プラスチックの摩擦・摩耗の評価方法

加 田 雅 博*・龍 和 博*

1. はじめに

プラスチックの機構部品への応用は金属代替から始まり、ポリアセタール、ポリブチレンテレフタレート、ポリアミド等が採用されてきた。現在では独自の発展を見せ、数十種類のプラスチックが、各々の特長を生かした用途に使用されている。

金属からの代替の大きな理由の一つは、しゅう動部位に無給油で使用できることであったが、現在では用途拡大及び要求性能の高度化に伴い、より広範囲な条件・環境下での“無給油”に対応できるよう、材料自体が進歩している。その中でも、とりわけポリアセタール樹脂（以下POM）はバランスの取れた良好な長短期機械物性を併せ持つため、一種の個体潤滑剤としての性能を有する機能部材として軸受、歯車、カム機構等に多く用いられてきた。2001年の著者らによる独自の統計では、国内のPOM総需要およそ8万トンのうち2万トン程度がしゅう動する部品として用いられ、業界も広範囲に渡っている。

一方で、摩耗による製品トラブルが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大きな原因として挙げられる。機構部品を有する製品の摩耗予測は、強度予測と同様、重要なことと考えられるが、摩耗に関しては強度予測における「材料力学」のような普遍的な考え方が確立されておらず、事前にトライアンドエラーを繰り返さざるを得ない場合や、経験と勘に頼らざるを得

ない場合が多い。著者らも、顧客技術サポート、材料開発を実施するにあたり、多くの試行錯誤を繰り返してきた。したがって、市場のしゅう動部品の条件を再現できる試験方法の設定が重要となるが、的確な根拠を持った方法は見出されていないのが実情である。

このような状況の中、著者らの所属する研究グループでは、適切な摩耗評価法を模索しているが、現時点で、顧客サポート、材料開発に応用している考え方を紹介するとともに将来の展望について述べる。

2. 摩耗試験結果に与える要因

摩擦摩耗の特性に与える要因としては、様々なものがあるが、代表的なものに、しゅう動形態、すべり速度、面圧、温度、などが挙げられる。ここではこれらがどのように結果に影響を与えるかを述べる。

本解説における“しゅう動形態”を以下の3種類に分類定義した（図1）。

- ①両連続しゅう動形態
- ②連続間欠しゅう動形態
- ③両間欠しゅう動形態

①の両連続しゅう動形態とは、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、スラスト式摩擦摩耗試験とも言われている。しゅう動接触面が面と面であり、しゅう動する互いの部品の全しゅう動面が見掛け上、常にしゅう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の連続間欠

図1 しゅう動形態の分類

* Kada, Masahiro/Ryu, Kazuhiro
ポリプラスチック(株) テクニカルソリューションセンター
富士市宮島 973 (〒416-8533)
2006. 2. 17 受理

図2 試験方法による摩耗傾向の違い

図3 試験条件による摩耗傾向の違い（スラスト型摩擦摩耗試験）

しゅう動形態は 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しゅう動面は常に相手部品としゅう動接触している。一方、相手材のしゅう動面は、しゅう動する部位が時間とともに変化し、全しゅう動面は相手部品と同時にしゅう動接触しない。具体的には、カム・スライダなどがこれに該当する。③の両間欠しゅう動は、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しゅう動する部位が互いに時間とともに変化し、双方の全しゅう動面が同時にはしゅう動接触しない。

スラスト型摩擦摩耗試験は従来国内樹脂業界で最もポピュラーな評価法の一つであった。本方法は両連続しゅう動形態に相当するが、しゅう動樹脂部品が増加するにつれ、この評価法に関する種々問題点が明らかになっている。図2に歯車摩耗試験との比較結果を示す。

両評価法を比較すると摩耗の優劣順位が異なることが分かる。各樹脂メーカーでは各社の方法に基づいた摩耗データを紹介しているが、このように一定の評価法で測定されたデータを用いても、材料選定の指標にもならない場合があるので注意が必要である。また、同じ評価法においても、速度、面圧、温度条件が異なると摩耗優劣順位が異なる場合もある。図3に例を示した。すなわち、実際のしゅう動部品と試験しゅう動形態が同じであっても、条件が異なれば材料カタログ値から材料選定を行えない場合もあるため、注意が必要である。したがって、基本的にはカタログ摩耗

表1 部品形状に対応する試験方法

しゅう動形態	市場部品例	対応する試験方法
両連続形態	平板クラッチ	スラスト試験機
連続間欠形態	カム	回転間欠試験機 往復動試験機
軸受		軸受試験機 回転間欠試験機
両間欠形態	ウォーム	スラスト試験機
ギヤ		歯車試験機

データは大まかな判断指標に留め、実機で十分な確認を行うことも重要である。

著者らはこのような状況を少しでも改善すべく、顧客技術サポート、材料開発において、市場で想定されるあらゆるしゅう動形態、すべり速度、面圧、温度条件を考慮できる各種試験機をとりそろえ、評価を行ってきた(表1)。“歯車なら歯車試験機”というように、部品と試験片をなるべく近いものとし、速度、面圧条件も合わせて試験を行う。部品と試験片の形状を同じにできないものに関しては、最低限しゅう動形態を合わせて試験を行う。結局はそれぞれの部品の使用条件に可能な限り近づけるという方法であり、当然実機における再現は良くなる。しかし、現在単一試験片の結果と種々形状を有する実機部品の結果の関係をあらゆる状況において的確に説明できる考え方は確立されておらず、実機試験で評価を行うことが最も無難である。このようなことから摩擦摩耗試験方法はかなり多くのものが世の中に存在し、統一的な試験方法はないと言って良い^{1),2)}。ただし筆者らの最近の研究^{3)~7)}によって、試験条件、試験方法による結果の相違を説明できるようになりつつあり、今後の適切な試験方法の確立に期待が持たれる。これらの研究に基づき、次節以降で試験方法の違いと得られる結果の差異、およびその原因について述べる。

3. しゅう動形態

筆者らは、ポリアセタール製品の故障相談で最も多い連

図4 両連続しゅう動形態と連続間欠形態における摩耗量の違い

図5 選択的移着効果

連続間欠形態と両連続形態の関係について詳しく検討を行っている^{5)~7)}。図4は非強化ポリアセタール同士を異なるしゅう動形態で試験を行ったときの結果を示している。ただし、すべり速度、荷重、雰囲気温度は同条件で試験を行った。連続間欠形態で非常に特徴的なのは、連続側の摩耗量が間欠側に比較し極めて少ないことである。常にしゅう動している連続側の摩耗が少ないことは、一見不可解な結果であるが、異なる条件で測定を行っても、同様に連続側の摩耗が少なくなる。この結果は、移着現象と密接な関係があることが別途判明している(図5)。造語ではあるが、著者らはこれを“選択的移着効果”と呼んでいる。検証は別途行っているため、その詳細は別稿に譲る⁷⁾。“選択的移着効果”とは、概略次のような現象である。しゅう動を開始すると最初は連続側、間欠側双方から摩耗粉が発生する。発生した摩耗粉は、ほうきで床を掃くが如くそのほとんどが物理的に連続側によって掻き寄せられる。摩耗粉の一部は再びしゅう動界面に侵入し何れかのしゅう動面に再移着する。特に連続側に関しては間欠側に比較し、しゅう動面温度が高いため、摩耗粉が付着しやすく、かつ脱落しにくい。そのため移着の連鎖が生じやすい。一方、間欠側に関してはしゅう動面温度が低いため摩耗粉が付着しにくく、かつ脱落しやすい。また移着した摩耗粉が連続側により掻き取られやすいため移着の連鎖が起こりにくく、しゅう動面がむき出しになりやすい。以上が選択的移着効果である。さて、このことを踏まえると、潤滑剤の配合されたいわゆるしゅう動グレードを連続間欠形態に用いた際の特異な結果が明快に説明できる。すなわち、図6に示すように、しゅう動グレードを間欠側の材料として用いた場合と、連続側に用いた場合では、全く摩耗特性が異なることが、経験的にも実験結果からも分かっていた。この現象は従来の確に説明できなかったが、選択的移着効果によって説明が可能となる。つまり、間欠側にしゅう動グレードを用いた場合、選択的移着効果により連続側からの摩耗粉の発生は抑制される。

すべり線速度：5cm/s 荷重：98N ストローク：50mm 往復回数：30000回
プレート幅(間欠)：3.2mm ピン径(連続)：10φ
A, B: POMしゅう動グレード, POM: 一般POM

図6 しゅう動グレードを用いる部位の違いによる摩耗量変化

その結果、発生する摩耗粉はしゅう動グレードの摩耗粉が主となり、しゅう動グレードの摩耗粉が連続側しゅう動面を覆うようになる。このシステムにおけるしゅう動は、むき出しにされたしゅう動グレードの間欠しゅう動面と、しゅう動グレードの摩耗粉が移着した連続側しゅう動面の間で生じ、常に良い組合せのしゅう動を維持することが可能となる。一方、連続しゅう動側にしゅう動グレードを用いた場合は、これと逆の結果を生じ、最終的にむき出しにされた一般POMの面と、一般POMの摩耗粉が移着した連続しゅう動面の間におけるしゅう動となる。すなわちこのシステムでは、一般POM同士の組合せとなり、しゅう動グレードを用いる意味がなくなる。詳細は割愛するが、この考え方を応用すると、何かと解釈に苦しむしゅう動に関する種々現象が説明可能となる場合が多い。

さて、以上の考え方を踏まえると、いくつかのしゅう動部品を一つの試験方法に集約できる。すなわち、摩耗粉の移着の状態が同じであれば、同じ試験方法を適用できると考えると、軸受、カム、スライダなどは連続間欠しゅう動であるため、表1の回転間欠試験もしくは、往復動試験機のどちらか1本に絞り込むことが可能である。また、各部品の組合せ材料の連続/間欠の関係を、回転間欠試験に反映することも重要であることは言うまでもない。ただし、すべり速度、面圧、温度条件も適切に反映しなければならないが、この反映手法は近い将来検討を進める予定である。

4. 試験条件

前項において試験条件を適切に反映する手法を今後検討する旨述べたが、基礎的な概念は、従来から数多くの研究があり⁸⁾、著者らの研究グループでも種々研究を行っている^{3),4)}。考え方のキーワードは“しゅう動面温度”である。試験条件として、すべり速度、面圧、雰囲気温度などが挙げられる。これらの条件は組み合わせると無限大に存在するが、これらの条件をいかに組み合わせようと、しゅう動面温度が同じになれば、比摩耗量は同じになることが分かっている(図7)。同様な研究は以前から多く報告されているが、これを現場において応用する場合に問題となる

図7 各種条件依存性をしゅう動面温度依存性へ集約

のは、部品の形状、すべり速度、面圧、雰囲気温度条件から、実際にしゅう動面温度が何度になるかを予測することが難しいことである。単純に実機部品と試験におけるすべり速度、面圧、雰囲気温度条件を正確に合わせこむだけではしゅう動温度は等しくならないことも別途分かっている。軸受などの部品を回転間欠試験などで試験を行う場合のように、部品形状が異なる場合、どのような条件設定を行えば良いかを明確することが今後の課題である。

5. 最後 に

摩擦摩耗の分野はあらゆるしゅう動形態、あらゆる条件をすべて効率的、統一的に解析できる手法が確立されていないのが現状である。したがって、実機部品の形状、条件に極力合わせることが重要となる。しかし今回述べたようにポイントをしっかりと押えていけば特定のしゅう動形態、しゅう動条件については限られた試験片の中で、正しい傾向を把握できることも事実である。今後、効率的かつ統一

的な評価方法、摩擦予測手法が確立されることが望まれる。

参 考 文 献

- 1) 市橋俊彦：トライボロジー入門講座教材, **33**, 71 (2002)
- 2) 竹内栄一：熱処理, **41**(11), 131 (2001)
- 3) 加田雅博, 中村俊明, 石川 優：成形加工シンポジア'04, 273 (2004)
- 4) 加田雅博, 中村俊明, 石川 優：トライボロジー会議, 171 (2005)
- 5) 加田雅博, 中村俊明, 石川 優：成形加工'05, 303 (2005)
- 6) 加田雅博, 中村俊明, 石川 優：トライボロジー会議, 173 (2005)
- 7) 加田雅博, 石川 優：トライボロジスト, **51**(2), 147 (2006)
- 8) 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)