

低トルク No. 1 を目指した HUBLFT の開発

HUBLFT: Hub Unit for Low Friction Torque

山根伸志 S. YAMANE 荻本健治 T. OGIMOTO

Hub Units are used worldwide as automobile wheel bearings. Through careful consideration of the function and performance of component such as grease and seal, we have completed the development of a low torque Hub Unit called "HUBLFT". This paper will introduce the factors that have been redesigned to give this product top performance.

Key Words: Axle bearing, low torque, grease, seal, hub unit

1. はじめに

地球環境保全への取り組みは、COP（気候変動枠組条約会議）に代表されるように、世界的に活発な議論が継続されている。自動車業界も、地球温暖化防止のためのCO₂排出量規制による燃費規制が年々厳しくなっている。特に欧州では、CO₂排出量130g/km（2015年）から95g/km（2021年）への規制が決定されており、さらに70g/kmへの規制に向け議論が交わされている。欧州以外の各国・各地域でも燃費規制の厳格化は同様の傾向であり、各自動車メーカーの燃費改善目標も、さらに加速していくものとする。当社のホイール用軸受のハブユニットにおいても、燃費改善目標に貢献するため、軽量化だけではなく、回転トルクの低減にも取り組んでいる。ハブユニットの摩擦損失の要因を一つ一つ抽出し、それぞれの低減方策を適用することによりダントツの低トルク性能を有する「HUBLFT」を開発した。本報では、「HUBLFT」で採用した低トルク化技術について紹介する。

2. 摩擦損失の分析

ハブユニットとは、図1のとおり車両のホイール内に配置され、車両重量を支えつつホイールが円滑に回転するように、転動体と内外輪軌道を有する「軸受部」と、乗用車側と締結するためのフランジ部で構成されたユニット軸受である（図2）。軸受部の側方には、タイヤがかき上げる泥水の軸受部への浸入を防ぎ、かつ潤滑グリースを外に漏らさない機能を持つ「シール」を備えてお

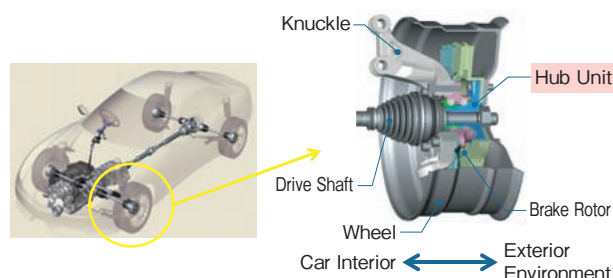


図1 ハブユニットの配置
Structure of axle assembly

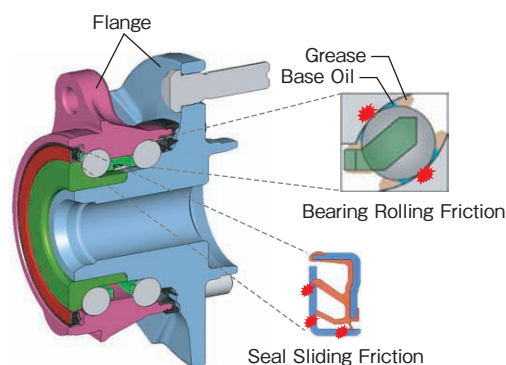


図2 ハブユニット
Hub Unit

り、車両の寿命まで軸受の円滑な回転機能が失われないように、メンテナンスフリー化されている。

摩擦損失の主要因としては、前述の「軸受部の転がり抵抗」と「シールのしゅう動抵抗」がある。車両重量によってハブユニットの転動体PCD（Pitch Circle Diameter, ボルト穴ピッチ円直径）などの諸元が変わるため、それぞれの寄与度は多少変化するが、この主要因二つがおおよそ50%ずつを占めている。

3. 各摩擦損失への低減方策

3.1 軸受部の摩擦損失

ハブユニットの軸受部は、予圧と呼ばれる軸方向荷重を付与された状態で使用される。軸受部の寿命の安定と車両の良好な操舵特性を保持するため、すなわち軸受剛性を確保するためには予圧が必要であり、軸端かしめやナットにより付与される。軸受部の摩擦損失を低減するには、この予圧を低減することも一つの方策であるが、前述の車両の操舵特性などへの影響も大きい。背反のない低損失を実現するには軸受の諸元を変更しない前提での検討が必要であり、軸受諸元以外の軸受部摩擦損失の要因解析を実施した。その結果を、**図3**に示す。軸受部の摩擦損失は、グリース自体のかくはん抵抗、基油の粘性抵抗、および軸受部の転がりすべり抵抗に分けられる。以下、各因子の低減方策と結果を述べる。

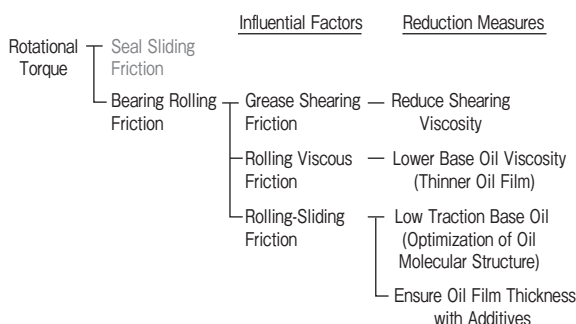


図3 摩擦損失の要因と低減方策

Influential factor analysis and measures for reduction of rotational torque

3.1.1 グリースのかくはん抵抗

転動体や保持器・内外輪の相対速度差によりグリース自体が動く際の抵抗を、かくはん抵抗と呼んでいる。ハブユニットには従来、転動体の軌道通過に伴いグリースがかき分けられ、軌道に戻らないチャネリング特性を持つグリースが使用されている。ただし、かき分けられたグリースも転動体が通過する際の負圧で軌道側へ戻り、グリースと回転体（転動体や保持器）が接触し続けるものと考えられる。

グリースが動く際のせん断抵抗を表す特性として、せん断粘度が挙げられる。せん断粘度を低減するための手法としては、ちょう度の増大（軟化）も一つの方策であるが、ハブユニットにグリースを封入する工程での流下や、シールからのグリース漏れなど、マイナス点も大きい。そのため、従来のグリースからちょう度を変えずに、

せん断粘度を低減することを目指しグリースを開発した。その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。全速度域で、開発グリースのせん断粘度の低減が確認できた。低速度域のせん断粘度の低減は、特殊な増ちょう剤の採用により、同じちょう度を実現するために増ちょう剤の含有量を低減できるため、せん断粘度が低減したと考えられる。一方、高速域のせん断粘度は、基油の動粘度が支配的であることが良く知られており、せん断粘度の低減は後述する基油の低粘度化の効果と考えられる。

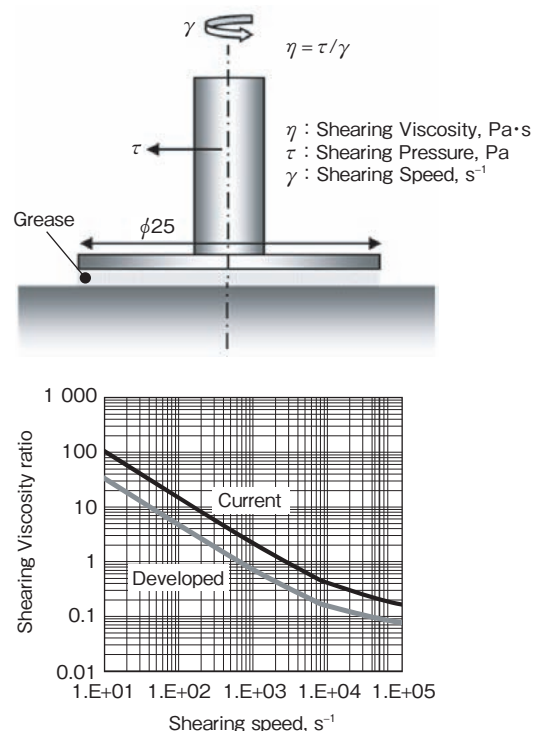


図4 せん断粘度の測定結果
Comparison of shearing viscosity

3.1.2 粘性抵抗

EHL (Elasto-Hydrodynamic Lubrication：弾性流体潤滑) 理論では、転動体は軌道との間に油膜を介して転動しており、その油膜上を通過する抵抗を粘性抵抗と呼んでいる。**図5**は、グリースのかくはん抵抗を除く摩擦損失の計算結果である。ハブユニットなどの軸受は高回転速度であればあるほど摩擦損失が大きく、この高速域での寄与が最も大きい因子である粘性抵抗を極限まで下げること考えた。

粘性抵抗には、基油の動粘度が支配的なため、軸受の高面圧下でも油膜厚さが確保できるように考慮しつつ、動粘度を極小化することで粘性抵抗の低減を達成した。

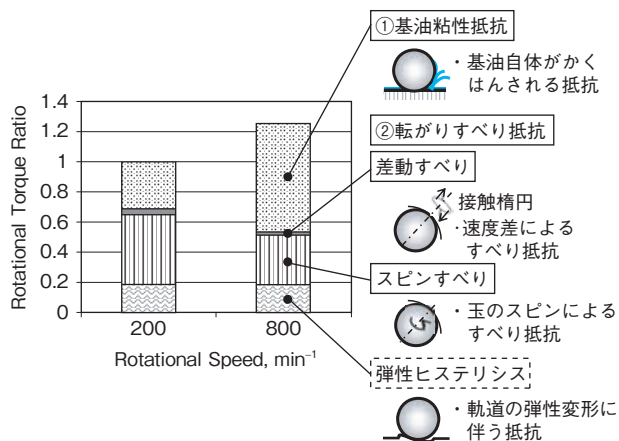


図5 摩擦損失の計算結果 (かくはん抵抗を除く)
Breakdown of bearing torque (calculated)

3.1.3 軸受部の転がりすべり抵抗

転がりすべり抵抗は、スピンすべり抵抗と差動すべり抵抗に分けられ、いずれも玉と軌道間のすべり損失に分類される。そのすべり損失低減のため摩擦係数 μ に着目した。

μ を下げる方策として、基油種すなわち基油の分子構造を見直した。基油の種類によるトラクション係数の比較結果を、図6に示す。供試油は、合成炭化水素油と従来のパラフィン系鉱油を用い、2円筒式トラクション係数測定器で測定した。合成炭化水素油では、従来のパラフィン系鉱油に比べて約30%低いトラクション係数が得られた。従来用いていたパラフィン系に代表される鉱油は凹凸のある三次元の分子構造であるのに対し、炭化水素油は平滑でリニアな分子構造であるということはよく知られており、筆者らの測定でも低減効果を確認できた。

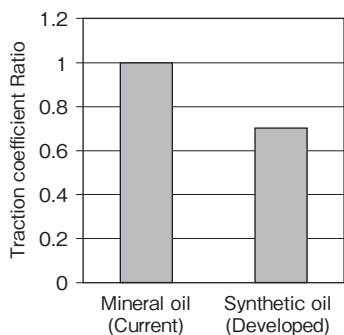


図6 トラクション係数比較
Results of comparison of traction coefficient

また基油の分子構造以外にも、この μ 特性は、転動体と軌道間の油膜の厚さと相関性がある。前述の図5によると、高回転速度条件では転がりすべり抵抗の寄与度が小さいことより、寄与度の大きい低速度域で本抵抗を低減する方策、つまりは油膜厚さを増大する方策を採れば、回転トルクへの影響は小さいと判断できる。開発グリースと従来グリースの油膜厚さの測定結果を図7に示す。S = 1m/s以下の低速度域では増ちょう剤による油膜の厚膜化は良く知られている現象である。今回の開発グリースでは、増ちょう剤の効果以上に油膜厚さを厚膜化できる添加剤を選び、低速度域で従来グリースよりも厚い油膜を確保することができ、転がりすべり抵抗においても低減することができた。

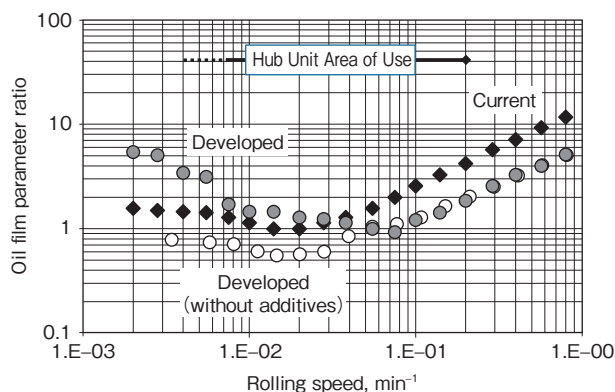


図7 油膜厚さの比較
Comparison of oil film parameter

3.2 シール部の摩擦損失

軸受部の側方に用いられるシールはハブユニットの機能を維持するために必要で最も重要な部品であり、このシール性を損なわず、損失の低減を図ることが必要になる。シールのしゅう動トルクの計算式は、式(1)で表される。ここで、 T_s はシールしゅう動トルク、 μ は摩擦係数、 Pr はシールリップの緊迫力、 D はシールリップのしゅう動径を表す。シールしゅう動トルク T_s は、摩擦係数 μ と緊迫力 Pr の積に比例している。この二つの項目の低減方策を下記に述べる。

$$T_s = \mu Pr \frac{D}{2} \tag{1}$$

まず、緊迫力の低減の方策から述べる。従来、シールは図8のとおり、ラジアルリップとアキシャルリップにより構成されており、ラジアルリップはシールに許容されるスペース上、リップ長が短く剛性のあるものにせざ

るを得ない。その結果、シールトルクは大きくなっていった。今回、ラジアルリップを廃止し、ダブルアキシャルリップ化することで、長く柔軟なリップのみの構成とすることができた。また、シールゴム材の引っ張りひずみ線図を用いた当社独自の超弾性解析手法を駆使して、緊迫力を最適化することにより、シールトルクの低減を実現した。また、シール性についてもダブルアキシャルリップ化と最適化された緊迫力の相乗効果で、当社の試験条件において、泥水密封性が2倍に向上した。

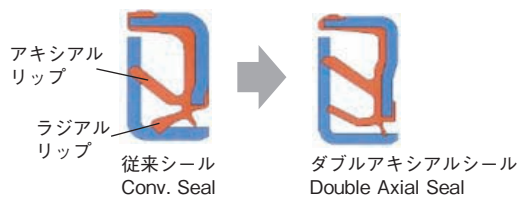


図8 シールリップ構成の比較
Comparison of seal lip

一方、摩擦係数 μ の低減については、シール用グリースの改善に取り組んだ。従来は、異種グリースを混合するとグリースの特性が変わることを懸念し、軸受部と同一のグリースを使用してきた。しかし、シールの接触面圧は小さいため、比較的低い回転速度で、潤滑として安定した流体潤滑領域になることが知られている。軸受部のグリースとは別に、シール専用グリースとして超低粘度基油のグリースを採用した。

なお、先に述べたグリースの混合性については、軸受部とシールの開発グリースを混合しても、ちょうどやその他の物性の変化が見られず、赤外分光 (IR) 分析でも、組成面の変化は認められず、両グリースの親和性に問題がないことを確認した。

4. 効果検証と車両適合性について

効果の検証として、実際にハブユニットを用いて、軸受部開発グリースのトルク低減効果を確認した。その結果を図9a)に示す。なお、測定に使用したハブユニットは、シールのしゅう動トルクの影響をなくすためリップ先端をカットしたシールを用いている。JC08モード最高速の80km/h相当の800min⁻¹において、従来比50%のトルク低減効果を確認できた。他の回転速度でも同等の低減効果が確認でき、また、基油の合成油化に伴う低温流動点の向上により、極低温時の起動トルクの低減にも効果があることが分かった。

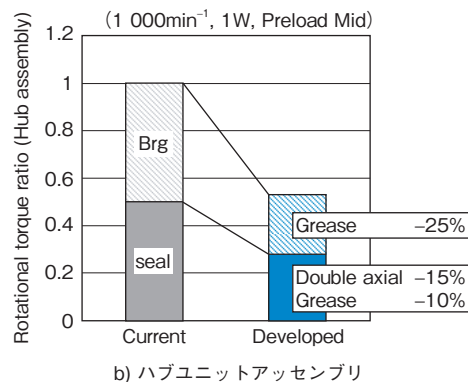
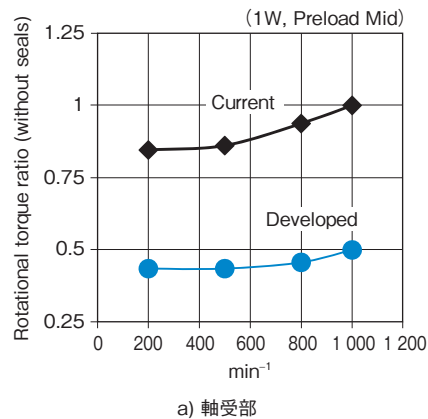


図9 トルク比較
Results of comparison of torque

また、シールのダブルアキシャルリップ化、シール用グリースの改善についても、図9b)のとおり1000min⁻¹の条件において、シール単品では、それぞれ30%と20%のトルク低減効果（ハブユニットアッセンブリでは、それぞれ15%、10%のトルク低減効果）を確認しており、軸受部グリース同様に、他の回転速度でのトルク低減効果も確認できた。

車両への適合性については、剥離寿命を始めとして、当社独自のロバスト試験（水封入剥離試験・低速剥離試験・高速回転速度試験・シール泥水耐久など）においても、全項目につき従来グリースと同等以上の性能を確認している。

5. 低トルク化以外の効果について

乗用車需要のグローバルな拡大に伴い、ロシアなどの極寒地域への乗用車の搬送も多くなってきている。乗用車の貨車輸送時の振動により、軸受軌道がフレットイング摩耗を起こす場合があり、乗用車に異音や振動が発生することがある。

開発した軸受用グリースを採用することで、当社試験条件で低温フレットング摩耗量を 70% 低減可能であることを確認している。軌道部への添加剤供給の担い手が基油と考えており、前述の基油の合成油化に伴う低温流動点の向上により、極低温でのレオロジー（流動）性が改善し、また極低温で吸着性や反応性が良好な添加剤を選定することで、摩耗量が低減したと考えている。極寒地域での貨車輸送時の軸受のフレットング摩耗の防止による、非走行状態での損傷の撲滅を期待している。

またシール用グリースにおいても、極寒地域で十分なシール性を発揮するには、低温下でのグリースと基油のレオロジー特性の維持が重要である。軸受部グリースと同様に、基油合成油化に伴い低温流動点が向上し、低温環境でも十分にレオロジー性を保つことにより、シール性の向上効果が認められた。

6. おわりに

ダントツの低トルクボールハブユニットを開発するため、これまで未着手であった軸受部・シール用グリースにも着目し、ハブユニットの摩擦損失の要因を明確にし、低減方策として低粘度合成基油を採用した。その結果、ダブルアキシャルリップシールの採用と緊迫力の最適化も合わせて、50% のトルク低減が達成でき、基油の低粘度化に伴う二律背反は、添加剤種と量の最適化で抑えることができた。

特にグリースの開発では、軸受回転中のグリース挙動の確認、軸受剥離やフレットング摩耗と添加剤被膜の効果検証を進める中で、新たな知見が得られた。乗用車向けに限らず、SUV やピックアップトラックなどへも燃費規制が厳しくなりつつあることから、それらの車両に使用されているテーパローラハブユニットへの本技術の応用展開を進め、さらなる車両の低燃費化とともに地球環境保全にも貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 中田竜二：自動車しゅう動部品用グリース潤滑技術 JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1011(2013) 25-30
- 2) 吉崎浩二：転がり軸受のグリース潤滑技術 JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1010(2012) 27-33
- 3) 滝本将生：自動車ホイール軸受用シールの技術開発(泥水性能, 低温環境, 超低トルク), JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1008(2010) 63-68.

筆者



山根伸志*

S. YAMANE



荻本健治**

T. OGIMOTO

* 軸受事業本部 軸受ユニット技術部

** 軸受事業本部 実験解析部