

氏名	南 條 弘
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 61 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学位論文題目	ポリマー水溶液中のキャビテーション損傷に関する研究
指導教官	東北大学教授 嶋 章
論文審査委員	東北大学教授 嶋 章 東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 神山 新一

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

キャビテーション損傷は、ポンプ、水車および船舶推進器などの流体機器における重大な問題として認識されており、キャビテーション損傷の機構解明および防止対策の究明を目的として、様々な流動形態および種々の条件下におけるキャビテーション損傷について、実験的および理論的研究が行われてきている。

これらについての研究は、これまで主にニュートン流体を対象としてきたが、近年、水に微量のポリマーを添加すると、乱流の摩擦抵抗が減少するというトムズ効果が明らかにされて以来、ポリマー水溶液中の高速流動現象について研究されてきている。例えば、噴流の乱れが減少することおよびキャビテーションの発生が抑制されることなどポリマーの添加は、高速流動特性を改善することが知られている。しかしながら、キャビテーション損傷に対するポリマー効果については、相反する結果が報告されており [1, 2], 未だ十分な結論は得られていない。よって、統一的な結論を得るためには、より多くの実験データの提供および損傷機構の解明が必要不可欠である。

第 2 章 キャビテーション損傷に及ぼすポリマーの種類およびポリマー濃度の影響

本章では、高速流動現象に関する実際にしばしば用いられているポリエチレンオキサイド (Polyox),

カルボキシメチルセルロース (CMC), ヒドロキシエチルセルロース (HEC), グアガム (GGM) およびポリアクリルアミド (PAM) の 5 種類のポリマー添加剤を選定し, 実験時のポリマーの劣化を抑制し得るシステムを備えた振動キャビテーション損傷試験装置を用いて実験を行った。よって, これら水溶液中における損傷量, キャビテーションの様相および試片表面の損傷状態に及ぼすポリマー濃度 ($c=100 \sim 1000$ wppm) の影響を明らかにした。次いで, 損傷量, 損傷率, 損傷面積, 平均損傷深さおよび平均損傷率などに及ぼすポリマーの種類による影響について比較検討し, 以下のような結論を得た。

100 wppm Polyox 水溶液中のキャビテーションによる損傷量は水に比べて大きくなるが, 100 wppm および 200 wppm PAM 水溶液の場合には逆に小さくなる。 $c=1000$ wppm の場合には, いずれのポリマー水溶液中においても不規則で局所的な損傷模様が現れる。特に, Polyox および PAM 水溶液中においては試片表面上に筋状損傷が現れ (図 1), 試験時間 $t=60$ min における損傷量 (図 2), 損傷率および損傷面積は, 水および他のポリマー水溶液の場合よりも小さくなる。しかしながら, 平均損傷深さは他のポリマー水溶液の場合よりも大きくなる。CMC および HEC 水溶液中の損傷量はポリマー濃度に依存せず, 水中における結果と同程度であることから, これらのポリマーの添加による影響は比較的小さいと言える。 $t=60$ min における 1000 wppm GGM 水溶液中の損傷量および損傷面積は Polyox および PAM 水溶液の場合よりも大きい, CMC および HEC 水溶液の場合よりも小さくなる。

次に, ポリマー水溶液と同じ粘度および表面張力を有するニュートン流体 (水・グリセリン混合液) 中において損傷実験を行い, 得たる結果をポリマー水溶液の場合と対比することにより, ポリマー水溶液中のキャビテーション損傷には液体の弾性的な性質が強く関与していることを明らかにした。さらに, ワイゼンベルグ効果に関する実験を行い, ポリマー水溶液中で見られる筋状損傷の発生には法線応力効果が強く作用していることを指摘した。

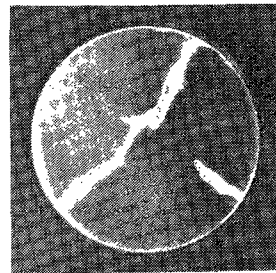


図 1 Polyox 水溶液中における試片表面の損傷状態 (5 min)

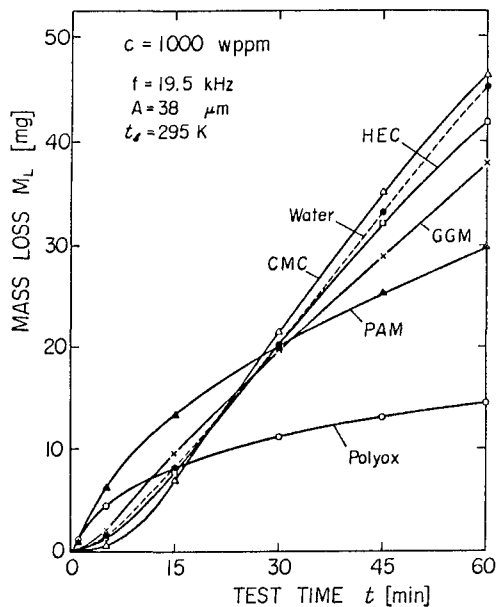


図 2 損傷量に及ぼす各種ポリマー添加剤の影響

第3章 ポリマー水溶液中のキャビテーション損傷に及ぼす表面粗さの影響

本章では試片の表面粗さによる影響に着目した。翼型のキャビテーション性能、ポリマー水溶液中における管摩擦係数およびニュートン流体中のキャビテーション損傷などにおいて、表面粗さは重要な役割を果たしていることが知られている。しかしながら、ポリマー水溶液中におけるキャビテーション損傷に及ぼす表面粗さの影響について言及した文献は見当たらない。よって本章では、4段階の粗さ（最大高さ $R_{max}=1, 5, 20, 240 \mu\text{m}$ ）を設けた試片について実験を行い、損傷量、キャビテーションの様相、試片表面の損傷状態、断面曲線および最大損傷深さなどに及ぼす表面粗さの影響を明らかにした。さらに、各粗さについて水の場合の結果と対比することにより、キャビテーション損傷に及ぼすポリマー効果を明らかにし、以下のような結論を得た。

ポリマー水溶液中で見られる皿型のキャビテーションクラウドおよび筋状損傷は試片の表面粗さに依存し、粗さが大きくなるにつれて、これらの特徴は見られなくなる。ポリマー水溶液中のキャビテーションによる損傷量は水の場合と同様、粗さの増加と共に大きくなるが、損傷量と試験時間との関係は異なる。すなわち、ポリマー水溶液中における初期の損傷量および損傷率は、水に比べて著しく大きくなるが、 $t=60 \text{ min}$ におけるそれらは、どの粗さにおいても水の場合よりも小さくなる。ポリマー水溶液中で形成されるピットの形状は水の場合とは異なり、細長く、その先端が鋭い。このようなピットの形成には液体の弾性的な性質が重要な役割を果たしている。また、ピットの最大損傷深さは初期表面が滑らかな試片ほど深くなる。

第4章 ポリマー水溶液中のキャビテーションクラウドおよび損傷ピットの形成

本章では、第2章および第3章で得られた結果を基にして、ポリマー水溶液中でしばしば見られる皿型のキャビテーションクラウドおよび筋状損傷の発生およびピットの形成機構について考察した。よって、以下のような結果を得た。

試験開始直後、試片上に気泡はほとんど見られない（図3）。これは Polyox 水溶液の応力緩和時間が試片の振動周期に比べて十分大きいこと、緩和効果により、試片近傍の液体が試片の振動に比較的良く追従し、気泡を発生させるのに十分な大きな圧力降下が生じないことが一つの原因として考えられる。また、試片から数mm離れた所に多数の気泡が見られ、それらがアルミニウムを損傷し得るということは、液体が弾性的に挙動することにより、液中の圧力変動が数mm離れた所までさほど減衰せずに伝達されることを意味している。筋状損傷は、試片上の傷や液体中の異質物を気泡の発生源として、そこから出現する。水中で形成されるピットの壁面は比較的なだ

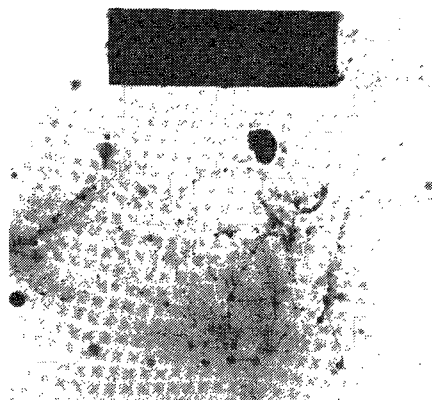


図3 Polyox 水溶液中における試験開始直後のキャビテーションの様相

らかであるが、ポリマー水溶液中のピットは凹凸が激しく、一つの大きなピット内に数個の微小ピットが形成されている。それらの中には振動方向に対し斜めにあいたピットやつぼ型のピットもある。このようなピット形状の違いから、ポリマー水溶液中では水の場合に比べて局所的で方向性を持った衝撃的圧力の作用がより強くなると考えられる。水中における損傷はピットの側壁と頂部の両方向に進行する。ポリマー水溶液中では断面形状が急変する円錐ピットの頂部および円柱ピットの角が損傷されるが、平坦な所は損傷されにくい。

第5章 粘弾性流体中の気泡の非線形振動

本章では、ポリマー水溶液（粘弾性流体）のレオロジー等性を良く記述する3定数 Oldroyd モデルを用いて、脈動圧力を受ける粘弾性流体中の気泡の非線形振動について理論解析した。次いで得られた気泡の運動方程式および気泡表面での圧力方程式の数値計算を行うことにより、気泡の固有振動数、周波数応答曲線、無次元振幅および気泡表面における最大圧力と気泡平衡半径との関係ならびに各共振近傍における気泡半径および気泡表面圧力の時間的変化を明らかにした。さらに、第2章で行った実験結果に対する理論的考察を加えた。主な結論は以下のごとくである。

気泡平衡半径 R_0 が小さい範囲では ($R_0 < 0.04 \text{ mm}$)、緩和時間 λ_1 が大きく、かつ、遅延時間 λ_2 が小さいほど、気泡の固有振動数 f_0 は大きくなる。気泡の無次元振幅 R^* および気泡振動時に発する気泡表面の最大圧力 $P_{w\max}$ は、 λ_1 が大きいほど、かつ、 λ_2 が小さいほど大きくなる。 $\lambda_1/\lambda_2 \geq 10$ なる粘弾性流体中における $P_{w\max}$ は、ニュートン流体中の場合よりも大きい。また、 $\lambda_1/\lambda_2 = 1$ の粘弾性流体中の $P_{w\max}$ は、逆に小さくなる。 $f = 20 \text{ kHz}$ の場合には、 $R_0 \approx 0.15 \text{ mm}$ で主共振をなし、発生する最大圧力 $P_{w\max}$ は最も大きくなる。次いで、 $2/1$ 次高調波振動 ($R_0 = 0.08 \text{ mm}$) および $1/2$ 次分数調波振動 ($R_0 = 0.32 \text{ mm}$) するときの圧力が大きい。Polyox 水溶液中のキャビテーションによる損傷量の増加は、液体の緩和効果による気泡振動時に発生する圧力の増大が、一つの要因と考えられる。

第6章 結 論

本章では、本論文で得られた結論を総括している。

文 献

- [1] V. Ashworth and R.P.M. Procter, Nature, Vol.258(1975), p.64.
- [2] I.F. Shapoval and K.K. Shal'nev, Sov. Phys. Dokl., Vol.22(1977), p.635.

審査結果の要旨

近年、ポンプ、水車、船舶推進器等の流体機器の大形化並びに高速化に伴って発生するキャビテーションによる材料の損傷問題は緊急に解決すべき重要課題の一つとなってきた。キャビテーション発生抑制法の一つとして流体へのポリマー添加があるが、キャビテーション損傷に対するポリマー効果については、殆んど解明されておらなかった。

著者は、キャビテーション損傷に及ぼすポリマー添加の影響を明らかにすることを目的として、振動型損傷試験装置を用い、ポリマー水溶液について損傷実験を行うとともに、気泡力学に基づいた理論的検討等、実験と理論の両面から研究を進めてきた。本論文は、その成果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、各種ポリマーを水に添加した損傷実験を行い、ポリマー濃度の影響を明らかにしている。さらに、損傷量、損傷率、損傷面積、平均損傷深さ等に及ぼすポリマーの種類の影響を明らかにした。よって、100 wppm Polyox 水溶液中のキャビテーションによる損傷量は水に比べて大きくなるが、100 wppm および 200 wppm PAM 水溶液の場合には逆に小さくなること等注目すべき結果を得ている。また、1000 wppm の Polyox および PAM 水溶液においては明瞭な筋状損傷が発生することを見出し、このような損傷の発生には法線応力効果が強く作用することを指摘している。これは有用な知見である。

第3章では、筋状損傷の機構の解明を目的として、ポリマー水溶液中のキャビテーション損傷に及ぼす表面粗さの影響を調べている。その結果、筋状損傷は表面粗さに依存することおよび損傷量と試験時間との関係は水の場合と異なること等興味ある成果を得ている。

第4章では、試片およびその周囲環境を種々設定してキャビテーションの様相および損傷状態を観察し、発生するクラウドおよび損傷ピットの形成機構について考察している。その結果、ポリマー水溶液中のキャビテーションクラウドの形成には緩和効果が重要な役割を演じていることや筋状損傷は試片上の傷や断面形状の急変する箇所が発生しやすいことを実験的に確かめている。これらは重要な知見である。

第5章では、粘弾性流体としての Oldroyd モデルを用いて、振動圧力場でのキャビテーション気泡の挙動並びに発生圧力の計算を行い、損傷を与えるべき圧力に対する液体の弾性の影響について述べている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ポリマー水溶液中のキャビテーション損傷について実験的および理論的に究明したものであり、流体工学並びにキャビテーション工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。