

報告日 2019 年 (令和 元 年) 6 月 3 日

報告者 大分大学 理工学部 講師

本田 拓朗

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名 (日本語)

親水性素材を適用した低トルク高耐水圧仕様軸封装置の開発

(2) 研究者氏名

本田 拓朗 大分大学 理工学部 講師

(3) 研究概要 (日本文)

ポンプや攪拌機のように回転軸を有する流体機器において、軸受などの機械部品への液体の流入を防ぐために回転軸シールが必要である。従来の回転軸シールでは適用が困難な防水回転軸仕様に対して、親水性素材からなるシールリップを回転軸シールとして設計開発し性能評価を行った。親水性の低摩擦材料としてポリビニルホルマール (PVF) を主材料に用い、シールリップの耐水圧性・機械的強度を高めるための繊維強化を加え、回転軸シールとしての低トルク性及び耐圧耐久性能の向上を図った。

(4) キーワード

回転軸シール, シールリップ, 境界潤滑, 親水性素材, 繊維強化

(英文)

(1) Research title

Development of water sealing systems using hydrophilic materials that provide a low torque operation and high pressure resistance

(2) Name of researcher with title of position

Takuro Honda, Lecturer, Oita University

(3) Summary

Shaft seals are installed in many rotating devices such as pumps, screw to prevent leakage of lubricating fluid or protect machine elements against surrounding liquid. There are some waterproof situations which conventional shaft seals won't work well. To satisfy both low-torque operation and high water-sealing function, new shaft seals using a hydrated seal lip were developed. Polyvinyl formal was prepared as a low-friction sliding material for hydrophilic seal lips, and reinforcement fibers were mixed into it to enhance mechanical strength or pressure resistance as seal lips. As a result,

new shaft seals with hydrophilic seal lips offered low-torque operation and high water-sealing function under the conditions conventional shaft seals couldn't work effectively. Fiber reinforcement of hydrophilic materials was also successful to durability of seal lips.

(4) Key Words

Shaft seal, Seal lip, Boundary lubrication, Hydrophilic materials, Fiber reinforcement

2. 本研究の意義・特色

機器の省エネ性能が追及される中で、軸受やシール部品などのような摩擦部品の低摩擦化・長寿命化が求められている。また、環境・安全への配慮からオイルレス化が進み、水環境や水潤滑系で駆動する機械装置やアクチュエータも増えている。既存のシール部品は油膜による流体潤滑を想定した設計であるため、油と比較して低粘度である水を密封対象とする場合、運転条件によっては本来の性能が期待できないことがある。そこで、シールリップと回転軸がマイクロレベルで部分接触する境界潤滑モードを想定し、シールリップ素に親水性素材を適用することにより、水潤滑下における密封性と低摩擦性の両立を図った。本研究開発により、従来品の適用が困難な防水仕様に対して、低トルク性能と耐圧密封性能をもたらし、機器やアクチュエータの使用雰囲気について開発自由度が高まることが期待できる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

3.1 親水性シールリップ素材の開発

親水性のシールリップ材料として、ポリビニルアルコールハイドロゲル（PVA ゲル）を架橋強化して得られるポリビニルホルマール（PVF）を合成した。PVF は連続多孔質構造を呈し、優れた保水性と伸縮性を有するため、水和潤滑性と密封性に長けている。しかしながら、PVF は低弾性であるため、水圧などの作用力が大きくなるとシールリップ形状が変形し、すきま漏れや破断の原因となることが想定された。

そこで、シールリップの回転軸への密着性と水潤滑下での境界潤滑性を生かしつつ、高速回転・高水圧条件下での形状変形を抑制するために繊維強化を行った。強化繊維の選定にあたっては、親水性を示す主材料との材料接着性・親和性を考慮した上で、同様に親水性を示す繊維材料の中からセルロース繊維を候補とした。

繊維長や繊維径の大きさや由来原料の異なるセルロース繊維を準備し、主材料との配合濃度についても条件設定の下、材料合成を行った。

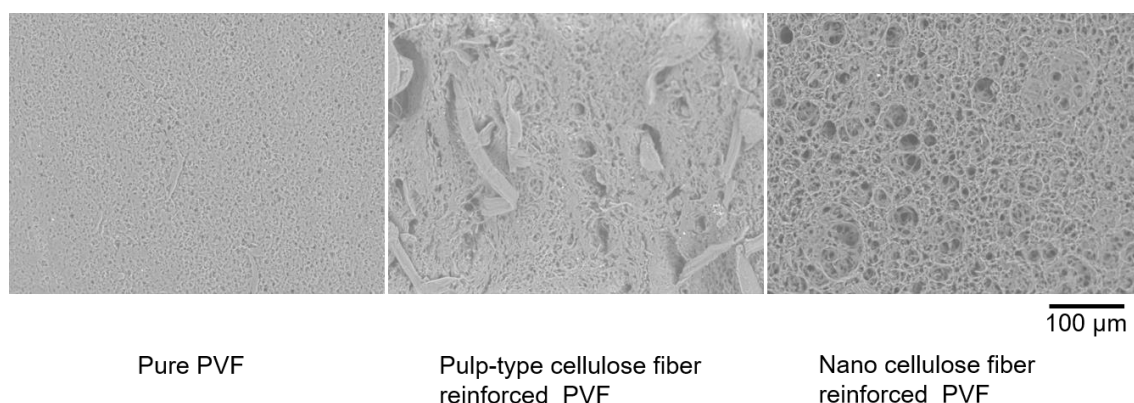


図1 電子顕微鏡による親水性シールリップ材料の観察画像

3.2 繊維強化したシールリップの材料引張試験

繊維強化した親水性素材の材料物性値の変化を把握するために材料引張試験を行い、ヤング率を導出した。引張試験条件の決定にあたっては、日本工業規格 K6251「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方」を参考とした。繊維強化の効果として、約 10 %前後の弾性率の向上が確認され、重量比 10 %までに関しては配合濃度に比例して物性値が増加することが示された。セルロース繊維のサイズ・形状に関しては、綿花状のものやパルプ状のものを使用した場合、引張試験の結果にばらつきが見られたり、電子顕微鏡観察によって材料不均一状態が確認されたりした。一方で、繊維サイズが小さなナノセルロース繊維を使用した場合は、配合作業も容易で且つ、材料ムラの少ない均質な材料を獲得できたことから、今回の繊維強化において最も適した繊維材料であったと考えられる。

表 各シールリップ素材の弾性率の平均値（単位：MPa）

	Pure	Pulp-type cellulose	Nano cellulose
No fiber	9.91×10^{-4}		
5 wt%		9.11×10^{-4}	1.10×10^{-3}
10 wt%		1.09×10^{-3}	1.60×10^{-3}

3.3 シール性能試験

繊維強化を施した各シールリップ材料について、回転トルクのモニタリングを並行した連続耐久シール性能評価試験を行った。試験装置を図 2 に示す。回転軸は直径 8.0 mm のステンレス鋼（SUS304，JIS）製を使用し、軸表面は鏡面仕上げ（ $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ ）とした。運転条件についてはより過酷な設定となるように、回転停止と加減速を含む両方向回転を周期的に繰り返す条件とし、AC サーボモータによって $\pm 5000 \text{ rpm}$ に制御した（図 3）。密封対象は純水とし、常時設定水圧を 0.5 MPa とした。試験継続期間は 600 時間（25 サイクル）とした。

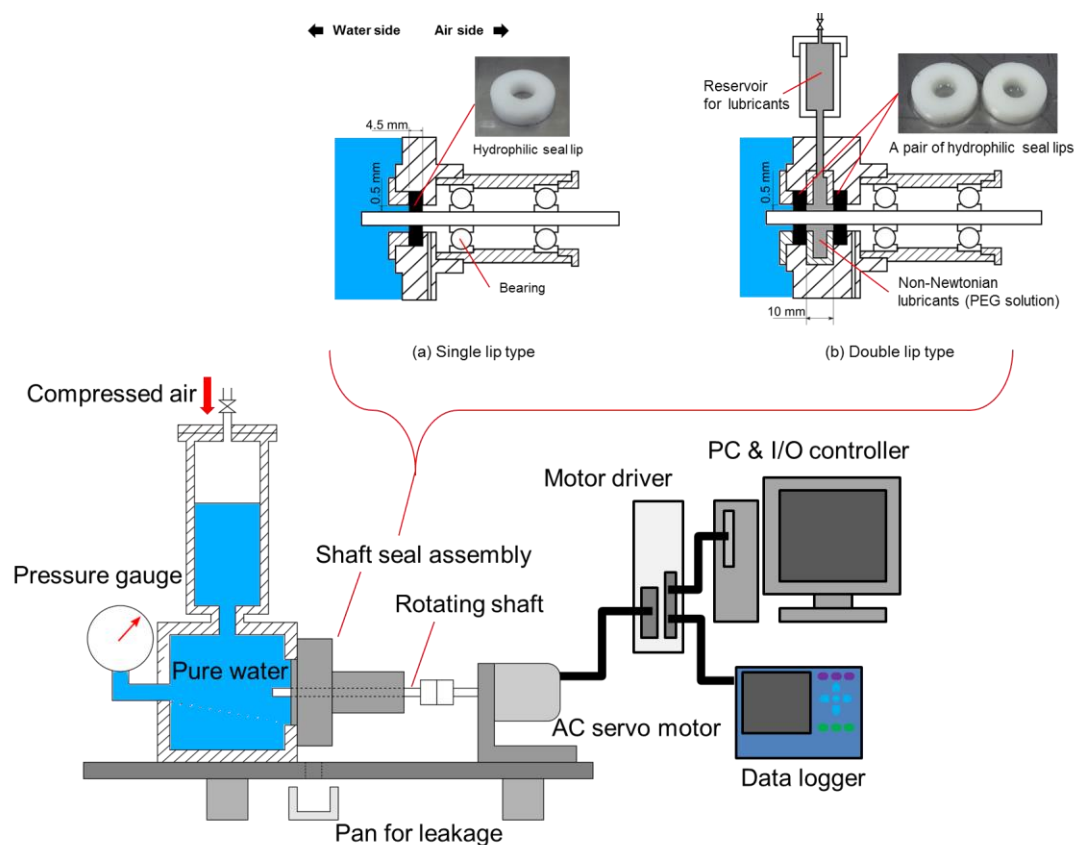


図2 シールリップ封入機構およびシール試験装置構成

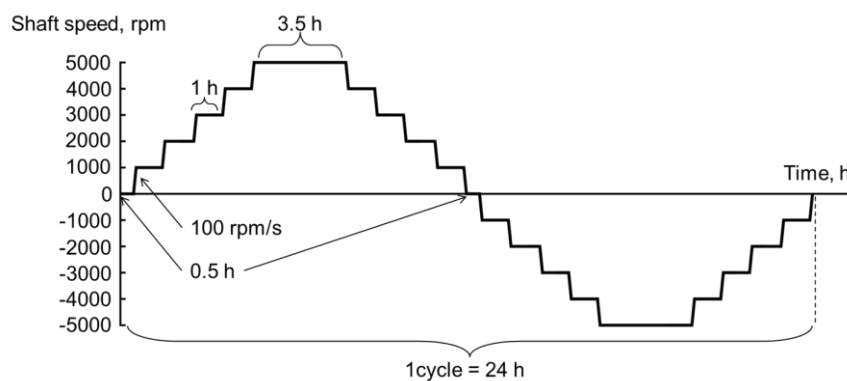


図3 軸回転速度条件（24時間1サイクル）

図4に各シールリップ材で発生した摩擦トルクの平均値と試験寿命を示す。比較対象として用いた従来品のオイルシールでは潤滑不良に陥り、短時間でシール機能を喪失した。これに対して、親水性シールリップからなる回転軸シール（Pure PVF）は低摩擦トルク値を示しつつ、シール寿命を延ばすことに成功したが、水圧によるシールリップの変形及び損傷を受けていた形跡が確認された。繊維強化を施したシールリップ（FRPVF）では、こ

これらの変形・損傷が抑制されたことによって更なる低トルク化と寿命延長を実現した。しかしながら、繊維の形態や最表面での繊維露出状態によっては、漏れ経路の発生や相手軸表面への攻撃性の問題が懸念された。また、主材料に対する強化繊維の配合量についても最適値が存在すると考えられ、今回の最大量である PVA 重量比 10 %は過剰量である可能性が示された。実験結果より、ナノセルロース繊維を PVA 重量比 5 %配合したシールリップにおいて摩擦トルク・シール寿命の双方のバランスにおいて良好な性能を得た。

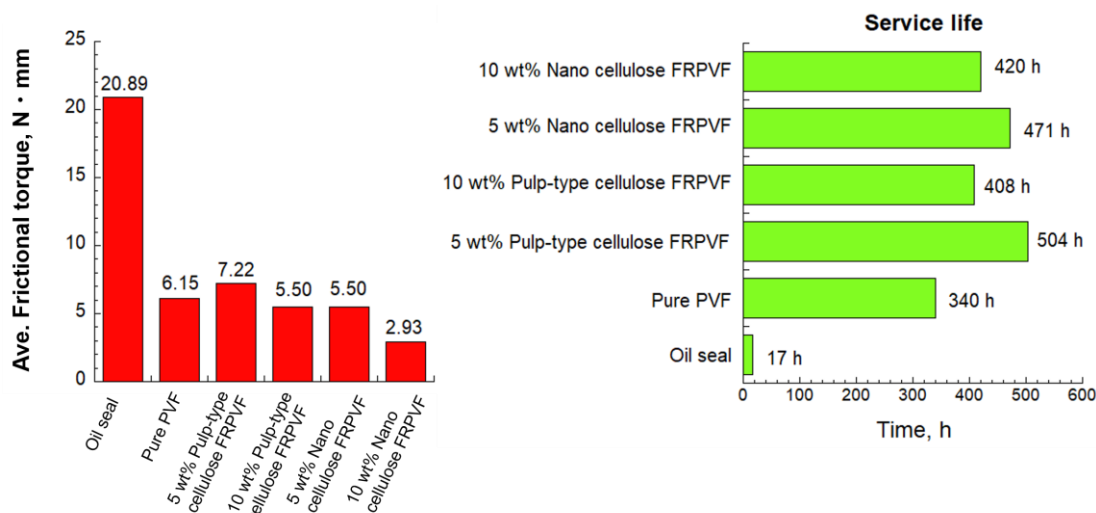


図4 各シールリップ材の平均摩擦トルクおよび耐久時間

さらに、ナノセルロース繊維を PVA 重量比 5 %配合したシールリップに関して、耐久性と耐圧性を高める目的でダブルリップ式シール（図 2(b)）を構成し、性能評価を行った。ダブルリップ式シールではシールリップを 2 列配置し、その間に非ニュートン性を示すポリエチレングリコール水溶液（PEG 水溶液）を充填することで、シールリップの潤滑性能・密封性能の向上を図った。シールリップの接触部面積は 2 倍となるが、摩擦トルクの増加をシングルリップ式の約 20%に留め（図 5）、所定の試験時間を満了した。シールリップへの負荷がより大きくなる条件においては、耐久性の面でダブルリップ式シールのほうが有利であると考えられる。

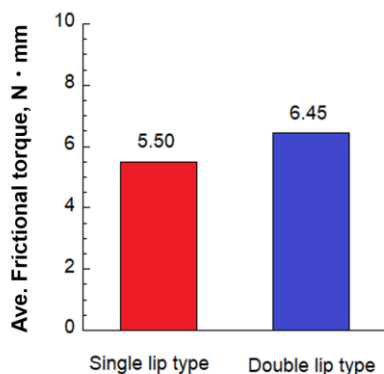


図5 シングルリップ式シールおよびダブルリップ式シールの平均摩擦トルクの比較

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

本田 拓朗 大分大学・講師

中西 義孝 熊本大学・教授

5. 研究実施時期

2017 年（平成 29 年） 9 月 1 日から 2019 年（平成 31 年） 3 月 25 日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

論文

- [1] Fiber reinforcement of hydrophilic materials for a low-torque shaft seal in water environment, Mechanical Engineering Letters, Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.4, Paper No. 17-00590, (2018), DOI: <https://doi.org/10.1299/mel.17-00590>,
Honda T, Nakashima Y, Higaki H, Nakanishi Y
- [2] Bio-inspired seal lip for application in electric vehicle coolant pumps, Mechanical Engineering Letters, Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 4, Paper No. 17-00654, (2018), DOI: <https://doi.org/10.1299/mel.17-00654>,
Nakanishi Y, Honda T, Kasamura K, Nakashima Y, Higaki H
- [3] Biomimetic Shaft Seal for Ocean Current or Tidal Power Generation, 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, IEEE, pp.199-204, (2018), DOI: 10.1109/ICRERA.2018.8566721, Nakanishi Y, Nakashima Y, Yoshioka Y, Honda T
- [4] Use of hydrated material for dynamic seal faces in shaft seal, Mechanical Engineering Letters, Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 5, Paper No. 19-00001, (2019), DOI:10.1299/mel.19-00001,
Yoshioka Y, Honda T, Kasamura K, Nakashima Y, Higaki H, Nakanishi Y

学会発表

- [1] Low-friction composites for seal lips operated in water boundary lubrication, The 18th Nordic Symposium on Tribology, 18-21 June, 2018, Uppsala, Sweden,
Honda T, Yoshioka Y, Kasamura K, Nakashima Y, Higaki H, Nakanishi Y
- [2] 高耐圧仕様防水軸封機構の開発, 日本機械学会 2018 年度年次大会, 2018 年 9 月 9-12 日, 関西大学千里山キャンパス,
本田拓朗, 吉岡祐輝, 中島雄太, 日垣秀彦, 中西義孝
- [3] 接触式シールによる防水軸機構の開発 -第 1 報-, トライボロジー会議 2018 秋 伊勢, 2018 年 11 月 7-9 日, シンフォニアテクノロジー響ホール伊勢(伊勢市観光文化会館),
本田拓朗, 中島雄太, 日垣秀彦, 中西義孝,
- [4] Honda T, Nakashima Y, Higaki H, Nakanishi Y, International Tribology Conference Sendai 2019 「Fiber reinforcement of hydrophilic seal lips for water sealing」, 17-21 September, 2019, Sendai, Japan, 発表予定

7. 内外における関連研究の状況

オイルシールやメカニカルシールなどの既存製品において、低摩擦化・長寿命化に関する研究が各シール部品メーカーの研究所を中心に精力的に取り組まれている。一方で防水仕様に特化したシール製品や研究例は少なく、従来品で十分に適応できないシール需要も近年見受けられる。本研究開発は、水潤滑下におけるシール需要に対して、既存製品群のスキマを埋める技術として貢献できるものと考えられる。

8. 今後の発展に対する希望

今後の研究課題として、繊維強化したシールリップ素材の物性値の把握手法の確立および物性値とシールリップの機能性との関係性を解明することが挙げられる。これにより、シールリップの繊維強化手法の方向性（設計指針）になると考えられる。また、繊維強化シールリップ材料の開発に関しては、複数の強化繊維（サイズ・形態）の長所を引き出すためのブレンドや繊維配向のコントロール等が考えられる。