真空中におけるセラミックスの摩擦・摩耗 (ピン・ディスクによる摩擦・摩耗試験)

久 門 輝 正*

(受理1999年3月26日, 掲載決定1999年6月5日)

Friction and Wear of Ceramics in Vacuum
(Pin on Disk Type Wear Test)

Terumasa HISAKADO

(Affiliation Faculty of Engineering, Gunma University 5-1, Tenjinchō 1-chōme, Kiryu-shi, Gunma 376-8515)

(Received March 26, 1999, Accepted June 5, 1999)

1. はじめに

同種の組合せのとき真空中における摩擦係数や摩耗率は大気中に比べて増加することはすでに20年前に報告¹⁾され, それ以後も雰囲気の影響を実験的に明らかにした報告²⁻¹⁰⁾が多数発表されてきている. 真空中においてインジウム膜によって潤滑すると Si_3N_4 と SUS440C の組合せで摩擦係数が0.02になり, 膜の寿命もこの組合せが最長になることが明らかにされている⁷⁾. 最近ではセラミックスのトライボ特性を改善するために異種のセラミックス粉末や金属粉末を添加したり, セラミックウイスキーを含有させる方法が試みられている¹¹⁻¹³⁾. しかし, これらの複合化材の真空中のトライボ特性はまだ明らかにされていないのが現状である.

筆者らが真空中におけるセラミックスの摩擦・摩耗に及ぼす荷重と温度の影響を実験的に明らかにしてきた¹⁴⁻¹⁶⁾. その結果¹⁴⁾によれば, 実験条件にもよるが真空中の室温における比摩耗量(摩耗体積を摩擦距離と荷重で除した値をいう)の方が, 窒素, 酸素やアルゴン中のものよりも小さくなることがわかった. また, 摩耗面のトポグラフィーの解析から摩耗機構を推定してきた. したがって, 本稿では摩耗面のトポグラフィーの解析から

摩耗機構をどのように推定できるかについて主として解説してみる.

2. 室温におけるピンとディスクの比摩耗量の関係¹⁵⁾

実験は油回転ポンプとターボ分子ポンプを用いて真空雰囲気圧力を 4.8×10^{-4} Pa にして行われ, 一部の実験は油回転のみを用いて0.27 Pa でも行われた. 荷重は5.9~13.7 N の範囲で変え, 摩擦速度は0.128~0.245 m/s の範囲で真空中無潤滑下の摩耗試験結果である. なお, ピン試験片としては直径15.2 mm の ZrO_2 球と12.7 mm の Si_3N_4 球を使用し, 4種類 (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC , Si_3N_4) のセラミックディスク(直径60 mm, 厚さ8 mm)を使用した. 温度は $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ である.

図1からピンの比摩耗量が増加するとディスクの比摩耗量も増大する傾向を示している. なお, 図中の実験値に対する試験片の組合せと荷重の符号表を表1に示す. また, 図中の実線は等比摩耗量直線を表す. ZrO_2 ピンの方が Si_3N_4 ピンに比べてピンとディスクともに比摩耗量が小さい. これは, ZrO_2 ピンの方が相手材への移着層の厚さや移着粒子の大きさも小さくなり, 相手に対する表面損傷を小さくしていることに起因している¹⁷⁾. それでも, ZrO_2 ピンと ZrO_2 ディスクの組合せでは, $W=13.7$ N になると $W=11.8$ N のときのピンの比摩耗量の約 6×10^3 倍, ディスクでは約 10^5 倍に急増する. こ

* 群馬大学工学部機械システム工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1丁目5-1)

図1 ディスクとピンの比摩耗量

図2 ディスクの比凝着量とピンの比摩耗量

表1 試験片の組合せと荷重の符号表

ピン	ディスク	5.9 N	7.8 N	9.8 N	11.8 N	13.7 N	6.9 N*
ZrO ₂	Al ₂ O ₃	■	■	■	■	■	
	ZrO ₂	●	●	●	●(●-)	●	
	SiC	▲	▲	▲	▲	▲	
	Si ₃ N ₄	◆	◆	◆	◆	◆	
Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	■	■	■	■	■	□
	ZrO ₂	●(●)	●	●	●	●	○
	SiC	▲	▲(▲)				△
	Si ₃ N ₄	◆(◆)	◆	◆	◆	◆	◇

* 大気圧下の実験値 () : 雰囲気圧力0.27 Pa

れは、摩耗面に大規模な凝着が生じ、引っかき損傷も急増したことに起因している。また、比較のために図中に白符号で大気圧下の実験値¹⁸⁾を図示した。ほぼ同じ荷重の黒符号の値と比較すると、同種の組合せ（SiC ディスクと Si₃N₄ ピンも同種と考える）のとき、大気圧下の方が真空中より比摩耗量は小さくなる。また、同種の組合せでは圧力の高い0.27 Paの方がディスクの比摩耗量が減少する。一方、Si₃N₄ ピンと ZrO₂ ディスクや Al₂O₃ ディスクの組合せでは大気圧下の方が比摩耗量は大きくなる。この原因として摩耗粉の移着と成長が雰囲気分子の吸着によって変化することが考えられる。すなわち、同種の組合せでは真空中の方が摩耗粉の移着と成長が促

進されるが、異種の組合せは混合摩耗粉のために真空中の方が抑制されると考えられる。

2.1 移着粒子の作用

図2は比凝着量とピンの比摩耗量の関係である。ここで、比凝着量とは荷重と摩擦距離当たりのディスクの増加体積である。この図からディスクの比凝着量が増加するほど引っかき作用や凝着作用が大きくなるためにピンの比摩耗量が增大する。ZrO₂ ピンと Si₃N₄ ディスクや SiC ディスクの組合せではディスク側にピンの摩耗粒子が移着しやすいことがわかる。

2.2 摩耗面トポグラフィによる摩耗の評価

2.2.1 微細条こんの平均深さ Sp/b

図3から実験値はかなりばらついてはいるが全般的には微細条こんの平均深さ Sp/b が増加すると硬い突起の掘り起こし作用や凝着作用によって表面損傷がかなり大きくなり、ピンの比摩耗量は増大する。なお、 Sp/b の値は摩擦方向に垂直に測定された断面曲線を横方向の間隔約1 μm ごとにパーソナルコンピュータに取り込み、図中の斜線のような微細条こんの断面積を見かけの長さで除して平均深さとして表した値である。ZrO₂ 同士や Si₃N₄ 同士の場合、 Sp/b の増加とともにピンの比摩耗量がやや減少する傾向がある。これは、ピンとディスクの摩耗粒子の相互移着が生じ、見かけ上 Sp/b は大きくなるが、移着粒子がピンを保護するためにピンの比摩耗量は減少する¹⁹⁾。

2.2.2 平均線深さ $l\sigma$

図4から全般的には平均線深さ $l\sigma$ が増加するとピン

図3 ピンの比摩耗量とピンの微細条こんの平均深さ (摩擦方向に垂直)

図5 ピンの比摩耗量とピンの平均突起先端半径 (摩擦方向に垂直)

図4 ピンの比摩耗量とピンの平均線深さ (摩擦方向に垂直)

の比摩耗量は増大する。ただし、 $l\sigma$ は断面曲線の平均線から最も高い突起までの高さである。この図で ZrO_2 同士や Si_3N_4 同士の場合、 $l\sigma$ の増加とともにピンの比摩耗量は減少する。これは、2.2.1項で述べたように摩耗粒子の保護作用が生じていることに起因している。

2.2.3 平均突起先端半径 r_0

図5 から平均突起先端半径 r_0 が増加するとピンの比

摩耗量は減少する。これは真実接触面積が一定のとき、 r_0 が大きくなるほど掘り起こしによる表面損傷断面積は小さくなることや、条こんの形成の際盛り上がり部先端の r_0 は損傷の小さい繰返し接触によって大きくなることを意味している。なお、相手ディスクについても同様の傾向がある¹⁵⁾。

2.3 摩耗粉の排出割合 α_b

2.3.1 比摩耗量との関係

摩耗面の損傷が主として硬い突起の引っかきこんによって生じると仮定し、円すい突起の掘り起こし体積のうち、摩耗粉として排出される割合を α_b とおくと、次式によって α_b は求められる²⁰⁾。

$$\alpha_b = (V/WL) (\pi/2) (p_f / \tan \theta) \quad (1)$$

ここで、 V/WL は比摩耗量、 p_f は平均塑性流動圧力であり、マイクロビッカース硬さにより近似できる。 θ は円すい形突起斜面の傾き角であり、ここでは θ の値を断面曲線上の各点 (約 $1 \mu m$ 間隔) における傾き角の平均値を用いている。なお、円すい形突起と仮定するとき、突起頂点の分布や各点高さの分布、接触点の大きさに無関係に式(1)によって求めることができる²⁰⁾。式(1)によって求めたピンの比摩耗量と α_b の関係を図6に示す。この図から3つのグループに分けることができ、 α_b が同じでも相手が ZrO_2 ディスクや Al_2O_3 ディスクではピンの比摩耗量は小さい。一方、相手が Si_3N_4 ディスクのときにはピンの比摩耗量は大きくなる。

図6 ピンの比摩耗量とピンの摩耗粉の排出割合

図8 ピンの $\tan \theta/p_f$ とピンの微細条こんの平均深さ

図7 ピンの摩耗粉の排出割合とピンの $\tan \theta/p_f$

2.3.2 単位荷重当たりの表面損傷 $\tan \theta/p_f$ との関係

図7に α_b と $\tan \theta/p_f$ の関係を示す。実験値は相当ばらついてはいるが、ピンとディスクの組合せを決めれば、実験値の傾向は見受けられる。SiC や Si_3N_4 ディスクに対する ZrO_2 ピンの場合には $\tan \theta/p_f$ の増加とともにピンの比摩耗量が増加する。しかし、他の組合せのときには、 $\tan \theta/p_f$ の減少とともに α_b は増加する。このことは Sp/b (後述の図8参照) の値が小さくなると盛り上がり部への塑性流動する割合も小さく、また、繰り返

し接触によって摩耗粉が発生する割合も高くなることを意味している。

2.3.3 $\tan \theta/p_f$ と Sp/b の関係

図8に微細条こんの平均深さ Sp/b と $\tan \theta/p_f$ の関係を示す。この図から相手ディスクの種類によって2つのグループに分けられ、相手が Al_2O_3 や ZrO_2 ディスクに比べてSiC や Si_3N_4 ディスクのとき、同じ Sp/b でも $\tan \theta/p_f$ が大きくなる。しかし、いずれの場合も Sp/b が増加すると $\tan \theta/p_f$ も増大するので、 $\tan \theta/p_f$ によって表面損傷の程度を評価することができる。

3. 高温におけるピンとディスクの比摩耗量の関係¹⁶⁾

真空中で直径12.7 mm の Si_3N_4 球と5種類のセラミックディスク (Si_3N_4 , ZrO_2 , TiC , SiC , Al_2O_3) を組合せ、室温より200°C, 400°C, 600°Cと温度を上昇させてピン・ディスク型摩耗試験機を用いて実験を行った。なお、無潤滑下で荷重は $W=6.02 \text{ N}$ 一定とし、摩擦速度 $v=0.2 \text{ m/s}$ 、真空装置内の圧力は $5.8 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ で実験を行った。摩耗体積は、ピンとディスクともに幾何学的形状の変化から求めた。

図9と図10からピンおよびディスクともに温度が高くなると比摩耗量が増加する。なお、実験値の符号表を表2に示す。それぞれのセラミックディスクに対して比摩耗量が急増する温度(ここでは臨界温度 T_c と呼ぶ)が存在することがわかる。これらの図から推定すると

図9 ピンの比摩擦耗量と温度

図10 ディスクの比摩擦耗量と温度

SiC: T_c = 常温~200°C, TiC: T_c = 200°C~400°C, Si₃N₄: T_c = ~ 常温, ZrO₂: T_c = 200°C~400°C, Al₂O₃: T_c = 400°C~600°Cの範囲になる. 本実験の範囲ではAl₂O₃の T_c が最も高くなっている. 一方, SiCやSi₃N₄ディスクでは T_c が低い. これは, ピンとディスクともにSi元素を含有するため激しい凝着が起こり, 移着粒子の成長とともに相手面に大きな掘り起こしによる表面損傷を与えるためである. なお, 図10で400°Cから600°Cになったとき, SiCとSi₃N₄ディスクの比摩擦耗量が減少する

表2 実験条件に対する符号表

温度 ディスク	25°C	200°C	400°C	600°C
SiC	▲	▲	▲	△
TiC	▼	▼	▼	▽
ZrO ₂	●	●	●	○
Al ₂ O ₃	■	■	■	□
Si ₃ N ₄	◆	◆	◆	◇

図11 ディスクの比摩擦耗量とディスクの微細条こんの平均深さ (摩擦垂直方向)

のは, 摩擦粒子がディスク摩擦面上に堆積し, 排出しにくく, ディスクを保護する作用をするためである.

3.1 摩擦面トポグラフィーによる摩擦の評価

3.1.1 微細条こんの平均深さ Sp/b

図11からディスクの比摩擦耗量は微細条こんの平均深さ Sp/b の増加とともに増大する. また, マイルド摩擦領域 (ここでは, Sp/b の値が急激に変化する所を境界として小さい領域をマイルド摩擦領域, 大きい領域をシビヤー摩擦領域と呼ぶ) とシビヤー摩擦領域では Sp/b の値が異なり, Sp/b に対する比摩擦耗量のこう配も異なる. Sp/b が大きいことは, 表面損傷が大きくなり, 大きな摩擦粒子が発生しやすいことを意味している. なお, ピンについても同様の傾向がみられている.

3.1.2 平均突起先端半径 r_0

図12からピンの平均突起先端半径 r_0 が増加するとピンの比摩擦耗量が減少している. また, シビヤー摩擦領域

図12 ピンの比摩耗量とピンの平均突起先端半径 (摩擦方向)

図14 ピンの摩耗粉の排出割合とピンの $\tan \theta / p_f$

図13 ピンの比摩耗量とピンの摩耗粉の排出割合 α_b

図15 ピンの微細条こんの平均深さとピンの $\tan \theta / p_f$

では逆の傾向を示している。これは、摩耗粒子の移着によって r_0 が減少することを意味していて、このとき移着粒子がピンの摩耗面を保護するのでピンの比摩耗量は減少する。

3.2 摩耗粉の排出割合 α_b

3.2.1 比摩耗量との関係

ピンの比摩耗量と式(1)によって求めた α_b の関係を図

13に示す。この図からシビヤー摩耗領域ではマイルド摩耗領域に比べて同じ α_b でもピンの比摩耗量が大きくなる。したがって、 α_b によって摩耗粉の排出状態が変化するときには比摩耗量を定量的に評価できる。

3.2.2 $\tan \theta / p_f$ と α_b の関係

図14から相手が SiC, Si_3N_4 と TiC ディスクの一部の実験値を除けば、 $\tan \theta / p_f$ の増加とともに α_b が増大する。このことは、表面損傷が大きくなるとともに摩耗粉

図16 ピンの比摩耗量と平均摩擦係数

として排出される割合も高くなることを示唆している。また、実験値の傾向は室温における荷重を変えたときの傾向（図7参照）とはかなり異なっている。

3.2.3 $\tan \theta/p_t$ と Sp/b の関係

図15から $\tan \theta/p_t$ と Sp/b の間には相関関係が存在することから $\tan \theta/p_t$ は Sp/b と同様に表面損傷を表すパラメータになることがわかる。

3.3 ピンの比摩耗量と平均摩擦係数 μ

図16から掘り起こしを伴う凝着摩耗のマイルド摩耗領域とシビヤー摩耗領域に分けられる。この2つの領域では μ もかなり急激に増大する。なお、 μ が小さい領域では摩耗粒子が摩耗面間に介在して凝着抵抗を減少させていると考えられる。

4. おわりに

ピン-ディスクによる摩耗試験機で真空中でセラミックスの摩耗試験を著者らが行った結果を中心に解説した。摩耗試験結果を単に比摩耗量の大きさだけで評価するのでは充分とはいえない。本稿で解説したように摩耗面の表面損傷の大きさを表面トポグラフィ解析によって定量的に評価し、また、摩耗粉の排出割合 α_b を実験的に評価することによって摩耗形態が明らかになると考えている。しかし、複雑な摩耗現象は突起の幾何学的形状の解析だけでは不充分であって、移着粒子がどのよう

な成分になっているのか、またどのような界面反応が起こり、摩耗粒子の凝着とともに移着粒子の成長が起こるのかなどの問題も解明して行く必要がある。しかし、さしづめ著者らは α_b , $\tan \theta/p_t$ や Sp/b を用いて比摩耗量を定量的に推定できればと思って研究を進めている。また、常々耐摩耗性を向上させるには、移着粒子は薄くしかも小さく、相手摩耗面を引っかきや凝着により塑性的な表面損傷を与えない材料を開発する必要があると考えている。拙稿が多少なりとも読者各位にご参考になれば幸甚である。

〔文 献〕

- 1) 窯業協会編集委員会講座小委員会編：セラミックスの機械的性質，窯業協会（1979）78.
- 2) 津谷裕子，斉藤慶子，志村洋文，勝村祐次：日本潤滑学会，九州大会講演論文集（大分）（1976）153.
- 3) 梅田一徳，津谷裕子：日本潤滑学会，第26期通常総会（春季研究発表会）予稿集，（1982）5.
- 4) 梅田一徳，津谷裕子：日本潤滑学会，東北大会予稿集，（1982）117.
- 5) Y. Tsuya: Proc. of JSLE Int. Trib. Conf. (Tokyo), (1985) 641.
- 6) 倉藤 康，・松川公映，中川 潤，幸山彰夫，鈴木峰男，西村 充：第31回宇宙科学技術連合講演会講演集，（1987）222.
- 7) K. Kato, H. Furuyama and M. Mizumoto: Proc. Japan Int. Trib. Conf. (Nagoya), (1990) 261.
- 8) 佐々木信也：トライボロジスト，39, 5 (1994) 406.
- 9) I. L. Singer, T. Le Mogne, C. Donnet and J. M. Martin: Trib. Trans., 39, 4 (1996) 950.
- 10) 加藤康司：トライボロジスト，40, 1 (1995) 38.
- 11) C. S. Yust and C. E. DeVore: Trib. Trans., 33 (1990) 573.
- 12) D. Wang and Z. Mao: J. Am. Ceram. Soc., 78, 10 (1995) 2705.
- 13) A. A. Voerodin, C. Rebholz and A. Matthews: Trib. Trans., 38 (1995) 829.
- 14) 久門輝正，塚田隆夫，森尻英一：トライボロジスト，38, 12 (1993) 1104.
- 15) 久門輝正，森尻英一：トライボロジスト，40, 3 (1995) 260.
- 16) T. Hisakado and H. Tani: Wear, 224 (1999) 165.
- 17) O. O. Aiayi and K. C. Ludema: Wear (1990) 191.
- 18) 久門輝正，加瀬博文：日本機械学会論文集（C編），56, 523 (1990) 789.
- 19) 久門輝正，浦野 渡：トライボロジスト，39, 10 (1991) 785.
- 20) 久門輝正，須田 博・浜野秀光：トライボロジー会議予稿集（北九州）（1996）256.