

福岡工業大学 機関リポジトリ

FITREPO

Title	気泡流のボイド率測定に対する定電流法適用の検討
Author(s)	児玉 哉太, 江頭 竜
Citation	福岡工業大学総合研究機構研究所所報 第2巻 P35-P38
Issue Date	2020-2
URI	http://hdl.handle.net/11478/1527
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher

Fukuoka Institute of Technology

気泡流のボイド率測定に対する定電流法適用の検討

児玉 哉太 (大学院工学研究科知能機械工学専攻)

江頭 竜 (工学部知能機械工学科)

Consideration on Applicability of Constant Current Method to Measurement of Void Fraction in a Bubbly Flow

Kanata KODAMA (Department of Intelligent Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering)

Ryu EGASHIRA (Department of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

Abstract

The present study aims at considering applicability of the constant current method as the measurement method of void fraction in a bubbly flow through a Venturi nozzle, which can be used to generate fine bubbles recently. For the accurate measurement of void fraction using this method, it is essential to identify the cause of having the a negative value of void fraction. The experimental result of a single bubble through the nozzle showed that the void fraction becomes negative when the bubble contacts with one electrode and do not contact with the other electrode, whilst the void fraction correctly becomes positive when it contacts with the both electrodes or do not contact with the both.

Keywords : Void fraction, Constant current method, Bubbly flow, Sound velocity, Venturi tube,

1. 緒言

近年、ファインバブルは様々な産業分野でその効力を発揮し注目されている。ファインバブルの代表的な生成法の一つに、ベンチュリ管をノズルとして用いるベンチュリ式がある。このベンチュリ式は他の生成法に比べ構造が簡単であること、比較的大流量にも対応できること、噴射圧力や流量など流体力学的パラメータの調整により比較的容易に微細気泡の生成をコントロールすることができるといった特徴がある¹⁾。ベンチュリノズルはノズル内の流速を音速にすることで衝撃波を発生させることができるとされている。この衝撃波による急激な圧力上昇によって気泡を粉砕し、ファインバブルを生成することができる。気泡流中の音速はボイド率（全体積に占める気泡体積の割合）に依存して水単相、空気単相の音速よりもはるかに小さい（例えばボイド率 10%では音速は約 40m/s）ことはよく知られている。特に、水単相からボイド率をわずかに大きくすることで音速が急低下する。このことは、気泡流の場合には比較的低い流速で音速に達することを意味する。以上のことから、ベンチュリノズルを用いたファインバブル生成法では、ノズル内のボイド率が重要なパラメータとなる。

従来の研究¹⁻³⁾では、ノズル内気泡流の流動特性を明らかにするためにベンチュリノズル内の圧力分布とボイド率分布が測定されている。そこではボイド率の測定に定電流法が用いられているが、この手法では、本来正の値であるはずのボイド率が負の値をとる場合があるといった問題があ

り、その原因は未だ不明のままである。ベンチュリノズルによってファインバブルを効率的に生成するためには、ノズル内気泡流に対する理解が不可欠であり、そのためにはノズル内のボイド率を正しく測定する必要がある。そこで本研究では、ノズル内のボイド率を正確に測定する方法を検討する前段階として、ノズル内のボイド率の値が負になる原因を調べた。

2. 定電流法によるボイド率測定の原理

ボイド率は管内の気泡流を理解する上で欠かすことのできない物理量である。そのため、管内のボイド率の測定方法が研究されてきた。例えば村上らは気相と液相の電気伝導率や誘電率の違いを利用してボイド率を算出する電気式のボイド率測定法を提案した²⁾。電気式ボイド率測定法の一つである定電流法では、測定対象の流体に定電流を流し、流路中に設けられた計測電極で測定領域内の電位差を測定、それをボイド率に換算する。定電流法の最大のメリットは流体の流れを止めることなくボイド率を測定することができることである。

定電流法によるボイド率の測定装置を図 1 に示す。まず、測定領域を水単相で満たし、そのときの計測電極間の電圧 V_0 を測定する。次に測定領域内に気泡流を流入させ、そのときの電圧 V_m を測定する。通常、抵抗率は液体より気体の方が大きいため、水単相時の電圧 V_0 に比べ気泡を含む気泡流の電圧 V_m の方が大きくなる ($V_m > V_0$)、ボイド率 α は次のように表すことができる。

$$\alpha = \frac{V_m - V_0}{V_m} \quad (1)$$

式(1)は主に環状流の液膜厚さを測定する際に用いられてきた。そのため、分散した微細な気泡流に対して式(1)を用いるとボイド率の測定誤差が大きくなることが報告されている³⁾。上澤らによるとマクスウェルの理論を応用して導出した式を用いることで微細な気泡流におけるボイド率にも適用できると報告⁴⁾されており、本研究ではこの上澤らの以下の式を用いてボイド率を算出する。

$$\alpha = \frac{V_m - V_0}{V_m + 0.5V_0} \quad (2)$$

先に述べたように、通常、抵抗率は液体より気体の方が大きいため、水単相時の電圧に比べ気泡を含む気泡流の電圧の方が大きくなり ($V_m > V_0$)、このため、式(2)よりボイド率が負の値になることはない。逆に、ボイド率が負の値になる場合には、何らかの原因で、気泡流の場合の電圧が水単相の場合の電圧に比べ小さくなっている ($V_m < V_0$) ことが予想される。

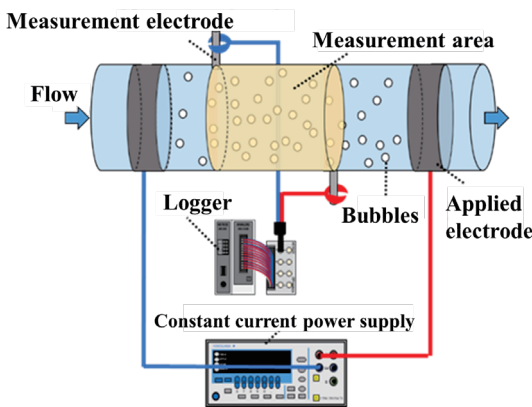


図1 定電流法の測定装置

fig.1. Measurement system of constant current method

3. 溶存酸素量が測定電圧に及ぼす影響

ベンチュリノズルでは、ある一定流速以上の流速で水を流すと、もともとは水中に気泡が含まれていないにもかかわらず、ノズルのど部下流域で気泡が発生する(キャビテーション)。キャビテーションは、水の圧力が局所的にその温度における飽和蒸気圧以下になることで蒸発が起き、気泡が生成されるとともに、水の圧力の低下により水中に溶け込んでいた空気が気泡内に析出する現象である。すなわち、キャビテーションが起きると、水中の溶存酸素量(以降 DO 値)が減少する。このような DO 値の変化が定電流法による電圧測定に何らかの影響を及ぼしている可能性があるため、実験により DO 値の影響を調べた。

実験には DO 値の高い水として水道水を、DO 値の低い水として脱気水を用いた。脱気水は、水道水をいったん沸騰させることで水中の溶存酸素量を減少させ、空気に触れないように自然冷却させて作製した。これら水道水と脱気水

のそれぞれに対して電流源(横河計測機製, GS200)より 0.03mA の一定電流を 60 分間印加し、そのときの電圧の時間変化をロガー(株式会社エンス, NR-500&HV-04)で記録した。ロガーのサンプリング周波数は 0.1Hz とした。測定開始時の DO 値は水道水 8.42mg/L, 脱気水 6.77mg/L であった。

図 2 に実験で得られた電圧の時間変化を示す。測定開始から 60 分後(測定終了時)の DO 値は水道水が 8.44mg/L, 脱気水が 6.85mg/L であった。図より、水道水と脱気水では DO 値に大きな差があるにもかかわらず電圧値はほぼ同じ値、同じ傾向となった。この結果より、ベンチュリノズルでのボイド率測定において水単相の流れと気泡流では DO 値に差があるにもかかわらず、この DO 値は電圧に影響を与えない、すなわち DO 値の差はボイド率が負の値をとる原因ではないことがわかった。

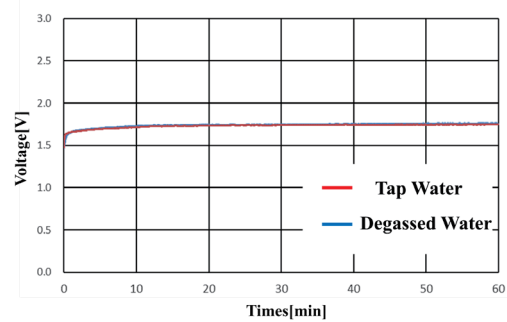


図2 水道水と脱気水の電圧測定

fig.2. Voltage change of tap water and degassed water

4. ストレートノズル内の単一気泡の電圧測定

ファインバブルをベンチュリノズルで生成する際には、ノズル内に微細な気泡が数多く存在している。このような流れでは、ノズル内は乱流になっており、微細な多数の気泡が複雑に運動(並進運動, 膨張収縮運動, 合体, 分裂, 変形)しているため、定電流法によるボイド率測定でボイド率が負になる原因を明らかにすることは困難である。そこで本研究ではまず、ノズル内を単一気泡が浮力でゆるやかに上昇する際のボイド率の変化を測定する実験を行う。

先に述べたように、定電流法では、空気の電気抵抗が水の電気抵抗よりも大きいため、気泡を含む気泡流の電圧 V_m は水の電圧 V_0 よりも高くなるはずであり、まず、このことを確認するための実験を行う。

図 3 に実験装置を示す。図 3 には次節で行う実験のベンチュリノズルが描かれているが、ここではまず現象を単純化するために、ノズルには流路半径が一定のストレートノズルを使用した。単一気泡が浮力で上昇しながらノズル内を通過するようにノズルを上向きに設置し、その下方に注射器(注入する空気量を一定にするために使用)から空気を注入するための空気吸入ノズルを取り付ける。ノズル内を水単相で満たし、ノズルを挟んで両端に取り付けた電極から一定電流を印加し、電圧をロガーで測定する。注射器を用いて空気を 1ml 注入することで単一の気泡を発生させ、この気泡がノズル内を通過する際の電圧の変化を測定し

た。実験条件は、印加電流 0.3mA, ロガーのサンプリング周波数 10Hz, 計測時間 3 秒間とした。

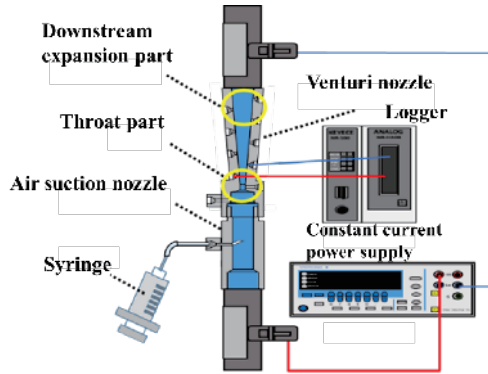


図 3 ベンチュリノズルを通過する単一気泡の電圧測定
fig.3. Voltage measurement for a single bubble in a Venturi nozzle

図 4 に実験で得られた電圧変化の測定結果を示す。図 4 より、約 1.3~1.8 秒の間で電圧が上昇しており、この間に気泡が電極間を通過していることが確認できる。電圧上昇の前後の電圧は水単相の電圧を表している。以上の結果より、ストレートノズル内を上昇する単一気泡のボイド率は定電流法を用いて測定可能であることがわかった。

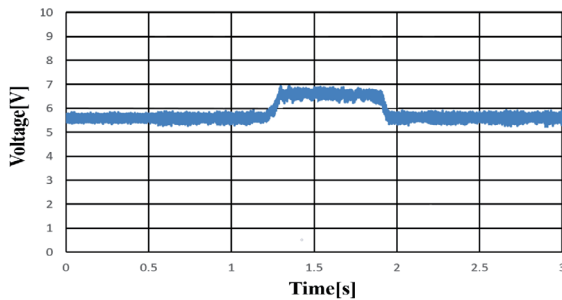


図 4 ストレートノズルを通過する単一気泡の電圧変化
fig.4 Voltage change of a single bubble in a straight nozzle

5. ベンチュリノズル内の単一気泡の電圧測定

次に、図 3 に示したように、前節のストレートノズルをベンチュリノズルに置き換えて実験を行った。ボイド率の測定箇所は、先行研究⁽¹⁾でボイド率が負の値を示した 2 点（のど部と下流側拡大部）とした。また同時に、ノズル内の気泡の挙動を確認するため、気泡の運動を高速カメラ（柵デジモ, VCC2500）で撮影し、電圧測定と同期させた。印加電流、ロガーのサンプリング周波数、計測時間は前節と同様である。

図 5 は単一気泡がベンチュリノズル内を上昇する際の電圧変化を、図 6 は測定開始から 1.2, 1.3, 1.4 秒後の画像を示す。図 5 と画像から、気泡がのど部に接近し、気泡が管断面を覆う（測定開始 1.0 秒後）と、のど部と下流側拡大部の電圧はともに減少し始めることがわかった。さらに、気

泡がのど部上流側のロガー端子を覆い（図 6(a)1.2s）、のど部下流側のロガー端子に触れる直前まで、のど部と下流側拡大部の電圧がともに下降し続ける。その後、気泡がのど部下流側のロガー端子に触れるとのど部の電圧は大きく上昇する。のど部のロガーの両端子が 1 つの気泡で満たされると（図 6(b)1.3s）のど部の電圧は高い値を示す。その後、気泡がのど部上流側のロガー端子から離れ、のど部下流側のロガー端子のみに接触しているとき（図 6(c)1.4s）のど部の電圧が急激に下降する。さらに、気泡がのど部下流側のロガー端子からも外れ、下流に向かうにつれてのど部の電圧が水単相時の電圧まで徐々に上昇する。図 5 の下流側拡大部での電圧は、気泡がのど部ロガー両端子からはずれたときに水単相時の電圧に戻り、気泡が下流側拡大部の測定範囲に入ると気泡による抵抗増加により電圧が上昇する。以上より、気泡が 2 つのロガー端子（上流側と下流側）を覆っているときは電圧が水単相時よりも上昇し、片方のロガー端子だけが気泡に触れているか、流路断面を気泡が覆うときに電圧が水単相時よりも下降することがわかった。

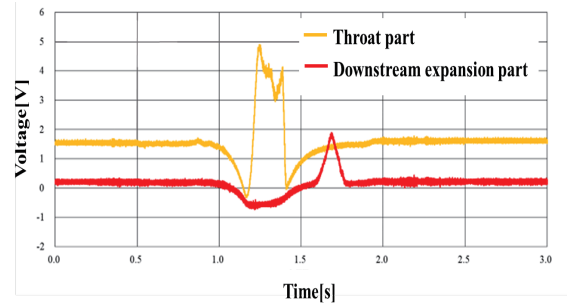


図 5 ベンチュリノズルを通過する単一気泡の電圧変化
fig.5. Voltage change of a single bubble in a Venturi nozzle

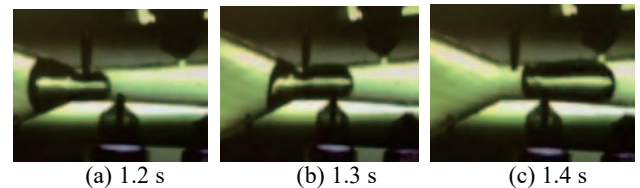


図.6 ベンチュリノズル内を通過する気泡の様子
fig.6. A bubble passing through a venturi nozzle

6. 端子への気泡の接触が測定電圧に与える影響

ベンチュリノズル内での単一気泡の実験から、気泡が片方の端子に触れるか、流路断面を気泡が覆うことで水単相の電圧よりも低い電圧をとることが確認された。そこで、このことをさらに確かめるために、図 7 に示すように、ストレートノズル内に閉じ込めた単一の気泡を左からロガー端子の正極→定電流源端子の正極という順に接触するように動かし、そのときの電圧変化を測定した。次に、ノズルを図 7 の状態からノズルの軸周りに 90° 回し、気泡が定電流源とロガーのどの端子にも触れないように気泡を動かしそのときの電圧変化を測定した。気泡がノズル内壁に沿っ

て移動するように、ノズルを斜めに傾けて気泡を動かした。測定範囲は図7に示してある。

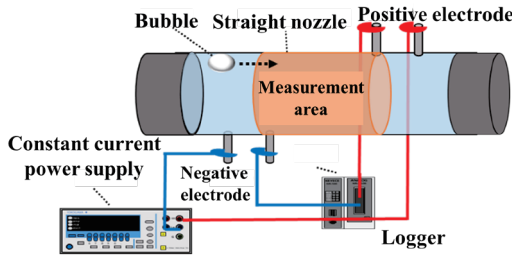


図7 気泡を端子に接触させる実験

fig.7. Experiment on contact of a bubble with electrodes

図8に気泡を端子に接触させたときの電圧変化を、図9には気泡が正極側のログー端子と定電流源端子を通過する際の様子を示す。図9(a)のように、気泡が測定範囲内にあるときは、気泡による抵抗増加のために電圧が上昇し、図9(b)のように、気泡がログー端子の正極に触れているとき(図8の約1.4s)に電圧が水単相時よりわずかに小さくなる。その後、定電流源端子とログー端子の間に気泡があるとき、水単相と同じ電圧まで上昇し、さらに図9(c)のように気泡が定電流源端子の正極に触れているとき(図8の約1.7s)、電圧は水単相時より大きく下降した。

図10は気泡が端子に触れないときの電圧変化を示す。このときの電圧は図8のように水単相時よりも下降することなく、気泡がログー端子間の測定範囲に移動したときの電圧上昇のみ確認された。以上の結果より、ログーの端子の片方、あるいは定電流源の端子の片方が気泡に接触することによって、電圧が水単相時よりも低くなることがわかった。なお、ベンチュリノズルでも同じ結果が得られた。

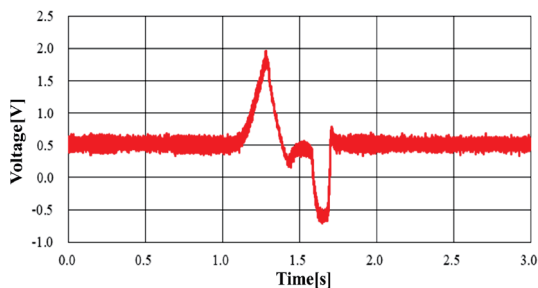
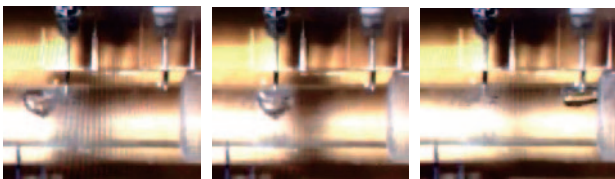


図8 気泡を端子に接触させた場合の電圧波形
fig.8. Voltage change in the case of contact



(a)1.2s (b)1.4s (c) 1.7s

図9 端子への気泡の接触の様子

fig.9. Contact of a bubble with electrodes

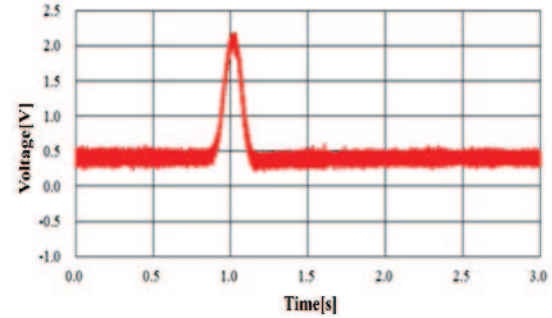


図10 気泡を端子に接触させない場合の電圧波形
fig.10. Voltage change in the case of no contact

7. 結言

本研究では、定電流法によるベンチュリノズル内の気泡流のボイド率測定において、ボイド率が負になる原因を明らかにするための実験を行った。その結果、水中の溶存酸素量はボイド率測定に影響を及ぼさないこと、ノズル内を通過する単一気泡がログー端子の片側に接触する場合、あるいは定電流源端子の片側と接触する場合、あるいはノズル断面を単一気泡が覆う場合に、電圧が水単相よりも低くなり、ボイド率が負になることを明らかにした。今後、気泡のログー端子への接触や、気泡の定電流源端子への接触に影響されない定電流法によるボイド率測定法を確立し、ベンチュリノズル内の正確なボイド率分布の測定を行う。

謝辞

本研究の一部は平成30年度福岡工業大学エレクトロニクス研究所からの助成によって行われました。ここに深く謝意を表します。

(令和元年10月18日受付)

文 献

- 1)山本翔太：ノズル内の気泡流の流動特性に関する実験的研究，福岡工業大学大学院修士論文，2018年2月。
- 2)村上光正，吉識忠継：定電流法による気泡流のボイド率測定，混相流，2巻，1号，1988年12月，pp.61-70。
- 3)上澤伸一郎，金子暁子，阿部豊：定電流法によるマイクロバブルを含む分散気泡流のボイド率計測，日本機械学会論文集B編，77巻，779号，2011年7月，pp.1493-1508。
- 4)S. Uesawa, A. Kaneko and Y. Abe : "Measurement of void fraction in dispersed bubbly flow containing micro-bubbles with the constant electric current method" Flow Measurement and Instrumentation, Vol.24, April 2012, pp.50-62.