

鉄鋼材料の土砂による摩耗について*

三好栄次**・阿澄一寛***・加藤直****・大森靖也***・中川勝***

On the Abrasion Properties of Steels by Sand.

Eiji MIYOSHI, Kazuhiro AZUMI, Tadashi KATOU,

Yasuya OHMORI and Masaru NAKAGAWA

Synopsis :

The abrasion of line pipes by sands is a serious problem. In this report 29 steels including low alloy steels, tool steels and austenitic stainless steel, were tested by the machine designed in our laboratories, which had four rotating arms with four test pieces mounted. Because of the scattering of abrasion losses, it was difficult to judge the results, but the introduction of statistical method, Youden squares, made it possible to distinguish the small differences between the effects of microstructures and alloying compositions with certain reliability.

The results are as follows :

- (1) The abrasion loss decreases with increasing hardness under the same condition of microstructures.
- (2) The results depend definitely on the microstructures of steels with the same hardness. Ferrite-pearlite structure shows the best result.
- (3) Under the same conditions except composition, carbon and chromium improve the abrasion resistance.

(Received 20 May 1965)

1. 緒 言

粒体の水力輸送、たとえば石炭、埋立用土砂の輸送などに用いられる鋼管、サンドポンプの部品、コンクリートミキサーなど、粒体と水の混合物による摩耗が問題となる鉄鋼材料の用途は多い。このような条件の場合の摩耗についても古くから種々の実験が行なわれている^{1)~3)}。

しかしこれらの実験の結果によつても、耐摩耗性におよぼす成分、組織などの影響は必ずしも明白でなく、硬度が高い方が耐摩耗性が優れている傾向が認められる程度である。

一方この種の摩耗試験においては、試験条件を一定にし再現性のある結果を得るためには種々の工夫が必要であるといわれている。たとえばAbrasiveの均質性を保証するのに標準試験片を用いた摩耗試験によつて、品質管理を行なうとか、試験結果の評価に当つても統計学的な観点でみるといつたことである。

この研究は水を含む粒体による摩耗、すなわち low stress scratching abrasion といわれる Type の摩耗において、鉄鋼材料の耐摩耗性におよぼす成分、組織などの影響を調べることを目的としたものである。

2. 実験方法

2.1 摩耗試験機と試験片

本実験に使用した試験機と試験片の略図を Fig. 1 に示す。この試験機は宮野⁴⁾らが報告されたものと同種類のものであつて、その特徴は

- (i) 国定槽内の Abrasive と水の中で試験片が水平に回転する。
- (ii) 試験片は回転面と伏角をなしており Abrasive をすくい上げながら回転する。
- (iii) 摩耗量は試験片の重量減によつて測定することである。

Abrasive としてなにを用いるかも試験結果を左右する重要な因子であるので、鋼材の耐摩耗性の差が顕著に現われやすいと考えられる硬いもの、均質で入手しやすいことなどから鑄型用の人工珪砂(平均粒度 35mesh)を用いた。試験条件は予備実験の結果、平均周速度(試験片中心での周速度) 3.5 m/sec, 運転時間 68 hr とした。

2.2 試験機の特性和その対策

この試験機では同一材質の試験片を用いても試験チャンス、試験片取付位置によりかなり摩耗量がバラツキ、

* 昭和40年4月本会講演大会にて発表
昭和40年5月20日受付

** 住友金属工業株式会社中央技術研究所, 工博

*** 住友金属工業株式会社中央技術研究所

**** 住友金属工業株式会社小倉製鉄所

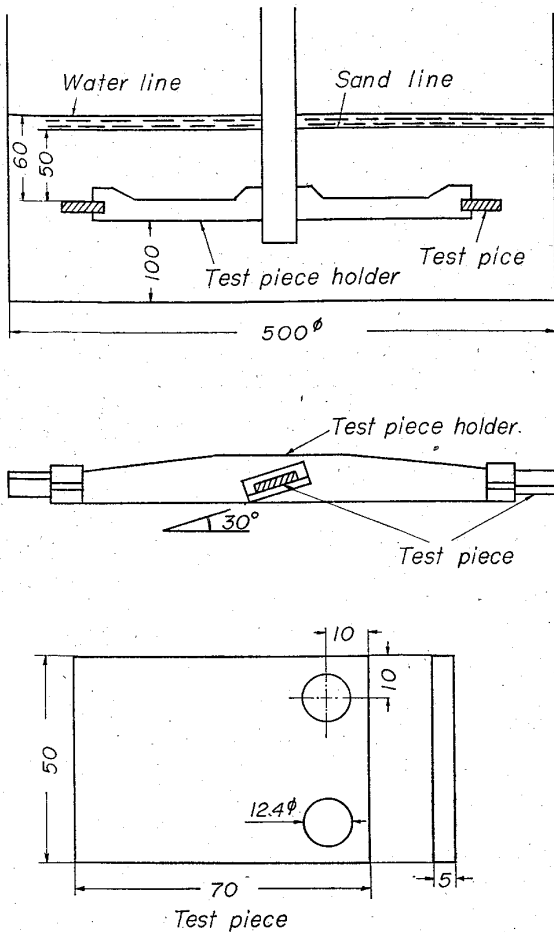


Fig. 1. Schematic diagram of abrasion testing machine.

標準試験片による補正を行なっても鋼種間の比較はほとんど不可能であった。そこでこれらの詳細を明らかにするために試験片の材質(W)、試験機(M)、周速度(S)、取付位置(A(M))、試験時間(T)について調べた。

その結果、本試験機においては上記因子と摩耗量(y)の関係は

$$y = A(M) \cdot S(M.W) \cdot w(M.W.T)$$

S(M.W): 速度によるかたよりで M.W の関数

w(M.W.T): AとSのかたより以外の摩耗で M.W.T の関数

の形で表現出来、実際問題として鋼種間の耐摩耗性を比較するには“2種類の標準試験片を用いて尺度の調整を行ないつつ比較する”ことが必要であると判断された。

2-3 鋼種間の摩耗量の差を調べるための実験方法としてのユーデン方格の採用

以上の検討によつて試験チャンス、試験機、取付位置の効果を消去するにはユーデン方格(釣合型不完備型ラテン方格)による実験を行ないユーデン方格間の結果をつなぐために2種類の標準試験片によつて尺度調整を行

Table 1. Design of experiments (Youden squares)

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7
Arm							
1	A	B	C	D	E	F	G
2	G	A	B	C	D	F	E
3	F	G	A	B	C	D	E
4	D	E	F	G	A	B	C

なうのが最適と考えられた。

この試験機では試験片取付位置が4本しかないために1度に4鋼種の実験しか出来ない。そこで7×4ユーデン方格を用いた。わりつけをTable 1に示す。

すなわち、7鋼種を比較するために各鋼種4個の試験片を用いて7回の実験で5鋼種の比較が可能となる。

この実験では取付位置、実験条件の効果は積の型で測定値に寄与していると予想されるので、生のデータとその対数をとつたものについて解析を行なつた。

その結果対数をとつたものの方が残差平方和ははるかに小さく、予想されたように取付位置、実験条件などの効果は積の型で測定値に寄与していることが明らかとなった。

以上の結果に基づき本実験においてはすべて2種類の標準鋼種を用いて、ユーデン方格により、データの解析は測定値の対数を取り和の型になおして行なつた。

すなわち、構造模型は

$$Y_{ijk} = \mu \cdot \alpha_i \cdot \beta_j \cdot \gamma_k \cdot e_{ijk}$$

Y_{ijk}: 摩耗量

μ: 1組の実験における平均の効果

α_i: 鋼種の効果 (i=1,2,...,7)

β_j: 取付位置の効果 (j=1,2,3,4)

γ_k: 実験チャンスの効果 (k=1,2,...,7)

e_{ijk}: 実験誤差

である。

ここで問題としたいのは鋼種間でどちらが耐摩耗性がすぐれているかという点であるので(2)式におけるlog α_iの平均値とその信頼限界を求めることにより十分に目的は達成される。そこでlog α_i(log α_iの平均値)を摩耗係数と定義し、この値の大小で耐摩耗性を比較した。すなわち、log α_iが大であると摩耗量が大で耐摩耗性は悪いことを示す。次にユーデン方格間の結合には

$$\frac{\log \alpha_{Q_1} + \log \alpha_{Q_2}}{2} \text{expt. } A - \frac{\log \alpha_{Q_1} + \log \alpha_{Q_2}}{2} \text{expt. } X = \delta AX$$

log α_{Q₁}: 標準試験片 Q₁ の摩耗係数

log α_{Q₂}: " Q₂ の "

expt. A: 実験 A

Table 2. Compositions of steels. (wt. %)

Code	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Zr	B
Q11	0.10	0.14	0.41							
Q46	0.13	0.19	0.50							
Q71	0.18		0.50							
Q72	0.10	0.48	0.46	0.46	0.84			0.51		
Q41	0.33	0.30	1.00			0.24				
Q42	0.30	0.27	0.63	1.84	0.77	0.39	0.12			
Q47	0.32	0.23	0.74		0.99	0.19				
Q44	0.96	0.23	0.45		1.73					
Q27	0.06	0.84	1.16	9.70	19.18					
Q39	0.36	0.25	0.64							
Q40	0.43	0.26	1.80							
Q67	0.42	0.24	0.65							
Q43	0.69	0.23	0.63							
Q57	0.81	0.25	0.88							
Q24	0.13	0.27	1.36			0.23				
Q49	0.16	0.38	1.18							
Q50	0.16	0.25	0.90	0.83	0.63	0.49	0.08	0.45		0.005
Q51	0.17	0.55	0.81		0.58	0.21			0.07	
Q52	0.27	0.62	0.92		0.57	0.20			0.02	
Q45	0.61	0.67	0.85							
Q68	0.17	0.27	1.24		2.04			0.29		
Q69	0.28	0.34	1.40		2.00			0.31		
Q48	0.11	0.33	0.48		2.24	0.88				
Q53	0.37	0.98	0.36		5.13	1.35	0.45			
Q54	0.12	0.49	0.90		13.29					
Q55	0.33	0.48	0.90		13.19					
Q21	0.29	0.19	1.31			0.28				
Q56	0.43	0.10	1.45			0.20				
Q70	0.24	0.25	1.58			0.19		0.19		

expt. X: 実験 X

δ_{AX} : 実験 X についての実験に対する $\log \alpha_i$ の補正値

なる δ_{AX} を用いて $\log \alpha_i$ の補正を行なうことにした。

3. 供試材

供試材の主要成分を Table 2 に示す。表に示したごとく供試材は主として炭素鋼、低合金構造用鋼、溶接性高張力鋼の範囲に属するもので、一部工具鋼、不銹鋼などの高合金鋼に属するものを含んでいる。これらの鋼に

種々の熱処理を行なうことによつて、フェライト+パーライト組織、ベイナイト、マルテンサイトならびにそれらの焼もどし組織などにとともに同一組織でも硬度が異なつたものが得られるようにした。

4. 実験結果

4.1 摩耗係数と硬度の関数

上記供試鋼の摩耗係数($\log \alpha_i$)と硬度の関係を Fig. 2 に示す。各摩耗係数の上下の線は95%信頼限界を示すものである。この結果は多少の変動が認められるが。

(i) 摩耗係数と硬度の関係

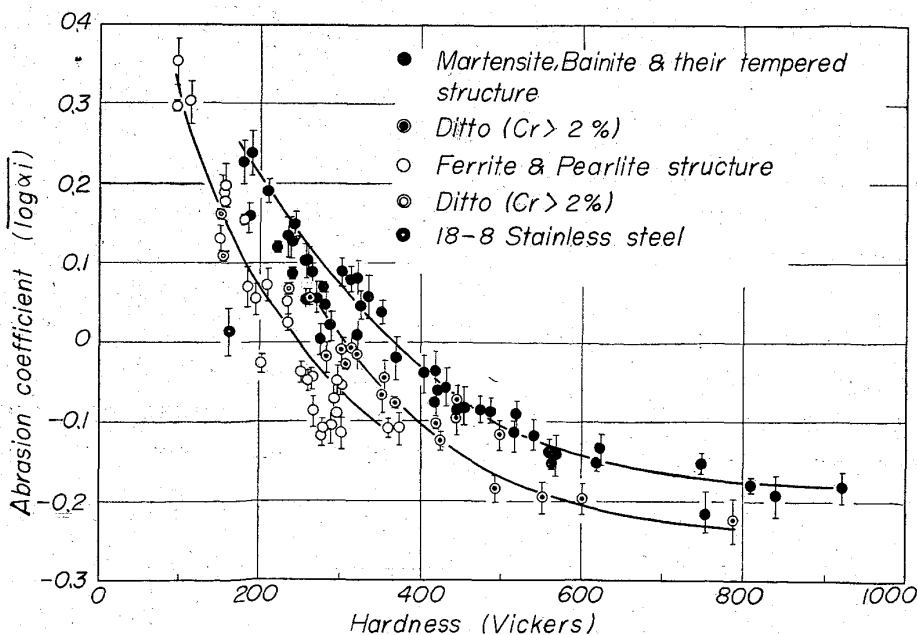


Fig. 2. Relation between abrasion coefficient and hardness.

は組織、成分によつて大きく三つにわけられる。すなわち、マルテンサイト、ベイナイトならびにそれらの焼もどし組織、Crを2%以上含む鋼の前記組織、フェライト+パーライト組織である。

(ii) 同一組織では硬度が上昇すると摩耗係数は減少し、その割合は硬度の増加とともにゆるくなる。

(iii) 同一硬度レベルではマルテンサイト、ベイナイトならびにそれらの焼もどし組織、Crを2%以上含む上記組織、フェライト+パーライト組織の順に摩耗係数は減少する。

(iv) 同一成分の鋼では硬度のもつとも高いもの(マルテンサイト組織)がもつとも摩耗係数が小さい。

(v) オーステナイト系ステンレス鋼(18Cr-8Ni)は同一硬度のフェライト+パーライト組織よりも摩耗係数が小さい。

ということがわかる。

4.2 Crの影響

Fig. 2で認められたCrの影響を詳細に調べるために、Table 3に示すC 0.24~0.37%の10鋼種のマルテンサイトおよびその焼もどし組織についての摩耗係数

Table 3. Compositions of steels. (wt. %)

Code	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Zr
Q70	0.24	0.25	1.58			0.19		0.19	
Q21	0.29	0.19	1.31			0.28			
Q39	0.36	0.25	0.64						
Q52	0.27	0.62	0.92		0.57	0.20			0.02
Q42	0.30	0.27	0.63	1.84	0.77	0.39	0.12		
Q47	0.32	0.23	0.74		0.99	0.19			
Q41	0.33	0.30	1.00		1.18	0.24			
Q69	0.28	0.34	1.40		2.00			0.31	
Q53	0.37	0.98	0.36		5.13	1.35	0.45		
Q55	0.33	0.48	0.90		13.19				

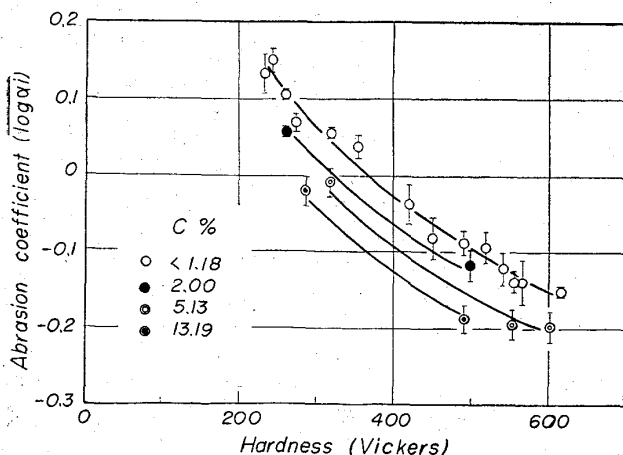


Fig. 3. Effect of Cr on the relation between abrasion coefficient and hardness. (Martensite & Tempered martensite of 0.3%C steel.)

と硬度の関係を Fig. 3 に示す。硬度と摩耗係数の関係はCr量によつて異なり、Cr量1.18%以下、2%、5%、13%の4本の硬度と摩耗係数の関係を示す曲線が得られ、Cr量の増大とともに同一硬度での摩耗係数は小になる。Cr量の摩耗係数におよぼす影響をHv=500で求めたものを Fig. 4 に示す。以上の結果はCrが硬度上昇を通ずる以外に耐摩耗性の改善に効果があることを示している。

4.3 C, Moの影響

C (0.81%以下) Mo (0.28%以下)の影響を検討した鋼の成分を Table 4 に示す。これらの鋼の硬度と摩耗係数の関係をフェライト+パーライト組織については Fig. 5 マルテンサイトおよびその焼もどし組織については Fig. 6 に示す。

(i) Moを含むフェライト+パーライト組織の鋼の硬度と摩耗係数の関係は炭素鋼のそれと異なり、同一硬度の炭素鋼とを比較すると摩耗係数が大きくMoは硬度の上昇には効果があるが、摩耗係数減少には寄与しないと考えられる。

(ii) フェライト+パーライト組織において、高硬度

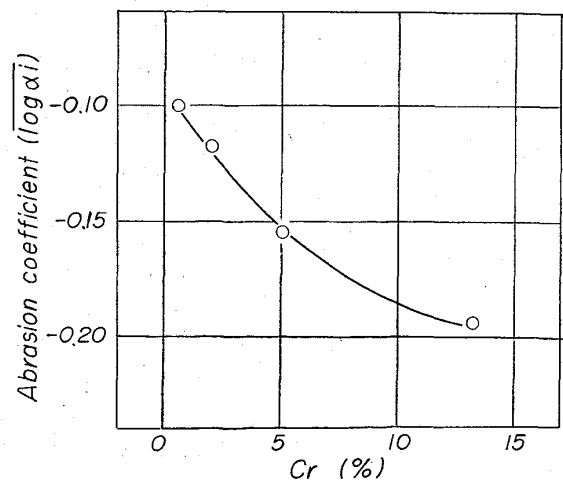


Fig. 4. Effect of Cr on the abrasion coefficient of 0.3%C steel. Tempered martensite : Hv=500

側ではCの影響が認められC量が増大すると、摩耗係数は減少する。

Table 4. Compositions of steels. (wt. %)

Code	C	Si	Mn	Mo
Q11	0.10	0.14	0.41	
Q46	0.13	0.19	0.50	
Q24	0.13	0.27	1.36	0.23
Q49	0.16	0.38	1.18	
Q71	0.18		0.50	
Q70	0.24	0.25	1.58	0.19
Q21	0.29	0.19	1.31	0.28
Q39	0.36	0.25	0.64	
Q40	0.43	0.26	1.80	
Q56	0.43	0.10	1.45	0.20
Q67	0.42	0.24	0.65	
Q45	0.61	1.67	0.85	
Q43	0.69	0.23	0.63	
Q57	0.81	0.25	0.88	

は減少する。

(iii) マルテンサイトとその焼もどし組織においてはフェライト+パーライト組織の場合とは逆に低硬度側でのCの影響が認められ、C量が増大すると摩耗係数は減少する。

4.4 組織の影響

共析成分に近い 0.81C-0.25Si-0.88Mn 鋼について組織の影響を Fig. 7 に示す。硬度と摩耗係数の関係はマルテンサイトとその焼もどし組織、等温変態によつて得られたパーライト (ただしセメントイトは球状化している) とベイナイト組織、パーライト (セメントイトは層状) 組織の3つにわかれ、同一硬度で比較すると、マルテンサイト系、ベイナイト系、パーライト系の順に摩耗係数が減少する。またオーステナイト化温度を変えて

粒度を変えても摩耗係数は変化しない。

以上の結果 Cr, C, 組織などが硬度と摩耗係数の関係に影響をおよぼすことが明らかとなつた。しかしこれらの材質的な因子が如何にして耐摩耗性に影響をおよぼすかは明瞭でない。

しかし耐摩耗性を支配する材質上の主要な因子としてマトリックス (フェライト) の性質と析出物 (セメントイト) の性質、大きさ、形状、量などが大きな役割を果していることは容易に予想されるところである。本実験において共析鋼で認められた組織による硬度と摩耗係数の関係の相違はセメントイトの形状、大きさ、分布が硬度と耐摩耗性のそれぞれに対して異なる影響をおよぼすことを示している。同一硬度レベルで比較したときにパーライト、ベイナイト、マルテンサイト組織の順に摩耗係数が増大することは、主としてセメントイトの形状の違いによつて説明されると考える。また同一組織において硬度が上昇すると摩耗係数が減少するのはセメントイトの分布が密になるか、セメントイト量の増加によるものである。

次にフェライト+パーライト組織においては高硬度側でそれぞれの組織において同一硬度でC量が多いほど摩耗係数が小さくなっていることは、パーライトの層間隔がある程度以下になつたとき焼もどしマルテンサイト組織中のセメントイト間の平均距離がある程度以上になつたときにセメンタ

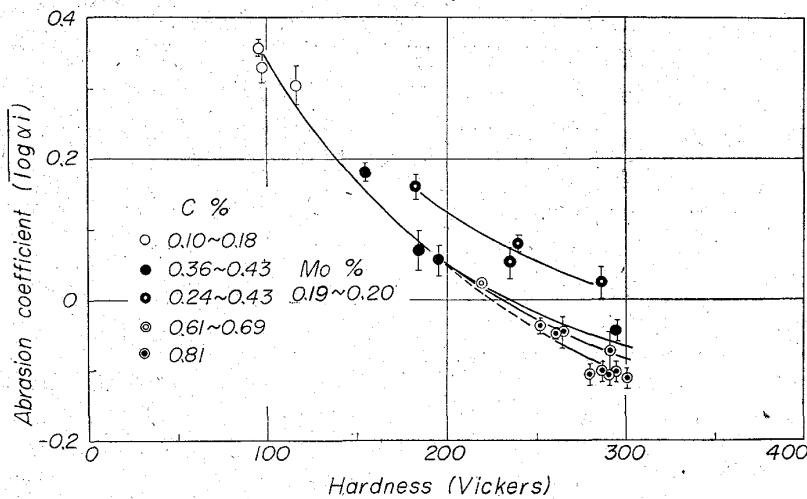


Fig. 5. Effect of C & Mo on the relation between abrasion coefficient and hardness. (Ferrite & Pearlite)

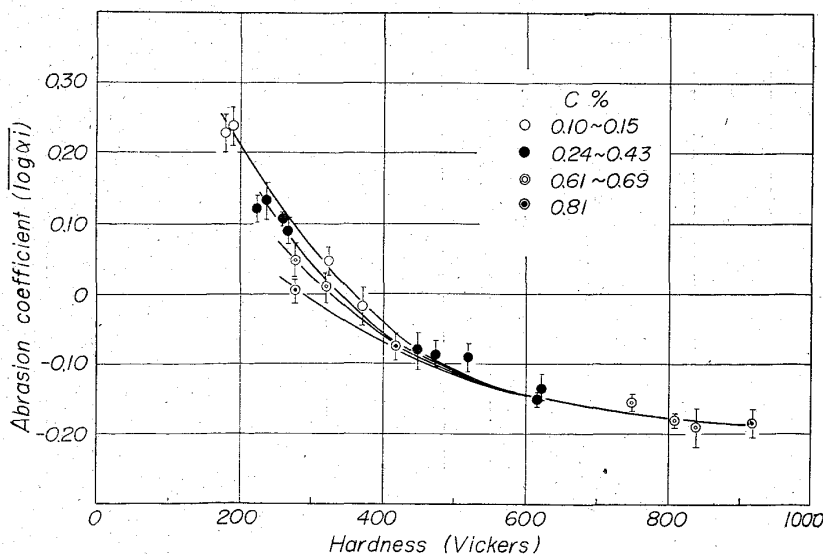


Fig. 6. Effect of C on the relation between abrasion coefficient and hardness. (Martensite & Tempered martensite)

イト量が硬度を通ずる以外に耐摩耗性に寄与することを示している。

また同一C量, 同一組織でCrが摩耗係数減少に効果があるのは, 主としてフェライト地の性質を変えることによるものと考えられる。オーステナイト系不銹鋼が同一硬度のフェライト系鋼より摩耗係数が小さいことは, 合金元素の効果というよりも結晶構造の違いによるものと考えの方が妥当であろう。

フェライト+パーライト組織においてMoが硬度上昇に寄与しながら摩耗係数の減少がみられないことは, その原因については不明である。

5. 結 言

主として炭素鋼, 低合金構造用鋼, 溶接性高張力鋼と一部工具鋼, 不銹鋼の範囲に属する供試鋼について, 水中の土砂による耐摩耗性を調べるために試験片が水を含む珪砂中を回転する型の摩耗試験機を用いて実験を行ない以下の結果を得た。

(1) 炭素鋼, 低合金鋼について硬度と摩耗係数の関係はフェライト+パーライト組織とマルテンサイト, ベイナイトとそれらの焼もしど組織の2組にわかれ, 同一硬度では前者の方が摩耗係数が小さい。しかし同一鋼では最高の硬度のマルテンサイト組織がもつとも摩耗係数が小さい。

(2) 摩耗係数は硬度の上昇とともに低下するが, 硬度が高くなるほど摩耗係数の減少の程度は低下する。

(3) 共析鋼ではパーライト組織, ベイナイト組織(球状セメンタイト+フェライト組織を含む)マルテンサイト組織で硬度と摩耗係数の関係は異なり同一硬度では前記の順に摩耗係数が増大する。

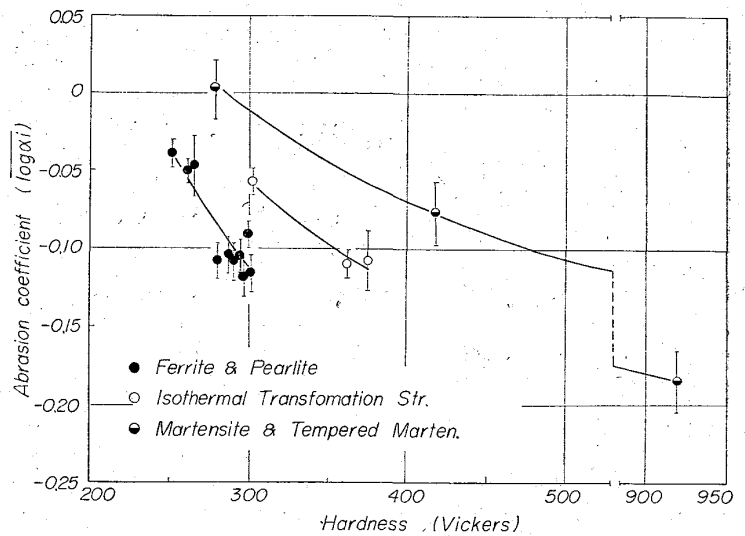


Fig. 7. Effect of of microstructure on the abrasion properties. (0.81% C steel)

(4) マルテンサイトとその焼もしど組織において, Cr量によつて硬度と摩耗係数の関係は異なり, 同一硬度での摩耗係数は減少する。

(5) フェライト+パーライト組織においては高硬度側, 焼もしどマルテンサイト組織においては低硬度側でC量が増すと摩耗係数が小さくなる。

(6) フェライト+パーライト組織においてMoは硬度上昇に効果はあるが, 摩耗係数の減少には効果がない。

(7) 18Cr-8Ni 不銹鋼は同一硬度のフェライト+パーライト組織より摩耗係数が小さい。

文 献

- 1) 山下貞二: 配管と装置, 2 (1962) No. 1 p. 15, No. 2 p. 11, No. 3 p. 3
- 2) Engineering, 14 (1961) April, p. 546
- 3) T. E. NORMAN: Hand Book of Mechanical Wear, (1961), p. 277
- 4) 宮野, 他: 鉄と鋼, 47 (1961) 3, p. 431