2109 低粘度オイルにおける鋳鉄のトライボロジー特性とグラファイトの影響

Research on tribological properties and graphitized effect for cast iron in low viscosity oil

○非 中村 竜太 (岩手大) 正 岩渕 明 (岩手大)

Ryuta NAKAMURA, Iwate University, Ueda 4-3-5, Morioka, Iwate

Akira IWABUCHI, Iwate University, Ueda 4-3-5, Morioka, Iwate

In order to reduce the environmental burden, low viscosity oils have been required applying for engines. However, the excessive low viscosity oil causes the increase of friction and wear. Therefore, the lower limit exists for application. In general, it is said that there is an effect of graphite to decrease the friction and wear in cast iron. However, the literatures that logically explained this common sense are few. In this study, The aim of this paper is to clarify low viscosity limit with block on cylinder type tribometer and to analyze composition with EPMA and XPS. The wear mechanism was discussed from the viewpoint of an effect of graphite. The region where specific wear rate is small narrows with low viscosity in PV-diagram. By analyzing XPS, it could be confirmed that a relative carbon content on wear surfaces increased more than non-wear surfaces.

Key words: Tribology, Engine, Low viscosity oil, Cast iron, Graphite

1. 緒言

近年のエンジンオイルは単にエンジンの動力性能を向上させるだけでなく環境負荷を低減させることが要求されており、その手法の1つとして潤滑油の「低粘度化」が進められている¹⁾。しかし、過度の低粘度化は摺動部における油膜厚さの減少、それに伴う摩擦摩耗の増大を招く。そのため、低粘度化には下限が存在する²⁾。そこで、本研究では軽摩耗モードを維持するための低粘度限界を明らかにすることを1つの目的とした。

また、グラファイトには摩擦摩耗を低減するような効果があると一般的に言われている。しかし、一見常識と考えられていることを論理的に説明している文献は少ない³⁾。このことから、鋳鉄の耐摩耗性について摩擦摩耗試験前後の表面形態をSEMによって観察し、元素分析及び化学状態をEPMA、XPSによって検討し、摩耗機構を鋳鉄に含有するグラファイトの作用の観点から検討した。

2. 実験装置及び試験方法

2.1 実験装置

Fig.1 に本試験で用いた摩擦摩耗試験機の概略図を示す。本実験装置は旋盤に下部試験片としてピストンリングを装着し、上部試験片を接触させるブロックオンシリンダー形式である。また潤滑油はポンプを用いてオイルパンから摩擦接触部へ一定量滴下させた。試験片の接触面温度は、クロメル-アルメル(Kタイプ)熱電対を使用し、上部試験片の接触面上2mmの場所で測定された。

Fig.1 Schematic diagram of the block on cylinder type tribometer

2.2 試験片

試験片の化学成分と硬さ及び形状と寸法を Table 1, Fig.2 にそれぞれ示す。上部試験片、下部試験片ともに鋳鉄を用いた。下部試験片はリング形状とし、上部試験片は下部試験片を16等分に切断したものを使用した。また、両試験片の表面粗さは $Ra0.89\mu m$ に旋盤による機械加工で仕上げた。さらに表面にバフ研磨を施した上部試験片も作製した。その試験片の粗さは $Ra0.27\mu m$ であった。硬さはピッカース硬さで 263HV であった。

Table 1 Chemical composition and hardness of the cast iron

Material	Vickers Hardness (HV)	Chemical Composition (%)						
		T.C	Si	Mn	P	S	B	Fe
NPR cast iron	263	3.49	2.64	0.63	0.33	0.04	0.02	92.85

Fig.2 Specimen shape and size

2.3 潤滑油

本試験で使用する潤滑油は、W0 以下、W0, W15(それぞれ粘度 8.3, 17.5, 78.7mPa·s)のベースオイル3種を使用した。

2.4 実験条件の設定

本試験装置では旋盤の回転数を変化させてすべり速度を制御した。エンジンの回転数の 954~6660rpm に相当する、旋盤の回転数 300~2100rpm で試験した。Table 2 にその他の試験条件を示す。

Table 2 Test conditions

Atmosphere temperature [°C]	18 ± 3
Sliding distance [m]	800
Number of rotations for Latch [rpm]	300 · 600 · 900 · 1200 · 1500 · 800 · 2100
Sliding velocity [m/s]	1.6 · 3.2 · 4.8 · 6.3 · 7.9 · 9.5 · 11.1
Normal load [N]	7.6 · 20 · 40 · 105
Amount of lubricants supply [ml/h]	1200

3. 機械加工試験片における摩擦摩耗実験の結果と考察

3.1 すべり距離によるトライボロジ特性の影響

Fig.3 は 40N, 9.5m/s におけるすべり距離に対する摩擦係数である。低粘度オイルの場合、摩擦係数は 0.25 まで上昇し、すべり距離 300m 付近で摩擦係数 0.02 以下の定常状態となった。このことより、境界潤滑から流体潤滑に変化したと考えられた。粘度が高くなれば摩擦係数が定常状態となる距離が短くなることがわかる。低粘度油に比べ、より早い段階で厚い油膜が形成されるためだと考えられる。

Fig.3 Relationship between coefficient of friction and sliding distance at 40N, 9.5m/s

Fig.4 に 40N, 9.5m/s のすべり距離に対する温度変化を示す。本試験において温度は初期温度との差で評価した。粘度が低くなるほど上昇温度は高く、温度が定常になる距離が長くなっていた。これはオイルの温度が上がればオイルの粘度は下がるという性質によるものだと考えられる。つまり、粘度が下がることにより、金属同士の直接接触が長くなるためと考えられる。

Fig.4 Relationship between temperature rise and sliding distance at 40N, 9.5m/s

Fig.5 に 40N, 9.5m/s の摩耗曲線を示す。これを見るとシビアマイルド摩耗遷移が起こっていることがわかる。シビア摩耗領域に対してマイルド摩耗領域の傾きは W0 以下で 2 オーダー、W0 で 2 オーダー、W15 で 1 オーダー小さい。よって摩耗のほとんどはシビア摩耗領域で行われていることがわかる。本試験において臨界距離 Lcr を比摩耗量算出時のすべり距離とした。また、Fig.3, Fig.4 と Fig.5 を比較すると摩擦係数、温度が共に最大に達した時にシビアマイルド遷移が起こっていることがわかった。

Fig.5 Wear curve at 40N, 9.5m/s

3.3 PV 線図による低粘度オイルの限界値の検討

Fig.6 に 7.6N 時の粘度と比摩耗量の関係を示す。すべり速度 1.6m/s から 4.8m/s までは全粘度範囲で変化は少なかった。W0 以下と W0 の低粘度オイルはすべり速度 7.9m/s 以上で比摩耗量が 10^{-4} mm³/Nm 以上と大きくなっていた。ここで、臨界すべり速度 Vcr を比摩耗量が大きくなったすべり速度とその 1 つ前の条件におけるすべり速度との平均として評価した。同様に 20N, 40N, 105N も算出した。Table 3 に各オイルにおける荷重と臨界すべり速度の関係を示す。

Fig.6 Relationship between specific wear rate and viscosity at 7.6N

Table 3 Relationship between critical sliding velocity and load

Load, N	7.6	20	40	105
	Critical sliding velocity, m/s			
Under W0	7.1	5.6	5.6	4.0
W0	7.1	5.6	5.6	4.0
W15			7.1	4.0

また、Fig.7 に本研究の結果から得られた比摩耗量を接触圧とすべり速度との関係で表した PV 線図を示す。これは臨界すべり速度で評価した。W0 以下、W0 に違いはなかった。さらに詳細な条件

で試験を行えば違いが現れるのではないかと推測できる。低粘度になるほど限界は左にシフトしていたということがわかった。

Fig. 7 PV diagram showing the severe-mild transition

4. 鋳鉄中のグラファイトの表面観察及び表面測定結果の考察

4.1 機械加工試験片の SEM 観察及び EPMA 分析

Fig.8 に試験前の機械加工試験片の SEM 写真を示す。Fig.8(a)に W0 以下, 40N, 9.5m/s, すべり距離 50m, 図の(b)にすべり距離 800mにおける SEM 写真を示す。また, Fig.9(a)に W0, 40N, 9.5m/s, すべり距離 50m, 図の(b)にすべり距離 800mにおける SEM 写真を示す。W0 以下と W0 の表面状態はほぼ同様に, すべり距離 50mでは, 凝着摩耗損傷が確認できる。また, EPMA 分析よりグラファイトと思われる炭素が確認できた。すべり距離 800 mではすべり距離 50mに比べ表面が滑らかであった。

Fig.10(a)に W15, 40N, 9.5m/s, すべり距離 50m, 図の(b)にすべり距離 800mにおける SEM 写真を示す。低粘度オイル同様にすべり距離 50mでは, 凝着摩耗損傷が確認でき, すべり距離 800mでもすべり距離 50mに比べ表面が滑らかある表面が観察できた。しかし, W15 のすべり距離 50mでは, 低粘度の W0 以下, W0 に比べグラファイトが少なかった。

Fig.8 SEM photograph of before test for turning specimen

(a) Sliding distance 50m

(b) sliding distance 800m

Fig.9 SEM photograph at Under W0,40N and 9.5m/s

(a) Sliding distance 50m

(b) sliding distance 800m

Fig.10 SEM photograph at W0,40N and 9.5m/s

(a) Sliding distance 50m

(b) sliding distance 800m

Fig.11 SEM photograph at W15,40N and 9.5m/s

4.2 パフ研磨試験片の SEM 観察及び EPMA での定量分析

Fig.12 に試験前のパフ研磨試験片の SEM 写真を示す。パフ研磨を施すことによって鋳鉄中のグラファイトが顕著に観察できた。

Fig.13(a)に W0 以下, (b)に W0, (c)に W15 で, いずれも 40N, 7.9m/s, すべり距離 800mにおける SEM 写真を示す。これは各粘度での比摩耗面と摩耗面の境界である。摩耗面においてははっきりと見えていた片状黒鉛が見えなくなっていた。

次に EPMA で非摩耗面と摩耗面の炭素と酸素の質量%濃度を分析した。Fig.14 に各粘度における非摩耗面の鉄の質量%濃度に対する炭素の質量%濃度(C_0/Fe_0)を 1 とした摩耗面の鉄の質量%濃度と炭素の質量%濃度の割合 (相対炭素量) を示す。全粘度範囲において摩耗面で相対炭素量が 0.5 以下に減少していた。

Fig.12 SEM photograph of before test for buffing specimen

(a) Under W0

(b) W0

(c) W15

Fig.13 SEM photograph at 40N,7.9m/s and sliding distance 800m

Fig.14 Relationship between $(C/Fe)/(C_0/Fe_0)$ and viscosity for at 40N,9.5m/s and sliding distance 800m measured by EPMA

4.3 XPS によるバフ研磨試験片の定量分析

次にXPSを用いて最表面を測定した。EPMA分析では、深さ方向の分解能が $0.3\mu\text{m}$ から数 μm なのに対し、XPSは 1nm であるから最表面を測定できる。測定はいずれもバフ試験片を用い(i)試験前の試験片、(ii)W0以下、40N、9.5m/s、すべり距離800m、(iii)粘度W15、40N、すべり速度9.5m/sの3種を測定した。(ii)、(iii)はいずれも摩耗痕表面を測定した。測定は初期状態、3.5nmエッチングし、汚染物を除去した状態、7nm/minで深さ方向にエッチングしながら測定した後の状態、この3つの状態で測定した。

Fig.15に各粘度における初期状態、汚染物除去した状態、エッチング後の状態での非摩耗面の鉄の原子%濃度に対する炭素の原子%濃度(C_0/Fe_0)を1とした摩耗面の鉄の原子%濃度と炭素の原子%濃度の割合を示す。ここでの非摩耗面とは試験前の試験片の表面である。XPS分析では初期状態、汚染物除去状態において非摩耗面より摩耗面の方の割合が大きくなっている。つまり、EPMA分析とは逆の結果が得られたことになる。これはXPS分析によって最表面の分析が出来たからであると推測される。この結果よりグラファイトが表面において塑性流動し、薄く延ばされてグラファイトフィルムを形成しているという仮説が証明されたと言えるのではないかと考える。また、粘度が高くなると割合が減少していることがわかる。

Fig.15 Relationship between $(C/Fe)/(C_0/Fe_0)$ and viscosity at 40N, 9.5m/s and sliding distance 800m measured by XPS

4.4 オイル中における鋳鉄の摩耗メカニズム

Fig.16に本試験の結果から考えられたオイル中における鋳鉄の摩耗メカニズムのモデルを示す。試験装置において荷重を落とした時に一度油膜が切れ、すべり距離初期に起こる激しい凝着摩耗によって表面にグラファイトがかきだされる。低粘度オイルであるW0以下、W0では、その後かきだされたグラファイトが表面に薄く引き伸ばされるというメカニズムになっていると考えられる。また、SEM観察、EPMA分析、XPS分析からW0以下、W0と比較してW15の方でグラファイトの量が減っていることから、高粘度オイルであるW15は、同じようにすべり距離初期に起こる激しい凝着摩耗によってグラファイトがかきだされるが、粘度が高く油膜が形成されやすい分、オイルによって流されてしまっているのではないかと推測できる。

Fig.16 Model of wear mechanism in oil

5. 結言

- (1) PV線図より、高荷重、低粘度、高すべり速度になるほどPV線図において比摩耗量の小さい領域が狭まる。例えば、荷重7.6N、粘度 $8.3\text{mPa}\cdot\text{s}$ における限界すべり速度は 7.1m/s 、荷重105N、粘度 $78.7\text{mPa}\cdot\text{s}$ における限界すべり速度は 4m/s であった。
- (2) オイル中において、シビアマイルド遷移が生じると同時に、境界潤滑 - 流体潤滑遷移が生じていると言える。
- (3) EPMAより分解能が優れているXPSの分析により、初期状態、汚染物除去状態の表面における相対炭素量が非摩耗面より摩耗面の方で増加していることを確認できた。
- (4) SEM、EPMA、XPS分析から、鋳鉄の摩耗メカニズムは、まず、すべり距離初期に起こる激しい凝着摩耗によってグラファイトがかきだされる。その後、グラファイトが表面に薄く引き伸ばされ、グラファイトフィルムを形成するというメカニズムになっていると推測できる。また、粘度の影響として、油膜が形成されにくい低粘度ほどグラファイトがオイルによって流されにくいため、表面にとどまりグラファイトの効果が発揮されることが考えられる。

参考文献

- 1) 遠藤護, 大森俊英, 筒井治, 山本匡吾: 低摩擦ガソリンエンジン油—低粘度化と摩擦調整剤の効果—, 豊田中央研究所R&Dレビュー, Vol.32 (1997)

その他 省略

謝辞

本研究において試験片を提供してくださった、日本ピストンリング㈱、潤滑油を提供してくださった出光興産㈱に深く感謝します。