

新幹線車軸用油浴潤滑式円すいころ軸受の低昇温化技術開発

Development of Low Temperature Rise Technology for Oil Bath Tapered Roller Bearings Adopted in High-speed Train Axles

大西真吾 S. ONISHI 加藤弘之 H. KATOU 戸谷仁史 H. TOYA 戸田拓矢 T. TODA

Manufacturers of axle bearings adopted in high-speed trains face the issue of increasing temperature rise due to faster travel speeds. In particular, oil bath lubrication generates a large amount of heat due to oil agitation. In response to this issue, we have developed additional parts which decrease temperature rise by 10% through controlling oil flow in an axle box. This paper introduces low temperature rise technology.

Key Words: high-speed train, oil bath, low temperature, tapered roller bearing, oil agitation, Shinkansen

1. はじめに

1964年の東海道新幹線の開業以来、日本の交通インフラとして欠かせない存在となっている新幹線は、その走行速度を向上させることで経済の成長に貢献してきた。開業当時の東海道新幹線の最高走行速度は時速210kmであったが、2021年現在は時速285kmまで向上している。また、東北新幹線ではさらに高速化を目指し、札幌延伸時に時速360kmを実現するための開発が進められている(図1)。高速化に伴い車軸軸受(図2)の昇温(軸受温度から環境温度を引いたもの)も上昇しており、発熱をどのように抑えるかが課題となっている。

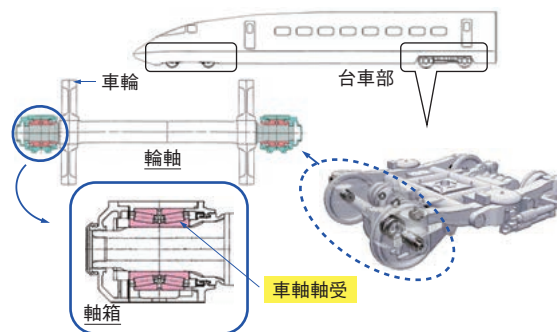


図2 車軸軸受使用箇所
Axle bearing mounted position

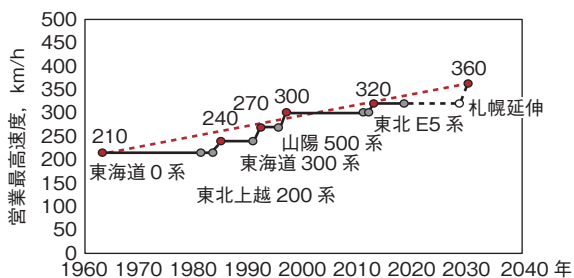


図1 最高走行速度の変遷
Transition of maximum travel speed

新幹線車軸軸受には主に3種類の仕様が存在する(図3)。中でも油浴潤滑式は、オイル窓や磁気栓により非分解でハウジング内部の軸受やオイルの状態を確認でき、新幹線開業以来使用されてきた信頼性の高い方式である。一方でグリース潤滑式に比べて温度が高いという短所が存在する。この油浴潤滑式の円すいころ軸受について、発熱を抑える開発に取り組み、現行品に対して外輪昇温を6℃(10%)低下させることに成功した。今回この低昇温化技術について紹介する。




開発対象軸受			
	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
品種	複列円筒ころ軸受	複列円すいころ軸受	複列円すいころ軸受
潤滑	油浴潤滑式	油浴潤滑式	グリース潤滑式
構造			
長所	・オイル窓や磁気栓で軸受状態を把握 ・信頼性の高い潤滑方式		・発熱が小さい ・軸箱構造簡素
	・分解点検容易	・走行安定性が高い	
短所	・グリース潤滑式に比べて温度が高い		・分解に伴う軸受状態確認

図3 車軸軸受の仕様
Axle bearing specifications

2. 開発の狙い

新幹線車軸用の油浴潤滑式円すいころ軸受は複列で構成されており、ハウジングにより周囲を覆われている。また、ハウジングには油だまりと呼ばれるくぼみが存在し、車軸中心から下方80mmのところまで潤滑油が満たされている。停止時、最下部のころは半分程度潤滑油に浸かっており、走行時はこの潤滑油をかき上げながら回転する。なお、試験時は外輪外径面上部に取り付けられた熱電対とハウジング下部に取り付けられた潤滑油中の熱電対で昇温を測定し状態を監視している(図4)。

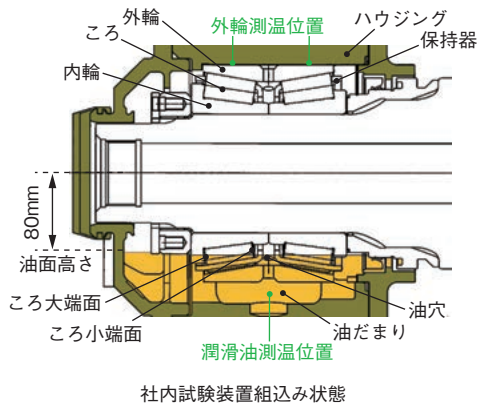


図4 油浴潤滑式円すいころ軸受
Oil bath tapered roller bearing

過去の社内試験結果より、油浴潤滑式とグリース潤滑式を比較すると昇温に対する速度依存性が大きく異なることが分かっており、時速400kmでは昇温で約30℃の差が発生する(図5)。

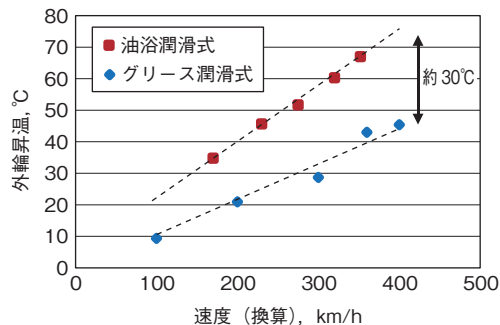


図5 潤滑方式の比較 (円すいころ軸受)
Comparison of lubrication methods (tapered roller bearing)

円すいころ軸受の発熱要因は、転がり粘性抵抗や潤滑油のかくはん抵抗、内輪大つば—ころ大端面のしゅう動抵抗などであるが、油浴潤滑式軸受では、潤滑油のかくはん抵抗が大きな要因となっていると考えられる。当社では、過去に自動車用デファレンシャルのピニオン軸で使用されるLFT® (Low Friction Torque) 軸受¹⁾において、保持器構造を工夫することにより潤滑油のかくはん抵抗を抑えることにより、従来品と比較して最大50%以上のトルク低減(かくはん抵抗の抑制)を達成した。この技術を参考にして、本開発では、ハウジング構造や油量を変更することなく、軸受周辺の構造変更のみで潤滑油のかくはん抵抗を小さくし、高速走行時の発熱を抑えることを狙いとした。

3. 高速走行条件での潤滑油挙動推定

3.1 潤滑油挙動推定 (高速走行条件) の手順

潤滑油のかくはん抵抗を小さくするためには、回転中のハウジング内部の潤滑油の状態を把握する必要がある。アクリル製透明ケースを用いた観察を考えた。しかし、アクリル製透明ケースでは耐久性の問題から実車相当の高速走行条件での台上試験の実施・観察は難しく、CAE解析技術を活用することとした。手順としてはまず、低速走行条件(回転速度: 500min⁻¹)にてアクリル製透明ケース、高速度カメラを用いた台上試験による可視化を行う。また、同様に低速走行条件にてCAE流体解析を実施し、合わせ込みを行う。潤滑油の流れが再現できていることを確認したのち、高速走行条件(回転速度: 2 418min⁻¹, 車速: 時速360km相当)にてCAE流体解析を実施し、かくはんの状態を推定した(図6)。

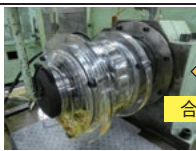
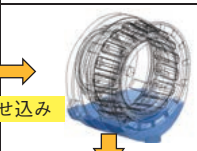
	透明ケース+高速カメラ	CAE 流体解析
500min ⁻¹		
	合わせ込み	
2 418min ⁻¹ (360km/h相当)	耐久性で不可 (一番知りたい)	高速走行条件 推定

図6 潤滑油挙動推定（高速走行条件）の手順
Procedure for estimating lubricating oil behavior (high-speed travel)

3.2 台上可視化試験結果（低速走行条件）

アクリル製透明ケースと高速カメラを用いた観察は、潤滑油をかき上げる正面側とその反対の背面側の2方向で実施した（表1、図7）。潤滑油をかき上げる正面側では、軸受下部にて潤滑油がころ大端側から流入し、小端側へ向かって転走面を通過することが確認できた（図8）。また、背面側では軸受上部において、前述のころ小端側へ向かった潤滑油が押し戻され大端側から排出されていることが確認できた（図9）。

表1 試験条件（低速走行条件）
Test condition (low-speed travel)

項目	台上試験	CAE 流体解析
回転速度	500min ⁻¹	
油温	40℃	
荷重	極小荷重	無負荷
解析対象	—	片列（軸端側）

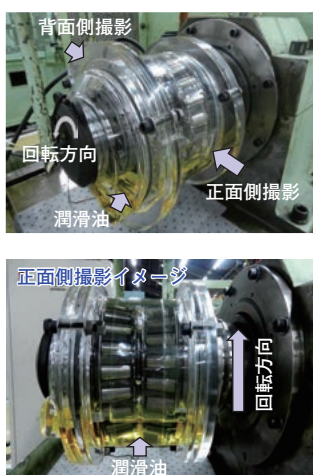


図7 撮影状況
Video recording state

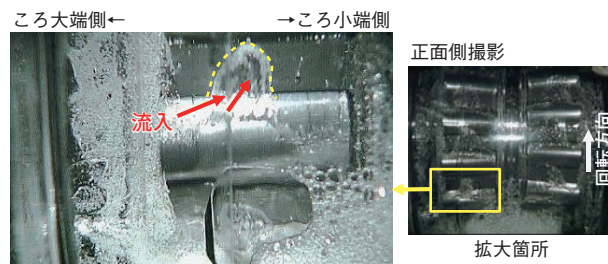


図8 潤滑油の流入方向（正面側）
Inflow of lubricating oil (front)

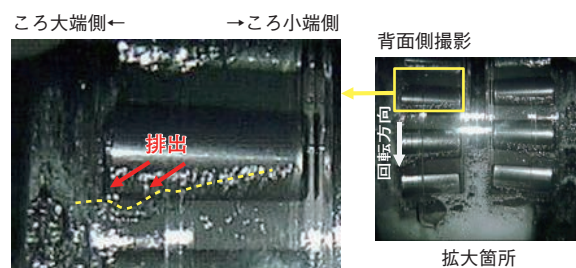


図9 潤滑油の排出方向（背面側）
Outflow of lubricating oil (rear)

3.3 CAE 流体解析結果（低速走行条件）

台上試験と同様の条件にて、CAEによる流体解析を実施した。潤滑油をかき上げる正面側では、台上試験と同様に潤滑油がころ大端側から流入し、小端側へ向かって転走面を通過しており（図10）、背面側では潤滑油が押し戻され、ころ大端側から排出されていることが確認できた（図11）。

台上試験とCAE流体解析にて潤滑油の流入、排出の方向、位相が近似していることが確認できた。この結果より、低速走行条件ではCAE流体解析で実機相当の潤滑油の流れが再現できていると判断した。したがって、高速走行条件でのCAE流体解析による潤滑油の挙動推定が可能であると考えた。

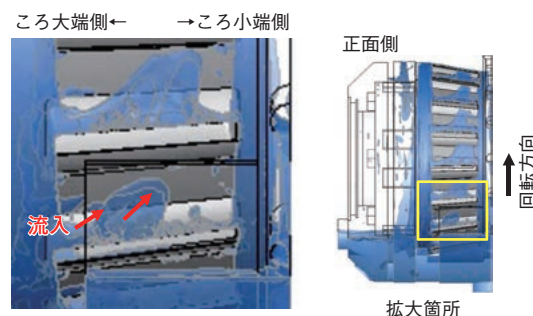


図10 潤滑油の流入方向（正面側）
Inflow of lubricating oil (front)

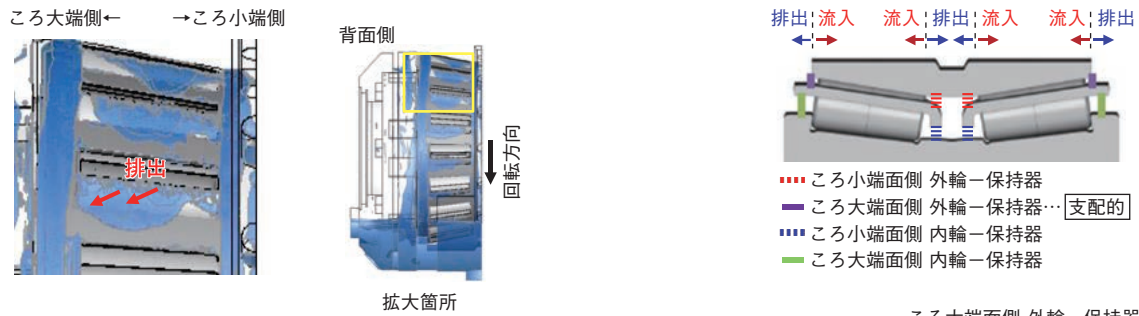


図11 潤滑油の排出方向（背面側）
Outflow of lubricating oil (rear)

3.4 CAE 流体解析結果（高速走行条件）

3.3 項と同様に CAE 流体解析を高速走行条件（表2）にて実施した。ころ転走部への潤滑油の出入りを大きく4面で区切り（ころ小端面側 外輪-保持器間，ころ大端面側 外輪-保持器間，ころ小端面側 内輪-保持器間，ころ大端面側 内輪-保持器間）時系列で追跡した。その結果，ころ大端面側 外輪-保持器間における潤滑油の流入，排出が最も支配的であることが分かった。また，ころ大端面 外輪-保持器間の潤滑油流入時にかくはん抵抗が大きくなる傾向が認められた（図12）。

表2 試験条件（高速走行条件）
Test condition (high-speed travel)

項目	内容
回転速度	2 418min ⁻¹ （車速：時速 360km 相当）
油温	95.5℃
荷重	無負荷
解析対象	片列（軸端側）

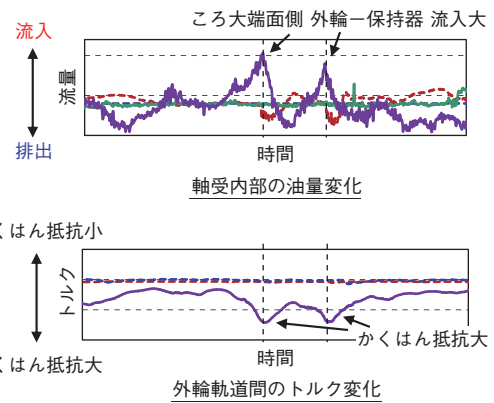


図12 潤滑油挙動とかくはん抵抗の関係
Relationship between lubricating oil behavior and agitating resistance

特に潤滑油の流入，排出の多いころ大端面側に着目し，それぞれの位相を観察した結果，次の傾向があることが分かった（図13）。

- ・ 流入位相：135 度～ 225 度
油面下の位相で公転するころによって，ころ大端面側からかき上げられ，その後ころ小端面側へ流れる。
- ・ 排出位相：0 度～ 135 度
軸受のポンプ作用によりころ大端面側への力が常に発生しており，0 度付近でころ小端面側からころ大端面側へ押し戻されるように流れ始める。

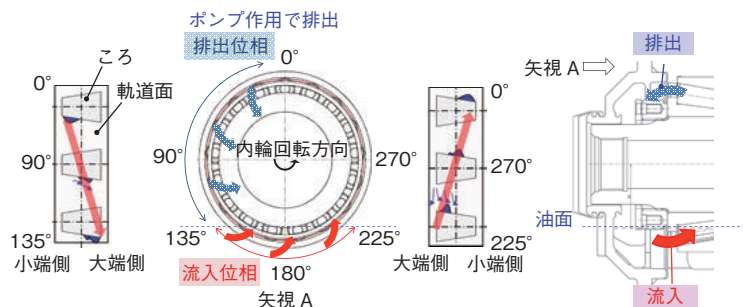


図13 潤滑油の流入位相，排出位相
Lubricating oil inflow phase and outflow phase

4. 設計案①

4.1 設計案①のコンセプト

3.4 項の結果から、潤滑油がころ大端面から流入する際にかくはん抵抗が増加していることが分かった。また、流入する位相は135度～225度の箇所であり、この位相の潤滑油の流入を抑制できれば、かくはん抵抗を低減し、発熱を低下させられると考えた。したがって、設計案①では潤滑油の流入を抑制する遮へい板（図14）にて検証を実施した。なお、遮へい板は外輪の両端面に取り付ける構造とした（図15）。



図14 遮へい板の構造
Shield plate structure

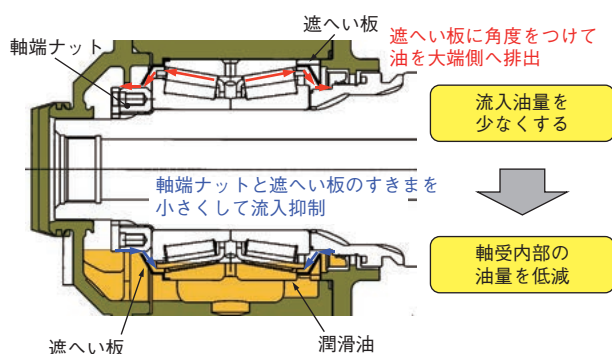


図15 遮へい板取り付けのイメージ図
Image diagram of shield plate installation

4.2 台上昇温試験（高速走行条件）

本遮へい板を取り付けた軸受で高速走行条件（表3）での試験を実施した。試験結果は予想と異なり外輪昇温の低下効果は認められなかった。一方、ハウジング下部で測定している潤滑油温度の低下が認められた（図16）。

軸受内部の温められた潤滑油が遮へい板、またはハウジングの突起部分により排出を阻害され、油だまり側へ循環しなかったため外輪昇温は現行品と同程度で低下せず、潤滑油温度が低下したと考えた（図17）。また、外輪昇温に変化がないことから、軸受内部でかくはんされる潤滑油の量が変化していないと推定した。

表3 試験条件
Test condition

項目	内容
回転速度	2 418min ⁻¹ （車速：時速360km相当）
ラジアル荷重	53.1kN
アキシアル荷重	15.9kN
試験時間	24時間
冷却	風冷10m/s

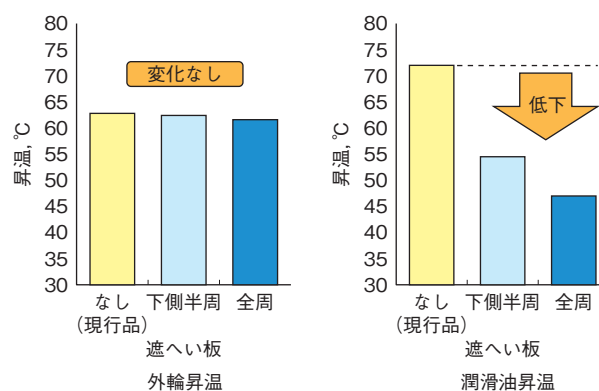


図16 試験結果
Test result

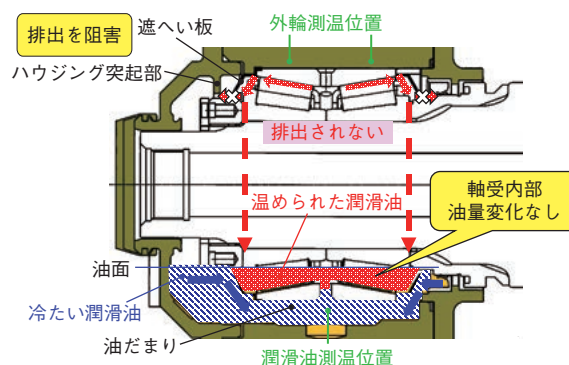


図17 潤滑油流れのイメージ図
Image of lubricating oil flow

5. 設計案②

5.1 設計案②のコンセプト

設計案②は、設計案①の試験結果から得られた知見を考慮し、軸受内部でかくはんされる潤滑油の量を減少させるため、以下のコンセプトで製作した。

- ・ 排出された潤滑油が軸受内部へ戻らないよう流入位相にラビリンス構造を設ける
- ・ 排出位相では可能な限り排出を阻害しないために排出窓を設ける

なお、外輪外径面には遮へい板を取り付け、回転輪側（軸端ナット）にはラビリンスカラーを取り付け、この

二つの部品でラビリンス構造を設けるものとした(図18)。

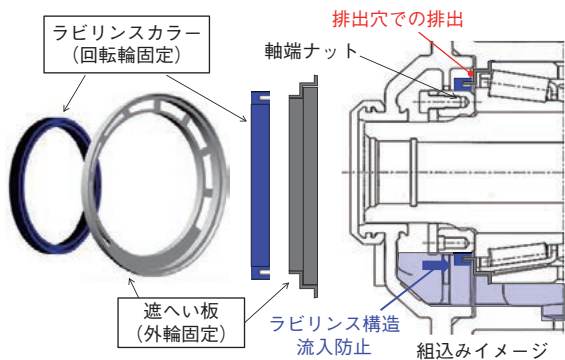


図18 設計案②の構造, 組み込みのイメージ図
Structure of developed product, diagram of embedded state

5.2 台上可視化試験 (低速走行条件)

高速走行条件で昇温値の比較を実施する前に, 流入抑制効果を確認するためにアクリル製透明ケースによる観察を行った。現行品と比較して設計案②の軸受下部では, ころ大端面からころ小端面へ向けて流入する潤滑油の量が減少していることが確認できた(図19)。

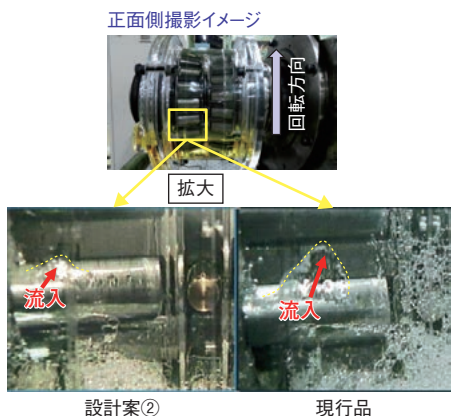


図19 観察結果
Observation result

5.3 台上昇温試験 (高速走行条件)

次に, 高速走行条件で試験を実施し, 設計案②の性能を確認した。外輪では現行品に対して, 約6℃(10%)の昇温低下に成功した。また, 潤滑油でも約16℃(25%)の昇温低下となっており, 潤滑油の熱劣化の抑制も期待できる結果が得られた(図20)。

設計案①で認められた, 潤滑油が排出されずに軸受内部でかくはんされる油量が変化しないという問題は解決された。それにより, 外輪, 潤滑油ともに昇温低下効果が得られ, 新幹線車軸用油浴潤滑式円すいころ軸受の低昇温化を実現することができた。

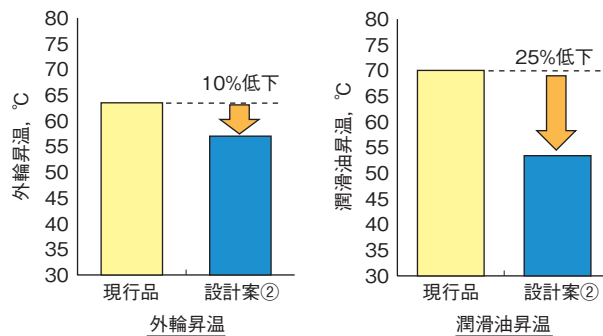


図20 試験結果
Test result

6. おわりに

新幹線車軸用油浴潤滑式円すいころ軸受の高速走行時における低昇温化を実現するために, ここでは軸受内部の潤滑油の挙動に着目した。具体的には, 低速走行条件での軸受内部の潤滑油の挙動を観察するため, アクリル製透明ケースを用いて可視化を行い, CAE 流体解析結果と実際の潤滑油の挙動がほぼ一致することを確認した。そこで, 高速走行条件でも CAE 流体解析が適用できると考え, 高速走行条件における潤滑油の流れを推測した。その結果をもとに軸受内部での潤滑油かくはんを抑制するラビリンスカラーと遮へい板を開発し, 現行品と比較して外輪昇温を約6℃(10%)低下させることができた。今後, 新幹線の高速化に対応した車軸軸受の低昇温化技術をさらに向上させ, 新幹線の安定操業に貢献していきたいと考える。

* LFT は, 株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 岡本大輔, 鈴木章之, 合田友之, 内藤光一郎: 次世代超低トルク円すいころ軸受 (LFT-IV) の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1014(2016)69.
- 船越久雄: 500系新幹線車軸用軸受について, Koyo Engineering Journal, No. 153(1998)33.
- 大山忠夫: 鉄道の起源と車両用軸受の変遷(2) - 車軸軸

受を中心とした進展一, Koyo Engineering Journal, No. 161(2002)65.

4) 浅井康夫, 大島宏之: 円すいころ軸受の低トルク化について, Koyo Engineering Journal, No. 143 (1993) 23.

5) 林田一徳, 松山博樹: 転がり軸受技術の進展と将来展望, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1015(2017) 17.

筆者



大西真吾*
S. ONISHI



加藤弘之*
H. KATOU



戸谷仁史*
H. TOYA



戸田拓矢**
T. TODA

* 産機・軸受事業本部 産業機器技術部

** 産機・軸受事業本部 実験解析部