Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-08-13

楕円形気泡の形状と揚力に関する研究

青山, 昌平

(Citation)
神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要,9:36-39

(Issue Date)
2017

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81010014

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要　第 9 号　36～39 頁　2017 年
doi:10.5047/gseku.j.2017.004

【研究紹介】

楕円形気泡の形状と揚力に関する研究

青山　昌平 [1*]

[1] 工学研究科機械工学専攻

（受付：December 8, 2017　受理：December 11, 2017　公開：December 22, 2017）

キーワード：　気泡，揚力，形状，流体工学

１．緒　　言

火力・原子力発電所，石油精製プラントといった工業機器では，連続相内に分散相として気泡が存在する気泡流が応用されている．これらの工業機器の最適設計や安全性向上のためには，機器内の流動特性の把握が不可欠となる[1]．気泡流の流動特性は主に気泡の分布及び挙動で特徴付けられる．この分布や挙動は気泡に働く種々の力の相互作用によって決定されるため，これらの力の把握は重要である．

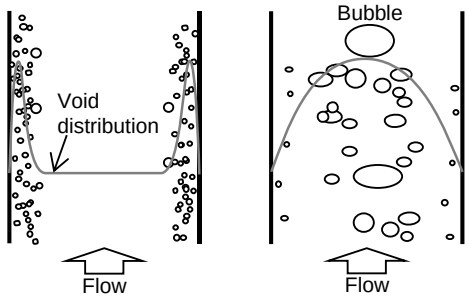
工業的に広く利用されている鉛直管内気泡流においては，気泡に対して流れに直交する方向に働く揚力が管断面内気泡分布に大きな影響を及ぼす[2]．特に，鉛直管内気泡流のボイド率分布が，揚力に起因する横方向移動より，**図1**に示すような，ウォールピーク型やコアピーク型の様式を呈することが良く知られている[3]．ここでC_Lは揚力係数である．小さな気泡に働く正の揚力($C_L > 0$)は気泡を管壁側へと移動させ，大きな気泡に働く負の揚力($C_L < 0$)は気泡を管中央へと移動させる．これより，気泡に働く揚力の評価は，気泡流のボイド率分布予測に極めて重要となる．しかしながら，揚力に関する研究例は少ない．また，気泡に働く揚力に関する実験例は非常に少なく，これまでに得られた揚力に関する知見や相関式の妥当性検証も不十分な現状にある．また，揚力に影響を及ぼすと報告されている気泡形状に関する実験データベースも不十分であり[4, 5]，さらなる知見の整理・検証が求められている．

そこで本研究では，楕円形気泡に作用する揚力に及ぼす液相速度勾配，流体物性，気泡形状の影響を調べることを目的とした．また，気泡の揚力を考察する際に重要となる気泡形状に関する知見の整理・検証のため，無限静止液中を上昇する単一気泡の形状に流体物性が及ぼす影響も調べた．第2章では，まず単純な系である静止液中気泡の形状を実験的に測定した研究内容(Aoyama, S., Hayashi, K., Hosokawa, S., Tomiyama, A., Shapes of ellipsoidal bubbles in infinite stagnant liquids, Int. J. Multiphase Flow, 2016)を纏める．第3章では，一様せん断流中楕円形気泡のC_Lを高精度に測定した研究内容(Aoyama, S., Hayashi, K., Hosokawa, S., Lucas, D., Tomiyama, A., Lift force acting on single bubbles in linear shear flow, Int. J. Multiphase Flow, 2017)を纏める．

２．無限静止液中を上昇する単一気泡の形状

2.1　実験装置及び条件

図2に実験装置の概略を示す．本装置は正方形断面を有するアクリル製水槽(600×200×200 mm)，空気注入ノズルから成る．液相中にノズルより単一気泡を発生させ，上昇する気泡を高速度ビデオカメラで撮影した．画像処理により気泡の球体積等価直径d，アスペクト比E (= 気泡短径d_V/気泡長径d_H)，終端上昇速度V_Tを算出した．液相にはグリセリン水溶液を用いた．**表1**に流体物性を示す．ここで，M (= $\mu_L^4(\rho_L - \rho_G)g/\rho_L^2\sigma^3$)は気液二相の流体物性を表すモルトン数，$\rho$は密度，$\mu$は粘度，$\sigma$は界面張力，$g$は重力加速度である．また下添字$G$，$L$は各々気相と液相を表す．



(a) Wall peak (Bubble size: small, $C_L > 0$)　(b) Core peak (Bubble size: large, $C_L < 0$)

Fig. 1 Void distributions in upward bubbly pipe flows

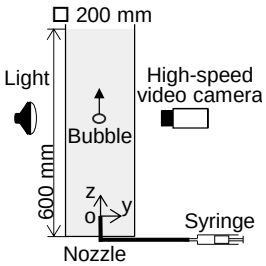


Fig. 2 Experimental setup

Table 1 Fluid properties (25 °C)

log$M$	ρ_L [kg/m^3]	μ_L [Pa· s]	σ [N/m]
−6.6*,†	1155	0.0098	0.067
−5.5*,†	1178	0.018	0.067
−4.8†	1191	0.027	0.067
−4.9*	1191	0.026	0.066
−3.9*,†	1205	0.045	0.066
−3.2†	1214	0.068	0.065

*to measure bubble shape
†to measure C_L

2.2　無限静止液中気泡の形状及び終端上昇速度

図3にlog$M$ = –6.6, –3.9における小気泡((a), (c))及び大気泡((b), (d))の画像を例示する．高Mにおいては，小気泡はほぼ球形を呈しているのに対し，低Mにおいては，気泡は僅かに偏平化している．大気泡は小気泡と比べ，より偏平化しており，また，M低下に伴い形状変形は大きくなっている．

V_Tを**図4**に示す．d増加に伴いV_Tは増加する．また，Mが低下すると，液相粘度が小さくなり，V_Tは増加する．**図3**に示すように，d増加に伴い，すなわちV_T増加に伴い，気泡変形は大きくなりEは低下する．これは，d増加に伴い気泡先端に働く動圧が高くなるためである[6]．Mが増加するにつれ液相粘度は高くなり，気泡変形は制限される．

2.3　気泡アスペクト比相関式

楕円形気泡に働く揚力や抗力といった力や熱・物質移動を精度良く評価するには，Eの影響を考慮する必要がある[4),7)-9)]．このため，Eに関する数多くの研究がなされてきた[6),10)-13)]．Eはウェーバー数We (= $\rho_L V_T^2 d/\sigma$: 慣性力F_i/界面張力F_σ)，エトベス数Eo (= $(\rho_L-\rho_L)gd^2/\sigma$: 浮力$F_b/F_\sigma$)，タダキ数$Ta$ (= $ReM^{0.23}$)等を用いてしばしば整理されてきた．ここでReは気泡レイノルズ数($\rho_L V_T d/\mu_L$: F_i/粘性力F_μ)である．**図5**に本実験結果及び杉原ら[12)]の純水中気泡のデータ(log$M$ = –11)と既存のE相関式の比較を示す．実験結果は上記の単一の無次元数のみならずM, すなわち液相粘度にも依存している．また，これらの相関式の適用範囲は限られており，幅広いMにおけるEを正しく評価できない．

気泡変形に関連する力として，F_b，F_i，F_σ，F_μが挙げられる．これらのうち，F_bとF_iの増加はEを減少させる．一方，F_σとF_μの増加はEを増加させる．そこで，Eを整理するための無次元パラメータとして以下を定義する．

$$\Omega = \frac{F_b^{\alpha} F_i^{\beta}}{F_\sigma^{\gamma} F_\mu^{\delta}} \quad (\alpha,\beta,\gamma,\delta > 0, \alpha+\beta=\gamma+\delta) \tag{1}$$

また，既存のE相関式を参考に次の関数形を仮定する．

$$E = \frac{1}{[1+p\Omega]^q} \quad (p,q>0) \tag{2}$$

定数α，β，γ，δ，p，qを，実験結果を用いて最小二乗法により決定した．この結果，Ω及びEは各々以下の式で表せる．

$$\Omega = \frac{F_b^{1.12} F_i^{1.00}}{F_\sigma^{1.12} F_\mu^{1.00}} = Eo^{1.12} Re \tag{3}$$

$$E = \frac{1}{[1+0.016 Eo^{1.12} Re]^{0.388}} \tag{4}$$

全実験結果のEをΩに対してプロットし**図6**に示す．全データは一つの曲線上にまとまり，式(4)はこれらと良好に一致している．また本実験条件に比べ高いMにおいて気泡のEを測定したLiuら[13)]の実験結果も**図6**に示している．式(4)は彼らのデータともよく一致している．本図よりΩが–11 ≤ log$M$ ≤ 0.63という広範囲のE整理に適する無次元パラメータであると判断できる．

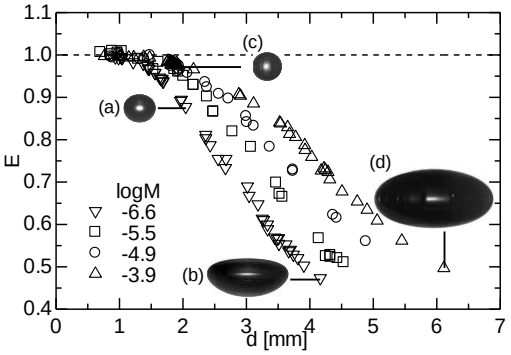


Fig. 3 Bubble aspect ratio

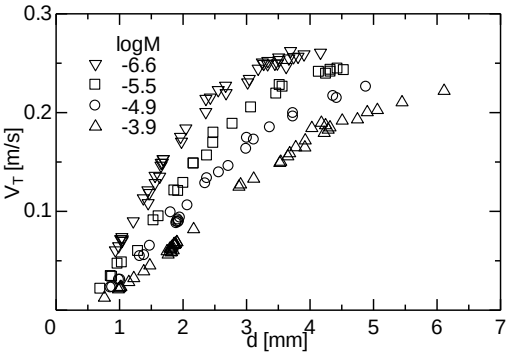


Fig. 4 Bubble velocity

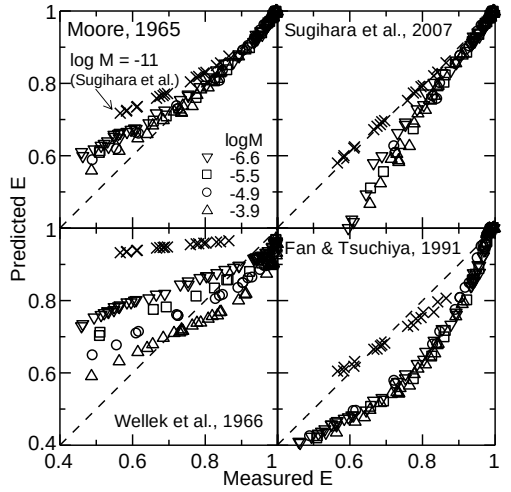


Fig. 5 Available correlations

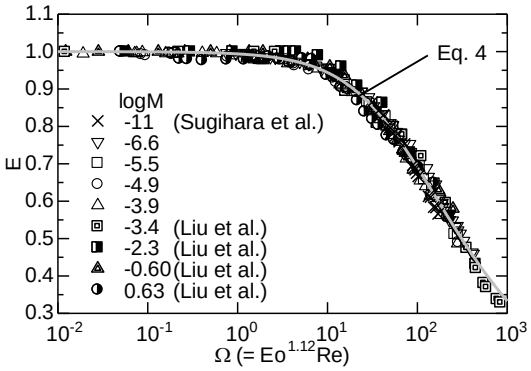


Fig. 6 Proposed correlation

３．一様せん断流中気泡に作用する揚力

3.1　実験装置及び条件

図7に実験装置の概略を示す．本装置は主にアクリル樹脂製容器，液相駆動用ベルト，気泡注入ノズルから成る．容器に満たしたグリセリン水溶液をベルトで循環し，試験部に液相速度勾配ωの一様せん断流を形成した．せん断流中に注入した単一気泡を高速度ビデオカメラで撮影し，画像処理により気液間相対速度$\boldsymbol{V}_R$，d，Eを求めた．これらの計測値に小川ら[14]の方法を適用してC_Lを評価した．気泡の横方向(x方向)移動を精度良く計測するため，2台のカメラを鉛直方向(z方向)に並べて設置することで測定区間を長くし，試験区間内における横方向移動量を大きくした．M，ωは各々，$-6.6 \leq \log M \leq -3.2$，$0 \leq \omega \leq 7.4\ \mathrm{s}^{-1}$とした．実験に用いたグリセリン水溶液の物性値を**表1**に示す．

液相速度は時空間フィルタ流速計(SFV)[15]を用いて測定した．ノズルからの高さがz = 150，350 mmの位置における流速w_L測定結果を**図8**に例示する．いずれのMにおいても，速度分布がこのzの区間内で変化していないことから，十分に発達した一様せん断流が形成されていることを確認した．

3.2　せん断流中気泡の形状

図9に静止液中気泡及び一様せん断流中気泡の形状を示す．**図9 (b)**に示したせん断流中気泡は，液相速度の高い側(紙面右側)が上となる傾きを有している．一方ω = 0，ω ≠ 0のいずれの場合においても，Eはおおむね同じ値をとっている．**図10**にせん断流中気泡のEと式(4)を示している．ここでSrは無次元速度勾配($\omega d/|\boldsymbol{V}_R|$)である．式(4)は$E$データと良好に一致している．これは本実験条件においてEに及ぼす液相せん断の影響が非常に小さいことを意味しており，静止液中気泡を基に構築したE相関式(式(4))はせん断流中気泡にも適用可能である．

3.3　一様せん断流中単一気泡の揚力係数

図11 (a)に本実験で得られた揚力係数C_LをReに対して示す．C_LはRe増加に伴い減少している．C_Lに及ぼすMの影響は，Reが増加するにつれ大きくなる．特に中程度のReにおいては，M増加に伴いC_Lは大きく減少している．いずれのMにおいても，Reが増加するとC_Lの符号は正から負へと切り替わる．図中にLegendreとMagnaudet[16]が提案した球形気泡用C_L相関式を示している．本相関式は低Re (< 2)においてC_L測定結果とほぼ一致している．一方，本相関式は球形気泡を対象としているため，Eが減少するにつれ(Reが大きくなるにつれ)実験値と相関式の差は大きくなる．

Tomiyamaら[4]はC_Lを整理する際に，気泡変形の効果を考慮するため，気泡長軸の長さを代表長さとしたエトベス数Eo_H (= $(\rho_L-\rho_G)gd_H^2/\sigma$)を用いた．彼らの取得した$-5.5 \leq \log M \leq -2.8$，$4 < Eo_H < 11$における$C_L$のデータは$Eo_H$を用いて整理可能であったが，**図11 (b)**に示すように，さらに広範囲のM及びEo_Hのデータを含む本実験結果は，Eo_Hを用いても整理できず明らかなM依存性を有している．

3.4　臨界気泡径

図12に揚力係数の符号が切り替わる臨界気泡径d_Cを示す．$\log M$がおおよそ−4より小さい範囲においては，Mが増加するにつれd_Cは増加し，一方これより高いMの範囲においては，Mの増加に伴いd_Cは低下している．LucasとTomiyama[2]は空気-水系及び蒸気-水系の管内上昇気泡流の半径方向ボイド率分布を測定した．本測定においてボイド率分布は気泡径に依存し，ウォールピーク型及びコアピーク型を呈していた．彼らのボイド率分布の様式が遷移するd_Cデータを**図12**に示す．両実験におけるd_Cの存在領域はいずれも3から5.5 mm程度である．これよりd_CのM及び流動条件依存性は小さいとわかる．

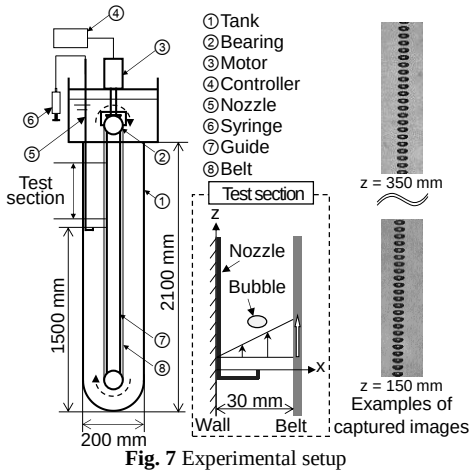


Fig. 7 Experimental setup

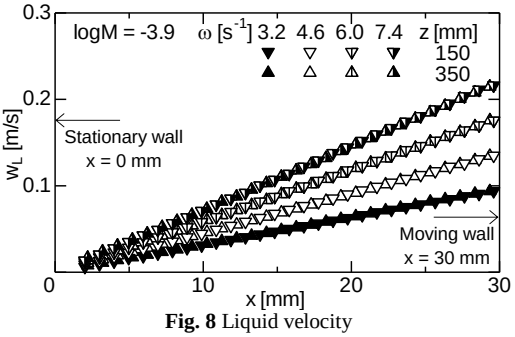
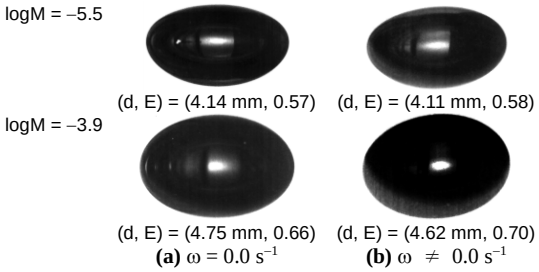


Fig. 8 Liquid velocity



(a) ω = 0.0 s^{-1}　**(b)** ω ≠ 0.0 s^{-1}

Fig. 9 Bubble shape

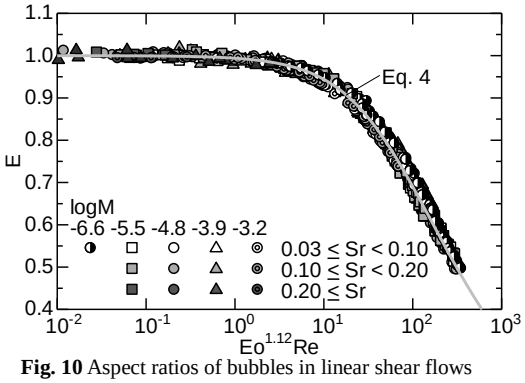
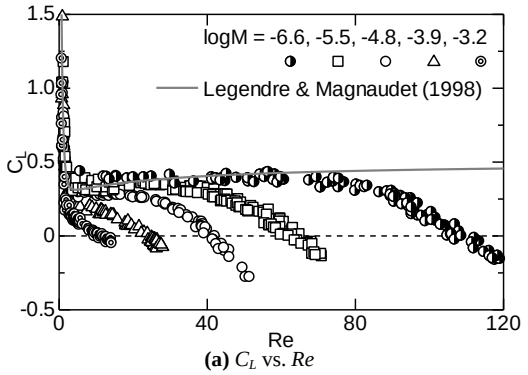
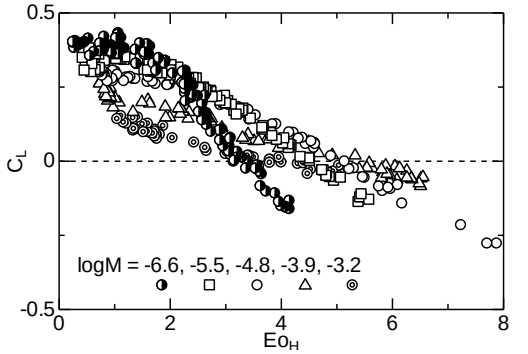


Fig. 10 Aspect ratios of bubbles in linear shear flows



(a) C_L vs. Re



(b) C_L vs. Eo_H (E < 0.98)

Fig. 11 Lift coefficients

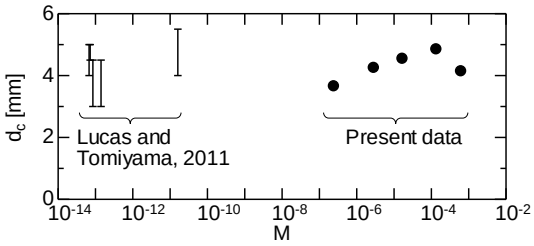


Fig. 12 Critical bubble diameter

４．まとめ

楕円形気泡に作用する揚力と，揚力に影響を及ぼす気泡形状について著者の取り組んだ研究内容について紹介した．

本研究において，幅広い流体物性における気泡アスペクト比の実験データベースを構築し，流体物性がアスペクト比に及ぼす影響を調べた．アスペクト比は，気泡の形状変形に関連するすべての力(慣性力，粘性力，浮力，表面張力)の考慮により整理でき，気泡レイノルズ数及びエトベス数を変数とした幅広い流体物性に適用可能なアスペクト比相関式を構築した．また，一様せん断流中を上昇する単一気泡の揚力係数C_Lに及ぼす流体物性，気泡形状及び液相速度勾配の影響を調べるため，高精度C_L測定を実施した．本実験では，気泡アスペクト比に及ぼす液相せん断の影響は非常に小さかった．低気泡レイノルズ数における球形気泡のC_Lは，LegendreとMagnaudetが提示した球形気泡のC_L相関式と良く一致した．C_Lの符号が切り替わる臨界気泡径は幅広い流体物性において，3から5.5 mmであることがわかった．

最後になりましたが，本研究を遂行するにあたりご指導いただいた冨山明男教授，細川茂雄准教授，林公祐准教授に御礼申し上げます．また工学研究科プレミアム・プログラムにおけるドレスデン・ヘルムホルツ研究所(ドイツ)への留学に際し，私を受け入れて下さいましたDr. Dirk Lucasに感謝申し上げます．

References

1) 小嶋真平，スラリー気泡塔内流れに関する研究，神戸大学博士論文 (2015).
2) Lucas, D., Tomiyama, A., On the role of the lateral lift force in poly-dispersed bubbly flows, Int. J. Multiphase Flow, vol. 37, pp. 1178-1190 (2011).
3) Grossetete, C., Experimental investigation of void profile development in a vertical cylindrical pipe, Multiphase Flow, pp. 333-346 (1995).
4) Tomiyama, A., Tamai, H., Žun, I., Hosokawa, S., Transverse migration of single bubbles in simple shear flows, Chem. Eng. Sci., vol. 57, pp. 1849-1858 (2002).
5) Adoua, R., Legendre, D., Magnaudet, J., Reversal of the lift force on an oblate bubble in a weakly viscous linear shear flow, J. Fluid Mech., vol. 628, pp. 23-41 (2009).
6) Moore, D.W., The velocity of rise of distorted gas bubbles in a liquid of small viscosity, J. Fluid Mech., vol. 23, pp. 749-766 (1965).
7) Lochiel, A.C., Calderbank, P.H., Mass transfer in the continuous phase around axisymmetric bodies of revolution, Chem. Eng. Sci., vol. 19, pp. 471-484 (1964).
8) Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E., Bubbles, drops, and particles, Academic Press (1978).
9) Rastello, M., Marie, J., Lance, M., Drag and lift forces on clean spherical and ellipsoidal bubbles in a solid-body rotating flow, J. Fluid Mech., vol. 682, pp. 434-459 (2011).
10) Wellek, R.M., Agrawal, A.K., Skelland, A.H.P., Shape of liquid drops moving in liquid media, AIChE J., vol. 12, pp. 854-862 (1966).
11) Fan, L.S., Tsuchiya, K., Bubble wake dynamics in liquids and liquid-solid suspensions, Butterworth-Heinemann (1990).
12) 杉原慶治，真田俊之，城田農，渡部正夫，超純水中の単一気泡挙動，化学工学論文集，第 33 号，第 5 巻, 402-408 (2007).
13) Liu, L., Yan, H., Zhao, G., Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids, Exp. Thermal and Fluid Sci., vol. 62, pp. 109-121 (2015).
14) 小川耕平，Myint, W.，細川茂雄，冨山明男，一様せん断流中単一液滴に作用する揚力に関する研究，混相流研究の進展 2, pp. 55-62 (2007).
15) Hosokawa, S., Tomiyama, A., Spatial filter velocimetry based on time-series particle images, Experiments in Fluids, vol. 52, pp. 1361-1372 (2012).
16) Legendre, D., Magnaudet, J., The lift force on a spherical bubble in a viscous linear shear flow, J. Fluid Mech., vol. 368, pp. 81-126 (1998).