

## 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 :

# 弾性流体潤滑におけるキャビテーションに関する研究

大津 健史

# 目次

第1章 緒言	1
1.1 はじめに	2
1.2 機械の作動雰囲気の多様化	4
1.3 機械の設計への雰囲気気体の考慮	7
1.4 キャビテーションが潤滑性能へ与える影響	11
1.5 研究の目的と本論文の構成	17
参考文献, 図	18
第2章 キャビティ成長の観察	31
2.1 実験方法	32
2.1.1 実験目的	32
2.1.2 実験装置	32
2.1.3 試験片, および, 潤滑油	33
2.1.4 実験方法	34
2.1.5 実験条件	36
2.1.6 キャビティ長さの評価方法	36
2.1.7 油膜厚さの測定方法	36
参考文献, 図表	36
2.2 雰囲気気体のキャビティ成長へ与える影響	39
2.2.1 実験条件	40
2.2.2 空気中におけるキャビティの観察	40
2.2.3 各雰囲気におけるキャビティの観察	41
2.2.4 まとめ “キャビティの成長現象”	41
2.2.5 発生直後のキャビティの観察	43
2.2.6 キャビティの成長過程	45
2.2.7 まとめ	46
参考文献, 図	47

2.3	滑り速度, 潤滑油粘度のキャビティ成長へ与える影響	63
2.3.1	実験条件	64
2.3.2	実験結果, 考察 —滑り速度の影響—	64
2.3.3	実験結果, 考察 —潤滑油粘度の影響—	65
2.3.4	まとめ	66
	参考文献, 図	66
2.4	雰囲気温度のキャビティ成長へ与える影響	71
2.4.1	実験条件	72
2.4.2	溶解度の温度特性	73
2.4.3	実験結果, 考察	76
2.4.4	まとめ	78
	参考文献, 図	79
2.5	雰囲気圧力のキャビティ成長へ与える影響	89
2.5.1	実験条件	90
2.5.2	実験結果, 考察	91
2.5.3	キャビティ形状の検討	94
2.5.4	まとめ	97
	参考文献, 図	98
2.6	表面張力のキャビティ成長へ与える影響	115
2.6.1	実験条件	116
2.6.2	表面張力, 濡れ性の測定	117
2.6.3	実験結果, 考察	119
2.6.4	まとめ	122
	参考文献, 図表	122
第3章	キャビティ成長のモデル	135
3.1	Initial stage のキャビティ成長モデル	136
3.1.1	キャビティモデルの提案	137

3.1.2	接触域後方の圧力分布の計算	139
3.1.3	キャビティ成長モデルの検討	142
3.1.4	まとめ	144
	参考文献, 図	145
3.2	MD シミュレーションによるキャビティ発生 の検討	155
3.2.1	分子動力学法	156
3.2.2	計算モデル	157
3.2.3	ポテンシャル	157
3.2.4	計算方法	159
3.2.5	運動方程式の解法	161
3.2.6	モデル図, および, 計算条件	168
3.2.7	計算の妥当性の検討	169
3.2.8	計算結果, および, 考察	171
3.2.9	まとめ	179
	参考文献, 図表	182
3.3	Second stage のキャビティ成長モデル	235
3.3.1	物質移動を考慮したモデルの提案	236
3.3.2	総括物質移動係数の測定	237
3.3.3	キャビティ体積の計算	239
3.3.4	キャビティ長さへの変換	240
3.3.5	キャビティ長さの計算	240
3.3.6	キャビティ内圧力の推算	241
3.3.7	自由エネルギーによるキャビティ内圧力の決定	242
3.3.8	力学的平衡を考慮したキャビティ内圧力の決定	245
3.3.9	本モデルにおける問題点	247
3.3.10	まとめ	248
	参考文献, 図表	248

3.4 各条件におけるキャビティ成長へのモデルの適用	263
3.4.1 滑り速度, 粘度の影響	264
3.4.2 雰囲気温度の影響	270
3.4.3 雰囲気圧力の影響	272
3.4.4 表面張力の影響	275
3.4.5 まとめ	277
参考文献, 図表	278
3.5 キャビティ成長モデルの一般性と応用	291
3.5.1 Initial stage と Second stage の区別	292
3.5.2 モデルの一般性	293
3.5.3 モデルの応用	296
参考文献, 図	298
第4章 キャビティ成長モデルの応用	301
4.1 グリース潤滑下におけるキャビティの観察	302
4.1.1 実験条件	303
4.1.2 実験結果, および, 考察	304
4.1.3 キャビティ成長モデル	307
4.1.4 キャビティ領域の回復	311
4.1.5 まとめ	314
参考文献, 図表	314
4.2 往復動運転時のキャビティの発生と消滅	335
4.2.1 実験条件	336
4.2.2 実験結果, および, 考察	337
4.2.3 キャビティ成長, 消滅モデル	339
4.2.4 まとめ	341
参考文献, 図表	342

4.3	2点 EHD 接触下でのキャビティの観察	357
4.3.1	実験条件	358
4.3.2	実験結果, および, 考察	359
4.3.3	キャビティ成長モデルの検討	362
4.3.4	まとめ	363
	参考文献, 図	364
第5章	結言	375
5.1	総括	376
5.2	今後の課題	380
	謝辞	383

## 第 1 章 緒言



# 1. 緒言

## 1.1 はじめに

人間は日々、空気と接して生活している。冬には空気の温度が低下し湿度も低いため、人間の体は寒いと感じ、暖かくなるように工夫をする。逆に、夏には空気の温度が上昇し湿度も高いため、人間の体は蒸し暑いと感じ、涼しくなるように工夫をする。他にも、雨、風などの自然の影響によって、常に人間の接する雰囲気に変化は生じるが、人間はその雰囲気の変化を敏感に捉え、それによって問題が生じないように改善しようと常に動いている。

同じように、私たちの身の回りで動作している機械も、その使用環境内で雰囲気と接して働き、人間の生活世界を支えている。このような機械は、人間が設計したものである。そのため、環境が変化したことによって生じた問題を機械自身では解決できない。従って、人間は、機械の動作する雰囲気を考えた上で設計を行い、予め、問題が生じないように考慮している。また、問題が生じても対処できるような機能を、予め、機械に付け加えている。

機械の動作する雰囲気は、その目的に合わせて設定され、さまざまである。機械によって、雰囲気気体、雰囲気温度、雰囲気圧力などの条件が変化する。また、潤滑油中、水中などで動作する機械では、雰囲気が液体の条件となる。また、現在では、更なる効率化や環境問題への配慮などの要求から、利用される雰囲気条件はさらに多様化してきている。そのため、今までは、使用されていなかった雰囲気条件が、時代とともに次々に現れており、それを考慮した機械、そのシステムの設計が求められている。

機械の設計とは、目的の動作を実現するように、ある制限の下で、機械を構成する部品の機構、構造、形状・寸法、加工・製造方法、および、そのシステム化に関して、決定・評価を行うことである<sup>1</sup>。その制限として、その機械が安全、効率的であることや、費用や時間などの経済的条件、環境への対応などが挙げられる。また、この制限の中で、雰囲気の影響も考慮され、その雰囲気で目的とする動作が可能となるように、各部品の機構、部品、寸法、使用材料、潤滑方法などを決めていく。

機械を構成する機械要素の中には、2つの面が接触している部分や相対運動を行う部分が必ず存在する。そのような部分では摩擦が生じている。この摩擦は、機械の動作において、動力の伝達や締結などの部分で大きな役割を果たしている。その一方で、摩擦の発生は、表面損傷による動作の不具合、エネルギー損失、振動・騒音の発生の原因となる。そのため、機械においては、必要に応じて発生する摩擦を制御することが重要となる。従って、安全、かつ、効率的となるような、摩擦面の設計を行うことが必要とされる。

摩擦は、表面で起こる現象である。摩擦が起こると、加わっている応力、2面間の凝着力、発生す

る摩擦熱などによって、材料の表面状態は変化する。例えば、金属同士を摩擦させることを考える。摩擦することにより、表面に形成されていた酸化膜や吸着膜(一般的には、大気中に保持されていた金属表面には、酸化膜や吸着膜が存在する)が取り除かれると、金属の新生面が現れる。新生面上の原子は、内部の原子のように周囲が規則的に原子で囲まれていないので、エネルギー的に安定ではなくなる。従って、この面のエネルギーは非常に高くなり、それに接する雰囲気気体は吸着、反応しやすく、表面膜が形成される。また、周囲の雰囲気に酸素、水分がなければ、酸化膜などは形成されない。摩擦前後での表面膜の状態が変化する。一般に、表面上の吸着膜や反応膜は、摩擦の際に潤滑の働きをしており、摩擦力や表面損傷は、この影響を強く受ける<sup>2</sup>。また、雰囲気気体は、材料内へ浸入し、内部の構造・組織の変化も引き起こす。これにより表面損傷の機構も変化する。このように、雰囲気条件は、摩擦面で起こる現象に大きな影響を与えるため、摩擦面の設計において、非常に重要な条件の一つとなる。従って、その雰囲気における影響を考慮した上で、摩擦面を構成する材料、形状・寸法、潤滑方法(これらをトライボシステムという<sup>2</sup>)を選択し、適切な摩擦面となるように設計する。

このように設計を行う上では、機械の中で起こる動作に関して、雰囲気がどのような影響を与えるかを、予め把握しておく必要がある。従って、基礎的な知見の蓄積が重要となり、これによって設計における指針が決定できる。特に、摩擦、摩耗、潤滑部で起こるトライボ現象は、雰囲気の影響も含め、多くの現象が重なり合った複雑な問題であり、実際の機械における不具合の原因になることが多い。トライボ現象に及ぼす雰囲気の影響のメカニズムを探求することは、今後多様化していくと予想される雰囲気内で動作する機械の設計において、有益であると考えられる。

## 1.2 機械の作動雰囲気の多様化

機械の動作する雰囲気は、時代とともに、多様化してきている。新たな雰囲気での運転の方が効率、機能的に優れるようであれば、そちらへの変更が求められ、新たな雰囲気での運転の方が環境負荷が低いのであれば、そちらへの変更が求められる。また、今までは、利用されていなかった雰囲気で作る機械が必要となれば、機械はその雰囲気での動作が求められる。

例えば、冷凍機器やヒートポンプでは、地球環境問題への対応とともに、使用される冷媒が変化しており、機械の動作雰囲気も変化している。また、現在、化石燃料に変わる新しいエネルギー媒体として、水素が期待されており、水素雰囲気で動作する機械が増えてきている。他にも、高温環境(ガスタービンなど)、宇宙空間、極低温環境、深海、生体内などの新たな雰囲気で作る機械が現れている。

以下に、冷媒の変化と水素雰囲気が必要となった背景、理由をそれぞれ述べる。

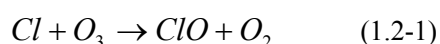
### (1) 冷媒の変化

Fig.1.1 に、冷媒の移り変わりを示す。冷媒は、CFC から HFC、新しい冷媒へ時代とともに移り変わっている。以下に、冷媒の移り変わりとその理由について述べる<sup>3-5</sup>。

#### (i) CFC 冷媒(1930年 - 1996年全廃)

1928年から1930年にかけて、“CFC(Chloro Fluoro Carbon)冷媒”が開発され<sup>6</sup>、1931年に工業化された。これ以前は、アンモニア(NH<sub>3</sub>)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、メチルクロライド(CH<sub>3</sub>Cl)、メチレンクロライド(CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>)が使用されていたが、安全性の面で問題があった。それに対して、CFC冷媒は、引火爆発性、毒性・臭気性がなく、また、化学的安定で、金属腐食も発生しないと報告された。その後、CFC冷媒の使用が一般的となった。

1960年代から、自動車の排気ガスによる大気汚染が環境問題として取り上げられるようになり、その調査が始まった。その調査の中で大気中からCFC(CCl<sub>3</sub>F, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)、および、塩素系化合物が検出された。また、化学的安定なCFC冷媒は大気中では分解されず、成層圏まで到達した後に強い紫外線を受け、分解され、塩素原子を発生する。そして、発生した塩素原子は、オゾンO<sub>3</sub>と反応し、以下の式(1.2-1)のように、オゾンの分解を引き起こすことが分かった<sup>7</sup>。これにより、成層圏のオゾン層が破壊される。



オゾン層が破壊されることにより、太陽からの強い紫外線が地表の届くようになり、人体に対し問題となる<sup>8</sup>。また、南極上空にオゾンホールが存在も確認されており、最近でもその拡大が報告されている。

この報告を受け、1977年から、欧米を中心に、CFC冷媒の使用禁止が始まった。1985年にウィー

ン条約, 1987年にモントリオール議定書が採択され, 国際的な使用制限が決められた。モントリオール議定書に基づく削減計画により, 1996年までに全廃することとなった。

この対応として, CFCの一部の塩素を水素に置換した HCFCが開発され, オゾン層破壊係数が比較的小さくなったが, この冷媒に関しても, モントリオール議定書により, その消費を2020年までに全廃することが決定されている。

#### (ii) HFC冷媒(1980年後半-現在)

CFCやHCFCの代替冷媒として, 1980年代後半に”HFC(Hydro Fluoro Carbon)冷媒”が開発された。この冷媒は, 分子構造に塩素を含まないために, オゾン層破壊係数はほぼ0である。開発後, HFC134aが冷蔵庫やカークーラーの主流として使用され, HFCの混合冷媒のR410AやR407Cがエアコンの主流として使用されており, 現在も使用されている。また, 2008年時点において, HCFCからHFCへの代替がほぼ完了している。従って, CFCやHCFC冷媒において問題となったオゾン層破壊への影響は, 解決されたとみられる。

1990年代に入り, 社会問題として, 地球温暖化が強く取り上げられてくるようになった。そこで, HFCのもつ地球温暖化係数の高さが問題となった。1997年のCOP3(気候変動枠組条約締約国会議)では, 京都議定書が採択され, 2008-2012年において, CO<sub>2</sub>などの温暖化に起因する気体とともに, HFCの排出量も1990年の量より6%削減すること(日本の削減目標)が決められた。これは, 2005年に発効された。これにより, HFCは, CO<sub>2</sub>に比較して排出量が非常に少ないが, 地球温暖化係数が高い気体として定められ, 削減が必要となった。

この対応として, 冷媒を回収し, 破壊すること<sup>9</sup>を徹底的に行うことによって, 削減目標を達成することが考えられるが, 冷媒回収を徹底化することは困難であると見られている。従って, 新しい冷媒への変更が求められている。

#### (iii) 新しい冷媒(現在 -)

HFCの削減に対処するために, 新たな代替冷媒が必要となってくる。現在, その候補として, フロン系冷媒のHFC32やHFO1234yf<sup>10</sup>, 自然冷媒の利用<sup>11</sup>が挙げられる。

HFC32は, HFC410AやHFC407Cの1/3程度の温暖化係数であり, 冷媒としての性能も他のHFCと変わらない。HFO1234yf(Hydro Fluoro Olefin)は, 分子構造の一部が炭化水素となっており, 温暖化係数が非常に小さい。現在, カーエアコン用の冷媒として開発が進められているが, 安全性や効率面において課題があるといわれている。

もう一つの代替冷媒として, 自然冷媒の使用が挙げられる。自然冷媒には, プロパンやイソブタンなどの炭化水素, 二酸化炭素, アンモニア, 水, 空気が挙げられる。自然冷媒は, 以前より開発されていたが, CFCやHFCなどのフロン系冷媒に比較して, 効率が劣る点で使用が進んでいなかった。

特に、二酸化炭素は、現在、カーエアコンや給湯器において使用されており、その拡大が検討されている。

また、今後、温暖化係数が小さく、冷媒としての性能も高い物質が開発されることも予想される。

## (2) 水素雰囲気<sup>12,13</sup>

近年、化石燃料である石油、天然ガス、石炭の枯渇が問題となっており、石油が 35 年程度、天然ガスが 60 年程度、石炭が 200 年程度で枯渇すると予測されている。現在の日本において供給されているエネルギー(電気や自動車の燃料など)の 80%程度は、化石燃料を利用しており、人間の生活は化石燃料に依存しているといえる。また、地球温暖化問題の原因の一つである二酸化炭素の排出は、化石燃料(炭素、炭化水素)が燃焼することが主な要因になっている。先の(1)冷媒の変化のところで述べたように、二酸化炭素の排出量の削減は、京都議定書の採択によって取り決められており、現在、削減への取り組みが必要となっている。

このように、現在の社会には、化石燃料の枯渇と二酸化炭素の排出量削減の課題があり、その解決が求められている。解決策の一つとして、化石燃料に変わる新しいエネルギーとそのシステムを利用することが挙げられる。その新しいエネルギーとシステムの一つとして、水素と燃料電池を利用することが期待されている。

燃料電池は、水素と酸素の化学反応から電気に変換する装置である。燃料が水素と酸素であり、反応後に排出されるものは水であることから、化石燃料への依存、二酸化炭素の排出量削減の問題を解決することができる。また、燃料電池の効率は非常に高く(25°Cでの電気変換の理論効率 83%)、発電時の排熱を利用できる。家庭用の定置型燃料電池では、排熱を利用して温水化を行っている。

水素エネルギー利用社会の実現は、国家プロジェクトとして考えられており、その社会作りが将来的に計画されている。政府の定めた目標(2004 年)として、2020 年までに 500 万台の燃料電池車、1000 万 kW の定置型燃料電池を普及させることが計画されている。

水素エネルギー利用社会の実現への課題として、燃料電池の技術的問題(効率、使用材料など)、水素の製造における問題、水素の供給、貯蔵のインフラ設備における問題などが挙げられる。インフラ設備における問題は、水素の供給網、製造、貯蔵場所、ステーションの配置など、供給システムの整備に関するものとともに、それを構成する機械の安全性に関する問題がある。従って、水素雰囲気で動作する機械の設計の指針が必要となっている。例えば、水素ステーションでは、35、70 MPa に圧縮した水素が、ディスペンサーから燃料電池車のボンベに供給される。ここで、水素ガスを圧縮するための圧縮機は、水素雰囲気下で動作することになる。また、ディスペンサーや供給部に使用されるバルブやシールなども、水素雰囲気で動作する。このような機器における動作、使用されている材料

の強度、寿命に関する水素の影響を把握し、安全な設計を行うことが求められている。

### 1.3 機械の設計への雰囲気の影響

#### 1.3.1 機械の設計と雰囲気

1.2 にて、利用される雰囲気が多様化してきていることを述べた。次に、機械の設計において、雰囲気の影響がどのように考慮されているか、について述べる。

機械が故障する原因の一つとして、使用している材料の損傷(破壊、表面損傷、摩耗など)に起因した問題が挙げられる。そこで、設計を行う際の一つの基準として、機械、そのシステムを構成する材料(潤滑油等も含め)が、対象とする雰囲気において、損傷せずに動作を続けることができるかどうかを判断することが、重要となる。従って、材料の各機械的特性や物性値、トライボ特性への雰囲気の影響を予め、調査しておき、そのデータを基に使用する材料を選択することが必要となる。また、雰囲気の影響を考慮した適切な安全率の設定、使用時のメンテナンスの計画も必要である。

#### (1)材料の選択

使用する材料は、対象とする雰囲気がその材料の機械的特性や疲労特性などに影響を与えないかを確認し、選択しなければならない。雰囲気が材料特性に与える影響には、以下のようなことが挙げられる<sup>14</sup>。

##### (i) 腐食環境

水分を含んだ環境では、材料表面で電池の形成が起こり、腐食が起こる。これにより、表面の一部が欠乏し、寸法、形状が変化することにつながる。また、き裂先端で腐食が起こると、応力腐食割れや腐食疲労が引き起こされ、寿命の低下が起こる。

##### (ii) 水素脆性

腐食部分では、水から水素の発生が起こり、それが材料内に浸入し、材料を脆化させることが報告されている<sup>15</sup>。近年では、水素ガス雰囲気下での試験により、水素の存在が材料の組織や破壊機構を変化させ<sup>16</sup>、その結果、疲労寿命が低下することも報告されている<sup>17,18</sup>。

##### (iii) 高温環境

高温環境では、原子運動の活発化により、転位や空孔の運動が大きくなる。そのため、クリープ変形が起こりやすくなる。また、温度が変化することで、熱膨張が起こり、それによる熱応力が発生する。これは、設定された応力状態を変化させることにつながり、破壊の一要因になりうる。

#### (iv) 低温脆性

低温環境では、じん性の低下が起こり、脆性破壊が発生しやすくなる。

#### (2)安全率の設定

機械の設計では、安全率という考え方が利用される。安全率を設定することにより、応力状態の変化、材料強度のばらつきや材料の性能試験における評価の不正確さ、使用条件の変化(地震など予期せぬもの)、使用者に対する安全の考慮などの補償が考慮される<sup>1</sup>。一般的には、雰囲気における影響もこの部分において、補償される。

この安全率を大きくとれば、設計としては安全となるが、それによって、機械の重量が増大したり、製作時間、コストが大きくなることが考えられ、適切な設定が求められる。雰囲気の変化によって、材料の強度の変化が引き起こされる場合には、この値を安全側にとり、実際に加わる応力を低下させる必要がある。

また、転がり軸受の疲労寿命においては、以下のように安全率が設定されている<sup>1</sup>。

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10} \quad (1.3.1-1)$$

$L_{na}$  : 補正疲れ寿命,  $L_{10}$  : 定格疲れ寿命,  $a_1$  : 信頼度係数,  $a_2$  : 材料係数,  $a_3$  : 使用条件係数

竹村らは、潤滑油中の摩耗粉などの異物が寿命に影響することを考慮し、汚染度係数を定義し、式を補正している<sup>19</sup>。この係数の設定によって、動作する雰囲気の影響が考慮されている。

#### (3)メンテナンス

メンテナンスにより、定期的に損傷がないかを確認していく。特に、雰囲気の影響が強いと思われる条件下での機械では、実施頻度を高めるなどの工夫が必要となる。また、センサなどを利用し、常にモニタリングし、状態の確認を行っておくことも必要になると考えられる。

例えば、潤滑油は、使用中に、空気中の酸素や水分と反応し、酸化劣化を起こす。また、高温雰囲気では、酸化劣化が促進される。従って、このような雰囲気では、潤滑油の酸化度、粘度などを定期的に分析、確認し、潤滑油の状態を常に確認しておくことが必要となる。これにより、潤滑性能の低下によってもたらされる機械の不具合を防止することができる。雰囲気の影響を考慮したオイルマネージメント<sup>20</sup>が必要である。

### 1.3.2 潤滑部分への雰囲気の影響

ここでは、潤滑部分における、雰囲気の影響を述べる。特に、本研究で課題の対象とした雰囲気気体がどのように関係しているのかについて述べる。

雰囲気気体は、潤滑部において起きているいくつかの現象に対して、影響を与える。その結果、場合によっては、潤滑性能、機能の低下が引き起こされる。以下に、その影響について述べる。

#### (1)潤滑油の物性への影響

潤滑部において、潤滑油は雰囲気気体と接する。これによって、雰囲気気体は、潤滑油側と気相側の気体の分圧差(気体の濃度差)によって潤滑油中へ溶解する。その後、気体は液中を拡散し、その状態が安定であれば、溶解状態を維持する。

潤滑油中に気体が存在するようになると、潤滑油の物性が変化する。気体は、潤滑油の分子と反応を起こし、結合、または分解する。その結果、潤滑油の分子構造が変化する。酸素の存在などで、潤滑油の酸化劣化が引き起こされる<sup>21</sup>。また、気体が溶解することにより、潤滑油分子の分子間力が変化する。粘度が変化する。一般に、溶解量が増えるとともに、粘度は低下する<sup>22,23</sup>。また、潤滑油の密度、粘度 - 圧力係数も変化する。このような潤滑油の物性の変化は、潤滑性能に対して、大きな影響を与える。粘度、粘度-圧力係数が変化すると、流体潤滑、弾性流体潤滑における接触面に形成される油膜厚さは、変化する。また、潤滑油の化学構造の変化により、固体表面への吸着性が変化すると、境界潤滑膜の形成に影響を及ぼし、その特性が変化する。また、添加剤による反応膜の形成にも溶解気体の存在が寄与する<sup>24,25</sup>。

#### (2)表面での吸着・反応

潤滑油中の気体は、油中を拡散し、固体表面まで移動すると、場合によっては表面に物理吸着、または、化学吸着し、そのエネルギーを安定させる。場合によっては、吸着した分子は、固体表面と化学反応を起こし、反応膜を形成する。酸素や水の存在は、鉄表面での酸化膜の形成に関与し、その形成状態が損傷や寿命に影響する<sup>26-28</sup>。また、潤滑油中の水や水素は、鉄表面の新生面に吸着し、その後、分解・解離し、水素原子を発生させる。この水素原子は、材料内へ浸入すると考えられ、これが材料の機械的特性、破壊特性を変化させる<sup>29-32</sup>。従って、水素が溶解した場合は、接触表面での水素の浸入現象<sup>33,34</sup>に配慮しなければならない。

#### (3)密封特性への影響

潤滑部に複数の気液界面をもつような系では、溶解した気体は、別の界面で放散することが考えられる。例えば、リップシールで封入側にある気体が存在すると、封入側の界面で気体が潤滑油中に溶解し、その後、大気側の界面まで拡散し、大気側へ放散されることが分かっている<sup>35-37</sup>。従って、こ



の場合、潤滑油は密封されているが、気体の密封は制御できていないことになる。

#### (4)気体性キャビテーション、発泡への影響

溶解気体の存在は、気体性キャビテーションに影響を及ぼすことが考えられる。潤滑部に、負圧部が形成され、その圧力が溶解気体の析出圧力に達すると、気体は析出し、キャビティーとなる(本文中において、”キャビティー”はキャビテーションによって発生した空洞を示す)<sup>2</sup>。キャビティーは、往復動運転や高速運転時において、供給潤滑油量の低下を引き起こすため、早期に油膜の破断をもたらすことになる。他にも、潤滑性能に対して影響を与える。詳しくは、1.4.2 で述べる。

また、発生したキャビティーは、泡となり、潤滑油中に存在する。泡の発生が顕著になると、液体量が低下し、油量の低下や潤滑油供給システムでのトラブルの原因になる。また、泡の発生が、潤滑油のみかけ粘度を増加させることも報告されている<sup>38</sup>。

ここまでで述べたように、潤滑油に溶解気体が存在すると、様々な部分に影響し、その結果、潤滑性能を変化させる。従って、溶解気体量によって変化する物性値(粘度、密度、粘度 - 圧力係数など)、現象(吸着性、化学反応、キャビテーション)を調査し、整理しておくことが、このような潤滑部の設計において重要となる。ただし、一般的に、そのような物性を調査する場合には、その系をモデル化し、静的な条件下で起こる現象を観測することで行われることが多い。従って、実際の潤滑部での現象とは、少し異なることが予想される。潤滑部では、潤滑油の流動、せん断、高圧の発生、負圧の発生、高温の発生、新生面の発生など特異的な現象が起こっており、それによって、いくつかの物理現象は大きく変化してくると予想される。

ここで、潤滑部での特異的な現象として、溶解現象への影響の例を挙げておく。

中岡らは、潤滑部において、軸の回転がかくはん作用を引き起こし、気体の溶解速度を上昇させると報告している<sup>34</sup>。潤滑部でかくはんが起こると、気液界面での物質移動が変化する。例えば、界面での物質移動係数の増加や、界面の更新速度の増加、ガス吸収に関する表面積の増加が起こるため、気体の溶解速度が速くなることが考えられる。溶解速度が速いと、油中の溶解気体量が早期に高くなり、その結果、潤滑油の粘度が低下することになる。従って、静的な状態で考える場合よりも、潤滑部の油膜厚さの低下が早期に起こると予想される。

従って、雰囲気気体の影響を、基本的な物性と関連させて調べ、検討するとともに、潤滑部で起こる特有の現象をも考慮して検討することが重要となってくる。また、そのような知見の蓄積が、各雰囲気における潤滑部の設計の指針を立てる際に有益になると考える。

本研究では、潤滑部への影響として示した、”気体性キャビテーション現象への影響”を課題として設定した。

## 1.4 キャビテーションが潤滑性能へ与える影響

### 1.4.1 キャビテーションの観察

潤滑部でのキャビテーションの観察は、2つの接触部のどちらかを透明な材料(アクリル樹脂, ガラス, サファイアなど)にし、顕微鏡等でその接触部を観察することにより、行われている。以下に、その観察結果と、観察から分かったキャビティの特徴について、いくつか紹介する。

Fig.1.2 は、ジャーナル軸受において、見られるキャビティである<sup>39</sup>。(a), (b), (c)の順に滑り速度が大きい。この図より、滑り速度とキャビティの形状に関係があることが分かる。(a)では、潤滑油が筋状に流れ、その筋の間にキャビティが形成されている。(b)では、潤滑油の筋の先が玉のようになる(論文の中では'comb'と表現されている)。(c)では、筋状流れはなくなり、潤滑油は薄い層になり、その上にキャビティが形成されるようになる。また、ジャーナルの面にマノメータや圧力センサを取り付け、キャビティ部の油膜の圧力分布も測定されている<sup>40-42</sup>。Dowsonらは、キャビティ内の油膜の圧力は、大気圧よりも3.5 kPa低い値で、その領域内での分布はほぼないと報告している<sup>40</sup>。この圧力値は、ほぼ大気圧に近いものである。これらの結果を基に、潤滑膜に発生するキャビティは、溶解気体の析出に関係した気体性キャビテーションであること、溶解気体の析出圧力は、大気圧よりも若干低い値であることを示している。また、潤滑油中の空気の溶解度は約10%であり<sup>43</sup>、潤滑油の蒸気圧は非常に低い値(例えば、合成油, 220 mm<sup>2</sup>/s@313Kでは、約10<sup>-8</sup> Pa)である<sup>44</sup>ので、潤滑膜に発生するキャビティは、一般には、気体性キャビティと考えてよいと示されている<sup>45</sup>。キャビティを軸方向から撮影した画像も報告されており<sup>39</sup>、その形状は、軸と軸受に沿って拡がり、後方で丸まっている形状と観察されている(Fig.1.3)。

Archard, Kirkらは、点接触EHL膜に発生するキャビテーションを観察している<sup>46</sup>。キャビティは、EHL膜出口部において形成され、運転速度や潤滑油粘度によって、その形状が異なることが示されている<sup>47,48</sup>。メニスカスによって、潤滑油が保持されている場合(Fig.1.4)、速度が遅いと、キャビティは潤滑油中で閉じた形状として存在する(図中の(a))が、速度が大きくなると、キャビティ領域は、メニスカス領域を突き抜け、大気と接続する(大気開放型キャビティ、図中の(b))。また、キャビティ領域内には、接触域から出た潤滑油が筋状に拡がるが(Fig.1.5)、このパターンは、速度、油膜厚さ、潤滑油の物性(粘度、粘度 - 圧力係数、表面張力)、添加剤等の影響を受けると報告されている<sup>47,49</sup>。

Fig.1.6 は、ディスクに押し当てた球を瞬時に引き離れたときに観察されるキャビティである<sup>39</sup>。キャビティは、花びらのような形状をしており、非常に興味深い。負のスライズモーションで発生するキャビティは、佐木ら、黒田ら、Cohenらによっても報告されている<sup>50-51</sup>。

ピストンリングとシリンダライナにおけるキャビティの観察も報告されており<sup>53</sup>、クランク角の

変化によって、キャビティの形状が変化することが示されている。また、ピストンリングでは、キャビティ、気泡の破壊によるキャビテーションエロージョンの発生が問題となっている<sup>54</sup>。

Fig.1.7は、リップシールに発生したキャビティ<sup>55</sup>を観察した結果である。白い領域がキャビティ領域である。これは、シール面上の表面粗さの急拡大部でキャビティが発生していることを示している。また、中岡らは、雰囲気気体の違いが、キャビティ領域に影響を及ぼすことを報告している<sup>56</sup>。Fig.1.8は、メカニカルシールにて発生したキャビテーションである<sup>57</sup>。キャビティの発生は、シール表面のうねりや表面粗さに起因すると考えられている<sup>57-59</sup>。このキャビテーションの発生が、シールの密封特性に影響を及ぼすことも報告されている<sup>60</sup>。また、メカニカルシール表面に、マイクロピットを付与することにより、流体潤滑効果の向上と摩擦低減効果を得ることできる<sup>61,62</sup>。このような技術が実用化されている。Tokunagaらは、マイクロピットを施したシール面において、それぞれのピットにおいて発生したキャビテーションが周方向につながり、キャビテーションリングを形成することを報告している<sup>63</sup>。

#### 1.4.2 キャビテーションと潤滑性能

ここでは、潤滑膜に発生したキャビテーションが潤滑性能へ与える影響について、述べる。その影響は、大きく以下の5つと考えられる。

- ・キャビテーションエロージョン
- ・油量不足
- ・潤滑部のメニスカスの形状
- ・粘性抵抗の低下
- ・シールの潤滑機構、密封機構

以下に、それぞれについて述べる。

##### (1)キャビテーションエロージョン<sup>64,65</sup>

発生したキャビティは、その後、高圧部に移動すると崩壊する。このとき、衝撃圧やマイクロジェット流が発生する。材料表面において衝撃圧やマイクロジェット流が発生すると、表面には衝撃荷重が加わることになり、表面損傷が引き起こされる。また、それが繰り返される場合には、疲労損傷のようになる。滑り軸受やピストンリング-シリンダライナ、シール表面において、エロージョンの発生が確認されている。

##### (2)油量不足

例えば、往復動運転の反転時には、前の動作で発生したキャビティ領域が接触域の前方に存在す

ることになるので、入口側の潤滑油量が低下し、くさび作用による十分な圧力発生ができなくなる。従って、油膜の低下、および、油膜の破断が引き起こされる。西川らは、この油量不足による油膜厚さの低下を実験により確認しており、周波数が早く、ストロークが短い場合に油膜厚さの低下が起こることを報告している<sup>66,67</sup>。また、スクイズ運動下においても、残存したキャビティが、油膜の形成に影響を与える<sup>68</sup>。Leonardらは、グリース潤滑下における往復動運転条件において、気体性キャビティの発生が油量不足を引き起こし、摩耗の早期発生に起因することを報告している<sup>69</sup>。また、数値計算によるアプローチも行われており<sup>60-72</sup>、実験結果が再現されている。Izumiらは、数値計算により、キャビティの消滅する時間が往復動運転時の油膜厚さの低下と関係することを示している<sup>73</sup>。Yamamotoらは、代替冷媒のHFC134aの雰囲気中で、往復動運転条件における油膜を観察し、HFC134a雰囲気の方が窒素中よりも油膜の破断が早く起こることを示した<sup>74</sup>。これは、HFCの潤滑油への溶解性の高さによる粘度低下の影響とともに、雰囲気の違いによりキャビティ領域が変化することが油膜厚さの低下に影響を及ぼしたと考察している<sup>23</sup>。また、EHD接触においても、接触域に表面粗さのような形状変化があると、条件によっては、キャビティが発生し(Fig.1.9)<sup>75</sup>、後方接触部の油量に影響を及ぼす<sup>76</sup>。

### (3)潤滑部のメニスカス形状

キャビティ領域は、接触域後方の潤滑油の流れの状態に影響を与える。後方の油量は、次の接触部に供給される油量となるため、この接触部における油膜に強く影響を与える。例えば、Fig.1.10に示す<sup>77</sup>ように、キャビティが大気開放型であれば、潤滑油の流れは、両側に広がったメニスカスに沿って流れ、接触のトラックの方には流れない。従って、次の接触部の前方に供給される油量は非常に少なくなる。実際には、接触域前方で、接触部への油の流れがあり、この量が十分であれば、入口部ではくさび作用による圧力発生ができる。しかし、宇宙機器の潤滑部のように少量の潤滑油が供給されるような条件では、この量が低下するため、油膜の低下が起こる<sup>78</sup>。また、グリースは流動性が低いため、この供給量が少なくなる、その結果、油膜の破断が潤滑油よりも早期に引き起こされる<sup>79</sup>。一方で、キャビティが潤滑油中で閉じた形であれば、このような後方での油量の低下は起こらない。従って、キャビティ形状の把握が、非常に重要となる。

### (4)粘性抵抗の低下

キャビテーションが発生すると、その部分では、気体が存在することになる。気体性キャビティでは、潤滑油中の溶解気体、蒸気性キャビティでは、気体へと相変化した潤滑油が存在することになる。気体の粘度は、一般に、液体よりも低い<sup>80</sup>(空気の粘度は、 $18.2 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}@295\text{K}$ であり、これは同温度のPAO63の0.02%の値である)。従って、キャビティ部分における粘性抵抗は減少し、潤滑部の摩擦力が低下することになる。キャビティ領域が大きくなれば、大きな摩擦損失を減らすこと

ができ、有効となる。そのような取り組みは、シールなどを中心に、積極的に試みられている。

Etsion らは、スラストパッド軸受やピストンリング - シリンダライナの潤滑面にマイクロピットを付与し、その潤滑性能への影響を調べている。その結果、流体潤滑効果による油膜厚さの上昇とともに、キャビテーションの影響による摩擦係数の低下が起こることを報告している<sup>81,82</sup>。また、Yagi らは、メカニカルシール面のマイクロピットの配置によって、摩擦係数が減少することを報告しており、これはシール面に形成されるキャビテーション領域がピットの配置により変化することで起こったと検討している<sup>83</sup>。水田らは、リップシール表面に発生するキャビテーションを観察し、キャビテーション領域の拡大が摩擦係数の減少と関係していることを報告している<sup>84</sup>。

#### (5)シールの潤滑機構、密封機構

シールにおけるキャビテーションの発生は、潤滑面での負荷容量の発生と密封機構に関与している。

シール面では、面の傾斜、うねりや表面粗さによって、くさび作用による圧力が発生する。狭まりすぎ部分では、正圧が発生する。拡がりすぎ部分では、負圧が発生し、この部分がキャビテーション領域となる。キャビテーション領域では、圧力一定となるので、正圧と負圧の対称性が崩れ、その結果、正圧による負荷容量が発生し、シール面に潤滑膜が形成される。従って、潤滑作用をもたらす場合には、キャビテーションの発生が必要となる<sup>59,85</sup>

密封機構に対しても、キャビテーションの関与は報告されている。キャビテーションの発生とともに、漏れ量が減少することが確認されている<sup>60</sup>。メカニカルシールに関して、キャビテーションが関連した密封機構には、以下のことが関係していると考えられている<sup>60,86,87</sup>。

##### (i)二相流による流体膜の破断

流体膜の中にキャビテーションの気相領域が発生することにより、流体膜の連続性が途切れ、キャビテーション領域を解して液体の移動が行われなくなる。従って、二相流となることによって、液体を密封することができる。

##### (ii)ポンピング作用<sup>85,88-90</sup>

キャビテーションが発生すると、潤滑面での圧力分布が変化することになる。半径方向の圧力分布が変化すると、シールの側方での半径方向の流量が変化することになり、漏れ量が変化する。従って、キャビテーションの発生が、密封性能に対して影響を与えることになる。シール面におけるキャビテーション領域は、面の形状を制御することにより、変化させることができるため、潤滑作用と密封作用の両方を満足するシール面形状の制御が試みられている<sup>91</sup>。

##### (iii)気液界面のメニスカス<sup>92</sup>

キャビテーションが発生し、気液界面が発生すると、気液界面に表面張力によるメニスカスが形成される。メニスカスが気液側に向かって、凸形状となった場合、界面に働く表面張力  $2\gamma h$  ( $\gamma$  は、表面張

力,  $h$  は, すきまの厚さ)が, 流体内の圧力よりも高ければ, 液体の移動はなくなる. 従って, 密封できることになる.

### 1.4.3 キャビティ領域の考え方

1.4.2 において, 潤滑性能へのキャビティの影響について述べたが, いずれもキャビティ領域を把握することによって, その影響を検討することができる. また, 潤滑部の設計を行う際に, 予め, その運転条件において, どの程度のキャビティ領域となるのか把握していれば, 問題解決を導くことが可能である. 従って, キャビティ領域の計算, 推算方法が重要となってくる. 以下に, 現在, 一般的に認識されている, キャビティ領域の考え方<sup>39,93</sup>について説明する.

Fig.1.11 には, 曲面の潤滑部における圧力分布を示している<sup>39</sup>.

入口側の狭まりすきまでは, 正圧が発生する. 一方で, 出口部分では, 拡がりすきまによって, 負圧が発生する. このときに, 正圧と負圧が曲面の中心位置に対して左右対称であると, 圧力の総和は 0 となり, 負荷容量は発生しない. 実際には, 負圧によりキャビテーションが発生するので, 正圧の方が大きくなり, 負荷容量が発生するとともに, 油膜が形成される.

キャビティ領域は, ある圧力(キャビティ圧と表現される)を閾値とし, その圧力以下の部分という考え方で決められる. なお, キャビティ内は気体(溶解気体, あるいは, 蒸気)で占められており, 気体の分子運動速度は非常に速いので, キャビティ内の圧力は領域内で一定(圧力分布はない)と考えている. この図においては, 閾値となるキャビティ圧は, Saturation pressure と記されている溶解気体の析出圧力(この場合, 気体性キャビティが発生する), Vapor pressure と記されている潤滑油の蒸気圧(この場合, 蒸気性キャビティが発生する)としている. 従って, キャビティ領域は, この圧力の設定に依存することが分かる. 過去の文献を調べると, キャビティ圧の値はさまざまに設定されており, その値は, 絶対真空圧から大気圧までである<sup>48,62,70-74,76,85,88,94-97</sup>.

実際の数値計算においては, 油膜とキャビテーション領域の境界での流量の連続性を考慮した Reynolds の境界条件(Swift-Stieber の境界条件), Coyne, Elrod の条件などが使用される<sup>98-100</sup>. これによって, キャビティ領域が決定される. また, 差分方程式を使用する場合には, JFO 理論<sup>101,102</sup>, Elrod アルゴリズム<sup>103</sup>などが使用される. このアルゴリズムでは, 油膜とキャビテーション領域での流量の連続性を保つために, キャビティ内での潤滑油の密度(充填率)を変化させ, レイノルズ方程式を解いている. これらの境界条件やアルゴリズムの中におけるキャビティ領域は, Fig.1.11 のように, キャビティ圧を設定して求められている. 最近でも, キャビティ領域の取扱いを考慮したアルゴリズムが報告されているが<sup>104,105</sup>, キャビティ領域の決定方法は, キャビティ圧を使用した考え方によるものである. ここで, この方法により計算された結果は, キャビティ圧の影響を強

く受けていることを述べておく。正確な計算結果を得るためには、キャビティ圧の設定が極めて重要である。

#### 1.4.4 実際のキャビティ領域，キャビティの成長

Archard, Kirk は、2円筒を対角に点接触させる条件で、EHL 膜に発生するキャビティを観察している<sup>45</sup>。Fig.1.12 には、実験開始からの各時間における観察結果を示す。キャビティ長さが時間とともに長くなっており、時間依存性があることを示している。

Dowson は、軽負荷の点接触潤滑部において、キャビティの観察を行っている。彼らも、その結果として、キャビティ領域が拡大することを確認している<sup>106</sup>。

なお、以上の2つの文献において、その成長機構の解説は、詳しく行われていない。

この2つの実験結果は、1.4.3 で示したようなキャビティ領域の決定方法では、得られないものである。キャビティ圧を設定した方法では、速度や油膜形状などが変化しない限り、圧力分布は変化しないので、キャビティ領域は時間に対して一定のままである。しかし、実際のキャビティは、時間とともに成長しており、この方法ではその領域を求めることができないことになる。従って、実際のキャビティ領域を正確に知るためには、従来のキャビティの考え方とは違った考え方を導入する必要がある。すなわち、キャビティの成長機構を解明し、それをモデル化し、キャビティ領域の計算方法の方へ反映させることが求められる。また、潤滑部で発生するキャビティは、潤滑油の溶解気体の析出が関係した現象である。Nakahara らは、溶解気体量とキャビティ領域が関係性をもつことを報告している<sup>107</sup>。また、1.4.2 で示した、Yamamoto らの報告<sup>73</sup>も、雰囲気気体の影響を示している。雰囲気の変化とともに、その溶解気体とその量は変化することが予想される。従って、雰囲気に変化する潤滑部では、キャビティ成長に及ぼす雰囲気の影響の把握も必要となる。

## 1.5 研究の目的と本論文の構成

本研究は、潤滑における雰囲気の影響をテーマに、その中の一つである 1.4.4 に示した EHL 膜における気体性キャビテーションの成長現象に関して調べる。このキャビテーションの成長現象は、これまでに詳細に理解されていない課題であり、そのメカニズムを探求することは重要と考える。また、その成長現象に対する雰囲気の影響も調べる。得られた結果を基に、キャビテーション成長のモデルを検討し、また、基礎的な物性・現象(ここでは、溶解気体量や気体の吸収・放散現象)や、潤滑部での特有の現象(ここでは、負圧の発生や、潤滑油の流動、せん断など)との関係を整理する。そして、各雰囲気におけるキャビテーション成長の考え方を提案することを、本研究の最終的な目的とする。また実用的な運転条件(グリース潤滑下、往復動運転、複数接触条件)でのキャビテーションの挙動に関しても調べる。

本論文は、全 5 章より構成される。

第 1 章では、本論文で取り上げた研究課題の背景、および、本論文の目的について述べる。

第 2 章では、実験方法、実験結果について述べる。雰囲気条件や運転条件のキャビテーション成長に及ぼす影響を調べる。

第 3 章では、第 2 章で得られた結果を基に、キャビテーションの成長モデルを検討する。また、その成長モデルに及ぼす雰囲気の影響を整理する。

第 4 章では、これまでに得られたキャビテーションの成長モデルを、各問題へ応用する。グリース潤滑下におけるキャビテーション成長と、キャビテーションの発生が問題となる、往復動運転条件と複数接触条件におけるキャビテーションを調べる。

第 5 章では、本研究の総括を行う。本研究から得られた結論と今後の課題について述べる。



(参考文献)

- 1 兼田, 山本, 基礎機械設計工学 第2版, 理工学社, 1999
- 2 山本, 兼田, トライボロジー, 理工学社, 1998
- 3 小口, ”代替冷媒と高効率化”, 冷凍, 80, 935, 2005, 778-782
- 4 平岡, ”フロン等の規制と回収・再利用・破壊の動向”, 廃棄物学会誌, 5, 4, 1994, 344-356
- 5 水原, ”特殊気体環境下におけるトライボロジー”, トライボロジー, 52, 11, 2007, 765-770
- 6 Midgley, T. and Henne, A.L., “Organic Fluorides as Refrigerants”, Industrial and Engineering Chemistry, 22, 5, 1930, 542-545
- 7 Molina, M.J. and Rowland, F.S., “Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone”, Nature, 249, 1974, 810-812
- 8 安藤, ”フロンによる成層圏オゾン破壊の健康リスク評価”, 日衛誌, 45, 5, 1990, 947-953
- 9 清水, ”フロン類破壊装置”, 日本機械学会第16回環境工学総合シンポジウム2006講演論文集, 2006 221-224
- 10 平原, 藤本, “最新の冷媒動向 -低 GWP 候補冷媒適応機器の LCCP 予測-“, 冷凍, 85, 987, 2010, 15-20
- 11 飛原, “自然作動冷媒新技術の動向”, 日本機械学会熱工学講演論文集 2001 岡山, 2001, 141-142
- 12 西川, 渡辺, 深田, 水素 -将来のエネルギーを目指して, 養賢堂, 2006
- 13 化学工学会, 図解 新エネルギーのすべて 改訂版, 工業調査会, 2009
- 14 日本材料学会, 材料強度学, 日本材料学会, 1986
- 15 南雲, 水素脆性の基礎 水素の振るまいと脆化機構, 内田老鶴圃, 2008
- 16 Rozenak, P, Robertson, I.M. and Birnbaum, H.K., “HVEM STUDIES OF THE EFFECTS OF HYDROGEN ON THE DEFORMATION AND FRACTURE OF AISI TYPE 316 AUSTENITIC STAINLESS STEELS”, Acta metallurgica et materialia, 38, 11, 1990, 2031-2040
- 17 村上, 長田, ”高強度鋼の長寿命疲労破壊に及ぼす水素の影響”, 材料, 54, 4, 2005, 402-427
- 18 Fujita, S., Matsuoka, S., Murakami, Y. and Marquis, G., “Effect of hydrogen on Mode II fatigue crack behavior of tempered bearing steel and microstructural changes”, International Journal of Fatigue, 32, 2010, 943-951
- 19 武村, 松本, 村上, “玉軸受・ころ軸受における NSK 新寿命計算式の開発”, NSK テクニカルジャーナル, 671, 2001, 21-29
- 20 日本トライボロジー学会, メンテナンストライボロジー, 養賢堂, 2006
- 21 五十嵐, “合成潤滑油の化学構造と酸化劣化挙動”, トライボロジスト, 40, 2, 1995, 123-128

- 22 畑, “気体の溶解度と気体の溶解時の物性(2)”, トライボロジスト, 36, 7, 1991, 519-522
- 23 Yamamoto, Y., Gondo, S. and Kim, J., “Solubility of HFC134a in Lubricants and Its Influence on Tribological Performance,” Tribology Transaction, 44, 2, 2001, 209-214
- 24 権藤, 山本, “モリブデンジチオカーバメイト(MoDTC)による表面膜形成機構と摩擦面材質の影響”, トライボロジスト, 36, 3, 1991, 242-248
- 25 Yamamoto, Y. and Gondo, S., “Environmental Effects on the Composition of Surface Films Produced by an Organo-Molybdenum Compound”, Tribology Transaction, 37, 1, 1994, 182-188
- 26 村上, 境, 山本, 坂本, 平野, ”すべり接触における酸化膜形成と潤滑油の潤滑性能に及ぼす溶存酸素の影響”, 潤滑, 31, 7, 1986, 485-492
- 27 Yamamoto, Y., Hirano, F. and Hashimoto, M., “The Effect of Surface Roughness on Scoring, Part 3 In the Case of Hardened Carbon Steel”, Bulletin of the JSME, 23, 186, 1980, 2132-2138
- 28 諸藤, 田中, 橋本, 杉村, “水素雰囲気下における転がり疲れに及ぼす温度の影響”, JAST トライボロジー会議予稿集 東京 2011-5, 253-254
- 29 SCHATZBERG, P. and FELSEN, I.M., “EFFECTS OF WATER AND OXYGEN DURING ROLLING CONTACT LUBRICATION”, Wear, 12, 1968, 331-342
- 30 Tanaka, H., Hashimoto, M., Sugimura, J. and Yamamoto, Y., “ROLLING CONTACT FATIGUE OF SOME BEARING STEELS IN HYDROGEN ENVIRONMENT”, Proceedings of ASIATRIB 2006 KANAZAWA, 669-670
- 31 Imai, Y., Endo, T., Dong, D. and Yamamoto, Y., “Study on Rolling Contact Fatigue in Hydrogen Environment at a Contact Pressure below Basic Static Load Capacity”, Tribology Transaction, 53, 2010, 764-770
- 32 Uyama, H., Yamada, H., Hidaka, H. and Mitamura, N., “The Effects of Hydrogen on Microstructural Change and Surface Originated Flaking in Rolling Contact Fatigue”, Tribology Online, 6, 2, 2011, 123-132
- 33 Fujita, S., Mitamura, N. and Murakami, Y., “RESEARCH OF NEW FACTORS AFFECTING ROLLING CONTACTS FATIGUE LIFE”, Proceedings of WTC 2005, World Tribology Conference III, 2005
- 34 Tanimoto, H., Tanaka, H. and Sugimura, J., “Observation of Hydrogen Permeation into Fresh Bearing Steel Surface by Thermal Desorption Spectroscopy”, Tribology Online, 6, 7, 2011, 291-296
- 35 杉村, 権藤, 山本, 中岡, 佐藤, “オイルシールの気体吸込み特性に関する研究”, トライボロジスト, 51, 12, 2006, 906-912
- 36 中岡, 佐藤, 杉村, “オイルシールの気体移動に及ぼす運転条件の影響”, トライボロジスト, 53, 9, 2008, 621-627

- 37 Mizuta, H., Nakaoka, S., Sato, Y. and Sugimura, J., "SIMULATION OF GAS TRANSPORTATION IN SHAFT SEAL WITH MODEL SURFACES", Proceedings of the STLE/ASME 2010 International Tribology Conference, 2010, IJTC2010-41260
- 38 Hayward, A.T.J., "AERATION IN HYDRAULIC SYSTEMS- ITS ASSESSMENT AND CONTROL", Proceedings of the Conference on Oil Hydraulic Power Transaction And Control 1961, 1962, 216-224
- 39 Dowson, D. and Taylor, C.M., "Fundamental Aspects of Cavitation in Bearings," Institution of Mechanical Engineers, 1975
- 40 Dowson, D., "Laboratory experiments and demonstrations in tribology", Tribology, 1, 2, 1968, 150-156
- 41 Heshmat, H., "The Mechanism of Cavitation in Hydrodynamic Lubrication", Tribology Transaction, 34, 2, 1991, 177-186
- 42 Etsion, I. and Ludwig, L.P., "Observation of Pressure Variation in the Cavitation Region of Submerged Journal Bearings", Transaction of ASME, Journal of Lubrication Technology, 104, 1982, 157-163
- 43 畑, "気体の溶解度と気体溶解時の物性(1)", トライボロジスト, 35, 7, 1990, 471-474
- 44 金子, "蒸気圧および蒸気圧関連物性", 潤滑, 33, 6, 1988, 454-457
- 45 中原, "流体油膜の挙動 -キャビテーション-", 潤滑, 26, 3, 1981, 146-152
- 46 Archard, J.F. and Kirk, M.T., "INFLUENCE OF ELASTIC MODULUS ON THE LUBRICATION OF POINT CONTACTS," Lubrication and Wear convention 1963, Institution of Mechanical Engineers, London, 1963, 181-189
- 47 Wedeven, L.D., Evens, D. and Cameron, A., "Optical Analysis of Ball Bearing Starvation," Transaction of the ASME, Journal of Lubrication Technology, 93, 1971, 349-363
- 48 Stadler, K., Izumi, N., Morita, T., Sugimura, J. and Piccigallo, B., "Estimation of Cavity Length in EHL Rolling Point Contact," Transaction of the ASME, Journal of Tribology, 130, 2008
- 49 平野, 兼田, 桑野, 大野, "EHL 及び固液転換域での後流について", 日本潤滑学会第33期春季研究発表会予稿集, 1989, 435-438
- 50 佐木, 平野, 境, 下釜, "振動面間の油膜の挙動(第1報) -気液固三重界面の挙動-", 潤滑, 20, 8, 1975, 552-559
- 51 黒田, 堀, "スクイズフィルムの研究 -負のスクイズにおけるキャビテーションと液体内張力について-", 潤滑, 23, 6, 1978, 436-442
- 52 Cohen, M.R. and Ettles, C.M., "Measurement and Correlation of the Striations in a Liquid Film During Sudden Separation", ASLE Transaction, 30, 1986, 84-90
- 53 Dellis, P. and Arcoumanis, C., "Cavitation development in the lubricant film of a reciprocating piston-ring assembly," Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering

Tribology, 218, 2004, 157-171

- 54 Yu-Kang, Z., Jiu-Gen, H. and Hammitt, F.G., “Cavitation erosion of diesel engine wet cylinder liners wear”, 76, 3, 2003, 494-502
- 55 佐藤, 杉村, 山本, “オイルシールしゅう動面の油膜形成と摩擦特性に関する研究”, トライボロジスト, 48, 6, 2003, 494-502
- 56 中岡, オイルシールの気体移動機構に関する研究, 九州大学 博士論文, 2009
- 57 Nau, B.S., “Film Cavitation Observations In Face Seals”, Proceedings of the 4th International Conference on Fluid Sealing, BHRA, 1969, 190-198
- 58 Anno, J.N., Walowit, J.A. and Allen, C.M., “Microasperity Lubrication,” journal of Lubrication Technology, 1968, 351-355
- 59 Hamilton, D.B., Walowit, J.A. and Allen, C.M., “A Theory of Lubrication by Micro-irregularities”, Transaction of ASME, Journal of Basic Engineering, 1966, 177-185
- 60 平野, “接触式密封装置の密封機構”, 潤滑, 24, 5, 1979, 261-269
- 61 Etsion, I., Kligerman, Y. and Halperin, G., “Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces”, Tribology Transaction, 42, 3, 1999, 511-516
- 62 徳永, 杉村, 山本, “流体潤滑能力に及ぼす表面マイクロピットと表面うねりの影響”, JAST トライボロジー会議予稿集 鳥取 2004-11, 161-162
- 63 Tokunaga, Y., Inoue, H., Okada, K., Shimomura, T. and Yamamoto, Y., “Effects of Cavitation Ring Formed on Laser-Textured Surface of Mechanical Seal”, Tribology Online, 6, 1, 2011, 36-39
- 64 岩井, 岡田, “すべり軸受のキャビテーション・エロージョン”, 潤滑, 83, 1, 1988, 2-8
- 65 Cameron, A., Principles of Lubrication, John Wiley and Sons INC, 1966
- 66 Nishikawa, H., Handa, K. and Kaneta, M., “Behavior of EHL Films in Reciprocating Motion,” JSME International Journal, Series C, 38, 3, 1995, 558-567
- 67 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
- 68 西川, 半田, 手嶋, 松田, 兼田, “周期スクイズ運動下における EHL 膜の挙動”, 日本機械学会論文集(C編), 59, 561, 1993-5, 1946-1503
- 69 Leonard, B., Sadeghi, F. and Cipra, R., “Gaseous Cavitation and Wear in Lubricated Fretting Contacts,” Tribology Transaction, 51, 2008, 351-360
- 70 Izumi, N., Tanaka, S., Ichimaru, K. and Morita, T., “Observation and Numerical Simulation of Oil-Film Formation under Reciprocating Rolling Point Contact,” in “Transient Process in Tribology,” Elsevier, Amsterdam, 2004, 565-572

- 71 Wang, J., Hashimoto, T., Nishikawa, H. and Kaneta, M., "Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion", *Tribology International*, 38, 2005, 1013-1021
- 72 Chevalier, F., Lubrecht, A.A., Cann, P.M.E., Colin, F. and Dalmaz, G., "Film Thickness in Starved EHL Point Contacts", *Transaction of ASME, Journal of Tribology*, 120, 1998, 126-133
- 73 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
- 74 Yamamoto, Y., Kim, J., Gondo, S. and Sugimura, J., "The Effect of HFC Refrigerant Dissolution on Oil Film Thickness and Wear Characteristics of Oils," in "Thinning Films and Tribological Interfaces," Elsevier, Amsterdam, 2000, 771-776
- 75 Jackson, A. and Cameron, A., "An Interferometric Study of the EHL of Rough Surfaces", *ASLE Transactions*, 19, 1, 1976, 50-60
- 76 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
- 77 Pemberton, J. and Cameron, A., "A MECHANISM OF FLUID REPLENISHMENT IN ELASTOHYDRODYNAMIC CONTACTS," *Wear*, 37, 1976, 185-190
- 78 野木, "点接触 EHL 膜厚に及ぼす入口膜厚分布の影響", *JAST 日本トライボロジー会議予稿集 鳥取 2004-11*, 185-186
- 79 Cann, P.M.E., "Thin Film Grease Lubrication," *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology*, 213, 1999, 405-416
- 80 Cameron, A., *Basic Lubrication Theory Third Edition*, John Wiley & Sons, 1981
- 81 Etsion, I., Halperin, G., Brizmer, V. and Kligerman, Y., "Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings", *Tribology Letters*, 17, 2, 2004, 295-300
- 82 Ryk, G., Kligerman, Y., Etsion, I. and Shinkarenko, A., "Experimental Investigation of Partial Laser Surface Texturing for Piston-Ring Friction Reduction", *Tribology Transaction*, 48, 2005, 583-588
- 83 Yagi, K., Takedomi, W., Tanaka, H. and Sugimura, J., "Improvement of Lubrication Performance by Micro Pit Surfaces," *Tribology Online*, 3, 5, 2008, 285-288
- 84 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
- 85 池内, 森, "キャビテーションの存在するシールの流体潤滑特性(第1報, 空どう圧力の潤滑膜への影響)", *日本機械学会論文集(C編)*, 47, 422, 1981, 1337-1345
- 86 兼田, "シールの密封理論", *トライボロジスト*, 43, 2, 1998, 125-130
- 87 山本, 關, *初めてのシール技術*, 工業調査会, 2008
- 88 池内, 森, "キャビテーションの存在するシールの流体潤滑特性(第2報, 空どう圧力の密封特

- 性への影響)”, 日本機械学会論文集(C編), 47, 422, 1981, 1337-1345
- 89 Sneck, H.J., “The Effects of Geometry and Inertia on Face Seal Performance –Laminar Flow”, Transaction of ASME, Journal of Lubrication Technology, 1968, 333-341
- 90 兼田, “メカニカルシールのポンピング作用”, 潤滑, 28, 3, 1983, 151-156
- 91 徳永, 井上, 岡田, 山本, “しゅう動面設計によるメカニカルシールの密封性能向上と摩擦低減機構の検討”, JAST 日本トライボロジー会議予稿集 東京 2011-5, 315-316
- 92 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
- 93 Braun, M.J. and Hannon, W.M., “Cavitation formation and modeling for fluid film bearing: a review”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 224, 2010, 839-863
- 94 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
- 95 Priest, M., Dowson, D. and Talor, C.M., “Theoretical modeling of cavitation in piston ring lubrication”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 214, 2000, 435-447
- 96 Olver, A.V., Fowell, M.T., Spikes, H.A. and Pegg, I.G., “‘Inlet suction’, a load support mechanism in non-convergent, pocketed, hydrodynamic bearings”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 220, 2006, 105-108
- 97 Qiu, Y. and Khonsari, M.M., “On the Prediction of Cavitation in Dimples Using a Mass-Conservative Algorithm”, Transaction of ASME, Journal of Tribology, 131, 2009, 041702 1-11
- 98 日本トライボロジー学会, トライボロジーハンドブック, 養賢堂, 2001
- 99 Coyne, J.C. and Elrod, H.G., Jr, “Conditions for the Rupture of a Lubricating Film, Part I : Theoretical Model”, Transaction of ASME, Journal of Lubrication Technology, 1970, 451-456
- 100 Coyne, J.C. and Elrod, H.G., Jr, “Conditions for the Rupture of a Lubricating Film- Part II New Boundary Conditions for Reynolds Equation”, Transaction of ASME, Journal of Lubrication Technology, 1971, 156-167
- 101 Jakobsson, B. and Floberg, L., “The Finite Journal Bearing, Considering Vaporization”, Transaction of Chalmers University of Technology, 1957
- 102 Olsson, K.O., “Cavitation in Dynamically Loaded Bearings”, Transaction of Chalmers University of Technology, 1965
- 103 Elrod, H.G., “A Cavitation Algorithm”, Transaction of ASME, Journal of Lubrication Technology, 103,

1981, 350-354

- 104 Sahlin, F., Almqvist, A., Larsson, R. and Glavatskin, S., “A cavitation algorithm for arbitrary lubricant compressibility”, *Tribology International*, 40, 2007, 1294-1300
- 105 Giacomini, M., Fowell, M.T., Dini, D. and Strozzi, A., “A Mass-Conserving Complementary Films in the Presence of Cavitation”, *Transaction of ASME, Journal of Tribology*, 132, 2010, 041702 1-12
- 106 Dowson, D., “Investigation of Cavitation in Lubricating Films Supporting Small Loads”, *Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear, Institution of Mechanical Engineers*, 1957, 93-99
- 107 Nakahara, T., Kobayashi, T. and Masuko, M., “The Influences of Air Content of Lubricant on Cavitation in the Thrust Bearing with Closed Recesses”, *Proceedings of Joint conference JSLE/STLE 1975 Tokyo*, 1975, 204-211

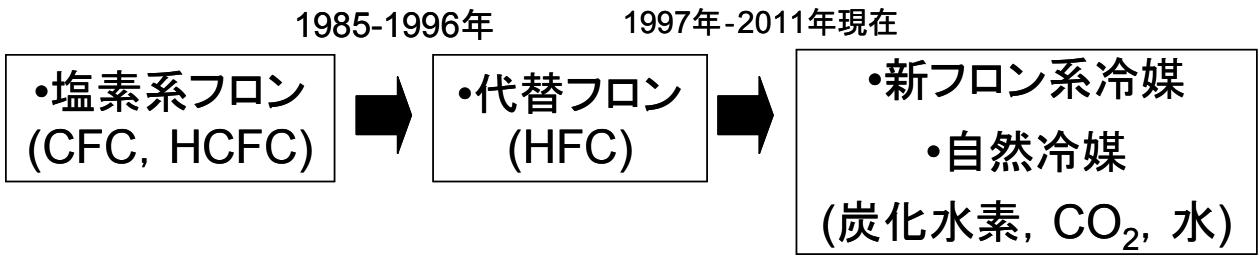


Fig.1.1 Change of refrigerant with time

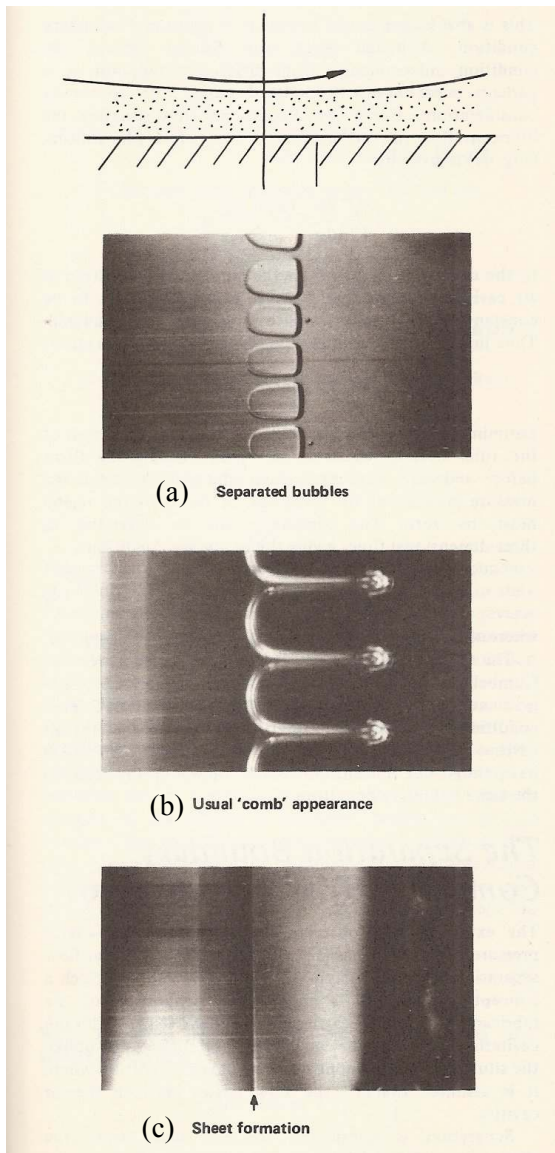


Fig.1.2 Cavitation observed in journal bearing<sup>39</sup>

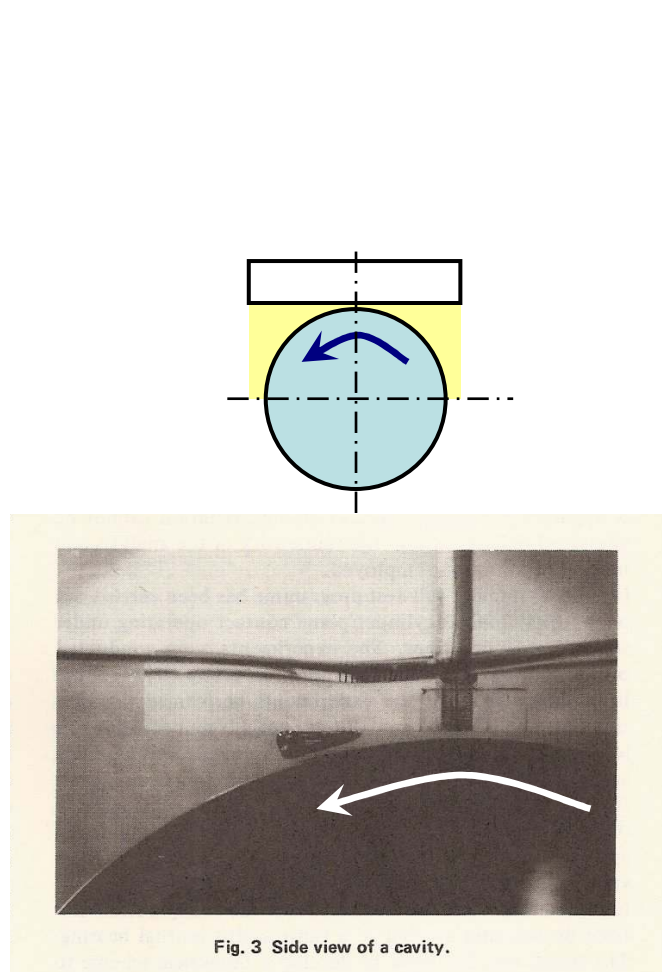


Fig.1.3 Shape of cavity in journal bearing<sup>39</sup>



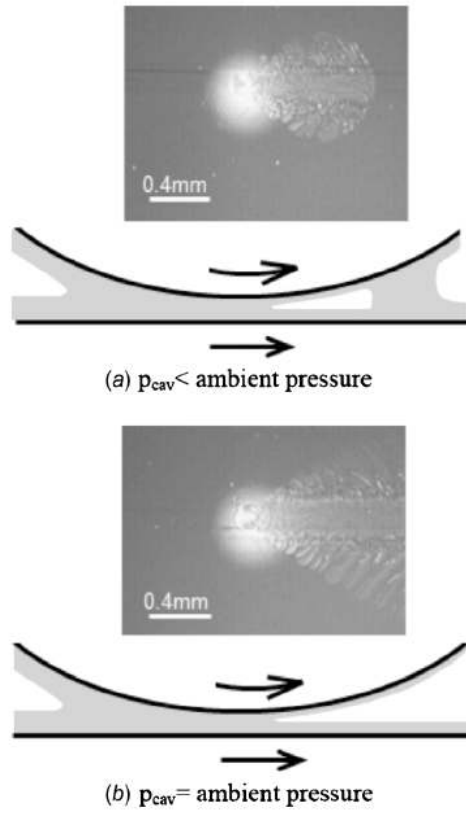


Fig.1.4 Pattern of cavity in EHL film<sup>48</sup>

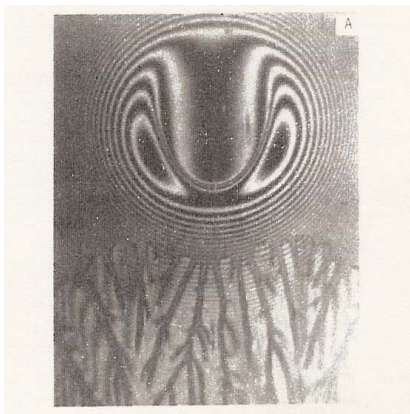


Fig.1.5 Flow pattern in cavity region<sup>47</sup>

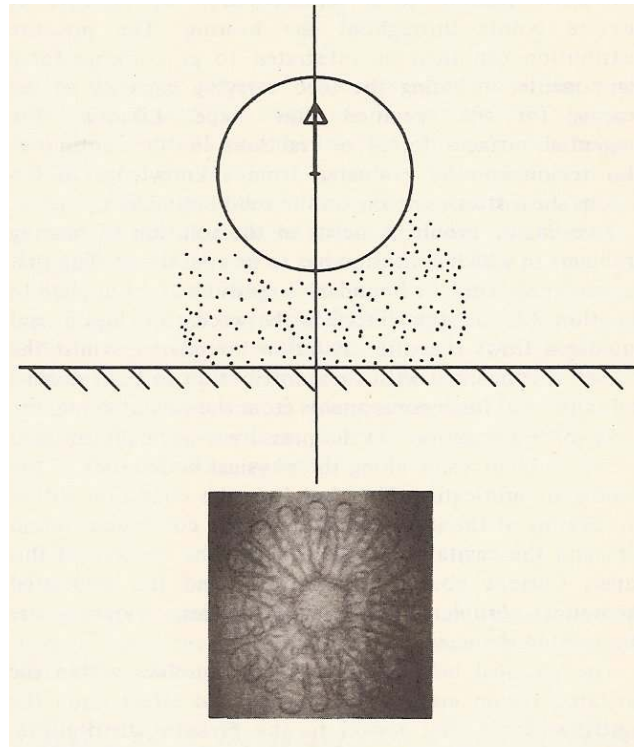


Fig.1.6 Cavity in separation film<sup>39</sup>

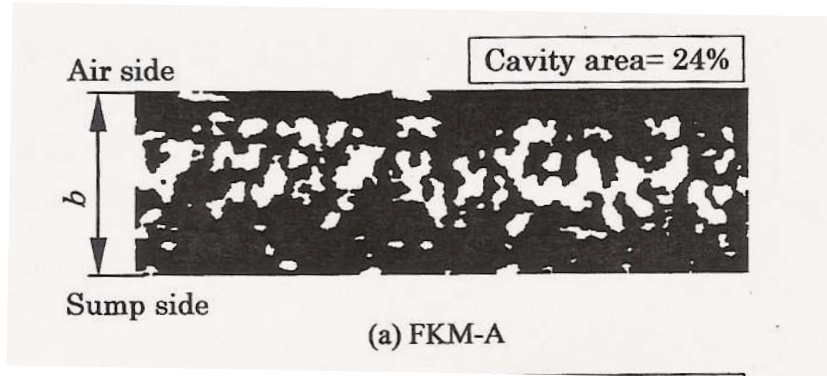


Fig.1.7 Cavity in lip seal<sup>84</sup>

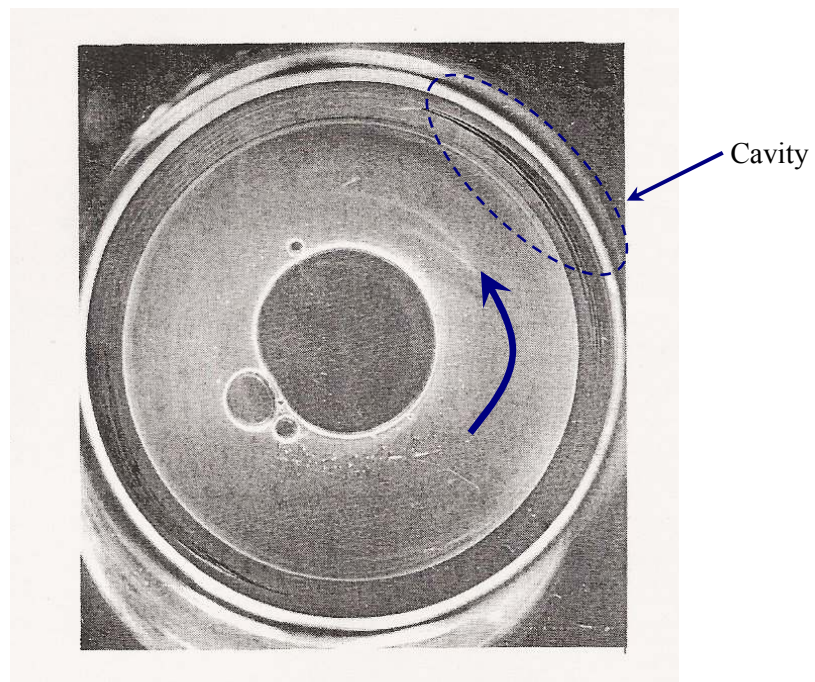


Fig.1.8 Cavity in mechanical seal<sup>57</sup>

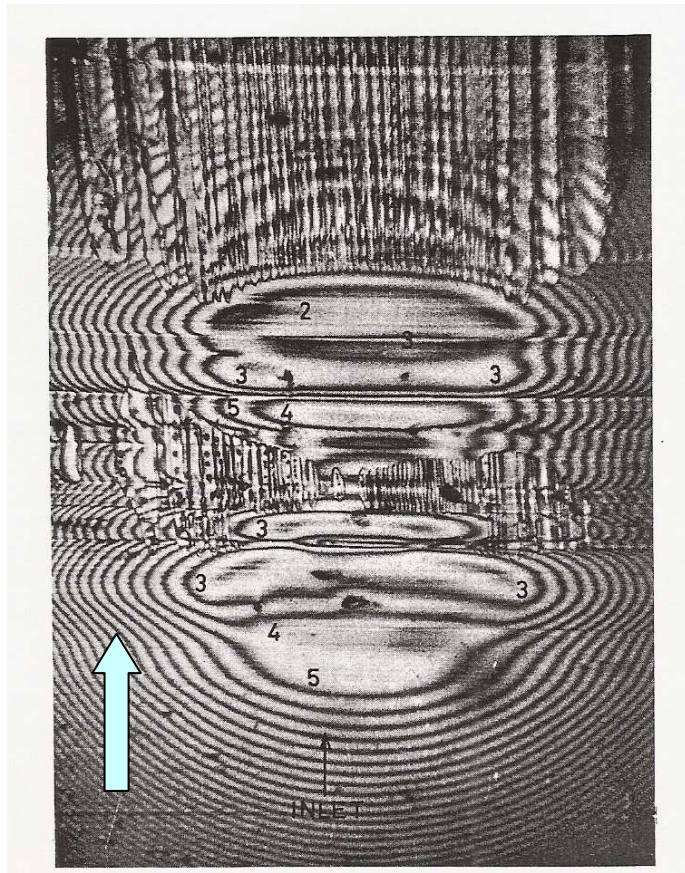


Fig.1.9 Effect of surface roughness on formation of cavity<sup>75</sup>

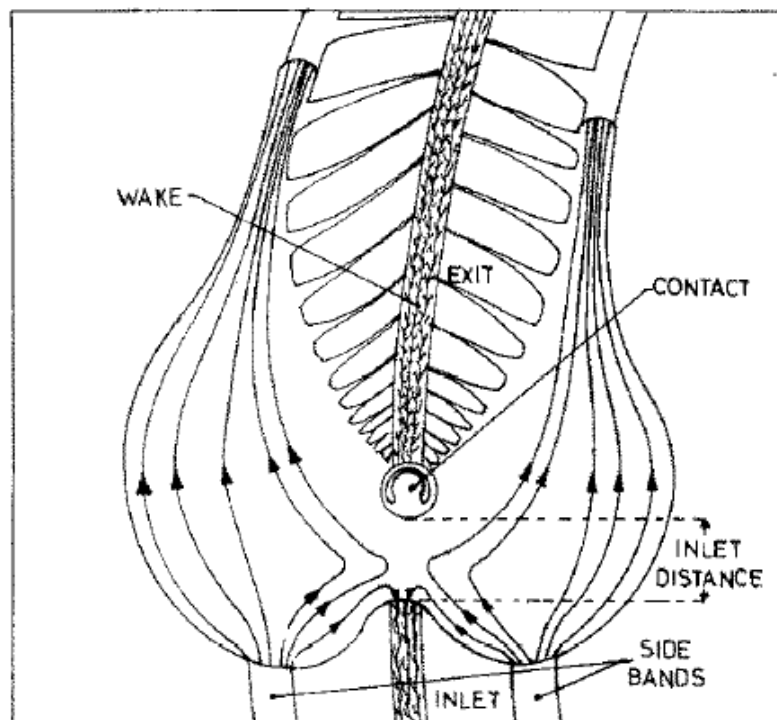


Fig.1.10 Lubricant flow in contact area<sup>77</sup>

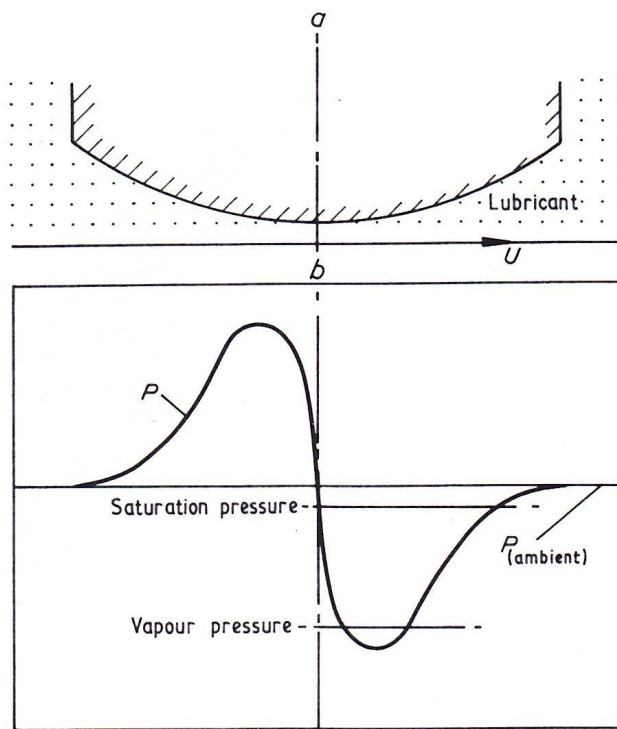
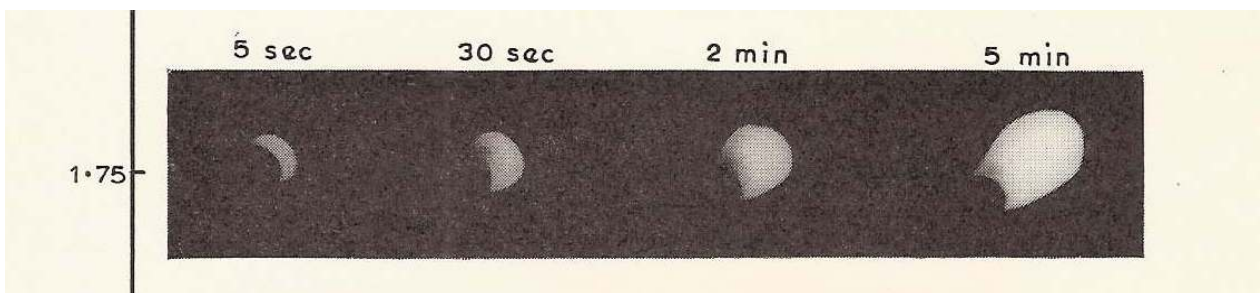


Fig.1.11 Definition of cavity region<sup>39</sup>



2mm

Fig.1.12 Cavity growth in EHL film<sup>46</sup>



## 第2章 キャビティー成長の観察

## 2.1 実験方法

### 2.1.1 実験の目的

本研究では、弾性流体潤滑膜に発生するキャビテーションを観察し、その成長について調べる。従って、キャビテーションを直接観察することが必要となる。

本研究では、接触部の一方をガラスディスクにすることで、接触域を観察できるようにした。接触部の観察は顕微鏡を用いて行う。また、高速度カメラにより撮影を行い、約 0.5 ms 間隔で画像を取得することができるようにした。接触部は真空チャンバ内に設け、チャンバ内の雰囲気気体、雰囲気圧力、雰囲気温度を変化させ、雰囲気の影響を調べた。

### 2.1.2 実験装置

本研究では雰囲気制御型点接触滑り試験機を使用し、実験を行った。接触域の観察は、チャンバの上部蓋に設けられたビューポートから、直接観察することができる。実験装置の概略図を Fig.2.1-1 に示す。

Fig.2.1-1 に示した実験装置の概要は、以下の通りである。

平面凸レンズ①は、梃子②により、ディスク③に押し当て、荷重を加えた。梃子の軸は、真空チャンバ④に連結されているベローズ継ぎ手と溶接されており、これにより、チャンバ内の密封性は確保される。また、ベローズ継ぎ手を使用することで、加えた荷重の一部が、ベローズの変形に使用されることが予想されるが、ディスクとレンズ間に加わる荷重を測定した結果、大きな荷重損失はないと確認された。ディスクは、マグネットカップリング⑤を介して、回転軸⑥と接続され、モータ⑦によって、回転させることができる。この回転部において、マグネットカップリングを使用することにより、チャンバ内の密封性を維持した。また、使用したモータはサーボモータであるため、その入力パルスを制御することにより、一方向だけでなく、往復動にディスクを回転させることができる。

本研究では、点接触の滑り試験だけでなく、接触状態から、瞬時にレンズをディスクから引き離す実験も行った。本論文中では、これ以降、この実験を引き離し試験と記す。梃子の先端⑧に接続されたワイヤを、滑車⑨を介して、電磁石⑩により、引っ張ることで、レンズをディスクから引き離した。引き離し速度は、梃子の先端の変位を変位センサで測定し、その時間変化より求めた。

真空チャンバは、ロータリーポンプ⑪(アルカテル社製、PASCAL 2015 SD)と接続されており、真空引きすることができる。また、油拡散ポンプ⑫(大亜真空社製、DPF-2ZA)を、ロータリーポンプの前段に設置することにより、チャンバ内を 0.01 Pa 程度までの減圧することができる。チャンバ内の圧力の測定は、2 種類の真空ゲージ(ピラニー真空ゲージ、ペニング真空ゲージ)を使用し、圧力範囲によって、ゲージを使い分けた。圧力が 10000 – 0.2 Pa までの範囲では、ピラニー真空ゲージを使用し、

圧力が 0.01 – 10 Pa までの範囲では、ペニング真空ゲージを使用した。

チャンバには、ガス導入ポートと排気用ポートが設けてある。真空引きを行った後に、任意の気体をチャンバ内に導入でき、雰囲気気体、および、雰囲気圧力が制御できる。なお、大気圧付近の圧力の確認は、チャンバに取り付けられたブルドン真空計にて行った。

チャンバ内の温度を変化させる場合、チャンバ外壁の側面に取り付けたバンドヒータ<sup>⑬</sup>によって、側面を加熱し、内部の温度を変化させた。チャンバ内の温度は、内部に差し込んだ熱電対により、確認した。本実験では、加熱後のチャンバ内の最高温度は、358 K であった。

真空チャンバの上部蓋には、サファイア製のビューポートが設けてあり、この部分から、接触部を観察することができる。接触部の観察は、顕微鏡<sup>⑭</sup>により、行った。顕微鏡は、高速度カメラ<sup>⑮</sup>(ファントム社製、Phantom V4.2)と接続されており、このカメラによって、実験時の接触部の様子を録画することができる。その後、必要な画像を抜き出し、キャビティー領域や油膜厚さの測定のために、画像を解析した。

### 2.1.3 試験片, および, 潤滑油

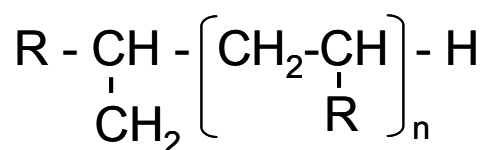
#### (1) 試験片

本研究では、平面凸レンズとディスクの材料には、光学ガラス BK-7 を使用した。平面凸レンズは、曲率半径が 10.38 mm で、その表面をクロムで鏡面コーティングした。ディスクは、直径が 80 mm で、厚さが 8 mm であり、その表面には、クロムの半透過膜とシリカのスペーサレイヤを施した。このスペーサレイヤを使用することにより、数 nm 程度の油膜厚さを、光干渉法にて測定することができる<sup>1</sup>。

なお、スパッタリングに関する条件は、過去に得られた情報を基に決定した<sup>2</sup>。

#### (2) 潤滑油, グリース

本研究で使用した潤滑油は、主として炭化水素系の合成油であるポリアルファオレフィン(PAO)である。以下に、分子構造式を示す。本研究では、5 種類の粘度のものを使用した。Table 2.1-1 にその詳細を示す。



他に、市販されている鉱油系真空ポンプ油(第 2 章 2.5 にて使用)、シリコーン油(第 2 章 2.6 にて使用)も使用した。潤滑油の詳細に関しては、それぞれの節に示す。



グリースは、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、ジウレアグリースの3種類を使用した。全てのグリースにおいて、基油は、PAOである。詳細に関しては、第4章4.1にて示す。

#### 2.1.4 実験方法

実験を行った実験室は、室温 295 K、湿度 55 %に維持されている。

以下に、雰囲気制御試験、雰囲気温度制御試験、雰囲気圧力制御試験のそれぞれについて、実験手順を示す。

##### (1) 雰囲気気体制御試験

以下に、チャンバ内の雰囲気気体を制御した条件での実験手順を示す。

1. 平面凸レンズ、ディスクをアセトンにて洗浄し、実験装置に取り付ける。ここで、ディスクに潤滑油を塗布しておく。ディスクの滑り試験のトラックとなる領域に、シリンジを使用し、0.2 ml 程度の潤滑油を均一に塗布した。
2. チャンバ上部蓋を取り付け、チャンバ本体とボルトで締結する。
3. チャンバ内を真空引きする。チャンバ内の真空引きは、3時間行った。
4. 真空引き後、任意の気体をチャンバ内に、導入した。導入後のチャンバ内圧力は、大気圧である。
5. 実験中に、十分な潤滑油が接触域に供給されるように、無負荷の状態で、ディスクを回転させた。回転は、3回転程度であった。また、この操作によって、雰囲気気体が潤滑油中に飽和溶解することが確認されている<sup>3</sup>。これは、潤滑油がかくはんされ、雰囲気気体の溶解が早く起こったためと考えられる。
6. 任意の条件(荷重、滑り速度)にて、実験を行う。
7. 実験終了後、チャンバ内に導入した気体を排出するため、真空引きを行う。真空引き後に、チャンバ内に空気を導入し、大気圧にする。その後、チャンバ蓋と本体を固定していたボルトを取り外し、試験片を取り外す。

なお、ここで、空気中での実験においては、チャンバ内の雰囲気気体を制御する際の真空引きは行わず、大気雰囲気の状態で実験を行った。

##### (2) 雰囲気温度制御試験

以下に、チャンバ内の雰囲気温度を制御した条件での実験手順を示す。

まず、雰囲気気体を制御するために、(1) 雰囲気気体制御試験の1-4の手順にて、チャンバ内の雰

雰囲気体を制御した。

1. 試験片の洗浄と取り付け
2. チャンバ上蓋の固定
3. チャンバ内の真空引き
4. 雰囲気体のチャンバ内への導入
5. チャンバ側面をバンドヒータにて加熱し、雰囲気温度を変化させる。チャンバ内の温度は、熱電対を使用し、確認している。また、チャンバ内の圧力は、ブルドン真空計にて確認し、大気圧に保持されるようにした。
6. 雰囲気温度が制御された後、実験中に、十分な潤滑油が接触域に供給されるように、無負荷の状態で、ディスクを回転させた。回転は、3回転程度であった。
7. 任意の条件(荷重, 滑り速度)にて、実験を行う。
8. チャンバの冷却を行う。その後、真空引き、空気の導入、試験片の取り外しを行う((1) 雰囲気気体制御試験における手順 7)。

### (3) 雰囲気圧力制御試験

以下に、チャンバ内の雰囲気圧力を制御した条件での実験手順を示す。

1. 試験片の洗浄と取り付け
2. チャンバ上蓋の固定
3. チャンバ内を真空引きする。この実験では、油拡散ポンプを使用した。到達圧力は、0.015 Pa であった。真空引きの時間は、3時間であった。
4. 空気をチャンバ内へ導入し、雰囲気圧力を制御する。

本実験装置では、空気を導入するためのバルブに、ボールバルブを使用した。そのため、微流量の気体の導入を行うことができず、圧力を 100 Pa 以下では正確に制御できなかった。そのため、この実験では、最小圧力を 0.015 Pa、次に低い圧力を 100 Pa とした。なお、0.015 Pa 条件では、実験中も油拡散ポンプによる真空引きを引き続き行った。
5. 雰囲気温度が制御された後、実験中に、十分な潤滑油が接触域に供給されるように、無負荷の状態で、ディスクを回転させた。回転は、3回転程度であった。
7. 任意の条件(荷重, 滑り速度)にて、実験を行う。
8. 空気の導入、試験片の取り外しを行う((1) 雰囲気気体制御試験における手順 7)。

### 2.1.5 実験条件

本研究における実験条件の範囲を Table 2.1-2 に示す.

各実験は、これらの実験条件の中から、それぞれの課題における実験条件を選択し、行った.

### 2.1.6 キャビティー長さの評価方法

Fig.2.1-2 に、滑り試験時の接触部の観察結果を示す. ヘルツ接触部が光干渉法によって示され、接触域の油膜の出口付近に、弾性流体潤滑膜に現れる馬蹄形の油膜厚さが低下した領域が観察される. また、この図において、接触域の出口部に、キャビテーションが発生していることが確認される.

本研究では、キャビテーション領域の大きさを評価するものとして、”キャビティー長さ”を定義した. キャビティー長さは、Fig.2.1-2 に示されるように、ヘルツ接触域の外側から、キャビティーの後端までの長さとした.

引き離し試験時のキャビティーでは、図に示すように、縦方向、横方向の最大径の平均値を”キャビティー径”として定義した.

### 2.1.7 油膜厚さの変換

接触部の油膜厚さは、接触域の干渉像の色情報(R, G, B)を調べることにより求めた. 本研究では、色相値 Hue を画像の色情報から求めた. 色相値を使用することにより、輝度、彩度の影響を取り除くことができる.

静的に接触させた画像を用い、ヘルツ接触理論から求まる接触域外のすきまと、画像から得られる色相を関係付けることによって、色相と膜厚の関係式を求めた. 各次数において、その関係式を求めた. 干渉画像の色相値の次数を確認し、色相値を膜厚との関係式から膜厚へと変換した.

#### (参考文献)

- 1 Johnston, G. J., Wayte, R. and Spikes, H. A., “The Measurement and Study of Very Thin Lubricant Films in Concentrated Contacts”, Tribology Transaction, 34, 1997, 187-194
- 2 塩見, 流体潤滑膜の破断と摩耗の進展に及ぼす表面形状の影響, 九州大学 博士論文, 2008
- 3 大津, 潤滑表面における雰囲気気体の影響, 九州大学 修士論文, 2009

Table 2.1-1 Five kind of PAO used in this study

Fluid	Viscosity, mm <sup>2</sup> /s	
	313K	373K
PAO10	11	2.8
PAO17	17	2.9
PAO32	32	5.9
PAO63	63	11.4
PAO400	398	39.0

Table 2.1-2 Test conditions

<b>Sliding speed</b>	3.8 – 548 mm/s
<b>Weight</b>	1-7 N
<b>Oil and Grease</b>	PAO, Mineral oil, Silicone oil Greases (Lithium stearate, Lithium hydroxystearate, Diurea)
<b>Viscosity of oil</b>	PAO: 11 - 398 mm <sup>2</sup> /s @ 313 K
<b>Surrounding gas</b>	Air, Ar, He and CO <sub>2</sub>
<b>Surrounding pressure</b>	0.015 – 101300 Pa
<b>Surrounding temperature</b>	295 – 358 K

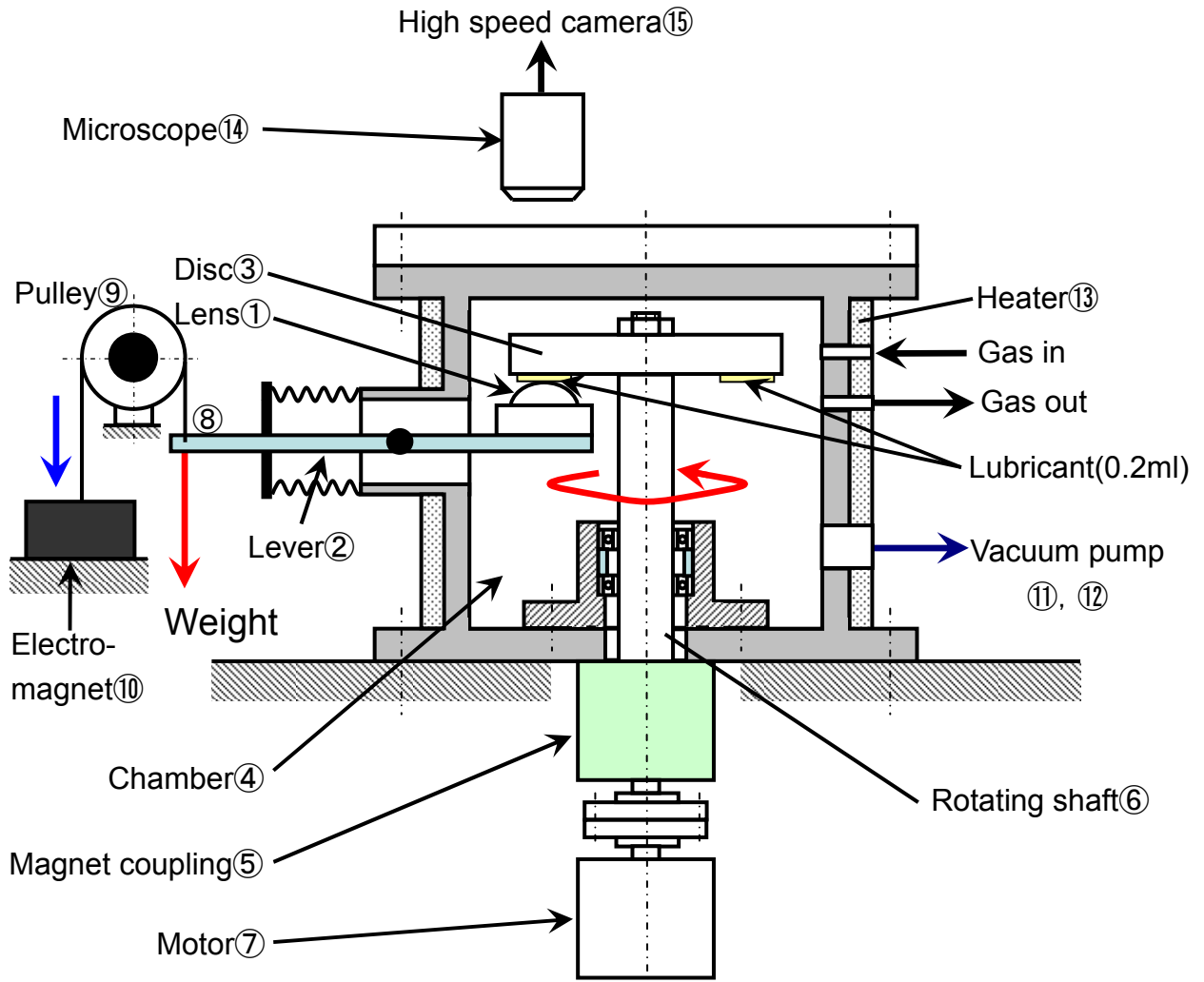


Fig.2.1-1 Test apparatus

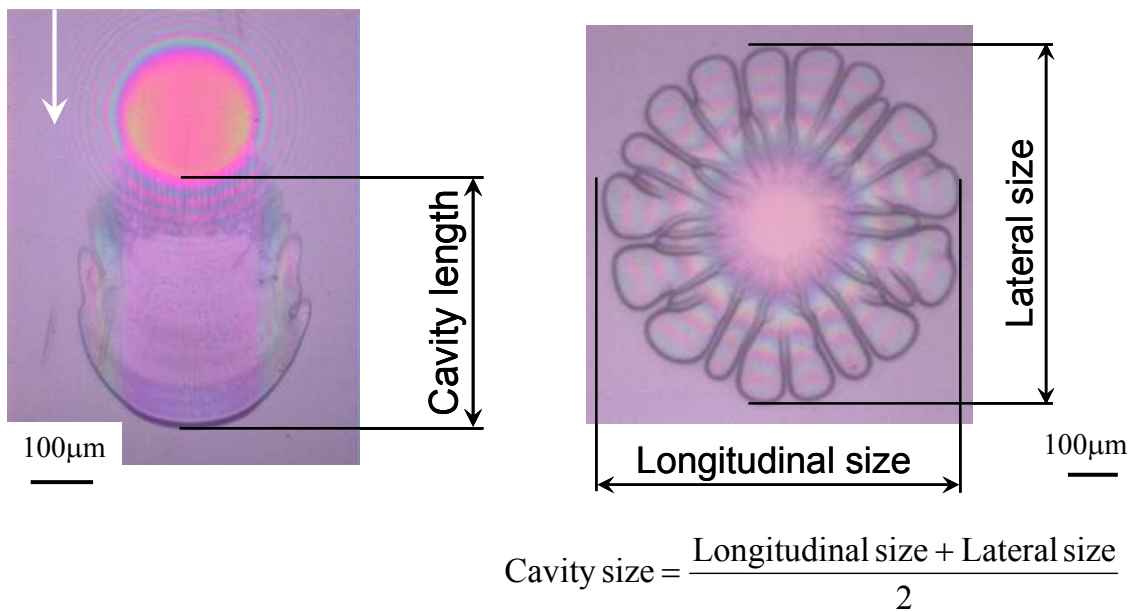


Fig.2.1-2 Definition of cavity length and cavity size

## 2.2 雰囲気気体のキャビティ成長へ与える影響

本節では、雰囲気気体がキャビテーションへ及ぼす影響を調べた。

第1章 1.3.2 で述べたように、雰囲気気体は、潤滑部で起こるいくつかの現象に影響を与え、その結果、潤滑性能の変化を引き起こす。

本節では、2.1 の実験方法にて述べた方法により、チャンバ内の雰囲気を任意の気体に制御し、EHL潤滑部に発生するキャビテーションの観察を行った。また、本節で示す実験では、一方向の滑り試験と引き離し試験を行った。

### 2.2.1 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.

- ・潤滑油：PAO，動粘度  $63 \text{ mm}^2/\text{s}$  @ 313 K
- ・雰囲気：空気，ヘリウム，アルゴン，二酸化炭素
- ・滑り速度：20 mm/s
- ・荷重：1 - 7 N，最大ヘルツ接触圧：0.14 - 0.27 GPa
- ・温度：295 K

チャンバ内の雰囲気気体は，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，300 Pa であった.

### 2.2.2 空気中におけるキャビティの観察

Fig.2.2-1 に，空気中における，実験開始より 30 min までの各時間におけるキャビティの画像を，それぞれ示す. 図中の矢印は，潤滑油の流れる方向(ディスクの回転方向)を示している. 本実験での荷重は，7 N であった. Fig.2.2-2 には，実験開始から 10 min 後，Fig.2.2-3 には，実験開始から 1 h 後までのキャビティ長さの時間変化をそれぞれ示す.

Fig.2.2-1 より，キャビティ長さは，時間とともに拡大していることが分かる. また，キャビティの拡大は，潤滑油の流れ方向に起こっており，キャビティの横幅の変化は小さい. Fig.2.2-2, 2.2-3 より，キャビティ長さは，実験開始より急速に長くなっており，時間とともにその長さの変化量は小さくなる. また，1 h 経過後にも，その長さは長くなっている.

また，実験中，接触域において温度の上昇がないかを確認するために，接触域後方の潤滑油の温度を熱電対にて測定した. その結果，潤滑油の温度は，実験中，室温と同等であり，温度上昇は見られなかった.

本実験結果より，キャビティ長さは，時間とともに成長する時間依存性を示すことが分かった. この結果は，第 1 章 1.4.4 に示すように，Archard and Kirk<sup>1</sup>，Dowson<sup>2</sup>らによって確認されている結果と同様なものである.

### 2.2.3 各雰囲気におけるキャビティの観察

次に、各雰囲気におけるキャビティの観察結果を示す。

Fig.2.2-4, 2.2-5 に、各雰囲気におけるキャビティ長さの時間変化をそれぞれ示す。Fig.2.2-4 には、実験開始から 10 min までの時間変化、Fig.2.2-5 には、実験開始から 1 h までの時間変化である。Fig.2.2-6 には、実験開始から 10 min 後における各雰囲気でのキャビティの画像を示す。

Fig.2.2-4 より、実験開始後のキャビティ長さには、雰囲気における差が見られた。その長さには、開始した後の 10 s において、雰囲気による影響が見られており、ヘリウム、空気、アルゴン、二酸化炭素の順に長くなるものであった。Fig.2.2-5 より、10 min 以後も、すべての気体において、キャビティ長さは、時間とともに長くなることが分かった。また、Fig.2.2-4 で見られた雰囲気の差が引き続き見られ、ヘリウム、空気、アルゴン、二酸化炭素の順に長くなっていた。キャビティ長さは、実験開始後、約 10 min までに急速に成長し、時間とともにその長さの変化量は小さくなっている。Fig.2.2-6 より、キャビティの拡大は、すべての雰囲気において、潤滑油の流れ方向に拡大している。

従って、これらの結果より、ヘリウム、アルゴン、二酸化炭素の雰囲気においても、キャビティが時間とともに成長する時間依存性をもつことが分かった。また、その長さは、雰囲気気体によって異なり、今回使用した気体では、二酸化炭素中で最も長くなり、ヘリウム中で最も短かった。この結果は、雰囲気気体によって、キャビティの成長が変化することを示している。従って、キャビティの成長には、雰囲気依存性があることが分かった。

### 2.2.4 まとめ “キャビティの成長現象”

先に示した 2.2.2, 2.2.3 より、弾性流体潤滑膜の後方に発生するキャビテーションには、“時間依存性”と、“雰囲気依存性”があることが確認された。

ここでは、この 2 つの現象について、“キャビテーションと潤滑油中の溶解気体の関係”，という観点から考察する。

まず、各気体の溶解特性の影響を検討するために、各気体の潤滑油への溶解特性とキャビティ長さの関係を検討してみる。Fig.2.2-7 に、本実験に使用した潤滑油である PAO への各気体の溶解度とキャビティ長さの関係を示す。なお、溶解度は、ガスクロマトグラフを使用する測定方法にて求めた。その測定方法は、後述の第 3 章 3.3.2 に示す。また、ここで示されている溶解度は、オストワルド係数である。この係数の定義は、同一温度における溶解した気体の体積と溶媒の体積の比である。

この図より、キャビティ長さは、明らかに気体の溶解度と関係があり、溶解度の高い気体ほど、その長さは長くなる。従って、この結果より、潤滑油に多く溶解する気体ほど、キャビティが長い



ことが考えられ、溶解気体の影響が示唆される。

また、気体の潤滑油への溶解は、潤滑油粘度に対して影響することが報告されている<sup>3,4</sup>。過去の報告より、溶解の影響により、PAOの粘度も低下することが分かっている<sup>5</sup>。従って、潤滑油粘度とキャビティー長さの関係も検討しておく必要がある。潤滑油粘度への影響を確認するために、潤滑膜の油膜厚さの測定を行った。

Fig.2.2-8に、二酸化炭素中、空気中における、実験開始から1hまでの、油膜厚さとキャビティー長さの変化をそれぞれ示す。この結果より、二酸化炭素中の油膜厚さが、空気中のものよりも、10%程度低下していることが分かった。これは、二酸化炭素の溶解量が、空気の溶解量よりも、体積比で10倍程度大きく、その影響が潤滑油粘度の低下、および、油膜厚さの低下を引き起こしたと考えられる。なお、油膜厚さのばらつきは、ディスク表面にコーティングしたクロム、および、シリカの膜厚のばらつき、および、取り付けたディスクのレンズに対する垂直度によって生じる、膜厚の微小変化に起因するものである。Fig.2.2-9には、潤滑油粘度のキャビティー長さへの影響を確認するために、PAO32でのキャビティー長さの時間変化と油膜厚さを示している。ここで用いたPAO32は、動粘度が $31 \text{ mm}^2/\text{s}@313\text{K}$ である。この図より、潤滑油粘度が低下すると、キャビティー長さが短くなることが分かる。これらの実験はどちらも空気中において行われている。従って、溶解気体量が大きく変化しない条件下では、潤滑油粘度の増加とともにキャビティーは長くなることが分かる。一方で、二酸化炭素中では、空気中よりも潤滑油粘度は低くなるが、キャビティー長さは長くなっている。この結果は、キャビティー長さが、潤滑油粘度のみに依存しないことを示している。

従って、この条件において、キャビティーの成長には、Fig.2.2-7でも示されたように、溶解気体の与える影響が大きいと考えられる。

これまでの結果を基にし、“時間依存性”と“雰囲気依存性”について、検討すると以下のようなになる。

一般的に、気体性キャビティーは、接触域後方に発生した負圧が、溶解気体の析出圧力まで低下したため、油中の溶解気体が析出することに起因した現象であると考えられている<sup>6</sup>。従って、今回観察されたキャビティーの成長では、潤滑油中の溶解気体がキャビティー内へ時間とともに析出したために起こったと考えられる。また、キャビティー内へ析出する気体の量は、溶解気体量に影響すると考えられるので、溶解度の高い気体ほど、その成長が大きくなると考えられる。本実験結果のキャビティーの成長は、潤滑油中の溶解気体の影響を強く受けていると推測される。

## 2.2.5 発生直後のキャビティの観察

2.2.3 では、実験開始後 10 s から 1 h におけるキャビティの成長の結果を検討したものであった。一方で、発生からのキャビティの成長を議論するためには、発生直後における現象も調べておく必要がある。本節では、発生直後のキャビティを時間間隔、約 0.5 ms で撮影し、その挙動を観察した。また、滑り試験と引き離し試験の 2 つの方法にて、実験を行った。

### (1) 滑り試験

Fig.2.2-10 に、空気中における、キャビティが発生してから、15.7 ms までのキャビティの画像を示す。また、Fig.2.2-11 に、発生から 30 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す。なお、この実験では、ディスクが 20 mm/s で回転している状態で、荷重 1 N を加え、そこで発生したキャビティを観察した。

Fig.2.2-10 の 1.1 ms において、接触域出口の一部でキャビティが発生していることが確認される。その後、キャビティが急速に成長している。2.2 ms における画像より、キャビティの後端の形状は、一部分が急速に伸びた特異的なものとなっている。3.3 ms における画像では、接触域出口の全体からキャビティの発生が見られるが、キャビティの後端は、依然として、一部分が長くなった特異的な形状を示している。その後、時間とともに、キャビティは成長し、次第にキャビティ後端は、滑らかな界面へと変化する。13.4 ms 後には、丸みを帯びたキャビティ形状となる。この時間でのキャビティ形状は、Fig.2.2-1 に示す形状とよく似ている。Fig.2.2-12 に、開始から 16 ms におけるキャビティの発生位置と油膜厚さを示している。この図より、キャビティの発生位置は、最小油膜厚さ位置後方であることが確認できる。

Fig.2.2-11 より、キャビティ長さは、発生から、約 10 ms までに急速に成長する。その後、キャビティ長さの変化量は小さくなる。Fig.2.2-10 と照らし合わせると、キャビティ後端が特異的な形状を持つ時間において、キャビティの急速な成長が見られることが確認される。発生から 6.2 ms における成長速度は、21.7 mm/s であり、滑り速度の 20 mm/s に近づいている。10ms から 15 ms における成長速度は、3.2 mm/s であり、それ以前の時間のものと比べると大きく低下している。13 ms 以降におけるキャビティ形状は、滑らかな界面を示した形状である。

この結果より、発生から、その後の時間におけるキャビティの成長は、成長速度が異なった 2 段階で起こっていることが分かる。

Fig.2.2-13 には、各雰囲気における、発生直後から 80 ms までのキャビティ長さの変化を示している。また、Fig.2.2-14 には、発生から 10 ms における各雰囲気でのキャビティの画像を示す。Fig.2.2-15 には、発生から 1 s までのキャビティ長さの変化を示す。Fig.2.2-16 には、発生から 1 s 後

におけるキャビティの画像を示す。

Fig.2.2-13 より、発生から 10 ms までにおいて、キャビティ長さには、雰囲気の影響が見られないことが分かる。Fig.2.2-14 において、キャビティ形状に、雰囲気による大きな差は見られない。その後の 20 – 30 ms 以降の時間では、キャビティ成長に対し、徐々に雰囲気の影響が現れてくる。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る。Fig.2.2-15 より、約 1 s 後には、雰囲気の影響は大きくなり、雰囲気気体のキャビティ長さへの影響が明確となる。また、Fig.2.2-16 より、すべての気体において、キャビティの成長する方向は、潤滑油の流れ方向であることが分かる。

Fig.2.2-17 には、10 ms, 1 s, 1 min におけるキャビティ長さと各気体の潤滑油への溶解度の関係を示す。10 ms 後におけるキャビティ長さは、溶解度との関係がほぼ見られない。一方で、1 s, 1 min におけるキャビティ長さは、溶解度と関係が見られ、溶解度が高いほどキャビティ長さも長くなる。

これらの結果より、キャビティが発生してから 10 ms までは、潤滑油中の溶解気体はキャビティの成長には影響を与えないが、その後の約 20-30 ms 以降は、2.2.4 で述べたように、キャビティの成長に溶解気体が影響を与えることが確認された。

## (2) 引き離し試験

ここでは、レンズをディスクから瞬間的に引き離すときに発生するキャビテーションを観察した結果を示す。また、雰囲気気体の影響についても調べた。

実験の概要は、以下に示す通りである。まず、レンズをディスクに 1 N の荷重で押し当てる。その後、電磁石により梃子を引っ張り、レンズをディスクから引き離した。引き離し時に発生するキャビティは、時間間隔、約 0.5 ms で撮影し、その挙動を観察した。

Fig. 2.2-18 に、引き離し時における、梃子の変位を測定した結果を示す。この図より、3 ms から 10 ms までの引き離し速度を求めると、11 mm/s であった。

Fig.2.2-20 に、発生から 9.9 ms までのキャビティの画像を示す。Fig.2.2-19 に、引き離し時の接触域の膜厚を光干渉法により求めた結果を示す。この図より、2.2 ms には、完全にレンズがディスクから引き離されていることが分かる。

Fig.2.2-20 より、2.2 ms 後にキャビティが接触域外側より、発生していることが確認される。Fig.2.2-19 より、この時間域では、まだ、レンズとディスクは接触していることが分かる。従って、この時間でのキャビティの発生は、レンズとディスク間の弾性変形の回復による、厚さ方向すきまの急拡大に起因したものと考えられる。2.2 や 3.1 ms では、小さなキャビティが、接触域の周囲か

らほぼ等間隔で発生していることが確認できる、その後、時間とともに、その一つ一つのキャビティーが長くなり、キャビティー径は拡大していく。その後の 5, 6.3 ms では、花びらのような形状となる。6.3 ms で最大となり、その後、潤滑油のキャビティー内への流入が引き起こされ、キャビティー径は収縮していく。9 ms では、収縮したキャビティーは、一つの気泡となり、その後も潤滑油中に残り続ける。

Fig.2.2-21 には、各雰囲気における、発生から 10 ms までのキャビティー径の時間変化を示す。Fig.2.2-22 に、6.3 ms 時のキャビティーの画像を示す。Fig.2.2-23 に 9.4 ms 後における気泡の画像を示す。

より、発生から 6.3 ms までのキャビティーが拡大する時間において、キャビティー径は、雰囲気によらず、ほぼ同じである。Fig.2.2-22 より、最大のキャビティー径となる時間において、その形状や大きさに雰囲気の差はほぼ見られない。一方で、6.3 ms 以後の収縮していく過程では、雰囲気によって、キャビティー径が異なる。ヘリウム中で、キャビティーは最も早く収縮し気泡となる。一方で、二酸化炭素中では、最も遅く収縮し、収縮後の気泡径は最も大きい。Fig.2.2-23 の 9.4 ms の画像より、ヘリウム、空気、アルゴン、二酸化炭素の順に気泡径は大きいことが分かる。

Fig.2.2-24 に、6.3 ms, 9.4 ms におけるキャビティー径と気体の溶解度の関係を示す。発生から 6.3 ms におけるキャビティー径は、溶解度との関係が見られないが、9.4 ms では、溶解度との関係が見られ、溶解度が高いものほど、キャビティー径(気泡径)が大きい。従って、キャビティーが発生し、急速に成長する過程では、溶解気体の影響は見られないが、その後、潤滑油の流入によってキャビティー領域が収縮していく過程では、溶解気体の影響が見られる。

## 2.2.6 キャビティーの成長過程

ここでは、2.2.5 で得られた結果を基に、キャビティーの成長を検討する。Fig.2.2-25 に、前節より分かった、滑り試験時におけるキャビティーの成長挙動を示す。

Fig.2.2-25 に示すように、キャビティー成長は、その成長速度から、2 段階の成長過程をもつことが推測される。発生直後の時間域(本実験条件では、10 ms 以下)では、成長速度が大きく、その値は滑り速度に近い。キャビティーは、一部分が伸びた特異的な形状を示している。Saffman らは、液体が急速に拡大する場合には、全体が一様に拡大するのではなく、一部分が急速に広がった形状となることを報告している(このような界面を不安定な界面と表現している)<sup>7</sup>。従って、この時間では、溶解気体が急速に析出したことが考えられる。この急速な成長が終わると(本実験では、約 20 – 30 ms 以降)、成長速度は前段階における値よりも非常に小さくなる。また、キャビティー形状も滑らかな界面を持

つ丸まった形状となる。従って、溶解気体の急速な析出は起こっていないと推測され、時間とともに徐々に起こる遅い析出現象と考えられる。

また、雰囲気気体との関係を見ると、発生から 10 ms までの急速な成長過程では、雰囲気気体の影響が見られない。一方で、20-30 ms 以後の成長過程では、雰囲気気体の影響が見られる。従って、2 段階の成長過程では、溶解気体の影響が異なることが分かった。

本研究では、発生から急速な成長を示す過程を ” Initial stage ”, その後の成長過程を ” Second stage ” と名づけ、以降、このように記す。

第 3 章に、この成長過程について考察し、そのモデルを検討する。

### 2.2.7 まとめ

本節において、キャビティー成長に及ぼす雰囲気気体の影響を調べ、以下の結果が得られた。

- EHL 膜の後方に形成されるキャビティーにおいて、その長さは時間とともに拡大する。また、雰囲気の影響を受け、二酸化炭素中において、最も長くなり、ヘリウム中において、最も短くなる。キャビティー長さは、潤滑油への気体の溶解度と関係することが分かった。
- 発生からのキャビティーの成長を観察した結果、キャビティーの成長は、2 段階で起こることが分かった。
- 発生から約 10 ms では、キャビティーは急速に成長する。この成長において、雰囲気気体の影響は見られなかった。
- 発生から 20-30 ms 後から、キャビティー長さに雰囲気気体の影響が見られ始め、溶解度の高い気体ほど、キャビティーが長くなる。また、この時間域におけるキャビティーの成長速度は、前の成長段階のものより非常に小さい。
- 引き離し試験で観察されるキャビティーの成長において、発生から最大径に達するまでのキャビティー径の変化には雰囲気の影響が見られなかった。最大径に達した後、キャビティーは収縮し、気泡へと変わるが、この収縮過程では雰囲気の影響が見られ、溶解度の高い気体で収縮が遅い。

(参考文献)

- 1 Archard, J.F. and Kirk, M.T., “INFLUENCE OF ELASTIC MODULUS ON THE LUBRICATION OF POINT CONTACTS,” Lubrication and Wear convention 1963, Institution of Mechanical Engineers, London, 1963, 181-189
- 2 Dowson, D., “Investigation of Cavitation in Lubricating Films Supporting Small Loads”, Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear, Institution of Mechanical Engineers, 1957, 93-99
- 3 畑, “気体の溶解度と気体の溶解時の物性(2)”, トライボロジスト, 36, 7, 1991, 519-522
- 4 Yamamoto, Y., Gondo, S. and Kim, J., “Solubility of HFC134a in Lubricants and Its Influence on Tribological Performance,” Tribology Transaction, 44, 2, 2001, 209-214
- 5 井上, 気体溶解時における潤滑油の粘度特性, 九州大学 卒業論文, 2007
- 6 Dowson, D. and Taylor, C.M., “Cavitation and Related Phenomena in Lubrication,” Institution of Mechanical Engineers, 1975
- 7 Saffman, P.G. and Taylor, G, “The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid”, Proceedings of Royal Society, A 245, 1958, 312-329

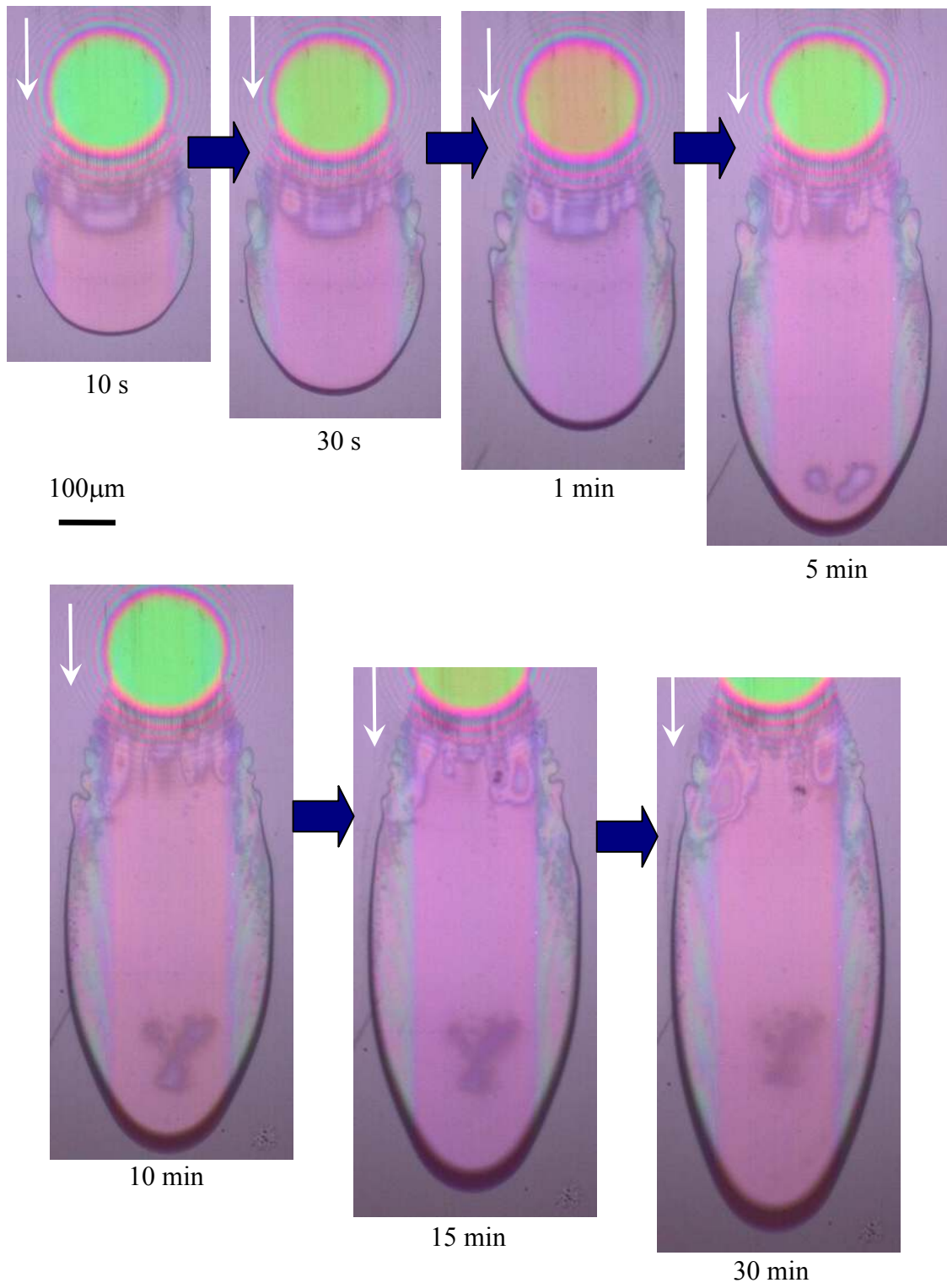


Fig.2.2-1 Cavity growth from the start to 30 min

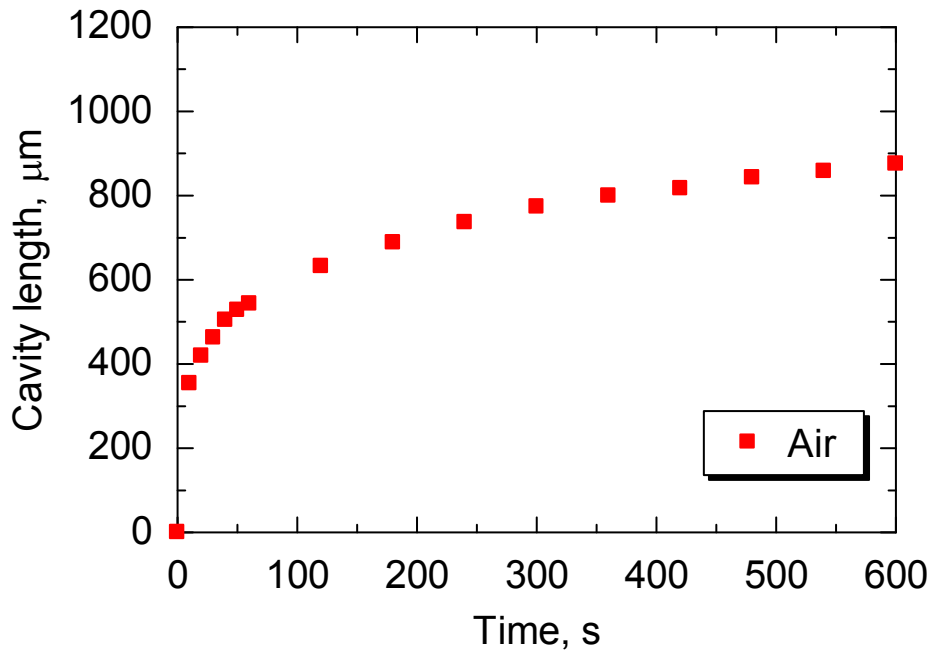


Fig.2.2-2 Changes in cavity length from the start to 10 min

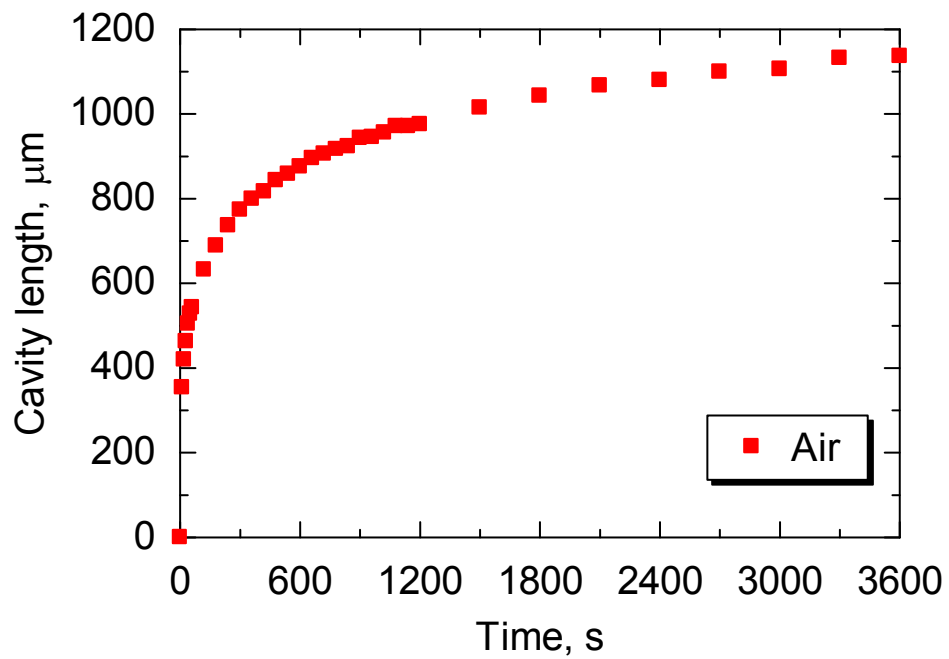


Fig.2.2-3 Changes in cavity length from the start to 1 h



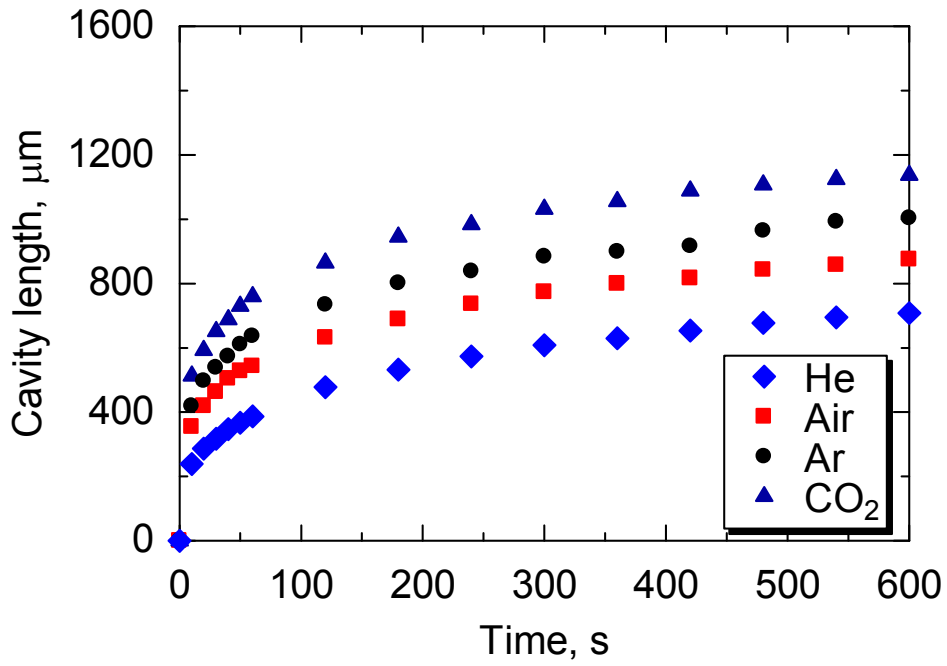


Fig.2.2-4 Changes in cavity length from the start to 10 min in various gases

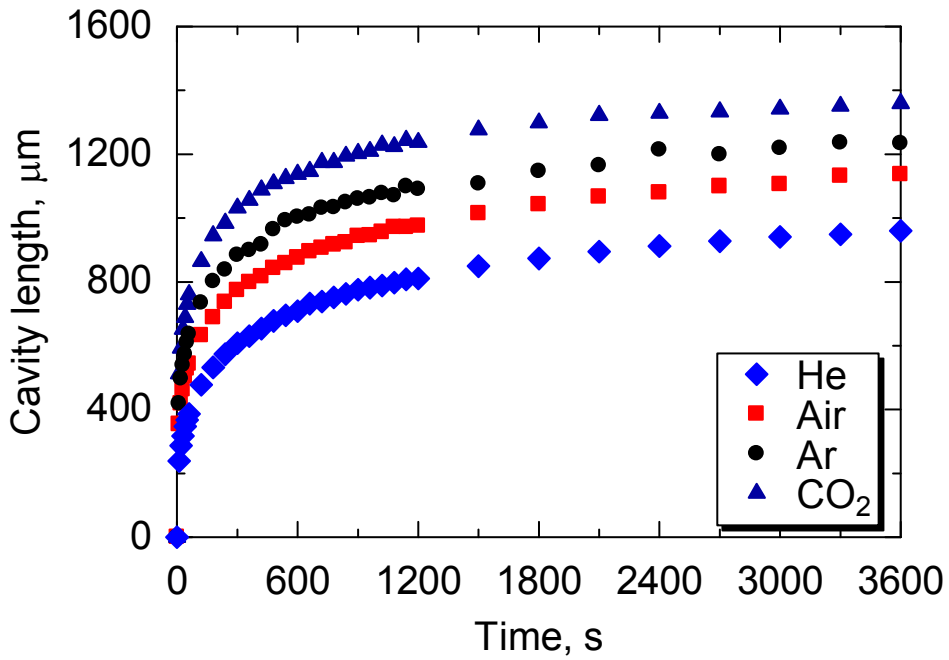


Fig.2.2-5 Changes in cavity length from the start to 1 h in various gases

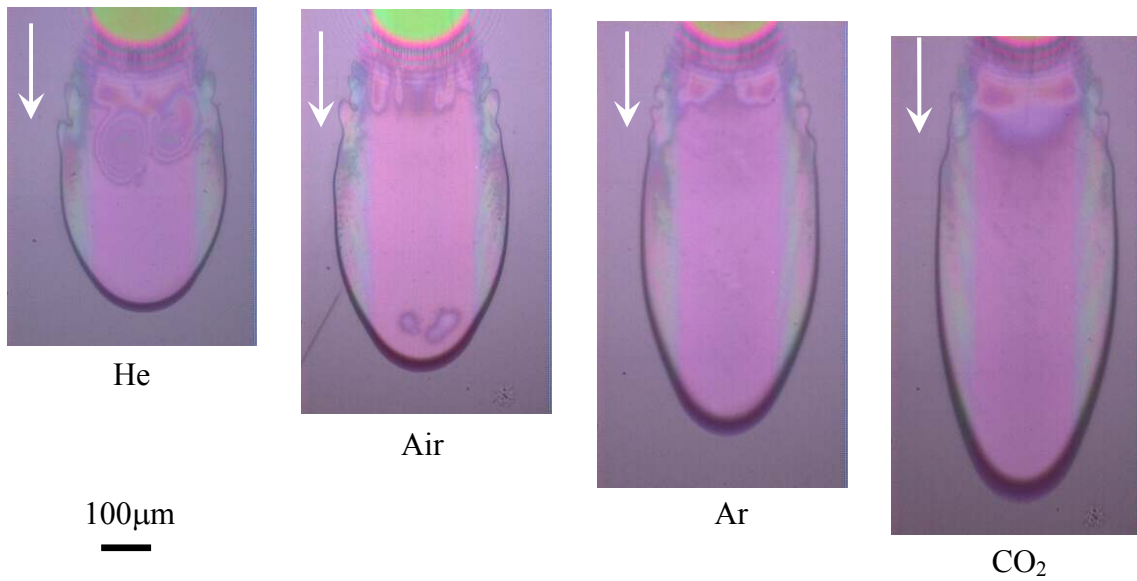


Fig. 2.2-6 Cavity at 10min in various gases

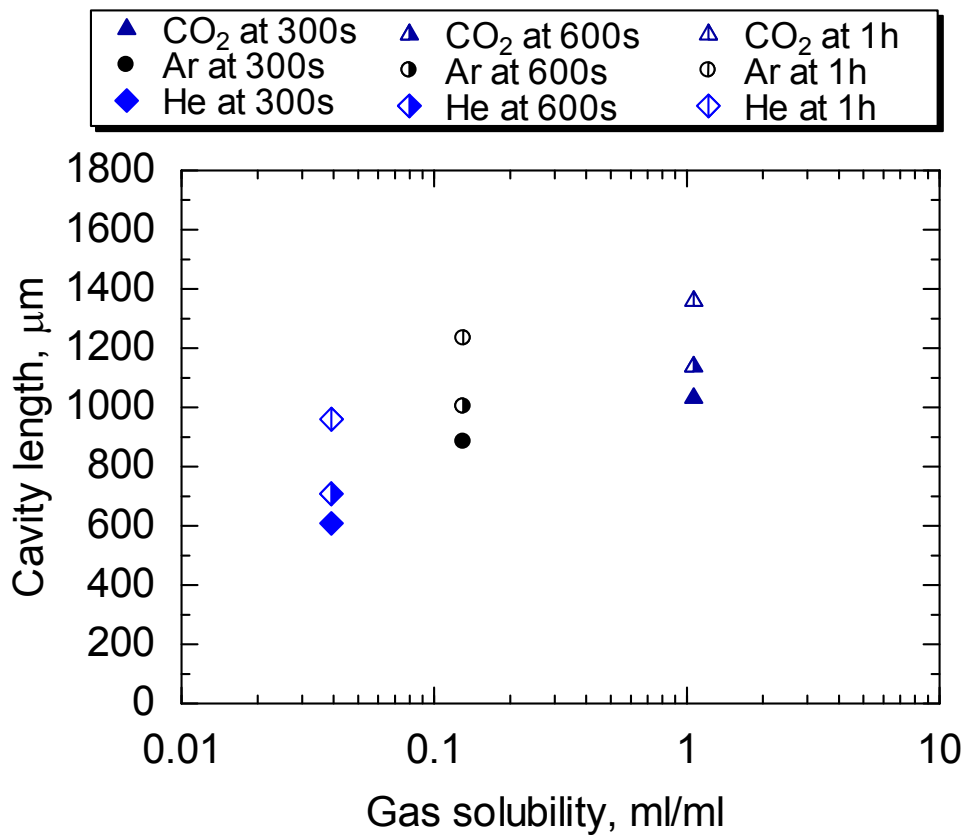


Fig.2.2-7 Relation between cavity length and gas solubility

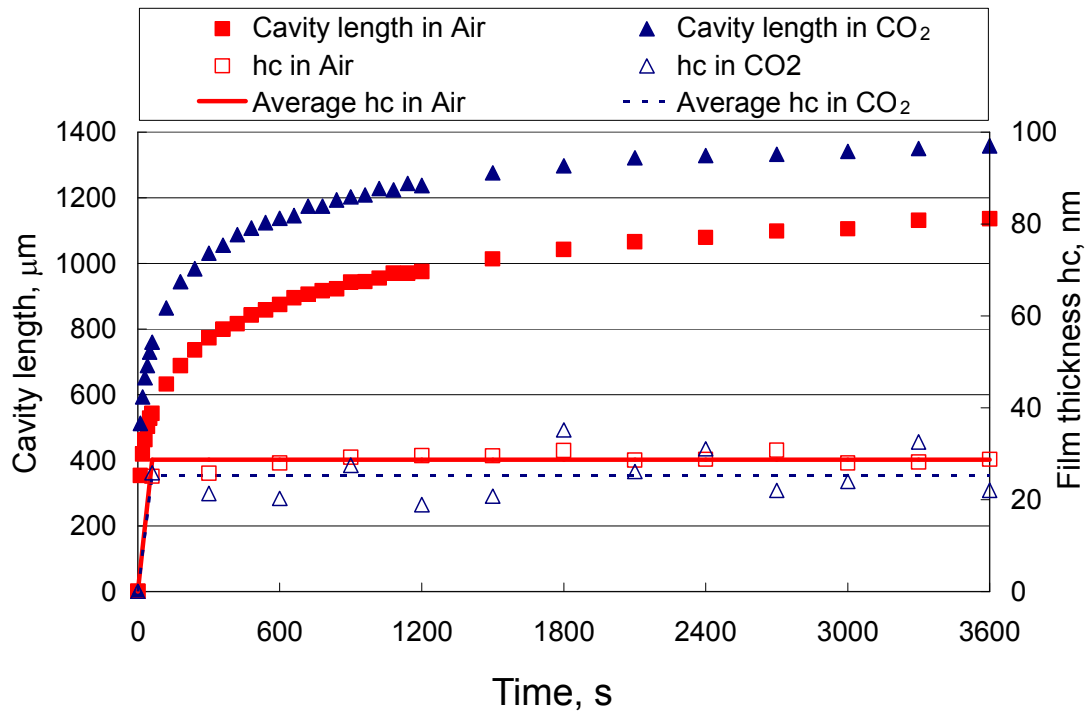


Fig.2.2-8 Relation between cavity growth and oil film thickness

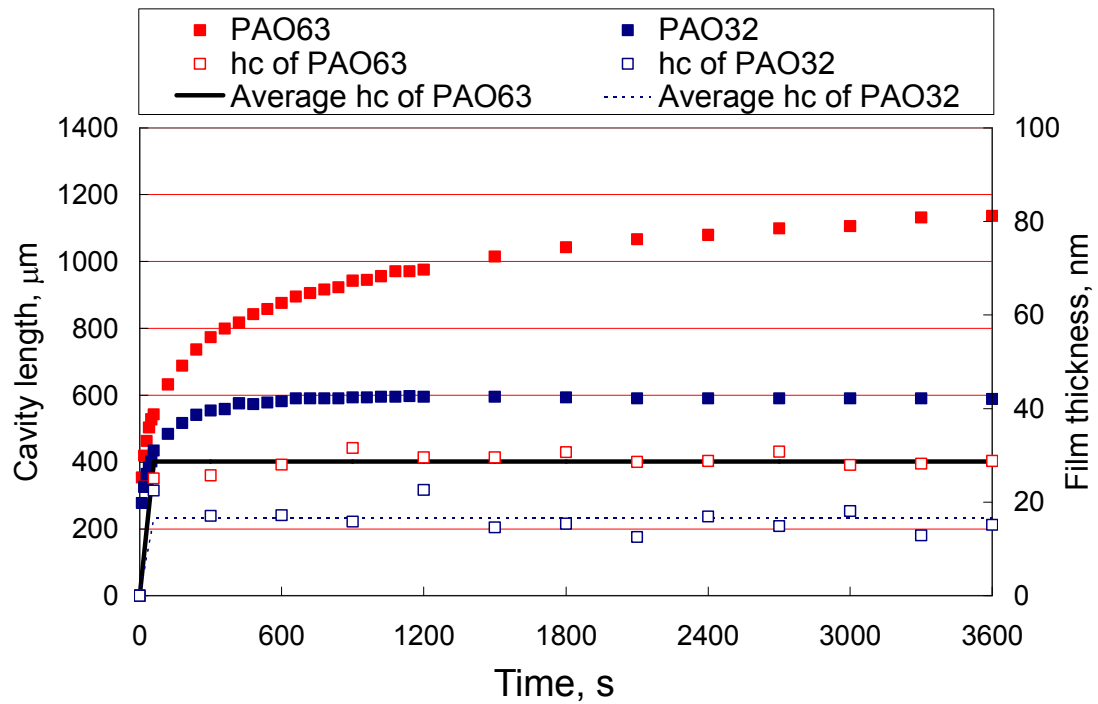


Fig.2.2-9 Effect of viscosity on cavity growth and oil film thickness

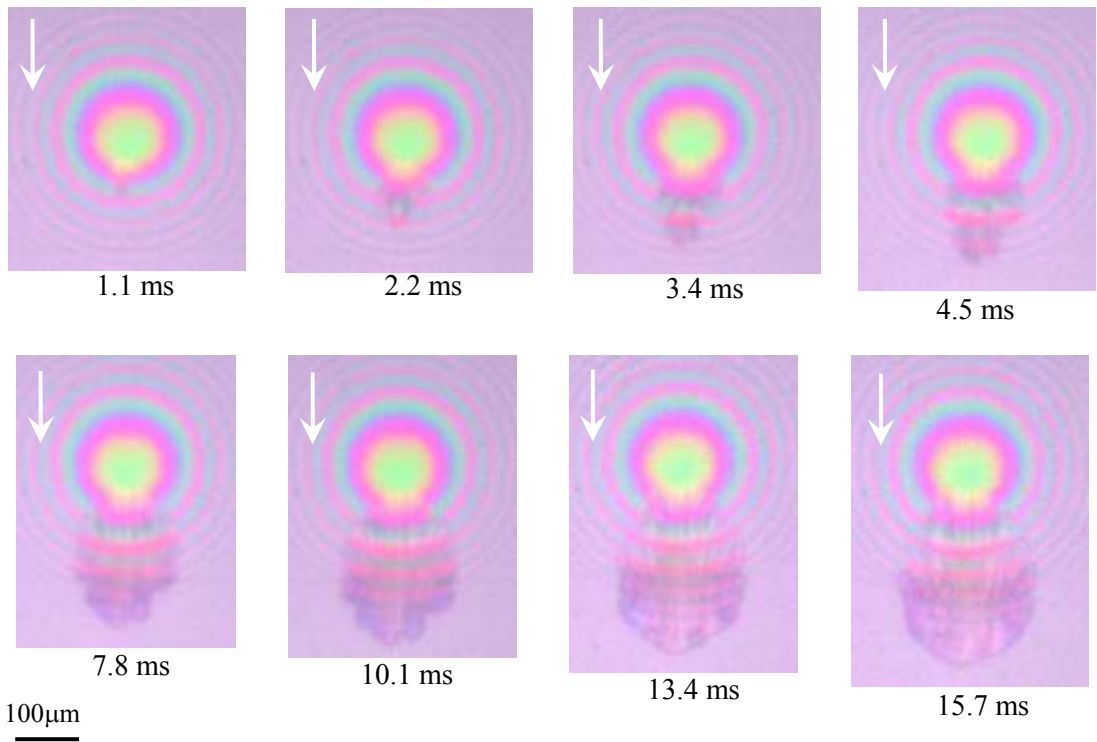


Fig.2.2-10 Photograph of cavity until 15.7 ms after the start

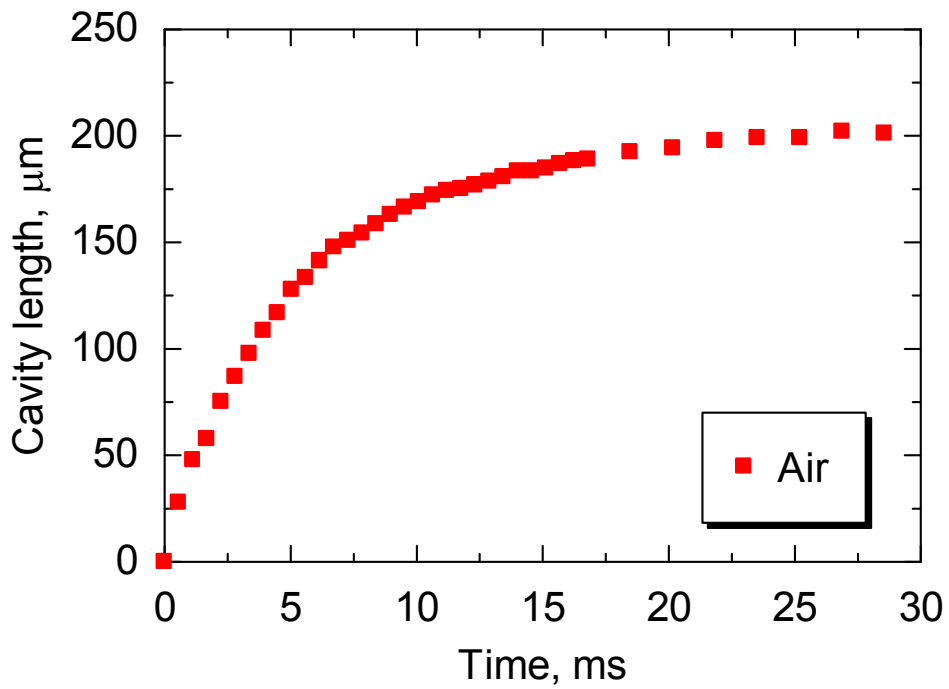


Fig.2.2-11 Cavity growth until 30 ms after the start

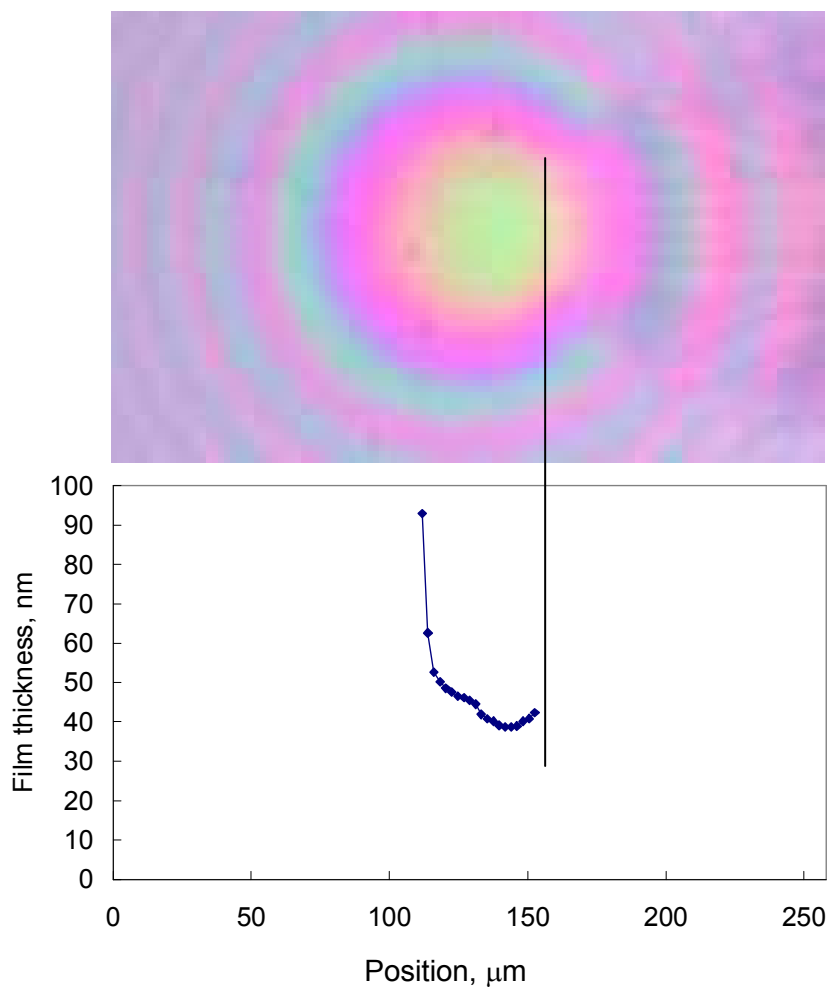


Fig.2.2-12 Relation between initiation of cavity and film thickness

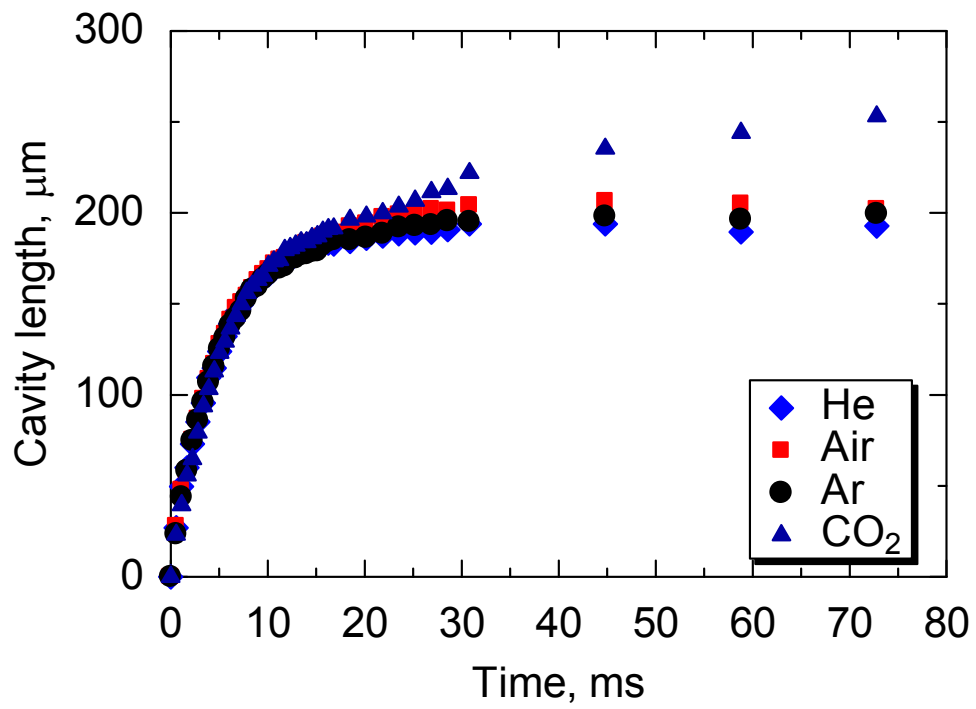


Fig.2.2-13 Changes in cavity length until 80 ms after the start

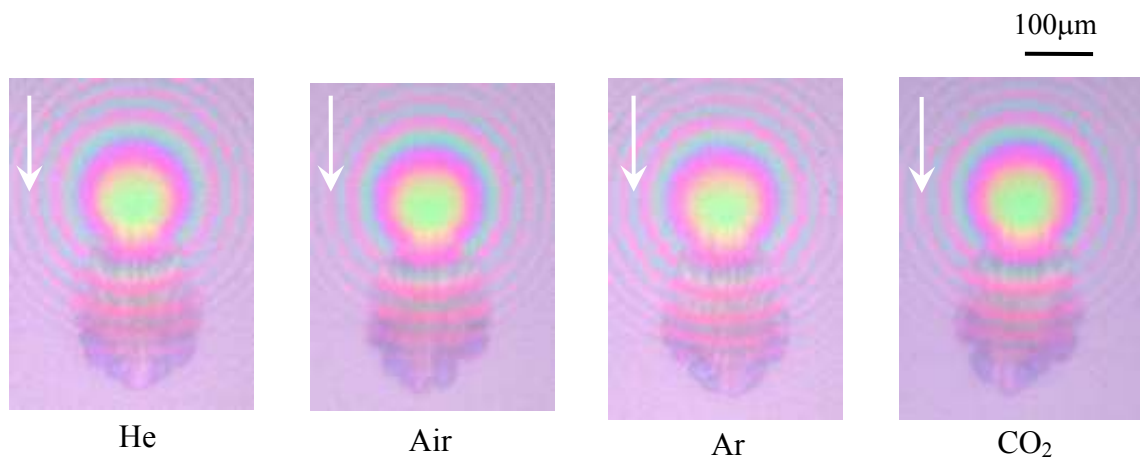


Fig.2.2-14 Photograph of cavity at 10 ms in various gases

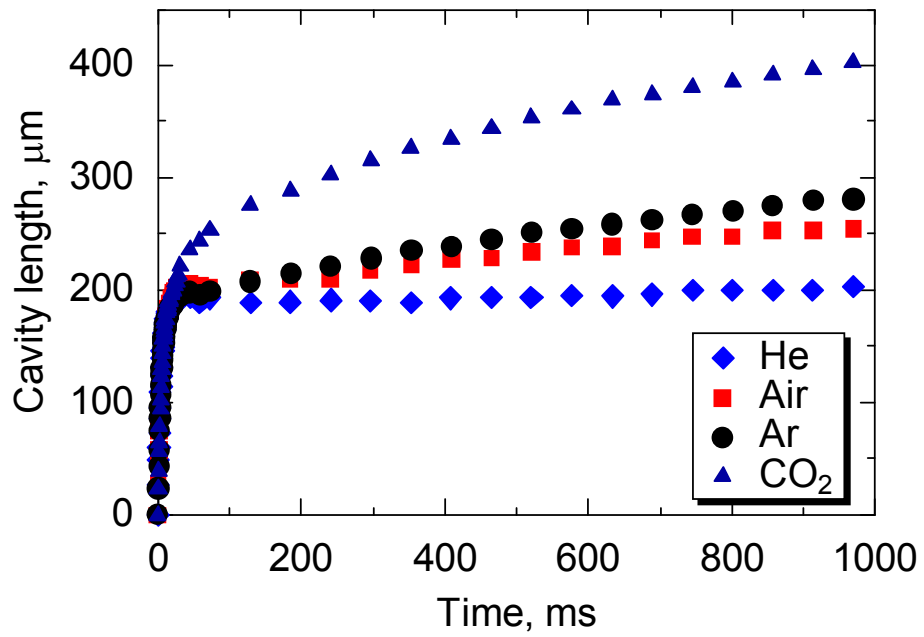


Fig.2.2-15 Changes in cavity length until 1 s after the start

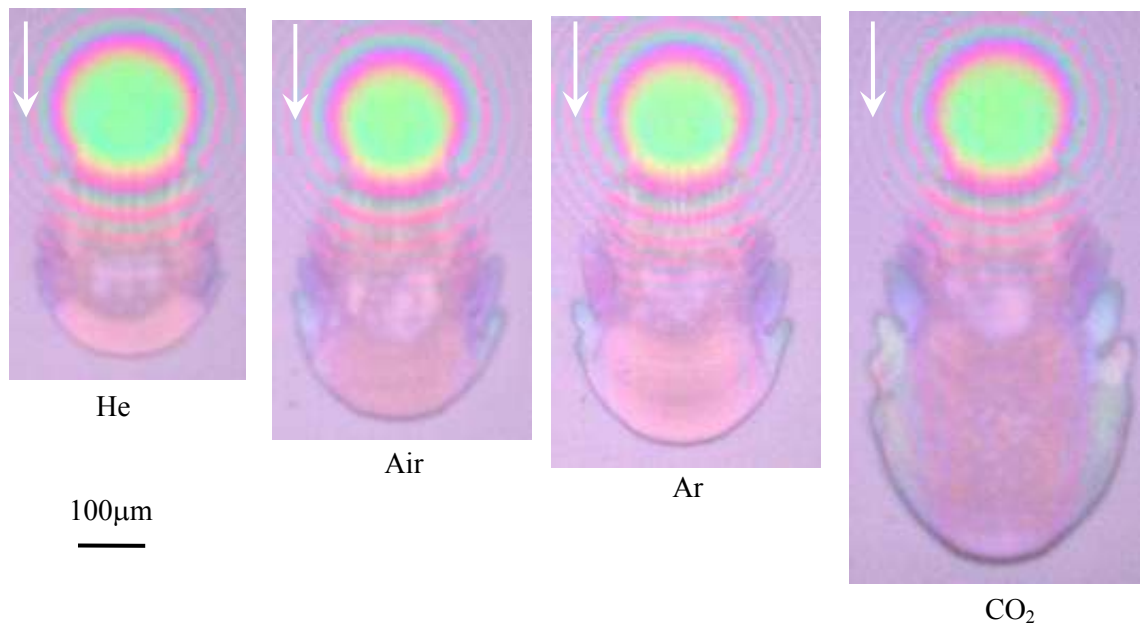


Fig.2.2-16 Photograph of cavity at 1 s in various gases

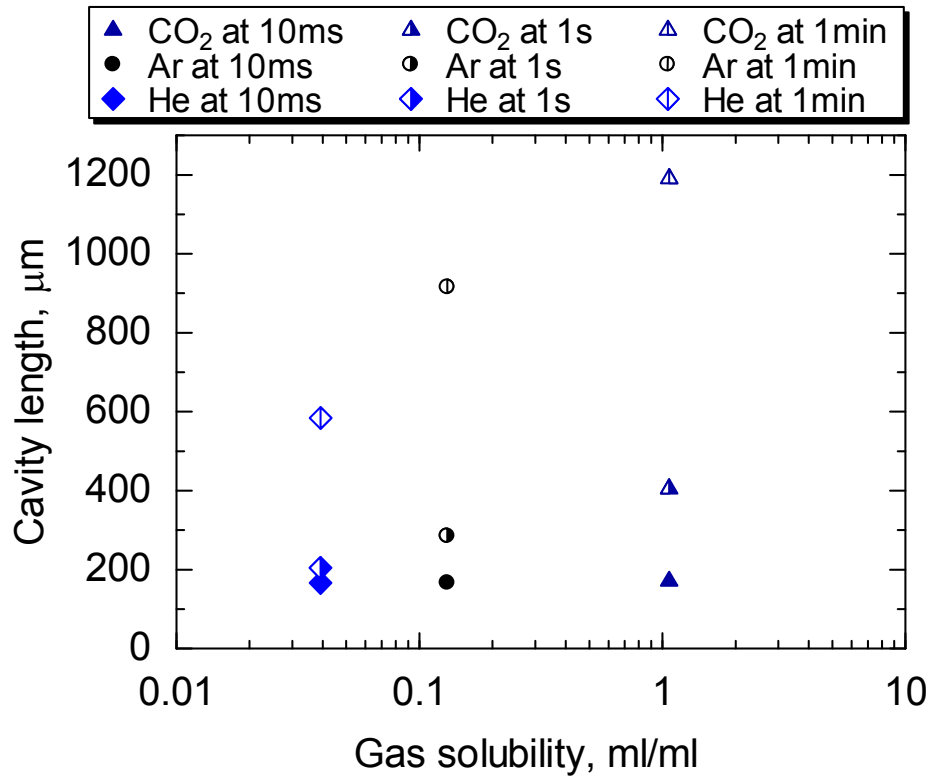


Fig.2.2-17 Relation between cavity length and gas solubility



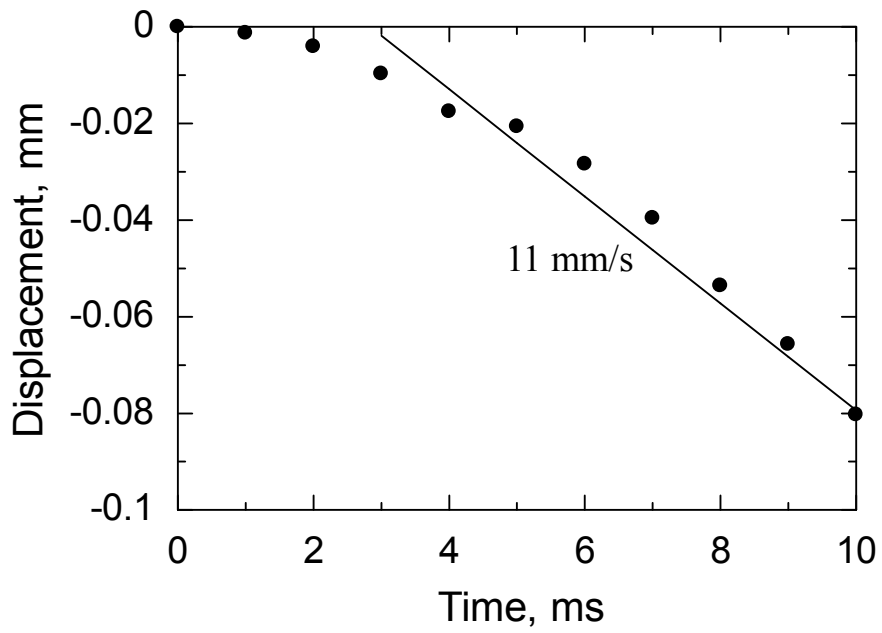


Fig.2.2-18 Changes in displacement between lens and disc

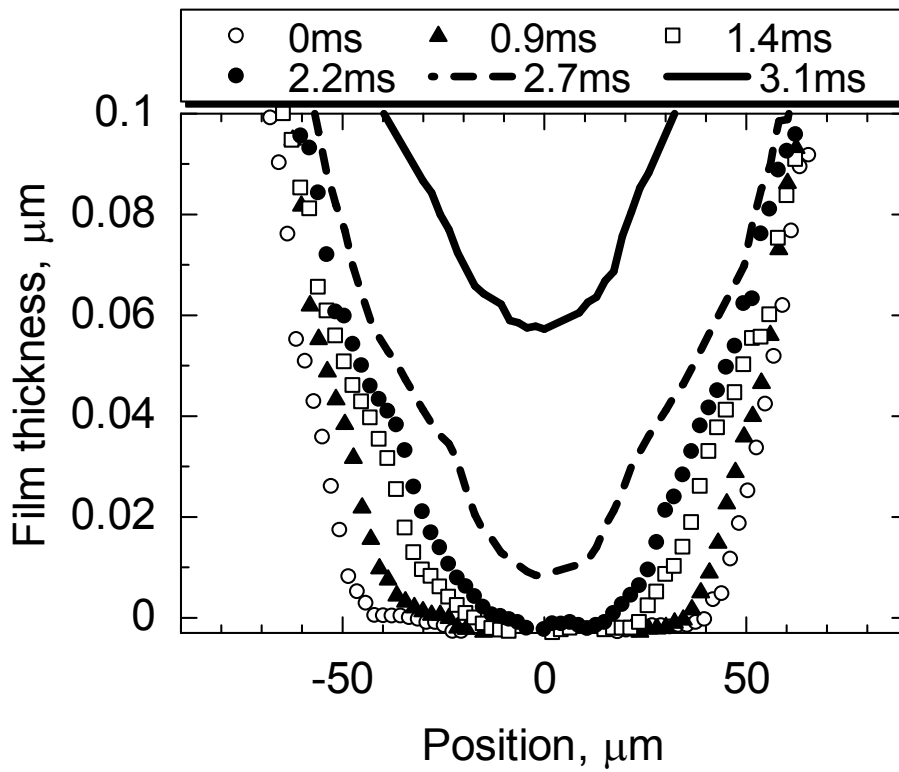


Fig.2.2-19 Changes in film profile between lens and disc with time

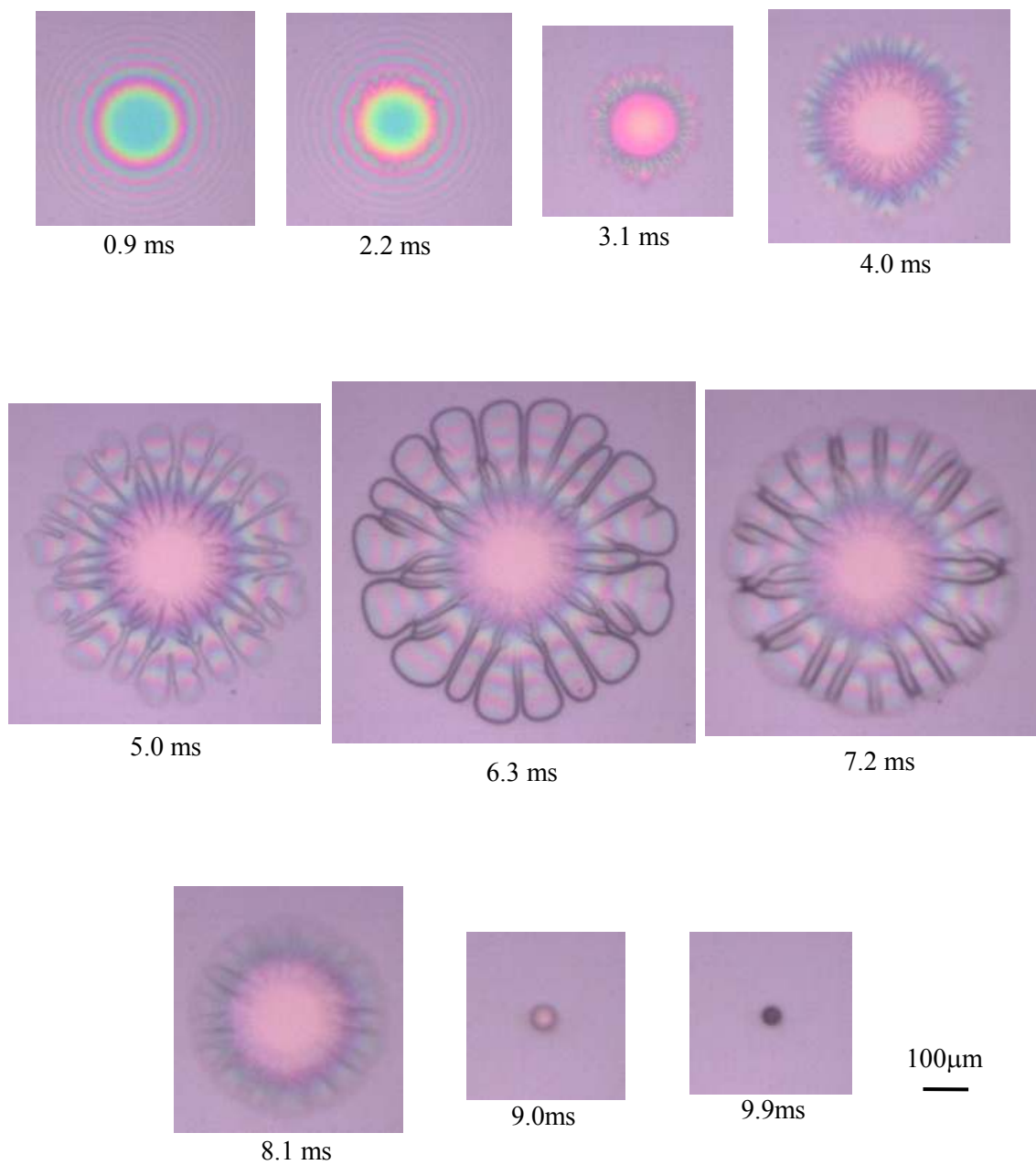


Fig.2.2-20 Cavity growth to 6.3 ms in separating test

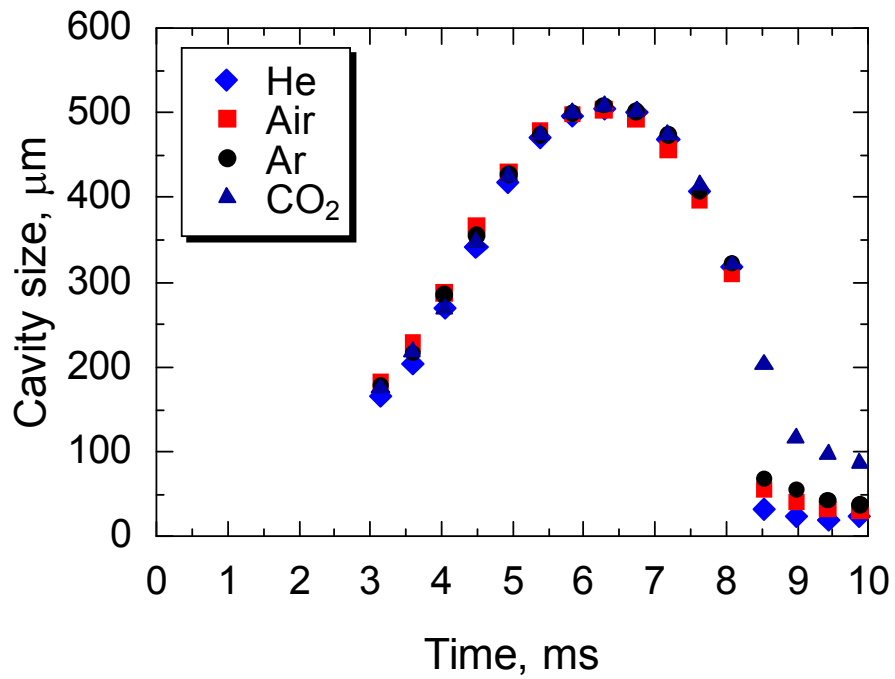


Fig.2.2-21 Changes in cavity size from the start to 10 ms

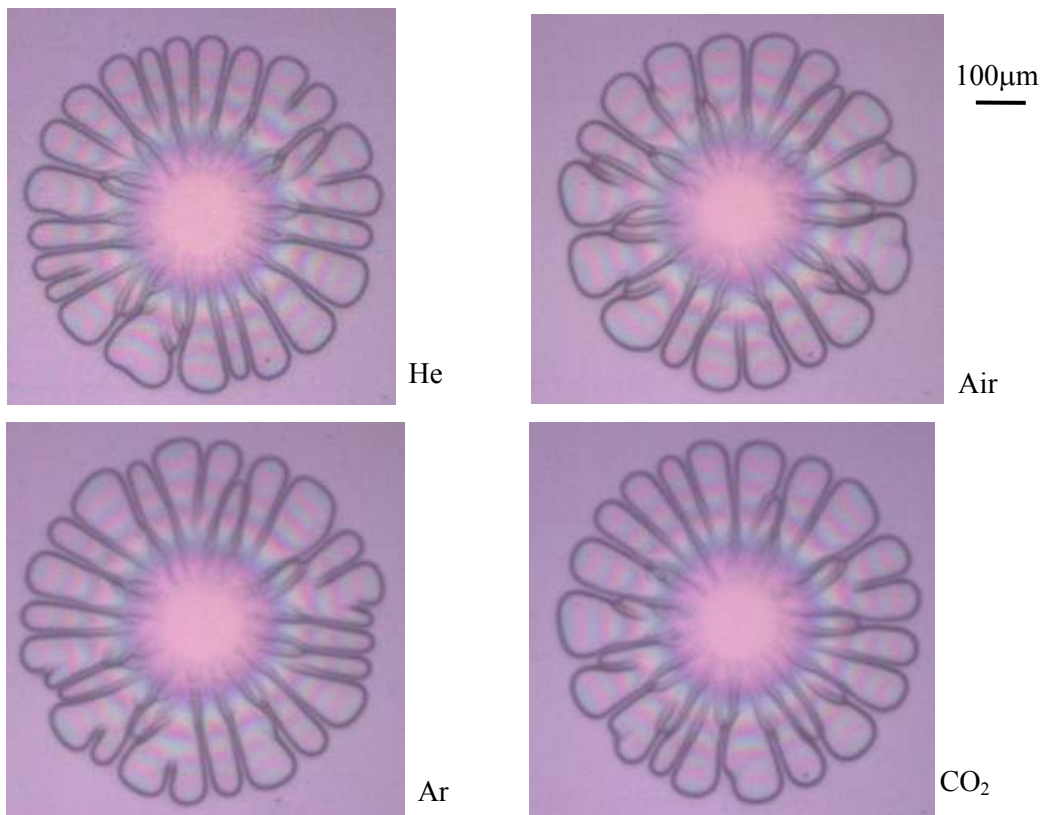


Fig.2.2-22 Cavity at 6.3 ms in various gases

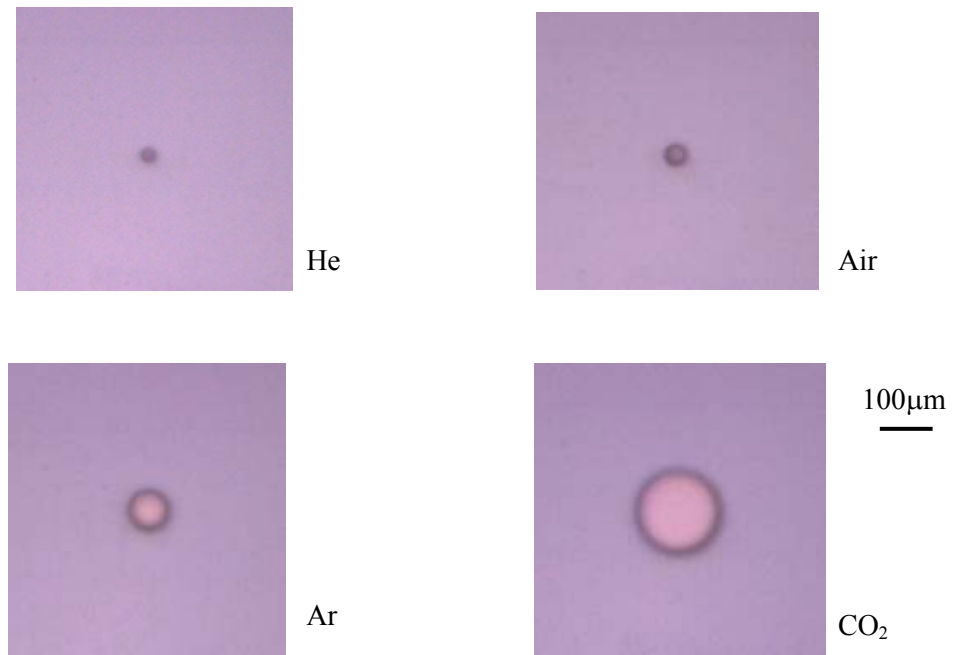


Fig.2.2-23 Bubble at 9.4 ms in various gases

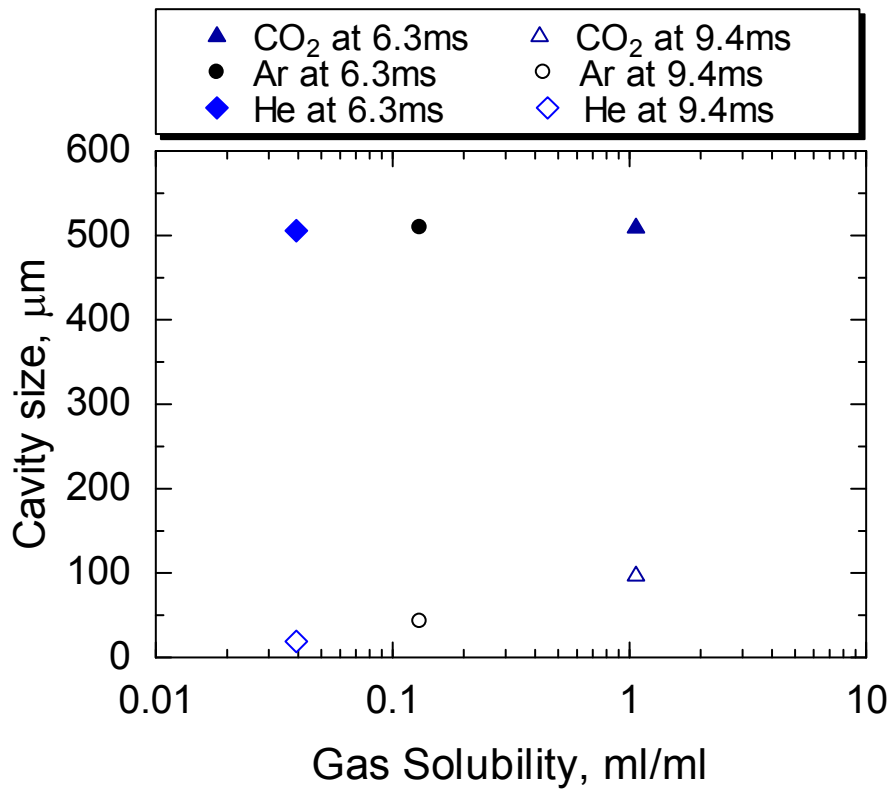


Fig.2.2-24 Relation between cavity size and gas solubility

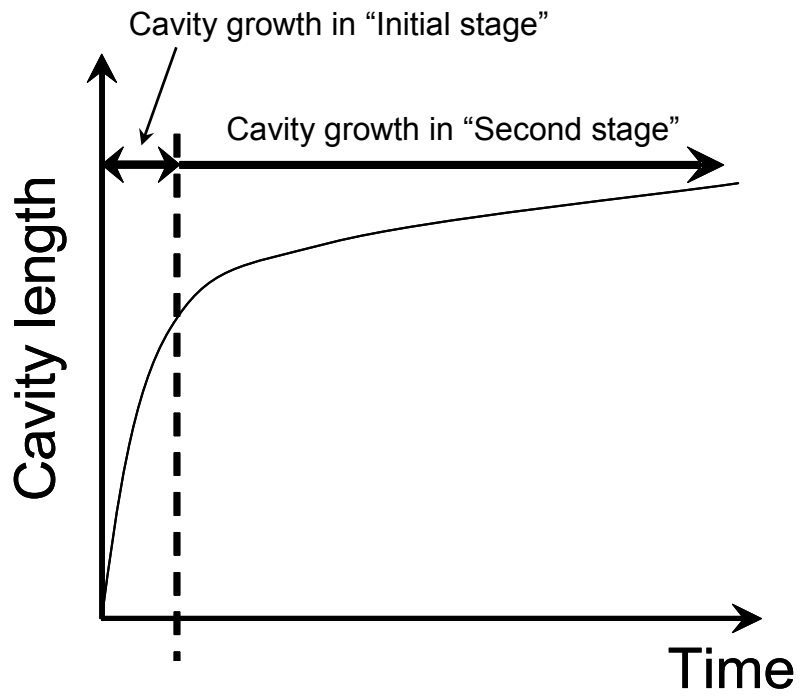


Fig.2.2-25 Cavity growth in two stages

## 2.3 滑り速度，潤滑油粘度のキャビティ成長へ与える影響

本節では，滑り速度，および，潤滑油粘度がキャビティ成長に及ぼす影響を調べた。

流体潤滑，弾性流体潤滑において，滑り速度，潤滑油粘度は，接触面間に形成される油膜厚さを決定する重要なパラメータの一つである．EHL の油膜厚さを求める推算式では，速度パラメータとして，整理されている<sup>1-3</sup>．この推算式を使用することにより，油膜厚さに対する速度，粘度の影響を簡易に検討できる．従って，キャビテーション領域に関しても，速度や粘度との関係を調べ，整理しておくことが，実用面では重要と考える．

本節での実験では，潤滑油に PAO を使用し，5 種類の粘度を使用した．また，滑り速度は，11-260 mm/s の間で変化させた．その結果，各成長段階において，潤滑油粘度と滑り速度のそれぞれの影響を調べた．

### 2.3.1 実験条件

本章で行った実験における各条件を以下に示す.

- ・潤滑油 : PAO, 動粘度 11, 17, 32, 63, 398 mm<sup>2</sup>/s @ 313 K  
潤滑油の粘度は, 第 2 章の Table 2.1 に示す.
- ・雰囲気 : 空気
- ・滑り速度 : 11 - 260 mm/s
- ・荷重 : 1 - 7 N, 最大ヘルツ接触圧 : 0.14 - 0.27 GPa
- ・温度 : 295 K

### 2.3.2 実験結果, および, 考察 —滑り速度の影響—

2.2 で示したように, キャビティの成長は, 2 段階で起こることが分かった. ここでは, それぞれの成長段階で結果を示し, その影響を整理することにする.

#### (1) Initial stage

Fig.2.3-1 に, 滑り速度を 20, 40, 80 mm/s と変化させた場合の, 発生から 15 ms におけるキャビティ長さの時間変化を示す. 潤滑油粘度は, 63 mm<sup>2</sup>/s, 荷重は 1 N とした. 荷重は, 設定した滑り速度で回転している状態で, 加えた. なお, この図において, 各滑り速度を示している.

この図より, 滑り速度の違いにより, キャビティの成長が異なることが明らかに分かる. 発生直後から, 滑り速度が大きいほど, キャビティ長さが長くなっている. また, すべての速度において, 発生直後のキャビティの成長速度は大きく, 急速に成長している. また, この時間における成長速度は, 滑り速度よりも少し高い値となっている. この急速な成長は, 滑り速度が 80 mm/s では, 3 ms まで見られるが, 20 mm/s では, 5 - 6 ms まで見られる. 従って, 急速な成長が起こる時間は, 滑り速度とともに短くなる. 急速な成長後, キャビティ長さの時間変化は小さくなる. その値は, 滑り速度よりも非常に小さい. 発生から 10 ms 後におけるキャビティ長さは, 滑り速度の影響を受け, 滑り速度が大きいものほど長くなる.

この時間で見られた急速なキャビティ成長は, Initial stage での成長過程である. 従って, Initial stage における成長速度は, 滑り速度とともに大きくなり, 成長後の長さも滑り速度が大きいほど長くなることが分かった.

## (2) Second stage

Fig.2.3-2 に、滑り速度を 20, 40, 80 mm/s と変化させた場合の、開始から 1 h までのキャビティ長さの変化を示す。潤滑油粘度は、63 mm<sup>2</sup>/s, 荷重は 7 N であった。

この図より、キャビティの成長は、滑り速度の影響を受け、この時間において、キャビティ長さは、滑り速度が大きいほど、長くなることが分かる。これは、(1) Initial stage での結果と同様の傾向であり、Fig.2.3-1 における滑り速度とキャビティ長さの関係を引き継ぎ、その後の時間においても、滑り速度が大きい条件ほど、キャビティが長くなっている。すべての条件において、開始後すぐのキャビティの長さの変化は大きく、時間経過とともに、その長さの時間変化は小さくなっていく。開始から 1 h 後の長さの変化は、どの条件においても初期に比較して小さいが、80 mm/s の方が 20 mm/s のものより大きい。

### 2.3.3 実験結果、および、考察 —潤滑油粘度の影響—

ここでも、それぞれの成長段階で結果を示し、その影響を整理することにする。

#### (1) Initial stage

Fig.2.3-3 に、5 種類の潤滑油粘度における、発生から 10 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す。すべての実験において、滑り速度は 20 mm/s, 荷重は 1 N である。荷重は、20 mm/s で回転している状態で、加えた。Fig.2.3-4 には、発生から 45 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す。

Fig.2.3-3 より、発生から 1 ms におけるキャビティ長さは、各粘度条件によって、Fig.2.3-1 の滑り速度の影響で見られたほどの差は見られない。PAO63 と PAO400 では、発生から約 2.2 ms までのキャビティ長さが、ほぼ等しいことが分かる。また、急速に成長している時間では、すべての条件において、成長速度が滑り速度 20 mm/s より高くなっている。その後、時間経過とともに、急速なキャビティの成長は見られなくなり、キャビティの成長速度は小さくなる。急速な成長が継続される時間は、粘度によって異なり、粘度が高いものほど、その時間が長くなる。Fig.2.3-4 より、PAO400 では、約 15 ms まで続いている。また、約 30 ms 後のキャビティ長さは、明らかに粘度の影響を受け、粘度が大きいものほど長くなる。

#### (2) Second stage

Fig.2.3-5 に、4 種類の潤滑油粘度における発生から 1 h までのキャビティ長さの変化を示す。すべての実験において、滑り速度は 20 mm/s, 荷重は 7 N である。



この図より、開始後 10 s から、キャビティー長さには粘度の影響が見られ、潤滑油の粘度が高いものほど、キャビティー長さが長いことが分かる。従って、Fig.2.3-4 に示される Initial stage 成長後のキャビティー長さとの関係と同様である。すべての条件において、実験開始後のキャビティー長さの時間変化は大きいですが、時間経過とともに、その時間変化は小さくなる。また、約 1 h 後における長さの変化量は、粘度が高いものほど、大きくなっている。

#### 2.3.4 まとめ

本節において、滑り速度、潤滑油粘度のキャビティー成長へ及ぼす影響を調べ、以下の結果が得られた。

##### (1)滑り速度の影響

Fig.2.3-6 に、キャビティー成長への滑り速度の影響を示す。発生直後の急速な成長を示す 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、滑り速度が大きいほど、長くなる。Initial stage 後の成長過程である Second stage では、キャビティー長さは、滑り速度が大きいほど長くなる。

##### (2)潤滑油粘度の影響

Fig.2.3-7 に、キャビティー成長への潤滑油粘度の影響を示す。Initial stage において、成長後のキャビティー長さは、粘度が高いほど、長くなる。発生直後の成長速度は、粘度の影響が小さい。Second stage では、キャビティー長さは、粘度が高いほど長くなる。

#### (参考文献)

- 1 Dowson, D. and Higginson, G.R., *Elastohydrodynamic Lubrication*, Pergamon Press, Oxford, 1977
- 2 HAMROCK, B.J. and DOWSON, D., *Ball Bearing Lubrication*, John Wiley & sons, 1981
- 3 Spikes, H.A., "Sixty years of EHL", *LUBRICATION SCIENCE*, 18, 2006, 265-291

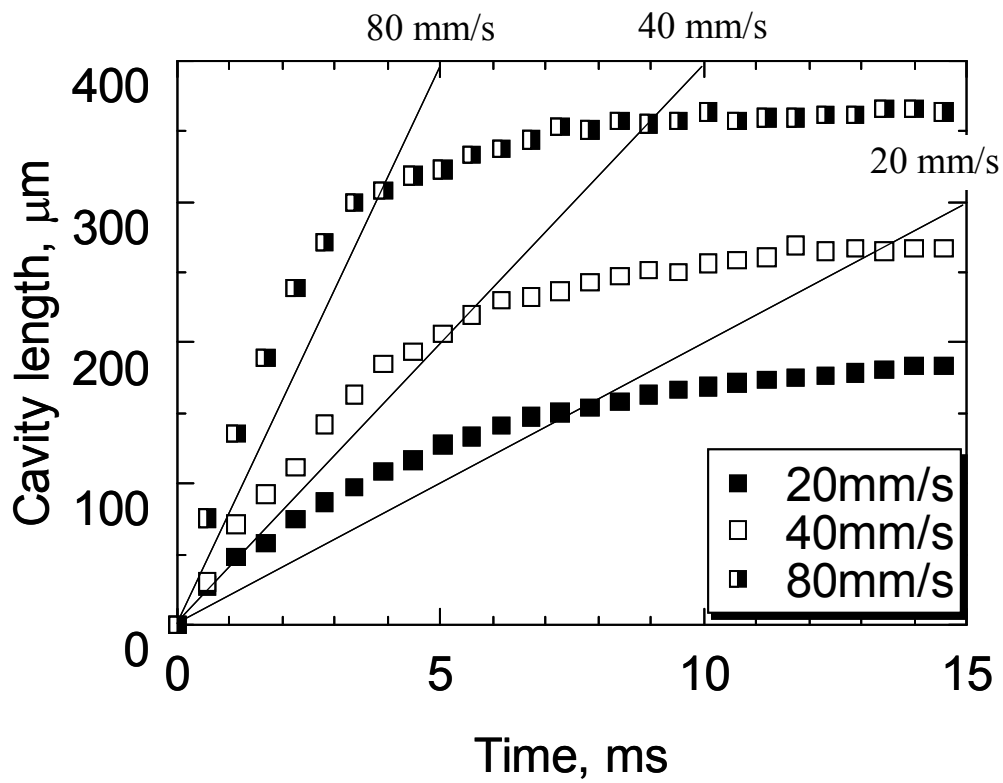


Fig.2.3-1 Changes in cavity length from the start to 15 ms in various sliding speed conditions

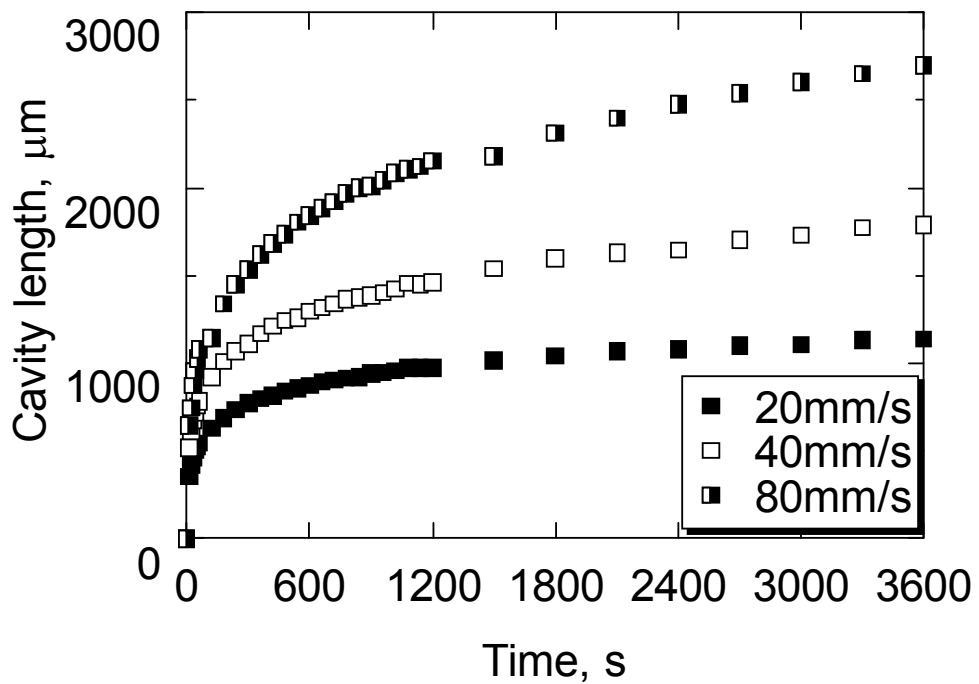


Fig.2.3-2 Changes in cavity length from the start to 1 h in various sliding speed conditions

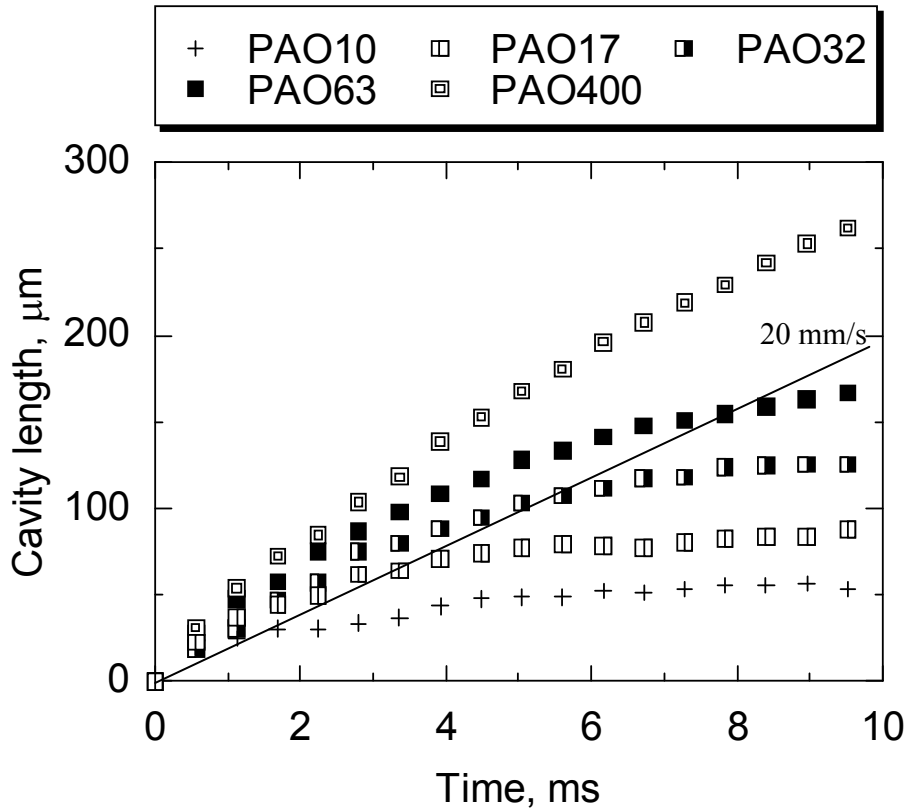


Fig.2.3-3 Changes in cavity length from the start to 10 ms in various viscosity conditions

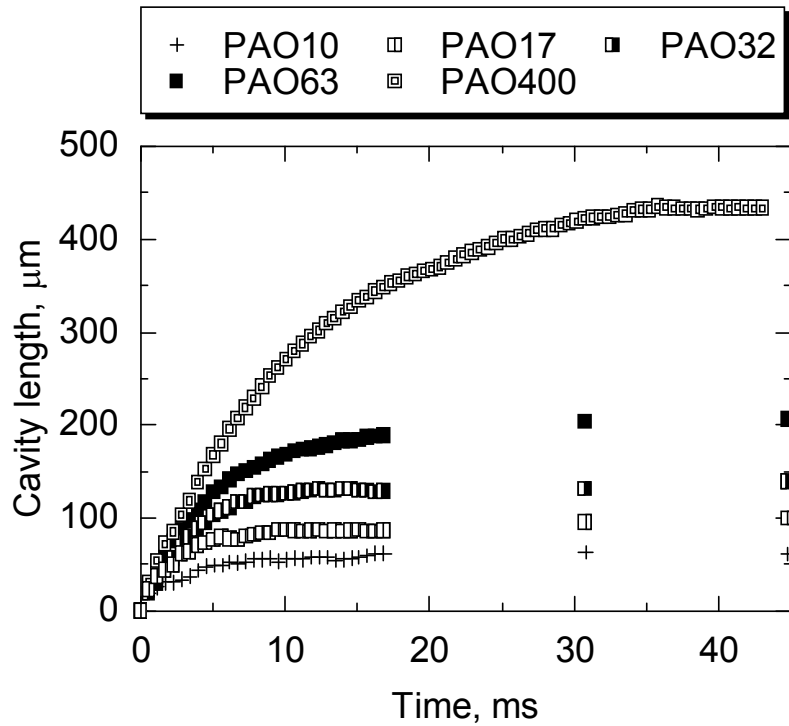


Fig.2.3-4 Changes in cavity length from the start to 40 ms in various viscosity conditions

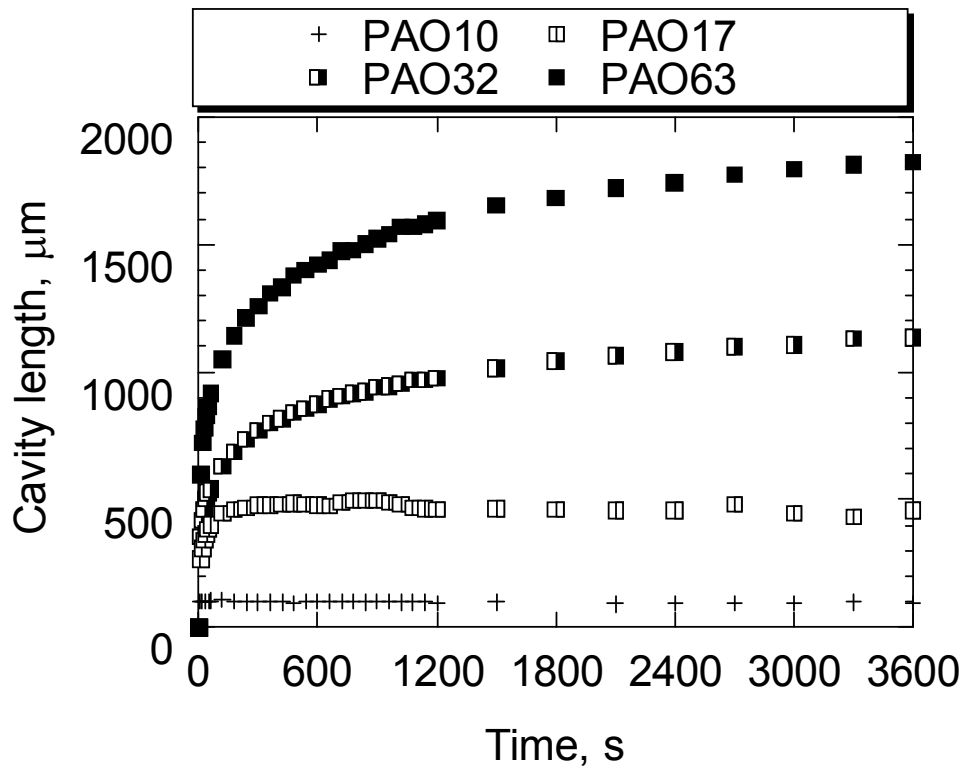


Fig.2.3-5 Changes in cavity length from the start to 1 h in various viscosity conditions

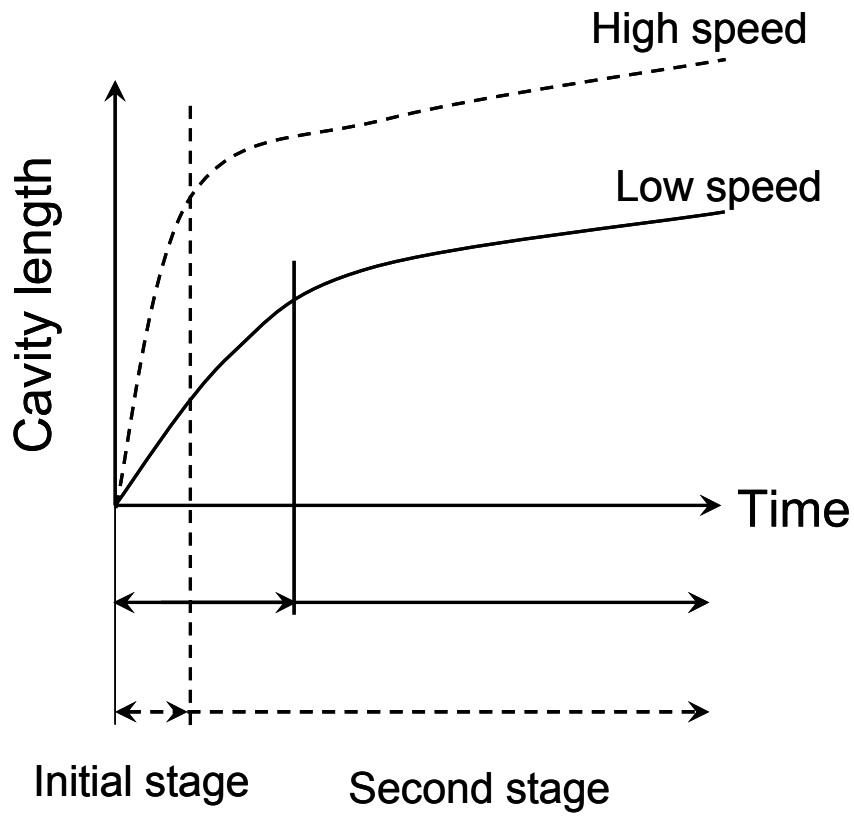


Fig.2.3-6 Effect of sliding speed on cavity growth

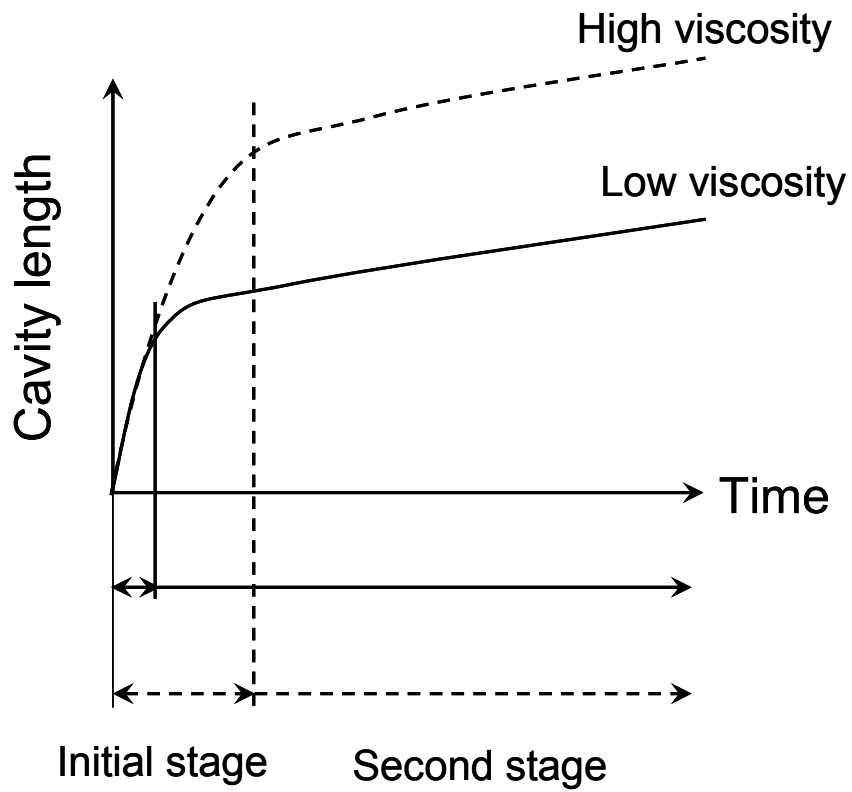


Fig.2.3-7 Effect of sliding speed on cavity growth

## 2.4 雰囲気温度のキャビティー成長へ与える影響

本節では、雰囲気温度がキャビティー成長に及ぼす影響を調べた。

雰囲気温度は、潤滑油の粘度の変化、酸化劣化の促進などに影響を与え、その結果、流体潤滑、弾性流体潤滑、境界潤滑における潤滑性能が変化する<sup>1</sup>。また、温度は、分子運動速度と関係するため、表面での分子の吸着状態<sup>2</sup>を変化させ、境界潤滑膜に影響を及ぼす。また、高温雰囲気では、潤滑面上の油は拡がり、場合によっては蒸発が起こるため、油量の変化が生じる<sup>3</sup>、一方で、低温では、潤滑油の粘度増加や固化が起こる。このように、潤滑部の設計の際に、雰囲気温度は、重要な雰囲気条件の一つと考えられる。

これまでの実験において、キャビティーの成長は、潤滑油中に含まれる溶解気体の影響を強く受けることが分かった。一般に、潤滑油中への気体の溶解現象は、温度の影響を受け、気体の溶解量は温度によって変化することが分かっている<sup>4</sup>。また、溶解気体のキャビティー内への析出現象も、相変化の一つであるので、温度の影響を受けると予想される。従って、キャビティー成長と、雰囲気温度の関係を整理することが必要となる。これによって、雰囲気温度が変化するような条件下において、キャビテーション領域の推測が可能になると考えられる。

本節での実験では、潤滑油に PAO を使用し、295、350 K の 2 つの温度条件を設定した。また、2.3 で明らかになったように、キャビティー成長は潤滑油粘度の影響を受ける。従って、本実験では、粘度の及ぼす影響を除くために、各温度において、潤滑油粘度が一致するようにし、温度の影響のみを対象とした。

#### 2.4.1 実験条件

本章で行った実験における各条件を以下に示す.

- ・潤滑油 : PAO, 動粘度 11,  $63 \text{ mm}^2/\text{s}$  @ 313 K
- ・雰囲気 : ヘリウム, 空気, アルゴン, 二酸化炭素
- ・滑り速度 : 62.5 - 137 mm/s
- ・荷重 : 1 - 7 N, 最大ヘルツ接触圧 : 0.14 - 0.27 GPa
- ・温度 : 295, 350 K

なお, PAO10 の 295 K における粘度, および, PAO63 の 350 K における粘度は, 約  $0.017 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  とほぼ一致している. 295 K では PAO10 を, 350 K では PAO63 を潤滑油として使用することにより, 両雰囲気温度における, 粘度を一定にすることができる.

雰囲気気体の PAO への溶解度の測定結果を Fig.2.4-1 に示す. 測定方法は, 第 3 章 3.3.2 にて示す. 気体の種類によって, 溶解度の温度依存性が異なる. ヘリウム, アルゴンでは, 溶解度は温度ともに上昇するが, 二酸化炭素では, 溶解度は温度とともに低下している. この溶解度と温度の関係については, 後述の 2.4.2 で詳しく述べる.

チャンバ内の温度の制御は, チャンバ側面に取り付けたバンドヒータの加熱を制御することによって行った. チャンバ内温度は, チャンバ内に挿入した熱電対によって測定した.

なお, 実験の手順は, 2.1.4 (2)で述べた通りである. まず, 予め真空引きを行い, その後, ガスを大気圧まで導入する. 真空引き時のチャンバ内圧力は, 5 Pa であった. この状態で, チャンバ内を設定温度まで加熱する. 設定温度に達した後, 実験を開始した.

## 2.4.2 溶解度の温度特性<sup>5-7</sup>

Fig.2.4-1により、アルゴン、ヘリウムでは、温度とともに潤滑油への溶解度が高くなり、二酸化炭素では、温度とともに溶解度が低くなることから分かる。ここでは、各気体の潤滑油への溶解度と温度の関係について考察する。

この温度依存性は、ヘンリー定数から、以下のように理解できる。ヘンリーの法則は、気液の相平衡を基にして考えられ、気体の溶解量と分圧の関係を示したものである。従って、気相側の気体*i*の化学ポテンシャル $\mu_i^V$ と液相内に溶解した気体*i*の化学ポテンシャル $\mu_i^L$ が等しく(式(2.4.2-1))、平衡状態となっているという条件の下で導かれる。

$$\mu_i^V = \mu_i^L \quad (2.4.2-1)$$

$\mu_i^V$  : 気相側の気体*i*の化学ポテンシャル,  $\mu_i^L$  : 液相側の気体*i*の化学ポテンシャル

それぞれの化学ポテンシャルは、以下のように示される。理想状態との差を考慮し、 $\mu_i^V$ は、フガシチーで表され、 $\mu_i^L$ は、活量で表される。

$$\begin{aligned} \mu_i^V(T, p, y_i) &= \mu_{i,ref}^V(T) + RT \ln f_i \\ &= \mu_{i,ref}^V(T) + RT \ln py_i \phi_i^V \end{aligned} \quad (2.4.2-2)$$

$\mu_{i,ref}^V$  : 標準状態における気相側の気体*i*の化学ポテンシャル,  $R$  : 気体定数,  $T$  : 系の温度,  $p$  : 系の圧力,  $y_i$  : 気体*i*のモル分率,  $\phi_i^V$  : フガシチー係数

$$\begin{aligned} \mu_i^L(T, p, x_i) &= \mu_{i,ref}^L(T) + RT \ln a_i \\ &= \mu_{i,ref}^L(T) + RT \ln \gamma_i x_i \end{aligned} \quad (2.4.2-3)$$

$\mu_{i,ref}^L$  : 標準状態における液相側の気体*i*の化学ポテンシャル,  $x_i$  : 気体*i*の濃度,  $\gamma_i$  : 活量係数

式(2.4.2-1)に、上の2つの式を代入し整理すると、以下のようなになる。

$$\ln \left( \frac{py_i \phi_i^V}{x_i \gamma_i} \right) = \frac{\mu_{i,ref}^L - \mu_{i,ref}^V}{RT} \quad (2.4.2-4)$$

また、上の式を整理すると、以下のようなになる。

$$\frac{py_i \phi_i^V}{x_i \gamma_i} = \exp \left( \frac{\mu_{i,ref}^L - \mu_{i,ref}^V}{RT} \right) \quad (2.4.2-5)$$

ここで、式(2.4.2-5)の右辺は、標準状態における各相での化学ポテンシャルの差と温度の関数とな



る。これをヘンリー定数  $H$  として、以下のように定義する。

$$H(T, p) = \exp\left(\frac{\mu_{i,ref}^L - \mu_{i,ref}^V}{RT}\right) = \exp\left(\frac{\Delta\mu_{i,ref}}{RT}\right) \quad (2.4.2-6)$$

ここで、系の圧力が低圧(2 気圧以下)で、希薄溶液と考えられるならば、フガシチー係数  $\phi_i^V$ 、および、活量係数  $\gamma_i$  は 1 となり、式(2.4.2-5)は、ヘンリー定数  $H$  を考慮して、以下の式で示される。なお、モル分率  $y_i$  と系の圧力  $p$  の積は、分圧  $p_i$  である。これは、ヘンリーの法則として、知られている式である。

$$p_i = Hx_i \quad (2.4.2-7)$$

次に、温度の関数であるヘンリー定数から、溶解現象の温度依存性を検討してみる。

まず、化学ポテンシャルは、1 モルあたりのギブスエネルギーであるので、モル数  $n$  とすれば、以下のように表される。

$$\Delta\mu = \frac{\Delta G}{n} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{n} \quad (2.4.2-8)$$

$G$ : ギブスエネルギー,  $H$ : エンタルピー,  $S$ : エントロピー,  $n$ : 系のモル数

式(2.4.2-6)を、式(2.4.2-8)を考慮し、温度で微分すると、以下ようになる。

$$\frac{\partial \ln H(T, p)}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\Delta\mu_{i,ref}}{RT} \right) = \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{1}{n} \frac{\Delta H - T\Delta S}{RT} \right) = -\frac{1}{n} \frac{\Delta H}{RT^2} \quad (2.4.2-9)$$

この式より、溶解におけるエンタルピー変化  $\Delta H$  によって、溶解度の大きさを示すヘンリー定数が決まることが分かる。溶解前後でのエンタルピー変化は、その過程が発熱過程であるか、吸熱過程であるかを示している。すなわち、以下ようになる。

- $\Delta H > 0$  の条件では、溶解過程において、周囲から熱を奪い、エンタルピーを増加させている。式(2.4.2-9)より、この条件では、ヘンリー定数は温度とともに小さくなる。従って、気体の溶解度は、温度とともに増加していく。
- $\Delta H < 0$  の条件では、溶解過程において、周囲に熱を放出し、エンタルピーを減少させている。式(2.4.2-9)より、この条件では、ヘンリー定数は温度とともに大きくなる。従って、気体の溶解度は温度とともに減少していく。

また、エントロピー変化も、溶解度の温度依存性と関係するが、ここでは省略する。

このように、気体の溶解度の温度特性は、溶解に伴うエンタルピー変化の違いによって変化する。この溶解現象におけるエンタルピー変化には、液体分子と気体分子間の相互作用が関係している。一

般的に、この分子間相互作用力は、Hildebrand によって提唱された溶解度パラメータ  $\delta$  によって、評価される<sup>5</sup>。溶解度パラメータは、式(2.4.2-10)で示される。この式では、蒸発エネルギーが利用されているが、これは分子間力に起因している(分子間力の弱い結合ほど、低温で蒸発できることから理解できる)。なお、蒸発エネルギーは、測定が比較的容易なことから、利用されている。また、このパラメータを使用した溶解度を求める方法も提案されている<sup>5</sup>。

$$\delta = \left( \frac{\Delta U_{\text{vaporization}}}{V} \right)^{0.5} = c^{0.5} \quad (2.4.2-10)$$

$\Delta U_{\text{vaporization}}$  : 蒸発エネルギー,  $V$  : 分子容,  $c$  : 凝集エネルギー密度

溶媒の液体分子と溶質の気体分子の溶解度パラメータが近いと、溶解し、混合するためのエネルギー障壁が小さいことになり、溶解量が大きくなる。このとき、エンタルピー変化  $\Delta H$  は小さい(正の値)。また、溶解した気体は、液体の中でエネルギー的に安定となるために、溶解した状態を維持できる。このとき、液体と気体の分子間力の方が高くなるような場合では、エンタルピー変化  $\Delta H$  は負の値となる<sup>8</sup>。

一方で、溶解度パラメータの差が大きいと、溶解する際に対するエネルギー障壁が大きいため、溶解しにくくなる。従って、この場合、周囲の温度が上昇することによって、溶解度は大きくなる。このとき、溶解におけるエンタルピー変化  $\Delta H$  は大きい(正の値)。

ここまでの議論から、Fig.2.4-1 の溶解度の温度特性を検討してみる。

ヘリウム、アルゴンでは、温度とともに溶解度が増加するので、溶解におけるエンタルピー変化  $\Delta H$  は正の値となる。従って、気体では、周囲の熱を吸収し、液体への溶解が起こる。温度が高くなると、気体の分子運動が高まるため、溶解におけるエネルギー障壁を越えやすくなり、多くの気体が潤滑油中へ溶解する。

二酸化炭素では、温度とともに溶解度が減少するので、溶解におけるエンタルピー変化  $\Delta H$  は負の値となる。従って、気体は溶解し、液体と相互作用するときに、周囲に熱を発する。温度が高くなると、分子運動が高まり、溶解している気体は、液体との相互作用から抜け出しやすくなり、気体の溶解量は少なくなる。Fig.2.4-2 には、各気体の Lennard-Jones 分子間力を示す。二酸化炭素の分子間の引力が、アルゴン、ヘリウムよりも強いことが分かる。異種の2つの分子同士の相互作用力は、それぞれの分子間相互作用力の平均と見積もれる<sup>8</sup>。従って、溶液である PAO の分子間力(気体よりも分子間力は高いと予想できる)と、二酸化炭素の分子間相互作用が、他の気体の場合よりも大きくなることが推測できる。また、二酸化炭素は、分子中に炭素、酸素を含む気体であり、潤滑油の構成分子である炭素や水素との化学的相互作用が強くなることが考えられる。そのため、溶解時の液体との相互

作用力が強くなり、エンタルピー変化が負の値になったと推測できる。

### 2.4.3 実験結果, および, 考察

#### (1) アルゴン中におけるキャビティの成長の観察

まず、アルゴン中での実験結果を基に、雰囲気温度の影響を述べる。

Fig.2.4-3 に、アルゴン中の 295, 350 K における、発生から 4.5 ms までのキャビティの画像を示す。Fig.2.4-4 は、2つの温度条件における、発生から 10 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す。この図の中に、滑り速度を直線で示している。この実験において、滑り速度は 62.5 mm/s, 荷重は 1 N であった。荷重は、設定した滑り速度で回転している状態で、加えた。

Fig.2.4-3 より、1.1 ms の画像において、キャビティの発生が見られ、その後急速に成長している。1.1 ms において、キャビティは、接触部出口全体からではなく、一部分で長くなった特異的な形状をしている。その後、4.5 ms には、キャビティ後端は、滑らかな界面を持った形状へと変化する。この時間域におけるキャビティの形状や長さには、2つの温度において、大きな差は見られない。Fig.2.4-4 より、キャビティは、発生から約 3 ms までに急速に成長しており、この時間域における成長速度は、滑り速度に近づいている。4 ms 以降は、キャビティ長さの時間変化は、それ以前の時間と比べて小さくなる。また、この時間域におけるキャビティの成長には、雰囲気温度の影響が明確には見られなかった。

Fig.2.4-5 には、両温度における、発生から 61, 500, 1000 ms におけるキャビティの画像を示す。また、Fig.2.4-6 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.2.4-7 には、発生から 10 min 後のキャビティの画像を示す。なお、Fig.2.4-7 における実験では、滑り速度が 137 mm/s, 荷重が 7 N であった。

これらの図より、時間経過とともに、キャビティの成長において、雰囲気温度の影響が見られることが分かる。Fig.2.4-5 より、61 ms のキャビティ長さは、350 K の方が 295 K よりも長くなり、時間経過でもその差が観察される。Fig.2.4-6 より、約 40 ms において、キャビティ長さに違いが見られ始め、約 1 s 後には、明確になる。Fig.2.4-7 の 10 min 後における画像より、その差は時間とともに少しずつ拡大していることが分かる。また、キャビティの成長する方向は、両温度において、潤滑油の流れ方向であった。

## (2) 各雰囲気におけるキャビティの成長の観察

Fig.2.4-8 に、各雰囲気における発生から 10 ms におけるキャビティ長さの時間変化を示す。Fig.2.4-9 に、発生から 4.5 ms 後のヘリウム中でのキャビティの画像を示す。Fig.2.4-10 には、発生から 4.5 ms 後の二酸化炭素中でのキャビティの画像を示す。

Fig.2.4-8 より、発生から 10 ms までのキャビティ長さの時間変化は、各雰囲気温度における大きな違いは見られない。いずれの雰囲気の両温度において、キャビティ長さは、3 ms までに急速に長くなり、その後、その変化量は小さくなる。また、Fig.2.4-9, 2.4-10 より、ヘリウム、二酸化炭素において、4.5 ms 後におけるキャビティ形状には、雰囲気温度の大きな差は見られない。従って、雰囲気気体が異なっても、この時間域におけるキャビティの成長へ及ぼす温度の影響は大きくは見られないことが確認できる。

Fig.2.4-11 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。また、Fig. 2.4-12 には、発生から 10 min までのキャビティ長さの変化を示す。Fig.2.4-13, 2.4-14 には、ヘリウム中、二酸化炭素中の両温度での発生から 1 s 後におけるキャビティの画像をそれぞれ示す。Fig.2.4-15, 2.4-16 には、ヘリウム中、二酸化炭素中の両温度での発生から 10 min 後におけるキャビティの画像をそれぞれ示す。なお、Fig.2.4-12, 2.4-15, 2.4-16 においては、滑り速度が 137 mm/s、荷重が 7 N の条件で実験を行った。

Fig.2.4-11 より、ヘリウム、二酸化炭素の場合でも、アルゴンの結果と同様に、キャビティの成長に温度の影響が見られる。ヘリウムにおいて、約 40 ms において、キャビティ長さに温度の影響が見られ、温度が高いほど長くなる。それ以降の時間においてもその差は見られる。この傾向は、アルゴン中のものと同様である。一方、二酸化炭素中においても、約 40 ms から温度の影響が見られるが、キャビティ長さは温度が低いほど長くなることが分かる。これは、ヘリウム、アルゴンにおける傾向とは、逆である。従って、発生から約 40 ms 後のキャビティの成長では、雰囲気温度の影響が見られるが、雰囲気気体によって、その影響は異なる。

Fig.2.4-13, 2.4-14 より、キャビティは、両温度において、潤滑油の流れ方向に拡大していることが分かる。また、Fig.2.4-12 において、10 min までの時間において、各雰囲気でのキャビティ長さと温度の関係は、Fig.2.4-11 の 1 s 後に見られる結果と同様である。また、Fig.2.4-15, 2.4-16 からも、両温度において、キャビティは、時間経過とともに、潤滑油の流れ方向に拡大を続けることが分かる。

### (3) 溶解度とキャビティー長さの関係

ここでは、2.2 で、キャビティー長さを気体の潤滑油への溶解度との関係により整理したように、気体の溶解度を用いて温度の影響を整理してみる。

Fig.2.4-17 に、2つの温度条件での各気体の潤滑油への溶解度と、5, 500 ms, 10 s の各時間におけるキャビティー長さの関係を示す。

この図より、5 ms において、キャビティー長さには、溶解度との関係が見られない。500 ms, 10 s においては、キャビティー長さとの関係が見られ、溶解度が高くなるほどキャビティー長さが長くなる。従って、ヘリウムやアルゴンのような気体では、温度とともに溶解度が高くなるため、潤滑油中の溶解気体量が多くなり、キャビティーが長くなったと考えられる。一方、二酸化炭素は、温度とともに溶解度が低下するため、潤滑油中の溶解気体量が少なくなり、キャビティーが短くなったと考えられる。従って、この時間におけるキャビティー長さへの雰囲気温度の影響は、溶解度の温度依存性によるものであると考えられる。

#### 2.4.4 まとめ

本節において、350 K での実験においても、キャビティーの成長は、2段階の成長過程で起こることが分かった。Fig.2.4-18 に、各気体でのキャビティー成長への温度の影響を示す。

発生から 5 ms までのキャビティーの成長は、急速に起こり、溶解気体の急速な析出が考えられる。従って、この時間域は **Initial stage** である。今回の実験結果より、**Initial stage** での成長には、雰囲気気体の影響とともに、温度の影響も見られないことが分かった。

その後、キャビティー長さは、徐々に拡大していく。従って、この時間域は **Second stage** である。発生から約 40 ms の時間より、キャビティーの成長に温度の影響が見られる。ヘリウム、アルゴンでは、350 K の方が 295 K よりも長くなる。二酸化炭素では、295K のキャビティーの方が 350K よりも長くなる。この結果は、キャビティー長さの温度変化が気体の溶解度の温度依存性と関係することを示しており、**Second stage** におけるキャビティーの成長は溶解気体と関係すると考えられる。

(参考文献)

- 1 日本潤滑学会, 潤滑ハンドブック, 養賢堂, 1987
- 2 岩澤, 梅澤, 澤田, 辻井, 界面ハンドブック, アイ・ティ・オウ, 2001
- 3 平野, 境, 山県, “鉍油膜の蒸発に関する研究(続報) –鉍油の分子量分布の影響–”, 潤滑, 22, 11, 1977, 726-733
- 4 畑, “気体の溶解度と気体溶解時の物性(1)”, トライボロジスト, 35, 7, 1990, 471-474
- 5 中西, 溶解度の理論と計算, 講談社サイエンティフィック, 1982
- 6 川合, 尾上, 今村, 物理化学による化学工学基礎, 槇書店, 1996
- 7 篠田, 改定増補 溶液と溶解度, 丸善, 1974
- 8 中原, 集合体の熱力学・統計熱力学, 岩波書店, 2007

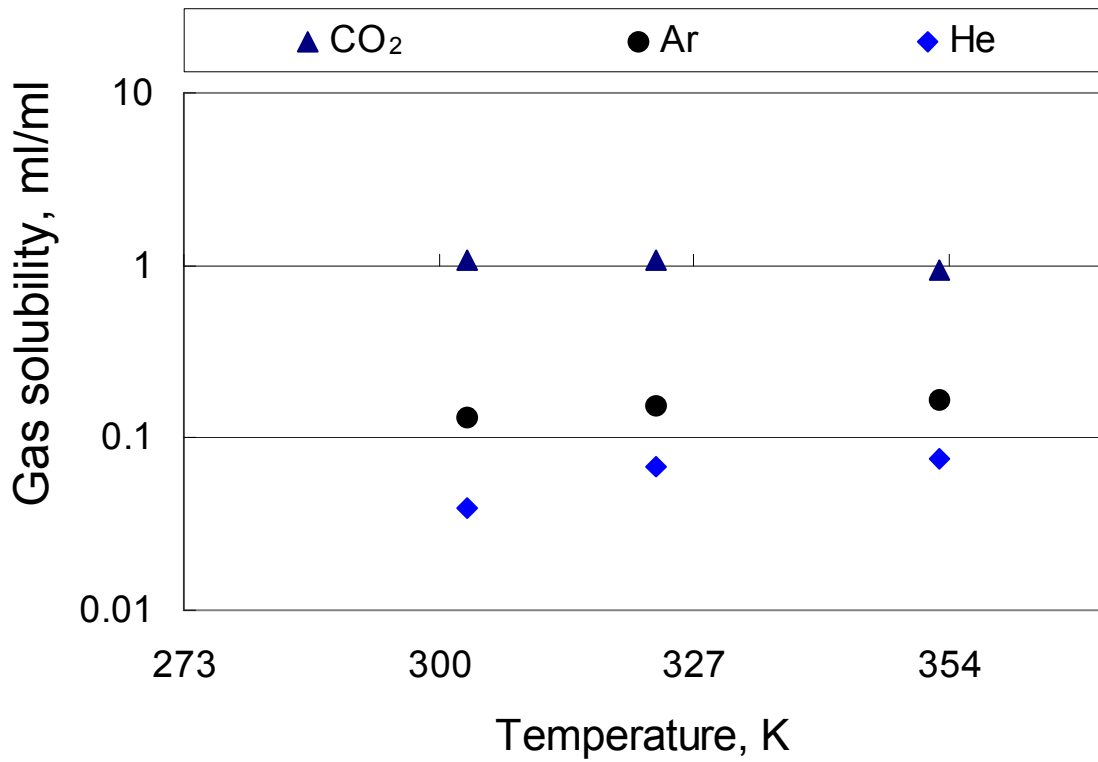


Fig.2.4-1 Relation between temperature and gas solubility in various gases

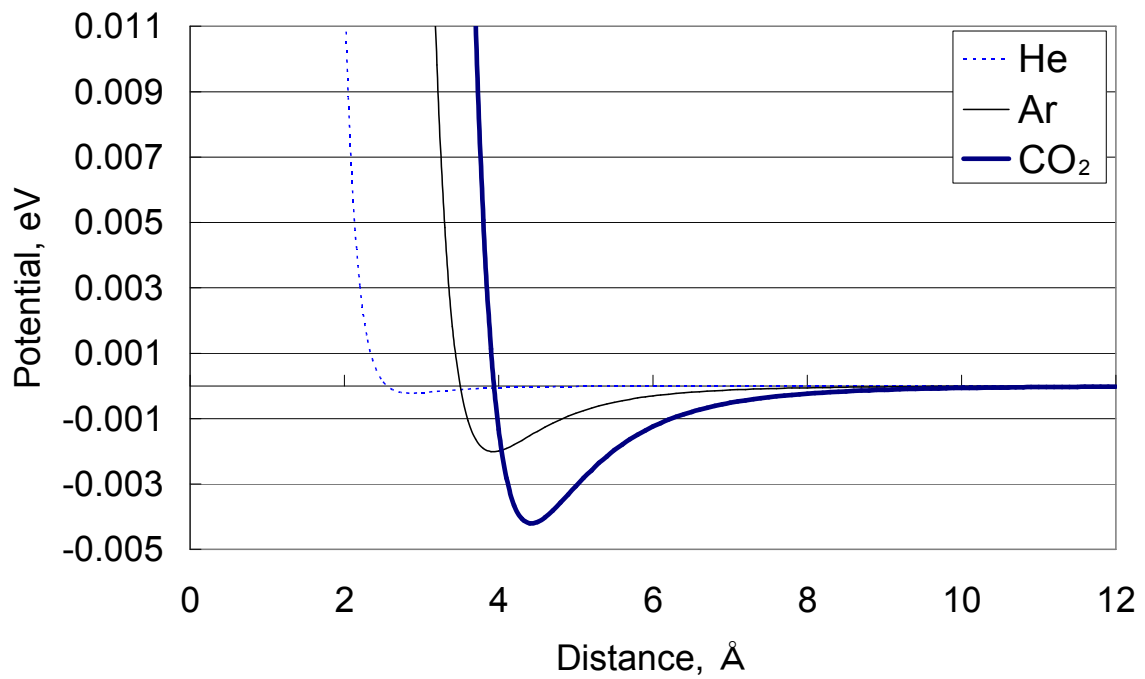


Fig.2.4-2 Comparison of potential energy between three gases

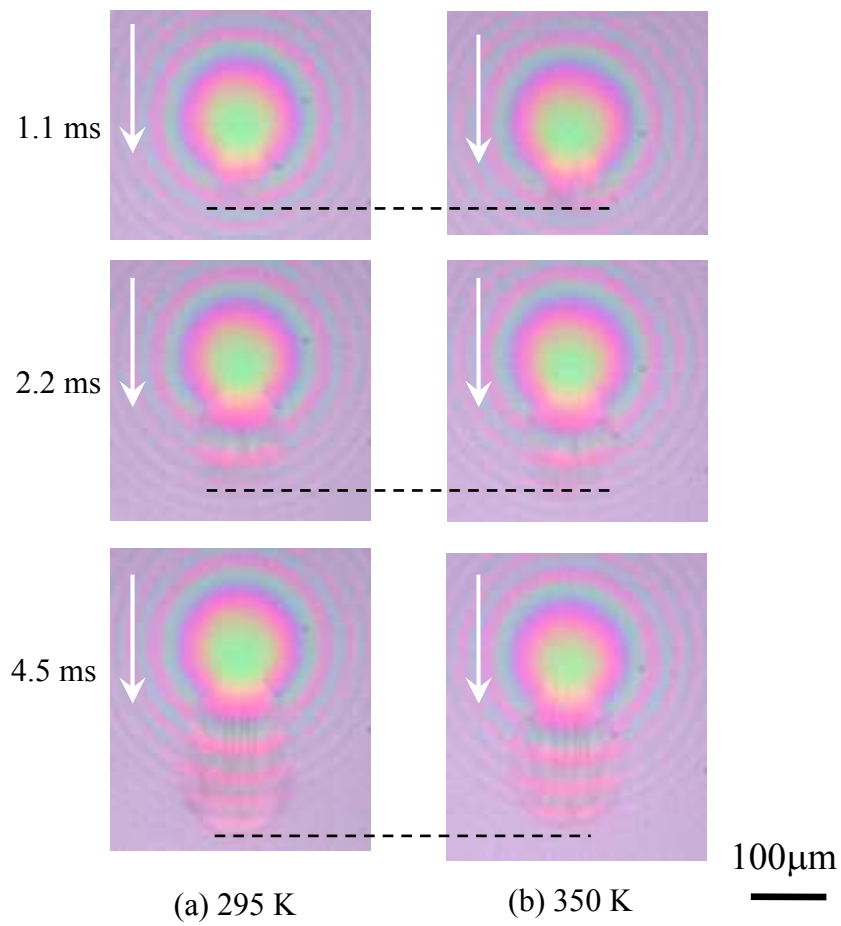


Fig.2.4-3 Photograph of cavity in argon at 295, 350 K

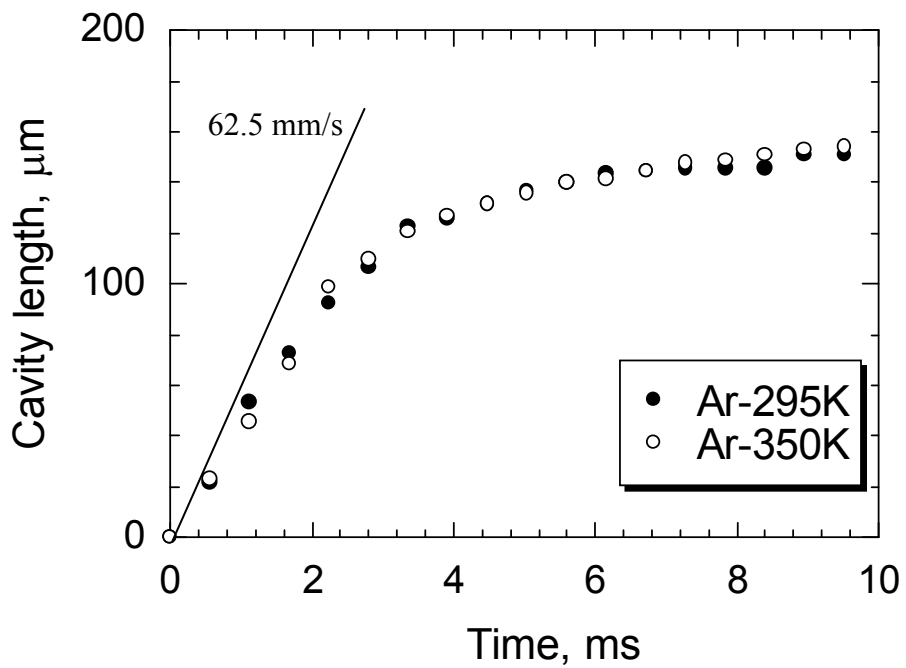


Fig.2.4-4 Changes in cavity length in argon from the start to 10 ms at 295, 350 K



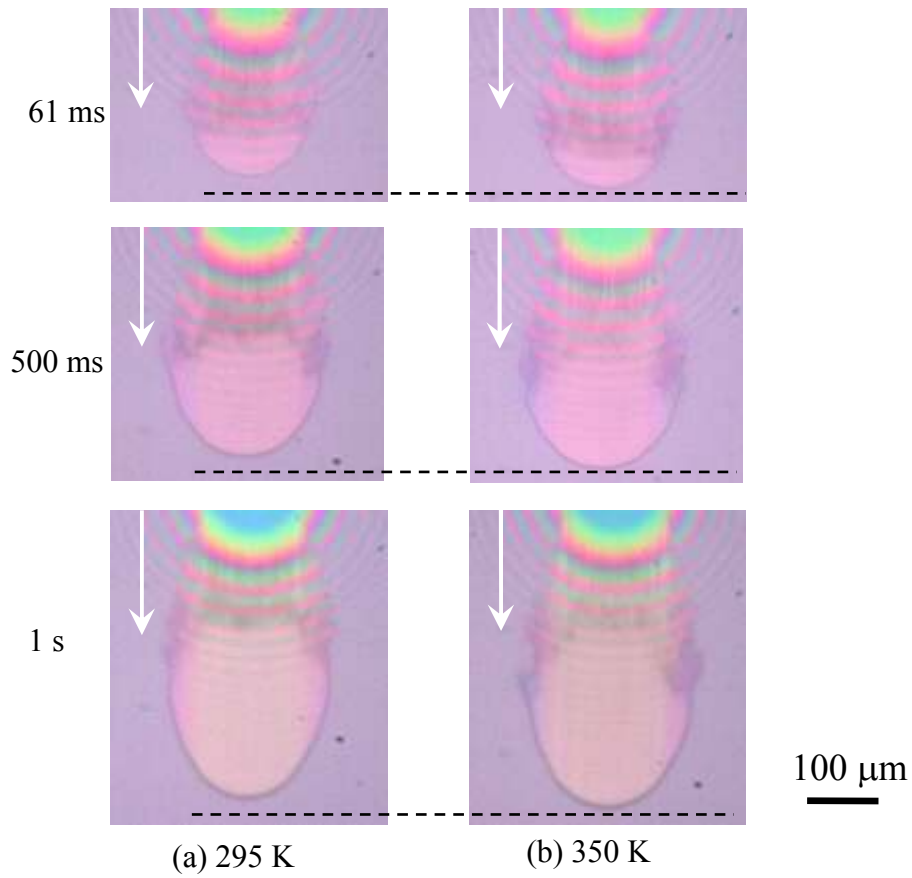


Fig.2.4-5 Photograph of cavity in argon at 295, 350 K

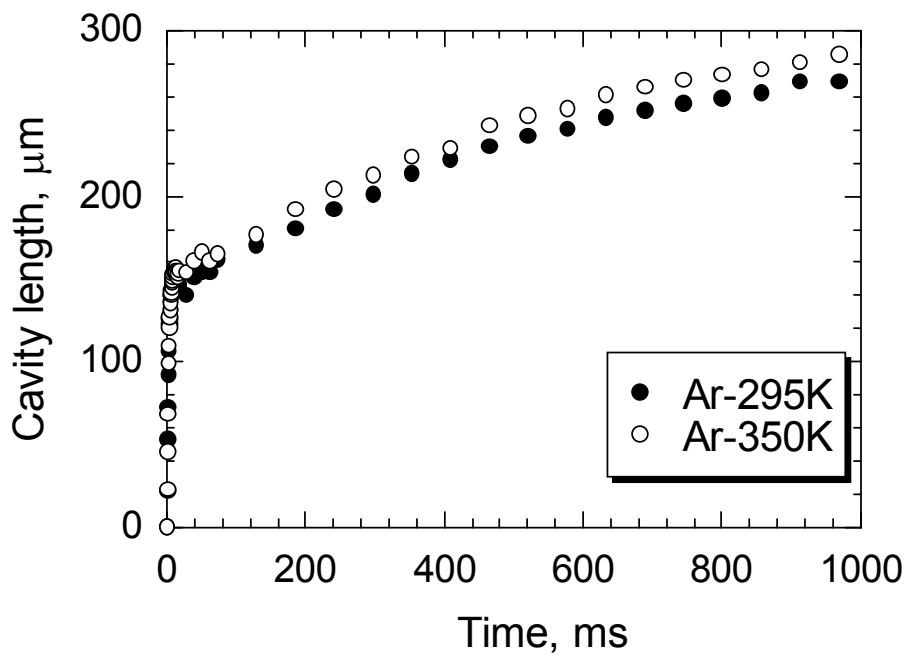


Fig.2.4-6 Changes in cavity length in argon from the start to 1 s at 295, 350 K



(a) 295 K



(b) 350 K

Fig.2.4-7 Photograph of cavity in argon at 10 min

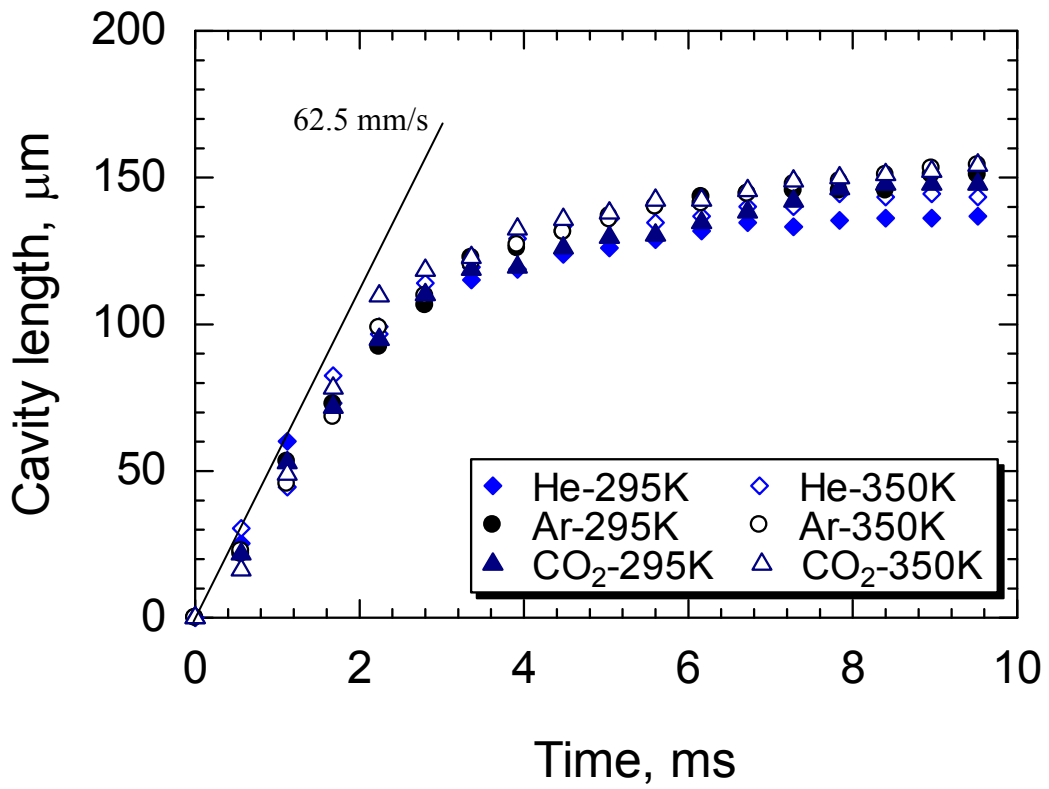


Fig.2.4-8 Changes in cavity length from the start to 10 ms in various conditions

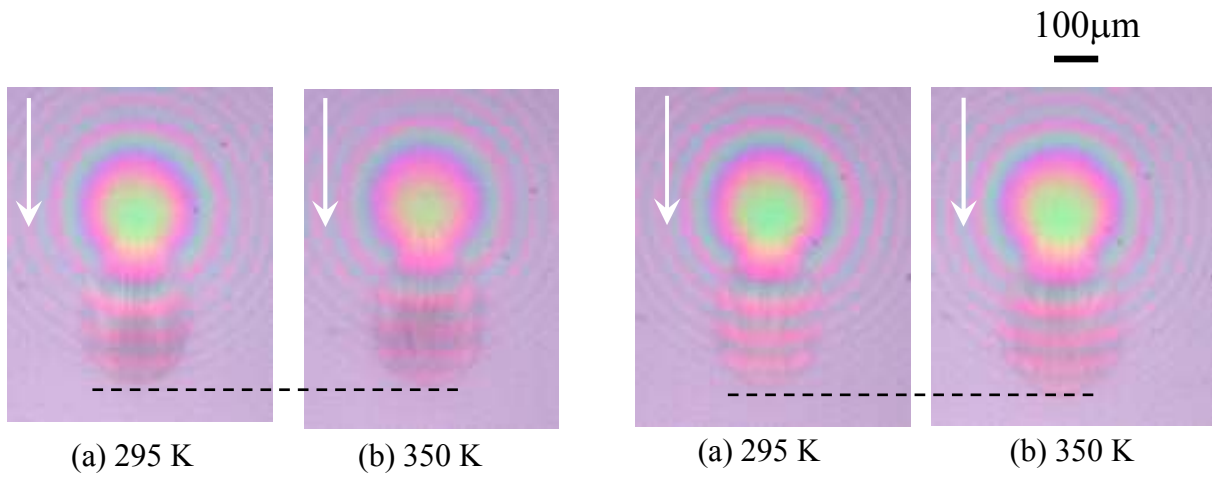


Fig.2.4-9 Cavity at 4.5 ms in helium

Fig.2.4-10 Cavity at 4.5 ms in carbon dioxide

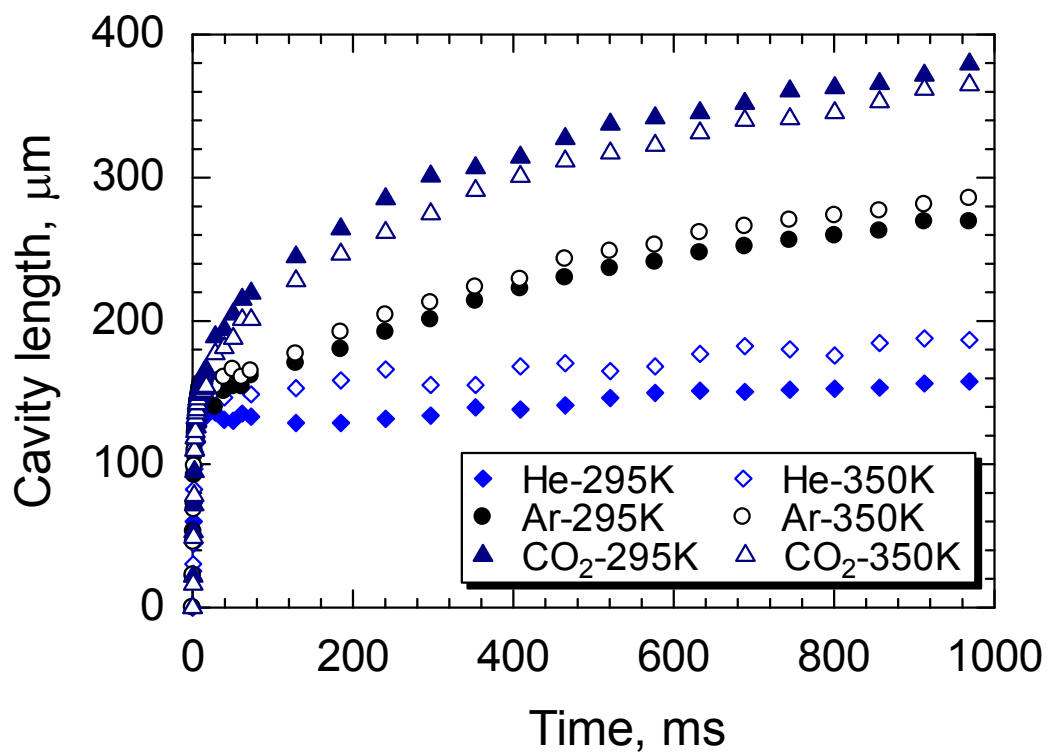


Fig.2.4-11 Changes in cavity length from the start to 1 s in various conditions

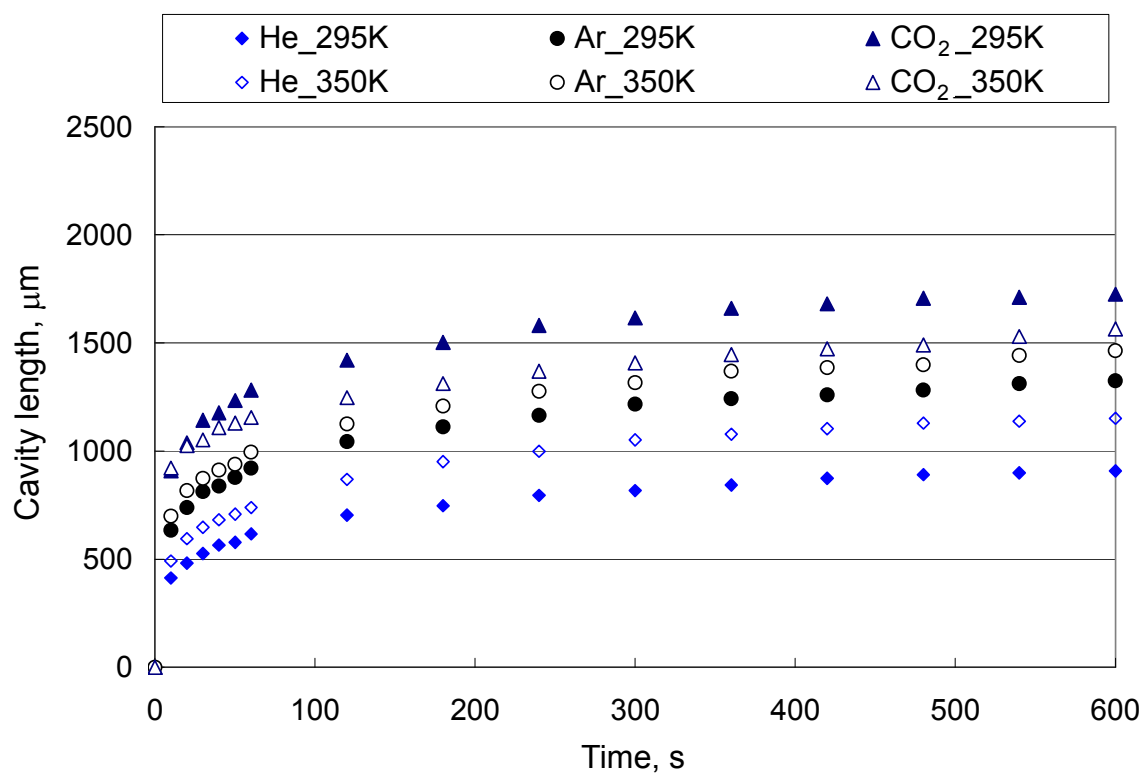
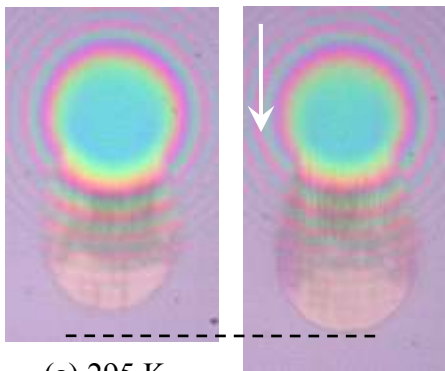


Fig.2.4-12 Changes in cavity length from the start to 10 min in various conditions

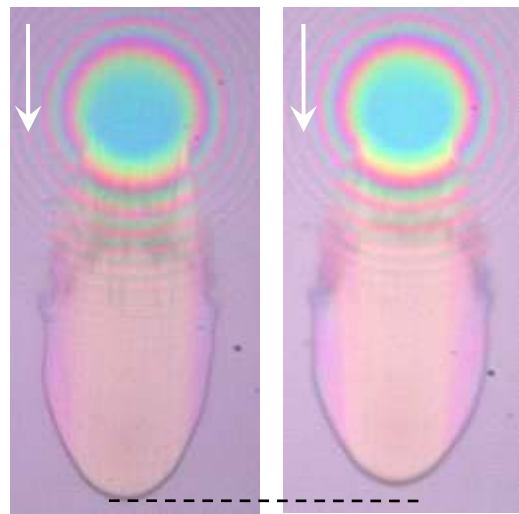


(a) 295 K

(b) 350 K

100 $\mu$ m

Fig.2.4-13 Cavity at 1 s in helium



(a) 295 K

(b) 350 K

Fig.2.4-14 Cavity at 1 s in carbon dioxide



(a) 295 K

100 $\mu$ m

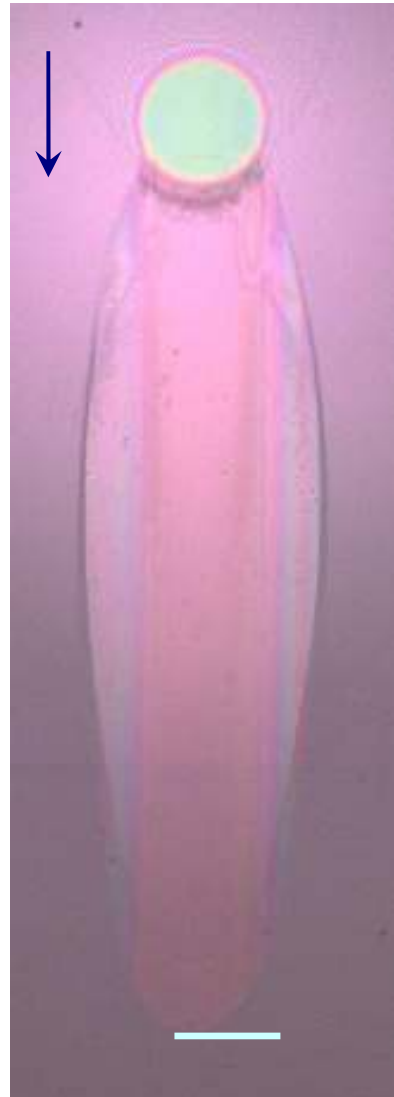


(b) 350 K

Fig.2.4-15 Cavity at 10 min in helium



(a) 295 K



(b) 350 K

100μm

Fig.2.4-16 Cavity at 10 min in carbon dioxide

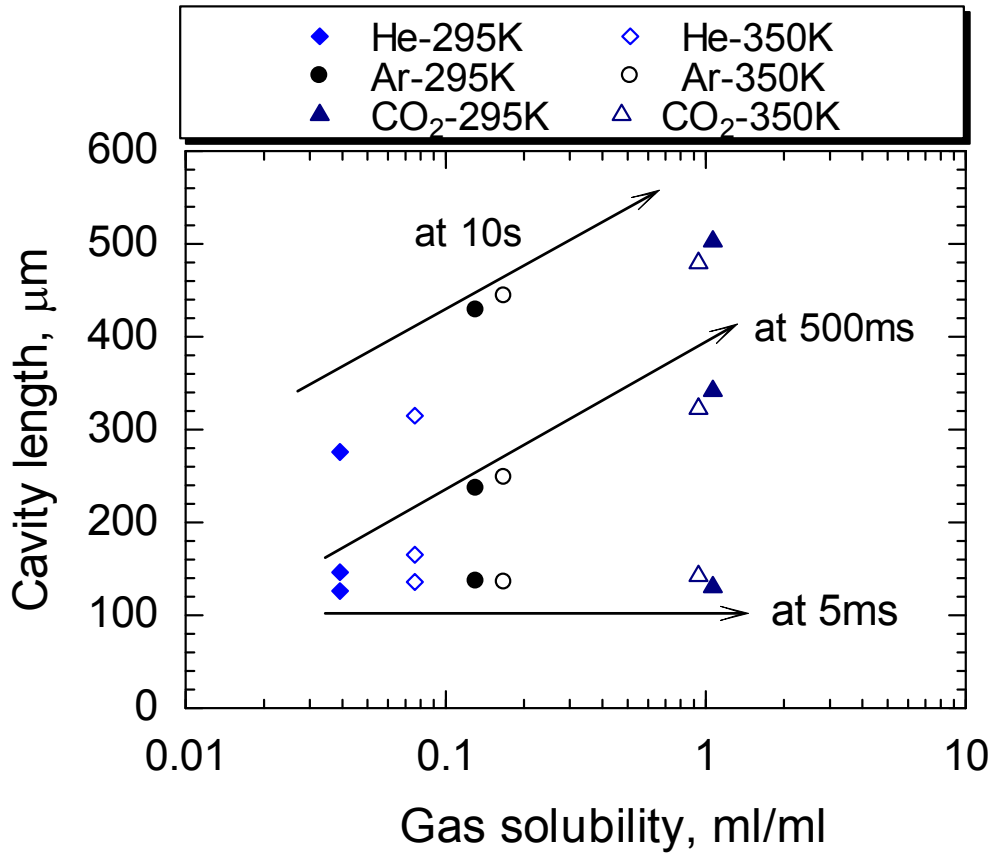


Fig.2.4-17 Relation between cavity length and gas solubility

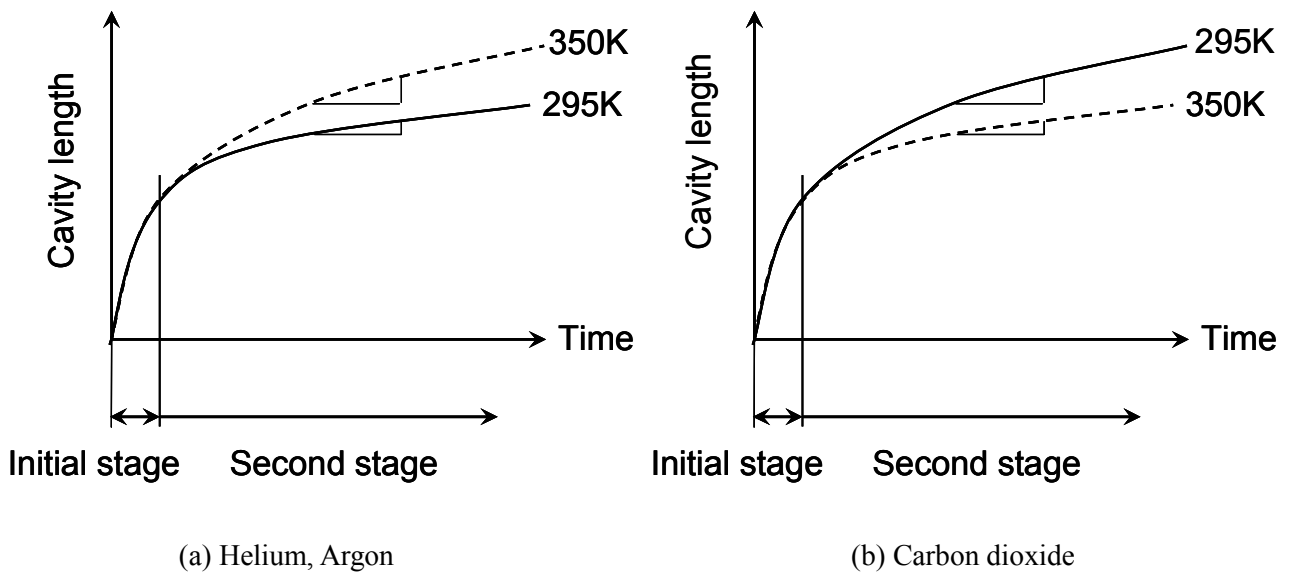


Fig.2.4-18 Model of cavity growth in various gases

## 2.5 雰囲気圧力のキャビティー成長へ与える影響

本節では、雰囲気圧力がキャビティー成長に及ぼす影響を調べた。

機械の動作する圧力は、大気圧条件とともに、大気圧よりも高い条件や、大気圧よりも低い真空条件のどちらも存在する。こういった機械でも、潤滑技術は利用されている。半導体産業における機械、真空装置内の機械、宇宙空間で使用される機械<sup>1</sup>での潤滑部では、極高真空条件であるので、一般の潤滑油は蒸発してしまう。従って、それに伴う潤滑油量の低下、油膜の破断が引き起こされる。また、蒸発した潤滑油が周囲の部分に吸着することで、汚染が起こり、その機器の動作において問題となる。このような点を踏まえ、宇宙機器では、蒸気圧の低い、フッ素系の潤滑油や炭化水素系の潤滑油<sup>2-4</sup>を少量使用することが行われている。また、コモンレール噴射装置部は、潤滑油は、高圧条件(200 MPa など)に耐えなければならない。高圧条件では、油の一部がワックスとして析出したり、粘度増加による流動性低下が引き起こされたりする<sup>5,6</sup>ので問題となる。従って、粘度 - 圧力係数を適切にした潤滑油の選択が求められる。

これまでに、潤滑油中で発生するキャビテーションは、潤滑油内の溶解気体の析出が関係している気体性キャビテーションと述べた。一方で、真空環境下では、周囲圧力が潤滑油の蒸気圧に近づくので、蒸気性のキャビテーションの発生も考えられる。また、高圧条件下では、ヘンリーの法則から、溶解気体量の増加が予想されるため、気体性キャビテーションの成長が異なったものとなると考えられる。従って、雰囲気圧力のキャビティー成長に及ぼす影響を調査しておくことにより、圧力条件が異なった潤滑部の設計の際にキャビティー領域を予測することができる。

本節での実験では、真空条件に限って、雰囲気圧力の影響を調査した。チャンバ内圧力は、油拡散ポンプによる真空引きで、0.015 Pa まで低下させ、大気圧からこの圧力までの範囲で実験を行うことができる。潤滑油には、PAO と鉱油系潤滑油を使用した。鉱油系潤滑油の蒸気圧は、使用できる雰囲気圧力と近い値である。

また、真空中で見られたキャビティー内の干渉像から、キャビティー形状を検討した。その結果についても示す。



### 2.5.1 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.

- ・潤滑油： PAO63, 動粘度  $63 \text{ mm}^2/\text{s}$  @ 313 K

なお, 合成油の蒸気圧は,  $10^{-8} \text{ Pa}$ @293K(動粘度  $220 \text{ mm}^2/\text{s}$ @313K), ポリオレフィン系炭化水素は,  $10^{-3} \text{ Pa}$ @323K(動粘度  $51.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ @311K)と報告されている<sup>7,8</sup>. また, 蒸気圧は, 温度とともに上昇することも報告されている. 従って, 295 Kにおける PAO の蒸気圧は,  $0.015 \text{ Pa}$  よりも低いことが推測される.

鉱油系潤滑油(アルバック社製, ULVOIL R-4), 動粘度  $45 \text{ mm}^2/\text{s}$ @313K

この潤滑油の蒸気圧と温度の関係を Fig.2.5-1 に示す. なお, このデータは, カタログからのものである.

- ・雰囲気圧力：  $0.015\text{-}101300 \text{ Pa}$
- ・滑り速度：  $62.5 - 160 \text{ mm/s}$
- ・荷重：  $1 - 7 \text{ N}$ , 最大ヘルツ接触圧：  $0.14 - 0.27 \text{ GPa}$
- ・温度：  $295\text{-}358 \text{ K}$

雰囲気圧力の制御は, 2.1.4 (3)に示す通りである. 潤滑油をディスクに塗布し, 試験機に取り付ける. チャンバ蓋を閉め, 真空ポンプを作動させ, 到達圧力  $0.015\text{Pa}$  の状態で, 3 時間真空引きを行った. その後, 任意の圧力に制御するために, 各ポンプを停止させ, チャンバ内に空気を導入し, 圧力を制御した. 今回の実験では,  $0.015, 100, 1000, 10100\text{Pa}$  の 4 条件で実験を行った. なお,  $0.015 \text{ Pa}$  の条件では, 真空引きを続けている状態で, 実験を行った.

## 2.5.2 実験結果, および, 考察

### (1) 0.015Pa におけるキャビティ発生時の観察

Fig.2.5-2 に, 0.015Pa における, 発生から 50 ms までのキャビティの画像を示す. Fig.2.5-3 には, 発生から 50 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す. 滑り速度を直線で示している. この実験では, 滑り速度が 20 mm/s, 荷重 1 N のもとで行った. 荷重は, ディスクが滑り速度 20 mm/s で回転している状態で, 加えた.

Fig.2.5-2 より, 1 ms の画像において, キャビティの発生が見られる. その後, キャビティは成長していくが, 画像より明らかなように, この時間域におけるキャビティは, 特異な形状をしている. キャビティの後端の界面には, 部分的に長くなったいくつかの突起が見られる. 時間とともに, それぞれの突起部は成長する. 50 ms には, 突起部は消滅し, キャビティ後端は滑らかな界面へと変化する. また, キャビティは, 潤滑油の流れ方向に拡大していることも分かる. Fig.2.5-3 から, 発生から 15 ms までのキャビティの成長速度は, 滑り速度に近いことが分かる. Fig.2.5-4 には, 滑り速度を 10, 20, 40 mm/s と変化させた条件での発生から 40 ms 後のキャビティ長さの時間変化を示す. この図より, 各条件において, この時間域におけるキャビティ成長速度は, 滑り速度に近いことが分かる.

従って, 圧力を 0.015 Pa に低下させても, 発生後のキャビティの成長は急速に起こっており, その時間におけるキャビティは特異的な形状を示すことが確認された.

### (2) 各雰囲気圧力におけるキャビティの成長

Fig.2.5-5 に, 0.015, 100, 1000, 101300Pa における, 発生から 50 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す.(1)の実験と同様な方法で, 荷重 1 N を負荷した. 滑り速度は, 20mm/s であった. Fig.2.5-6, 2.5-7 には, 各圧力での実験開始から, 3.4, 30 ms におけるキャビティの画像をそれぞれ示す.

Fig.2.5-5 より, 発生から 5 ms におけるキャビティ長さには, 雰囲気圧力による大きな変化が見られない. また, Fig.2.5-6 より, 3.4 ms におけるキャビティの画像から, その形状に圧力による大きな変化が見られないことが確認される. すべてのキャビティにおいて, 一部分が伸びた特異的な形状のキャビティが観察される. その後, 5 ms 以後において, 101300Pa でのキャビティの成長が小さくなり, 他の圧力条件より, その長さが短くなる. 0.015, 100, 1000 Pa の条件に関しては, 5 ms 以後において, キャビティ長さに大きな変化は見られない. また, Fig.2.5-7 から, 101300 Pa 中のキャビティの後端は滑らかな界面をもち, 丸まった形状のキャビティへと変化している. 一方で, 他の圧力条件では, 一部分が伸びた特異的な形状のキャビティが, 依然として観察される.

Fig.2.5-8 には, 発生から 250 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す. Fig.2.5-9 には, 各圧力

における発生から 200 ms におけるキャビティー画像を示す。

Fig.2.5-8 より、約 50 ms 以降において、1000 Pa におけるキャビティー成長速度が低下することが分かる。また、100 Pa のキャビティー成長速度が、0.015 Pa の成長速度よりわずかに低いことも確認され、約 150 ms 以降より、その差が明確になってくる。200 ms 以降では、全ての圧力において、キャビティー長さの変化は、非常に小さくなる。Fig.2.5-9 より、キャビティー長さは、明らかに、圧力が低いものほど、長くなっている。また、キャビティー形状は、全ての条件において、丸まった形状になっており、キャビティー後端は滑らかな界面を示している。

Fig.2.5-10 には、発生から 1 s までのキャビティー長さの時間変化を示す。この図には、成長速度も示している。成長速度は、すべての圧力において、約 250 - 1800 ms の範囲で、キャビティー長さの時間変化の傾きより求めた。

Fig.2.5-10 より、図に示した急速な成長後から 1 s までの成長速度は、圧力の影響が見られることが分かる。雰囲気圧力が高くなるほど、この時間域における成長速度は大きくなる。101300 Pa における成長速度は、0.015 Pa の 10 倍以上であった。

Fig.2.5-11, 2.5-12 には、発生から 60 s, 1 h におけるキャビティー長さの時間変化をそれぞれ示す。なお、この実験では、荷重を 7 N とした。また、Fig.2.5-13 には、すべての圧力における、発生から 1 h 後のキャビティー画像を示す。

Fig.2.5-11 より、100 Pa におけるキャビティー長さは、発生から約 30 s 経過後に、0.015 Pa の長さまで成長している、その後の時間は、その長さでほぼ一定となる。1000 Pa におけるキャビティー長さは、60 s 経過後に、0.015, 100 Pa の長さまで成長している。その後、その長さでほぼ一定となる。101300 Pa におけるキャビティー長さは、60 s 経過後には、他の圧力条件におけるキャビティー長さの半分程度まで成長している。Fig.2.5-12 から、101300 Pa におけるキャビティーは、60 s 以降も成長し続け、1 h 経過後に他の圧力の長さに近い。Fig.2.5-13 より、1 h 経過後には、雰囲気圧力のキャビティー長さへ与える影響が、ほぼなくなっているのが分かる。また、キャビティー形状もほぼ同様なものであることが確認できる。

### (3) 潤滑油の蒸気圧と雰囲気圧力を近づけた条件でのキャビティー成長

この実験では、潤滑油に ULVOIL R-4 を使用した。雰囲気温度を 358 K に制御した。この温度におけるこの潤滑油の蒸気圧は、0.021 Pa である。雰囲気圧力は、0.035 Pa とし、蒸気圧に近づくように設定した。実験において、予めチャンバ内を 0.04 Pa まで真空引きし、その後、チャンバ内を加熱した。加熱後、チャンバ壁面に吸着しているコンタミネーションなどの影響によりチャンバ内の圧力が上昇するので、約 7 時間、真空引きを続け、圧力を 0.035 Pa まで低下させた。その後、実験を開始し

た。

この条件において、潤滑油が潤滑部から完全に蒸発することはなく、接触部に形成されるメニスカスの大きさはこれまでの実験と同様のものであった。一方で、実験後に、チャンバ内を確認すると、チャンバ底面に油の付着が確認された。従って、本条件において、潤滑油表面では、蒸発が起こっていたことも確認できた。

Fig.2.5-14 に、開始から 50 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す。また、358 K、101300 Pa におけるキャビティ長さの時間変化も示している。滑り速度は、160 mm/s、荷重は 2 N であった。荷重は、ディスクが回転している状態で、加えた。Fig.2.5-15 には、開始から 1.5 s までのキャビティ長さの時間変化を示す。また、この図には、30 ms から 1.5 s までのキャビティ長さの変化量から求められた、成長速度も示している。

Fig.2.5-14 より、この潤滑油条件においても、発生からすぐに、キャビティは急速に成長する。発生から 1.5 ms までのキャビティ成長速度は、2 つの圧力条件において、ほぼ同じである。また、この時間における成長速度は、滑り速度に近づいている。その後、0.035 Pa では、急速な成長が引き続き起こり、約 15 ms 以後は、キャビティ長さの変化が小さくなっている。101300 Pa では、約 2 ms 以後は、キャビティ長さの変化が小さくなる。また、急速な成長後のキャビティ長さは、0.035 Pa の方が 101300 Pa よりも長くなる。

Fig.2.5-15 より、急速な成長後のキャビティの成長速度は、101300 Pa の方が大きいことが分かる。この傾向は、(2)に示した PAO での実験結果と同様の傾向である。

従って、雰囲気圧力を潤滑油の蒸気圧付近に設定した条件においても、キャビティの成長は、雰囲気圧力が蒸気圧より高い PAO での実験結果((2)での結果)と同様なものであると考えられる。

### 2.5.3 キャビティー形状の検討

#### (1) キャビティー形状

Dowson らは、キャビティーを横方向(回転軸方向)から観察し、その形状を示している<sup>9</sup>。平野らは、ディスク側のクロムの半透過膜を取り除き、キャビティーの下界面と金属球の表面での干渉の情報を強め、その干渉像から、Fig.2.5-16 に示すような形状であることを示している<sup>10</sup>。また、和泉らは、キャビティー部における油量(油の充填率)を、キャビティー領域の干渉縞から求めている<sup>11</sup>。

ここでは、真空中で発生したキャビティーの形状を、その領域に観察される干渉縞から、検討する。

#### (2) 観察結果

実験は、滑り速度が、10 mm/s、荷重が 7 N の条件で行った。潤滑油は、PAO63 を使用した。また、ディスクには、クロムの半透過膜を施していないガラスディスクを使用した。これにより、Fig.2.5-17 に示すように、干渉像は、キャビティーの下界面とレンズ表面での干渉を示すことになる。また、干渉縞の次数とすきまの厚さを簡易に関係付けるために、白色光を赤色のカラーセロハンにて、赤の単色光へと変化させた。式(2.5.3-1)に、干渉縞が強めあう場合と弱めあう場合の光路差  $h$  と光の波長  $\lambda$  の関係を表す式を示す。使用した潤滑油の屈折率は 1.49、赤の波長は 700 nm であるので、干渉縞が一次変化するごとに、すきま  $h$  が 235 nm 変化していると考えられる。

$$h = \frac{\lambda}{2n} = 235 \text{ nm} \quad (2.5.3-1)$$

$h$  : すきま,  $\lambda$  : 波長,  $n$  : 屈折率

Fig.2.5-18 には、雰囲気圧力が 2 Pa 下での、発生から約 1 min におけるキャビティー画像を示す。キャビティーが存在すると、Fig.2.5-19 に示すように、いくつかの界面での反射が起こり、それらの干渉が発生すると考えられる。今回の条件では、Fig.2.5-17 に示すように、キャビティーの下(キャビティーと潤滑油膜の界面)でおこる反射と、クロムの全反射膜を施したレンズ表面で起こる反射による干渉が強くなることから、Fig.2.5-18 に示されるキャビティー内の干渉縞は、レンズ表面に付着している油膜の厚さを示していると考えられる。もし、ディスク側に付着した油膜の情報であるならば、ディスクとともに移動するので、その膜の移動や変化が観察されると予想される。しかし、本実験では、そのような現象は観察されなかった。Fig.2.5-20 には、ディスク側にクロムの半透過膜を施した場合のキャビティー画像を示す。この画像は、PAO63、滑り速度 40 mm/s、白色光での観察結果である。この図では、幅を  $W$  と示している部分が、ディスクとキャビティー上界面での干渉を示している。すなわち、ディスクに付着した油膜を示している。この部分は、ディスクとともに移動していることが観察され、ディスク上に付着していると分かる。また、Fig.2.5-18 とは、明らかにその様相が

異なる。このことから、Fig.2.5-18 で見られる干渉が、レンズ表面に付着した油膜厚さを示していると推測できる。

Fig.2.5-18 より、キャビティー領域に干渉縞が観察される。その干渉縞は、2種類に分類することができる。Fig.2.5-21 に、A、B にて示す。

まず、接触域出口の A の部分における干渉について、検討する。この部分には、ガラスディスク表面とレンズ表面での反射における干渉の情報も含まれる。Fig.2.5-22 には、潤滑油なしの状態、レンズとディスクを 7 N の荷重の下で、接触させた画像を示す。Fig.2.5-21 と同様に、接触域の外側からすきまによる干渉縞が見られ、その観察される領域(縞が見えなくなる位置)もほぼ同じである。従って、A での干渉縞は、レンズとディスクのすきまによるものが強いと考えられる。しかし、両画像において、同じ位置における赤の強度を比較すると、Fig.2.5-21 の方が全体的に暗くなって見えている。例えば、Fig.2.5-18 と 2.5-22 の C(2 次の干渉縞を示す明るい部分)の強度は、Fig.2.5-18 の方が、Fig.2.5-22 の 16%低い。また、Fig.2.5-18 において、この部分には、色のむらが見られる。従って、この図における干渉は、ガラスディスクとレンズの反射による干渉とキャビティーの下の界面とレンズの反射における干渉の 2 つの情報が含まれていると考えられる。この 2 つの干渉の情報を正確に切り分けることは困難であるが、赤の強度の低い(暗い)色は、レンズに付着している油膜の厚さを示していると推測される。

次に、B 部において検討する。Fig.2.5-22 より、この領域では、すきまが大きくなるため、ディスクとレンズのすきまに起因した干渉は起こらない。従って、ここでの干渉は、レンズ表面に付着している油膜の厚さを示していると考えられる。次に、この干渉縞を、式(2.5.3-1)に示されるすきまと次数の関係から、油膜厚さへ変換した。ここでは、接触域出口からの暗い干渉縞を一次と仮定した。Fig.2.5-23 に、その計算結果を示す。この図より、レンズ表面に付着した油膜の厚さには、2つの山が見られる。一つ目の山は、260 μm の位置で、約 230 nm の頂点をもつ。2つ目の山は、520 μm の位置で、約 670 nm の頂点もち、その領域は、1つ目の山よりも大きい。その後、キャビティー後端位置へ向けて低下する。また、Fig.2.5-24 には、レンズの形状に、Fig.2.5-23 で示される油膜厚さを足した結果である。レンズの形状は、以下の式(2.5.3-2)で示される<sup>12</sup>。この図より、付着油膜厚さは、レンズとディスク間のすきまに対して、非常に小さいことが分かる。

$$h(x) = h_{\min} + \frac{a^2}{\pi R} \left( - \left( 2 - \frac{x^2}{a^2} \right) \cos^{-1} \frac{a}{x} + \left( \frac{x^2}{a^2} - 1 \right)^{0.5} \right) \quad (2.5.3-2)$$

$a$  : ヘルツ接触円半径,  $R$  : レンズの曲率半径,  $h_{\min}$  : 最小油膜厚さ

Fig.2.5-25 には、滑り速度が 20mm/s である条件でのキャビティ画像を示す。この図においても、キャビティ領域において、干渉縞が現れている。接触域後方では、Fig.2.5-18 と同様に、ディスクとレンズのすきまに起因した干渉が見られるが、その後方では、レンズに付着した油量による干渉が見られる。10 mm/s における条件よりも、その次数の変化は大きい。観察される縞の変化からは、キャビティ領域では、1.4  $\mu\text{m}$  以上の膜厚変化が起こっていると考えられる。

キャビティ領域内で、レンズ面に油膜が形成されることに関しては、以下のように考えられる。Initial stage において、キャビティが拡大していくとともに、元々あった油は排除されていく。この過程で、一部の油は完全には排除されずに、レンズ表面に残る。その後、レンズの曲率に沿って、流れ、Fig.2.5-23 に示すように、液滴のような形で残ることが考えられる。真空中では、Initial stage の成長時間が長くなるため、急速に拡大するキャビティ領域は大きい。そのため、その油膜の形成される領域が大きくなったと考えられる。Fig.2.5-26 は、大気圧条件における 20mm/s におけるキャビティを示しているが、接触域後方の A の部分にこのような油膜の形成が確認できる。大気圧では、同じ滑り速度、潤滑油粘度の条件では、Initial stage の起こる時間が真空中よりも短くなるため、急速に拡大するキャビティ領域は小さい。そのため、油膜の形成される位置が接触域に近くなると考えられる。また、キャビティの他の領域、例えば B 部では、干渉縞が見られない。この部分の油膜が厚くなっていれば、A 部分から連続的に変化する干渉縞が観察されるはずである。従って、この部分のレンズに付着した油膜厚さは、ほぼ 0 であることが考えられる。

これらの結果より、この条件でのキャビティ形状は、Dowson らの示すようにレンズ沿って拡がり、後方で丸まった形状になっていることが推測される。また、キャビティ領域内に、キャビティ後端で見られるような曲面を示す暗い縁が見られないこと、表面張力を考慮すると気泡の気液界面は凸部(球のような形状)である方が安定であることから、そのような形状であることが推測される。一方で、純転がり条件や潤滑油粘度の影響により、キャビティ後方で油が逆流し、その一部がキャビティ内へ進入するような場合では、平野らの報告しているような形状(Fig.2.5-16)となることも予想される。さまざまな運転条件下におけるキャビティの形状を検討するには、さらなる実験が必要と思われる。これは、今後の課題としたい。

## 2.5.4 まとめ

本節において、雰囲気圧力のキャビティ成長へ及ぼす影響を調べ、以下の結果が得られた

### (1) キャビティの成長への雰囲気圧力の影響

この章における実験結果より、雰囲気圧力が変化しても、発生から初期の時間域では、キャビティの成長が急速に起こり、その後は、徐々に成長していくことが分かった。従って、2.2 に示した大気圧下でのキャビティの成長過程と同じく、キャビティの成長は2段階(Initial stage, Second stage)で起こる。

Fig.2.5-27 に、0.015 Pa、および、101300 Pa におけるキャビティ成長のモデル図を示す。この図に示すように、Initial stage における成長の時間は、0.015 Pa の方が長い。また、その成長時間の関係から、成長後のキャビティは、0.015 Pa の方が長くなる。Second stage におけるキャビティの成長速度は、101300 Pa の方が 0.015 Pa よりも大きい。また、1 h 程度経過後には、101300 Pa におけるキャビティ長さは 0.015 Pa における長さに近づき、キャビティ長さへの圧力の影響は小さくなる。

また、雰囲気圧力を潤滑油の蒸気圧に近づけた条件においても、2 段階のキャビティ成長が見られた。

### (2) キャビティ形状の検討

キャビティ内で観察される干渉縞から、キャビティ形状を検討した。その結果、キャビティは、ディスクとレンズに沿って拡がり、後端で丸くなった形状と予想される。また、キャビティ領域において、レンズ表面には付着した油膜が観察された。



(参考文献)

- 1 Zaretsky, E.V., “Liquid lubrication in space”, *Tribology International*, 23, 2, 1990, 75-93
- 2 大野, “EHL 条件下における宇宙用潤滑油の諸特性”, *設計工学*, 41, 1, 2007, 9-14
- 3 Ohno, N. Komiya, H., Mia, S., Morita, S., Satoh, N. and Obara, s., “Bearing Fatigue Life Tests in Advanced Base Oil and Grease for Space Applications”, *Tribology Transactions*, 52, 2009, 114-120
- 4 木村, “宇宙機器用グリースの現状と技術課題”, *月刊トライボロジー*, 2001 年 8 月, 50-51
- 5 松尾, 曾谷, 南原, “流体物性測定用装置の研究開発”, *高圧力の科学と技術*, 19, 4, 2009, 256-263
- 6 福田, 劉, 森田, 大野, “環境にやさしい植物油の高圧物性に関する研究”, *JAST トライボロジー会議予稿集 福井 2010-9*, 365-366
- 7 金子, “蒸気圧および蒸気圧関連物性”, *潤滑*, 33, 6, 1988, 454-457
- 8 MICHAEL, N.G., “Evaporation Rate and Vapor Pressure of Selected Polymeric Lubricating Oils”, *ASLE Transactions*, 17, 1, 53-61
- 9 Dowson, D. and Taylor, C.M., “Cavitation and Related Phenomena in Lubrication,” *Institution of Mechanical Engineers, London*, 1975, 15-26
- 10 平野, 兼田, 桑野, 大野, “EHL 及び固液転換域での後流について”, *日本潤滑学会第 33 期春季研究発表会予稿集*, 1989, 435-438
- 11 溝口, 辰巳, 和泉, 森田, 杉村, “往復転がり EHL 接触におけるキャビティ内油量と圧力”, *JAST トライボロジー会議予稿集 東京*, 2010-5, 181-182
- 12 Wedeven, L.D., Evens, D. and Cameron, A., “Optical Analysis of Ball Bearing Starvation,” *Transaction of the ASME, Journal of Lubrication Technology*, 93, 1971, 349-363

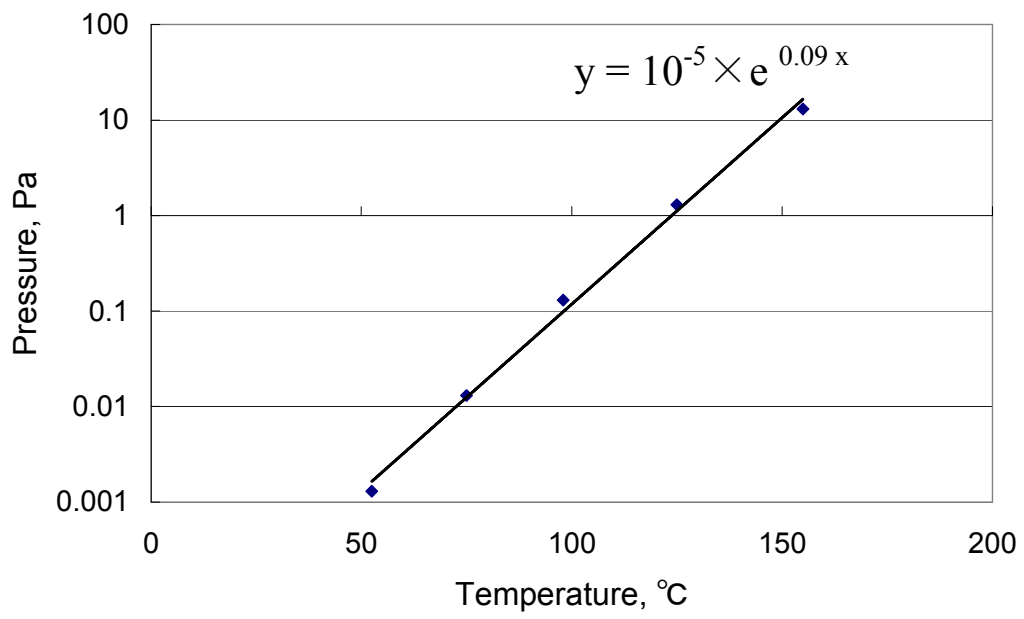


Fig.2.5-1 Vapor pressure of ULVOIL R-4

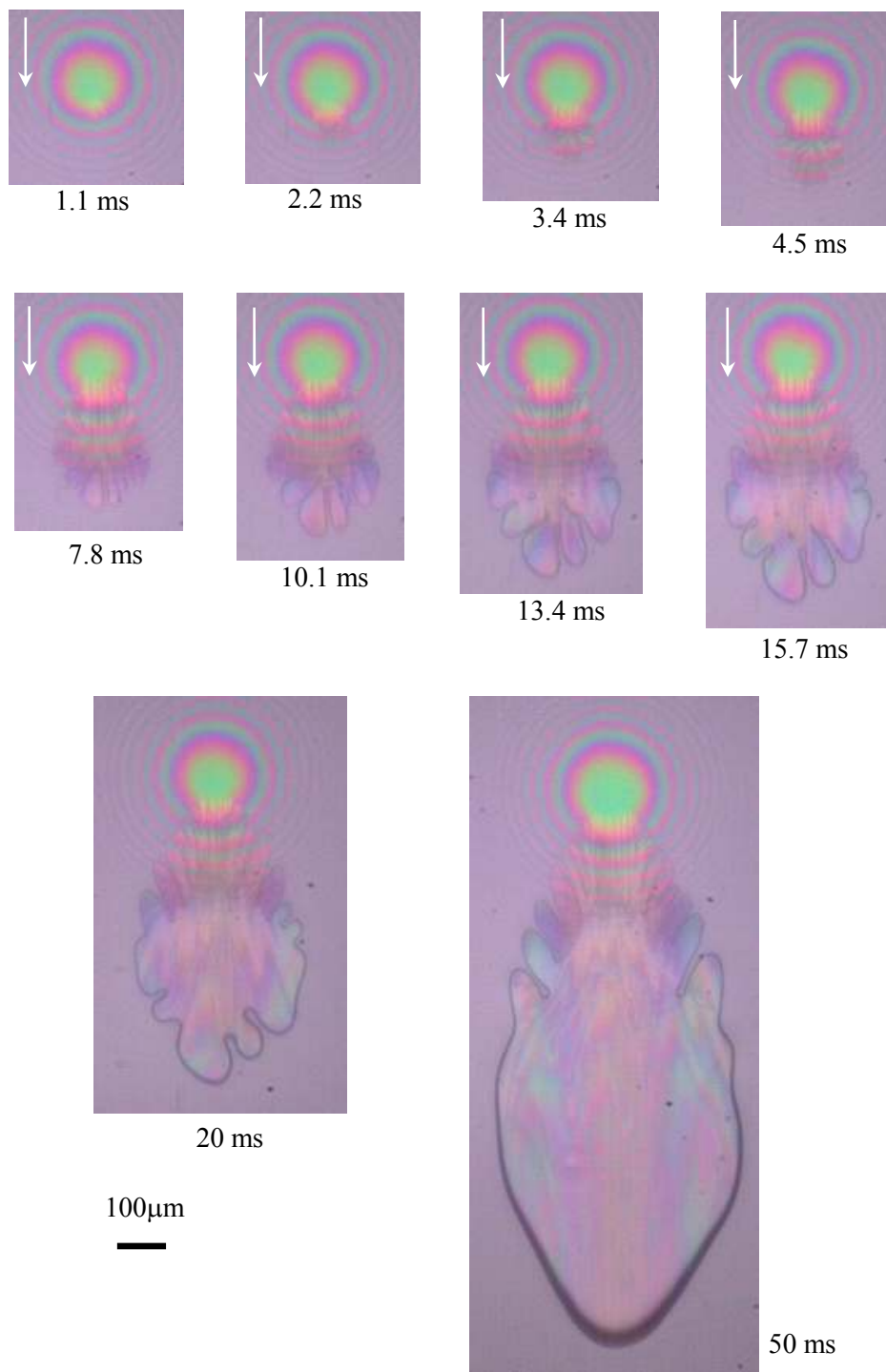


Fig.2.5-2 Cavity growth until 50 ms at 0.015 Pa

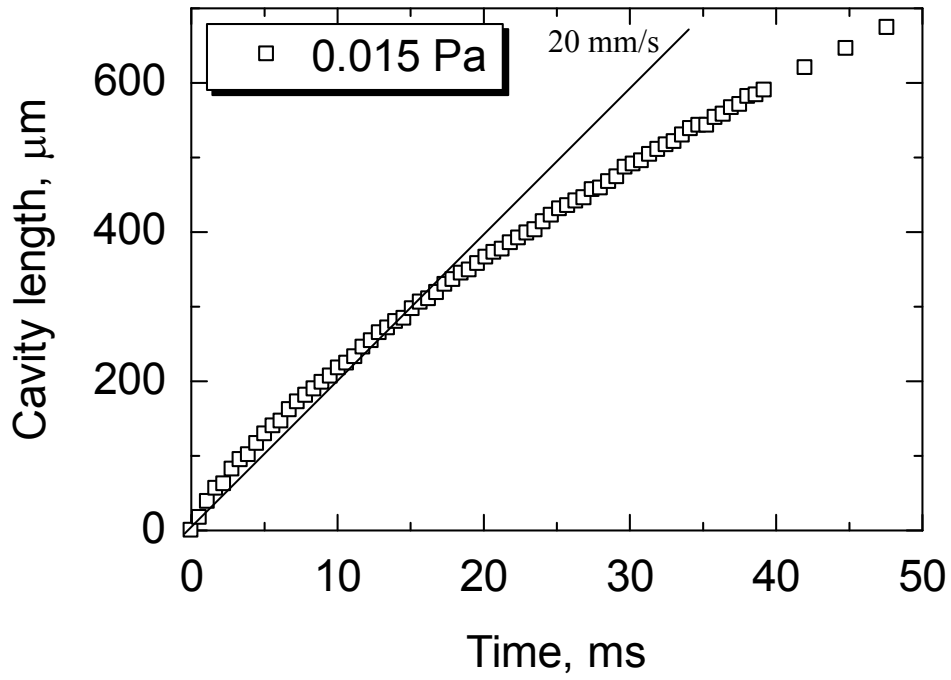


Fig.2.5-3 Changes in cavity length from the start to 50 ms at 0.015Pa

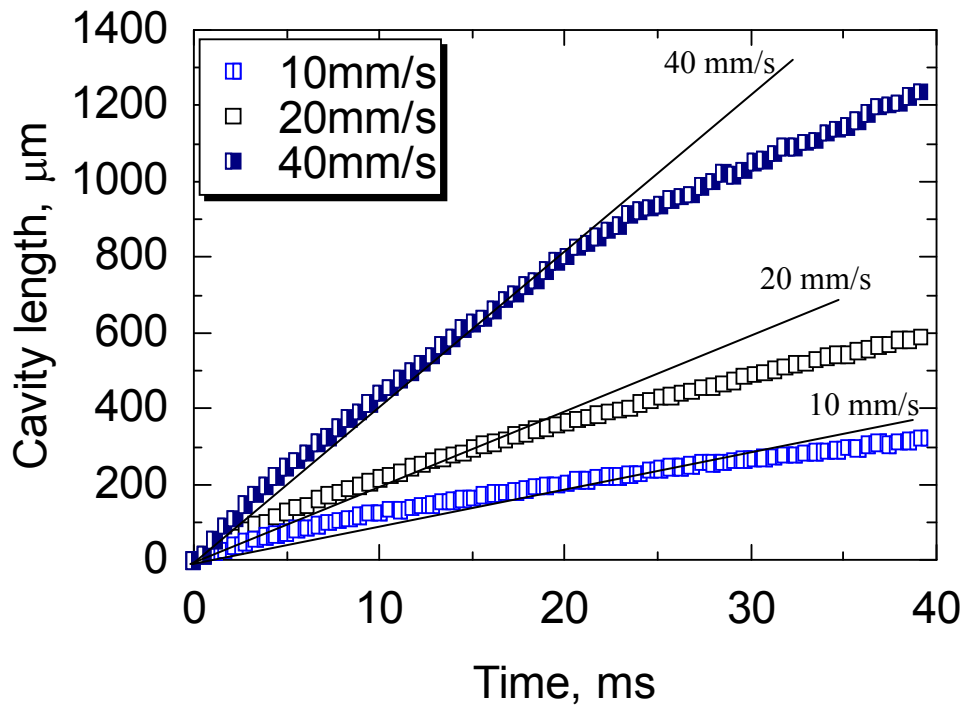


Fig.2.5-4 Effect of sliding speed on cavity growth at 0.015 Pa

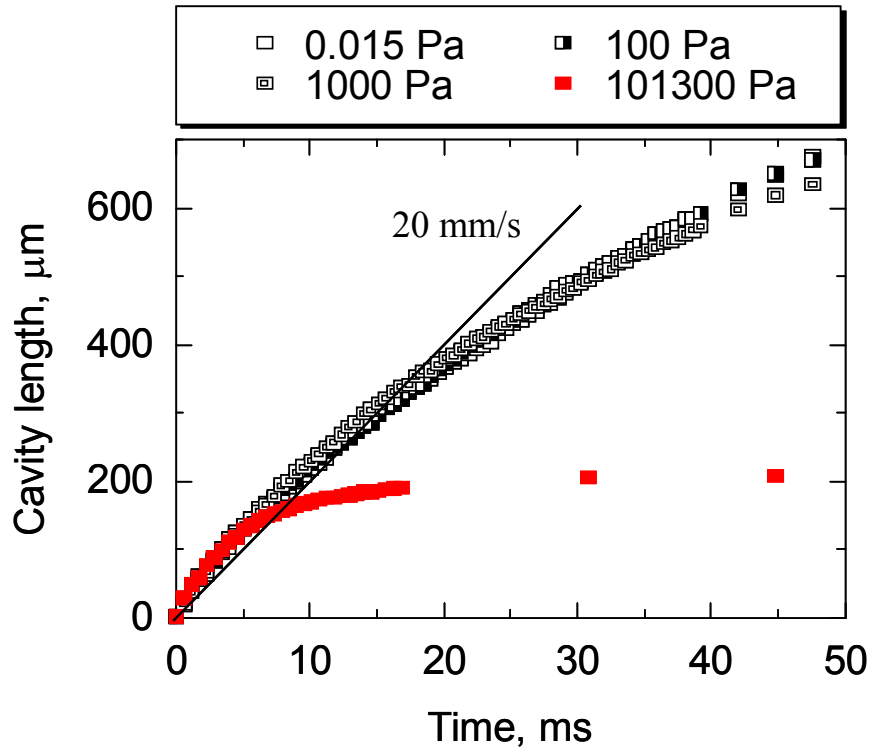


Fig.2.5-5 Changes in cavity length from the start to 50 ms in various pressures

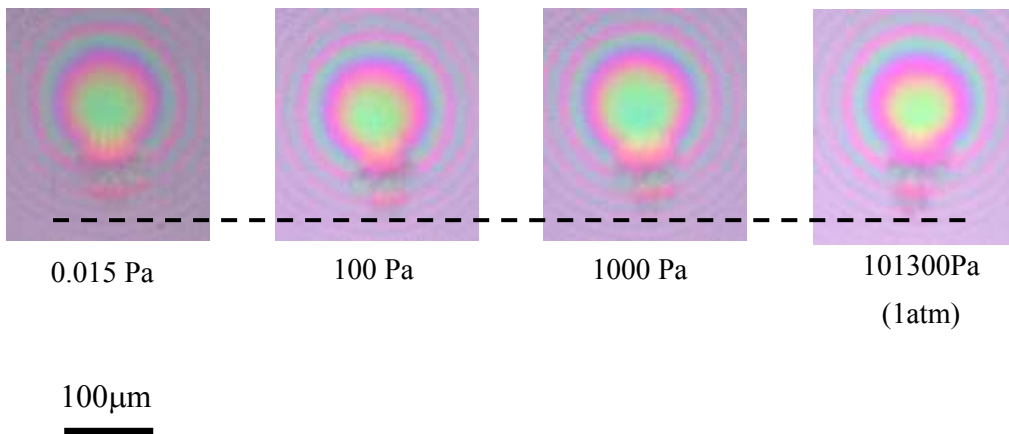


Fig.2.5-6 Cavity at 3.4 ms in various pressures

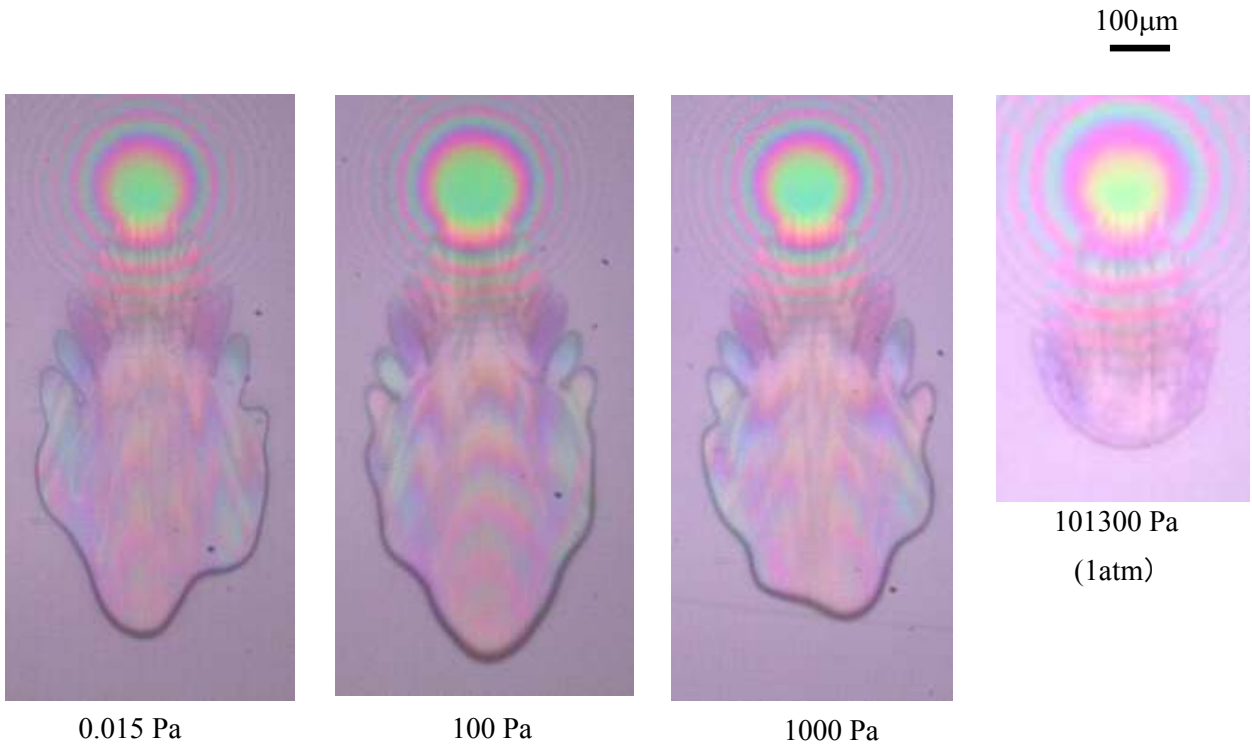


Fig.2.5-7 Cavity at 30 ms in various pressures

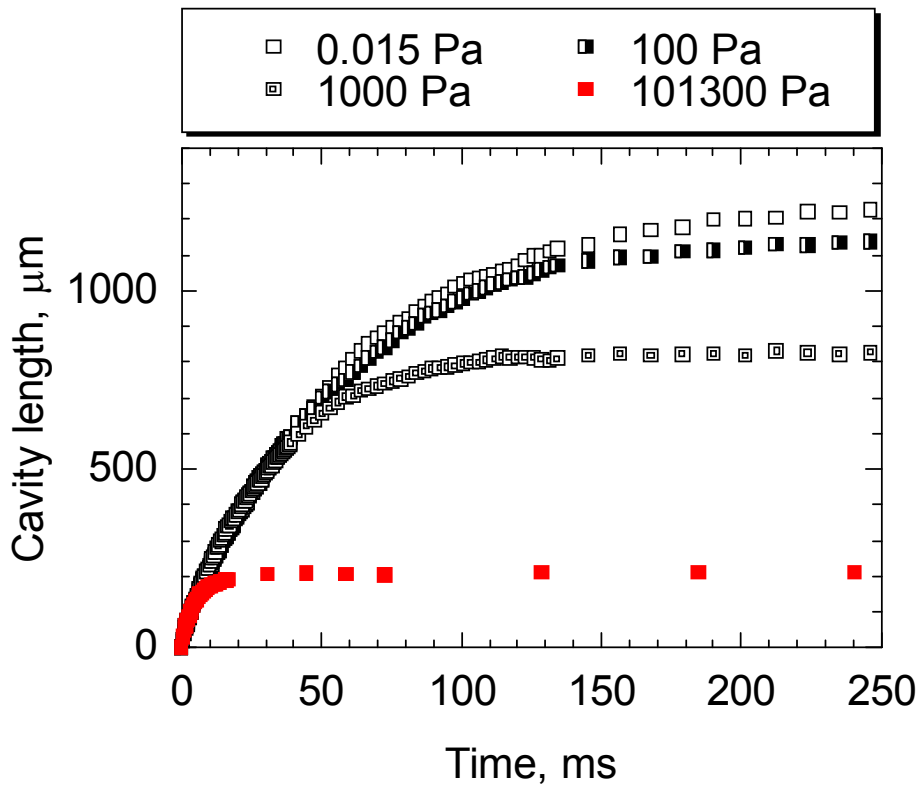


Fig.2.5-8 Changes in cavity length from the start to 250 ms in various pressures

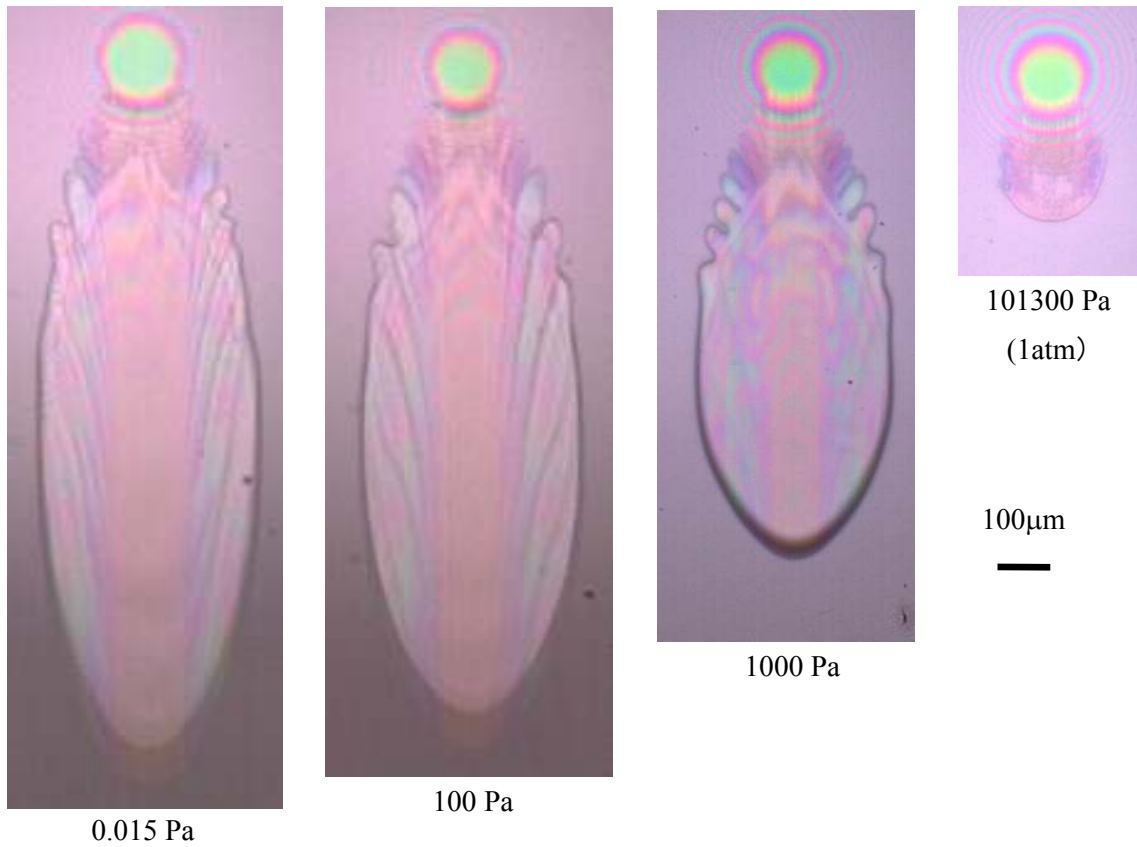


Fig.2.5-9 Cavity at 200 ms in various pressures

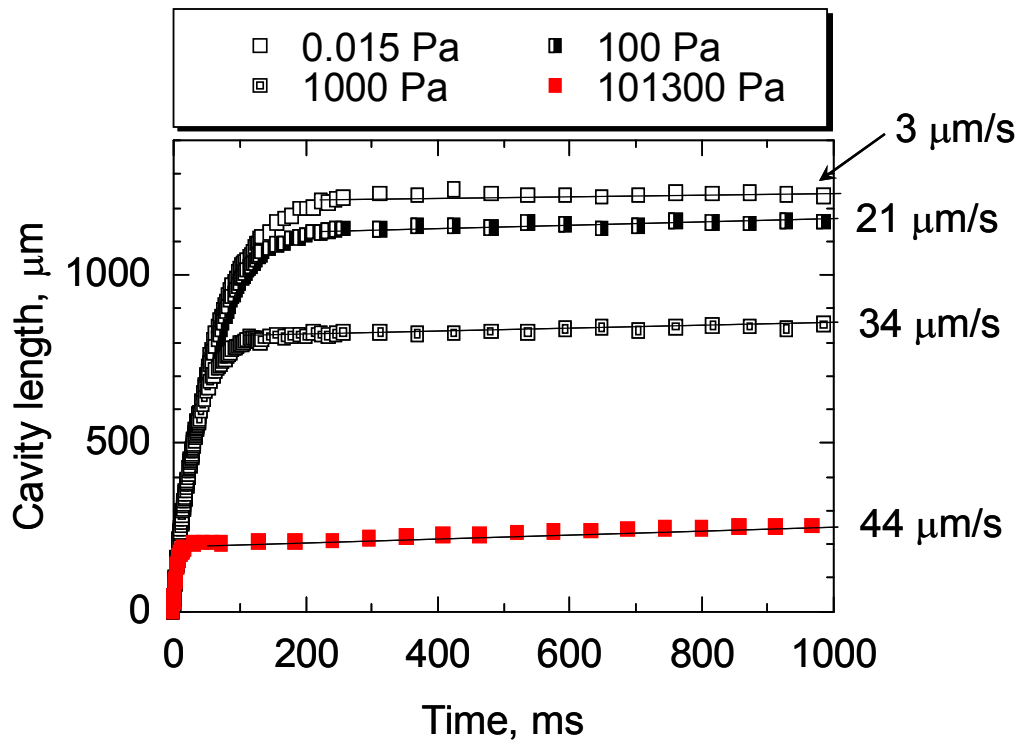


Fig.2.5-10 Changes in cavity length from the start to 1 s in various pressures

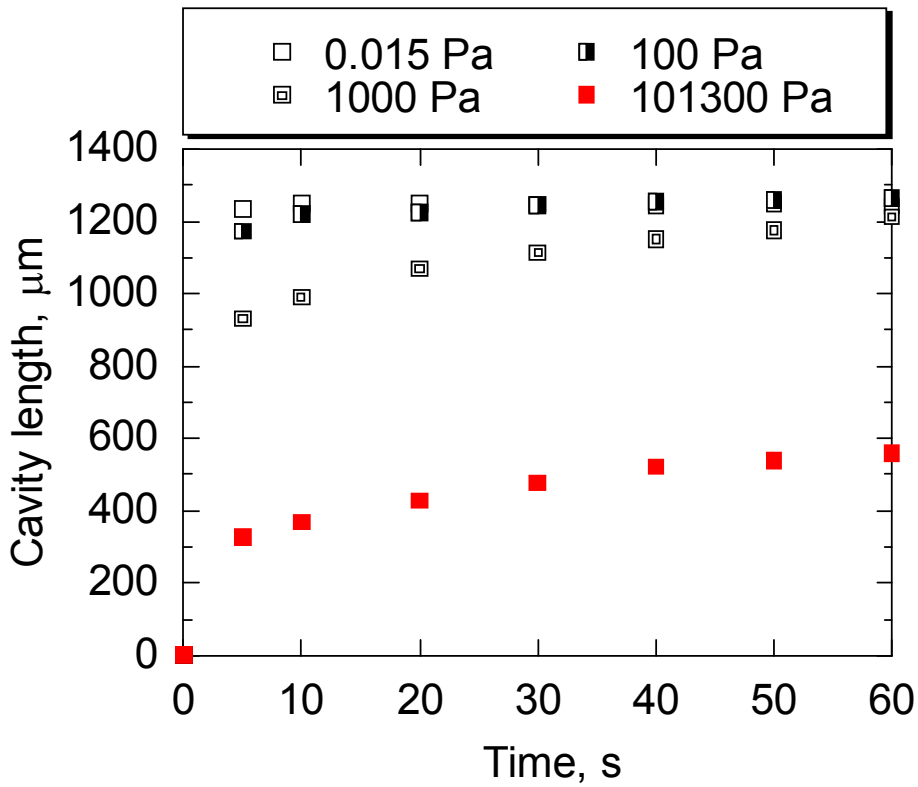


Fig.2.5-11 Changes in cavity length from the start to 60 s in various pressures

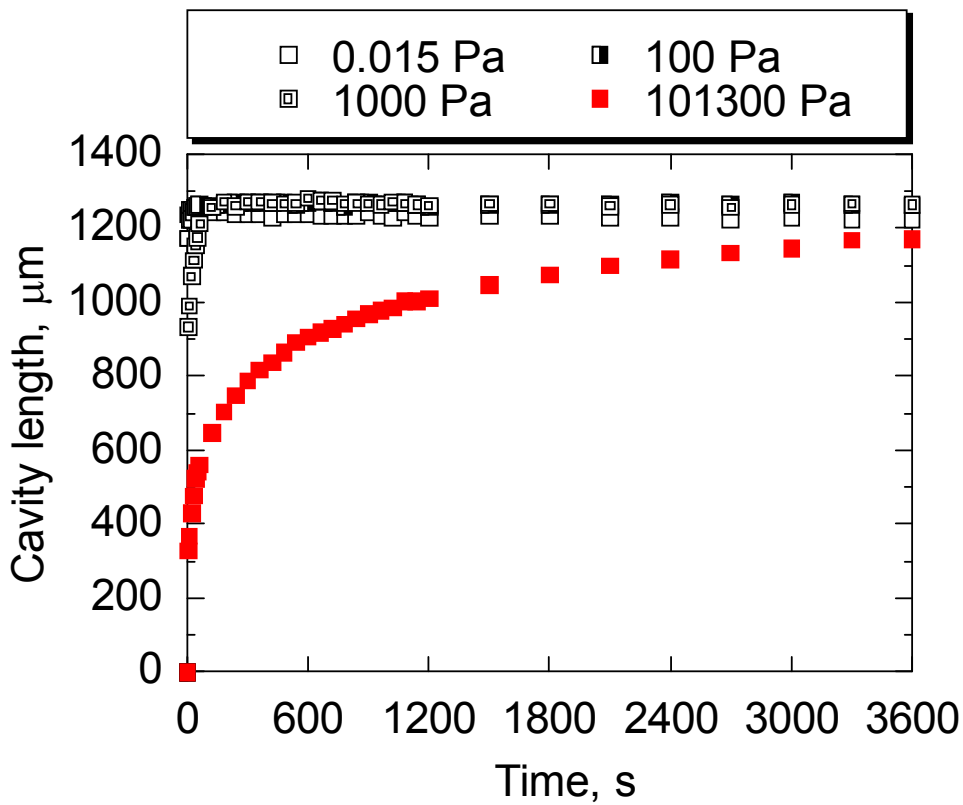


Fig.2.5-12 Changes in cavity length from the start to 1 h in various pressures



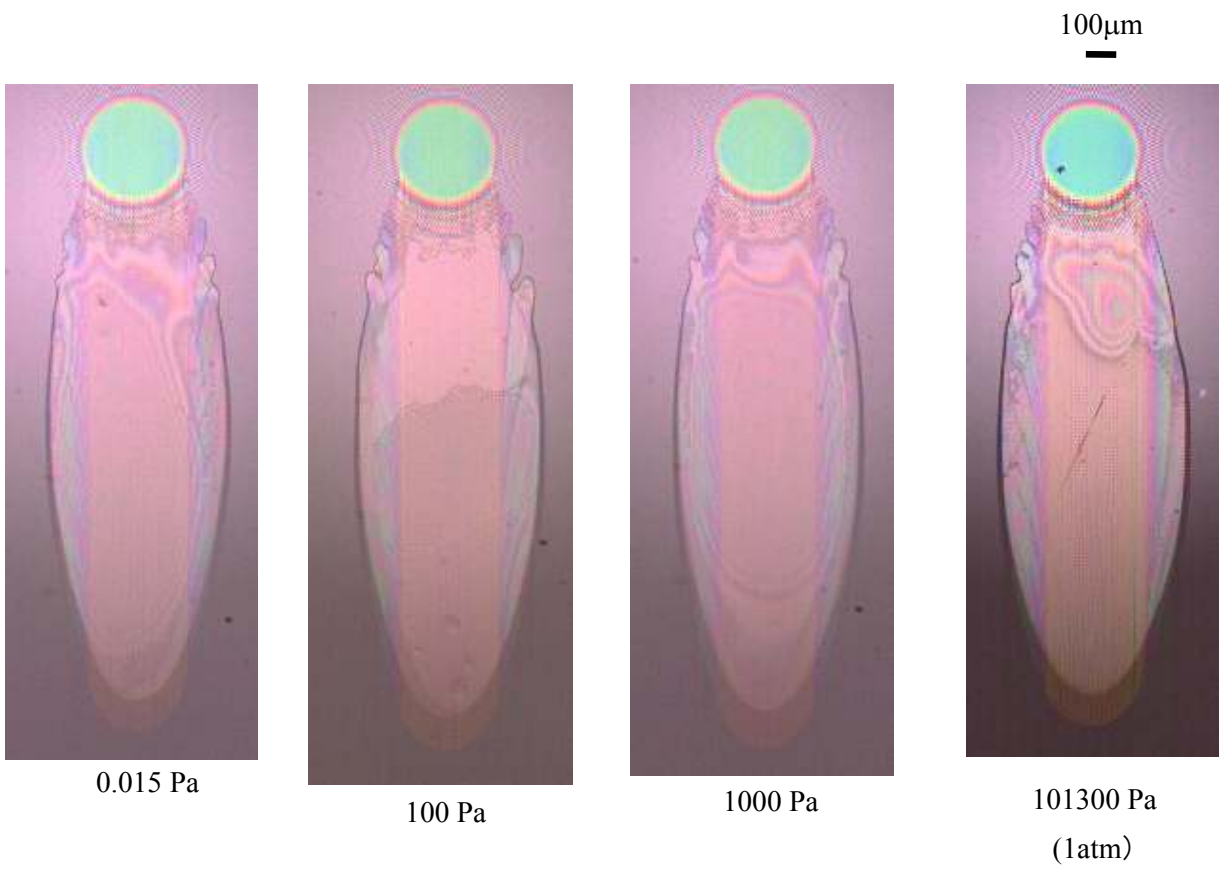


Fig.2.5-13 Cavity at 1 h in various pressures

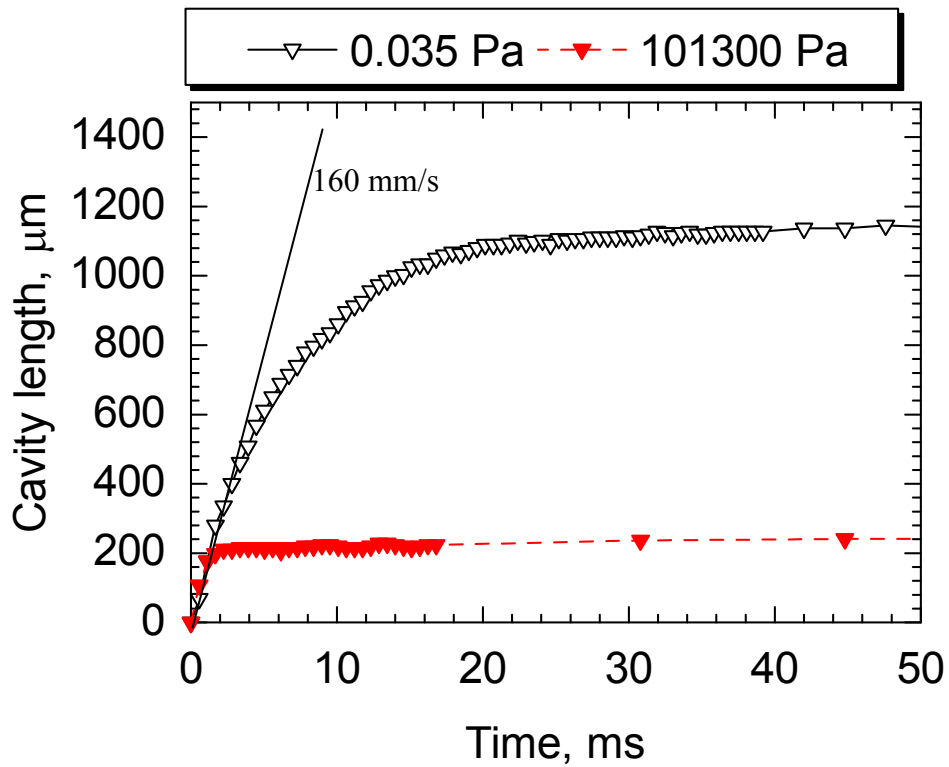


Fig.2.5-14 Changes in cavity length from the start to 50 ms

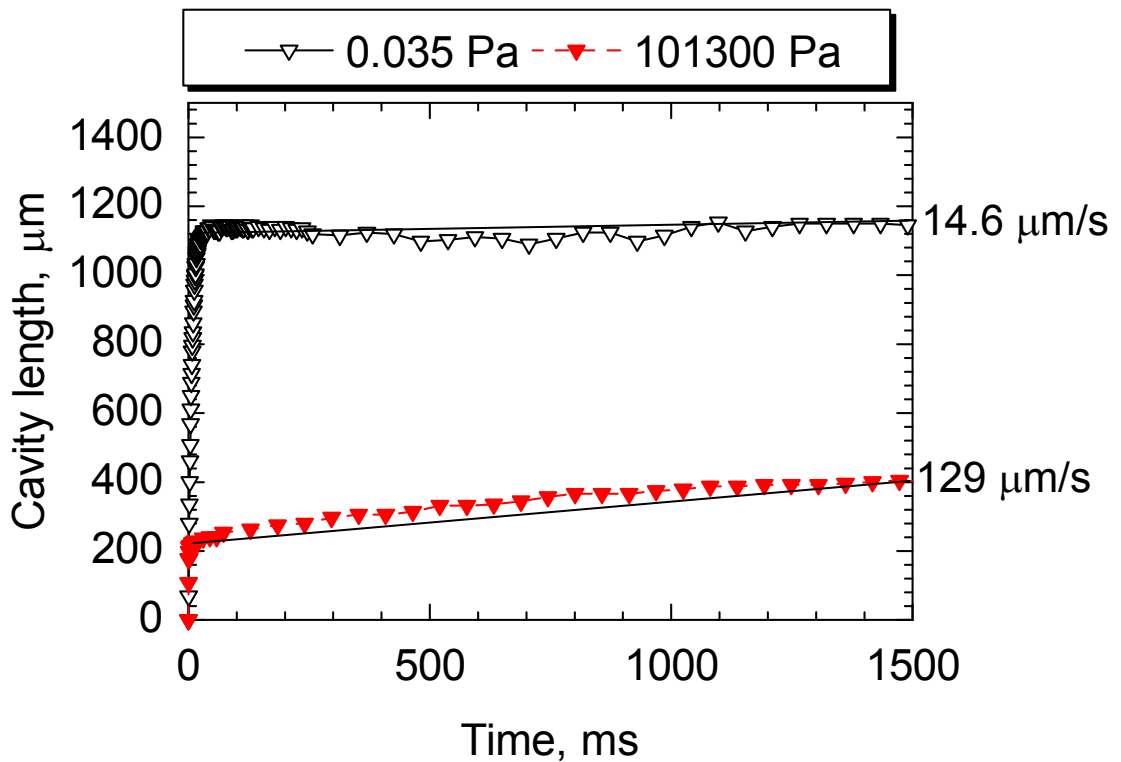


Fig.2.5-15 Changes in cavity length from the start to 1 s

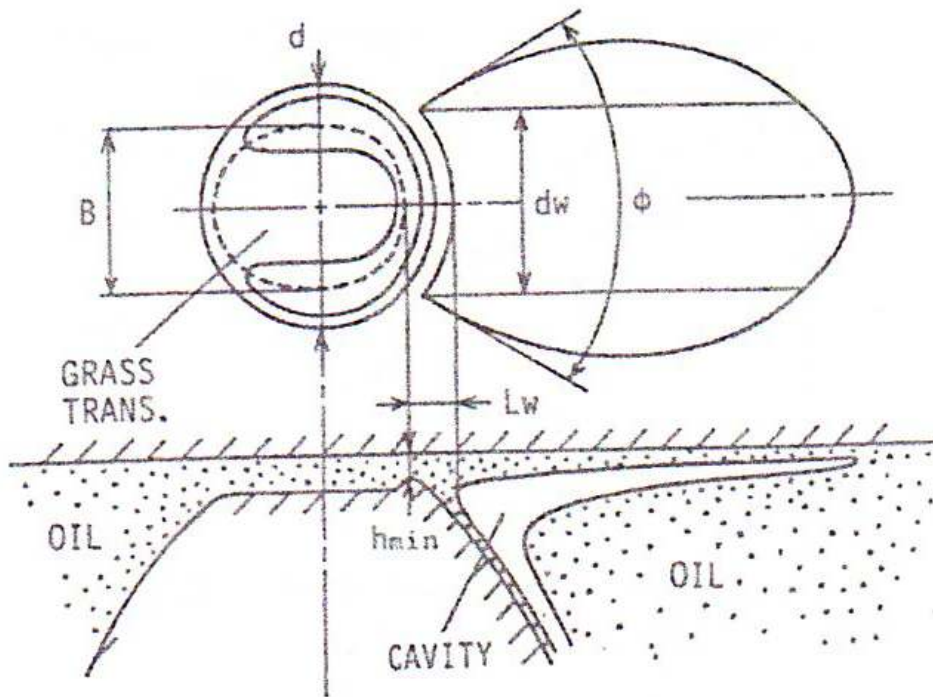


Fig.2.5-16 Cavity shape in EHL film<sup>10</sup>

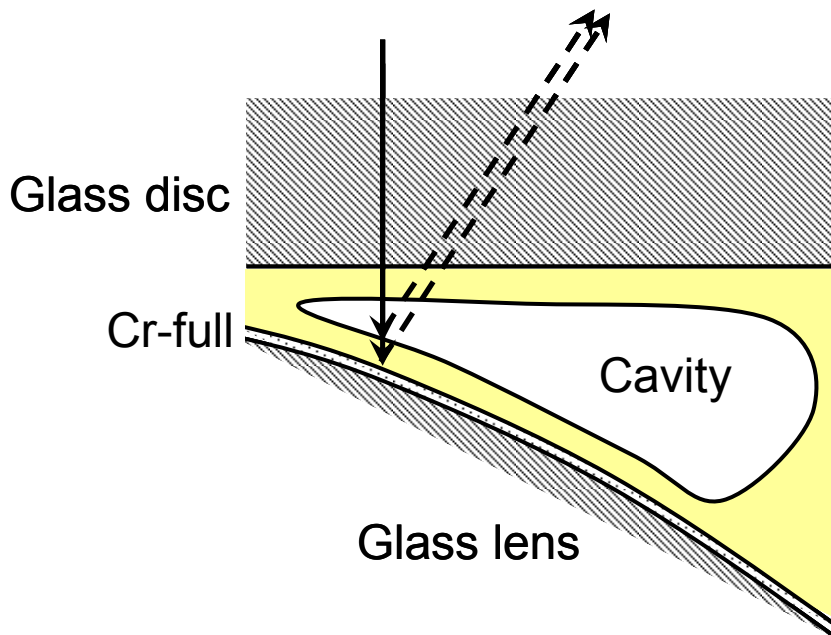


Fig.2.5-17 Model of optical interferometry image in contact

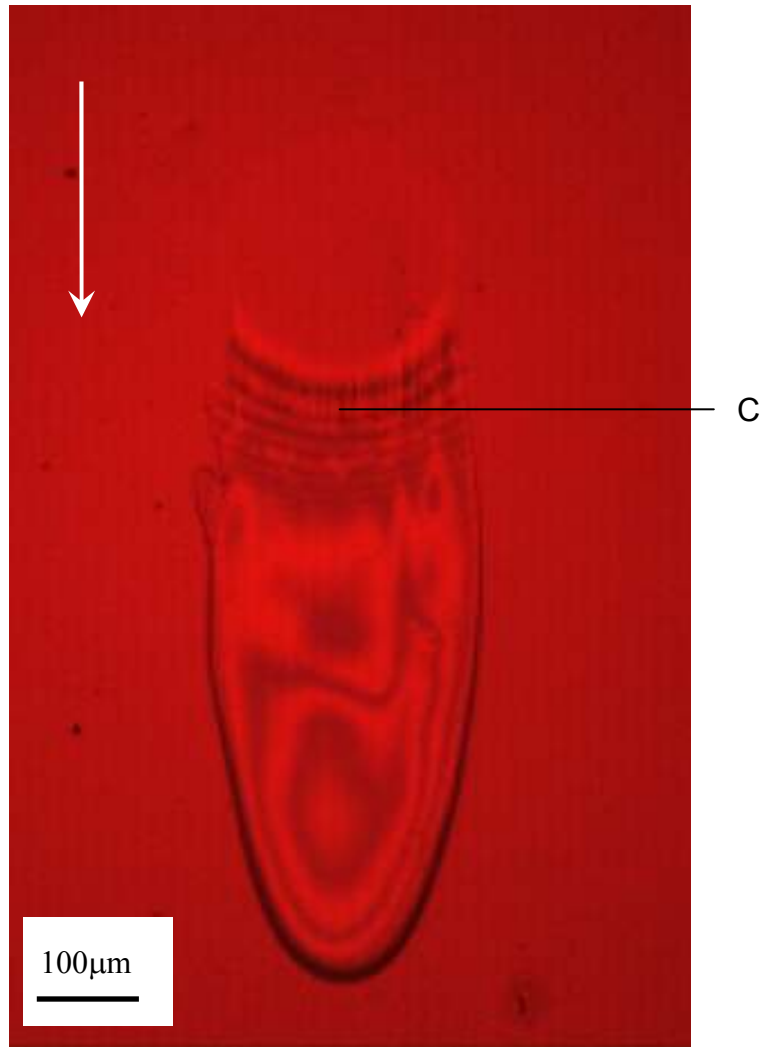


Fig.2.5-18 Optical interferometry image of cavity

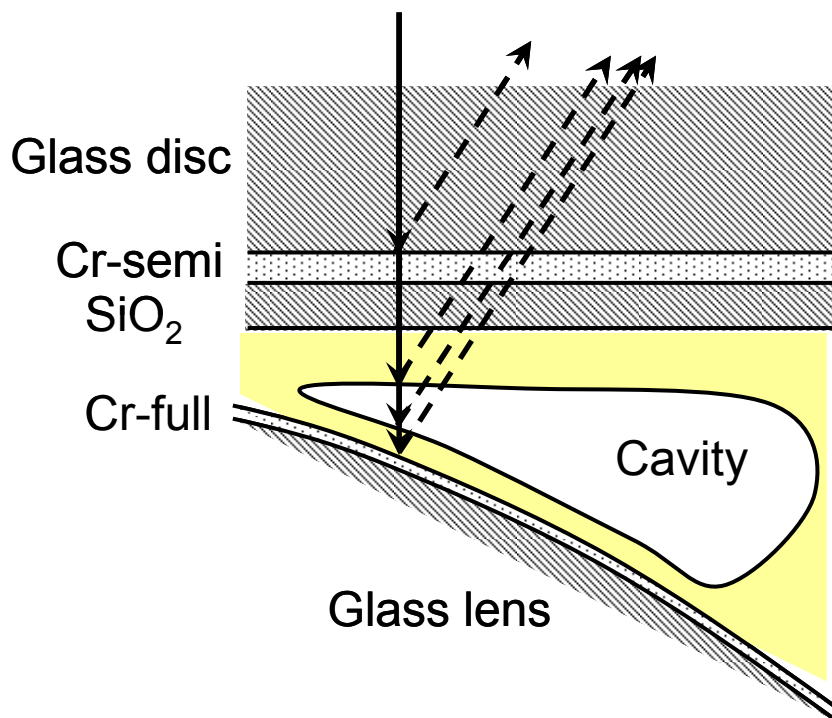


Fig.2.5-19 Effect of spacer layer on optical interferometry

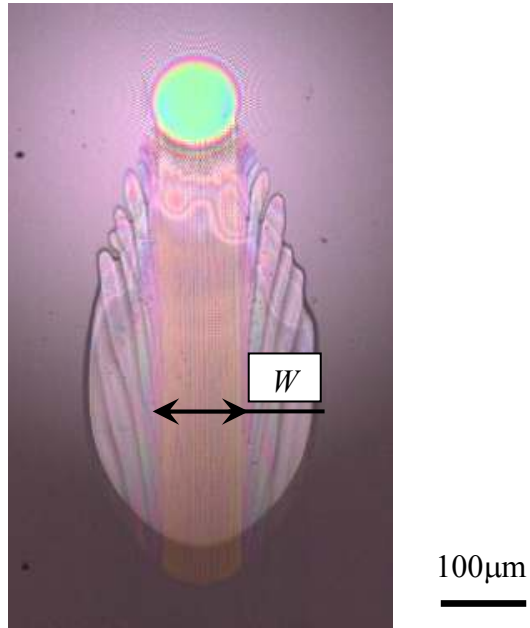


Fig.2.5-20 Optical interferometry with spacer layer

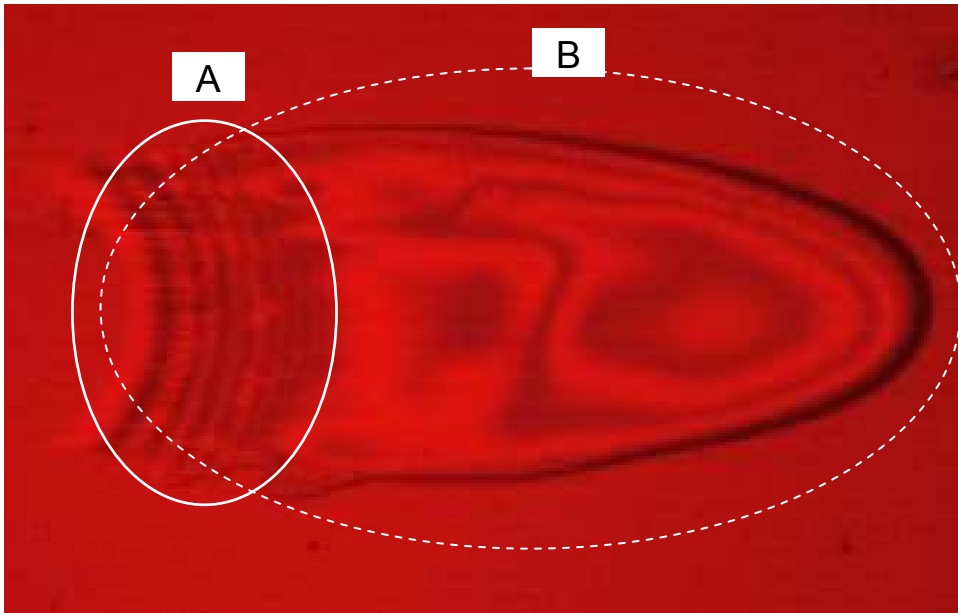


Fig.2.5-21 Two types region of optical interferometry

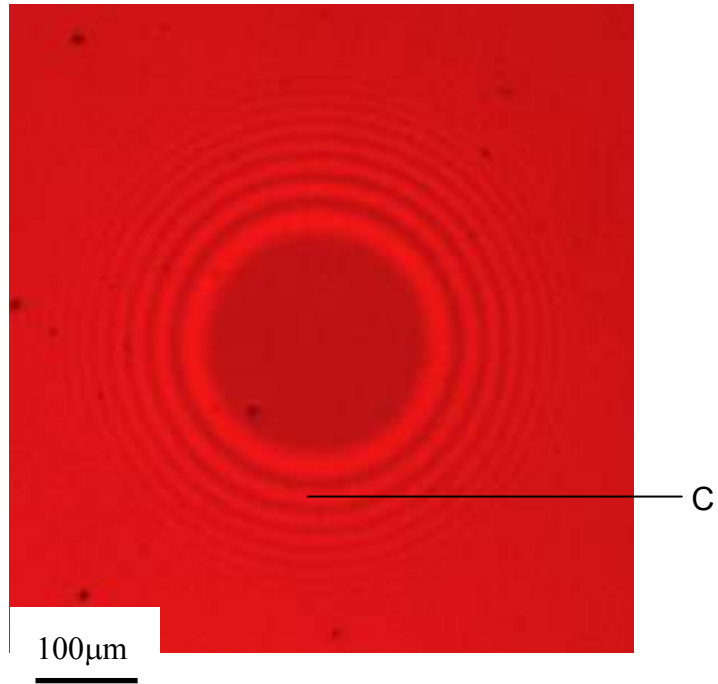


Fig.2.5-22 Optical interferometry in dry contact

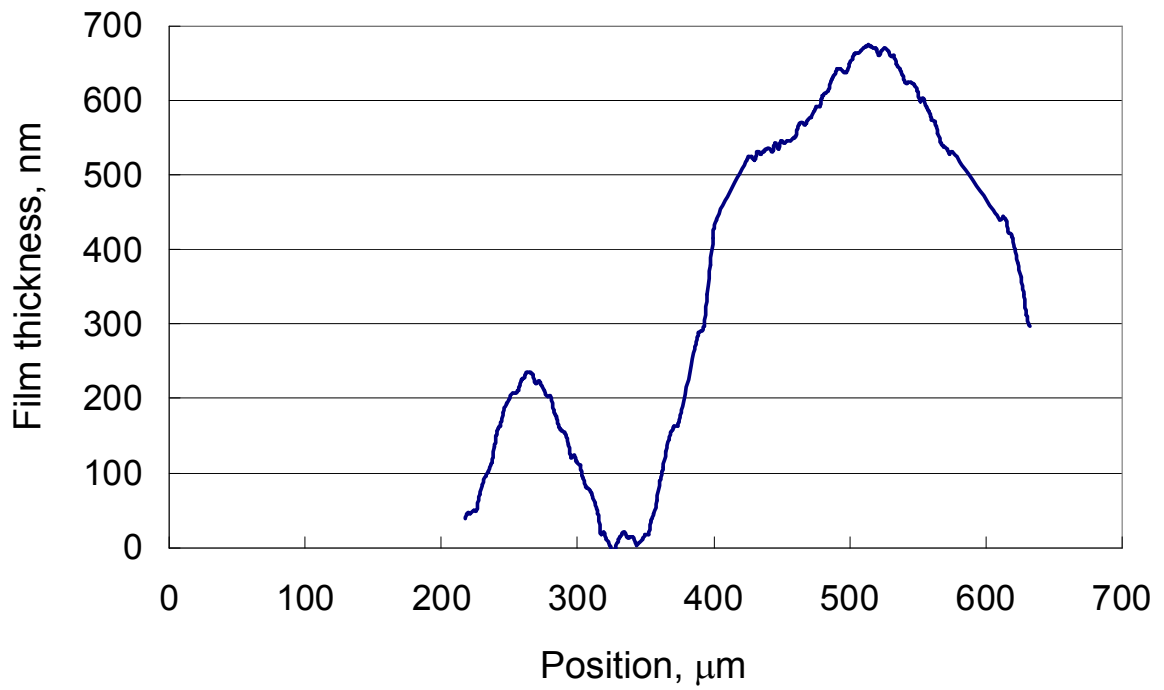


Fig.2.5-23 Film thickness in cavity region

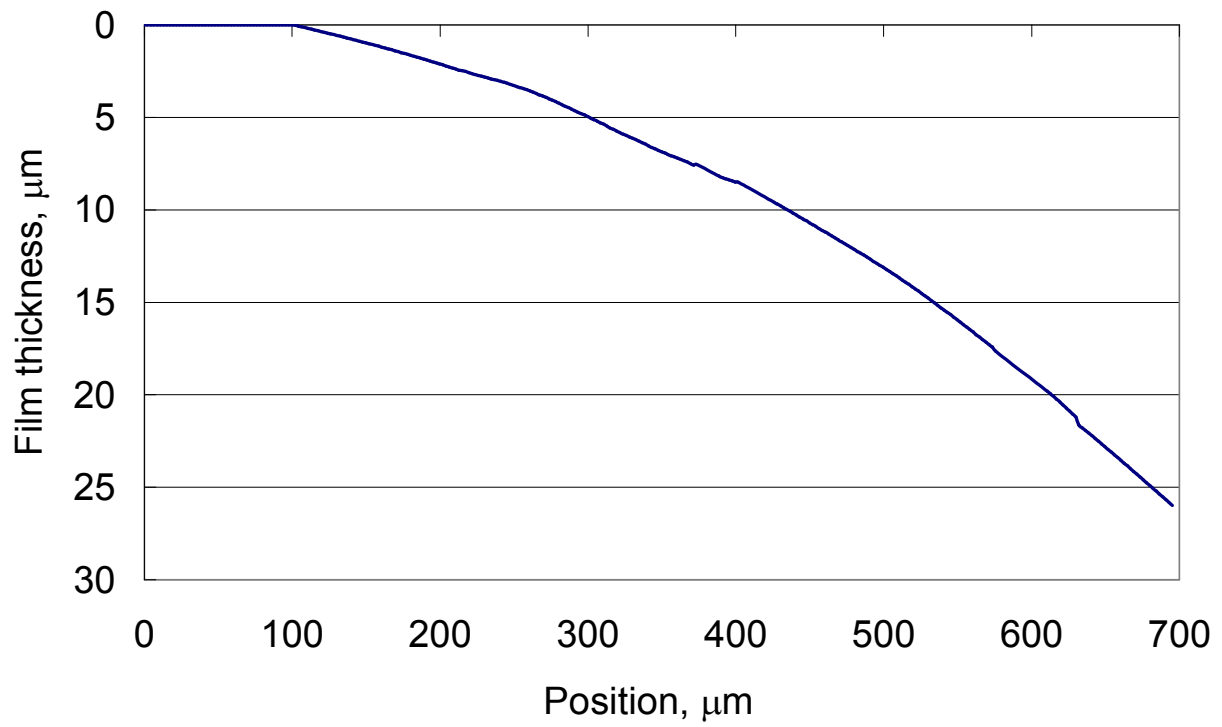


Fig.2.5-24 Film profile at outlet of contact

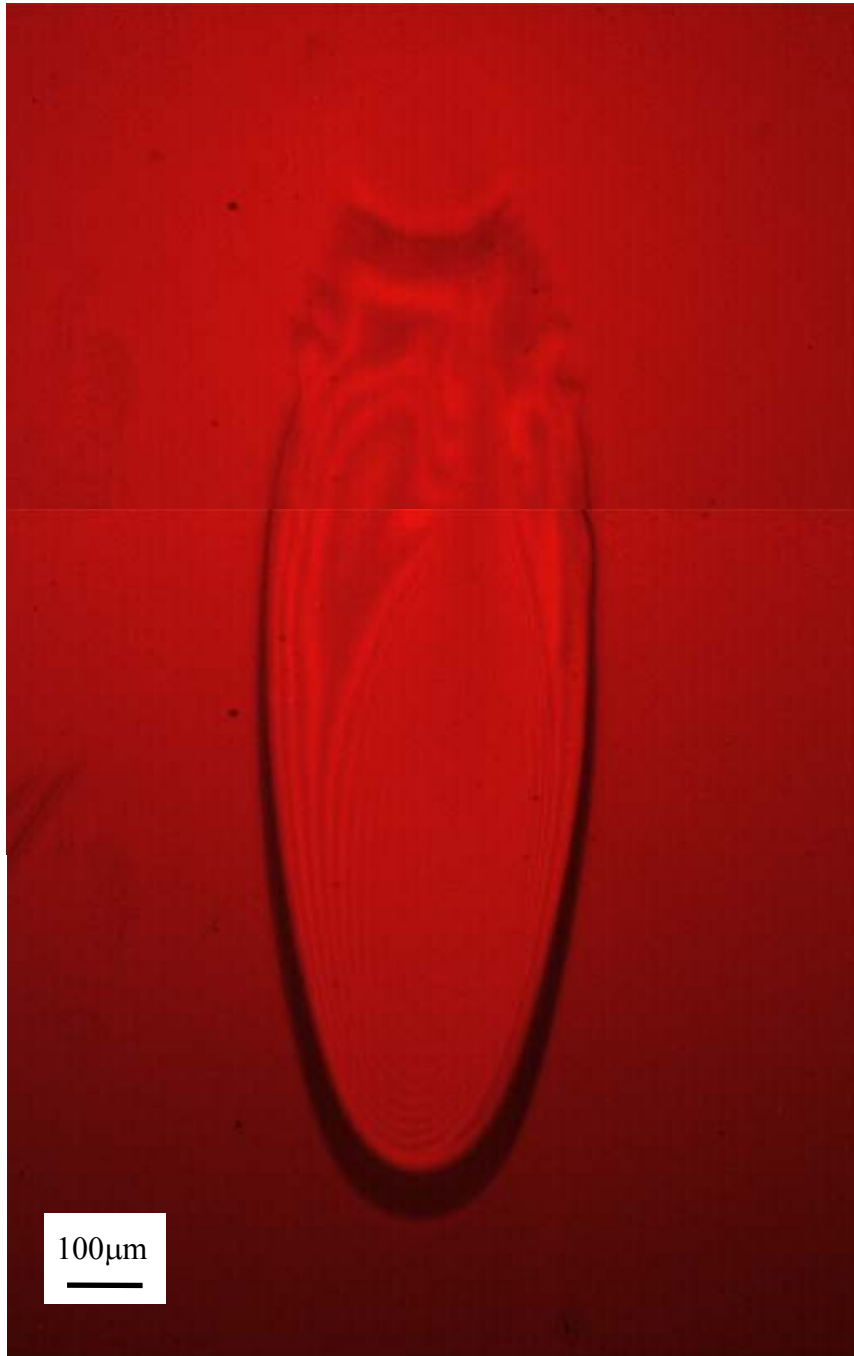


Fig.2.5-25 Optical interferometry image at 20 mm/s



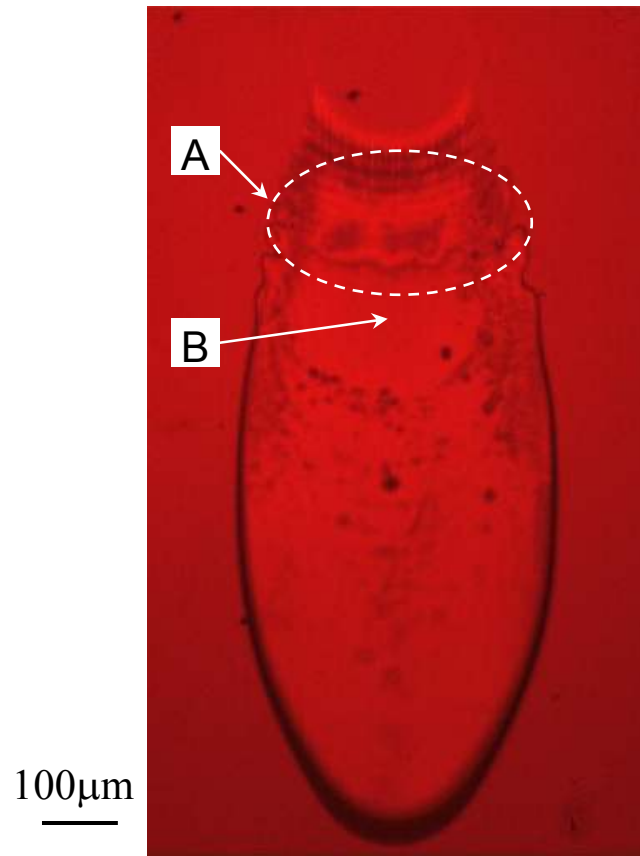


Fig.2.5-26 Optical interferometry image at 20 mm/s in air

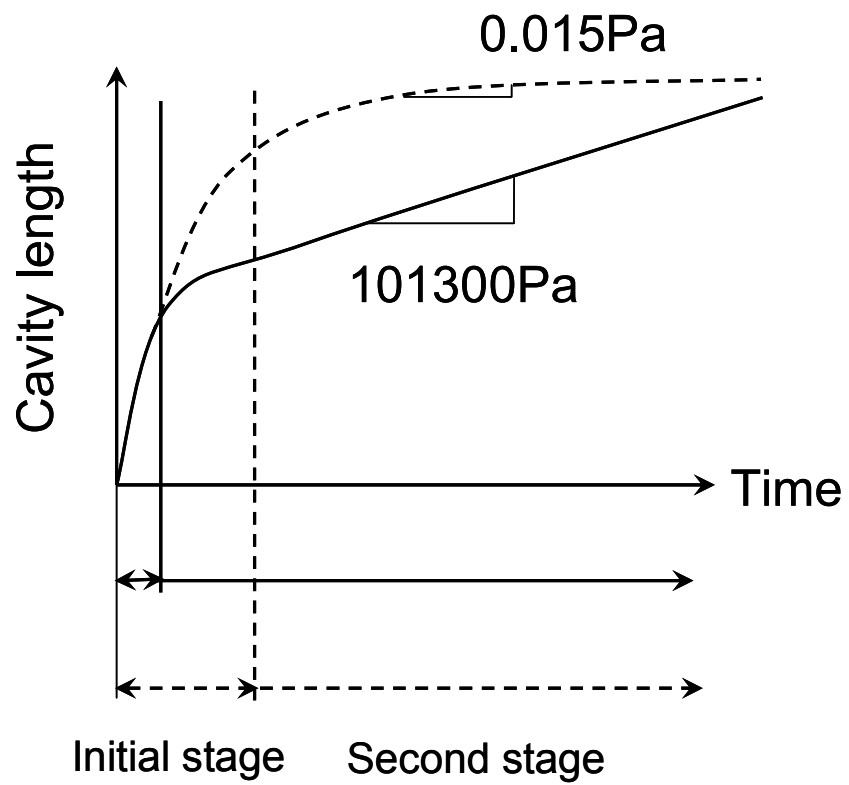


Fig.2.5-27 Effect of pressure on cavity growth

## 2.6 表面張力のキャビティー成長へ与える影響

本節では、表面張力がキャビティー成長に及ぼす影響を調べた。

潤滑油の種類によって、表面張力は異なる。潤滑油の表面張力が異なると、固体表面での潤滑油の濡れ性が変化する。これは、場合によって、油量の不均一などの問題を引き起こし、潤滑膜の形成に影響を与える<sup>1</sup>。従って、潤滑部の固体表面に応じた潤滑油の選定が必要になる。

また、潤滑において表面張力の関係する現象として、発泡現象が挙げられる。表面張力は、発生する気泡の大きさやその成長に影響を与える<sup>2,3</sup>。従って、潤滑油中で発生するキャビテーションにも、表面張力の影響が見られると予想される。潤滑部に多数の気泡が発生すると、液体量が減少するため、循環システム部分などにおいて油不足の問題となり、その結果、供給される潤滑油量の低下が起こる。この問題の対策のために、消泡剤の使用が行われる<sup>4</sup>。液体の一部に表面張力の低い分子(消泡剤、シリコーン油が主に使用される)を導入させることにより、局所的な分子間力の低下が起こり、その部分で気泡の膜が破断される。

本節での実験では、潤滑油にシリコーン油と PAO を使用し、滑り試験において発生するキャビテーションを観察した。なお、表面張力は、シリコーン油の方が PAO よりも低い。また、2つの潤滑油の粘度は、実験温度においてほぼ等しくし、潤滑油粘度の影響を取り除いた。

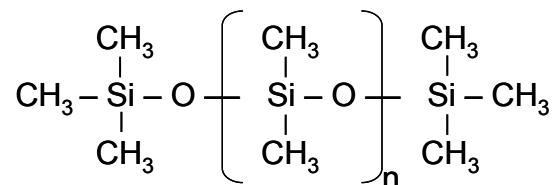
## 2.6.1 実験条件

本節で行った実験における各条件を以下に示す.

- ・潤滑油：シリコーン油(信越化学工業社製, KF96 100cs), PAO63

粘度は, 0.1 - 0.11 Pa/s @295K であった.

シリコーン油の分子構造を, 以下に示す.



- ・雰囲気：ヘリウム, 空気, アルゴン, 二酸化炭素
- ・滑り速度：62.5 - 137 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, 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.

- ・各気体の溶解度

シリコーン油における各気体の溶解度を調べた. 測定方法は, 第3章3.3.2にて示す, Table 2.6-1 に, 得られた溶解度を示す. 温度は, 295K である. この表より, シリコーン油における気体の溶解度は, ヘリウム, アルゴン, 二酸化炭素の順に大きくなっており, PAO の場合と同じ傾向である. また, PAO とその値を比較すると, ヘリウム, アルゴンで高く, 二酸化炭素では若干低いことが確認される. (なお, カタログによると, 一般に, シリコーン油における空気の溶解度は, 鉱油よりも高いと報告されている.)

## 2.6.2 表面張力，濡れ性の測定

### (1) 表面張力

表面張力の測定方法は，様々なものが提案されている<sup>5</sup>．今回は，懸滴法(ペンダントドロップ法)により測定した<sup>6,7</sup>．この方法では，管に懸垂した水滴の落下する直前の形から，表面張力を求める．液滴の表面に加わる表面張力の線張力と，液滴の重量，静水圧が釣り合うと仮定し，釣り合いの式から表面張力を求める．

一般には，表面張力を容易に測定できるように，いくつかのパラメーターの関数として表記される．以下の式は，Andreasらによって提案された式である．

$$\gamma = gD_1^2(\rho - \sigma)F \quad (2.6.2-1)$$

$\gamma$ ：表面張力， $g$ ：重力加速度(9.8 mm/s<sup>2</sup>)， $\rho$ ：液体の密度， $\sigma$ ：気体の密度，

$D_1$ ， $D_2$ は，Fig.2.6-1 に示されるように，液滴の最大直径，液滴の先端から  $D_1$  だけ上部の直径である． $F$  は， $D_1$ ， $D_2$  の関数で示される値であり，各文献において，一覧表が示されている<sup>6</sup>．今回は，この換算式を使用し，表面張力を計算した．本測定は，ばらつきも大きいため，5 回程度の測定結果を平均し，それを表面張力として定めた．

本研究では，雰囲気気体を変化させ，実験を行っているので，表面張力に対する雰囲気気体の影響も調べておく必要がある．そこで，雰囲気気体を制御できる環境下で，懸滴法による表面張力の測定を行った．本実験に使用した測定装置を，Fig.2.6-2 に示す．メスシリンダを容器とし，開口部をゴム栓で塞ぐことにより密封性をもたせた．ゴム栓には，2 つの穴を設け，気体を導入するためのチューブと，排気のためのチューブをそれぞれ挿入した．雰囲気気体の置換は，予め，十分な時間，任意の気体を容器内に導入，排気することによって行った．その後，測定を開始した．また，測定中もその気体を流し続けた．

シリンジの針は，ゴム栓の中央部から，容器内に達するまで差し込む．プランジャーを押すことにより，容器内で針の先端から液滴を形成させる．なお，シリンジ内に取り込む潤滑油には，予め飽和溶解になるまで気体を吹込み処理している．

液滴は，メスシリンダのガラス越しに，顕微鏡により観察した．

Fig.2.6-3，2.6-4 に，空気中における PAO，シリコーン油の液滴を示す．この図より得られた，各直径  $D_1$ ， $D_2$  を基に表面張力を計算すると，PAO63 では，29.0 mN/m，シリコーン油では，18.4 mN/m と分かる．従って，シリコーン油の方が低いことが確認された．また，Fig.2.6-5 に，測定された表面張力と各気体の溶解度の関係を示す．これらの図より，すべての雰囲気気体において，PAO63 の表面張力の方がシリコーン油のそれよりも大きいことが分かる．また，PAO，シリコーン油の両油において，雰囲気気体と表面張力の関係は，明確に見られなかった．その差は，測定によるばらつきと見れる．従

って、雰囲気気体の表面張力へ及ぼす影響は大きくはないことが分かる。表面張力への溶解気体の影響の報告もある<sup>8</sup>が、この測定では、雰囲気圧力が高い条件である。今回の測定では、雰囲気圧力が大気圧であり、気体の溶解量が小さいため、その影響が見られなかったと考えられる。例えば、溶解によって、粘度などの特性が明らかに変化する場合、表面張力にもその影響が見られると推測される。一般的に、潤滑油粘度と表面張力は関係しており、粘度が高いものは表面張力も高い<sup>9</sup>。従って、溶解量が大きくなるほど表面張力への影響も大きくなると考えられるが、本実験での条件では溶解量の表面張力へ及ぼす影響が小さかったと考えられる。

## (2) 接触角の測定

接触角は、クロムの全反射膜を施したガラス表面(実験で使用するレンズ表面と同条件)に、潤滑油を1滴落とし、10 s 経過後の液滴を撮影し、その画像から接触角を求めた。今回は、 $\theta/2$ 法を使用した<sup>10</sup>。

その結果、シリコーン油では、 $9^\circ$ 、PAO63では、 $14^\circ$ であり、シリコーン油の方が接触角は小さい。従って、シリコーン油の方が、表面濡れ性が高いことが分かった。

## 2.6.3 実験結果, および, 考察

### (1) シリコン油におけるキャビティの成長の観察

ここでは, シリコン油におけるキャビティの発生時の観察結果, および, シリコン油におけるキャビティ成長と雰囲気気体の関係について述べる.

Fig.2.6-6 に, ヘリウム中におけるキャビティの発生から約 16 ms までのキャビティの画像を示す. この実験において, 滑り速度は 20 mm/s, 荷重は 1 N であった. 荷重は, 設定した滑り速度で回転している状態で, 加えた. Fig.2.6-7 は, 各雰囲気における発生から 75 ms までにおけるキャビティ長さの変化を示したものである. この図において, 滑り速度を直線で示している. Fig.2.6-8 には, 発生から 10 ms における各雰囲気でのキャビティの画像を示す.

Fig.2.6-6 より, 1.1ms においてキャビティの発生が見られ, その後急速に成長していることが分かる. 発生から 2.2, 3.4 ms におけるキャビティの画像より, キャビティの後端は, 一部分が伸びた, 特異的な形状をもつことが確認できる. その後, 約 10 ms 以降では, キャビティ後端が滑らかな界面を持った形状へと変化する. Fig.2.6-7 より, キャビティ長さは, 約 5 ms までに急速に成長し, その成長速度は滑り速度に近い. その後, 10 ms 以降では, 成長速度は低下する. また, この図より, この時間域におけるキャビティ成長には, 雰囲気気体の影響が明確には見られないことが分かる. Fig.2.6-8 には, 開始から 10 ms におけるキャビティの画像を示しているが, その形状や長さには, 雰囲気による大きな差は見られない.

Fig.2.6-7 より, 約 30 ms では, キャビティ長さに雰囲気気体の影響が見られた. その長さは, 二酸化炭素で長くなる. この時間で, 他の気体では, その大きさに大きな差は見られない.

Fig.2.6-9 には, 各雰囲気における発生から 1 s までのキャビティ長さの変化を示す. また, Fig.2.6-10 には, 発生から 1 s における, 各雰囲気でのキャビティの画像を示す. Fig.2.6-11 には, 発生から 60 min までのキャビティ長さの変化を示したものである. なお, この図における実験では, 荷重は 7 N である.

Fig.2.6-9 より, 約 1 s 後には, 雰囲気気体の差は, 明確に見られる. キャビティ長さは, ヘリウム, 空気, アルゴン, 二酸化炭素の順に長くなる. Fig.2.6-10 より, すべての気体において, キャビティは, 潤滑油の流れ方向に拡大している. Fig.2.6-11 より, 60 min 経過後においても, 雰囲気による差は見られ, 1 s 後における差と同様である. また, 約 60 min 経過後のキャビティ長さの時間変化は, 二酸化炭素中で一番大きい.

従って, シリコン油におけるキャビティの成長に関しても, 発生から初期の成長では, 雰囲気気体が影響せず, その後の成長においては, 雰囲気気体の影響する段階が見られ, 成長は 2 段階で起こることが分かった.

## (2) PAO との比較

Fig.2.6-12 に、発生から 1.1, 3.4, 10.1 ms における、シリコーン油と PAO の各潤滑油でのキャビティの画像を示す。この実験において、滑り速度は 20 mm/s, 荷重は 1 N であった。なお、雰囲気は、アルゴンである。Fig.2.6-13 には、発生から 75 ms までのキャビティ長さの時間変化を示す。Fig.2.6-7 の結果に、PAO での結果を付け加えたものである。なお、この図には、各雰囲気における結果を示している。

この時間域でのキャビティの形状は、両潤滑油において、よく似たものである。また、両条件で、急速に成長していることが分かる。また、Fig.2.6-13 より、発生から約 15 ms までのキャビティの成長には、各雰囲気において、潤滑油の違いが見られない。その後、成長速度が低下する。75 ms でのキャビティ長さには、潤滑油による大きな違いは見られない。従って、この時間域におけるキャビティ成長には、表面張力の影響が見られないと分かる。

Fig.2.6-14 には、各潤滑油における、発生から 1 s 後までのキャビティ長さの変化を示す。Fig.2.6-15 には、アルゴン中での、発生から 1 s 後におけるキャビティの画像を示す。Fig.2.6-16 には、発生から 60 min におけるキャビティ長さの変化を示す。この実験においては、荷重は 7 N であった。また、Fig.2.6-17 に、アルゴン中での、発生から 60 min 後におけるキャビティの画像を示す。

Fig.2.6-14 より、各雰囲気において、約 200 ms 後から、キャビティ長さは、シリコーン油の方が PAO よりも長くなっている。時間とともに、その差は大きくなる。1 s 後には、シリコーン油の方が、二酸化炭素では、20%、アルゴンでは、10%、空気では、8%、ヘリウムでは、10%、PAO よりも長い。Fig.2.6-15 より、キャビティの形状は、潤滑油による差は見られず、キャビティは流れ方向に拡大している。Fig.2.6-16 より、1 s 以降の時間においても、各雰囲気において、シリコーン油のキャビティ長さが、PAO よりも拡大していることが分かる。60 min 後には、シリコーン油の方が、二酸化炭素で 80%、アルゴンで 26%、空気で 30%、ヘリウムで 34%、PAO よりも長くなっている。このシリコーン油における増加量は、1 s 後におけるものよりも、大きくなっている。Fig.2.6-17 に示される画像においても、キャビティ長さの違いが明確である。

従って、発生から、約 200 ms 以降のキャビティの成長には、表面張力の影響が見られ、表面張力が小さい潤滑油において、キャビティは長くなることが分かった。

これらの結果をまとめると、以下のようなになる。発生から初期の段階におけるキャビティ成長には、表面張力の影響が見られない。一方で、約 200 ms 後の成長では、その影響が見られ、シリコーン油の方が、PAO よりもキャビティ長さが長くなる。従って、この時間では、キャビティ長さは、表面張力が小さな潤滑油において、長くなる。

### (3) 気体の溶解度、および、表面張力の影響

ここでは、シリコーン油におけるキャビティ成長を、これまでのように気体の溶解度との関係から検討する。その後、表面張力の影響を検討していく。

Fig.2.6-18 には、発生から、10 ms, 1 s, 10 min の各時間におけるキャビティ長さ及各気体の溶解度の関係を示す。この図より、10 ms では、PAO の場合と同様に、シリコーン油においても、溶解度の影響が見られず、各気体においてキャビティ長さはほぼ同じである。1 s, 10 min では、キャビティ長さとの溶解度に明確な関係が見られ、PAO の場合と同様に、シリコーン油においても、溶解度の高い気体ほどキャビティ長さが長くなる。また、シリコーン油におけるキャビティ長さの方が、PAO の場合よりも長くなる。

シリコーン油における気体の溶解度は、Table 2.6-1 に示すように、アルゴン、ヘリウムでは、PAO の場合よりも大きい。従って、アルゴン、ヘリウムでは、シリコーン油の方が、溶解気体量は多くなる。そのために、シリコーン油の方が、キャビティ内に析出する気体量が多く、キャビティ長さが長くなることが考えられる。しかし、二酸化炭素では、シリコーン油における溶解度よりも、PAO の場合の方が大きい。従って、この結果では、これまでに示したようなキャビティ長さとの溶解度の関係は成立しない。また、アルゴン中、シリコーン油での 10 min におけるキャビティ長さは、二酸化炭素中、PAO でのキャビティ長さを上回っている。溶解度との関係を考えると、PAO における二酸化炭素の溶解度は、シリコーン油のアルゴンの溶解度よりも高いので、キャビティ長さとの溶解度の関係は逆比例していることになる。従って、この時間におけるキャビティ長さには、溶解度とともに、表面張力が影響していると考えられる。

Fig.2.6-19 には、アルゴン中における、各時間でのキャビティ長さとの表面張力の関係を示す。この図より、発生から 10 ms においては、キャビティ長さには、表面張力の影響は見られないが、1 s, 10 min では、表面張力が大きいほど、キャビティ長さが小さいことが分かる。従って、キャビティが急速に成長した後の時間(本実験では、約 200 ms 以降の時間)では、キャビティ成長に、溶解気体の影響とともに、表面張力の影響が関係してくると考えられる。



#### 2.6.4 まとめ

本節での実験結果より、各雰囲気におけるシリコーン油でのキャビティ成長は、PAOの場合と同様に、2段階で起こることが分かった。Fig.2.6-20に、キャビティ成長への表面張力の影響を示す。

Fig.2.6-20に示すように、Initial stage(本実験では、発生から約15 msまでの時間)では、キャビティ成長に表面張力の影響はなく、キャビティは急速な成長を示す。Second stage(発生後、約200 msからの時間)では、キャビティ成長には、表面張力の影響が見られ、表面張力の小さいシリコーン油において、同粘度のPAOよりもその成長が大きくなる。

また、シリコーン油においても、各段階のキャビティ成長に溶解気体の影響が見られた。急速な成長が見られるInitial stageでは、シリコーン油においても溶解気体の影響が見られない。Initial stage後の成長段階のSecond stageでは、成長速度はInitial stageの時よりも小さくなり、溶解気体の影響が見られる。キャビティ長さは、溶解度の高い条件で長くなる。

#### (参考文献)

- 1 山本, 兼田, トライボロジー, 理工学社, 1998
- 2 高野, 小山, “潤滑油の泡立ち性について”, 出光トライボレビュー, 2, 1980, 145-149
- 3 喜多, “かくはん法による油中気ほうの作成とその評価法”, 潤滑, 23, 7, 1978, 478-481
- 4 三浦, “添加剤の種類と性能(7) 消泡剤”, トライボロジスト, 40, 4, 1995, 353-356
- 5 関根, 表面張力測定法, 理工図書, 1957
- 6 ANDREAS, J.M., HAUSER, E.A. and TUCKER, W.B., “BOUNDARY TENSION BY PENDANT DROPS”, The Journal of Physical Chemistry, 42, 1938, 1001-1019
- 7 長谷川, 浅野, “表面張力の精密測定に関する研究”, 日本機械学会論文集, 18, 69, 1952, 38-41
- 8 日本潤滑学会, 潤滑ハンドブック, 養賢堂, 1970
- 9 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
- 10 福山, “撥水性の評価法”, 表面技術, 60, 1, 2009, 21-26

Table2.6-1 Gas solubility in silicone oil and PAO63

Gas	Gas solubility, ml/ml	
	Silicone oil	PAO63
He	0.045	0.04
Ar	0.14	0.13
CO <sub>2</sub>	1.09	1.14

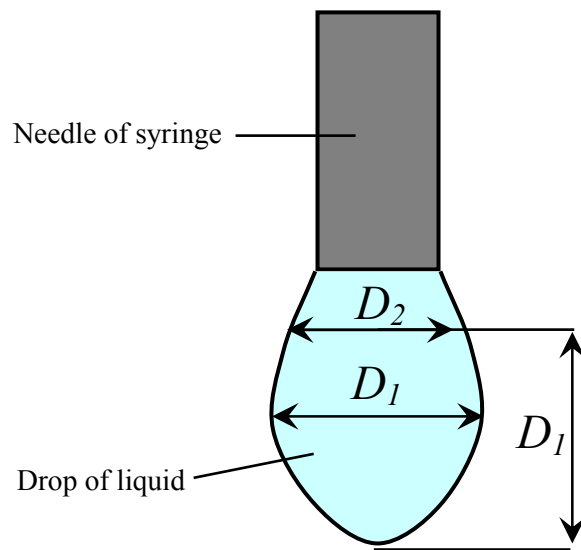


Fig.2.6-1 Pendant drop method for measurement of surface tension

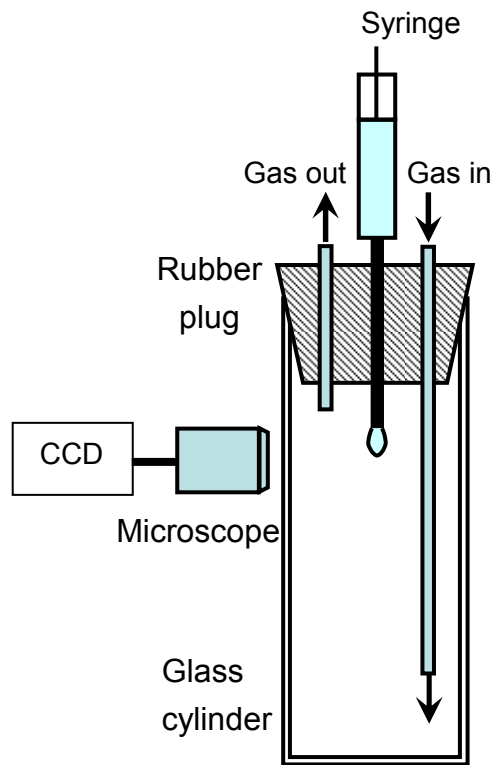


Fig.2.6-2 Test apparatus for measurement of surface tension in various gases



Fig.2.6-3 Photograph of drop in PAO63

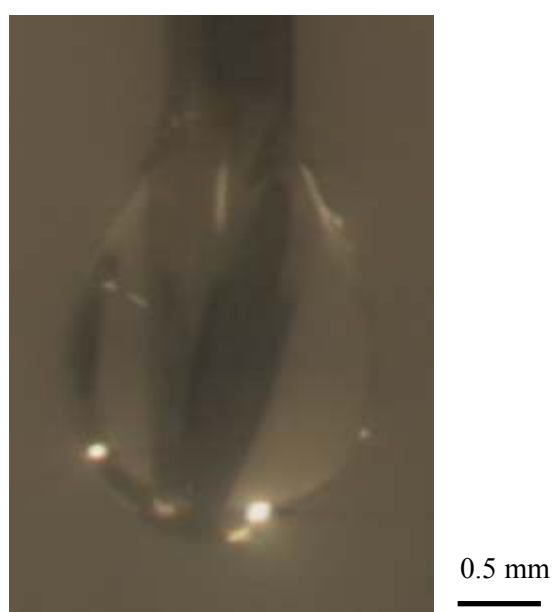


Fig.2.6-4 Photograph of drop in Silicone oil

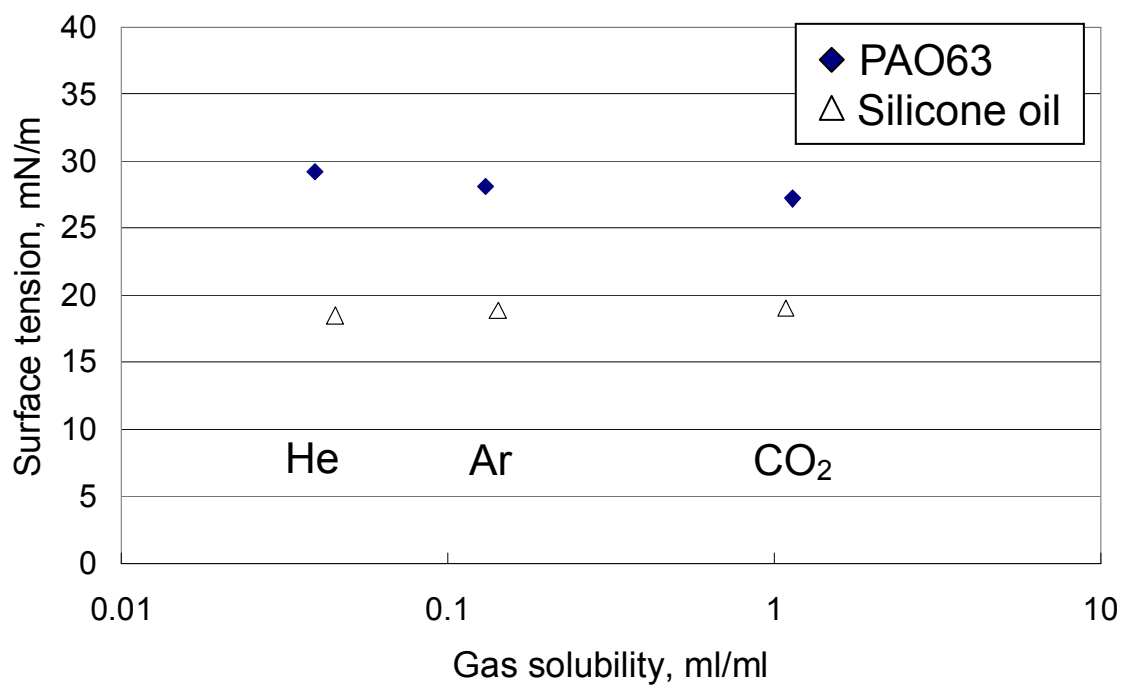


Fig.2.6-5 Relation between surface tension and gas solubility

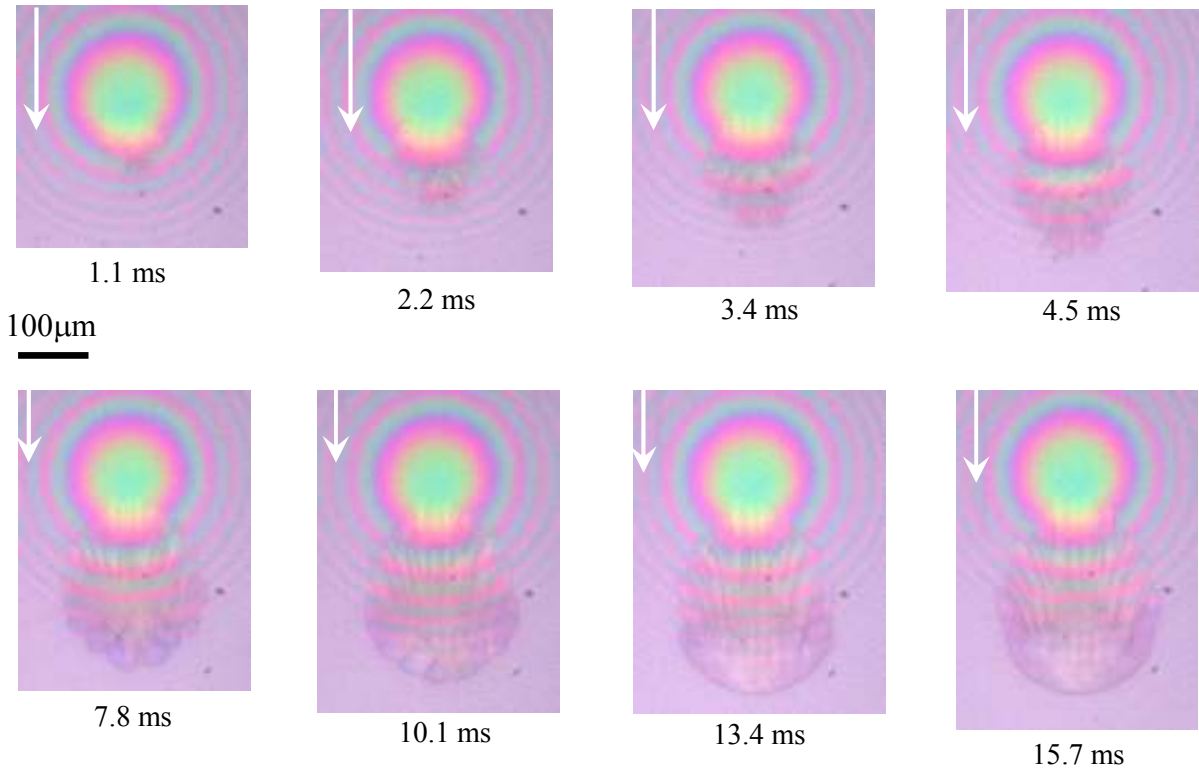


Fig.2.6-6 Cavity growth in helium

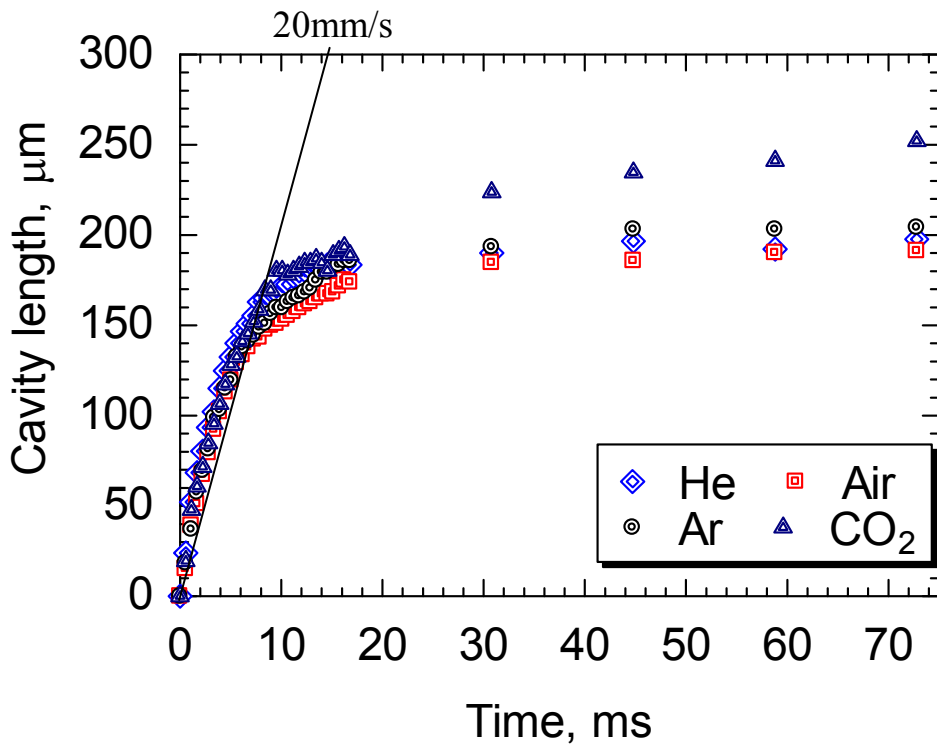


Fig.2.6-7 Changes in cavity length from the start to 75 ms

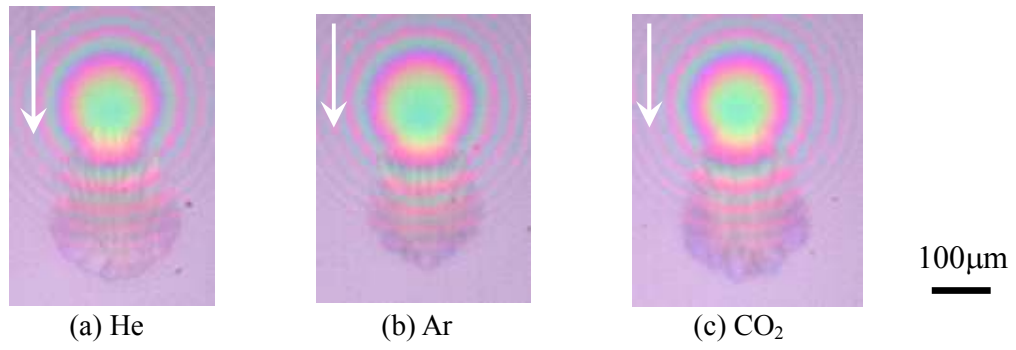


Fig.2.6-8 Photograph of cavity at 10 ms

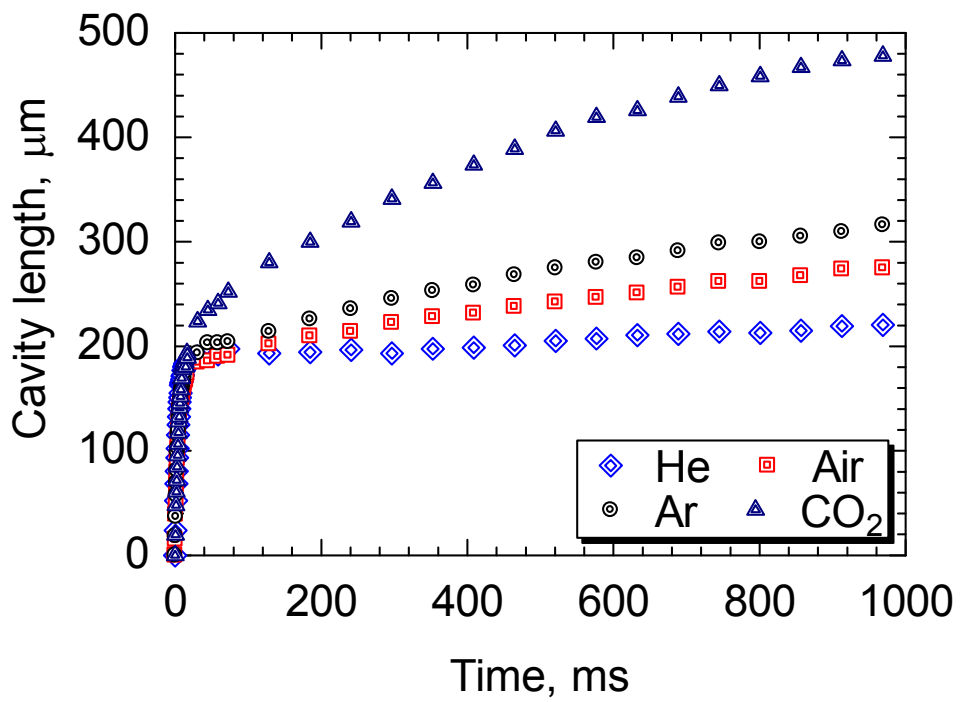


Fig.2.6-9 Changes in cavity length from the start to 1 s

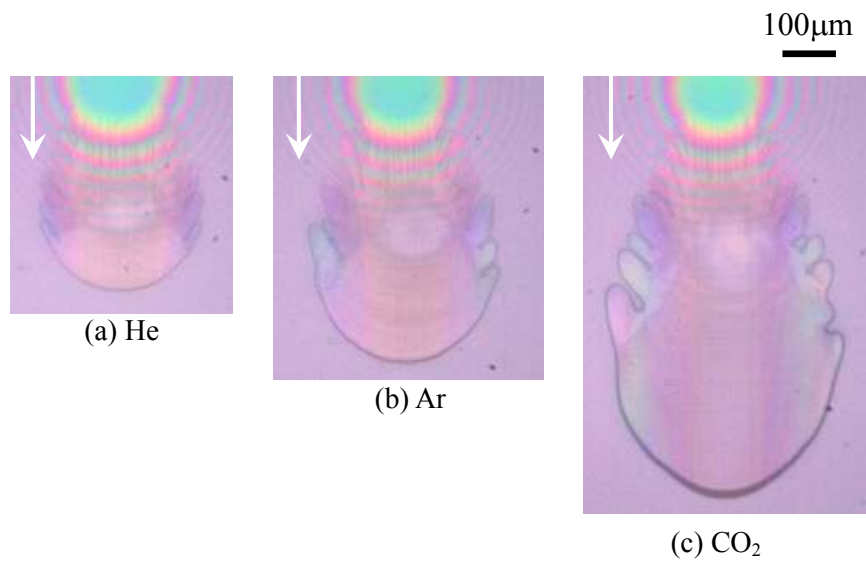


Fig.2.6-10 Photograph of cavity at 1 s

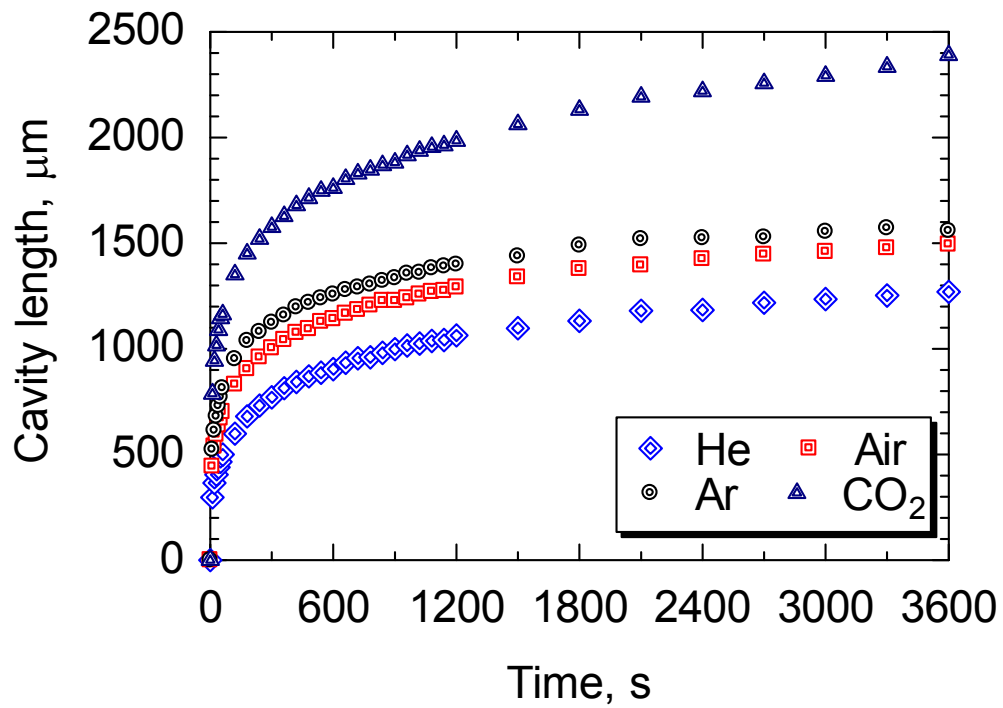


Fig.2.6-11 Changes in cavity length from the start to 1 h

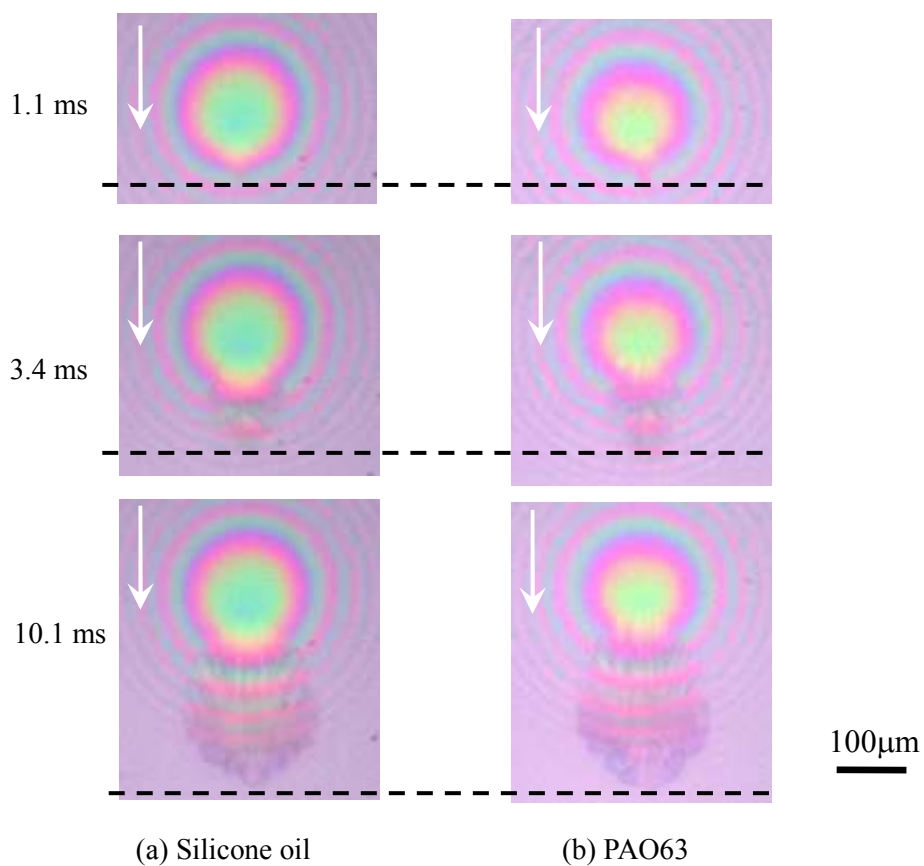


Fig.2.6-12 Comparison of cavity growth between silicone oil and PAO63

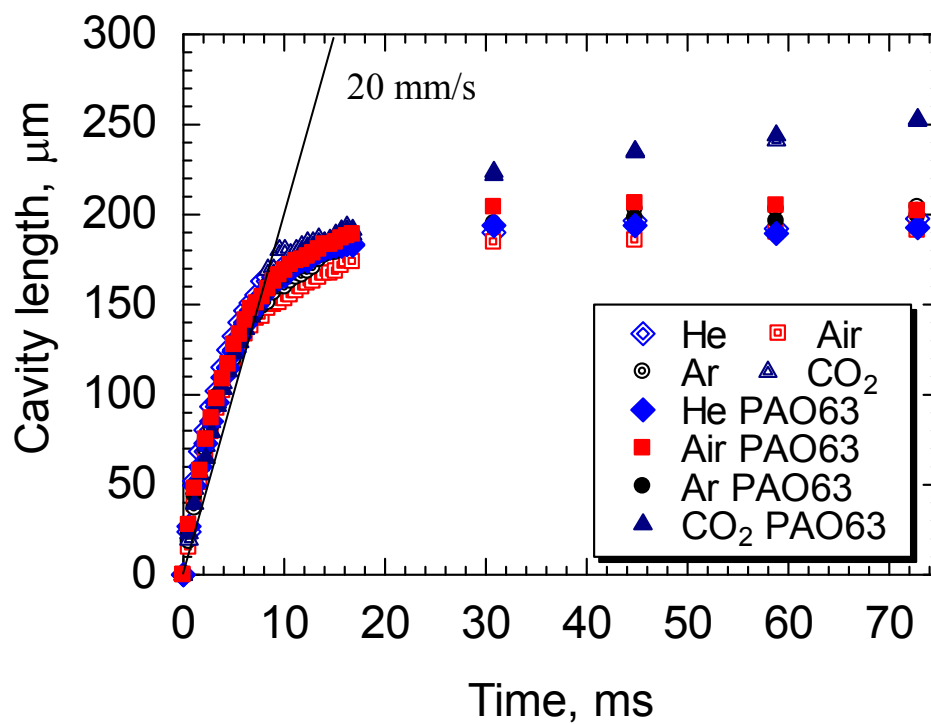


Fig.2.6-13 Changes in cavity length until 75 ms after the start



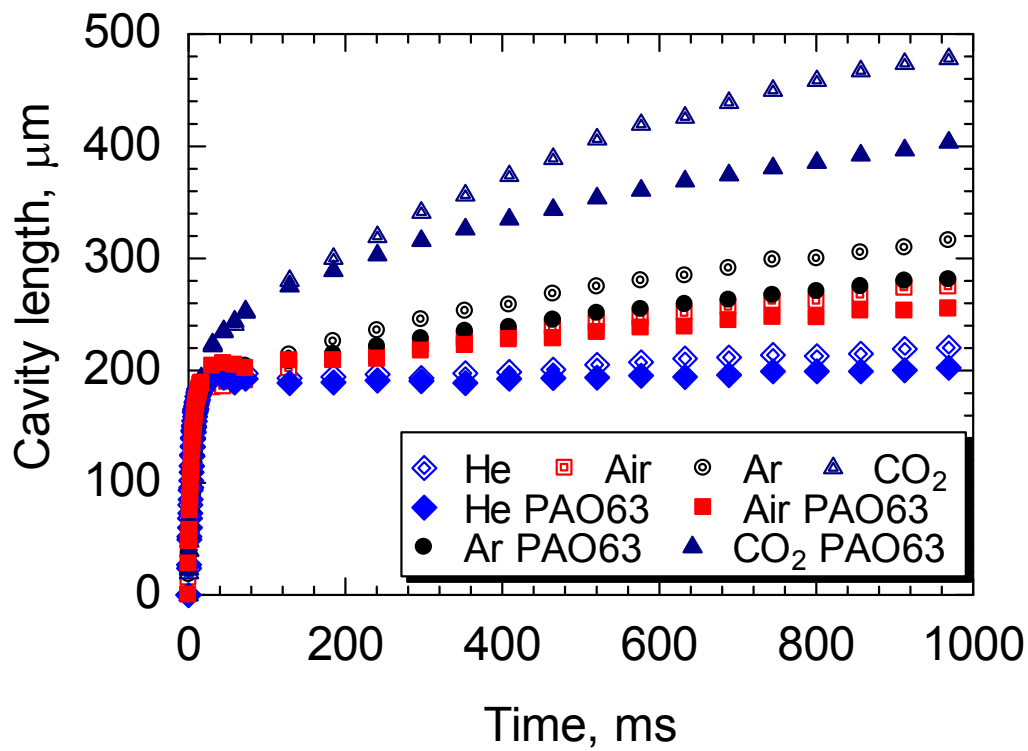


Fig.2.6-14 Changes in cavity length until 1 s after the start

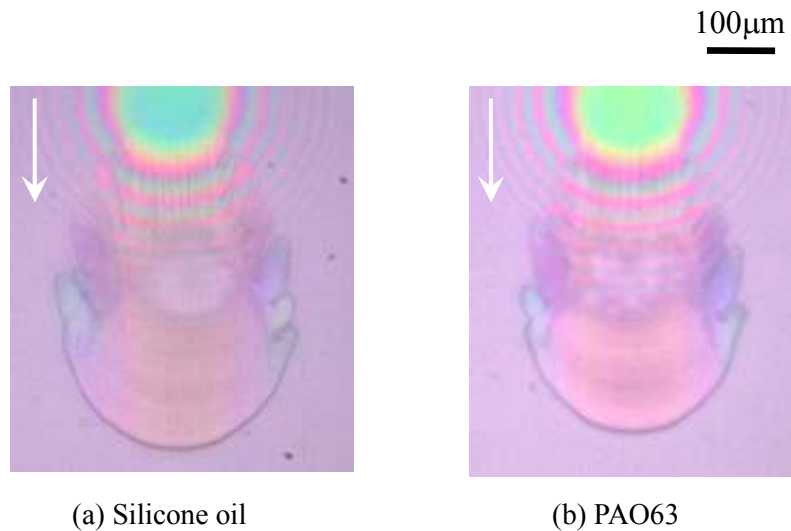


Fig.2.6-15 Comparison of cavity at 1 s between silicone oil and PAO63

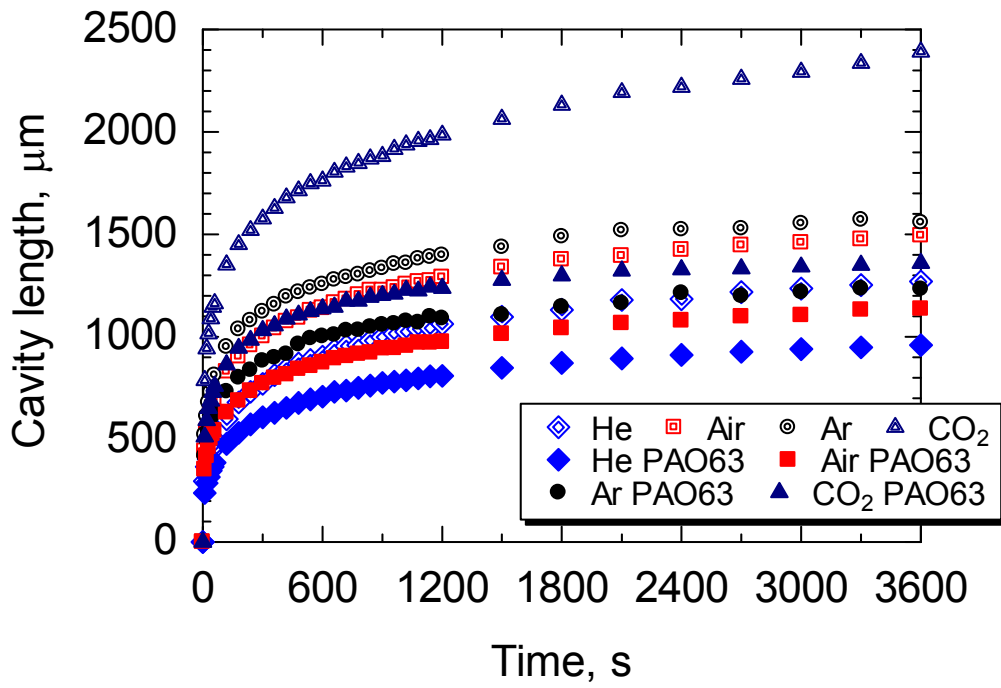


Fig.2.6-16 Changes in cavity length until 1 h after the start

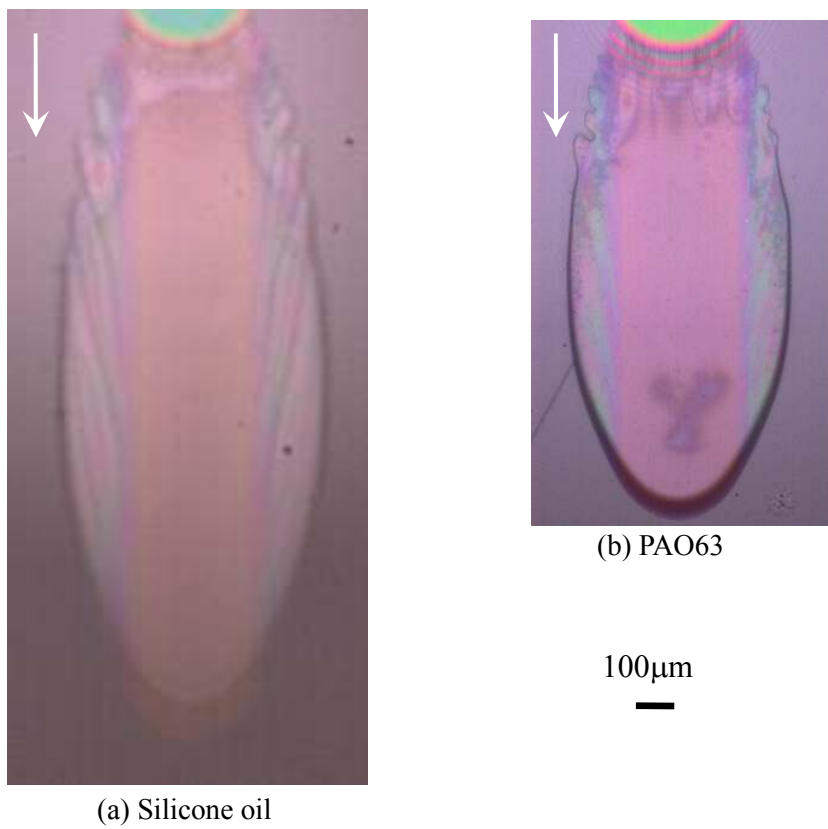


Fig.2.6-17 Comparison of cavity at 10 min between silicone oil and PAO63

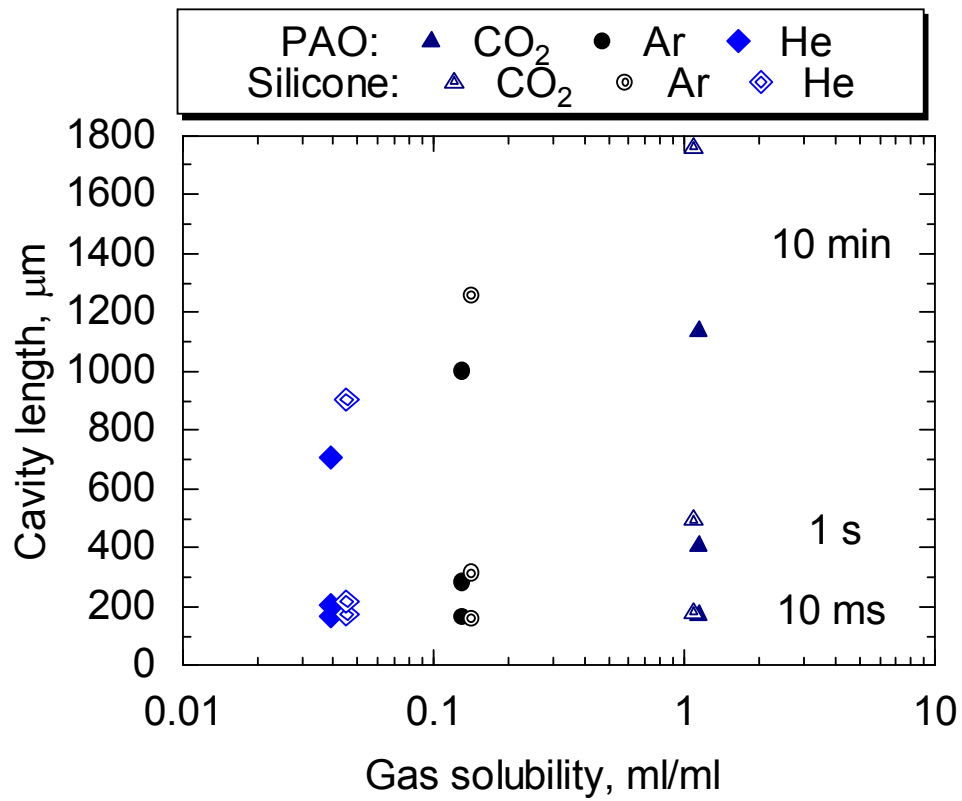


Fig.2.6-18 Relation between cavity length and gas solubility

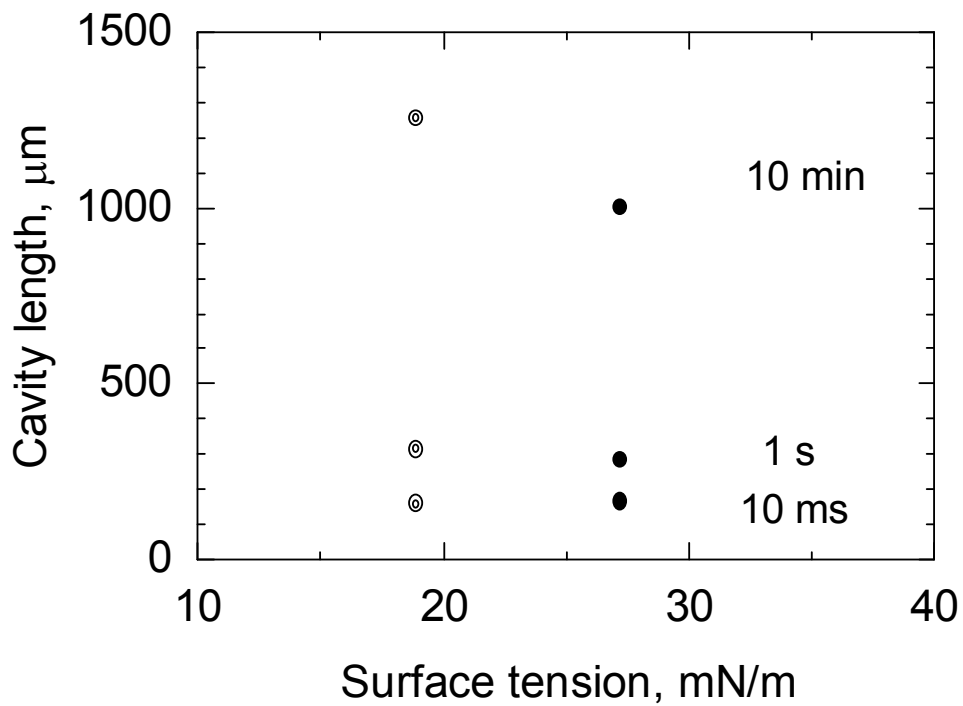


Fig.2.6-19 Relation between cavity length and surface tension in argon

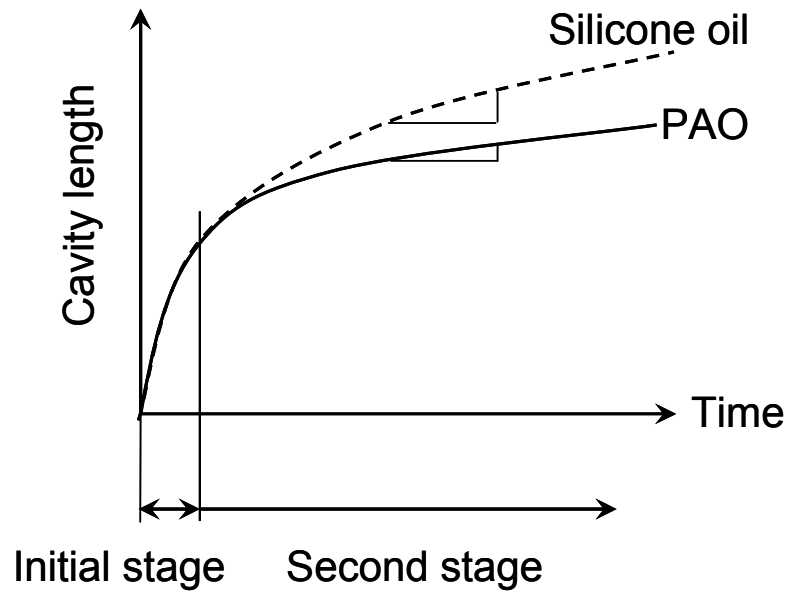


Fig.2.6-20 Effect of surface tension on cavity growth

