

報告日： 令和 4 年 4 月 28 日
報告者： 大分大学 理工学部 准教授
大津 健史

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

油圧機器におけるキャビテーション発生現象の解明とそれを応用した設計法の提案

(2) 研究者氏名、職名

大津 健史 大分大学 理工学部 准教授

(3) 研究概要

本研究では流体潤滑部でのキャビテーションの発生現象の解明を目的に、すきま厚さを一定とした条件でのキャビティの観察を高速度カメラにより行い、課題とされていたキャビティの発生と負圧の関係性を明らかにする。実験結果より、キャビティの発生はすきま厚さに依存し、発生時の負圧は絶対真空圧(-0.1 MPa)よりも低くなることが明らかとなった。結果を基にキャビテーションの発生に及ぼす液体の張力の影響について考察し、さらに、キャビティの発生との関係性を示す設計パラメータについても提案を行った。

(4) キーワード

キャビテーション, 流体潤滑, 潤滑油, 負圧, 張力, 溶解気体

(英文)

(1) Research title

Study on initiation of cavitation in fluid power machine and propose of machine design considering cavitation

(2) Name of researcher with title of position

Takefumi Otsu, Associate Professor, Oita University

(3) Summary

This study described that the observation of cavitation in the lubrication film was conducted using a high speed camera in order to understand the initiation phenomenon of cavity. The test apparatus used in this study can be applied to constant gap thickness condition. The results showed that the occurrence of cavity depends on the gap thickness and that in the case of occurrence of cavity the negative pressure was lower than -0.1 MPa. Furthermore, the initiation of cavity was discussed based on the tension of liquid, and the cavitation parameter which is related with the initiation of

cavity, was suggested from the results.

(4) Key Words

Cavitation, Fluid dynamics, Lubricant, Negative pressure, Tension, Dissolved gas

2. 本研究の意義、特色

油圧機器の構成要素であるポンプ、流量制御弁、流体継手、軸受部では、その流れ場に負圧が発生し、そこではキャビテーションが引き起こされる。このキャビテーションは古くから問題とされており、ポンプ圧力の低下、振動の発生といった機器の機能・効率を著しく低下させる要因になる。それとともに、腐食による表面損傷、軸受での油量不足と油膜破断(摩耗)の要因にもなり、機器の安全運転やメンテナンスの面でも問題となる。従って、機器の機能や効率、安全性を向上させるためには、キャビテーションの発生を制御、抑制できる技術が必要であり、そのためには現象の詳細な理解とその知見を設計方法へ展開することが求められる。

本研究では、観察実験を通してキャビテーションの発生条件を整理し、設計パラメータを提案することを目的とする。これまでのキャビテーションモデルでは、キャビティの発生領域を圧力設定で求めてきたが、必ずしも実現象と一致しない点が存在していた。従って、ここではキャビテーションの発生と負圧の関係性を明らかにし、その結果からキャビテーション発生圧力の検討を進め、液体の張力等を考慮した新規的なキャビテーションの発生モデルを検討する。また、その結果を設計法へ展開するため、設計パラメータの検討も行う。

3. 実施した研究の具体的内容、結果

本研究では、潤滑面に形成されるキャビテーションのその場観察を行い、その発生と負圧の関係性を調べる。以下、実験方法、観察結果、キャビテーション発生と負圧の関係、設計パラメータの検討の項目ごとにその内容を示す。

3.1 実験方法

本研究の実験では、潤滑面のすきま厚さを一定にした条件でのキャビテーションのその場観察を行い、各すきま厚さ条件でのキャビティの発生について調べる。図 1 に、使用した実験装置を示す。試験はボールとディスクの点接触状態とし、ディスクを回転させ、油槽内ですべり試験を行う。

試験機上部の回転部はプーリを介し、モータにより回転でき、回転部の下部にディスクを取り付ける。ボールは梃子部の板上の油槽内に固定され、その高さは板の先端の高さを z 軸ステージで調整した。また、ステージの変化量はダイヤルゲージで測定し、ボール位置でのすきま厚さは梃子の長さの関係より求めた。なお、すきま厚さ $0.053\text{-}0.67\ \mu\text{m}$ の条件では接触域の光干渉による色相の変化を解析し、二面間のすきま厚さを求めた。

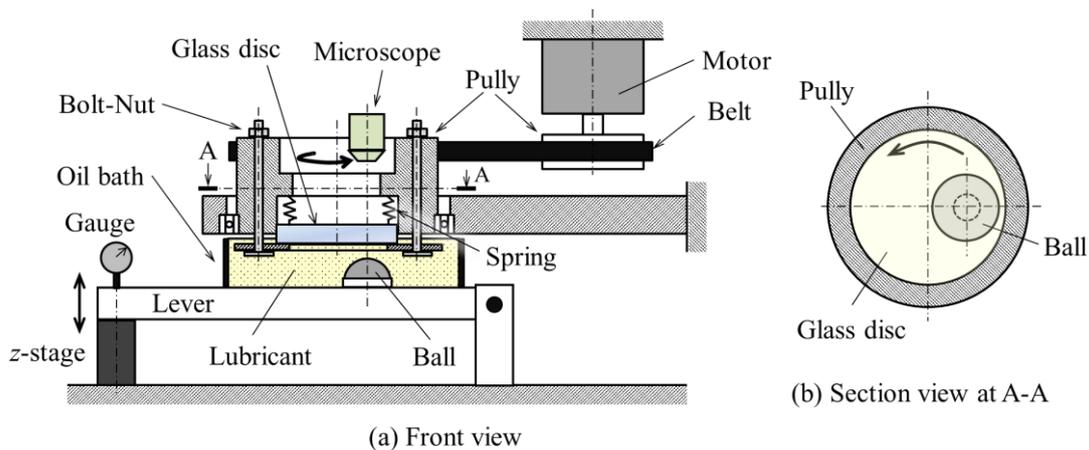


図1 実験装置

上述したように、本実験ではディスクとボールの間のすきま厚さを一定とするが、その上ではディスクの平面度を保証しておく必要がある。本装置では、ディスクと回転部の溝部の間にばねを配置しており、3か所の固定用ねじを締め付けると、このばねの変形によりその位置が変化する。従って、この3か所のねじの締め付け量を調整することにより、平面度の調整を行うことが可能である。本実験では平面度が $5\ \mu\text{m}$ 以下となるように調整した。

観察は上方より顕微鏡を用いて行い、接触部は高速度カメラで撮影する。高速度カメラのフレームレートは $1000\ \text{fps}$ である。また、観察は、すきま厚さを調整した位置(回転位置)で常に行うようにしている。

実験は、室温 24°C (湿度 25%)の下、すべり速度 $10.96\ \text{mm/s}$ 、すきま厚さ $0.053\text{-}100\ \mu\text{m}$ として行った。潤滑油にはポリアルファオレフィン(PAO)を使用した。 40°C における動粘度は $1254\ \text{mm}^2/\text{s}$ である。ディスクにはクロムの半透過膜とシリカのスペーサレイヤをコーティングしたガラスを使用し、ボールには軸受鋼球(直径 $13.5\ \text{mm}$)を用いた。

3.2 観察結果

図2に、すきま厚さ $0.053\text{-}5\ \mu\text{m}$ における接触域の観察結果を示す。図中でキャビテーション領域は白い点線で囲っており、矢印はすべり方向を示す。この結果より、すきま厚さによってキャビテーションの発生状況が異なっていることが分かり、すきま厚さ 0.053 、 $0.092\ \mu\text{m}$ では接触部の後方でキャビテーションが発生しており、急速に成長している。表1には各すきま厚さ条件でキャビテーションの発生を整理した結果である(発生は○、発生しない場合は×で示す)。この表より、キャビテーションは、 $0.092\ \mu\text{m}$ 以下のすきま厚さで発生していることが分かる。従って、キャビテーションの発生はすきま厚さの条件と関係しているといえ、この結果は接触域の後方で発生する負圧が影響しているものと考えられる。

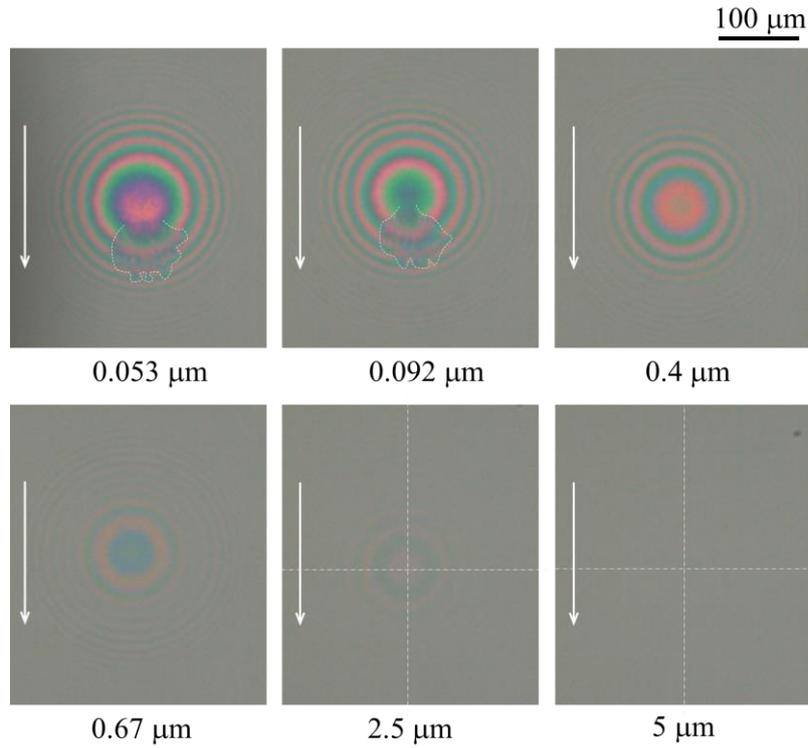


図2 各すきま厚さ条件での接触域の観察結果

表1 各すきま厚さ条件におけるキャビテーションの発生

Gap thickness, μm	Occurrence of cavity
0.053	○
0.092	○
0.4	×
0.67	×
2.5	×
5	×
10	×
50	×
100	×

3.3 キャビテーション発生と負圧の関係

ここでは、各すきま厚さ条件における負圧の発生を数値計算により求め、その結果を基にキャビテーションの発生を検討する。数値計算は以下の図3のモデルで行う。ボールとディスクの間のすきま h_0 を実験と同じように設定し、式(1)で示される2次元のレイノルズ方程式を差分法で解く。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{u}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 h : すきま厚さ、 p : 圧力、 η : 粘度、 u : すべり速度

なお、すきま厚さ h は以下の式(2)で示される。

$$h = h_0 + \frac{x^2 + y^2}{2R} \quad (2)$$

ここで、 R : 球の半径

図 4(a), (b)には、各すきまにおける負圧分布の計算結果を示す。図のように負圧の大きさはすきま厚さに依存しており、すきま厚さが小さいほど圧力が大きく低下することが分かる。特に、 $0.053 \mu\text{m}$ では約-50 MPa、 $0.092 \mu\text{m}$ では約-28 MPa となり、絶対真空圧(-0.1 MPa)よりも大きく低下する。表 2 にはすきま厚さと最大負圧の関係を示し、キャビテーションが発生した場合は○、発生しなかった場合は×で表している。この結果より、本実験では負圧が約-28 MPa に到達する条件でキャビテーションが発生することが分かるとともに、絶対真空圧以下となる $0.4\text{-}2.5 \mu\text{m}$ の条件ではキャビテーションが発生しないことも明らかである。ここで、一般には、絶対真空圧となった条件では油は蒸気になると考えられるが、実験では液体を維持しており、キャビテーションの発生は確認できなかった。この要因の一つとして、液体の張力が考えられ、鉱油は最大 11.9 MPa の張力に耐え、液体の破断が生じないとも報告されている。従って、本実験で使用した潤滑油は約 28 MPa の張力に耐えることも可能と考えられ、油膜内で局所的に負圧が発生しても破断せずに液体状態を維持すると推測される。一方で、それ以上の大きさの負圧が発生すると、その領域で液体の破断が生じ、キャビテーションが形成されると予想される。また、膜内でキャビテーションが発生すると、その領域への溶解気体の析出が生じ、キャビテーションは急速に成長する。その結果、安定した気泡になると考えられる。

以上のようにキャビテーションの発生と負圧の関係性が確認できたが、本実験ではすべり速度が一つの条件であり、また使用した潤滑油も一種類である。従って、結果の一般性を確認するために、様々な実験条件での観察を行う必要があり、この点については今後の課題とする。

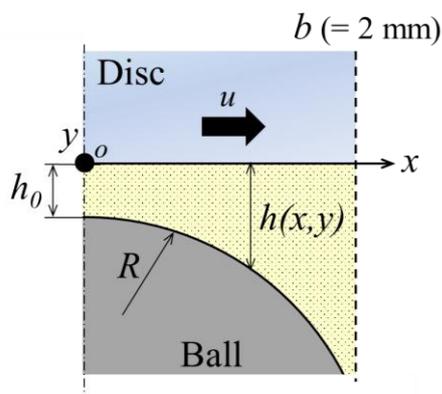


図 3 計算モデル

表 2 各すきま厚さにおける最小圧力値

Gap thickness, μm	Minimum Pressure, Pa	Occurrence of cavity
0.053	-50544528	○
0.092	-27916374	○
0.4	-3750520	×
0.67	-1802130	×
2.5	-262982	×
5	-94228	×
10	-33579	×
50	-3021	×
100	-1063	×

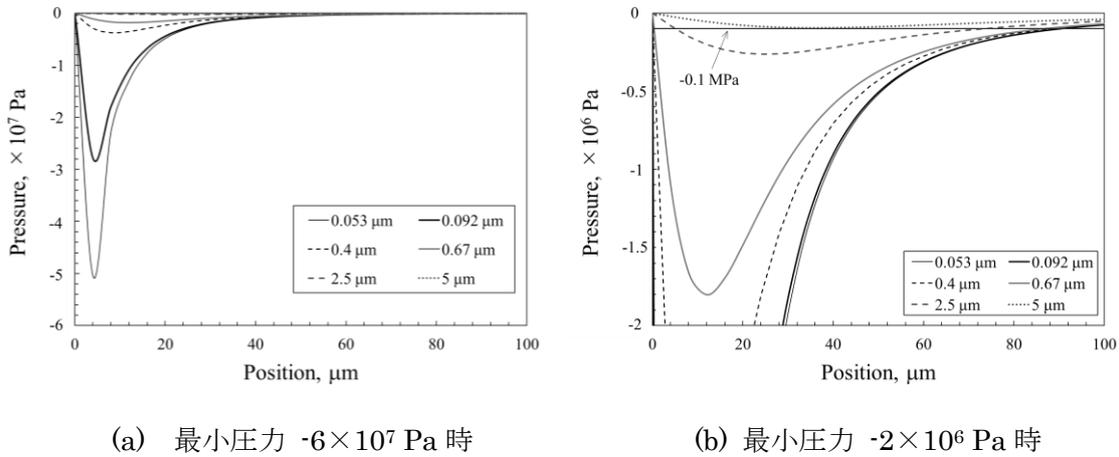


図 4 各すきま厚さにおける負圧分布

3.4 キャビテーション発生に関する設計パラメータの検討

3.3 で示したようにキャビテーションの発生は接触域後方の負圧と関係することが明らかとなり、この結果を潤滑面設計に展開するためには、運転条件と発生する負圧値を関連付け、それを設計パラメータとして示すことが必要となる。レイノルズ方程式を整理すると、接触面で発生する負圧は以下の式(3)のパラメータ C_i に依存することが導出される。従って、粘度、速度、球の半径、すきま厚さが決まると、キャビテーションの発生を予測することが可能と考えられる。なお、このパラメータは大気圧 p_0 (絶対圧 0.1 MPa) で除しており、無次元化されている。

$$C_i = \frac{\eta u \sqrt{R/h_0^3}}{p_0} \quad (3)$$

図 5 には、キャビティ発生パラメータ C_i と負圧の関係を示し、キャビテーションが発生した場合は黒塗り、発生しない場合は白抜きで表している。この図より、 C_i が約 807 以上となるとキャビティが発生することが整理され、このパラメータに有効性を確認することができる。今後、様々な実験条件で観察を行い、キャビテーションの発生とパラメータ C_i の関係を整理する必要がある、それより潤滑面設計への応用に近づくことが期待できる。

以上、本実験結果より、潤滑面に生じるキャビテーションの発生を予測する設計パラメータを提案した。実際のキャビテーションの発生は、本実験で観察された膜内での液体の破断に起因するものと、空気との界面から気泡を取り込むものの二つに分類される。接触状態から始動する場合はすきま厚さが 0 から動くために破断によるキャビティが発生し、それが成長し、安定的なキャビティとなる。一方、パラメータ C_i を下回る条件から始動する場合はキャビティの発生は無いと考えられるが、接触域後方には負圧が発生するため、油中内の気泡(巨視的な気泡)や大気から空気を巻き込み、それがキャビ

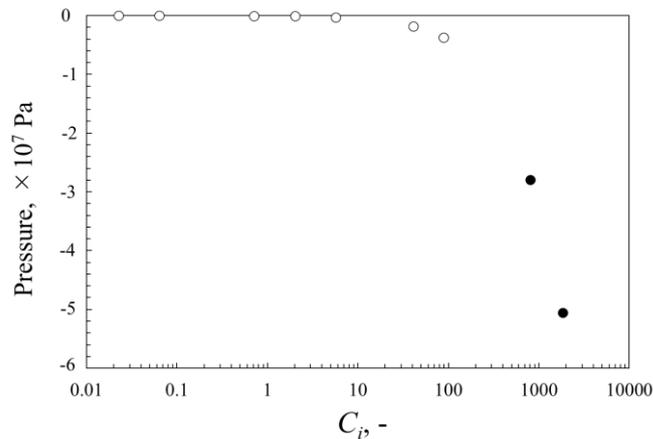


図5 パラメータ C_i と負圧の関係

ティーとなる場合もある(この場合、キャビティ内圧力は大気圧になると予想される)。このように、パラメータ C_i を応用させることで潤滑面に発生するキャビテーションの種類を判定することも可能であり、これらの知見は潤滑面設計技術に応用できるものと期待される。

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

大分大学理工学部創生工学科福祉メカトロニクスコース 大津健史、准教授

5. 研究実施時期

令和2年 3月 1日から 令和4年 3月 31日まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

2022年度日本機械学会機素潤滑設計部門講演会にて発表予定。

また、継続的に研究を実施し、その結果について論文投稿を予定している。

7. 内外における関連研究の状況

当該分野において、潤滑部でのキャビテーション圧力は一義的でなく、様々な値で設定され、数値計算に利用されている。一方で、実際のキャビテーション現象では、油膜破断時に液体の張力等の影響が現れ、それらを考慮した上で圧力を検討する必要がある。本研究ではこの点を実験的に調べ、キャビテーション発生圧力と液体の張力との関係を考察しており、新規的な知見を明らかにしている。また、実験結果を基に、独自のキャビテーション発生パラメータを提案しており、研究の発展は新規的な設計技術に繋がるものとする。

8. 今後の発展に対する希望

今後は実験を継続的に進め、様々な運転条件におけるキャビテーションの発生状況を調べる。また、それとともに発生パラメータとの関係も整理し、パラメータの一般性や各種潤滑油のキャビテーション圧力について検討を進める。これらの知見は、潤滑部におけるキャビテーション発生モデルの確立に繋がるとともに、設計パラメータの提案により、新規的な潤滑面設計技術にも展開すると考えている。