

解 説

超低トルク円すいころ軸受の開発*

松山博樹**

* 平成 19 年 6 月 4 日原稿受付

** 株式会社ジェイテクト，〒582-8588 大阪府柏原市国分東条町 24-1

1. はじめに

円すいころ軸受は、サイズの等しい玉軸受に比べて 2~2.5 倍程度の大きな負荷容量を有する。また、玉軸受に比べてラジアル方向とアキシアル方向の両方向の大きな荷重を支持することができ、かつ剛性が高い。このため、円すいころ軸受は自動車をはじめとする産業機械の回転支持部に幅広く使用され、回転部の摩擦エネルギーの低減に大きく貢献している。しかし、円すいころ軸受は、玉軸受に比べて回転トルク（以下、トルクと称す）が高く、発熱が大きいという欠点を有している。近年の CO₂ 排出量削減を目的とした省エネルギー化、高効率化のニーズの中で、円すいころ軸受のトルクを低減し、長寿命、高剛性と両立を図ることは非常に重要な課題である。

円すいころ軸受の低トルク化には軸受メーカー各社が取り組んでおり、当社も 10 年以上前から低トルク円すいころ軸受¹⁾²⁾を市場に提供しているが、従来の低トルク円すいころ軸受のトルク低減率はせいぜい 20%程度であり、玉軸受のトルクに比べると依然として高い。そのため、燃費低減が法的規制で強く求められている自動車業界では、ユニットの高効率化を目的とした円すいころ軸受から玉軸受への置き換えが検討されている³⁾。しかし、円すいころ軸受と同等の寿命、剛性を得るためには玉軸受のサイズを大きくしなくてはならず、ユニットの大型化や構造の見直しが必要となる。これはコンパクト化という時代の流れに逆行する。

著者らは、このような状況を鑑み、新たな視点で実験と理論の両方に基づく画期的な低トルク化技術の開発に取り組んだ。具体的には、これまで検討されていない攪拌抵抗に着目し、転がり粘性抵抗と攪拌抵抗を低減するための設計指針を明らかにした。そして、これらの軸受設計技術を基幹として、従来の常識を打ち破る、玉軸受よりもトルクの低い超低トルク円すいころ軸受^{4)~6)}を開発した。本稿では、開発の着眼点、開発軸受の概要とその効果について紹介する。

2. 円すいころ軸受のトルク発生要因と寄与率

一般に、円すいころ軸受のトルクの発生要因は以下の 4 つである。

- ① ころと軌道との間の転がり粘性抵抗
- ② 内輪つばと端面の間のすべり抵抗
- ③ 潤滑油の攪拌抵抗
- ④ ころと保持器の間のすべり抵抗

従来の低トルク化手法は、転がり粘性抵抗とすべり抵抗に着目して、軌道形状や内輪つばの表面粗さ形状を最適化するというものであった¹⁾²⁾。しかし、円すいころ軸受が多量の潤滑油（以下、油と称す）で潤滑される場合、攪拌抵抗の影響を無視することはできない。

円すいころ軸受が多量の油で潤滑される用途の代表例として、図 1 に示すような自動車のディファレンシャル（以下、デフと称す）が挙げられる。ドライブピニオン（以下、ピニオンと称す）を支持する 2 つの円すいころ軸受にはリングギヤの回転に伴うはねかけによって多量のギヤオイルが供給され、軸受は油量過多の状態にある。透明アクリル樹脂で作製されたデフキャリアを用いて軸受周辺の油の挙動を観察した結果、ピニオン回転速度が 600~900r/min（車速 20~30km/h 相当）以上では円すいころ軸受が完全に油で満たされることがわかった。

つぎに、デフの代表的な運転条件における円すいころ軸受のトルク発生要因とその寄与率を実験と計算によって求めた結果⁴⁾を図2に示す。転がり粘性抵抗の寄与率がもっとも大きく、ついで攪拌抵抗の寄与率が大きいことがわかる。一方、すべり抵抗の寄与率は小さい。これは、内輪つばと端面の間には十分な油膜が形成されるためである。

以上の結果に基づき、転がり粘性抵抗のさらなる低減とともに、これまで未検討であった攪拌抵抗の低減に取り組むことによって、玉軸受並みの低トルク化が可能であると考えた。

3. 開発軸受の概要

今回開発した超低トルク円すいころ軸受の特徴を図3に示す。開発軸受は3つの基本技術から成り立っている。

第1の技術は性能バランスを考慮した内部諸元の最適化である。転がり粘性抵抗の低減にはころ数を減らし、ころ長さを短くしてころと軌道の接触面積を減らすことが有効であるが、単なる接触面積の削減は寿命と剛性の低下を招く。そこで、接触面積の削減と同時にころ径を大きく、接触角を大きくすることで寿命と剛性の低下を抑制した。さらに、軌道に特殊クラウニング形状を施して、低トルク化と長寿命化を両立させた。すなわち、エッジロードの発生と接触面圧の増加に伴う寿命低下を考慮したうえでクラウニング量を最適化して転がり粘性抵抗を低減した。このような内部諸元の最適化は、理論と実験に基づいた独自のトルク計算式⁷⁾と軸受の基礎理論式を組み合わせたコンピュータシミュレーションによって可能となる。

第2の技術は潤滑油の流れ制御による攪拌抵抗の低減である。軸受のトルクに及ぼす潤滑油の流入出経路の影響を調べた結果、図4に示すように、流入経路をふさぐと貫通油量が減ってトルクが減少し、逆に流出経路をふさぐとトルクが増加することが明らかとなった⁸⁾。本知見に基づき、潤滑油を軸受構成部品の1つとみなし、油の流れを設計した。すなわち、軸受内部に流入する油量を減らすために、保持器の内径を小さくし、内輪小つばに特殊形状を与え、保持器と内輪小つばの間にラビリン構造を形成した。さらに、軸受内部に流入した油の滞留を抑制し、速やかに外部に排出させるために、接触角を大きく、ころ数を少なく、ころ径を大きくして、軸受のポンプ性能を高めた。図5に流入油量制御の有無による軸受内部の油の攪拌状態の違いを示す。流入油量制御によって気泡の発生が抑制され、油の攪拌が低減されているのがわかる⁸⁾。

第3の技術は長寿命熱処理の適用による軸受の小型化である。当社は、軸受の表面硬度を高め、残留オーステナイト量を適正化して軸受の長寿命化を図る独自の熱処理技術を開発した⁹⁾。浸炭熱処理を基本とするこの熱処理技術を適用することによって、特にギヤなどの摩耗粉が混入した汚れ油中の軸受寿命を飛躍的に向上させることができる。軸受の負荷容量と静的強度を向上することができるので、寿命を保持したまま軸受を小型化できる。小型化によってトルクに及ぼす影響が最も大きいころピッチ円径を小さくすることが可能となり、転がり粘性抵抗と攪拌抵抗の低減に有効となる。

以上の基本技術に加え、従来の低トルク円すいころ軸受と同様、開発軸受の内輪つば面には特殊な表面粗さ形状¹⁰⁾が与えられている。これはなじみ運転後の内輪つば面の粗さ形状を近似したものであり、一般形状よりも接触面圧が低く、油膜形成に有利である。つばと端面間のすべり抵抗の低減に有効であり、耐摩耗、耐焼付き性に優れ、予圧の減少による支持剛性の低下を抑制できる。

同じ計算寿命を有するように設計された開発軸受と従来の低トルク円すいころ軸受（以下、従来低トルク軸受と称す）、複列アンギュラ玉軸受（以下、玉軸受と称す）のトルク実測値の比較⁵⁾を図6に示す。開発軸受は従来低トルク軸受に対して75%の低トルク化を実現し、玉軸受よりもトルクが低い。表1に示すように、標準的な自動車デフ用円すいころ軸受（以下、標準軸受と称す）を基準とした場合、開発軸受は軸受の基本性能を維持したまま80%の低トルク化と40%の軽量化が図られている。

4. 実機への適用

実機への適用例として、円すいころ軸受の代表的な用途である自動車のデフのピニオン部に開発軸

受を適用した場合の効果⁶⁾について以下に述べる。

図7は開発軸受をデフに適用した場合のピニオン軸支持構造を示す。流入油量を制御するラビリンス構造はヘッド軸受のみに設け、テール軸受には設けていない。これは以下の理由による。従来、ヘッド軸受には内輪の正面側から供給される油に加えて内輪の背面側からも油が供給されるため、潤滑油量が過多の状態であった⁴⁾。一方、デフの構造的理由によって、低温始動時や高速回転時にはテール軸受に油が供給されにくく、焼付きの発生が懸念されていた。新しいピニオン軸支持構造では、これらの課題を解決するために、ヘッド軸受に供給される油量を減らすことで攪拌抵抗を低減し、逆にテール軸受への供給油量を増加させて耐焼付き性を向上させている。

開発軸受を乗用車用デフのピニオン部に組み込み、ピニオン軸を回転させるのに必要なトルクとデフキャリア底部の油温を測定した結果⁶⁾を以下に示す。試料軸受を組付けたピニオン軸を図8に示す。これらの軸受は同等の寿命、軸支持剛性、静的強度を有するように設計されている。同一のデフに組み込むため、開発軸受と従来低トルク軸受の外径および組幅はもっともサイズの大きい玉軸受の外径と組幅に統一されている。

試験装置の概略構造を図9に示す。試料軸受は、なじみ運転された後にピニオン支持部に一定の予圧で組み込まれた。リングギヤとピニオンが噛合わないようピニオン形状を変更することで、ピニオン軸受のトルクのみを測定した。また、別のモータによってピニオンの回転速度に相当する速度でリングギヤを回転させることで、デフ内部の油の流れを実際と同じ状態にした。

試験結果を図10に示す。図10(a)は油温を一定に制御した場合のピニオン軸受のトルク測定結果である。試験を行った全速度域において開発軸受のトルクは玉軸受と同等であり、従来低トルク軸受よりも40%低い。これは標準軸受に比べて50%の低トルク化に相当する。つぎに、図10(b)はデフ内部の油温測定結果である。試験を行った全速度域において開発軸受の油温は玉軸受と同等である。約220km/hの車速に相当する、ピニオン回転速度が7000r/minのとき、開発軸受は従来低トルク軸受に比べて油温の上昇を約20°C抑制できる。

前述した実機試験に加えて、実車走行時を想定した負荷が軸受に作用する場合のトルク性能をベンチ試験で確認した。図11に2000r/minにおけるプロペラシャフトからの入力トルクと軸受トルクの関係を示す⁶⁾。負荷が大きくなると玉軸受のトルクは著しく増加して従来軸受との差がほとんどなくなるが、開発軸受はこのような高負荷条件下においても低トルク性能を維持できる。

以上のように、開発軸受が玉軸受と同等以上の低トルク、低昇温性能を有することが実機試験で確認できた。開発軸受は標準軸受に対して50%以上の低トルク化が図られているので、開発軸受をデフに適用することによってデフの動力損失を25~35%低減できる。今回開発した軸受の効果を試算すると、1.5~2%の車両燃費向上と3.5~4.5g/kmのCO₂排出量削減が期待できる。さらに、開発軸受の昇温抑制効果は、潤滑油の劣化防止や高速化対応だけでなく、冷却フィンの廃止など、ユニット側のコスト低減にも貢献できる。

5. おわりに

自動車のデフの効率向上を目的として開発した超低トルク化技術は、装置の性能向上と環境負荷低減を両立した21世紀型環境対応技術であり、地球環境保護のための要素技術として今後自動車だけではなく各種産業機械分野への拡大が期待される。たとえば、農機や建機のデフ、トランスミッション、斜軸式ピストンポンプ、ピストンモータなどの用途で使われる円すいころ軸受においても有効であり、機械装置の高効率化に貢献できると信じている。

参考文献

- 1) 竹内正道：LFT軸受について, Koyo Engineering Journal, 127 (1985) pp.52/58.
- 2) 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, 143 (1993) pp.23/26.
- 3) H. S. Braun and J. Poggel : The Drive Train Fitted in the BMW 1-Series, ATZ/MTZ extra, Oct. (2004)

pp.28.

- 4) H. Matsuyama, H. Dodoro, K. Ogino, H. Ohshima and K. Toda : Development of Super-Low Friction Torque Tapered Roller Bearing for Improved Fuel Efficiency, SAE Technical Paper, 2004-01-2674 (2004).
- 5) 松山博樹, 戸田一寿, 荻野清, 大島宏之, 上村篤司, 瀧井裕一 : 超低トルク円すいころ軸受の開発, トライボロジー会議予稿集 (2006 春・東京) pp.315/316.
- 6) H. Matsuyama, K. Toda, K. Kouda, K. Kawaguchi and A. Uemura : Development of Super-low Friction Torque Tapered Roller Bearing for High Efficiency Axle Differential, Proc. FISITA 2006 Yokohama Conf., F2006P299 (2006).
- 7) 松山博樹, 鎌本繁夫 : 円すいころ軸受における軌道接触部の摩擦トルク解析, Koyo Engineering Journal, 159 (2001) pp.52/60.
- 8) 千葉博行, 松山博樹, 戸田一寿 : 円すいころ軸受のトルクに及ぼす油流れの影響, Koyo Engineering Journal, 168 (2005) pp.25/30.
- 9) K. Toda, T. Mikami and T. M. Johns : Development of Long Life Bearing in Contaminated Lubrication, SAE Technical Paper, 921721 (1992).



著者紹介

まつやまひろき
松山博樹君

1991 年名古屋大学工学部電子機械工学科卒業。同年光洋精工株式会社（現株式会社ジェイテクト）入社，現在に至る。転がり軸受のトライボロジーに関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会，日本トライボロジー学会会員。

E-mail: hiroki_matsuyama@jtekt.co.jp

URL: http://jtekt.co.jp

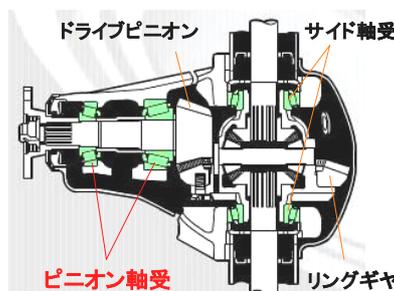
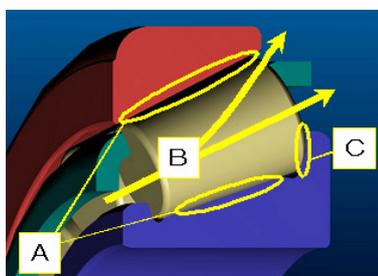
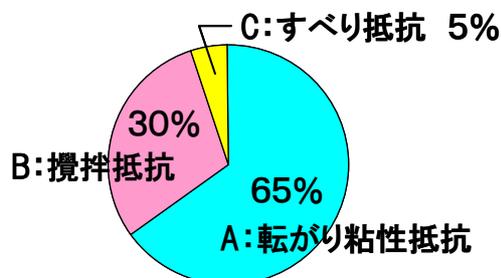


図 1 自動車ディファレンシャルの構造



(a) 円すいころ軸受の断面図



(b) トルク発生要因と寄与率

図 2 円すいころ軸受のトルク発生要因と寄与率
(荷重 : 4kN, 回転速度 : 2000r/min, 潤滑 : ギヤオイル, 油温 : 50°C)

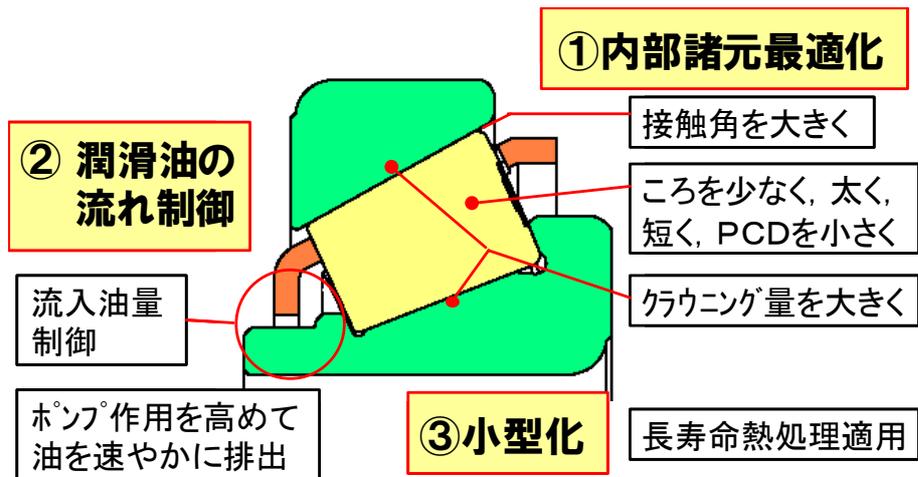


図3 開発軸受を構成する基本技術

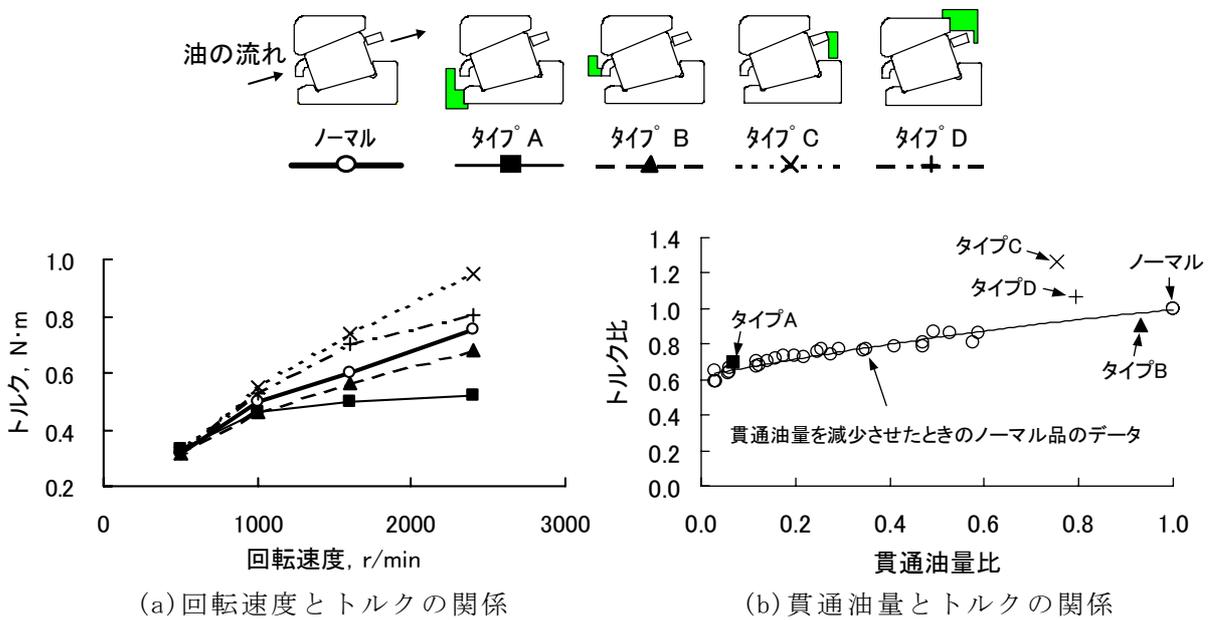


図4 トルクに及ぼす油流れ制御の影響

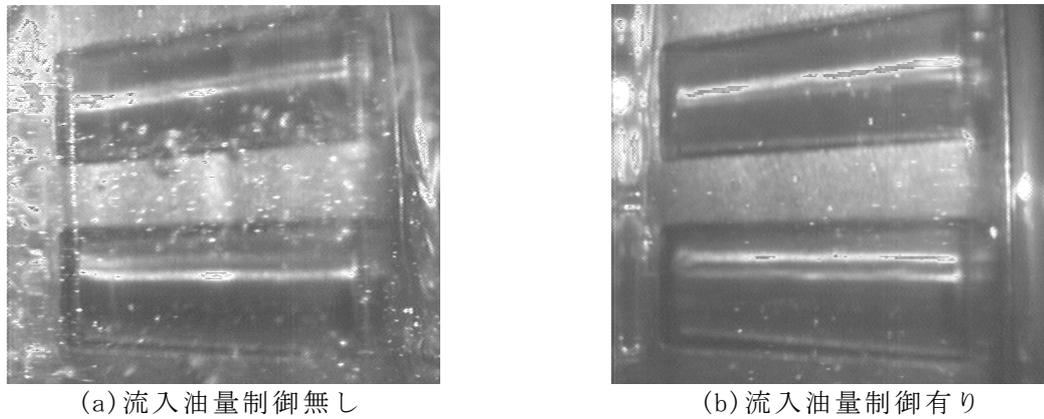


図5 流入油量制御有無による軸受内部の攪拌状態の比較

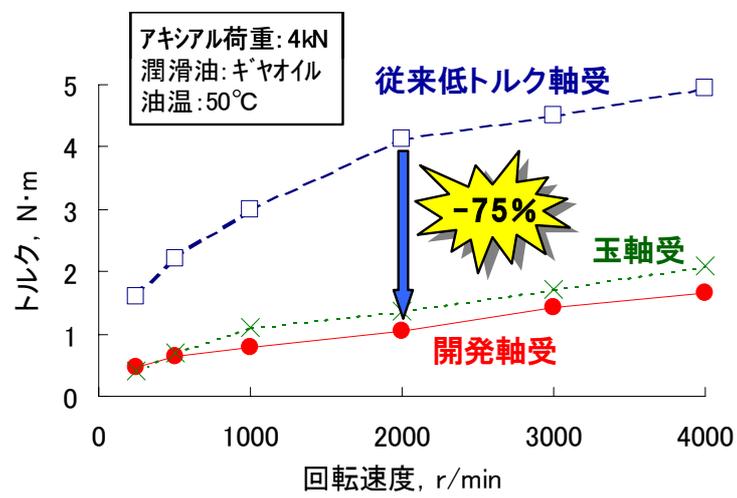
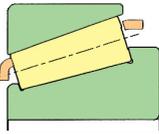
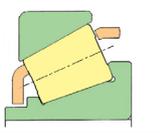
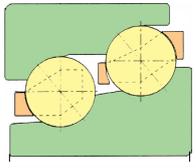


図6 開発軸受，従来低トルク軸受および玉軸受のトルク比較

表 1 開発軸受の性能（標準軸受の性能を 1 とした場合）

軸受タイプ	標準軸受	開発軸受	玉軸受
形状			
主要寸法 (mm)	$\phi 45 \times \phi 115 \times 45$	$\phi 45 \times \phi 108 \times 32.5$	$\phi 45 \times \phi 135 \times 55$
トルク	1	0.2	0.3
寿命	清浄油中	1	1
	異物油中	1	1
剛性	1	1	1
耐焼付き性	1	1	—
組付け性	1	1	0.3
サイズ	1	0.6	1.8

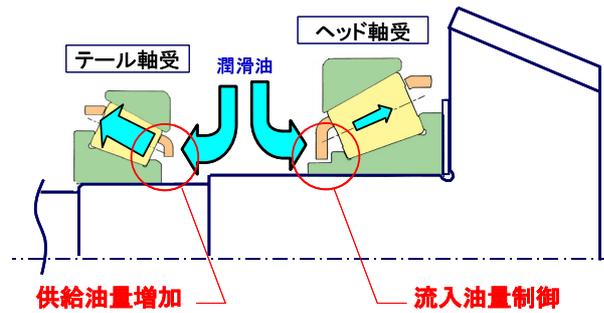


図 7 新しいピニオン軸支持構造

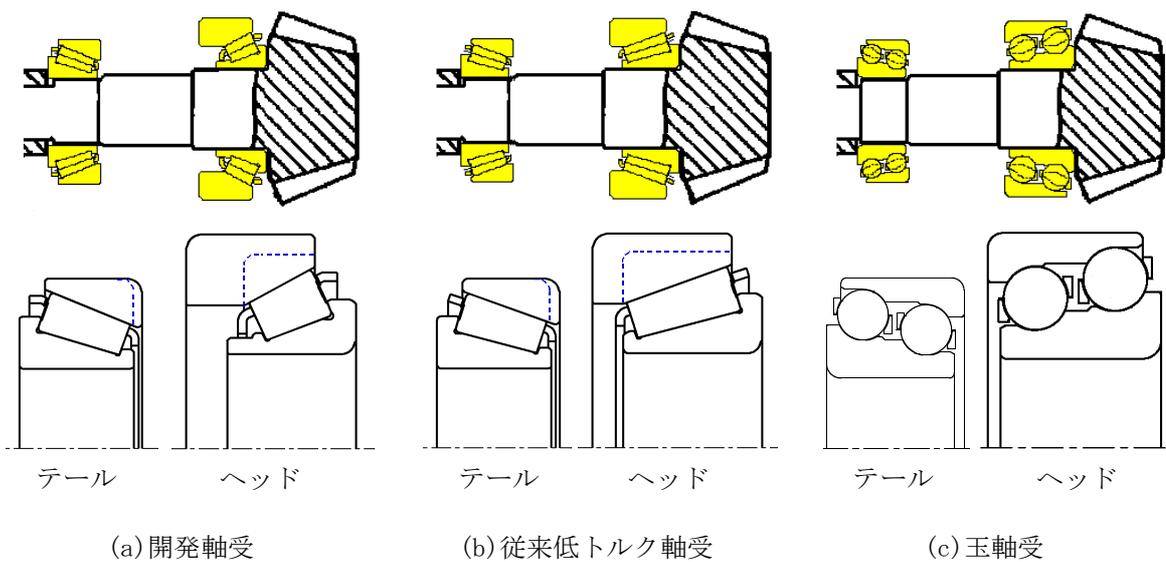


図 8 試料軸受を組付けたピニオン軸

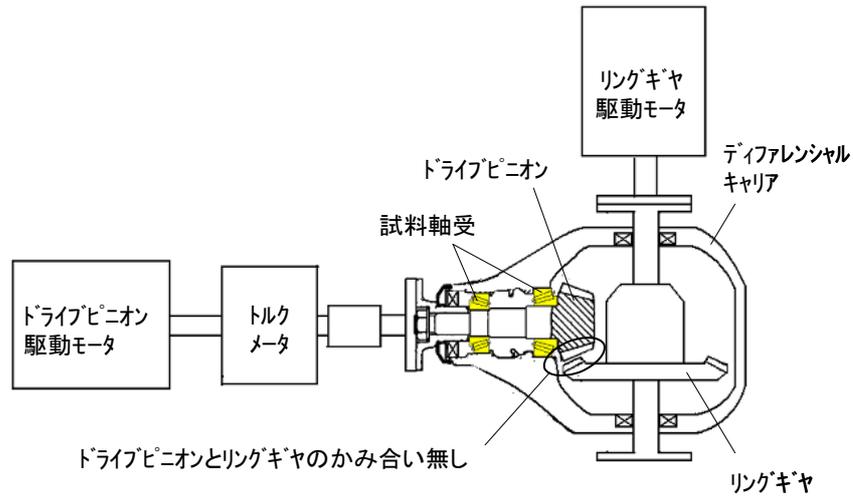


図9 実機試験装置の概略構造

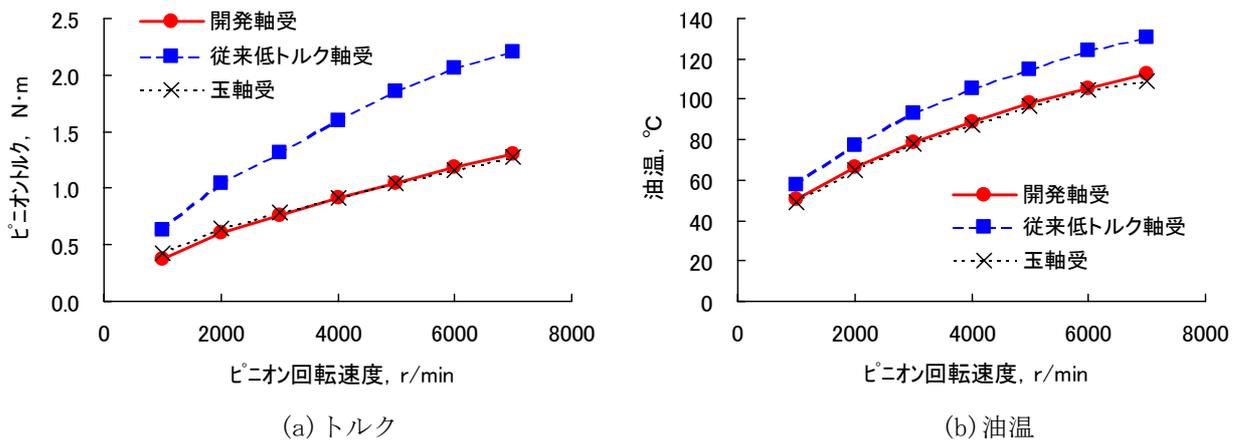


図10 実機デフ試験結果

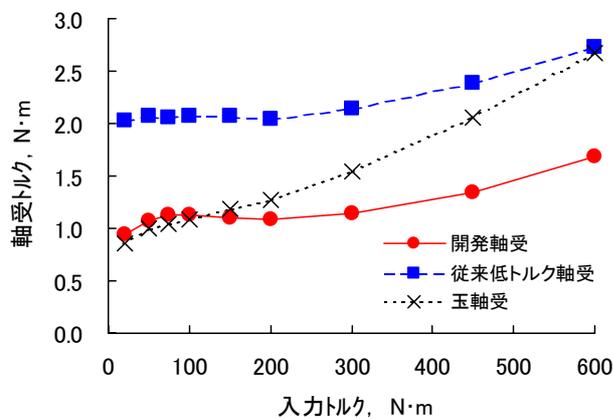


図11 ベンチ試験に基づく入力トルクと軸受トルクの関係