

2次元気泡の離脱挙動

Behaviors of Formation and Departure of Two-dimensional Bubbles

*石川 桂 (東大工院) 伝正 庄司 正弘 (産総研)
伝正 渡辺 誠 (東大工) 伝正 丸山 茂夫 (東大工)

Kei ISHIKAWA¹, Masahiro SHOJI², Makoto WATANABE¹ and Shigeo MARUYAMA¹
¹Dept. of Mech. Eng., The University, of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
²Energy Technology Research Institute, AIST, 1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564

Two-dimensional bubbles were produced from a single orifice in a narrow gap between two parallel plates in an air-water isothermal system, aiming to obtain information on bubble dynamics and behaviors for the better understanding of boiling phenomena. In the experiment, static aspects and nonlinear features of bubble formation, departure and rising motion were investigated. The observation and the data obtained show the multiplicity of bubble formation and departure depending on air flow rates. Different from three-dimensional system, bubble motion is affected by viscous force. The dependency of bubble formation and departure on air flow rate is explained fairly well by a simple theoretical analysis.

Keywords: Bubble dynamics, Two-dimensional bubble, Bubble formation, Nonlinear features

1. 序論

気泡の生成や離脱などの力学挙動の理解は、沸騰あるいは気泡を利用した各種プラント（攪拌塔、反応塔など）などにおける現象の理解にとって重要である。通常の3次元系において気泡核やオリフィスから多数の気泡が発生する場合、先行して発生する気泡と後続する気泡の干渉は大変複雑である。そして、たとえば後続気泡が先行気泡にもぐりこみ、合体するなどの場合、そのプロセスを観察することは難しい。そこで本研究では、観察を容易にするため特に、狭い垂直空間（Hele-Shaw Cell）内に気泡を発生させ、成長から離脱、上昇する過程を観察することとした。こうした2次元気泡の挙動は、実際の3次元系におけるものとは挙動を異にするが、基本的な気泡挙動の理解には有効であり、また狭歪流路の沸騰や多数の隔壁が置かれた流路を気泡が成長・運動する問題などには直接的な結びつきを持っている。前報⁽¹⁾では気泡の合体挙動について報告したが、本研究では気泡の成長、離脱、上昇などの力学的挙動に関し得られた実験結果と解析結果について記す。

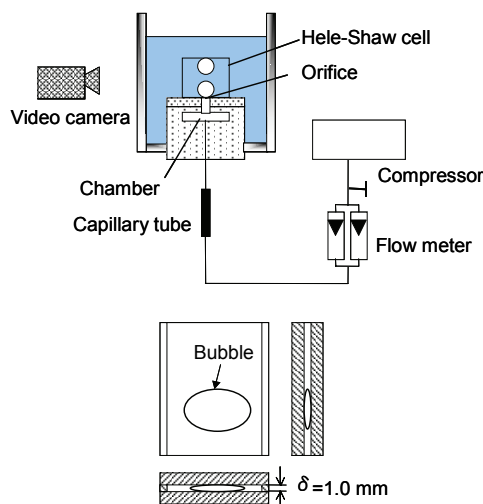


Fig.1 Experimental apparatus

2. 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。オリフィスを1個とした他は前報と構成はおなじである。つまり、垂直平行平板間の狭い隙間（隙間は1 mm）を実験水槽におき、その底部に設けたオリフィスから気泡を発生させた。オリフィス孔は隙間間隙に等しい1 mmとし、実験は大気圧下の空気-水等温系で行った。実験パラメータは空気流量のみである。本実験系の場合、壁面の濡れ性が気泡挙動に強く影響する。そのため、平板内面をコーティングして親水面とした。気泡の挙動は高速カメラで撮影し、その映像から気泡の各種データ（気泡の離脱径や周期、気泡の形状や運動速度）を取得した。

3. 実験結果

3.1 気泡の成長と離脱の特性 平均離脱気泡体積の空気流量による変化を図2に示す。気泡体積は毛管定数の3乗で無次元化し、空気流量がオリフィスレイノルズ数で表している。3次元気泡の場合、低流量（低 Re ）での離脱気泡体積（離脱気泡径）は浮力と表面張力の釣合で定められ、高流量（高 Re ）では慣性と浮力の釣合で定められることが知られている。図2で明らかのように、2次元離脱気泡はこのいづれでもない流量依存性を示しているが、これは粘性の影響が大きいと考えられる。

3.2 気泡離脱の非線形特性 気泡の離脱は各流量において、必ず

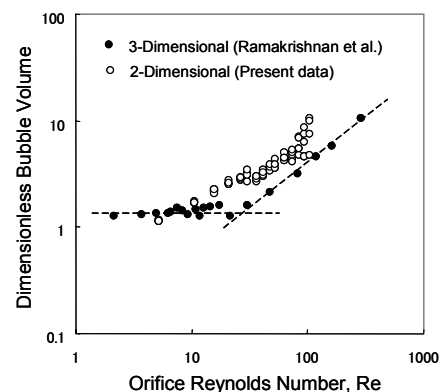


Fig.2 Bubble departure volume. Variation with air flow rate.

しも一定、規則的でなく、特に高流量では多価性（非線形性）が現れる。図3は気泡離脱周期について、発生気泡ごとの離脱周期を見たものであるが、 Re がおよそ30を境に高流量側で多価性が現れる。これは気泡の変形様態と先行気泡との干渉・合体に関係しており、非線形特性はおよそ図4のように分類できる。3次元気泡においても同様の挙動が観察され分類されているが⁽²⁾、領域区分（ Re 依存）は当然のごとく3次元の場合とは異なっている。

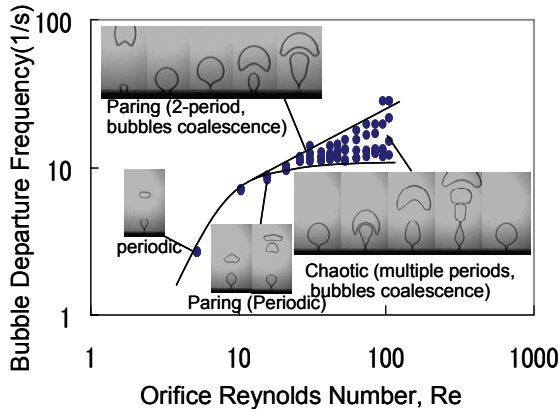


Fig.3 Multiplicity of bubble departure frequency.

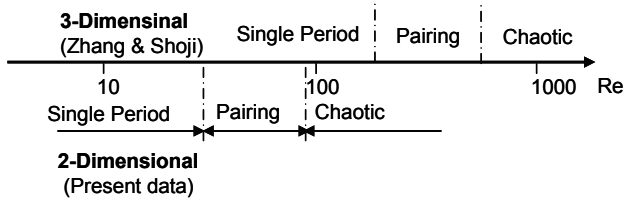


Fig.4 Classification of multiplicity and nonlinearity

3.3 気泡の離脱条件 気泡離脱の複雑性に関わらず、図5に見るように気泡は流量によらず、ほぼ一定位置で切断、離脱する。この位置（高さ）はオリフィス口径（現在は1mm）程度である。ZhangとShoji⁽²⁾⁽³⁾はこの値をオリフィス口径に等しい気柱のレイリー不安定波長であるとしてモデル解析しているが、2次元気泡にあってもこの仮定が成立しているように見える。

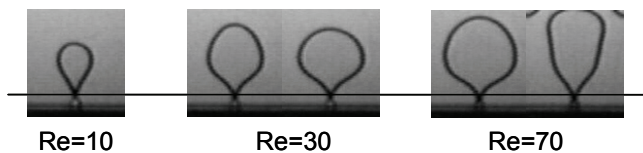


Fig.5 Condition of bubble departure

3.4 気泡の上昇運動 成長期間中および離脱上昇中の気泡中心（重心）の変化（時間変化）を図6に示す。気泡中心の移動は前節

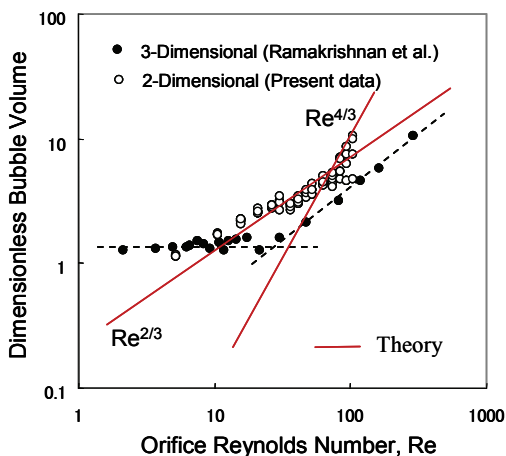


Fig.7 Theoretical analysis for bubble departure volume

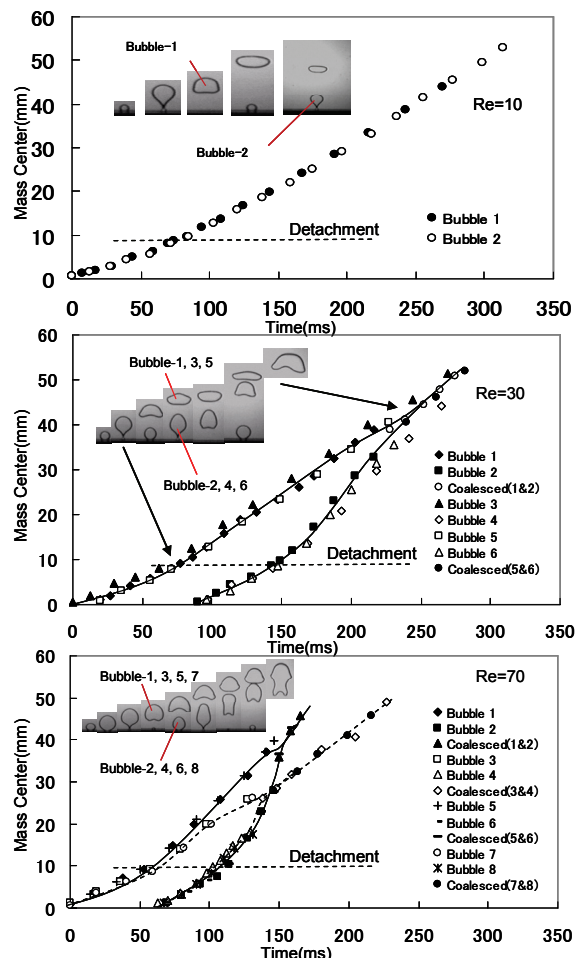


Fig.6 Displacement of bubble mass center

でも述べた気泡挙動の多様性に関連しており、離脱後の気泡の上昇は浮力と粘性の釣合で定まり、粘性抗力は気泡径および気泡運動のレイノルズ数にほぼ比例している。

3.5 離脱気泡体積の解析的考察 甲藤と横谷⁽⁴⁾はプール沸騰における蒸気塊（合体2次元気泡）の離脱気泡径に関し、浮力と慣性力を考えた理論解析を行っている。前報⁽¹⁾で示したように、この甲藤と横谷の解析法を2次元気泡に適用すると次の結果が得られる。

$$V^* \propto Re^{4/3} \quad (\text{高流量域: } Re \geq 100) \quad (1)$$

一方、本実験の場合、低 Re では粘性の影響が強い。そこで、簡単のため慣性の影響を無視し、浮力と粘性のみを考えて解析を行うと次の結果が得られる（詳細の記述は省略）。

$$V^* \propto Re^{2/3} \quad (\text{低流量, 低 } Re \text{ 域}) \quad (3)$$

気泡体積の Re 依存性に関するこの結果は、図7に見るように実験結果の流量依存性と傾向が近い。

4. 結言と残された課題 前報と本報において、空気-水等温系のHe-le-Shaw Cell内でオリフィスから生成する気泡の離脱、合体、運動挙動の、特に非線形特性などを明らかにした。しかし、オリフィス径、2次元空間幅、液体の種類などの関連パラメータの影響について未だ調べておらず、気泡成長と離脱の詳細なモデル解析も行っていない。今後の課題として残っている。

引用文献

- (1) 楠原ら, 第41回日本伝熱シンポジウム, A224(2004), 367-368.
- (2) Zhang and Shoji, Chem. Eng. Sci., 56-18(2001), 5371.
- (3) Shoji et al., J. Tsinghua Sci. & Tech., 17-2(2002), 114.
- (4) Katto & Yokoya, Heat Transfer, Jap. Res., 15-2 (1976), 45.
- (5) Ramakrishnan et al, Chem. Eng. Sci., 24(1969), 731.