

(研究資料)

架空線用滑車の磨耗について

(Research materials)

On the Abrasion of Sheaves for a Sky-Line Transport System

Mitsuo HONDA, Minoru UEDA, Toshihiko SAITO, Mitsugu KAZAMA

and Yasuhiko ISHIBASHI

本多三雄⁽¹⁾・上田 実⁽²⁾・斎藤敏彦⁽³⁾

風間 貢⁽⁴⁾・石橋泰彦⁽⁵⁾

I 緒 言

伐採地が奥地に移行するにともない、架空線による運材は近來急激な発達をみせているが、これに使用する搬器滑車および並滑車類は従來各索道業者によつてそれぞれの経験を基にいろいろの材質で製作されている。この材質をいかに定めたら鋼索の磨耗とも関係づけて最も経済的であるかということについては定説がない。

集材機や索道運材の搬器の運行をみていると、滑車は鋼索の撚りの上を走行するので、たえず振動し、また曳索その他の影響で搬器が傾き滑車はその溝底の側方で主索と接触して回転することもある。作業索用並滑車の回転においても振動と傾斜は同様である。鋼索は普通には油を含み、また表面も塗油されているから滑車の転がり摩擦は小さいはずで、したがつて磨耗は少ないと思われるが、使いふるした滑車には鋼索が食いこんだような撚りの跡をみることが多い。また、滑車の軸荷重が過酷で軸受が不完全であると、滑車はときどき滑走状態に入り局部的磨損をきたし、さらに鋼索にも磨耗を生ぜしむることになる。以上のような現況から架空線運搬装置における滑車の磨耗の性状を知り対策を求めることは重要であり、この研究に強い要望がある。最近半実際的実験装置による報告が日本林学会誌 Vol. 37, No. 10⁽¹⁾ および Vol. 38, No. 5⁽²⁾ において發表されたが、われわれも滑車磨耗の現象を明らかにし、滑車に適する材質に関する資料を求める目的で数年前から並滑車向きの室内実験装置で研究を開始し、第1回の実験を完了し取りまとめたので報告する。

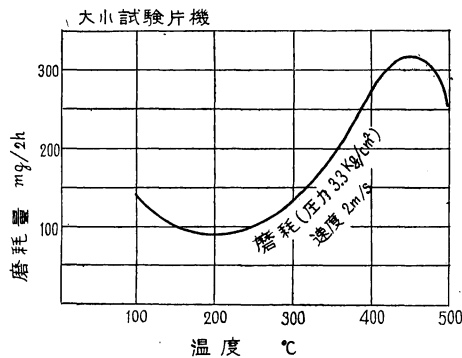
II 滑車の磨耗

1. 金属磨耗に関する既往の研究

一般に金属の磨耗については、従來から多くの研究があり、磨耗状態によりいろいろ分類されるが⁽³⁾、滑車の磨耗は「2つの剛体面が潤滑または乾燥状態において、転がり接触または転がり接触と滑り接触とを同時になす場合」にあてはまると思う。しかして、滑車と鋼索との接触面を考えると、そこには磨耗の結果生ずる粉末を挟んでいるから、この磨耗粉末の性質が磨耗に著しい影響を与える場合がある。一般に金属間の接触圧力、滑り速度、温度、雰囲気等の影響につき過去においていろいろの実験結果が報告され

(1) 元経営部作業科長・現防衛大学校教授 (2) 経営部作業科機械研究室長

(3)(4)(5) 経営部作業科機械研究室員



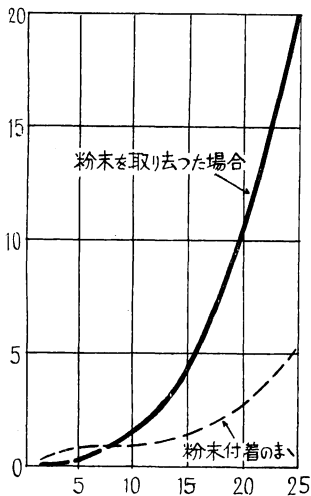
第 2—1 図 磨耗に及ぼす熱影響

してだんだんと上り、450°C を頂点とし、この点で摩擦熱によりむしり取られた後は面が平滑になるため磨耗量は少なくなる (第 2—1 図)。

4) 潤滑油のある場合には、ない場合に比較して磨耗量は数千分の 1 ないし 1 万分の 1 になることがある⁷⁾。

5) 脱落粉末の影響の一例として回転摩擦試験の結果を挙げると、粉末を取り去った場合両接触面の滑り率* 7.5% 以下では磨耗は僅少であるが、以後増加し、滑り率 25% においては粉末付着の約 3 倍に達する。また粉末のままでは滑り率 7.5% 以下では粉末を取り去った場合より磨耗が多い。しかし、以後はさほど磨耗の増加は認められず、粉末を取り去った時の 1/3 以下である。これは粉末があたかも潤滑剤の作用をするためと思われる⁸⁾ (第 2—2 図)。

6) 金属組織と磨耗の関係については一概にいいない。



第 2—2 図 磨耗に及ぼす粉末の影響

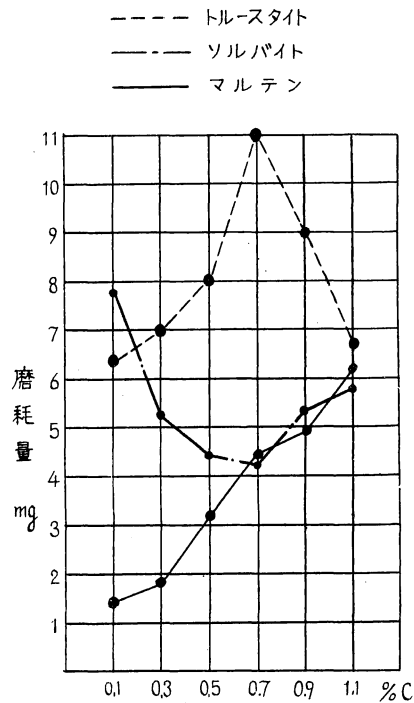
(1) まず鋼索は 0.65 ~ 0.55% C のソルバイト組織の鋼線により構成されている。ソルバイト組織同志の磨耗は、炭素含有量 0.1% を最高として以後少なくなり、0.7% が最低でふたたび磨耗は増加し、炭素量 1.1% においては 0.3% C とほぼ同じ磨耗量を示す⁹⁾。(2) つぎに滑車

ているので、磨耗の機構を明らかにするため文献によりその概要を述べる。

1) 両接触面に潤滑油膜があるときには、磨耗は圧力に無関係であるが、その仕上面の粗さにより油膜が破れ固体接触を起すような場合には圧力の影響がある⁴⁾。

2) 表面の硬度については普通常識で考えるごとく硬度の高いものが必ずしも耐磨耗性が大きいとはいえない⁵⁾。

3) 摩擦熱の影響により磨耗量は約 300°C を境に



第 2—3 図 組織と磨耗の関係

* 滑り率 $S = \frac{N - N'}{N}$ N, N' は回転数

にはいろいろの材質で表面焼入されたものが使われている。この場合マルテンサイト組織においては、炭素含有量の少ないもの、すなわち硬度の低いものの方が耐磨耗性がある。トルスタイト組織においては、ソルバイトと全く逆の傾向を示し、0.7%C が最も磨耗し、0.1%C と 1.1%C が同じ最低の磨耗量を示す（第 2—3 図）。なお、これらは本多光太郎博士の研究であるが、組織の影響は複雑のようであり、朝倉博士は Willi Tom の異なつた試験結果をも引用している¹⁰⁾。

(1) マルテンサイトが耐磨耗性を示し、これが炭素含有量の増加にともない増大する。

(2) 500°C より焼戻したソルバイトが炭素含有量 0.1% 以下ではマルテンサイト同様の値を示し、0.1% 以上ではマルテンサイトと多少の差をつけながら磨耗の減少をみる。

(3) 300°C より焼戻したトルスタイトにおいては炭素含有量 0.1% 以下では前の 2 組織同様の値で 0.1% を境として炭素含有量が増すと段々と磨耗が減少する。しかし磨耗量はマルテンサイト、ソルバイトに比べはるかに大きい（第 2—4 図）。

鋳鉄においてはパーライト組織が耐磨耗性にすぐれ、フェライト組織においては磨耗が多い¹¹⁾。

2. 滑車磨耗の過程

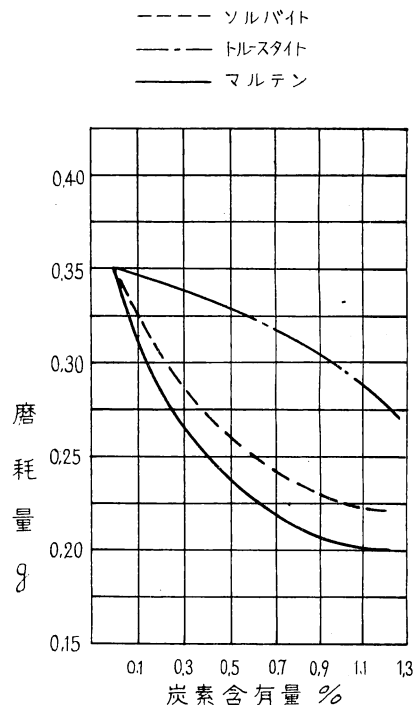
以上滑車と鋼索の磨耗に関連のありそうな金属の磨耗の文献を要約して述べたのであるが、しからばどの材質を選定すれば滑車および鋼索の磨耗に対して良い結果が得られるか判断に苦しむ。鋼索の材質が一定であれば、滑車と鋼索の磨耗には滑車の材質が最も影響し、その他輪圧、回転周速度が影響すると思われる。しかして、いろいろな条件のもとに各種の材質が特有の磨耗を示すとすれば、いかなる材質がいかなる使用条件のもとに最も適しているかを知るためには、かなり多くの実験が必要である。その場合、実験計画をたてるためまず滑車と鋼索における磨耗の生ずる原因と過程について、前述の文献その他により考察してみると、

(1) 負荷状態の滑車と鋼索の接触面は初期においては Herz の弾性接触¹²⁾ をなし、その応力により局部的機械的破壊をきたし、あるいはその応力の繰返しによる疲労のため斑磨耗¹³⁾¹⁴⁾ のような状態で破壊してゆく。

(2) 滑車は鋼索の表面および軸受の摩擦等により走行中抵抗を受け、転がり接触に付随する微小の滑りを生ずるから、滑り摩擦のために機械的破壊を助長する。

(3) 鋼索油が接触面に油膜を形成して潤滑状態を呈している場合はきわめて磨耗は少ないが、接触圧が増大すると油膜が破れて鋼索と滑車が直接接触することにより (2) のごとき乾燥磨耗の状態にはいる。

(4) 機械的破壊で生じた脱落粉末が接触面に挟合して機械的破壊を助長し、あるいは潤滑材の役目をし



第 2—4 図 組織と磨耗の関係

て磨耗を少なくする。

以上 4 つの組合せによつて磨耗過程は複雑に変化すると考えられるが、このうち重要な因子である摩擦圧力は接触面積により変化するはずである。滑車円周方向における鋼索との接触弧長は、滑車の直径が同じでも、輪圧あるいは鋼索張力によつて変つてくるし、接触部分の鋼索横断面の形状も変り、それと溝型の曲率によつて溝に直角方向の接触弧長も変ると考えられる。ゆえに、接触部分を帯状に考えた場合の接触面積は、滑車の径、溝底の曲率、鋼索の径が一定の場合でも輪圧あるいは張力によつて変るから、これらがすべて変れば接触面積はさらに多様に变化する。しかして、鋼索は小繩がさらにまた撚られているから、その接触部分は帯状の連続面をなしているのではなく、Herz の弾性接触の集合で、この接触部分の帯状面積に対する比率は鋼索の構造によつても变化する。以上のごとく滑車と鋼索の磨耗試験には輪圧と回転周速度のほかには種々の条件を考慮する必要がある。

以上述べた磨耗機構に関する事項は、本試験を始めるにあたつて立てた一つの仮説であつて、試験により得られた情報がこの仮説を否定することになれば、仮説は棄却または修正を要し、仮説が肯定されれば現場の磨耗過程にもこの仮説が適用されるのではなからうか。現場のデータは、往々個々別々の要因が混入してくるため、あらかじめこの磨耗過程を理解していないと試験結果の解析に苦慮することが多いと思う。しかして、現場における磨耗過程が推定されて、それに適した室内実験装置により結果が導かれるならば耐磨耗性滑車を選定することはわりに容易になる。従来金属の磨耗試験はいろいろの試験機により多くの発表が行われているが、滑車と鋼索の磨耗試験についてはほとんど文献もなく、試験装置にも適当なものがない状態である。ゆえに滑車と鋼索の磨耗機構を究明しながら従来の文献を利用してゆくことは研究速度を早めるうえにも重要なことと思う。

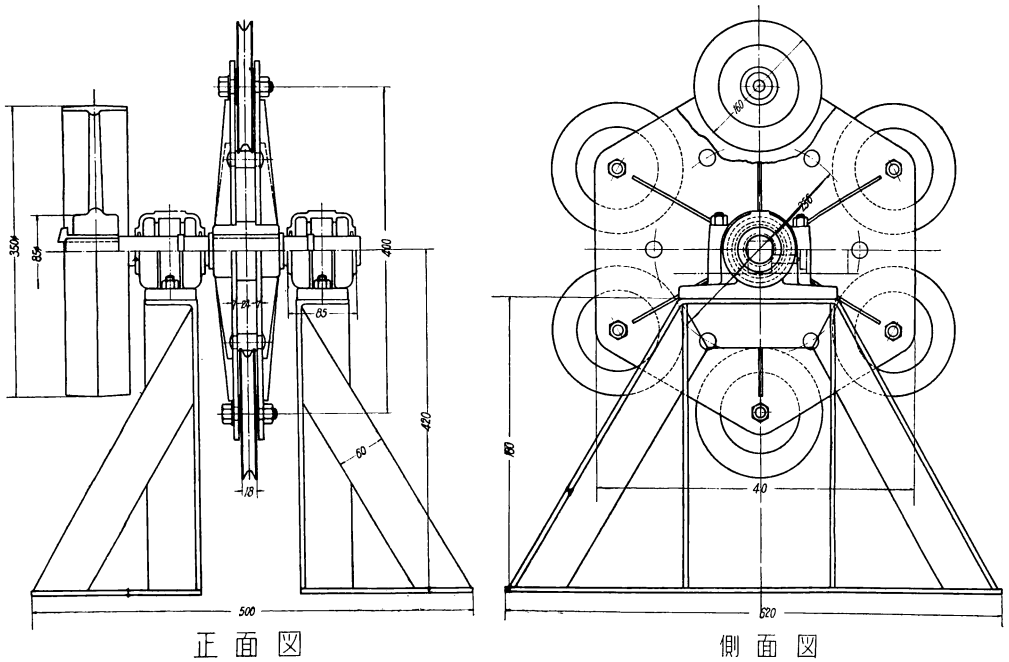
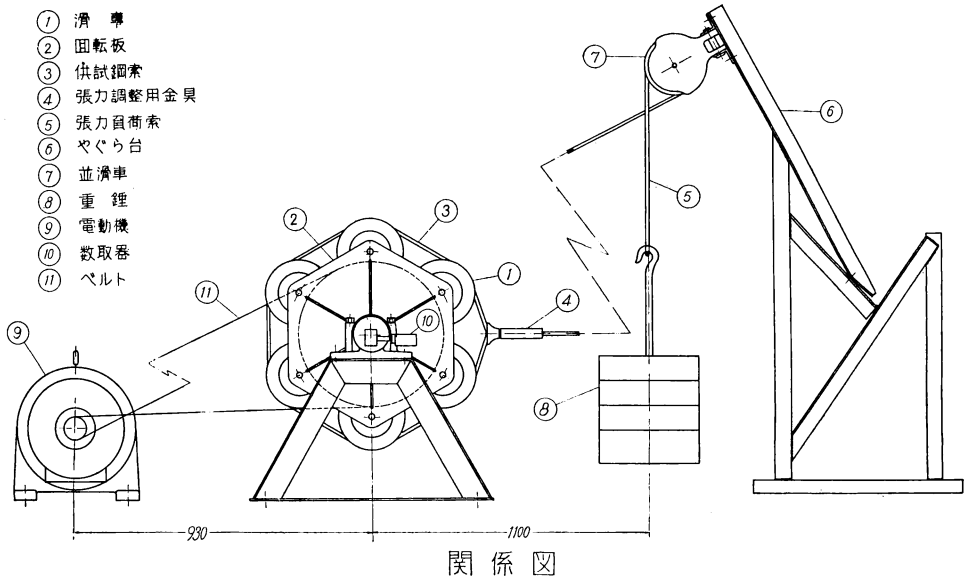
Ⅲ 試 験 方 法

1. 試験装置の構造と測定方法

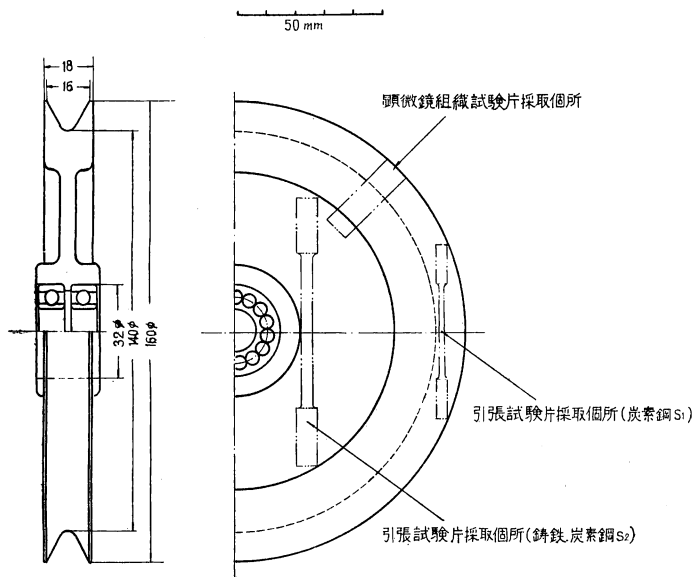
磨耗試験を行うにあつて重要なことは、試験状態を現場における滑車の使用条件になるべく近づけることであろう。従来鋼索の疲労試験機は種類も少なく、一定張力のもとで鋼索が滑車上を往復運動するか、あるいは緊張された鋼索の上を負荷を受けた滑車が往復運動する型式のものが主である。一般に試験速度が遅く実際現場で行われているような高速度（秒速約 5～10 m）にすることがむずかしい。われわれの研究では、日本国有鉄道技術研究所で試験実施中の鋼索疲労試験機を小型化したものを滑車磨耗試験に採用し、これを 6 輪回転式磨耗試験機と呼ぶこととする。

1) 試験機と滑車 第 3—1 図に示すように供試滑車は正六角形の回転板にボールベアリング (No. 6,002 X) によつて支えられる。この滑車に 6 mm の供試鋼索 (6×19 裸 Z 撚東京製鋼製) を掛け張力調整用金具を経て、C 点においてクリップによつて両端を他の張力負荷索に連結する。張力負荷索はやぐら台に取りつけられた並滑車を経て重錘を釣り下げている。回転軸を電動機 (容量 1 馬力三相超分巻型) により運転すれば、6 個の滑車はループ状の鋼索を接触しながら回転する。軸の回転数は数取器によつて読みとられる。鋼索張力 150 kg において滑車周速度は最高 7 m/s 付近である。

供試滑車の形状ならびに寸法は第 3—2 図に示す。Ⅲ—4 で述べるが同一滑車を 3 回使用するため、1 回の試験を終るたびに溝底直径のわずかの削り直しを都合 2 回行つた。なお、試験片の採取箇所は同図に示すとおりである。



第3-1図 6輪回転式磨耗試験機



第 3—2 図 供試滑車ならびに試験片採取箇所

で洗滌ブラシを用いて充分洗滌し、第 3—1 図のごとく取り付け、所定の重錘をかける。鋼索を洗滌した理由は、鋼索表面の塗油の不均一、ごみの付着等による影響をなくするためである。

試験機運転につれ鋼索麻芯に含まれている油は、鋼索の受ける衝撃と振動のため表面に浸出し、磨耗粉末を混入して遠心力により供試滑車の溝縁に付着し、試験機の周囲にもはねだす。この油のはね出し方は現場においては見うけられない現象で、普通コンポジション油が塗つてある鋼索でも滑車との接触部分は塗油が消失し、ある程度乾燥している。この状態になるべく近づけるために、試験機運転開始から 2,400 回転後と、つぎに 12,000 回転後に運転を停め、油をふきとつてから運転を継続し、所定の 30,000 回転までで 1 回の運転を終り鋼索を交換する。最初のふきとりの時は溝縁一面に油が付着しているが、第 2 回目は初回の 1/4 程度しか付着せず、最終時においてもその差はあまりなかった。すなわち 2,400 回転までに麻芯内の油はその大半、12,000 回までには残りの大部分、それ以後は残部がはね出されたものと考えられる。ゆえに滑車と鋼索の接触面には、はじめは油膜が形成され、磨耗粉末は少量であるが、第 2 回目以後の運転では油が少ないため、この磨耗粉末の量は増え、本格的な磨耗は第 3 回目から行われたものと思われる。前述の要領で試験鋼索 10 本を使用したとき、その滑車の磨耗試験は完了する。滑車の走行距離は 528 km、鋼索の屈曲回数は 18 万回である。

試験済の滑車は試験前の要領で重量ならびに溝底の直径を測定し、つぎに予定する試験に使用するため溝型ゲージに合わせて約 1 mm 表面の削り直しを行う。

(1) 滑車磨耗の測定 磨耗重量および磨耗による溝底直径の減少量を試験前後の測定差により求める。なお、試験前後の比較のため滑車溝底部の外観写真をとる。

(2) 鋼索は 6 mm (6×19) であるため、細い素線の磨耗量を測定することは困難であるから、破断強度と伸びの測定を行う。

2. 試験機の特性

1. 供試鋼索の応力関係 第 3—1 図のように供試鋼索が張力調整用金具の左側でなす角を α とし、

2) 試験方法 供試滑車
はまず軸受を取りはずし
て、ガソリンで充分洗滌
し、油その他塵を取り除
く。滑車は大型化学天秤
(容量 10 kg, 感度 3 mg)
で秤量し、また溝底の直径
を特製のマイクロメータ
(測定範囲 125~150 mm,
0.01 mm) で測定する。つ
ぎにグリスを充分つめた軸
受を供試滑車にはめこみ、
磨耗試験機に取りつける。
所定の長さ(約 2 m)に切断
した試験用鋼索を洗油の中

ゲージを作つて $\alpha=127^{\circ}30'$ に一定に規正したから、重錘の重量 W 、張力 T とすれば、その関係は次のようになる。

$$T=1.185 W$$

この試験機において滑車が鋼索に及ぼす横荷重 P を、滑車を挟んだ張力の合力とすれば滑車は正六角形の関係位置にあるから、その合力すなわち輪圧は鋼索の張力と等しい。また、経費の関係から試験機を小型化したため、負荷に制約を受け、最大荷重 W は 150 kg になつた。

いま最大荷重 150 kg のときの引張応力 σ_t と曲げ応力 σ_b を求めると、

$$\text{鋼索の張力 } T=1.185 \times 150=177.75 \text{ kg}$$

$$\sigma_t=T/\eta A$$

ただし、 η = 鋼索の実際の断面積に対する効率 6×7 普通撚で $\eta=0.86^{(15)}$

A = 鋼索の鋼線断面積

$$\therefore \sigma_t=177.5/(0.87 \times 14.33)=14.3 \text{ kg/mm}^2$$

曲げ応力 σ_b は鋼索が滑車にそつて曲げられるから次式で与えられる。

$$\sigma_b=\frac{\delta}{2R} \cdot \frac{3}{8} E^{(16)}$$

ただし、 δ = 鋼線の直径 R = 滑車の半径 E = 鋼線の弾性係数 $22,000 \text{ kg/mm}^2$

$$\therefore \sigma_b=\frac{0.4}{140} \cdot \frac{3}{8} \cdot 22000=23.6 \text{ kg/mm}^2$$

$$\therefore \sigma_t/\sigma_b=14.3/23.6=0.606$$

同様にして荷重 $130, 110 \text{ kg}$ の場合の σ_t, σ_b を求めると第3—1表のようになる。

第3—1表 σ_t, σ_b の 値

重錘の 重量	鋼索の 張 力	鋼索の 直 径	鋼線の 直 径	引張応力 σ_t	曲げ応力 σ_b	σ_t/σ_b	総安全率
kg	kg	mm	mm	kg/mm^2	kg/mm^2		
150	177.75		0.4	14.3	23.6	0.60	4.09
130	154.00	6	0.4	12.4	23.6	0.52	4.31
110	130.35	6 (6×19)	0.4	10.5	23.6	0.44	4.55

2. 供試滑車の輪圧 供試滑車に鋼索が負荷を与えている状態は、ちょうど張力 T なる鋼索が受鞍に作用しているときと同様であるから、単位長さ当りの荷重 p' は、

$$p'=T/R^{(17)}$$

ゆゑに鋼索直径の $1/2$ の幅で溝底に接触しているとすれば単位面積当り圧力 p は、

$$p=p' \bigg/ \frac{d}{2}=2 T/Rd$$

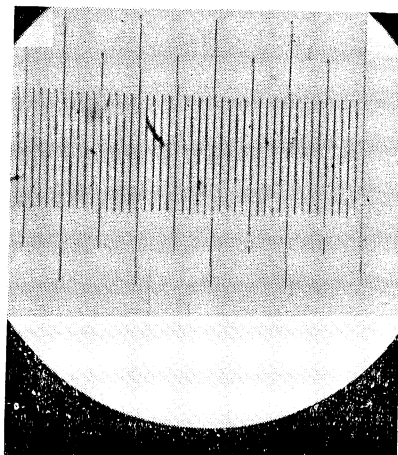
重錘を各種かえたときの p' および p は第3—2表のようになる。ただし $R=70 \text{ mm}$, $d=6 \text{ mm}$ 。

第3—2表 p', p の 値

重錘の重量	張 力 T	p'	p
kg	kg	kg/cm	kg/cm^2
150	177.75	25.4	84
130	154.00	22.0	73
110	130.35	18.6	62



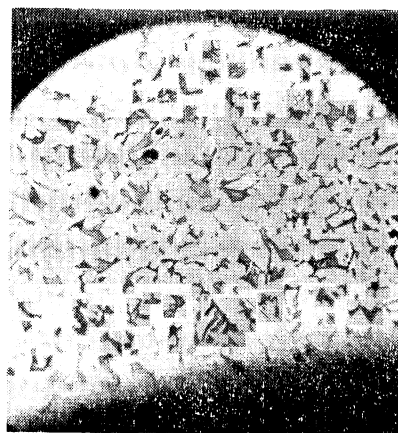
鑄鉄 ×110
腐蝕：5% ピクリン酸のアルコール溶液
白きはフェライト，黒色片状は黒鉛
地はパーライトを示す



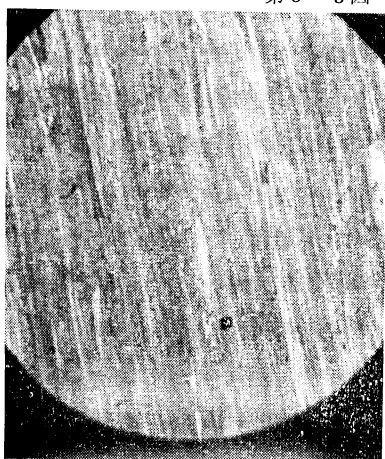
スケール ×110



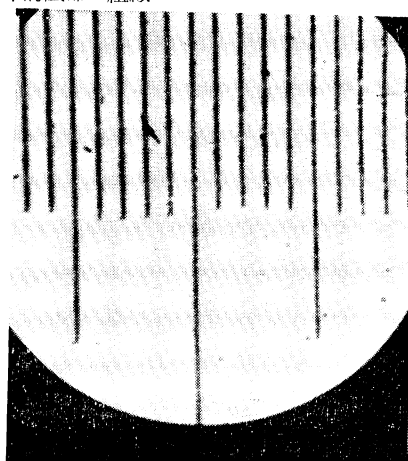
炭素鋼 S₂ ×110
腐蝕：5% 硝酸のアルコール溶液
白地はフェライト，黒きはパーライトを示す
第 3—3 図



炭素鋼 S₁ ×110
腐蝕：5% 硝酸のアルコール溶液
白地はフェライト，黒きはパーライトを示す
供試滑車溝底部の組織



腐蝕：5% ピクリン酸のアルコール溶液
倍率 370



スケール ×370

本試験機運転状態では、集材機作業索が並滑車によつて屈曲されて走っているときの状態と似ている。面圧 $p=84\sim62\text{ kg/cm}^2$ を受けるときの作業索の張力を逆に求めると、 $d=12\text{ mm}$ 、 $R=70\text{ mm}$ として、 $T=353\sim258\text{ kg}$ となる。この値はスパン 500～600 m のタイラー式による集材機作業索の張力に該当する。

以上 1)、2) のことから次のようなことがいえる。

本試験機による運転状態は、タイラー式の集材機作業索によつて受ける並滑車の作動状態と近似しているから、本試験機により得られた情報は並滑車の磨耗に関連して滑車の回転速度および輪圧が磨耗に及ぼす影響、あるいは滑車の成分および材質が磨耗に及ぼす影響などの資料を提供するものと思う。

3. 供試滑車と鋼索の材質について

滑車にはまず最も普通に使われている鋳鉄と炭素鋼の2種を選び、炭素鋼は比較の意味でマンガン含有量が若干異なるものを2種類とすることにした。溝部修正仕上げ時の削りくずによる定量分析と、溝部側面の硬度測定の結果は第3—3表のとおりである。

第3—3表 滑車の成分と硬度

材質別 試験種別	鋳鉄 I	炭素鋼 S ₁	炭素鋼 S ₂	備考
	%	%	%	
含有成分	炭素 3.40 珪素 1.25 マンガン 0.35	0.19 0.16 0.41	0.19 0.18 0.61	{ 鋳鉄、炭素鋼 S ₂ は工業技術院東京工業試験所に、炭素鋼 S ₁ は東京都立工業奨励館にそれぞれ定量分析委託 }
硬度(ロツクウェル)	197	143	158	
				荷重 30 kg ただし S ₂ は 20 kg

また、溝底部を倍率 110 で検鏡すると第3—3図のとおりである。

以上の検査から鋳鉄滑車は普通鋳物であり、炭素鋼滑車はともに S 15 C（機械構造用炭素鋼第2種）に該当する。

鋼索は東京製綱株式会社製 19 本線 6 熱・Z・普通燃裸 2 種 6 mm で、同社資料によれば素線の成分および硬度は第3—4表のとおりである。

第3—4表 素線の成分と硬度

成 分					硬 度
C	Si	Mn	P	S	マイクロヴィツコース（ライツ製） 420（荷重 100 g において）
0.55～0.65	0.15～0.35	0.60以下	0.045 以下	0.045 以下	

また、素線の組織を検鏡すると第3—4図のとおりである。

4. 試験計画

本試験においては磨耗に関係する大きな因子として摩擦圧力、摩擦速度を変えて磨耗量を調べることとした。その場合、たとえば2因子をそれぞれ3水準とつて9組合せについて試験を行えば相当長日数を要することになるが、その場合当然試験条件が変ってくる。すなわち、

- 1) 試験期間が四季にまたがった場合、温度湿度の相異
- 2) 季節風等による風塵の多少
- 3) 鋼索の製造むら
- 4) 電圧の変動による試験機の回転むら

5) 測定者の個人差

などの影響による実験誤差が考えられる。これらの影響をなるべく全部のデータに均等に分散するよう、グレゴラテン方格で実験計画を樹てた。

摩擦速度に対応する滑車の回転周速度は $4 \sim 7 \text{ m/s}$ の範囲に 3 水準を、また摩擦圧力に対応する試験機荷重は 150, 130, 110 kg の 3 水準を選ぶと、各水準の組合せは 9 とおりとなる。しかるに供試滑車は経費の都合で 3 材質ともそれぞれ 6 個ずつで、これだけの滑車で 9 とおりの試験を実施することはできないので、各材質の滑車を 2 個ずつ試験機にとりつける。II—1 で述べたように脱落粉末の影響は無視できないが、異なる材質の磨耗粉末の影響は各データに一樣に作用し、したがって相対的な磨耗量については影響がないと仮定し、次のような試験計画をたてた。

第3—5表 磨耗試験のための実験計画

滑車材質 滑車番号	I, S ₁ , S ₂	I, S ₁ , S ₂	I, S ₁ , S ₂	ブロック内 試験順序
	3, 4	1, 2	5, 6	
要因 α, β の組合せ	$\alpha_0 \quad \beta_0$	$\alpha_1 \quad \beta_2$	$\alpha_2 \quad \beta_1$	0
	$\alpha_1 \quad \beta_1$	$\alpha_2 \quad \beta_0$	$\alpha_0 \quad \beta_2$	1
	$\alpha_2 \quad \beta_2$	$\alpha_0 \quad \beta_1$	$\alpha_1 \quad \beta_0$	2
ブロック別試験順序	I	II	III	

ただし、I: 鋳鉄, S₁: 炭素鋼 (マンガン 0.41%), S₂: 炭素鋼 (マンガン 0.61%)

磨耗量の総平均値を μ , 荷重による効果を α_i (i は 0, 1, 2), 速度による効果を β_j (j は 0, 1, 2), ブロック効果を K , 滑車を削切することによる効果を D , 誤差を ε とすると、任意の材質の磨耗量 y の構造模型は次のようになる。

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{i+j} + (\alpha\beta^2)_{i+2j} + K + D + \varepsilon$$

データの数を n , α_i の処理の合計を A_i , β_j の処理の合計を B_j , データの合計を G とすると解は次のとおりになる。

$$\hat{\alpha}_i = \frac{A_i}{3n} - \frac{G}{9n} \quad V(\hat{\alpha}) = \frac{2}{9n} \sigma^2$$

$$\hat{\beta}_j = \frac{B_j}{3n} - \frac{G}{9n} \quad V(\hat{\beta}) = \frac{2}{9n} \sigma^2$$

2 因子交互作用: 完全交絡

分散分析表

要因	平方和	自由度
主効果 $\left\{ \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \end{array} \right.$	$\frac{1}{3n} (A_0^2 + A_1^2 + A_2^2) - \frac{G^2}{9n}$	2
	$\frac{1}{3n} (B_0^2 + B_1^2 + B_2^2) - \frac{G^2}{9n}$	2
直径間	2 因子交互作用 ($\alpha\beta$) と完全交絡 $\frac{1}{3n} (D_0^2 + D_1^2 + D_2^2) - \frac{G^2}{9n}$	2
ブロック間	2 因子交互作用 ($\alpha\beta^2$) と完全交絡 $\frac{1}{3n} (K_0^2 + K_1^2 + K_2^2) - \frac{G^2}{9n}$	2
残差		9 (n-1)
総計	$\sum y^2 - \frac{G^2}{9n}$	9n-1

IV 試 験 結 果

1. 磨耗量 磨耗重量に関するデータは第4—1表のとおりである。

第4—1表 磨 耗 量 （単位 mg ）

材 質 ブロック	鋳鉄 I			炭素鋼 S ₁			炭素鋼 S ₂			直 径
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
要 因 α, β の 組 合 せ	$\alpha_0\beta_0$	$\alpha_1\beta_2$	$\alpha_2\beta_1$	$\alpha_0\beta_0$	$\alpha_1\beta_2$	$\alpha_2\beta_1$	$\alpha_0\beta_0$	$\alpha_1\beta_2$	$\alpha_2\beta_1$	0
	540	975	950	85	490	550	155	315	360	
	430	855	1350	375	445	540	250	325	360	
	$\alpha_1\beta_1$	$\alpha_2\beta_0$	$\alpha_0\beta_2$	$\alpha_1\beta_1$	$\alpha_2\beta_0$	$\alpha_0\beta_2$	$\alpha_1\beta_1$	$\alpha_2\beta_0$	$\alpha_0\beta_2$	1
	760	1390	430	360	750	410	190	350	210	
	430	950	610	470	610	420	250	360	220	
	$\alpha_2\beta_2$	$\alpha_0\beta_1$	$\alpha_1\beta_0$	$\alpha_2\beta_2$	$\alpha_0\beta_1$	$\alpha_1\beta_0$	$\alpha_2\beta_2$	$\alpha_0\beta_1$	$\alpha_1\beta_0$	2
	1165	750	520	690	470	430	390	320	220	
	790	440	800	630	470	490	430	270	320	

ただし, α_0 : 重錘の重量 110 kg, α_1 : 130 kg, α_2 : 150 kg, β_0 : 回転周速度 220 m/min, β_1 : 270 m/min, β_2 : 400 m/min, 回転距離 528 km

第4—1表の解析の結果は次のとおりである。

μ, α, β の推定値 （単位 mg ）

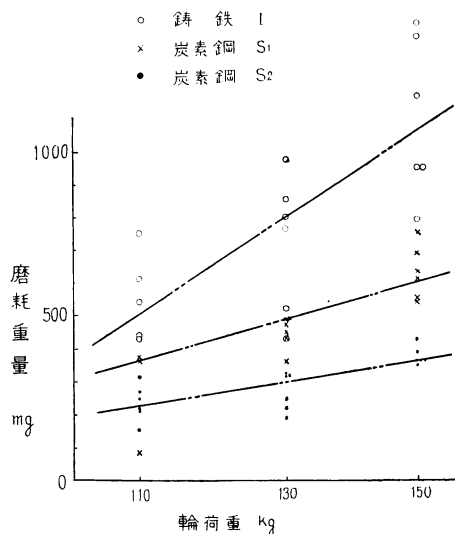
要因 材質	$\hat{\mu}$	$\hat{\alpha}_0$	$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
鋳 鉄 I	784	-251	-63	314	-13	-4	17
炭素鋼 S ₁	482	-112	-35	147	-27	-5	32
炭素鋼 S ₂	293	-57	-25	82	-18	-2	20

分 散 分 析 表

材 質 別		鋳 鉄 I				炭素鋼 S ₁				炭素鋼 S ₂			
変 動 因		平方和	自由 度	不偏 分散	分散 比	平方和	自由 度	不偏 分散	分散 比	平方和	自由 度	不偏 分散	分散 比
直 径 間 ブ ロ ッ ク 間 残 差 総 計	主 効 果 $\left\{ \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \end{array} \right.$	9932	2	4966	10.7**	2113	2	1056	15.1**	630	2	315	20.0**
		29	2	14	0.0	105	2	52	0.7	44	2	22	1.4
	(2因子交互作用) ($\alpha\beta$) と完全交絡)	378	2	189	0.4	463	2	231	3.3	114	2	57	3.6
	(2因子交互作用) ($\alpha\beta^2$) と完全交絡)	1287	2	643	1.4	337	2	168	2.4	73	2	36	2.3
		4163	9	462		627	9	69.7		141	9	15.7	

要因 α の効果を図示すると第4—1図のとおりである。

分散分析表にみるように当初心配した直径ならびにブロックによる効果は各材質ともきわめて少なく, 主要因とした速度 β による効果もあり大した影響がなく, 荷重による効果 α だけがきわめて大きい。また, 材質間の差は図より明らかであるがきわめて大きい。



第 4—1 図 輪荷重と磨耗重量の関係

2. 直径の減少 直径の減少量に関するデータは第 4—2 表のとおりである。

第 4—2 表 直径の減少量 (単位 mm)

材 質	鑄鉄 I			炭素鋼 S ₁			炭素鋼 S ₂			直 径
ブロック	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
要 因 α, β の 組合せ	$\alpha_0\beta_0$	$\alpha_1\beta_2$	$\alpha_2\beta_1$	$\alpha_0\beta_0$	$\alpha_1\beta_2$	$\alpha_2\beta_1$	$\alpha_0\beta_0$	$\alpha_1\beta_2$	$\alpha_2\beta_1$	0
	0.510	0.535	0.325	0.025	0.060	0.075	0.010	0.110	0.050	
	0.255	0.420	0.445	0.030	0.065	0.122	0.010	0.065	0.045	
	$\alpha_1\beta_1$	$\alpha_2\beta_0$	$\alpha_0\beta_2$	$\alpha_1\beta_1$	$\alpha_2\beta_0$	$\alpha_0\beta_2$	$\alpha_1\beta_1$	$\alpha_2\beta_0$	$\alpha_0\beta_2$	1
	0.600	0.565	0.080	0.055	0.090	0.050	0.055	0.070	0.030	
	0.230	0.365	0.430	0.080	0.095	0.070	0.035	0.050	0.025	
	$\alpha_2\beta_2$	$\alpha_0\beta_1$	$\alpha_1\beta_0$	$\alpha_2\beta_2$	$\alpha_0\beta_1$	$\alpha_1\beta_0$	$\alpha_2\beta_2$	$\alpha_0\beta_1$	$\alpha_1\beta_0$	2
	0.550	0.485	0.278	0.145	0.070	0.045	0.060	0.030	0.032	
	0.285	0.125	0.500	0.090	0.050	0.055	0.085	0.004	0.020	

第 4—2 表の解析の結果は次のとおりである。

μ, α, β の推定値 (単位 mm)

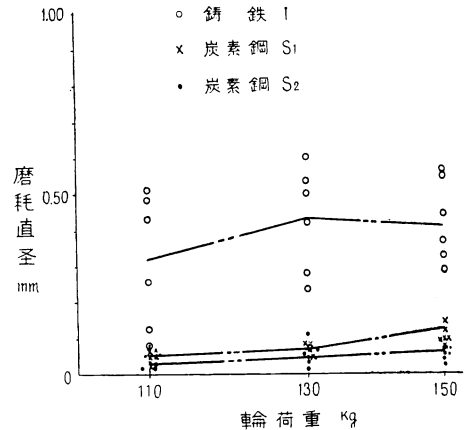
要 因	$\hat{\mu}$	$\hat{\alpha}_0$	$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
材 質							
鑄 鉄 I	0.386	-0.074	0.041	0.033	0.024	-0.021	-0.003
炭素鋼 S ₁	0.068	-0.020	-0.012	0.032	-0.015	0.005	0.010
炭素鋼 S ₂	0.042	-0.025	0.008	0.017	-0.010	-0.008	0.018

分散分析表

材 質 別 変 動 因		鋳 鉄 I				炭素鋼 S ₁				炭素鋼 S ₂			
		平方和	自由度	不偏分散	分散比	平方和	自由度	不偏分散	分散比	平方和	自由度	不偏分散	分散比
主 効 果	$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \end{array} \right.$	494	2	247	0.7	93	2	46.5	12.8	58	2	29	10.0
		62	2	31	0.1	21	2	10.5	2.4	30	2	15	5.2
直 径 間 (2因子交互作用 ($\alpha\beta$) と完全交絡)		64	2	32	0.1	7	2	3.5	0.9	2	2	1	0.4
ブ ロ ッ ク 間 (2因子交互作用 ($\alpha\beta^2$) と完全交絡)		176	2	88	0.25	1	2	0.5	0.1	14	2	7	2.4
残 差		3221	9	358		33	9	3.64		26	9	2.9	
総 計		4017	17			155	17			130	17		

要因 α の効果を図示すると第4—2図のとおりである。

直径の減少は分散分析表にみるように、磨耗重量のように各材質とも同一傾向をみせず（炭素鋼 S₁, S₂ 滑車だけが荷重 α の効果が顕著で、S₂ 滑車は速度 β の効果も5%水準で有意にでたが、鋳鉄滑車 I はいずれの効果もはつきり現われていない。これは鋳鉄滑車の材質が均一でなく、表面とところどころに微小の「ス」がみられ、このために直径測定の変差が大きくなったことに起因すると考えられる。しかしながら、材質間の差は磨耗重量の場合と同様きわめて大きい。



第4—2図 輪荷重と直径の減少の関係

3. 鋼索の破断力 供試鋼索の強度試験の結果、その破断力に関するデータは第4—3表のとおりである。

第4—3表 鋼索の破断力 (単位 kg)

要 因	荷重 α_0 110 kg			荷重 α_1 130 kg			荷重 α_2 150 kg		
	周速度 β_0 220 m/min			周速度 β_1 270 m/min			周速度 β_2 400 m/min		
	β_0 220	β_1 270	β_2 400	β_0 220	β_1 270	β_2 400	β_0 220	β_1 270	β_2 400
破断力	1750	1630	1450	1680	1670	1250	1500	1250	1030
	1500	1700	1200	1650	1550	1100	850	1580	1100
	1550	1750	1600	1700	1800	1200	1550	1600	1080
	1680	1750	1600	1530	1650	1070	1380	1630	1200
	1630	1730	1620	1730	1500	1080	1350	1650	1030
	1800	1650	1600	1730	1650	1050	1550	1530	1100
	1750	1750	1400	1700	1620	950	1750	1700	1100
	1550	1500	1400	1730	1600	1150	1650	1680	1500
	1750	1650	1380	1500	1700	850	1550	1700	1150
	1470	1800	1580	1730	1720	1080	1460	1750	1000

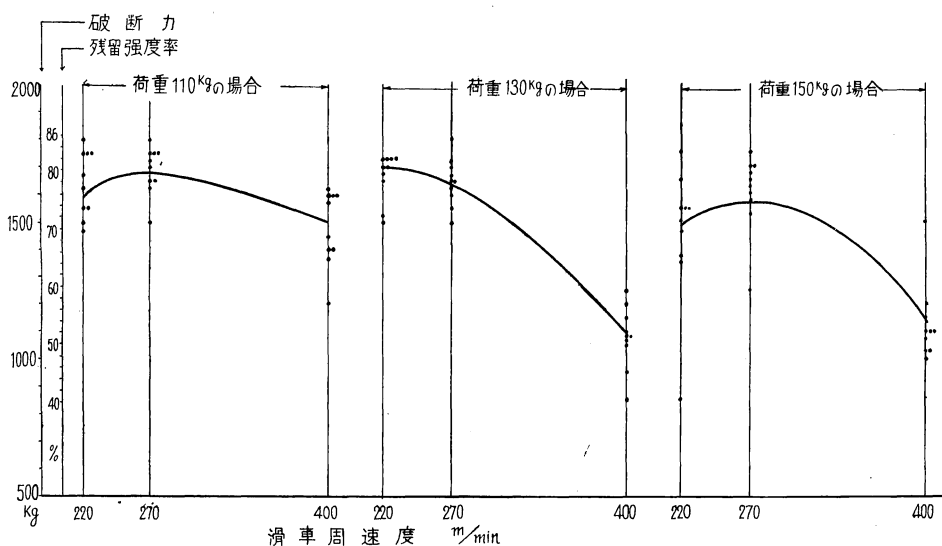
鋼索の屈曲回数 18 万回、滑車の走行距離 52.8 km

μ, α, β の推定値

要 因	$\hat{\mu}$	$\hat{\alpha}_0$	$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
	1489	116	-25	-91	101	159	-260

分 散 分 析 表

変 動 因	平方和	自由度	不偏分散	分散比
主 効 果 $\left\{ \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \end{array} \right.$	6,790	2	3,395	17.1**
	30,436	2	15,218	76.4**
直 径 間 (2因子交互作用 ($\alpha\beta$) と完全交絡)	1,147	2	573	2.8
ブ ロ ッ ク 間 (2因子交互作用 ($\alpha\beta^2$) と完全交絡)	4,173	2	2,086	10.5*
残 差	16,130	81	199	
総 計	58,676	89		



第 4—3 図 破断力に及ぼす荷重ならびに周速度

滑車材質が鋼索の破断力に及ぼす影響については各材質の滑車を一緒にして試験したから不明である。要因 α, β の効果を図示すると第 4—3 図のとおりである。

分散分析表からわかることは破断力にいちばん影響を及ぼす要因は速度 β , つぎが荷重 α である。1% 以下の危険率でいえる。またブロック間には 2 因子交互作用 ($\alpha\beta^2$) が完全交絡しているから、どちらの影響ともはつきりいえないが、その一緒になったものが 5% の危険率ではあるが影響のあることがわかった。なお、ここで考えられることは供試鋼索は特に同一時期に製作されたもの 1 丸 200 m のものを 2 丸準備したが、試験の途中で 1 丸を使用しつくし、ブロック 3 の試験から次の 1 丸に手をつけたので、あるいはこの鋼索間による影響があつたかもしれない。

4. 鋼索の伸び 供試鋼索の強度試験における伸びに関するデータは第 4—4 表のとおりである。

第4—4表 鋼索の伸び（単位 mm/900 mm）

要 因	荷重 α_0								
	110 kg			α_1 130 kg			α_2 150 kg		
	周速度 m/min β_0 220	β_1 270	β_2 400	β_0 220	β_1 270	β_2 400	β_0 220	β_1 270	β_2 400
伸 び	17	20	6	16	19	13	20	13	10
	18	22	13	15	14	11	8	17	9
	14	20	13	19	19	12	19	15	10
	16	21	16	16	13	9	13	16	9
	15	19	12	20	14	11	17	15	10
	18	17	12	17	17	10	14	12	10
	21	19	19	20	18	10	17	14	14
	16	14	13	18	18	13	18	15	12
	17	19	20	16	16	8	18	5	8
	14	20	16	17	18	11	16	16	9

第4—4表の解析結果は次のとおりである。

μ, α, β の推定値（単位 mm/900 mm）							
要 因	$\hat{\mu}$	$\hat{\alpha}_0$	$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
	14.9	1.6	0	-1.6	1.7	1.6	-3.3

分散分析表

変 動 因	平方和	自由度	不偏分散	分散比
主 効 果 $\left\{ \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \end{array} \right.$	160	2	80	11**
	490	2	245	35**
直 径 間（2因子交互作用（ $\alpha\beta$ ）と完全交絡）	12	2	6	0.9
ブロック間（2因子交互作用（ $\alpha\beta^2$ ）と完全交絡）	65	2	32	4.6*
残 差	571	81	7.1	
総 計	1,298	89		

材質の影響は破断力と同様不明である。

分散分析表をみると破断力の場合とまったく同様の傾向であることがわかる。

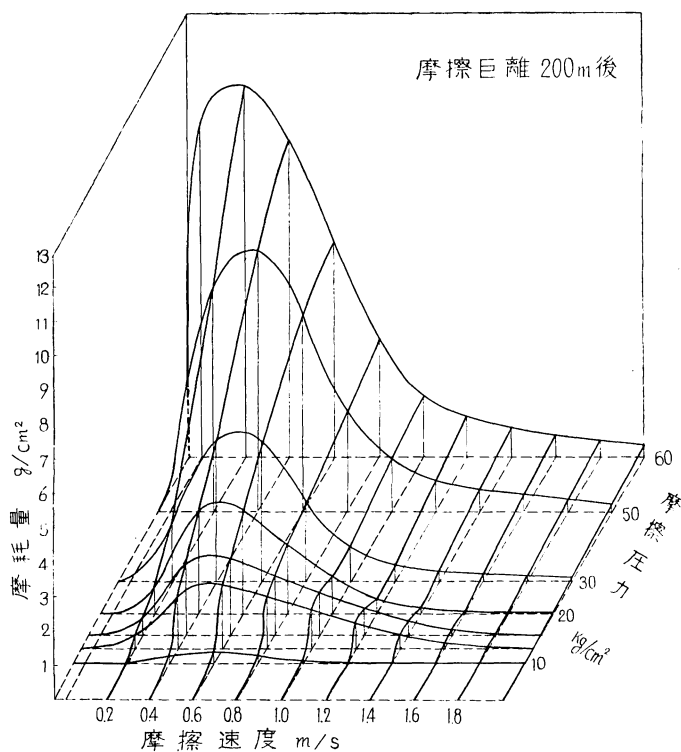
V 考 察

この磨耗試験の範囲では第4—1表に示すごとく、滑車の磨耗重量については輪圧の影響は大きい、回転周速度の影響は少ない。直径の減少については鑄鉄滑車では輪圧の影響もあまり認められない結果がでている。このことは磨耗が円周上に一様に起らないため、溝底直径測定にはそれらの要因の効果が顕著に現われなかつたものと認め、磨耗についてはこれから磨耗重量によつて考えることにする。

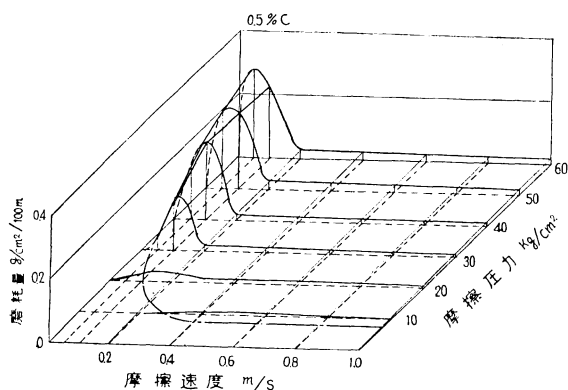
滑車の磨耗についてII—2で述べた仮説にしたがって検討してゆく。

1. 滑車の回転周速度、輪圧が磨耗量に及ぼす影響

鑄鉄同志、あるいは同種の炭素鋼同志を、乾燥状態において摩擦させると、圧力および速度に応じ、磨耗面は種々なる様相を呈し、磨耗量は圧力・速度により著しく異なることは大越諄博士の筒形試験片機を用いた実験により明らかであるが¹⁹⁾、その共通した傾向としては、摩擦速度が鑄鉄で 0.2 m/s、炭素鋼で



第 5—1 図 鋳鉄同志の磨耗



第 5—2 図 同種の炭素鋼同志の磨耗

と対照する。

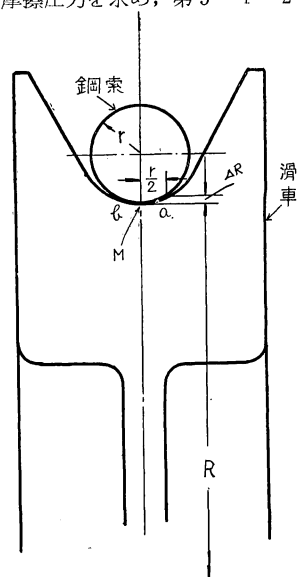
1) 回転周速度と摩擦速度との関係

(1) 回転半径からくる摩擦速度について

第 5—3 図のごとく半径 R なる滑車に、半径 r なる鋼索が $a \sim b$ 間において接触しているとき、実測の結果は弦 ab はほぼ r に等しいので、鋼索断面を円とすると幾何学的に溝底部 M の回転半径と接触端 a のそれとの差 $\Delta R = r - \frac{\sqrt{3}}{2}r = 0.134r$ になる。

0.1 m/s 付近において急激に磨耗量が増加し、それから遠ざかるにしたがい徐々に減少し、前者は 2 m/s 、後者は 1 m/s で摩擦圧力にもあまり影響されない一定の磨耗量を示している (第 5—1～2 図)。この点に関して朝倉希一博士は、速度がきわめて小なるときは酸化磨耗を起して磨耗量は少ないが、速度の増加に伴って磨耗は急激に増大して輝面磨耗となり、ある速度で極大値に達し、それ以上速度が増すと熔着磨耗となつて磨耗は漸次減少し、さらに速度が増大すると熔融磨耗となり、磨耗は小となると説明しているが²⁰⁾、われわれの試験

は滑車が鋼索上を転がりながら滑り摩擦をなしてゆく場合であるから、滑車の回転周速度ならびに輪圧から摩擦速度・摩擦圧力を求め、第 5—1～2 図



第 5—3 図 滑車と鋼索の接触状態

実際には鋼索断面は負荷を受けると楕円状になるから、 ΔR は輪圧、鋼索の張力、滑車の溝の曲率、鋼索の径等の関係でいろいろ変化すると考えられるが、いま簡単に ΔR がこれらに無関係であるとする、本試験の場合 $r=3\text{ mm}$ から、 $\Delta R=0.134 \times 3\text{ mm} \approx 0.4\text{ mm}$ となる。

滑車と鋼索の運動において、すでに滑車の溝にそつて曲げられた鋼索と滑車の接触点では滑りはおきないが、滑車に接触する直前の鋼索部分はほとんど直線とみなせるから、接触の瞬間々々はあたかもレールの上を車輪が転がる時と同様な状態である。すなわち、滑車が回転するとき、踏面の平均直径に相当するだけ進行し、それより直径の大きな部分は後方に滑り、直径の小さな部分は前方に滑るから接触面は常に滑り接触をしていることになり、滑り摩擦を生ずる。

この場合、 $R+\Delta R/2$ の平均半径を中心として $\pm \Delta R/2$ の間で滑りを生ずるものと仮定すると、鋼索と滑車の平均摩擦速度は $\pi n \frac{\Delta R}{2}$ である。 n は滑車の回転数で、 $\Delta R/2=0.2\text{ mm}$ から下表のようになる。

(2) 滑車の抵抗からくる滑りについて

負荷状態における滑車と鋼索の運動状態は、凹凸のはなはだしいレール上の車輪の回転と同様なものであり、滑車にはこの転がり抵抗に軸受の抵抗も加わつており、両者の接触面に摩擦

回転周速度 m/min	滑車回転数 回/ min	摩擦速度 m/s
β_0 220	1570	0.016
β_1 270	1925	0.020
β_2 400	2860	0.030

を生じきわめて微細の滑りにより磨耗をきたす。この滑りは輪圧、周速度により変化するが、同一条件においても初期磨耗と定常磨耗は変化することが考えられる。

以上、滑車の摩擦速度は鋼索との接触瞬間における接触個所の半径の相違からくる滑りと、走行抵抗による滑りとの両者の合計速度が考えられる。しかし後者は微小であるから、単に前者だけの滑り速度をもつて、大越諄博士の実験と比較すると（第5—1～2図参照）、前記摩擦速度の値は輝面磨耗の初期に該当する。輝面磨耗が最も多い部分は、われわれの試験ではさらに高速度のところにあると思われる。試験前後で撮影した滑車の溝底部の外観写真（Plate 1 参照）によれば、溝面の削切跡が試験後はまったくなくなり、“うろこ状”の磨耗面が現われている。肉眼で見ても金属光沢を示し、表面が機械的に破壊された様相を呈し、輝面磨耗が行われたことが認められる。

2) 輪圧と摩擦圧力との関係

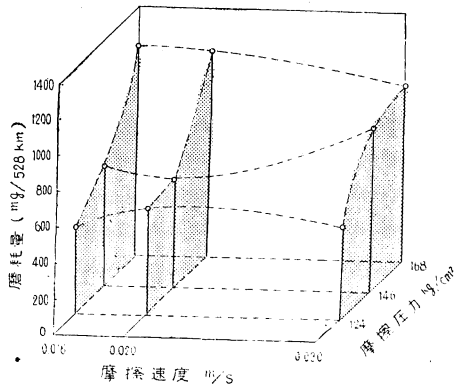
接触面は前述のように小繩の凸部が磨耗の初期においては Herz の弾性接触をなし、その集合であると考えられるが、接触部分において軟らかい滑車の方がまず塑性変形をきたすか、あるいは機械的破壊によつて滑車の微細な凸部が平滑になつてゆくから、接触面は逐次大きくなつてゆくであろう。ゆえに初期磨耗における摩擦圧力は、定常磨耗におけるものよりかなり大きい、ごく初期における一時的なものと考え、いまは触れないことにする。

摩擦圧力についてはⅢ—2において述べたように、輪圧を接触面積にて除せば求められるが接触面積を求めることはなかなかむずかしい。みかけの接触面積は $A = \frac{\theta \pi}{180} R \cdot \frac{d}{2}$ として求められる。ただし θ は接触角である。この面積に対する実際の接触面積 A_c との比を η とすると、 $A_c = \eta A$ で表わされるが、 η の値を求めることは困難である。いま鋼索接触跡等から考察して概略 $\eta=1/2$ と推定して摩擦圧力を求めると次のとおりである。

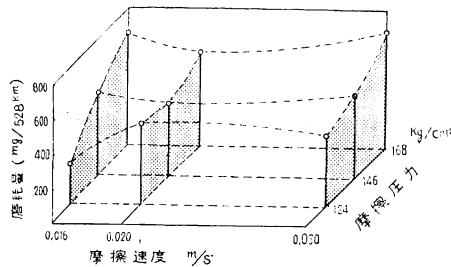
荷重 150 kg のとき

摩擦圧力 168 kg/cm²

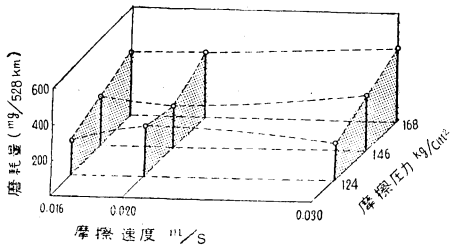
130	〃	〃	146	〃
110	〃	〃	124	〃



第 5—4 図 鋳鉄滑車の磨耗線図



第 5—5 図 炭素鋼 S₁ 滑車の磨耗線図



第 5—6 図 炭素鋼 S₂ 滑車の磨耗線図

3) 以上求められた摩擦速度, 摩擦圧力により摩擦線図を画くと, 第 5—4~6 図のようになる。

第 5—4 図の鋳鉄においては, 摩擦圧力 124 kg/cm², 摩擦速度 0.016 m/s における磨耗量は 500 mg 近い値を示しているが, 168 kg/cm² ではその倍近い 1,100 mg をみせ, 146 kg/cm² ではあまり増加せず 700 mg である。この現象は摩擦速度 0.020, 0.030 m/s についてもみられ, また炭素鋼 S₁, S₂ においても同様の傾向がみられる。また, 摩擦速度による磨耗量の変化はあまり認められない。そこで摩擦速度はしばらくおき, 摩擦圧力について考えると, 磨耗は摩擦圧力のある値から急に増加する傾向が見られる。供試材の抗圧力は, 鋳鉄 63 kg/mm² 以上, 炭素鋼 S₁ 51.7 kg/mm², S₂ 57.7 kg/mm² と若干鋳鉄の方が高い値を示しているが, 磨耗量の差にみられるほどの相違はない。

つぎにその抗張力をみると, 鋳鉄 22.9 kg/mm², 炭素鋼 S₁ 51.7 kg/mm², S₂ 57.7 kg/mm² で鋳鉄はかなり低く, もろさを示している。

さて, 摩擦圧力が低い間は磨耗はあまり変化しないが, 168 kg/cm² ぐらいからは磨耗が急に増加するということは繰返し応力により疲労が早まることを裏付けていると思われる。しかして大越博士の第 5—1~2 図は, われわれの試験条件よりずっと低いところであるが, 摩擦圧力がある値付近から急に磨耗量を増す傾向は合致している。

つぎに摩擦速度については, 第 5—1~2 図のように輝面磨耗最盛の摩擦速度が鋳鉄と炭素鋼によつて異なつていて, 鋳鉄において 0.4 m/s, 炭素鋼において 0.1 m/s 付近であるから, もしわれわれの場合前に求めた摩擦速度が転がり抵抗の滑りを加えて倍近く値, すなわち 0.03~0.06 m/s の摩擦速度であつたとしても輝面磨耗の最盛速度のかなり左の方の状態にあることが考えられる。しかして, 輝面磨耗の最盛位置は摩擦圧力の増加にともない低速の方に移行するから, 概算ではあるが現場において 2,500 kg/cm² もの摩擦圧力が働くとする, 摩擦速度はずつと低いところでも輝面磨耗最盛点を作り, あるいは融着磨耗をおこしているのではないかと考えられる。

現場で使用された滑車面が, 鋼索の熱りと同じ跡を明瞭に刻んで磨耗しているのをみると, 輝面磨耗ととりこして融着磨耗をしていたように考えられる。これに関してはそのような滑車の磨耗断面の組織を

検鏡し、あるいは磨耗粉を検査することにより判明すると思う。

以上、鋼索と滑車の摩擦速度、摩擦圧力と磨耗との関係が大越博士の筒形試験片機による磨耗線図とその傾向が似ており、滑車磨耗の状態が筒形試験片機における試験結果と変りがないように考えられる。ゆえに、磨耗機構の仮説 1), 2) をさらに確かめるため、今後種々な速度荷重について実験を行つてゆきたいと考える。

2. 硬度と磨耗について

「磨耗は種々の原因によつて起り、その原因中最も重要な役割をなすものによつて磨耗が起る様な観を呈するのであり、硬さが主要な役割をなすと見做される場合もあるが、磨耗現象は複雑であつて、硬さと磨耗との関係を知るには個々の場合について観察する必要がある。」と朝倉希一博士は述べておるが²¹⁾、それを要約すると次のようになる。

(1) 硬さと磨耗が関連があると思われるのは、磨耗が機械的破壊によつて起る場合である。

(2) 磨耗はある摩擦条件下の加工効果により生じた変質層に起るのであるから、硬さが関係するとすればこの変質層の硬さが問題となる。表面から相当の深さまでのくぼみを測定する普通の硬度計、たとえばブリネル、ロツクウェル、ピツカース等の装置による硬さが磨耗とは関連がなくても当然のように思われる。

(3) 耐磨耗性にはきわめて小さい部分の硬さが効果をもつ場合がある。すなわち、地金に炭化物がはまりこんだような組織にあつては、炭化物が相手を磨耗させ自身はあまり磨耗しない。したがつて、面の平均の硬さは磨耗と関連しなくなる。

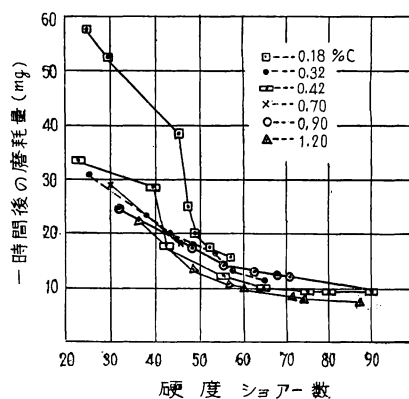
(4) 硬度の小なる方が耐磨耗性がある場合がある。すなわち、硬度の小なるものの方が靱性があるため、2つの摩擦体の間にあつて、研磨作用をする粉を一時的に保持する力が大で、この種の研磨体が保持されると表面が変化して耐磨耗性となるからである。

(5) ショアの硬度が直接磨耗に関連する結果を示す場合があるが（第5—7図）、一般的な関係でなく特別の場合と考えられる。

(6) 酸化磨耗をする条件では、硬いものが磨耗が少なく、異なる炭素鋼の組合せで輝面磨耗をする条件では、硬度の差が約 20% 以上になると硬さが磨耗に及ぼす影響が大である。

われわれの行つた実験では、3種類の滑車と鋼索がその接触面において機械的な破壊を起し、ために輝面磨耗を呈し、また異種の脱落粉末の影響下の磨耗であると考えられる。各滑車の硬度と磨耗量との結果を示すと、第5—1表のとおりである。

1) 第5—1表の結果の範囲においては、炭素鋼滑車の硬度と鋼索硬度の差はかなり大きく、(6)に述べたように硬さが磨耗に及ぼす影響の大きい状態に相当する。しかして、炭素鋼 S₁, S₂ の硬度はあまり差がないのに両者の磨耗は判然たる差があること、また同一材質の滑車の硬度と磨耗量を比較しても硬度の高いものが必ずしも磨耗量が小さくないことを示し、硬さと磨耗の関連性が認められない。これは硬度が測定位置によつてかなりバラつくので、(3)に述べたように磨耗に効果をもつきわめて小さい部分の硬度を適確に示していなかつたことによるものと思われる。



第5—7図 ショア硬度と磨耗量

第 5—1 表 硬 度 と 磨 耗 量

滑車番号	材質 硬度と 磨耗量	鋳 鉄 I			炭素鋼 S ₁			炭素鋼 S ₂		
		Hrc	%	磨耗量	Hrc	%	磨耗量	Hrc	%	磨耗量
1		28	65	3115	25	58	1710	27	63	985
2		27	63	2245	23	54	1525	24	56	955
3		28	65	2465	25	58	1135	24	56	735
4		27	63	1650	23	54	1475	24	56	930
5		26	60	1900	25	58	1390	22	50	790
6		25	58	2760	24	56	1450	24	56	900
平 均		27	62	2360	24	56	1450	24	56	880

備考 1. Hrc はロツクウェル硬度 C スケール 3 回測定した平均値を示す。

2. % は (滑車の硬度) ÷ (鋼索の硬度) × 100

ここに鋼索の硬度はビツカース硬度で 420 であつたが、これをロツクウェル硬度に換算すると Hrc = 43

3. 磨耗量は単位 mg で、第 4—1 表から求めた各滑車の総磨耗量である。

2) 鋳鉄滑車においても各滑車の硬度と磨耗量には関連がないようである。

3) 以上硬さと磨耗の関係については、鋳鉄は炭素鋼に比して組織ならびに靱性が異なるので磨耗機構もおおのずと異なるといわれているから、両者の磨耗をただ硬さから比較することはできないが、同一材質内の磨耗を比較してもまた硬さとあまり関連がなさそうである。これはさきに挙げた磨耗現象 (2), (3), (4) の理由によるものと考えられる。

3. 滑車の成分および組織と磨耗について

各滑車につき 3 回試験した磨耗量の合計を求め、この合計欄において磨耗量の順序に各材質別に配列すると第 5—2 表のとおりで、この表の試験荷重の行ごとに磨耗量の大小に応じ不等号をつけると、これらの順位はおおむね総磨耗量と同様の傾向を示すことがわかる。第 3—3 表にあげた成分は各滑車の平均的なもので、個別的には分析を行なかつた。したがつて、上記の順位は成分の相異によるかどうかは確認できないので、各滑車の組織写真により別々に考察する。

1) 鋳鉄滑車

第 5—2 表 各滑車の磨耗量 (単位 mg)

材質	荷 重	磨 耗 量					
鋳 鉄 I	滑車番号	I 4	I 5	I 2	I 3	I 6	I 1
	110kg	430 =	430 <	440 <	540 <	610 <	750
	130	430 <	520 <	855 >	760 <	800 <	975
	150	790 <	950 =	950 <	1165 <	1350 <	1390
	計	1650 <	1900 <	2245 <	2465 <	2760 <	3115
炭素鋼 S ₁	滑車番号	S ₁ 3	S ₁ 5	S ₁ 6	S ₁ 4	S ₁ 2	S ₁ 1
	110kg	85 <	410 <	420 >	375 <	470 =	470
	130	360 <	430 <	490 >	470 >	445 <	490
	150	690 >	550 >	540 <	630 >	610 <	750
	計	1135 <	1390 <	1450 <	1475 <	1525 <	1710
炭素鋼 S ₂	滑車番号	S ₂ 3	S ₂ 5	S ₂ 6	S ₂ 4	S ₂ 2	S ₂ 1
	110kg	155 <	210 <	220 <	250 <	270 <	320
	130	190 <	220 <	320 >	250 <	325 >	315
	150	390 >	360 =	360 <	430 >	360 >	350
	計	735 <	790 <	900 <	930 <	955 <	985

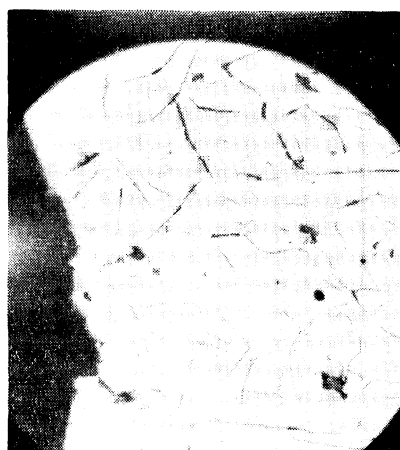
一般に鼠鋳鉄が摺動摩擦部に用いられて、著しく耐磨耗性に優れていることは、大きな特性であり利点であるが、この特性の真の理由はいまだ解つていないようである。ただ黒鉛が潤滑剤としての大きな役割をもち、その析出状態が重要な影響をもつことは確かで、黒鉛が方向性なく、彎曲した曲線状をなして一様に析出しており、さらにはかの組織が全部パーライトになつていて、フェライトのないものが良いとされている。また鼠鋳鉄の耐磨耗性は化学成分にもかなりの影響をうけ、実際には Si の影響が大きく、Si 1.2~1.4% ぐらいの低珪素の高級鋳



滑車番号 I 4 ×110 酸化クローム研磨のまま



滑車番号 I 3 ×110 酸化クローム研磨のまま



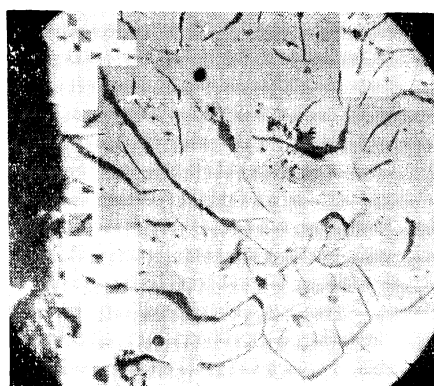
滑車番号 I 5 同上



滑車番号 I 6 同上



滑車番号 I 2 同上



滑車番号 I 1 同上

第 5—8 図 鑄鉄滑車溝底部の黒鉛の形状ならびに分布状態

鉄がシリンダーなどには最も適しているといわれる²³⁾。

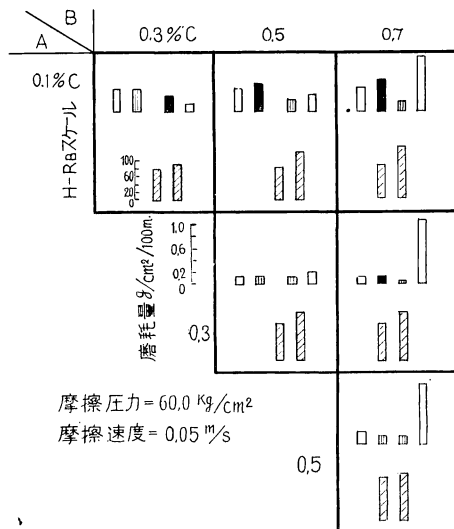
われわれの試験に用いた鑄鉄滑車は Si 1.25% の低珪素鑄鉄であり、その組織は第 5—8 図のごとく上述の組織に近く ASTM の規格によると A 型黒鉛に属し、耐磨耗性の優れた黒鉛析出型であるが、フェライトが白くところどころに認められるから、その点耐磨耗性はやや低いと思われる。第 5—2 表の磨耗量と黒鉛の形状ならびに分布状態を対照すると、磨耗量の少ない I 4, I 5 は粗大な黒鉛が少なく全体に均等に分布していること、磨耗量の多い I 6, I 1 は粗大な黒鉛が多く、分布が疎であることから、黒鉛が耐磨耗性に大きな役割をもっていることがうなずける。

鑄鉄の磨耗量を炭素鋼と比較するとき、同じ摩擦圧力、摩擦速度の下における実験であるのに、鑄鉄の方の磨耗量が多く、ことに炭素鋼 S₂ 滑車の約 2—3 倍の値を示した。これは普通鑄鉄の場合硬度は第 5—1 表のように炭素鋼より高いが、一方抗張力は第 5—3 表のように低いことから、靱性が低く脆いことがわかる。この脆さのため摩擦圧力に対して炭素鋼よりも疲労を早め、接触面が剝離するように磨耗し

第 5—3 表 供試滑車の抗張力 (単位 kg/mm²)

材質	鑄鉄 I	炭素鋼 S ₁	炭素鋼 S ₂
滑車番号			
1	22.5	51.5	56.4
2	24.4	52.5	57.2
3	21.8	51.7	60.6
4	27.7	51.8	59.5
5	21.6	51.1	56.6
6	19.6	51.7	56.2
平均	22.9	51.7	57.7

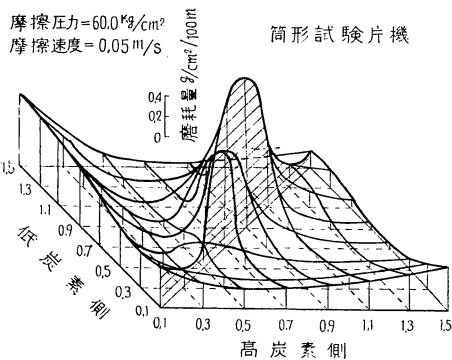
備考：試験片採取箇所は第 3—2 図参照



欄内上段は磨耗量を示す。

4つの長さのうち、左端のものは A 同志の磨耗量であり、右端のものは B 同志の磨耗量であり、中央の 2つは A B を組み合わせた場合の磨耗量で、左のものは A の磨耗、右のものは B の磨耗である。

第 5—10 図 異なる炭素鋼の組合せ磨耗線図



第 5—9 図 異なる炭素鋼の組合せ磨耗線図

てゆくのではなからうか。

2) 炭素鋼滑車

輝面磨耗の場合、炭素鋼の磨耗に及ぼす炭素含有量の影響については、大越諄博士の筒形試験片機による乾燥状態の実験結果があるが²³⁾、これによると第 5—9 図のごとく炭素量の同じ対角線上において磨耗量は最大となり、それからはずれると減少するが複雑な増減をみせている。われわれの行つた試験についてみると、鋼索の炭素量は 0.65%、滑車の炭素量は 0.19% であるから、第 5—9 図を参考にすると磨耗量の少ない点に関しては鋼索と滑車の炭素含有量の組合せは割に条件の良いところにおける試験であつたということがいえる。また、このときの両者の磨耗量を大越諄博士は第 5—10 図のように示しているが、これによると炭素量 0.7%

のものと 0.3% のものとの組合せの場合に両者の磨耗はともに少なくなることがわかる。ゆえに、鋼索に炭素量 0.7% ぐらいの材料を使用するとき、滑車には炭素量 0.3% 付近の材料を選定すれば両者間の磨耗が少なくなるのではないかということがうかがわれる。また、このときの硬度は、第 5—10 図の下段にハツチを施して示してあるが、磨耗量の最も少ない 0.7% C, 0.3% C の組合せの硬度が相手の硬度とあまり開きがなく、また接近もしていないことは、今後滑車の表面焼入れの問題とも関連して興味あることであろう。われわれの試験に用いた S₁, S₂ 炭素鋼滑車の炭素含有量はともに 0.19% で、これだけでは両者の比較はむずかしいのであるが、炭素鋼については炭素の偏析も考えられるから、念のため両者の組織を検鏡してみた。その結果は同一材質内の組織は、S₁ 滑車では若干異なり、S₂ 滑車ではほとんど近似しているが、両材質を総合的に比較すると、組織上からは S₂ の方が炭素含有量が多いことが認められる。

しかして、さきにあげた第 5—9 図の高炭素側 0.7% 線上では低炭素側の 0.1% から 0.3% に近づくにつれて磨耗量が漸次減少する傾向をみせている。本試験においても滑車の炭素量が前記検鏡の結果のごとく差があり、また両炭素鋼滑車を比べると、S₁ 滑車は S₂ 滑車の約 5—7 割増の磨耗量を示しているの、滑車と鋼索との磨耗においても第 5—9 図のような関係があるのではないかと考えられる。

4. 鋼索油ならびに脱落粉末について

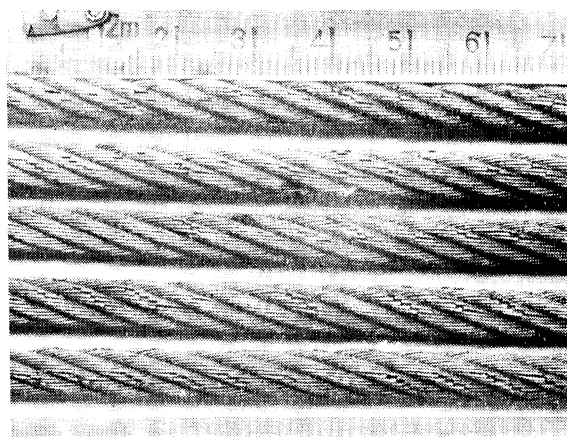
摩擦熱により鋼索油の粘度が変わり、接触面における油膜の構成状態が異なることは充分考えられることであり、さらにこれに磨耗粉が混入してくると、滑車と鋼索の磨耗現象はさらに複雑になる。しかしながら、現場における鋼索と滑車との接触面は油がなくなり、乾燥状態にあることをしばしばみかける。これは使用はじめに鋼索の表面に塗つてあつた油が夏などは外気のために粘度が低くなり、滑車が通過するたびに摩擦圧力のために油が接触面から外部に追い出され、さらに摩擦熱により粘度が低下し、この作用が著しくなるものと考えられる。また接触面から下側へ流動した油は鋼索の撓み等が変つて、滑車との接触面が逆にならないかぎり下側に集まり、上側はいつも乾燥状態に近いから滑車と鋼索は固体接触をきたして、両者の磨耗は促進されることになる。ゆえに、現場に近い試験条件として乾燥状態下の磨耗試験も考えられる。

本試験では、Ⅲ—1 で述べたように試験機を 2,400 および 12,000 回転で停めて油をふきとつたのであるが、試験終了においても滑車に多少付着した磨耗粉末は油を含んでおり、脱落粉末がたえず接触面に挟合して半潤滑状態の磨耗が行われていたものと思われる。しかして、回転数に対する磨耗の推移まで測定していないことと、異種の脱落粉末の相互作用が考えられることから、Ⅱ—2 にあげた磨耗過程 (3), (4) の仮説については究明できなかつた。

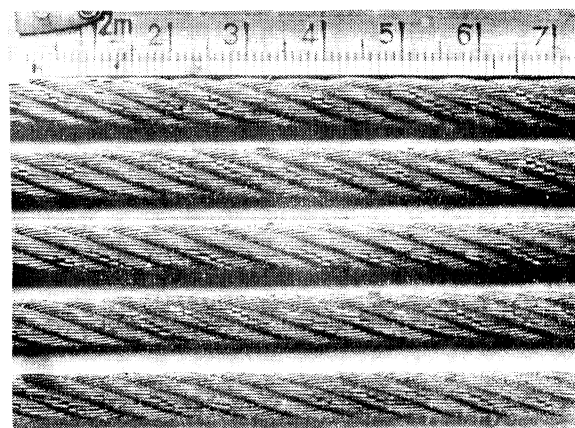
また接触面の温度測定もきわめて困難であるため、今回の試験においては実施し得なかつたが、試験機停止直後鋼索に手を触れてみた感じは約 100°C で、接触面の温度もその付近と想像される。なお、ねんのために供試鋼索の磨耗面組織を検鏡したが熱影響はみられなかつた。

5. 鋼索の疲労について

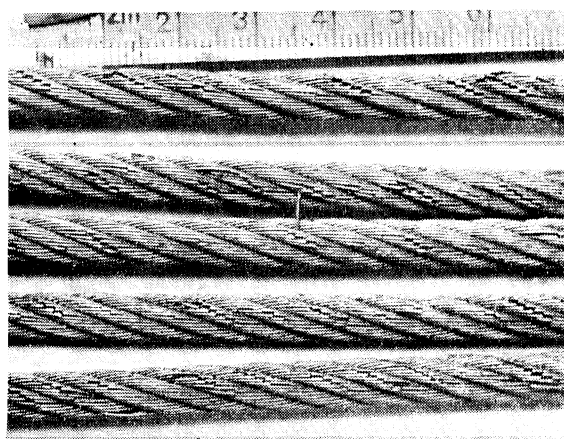
本試験に用いた試験機の構造および強度から供試鋼索が予定より細くなつたので、鋼索の磨耗量の測定も困難であつた。しかし、鋼索の磨耗が破断強度と相関度が高いと考え供試鋼索全部について破断強度試験を行つた（第 5—11 図参照）。鋼索は引張力を受けても撓られた素線一本一本は引張応力と曲げ応力を受けるほか、相互の間に摩擦を生じ外観的には現われない内部表面磨耗をきたし疲労してゆく。引張力のほかに横荷重を受けた鋼索は、さらにこの内部表面磨耗が増大し、滑車による鋼索外側の磨耗とともに全



荷重 110 kg, 周速度 220 m/min



荷重 130 kg, 周速度 270 m/min



荷重 150 kg, 周速度 400 m/min

第 5—11 図 試験終了後の供試鋼索の疲労状態

体の疲労を助長すると考えられる。かくのごとく鋼索の引張応力と曲げ応力との関係は重要であるが、われわれの行った試験ではその両応力の関係が集材機作業索の場合に相当しているので作業索の見地から考察する。

供試鋼索は 18 万回的一方方向だけの曲げを受け、第 4—3 図のように滑車の回転周速度が早くなるにつれて強度の低下を示している。この 18 万回という曲回数は、搬器 1 往復に作業索が 20 回の曲げを受け、1 日に搬器が 40 回往復するとして約 220 日分の作業量に相当する。もつとも鋼索は途中の障害物との接触による磨耗、素線断線、逆方向の曲げ等によっても強度は低下するから、この 220 日という数字は若干引ききして考えなければならない。なお、滑車の回転周速度が 200 m/min から 400 m/min に約倍になると、残留強度率が約 80% から約 50% に低下することは作業管理上注意すべきことであろう。たとえば、

1) 運転待時間を少なくして、今まで 400 m/min で運転していたのを 220 m/min で作業を行い得たとする。この場合強度の低下が少ないから、400 m/min で作業を行った場合の鋼索を棄却限度まで使用しうるとすれば、さらに相当日数鋼索の使用が可能になる。これは経済効果と結びつけて重要なことであると思う。

2) 事業計画をたてる場合に作業索の償却時期、償却費等算出の資料になる。

IV 総 括

3種類の材質（鋳鉄1種類，炭素鋼2種類）を2個ずつ，6輪回転式磨耗試験機（第3—1図）に取り付け，6mm 鋼索（東京製綱株式会社製 6×19 Z普通燃裸2種）を用いて，試験機にかかる荷重を110，130，150 kg，滑車の回転周速度を220，270，400 m/min に変えて，全部の組合せ9条件について，滑車の磨耗量の測定ならびに使用した鋼索の破断強度試験を行った。これを要約すると，おおむね次のとおりである。

1. 試験条件は次のとおりである。

1) 6輪回転式磨耗試験機は，その機構上鋼索の受ける応力関係を現場のそれに近づけることはできないが，計算より求めた応力ならびに応力関係は次のとおりである。

重錐の重量	引張応力 σ_t	曲げ応力 σ_b	σ_t/σ_b	総 安 全 率
kg	kg/mm ²	kg/mm ²		
110	10.5	23.6	0.44	4.55
130	12.4	23.6	0.52	4.31
150	14.3	23.6	0.60	4.09

2) 輪圧から接触部分の摩擦圧力を推定すると次のとおりである。

重錐の重量	接触長当り荷重	輪 圧	摩 擦 圧 力
kg	kg/cm	kg/cm ²	kg/cm ²
110	18.6	62	124
130	22.0	73	146
150	25.4	84	168

3) 滑車の回転周速度から摩擦速度を推定すると次のとおりである。

滑車の回転周速度	回転半径からくる滑り速度 (a)	滑車の抵抗からくる滑り速度 (b)	摩 擦 速 度 (a + b)
m/min	m/s		m/s
220	0.016	未測定	(0.016)
270	0.020	同上	(0.020)
400	0.030	同上	(0.030)

4) 供試滑車ならびに鋼索の成分，硬度，抗張力は次のとおりである。

区分		成 分			硬 度	抗 張 力		
材質別		炭	素	珪	素	マンガン	HRC	kg/mm ²
滑車	鑄 鉄 I	3.40		1.25		0.35	27	22.9
	炭素鋼 S ₁	0.19		0.16		0.41	24	51.7
	炭素鋼 S ₂	0.19		0.18		0.61	24	57.7
鋼	索	0.55～0.65		0.15～0.35		0.60 以下	43	155

2. 本試験はスパン 500 m ぐらゐの集材機の作業索と並滑車の接触状態に近似しているが，試験結果は次のとおりである。

1) 滑車の磨耗については，摩擦圧力 124～168 kg/cm² の範囲において圧力の影響が大きいが，摩擦速度の影響は推定 0.016～0.030 m/s の範囲においては認められない。

2) 鋼索の破断強度の低下については、輪荷重による影響も大きいですが、滑車の回転周速度による影響はそれよりさらに大きい。各試験条件による破断強度の低下の状態は屈曲回数 18 万回で第 4—3 図のとおりである。

3) 滑車の磨耗量は材質による影響が大きく、鋳鉄が炭素鋼 S₂ の約 2～3 倍、炭素鋼 S₁ の 3～6 割増の磨耗量を示した。

4) 組織上からみると、鋳鉄では黒鉛の分布が磨耗に影響しているようで、黒鉛が一様に析出して多少彎曲した曲線状をなして分布の多いものが磨耗が少なく、0.19% C 付近の炭素鋼では炭素含有量の多いものが磨耗は少ない傾向を示している。

5) 硬度による影響はみられなかった。

3. 磨耗機構について

滑車と鋼索の磨耗機構は複雑であるが、あらかじめ設けた仮説をこの試験成績の範囲で検討した結果、滑車溝面は鋼索から受ける、摩擦圧力による疲労のための機械的な破壊と鋼索との間の滑りによる機械的な破壊により磨耗をきたす。しかして、その摩擦速度は主として接触個所の回転半径の差による滑りで、これに転がり接触における滑りを加算したものと考えられる。ゆえに摩擦圧力、摩擦速度が求められるならば、既往の文献と対照して磨耗の傾向がほぼ推定できる。かかる意味において筒形試験片機のような基礎的磨耗試験を併行して行い、滑車および鋼索間の試験結果と照合してゆくことは、特にわれわれの使っている実物模型試験機の場合には必要なことであろう。しかして、その結果 6 輪回転式試験機を使うまでもなく、一般の磨耗試験機で充分成果が期待できるという見通しが立てば、直接現場の試験と結びつけて磨耗機構の究明が行えるかもしれない。

以上のように今後磨耗試験機と 6 輪回転式試験機とを併用することによつて、さらに研究を進めたいと考えている。

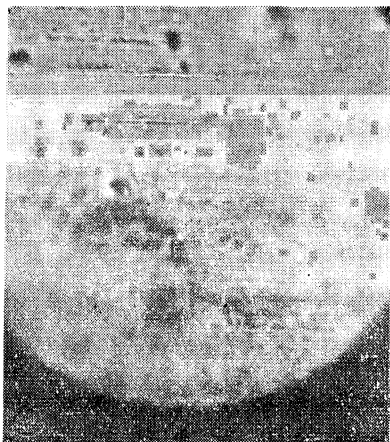
最後に、本試験を行うにあたり実験計画については本場測定研究室長大友栄松氏、慶応大学工学部浦昭二氏に、検鏡のために東京都立工業奨励館材料部押上森喬氏、大同製鋼森成敏氏にそれぞれ教示を受けた。磨耗重量の測定には東京工業大学大石研究室栗野満氏の厚意により計器の借用を受けた。また、鋼索の破断試験は東京製綱株式会社に依頼し、技術課長節丸狷介および検査課慶野郷郎両氏にいろいろ便宜を計つてもらつた。ここに深甚の謝意を表する。

文 献

- 1) 梅田三樹男・五十嵐 勇・芹田 陽：機械集材におけるワイヤーロープと滑車の磨耗について（第 1 報），日本林学会誌，**37**，10（昭 30）p. 435～440
- 2) 梅田三樹男・芹田 陽・仙北谷八郎：同上（第 2 報），日本林学会誌，**38**，5（昭 31）p. 178～179
- 3) 朝倉希一：金属の磨耗，丸善出版株式会社，（昭 23）p. 5
- 4) 斎藤省三・山本信公：磨耗試験，常盤書房，（昭 18）p. 104
- 5) 朝倉希一：金属の磨耗，丸善出版株式会社，（昭 23），p. 216
- 6) “：同上，p. 200
- 7) “：同上，p. 202
- 8) “：同上，p. 62

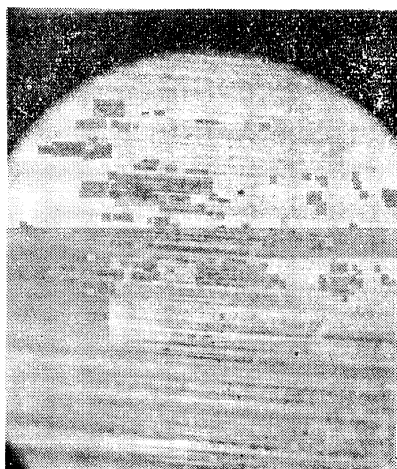
- 9) 朝倉希一：金属の磨耗，丸善出版株式会社，（昭 23），p. 2
- 10) “ ”：同上，p. 1～2
- 11) 飯高一郎：球状黒鉛鑄鉄の研究，日刊工業新聞社，（昭 27）p. 74～75
- 12) テイモシエンコ：弾性体の力学，井坂富士雄 他 2 名共訳，コロナ社，p. 292
- 13) 石橋 正：金属の疲労と破壊の防止，養賢堂，（昭 31）p. 300
- 14) 朝倉希一：金属の磨耗，丸善出版株式会社，p. 193
- 15) 加藤誠平：架空線集材用鉄索の計算法に関する研究，東京大学農学部演習林報告，38（昭 25）
p. 195，表 5
- 16) “ ”：同上，p. 198，式（13）
- 17) “ ”：同上，p. 207，式（28）
- 18) 真島卯太郎：架空索道，理工図書株式会社，（昭 30）p. 106
- 19) 朝倉希一：金属の磨耗，丸善出版株式会社，（昭 23）p. 113，133
- 20) “ ”：同上，p. 114
- 21) “ ”：同上，p. 219
- 22) 鉄鋼便覧，丸善出版株式会社，（昭 30）p. 539～540
- 23) 朝倉希一：金属の磨耗，p. 148～150

試 験 前

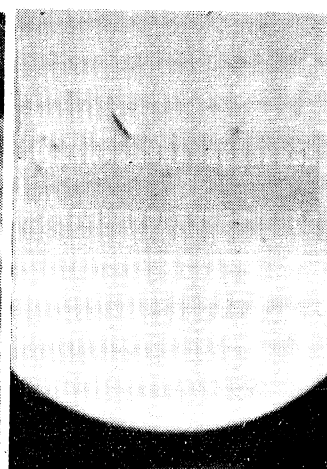
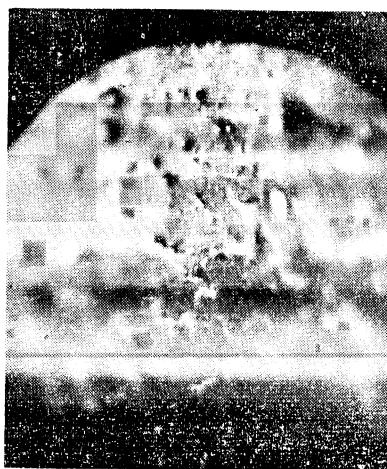
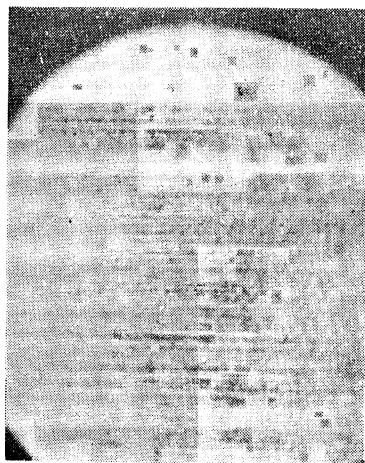


铸 鉄

試 験 後



炭素鋼 S₁



炭素鋼 S₂

試験条件：荷重 150 kg，周速度 400 m/min 倍率 40
試験前後の滑車溝底部の外観写真