

高速回転に対応可能な減速機用表面テクスチャメカニカルシールの実用化検討

Development and Practical Evaluation of Surface Textured Mechanical Seals for High-Speed Gearboxes

イーグル工業（正）*板谷 壮敏 （非）近藤 正大 （非）香取 一光 （正）徳永 雄一郎

Masatoshi Itadani*, Masahiro Kondo*, Hikaru Katori*, Yuichiro Tokunaga*

*Eagle Industry Co., Ltd.

1. はじめに

近年、地球温暖化の進行を背景に各国は二酸化炭素排出量削減に向けた取り組みを強化しており、自動車ではモータによって駆動するEV（Hybrid Electric Vehicle, Battery Electric Vehicle など）の開発・普及が急速に進んでいる。自動車用動力伝達技術研究組合(TRAAMI)では5万rpmを超えるEV駆動用モータの超高速回転化の実現を目標とした研究が推進されるなど、モータの小型・高速化による高効率化がトレンドとなっている。一般に、モータには減速機が接続されることが多く、インバータを含めて一体化したものはe-Axleと呼ばれる。減速機では、ギアの潤滑および冷却を目的として潤滑油が使用されるが、潤滑油がモータ内部のステータとロータ間の隙間に侵入すると、摩擦抵抗が増加し、性能低下を招く可能性があり、これを防止するため、モータと減速機の両機構を軸シールによって分離する構造が採用される場合がある^{2,3)}。

減速機用軸シールに求められる性能は、モータの高速回転化および環境負荷低減の要求に伴い厳しくなっている。高速回転化により、軸シールのしゅう動速度は100m/sを超える可能性があり、これに伴う摩擦抵抗の増加やしゅう動発熱による潤滑性能の低下が懸念される。潤滑性能の低下はしゅう動面の摩耗を引き起こすため、密封性能および耐久性能の低下が課題となる。さらに、モータの入力軸における摩擦損失は、減速機を介して直接的に増幅され、出力軸へと伝達される。このため、摩擦損失の最小化はシステム全体の効率向上および環境負荷の低減において重要な課題となる。これらの課題に対して、我々は超低摩擦と超低リークを実現した表面テクスチャメカニカルシールを開発した^{4,5)}。

本報では、実条件でのロバスト性をより向上させるため、逆回転時においても安定した密封性能を維持する表面テクスチャメカニカルシールの設計および機能試験を行い、実用化可能であることを確認したので報告する。

2. メカニカルシールの構成

開発したメカニカルシールは軸径φ32mmに適合し、外周側に密封流体が配置される。メカニカルシールの固定環にはカーボン、回転環には炭素鋼を用いた。固定環の内径はφ38.6mm、面幅は3.1mmとし、バネ荷重は31Nとした。

回転環にはFig. 1に示す表面テクスチャリングをレーザー加工により付与した。しゅう動面の外周側には液体潤滑機構として、正・逆回転のいずれの方向においても低速回転時から密封流体をしゅう動面に導入して負荷容量を発生させる、T字型のレイリーステップを6等配で配置した。しゅう動面の内周側には密封機構および気体潤滑機構としてヘリングボングループを36等配で配置した。ヘリングボングループは、内周から外周にポンピング作用を持つ内側スパイラルグループと、外周から内周にポンピング作用を持つ外側スパイラルグループを連結した形状で構成されている。内側スパイラルグループは、正回転時において、低速回転からポンピング作用により密封性能に寄与し、高速回転時にはしゅう動面に気体を吸引して気体潤滑状態へと遷移させる機能を有する。一方、外側スパイラルグループは、逆回転時において、ポンピング作用により密封性能に寄与する。このように、低速回転時には液体潤滑で動作し、高速回転時には気体潤滑への遷移を可能とする表面テクスチャリングパターンは、気液ハイブリッドテクスチャと呼ばれる⁶⁾。

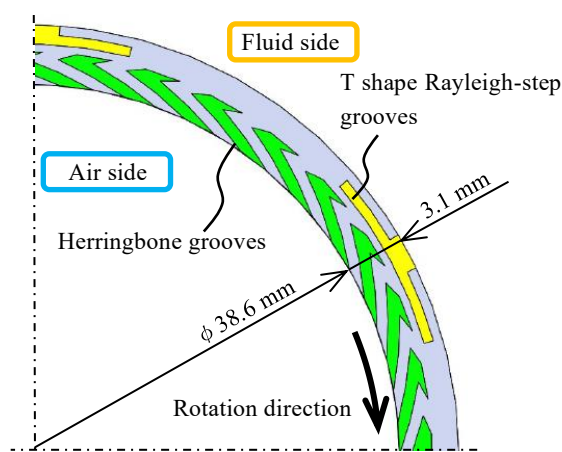


Fig.1 Structure of textured surface

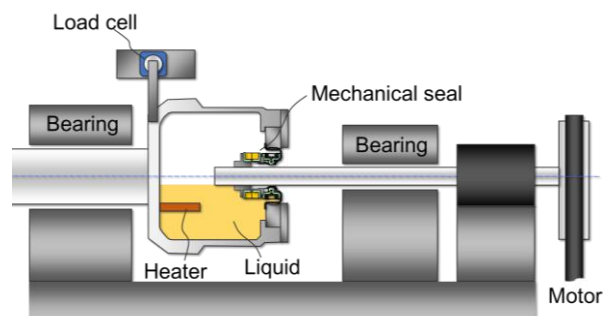


Fig. 2 Schematics of Torque measurement tester

3. 試験方法

本研究では、メカニカルシールの機能試験として、しゅう動トルク測定と密封耐久試験を実施した。

しゅう動トルクの測定には、Fig. 2 に示す摩擦摩耗試験機を用いた。メカニカルシールの固定環を保持した試験液槽に設置されたカンチレバーを介して、ロードセルによりトルクを計測した。表面テクスチャリングを施したメカニカルシールのしゅう動トルクは非常に小さいため、測定感度を向上させる目的で、試験液槽はエアベアリングにより支持されている。また、試験液槽には熱電対およびヒーターが設置されており、液温の制御が可能である。

密封耐久試験は、Fig. 3 に示す回転試験機を用いて実施した。本試験機においても、摩擦摩耗試験機と同様に、試験液槽には熱電対およびヒーターが設置されており、液温の制御が可能である。

4. 試験条件

密封流体として市販の潤滑油（動粘度： $8.28\text{mm}^2/\text{s}$ @ 40°C ）を用いた。

しゅう動トルクの測定条件は、潤滑油の温度は 90°C 、液量は軸の下端までとし、圧力は大気圧とした。回転条件は、加速度 100rpm/s で最大回転数 $30,000\text{rpm}$ まで上昇させた後、同じ加速度で減速して停止させる一連の動作を 1 サイクルと定義した。しゅう動面の初期なじみを目的として、このサイクルを複数回繰り返した。

密封耐久試験の条件は、潤滑油の液面を軸中心までとし、圧力は大気圧とした。液温、回転数および試験時間については、Table 1 に示す、逆回転運転を含む No.1～No.5 の一連の動作を 1 サイクルと定義し、このサイクルを 5 回繰り返して試験を実施した。なお、本試験条件は、中国自動車業界における電気乗用車用減速機の技術仕様を定めた QC/T 1022-2015⁷⁾ に準拠しており、No.5 の停止時間のみを 1.9h 延長した。

5. 試験結果

しゅう動トルクの試験結果について、しゅう動面のなじみ完了後における加速時のしゅう動トルクを Fig. 4 に示す。比較のため、テクスチャの無い通常のメカニカルシールの、同一条件下におけるしゅう動トルクも示す。なお、通常のメカニカルシールでは試験の最大回転数を 6000rpm とし、以降は推定値とした。表面テクスチャメカニカルシールは全回転数領域において非常に低いしゅう動トルクを示した。低速回転域では潤滑油の粘性によりトルクが速度に応じて増加する傾向が認められたが、 3000rpm 付近を境に減少に転じ、 $0.01\text{N}\cdot\text{m}$ 以下の極めて低いトルクを示した。この挙動は、設計意図通りに気体潤滑状態へと遷移していることを示唆している。なお、本試験中においてシールからの漏れは確認されず、試験後のしゅう動面に顕著な摩耗は認められなかった。

密封耐久試験については、試験後の累積漏れ量は 0.5ml と非常に少なく、優れた密封性を示した。また、Fig. 5 に示す通り、試験後のしゅう動面には顕著な摩耗や損傷は認められず、密封性能を維持できることが確認された。

6. まとめ

逆回転時においても安定した密封性能を維持可能な表面テクスチャメカニカルシールの設計および機能試験を行い、以下を明らかにした。

- (1) 表面テクスチャメカニカルシールは、最大 $30,000\text{rpm}$ における全回転数領域で極めて低いしゅう動トルクを示すことが確認された。特に高速回転域では、気体潤滑状態への移行により摩擦抵抗が大幅に低減された。

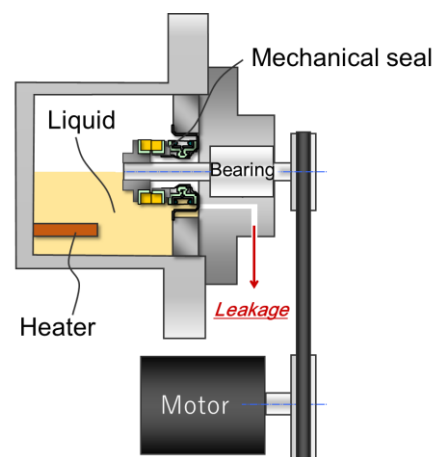


Fig. 3 Schematics of rotating test rig

Table 1 Test condition of durability test

	Temperature, $^\circ\text{C}$	Rotation speed, rpm	Time, hour
No.1	90	17,000	13.0
No.2	90	Reverse 5,000	0.4
No.3	130	17,000	5.0
No.4	130	Reverse 5,000	0.2
No.5	Room temp.	0 (stop)	5.4

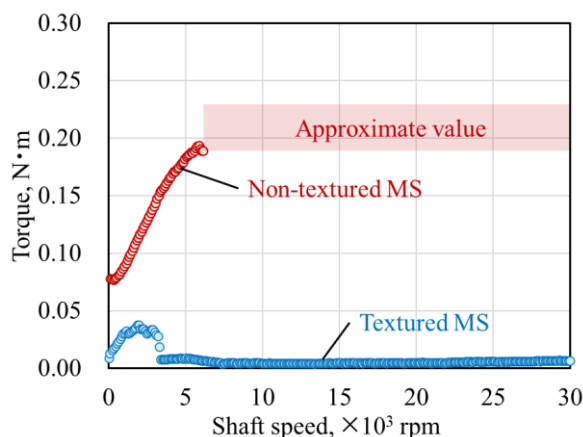


Fig. 4 Test result of friction torque

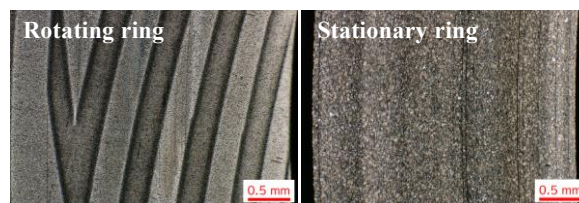


Fig. 5 Sliding surface after durability test

(2) 表面テクスチャメカニカルシールは、密封耐久試験における漏れ量が非常に少なく、しゅう動面に顕著な摩耗も認められなかったことから、高い密封性能と耐久性能を兼ね備えていることが示された。

これらの結果より、モータの高速回転化および環境負荷低減が求められる次世代の減速機用シールとして、表面テクスチャメカニカルシールは実用化可能であることが強く示唆された。

文献

- 1) 自動車用動力伝達技術組合(TRAMI) 第7回公開フォーラム資料：<https://trami.or.jp/> (2025年7月現在)
- 2) 長田：遊星歯車機構を用いた小型高効率1軸 e-Axle の低コスト潤滑システムの開発，ジヤトコテクニカルレビュー，No.22, (2023) 9-13.
- 3) J. Doerr, T Attensperger, L. Wittmann & T. Enzinger : The New Electric Axle Drivers from Audi, MTZ Worldwide, 79, 6 (2018) 18-25.
- 4) R. Dircks, H. Huppertz, M. Itadani & T. Okada : GlideX™ - Frictionless Sealing Solutions for Electric Drives, Antriebstechnischen Kolloquium, (2019).
- 5) Y. Tokunaga, N. Nakahara & M. Itadani : Development of Ultra-Low-Friciton and Zero-Leakage Mechanical Seal for High-Speed e-Mobility Shaft Sealing Applications, SAE Technical Paper 2020-01-1090, (2018)
- 6) W. Kimura, H. Katori, R. Dircks & Y. Takigahira : Realization of Ultra-High Speed, Zero-Leakage and Low-Friction Textured Mechanical Seals by Combining Liquid and Gas Lubrications – Gas Liquid Hybrid Face, Proc. 20th International Sealing Conference Stuttgart, (2018), A6.
- 7) 中華人民共和国工業和信息化部：QC/T 1022-2015 純電動乗用車用減速器総成技術条件，(2015) 4-5.