

氏名	たけばやし ひろあき 竹 林 博 明
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年6月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和52年3月 大阪大学 大学院 工学研究科 溶接工学専攻 前期課程 修了
学位論文題目	窒化けい素転がり軸受の基礎と応用の研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 加藤 康司 東北大学教授 島田 昌彦 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学助教授 梅原 徳次

論文内容要旨

第1章 緒論

最近の技術の進歩にともなって、転がり軸受の使用される環境や条件は、従来と比較して過酷でかつ多様化してきており、一般の軸受鋼製の転がり軸受だけでは対応できなくなっている。そこで耐熱性、耐食性及び耐摩耗性等に優れた特性を示す窒化けい素の転がり軸受への対応が考えられている。例えば、窒化けい素の優れた耐熱性は、転がり軸受の高温下での使用に対して有効であり、また、窒化けい素の低密度特性は、軸受の軽量化と高速化の際の転動体(玉、ころ)の遠心力軽減に効果を発揮する。さらに窒化けい素の結合状態(共有結合)から、高速回転時の潤滑油・油膜切れによる耐焼付性向上も期待できる。

そこで本論文では、窒化けい素を転がり軸受に適用するために基礎と応用研究を行い、窒化けい素転がり軸受の実用化を目的とする。具体的には、窒化けい素転がり軸受の静定格荷重(静的に加えることが可能な限界荷重)と転がり疲れ寿命及び窒化けい素内輪と鋼製軸のはめあい限界を明らかにし、次に窒化けい素転がり軸受を高温、水中及び高速回転のそれぞれの条件で試験を行い、窒化けい素転がり軸受の優れた性能を明らかにする。

第2章 窒化けい素の静的負荷能力

本章では、窒化けい素転がり軸受の静定格荷重(静的に加えることが可能な限界荷重)について検討した。鋼製の転がり軸受の静定格荷重は、最大荷重を受けている接触部の塑性変形量を基準とした最大接触応力で決められている。しかし、窒化けい素には塑性変形はほとんど発生しないので、鋼製転がり軸受の静定格荷重の考え方は適用できない。そこでここでは、窒化けい素転がり軸受の静定格荷重を、窒化けい素に発生するクラックで定めることを提案した。具体的には、窒化けい素平板に玉を押し込み、窒化けい素平板のクラック発生荷重と計算によって求めた鋼製軸受の静定格荷重を比較した(図1)。その結果、窒化けい素平板のクラック発生荷重は、鋼製転がり軸受の静定格荷重より1桁以上大きく、窒化けい素は静定格荷重の面からは転がり軸受に十分適用可能であることを明らかにした。

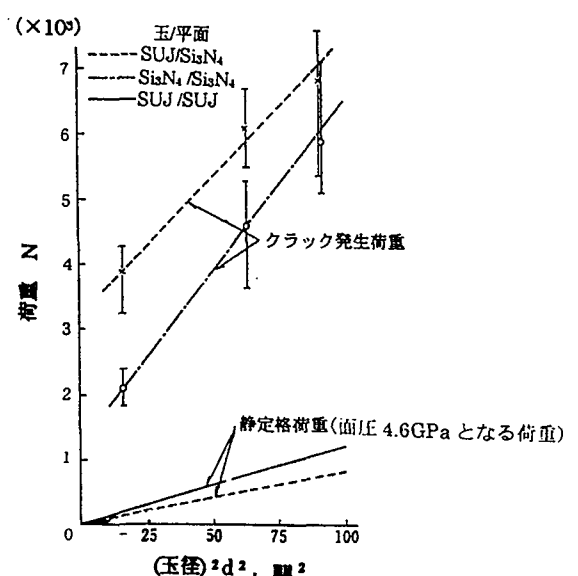


図1 クラック発生荷重と静定格荷重の比較

第3章 窒化けい素の転がり疲れ寿命

本章では、窒化けい素の転がり疲れ寿命を明らかにした。窒化けい素を転がり軸受に適用する場合、窒化けい素の転がり疲れ寿命を明確にすることが重要である。そこで、窒化けい素と軸受鋼の転がり疲れ寿命を比較し、窒化けい素は軸受鋼と同等以上の転がり疲れ寿命を有しており、転がり軸受に十分適用可能であることを明らかにした(図2)。さらに、窒化けい素の転がり疲れ寿命の信頼性確保のためには、材料の密度管理や焼結助剤の偏析防止等が重要となることにも言及した。

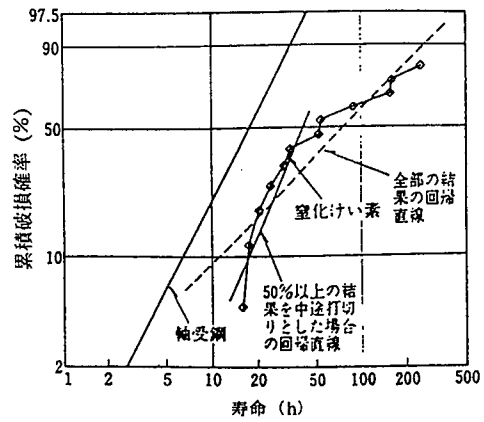


図2 窒化けい素の寿命分布

第4章 窒化けい素玉軸受の寿命

第2章、第3章では、窒化けい素が転がり軸受に適用可能なことを述べてきた。

本章では、実際に窒化けい素玉軸受を製作し、窒化けい素玉軸受の転がり疲れ寿命を明らかにした。

具体的には、内外輪、玉ともに窒化けい素で製作した総セラミック玉軸受、内外輪が軸受鋼で玉に窒化けい素を用いた組合せセラミック玉軸受、内外輪、玉ともに軸受鋼で製作した鋼製玉軸受の3種類で寿命比較を行った。その結果、総セラミック玉軸受及び組合せセラミック玉軸受は、鋼製玉軸受と同等もしくはそれ以上の転がり疲れ寿命を示すことを明らかにした。

第5章 窒化けい素軸受の表面欠陥と転がり疲れ寿命の関係

本章では、窒化けい素の表面欠陥が転がり疲れ寿命に与える影響について検討した。

窒化けい素は高脆性材料として一般に知られており、窒化けい素を軸受鋼に使用した場合、ちょっとした表面欠陥により重大な破損に至る心配がある。そこでここでは、窒化けい素平板にピッカース圧痕と線条痕をそれぞれ付与して転がり疲れ寿命試験を行った。その結果、①ピッカース圧痕を付与した窒化けい素平板の試験では、30 μm以下のピッカース圧痕が単独で存在する場合は、転がり疲れ寿命に影響しない(図3)。②線条痕を付与した窒化けい素平板の試験では、線条痕幅30 μm以下では線条痕部や窒化けい素玉に摩耗は発生しない(表1)。等が明らかとなった。また、はく離が発生した窒化けい素軸受をさらに運転し、短時間で大きな破損に至らないことも確認した。

表1 線条痕を付与した窒化けい素平板の転がり寿命試験結果

線条痕幅	試験時間	摩耗
20 μm	450Hr 打切り	無
30 μm	450Hr 打切り	無
40 μm	450Hr 打切り	無
	450Hr 打切り	有
50 μm	450Hr 打切り	無
	450Hr 打切り	有

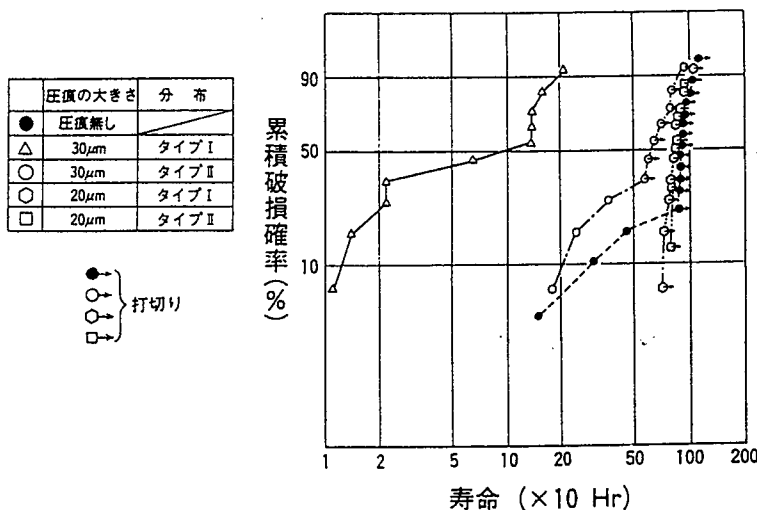


図3 ピッカース圧痕を付与した窒化けい素平板の転がり疲れ寿命試験結果

第6章 窒化けい素軸受のはめあいについて

本章では、窒化けい素内輪と鋼製軸のはめあい限界について検討した。

窒化けい素は鋼に比べて1/4～1/5の線膨張係数である。したがって総セラミック軸受を使用する場合、運転中の温度上昇により、軸が膨張して窒化けい素内輪が破損する可能性がある。そこで、ここでは窒化けい素内輪と鋼製軸の静的はめあい試験及び動的是めあい試験を行うと共に、それぞれの場合で軸形状（中実軸、中空軸、スプライン軸）の影響についても検討した。その結果、①静的はめあい限界に比べて動的是めあい限界が小さくなること。②静的はめあい限界及び動的是めあい限界ともに、中実軸に比べて中空軸及びスプライン軸が大きくなること。③総セラミック軸受を鋼製軸に組込んで使用する場合、窒化けい素内輪に発生する円周応力を200MPa以下にする必要があること。等を明らかにした。

第7章 窒化けい素軸受の水中における転がり疲れ寿命

第2章から第6章では、窒化けい素軸受の基礎研究に関して明らかにした。ここからは、窒化けい素軸受の応用研究について述べる。

本章では、窒化けい素軸受の水中での使用について検討した。総セラミック軸受、組合せセラミック軸受Ⅰ（内外輪：SUS440C、玉：窒化けい素）、組合せセラミック軸受Ⅱ（内外輪：SUS630、玉：窒化けい素）及びステンレス軸受を水中で寿命試験を行い、それぞれの損傷形態を明らかにした（表2）。その結果、総セラミック軸受の損傷形態は油潤滑の場合と同様のはく離であることより、水中での総セラミック軸受の寿命は、従来の寿命計算式から予測できることを述べた（なお、組合せセラミック軸受とステンレス軸受の損傷形態は摩耗であることより、従来の寿命計算式の適用は困難）。

表2 水中での破損形態

軸受種類	損傷形態
総セラミック軸受 NC6206	はく離
組合せセラミック軸受Ⅰ 3NC6206ST4	軌道輪の摩耗主体 一部軌道輪の微小はく離及び表層はく離
組合せセラミック軸受Ⅱ 3NC6206MD4	軌道輪の摩耗主体 一部軌道輪の微小はく離及び表層はく離
ステンレス軸受 6206ST	摩耗主体 一部軌道輪の微小はく離

第8章 窒化けい素軸受の高温における運転性能

本章では、高温（500℃）雰囲気ではく離で窒化けい素軸受を使用する場合について検討した。

高温500℃では油やグリースが使用できないので、黒鉛クロム系セラミック複合材料の固体潤滑保持器を用いた総セラミック軸受の高温（500℃）潤滑性能試験を行った。その結果、①7204相当の総セラミック軸受を、15,000r/minで運転しても問題無いこと。②総セラミック軸受の駆動トルクは、グリースを用いた軸受とほぼ同等であること。③固体潤滑移着膜の不均一さにより、総セラミック軸受の振動はグリースを用いた軸受の振動より1桁大きくなること。等を明らかにした。

第9章 組合せセラミック軸受の高速性能

本章では、窒化けい素を高速回転する軸受の転動体（ここでは玉）に応用した場合の軸受特性について検討する。具体的には、玉に窒化けい素を用いた組合せセラミック軸受と鋼製軸受の高速回転時の性能を定量的に把握するために、軸受部の動力損失に注目して試験を実施し、それぞれの軸受の動力損失を比較した（表3）。

その結果、①同量の潤滑油を用いた場合、組合せセラミック軸受は鋼製軸受に比べて回転数100,000r/minで30%動力損失が削減できること。②組合せセラミック軸受は鋼製軸受に比べて潤滑油量を少なくできるので、潤滑油量を考慮した場合、組合せセラミック軸受は鋼製軸受に比べて、100,000r/minで55%動力損失が削減できること。等を明らかにした。

表3 動力損失の比較

	焼付き限界油量 (L/min)		動力損失比 (鋼製軸受を1とする)			
			潤滑油量：1.0L/min		潤滑油量：焼付き限界油量 2倍	
	80,000r/min	100,000r/min	80,000r/min	100,000r/min	80,000r/min	100,000r/min
鋼製軸受	0.15	0.25	1	1	1	1
組合せ セラミック軸受	0.1	0.15	0.9	0.7	0.7	0.45

第10章 結論

本章では、第2章から第9章までに得られた結果を列記した。最後に本論文で得られた成果により、今後窒化けい素軸受は、各種産業分野でさらに実用化が進んでいくことを述べている。

審査結果の要旨

窒化けい素転がり軸受は、航空機のガスタービンエンジン用軸受や工作機械主軸用軸受への実用化を中心として、各種産業分野に広まりつつある。しかし、窒化けい素軸受の耐荷重性や軸受寿命等に関する実用化のための資料は未だ非常に乏しく、基礎的設計指針は確立されていない。

本論文は、このような現状において、窒化けい素転がり軸受の諸特性を幅広い条件のもとで実験的に明らかにし、軸受設計と実用の指針を明らかにしたものであり、全編10章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、窒化けい素球に発生するクラックの観点から、窒化けい素転がり軸受の静的負荷能力（静定格荷重）の検討を行い、鋼製軸受と同等以上の静的負荷能力を有していることを明らかにしている。これは窒化けい素転がり軸受設計のための基本知識として重要である。

第3章では、窒化けい素と軸受鋼の転がり疲れ寿命を比較し、窒化けい素が軸受鋼と同等以上の転がり疲れ寿命を有していることを明らかにしている。これは窒化けい素を転がり軸受に適用するための信頼性を保証するものである。

第4章では、総セラミック軸受（内外輪、玉共に窒化けい素）及び組合せセラミック軸受（内外輪が鋼、玉が窒化けい素）の転がり疲れ寿命試験を行い、これらが鋼製軸受と比べて同等以上の寿命を有していることを明らかにしている。これは窒化けい素転がり軸受を設計・製作するための基礎知識として重要な知見である。

第5章では、窒化けい素平板にピッカーズ圧痕と線条痕をつけ寿命試験を行い、窒化けい素の転がり疲れ寿命と表面欠陥の関係を明らかにしている。また、窒化けい素転がり軸受の運転中におけるはく離痕の変化状態も観察している。これらは、窒化けい素転がり軸受の信頼性を確認するために重要な知見である。

第6章では、窒化けい素転がり軸受の窒化けい素内輪と鋼製軸のはめあい限界を求める試験を行い、静的のはめあい限界と動的のはめあい限界を明らかにしている。窒化けい素内輪と鋼製軸を組合わせて使用する際、温度が上昇すると窒化けい素と金属の線膨張係数の差により、軸が膨張して窒化けい素内輪が破損することがある。従って、ここで明らかにしている静的のはめあい限界と動的のはめあい限界は、窒化けい素転がり軸受を使用する場合の基礎知識として重要な知見である。

第7章では、窒化けい素転がり軸受の水中での寿命試験を行い、その耐荷重性を明らかにするとともに寿命計算式を提案している。これは、窒化けい素転がり軸受を水中で使用する際の実用上重要かつ有益な知見である。

第8章では、固体潤滑保持器を用いた窒化けい素転がり軸受の500℃における性能試験により、そのトルク特性と振動特性を明らかにし、それが高温雰囲気でも実用可能であることを明らかにしている。

第9章では、玉が窒化けい素の組合せセラミック軸受と鋼製軸受の高速回転試験を行い、鋼製軸受に比べて組合せセラミック軸受の方が優れた特性を示すことを明らかにするとともに、組合せセラミック軸受は鋼製軸受に比べて軸受部の動力損失を大幅に低減させることを明らかにしている。これは、組合せセラミック軸受を高速回転で使用する際の実用上重要かつ有益な知見である。

第10章は、結論である。

以上要するに本論文は、窒化けい素転がり軸受を各種産業分野に広く用いるために、窒化けい素転がり軸受の設計と実用ための指針を明らかにし、その有効性を実証したものであり、機械工学ならびにトライボロジーの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。