

EV 駆動モーター用高周速度シールの開発

Development of High Peripheral Velocity Seals for EV Drive Motors

李保 優 Y. MOKUBO 黒田英希 H. KURODA

A new type of oil seal has been developed by improving the composition of the fluororubber and optimizing the design of the main lip shape in order to support the high peripheral speeds (up to 50 m/s) of EV drive motors. Seal performance, including durability, has been evaluated under both poor and good lubrication conditions. It was found that deterioration of the lubrication condition of the sliding part and occurrence of stick-slip were problems with current products. These problems were solved by developing low-friction fluororubber, adding ribs that could guide lubricating oil to the main lip sliding part, and devising a screw mechanism to collect a small amount of oil that leaked.

Key Words: EV drive motors, oil seals, high peripheral velocity, fluororubber

1. はじめに

近年、EV 駆動モーターは小型化・高効率化を目的とした高速回転化が進んでおり、2025 年には最大回転速度 $20\,000\text{min}^{-1}$ に達すると予想される。その際、EV 駆動モーター用シールの周速度は、 50m/s になる (図 1)。

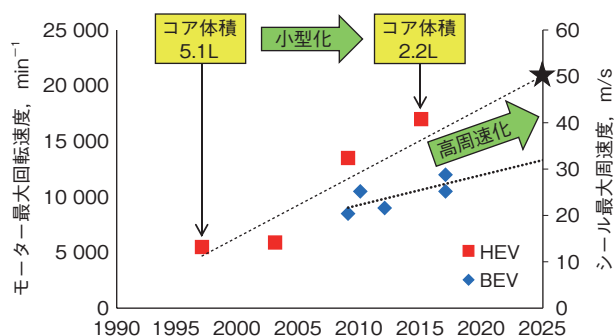


図 1 シール周速度の動向

Trends in peripheral speed of oil seals

シールは駆動モーターの出力軸と減速機との間に取り付けられ、潤滑はモーターに隣接する減速機内の油によって供給される。つまり、減速機内ギヤの回転により飛散する油がシールの潤滑となる。しかし減速機のトルク損失低減のため、油量が必要最小限に抑えられており、油面レベルはシール設置部よりも下方となっている (図 2)。

シールへの飛散量が少ない場合は“貧潤滑環境”とな

り、一方、シールへの飛散量が多い場合は“良潤滑環境”となることから、ユニット構造や回転速度によってシールの潤滑状態に差が生じることが想定される。

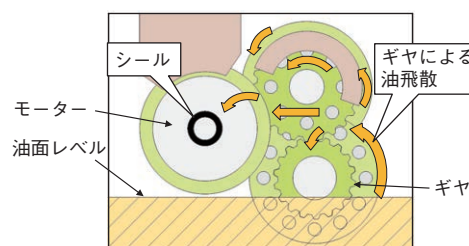


図 2 シールの油面レベル
Oil level at seal

EV 駆動モーター用シールは、減速機内の油をモーター内へ浸入させない機能を持つ重要な部品であり、モーター内へ油が浸入すると、絶縁劣化の原因となり、故障につながる。

本報では、高周速度 (50m/s)、貧潤滑・良潤滑環境下において、良好な耐久性維持可能となるシールの開発について紹介する。

2. 現行品の性能評価

高周速度 (50m/s)、貧潤滑環境下における EV 駆動モーター用シールの問題点を明確にするため、駆動モーター用シールとして量産実績のある現行品の性能把握を行った。

2.1 実験装置および評価条件

評価条件を表1、実験装置を図3に示す。顧客用途を想定し、目標サイクル数を600回に設定した。試験時はビデオ撮影による軸回転時の主リップ側面の油付着状態の観察と、熱電対の装着による主リップしゅう動部の温度測定を試みた。

表1 貧潤滑評価条件
Test condition for poor lubrication

ゴム材	ふっ素ゴム								
油種	ATF								
目標サイクル数	下記運転ステップを600回								
運転ステップ	①	周速度	50m/s	油有無	有	時間	3min	目的	密封性確認
	②	周速度	50m/s	油有無	無	時間	30min	目的	貧潤滑状態の運転

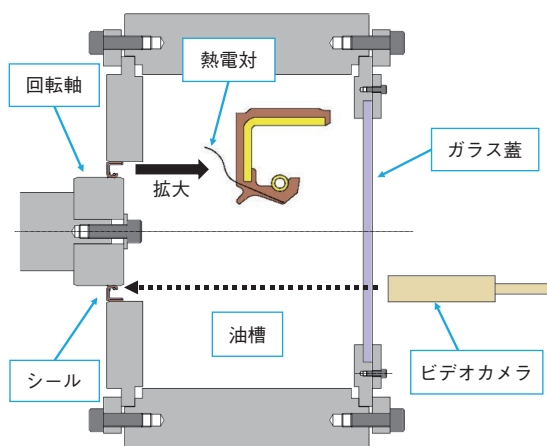


図3 実験装置
Test equipment

2.2 実験結果および考察

現行品では、18サイクルで油漏れが発生し、油漏れが発生した時点での主リップしゅう動部を観察すると、図4に示すように、しゅう動部に偏摩耗と油やけが確認された。

ビデオ撮影からは、運転ステップ②の開始時点で主リップカット面に少量の油が付着しており、運転開始とともに遠心力により付着していた油が飛散していく様子が確認された。この油の飛散によりしゅう動部の潤滑状態が悪化し、主リップの偏摩耗を発生させたと推測する。また、主リップしゅう動部の温度は165℃まで上昇することを確認した。このしゅう動部の発熱により基油の

酸化劣化が進行し、油やけが発生したと推測する。

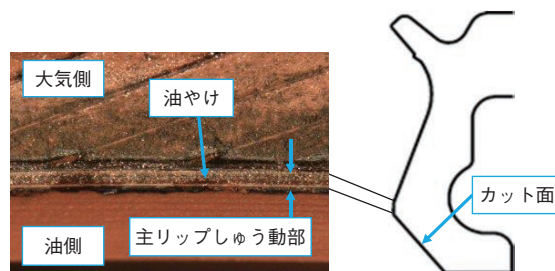


図4 主リップしゅう動部の状態
Condition of main lip sliding area

さらに、周速度30m/s以上の高速回転時には、主リップノーズ面に付着した油が軸回転方向に移動する現象が確認された(図5)。高速回転時には油を移動させるほどに強い空気の流れ(以下、空気の流れ)が発生したと推測する。

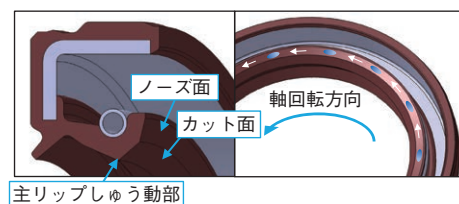


図5 主リップノーズ面の油移動
Oil transfer on main lip nose face

3. 主リップしゅう動部の改良

高周速度(50m/s)、貧潤滑環境下の主リップしゅう動部の問題点(潤滑状態悪化による偏摩耗、発熱による油やけ)の改良手法として、ゴム配合成分とリップ形状の改良を実施した。

3.1 ゴム配合成分の改良

ゴム材の耐摩耗性向上と発熱抑制の手法として、ゴム材の摩擦係数低減に着目した。その改良策として、ゴム配合成分の設計変更とゴム表面処理が考えられる(図6)。

ゴム表面処理については、シール製造時に追加工程が必要であることに加え、表面処理膜の耐久性が懸念される。特に、複合処理やコーティングは高周速度(50m/s)、貧潤滑環境下で使用されると、主リップしゅう動部の摩耗により剥離し、表面処理膜が早期になくなってしまうことが予想される。

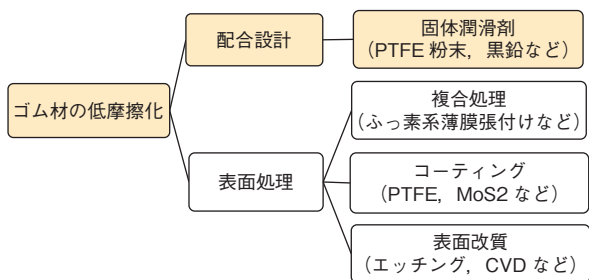


図6 ゴム材の摩擦係数低減手法
Coefficient of friction reduction method

したがって、本開発ではふっ素ゴム配合成分の設計を見直した。添加剤の種類・量を変更することでゴムの摩擦係数低減に取り組んだ。その結果、改良したふっ素ゴムは現行ふっ素ゴムと比較して、摩擦係数を60%低減することに成功した(図7)。

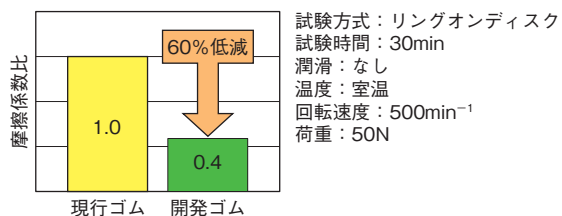


図7 摩擦係数比較
Comparison of friction coefficients

3.2 リップ形状の改良

リップ形状の改良として、主リップノーズ面にねじを設け、空気の流れの活用で、主リップノーズ面の付着油を積極的にカット面へ送り込み、主リップしゅう動部が長時間にわたり良好な潤滑状態になることを狙った。ビデオ撮影の結果、空気の流れにより主リップノーズ面の付着油が移動し、ノーズ面のねじに沿ってカット面へ送り込まれる事象を確認した。それにより、現行品と比較して主リップしゅう動部潤滑の長時間確保に成功した(図8)。

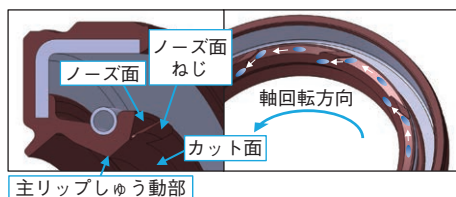


図8 主リップノーズ面のねじ
Rib on main lip nose face

3.3 改善効果の検証

開発ふっ素ゴムと主リップノーズ面のねじを組み合わせた『開発シール Ver. 1』を用いて、高周速度(50m/s)、貧潤滑条件下での耐久性評価を実施した。結果、現行品と比較して、主リップ摩耗幅は95%低減(偏摩耗なし)、主リップ発熱は30%低減(油やけ減少)することを確認した。さらに、目標のサイクル数600回を達成し、『開発シール Ver. 1』の耐久性は現行品と比較して30倍以上に向上することを確認した(図9)。

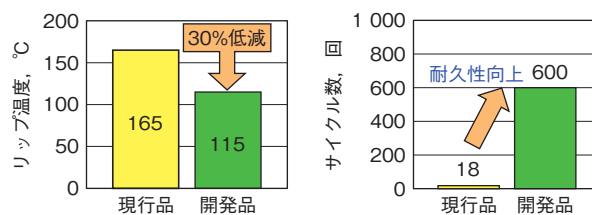


図9 リップ温度とサイクル数
Lip temperature and number of cycles

4. 良潤滑環境でのシール耐久性評価

3章では、貧潤滑環境下でシールの耐久性を大幅に改良した結果を説明した。ここでは、高周速度(50m/s)、良潤滑環境下においてシールの耐久性評価を実施する。

4.1 『開発シール Ver. 1』での耐久性評価

高周速度(50m/s)、貧潤滑環境下で耐久目標を達成した『開発シール Ver. 1』を用いて、良潤滑環境下での耐久性評価を実施した。実験装置は図3と同様、評価条件を表2に示す。顧客用途を想定し、目標サイクル数を10回に設定した。試験時は高速度カメラによる主リップ状態の観察を試みた。

表2 良潤滑評価条件
Test condition for good lubrication

ゴム材		開発ふっ素ゴム			
油種		ATF			
目標サイクル数		下記運転ステップを10回			
運転ステップ	①	周速度 15~30m/s	油 有	時間 15h	目的 低速・中速域の密封性確認
	②	50m/s	有	6h	50m/s × 良潤滑の密封性確認
	③	停止	有	3h	停止による放冷

4.2 高速度カメラによるリップ状態の観察結果

耐久試験の1サイクル目の運転ステップ②において油漏れが発生した。高速度カメラからは、油漏れが発生する際、主リップにはスティックスリップが発生していることが観察された。

耐久性評価中のスティックスリップの発生頻度は低いが、発生すると主リップに軸方向と径方向への振動現象が発生し、主リップ先端と軸との間に約0.1mmの微小なすきまが生じ、油漏れに至ることを確認した(図10)。

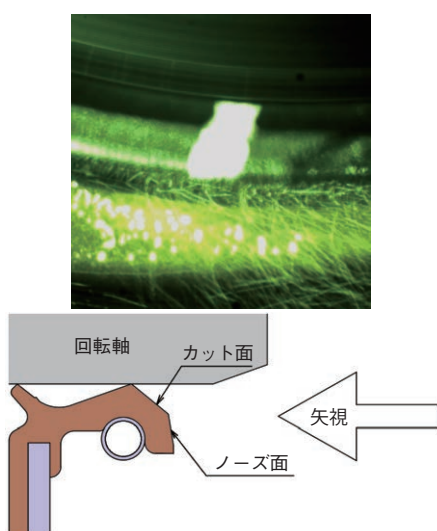


図10 スティックスリップ発生の瞬間
Moment of stick-slip occurrence

5. スティックスリップの対策

5.1 スティックスリップ抑止手法の検討

スティックスリップの発生メカニズム検討のために、シールを振動モデルに変換し、スティックスリップの抑止手法を検討した(図11)。

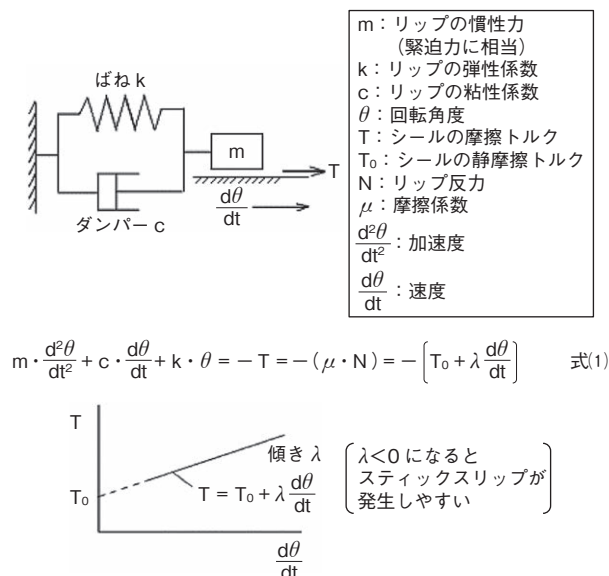


図11 シールの振動モデル
Oil seal vibration model

式(1)より、スティックスリップに影響する因子として摩擦係数 μ 、緊迫力 N 、主リップ剛性 K 、主リップ粘性 C がある。スティックスリップを抑止するためには、摩擦係数 μ と緊迫力 N は小さく、主リップ粘性 C と主リップ剛性 K は大きくすることが必要である(表3)。

ここでは、ゴム材は、前述の摩擦係数を低減した開発ふっ素ゴムを適用している。したがって、主リップ緊迫力 N と主リップ剛性 K の2因子について改良を検討した。

表3 スティックスリップの影響因子
Factors affecting stick-slip

	あるべき姿	手法	改良要否
摩擦係数 μ	小	ゴム材の摩擦係数を低減	否
緊迫力 N	小	主リップ緊迫力を低減	要
主リップ粘性 C	大	ゴム材の $\tan \delta$ (粘性 / 弾性) を低減	否
主リップ剛性 K	大	主リップ形状を変更 (リップ長, リップ角度など)	要

5.2 スティックスリップ抑止効果の検証

主リップ緊迫力 N と主リップ剛性 K を変化させて、スティックスリップの再現評価を実施した。スティックスリップの発生は、主リップしゅう動部温度急上昇の振幅の大きさによって判定できる。温度計測の結果、ある一定の主リップ緊迫力と特殊な主リップ形状において、スティックスリップの抑制を確認した (図12)。

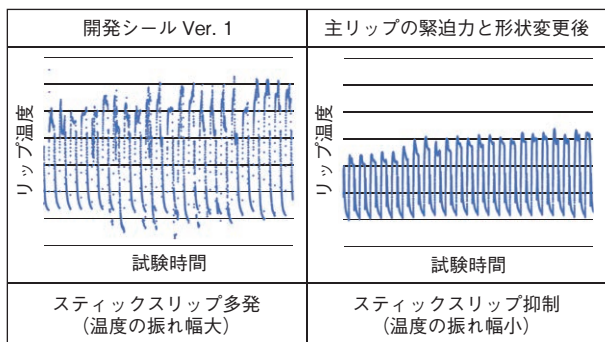


図12 スティックスリップ抑止の効果確認
Checking the effect of stick-slip prevention

前記評価で得た主リップ緊迫力および主リップ形状を『開発シール Ver. 1』へ反映させて、『開発シール Ver. 2』を製作した。『開発シール Ver. 2』を用いて高周速度 (50m/s)、良潤滑環境下の耐久性評価を実施した結果、スティックスリップを完全に抑止できなかったものの、大きく抑制できたことにより、10 サイクル後の油漏れ量は30分の1以下に低減されることを確認した。油漏れ状態の外観を図13に示す。

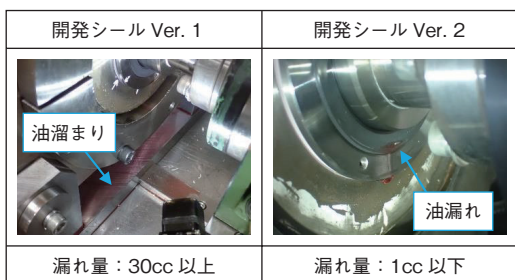


図13 油漏れ状態の外観
Appearance of oil leak

『開発シール Ver. 1』は試験機上に油だまりができる程度の漏れ量であるが、『開発シール Ver. 2』はわずかに垂れる程度となった。

6. 油漏れの完全抑止対策

5章では、『開発シール Ver. 2』であっても、高周速度 (50m/s)、良潤滑環境下で微量の油漏れが発生することが分かった。そこで、油漏れを完全に抑止する手法を検討した。

6.1 油漏れ抑止機構の検討

『開発シール Ver. 2』について、油漏れ量は1cc以下と微量であること、さらに空気の流れがあることの2点を活用し、漏れた微量の油を密封側へ回収する機構を検討した。

図14に示すように、サブリップを設けることで主リップ先端から大気側へ漏れた微量の油を一時的にためる空間 A を設ける。さらに、主リップ先端からサブリップまでの間に“漏れ回収ねじ”を設け、そのポンプ作用を活用して、空間 A にたまった油は“漏れ回収ねじ”に沿って主リップ油側に送り戻して回収する。このシールを『開発シール Ver. 3』と称する。

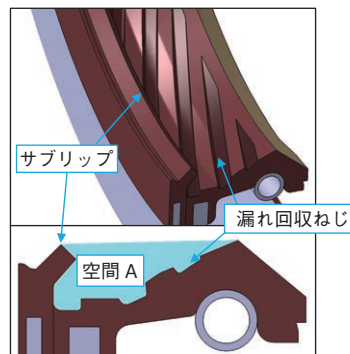


図14 開発シール Ver. 3 の形状
Shape of development seal Ver. 3

6.2 油漏れ抑止機構の効果検証

『開発シール Ver. 3』を用いて、高周速度 (50m/s)、良潤滑環境下の耐久性評価を実施した結果、油漏れは完全に抑止され、表2の目標サイクル数10回を達成した。耐久性評価後の現品を観察すると、空間 A までは油が浸入した痕跡はあるが、大気側への油漏れは認められなかった。したがって、主リップ先端より漏れた微量の油が一時的に空間 A にたまり、“漏れ回収ねじ”の効果によって密封側へ回収されたものと推定できる (図15)。

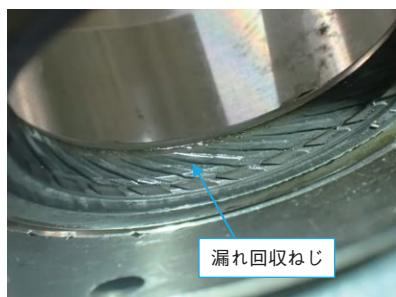


図15 耐久性評価終了後の空間 A 状態
Space A state after endurance evaluation

さらに、『開発シール Ver. 3』を用いて、高周速度 (50m/s)、貧潤滑環境下の耐久性評価を実施したところ、表1の目標サイクル数 600 回を達成した。その結果、『開発シール Ver. 3』は、高周速度 (50m/s)、貧潤滑・良潤滑環境下で耐久性を有すると判断した。

7. おわりに

本報では、シールの EV 駆動モーターの高周速度 (50m/s まで) 対応のため、ふっ素ゴムの配合成分の改良および主リップ形状の最適化を実施した。その結果、開発シールでは貧潤滑・良潤滑の両環境下での耐久性評価において、目標サイクル数を達成した。

貧潤滑環境下では、偏摩耗・油やけを抑制するために主リップしゅう動部の潤滑状態の改善および主リップしゅう動部温度の低減に取り組んだ。ゴム配合成分の改良により摩擦係数を 60% 低減、さらに主リップノーズ面ねじ設計により良好な潤滑状態を長時間確保した。これらの効果で、主リップの耐摩耗性 95% 向上 (偏摩耗なし)・発熱 30% 抑制 (油やけ減少) に成功した。

良潤滑環境下では、油漏れを抑止するために、スティックスリップの抑制に取り組んだ。主リップの緊迫力・剛性を最適化することで、スティックスリップの発生頻度を低減し、油漏れ量を 30 分の 1 に低減した。さらに、サブリップと“漏れ回収ねじ”を設けることで、主リップ先端より漏れた微量の油を回収し、油漏れを完全に抑止することに成功した。

本開発内容を当社のシール設計標準に反映するとともに、得られた知見を今後のシール開発に活用する。

筆者



空保 優*
Y. MOKUBO



黒田英希*
H. KURODA

* 株式会社ジェイテクトシーリングテクノ
技術統括部