金属の摩耗に及ぼす普遍的な潤滑油の影響について*

小 川 喜代一** 竹 内 栄 一**

Kiyokazu Ogawa and Eiichi Takeuchi: The Influence of Generally Used Lubricating Oils on the Wear of Metals (Effect of Oil Lubrication on Metal Wear, Part I). The experiments were carried out with several lubricating oils of the same group, which were of different viscosities and were separated by reduced pressure distillation. The results obtained were as follows; (1) The reasonable experimental conditions for wear testing were determined by preliminary experiments in which the relations between the contact pressure and the friction velocity and the wear loss were observed. For these experiments hardened bearing steel was used as test specimens in combination with S55C sorbitic carbon steel. The degree of adhesional wear depended on the strength of the oil film formed on the metal surface; when the strength of the oil film increased, the adhesional wear was observed in the higher velocity of pressure region. (2) The efficiency of lubricating oils for the reduction of wear loss depended remarkably on the oil film strength and the coefficient of boundary friction. Experiments under conditions of prolonged mechanical wear also was carried out to verify the above mentioned relation and to compare the lubricating efficiency various lubricating oils.

(Received February 6, 1961)

I. 緒 言

金属の摩耗現象を軽減するための手段として、一般に潤滑性の高い油類が採用されている。潤滑性の内容に関してはすこぶる複雑な因子が存在するが、潤滑油として直接摩擦、摩耗に関連性をもつものとしては油性、粘度ならびに粘度指数、あるいは油膜強さなどによる影響が主要因子となる。したがって潤滑油の性質については、一般に上述の諸性質を向上させるための研究がなされ、また各種の添加剤が加えられ、より潤滑性の増大が計られている。

しかしながら、前述の如く金属の摩耗と潤滑剤との相互関係は複雑な現象をともなうために、摩擦に関する個々の問題については従来多くの研究^{(1)~(6)}があるにもかかわらず、これが摩耗に及ぼす影響を本質的に究明した研究はほとんど見受けられない。

本報告は特に添加剤を加えずに基本となる潤滑油についてその各種性質が金属の耐摩耗性に及ぼす潤滑性について研究を行なった。すなわち本研究は減圧蒸溜法により製造した同一系で粘度その他性質の異なる数種の潤滑油について検討し、これが鋼材同志を組合せた滑り摩耗に及ぼす影響を明らかにしたものである。

** 東京都立工業奨励館

* 1958年4月本会東京大会に発表；金属の摩耗に及ぼす潤滑油に関する研究(第1報)

- (1) W.B.Hardy and I.Doubleday: Proc. Roy. Soc., [A] **100** (1922), 550.
- (2) W.B.Hardy and M.Nottage: Proc. Roy. Soc., [A] **138** (1932), 259.
- (3) E.P.Bauden and L.Leben: Phil. Trans. Roy. Soc., **239** (1940), 1.
- (4) 曾田, 岡本: 東大理工研報告, **1** (1947), 135.
- (5) 永井, 長谷川: 東大理工研報告, **2** (1948), 101.
- (6) R.H.Savage: J. Appl. Phys., **19** (1948), 1.

まず各潤滑油における固有の性質を究明し、つぎにこれが摩耗鋼材として熱処理を施した軸受鋼と S55C 炭素鋼とを組合せた滑り摩耗に及ぼす各種潤滑油の効果ならびに挙動を吟味したものである。

II. 実験に用いた試料ならびに方法

1. 実験に用いた潤滑油

本実験で使用した潤滑油は Motor oil としての原油を種々の条件の下で減圧蒸溜法により分溜したものである。すなわち Table 1 中の No.1~3 潤滑油 (Lub.No.1~3) は蒸溜装置を 3mmHg 以下に減圧し、250°, 300° および 350°C において蒸溜して得たものであり、No.4 (Lub.No.4) は前者に較べてさらに圧力を低下させ、1mmHg 以下のもとで 500°C に加熱しながら蒸溜を行なつたが、これら潤滑油はその粘度から推測して SAE# 10, 20, 30 および 50 Motor oil に相当するものといえる。

上述の方法で製造した各種潤滑油の性質は Table 1 に示す如くである。すなわち表中、粘度、粘度指数、境界摩擦係数ならびに油膜強さなどは先にも述べた如く直接摩擦に影響を及ぼすものと推察される。しかし不純物として残留する硫黄分などは、活性化硫黄の場合と異なり安定であるため摩耗現象にはほとんど影響しないものと考えられる。また Table 1 にはパラフィン系 60 spin の結果をも付記したが、このものは著者らの従来の研究からその性質ならびに摩耗との関連性につき十分検討されて既知のものであるため、供試潤滑油との比較を行なう目的で加えた。

なお実験中は潤滑油の物理化学的性質の変化を防止することにつとめ、Fig. 1 に示す如き装置を用いた。すなわち恒温油槽から 20 cc/min の一定量流出した潤滑油が鋼材摩擦面に作用し、使用された油は二段に設けられたガラスフ

フィルターにより濾過することによつて清浄化した後ギヤポンプにより冷却槽に送られて冷却し、さらに恒温油槽に

的な軸受鋼を一貫して使用したにすぎない。また組合せ鋼材の S 55 C ソルバイト組織鋼は摩耗試験の経験上、相手

Table 1 Property of lubricating oil.

	Lub 1	Lub 2	Lub 3	Lub 4	60 Spin
Specific Gravity 15/4°C	0.8685	0.8761	0.8790	0.8935	0.8805
Color (Union)	1½	3½	3½	5	-1
Flash Point (C.O.C)	206	220	237	287	166
Viscosity (Redwood-at 50°C)	975	168.0	251.7	1029.8	48.0
〃 (SUS-at 100°F)	180.4	338.0	585.1	2508.0	66.2
〃 (SUS-at 210°F)	45.2	54.8	68.4	153.2	35.7
Viscosity Index	99.1	99.0	98.1	97.4	80.4
Carbon Residue(Conradson)	0.02	0.11	0.21	0.73	Tr
Sulphur Content.	0.093	0.131	0.143	0.153	1.59
Ash Content.	Tr	Tr	Tr	0.002	Tr
Total Acid (mg/gKOH)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
Pour Point	-22	-15	-17	-12	-12.5
Coefficient of Boundary Friction (at 20°C)	0.36	0.38	0.27	0.184	0.255
Oil Pressure (Four Ball)	6.0	6.5	7.0	10.5	2.5
〃 (Timken)	10	---	12	17	---

Fig.1 Experimental apparatus of lubricating system.

入れて再び所定の実験温度に保持して供給することとした。

2. 鋼材試料

実験に用いた摩耗鋼材には軸受鋼 (SUJ-2) を使用したが、これと組合せる相手鋼材には S 55 C 炭素鋼を選び、Fig.2 に示す如き形状の固定ならびに回転試験片とした。

Fig.2 Specimens.

すなわち固定試験片は球状化組織の軸受鋼であり、これを所定の形状に加工したのち 850°C から油焼入し、直ちに 180°C で 60 分間焼戻処理を施し、 β -マルテンサイトとしたが摩擦面の硬さは Hv 700~722 であつた。つぎにこれと組合せる

回転試験片には前述の S 55 C 炭素鋼を用い機械仕上げ後 900°C から油焼入し、さらに 570°C で 60 分間焼戻を行なつてソルバイト組織として使用したが、このものの硬さは Hv 276~301 である。なお摩耗鋼材として採用した軸受鋼には特別の意味はない。すなわち各種潤滑油が耐摩耗性に及ぼす影響を検討するために耐摩耗が既知である、普遍

鋼材の摩耗機構を正確に批判できることから選定したものである。

また上述の各試験片はいずれも摩擦面粗さが 0.8~1.0 μ となるようエメリー仕上げを施し、一定粗さとして実験に供した。

3. 実験方法

Table 1 に示した諸性質はいずれも JIS に規定された方法により測定を行なつたもので、潤滑性を左右する重要因子となる境界摩擦係数、ならびに Ps 点として現わされる油膜強さに関してとともに従来定評のある方法を選んだ。すなわち境界摩擦係数は T 字型振子式油性試験機 II 型を用い、20~150°C において油の温度変化による影響を測定した。また油膜強さは四球式摩擦試験機と Timken 式摩擦試験機とを併用して測定を行なつた。前者の場合は 3/4"φ の鋼球を 4 個三角錐状に組合せ、それぞれが点接触した状態のもとに 20°C の供試潤滑油中に浸漬し、上述の 4 個のうち上側にある 1 個を 200 r.p.m なる一定条件で回転させながら漸次圧力を加え、油膜の破断にともない溶着の生じた際の圧力をもつて油膜強さとした。また Timken の場合は外周 6", 幅 2" の回転試験片をブロック状の固定試験片に線接触させ、800 r.p.m の速度で 5 あるいは 2 ポンド毎に順次荷重を加えて溶着の生ずる圧力を求めた。なお実験中油温は 125°±5°F に保持した。

Fig.3 Experimental apparatus of wear.

また摩耗試験については Fig.3 のような構造をもつピンドル型を改良した 100% 滑り摩擦方式の摩耗試験機に

より行なつた。

まず回転試験片を主軸に取付け、その偏心が 2μ 以下となるよう調整する。つぎに固定試験片を試験片保持具に取付けて両試験片の摩擦面を均一密着させ、油温は常に 20°C に一定して、合理性のある摩耗条件のもとで実験を行なつた。

なお摩耗量の実測については、試験片に附着した潤滑油を有機溶剤で十分洗滌し、完全に乾燥させたのちメトラ社製自動マイクロ天秤を用い秤量したもので、摩耗機構は主として電子顕微鏡により吟味した。

III. 供試潤滑油の潤滑性の検討

T字型振子式油性試験機により、油温 20° 、 50° 、 100° 、および 150°C の各条件のもとで20時間連続的に測定を行なつた。この結果によるといずれの潤滑油も境界摩擦係数は時間の経過とともになつて軽減し、数時間後に安定化する傾向がある。しかもこの場合安定化に要する時間は温度の高いものほど短時間となることを認めた。この現象は摩擦面への油分子の吸着による配列が時間の経過とともに、本実験の範囲内では温度の高くなるほど容易に促進されることによるものと推察される。この実験から境界摩擦係数の温度による変化はFig.4に示す如くなる。すなわち、油温

Fig.4 Relation between coefficient of boundary friction and temperature of lubricating oils.

の上昇とともになつて減少するが、この傾向は低粘度の油ほど顕著である。換言すると高粘度の油の方が低粘度のものよりも高分子であるため吸着性に優れており、したがつて実験の初期においてすでに安定化の傾向が現われ、温度に対して境界摩擦係数の変化が少なくなるものと考えられる。

つぎに油膜強さについてはFig.5から明らかな如く粘度に比例して増加する傾向がある。すなわち油膜強さは同

一系統の潤滑油の場合、粘度が大きいものほど強化される例えばLub-No.1~3の潤滑油は粘度の差が比較的少な

Fig.5 Relation between oil pressure and viscosity.

く、したがつて油膜強さもほとんど変りないがLub-No.4は前者に較べてはるかに高粘度であるため油膜強さも一層優れた値を示している。これは前述と同様に高分子の油となるほど金属との結合が強化されるためと思われる。

IV. 接触圧力ならびに摩擦速度の変化にともなう潤滑油の効果

摩耗に及ぼす潤滑油の効果を明らかにする目的から、まず合理的な摩耗条件を求めるために、接触圧力あるいは摩擦速度を広範囲に変えて、軸受鋼による摩耗の実験条件を検討した。

接触圧力と摩耗量との関係については、摩擦速度を 3.40 m/sec に一定とした場合、Fig.6に示す如く潤滑油の潤滑

Fig.6 Relation between wear loss and contact pressure.

性、ことに油膜強さの如何により、溶着摩耗の生ずる摩耗条件は著しい差異の現われることを認めた。すなわち、Lub-No.1~3は圧力 $60\sim 70\text{ kg/cm}^2$ において溶着にともなう摩耗量の急激な増加が現われるのに対し、Lub-No.4では前者に較べてはるかに高圧力のもとにおいてもなお摩耗量は極めて少ない。なお各条件で実験を行なつた両試験片の摩擦面の状態を顕微鏡により検討するとPhoto.1~2に明らかな如く金属接触を生じたと思われる斑点模様が見受

けられる。この値は溶着摩耗を生成する条件よりもはるかに低圧側にあり、Lub-No.1 および 2 では 40 kg/cm^2 Lub-No.3 は 35 kg/cm^2 、No. 4 は 60 kg/cm^2 であることを認めた。なお

Photo.1 Structure of frictional face. Condition; $p. 30\text{ kg/cm}^2$ $v. 3.40\text{ m/sec}$ $l. 30,000\text{ m}$. Oil, Lub-No.2. Oil temp. 20°C .

Photo.2 Structure of frictional face. Condition; $p. 40\text{ kg/cm}^2$ $v. 3.40\text{ m/sec}$ $l. 30,000\text{ m}$. Oil, Lub-No.2. Oil temp. 20°C .

高粘度の油ほど摩耗量の少なくなる傾向のあることを認めた。

以上の実験結果から潤滑油の効果を検討するための摩耗条件には摩擦速度を 3.40 m/sec に一定とした場合、圧力に

つぎに摩擦速度による影響を検討したが、この際の接触圧力は上述の実験結果から各機械的に安定な条件を採用して、摩擦速度のみを $0.6\sim 4.0\text{ m/sec}$ の範囲内で変化させ、Fig.7の結果が得られた。これによると比較的低速度のもとでは潤滑油の如何にかかわらず摩耗量は少ないが、漸次速度を増加するにともなつて各潤滑油は固有の性質による影響を生じ、熱的に安定な

Fig.7 Relation between wear loss and frictional velocity.

については Lub-No.1 および 2 では 40 kg/cm^2 、No.3 は 35 kg/cm^2 、No.4 は 60 kg/cm^2 、パラフィン系 60 spin では 20 kg/cm^2 であることが最も合理的であると考え、これらの条件のもとで実験を行なつた。換言すると各種潤滑油の耐

摩耗性に及ぼす影響は、これら摩耗の実験結果から明らかにように摩擦速度を一定とした場合、正常の摩耗機構のもとで接触圧力の許容量の大なるものほど潤滑性は優れていることを示すものとなる。つぎにこれらの関係をより詳細に検討してみる。

V. 潤滑油の摩耗に及ぼす効果

上述の実験結果から得た摩耗条件、すなわち接触圧力ならびに摩擦速度により長距離摩耗を行ない、その結果を Fig.8 に示した。これによるといずれの場合も初期摩耗は $50,000\text{ m}$ までに終了し、それ以後は定常摩耗状態となる。すなわち初期摩耗に関しては粘度の大きいものほど摩耗量が小さくなる傾向があり、殊にパラフィン系 60 spin は他の潤滑油に較べて軽負荷であるにもかかわらず最も大きな値を示す。この現象は高粘度、すなわち高分子の油ほど鋼材表面への吸着が容易であることによるものと考えられる。な

Fig.8 Relation between wearing tendency and lubricating oils.

おいずれの潤滑油もそれぞれ異なる接触圧力とし、いわゆる機械的破壊摩耗における条件を選定したため、摩擦面における破壊機構はほぼ同様な状態で摩耗が促進されていることから摩耗量の差異は認められるが、摩耗曲線の示す傾向は同様であつた。

VI. 結 言

粘度の異なる同一系統の各種潤滑油を用い、これが熱処理を施した軸受鋼と S55C 炭素鋼とを組合せた場合の滑り摩耗に及ぼす潤滑油の影響を検討するため実験を行なつた。その結果を要約すると

(1) Motor oil 用原油を減圧蒸留法によつて粘度の異なる 4 種類の潤滑油に分留したのち、それらの潤滑特性を吟味した。すなわち境界摩擦係数は油温の上昇するにともなつて短時間で安定化するとともにその値は減少するが、この傾向は低粘度の油ほど顕著である。また油膜強さは粘度に比例して増大することを認めた。

(2) 上述の特性をもつ潤滑油が滑り摩擦状態のもとで鋼の摩耗に及ぼす影響を検討した。すなわち接触圧力と摩耗との関係については摩擦速度を一定とした場合、いずれも圧力の増加するにともなつて 2 次曲線的に摩耗量が多くなる。しかしながら、油膜の破断による金属接触や溶着現象

の生ずる条件は油膜の強い油ほど高圧側へ移行することが認められた。

(3) 各種潤滑油の摩耗に及ぼす潤滑性には著しい差異があつて、摩擦速度 3.40 m/sec 一定とした場合、機械的破壊摩耗領域における許容最大圧力は油性によつて各々異なる。すなわち正常な破壊機構の示す接触圧力の条件によつて、各種潤滑油の表面エネルギーの低下を明確に知ることができ、Lub-No.4 に較べて Lub-No.1, 2 および 3 は

潤滑性の劣ることを知つた。

(4) つぎにこの点を一層吟味するために各潤滑油の許容最大圧力のもとに長距離摩耗を行なつて比較したが、これによると前記 (3) の現象をさらに明瞭に知ることができた。しかしながらいずれの場合においても、粘度および油膜強さが大きく、境界摩擦係数の小さいものほど高負荷の摩耗条件に耐え得るもので耐摩耗性を改善するものであることを認めた。