

電車の軸受の発熱と 運転条件の関係を解明する

鉄道車両にはパンタグラフから台車まで、大小さまざまな回転軸が取り付けられています。これらの回転軸には、荷重を支えながら滑らかな回転を保つための部品として軸受が使用されています。なかでも台車に使用される軸受は車両の走行による振動や熱にさらされながら使用されており、万が一損傷が発生すると、部品の固着や脱落をともなう重大な故障に至る可能性があるため、高い信頼性が求められています。ここでは、軸受の信頼性を確保するために、その損傷に影響を与える軸受の発熱に注目して、運転条件との関係を調べた結果について紹介します。



高橋 研
Ken Takahashi
材料技術研究部
潤滑材料研究室
主任研究員



鈴木 大輔
Daisuke Suzuki
材料技術研究部
潤滑材料研究室
副主任研究員



岡村 吉晃
Yoshiaki Okamura
材料技術研究部
潤滑材料研究室
主任研究員

はじめに

電車の台車には車軸、歯車装置、駆動用モーターなどの回転部分を支える機械要素として転がり軸受（図3参照；以下、軸受とします）が使用されています。電車の走行中には軸受は回転により発熱してその温度が上昇しますが、例えば潤滑不良など、何らかの要因により異常に大きい発熱があると、焼き付きにより損傷し、正常な回転を保てなくなる場合があります。このような損傷を防止するためには、軸受の発熱と運転条件の関係を明らかにし、軸受

やその周辺部品の設計指針に活用することで軸受の低発熱化を図ることが重要です。ここでは、歯車装置に使用される軸受を対象として、発熱と運転条件の関係を調査した結果¹⁾を、新たに設計・製作した試験機とあわせて紹介します。

小歯車軸受の回転試験機

歯車装置は図1に示すように、小歯車と大歯車のかみ合いにより駆動用モーターの動力を車輪に伝える機械であり、その回転部に軸受が使用されて

図3 転がり軸受（ベアリング）

相対的に回転する外輪、内輪、両者の間で転がり（自転、公転）ながら荷重を伝達する複数の転動体（玉またはころ）、および転動体同士を等間隔に保つ保持器の4種類の部品で構成される機械要素です。油やグリースで潤滑されます。図3に実物の軸受を示します。

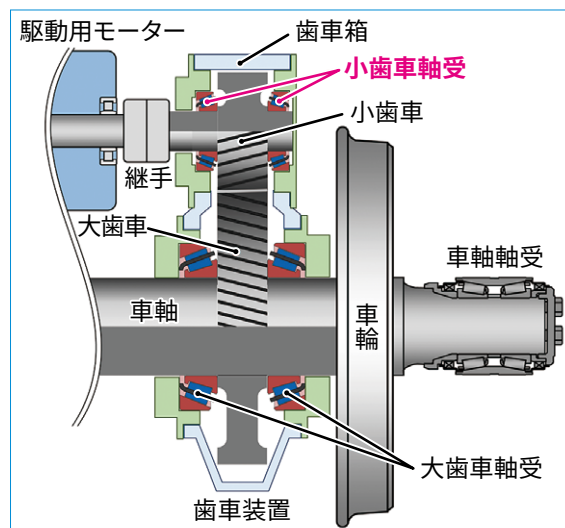


図1 歯車装置および周辺の構造

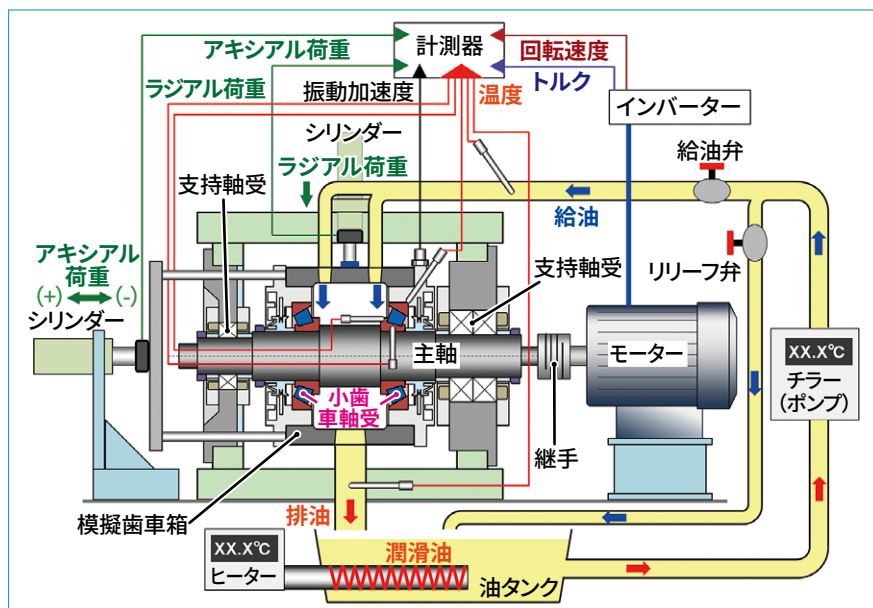


図2 製作した小歯車軸受回転試験機

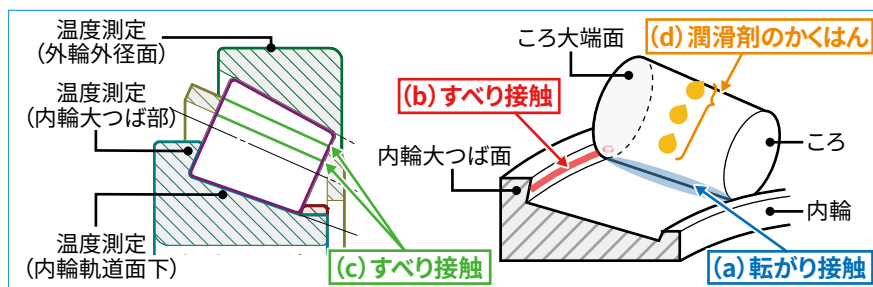


図4 軸受の温度測定箇所とトルク損失要因

います。実物の歯車装置は、図1のように複雑な構造をしており、このままでは軸受単体での性能を評価することは困難です。そこで、図2に示すように、小歯車軸受部のみを模擬して回転させることができる試験機を製作しました。本試験機の製作にあたっては、実車両での使用環境を考慮して軸受に小歯車からの反力に相当する荷重（※参照）を負荷させつつ、歯車箱底部にたまった潤滑油を大歯車によりはねかける潤滑方式を模擬するために軸受上部から潤滑油を滴下して、小歯車軸の回転速度に相当する主軸回転速度で回転試験を行えることを設計条件としました。本試験機は対向する2個の小歯車軸受（図3）を試験軸受として、それらの内輪が取り付けられた主軸をモーターで回転させる構造です。試験軸受は、ころが円すい台の形をした円すい

ころ軸受とよばれる軸受です。試験軸受の外輪は模擬歯車箱に固定され、この模擬歯車箱をシリンダーで主軸と垂直方向に押すことによりラジアル荷重を、平行方向に押し引きすることによりアキシアル荷重を、試験軸受に作用させることができます。また、2個の試験軸受の外輪間の距離を変更することによりエンドブレイ値（※参照）を任意に調整できます。試験軸受部に供給する潤滑油の温度と流量は一定の範囲内で調整できます。試験中には、主軸の回転速度とトルク、ラジアル荷重とアキシアル荷重、試験軸受の温度（図4に示す3箇所）、給油温度と排油温度、給油量をそれぞれ測定できます。

軸受の発熱要因

軸受において、そのトルク損失（有効に仕事に使われないトルク）が熱に



図3 小歯車軸受

変化するため、軸受単体でのトルク損失と発熱はほぼ等価であるとみなすことができます。一般に円すいころ軸受のトルク損失要因はおもに、(a)ころと内輪および外輪との間の転がり接触部の摩擦、(b)ころ大端面と内輪大つば面との間のすべり接触部の摩擦、(c)ころと保持器との間のすべり接触部の摩擦、(d)潤滑剤のかくはん抵抗の4点とされます（図4）が、小歯車軸受の使用条件である比較的高い回転速度では、(a)が全トルクの大部分を占めることがわかっています。したがって、小歯車軸受の発熱要因の大部分はころと内輪および外輪との間の転がり接触部の摩擦に起因するといえます。この転がり接触部の摩擦を転がり粘性抵抗（※参照）とよびます。

運転条件の軸受性能への影響

以上のことから、軸受の発熱の指標としてトルクに着目することが有効で

※ 軸受に作用する荷重

軸受に作用する荷重は2種類に分けられ、軸に垂直方向の荷重をラジアル荷重、軸に平行方向の荷重をアキシアル荷重とよびます。

※ エンドブレイ値

2個の軸受を組み合わせた際の内部すきまのことで、主軸を軸方向に押し引きした際の移動量で表します。

※ 転がり粘性抵抗

転がり接触部に存在する油膜を介して働く抵抗であり、一般に油膜が厚いほど大きくなります。

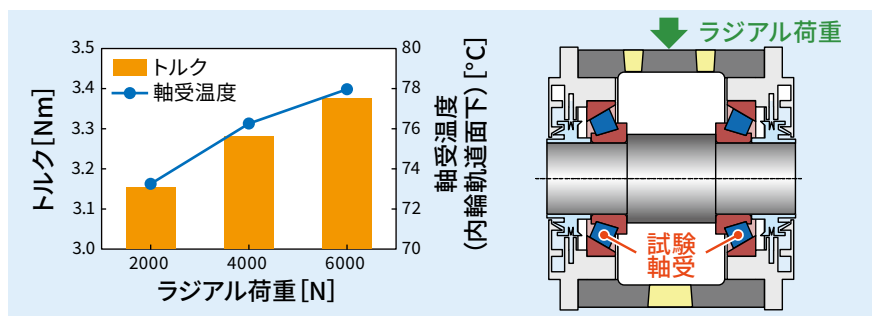


図5 ラジアル荷重が軸受性能へ与える影響

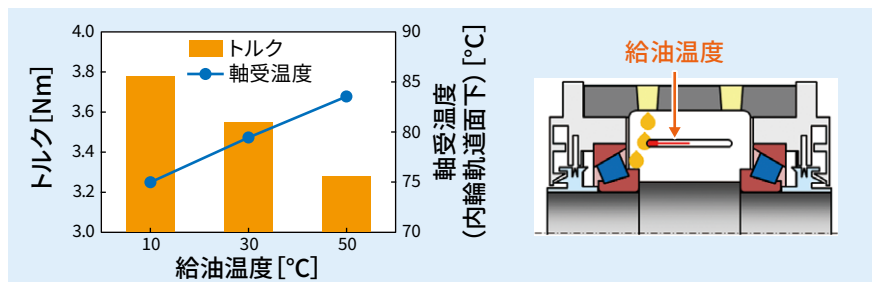


図6 給油温度が軸受性能へ与える影響

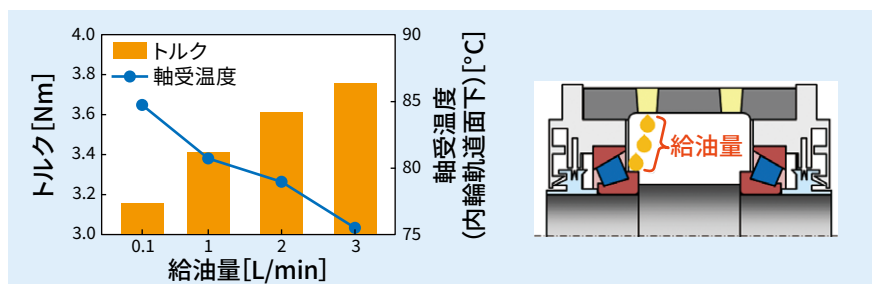


図7 給油量が軸受性能へ与える影響

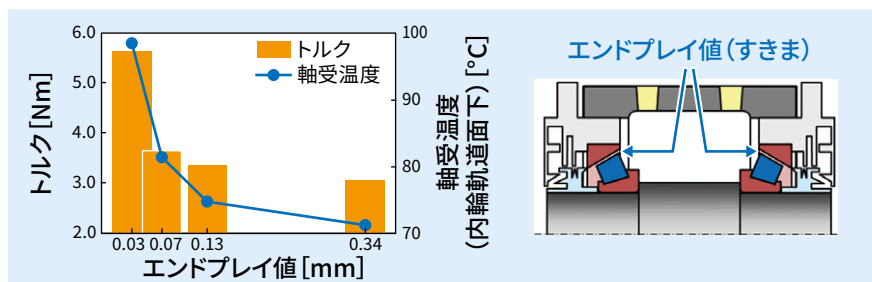


図8 エンドプレイ値が軸受性能へ与える影響

す。そこで、図2に示した小歯車軸受回転試験機を使用して、運転条件を変更しながら軸受の温度やトルクを測定しました。ここでは、運転条件としてラジアル荷重、給油条件、エンドプレイ値が軸受性能へ与える影響を調べた例を紹介します。

(1) ラジアル荷重の影響

回転速度、給油量、給油温度、エンドプレイ値をそれぞれ一定として、ラジアル荷重を変化させて軸受のトルク

と温度を調べた結果を図5に示します。ラジアル荷重が増加すると、トルク、軸受温度はいずれも増加することがわかります。このトルクと軸受温度の増加は、ラジアル荷重の増加により、軸受内部での転がり粘性抵抗(図4の(a)部の抵抗)が増加することに加え、内輪の大つば面ところの大端面とのすべり接触部の摩擦抵抗(図4の(b)部の抵抗)が増加することによるものと考えられます。

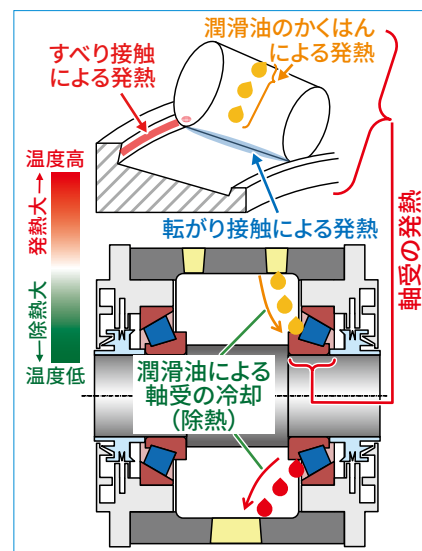


図9 軸受の発熱と除熱

(2) 給油温度の影響

回転速度、給油量、ラジアル荷重、エンドプレイ値をそれぞれ一定として、給油温度を変化させて軸受のトルクと温度を調べた結果を図6に示します。給油温度が上昇するとトルクは低下することがわかります。これは温度の増加とともに潤滑油の粘度が低下したことにより、軸受内部での転がり粘性抵抗(図4の(a)部の抵抗)が減少することに加え、潤滑油のかくはん抵抗(図4の(d)部の抵抗)も減少するためと考えられます。一方、軸受温度は給油温度の上昇とともに増加しています。給油温度の上昇により軸受のトルク、すなわち発熱が低下するにもかかわらず軸受温度が上昇する理由は、給油温度が高くなると、潤滑油により軸受部が冷やされる熱量(除熱量)が減少するため、つまり軸受から熱が逃げていくためと考えられます。

(3) 給油量の影響

回転速度、給油温度、ラジアル荷重、エンドプレイ値をそれぞれ一定として、給油量を変化させて軸受のトルクと温度を調べた結果を図7に示します。給油量が増加するとトルクは増加することがわかります。これは、給油量の増加とともに軸受内部に滞留する潤滑油量も増加して、軸受内部での転がり粘

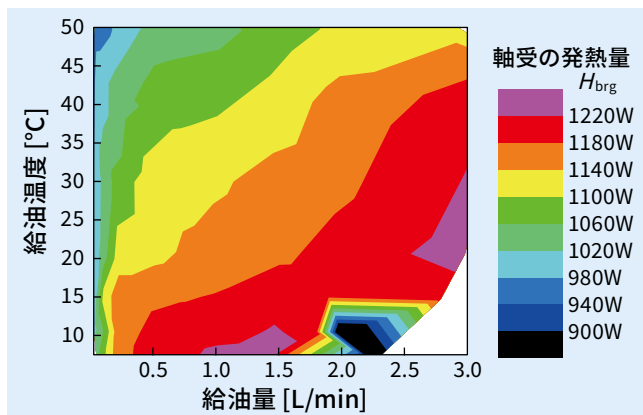


図10 給油条件が軸受の発熱へ与える影響

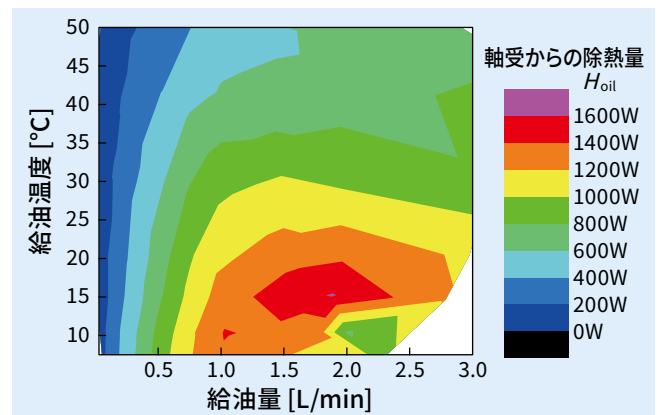


図11 給油条件が軸受からの除熱へ与える影響

性抵抗(図4の(a)部の抵抗)や潤滑油のかくはん抵抗(図4の(d)部の抵抗)が増加するためと考えられます。一方、軸受温度は給油量の増加とともに低下しています。給油量の増加により軸受のトルク、すなわち発熱が増加するにもかかわらず軸受温度が低下する理由は、給油量が増えると、潤滑油による軸受の冷却効果が増大するためと考えられます。

(4) エンドプレイ値の影響

回転速度、給油量、給油温度、ラジアル荷重をそれぞれ一定として、エンドプレイ値を変化させて軸受のトルクと温度を調べた結果を図8に示します。トルクと軸受温度はともにエンドプレイ値がおおむね0.10mmを下回ると急激に増加することがわかります。過去の実験により、軸受やその周辺部材の熱膨張による伸びは、主軸側が模擬歯車箱側よりも大きい(主軸の方が模擬歯車箱よりも高温になる)ことがわかっています。そのため、エンドプレイ値が小さい条件では、回転中の軸受内部のすきまが0近くまで減少することにより、軸受が回転しにくくなりトルクや温度が急激に増加したと考えられます。

軸受の発熱と除熱

以上のように、軸受の温度は軸受自体の発熱や潤滑油による軸受からの除熱のバランスにより変化する(図9)こ

とがわかりました。ここでは、気温など歯車装置外部の環境の影響を受けるため、未解明な点が多い給油条件が軸受の発熱や除熱に与える影響を詳しく調べました。

はじめに、軸受の発熱量 H_{brg} を、モーターの仕事(トルクと回転速度の積に比例)と等価であると考え、主軸のトルクと回転速度から計算により求めました。一方、潤滑油による軸受からの除熱量 H_{oil} を、潤滑油の物性や供給量、温度から計算により求めました。

回転速度、ラジアル荷重、エンドプレイ値を一定として、給油温度と給油量を種々に変化させた場合の軸受の発熱量 H_{brg} を図10に、軸受からの除熱量 H_{oil} を図11に示します。図は、横軸を給油量、縦軸を給油温度として等値線図で表したものです。図中の白色部は、軸受部の振動が急激に増加したため、測定を行わなかった領域です。同じ給油量で比較すると、給油温度が低いほど H_{brg} が増加する傾向が認められます。一方、同じ給油温度で比較すると、給油量が多いほど H_{brg} が増加する傾向が認められます。なお、図10の右下部で H_{brg} が著しく低くなっているのは、低温で粘度が著しく高い潤滑油が大量に供給されたため、軸受内部への潤滑油の正常な流入が阻害され、軸受内部でかくはんされる潤滑油が減少したためと考えられます。 H_{oil} は H_{brg} とは一致せず、潤滑油によ

る除熱だけでは熱収支は均衡していません。両者の差分は、潤滑油を介さず熱伝導や輻射により周囲の部品や環境と直接伝熱した熱量です。給油量がおおむね1.0L/minより少ない条件では、 H_{oil} はおもに給油量の増加とともに増加し、1.0L/minより多い条件では、 H_{oil} はおもに給油温度の低下とともに増加する傾向が認められます。

おわりに

以上のように、軸受の温度上昇を抑制するため、発熱を減少させる観点からは、一定以上の給油温度の確保や潤滑を保てる範囲での給油量の低減が、除熱を増加させる観点からは、給油量が少ない範囲では給油量の増加が、給油量が多い範囲では給油温度の低下がそれぞれ有効であることが明らかになりました。車両用転がり軸受の発熱を抑制することはトルクを低下させることとも一致し、軸受自体の信頼性向上のみならず回転部でのエネルギー損失の低減にもつながります。今後も、これらの目的を達成するため、運転条件と軸受の発熱の関係についての研究開発を進めていきます。[RRR]

文献

- 1) 高橋研, 鈴木大輔, 永友貴史: 鉄道車両の駆動装置用小歯車軸受の運転状態に影響を及ぼす要因の検討, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.876, p.19-00181, 2019