



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．ミニチャン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で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」が半円ミニチャン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．半円ミニチャン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ン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ると考えられることから、「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.

並列半円ミニチャネルと並列円ミニチャ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ネルの沸騰二相流の摩擦損失は円ミニチャ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, 半円ミニチャネルの沸騰二相流の摩擦損失は円ミニチャ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ネルの Annular 流は直線半円ミニチャ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こり、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。