

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究 B

研究期間：2011～2012

課題番号：23760194

研究課題名（和文）MEMS 技術を用いたマイクロチャネル内沸騰流の圧力分布と気泡動的挙動の同時計測

研究課題名（英文）Pressure measurement and bubble behavior of flow boiling in a microchannel using MEMS technique

研究代表者

丹下 学（TANGE Manabu）

芝浦工業大学・工学部・助教

研究者番号：70549584

研究成果の概要（和文）：本研究は、マイクロチャネル内部の沸騰気泡の充満と圧力損失の増大を背景とし、気泡の動的挙動が圧力損失に与える影響を詳細に解明することを目的として実験的研究を行った。内部に多数の微細な圧力センサを持つマイクロチャネル製作し、流れ方向の圧力分布およびその時間的变化を計測した。単相流における圧力損失実験は理論解とよい一致を示し、気液二相流実験においては、高速度カメラを用い局所的な圧力勾配と気泡の動的挙動との間に相関を見出すことができた。

研究成果の概要（英文）：

This research aims to reveal the relation between boiling bubble behavior and pressure drop in a microchannel. We made microchannels with tiny pressure sensors. Pressure drops in single phase flow agree with theoretical value. Pressure drops and bubble behavior in two phase flow show relations between bubble shape and pressure.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：沸騰熱伝達・MEMS・マイクロチャネル

1. 研究開始当初の背景

電子素子冷却・原子炉の緊急冷却・小型の熱交換器など、狭隘路における流動沸騰は発生した蒸気泡による流路の閉塞と、それに伴う圧力損失の増大が問題となる。特にマイクロチャネルでは気泡の大きさ（～キャピラリ長さ）に比べて流路幅が小さく、流路方向に伸びた気泡が大きな圧力損失と気泡胴体部でのドライアウト（焼損）を引き起こすことが知られている。Bowers らは、複数の並行マイクロチャネルにおける流動沸騰実験を行い、高熱流束域での圧力損失の急増を報告している。研究代表者らも高サブクール沸騰のマイクロチャネル内

の全体の圧力の計測に成功し、気泡の発生によって圧力損失が増加していることを確認した。これらの研究のように、チャネル入口と出口の圧力差を計測することでマイクロチャネル全体での圧力損失を求める研究は多いが、流動沸騰では単相流のように流路方向に一定の圧力勾配を持っているとは考えられず、気泡の形状とその時間変化によって局所的に変動する圧力勾配を積分した値として圧力損失を計測しているに過ぎない（図 1）。しかし、内部の気泡状態と圧力損失との関係は、流動パターンや気泡の充満具合など、定性的な理解にとどまり、チャネル内部での局所的な気泡の挙動と圧力降下を定量的に結びつける研究は少ない。

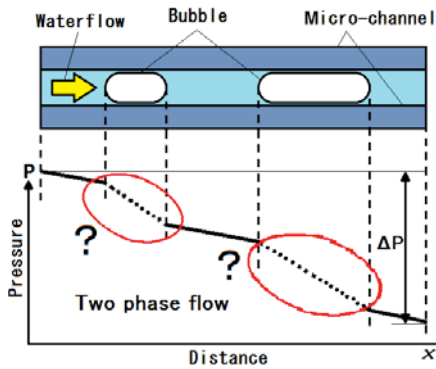


図 1：マイクロチャンネル内圧力分布の模式図

近年のMEMS加工技術の発展によって、マイクロチャンネル内に極小のバルブやポンプを加工することが可能となり、発熱量に応じた局所的な冷却能力制御の可能性が示され、マイクロチャンネル内部の気泡挙動と圧力損失との関係について本質的な理解が期待されている。Barberらは、 $727\mu\text{m}$ の水力直径をもつマイクロチャンネル内での流動沸騰において、気泡の観察と同時にチャンネル両端間の圧力損失を計測し、気泡の成長と圧力増加の関係を定性的に議論している。また、Kohlらは、チャンネル内の複数個所で時間平均圧力を測定し、单相流の管摩擦係数を求めている。

2. 研究の目的

本研究課題の目的はマイクロチャンネル内の気泡の閉塞が圧力降下を与える影響を調べるものである。流動沸騰系において計測の難しかった物理量を取り出す試みである。マイクロチャンネルの作成や圧力損失の計測にMEMS技術を用いているだけでなく、圧力分布の時空間的变化と気泡の観察を同期して行うことで平均化されることの多いマイクロチャンネル内圧力損失計測の研究に時間的・空間的な視点を取り入れるものとして位置づけられる(図2)。

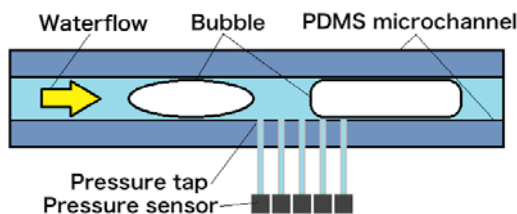


図 2：マイクロチャンネル内圧力分布計測

3. 研究の方法

(1) マイクロチャンネルの作成

はじめに、実験に用いるマイクロチャンネルを作成した。チャンネルの底面にはシリコンウェハもしくはガラス板を用い、流れ方向に複数の圧力センサを配置した。

高速度カメラによる気泡の観察を可能にするため、チャンネルには透明度の高いPDMS樹脂を用いた。フォトリソグラフィによってSU-8レジストをチャンネル形状に成型し、それにPDMSを押しつけることでチャンネル形状が転写され、凹んだ部分がマイクロチャンネルとして機能する。チャンネルサイズは、気泡の充満が起きる程度に小さく、気泡端部の曲率半径が小さくなりすぎず圧力センサの分解能が確保できるサイズとして、500ミクロン角を採用した(図3、4)。

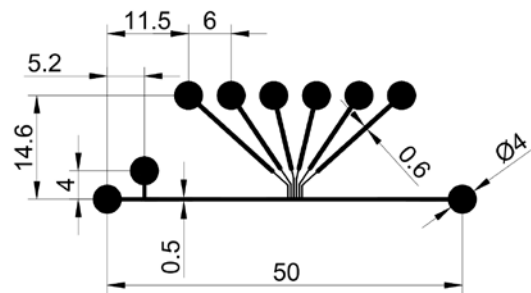


図 3：マイクロチャンネルの形状

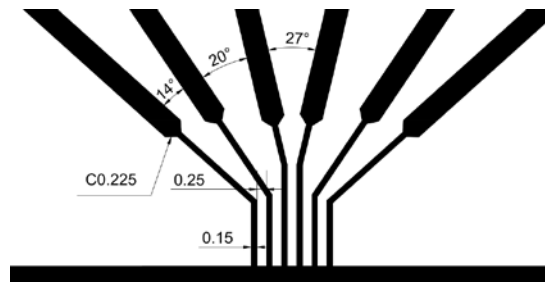


図 4：圧力計測部の詳細

(2) 圧力計測部の作成

圧力計測には、シリコンウェハの異方性エッチングを用いたダイアフラム形成による微小圧力センサの組み込みを検討し、圧力センサの作成、変形の確認まで行ったが、MEMS加工施設の継続的利用ができなくなったことから、市販のMEMS圧力センサを用い、圧力計測部の空間が大容量の圧力センサに比べ、時定数の小さい計測が可能な実験系を構築した。(図5)

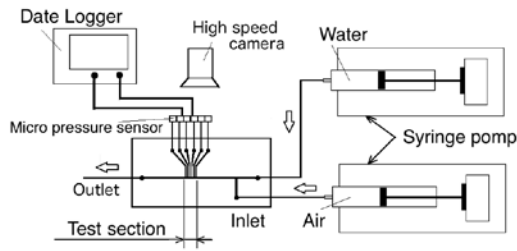


図 5 : 実験系

(3) 圧力分布および気泡動的挙動の同時計測実験 (水-空気系)

上記(1)、(2)で作製したマイクロチャネルを用い圧力分布の測定を行った。まず、圧力計のキャリブレーションとして、差圧系を用いた静水圧や单相ボアズユ流の実験を行った。二相流実験においては、顕微鏡に高速カメラを接続することで観察を行う。二つのシリンジポンプからそれぞれ、水、空気をチャネル内に流入させ、任意の流量比で実験を行うことができた。圧力センサによって流れ方向の圧力分布およびその時間的変化を計測し、高速カメラによって撮影された気泡の動的挙動との比較を行った。

4. 研究成果

内部に多数の微細な圧力センサを持つマイクロチャネル製作した。具体的にはフォトリソグラフィ技術を用いて PDMS 樹脂製の 0.5mm 角の断面を持つ矩形チャネルを制作し、流路中央部に 0.25mm 間隔で 6 つの瞬時局所の圧力計測が可能な圧力センサを設置した (図 6)。

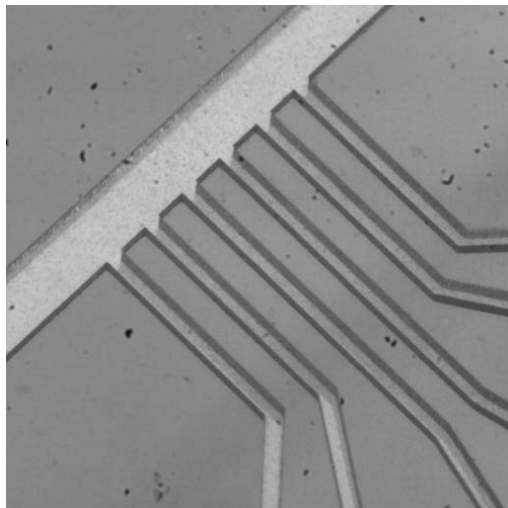


図 6 : マイクロチャネル (圧力計測部拡大)

单相流における圧力損失実験は理論解と

よい一致を示し、定常状態における圧力計測の妥当性を確認することができた。(図 7)

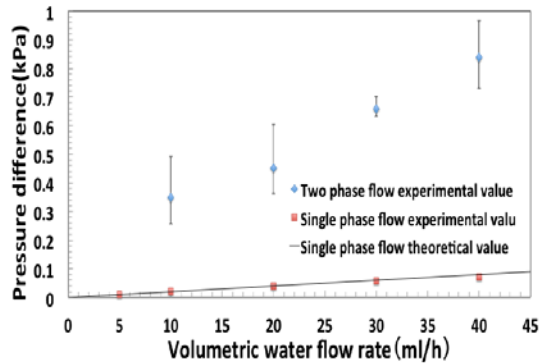


図 7 : 圧力損失実験結果

また、図 7 に示すように気液二相流実験においては、同流量の单相流に比べ圧力損失の増大が計測され、既存の研究と矛盾のない結果が得られた。

高速カメラを用いた気泡挙動及び形状変化の観察と圧力計測の時間変化を比較することで、局所的な圧力勾配と気泡の動的挙動との間に相関を見出すことができた。具体的には、気泡の後流における圧力増大が大きく閉塞空間で気泡を押し流すために大きな圧力損失が発生し、気泡をすり抜ける液体による管摩擦が大きいことが実験的に確認された (図 8)。図 9 の写真は、450ms 時点での気泡の様子を示し、気泡が圧力計測点を通じた瞬間にそこでの圧力が増加していることが図 8 から見て取れる。

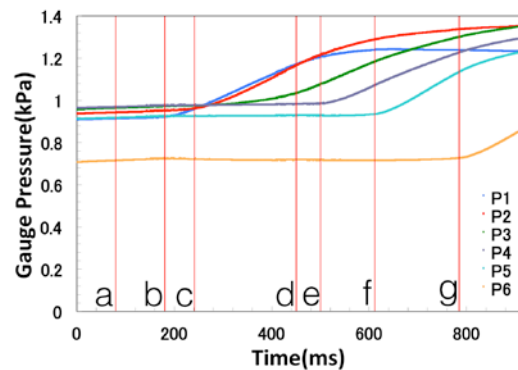


図 8 : 圧力分布計測実験結果

今後は、改良によって圧力計測部の温度管理 (冷却) が可能な実験系を構築し、マイクロチャネル内沸騰二相流の圧力損失計測実験および、高速カメラ画像と瞬時局所圧力計測値との比較による圧力損失増大メカニズムの解明を行っていく予定である。

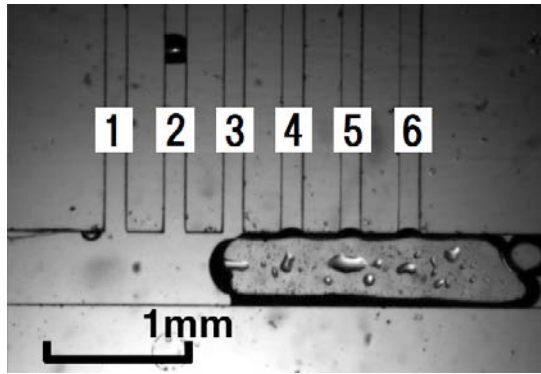


図9：気泡の様子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計0件)

(沸騰に関する研究を追加し、ISFVにて発表予定)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丹下 学 (TANGE Manabu)

芝浦工業大学・工学部・助教

研究者番号：70549584