アルカリ溶解性会合高分子溶液中を上昇する気泡に作用する特異な弾性効果

Peculiar Elastic Effects on a Bubble Rising in Hydrophobically Modified Alkali-Soluble Associative Polymer Solutions

○学 徳井紀彦 (徳島大) 正 太田光浩 (徳島大)
正 岩田修一 (名工大)

Norihiko TOKUI, The University of Tokushima, 2-1 Minamijyousanjima-cho, Tokushima 770-8506
Mitsuhiro OHTA, The University of Tokushima, 2-1 Minamijyousanjima-cho, Tokushima 770-8506
Shuichi IWATA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

The motion of single bubbles rising in hydrophobically modified alkali-soluble associative (HASE) polymer solutions are experimentally examined. The non-Newtonian liquid is made up of 1.1 and 1.4 wt% HASE polymer solution, which are adjusted to $\text{pH} \approx 7.0$ by adding a sodium hydroxide solution. Rising bubbles with threadlike shapes are observed, regardless of small Deborah number conditions. It is shown that unique shapes of the bubble largely depend on the HASE solution and the bubble size. Consideration for unique shapes is made based on enlarged pictures taken with a high-speed video camera.

Key Words: Bubble rise motion, Viscoelastic fluid, HASE solution

1. 緒言

工業的に使用されているアルカリ溶解性会合高分子(HASE)溶液中を上昇する気泡は、非常にユニークな気泡形状で運動することが Soto ら⁽¹⁾により初めて報告された。著者らは、Soto ら⁽¹⁾の研究条件より広範囲の物性・物理条件下で HASE 水溶液中での気泡上昇運動を調べ、特異な形状を有する気泡を観察してきた⁽²⁻⁴⁾。これらの研究で観察される気泡は、古くから多数の研究者により調べられてきた水溶性会合高分子溶液中を上昇する気泡運動⁽⁵⁻⁷⁾とは全く異なり、気泡に作用する HASE 水溶液の特異な弾性効果に起因すると考えられる。しかし、HASE 水溶液の見掛けのレオロジー特性は水溶性高分子溶液と同様の特性を有しており、この点が現象の考察を難しくする。本研究では、先の研究とは異なった条件で実験を行い、特徴的な気泡形状の出現について議論するとともに、特徴的な気泡形状部に焦点をあてて考察を行う。

2. 実験方法

Fig. 1 に実験装置を示す。装置本体は、正方断面形状(0.25 m × 0.25 m)のアクリル塔(高さ 1.1 m)である。HASE として Primal TT-935(Rohm and Haas Co.)を用いた。本研究では、NaOH を添加し、 $\text{pH} \approx 7$ に調整した 1.1 wt% および 1.4 wt% HASE 水溶液を用いて実験を行った。実験では、装置内を HASE 水溶液で満たし、所定体積の気泡を装置下部に取り付けた半球状のカップに貯めた後に単一気泡を放出した。気泡運動をビデオカメラ(500 fps)で撮影し、撮影映像から上昇速度を算出した。実験で用いた流体物性は実測した。なお、実験での水溶液温度 20 ± 1 °C であった。

Fig. 2 に HASE 水溶液の粘度(η)および第1法線応力差(N_1)の剪断速度($\dot{\gamma}$)依存性を示す。図中の実線は、Carreau-Yasuda モデル⁽⁸⁾によるモデル・ラインである。本実験で用いた HASE 水溶液は、Shear-thinning 性と弾性特性を有した非ニュートン流体であり、ゼロ剪断速度粘度(η_0)は 1.1 wt% HASE 水溶液で $\eta_0 = 0.13$ Pa·s、1.4 wt% HASE 水溶液で $\eta_0 = 0.48$ Pa·s であった。Leider と Bird の方法⁽⁹⁾より算出した緩和時間(λ)は、両水溶液ともおよそ $\lambda = 0.005$ s となった。 η_0 で定義した Morton (M) 数条件は、1.1 wt% HASE 水溶液で $M (= g(\rho_L - \rho_G) \eta_0^4 / \rho_L^2 \sigma^3) = 0.04$ 、1.4 wt% HASE 水溶液で $M = 7.9$ である。ここで、 g : 重力加速度、 ρ_L : 液相密度、 ρ_G : 気相密度、 σ : 表面張力 である。

Fig. 1 Experimental system.

Fig. 2 Shear viscosity and first normal stress difference as a function of the shear rate.

3. 結果と考察

Figs. 3 と 4 に Eötvös 数 ($= g(\rho_L - \rho_G) d^2 / \sigma$; d : 球体積相当径) に依存した気泡形状を示す。Fig. 3 は 1.1 wt% HASE 水溶液 ($M = 0.04$) の場合、Fig. 4 は 1.4 wt% HASE 水溶液 ($M = 7.9$) の場合である。まず、1.1 wt% HASE 水溶液中の気泡 (Fig. 3)

Fig. 3 Experimental results for $M=0.04$.

Table 1 Experimental results for Re and De numbers.

	Eo	Re	De
$M=0.04$	26	17.0	0.16
	170	70.6	0.10
$M=7.9$	27	3.8	0.17
	175	18.3	0.12

に着目すると $Eo = 26$ では、これまで観察してきた⁽⁵⁻⁷⁾ように気泡の底部に1本の非常に細長い糸形状を形成する。気泡径が大きくなると ($Eo = 170$)、気泡形状はCap型になり、気泡形状底部の縁から無数の糸状部分が形成される。拡大図から明らかな様に、この糸形状はランダムに形成され、不規則に枝分かれしている。枝形状の先端吹きでは、気泡が細かく分裂し、微細気泡が形成されているのが分かる。

1.4 wt% HASE 水溶液中の気泡 (Fig. 4) の場合、 $Eo = 27$ では、1.4 wt% HASE 水溶液の場合と同様に1本の非常に細長い糸形状が形成されている。Fig. 4には糸形状の先端部の拡大写真も示したが、先端部では微小気泡が連続的に繋がったような形状を経て、最終的に等間隔に比較的均一なマイクロスケールの気泡が形成されていることが観察された。 $Eo = 175$ の条件の気泡は、歪な気泡形状となっている。 Eo 数が175より大きくなると、スカート型気泡が形成されたため、 $Eo = 175$ の気泡は、スカート型気泡が形成される前段階 (過渡段階) にあると考えられる。この場合の特徴は、気泡底部が非対称に歪な形で下方に伸びていることである。この非対称な形状は、気泡生成時の流動条件に依存することが1つの可能性として考えられ、今後の検討課題である。気泡底部の拡大図を見ると、気液界面ではノコギリ形状が形成されているのが分かる。このノコギリ形状は、界面に沿って動いているように観察され、また時間とともに気泡底部の歪な形状も不安定に変化した。

Table 1 に Reynolds (Re) 数 ($= \rho_L V d / \eta_0$, V : 気泡上昇速度) と Deborah (De) 数 ($= 2V \lambda / d$) の実験結果を示す。Table 1 の結果で重要な点は、 De 数の値が小さいことである。見掛けの弾性効果は非常に小さく、また見掛けの η や N_1 のレオロジー特性も通常の粘弾性流体の特性と変わらないにも関わらず、特異な弾性効果が発現する。HASE 水溶液系は、レオロジー特性から現象を予測し、制御できないことを示唆している。

4. 結論

本研究では、先の研究とは異なった条件で実験を行い、特

Fig. 4 Experimental results for $M=7.9$.

徴的な気泡形状をより詳細に観察した。マイクロスケール・レベルでダイナミックに変形する非常にユニークな気泡形状を観察した。HASE 水溶液が持つ特異な弾性応力効果の影響は、溶液の濃度 (物性値) や気泡径に依存して大きく異なることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、(財)高橋産業経済研究財団からの研究助成ならびに日本学術振興会・科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 24560180) より行われた。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- (1) E. Soto et al., *Phys. Fluids*, **18**, (2006) 121510.
- (2) 太田光浩ほか, 日本混相流学会年会講演会 2011 講演論文集, (2011) 320-321.
- (3) M. Ohta et al., *Proc. 8th Int. Conf. Multiphase Flow*, (2013) ICMF2013-972.
- (4) 太田光浩ほか, 混相流シンポジウム 2013, (2013) F224.
- (5) D. Rodrigue and D. De Kee, *Rheol. Acta*, **38**, (1999) 177-182.
- (6) R.G. Sousa, et al., *J. Fluid Mech.*, **511**, (2004) 217-236.
- (7) S. Amirnia, et al., *Chem. Eng. Sci.*, **94**, (2013) 60-68.
- (8) K. Yasuda et al., *Rheol. Acta*, **20**, (1981) 163-178.
- (9) P.J. Leider and R.B. Bird, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **13**, (1974) 336-341.