

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 ~2008

課題番号：19560179

研究課題名 (和文) マイクロチューブ内気液二相スラグ流の圧力損失の測定

研究課題名 (英文) Measurement of Pressure Drop for Gas-Liquid Two-Phase Slug Flows in Micro-tubes

研究代表者

南川 久人 (MINAGAWA HISATO)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：60190691

研究成果の概要：管内径  $D = 75, 100$  及び  $320 \mu\text{m}$ 、外径  $375 \mu\text{m}$  の水平マイクロチューブに気液二相スラグ流を流動させ、その流動状況を観察し、ボイド率、摩擦圧力降下を測定した。デジタルマイクロスコープを用いた装置によってより精密に測定することに留意した。測定の結果、 $D = 75, 100 \mu\text{m}$  の場合ボイド率はほぼ体積流量比で表せること、摩擦圧力降下は液相体積流束と共に増加することなどが確認された。また  $D = 320 \mu\text{m}$  では、大気泡や液体スラグ長さが一定ではないが周期性を持つスラグ流が確認された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：(1)マイクロチューブ, (2)気液二相スラグ流, (3)摩擦圧力降下, (4)ボイド率

## 1. 研究開始当初の背景

(1)近年、ミリメートル・オーダーからマイクロメートル・オーダーのマイクロマシンや、半導体の微細加工技術で作られた微小部品から構成される電気機械システム(MEMS)等が大きな話題になり、各種機械・装置の矮小化技術がさらに発展している。これに伴い、各種流体技術もこれまでの通常サイズ管、すなわち管内径数ミリメートル程度より大きいサイズの管だけでなく、さらに小さいサイズの管内流動を取り扱う必要が生じてきた。気液二相流についても、1990 年ごろまでに熱交換器の小型化、その性能向上などを契機に、管内径が  $D = 1 \text{ mm}$  程度までの細管内を流動する気液二相流の流動機構を知ることが始まった[1]が、近年このほかにもマイクロチャ

ネル、マイクロヒートポンプ、マイクロリアクター、マイクロ化学分析システム、インクジェットプリンターノズルなど、枚挙にいとまないほどの微細管内二相流技術が開発され、その特性のさらなる把握が非常に重要になってきているし、管内径もさらに小さなものが用いられ始めている。しかし、 $D = 1 \text{ mm}$  より管内径が小さい管については、流動様式、ボイド率、圧力損失の重要巨視的三物理量についてさえ、まだ十分にデータが得られているとはいえず、比較的速やかな研究の進展が、今後の二相流技術を含んだマイクロマシン等の技術発展に不可欠であろう。管路内を流れる単相流の流体力学は通常レイノルズ数を基本となる無次元数とした相似則がよく用いられ、管内径などは少々の変化があつて

も、相似則の適用で問題なく流動特性を推定できる場合がほとんどである。しかし、空気単相流の場合  $D = 50 \mu\text{m}$  程度を下回ると、連続体近似の限界を超えてしまい、滑り流の取り扱いが必要となる[2]など、単相流でさえ、複雑な問題が生じてくる。気液二相流では当然ながらその複雑さは何倍にもなる。元来気液二相流では、相似則は単純でない。これは、密度や粘性といった物性値も二相両者のものを考慮する必要が生じ、加えて気液界面という要素が入ってくるためである。表面張力の影響が、粘性の影響とどちらが優位に働くかが、管内径によって異なる。だいたい  $D$  が数ミリメートルを境に表面張力の影響が無視できなくなり、それより小さい管内径では徐々に表面張力が支配的になってくることが知られている。表面張力の影響は、管内では気泡径と大きく関連する。その気泡径は、単に管内径だけでなく、気液両相の流量などにも影響を受けるので、結局、各相流体種、管内径、気相流量、液相流量などを系統的に変化させながら測定を行っていく必要がある。芹澤ら[3]によると、水平管内の気液二相流においては、管内径  $D = 100 \mu\text{m}$  を境に流動特性が大きく変わり、これより小さい管内径をマイクロチャネルと分類している。そこで、本研究でも  $D = 100 \mu\text{m}$  より小さい管内径を対象に考えることとする。また、円管（チューブ）のみを取り扱うので、用語「マイクロチューブ」を用いることとする。

(2) マイクロチューブ内の気液二相流の流れ場は、理論解析や数値シミュレーションで解くことは現時点では不可能であり、まだまだ系統的な実験データを必要とする。特に、上述の重要巨視的三物理量のなかでも、圧力損失のデータが不足していると考えている。この原因は、圧力損失の測定の困難さが最たるものである。流動様式とボイド率は、顕微鏡に高速度ビデオを組み合わせたシステムによって測定するのがほとんどである[3,4]が、近年それらがともに性能が良くなってきているため、流動様式とボイド率の測定精度には、大きな問題はないものと考えている。

これに対し、圧力損失の測定はというと、マイクロチューブ自体が  $D = 100 \mu\text{m}$  以下となれば、管に管壁に垂直な穴を2カ所あけて、その間の圧力差を直接測定するという、通常気液二相流に対して用いられている方法が、不可能となる。管内径の最大でも1/10程度より小さい穴 ( $D = 100 \mu\text{m}$  でも  $D = 10 \mu\text{m}$  以下) の穴あけ加工、穴からのチューブ接続がともに非常に困難であるからである。これまでこの領域の管で圧力損失を測っている Kawahara ら研究[4]においては、マイクロチューブ ( $D = 100 \mu\text{m}$ ) の両側に  $D = 250 \mu\text{m}$  の T-ジャンクションを設け、そこに接続したチューブからの圧力差を測定し、その値から

管路の急縮小部での損失、急拡大部での損失を推定したものを差し引くことによって、マイクロチューブ部分での圧力損失を推定している。しかし、この方法には問題があると考えている。まず、Kawahara ら [4]は気液二相流の急縮小部、急拡大部での圧力損失は、通常の管路で得られた、気液二相流の急縮小損失の式、加速による圧力変化の式で推定されている。急縮小部では、式中に現れる収縮係数も通常の管路での式が用いられている。さらに加速による圧力変化の式では時間平均ボイド率が必要であるが、これは体積流量比で代用されている。このように、多くの仮定を用いて、しかも通常の管路での考え方を適用して推算し、その結果、測定したい摩擦圧力損失に比べて、急縮小部、急拡大部での圧力損失があまり大きい比率とならなかったから、測定結果は正しいであろうとしている。確かにそれが正しいのかもしれないが、現時点ではそれを試すすべもなく、結果として測定された、マイクロチューブ部分での圧力損失も、正しいかどうかはわからないと言わざるを得ない。もっとも、他の測定法が提案されていない現在の状況では、これはやむを得ない話であり、今後の発展は、いかにして、このような仮定を用いない方法で、圧力損失が測定できるかにかかっている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、 $D = 75 \mu\text{m}$  と  $D = 100 \mu\text{m}$  のマイクロチューブ内に、気液二相スラグ流を流動させ、そのボイド率と圧力損失を計測した [5]。ここで圧力損失測定に用いた方法は、上記のものとは全く異なるものである。この程度の管内径となると、図1の写真に示すような、ほぼ左右対称の大気泡（別称：気体スラグ）が周期的に流れる「スラグ流」がよく見られる。芹澤ら[3]によると、気相体積流束が  $0.2 \sim 20 \text{ m/s}$ 、液相体積流束が  $0.1 \sim 20 \text{ m/s}$  程度の、非常に広い範囲でスラグ流が現れている。このスラグ流が安定して流動するとき、大気泡と液体スラグ部は周期的に流動し、隣り合う大気泡が合体することはほとんどない。申請者らは、この大気泡の体積に注目して、圧力損失を測定する方法を提案した。図1に示すように、一定の距離（実験では  $40\text{mm}$ ）を離して、流動の画像を撮影すると、上流側のものより下流側のものが体積が増大している。これは、管出口に近づくにつれて、静圧が小さくなるため膨張した結果である。この体積膨張率を用いれば、出口圧力がわかっているので、一定の距離間での圧力の変化が推算できる。管路はこの間一定断面積であるので、これがまさに、この区間での摩擦による圧力損失を表している。ただし、このとき用いた実験方法には問題がある。それは、用いた倒立顕微鏡と高速度ビデオシステムの組

み合わせでは、被写界深度の浅さ、シャープネス不足、視野角の狭さなどにより十分な測定精度を得られていなかった。しかも、視野角の狭さのため、たとえ鏡などを利用して2カ所を同時撮影できないので、2カ所の撮影にはどうしても時間間隔があいてしまい、この間、流れが全く変化していないという保証もなかった。また、40mmの移動は、管路を移動させることで行っていたが、その際、どうしても管路に曲げ応力や振動を与えることとなってしまう、測定の正確さを損ねる可能性がある。そのため、これまで取得した摩擦圧力損失データに十分な信頼性はなく、論文で公表するに至っていない。そこで、本研究では信頼性あるデータを得ることを第一の目的として研究を行う。

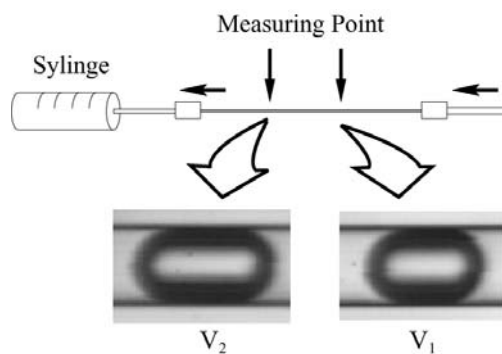


図1 圧力損失の測定原理

### 3. 研究の方法

(1)本研究では、デジタルマイクロスコープを中心に購入した。この製品は、十分な被写界深度とシャープネスを確保しながらも、高倍率が確保できる製品である。しかもシャッター速度が最大  $1/15000$  s と高速で撮影できる。しかも視野角が圧倒的に広い。したがって、ミラーシステムを利用して一定の距離を隔てた2カ所の画像を取得することができ、時間遅れを速度から算出すれば、大気泡を対応させることも可能となるので、測定精度は、格段に良くなるものと思われる。そこで、マイクロチューブ内気液二相スラグ流の、スラグ特性（大気泡長さや周期）、ボイド率、そして圧力損失の実験データを系統的に取得し、この流れの解明及び、この流れを伴う各種マイクロマシンの設計や運転に役立つ資料を得る。

(2)デジタルマイクロスコープを組み込む形で、マイクロチューブ実験流路系を新たに構築する。実験台の上に、堅固な板を置き、その上に実験装置を組み立てていく。気相にはコンプレッサーからの空気、液相には精製水（以下、水）を用いる。コンプレッサーからの圧縮空気を2系統に分け、それぞれに精密

減圧弁を設ける。そしてその先の片側は管内径を徐々に細めながら気液混合部へ、もう片側は水を貯めた容器に圧力をかける。圧力に押された水はやはり管内径を徐々に細めながら気液混合部へ向かい、空気と混合されて、マイクロチューブに入っていく、気液二相スラグ流を形成する。

以上の装置の大部分は、現在実験に用いているもの[5]と同様である。したがって、このような流動を実現することに関してのノウハウは、十分に得ている。しかし、今回新たに作成する装置は、現在のものより、より堅固なものとし、外乱による測定への影響を極力抑えられるものとした。

(3)気液混合部を改良する。気液混合部が流動自体にかなり影響を及ぼすとの見解もある[6]ので、混合部については既存の方式のほか、2~3方式を試作して、その違いを確認する必要がある。図2に示すのは、申請者らがこれまで使用してきた気液混合部である。右から左に流れており、試験部の管よりさらに管内径の小さい管から出てきた空気と、その管端周囲から流れ込む水が混合して、気液が試験部（マイクロチューブ）に流れ込む方式をとっている。

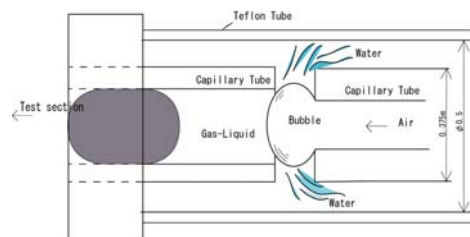


図2 これまで使用してきた気液混合部[5]

しかし、我々の見解では、マイクロチューブとT-ジャンクションの管内径比が与える影響は、ここまで大きいはずはなく、この比の違いが影響しているのは、流れの周期性ではないかと考えている。すなわち、混合部が十分大きい内容積を持っている場合、一種のバッファタンクとなり、流体、特に気相はこの中に一時溜まることできる。気相が急激な縮小部を通って気泡となってマイクロチューブに流れ込むには、表面張力による反力にうち勝つ必要があるので、水が優先的に入ると考える。したがってこの間、液相はマイクロチューブに流れ込み、ほぼ単相流に近い、非常にボイド率の低い流れを作る。やがて、気相はこれ以上溜まれなくなると、反力と圧縮性の影響で液相より高压となっており、表面張力による反力にうち勝った瞬間に一気にマイクロチューブに流れ込む。申請者らの観察でも、これが起こるときには気相が通過するのはほんの一瞬で、その全体積を一気に流れ去る。したがって、各相流量等を時間平

均で測定した値とは大きな違いが入り込む懸念がある。このようなことが原因となって、彼らの結論、すなわち混合部がボイド率と摩擦圧力損失に大きな影響を与えるという結果が出ている可能性があると考えている。

#### 4. 研究成果

(1)管内径  $D = 75 \mu\text{m}$  のフューズド・シリカチューブ内に定常的な気液二相スラグ流を作り、チューブ内の流れを撮影、観察を行うことにより、その傾向を明らかにした。そして、撮影された画像から気泡速度、気泡体積、ボイド率、圧力損失などの諸量を求め、従来の研究例との比較を行った。

実験手順について記す。コンプレッサーで押し出された空気と水を混合し、内径  $D = 75$  および  $100 \mu\text{m}$ 、外径  $375 \mu\text{m}$  のマイクロチューブに気液二相スラグ流を流動させる。試験部では、光の屈折の影響を軽減するため、カバーガラスを被せ、間を水で満たす。画像をモニターによって確認し、高速度カメラによる撮影を行う。本実験では、画像記録を 18000 frame/s で行い、30 frame/s で録画した。約 40mm 離れた上流側と下流側の二箇所測定し、気相体積流束と移動速度の比からボイド率を、気泡体積の変化から圧力損失を求めた。実験装置の概要を図3に示す。本実験では、コンプレッサーで空気と水を押し出し、レギュレーターで圧力を調節して試験部に送り出す。また、試験部までの経路にバルブを取り付け、抵抗をかけることによって気相と液相を臨界速度にし、スラグ流の安定を図った。マイクロチューブの出口部分には、シリンジを取り付け、全体積流束の測定に用いた。

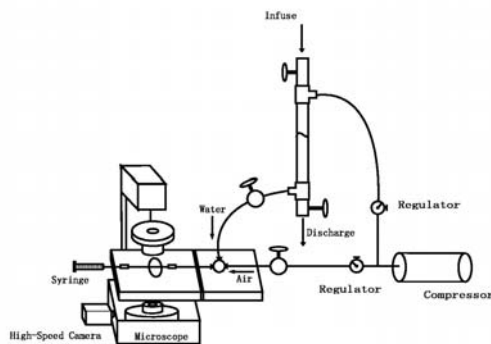


図3 実験装置概要

なお、この時点ではデジタルマイクロスコープを使用していないが、この実験に対してこれは購入が間に合わなかったことと、今回の流れは、いかに安定した流れを得ることができるかということに重点を置いていたためである。したがって、観察は従来からある倒立型顕微鏡を介して行っている。

管内径  $D = 100 \mu\text{m}$  でのボイド率と体積流

量比の関係を図4に示す。多少ばらつきはあるが、45°の線上に並ぶデータが多い。しかし、ボイド率 $>0.6$ 程度では、ボイド率 $<$ 体積流量比となるデータが多く確認できる。また、図中に示した従来の研究例とはやや異なった結果となった。

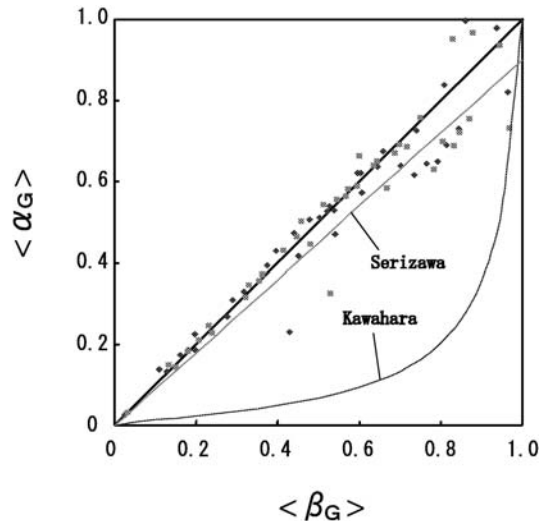


図4 体積流量比とボイド率の関係 ( $D = 100 \mu\text{m}$ )

次に、気相の平均速度 (= 気相体積流束/ボイド率) と全体積流束との関係を図5に示す。横軸は全体積流束で、気相体積流束と液相体積流束をたし合わせたものである。また、縦軸は、気相の平均速度を示す。全体積流束  $>0.5 \text{ m/s}$  より気相の平均速度  $>$  全体積流束となるデータが多く見られ、スリップの発生が確認できる。なお、図中に示した  $D = 75 \mu\text{m}$  のデータと  $D = 100 \mu\text{m}$  のデータは、ほぼ同様の傾向と考えられる。

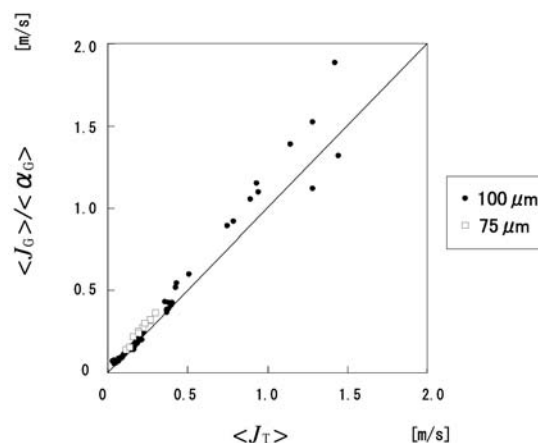


図5 気相平均速度と全体積流束の関係

(2)続いて、同じ実験から得られた、摩擦圧力降下の測定結果について示す。図6は、異なる範囲の気相体積流束に対する液相体積流

束と単位長さ当たりの摩擦圧力降下をプロットしたものである。

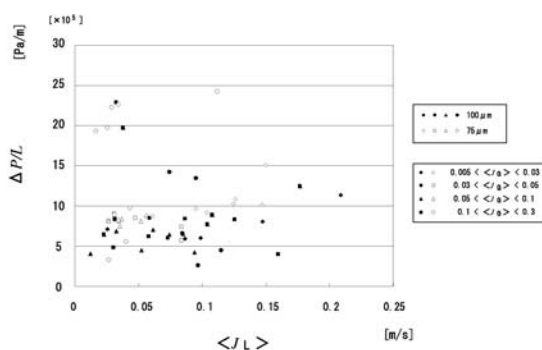


図6 摩擦圧力降下

この結果から、一部のデータを除いて、液相体積流速が大きくなるにつれて、圧力損失は大きくなることがわかる。また、 $D = 75 \mu\text{m}$  のデータと  $D = 100 \mu\text{m}$  のデータを比較すると、 $D = 75 \mu\text{m}$  のデータの方がやや圧力損失が大きい傾向にあることがわかる。

(3)  $D = 100 \mu\text{m}$  の場合の流りの様子を図7に示す。デジタルマイクロスコープで撮影した画像である。

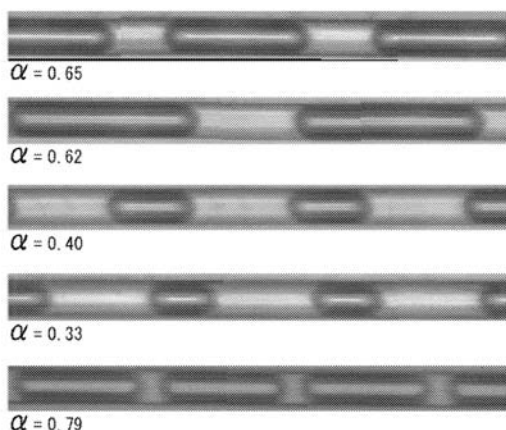
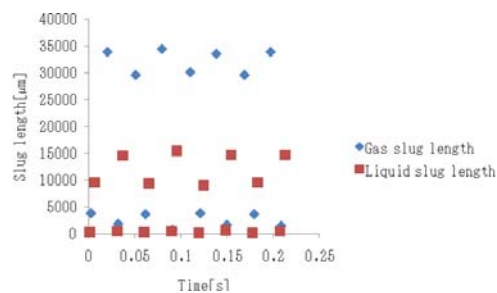


図7 流りの様子

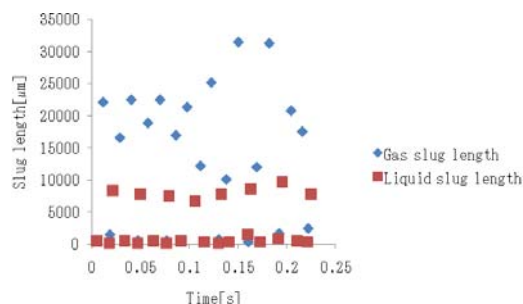
どの流れも典型的なスラグ流である。流れは左から右に進んでおり、楕円体のように見えている部分が大気泡、より透明な部分が液体スラグ部である。 $\alpha$ はボイド率を表している。ボイド率が大きいことと、大気泡の長さは直接関係しないことが確認でき、大気泡が大部分を占める流れは必然的にボイド率が大きい。

(4)最後に、管内径が  $320 \mu\text{m}$  のチューブ内を流動する気液二相スラグ流での実験結果を示す。この内径となると、従来  $D = 75 \mu\text{m}$  および  $D = 100 \mu\text{m}$  の場合のような同じ長さを持つ大気泡が連続的に流動するスラグ流は

見られなくなり、順次異なる長さの大気泡と液体スラグが流動する、しかし、その挙動が全くランダムかというとはそうでない場合の方が多く、周期性を持つ場合の方が多かった。そこで、代表的な場合について、大気泡長さと液体スラグ長さを連続的に測定し、それを時刻に対して並べてみた。図8(a)~(b)に同じ流量条件での時系列スラグ長さのグラフ例を示す。



(a)



(b)

図8 大気泡、液体スラグ長さの時系列変化

図8の(a)では、非常に短い液体スラグが来た次には、4mm程度の気泡、次に10mm程度の液体スラグが来て、そのあとに約35mmの長大な気泡が続く。さらに再び非常に短い液体スラグが来て、このサイクルを繰り返している。しかしよく見ると、次の気泡長さは2mm程度と、先程の4mmより短く、次の液体スラグは15mm程度と先程の10mmより長く、そのあとの長大な気泡も、35mmより少し短く、30mm程度である。この2つのサイクルを周期約0.06sの大きな1つのサイクルと見なしたとき、再現性の高い繰り返しとなっている。これを模式的に示したのが図9である。

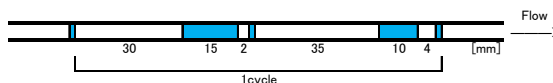


図9 図8(a)の流動パターン

しかし、(b)では、非常に短い液体スラグが来た次には、非常に短い気泡、次に10mm程



度の液体スラグが来て、そのあとに長大な気泡が続く。さらに再び非常に短い液体スラグが来て、このサイクルを繰り返している。しかし、(a)とは違って、長大な気泡の大きさは一定せず、やや乱れた流れになっている。ただし、非常に短い液体スラグ、非常に短い気泡、10mm程度の液体スラグに関しては、再現性のある繰り返しになっている。このように、 $D=320\ \mu\text{m}$ では、 $D=75\ \mu\text{m}$ および $D=100\ \mu\text{m}$ の場合と大きく異なるスラグ流動となった。

#### 参考文献

- [1]深野・ほか2名, 機論(B), 56-528, 2318-2326, (1990).
- [2]荒木・ほか4名, 機械学会関西支部第74期定時総会講演会, 7-15-16, (2000).
- [3]芹澤・ほか2名, 日本混相流学会年会講演会講演論文集, 137-138, (2004).
- [4]Kawahara, A. et al., Int. J. Multiphase Flow, 28, 1411-1435, (2002).
- [5]南川・ほか, 日本混相流学会年会講演会講演論文集, 9-10, (2005).
- [6]川原・ほか2名, 日本混相流学会年会講演会講演論文集, 17-18, (2005).
- [7]Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., Chem. Engng. Progress, 45, 39-48, (1949).
- [8]Chisholm, D. and Laird, A.D.K., Trans. ASME, 80-2, 276-286, (1958).

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

安岡彰一、南川久人、マイクロチューブ内気液二相スラグ流のボイド率の測定(管内径  $100\ \mu\text{m}$ の場合), 日本機械学会関西支部第83期定時総会講演会, 2008.3.14, 大阪大学豊中キャンパス.

学会発表予定の

南川久人、マイクロバブルの大深度をもつ水域の水質浄化と流体計測への応用, 日本混相流学会混相流レクチャーシリーズ35、大阪市立大学(2009.6.5 予定). は、豚インフルエンザのため、延期となりました。

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

南川久人 (MINAGAWA HISATO)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：60190691

(2)研究分担者

安田孝宏 (YASUDA TAKAHIRO)

滋賀県立大学・工学部・助教

研究者番号：60347432