

ポリマー水溶液中における気泡上昇に関する研究

辻野 智二, 井上健次郎, 城下宗一朗*

Studies of Rising Bubbles in Polymer Aqueous Solutions

Tomoji TSUJINO, Kenjiro INOUE and Soichiro SHIROSHITA*

(Received September 1, 1998)

Phenomena of two phase flow in non-Newtonian fluids have received interest in recent year. In the present paper, experimental studies about rising velocity of bubble and behavior of bubble shape in polymer solutions are conducted. The results are compared with the bubble in water. The tested liquids are Polyox aqueous solutions with the polymer concentration of 50ppm-3000ppm and water. As a result, the rising velocities of bubble diameter $d \leq 2.0$ mm in the polymer solutions with the concentration $C \leq 1000$ ppm increase linearly with the bubble size. The increment of polymer concentration lowers the rising velocities of bubble. The rising velocities of bubbles with diameter 5.7 mm to 10.5mm in a 3000ppm polymer solution are large as compared with the cases of water and a 500ppm polymer solution.

Key words: polymer aqueous solution, non-Newtonian fluid, bubble, rising velocity of bubble

1. 緒 言

プレート塔, エアリフトおよび通気攪拌などの工業装置における気液二相流の流動特性の解明とも関連して, 液中における気泡上昇の速度および気泡形状を明らかにすることは重要である^{1, 2)}. 従って, 水などのニュートン流体中の上昇気泡を扱った実験的研究は, これまでいくつか報告されている³⁻⁵⁾. 関連する理論的研究は Moore⁶⁾ および高木・松本⁷⁾ らによってなされている.

また, 最近の環境問題に関連する研究として, 微細気泡を利用した水の浄化法の開発⁸⁾, および CO₂ 気泡による二酸化炭素の海洋処理技術開発⁹⁾ 等も注目されている. さらに, 機能性流体の一つである磁性流体中の気泡の変形問題なども検討されている¹⁰⁾.

一方, 非ニュートン流体中の気泡の問題も, ポリマー水溶液中のキャビテーション現象の解明とも関連し, 研究が進められてきている^{11, 12)}. 非ニュートン流体中における上昇気泡については, 例えば, Zana and Leal¹³⁾ および Kee et al¹⁴⁾. の論文があるが, 未だ十分な知見は得られていないようである.

よって, 本研究では, ポリマー水溶液中における気泡の上昇に関する基礎的知見を得ることを目的とし, 実験的研究を行った. はじめに, 上昇気泡観察用アクリル製角柱容器を製作した. その角柱容器を供試液体で満たした後, 容器下部より注射器にて空気を送入して, 気泡を生成・上昇させた. 液中を上昇する気泡の観察は, 高速ストロボを同期させた写真撮影による. ここでは, 気泡の上昇速度およびその変形挙動とポリマー濃度との関係などを明らかにし, その結果について考察する.

* 宇土市立鶴城中学校

2. 実験装置および供試液体の物性

2.1 実験装置と方法

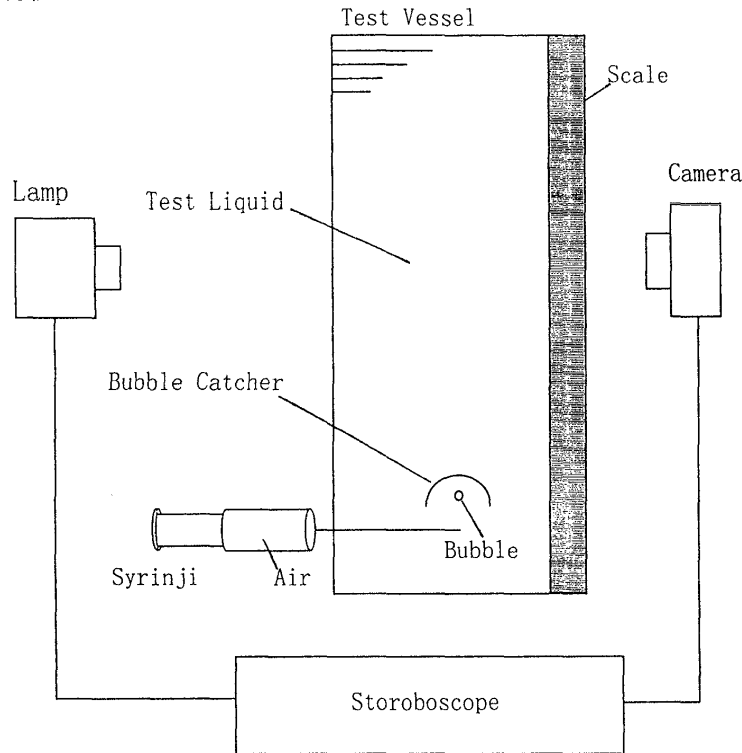


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

本研究で用いた実験装置の概略を図1および2に示す。気泡を上昇させる角柱容器は透明アクリル樹脂製であり、気泡の運動に及ぼす壁面の影響を十分減じるため、これまでの研究を参考にして、角柱断面を150mm×150mm、高さを1000mmとしている。角柱容器を供試液体で満たした後、図1および2に示すように注射器によって液中にガスを放出し、気泡を発生させる。使用した注射器は、容量2500mm³、100mm³（死容積1.7±0.3mm³）、5mm³（0.9±0.3mm³）の3種である。これらの注射器の使用は生成する気泡直径 d の大きさによって異なり、 $5.7\text{mm} \leq d \leq 15.6\text{mm}$ の範囲では容量2500mm³、 $2.0\text{mm} \leq d \leq 5.0\text{mm}$ では容量100mm³、 $0.6\text{mm} \leq d \leq 1.8\text{mm}$ では容量5mm³の注射器をそれぞれ採用している。

角柱容器内で発生させた気泡は、始め気泡捕集器にトラップさせ、次いで、この捕集器をゆっくりと回転させることにより、上昇させた。捕集器は図1の真鍮製半球状のもの、および図2のガラス製円錐形状の2種を用いている。図1に示す捕集器は容器底部より105mm上側に設置し、注射針の先端は容器中央部になるようにセットしている。図2は、微細気泡生成用である。液体で満たされたビニール管中に、小注射器から体積が既知の空気を注入し、気泡を生成する。次いで、大注射器から液体を送入することによって、その気泡を角柱容器内におかれた気泡捕集器まで移動させた後上昇させる。なお、液中を上昇する気泡の位置を確認するため、容器壁面に長さ1000mmのスケールを設置している。

予備実験の結果より、気泡の上昇速度は捕集器より200mm上側で定常状態になることが確認されたので、気泡の上昇速度は捕集器から200~600mm間を上昇する時間をストップウォッチで測定し求めることにした。なお、上昇速度は、10回の測定結果の平均値として求めた。本実験で測定対象

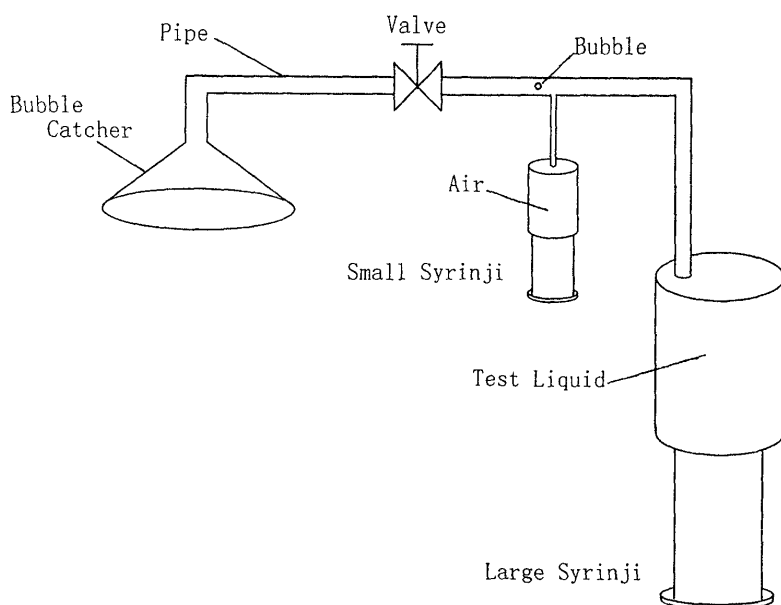


Fig.2 Release mechanism of a small bubble

とした気泡の直径 d の値は $d=0.6\sim 15.6\text{mm}$ である。捕集器から液中に放出された気泡が上昇する際の気泡形状の写真撮影は、捕集器からの距離が 200mm 以上の上昇速度の定常な範囲で行った。

供試液体として採用するポリマー水溶液は、これまでのキャピテーション実験などで良く用いられる Polyox 水溶液 (Union Carbide Co. Ltd, Polyox WSR-301) であり、そのポリマー濃度は、50, 100, 500, 1000, および 3000ppm としている。また、比較のために水道水も用いた。液中の空気含有量を一定にするため、液体は 24 時間以上大気中で静置した後、実験に供した。

2. 2 供試液体の物性

気泡の上昇速度並びにその変形運動は、液体の物性値によって著しく影響されるものと考えられる。そこで、ここでは、本実験で用いる水、Polyox 水溶液の動粘度および表面張力を測定し、明らかにする。動粘度の測定には、キャノンフェンスケ型細管粘度計を用いた。また、水、および Polyox 水溶液の表面張力の測定は、ウイヘルミ法表面張力測定器を用いて行った。

表 1 には、測定した供試液体の物性値を示す。動粘度 ν はポリマー濃度 C が大きくなると共に大きくなる。例えば、水の動粘度に比べて、50ppm ポリマー水溶液では約 1.5 倍、500ppm では 1.7 倍、また、3000ppm の水溶液では約 3.4 倍になっている。

Table 1 Physical properties of test liquids

Polymer concentration C [ppm]	water (0)	50	100	500	1000	3000
Surface tension σ [N/m]	0.078	0.069	0.067	0.067	0.065	0.067
Kinematic viscosity $\nu \times 10^6$ [m ² /s]	0.907	1.329	1.478	1.510	2.980	3.110

表面張力 σ はポリマー濃度 $C \geq 50\text{ppm}$ の範囲内においては、 $\sigma = 0.065 \sim 0.069$ となり、ほぼ一定とみなされる。なお、これらのポリマー水溶液の表面張力の値は、水に比べて約14%低下している。

3. 実験結果と考察

3. 1 上昇気泡の様相

水および3000ppmポリマー水溶液中を上昇する気泡の様相を図3および4に示す。図からわかるように、両液体とも直径 $d=2.2\text{mm}$ の小さな気泡の場合には球状を保っているが、気泡半径 d が大きくなると気泡の変形も大きくなる。その変形量は、水中の気泡の方がより大きくなる。直径 $d=7.3\text{mm}$ の気泡は楕円形状を示すが、ポリマー水溶液中の気泡の方が水中の気泡に比べて長・短径比が小さくなる。また、 $d=14.2\text{mm}$ の大きな気泡の場合には、ポリマー水溶液中においては対称的なキノコ笠形状を呈しており、水中の気泡に比べて上昇時における時間的な変形量も小さい。なお、気泡直径 d の値は、注射器で注入したガス体積を球の直径に換算したものである。

液中を上昇する気泡挙動の観察結果より、気泡形状はその大きさによりキノコ笠状、回転楕円体形状、および球形の3種類に大別される。水中を上昇する気泡の運動の観察によれば、球形では螺旋運動、楕円体状ではジグザグ運動、キノコ笠状では比較的小さなジグザグ運動を呈する。一方、3000ppmポリマー水溶液中では螺旋運動やジグザグ運動は観測されず、気泡はその大きさに依存せずほぼ直線的に上昇する。

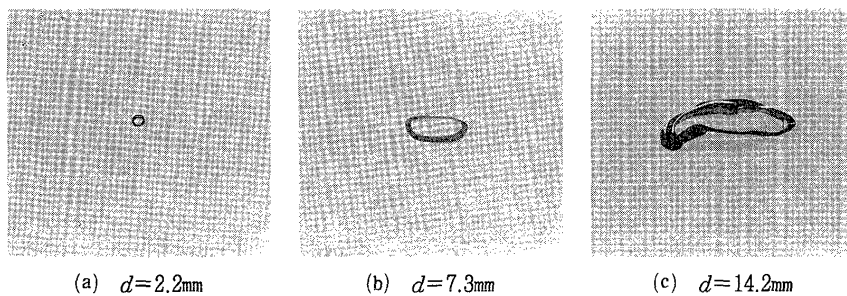


Fig.3 Shape of rising bubbles in water

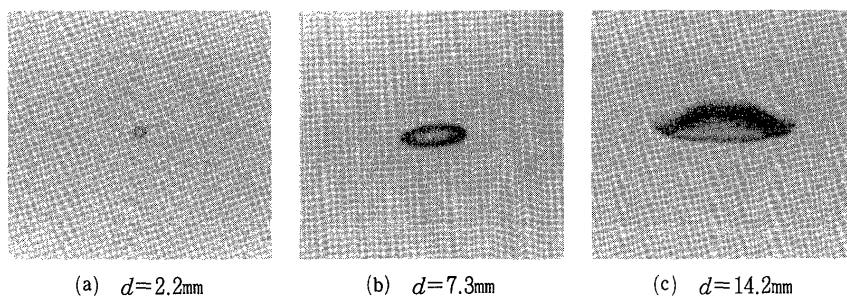


Fig.4 Shape of rising bubbles in a 3000ppm polymer aqueous solution

3. 2 気泡直径 d と上昇速度 V との関係

500ppmおよび3000ppmポリマー水溶液中における気泡直径 d と上昇速度 V との関係を図5に示し、水中の気泡の場合と比較している。測定対象とした気泡直径は $d=0.6 \sim 15.6\text{mm}$ である。

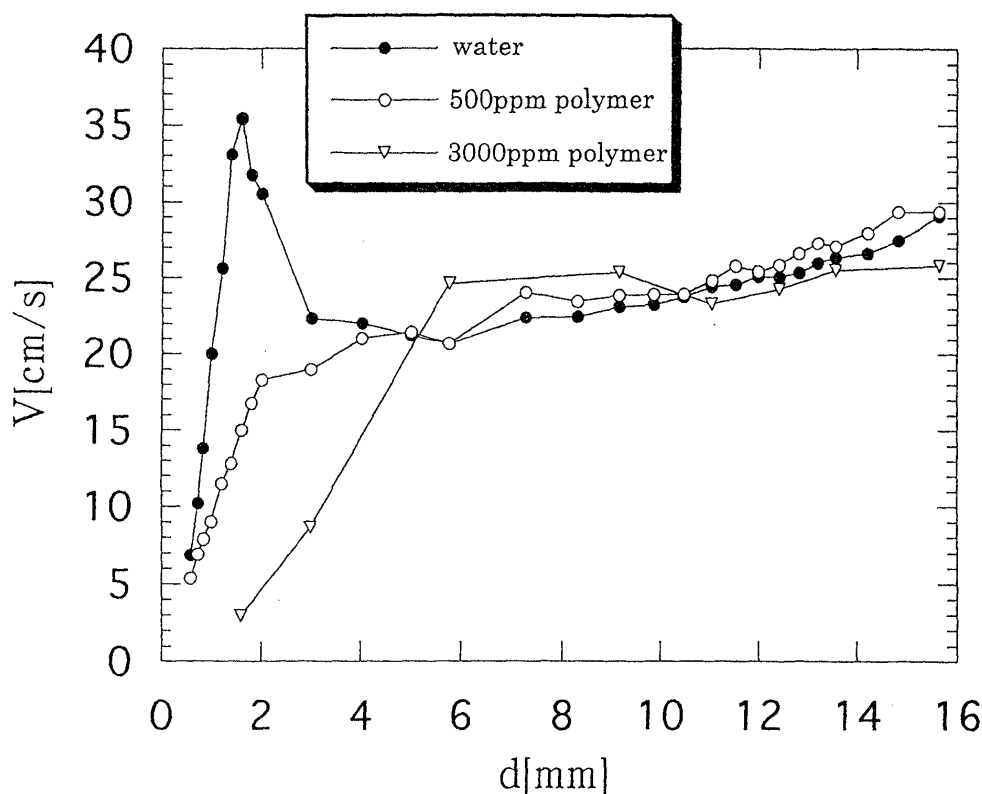


Fig.5 Rising velocity of bubble vs bubble diameter

水中における気泡の上昇速度は、 $0.6\text{mm} \leq d < 1.6\text{mm}$ の範囲で直線的に増加し、 $d=1.6\text{mm}$ で最大値 $V_{max} = 36\text{cm/s}$ となる。気泡径が増大し、 $1.6 \leq d \leq 5.8\text{mm}$ の範囲では上昇速度 V の値はしだいに減少するが、 $d \geq 5.8\text{mm}$ の範囲では、速度 V は漸増の傾向を示す。

ポリマー濃度 $C=500\text{ppm}$ のポリマー水溶液では、 $d \leq 2.0\text{mm}$ の範囲で上昇速度 V は線形的に増加し、それ以降、 V の値は、気泡径の増加と共に徐々に増大する。 $C=3000\text{ppm}$ の場合、気泡直径 $d \leq 5.7\text{mm}$ の範囲では V の値は直線的に増加している。さらに、気泡径が大きくなり $d \geq 5.7\text{mm}$ の範囲においては、上昇速度 V はほぼ一定値を示す。

水とポリマー水溶液の場合の比較によれば、 $d \leq 5.0\text{mm}$ の範囲では、ポリマー濃度 C が大きいほど上昇速度 V は小さくなる傾向がみられる。しかし、 $5.7\text{mm} \leq d \leq 10.5\text{mm}$ の範囲では、ポリマー濃度 C が大きいほど上昇速度 V は大きくなる。気泡直径の比較的大きな $d \geq 11.0\text{mm}$ の範囲になると、 $C=3000\text{ppm}$ の高濃度ポリマー溶液では、 V の値は、他の液中と比べて小さくなる。以上のような結果を生む要因としては、液体の物性並びに気泡の挙動の観察結果より次のように考察できる。

気泡直径が $5.7\text{mm} \leq d \leq 10.5\text{mm}$ の範囲においては、水中を上昇する楕円形状の気泡はジグザグ運動をしながら上昇するが、ポリマー水溶液中では、液体粘度の増加によりジグザグ運動が抑制され、気泡は直線的に上昇する。その結果、ポリマー水溶液中の方が上昇速度 V が大きくなるものと考えられる。

大きな気泡の $d \geq 11.0\text{mm}$ の範囲では、気泡上昇時におけるジグザグ運動がより促進されるが、高濃度ポリマー $C=3000\text{ppm}$ では、粘度がかなり大きくなるため気泡のジグザグ運動が抑制されるが、上昇する気泡の浮力に対する抗力が増加するため、上昇速度 V の値は低下する。水中では気泡

の形状が楕円形状からキノコ笠状に変わるためジグザグ運動が抑制され、気泡径の増大と共に浮力が増大し、上昇速度が徐々に増加する。ポリマー濃度 $C=500\text{ppm}$ 中では、ポリマーの添加による抗力の増加よりも、気泡のジグザグ運動が抑制されるために、上昇速度 V の値が大きくなるものと思われる。

図6は小さな気泡サイズである $d \leq 2.0\text{mm}$ における結果を示す。いずれの液体中でも、上昇速度 V の直線的な増加傾向が現れている。しかし、水中では $d \leq 1.6\text{mm}$ の範囲、 $C=50\text{ppm}$ のポリマー水溶液では $d \leq 1.8\text{mm}$ の範囲、および $C=500, 1000\text{ppm}$ のポリマー水溶液では $d \leq 2.0\text{mm}$ の範囲において、直径 d の増加と共に、上昇速度 V の直線的増加が見られる。この図に示す気泡の形状は球形を保持しており、ポリマー濃度が大きいほど気泡の流体抵抗が大きくなるため、上昇速度の低下をきたすことになる。

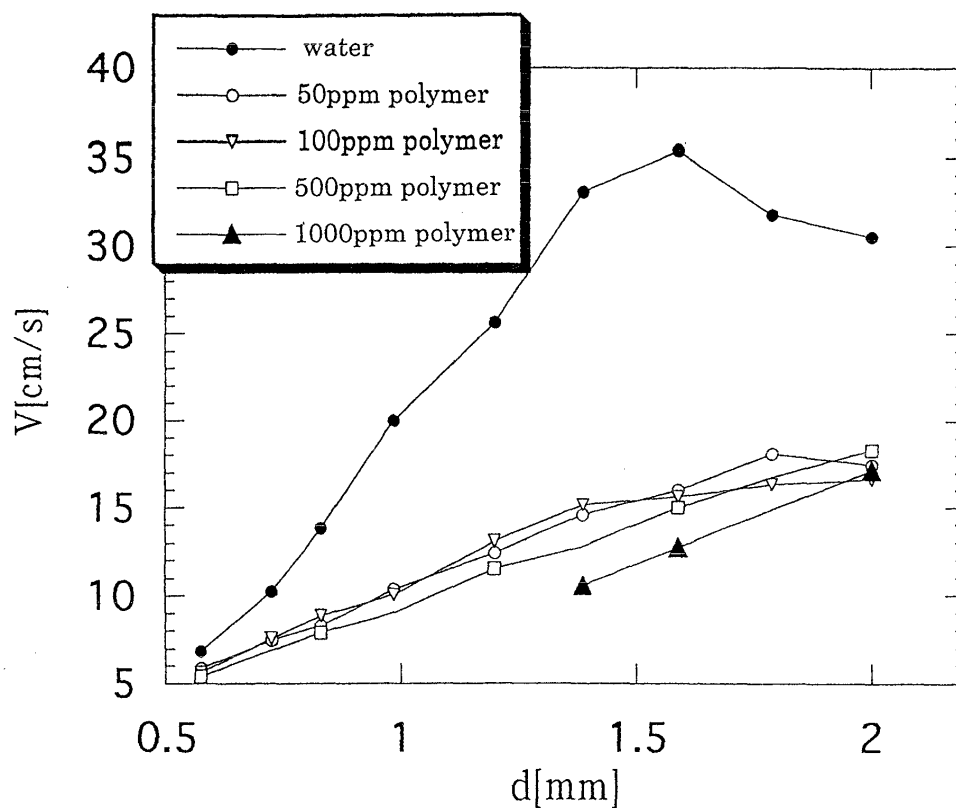


Fig.6 Rising velocity of bubble vs bubble diameter
($0.6\text{mm} \leq d \leq 2.0\text{mm}$)

3.3 ポリマー濃度と上昇速度との関係

ポリマー濃度 C と上昇速度 V との関係を、気泡直径 d をパラメータとし、図7に示す。ここでは、気泡の大きさとして $d=1.6, 3.0, 5.0\text{mm}$ を選んでいる。比較的小さな気泡直径 $d=1.6\text{mm}$ ではポリマーのわずかな添加によって上昇速度 V は急激に減少する。さらに、ポリマー濃度 C の増加と共に V の値は徐々に低下する。気泡直径 $d=3.0\text{mm}$ の場合、 $100\text{ppm} < C < 1000\text{ppm}$ の範囲で V の値が若干増加しているが、大略的には $d=1.6\text{mm}$ の傾向と類似している。気泡直径が比較的大きい $d=5.0\text{mm}$ の気泡では、ポリマー濃度の増加に伴って、上昇速度 V はむしろ増加傾向にある。これは、 $d=$

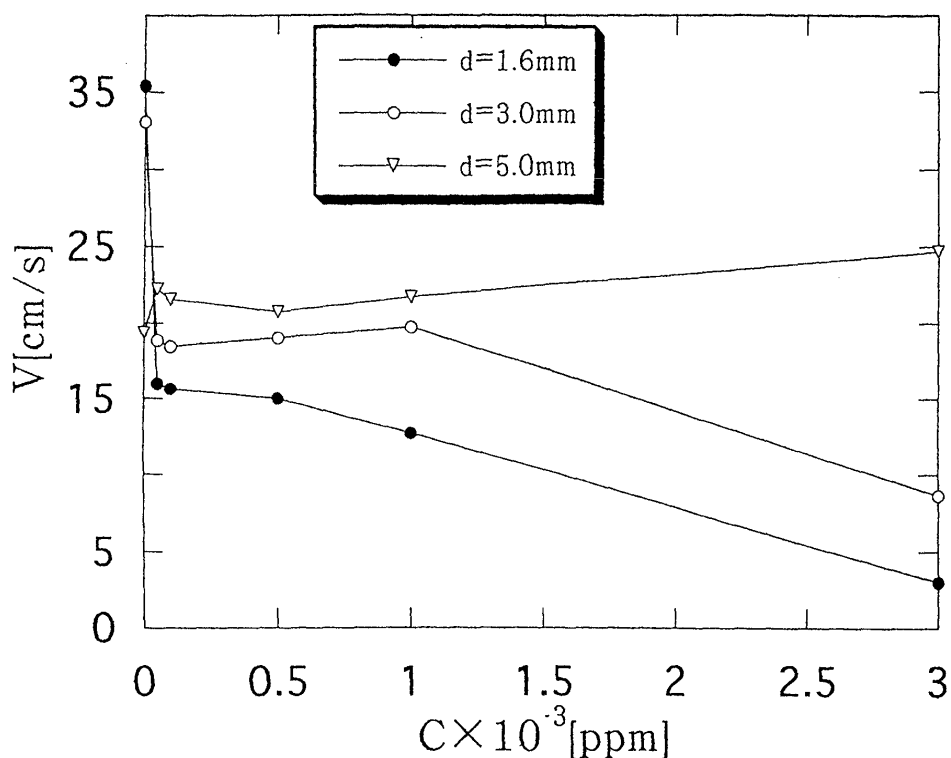


Fig.7 Rising velocity of bubble vs polymer concentration

5.0mm の気泡形状は回転楕円体となるが、ポリマー濃度が大きいほど、上昇時のジグザグ運動が抑制されることによる。

また、 $d=1.6$ mm および 3.0 mm では、ポリマー濃度が 50ppm 以下の微量のポリマーの添加が上昇速度 V の変動に大きく影響している。

4. 結 言

ポリマー水溶液中における気泡の上昇速度およびその変形挙動に及ぼすポリマー濃度を明らかにすることを目的として、実験的研究を行った。次いで、水中の気泡の場合との比較も行うことにより次の結論を得た。

- (1) ポリマー濃度 $C \leq 1000$ ppm のポリマー水溶液中においては、直径 $d \leq 2.0$ mm の上昇速度 V は線形的に増加する。この速度 V は、ポリマー濃度の増加と共に低下する。
- (2) 高ポリマー濃度の $C = 3000$ ppm の場合、直径 $d \leq 5.7$ mm の気泡上昇速度 V は気泡径の増加と共に直線的に増加するが、 $d > 5.7$ mm では速度 V はほぼ一定となる。このポリマー水溶液中では、 5.7 mm $\leq d \leq 10.5$ mm の範囲の気泡上昇速度は水および 500ppm ポリマー水溶液に比べて大きくなる。この要因は、液体の粘度の増加によって気泡上昇時のジグザグ運動が抑制されたことによる。
- (3) 直径 $d \leq 3.0$ mm の気泡の上昇速度は、低ポリマー濃度の 50ppm ポリマー水溶液中においても、

水の場合に比べて急激に低下する。

- (4) 直径 $d=2.2\text{mm}$ の気泡は球形を保ち、螺旋運動を伴って上昇する。直径 $d=7.3\text{mm}$ の気泡は楕円形状を示すが、ポリマー水溶液中の方が水の場合に比べてより扁平な形状を呈する。直径 $d=14.2\text{mm}$ の大きな気泡の場合、ポリマー水溶液中では対称的なキノコ笠形状となり、水中の気泡に比べて変形量が小さく、上昇時のジグザグ運動が抑制される。

本研究の一部は、平成10年度文部省科学研究費補助金（課題番号09650199）を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) TREYBAL, E. R.: Mass-Transfer Operations, McGraw-Hill Book Company, 1987.
- 2) 赤川ら：気液二相流技術ハンドブック，日本機械学会編，コロナ社，1989.
- 3) SAFFMAN, P. G.: J. Fluid Mech., 1 (1956), 249.
- 4) 佐藤ら：熊本大学工学部研究報告，23 (1974), 43.
- 5) 柘植・日比野：化学工学，37 (1973), 1125.
- 6) MOORE, D. W.: J. Fluid Mech., 6 (1961), 113.
- 7) 高木・松本：混相流，10 (1996), 264.
- 8) 大成：混相流，11 (1997), 263.
- 9) 綾ら：混相流シンポジウム講演論文集，13 (1994), 211.
- 10) 東谷ら：混相流シンポジウム講演論文集，13 (1994), 229.
- 11) TSUJINO, T. *et al.*: Proc. Instn. Mech. Engrs., 200 (1986), 231.
- 12) SHIMA, A. and TSUJINO, T.: Bubble Dynamics and Interface Phenomena Edited by Blake, J. R. *et al.*, Kluwer Academic Publishers, 1994, 81.
- 13) ZANA, E. and LEAL, L. G.: Int. J. Multiphase Flow, 4 (1978), 237.
- 14) KEE, D. D. *et al.*: J. Non-Newtonian Fluid Mech., 37 (1990), 1.