

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 先細末広ノズル内での超臨界炭酸ガス冷媒の減圧沸騰に関する実験的研究

(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。これまでの研究結果¹⁾から CO₂を用いたノズル内静圧測定実験からノズル効率を求め、最も高い条件で約95%となることを示し、また、末広部開き角が大きくなるノズルでは、喉部にて沸騰遅れが生じることを示した。しかし、先行研究のノズルの末広部長さは最短10[mm]であり、今後、実機における小型化等を視野に入れる際に末広部長さがさらに短くなることが考えられる。そこで、本研究では、末広部が非常に短いノズルに対し、末広部開き角の違いによって喉部での減圧沸騰現象に違いが現れるか確かめることを目的に可視化実験を行った。

(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を図9-1-1に示す。なお、各長さ寸法は喉部径 D_{th} で無次元化している。ノズルはステンレス板を炭酸ガスレーザー加工によって流路をくり抜いたノズル板をベークライト板及びポリカーボネート板で挟み込むことにより矩形断面を有する流路を構成している。本研究では喉部直下の末広部開き角による影響を調査するために、表9-1-1に示すような末広部開き角が異なる2種類のノズル（以降、Nozzle I, Nozzle IIIと呼称）を製作した。なお、本研究で用いるノズルは末広部長さが非常に短く、静圧孔を加工できないため、静圧測定は行っていない。

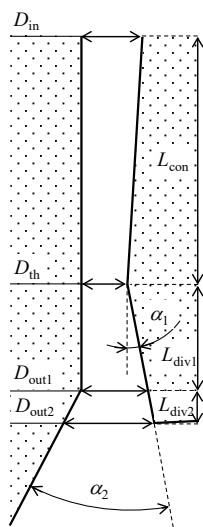


図9-1-1 ノズル形状の模式図

表9-1-1 各ノズルの詳細形状

	Nozzle I	Nozzle III
Thickness t [-]	3.14	2.85
Inlet height D_{in} [-]	7.40	
Throat height D_{th} [-]	1.0	
Outlet1 height D_{out1} [-]	1.38	1.01
Outlet2 height D_{out2} [-]	2.14	1.55
Convergent length L_{con} [-]	113.3	
Divergent length L_{div1} [-]	1.93	1.44
Divergent length L_{div2} [-]	1.16	1.18
Divergent angle 1 α_1 [O]	11.1	0.28
Divergent angle 2 α_2 [O]	36.6	25.6

※Length dimension is dimensionless by throat height D_{th} .

(3) 可視化画像との比較

図9-1-2及び図9-1-3に末広部開き角の異なるNozzle IとNozzle IIIにおける入口条件ごとの可視化画像を示す。なお、撮影は、撮影速度224,000[fps]、解像度384×152で行った。各図とも白色の実線でノズル壁面を、白色の点線でノズルの喉部、第1末広部出口、第2末広部出口の各流路断面を示している。また、可視化画像の上方には入口条件を示している。

まず、Nozzle Iの可視化結果に注目すると図9-1-2にて上方から下向きに流入している超臨界状態のCO₂冷媒が沸騰することで密度差が生じ、白濁していることが確認できる。入口条件ごとに比較すると、入口温度 $t_m = 30$ [°C]、入口圧力 $p_m = 8.5$ [MPa]以上の条件（図9-1-2の①～③）において、冷媒が喉部の右側壁面から沸騰を開始しており、そこを基点に下流に向かって放射状に白濁領域が拡大していることが確認できる。一方、それ以外の条件（図9-1-2の④～⑧）では、冷媒が喉部より上流側から

沸騰していることが確認できる。そこで、等エントロピー変化を仮定した平衡均質流モデル（以降、IHE モデル(Isentropic Homogeneous Equilibrium Model)と呼称。）を用いて流れが臨界となる状態（以降、チョーク点と呼称。）を算出してみたところ、図 9-1-2 の①～③に該当する条件ではチョーク点が飽和線上にあり、図 9-1-2 の④及び⑦～⑧に該当する条件ではチョーク点が飽和線よりも下側、すなわち二相域内にあることが確認された。ゆえに、図 9-1-2 の④、⑦、⑧の可視化画像では喉部よりも上流側から沸騰していると考えられる。一方で、図 9-1-2 の⑤及び⑥に該当する条件ではチョーク点が飽和線上にあるとして算出されたが、図 9-1-2 では喉部よりも上流側から沸騰していた。これは、IHE モデルの臨界点近傍における精度の問題のためであると考えている。

次に、図 9-1-3 に示す Nozzle III の可視化結果では図 9-1-2 とは異なり、 $t_m=30$ [°C]、 $p_m=8.5$ [MPa]以上の条件（図 9-1-3 の①～③）においてノズル喉部よりも下流側から白濁していることが確認できる。この要因としては臨界となる場所が喉部ではなく、第 1 末広部出口にあることが考えられる。一般に面積変化の小さい末広ノズル内では壁面に形成される境界層によって仮想的なノズルの流体スロートが形成され、臨界流量が減少する。しかし、本実験で用いた Nozzle III では末広部にてわずかに開いていることと、喉部から第 1 末広部出口にかけて形成された境界層による流体スロートが合わさることによって面積変化のないストレート部が形成されたため、測定流量としては喉部断面積で算出したものと理論臨界流量が近くなり、一方で、臨界となるのは第 1 末広部出口であったことから、沸騰により白濁するのは Nozzle III の喉部よりも下流であったと考えられる。

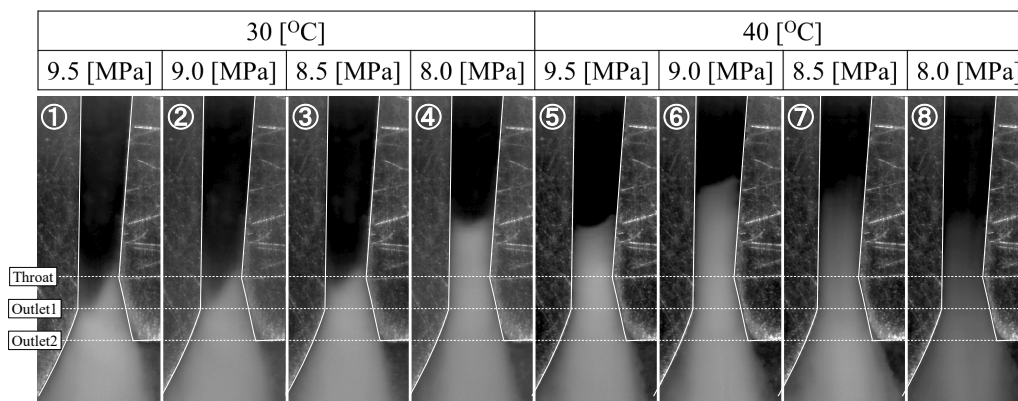


図 9-1-2 Nozzle I における CO₂ 冷媒の減圧膨張現象の可視化画像

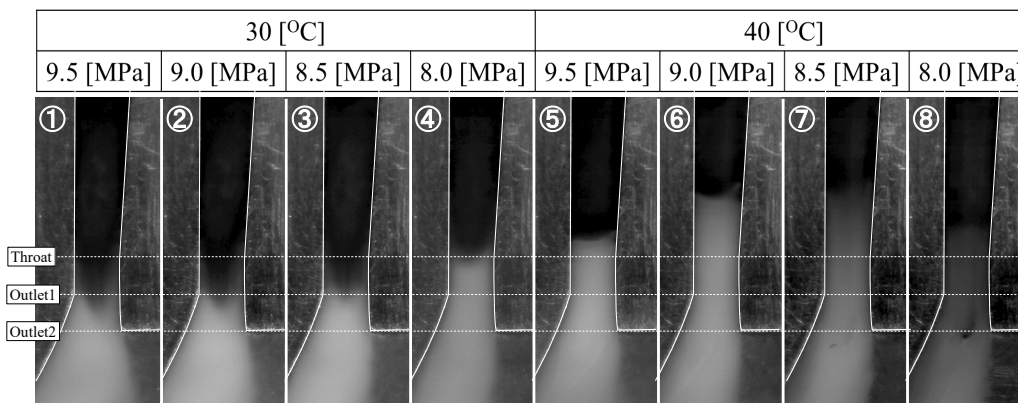


図 9-1-3 Nozzle III における CO₂ 冷媒の減圧膨張現象の可視化画像

参考文献

1) Niimi, T. et al., Proc. of HEFAT2012, (2012), 946.