

## 技術資料

## 高炭素鋼の耐アブレシブ摩耗性に及ぼす組織因子の影響

武田 公良\* 壽 福 博 之\*\* 田 頭 聡\*\*\* 平 松 昭 史\*\*\*\*

## Effect of Microstructure on Abrasive Wear Resistance in High Carbon Steel

Kimiyoshi Takeda, Hiroyuki Jufuku, Satoshi Tagashira, Akifumi Hiramatsu

## Synopsis :

Wear resistance is one of the most significant properties of the steels used as machine parts after various heat treatment. In the quench and tempered 0.85% carbon steel, we investigated the wear testing condition whether two-body or three body abrasive wear occurs, and the effect of microstructure on the specific wear amount in the each wear mode. Main results obtained are as follows ;

- (1) Abrasive wear mode which is two-body or three-body wear, depends on tempering hardness and adhesion force of grain particles in the grindstone disk.
- (2) Specific wear amount increases with increasing the hardness of specimens in case wear mode transits from three-body wear to two-body wear.
- (3) Specimen which exhibits pearlite structure shows less specific wear amount than those having tempered martensite or ferrite and spherical cementite structure in both two-body and/or three-body abrasive wear mode.

## 1. 緒 言

高炭素鋼は部品形状に加工された後に、適正な熱処理を施した上で、種々の機械部品として使用される例が多い。機械部品同士が互いに摺動する使用環境、例えばチェーンでは、金属間の摩耗が生じるため、耐摩耗性の向上は部品としての性能維持のために重要である。また、丸鋸や草刈刃等の刃物として使用される場合には、使用中の安全性確保のための韌性向上とともに、切断性能維持の点から刃先部の耐摩耗性向上が必要である。これらの用途においては、摩耗形態の中でもアブレシブ摩耗が支配的である。

アブレシブ摩耗は、硬質粒子の存在形態の違いによって二元アブレシブ摩耗（以下、二元摩耗）と三元アブレシブ摩耗（以下、三元摩耗）に分けられることが知られており<sup>1), 2)</sup>、鋼材が使用される環境下では二元摩耗、

三元摩耗ともに重要な役割を果たしている。

これまでの研究では、Sasada<sup>3)</sup>らが同じ供試材を用いても摩耗形態が二元摩耗と三元摩耗のどちらであるかにより比摩耗量が全く異なることを報告している。この結果は、鋼材の耐摩耗性が摩耗形態の影響を受けていることを示唆したものと考えられる。しかしながら、アブレシブ摩耗を二元摩耗と三元摩耗に分離して、それぞれの摩耗形態におよぼす材料因子、特に金属組織の影響を系統的に調査した例は少ない。

そこで、筆者らは二元摩耗と三元摩耗を単純な摩耗試験方法で発現する方法を把握した上で、高炭素鋼の耐摩耗性におよぼす金属組織の影響を調査した結果を報告する。

## 2. 二元摩耗と三元摩耗について

アブレシブ摩耗は硬質粒子が材料（ここでは鋼）の中

\*鋼材研究部鋼材第二研究チーム \*\*商品開発部 主任部員  
\*\*\*鋼材研究部鋼材第二研究チーム 主任研究員 \*\*\*\*鋼材研究部 部長

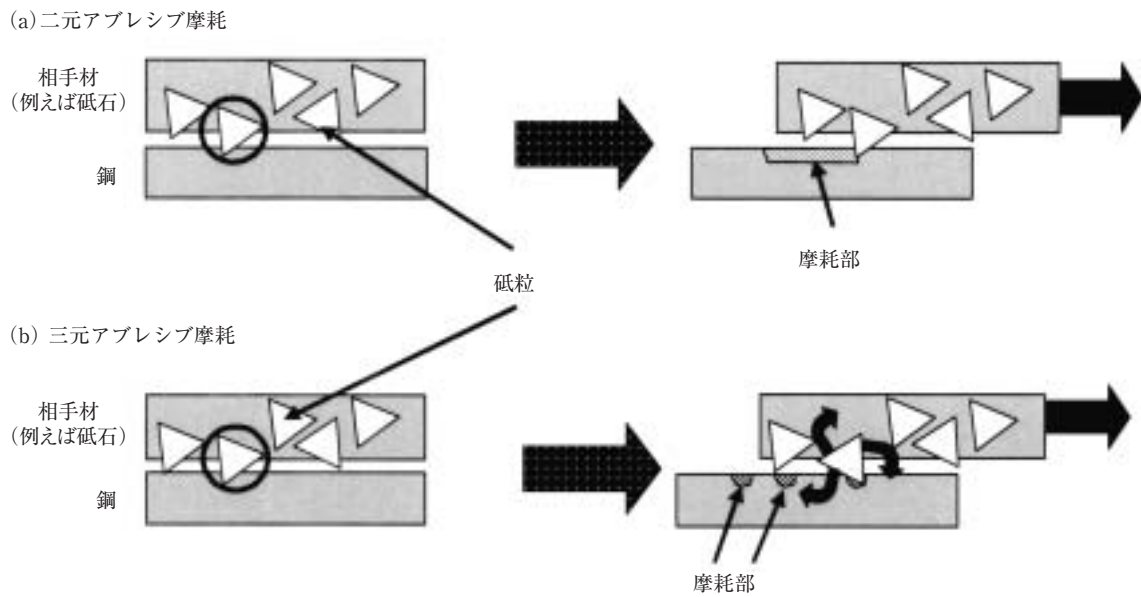


図1 アブレシブ摩耗の模式図 (a) 二元アブレシブ摩耗, (b)三元アブレシブ摩耗

Fig. 1 Schematic illustrations of abrasive wear. (a) is two-body abrasive wear and (b) is three-body abrasive wear.

に押込まれ、引き摺られることにより、材料が掘り起こされたり、削り取られたりする摩耗現象である。前述したように、アブレシブ摩耗は硬質粒子の関与の仕方により二元摩耗と三元摩耗に分類される<sup>1), 2)</sup>。図1は二元摩耗と三元摩耗の模式図である。二元摩耗は、エメリー紙のように硬質粒子が相手側にしっかり固定された上で、材料が摩耗する形態である。一方、三元摩耗は硬質粒子が材料との間に挟まり遊離した状態で摩耗が進行する形態である。二元摩耗と三元摩耗の摩耗後の相違点を表1に示す<sup>3)</sup>。二元摩耗の比摩耗量は三元摩耗よりも一

桁多い。二元摩耗における摩耗痕は三元摩耗よりも線状を示すとされている。また、二元摩耗での摩耗粉は紐状となり、三元摩耗では塊状となることが特徴である。

### 3. 実験方法

#### 3.1 供試材

供試材の素材には、表2の化学成分を有するJIS-SK85鋼の実機熱延板を用いた。熱延板の金属組織は図2に示すとおりパーライト単一組織である。この熱延板を用いて

表1 二元アブレシブ摩耗と三元アブレシブ摩耗の特徴の比較

Table 1 Comparison of two-body and three-body abrasive wear characteristics

比摩耗量	二元アブレシブ摩耗の方が三元アブレシブ摩耗より一桁程度多い
摩耗痕	二元アブレシブ摩耗では三元アブレシブ摩耗よりも線状痕が強く現れる
摩耗粉	二元アブレシブ摩耗では紐状、三元アブレシブ摩耗では塊状の摩耗粉が多い

表2 供試材の化学成分

Table 2 Chemical compositions of steel used

	(mass%)				
	C	Si	Mn	P	S
SK85	0.81	0.24	0.39	0.022	0.009

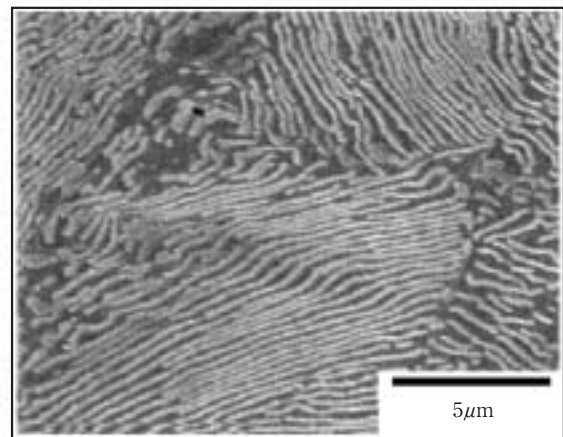


図2 素材の金属組織

Fig. 2 Microstructure of hot-rolled steel used.

表3 供試材の作製方法  
Table 3 Producing methods of specimens

組織/硬さ	作製方法	硬さ/HV	T/°C
		焼戻マルテンサイト組織 /300、400、500、600、700HV	
パーライト組織 /300HV		400	490
		500	400
		600	310
		700	250
フェライト+球状炭化物組織 /300HV			

種々の硬さおよび金属組織を得るために表3に示す熱処理および冷間圧延を施した。その詳細を以下に記述する。

3.1.1 硬さの異なる試験片作製

組織形態を焼戻マルテンサイト組織に揃えた硬さの異なる試験片を作製するために、850°Cで10minの均熱後に油焼入れし、250~620°Cで30minの焼戻しを施して、300~700HVに調質した。

3.1.2 組織形態の異なる試験片作製

硬さは300HVで同等とし、金属組織が異なる試験片を作製するために以下の処理を施した。焼戻マルテンサイト組織材は、850°Cで10minの均熱後に油焼入れし、620°Cで30minの焼戻しを施した。パーライト組織材は、850°Cで10minの均熱後に630°Cで30minの恒温変態処理を施した。フェライト+球状炭化物組織材は、500°Cで10hの焼鈍後、板厚減少率60%の冷間圧延を行い、さらに580°Cで10hの焼鈍を施した。

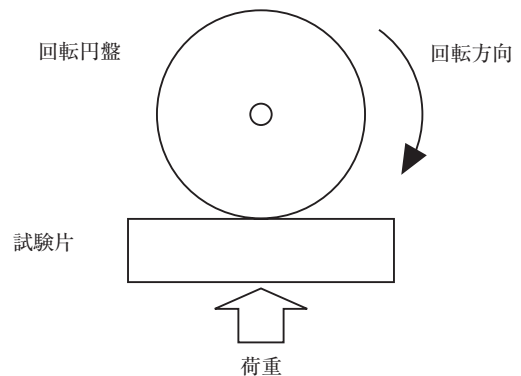
3.2 摩耗試験方法

摩耗試験は大越式迅速摩耗試験機を用いて実施した。この試験機は、図3に示すように板状の試験片を回転している円盤に押し付け、一定距離摩擦させる装置である。本実験では、相手材である回転円盤に砥石製のものを用いた。耐摩耗性の評価には、図4に示した試験後の摩耗痕の長さおよび幅を測定することにより、摩耗部の容積を算出し、摩耗部の容積を接触荷重および接触面積で除した値である比摩耗量を用いた。試験条件は、摩擦速度を0.61m/s、試験荷重を62N、摩擦距離を200m、試験環境を無潤滑とした。試験後には試験片の摩耗面と断面、および摩耗粉を走査型電子顕微鏡（以下、SEM）にて観

察した。

本実験において、摩耗形態が二元摩耗と三元摩耗のど

(a)試験前



(b)試験後

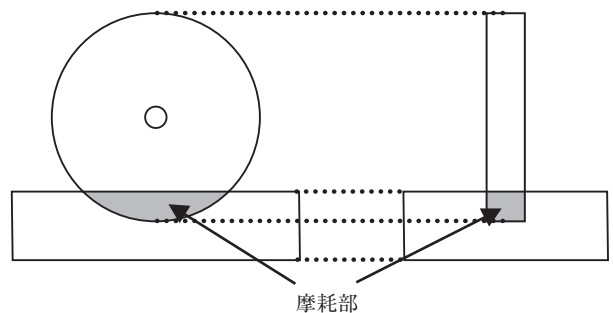


図3 大越式迅速摩耗試験の概略図

Fig. 3 Schematic illustration of Ogoshi's universal wear testing.

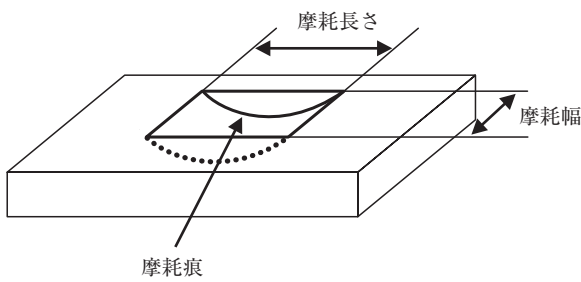


図4 摩耗痕の寸法測定部

Fig. 4 Measuring parts of wear track.

ちらが主体になるかは、砥粒が砥石から脱落して遊離粒子になる度合いにより決まると考えられる。結合剤の結合力が弱く、砥粒の粒径が小さいほど、砥粒は脱落しやすいとされているので、結合剤（砥粒の材質）と砥粒の大きさ（粒度）を変化させた三種類の砥石を用いた。砥石の詳細を表4に示す。砥粒の材質は、立方晶系窒化ホウ素（以下、CBN）と緑色炭化ケイ素（以下、GC）の二種類であ

る。砥粒の硬さはヌープ硬さでそれぞれ4800HK、2500HKである。ヌープ硬さとビッカース硬さの換算表は存在しないが、目安として4800HKでは6000HV、2500HKでは3100HV程度と考えられる。砥粒の粒度は、CBNでは#120（平均粒径125 $\mu$ m）と#400（平均粒径37 $\mu$ m）を、GCでは#120を用いた。以下、砥粒材質と粒度を合わせてCBN120、CBN400、GC120と表記する。砥粒の結合力はCBNの方がGCよりも強く、粒径が大きいほど強いことから、CBN120の砥粒が最も脱落到しにくいと推定される。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 二元摩耗と三元摩耗の発現条件

二元摩耗と三元摩耗の発現条件の把握には、3.1.1項に記述した方法により、組織形態を焼戻マルテンサイト組織に揃え、硬さを300~700HVに調整した試験片を用いた。得られた金属組織は、図5に示すようにすべて焼戻

表4 砥石製円盤の詳細

Table 4 Details of grindstone disks

種類	砥 粒					結 合 剤	
	材 質	ヌープ硬さ	粒度番号	砥粒の平均粒径	砥粒率	材 質	結合力
CBN120	立方晶系窒化ホウ素	4800HK	#120	125 $\mu$ m	40%	レジノイドボンド	強
GC120	緑色炭化ケイ素	2500HK	#120	125 $\mu$ m	46%	ビトリファイドボンド	弱
CBN400	立方晶系窒化ホウ素	4800HK	#400	37 $\mu$ m	40%	レジノイドボンド	強

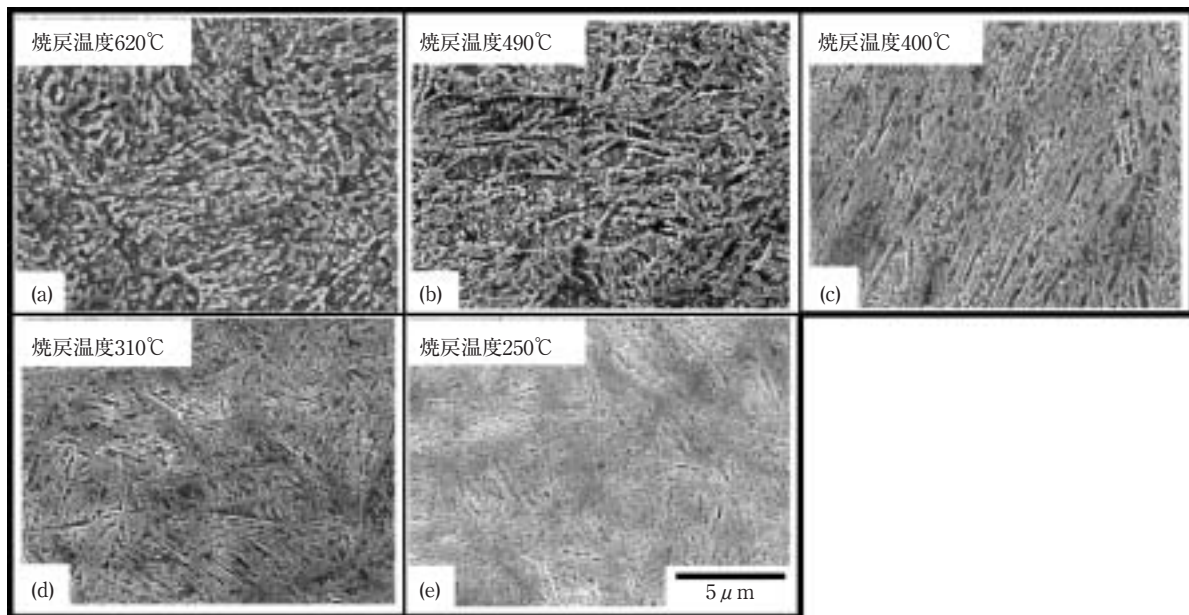


図5 焼戻マルテンサイト組織材の金属組織

(a) 300HV, (b) 400HV, (c) 500HV, (d) 600HV, (e) 700HV

Fig. 5 Microstructures of tempered martensites having various hardness.

Hardness is (a) 300HV, (b) 400HV, (c) 500HV, (d) 600HV and (e) 700HV.

マルテンサイト組織を呈している。

#### 4.1.1 砥石材質の影響

図6に比摩耗量におよぼす焼戻マルテンサイト組織の硬さの影響を示す。CBN120とGC120では、硬さの増加にともない比摩耗量は減少する。この結果はアブレシブ摩耗の特徴である試料の硬さが増加するとともに比摩耗量が減少する点において妥当である。しかし、CBN400では500HV以上で硬さの増加にともない比摩耗量が増加する逆転現象が起こっている。アブレシブ摩耗では硬さの増加にともない比摩耗量が減少することが知られているので、これは非常に特異なケースである。原因については後述する。

本実験における二元摩耗と三元摩耗の発現の様子を検討するため、試験片の摩耗面と摩耗粉をSEMにて観察した。

##### (1) CBN120の場合

試験片の摩耗面と摩耗粉のSEM観察結果を図7に示す。いずれの硬さ水準においても摩耗面には全面に線状痕が認められ、摩耗粉の形状は紐状である。また、図6で示したように、比摩耗量は三種類の砥石の中で最も多く、GC120に比べて一桁多い。よってCBN120では、二元摩耗が主体であると考えられる。

##### (2) GC120の場合

試験片の摩耗面と摩耗粉のSEM観察結果を図8に示す。摩耗面にはむしり取られたような剥離領域が観察され、摩耗面の線状痕はCBN120の場合に比べて不鮮明である。摩耗粉の形状はいずれの硬さ水準においても塊状が主体になっている。比摩耗量は図6に示したように、CBN120よりも一桁少ない。よって、GC120では三元摩耗が主体であると考えられる。

##### (3) CBN400の場合

試験片の摩耗面と摩耗粉のSEM観察結果を図9に示す。700HVの摩耗面は線状痕が目立ち、CBN120の摩耗面に類似している。加えて、比摩耗量が $9.5 \times 10^{-4} [\text{mm}^3 \text{m}^{-1} \text{N}^{-1}]$ と多くCBN120の場合 ( $12.7 \times 10^{-4} [\text{mm}^3 \text{m}^{-1} \text{N}^{-1}]$ ) と近い値であるので、700HVでは二元摩耗が主体であると考えられる。一方、300HVと400HVでは摩擦方向に垂直に成長したボイドやむしり取られたような剥離領域が観察され、摩耗粉の形状は、GC120と同様に塊状が主体である。よって、300HVと400HVでは三元摩耗が主体であると考えられる。

#### 4.1.2 試料の硬さの増加により比摩耗量が増加する現象

図10に、CBN120、GC120およびCBN400での比摩耗量と硬さの関係を示す。図には摩耗形態を付記している。4.1.1項に記述したとおり、いずれの硬さ水準でもCBN120では二元摩耗のみが、GC120では三元摩耗のみが起こることが確認された。しかし、CBN400では、700HVで二元摩耗、300HV、400HVで三元摩耗を呈し、

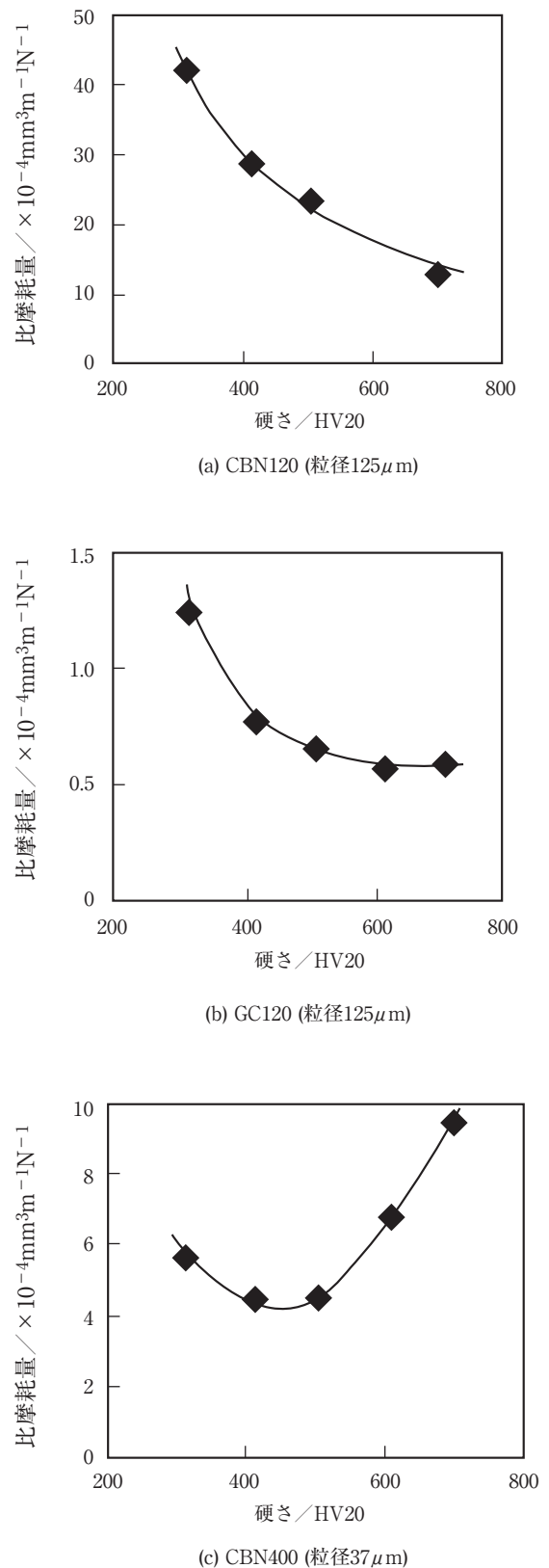


図6 比摩耗量におよぼす焼戻硬さの影響 (a)CBN120, (b)GC120, (c)CBN400

Fig. 6 Effect of tempering hardness on specific wear amount. The opponent materials are (a)CBN120, (b)GC120 and (c) CBN400.

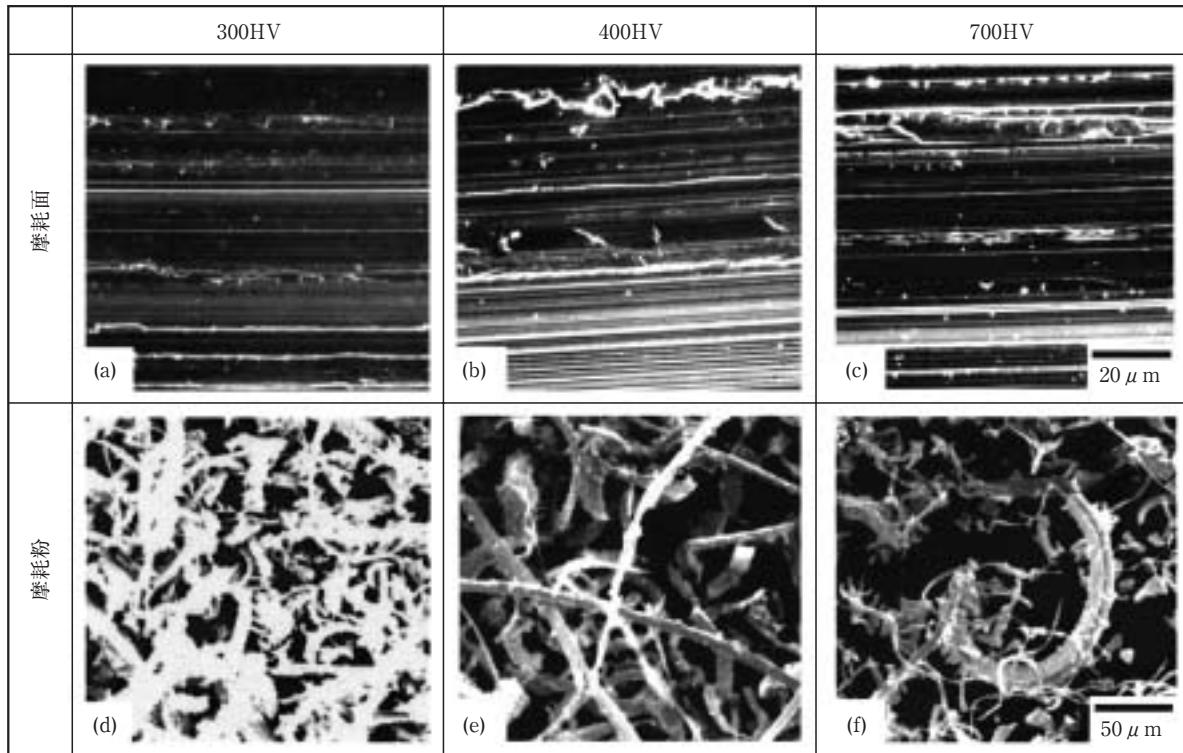


図7 CBN120を用いた試験後の摩耗面と摩耗粉のSEM観察結果

Fig. 7 SEM micrographs showing wear surfaces and wear particles of specimens after wear testing. Opponent material is CBN120.

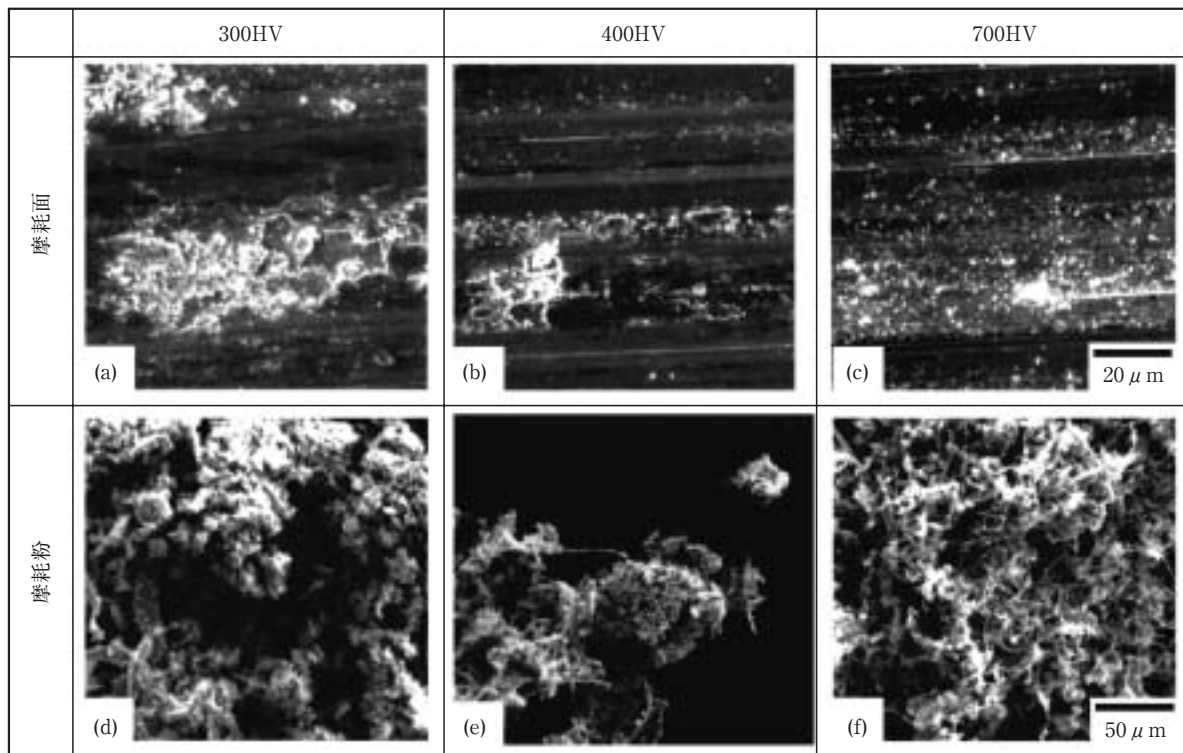


図8 GC120を用いた試験後の摩耗面と摩耗粉のSEM観察結果

Fig. 8 SEM micrographs showing wear surfaces and wear particles of specimens after wear testing. Opponent material is GC120.

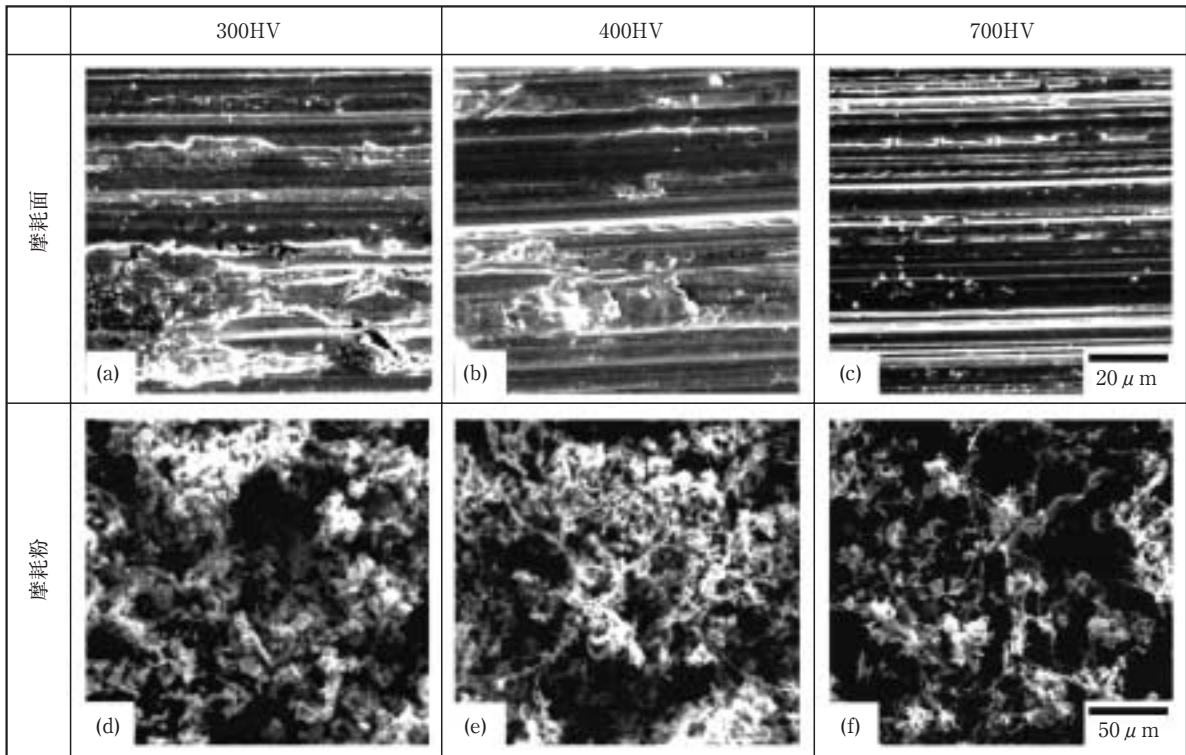


図9 CBN400を用いた試験後の摩耗面と摩耗粉のSEM観察結果

Fig.9 SEM micrographs showing wear surfaces and wear particles of specimens after wear testing. Opponent material is CBN400.

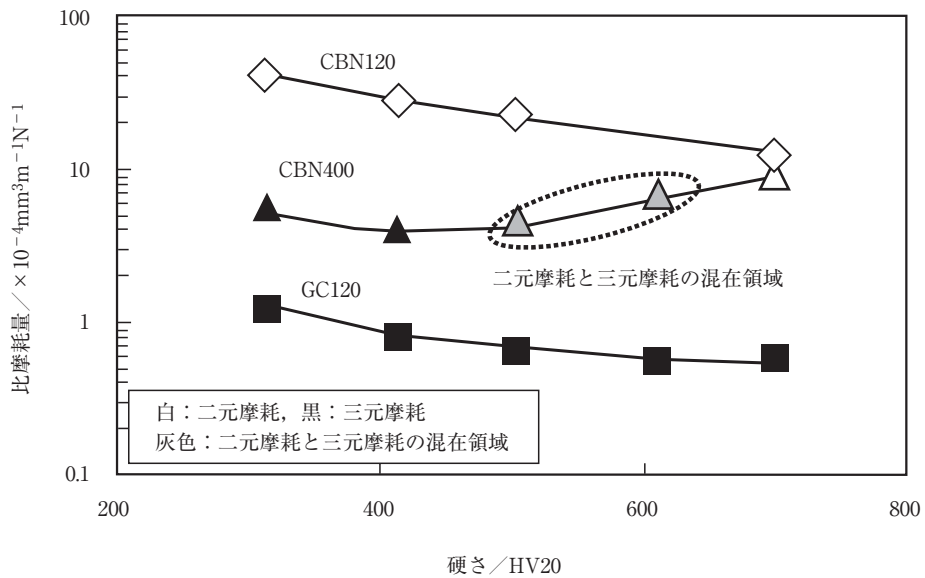


図10 CBN120, GC120およびCBN400を用いた場合の摩耗形態

Fig.10 Wear modes in wear testing. Opponent materials are CBN120, GC120 and CBN400.

中間の硬度域 (500~600HV) では硬さの増加にともない比摩耗量が増加するという逆転現象が起こることがわかった。この領域では、二元摩耗と三元摩耗が混在した状況であると推定される。

CBN120とCBN400を比較した場合、砥粒材質と結合剤は同じである。しかし、粒径の小さい砥粒の方が脱落しやすいとされているので、CBN400はCBN120よりも三元摩耗を起こしやすいと推定される。加えて、鋼の硬さが低いほど鋼中への砥粒の押込み深さが増大し砥粒と鋼の間の摩擦力が増加する、つまり硬さが低いほど砥粒を脱落させようとする力が大きくなるので、砥粒の結合力が弱いCBN400では硬さが低い300HV、400HVにて三元摩耗が生じたと推定される。

二元摩耗は三元摩耗に比べて比摩耗量が一桁程度多いので、三元摩耗主体の中に二元摩耗が混在すると、比摩耗量は増加する。つまり、砥粒の固定/脱落の挙動が摩耗量に大きな影響を与えることが推察される。このことから、CBN400にて焼戻硬さの増加にともない比摩耗量が増加する領域が生じた原因は、砥粒の脱落しやすさと鋼板の硬さ (すなわち砥粒の押込み深さ) の違いによる摩擦抵抗の大きさが影響して三元摩耗から二元摩耗への遷移が起こったことによるものと推察される。

## 4.2 比摩耗量におよぼす金属組織の影響

供試材には、3.1.2項で記述した方法により硬さは300HVで同等とし、金属組織をパーライト組織、焼戻マルテンサイト組織、フェライト+球状炭化物組織に調整した試験片を用いた。得られた金属組織を図11に示す。炭化物の形状は、パーライト組織材ではラメラ状であり、フェライト+球状炭化物組織材では球状である。焼戻マルテンサイト組織材では、フェライト+球状炭化物組織材と比べて、炭化物の粒径は微細であり、炭化物の粒子間隔は短い。

### 4.2.1 二元摩耗と三元摩耗の比摩耗量におよぼす金属組織の影響

4.1.1項にて二元摩耗と三元摩耗を分離し再現させるための砥石を把握したので、二元摩耗と三元摩耗のそれぞれにおける比摩耗量におよぼす金属組織の影響について検討した。砥石は二元摩耗用にCBN120、三元摩耗用にGC120を用い、供試材には硬さを300HVに揃えたパーライト組織材、焼戻マルテンサイト組織材およびフェライト+球状炭化物組織材を用いた。摩耗試験の結果を図12および図13に示す。CBN120とGC120の比摩耗量はそれぞれ $25 \sim 70 \times 10^{-4} [\text{mm}^3 \text{m}^{-1} \text{N}^{-1}]$ 、 $0.9 \sim 1.5 \times 10^{-4} [\text{mm}^3 \text{m}^{-1} \text{N}^{-1}]$ であり、4.1.1項で示した二元摩耗と三元摩耗の比摩耗量とほぼ同等である。よって、CBN120では二元摩耗、GC120では三元摩耗が発現できていると考えられる。

図12より、二元摩耗では、パーライト組織材が最も比摩耗量が少なく耐摩耗性に優れ、次いで焼戻マルテンサイト組織材であり、フェライト+球状炭化物組織材が最も耐摩耗性に劣ることがわかった。図13に示すように三元摩耗でも二元摩耗の場合と同様の結果である。

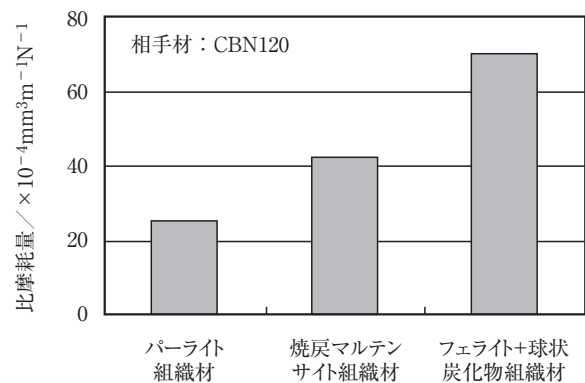


図12 CBN120を用いた場合の比摩耗量におよぼす金属組織の影響  
Fig.12 Effect of microstructures on specific wear amount. Opponent material is CBN120.

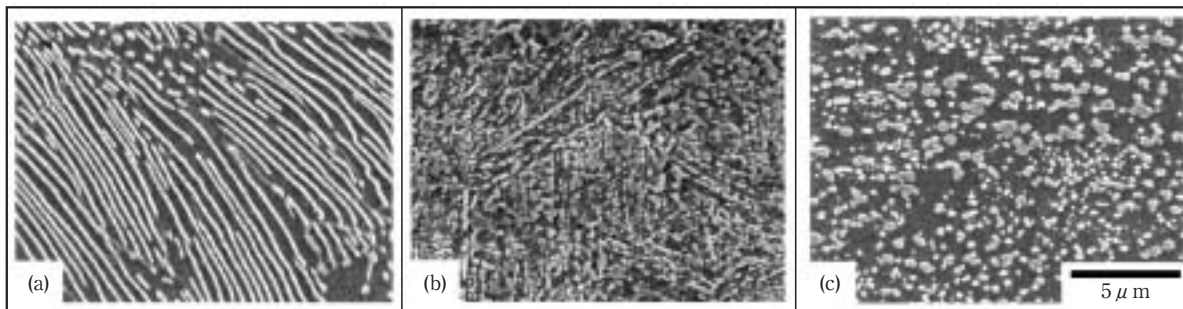


図11 組織形態の異なる金属組織 (a) パーライト組織, (b) 焼戻マルテンサイト組織, (c) フェライト+球状炭化物組織  
Fig.11 Microstructures of specimens having various structure morphology.  
(a) pearlite, (b) tempered martensite, (c) ferrite and spherical cementite.



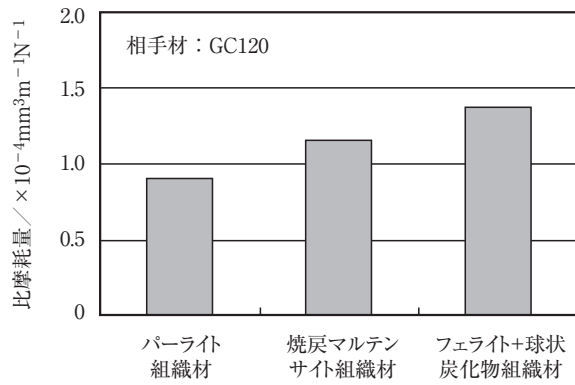


図13 GC120を用いた場合の比摩耗量におよぼす金属組織の影響  
 Fig.13 Effect of microstructures on specific wear amount. Opponent material is GC120.

CBN120を用いた摩耗試験後の試験片を摩擦方向と平行に切断し、摩耗面直下の板厚断面をSEM観察した結果を図14に示す。いずれの供試材表層でも摩擦方向に塑性流動が生じているが、特にパーライト組織材において、

セメントイトラメラが摩擦方向に配向していることが特徴的である。

以上の結果より、二元摩耗（砥石CBN120）でも三元摩耗（砥石GC120）でも、パーライト組織材の耐摩耗性が最も優れていることが明らかになった。よって、二元摩耗と三元摩耗を包括したアブレシブ摩耗でも、パーライト組織材の耐摩耗性が最も優れると結論付けられる。

4.2.2 パーライト組織の耐摩耗性

図12の二元摩耗（砥石CBN120）に示したとおり、パーライト組織材の比摩耗量はフェライト+球状炭化物組織材の約3分の1であり、同じ硬さ（300HV）でありながら耐摩耗性に大きな差が認められた。図15は、図6(a)に示したCBN120を用いた摩耗試験結果に、パーライト組織材の結果をプロットしたものである。300HVであるパーライト組織材の耐摩耗性は、約450HVの焼戻マルテンサイト組織材に匹敵することがわかる。

パーライト組織材が最も優れた耐摩耗性を示した詳細なメカニズムは不明であるが以下のように推定される。パーライト組織材の耐摩耗性は、レール用鋼の分野でよ

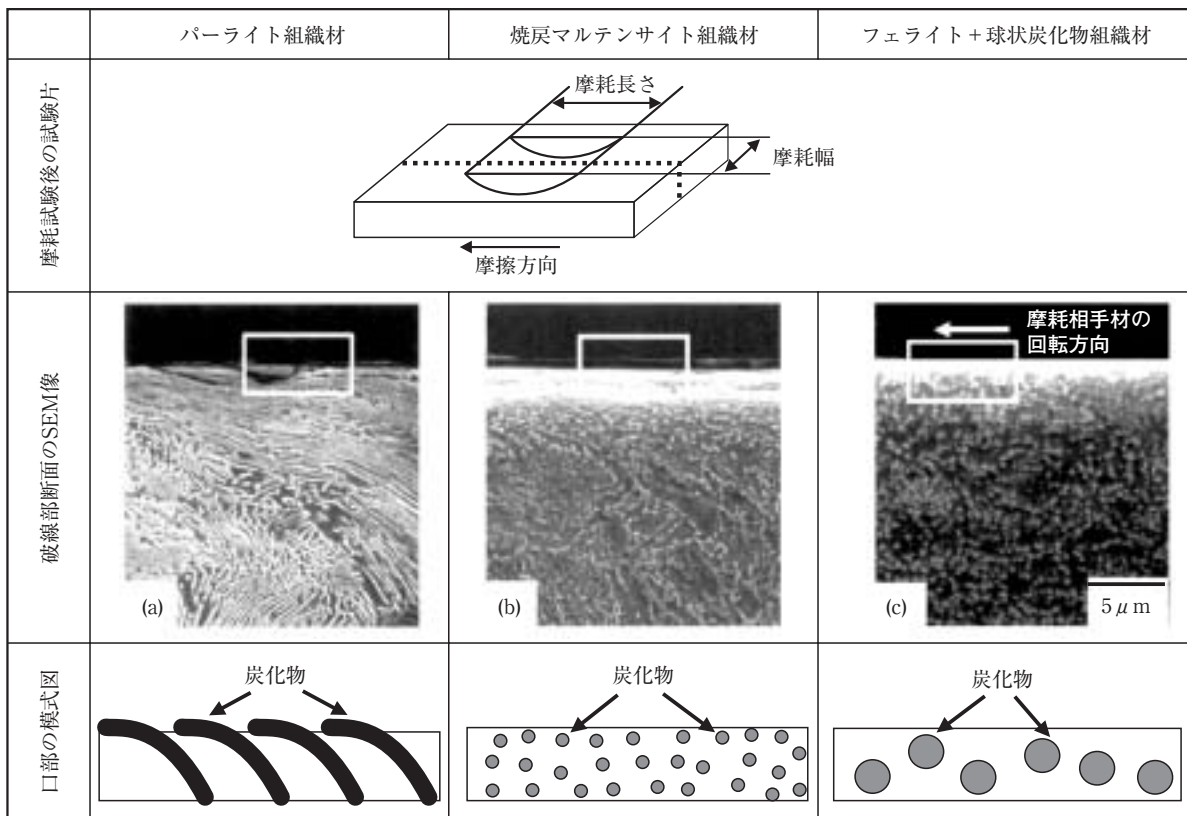


図14 摩耗試験後の板厚断面の組織 (a) パーライト組織材, (b) 焼戻マルテンサイト組織材, (c) フェライト+球状炭化物組織材

Fig.14 Sectional microstructures of thickness section after wear testing. (a) pearlite, (b) tempered martensite, (c) ferrite and spherulitic cementite.

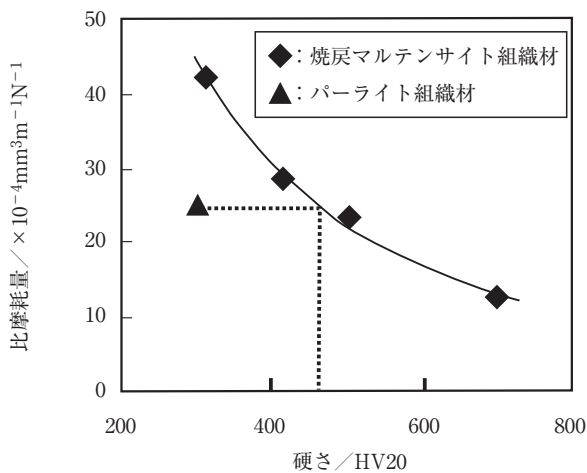


図15 焼戻マルテンサイト組織材とパーライト組織材の比摩耗量の比較

Fig.15 Comparison of tempered martensite and pearlite in specific wear amount.

く研究されている<sup>4),5)</sup>。レールの摩耗形態は主として転動疲労によるものであるが、パーライト組織に特徴的な現象として、接触面近傍における著しい塑性流動と、それに伴うラメラ間隔の微細化と硬さの上昇が報告されている<sup>4)</sup>。図14(a)に示した、パーライト組織材の摩耗面直下における顕著な塑性流動とラメラ間隔の微細化は、レール用鋼での報告例と類似の形態を呈しており、摩耗面近傍での著しい加工硬化を示唆している。図14(b), (c)に示した焼戻マルテンサイト組織材およびフェライト+球状炭化物組織材も塑性流動を呈しているが、パーライト組織の特徴である高い加工硬化率<sup>6)</sup>を勘案すれば、塑性流動領域の硬さはパーライト組織材が最も高くなっているものと推定される。つまり、同一硬さ(300HV)に調整した供試材でも、摩耗面近傍ではパーライト組織材の硬さが相対的に高まっている可能性がある。よって、パーライト組織材の耐摩耗性が優れていたのは、摩耗面近傍の硬さの影響であったと推定されるが、この点に関してはさらに詳細な検討が必要である。

## 5. 結 言

機械部品として使用される炭素鋼にとって重要な特性であるアブレシブ摩耗について、二元摩耗と三元摩耗を発現する試験方法を把握し、それぞれの耐摩耗性におよぼす金属組織の影響を調査した。

- (1) 焼戻マルテンサイト組織材において、焼戻硬さおよび砥石(相手材)中の砥粒の固定程度に依存して、二元摩耗または三元摩耗が発現する。
- (2) 焼戻硬さの増加にともない、比摩耗量が増加する場

合がある。これは、摩耗形態が三元摩耗から二元摩耗へ遷移した場合に生じる現象と考えられる。

- (3) 摩耗形態が二元摩耗あるいは三元摩耗のいずれの場合でも、パーライト組織材の耐摩耗性は焼戻マルテンサイト組織材およびフェライト+球状炭化物組織材に比べて良好である。

### 参考文献

- 1) E. Rabinowicz, L. A. Dunn and P. G. Russell : Wear, 4 (1961), 345
- 2) A. Misra and I. Finne : Wear, 60 (1980), 111
- 3) T. Sasada, M. Oike and N. Emori : J. Jpn. Soc. Lubr. Eng., 27 (1982), 922
- 4) M. Ueda, K. Uchino and T. Senuma : Tetsu-to-Hagane, 87 (2001), 32
- 5) H. Yokoyama, S. Mitao and M. Takemasa : NKK Tech. Rep., 176 (2002), 59
- 6) T. Takahashi : Met. Technol. (Jpn.), 66 (1996), 19