



入門講座

鉄鋼の試験/評価-6

摩擦・摩耗試験

Friction and Wear Test

佐々木信也

Shinya Sasaki

東京理科大学
工学部 機械工学科
教授

1 はじめに

今日、機械システムで発生する故障の原因は、トライボロジーに関連するものが大半を占めるとも言われている。このことからトライボロジー技術は、機械システムの信頼性や性能の向上など、製品の競争力強化に資する一つのコア技術と捉えることも出来るはずであるが、一般の認識としてはトラブルシューティングのための技術という枠を超えることは稀である。ではなぜ、トライボロジーはトラブル発生後の対策技術に甘んじることが多いのか。その一端は最近の機械設計手法の変貌にも見る事ができよう。近年、CAEの目覚ましい発展とその活用により、シミュレーションによる構造強度や熱流体性能等の予測精度が大幅に向上し、これまでモデル実験などに掛けていた時間やコストを大幅に削減できるようになった。さらに、計算機上の思考実験故に可能となった設計自由度の拡大により、実験のみからでは考えられなかったような最適解の導出やトラブル予測などの付加的効果も生み出している。その一方でトライボロジーに係わる機械要素については、理論体系の整った流体潤滑域は別として、依然としてその設計根拠を経験式もしくは実証的データに頼ることが余儀なくされている。これはトライボロジー、特に摩擦・摩耗現象については、これらを説明できる理論体系が存在しないことに起因している。そのため、特に新規の摺動形態や摺動条件を対象とする場合には、机上の設計のみで性能を予測することやトラブルを未然に防ぐ対策を講じることは難しい。機械システムの設計・製作、運転、メンテナンスといった製品サイクルのあらゆる段階において、摩擦・摩耗のメカニズムや発現する特性を把握する上での判断根拠を取得する方法として、摩擦・摩耗試験が果たす役割は大きい。

2 摩擦・摩耗試験の目的と分類

摩擦・摩耗試験は、界面での物理化学的現象の解明を目的とするものから、機械要素や機械システムの性能・信頼性評価に至るまで、その評価の対象と目的ならびに手法は、広範かつ多岐に渡っている。試験結果をどのように評価に活用するかはその目的によって異なるが、いずれの場合でも目的に適した情報が提供されなければ、如何に多くのデータを積み上げようと意味をなさない。摩擦・摩耗試験は、まず目的と意義によって次の3つに種別される¹⁾。

- ①カテゴリーⅠ 摩擦・摩耗メカニズムの科学的追究を目的とする。
実機との相関よりも、現象や機能発現の基礎的な解明に主眼を置くもので、試験時間やコストを低く抑えられることが利点。試験方法の中には、工業規格として標準化されているものも多い。
- ②カテゴリーⅡ 摺動材料や潤滑剤の品質管理やスクリーニングを目的とする。
実機との相関性を考慮し一定枠内での優劣評価に主眼を置くもので、実機よりも過酷な条件下での加速試験として用いられることも多い。
- ③カテゴリーⅢ 実機での摩擦・摩耗を再現することを目的とする。
実機との一致を前提として性能確認や信頼性評価に主眼を置くもので、台上試験と呼ばれる歯車試験やエンジン試験など、大がかりな装置を用いた長時間に渡る試験が多い。

上記の分類は、決して摩擦・摩耗試験方法や試験機の分類に対応するものではない。例えば、もっとも簡便な試験方法

の一つであるピンオンディスク型試験は、通常、カテゴリーⅠの用途に用いられることが多いものの、カテゴリーⅡの用途に適用することもやぶさかでない。重要なことは、摩擦・摩耗試験はその目的と意義を理解した上で、試験方法や試験装置を選択することである。

3 摩擦・摩耗試験の特徴

我が国のトライボロジー研究の礎を築いた曾田範宗先生は、曾田式四球摩耗試験機をはじめとして数々の摩擦・摩耗試験機の開発を指導し、「トライボロジーの試験研究について」と題して次のような言葉を残されている²⁾。

「トライボロジー研究に関する試験機、測定機がかかわるの深い現象のなかで、もっとも重要な評価点となるのは摩擦の大小、焼き付き限界点の高低、摩耗の大小、疲労剥離寿命(疲労寿命)の長短の4点がまっ先に挙げられよう。しかし上にあげた評価点の現象をみると、その値はばらつき易かつきわめて不安定であるのがふつうで、むしろこのトライボロジー関連値の特定しにくさと不安定さのなかにこそトライボロジーの実態があるともいえるのである。

トライボロジー現象にこうしたばらつきや不安定さが本質的に存在または発生し易いことによって、トライボロジーの関連試験機や測定機の計画と利用において、摩擦現象にかかわる微妙な誤差原因は徹底的に除去する必要性があり、具体的には試験機の剛性増や熱変形除去による片当り防止、固形粒子の混入排除、機械の組みつけすき間の正しい調整管理等は、トライボロジーに関わる試験研究においては特に重要な意味をもつものである。」

“ばらつきや不安定さの問題が常に根底にあるのが摩擦・摩耗試験の本質である”とは、まさに的を射た指摘であり、計測制御技術の進歩によって格段に精度と情報量が向上した今日の摩擦・摩耗試験においても、その本質は変わっていない。

3.1 ばらつきと不安定性

試験結果のばらつきと不安定性は、摩擦・摩耗の本質的な問題ではあるが、試験を行う際には極力その原因を排除する必要がある。摩擦・摩耗試験において想定される、ばらつきや不安定性をもたらす因子を表1に示す。

一般に摩擦・摩耗試験はマクロな現象を評価の対象にするが、基本となる現象は摩擦表面における原子・分子レベルの状態によって支配されるため、雰囲気湿度の違いや試験片の極僅かな汚れなどでも試験結果に大きな違いとなって現れることがある。また、摩擦面の状態は試験中に常に変化したが、変化の具合は摩擦面からの摩耗粉の排出し易さなど、2次的な因子によっても影響を受けることになる。

相対運動という動的かつ拘束されない系を扱うということも摩擦・摩耗試験の特徴の一つである。通常、摩擦・摩耗試験条件として明記されるのは、摺動方法、試験片形状、摩擦速度、荷重、温度、摩擦時間、潤滑状態などであり、試験機の荷重付加方式や摩擦力測定方式、ましてや装置剛性まで記述されることはほとんどない。しかし、試験機の静剛性および動剛性は摩擦面の振動や接触状態、摩耗粉の排出挙動などに直接関与するとともに、摩擦力の計測にも影響を及ぼすことは古くから指摘されている³⁾。実機との相関を必要とするカテゴリーⅡおよびカテゴリーⅢの試験機の場合には、剛性特性について特に留意が必要である。

表1 摩擦・摩耗試験のばらつきや不安定性をもたらす因子

プロセス	項目	原因となる因子
試験片の準備	素材	組成、均一性、純度、内部欠陥、試験片使用履歴
	加工	形状精度、表面粗さ、加工変質層
	表面処理	膜厚、焼き入れ深さ、酸化
	洗浄	吸着物、コンタミの残存、洗浄液のしみ込み
	取り付け	取り付け不良、試験片の汚染、損傷
試験方式・条件	雰囲気	湿度、雰囲気組成、有機汚染物質、粉塵
	温度	温度測定法、測定点、温度制御方式
	荷重	荷重負荷方式、荷重制御方式
	速度	駆動方式、速度検出方法、速度制御方式
	潤滑	潤滑油性状、供給方式、油量
試験中の測定	摩擦測定	摩擦力測定方法、固有振動数、剛性
	外乱	振動、電磁ノイズ、漏電流
試験後の計測	重量測定	摩耗粉の除去、潤滑油・洗浄液のしみ込み、試験片の磁化、摩耗以外の試験片破損
	形状測定	測定方法、測定精度、測定箇所
その他	データ数	測定回数

摩擦・摩耗試験は、データ取得までに複数のプロセスと時間を必要とすることも特徴の一つと言える。摩擦試験片の準備に限っても、素材の製造・加工から表面仕上げ、洗浄、取り付けまで、試験実施者が直接操作する以外のところでも多くのプロセスが関与している。これらの個々のプロセスにおける不確かさや誤りは、累積もしくは連成されて最終的な試験結果に影響を及ぼすことになる。また、データ取得までに時間がかかるため、データ点数を増やすことには自ずと限界があり、統計的にデータのばらつきを解析することが難しい場合も多い。

3.2 摩擦・摩耗試験における標準化

摩擦・摩耗試験におけるデータのばらつきと再現性の問題を学術的に取り上げたのは、わが国では日本学術振興会第6委員会（1957）が最初と言われている⁴⁾。1964年にはOECD摩耗部会の発足を受けて日本摩耗部会が結成され、摩耗研究の調査⁵⁾が実施された。そしてこれを引き継ぐ形で日本潤滑学会（現日本トライボロジー学会）摩耗部会において「試験機の差異に基づく摩耗量の相違」についての協同研究⁶⁾が行われた。国際的な取り組みとしては、VAMAS (the Versailles Project on Advanced Materials and Standards) の中に摩耗試験に関するワーキンググループ (TWA1 Wear Test Methods)⁷⁾が作られ、プロジェクト発足以来、試験結果のばらつきや再現性に関しての問題を解消するとともに、試験法の標準化等を目指した活動⁸⁻¹⁰⁾が行われた。摩擦・摩耗試験方法の標準化や体系化に関しては、ドイツのBAM（ドイツ連邦材料試験研究所）が国際的な先導役を果たしてきた。国内では1999年に日本機械学会基準としてJSME S013「摩耗の標準試験方法」が策定され、2009年に改定が行われている¹¹⁾。また、2007年には日本トライボロジー学会より「摩擦・摩耗試験とその活用」¹²⁾が出版されている。このような長年に渡る取り組みの中で、世の中の技術動向に応えるべく新材料や特殊環境下での新しい試験法などが提案され、国際標準規格のISOやASTM、DIN、JIS、JASOなどの国内外の工業標準、産業界における社内評価基準などの策定に反映されている。

しなしながら、試験結果のばらつきと再現性の問題は解決されるには至っておらず、一般的な材料強度試験などと比べるとデータの汎用性は著しく劣るのが現状である。試験結果のばらつきと再現性に対する現実的な解決策は、目的に応じた標準試験機を選定して利用する以外に策はない。実機との対応という点では、各企業は製品に応じて独自の社内基準を持ち、これに対応した試験方法を実施している。一方、より汎用性のある試験法の確立を目指し、同一もしくは同種の試験機を用いてデータのばらつきを極力抑えるための取り組みもある。その前提になるのは、世界的なシェアを持つ市販

装置の存在である。市販装置がデファクトスタンダードとして認められるためには、評価目的に応じてその試験機に最適な試験法の標準化が図られる必要がある。同一機種の試験機を使用する利点は、試験条件の検証可能なデータを複数の機関から得ることができる点にある。データ解析や実機との対応付けなどの高度なノウハウが複数機関によって蓄積・共有化されることにより、デファクトスタンダードとしての国際的な地位が築かれていくことになる。このようなデファクトスタンダード試験機で重要になるのは、オペレータに依存しない正確なデータ取得が常に可能であることを保証することである。デファクトスタンダード機の一つであるドイツOptimol社のSRV試験機の場合には、毎年、国際的な規模でのラウンドロビンテストを実施し、装置メンテナンスの徹底とヒューマンエラー排除のための試験マニュアルの更新などを同時に推進することで、データの品質を担保する仕組みを確立している¹³⁾。

4 摩擦・摩耗試験機

通常、摩擦・摩耗試験は、一对の試験片を一定の荷重と速度のもとで摺動させ、このときの摩擦力を計測するとともに、所定距離摺動後の摩耗量を測定することによって行う。摩擦係数の測定方式には、歪ゲージやロードセル、回転トルク計等で摩擦力を直接計測する方法、駆動モータの負荷電力から変換して求める方法、振り子式摩擦試験機のように摩擦による振動減衰挙動から求める方法、斜面上においた物質が滑り出す角度から最大静止摩擦力を求める方法などがある。測定する摩擦係数の値は、概ね 10^{-4} から 10^2 までの範囲で変化する。

摩耗量測定は、試験片の重量変化から体積を求める方法と直接的に形状変化を計測する方法がある。重量変化は全体の摩耗量を簡便に測定できるという点で優れているが、一般的な電子天秤の分解能では10g程度の試験片に対し μg 以下の変化を計測することは難しく、耐摩耗性に優れる材料の評価には適用が難しい。また、油潤滑下での試験では、摩耗しているにもかかわらず試験前より質量が増えるようなことも起こる。これは試験片への潤滑油のしみ込みが原因なのだが、影響が顕著でない時は見逃す危険もあるので注意が必要である。形状変化から摩耗量を求める場合、共焦点レーザ顕微鏡や白色干渉顕微鏡の普及により3次元形状計測が比較的容易になってきたとは言え、摩耗体積全体を直接計測することは一般的ではない。通常は触針式表面粗さ計によって摩耗痕深さや断面積を計測し、これから全体の体積を概算する方法が用いられている。ボール試験片の場合には摩耗痕径から摩耗体積を算出する他、摩耗痕径そのものを摩耗の指標として用いることもある。

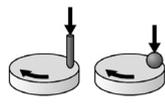
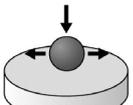
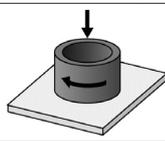
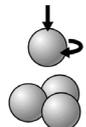
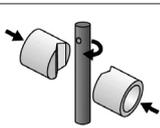
4.1 摩擦・摩耗試験機の種類

摩擦・摩耗試験は、試験片形状とすべり形態によって多種多様な組み合わせが可能となるため、表2に示すような様々な摺動形態に対応する装置が利用されている。ここに示した摩擦・摩耗試験機は先に述べたカテゴリー I や II の用途に利用されるもので、基本的に評価結果をそのまま実機に適用することは難しい。実機での特定の摩擦・摩耗現象を単純化してモデル試験を行う場合、摩擦形態は少しでも実機に近い状態が良いと考えがちであるが、形態一致の過剰な追求はむしろ本質を見失わせる危険性もあるので注意が必要である。

(a) 回転式ボールオンディスク型試験機

ボールオンディスク型試験機は、図1に示すように回転部と固定したボールを押し当てる構造で、摩擦・摩耗に関連する学術論文の約半分がこの試験方法を採用しているとも言われるように、最も普及している摩擦・摩耗試験機である。また、試験片形状がシンプルなため難加工性の新素材など、様々な摺動材料が入手し易いことも大きな利点の一つで、大学や研究機関等で基礎研究に利用されている事例が多い。関連する工業規格としては、ASTMG99-05¹⁴⁾がある。また、JIS規格では、構造用ファインセラミックス材料の耐摩耗性評価法 (JISR1613-2010¹⁵⁾、JIS R1697-2011¹⁶⁾として、ボールオンディスク方式が標準化されている。ボールオンディスク方式

表2 摩擦・摩耗試験の形態と関連する工業標準

摩擦・摩耗試験	形態	関連する工業標準
(1) 回転ピンオンディスク式		ASTM G99 JIS R 1613 JIS R 1691
(2) 往復動 ボールオンディスク式 Optimol SRV		ASTM D5706 ASTM D5707 ASTM D6425
(3) スラストシリンダ式 AND EFM-III		JIS K 7218
(4) ブロックオンリング式 FALEX LFW1 Timken E.P. Tester		ASTM G77 ASTM D2714 ASTM D3704
(5) 四球式 曾田四球式 Shell 4-ball E.P. Tester		ISO 20623 ASTM D2266 ASTM D2596 ASTM D2783 ASTM D4172 ASTM D5183 ASTM F2161 JIS K 2519
(6) ピン・ブロック式 FALEX Pin & Vee Block		ASTM D2625 ASTM D2670 ASTM D3233

は点接触から摩擦を開始するために当りを出しやすいという長所がある一方で、ボールの摩耗に伴って接触面積が増加するため、試験中に面圧が減少するという短所もある。なお、ボールの代わりにピンを用いる場合には、最初にピン端面の接触状態を管理する点に難しさがある。

(b) 往復動ボールオンディスク型試験機

上記の試験機とは試験片の形態は同じであるが、往復動摺動する点が異なる。シリンダ試験片を使い、側面をディスクと線接触させて試験する場合もある。関連する標準規格としては、ASTM D5706¹⁷⁾、ASTM D5707¹⁸⁾、ASTM D6425¹⁹⁾、ISO 19291²⁰⁾等があり、ドイツOptimol社のSRV試験機がこれに準拠している。SRV試験機は主に潤滑油添加剤の摩擦特性評価用に開発されたもので、後述するFALEX試験機²¹⁾と同様に国際的に普及している代表的なデファクトスタンダード機の一つである。

往復動摩擦でも振幅が小さい時に起こる摩耗損傷はフレッチング摩耗と呼ばれ²²⁾、一般の摩耗現象と異なる点も多いことから、評価試験に関しては特別な配慮が必要とされる。フレッチング試験機で重要となるのは、接線方向に数百μmまでの小さい相対振幅を任意に与えることが出来る駆動機構を持つことで、カム駆動²³⁾、油圧サーボ²⁴⁾、ピエゾ駆動²⁵⁾、電磁アクチュエータ²⁶⁾、磁歪アクチュエータ²⁷⁾方式が用いられている。

(c) スラストシリンダ型試験機

我が国では鈴木式摩擦試験機とも呼ばれ、プラスチック系材料の摩耗試験方法としてJIS規格 (JIS K7218-1986²⁸⁾) に標準化されている。試験形態は円筒の端面を平板試験片に押し付ける面接触方式のため、摩耗の進行によっても接触面積が変化しない。すべり軸受材料等の耐焼付性評価などに利用されることが多い。

(d) ブロックオンリング型試験機

円筒側面にブロック試験片を押し付ける試験形態のため、摩擦開始直後は線接触であるがブロック試験片の摩耗に伴い面接触になる。このため、摩耗の進行に伴い面圧が変化するという点で、ボールオンディスク方式と同様の問題を有して

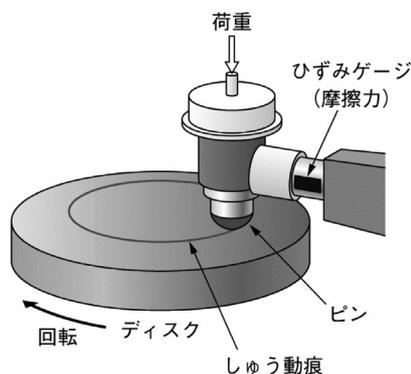


図1 ピンオンディスク摩擦・摩耗試験機の概略

いる。境界潤滑下での摩擦・摩耗特性評価方法としてASTM規格 (ASTMG77-05²⁹) などに標準化されており、FALEX社のLFW1試験機がこれに準拠している。また、チムケン式極圧試験機が、JIS規格 (JIS K2519³⁰) に標準化されている。

(e) 四球式摩擦試験機

四球式には、曾田四球式とシェル四球式の2種類の試験方法が用いられている。供試する試験鋼球の大きさが、曾田四球式では3/4インチ、シェル四球式では1/2インチである点に違いがある。曾田四球式はJIS K 2519³⁰、シェル四球式はASTM D 2783³¹ や ASTM D 4172³² 等の工業規格に準拠している。主に潤滑油の耐荷重能評価に用いられる。

(f) ピン・ブロック型試験機

ピン・ブロック方式はASTM規格 (ASTM D2670³³) などに採用され、FALEX社のPin & Vee Block試験機がこれに準拠している。回転するピンを2対のV字ブロックで挟み込み、その押付け力を連続的に増していくことで、潤滑油の耐荷重能評価に用いられる。

4.2 その他の摩耗評価試験

潤滑状態や相手材料に依らず、材料表面の耐損傷性に着目した評価が求められる場合がある。エロージョンやキャビテーションに対する耐性評価がこれに該当する。また、コーティング等によって改質された表面においては、密着性を評価するためのスクラッチ法が用いられる。

(a) スクラッチ試験

スクラッチ試験は、コーティング膜の密着性を評価する際に用いられる手法である。一般には、図2に示すようにダイヤモンド圧子を表面に押し付け、摩擦距離とともに押し付け荷重を連続的に増加させ、この時の摩擦係数の変化や表面損傷具合より密着性を評価する。コーティング膜の剥離は、AE

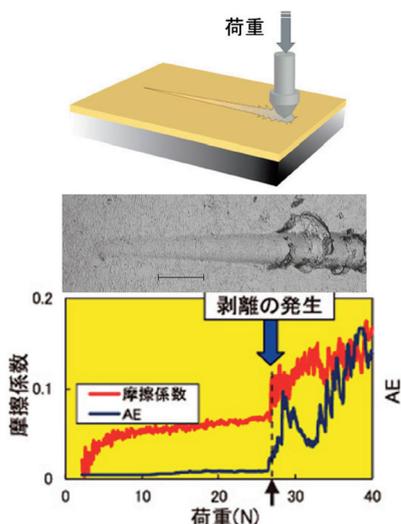


図2 薄膜のスクラッチ試験の例

信号によるインプロセスモニタリングを用いる場合もあるが、通常は試験後に光学顕微鏡によって表面観察して特定する。なお、薄膜が破壊した時の剥離荷重を以って密着性の指標とするが、その値は圧子形状や膜厚、試験装置などに大きく依存することから、引張強度のような汎用性はないことに留意すべきである。

(b) エロージョン摩耗試験

エロージョン摩耗とは、流体中の粒子が固体表面に衝突することにより表面を損傷させ、除去する現象である。通常、作用する粒子は固体であるが、高温高压蒸気雰囲気中のような場合には水滴そのものがエロージョン作用を及ぼす。実際の機械表面では、流体を構成する物質と表面との化学反応による腐食を伴うことも多く、表面に形成された腐食物質が除去されることで摩耗の進行が加速されることがある。このような摩耗現象は、エロージョン・コロージョン摩耗と呼ばれる。エロージョン試験法には、セラミックス材料を対象にした工業標準 (JIS R 1645)³⁴ や溶射皮膜を対象にしたブラストエロージョン試験³⁵ などが知られている。近年では、エロージョン粒子に微粒子を用いるマイクロスラリーエロージョン (MSE) 法³⁶ が開発され、硬質薄膜の評価に適用した事例³⁷ なども報告されている。エロージョン特性は評価条件が多岐に渡るため、用途と目的に合わせた試験方法を対象ごとに設定する必要がある。

(c) キャビテーション摩耗試験

キャビテーション摩耗は、液体中に形成された泡が固体表面近傍で崩壊する際にジェット流を生じ、これによる表面損傷に起因して摩耗が進行する現象で、ターボ機械のプロペラなどで多く発生する。エロージョン摩耗と同様に、表面化学反応による腐食を伴う場合には、キャビテーション・コロージョン摩耗として整理される。セラミックス材料を対象とする標準試験方法 (JIS R1646)³⁸ があるが、金属材料やコーティング材料の場合にも適用されることが多い。

5 おわりに

摩擦・摩耗試験の結果は、摩擦係数や摩耗量などの数値として表現され、その数値をもとにメカニズムの解釈や性能評価が行われることになる。摩擦・摩耗試験の場合に特に注意しなければならないのは、たとえば金属材料の引張強度などとは違って、それらの数値そのものには汎用性がないという点である。繰り返し述べたように、摩擦係数や摩耗量といった数値は、あくまでも個別の試験機のある試験条件において成立する値であって材料の固有値ではない。カテゴリー I では、同一実験系における完結性が担保されれば目的は達成されるが、カテゴリー II においては、他の試験データとの相関

が必要になる。それ故、試験方法の標準化やデファクトスタンダード機の利用により試験条件を狭い範囲に限定することで、データの汎用性を担保する方策が行われている。しかし、この方策からは実機との相関を得るには自ずと限界があるため、実機との一致を目的としたカテゴリーⅢの摩擦・摩耗試験がどうしても必要になる。一方、カテゴリーⅢの試験を初期のスクリーニング段階から単純に適用することは現実的ではない。評価対象とする摩擦・摩耗現象の支配因子を抽出してカテゴリー毎のモデル試験を最適化するとともに、各段階での試験結果と実機との相関が連続するよう一連の試験の流れを組み立てるところに、トライボロジストとしての腕が試されることになる。

参考文献

- 1) 佐々木信也, 志摩政幸, 野口昭治, 平山朋子, 地引達弘, 足立幸志, 三宅晃司: はじめてのトライボロジー, 講談社, (2013)
- 2) 神鋼造機株式会社Webサイトを参照,
http://www.shinko-zoki.co.jp/shinko_jp/shikenki/pdf/manuscript.pdf
- 3) 水野萬亀雄: 潤滑, 22 (1977) 3, 152.
- 4) 水野萬亀雄: 潤滑, 34 (1989) 5, 354.
- 5) 岩元兼敏: 潤滑, 15 (1970) 11, 752.
- 6) 笹田直: 潤滑, 14 (1969) 12, 671.
- 7) VAMASの活動, <http://www.vamas.org/>
- 8) H.Czichos, S.Becker and J.Lexow: Wear, 114 (1987) 1, 109.
- 9) H.Czichos, S.Becker and J.Lexow: Wear, 135 (1989) 1, 171.
- 10) Y.Emonoto and K.Mizuhara: Wear, 162-164 (1993), 1, 119.
- 11) 日本機械学会基準 摩耗の標準試験方法JSMES 013, 日本機械学会, (1999)
- 12) 摩擦・摩耗試験機とその活用, トライボロジー学会編, 養賢堂, (2007)
- 13) M.Woydt and J.EbrEcht: Tribotest Journal, 10 (2003) 1, 59.
- 14) ASTM G99-05 (2016): Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
- 15) JIS R1691 (2011): ファインセラミックスのボールオンディスク法による潤滑下の摩耗試験方法
- 16) JIS R1613 (2012): ファインセラミックスのボールオンディスク法による摩耗試験方法
- 17) ASTM D5706 (2011): Standard Test Method for Determining Extreme Pressure Properties of Lubricating Greases Using a High-frequency Linear Oscillation (SRV) Test Machine
- 18) ASTM D5707 (2011): Standard Test Method for Measuring Friction and Wear Properties of Lubricating Grease Using a High-Frequency, Linear-Oscillation (SRV) Test Machine
- 19) ASTM D 6425 (2011): Standard Test Method for Measuring Friction and Wear Properties of Extreme Pressure (EP) Lubricating Oils Using SRV Test Machine
- 20) ISO19291 (2016): Testing of lubricants-Tribological test in the translatory oscillation apparatus-Determination of tribological quantities for oils and greases in the translatory oscillation apparatus
- 21) 米国FALEX社, <http://www.falex.com/>
- 22) R.B.Waterhouse, 佐藤準一訳: フレッチング損傷とその防止法, 養賢堂, (1984)
- 23) 志摩政幸: トライボロジスト, 34 (1989) 5, 364.
- 24) O.Jin and S.Mall: Effects of slip on fretting behavior: experiments and analyses, Wear, 256 (2004), 671.
- 25) E.Mariu, H.Endo, N.Hasegawa and N.Mizuno: Wear, 214 (1998), 221.
- 26) A.Iwabuchi: Wear, 151 (1991), 301.
- 27) B.D.Leonard, F.Sadeghi, S.Shinde and M.Mittelbach: Wear, 274-275 (2012), 313.
- 28) JIS K7218 (1986): プラスチックの滑り摩耗試験方法
- 29) ASTM G77-05 (2010): Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test
- 30) JIS K 2519 (1995): 潤滑油耐荷重能試験方法
- 31) ASTM D 2783-03 (2009): Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Fluids (Four-Ball Method)
- 32) ASTM D4172-94 (2010): Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method)
- 33) ASTM D2670-95 (2010): Standard Test Method for Measuring Wear Properties of Fluid Lubricants (Falex Pin and Vee Block Method)
- 34) JIS R 1645 (2002): ファインセラミックスの噴流エロージョン試験方法
- 35) 桑嶋孝幸, 高橋幾久雄, 富田友樹, 大森明: 日本金属学会誌, 67 (2003) 9, 444.
- 36) <http://www.palmeso.co.jp/>
- 37) 岩井善郎, 浅海悠, 水野顕, 宮島敏郎, 本田知己, 山本謙司, 伊藤弘高: 日本機械学会論文集C編, 75 (2009) 749, 171.
- 38) JIS R1646 (2002): ファインセラミックスのキャビテーションエロージョン試験方法

(2016年10月19日受付)