

PTFE 保持器を用いた液体水素用超高速軸受の性能評価

Performance evaluation of ultra-high speed bearings with PTFE cages for liquid hydrogen

宇宙航空研究開発機構（正）*檜川 卓也 （正）高田 仁志 （正）上杉 宜司

中興化成工業株式会社 （非）増田 智洋 （非）山田 智詞

Takuya Mitsukawa*, Hitoshi Takada*, Takashi Uesugi*, Chihiro Masuda**, Tomonori Yamada**

* Japan Aerospace Exploration Agency, ** Chukoh Chemical Industries, Ltd.

1. 研究背景

回転機械においては軸受保持器の異常な摩耗や破壊が機械の機能を失うことがあり、特にロケットエンジンのターボポンプではロケットの致命的な事故につながる。そのため、日本では多くの実績のある PTFE を含浸したガラス織布を円筒状に積層した複合材が保持器に用いられている。この保持器は液体水素環境といった低温における機械的強度や耐摩耗性に優れているが、露出したガラス繊維が移着を阻害するため、軸受の摩耗や発熱が大きくなる。そこでターボポンプ用軸受では、フッ酸処理により保持器表面に露出しているガラス繊維を溶解、除去することで、潤滑性を向上させている¹⁾。しかし、このような表面処理を含む複雑な製造工程のため、保持器は高コスト、長納期となり、ターボポンプの研究および開発を進める上での課題となっている。さらに、超高速回転時に保持器の受ける摩擦力、固体潤滑による摩擦係数や耐摩耗性といった潤滑性能は、メカニズムが複雑なため予測が難しく、試験を主体とした実証による開発が行われている。

そこで本研究では、液化水素環境下で高速回転する保持器に要求される機能を明確にし、短納期かつ低コストな保持器を開発することを目的とする。本報では、ガラス織布保持器で使用している PTFE と同等の素材で保持器を製作し、液化水素中で試験室圧および回転数を変化させた試験を行ったので、結果を報告する。

2. 供試体及び試験装置

本研究で用いた軸受寸法を Fig.1 に示す。試験に使用した軸受は、セラミック（Si3N4）製の転動体、SUS440C 製の内外輪からなり、内輪内径 25mm、外輪外径 52mm の外輪片案内の自己潤滑アンギュラ玉軸受である。本試験では、供試体となる PTFE 保持器を用いた軸受（PTFE 軸受）と、PTFE を含浸させたガラス織布で作られた保持器を用いた軸受（ガラス織布軸受）を 1 個ずつ用いた。PTFE 保持器は、ガラス織布の保持器に用いられている PTFE と同等の素材を用いている。

自己潤滑軸受は、セラミック転動体に PTFE 潤滑膜が付着することで軸受の発熱、摩耗を防ぐことができる。また、外輪と接触する保持器の案内面が片側になるため、平円ポケット形状を利用して、高速回転する保持器の振動発生を抑え、発熱量を減少させている²⁾。また、液体水素による冷却に伴う熱収縮と、回転時の遠心力による膨張を考慮し、回転中に保持器案内すき間が十分小さくなるように設計されている。

軸受試験機を Fig.2 に示す。本試験機の主軸は 2 つの軸受により支持されており、主軸端に連結したタービンにコンプレッサーからの圧縮空気を圧送ことで回転する。また、軸受間の設置されたベローズにヘリウムガス加圧することで、2 つの軸受に等しいスラスト荷重をかけることができる。軸受の冷却は、軸受間に液体水素を供給し軸受を貫通冷却している。液化水素がタービン側に漏れないように、タービンと軸受の間にフローティングリングシールとヘリウムパージシールを取り付けている。

計測項目は、試験機内外を流れる流体（LH2, GH2, He）の温度、圧力及び流量、軸受外輪の温度、軸受外輪をケーシングに組み付けるカートリッジの径方向加速度、回転数（変位計と FV コンバータ）等、である。

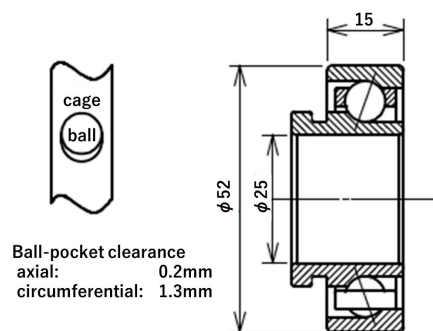


Fig. 1 Test bearing dimensions

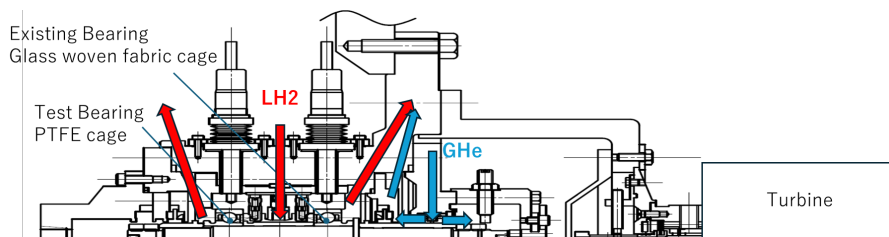


Fig.2 Schematic of bearing tester

3. 試験条件

Table 1 に試験条件を示す。タービン入口圧力を調整することで回転数は 80,000rpm (DN 値 200 万) を目標とした。軸受を冷却する液体水素の圧力は 1.0 ~ 1.2MPaG, 流量は軸受 1 個当たり 0.3L/s 以上, 軸受スラスト荷重は約 1kN とした。

Table 1 Bearing test condition

Parameter	Test condition
Rotation Speed	~ 80,000 rpm
Coolant Pressure	1.0~1.2 MPaG
Coolant mass flow rate	0.7 ~ 0.9 L/s
Thrust load	1kN

4. 試験結果及び考察

試験結果を Fig.3 に示す。回転数は、約 40,000rpm (DN 値 100 万), 60,000rpm (DN 値 150 万) と段階的に上昇させた。40,000rpm 静定中に、PTFE 軸受の出口温度が変動した。その後、40,000rpm から 60,000rpm への回転数増加に伴い、軸受外輪温度の上昇が見られた。特に、PTFE 軸受の温度上昇が顕著であった。

60,000rpm 到達付近から PTFE 軸受の振動が 6G 程度まで急上昇し、1 分程度で下がった。一方、ガラス織布軸受には大きな振動は見られなかった。約 200 秒の 60,000rpm 静定時には、PTFE 軸受出口の液化水素温度に 0.5K 程度の微上昇が見られた。静定後に 80,000rpm を目標に回転数を上げた際、PTFE 軸受の外輪温度が回転数の上昇と共に急上昇した。回転数は、78,500rpm 以上に上昇できない状況となり、また PTFE 軸受の外輪温度が上がり続けたため、回転数を下げて試験終了とした。

試験終了後に試験機を分解したところ、PTFE 保持器は軸方向に傾き、PTFE 保持器の削れた破片が試験機内壁面に散乱していた。試験前後の PTFE 保持器を Fig. 4 に示す。保持器内面は軸受の内輪外径面に、保持器外面は軸受の外輪内径面に接触して摩擦しており、周方向逆位相位置で周方向半分程度削れていた。

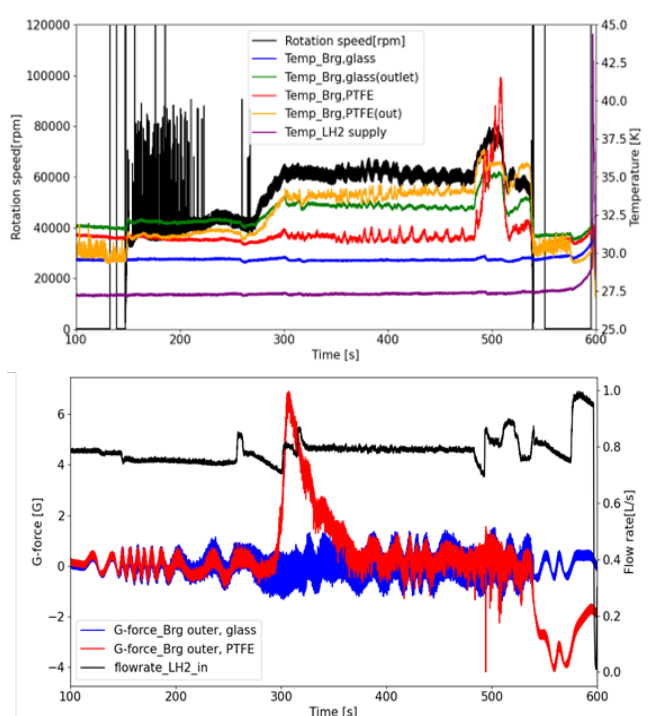
今回の試験では、PTFE 保持器が外内輪に接触し、かつ、摩擦量がガラス織布に比べ多かったため、軸受温度が上昇してしまったと考えられる。一方、Fig.5 に内外輪の母線形状を示す。内外輪ともに、大きな摩擦は発生していないことが分かる。これは、PTFE の移着が進み、良好に潤滑されていたと考えられる。

5. 結論

本研究では、従来の PTFE を含浸したガラス織布に代わる軸受保持器の材質と同等の PTFE を用いて保持器を製作し、回転試験を行った。その結果、保持器は軸受内外輪と接触し、保持器の案内面は、ガラス織布に比べて広い範囲で摩擦したが、母線形状の検査結果から PTFE による潤滑は良好であったと考えられる。保持器と内外輪との接触を抑える機構や接触した際の摩擦を抑える改良が必要であることが明らかとなった。

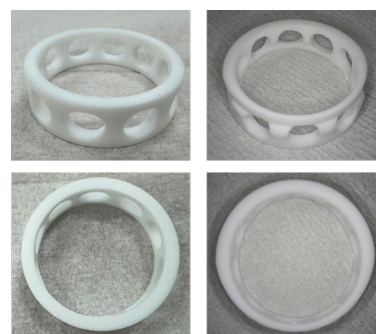
文献

- 1) 野坂：ロケットターボポンプ用服造材の潤滑特性，日本複合材料学会誌，20，6（1994），215-223
- 2) 野坂，菊池，尾池：ロケットターボポンプの極低温・自己潤滑高速玉軸受，ターボ機械，24，3（1996），150-156



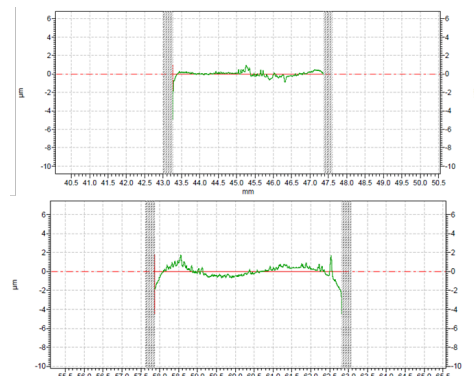
Top: Temperature around bearing, Bottom: G-force and LH2 flow rate

Fig. 3 Test sequence



(a) Before the test (b) After the test

Fig. 4 Test bearing cage



Top: Outer race, Bottom: Inner race

Fig. 5 Bearing surface Profile