

修士論文

2次元気泡の生成メカニズム

1 - 36 ページ 完

平成17年2月10日提出

指導教員 丸山 茂夫 教授

26155 石川 桂

目次

1. 序論	4
1.1. 概要	4
1.2. 研究の目的	7
1.3. オリフィスからの気泡生成に関して	8
1.4. Hele-Shaw セルとは	10
2. 実験方法	12
2.1. 実験方法	12
2.2. 実験装置	13
2.3. Hele-Shaw セルについて	15
2.4. 塗りつぶしプログラムについて	16
3. 実験結果	19
3.1. 観察	19
3.2. 低流量離脱画像	20
3.3. 高流量離脱画像	21
4. 考察	23
4.1. 離脱気泡の静的挙動	23
4.2. モデルによる説明	23
4.3. 離脱気泡の動的挙動	25
4.4. 輪郭長さについて	28
5. 結論	31
付録1	32
付録2 その他の考察	33
参考文献	34
謝辞	35

第一章

序論

1. 序論

1.1. 概要

Hele-Shaw セルとは、狭い平行平板に挟まれた Fig.1.1.1 のような隙間のことである。このセル内の流れは、2 次元的にとらえられる (Lamb § 330[1])。以下 Hele-Shaw セル内の流れについて 2 次元と呼び、セルを通さない従来の流れを 3 次元と呼ぶ。

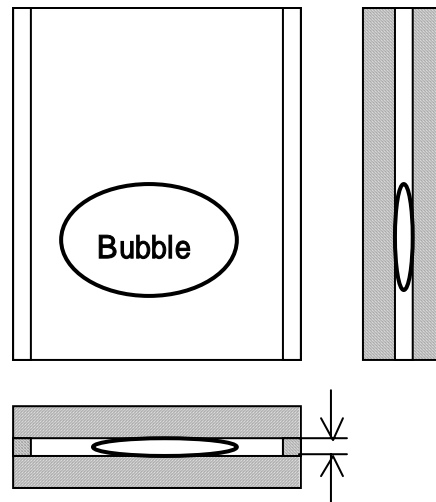


Fig.1.1.1 Hele-Shaw セル

3 次元の空気と水を用いた気泡離脱 (等温系という) については、沢山の実験とモデル化が行われてきた。Davidson[2]、Ramakrishnan[3]は、モデル化を行った。甲藤ら[4]はこの気泡離脱モデルが沸騰現象のモデルに応用できるとした。

これらの研究は、気泡離脱の周期や気泡体積に関して統計的観点でまとめていたものであったが、近年 Zhang[5]や庄司[6]により離脱現象の動力的側面について 3 次元系を研究するアプローチがとられている。

一方、2 次元系については、Viscous Fingering (Saffman[7]参照) の関連研究として、Maxworthy[8]及び Kopf-Sill[9]により実験がなされており、特に上昇中の気泡の問題については、Burgess[10]等が沢山のモデルを作っている。生成についても実験はなされているものの、離脱現象に焦点を当てたものは見あたらない。

本研究では 2 次元系の気泡離脱現象に注目し、次の文に述べる工業的・科学的価値を念頭に置きつつ、これの観察を行い、メカニズムを理解することを目的とする。

この研究の価値についてであるが、工業面で言えば、沸騰現象、熱物質伝達の、2 つにわけられる。科学面では非線形性である。それぞれ説明をすることにする。

沸騰現象は、家庭での鍋の発泡に見られるだけでなく、その潜熱による熱伝達率の良さのため（対流熱伝達の10倍以上の効率）、コンピューターのCPU冷却に使われるヒートパイプや原子炉の冷却等において使われており、工業的に非常に重要な現象である。

この沸騰現象は、解析を行うには液体の流れ・界面・相変化・潜熱を考慮しなければならず、非常に複雑であるので、通常の数値シミュレーションによる解析は実質的に不可能である。

空気・水系（等温系）で実験を行うと、相変化と潜熱を考慮しなくてよいので、模擬的な実験モデルになりうるため、メカニズムを把握しやすくなる。この実験系については、オリフィスからの気泡生成と題する沢山の研究が行われている(Davidson[2], Ramakrishnan[3])。この系においてさえも厳密な数値シミュレーションは非常に難しい上、単なるシミュレーションではメカニズムの理解にはつながらない。だが気泡を球体ととらえ、球にかかる力学の視点で現象を考察することで、現象の理解を深めるというアプローチが存在し、甲藤ら[4]がモデル化している。

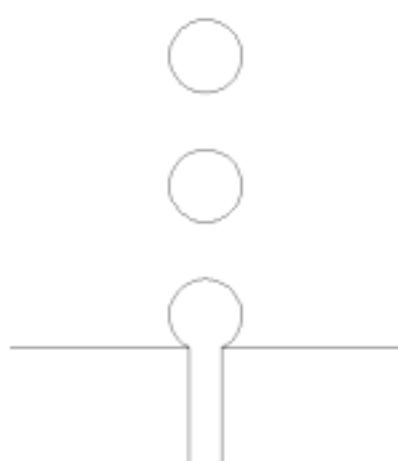


Fig.1.1.2 オリフィスからの気泡生成イメージ

熱物質伝達とは、化学工学において、気泡塔やバイオリクターへの応用である。人工心肺、汚水処理等を例として、気体と液体の混合を行う部位についてどのようにしたら攪拌が促進できるかということが沢山研究されている。3次元系については研究があるものの2次元系ではまだそれを目的とした研究はない。2次元系で何らかの促進が行われることが判明すれば、工学的に有用である。昨今沢山の研究がなされているマイクロチャネルとよばれる薄い層の研究の基礎としても研究の価値があると考えられる。

非線形性については上に述べた工学的応用にも含まれるともいえるかもしれない。3次元で上昇中の気泡の合体については Nguyen[11]のものがあり、特に離脱部分に注目している研究としては Zhang[5]や庄司[6]のものがある。

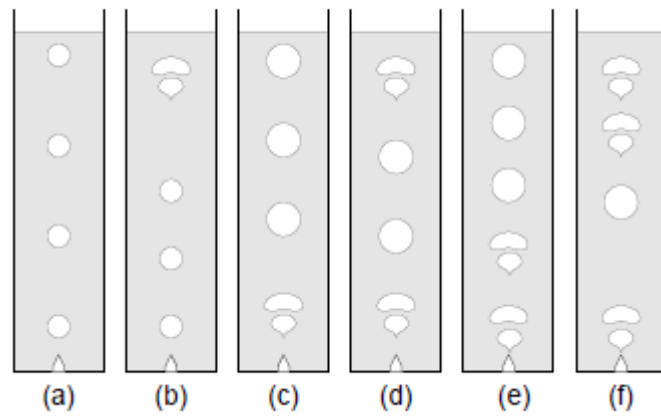


Fig.1.1.3 Nguyen[11]から．左から右へと流量が段々大きくなっていく．

Hele-Shaw セルは多孔質と数式上等価とみなせるので 本研究による直接の工業的応用として、石油埋蔵層（多孔質）への気体の注入も考えられる．

1.2. 研究の目的

本研究では 2 次元の気泡離脱現象に新たに注目し，沸騰現象，熱物質伝達，非線形性といった工業的・科学的価値を念頭に置きながら現象の観察を行い，モデル等を通じ現象のメカニズムを理解することを目的とする．

1.3.オリフィスからの気泡生成に関して

発泡周期と離脱体積について沢山の研究が行われている．低流量で体積一定となり，高流量で体積が指数的($V \propto Q^{\frac{6}{5}}$)に変化することが特徴的である．代表的なモデルとして Davidson[2]，Ramakrishnan[3]のものがある．

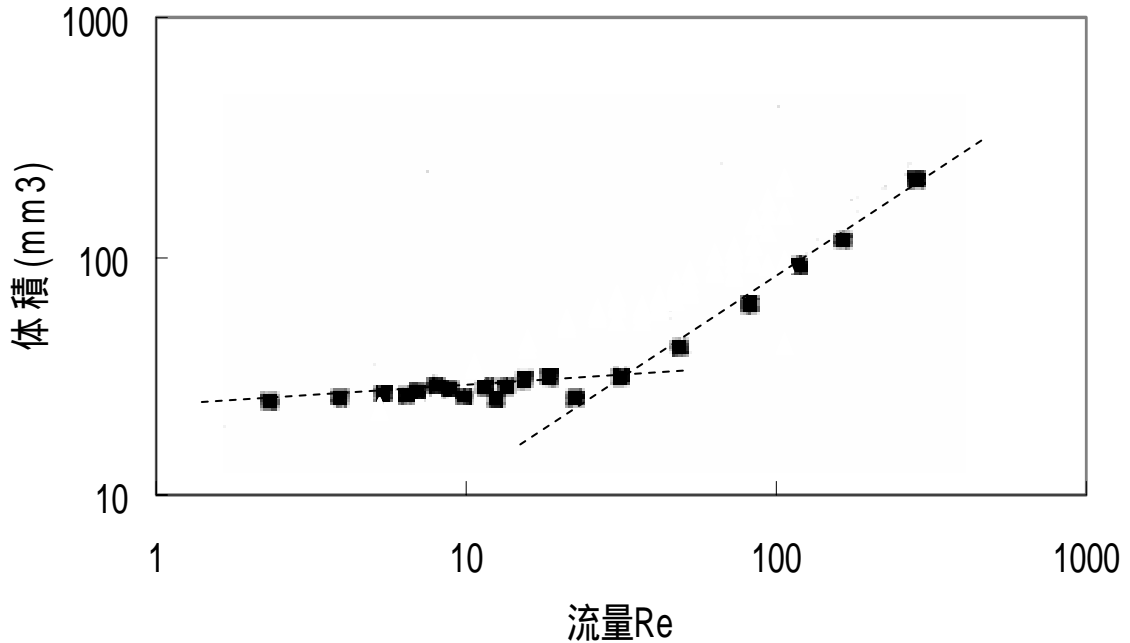


Fig.1.3.1 Ramakrishnan[3]の実験結果(世古口[12]から引用)

Davidson[2]のモデルは，離脱気泡を球と仮定し，かかる浮力と慣性力が等しいとした非常にシンプルなモデルである．

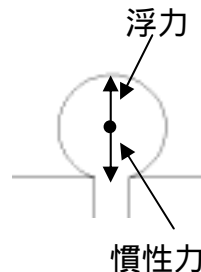


Fig.1.3.2 Davidson[2]のモデル

Ramakrishnan[3]は気泡の成長過程を膨張過程と離脱過程の二段階に分割したモデルを提唱した．膨張過程では気泡球の部分が成長し，離脱過程では首の長さが長くなるというものである．

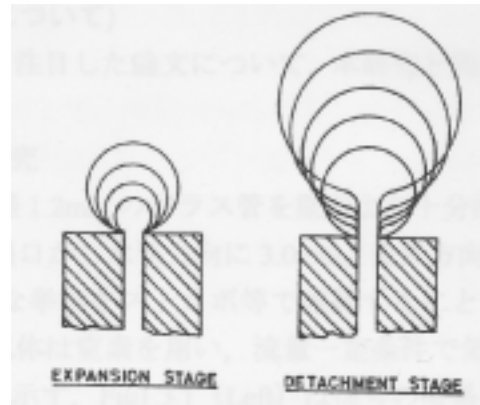


Fig.1.3.3 Ramakrishnan[3]の二段階モデル概略

一方世古口[12]は、気泡を球状とした場合にかかる力を実験値の頻度から計算し次のグラフを作成した。

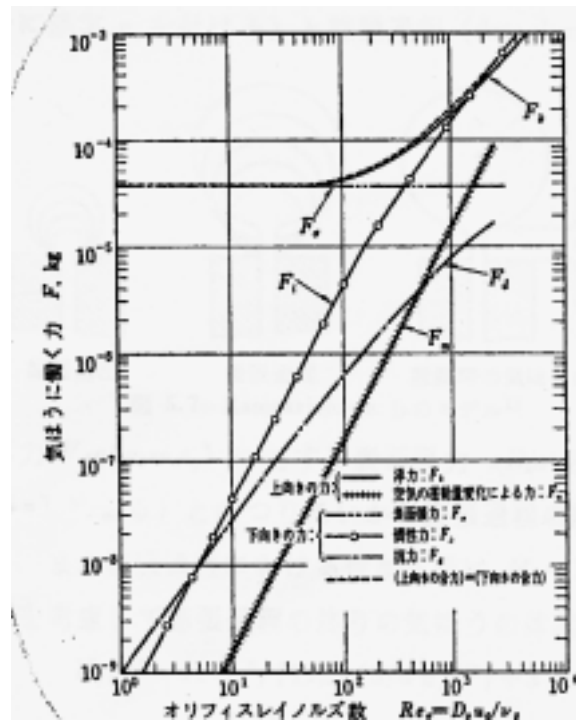


Fig.1.3.4 世古口[12]による気泡に働く力

1.4.Hele-Shaw セルとは

図のように二枚の板に挟まれた狭い空間であり，圧力と速度について Saffman らにより多孔質と類似的であるとされている．

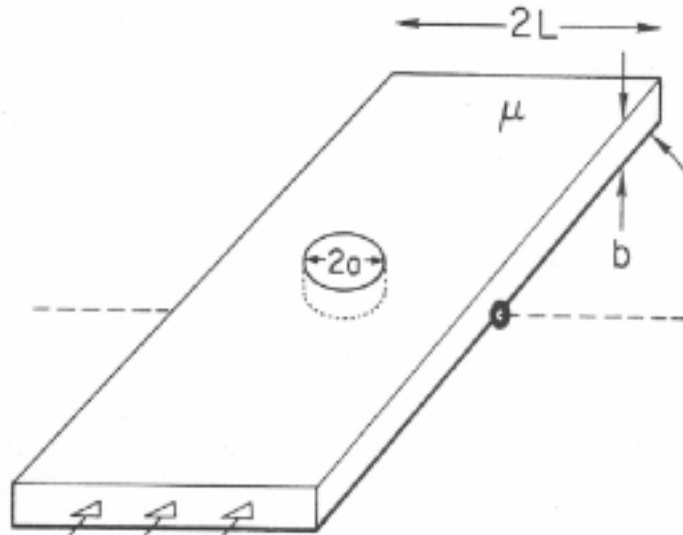


Fig.1.4.1 Kopf-Sill[9]による Hele-Shaw セル概略図

このセル内では，

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \bar{u} &= 0, \\ \nabla \bar{P} &= -12\mu\bar{u}/b^2\end{aligned}$$

の方程式が成り立つ．

・ Hele-Shaw セル内の気泡について

上昇中の気泡については数多く研究が行われている．

Walters[13]は 3 次元の気泡の上昇中の歪みを説明するために，より簡易な系と考えられる 2 次元系として Hele-Shaw セルを用いた実験を行い，これにより得られた予想を 3 次元の気泡にあてはめるということを行った．

また，Hele-Shaw セル内に二つの粘性流体を投入した場合，界面が指状のフラクタル的な形状になるという現象がある(Saffman[7]によりレビューされている)．この現象は界面不安定によって生じるものであるが，この研究から派生した研究として，液体中に気体を投入した場合の研究がある．特に次の二つの研究が実験として有名である．Maxworthy[8]は，Hele-Shaw セル内で界面不安定が生じない場合について観察を行った．一方 Kopf-sill[9]は気泡の形状を観察し，6 種類の形状に分類を行った．

第二章

実験方法

2. 実験方法

2.1. 実験方法

液体槽の中にセルを配置し，セル内にオリフィスから気体を送り込むことで2次元発泡をおこす．今回の実験装置は従来の研究[5,6]で使われた実験装置を用い，発泡点の真上に図のようにセルを配置する．

本実験では，液体として水を用い気体として空気を用いる．

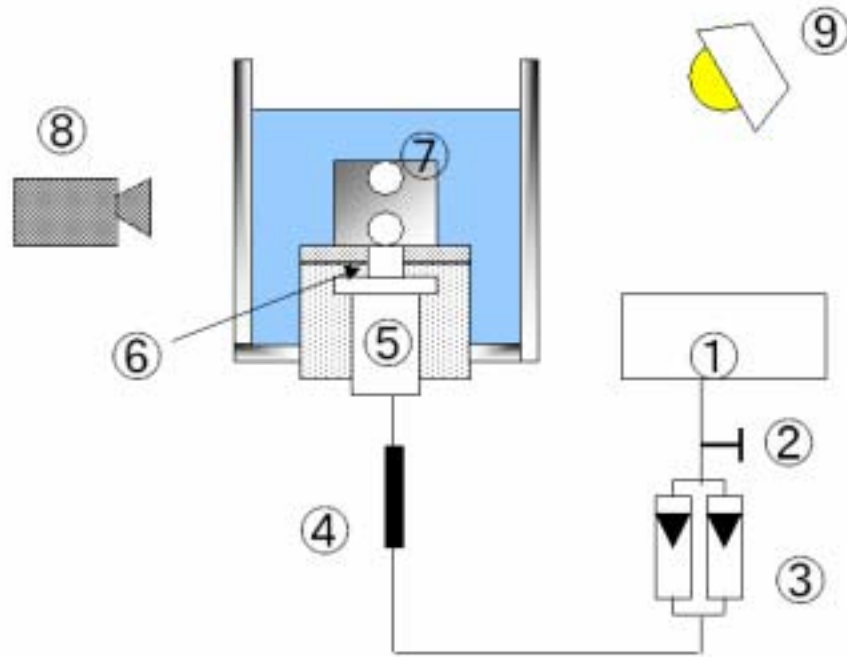
コンプレッサーで空気を流し込み，流量を調整し，流量計で流速をはかる．キャピラリーチューブで十分な流路抵抗を与えることでチャンバーへの空気供給量を安定させる．チャンバーは容積を変更可能だが今回の実験では他研究[2,3,5,6]との比較のため容量を 10cc とする．

オリフィスは 2mm × 1mm の四角状とする．流入気体のオリフィスレイノルズ数（代表長さ：オリフィス幅，代表速度：オリフィス出口の平均流速） $Re=Ud/\nu$ は 5 ~ 300 とする（ U は気泡速度， d はオリフィス太さ， ν は動粘性係数）．表面張力に対する流体の粘性の大きさを表すキャピラリー数 $Ca=\rho\nu U/\sigma$ は実験結果から計算すると，0.1 ~ 2.5 であった（ ρ は液体密度， σ は表面張力）．

高速度カメラで離脱部分を撮影し，コンピューターに動画を取り込み，離脱時点の画像を切り出し，塗りつぶしアルゴリズムにより面積を求めることで近似的に体積・重心などを抽出する．

印刷された離脱画像から，キルビメーター，定規を用いて気泡の輪郭と縦横の長さなどを求める．

2.2. 実験装置



コンプレッサー (日立製作所 BEBICON)
 流量計 (小野製作所 OMEGA)
 流量計 (小野製作所 OMEGA)
 キャピラリーチューブ
 チャンバー
 オリフィス
 Hele-Shaw セル
 高速ビデオカメラ (Photron FASTCAM-Net Max)
 光源

Fig.2.2.1 実験装置概略図



Fig.2.2.2 実験装置全体写真

2.3.Hele-Shaw セルについて

セルはアクリル製であり，表面に濡れ性を改善するためにアトムサポート(株)「鏡とガラスのくもり止め」を塗布してある．これにより接触角は約 10 度になる．

セルの隙間は 1 mm である．

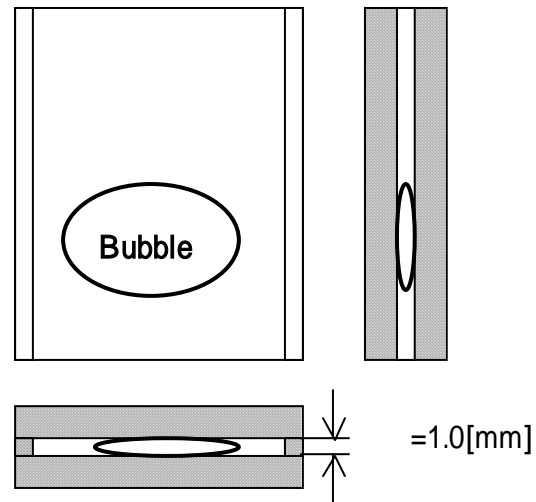


Fig.2.3.1 Hele-Shaw セル概略図



Fig.2.3.2. Hele-Shaw セル写真

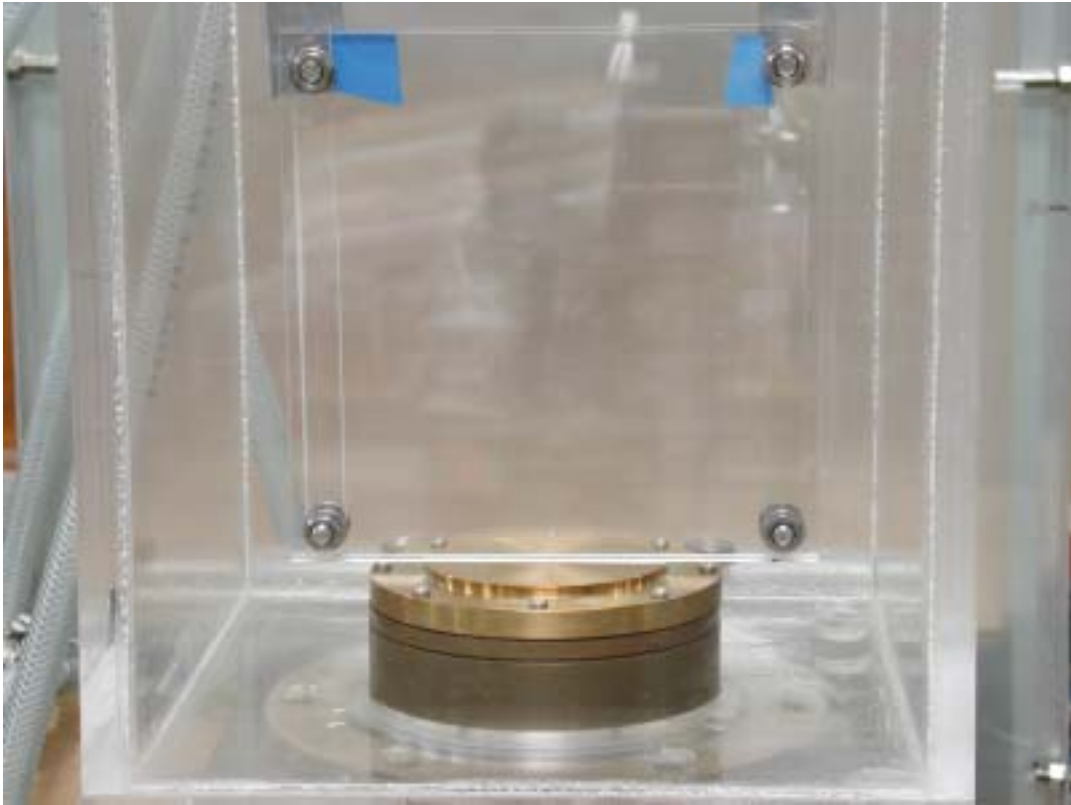


Fig.2.3.3. 実験部分

・どれぐらいの厚さのすきまなら気泡が3次元性を失うのか？

$$\frac{4}{3}\pi r_3^3 = \pi r_2^2 \delta$$

これを解くと、

$$r_2 = \sqrt{\frac{4}{3\delta}\pi r_3^3}$$

直径 5mm の球状の気泡を考える．セル厚さ $\delta=1\text{mm}$ で、 $r_3=5\text{mm}/2=2.5\text{mm}$ を代入すると、 $r_2=4.5\text{mm}$ 、つまりセル内では直径 9mm になる．

2.4.塗りつぶしプログラムについて

本研究において気泡の体積を求めるために、気泡のビデオ画像から体積を求めるプログラムを作成した．塗りつぶしに使用したアルゴリズムは、一般に走査線アルゴリズムあるいはスキャンラインアルゴリズムと呼ばれるものである．

1. まず気泡の内側の一点を定め、気泡の内側である条件、つまり気泡界面の色の濃さを閾値として指定する．
2. 指定した一点からX軸方向にマイナス方向に1ピクセルずつ閾値の範囲内であるところを探

- し、ぶつかった点を記憶しておく。
3. 指定した一点からX軸方向にプラス方向に1ピクセルずつ閾値の範囲内であるところを探し、ぶつかった点を記憶。
 4. 2及び3で求めた範囲内すべてでY軸方向に1ピクセルマイナスした一点を設定し、2を実行する。
 5. 2及び3で求めた範囲内すべてでY軸方向に1ピクセルプラスした一点を設定し、2を実行する。
 6. 以上でみつかったピクセルをすべて合計したものはピクセル数での面積である。
 7. これを、1mmあたりのピクセル数で割ると気泡の面積がでる。
 8. 本実験ではセルのスペースは1mmであるので、(気泡の面積)×1mm=(気泡の体積)である。



Fig.2.4.1 塗りつぶしプログラム画面

青色の部分が塗りつぶされた部分である。

第三章

実験結果

3. 実験結果

3.1. 観察

流量レイノルズ数 $Re=5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,60,70,80,90,100$ については離脱体積と離脱周期を測定した。 $Re=5,10,15,20,30,40,60,80,100$ についてのみ各種データ処理を行った。

- ・ $Re=5$

周期が大きくなっている様子が見られる。

- ・ $Re=10 \sim 20$

特徴的なことは起こらない。

- ・ $Re=25$

気泡が上昇した後、合体するようになる。気泡体積にばらつきがあることによると考えられる。

- ・ $Re=30 \sim 45$

この流量付近から気泡体積と気泡離脱周期の両方にばらつきが大きくなるようになる。

- ・ $Re=50 \sim$

先行気泡があると上昇が促進されるようになる。2個の気泡で一組という感じである。

- ・ $Re=90 \sim$

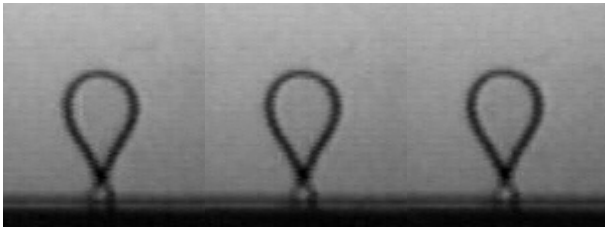
気泡の離脱前に気泡が分裂してしまう。

- ・ $Re=100 \sim$

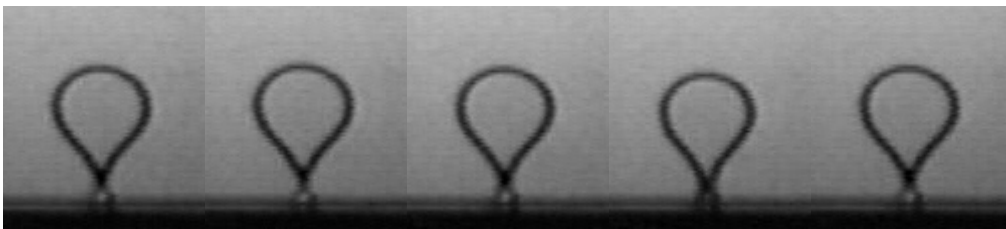
気泡の離脱前に気泡が分裂する現象が顕著である。

気体の押し込みにより離脱する気泡に変形が生じている。

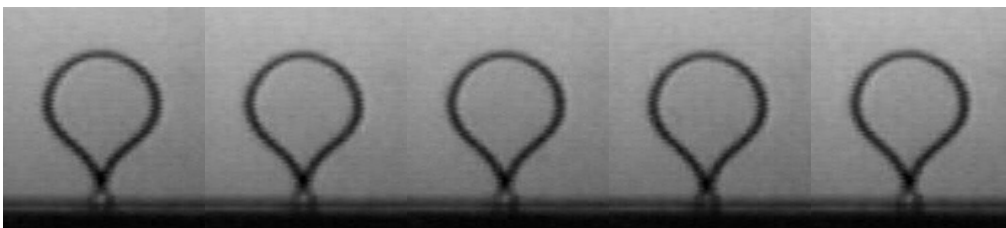
3.2. 低流量離脱画像



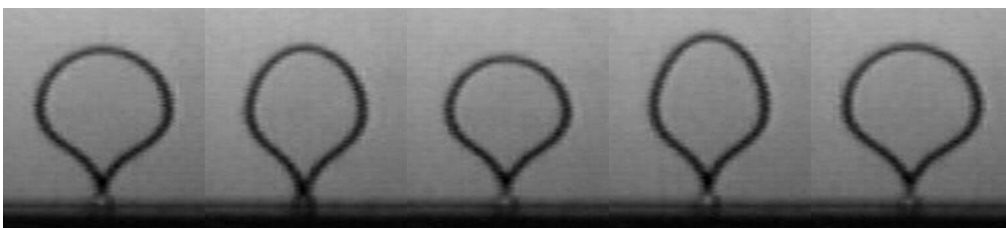
Re=5



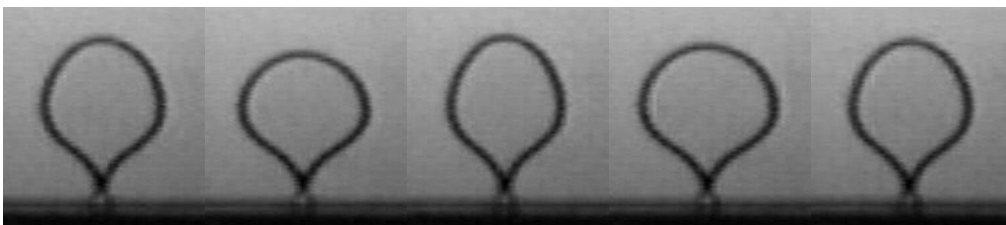
Re=10



Re=20

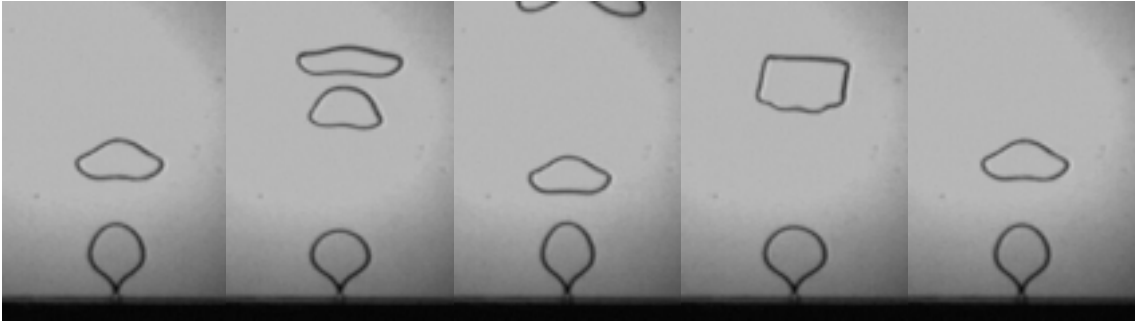


Re=30

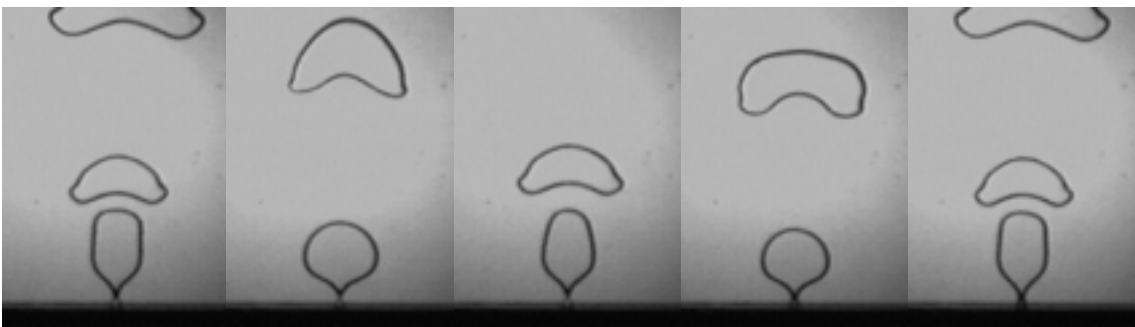


Re=40

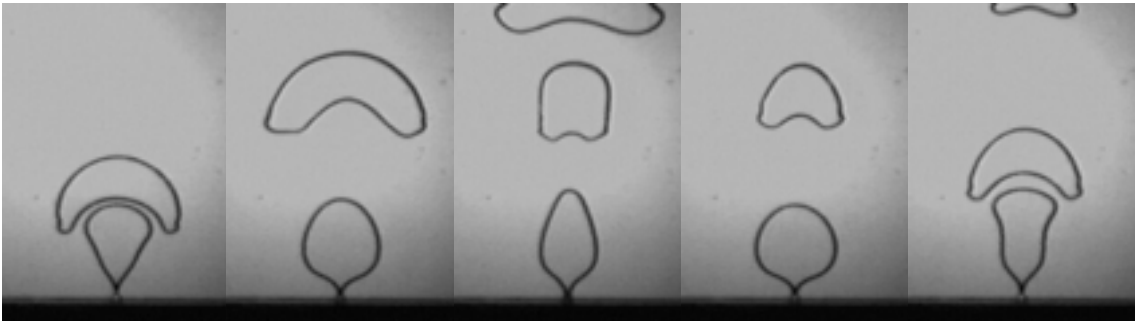
3.3. 高流量離脱画像



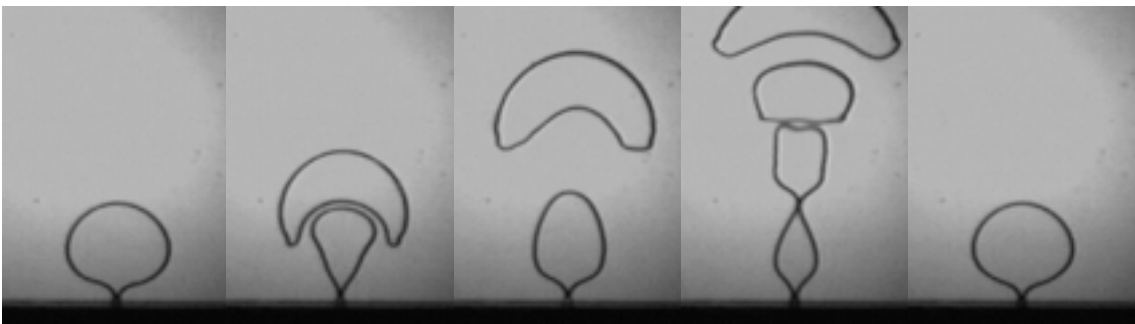
Re=40



Re=60



Re=80



Re=100

第四章

考察

4. 考察

4.1. 離脱気泡の静的挙動

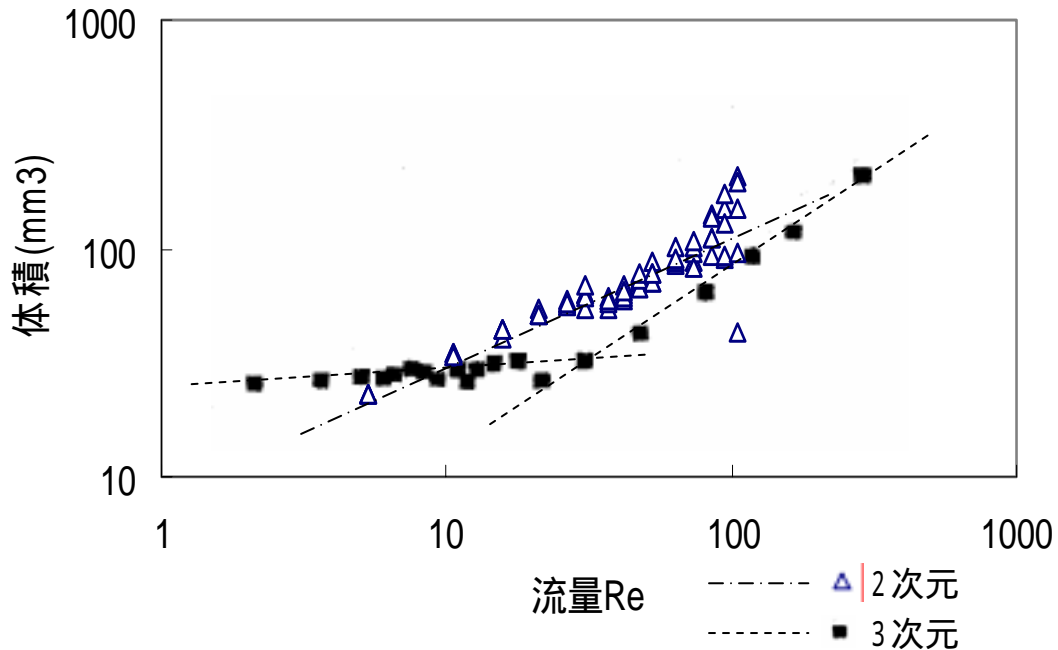


Fig.4.1.1 流量と気泡体積の関係（3次元データは Ramakrishnan[3]のものをあてはめている）

・気泡体積の流量依存性

3次元系についての説明は第1章3節にある。

2次元系の実験では，Fig.4.1.1 から読みとれるように3次元の実験結果と異なり，体積が流量の影響を受けず一定になる領域は見られず，流量が大きくなるほど気泡体積は大きくなった。

4.2. モデルによる説明

3次元系のモデルでは気泡を球と仮定したが，2次元系では気泡を円柱と考えた。

気泡にかかる力として表面張力，慣性力，浮力が考えられる。

$$\text{表面張力} \quad 2(\delta + d)\sigma$$

$$\text{慣性力} \quad (\rho_v + \xi\rho_L)\frac{d}{dt}\left(V\frac{ds}{dt}\right)$$

$$\text{浮力} \quad (\rho_L - \rho_v)Vg = (\rho_L - \rho_v)\frac{\pi}{4}D^2\delta g$$

これに加えて，2次元では， $V = \pi\delta r^2$ (円柱)とする。

3次元の低流量域では、表面張力が支配的である。これについて2次元の実験系ではどうかを計算してみる。離脱部において表面張力は常に

$$2(\delta + d)\sigma = 4.2 \cdot 10^{-5} (N)$$

である。一方代表的な気泡寸法 $D=6\text{mm}$ ($Re=10$ 程度に相当) について浮力を計算してみると

$$\frac{\pi}{4} D^2 \delta (\rho_L - \rho_V) g = 1.5 \cdot 10^{-3} (N)$$

であり、表面張力とはまるでつりあわない。以上のことは実験結果からも明らかである。

表面張力と浮力が釣り合う領域は、気泡径 $2,3\text{mm}$ 程度の領域であり、オリフィス径が 2mm ほどであることを考えると現実的には存在し得ないのである。

$$Q = \frac{dV}{dt}$$

$$Q = Vf = \pi \delta r^2 f$$

$$V = \pi \delta r^2$$

以上から、離脱頻度 $f = \frac{1}{\tau}$ の時 $r = r_0$ で $s = r$ とすると、

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r_0 f}{2}$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{r_0 f^2}{4}$$

が求まる。

以上から慣性力は

$$\begin{aligned} F_i &= (\rho_V + \xi \rho_L) \frac{d}{dt} \left(V \frac{dr}{dt} \right) \\ &= (\rho_V + \xi \rho_L) \left(\frac{dV}{dt} \frac{dr}{dt} + V \frac{d^2 r}{dt^2} \right) \\ &= (\rho_V + \xi \rho_L) \cdot \frac{3}{4} \pi \delta r_0^3 f^2 \end{aligned}$$

一方浮力は

$$\begin{aligned} F_{bi} &= (\rho_L - \rho_V) g V \\ &= (\rho_L - \rho_V) g \pi \delta r_0^2 \end{aligned}$$

これらのつりあいから、 $V \propto Q^{\frac{4}{3}}$ 、 $f \propto Q^{-\frac{1}{3}}$ が求まる。なお $Q \propto Re$ である。

だが Fig.4.1.1 を見たところでは2次元の近似直線の傾き(4/3)は3次元のそれ($V \propto Q^{\frac{6}{5}}$ の 6/5)

よりもモデル上きついはずであるがゆるやかである．そこで次のグラフを用意した．

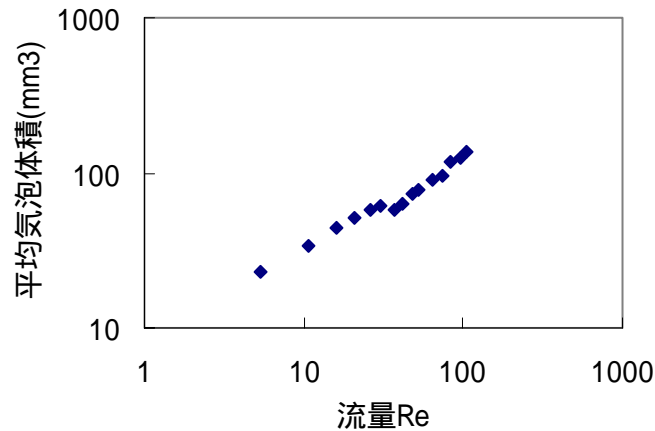


Fig.4.2.1 Fig.4.1.1 の気泡体積データを平均化

このグラフから， $Re=30$ 以下では傾きがそれほどではなく計測してみると 0.56 であり， $Re=30$ 付近でグラフの傾きが変わり， $Re=30$ 以上では傾きが 0.87 になることがわかる．

これはモデルには含まれていない力が気泡にかかっているからではないかと考えられる．抗力 $F_d = \frac{1}{2} C_d (\rho_v + \xi \rho_L) \cdot D \delta \left(\frac{ds}{dt} \right)^2$ を計算してみたら良いのではないかと(機械工学便覧 流体力学 A5[14])．また，4.3.節に述べている縦長 横長 縦長という発泡傾向が発生しはじめるポイントとちょうど一致しているのもので，先行気泡による影響も考えられる．

4.3.離脱気泡の動的挙動

$Re=5 \sim 30$ については，気泡は一定の形状をとる．

$Re=30$ 以上では横長気泡が発生した後は縦長気泡が発生し，その後横長気泡が発生し，縦長 横長 縦長という発泡傾向が見られた．

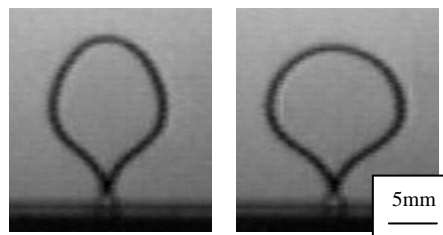


Fig.4.3.1 $Re=40$ での離脱気泡画像

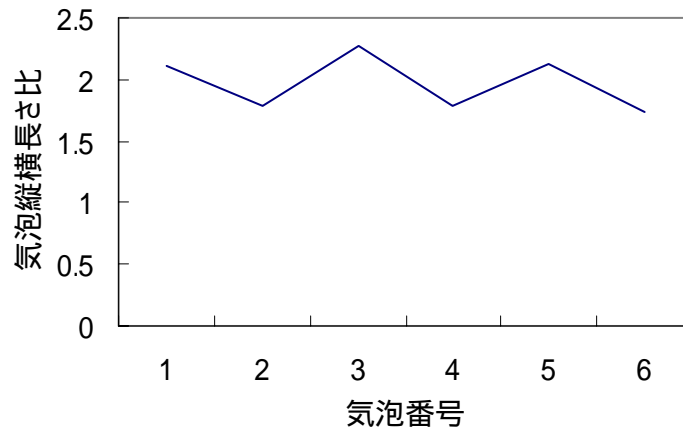


Fig.4.3.2 Re=40 での時系列データ

この Re=40 では、離脱周期は約 0.083(s)である。周期も多少依存傾向がある。縦長の気泡と比べると横長の気泡の方が体積が大きい。

この縦長 横長 縦長となる現象は倍分岐現象である。画像から、先行気泡と続く気泡の距離が気泡等価半径のおよそ 2 ~ 3 倍の範囲内だと続く気泡に影響が出ることがわかる。

この現象について、次のように考えた。横長の気泡が発生した場合、後流の影響で続く気泡が縦長に発生し、この気泡は縦長であるために速く上昇するので次の気泡には後流の影響が無くなり、横長の気泡が発生するというサイクルでまわっているのである。

高レイノルズ数では、先行気泡に吸い付くような形状になることがあり、必ずしも縦長 横長 縦長とはならず、体積に大きなばらつきがでた。これは Re=80 について画像を見たところでは、4 周期の分岐がおきているからではないだろうか。もっと精密な計測が可能なのであれば、周期倍分岐が観測可能なのではないか。

Re=100 以上では離脱と分裂とが判別しがたい複雑な様相を呈し始めた。

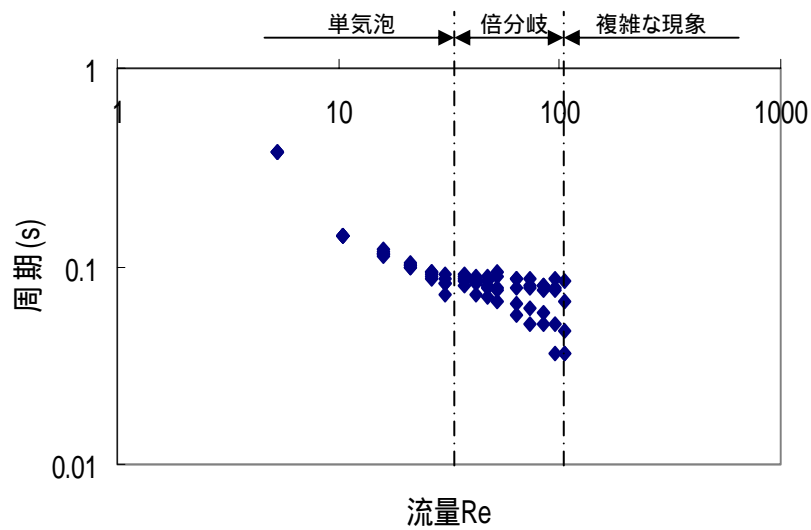


Fig.4.3.3 2次元系の流量レイノルズ数 Re と分岐傾向

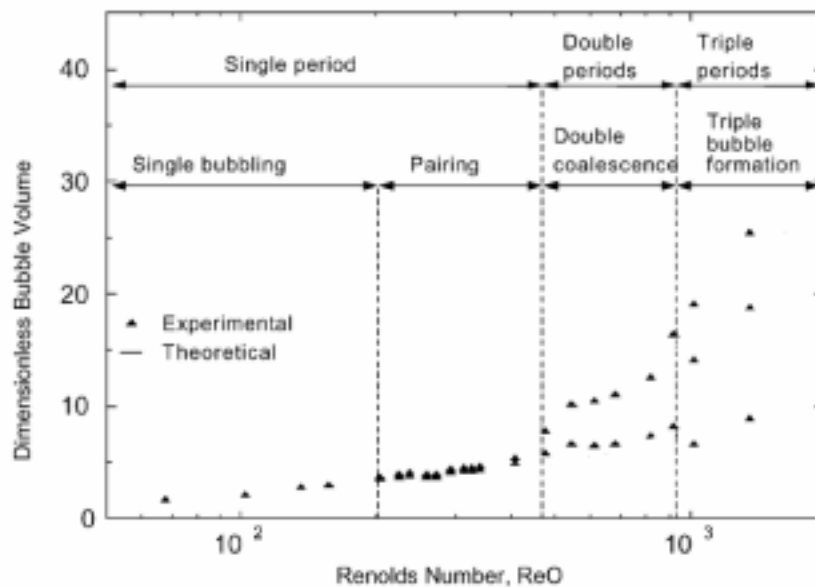


Fig.4.3.4 3次元系の分岐傾向の実験データ(Zhang[5]による)

上下の気泡の合体は、レイノルズ数が低い(仮に $Re=50$ とする)場合は、高い位置で起こるが、 $Re=100$ では発泡点付近まで下がった。これは Nguyen[11]の3次元の結果と似たものであった。以下 Zhang[5]のデータと比較してみる。

3次元で倍分岐(pairing)が起こり始めるのは $Re=200$ からだが、2次元では $Re=30$ から始まる。2つの気泡が合体しつつ発泡しはじめるのは、3次元では $Re=450$ からであるが、2次元では $Re=90$ からである。2次元での発泡は、3次元と比べて一桁少ないレイノルズ数 Re で倍分岐をはじめるのである。3次元系と比較すると2次元のほうが攪拌力が高いということになる。

この理由として、次のようなことが考えられる。奥行き方向の流れが発生しないため、3次元と比べて2次元のほうが流れが強くなり、後流が強くなるのではないか。実験のほこりの軌跡を見ていると、3次元系と比べるとマクロな対流が3次元と比べて強くなっていたことからそう考えられる。

4.4.輪郭長さについて

同じ体積でも輪郭長さが長ければ熱物質伝達の促進される。各流量について輪郭長さを測定してみた。

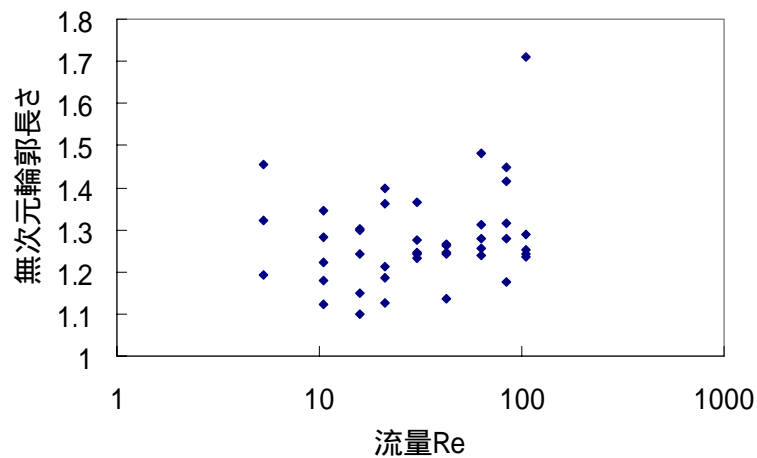


Fig.4.4.1 流量レイノルズ数と、体積から求まる円からのずれ

Fig.4.4.1 は各流量における輪郭長さを、体積の等価半径から求められた真円の輪郭長さで無次元化したものである。つまり無次元輪郭長さが1からはずれないほど、真円からはずれているということである。

グラフから、真円からはそれほどずれないことがわかる。表面張力が強く、粘性が弱いのだろう。Ca(キャピラリー数)をさらに大きくするとずれが大きくなるのではないか。気液接触面積が大きくなれば序文にある熱物質伝達が促進されると考えられる。このことについて次のような考察を行った。

まず円と正方形ではどの程度輪郭長さが異なるかを計算した。

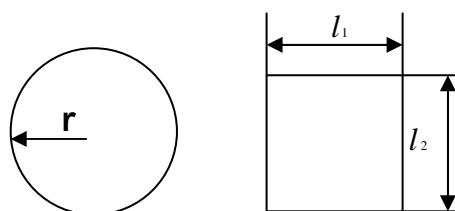


Fig.4.4.2 輪郭長さの比較

$$\pi r^2 = l_1 l_2$$

$$\alpha \cdot 2\pi r = 2(l_1 + l_2)$$

と置く．両式から，

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{l_1 + l_2}{\sqrt{l_1 l_2}}$$

が導き出せる．

正方形では $l_1 = l_2$ なので代入すると $\alpha = 1.13$ ぐらいになる．

同じ面積の円と正方形という，見た目として大きく異なる形状でも，輪郭長さではそれほど大きな差にはならない．

ここで，上昇している気泡である大きな楕円状の気泡について考える． $l_1 = 5l_2$ ぐらいの長方形と楕円を近似してみる．すると， $\alpha = 1.5$ 程度となる．このことと Fig.4.4.1 を鑑みて，輪郭長さは指標として鈍感なものであり，計測誤差も大きくなりがちであるので，測定しても意味のある結果はでにくいと言えるのではないか．

第五章

結論

5.結論

- ・ 2次元気泡の離脱現象を高速ビデオカメラで撮影した。

- ・ 離脱気泡の静的挙動について

流量が増えるとともに気泡体積が増加することがわかった。これは従来の3次元の現象とは異なっている。離脱部の表面張力が他の力と比べて小さいことが理由であると考えられる。静的挙動のモデル化を行い、円柱モデルによる現象の説明を試みたが、慣性力と浮力では数値的に少々無理があるようであり、他の力（抗力など）を考慮に入れるか、また次の文で述べる先行気泡の影響も考慮に入れるかする必要があるのでないか。

- ・ 離脱気泡の動的挙動について

流量レイノルズ数 $Re=30$ 以上で縦長 横長 縦長という気泡発生傾向が見られた。倍分岐現象である。先行気泡の後流の影響でこのようになると考えられる。この倍分岐現象が3次元と比べてオーダーが一桁低いレイノルズ数で起こる。3次元系と比べて2次元系のほうが攪拌力が高くなるのである。2次元系と3次元系との比較から、2次元系では奥行き方向の流れが発生せず、後流が強くなるためと考えられる。

- ・ 輪郭長さについて

多少の形状の変動は輪郭長さに大きな影響を与えないことを数式で示した。

付録 1

数値シミュレーションソフト **Phoenixs** による数値シミュレーションについて

このソフトによる二相流の解析方法は次の5つである。

- **I P S A (Inter-Phase-Slip Algorithm)**
- **G E N T R A (G E N e r a l T R A c k i n g)**
- **A S M (Algebraic Slip Model)**

これらの三つは、界面を分散相として平均化して扱うものであり、相の界面を追うことができない。

- **S E M (Scalar Equation Method)**
界面における表面張力の影響が含まれていない。
- **H O L (Height-Of-Liquid Method)**
界面の上に界面が来るような複雑な現象には使うことができない。

いずれのモデルも本研究のシミュレーションには使用不可能である。

付録2 その他の考察

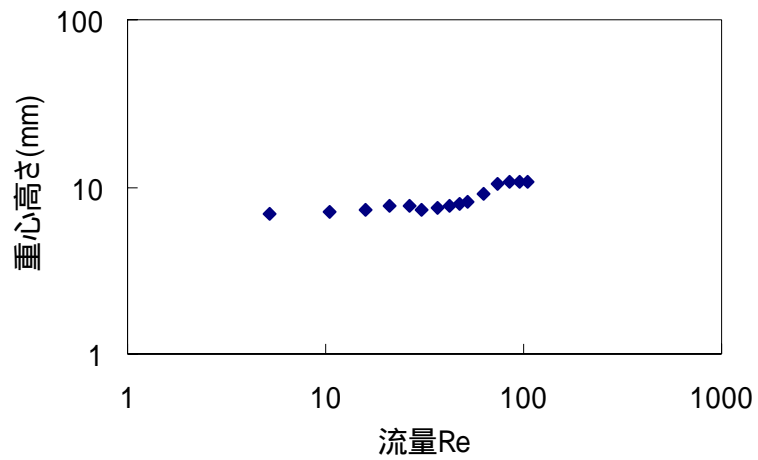


Fig.6.2.1 流量レイノルズ数 Re - 重心

・流量に対する気泡離脱時の重心位置である．モデル上 $s=r$ としていることがグラフとして問題を引き起こしていないかを調べようと思ったが，興味深い結果は得られなかった．重心は2次元気泡体積のルートでしか効果がないのではないだろうか．

・モデルを作る上で，重心位置と等価半径が一致したときに離脱することになっている．表面自由エネルギーと運動エネルギーとの関係からモデルを作ったほうがきれいなモデルが作れるのではないか．

参考文献

- [1] ラム 『流体力学』 東京図書.
- [2] Davidson, J. F. and Shuler, B. O. G., "Bubble formation at an orifice in an inviscid liquid," Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol. 38, pp.335-342, 1960.
- [3] Ramakrishnan, S., Kumar, R. and Kuloor, N. R., "Studies in bubble formation – I Bubble formation under constant flow conditions," Chem. Eng. Sci., Vol.24, pp.731-747, 1969.
- [4] 甲藤ら 『限界熱流束の研究』 東京大学船用機械工学科.
- [5] Lei Zhang and Masahiro Shoji, "Aperiodic bubble formation from a submerged orifice", Chem. Eng. Sci.. Vol. 56, pp.5371-5381, 2001.
- [6] Masahiro Shoji, "Nonlinear Bubbling and Micro-Convection at a Submerged orifice", Tsinghua Science and Technology, April 2002, 7(2): 97-108.
- [7] Saffman, P. G., "Viscous fingering in Hele-Shaw cells", J. Fluid Mech., vol. 173, pp.73-94, 1986.
- [8] Maxworthy, T. "Bubble formation, motion and interaction in a Hele-Shaw cell," J. Fluid Mech., Vol.173, pp.95-114, 1986.
- [9] Kopf-sill, Anne R. and Homsy, G. M. "Bubble motion in a Hele-Shaw cell," Phys. Fluids Vol. 31(1), pp.18-26, 1988.
- [10] Burgess, D. and Tanveer, S., "Infinite stream of Hele-Shaw bubbles", Phys. Fluids A 3(3), pp. 367-379, 1991.
- [11] Nguyen, K., Daw, C. S., Chakka, P., Cheng, M., Bruns, D. D., Finney, C. E. A. and Kennel, M. B., "Spatio-temporal dynamics in a train of rising bubbles", Chem. Eng. J., 64:1, pp.191-197, 1996.
- [12] 世古口ら 『伝熱工学の進展』 養賢堂(1974).
- [13] Walters, J. K. and Davidson, J. F., "The initial motion of a gas bubble formed in an inviscid liquid," J. Fluid Mech., Vol. 12, pp.408-417, 1962.
- [14] 『機械工学便覧 A 5 流体工学』, pp. A5-99 , 日本機械学会 .

謝辞

この論文を書き終えるにあたり、研究室内外の皆さんの協力に感謝の念を抱いていることをまずここに記したいと思います。庄司名誉教授には、退官され産業技術総合研究所に移られた後も幾度も面倒を見て頂き、この研究を指導して頂きました。勝手なお荷物で押しかけられ本当に迷惑千万であったと思いますが、計4年にあたるご指導ありがとうございました。丸山教授にも押しかけてしまいましたが、指導教員として温かく見守って頂く一方、研究会での建設的意見には大変助かりました。技官の渡辺さんには、渡辺さんがいないと実験ができない、というほど研究でお世話になりました一方、研究室でも親身にして頂き、ありがとうございました。技官の井上さんにはキルビメーター購入をめぐりご迷惑をおかけしました。そして、この研究を昨年度行ったパートナーであった4年生の楠原君とは、研究で大変助けてもらっただけでなく、楽しく研究ができました。

そしてPDの塩見さんには、分子系の研究室にしながら流体関連の話をさせて頂いた上、研究のまとめを大分手伝って下さいました。ありがとうございました。丹下君にはアブストラクトをチェックしてもらっただけでなく、長いつきあいを今でもさせてもらってます。同期といえば湯浅君とは色々と会話を楽しんだ記憶があります。谷口君、小川君とも楽しく研究室生活を送りました。宮内君、体に気をつけてね。そして現在の丸山研の人たちである渋谷さん、西井さん、村上さん、嶋田さん、千足さん、Erikさん、面倒を見て下さりありがとうございました。お世話になりました。五十嵐君、枝村君、吉永君、色々ありがとうございます。大場君、佐藤君、吉松君、これからもがんばってください。4年生の皆さんもがんばってください。

ここには書いていない先輩方、関わった方々にも本当に感謝しています。そしてこの生活は家族なしには成り立つものではありませんでした。皆さんありがとうございました。

以上

修士論文

2次元気泡の生成メカニズム

1 - 36 ページ 完

平成17年2月10日提出

指導教員 丸山 茂夫 教授

26155 石川 桂