

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Components

Vol. **22**B3
March/2011

機能部品事業

■ 新商品・適用事例紹介

「**駆動系ユニット用軸受の抵抗低減技術**」

—ELT軸受 (Extra Low Torque Bearing) の開発—

Technology for Reducing Resistance of a Bearing for Drive Unit
---Development of Extra-low Torque Bearing "ELT Bearing"

〈キーワード〉 抵抗低減・円すいころ軸受・玉軸受・線接触・
点接触・疲労寿命

軸受事業部／技術部／自動車技術

富成 敬史

Takafumi TOMINARI

要 旨

駆動系ユニット(トランスミッションやデифアレンシャル)の軸支持には転がり軸受を使用している。転がり軸受単体での損失抵抗は小さいものであるが、自動車の燃費向上が急務となっており、それらの抵抗低減も強く望まれるようになってきた。

一般的に、支持剛性や疲労寿命の観点から円すいころ軸受を用いるケースが非常に多く、それらの抵抗低減が大きな課題となっている。

そこで円すいころ軸受に対し、支持剛性や疲労寿命の低下を伴わずに大幅な抵抗低減を可能とする並列型複列アンギュラ玉軸受 (Extra-Low-Torque軸受;以下、ELT軸受)を開発した。

Abstract

A roller bearing is used for the support of drive shaft for a drive unit (transmission or differential). Resistance loss of a roller bearing itself is small. However, it has become an urgent matter to improve fuel efficiency, and the reduction of the bearing resistance has been strongly demanded. Generally, a tapered roller bearing is used in so many cases from the viewpoint of support rigidity and fatigue life, so it is a major challenge to reduce resistance.

Thus, NACHI has developed Tandem Double-row Angular Contact Ball Bearing (Extra-low Torque Bearing --- ELT Bearing) that enables the substantial reduction of resistance, replacing a tapered roller bearing.

1. 駆動系ユニットの抵抗低減要求

地球環境保護の視点からCO₂排出量低減の動きは年々強くなっている。自動車の燃費向上は重要な課題であり、駆動系ユニット(トランスミッションやデифアレンシャルなど)では軽量化と各部の効率向上が急務となっている。

駆動系ユニットでは入力荷重が大きな軸の支持に円すいころ軸受を組合せて配置し、予圧※1を与えて使用することが多く、それらの抵抗低減は軸受側の課題となっている。

円すいころ軸受については、既に転がり抵抗の発生メカニズムが明らかにされており、理論式に基づく机上検証から軸受内部諸元を最適化することで抵抗低減を図ってきた。しかし、その延長線上では、これ以上の大幅な抵抗低減は期待できなくなっている。

一方、玉軸受は点接触のため、接触面積が小さく、転がり抵抗の面で非常に有利であるが、疲労寿命や支持剛性の面で入力荷重の大きな部位には不適といわれてきた。

ここでは、実質的な支持剛性や疲労寿命の低下を伴うことなく、ころ軸受から玉軸受への転換を図り、大幅な抵抗低減を可能にしたELT軸受の事例をまじえ、軸受の抵抗低減技術を紹介する。



2.円すいころ軸受の転がり抵抗発生メカニズム



図1 ELT軸受

円すいころ軸受の転がり抵抗については、各軸受メーカーにおいて理論化されている。NACHIにおいても理論構築～検証実験を進め、机上検討段階で転がり抵抗の予測が可能となっている。¹⁾

転がり運動領域でのトルクを T_R 、ころ端面のすべり部分でのトルクを T_S とすると、これらの値は互いに影響をおよぼし合うことなく独立に計算することができる(図2)。実際の測定値には、これらに保持器摺動摩擦や潤滑油の攪拌抵抗が加わるが、過多の潤滑環境でない限りは、ほぼ計算値に近い値が観測される。

$$T_R = fr \cdot L^{0.69} \cdot dpc^{1.69} \cdot \Sigma Q^{0.31} \cdot (\nu \cdot N)^{0.69}$$

$$T_S = e \cdot \cos\theta \cdot \sin\alpha \cdot \mu \cdot \Sigma Q \cdot \exp(-1.8\Lambda r^{1.2})$$

L;ころ長さ dpc;ころピッチ円径 Q;転動体荷重
 ν ;潤滑油動粘度 N;内輪回転数 α ;接触角
 fr ;潤滑剤による係数 Λr ;つば部の油膜パラメーク
 e ;ころ端面のつばあたり高さ

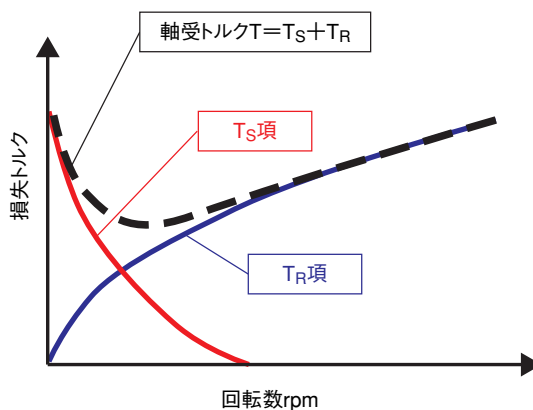
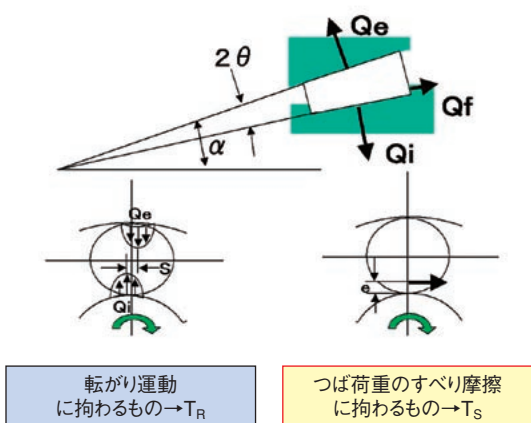


図2 円すいころ軸受 トルクTの構成

3. 円すいころ軸受の抵抗低減技術

図2に示すように、回転数と T_R 、 T_S の関係は低回転域では T_S の影響が大きく、高回転域では T_R の影響が大きくなる。したがって、狙いの回転数によって抵抗低減に影響する因子が異なることが判る。

例えば、ディファレンシャルにおいて、プロペラシャフトと同じ回転数で回るピニオン軸受では T_R の低減が重要であり、タイヤと同じ回転数で回るサイド軸受では T_S の低減が重要となる。最終減速比を4.00、車速60km/h、タイヤ半径300mmとすれば、サイド軸受は約530rpm、ピニオン軸受は約2120rpmで回転する。軸受の損失エネルギー Q は

$$Q \text{ (kW)} = 0.1047 \times \text{軸受トルク} T \text{ (N} \cdot \text{m)} \times \text{回転数} n \text{ (rpm)}$$

で求めることができ、軸受トルクと回転数に比例する。仮に、ピニオン軸受とサイド軸受の軸受トルク T が同じ場合、ピニオン軸受による損失はサイド軸受の4倍に相当する。このことより抵抗低減を図るにはピニオン軸受の T_R を低減することがより効果的と考えられる。

1) 小型化による抵抗低減

T_R の低減に最も効果的な因子は、ころピッチ円径の縮小であり、理論式より1.69乗で影響することがわかる。したがって、軸受の小型化は軽量化の達成のみならず、抵抗低減にも非常に有効な手段である。しかし、この場合、おのずと軸径も小さくなってしまいますので、軸剛性の低下や疲労寿命面の低下といった背反事項がでてくる。(図3)

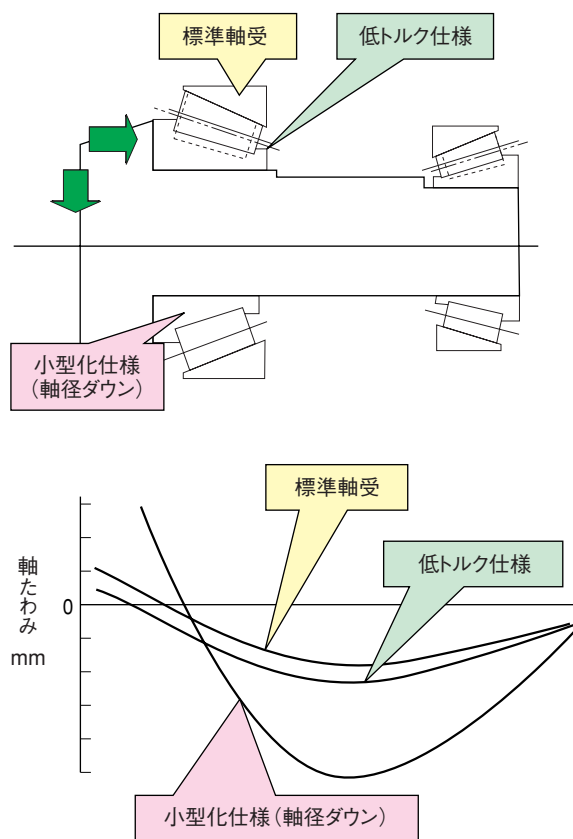


図3 軸受小型化による背反(軸剛性低下)

2) 内部諸元適正化による抵抗低減

残された因子による抵抗低減は、いかに転動体荷重 Q を小さくするか、いかに接触長さ L を短くできるかで決まってくる。

Q は外力の軸受内部への分散として現れるものであり、内部諸元の適正化により Q を極小化する方法はあり得る。それに寄与する大きな因子は接触角 α であり、アキシャル荷重が大きければ α を大きくし、ラジアル荷重が大きければ α を小さくするなど、外力に応じた α の適正化が可能である。このとき同時に、軸受寿命も結果として向上することになる。(図4)

このように Q を小さくする手法は、元々ディファレンシャルのサイド軸受などの疲労寿命向上を目的として、外力に応じて組み合わせる軸受の内部諸元の適正化を行なったことに端を発している。

当時は、抵抗低減よりも疲労寿命のバランスをとることが狙いであったが、同時に転がり抵抗も小さくなるという付帯効果を生んでいたことになる。(図5)

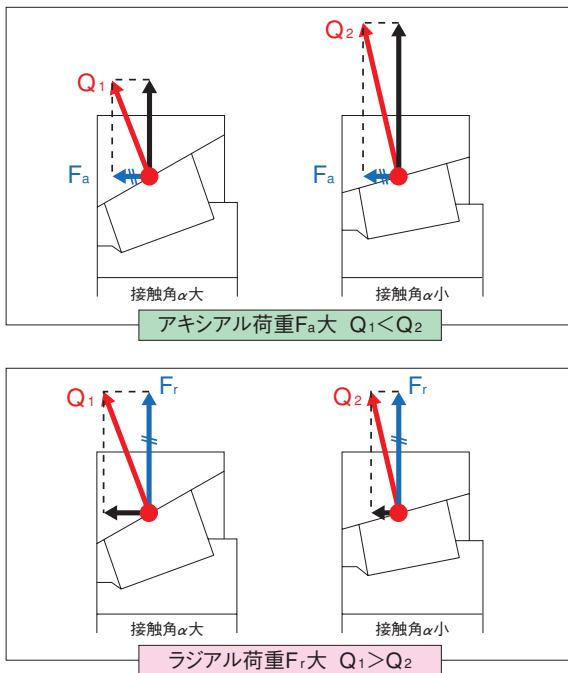


図4 外力に応じた接触角 α の適正化

3) 寿命的余裕の活用

Q を小さくするには、組み合わせて使用する軸受の疲労寿命のバランスを図ることになる。アンバランスが存在するという事は、寿命の短い列は Q の極小化により寿命向上を図り、寿命の長い列は背反を生じない範囲で抵抗低減を達成する方策が打てる余裕を持つことを示している。

これと同様の発想が軸受単体にも適用できる。軸受の疲労寿命は主に回転輪の接触に支配されており、固定輪ではかなり余裕を持っている。そこで、疲労寿命の低下を伴わない範囲で固定輪の接触長さを短くすることで、大きな抵抗低減効果を得ることが可能となる。回転輪の接触長さを大きく、固定輪の接触長さを短くするには、固定輪側軌道のクラウニングを大きくすることで容易に得ることができる。

以上の様な手法を合せて用いることで、標準的な円すいころ軸受を選定した場合に比べ、およそ30%の抵抗低減を達成させることが可能である。これをNACHIではSLT (Super-Low-Torque) 軸受として、市場に投入し続けてきた。

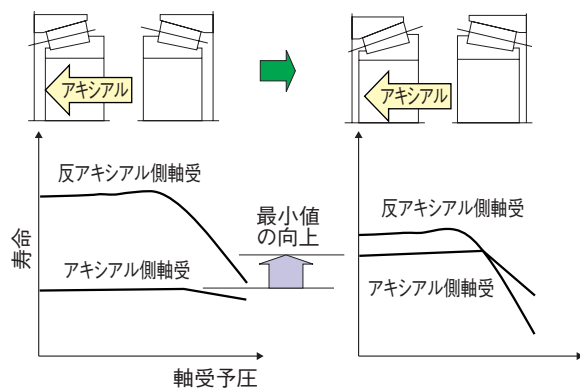


図5 左右軸受の適正化による寿命向上事例

4. 玉軸受への転換

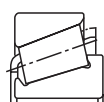
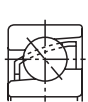
1) 並列型複列アンギュラ玉軸受(ELT軸受)

年々、軸受への抵抗低減の要望は強くなっているが、円すいころ軸受の抵抗低減は従来技術の延長線では限界に近いレベルにきている。

一方、玉軸受については、点接触であるがゆえに、支持剛性の低下、疲労寿命の低下など乗り越えねばならない課題があり、大きな抵抗低減効果が期待できるものの円すいころ軸受から玉軸受への転換は難しいと捉えられてきた。(表1)

NACHIではこれらの技術課題に積極的に取り組み、円すいころ軸受から玉軸受への転換を可能にした並列型複列アンギュラ玉軸受(Extra-Low-Torque軸受)を開発し、ディファレンシャルピニオン軸のフロント軸受として、市場への投入を開始している。(図6)

表1 ころ軸受と玉軸受の一般的な特性比較

耐久性	◎	×
合成荷重負荷	○	○
転がり抵抗	×	◎
予圧調整可	○	○
剛性	○	×
潤滑敏感性	×	◎
		

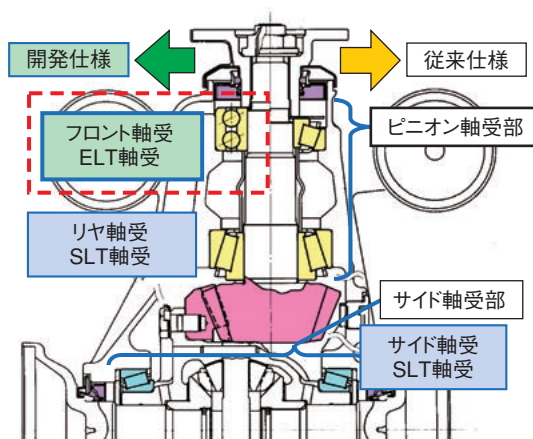


図6 ELT軸受の採用事例

ピニオン軸はフロント軸受とリヤ軸受の組み合わせで支持されるが、円すいころ軸受同士の組み合わせでは、フロント軸受の疲労寿命にかなりの余裕がある。これを単純に単列の玉軸受に置き換えるとリヤ軸受の疲労寿命を下回ってしまうが、2列配置とし負荷容量を大きくすることでリヤ軸受と同等の疲労寿命を得ることが可能である。(図7)

また、アキシャル荷重による変位量自体は円すいころ軸受よりも大きくなるが、アキシャル荷重が大きいと荷重～変位の勾配(=剛性)に大きな差は出でこない。(図8)

したがって、反アキシャル荷重側に配置されるフロント軸受では、複列玉軸受化により疲労寿命と支持剛性の低下を補うことが可能である。

ただ、アキシャル荷重が大きな領域でのアキシア

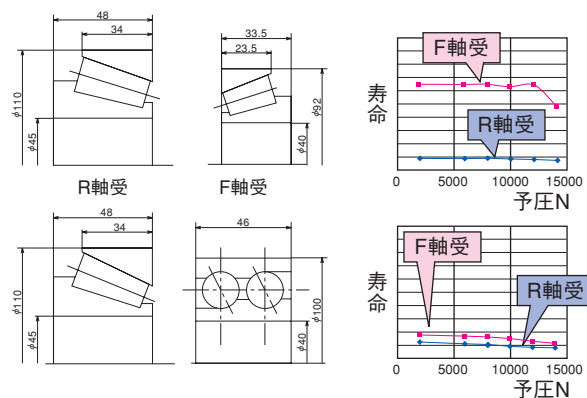


図7 フロントELT軸受適用での疲労寿命

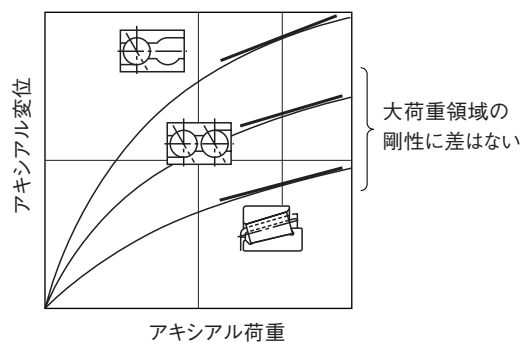


図8 アキシャル荷重とアキシャル変位量の比較

剛性が円すいころ軸受と変わらなくても、ELT軸受のアキシャル変位量自体は大きくなる。フロント軸受をELT軸受とした場合、リヤ軸受が分担する外力アキシャル荷重は増加するため、リヤ軸受の接触角を大きくするなど、リヤ～フロント軸受の組み合わせでの最適化が必要となる。

2) ELT軸受の妥当性検証

軸受単体および組み合わせ使用時において、転がり抵抗の比較を行なった。

軸受単体での転がり抵抗は、円すいころ軸受に比べ、30～50%の抵抗低減効果を確認できた。(図9)

また、車両走行モードでの軸受による累積損失の計算を行ない、大幅な損失低減効果が得られることを確認できた。(図10)

さらに、支持剛性の検証として、ディファレンシャルを模擬した試験装置を製作し、最大トルク時の歯車かみ合い点の変位量比較を行なった。その結果、「円すいころ+ELT軸受」の組み合わせでも支持剛性の低下が無いことを確認できた。(図11)

円すいころ軸受と玉軸受を組み合わせることで自身が初めての試みであるため、実機を模擬した耐久試験装置に「円すいころ+ELT軸受」を組み合わせ配置した疲労寿命の確認を行ない、計算寿命に対して十分な耐久性を有することを確認済みである。

3) 付帯効果

玉軸受には、円すいころ軸受のようにすべり摩擦部が存在しないため、焼き付き敏感性が低くなる。特にピニオン部のフロント軸受は、歯車による飛沫潤滑が届きにくい部位であり、攪拌抵抗低減のための潤滑油量低減が進行している現在では、この特性は有効と考えられる。

この付帯効果を評価するために、運転条件下で給油のON/OFFを繰り返す焼き付き評価試験を行なった。

円すいころ軸受では時間の経過につれて、焼き付きの発生が見られたが、ELT軸受では、かなりの時間使用しても焼き付きの発生はなかった。

これらのことから、ELT軸受は円すいころ軸受にとって代わる可能性を持った軸受といえる。

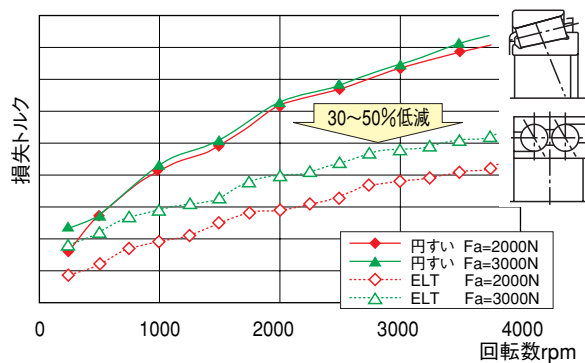


図9 軸受単体での転がり抵抗比較

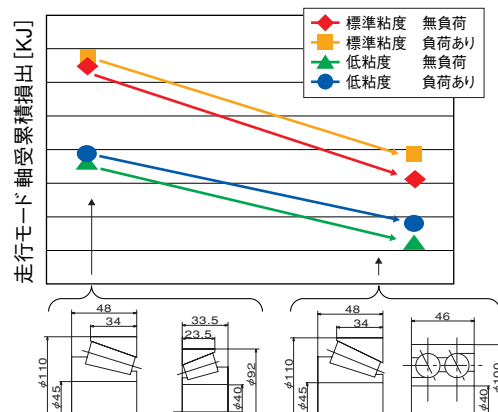


図10 走行モードでの軸受累積損失の比較

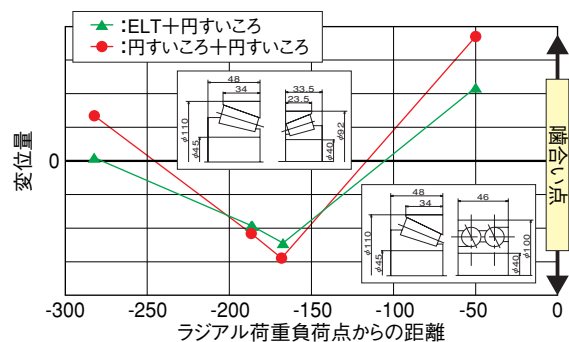


図11 ディファレンシャル模擬での軸剛性比較

5. 更なる抵抗低減へ向けて

本稿ではディファレンシャル ピニオン軸のフロント軸受へのELT軸受適用事例を紹介してきたが、当然のことながら、リヤ軸受もELT軸受とした方がより大きな抵抗低減が期待できる。

しかしながら、フロント軸受、リヤ軸受ともにELT軸受を適用した場合、円すいころ軸受と同一サイズの軸受では、疲労寿命の低下、支持剛性の低下を補うことは困難であり、これらを満足させるには軸受サイズの大型化が必要となる。また、予圧は起動トルク値による管理が一般的であるが、玉軸受には、円すいころ軸受のようなつば面の滑りトルクが存在しないため、起動トルク自身が非常に小さく、新たな予圧管理手法の検討が必要と考えられる。(図12)

従来技術の延長線上では限界に来ている事象を解決するには、常識では難しいとか困難だとか言われているところに解決の糸口が存在するように思われる。現在否定されている事柄も視点を変えたりことや新たに発見された技術などから肯定される事柄へと変化していく可能性は十分あると思われる。

NACHIでは疲労寿命・耐圧痕強度を向上させるための材料・熱処理技術や実機状態を模擬した解析技術などの開発にも継続的にとり組んでおり、それらの技術の融合からさらなる軸受の抵抗低減を押しすすめ、地球環境保護に貢献していく。

	円すい + 円すい	円すい(SLT) + ELT	ELT + ELT
概略図			
損失トルク (2000rpm)	ベース仕様	○ (△52%)	◎ (△80%)
剛性 (軸たわみ)	◎	○	△
予圧管理	○	△	×
耐焼付き性	×	○	◎
ウエイト	○	△	×

図12 円すいころ軸受・ELT軸受 比較事例

用語解説

※1 予圧

軸受組み付け時に負のすきまとなるようにあらかじめ付加するアキシャル荷重のこと。

※2 クラウニング

軌道と軸受の接触端部に生じる応力集中を防ぐことを主目的とした軌道面または軸受表面のごくわずかな曲率のこと。

引用文献

1) 円すいころ軸受のトルク発生理論式の検証・補填とその応用…不二越技報 vol.50 No.1 1994