

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560166

研究課題名(和文)セラミックス製転動体を用いた小径玉軸受の総合的な性能評価に関する研究

研究課題名(英文) COMPREHENSIVE EVALUATION FOR PERFORMANCE OF BALL BEARING HAVING CERAMICS ROLLING ELEMENTS

研究代表者

野口 昭治 (Noguchi, Shoji)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：80349836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：セラミックス球は、低密度、低熱伝導、電気絶縁性が高い等のメリットはあるが、コストが高いため、使用できる機械が限定されていた。しかし、軸受の要求される性能において、鋼球よりも優れていることが確認できれば、トータル的なコストの優位性を主張できるので、セラミックス球の普及につながることを期待される。

本研究では、同一型番の玉軸受を用いて様々な性能試験を行い、セラミック球を用いた玉軸受の総合的な優位性を評価することを最終目的として、内部摩耗の低減、振動上昇の抑制とグリース酸化劣化の抑制等について優位性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Ceramic ball (rolling element) has some merits such as low density, low-thermal conductance and excellent electrical insulation. However, application to machine is restricted due to its high cost. On the other hand, if the applicability of ceramic ball to rolling bearings and superiority against steel ball were verified from the standpoint of desired performance, ceramic ball bearings will become widely used owing to relatively low over-all cost.

In this research, several performance experiments, using the same model number ball bearing, were conducted with changing the rolling elements from steel balls to ceramic balls. The definitive purpose was to verify the over-all superiority of ceramic ball bearing. As a consequence, the superiority was confirmed on lowering of internal wear, restraining for elevation of vibration and restraining for degradation of grease oxidation.

研究分野：工学

キーワード：機械要素 トライボロジー 玉軸受 セラミックス転動体 摩耗 振動 グリース酸化劣化

1. 研究開始当初の背景

セラミックス球を転動体にした玉軸受の研究開発は 1980 年後半から行われ、現在では窒化ケイ素 (Si_3N_4) 製の転動体が実用化されている。窒化ケイ素は軸受鋼と比較して軽量、低熱伝導性であり、その特性を利用して工作機械、航空機エンジン等高速回転用途に使用されてきた。しかし、言い換えれば、窒化ケイ素球のコストが高く、軸受価格も高くなるため、軸受のコスト上昇分を製品価格に転嫁できる用途に制限されていた。

また、これまでのセラミックス製転動体の性能評価は、用途に求められている性能のみで行われることが多く、ひとつの型番に組み込んで総合的に評価されることはなかった。工作機械用であれば温度上昇、許容回転速度が評価項目であり、コンピュータのハードディスクスピンドルモータ用（現在は動圧滑り軸受）であれば、音振動が評価項目であり、それ以外の項目は同じ土俵で評価されることはなかった。さらに、現在は窒化ケイ素のみ実用されているが、研究当初はジルコニア系、酸化アルミナ系等他のセラミックス球も評価されていた。しかし、実用において最重要視した項目が、“軸受鋼球と同等の信頼性”であったため、強度的に優れた窒化ケイ素だけが生き残った形となっている。

しかし、近年小径玉軸受の損傷として、“電食”が増加している。鉄道車両用軸受の損傷として知られていたが、近年家電品用の小型モータにこの損傷が多く発生している。著者らはこれまでに小径玉軸受における電食発生状況を研究し、

- (1) 乾電池 1 本の電圧 (1.5V) が印加され、10mA の電流が軸受内を通過すると小径玉軸受では電食が発生すること
- (2) 電食を完全に防止する対策としては、転動体を絶縁体であるセラミックスにすること

を明らかにした。電食は放電による痕跡が原因であるので、導電体である軸受鋼の転動体では防止することは難しい。セラミックス球を用いれば防げるが、家電品用小型モータはコスト競争が激しく、高価であるセラミック球を採用することができない。また、電食対策だけで高価なセラミック球を使うことに対して、コストパフォーマンスが問題視されている。このようにコストが重視される用途においては、性能が優れていてもセラミック球が採用されない場合がある。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえて、本研究ではセラミックス製転動体を組み込んだ同一型番の軸受を用いて、様々な試験を行って、総合的な性能評価を行う（ここで窒化ケイ素製転動体としなかった理由は、窒化ケイ素以外の材料も試験計画に入っているからである）。電食だけではなく、音響寿命や内部摩耗が少ない

等の複数項目で性能向上が確認できれば、セラミックス球の価格によるコストアップを軸受が使われている“製品寿命の向上”という観点から見て、“トータル的には逆にコストダウン”になる可能性がある。

セラミックス球を使うことのコスト的優位性を導くことができれば、セラミックス球の普及につながり、量産されることで更なるコストダウンが進むという成功のスパイラルを形成し、セラミックス転動体を使用した玉軸受の普及を図ることを最終的な目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、寿命評価など複数項目を並行して行うが、単年ではなく複数年にわたって研究を行う必要がある（平成 24～26 年の 3 年間）。研究内容を以下に記す。

(1) 窒化ケイ素球の総合的な性能評価

窒化ケイ素は現在実用化されている素材であるが、同一の型番を用いての総合的な評価は行われていない。現在実用化されているという観点からすると、窒化ケイ素の諸性能数値が他材料球実用化の基準となるので、実用基準を明らかにする意味でも窒化ケイ素の性能評価を行う必要がある。評価項目によって試験期間に差があるので、評価期間は平成 24～25 年度を充てる。評価項目としては、

- ① 電食性能（電圧を印加しながらの回転耐久試験）
- ② 振動上昇寿命（振動を測定しながらの回転耐久試験）
- ③ グリース酸化劣化（酸化防止剤の消費量を測定して、劣化度を比較する）
- ④ 内部摩耗（グリース中の鉄粉濃度を測定し、内部摩耗量を比較する）
- ⑤ 疲労寿命（一定荷重条件での回転耐久試験。荷重は基本動定格荷重の 20%）

の 5 項目である。

(2) 窒化ケイ素以外の材料評価

最近では太陽光発電や燃料電池の材料として高純度ケイ素が使用されており、ケイ素の価格が上昇している。さらにケイ素の用途拡大による品不足が起こると、価格だけでなく原料不足を招く恐れもある。そこで、窒化ケイ素以外のセラミックス球が重要となる。強度や信頼性の関係で使われなかった材料や新しいセラミック球（イスマンジェイ株式会社、メラミック）の評価を行う。その際、窒化ケイ素は“軸受鋼と同等”という高い信頼性や強度をクリアしたが、負荷が軽い家電品用途等においては、軸受の疲労寿命を計算すると 30 年以上となることが多い。製品の保証期間を考慮すると明らかな“過剰品質”である。実用的な荷重での寿命評価を中心に行う。

具体的な実験装置を以下に示す。図 1 は①電食性能の評価に使用した電食試験装置である。試験軸受に直流電圧を印加した状態で、振動上昇を測定する。

図2は、②、③、④で使用した軸受回転試験装置である。この装置を高温槽に入れて高温環境で回転試験を行い、試験前後でそれぞれの項目に関する評価を行った。

図3は、⑤疲労試験で使用した軽荷重負荷軸受耐久試験装置である。

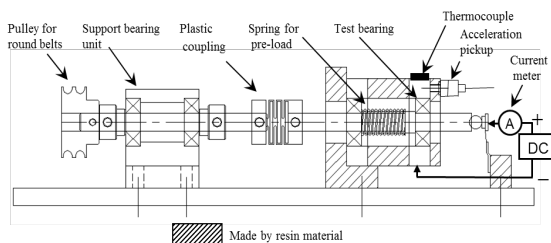


図1 電食試験装置

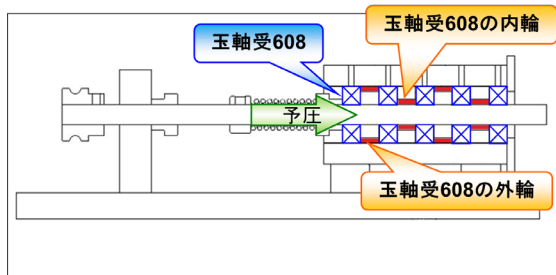


図2 高温槽内に入れた軸受回転試験装置

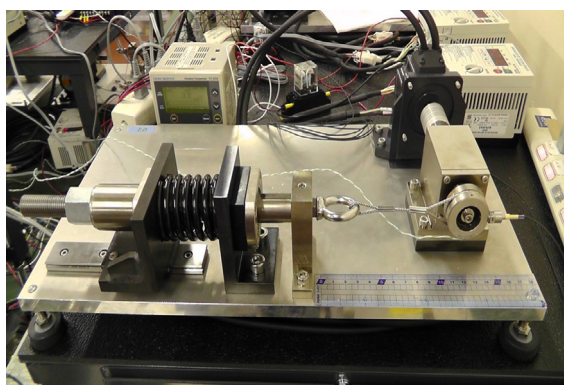


図3 軽荷重軸受耐久試験装置

4. 研究成果

得られた研究成果の概要を項目別に以下に記す。

(1) 電食性能

直流電圧 5V、電流 0.1A を印加して、 3000min^{-1} で回転させる耐久試験を行った結果を図4に示す。

SUJ2 ボールでは 20 時間程度で振動上昇した条件であったが、窒化ケイ素ボールでは 3000 時間を経過しても振動上昇は観察されなかった (グリースは NS7)。素材が不導体であることに起因する耐電食性が確認された。

(2) 振動上昇試験

70°C に保った恒温槽の中で軸受を回転させて、1000 時間毎に 5000 時間まで回転させて振動測定を行った結果を図5に示す。

どの時間においても窒化ケイ素ボール軸受の方が SUJ2 ボールよりも振動加速度が低く、振動上昇抑制効果が確認された。

(3) グリース酸化劣化

酸化防止剤 (3%) だけを添加したグリースを封入して酸化防止剤の残存量を測定した結果を図6に示す。常温環境で回転速度 5000min^{-1} の条件で回転させた結果であるが、窒化ケイ素ボールの方が酸化防止剤の残存量が多い、逆に言えば酸化防止剤の消費量が少ないことから、酸化劣化防止効果が認められた。この結果から窒化ケイ素転動体では、グリース寿命が長くなることが確認された。

(4) 内部摩耗

608 を 70°C の恒温槽内で回転させ、1000、2000、3000 時間後のグリースに含まれる鉄粉濃度を測定し、内部摩耗量を比較した結果を図7に示す。保持器はプラスチックであり、鉄粉は転動体、軌道面から排出された摩耗粉と判断できる。同じ回転時間で比較した場合、どの試験時間でも窒化ケイ素ボールの方が、鉄粉濃度が低いことが確認された。潤滑条件が悪い場合には、転動体と軌道面で固体/固体接触が起こる境界潤滑になっていると考えられる。その際には同種材料よりも異種材料間の方が摩耗が少ないことが知られているが、本実験によりその効果が確認された。

(5) 疲労寿命

SUJ2 ボールを組み込んだ 608 の基本定格荷重の 20% のラジアル荷重を負荷して耐久試験を行った結果を図8に示す。10 個試験を行ったが、定格寿命の 3 倍を経過しても異常が無いことが確認されており、軽荷重用途としては十分な寿命を持つと判断できる。

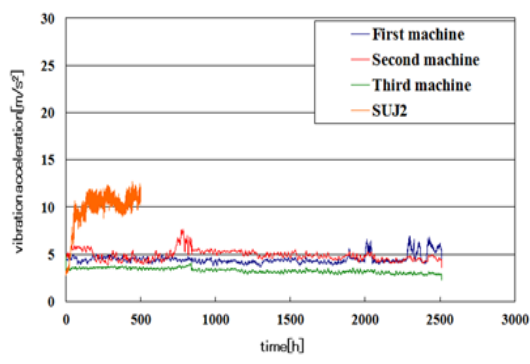


図4 電食耐久試験結果

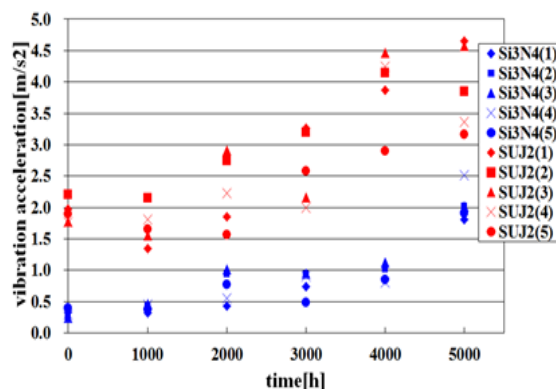


図5 振動上昇試験結果

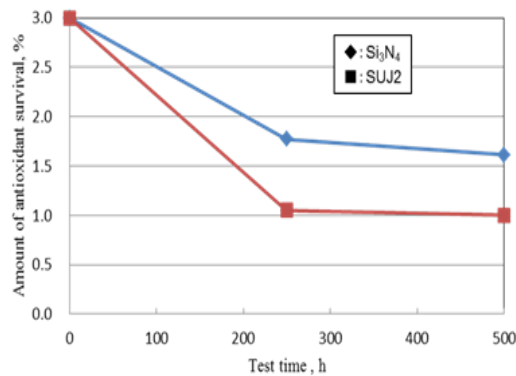


図6 グリース残存量測定結果

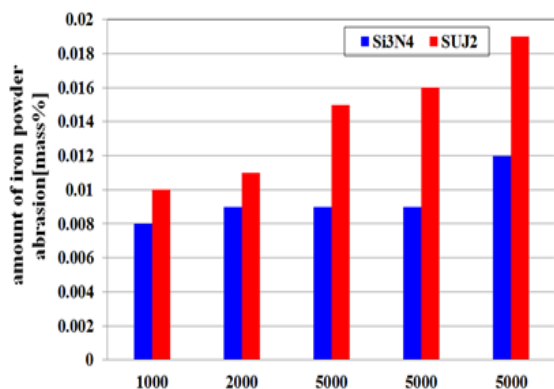


図7 鉄粉濃度測定結果

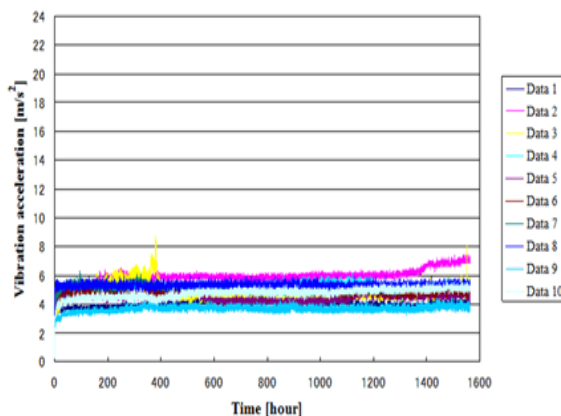


図8 定格荷重の20%を負荷した寿命結果

窒化ケイ素以外のセラミック材料として、メラミックス（イスマンジェイ製、βサイアロン材料）を用いて定格荷重の20%を負荷して耐久試験を行った結果を図9に示す。図8と同じ条件で10個試験を行ったが、図8と同じようにどの軸受も定格寿命の3倍になっても振動は上昇しておらず、試験後の内部観察においても異常は観察されなかった。

メラミックスは窒化ケイ素よりも素材が安価なため、製造コストを低減できる可能性が高い。軽荷重用途としては寿命性能的に窒化ケイ素と同等と評価できるため、コスト次第ではあるが、窒化ケイ素以外の材料を玉軸受の転動体として使用できることへの可能性を示唆することができたと考える。

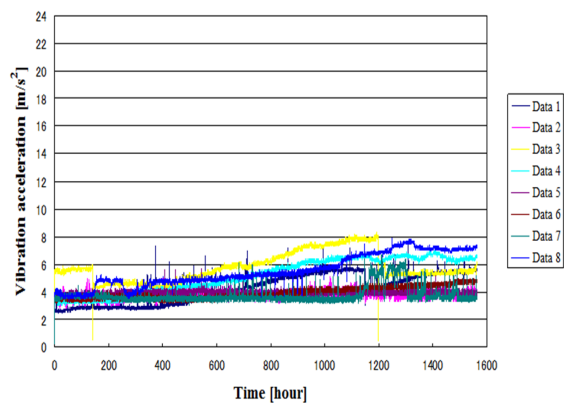


図9 メラミックスを使用した耐久試験結果

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 10 件）

- ①野口昭治、谷村聡一、吉田一郎：玉軸受用ボールの熱による形状変化の観察、2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集（2013）、379-380、査読無し
- ②谷村聡一、長谷川 徹、野口昭治：高温放置によるベアリング性能の変化に関する研究、日本機械学会関東支部第19期総会講演会講演論文集（2013）、321-322、査読無し
- ③大貫雅和、金田 徹、李 紹景、野口昭治：軸受用鋼球の高温放置による直径寸法変化の定量的観察、関東学院大学工学部研究報告、56（2012）、1-11、査読有り
- ④野口昭治：セラミック球を用いた玉軸受の総合的優位性評価、日本設計工学会2013年度春季大会研究発表講演会講演論文集（2013）、113-114、査読無し
- ⑤谷村聡一、野口昭治：回転非同期振れに及ぼす高温放置による鋼球形状変化の影響、日本設計工学会2013年度秋季大会研究発表講演会講演論文集（2013）、73-74、査読無し
- ⑥野口昭治、金田 徹、吉田一郎：高温放置による玉軸受転動体の幾何学的形状変化と回転非同期振れへの影響、日本機械学会論文集（2014）No.14-00329、査読有り、DOI：10.1299/transjsme.2014trans0342
- ⑦野口昭治：高温放置における国受けよう転動体の幾何学的形状変化に関する研究、トライボロジー会議2014秋盛岡予稿集（2014）、189-193、査読無し
- ⑧野口昭治：玉軸受用転動体の繰り返し応力による幾何学的形状変化、日本設計工学会2014年度秋季大会研究発表講演会講演論文集（2014）、163-164、査読無し
- ⑨若月幸也、野口昭治：軽荷重用途を目的としたメラミックス転動体の性能評価、日本設計工学会2014年度秋季大会研究発表講演会講演論文集（2014）、173-174、査読無し
- ⑩野口昭治：セラミック球を用いた玉軸受の優位性評価ー内部摩耗とグリース酸化劣化

一、日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集 (2014)、S1140203、査読無し

〔学会発表〕(計 9 件)

①野口昭治、谷村聡一、吉田一朗：玉軸受用ボールの熱による形状変化の観察、2013 年度精密工学会春季大会学術講演会 (2013)、東京工業大学 (東京都目黒区)、2013 年 3 月 13 日

②谷村聡一、長谷川 徹、野口昭治：高温放置によるベアリング性能の変化に関する研究、日本機械学会関東支部第 19 期総会講演会 (2013)、首都大学東京 (東京都八王子市)、2013 年 3 月 15 日

③野口昭治：セラミック球を用いた玉軸受の総合的優位性評価、日本設計工学会 2013 年度春季大会研究発表講演会、国士舘大学 (東京都世田谷区)、2013 年 5 月 26 日

④谷村聡一、野口昭治：回転非同期振れに及ぼす高温放置による鋼球形状変化の影響、日本設計工学会 2013 年度秋季大会研究発表講演会 (2013)、名城大学 (愛知県名古屋市)、2013 年 10 月 5 日

⑤野口昭治：最近の小型玉軸受の研究事例、日本機械学会第 14 回機素潤滑設計部門講演会招待講演 (2014)、信州松代ロイヤルホテル (長野県長野市)、2014 年 4 月 22 日

⑥野口昭治：高温放置における国受けよう転動体の幾何学的形状変化に関する研究、トライボロジー会議 2014 秋盛岡、アイーナいわて県民情報交流センター (岩手県盛岡市)、2014 年 11 月 5 日

⑦野口昭治：玉軸受用転動体の繰り返し応力による幾何学的形状変化、日本設計工学会 2014 年度秋季大会研究発表講演会 (2014)、山形大学 (山形県米沢市)、2014 年 10 月 4 日

⑧若月幸也、野口昭治：軽荷重用用途を目的としたメラミックス転動体の性能評価、日本設計工学会 2014 年度秋季大会研究発表講演会 (2014)、山形大学 (山形県米沢市)、2014 年 10 月 4 日

⑨野口昭治：セラミック球を用いた玉軸受の優位性評価ー内部摩耗とグリース酸化劣化ー、日本機械学会 2014 年度年次大会 (2014)、東京電機大学 (東京都足立区)、2014 年 9 月 8 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野口 昭治 (NOGUCHI SHOJI)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号：80349836

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし