電磁誘導によるボイド率計測*

Void Fraction Measurement by Using Electromagnetic Induction

桑 原 拓 也**
KUWAHARA Takuya

山 口 博 司***
YAMAGUCHI Hiroshi

Abstract This paper describes a new measuring technique of void fraction using a magnetic fluid. The proposed measurement utilizes the electromagnetic induction so that the measurement can be realized with simple experimental devices. The present study consists of two kinds of experiments; one is “static experiment (calibration test)” and another is “flow experiment (actual flow test)”. In the present study, the experiments have been performed with fully diluted magnetic fluid for the purpose of applying to the ordinary two-phase flows such as water-air two-phase flow. Results of the experiments have verified that the proposed measuring technique of void fraction is very effective to measure the void fraction in the two-phase flow by adding a small amount of the magnetic fluid to objective fluid.

Keywords: Void fraction, Magnetic fluid, Gas-liquid two-phase flow, Quick-closing valves

1. 緒 言

気液二相流の基礎パラメータの計測は流動解析やモデリング、実用において、非常に重要である。しかし、気液二相流の現象自身が複雑であるため、主要なパラメータの計測技術が不十分であるのが現状である。中でも気相の体積割合を表すボイド率は重要なパラメータである。これまでのボイド率測定方法[1]としては差圧法、締切法、触針法[2]、光ファイバプローブ法[3]、コンダクタンス法、X線を利用した方法などが挙げられる。中でも、締切法、触針法は比較的簡便に計測できるため、広く用いられている。一方、これらの計測方法にもいくつかの問題点が挙げられる[4]。例えば、締切法においては計測時に流路を遮断する必要があり連続的に計測できない。また、間欠性のある流れや高ボイド率領域では誤差が増大するなどの問題がある。さらに、触針法においては、気泡と接触させるセンサーを非常に細くしなけ

ればならないなどの短所を有する。以上のことから、比較的低コストで容易な計測、また連続的に計測が行なえ、且つ流路に特別な加工を施す必要の無い計測方法が望まれる。

磁性流体は磁場に感応する性質を持つ液体で多くの応用が提案され、研究が進められている[5]。中でも、磁性流体の気液二相流を利用した応用として、熱輸送装置やエネルギー変換装置が挙げられ[6-8]、これらの装置の中に存在するボイド率計測についての研究が進められている。本研究では、これらの磁性流体を用いた装置のみならず、空気-水のような通常の気液二相流にも応用できる新しいボイド率測定方法として、微量の磁性流体を、対象となる流体に添加し磁化を持たせ、電磁誘導によりボイド率を計測する方法を提案する。本研究では、実験により有用性および実用性を検証することを目的とする。

* 2005.11.12 受付

** 同志社大学大学院工学研究科博士課程後期課程 〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3

TEL: (0774)65-7749 FAX: (0774)65-7749 E-mail: ete1301@mail4.doshisha.ac.jp

*** 同志社大学工学部機械システム工学科

2. 計測原理・理論

一般に、磁束密度 B は以下のように表すことができる。

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 H は磁場の強さ、 M は磁場中に置かれた物質の磁化を表す。Fig.1 に本研究で提案したボイド率計測原理の模式図を示す。

Fig.1 Principle of measurement

励磁コイルにより発生した一様な交番磁場中に気液二相流が流れる流路が設置されている。気液二相流の気相が空気 (10^{-7} オーダー) のように磁化が無視できるほど小さい気体で、液相が気相と比べて比較的大きな磁化を有する場合、気液二相流を貫く磁束密度 B_{mf} は

$$B_{mf} = \mu_0 \{H + M_{mix}(\alpha)\} \quad (2)$$

と表される。ここで、 M_{mix} は気液二相状態での見かけの磁化を表し、気相の体積割合であるボイド率 α の関数となる。水など多くの液体は磁化が小さいものの、本研究では、液相が持っている流体力学特性に影響を与えない微量の磁性流体を液相に添加して液相に磁化を持たせる方法を提案する。この方法では比較的弱い磁場を用いて計測が行なえるため、コイル冷却も不要で装置が複雑にならない。Fig.1 のように、二次コイルを交番一様磁場中の流路上部および下部に設置した場合、二次コイルに発生する誘導起電力 V は Faraday の電磁誘導の法則より、

$$V = -n \frac{\partial}{\partial t} \iint_S [\mu_0 \{H + M_{mix}(\alpha)\} \cdot \hat{n}] \cdot dS \quad (3)$$

となる。ここで、 n は二次コイルの巻き数で、 S は二次コイルの内面積である。本計測では磁場 H は一定で、液相の磁化も一定であるので、二次コイルで発生する誘導起電力はボイド率 α のみ

の関数となる。言い換えれば、誘導起電力の値からボイド率を計測することができる。ここで、気液二相状態での見かけの磁化は、理論上、気液界面で発生する磁気分極が小さいため、次のように近似でき、誘導起電力とボイド率には線形関係が成り立つ。

$$M_{mix} = \left(1 - \alpha \frac{1 + (1 - \alpha)\chi_m}{(1 - N)\{1 + (1 - \alpha)\chi_m\} + N} \right) M_{mf} \\ \cong (1 - \alpha)M_{mf} \quad (4)$$

3. 実験および方法

3.1 添加磁性流体濃度の選定

本研究では、タイホー工業製水ベース磁性流体 W-40 を液相に磁化を持たせるための磁性流体として用いた。Dunouy 式表面張力測定器を用いて表面張力を計測し、磁性流体の体積濃度と表面張力の関係を調べた。その結果を Fig.2 に示す。結果より濃度 10 [vol%] 以下になると表面張力が増加し、さらに濃度 1 [vol%] 以下になると急激に増加することが読み取れる。濃度 1 [vol%] 以下においては線形近似をすることができ、濃度が 0.1 vol% 減少することにより表面張力が 1.7 [mN/m] 増加する。本研究では、濃度 0.1 [vol%] まで蒸留水により希釈した希釈磁性流体を供試流体として用いた。

Fig.2 Concentration and surface tension

磁性流体 W-40 および本研究で用いた濃度が 0.1 [vol%] の希釈磁性流体、蒸留水の物性を Table 1 に示す。なお、濃度が 0.1 [vol%] の希釈磁性流体の表面張力に関しては上述のように表面張力計測結果をもとに濃度 1 [vol%] 以下での線形近似により求めた。

Table 1 Properties of magnetic fluid, distilled water and diluted magnetic fluid of 0.1 [vol%] (at 296K)

	Magnetic Fluid (W-40)	Diluted Magnetic Fluid	Distilled Water
Density [10^3kg/m^3]	1.41	1.00	1.00
Viscosity [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]	18.85	1.011	1.008
Surface tension [mN/m]	38.9	70.4	72.1

希釈磁性流体と蒸留水を比較した場合、計測により、気液二相流の流動特性に影響を及ぼす密度、粘度、表面張力において、値がほぼ等しいことが確認された。計測は実験時と同じ室温 23°C (296K)で行なわれた。希釈磁性流体と蒸留水における表面張力の差が気泡体積に及ぼす影響を Laplace の式に基づいて計算した結果、 1.2×10^{-3} [%]と非常に小さく、ボイド率計測に与える影響を無視することができる。すなわち、ボイド率測定の対象となる母液に濃度が $0.1[\text{vol}\%]$ となるように磁性流体を添加することによりボイド率測定が可能となる。

3.2 実験装置

本研究は誘導起電力とボイド率の関係を調べる検定実験と実際の気液二相流において計測方法の妥当性を検証する流動実験から成り立つ。Fig.3 に検定実験で用いられた実験装置を示し、Fig.4 に流動実験で用いられた実験装置を示す。以下に実験装置を構成する主要な部分の詳細を述べる。

Fig.3 Experimental setup of calibration experiment

Fig.4 Experimental setup of flow experiment

(1) 励磁コイル (Helmholtz コイル)

比較的広範囲な一様磁場を発生することのできる Helmholtz コイルを励磁コイルとして用いた。Fig.5 にコイルの配置方法を示す。Fig.3 と Fig.4 に示されるように、励磁コイルは同仕様のものが計測部分と減電圧部分に用いた。Fig.6 に励磁コイルの仕様を示す。一様磁場領域における磁場の強さは $0.33[\text{mT}]$ であり、この値は一般の磁石 (約 $100[\text{mT}]$) に比べると非常に小さな値であり、さらに磁場が一様であることから、磁場が流れに及ぼす影響は無視できる。

Fig.5 Arrangement of coils

Fig.6 Specifications of coils

(2) 二次コイル

二次コイルは一樣磁場領域内に設置され、ボイド率の関数である誘導起電力を検出するために用いられた。二次コイルは検定実験および流動実験において共通のコイルが用いられた。二次コイルの配置を Fig.5 に示し、二次コイルの仕様を Fig.6 に示す。流路の上部および下部に設置されている二次コイルは互いに同符号（同じ向き）の起電力となるように直列に接続し、後述の減電圧コイルとは逆起電力（逆符号、逆向き）になるように直列に接続した。

(3) 減電圧コイル

減電圧コイルは、誘導起電力をコンピュータに取り込む A/D 変換器の最大入力が $\pm 10[\text{V}]$ であることを考慮して、ボイド率計測に影響しない外部磁場により発生する誘導起電力を差し消すために用いられ、計測部の二次コイルと逆起電力になるように接続し、減電圧部に設置する。すなわち、減電圧コイルにより、磁性流体による誘導起電力のみをデータとしてコンピュータに取得できる。

(4) 希釈磁性流体テストプラグ

検定実験に用いた希釈磁性流体テストプラグを Fig.7 に示す。パイプ内の断面ボイド率が 0～0.10 まで 0.10 刻みになるようにあらかじめ計量した希釈磁性流体が封入されている。Fig.3 に示すように、検定実験において磁性流体テストプラグは水平状態に設置し、ボイド率と誘導起電力の関係を求めた。なお、磁性流体テストプラグは内径 12 [mm]、長さ 300 [mm]の亚克力パイプである。

Fig.7 Magnetic fluid test plugs

(5) データ処理システム

二次コイルにより得られた誘導起電力は瞬時に A/D 変換器を通して、デジタルデータとしてコンピュータに送られ、コンピュータに保存される。サンプリング周波数は 10000[Hz]でサンプリング件数は 30000 である。すなわち、ボイド率計測は 3 秒間行なわれた。また、圧力や各相の流量も同様にデジタルデータとしてコンピュータに送られ保存される。A/D 変換器の仕様は最大入力が $\pm 10[\text{V}]$ で分解能が 16[bits]である。データ処理システムの時間応答性は $10^{-5}[\text{s}]$ である。なお、磁性流体そのものによる時間応答性は $10^{-6}[\text{s}]$ であり、これは Brown 緩和時間の値である。

(6) 空気注入システム

Fig.4 に示すように、磁性流体中に気泡を混入し、気液二相流を実現するための気泡混入部は、エアーコンプレッサー、オイルフィルター、定圧力調整弁、電子式ガス流量計、流量制御バルブにより構成されている。エアーコンプレッサーで発生した空気は定圧力調整弁によって制御され、圧力変動が無い空気が流路に供給される。本実験で使用した流量制御バルブには、出口側の圧力変動に対して、一定流量を安定に制御可能なバルブを使用した。また、流路に空気を注入するインジェクタには径が 0.1[mm]の 2 つの銅パイプが用いられた。2 つの銅パイプは、空気注入時にインジェクタ近傍での気泡の合体をできるだけ避けるため、空気注入部が 25[mm]ずれるように配置されている。

3.3 実験手順

本研究は、前述の通り、ボイド率と誘導起電力の関係を直接求めるための水平・静止状態での実験と実際の気液二相流におけるボイド率と誘導

起電力の関係を求める流動状態での実験とで構成されている。前者は検定実験と呼称され、ボイド率と誘導起電力の関係を示す検定線を作成するため実験である。後者は流動実験と呼称され、ボイド率を締切法により求め、同時に誘導起電力を測定することにより、流動状態におけるボイド率と誘導起電力の関係を求めるための実験である。検定実験で得られた検定線と流動実験で得られた実験データを比較検討することにより、本研究で提案されたボイド率測定方法の実用性を検証する。実験条件およびデータ処理方法是对应する両実験で同じである。各実験の詳細を以下に示す。

(1) 検定実験

検定実験はボイド率と誘導起電力の関係を調べ、流動実験に用いる検定線を作成するための実験であり、Fig.3 に示すように誘導起電力は一様磁場領域に磁性流体テストプラグを挿入することにより求められる。得られた誘導起電力はA/D変換器によりデジタル化されコンピュータに記録される。デジタル化された誘導起電力データを用いて実効値を求めた。本研究では、希釈磁性流体によって発生する誘導起電力、すなわち、得られた誘導起電力からボイド率1.0(空気のみ)の誘導起電力を差し引いた電圧を検出起電力 ΔV と呼称し、主要パラメータとして用いた。

$$\Delta V = V_{RMS}(\alpha=\alpha) - V_{RMS}(\alpha=1.0) \quad (5)$$

(2) 流動実験

Fig.4 に示す流動実験における実験装置において、希釈磁性流体はポンプにより流路を時計回りに循環する。流路内径は磁性流体テストプラグと同じ12[mm]である。空気インジェクタにより誘導起電力計測部において気液二相流を実現することができる。注入された気泡はセパレータタンクにより大気中に放出され、液相のみが再循環する。誘導起電力計測部の上部および下部には空気圧作動アクチュエータを装備したボール弁が設置されている。流動実験においてボイド率は、誘導起電力計測部の上部および下部に設置された2つのボール弁を同時に瞬間的に閉弁し、閉弁後に気相と液相が分離させ、液相の高さよりボイド率を算出する、いわゆる締切法により計測した。なお、ボール弁を締め切る際に管内の圧力変動を圧力変換器により観測した。圧力変動が比較的小さ

い場合に計測されたボイド率をデータとして採用したものの、さらに圧力変動によるボイド率の修正をBoyleの法則に基づいて算出された以下の式を用いて行なった。

$$\alpha_1 = \frac{P_2}{P_1} \alpha_2 \quad (6)$$

ここで、 α はボイド率、 P は圧力を表し、添え字の1は締切前、2は締切後を意味する。

4. 結果および考察

4.1 流動可視化実験

希釈磁性流体および蒸留水の物性計測により、両物性はほぼ同じ値であることを確認したものの、微量でも不純物を含む場合は流動に影響を及ぼす可能性が指摘されている。そこで、検定実験および流動実験に先立ち、特に希釈磁性流体と蒸留水における表面張力の差が流動様式に及ぼす影響を確認するために、同流動条件下で流動可視化実験を行った。Fig.8 に代表的な可視化実験結果(気泡流、スラグ流、チャーニー環状流)を示す。左側に蒸留水、右側に希釈磁性流体の可視化写真を示す。

流動可視化実験では、希釈磁性流体および蒸留水において流動および流動様式の異差は確認されなかった。そのため、0.1[vol%]の希釈磁性流体でのボイド率計測実験は妥当なものと判断した。

Fig.8 Results of visualization experiment

4.2 検定実験

検定実験で得られた結果をFig.9に示す。なお、励磁コイルの印加電流0.25[A]、周波数1000[Hz]、増幅器のゲイン500で実験を行った。Fig.9の結

果から検出起電力とボイド率との間には良好な線形関係が成り立つことが分かる。すなわち、検定実験の結果からも気泡の気液界面における磁気分極の影響は非常に小さいことが確認された。なお、本研究では、得られた実験データを線形近似した直線を検定線と呼称し、流動実験で得られた結果との比較に用いられた。

Fig.9 Results of calibration experiment

4.3 流動実験（締切法による検証）

流動実験は、検定実験と同じ、励磁コイルの印加電流 0.25[A]、周波数 1000[Hz]、増幅器のゲイン 500 で行われた。流動に関する実験条件を Table 2 に示す。流動条件は、流動実験でボイド率計測に用いられる締切法では間欠性のある流れや高ボイド率領域では誤差が大きいこと、さらに流動実験における気泡放出用のセパレータタンクでの気泡除去ならびにセパレータタンクでの空気の吸い込みを考慮して表中の条件とした。

Table 2 Flow conditions in flow experiment

Volumetric flux in liquid phase j_l [m/s]	Volumetric flux in gaseous phase j_g [m/s]
0	0.032–0.206
0.042	0.045–0.193

流動実験で得られた結果を Fig.10 および Fig.11 に示す。Fig.10 は液相流速 0[m/s]、Fig.11 は液相流速 0.042[m/s]における結果であり、図中には計測時に撮影された代表的な流動様式における可視化写真がデータ近傍に示されている。図中に示されている直線は検定実験により得られた検定線である。

Fig.10 Results of flow experiment ($j_l=0$ [m/s])

Fig.11 Results of flow experiment ($j_l=0.042$ [m/s])

Fig.10 ならびに Fig.11 において、データにバラつきがあるように見受けられるが、締切法そのものが誤差を含む方法であり複数回計測することが推奨されている。そこで、本研究ではまず、同じ検出起電力において、流動実験で得られたボイド率と検定線から求められるボイド率の差を求めた。検定線から求められたボイド率が流動実験で得られたボイド率より大きい場合は負の値をとるものとした。次に、ボイド率の差の平均を求めることにより、本研究で提案した計測方法の精度を評価した。その結果、Fig.10 において、差は 1.3 [%]（ボイド率 0.013）、Fig.11 において、差は 1.1 [%]（ボイド率 0.011）であった。これらの結果より、流動実験の結果は検定線と比較的良好一致を示していることが分かった。

4.4 流動実験（ドリフトフラックスモデルによる検証）

流動実験において、検出起電力により算出したボイド率と Zuber-Findlay[9]によるドリフトフラ

ックスモデルに基づくボイド率の比較を行なった。

ドリフトフラックスモデルに基づくボイド率[10]は、次式で記述される。

$$\alpha = \frac{\xi / \left\{ \xi + (1 - \xi) \rho_g / \rho_l \right\}}{C_0 + V_{Gj} / \left[\left\{ \xi / \rho_g + (1 - \xi) / \rho_l \right\} G \right]} \quad (7)$$

ここで、 ξ はクオリティ、 ρ は各相の密度、 C_0 は分布パラメータ、 G は気相と液相の合計の質量流量、 V_{Gj} は平均ドリフト速度である。分布パラメータ C_0 と平均ドリフト速度 V_{Gj} については気泡流およびスラグ流において以下の式により求めた。(気泡流)

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (8)$$

$$V_{Gj} = \sqrt{2} \left(\sigma g \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

(スラグ流)

$$C_0 = 1.2 \quad (10)$$

$$V_{Gj} = 0.35 \left(\sigma D \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

ここで、 σ は表面張力、 D は流路内径である。

液相流速 0.042[m/s]における結果を Fig.12 に示す。気泡流からスラグ流への遷移は数々の見解があるものの、一般的にボイド率 0.2-0.3 とされている。そこで、ボイド率 0.2 以下の場合は気泡流のパラメータを用いてドリフトフラックスモデルに基づくボイド率を算出し、0.3 以上ではスラグ流のパラメータを用いて算出した。なお、ボイド率 0.2-0.3 の領域を気泡流からスラグ流への遷移領域とし、検出起電力により算出したボイド率とドリフトフラックスモデルに基づくボイド率との差が小さい場合の流動様式パラメータを採用した。なお、実験では高ボイド率においてチャーン流に属する流動様式が確認されたものの、スラグ流とチャーン流の遷移境界の判断は難しいため、ドリフトフラックスモデルに基づくボイド率の算出においてはスラグ流として計算した。検出起電力により算出したボイド率とドリフトフラックスモデルに基づくボイド率との差を求め

た結果、気泡流域では最大 6.4[%]、スラグ流域では最大 9.2[%]であった。また、全領域での差の平均は 1.1[%]であった。

Fig.12 Comparison of void fraction

Fig.13 に検出起電力により算出したボイド率とドリフトフラックスモデルに基づくボイド率との差 1[%]刻みごとに出現するデータの割合を示したヒストグラムを示す。ヒストグラムより多くのデータは 5[%]以内に収まることが分かる。

Fig.13 Data appearance rate against to difference rate

本研究では、水-空気系の気液二相流を対象として水ベース磁性流体を用いたが、液相がオイル系液体である場合、オイルベース磁性流体を用いることにより本方法でボイド率の計測が行える。

なお、本研究のボイド率計測方法は、計測対象の流体と機械的に非接触で行なえるものである。従来の非接触型ボイド率計測方法として、主に差圧法、コンダクタンス法、X線法などが挙げられる。差圧法、コンダクタンス法は比較的低コストで計測を行なえるものの、流路に加工を施す必要がある。また、X線や中性子線を利用する方法で

はコストが高くなり、装置が大掛かりになり用途が限定される。これらの方法と比較して、本研究のボイド率計測方法は、低コストで容易な計測が行なえる。また、電磁誘導を用いて計測を行なうため、連続的に計測が行なえ、流路に加工を施す必要が無い。

4. 結 論

本研究により以下の結論が得られた。

1. 0.1[vol%]に希釈された磁性流体(W-40)の物性は蒸留水とほぼ同じであることが計測により確認された。また、流動可視化実験においても異差がないことが確認された。
2. 気液界面にて発生する磁気分極の影響は理論上、非常に小さく、気泡形状が気液二相状態の希釈磁性流体に及ぼす影響は無視できる。このことを考慮すると、気液二相状態の見かけの磁化の理論式より、ボイド率と検出起電力の関係は線形であることが示された。
3. ボイド率と検出起電力の関係を検証する検定実験からもボイド率と検出起電力の間には線形関係が成り立つことが確認された。
4. 本研究で提案されたボイド率計測方法の実用性を検証する流動において、検定実験より得られた検定線と流動実験結果の差が比較的小さいことが確認された。

以上より、対象となる液相に 0.1[vol%]の希釈磁性流体になるように微量の磁性流体を添加し、電磁誘導を利用することにより、一般的な流体の気液二相流のボイド率計測が可能であることが分かった。

謝 辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッションエネルギー変換システム」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

Nomenclature

B	: Magnetic flux density	[T]
ΔB	: Detected magnetic flux density	[T]
C_0	: Distribution parameter	[-]
D	: Inner diameter of flow pipe	[m]
G	: Mass flow rate	[kg/s]
H	: Magnetic field	[A/m]

M	: Magnetization	[A/m]
N	: Demagnetization factor	[-]
P	: Pressure	[Pa]
S	: Inner area of induction coil	[m ²]
V	: Voltage	[V]
ΔV	: Detected voltage	[V]
V_{RMS}	: Root mean square value of voltage	[V]
V_{Gj}	: Mean drift velocity	[m/s]
g	: Acceleration of gravity	[m/s ²]
j	: Volumetric flux of gaseous phase	[m/s]
n	: Winding turn of excitation coil	[-]

(Greek letters)

α	: Void fraction	[-]
ρ	: Density	[kg/m ³]
σ	: Surface tension	[N/m]
ξ	: Quality	[-]

(Subscripts)

g	: Gas phase
l	: Liquid phase
mf	: Magnetic fluid
T	: Total of liquid phase and gas phase

参考文献

- [1] 日本混相流学会編, 混相流ハンドブック, 朝倉書店, 88-97, (2004).
- [2] Sekoguchi, K., Takeishi, M., Hironaga, K. and Nishimura T., Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows, Springer, Berlin, (1984).
- [3] Sekoguchi, K., Takeishi, M., Kano, H., Hironaga, K. and Nishimura, T., Proceedings of 2nd Int. Symposium, Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, 1-5, (1984).
- [4] 混相流レクチャーシリーズ 第25回【基礎と応用】混相流の実験・計測技術の基礎, 日本混相流学会主催, 15-24, (2001).
- [5] Rosensweig, R.E., Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press, 131-176, (1985).
- [6] 石本 淳, 大久保雅章, 神山新一, 機論 B 61-581, 157-165, (1995).
- [7] Ishimoto, J., Kamiyama, S., JMMM 289, 260-263, (2005)
- [8] Shuchi, S., Mori, T. and Yamaguchi, H., IEEE Transaction on Magnetics 38, 3234-3236, (2002).
- [9] Zuber, N. and Findlay, J.A., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 87, 453-468, (1965).
- [10] 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社, 78-83, (1989).