

新アルミナ系セラミック球の転がり軸受への適用検討

Study on the Implementation of Original Alumina-Based Ceramic Ball for Rolling Bearings

日本精工（株）（正）＊坂井 祐太（正）内田 啓之 （正）植田 光司 日本特殊陶業（株）（非）茂木 淳
（株）天辻鋼球製作所 （正）阿野 亮介

Yuta Sakai*, Hiroyuki Uchida*, Kouji Ueda*, Jun Moteki**, Ryousuke Ano***

*NSK Ltd, **Niterrra Co., Ltd., ***Amatsuji Steel Ball Mfg.Co.,Ltd.

1. はじめに

カーボンニュートラルや持続可能な社会の実現に向け、自動車の分野においては EV 化が推進されており、高機能化、高効率化のための高電圧化が進むことでモータ支持軸受の電食損傷が報告されている。セラミック球軸受は電食対策として実績が多く、セラミック材料には窒化けい素（Si₃N₄）が用いられている。窒化けい素は軸受鋼と同等以上の転がり寿命と耐荷重性能をもつことから、転がり軸受用セラミックスとして幅広く使用されている。しかしながら、窒化けい素は、原材料が高価で、焼結工程において厳密な雰囲気管理を要し、また軸受鋼に比べ高硬度であるため加工時間が長くなるなど、生産性においても課題があり、EV 需要の逼迫により供給量の不足も懸念されている。

セラミック材料の中でアルミナ（Al₂O₃）は原材料の入手性が良く、生産性にも優れるため工業的に広く使用されている。しかし、軸受分野においては転がり疲労特性が低いため、窒化けい素が適用できない耐食用途かつ極軽荷重の一部の用途しか適用されていない。筆者らはこれまでにジルコニア（ZrO₂）をベースにアルミナを複合化させることで、機能と生産性を兼ね備えた酸化物系セラミック転動体を開発してきた¹⁾。しかしながら、ジルコニアは 100 ～ 200 ℃程度の高温環境下で相変態し、その体積膨張で発生したき裂に起因する強度低下が起こるため、耐熱性に課題があった²⁾。そこで、高い生産性を有するアルミナ系セラミックスに着目し、幅広い用途に適用できるよう耐熱性を改善し、耐荷重性等の各種機能評価を行い、転がり軸受の転動体としての適用可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材として、アルミナをベースとしジルコニアを複合化した複合化アルミナ-ジルコニアおよび窒化けい素を用いた。Table 1 に各供試材の材料特性を示す。硬さ測定は JIS R 1610 に準拠し、196 N、保持時間 30 s の条件でビッカース圧子を押し込み、各材料で n=3 測定した。破壊靱性値測定は JIS R 1607 に準拠し、IF 法により前述の硬さ測定と同一条件でビッカース圧子を押し込み、各材料で n = 3 測定した。

Table 1 Material properties of sample ceramic

Items	Composite oxide Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	Silicon nitride Si ₃ N ₄
Hardness, HV	1744～1754	1477～1488
Fracture toughness, MPa・m ^{1/2}	3.8～3.9	7.5～7.7

2.2 転がり疲労特性の評価

転がり疲労特性の評価するため、スラスト型寿命試験を実施した。Table 2 に試験条件を示す。試験軸受は、スラスト玉軸受 51305（外径 52 mm、内径 25 mm）であり、軌道輪には SUJ2 焼入れ焼戻し材、転動体には複合化アルミナ-ジルコニアを用いた。

Table 2 Fatigue life test condition

Bearing	51305
Load, kN	6.9
Max. contact pressure, GPa	3.6
Test temperature, °C	120
Ball size	3/8"(9.525mm)
Number of balls	3
Rotation speed, min ⁻¹	2000
Lubrication oil	ISO-VG12
Material of ring	SUJ2
Material of ball	Al ₂ O ₃ -ZrO ₂
Material of cage	Plastic

2.3 耐摩耗性の評価

耐摩耗性の評価として、ボールオンディスク試験を実施した。Table 3 に試験条件を示す。摩耗量はレーザ顕微鏡を用いてボール及びディスクの摩耗体積を測定した。ディスクの摩耗体積は、走行跡の 4 個所の平均断面積 A と摺動半径 r を用いて 2πrA より算出した。

2.4 耐食性の評価

耐食性の評価には 49 % のフッ化水素酸溶液を用いた。腐食を加速させるため溶液の温度は 60 ℃、浸漬時間は 24 h とした。腐食前後の転動体の表面粗さを 3 点測定し、その算術平均高さ S_a を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 転がり疲労寿命

Table 4 に試験結果を示す。本試験の計算寿命 L_{cal} は約 1.1×10^7 cycle である。試験数 $n=5$ のうち、リングはく離が $n=2$, $n=3$ は L_{cal} の約 3 倍で試験を打ち切った。球の表面観察の結果、3.6 GPa の面圧においても、アルミナ単体の損傷で見られるような粒子の脱落や欠け¹⁾は見られず、損傷は確認されなかった。

複合化アルミナ-ジルコニアの疲労特性は、複合化による結晶粒径の微細化²⁾、アルミナとジルコニアの線膨張係数の違いによる圧縮残留応力の効果が影響していると考えられ³⁾、本セラミック球に関しても同様の長寿命効果が発揮されたと推測している。また、本試験は 120 °C の高温環境下で実施しており、ジルコニアの相変態に起因する強度低下は起きていなかった。本材料では、ジルコニアの量を減らし、ジルコニアをアルミナ中に均一に分散させることで、イットリアが偏析しにくくなり、ジルコニアの相変態が抑制されたため⁴⁾と推測している。

3.2 ボールオンディスク試験後の摩耗量

Figure 1 に球及びディスクの摩耗体積を示す。軸受鋼製のディスクの摩耗体積は同等であるが、複合化アルミナ-ジルコニア球の摩耗体積は、窒化けい素球に対して非常に小さく、複合化アルミナ-ジルコニアは耐摩耗性に優れた結果となった。

アルミナは窒化けい素より硬質であり、ヤング率が大きく球とディスクの接触面積が小さいことなどが影響していると推測している。

3.3 腐食試験後の外観及び表面粗さの変化

Figure 2 にセラミック球の腐食前後の外観写真、Fig. 3 に腐食前後の算術平均高さ S_a を示す。複合化アルミナ-ジルコニアは外観及び粗さの変化が小さく、窒化けい素では大幅に悪化した。

アルミナはフッ化水素酸に対し耐食性が高く、ジルコニアは低いことが知られている。複合化アルミナ-ジルコニアでは表面粗さの変化が小さいことから、大部分のアルミナは腐食されず、ジルコニアのみが腐食されることで表面粗さの悪化が起きたと推測している。

4. まとめ

アルミナ系セラミック球の転がり軸受への適用を検討した結果、以下の結論が得られた。

- ① 複合化アルミナ-ジルコニア球は 120 °C の高温環境かつ 3.6 GPa の面圧において、高い転がり疲労特性を有する。
- ② ボールオンディスク試験の結果、複合化アルミナ-ジルコニア球は窒化けい素球よりも耐摩耗性に優れる。
- ③ フッ化水素酸浸漬において、窒化けい素球よりも表面粗さの劣化が少なく、耐食性に優れる。

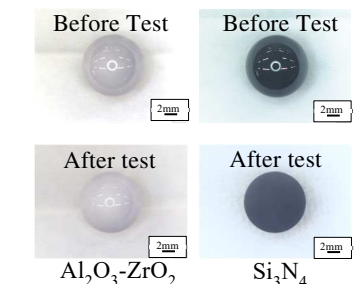


Fig. 2 The result of ball condition by HF soaking test

Table 3 Ball on disk test condition

Material of disk	SUJ2
Lubrication	Dry
Load, N	4.9
Sliding distance, m	200
Sliding speed, m/sec	1.0
Sliding radius, mm	Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ : 17 Si ₃ N ₄ : 12

Table 4 The result of rolling fatigue test

N=1	1.9×10^7 cycle	Upper raceway flaking
N=2	2.7×10^7 cycle	Upper raceway flaking
N=3	3.8×10^7 cycle	Suspended
N=4	3.4×10^7 cycle	Suspended
N=5	3.4×10^7 cycle	Suspended

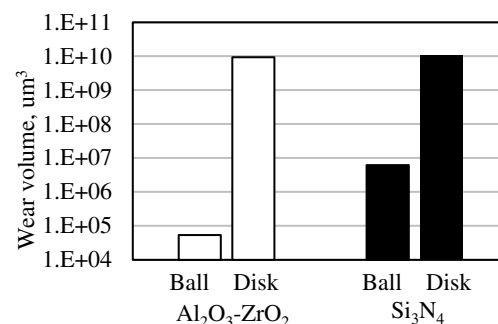


Fig. 1 The result of ball on disk test

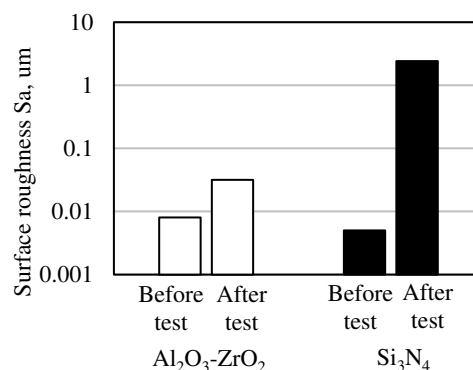


Fig. 3 The result of surface roughness by HF soaking test

文献

- 1) 遠藤雄一, 清水康之, 植田光司, 三田村宣晶: トライボロジー会議予稿集 (2015-10) F17
- 2) T. Masaki, "Mechanical Properties of Y-TZP After Aging at Low Temperature", Int. J. High. Tech. Ceram., 2, 85-98 (1986)
- 3) 田中・松井・四方・西川: ジルコニア・アルミナ複合セラミックスの 3 軸残留相応力の X 線測定, 材料, 41, 464(1992)593
- 4) 松井: ファインセラミック用ジルコニア粉末の製造方法, J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 68 (2021) 103-110