

## 1 2. 二相流エジェクタによる冷凍・空調サイクルの高効率化 ～二相流ノズル出口に発生する衝撃波による圧力変動に関する研究～

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

### 1 2-1 はじめに

昨今、世界的なエネルギー需要の増加に伴う地球温暖化などの環境問題の観点から、冷凍空調機器（以下、冷凍サイクルと略す）の省エネルギー化・高効率化が望まれている。これに対して近年、二相流エジェクタを適応した冷凍空調機器が登場し普及し始めている。エジェクタはサイクルの膨張過程で無駄に捨てられていた膨張エネルギーを圧縮エネルギーに変換し、コンプレッサの圧縮仕事として回収することで冷凍サイクル効率を向上させる技術である。

エジェクタはノズル、混合部、ディフューザから構成され、その内部流れは二相流となる。二相流の音速はガス単相に比べ非常に低いいため容易に超音速流となり二相流衝撃波が発生する<sup>1)</sup>。この二相流衝撃波はエジェクタの昇圧に大きな影響を与えるため、効率向上のためにその特性を明らかにすることは重要である。

これまでの研究により、二相流衝撃波は増幅周波数成分に加え、減衰成分の微小圧力変動を有することが明らかになってきた<sup>2)</sup>。しかし、衝撃波の強さによって圧力変動がどのように変化するかについてはまだ詳しくわかっていない。

このため、本研究では、壁面静圧および壁面圧力変動を計測できるエジェクタノズルおよび実験装置を製作し、低環境負荷であるHFO1234yfを用いて実験を行い、二相流ノズル出口に発生する二相流衝撃波が圧力変動に与える影響を調査した。

### 1 2-2 実験装置と方法

#### (1) 実験で用いた冷凍サイクルと実験方法

実験装置の概要を図 12-2-1 に示す。実験装置の詳細は文献 2) に示す。二相流ノズルに流入する二相流はコンプレッサから吐出された過熱ガスとコンデンサにより凝縮された過冷却液を混合することで生成している。流量調整バルブにより双方の流量を制御することでノズル入口乾き度を調整した。また、コンデンサ、エバポレータは水冷方式を採用した。これらの温度、流量とコンプレッサ回転数を制御することによりノズル背圧を調整し、所定の実験条件を達成した。

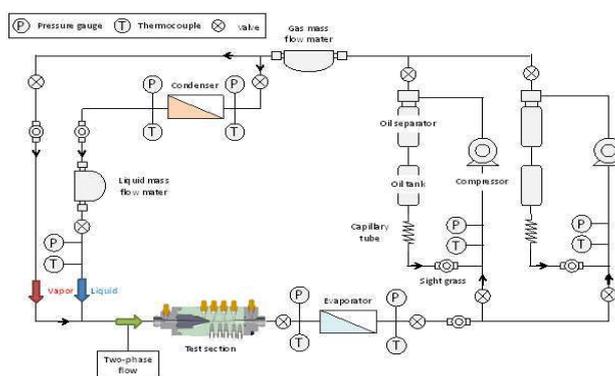


図 12-2-1 実験で用いた冷凍サイクルの概略図

#### (2) テストセクション

テストセクションである二相流ノズルは先細末広ノズルであり、その主要寸法を図 12-2-2 に示す。材質は長時間計測時の耐摩耗性、断熱性を考慮して SUS303 を用いた。図中①がノズル入口圧計測部、②がノズル出口の背圧部である。壁面静圧は、喉部上流で 4 ケ所、喉部下流で 10 ケ所を圧力センサにて計測した。また、圧力変動を測定するために二相流ノズルにはキスラー社製水晶圧力センサ（以

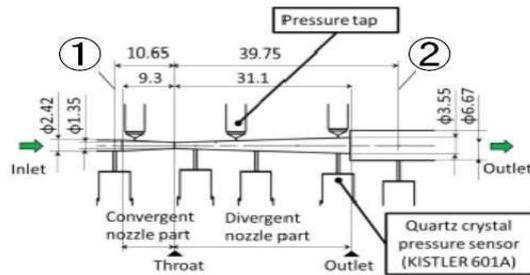


図 12-2-2 実験で用いたノズルの寸法

下キスラーセンサ) を末広ノズル部に 3 ケ所, ノズル入口圧計測部とノズル出口の背圧計測部の合計 5 ケ所に取り付けた。キスラーセンサの出力を, キスラー社製チャージメータ(5015A)を用いることで, 電圧として出力させた。圧力変動は実時間に対する圧力変動 $\Delta p(t)$ を FFT 処理し, 圧力振幅スペクトル $\Delta P(f)$ を求め, そのスペクトルから算出した。そして,  $|\Delta P(f)|$ の二乗平均の平方根をとったものを圧力変動量  $P_v$  として圧力変動の大きさを定量化した。

### (3) 実験条件

ノズル入口圧力を 1.6 MPa で一定, ノズル入口乾き度を 0.2, 0.5, 0.8 の 3 つの条件で, ノズル内に衝撃波が発生しない状態まで減圧させ, そこから背圧を細かく上昇させた時の各状態における圧力変動を測定した。

## 12-3 実験結果及び考察

### (1) ノズル内圧力分布

ノズル入口乾き度 0.2 で背圧を変化させた場合におけるノズル壁面の静圧分布を図 12-3-1 に示す。背圧が最も低い  $P_b = 0.039$  MPa ではノズル出口を出てからさらに減圧し, その後昇圧していることから, ノズル内で不足膨張となり, 膨張波が発生していると考えられる。また, 本研究ではノズル出口から背圧までほぼ圧力が変化していないときを適正膨張が達成していると考え。これより,  $P_b = 0.098$  MPa の時最も適正膨張に近い条件であるといえる。さらに背圧を上昇させることでノズル内部に衝撃波が発生し, 背圧の上昇とともに昇圧量も大きくなっていることがわかる。

図 12-3-1 に示すように適正, 不足膨張下ではセンサ 4 と 5 の間, それより背圧の高い条件では 3 と 4 の間に衝撃波が発生する。よって全体で圧力変動を評価するには 3~5 の圧力変動量を用いる必要がある。しかし, 単純に 5 番と 3 番の差分では減衰などの影響により, 正確

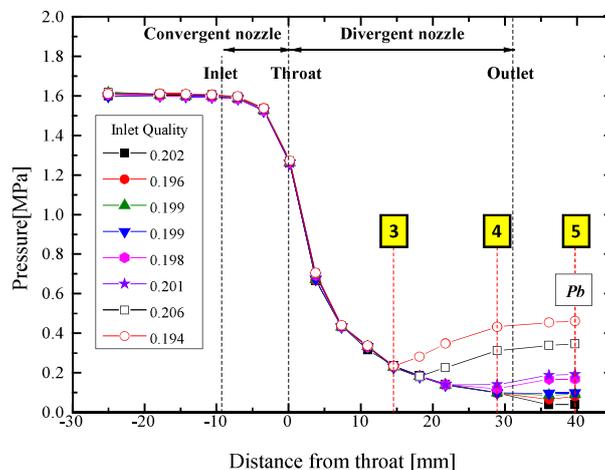


図 12-3-1 ノズル内部での静圧分布

に評価できないため、各センサの圧力変動の差分を増幅，減衰成分をそれぞれ積算することで整理を行った。図 12-3-2 にノズル入口乾き度 0.2 のセンサ 3, 4 の増幅成分の差分，及び 3~5 の各センサの増幅成分の差分の積算値をそれぞれ示す。図 12-3-2 より圧力変動量は背圧が最も低い条件ではなく，適正膨張と考えられる条件で最も低い値を示した。これは不足膨張である  $P_b = 0.039$  MPa では発生した膨張波が壁面に反射して発生した衝撃波が発生したため，圧力変動量が増加したと考えられる。ノズル内に衝撃波を発生させ背圧を上げていくことで，圧力変動量も増加していることがわかる。これらの結果より，衝撃波は圧力変動を増加させる要因であると言える。また，図 12-3-3 に圧力比( $P_b/P_0$ )の平方根を横軸にとり，ノズル内衝撃波が発生している場合の増幅成分の圧力変動量  $P_v$  を示す。すべての乾き度に於いて，二相流衝撃波の増幅成分の圧力変動量  $P_v$  は圧力比の平方根に対し，線形増加する傾向を示す。また圧力比が同じ時，乾き度によって圧力変動量が異なることから末広ノズル内で発生している二相流衝撃波の形態が異なっていると思われる。

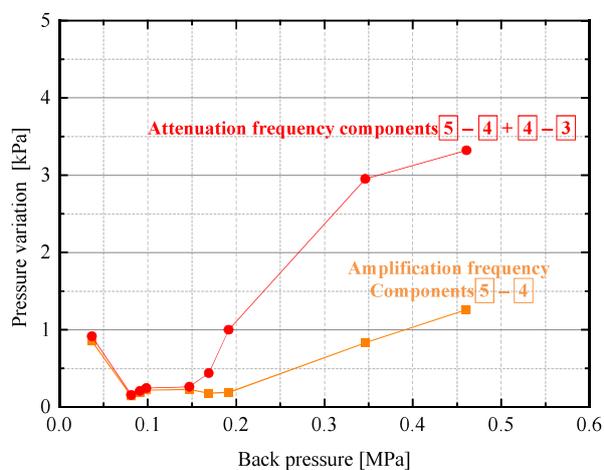


図 12-3-2  $X_m = 0.2$  における増幅周波数成分

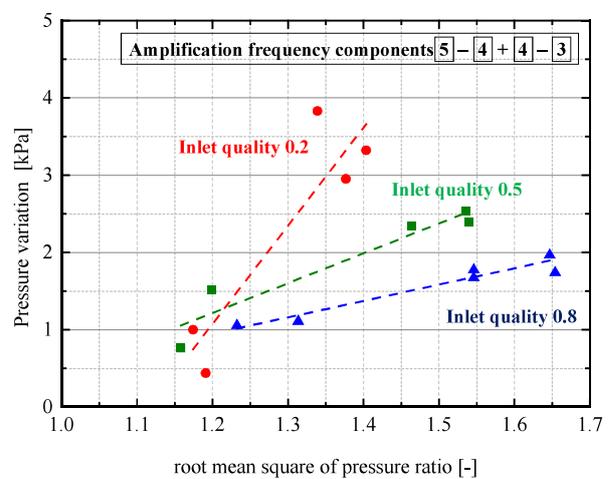


図 12-3-3 各実験条件における増幅周波数成分

次に，各入口乾き度の減衰成分の変化を図 12-3-4 に示す。減衰成分は背圧，すなわち衝撃波の強さにほとんど関係せず，ノズル入口乾き度が低いほど減衰量が大きくなることがわかる。これは二相流中に含まれる液滴による減衰効果が多きいため，低乾き度で減衰量が大きくなったと考えられる。

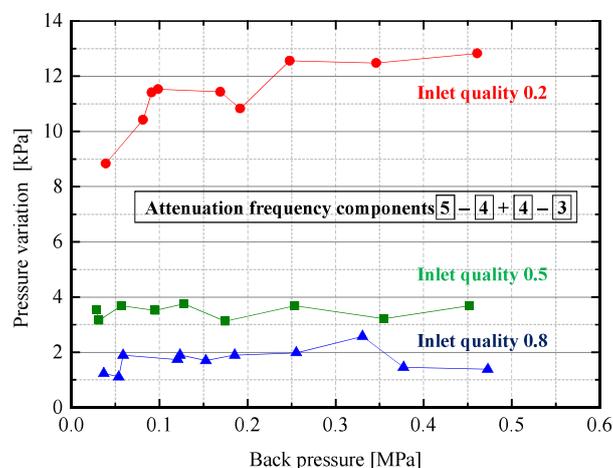


図 12-3-4 減衰周波数成分

#### 12-4 結論

二相流衝撃波によって発生する圧力変動を調べるため、実験によって衝撃波の圧力変動を測定し、検討した結果以下の結論を得た。

1. 衝撃波の発生しない適正膨張では圧力変動はほとんどなく、衝撃波によって圧力変動が増加することが明らかとなった。
2. 圧力比を変化させた場合、二相流衝撃波の圧力変動量は線形的に増加する傾向を示した。
3. 二相流における減衰成分はノズル入口乾き度が低いほど大きいことがわかった。

#### 参考文献

- 1) 中川勝文・原田敦史, 混相流, 16-4 (2008), pp.139-145.
- 2) 西嶋春幸・他, Thermal Science & Engineering, 24-4 (2016), pp.47-54.