研究

静圧スラスト軸受における気泡の発生限界*

青山 藤詞郎** 稲 崎 一 郎** 米 津 栄**

Limit of Bubbles Production in Hydrostatic Thrust Bearings

Tojiro AOYAMA, Ichiro INASAKI,
and Sakae YONETSU

Bubbles will be produced in the lubricant film of hydrostatic bearings caused by the hydrodynamically generated negative pressure. The production of bubbles should be avoided because bubbles in lubricant films give the undesirable effects on bearing performances. In this study, the limit of bubbles production in the sector-shaped recesses of hydrostatic thrust bearings is experimentally and theoretically investigated. Effects of the spindle

tilt on bubbles production in recesses are also analysed. The analysis lead to the results as follows. (1) Bubbles production in recesses are caused by the air drawing through the bearing clearance or the so-called aeration. (2) The limit of bubbles production is given in terms of the speed parameter and the tilting ratio. (3) The bubbles production in recesses can be supposed theoretically by calculating the region of the negative pressure in the lubricant film by means of the finite element method.

Key words: hydrostatic thrust bearing, lubrication, cavitation, aeration.

1. 緒 言

静圧軸受は、その高精度な性能から、近年工作機械の主軸受や案内面への応用が活発である。ところで、静圧軸受の軸と軸受面の間に相對運動が存在すると、これにより生ずる動圧効果によって、軸受すきまに介在する潤滑油膜の圧力が部分的に大気圧以下になることがある。このような負の圧力が発生すると、そこにキャビテーションやエアレーションならびに軸受外部からの空気の吸込み等を起して潤滑油膜中に気泡が生ずる可能性が大きくなる。軸受すきまにおける気泡の発生は、例えば振動の発生や温度上昇等、軸受の動作特性に好ましくない影響を及ぼすことが多く、これをできる限り避ける必要がある。このような問題に対して、これまでにも幾つかの研究報告があるが、その多くはすべり軸受を対象としたものであって^{1)~3)}、静圧軸受について検討を加えたものは少ない⁴⁾。

本研究では、多く実用に供されている円環状に複数個のリセスを有する静圧スラスト軸受を対象として、軸受すきまにおける気泡の発生機構および発生限界を理論的ならびに実験的に解析することを目的としている。ところで、静圧スラスト軸受は、通常、平行な軸受すきまを想定して、その動作特性が解析される。しかし、実際には、軸に何らかの外力が作用してこれが傾斜し、軸受すきまが非平行になっている場合が多い。本研究では、軸

受すきまが平行な状態と非平行な状態の両者について解析を行った。

2. 有限要素法による油膜圧力分布の数値解析

軸受すきまにおける気泡の発生状態そのものを理論的に解析することは困難である。そこで気泡発生の原因として挙げられるキャビテーションやエアレーションあるいは軸受外部からの空気の吸込み現象などに最も関係すると考えられる、潤滑油膜の圧力分布、特に大気圧以下の負圧の発生領域を理論的に求め、これから気泡の発生を推測した。潤滑油膜の圧力分布は、有限要素法によって数値的に求めた⁵⁾。ただし、潤滑油は非圧縮粘性流体で流れは層流と仮定し、さらに油の慣性力を省略した。使用した要素は、三角形3節点要素である。ステップランド軸受の理論より、軸受すきまが平行な状態では、相對滑り運動によって軸受すきまに最も負圧が発生しやすい部分は、リセスとランドの境のステップ部分であると考えられる。したがって、有限要素法によって軸受すきまの圧力分布を計算する際には、リセス部分も要素分割を施す必要がある。

3. 実験装置および実験方法

前節において述べたようにして理論的に求めた負圧発生領域と実際の気泡発生との関係を明らかにするため、軸受すきまにおける気泡の発生状態や気泡の発生と軸受動作条件の関係を、以下に述べる方法によって実験的に検討した。

実験装置の概要を図1に示す。回転軸は、静圧スラスト軸受と静圧ジャーナル軸受によって支持されている。

* 原稿受付 昭和55年2月5日。昭和53年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和53年10月5日)にて発表。

** 正会員 慶応義塾大学工学部(横浜市港北区日吉3-14-1)

図3 軸受すきまの圧力分布

すりセス深さ h_r の比 (h_r/h_m) をパラメータとして示す。これより h_r/h_m が大きいほど、すなわち一定の軸受すきまに対してリセスが深いほど負圧が発生しにくいことがわかる。 $S^* < 50$ の通常の動作条件では、 $h_r/h_m > 25$ とすれば、軸受すきまに負圧が発生することはない、これによる気泡の発生もないと考えられる。なお、図3は、絞りパラメータ $u_c = 2$ の場合を示したものであるが、 u_c の値は、これが小さいほど同じ供給圧力に対してリセス

圧力が高くなるから、それだけリセスに負圧が発生しにくくなる。通常、絞りパラメータは、油膜の静剛性の観点から $u_c = 0.5 \sim 2$ に設定することが多い。したがってこの範囲で $h_r/h_m > 25$ なる条件は、負圧発生に関して常に安全側にあることになる。

負圧発生の原因は、ここで述べた潤滑油膜の形状に起因するもののほかに、平行面軸受については、温度による潤滑油の膨張によって負荷能力が発生する、いわゆる熱くさび作用のちょうど逆の効果が起因していることも指摘されている¹⁾が、静圧軸受の場合、潤滑油の温度変化はすべり軸受の場合に比較して少ないため、熱くさび作用の影響は、ほとんどないと考えられる。

4.2 軸が傾斜している場合

回転中の軸に何らかの原因で外力が作用して軸が傾斜すると、軸受すきまには、くさび作用による圧力が発生して、これにランドとリセスによって形成されるステップ部分に生ずる圧力と本来の静圧が重ね合わさって全体の圧力分布が形成される。したがって、軸が傾斜している状態では、前項で述べた軸受すきまが平行な場合よりも部分的には負圧が生じやすく、これによる気泡発生の可能性も大きくなるはずである。

1) リセスにおける気泡発生の観察

軸が傾斜している場合、4個のリセスのうち軸の回転方向に対して軸受すきまが拡大する側のリセスにおいて気泡の発生が観察された。図4に、この部分における気泡発生の観察例を示す。ここで ε は軸傾斜率で、軸受面外径を D 、軸の傾斜角度を θ_r として次式で与えられる無

図4 気泡発生の観察例

$P_s = 0.4 \text{ MPa}$

図5 気泡排出の瞬間

$P_s = 0.4 \text{ MPa}$

図6 気泡発生瞬間

次元量である。

$$\epsilon = \frac{D\theta_r}{2h_m} \quad (3)$$

$\epsilon=0$ のとき平行な軸受すきまを, また $\epsilon=1$ のとき, 傾斜した軸の一端が軸受面に接触した状態を表す。軸受すきまが平行 ($\epsilon=0$) の場合には気泡が全く認められないが, 傾斜率を少し増す (図4(a)) と, 軸の回転方向に対して手前側のリセスとランド間のステップ部分から気泡が発生して, 軸回転方向と同方向にリセス内を発達する。軸回転速度が低いと, 気泡は単一で比較的大きなものが観察され, 回転が高速になると気泡は小さなものが増える。さらに軸の傾斜率を増す (b) と, 気泡が発生

図7 リセス圧力の測定例

している領域はほぼリセス全体に及ぶ。軸回転速度が高速であると, リセス内は気泡で白濁する。このとき, 軸受すきまから流出する潤滑油も白く濁る様子が観察された。再び軸受すきまを平行にする (c) と気泡が発生している領域は縮小するが, 一度リセス内に発生した気泡は, 軸受すきまから外部へ排出されることなく, リセス内に残留している。そこで軸回転速度を次第に低くして行くと, ある時点でリセス内の気泡は軸受すきまを通して外部へ排出される。この様子を図5に示す。気泡は, 軸回転方向に対して手前側のリセス端から外周ランドを通して外部へ排出される。気泡が排出される瞬間の軸回転速度は一定していないが, 本実験では 10 rpm 以下であった。

リセス内に気泡が発生した瞬間の様子を図6に示す。気泡は, リセスとランドの間のステップ部分の近傍に発生する。この位置は, 図2に示したステップランド部分の影響によって最大の負圧が発生する位置に近い。気泡が発生した瞬間は, その大きさも小さいが, 軸の回転速度や傾斜率を増大すると, 軸の回転方向に気泡が引ばられてリセス全体に気泡が発達する。特に軸回転速度が速い場合は, 気泡の粒子が非常に細くなって先に述べたようにリセス内は白濁する。気泡はリセスとランド間のステップ部分に集中する傾向が見られ, 気泡の発生とその挙動に対して, ステップランド部分に発生する圧力の影響が大きいことがわかる。

2) 気泡発生時のリセス圧力の挙動

リセスに気泡が発生すると, これによってリセス圧力に何らかの変化が起こるはずである。回転中の軸に次第にモーメントを加えたときのリセス圧力 P_{r1} の時間的変

 $N=1060 \text{ rpm}$, $P_s=0.2 \text{ MPa}$

図8 油みぞがある場合の気泡発生の様子

 $P_s=0.3 \text{ MPa}$, $N=940 \text{ rpm}$

図9 油みぞがある場合の空気の侵入

化の記録例を図7に示す。軸の傾斜量が増加するにつれて、リセス圧力 P_{r1} は次第に低下する。このとき、供給圧力が低く、したがって速度パラメータが大きな値となる場合ほど、リセス圧力の低下が著しい。リセスに気泡が発生すると、リセス圧力はそれまでの負圧から瞬間的にはほぼ大気圧まで上昇する。しかし、それ以上にリセス圧力が上昇することはない、したがって気泡が発生しているリセスには負荷能力がほとんどないことがわかる。

リセスに気泡が発生するとき、リセス圧力が大気圧以下であることがわかるが、気泡発生の直接の原因がキャビテーションあるいはエアレーションであるか、または軸受外からの空気の吸込みであるのかは、実験観察結果から判断することが困難である。ここでキャビテーションとは、圧力が油の蒸気圧以下に低下することにより、油中に油の蒸気泡が発生することをいい、またエアレーションとは、油中に溶解した空気が圧力の低下により分

図10 気泡発生による軸受姿勢の変化

離析出することをいう。しかし実験においてリセス圧力は常に潤滑油の蒸気圧以上であることからキャビテーションが生じている可能性はほとんどない。一方、エアレーションについては、リセス圧力の測定値が潤滑油の常温での気泡分離圧⁷⁾(約 -0.04 MPa)に近い値となる場合もあったことから、部分的にはさらに低い圧力となってエアレーションが起こっていることも十分考えられる。しかし図8に示すように各リセス間に油みぞを有するタイプについて同様な実験を行ってみると、軸受すぎが平行な状態でもリセスに気泡が発生し、油みぞがないものよりも気泡が発生しやすいことがわかった。この場合、図9に示すように、気泡発生は油みぞからの空気の吸込みによって起こることが観察された。

このように、本研究の実験結果からは、エアレーションと軸受外からの空気の吸込みの両者がリセスにおける気泡発生の原因として推定されるが、そのいずれが支配的であるのかはまだ断定できない。なお、本実験で使用した潤滑油中の空気含有量はおよそ体積で7~8%、気泡分離圧は約 -0.04 MPa (30°C)と推定される⁷⁾。

ところで、リセスに気泡が発生すると、リセス圧力が瞬間的に変動するため、このとき軸の姿勢も瞬間的に変化する。この関係を図10に示す。リセスに気泡が発生すると、リセス圧力が瞬間的に、ほぼ大気圧まで上昇するため、この結果それまで潤滑油膜の張力として軸に作用していた復元モーメントが減少して軸の傾斜方向も変化する。すなわち、リセスに気泡が発生することによって軸の傾斜剛性、つまり軸を単位角度傾斜させるに必要なモーメントの大きさが瞬間的に小さくなる。またこのとき、平均軸受すぎも瞬間的に増加することが実験的に確認された。

3) 気泡発生と軸受動作条件の関係

前項で述べたように、リセスに気泡が発生すると軸の姿勢が瞬間的に変化し、傾斜剛性が低下するなど軸受の

図 11 気泡発生と軸受動作条件の関係

図 12 有限要素法による負圧領域の計算

動作特性に悪影響を及ぼすことが多い。したがって、軸受は、このような気泡が発生しないような動作条件で運転する必要がある。

リセスに気泡が発生したときの速度パラメータと軸傾斜率の関係を図 11 に示す。図に示した個々の点は、同一の実験条件のもとで 10 回測定を行った結果の平均値である。気泡の発生する動作条件には多少ばらつきがあり、図に斜線を施した領域は、気泡が発生しない動作条件と発生する条件の間の遷移的領域であると考えられる。速度パラメータと軸傾斜率の値は、これが大きいほど気泡が発生しやすい。有限要素法によって、軸受すきまに負圧が発生する条件を求めると、図 11 に実線で示したような結果が得られる。実線より上側が負圧の発生する領域である。実線上は、ちょうど負圧が発生する限界の動作条件であるが、これは実験的に得られた遷移的領域に良く一致している。

いま図 11 において、各動作条件に対し有限要素法によって軸受すきまの圧力分布を計算して負圧の発生領域を調べてみると、その結果は図 12 のようになる。図に示し

た動作条件 A, B は、それぞれ図 11 に示した点 A, B における動作条件に対応する。図 11 に示す実線より下側の動作条件では、軸受すきまに負圧は発生しないが、ちょうど実線上の動作条件 A では、図 12 に示すように、ランド部分に負圧領域が認められるようになる。さらに、図 11 の実線より上側の動作条件 B においては、図 12 に示すように、負圧領域はリセス内にも広がっていることがわかる。図 12 は、軸の傾斜方向がリセス方向のときの結果であるが、ランド方向の場合についても、軸受動作条件と負圧領域の間の定性的な関係は同様である。

以上要するに、有限要素法によって軸受すきまの圧力分布を計算した場合、負圧領域が存在するならば、そのときの軸受動作条件は、少なくともここで言う気泡発生の遷移的領域、あるいは気泡発生領域に対応し、気泡発生の可能性が大きいと考えられる。

5. 結 言

複数のリセスを有する円環状静圧スラスト軸受の軸受リセスにおける気泡の発生について理論的ならびに実験的に検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 軸受すきまが平行な状態では、通常の動作条件 ($S^* < 50$, $0.5 \leq u_c \leq 2$) において $h_r/h_m > 25$ とすれば、リセス内に負圧が発生することはない。 h_r/h_m は、これが小さいほどリセス内に負圧が発生しやすくなる。
- (2) 一度リセス内に発生した気泡は、軸受すきまから外部へ排出されることなく、軸が回転している間リセス内に残留する。
- (3) リセス内に気泡が発生すると、リセス圧力はほぼ大気圧に等しくなり、このとき軸の傾斜量は瞬間的に増大し、その傾斜方向も変化する。
- (4) リセス間に油みぞを設けると、これがない場合よりも、リセスに気泡が発生しやすくなる。
- (5) 有限要素法によって軸受すきまの圧力分布を計算して得られた負圧発生領域の有無と実験における気泡発生の有無は、良く対応する。したがって、有限要素法を用いてリセスにおける気泡の発生を予測することが可能である。
- (6) リセスにおける気泡発生を防止するには、通常の軸受動作条件において、リセス深さを軸受すきまの 25 倍以上とし、軸傾斜率は 0.15 以下におさえることが望ましい。
- (7) 本研究で行った実験の範囲においては、気泡発生の原因として、キャビテーションの可能性はほとんど考えられない。なお気泡発生がエアレーションによるのかあるいは外気の侵入によるのかは断定でき

ない。

最後に、本研究の実験ならびに計算の遂行にあたり熱心に協力下された当時本学部生・落合宏行氏、田村裕氏、南安氏、荒井隆氏に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐々木外喜雄, 中井 学: 平行平面スラスト軸受における負圧発生に関する研究, 潤滑, **12**, 3 (1967) 110.
- 2) 益子正巳, 仙波 晃, 伊東 諒: 複合ステップ型スラスト軸受の油膜圧力分布, 潤滑, **18**, 1 (1973) 35.
- 3) T. Nakahara, T. Kobayashi and M. Masuko: The

Influences of Air Content of Lubricant on Cavitation in the Thrust Bearing with Closed Recesses, JSLE-ASLE Int. Lubrication Conf., Tokyo, (1975) 113.

- 4) R. B. Howarth and M. J. Newton: Cavitation in Hydrostatic Thrust Bearings, Proc. 1st Leeds-Lyon Symp. Tribology, (1974) 63.
- 5) 坪井晴人, 稲崎一郎, 米津 栄: 静圧回転テーブルの傾斜特性, 精密機械, **41**, 5 (1975) 483.
- 6) 青山藤嗣郎, 稲崎一郎, 米津 栄: 静圧スラスト軸受の動作特性, 昭和50年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1975) 203.
- 7) 辻 茂: キャビテーション特性, 油圧化設計, **2**, 1(1964) 41.

情 報

通産省, 創造的技術開発の推進策検討

通産省は今後わが国の技術立国化を進める上で, 欧米に比べ立ち遅れているとされる創造的技術開発の体制・構造にメスを入れ, 国際水準と比較しつつ, わが国が立ち遅れている点を率直に指摘する一方, 今後の克服策の検討を進めることになった。これは同省が56年度から取り組む次世代産業基盤技術研究開発制度を一步進める考えで, 同制度によって生み出される90年代以降の先端技術の芽を現実に大きく育てるために必要な畑の役割を果たす製造技術や市場創出技術も並行して開発・育成しなければ本格的に欧米をしのぐ産業水準には到達しないとの判断に立つものである。

そもそもわが国は戦後, 欧米先進工業国との技術格差を埋めるために, 積極的な技術導入により, 生産性の向上, コストダウンを果たしてきた。このなかでわが国の産業技術水準は着実に向上し, 先進工業国へのキャッチアップを達成したが, 同時に, ここへきて欧米技術の模倣の時代から, 独自の創造的技術開発を迫られる時代に差し加かってきた。

通産省は, わが国が未踏技術へ挑まざるを得ない段階に入ったのを踏まえ, 最近技術立国論を強く展開, この一環として56年度から次世代産業基盤技術研究開発制度を創設する方針である。

90年代以降に開花するとされる新材料, バイオテクノロジー, 新機能素子などを10年単位で研究開発, 実用化の芽を生み出そうという制度で, リスクが多いため, 先端技術開発に慎重に民間企業を動員してわが国の次世

代産業育成を促そうというものである。

しかし, 同制度は, 研究開発がもともと困難なテーマが多いこともあり, 実験室的に実用化のメドを得ることが最大の眼目となり, 事業化を前提とした製造技術の開発や, 市場開拓技術の開発まで見すえた総合的な創造技術開発システム作りはねらっていない。

わが国にとって新たな先端技術の芽の研究開発が必要なのはもちろんだが, 現実には芽を実用化する製造技術の確立が立ち遅れていることこそ, わが国の技術水準が欧米に比べ差がある大きな要因との指摘も多い。

いまや花盛りの半導体産業をみても, 生産性や品質ではわが国のレベルが高く評価されているが, なおその中核の製造技術, 製造装置は欧米の技術に依存しており, 生産・量産は優れているが, 基礎研究, 製造研究には劣るとの指摘もある。

欧米諸国が先端技術の芽をわが国に出ししぶりだしていると同様に, 製造技術, 製造装置をわが国に提供しない傾向が現れはじめているという新たな問題も出ている。

通産省は, こうしたわが国の技術開発体制が国際的にみてもろさをもっているため, 単に先端革新技術の芽を研究開発するだけでなく, 芽を支える製造技術や市場創造技術の開発にも合わせて取り組む必要があると判断, わが国の創造技術開発の体制・構造の現実に切り込み, わが国の今後の技術開発のぜい弱性を浮きぼりにするとともに, これを克服する総合的な対策作りに進む考えである。 (服部 敏夫)