ファインセラミックスの摩擦試験方法の解析

阪口修司・平尾喜代司*・山内幸彦*・神崎修三*

産業技術総合研究所セラミックス研究部門, 463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ケ洞 2266-98

*産業技術総合研究所シナジーマテリアル研究センター, 463-8687 名古屋市守山区下志段味穴ケ洞 2268-1

Analysis of Friction Test Methods for Fine Ceramics

Shuji SAKAGUCHI, Kiyoshi HIRAO,* Yukihiko YAMAUCHI* and Shuzo KANZAKI*

Ceramics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,
2266-98, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya-shi 463-8560

*Synergy Materials Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,
2268-1, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya-shi 463-8687

Stress analysis was carried out on two kinds of friction tests (pin-on-disk test and block-on-ring test). The test procedure of pin-on-disk test is standardized as JIS R 1613. If we follow the procedure as stated in this document, a tensile stress from several hundred MPa to 1 GPa is generated on the test surface. This value equals the tensile strength of typical engineering ceramics, meaning that this test condition corresponds to severe wear conditions with possibility of mechanical fracture on the surface. In the block-on-ring test, the surface tensile stress is one-digit smaller compared to that of the pin-on-disk test, under the same testing force. It is thus assumed that the block-on-ring test can measure wear under mild conditions without the risk of mechanical fracture on the surface. It is important to use an appropriate friction test method that fits with the application of the investigated material, for properly discussing the friction property of ceramic materials.

[Received May 16, 2003; Accepted July 24, 2003]

Key-words : Friction test, Ceramics, Pin-on-disk, Block-on-ring, Stress, Surface, Fracture, Contact

1. 緒 言

セラミックスの摩擦試験方法については、日本では既に JIS R 1613「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擦試験方法」が規定されており、国際規格化についても現在作業が進められているところである。JIS R 1613の規格内容は要約すると以下のように記述できる。(1)直径9~10 mmのボールもしくはこれに相当する先端が球形の試料を、(2)10 Nの負荷力で平面に押しつけ、(3)0.1 m/sの速度で2000 m 摺動させ、試料の減少量を質量もしくは体積から求めて、比摩擦量を決定する。一方、著者らはこれまで種々の摺動部材用セラミックスの研究に取り組んできたが^{1)~8)}、摩擦特性の評価において、試験方法が材料の耐摩耗特性の順位付けに影響を与える場合があることを明らかにしてきた。ここでは、摩擦試験時の表面応力解析を計算機により行い、測定結果の適用について考察した。

2. 解 析

解析に用いたソフトウェアは、トライボロジー解析技術研究所より市販されている TED/CPA である⁹⁾。このソフトウェアは、摩擦のある弾性接触物体の応力分布を算出できるものである。

今回計算した条件は以下の2種類である。

- (1) JIS R 1613の形状に従った、ボールオンディスク試験、
- (2) 3 mm 幅の直方体試験片をリングに接触させる、ブロックオンリング試験。

図1に試験の模式図を示す。また、今回の解析に用いた条件を、表1に示す。試験負荷力はいずれも10 Nと設定した。図から分かるとおり解析条件はX軸方向に対称であることから、応力解析として、図1に示すX軸方向の中心での、試料のY-Z面の応力分布を求めて検討した。

3. 結果及び考察

図2及び図3に、試料の接触中央部断面での応力分布を示す。図2がボールオンディスク試験の、図3がブロックオンリング試験の結果であり、それぞれ摩擦係数0.3及び0.6の場合について解析した。ここで与えた摩擦係数の値はセラミック材料を室温、無潤滑状態で摺動した場合の代表的な数値である¹⁾。いずれの試験においても接触部中央より摺動方向へ移動した位置に最大圧縮応力が現れ、摺動方向の後ろ側の接触端部に最大引張り応力が発生することが分かる。しかし、発生する応力は2種類の試験で大きく異なり、ボールオンディスク試験では数百 MPa から1 GPa 以上の引張り応力が発生するのに対し、ブロックオンリング試験ではそれより約一けた小さい引張り応力が発生していることが分かる。

SiAlON セラミックスの結晶相及び微細構造と摩耗特性との関係をこの2種類の試験方法で検討しているが^{4),8)}、二つの試験結果で比摩擦量と組成との相関に逆転現象が見られ、一方の試験結果からもう一方の試験結果を推定することができない。この違いは、ボールオンディスク試験で発生する引張り応力が、材料の引張り強度に近い値であり、試料表面での微細な破壊を伴うシビアな摩耗現象を測定しているのに対し、ブロックオンリング試験で表面に発生する応力は材料の引張り強度より十分に小さく、表面での力学的な破壊を伴わないマイルドな摩耗現象を測定していることに起因すると考えられた。

ボールオンディスク試験で発生する最大引張り応力については、Adachi らによって検討されている¹⁰⁾。彼らは、(1)式により¹¹⁾、摺動試験中の最大引張り応力を算出している。

$$\sigma_{\max} = P_{\max} \left[\left(\frac{1-2\nu}{3} \right) + \frac{4+\nu}{8} \pi \mu \right] \quad (1)$$

ここで、 ν は試料のポアソン比、 μ は摩擦係数である。また、 $P_{\max}$ は最大ヘルツ接触応力であり、表1にある条件からは1.26 GPaと算出される¹²⁾。したがって、(1)式から得られる最

Fig. 1. Schematic figures of (a) ball-on-disk test and (b) block on ring test.

Table 1. Parameters for the Friction Test Analysis

ball-on-disk test	block-on-ring test
Ball: radius (R_1): 5 mm Young's modulus: 300 GPa Poisson's ratio : 0.25	Ring: radius (R_2): 17.5 mm Young's modulus : 300 GPa Poisson's ratio : 0.25
Disk: Young's modulus : 300 GPa Poisson's ratio : 0.25	Block: Young's modulus : 300 GPa Poisson's ratio : 0.25
Normal force: 10 N	Normal force: 10 N Contact width (B) : 3 mm

大引張り応力は摩擦係数0.3で0.84 GPa, 摩擦係数0.6で1.47 GPaとなる. 今回の計算機解析により得られた最大引張り応力は, いずれの条件においても算出式で得られた値より小さい. 今回設定した無潤滑摺動条件が比較的摩擦係数が高い条件であり, そのため, 図2に見られるように圧縮応力の分布にも摺動の影響が見られ, 摩擦係数に応じて最大圧縮応力も変化することが, 計算式と解析で異なる値が得られた理由の一つではないかと考えられる.

Fig. 2. Stress analysis of ball-on-disk test, friction coefficient: (a) 0.3, (b) 0.6.

4. 結 論

2種類の摩擦試験方法の応力解析を行い, 以下の結論を得た. ファインセラミックスの摩擦試験については, JIS R 1613でボールオンディスク試験方法が規定されているが, この試験条件では材料表面での引張り応力は数百 MPa から 1 GPa を越える範囲であると予想され, 表面での引張り応力による亀裂発生を伴ったシビアな摩擦に対する材料の耐摩耗性を測定することが予想される. 一方, 試料同士を線接触させるブロックオンリング試験方法では, 表面に発生する引張り応力はボールオンディスクの場合より一けた程度小さく, 亀裂発生を伴わないマイルドな摩擦に対する材料の耐摩耗性を測定できるものと考えられる. 材料の摩耗特性を評価するためには, どのような応用を材料に期待するかを考慮した上で評価方法を選択する必要があると考えられる.

謝 辞 本研究は経済産業省産業技術環境局が推進する産業技術基盤研究開発プロジェクト「シナジーセラミックスの研究開発」の一環として, 新エネルギー・産業技術総合開発機構より委託を受け, シナジーセラミックス研究体に所属する著者らによって行われたものである.

References

- 1) Nakamura, M., Hirao, K., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 84, pp. 2579-2584 (2001).
- 2) Nakamura, M., Hirao, K., Sakaguchi, S., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 22, pp. 203-208 (2001).
- 3) Nakamura, M., Hirao, K., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S.,

Fig. 3. Stress analysis of block-on-ring test, friction coefficient: (a) 0.3, (b) 0.6.

- Wear*, Vol. 252, pp. 484–490 (2002).
- 4) Jones, M. I., Hirao, K., Hyuga, H., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 23, pp. 1743–1750 (2003).
 - 5) Nakamura, M., Hirao, K., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., *J. Jpn. Soc. Tribologists*, Vol. 48, pp. 152–159 (2003) [in Japanese].
 - 6) Yamada, S., Sakaguchi, S., Hirao, K., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., *J. Ceram. Soc. Japan*, Vol. 111, pp. 53–58 (2003) [in Japanese].
 - 7) Amutha Rani, D., Sakaguchi, S., Hirao, K., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., *J. Ceram. Soc. Japan*, Vol. 111, pp. 294–299 (2003).
 - 8) Hirao, K., Jones, M. I., Hyuga, H., Yamauchi, Y. and Kanzaki, S., *Key Eng. Mater.*, Vol. 237, pp. 203–210 (2003).
 - 9) Kakoi, K. and Obata, T., *JSME Int. J., Ser. A*, Vol. 36, pp. 57–62 (1993).
 - 10) Adachi, K., Kato, K. and Chen, N., *Wear*, Vol. 203–204, pp. 291–301 (1997).
 - 11) Hamilton, G. M., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 197C, pp. 53–58 (1983).
 - 12) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., “Theory of Elasticity,” 3rd ed., McGraw-Hill (1982) pp. 409–420.