

# 密封装置の変遷と最近のねじ付きシールの技術動向

## History and Development of Sealing Devices and Recent Technical Overview of Helix Seals

荒木義文 Y. ARAKI

The development of sealing devices dates back to the era of the ancient Roman Empire. At the beginning, people simply lubricated the wheel axle with some kind of animal fat. In the 1920s, leather seals were invented. The development of various kinds of synthetic rubber in later years led to the success of the contemporary style of oil seals. The theoretical research and practical development actually began in the 1950s. One of the most significant and practical developments may have been that of oil seals with helix configuration on the surface of a sealing lip. In this paper the current state of helix seal technology and issues for further development will be discussed.

**Key Words:** leather seals, helix seals, pumping rate, rib contact length, super helix seals

### 1. はじめに

潤滑技術に関して遡れば、約2000年前に物流戦略にたけた古代ローマにおいて兵器や食料などを輸送する荷車の車軸に動物の油脂分を潤滑剤として使用したという報告が見られる<sup>1)</sup>。当初は、この動物性油脂分を車軸部に単に塗布した状態で使用されていたようで、使用の都度補給が必要であった。

その後、工夫や改良が繰り返され車軸の周りに、ある種の油だまり装置が考案された。これにより車軸部への油脂分補給回数は極端に少なくなり高速で長距離の移動が可能になった。これが密封装置(以下オイルシールと称す)の草分け的なものと思われる。

本報ではオイルシールの変遷と最近のねじ付きシールの技術動向について紹介する。

### 2. オイルシールの変遷

#### 1) 第1期

革製のオイルシールは、1960年代にテレビで放映された映画「ローハイド」に出てくるカウボーイとともに米国中西部の各地よりシカゴに移動してきた何万頭もの牛のRawhide(剥された牛の皮)から作られたものである。

1927年には、米国で初めて金属環に挟んで固定された図1のような革製のオイルシールが作られ、米国で初めて特許が確立している。

その後、図2のようなガータスプリングを組み込んだオイルシールが考案された。

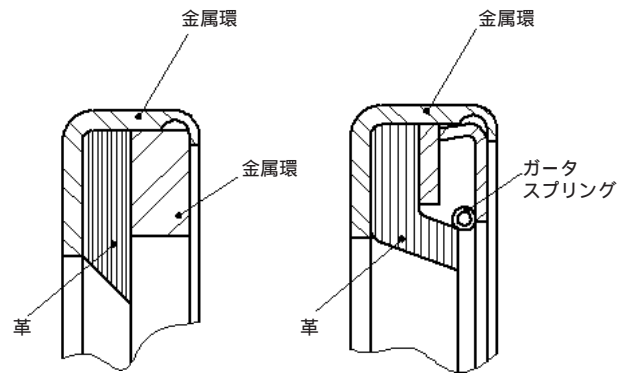


図1 革製シール  
Leather seal

図2 革製ガータスプリング付きシール  
Leather seal with garter spring

同時期にヨーロッパでも独国バインハイム市で同様の革製オイルシールが作られていた。この製造会社は後にバックスキンの革靴製品の製造、販売でも世界的に有名になった。

#### 2) 第2期

1935年頃合成ゴムが開発されたが、これが合成ゴム製オイルシールの開発に繋がった。1940年代には合成ゴムと金属環を接着する技術も開発され、その後金属環とゴムとの接着剤の改良、改善が繰り返されて図3のような形状のオイルシールが開発された。

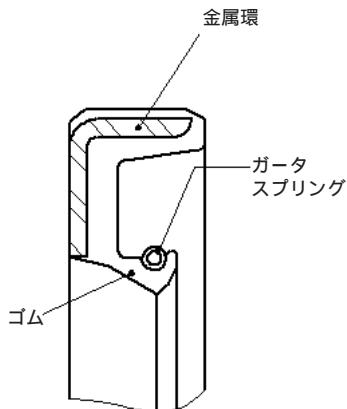


図3 ゴム製オイルシール  
Rubber oil seal

3 第3期～現在

1950年代には図3の基本形状品について密封機能向上のために、形状やゴム材料の改良開発が活発に行われはじめた。

1957年にはオイルシールのリップと軸との接触部に薄い潤滑油膜が存在することが明らかにされそれ以降、密封メカニズムの研究が活発化し始めた<sup>2)</sup>。

その後、密封部の金属面とエラストマー(ゴム弾性体)面との間に潤滑油が存在した場合、接触部は流体潤滑状態や乾燥潤滑状態でもなく、お互いが入り混じった境界潤滑状態であるとする密封理論<sup>3)</sup>が発表された。

この理論により実際の密封状態が定性的によく説明できるとのことで多くの支持を得た。

密封装置技術に関する研究ではBHRA(British Hydrodynamic Research Association)を中心とした研究などがあるが特に、GMTC(General Motors Technical Center)とCR(Chicago Rawhide Mfg. co.)の研究者によるねじ付きシール(ヘリックスシール)の開発<sup>4)</sup>は、オイルシールの密封性能や品質を格段に向上させ、現在のオイルシール技術の基礎を築いたと言っても過言ではない。

1969年に米国でマシンデザイン誌がシール特集号<sup>5)</sup>を発行し、顧客への密封技術の啓蒙活動に努め、オイルシールの取扱いや軸の表面仕上げ方法などに人々の関心が集まり、密封に関する総合技術の向上に貢献した。

1986年にはKammüller<sup>6)</sup>がシール表面に軸方向に伸びるしわが生成し軸が回転すると摩擦力のため密封面のゴムが圧力分布に比例して引っ張られることを明らかにした。ゴムの表面には微細な凸凹のしわが生成し、このしわが非対称に変形をすることにより密封面の油は流体力学的にしわに沿

って流れる。その結果図4に示すように(A+B)の合成流れが油側に向かって発生するという粘性シール密封概念を発表し多くの支持を得た。

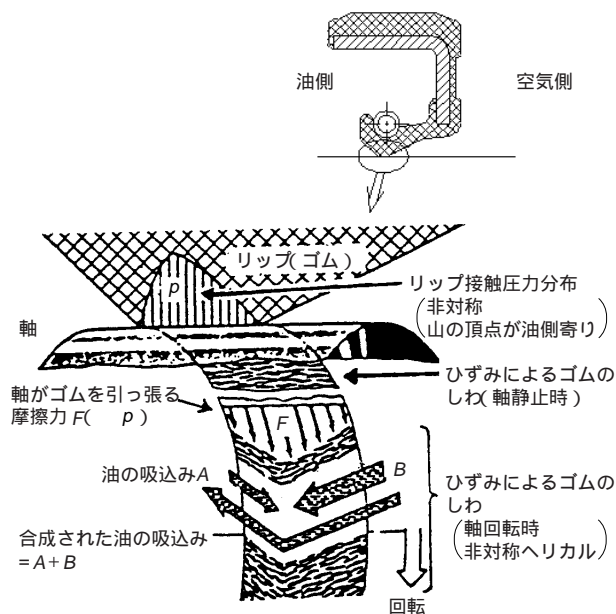


図4 微視的粘性シールの密封概念(Kammüller)<sup>6)</sup>  
Micro-visco seal concept proposed by Kammüller

3. スーパーヘリックスシールの開発

ヘリックスシールは、GMTCとCR社により開発された。このヘリックスシールの密封性能に関してKoyoのLou Limingがニュートンラブソン法を用いてレイノルズ基礎潤滑方程式にEHL理論(弾性流体潤滑理論)を導入し、数値解析を行い報告している<sup>7)・9)</sup>。図5～7にその結果の実験値と計算値を示す。

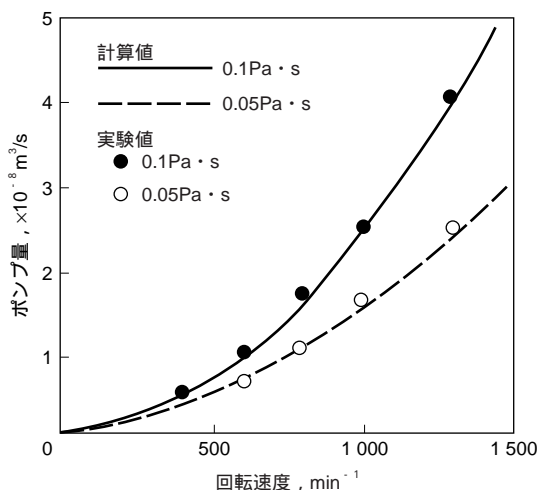


図5 ポンプ量の実験的検証  
Pumping rate test

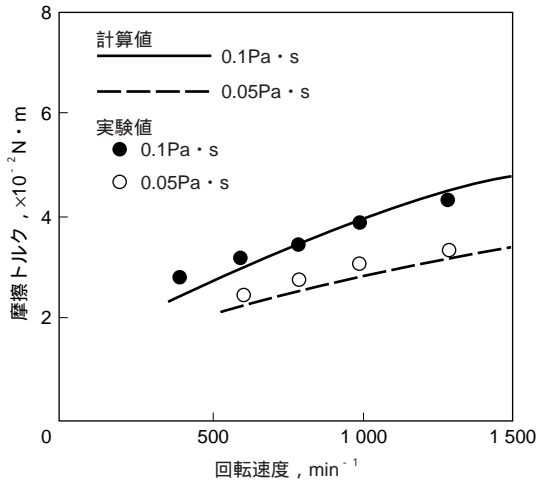


図6 摩擦トルクの実験的検証  
Seal torque test

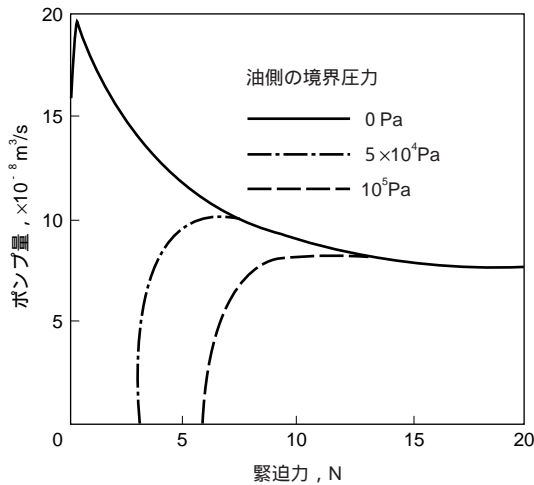


図7 緊迫力によるポンプ量の変化  
(回転速度:  $2000\text{min}^{-1}$ , 粘度:  $0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ )  
Pumping rate vs. radial load  
(rotating speed:  $2000\text{min}^{-1}$ , viscosity:  $0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

- 1) 図5, 図6よりポンプ量, 摩擦トルクはともに計算値と実験値がほぼ一致している事がわかる.
- 2) 図7に示すように, 密封限界(ポンプ量がゼロになる点)と最適緊迫力は解析で導くことができる.
- 3) 1), 2)の結果より摩擦トルクを最小にしオイルシールの密封能力を最大にする手法は, 解析により導きだすことは可能であるが密封性能には取り付け方法や軸の仕様, 動的挙動, さらに油中の異物などの要因に大きく作用され図8に示すように時間経過とともにリップ摩耗が進み, それとともにポンプ量が減少する.

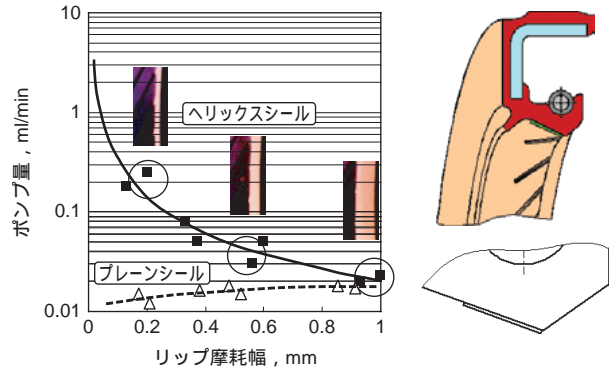


図8 リップ摩耗によるポンプ量  
Pumping rate vs. lip wear width (conventional)

4) リップによるポンプ量  $Q$  は, リップ接触長さを大きくすれば増大し, 小さくすれば減少する. 近似式的には,

$$Q \propto L / W$$

$Q$ : ポンプ量

$L$ : リップ接触長さ

$W$ : リップなし部の接触長さ

に回帰する.

従来一般的ヘリックスシールではリップ摩耗の進行に伴いポンプ量が減少し安定した密封性能の確保が困難であった.

この課題解決のために考案されたのがKoyoスーパーヘリックスシールであり, 第42期日本トライボロジー学会技術賞を受賞した. スーパーヘリックスシールは初期に接触するリップ部の高さは従来品と同じとし, リップと軸のすきまをなくし気密性を確保し, リップ摩耗とともにリップ部が軸と接触する稜線形状(図10)を三次元FEM解析結果を基にしてリップ接触長さ( $L$ )がリップ摩耗に影響されにくい図9に示すような二段リップ形状とした.

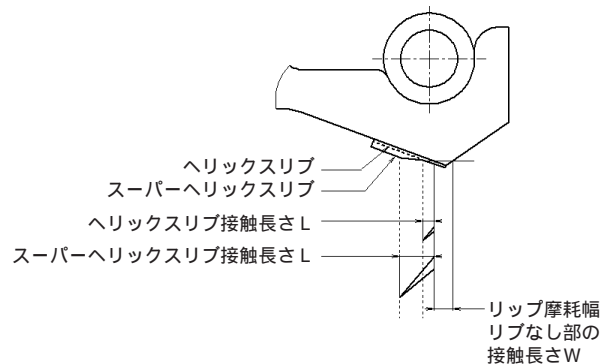


図9 リップ形状比較  
Rib design comparison

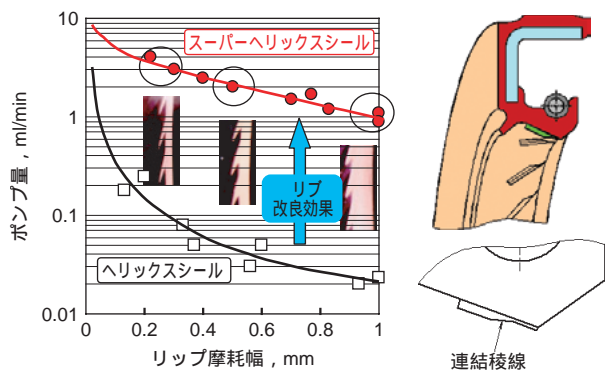


図10 リップ摩耗によるポンプ量  
Pumping rate vs. lip wear width (new)

図10に示すとおり従来のヘリックスシールと比較してリップ摩耗が進行した状態でもポンプ量の減少がなく高いポンピング性能を保持していることが確認できた。

#### 4. おわりに

オイルシールの密封能力を長期間維持するにはリップ直下に常に必要量の潤滑油を保持しながら、漏れようとする油を油側へ押し戻そうとする作用(ポンピング作用)が重要な要素となる。このポンピング作用はリップ表面の微細な凹凸形状が非対称に変形をする事で発生するがそのポンプ量は小さく(図8プレーンシール参照)、使用条件の影響を受けやすく不安定である。しかし流体力学的なリップを付加する設計ではポンプ量を大幅に増大させ、密封性能を大きく向上することが可能である。

油漏れによる不具合の発生は、スーパーヘリックスシールの適用拡大により大幅に低減し、その密封効果は十分確認されている。しかし信頼性、ロバスト性をさらに向上させるためリップ成形金型技術やリップ成形方法など更なる革新的な新技術を開発する必要がある。

それらの新技術をもとに、両方向回転用シールとして開発した両リップ付きシール(パーフェクトシール)の更なる性能向上品を提供していきたいと考える。

#### 参考文献

- 1) Duncan Dawson, Longman Group Limited: "History of Tribology" London, UK 1959.
- 2) Jagger. ET: "Proceedings, Conference on Lubrication and Wear." IME, London, UK 1959.
- 3) F. Hirano & H. Ishiwata: "The Lubricating Condition of a Lip Seal" IME, London, UK 1965.
- 4) R. L. Daga: "Zero Leakage: Results of an Advanced Lip Seal Technology" GMTC., ASME Paper no. 67-WA/Lub-11, 1967.
- 5) The Penton Publishing Company: The Machine Design, "Seals" Reference Issue (4<sup>th</sup> Edition) vol. 41, no. 14, 1969. Cleveland, OH 44113, USA.
- 6) Kammüller. M: Zur Abdichtwirkung von Radial-Wellendichtringen. Thesis 1986, Univ. of Stuttgart.
- 7) Lou. Liming: "Investigation of Oil film on The contact surface of a Flooded Model Helical Lip Seal", Lubrication Engineering of STLE (USA), vol. 57 (2001), no. 12, pp. 15-21.
- 8) 楼 黎明・満丸道敏・池内 健: "EHL理論によるヘリックスシール密封性能の解析" トライボロジー学会講演(1997春) 418-420.
- 9) 楼 黎明・満丸道敏・岡田利喜生・田村委三: "EHL理論による低摩擦・耐摩耗性に優れた高性能ヘリックスシール" トライボロジー会議全刷集(1998春) 462-464.

#### 筆者



荒木義文\*  
Y. ARAKI

\* 光洋シーリングテクノ株式会社  
理事 技術部