

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：31308

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420128

研究課題名(和文) 極低温ハイブリッド・ジャーナル軸受の流動特性に関する研究

研究課題名(英文) Study on Flow Characteristics of Cryogenic Hybrid Journal Bearings

研究代表者

尾池 守(Oike, Mamoru)

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：70292282

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：極低温ハイブリッド・ジャーナル軸受(HJB)を模擬した透明フローティング・リングを用い、液体窒素を作動流体とした可視化流動試験を行い、HJBの流動特性を把握した。流動特性の回転数依存性はジャーナル回転方向に対するリセス前縁後退角の影響を強く受けることが確認された。また、マイナスの前縁後退角を有するリセスでは昇圧効果があるものの、高速回転状態では圧力変動を引き起こす可能性が確認された。さらに、実験結果と数値解析結果を比較することで、リセス形状の影響がキャビテーションの発生状態には顕著に現れるが、流量係数には明確に表れないことを、定量的に把握することができた。

研究成果の概要(英文)：The flow visualization experiment in the clearance between the clear floating-ring (CFR) and the rotating journal was carried out using liquid nitrogen as the working fluid in order to clarify effect of the recess geometry on the flow characteristics of the cryogenic hybrid journal bearings (HJB).

The dependence of the flow characteristics on the rotational speed was confirmed to be affected by the sweepback angle of the recess leading edge. The results demonstrated that the pumping effect of the recess with a negative sweepback angle is stronger than that of the positive angle. However, the strong pumping effect may produce a large pressure fluctuation in the circumferential direction, which seems to excite journal vibration for the HJB. Furthermore, comparison between the experiment and the calculation indicates that the recess geometry strongly affects the cavitation area ratio, and weakly influences the flow coefficient because of the choked flow at the clearance outlet.

研究分野：流体力学とトライボロジーの融合分野

キーワード：流体力学 航空宇宙工学 トライボロジー 混相流 極低温流体

1. 研究開始当初の背景

ロケット用極低温ターボポンプの寿命を制限する要素の一つは、耐久性機能部品である軸受の摩耗ならびに損傷である。現在実用化されているロケット用ターボポンプのほとんどは、液体水素や液体酸素中で高速回転する軸系を、玉や円筒ころ等の転動体を介して支持するころがり軸受を用いている。ころがり接触では、有限の接触面内に差動すべりと Hertz 応力が働くため、接触面での摩耗を回避することが困難である。また、極低温流体中での転動体の円滑な回転を維持する PTFE 固体潤滑膜が、有効に作用する SV 値 (Hertz 応力  $S$  と差動すべり速度  $V$  の積) には限界があり、焼付き等の致命的な損傷を回避するためには、ターボポンプの回転数を制限せざるを得ない。このようなころがり軸受の問題点を回避し、極低温ターボポンプの高速化と長寿命化を図るための一方策として、ポンプ作動流体の静圧と動圧を利用した流体潤滑軸受の適用が検討されている。これまで、9 個のリセスを有するオリフィス自生絞り式ハイブリッド・ジャーナル軸受を試作し、液体酸素の模擬液である液体窒素を作動流体として、一対の供試軸受で支持された回転体の 70,000 rpm までの高速回転試験を行った。その結果、作動流体の流動状態に係わる以下の特性が明らかになった。( )

- (1) 作動流体の静圧を有効利用するために設けたリセス内でキャピテーションの発生 (気液二相流化) が推定される事態に至ると、回転体に強度の自励振動が発生する。
- (2) 無回転の静的状態や低速回転状態において、上記キャピテーションの発生を抑制するためにはオリフィス自生絞りの形状を適正化する必要がある。
- (3) 軸受すきま (ランド部) の流量係数は静的状態においても 0.5 程度であり、回転数に関わらずすきま出口では気液二相化状態で流出するものと推定される。
- (4) 軸受円周方向に非対称なりセス形状ではジャーナル回転方向の影響を受け、特に高速回転状態では、軸振動の回転数依存性に有意な差が認められる。

これらの事項は作動流体の流動状態に起因する特性であり、特にキャピテーションの問題は極低温液体を作動流体とする限り、避けて通ることのできない課題である。また、(4)の事項は高速回転時の動的安定性に直結する特性であり、広範囲の回転領域で安定に作動する極低温ハイブリッド・ジャーナル軸受を開発するためには、リセスおよびランド部における極低温流体の流動状態を、気液相変化を含めて詳細に把握する必要がある。

2. 研究の目的

ロケット用極低温推進剤ターボポンプの

長寿命化を図るため、広範囲の稼働領域で安定に作動する極低温ハイブリッド・ジャーナル軸受の開発を目指す。液体窒素を作動流体としてリセス形状を主パラメータとしたポリカーボネイト製極低温ハイブリッド・ジャーナル軸受の可視化試験を行い、リセスおよびランド部における極低温流体の流動状態を詳細に把握し、流動特性の同定に資するデータを蓄積する。それと並行して、軸受すきま内の数値解析を行い、実験結果と比較検討することで計算コードの高度化を進め、リセスおよびランド部における極低温流体の流動特性を予測する手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

ハイブリッド・ジャーナル軸受(HJB)を正確に模擬した極低温流体の可視化実験を行うことは困難であるため、シール径  $d=40$  mm、長さ 30 mm のフローティングリングシールの中間に供試 HJB とほぼ同一形状のリセスを、円周上で 4 個有するポリカーボネイト製透明リング(CFR)を試作し、液体窒素(LN<sub>2</sub>)での可視化流動試験を行った。直径 1 mm のオリフィスを介してリング上流部から LN<sub>2</sub> を各リセスに供給することで、リセスからの湧き出し流とジャーナルの回転による旋回流との干渉状態を模擬している。試作した供試 CFR (Type D) の主要諸元を表 1 に、リセス形状の概要を図 1 に示す。また表 2 に、比較のために用いた 7 種類の供試 CFR の LN<sub>2</sub> 温度での静止時半径すきま ( $C_0$ )、リセス形状及びリセス前縁後退角 ( $\theta_s$ ) の値を示した。なお、その他の主要諸元は Type D と同じである。Type FR は通常のフローティングリングシールで、すきま中間に LN<sub>2</sub> 供給用のオリフィス絞り式リセスを持たない。

表 1 供試 CFR (Type D) の主要諸元

CFR リング厚さ, $Ad$ (mm)	25
CFR 内径, $d$ (mm)	40
CFR 軸方向長さ, $L$ (mm)	30
静止時半径すきま, $C_0$ (mm)	0.041
オリフィス径, $do$ (mm)	1.0
リセス形状	YLM
平均リセス前縁後退角, $\theta_s$ (deg)	45
リセス数, $N_r$	4
軸方向リセス長さ, $L_r$ (mm)	10
周方向リセス長さ, $L_c$ (mm)	10
最大リセス深さ, $h$ (mm)	1.0
リセス面積比, $Ar$	0.106

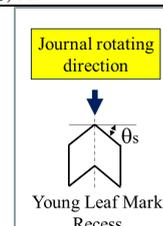


図 1 若葉マーク(YLM)リセス (Type D)

表2 供試 CFR のリセス形状

CFR	$C_o$ (mm)	リセス形状	$\theta_s$ (deg)
Type B	0.050	正方形	0
Type C	0.044	YLM	-45
Type D	0.041	YLM	45
Type E	0.044	平菱形	45
Type F	0.044	平円	45
Type G	0.042	円弧 YLM	-45
Type FR	0.047	None	-

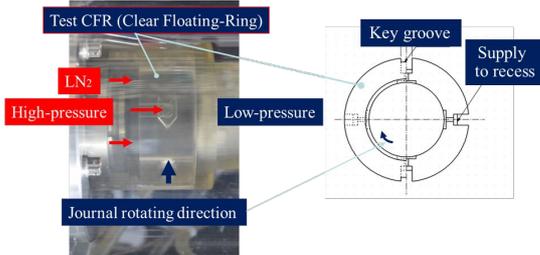


図2 可視化流動試験部概要 (Type D)

表3 主要試験条件

LN <sub>2</sub> 供給圧力, $P_l$ (MPa)	0.7 ~ 1.7
CFR 差圧, $\Delta P_{l2}$ (MPa)	0.6 ~ 1.6
LN <sub>2</sub> 供給温度, $T_l$ (K)	85~105
LN <sub>2</sub> 供給流量, $Q$ (L/s)	0.050~0.150
定常回転数, $N$ (rpm)	20,000 ~ 45,000

一対の自己潤滑球軸受で支持された軸系の一端に、図2に示す可視化流動試験部を設置した。図2はType Dを装着した場合で、CFRの相手方となるジャーナル表面はCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>溶射被膜でコーティングされており、画面上では黒色に見える。CFRの上流部からすきま内に流入したLN<sub>2</sub>は、ジャーナルの回転により旋回しながら下流へと流出する。一方、上流側からCFR外周に設けられたバイパス流路を通過したLN<sub>2</sub>はオリフィスを介してリセスへと供給される。CFRすきま内の旋回流とリセスからの湧き出し流の干渉状態を、半径方向に設置した3台のVTRと20,000 fpsの高速VTRで画像収録する。回転軸の他端は小型動力計に連結されており、50,000 rpm程度までの回転試験を行うことができる。表3に主要試験条件を示す。

CFRすきま内の流動状態を定量化するため、流量係数( $C_f$ )を測定値から求めた。 $C_f$ は液相供給流量から求めたCFRすきま出口における流速を、CFR差圧( $\Delta P_{l2}$ )に基づく理論飽和液流速で除した値である。また、CFRすきま内のキャビテーション発生状況を評価するために、キャビテーション面積比( $A_c$ )を求めた。 $A_c$ はCFR内面上で観察されたキャビテーションクラウド領域の面積比率で、VTRの静止画像から求めた。さらに、すきまに流入するLN<sub>2</sub>のキャビテーション数( $\sigma_{ps}$ )は、CFRの圧力差とジャーナル周速による動圧の効果を考慮して算出した。

#### 4. 研究成果

(1) 一対の供試極低温ハイブリッド・ジャーナル軸受(HJB)で支持された回転体の高速回転試験において、回転体の軸振動振幅とリセス前縁後退角との間には強い相関性の存在が確認された。図3と図4に示した3種類の供試HJBに対して、液体窒素(LN<sub>2</sub>)を作動流体とする高速回転試験を行った。その結果図5に示したように、各タイプのHJBで支持された回転体の軸振動は、50,000 rpm以上の高速回転領域で有意な差が生じることが判明した。60,000 rpm以上の回転領域におけ



図3 HJB (Type Ba)

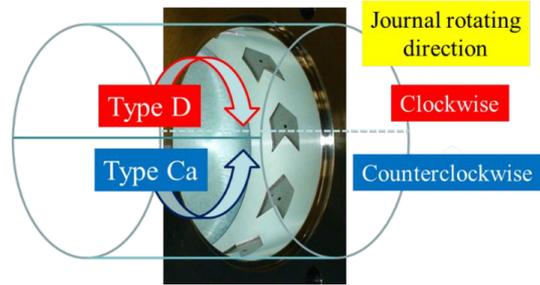


図4 HJB (Type C と Type D)

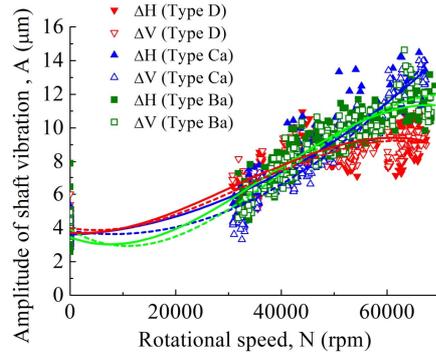


図5 回転軸心の水平方向、鉛直方向振幅

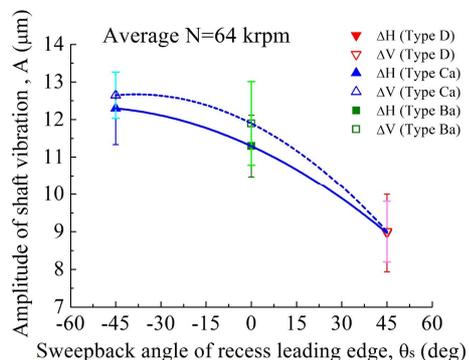


図6 軸振幅とリセス前縁後退角の関係

る水平方向振幅( $\Delta H$ )と鉛直方向振幅( $\Delta V$ )の平均値を求め、リセス前縁後退角( $\theta_s$ )に対してプロットした結果が図6である。 $\theta_s$ の増加に伴って軸振幅は一樣に減少しており、両者の間に強い相関性のあることが実験的に確認できた。さらに、これら3種類の極低温HJBでは、Type Dが最も高速安定性に優れていることが判明した。

(2) 透明フローティングリング(CFR)を用いた高速回転可視化流動試験結果と数値解析結果を比較することで、CFR すきま内における極低温流体の定常的な流動特性に及ぼすリセス形状の影響を明らかにした。図7に示したように、回転数の増加に伴ってキャビテーション数( $\sigma_{ps}$ )が減少するとキャビテーション面積比( $Ac$ )が増加し、流量係数

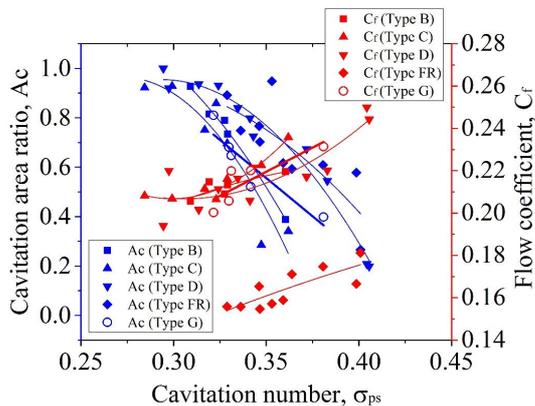


図7 定常特性に及ぼすリセス形状の効果

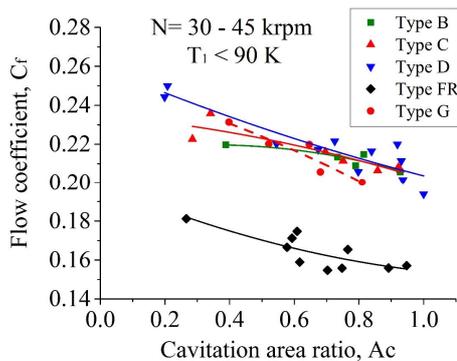


図8 キャビテーション面積比と流量係数

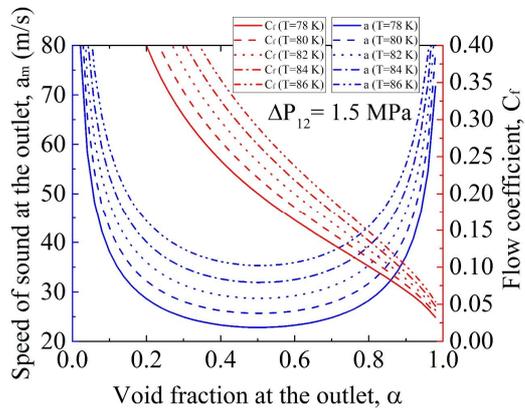


図9 出口音速、流量係数と出口ボイド率

( $Cr$ )が減少することが実験的に確認できた。また可視化画像より、回転数に関わらず、全てのCFRのすきま出口では、液体窒素(LN<sub>2</sub>)が気液二相流状態で流出することが確認された。したがって、すきま出口は気液二相流の音速に制約されるため、 $Cr$ 値はリセスの有無に強く依存するが、リセス形状の影響は余り明確ではないものと理解できる。これに対して、 $Ac$ 値はリセス形状の影響が明確であり、プラスの $\theta_s$ では高い $\sigma_{ps}$ からすきま内にキャビテーションクラウドが発生し、その進展速度も速いが、マイナスの $\theta_s$ では初生も進展もより低い $\sigma_{ps}$ にスライドしている。図8に $Ac$ と $Cr$ の関係を示した。CFRのタイプに関わらず、 $Ac$ の増加に伴って $Cr$ が一樣に減少することが分かる。この関係性が、CFRのすきま出口でのボイド率の増加が誘発する二相流の音速と密度の変化に起因することを検証するために、数値計算を行った。その結果の一例を図9に示す。LN<sub>2</sub>の出口飽和温度が一定ならば、ボイド率が増加すると $Cr$ 値が一樣に減少することが分かる。また図7図8を比較すると、 $Ac$ の値が同一ならば、リセスの存在が出口ボイド率を0.1程度減少させるものと理解できる。

(3) 高速回転可視化流動試験中にLN<sub>2</sub>供給温度( $T_1$ )を急激に増加させる過渡状態での試験を行い、過渡的な流動特性に及ぼすリセス形状の影響を明らかにした。 $T_1$ の上昇( $\Delta T_1$ )で誘起された $Ac$ の増加量( $\Delta Ac$ )と $Cr$ の減少量( $\Delta Cr$ )を $Cr$ の平均値で除した値を、 $\theta_s$ に対してプロットしたのが図10である。 $\theta_s$ と $\Delta Ac$ 及び $\Delta Cr$ の間には強い相関性が認められる。 $\theta_s = -45^\circ$ のType CとGでは、温度上昇が誘発した $\Delta Ac$ と $\Delta Cr$ が共に小さく、リセスからの湧き出し流とジャーナルの回転による旋回流との干渉が誘発するリセス前縁の昇圧効果が強いものと理解できる。しかしながら、リセス前縁の強い昇圧効果は、高速回転時のHJBすきま内で円周方向の大きな圧力変動を引き起こす可能性がある。したがって、図6と図10を比較すると、この圧力変動が回転体を励起した結果、HJBのType Cでは軸振動が大きくなったものと推察される。

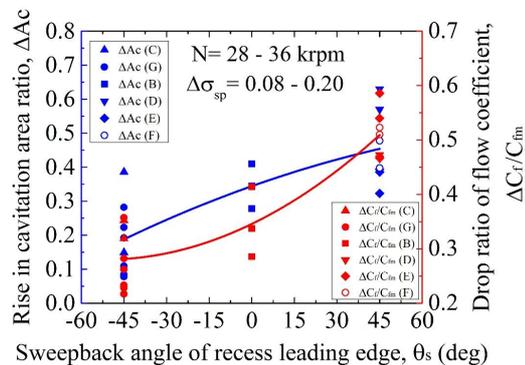


図10 過渡特性に及ぼすtheta\_sの効果

(4) HJB と CFR で得られた結果を総合すると、極低温 HJB に及ぼすリセス形状の影響は主にリセス前縁後退角の効果であると理解できる。さらに、極低温 HJB の高速安定性にはプラスの前縁後退角が有効であることを実証した。

<引用文献>

Mamoru Oike, Masataka Kikuchi, Satoshi Takada, Takayuki Sudo and Tomoyuki Takano, Robustness of Cryogenic Hybrid Journal Bearings, JAST Tribology Online, Vol. 7, 2012, 171-178

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Mamoru Oike, Masataka Kikuchi, Satoshi Takada, Takayuki Sudo and Tomoyuki Takano, Study on Flow Characteristics of Cryogenic Hybrid Journal Bearings, JAST Tribology Online, 査読有, Vol. 11, 2016 (in print)  
DOI:10.2474/troll.11.

Mamoru Oike, Masataka Kikuchi, Satoshi Takada, Takayuki Sudo and Tomoyuki Takano, Influences of Journal Rotating Direction on Cryogenic Hybrid Journal Bearings, JAST Tribology Online, 査読有, Vol. 10, 2015, 96-105  
DOI:10.2474/troll.10.96

[学会発表](計6件)

Mamoru Oike, Effect of the Recess Geometry on Cryogenic Cavitating Flow through the Floating-Ring Clearance, 9<sup>th</sup> International Conference on Multi-phase Flow (ICMF 2016), 2016年5月24日, Firenze (Italy)

菊池正孝、極低温ハイブリッドジャーナル軸受の流動特性に及ぼすリセス後退角の影響、日本航空宇宙学会北部支部2016年講演会ならびに第17回再使用型宇宙推進系シンポジウム、2016年3月10日、北海道大学(北海道・札幌市)

Mamoru Oike, Study on Flow Characteristics of Cryogenic Hybrid Journal Bearings, International Tribology Conference, TOKYO 2015, 2015年9月17日、東京理科大学葛飾キャンパス(東京都・葛飾区)

尾池守、極低温ハイブリッドジャーナル軸受の流動特性に関する研究、日本トライボロジー学会 トライボロジー会議2014秋盛岡、2014年11月6日、いわて県民情報交流センター(岩手県・盛岡市)  
菊池正孝、極低温ハイブリッドジャーナ

ル軸受に及ぼすリセス後退角の影響、日本航空宇宙学会北部支部2014年講演会ならびに第15回再使用型宇宙推進系シンポジウム、2014年3月11日、東北大学青葉記念会館(宮城県・仙台市)

Mamoru Oike, Influences of Journal Rotating Direction on Cryogenic Hybrid Journal Bearings, World Tribology Congress 2013, 2013年9月10日, Torino (Italy)

[その他]

ホームページ等

<https://reach.acc.senshu-u.ac.jp/Nornir/search2.do>

6. 研究組織

(1)研究代表者

尾池 守(OIKE Mamoru)

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：70292282

(2)研究分担者

高田 仁志(TAKADA Satoshi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究員

研究者番号：30358569