

熱間圧延ロール用黒鉛鑄鉄の摩擦・摩耗特性

後 藤 邦 夫*・間 瀬 俊 朗*2

Friction and Wear Properties of Graphite Cast Iron for Hot Working Rolls

Kunio GOTO and Toshiro MASE

Synopsis :

Two-disc type wear test and disc-block type adhesion test were conducted on the graphite cast iron roll material in hot rolling mills for the purpose of improving its wear and adhesion resistance. The effects of the amount of graphite in microstructure on friction and wear behaviors of the graphite cast iron were studied under the mild and severe conditions. Austenitic stainless steel SUS304 and carbon steel S45C were selected as the mated materials.

The coefficient of friction is decreased by the increasing amount of graphite in microstructure, independent of mated materials and adhesion test conditions. Wear rate can be decreased by the increasing small amount of graphite, but it is increased by the increasing large amount of graphite, except for the case of the mated material S45C under the mild wear condition where wear rate is increased by the increasing amount of graphite.

A new friction and wear model is proposed and it enables to explain these experimental results.

Key words : friction; wear; hot rolling; work roll; graphite; cast iron; microstructure.

1. 緒 言

近年の熱間圧延用ミルにおける動向は、高圧下圧延による生産性向上、圧延製品の高品質化の傾向にあり、使用されるロールにかかる負荷は、ますます過酷なものとなってきた。このため、耐摩耗性に優れた表層部と強靱な中心部とからなる遠心鑄造製の複合ロール¹⁾²⁾が現在主流となっている。圧延材と接するロール表層部材料には、耐摩耗性向上のために炭化物を多量に含有した高クロム鑄鉄^{3)~5)}や高合金グレン鑄鉄^{6)~7)}などが使用されている。しかし、ステンレス鋼などのように変形抵抗が高く、しかも耐酸化性のよい材料を熱間圧延すると、ロール表面には摩耗はもとより焼付きが発生し、圧延製品に悪影響を及ぼす。したがって、早期のロール替えを余儀なくされ、圧延効率の低下をまねいている。

ところで、ロール表層部材料に関して、これまで高クロム鑄鉄は高硬度のクロム炭化物 [Cr_7C_3 (HV 2500)] を多量に含有しているため耐摩耗性に優れているが、熱

伝導性に劣るため焼き付きやすい⁴⁾。高合金グレン鑄鉄は少量の晶出黒鉛を含有し熱伝導性、潤滑性に優れているため焼付きは軽減されるものの炭化物がセメントタイト [Fe_3C (HV 1500)] であるため高クロム鑄鉄よりも摩耗しやすいことなどが指摘されていた。このように、摩耗には高硬度炭化物、焼付きには晶出黒鉛が有効であるという報告¹¹⁾¹²⁾は多いが、特に組織中に存在する晶出黒鉛の摩擦軽減効果に注目し、晶出黒鉛が摩擦・摩耗挙動へ及ぼす影響について定量的に取り扱った研究は数少ない。

そこで、本研究では熱間圧延ロールの耐摩耗性と耐焼付き性を向上させるに必要な知見を得るため、高硬度クロム炭化物と晶出黒鉛とを共に含有する黒鉛鑄鉄について、高温摩擦・摩耗試験を行い、その摩擦・摩耗挙動に及ぼす晶出黒鉛、相手材質、負荷条件の影響を明らかにするとともに、黒鉛鑄鉄の摩擦・摩耗挙動を定性的に説明することのできるモデルの提案を試みた。

平成元年9月本会講演大会にて発表 平成2年3月29日受付 (Received Mar. 29, 1990)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagasu-hondori Amagasaki 660)

*2 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (現:住友軽金属工業(株))工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Now Sumitomo Light Metal Industries, Ltd.)

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は、50 kg 高周波誘導溶解により Table 1 に示す化学組成の黒鉛鑄鉄を溶製した後、950°C×5 h の焼入れとそれに続く 550°C×5 h の焼もどしを施すことによって、熱間圧延ロールの必要硬度であるロックウェル C 硬度 58~59 に調整したものから採取した。なお、黒鉛の晶出量は C, Si, Ni を主とする化学組成と溶解時の Fe-Si 合金の接種量とを調整することによって変化させており、供試材の採取にあたっては、凝固速度の速い表層部チル層を十分に除去して行っている。

2.2 高温摩耗試験

高温摩耗試験には、二つの円板を圧接して回転させるころがりすべり方式の試験機を用いた。高温摩耗試験機の概要を Fig. 1 に示す。相手材加熱片には、SUS304 及び S45C を用いており、寸法は 120 mmφ×10 mm t で、摩耗試験片寸法は 100 mmφ×30 mm t とし、摩耗面は研削加工により表面粗さ 0.2~0.4 $\mu\text{m}Ra$ に仕上げた。試験条件を Table 2 に示す。試験は、低負荷 A と高負荷

Table 1. Chemical compositions (wt%).

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
2.8~3.2	1.5~3.0	0.7~1.0	4.0~7.0	7.0~8.0	2.0~3.5	~0.1

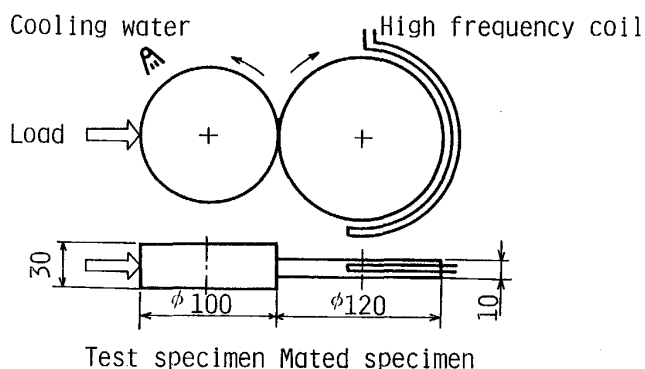


Fig. 1. Schematic illustration of two-disc type wear test.

Table 2. Wear test conditions.

Test condition	A	B
Mated specimen	SUS304, S45C	
Hertz stress	100 MPa	200 MPa
Temperature of mated specimen	800°C	
Rolling speed of test specimen	1.05 m/s	
Slip ratio	5%	20%

B の 2 条件について行った。荷重は油圧により最大 3 kN まで負荷でき、加熱片は周囲の高周波誘導コイルによって 800°C に加熱した。すべり率は、両軸の回転速度を変えることにより調整した。摩耗状況の調査は、熱間圧延仕上前段ロールの組替えまでの転動回数にはほぼ相当する 10^4 回転動した後にいった。

耐摩耗性は、Fig. 2 に示すように表面粗さ測定によって得られた摩耗プロフィールから摩耗断面積 S_i と摩耗幅 W_i を測定し、次式にて算出した平均摩耗深さ d_m によって評価した。

$$d_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{W_i} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $N=4$

2.3 高温摩擦試験

高温摩擦試験には、回転する円板側面に小型ブロックを押し付けるディスク・ブロック方式の試験機を用いた。高温摩擦試験機の概要を Fig. 3 に示す。相手材加熱片には SUS304 及び S45C を用いており、寸法は 100 mmφ×30 mm t で、摩擦試験片寸法は 10 mm×20 mm×40 mm とした。摩擦面は研削加工により表面粗さ 0.2~0.4 $\mu\text{m}Ra$ に仕上げ、さらに試験前にトルエンで脱脂洗浄した。試験条件を Table 3 に示す。試験は、低負荷 A と高負荷 B の 2 条件について行った。潤滑剤に関しては、摩耗試験同様に現象単純化の観点から使用しな

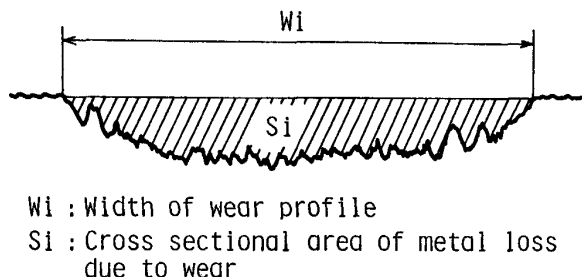


Fig. 2. Wear profile after 10^4 cycles.

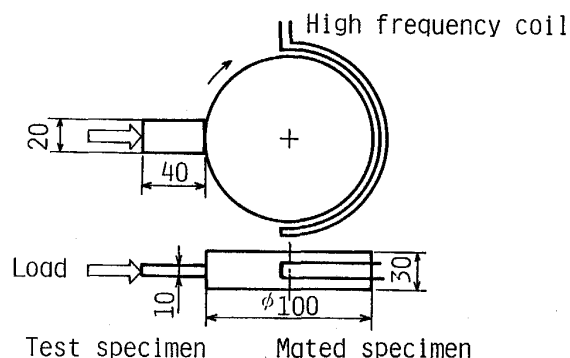


Fig. 3. Schematic illustration of disc-block type adhesion test.

Table 3. Adhesion test conditions.

Test condition	A	B
Mated specimen	SUS304, S45C	
Hertz stress	10 MPa	20 MPa
Temperature of mated specimen	800°C	
Rolling speed of mated specimen	0.05 m/s	
Test time	60 s	

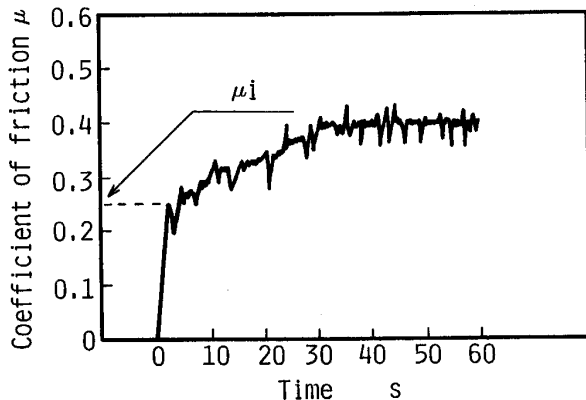


Fig. 4. An example of friction curve obtained by adhesion test.

かった。凝着性（焼付き）評価に用いた摩擦係数は、荷重とトルクの変化から自動計測され、Fig. 4 に示す摩擦曲線として記録した。摩擦係数は時間変化とともに複雑な挙動を示すが、接触面に発生した酸化保護皮膜が破壊されるような高応力高すべりの下では、摩擦直後の摩擦係数 μ_i が両金属間の凝着性の大小、すなわち焼付きの発生（焼付きやすさ）に関係する¹³⁾と考え、この値を採用した。

2・4 摩擦・摩耗面及び組織観察

試験後の摩擦・摩耗面及び微視組織を光学顕微鏡と走査電子顕微鏡により観察した。組織中の黒鉛量と炭化物量は、画像処理装置により測定した。黒鉛および炭化物とも 400 倍の画像において等価面積を有する円として解析し、100 視野を累積平均することによって面積率を求めた。

3. 実験結果

3・1 低負荷条件下における摩擦・摩耗挙動

低負荷条件下における摩擦係数 (μ_i)、摩耗深さ (d_m) と晶出黒鉛量との関係を Fig. 5 に示す。相手材 SUS304 の方が S45C よりも、 μ_i は晶出黒鉛量に関係なく高い。SUS304 との摩擦では、晶出黒鉛量が 2.0% 前後まで μ_i は低下するが、それ以上になってもあまり変化しない。一方、S45C との摩擦では、晶出黒鉛量に

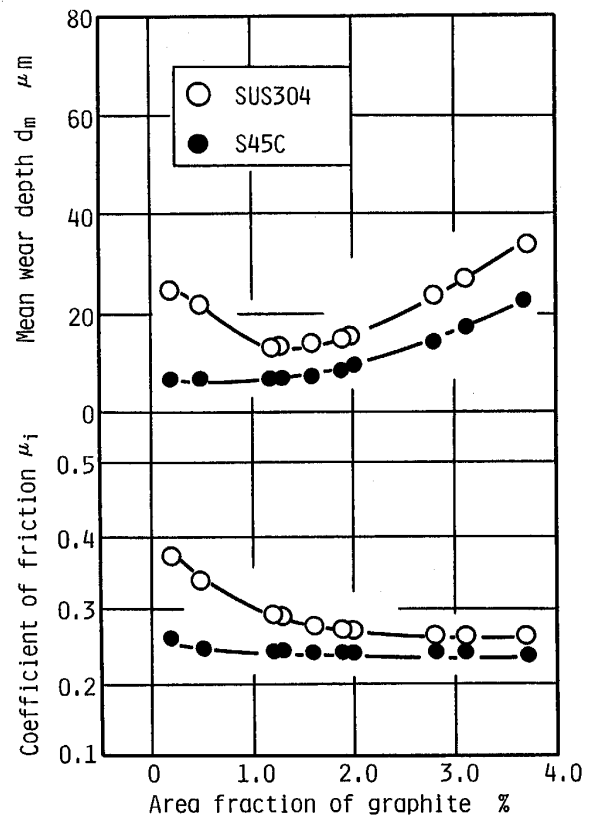


Fig. 5. Relation between coefficient of friction, mean wear depth and area fraction of graphite (Test condition A).

関係なく μ_i はほぼ一定値を示している。 d_m は相手材 SUS304 の方が S45C よりも晶出黒鉛量に関係なく大きく、摩耗しやすいことがわかる。SUS304 を相手材とした場合、 d_m は晶出黒鉛量がおよそ 1.2% のとき最小値をとり、以後漸増している。一方、S45C を相手材とした場合、晶出黒鉛量の増加にともなって単調に増加している。

3・2 高負荷条件下における摩擦・摩耗挙動

高負荷条件下における摩擦係数 (μ_i)、摩耗深さ (d_m) と晶出黒鉛量との関係を Fig. 6 に示す。 μ_i は、相手材が SUS304 の場合も S45C の場合も、晶出黒鉛量がそれぞれ 3.0%, 2.0% までは低下するが、それ以上ではほぼ一定値をとる。また、低負荷条件下と同様に、SUS304 の場合の方が S45C の場合よりも全般的に μ_i が大きく、上記のように一定値をとりはじめる晶出黒鉛量も異なっている。 d_m は相手材が S45C よりも SUS304 の方が大きく、ともに下に凸の曲線を描いている。すなわち、 d_m が最小になる晶出黒鉛量が存在し、その値は SUS304 が相手の場合およそ 2.0% で S45C が相手の場合およそ 1.0% である。

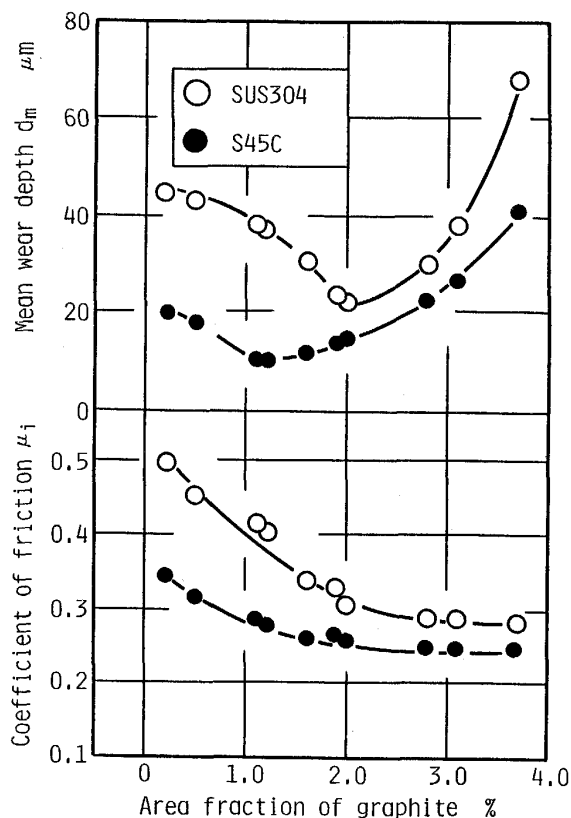


Fig. 6. Relation between coefficient of friction, mean wear depth and area fraction of graphite (Test condition B).

3.3 摩擦・摩耗面観察結果

高負荷条件下で SUS304 を相手材とした際に生じた摩擦・摩耗面を光学顕微鏡で観察した結果をそれぞれ Photo. 1, Photo. 2 に示す。Photo. 1 において晶出黒鉛量が少ない(A)には相手材もしくは酸化物と考えられる移着物すなわち焼付きが観察されるが、(B)および(C)の摩擦面は美しい光沢を呈している。Photo. 2 において、晶出黒鉛量の少ない(A)には、相手材もしくは酸化

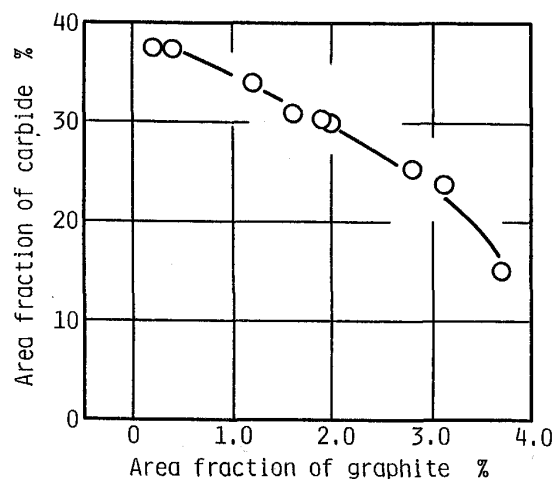


Fig. 7. Relation between area fraction of carbide and area fraction of graphite in graphite cast iron.

物と考えられる移着物が積層した部分とそれが剥離した部分とが観察される。一方、晶出黒鉛量の多い(C)には、摩擦方向に平行に多数の引っかき疵が生じているのが観察される。なお、(B)は(A)と(C)との中間的な摩耗面の様相を呈している。

3.4 組織同定結果

今回試験に供した黒鉛鑄鉄の代表的な顕微鏡組織を Photo. 3 に示す。組織は、基本的に焼もどしマルテンサイトの基地、 $(Cr, Fe)_7C_3$ を主体とした炭化物および黒鉛からなっている。試験片の摩擦・摩耗面近傍における晶出黒鉛量と炭化物量を画像処理装置により測定した結果を Fig. 7 に示す。一般に、黒鉛鑄鉄の晶出黒鉛量は、溶解成分、鑄込条件、接種処理等によって左右されるため、必ずしも炭化物量と相関があるわけではないが、本供試材の場合、晶出黒鉛量と炭化物量とはおおむね負の直線関係にあることがわかる。特に、晶出黒鉛量が 0~3% の範囲では、炭化物量 (Ca) と晶出黒鉛量 (Gr)

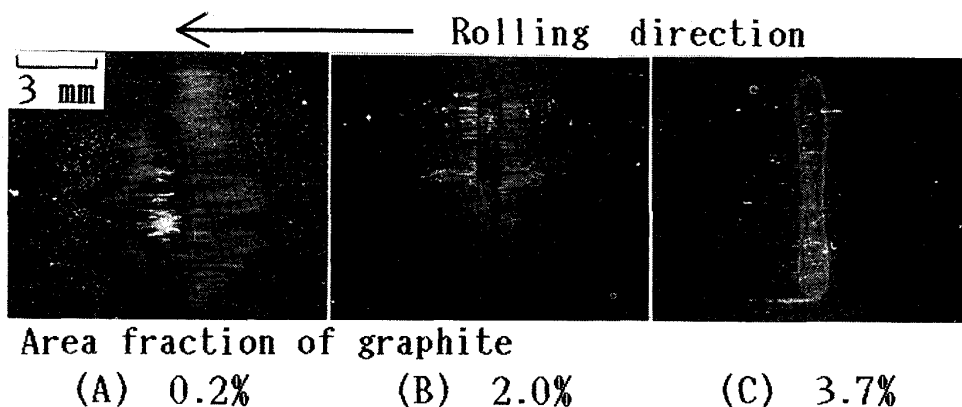


Photo. 1. Surface appearances of test specimen after adhesion test under the severe condition (Mated specimen SUS304).

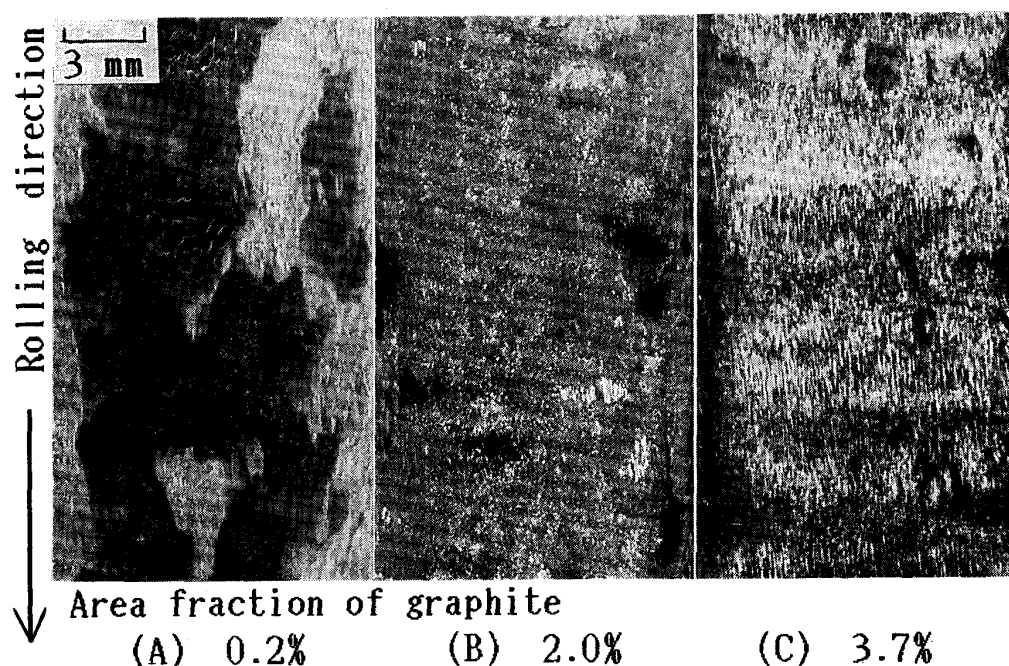


Photo. 2. Surface appearances of test specimen after wear test under the severe condition (Mated specimen SUS304).

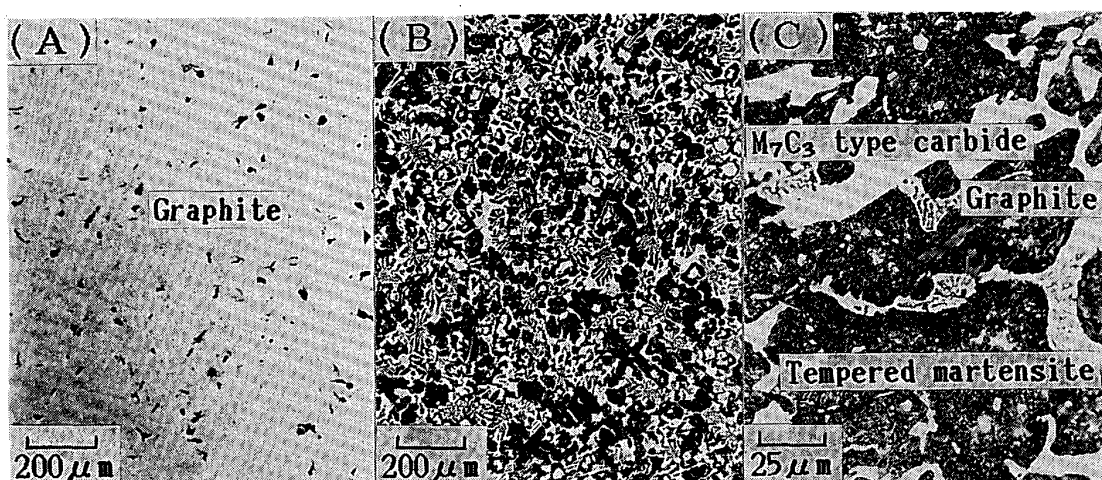


Photo. 3. Typical microstructure of test specimens. (A) shows graphite distribution and (B), (C) shows tempered martensite, M_7C_3 type carbide and graphite appeared by nital etch.

との関係は次の直線に近似できる。

$$(Ca) = 40 - 5(Gr) \dots \dots \dots (2)$$

4. 考 察

4.1 摩擦・摩耗挙動に及ぼす晶出黒鉛の影響

組織中に黒鉛を有する材料は、一般に熱伝導率が高いこと、応力集中源となって多数のき裂を生成させるので応力緩和効果を有すること、弾性係数を低下させるので発生応力が小さいことなどの性質をもっているため、熱き裂に対する抵抗が高いと考えられている¹⁴⁾。さらに、

黒鉛はそれ自身固体潤滑剤として作用することが期待できるため、晶出黒鉛が接触表面に露出すると、摩擦を軽減し、耐摩耗性の向上に寄与するとの見方もあった¹⁵⁾¹⁶⁾。そこで、まず黒鉛鑄鉄の組織中に含有される黒鉛の潤滑作用に注目し、その影響が負荷条件や相手材質などの違いによってどのように摩擦・摩耗挙動に現れてくるかを明らかにする。

摩擦試験の結果は、熱間における晶出黒鉛による摩擦係数の低下、すなわち摩擦軽減効果は、相手材質にもよるが、おおむね晶出黒鉛量が増加すれば向上することを

示している。また、晶出黒鉛量の増加によって摩擦軽減効果が著しい領域とほとんど期待できない領域とがあり、その境界は相手材質や負荷条件によって変化している。摩擦軽減効果が飽和する晶出黒鉛量は、S45C よりも SUS304 を相手材とした方が、また低負荷条件下よりも高負荷条件下の方が高い値となっている。こうした条件下では、摩擦を大きく軽減するためには、より多くの晶出黒鉛が必要であることを示している。このように材料内部に初めから黒鉛を有する場合でも、外部から黒鉛を供給する場合と同様に、摩擦軽減効果を示すことが判明した。しかも、外部からの供給とは異なり、材料内部に黒鉛が存在することは接触界面へ黒鉛が確実に供給、導入されるという点で有利であるともいえよう。さらに、高負荷になると摩耗が増加し、その過程で新しい黒鉛粒が次々に表面に露出してくるため、摩擦軽減効果を同時に高くなると考えられる。したがって、組織中に黒鉛を有する材料は耐摩耗性が特に要求されないような用途においては焼付防止材料としてうってつけといえる。

一方、摩耗挙動についてみると、黒鉛晶出量の増加に伴って摩擦が軽減する領域では、摩耗も減少するが、摩擦軽減効果が飽和した領域では、摩耗はしだいに増加しはじめる。さらに、摩耗試験後の摩耗面観察から、晶出黒鉛量が増加するにしたがって、酸化物あるいは相手材の焼付きと考えられる部分の占める割合が少なくなり焼付きが軽減されている。しかし、晶出黒鉛量が増えすぎると、焼付部分はなくなるものの黒鉛の欠落や脱落によって助長された引っかき状の疵すなわちアブレシブ摩耗が生じている。このように、黒鉛を含有する材料は、晶出黒鉛量が増えれば摩擦軽減効果は改善されるものの、摩耗は必ずしも単調に減少するわけではないことが明らかになった。したがって、耐摩耗性が要求される用途への黒鉛を含有する材料の適用にあたっては、相手材質や負荷条件に応じて摩耗が最小になるような晶出黒鉛量をあらかじめ見つけておく必要がある。このような摩擦・摩耗軽減へのロール材質面からのアプローチの方法は、外部から黒鉛のような潤滑剤を供給する場合でもその量（濃度）が多ければ良いというものではなく、摩擦軽減効果、導入性、スリップ性を考慮して適切な量を定める方法とよく似ている。

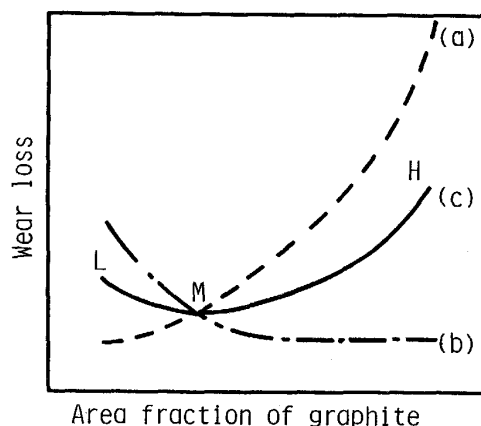
4.2 相手材の影響

今回相手材として用いた S45C と SUS304 は、熱間変形抵抗と耐酸化性の 2 点で供試材の摩擦・摩耗挙動へ与える影響が大きく異なっている。熱間での変形抵抗が高いことは実質的な負荷の増加を意味し、酸化物が生成

しやすくしかも密着性が高いこと、すなわち酸化物が常に供試材との間に存在するならば、摩擦・摩耗は軽減されると考えられる。800°C における S45C と SUS304 の変形抵抗は、明らかに SUS304 の方が高い。しかも、SUS304 の酸化物の発生量は S45C よりも少ないため、摩擦・摩耗環境は SUS304 の方が非常に厳しいことが予想される。試験の結果からも、SUS304 では摩擦係数と摩耗深さが S45C よりも高い値を示していることがこれを裏付けている。一方、S45C は熱間変形抵抗が低く、しかも酸化物によって接触界面が保護されやすい。したがって、低負荷条件下での S45C を相手材とした摩耗試験において、晶出黒鉛量に関係なく摩擦係数と摩耗量に小さな値を示したのは、晶出黒鉛による摩擦・摩耗軽減効果以上に酸化物の介在による軽減効果が大きかったと考えられる。したがって、高負荷条件下になると、酸化物が破壊されやすくなるため、SUS304 と同様に金属間接触に近い厳しい摩擦・摩耗状態となり、SUS304 に似た摩擦・摩耗挙動を示したものと考えられる。

4.3 摩擦・摩耗メカニズム

以上の結果から、黒鉛鑄鉄の摩擦・摩耗挙動は、晶出黒鉛の欠落や脱落による摩耗の助長作用と表面に露出あるいは欠落や脱落した晶出黒鉛の接触界面への導入による摩擦の軽減作用との大小関係によって支配されると考えられる。すなわち、晶出黒鉛量と摩耗量との関係は、Fig. 8 により定性的に説明される。接触界面へ黒鉛が導入され摩擦が軽減されることによる摩耗量の変化は、摩擦係数の変化にはほぼ対応するので、(b) のような右下がりの曲線として考えてよい。一方、黒鉛が欠落や脱落して摩耗を助長することによる摩耗量の変化は、晶出黒



- (a) A proportion of wear enhanced by graphite
- (b) A proportion of wear relieved by graphite
- (c) Total wear loss

Fig. 8. Schematic illustration of effects of graphite in microstructure on wear behavior.

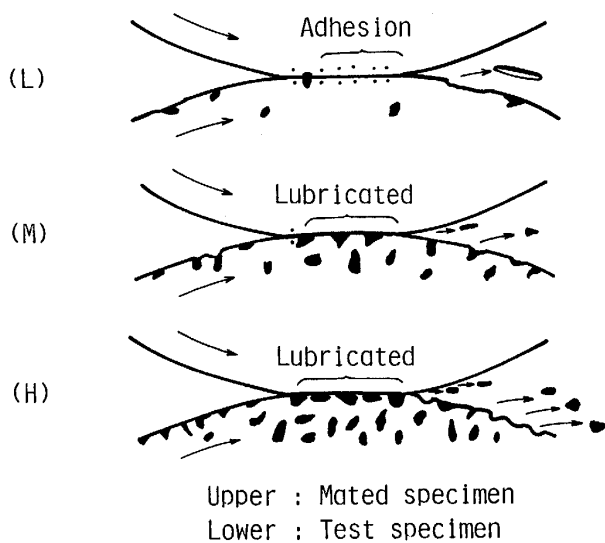


Fig. 9. Explanatory figure of friction and wear behaviors in graphite cast iron.

鉛の面積率に比例する項と表面強度に反比例する項とからなるため、(a)のような右上がりの曲線になると考えられる。したがって、ある負荷条件下における晶出黒鉛量と摩耗量との関係は、摩擦軽減曲線を(b)、摩耗助長曲線を(a)とすると、(a)と(b)とを合成した曲線(c)で表される。この結果、図中 M が摩耗が最小となる点として出現する。また、負荷条件が変化することにより曲線(a)と(b)も変化し、その結果 M 点の位置も移動する。Fig. 9 に Fig. 8 中の L, M, H 点にそれぞれ対応する接触面の様子を模式的に示してみた。晶出黒鉛量が少ない L では、摩擦係数も高く、凝着摩耗を生じている。しかし、晶出黒鉛が接触界面を適度に被う M では、摩擦係数も低く、摩耗も少なくなる。一方、晶出黒鉛量が過剰な H になると、摩擦係数は低いものの、黒鉛の欠落や脱落さらに残った部分が高面圧を受けて次々に破壊されるため、摩耗が著しくなる。

晶出黒鉛を有する材料に関しては、摩耗が増加したために焼付きが成長できず、その結果として耐焼付きが良いという考え方や、晶出黒鉛には潤滑作用はなく、焼付け物の移着を阻止する作用によって耐焼付き性を向上させるとの報告¹⁷⁾もある。また、実機ミルにおける高合金グレン鑄鉄ロールの使用実績などから、晶出黒鉛量が少ないほど耐摩耗性は向上するとの報告¹⁸⁾¹⁹⁾もある。しかし、これは比較的負荷の軽い仕上後段スタンドでの炭素鋼圧延の結果であることから、本研究における低負荷条件下で S45C を相手材としたケースに相当し、黒鉛の欠落や脱落による摩耗助長効果が現象として優勢に現れたものと考えられ、本研究結果とは何ら矛盾していない。

しかし、外部潤滑との関係や組織中の炭化物あるいは酸化物の影響などを今後さらに詳細に調査することが必要である。

5. 結 言

熱間圧延ミルに使用される黒鉛鑄鉄ロールの耐摩耗性と耐焼付き性を向上させることを目的に、面圧、すべり率の異なる摩擦・摩耗試験条件下において相手材質を SUS304, S45C とした場合の黒鉛鑄鉄の摩耗量や摩擦係数などを二円板型摩耗試験と円板-ブロック型摩擦試験により調べ、黒鉛鑄鉄の摩擦・摩耗挙動に及ぼす組織中の黒鉛量の影響を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 摩擦係数は、相手材質や試験条件にも依存するが、おおむね組織中の黒鉛量の増加とともに低下する。

(2) 摩耗量は、低負荷条件下で S45C を相手材質とする場合を除いて、組織中の黒鉛量の増加とともにいったん減少した後、増加する。

(3) 低負荷条件下で S45C を相手材質とする場合には、接触界面に摩擦係数の低い保護酸化物が存在しており、摩耗量は黒鉛量の増加とともに単調に増加する。

(4) 組織中の黒鉛には、黒鉛自身の潤滑作用により接触界面の摩擦を軽減させる働きと、黒鉛が容易に欠落や脱落することにより摩耗を助長させる働きとがあるとの考えに基づいて提案した黒鉛鑄鉄の摩擦・摩耗モデルは、これらの実験結果をうまく説明することができる。

文 献

- 1) M. GROUTES and K. INESTAM: *Iron Steel Eng.*, **56** (1979) 4, p. 42
- 2) 本田順太郎: *鉄と鋼*, **69** (1983), p. 507
- 3) H. E. MULLER: *Iron Steel Eng.*, **52** (1975) 10, p. 63
- 4) 橋本 隆, 片山博彰, 船越 淳, 瀬戸良登, 中川義弘: *クボタ技報*, **7** (1982), p. 21
- 5) 野口 紘, 田中智夫, 川元孝一, 梅本純生: *鉄と鋼*, **70** (1984), p. 138
- 6) 佐野義一, 枝 徹也, 杉村幸彦, 平田一雄: *日立金属技報*, **1** (1985), p. 57
- 7) 西村好宏, 佐野義一: *鉄と鋼*, **70** (1984), S1213
- 8) 樋口紀生, 鷲田政昭, 橋本 隆, 中川義弘, 片山博彰, 森川 長: *鉄と鋼*, **71** (1985), S113
- 9) 加藤 治, 川並高雄: *塑性加工連合講演会* (1984), p. 493
- 10) 加藤 治, 川並高雄: *塑性加工*, **28** (1987), p. 264
- 11) 野口 紘, 渡辺靖夫: *川崎製鉄技報*, **19** (1987), p. 45
- 12) 甲賀孝彦, 中村 宏, 橋本 隆, 中川義弘, 森川 長, 片山博彰: *鉄と鋼*, **73** (1987), S364
- 13) 加藤 治, 川並高雄: *塑性加工春季講演会* (1985), p. 381
- 14) 杉村幸彦: *鑄物ノート*, **47** (1982), p. 27
- 15) 杉下潤二, 藤吉正之進: *塑性加工連合講演会* (1979), p. 513
- 16) 杉下潤二, 藤吉正之進: *潤滑*, **24** (1979), p. 47

-
- 17) 加藤 治, 内田 秀, 菊間敏夫: 製鉄研究 (1989) 335,
p. 35
- 18) 佐野義一: 第 81 回塑性加工シンポジウム (1982), p. 12
- 19) 佐野義一, 杉村幸彦, 枝 徹也, 平田一雄: 日立評論,
67 (1985), p. 303
-