

1. 序論

水素インフラ技術には外部からの熱流入を極力防ぐため、輸送システム全体に真空断熱を用いられることが多い。すなわち液体水素の「極低温」及び「真空」という2つの過酷条件下で利用可能なポンプが必要となる。そこで本研究では、これら2つの過酷条件に対応した軸受の知見を得るため、軸受の真空中及び低温状態での挙動を計測できる試験機の製作を行った。さらに、真空中での極低温流体輸送に最適とされる 1)2)3)DLC (Diamond-like-Carbon) コーティングされた軸受の球を比較対象とし、真空中での軸受の温度計測と真空中及び低温状態での軸受損傷の確認を行った。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 製作した実験装置 製作した実験装置の概要を図1に示す。軸受試験機は「真空」に特化したアクリル真空デシケータ内に設置され、磁性流体シールを介して装置外部に設置されたモータからの駆動を試験機に伝える構造となっている。また、装置内への液体窒素の流入と流出は真空フィードスルーを介して行う。

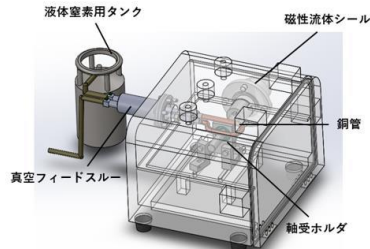


図1 実験装置の概略図

2.2 実験方法 本研究では、①低真空状態における軸受の温度上昇の計測、②低真空中及び低温状態での軸受損傷の確認の2点に着目して実験を行った。

装置上部のアダプタを真空ポンプ(E2M28:エドワード社製)と接続して1.1[kPa]まで減圧し、装置内を低真空状態にした。尚、装置内圧力の確認は圧力センサ(AP-C40:キーエンス製)のモニタに表示されるアナログ値を目視にて行った。総回転数[rev]は回転速度[rps]×時間[sec]で表したものとす。また、1[sec]毎に温度変化の記録を取った。記録する上昇温度は、計測された温度 T から時間 t=0 の時の温度 T0 を引いたものである。実験中の回転数はモータ及び、光電ピックアップ(LG-930:小野測器製)とF/V変換器(FV-1300:小野測器製)の組合せによるパルス計測の2つを用いて制御を行った。温度の計測は、測温抵抗体(RESIOPAK:岡崎製作所製)を用いて行った。また、温度センサは装置内の軸受の回転部、軸受と同じ高さで回転の影響を直接的に受けけない位置の計2か所に設置した。装置内の2つの温度センサを比較することで実験中の温度上昇が外気によるものではないことや発生した熱の周囲への影響を示している。

これらの真空状態のみでの実験方法に加え、低真空状態で軸受を液体窒素(100[L])により非DLC軸受は-10[°C]程度、DLCコーティング軸受は-20[°C]程度まで冷却した状態において軸を2500[rpm]で3[h]回転させ、実験後の軸受損傷の様子を確認した。それぞれの軸受は、段階的な損傷の様子を確認するために低真空状態のみでの実験で使用したものを再度用いた。また、軸受損傷の確認は電子顕微鏡(VE-8800:キーエンス製)画像を用いて行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 低真空及び大気開放時の温度上昇 図2は、非DLCコーティング軸受の大気開放及び低真空状態における軸受温度上昇とDLCコーティング軸受の低真空状態における軸受温度上昇の計3つの温度上昇を比較したものである。図3は、非DLCコーティング軸受の大気開放及び低真空状態における環境温度上昇とDLCコーティング軸受の低真空状態における環境温度上昇の計3つの温度上昇を比較したものである。尚、非DLCコーティング軸受(SS6000-T:NSK製)はスチール製のものである。また、DLCコーティング軸受は両面蒸着のものを使用した。

図2及び図3より、総回転数が 4.0×10^5 [rev.]における軸受温度上昇と環境温度上昇の差を比較すると、以下に示す通りになった。

・(非DLC・低真空) : 12[K](軸受)-11[K](環境)=1.0[K]

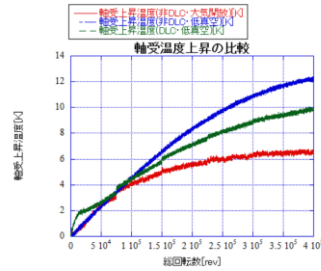


図2 軸受温度上昇の比較

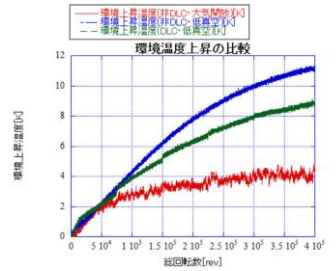


図3 環境温度上昇の比較

・(DLC・低真空) : 10[K](軸受)-9[K](環境)=1.0[K]
 ・(非DLC・大気開放) : 6.3[K](軸受)-4[K](環境)=2.3[K]

これらの結果から、大気開放状態では摩擦により発生する軸受からの熱は熱伝達により大気中に拡散していると考えられる。対して、低真空状態では熱伝達が起こりにくいため、発生した熱は軸受周辺にとどまりやすくなっていると考えられる。更に低真空状態では、DLCコーティング軸受は非DLCコーティング軸受よりも温度上昇が小さくなっているため、低摩擦であるといえる。

3.2 低真空及び低温状態での軸受損傷

図4は非DLCコーティング軸受球の表面を撮影した電子顕微鏡画像、図5はDLCコーティングされた軸受球の表面を撮影した電子顕微鏡画像である。図4から、使用後の軸受球の表面には損傷が確認できる。更に、低真空で使用後の軸受球の表面には大気開放で使用した場合よりも大きな傷が確認された。低温状態も加わると、損傷の範囲はより広がった。従って、低真空及び低温状態では摩擦による軸受の損傷が大きくなるといえる。対して図5では、使用後の軸受球の表面から損傷は見られなかった。低真空及び低温状態で使用後の軸受球表面ではDLCコーティングが粗くなっているように見えるが、目立った損傷は確認されなかった。従って、低真空及び低温状態においてDLCコーティングは耐摩耗性に優れているといえる。

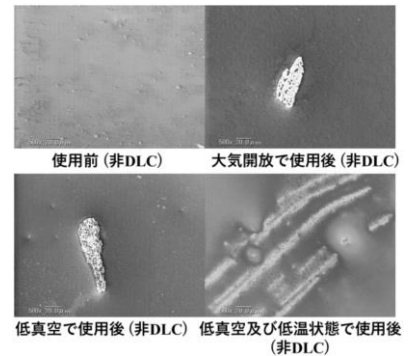


図4 非DLC軸受球表面の損傷比較

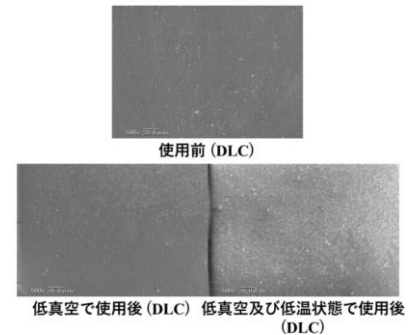


図5 DLC軸受球表面の損傷比較

4. 結論

「真空」と「低温」の2つの過酷条件に着目した軸受の挙動を測定したことについての結論を以下に示す。

- ① 低真空状態では、摩擦により軸受から発生した熱は軸受周辺に停滞する。
- ② 低真空状態においてDLCコーティングされた軸受は、そうでないものに比べて低摩擦であるといえる。
- ③ 低真空及び低温状態では、軸受の損傷は激しくなる。
- ④ DLCコーティングされた軸受は低真空及び低温状態において耐摩耗性に優れているといえる。

参考文献

- 1)伊藤弘高「スパッタリング法によるDLC薄膜の作製」, J.Plasma Fusion Res. Vol.92, No.6 (2016) 454-459
- 2)鈴木峰男「真空中における潤滑技術の現状と課題」, J.Vac.Soc.Jpn.(真空) Vol.51, No.7, 2008
- 3)林田一徳, 竹林博明「真空用転がり軸受について」, J.Vac.Soc.Jpn.(真空) Vol.42, No.9, 1999