

高い冷却効率を実現する EV モータの軸水冷システム向け軸シールの開発動向

Development trend in shaft seal of rotor cooling system for EV-motor which realizes high cooling efficiency

イーグル工業（正）*井村 忠継，（正）徳永 雄一郎

Tadatsugu Imura*, Yuichiro Tokunaga*

*Eagle Industry Co., Ltd.

1. 緒言

近年、持続的な開発の実現という世界的な方針を受け、世界中で自動車の電動化が進められている。自動車の電動化は CO₂ 排出量の低減・地球温暖化の防止を目的とした自動車の CO₂ 排出量をゼロにする取り組みの一つであり、各国の規制体制もこの取り組みを後押ししている。電動化において、自動車の駆動源は従来の内燃機関からモータに置き換えることになる。モータは回転することで発熱し、効率が大幅に低下することがよく知られている。車両の系全体の効率面から軽量かつ高効率なモータが求められており、モータの冷却は重要な要素といえる。

モータの冷却方式を使用媒体で区別すると、空冷、水冷、油冷があり、電動自動車では、主に水冷、油冷が採用され、空冷はインホイールモータなどの一部車両に限定されている。水冷において最も多く採用されている方式にウォータジャケット方式がある。ウォータジャケット方式では動的なシールが必要ないという長所があるものの、構造上モータの中心部を冷却出来ないという短所がある。油冷は、モータの発熱部に直接油が触れることで冷却する方式であり、先に示したウォータジャケット方式より一般に冷却性能が高い。しかしながら、油の粘度によるせん断抵抗などの課題がある。

本稿では水冷の中でも冷却性が高いとされる軸水冷システム向けのメカニカルシールの開発動向について報告する。

2. 軸水冷方式

軸水冷方式はロータ軸水冷方式とも呼ばれ、現在欧州を中心に採用されている。発熱源であるモータのロータを中空にしたシャフト内径側から直接冷却できること、さらに油より冷却効率の高い水系（主にロングライフクーラント、以下 LLC）が媒体のために冷却性が高く、モータ効率が上昇する（Fig. 1）。崎間らは永久磁石同期モータに軸冷却方式を用いることにより、軸を冷却しない場合に比べ、磁石温度の上昇を抑え、モータの損失低減・トルク密度が上昇することを示した¹⁾。軸冷却方式に使用するシールは、高く安定し密封性が求められる。LLC が漏れた場合、直接モータ内部に漏れ液が浸透するため電気系統がショートし、走行できなくなる事態に陥る。したがって、軸水冷方式においては、シール機能が非常に重要である。

軸水冷方式におけるシールの使用環境例を Table 1 に示す。既存の LLC 向け軸シールである自動車用ウォータポンプシールに比べ、軸径・最大回転数が大きい最大周速は 4 倍以上になり、より厳しい潤滑状態となるためしゅう動面の焼き付きや摩耗が比較的生じやすいといえる。さらには、軸水冷方式においてはモータ構造の簡素化や生産効率上昇を意図し、しゅう動面の内周側に密封流体を配置するアウトサイド形と呼ばれる方式のメカニカルシールがしばしば用いられる。アウトサイド形では、密封流体の遠心力が漏れ方向に作用するため、一般的に密封に不利とされる。前述の通り、軸水冷方式では、高回転数・大径であるため遠心力の影響が比較的大きく、密封性という面でも厳しい条件となる。このことから潤滑性・密封性ともに既存の LLC 向け軸シールより高い機能が求められる。

3. 軸冷却方式向け軸シールにおける表面テクスチャリング技術

メカニカルシールにおいて、高い次元での密封性と潤滑性を両立するための手法としてしゅう動面への表面テクスチャリング技術が研究されている。徳永らは、しゅう動面の密封側に潤滑機構を、漏れ側に吸い込み機構を付与することにより、漏れなしかつ低トルク化を実現したメカニカルシールを提案し²⁾、板谷らが実用化した³⁾。KIMURAらの提案した気液ハイブリッド潤滑型メカニカルシール⁴⁾は、しゅう動面の密封側にレイリーステップを、漏れ側にスパイラル溝を配置することにより、低速領域ではレイリーステップによって液潤滑となる一方、高速領域ではスパイラル溝により吸い込んだ空気によって浮上し、気体潤滑となる。その結果、幅広い領域で低摩擦を示し、特に高速

Table 1 General condition for shaft seal of rotor cooling system

Lubricant	Long life coolant
shaft diameter	φ 20 - φ 50mm
Max. rotational speed	30 000 rpm
Max. Seal Pressure	0.3 MPaG
Temperature	- 40 ~ 85 °C

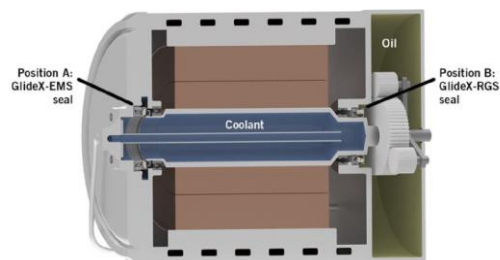


Fig. 1 An example of shaft seal in Rotor cooling system⁶⁾

域では気体潤滑による低摩擦状態が発現する気液ハイブリッド潤滑 (Fig. 2) を報告している。高い水準の密封性と潤滑性が求められる軸冷却方式向けメカニカルシールは、表面テクスチャリング技術を用い、実用化が進められている。

DIRCKS らは、表面テクスチャリング技術を用いた軸径 $\phi 25 \sim 28$ mm の軸水冷方式向けメカニカルシールのしゅう動試験を実施し、回転数最大 18000 rpm、最大液圧 0.3 MPaG において、漏れ 0.01 ml/h 以下の良好な密封性能を示し、また高い耐久性を有することを示した⁵⁾。Figure 1 のとおり、INOUE らは軸径 $\phi 22$ の軸水冷方式向けメカニカルシールを対象とし、最大回転数 30000 rpm、最大液圧 0.3 MPaG において、気液ハイブリッド潤滑における潤滑領域への遷移とトルク性能、密封性能および摩耗耐性を確認した⁶⁾。このシールは、漏れがなく、摩耗はほぼ生じなかったことに加え、気体潤滑へと遷移することにより摩擦損失を接触式メカニカルシール対比 98% 低減可能であった。

4. 軸冷却方式向け軸シールの最新動向と今後の課題

モータが動力源の場合には内燃機関の場合とは異なり、車両の後退時にシャフトが逆回転し得る。加えて、自動運転技術が十分に向上した将来の電動自動車においては、従来の単なる移動手段とは異なる使用用途も提案されており、両回転に対応した表面テクスチャリング技術の必要性が高まっている。両回転に対応した表面テクスチャリング技術として、根岸らのポンピンググループ (Fig. 3)⁷⁾、王らの両回転に対応する丁字型レイリーステップを内外周に配置した形状⁸⁾などが挙げられ、両回転に対応した軸冷却方式向けの軸シールとしてこれらの形状は開発が進められている。

今後の課題としては、両回転方向に対応した低損失・極低漏洩シールの実現がある。両回転方向対応の気液ハイブリッド潤滑の実現や、空気を取り込みを伴う気体性キャビテーションの積極的な利用とその気液界面制御手法を確立することにより、さらなる低損失化・低漏洩化が可能と考えられる。形状パラメータを設計変数とする従来の最適化に加えて、セルオートマトンを用いた最適化⁹⁾、トポロジー最適化や機械学習⁸⁾に近年注目が集まっている。これらの技術を活用することで低損失・極低漏洩化を果たした両回転対応の軸冷却方式向け軸シールの実現が望まれる。

5. 結言

ウォータジャケット方式の水冷や、対象を直接冷却できる油冷とならび冷却性が高い軸水冷方式向けのメカニカルシールの開発動向について以下のようにまとめられる。

1. 気液ハイブリッド潤滑を利用することで 30000 rpm の高回転数領域において、液圧 0.3 MPaG で漏れが生じないメカニカルシールが開発されており、大幅なトルク低減が実現できている。
2. 両回転に対応した軸冷却方式向けの軸シールの開発が進められている。

参考文献

- 1) 崎間・川副・向・永尾：永久磁石同期モータのシャフト水冷によるトルクの向上，電気学会研究会資料，RM，49 (2020) 7-10.
- 2) 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.
- 3) 板谷・徳永・千葉・吉柳・上村：表面テクスチャメカニカルシール実用化検討-流体循環溝の形状と効果-，トライボロジー会議 2016 春 東京 予稿集，A30 (2016).
- 4) 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.
- 5) R. DIRCKS, T. HUPPERTZ, M. ITADANI & T. OKADA : Frictionless Sealing Solution for Electric Drive, Antriebstechnisches Kolloquium (2019).
- 6) H. INOUE, Y. TAKIGAHIRA & R. DIRCKS : Low-friction Sealing Systems for EV-drives, MTZ Worldwide, 81, 11 (2020) 28-35.
- 7) 根岸・小杉・井上・徳永・井上：潮流発電機用両回転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，C33 (2017).
- 8) 王：機械学習を用いたメカニカルシールの表面テクスチャで発生する圧力分布の予測，トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集，A23 (2021).
- 9) 落合・明戸・橋本：セルオートマトンを用いた表面テクスチャリング最適化法の検討とドライガスシールへの適用，機素潤滑設計部門講演会講演論文集/2018.18, 2C1-7 (2018)

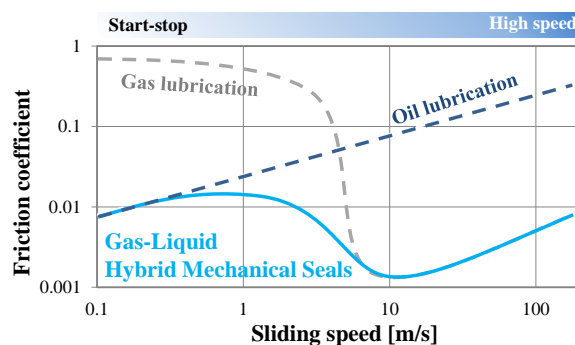


Fig. 2 Schematics of sliding behavior of gas-liquid hybrid mechanical seals

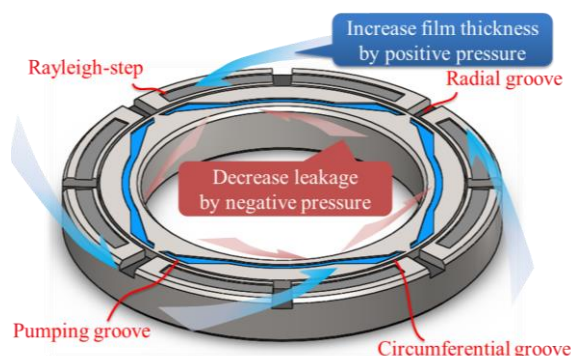


Fig. 3 sliding surface with pumping groove