Experimental study of safety supply flow rate on a small bore cylindrical journal sliding bearing

小口径ジャーナルすべり軸受における安定化流量の実験的検討

Yuta NARUSE

Graduate School of Mechanical Engineering, Tokai University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 Japan

TEL: +81-463-58-1211(EX.4364) FAX: +81-463-59-2207 e-mail: 2bmkm040@mail.tokai-u.jp

Masayuki OCHIAI

Mechanical Engineering, Tokai University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 Japan

TEL: +81-463-58-1211(EX.4346) FAX: +81-463-59-2207 e-mail: ochiaim@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

(Received 30 April, 2013 Accepted 29 May, 2013)

The effects of temperature distribution and external vibration on stabilized supply flow rate of small bore journal sliding bearing were experimentally investigated. Journal sliding bearings are used widely in many rotational machineries such as engine, turbine, HDD etc.. However, journal sliding bearings generate oilwhip under high speed operation. In order to solve this problem, Hashimoto suggested a stabilization method for suppressing oilwhip by using starved lubrication in which supply oil rate is reduced. However, the starved lubrication have the risks of sudden rising of temperature and regenerating oilwhip caused by external vibrations. In this study, the temperature distribution around the axis and the effect of the external vibrations was investigated to make clear the behavior of the oil. The temperature distributions were measured with thermocouples and cavitations generating in the bearing clearance were visualized by using a high-speed camera. In addition, the vibration test was carried out with an impulse hammer and an acceleration sensor. The area was observed for the temperature to increase rapidly from the results of reducing supply of flow rate. In addition, in the case of increasing supply flow rate, the difference between the maximum temperature and minimum temperature in the bearing is reduced gradually. Moreover, the oil whip was occurred by the external vibration. It was found that both risks were possible to avoid by adjusting the supply flow rate adequately.

Keywords : Oil whip, Journal sliding bearing, Temperature distribution, Stability, Cavitation, External vibration.

I. INTRODUCTION

ジャーナルすべり軸受は、軸と軸受を非接触で支持するため耐摩耗性に優れており、火力・水力・原子力用の発電タービン、ハードディスクドライブなど、数多くの回転機械に用いられている。近年、省エネルギー化・省

スペース化の指向から回転機械は小型化・高速化の傾向にある。しかし、ジャーナルすべり軸受では高速回転時にオイルホイップと呼ばれる自励振動が発生し、軸と軸受が接触し、破壊に至る危険性がある。現在オイルホイップの抑制方法としてティルティングパッド軸受が広く用いられているが、同軸受は形状が複雑であるためコストが高く小型化に不向きという問題がある。

SAS Award was given to this paper presented as Poster Presentation at the 2012 SAS Intelligent Symposium.

このような問題に対して橋本らは、軸受に供給する潤滑油量を減少させるスターブ潤滑を用いたオイルホイップの抑止法を考案し、¹ 小口径真円ジャーナルすべり軸受において高速回転時に高い安定性を有することを理論および実験の両面から明らかにしてきた。しかしながら、スターブ潤滑下では潤滑油量の減少により油膜厚さが薄くなるため、急激に温度が上昇し焼付きを起こす危険性が高まる。

これまで、ジャーナルすべり軸受内の温度分布に関する研究は数多く行われてきた。例えば杉本らは、軸受内における油膜温度分布と軸荷重、潤滑油の粘度の関係について研究している。² その中で、軸受内で局所的に潤滑油の温度が上昇することや、軸荷重および潤滑油の粘度の増加に伴い潤滑油の温度が高くなることを実験的に明らかにしている。また、三井らはジャーナルすべり軸受の温度特性に関して、様々な運転条件下における熱発生とその放熱方法について論じている。^{3,4} その過程で軸回転数および偏心率が軸受面の温度分布に与える影響や給油条件と温度上昇の関係、潤滑油の特性による軸受温度特性の違い等の基本的な特性を明らかにしている。一方田中らは、定常状態にある層流の潤滑油膜に限定し、熱伝達モデルによる熱流体潤滑理論の定式化と数値解析法について検討している。^{5,6} しかし、いずれの研究においてもスターブ潤滑下における温度分布の測定は行われておらず、軸回転数も 500~4000[rpm]程度の運転条件である。さらに軸受のサイズも大型のもので小型化を念頭においた条件下での温度分布測定例は数少ない。また、キャビテーションが軸受特性に関わることが知られており

その可視化に関する研究が過去にいくつか行われているが、^{7,8} 温度分布とキャビテーションの発生状況を比較して、その関係性について論じている研究は我々の知る限り見受けられない。一方で、オイルホイップ状態から供給流量を絞りオイルホイップが収まる時の供給流量とスターブ潤滑から供給流量を増加させオイルホイップが起きる時の流量にはヒステリシスの関係があることが著者らの過去の研究より明らかになっている。⁹ この現象を利用することでスターブ潤滑下においても軸受内油膜厚さを確保でき、軸受内の温度上昇を抑えることが期待できる。しかし、地震等に起因した外乱などが加わった場合には、再びオイルホイップが生じて不安定化する恐れがある。

このような背景の下、本研究ではスターブ潤滑下において小口径ジャーナルすべり軸受内の温度分布測定とキャビテーションの可視化実験を同時に行い、軸受内温度分布の発生原因を考察した。また、供給流量を変化させて加振実験を行い、外部振動が作用した際の小口径ジャーナル軸受の安全性について検討したので報告する。

II. MATERIALS

本実験に用いた小型軸受試験装置を Fig. 1 に示す。試験軸受は真円軸受で、寸法は軸受直径 $D=25$ [mm]、軸受幅 $L=14.5$ [mm]、クリアランス $Cr=0.175$ [mm] であり、軸受にかかる荷重は 4.24[N] である。また、試験軸受の材質を透明アクリルにすることでキャビテーションの可視化を可能としている。

潤滑油はオイルタンクから軸受部（挿入穴 0°）へと供給され、供給流量は流量制御装置を用いることで自動で調整することが可能である。また、オイルタンクにはラバーヒータが取り付けられており、潤滑油温度を任意に調節することができる。なお、潤滑油は ISOVG22 を用いている。

温度分布測定は、7 本のシース熱電対を試験軸受周りに 45° 間隔で取り付けて行った。熱電対の取り付けには専用の治具を用い、治具内部には油もれ防止のためにシールを設けている。なお、熱電対の分解能は 0.1℃ である。また、キャビテーションの可視化は高速度カメラを用いた。使用した高速度カメラの分解能は 720×640[pixel] であり、撮影速度は 3000[fps] とした。加振実験の際には、試験台を下方からインパルスハンマーを用いて装置全体を加振し、軸受上部に取り付けた加速度センサーにより加速度の測定を行った。

Fig. 1. Experimental setup.

III. METHODS

Figure 2 に本実験で実施した 2 種類の安定臨界流量 Q_c の決定方法を示す. Figure 2(a)はオイルホイップ発生状態から供給流量を減らし,安定化した際の供給流量(以降,減少時臨界流量)を, Figure 2(b)はスターブ潤滑下の安定状態から供給流量を増やし,オイルホイップが発生する直前の供給流量(以降,増加時臨界流量)を測定する方法である. 以上のような 2 種類の供給流量の条件下にて,温度分布測定とキャビテーション可視化実験,及び加振実験を行った.

なお,キャビテーションの可視化実験では,最小供給流量,減少時臨界流量及び増加時臨界流量の 3 条件下において高速カメラを用いて撮影を行った. また,加振実験では,各供給流量において装置全体にかかる加振力を徐々に大きくし,オイルホイップが発生する加速度を

オイルホイップ発生加速度として測定した.

本実験では安全性を考慮して最小供給流量を $0.23 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$ とし,装置全体にかかる加速度の上限を $10 [\text{m}/\text{s}^2]$ とした. 供給油温を $40 [^\circ\text{C}]$ とし,軸回転数を $7500 [\text{rpm}]$ とした.

Fig. 2. Measurement method for determination of critical supply flow rate.

Fig. 3. Temperature distribution under decreasing supply flow rate condition.

Fig. 4. Temperature distribution under increasing supply flow rate condition.

Fig. 5. Visualization results of cavitations.

IV. RESULTS

Figure 3 は減少時臨界流量から供給流量を減少させたときの軸受内温度分布を, Fig. 4 は減少時臨界流量から供給流量を増加させたときの軸受内温度分布をそれぞれ示している. また, Fig. 5(a)~(c)はそれぞれ最小供給流量, 減少時臨界流量及び増加時臨界流量におけるキャビテーション画像を表している. 破線で囲まれた領域がキャビテーション領域を示しており, それ以外の部分は油膜領域を示している.

Figure 3 より, それぞれの供給流量において, 温度測定位置 45° から 135° および 275° から 315° の領域で軸受すきま内の温度が低下する傾向にあることが見て取れる. これは Fig. 5(a)及び Fig. 5(b)に示すように, 軸受すきま内においてキャビテーションが発生し, 軸受すきま内の流れが空気と油の混層流状態となるため油に満たされている場合に比べて粘性摩擦による発熱が抑えられ, 温度が低下したものと考えられる. 一方, 135° から 270° 付近では温度が上昇している. これは 135° から 270° 付近において油膜領域となるため, せん断摩擦による発熱の影響が大きくなったためと考えられる. Figure 4 においても Fig. 3 とほぼ同様の傾向が見て取れるが 135° 付近から温度が上昇する傾向が異なる. また, 軸受内温度分布の差異も小さくなっていることがわかる. その原因は, 軸受内への供給流量が増加するため, 潤滑油による冷却効果が高くなることに加え, Fig. 5(c)のキャビテーション画像からわかるように油膜厚さが広い領域で確保されたことにより油膜のせん断摩擦による発熱が生じにくくなったためと考えられる.

Figure 6 は, 軸受内最高温度と最低温度及び加振実験によるオイルホイップ発生加速度と臨界流量の関係を示している. 減少時臨界流量以下の領域に着目してみると, 軸受内の温度は供給流量が $0.5 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$ 付近から急激に上昇する傾向が見て取れる. また, それに伴い軸受内最高温度と最低温度の差も大きくなっている. なお, この領域においては, 加振実験によるオイルホイップの発生は確認されなかった. 次に減少時臨界流量以上の領域に着目してみると, オイルホイップ発生直前までは供給流量の増加に伴い軸受内最高温度は低下しているが, オイルホイップが発生すると, 軸受内最高温度及び最低温度の双方で温度上昇することが見て取れる.

一方, 加振実験の結果より, 供給流量が増加するにつれて線形的にオイルホイップが発生する加速度が小さくなっていることがわかる. その原因は, 供給流量が増加するにつれて軸受内の油膜が厚くなり, 油膜反力の連成ばね成分が増加するためだと考えられる.

Fig. 6. Temperature distribution and oil whip acceleration with supply flow rate.

以上の結果より, 供給流量が減少すると軸受内で急激に温度上昇する領域があり, 一方で供給流量が増加すると, 外乱によりオイルホイップが発生する領域がある. しかし, 同図中に示すように安全な流量領域が存在することから, 供給流量を適切に調節することで, これら両方の危険性を回避することができると考えられる.

V. CONCLUSION

小口径ジャーナルすべり軸受において, スターブ潤滑下での温度分布測定とキャビテーションの可視化実験および加振実験を行った. その結果, 減少時臨界流量から供給流量を徐々に減少させた場合においては軸受内の温度上昇が小さい供給流量領域が存在することがわかった. また, 減少時臨界流量から供給流量を徐々に増加させた場合においては, 外部振動によりオイルホイップが発生する危険性があることが確認された. しかし, 供給流量を適切に選定することにより外部振動による不安定化と急激な温度上昇を同時に回避し得ることが確かめられた.

REFERENCES

- 1 H. Hashimoto and M. Ochiai, Journal of Tribology ASME, 132, 1, pp.1-7 (2010).
- 2 Y. Sugimoto, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 14, 47, pp.II-1-II-8 (1948)
- 3 J. Mitsui, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 49, 438, pp.199-208 (1983).
- 4 J. Mitsui, Y. Hori and M. Tanaka, Transactions of the ASME Journal of Lubrication Technology, 105, 3, pp.414-421(1983).
- 5 M. Tanaka and K. Hatakenaka, Journal of Japanese Society of Tribologists, 49, 9, pp.36-41 (2004).

- ⁶ K. Hatakenaka, M. Tanaka and K. Suzuki, Journal of Japanese Society of Tribologists, 45, 8, pp.628-635 (2000).
- ⁷ M. Noma and A. Mori, Journal of the Visualization Society of Japan, 23, 10, pp.93-99 (2003).

- ⁸ H. Mori, S. Miyata and Y. Abe, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 33, 248, pp.658-666 (1967).
- ⁹ Y. Sunami, H. Hashimoto and M. Ochiai, Proceedings of JAST Tribology Conference, 5, pp.103-104 (2011).