油圧管路内の過渡流れに伴うキャビテーションの初生* (液中に存在する固形微粒子およびガスの影響)

李 一 永**

Cavitation Inception Caused by Transient Flow in an Oil Hydraulic Pipeline (Effects of Solid Particles and Gas in Liquid)

by Ill Yeong LEE

The effects of solid particles and gas on cavitation inception caused by transient flow in an oil hydraulic pipeline have been studied. The existence of a stable gas pocket in the clearance space of particles in a cluster has been suggested as a new model of the cavitation nucleus. In experiments, the transient flow is generated by simultaneously releasing the pressure at both ends of a pressurized pipeline, and the pressure fluctuations are recorded. Teflon powder is used as solid particles, and N_2 gas is used as a dissolved gas. The liquids used in experiments are turbine oil and distilled water. It has been definitely shown by experiments that Teflon powder in water plays an active role in forming the cavitation nucleus, but in oil it hardly does so. It has been concluded that the dissolved gas, or solid particles which are apt to be wet, have no considerable influence on cavitation inception in transient pipe flow.

Key Words: Unsteady Flow, Negative Pressure, Cavitation Nuclei, Cavitation Inception, Wettability, Hydraulic Oil

1. 緒 言

管路内での液柱分離現象の研究は数多くなされているが、その発生機構はまだ完全には解明されていない。一般に、管路上のある地点における圧力が飽和蒸気圧あるいは空気分離圧に達すると、そこに気泡が発生し、これが成長して液柱が分離すると考えられている。しかし著者らは先に、油圧管路内の過渡流れを利用して、通常の油圧作動油が液柱分離をせずに絶対圧零より低い負圧に耐える性質をもつことを実験的に示した⁽¹⁾。その実験では特別な前処理は何も行っていないが、負圧領域の現象の再現性は非常によく、絶対値が1 MPa (ゲージ圧) を超える負圧を観測した。

液柱分離の初期過程として、過渡流れに伴うキャビテーションの発生が考えられる。本研究ではこれを過渡流れに伴うキャビテーションと呼ぶが、前述の実験結果⁽¹⁾を説明するには過渡流れに伴うキャビテーションを引き起こすキャビテーション核についての考察が必要になる。キャビテーション核の形態としては、

(1) ガス気泡

(2) 液体にぬれ難い固体粒子表面の割れ目におけるガスポケット^{(2)~(4)}

(3) 有機物質の膜に覆われたガス気泡⁽⁵⁾などが挙げられている。このうち(2)の Harvey らのモデル^{(2)~(4)}は液中にキャビテーション核が安定残存する一つの可能性を簡明に説明している。

本研究は、液体に比較的ぬれ難い固体粒子としてテフロン (PTFE) 粉を選定し、供試液中へのその混入が管内過渡流れに伴うキャビテーションに及ぼす影響を調べることににより、ぬれやすさの違いが過渡的な負圧の起こりやすさに大きく関係していることを明らかにする。そして、それをうまく説明するモデルとして、Harvey らのモデルを拡張した新しい核形成モデルを提案する。

2. 実 験

2.1 混入固体粒子の選定 液中に混入された固体粒子と液体とのぬれやすさの違いが、管内過渡流れに伴うキャビテーションに及ぼす影響を調べるのが本実験の主な目的である。供試液体には油圧作動油 (無添加タービン油 ISO VG 32) および蒸留水を用いる。テフロンは液体に最もぬれ難いものの一つであるが、前述の両液体に対するぬれやすさに顕著な違いを有す

* 昭和60年11月20日 関西支部第245回講演会において講演，原稿受付 昭和60年3月6日。

** 正員，東京工業大学大学院 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

る。これは接触角の測定により確認された。すなわち、両液体とテフロン板との常温の空気中における平衡接触角の測定値は、油圧作動油の場合 57° 、蒸留水の場合 108° であったが、これはテフロンが水には非常にぬれ難く、それに比べると油圧作動油にはぬれやすいことを示すものである。またテフロンは耐薬品性、耐熱性に優れた安定した固体であり、粒径が $0.05 \sim 0.5 \mu\text{m}$ の微粒子を容易に得ることができる⁽⁶⁾。以上を総合し、本実験では混入固体粒子としてテフロン粉を選定した。

2.2 実験の概要 実験は供試液体の種類や状態によって、次の5種類に類別される。

〔実験 O-I〕 清浄な油を用いた実験

〔実験 O-II〕 油にテフロン粉を混入した実験

〔実験 O-III〕 油中のガス含有量を調整した実験

〔実験 W-I〕 清浄な水を用いた実験

〔実験 W-II〕 水にテフロン粉を混入した実験

実験番号の頭の O および W は油圧作動油および蒸留水を表しており、後の番号 I は清浄な液体、番号 II はテフロン粉を混入した液体を表している。実験 O-III は他の実験とは異なり、油が含有するガスの影響を調べる実験である。

管路両端の圧力を同時にステップ状に下げると、管路両端から伝播する圧力降下波が管路中央部で重なり、絶対圧零以下の負圧領域を含む管内過渡流れが発生する⁽¹⁾。本実験はすべて、この手法を用いて過渡流れを発生させ、その際の圧力変動を測定する。

2.3 実験装置 本実験は供試液体として油圧作動油と蒸留水を用いるため、ほぼ同じ構成の実験装置

を二とおり製作し、油用および水用として用いる。過渡流れを発生させる管路は、どちらも長さ 20 m、肉厚 1 mm の銅管である。管路内径は、油用のものは 8 mm、水用のものは 6 mm である。

圧力変動の測定点は管路端および管路端から 5 m、10 m (管路中央) 地点であるが、圧力変動の測定には実験管路の外周のひずみを検出する方法を用いる。負圧領域を含む管内過渡流れの圧力測定を行う場合、管内への圧力計の挿入が測定対象となる現象自体に大きく影響するからである⁽¹⁾。

図 1 に油用の実験装置を例示する。実験管路⑫は、その両端を連結してループ状にしてある。したがって、その連結部に設置された弁⑩を急開放することにより、管路両端の圧力を初期設定圧力 p_s から大気圧まで同時にほぼステップ状に下げることができる。

2.4 実験上の留意点 本実験を行うにあたっては、供試液体の取扱いや、実験装置内の清浄状態の確保について、十分注意する必要がある。本節では、これらに関する実験上の主な留意点について述べる。

実験装置内部の汚れについては、これを事前に除去するため、供試液体に触れる部分はすべてメンブランフィルタ (ポアサイズ $0.2 \mu\text{m}$) でろ過した溶剤 (n-ヘキサン) によって十分洗浄した。この実験装置は閉回路になっており、装置内部の液体は外部の大気に触れることはないので、実験途中での外部からの異物質の混入は防止されている。

次に供試液体については、装置内部に充てんした後、ライン用の二重メンブランフィルタ (ポアサイズ $0.2 \mu\text{m}$) を経由して実験装置内を循環させ、液中の残

図 1 油用の実験装置

留固形異物質の除去を事前に十分行った。供試液体の循環は2個のアクムレータを用い、ブラダを隔壁として両者を交互に加圧することにより行っている。すなわち、アクムレータの加圧と弁操作により、供試液体は①→⑨→⑫→①→②→①の順路で循環する。

上記のような供試液体の循環は、実験の1回ごとに十分行った。これは実験後に残存しているかもしれない気泡を除去し、常に同一の実験条件とするためである。またテフロン粉を混入した実験を行う場合には、フィルタを経由せずに供試液体を循環させ、混入したテフロン粉ができるかぎり管内に一様に分布するようにした。

実験 O-III では、供試油へ加えるガスとして窒素ガ

スを用い、窒素ポンプ④によって液体タンク②の圧力を飽和設定圧力 p_{GS} に保つことにより含有量を調整する。供試油とガスの混合は、小形歯車ポンプ③で行う。ガス含有量は、Van Slyke 装置の原理を用いた測定装置を製作し、これを用いて周期的に測定した⁷⁾。そして測定値がほぼ一定に落ち着いた状態を飽和状態とみなした。

3. 実験結果および考察

3.1 実験 O-I および実験 O-II 図2は実験 O-I の測定例である。図2(a)は液柱分離が発生しなかった例、図2(b)は液柱分離が発生した例である。実験 O-II で得られた圧力変動も図2と同様なものである。本論文では測定圧力はすべてゲージ圧で示しているが、図2に示した例では、いずれも-1 MPa を超えるかなり絶対値の大きな負圧が記録されている。図2(a)に示した破線は非定常層流圧力損失を考慮した特性曲線法による計算値であるが、その値は負圧領域においても測定値とほぼ一致しており、測定された負圧値が信頼できる値であることを示している。

過渡時の最低圧力と初期設定圧力 p_s の関係を図3に示す。図3(a)は実験 O-I、図3(b)は実験 O-II の結果である。黒ぬりの記号は液柱分離が発生しない場合、白ぬきの記号は液柱分離が発生した場合を示しているが、後者の値は液柱分離が始まる直前に記録された値〔図2(b)の場合は-1.2 MPa〕である。過渡時の最低圧力は、初期設定圧力 p_s が小さな場合には p_s にほぼ比例するが、 p_s を上げていくと液柱分離が発生するようになるため、計算によって予測した値より絶対値の小さな値になっている。

液柱分離を伴わない領域と伴う領域は p_s の値によ

(a) $x=10$ m, $p_s=2.0$ MPa

(b) $x=10$ m, $p_s=2.6$ MPa

図2 圧力変動の記録 (実験 O-I)

(a) 実験 O-I ($V_g=8.8\%$)

(b) 実験 O-II ($V_g=8.5\%$)

(c) 実験 O-III

図3 油圧作動油を用いた実験における最低圧力と p_s との関係 ($x=10$ m, 油温 18°C)

って明確に分かれている。すなわちこの二つの領域の境界(図3において記号が黒ぬりから白ぬきに変わる所)において、過渡流れに伴うキャビテーションが初生したと考えることができる。そこで本研究では、この境界における過渡時の最低圧力を過渡流れに伴うキャビテーション初生圧と呼ぶ。実験 O-I と実験 O-II についてこれを比較すると、後者は前者より若干絶対値の小さな値になっているが、顕著と言えるほどの差はない。これは油圧作動油中に混入したテフロン粉が、過渡流れに伴うキャビテーションにそれほど大きな影響を及ぼさないことを意味している。

3.2 実験 O-III この実験は他の実験と異なり、管路端の圧力を初期設定圧力 p_s からガスの飽和設定圧力 p_{Gs} までほぼステップ状に下げて過渡流れを発生させている。設定したガス含有率 V_G は 23.7% ($p_{Gs} = 0.3 \text{ MPa}$) および 50.2% ($p_{Gs} = 0.6 \text{ MPa}$) である。なお V_G は標準状態 (0°C , 1 atm) に換算した含有ガス体積の液体体積に対する百分率である。この実験で得られた圧力変動の波形は図2と同様なものであった。そして、過渡時の最低圧力は図3(c)に示すように、その絶対値がかなり大きいものも観測されており、過渡流れに伴うキャビテーション初生圧はガス含有量を変えてもあまり変化していない。このことは、多量のガスが油圧作動油中に存在していても、それが完全に溶解しているかぎり、過渡流れに伴うキャビテーションに直接的な影響力をあまりもたないことを意味している。

3.3 実験 W-I および実験 W-II この実験で

(a) $x=10 \text{ m}$, $p_s=1 \text{ MPa}$

(b) $x=10 \text{ m}$, $p_s=2.6 \text{ MPa}$

図4 圧力変動の記録(実験 W-I)
(予加圧: 3 MPa, 5 min)

は、1回の実験ごとに供試水を2.4節で述べた方法で循環させた後、実験管路内を所定の時間(実験 W-I では 5 min, 実験 W-II では 5 min あるいは 60 min) 所定の圧力 (3 MPa あるいは 6 MPa) で加圧することにした。この操作を以後予加圧と呼ぶが⁽⁸⁾、これをせずに実験を行うと、液柱分離が非常に発生しやすく、実験 W-I と実験 W-II の比較が十分できないためである。

図4に実験 W-I の測定結果を示す。図4(a)は液柱分離が発生しなかった例、図4(b)は発生した例である。図4(b)では、 -2 MPa を超える負圧が記録されたところでキャビテーションが起こり、液柱分離が発生している。実験 W-I においては、このように液柱分離が発生する場合、液柱分離が始まった直後に激しい圧力変動が見られる。これは管内に発生した少数の気泡間を伝ばする圧力変動と考えられる。

図5に実験 W-II の測定例を示す。実験 W-II においては、予加圧の時間が 5 min であると、ほとんどの場合液柱分離が発生し、そこで得られる圧力変動の波形は図5と同様なものであった。この圧力波形では、現象の初めの瞬間的な負圧の発生は認められるが、その後圧力は直ちに絶対圧零に近い値に落ち着いており、図4(b)のような液柱分離が始まった直後の激しい圧力変動は生じていない。図4(b)と図5のこのような違いは、過渡流れに伴って管路途中に発生する気泡量の違いに起因すると考えられる。すなわち前者では発生する気泡量が比較的少ないのに対し、後者では気泡が発生しやすいためにその発生量が多く、前者で見られるような圧力変動が打ち消されていると推察される。

図6は過渡時の最低圧力である。図6(a)と図6(b)はどちらも予加圧の時間を 5 min としたときの実験 W-I および実験 W-II の結果であるが、過渡流れに伴うキャビテーション初生圧は、この両者では大幅に異なっている。この事実は、テフロン粉の混入によって気泡が極めて発生しやすくなることを裏付けて

図5 圧力変動の記録(実験 W-II, $x=10 \text{ m}$, $p_s=1 \text{ MPa}$)
(予加圧: 3 MPa, 5 min)

おり、蒸留水の場合にはテフロン粉がキャビテーション核の形成に大きくかかわっていることを示すものである。

図6(c)は、実験 W-IIにおいて予加圧の時間を60 minとしたときの過渡時の最低圧力である。この場合は、予加圧の時間を5 minとして場合〔図6(b)〕よりも絶対値の大きな負圧が観測され、過渡流れに伴うキャビテーション初生圧も、その絶対値が図6(b)に比べて大きくなっている。また液柱分離が発生した場合の圧力変動の波形は、そのほとんどが図4(b)に近いものであった。このことは、テフロン粉にかかわって存在するキャビテーション核が、長時間の加圧によって、過渡流れに伴うキャビテーションに及ぼす影響力の小さなものになることを意味している。

3.4 キャビテーション核のモデル 3.3節までに示した実験結果は次のように要約される。すなわち、混入したテフロン粉は、蒸留水を用いた実験における過渡流れに伴うキャビテーションに大きく影響するが、油圧作動油を用いた実験ではそれにあまり影響しない。このような違いは、テフロン粉の蒸留水および油圧作動油に対するぬれやすさの違いに起因していると考えられる。したがって、ぬれ難い固体粒子表面のガスポケットを考え、これが安定残存してキャビテーション核となる可能性について検討を加えることが必要となる。

ぬれ難い固体粒子表面の安定したガスポケットのモデルとして Harvey らが提案したモデルがある⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。これは図7のような固体粒子表面の円すい形割れ目を想定し、その頂部に安定残存するガスポケットをキャビテーション核と考えるモデルである。この場合、ガスポケットが安定して存在する条件は式(1)で表され、ガス-液の界面は圧力平衡式(2)によって決まる。

$$\alpha_R < \beta + \pi/2 < \alpha_A \dots\dots\dots (1)$$

$$P_L = (P_G + P_V) + 2\sigma/R \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 β は円すい形割れ目の半頂角、 α_A 、 α_R は前進および後退接触角、 P_L 、 P_V は液体の静圧(絶対圧)および蒸気圧、 P_G は液中に溶存するガスの平衡圧、 R 、 σ はガス-液の界面の平衡曲率半径および表面張力である。周囲の液体の圧力を十分に下げるとガス-液の界面の形は図7(a)から図7(b)のように変化する。そして接触角が α_R に達すると、このガスポケットは不安定になって膨張し、キャビテーションが発生することになる。

上記のモデルが、テフロン粉の混入に伴って生じるキャビテーション核のモデルとして適用できるかどうかを調べるため、混入したテフロン粉の捕集ならびにその観察を行った。テフロン粉を捕集したメンブランフィルタの観察に走査形電子顕微鏡を用い、計数法(JIS 9930)を準用して行った寸法別個数濃度測定の結果を表1に示す。観測されたテフロン粉は、図9(付録)の電子顕微鏡写真に示すように、凝集塊として存在し、その凝集塊の寸法は0.2~10 μm のものがほとんどであった。また、テフロン粉表面の、より微視的な観察からは、Harvey らが想定したような割れ目の存在は確認できなかった。

そこで本研究では、テフロン粉が凝集塊として液中を浮遊することならびにテフロン粉表面の割れ目が認められないことを念頭に置き、凝集塊となったぬれ難い固体粒子のすきまに安定残存するガスポケットがキャビテーション核となるモデルを提案する。

提案するモデルの最も簡単な例として、2個の同一寸法の球形固体粒子が接している場合を想定し、そのすきまにガスポケットが安定残存する例を図8に示す。この場合、固体粒子表面をガス-液の界面が接する

図6 水を用いた実験における最低圧力と p_s との関係 ($x = 10 \text{ m}$, 水温 16°C)

地点の接線（図8中の破線）で近似すればガスポケットの安定残存条件式およびガス-液の界面の圧力平衡式は Harvey らのモデルと同じになる。また図8(a)に示す形でガス-液の界面が平衡すると、ガス-液の界面における表面張力は両固体粒子を引き寄せる方向に働き、二つの固体粒子の離散を防げることになる。このことはガスポケットの安定残存を可能とする環境が保持されることを意味している。一方、周囲の液体の圧力を十分に下げると、ガス-液の界面は図8(b)のようになり、最終的には Harvey らのモデルと同様、キャビテーションが発生することになる。

以上のように、本研究で提案するモデルは、ぬれ難い固体粒子表面の割れ目を想定することなく、キャビテーション核の形成を説明できるものである。本モデルを適用すれば、本研究で得られた実験結果は次のように説明される。すなわち蒸留水の場合は、塊状になって浮遊するテフロン粉のすきまに安定残存するガスポケットがキャビテーション核となるのに対し、油圧作動油の場合には、油圧作動油が水に比べてテフロン粉をぬらしやすいためにガスポケットが安定残存することはなく、前述のようなキャビテーション核は形成されない。この違いが、実験で得られたような過渡流れに伴うキャビテーション初生圧の違いとなって現れ

ている。

4. 結 言

本研究で得られた結果を要約して以下に示す。

(1) 油圧作動油および蒸留水を用いて、負圧領域を含む管内過渡流れの実験を行い、テフロン粉の混入によって、蒸留水の場合には過渡流れに伴うキャビテーションが非常に起こりやすくなるのに対し、油圧作動油の場合には起こりやすさにあまり変化のないことを示した。そして、テフロン粉が水に非常にぬれ難いことから、ぬれ難い固体粒子表面のガスポケットがキャビテーション核となる可能性を指摘した。

(2) テフロン粉が凝集塊として液中を浮遊することならびにテフロン粉の表面に割れ目が認められないことから、キャビテーション核の新しいモデルとして、凝集塊となったぬれ難い固体粒子のすきまに安定残存するガスポケットのモデルを提案した。

(3) テフロン粉にかかわって存在するキャビテーション核が、長時間の予加圧によって、過渡流れに伴うキャビテーションに及ぼす影響力の小さなものになることを実験的に示した。

(4) 油圧作動油中のガスは、油中に溶解しているかぎり、その量が多量でも、過渡流れに伴うキャビテ

図7 ぬれ難い固体粒子表面の円すい形割れ目におけるガスポケットのモデル

図8 ぬれ難い固体粒子のすきまにおけるガスポケットのモデル

表1 液中のテフロン粉の凝集塊の寸法別個数濃度

Dimension Range of Particles (μm)	Concentration (Particles / 100 cm^3)	
	Oil + PTFE (used in Exp.O-Ⅱ)	Water + PTFE (used in Exp.W-Ⅱ)
0.2 ~ 1	1.45×10^8	1.68×10^8
1 ~ 5	3.42×10^7	5.02×10^7
5 ~ 10	4.23×10^6	3.92×10^6

図9 捕集したテフロン粉の電子顕微鏡写真 (倍率 10 000)

ーションにあまり影響しないことを実験的に示した。

以上をもとに、油圧管路内の過渡流れに伴うキャビテーションを再考すると、油圧システムは通常高压で油を流動させているので油中の浮遊ガスは溶解しやすく、また石油系の作動油は固形異物質をぬらしやすい性質を有することから、油圧管路内における過渡流れに伴うキャビテーション初生圧は、絶対圧零よりかなり低い値となる可能性が十分あることがわかる。

終わりに、本研究を進めるにあたり有益なご助言をいただいた東京工業大学工学部 竹中俊夫教授ならびに北川能助教授に深く感謝いたします。また実験に協力された東京工業大学 渡均君に感謝いたします。

付 録

図 9 は、実験 W-II の供試水から捕集したテフロン

粉の電子顕微鏡写真である。図 9 中の白線は $1\mu\text{m}$ である。ぶどう状に見えるものがテフロン粉であり、混入したテフロン粉の多くが凝集塊となって液中を浮遊していることがわかる。

文 献

- (1) 李・北川・竹中, 機論, 50-458, B (昭 59), 2655.
- (2) Harvey, E. N., ほか 5 名, *J. Cell. Compar. Physiol.*, 24-1 (1944), 1.
- (3) Harvey, E. N., ほか 4 名, 文献(2)の 23 ページ.
- (4) Harvey, E. N., ほか 2 名, *J. Appl. Phys.*, 18-2 (1947), 162.
- (5) Fox, F. E. and Herzfeld, K. F., *J. Acoust. Soc. Am.*, 26-6 (1954), 984.
- (6) 米谷, 化学工業, 14-7 (昭 38), 676.
- (7) Ripken J. F. and Killen J. M., *Proc. IAHR - Symp.*, (1962), 37.
- (8) Knapp, R. T., *Trans. ASME*, 80-6 (1958), 1315.

討 論

〔質問〕 大場 利三郎〔東北大学高速力学研究所〕

(1) 「過度流れに伴うキャビテーション」と著者が考えたものが、現実にキャビテーションであることを示す証拠としてキャビテーション気泡の瞬間写真(数 μs 以下の露出時間のもの)を示していただきたい。通常、発生領域などの異なる特殊なタイプのキャビテーションが発生しており、これを特定し得ればキャビテーション核のタイプの推定も可能かもしれないから。

(2) 圧力変動の変化から「キャビテーションの初生」をとらえたものか、どのようなキャビテーションの発達段階に限定しているものかを瞬間写真などで明示願いたい。

(3) テフロン粉の粒径に比べて凝集塊のサイズは 1~2 けた大きいから一種の多孔質の塊をつくっているようである。したがって、図 3, 6 に示された $\rho_{\min}$ の大幅な増大(O-II→W-II の場合)を説明するには $\text{Porosity} = (\text{粒のすき間の体積} / \text{塊全体の体積})$ を導入したほうがわかりやすいと考えるがいかがか。

(4) 核を seed したときの試料液中のキャビテーション核分布は測定されましたか。

(5) 「絶対圧零より低い負圧に耐える性質をもつ」理由はこの時のキャビテーションが直径 $1\text{mm} \sim 1\mu\text{m}$ のオーダのいわゆるホール核より生じ、また、テフロン粉を入れると上述の直径以上のキャビテーション核(数 μm 以上)がつくられ、初生が容易になると単純に解してはいかがか。

〔回答〕 (1) 本研究における「キャビテーションの初生」の判断はすべて圧力変動の記録より得ており、瞬間写真はとっていない。それは次のような理由による。(i) 実験管路の長さは 20 m であり、過渡流れに伴ってキャビテーションが初生する管路上の位置が特定できない。また時刻も特定できない。(ii) -1MPa の負圧に耐えるほどの微細なキャビテーション核(または空孔)が油中に存在すると仮定すればその寸法はかなり小さいものと予測される。(iii) 本実験管路は継目のない 20 m の銅管である。以上のように、キャビテーション気泡について数 μs 以下の露光時間の瞬間写真をとるのは場所、時刻、核の大きさ、実験管路の面からみてきわめて困難である。

(2) 回答(1)をご参照いただきたい。

(3) 液中のテフロン粉の塊は多孔質に類似したものであるが、その最も基本的なものとして本研究では 2 個の粒子からなる塊を考え、粒子のすきまにガスポケットが残存するモデルを提案した。

(4) 混入したテフロン粉の管路上の分布は測定していないが、浮遊テフロン粉の個数濃度(表 1)はいつもかなり高いこと、実験に先立って油を実験管路を通して十分に循環させていることより、混入テフロン粉の塊はこの実験に影響しない程度に一様に分布していると思う。

(5) ご質問の内容を「水中に混入したテフロン粉そのものがキャビテーション核として作用し、固・液の界面がはがれることによるキャビテーション」と受

けとめて考える。

テフロン粉は確かに水にはかなりぬれ難いものであり、ご指摘の可能性もあるが、本研究で提案するモデルによって合理的に現象が説明されたと思う。予加圧

の時間が長くなるとともに生じる $p_{\min}$ の変化〔図 6 の (b)→(c)〕も混入テフロン粉が微小ガスポケットの残存を助長することを反映していると思う。