

二酸化炭素ヒートポンプサイクルにおける気液二相流エジェクタの数値解析

66814 松野 潤一

指導教員 飛原 英治 教授

The heat pump cycle with two-phase ejector in carbon dioxide is useful to decrease compressor force and raise the coefficient of performance of the heat pump cycle. Firstly, this paper shows the way how the ejector behaves in the CO₂ heat pump cycle. Next 1-dimensional ejector nozzle was calculated and the condition of 2-dimensional calculation was derived. Finally, by investigating influence of droplet diameter, position of nozzle, the diameter of mixing tube and diffuser position, experimental result was compared with the simulation result. And design value of ejector was estimated and derived.

Key words : Heat pump, Coefficient of performance, Expansion work, Two-phase ejector, Expander, Carbon dioxide, Coordinate conversion

1. 緒言

冷凍機・ヒートポンプに用いる自然冷媒として、二酸化炭素は可燃性も毒性も無いことから特に注目を集めているが、COP (Coefficient of Performance) が他の冷媒と比べて低い。その原因として、膨張過程において捨てているエネルギー (膨張動力) が非常に大きいことが挙げられる。そこで、膨張弁の代わりにエジェクタを用いて膨張動力を回収することでCOPを向上させることができる。本研究では二酸化炭素ヒートポンプサイクルに用いられるエジェクタの数値解析を行い、先行研究(1)で得られている実験データと検証し、エジェクタの設計指針を得ることを目的とする。

2. エジェクタ及び先行研究について

2.1 サイクルの性質

Fig.1は実際に蒸気圧縮式ヒートポンプをエジェクタによって高効率化させる基本的なサイクル構成である。

エジェクタはノズル、吸引部、混合部、ディフューザから成り、混合部は先細混合部と直線混合部からなる。まず駆動流がノズルを通じて高速に加速される。次に、蒸発器出口の蒸気がエジェクタに吸引され、混合部において高速の駆動流と混合され、圧力が上昇する。混合部を

出た後にディフューザによって更に圧力を上昇させる。こうして圧力の高まった二相流の気相部分を、圧縮機に誘導することで圧縮仕事が低減し、COPが向上する。

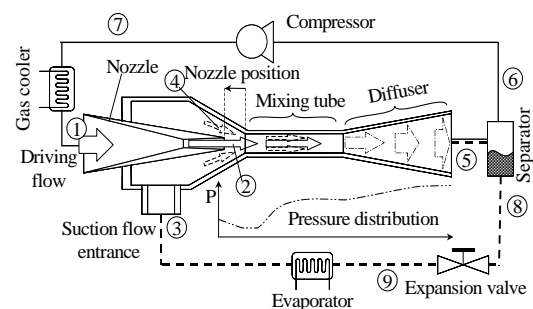


Fig.1 Schematic of Ejector-equipped vapor compression heat pump cycle

2.2 先行研究

先行研究では混合部の影響の解析として、ディフューザの無いエジェクタの実験が行われており、以下のような結果が得られている。

- ①混合部長さには混合昇圧と管摩擦損失の関係から最適値が存在する
- ②ノズルを直線混合部から離すほど圧力回復が減少する
- ③混合部径には圧力回復に対して最適値が存在する。

本研究ではディフューザのあるエジェクタにおける直線混合部長さや径、ノズル位置などの影響を数値計算によって解析することを目的と

する。

3. ノズルの一次元計算

先細混合部からディフューザまでの二次元解析を行うために、ノズル出口条件をノズルの一次元解析を行う。Fig.2にあるように臨界流である高圧部では、基礎式をそのまま用いるのではなく IHE モデルと呼ばれるモデルを用いる。これはエントロピーを一定と仮定し (Isoentropic), 気相も液相も同じ速度を持ち(Homogeneous), 同じ温度を持つ(Equilibrium)と仮定したモデルである。また二相状態となった後は、二速度モデルと呼ばれるモデルを用いノズル出口の気液両相の速度や物性、出口半径を求める。Table1 にノズル入口条件を示す。

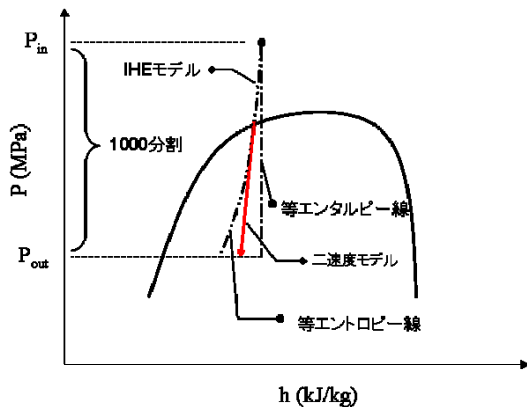


Fig.2 Simulation scheme of ejector Nozzle

Inlet diameter	2mm
Inlet Pressure	10MPa
Inlet Temperature	35°C
Outlet Pressure	4.5MPa
Mass Flux	1.56 kg/min

Table1. Calculate conditions

4. 解析手法・条件

4.1 解析手法

気液二相エジェクタの二次元解析には、CDadapco 社の汎用熱流体解析プログラム「STAR-CD」を用いた。駆動流と吸引流の混合過程を取り扱うため、STAR-CD では、二相流解析として、ラグランジュ二相流解析とオイラー二相流解析の2つを選択することができるが解析コストを考慮してオイラー二相流解析を用いる。また二次元解析の流路入口条件を Table2 に示す。

温度[K]	283.13
平均密度[kg/m ³]	394.79
気相密度[kg/m ³]	135.04
液相密度[kg/m ³]	861.07
半径[mm]	0.3743
平均速度[m/s]	149.61
気相速度[m/s]	209.07
液相速度[m/s]	132.87
クオリティ	0.307
ボイド率	0.642

Table2. Calculate result

本計算の解析アルゴリズムは SIMPLE 法を用いた。以下にその特徴をごく簡単に示しておく。

1. 圧力場を推定する。
2. 運動方程式を解き、速度の推定値を得る。
3. 圧力補正式を解き、圧力補正值を得る。
4. 圧力補正值を圧力推定値に加えることにより圧力の値を得る。
5. 速度補正式より、速度を求める。
6. もし他の変数 ϕ が流体の性質や生成項などを介して流れ場に影響を与えるならそれらの離散化方程式を解く
7. 補正された圧力を新しく推定した圧力として 2 に戻り、収束解が得られるまで繰り返し計算する。

5. 解析結果

5.1 粒子径の影響

Fig.3 に粒子径を変化させた際の管軸方向の圧力分布を示す。液滴が小さいほど直線混合部での昇圧が大きいことがわかる。また圧力上昇の立ち上がり角度が、粒子が小さいほど大きい。これはすなわち運動量交換の現象は粒子が小さいほど迅速に行われているものと考えられる。液滴径が小さければ管摩擦損失の蓄積が小さい上流側で圧力がピークになるので、そのピーク値は液滴径が小さいほど大きくなる。そして、昇圧のピークは約 10~15mm 付近に現れることがわかる。この解析傾向は実験による結果と一致している。

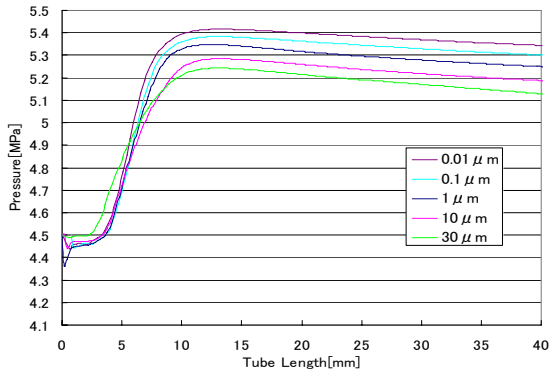


Fig.3 Correlation between Pressure recovery and Droplet diameter

5.2 ノズル位置の影響

Fig.4 はノズル出口クリアランス（直線混合部入口からノズル出口までの距離）ごとに見た管長手方向に見た圧力回復の図である。Fig.5はそれを直線混合部の入り口位置であわせたものである。ノズル出口クリアランスが大きくなればなるほど、直線混合部に流入してからすぐに圧力上昇が起きている。これは、ノズルを遠ざけると駆動流と吸引流との混合が先細混合部内で行われるようになり、この混合による昇圧の効果と先細混合部における減圧加速の効果とが打ち消しあうので、ノズルを遠ざけるほど直線混合部入口の圧力が高くなる。しかし、ノズルを離れた場合は、駆動流と吸引流との混合の一部を面積の大きい先細混合部で行うため、直線混合部での圧力回復の最大値は、ノズル出口クリアランスが小さいほど大きくなる。これは先行研究の実験の結論と合致している。

よって本解析条件のように流量比が同じであれば、先細混合部が無い場合のほうが、圧力回復が大きいといえる。

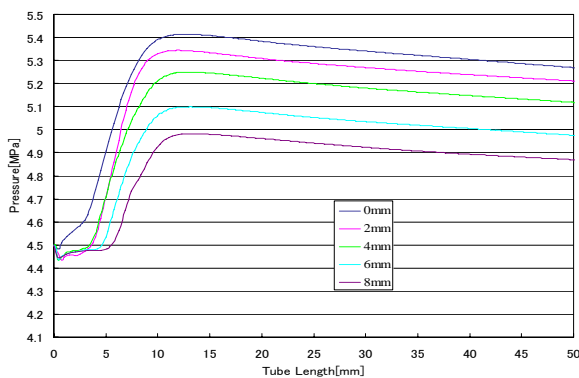


Fig.4 Relation between nozzle outlet clearance and pressure recovery

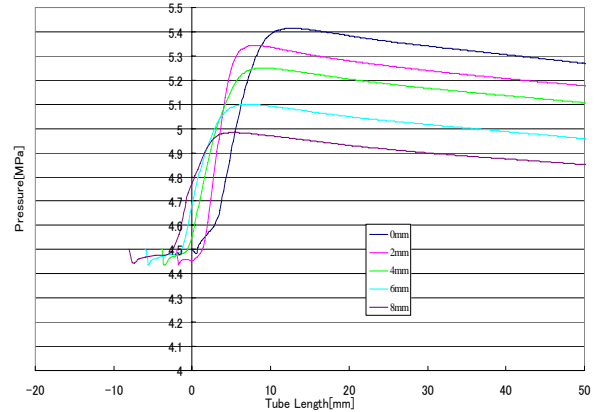


Fig.5 Distribution between Nozzle outlet clearance and maximum pressure recovery

5.3 直線混合部径の影響

次に直線混合部の径の影響について示す。Fig.7に直線混合部長さごとの圧力回復のグラフを示す。1.5mm~2mmまでは管径が大きくなるにしたがって、圧力回復量が大きくなっている。このようになる理由としては、今回の解析では駆動流と吸引流の流量比を固定としている為管径を大きくすると連続の式より吸引流の流速が小さくなる。したがって駆動流との流速差は増加する。つまり運動量交換量が大きくなるために最大圧力回復量が大きくなったものと考えられる。しかし、2mmより管径が大きくなると、最大圧力回復量は頭打ちとなり、次第に減少していくことが分かる。しかし管の長さ方向に対する圧損による圧力減少は小さくなっている。これは次のように説明がされる。つまり、二相流の運動量保存の式から導ける式(1)にあるように、圧力回復量は速度の変化量と断面積の比で表せるが、管径を大きくすることによって速度の変化量は大きくなるのだが、断面積は径の二乗で効いてくるため、ある位置で管径の影響のほうが大きくなり圧力回復量が減少してしまう。つまり管径には最大圧力回復量に最適値があることが分かる。また管径を大きくするにしたがって圧損の影響が小さくなっていくことについては、式(2)のFanningの式にある様に、ある長さにおける圧損は、速度の二乗に比例し、直径に反比例している。つまりFanningの式の分子が小さくなり分母は大きくなることとなるので、圧損は減少するのである。

$$\text{圧力回復} \propto \frac{\text{運動量変化量}}{\text{面積}} \quad (1)$$

$$\Delta P_f = 2 f \frac{Lu^2}{\rho D} = 4 f \frac{\rho u^2}{2} \frac{L}{D} \quad (2)$$

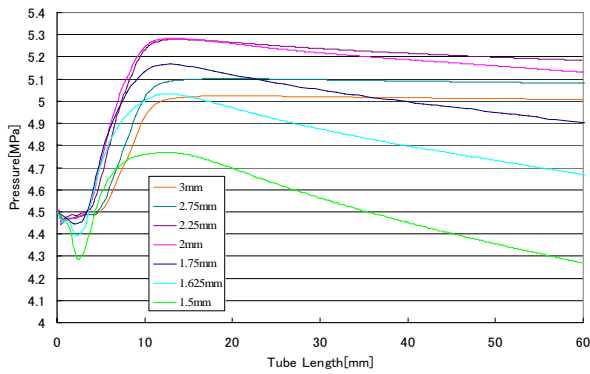


Fig. 7 Relation between mixing tube diameter and Pressure recovery

5.4 直線混合部長さ（ディフューザ位置）

この解析では直線混合部の長さの影響を見る。直線混合部が無い場合である 0mm の位置から 60mm まで直線混合部を伸ばして計 6 種類解析を行い Fig.8 にその結果を示す。

まずはディフューザをつけたことにより、さらなる圧力回復を得ることができていることが確認される。そして 0mm とその他の長さのものを比べてみると、0mm の時よりも最大圧力回復量が大きくなっていることが分かる。このことから、直線混合部内で駆動流と吸引流が運動量交換をしながら混合し、圧力回復を十分にしてからディフューザに流入した方がよいことが言える。また直線混合部が長くなるに従ってディフューザでの最大圧力回復値は小さくなっている。そしてディフューザに流入した後、圧力が一定値に漸近しており、ディフューザ内部での圧力回復量は一定値となっていることもわかる。また直線混合部で駆動流と吸引流が混合した後、さらに速度は一定値に落ち着きディフューザ内部に流入したあとは速度も 0m/s に漸近していく。以上より、気液二相エジェクタに用いられるディフューザでは、流れの運動エネルギーがすべて圧力エネルギーに変換されるとすると、ディフューザによる圧力回復量は、ディフューザに流入する前の運動エネルギーで決定されるので、すなわちディフューザに流入する際速度によって決定される。よって、直線混合部で運動量交換がおこり、昇圧した後、駆動流、吸引流の速度が等しくなり、十分発達した流れになれば、それ以上直線混合部を長くすることは圧力損失により管内圧力が減少していくことになってしまうので、最大圧力上昇の観点からは適さない。また、ディフューザ内で速度が十分減少したら、それ以上ディフューザ自体を長くすることの利点

も無いといえる。

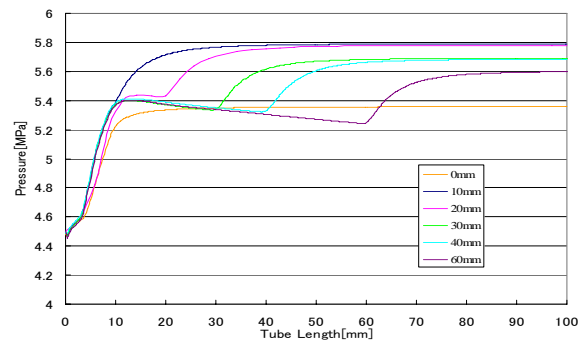


Fig.8. Relation between the diffuser position and pressure recovery

結 論

- 粒子径の影響
液滴の液滴径を変化させて解析を行った結果、液滴径が小さいほうが、直線混合部での昇圧が大きい。また昇圧の立ち上がりも大きく、迅速に混合が行われる。
- ノズル位置
ノズル位置の影響を調べた結果、二酸化炭素気液二相エジェクタでは、ある流量を固定として比べてみると、先細混合部のない方が、圧力回復は大きくなる。
- 直線混合部径の影響
流量が一定の場合、直線混合部の径には運動量減少と断面積のバランスにより最適値が存在する。また圧力損失は管径が大きくなるほど、小さくなる。
- ディフューザ位置
ディフューザを使用することによって更なる圧力回復を得る事ができることを確認した。しかし、直線混合部で運動量交換を終了させた後にディフューザを使用する必要がある。また直線混合部において運動量交換がおこり昇圧が終了した位置よりも直線混合部が長いと、圧力損失があるためにディフューザの効果が減少してしまう。そしてディフューザ自体も速度が流路内で十分減速してしまったら、それ以上長くする必要は無い。

文 献

- (1) 赤木智, 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻飛原研究室, 博士論文(2006)