

ハブユニットベアリングの低摩擦技術

Low-Friction Technology for HUB Unit Bearings

水野祐樹 Y. MIZUNO 吉岡祐一 Y. YOSHIOKA 戸田拓矢 T. TODA

A hub unit bearing is a key vehicle component whose friction loss affects fuel and energy efficiencies. As demand for lower friction continues to grow, JTEKT has developed HUB-LFT, a low-friction hub unit bearing. Friction loss in the bearing is reduced through the use of a newly developed low-friction grease and an optimized cage design, while improved grease, low-friction surface treatments, and optimized rubber materials are employed in the seal. Additionally, a reinforced labyrinth structure enables optimization of the seal lip geometry, reducing friction while maintaining sealing performance. These technologies achieve a 65% reduction in hub unit bearing friction loss, resulting in approximately a 1.4% improvement in the energy efficiency of battery electric vehicles.

Key Words: friction, bearing, seal, grease, hub unit, fuel efficiency, carbon neutral

1. はじめに

自動車の車両支持機構を構成する部品の一つにハブユニットベアリング（以下、ハブユニット）がある。図1に示すように、ハブユニットは車両のホイール内部に配置され、車両質量を支持するとともにホイールの回転を円滑にする機能を有している。一般的に本ユニットには複列のアンギュラ玉軸受が用いられ、タイヤが巻き上げる泥水から軸受部を保護するシールが設けられている（図2）。軸受部およびシール部で発生する摩擦損失は、自動車の燃費・電費に影響する。

自動車に対する低燃費化の要求は地球環境保全の観点から年々高まっており、カーボンニュートラルの実現に向けてさらなる性能向上が求められている。車両全体の燃費性能を向上させるには、各自動車部品の構成要素に

おける摩擦損失の低減が不可欠であり、ハブユニットも同様である。

近年、車両の電動化に伴い、ハブユニットの摩擦損失低減の重要性は一層高まっている。ガソリン車におけるハブユニットに起因する摩擦損失は、車両全体の損失のうち1.3%程度である¹⁾。一方、電気自動車（Battery Electric Vehicle：BEV）においては、排気損失やエンジンの摩擦損失が大幅に低減されるため、相対的にハブユニットの寄与割合が増加し、筆者らの試算では3.4%程度を占める。BEVの電費向上は航続距離の延長および搭載バッテリー量の低減に寄与し、BEVの商品性向上につながる。

以上の背景より、当社ではハブユニットの摩擦損失低

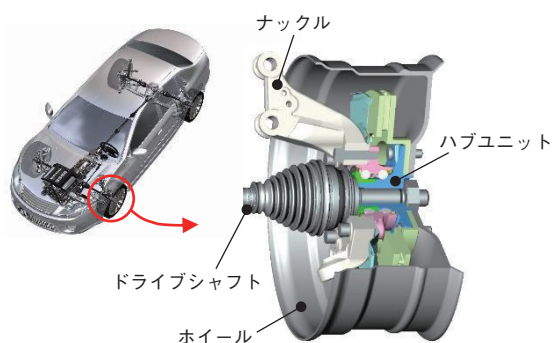


図1 ハブユニットの配置
Location of a hub unit in a vehicle

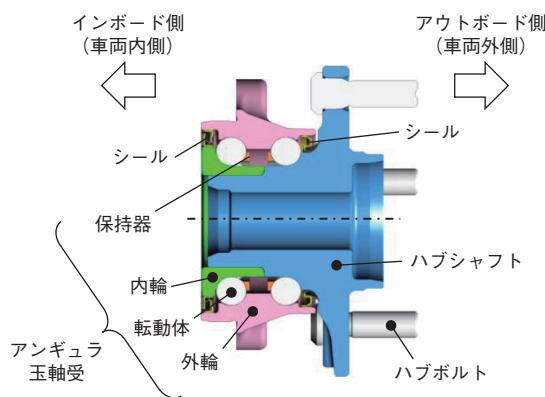


図2 ハブユニットの構成部品
Hub unit components

減技術を開発し、HUB-LFTとして製品化した²⁾、³⁾。LFTは当社の登録商標であり、Low Friction Torqueを意味する。本報では、摩擦損失の発生要因を整理したうえで、HUB-LFTの技術について紹介する。

2. ハブユニットの構造

図2に示すように、ハブユニットは、車両ナックル側に固定される外輪とホイール側に固定されるハブシャフトが転動体と保持器からなる軸受部で連結されている。軸受部には潤滑剤としてグリースが封入されており、シール構造と組み合わせることで車両寿命期間にわたってメンテナンスフリーで円滑な回転性能を維持できる。前述のとおり、ハブユニットにおける摩擦損失は軸受部とシール部で発生する。その割合はおおむね1:1であり、摩擦損失低減には軸受部およびシール部双方の改善が必要である。

3. 軸受部における摩擦損失低減技術

軸受部の転がり摩擦損失は、図3に示すように複数の要因に分類される。各要因は転動体P.C.D. (Pitch Circle Diameter) や転動体数などの軸受部諸元にくわえ、軸方向荷重である予圧の影響を受ける。しかし、軸受諸元の過度な小型化や予圧の低減は、信頼性や車両特性を損なう可能性がある。したがって、軸受諸元および予圧を変更せずに摩擦損失を低減する技術が求められる。

本章では、それぞれの摩擦損失を低減する技術について述べる。

3.1 かくはん抵抗

転動体の運動によってグリースがせん断変形・流動する際の摩擦損失をかくはん抵抗とよぶ。かくはん抵抗は転動体が通過する領域（以下、かくはん領域）で発生する。

3.1.1 グリースのせん断抵抗低減

ハブユニットでは従来、転動体の運動によって非かくはん領域へかき分けられ、その領域に留まりやすいチャネリング性グリースが使用されている。しかし、かくはん領域に残存するグリースおよび非かくはん領域から再流入するグリースにより、かくはん抵抗が生じる。

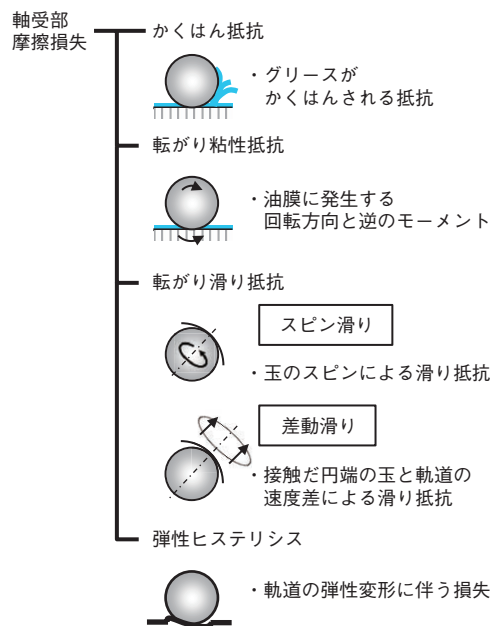


図3 軸受部の摩擦損失要因
Sources of bearing friction loss

このかくはん抵抗は、グリースのせん断抵抗の低減によって抑制できる。せん断抵抗 F は式(1)で表され、 η はせん断粘度、 U は相対速度、 S はせん断面積、 h はグリース膜厚を示す。

$$F = \eta US/h \quad (1)$$

グリースのせん断粘度を低減させるには、増ちょう剤や基油の分子鎖間の相互作用に起因する抵抗を抑制する必要がある。ちょう度の増大（軟化）はその一手段であるが、前述のチャネリング性の低下や封入工程におけるグリースの流下、軸受からの漏れなどの課題を伴う。

そこで、ちょう度を維持したまま、せん断粘度を低減したグリースを開発した。開発グリースでは、増ちょう剤組成を最適化することで増ちょう剤含有量を低減した。これにより分子鎖の絡み合いを抑制し、せん断粘度を低減している。さらに、高速せん断速度域では基油の動粘度が支配的なため、基油を低粘度化することでせん断粘度を低減した。開発グリースと従来グリースのせん断粘度の比較結果を図4に示す。

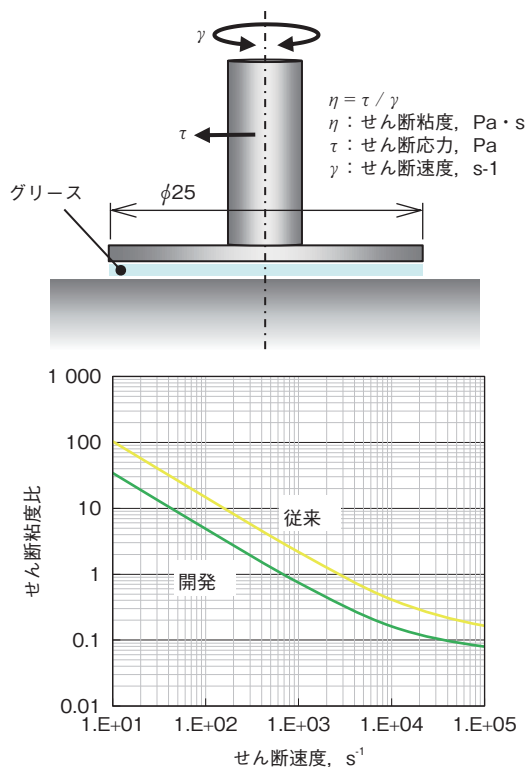


図4 せん断粘度の測定結果
Shear viscosity measurement results

3.1.2 保持器形状の最適化によるせん断抵抗の低減

保持器においては、転動体がポケット内で自転する際にグリースのせん断抵抗が発生する。当社ではこのポケット形状の最適化により、せん断抵抗を低減する保持器を開発した。図5に示すとおり、開発保持器はポケット内に転動体と接触する平面部を設け、その位置を転動体の自転軸近傍に配置している。これにより、接触部における転動体の自転周速度（式(1)の U ）が低減されるとともに転動体とポケット間のグリース膜厚 h が増大し、せん断抵抗が低減される。

試験後に保持器ポケット内グリース膜の厚さを確認したところ、従来品では全体的に薄いのにに対し、開発品では接触する平面部を除きグリース膜が厚かった（図6）。また、保持器は公転する転動体から荷重を受けるが、その影響は非常に小さい。開発保持器においても平面接触部の面圧は低く、各種耐久評価において顕著な摩耗は認められなかった。開発保持器は、グリースの供給性および軸受寿命を維持したまま軸受部の摩擦損失を18%低減した（図7）。

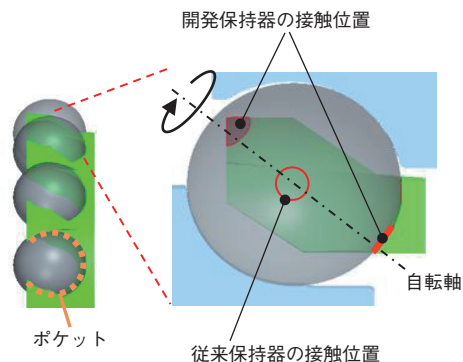


図5 保持器接触位置の比較
Comparison of cage contact positions

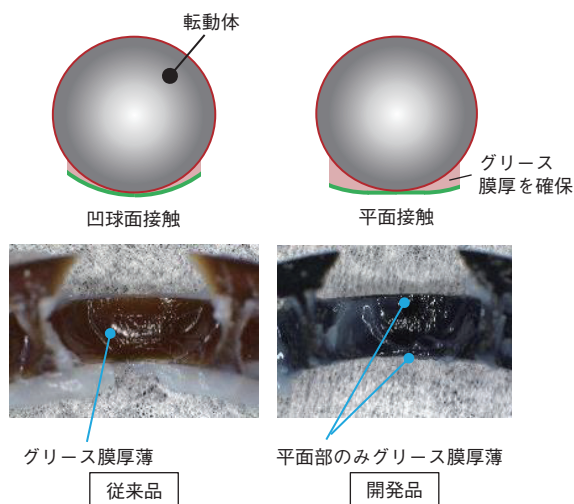


図6 グリース膜厚さの比較
Comparison of grease film thickness

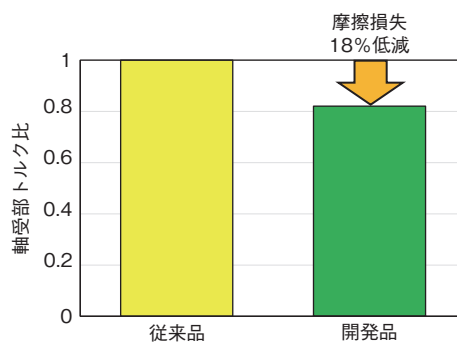


図7 摩擦損失の比較
Comparison of friction loss

3.2 転がり粘性抵抗

弾性流体潤滑（Elasto-Hydrodynamic Lubrication：EHL）理論によれば、転動体は軌道との間に形成される油膜を介して転動し、油膜圧力分布の偏りによる抵抗が生じる。この抵抗を転がり粘性抵抗とよぶ⁴⁾。転がり

粘性抵抗は基油の動粘度に強く依存する。そこで開発グリースでは、軸受の高面圧条件下で必要な油膜厚さを確保しつつ、基油の動粘度を低減することで転がり粘性抵抗を低減した。

3.3 転がり滑り抵抗

ハブユニットに用いられるアンギュラ玉軸受では、転がり滑り抵抗はスピン滑り抵抗および差動滑り抵抗に分類される。両者はいずれも転動体と軌道間の滑りに起因する摩擦損失である。これらの滑りは軌道曲率や接触角といった幾何学的特性に起因し、その発生は避けられない。したがって、転がり滑り抵抗の低減にはトラクション係数の低減が必要となる。

開発グリースでは基油の分子構造に着目し、トラクション係数の低減を図った。二円筒式トラクション係数測定機による評価の結果、選定した合成炭化水素油は従来のパラフィン系鉱油と比較してトラクション係数が約30%低いことが確認された(図8)。パラフィン系鉱油は凹凸を有する三次元の分子構造であるのに対し、合成炭化水素油は平滑で線状の分子構造を有し、分子間の引っ掛かりが少ない。この構造の違いにより、トラクション係数が低減したと推察される。

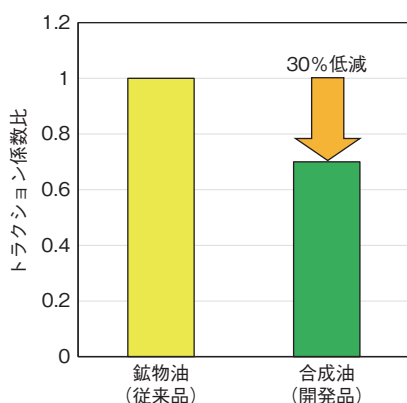


図8 トラクション係数比較
Comparison of traction coefficients

4. シール部における摩擦損失低減技術

シールの摩擦損失であるしゅう動トルク T_s は式(2)で表される。ここで、 μ は摩擦係数、 P_r はシールリップの緊迫力(シールリップをしゅう動面に押し当てる力)、 D はシールリップのしゅう動径を表す。

$$T_s = \mu P_r D / 2 \quad (2)$$

式(2)のとおり、シールしゅう動トルク T_s は摩擦係数 μ と緊迫力 P_r に比例する。

本章では、摩擦係数 μ および緊迫力 P_r を低減する手法について述べる。

4.1 摩擦係数 μ

シールしゅう動部は、混合潤滑状態であると推定されている⁵⁾。このため、式(2)の摩擦係数 μ を低減するには、真実接触部と非真実接触部の双方の摩擦損失を低減する必要がある。そこで、真実接触部については、低摩擦材を配合したゴム材料を開発した。

一方、非真実接触部ではグリースのせん断抵抗が支配的であるため、基油の低粘度化が有効である。シール部は軸受部と比較して接触面圧が低く、安定した油膜を形成できるため、軸受部より低粘度の基油を適用できる。しかし、過度な低粘度化は基油の揮発性を高め、外部環境にさらされるシール部においては、油分不足やシール性低下につながる。したがって、基油の動粘度はシール性との両立を考慮して選定した。

さらに、しゅう動面に微細な凹凸を設けることで摩擦係数 μ を低減した。凹凸により真実接触面積が減少するとともに非真実接触部でのグリース膜厚 h が厚くなるため、せん断抵抗が低減される。ただし、過大な凹凸はシール性が低下するため、適切な形状の範囲で採用した。

4.2 リップ緊迫力 P_r

緊迫力 P_r の低減には、シールリップ形状の最適化が有効である。図9に示すとおり、従来のシールは内径方向に延びるラジアルリップと軸方向に延びるアキシャルリップによって構成される。ラジアルリップは、設計空間の制約によって短く高剛性となるため、リップのしめしろに対して緊迫力が大きくなる傾向がある。一方、アキシャルリップは長く柔軟に設計できるため、緊迫力を低減させられる。

次項で述べる開発品では、これらの特性を考慮してリップ形状を最適化し、緊迫力の低減を図った。

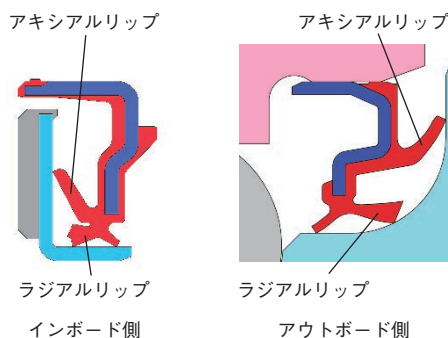


図9 従来シールの構造
Structure of the conventional seal

4.3 ラビリンス強化とリップ枚数削減

シールにおける摩擦損失はリップ枚数に依存する。しかし、リップ枚数を削減するだけではシール性を低下させるため、リップ以外の手法でシール性を向上させる必要がある。

そこで、図10に示すとおり、シール入口部にラビリンス構造を付加した（緑点線部）。シール入口の隙間を適切に設定することでシール内の泥水流動を制御し、流入抑制と排出性を両立させている。

さらに、リップ前段に設けたとい構造により、タイヤの巻き上げによってシールへ流れ込む泥水を一時的に捕捉し、周方向へ流すことでリップ部への被水を抑制している。これら構造の寸法は、水 - 空気二相流を対象とした三次元 VOF（Volume of Fluid）法による流体解析に基づき最適化した。表面張力と重力を考慮し、泥水の巻き上げを想定したアキシャルリップ外周部の水滞留量

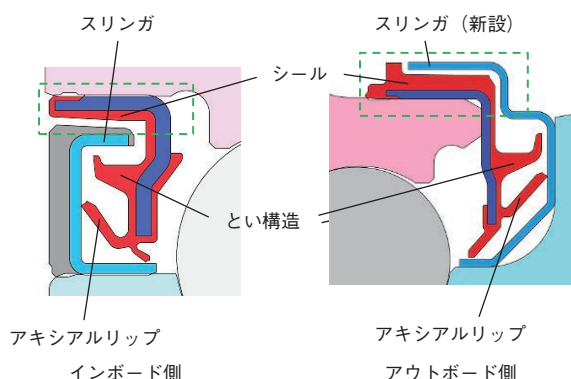


図10 開発シールの構造
Structure of the developed seal

の可視化結果と、水滞留量の時間変化を図11に示す。

これらの構造により、シール性を確保したうえでラジアルリップを削減し、緊迫力の低いアキシャルリップ主体の構成を実現した。その結果、シール部の摩擦損失を低減した。

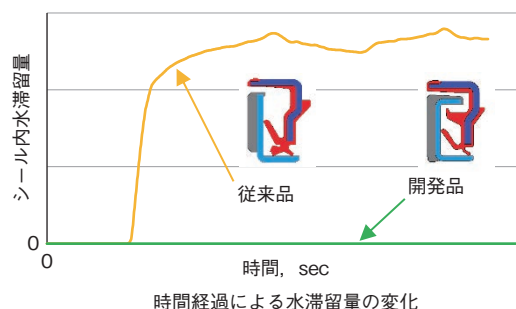
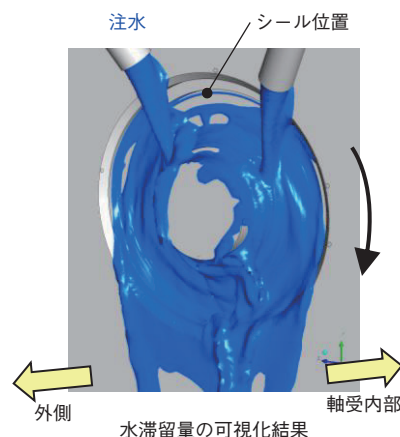


図11 アキシャルリップ外周部の水滞留量解析結果
Analysis results of accumulated water outside the axial lip

5. おわりに

本報では、当社の低摩擦ハブユニット「HUB-LFT」に適用した摩擦損失低減技術について紹介した。軸受部ではグリースの低摩擦化にくわえ、新形状の保持器を開発した。シール部では、低摩擦グリース、表面処理、ゴム材料にくわえてラビリンス構造の付加およびリップ構成の最適化により、摩擦損失の低減を図った。

これらの技術により、ハブユニットの摩擦損失は従来品比で65%低減した（図12）。BEVに適用した場合、航続距離が約7 km向上し、電費は約1.4%改善する。これにより、航続距離の延長および搭載バッテリー量の低減に寄与する。

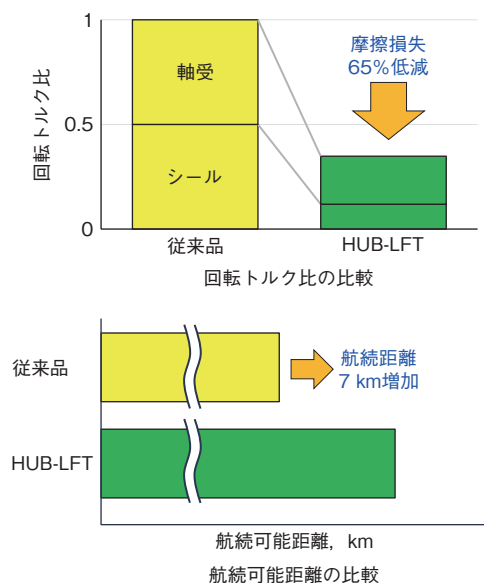


図12 HUB-LFTの摩擦損失低減効果
Benefits of HUB-LFT

今後も低摩擦損失技術のさらなる高度化を継続し、低炭素社会およびカーボンニュートラルの実現に貢献する。

* LFT は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 中村 隆：自動車のトライボロジーによる省エネルギー（中間報告），トライボロジー会議予稿集，2013 春 東京，日本トライボロジー学会(2013)F1.
- 2) 山根伸志，荻本健治：低トルク No.1 を目指した HUBLFT の 開 発，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1014(2016)64-68.
- 3) 中川義浩，本庄卓也，戸田拓矢：低トルク No.1 を目指した HUBLFT II の 開 発，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1019(2022)56-61.
- 4) 松山博樹：転がり軸受の高効率化とトライボロジー，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1009(2011) 108-113.
- 5) 水田裕賢：回転用オイルシールの潤滑機構の解明と摩擦低減に関する研究，九州大学学位論文(2013)197.

筆 者



水野祐樹*
Y. MIZUNO



吉岡祐一*
Y. YOSHIOKA



戸田拓矢**
T. TODA

* 自動車事業本部 ハブユニット技術部

** 産機・軸受事業本部 技術企画部