

軸受基礎要素技術の動向と展望

Trends of Basic Technologies of Rolling Bearings



荒井 肇*
H. ARAI

In correspond to recent technical improvements of machines or apparatuses in various industries, rolling bearings applied are required to have higher performance in life, noise, torque, etc., because they are used in such wide conditions as high speed, high or low temperature, high load, or special environments.

Herein, these trends are reviewed, and future movements about basic or elemental researches and developments on rolling bearings are briefly commented.

Key words: rolling bearing, performance, trend, analysis, material, grease, retainer, ceramic.

1. はじめに

転がり軸受の用途の多様化と用いられる機械・装置類の高性能化・高機能化などとともに高速化，高・低温化，高荷重化，特殊雰囲気化などの使用条件の変化は著しく，小型軽量化，低トルク化，低騒音化，長寿命化などの軸受に対する要求性能はますます高まる傾向にある。

これらに対応する軸受製品の開発には軸受理論・解析，材料・熱処理，潤滑，基礎要素技術，新材料(樹脂，セラミックス)，表面処理技術などの果たすべき役割は大きく，これらの技術の進展があつて初めて達成される。

ここでは，これらの各技術分野についてこれまでの動向を振り返り，今後の展望をまとめてみたい。

2. 軸受理論解析

軸受分野におけるここ十数年の解析技術の発達 は目覚しく，数多くの優れたプログラムや手法が開発され，これらを使った技術検討やシミュレーションによる最適設計が行われるようになってきた。軸受の設計に必要な解析技術とKoyoにおける解析例を図1に示す。静的解析に必要な基礎理論(Hertz理論)は19世紀末には確立されていたが，動的性能を議論するのに必要な解析ができるようになったのは比較的近年である。その原動力になったのはコンピュータの発達と同時に弾性流体潤

滑理論(以下EHLと称す)の確立が大きい。すなわち軸受へのEHLの適用拡大とともにその数値解析技術が発展してきた。

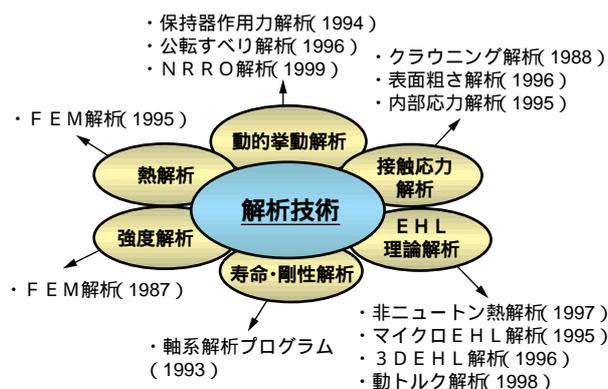


図1 解析技術とその応用例
Basic analysis

EHLは流体理論を組み合わせた接触問題を解くことによって，接触部の詳細な膜厚分布，圧力分布を求めることができる。油膜厚さと表面粗さとの比から寿命が，圧力分布からトルクが，すべり条件下ではトラクション・発熱などの性能が求められることができる。当社では1987年に光干渉法を用いた油膜厚さ測定装置を開発し，さまざまな運転条件や各種の油種について油膜挙動を明らかにした。併せて，理論的検討も行い，3次元モデルで通常の解析では収束解が得にくい4GPaを超える高面圧での圧力分布が得られている。また，2次元モデルを用いて実測値と良く一致するころ軸

*常務取締役 総合技術研究所長

受の動摩擦トルク理論式を導出した。

動解析にEHL・トラクションモデルが考慮され、転動体のスピン・すべりなどによる発熱計算、公転すべり・保持器などの運動解析ができるようになったのは1980年代後半である。Koyoでは、HDDスピンドル用玉軸受で重要な特性の1つであるNRRO(非同期回転振れ)をリアルタイムシミュレーションできる手法を確立した。HDD軸受にはナノオーダレベルの性能が求められており、Koyoではこのプログラムを用いて影響度の大きい要因を抽出し加工精度を上げている。

動解析は軸受の動的性能を予測する上で有力なツールとなるが、実験検証や収束性などの問題もあり、今後、信頼性、計算技術などを高めることが課題となっている。

現状の解析対象分野は、材料力学、機械力学、動力学、振動、熱、EHL、疲労、潤滑など多岐にわたるが、今後個々の解析内容の高度化、高速化、底辺の拡大を計り、また、これまで解析対象物は軸受単体が多かったが、今後は軸受周辺を含む構造物(ユニット品)の解析への対応を計りたい。

3. 材料・熱処理

3.1 材料技術開発

転がり軸受における材料技術開発の取組みを図2に示す。長寿命化技術と寿命解析技術は転がり軸受に関する材料技術開発の主要な課題である。近年では、顧客の低コスト化要請に対応するために開発の重点が移っていく傾向にある。以下に、これまで取り組んできた長寿命化技術開発の事例を紹介する。なお、個別内容は本誌別稿で詳細に報告されているのでここでは概要を述べるとどめる。

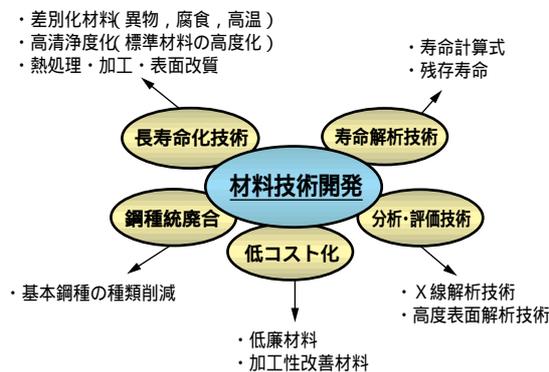


図2 材料技術とその応用例

Material technology

3.2 長寿命化技術

長寿命化への対応は、清浄な潤滑剤中での寿命向上策 異物が混入した潤滑剤中での寿命向上策 高温域での寿命向上策などに分けられる。

3.2.1 清浄な潤滑剤中での寿命向上

清浄な潤滑剤中での転がり疲れ寿命の向上策は、材料内に発生したき裂の発生、進展をいかに抑えるかであり、材料清浄度の向上(非金属介在物の低減)と材料自体の強度向上が必要である。前者は高纯净度軸受鋼HRSとして、後者は高強度軸受鋼GT鋼として開発し、商品化した。

3.2.2 異物混入潤滑剤中での寿命向上

自動車のトランスミッション、デファレンシャルで使用される軸受は、ギヤの摩耗粉等の異物が混入した状態で潤滑され、圧痕を起点としたはく離が発生しやすい。異物混入潤滑剤中の寿命向上には表面硬度を高くすることで転走面の耐摩耗性を向上させることや、異物による圧痕を付きにくくすることが有効で、Koyoでは表面硬化熱処理方法の開発によりSH軸受、KE軸受を開発した。現在、SH軸受は深溝玉軸受に、KE軸受は円すいころ軸受に主に採用している。

3.2.3 準高温用軸受鋼の開発

100 ~ 200 程度の準高温域で軸受を使用するには、焼戻し軟化抵抗性向上、繰返し疲労による組織変化ならびに硬さ低下の抑制が必要である。このような考えのもとに準高温軸受鋼KUJ7を開発した。

転がり軸受の長寿命化にあたり、その課題の中には従来技術では互いに課題の解決を両立させることが困難なものもある。例えば、高硬度、高靱性の付与である。このような課題に対して表面硬化を主目的とする熱処理対策は有効な手段である。

また、安価材使用への要求が今後ともますます強まってくる。近年のコンピュータ技術の発達により、雰囲気、温度、時間といった熱処理条件の複雑な制御が可能になり、また炉内ガスの流れ解析もすすめられている。今後はこれらの技術を融合させ、高級材を使用することなく、軸受の長寿命への必要特性を満たすことの可能な熱処理技術の開発が課題である。

4. 潤滑技術

転がり軸受における潤滑技術は、軸受の性能面での重要な要素技術である。転がり軸受の80%はグリース潤滑が採用されており、油潤滑に比べ密封装置不要、機械の小型軽量化、メンテナンス容易等の多くの利点がある。機械装置の性能ならびに信頼性向上の動向に伴い転がり軸受の使用条件は過酷化しグリースの高性能化、長寿命化が必須となってきた。従来のNa系、Li系より優れた性能のウレア系グリースが60年代に米国で実用化され、KoyoにおいてもKNGシリーズを開発した。高温、高速、高荷重、長寿命のみならず、低トルク、低騒音、低発塵、高防錆など各用途に応じた高性能グリースを実用化してきた。さらに地球環境保全、安全性などにも対応したグリースの開発に向け基礎研究を進めている。主な取組みアイテムを図3に示す。

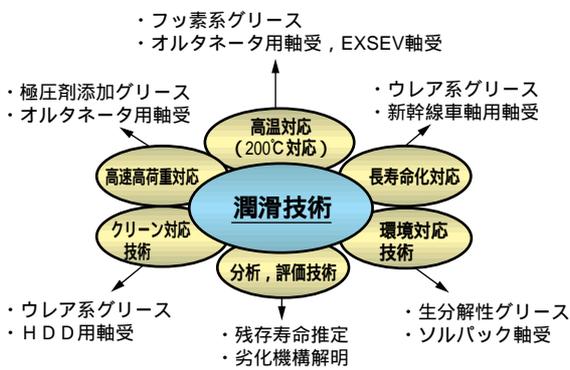


図3 潤滑技術とその応用例

Lubrication technology

以下に、おもな用途用グリース開発事例を示す。

4.1 オルタネータ軸受用グリース

高温高速化に対応してウレア/PAOグリース(KNG170)の開発で上限150℃まで可能となった。さらにポリVベルト化による高張力、高振動に起因する早期はくり対応としてウレア/ADE/有機金属系極圧剤グリースを開発し、信頼性向上、上限温度も170℃まで可能となった。

4.2 新幹線車軸軸受用グリース

従来、油潤滑方式であったが、1997年にJRの500系のぞみのグリース潤滑用に高速長寿命用の耐熱性、酸化安定性に優れたウレア系長寿命グリースを開発した。

4.3 電機・情報機器軸受用グリース

小型モータ用は、Li/エステル系グリースが主流であったが、低騒音対応のウレア系低騒音長寿命グリース(KNG144)を開発した。

4.4 環境調和型潤滑剤

植物油脂を基油とした生分解性グリースとして1998年にカルシウム石けん・菜種油を用いた長寿命生分解性グリース(バイオスーパーLLグリース)を開発し商品化した。このグリースは、エコマークの認証を取得している。その他に環境汚染防止を考慮したものとして、1996年には固形潤滑剤を封入した軸受(ソルパック)を開発した。

技術革新の進む中、転がり軸受のさらなる高性能化、高機能化の要求に応えるため、環境保全と安全を考慮しつつ、高性能化と経済性を追求した潤滑技術の研究開発が今後ますます重要となってくる。さらに、軸受内の潤滑挙動、潤滑機構、潤滑寿命の解明や潤滑剤と摩擦面のトライボケミカル反応の解明などの研究により、理論に裏付けられた潤滑技術の開発を目指してゆきたい。

5. 樹脂材料

樹脂材料は金属と比較して機械的物性、耐熱性に制約があるが、適正な使用環境下では樹脂材料の持つ特性が有効に発揮できる。特に柔軟性や自己潤滑性、軽量(衝撃、振動下での使用に有利)、耐腐食性、形状自由度などは転がり軸受の保持器としての必要特性を十分に満足している。

現在の取組み事例を図4に示す。

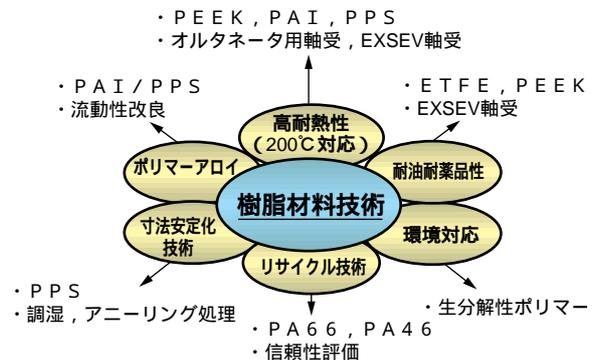


図4 樹脂材料技術とその応用例

Plastic technology

樹脂材料は軸受の使用条件、特に耐熱性、耐油性の過酷化にともない、ポリアセタール樹脂からポリアミド樹脂へと変わってきたが、コストと性能のバランスから現在最も一般的に用いている材質はガラス繊維で強化したポリアミド樹脂である。

しかし、使用温度、耐衝撃性等の条件により180℃以上の高温では耐熱性に優れたスーパーエンプラであるPEEK樹脂を用いる場合もある。

PEEK樹脂では、その分子構造から高剛性で成形時の白化異常の防止が課題である。

Koyoでは、各軸受形式と用途区分での保持器用樹脂材料の標準化をしている。今後の研究方向としては、材料開発とともに成形技術と設計の最適化を併せた取組みがますます重要となっている。

6. セラミック材料

窒化けい素(Si_3N_4)や炭化けい素(SiC)に代表されるエンジニアリングセラミックスは耐熱性、耐食性、耐摩耗性など優れた特性をもつため、エンジン部品、各種産業機械部品、エレクトロニクス部品、半導体部品など広い分野で実用化されている。しかし構造用としての成功例は比較的少ない。当社においては、1980年に他社に先駆け、転がり軸受への適用に着目し転がり軸受に必要な特性を満足する窒化けい素材料の開発を進めた。1985年には窒化けい素を用いたセラミック玉軸受を開発し、各種用途用に製品化した。以下に用途別に開発品を紹介する。

6.1 特殊環境用セラミック軸受

上記セラミック材料の特徴が効果を発揮する環境としては、金属材料では使用できない高温環境、腐食環境、磁場環境、真空環境などの特殊環境があげられる。用途としては、半導体製造装置、原子力関係装置、宇宙関係装置などであり各条件に対応した製品をシリーズ化している。

6.2 工作機械用セラミック軸受

高速、高剛性、低昇温など要求性能の厳しい用途がセラミック材料の特性を最も活用できる。すなわち密度が小さく高速回転時の遠心力減少により面圧を低下できる。材料剛性が高く、軸受剛性、主軸剛性を向上できる。軸受での発熱が少なく潤滑油を減少させても接触部で損傷に至らない、などが挙げられる。

6.3 車載用セラミック軸受

高温、高速で使用される代表例がターボチャージャー用セラミック玉軸受である。運転時の軸受温度は200~300℃、回転速度も $d \cdot n$ 値で130万に達する。潤滑はオイルジェットで、油量は比較的

いがオイル中のスラッジ等の異物による軸受転送面への攻撃、損傷の可能性がある。このような使用条件に対しセラミック玉の耐熱性(軌道輪にはKoyo開発の準高温材料を使用)低密度硬さ大の各特性が効果を発揮している。特にセラミック玉とすることにより異物による玉の損傷を軽減にすることができる。

6.4 電機用セラミック軸受

電機用としてはHDDスピンドル用、ポリゴンミラースキャナーモータ用セラミック玉軸受を開発量産化している。いずれも低トルク低発塵長寿命：特に振動、トルク、NRR0などの機能性能寿命が要求される。このような条件に対し適正潤滑剤の選定、封入量、封入条件の適正化を計り、なおかつセラミック材料の貧潤滑下での優れたトライボロジー特性により、長期運転による潤滑悪化状態でのセラミック玉と金属軌道輪の損傷を軽減とすることができる。

以上のとおりセラミック軸受は、広い分野で製品化を進めてきたがさらに高性能材料開発・用途開発を進めている。

コストについてもここ数年で、数量の増大(ロットを大きくする効果)や材料、製造技術、品質保証技術の向上などにより改善を行ってきた。今後はさらなる高性能化とともにコスト、品質などをさらに配慮した製品開発に取り組んでいきたい。また、基礎研究においてもこれまでに築き上げたデータベースをさらに充実させ(質、量で)信頼性の高い製品の供給の裏付けをしていきたい。

7. 表面処理技術

転がり軸受における表面処理技術は、軸受に付加価値を与え、高性能化をはかる目的で使用される。Koyoでは1970年代より各種の表面処理技術とその技術を利用した軸受を開発・製品化している。

表面処理技術と適用製品を図5に示す。

表面処理技術としては、材料表面を窒化、浸炭などにより表面硬化する表面改質と材料表面に軟質金属や高分子膜を堆積させる表面処理(コーティング)に大別される。ここでは後者の表面処理技術を利用した代表的開発品について紹介する。

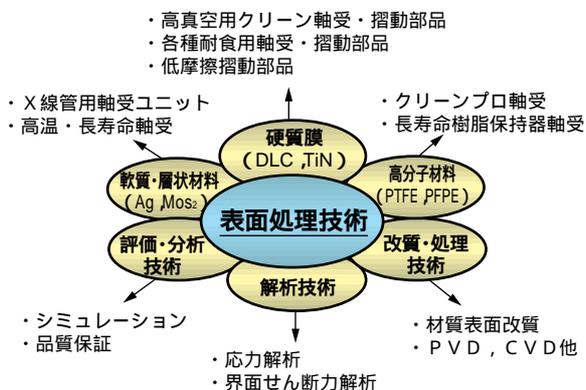


図5 表面処理技術とその応用例

Surface treatment technology

7.1 真空用銀イオンプレーティング(Ag-IP)軸受

Koyoでは、1978年世界ではじめてステンレス製の玉に銀のプレーティングをした真空用銀イオンプレーティング(Ag-IP)軸受の製品化に成功した。真空雰囲気では一般の油やグリースといった流体潤滑剤が使用できないことから固体潤滑剤である銀を採用したこの軸受は、真空装置産業の成長とともに広く用いられてきた。

特殊な用途としては医用回転陽極X線管があり、高真空($\sim 10^{-5}$ Pa)・高温($\sim 550^{\circ}\text{C}$)・高荷重($\sim 2.5\text{GPa}$)の過酷な条件で使用されるため、耐熱鋼に銀や鉛の特殊イオンプレーティングした総玉軸受が、数多く使用されている。

7.2 PTFE軸受、クリーンプロ軸受

その後1980年代後半より現在に至り半導体や情報機器をはじめとする電子部品産業急成長の背景からこれまでの要求が一変し、クリーン性、耐食性といったコンタミネーションに係わる要求が高まってきた。そこでKoyoは、これらに対応したクリーン環境で使用できるPTFEをコーティングしたPTFE軸受や特殊ふっ素高分子をコーティングしたクリーンプロ軸受を開発・製品化した。これらの軸受は、低発塵性に優れるふっ素系高分子を特殊焼付け法や特殊ディッピング法により部品単体や軸受全体にコーティングしたもので、スパッタリング装置やCVD装置といった半導体・液晶製造装置用クリーン軸受として広くご使用されている。

近年、PVD、CVDをはじめとする種々の表面処理技術が進展し、今後さらなる多様かつ過酷な要求に対応するため、これら技術の適用拡大を進めたい。

これら表面処理技術に関連して薄膜の応力解析や評価・分析技術も今後の必要不可欠な技術のひとつとなり、被加工体となる材料に関する技術、それから表面処理後の加工技術などを含めてこれらをトータルで考えること、すなわち表面工学としてとらえることが重要となるだろう。

8. おわりに

以上当社の軸受製品を支える基礎要素技術の比較的最近の成果と近未来の展望について述べた。ころがり軸受は構成要素が少なく極めて単純な構造である。この基礎的な要素部品をさらに進化させていくためには、既存技術の延長線上にあるものの追求と併せて、新しい材料、材料の熱処理、表面改質、成形方法などの物質レベル、分子レベルの研究が重要になるものと考えている。

また、ここでは軸受単体について述べたが、軸受を使用する機械システムとしての最適設計も重要な課題である。環境に対する負荷の少ない軸受システムが提案できるように、周辺技術を含めた研究・開発を推進していきたい。