

熱間焼き付き・摩耗試験機の開発と各種材質の耐摩耗性の評価

Development of the hot wearing-sticking simulator and evaluation of wear resistance for CPC materials



CPC技術開発室
沼 和宏
Kazuhiro Numa

CPC技術開発室
坂本 眞一
Shin-ichi Sakamoto

仙台工場 工場長
植田 勝裕
Katsuhiro Ueta

CPC技術開発室長
斉藤 弘道
Hiromichi Saito

要 旨

近年の製鉄業界における技術改善は、製品品質の向上、生産性の向上および製造コスト低減を目的としている。これに伴い、長寿命、高い信頼性を有したロール・ローラ材へのニーズが増大しており、当社では、そのニーズに対応した材質の開発に用いる熱間焼き付き・摩耗試験機を開発した。

今回、本試験機での摩耗試験評価技術の適正化を図るため、機械的諸因子が材料の摩耗特性へ及ぼす影響について調査し、合理的な結果が得られた。また、当社規格材の耐摩耗性の評価を実施し、実機使用されている材質間の耐摩耗性の比較に適用できる見通しが得られ、新たな知見を得ることが出来た。

Synopsis

Improvement of productus quality, improvement of productivity and reduction of production cost are the targets of steel makers in their technology improvement efforts in recent years. This has led to increasing demands for rolls and rollers with long durability and high reliability. A hot wearing-sticking simulator has been developed to do a research work about the above roll materials.

In order to verify the usefulness of the simulator in wearing tests of such materials and to establish proper evaluation techniques thereof, a series of tests were carried out to examine the effects of mechanical elements on the wear characteristics of the materials. The obtained results are convincing and legitimate. The wear resistance of standard CPC material was also evaluated. To our fresh knowledge, the results explain the possibility of using the simulator in comparing the wear resistance of verious types of rollers and rolls installed at rolling mills.

1 緒言

製鉄業界における技術改善は、製品品質の向上、生産性の向上および製造コスト低減を目的として行われている。それに伴い、例えば熱延ラインでは、従来よりも格段に性能を向上したロール、長寿命のロールが求められている。

そういった状況におけるロール・ローラメーカーの使命として、様々なニーズに対応できる製品（ロール・ローラ材）を研究、開発していくこと、さらには、ロール・ローラ材と熱延搬送材料との界面現象等について十分に究明、把握しておくことが必要不可欠である。

以上のようなことから、当社では、その使命を達成すべ

く、主に熱延ラインで使用されるロール・ローラ材の耐摩耗性および耐焼き付き性を定量評価するため、熱間焼き付き・摩耗試験機を開発し¹⁾、現在、その試験機による評価技術の適正化を図っている。

本稿では、まず熱間焼き付き・摩耗試験機の開発結果、その特徴について概要を説明する。次に、材料の耐摩耗性を評価するために実施した機械的諸因子が摩耗特性へ及ぼす影響の調査結果、および当社規格材の耐摩耗性を相対的に比較するため、所定の条件で実施した試験結果について報告する。

2 試験機開発における試験機能の検討

本試験機は、実機を再現し、材料の相対的な比較の可能な設備として開発したが、実際に熱延ラインで使用されているロール・ローラ材の主な使用特性としては、どのような特性が要求されているか、ランナウトテーブルローラとコイラーロールを例に考えてみる。

2.1 ランナウトテーブルローラ

Fig. 1 にランナウトテーブルローラの概要を示す。ランナウトテーブルローラは、最終仕上げスタンドと巻取機との間に位置しており、鋼板を安定した速度で搬送するという役割を持っている。鋼板を安定に搬送するために、ローラは鋼板速度の1.1~1.2倍の速さで回転しているが、その際、ローラと鋼板との間で滑りが発生する。この滑りが焼き付きなどの大きな原因となる。したがって、鋼板の表面性状に影響を及ぼしてはならないことから、Fig. 1 に示すような耐焼き付き性を始めとした諸特性が要求される。

また、ローラの耐用に及ぼす特性として、冷却水を使用することから腐食雰囲気となるため耐食性が要求され、鋼板と接触することから機械的な耐摩耗性が要求されている。

2.2 コイラーロール

次に、コイラーロールの使用特性について、その概要をFig. 2 に示す。コイラーロールは、熱延ラインの最終端に位置しており、ピンチロール、ラッパーロール、マンドレル等からなる設備である。その役割としては、仕上げ圧延

された鋼板を良好な状態で巻き取ることであるが、この場合も鋼板との間で滑りが発生するため、耐焼き付き性が要求される。さらに、コイラーロールは、鋼板の衝突による衝撃や押し付けた状態で滑りを伴って使用されることから、肌荒れの発生する可能性がある。肌荒れは、鋼板を巻き取る際に鋼板へ転写してしまうため、もたらす影響は大きい。したがって、重要な特性の一つとして、耐肌荒れ性も要求される。また、鋼板との衝突による衝撃に対して耐打ちキズ性、そして、その衝撃と滑りにより発生するチャターマーク、これは多角形摩耗の要因となることから、耐チャターマーク性が要求される。

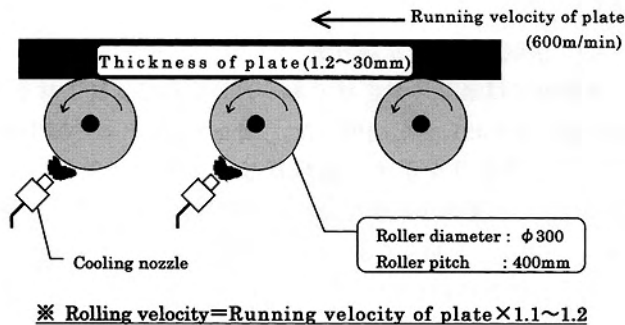
ロールの耐用に及ぼす特性としては、鋼板との接触に対して耐摩耗性、冷却水の使用に対して耐食性、ロールの過熱に対して耐酸化性、過熱・冷却の繰り返しに対して耐ヒートクラック性が要求される。

3 熱間焼き付き・摩耗試験機の開発

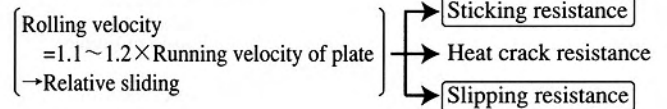
以上のように、各種ロール・ローラ材には、様々な特性が要求され、開発した試験機ではロール・ローラ材の必要特性の中で、枠で囲んでいる特性が評価可能になるように設計した。

3.1 試験機の概要

本試験機の外観写真をFig. 3 に、概略図をFig. 4 に示す。本試験機は、本体、高周波加熱装置、制御盤（シーケンサ、コンピュータ）より構成され、任意の設定による自動運転



(1)Steadily delaying of plate



(2)Durability of roller

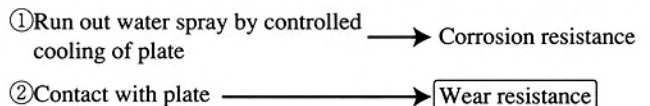
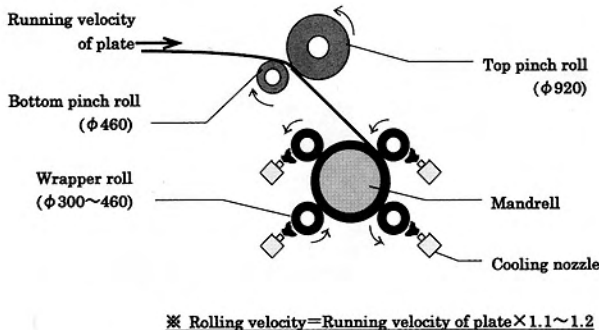
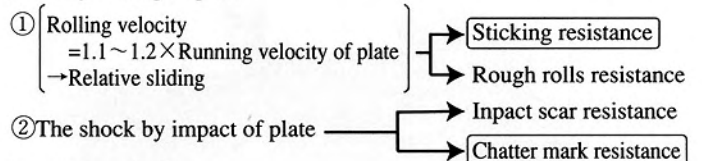


Fig.1 Necessary properties of run-out table roller



(1)Steadily coiling of plate



(2)Durability of roll

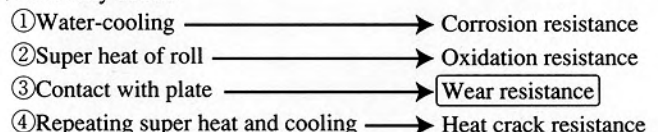


Fig.2 Necessary properties of coiler roll

方式を採用している。主な機構の概要については、次に記す通りである。

3.1.1 押し付け機構

押し付けは、油圧シリンダにより試験材側を駆動させて(エアースライド機構の導入)、所定の負荷荷重が掛けられるようにした。負荷荷重は、ロードセルで検出し、一定時間ごとにコンピュータでサンプリング出来るようになってる。

3.1.2 相手材の加熱

相手材の加熱は、高周波加熱装置(50kHz,30kw)で行い、温度は放射温度計で検出する。高周波加熱装置と放射温度計とを連結することで、試験温度を一定に保持できるようにした。

3.1.3 滑り率

試験材、相手材の各々にサーボモータを連結し、回転速度を制御することで、実機と同様の滑り率を再現できるようになっている。例えば、試験材および相手材の回転速度をそれぞれV1、V2(V2はV1と滑り率により自動算出)に設定して、2円筒間で滑りが発生するようにした。

3.1.4 冷却機構

冷却水は、冷却タンクにより循環して使用するようになっており、常に一定温度、一定流量に保持できる。

3.2 試験機の特徴

Table 1は、本試験機の設備仕様である。本試験機の大きな特徴として次の点が挙げられる。

Table 1 Apparatus specifications

The methods of test	<ul style="list-style-type: none"> Wearing test : double cylinder Sticking test : ① cylinder-block ② double cylinder
Temperature	400~900℃
Sizes of test piece	<ul style="list-style-type: none"> Cylinder : $\phi 100 \sim 300 \times 10\text{mm}$ Block : $10 \times 10 \times 20\text{mm}$
Size of mated piece	$\phi 100 \times 15\text{mm}$
Cooling conditions	<ul style="list-style-type: none"> Water Oil suspension
Rolling velocity	100~1000rpm
Load	1~50 kg
Sliding ratio	0~±100%

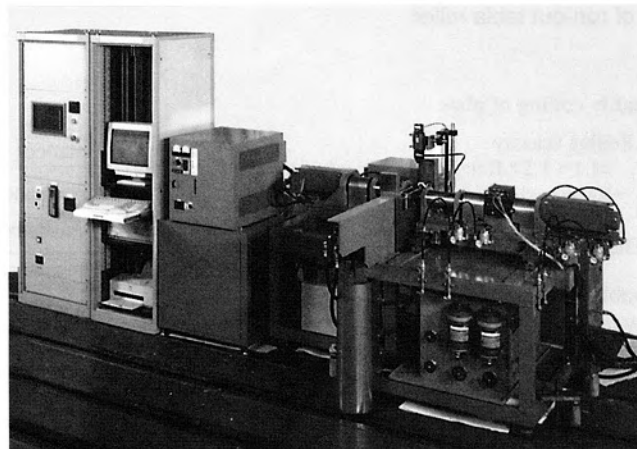


Fig.3 View of the hot wearing-sticking simulator

- (1) 押し付け機能に、エアースライド機構と油圧定加圧機構を導入したことにより、低負荷域からの荷重設定が可能である。
- (2) より実機に近い試験材サイズ(Max $\phi 300\text{mm}$)での試験実施が可能である。
- (3) 工業用水および油懸濁水など、実機に近い冷却水の選定が可能である。

4 摩耗に影響を及ぼす因子について

機械(金属)設備の寿命の約75%は、摩擦面における摩耗に起因すると考えられている。摩耗は、摩擦とその繰り返しにより、固体表面あるいはその表面下に亀裂が発生し、それが表面層の一部を除去せしめる程度に伝播する一種の疲労破壊であり、一般には、疲労摩耗と呼ばれることもある。この疲労摩耗に影響を及ぼすと考えられる諸因子として、接触圧力、表面粗さ、摩擦方向、回転速度、潤滑油の有無といったものが挙げられる²⁾。ロール・ローラ材の場合、前述の使用環境からも判るように、摩耗に影響を及ぼす因子として、荷重(接触圧力)、回転速度、滑り率(摩擦の方向)、表面温度、冷却水の有無などが挙げられる³⁾。つまり、ロール・ローラ材の耐摩耗性を評価するには、上記諸因子の変化に対して、どの様な摩耗挙動を呈するのかを調査する必要がある。

今回、本試験機により評価可能な諸特性のうち、耐摩耗性についての評価技術を確認するため、まず、摩耗に影響を及ぼす因子と材料の摩耗特性との関係について調査を実施した。

4.1 供試材および試験方法

試験材には当社の規格材であるFKC-303THT材を、相手材にはS45C材を適用した。Table 2にFKC-303THT材の化学成分を示す。試験材は、溶解炉で溶解(約1630℃)した溶湯を円筒型の砂型に鑄込み、熱処理(焼鈍680℃、炉冷)を施した後に採取した。なお、試験材および相手材の形状は、それぞれ $\phi 100 \times \phi 35 \times 10\text{mm t}$ 、 $\phi 100 \times \phi 35 \times 15\text{mm t}$ (端面R100)である。

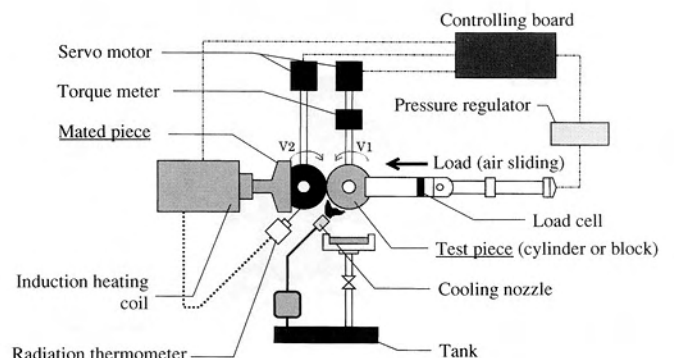


Fig.4 Schematic diagram of precise hot wearing-sticking simulator and parameter to be controlled

Table 2 Chemical compositions of FKC-303THT (wt%)

	C	Si	Mn	Cr	V	Mo
THT	0.91	1.30	0.76	13.2	3.35	0.47

試験は2円筒転動方式で実施した。相手材側の加熱は高周波加熱装置 (30kw) で行い、その表面温度を放射温度計により測定し、一定温度に保持した。また、試験材および相手材の回転速度をそれぞれV1、V2に設定して、2円筒間で滑りを発生させた。試験材の冷却は、冷却ノズルにより行った。

4.2 試験条件

Table 3 に、試験の基準とした試験条件を示す。今回の調査試験では、本試験機の設備上の信頼性を確認することも目的としているため、Table 3 の様に基準となる条件を任意に設定した。したがって、各因子の影響について調査する場合、その因子のみを数水準変化させ、その他の因子については、この基準条件に固定して試験を実施した。試験時間はいずれの試験についても3時間 (回転速度の影響調査時のみ2時間) とし、1時間ごとに摩耗減量を測定した。

Table 3 Referential conditions

Load	10 kg
Rolling velocity	500 rpm
Sliding ratio	5 %
Temperature	600℃
Cooling condition	Water cooling
Test time	3 h

4.3 試験調査結果

4.3.1 回転速度の影響

回転速度を200rpm~700rpmまで100rpmピッチで変化させ、他の条件は基準条件として試験を実施した。Fig. 5 は、試験終了2時間での総摩耗量である。一定時間、一定荷重において回転速度を速くした場合、試験材と相手材との接触距離が増し、それに伴って摩耗量も増加するようであり²⁾、試験結果からもその傾向がうかがえる。

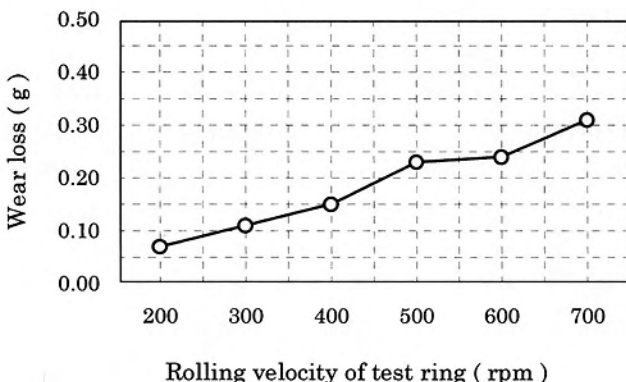


Fig.5 Relation between rolling velocity and wear weight loss

4.3.2 荷重の影響

次に、同様の方法で、荷重条件のみを5、10、20、30kgの4水準に設定して試験を実施した。Fig. 6 に各荷重条件で得られた1時間毎の摩耗量の結果を示す。時間の経過と共に、各水準ともほぼリニアに摩耗量が増加している。また、水準ごとに見た場合、荷重が大きくなるほど摩耗量も増えている。

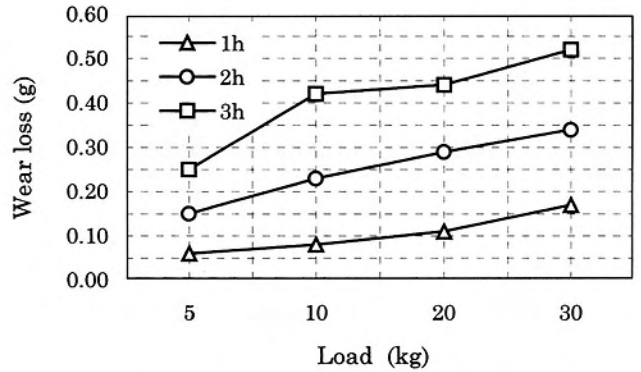


Fig.6 Relation between load and wear weight loss

金属材料の摩耗は、摩擦力との関係を例に挙げられる場合が多い。摩擦の環境にもよるが、一般的に摩擦力が大きければその時の摩耗量は増加すると考えられる^{2),3)}。Fig. 6 の結果から、荷重の増加に伴い摩擦力も増大し、したがって摩耗量も増加したものと考えられる。

4.3.3 温度の影響

試験は、相手材側の加熱温度を、常温 (25℃)、500℃、600℃、700℃に設定して行った。Fig. 7 に、相手材の加熱温度が試験材の摩耗量に及ぼす影響について調査した結果を示す。各温度について、1時間毎の摩耗量を示している。明らかに温度が高くなるにしたがって、摩耗量が増加している。試験材側は直接加熱していないが、相手材との接触により、その表面温度は上昇すると考えられる (摩擦熱も発生)。また冷却も行っていることから、試験材表面は急熱、急冷を繰り返している状態と同様である。つまり熱疲労の進行により、摩耗量が増加したのではないかと考えられる。

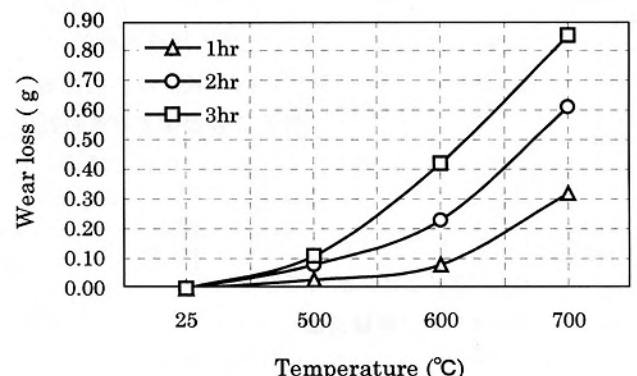


Fig.7 Relation between temperature and wear weight loss

また、相手材表面に生成する酸化スケールは、高温になるほど、より強固な状態になり、試験材の摩耗に影響を及ぼすことも、その要因として想定される。

4.3.4 滑り率の影響

滑り率の設定条件により、ロール・ローラ材と鋼板との間で生じる摩擦速度は変化する。摩擦速度を変化させた場合、金属材料には、ある摩擦速度（臨界速度）に達すると、摩耗量が最大になる特性があり、また臨界速度も、荷重の大小により変化すると考えられている⁴⁾。ここでは、荷重5、10、20kg各々について、滑り率を5、10、20%変化させた試験を実施した。Fig. 8は、各水準における3時間の試験終了後の総摩耗量である。

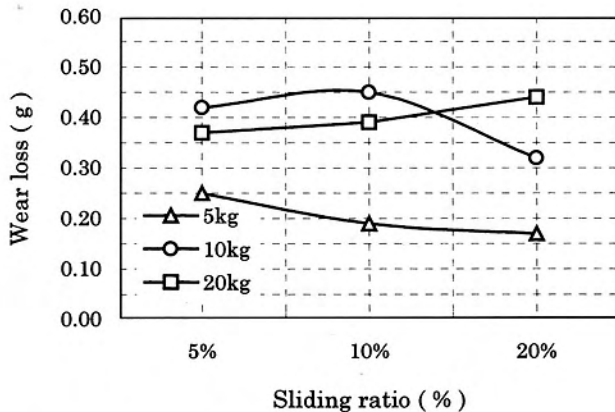


Fig.8 Relation between sliding ratio and wear weight loss

荷重ごとに異なった摩耗挙動を示している。荷重の変化に伴い、摩耗量が最大となる滑り率も変化しており、特徴のある結果が得られている。今後、摩耗に及ぼす滑り率の影響については、さらに高い滑り率について調査をすると共に接触界面に生じている現象を解析していく必要がある。

5 当社規格材の耐摩耗性の評価

次に、本試験機により、現在実機ロール・ローラとして適用されている材質について耐摩耗性の比較を行った。

5.1 ホットランテーブルローラ適用材

ホットランテーブルローラは当社の主要なCPC製品の一つであり、国内外の製鉄所において広く採用されている。その材質であるFKC-303系材（高Cr-V材）は、熱延搬送ローラ材として、必要なライン特性に合わせて材質特性の強化を図った結果、多岐に派生しており、現在までに、その代表的な特性については明確に把握されている。今回、FKC-303系材の耐摩耗性についての知見を得ることにより、今後の材質選定などに活用できると考えている。

5.1.1 供試材および試験方法

供試材は、FKC-303系の4材質とし、ホットランテーブルローラに適用している熱処理（焼鈍680℃、炉冷）を施した。Table 4に4材質の化学成分を示す。また、相手

材はS45C材とし、形状は、試験材および相手材それぞれφ100×φ35×10mm t、φ100×φ35×15mm t（端面R100）である。摩耗試験は、Table 5に示す条件で実施し、3時間の試験終了後に摩耗減量の測定を行った。

Table 4 Chemical compositions of FKC-303 series materials (wt%)

	C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Ni
303	1.75	1.25	0.75	13.0	5.50	-	-
4T	1.60	1.35	0.85	15.0	5.80	0.90	0.70
HT	1.25	1.25	0.75	13.0	4.00	0.50	-
THT	0.91	1.30	0.76	13.2	3.35	0.47	-

Table 5 Experimental conditions

Test material	303 4T HT THT
Mated material	S45C
Load	10 kg
Rolling velocity	500 rpm
Sliding ratio	5 %
Temperature	750℃
Cooling condition	Water cooling
Test time	3 h

5.1.2 試験結果および考察

FKC-303系4材質のマイクロ組織をFig. 9に、摩耗試験の結果をFig.10に示す。摩耗試験の結果から、摩耗量は303<4T<HT<THTの順に多くなっている。化学成分の一つであるVは、カーボン（C）と結合してMC炭化物を形成する元素である⁵⁾。FKC-303系材は、このMC炭化物の生成により耐摩耗性を出現させた材質であるが、マイクロ組織からも解るように、その分布量の多い材質ほど高い耐摩耗性を有していることがわかる。

5.2 熱延粗テーブルローラ適用材

熱延粗テーブルローラとして適用されている材質についても耐摩耗性の評価を行った。

5.2.1 供試材および試験方法

Table 6に試験条件を示す。供試材として、当社CPC製品の一つであるFKC-305材（ダクタイル鋳鉄）、FKS-401材（13Cr鋳鋼）およびFKS-402材（6Cr鋳鋼）の3材質を使用した。ここでは、実機使用条件に近づけるために、荷重を軽負荷の3.3kg（試験面10mm当りに換算した線圧）、試験材の回転数を380rpm、滑り率を20%に設定して摩耗試験を実施した。また、冷却を行う場合と行わない場合で、摩耗量にどのような影響を及ぼすかについての調査も実施した。なお、試験材の化学成分は、Table 7に示す通りである。

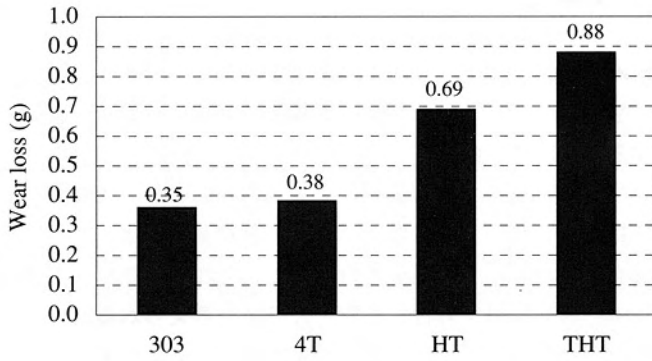


Fig.10 Results of wearing test for FK3-303 series materials

Table 6 Experimental conditions

Test materials	FKC-305 (Ductile cast iron) FKS-401 (13Cr cast steel) FKS-402 (6Cr cast steel)
Mated material	S45C
Load	3.3 kg
Rolling velocity	380rpm
Sliding ratio	20%
Temperature	750°C
Cooling conditions	Water cooling Air cooling
Test time	2 h

Table7 Chemical compositions of test materials (wt%)

	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni
FKC-305	3.50	2.60	0.35	<0.30	0.80	-	1.00
FKS-401	0.50	0.55	1.00	13.0	-	1.00	-
FKS-402	0.35	0.75	0.75	6.00	-	<0.50	-

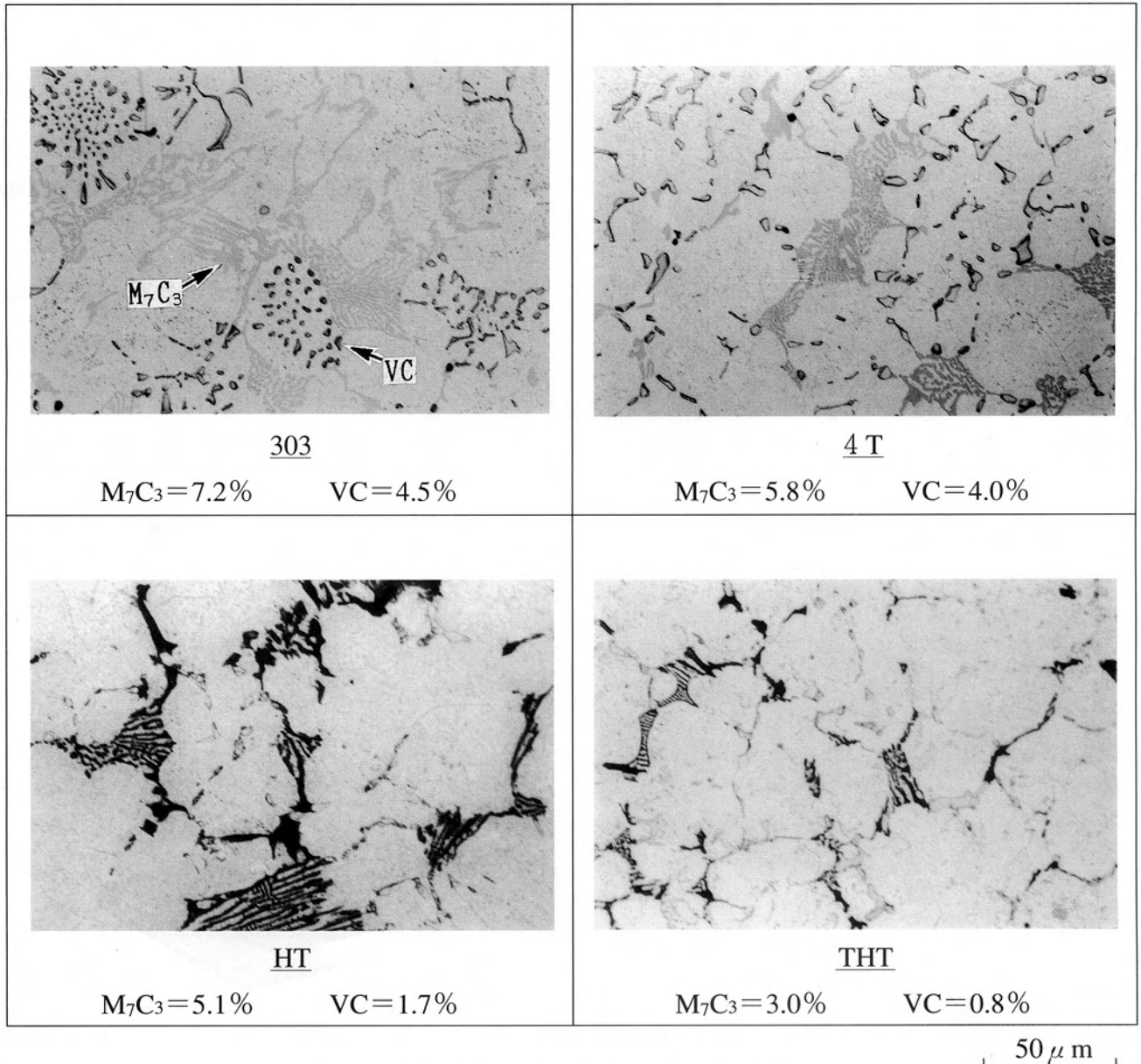


Fig.9 Optical micrographs of FK3-303 series materials

5.2.2 試験結果および考察

試験材冷却の有・無、それぞれの場合について3材質の摩耗試験の結果を、Fig.11に示す。3材質ともに、冷却を行った場合の摩耗量が、冷却を行わない場合よりも多くなっている。今回、冷却に使用した冷却水は水道水であるが、明らかに摩耗量に影響を及ぼしていることが解る。また、材質間の摩耗量を比較すると、いずれの場合においても、摩耗量はFKC-305<FKS-401<FKS-402の順で増加しており、FKC-305材が最も耐摩耗性に優れているという結果であった。この要因の一つとして、マイクロ組織中に晶出した黒鉛による摩耗量の軽減が考えられる。つまり、ダクタイル鋳鉄の組織中の球状化黒鉛が、試験面上で潤滑材の作用を有したため、他の2材質よりも摩耗量が少なかったのではないかと推定される。

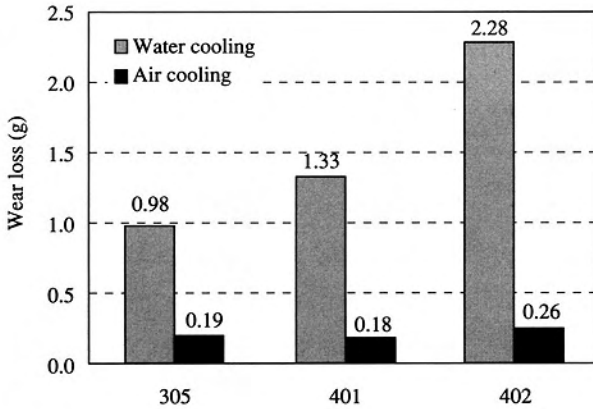


Fig.11 Results of the wearing test for materials of rough mill table roller

6 結論

今回、主に熱延ラインで使用されるロール・ローラ材の耐摩耗性および耐焼き付き性を定量評価することを目的に開発した熱間焼き付き・摩耗試験機の評価技術の適正化を図るため、機械的因子が材料の摩耗特性へ及ぼす影響について調査した。また、当社の代表的な材質として実機ローラに適用されている材質について、各材質の耐摩耗性の評価を行った。その結果を要約すると、次の通りである。

- (1) 材料の耐摩耗性に影響を及ぼすと考えられる諸因子（回転速度、荷重、加熱温度、滑り率）の変化に対して、再現性のある合理的な結果が得られた。
- (2) 各材質の特性、例えばマイクロ組織中に占める炭化物やマトリックスの割合などを反映した耐摩耗性は十分に再現でき、実機使用されている材質間の耐摩耗性の比較に適用できる見通しが得られた。

参考文献

- 1) フジコー技報, No 5 (1997), P.39
- 2) 岡本純三, 中山影次, 佐藤昌夫: トライボロジー入門 (摩擦・摩耗・潤滑の基礎), 幸書房, (1996)
- 3) 鉄鋼基礎共同研究会・鉄鋼材料の摩耗部会: 鉄鋼材料の摩耗 (1984.2)
- 4) 岡林邦夫: 鉄鋼の摩耗, 解説資料 (1980)
- 5) 李平, 坂本眞一, 斉藤弘道: フジコー技報, No 3 (1995), P.26

