

樹脂ブレンドによる軽量しゅう動部材の開発

～ ポリアセタール/高密度ポリエチレンブレンド樹脂の限界 pv 値 ～

三木靖浩^{*1)}、中井猛夫^{*2)}、足立茂寛^{*1)}、西村敬一^{*1)}、司文華^{*3)}、斎藤篤^{*4)}

Development of Excellent Material in Lightness and in Tribological Characteristics by Polymer Blends

～ The pv Limit of Polyacetal / High Density Polyethylene Blend Polymers ～

Yasuhiro MIKI ^{*1)}, Takeo NAKAI ^{*2)}, Shigehiro ADACHI ^{*1)}, Keiichi NISHIMURA ^{*1)}, Bunka SHI ^{*3)}
and Atsushi SAITO ^{*4)}

The blends with high density polyethylene (HDPE) were examined to improve the tribological characteristics of polyacetal (POM), and the pv limits of the blend polymers were researched. The frictional wear was examined by the condition of the unlubricating with thrust cylinder abrasion tester, and the pv limits of the polymers was obtained. First of all, the pv limits of POM polymers on the market which added oil, MoS₂ or fluoroplastics, etc. were researched. As a result, the pv limit of the POM (POM-OL10) polymer which added the oil of 10wt% was 0.30MPa·m/sec, and 1.5 times the pv limit of natural POM polymer. Next, the pv limits of the POM/HDPE blend polymers by which the HDPE polymers were mixed with the natural POM polymer at a fixed rate were researched. As a result, the pv limit of the POM polymer which blended the HDPE polymer for the blow molding of 30wt% was 0.31MPa·m/sec, and the pv limit equal with the POM polymer with 10wt% oil was shown.

1. 緒言

近年、国内のプラスチック産業界は中国を中心とした輸入品の激増や生産の海外移転等によって、かつて経験したことのない規模のコスト削減、高機能化・高付加価値化が求められている。従来、プラスチック産業は、少品種大量生産を効率よく行うことによってコスト削減を図ってきた。プラスチック産業・関連産業が今後も持続的に発展していくためには、超精密化、超薄肉化およびプラスチック材料の複合化などによる高機能化・高付加価値化が不可欠な課題となっている。

本研究開発では、プラスチック製品の高機能化・高付加価値化を目指し、高分子材料のうちポリアセタール樹脂に注目した。ポリアセタール樹脂は低摩擦で摩擦の少ない樹脂として主に家電製品等の歯車などに用いられている¹⁾。また、高分子材料のトライボロジー特性をさらに向上させるために、ポリアセタールとポリブタジエンとのブレンド²⁾、ポリエチレンとポリアミドとのブレンド³⁾などについて検討されているが、大きな耐荷重を必要とする機械系部品への応用はほとんどない。

そこで、本報では、市販のポリアセタール樹脂(POM)、ならびに POM と高密度ポリエチレン樹脂(HDPE)とのブレンド材を調製し、無潤滑状態で炭素鋼とのスラストシリンダ摩擦摩耗試験を行い、POM 樹脂の限界 pv 値に対する HDPE 樹脂のブレンド効果について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試樹脂、成形条件および成形方法

Table 1-1 に示した 8 種類の市販樹脂のうち、中空成形用 HDPE 樹脂(B-HDPE 樹脂)を除いた七種類の樹脂を用い、Fig.1(a)に示した形状のスラストシリンダ摩耗試験用の円筒試験片を成形した。試験片の成形には(株)日精樹脂工業製 FS120S-18ASE 型射出成形機を用いた。各樹脂に対する射出成形条件は、Table 1-1 のとおりである。一方、Table 1-1 に示した樹脂のうち、HDPE 樹脂と POM 樹脂(ジュラコン M90S)、ならびに B-HDPE 樹脂と POM 樹脂(ジュラコン M90S)とをブレンドするため、プラスチック工学研究所(株)製 BT30-S-30L 型二軸押出機を用い、所定の配合比(重量%)となるように各樹脂ペレットを混練し、ブレンド樹脂のペレットを調製した。調製したブレンド樹脂のペレットを用いて、上記射出成形機によりスラストシリンダ摩耗試験用の円筒試験片を成形した。なお、各ブレンド樹脂の配合比および射出成形条件を、Table 1-2 に示す。

2.2 スラストシリンダ摩耗試験

(株)エーアンドデイ製 EFM- -EN 型摩擦摩耗試験機を用い、日本機械学会基準 JSME S 013(摩擦の標準試験方法)に準拠し、スラストシリンダ摩耗試験を行った。相手材(スライダ)には、Fig.1(b)に示した平板形状を有する炭素鋼(S50C)の調質材を使用した。スライダの平面度

^{*1)}繊維・高分子技術チーム ^{*2)}企画・交流支援チーム ^{*3)}株式会社カイバラ ^{*4)}日本大学理工学部精密機械工学科

およびスラスト面の表面粗さ(算術平均粗さ: Ra)は、それぞれ 0.015mm および 0.03 μm である。また、円筒試験片のしゅう動面の表面粗さ(Ra)は、0.05 μm である。射出成形した樹脂製の円筒試験片のしゅう動面をメタノールで洗浄し、乾燥させた後、円筒試験片の質量(0.1mgの精度)を測定した。摩擦摩耗試験機の概要を、Fig.3 に示す。円筒試験片を試験機の回転主軸に固定した後、メタノールで洗浄したスライダを専用のホルダに固定し、摩擦トルクを検出する治具に取り付けた。

円筒試験片に所定の荷重を加えた後、所定のすべり速度で回転させ、しゅう動距離が 1800m になるまで試験を行った。摩耗試験後、円筒試験片に付着している摩耗粉を、メタノールを含浸させた清潔な布で拭き取り乾燥させた後、天秤を用いて 0.1mg の精度で円筒試験片の質量を測定した。その後、円筒試験片の質量減少量を摩耗による減少量とし、次の(1)式を用いて摩耗率(単位しゅう動距離当たりの摩耗体積)を算出した。

$$V_w = (W_1 - W_2) / (P \cdot L) \quad (1)$$

ここで、 V_w は摩耗率(mm^3/m)、 W_1 は円筒試験片の試験前の質量(mg)、 W_2 は円筒試験片の試験後の質量(mg)、 P は

円筒試験片の密度(mg/mm^3)、ならびに L はしゅう動距離(mm)を示す。次の(2)式を用いて比摩耗量を算出した。

$$V_s = (W_1 - W_2) / (P \cdot V) \quad (2)$$

ここで、 V_s は比摩耗量(m^2/N)、および P は加圧荷重(N)を示す。

限界 p_v 値は、使用限界における接触圧力(P)とすべり速度(V)との積で表わされる。本摩耗試験では、接触圧力を一定にし、すべり速度を低速から高速へと順次、所定の値に設定しながら試験を行い、円筒試験片の摩耗率の急激な増加時(または円筒試験片の溶融時)のすべり速度を求めた。接触圧力は、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、2.0 および 4.0MPa から選択した。この結果を基に、次の(3)式を用いて各樹脂の限界 p_v 値を算出した。

$$PV^n = C \quad (3)$$

ここで、 C および n は、それぞれ限界 p_v 値および p_v 線図における限界すべり速度に対する接触圧力の勾配を示す。なお、摩耗試験は、すべて温度 23 ± 1 、湿度 $50 \pm 2\%$ の恒温恒湿室内において無潤滑の状態で行った。

Table 1-1 Polymers on the market and it's conditions of injection molding.

Polymer	Brand	Manufacturing Company	Density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Molding Temperature / K	Molding Pressure / MPa	Molding Speed / $\text{mm} \cdot \text{sec}^{-1}$	Temperature of Mold / K
High Density Polyethylene (HDPE)	J-Rex KM770W	Polyplastics Co., Ltd.	0.954	473	70	40	313
High Density Polyethylene (B-HDPE)	Blow grade 550BR	Idemitsu Co.,Ltd.	0.954	-	-	-	-
Polyasetal (POM)	Duracon M90S	Polyplastics Co., Ltd.	1.41	473	70	60	348
Polyasetal (POM-OL10)	Duracon OL10		1.40				
Polyasetal (POM-MS02)	Duracon MS02		1.43				
Polyasetal (POM-NW02)	Duracon NW02		1.36				
Polyasetal (POM-YF10)	Duracon YF10		1.50				
Polyasetal (POM-YF20)	Duracon YF20		1.53				

Table 1-2 Blend polymers and it's conditions of injection molding.

Brend polymer (wt%)	Brand	Density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Molding Temperature / K	Molding Pressure / MPa	Molding Speed / $\text{mm} \cdot \text{sec}^{-1}$	Temperature of Mold / K
POM85% / HDPE15%	M90S / M770W	1.31	473	70	60	348
POM70% / HDPE30%	M90S / M770W	1.21				
POM55% / HDPE45%	M90S / M770W	1.15				
POM85% / B-HDPE15%	M90S / 550BR	1.31				
POM70% / B-HDPE30%	M90S / 550BR	1.21				
POM55% / B-HDPE45%	M90S / 550BR	1.15				

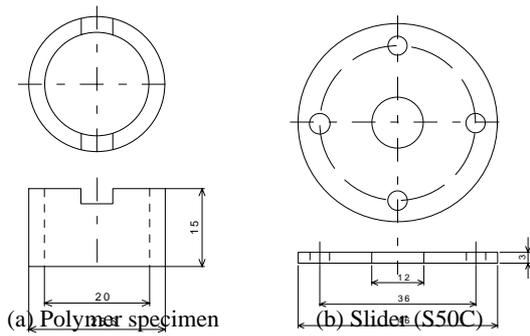


Fig.1 The forms of polymer specimen and slider.

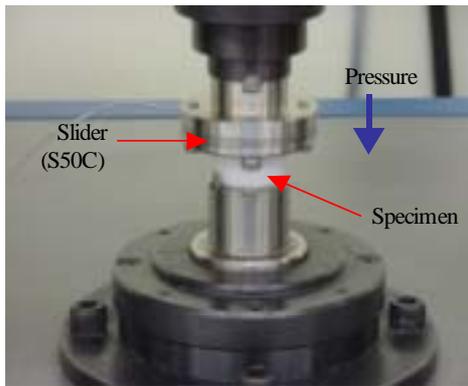


Fig.2 Photograph of thrust slider type testing apparatus.

3. 結果および考察

3.1 POM樹脂のすべり速度と摩耗率との関係

Table 1-1 に示した市販の HDPE 樹脂および POM 樹脂におけるすべり速度と摩耗率との関係を、Fig.3 ~ Fig.9 に示す。なお、図中の、 \times 、 \triangle 、 \square 、 \diamond および $*$ 印は、それぞれ接触圧力 0.1、0.2、0.3、0.5、1.0 および 2.0MPa のときの摩耗率を示している。いずれも接触圧力の増加にともない摩耗率が急激に増加するときのすべり速度の

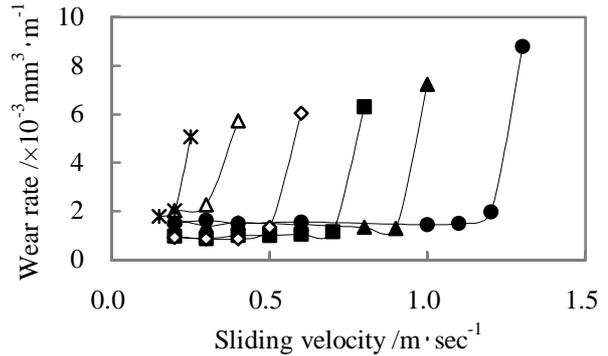


Fig.3 Relationship between sliding velocity and wear rate for HDPE polymer.

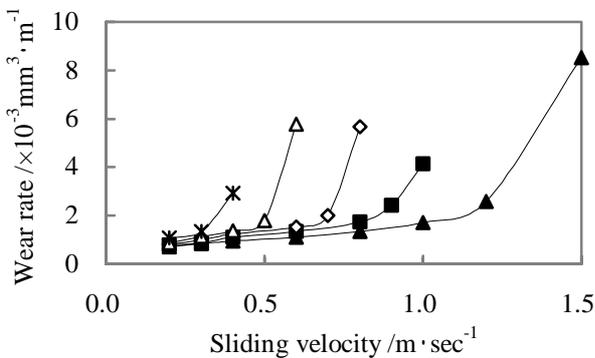


Fig.4 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM polymer.

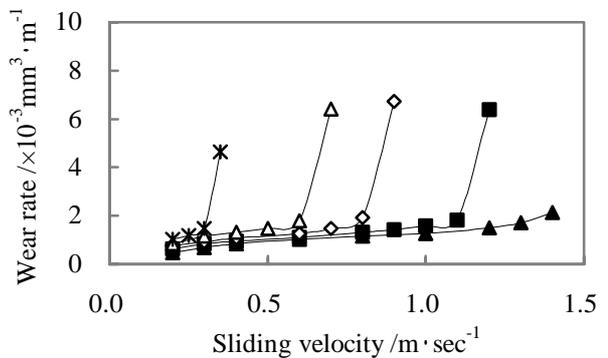


Fig.5 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM-OL10 polymer.

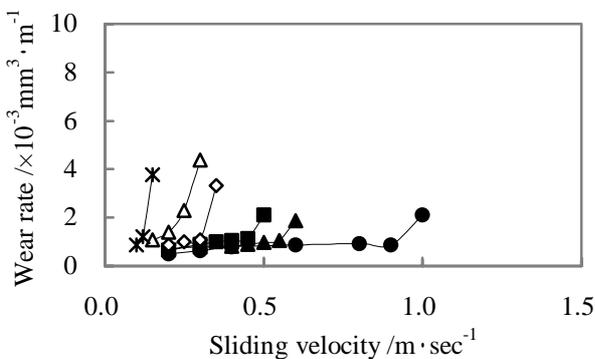


Fig.6 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM-MS02 polymer.

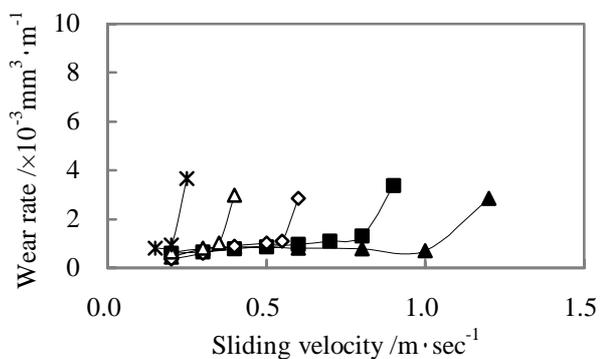


Fig.7 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM-NW02 polymer.

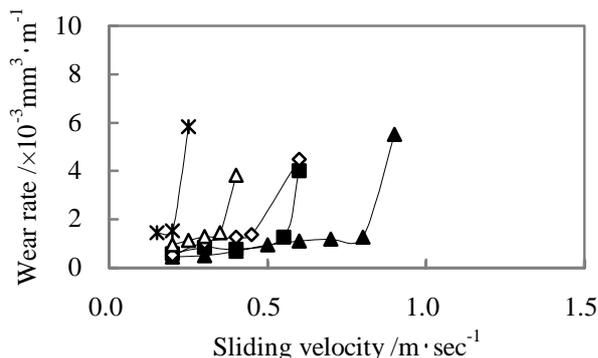


Fig. 8 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM-YF10 polymer.

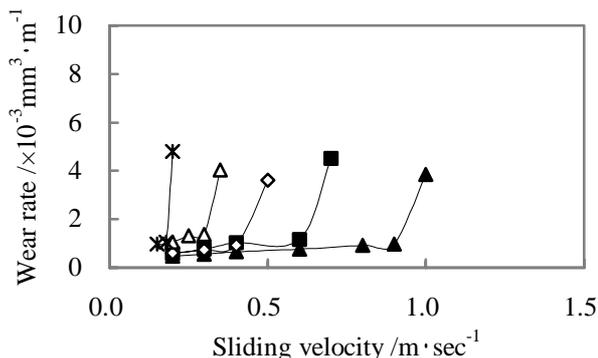


Fig. 9 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM-YF20 polymer.

値は、小さくなっている。Fig.5 からわかるように、POM 樹脂の摩耗率は、接触圧力 0.2MPa のとき、すべり速度 1.0 ~ 1.2m/sec まではすべり速度の増加にともない徐々に増加し、それ以降急激に摩耗率が増加している。一方、Fig.6 からわかるように、10wt%のオイルを含浸した POM-OL10 樹脂の摩耗率は、接触圧力 0.2MPa のとき、すべり速度 1.4m/sec でも急激な増加を示していない。POM 樹脂にオイルを含浸させることによって、限界すべり速度が 1.4 倍以上大きくなっていることがわかる。

二硫化モリブテン(MoS_2)を充填した POM 樹脂のすべり速度と摩耗率との関係を、Fig.6 に示す。 MoS_2 は一般に固体潤滑剤として用いられているため、トライボロジー特性の向上を期待したが、POM 樹脂単体のトライボロジー特性を悪化させる結果となっている。接触圧力 0.2MPa、すべり速度 0.4m/sec における摩擦係数は、POM 樹脂では 0.24 であり、POM-MS02 樹脂では 0.49 であった。このことから、 MoS_2 の充填によって POM 樹脂は接触圧力の影響を受けやすくなり、発生する摩擦熱によって摩耗試験中に POM 樹脂がより高温にさらされ、摩耗が促進するものと考えられる。一方、特殊潤滑剤を充填した POM-NW02 樹脂におけるすべり速度と摩耗率との関係を、Fig.7 に示す。すべり速度の増加にともない摩耗率の増加は抑制されている。しかしながら、各接触圧力において摩耗率が急激に増加するすべり速度は、POM 樹脂単体の場合とほとんど変わっていないことがわかる。

フッ素樹脂粉末を 10wt% および 20wt% 充填した POM 樹脂におけるすべり速度と摩耗率との関係を、それぞれ Fig.8 および Fig.9 に示す。 MoS_2 を充填した POM-MS02 樹脂の場合は、いずれのすべり速度においても POM 樹脂単体よりも大きな摩擦係数を示していたが、POM 樹脂にフッ素樹脂粉末を充填した場合、すべり速度の値が小さいときには POM 樹脂単体よりも小さな摩擦係数を示し、すべり速度の増加にともない急激に摩擦係数が大きくなった。このことによって、摩耗率の増加が引き起

こされ、限界すべり速度が小さくなるものと考えられる。

3.2 各種 POM 樹脂の限界 pv 値

HDPE 樹脂、POM 樹脂、ならびに POM-OL10 樹脂における限界すべり速度と接触圧力との関係を、Fig.10 に示す。また、HDPE 樹脂および各 POM 樹脂の限界 pv 値と(3)式より求めた n 値(両対数グラフにおける限界すべり速度に対する接触圧力の勾配)を、Table 2 に示す。POM 樹脂にオイルを充填することによって、使用限界におけるすべり速度および接触圧力が増大しており、限界 pv 値は POM 樹脂の 1.5 倍(HDPE 樹脂の約 1.9 倍)となり、

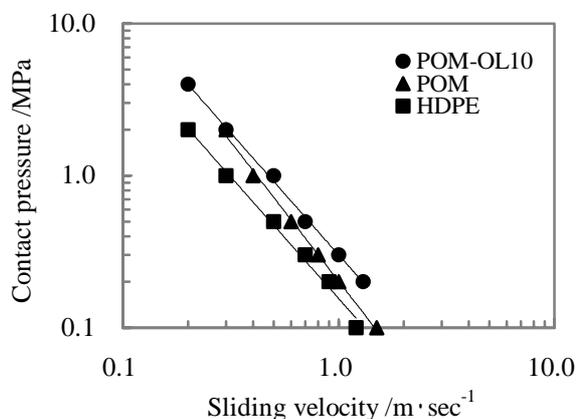


Fig. 10 Relationship between sliding velocity and contact pressure for HDPE, POM and POM-OL10.

Table 2 The pv limit and n value of polymer specimens.

Polymer	pv limit / MPa · m/sec	n value
HDPE (KM770W)	0.16	1.60
POM (M90S)	0.20	1.83
POM-OL10	0.30	1.60
POM-MS02	0.09	1.50
POM-NW02	0.21	1.43
POM-YF10	0.10	1.87
POM-YF20	0.15	1.38

耐焼付き性が改善されている。一方、POM 樹脂にオイルを充填することによって、 n 値は約 12% 小さくなり、限界すべり速度に対する接触圧力の変化が POM 樹脂よりも小さくなっている。すなわち、POM 樹脂にオイルを充填することによって接触圧力の影響を受けやすくなるものと考えられる。

3.3 ブレンド樹脂材のすべり速度と摩耗率との関係

Table 1-2 に示した HDPE 樹脂と POM 樹脂のブレンド、および B-HDPE 樹脂と POM 樹脂のブレンドにおけるす

べり速度と摩耗率との関係を、Fig.11 および Fig.12 に示す。なお、図中の \square 、 \triangle 、 \diamond 、 \circ 、および $*$ 印は、それぞれ接触圧力 0.2、0.3、0.5、1.0、および 2.0MPa のときの摩耗率を示している。Fig.11 および Fig.12 からわかるように、POM 樹脂に HDPE 樹脂をブレンドすると、POM 樹脂単体の場合と比較してすべり速度の増加にともなう摩耗率の増加は極めて小さく、各接触圧力における摩耗率も約 1/2 まで小さくなっている。一方、Fig.12 からわかるように、POM 樹脂にメルトマスフローレイト (MFR:g/10min) の値(溶融樹脂が 10min 間に流れる量)が

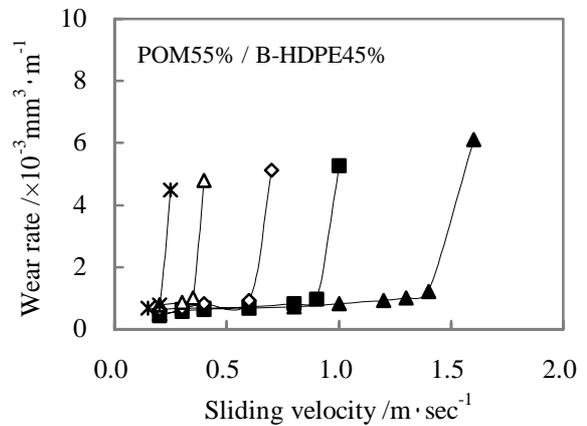
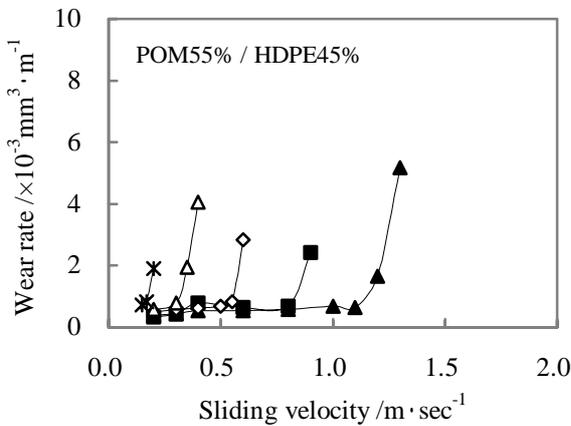
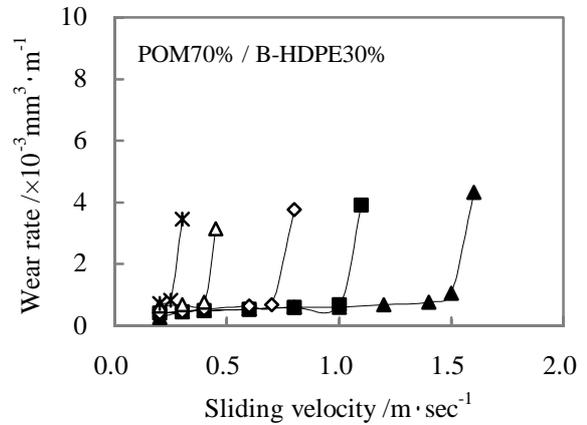
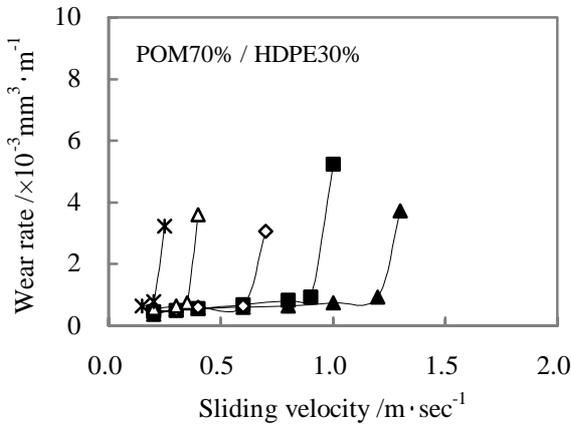
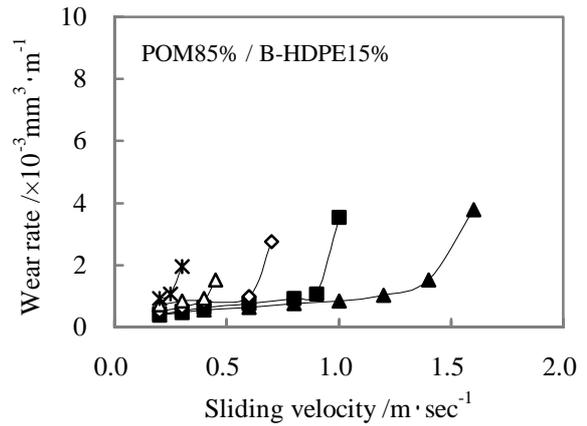
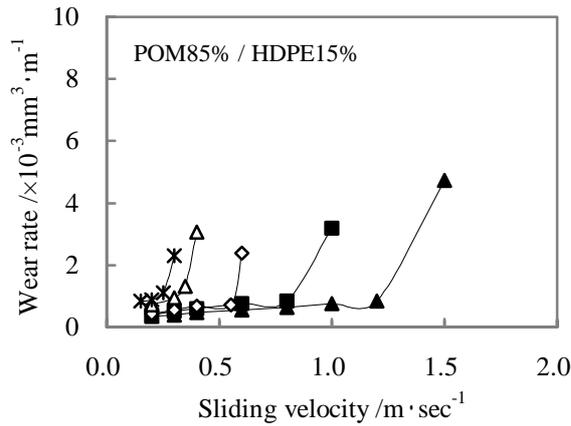


Fig.11 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM / HDPE blend polymers.

Fig.12 Relationship between sliding velocity and wear rate for POM / B-HDPE blend polymers.

小さい中空成形用 B-HDPE 樹脂 (MFR=0.3) をブレンドすると、Fig.11 の射出成形用 HDPE 樹脂 (MFR=12) の結果と比較して、約 1.3 倍まで耐速度性が向上している。POM 樹脂の MFR 値は 9.0 であり、MFR 値が小さいほど熔融粘度が大きい。したがって、B-HDPE 樹脂よりも POM 樹脂の方が摩耗試験時に流動変形を起こしやすいが、摩擦面に分散している B-HDPE 樹脂が接触荷重を支え⁴⁾、流動変形を防止しているものと考えられる。一方、HDPE 樹脂および B-HDPE 樹脂の双方において、POM 樹脂への充填量の増加にともない限界すべり速度は大きくなっているが、充填量が 45wt% になると摩耗率が大きくなり、限界すべり速度が低下している。これは、剛性の低下によりスライダ(S50C)と直接接触(真実接触)する HDPE 樹脂や B-HDPE 樹脂が多くなり、HDPE 樹脂表面の温度が摩擦熱により上昇しやすくなるためであると考えられる。

3.4 ブレンド樹脂材の比摩耗量および摩擦係数

POM 樹脂、POM70% / HDPE30% ブレンド樹脂および POM70% / 30%B-HDPE ブレンド樹脂のすべり速度と比

摩耗量との関係を、それぞれ Fig.13 ~ Fig.15 に示す。なお、図中の \square 、 \triangle 、 \diamond 、および * 印は、それぞれ接触圧力 0.2、0.3、0.5、1.0、および 2.0MPa のときの比摩耗量を示している。いずれの樹脂においても接触圧力の増加にともない比摩耗量は小さくなり、接触圧力の増加により摩耗面外部への摩耗粉の排出が抑制されることによるものと考えられる。Fig.13 ~ Fig.15 からわかるように、POM70% / HDPE30% ブレンド樹脂および POM70% / 30%B-HDPE ブレンド樹脂の比摩耗量は、POM 樹脂の比摩耗量よりも小さい。接触圧力 0.2MPa、すべり速度 1.0m/sec の摩耗条件での比摩耗量 ($\times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$) を比較すると、POM 樹脂では 43 であるのに対し、POM70% / HDPE30% ブレンド樹脂では 18、POM70% / 30%B-HDPE ブレンド樹脂では 14 であり、それぞれ POM 樹脂に対して約 2/5 および約 1/3 まで比摩耗量が減少している。また、POM70% / HDPE30% ブレンド樹脂および POM70% / 30%B-HDPE ブレンド樹脂は、POM 樹脂に比べてすべり速度の増加にともなう比摩耗量の変化が極めて小さく、しゅう動特性に優れていることがわかる。

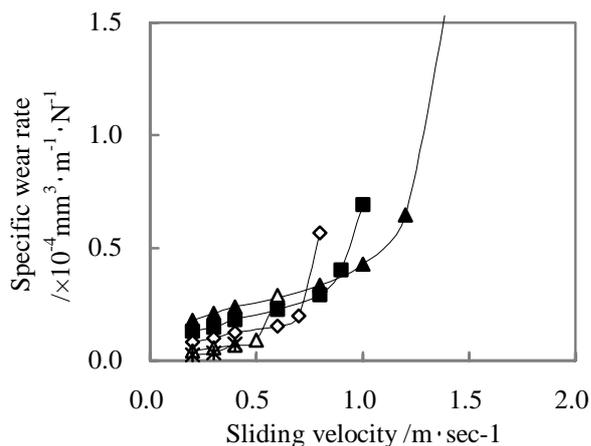


Fig. 13 Relationship between sliding velocity and specific wear rate for POM polymer.

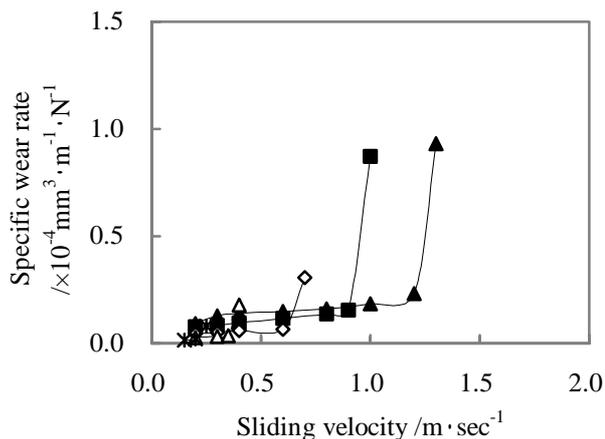


Fig. 14 Relationship between sliding velocity and specific wear rate for POM / HDPE blend polymer.

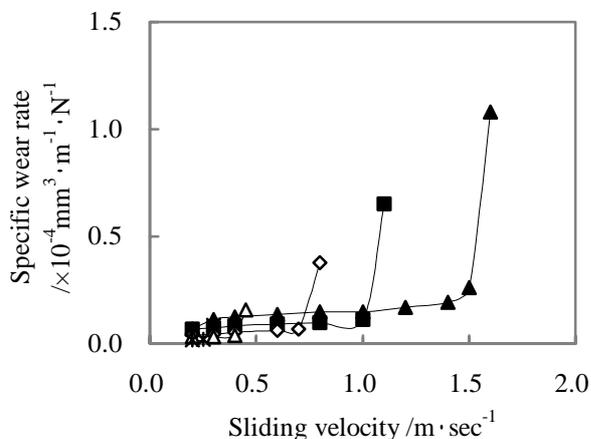


Fig. 15 Relationship between sliding velocity and specific wear rate for POM / B-HDPE blend polymer.

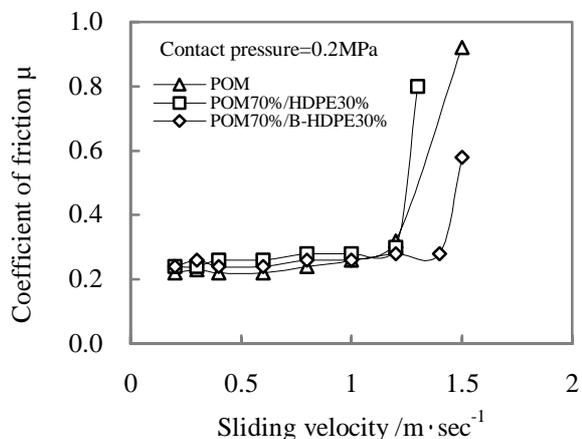


Fig. 16 Relationship between sliding velocity and coefficient of friction μ

接触圧力 0.2MPa における POM 樹脂、POM70% / HDPE30% ブレンド樹脂および POM70% / 30%B-HDPE ブレンド樹脂のすべり速度と摩擦係数 μ との関係を、Fig.16 に示す。POM 樹脂ならびに POM70% / HDPE30% ブレンド樹脂においては、すべり速度 1.2m/sec までは $\mu = 0.22 \sim 0.26$ の値を示しているが、すべり速度が 1.2m/sec を超えると、急激に摩擦係数が大きくなっている。一方、POM70% / B-HDPE30% ブレンド樹脂においては、すべり速度 1.4m/sec まで $\mu = 0.24 \sim 0.26$ であり、摩擦係数はほぼ一定の値を示している。

3.5 ブレンド樹脂材の限界 pv 値

POM 樹脂、POM / HDPE ブレンド樹脂および POM / B-HDPE ブレンド樹脂における限界すべり速度と接触圧力との関係を、Fig.17 に示す。また、各ブレンド樹脂の限界 pv 値と(3)式より求めた n 値を、Table 3 に示す。POM 樹脂に HDPE 樹脂を充填することによって、使用限界におけるすべり速度および接触圧力が増大し、HDPE 樹脂の充填量が 30wt% のとき、限界 pv 値は最も大きくなる。とくに、POM 樹脂に MFR 値の小さい B-HDPE 樹脂を 30wt% 充填したとき、限界 pv 値は POM 樹脂の約 1.5 倍となり、オイルを充填した POM 樹脂と同等の限界 pv 値を示している。一方、HDPE 樹脂を充填した場合は、充填量の増加にともなう n 値は逆に小さくなり、接触圧力の影響を受けやすくなるものと考えられる。

一般に、POM 樹脂に HDPE 樹脂を充填すると、POM 樹脂が連続相で HDPE 樹脂が分散相に相当する海島構造を示す^{4,5)}と言われている。スライダの摩擦面に POM 樹脂や HDPE 樹脂の一部が移着⁵⁾とすると、スライダとブレンド樹脂試験片との摩擦面に境界潤滑膜が形成され、それによって真実接触部の外側でのせん断抵抗が小さくなり、限界 pv 値が大きくなるものと考えられる。

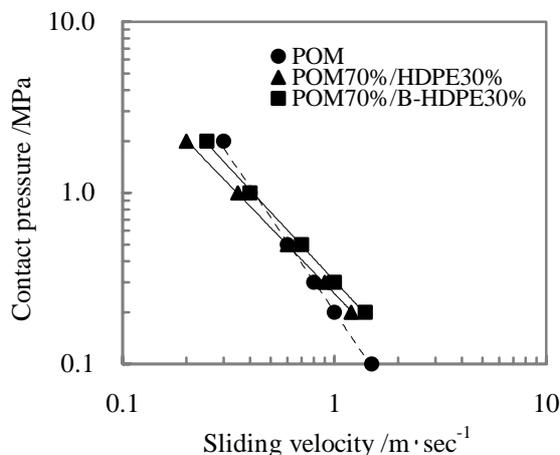


Fig.17 Relationship between sliding velocity and contact pressure for POM and blend polymers.

Table 3 The pv limit and n value of blend polymers.

Brend polymer	pv limit / MPa · m/sec	n value
POM85% / HDPE15%	0.23	1.46
POM70% / HDPE30%	0.26	1.28
POM55% / HDPE45%	0.23	1.23
POM85% / B-HDPE15%	0.25	1.47
POM70% / B-HDPE30%	0.31	1.33
POM55% / B-HDPE45%	0.27	1.24

4. 結言

高分子材料のトライボロジー特性を向上させるために、市販のポリアセタール樹脂(POM)、ならびにポリアセタール樹脂(POM)樹脂と高密度ポリエチレン(HDPE)樹脂とのブレンド材を調製し、無潤滑状態で炭素鋼(S50C)とのスラストシリンダ摩擦摩耗試験を行い、POM 樹脂の限界 pv 値に対する HDPE 樹脂のブレンド効果について検討した。そして、以下の知見を得た。

- 1) トライボロジー特性を改善させた市販のポリアセタール(POM)樹脂の限界 pv 値について検討した結果、オイルを充填した POM 樹脂の限界 pv 値は 0.3MPa·m/sec であり、POM 樹脂の 1.5 倍であった。
- 2) POM 樹脂にメルトマスマフローレイト(MFR:g/10min)値の異なる二種類の高密度ポリエチレン(HDPE)樹脂を充填し、摩耗率および限界 pv 値について検討した結果、MFR 値が小さい HDPE 樹脂を充填したブレンド樹脂の方が限界 pv 値は優れていた。
- 3) POM 樹脂に MFR=0.3g/10min)の HDPE 樹脂を 30wt% 充填したブレンド樹脂の限界 pv 値は 0.31MPa · m/sec であり、オイルを充填した POM 樹脂と同等の限界 pv 値を示した。

今後は、POM / B-HDPE ブレンド樹脂に金属・カーボンを充填し、 n 値の向上、ならびにさらなる限界 pv 値の向上を図る予定である。

参考文献

- 1) 片岡俊郎, 綾敏彦, 井上俊英, 岩元正聡, 門井晶, 小林裕和, 米谷起一, 千葉一正, 山本善行; 高分子新素材 One Point-1, エンジニアリングプラスチック, 1 (1989) 共立出版(株) .
- 2) Y. Yamaguchi and I. Sekiguchi, ASLE. Proc. 3rd International Conference Solid Lubrication, 187 (1984) .
- 3) H. Yelle, H. Benabdallah and H. Richards, Wear, **149**, 341 (1991) .
- 4) 嚴翼鎮, 齋藤篤; 材料, **50**, 3, 309(2001) .
- 5) 高橋博正, 齋藤篤; 材料, **52**, 4, 419(2003) .