

9. 二相流エジェクタによる冷凍・空調サイクルの高効率化

未来ビークルシテリサーチセンター 特定教授 中川 勝文, 特定助教 川村 洋介

9-1 HFO-1234yf 冷媒に適用される二相流ノズルの先細角度がサブクール沸騰現象に与える影響

(1) 研究目的

我々の研究室では、これまでに二相流エジェクタを利用した冷凍空調機器の効率向上技術に関する研究を行ってきた。過去に実施した HFO-1234yf 冷媒を用いた実験¹⁾では、ノズル入口における冷媒のサブクール度の増大に伴い、実験流量が均質平衡流の理論臨界流量を下回っており、また、末広部角度が小さいほど下回る位置が低サブクール域にシフトすることが確認された。この現象がノズル末広部形状だけの要因か明確にするために、異なる先細部形状のノズルを用いて HFO-1234yf 冷媒のサブクール沸騰現象を実験的に調査した。

(2) 試作ノズルについて

本実験で用いた先細末広ノズルの形状の概略図を図 9-1-1 に示す。ノズルはステンレス板をワイヤー放電加工により流路をくり抜き、静圧孔を設けた平板で挟み込むことにより矩形流路を構成している。本研究では先細部角度 θ_{con} による影響を調査するために、先細部形状のみが異なる 3 種類のノズル（以降、Nozzle I, Nozzle II, Nozzle III）を作成した。詳細な寸法については表 9-1-1 に示す。ノズル内の静圧測定では、先細部に 7~9 ヶ所、末広部に 24 ヶ所設けた静圧孔より圧力計にて計測した。

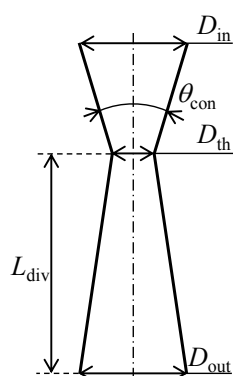


図 9-1-1 ノズル形状の模式図

表 9-1-1 各ノズルの詳細形状

Nozzle name		I	II	III
Thickness	t_{noz}	0.98 mm		
Inlet width	D_{in}	9.4 mm		
Throat width	D_{th}	0.26 mm		
Outlet width	D_{out}	1.6 mm		
Divergent length	L_{div}	15.0 mm		
Convergent angle	θ_{con}	20 °	30 °	40 °

(3) 臨界流量の比較結果

図 9-1-2 に各ノズル実験で測定された流量と理論臨界流量との比較結果を示す。ここで、横軸は入口サブクール度 ΔT_{sub} 、縦軸は流量を喉部断面積で割った質量流束 J とした。なお、図中の□が Nozzle I, ○が Nozzle II, △が Nozzle III での実験流量、実線が等エントロピー変化を仮定した 1 次元の均質平衡流モデル（以降、IHE モデル）の理論臨界流束である。

図より、各ノズル共に入口サブクール度の増加に伴って実験流量は理論臨界流量に近づく傾向が得られた。また、Nozzle II 及び III では ΔT_{sub} の増加に伴い、理論臨界流束を下回ることも確認でき、特に、先細部角度 θ_{con} が最も大きい Nozzle III では II に比べてより低サブクール域で下回っている。これは、既往研究¹⁾での理論臨界流束を下回る現象が末広部形状のみではなく、先細部形状にも起因していることを示唆している。

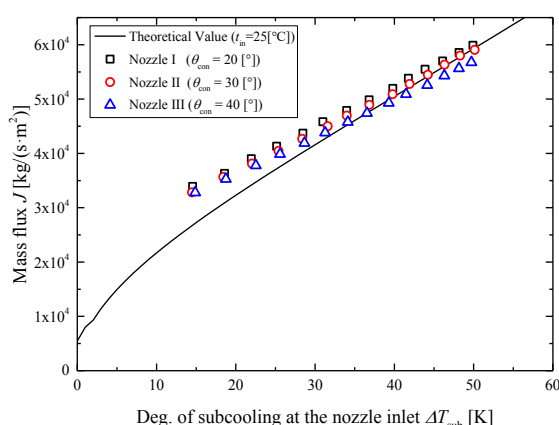


図 9-1-2 理論臨界流束との比較

(4) 喉部過熱度の算出結果

臨界流量の結果を受け、喉部での沸騰現象との関連を調べるために、式(1)を用いて沸騰の開始度合を示す重要なパラメータである喉部過熱度 ΔT_{sh} を算出した。

$$\Delta T_{sh} = T_{th} - T_{sat}(p_{th}) \quad (1)$$

喉部過熱度は、喉部圧力 p_{th} の飽和温度 $T_{sat}(p_{th})$ が喉部での冷媒の温度 T_{th} からどの程度離れているかを表している。喉部での冷媒温度 T_{th} は、ノズル入口から断熱変化し、喉部圧力まで液冷媒のまま減圧されたと仮定して求めた。なお、本実験では喉部直下に静圧孔を設けていないので、先細部の静圧分布から式(2)に従って流量係数を算出し、その値と式(2)から喉部圧力を予測した。

$$C = \frac{G}{\sqrt{2\rho_l(p_{in}-p)/\left(\frac{1}{A^2}-\frac{1}{A_{in}^2}\right)}} \quad (2)$$

ここで、 G は実験流量、 ρ_l は入口液体密度、 p は圧力、 A は流路断面積を表している。また、添え字の in はノズル先細部入口部を表している。なお、流量係数の算出結果に関しては本紙では割愛するが、流量に対して概ね $C \approx 1$ であった。

図9-1-3には、横軸に実験流量を喉部断面積で割った質量流束 J 、左縦軸に喉部過熱度 ΔT_{sh} をとったものを示している。図中の□、○、△が前述の方法で予測した喉部圧力から算出した喉部過熱度 ΔT_{sh} である。図より、流量の増加に伴って、 ΔT_{sh} がほぼ線形的に減少している。加えて、先細部角度の増加に伴って ΔT_{sh} がより小さく、また、流量に対する減少勾配もより急になっている。さらに、Nozzle II 及び III では ΔT_{sh} が0を下回る領域が存在し、先細部角度の増加に伴い、0を下回る位置が低流量側にシフトしている。過熱度が負であるということは、算出した喉部圧力が沸騰開始圧力に達していないことを意味している。

しかし、ノズル流れは喉部で音速点を超えていることから、流れが臨界となるのに要する入口から喉部までの圧力差が小さくてもよいために、図9-1-2において高サブクール域でIHEの理論臨界流束よりも低くなったと考えられる。

ここまで示してきた喉部圧力において、算出に用いた静圧分布はノズル流路の中央で測定されたものであることを考慮する必要がある。そこで、ノズルにおける沸騰がバルクではなく、壁面からのキャビティ供給によるものであるとし、沸騰して二相流となっている末広部の静圧分布から二次近似により喉部圧力を求め、喉部過熱度の算出を試みた。図中にて、中実の■、●、▲は末広部圧力から求めた喉部過熱度を表しており、これらの値は0を下回ることがなく、すべて正の値をとっている。これは、予測された圧力が沸騰に必要な圧力よりも低くなっており、喉部で沸騰していることを意味している。ゆえに、この過熱度こそが沸騰が生じている喉部エッジでの過熱度だと考えられる。

また、先細部、末広部からそれぞれ求めた過熱度の差分を図中の下部に□、○、△に縦線を加えた記号で示す。この差分値は流量とともに増加している。仮に、先細部のものが流路中央、末広部のものが喉部エッジだとするならば、その差分値は喉部エッジを冷媒が通過する際に生じる減圧効果（エッジ効果）を表しているのではないかと考えられる。

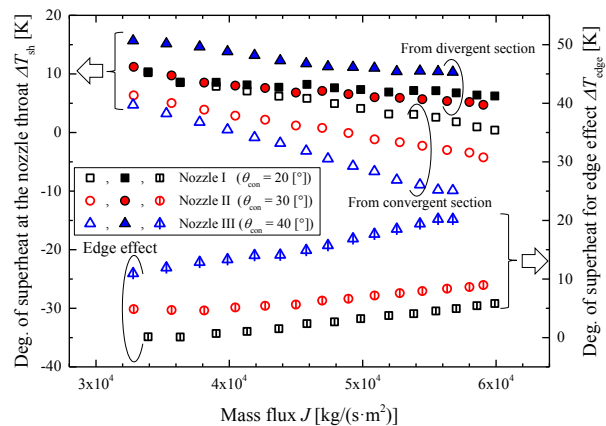


図9-1-3 喉部過熱度とエッジ効果の見積り

参考文献

- 1) 川村洋介, 平野裕真, 中川勝文, “新冷媒 HFO-1234yf に適用される二相流ノズル性能に関する実験的研究”, 第23回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, No.18-17 (2018), 4p.