価試験機の特性と応用事例について紹介する。

2. 評価試験機の概要

今回の研究で開発した熱間板圧延用評価試験機は著者が所属していた研究室にて開発された冷間圧延用潤滑性評価試験機¹⁾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構成は図1に示す様に、メインとサブの2つのスタンドからなる2段圧延機である。潤滑性評価には、すべり圧延により求められる摩擦係数を用いる。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（下ロールは従動状態）、供試材上をすべりながら圧延を行うものである。実験中に測定される圧延荷重 P 、上ロールのトルク G 、ロール扁平を考慮に入れたロール半径 R によって摩擦係数 μ は $\mu=G/PR$ によって導出される。

供試材を加熱するため、この試験機のメインスタンドとサブスタンドの間に赤外線瞬間加熱炉を設置した(図2)。この瞬間加熱炉には赤外線ランプが上下に15本ずつ計30本配置されている。加熱温度は炉への通電電流を手動で制御し行う。炉内には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。

メインスタンドに装着される評価ロールは、取り外し可

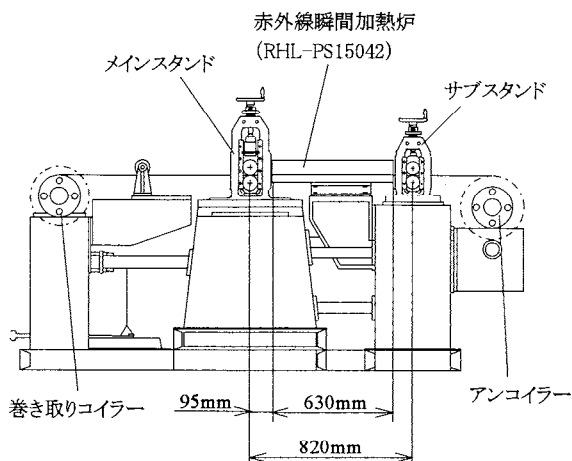


図1 熱間板圧延用トライボロジー特性評価試験機(模式図)

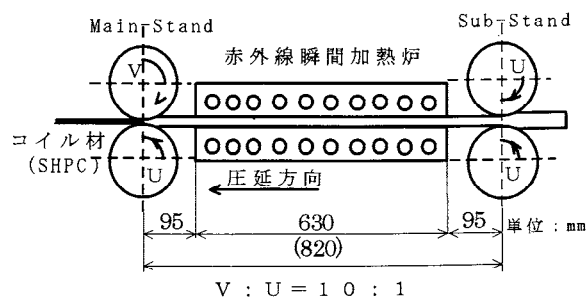


図2 熱間すべり圧延の概略図

能なリングロールとした。リングロールの寸法は外径 76mm、内径 48mm、幅 35mm 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供試材は伸び、破断する。そのため、供試材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 のコイル材とした。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、炉に進入後、徐々に加熱され、炉出口で最高温度に達する。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を測定した。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、圧延板速度 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、圧延板速度 11mm/s とした。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

表 1 熱間圧延時における供試材の温度変化

通電電流	板速度			
	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

上段 : 炉出口における温度(℃)
下段 : 評価ロールバイト位置における温度(℃)

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。

以上の温度測定結果から通電電流 135A、圧延板速度 11mm/s、すべり圧延距離 1000mm 以上という条件で 1030℃ の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、すべり圧延時による摩擦係数測定の実験の再現性の確認を行った。評価ロール材質にはハイスを使用した。ロールは実験毎に表面粗さ 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、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。圧延条件は圧延板速度 11mm/s、圧延距離 1600mm、圧延温度 1030℃、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 3 (上部) 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 3 (下部) 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。供試材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

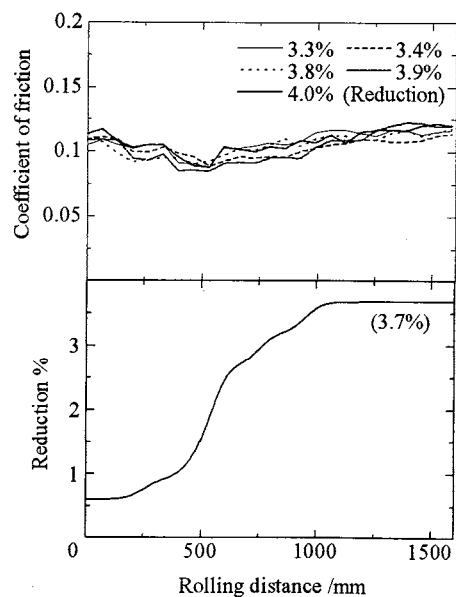


図 3 熱間すべり圧延時の摩擦係数の再現性 (上部) および供試材の圧下率変化 (下部)

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。

3. 3 実験手法の改善²⁾

前項で述べた圧延方法では、低温ですべり圧延を行っている距離が長いこと、高温域の実験結果は低温域での圧延状態の影響を受けやすい。そこで低温域での圧延距離を短くするために、予め炉内で保持し、加熱温度に加熱された部分だけを圧延するように実験方法の改善を検討した。具体的には供試材を炉内で2分30秒保持し、1050℃に均一に加熱された後、加熱された部分(640mm)を駆動し、評価ロールにて950℃ですべり圧延するものである。圧延条件としては、圧延板速度20mm/s、圧下率5%を基本条件とし、圧延速度、圧下率をそれぞれ変化させ、摩擦係数値に及ぼす変形条件の影響を評価した。

圧延速度20mm/sで圧下率を変化させた結果を図4に示す。圧延開始後25cm以降の熱間圧延領域において、圧下率の上昇と共に摩擦係数がわずかに低下する傾向を示した。圧下率5%で圧延速度を変化させた場合では、摩擦係数に圧延速度の影響はほとんど見られなかった。この実験範囲では摩擦係数に対する圧延条件の影響はほとんど見られなかったため、比較的ハンドリングしやすい、圧延速度20mm/s、圧下率5%という試験条件を基本条件として用いることとした。

以上の検討により、新たに開発した熱間板圧延用試験機を用いて、幅20mm、厚さ2mmのSPHCを用い、圧延温度950℃、圧延速度20mm/s、圧下率5%という条件下で、圧延油の潤滑性を熱間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. 潤滑性評価の応用事例^{3,4)}

近年の熱間圧延におけるハイスロール適用の拡大に伴い、添加材としてカルシウム系化合物を添加した潤滑油の開発が報告されている^{5~8)}。この種の潤滑油を本評価試験機で評価し、圧延後の供試材表面に対し定性分析等を併用することにより、添加剤効果を評価した事例を紹介する。

4. 1 実験方法

潤滑油は鉱油にカルシウムスルホネートをそれぞれ10, 30, 50wt%添加したものを用いた。これらの潤滑油は、ニート潤滑の場合はオイラーにて評価ロールに直接滴下し、

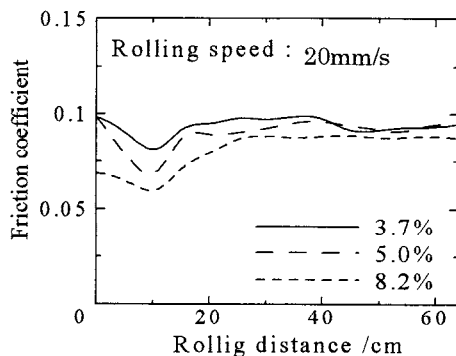


図4 圧下率の変化による摩擦係数への影響

エマルジョンの場合はウォーターインジェクションによりエマルジョン化し、フラットノズルを用いてメインスタンドの上下ロールのロール表面に給油した。また水切りのためエアースプレーを設置した。エマルジョン濃度は1%, 5%の2種類とした。

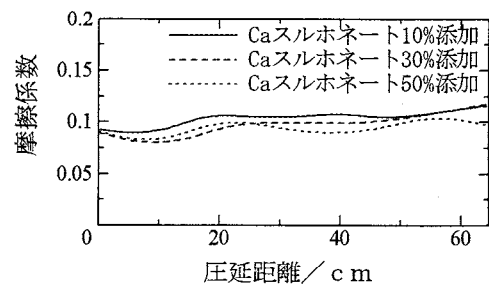
供試材には板幅20mm、板厚2mmのSPHCのコイル材、評価ロールには直径76mm、幅35mm、ロール表面粗さを0.1μm Raに整えたハイスロールを用いた。圧延温度は950℃、圧延速度を20mm/s、圧下率は5%を目標とし、予め炉内で保持され、加熱された部分をすべり圧延した。同条件下で3回の圧延を行い、その平均を結果とした。圧延終了後の供試材の表面に対し蛍光X線分析装置による定性分析を行った。

4. 2 摩擦係数測定結果

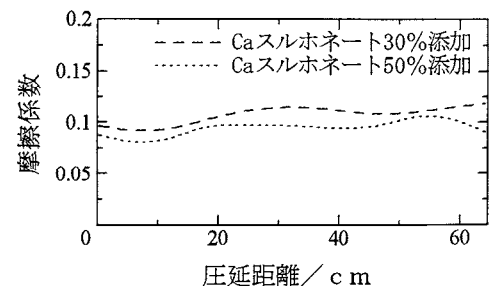
すべり圧延中の摩擦係数の変化を図5に示す。エマルジョン濃度5%ではカルシウムスルホネート添加量30%以上で十分な添加剤の効果が得られた。エマルジョン濃度1%では添加量50%で十分な添加剤の効果が得られた。添加量10%では供試材がネッキングしたため実験を中止した。ニート潤滑下の結果と比較するとエマルジョン濃度5%ではニート潤滑と同等の潤滑性を示し、ロールへの潤滑油の供給が十分だったが、エマルジョン濃度1%では潤滑油の供給量が不十分であったと考えられる。

4. 3 潤滑油の挙動

蛍光X線によって検出されたカルシウム量に着目して潤滑油挙動について考察を試みた。まずカルシウムスルホネートを用いたニート潤滑の圧延状態を、①加熱された供試材が圧延されず、潤滑油も付着していない部分(メインスタンドの上ロールを取り外し加熱した供試材をそのまま空冷し再現)、②加熱された試験材料の圧延される前の状



(a) エマルジョン濃度 5%



(b) エマルジョン濃度 1%

図5 エマルジョン潤滑下におけるカルシウムスルホネート添加量を変化させた際の摩擦係数の変化

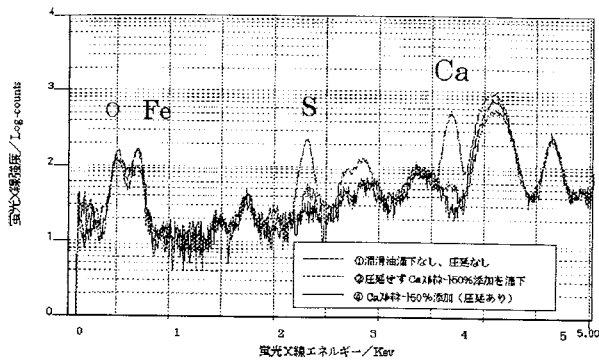


図6 圧延後の供試材各部の蛍光X線分析結果

態で表面に潤滑油が付着した状態（ニート潤滑でカルシウムスルホネートを50%添加した潤滑油を滴下して再現），③圧延界面，④圧延後の供試材材料表面，と4つの部分に分けた。①②④の部分における蛍光X線分析結果を図6に示す。含有しているカルシウムに応じて反応した蛍光X線強度を比較してみる。②は①に比べ、わずかにカルシウム量は増加したが、④は多量のカルシウムが検出された。これによりカルシウムの導入は熱による吸着よりも熱間変形伴う圧延状態に起因していると考えられる。

4. 4 カルシウムの圧延界面への導入量

ニート，エマルジョン潤滑下で圧延された供試材表面におけるカルシウム量を蛍光X線で分析した結果をまとめたものを表2に示す。相対カルシウム量はカルシウムスルホネート50%添加した潤滑油をニート潤滑で用いた際に検出される量を1とした。潤滑性の○は添加剤の効果が十分に得られたもの，△は不十分なもの，×は得られなかったものを示す。潤滑性評価の結果と比較すると，カルシウムスルホネートを50%添加した潤滑油をニート潤滑で用いた際の導入カルシウム量の1/4以上で添加剤効果が十分に得られることが分かった。

以上の様に，本評価試験機より得られた摩擦計数値の結果と圧延後の板表面の定性分析により，カルシウム系化合物の添加剤効果を評価することが可能となった。

5. 最近の状況

現在，新エネルギー・産業技術総合開発機構より委託され金蔵系材料研究総合センターにより研究が推進されている「環境調和型超微細粒鋼創製基盤技術の開発」プロジェクトにおいては，熱間圧延ラインにおいて結晶粒径が $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒鋼を製造する技術開発を行っている。その中で，低温大圧下圧延に対応した新たなロール材質と熱間圧延潤滑剤の開発が進められており，その潤滑性評価のために新たな評価試験機が横浜国立大学に設置された。この試験機は，試験条件が前述の試験機と異なるものの，評価手法は本報で紹介したものと同様，熱間すべり圧延による摩擦係数測定によるものである。

新たな試験機は，評価機としての性能評価が終了した状況^{9,10)}である。これからの成果に期待したい。

表2 相対カルシウム量と潤滑性

カルシウムスルホネート添加量	相対Ca量	潤滑性
50%添加ニート	1	○
50%添加エマルジョン5%	0.69	○
30%添加ニート	0.56	○
50%添加エマルジョン1%	0.32	○
30%添加エマルジョン5%	0.25	○
10%添加ニート	0.2	△
30%添加エマルジョン1%	0.15	△
10%添加エマルジョン5%	0.11	△
10%添加エマルジョン1%	0.026	×

6. おわりに

冷間圧延潤滑性評価試験を改良し，実験室用の熱間板圧延用トライボロジー特性評価試験機を開発し，その概略と応用事例を紹介した。この試験機の特徴をまとめると，以下のような点が挙げられる。

- 材料の塑性変形による新生面の露出が得られる
- 広い接触面積において実験が行える
- 接触面での相対すべり速度を生じさせる
- 幾何学形状の相似性を満足する
- 熱間圧延潤滑油の潤滑性を摩擦係数によって評価可能
- 摩擦係数の温度依存性が測定可能
- 実験コストが低い
- 同一条件の再実験が容易，再現性も高い

摩擦係数値に対して，本試験機で測定される値と，それぞれの実機で測定される値との相関に関しては慎重に検討する必要があるが，定性的な傾向は充分再現されており，潤滑剤の評価には非常に有効な試験機であろう。

謝辞

最後に，本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成（平成7年度研究開発助成AF-95039）によって行われた。財団に対し改めて深く感謝致します。

参考文献

- 1) A. Azushima: Tetsu-to-Hagane, 74(1988), 696.
- 2) 青木ほか: CAMP-ISIJ, Vol.11-2 (1998), 361.
- 3) 青木ほか: 第48回塑性加工連合講演会講演論文集 (1997), 593-594.
- 4) 青木ほか: 第49回塑性加工連合講演会講演論文集 (1998), 355-356.
- 5) 今江ほか: 日本鉄鋼協会 創形創質工学会シンポジウムテキスト 熱延潤滑圧延の現状と今後の課題 (1997), 15.
- 6) 日比ほか: 同上, 32.
- 7) 木原ほか: 同上, 36.
- 8) 後藤ほか: トライボロジー会議'96春予稿集 (1996), 427.
- 9) 薛ほか: CAMP-ISIJ, Vol.18-5(2005), 1234.
- 10) 小豆島ほか: 第56回塑性加工連合講演会講演論文集 (2005), 501-502.