

強制振動管内気液二相流に及ぼす慣性力の影響の解明

Study on Effects of Inertial Force on Gas-Liquid Two-Phase Flows in a Vertical Pipe with Forced Oscillation

研究代表者 神戸大学工学研究科 准教授 林公祐

Kosuke Hayashi

Bubbly pipe flows have been studied by many researchers, and various models and correlations, e. g., the drift-flux model, are available to estimate important variables such as the void fraction, the phase-averaged velocity and so on. Effects of oscillating motion of a flow channel on bubbly flow, which may possibly cause accumulation of bubbles near the wall, have however not been investigated in detail yet. In this study void fractions of air-water bubbly flows in a horizontally oscillating vertical pipe are measured and numerical simulations of the flows are also carried out to assess the numerical method and to discuss the characteristics of bubble motion in the accelerating frame of reference. The numerical method is based on the one-way bubble tracking method, and a lift force correlation developed for bubbles in low Morton number systems is implemented. The pipe diameter was 20 mm. The magnitude of the acceleration was 1 m/s^2 and the oscillation period was 0.8 s. The bubble size ranges from about 3 to 7 mm. The accelerating motion of the pipe induced significant lateral migration of bubbles and accumulation of bubbles on the pipe wall. The radial profile of the void fraction in the steady pipe case in comparison with the measured data was agreed with the experimental data. In the oscillating pipe case, the small peak of the void fraction distribution near the pipe wall disappears and the profile is closer to a typical core-peaking profile. We took the average of void fraction for the half period, which made clearer that a large increase/decrease in the local void fraction is caused by the oscillation.

要旨

本研究では、振動を伴う鉛直円管内気泡流に及ぼす慣性力の影響を実験的に明らかにするとともに、気泡追跡法によりその影響を再現することを目的とした。その結果、気泡径分布および気泡アスペクト比分布に及ぼす振動とボイド率の影響を明らかにして気泡形状モデルの形に整理するとともに、振動を伴う気泡流のボイド率分布の特性を把握し、また開発した数値シミュレーション手法により良好な予測が可能であることを明らかにした。

1. まえがき

気液二相流はボイラー、軽水炉、化学反応プラントなど主として静止構造物内（慣性系）の機器開発を目的として発展してきた経緯があり、海底資源引揚管や宇宙機器用熱交換装置など、慣性力がある場合（加速度系）の流動特性については知見がほとんどない。

二相流は気泡が分散して流れる気泡流、砲弾型大気泡が形成されるスラグ流、間欠的流下を伴う液膜とガスコアからなるチャーン流、環状液膜とガスコアが流れる環状流など、実に様々な流れの様式を呈

する複雑現象である。例えばメタンハイドレート海底資源をライザー管でガス化回収する場合にはスラグ流からチャーン流を形成すると考えられる。また沸騰熱伝達を応用した熱交換器では気泡流や局所的なスラグ流の形成が考えられる。

気液二相流の流動に及ぼす加振の影響として、主に船用原子炉に関連して行われた研究例が報告されている。Isshiki⁽¹⁾は、軽水型船用炉の熱水力特性及び限界熱流束に及ぼすヒーピング及びリスティングの影響を実験により詳しく調べている。その他にも、Ishidaら⁽²⁾による船用原子炉においてヒーピング及びローリングが限界熱流束に及ぼす影響、IshidaとYoritsune⁽³⁾による深海調査船用小型加圧水型軽水炉(PWR)内熱水力特性、OtsujiとKurosawa⁽⁴⁾による一様加熱円管中の冷媒流れに及ぼすヒーピングの影響などの研究例がある。このように従来の研究は限界熱流束など原子力技術応用を背景とした研究が多く、系の強制振動が二相流ダイナミクスに及ぼす影響に関する研究例は少なく、観察による流動特性の把握という点でさえも知見が整備されていないのが現状である。

二相流では、各相が占める体積割合（体積率）が

基本的かつ重要な物理量である。慣性力がある場合、気液の密度差が大きいため、体積率分布に大きな偏りを生じる可能性が高い。本研究では、強制振動管内気液二相流（気相と液相が混在する流れ）に及ぼす慣性力の影響を、実験により調べるとともに、数値シミュレーションによる現象の再現を試みた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。本装置はコンプレッサ、レギュレータ（CKD, R2000-10-W）、気液混合部、試験部用円管、アクチュエータ（オリエンタルモーター株式会社, 6-E15-AZAKD-3）、ポンプ（IWAKI, MD20RZ-N）、水供給タンク、排出タンク、気相流量計（日本フローセル, NSP-5-Q004, NSP-5-RC1/4-L）、液相流量計（日本フローセル, FLT）からなる。

液体に常温常圧の水を用い、供給タンクからポンプを通して液相流量計で流量を調整し、気液混合部に供給した。コンプレッサから供給された空気を、レギュレータで減圧、また気相流量計で流量調整したのち、気液混合部に供給した。混合した二相を内径 20 mm、長さ 1000 mm の鉛直円管に流入させたのち、流入部より 800 mm 下流で観察とボイド率測定を行った。気相は出口配管を通じて大気に開放し、液相は排出タンクを通じて供給タンクへと還流させた。助走部及び試験部は、流動可視化のために透明アクリル樹脂で製作した。

混合部のアクリルフランジおよび上部アクリルブロックにアルミ平板を固定し、アルミ平板にアクチュエータを接続することで、試験部全体を水平一軸方向に加振する構造とした。混合部及びアクリルブロックをボールキャスタ上に設置することで、試験部の荷重を支える構造とした。

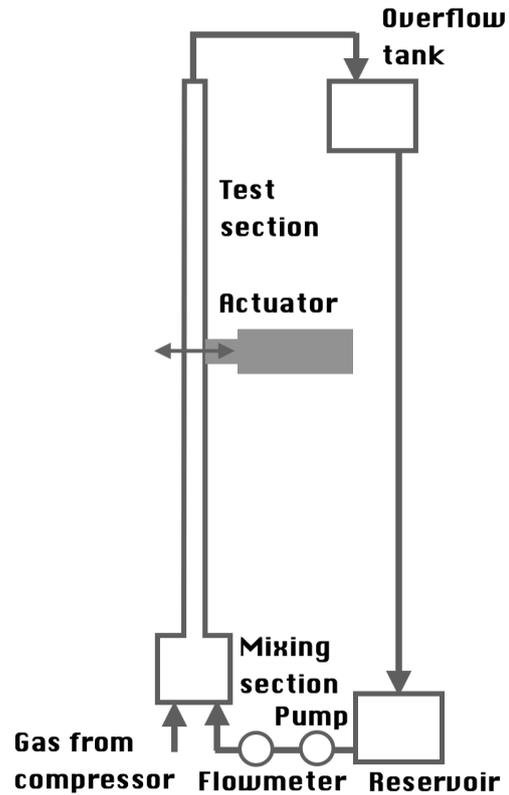


図1 実験装置概略

気液混合部は気相と液相が偏りなく混合するように、気相は混合部の下面の一箇所から、液相は混合部側面の2箇所から流入させた。混合部内に4mmのガラス球を敷き詰め、気相と液相を混合した。振動管には測定部の流動観察のためのものと、点電極プローブ測定⁵⁾をするための二種類を用いた。試験部の流動観察をする際は円管の壁面で発生する光の屈折を除去し、より正確な流動の観察を行えるように鉛直管の測定部にアクリルアダプタを取り付けた。ボイド測定時に用いる測定部の概略を図2に示す。この測定部は、測定用透明アクリル樹脂製円管、ボイドプローブ、マイクロメータ（シグマ光機, TSD-601C）で構成される。ボイド率測定用点電極プローブはマイクロメータで x 方向測定位置に移動させた。

流動撮影には高速度ビデオカメラ X-3（IDT 社製）を用いた。レンズは AI AF Micro-Nikkor 60 mm f/2.8D（NIKON 社製）である。光源には蛍光灯を用いた。

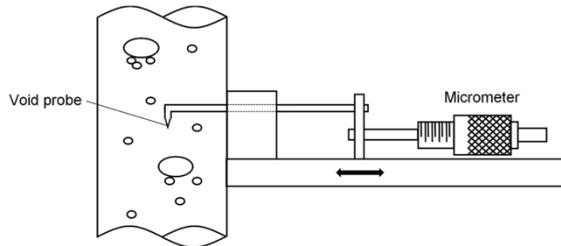


図2 点電極プローブ法の概要

2.2 流量および振動に関する条件

液相体積流速を $J_L = 0.20$ m/s, 気相体積流速を $J_G = 0.025, 0.050, 0.075$ m/s とした. これらの組み合わせにおける流動様式は気泡流であった. ただし, $J_G = 0.075$ m/s はやや気泡流-スラグ流遷移に近い条件である.

配管加振時のアクチュエータ運転条件の運転距離 L_0 (振幅 $L_0/2$), 加速度 a , 最大速度 V , 周期 T は表1に示す3パターンとした. Case 1は振動がない場合, Case 2, 3は加速度が異なる場合である. 加速度が 0 m/s^2 になる時間はなく, 常時加減速する運動となっている. 加速度の変動例を図3に模式的に示す.

表1 振動の条件

Case	L_0 [mm]	V [mm/s]	a [m/s^2]	T [s]
1	0	0	0	-
2	40	200	1	0.80
3	40	283	2	0.57

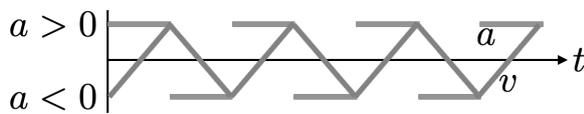


図3 振動管の速度および加速度の時間変化

点電極プローブ法を用いて局所時間平均ボイド率を測定した. 測定系は点電極プローブと電気回路, データロガー(横河電機, WE7000; GRAPHTEC, GL2000)から成る. 導線にはんだ付けした白金線(直径 0.10 mm)を外径 2.0 mm, 厚さ 0.3 mm のステンレスパイプに通し, 白金線の先端部以外を合成樹脂エナメル塗料(ビニローゼ, 大日本塗料)で絶縁したものをプローブとした. 図4にプローブ測定により得た電圧信号とそれを二値化した波形を例示する. 波形の立

ち上がっているところが気泡を表す. 気泡を明確に捉えることができる.

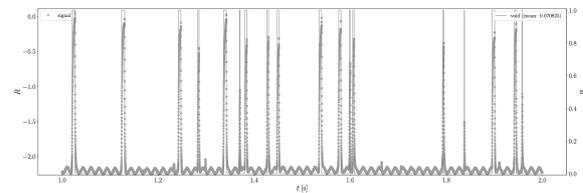


図4 電圧信号波形とその二値化波形

3. 数値計算モデル

気泡流の数値予測に用いられる手法は界面追跡法, 気泡追跡法, 二流体モデルに大別できる. 界面追跡法は気液界面の移動と変形を直接扱うため構成方程式のモデルに依存しない計算ができるが, 気泡流に含まれる全ての界面を空間的に分解するのは実質的に不可能である. 一方, 二流体モデルは平均化方程式に基づいて気液体積率の時間発展の形で気泡群運動を捉えるため効率の良い計算が行えるが, 気液間相互作用モデルの精度に計算結果が大きく左右される. 特に本研究のように振動に伴って気泡の集中が起こるような場合には, ボイド率に対する分散力のモデリングが重要であるが, この観点からは気泡追跡法の方が有利である. 気泡追跡法は, 各気泡の運動方程式を解いて気泡を追跡するラグランジュ法である. 気泡同士の衝突判定を行うので, 高ボイド率領域の分散力を自然に表現できる. 気液間相互作用を考慮して液相の運動方程式を解くものを Two-way カップリング, モデル等で与えるものを One-way カップリング⁽⁶⁾という. 本研究では後者を用いた. 液相速度には単相乱流の速度分布を与えた.

4. 結果および考察

4.1 静止管内の気泡流

以下では主に $J_G = 0.050$ m/s の結果について述べる. 図5に静止管($a = 0$)における気泡流の様子を例示する. 数 mm の気泡が多く, 大きい気泡でもいわゆるセミテイラー型に至るようなものを見受けられない. 管半径方向にはやや管中心に気泡が多い. 管軸方向には多少の疎密はあるものの, 大規模なクラスター化を伴うボイド波形成は生じていない.

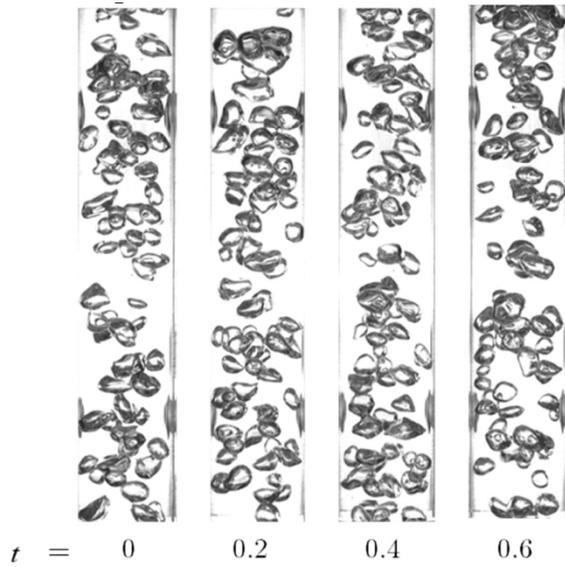


図5 振動のない状態の気泡流 ($a = 0$)

図6に $a = 0, 1 \text{ m/s}^2$ における気泡径分布を比較する。まず $a = 0$ では、モードは4.8 mm, 平均径は4.6 mmで、大小気泡側に対称性のよい分布である。気泡に作用する揚力の観点からは、この平均径は揚力係数が0となる気泡径に近い^{(7), (8)}。 $a = 1 \text{ m/s}^2$ でも分布の特徴はほぼ同じであるが、最頻値が小気泡側に移動し、 $a = 0$ に比べると対称性がやや崩れている。ただし平均径は4.5 mmで、それほど振動の影響を受けていない。

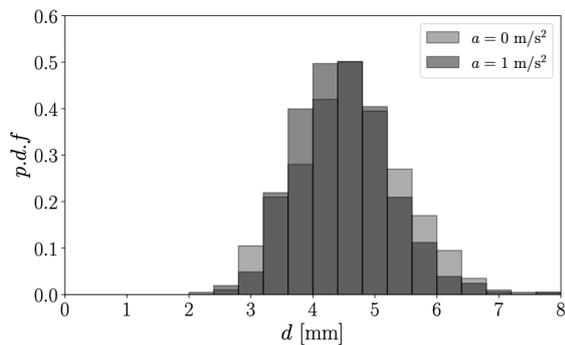


図6 気泡径分布の測定値

図7に気泡アスペクト比の頻度分布を示す。ここで、アスペクト比の定義は気泡の長軸を短軸で除したものとしている。 $a = 0$ において球形といえる気泡はほぼない。これは図6に示したように気泡径は2 mm以上であることから理解できる。振動が加わっても同様であり、振動により気泡が集中して衝突・反発が増加しても、過渡的な球形化はほぼ起こっていない。むしろ、振動が加わった場合の方が、アスペクト比分布は変形側にシフトしており、気泡径が振動している方が小さいことを考えると、振動は扁平化させる側に作用していることがわかる。

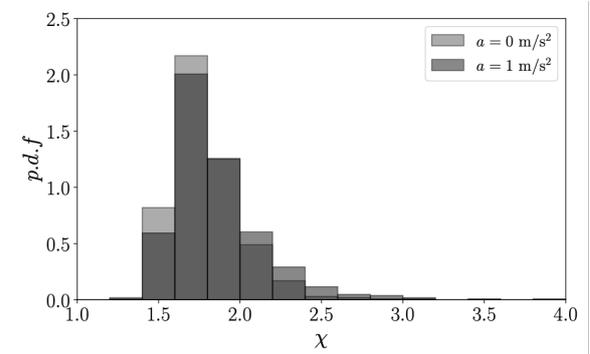


図7 気泡アスペクト比の測定値

図8に気泡アスペクト比を気泡ウェーバー数に対してプロットする。ウェーバー数の評価に必要な気泡の液相に対する相対速度は波動相似性に基づく標準的抗力モデル⁽⁹⁾で求めた。図7でも議論したように、振動の有無によってアスペクト比分布に顕著な差はなく、 chi-We プロットでも大きな差はない。ウェーバー数の増加にともない変形が大きくなる傾向はいずれの a においても同じである。アスペクト比が2.25を超えるデータも見られるものの、図7に示したようにその割合は相対的に少なく、ほとんどのデータは2.25以下のアスペクト比範囲に収まっている。これは汚染系気泡によく用いられる Wellek のアスペクト比モデルと、Hayashi らが清浄系気泡に対して提案したモデルの評価値の間に入っている。

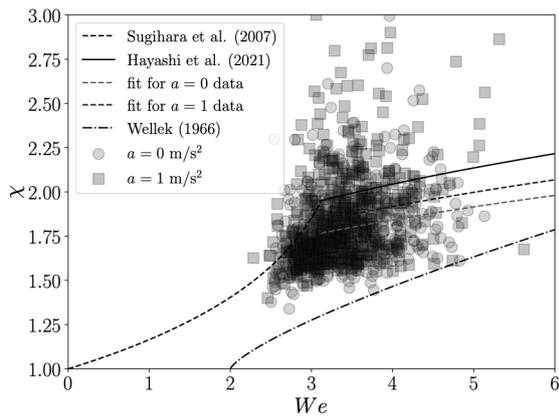


図8 気泡アスペクト比モデルとの比較

Hayashi らの形状モデルに修正係数を適用すると、アスペクト比データの平均値をよりよく表現できる。図9に修正係数を示す。修正係数に対しては、 a よりもボイド率の影響が明確であり、ボイド率の増加に対して修正係数の値は小さくなる、すなわち、気泡群の数密度が増加すると気泡が変形しにくくなる。

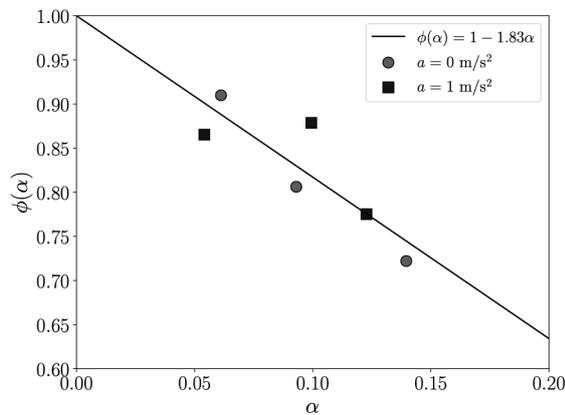


図9 気泡アスペクト比に対する群効果

図10に半径方向のボイド率分布を示す。管中心($r = 0$)のボイド率は0.14程度で、 r が増加するとやや低下するもののほぼ同程度のままであるが、 $r = 6$ mmにおいて若干増加する。さらに r が増加するとボイド率は急減している。平均気泡径が、揚力係数がおおむね0となる気泡径に近いことから r が小さい範囲でボイド率が平坦な分布になることが理解できる。また、平均気泡径とアスペクト比の関係から、 $r = 6$ mm以上では壁面側に近づける気泡が少なくなるため、ボイド率が壁面に向かって低下していく。

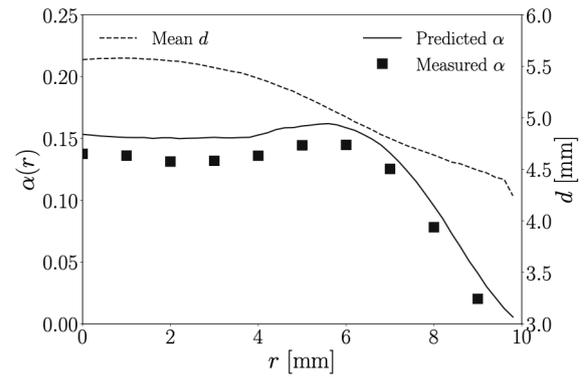


図10 加振のない場合のボイド率分布 ($a = 0$)

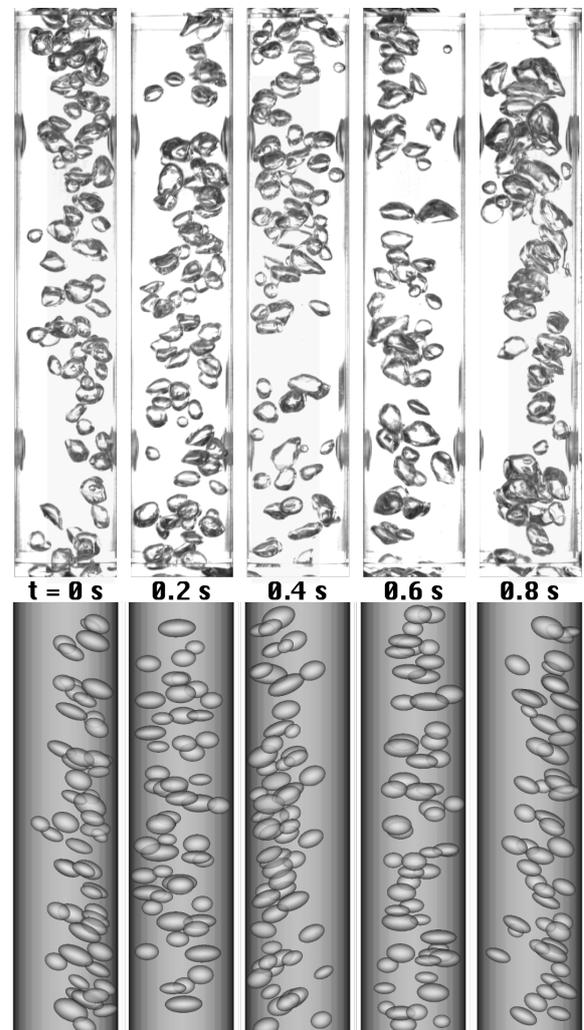


図11 加振状態の気泡流 (上段: 実験, 下段: シミュレーション)

実線で数値計算の結果を示す。計測値の傾向をよく再現できている。破線は計算で求めた各 r を通過する気泡径の時間平均値である。揚力の影響により管軸中心側に大きな気泡が多く分布していることがわかる。

図 11 に振動に伴う気泡流の揺動を観察した高速度ビデオ画像と、数値シミュレーションにより得た同条件での気泡流の様子を比較する。高速度ビデオ画像では、振動に伴う慣性力の影響で気泡が左右に揺動しており、偏っているときには管の片側に気泡、もう片側に液相がほとんど占めているような状態であり、気泡の断面内分布に及ぼす振動の影響が大きいことがわかる。数値シミュレーションでもその様子がよく再現できている。

図 12 にボイド率分布の計測値と計算結果の比較を示す。図 11 に示したように、気液相分布の振動に伴う偏りは大きいにもかかわらず、全時間平均値は $a = 0$ とそれほど変わらない。これは、各相が偏っている状態のボイド率を全て平均化すると偏り状態の情報が相殺されるためである。そこで、周期 T の前半と後半に分けて半周期の時間平均を求めたものを、実験では三角形のプロット、計算では破線で示す。半周期の平均値は全時間平均の分布と大きく異なっており、振動により相分布が大きな影響を受けていることが確認できる。また、数値シミュレーションはその影響をよく再現できている。

5. まとめ

本研究では、振動を伴う鉛直円管内気泡流に及ぼす慣性力の影響を実験的に明らかにするとともに、気泡追跡法によりその影響を再現することを目的とした。その結果、気泡径分布および気泡アスペクト比分布に及ぼす振動とボイド率の影響を明らかにして気泡形状モデルの形に整理するとともに、振動を伴う気泡流のボイド率分布の特性を把握し、また数値シミュレーションにより良好な予測が可能であることを明らかにした。

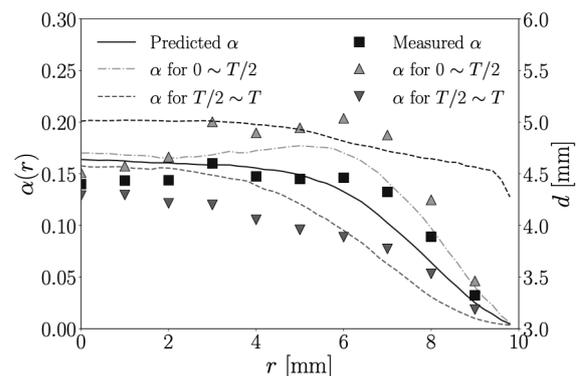


図 12 加振のある場合のボイド率分布 ($a = 1 \text{ m/s}^2$)

口頭発表、受賞等

- [1] 加藤大樹, 芳田直征, 林公祐, 栗本遼, 富山明男, 振動を伴う鉛直円管内の気液二相流動特性に関する研究, 混相流シンポジウム 2021, 2021 年 8 月.
- [2] K. Hayashi, H. Kato, N. Yoshida, R. Kurimoto, A. Tomiyama, Bubbly Flows in a Vertical Pipe with Horizontal Oscillation, The 4th International symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering (MMPE), 2022 年 9 月.

参考文献

- (1) Isshiki, Nuclear Eng. Design, 1966.
- (2) Ishida et al., Nuclear Eng. Design, 1990.
- (3) Ishida and Yoritsune, Nuclear Eng. Design, 2002.
- (4) Otsuji and Kurosawa, Nuclear Eng. Design, 1982.
- (5) Zun et al., Rev. Sci. Instrum, 66, 5055-5064, 1995.
- (6) Tamai and Tomiyama, Trans. JSME Ser. B, 70(692), 880-887, 2004.
- (7) Hayashi et al., Int. J. Multiphase Flow, 142, 103653, 2021.
- (8) Hayashi et al., Int. J. Multiphase Flow, 129, 103350, 2020.
- (9) Tomiyama et al., JSME Int. J. Ser. B, 41(2), 472-479, 1998.