

新幹線高速化のための車軸軸受用オイルシールの開発

中村 和夫* 細谷 哲也* 日比野 澄子*
半坂 征則** 間々田 祥吾** 吉田 博文***

Development of Axle Bearing Rotary Shaft Lip Seal for Speed-up of Shinkansen

Kazuo NAKAMURA Tetsuya HOSOYA Sumiko HIBINO
Masanori HANSAKA Shogo MAMADA Hirofumi YOSHIDA

We produced a trial axle bearing rotary shaft lip seal to suppress outbreaks of flaking (rubber and filler) of a lip contact surface as one of various measures to cope with the speed-up of 350km/h - 400km/h area of the Shinkansen vehicles. As the consequence of the bench test for the high-speed rotation of trial axle bearing rotary shaft lip seal, the characteristics of seal was well maintained after the test duration equivalent to 750,000km in vehicle running distance, and the condition of the seal after the test was also satisfactory. Therefore, it was confirmed that this rotary shaft lip seal has a suitable performance for use in high-speed Shinkansen vehicles.

キーワード：オイルシール，新幹線，車軸軸受，軸箱，ゴム，潤滑油

1. はじめに

新幹線車両を 350～400km/h 域まで高速化した場合、車軸軸受用オイルシールは回転速度の増加により過酷な条件下で使用されることになり、潤滑油の漏れ量が増大し、車軸軸受の正常な潤滑状態を阻害することが懸念される。そこで、新幹線車両の高速化に対応可能なオイルシールを開発するため、現行オイルシールの台上試験を実施し高速化による油漏れの原因を把握した。次に、その結果に基づきゴム材料等についての検討を行い、高速対応用として、リップ接触面のはく離（ゴムおよび充てん剤の脱落）の発生を、また、トンネル出入り時等における圧力変動による影響を抑えるための対策を施したオイルシールを試作した。そして、この試作品について台上試験を実施して高速条件における耐久性の確認を行った¹⁾。ここでは、これらの試験結果について報告する。

2. 車軸軸受用オイルシール

オイルシールは、ゴム材料と金属環からなるくさび形の断面形状のリップを有するパッキンで、回転部の潤滑油などの漏れおよび外部からの異物侵入を防止するために用いられる。鉄道車両のオイルシールは、主に、車軸軸受（軸箱）、主電動機軸受およびディーゼル機関等の走

り装置関係の機器において多く使用されている。車軸軸受は、車両の大きな荷重を支えながら車軸の回転を案内する重要な機械要素であり、軸箱内において潤滑油またはグリースによって潤滑されている。車軸軸受用オイルシールは、主にこれら潤滑油等を密封するために用いられており、油潤滑用とグリース潤滑用がある。油潤滑用オイルシールには、潤滑油が半固体状であるグリースよりも漏れやすいため、より優れた密封性能が要求される。ここでは、油潤滑用オイルシールを対象としている。

新幹線車両の軸箱および車軸軸受の概略図を図1に、車軸軸受用オイルシールの外観写真とその密封構造を図2の(a)、(b)に、それぞれについて一例を示す。固定側のリップ接触面において、回転側の油切り（クロムめっきを施した鋼製品）がしゅう動する。リップ接触面は、回転部における潤滑油の密封を行うオイルシール各部の中で最も重要な部分であり、この状態の良否がオイルシールの密封性能を左右する。

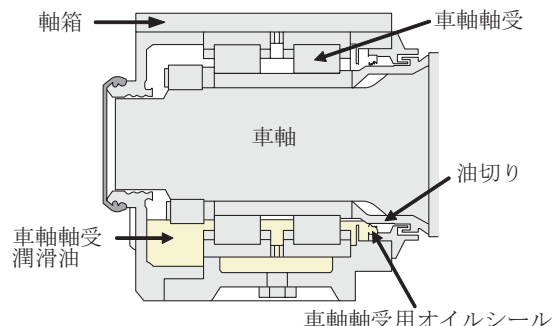


図1 新幹線車両の軸箱および車軸軸受の概略図（一例）

* 材料技術研究部（潤滑材料）
** 材料技術研究部（防振材料）
*** キーパー株式会社 技術開発部

特集：材料技術

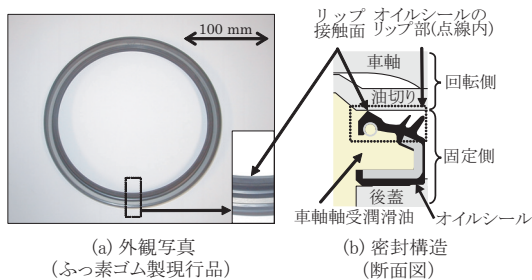


図2 車軸軸受用オイルシールとその密封構造（一例）

3. 高速化による油漏れ原因の把握

新幹線車両を350～400km/h域まで高速化した場合、車軸軸受用オイルシールは回転速度の増加により過酷な条件下で使用されることになり、現行オイルシールでは油漏れが多くなり対応が困難であることが予想される。そこで、これを確認するとともに、油漏れの原因を明らかにするため、現行オイルシールの台上試験を実施した。

3.1 現行オイルシールの台上試験

3.1.1 供試オイルシール

供試オイルシールは、現在、新幹線電車に使用されている代表的な現行オイルシールとして、アクリルゴム製オイルシール（以後、現行品1と称す）とふっ素ゴム製オイルシール（以後、現行品2と称す）の2種類とした。

3.1.2 試験方法

上記の現行オイルシールについて、オイルシール密封性能試験装置を用いて台上試験を実施した。その試験装置と供試オイルシールの取り付け部（断面図）をそれぞれ図3の(a), (b)に示す。油切りは実車で使用されているものを用いた。現行品1は実車と同じようにダストシール（ニトリルゴム+PTFE〔リップ接触面〕）を併用して試験を行った。試験条件を表1に示す。本試験は、高速条件だけでなく、比較のため現行条件においても行った。

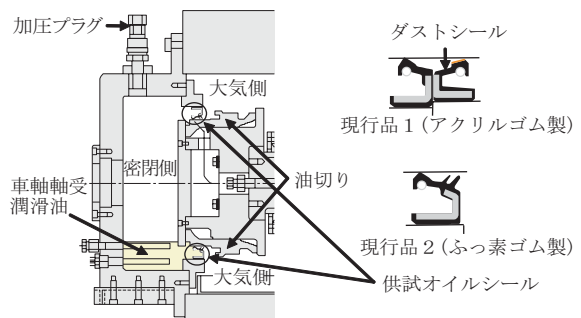
高速条件では運転速度400km/h相当の回転速度2700min⁻¹、現行条件では運転速度280km/h相当の回転速度1890min⁻¹とした。いずれの場合も、運転パターンは代表的な実車ダイヤを模擬し往復約1265kmとした。回

転方向が変わる間において20分間の停止時間と両回転方向の各行程中において3回の停止時間（1分間）を設けた。また、実車のトンネル出入り時やすれ違い時に発生する圧力変動即ち、漏れを促進する負圧（大気側）は、密閉側を周期的に加圧し圧力差を生じさせることによって模擬した。圧力変動の最大値は実車のデータに基づいて推定値²⁾を採用した。さらに、漏れを促進させるため、実車で発生しうる偏心を油切り（回転軸）とオイルシールに与えた。

試験では漏れを観察するとともに、オイルシールと油切りに関しては、表2に示す項目の調査および測定を行った。オイルシールは、リップ接触面の摩耗状態の観察やゴムの劣化の指標として硬さの測定等を行った。油切りは、オイルシールのリップが接触する面の摩耗状態を把握するため、母線形状を測定した。また、潤滑油に関しては、劣化状態を把握するため、動粘度と酸価を測定した。劣化の評価にあたっては、実車の車軸軸受潤滑



(a) 試験装置



(b) 供試オイルシール取り付け部(断面図)

図3 オイルシール密封性能試験装置

表1 台上試験の試験条件

項目	回転条件	高速条件	現行条件
回転速度*		2700 min ⁻¹ (運転速度約400km/h相当)	1890 min ⁻¹ (運転速度約280km/h相当)
運転パターン		正回転と逆回転の運転を1周期：約1265km	(車両走行距離の換算値*)
圧力変動(周期的に加圧)		1周期240秒間において ・最大圧力0.022MPaを6秒間1回 ・圧力0.011MPaを6秒間3回 ・各圧力の加減圧時間は3秒	1周期240秒間において ・最大圧力0.011MPaを8秒間1回 ・圧力0.006MPaを8秒間2回 ・各圧力の加減圧時間は4秒
偏心	回転軸	0.1mm (回転中心と軸中心との距離の2倍の値)	
	取り付け	0.3mm (後蓋穴中心と軸中心との距離の2倍の値)	
潤滑油および潤滑油量		JR添加タービン油68, 約400ml (油面：最下部のリップ接触面より約5mm上)	
グリースの充てん		リップ空間容積の約50%の量を充てん	
車両走行距離(換算)*		60万km (台車検査周期の車両走行距離)相当を目標	

*：車輪径790mmとして計算した。

表2 オイルシール、油切りおよび潤滑油の調査項目または測定項目

調査品名	調査項目または測定項目	解説
オイルシール	リップ接触面の状態	デジタルマイクロスコープを用いて摩耗状態を観察した。
	リップ摩耗幅	リップ接触面の摩耗幅を測定した。
	リップ内径	締め代を求めるために、リップ内径(ばね入り)を測定した。その値は、直交する2方向の測定値の平均とした。
	緊迫力	油切りを締め付ける力である緊迫力(ばね入り)を測定した。緊迫力測定器を用いた。
	リップ近傍のゴム硬さ	シール材の硬さを、JIS K6253(加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法)に準じて、マイクロサイズ国際硬さ計を用いて測定した。
油切り	リップ接触部周辺の母線形状	摩耗状態を把握するため、リップ接触部周辺の母線形状を測定した。

油交換の要否を判断するために用いられている管理基準値を適用した。

3.1.3 試験結果および考察

現行オイルシールの台上試験の結果を図4および表3に示す。高速条件においては、現行品1は早期ににじみが発生、以後少量の潤滑油の滴下が認められ、車両走行距離(換算)が約31万km相当で油の滴下量が増大したため、この時点で試験を中止した。一方、現行品2では、車両走行距離(換算)が約29万km相当でにじみ、約51万km相当で少量の油の滴下が発生した。また、現行条件においては、現行品1は、現行品2より早期に少量のにじみが発生するが、両現行品とも、車両走行距離(換算)60万km相当を回転することができた。以上の結果より、高速条件においては、現行品では油の滴下が認められたことから、高速化に対応することは困難であること、また、ふっ素ゴム製オイルシールの耐久性は、アクリルゴ

ム製オイルシールよりも優れていることを確認できた。

試験後のオイルシールを調査した結果、緊迫力の低下値は大きいものではなく、リップ接触面の摩耗幅も小さかったことから、面圧は十分に確保されていると思われる。従って、リップ面圧の点からは密封性能を損なうことはないと考える。また、ゴムの硬度もほとんど変化がなかったことから、ゴムの劣化は少ないと考えられる(表3)。両現行品のリップ接触面を観察したところ、ほぼ全周にわたり、はく離(ゴムおよび充てん剤の脱落)が認められた(代表例：図4(b))。ここで、充てん剤は、ゴム材料の耐摩耗性の向上や補強等の目的で使われる配合剤のことで、ゴム材料中に分散して含有されている。はく離を起こしている箇所は、両現行品とも高速条件では現行条件に比べ多く、また、同じ試験条件で比較した場合、両条件とも現行品1は現行品2よりも多かった。高速条件における、これらの早期のはく離は、すべり速度

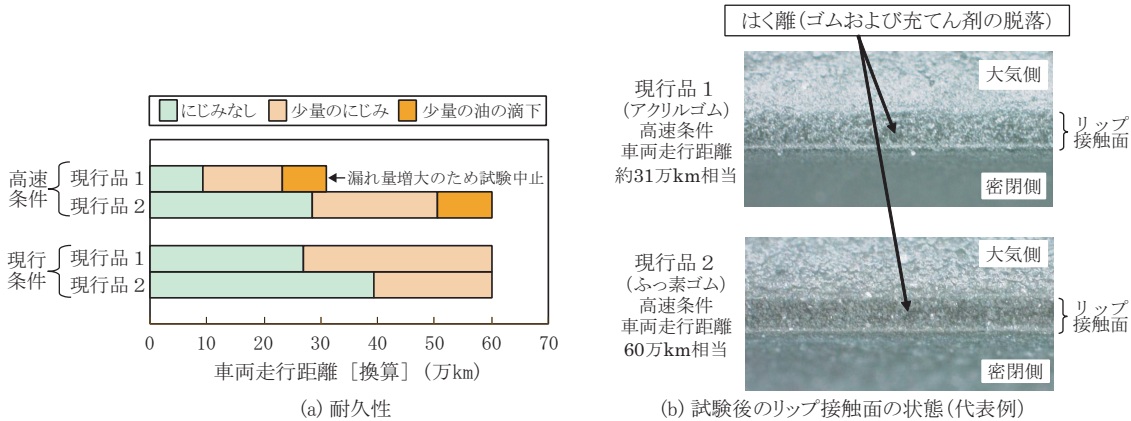


図4 現行オイルシールの台上試験

表3 台上試験後の現行オイルシールの測定結果

測定項目	種別 試験条件	現行品1 (アクリルゴム)		現行品2 (ふっ素ゴム)	
		現行条件	高速条件	現行条件	高速条件
車両走行距離 [換算] (万 km)		60	31	60	60
締め代 (mm) *1		2.54	2.33	2.61	2.48
緊迫力 (N)		22.3 (新品 32.2)	23.6 (新品 31.6)	31.2 (新品 39.0)	30.3 (新品 38.9)
緊迫力低下値 (N) *2		9.9	8.0	7.8	8.6
リップ摩耗幅 (mm) *3		0.10 ~ 0.20	0.10 ~ 0.25	0.10 ~ 0.20	0.10 ~ 0.20
リップ面圧 (MPa)		0.21	0.18	0.28	0.27
リップ近傍のゴム硬さ (IRHD)		73 (新品 75)	74 (新品 75)	75 (新品 76)	75 (新品 76)

*1：新品の油切りの外径は、新製時の標準値を基準として締め代を計算した。現行品1の場合は168.00mm、現行品2の場合は180.00mmである。

*2：各供試オイルシール(新品)の試験前の緊迫力で計算した場合の数値である。

*3：リップ摩耗幅は、最小値~最大値である。

特集：材料技術

や圧力変動が大きくなるとともに、主にリップ接触面において、せん断力および接触面圧が増大することにより発生したものであると考えられる。

油切りについては、リップの接触する面は、母線形状から判断してほとんど摩耗していない状態であった。また、潤滑油は、いずれの場合も、動粘度増加率および酸価の増加値は管理基準値内にあり劣化が少なかった。これらのことから、油切りおよび潤滑油に関しては、密封性能に影響を及ぼすような状態ではなく問題はなかった。

3.2 高速化による油漏れ原因

以上の結果より、高速条件の場合には、少量のにじみの発生でとどまった現行条件に対して少量の油滴や油漏れ量の増大が起こり、また、はく離の発生箇所は現行条件よりも多かったことから、高速化による油漏れの主原因は、早期のはく離（ゴムおよび充てん剤の脱落）であり、この脱落痕が油漏れを引き起こしたものであると考えられた。また、圧力変動によりリップの姿勢が変化した場合には、さらに油漏れが促進されると思われる。車軸軸受用オイルシールについて、高速化による漏れを防止するためには、ゴム材料の点からは早期のリップ接触面のはく離発生を抑制するゴム材料および充てん剤を適用すること、また、オイルシールの形状の点からは、圧力変動の増加に対して、接触圧力の増大を抑えリップの姿勢変化を少なくするため、リップ部の剛性を高めることが必要であると考えられた。

4. 高速新幹線車両用オイルシールの検討

4.1 ゴム材料および充てん剤の検討

現行オイルシールの台上試験結果から、高速化による早期のはく離（ゴムおよび充てん剤の脱落）は、リップ接触面におけるすべり速度や圧力変動の増大により促進されている。これは、試験後のオイルシールの硬さの変化がほとんどないことから、熱的よりも機械的な負荷の増大が大きく影響を及ぼしていると思われる。これらのことを踏まえてゴム材料および充てん剤について検討した。

現行のオイルシールに適用されているゴム材料は、ふっ素ゴムとアクリルゴムの2種類である。これらは、耐油性および耐熱性に優れ、オイルシール材として適正なゴム材料であり、実車の使用実績もある。よって、この2種類の材料の中から選択するのが好ましいと考えた。そこで、この2種類の材料を比較した場合、ふっ素ゴムはアクリルゴムよりも機械的強度が高く耐水性が優れており、また、現行オイルシールの台上試験の結果から耐久性も優れていることが確認されていることから、新幹線車両の高速対応用オイルシール材料には、ふっ素ゴムを採用することとした。

充てん剤は、前述のようにゴム材料の耐摩耗性の向上や補強等のために、ゴム材料中に分散して含有されている。高速化した場合、すべり速度や圧力変動の増大により、はく離（ゴムおよび充てん剤の脱落）の発生が促進される。そこで、はく離発生の抑制のため、充てん剤の材料および大きさについて検討を行い、適正な充てん剤への変更を試みた。

以上、この高速対応用オイルシールのゴム材料として、はく離発生の抑制対策を施した充てん剤を適用したふっ素ゴムを試作（以後、試作材と称す）した。

4.2 ゴム材料の耐油性試験

耐油性は、ゴム材料の潤滑油に対する耐性のことである。潤滑油に対して耐性の劣るゴム材料を使用した場合、膨潤や収縮および軟化や硬化が起こり、オイルシールが変形したり、緊迫力が大きく変化したり、また、摩耗が促進されるなどして密封性能は低下する。そこで、試作材の耐油性について評価するため、現行材と併せて試験を実施した。

4.2.1 供試ゴム材料

供試ゴム材料は、高速対応用の試作材（ふっ素ゴム）と、比較のため現行材については、現行品1のアクリルゴム（以後、現行材1と称す）と現行品2のふっ素ゴム（以後、現行材2と称す）とした。現行材2および試作材については、同じふっ素ゴムであるが、前述のように充てん剤の種類や大きさが異なる。

4.2.2 試験および測定方法

耐油性試験は、供試ゴム材料を潤滑油に一定温度および一定期間浸せきし、機械的性質の変化を測定し耐油性を評価するものである。潤滑油は、現行の車軸軸受潤滑油であるJR添加タービン油68とJRスーパータービン油68の2種類とした。具体的には、供試ゴム材料について、恒温槽を用いて120℃の高温条件下で、車軸軸受潤滑油に240時間浸せきさせた。その後速やかに取り出し、試験片に付着している油成分を拭き取り、外観調査を行い、浸せき前後の表面硬さ、引張特性である引張強さおよび伸びを測定した。そして、それぞれの変化を求めて耐油性を評価した。供試ゴム材料の試験片形状および個数を表4に、また、試験片（代表例：試作材）を図5に示す。

(1) 外観調査

試験片の外観を目視により観察し、き裂や欠けなど異常の有無を確認した。

(2) 表面硬さ

試験機は、JIS K6253（加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法）の定めるA型スプリング式硬度計を用いた。試験片を3枚積み重ね、最上段の試験片の表面硬さを測定した。硬さは値が大きいほど硬いことを意味する。

表4 試験片形状および個数

試験項目	試験片形状	個数*
外観	引張特性用試験片	3
引張特性	JIS K6251 の定める3号ダンベル状 [厚さ約2mm](図5)	3
表面硬さ	引張特性用試験片を併用	3

*: 各条件ごとの個数である。引張強さおよび伸びは、各条件ごとに測定値の算術平均値を求めた。

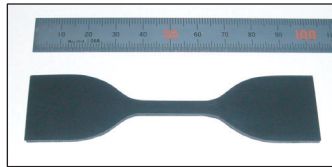


図5 試験片 (代表例: 試作材)

(3) 引張強さおよび伸び

引張強さの測定方法は、JIS K6251 (加硫ゴムの引張試験方法) に準じた。試験片を材料試験機に標線間距離約20mmで装着し、速度約500mm/minで引っ張り、破断時の最大荷重および破断時の標線間距離を測定した。その結果を用いて式(1)により引張強さ、式(2)により破断時の伸びを算出した。

$$T_B = \frac{F_B}{A} \quad (1)$$

ここに、 T_B は引張強さ (MPa)、 F_B は最大荷重 (N)、 A は初期の試験片断面積 (mm²)

$$E_B = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 E_B は破断時の伸び (%), L_1 は初期の標線間距離 (mm), L_2 は破断時の標線間距離 (mm) である。

4.2.3 試験結果および考察

各試験片の外観を調査した結果、いずれもき裂や欠けなどの異常が認められなかった。

試作材の表面硬さ、引張強さおよび伸びの試験結果を図6に示す。試作材の硬さは、JR スーパータービン油68に浸せきした場合、増加はしているが、その増加値は、現行材1, 2と同程度で小さかった。引張強さはほとんど変化がなく、また、伸びについても減少しているが、それらの減少値は小さかった。従って、試作材は、車軸軸受に使用されている潤滑油に対して120℃の高温条件下においても機械的特性の変化が少なかったことから、耐油性に問題のないことがわかった。

4.3 リップ部の高剛性化

高速化によりトンネル出入り時や車両のすれ違い時に発生する圧力変動は増加する。これによって、オイルシールのリップ接触部は変形が大きくなったり、また、オイルシールと油切りとの面圧が高まり発熱が多くなったりする。特に、大気側が負圧になった場合は漏れを促進する。そこで、試作品は、高速化に対応するため、圧

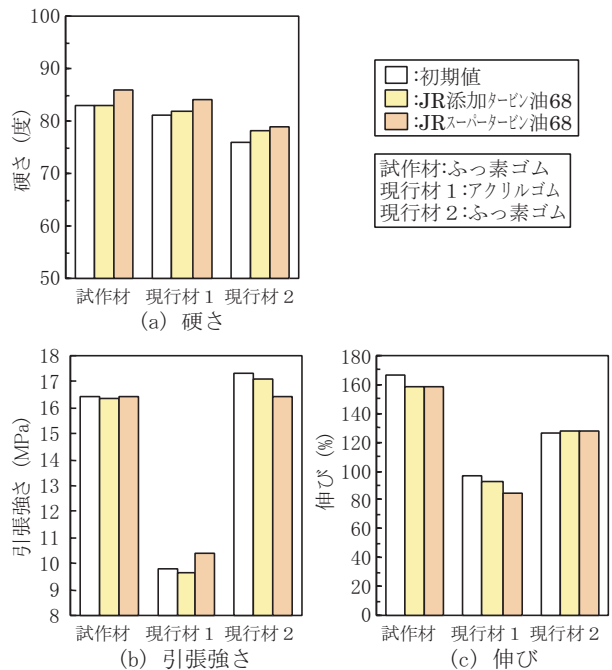


図6 耐油性試験結果 (120℃, 240h)

力変動の増加に対してリップの姿勢変化を抑制するため、リップ部の形状変更により剛性を高めることとした。

4.4 試作品

以上、新幹線車両の高速化に対応するため、ゴム材料および形状についての検討を行い、リップ接触面のはく離(ゴムおよび充てん剤の脱落)の発生を抑制することが可能なゴム材料(試作材)を適用し、また、トンネル出入り時等における圧力変動対策としてリップ部の高剛性化を図った車軸軸受用オイルシールを試作した。試作品について、外観写真およびその断面図をそれぞれ図7の(a), (b)に示す。

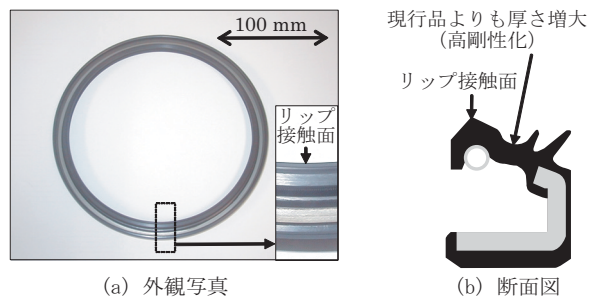


図7 試作品

5. 試作品の台上試験

試作品の耐久性を確認するため、オイルシール密封性能試験装置を用いて高速条件による台上試験を実施した。

特集：材料技術

5.1 試験方法

現行オイルシールと同じ試験方法とした(表1および表2)。ただし、車両走行距離(換算)は、現行品では60万km相当であったのに対して75万km相当(25%増)を目標とした。

5.2 試験結果および考察

試作品の台上試験結果について、耐久性に関しては比較のため前述の現行品と併せて図8(a)に、試験後のリップ接触面の状態を図8(b)に、また、試験後の測定結果を表5に示す。

試作品の高速条件における台上試験を実施した結果、現行品では前述のように潤滑油の滴下が認められたのに対し、試作品は車両走行距離75万km相当を回転させた場合でもにじみがなく密封性が保たれていた(図8(a))。

試験後の試作品を調査した結果、緊迫力は大きな低下はなく、リップ接触面は小さかったことから、面圧は十分に確保されていることが確認された。また、ゴムの硬度の変化は小さく(表5)、潤滑油も十分に管理基準値内にあったことから、ゴムおよび潤滑油の劣化も少なく問題はなかった。油切りは、リップが接触する面は母線形状から判断して、ほとんど摩耗していなかった。さらに、リップ接触面を観察した結果、はく離も少なく良好な状

態であった(図8(b))。これは、充てん剤の変更によって、はく離(ゴムおよび充てん剤の脱落)の発生が抑えられ、また、リップ部の高剛性化によって、圧力変動の増加に対してリップの姿勢変化が抑制されたものと思われる。以上の結果から、試作品は、車両走行距離75万km相当を回転させても漏れないこと、また、試験後の状態も良好であったことから、厳しい高速条件においても優れた耐久性を有することを確認した。従って、本試作品は、高速化に十分対応可能なオイルシールであると考えられる。

6. まとめ

新幹線車両の高速化(350~400km/h域)に対応可能な車軸軸受用オイルシールを開発するため、オイルシールおよびゴム材料について各種試験を実施した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 台上試験結果から、現行オイルシールは高速条件において油の滴下が認められたことから、高速化に対応することは困難であること、また、ふっ素ゴム製はアクリルゴム製よりも耐久性が優れていることがわかった。
- (2) 台上試験後のリップ接触面を調査した結果、油の滴下の主原因はリップ接触面のはく離(ゴムおよび充てん剤の脱落)であることがわかった。
- (3) (2)の結果に基づき検討を行った結果、高速対応用のゴム材料については、アクリルゴムより耐久性に優れ機械的強度の高いふっ素ゴムを採用し、はく離の発生を抑制するため充てん剤を変更した。また、この材料の耐油性に問題のないことを確認した。
- (4) 高速化に対応可能な車軸軸受用オイルシールとして、(3)で検討した材料を適用するとともに、さらに、実車のトンネル出入り時等における圧力変動によるリップの姿勢変化を抑制するため、リップ部について、寸法や形状の変更により剛性を高めたものを試作した。
- (5) 試作品の高速条件における台上試験を実施した結果、車両走行距離75万km相当を回転させても油漏れないこと、また、試験後のリップ接触面は、はく離が少なく良好であることを確認した。

以上の結果から、試作した車軸軸受用オイルシールは、高速対応用として適した性能を有すると判断された。

文献

- 1) 中村和夫, 細谷哲也, 間々田祥吾, 吉田博文, 西出裕之: 高速新幹線車両の軸箱用オイルシールの開発, J-Rail2005, 講演論文集, pp.241-242, 2006
- 2) 山本彬也: 新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気, 鉄道技術研究報告, No.871, p.4, 1973.10

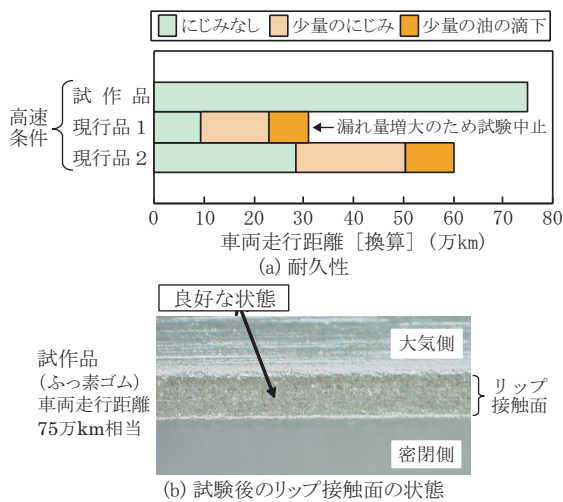


図8 試作品の台上試験結果

表5 台上試験後の試作品の測定結果

測定項目	種別	試験条件	試作品(ふっ素ゴム)
			高速条件
車両走行距離[換算](万km)			75
締め代(mm)*1			1.40
緊迫力(N)			29.7(新品38.2)
緊迫力低下値(N)*2			8.5
リップ摩耗幅(mm)*3			0.10~0.20
リップ面圧(MPa)			0.28
リップ近傍のゴム硬さ(IRHD)			75(新品76)

*1: 新品の油切りの外径は、新製時の標準値168.00mmを基準として締め代を計算した。
 *2: 新品の試験前の緊迫力で計算した場合の数値である。
 *3: リップ摩耗幅は、最小値~最大値である。