

軸シールの高圧下試験

High pressure testing of shaft seals

JAMSTEC (正) *澤 隆雄 GSI クレオス (非) 柳澤 隆 RIST (正) 城野 亮太

GSI クレオス (非) 外山 歩 GSI クレオス (非) 石井 伸幸

Takao Sawa*, Takashi Yanagisawa**, Ryota Jyono***, Ayumu Toyama**, Nobuyuki Ishii**

*JAMSTEC, **GSI Creos Corp., ***RIST

1. 背景

摩擦・摩耗の低減はエネルギー効率を向上させ、地球環境への負荷低減に極めて重要なアプローチである。ナノ炭素 CSCNT の微量添加による極めて低い動摩擦係数を有する多機能塗膜は、その一手法として注目されている。我々は計算科学と実験科学の融合により、その多機能性の解明を試みている。加えて実際の利用環境での評価も進めている。深海用水中ロボットのアクチュエータに着目し、その軸受け部シール材料に CSCNT を添加する事でより低摩擦・低負荷とすることを目指している。これまでに高圧下で軸シールを取り付けた軸のトルクを計測する試験装置 1) を製作した。本研究では試験片を製作し、圧力下でのトルク計測を行った。

2. CSCNT 配合多機能膜

従来知られている Carbon nano tube (CNT) は、炭素原子が 6 員環 (正 6 角形状) で直径 1nm 前後の筒状に結合して伸びたものであるが、引張力に非常に強く、熱の伝導性が高いなど特異な性質を持つ。柳澤らは、Cup-stacked carbon nano tube (CSCNT, Fig. 1) の微量添加により極めて低い動摩擦係数が発現し、かつ優れた耐衝撃性および低い表面自由エネルギーを有する多機能塗膜を見出した 2)。ただし材料設計に必要な分子論に基づく理論構築は、現時点で不十分である。そこで我々は電界放射型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) による観測、原子・分子レベルの物性予測シミュレーション、力学的な摩擦・摩耗試験を通じて、理論構築を進めている。

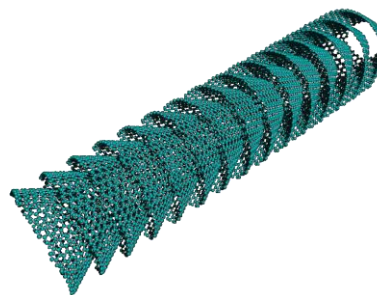


Fig. 1 Molecular structure of CSCNT.

3. 軸シール

エンジンの軸受部から潤滑油が外部に漏れないようにするため、オイルシール (Lip seal) と呼ばれる軸シールが広く用いられている。一般的にこのシールの摩耗と抵抗力は、軸の表面粗さ、軸の回転数、周囲圧力、シールが曝される物質 (空気、水、オイルなど) の影響を受け、耐久性は利用状態に大きく依存する。一般に高圧環境下では抵抗力が増大し、大気中よりも摩耗が進む。 f , P , r をそれぞれ摩擦係数、面圧力、軸の半径とすると、摩擦トルク T は

$$T = f \cdot P \cdot r \quad (1)$$

となる 3)。

多機能膜の適用候補の一つとして、我々は深海用ドローン (無人潜水機) のスラスタ (Fig. 2) に用いる軸シールを検討している。(1)式より圧力に比例してトルクは増大するため、深海の高圧環境では軸シールに大きな負荷を与えることがわかる。深海用ドローンの軸シールは水深 3000m での高圧・低温で利用され、かつ真夏の大气中における船上動作確認にも耐える必要があり、その過酷な使用環境は CSCNT の効果を明確にすると考えている。

そこで現在用いられている深海用ドローンの軸シールと形状互換を有し、かつ CSCNT を含有する試験片を製作し、従来シールと比較を試みることにした。Fig. 3 は専用金型を用いて試作した POM 製軸シールである。さらに母材を POM として CSCNT を含有する軸シールも現在製作中である。



Fig. 2 A thruster on an underwater drone.



Fig. 3 The prototype POM shaft seal.

4. 試験装置

深海用スラストの軸シールの圧力下トルク計測を行うため、海洋機構が所有する高压試験水槽内部に設置可能な専用の試験装置を開発した。Figure 4 は試験の全体の模式図である。最大で 14000m 深度相当の水圧を再現可能な高压試験水槽内に、試験装置と共にカメラとライトを設置し、電源および通信ケーブルを水槽蓋を通して外部に引き出す事で、加圧環境下でのトルクと映像を確認しつつ、装置を遠隔制御する事ができる。Figure 5 は試験装置の写真である。装置は回転軸を持つ小型の容器と、その軸を回転させるモーターで構成される。この回転軸は先述のスラスト軸と同じ直径であり、従来シールもそのまま取り付けて試験が出来る。モーターにはオリエンタルモーター製ブラシレスサーボモーター（BLM230HP）を用い、それに油を満たす処理をして深海の圧力に対応させた。このモーターにより軸の回転数を一定とした試験が可能で、その際の摩擦力の変動をモーター負荷として確認できる。

5. 試験結果例

Figure 6 は深海用スラストに用いられている現在の軸シールである、Terelleborg 社製「ターコン ロト・バリシール」（TVM200200-T40SM）の試験結果である。横軸は軸の回転数、縦軸は軸トルクである。気中および水中で計測し、水中においては水圧を 0MPa から 4MPa（水深 400m 相当）まで 1MPa 刻みで変化させた。回転数は 60rpm から 600rpm まで、60rpm 刻みで変化させた。気温および水温はおよそ 25 度でほぼ一定である。

全条件において、回転数はトルクにほとんど影響を与えなかった。(1)式に回転数が含まれない事と合致している。

気中と水中 0MPa では、両者はほぼ同じ値で、水の有無は負荷に大きな影響を与えなかった。ただし気中では回転数の上昇に伴い負荷が上昇した。摩擦熱によりシール温度が上昇し、シール硬度が低下することで摩擦力が上昇したのではと予想している。水中では冷却が進むため、その傾向が出なかったと考えられる。

加圧に従ってトルクは上昇した。回転数により不規則に変動しているが、これは高压試験水槽の圧力が変動しているためである。最大で 140MPa を維持する水槽のため、0.1MPa 単位の細かい制御は出来ない。

1MPa から 4MPa まではほぼ一定量ずつトルクの上昇が確認できる。しかし 0MPa から 1MPa の変化量は大きく、加圧の初期段階で(1)式では表現されない現象が発生している事が推測される。

6. 今後の予定

軸シールの試験装置を用いてトルクデータを問題無く取得出来たことから、今後は専用金型を用いて POM を母材とした CSCNT 含有試作軸シールを用いての試験を予定している。試験では圧力とトルクの関係性を明らかにしつつ、周囲の液体を水から油に変更しての試験も予定している。試験後には軸シールの表面を顕微鏡で確認し、材質や負荷状態による変化の有無を明らかにする。また 0MPa から 1MPa でのトルク増加が大きかった原因を、シミュレーションで解析中である。

7. 謝辞

本開発は防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けて実施しています。

文献

- 1) 澤・柳澤・城野：軸シールの高圧下試験装置，トライボロジー会議 2024 秋，(2024) 268.
- 2) 柳澤・安蔵・石井・外山：カーボンナノチューブ含有樹脂組成物 塗膜 成形体および摺動部品，特願 2022-009474，2022 年 1 月 25 日.
- 3) 沼田：オイルシールの低摩擦化技術動向，トライボロジスト，65，6，(2020) 349

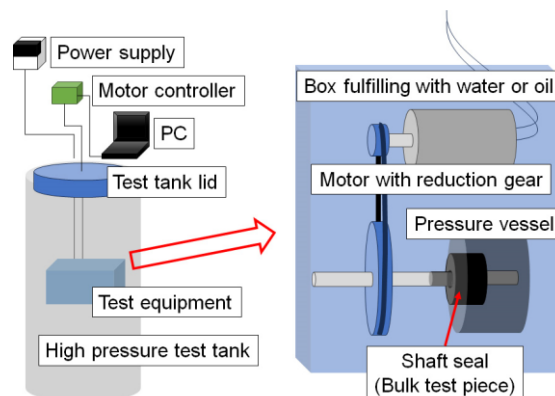


Fig. 4 The schematic diagram of high pressure testing of shaft seal.

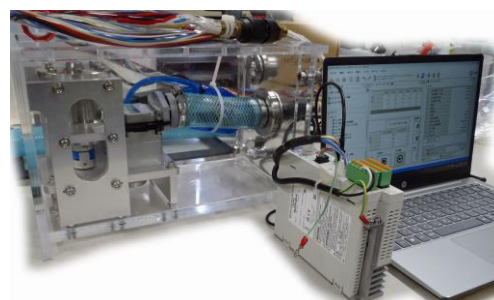


Fig. 5 The test equipment for shaft seals.

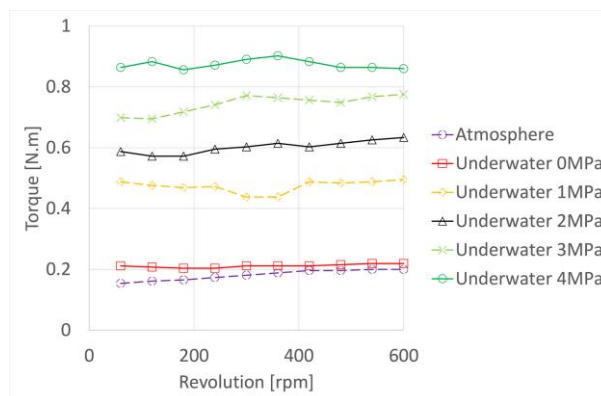


Fig. 6 Revolution vs torque of the shaft with seal under high pressure.