

狭い隙間におけるキャビテーション損傷に 及ぼすポリマー効果に関する研究

辻野 智二・井上健次郎・大橋 貴幸*

Study of Polymer Effect on Cavitation Damage in Narrow Clearance

Tomoji TSUJINO, Kenjiro INOUE and Takayuki OHASHI*

(Received October 1, 2003)

Cavitation damage tests are undertaken in polymer solutions and water using stationary aluminum in close proximity to the free end of vibratory horn. Experimental conditions are resonant frequency 19.5kHz and peak-to-peak amplitude 38.1 μ m. The mass loss in a 1000wppm polymer solution is larger than in a 100wppm polymer solution and water. In the 100wppm polymer solution, cavitation bubbles are generated on the vibratory tip, but in the 1000wppm polymer solution, the cavity in the clearance appears on the stationary specimens.

Key words : cavitation, cavitation damage, non-Newtonian fluids, polymer solution, bubble

1. 緒 言

キャビテーション問題は、ポンプ・水車などの流体機械のみならず、液体を取り扱う管路、バルブ等でも、遭遇する流体力学上の重要な研究課題の一つである⁽¹⁾。また、最近では、キャビテーションの発生は、人工臓器などのバイオエンジニアリングの分野においても注目されている^(2,3)。これまで、キャビテーション発生抑制方法として、ポリマー添加法が提案され、研究が進められてきている⁽⁴⁻¹⁰⁾。一方、キャビテーション損傷に及ぼすポリマー添加の影響についての研究報告は少ないが、これまでの研究としては以下の論文が挙げられる。辻野ら⁽¹¹⁻¹³⁾の論文では、振動式キャビテーション損傷装置を用いて水の場合との比較検討を行っている。結果として、ポリマー濃度 $C=1000\text{wppm}$ ポリマー水溶液の場合、試験時間 60 分における損傷量は水の場合よりもはるかに小さくなることを示し、ポリマー添加は損傷を抑制することを示している。望月ら⁽¹⁴⁾は希薄ポリマー水溶液中において回転円板法を用いた壊食試験を行っており、微量のポリマー添加は水の場合と比較して、損傷能力を著しく促進し、ポリマー濃度の増大に伴い損傷量は増加す

ることを示している。

振動式キャビテーション損傷装置には、振動ホーン先端に直接試験片を取り付けて、液中で振動させ試験を行う直接法（以下、直接振動法という）と、隙間の小さな対向二面型の試験法（以下、対向型静置試験法という）とがある。直接振動試験法は最も一般的な試験法として認知されているが、材質によっては加振の影響により試験片が割れるという欠点も指摘されている。対向型静置試験法では試験片をホーン直下に静止させているため、もろい材料でも試験ができ、かつ振動子との距離を変えることにより損傷の強さを変えることができる等の利点がある。この対向型静置試験法を行った論文としては、Ashworth-Procter⁽¹⁵⁾、Hansson-Morch⁽¹⁶⁾、遠藤ら⁽¹⁷⁾ および Hobbs-Rachman⁽¹⁸⁾ の研究がある。この中で、Ashworth-Procter はキャビテーション損傷に及ぼすポリマーの添加の影響を論究しているが、彼らが実験で用いたポリマー水溶液は、キャビテーション状態下にさらされ、かなり劣化したものであるため、ポリマー水溶液のレオロジー特性もかなり変化していたものとみなされよう。

本研究の目的は、対向型静置試験法を用いてキャビテーション損傷に及ぼすポリマー添加の影響および隙間距離の影響を明らかにする。本実験は、試験時にお

* 熊本県立八代工業高等学校

けるポリマーの劣化を抑制するため、新鮮なポリマー水溶液をポンプで試験槽内に供給し、キャビテーションによって劣化したポリマー水溶液が適宜排出されるようなシステムを採用している。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本実験で使用した対向型キャビテーション損傷試験装置の概略を図1に示す。

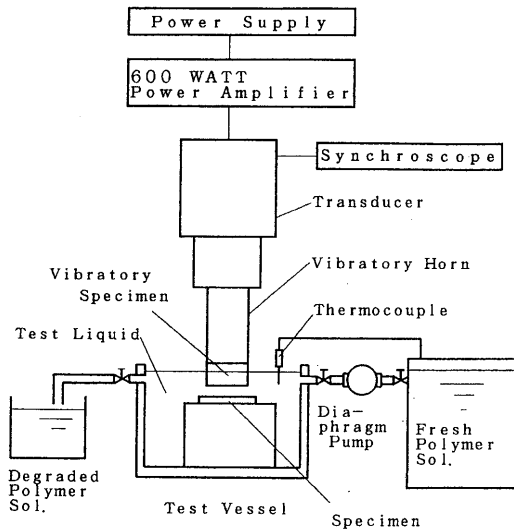


Fig.1 Experimental apparatus

キャビテーションはホーンの先端に取り付けた振動金属片を、供試液体中で超音波振動させることにより発生させ、隙間をもたせて置いた静置試験片を損傷させる。比較のために直接振動試験法の場合には、静置試験片の支持台を取り外し、ホーン先端に直接試験片を取り付け損傷試験を行っている。本実験で用いた供試液体は水およびポリマー水溶液である。水は大気中に12時間以上放置し、空気含有量が一定となったものを使用した。ポリマー水溶液の濃度 C は $C=100\text{wppm}$ および 1000wppm である。供試ポリマーは Union Carbide 社製 Polyox WSR-301 で分子量 400 万の水溶性高分子である。試験容器内の液体の温度を一定に保ち、かつキャビテーションによるポリマーの劣化をできるだけ抑制するため、供試液体は恒温槽内で一定温度にした後、ダイヤフラムポンプで流量 $Q=0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ で試験容器内に流入し、劣化したポリマー水溶液は適宜流出するシステムとしている。実験条件として、振動振幅 A は $38 \pm 1 \mu\text{m}$ 、振動数 f は $19.5 \pm 0.5 \text{kHz}$ 、供試液体温度 t_e は $295\text{K} (\pm 1)$ である。

2.2 実験方法

ホーン先端に取り付けた振動金属片（炭素鋼）を供試液体中で振動させ、発生したキャビテーション気泡により、振動金属片に隙間をもたせて対向させた静置試験片を損傷させる。静置試験片の材質はアルミニウムを用いた。振動金属片として用いた炭素鋼片の形状は直径 15.9mm 、高さ 8mm の円柱である。炭素鋼片は機械加工の後、試片表面を #3000 のエメリーペーパーで仕上げている。振動金属片もキャビテーションにより損傷されるので、5分ごとに交換している。隙間距離 h は $1, 3$ および 5mm である。

アルミニウム試験片の損傷量は、試験開始後5分ごとに取り出し、洗浄・乾燥させた後、電子天秤（精度 $\pm 0.1\text{mg}$ ）により測定した。試験時間は最大30分とした。アルミニウム試験片近傍に発生するキャビテーションの観察は、閃光時間 $2 \mu\text{sec}$ の高速ストロボスコープとカメラを同期させた瞬間撮影による。試験片の物性値は以下のようなものである。アルミニウム JIS 規格 5056、合金系 5000 系 Al-Mg 合金 (Mg5.0% Mn0.1% Cr0.1%)、せん断強度 181Mpa 、引張り強さ 289Mpa 、ブリネル硬さ $65\text{kg}/\text{mm}^2$ 。

3. 実験結果と考察

3.1 キャビテーション損傷量

アルミニウム試片のキャビテーション損傷量 ML を測定し、ポリマー濃度 C および隙間距離 h の影響を検討した。

図2～4には、隙間距離 h を変化させた場合の、キャビテーション損傷量に及ぼすポリマー濃度の影響について示している。

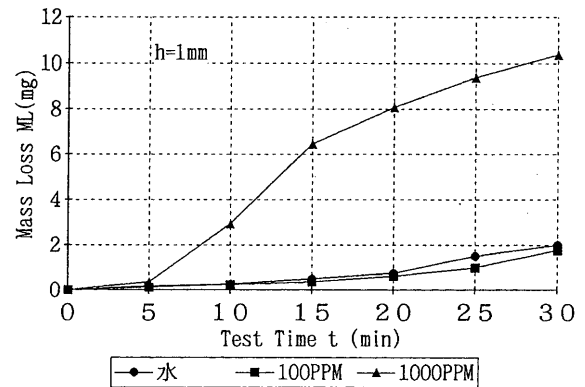


Fig.2 Relation of mass loss - test time
(Stationary specimen, $h=1\text{mm}$)

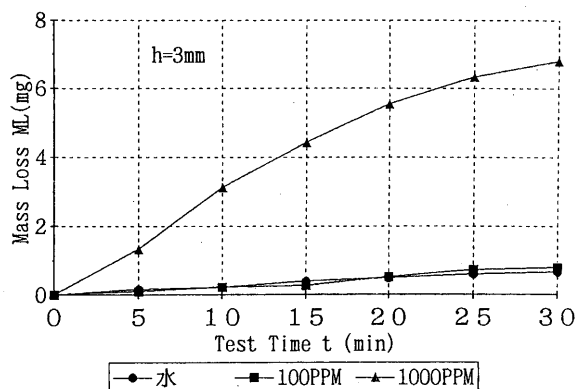


Fig.3 Relation of mass loss - test time
(Stationary specimen, $h=3\text{mm}$)

図2は、隙間距離 $h=1\text{mm}$ における水 ($C=0\text{wppm}$), $C=100\text{wppm}$ および $C=1000\text{wppm}$ ポリマー水溶液中のキャビテーション損傷量 ML と試験時間 t との関係である。水中における損傷量は僅少であり、その増加率も極めて小さい。また、 100wppm ポリマー水溶液中においても、水中の場合と類似した傾向を示す。他方、 1000wppm ポリマー水溶液の場合、試験開始後 $t > 5\text{min}$ において損傷量の顕著な増加を示す。このポリマー水溶液中における、試験時間 $t=30\text{min}$ の損傷量は水および 100wppm ポリマー水溶液中の場合と比較すると約5倍になる。

図3には、隙間距離 $h=3\text{mm}$ における各液中のキャビテーション損傷量 ML と試験時間 t との関係を示す。水中および 100wppm ポリマー水溶液中の損傷量は類似し、その損傷量は極めて小さい。一方、 1000wppm ポリマー水溶液中の場合、時間の経過に従い、損傷量は著しく増加する傾向となる。

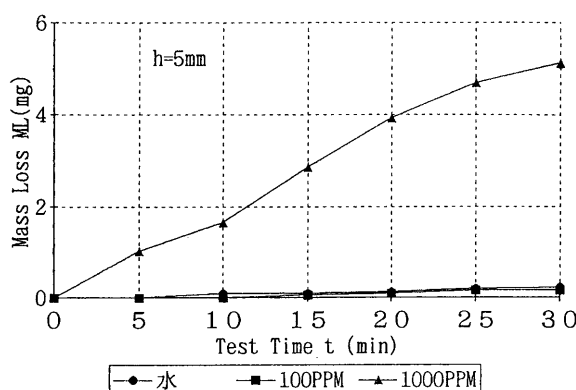


Fig.4 Relation of mass loss - test time
(Stationary specimen, $h=5\text{mm}$)

図4は隙間距離 $h=5\text{mm}$ における対比を示す。水および 100wppm ポリマー水溶液中における損傷量は僅かであり、その増加率も小さい。それに対して、 1000wppm ポリマー水溶液の場合では、試験開始直後

から損傷量の増加が現れる。 $t=30\text{min}$ におけるこのポリマー水溶液中の損傷量は、水および 100wppm ポリマー水溶液中の場合の約5倍となる。

対向型静置試験法において、比較的高濃度となる 1000wppm のポリマー添加はキャビテーション損傷を促進し、損傷量を増加させる。しかし、 100wppm ポリマー水溶液のように低濃度水溶液中では、損傷量は水中の場合と類似し、その大きさは極めて小さい。

図5～7には、各液中における直接振動法と静置法との比較を示している。

図5には、直接振動試験法と対向型静置試験法の隙間距離 $h=1, 3$ および 5mm の場合のキャビテーション損傷量 ML と試験時間 t との関係を示す。液体は水である。直接振動法の場合、試験時間の経過と共に損傷量が著しく増加している。他方、静置法における損傷量は、直接振動法のそれと比較して小さく、またその増加率も極めて小さい。 $t=30\text{min}$ における直接振動法の損傷量は静置法の $h=1\text{mm}$ の場合の約5倍、 $h=3\text{mm}$ の場合の約14倍、 $h=5\text{mm}$ の場合の約42倍となる。直接振動法は静置法と比較して損傷量が多いと言える。

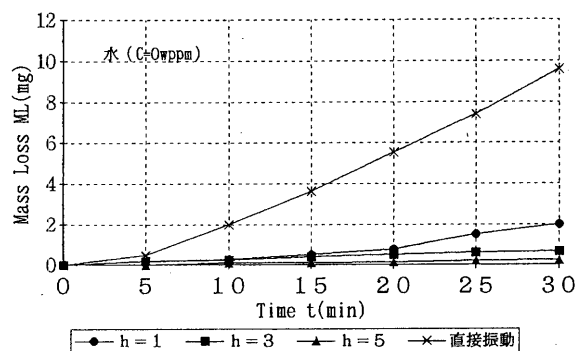


Fig.5 Relation of mass loss - test time (Water)

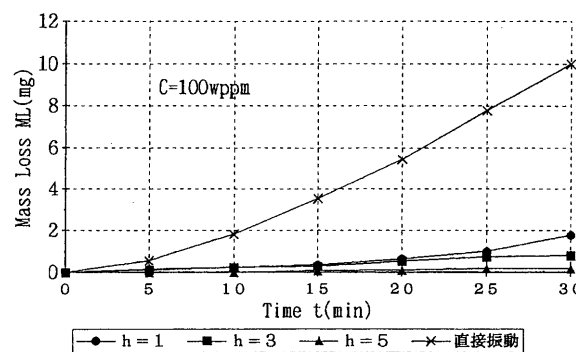


Fig.6 Relation of mass loss - test time
(100wppm polymer solution)

図6は $C=100\text{wppm}$ ポリマー水溶液中における両試験法によるキャビテーション損傷量 ML - 試験時間 t

である。直接振動法における損傷量は時間と共に増大する。試験時間 $t=30\text{min}$ における直接振動法の損傷量は、静置法における $h=1\text{mm}$ の場合の約5倍、 $h=3\text{mm}$ の場合の約13倍および $h=5\text{mm}$ の場合の約60倍になり、極めて大きい。

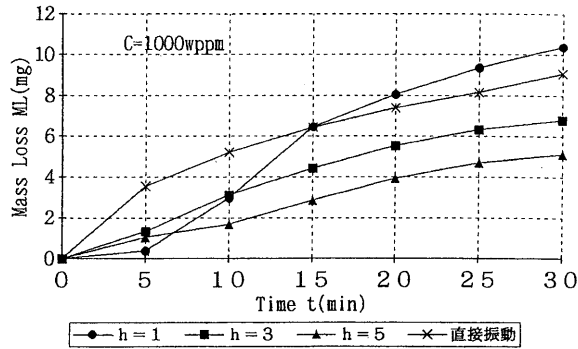


Fig.7 Relation of mass loss - test time (1000wppm polymer solution)

図7に $C=1000\text{wppm}$ ポリマー水溶液における両試験法の比較を示している。試験開始後 $t<5\text{min}$ においては、直接振動法の損傷量が多くなる。しかし、試験時間 $t>15\text{min}$ では、静置法の隙間距離 $h=1\text{mm}$ における損傷量が急激に増加し、試験時間 $t=30\text{min}$ の損傷量は、直接振動法の場合より大きくなる。

水および 100wppm ポリマー水溶液中において、直接振動法の損傷量は静置法のそれと比べて極めて多く、振動片と試験片の隙間距離が大きくなるにつれ損傷量は減少する。これら2つの液中におけるキャビテーション損傷量は類似した傾向を示すと言える。また、 1000wppm ポリマー水溶液は水と比較して、直接振動試験法においてはキャビテーション損傷量を減少させるが、対向型静置試験においては損傷量を増加させる場合がある。

3.2 キャビティの様相および試験片表面の損傷状態に及ぼすポリマー濃度および隙間距離による影響

試験時間 $t=30\text{min}$ におけるキャビティの様相および試験片表面の損傷状態から、ポリマー添加および隙間距離の影響について検討する。

図8には隙間距離 $h=1\text{mm}$ におけるキャビティの様相、試験片表面の損傷状態を示している。水の場合、ホーン先端振動金属片から発生した直径 0.3mm 以下のキャビティが下向きに流れ、試験片を損傷し、その試験片表面上は、直径約 13mm の同心円状に損傷される。 100wppm ポリマー水溶液中における試験片の損傷状態は、水の場合と類似した同心円状の損傷痕（直径約

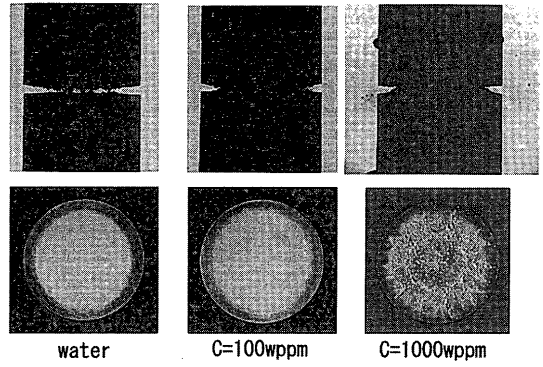


Fig.8 Cavitation clouds and damage patterns ($h=1\text{mm}$, $t=30\text{min}$)

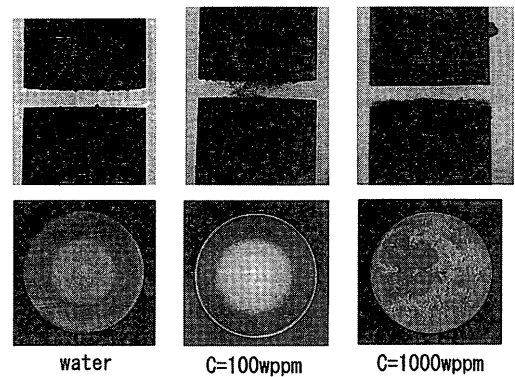


Fig.9 Cavitation clouds and damage patterns ($h=3\text{mm}$, $t=30\text{min}$)

14mm) が形成される。ポリマー濃度を 1000wppm とした場合も、振動片と試験片との隙間は 100wppm ポリマー水溶液中同様、気泡数密度が大きい。このポリマー水溶液中では、隙間から直径 0.5mm 以下の気泡が噴出する特異現象が現れている。また、キャビティが末広がり形成されていることから、ホーン先端の振動金属片からキャビティは発生せず、試験片表面上から発生し、損傷を促進させていると推測される。試験片表面は筋状の損傷痕が現れ、激しく損傷される。

図9は隙間距離 $h=3\text{mm}$ とした場合の各液中における結果である。水の場合、ホーン先端振動金属片から直径 0.3mm 以下の気泡が発生している。試験片表面は直径約 9mm の同心円状の損傷痕が形成される。 100wppm ポリマー水溶液中の場合、振動片から直径約 $0.2\sim 0.3\text{mm}$ の気泡が数多く発生している。その試験片表面は直径約 10mm の同心円状に損傷され、試験片中央の損傷が最も激しい。 1000wppm ポリマー水溶液中の場合、キャビティは静置試験片表面から発生し、損傷を促進させている。このポリマー水溶液中における試験片表面は、筋状に激しく損傷され、水および 100wppm ポリマー水溶液中の場合と比較すると損傷面積が大きい。

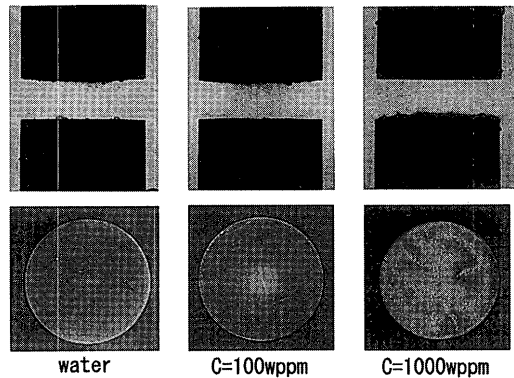


Fig.10 Cavitation clouds and damage patterns
($h=5\text{mm}$, $t=30\text{min}$)

図10は隙間距離 $h=5\text{mm}$ と拡大した場合の各液中の比較である。水中の場合、振動金属片から直径 0.3mm 以下の気泡が発生している。100wppm ポリマー水溶液中の場合、振動片から直径約 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ の気泡が発生し、軸対称流れが観察される。水および100wppm ポリマー水溶液中ともに、試片表面は中央に僅かな損傷痕が現れている。1000wppm ポリマー水溶液中の場合、キャビティは振動片から発生するのはほとんどみられず、静置試験片から激しく発生し、損傷を促進させている。試片表面は水および100wppm ポリマー水溶液中の場合と異なり、筋状に激しく損傷され、かつ非損傷面積も著しく減少する。

4. 結 言

(1) 対向型振動キャビテーション損傷試験装置を用いて、水とポリマー水溶液（非ニュートン流体）中におけるキャビテーション損傷に関する実験的研究を行い、キャビテーション損傷に及ぼすポリマー濃度および隙間距離の影響を明らかにした。得たる結果を要約すると次のようになる。

(2) 100wppm ポリマー水溶液中の損傷量、損傷率は共に小さく、水中における結果と大きな差異はない。隙間距離 $h=1\text{mm}$ の場合、振動金属片と試験片の隙間で生成する気泡数密度は高い。 $h=3\text{mm}$ の場合、直径 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ の気泡が多数発生している。 $h=5\text{mm}$ においては、直径 0.2mm 以下の気泡が発生し、下向きに軸対称に流動する。

(3) 1000wppm ポリマー水溶液中の損傷量は、水および100wppm ポリマー水溶液中の場合と比べて、約10倍程度増加する。この液中では、試験時間の経過と共に試片面から発生するキャビティが増大し、特有の筋状損傷が促進され、それは試片表面の全域に及ぶ。隙間距離 $h=1\text{mm}$ の場合、直径 0.5mm 以下の気泡が発生

し、隙間の気泡数密度が極めて高い。 $h=3\text{mm}$ および 5mm の場合、振動片から発生するキャビティは僅かであり、むしろ、静置試験片表面上からキャビティが発生する。

参 考 文 献

- 1) 加藤洋治：キャビテーション，槓書店，(1999)。
- 2) 辻野智二，三浦誠，浦西和夫，塚本光夫，平井和人：左心補助用マイクロ血液ポンプの試作に関する研究，ターボ機械，Vol.30, No.8, pp.479-485, (2002)。
- 3) 三浦誠，辻野智二：二葉式機械弁におけるキャビテーション気泡の生成とその動態，人工臓器，Vol.29, No.2, pp.379-383, (2000)。
- 4) A.T.Ellis, J.G.Waugh, R.Y.Ting : Cavitation Suppression and Stress Effects in High-Speed Flow of Water With Dilute Macromolecule Additives, ASME, J. Fluids Engng, Vol.92, Series D, No.3, pp.459-466, (1970)。
- 5) R.Y.Ting : Cavitation Suppression by Polymer Additives Concentration Effect and Implication on Drag Reduction, AIChE Journal, Vol.20, No.4, pp.827-828, (1974)。
- 6) R.Y.Ting : Characteristics of Flow Cavitation in Dilute Solution of Polyethylene Oxide and Polyacrylamide, Phys. Fluids, Vol.21, No.6, pp.898-901, (1978)。
- 7) H.Reitzer, C.Gebel, O.Scrivener : Effect of Polymeric Additives on Cavitation and Radiated Noise in Water Flowing Past a Circular Cylinder, J.Non-Newtonian Fluid Mech., Vol.18, pp.71-79, (1985)。
- 8) G.L.Chahine, G.F.Frederick, R.D.Bateman : Propeller Tip Vortex Cavitation Suppression Using Selective Polymer Injection, Trans. ASME, J. Fluids Engng, Vol.115, pp.495-503, (1993)。
- 9) 大場利三郎，浦西和夫：管内オリフィスを通る希薄ポリマ溶液のキャビテーション挙動，日本機械学会論文集，Vol.45, No.389, pp.72-79, (1979)。
- 10) 横田源弘，伊藤幸雄，大場利三郎：微小ノズルのキャビテーション特性に対するポリマ添加の影響，ウォータージェット，Vol.10, No.2, pp.3-13, (1993)。
- 11) A.Shima, T.Tsujino, H.Nanjo and N.Miura : Cavitation Damage in Polymer Aqueous Solutions, Trans. ASME, J. Fluids Engng, Vol.107, pp.134-138, (1985)。
- 12) T.Tsujino, A.Shima, and H.Nanjo : Effect of Various Polymer Additives on Cavitation Damage, Proc.Instn Mech. Engrs, Vol.200, No.C4, pp.231-235, (1986)。
- 13) H.Nanjo, A.Shima, T.Tsujino : Formation of Damage Pits by Cavitation in a Polymer Solution, Nature, Vol.320, No.6062, pp.516-517, (1986)。
- 14) 望月敬美，横田源弘，岡野内順三，末次昂之：回転円板法によるキャビテーション壊食に及ぼすポリマの添加の影響，ターボ機械，Vol.21, No.8, pp.23-27, (1986)。
- 15) V.Ashworth and R.P.M.Procter : Cavitation Damage in Dilute Polymer Solution, Nature, Vol.258, No.6, pp.64-66, (1993)。

- 16) I.Hansson and K.A.Morch : The Dynamics of Cavity Clusters in Ultrasonic Vibratory Cavitation Erosion, J.Appl.Phys, Vol.51, No.9, pp.4651-4658, (1980).
- 17) 遠藤吉郎, 岡田庸敬, 中野達也, 中島政明: 液中で振動する近接平行2面間の浸食(とくに軸受メタルの損傷について), 日本機械学会論文集, Vol.32, No.237, pp.831-841, (1966).
- 18) J.M.Hobbs and D.Rachman : Environmentally Controlled Cavitation Test Improvements in a Cavitation Film Erosion Test, ASTM Spec. Tech. Publ., No.474, pp.29-46, (1970).