

## 解 説

UDC 669.14.018.256 : 624/628 : 621

## 建設・土木機械用耐摩耗材料の最近の動向\*

荒 木 昭 太 郎\*\*

## The Recent Trend of Wear-Resistant Materials for Construction Machine and Heavy Equipment

Shotaro ARAKI

## 1. 建設機械および土木機械の種類

Table. 1 は通産省の機械統計年表による 1976 年度の建設機械および土木機械の分類と生産額である。このうちでトラクタ、とくにブルドーザ (photo. 1) およびドーザショベル (photo. 2) がもつとも使用条件が厳しい。これらが他の分野の機械に比してとくに特徴を有するのは土砂摩耗材料および高負荷歯車材料であるので、以下これらの材料を中心に最近の動向について紹介する。

## 2. 土砂摩耗材料

## 2.1 土砂摩耗の機構

金属材料の土砂摩耗の機構はおおよそつぎのように考えられている<sup>1)~3)</sup>。まず、金属材料よりも硬い土砂粒子が金属材料の表面にある接触圧力でおしつけられる。すると、金属材料中へ土砂がくい込む (penetration)、このくい込みが生じた状態で表面に平行な力がはたらくと、金属が削り取られる。削り取られた箇所は溝状 (grooving) になり、溝の終端は削られた金属がもり上がった状態になる (Fig. 1)。しかし、やがてこれが脱落 (chipping) する。すなわち、土砂摩耗はまず penetration が起こり、ついで grooving となり、最後に chipping という現象のくり返しである。そして摩耗の形態や摩耗速度は摩耗条件によつて変化する。

土砂摩耗の形態は通常 3 種類に分類されている<sup>4)</sup>。第 1 はガウジング摩耗 (gouging abrasion) で、金属が岩石などにより削りとられる状態の摩耗である (Fig. 2) ブルドーザではリップポイントやカッティングエッジなどにこの種の摩耗がみられる。ガウジング摩耗は接触面圧が大で摩耗速度はもつとも大きい。

第 2 はグラインデング摩耗 (grinding abrasion or

high stress abrasion) である。この摩耗は金属間に土砂などが入り込んでこれをすりつぶすことにより生ずる (Fig. 3)。かみ込まれた土砂粒子の先端の局部的な面圧は非常に高い。ブルドーザのトラックローラとトラックリンクの摩耗はこの種の形態に入る。

第 3 はスクラッチング摩耗 (scratching abrasion or low stress abrasion) である。この摩耗は Fig. 4 に示すように土砂の中で土砂をひつかきまわすような場合に生ずる。接触面圧は上記のか種類にくらべるともつとも小さく、したがって摩耗速度も比較的小さい。土砂の粒子は破碎されない。ドーザショベルのバケットの先端についているティースはこの種の摩耗をうける。

## 2.2 土砂摩耗試験方法

材料の耐土砂摩耗性を簡便に評価し、実際の部品の摩耗寿命を推定したり、あるいは土砂摩耗機構を解明する手段として土砂摩耗試験は重要な意味をもっている。そしてガウジング、グラインデングおよびスクラッチングのそれぞれの摩耗形態を再現するために古くから特徴ある各種の試験機が考案されている。

ガウジング摩耗試験に関しては最近ひつかき硬さが注目されている<sup>5)</sup>。これは Fig. 5 に示すごとくダイヤモンド圧子で荷重をかけ、これと直角方向にひつぱり、形成される溝幅を測定する。溝幅  $d$  とひつかき硬さ  $H$  の間には次式が成立する。

$$H = \frac{4W}{d^2} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$W$ : 試験荷重,  $d$ : 溝幅,

$\theta$ : ビッカース圧子の対面角

このひつかき硬さは摩耗量と良い相関のあることが報告されている<sup>6)</sup>。ガウジング摩耗試験に関してはほかに多くの報告がみられる<sup>7)~9)</sup>。

グラインデング摩耗試験機として代表的なものは

\* 昭和 53 年 6 月 21 日受付 (Received Jun. 21, 1978) (依頼解説)

\*\* (株)小松製作所技術研究所 (Techical Research Center, Komatsu Ltd., 2597 Shinomiya Hiratsuka Kanagawa 254)

Table 1. Classification of construction machine and heavy equipment.

Type	Million yen	Percentage (%)
Tractor	397 281 (177 898) (219 383)	54.7
Construction crane	77 204 (76 523) (681)	10.7
Excavating equipment	(1) Shovel type excavator	24.7
Tunnel boring machine	5 381	0.7
Grading machine	(1) Grader & scraper (2) Miscellaneous	3.5
Asphalt paving machine	(1) Asphalt plant (2) Miscellaneous	0.8
Concrete equipment	(1) Concrete pump (2) Miscellaneous	3.6
Foundation works equipment	(2) Pile driver (2) Miscellaneous	1.3
Total		726 347
		100

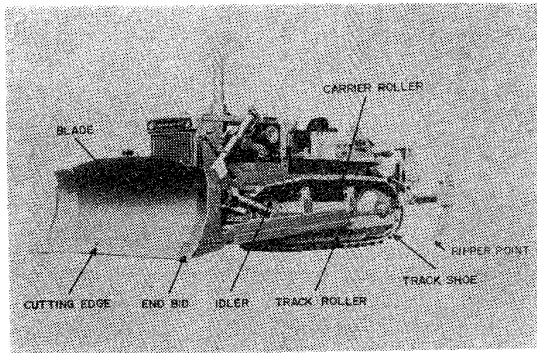


Photo. 1. Bull dozer.

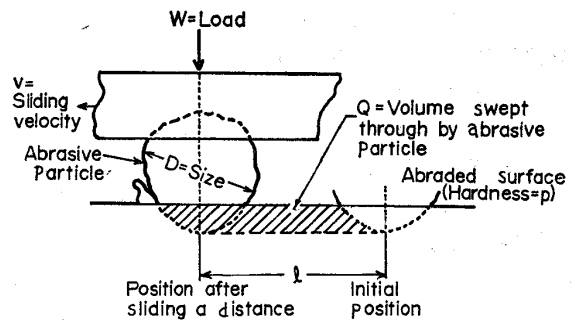


Fig. 1. Idealized picture of abrasive wear<sup>1)</sup>.

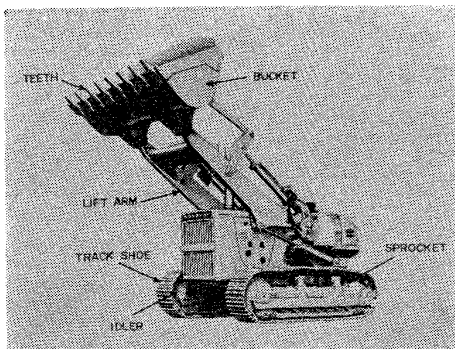


Photo. 2. Dozer shovel.

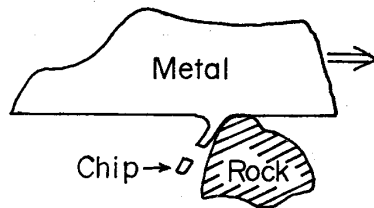


Fig. 2. Gouging abrasion.

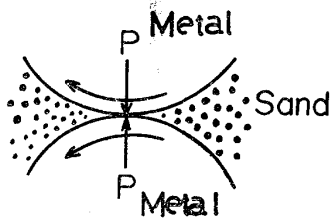


Fig. 3. Grinding abrasion.

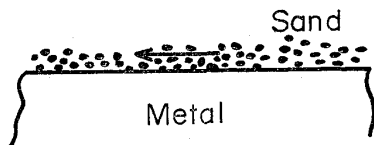


Fig. 4. Scratching abrasion.

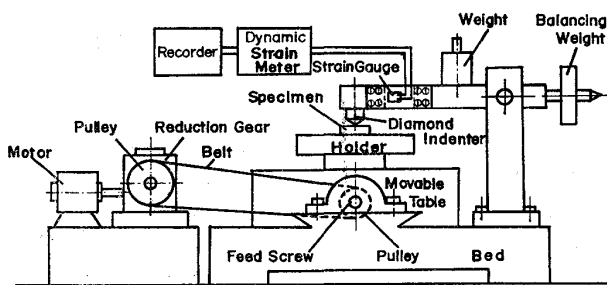


Fig. 5. Schematic diagram of the apparatus for scratch hardness test<sup>5)</sup>.

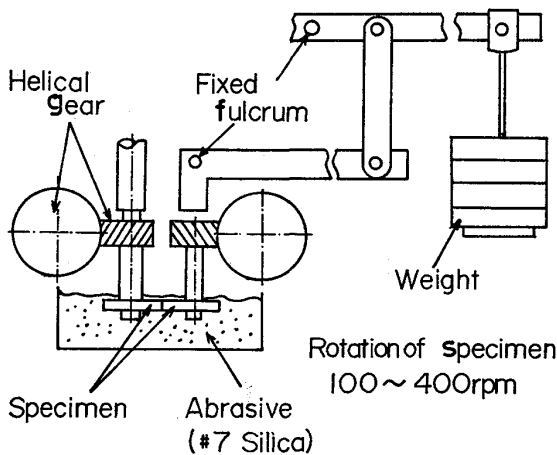


Fig. 6. Apparatus for grinding wear test<sup>12)</sup>.

American Brake Shoe 社の温式砂摩耗試験機<sup>10)</sup>および Climax Molybdenum 社のボールミル試験機<sup>11)</sup>である。Fig. 6 は著者らの会社で使用しているグラインディング摩耗試験機<sup>12)</sup>であり、これはブルドーザのトラックローラとリンクあるいはトラックブッシュとスプロケット間の摩耗機構を研究する目的で作られたものである。グラインディング摩耗試験に関してはほかに多くの報告がある<sup>13~15)</sup>。

スクラッチング摩耗試験には砂粒子の破碎の少ないゴムホイールタイプの試験機が使われることも多い (Fig. 7)<sup>16)</sup>。Fig. 8 は著者らの会社で行なっているスクラッチング摩耗試験機<sup>17)</sup>であり、ドーザショベルのバケットティースの摩耗を対象に考案されたものである。スクラッチング摩耗試験に関してもほかに多くの報告がある<sup>18~21)</sup>。

### 2.3 土砂摩耗におよぼす各種要因の影響

#### 2.3.1 土砂の硬さの影響

土砂摩耗部品の摩耗は土砂の硬さの影響を著しくうける。一般に、土砂の硬さが増せば摩耗量は大きくなる。Table. 2 に各種鉱物の硬さを示す<sup>22)</sup> Fig. 9 は種々の鋼種について土砂の種類を変えて行なつたグラインディング摩耗テスト結果である<sup>22)</sup>。マルテンサイト鋼はとくに土砂の硬さの影響をうけやすい。

#### 2.3.2 金属材料の硬さの影響

金属材料の硬さと耐摩耗性の関係は古くから経験的に知られており、耐摩耗性を向上させるためには、材料の硬さを上げることがよく行なわれる。材料の硬さと摩耗量との関係についてはきわめて多くの報告がある。KRUSHOV は熱処理した材料の硬さと摩耗抵抗との間には次式が成立するとしている<sup>23)</sup>。

$$E = E_0 + C(H - H_0)$$

$E$  : 熱処理状態の摩耗抵抗

$E_0$  : 焼鈍状態の摩耗抵抗

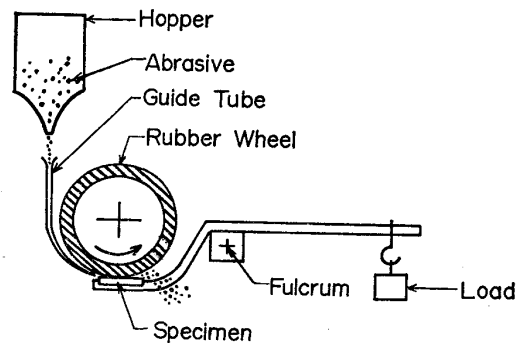


Fig. 7. Schematic diagram of dry sand erosion test<sup>16)</sup>.

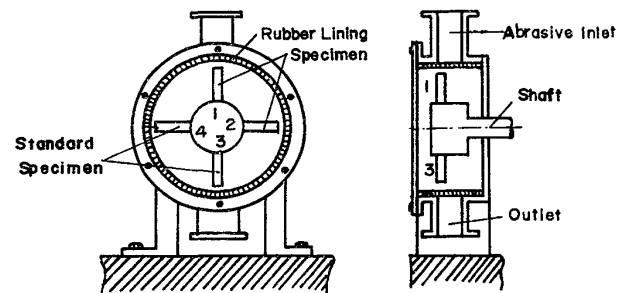


Fig. 8. Schematic diagram of the apparatus for wear test<sup>17)</sup>.

Table 2. Hardness of minerals and microconstituents.

Minerals	Hardness	
	Knoop	Hv
Talc	20	—
Carbon	35	—
Gypsum	40	36
Calcite	130	140
Fluorite	175	190
Apatite	335	540
Glass	455	500
Felspar	550	600~750
Magnetite	575	—
Orthoclase	620	—
Flint	820	950
Quartz	840	900~1280
Topaz	1330	1430
Garnet	1360	—
Emery	1400	—
Corundum (alumina)	2020	1800
Silicon carbide	2585	2600
Diamond	7575	10000

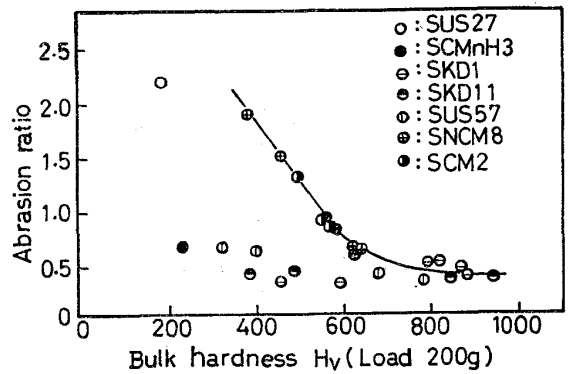


Fig. 10. Relation between abrasion ratio and the bulk hardness of various steels (Standard T. P. SK4 Hv 627)<sup>24)</sup>.

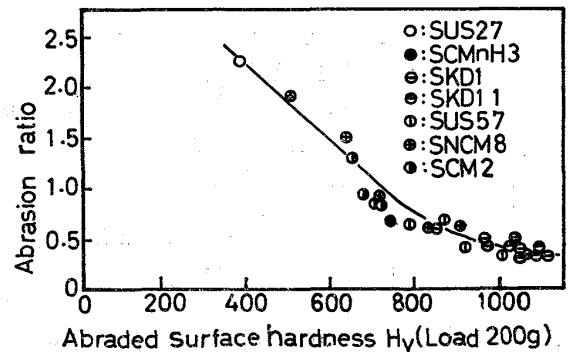


Fig. 11. Relation between abrasion ratio and the abraded surface hardness of various steels (Standard T. P. SK4 Hv 627)<sup>24)</sup>.

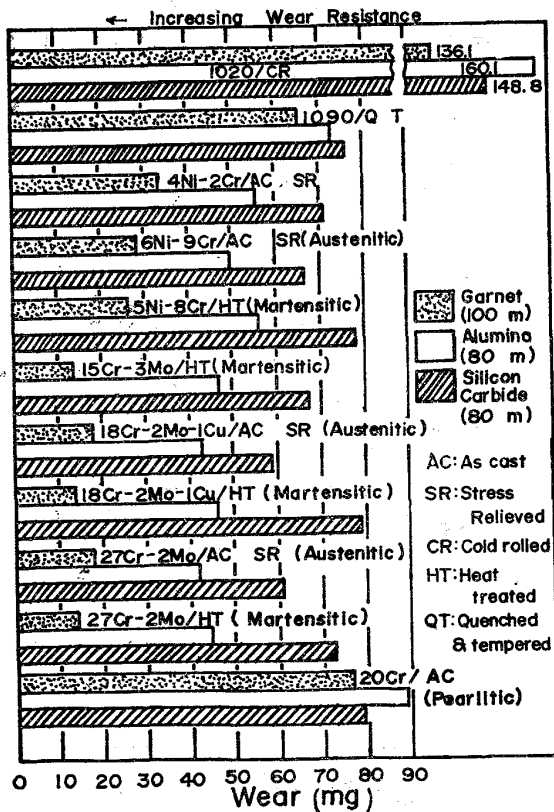


Fig. 9. Influence of various abrasives on the wear of ferrous materials<sup>22)</sup>.

H : 熱処理した状態の硬さ

H<sub>0</sub> : 焼鈍状態の硬さ, G : 定数

Fig. 10 および Fig. 11 は各鋼種について硬さをかえたものについてガウジング摩耗試験をした結果である<sup>24)</sup>. バルクの硬さでみると摩耗比は残留オーステナイトの多

いものはバラツキが大きい (Fig. 10) が, 摩耗テスト後の摩耗面の硬さで整理するとバラツキは非常に小さい (Fig. 11). 同様の結果が BORIK のジョウクラッシュ試験によつても示されている<sup>8)</sup>. この理由はオーステナイトを多量に含有する鋼は摩耗試験の初期において急速に硬化し, さらにマルテンサイト化するためと考えられている.

2.3.3 C量の影響

NORMAN はボールミル試験により Mn-Cr-Mo 系マルテンサイト鋼のグラインディング摩耗における耐摩耗性とC量との関係を求めた (Fig. 12)<sup>11)</sup>. C量は0.7%まで耐摩耗性の向上効果は大きい, これを越えると効果は小さくなる. C量の影響についてはこのほかに多くの報告がある<sup>8)25)</sup>.

2.4 耐土砂摩耗材料

2.4.1 焼もどしマルテンサイト鋼

耐土砂摩耗部品は硬さ, 靱性および溶接性などをあわせて要求されることが多いので, 中C焼もどしマルテンサイト鋼が多く使用されている (Table. 3)<sup>26)</sup>. C0.30~0.50% のC鋼, Mn 鋼および低合金鋼が多く, 焼入れ後低温焼もどしを施して使用される. プルドーザ

Table 3. Parts of bulldozer and dozer shovel.

Parts	Steels	Chemical	Composition (wt. %)
Track shoe	SMn1H Mn-B steel	Rolling Rolling	0.33C 1.30Mn 1.70Mn 0.002 B
Track link	SMn3H Mn-B steel	Forging Forging	0.43C 0.37C 1.55Mn 1.10Mn 0.0017 B
Track bush	SCM21H	Rolling	0.15C 1.00Cr 0.25Mo
Sprocket	SMn1H SiMn	Forging Casting	0.33C 0.44C 1.30Mn 0.50Si 1.10Mn
Track roller	SMn3H	Forging	0.42C 1.50Mn
Cutting edge	Mn-B steel	Rolling	0.35C 1.10Mn 0.0017 B
End bit	Mn-B steel	Forging	0.35C 1.10Mn 0.0017 B

Table 4. Chemical composition of SHSC-3H and SHSC-2H (wt %).

Steels	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	B
SHSC-3H	0.33	1.55	0.53	0.018	0.014	4.08	0.97	0.05	—
SHSC-2H	0.30	1.74	0.51	0.009	0.016	0.60	0.12	—	0.0012

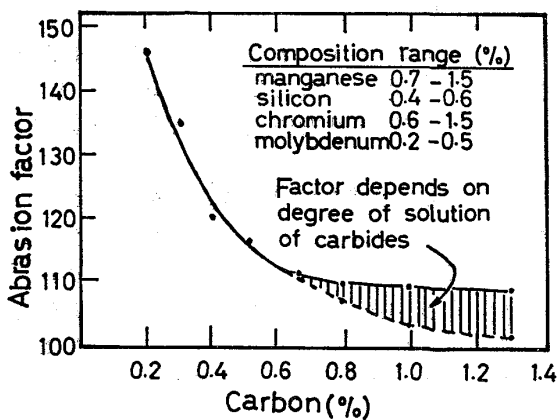


Fig. 12. Influence of carbon content on the wear rates of martensitic cast steels<sup>11)</sup>.

のリッパポイントのような過酷なガウジング摩耗をうける部品では使用中に岩石との摩擦熱で接触面の温度が600°Cにも上昇する<sup>27)</sup>。このような高温になると通常のマルテンサイト鋼では焼もどし温度を超えるため硬さが低下し、その結果耐摩耗性が急激に減少する。したがって、このような場合は焼もどし軟化抵抗の大きい材料が耐摩耗性は向上する。Table. 4<sup>27)</sup> に Si 添加により焼もどし軟化抵抗を高めた鋼種の例を示す。Fig. 13 はこれらの鋼の焼もどし硬さ曲線で高温に加熱されても硬さの低下が少ない。

2.4.2 高張力鋼

ブルドーザのブレードやダンプトラックのベッセルな

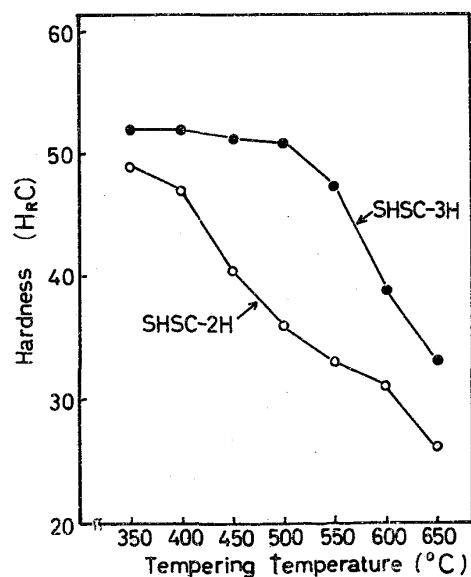


Fig. 13. Effect of tempering temperature on tempered hardness<sup>27)</sup>.

ど土砂摩耗をうける溶接構造物には耐摩耗性向上のために高張力鋼が使用される。溶接用高張力鋼板としてもつとも強度の高いものには現在、110 キロ級および140 キロ級のものがある。60 キロ級を超える高張力鋼は当初 Cr, Ni, Mo などの合金元素を多量に含有していたが、経済性および溶接性が好ましくないのにより安価なものが開発されている。Table. 5<sup>28)</sup> には 110 キロ級およ

Table 5. Chemical composition and mechanical properties of SHT110A and KN 360.

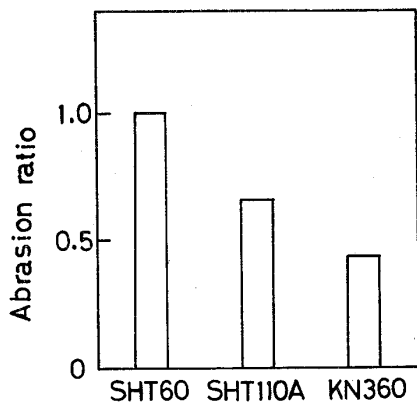
Grade of tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Steels	Chemical composition (wt %)									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
110	SHT110A	0.19	0.29	1.40	0.023	0.008	0.02	0.30	0.01	0.02	0.05
140	KN360	0.21	0.32	1.44	0.023	0.014	<0.05	<0.05	<0.01	<0.03	0.06

Grade of tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Steels	Chemical composition (wt %)				Mechanical properties			
		V	Nb	B	Ti	$\sigma_Y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of area (%)
110	SHT110A	0.032	—	0.0014	—	101	115.7	15.7	—
140	KN360	<0.03	<0.01	0.0016	<0.01	146	157	14.0	34.0

Table 6. Chemical composition of casting steels for construction machinery (wt %).

Steels	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Cr-Mo casting steel	0.33	0.60	0.06	<0.030	<0.030	0.90	<0.30	<0.35	0.15
	0.43	0.85	0.85			1.20			0.35
High-carbon casting steel	0.40	0.30	0.60	<0.040	<0.040	—	—	—	—
	0.50	0.60	0.90			—	—	—	—

Fig. 14. Gouging abrasion ratios of ultra-high strength steel plates<sup>28)</sup>.

び140キロ級高張力鋼の例を示す。これらは Mn-B 系の調質鋼であり、溶接性の点から低Cとし、 $G_{eq}$  および  $P_{CM}$  が低くおさえられ、予熱、後熱なしで溶接できる。Fig. 14 は摩耗試験結果を示したもので、耐摩耗性は60キロ級高張力鋼に比べ110キロ級高張力鋼は1.5倍、140キロ級高張力鋼は2.3倍すぐれている<sup>28)</sup>。

#### 2.4.3 浸炭鋼

耐土砂摩耗部品として浸炭鋼が使用されることは比較的少ない。ブルドーザなどのトラックブッシュには耐摩耗性と疲労強度の向上のため浸炭鋼が使われており、耐摩耗寿命をとくに大きくするため、たとえば浸炭深さ3mm というように極端に長時間の浸炭処理が施される。

#### 2.4.4 鋳鋼および鋳鉄

ブルドーザのsprocketなど形状の複雑な部品の場合には鋳鋼がコスト的に有利になる。Table. 6 にその鋼種例を示す<sup>29)</sup>。耐摩耗性を向上するために一般にC%は高目のものが多い。

また靱性はあまり要求せず耐摩耗性を極端に要求される場合には高Crマルテンサイト鋳鉄が使用されている。Table. 7 に高Crマルテンサイト鋳鉄の例を示す<sup>30)</sup>。高Cr鋳鉄はNi-Crチル鋳鉄の1.3倍の耐摩耗性がある。高Crマルテンサイト鋳鉄に関してはほかに20Cr-2Mo-1Cu系<sup>31)</sup>、18Cr-1Cu-Mo系<sup>32)</sup>など多くの報告がある。

### 3. 高負荷歯車材料

#### 3.1 高負荷歯車の損傷の分類と損傷機構

歯車の損傷についてはおおよそ Table. 8 のように分類されている<sup>33)</sup>。これらのうち建設機械の動力伝達用歯車は設計面圧が高いため、ピッチングがもつとも問題になるので、以下これについて述べる。

ピッチングは表面層の圧縮疲労によるもので、そのメカニズムはつぎのように考えられている<sup>34)</sup>。Fig. 15 はすべりのない円筒接触における応力状態を模式的に示したものである。ピッチングは最大せん断応力  $\tau_{max}$  の影響を大きく受ける。すべりのない Fig. 15 の場合は  $\tau_{max}$  の位置は内部にあるが、実際の歯車ではころがりのほかにすべりをともなうため  $\tau_{max}$  の位置はしだいに

Table 7. Comparison of martensitic white iron alloys in grinding.

Description and heat treatment	Composition (wt %)						Hardnes H <sub>RC</sub>	Abrasion factor
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni		
Martensitic Cr-Mo white iron, heated to 1950°F, air cooled	2.8	1.0	0.6	15.0	3.0	—	66	89
Martensitic Cr white iron, heated to 2000°F, air cooled	2.7	1.0	0.6	25.0	—	—	64	98
Chill cast Ni-Cr-Mo white iron, cast, cooled in sand, tempered 425°F	3.2	0.7	0.5	2.0	1.0	3.0	59	107
Chill cast Ni-Cr white iron, cast, cooled in sand, tempered 425°F	3.0	0.5	0.4	2.1	—	4.5	55	116

Table 8. Classification of gear tooth wear and failure.

Surface deterioration	Wear	Normal wear, Abrasive wear, Scratching, Overload wear, Ridging
	Plastic yielding	Rolling, Peening, Rippling
	Welding	Slight scoring, Severe scoring
	Surface fatigue	Initial pitting, Destructive pitting, Spalling
	Others	Corrosive wear, Burning, Interference, Grinding checks
Tooth breakage		Overload breakage, Fatigue breakage, Cracking, Quenching cracks

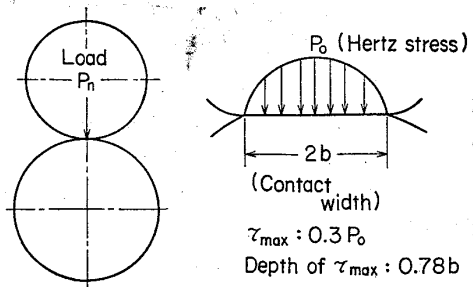


Fig. 15. Pressure distribution on contact surface ( $\mu=0$ ).

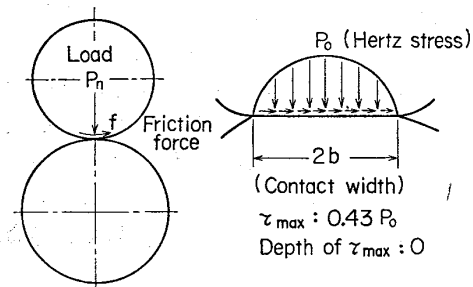


Fig. 16. Pressure distribution on contact surface ( $\mu=0.33$ )<sup>35)</sup>.

最表面に近くなる (Fig. 16)<sup>35)</sup>. 実際の損傷歯車はほとんど最表面よりピッチングき裂が発生している<sup>36)</sup>. photo. 3 は駆動ピニオンに発生したピッチングの例で

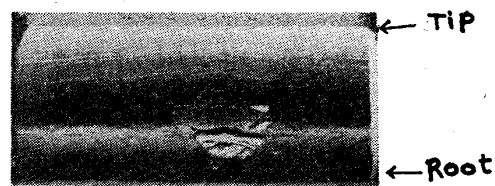


Photo. 3. Destructive pitting in a spur gear.

Table 9. Various types of pitting fatigue test machines.

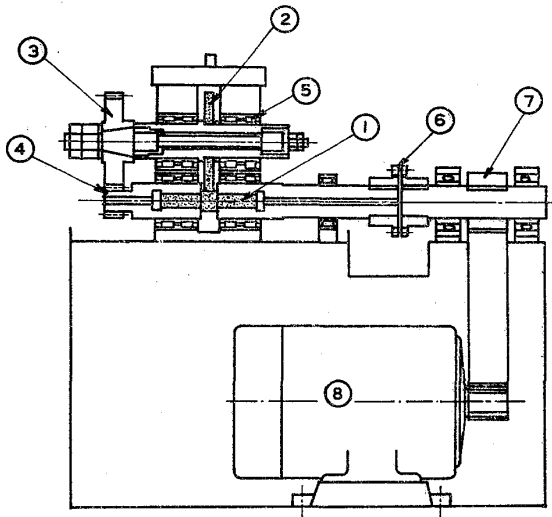
Type of specimen	Test machine
Disc and ball	Rolling contact fatigue machine
Roller	Geared roller test machine
Gear	Power circulating type gear test machine

ある。歯元から歯先へ向つて V 字形に進行している。また、内部方向へのき裂の進展角度は 25°~30° が多い<sup>37)</sup>。

### 3.2 ころがり疲れ試験方法

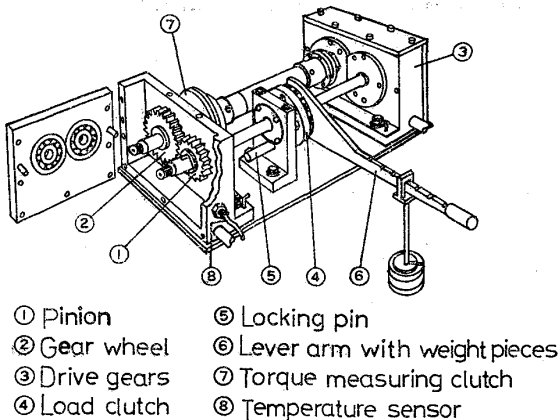
歯車材料の耐ピッチング強度の試験方法を分類すると Table.9 のようになる。転動疲労試験機はすべりがほとんどなく、ベアリング用材料などを対象とした試験に適している。ローラテストはローラどうしの接触により

歯車のかみ合い状態を再現したもので、すべりをあたえることができ、歯車材料の耐ピッチング強度を調べるのには簡便かつ信頼性の高い方法である。Fig. 17 はローラピッチング試験機の構造を示したもので、小ローラを試験片としてこれに負のすべりがあたえられる。つぎに、実際の歯車を使う試験機には各種のものがあるが、動力循環式のものが多い。Fig. 18 はその例を示す。



- ① Test roller
- ② Loading roller
- ③ Gear
- ④ Gear
- ⑤ Bearing
- ⑥ Coupling
- ⑦ Belt
- ⑧ Motor

Fig. 17. Geared roller test machine.



- ① Pinion
- ② Gear wheel
- ③ Drive gears
- ④ Load clutch
- ⑤ Locking pin
- ⑥ Lever arm with weight pieces
- ⑦ Torque measuring clutch
- ⑧ Temperature sensor

Fig. 18. F. Z. G. gear tester.

### 3.3 歯車材料

ブルドーザ用歯車は耐ピッチング強度を上げるため高い表面硬さを要求されることが多い。そのほとんどは浸炭歯車または高周波焼入れ歯車であるが、使用条件が厳しいのは浸炭歯車であるので、以下これに使用される材料について述べる。Table. 10 はブルドーザに使われている高負荷歯車用浸炭鋼の代表例である。通常 0.7~1.0% C に浸炭した後焼入れ焼もどしを施して使われており、表面硬さは H<sub>R</sub>C 60~62 である。

IITRI (イリノイ工科大学付属研究所)<sup>38)</sup> ではローラピッチングテトにより、ピッチング強度におよぼす材質、C量、潤滑油など各種要因の影響についてきわめて広範囲の実験を行ない、その結果次式の関係を求めた。

$$\log B_{50} = 2.57 + 4.41(\%C) - 2.11(\%C)^2 - 7 \log(S/100) + 0.01A - G$$

B<sub>50</sub>: ピッチング寿命(x10<sup>6</sup>)

%C: 表面C量 (wt%), S: ヘルツ面圧 (ksi)

A: 潤滑油の使用回数 (×10<sup>6</sup>)

G: 表面層の除去の有無により決る定数

C量は 1.05% までは増加にともないピッチング寿命を向上させる。表面層に不完全焼入れ組織(パーライト)があるとピッチング寿命は低下する。表面の粒界酸化層を除去するとピッチング寿命は低下する。不完全焼入れ組織がなければピッチング寿命は鋼種によつてほとんど差がない。残留応力および残留オーステナイトはピッチング寿命にほとんど影響をあたえない。

つぎに、ピッチング強度は表面硬さが高いほど大きくなることはよく知られている<sup>39)</sup>。Fig. 19 は実物歯車の表面硬さとピッチング寿命の関係を示したものである。<sup>40)</sup> 硬さの増加にともないピッチング寿命は向上する。表面硬さを上げるために特別な熱処理法が色々工夫されている。急熱処理法は 0.7~0.8% に浸炭した歯車を焼入れする際に急速加熱して焼入れるものである。Fig. 20 はこの方法による浸炭焼入れ材の表面硬さを示したもので、通常の浸炭焼入れ処理にくらべ約 H<sub>R</sub>C 2.5 表面硬さが高い<sup>41)</sup>。この処理の特徴はオーステナイト化時間およびオーステナイト化保持時間を短くすることによつてセメントタイトの溶けこみが不十分な状態で焼入れるため、オーステナイト中の C量が少なく、焼入れ時の残留オーステナイトが 5% 以下と極端に少ないことである。そのため焼入れ硬さが高くなる。photo. 4 にその顕微鏡組織を示す。また、これにより転動疲労寿命は通常

Table 10. Chemical composition of carburizing steels for heavy duty gears (wt %).

Steels	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SNCM21H	0.17~0.23	0.15~0.35	0.60~0.95	<0.030	<0.030	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.30
SNCM23H	0.17~0.23	0.15~0.35	0.40~0.70	<0.030	<0.030	1.55~2.00	0.35~0.65	0.15~0.30



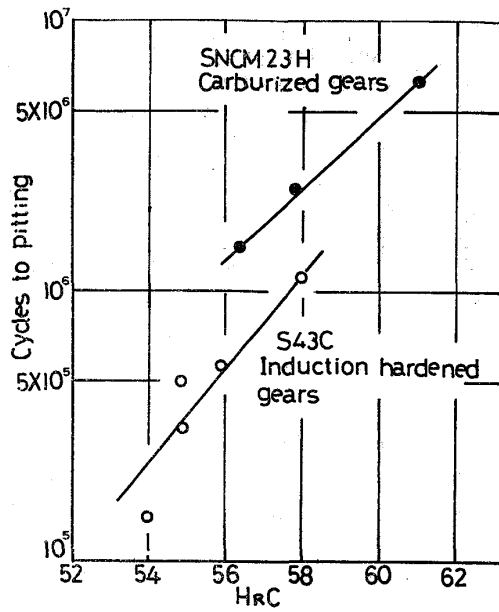


Fig. 19. Effect of surface hardness of hardened gears on pitting fatigue<sup>40</sup>).

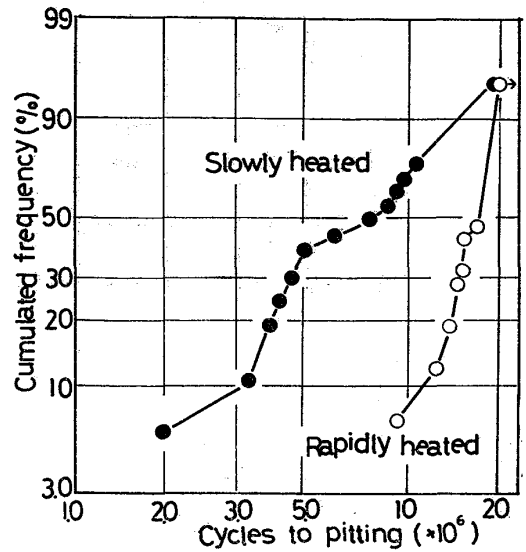


Fig. 21. Results of rolling fatigue life test of the carburized SNCM23H quenched and tempered after austenitization by rapid and slow heating<sup>42</sup>).

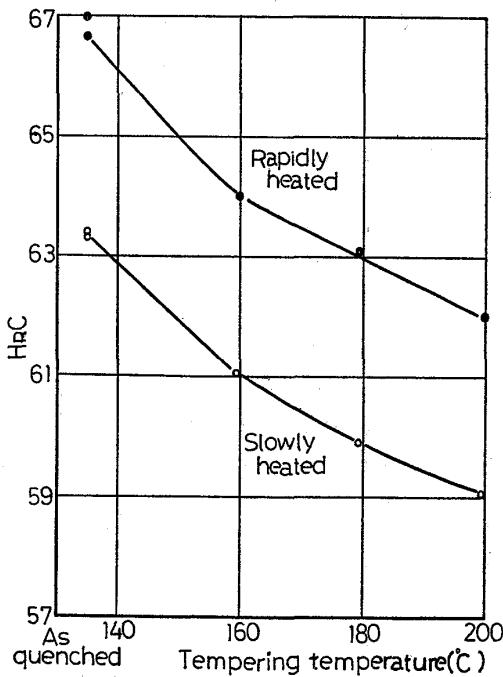


Fig. 20. Effect of heating rate in austenitizing on hardness of the steel SNCM23 quenched in oil and tempered to various temperatures<sup>41</sup>).

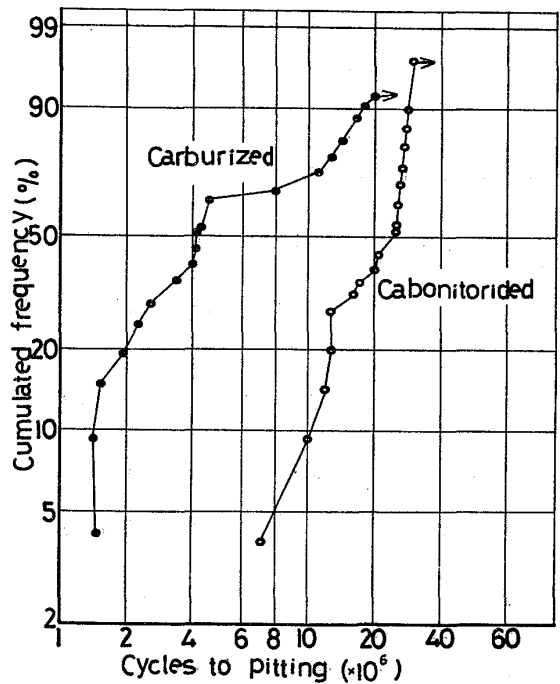


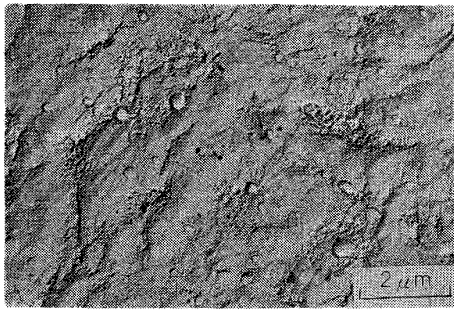
Fig. 22. Comparison of rolling contact fatigue life between carburized and carbonitrided specimen<sup>44</sup>).

の浸炭処理材より  $B_{10}$  寿命で約 3 倍向上する (Fig.21)<sup>42</sup>。

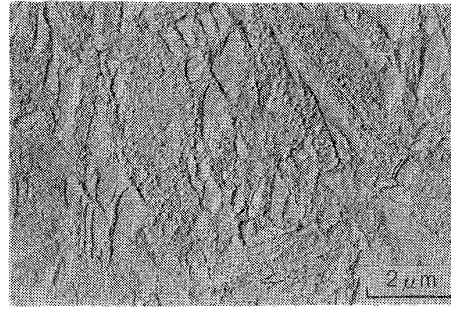
浸炭浸窒処理法<sup>43</sup>は浸炭処理時に一定時間浸炭ガスにアンモニアガスを多量に混合し、Cと同時にNを表面層に浸入させ、焼入れ後表面層に多量の残留オーステナイト (40~60%) を生ぜしめるものである。残留オーステナイトが存在すると硬さが低下し、ピッチング強度が低下するように思われるが、逆に、極端に多量に存在する

場合には残留オーステナイトが寿命向上にはたらく。

すなわち、残留オーステナイトが 40~60% のときの硬さは  $H_{RC}$  52~60 と通常の浸炭処理材にくらべると低い。そのため歯車のかみ合い時のあたりがよくなり面圧を低下させるとともに、この残留オーステナイトが塑性変形し、マルテンサイト化することにより硬化し、硬さが約  $H_{RC}$  62 に上昇する。これによりピッチング寿



(a) Rapidly heated



(b) Slowly heated

Photo. 4. Comparison of microstructure between rapidly heated and slowly heated specimens.

命が大幅に向上する。

Fig. 22 はこれの転動疲労試験結果<sup>44)</sup>を示したものである。通常の浸炭処理材より  $B_{10}$  寿命で約 6 倍向上する。

#### 4. む す び

耐土砂摩耗材料および歯車材料に関する最近の研究状況の概要を紹介した。耐土砂摩耗材料については部分的な研究報告の数は非常に多いが、より普遍的な理論の確立に向って模索の段階にある。高負荷歯車材料については新しい熱処理方法が生れつつあり、さらに一段の向上をめざして研究が行なわれている。

#### 文 献

- 1) SAE Information Report: Abrasive Wear-J965, (1966)
- 2) 松井昭男: 日本機械学会第 381 回講習会, (1973), p. 63
- 3) 室 達郎: 日本建設機械化協会摩耗対策分科会研究成果中間報告書, (1973), p. 21
- 4) H. S. AVERY: Wear, 4 (1961), p. 427
- 5) 武田信男, 鏡重次郎: 精密機械, 37 (1971) 3, p. 212
- 6) 横溝精一, 柄川尚慶: 熱処理, 17 (1977) 3, p. 176
- 7) 中西英介, 植田秀夫: 小松技報, 17 (1971) 4, p. 9
- 8) F. BORIK: Metals Engineering Quarterly, (1972)
- 9) 例えば D. N. ROSENBLAT: Annual Electric Furnace Conference, AIME, (1963)
- 10) H. S. AVERY: Wear, 4 (1961), p. 435
- 11) T. E. NORMAN: Trans. Amer. Found. Soc., 66 (1958), p. 187
- 12) 古川民雄, 樋山允男: 小松技報, 16 (1970) 2, p. 170
- 13) R. B. GUNDLACH and J. K. PARKS: Wear, 46 (1978), p. 97
- 14) D. GRAHAM and R. M. BAUL: Wear, 19 (1972), p. 301
- 15) D. N. ROSENBLATT: ASM Technical Report, (1966)
- 16) H. S. AVERY: Surface Protection Against Wear and Corrosion, ASM Book, (1954), p. 22
- 17) 安達秀男, 薩摩林和美, 増村 慎: 鑄物, 37 (1965), p. 48
- 18) D. A. STOLK: SAE combined National Farm, Construction & Industrial Machinery Power Plant Meetings, (1970)
- 19) E. RABINOWICZ: Proc. JSLE-SALE International Lubrication Conference, (1975)
- 20) W. A. STAUFFER: Metal Prog., (1956), p. 102
- 21) J. LARSEN-BASE: Proceedings of the 1971 International Conference on Mechanical Behavior of Materials, 3 (1972), 3 p. 353
- 22) R. B. GUNDLACH and J. L. PARKS: Wear, 46 (1978) 10, p. 97
- 23) M. M. KHRUSCHOV: Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear Institution of Mechanical Engineers, London, (1958)
- 24) 大村平人, 中西英介, 植田秀夫: 潤滑学会, 九州大会講演, (1972)
- 25) M. A. MOORE: Wear, 28 (1974), p. 59
- 26) 田口一男: 鉄と鋼, 58 (1972) 7, p. 963
- 27) 薩摩林和美, 渡辺敏美, 池田 宏, 田川富啓: 小松技報, 22 (1976) 2, p. 106
- 28) 中西英介, 小形 勝, 佐野精二郎: 小松技報, 21 (1975) 1, p. 29
- 29) 石坂隆一, 橘川顕夫: 建設機械, 12 (1967) 7, p. 38
- 30) T. E. NORMAN, A. SOLOMON, and D. V. DOANE: Modern Castings, (1959), p. 242
- 31) Abrasion-resistant Alloy Data Sheet, (1969), [Climax Molybdenum Co.]
- 32) Laboratory Investigation 212, (1974), Iron & steels Industry,
- 33) AGMA standard 110.02, Gear tooth wear and Failure, (1951)
- 34) A. B. JONES: Metallographic observation of Ball bearing Fatigue Phenomena, Symposium on Testing of Bearings, ASTM, (1946)
- 35) 仙波正荘: 歯車 (第 3 巻), p. 760 [日刊工業新聞社]
- 36) H. C. ALLOSOPP and R. I. LOVE: Resistance

- to Pitting of Gear tooth, The Motor Industry Research Association, (1958)
- 37) 齒車便覧編集委員会: 齒車便覧, p. 1008 [日刊工業新聞社]
- 38) IIT Research Institute, Summary Report B8012-11, (1967)
- 39) G. NIEMANN: Walzen festigkeit und Grübchenbildung von zahnrad und Wälzlager Werkstoffen, VDI, 87 (1943)
- 40) 原順之助, 三村 順: 金属材料, 12 (1972) 10, p. 38
- 41) 内藤武志, 彦根常夫: 鉄と鋼, 57 (1971) 1, p. 37
- 42) T. NAITO and Y. KIBAYASHI: Trans. ISIJ, 12 (1972), p. 454
- 43) 内藤武志, 木林靖忠, 三原健治: 小松技報, 19 (1973) 3, p. 20
- 44) 内藤武志, 木林靖忠, 三原健治: 金属材料, 15 (1975) 3, p. 24