ポリアセタール樹脂の限界 PV 値に与える摺動形態の影響

加 田 雅 博^{*1}・石 川 優^{*2}

Influence of Sliding Geometry on the Limiting PV Value of Polyacetal

Kada, Masahiro^{*1}/Ishikawa, Masaru^{*2}

The prediction in temperature of the sliding surface is one of the important issues so as to estimate the wear amount of polymeric materials such as polyacetal. For this purpose, it is essential to measure the critical sliding velocity or limiting PV values corresponded to both material properties and shape of test specimens. The limiting PV values have been measured only under a single sliding geometry in many cases, owing to the difficulty in applying different sliding geometries. In this study we discussed the influence of the sliding geometries on the limiting PV values of polyacetal and showed the total sliding area and dynamic friction coefficients were closely related to the limiting PV values.

Key words : Polyacetal/Limiting PV value/Sliding geometry/Sliding surface temperature

1. 緒 言

ポリアセタールはバランスのとれた良好な長短期機械物性、易成形性を併せ持つため、一種の固体潤滑剤としての性能を持った射出成形用機能部材として軸受、歯車、カム機構等に多く用いられている。一方で、摩耗による市場トラブルも絶えないことも事実である。ポリアセタールに限ったことではないが、金属を含め摩耗を事前に予測することが容易ではないことが原因の一つとして挙げられる。

樹脂メーカーのカatalogなどには、決められた試験片、試験条件で測定された摩耗データが紹介されているが、実際部品で同じ組合せで使用しても、形状、条件の違いから、摩耗量のみならず、材料の優劣順位さえもカatalog通りにならない場合が多い。樹脂に限ったことではないが、結局は事前のトライアンドエラーに頼らざるを得ない場合が多い。

本状況を鑑み、筆者らは、試験条件の影響¹⁾、試験片の影響²⁾について検討を行い、既に報告を行っている。試験条件の検討¹⁾によればポリアセタールの摩耗は、摺動面温度と非常に密接な関係にあり、摺動面温度が同じであれば、すべり速度、雰囲気温度などの条件が異なっても、比摩耗量は同等であることを述べた。このような検討はポリアミ

ドのような他の樹脂でも既に明らかにされている³⁾。

図面段階で、その形状、駆動条件から簡易的に摺動面温度を見積もることが可能となれば、設計現場において非常に有用な手法となる。摺動面温度は一般的に、閃光温度と試験片本体温度とに分類される⁴⁾。金属の摺動の場合、閃光温度が重要となるが、ポリアセタールの場合、試験片本体温度で議論することが可能である。なぜならば、別途ポリアセタールの摩耗の試験片本体温度に対する依存性と、機械的物性の雰囲気温度に対する依存性について検討を行ったが、両者に良い関係が得られているからである¹⁾。金属のように熱によって表層が酸化反応することがほとんどないことが理由であると推測する。したがって試験片本体温度の予測ができれば、摩耗予測が可能となることを期待できる。ポリアセタールの場合、限界 PV 値より少し高い条件で摺動すると、摺動界面から溶融樹脂が短期的に流出する現象が認められるため、限界 PV 条件においては、試験片本体温度はポリアセタールの融点である 162℃ 付近であるとみなすことができる。また、ポリアセタールのガラス転移温度は -85～-75℃ 程度であることから常識的な使用温度範囲においては大きな転移点がなく PV 値に概ね比例して摺動面温度が上昇する¹⁾。したがって限界 PV 値における温度を 162℃、PV=0 においては室温として、実際の PV の関係から比例的に摺動面温度（試験片本体温度）を見積もることが可能となる。ただし、限界 PV 値は単一の摺動形態で測定されていることが多く、異なる摺動形態の限界 PV 値に適用する手法が確立されていないのが現状である。そこで、本研究では、摺動形態の違いが限界 PV 値に及ぼす影響について検討を行った。

^{*1} ポリプラスチックス㈱ テクニカルソリューションセンター
富士市宮島 973 番地 (〒416-8533)
Technical Solution Center, Polyplastics Co., Ltd.
973, Miyajima, Fuji-shi, Shizuoka 416-8533

^{*2} 山形大学工学部機能高分子工学科
Department of Polymer Science and Engineering, Faculty of
Engineering, Yamagata University
2007. 12. 10 受理

2. 試験方法

2.1 試料

摩耗の評価には分子量 68200, MFR 9 の共重合ポリアセタールを用いた。

2.2 摺動形態の定義

本論文における“摺動形態”は以下の 3 種類に分類定義した。

- ①両連続摺動形態
- ②片側間欠摺動形態
- ③両間欠摺動形態

①の両連続摺動形態とは、JIS K 7218/A 法にて指定されている試験形態が代表例であるが、摺動接触面が面と面であり、摺動する互いの部品の全摺動面が見掛け上、常に摺動接触している形態のことを指す。具体的には、平板摩擦クラッチなどがこれに該当する。②の片側間欠摺動形態は JIS K 7218/B 法に指定されている試験形態が代表例であるが、組み合わせられる片方の部品の全摺動面は常に相手部品と摺動接触しているがもう一方の部品は、全摺動面の内、摺動する部位が時間とともに変化し、全摺動面は相手部品と同時に摺動接触しない。具体的には、カム・スライダなどがこれに該当する。③の両間欠摺動は、ギヤが代表例であるが組み合わせられるそれぞれの部品の摺動する部位が互いに時間とともに変化し、双方の全摺動面が同時には摺動接触しない。

2.3 限界 PV 値の測定方法

本検討では種々形状の試験片を組み合わせる試験片形状の限界 PV 値に対する影響を調査した。JIS K 7218/A 法指定の中空円筒試験片（図 1）を回転側摺動試験片とした。相手材（固定側）として、回転側と同じ中空円筒試験片、本中空円筒試験片の摺動部を半周除去し、半周分だけ接触するように加工したものや、種々形状のプレート試験片、小型円筒試験片（10 φ）を図 2 に示すように組合せた。

限界 PV 値は次の方法で測定した。いずれの組合せにおいても荷重 19.6 N 一定として摺動させ、30 分の間に摺動部から樹脂が溶融流出しない最大のすべり速度を、限界すべり速度と定義した。面圧は各試験片の接触面積を考慮して別途算出し、本面圧と実験で得られた限界すべり速度の積が限界 PV 値と定義される。30 分の試験中に摺動部から樹脂が溶融流出しない場合、試験片を交換し、すべり速度を 1 cm/s 増した条件で試験を行った。試験時の雰囲気は 23℃, 50% RH とした。

3. 試験結果

図 3, 4 に限界すべり速度、限界 PV 値の結果を示した。10 φ 円筒の限界 PV 値は、ヘルツの接触式による面圧を使用し算出した。図 3 から摺動形態によって限界 PV 値が大きく異なることが分かる。一方、図 4 の限界すべり速度に関しては、限界 PV 値ほどの大きな依存性は有していないものの、特異的な傾向を有していた。

4. 考 察

ポリアセタールの限界 PV 値は、巨視的な摺動面温度が融点（162℃）に達する条件である⁵⁾と考えられる。与えら

Fig. 1 Sleeve specimen in accordance with JIS K 7218/A-method

Fig. 2 Combination of specimens

Fig. 3 The relationship between limiting PV values and contact length

Fig. 4 The relationship between critical sliding velocity and contact length

れた駆動条件、試験雰囲気温度、試験片形状から 162℃ まで温度が上昇する要因を以下に考察していく。

本検討においては、摺動面温度は、放熱条件を同等とすると単位面積あたりの発熱量に依存すると仮定した。図 1

のような中空円筒試験片同士の場合、片側の摺動面積は 200 mm^2 であり、摺動による発熱が組合せ上下試験片で計 400 mm^2 の面積に熱が流入することになる。一方、図 2 の最右図のように、片方を中空円筒試験片、相手材を小型円筒試験片とした場合、摺動面積は中空円筒試験片の 200 mm^2 とヘルツ接触している小型円筒試験片の曲面接触微小面積であり、トータルで概ね 200 mm^2 と見なせる。すなわち、摺動発熱が同じとすれば、中空円筒試験片同士に比較し、中空円筒試験片と小型円筒試験片の組合せは温度上昇量が倍となると概算できると考えられる。片方を中空円筒試験片、相手材を小型円筒試験片とした場合、連続的に摺動している小型円筒試験片が大きく上昇すると考えがちであるが、著者らの検討²⁾によれば、ポリアセタール樹脂同士を中空円筒試験片と小型円筒試験片で組み合わせた場合、連続摺動側である小型円筒試験片の方の摺動面温度が高いものの、両試験片の摩耗の傾向から両者の摺動面温度が大きくは異ならないことがわかっている。熱流は常に温度の低い方に流れることと、ポリアセタール樹脂の熱伝導率の低さから間欠摺動側である中空円筒試験片の摺動面温度が低下しにくいことなどが考えられる。もちろん、本実験で行ったようなすべり速度よりも十分に低いすべり速度で、限界すべり速度に達するように摺動面への荷重値を大きく設定すれば、間欠摺動側の冷却効果が大きくなり、両試験片の温度差が大きくなることは十分に考えられる。したがって、本研究の目的である摺動形態が異なった場合の摺動面温度予測手法をあらゆる駆動条件領域に広げようとする場合は、サーボビューなどを用いた詳細な検討が必要となってくるであろう。また、ポリアセタールの場合、摺動面荷重が過大になるような条件では強度面で使用不能となる場合が多く、限界 PV 値が問題となるのは荷重条件が低くすべり速度が速い場合が殆どである。一方で樹脂市場では、メーカーのカタログ値として限界 PV 値が多く紹介されているが、実際には図 2 の最左図に示すような中空円筒試験片同士で測定されたものが記載されていることが殆どであり、他の摺動形態における限界 PV 値や限界すべり速度を概算でも見積もる手法がなく、簡易的に概算する手法の確立が急務である。したがって、条件によっては概算精度が異なる可能性はあるものの本検討においては、発熱量が同じ場合、摺動面温度は熱が流入する総摺動面積に比例すると仮定し、連続摺動側と間欠摺動側の温度差については無視して、実験結果の考察を行った。

放熱条件を同じとした場合、いずれの組合せにおいても限界すべり速度においては、式(1)で与えられる単位面積当たりの摺動発熱量 Q_s が一致すると仮定する。

$$Q_s = \frac{\mu W V}{S_u + S_L} \quad (1)$$

Q_s : 単位面積当たりの摺動発熱量 ($\text{J}/\text{m}^2\text{s}$)

μ : 摩擦係数, W : 荷重 (N), V : すべり速度 (m/s)

S_u : 上側試験片の摺動総面積 (m^2)

S_L : 下側試験片の摺動総面積 (m^2)

式(1)の分子は仕事率に相当する発熱の項であり、これを上下試験片の総摺動面積で除したものである。本来は一般的なアプローチとして、更に放射や対流によって持ち去ら

Fig. 5 Parameters to estimate critical sliding velocity and limiting PV value

Fig. 6 Experimental limiting PV values and estimated ones

れる熱を考慮することや連続摺動側と間欠摺動側の冷却効果の差を考慮すべきであるが、本検討においては概算方法を検討する目的から、このように発熱量を総摺動面積で除したパラメーターのみで考察を行った。

さて、この仮定に基づき、両連続摺動形態である中空円筒試験片同士の限界すべり速度 (限界 PV 値) から、片側間欠摺動形態の限界すべり速度 (限界 PV 値) を見積もる式は次の如く導出できる。すなわち、両連続摺動形態、片側間欠摺動形態それぞれにおいて限界 PV 値に達する条件においては、式(1)に示す単位面積あたりの摺動発熱量 Q_s が等しくなると置ける。したがって、図 5 に示すパラメーターを用いると、

$$\frac{\mu_1 W V_1}{S_{U1} + S_{L1}} = \frac{\mu_2 W V_2}{S_{U2} + S_{L2}} \quad (2)$$

とおける。限界すべり速度 V_2 について解くと、

$$V_2 = V_1 \times \frac{S_{U2} + S_{L2}}{S_{U1} + S_{L1}} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (3)$$

$$P_{V2} = V_2 \times \frac{W}{S_{U2}} \quad (4)$$

と解ける。本見積もり式を用い、各片側間欠摺動形態の限界すべり速度及び、限界 PV 値を求め、実験値と比較した結果を図 6 と 7 に示した。摩擦係数は別途測定を行った表 1 の結果を用いた。いずれとも極めて良い一致を示した。中空円筒試験片と小型円筒試験片の組合せなどの場合、中

Fig. 7 Experimental critical sliding velocities and estimated ones

Table 1 Dynamic friction coefficients for each contact length

Contact length	Dynamic friction coefficient μ
Approximately 0 mm	0.37
1.6 mm	0.40
3.2 mm	0.40
6.4 mm	0.36
18 mm	0.20
35.8 mm	0.22
71.6 mm (Sleeve specimen)	0.30

中空円筒試験片側は間欠的に摺動するため、連続的に摺動する小型円筒試験片に比較して摺動面温度が低くなり、結果として小型円筒試験片側の熱が中空円筒試験片側に移動し、温度が低くなると類推できる。樹脂の場合、その熱伝導率の低さから、間欠的に摺動する側の部品の温度が大きくは低下しないことも著者らの別の検討²⁾においても確認しており、このことが本検討のように、全く異なる摺動形態の

限界すべり速度の概算を可能とする理由であると考えられる。ただし荷重条件が大きいために限界すべり速度に達するすべり速度が非常に遅く、間欠摺動側の冷却効果が大きくなる場合や、相手材に熱伝導率の高い金属部品を組み合わせる場合、連続側摺動部品と間欠側摺動部品の摺動面温度が大きく異なることも考えられ、本研究結果の応用範囲は更なる詳細な検討が必要である。ただし、単一の摺動形態で測定した限界 PV 値から、異なる摺動形態の限界すべり速度や限界 PV 値を見積もる手法が存在していない現状において、本知見は大きな設計ミスを防ぎたいための設計指標となり得る。

5. 結 言

本検討においては、摺動形態の違いが限界 PV 値に及ぼす影響について検討を行った。中空円筒同士、中空円筒試験片と小型円筒試験片の組合せの限界すべり速度を見積もるためには組合せ各試験片の総摺動面積、摩擦係数が大きく影響することが分かった。適用範囲については注意が必要ではあるものの、各種部品の設計限界の概算に適用可能と考える。適用範囲拡大のためには、今後 CAE などを用いた詳細な検討が必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Kada, M. and Ishikawa, M.: *Applied Polymer Science*, **100**(5), 4212(2006)
- 2) 加田雅博, 石川優: *トライボロジスト*, **51**(2), 147 (2006)
- 3) 渡辺真, 山口春千代: *日本潤滑学会通常総会研究発表会予稿集*, **29**, 193(1985)
- 4) 野呂瀬進: *トライボロジスト*, **51**(2), 32 (2006)
- 5) 加田雅博, 石川優: *トライボロジスト*, **52**(3), 223 (2007)