

表面テクスチャリング技術による低損失と高密封性能を両立した メカニカルシールの開発と実用化

Development and Productization of Mechanical Seals Achieving Both Low Frictional Losses and High Sealing Performances by Surface Texturing Technology

イーグル工業（正）*徳永 雄一郎

Yuichiro Tokunaga*

*Eagle Industry Co., Ltd.

1. はじめに

各種回転機械軸封部に使用されているメカニカルシールは、相対すべり運動を行うシールリングとメイティングリングの両端面を互いにねじり付け、流体の漏洩を防ぐ密封装置である。このメカニカルシールにおいて、良好な密封状態を長期的に維持するためには、しゅう動面間に密封流体による流体潤滑膜を適度に形成させ、しゅう動面の摩耗・面荒れ等の表面損傷を防止する、すなわち密封と潤滑という相反する条件を両立させる必要がある。

メカニカルシールに要求される性能は年々厳しくなってきており、高温・高圧・高速化などのニーズの多様化への対応が要求される。加えて、低環境負荷・低エネルギー損失等の環境への配慮に対する声も高まってきている。これらのニーズに対応するためには、密封機能を保持しつつ、潤滑性能を向上させるためのしゅう動面設計の指針が必要不可欠である。メカニカルシールの作動領域をFig.1に示す。従来の接触形メカニカルシールは、しゅう動面を擦り合わせながら隙間を塞いで密封するため、漏れ量が少ない反面、摩擦係数が高い領域で作動する。このため、しゅう動発熱が大きくなり、油の劣化や、作動条件の過酷さの指標となるPV値（圧力Pとしゅう動速度Vの積）の大きい条件へ対応できない場合などが生じる。そこで、摩擦係数低減、耐焼き付き性向上、長寿命化などを目的として、しゅう動面に微小な窪みを複数設けたディンプル/ポーラスしゅう動材が用いられてきた。一方、回転するしゅう動面に動圧溝を設け、流体膜を介してしゅう動する非接触形メカニカルシールは、非接触状態で作動するため摩擦係数が小さく作動中の摩耗も殆ど生じない。この特徴により、ドライガスシールなど、潤滑性能に乏しい流体のシールとして使用されている。非接触形シールは、接触形と比較ししゅう動面隙間が大きいため、漏れ量も多くなる。

このように、これまでの接触形メカニカルシールは、漏れを最小化できるが完全には防ぐことができず、摩擦係数も比較的高い領域で作動することが特徴であった。またその密封メカニズムは十分な解明には至っておらず、流体の漏れとシール面の表面損傷の兼ね合いから経験に頼った設計がなされてきた。

本技術は、上記の課題を克服した、低損失と高密封性能を両立させた表面テクスチャリングメカニカルシールの開発と実用化に関するものである。

2. 表面テクスチャリング形状

以下に、代表的な形状として、提案された表面テクスチャリング形状を紹介する。低・中速回転用および高速回転用の2種類に分類できる。それぞれ溝形状は異なるが、構成は共通しており、高压側（密封流体側）に流体潤滑を促進する溝、低压側（漏れ側）に漏れを抑制する密封機構が、それぞれ配置された構成となっている。

2.1 低・中速回転用表面テクスチャリングメカニカルシール

周速1m/s以下から数十m/s程度の低・中速回転用途においては、主に水や油等の密封対象流体を潤滑剤として利用し、摩擦を低減する表面テクスチャリング形状が提案されている¹⁻⁵⁾。シールの漏れ量は、シールしゅう動面隙間における半径方向の流量として、数学的にモデル化できる。遠心力は無視できるほど小さいとし、理想的に平行な二平面を仮定すると、低压側の単位幅あたりの漏れ流量qは、次のように表される：

$$q = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

ここで、hは膜厚、 η は流体の粘度、pは圧力、rは円筒座標系における半径方向をそれぞれ表している。式(1)は圧力流れを示しており、qの正の値は放射方向の流れ（この場合ポンピング方向の流れ）を、負の値は求心方向（この場合漏れ方向）の流れを、それぞれ意味する。流体の粘性 η が一定とすると、漏れ流量qは、シールしゅう動面隙間hの3乗と、半径方向の圧力勾配 $\partial p / \partial r$ に比例する。一般的に、シール面の外周側が高压側流体となる「インサイドシール」の場合、 ∂

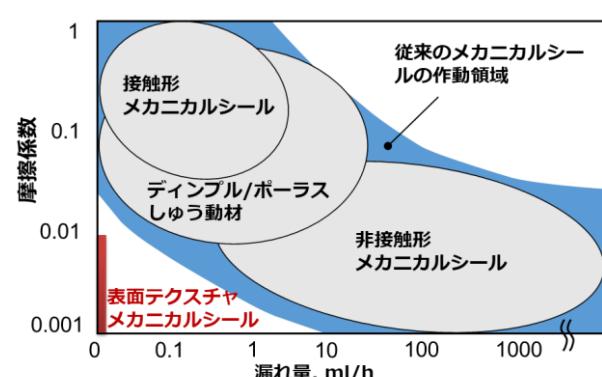


Fig. 1 メカニカルシールの作動領域

$p/\partial r$ は正の値となる。このため、従来のメカニカルシールでは、シール面隙間、すなわち流体膜厚 h を減少させることにより、漏れ量を減少させる設計とする。このとき h と η は常に正の値となるため、 q は常に負となる。すなわち、従来のメカニカルシールにおいては、本質的には漏れを完全に無くすことはできないことを意味している。ここで、式(1)において、膜厚 h の代わりに $\partial p/\partial r$ をゼロもしくは負の値に制御することができれば、理論的には、 q もゼロもしくは符号を逆転することができるうこととなり、ポンピング作用を実現できる。表面テクスチャリング技術を用いると、しゅう動面上の流体力学的圧力を制御できるため、上記の理論により漏れを抑制可能となる。

上記理論に基づき提案された、代表的な表面テクスチャリング構造を Fig. 2 に、計算された圧力分布を Fig. 3 に、それぞれ示す。しゅう動面の高圧流体側（この場合は外周側）に、流体潤滑機構としてレイリーステップを配置し、その流体潤滑作用によりしゅう動面に作用する荷重を支持する。一方、密封機能に関し、流体の漏れは流出口を塞ぐことにより防止できる。そこで、しゅう動面の低圧側（この場合は内周側）に、密封機構として逆レイリーステップ（レイリーステップを通常と逆方向にした形状）を配置する。逆レイリーステップにより内周側を負圧領域とすることにより、流体が負圧領域に吸い込まれ、径方向溝を通って高圧側に戻される。これらの作用の結果、流体潤滑により摩擦を低減すると同時に、負圧作用により漏れを抑制することが可能となる。さらに、外周側のレイリーステップと内周側の逆レイリーステップにより形成される潤滑機構と密封機構は、圧力開放溝としての円周方向溝により分断される。このことにより、潤滑機構と密封機構それぞれを分離独立して設計できるため、設計のプロセスが劇的に簡易化される。

Fig. 3 中の赤枠の部分において、密封性能を直接観察した結果を、Fig. 4 に示す。予めメカニカルシールしゅう動面の内周側に漏れ液に見立てた水滴を付着させておき、回転環として光学ガラス基板を押し当て、ガラス越しに液の様子を観察したところ、液側（外周側）が加圧されているにもかかわらず、回転開始後徐々に液滴が吸い込まれるポンピング作用を確認した。吸い込まれた後も液体はしゅう動面間に保持され、安定した流体潤滑状態が維持された。

次に、実際に流体潤滑膜が形成されているかどうかを確認するため、レーザ励起蛍光法を用いて液膜厚さおよびそのときの摩擦係数を実測した。結果を Fig. 5・Fig. 6 にそれぞれ示す。表面テクスチャシールは流体潤滑領域で作動し、テクスチャ無しのしゅう動面と比較し 90%以上の摩擦低減効果が得られることが確認できた。

2.2 高速回転用表面テクスチャリングメカニカルシール

数十から 100m/s を超えるような高速回転時においては、液体潤滑であっても、液体の粘性せん断摩擦により、摩擦損失が無視できない程度に増大する。そこで、起動-停止時の低速回転時は液体潤滑とし、高速回転時は気体潤滑に切り替えることで、極低速から超高速回転まで非接触で作動し、摩擦損失を低減可能な気液ハイブリッド潤滑タイプの表面テクスチャシールを提案した。^{6,7)} Fig. 7 に、気液ハイブリッド潤滑表面テクスチャリングメカニカルシールの構成図を示す。溝の形状は Fig. 2 と異なるが、基本的な機能としては共通である。すなわち、外周側（高圧側/青色の領域）が潤滑溝、内周側（低圧側/オレンジ色の領域）がポンピング溝という構成をとっており、内周側のポンピング溝が気体潤滑機能を併せ

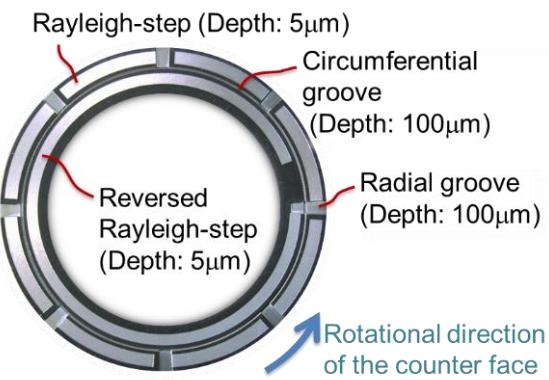


Fig. 2 表面テクスチャリング構造

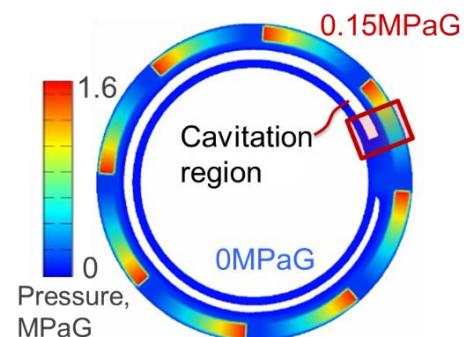


Fig. 3 圧力分布の数値解析結果

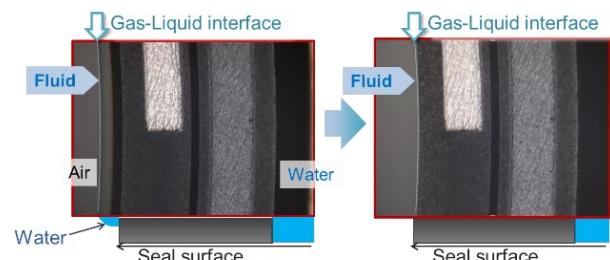


Fig. 4 ポンピング（吸込み）作用の可視化観察結果

(a) Without inner grooves	○ Experiment	— Calculation
(b) 8 inner grooves	△ Experiment	— Calculation
(e) 1 inner groove	◆ Experiment	- - - Calculation
Plain surface	■ Experiment	

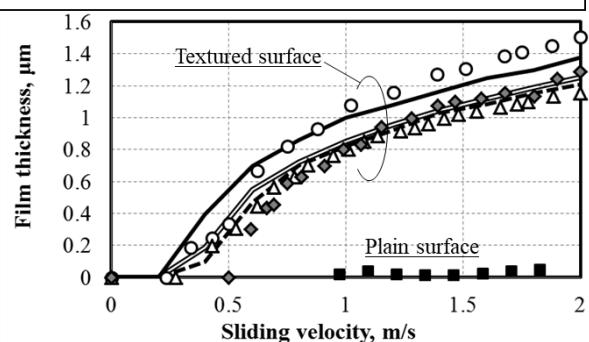


Fig. 5 膜厚計測結果 [出典：文献 2]

持つという部分のみ異なる。

起動-停止時および回転開始直後の低速回転時は、しゅう動面の外周側（高圧側）に配置されているレイリーステップにより、液体潤滑状態で作動する。液体は内周側（低圧側）に配置されているスパイラルグループにより高圧側に引き戻されるため、漏れは生じない。

高速回転時には、内周側のスパイラル溝により空気がしゅう動面内に引き込まれた結果、低速時に導入された液体がしゅう動面から完全に排除され、完全な気体潤滑状態となる。粘性の極めて小さい空気潤滑が主体となることで、高速回転時は超低摩擦状態での作動が可能となる。Fig. 8は、異なる潤滑状態での作動を想定した際の、すべり速度に対する摩擦係数を示す。液体潤滑状態では、起動時（低速時）の摩擦係数は比較的低い反面、速度の増加とともに摩擦係数が増加する（図中(a)参照）。対照的に、気体潤滑では、起動時（低速時）の摩擦係数は非常に高いが、高速時には劇的に低下する（図中(b)参照）。気-液ハイブリッド潤滑シールは、速度の増加とともに、半径方向溝に作用する遠心力により液体の供給が抑制され、しゅう動面間の液体潤滑膜が気体に置き換わることで、液体潤滑から気体潤滑状態に遷移する。このため、低速から超高速回転にわたり低摩擦を実現できるように設計されている（図中(c)参照）。

表面テクスチャリングメカニカルシールによる動力損失の低減事例をFig. 9に示す。従来シール対比97%以上の劇的な動力損失の低減が可能であることが明確に示された。動力損失は回転速度の増加に比例して増大するため、e-モータおよびe-axleの高速化のトレンドに伴い、シールの損失低減技術が将来的に必須となる可能性が高い。

3. 表面テクスチャリング形状の多目的最適化技術

表面テクスチャリングの微細溝形状の決定にあたっては、遺伝的アルゴリズムに基づく多目的形状最適化手法が有用である¹⁰⁾。シール性能は流体潤滑理論に基づき、数値解析により予測可能である。そのため、設計段階において数値解析により最適形状を算出することが可能である。Fig. 10に、前述の気液ハイブリッド潤滑シールの低圧側スパイラル溝について、低速および高速回転時のどちらにおいても流体潤滑で作動し、最大のシール性能が得られる形状を算出した事例を示す。メカニカルシールが使用される環境や条件、機械のサイズは多種多様であるため、実用化に際しては、それらの条件に最適な溝形状を都度提案する必要がある。溝幅、深さ、長さ、角度、本数等の設計パラメータ数が多い表面テクスチャリング形状については、手作業による最適化設計の範囲に限界があるため、このような自動最適化手法の適用により、顧客ニーズへの迅速な対応体制を構築した。

4. 開発状況および将来展望

本技術は各分野において実用化が進められおり、その事例のひとつとして、前述の通り、EV向け低損失シールが挙げられる。製品化にあたり、独自開発したレーザ加工技術としゅう動環を構成するセラミックスの特殊成型技術により、自動車部品としての量産にも耐え得る生産性を確保した。その結果、EV駆動モータの高効率な冷却方式の一つである軸水冷システム用シール⁷⁻⁹⁾として、その低摩擦損失性能・高密封性能・量産対応技術が認められ、2020年、欧州の自動車メーカー向けに上市した。現在、軸水冷システム用シールの他、e-Axle向けギアボックスシールなどの高速回転用途^{8,9)}として、国内外から多くの引き合いを受けており、今後益々の採用増加が期待できる。さらに、社内試験の結果、40,000rpmにおいても安定して作動することが確認されており、将来のEV駆動モータ回転数の高速化に対しても対応可能である。

再生可能エネルギーのひとつとして注目されている潮流発電について、相反転プロペラ式潮流発電用シールとして

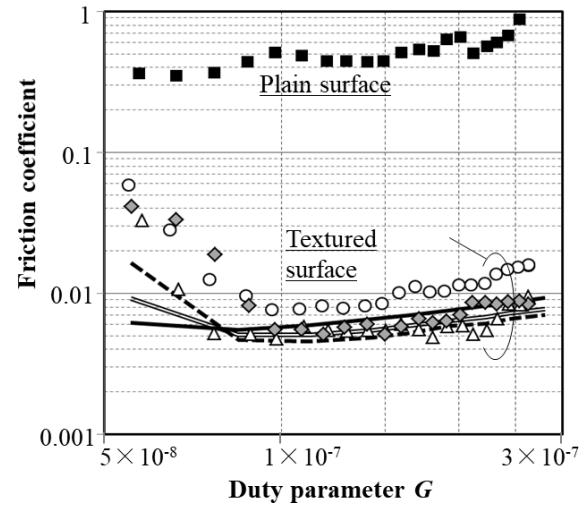
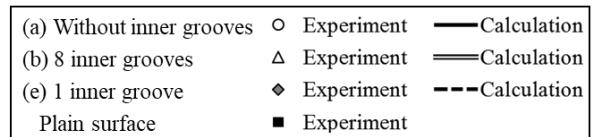


Fig.6 摩擦係数計測結果 [出典：文献 2]

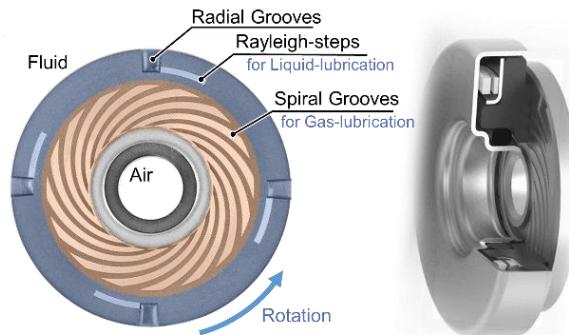


Fig.7 気液ハイブリッド潤滑テクスチャシールの概要図 [出典：文献 8]

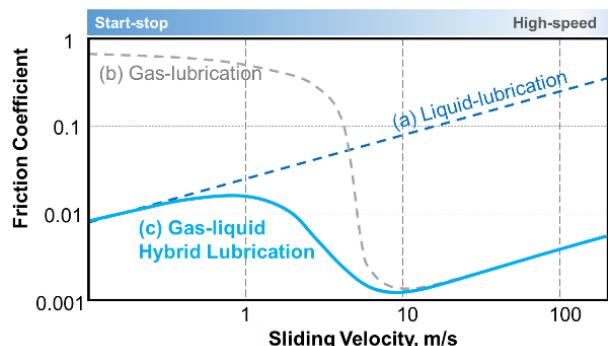


Fig.8 気液ハイブリッド潤滑テクスチャシールの作動特性イメージ [出典：文献 8]

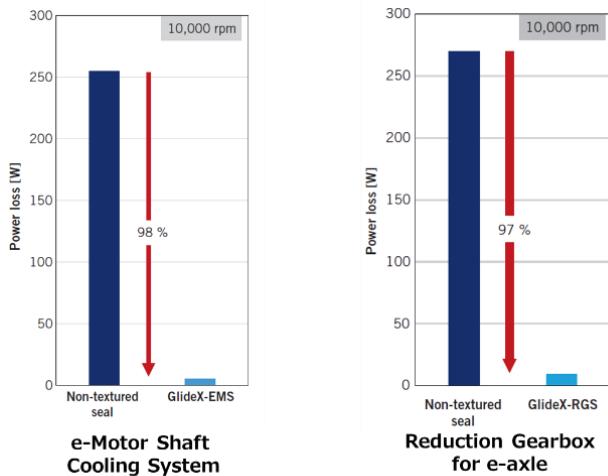


Fig. 9 摩擦損失(図中”GlideX”は表面テクスチャシールの商標) [出典：文献 9]

本技術の適用が検討された⁵⁾。長崎沖での発電効率に関する実証試験の結果、発電機内部への海水の侵入を防止する密封性能と低損失性能により、高い発電効率の実現が可能であることを実証した。この技術は潮流発電機だけでなく、海水用低損失シールとして、電動モータ駆動船外機用シール等にも適用可能である。

将来的な技術動向として、世界的なカーボンニュートラルの実現を目指し、水素エネルギーの利用拡大が予想される。さらに水素以外でも LNG (液化天然ガス : Liquefied Natural Gas) 等の揮発性極低温流体の利用促進に対し、これまで適用できなかった厳しい環境における本シール技術の適用が期待される。

5. おわりに

表面テクスチャリング技術を適用した新しい形式のシールについて、数値解析と実験による検討を行うとともに、設計変数と支配方程式の無次元化を行って理論の整理を行い、任意の条件下での最適設計を可能とした。従来型のメカニカルシールに比べて、低損失性能と密封性能のいずれも飛躍的に向上させるものであり、メカニカルシールの革新的技術確立に寄与するものである。本技術の適用により、今後各分野の技術革新や新規需要の創出等による貢献が期待される。

文献

- 1) 徳永・上村・山本：密封機構と摩擦低減機構を有するメカニカルシールの開発と性能評価－理論的検討－、トライボロジスト, 58, 2(2013) 102.
- 2) 徳永・杉村・山本：密封機構と摩擦低減機構を有するメカニカルシールの開発と性能評価－実験的検討－、トライボロジスト, 60, 5(2015) 3 – 32.
- 3) 徳永・上村・山本：密封機構と潤滑機構を有するメカニカルシールの開発と性能評価、トライボロジー会議 2013 秋福岡 予稿集(2013)D2.
- 4) 徳永：メカニカルシールの密封機能向上と摩擦低減に関する研究、九州大学博士論文(2015).
- 5) 根岸・小杉・井上・徳永・井上：潮流発電機用両回転対応ゼロリーク低損失テクスチャリングメカニカルシールの実用化、トライボロジー会議 2017 秋高松 予稿集(2017)C33.
- 6) 木村・前谷・徳永・井上：液体および気体潤滑を組み合わせた超高速対応ゼロリーク低損失テクスチャリングメカニカルシールの実現、トライボロジー会議 2017 秋高松 予稿集(2017)C31.
- 7) 細江・板谷：電気自動車用モータ冷却シール技術に関するトライボロジー、トライボロジスト, 65, 3 (2020)140.
- 8) Y. Tokunaga, N. Nakahara, and M. Itadani: Development of Ultra-Low-Friction and Zero-Leakage Mechanical Seal for High-Speed e-Mobility Shaft Sealing Applications, SAE Technical Paper (2020) 2020-01-1090, doi:10.4271 / 2020-01-1090.
- 9) H. Inoue, Y. Takigahira, and R. Dircks: Low-friction Sealing System for E-drives, MTZ worldwide (2020) 81, 28.
- 10) Y. Tokunaga, H. Inoue, and J. Sugimura: Multi-objective design optimization for zero-leakage and low-friction mechanical seals with surface texturing, Proc. The 6th WTC World Tribology Congress 2017 in Beijing (2017).

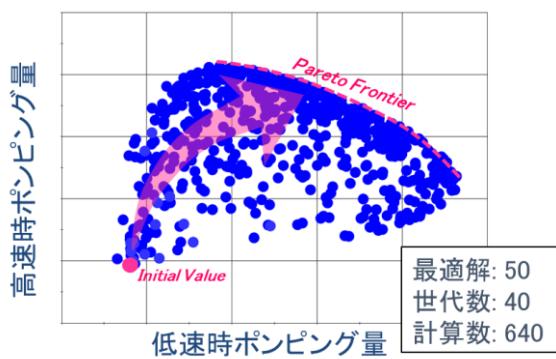


Fig. 10 遺伝的アルゴリズムによる設計パラメータ最適化の事例