

## 低損失・低漏洩を実現する再生可能エネルギー発電機用 表面テクスチャシール技術の最新動向

### Recent Trends in Surface Textured Sealing Technology for Renewable Energy Generators with Low Losses and Low Leakage

イーグル工業（正）\*徳永 雄一郎    イーグル工業（非）\*大沼 実憲

Yuichiro Tokunaga\*, Minori Onuma\*

\*Eagle Industry Co., Ltd.

#### 1. はじめに

近年、再生可能エネルギーは、最もクリーンな発電方法の一つとして注目されている。潮流発電機は水中で稼働することから、発電機へのダメージを防ぐためにシール性能が特に重要となる。また、発電効率を最大限に高めるためには、低摩擦・高効率性能が非常に重要であり、低潤滑性の水中環境下でシール性能と低摩擦性能を両立するシール技術が求められていた。著者らは、極めて低摩擦かつ高シール性能を両立した表面テクスチャメカニカルシール（以下、表面テクスチャシール）を開発し<sup>1,2)</sup>、電気自動車用駆動モータ<sup>3)</sup>や再使用型ロケットエンジン<sup>4,5)</sup>など、さまざまな分野への適用を検討してきた。本報告では、この表面テクスチャシールを再生可能エネルギー発電機、特に水中回転発電機という環境に適用し、長寿命化および発電効率の向上を目指した事例を報告する。表面テクスチャシールは、摺動面にシール機構と潤滑機構を独立して配置することで、流体潤滑で運転でき、摩擦係数を低減し、ポンピング作用による極めて低い漏れ量を実現できる。小型の潮流発電実証機では、シール損失を大幅に低減することで、高い発電効率を達成した。その他、主に実使用環境における水力発電のケーススタディを最新情報とともに紹介する。

#### 2. 低摩擦・低漏洩メカニカルシールの基本構成

潮流発電機等へ用いられる、表面テクスチャシールは、機器の使用される環境によって、異なる構成が採用されている。構成に影響する環境因子の一つとして、機内側が液体か気体（大気）かの違いがある。ここでは、機内側が気体の場合を一液用シール、機内側が液体の場合を二液用シールと呼び、区別する。機内側が液体となる例としては、機内側が軸受等の潤滑オイル、機外側が海水・河川水、と言う事例が挙げられる。もう一つの因子として、回転方向が片回転か、両回転が必要かの違いがある。例えば河川においては、水の流れは常に一方向であるため、片回転方向のみの対応で問題無い。一方、潮流発電機等の場合、時間帯によって潮の流れ方向が変化するため、機器の構成に関しては、正逆両回転への対応が必要となってくる。これら2つの因子の組み合わせにより、それぞれ異なる表面テクスチャリング形状のコンセプトが提案され、採用されている。2つの条件因子の組み合わせと、対応する表面テクスチャリング形状のコンセプト図を、Fig. 1 に示す。続いて、それぞれの形状について、各コンセプトの詳細を紹介する。

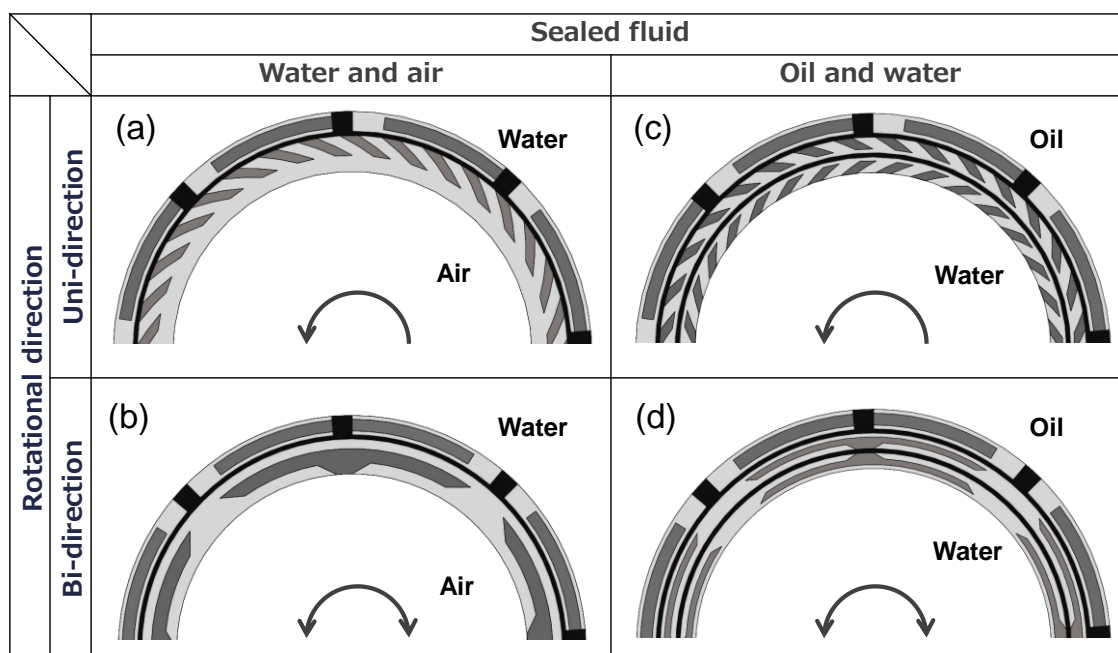


Fig. 1 Conceptual diagram of surface texturing shapes for different combinations of rotation direction and sealed fluid

#### (a) 一液・片回転用シール

機外側（この場合外周側）に潤滑機構，機内側（内周側）に密封機構が配置された，表面テクスチャリング形状が採用される．Figure 1(a)に示す例としては，外周側の潤滑機構としてレイリーステップ，内周側の密封機構として逆スパイラルグループが採用され，両機構を分断するように円周溝が配置されている．逆スパイラルグループは，回転により負圧を発生し，機外側へ漏れようとする液体を機内側へ吸い戻す，ポンピング作用を発現するよう設計されている．これらの密封・潤滑作用により，低損失と低漏洩作用が同時に達成される．

#### (b) 一液・両回転用シール

機外側（外周側）に両回転対応の潤滑機構，機内側（内周側）に両回転対応の密封機構が配置された，表面テクスチャリング形状が採用される．Figure 1(b)に示す例としては，外周側の潤滑機構として，円周方向に対称形状のレイリーステップ，内周側の密封機構として，両回転ポンピンググループと呼ばれる溝形状が採用され，両機構を分断するように円周溝が配置されている．対称形状レイリーステップは，回転により正圧と負圧両方が同時に発生する．負圧領域は大気圧より低いある圧力で液膜が破断し，キャビテーション領域を生じるとともに，その領域内部は，ある一定のキャビテーション圧力となる．一般にキャビテーション圧力は大気圧に近いので，負圧は事実上キャンセルされ正圧領域のみが残る．この圧力分布の非対称性により，両回転方向において流体潤滑作用が実現可能となる．両回転ポンピンググループは，閉塞された溝先端が密封流体側へ寄せて配置されていることにより，漏れようとする流体を密封流体側へ押し戻す作用を持つ．これらの回転方向に対称な表面テクスチャリング形状により，両回転方向において低損失と低漏洩作用が達成される．

#### (c) 二液・片回転用シール

外周側に潤滑機構，中央部に外周側流体（この場合潤滑オイル）用の密封機構，内周側に内周側流体（この場合水）用の密封機構が配置された，表面テクスチャリング形状が提案される．Figure 1(c)に示す例としては，外周側の潤滑機構としてレイリーステップ，中央部および内周側に，二液用の密封機構として逆スパイラルグループがそれぞれ採用され，各機構を分断するように円周溝が配置されている．逆スパイラルグループは，回転により負圧を発生し，漏れようとする液体を各密封流体側へそれぞれ吸い戻す，ポンピング作用を発現するよう設計されている．これらの密封・潤滑作用の組み合わせにより，低損失と二液同士が混合しない低漏洩作用が同時に達成される．

#### (d) 二液・両回転用シール

外周側に両回転対応の潤滑機構，中央部に外周側流体用の両回転対応密封機構，内周側に内周側流体用の両回転対応密封機構が配置された，表面テクスチャリング形状が採用される．Figure 1(d)に示す例としては，外周側の潤滑機構として，円周方向に対称形状のレイリーステップ，中央部および内周側に，二液用の密封機構として両回転ポンピンググループが採用され，各機構を分断するように，円周溝が配置されている．

### 3. 再生可能エネルギー発電機への適用事例

#### 3.1 潮流発電機

再生可能エネルギーのひとつとして，海洋エネルギーの利用について，多方面での研究がなされている．中でも，潮流発電は，潮の干満により生じる潮流を利用し，発電機を回転させることで電気エネルギーに変換する発電方式である．様々な方式が検討されている発電機の構造のひとつとして，高効率で小型化が可能な相反回転プロペラ方式を採用した発電機が検討されている<sup>6)</sup>．相反回転プロペラ方式とは，回転方向が異なる2つのプロペラに接続された内外回転シャフトによって，発電機内部の回転子を駆動する方式のことである（Fig. 2）<sup>7,8)</sup>．回転相対速度の増加により，発電機の小型化や回転トルクの相殺が可能となる等，様々な利点を有する<sup>7)</sup>．この方式を採用した1/7スケールモデルの実証試験機が開発・製作され，実海域での実証試験が行われた<sup>6)</sup>．2つのプロペラシャフトと発電機本体との接続部には，海水の発電機内部への侵入を防止するため，動密封が必要となる．このシールに求められる性能として，発電機の故障に繋がる漏れが生じないことはもとより，高い発電効率の達成のため，低損失であること，さらには潮流の方向が変化した際にも対応できるように，両回転方向に対応できることが求められる．そこで，本報2(b)に示した，「一液・両回転用シール」が採用され，実証試験が実施された．上記シールが組み込まれた発電機を，回流水槽における性能試験を実施した．試験後の発電機内部への漏れは確認されず，完全封水を実現できることが証明された．実証試験として，長崎沖の実海域において，海中に沈めた発電機を，潮流を模擬してタグボートで曳航し，性能を検証した．その結果，設計値を上回る，43.1%という高い発電効率が確認された<sup>9)</sup>．採用された表面テクスチャシールも，この高い発電効率の達成に貢献したと考える．

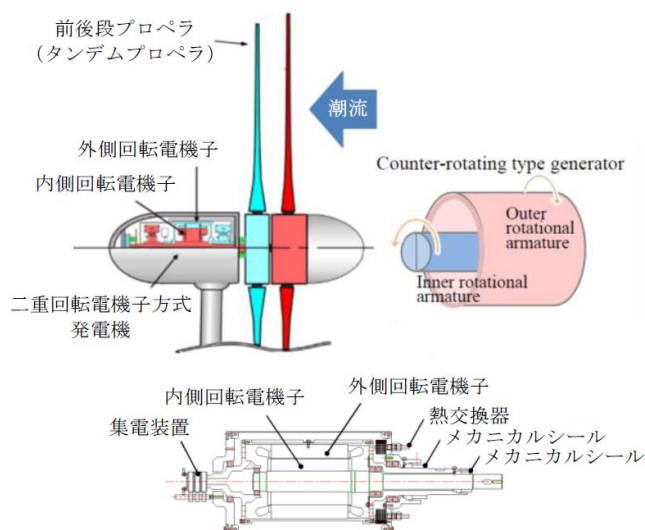


Fig. 2 Overview of contra-rotating type tidal current generator  
〔出典：文献7,8〕

### 3.2 小型インライン式ハイドロタービン発電機<sup>10, 11)</sup>

浄水場、下水道などに使用されているインライン式発電機について、直径 100mm 以下の小型な発電機の高出力化を目的とした、二重反転形軸流ハイドロタービンに関する研究が進められている。特に、農業用パイプラインや簡易水道などの低流量域に活用できる、高性能かつ低コストなインライン式ハイドロタービンは存在せず、小型・高出力を実現可能な二重反転形羽根車の適用が検討されている。このような小型の発電機においては、発電機の効率向上のため、シール損失を含む機械損失の低減が必須である。そこで重光らにより、低損失を実現可能な表面テクスチャシールが水車の出力特性に及ぼす影響について調査された<sup>10, 11)</sup>。インライン水車において、流体の流れ方向は一方のみであるため、回転方向も一方回転に限られる。したがって、表面テクスチャリング形状として、本報 2(a)に示した「一液・片回転用シール」が採用され、実証試験が実施された。回流試験装置の配管中に発電機が設置され、流量の変化における発電機の出力が計測された。メカニカルシールとして、表面テクスチャリング溝が付与されていない接触形メカニカルシールと、表面テクスチャシールの 2 種類について、試験が実施された。

発電試験の結果を Fig. 3 に引用する。18.5l/s 以上の高流量域においては、メカニカルシールの違いによる出力の変化は確認されなかった。一方で、18l/s 以下の流量域においては、表面テクスチャシールの効果・優位性が観察され、流量 15l/s において約 130W の出力の差が生じる結果が示された。このように、特にシール損失が無視できない低流量・低出力域において、表面テクスチャリング技術の適用による効果が顕著に得られる結果が示された。

### 3.3 帆船用水力発電機

ヨットレース等において長期航行を行う帆船用に、水力発電機が開発されている。航行中に発電機の回転用タービン部を海水中に沈め、船の推進力によりタービンを回転させ、発電することができる<sup>12)</sup>。発電機の写真を Fig. 4 に示す。この発電機のタービンシャフト部において、海水が発電機側に入らないように、また、発電機に使用されている潤滑オイルが海水側に漏洩しないように、シールが必要とされる。さらに、発電効率の向上のためには、シール損失を最小化することが望ましい。そこで、表面テクスチャリング形状として、本報 2(c)に示した、「二液・片回転用シール」が採用され、発電機に関する実海域での性能試験、長期耐久試験が実施された。実海域での性能試験の結果、海水側への漏洩、および海水の発電機内部側への流入は生じず、発電機の機能が維持できた。さらに、大西洋横断の長距離航海実証試験が実施された。発電機の性能を維持した状態で、耐久試験を終えることができた。このように、海水と潤滑オイルの両方を一つのシールで密封でき、長期間安定して低損失状態を保持できるため、機器の軽量化・長寿命化・高効率化に貢献できることが示された。

## 4. おわりに

本報では、再生可能エネルギー用発電機向け表面テクスチャシールについて、主に、水中発電機に適用が検討されている表面テクスチャリング形状のコンセプトや、それらの適用事例について、最近の技術動向を含めて紹介した。それぞれの事例において、表面テクスチャシールの適用により、漏れを防止しつつ、シール損失の低減効果が確認されている。また試験環境としても、シール単体試験だけでなく、実際の海水中での発電機への適用実績が積み上がりつつある。

さらには、本技術は海洋原動機用プロペラシャフトシールへの適用も可能であり、海水と潤滑オイルの「二液・両回転」に対応できるシールとして開発が進んでおり、低損失・長寿命化に貢献することが確認されている。このように、幅広い水中回転機器へ適用できる可能性があり、今後の水中回転機器全般の性能向上への貢献が期待される。

## 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

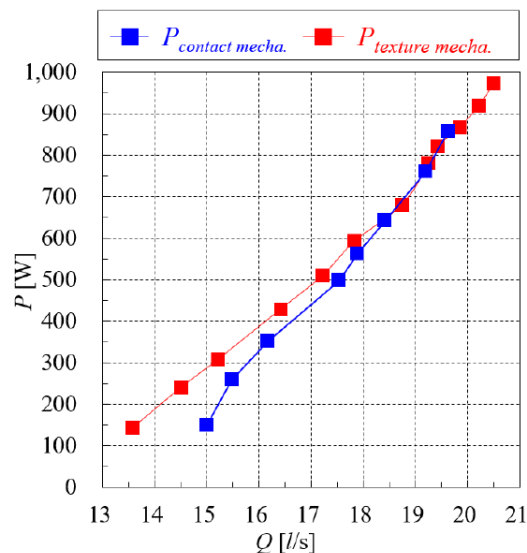


Fig. 3 Results of power generation tests using contact-type mechanical seals and surface textured mechanical seals [出典：文献 10, 11)]



Fig. 4 Photo of an underwater hydro generator [出典：文献 12)]

イボロジスト, 60, 5(2015) 3 32.

- 3) 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.
- 4) 田澤・角銅・高田・井村・徳永・笠原：相変化を伴う極低温流体環境下における動圧浮上型軸シールの密封特性の評価, トライボロジー会議 2023 春 東京 講演予稿集 (2023) E23.
- 5) Y. Tokunaga, T. Imura, H. Kasahara, A. Tazawa, H. Kakudo, and S. Takada: Recent Developments in High-Speed Sealing Applications with Hydrodynamic Laser-Textured Mechanical Seals for Reusable Rocket Engine Turbopumps, Proc. 2024 AIAA SciTech Forum and Exposition, AIAA-2024-1215 (2024) 1.
- 6) I. Samura, K. Kuwano, R. Kawashima, T. Oda, T. Imakyurei, H. Inoue, Y. Tokunaga, T. Kanemoto, K. Miyagawa, T. Miwa, and H. Yamanokuchi: Counter-Rotating Type Tidal Stream Power Unit: Excellent Performance Verified at Offshore, Proc. 29<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (2018).
- 7) 臼井：タンデムプロペラ型潮流発電ユニットの研究開発, 九州工業大学博士論文(2015).
- 8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 25 年度～平成 29 年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 海洋エネルギー技術研究開発 次世代海洋エネルギー 発電技術研究開発 (相反転プロペラ式潮流発電) (2018).
- 9) 青山：海洋エネルギーの利用技術, 電気設備学会誌, 40, 5 (2020) 290.
- 10) 重光・平石・小澤・細谷：二重反転形小型ハイドロタービンの高出力化に向けた基礎研究, ターボ機械協会 第 90 回総会講演会, A-07 (2024).
- 11) T. Shigemitsu, Y. Hiraishi, S. Ozawa, and T. Hosotani: Proc. the 10<sup>th</sup> Asian Join Workshop on Thermophysics and Fluid Science (2024).
- 12) watt and sea ウェブサイト (<https://www.wattandsea.com/en/hydrogenerators/>)