

Study on Cavitation in Elasto hydro dynamic Lubrication

大津, 健史
九州大学大学院工学府

<https://doi.org/10.15017/21997>

出版情報 : 九州大学, 2011, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

第 4 章 キャビティ成長モデルの応用

4.1 グリース潤滑下におけるキャビティの観察

本節では、グリース潤滑下において、EHL 膜後方に発生するキャビテーションの観察を行い、キャビティの成長現象を調べた。

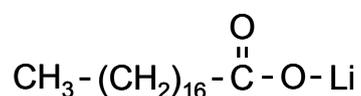
グリースは、増ちょう剤と基油によりなる半固体状のものである。グリースはせん断を受けることにより流動化する。その後、停止すると元の半固体状態へと戻る^{1,2}。油を用いた潤滑部では、油の供給、循環システムが必要となってくるが、グリースでは、そのようなシステムが不要、あるいは、簡易になるため、多くの部分で利用されている。一方で、流動性が低いことから、接触部へ流入する(供給される)グリースの量が少なくなり、油量不足の問題が早期に起こることが報告されている³⁻⁵。この接触域への油の戻りは、第1章 1.4.2 で示したように、キャビテーションの領域が関係した現象である。また、グリースの流動特性、潤滑作用には、増ちょう剤が強く影響を与えることが分かっている^{6,9}。従って、キャビティの発生へも増ちょう剤が影響を及ぼすことが考えられる。

本節では、現在、一般に利用されているグリースである、リチウムステアリン酸、ヒドロキシリチウムステアリン酸、ジウレアを使用したグリースを使用し、その潤滑膜において発生するキャビティを観察した。その結果より、キャビティの成長特性、雰囲気依存性、増ちょう剤の影響などを第3章で述べたキャビティモデルを基に検討した。

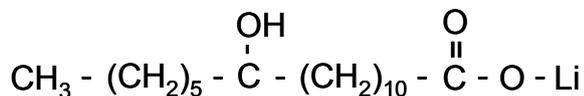
4.1.1 実験条件

本節で行った実験における各条件を以下に示す.

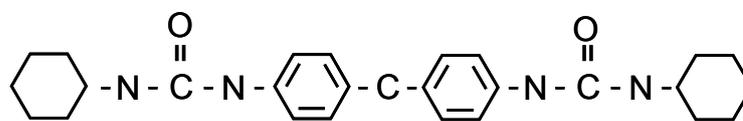
- ・ グリース：増ちょう剤には、リチウムステアリン酸、ヒドロキシリチウムステアリン酸、ジウレアを使用した. 分子の構造式は、以下のように示される.



リチウムステアリン酸 (LiSt)



ヒドロキシリチウムステアリン酸 (12OHLiSt)



ジウレア (Diurea)

基油には、PAOを使用した. ヒドロキシリチウムステアレートでは、3種類の粘度の基油を使用している. リチウムステアレートとジウレアグリースは、同じ基油粘度のものである. グリースの詳細に関しては、Table 4.1-1に示す.

実験におけるグリースの供給は、装置に取り付ける前に、ディスク表面に一定量を塗布することにより行った. なお、実験中の供給は行っていない. また、実験毎の供給量に差がないように、グリースの供給には一定量が供給できる型を使用した. 供給量は、約 0.4 ml である.

- ・ 雰囲気：ヘリウム，空気，アルゴン，二酸化炭素
- ・ 滑り速度：3.8 - 50 mm/s
- ・ 荷重：1 - 7 N，最大ヘルツ接触圧：0.14 - 0.27 GPa
- ・ 温度：295 K

雰囲気の制御方法は、第2章 2.1.4 (1)に示される方法で制御した. 真空引き時のチャンバ内圧力は、5 Paであった.

4.1.2 実験結果, および, 考察

(1) グリースと基油の比較

Fig.4.1-1 に, リチウムステアリン酸グリースにおける, 発生から 60 ms までのキャビティの画像を示す. また, Fig.4.1-2 に, このグリースの基油における, 発生から 16 ms までのキャビティの画像を示す. この実験では, 滑り速度を 20 mm/s, 荷重 1 N とした. 荷重は, ディスクを 20mm/s の一定速度で回転させているときに, 加えた. Fig.4.1-3 には, 発生から 80 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す. また, 測定された滑り速度の変化も示す.

Fig.4.1-1 より, 2 ms においてキャビティの発生が確認される. その後, 時間とともにその領域が流れ方向に拡大している. また, 開始から 16 ms までのキャビティにおいて, その形状は特異的なものである. キャビティ後端は, 部分的に長くなっており, 複数個の突起をもった形状となっている. その後, 30 ms では, キャビティ後端は滑らかな界面となり, 丸まった形状となる. Fig.4.1-2 に示すように, 基油においても, キャビティの発生から 5 ms におけるキャビティでは, 特異的な形状が見られるが, その後のキャビティは, 滑らかな界面をもつ, 丸まった形状へと変化している. 従って, グリースと基油では, 特異的なキャビティ形状が見られる時間が異なっており, その時間はグリースの方が長い. Fig.4.1-3 より, グリースでは, 発生から 30 ms まで, キャビティの急速な成長が見られる. 基油では, 発生から 5 ms まで急速な成長が見られ, その時間はグリースと比較すると短い. また, 発生から 3 ms までの時間におけるグリース, 基油のキャビティ成長速度は, それぞれ 25, 20 mm/s であり, 2つの成長速度が滑り速度に近づいていたことが分かる. また, Fig.4.1-1, 4.1-2 を比較すると, キャビティの急速な成長が起こっている時間において, 特異的なキャビティ形状が見られていたことも分かる.

Fig.4.1-4 には, 基油, グリースにおける発生から 0.1, 0.5, 1 s 後のキャビティの画像を示す. また, Fig.4.1-5 には, 発生から 1 s までのキャビティ長さの時間変化を示す.

Fig.4.1-5 より, グリース, 基油において, 約 50 ms 以降, キャビティの成長速度は小さく, キャビティは, 徐々に長くなっている. キャビティ長さは, Fig.4.1-3 の 80 ms 後の長さの影響を受け, グリースの方が長い. また, Fig.4.1-4 より, グリース, 潤滑油のいずれも, キャビティの成長する方向は, 潤滑油の流れ方向である. Fig.4.1-5 より, 100 ms から 1 s におけるキャビティの成長速度は, グリースにおいて, 0.1 mm/s, 基油において, 0.04 mm/s であり, グリースの成長速度の方が大きい.

Fig.4.1-6 には, 発生から 50 s までのキャビティ長さの時間変化を示す. 20 mm/s で回転させると, 流動性の低さから, 接触域後方のグリースの量がすぐに低下し, キャビティが大気と接続する(大気開放型のキャビテーションになる). 従って, この実験では, 滑り速度を 3.8 mm/s とし, 観察時間

を長くした。荷重は7 Nであった。Fig.4.1-7には、2 sから50 sまでの各時間におけるキャビティの画像を示す。

Fig.4.1-6, 4.1-7より、開始から50 sまでにおいても、キャビティ長さは時間とともに拡大している。また、キャビティは、時間とともに潤滑油の流れ方向に拡大している。

これまでの結果をまとめると次のようになる。グリースにおけるキャビティは、発生から初期の時間域では急速に成長し、その後の時間域では徐々に成長する。これは、潤滑油における成長過程と同傾向であるが、キャビティの各段階での成長時間や、成長後の長さなどは、基油とは異なっている。これは、グリースの見かけ粘度、グリース中に含まれる溶解気体量が基油のものとは異なることが強く影響した結果と考えられる。後述の4.1.3で、この影響について検討する。

(2) 雰囲気気体の影響

Fig.4.1-8には、各雰囲気における、発生から10 s後のキャビティの画像を示す。また、Fig.4.1-9には、各雰囲気における、キャビティ長さの時間変化を示す。リチウムステアリン酸グリースを使用し、滑り速度は3.8 mm/s、荷重7 Nであった。

Fig.4.1-9より、発生から2 sまでにおいて、キャビティ長さは雰囲気気体によって大きな差は見られない。その後、時間経過とともに、雰囲気気体による差が現れ、その長さは、ヘリウム、空気、アルゴン、二酸化炭素の順に長くなっている。また、時間経過とともに、雰囲気気体の差は大きくなる。特に、二酸化炭素中では、他の気体と比べ、キャビティ長さは拡大する。Fig.4.1-8より、発生から10 sにおいて、ヘリウム、空気、アルゴン、二酸化炭素の順に長くなっていることが確認できる。また、いずれも流れ方向に拡大している。

Fig.4.1-10には、10 sにおける各雰囲気でのキャビティ長さ、基油における気体の溶解度との関係を示す。この図より、グリースでのキャビティ成長においても、キャビティ長さは、溶解度が高くなるほど長くなることが分かる。従って、潤滑油の場合(Fig.2.2-7)と同様に、グリースで発生するキャビティにも雰囲気依存性があると分かる。

Fig.4.1-11には、Fig.4.1-9に示す滑り試験を行った後に、逆方向にディスクを回転させ、そこで発生するキャビティの長さを測定した結果である。"reverse"と示したものが、逆回転に試験を行った結果である。この図より、ヘリウムではその差が大きくは見られないが、その他の気体では、2 sにおいて、"reverse"(逆回転)のキャビティの方が長くなっている。その後、時間経過とともに、キャビティは成長し、その過程においても、正、逆回転の条件で差が見られる。特に、二酸化炭素において、逆回転におけるキャビティ長さが顕著に大きくなる。これは、先の正回転時での実験において、グリース中に雰囲気気体が吸収され、溶解気体量が多くなったことが影響したと考えられる(かくは

んによる吸収速度の増加によるもの¹⁰⁾。従って、逆回転時の試験前のグリース中の溶解気体量は、正回転試験の開始前の量よりも高くなるため、キャビティー内へ析出する気体の量が多くなり、キャビティーの成長が大きくなったと推測できる。

(3) 基油粘度の影響

Fig.4.1-12 に、3種類の基油粘度のグリースにおける、発生から 80 ms までのキャビティー長さの変化を示す。グリースは、ヒドロキシリチウムステアリン酸グリースである。基油粘度については、Table 4.1-1 に示す通りである。この実験では、滑り速度を 20 mm/s、荷重 1 N とした。荷重は、ディスクを 20mm/s の一定速度で回転させているときに、加えた。また、この図には、基油におけるキャビティー長さの変化も示している。Fig.4.1-13 には、発生から 40 ms 後における、各グリースでのキャビティーの画像を示す。

Fig.4.1-12 より、発生より 5 ms までは、各グリース、基油において、キャビティー長さには大きな差が見られず、いずれの条件においても、キャビティーは急速に成長する。その後、時間とともに、キャビティーの成長速度は低下していくが、成長速度が変化する時間は基油粘度によって異なる。400 mm²/s では約 40 ms、66 mm²/s では約 20 ms、31 mm²/s では約 15 ms 以降は、キャビティー長さの時間変化が非常に小さくなる。従って、基油粘度が高くなるほど、急速に起こる成長の時間は長くなる。また、この成長時間は、それぞれの粘度において、グリースの方が潤滑油の場合よりも長い。Fig.4.1-13 より、キャビティーの形状には粘度の差は見られず、キャビティー後端は滑らかな界面をもち、丸くなった形状と分かる。

従って、グリースにおいて、基油粘度のキャビティー成長に与える影響は、潤滑油における場合(Fig. 2.3-4)と同様である。急速な成長(大きな成長速度を示した成長)は、基油粘度が高くなるほど、長い時間で起こる。

(4) 増ちょう剤の影響

Fig.4.1-14 には、ヒドロキシリチウムステアリン酸グリースとジウレアグリースにおける、キャビティーの成長を観察した結果である。基油粘度を同じ 31 mm²/s² である。この実験では、予め荷重 7 N を負荷し、その状態からディスクを回転させる。従って、停止から設定速度まで加速する条件におけるキャビティーの観察を行った。ディスクの回転速度は、ガラスディスク表面に存在する傷の位置を時間ごとに測定し、その距離の時間変化を調べることにより求めた。Fig.4.1-15 には、求めた滑り速度の時間変化と、キャビティー長さの時間変化を示す。

Fig.4.1-14 より、2つのグリースにおいて、発生したキャビティーの状態が異なることが明確に分か

る。ヒドロキシリチウムステアリン酸グリースでは、これまでに報告しているように、接触域出口においてキャビティが発生し、急速に成長する、そして、その後、一つの丸まった形状のキャビティへと変化している。一方、ジウレアグリースでは、接触域出口からのキャビティの発生とともに、レンズ表面に付着していると推測される増ちょう剤の塊からのキャビティ発生がいくつも観察される。また、時間とともに、それぞれのキャビティが合体していくことにより、その領域が大きくなっている。Fig.4.1-15において、ジウレアグリースにおける、発生から8 msの時間でキャビティ長さが急に長くなっている。これは、Fig.4.1-14より、増ちょう剤から発生したキャビティと出口から発生したキャビティが合体し、その領域を拡大したことによるものと確認される。

従って、グリースでのキャビティにおいて、その成長は、雰囲気気体、基油粘度の影響の他に、増ちょう剤の分散状態の影響を受けることが分かる。また、この実験に示されたように、キャビティを観察することにより増ちょう剤の分散状態が分かることから、この観察が増ちょう剤の分散状態を調べる簡易な方法として利用できると考えられる。

4.1.3 キャビティ成長モデル

これまでの実験結果より、グリースにおけるキャビティ成長は、基油における場合と同様に、2段階(Initial stage, Second stage)で起こることが分かった。Fig.4.1-16に、グリースと基油におけるキャビティの成長過程を示す。

リチウムステアリン酸グリース、ヒドロキシリチウムステアリン酸グリースにおいて、Initial stageでは、キャビティの成長が急速に起こり、その形状は急速な溶解気体の析出を示す。また、この成長が継続される時間はグリースの方が基油よりも長く、その結果、成長後のキャビティ長さはグリースの方が長くなる。また、基油粘度が高いほど、Initial stageの成長時間は長くなり、成長後のキャビティは長くなる。ジウレアグリースでは、増ちょう剤の塊がキャビティの発生に影響し、キャビティ領域の拡大を引き起こす。

Second stageでは、キャビティは時間とともに成長し、成長速度はInitial stageでの速度よりも小さい。リチウムステアリン酸グリースにおいて、成長速度はグリースの方が基油よりも大きい。また、雰囲気気体の影響も確認でき、キャビティ長さは、基油に対する溶解度と関係を示し、溶解度が高いほど長くなる。

以下に、それぞれの成長段階について検討する。

(1) Initial stage

Initial stage では、第3章3.1.1に述べたように、キャビティの成長が、接触域後方に発生する負圧の領域に関係する。従って、この成長過程では、滑り速度と潤滑油粘度の影響を強く受けることが考えられる。今回、グリース、基油における実験において、滑り速度は一致していることから、粘度の影響を検討することが必要と考えられる。グリースの粘度は、せん断率依存性を持ち、せん断率が大きくなるほど、見かけ粘度は低下し、基油の粘度に近づくと考えられている。このような流動性を示すレオロジーモデルは、Sisko¹¹、Bair¹²、桜井^{1,13}などによって提案されている。グリースの見かけ粘度をレオロジーモデルによって表し、それを使用して、レイノルズ方程式を解けば、グリースにおける接触域後方の圧力分布を計算できると考えられる。以下、その計算方法、結果について述べる。計算モデルは、Fig.3.1-6で示されるものと同じく、接触域後方のすきま部分におけるものである。

今回、グリースのレオロジーモデルには、Sisko¹¹によって報告されている以下の式を使用することとした。

$$\eta = C_1 + C_2 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.1.3.1-1)$$

ここで、 η : 粘度、 $\dot{\gamma}$: せん断率、 C_1 : 基油粘度、 C_2 、 n : 流動性を示すパラメータ

桜井らは、グリースのレオロジー特性を測定し、Fig. 4.1-17, 4.1-18のように報告している^{1,13}。

これらの図より、見かけ粘度は、せん断率の増加とともに低下し、基油粘度(C_1)に近づいていくことが分かる。また、グリースの状態に応じて、パラメータ C_2 、 n を選択することにより、そのレオロジー特性を再現できることも分かる。

今回の計算に使用するパラメータは、以下のようにして決定した。

パラメータ C_1 は、リチウムステアリン酸グリースに使用した基油の粘度、 n は普通のグリースとして紹介されている 0.2 とした。 C_2 に関しては、この後の計算結果より検討する。

次に、レイノルズ方程式を、グリースのレオロジー特性、式(4.1.3.1-1)の考慮した形に修正する。

各パラメータの代入により、式(4.1.3.1-1)は、以下のように示される。

$$\eta = 0.04 + C_2 \dot{\gamma}^{-0.8} \quad (4.1.3.1-2)$$

また、せん断率 $\dot{\gamma}$ を滑り速度 U とすきま h により表すと、式(4.1.3.1-1)は、以下のようになる。

$$\eta = C_1 + C_2 \left(\frac{U}{h} \right)^m \quad (4.1.3.1-3)$$

ここで、すきま h は、式(3.1.1.2-3)で示される。また、 $m = -0.8$ である。

式(3.1.2-1)で示されるレイノルズ方程式において、粘度 η のところに式(4.1.3.1-3)を代入し、整理す

ると、以下のように示される。ここで、境界条件を x_1 で $p_{x_1}=0$ (大気圧), x_2 で $p_{x_2}=0$ (大気圧)とする。

$$\frac{dp}{dx} = 6 \left\{ C_1 + C_2 \left(\frac{U}{h} \right)^m \right\} U \frac{h - h_m}{h^3} \quad (4.1.3.1-4)$$

これを x で積分すると、以下のように示される。

$$p = 6C_1 U \left(\int_{x_1}^x \frac{1}{h^2} dx - h_m \int_{x_1}^x \frac{1}{h^3} dx \right) + 6C_2 U^{1+m} \left(\int_{x_1}^x \frac{1}{h^{2+m}} dx - h_m \int_{x_1}^x \frac{1}{h^{3+m}} dx \right) + C_3 \quad (4.1.3.1-5)$$

ここで、 C_3 , h_m は、積分定数であり、境界条件を考慮し、以下のように示される。

$$C_3 = 0 \quad (4.1.3.1-6)$$

$$h_m = \frac{C_1 \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{h(x)^2} dx + C_2 U^m \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{h(x)^{2+m}} dx}{C_1 \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{h(x)^3} dx + C_2 U^m \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{h(x)^{3+m}} dx} \quad (4.1.3.1-7)$$

従って、圧力分布は、以下のように示される。

$$p(x) = 6C_1 U \left(\int_{x_1}^x \frac{1}{h^2} dx - h_m \int_{x_1}^x \frac{1}{h^3} dx \right) + 6C_2 U^{1+m} \left(\int_{x_1}^x \frac{1}{h^{2+m}} dx - h_m \int_{x_1}^x \frac{1}{h^{3+m}} dx \right) \quad (4.1.3.1-8)$$

まず、パラメータ C_2 に関して、検討を行う。Fig.4.1-19 には、パラメータ C_2 を 10, 100, 150, 200 と設定したときの、粘度とせん断率の関係を示す。Fig.4.1-20 には、式(4.1.3.1-8)より計算された、各パラメータにおける圧力分布を示す。なお、この計算において、 $x_1=a$ である(すなわち、キャビティ一長さは 0)。従って、0 s における圧力分布を示していることになる。また、基油における結果も示す。また、滑り速度や荷重などの条件は、Fig.4.1-3 に示した実験と同様であり、20 mm/s, 1 N とした。

Fig.4.1-20 より、パラメータ C_2 が大きくなるほど、絶対真空を示す領域が大きくなっている。従って、Fig.4.1-19 から分かるように、せん断率の小さな条件で起こる見掛け粘度の増加が、接触域後方に発生する負圧に影響を及ぼしていると考えられる。Fig.4.1-3 より、グリースにおいて、Initial stage の成長後のキャビティ一長さは、約 500 μm である。3.4.1 (3)に示したように、Initial stage の成長後のキャビティ一長さは、0 s における圧力分布と関係してくる。Fig.4.1-20 より、パラメータ C_2 が 150 のとき、絶対真空圧を示す領域は、約 500 μm である。従って、パラメータ $C_2=150$ のときに、実験結果で観察されるキャビティ一長さとはほぼ一致することになる。この結果より、これ以降の計算では、パラメータ C_2 を 150 と設定し、計算を行った。

Fig.4.1-21, 4.1-22 には、計算された圧力分布の時間変化を示している。キャビティ一長さは、Fig.4.1-3 に示す実験結果を使用している。また、滑り速度や荷重などの条件は、実験と同様であり、20 mm/s,

1 Nとした。Fig.4.1-21は、開始から14.6 msまでの結果、Fig.4.1-22は、14.6 msから70 msまでの結果である。また、Fig.4.1-23は、開始から14.6 msまでの時間域における基油での結果である。

Fig.4.1-21と4.1-23の比較において、グリースでは、絶対真空圧が14.6msまで発生しているが、基油では3.4msまで絶対真空圧の発生が見られ、その発生している時間が短い。従って、グリースでは、大きな負圧の発生が継続して起こるので、キャビティの急速成長が引き続き起こったと考えられる。Fig.4.1-22より、グリースにおいても、時間経過とともに、負圧は緩和していく。

Fig.4.1-24には、最小圧力の時間変化とキャビティ長さの時間変化を比較したものを示す。この図より、急速なキャビティの成長は、絶対真空圧まで低下した負圧と関係しており、成長が小さくなる40 ms以降では、発生している負圧の緩和が起こっている。従って、Initial stageにおけるキャビティの成長は、潤滑油の場合と同様に、接触域後方に発生する負圧領域が影響していると考えられる。

上に示したように、グリースでのInitial stageにおけるキャビティの成長は、まず、グリースの粘度とせん断率の関係(レオロジーモデル)を調査し、それを用いて後方に発生する負圧の時間変化を計算することにより、評価できると考えられる。本研究において、レオロジー特性は、高せん断率における粘度の変化を、レオメーターを用いて測定することができなかつたため、モデル式を仮定の基に利用した。このグリースのレオロジー特性の測定は、今後の課題である。また、キャビティの成長の観察結果と、レオロジーモデルの基に求まる後方の負圧分布を比較して、その傾向がどのようなレオロジーパラメータ(例えば、式(4.1.3.1-1)の n , C_2)を探すことにより、そのグリースのレオロジー特性を評価できると考えられる。これは、レオロジー特性を調べる簡易な方法として利用できると考えられる。

(2) Second stage

Second stageでの成長は、第3章3.3に述べたように、溶解気体のキャビティ内への放散が関係している。従って、グリース中で起こる溶解気体の放散現象により、その成長を評価できると考えられる。

実験結果より、この段階におけるキャビティの成長が雰囲気気体に依存すること、また、かくはんによって起こる溶解気体量の増加がその成長に影響を及ぼすことを考慮すると、溶解気体の放散現象でモデル化できると考えられる。しかし、本研究において、グリース中の溶解気体量や移動係数の測定を行うことができなかったため、放散モデルによるキャビティ成長の計算を行うことができなかった。これらの測定に関しては、今後の課題である。

4.1.4 キャビティー領域の回復

これまでに示したように、滑り試験中にキャビティー領域は時間とともに拡大していく。一方で、試験後には、グリース、あるいは、分離した基油が表面張力や重力によって、キャビティー領域へ戻るため、その領域は減少していく。ある一定の時間経過後には、試験前の状態とほぼ変わらなくなる。大野らは、潤滑油において、このキャビティー領域消滅を観察している¹⁴。その結果、キャビティー領域の消滅時間は、潤滑油粘度と表面張力(濡れ性)で整理されると報告している。このような停止後のキャビティー領域の回復は、往復動運転時の反転時の油量や運転再開時の接触部の油量に関わるため、重要である。ここでは、運転停止後のキャビティー領域の消滅現象について検討を行う。特に、キャビティー領域に、グリース、あるいは、基油のどちらが戻っているのか、といった点に着目し、観察を行った。

(1) キャビティー領域の回復の観察

Fig.4.1-25 は、実験後の、キャビティー領域の消滅を観察した結果である。リチウムステアリン酸グリースを使用した。開始から 10 s 間、滑り試験を行い、その後、試験を停止し、95 min まで観察した。滑り速度は、3.85 mm/s、荷重は、7 N である。なお、荷重を負荷した状態から、ディスクを回転させている。

この図より、試験停止から 1 s 後において、接触域後方のキャビティー領域が消滅している。その後、キャビティー領域は、接触域後方の油膜出口であった部分から消滅していく。時間とともに消滅していき、1 min 後に、試験時に観察されたキャビティー領域の約半分が消滅している。その後の 95 min には、ほぼ全領域が消滅している。

次に、この回復の機構を検討する。これには、グリース自体が移動しているのか、基油のみが移動しているのかを把握する必要がある。その方法として、以下の 2 つ (FT-IR による調査、キャビティーの観察による調査) を試みた。

(2) FT-IR による調査

消滅したキャビティー領域を FT-IR により分析し、得られた赤外線吸収スペクトルを解析することにより、その領域の成分を知ることができる。従って、何がキャビティー領域に移動していたのか、を把握することができる。このような FT-IR を用いた潤滑試験は、これまでも行われている。例えば、接触域近傍での潤滑油の分子量分布の測定¹⁵や、接触域でのゲル潤滑剤の挙動の解析¹⁶、グリース潤滑膜での増ちょう剤量分析¹⁷⁻¹⁹、接触域での溶解した冷媒の濃度分布の測定²⁰などにおいて使用されている。

Fig.4.1-26 に、分析位置を示す。この図における(a)は、試験中 3 min における接触域の観察結果である。リチウムステアリン酸グリースを使用した。ディスク材料には、赤外線吸収が小さい、フッ化カルシウム(CaF₂)を使用した。滑り速度は、28 mm/s、荷重 8 N であり、この実験に関してのみ、ディスクと接触する相手側のボールに鋼球(SUJ2、直径 15 mm)を使用した。この画像より、ヘルツ接触域は確認できないが、接触域後方にキャビティーの発生が観察される。(b)は、試験後 5 min における接触域の画像である。キャビティー領域の消滅が確認できる。分析位置を、No.1、No.2 とした。No.1 は、試験中、キャビティー領域となっている部分であり、停止後、キャビティーは消滅している。No.2 は、接触域後方の部分であり、試験中もグリースが存在している。

Fig.4.1-27 に分析結果を示す。また、分析位置 No.1 の試験前の分析結果、グリース、基油における分析結果も示している。グリースの分析結果では、約 1600 cm⁻¹ で吸収が見られ、これは、増ちょう剤のステアリン酸分子中の C=O の伸縮運動によるものである²¹。基油では、約 1600 cm⁻¹ に吸収が見られない。従って、この部分の吸収により、グリースか、基油か、を判断できる。

この図より、No.1 の試験前には、約 1600 cm⁻¹ で吸収が見られるが、試験後には、その位置での吸収がなくなる。従って、試験後には、主に基油となっている。No.2 では、グリースのスペクトルが見られ、この部分では、グリースの分離は起こっていない。このような結果は、Hurley らによっても示されている¹⁸。

従って、この結果より、キャビティー領域には、周囲のグリースから基油のみが流れ、その領域を満たしていくことが推測される。接触域付近ではせん断率が非常に高く、グリースは強いせん断を受ける。そのため、基油と増ちょう剤の結合が弱くなり、基油は容易に分離することができる。停止後、キャビティー領域へは、流動性の高い基油のみが移動していくことが推測される。なお、ヒドロキシリチウムステアリン酸グリース、ジウレアグリースにおいても、同じ結果が得られ、消滅したキャビティー領域には基油が存在することが観察された。

(3) キャビティーの観察による調査

この節で述べたように、キャビティーの成長は、グリースと基油で異なる。4.1.2 (1)で示したように、Initial stage 成長後のキャビティー長さは、グリースの方が長くなる。また、Second stage でのキャビティー長さにおいても、初期のキャビティー長さの影響を受け、グリースの方が長くなる。従って、キャビティー領域が消滅した後に、滑り試験をもう一度行い、キャビティー長さを調べ、その結果をグリースや基油における結果と比較することにより、その成分を予想することができると考えられる。

Fig.4.1-28 の(a)は、滑り試験中 10 s におけるキャビティーの画像である。ヒドロキシリチウムステ

アリン酸グリース(動粘度 $31\text{mm}^2/\text{s}@313\text{K}$)を使用した。実験は、滑り速度 5mm/s 、荷重 7N の条件で行った。この図において、キャビティは、空気とつながった大気開放型キャビティとなっている。(b)は、(a)の試験を停止させ、 2h 経過後の接触域の画像である。キャビティ領域の消滅が確認される。

Fig.4.1-29 には、各条件での開始から 1s におけるキャビティの画像である。(a)は、Fig.4.1-28 の(b)の状態から、実験を行ったときに観察されるキャビティである。滑り方向は、始めに行った実験(Fig.4.1-28 の(a))と同じ方向である。(b)は、グリースにおける結果、(c)は、基油における結果である。また、図中には、キャビティ長さも示す。

これらの結果より、(a)のキャビティ長さは $63\text{ }\mu\text{m}$ であり、(b)のグリースの $226\text{ }\mu\text{m}$ より短く、(c)の基油の長さに近いことが分かる。また、(a)において、キャビティの両側部分での長さは、基油のものより長いことも分かる。

Initial stage 成長後におけるキャビティ長さは、同じ滑り速度であれば、潤滑油粘度が影響してくる。従って、本実験では同じ滑り速度であるので、キャビティ長さの比較より、回復後の領域には、グリースではなく、基油に近い粘度の成分が存在していることが推測される。(2)の FT-IR による結果を考慮すれば、この検討は妥当となる。また、両側部分では、グリースとの境界部分であるので、増ちょう剤の影響を受け、その長さが長くなったと考えられる。

このように、キャビティの成長挙動を観察することにより、グリースの成分とその分離を把握することができることが分かった。これは簡易な評価方法になると考えられる。

4.1.5 まとめ

本節において、グリース潤滑膜におけるキャビティの成長を調べ、以下の結果が得られた。

- ・グリース潤滑膜においても、キャビティ成長は、2段階で起こる
- ・Initial stage におけるキャビティ成長には、グリースと基油で違いが見られ、グリースの方が、成長時間が長く、成長後のキャビティ長さが長い。この時間域におけるキャビティの成長は、キャビティ後方に発生する負圧が関係しており、その時間変化によって成長を理解できる。このとき、グリースの見かけ粘度のせん断率依存性を考慮しなければならない。また、ジウレアグリースでは、増ちょう剤の塊からのキャビティの発生も見られた。
- ・Second stage におけるキャビティ成長には、溶解気体の影響が見られ、成長速度は Initial stage よりも小さい。この時間域におけるキャビティの成長は、溶解気体のキャビティ内への放散より理解できる。放散量を計算するには、グリース中の溶解気体量、気体の移動係数を把握しなければならない。
- ・停止後、キャビティ領域は時間とともに消滅するが、その領域には基油が存在していることが分かった。これは、観察されるキャビティ長さからも判断できる。

(参考文献)

- 1 日本トライボロジー学会 グリース研究会, 潤滑グリースの基礎と応用, 養賢堂, 2007
- 2 星野, “グリース潤滑の理論”, トライボロジスト, 47, 1, 2002, 8-14
- 3 相原, “弾性流体潤滑におけるグリース膜厚さの実験的研究(第2法)”, 潤滑, 25, 6, 1980, 379-386
- 4 CANN, P.M., “Starvation and Reflow in a Grease-Lubricated Elastohydrodynamic Contact”, Tribology Transactions, 39, 3, 1996, 698-704
- 5 Cann, P.M., “Thin-film grease lubrication”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 213, 1999, 405-416
- 6 Cann, P.M.E., “Understanding grease lubrication”, THE THIRD BODY CONCEPT: INTERPRETATION OF TRIBOLOGICAL PHENOMENA, Elsevier, 1996, 573-581
- 7 Kaneta, M., Ogata, T., Takubo. and Naka., “Effects of a thickener structure on grease elastohydrodynamic lubrication films”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 214, 2000, 327-336
- 8 遠藤, 董, 木村, “低速域におけるグリースの EHL 膜厚測定”, JAST トライボロジー会議予稿集 東

京 2008-5, 181-182

- 9 金満, 田中, 杉村, “グリース潤滑膜の基油と増ちょう剤の蛍光観察”, JAST トライボロジー会議予稿集 東京 2010-5, 279-280
- 10 大矢, 諸岡, 工学部学生のための移動速度論, 技報堂出版, 1980
- 11 SISKI, A.W., “The Flow of Lubricating Greases”, Industrial and Engineering Chemistry, 50, 12, 1958, 1789-1792
- 12 Bair, S. and Khonsari, M.M., “Reynolds equations for common generalized Newtonian models and an approximate Reynolds-Carreau equation”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 220, 2006, 365-374
- 13 桜井, 星野, 渡嘉敷, 藤田, 潤滑グリースと合成潤滑油, 幸書房, 1983
- 14 田中, 大野, “EHL 後流に及ぼす潤滑油の影響”, JAST トライボロジー会議予稿集 東京 2005-11, 227-228
- 15 小野, 山本, “流体潤滑下の接触域での潤滑油の構成成分変化に関する研究”, トライボロジスト, 49, 6, 2004, 501-508
- 16 Takahashi, K., Shitara, Y., and Mori, S., “Direct Observation of Thermo-Reversible Gel-Lubricants in EHL by FT-IR Micro-Spectroscopy”, Tribology Online, 3, 2, 2008, 131-136
- 17 Hurley, S. and Cann, P.M., “Infrared Spectroscopic Characterisation of Grease Lubrication Films on Metal Surfaces”, NLGI Spokesman, 2000 October, 13-21
- 18 Hurley, S. and Cann, P.M., “IR Spectroscopic Analysis of Grease Lubricant Films in Rolling Contacts”, Lubrication at the Frontier, Elsevier, 1999, 589-600
- 19 Yamashiro, T., Nanao, H., Minami, I. and Mori, S., “Analysis of greases at EHL contacts by means of an *in situ* FT-IR spectroscopy”, Proceedings of ASIATRIB 2006 KANAZAWA, 2006, 287-288
- 20 Tanaka, S., Kyogoku, K. and Nakahara, T., “THE MEASUREMENT OF REFRIGERANT CONCENTRATION IN LYBRICATION FILM UNDER REFRIGERANT ATOMSPHERE BY FT-IR”, Synopses of the International Tribology Conference Nagasaki, 2000, 341-342
- 21 堀口, 赤外吸光図説総覧, 三共出版, 1973

Table 4.1-1 Greases used in this study

Grease	Thickener	Base oil	Base oil viscosity	Worked penetration
LiSt	Lithium stearate, 12wt%	PAO	19 mm ² /s @ 313K	336
Diurea	Diurea, 13.4wt%		31 mm ² /s @ 313K	280
12OH LiSt	Lithium hydroxystearate, 12wt%		31 mm ² /s @ 313K	236
			66 mm ² /s @ 313K	291
			411 mm ² /s @ 313K	386

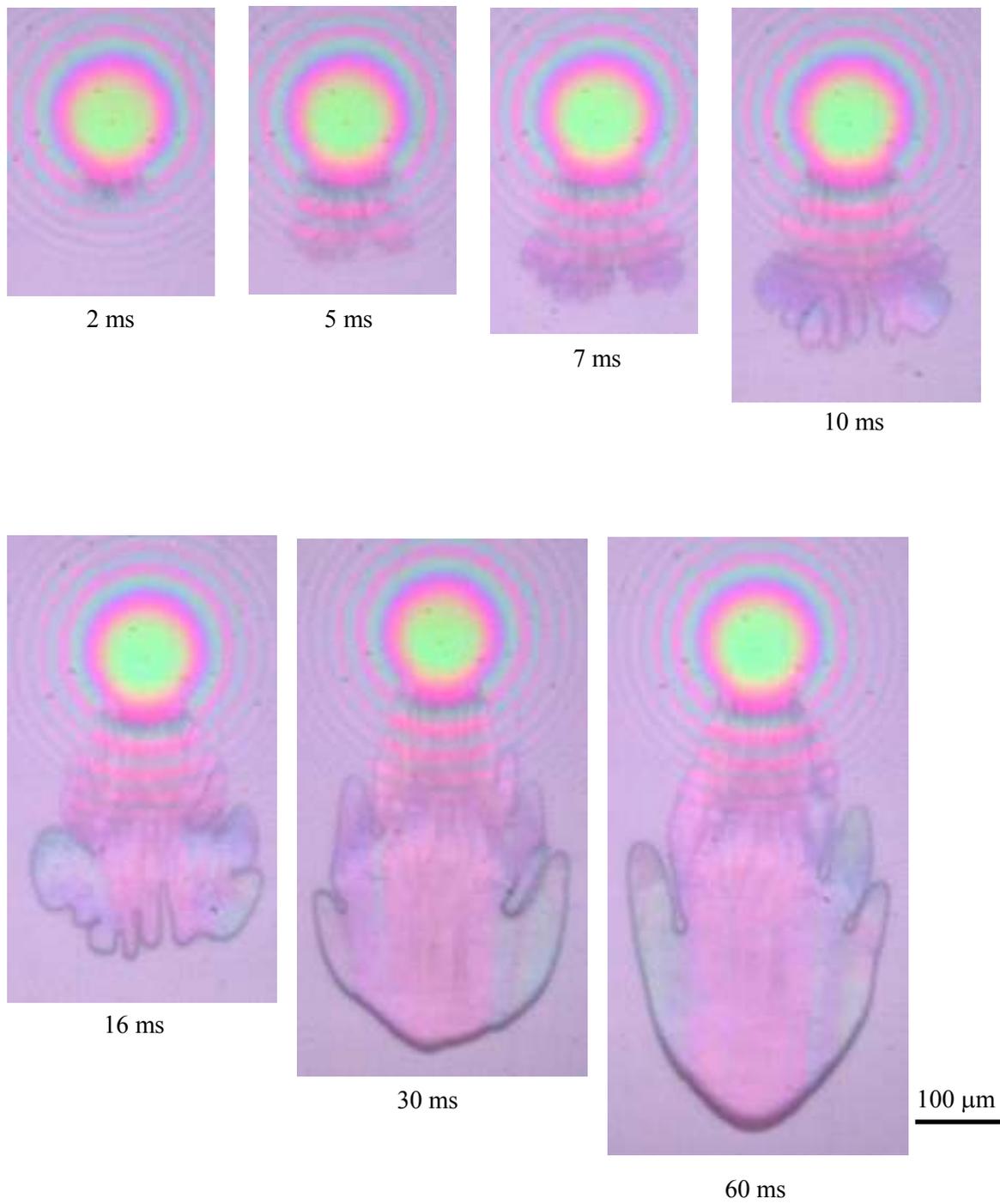


Fig.4.1-1 Cavity growth in LiSt grease until 60 ms after the start

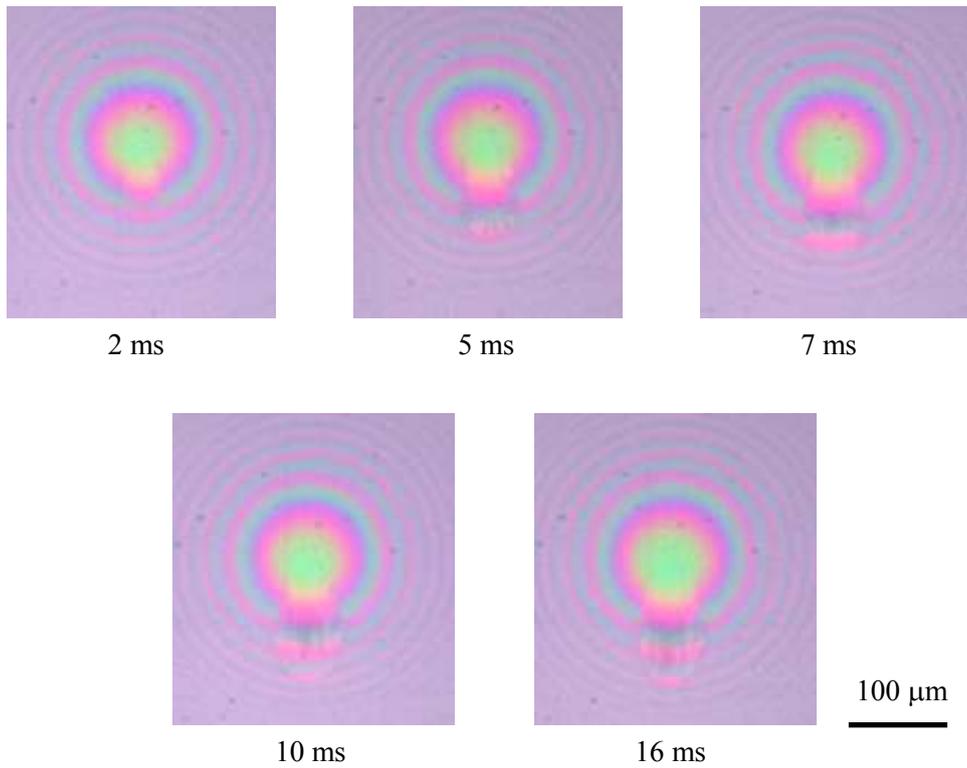


Fig.4.1-2 Cavity growth in base oil until 60 ms after the start

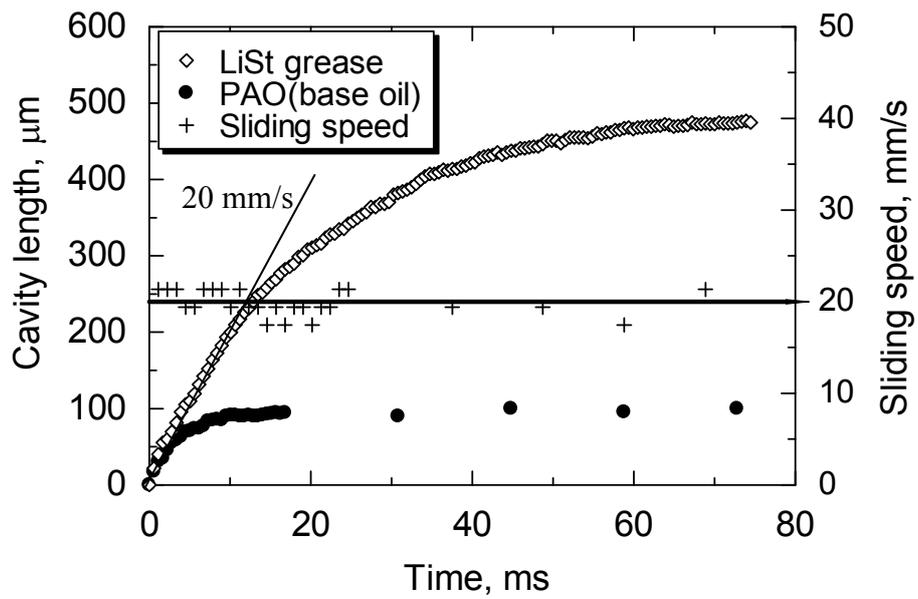
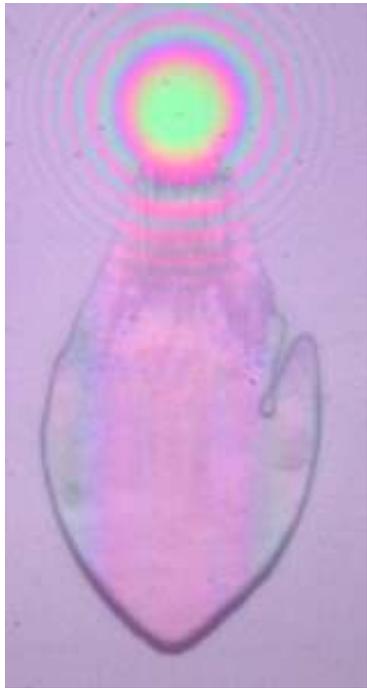


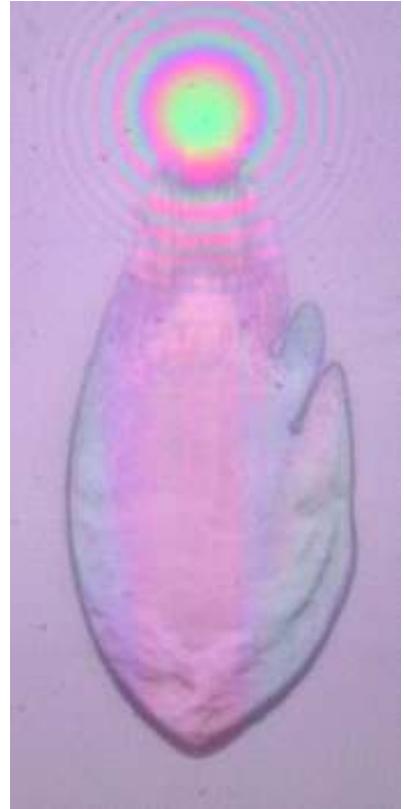
Fig.4.1-3 Changes in cavity length in LiSt grease and base oil



0.1 s



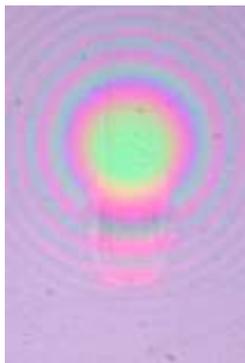
0.5 s



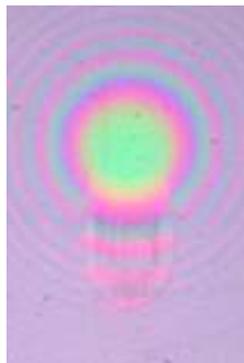
1 s

100 μm

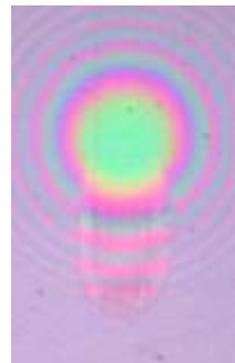
(a) Lithium stearate grease



0.1 s



0.5 s



1 s

(b) Base oil

Fig.4.1-4 Photographs of cavity in base oil and grease at 0.1, 0.5 and 1s

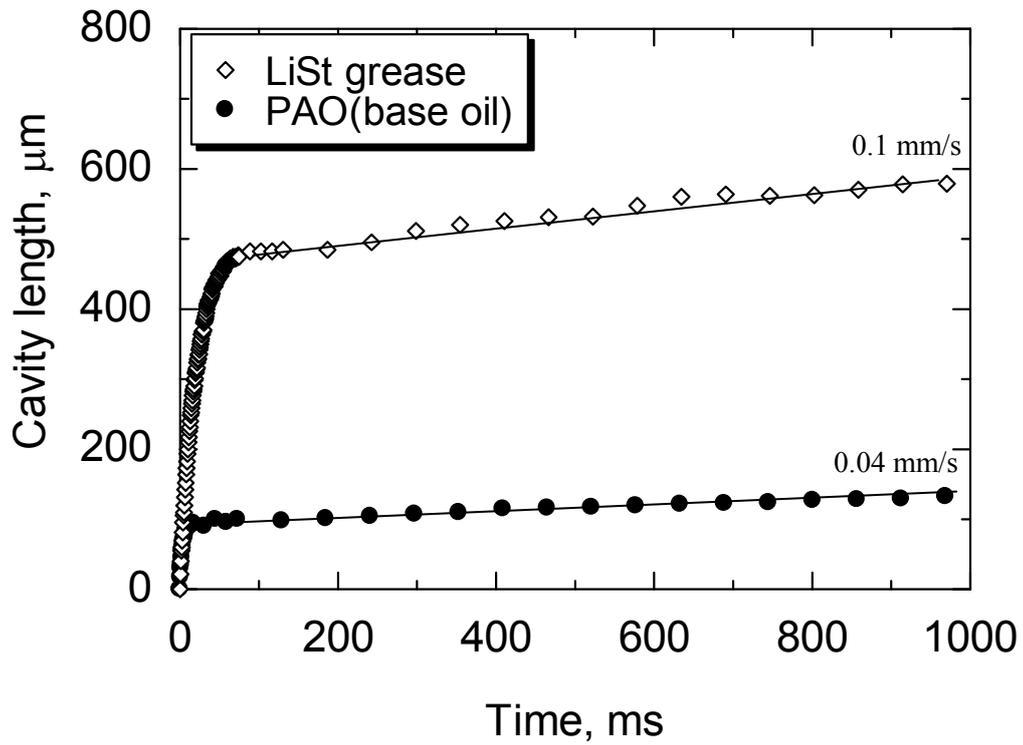


Fig.4.1-5 Changes in cavity length in LiSt grease and base oil

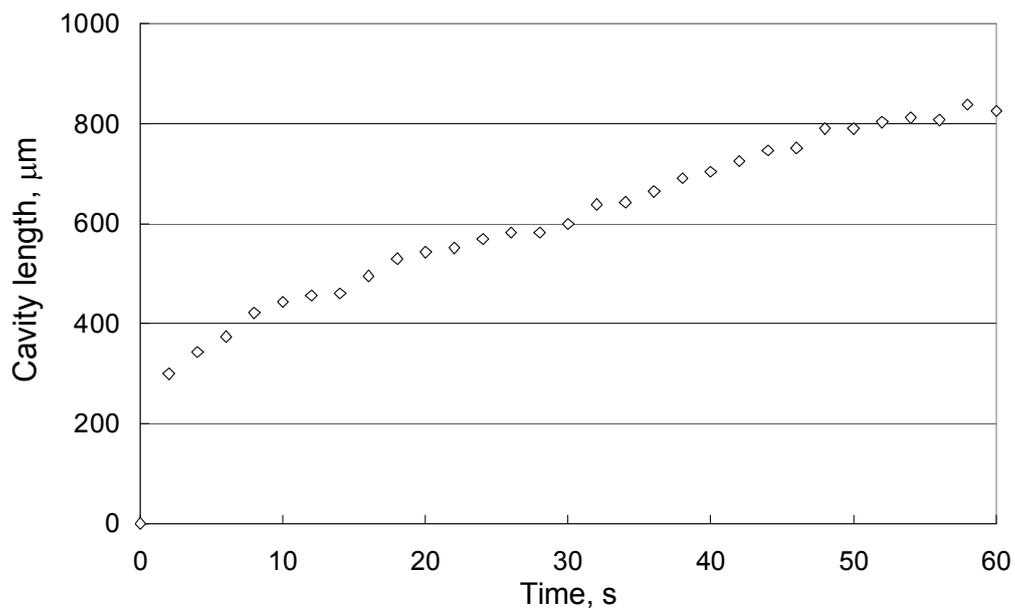


Fig.4.1-6 Changes in cavity length with time in LiSt grease

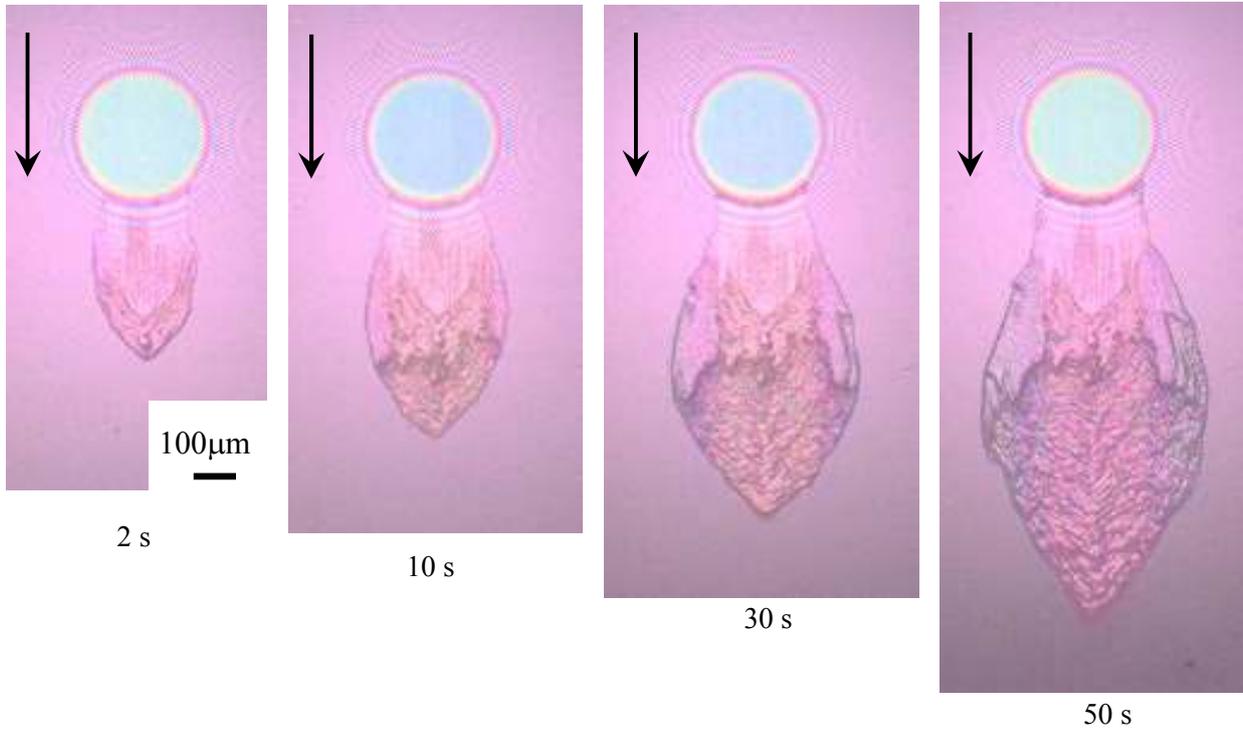


Fig.4.1-7 Cavity growth in LiSt grease

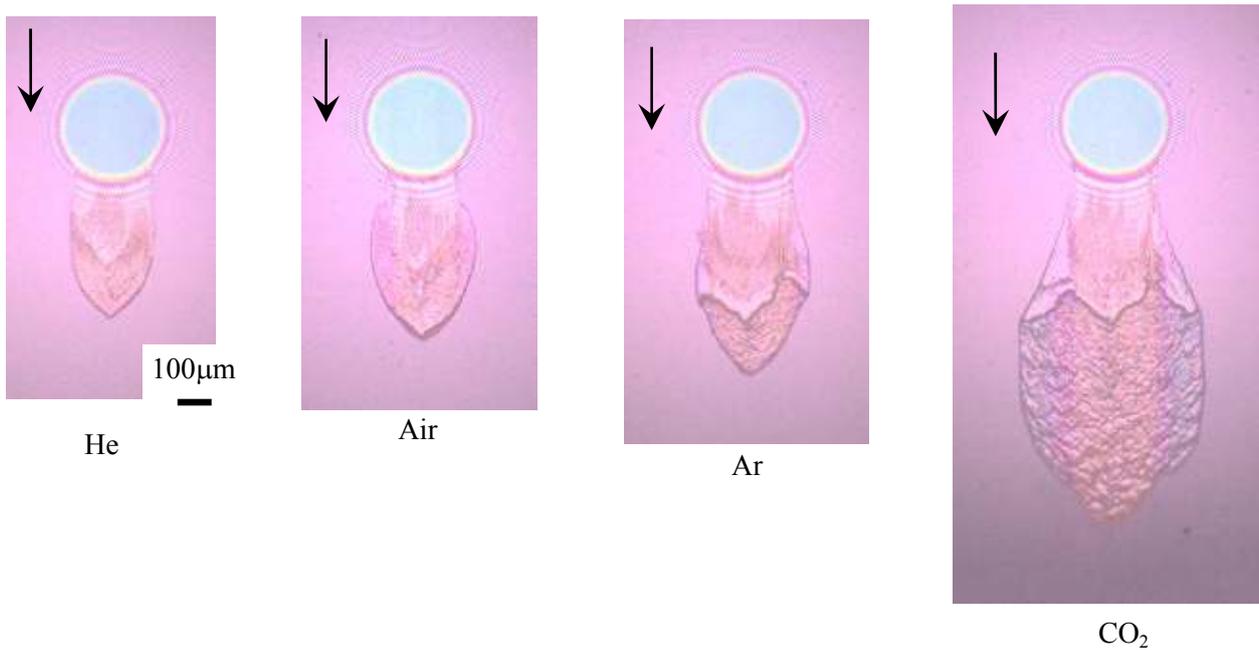


Fig.4.1-8 Effect of surrounding gas on cavity length at 10 s

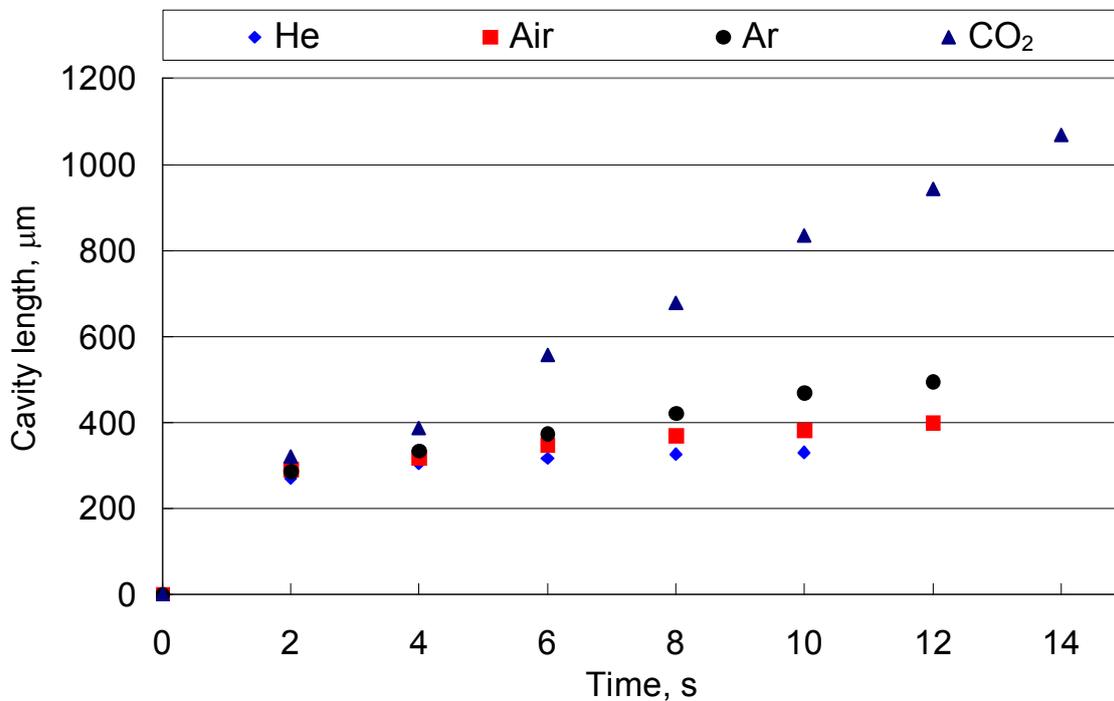


Fig.4.1-9 Changes of cavity length in LiSt grease from the start to 14 s in various gases

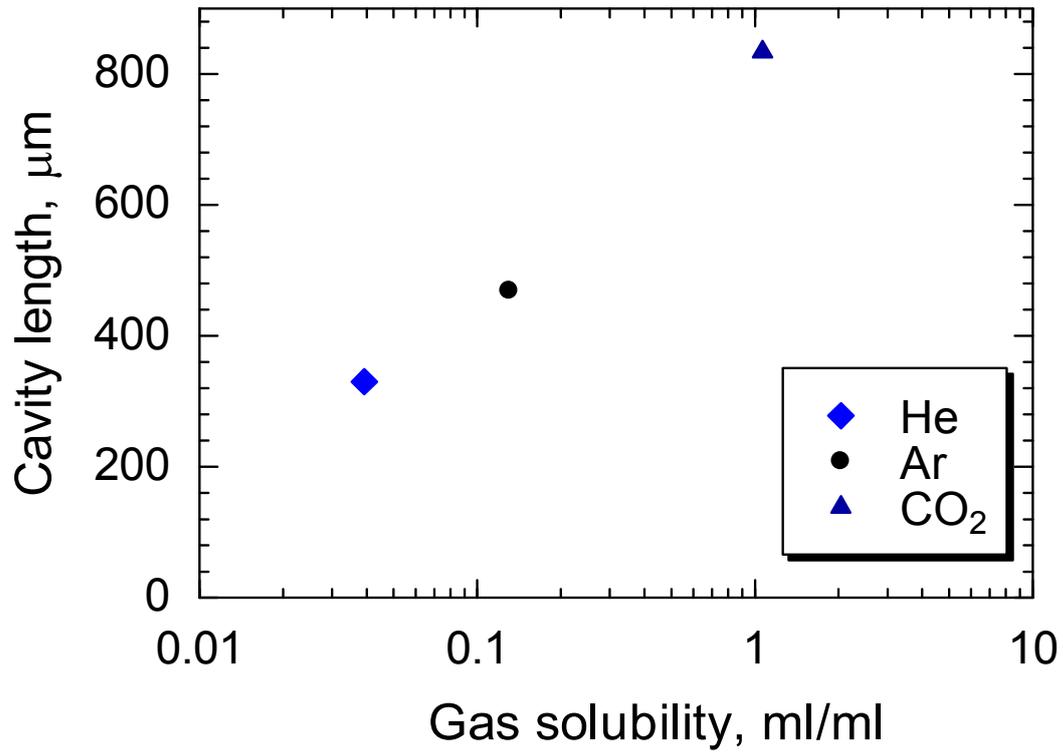


Fig.4.1-10 Relation between cavity length and gas solubility of base oil

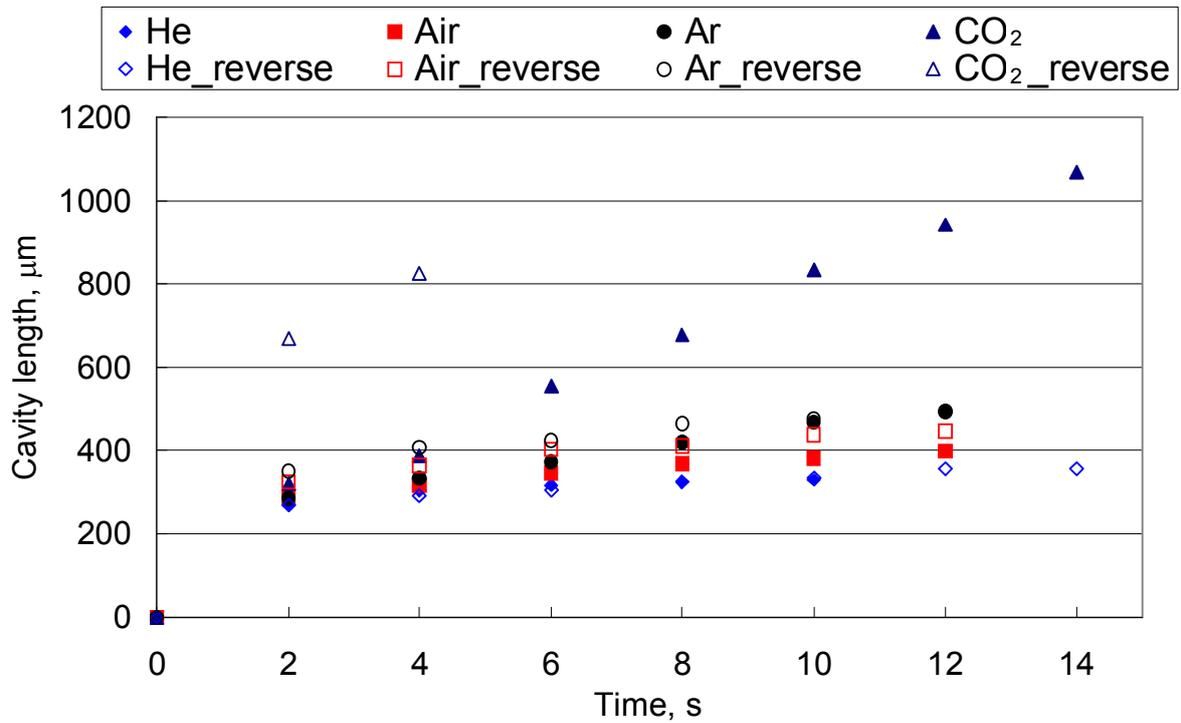


Fig.4.1-11 Cavity growth in reverse rotation

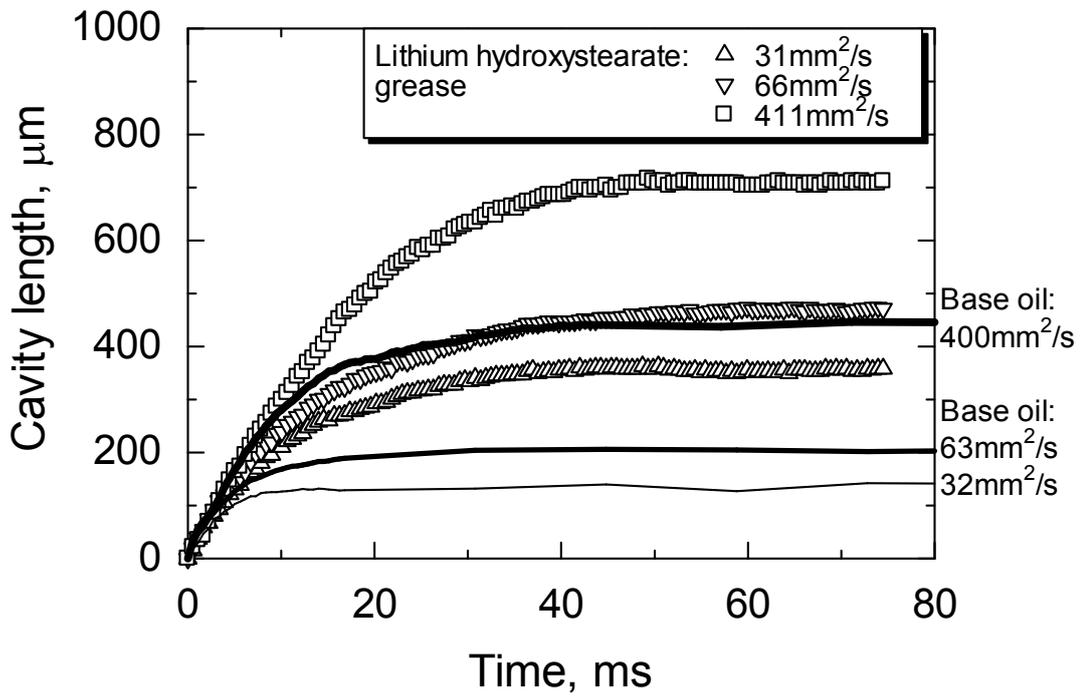


Fig.4.1-12 Effect of base oil viscosity on cavity growth

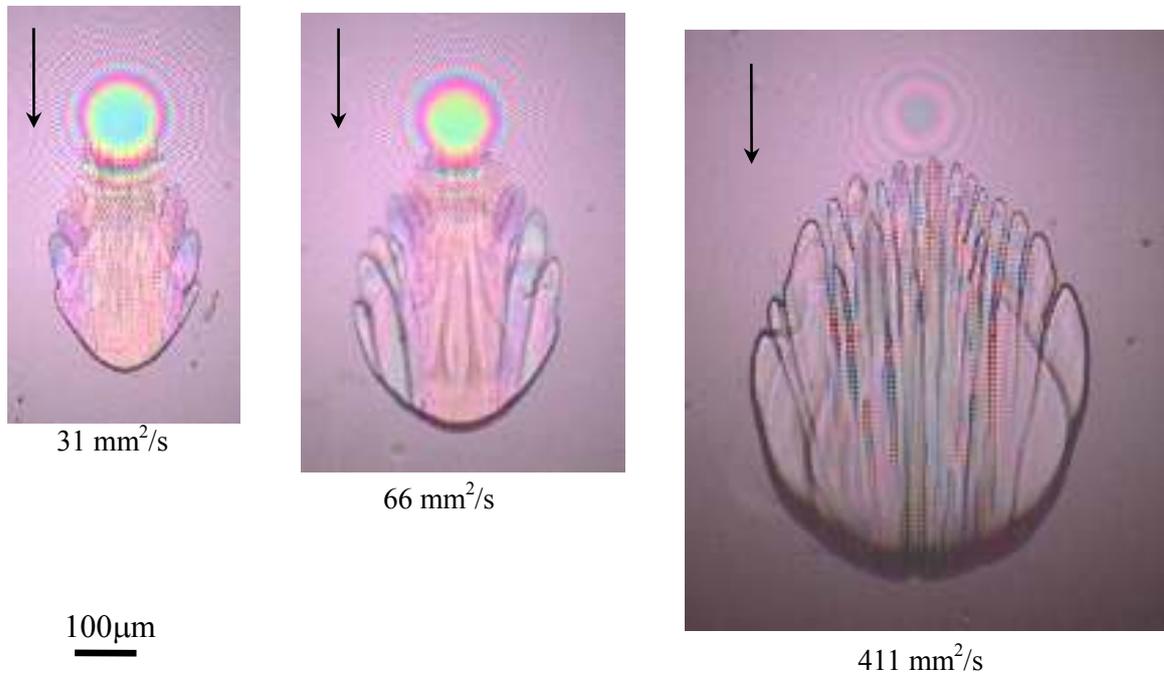


Fig.4.1-13 Cavity at 40 ms in greases with various base oil viscosity

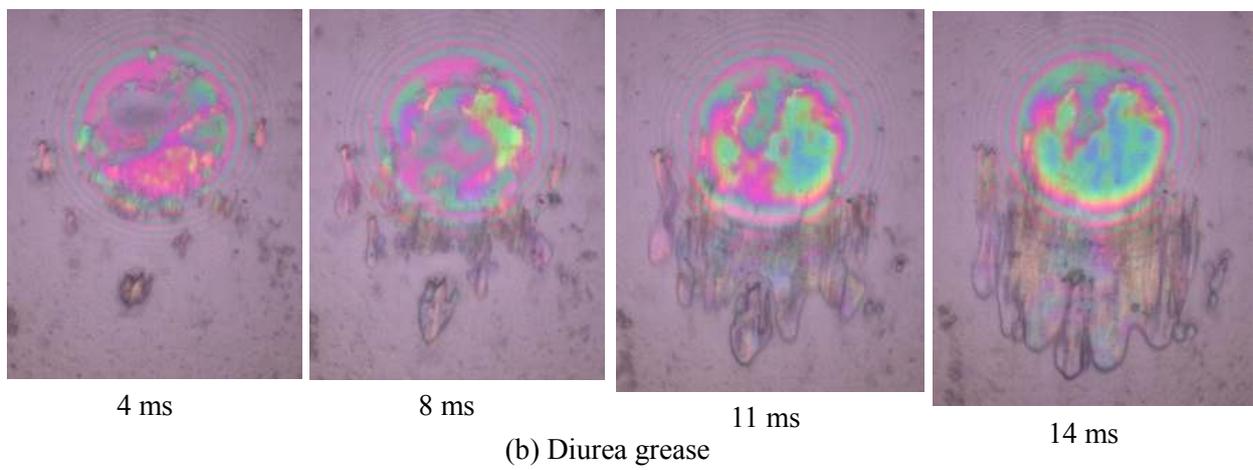
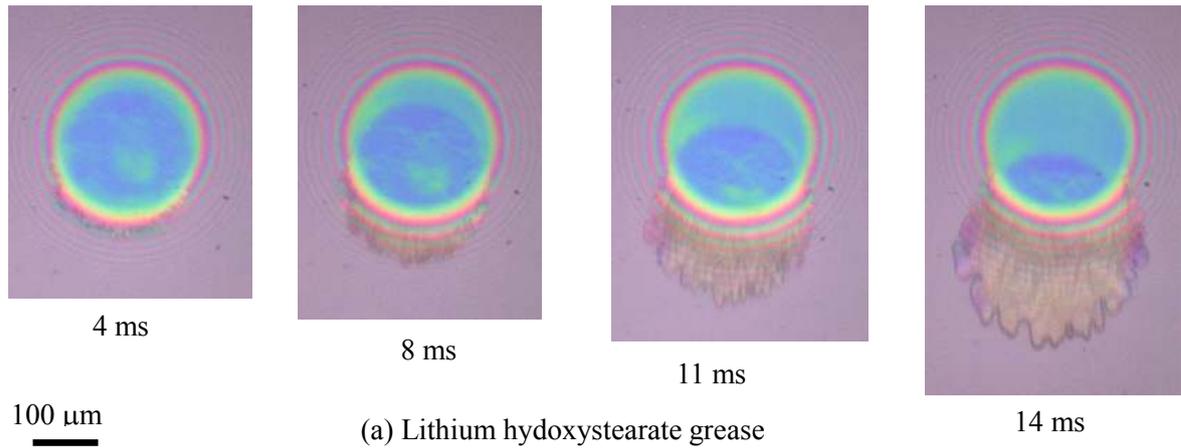


Fig.4.1-14 Cavity growth in two greases

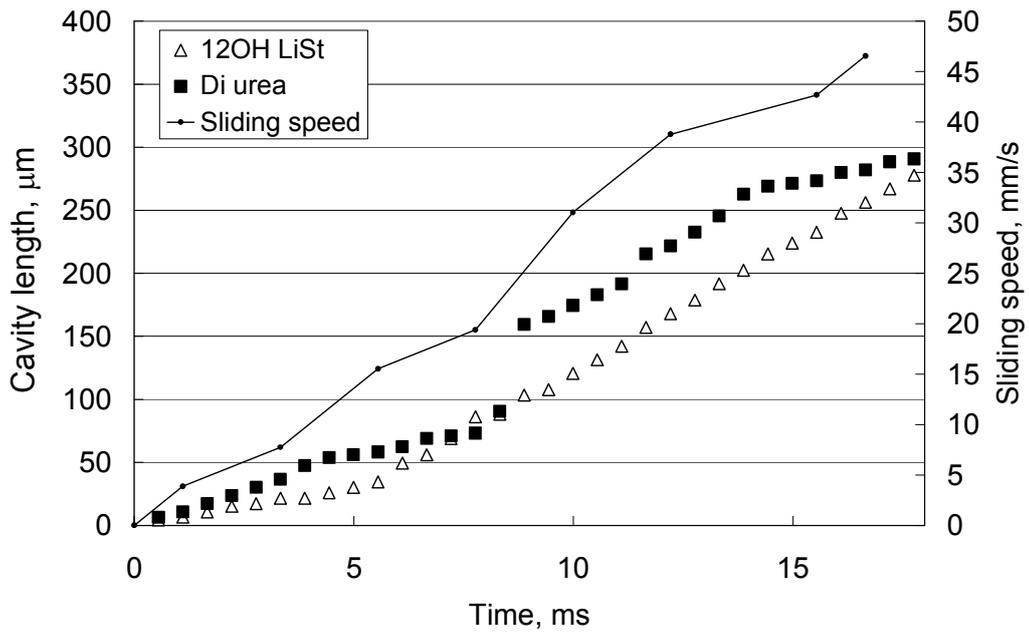


Fig.4.1-15 Changes in cavity length from the start to 18 s in two greases

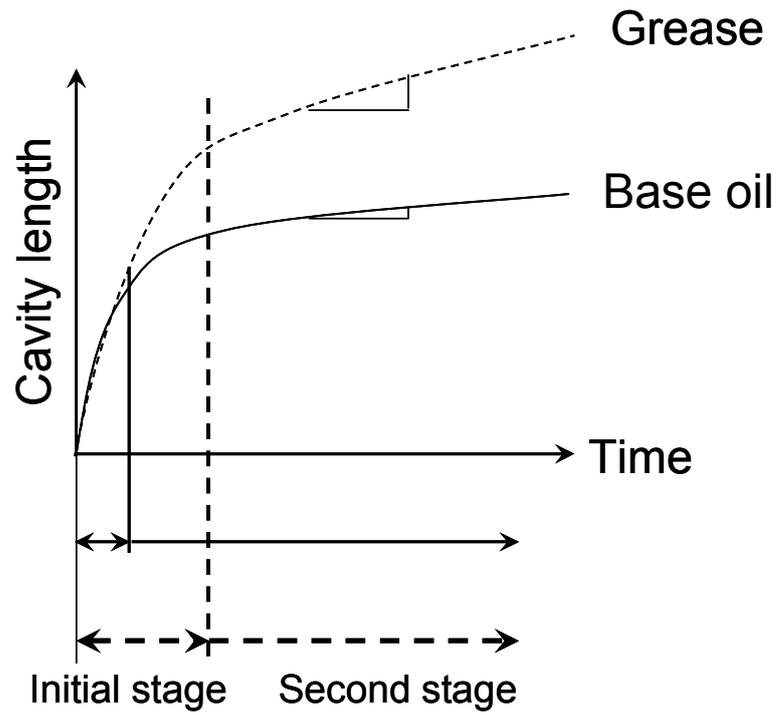


Fig.4.1-16 Cavity growth in grease

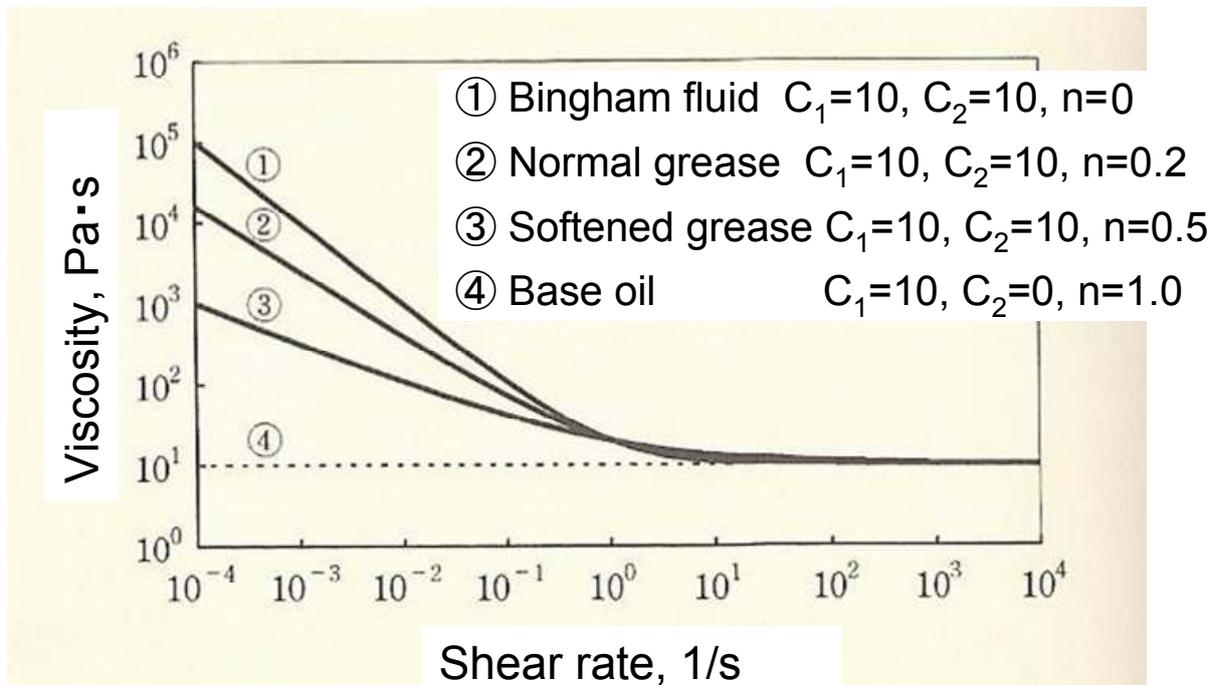


Fig.4.1-17 Grease rheology model, effect of n

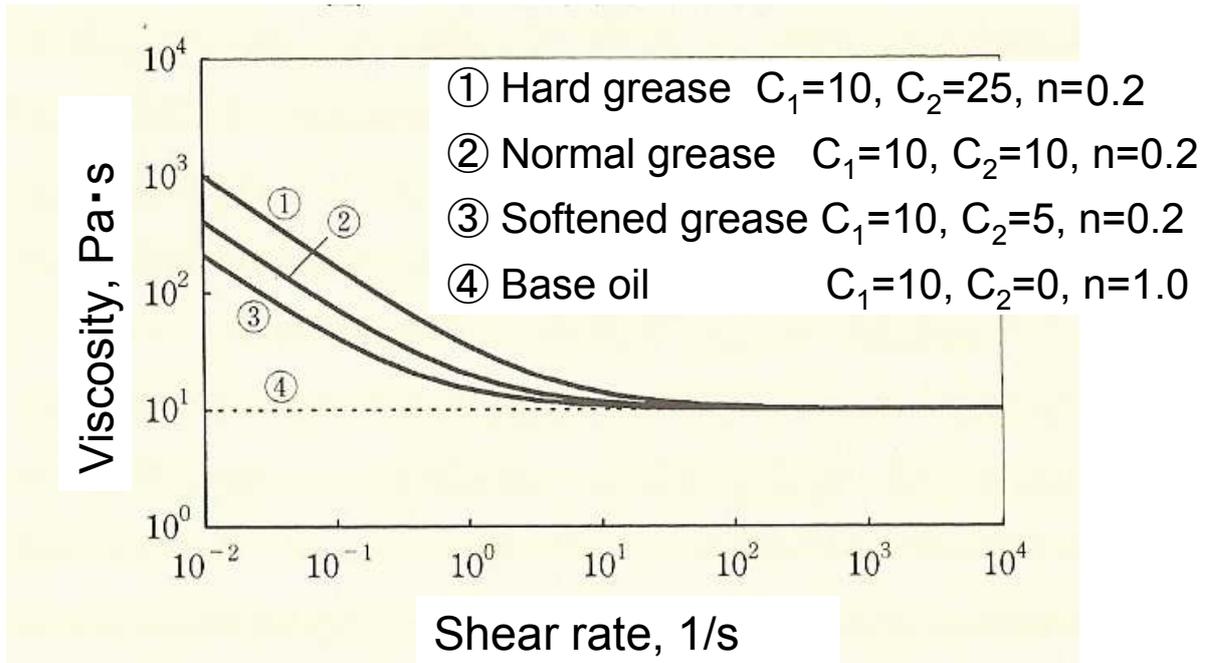


Fig.4.1-18 Grease rheology model, effect of C_2 ¹

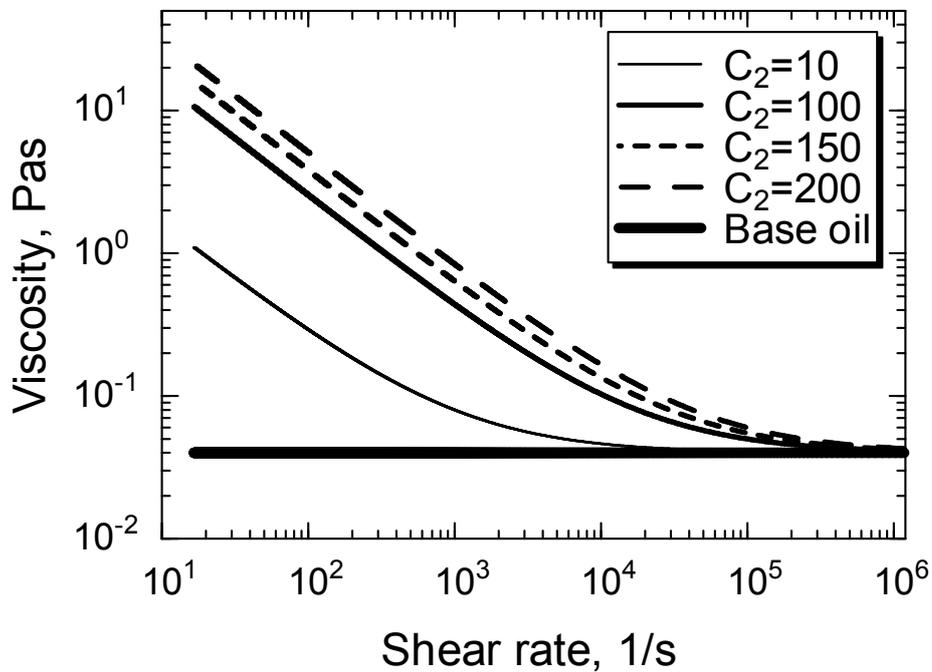


Fig.4.1-19 Relation between viscosity and shear rate

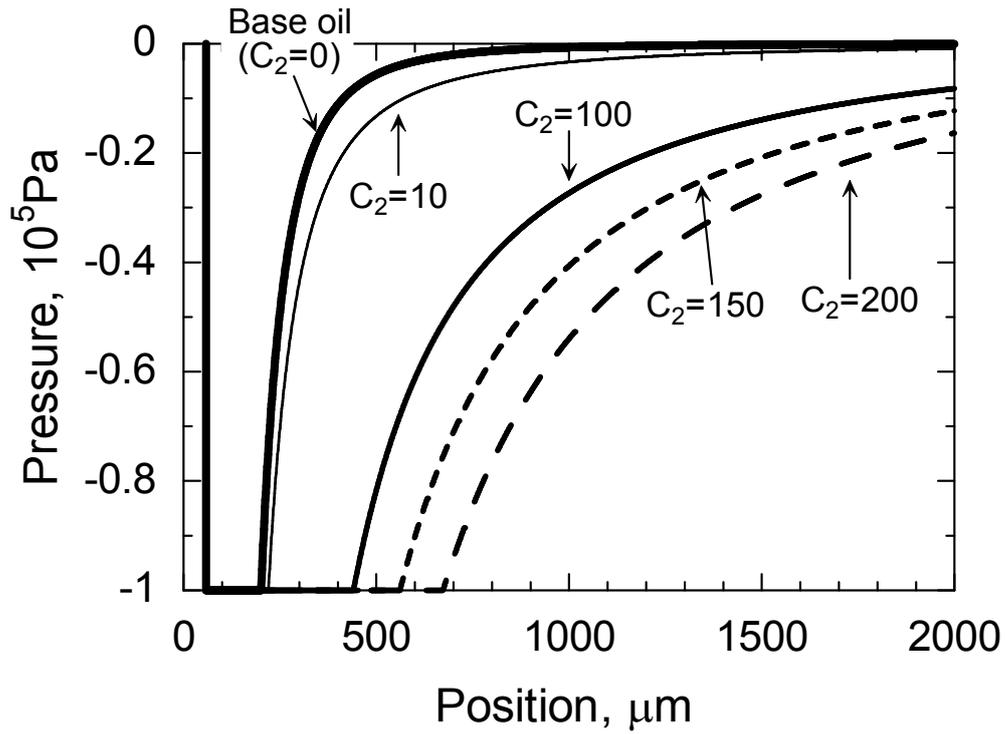


Fig.4.1-20 Effect of C_2 on negative pressure distribution

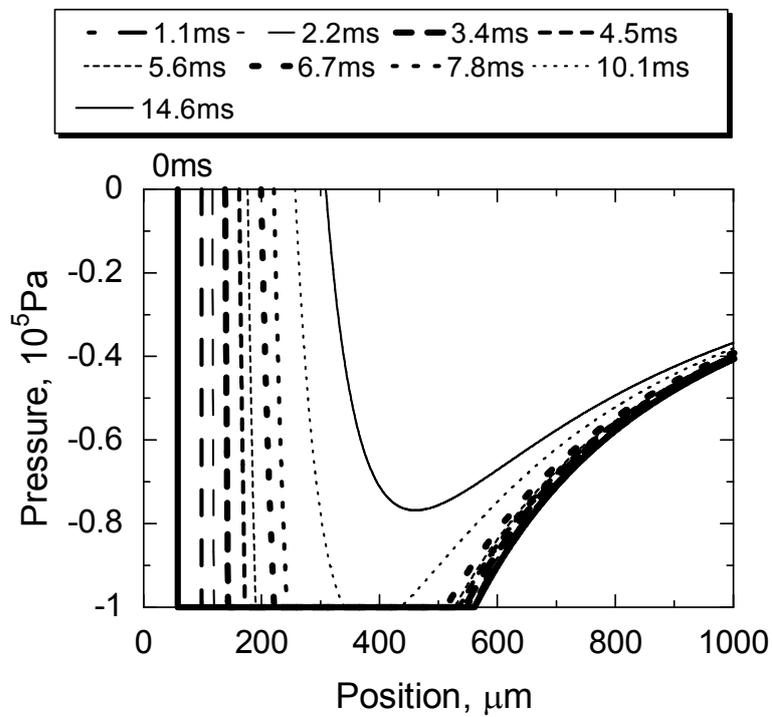


Fig.4.1-21 Changes in pressure distribution with time in LiSt grease

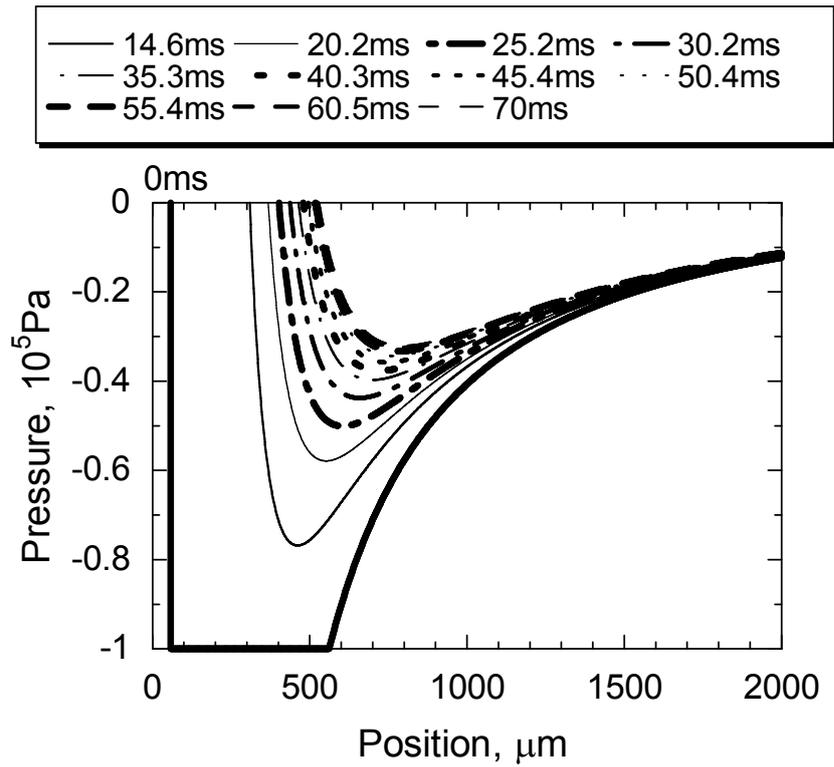


Fig.4.1-22 Changes in pressure distribution with time in LiSt grease

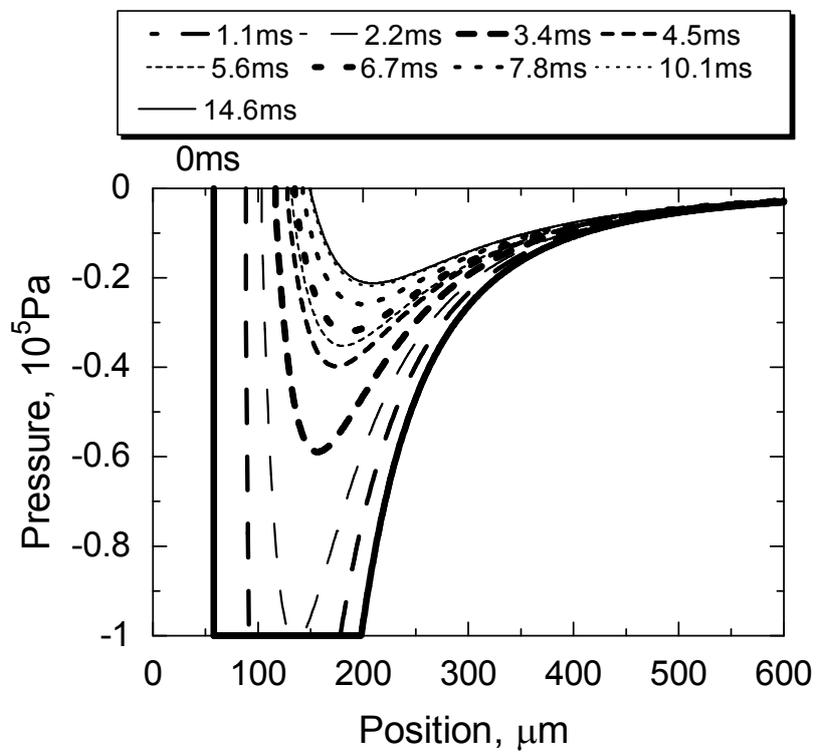


Fig.4.1-23 Changes in pressure distribution with time in base oil

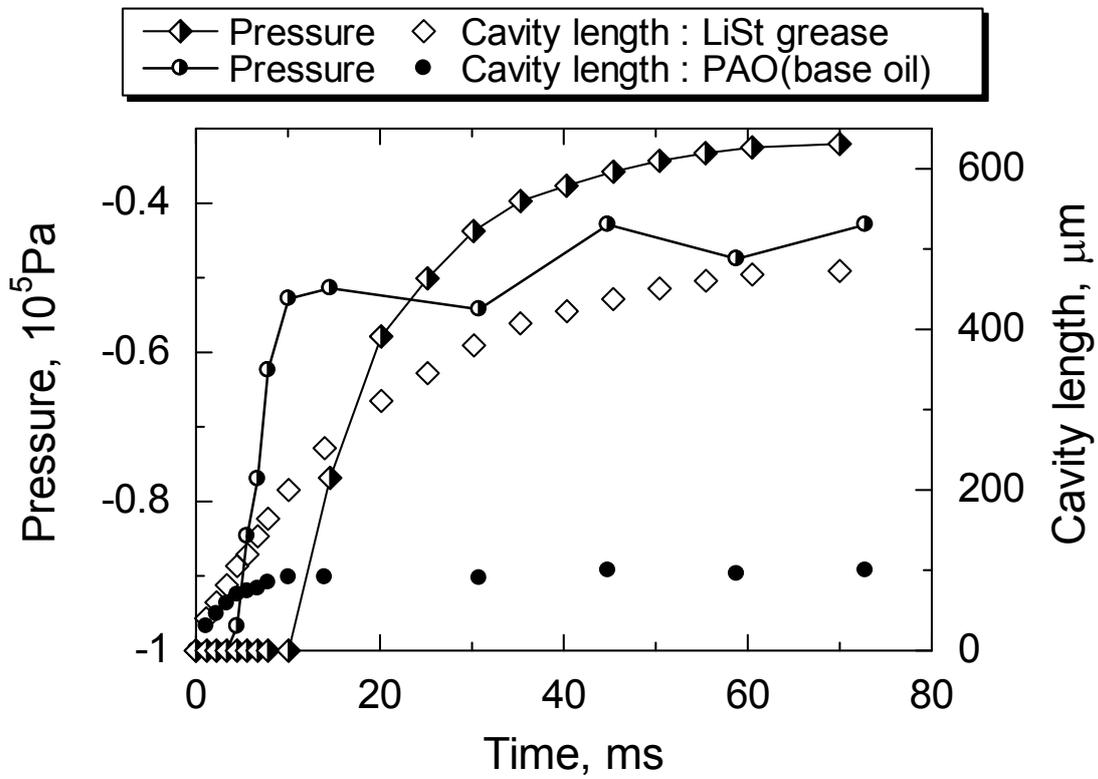


Fig.4.1-24 Relation between cavity growth and minimum pressure

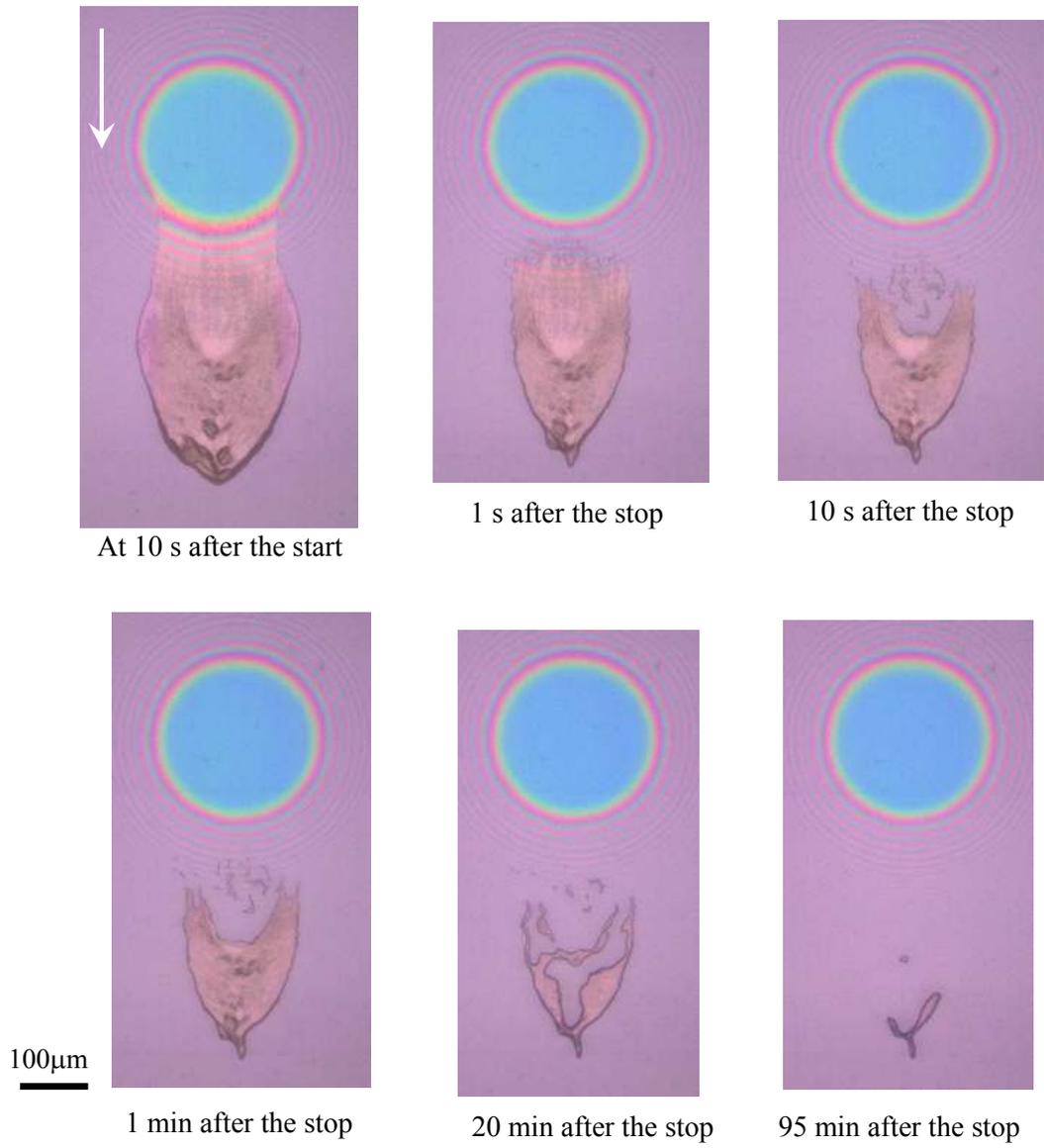


Fig.4.1-25 Disappearance of cavity region with time

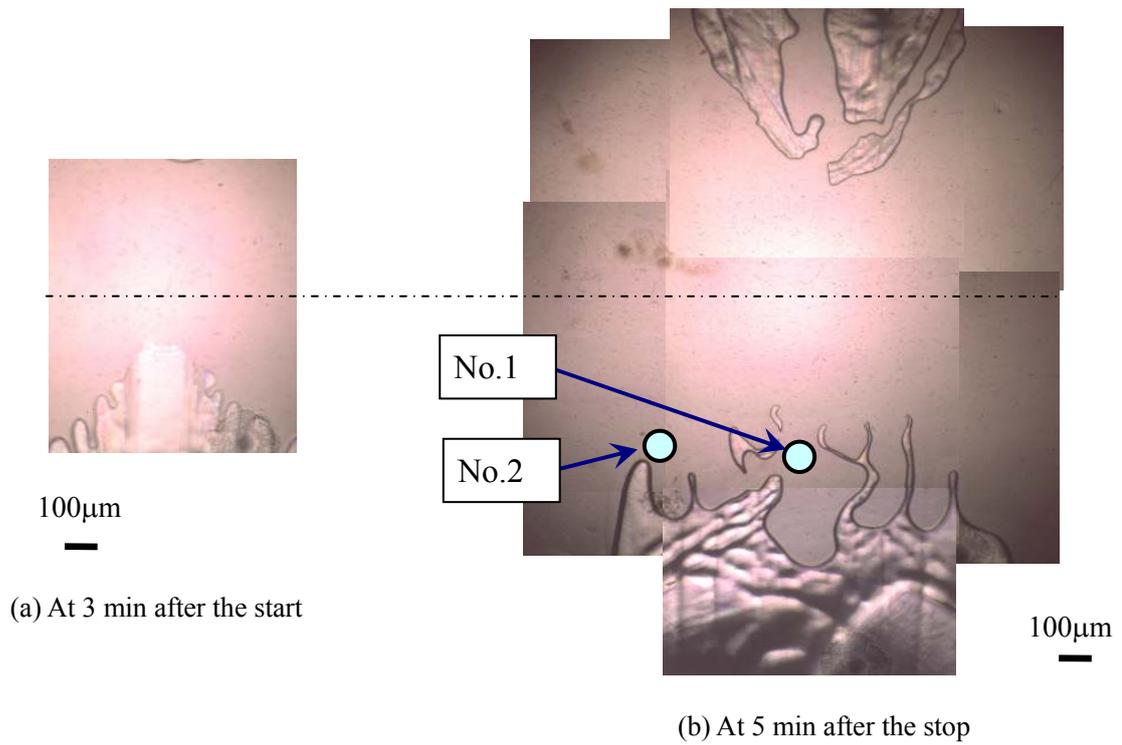


Fig.4.1-26 Analysis point for FT-IR

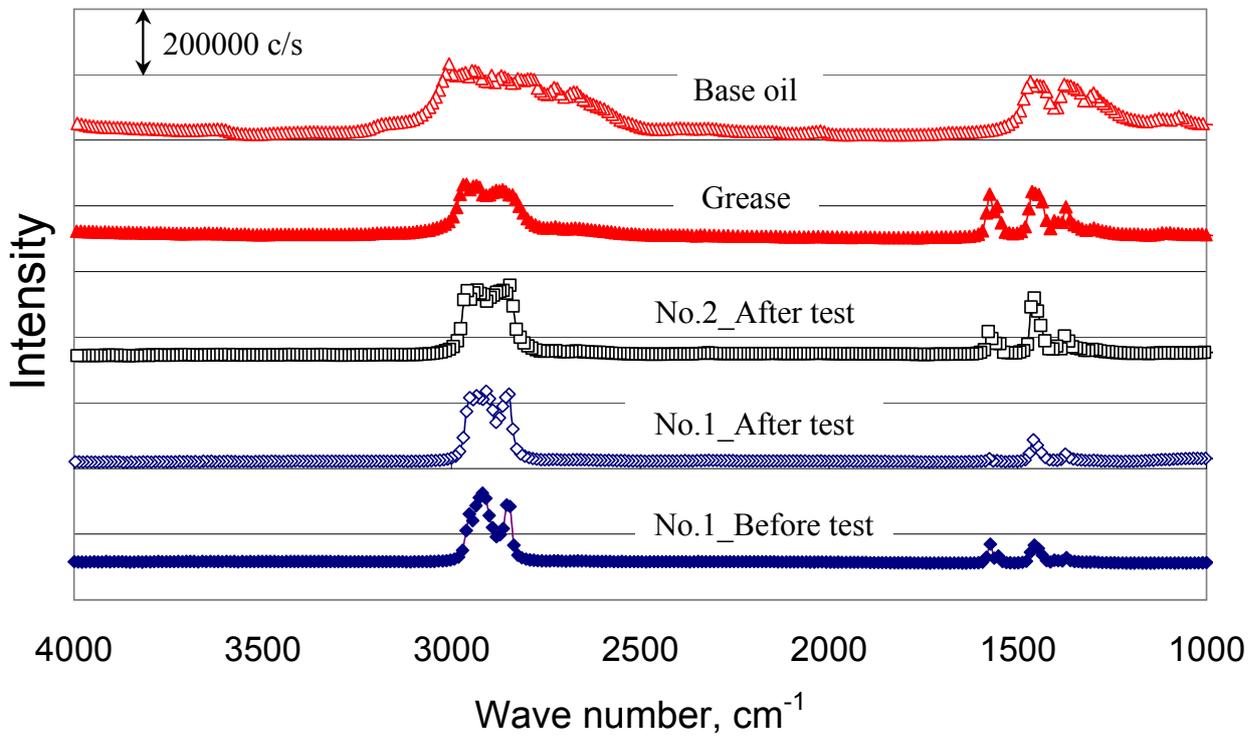


Fig.4.1-27 Comparison of IR spectra

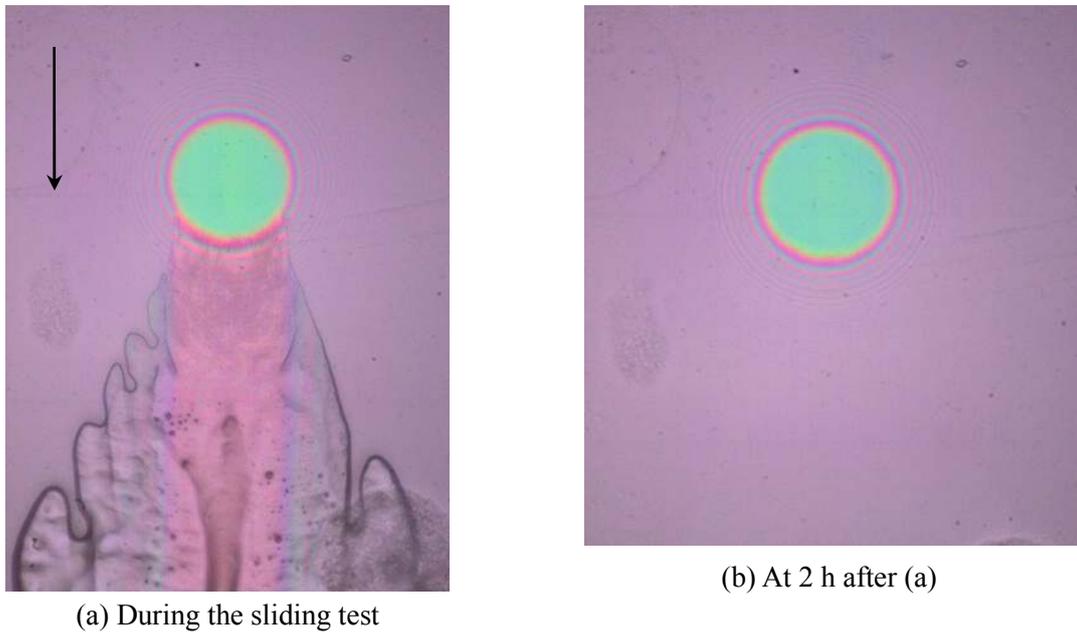


Fig.4.1-28 Disappearance of cavity region

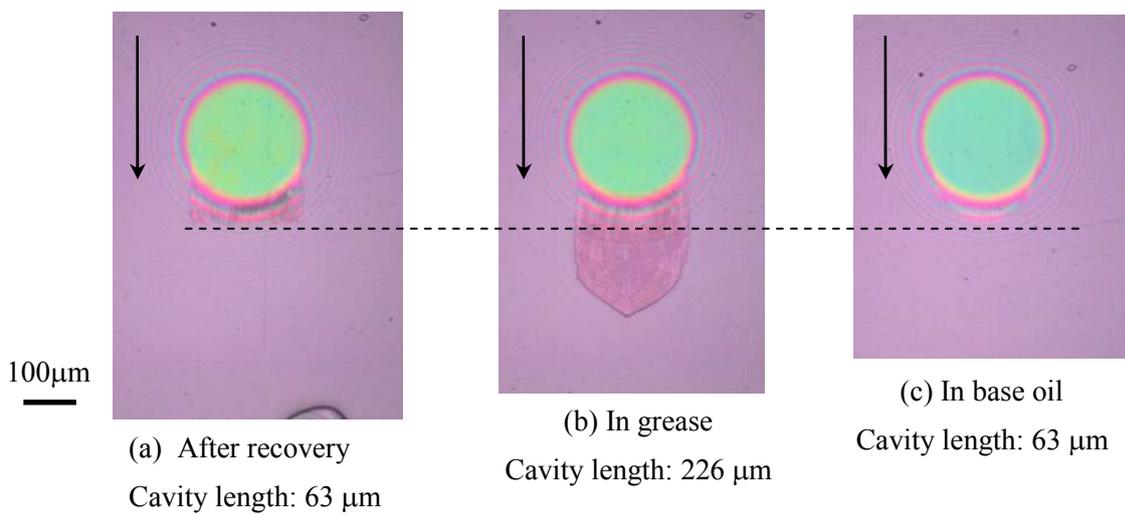


Fig.4.1-29 Comparison of cavity length in various conditions

4.2 往復動運転時のキャビティの発生と消滅

本節では、往復動運転におけるキャビテーションの発生と消滅を観察した。

往復動運転時において、油膜後方で発生したキャビティは、反転時の入口油量の低下を引き起こし、その結果、油膜厚さの低下、および、油膜の破断を引き起こす¹⁻⁴。従って、安全な運転条件を設定するためには、反転時に残存するキャビティの領域や消滅までの時間などの、キャビティの消滅時の挙動を把握しておく必要があると考えられる。

本節では、潤滑油に PAO、雰囲気气体にヘリウム、アルゴン、二酸化炭素を使用し、往復動の正転、反転時におけるキャビティの発生、および、消滅を観察した。また、ストローク長さを2つの条件に設定し、その影響を調べた。

4.2.1 実験条件

- ・潤滑油：PAO，動粘度 63，398 mm²/s @ 313 K
- ・雰囲気：ヘリウム，空気，アルゴン，二酸化炭素
- ・荷重：7 N，最大ヘルツ接触圧： 0.27 GPa
- ・温度：295 K
- ・速度パターン：速度パターンは，Fig. 4.2-1 に示すように 2 種類とし，それぞれを短ストローク，長ストロークと名づけた。

- ・短ストローク試験

Fig.4.2-2 に，この試験における滑り速度の時間変化を示す。図より分かるように，この試験では，加速後，すぐに減速過程に移る。到達速度は，約 50 mm/s で，減速から速度が 0 になるまでの時間は，約 10 ms，逆方向に動きだしてから最高速度 80 mm/s に達するまでの時間は，約 10 ms である。

- ・長ストローク試験

Fig.4.2-3 に，長ストローク試験での反転時の滑り速度の時間変化を示す。長ストローク試験では，加速後，到達速度 80 mm/s の状態で運転を続け，その後，図に示すように減速，反転方向への加速運転を行った。反転後，最高速度 80 mm/s まで加速する。この時間における滑り速度の時間変化は，短ストロークのものと同じである。従って，減速から速度が 0 になるまでの時間は，約 10 ms，逆方向に動きだしてから最高速度 80 mm/s に達するまでの時間は，約 10 ms である。

- ・実験方法：雰囲気気体の制御方法は，第 2 章 2.1.4 (1) に示す手順と同じである。
この実験では，荷重 7 N を負荷した状態から，往復動運転を行った。

4.2.2 実験結果, および, 考察

(1) 短ストローク試験

Fig. 4.2-4に, ヘリウム雰囲気における, 開始から 30 ms までのキャビティの画像をそれぞれ示す. 時間は, Fig.4.2-2 に示すものと同じである. Fig.4.2-5 に, 開始から約 35 ms までの各雰囲気におけるキャビティ長さの時間変化を示す. Fig.4.2-6, 4.2-7, 4.2-8 には, 20 ms, 26 ms, 31 ms における各雰囲気におけるキャビティの画像をそれぞれ示す.

Fig.4.2-4 より, 10 ms におけるキャビティの形状は, キャビティの後端で一部分が長くなった, 特異的なものであると分かる. この形状は Fig.2.2-10 で示した, 発生直後に見られるものと同じである. その後の加速過程において, キャビティは時間とともに成長している. Fig.4.2-5 から, この時間域におけるキャビティ長さには, 雰囲気の影響が見られず, 約 250 μm まで長くなることが分かる. また, Fig.4.2-6 より, キャビティの形状にも雰囲気の影響は見られない.

Fig.4.2-5 より, キャビティ長さは, 加速後, 最大速度に達した後の約 20 ms から, 時間とともに短くなっていく. Fig.4.2-4 より, ヘリウム中では, 速度が 0 となった時間においても, キャビティが存在していることが分かる. また, 逆方向に加速運転している時間域においても, キャビティは存在しており, 約 30 ms 後, キャビティは完全に消滅している. Fig.4.2-5 より, 約 20 ms からキャビティ長さが短くなっていく時間域において, 雰囲気気体の影響が見られることが分かる. キャビティ長さの時間変化は, ヘリウム, アルゴン, 二酸化炭素の順に小さくなり, 完全に消滅するまでにかかる時間は, ヘリウム, アルゴン, 二酸化炭素の順に長くなる. アルゴン中では, 約 31 ms, 二酸化炭素中では, 約 33 ms で消滅している. また, Fig.4.2-7, 4.2-8 の画像からも, キャビティ長さが減少していく時間において, 雰囲気によってその長さが異なることが確認される. また, キャビティの形状は雰囲気による大きな差は見られず, キャビティ長さは流れ方向に変化している.

(2) 長ストローク試験

次に長ストローク試験での結果を述べる.

Fig.4.2-9 に, ストローク長さを 200 mm にした場合の, ヘリウム, アルゴン, 二酸化炭素中におけるキャビティの画像を示す. この画像は, 反転する約 30 ms 前の時間のものである. この図より, キャビティ長さには, 雰囲気の影響が見られ, 二酸化炭素で最も長くなる. このストローク長さにおいて, キャビティの消滅を評価すると, キャビティ長さの影響が現れることが予想される. Fig.4.2-10 には, 反転した後 10 ms におけるキャビティの画像を示す. この画像より, 二酸化炭素で, キャビティは接触域と接続している. すなわち, 二酸化炭素中でキャビティ長さは最大となるため, キャビティの消滅において, その消滅時間が長いことが分かる.

従って、ここでは、反転直前におけるキャビティ長さ、それぞれの雰囲気気体において、同じとなるように、ストローク長さを制御した。実験には、アルゴンと二酸化炭素を使用し、アルゴンでのストローク長さは 200 mm、二酸化炭素では 60 mm とした。Fig.4.2-11 には、各雰囲気における反転直前のキャビティ画像を示す。この図より、2 つの雰囲気において、キャビティ長さに変化がないことが分かる。

Fig.4.2-12 に、アルゴン中における -4.4 ms から 12.8 ms までのキャビティの画像を示す。この図に示した時間は、Fig.4.2-3 で示したものと同一である。Fig.4.2-13 には、二酸化炭素中における -4.4 ms から 12.8 ms までのキャビティ画像を示す。Fig. 4.2-14 には、減速が始まる時間から約 12 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す。この図において、2 回の実験結果を示している。

Fig.4.2-12 より、-4.4 ms から 0 s におけるキャビティは、減速過程であるにもかかわらず、その長さ、および、その形状を大きく変化させていないことが分かる。また、2.2 ms においては、逆方向に加速している状態であるが、依然として、キャビティ長さは、前の時間の 0 s の長さと同様である。4.4 ms におけるキャビティでは、その領域が流れ方向と逆方向に伸びていくことが確認される。その後、10.6 ms において、接触域から 100 μm 上の部分で分裂し、2 つに分かれる。接触域と接続しているキャビティは、時間とともに、すぐに消滅する。一方で、分かれたもう一方のキャビティは、気泡として残存し、流れと逆方向に移動していく。運転をさらに続けると、この気泡は、潤滑油とともに接触域の後方へ移動し、後方で発生しているキャビティと合体する(Fig.4.2-15)。

Fig.4.2-13 から、二酸化炭素中においても、キャビティの消滅の傾向は、アルゴン中でのものと一致している。Fig.4.2-14 より、キャビティ長さには、雰囲気における影響は大きく見られない。どちらの雰囲気においても、減速、反転後の加速過程の時間域では、減速前のキャビティ長さを維持する。その後、加速過程の約 5 ms 後でその長さが長くなり、約 10 ms 後に分裂する。実験において、この部分における誤差は見られるが、両雰囲気においてほぼ同傾向である。

(3) キャビティの成長、消滅に及ぼすストローク長の影響

Fig.4.2-16 に、各ストローク試験における、減速過程でのキャビティ長さの時間変化を示す。アルゴン、二酸化炭素中における実験結果を示し、滑り速度の時間変化もそれぞれ示している。

この図より、短ストローク試験では、減速過程において、キャビティ長さは減少していき、逆方向への運転後に消滅する。消滅時間は、アルゴン、二酸化炭素の順に長い。一方で、長ストローク試験では、減速過程において、キャビティ長さの減少は見られず、逆方向運転時の約 5 ms からはその長さが増加する。その後、約 10 ms 付近で 2 つに分裂する。また、この過程において、雰囲気の影響は大きくは見られない。

従って、ストローク長によって、減速過程、および、逆方向加速過程におけるキャビティの消滅過程は完全に異なっている。これは、往復動の運転条件によって、キャビティの消滅挙動が異なり、その結果、油量不足への影響が変化することを示している。

4.2.3 キャビティ成長、消滅モデル

以下に、短ストローク、長ストロークにおけるキャビティ成長と消滅に関するモデルをそれぞれ検討する。

(1) 短ストローク試験

Fig.4.2-17 に、各雰囲気における、加速後の 20 ms、反転方向に加速中の 31 ms におけるキャビティ長さおよび気体の溶解度の関係を示す。

この図より、各時間でのキャビティ長さおよび気体の溶解度の関係が明らかに分かる。

20 ms においては、キャビティ長さは、雰囲気の影響を受けない。従って、キャビティの成長過程では、溶解気体の影響が見られないと考えられる。一方、31 ms においては、雰囲気の影響を受け、溶解度とともにその長さが長くなる。従って、キャビティが消滅していく過程では、溶解気体の影響を受ける。

第 2 章 2.2.5 に示した引き離し試験において、発生から 6.3 ms 後のキャビティ径は、雰囲気の影響を受けないが、その後、収縮し、気泡となる過程では雰囲気の影響を受け、その径は溶解度が高い気体ほど大きくなると報告した。これは、収縮時に起こるキャビティ内への潤滑油の圧力流れ(キャビティ内と周囲の潤滑油の圧力差で起こる流れ)で説明できると述べた。従って、この場合も、同じように考察すると、以下のようになる。

加速過程におけるキャビティの成長は、溶解気体の影響を受けないことから、Initial stage と考えられる。従って、その成長は、接触域の後方に発生する負圧の領域が影響すると考えられる。本節での実験では、潤滑油粘度、滑り速度の時間変化が同じことから、この時間域におけるキャビティの成長は同じになることが理解できる。

減速過程と反転運転時におけるキャビティの消滅には、キャビティ内圧力への雰囲気の影響が現れていると考えられる。従って、雰囲気によって、キャビティ内と周囲の潤滑油の圧力差による潤滑油の圧力流れが変化することが考えられる。Fig.4.2-18 には、Fig.4.2-5 のキャビティ長さの時間変化から、第 3 章 3.3.6 に示す方法によって、キャビティ内圧力を計算した結果を示す。発生から約 20 ms までの時間において、計算を行った。この図より、速度が 0 になる直前の約 20 ms に

におけるキャビティ内圧力は、二酸化炭素中で最も高く、アルゴン、ヘリウム中の順に低くなることが分かる。

圧力流れ(ポアズイユ流れ)は、式(4.2.3-1)で示される。この式において、キャビティ内への潤滑油の流れの駆動力は、キャビティと潤滑油の圧力差(圧力勾配, $\partial P/\partial x$)である。減速過程においては、クエット流れよりもポアズイユ流れの方が支配的となる。

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial x} (z^2 - hz) + u_1 \frac{h-z}{h} \quad (4.2.3-1)$$

Fig.4.2-18 に示すように、二酸化炭素中におけるキャビティ内圧力は、アルゴン、ヘリウム中よりも高いので、圧力流れは小さくなる。一方で、ヘリウム中では、キャビティ内圧力が一番低いので、圧力流れが大きくなり、その結果、キャビティ消滅時間が一番短くなったと考えられる。従って、この時間域におけるキャビティの消滅は、キャビティ内への潤滑油の圧力流れによって、評価できると考えられる。また、キャビティの消滅モデルには、雰囲気気体によってキャビティ内圧力が変化することを考慮しなければならないと分かる。また、圧力流れと同時に、キャビティ内へ析出している気体の潤滑油中への溶解も起こると考えられる。従って、キャビティ内の気体の潤滑油への吸収を考える必要があるが、Fig.3.3-7 に示すように、物質移動係数が気体によって、大きく変化しないことを考慮すれば、先に述べた潤滑油のキャビティ内への流れの影響の方が支配的と推測される。

(2) 長ストローク試験

長ストローク試験におけるキャビティは、Fig.4.2-9 に示すように、雰囲気気体の影響を受ける。従って、この条件でのキャビティの成長は、Second stage と考えられる。

長ストローク試験におけるキャビティの消滅に関しても、前述の短ストローク試験と同様に、キャビティ内圧力を基に検討を行う。

Fig.4.2-19 には、減速が起こる直前の時間と、その時間より 0.25 ms 前の時間におけるキャビティの画像を示す。図には、それぞれキャビティ長さも示している。この2つの画像におけるキャビティ長さの時間変化から、第3章 3.3.6 に示す方法によって、キャビティ内圧力を求めると、Table 4.2-1 のようになる。このキャビティ内圧力は、減速が起こる直前の時間における値としてみることが出来る。また、この表には、Fig.4.2-7 の短ストローク試験における、減速が起こる直前のキャビティ内圧力も示す。

Table 4.2-1 より、アルゴン、二酸化炭素中の長ストローク試験におけるキャビティ内圧力は、短ストローク試験における値と比較すると、大きく上昇している。また、二酸化炭素中でのキャビティ

一内圧力の方が、アルゴンよりも高いが、いずれも大気圧に近づいている。アルゴンでは、大気圧の87%、二酸化炭素では、大気圧の95%まで上昇している。このキャビティ内圧力を考慮し、キャビティの消滅を考えると、以下のように検討ができる。

実験結果より、減速過程におけるキャビティは、その長さをほぼ変化させていない。これは、この時間におけるキャビティ内圧力が Table 4.2-1 に示されるように大気圧近くまで上昇し、周囲の潤滑油圧力に近づいているためと考えられる。従って、キャビティ内圧力と周囲の圧力に大きな差がなく、潤滑油のキャビティ内への圧力流れがほぼ引き起こされていないと考えられる。そのため、キャビティは、潤滑油中に安定的に存在できると考えられる。また、アルゴン、二酸化炭素の両条件において、キャビティ内圧力は大気圧に近い値まで上昇しているため、雰囲気による違いは大きく現れなかったと考えられる。

その後、反転方向に運転している過程において、クエット流れにより、強制的に潤滑油がキャビティ領域へ流入してくる。Fig.4.2-12, 4.2-13 で見られるように、潤滑油の流入によって、接触域付近のキャビティの横幅は減少している。しかし、キャビティ内圧力は周囲潤滑油の圧力と近づいているので、キャビティはすぐには消滅できず、その体積を維持するために(潤滑油中に安定的に存在できるため)、潤滑油流れと逆方向に伸びる(横幅は減少し縦方向に伸びる)と考えられる。その後、接触位置に近い約 100 μm の付近で急激な収縮が見られ、やがて分裂する。接触位置と接続したキャビティは、潤滑油の強制的な流れによって、すぐにその領域を小さくする。分裂した一方は、キャビティ内圧力が周囲圧力と近いため、潤滑油中に気泡として残ることができると考えられる。

4.2.4 まとめ

本節において、往復動運転時におけるキャビティの発生と消滅の観察を行い、ストローク長によってその結果が異なることが分かった。以下に、本実験で得られた結果をまとめる。

- 短ストローク試験におけるキャビティの成長は **Initial stage** であり、雰囲気気体の影響を受けない。キャビティの消滅時間は、雰囲気気体の影響を受け、ヘリウム、アルゴン、二酸化炭素の順に長い。これは、雰囲気気体のキャビティ内圧力へ及ぼす影響と考えられる。雰囲気気体によってキャビティ内圧力が変化し、その結果、潤滑油のキャビティ内への圧力流れが変化することが考えられる。
- 長ストローク試験におけるキャビティの成長は、**Second stage** であり、雰囲気気体の影響を受けない。また、キャビティの消滅過程も、雰囲気気体の影響を受けない。これは、アルゴン、二酸

化炭素の両雰囲気において、キャビティー内圧力が大気圧近くまで上昇しており、キャビティーが潤滑油中で安定的に存在できることに関係していると考えられる。

- キャビティーの消滅現象を検討するには、キャビティー内圧力を知ることが必要である。本節で述べたように、キャビティーの成長からその圧力を知ることができ、その後起こる消滅挙動を検討することができる。

(参考文献)

- 1 Nishikawa, H., Handa, K. and Kaneta, M., “Behavior of EHL Films in Reciprocating Motion,” JSME International Journal, Series C, 38, 3, 1995, 558-567
- 2 橋本, 王, 西川, 兼田, “点接触往復運転 EHL 油膜に及ぼす気泡の影響”, JAST トライボロジー会議 予稿集 鳥取 2004-11, 175-176
- 3 Leonard, B., Sadeghi, F. and Cipra, R., “Gaseous Cavitation and Wear in Lubricated Fretting Contacts,” Tribology Transaction, 51, 2008, 351-360
- 4 Izumi, N., Nakashima, M., Watanabe, K., Morita, T. and Sugimura, J., “EHL numerical Simulation in Reciprocating Rolling Point Contact,” Proceedings of World Tribology Congress 2009, Kyoto, September, 2009, 678
- 5 Wolveridge, P.E., Baglin, K.P. and Archard, J.F., “THE STRVED LUBRICATION OF CYLINDERS IN LINE CONTACT”, Proceedings of Mechanical Engineers, 185, 81/71, 1970-1971, 1159-1169
- 6 Hamrock, B.J. and Dowson, D., “Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts”, Journal of Lubrication Technology, 1977, 1,15-23

Table 4.2-1 Comparison of P_{cav} between two stroke conditions

Gas	P_{cav} , Pa	
	Short stroke	Long stroke
Ar	7590	87762
CO ₂	35446	96730

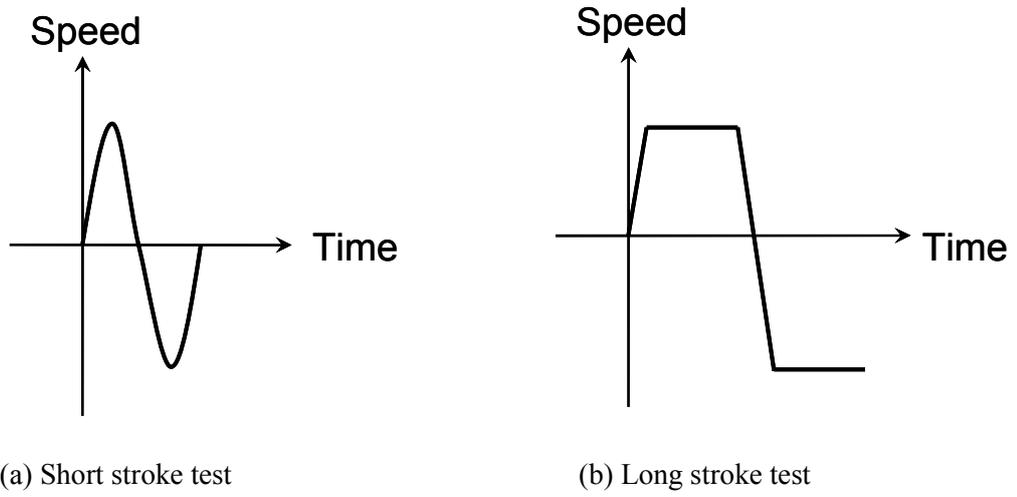


Fig.4.2-1 Two stroke test conditions

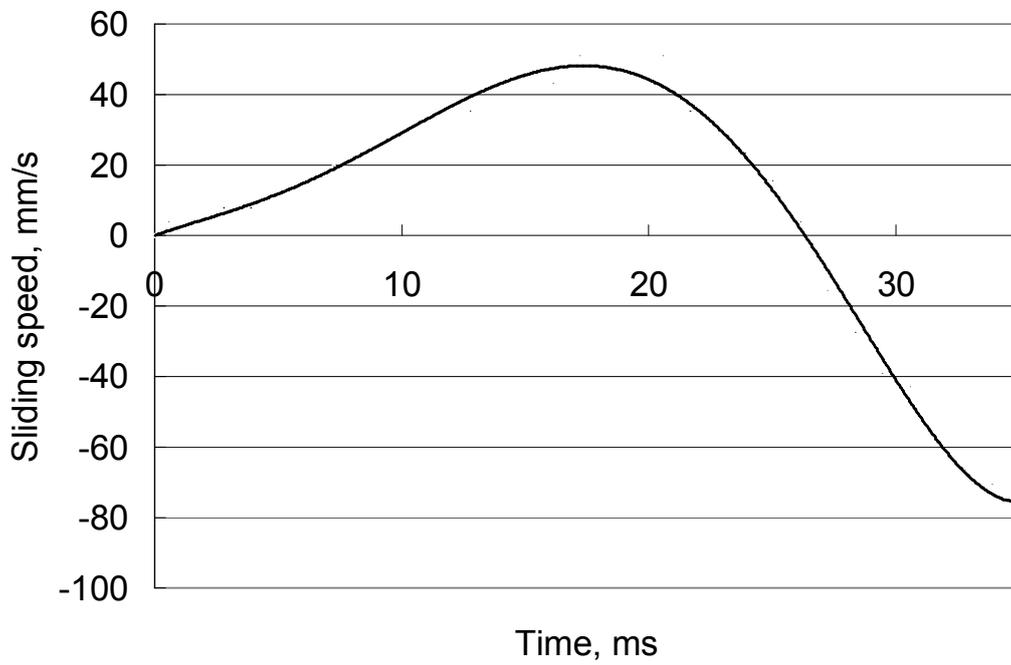


Fig.4.2-2 Changes in sliding speed with time in short stroke test

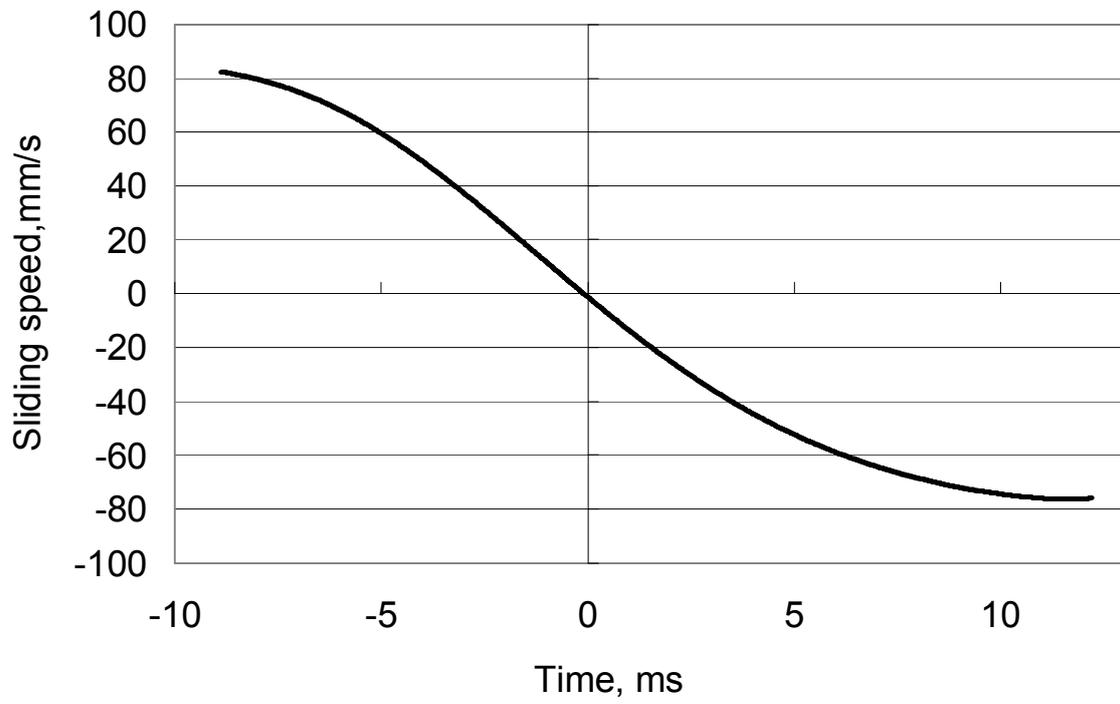


Fig.4.2-3 Changes in sliding speed with time in long stroke test

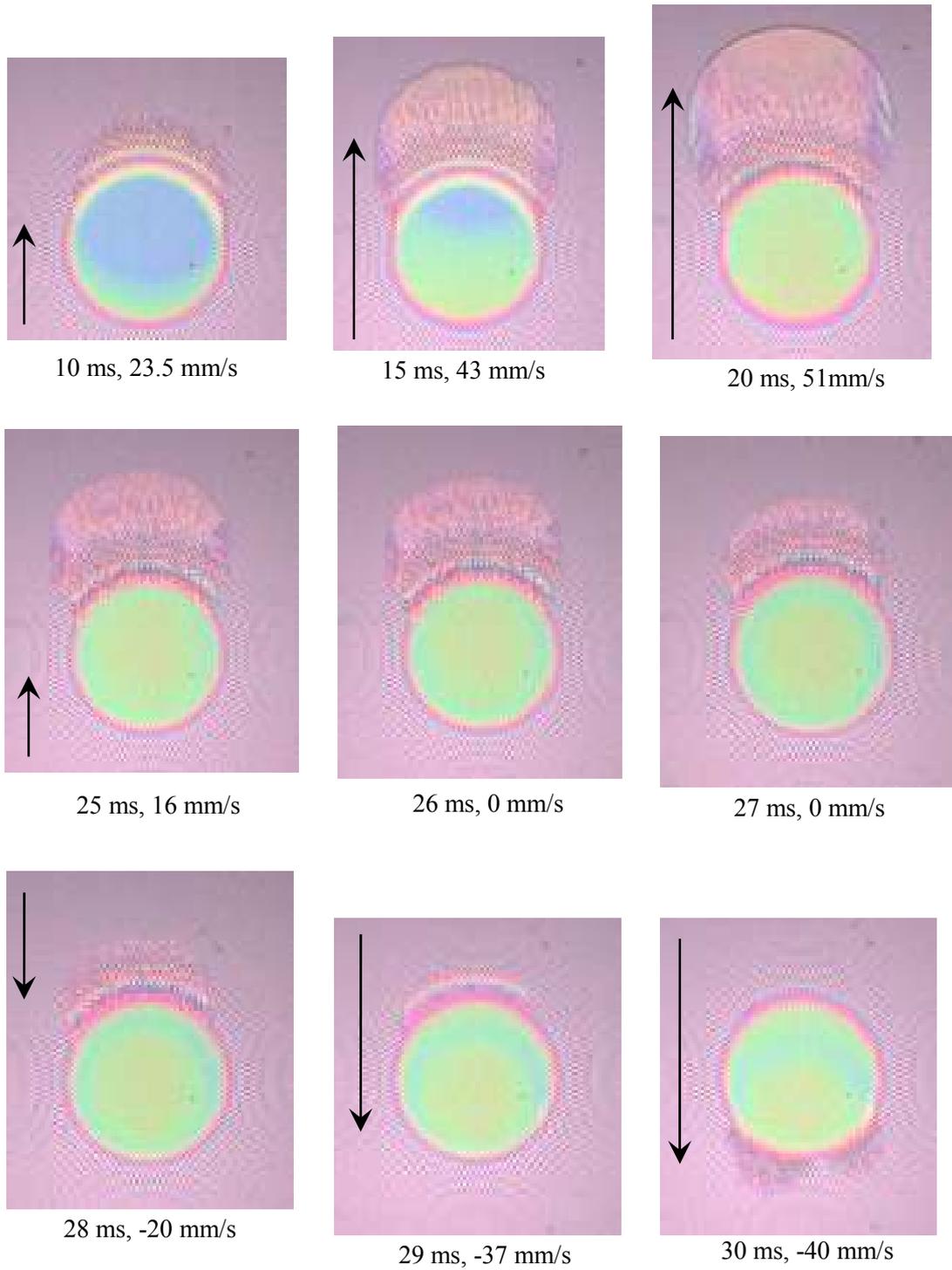


Fig.4.2-4 Changes in cavity region in He

100 μ m



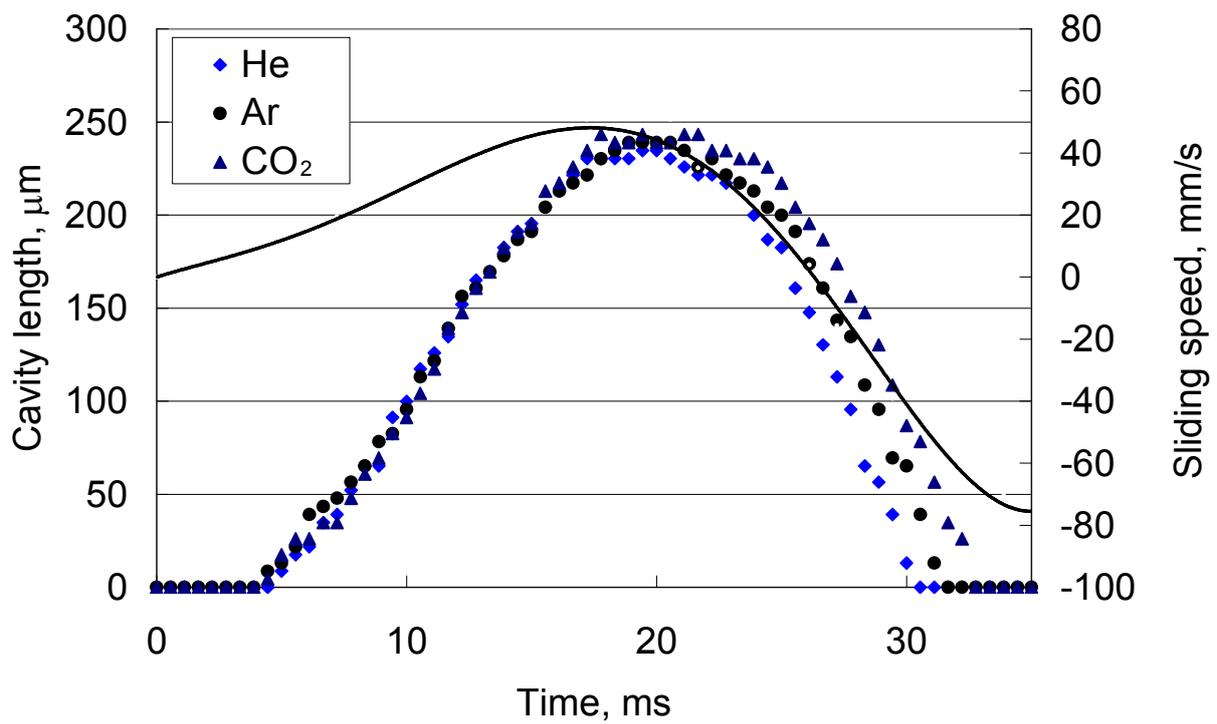


Fig.4.2-5 Changes in cavity length in various gases

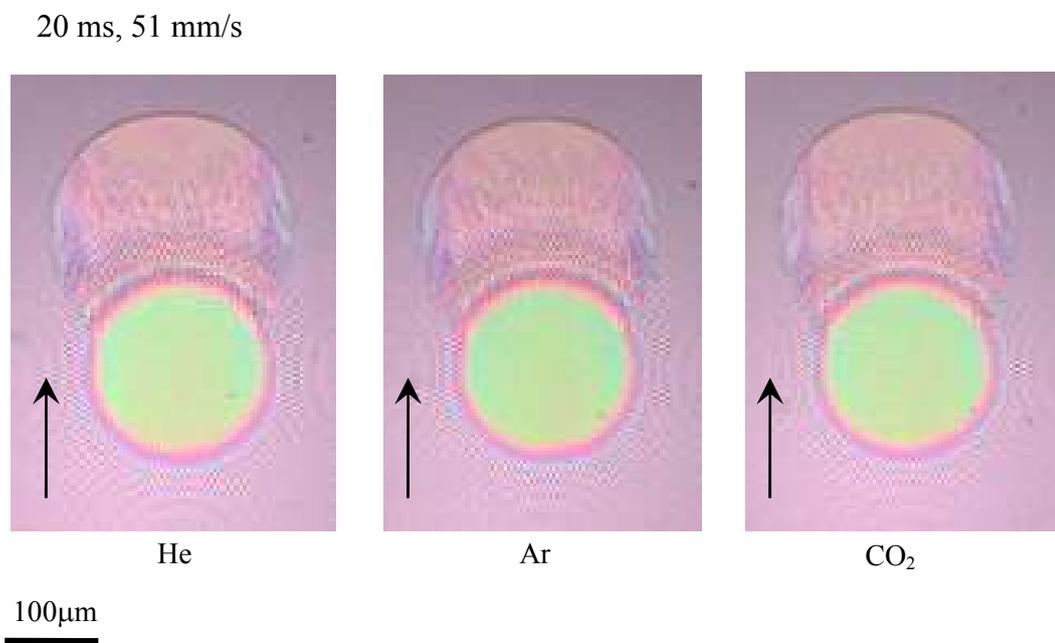
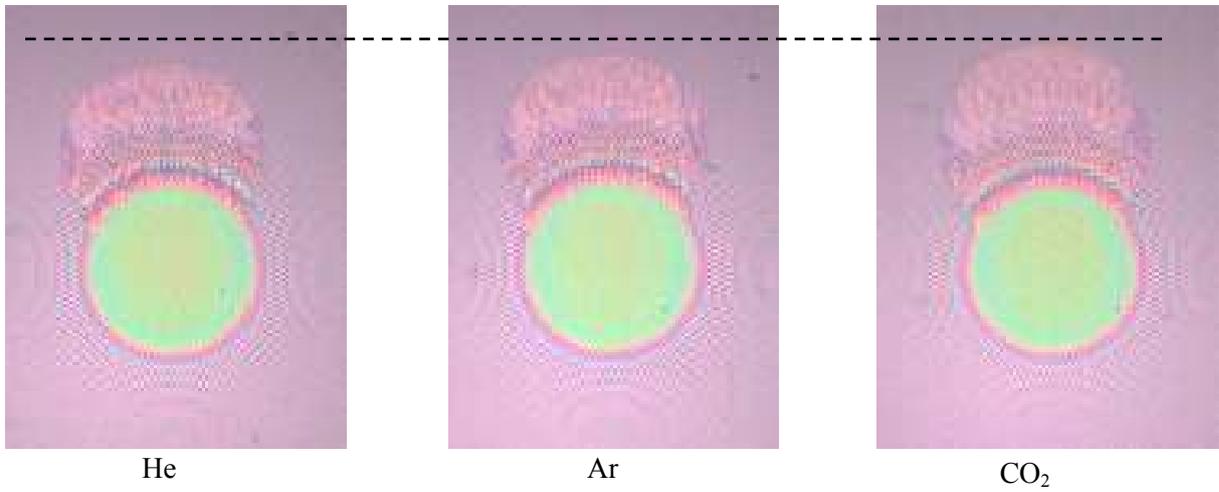


Fig.4.2-6 Cavity at 20 ms in various gases

26 ms, 0 mm/s

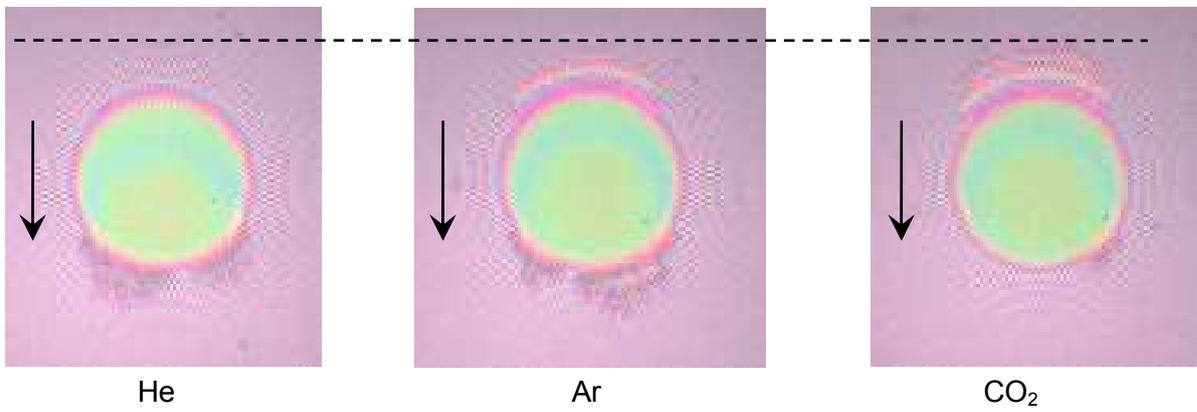


100μm



Fig.4.2-7 Cavity at 26 ms in various gases

31 ms, -60 mm/s



100μm



Fig.4.2-8 Cavity at 31 ms in various gases

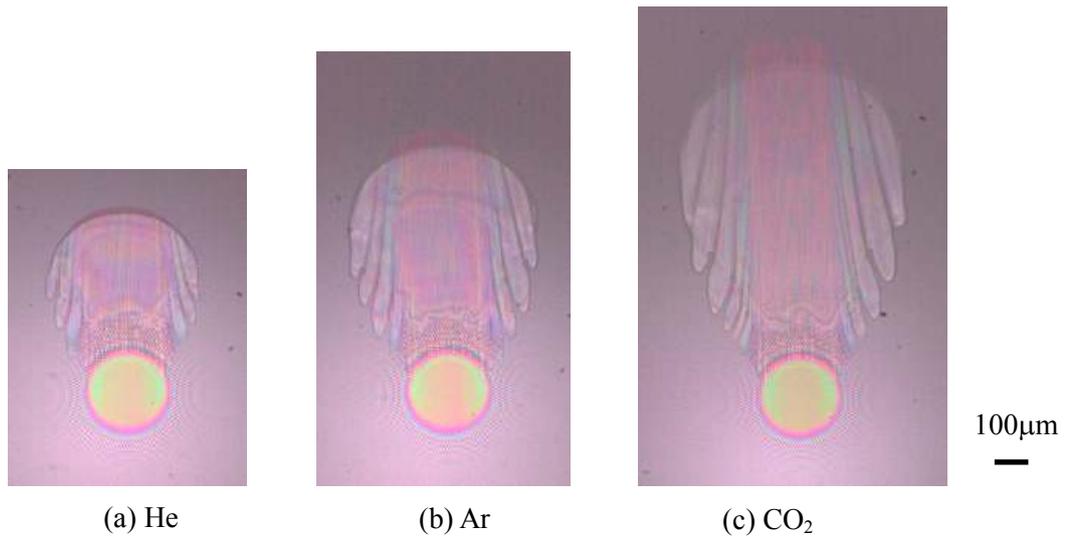


Fig.4.2-9 Cavity after sliding 200 mm in various gases

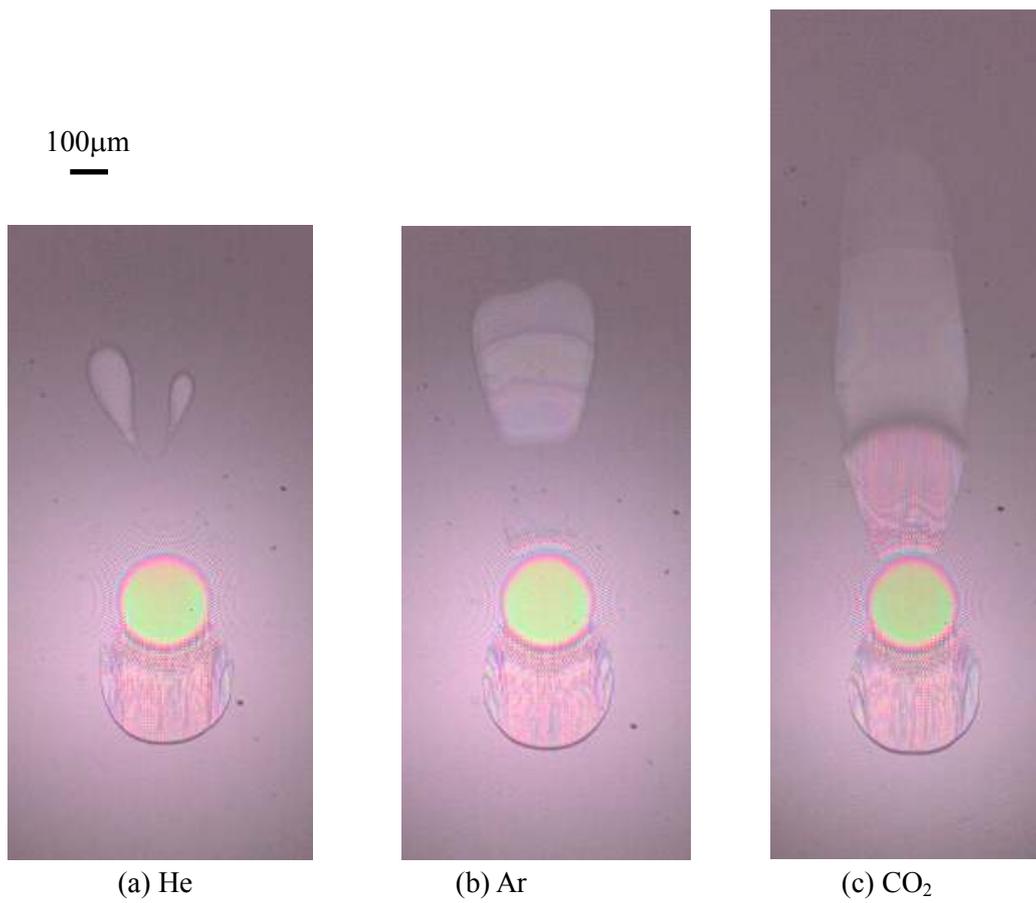


Fig.4.2-10 Cavity at 10 ms in next motion in various gases

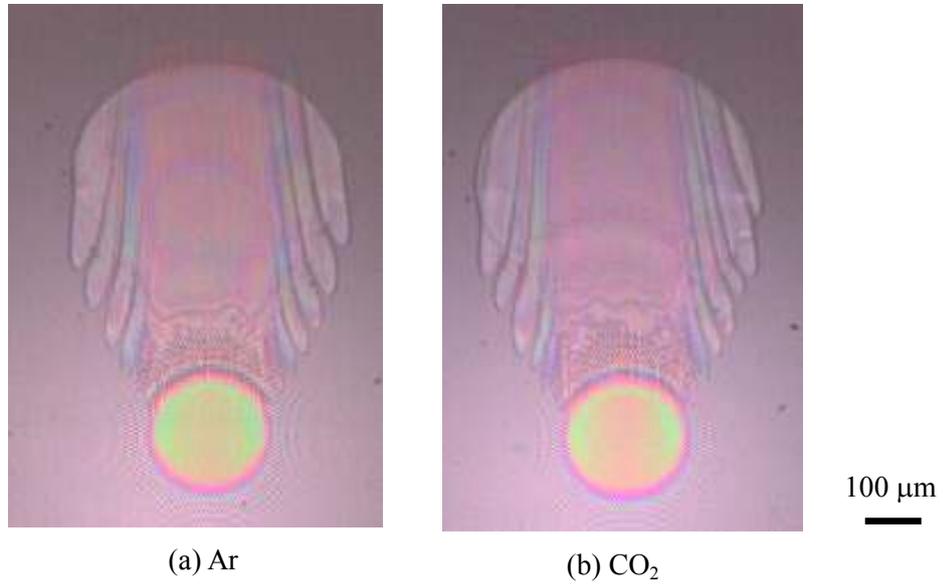


Fig.4.2-11 Cavity before deceleration in various gases

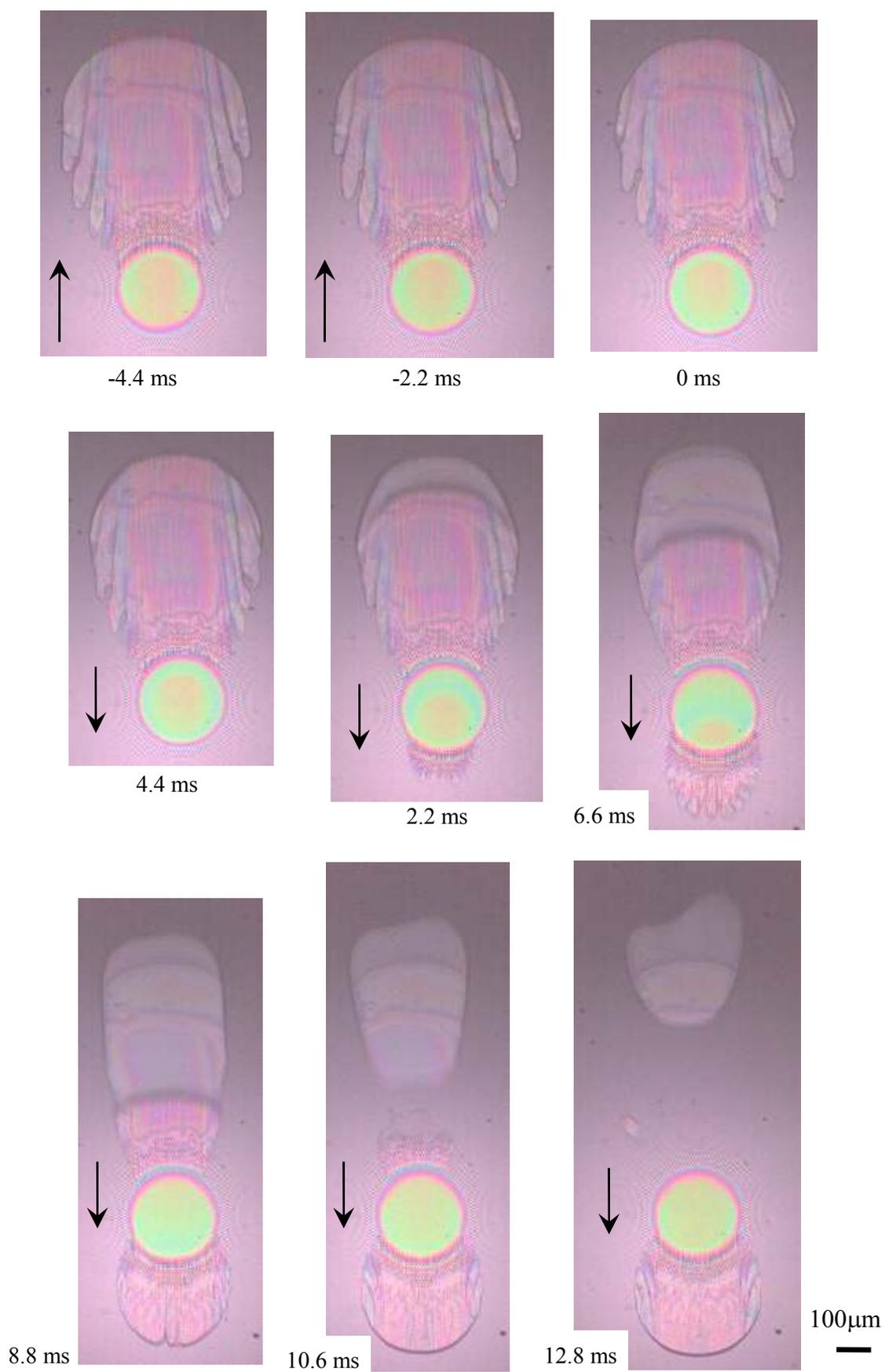


Fig.4.2-12 Changes in cavity region in argon

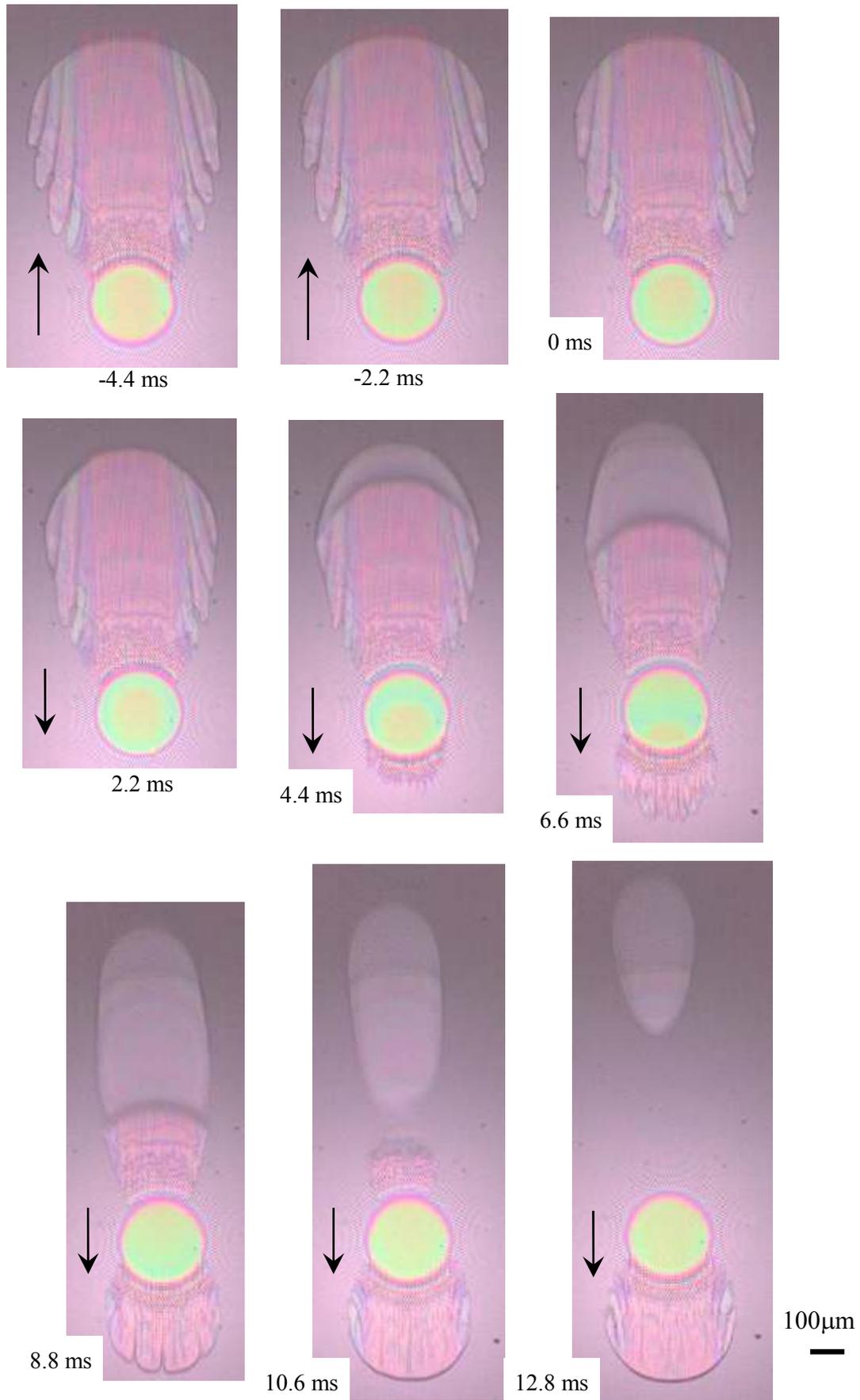


Fig.4.2-13 Changes in cavity region in carbon dioxide

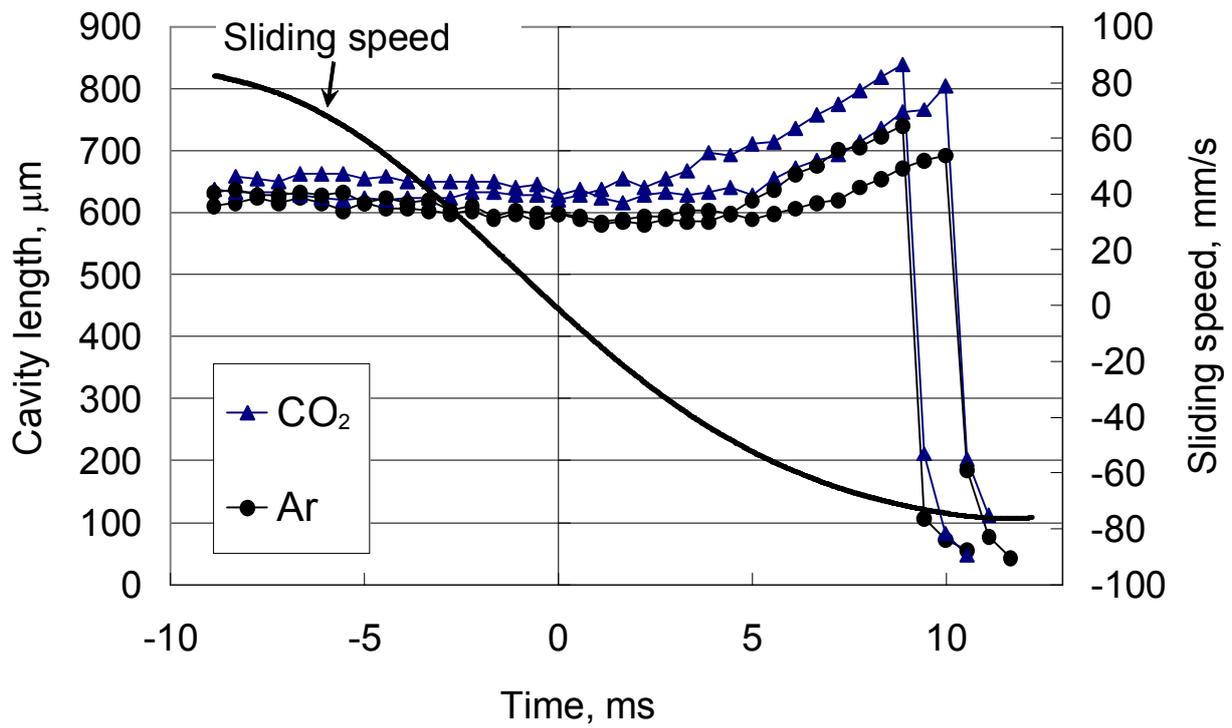
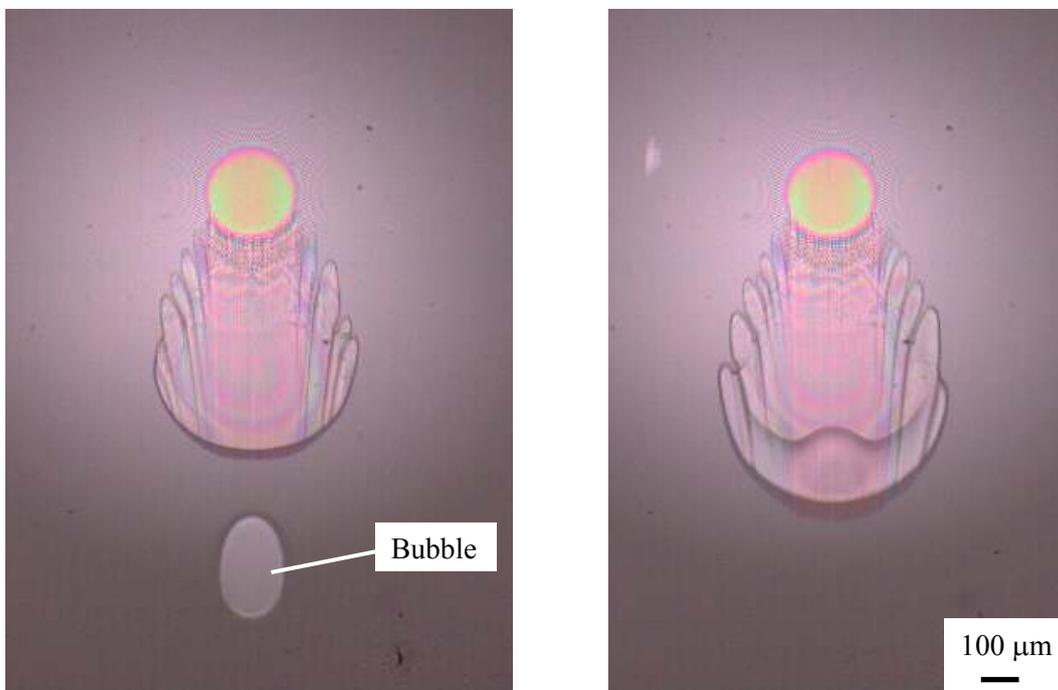


Fig.4.2-14 Changes in cavity length with time in argon and carbon dioxide



(a) At 660 ms after changes of motion

(b) At 20 ms after (a)

Fig.4.2-15 Coalescence of bubble with cavity

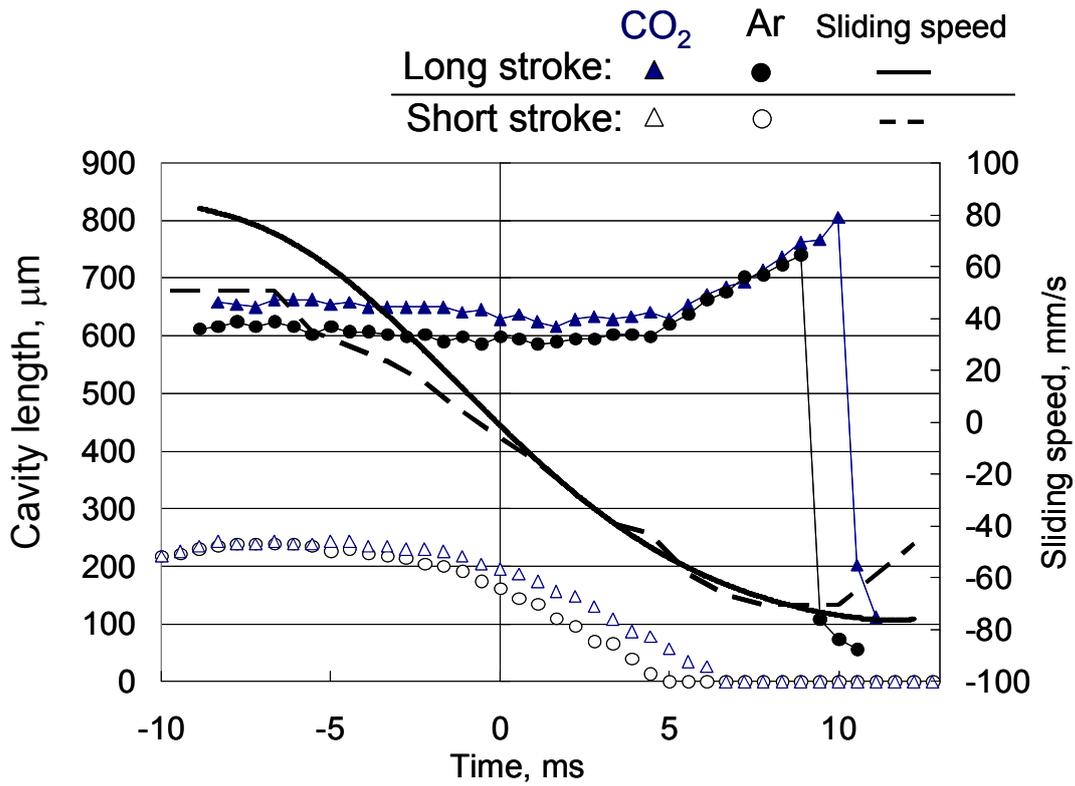


Fig.4.2-16 Comparison of cavity length between two stroke conditions

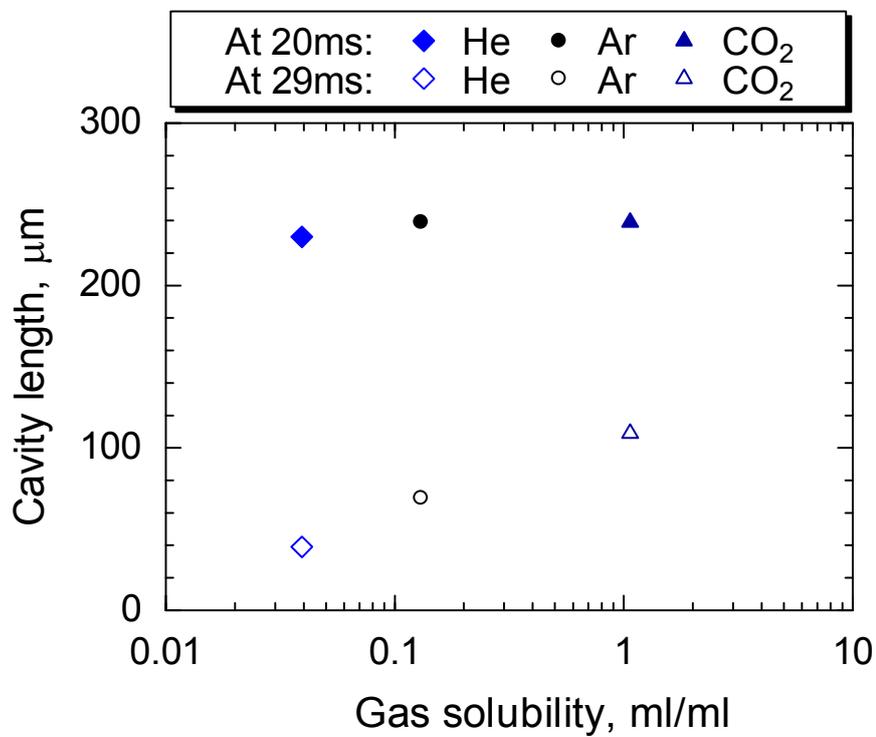


Fig.4.2-17 Relation between cavity length and gas solubility

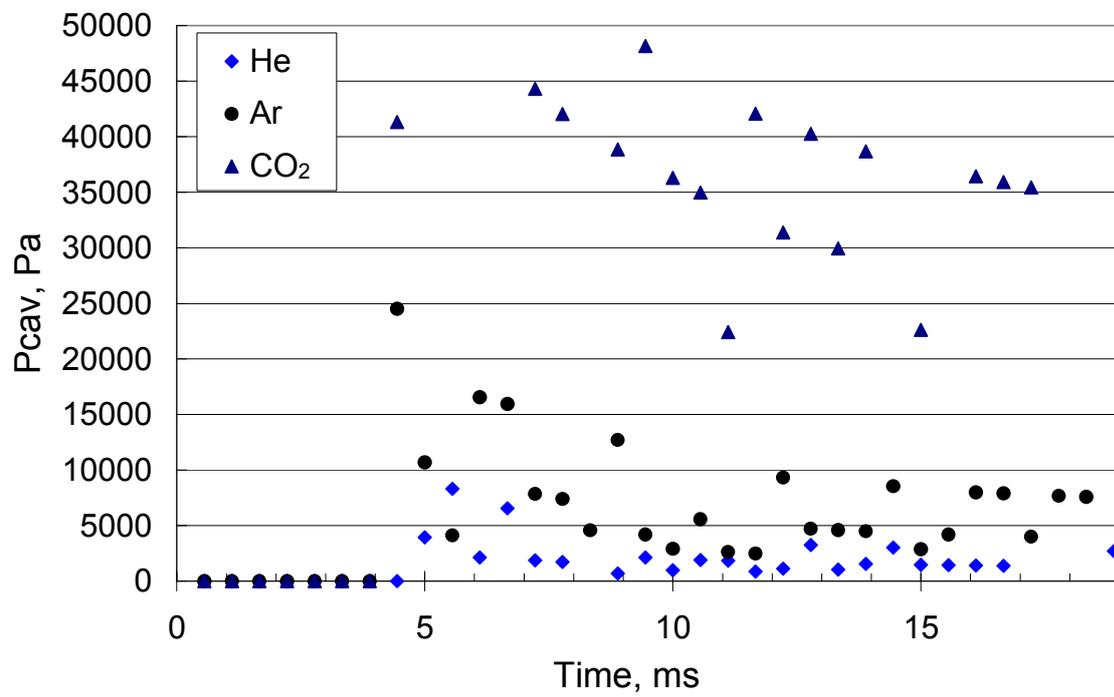


Fig.4.2-18 Difference of P_{cav} in various gases

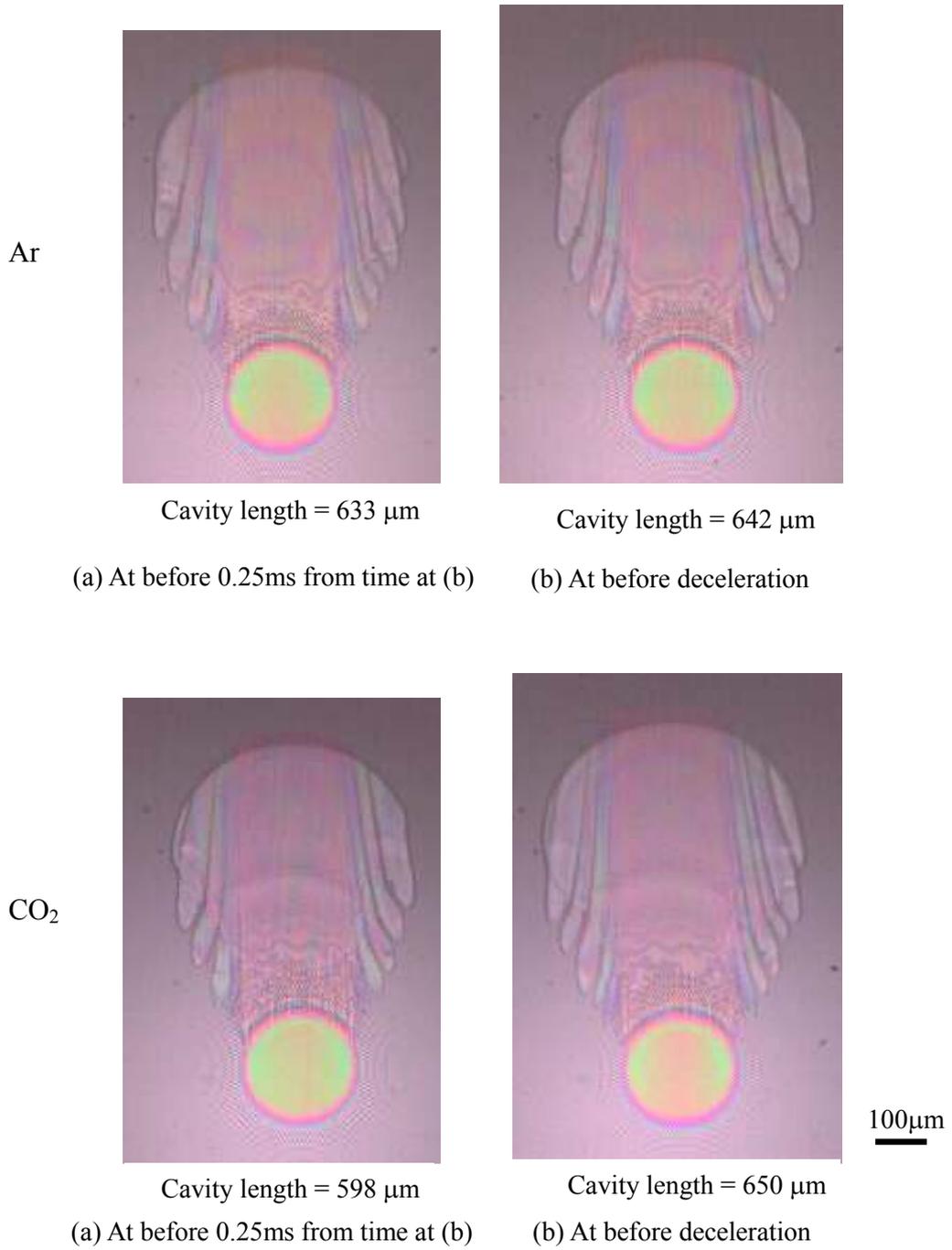


Fig.4.2-19 Cavity growth in argon and carbon dioxide

4.3 2点 EHD 接触下でのキャビティの観察

本節では、複数の接触部がある潤滑部におけるキャビティの成長、および、キャビティの成長が後方接触部の油量不足へ及ぼす影響について調べた。

オイルシールなどの接触面では、表面粗さ程度の形状変化でも、キャビティの発生が見られ^{1,2,3}、それによって、粘性抵抗が減少し、潤滑面の摩擦係数が低下する^{4,5}。従って、キャビティ領域の拡大が潤滑面の摩擦係数の低下をもたらす。一方で、表面粗さ程度の形状変化によって発生したキャビティは、後方接触部における油量の低下を引き起こし、その結果、油膜の破断が起こり、摩耗へと繋がる^{6,9}。従って、キャビティ領域の拡大が、他の接触部の油量に影響を及ぼさないようにしなければならない。

表面粗さ程度の形状変化部で起こるキャビティを実際に確認することは、その領域が小さいために非常に難しい。本節では、複数接触部をモデル化し、実験を行った。直径が 0.8 mm の球を 2 つ前後に配置したものをディスクと接触させ、その接触部に形成されるキャビティを観察した。油の供給条件の影響も確認するために、油槽による潤滑油供給、メニスカスによる供給の 2 条件で行った。

4.3.1 実験条件

- ・潤滑油：PAO，動粘度 $398 \text{ mm}^2/\text{s}$ @ 313 K
- ・雰囲気：空気
- ・球：直径 0.8 mm の軸受球(ミニチュアベアリングに使用される球)

Fig.4.3-1 に示すように，鋼板の一定深さの溝に，球を 2 つ並べ，それを接着剤で固定した。

- ・荷重：1 N，最大ヘルツ接触圧：1.2 GPa
- ・滑り速度：68.5, 137, 548 mm/s
- ・温度：295 K
- ・潤滑油の供給条件：油槽による供給，メニスカスによる供給(Fig.4.3-2)

- ・油槽：油槽を用い，接触部が完全に潤滑油に浸るようにした
- ・メニスカス：試験前に潤滑油を接触部に供給し，メニスカスを形成させた。

実験中に再供給は行っていない。

- ・実験方法：この実験では，まず，ディスクを球に静的に接触させ，2 つの接触部に均等に荷重が加わっているか，画像により確認した。Fig.4.3-3 には，その画像を示す。2 つの接触部において，ヘルツ接触が確認できる。その後，ディスクを回転させ，各時間における接触域の画像を撮影した。

4.3.2 実験結果, および, 考察

(1) キャビティーの成長の観察

この実験では, 油槽を使用し, 接触部を完全に潤滑油に充満させた条件における結果である.

Fig.4.3-4 に, 滑り速度が 68.5 mm/s における, 開始から 5 min までの 10 s 毎の接触域の画像を示す.

Fig.4.3-5 には, 137 mm/s における接触域の画像を示す.

Fig.4.3-4 より, 前方の接触域で発生したキャビティーは, 時間とともに拡大しており, 後方接触部の方へ近づいている. 5 min 経過後におけるキャビティー長さは, 4 min における長さとはほぼ同じであり, 成長速度は実験の初期の時間の値に比べ小さくなっている. また, Fig.4.3-5 より, 滑り速度が増加しても, キャビティーの成長は確認でき, 成長速度は時間とともに小さくなっていることが分かる.

Fig.4.3-6, 4.3-7 には, 548 mm/s における 2 回の実験結果を示す.

滑り速度が 548 mm/s の条件では, 2 回の実験結果において, キャビティーの成長が異なる. Fig.4.3-6 では, 前方の接触部で発生したキャビティーは, 時間とともに長くなり, 5 min 後には後方の接触部へ近づく. また, この時間でのキャビティー後端部は, 紙面の右側の方が長くなっている. Fig.4.3-7 では, 開始から 120 s 後に, 前方の接触部で発生したキャビティーが後方の接触部に到達している. その後の時間においても, キャビティーが後方の接触域と接続している. 従って, Fig.4.3-6 とは, キャビティーの成長が異なっていることが分かる. また, 実験時の観察において, キャビティーの到達により, 後方接触域の干渉像の色が変化していることも確認された. 3, 4 min 時では, 前方の接触部でも接触域の干渉像の色の変化が見られた. Fig.4.3-8 には, Fig.4.3-7 の試験後の接触部を観察した結果を示す. 後方接触域において, ディスクの回転方向に複数の傷が見られ, 開始前のヘルツ接触円は見られない. また, 接触域前方においても, 回転方向に傷の発生が見られ, 開始前のヘルツ接触円は見られない.

Fig.4.3-9 には, 前方接触部で発生したキャビティー長さの時間変化を示す. 3 つの滑り速度における 2 回の結果を示している. 548 mm/s における No.1 と No.2 は, Fig.4.3-6, 4.3-7 の結果をそれぞれ示している. 実験開始から, キャビティー長さには, 滑り速度の差が見られ, その長さは滑り速度が大きいほど長くなる. また, どの滑り速度においても, キャビティー長さの変化は, 時間とともに小さくなっている. 68.5, 137 mm/s において, 5 min 後におけるキャビティー長さの変化量は非常に小さい. また, 548 mm/s の No.1 の結果における 5 min のキャビティー長さは, 137 mm/s のものとはほぼ等しい. 548 mm/s の No.2 の結果では, 100 s 以後, キャビティー長さは, 約 700 μm で一定となっている.

(2) 接触域の油膜厚さの検討

本実験では、2つの接触部を撮影視野に入れるため、画像における接触部が小さくなり、その干渉像が不鮮明になった。また、キャビティー領域を明確にするため、接触部に導入した光量を強くした。そのため、接触部の干渉像が明確には確認できなかった。従って、得られた画像から、接触部に形成された油膜厚さを光干渉法により測定することができなかった。今回は、油膜厚さを把握するために、接触域前方に存在する潤滑油量にて評価した。ここでは、Wolveridgeら¹⁰、Hamrockら¹¹によって提案されている前方のメニスカス長さ(入口長さ)を利用した。入口長さは、EHL膜の形成におけるくさび作用による圧力発生の役割を持っており、これにより油膜形成が評価できる。油量不足により、この長さが小さくなれば、圧力が十分に発生せず、接触面に十分な油膜を形成することができない。ここでは、Hamrockらによる推算式を用いて、入口長さを評価した。以下に、推算式を示す。

$$H_{central} = H_{central, non-starvation} \left(\frac{m-1}{m^*-1} \right)^{0.29} \quad (4.3.2-1)$$

$$m^* = 1 + 3.06 \left[\left(\frac{R}{b} \right)^2 H_{central, non-starvation} \right]^{0.58} \quad (4.3.2-2)$$

ここで、 $H_{central}$: 無次元膜厚(= $h_{central}/R$) , R : 球の曲率半径, $H_{central, non starvation}$: 油量不足がない条件での無次元油膜厚さ, m : 無次元入り口長さ(= m/a), a : ヘルツ接触円半径, m^* : 油量不足となる限界の入口長さ

Fig. 4.3-10 には、実験より得られた入口長さと、式(4.3.2-2)によって計算された、油量不足となる限界の入口長さを示す。また、滑り速度は、3条件のものを示している。Fig.4.3-11 は、Fig.4.3-10 の縦軸を拡大したものである。

Fig.4.3-10 より、滑り速度が 68.5, 137 mm/s の場合、入口長さは、全ての時間において推算式による値を越えており、十分な油膜が形成されていたことが推測される。また、548 mm/s では、Data.No.1(Fig.4.3-6 におけるデータ)では、推算式による値を越えており、形成される油膜厚さは、十分であると考えられる。一方で、Data.No.2(Fig.4.3-7 におけるデータ)では、約 120 s において、推算式による値を下回っており、その後、150 s では上回るが、ほぼ全時間においてその値を下回る。従って、接触域では油量不足による油膜厚さの低下が引き起こされる状態が予想される。前方接触部で発生したキャビティーが後方接触部まで成長し、油量不足を引き起こす、その結果、後方接触部では油膜の破断が起こると考えられる。この油膜の破断により、ディスクが球と直接接触し、その結果、Fig.4.3-8 で見られるような傷の発生を引きこしたことが推測される。また、ディスクに発生した傷が、前方接触部における油膜厚さの変化をもたらしたため、前方接触部においても傷の発生が起こったと

考えられる。

(3) メニスカスによる油量の供給

これまでは、油槽を使用した実験における結果について述べた。ここでは、メニスカスによって、潤滑油を供給した条件における結果を示す。滑り速度は、137 mm/s である。

Fig.4.3-12 には、開始から 30 s までにおける、キャビティー長さの変化を示す。これまでの油槽を使用した実験結果 (Fig.4.3-10) に、メニスカスによる実験結果を付け加えている。Fig.4.3-13 には、この実験における 1.6 s から 1.643 s までのキャビティーの画像を示している。

Fig.4.3-12 より、キャビティー長さは、1.6 s 後に 200 μm から約 520 μm に急成長している。10 s 後のキャビティー長さは、メニスカス条件では、520 μm 、油槽付き試験では、約 300 μm である。従って、キャビティーの成長が、供給条件によって異なり、メニスカス条件でのキャビティー成長が早くなることを示している。

Fig.4.3-13 より、急速にキャビティー長さが拡大している時間のキャビティー長さの変化が確認できる。また、画像より、接触域のメニスカスは、それぞれの接触域に形成される円形のメニスカスが繋がったものであることが分かる。メニスカスの中間部には、くびれが見られる。1.625 s の画像において、前方の接触域後方のメニスカスのくびれが収縮していることが確認できる。従って、空気が接触域の方へ進入してきている。その後、1.638 s では、前方接触部に発生しているキャビテーション領域と空気領域が接続したことが考えられ、そのため、キャビティー領域が拡大している。1.643 s では、メニスカスはキャビティーに沿って広がっており、キャビティーと空気領域の接続はなくなっている。この時間域では、メニスカスは安定しており、その収縮は見られなくなる。Fig.4.3-14 に、観察結果をまとめる。メニスカス条件では、潤滑油が側方に流れることや振動等による油膜厚さの変化により、メニスカス領域の収縮が引き起こされる、その結果、接触域後方で油の戻り量が低下し、瞬間的に空気がキャビティー領域と接続すると考えられる (Fig.4.3-14 の (b))。そして、キャビティー領域は後方接触部の方へ拡大する (Fig.4.3-14 の (c))。

4.3.3 キャビティ成長モデルの検討

本節における結果より、2点接触下におけるキャビティの成長モデルを以下のように検討できる。

(1) キャビティの成長領域

前方接触部で発生したキャビティは、時間とともに成長し、後方の接触部の近くまで到達する。式(3.1.2-1)で示されるレイノルズ方程式より、負圧が発生する領域は、拡がりすきま部分と分かる。例えば、Fig.4.3-4の5 min後のキャビティにおいて、キャビティ後端部分は後方の球の位置であるので、狭まりすきま部分となり、レイノルズ方程式より負圧は発生しないと分かる。そのため、キャビテーションの発生は、この部分では起こらないと考えられる。しかし、今回の観察されたキャビティは、理論的に正圧が発生する領域において存在し、その長さを拡大している。

今回の実験で観察されたキャビティ成長は、その成長速度や形状から、第3章3.3に示したSecond stageと分かる。これまでの結果より、この成長段階におけるキャビティ内圧力は、大気圧に近くまで上昇していると予想される。従って、後方の接触部において、正圧が小さい領域では、キャビティは存在できると考えられる。時間とともに、溶解気体のキャビティ内への放散が起こり、キャビティ内と潤滑油の圧力バランスの下で、その成長が起こったと考えられる。

この結果は、第1章1.4.3に示した、キャビティ圧を基にキャビティ領域を求める方法では決して確認できない。

(2) 最終的なキャビティ長さの決定

前方の接触部で発生したキャビティは、時間とともに成長するが、Fig.4.3-10の約4 min経過後では、キャビティ長さは変化が小さく、ほぼ一定の値となる。Fig.4.3-15には、滑り速度が548 mm/sの開始から5 min後におけるキャビティの画像を示している。この図より、矢印で示している方向に潤滑油が流れていることが推測される。従って、潤滑油は、後方の接触部の前方部分へ引き込まれるので、その結果、この油の流れによってキャビティの成長は抑えられる。そのため、キャビティ形状は図のようになり、その長さは一定となる。

この結果より、最終的なキャビティ領域は、キャビティ後方で起こる潤滑油の流れに支配され、決定されることが分かる。従って、キャビティ後方で油の流れと、溶解気体のキャビティ内への放散を連成的に考えることが必要となる。

(3) 後方接触部へのキャビティの接続と油量不足

本実験より、滑り速度548 mm/sの条件では、後方接触部へのキャビティの接続と油量不足が引

き起こされることが確認された。

滑り速度が大きい条件では、高速回転により、系の振動が見られ、接触部に形成される油膜厚さの変化も確認された。この油膜方向の位置の変化は、後方の接触部における潤滑油の供給状態を変化させる。その結果、瞬間的にキャビティが成長し後方の接触部と接続することが予想され、これにより、後方の接触部は油量不足となる。その後、油の供給状態が依然として不安定なものであると、キャビティと接触部の接続は引き続き起こる。そのため、油量不足が引き続き起こる。

この結果より、キャビティの成長による油量不足を防止するためには、潤滑油が後方の接触部に十分に供給されるような流路を作ることが、重要であると考えられる。また、複数の接触部を持つ潤滑面では、それぞれの接触部においてキャビティが成長することにより、それらが合体し、拡大していく、その結果、油量不足が早期に起こることが予想される。従って、接触域内で十分な油量を確保し、後方接触部へ十分な油量を供給する工夫が必要と考えられる。その問題が解決できれば、潤滑面において、十分な油膜厚さと粘性抵抗の低下の両方を得ることができると考えられる。実験結果の Fig.4.3-5 の 137 mm/s のような条件では、”キャビティ領域は大きく、後方接触部の油量も十分に確保されている”。従って、このような条件を設定していくことにより、理想的な潤滑面を実現できると考えられる。

4.3.4 まとめ

本節において、2点接触下におけるキャビティの成長を観察し、以下のことが分かった。

- ・前方の接触部で発生したキャビティは、時間とともに成長し、後方の接触部に近づく。
- ・滑り速度が 548 mm/s の条件では、キャビティが後方接触部へ接続することが確認され、その結果、油量不足が起こることが分かった。この実験において、実験後の接触面には、直接接触が影響したと考えられる傷の発生が見られた。
- ・キャビティ領域は、キャビティ後方での潤滑油の流れの影響を受けることが分かった。
- ・メニスカスで潤滑油を供給した条件では、キャビティと大気の接続が起こるために、キャビティの成長が早くなる。

(参考文献)

- 1 Sato, Y., Seki, K., Sugimura, J. and Yamamoto, Y., “Experiments and Simple Modeling of Hydrodynamic Lubrication in Radial Shaft Seals,” Proceedings of the 17th International Conference of Fluid Sealing, BHR Group, 2003, 139-156
- 2 Harp, S.R. and Salant, R.F., “Inter-asperity cavitation and global cavitation in seals: An average flow analysis”, Tribology International, 35, 2002, 113-121
- 3 Hamilton, D.B., Walowit, J.A. and Allen, C.M., “A Theory of Lubrication by Micro-irregularities”, Journal of Basic Engineering, 3, 1966, 177-185
- 4 水田, 佐藤, 杉村, 山本, “オイルシールの表面粗さによるキャビティの発生と摩擦に及ぼす影響(第2報: 材料の影響)”, JAST 日本トライボロジー会議予稿集 東京 2004-5, 133-134
- 5 山本, “回転用オイルシールの潤滑機構”, 機械の研究, 62, 11, 2010, 1044-1054
- 6 Jackson, A. and Cameron, A., “An Interferometric Study of the EHL of Rough Surfaces”, ASLE Transactions, 19, 1, 1976, 50-60
- 7 兼田, “EHL と表面粗さ”, 潤滑, 27, 2, 1982, 80-85
- 8 中原, “混合潤滑理論の現状”, トライボロジスト, 39, 3, 1994, 220-228
- 9 Chang, L., Jackson, A. and Webster, M.N., “Effects of 3-D Surface Topography on the EHL Film Thickness and Film Breakdown”, Tribology Transactions, 37, 3, 435-444
- 10 Wolveridge, P.E., Baglin, K.P. and Archard, J.F., “THE STRVED LUBRICATION OF CYLINDERS IN LINE CONTACT”, Proceedings of Mechanical Engineers, 185, 81/71, 1970-1971, 1159-1169
- 11 Hamrock, B.J. and Dowson, D., “Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts”, Journal of Lubrication Technology, 1977, 1, 15-23

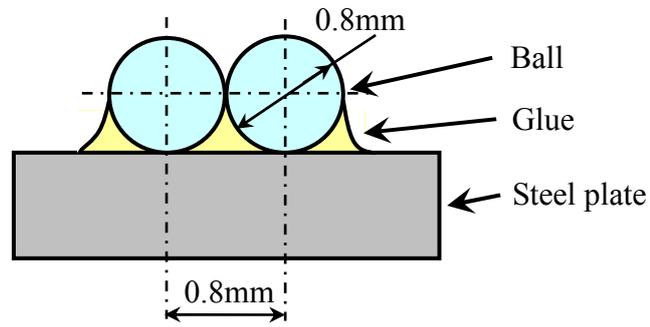
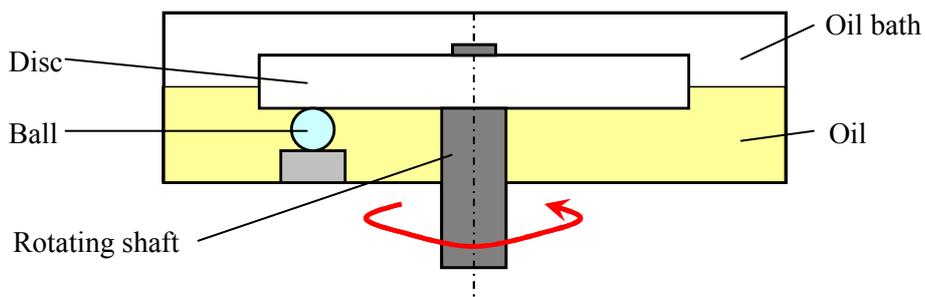
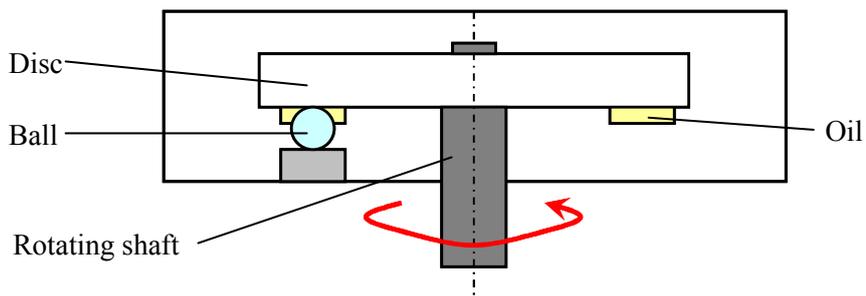


Fig.4.3-1 Specimen of ball



(a) Oil bath



(b) Meniscus

Fig.4.3-2 Two type method for oil supply

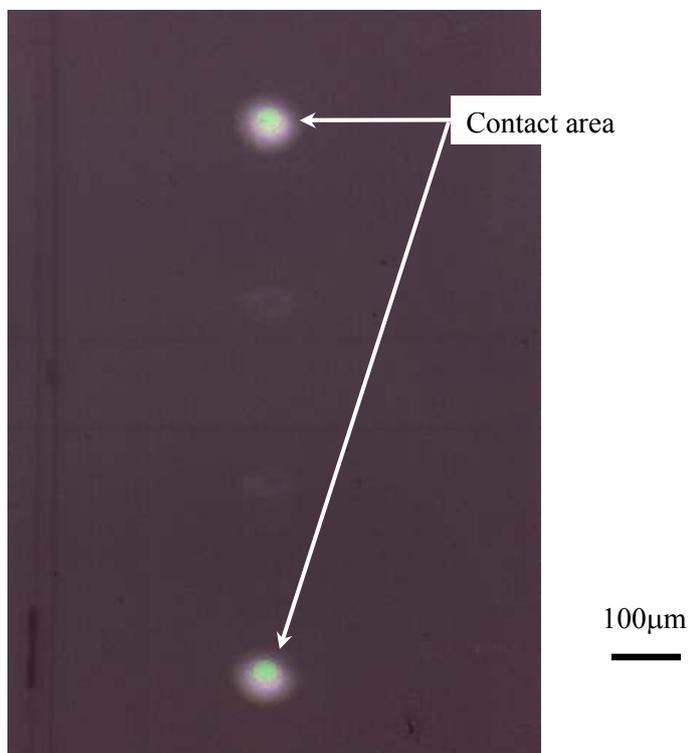


Fig.4.3-3 Photograph at static contact

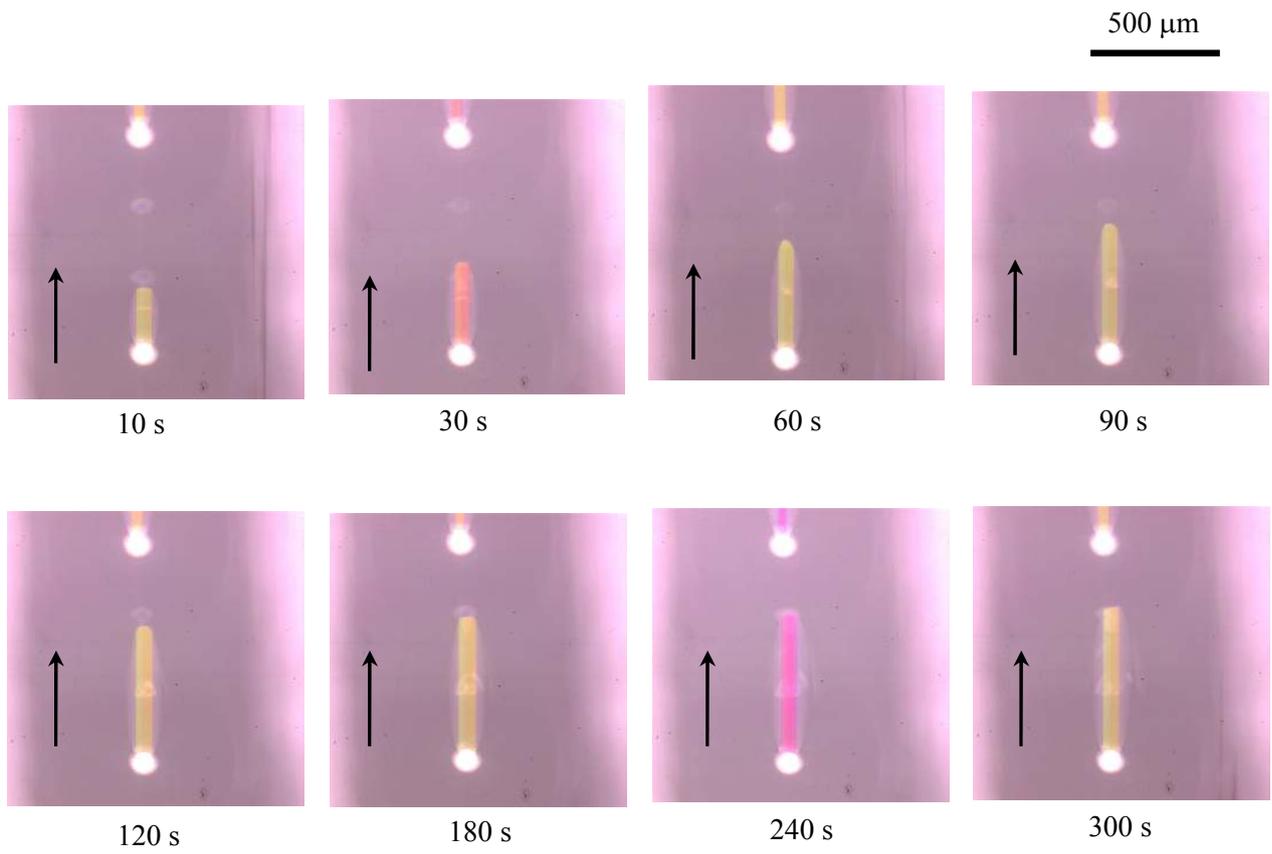


Fig.4.3-4 Cavity growth at 68.5 mm/s

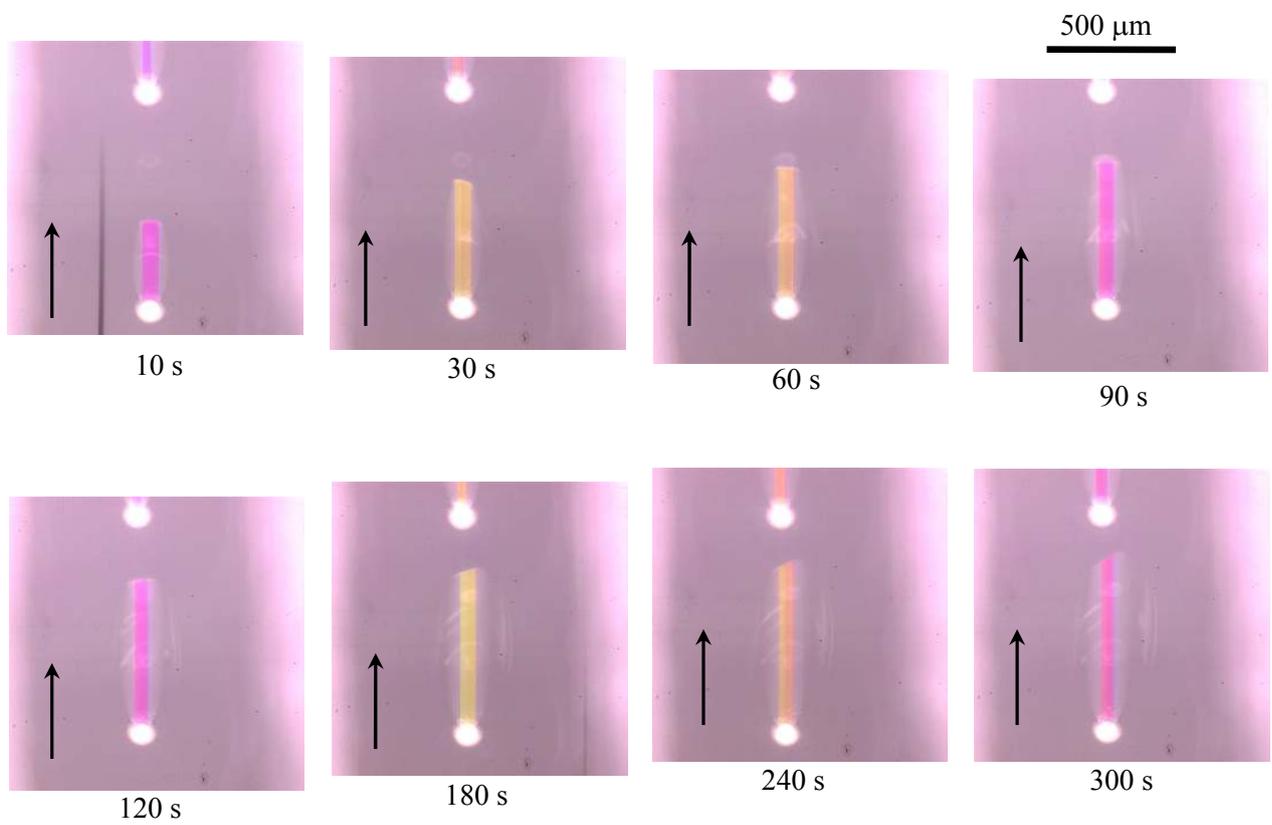


Fig.4.3-5 Cavity growth at 137 mm/s

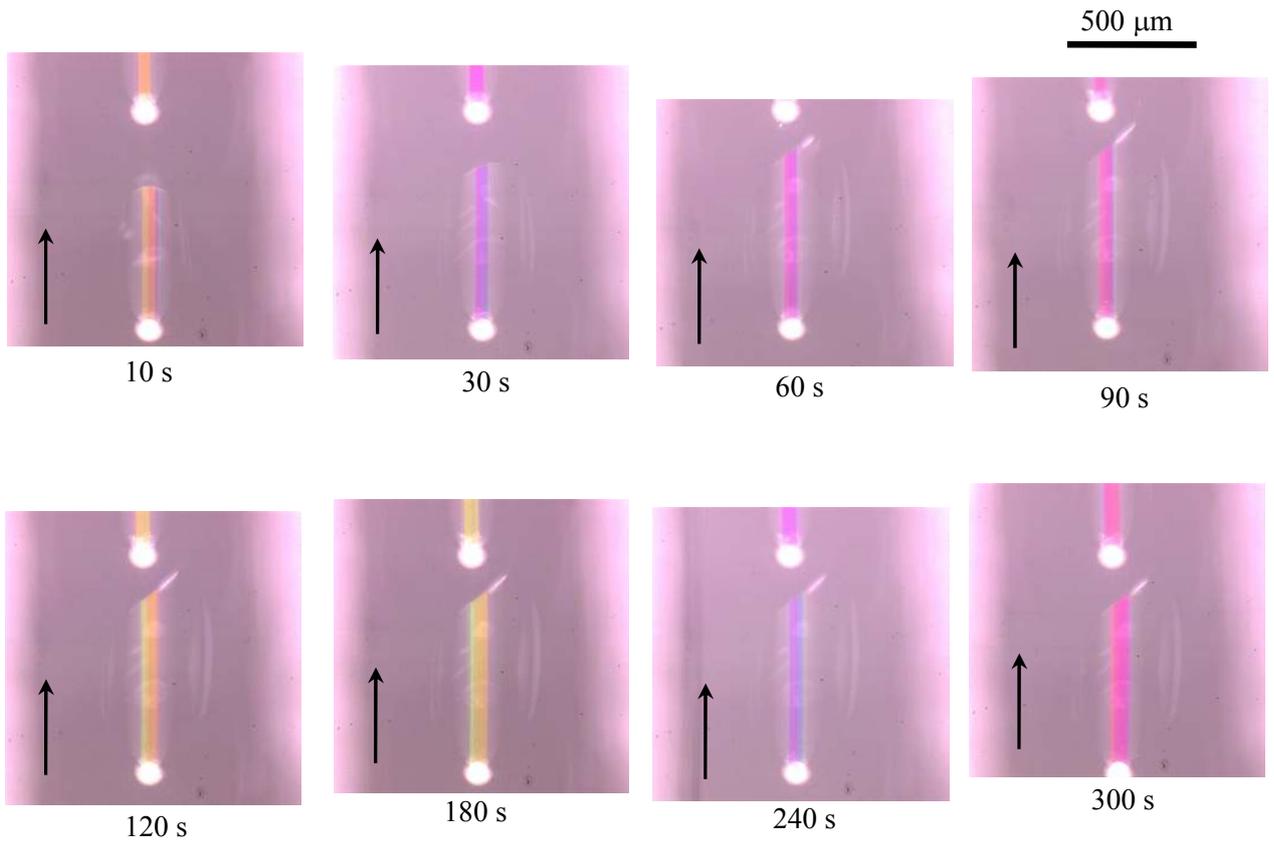


Fig.4.3-6 Cavity growth at 548 mm/s, Data. No.1

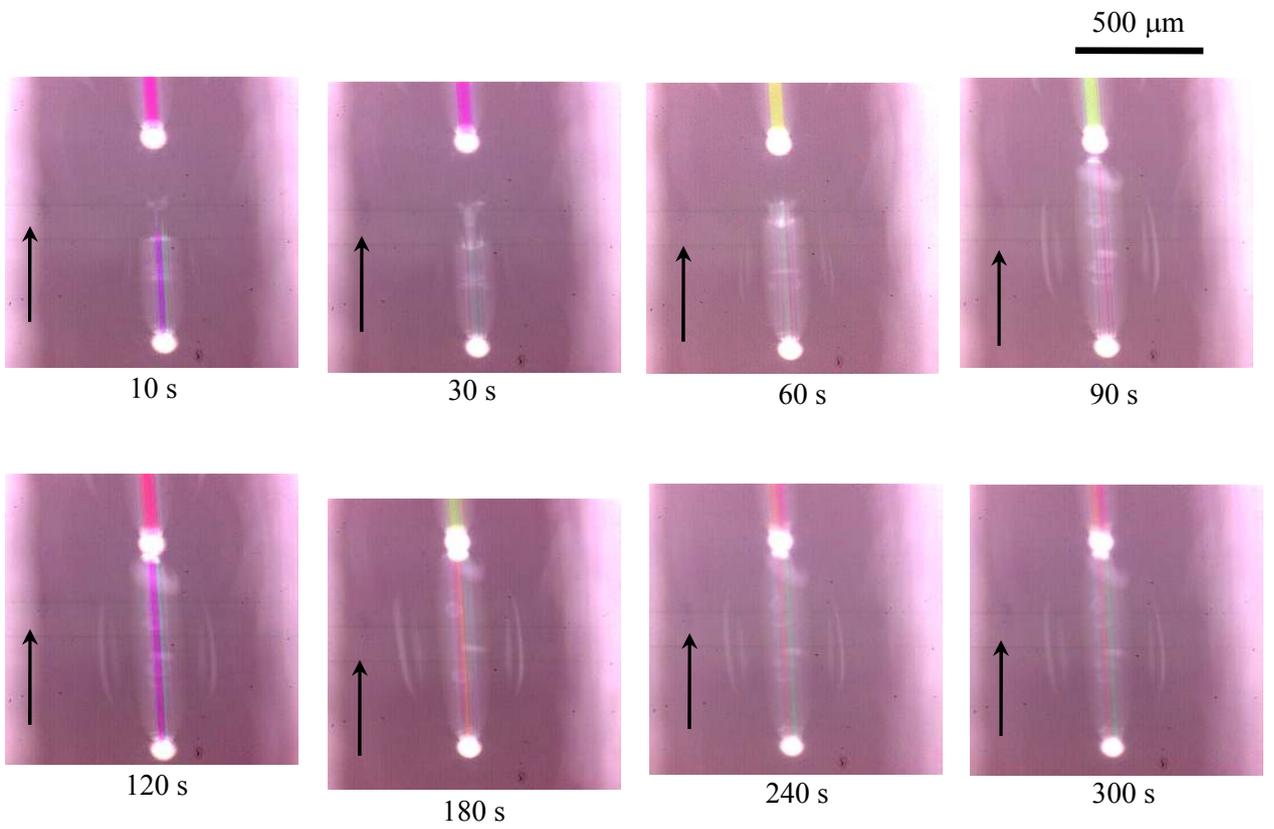


Fig.4.3-7 Cavity growth at 548 mm/s, Data. No.2

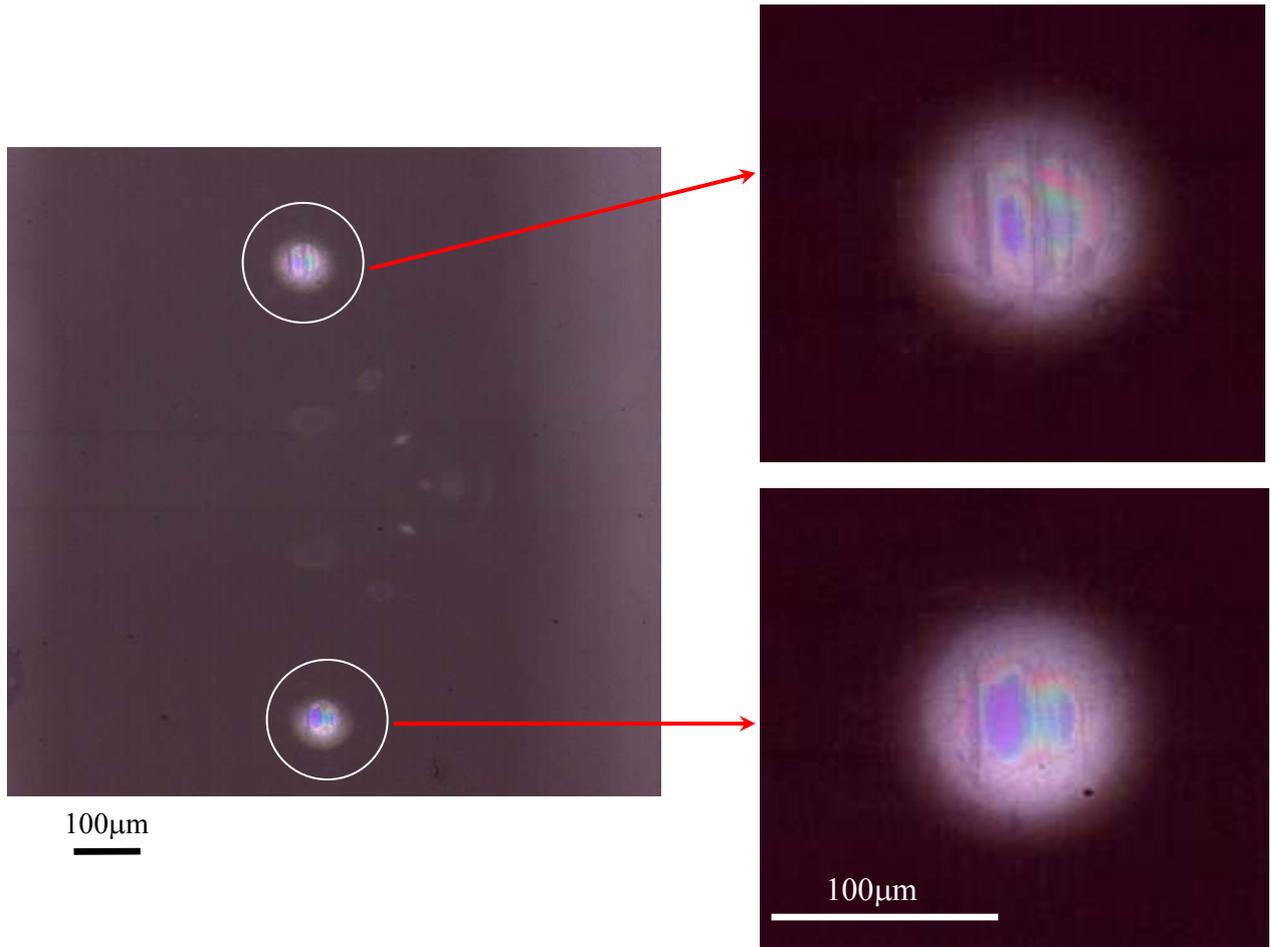


Fig.4.3-8 Contact area after test

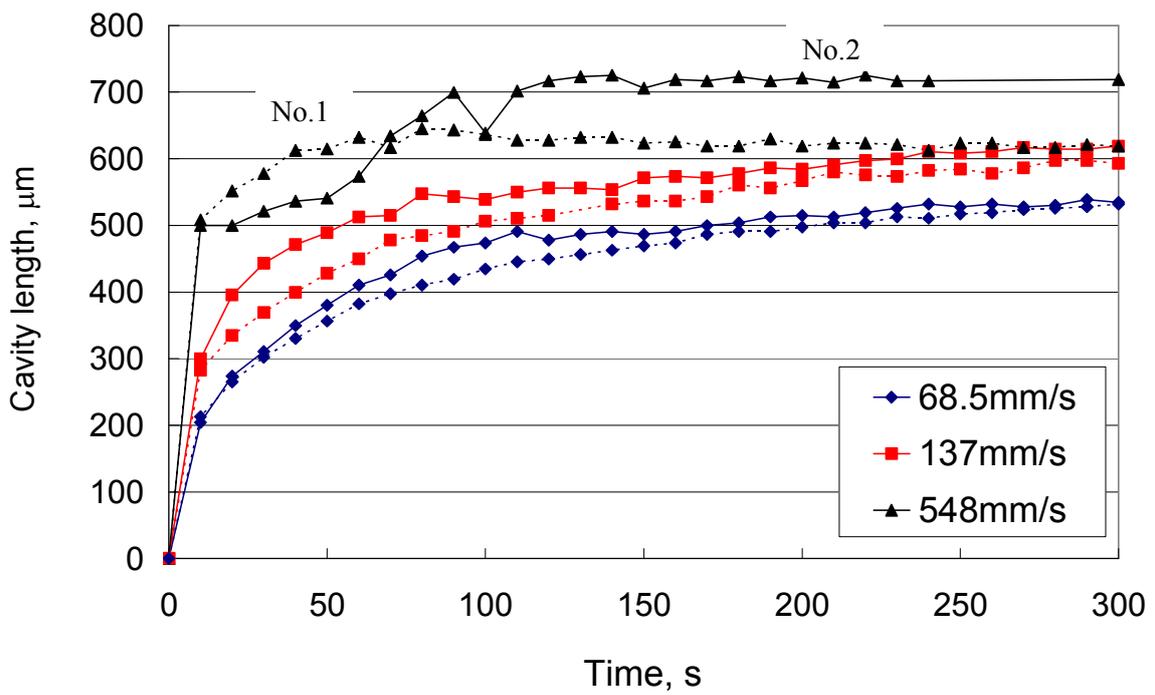


Fig.4.3-9 Changes in cavity length with time in various conditions

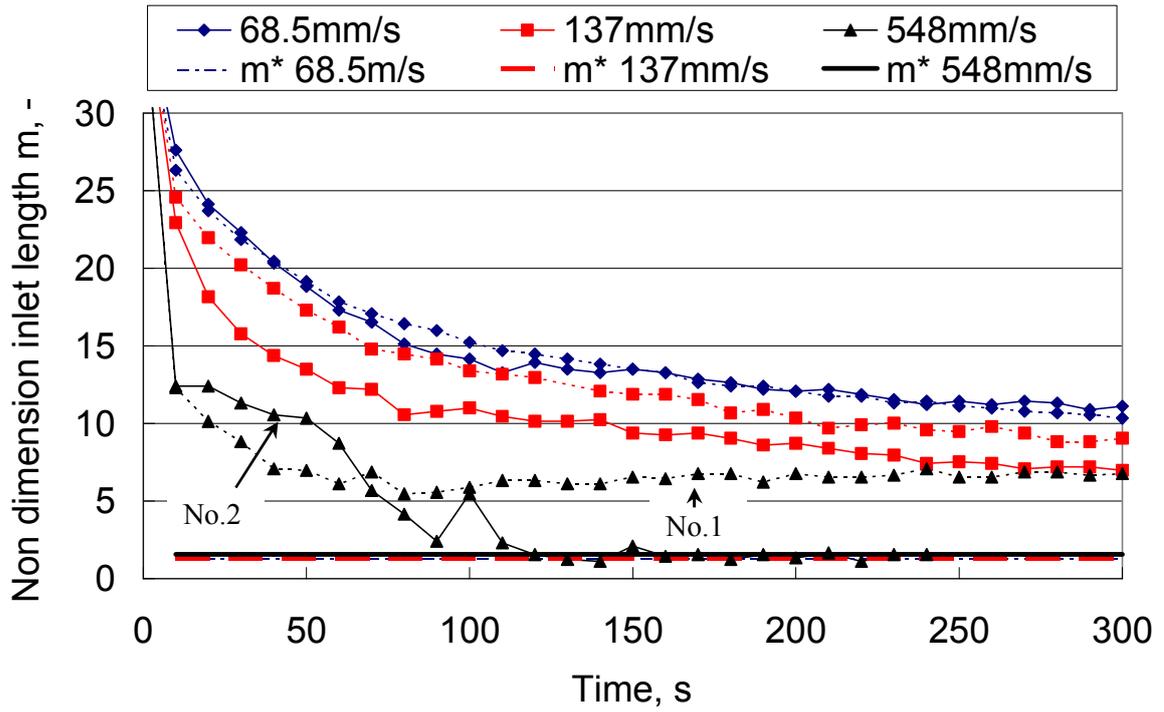


Fig.4.3-10 Changes in inlet length of meniscus with time

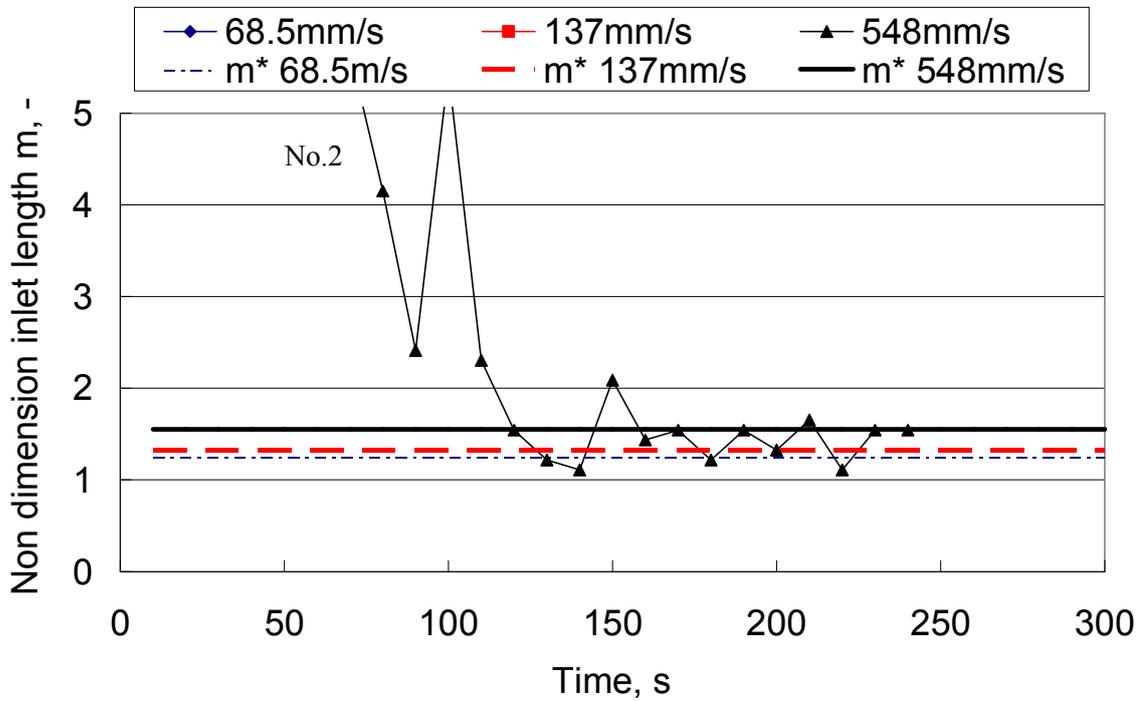


Fig.4.3-11 Changes in inlet length of meniscus with time

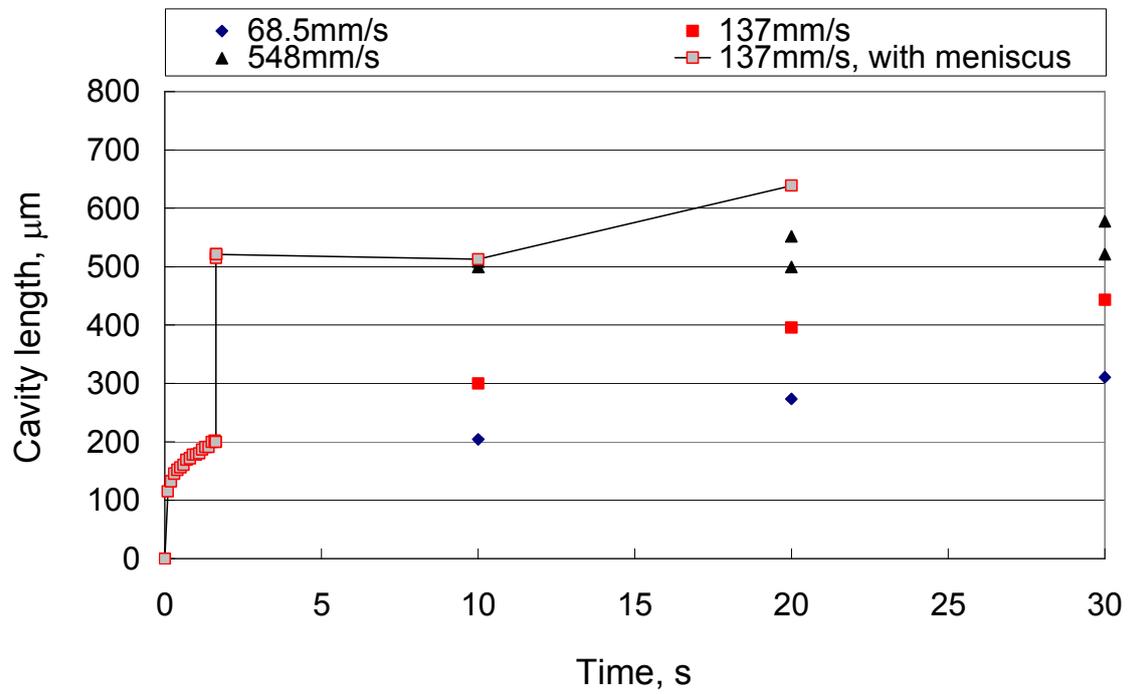
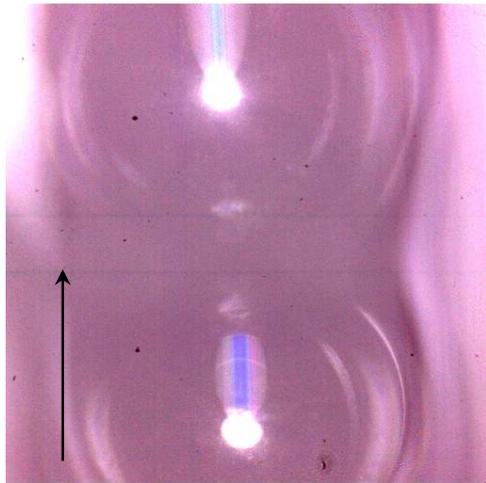
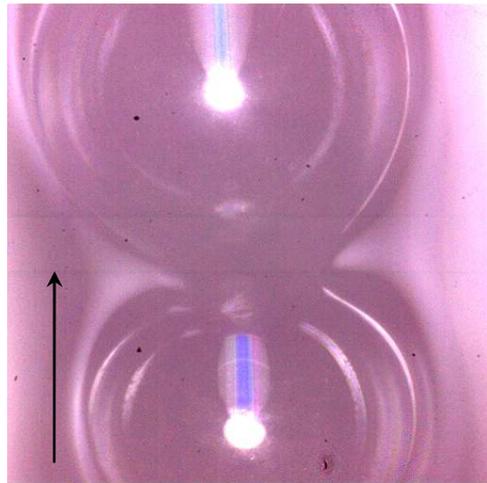


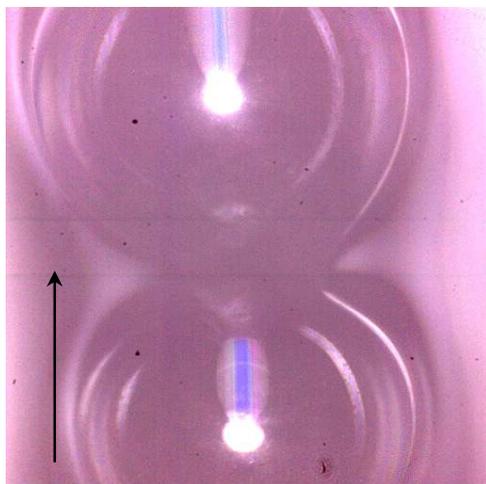
Fig.4.3-12 Effect of oil supply condition on cavity growth



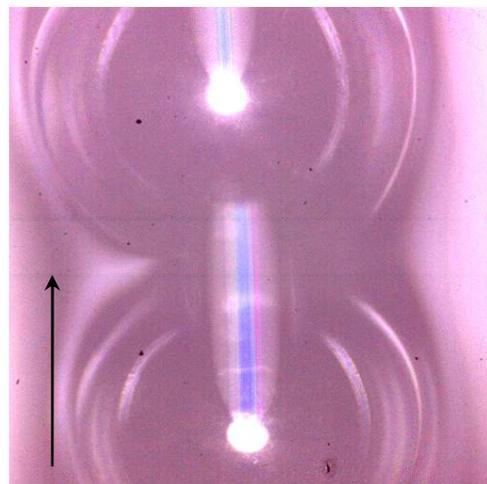
1.6 s



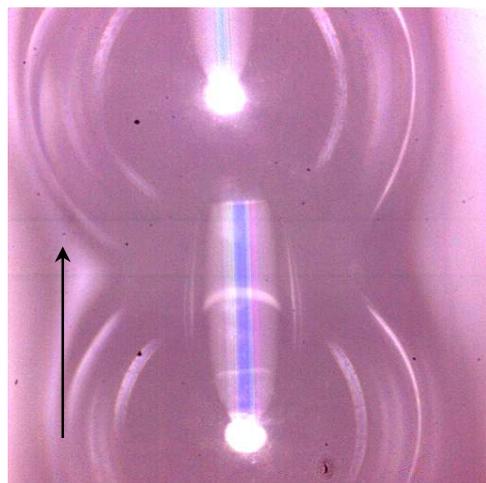
1.625 s



1.63 s



1.638 s



1.643 s

200μm



Fig.4.3-13 Cavity growth due to coalescence with air

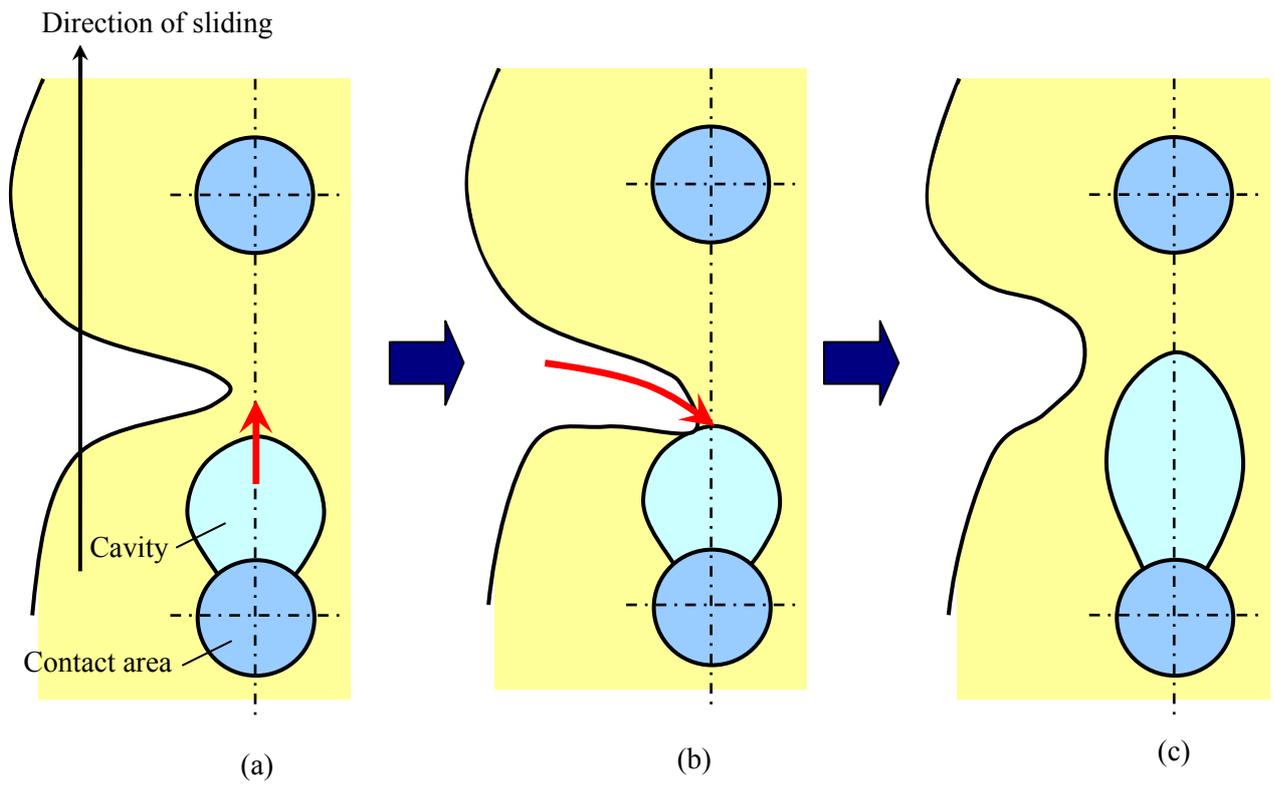


Fig.4.3-14 Coalescence of cavity with air

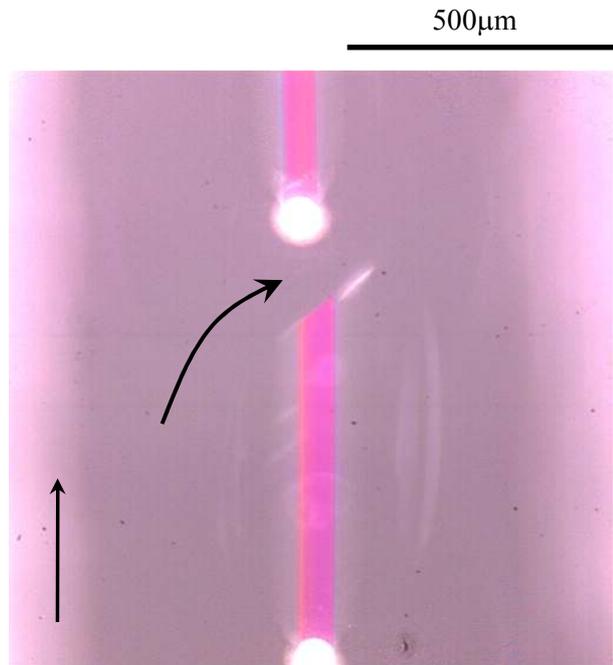


Fig.4.3-15 Photograph of cavity at 300 s after the start, 548 mm/s

第 5 章 結言

5. 結言

5.1 総括

本研究では、弾性流体潤滑(EHL)膜におけるキャビティー成長について調べた。得られた結果より、その成長機構を明らかにするとともに、成長のモデルを提案することを目的とした。以下にその結果をまとめる。

(1) キャビティーの成長に及ぼす雰囲気、運転条件の影響

雰囲気气体の影響

雰囲気气体にヘリウム、アルゴン、二酸化炭素、空気を使用し、EHL膜に形成されるキャビティーを観察した。

- ・キャビティー長さは時間とともに長くなる。また、その成長は雰囲気气体の影響を受ける。キャビティー長さは、溶解度の高い气体中で長くなる。
- ・発生後からのキャビティーの成長は、2段階の過程(Initial stage, Second stage)で起こる。
- ・発生から初期の時間域において、キャビティーの成長は、雰囲気气体の影響を受けず、急速に成長する(Initial stage)。
- ・その後の時間域では、キャビティーの成長に雰囲気气体の影響が見られる。成長速度は、初期の成長の速度より低下する(Second stage)。

滑り速度、潤滑油粘度の影響

滑り速度、潤滑油粘度の各成長段階に及ぼす影響を調べた。

- ・Initial stageにおいて、キャビティーの成長速度は、滑り速度が大きいほど大きくなる。また、成長後のキャビティー長さは滑り速度とともに長くなる。
成長後のキャビティー長さ、成長時間は潤滑油粘度とともに長くなる。成長速度は、粘度の影響を強く受けない。
- ・Second stageにおいて、キャビティーの成長速度は、粘度、滑り速度が大きいものほど大きい。

雰囲気温度の影響

雰囲気温度を295, 350 Kの2条件とし、キャビティーの観察を行った(両温度条件において潤滑油粘度は同じとした)。

- ・雰囲気温度350 Kでも、キャビティーの成長は2段階(Initial stage, Second stage)で起こる。
- ・Initial stageにおいて、キャビティーの成長は雰囲気温度の影響を受けない。

- Second stage において、キャビティの成長は温度の影響を受ける。その影響は、気体の種類によって異なり、溶解度の温度依存性と関係する。

雰囲気圧力の影響

雰囲気圧力を 0.015-101300Pa の範囲で変化させ、キャビティの観察を行った。

- 雰囲気圧力が変化しても、キャビティの成長は 2 段階(Initial stage, Second stage)で起こる。
- Initial stage において、キャビティの成長は雰囲気圧力の影響を受ける。成長時間は、雰囲気圧力が低いほど長くなる。
- Second stage において、キャビティの成長は雰囲気圧力の影響を受ける。成長速度は、雰囲気圧力が高いほど大きくなる。また、大気圧条件下でのキャビティは、1 h 経過後に 0.015 Pa の長さまで成長する。
- 潤滑油の蒸気圧と雰囲気圧力を近づけた条件においても、2 段階のキャビティの成長が見られる。これは、潤滑油中に残存した溶解気体がキャビティの成長に影響するためである。

表面張力の影響

潤滑油にシリコーン油を使用し、キャビティ成長に及ぼす表面張力の影響を調べた(両潤滑油の粘度は同じとした)。

- シリコーン油においても、キャビティの成長は、2 段階(Initial stage, Second stage)で起こる。
- Initial stage において、キャビティの成長は表面張力の影響を受けない。
- Second stage において、キャビティの成長は表面張力の影響を受ける。表面張力が低いほど、キャビティは長くなる。

(2) キャビティの成長モデル

キャビティ成長モデル (Initial stage, Second stage)

実験結果を基に、2 段階の成長過程のモデルをそれぞれ検討した。

- Initial stage では、接触域後方に発生する負圧分布から検討した。キャビティが急速に成長する時間では、キャビティ後方に発生する負圧が絶対真空圧まで低下している。その後、キャビティの成長とともに、発生する負圧は緩和する。この時間では、キャビティの成長も小さくなる。

この結果より、モデルの一つは、以下のように示される。負圧の発生により、キャビティ核が形成され、過飽和となった溶解気体がキャビティ内に析出することで安定的なキャビティと

して潤滑油中に存在できるようになる、その後もキャビティの拡大と溶解気体の析出が引き続き起こるため、キャビティは急速に拡大すると理解できる。分子動力学法を用いた数値計算により、キャビティの形成後、キャビティ内には溶解気体が析出すること、析出する気体の数は溶解気体数とともに増加することも確認された。その後、負圧の緩和により急速な成長は起こらなくなる。

また、二つ目のモデルは、以下のように示される。油中の気泡核は、負圧の領域に進入することにより、その領域を拡大する。そのため、キャビティが急速に成長する。その後、負圧の緩和によりその拡大が小さくなり、キャビティの成長は小さくなる。

また、この成長は、滑り速度、潤滑油粘度、雰囲気圧力の影響を受ける。

- **Second stage** の成長は、溶解気体のキャビティ内への放散現象から理解できる。キャビティ内と潤滑油中の溶解気体の分圧(濃度)に差があるとして、その界面に二重境界膜モデルを適用し溶解気体の放散量を計算した。その結果、計算されたキャビティ成長が、実験結果と同じ傾向となることが示された。また、キャビティ内の圧力は、時間とともに上昇しており、大気圧に近づく。

この段階での成長は、滑り速度、潤滑油粘度、雰囲気気体、雰囲気温度、雰囲気圧力、表面張力の影響を受ける。

(3) キャビティ成長モデルの応用

グリース潤滑におけるキャビティ成長

リチウムステアリン酸グリース、ヒドロキシリチウムステアリン酸グリース、ジウレアグリースを使用し、グリース潤滑膜におけるキャビティを観察した。

- グリースにおけるキャビティの成長も2段階(**Initial stage**, **Second stage**)で起こる。
- **Initial stage** における成長の時間は、基油の場合よりも長い。また、成長後のキャビティ長さは、グリースの方が基油よりも長くなる。また、成長後のキャビティ長さは、基油粘度が大きいほど長くなる。グリースの見かけ粘度のせん断率依存性、増ちょう剤の塊(分散状態)の影響をキャビティ成長モデルに考慮しなければならない。
- **Second stage** におけるキャビティの成長速度は、**Initial stage** のものより小さい。また、グリースにおけるキャビティ長さは、潤滑油の場合と同様に、雰囲気気体の影響を受け、基油の溶解度とともに長くなる。成長モデルには、グリース中の溶解気体量と移動特性を考慮しなければならない。

往復動運転におけるキャビティの成長と消滅

2 条件のストローク長さにおける，往復動運転時のキャビティの発生と消滅を観察し，その結果をキャビティ成長モデルを基に考察した．

- ・短ストローク試験において，加速過程でのキャビティの成長は，雰囲気気体の影響を受けない．減速過程，および，反転時における加速過程でのキャビティの消滅は，雰囲気気体の影響を受ける．キャビティの消滅時間は，ヘリウム，アルゴン，二酸化炭素の順に長い．
- ・長ストローク試験での反転時のキャビティの消滅には，雰囲気気体の影響を受けない．減速過程，および，反転時の加速過程において，キャビティは消滅しない．その後，キャビティの一部で2つに分かれ，その一方は気泡として残る．
- ・ストローク長さによってキャビティ成長段階が異なることと，キャビティ内圧力が変化することが，キャビティの成長と消滅過程に影響を及ぼす．

2 点接触条件におけるキャビティ成長

2 点 EHD 接触下でのキャビティ成長を観察した．

- ・油槽による供給条件において，前方の接触部で発生したキャビティは，時間とともに成長し，後方の接触部に近づく．
- ・開始から 5 min 後のキャビティ長さの時間変化は小さく，キャビティ領域は，キャビティ後方における潤滑油の流れの影響を受ける．
- ・滑り速度 548 mm/s では，前方接触部で発生したキャビティは，後方接触部と接続し，油量不足を引き起こす．
- ・メニスカスで供給した条件では，キャビティが大気と接続するため，キャビティ領域の拡大が早期に起こる．

5.2 今後の課題

ここでは、本研究を進める上で問題となった点と今後の課題について述べる。

(1) キャビティ内圧力の測定

本研究において、キャビティ内圧力の変化が、キャビティの成長、消滅現象に強く影響を及ぼしていることが分かった。例えば、Second stage での成長においては、キャビティ内圧力が上昇し、時間経過とともに大気圧近くになることが分かった。この圧力の変化が、キャビティ成長速度に影響を及ぼしている。

本研究の実験において、キャビティ内圧力は、測定しておらず、実験結果から放散量を求めることによって検討した。従って、今後の課題として、キャビティ内圧力を実際に測定することが求められる。

接触部近くに圧力センサを設け、キャビティ領域の圧力を測定し、本研究で求めた圧力値の妥当性を検討する必要がある。

(2) 潤滑油中の気泡核や溶解気体の存在状態の把握

キャビティの発生と成長には、潤滑油中の気泡核の影響があると考えられる。従って、潤滑部での気泡核や溶解気体の状態を知ることで、キャビティ成長をより詳細に理解することができる。

本研究では、溶解時の潤滑油中の溶解気体の状態、気泡核の大きさ、数については確認していない。また、気泡核に対する雰囲気気体の影響や、接触部において高い圧力を受けた場合の気泡核の状態などを確認することが必要である。

(3) キャビティ後方における潤滑油の流れを考慮したモデルの検討

本研究で得られた結果より、キャビティ成長には、キャビティ後方での逆流や、側方からの流れが影響していることが分かった。従って、油の流れの影響を考慮し、キャビティ領域を求めることが必要である。

例えば、潤滑部における油の流れをナビエ - ストークス方程式より求め、それに溶解気体のキャビティ内への放散を考慮することによって、流れを考慮したキャビティの成長を再現することができると考えられる。また、このような知見から、より現実の現象を再現した新しいキャビティ領域の計算方法が提案できると考えられる。

(4) 他の接触、運転条件におけるキャビティの観察

本研究では、点接触 EHL 膜に形成されたキャビティに関してのみ、観察を行った。従って、他の接触条件にも、本研究で得られたキャビティ成長モデルが適用できるか、調べる必要がある。これによって、より実用的なモデルの提案が可能となる。

線接触の EHL 膜、ジャーナル軸受、メカニカルシール、オイルシールなど、さまざまな潤滑膜において形成されるキャビティを観察し、本研究の結果と比較することが必要である。また、純滑り条件ではなく、純転がり条件、転がり - 滑り条件でのキャビティの観察と、その条件の影響の把握も必要である。

(5) 他の潤滑油、雰囲気気体におけるキャビティの観察

本研究では、潤滑油に主に PAO を使用し、雰囲気気体としてヘリウム、アルゴン、二酸化炭素を使用した。提案した成長モデルの一般性を調べるためには、他の潤滑油と気体の条件での実験が必要である。特に、気体が潤滑油中に化学的に溶解するような条件では、キャビティ内への気体の析出・放散現象が変化することが考えられる。

(6) 分子動力学法による数値計算の発展

本研究では、キャビティの発生時の様子を分子動力学法を使用したシミュレーションにより検討した。今後の課題として、液体を炭化水素にした場合、液体内に予め気泡核が存在する場合、液体が流動している場合などにおける計算を行うことが挙げられる。また、分子動力学法で計算された結果は、ポテンシャルの選定や計算条件の影響を強く受ける。従って、実際の現象を再現するポテンシャルや計算条件の設定を検討することも必要である。

謝辞

九州大学大学院工学研究院 杉村丈一教授には、本研究を進めるに際して御指導、御教示いただき、研究を進めるに際して最適な環境を整えていただきました。また、先生の御配慮により、博士課程在籍時に海外留学や国際会議への参加など多くの貴重な経験をさせていただき、とても充実した時間を過ごすことができました。ここに厚く、心より御礼を申し上げます。

九州大学大学院工学研究院 村上輝夫教授、澤江義則教授には、本論文を御審査いただき、丁寧な御校閲と貴重な御意見をいただきました。厚く御礼申し上げます。

久留米工業高等専門学校 和泉直志教授、九州大学大学院工学研究院 八木和行准教授には、本研究に対して多くの貴重な御意見をいただきました。厚く御礼申し上げます。

九州大学大学院工学研究院 田中宏昌助教には、本研究を進める上で最適な環境を整えていただいただけでなく、多くの御指導、御助力いただきました。また、九州大学大学院工学研究院 橋本正明技術職員、森田健敬助教、渡辺秀樹技術職員にも、研究の遂行の際に多くの御協力をしていただきました。厚く御礼申し上げます。

また、先生方からいただいた温かい激励の言葉にいつも助けられました。ありがとうございました。

本研究に使用した潤滑油、グリースは、出光興産(株)、日本精工(株)より提供していただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたっては、トライボロジー研究室に在籍された方々、友人にも多くの面で御協力いただきました。また、多くの激励をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行に際し、日本学術振興会の特別研究員(DC2)に対する特別研究員奨励費の援助を受けました。ここに謝意を表します。

最後に、大学院期間の生活を支えてもらい、いつも温かく見守ってくれた家族に深く感謝いたします。ありがとうございました。

2012年 1月10日 大津 健史

