



半円ミニチャネル内沸騰二相流の熱流動特性に関する研究

久保, 洋平

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2022-09-25

(Date of Publication)

2024-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8458号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100477884>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 久保 洋平 _____

専 攻 _____ 機械工学 _____

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

半円ミニチャンネル内沸騰二相流の熱流動特性に関する研究 _____

指導教員 _____ 浅野 等 教授 _____

(注) 2, 000 字~4, 000 字でまとめること。

(氏名：久保 洋平 NO. 1)

需要が拡大すると予想されている天然ガス、アンモニアおよび水素向けの熱交換器は、高耐久性、高耐食性、高性能およびコンパクト性が要求されている。これらの要件を満たす熱交換器として、拡散接合型熱交換器 (Printed Circuit Heat Exchanger: PCHE) が注目されている。天然ガス、アンモニアおよび水素向けのインフラコストが低減できれば、気候変動抑制に貢献することになる。さらなるコンパクト化および高性能化による設備エンジニアリング費用の低減、熱交換器使用素材の削減およびポンプ動力の削減が期待される。そこで、本研究成果の適用対象を気化器とし、気化器向けの PCHE のコンパクト化および高性能化のための気化器設計精度向上を目指している。

PCHE を気化器として適用する場合、作動流体は PCHE 内で沸騰二相流を形成する。化学エッチングにより加工された PCHE の流路は、深さ 1 mm 以下となり、断面形状が半円となる。さらにマスクのデザインにより直線以外の流路形状の製作が可能である。沸騰二相流は、流体の物性値、流路断面形状および水力等価直径などの影響を受ける複雑な現象であることから、その熱流動特性への影響を明らかにする必要がある。特に、流路径が 1 mm 以下であることから、作動流体の表面張力の影響が顕れ、水力等価直径数 mm 以上の円形または矩形流路内の沸騰二相流の熱流動特性とは異なる傾向を示すと考えられる。ミニチャネル内気液二相流や沸騰熱伝達率については多くの研究成果が報告されているが、それらは流路断面形状が円形、三角形または矩形である流路を対象としており、流路断面が半円形の流路を対象とした研究、特に曲線流路内流動沸騰二相流に関する研究例はほぼなく、未解明な点が多い。一方、様々な流路形状 (波状、S 型、翼状) を有する PCHE を対象とした研究が報告されているが、その場合、単相流や超臨界流体に関する研究例が多く、PCHE 内の気液二相流に関する報告例はほとんどない。並列流路においても同様に半円形流路に関する報告例はほとんどない現状にある。本論文では、「水力等価直径」「流路材質」「流路断面形状」および「流路形状」が半円ミニチャネル内沸騰二相流の熱流動特性、すなわち、沸騰二相流の流動様式、摩擦損失および沸騰熱伝達率に与える影響を明らかにすることを目的とする。半円ミニチャネル内沸騰二相流の熱流動特性を解明し、沸騰二相流の摩擦損失および沸騰熱伝達率の予測精度を向上すること、すなわち気化器設計精度を向上することができれば、気化器の設計余裕度を低減すること、すなわち気化器のコンパクト化によるコストダウンが期待できる。背景および従来研究を本論文第 1 章に記した。

上記の半円ミニチャネル内沸騰二相流の熱流動特性を解明するために、本研究では、「水力等価直径」「流路材質」「流路断面形状」および「流路形状」について以下の条件とした。

- ・「水力等価直径」：1.04 mm および 0.55 mm.
- ・「流路材質」：SS type 316L および Cu1020.
- ・「流路断面形状」：半円および円.
- ・「流路形状」：直線流路および 3 種類の流路角度を有する正弦波蛇行流路.

なお、「流路断面形状」の影響評価には拡散接合試験部を適用した。

(氏名：久保 洋平 NO. 2)

冷媒 R-245fa を作動媒体とし、試験部内で垂直上沸騰二相流を形成するように温水で加熱した流動沸騰試験を実施した。冷媒 R-245fa の密度比および表面張力はメタンのそれと比較的近い値であり、沸騰二相流の比較として有用であると考えられる。また、低圧冷媒のため装置構造を簡略化できるため、本試験で使用した。試験条件および試験装置を本論文第 2 章に記した。

「水力等価直径」および「流路断面形状」は沸騰二相流の熱流動特性に影響を与えることが知られている。本論文第 3 章では、「水力等価直径」および「流路断面形状」が沸騰二相流の流動様式、摩擦損失および熱伝達率に与える影響を評価した。

まず、「水力等価直径」および「流路断面形状」が与える沸騰二相流の流動様式への影響について示す。高速度カメラを用いた可視化により流動様式を観察し、流動様式を流動様式線図（液相見かけ速度と気相見かけ速度、質量流束とクオリティ、液相 Weber 数と気相 Weber 数）に整理し、従来研究と比較した。以下に示す知見を得た。

3-1: 試験部出口付近で 4 つの流動様式: Slug-annular flow, Semi-annular flow, Annular flow および Mist flow を観察した。水力等価直径 0.55 mm の低冷媒質量流束の条件下のみ Slug-annular flow を観察した。水力等価直径 1.04 mm, 高い熱流束の条件下では蒸気気泡密度が大きくなったため、気液界面構造が乱れた流動様式を観察した。

3-2: 流路断面形状が半円であるため、流路隅部に厚い液膜が形成し、また、ガスコアの形成が抑制されたため、Annular 流が従来の研究結果と比較して高い気相 Weber 数の条件にて形成することを確認した。

次に、「水力等価直径」および「流路断面形状」が与える沸騰二相流の摩擦損失への影響について示す。沸騰二相流の摩擦損失に与える影響を評価するために実験的に評価し、以下に示す知見を得た。

3-3: 水力等価直径 1.04 mm の沸騰二相流の摩擦損失よりも水力等価直径 0.55 mm のそのほうが高い値を示した。高冷媒質量流束条件下では出口クオリティの増加に伴い沸騰二相流の摩擦損失は増加したが、低冷媒質量流束の中間出口クオリティ条件下では、沸騰二相流の摩擦損失の増加が抑制されたことを確認した。

3-4: 分離流モデルに基づき Chisholm parameter を無次元数で構成した半円ミニチャネル内の沸騰二相流の摩擦損失の相関式を提案し、平均絶対誤差 MAE は水力等価直径 1.04 mm, 0.55 mm およびすべてのデータでそれぞれ 21.4%, 34.0% および 27.3 % となることを確認した。

「水力等価直径」の減少により流動様式と摩擦損失は表面張力の影響を受けており、さらに、伝熱面の温度分布、すなわちフィン効率は熱伝達に影響を与えられることから、「水力等価直径」、「流路断面形状」および「流路材質」が沸騰熱伝達率に与える影響を実験的に評価した。ここで、「流路材質」の影響を評価するためにフィン効率を考慮した沸騰平均熱伝達率を算出した。以下に得られた知見を示す。

(氏名：久保 洋平 NO. 3)

3-5: フィン効率の低い試験部の沸騰熱伝達率のほうがフィン効率の低い試験部のそれよりも高い値を確認した。

3-6: 水力等価直径 1.04 mm の沸騰熱伝達率のほうが水力等価直径 0.55 mm のそれよりも高い値を確認した。

3-7: 半円ミニチャンネル内の沸騰熱伝達率相関式を提案し、水力等価直径 1.04 mm の高フィン効率および低フィン効率の試験部、水力等価直径 0.55 mm の低フィン効率の試験部およびすべてのデータに対して、平均絶対誤差 MAE はそれぞれ 7.3%, 13.3%, 12.1% および 11.3% となることを確認した。

並列半円ミニチャンネルと並列円ミニチャンネルの比較のためには、同じ製作方法の試験部を使用するほうが望ましいと考えられる。そこで、本論文第 4 章では、拡散接合により作製した試験部を適用し、「流路断面形状」が沸騰二相流の摩擦損失および沸騰平均熱伝達率に与える影響を実験的に評価した。沸騰二相流の摩擦損失および熱伝達率は第 3 章と同様の評価方法を用いて評価した。以下に得られた知見を示す。

4-1: 低出口クオリティ条件では半円ミニチャンネルの沸騰二相流の摩擦損失は円ミニチャンネルのそれよりも低い値を示し、沸騰熱伝達率は円ミニチャンネルのそれよりも高い値を確認した。

4-2: 出口クオリティの増加に伴い、沸騰熱伝達率に与える流路断面形状の影響が小さくなり、半円ミニチャンネルの沸騰二相流の摩擦損失は円ミニチャンネルのそれよりも高い値を確認した。低出口クオリティ条件にて流路断面形状の影響が重要であることが明らかとなった。

PCHE の特徴を生かすためには直線以外の流路形状が熱流動特性に与える影響を評価する必要がある。そこで、本論文第 5 章では、「流路形状」が流動様式、沸騰二相流の摩擦損失および沸騰熱伝達率に与える影響を実験的に評価した。沸騰二相流の流動様式、摩擦損失および熱伝達率は第 3 章と同様の評価方法を用いて評価した。以下に得られた知見を示す。

5-1: 正弦波状半円ミニチャンネルの Annular 流は直線半円ミニチャンネルのそれよりも低い気相 Weber 数で形成した。

5-2: 流路角度 15° の試験部の沸騰二相流の摩擦損失が最も小さく、沸騰熱伝達率が最も高い値を示し、特に低出口クオリティ条件でその差が大きくなった。

5-3: 正弦波状半円ミニチャンネル内の沸騰二相流の摩擦損失の相関式を提案し、流路角度 15° 、 30° および 45° の相関式の平均絶対誤差 MAE はそれぞれ 26.7%, 24.6% および 16.0% となり、すべてのデータに対して 22.9% となった。

5-4: 正弦波状半円ミニチャンネル内の沸騰熱伝達率の相関式を提案し、流路角度 15° 、 30° および 45° の相関式の平均絶対誤差 MAE はそれぞれ 9.4%, 4.5% および 10.8% となり、すべてのデータに対して 8.6% となった。

(氏名：久保 洋平 NO. 4)

本論文第6章では本研究の結論を記している。本論文では、「水力等価直径」「流路材質」「流路断面形状」および「流路形状」が半円ミニチャンネル内の沸騰二相流の熱流動特性に与える影響を明らかにした。実機使用の範囲として適切と考える2種類の水力等価直径を適用したことで、熱流動特性に与える水力等価直径の影響が明らかとなった。流路隅部を有する流路断面形状である半円では、厚い液膜の形成や核沸騰の促進が起り、流路隅部を有さない円管とは異なる沸騰二相流の熱流動特性を示した。また、流路断面が半円の場合、2つの流路隅部と直線（流路弦部）および曲線（流路円弧部）状の流路壁面を有しており、流路隅部および直線流路壁面のみを有する矩形管や三角管と比較すると、流路隅部および流路円弧部の液膜厚みや液相の移動形態が異なったため、半円ミニチャンネル特有の傾向を示すことが明らかとなった。提案した相関式をPCHEの設計に適用するにはLNGや水素などの実流体を用いた実験を行い、相関式の係数の修正が必要であるため、今後の研究にて取り組む予定である。

氏名	久保 洋平		
論文 題目	半円ミニチャンネル内沸騰二相流の熱流動特性に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	浅野 等
	副 査	教授	富山 明男
	副 査	教授	今井 陽介
	副 査	准教授	村川 英樹
	副 査		
要 旨			
<p>CO₂排出量の削減のため化石燃料は石油から天然ガスへの転換がすすめられ、一方、再生可能エネルギー大量導入時の余剰電力対策のため電力から水素を製造する蓄エネルギーが検討されている。日本はエネルギー資源が乏しく、島国であることから天然ガスは液化された状態で海上輸送される。また、水素の製造・輸送においても、例えば、他国で水素を製造輸入する場合には液化水素やアンモニアの形態で輸送される。このような液化燃料の利用では気化器が必要となる。従来、液化天然ガス (LNG) は大規模発電設備や二次燃料としてのガス供給が主であったため海水で加熱する大型の気化器が使用されてきた。しかし、船用熱機関での使用、需要が比較的少ない地方での使用、水素の場合は水素ステーションでの使用など、小規模で利用する環境が多くなっており、コンパクト気化器が必要とされている。気化器のコンパクト化には、流路径を小さくして伝熱面積密度を増大させることが有効であり、耐圧も要求されることから、流路が加工されたステンレス鋼薄板を積層、拡散接合で製作されたマイクロチャンネル熱交換器が検討されている。この熱交換器は薄板に流路がプリント形成されることから Printed Circuit Heat Exchanger (以下、PCHE とする) と呼ばれる。</p> <p>気化器では液化燃料が蒸発し、気液二相流となるため機器性能 (熱通過率、圧力損失) は流動形態に強く依存する。流路が細径化すれば気液界面構造に及ぼす表面張力の影響は大きくなる。PCHE では流路が化学エッチングで加工されることから流路断面が半円形状であり、界面構造は流路断面形状の影響を受け、蒸発流の場合、沸騰気泡核形成に影響すると考えられる。そこで、本論文では、半円ミニチャンネル内沸騰二相流を対象として、流動様式、摩擦損失および沸騰熱伝達率を計測し、それらに及ぼす水力等価直径、流路材質、流路断面形状、そして流路形状の影響を明らかにすることを目的としている。実験装置および実験方法の詳細は第2章で示され、研究成果は第3章から第7章に以下の通りまとめられている。</p> <p>第3章では、沸騰二相流の流動様式に与える水力等価直径の影響が評価されている。高速度カメラを用いた可視化により流動様式を観察し、試験部出口付近での流動様式に対して流動様式線図を作成し、従来研究との比較・考察によって、以下の知見を得ている。</p> <p>(3-1) Slug-annular, Semi-annular, Annular, そして Mist flow の4種類の流動様式が観察された。水力等価直径 $D_H = 0.55 \text{ mm}$ では低質量流束でのみ Slug-annular flow が観察され、$D_H = 1.04 \text{ mm}$ では、高熱流束の場合、液膜内での沸騰気泡核生成によって気液界面構造が乱れる様子が観察された。</p> <p>(3-2) 半円形状の流路では、流路隅部に厚い液膜が形成されることでガスコアの形成が抑制されたため、Annular 流の遷移が、従来の研究結果と比較して高い気相 Weber 数で起こることが確認された。</p> <p>第4章では、第3章と同じ系に対して圧力損失特性が評価され、以下の知見を得るとともに、圧力損失予測のための相関式が提案されている。</p> <p>(4-1) 沸騰二相流の摩擦損失は水力等価直径の低下で大きくなるが、質量流束によって異なる傾向が確認された。すなわち、高質量流束では出口クオリティの増大に伴い摩擦損失は増大したが、低質量流束で出口クオリティが中位の場合、出口クオリティの増大に伴う摩擦損失の増大は抑制された。</p> <p>(4-2) 分離流モデルに基づき Chisholm parameter を無次元数で表した半円ミニチャンネル内沸騰二相流の摩擦損失の相関式を作成した。MAE (平均絶対誤差) は $D_H = 1.04 \text{ mm}$, 0.55 mm およびすべてのデータに対して、それぞれ 21.4%, 34.0% および 27.3% であった。</p>			

第5章では、第3章と同じ系に対して沸騰熱伝達率が評価されている。沸騰熱伝達率は伝熱面上での沸騰気泡核生成の有無が重要であり、その発生は伝熱面壁温に強く依存する。PCHEでは伝熱壁が厚くなること、壁面素材が熱伝導率の低いステンレス鋼であることから伝熱壁内の温度分布も無視できない。そこで、伝熱壁内温度分布をフィン効率として考慮し、熱伝導解析をもとにフィン効率を推定するとともに、ステンレス鋼に加えて高熱伝導率の銅を素材とした試験部に対しても実験を行い、壁面熱抵抗の影響を評価している。実験結果に基づき以下の知見を得るとともに、沸騰熱伝達率予測のための相関式が提案されている。

(5-1) フィン効率が低い試験部のほうが、フィン効率が高い試験部より高い沸騰熱伝達率を示した。流路隅部の壁温が高くなり、核沸騰を促進したためと考えられる。

(5-2) 水力等価直径が大きい $D_H=1.04$ mm のほうが 0.55 mm よりも高い沸騰熱伝達率を示した。

(5-3) フィン効率を考慮した半円ミニチャンネル内の沸騰熱伝達率相関式を提案し、実験データに対する予測精度が評価されている。本研究で取得した全データに対する MAE (平均絶対誤差) は 11.3%であることを示している。

第3から5章では、内部流動可視化のため半円形流路の弦部分の壁面を透明素材で置換した試験部で実験が行われたが、その結果から沸騰熱伝達特性に及ぼす流路隅部での沸騰気泡核形成、そして壁面温度分布の影響が大きいことが明らかとされた。そこで、第6章では、拡散接合で試験部を製作、また隅部の影響を明らかにするために半円流路を合わせた円形流路試験部を製作し、沸騰熱伝達率が評価された。実験結果に基づき以下 D_H の知見が得られている。

(6-1) 低出口オリティ条件では半円ミニチャンネル内沸騰二相流の摩擦損失は円ミニチャンネルよりも低くなるが、沸騰熱伝達率は円ミニチャンネルより高くなることを確認した。

(6-2) 出口オリティの増大に伴い沸騰熱伝達率に及ぼす流路断面形状の影響は小さくなる。

第7章では、沸騰熱伝達率の向上を目的として3種類の流路角度 (15°, 30°, 45°) の正弦波状半円ミニチャンネルを製作し、沸騰二相流実験を行い、流動様式、摩擦損失、そして沸騰熱伝達率に及ぼす流路形状の影響を実験的に評価している。実験結果に基づき以下の知見が得られている。

(7-1) 正弦波状半円ミニチャンネルでは、直線半円ミニチャンネルより低い気相 Weber 数で Annular 流に遷移した。

(7-2) 流路角度 15° の試験部の沸騰二相流の摩擦損失が最も小さく、沸騰熱伝達率が最も高い値を示した。特に低出口オリティ条件でその傾向が顕著であった。

(7-3) 正弦波状半円ミニチャンネル内沸騰二相流の摩擦損失の相関式が作成され、全データに対する MAE (平均絶対誤差) が 22.9%であることを示している。

(7-4) 正弦波状半円ミニチャンネル内沸騰熱伝達率の相関式が作成され、全データに対する MAE (平均絶対誤差) が 8.6%であることを示している。

以上より、LNG や水素などの液体燃料気化器のコンパクト化のため半円流路を有する拡散接合ミニチャンネル熱交換器の適用を想定し、気化器設計に必要となる沸騰二相流の流動様式、圧力損失、沸騰熱伝達率に及ぼす水力等価直径、流路材質、流路断面形状、そして流路形状の影響について多くの知見を得ている。さらに、圧力損失および沸騰熱伝達率に対して相関式を提案している。これらの成果は気化器設計とその高性能化に有効であり、工学的価値も高い。よって、提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の久保 洋平 は、博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。