

## 中分類 7 摩耗 (Wear)

### 概要

固体材料同士が、擦れ合う状態で使用されている場合、どちらか（または両方）が損耗し、肉厚が減少していく現象を摩耗と呼ぶ。

### 対策

一定期間使用後、上記の検査、評価を実施し、破損の防止を行うことが必要。

中分類	損傷形態	対処方法		
	(モード)	検査	評価	対策
摩耗	減肉	目視、肉厚計測	減肉速度予測、余寿命評価	判断基準を設けて、肉盛り補修、部品の交換、材質変更

### 1. 摩耗の定義

相対運動をする 2 表面がお互いに作用しあうときには必ず表面損傷を伴う。この表面損傷を摩耗という。摩擦における物体の運動を妨げる接触面で逆の力によって生じた力で固体表面が減る。

摩耗は、摩擦における力学的条件、雰囲気、両摩擦材料の特性における複数因子の組み合わせによる複雑な影響を受ける場合が多く、現在に至っても摩耗に関する明確な理論は定着していない。

摩耗は発生原因によってアブレシブ摩耗、凝着摩耗、フレッティング摩耗、疲労摩耗などに分類される。エロージョンは広義の摩耗と見なされている。

### 2. 摩耗の分類(小分類)

#### 1) 相対的運動としての分類

##### ① アブレシブ摩耗

アブレシブ摩耗は硬い角張った材料が柔らかい材料表面に接触して滑り運動をしたときに、柔らかい材料の表面に塑性変形を生じ、溝を形成する。延性材料の場合は掘り起こし (Ploughing) で生じて、脆性材料よりも摩耗は大きく、脆性材料の場合は材料が脆性破壊の様相を示す。摩耗形態の中で最も摩耗損失量が多く、実際の機械等で寿命・トラブルに大きな影響を与える。

アブレシブ摩耗には 2 つの摩耗形態があり、二元 (two body) 摩耗、および三元 (three body) 摩耗である。

##### ・二元摩耗

固体同士が加工面において接触するとき、図 1 に示すようにミクロ的には全面に接触せず、

いくつかの孤立した突起で接触する。このような状態で接触点に圧縮荷重が加わると、接触点で凸凹がかみ合って食い込みを生じ、滑り運動とともに硬質側固体が軟質側の固体を削り取るか、または離脱してミクロ的破片となって2固体内に挟まり、切削摩耗を生じる。ヤスリがけ、砥石による研削の機構である。

#### ・三元摩耗

摺り合わせる二物体の面の間に砂等の硬質の分離された異物が入った場合に摩耗が生じる。たとえばラッピングやバフ加工等の機構であり、この摩耗を砂噛みと称する。

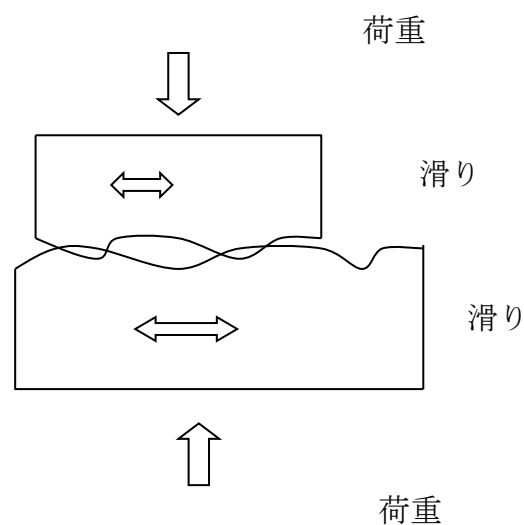


図1 固体／固体の表面同士がミクロ的接触しながら滑ることによる摩耗の現象

#### ② 凝着摩耗

固体同士が加工面において接触するとき、図1に示すようにミクロ的に見るといくつかの孤立した突起で接触する。このような状態で接触点に圧縮荷重が加わると、軟質突起部が凝着する。これらの凝着部分は滑り運動が生じるとせん断力によって引き裂かれて、硬質固体側に移行するか、または離脱してミクロ的破片（粒子）となって2固体内に挟まり、双方の固体に切削摩耗を生じる場合が多い。金属粒子の場合は、酸化して極めて硬質になる。

#### ③ フレッシングコロージョン

接触面に微少な振動で繰返し応力が作用するときに、疲労破壊により生じる表面の損傷である。振幅がマイクロメートルオーダーと小さく、接触面に凝着してむしりとられた摩耗粉は小さく、活性に富むため、酸化が高温で急速に進み、鉄系材料では $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 酸化物となる。

接触面の摩耗粉は損傷部から排除されにくく、損傷部には摩耗分とピittingを生じることが特徴である。

#### ④ 疲労摩耗（転がり摩耗）

転がり接触やすべり摩耗において、垂直加重と摩擦力が繰返し作用することによる疲労によっておこる摩耗のことを言う。表面疲労を起こさせる現象は材料の疲労現象と全く同じで、例えば、図2に示すように、レールに車輪が転がる例では、二物体間の接触面積が小さいため、接触点に最大のせん断応力がかかり、この応力状態が周期的に生じる。そのためにその付近から疲労破壊が発生し、表面に平行に周辺に向かって進行し、孔（ピitting）や鱗片（フレーキング）のような欠損が生じる。

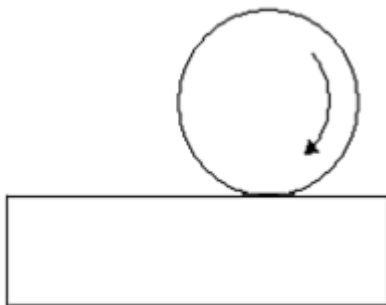


図2 ころがり摩耗

#### ⑤ 衝撃摩耗

図3に示すように固体に別の固体が衝撃的に衝突すると、局部的に食い込みさらにえぐられるように摩耗（ガウジング摩耗）したり、または小破片となって表面が離脱することによって摩耗する（衝撃摩耗）。後者は衝撃せん断応力を受けた場合に起こりやすく、多少の塑性変形を生じるのに対して、衝撃摩耗は衝撃圧縮応力を受けた場合に起こり、ほとんど塑性変形が生じない。

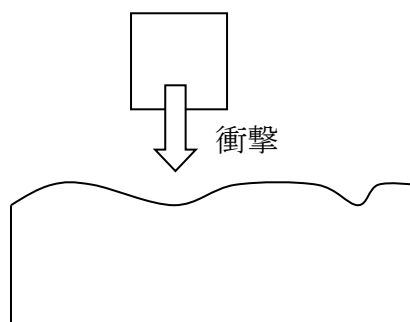


図3 固体表面に別の固体が衝撃的に衝突することによる摩耗現象

#### ⑥ インピンジメントアタック

硬い粒子の表面のブラストによって、材料が除去される。この摩耗現象は、衝撃摩耗と同様な摩耗現象で、腐食生成物を取り除かれ、常に新しい表面が現れるとき、摩耗速度は高い。ブラストは、通常、硬質の微細粉末を含有した気体または液体による高速流体によって、機械的に固体に衝突させる。腐食や摩耗の残骸の集積や空間抵抗の減少によって、機械的な摩耗は加速される。

#### ⑦ 腐食摩耗または化学的摩耗

腐食環境中で摩耗が生じる場合であり、酸あるいは塩基性溶液により物体の表面が化学変化を起こして変質し、それに凝着摩耗、アブレシブ摩耗等が重なって生じる。雰囲気との化学反応が支配的な摩耗であり、エロージョンコロージョン、フレッティングコロージョンを含む。

一般に、腐食環境は、酸素が腐食元素である大気である。金属の表面層に酸素が結合して、酸化薄膜が生じる。この酸化被膜は保護膜となる場合が多いが、酸化被膜と基板の間における結合は弱いため、二元摩耗における相対運動において、この層が剥離しやすい。剥離して露出した新しい表面はまた酸素により腐食する。この連続により摩耗が促進する。

このタイプの摩耗は摩耗による減肉速度が著しく速い。

#### ⑧ インレットアタック

管の入口端部で水の出入り口は乱流が生じやすく、乱流によりコンデンサ管の保護皮膜の破壊と生成が繰返し、徐々に管が減肉していく典型的なエロージョンコロージョンである。

### 3. 摩耗に関する定量化の試み

#### 1) アブレシブ摩耗

図4に Rabinowicz によるアブレシブ摩耗の単純化されたモデルを示す。上部に示す硬い材料の尖った先端を円錐と仮定し、下部に置かれた軟らかい材料を平面とした。尖った円錐は、 $dW$  の荷重によって柔らかな材料に幅  $2a$ 、深さ  $d$  の溝が形成されたとすると、軟らかい材料は一個の円錐により荷重  $\delta L$  において降伏し、

$$\delta L = na^2H \quad (1)$$

$H$  は軟らかい材料表面の硬さである。距離  $S$  における掘り起こされた体積は

$$\delta V = a^2 S \tan \theta \quad (2)$$

(1) と (2) 式より

$$\delta V = \delta L S \tan \theta / nH \quad (3)$$

よって、全体の摩耗による損失体積は

$$V = LS (\tan\theta) / nH \quad (4)$$

$\tan\theta$ は円錐形状突起における  $\tan\theta$ 全体の、重み付けされた平均値を示し、それを Rabinowicz は粗さ因子とした。

また、 $\tan\theta/n = k/3$ としたとき (4) 式は Archard 式と同じであり、アブレーション摩耗係数  $k_{abr}$  として、(5) 式を導いた。 $k_{abr}$ は無次元項であり、突起の形状、材料を除去する確率性を含む。

$$V = k_{abr} LS / H \quad (5)$$

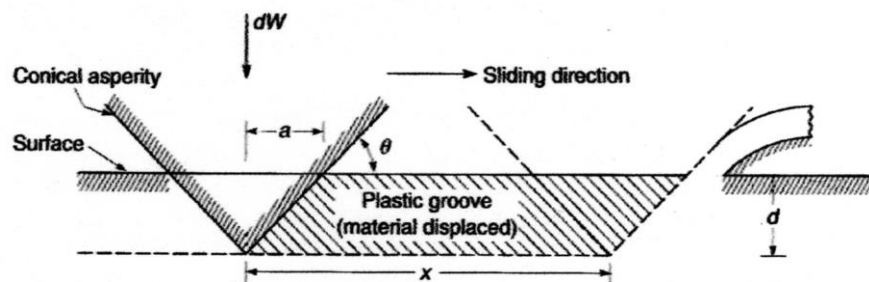


Figure 2.8 A hard conical asperity in contact (sliding) with a softer surface in abrasive wear taken from [Bhushan 1999].

図 4. Rabinowicz によるアブレッシブ摩耗のモデル

## 2) 凝着摩耗

Archard による凝着摩耗のモデルを図 5 に示す。2 つの材料の突起が接触したとき、確率係数  $k$  があり、付着断片が形成されるとした。各粒子は半径球状であり、それは接触における径と同じとした。

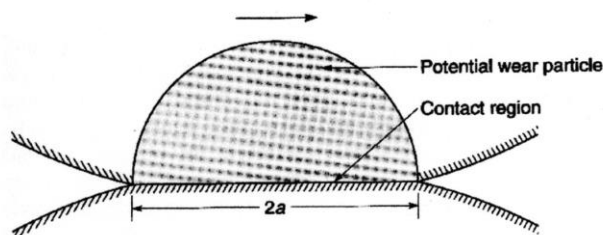


Figure 2.5 Hypothetical model of a hemispherical wear particle at the junction of two asperities taken from [Bhushan 1999]

図 5 Archard による凝着摩耗のモデル

荷重  $L$  下で、滑りにおける 2 つの面を考えたとき、接触における最大面積は

$$\delta A = \pi a^2 = \delta L / H \quad (6)$$

ここで、 $\delta L$  は全体荷重  $L$  に貢献し支える最大荷重とする。 $\delta A$  は全体真の接触面積  $A$  に貢献する最大面積とする。接触領域の半球における半径は  $a$  である。突起の相互作用による変形は塑性的であるとした。

次ぎに突起の接触は体積  $\delta V$  の摩耗粒子を生じる。この摩耗粒子の寸法は、接触寸法と直接比例する。一般に等軸であり、Rabinowicz の説明した層状とは異なる。この  $\delta V$  は粒子形状が半球であるとの仮定から、 $a^3$  に比例するとした。

$$\Delta V = 2 / 3 \pi a^3 \quad (7)$$

最後に、滑り距離  $\delta S$  に対する滑り接触において、突起が保持されるとした。接触が破壊された後、接触は  $2a$  であり、荷重は新しい接触を取る。

$$\delta S = 2a \quad (8)$$

(6)、(7)、(8) 式により、

$$\delta L / \delta S = 1 / 3 \pi a^2 = 1 / 3 \delta a = 1 / 3 \delta L / H \quad (9)$$

Archard は全体の接触のうち一部が摩耗粒子を形成するとした。これを摩耗係数 ( $k$ ) と定義した。摩耗粒子を形成する確率性とされる。 $k$  を (9) 式に加えると、全ての突起による摩耗体積は、

$$V = 1 / 3 \cdot LS / H = k' LS / H \quad (10)$$

$3k'$  はこれは Holm による摩耗式 (11) 式の、 $k$  に等しい。

$$V = k LS / H = k' LS / 3H \quad (11)$$

$$\text{および} \quad k = k' / 3 \quad (12)$$

(11) 式は Archard の摩耗式という。

Archard の摩耗係数  $k$  は、摩耗式のクリティカルな部分である。

できるだけ実機に近い条件で摩耗試験を行い、 $k$  値を算出することによって、摩耗寿命を見積もり、評価する。Rabinowicz は ASME の Wear Control Handbook において、摩耗係数を計算または定量的見積もりを示している。

しかしながら定量的摩耗解析はまだ初期段階であることを念頭に置くべきである。

### 3) 滑り摩耗の例

(参考文献：V.K.Gupta 等、Materials Science-Poland, Vol.26, No.3, 2008)

炭素鋼は鉄鋼の使用重量の 4 / 5 を占め、構造用材料として広く用いられているが、多くの損傷モードのうち摩耗特性と損傷寿命評価が重要な課題の一つとなっている。

ここでは、乾式滑り摩耗特性に及ぼすマイクロ組織の影響についての研究例を紹介する。

熱処理条件として、初めに 840℃ ( $\alpha + \gamma$ ) 領域に加熱した後、空冷し、フェライト微細パーライト組織とした。その他は水焼入し、フェライト中にマルテンサイトを含む組織とした。焼入材は 640℃ で高温焼戻を行い、さらに水冷し、フェライト焼戻マルテンサイトとした。もう一方は炉冷し、フェライト粗大パーライト組織とした。

表 1. 各種熱処理鋼の硬さ比較

サンプル	VHN
焼鈍 (Annealed: AD)	99
焼準 (Normalized: ND)	108
中間焼鈍 + 焼入 (IQ)	161
中間焼鈍 + 焼入 + 焼戻し (IT)	134

上記 4 種類の丸棒を供試材料として、35℃ でピンオンディスク摩耗試験を行った。ディスクは EN-32 鋼 (HRC62~65) を用いた。滑り速度を 1m/s の一定とし、荷重を 2.5、4.5、5.5kg とした。

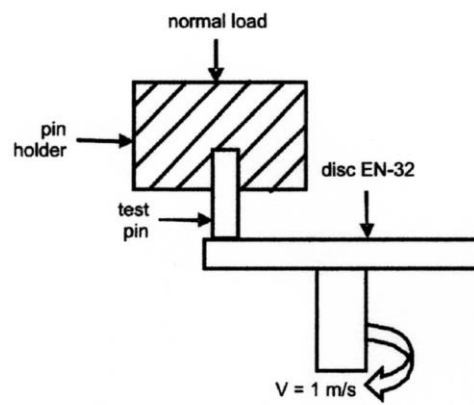


Fig. 1. Test geometry of Pin-on-disc wear testing machine

図 6 . ピンオンディスク摩耗試験装置



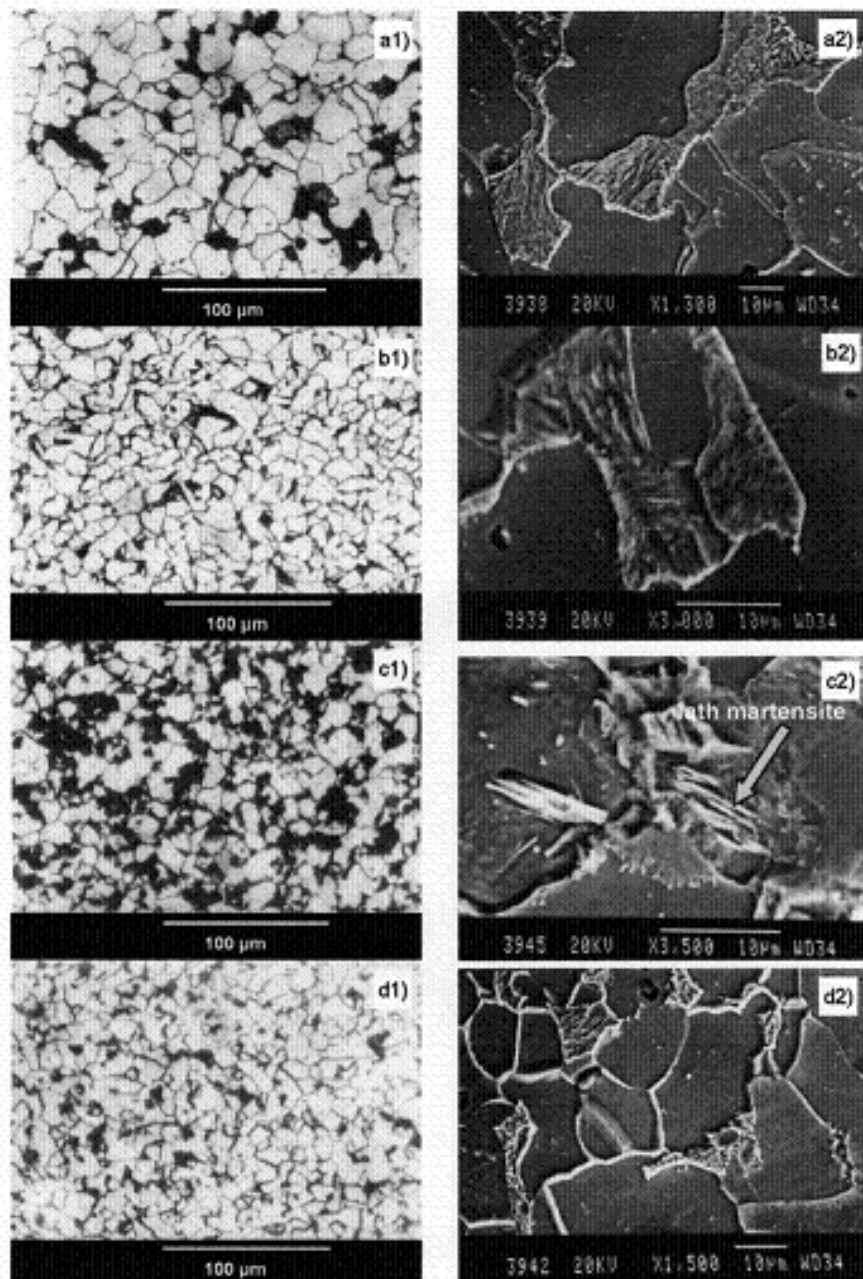


Fig. 2. Micrographs (1 – optical, 2 – SEM) of steel samples: a) annealed (AD), b) normalized (ND) c) intercritically annealed and quenched (IQ), d) intercritically annealed, quenched and tempered (IT)

図7.各種の熱処理を行った炭素鋼試験片の(1-光学的、2-SEM)ミクロ組織写真 : a)焼鈍 (AD)、b)焼準 (ND) c)焼鈍および焼入 (IQ) d) 焼鈍および焼き戻し (IT)

図7の a1 および a2 は焼鈍サンプルで、フェライト（白い部分）とパーライト（暗い部分）組織を示

す。フェライトの粒サイズは 10～20 $\mu\text{m}$ であった。

b1 および b2 は焼準されたフェライト微細パーライト組織で、パーライトの体積分率は 0.21 で、焼鈍サンプルの 0.16 より大きい。フェライトの粒サイズは 6～12 $\mu\text{m}$ で、焼鈍サンプルよりも微細である。

c1 および c2 は焼鈍 + 焼入サンプルで、明るいフェライトと暗いマルテンサイトが明らかに示されている。フェライトの硬さは 280VHN、マルテンサイト部分の硬さは 552VHN である。これは DP 鋼の硬さに相当する。フェライトとマルテンサイトの体積分率は各々 0.69 および 0.31 である。

d1 および d2 は焼鈍 + 焼入 + 焼き戻しサンプルで、フェライトと焼き戻しマルテンサイトである。焼き戻しマルテンサイトの体積分率は 0.20 と焼入サンプルよりも大幅に低下している。

ピンオンディスク試験結果を図 8 に示す。滑り距離に及ぼす累積摩耗体積損失の依存性を示す。直線の傾きは摩耗速度を示すが、この傾きは 2 つの線形切片で構成され、初期段階の摩耗と長時間側の定常摩耗を示している。いずれも初期摩耗は定常摩耗よりも傾きが大きい。

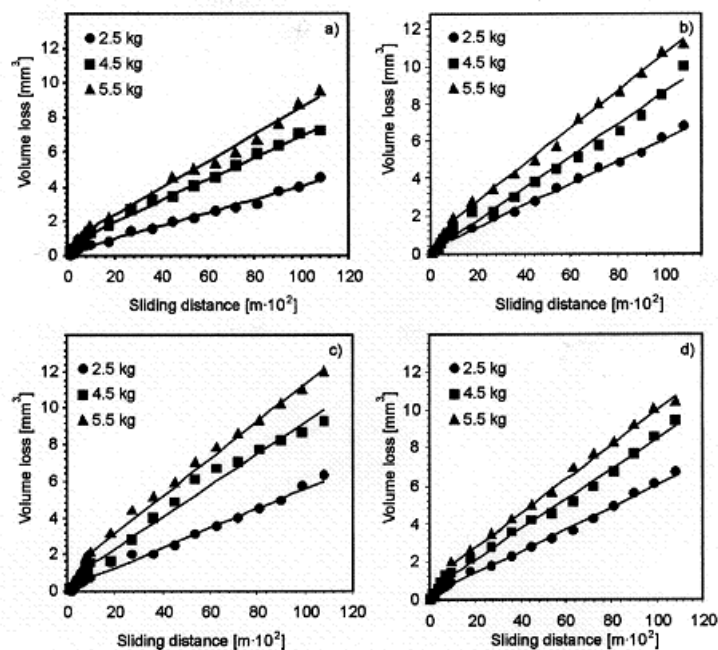


Fig. 3. Dependence of volume loss on the sliding distance for: a) AD, b) ND, c) IQ, d) IT steel specimen at various loads and a constant sliding velocity of 1 m/s

図 8. 各種荷重における鋼試験片の滑り距離に及ぼす摩耗体積損失の影響

a) AD, b) ND, c) IQ, d) IT 鋼試験片、

各炭素鋼試験片の摩耗速度を、図の線形部分から決定した。図 9 に示すように、摩耗速度もまたほぼ線形を示す。これは Archard の摩耗則に示されている通りである。荷重 2.5kg 以外は、摩耗速度は AD, IT, ND, および IQ の順に増した。

・垂直荷重 2.5kg における初期摩耗速度は ND が他の鋼よりも大きかった。

他の鋼はほとんど摩耗速度が同じだった。

・垂直荷重 2.5kg における定常摩耗速度は、AD が最も低く、その他の鋼はほとんど同じ速度であった。

フェライト-粗大パーライト組織（AD）は、フェライト-微細パーライト組織（ND）よりもいずれの荷重においても摩耗特性が優れていた。

・フェライト-焼き戻しマルテンサイト（IT）は、高い荷重では、フェライト-マルテンサイト（IQ）と比較して摩耗速度が低いが、低い荷重ではほとんど同じ速度であった。

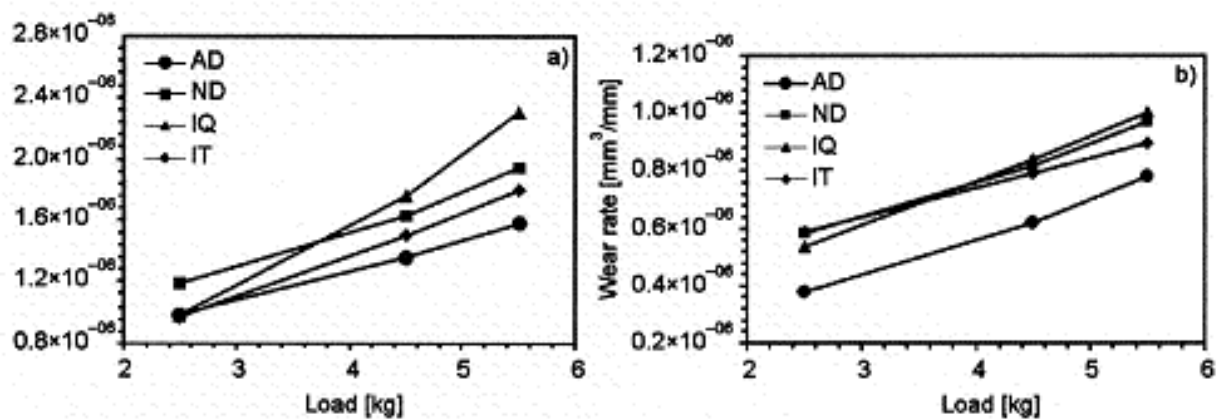


Fig. 4. Dependence of wear rate on load for heat-treated samples corresponding to: a) first linear segment, b) second linear segment

図 9 . 熱処理鋼の荷重に及ぼす摩耗速度の依存性

a)初期摩耗、 b)定常摩耗

AD,ND,IQ および IT 鋼の各種荷重において得られた摩耗係数を表 3 に示す。

1 1 式に示した Archard の摩耗則を用いて、摩耗係数を求めた。

$$V = k WS/3H \quad (11)$$

V : 摩耗による体積損失、W : 荷重、S 滑り距離、H : バルク硬さ、

k : 摩耗係数、

摩耗係数は接触面積 (W/H) によって摩耗速度 (V/S) を割ることにより推定された。

$$k = 3 (V/S) / (W/H)$$

摩耗係数 k をもとに判断すると、フェライト-粗大パーライト（AD）が最も摩耗速度が低く、フェライト-微細パーライト（ND）、フェライト-焼き戻しマルテンサイト（IT）、フェライト-マルテンサイト（IQ）の順に耐摩耗性が大きかった。

この結果は、粗大パーライトにおける比較的大きいセメントタイトプレートが滑り摩耗に対して有効な働きをしていることが想定される。

フェライト-マルテンサイト組織は硬いにもかかわらず、炭化物を組織に含まず、全体的な結合エネルギーが摩耗を高め、最も低い耐摩耗性を示した。

表 3 初期摩耗（1 次）および定常摩耗（2 次）に相当する摩耗係数

試験片	摩耗状態	摩耗係数( $k \cdot 10^{-4}$ )、荷重			平均 ( $k \cdot 10^{-4}$ )
		2.5kg	4.5kg	5.5kg	
AD	1 次	1.176	0.898	0.853	0.976
	2 次	0.451	0.409	0.421	0.427
ND	1 次	1.545	1.174	1.149	1.289
	2 次	0.752	0.590	0.571	0.638
IQ	1 次	1.891	1.890	2.020	1.934
	2 次	1.035	0.900	0.878	0.938
IT	1 次	1.560	1.344	1.316	1.407
	2 次	0.942	0.705	0.654	0.767