

## 軸シールの高圧下試験装置

### High pressure test equipment for shaft seals

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

Takao Sawa\*, Takashi Yanagisawa\*\*, Ryota Jyono\*\*\*

\*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ることから、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、そのアプローチの一手法として注目されている。我々の研究チームは、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。同時に、実環境における特性評価も重要であり、深海などの極限環境においてはその多機能性がより明確になると予想している。

#### 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<sup>1)</sup>。これはナノ炭素の添加により母材樹脂層の機械的強度が増したこと、成膜時および摩擦実験時に残留する応力が緩和されたことなどが、塗膜全体に良好な効果を及ぼし多機能性が発現したと考えられる。ただし、材料設計に必要な分子論に基づく理論構築が不十分であり、実用には至っていない。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・摩耗試験を通じての理論構築を進めている。

#### 3. 軸シール

力学的な摩擦・摩耗試験の一つとして、高圧環境下における回転軸シールの試験を実施予定である。一般的な回転軸にはオイルシールがしばしば用いられる。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。

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）のスラスターに用いられるオイルシールを考えている。このシールは深度 3000m の高圧・低温の水中だけでなく、真夏の大気中での動作確認にも耐える必要があり、使用環境として過酷で、性能差が明確に表れると考えた。そこで実在する深海用ドローンのシールと同形状で互換性のある CSCNT 含有（もしくは塗料を塗布した）シールを試作し、既存のシールとの比較試験を実施、最終的にドローンに搭載して深海で使用して実用上の性能や課題を明らかとする計画である。

Figure 2 は深海用ドローン「AUV-NEXT」の主推進スラスターを後方から撮影したものである。Figure 3 はそのスラスターの横断面図である。図の左側がモーター、右側がプロペラである。Figure 3 にある二つ矢印の先端部分のそれぞれに、Terelleborg 社製「ターコン ロト・バリシール」(TVM200200-T40SM) が使用されている。軸の直径は 20mm、材質は PTFE を母材としてカーボンファイバを充填したものである。

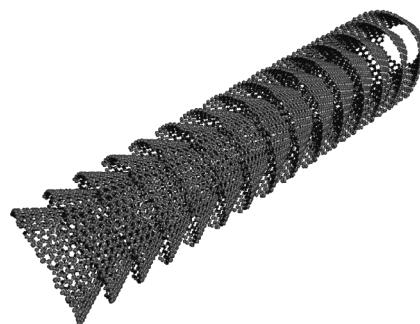


Fig. 1 Molecular structure of CSCNT.



Fig. 2 A thruster on underwater drone.

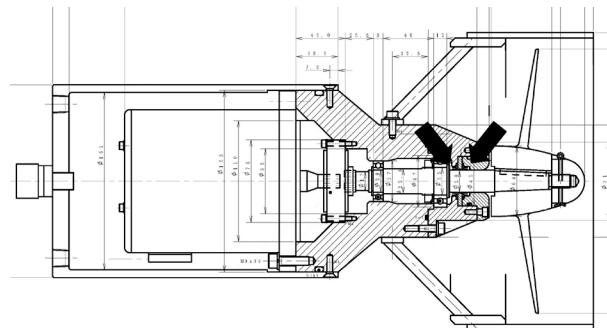


Fig. 3 Sectional view of the thruster.

二つ用いているのは、外圧と内圧の双方に対応するためである。深海用スラスターは高い外圧に耐える必要があるため、モーターは油で満たされた容器内に格納される。これにより周囲の水圧（外圧）と油圧（内圧）が一致し、モーターが保護される。ただし圧力バランスが崩れる場合もあり、その場合は内圧が上がる場合もある。このシールは方向性があるため、二つを背中合わせに用いて解決している。

#### 4. 試験装置

深海用スラスターのオイルシールを試験するため、専用の試験装置を開発することとした。Figure 4 は試験装置の模式図である。試験は海洋研究開発機構で所有する高圧試験水槽を用い、装置を深海同等の数百気圧の水圧環境に設置して実施する。水槽内に設置した装置から水槽蓋を通してケーブルを外に伸ばし、装置を遠隔制御する。水槽内にはカメラとライトを設置し、試験中の様子はモニタで確認できる。

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。回転軸は先述のスラスターと同直径で、実際のシールを用いる事ができる。また回転軸に多機能膜をコーティングしての試験も可能である。深海専用のモーターは種類が限られ、試験に適切なものが無かつたことから、装置には陸上用の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対応とすることとした。ブラシレスモーターは圧力耐性が高く、多くの深海用モーターはブラシレスである。サーボモータであるため軸シールを最大で 600rpm 程度の回転数を維持可能であり、また摩擦力が変動した場合にモーター負荷の変動としてドライバー側で確認できる。回転軸は空の耐圧容器から突き出す構造で、強い外圧をかける事が可能である。

Figure 5 は試験装置の CAD モデルである。装置は 400 x 240 x 210mm のアクリル容器に収められ、容器内に水もしくは油を満たすことができる。すなわち容器内を空にすれば気中試験、水または油を入れれば水中または油中の試験となる。容器右側のホースは圧力補償用のリザーバで、これにより容器ごと高圧試験水槽に入れて高圧下で試験ができる。

Figure 6 は適用候補のスラスターを水圧下で回転試験した際の電流変化である。大気中と比較して、水深 6000m 相当の水圧下ではモーター電流の増加が確認されている。この電流増加の原因を明確にしつつ、CSCNT を配合した多機能膜によって電流を抑制、すなわち負荷を低減させることが本研究の目的の一つである。

#### 5. 今後の予定

軸シールの高圧下試験装置は現在組み立て中で、組み立て完了後に準備が容易な気中における試験から実施する予定である。詳細については発表にて報告予定であるが、低速（60rpm）から高速（600rpm）まで変化させた際の負荷状態を確認後、例えば 100pm 程度の回転数で 5 分程度の空回りをさせ、その後に軸と軸シールの両方の表面状態を顕微鏡で確認する事を考えている。おそらく水中および油中の大気圧試験は気中試験よりも劣化が少ないことが考えられるが、逆に高圧下試験では大きく摩耗が進む可能性がある。周囲環境の変化が摩擦と摩耗に与える影響を確認し、さらに CSCNT の有無によって変化を確認する事ができれば、理論構築が大きく前進すると考えている。

#### 6. 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

- 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.

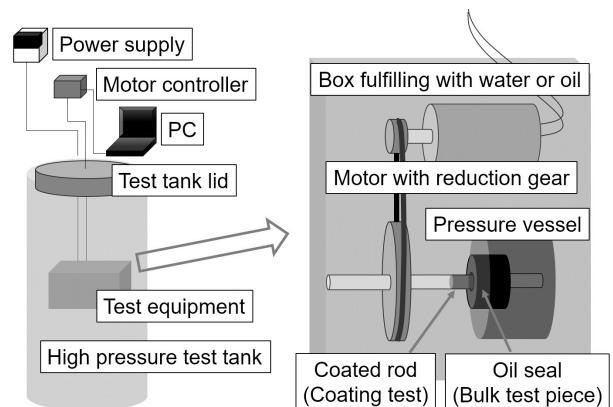


Fig. 4 The test equipment for shaft seals.

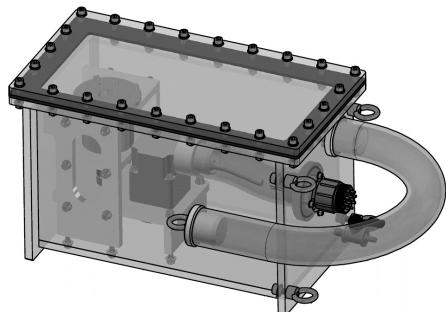


Fig. 5 CAD model of the test equipment.

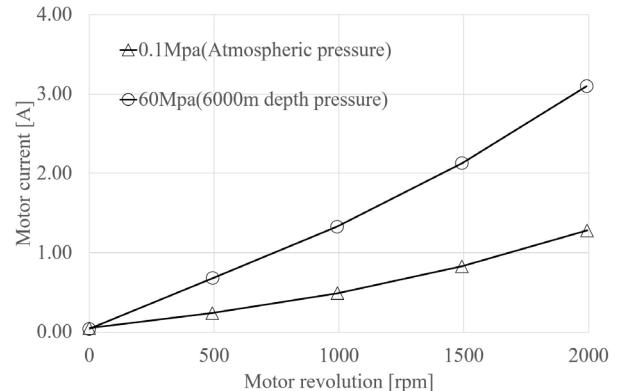


Fig. 6 Motor revolution vs current under pressure.