

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14887

研究課題名（和文）二相流衝撃波による昇圧効果を用いた高効率炭酸ガス冷凍サイクルの開発

研究課題名（英文）Development of High Efficiency Carbon-dioxide Refrigeration Cycle Using Pressure Rise Performance by Two-phase Flow Shock Wave

研究代表者

川村 洋介（Kawamura, Yosuke）

名城大学・理工学部・助教

研究者番号：80783505

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、炭酸ガス冷凍サイクルでの成績係数向上を目的に用いられるエジェクタに衝撃波による昇圧効果を利用した新型エジェクタの開発を目指した。実験では、衝撃波の発生に影響を与える形状因子を特定するために、試作された積層型エジェクタを炭酸ガスヒートポンプサイクルに組み込んで実験を行った。実験結果から、吸引流量なし状態において、混合部及びディフューザー部で約0.85MPaの圧力上昇を得ることができ、本エジェクタにおけるポテンシャルが確認できた。また、同入口条件下での理論計算結果にて約0.91MPaの圧力上昇が示されていることから、試作したエジェクタによって目的の性能が得られることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験より得られた昇圧量と理論計算結果が近い値を示したことから、本研究にて製作したエジェクタの設計時に用いた断熱理論モデルが有効であることが明らかとなった。また、圧力計によって測定された静圧分布と熱電対によって測定された飽和温度を用いて算出された飽和圧力分布が概ね一致していることから、熱電対による飽和圧力測定の有効性が明らかとなった。さらに、今回得られたエジェクタのポテンシャルが発揮された場合、理想的な従来型の膨張弁冷凍サイクルに比べて圧縮機仕事を約38.6%も削減できることから、冷凍空調機器のエネルギー消費削減に大きな期待を持てると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to develop a new ejector that utilizes the pressure rising effect of shock waves for the ejector used for the purpose of improving the coefficient of performance in the carbon dioxide refrigeration cycle. Therefore, in order to identify the shape factors that affect the generation of shock waves, the experiment was conducted by incorporating a prototype laminated ejector into a carbon dioxide heat pump cycle. From the experimental results, with no suction flow rate, a pressure increase of about 0.85 MPa could be obtained in the mixing section and diffuser section, confirming the potential of this ejector. In addition, the theoretical calculation results under the same inlet conditions showed a pressure increase of about 0.91 MPa, demonstrating that the desired performance can be obtained with the prototype ejector.

研究分野：混相流工学

キーワード：エジェクタ 気液二相流 炭酸ガス 冷凍サイクル 衝撃波

1. 研究開始当初の背景

本研究では自然冷媒の中でも炭酸ガス（以降、CO₂）を用いた冷凍空調機の開発に焦点を当てている。その理由は、2016 年 10 月にアフリカのルワンダ・キガリにて開催された第 28 回モントリオール議定書締約国会合(MOP28)でのキガリ改正の締約である。これに伴って、現在、空調機器の主流である HFC 系冷媒がモントリオール議定書の規制対象として新たに加えられることが決まり、また、我が国を含む先進国では、2011～2013 年を基準として冷媒の生産・消費の段階的な削減を行い、2036 年までに 85%減というスケジュールが課せられることとなった。ゆえに、近い将来、家庭用エアコンのみならず、HFC 系冷媒を用いる冷凍空調機器は使用できなくなる可能性が高く、次世代冷媒を用いた冷凍サイクルの開発が急務である。

そこで、注目されているのが自然冷媒である。本研究ではその中でも現在ヒートポンプ式給湯器などで最も普及している CO₂ 冷媒に焦点を当てた。CO₂ 冷媒は臨界温度が約 31 °C と低く、運転時にはサイクルの高圧側が超臨界となる遷臨界サイクルで作動するため、高温の加熱を高効率に行える。一方で、温度差の少ない冷蔵などの冷凍空調域では HFC 系冷媒に比べてエネルギー消費効率(成績係数)が低下する。それは、CO₂ が他の冷媒に比べて使用圧力が高く、また、圧縮機仕事が大さいためである。これに対しては、二段圧縮式ロータリ圧縮機^①による圧縮負荷低減や二相流エジェクタ^②による圧縮機入口圧力の底上げなどの圧縮機仕事低減技術が提案されているが、その効果は現行の HFC 系冷媒における成績係数に比べても劣っており、より効果的な技術開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目標は、二相流衝撃波による昇圧効果を応用した新型エジェクタの開発である。エジェクタの性能は、構成部品であるノズルでのエネルギー変換効率と混合部～ディフューザー一部における圧力回復現象によって左右される。特に、エジェクタ内においては、気液二相流特有の音速の低さに伴って流れが容易に超音速状態となるため、流れ場中に発生する二相流衝撃波や膨張波などの影響を無視することができない。一般に、衝撃波は発生に伴って大きなエントロピーが生成されることから損失としての負のイメージが強い。一方、別の見方をすると、衝撃波面前後にて大きな昇圧効果が得られるため、疑似的な圧縮機として考えられる。

そこで、本研究では、二相流衝撃波による昇圧効果を積極的に利用し、エジェクタでの昇圧量を大幅に向上させることを目指す。これにより、代替フロン冷媒よりも成績係数が劣る自然冷媒の欠点を解消でき、冷凍空調業界における自然冷媒の利用拡大に貢献できると考えている。

3. 研究の方法

二相流衝撃波を用いた新型エジェクタの開発に際し、「二相流衝撃波の発生位置の制御」と「エジェクタ混合部内の流動現象の定量化」が課題であると考え、本研究では前者に注目した。

「二相流衝撃波の発生位置の制御」は、冷凍サイクルの運転域全体にわたってのエジェクタでの安定的な昇圧効果を獲得するために必要不可欠な技術であるといえる。通常、エジェクタ内での衝撃波の発生位置は形状やサイクル運転条件によって定まらないが、本研究ではエジェクタ形状に工夫を加えることで安定的に昇圧効果が得られるエジェクタの開発を目指す。

二相流衝撃波の制御に寄与する形状因子を特定するにあたり、本研究では形状パラメータとしては「混合部壁面角度」と「ディフューザー部でのくさびの有無」に注目し、表 1 及び図 1 に示すように各部の形状を変化させた 3 種類のエジェクタを製作した。なお、Type-1 は混合部断面積が一定のもの、Type-2 は混合部先細型、Type-3 は両角 3 ° のくさび挿入型となっている。寸法値については、圧縮機での圧縮効率を 0.8、機械効率を 0.9、駆動流及び吸引流ノズル効率を 0.8、ディフューザー効率を 0.8 として断熱理論から算出した。これらの流路形状をワイヤー放電加工にてくり抜いたステンレス製のエジェクタプレートを図 2 に示すようにベークライト板及び真鍮板で上下面を挟み込むことで矩形流路断面を有する積層型エジェクタを製作した。なお、エジェクタプレートを挟み込む上面板には圧力計へと接続されたキャピラリーチューブが、下面板には熱電対がそれぞれ取り付けられており、流れ方向に沿う静圧及び飽和圧力分布の測定が可能となっている。また、直径 0.4 mm の微小な測定孔を流路中央だけでなく、流路壁面近傍にも設けることでエジェクタ内の二次元的な静圧分布を実験的に取得し、内部にて発生する衝撃波や膨張波の観測を可能としている。

製作したエジェクタは、図 3 に示す炭酸ガスヒートポンプサイクルを模擬した実験装置に搭載して評価を行う。図中において赤線で示す冷媒経路において、本実験では、吸引流量を任意に変化させるために、一般的なエジェクタサイクルとは異なり、低圧ではなく、高圧にて冷媒流を分岐させる形をとっている。実験装置で用いている熱交換器は水冷式のブレイジングプレート熱交換器であり、タンクに貯めた水をブライン液として循環させ温度調整を行っている。なお、タンクの水は、別途接続された低恒温水循環装置によって水温を一定に保っている。

実験では、駆動流ノズルの入口圧力 8.67 MPa、温度 35 °C におけるエジェクタ内の静圧分布測定を行い、エジェクタでの昇圧量や衝撃波の挙動について検討を行った。

表 1 試作エジェクタ寸法値

※寸法値は全て mm で表記

Type	D_{noz-in}	D_{noz-th}	$D_{noz-out}$	D_{mix-in}	$D_{mix-out}$	$D_{dif-out}$	$L_{noz-con}$	$L_{noz-div}$	L_{mix}	L_{dif}
1	10.00	1.50	1.85	4.15	4.15	10.65	15.86	10.00	15.00	53.05
2					3.36					
3					4.15					

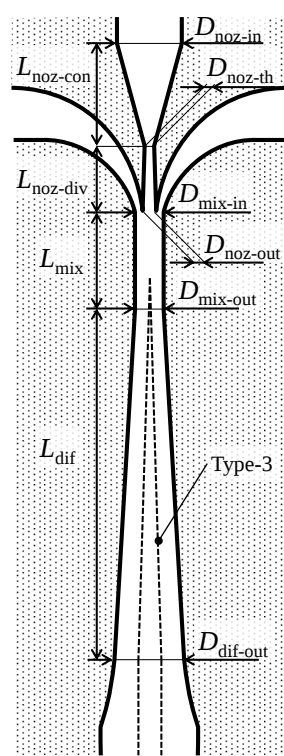


図 1 エジェクタ形状図

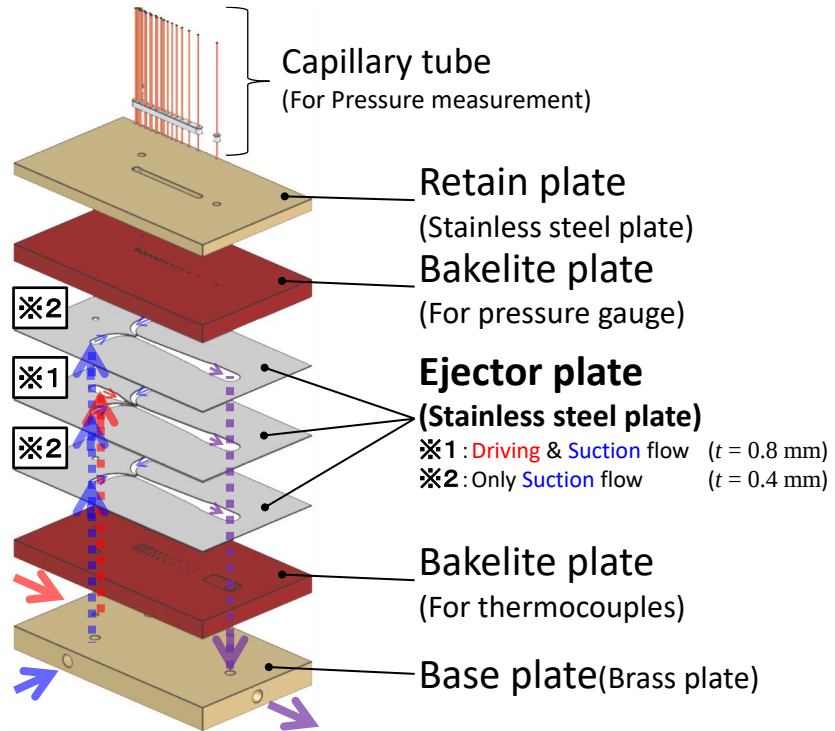


図 2 積層型エジェクタの概略図

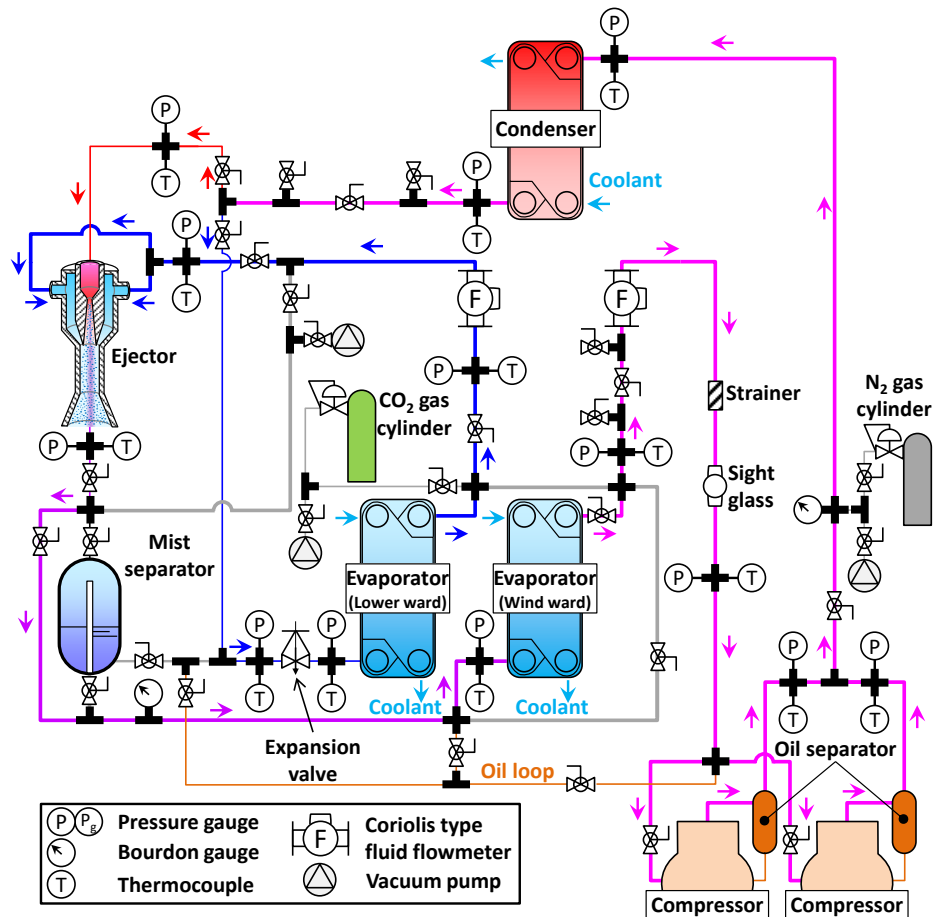


図 3 製作した炭酸ガスヒートポンプサイクルの概略図

4. 研究成果

(1) まず、前述の駆動流ノズル入口条件で吸引流量を無しとした駆動流量 168.4 kg/h の実験において測定された Type-1 エジェクタ内静圧分布を図 4 に示す．図中において、横軸は駆動流ノズル喉部からの距離、縦軸は圧力計によって測定された圧力をそれぞれ表しており、●印でプロットしている．また、×印はエジェクタ出口配管で測定された背圧である．なお、駆動流ノズル内の静圧分布については、エジェクタの構造上測定することができないため本実験では測定していないが、過去の研究成果^④にて超臨界状態から減圧膨張するノズル流れにおいては等エントロピー変化を仮定した均質平衡流 (IHE : Isentropic Homogeneous Equilibrium) のモデルによって表される減圧膨張曲線に近いことが分かっている．そこで、図中には太線にてこの IHE モデルより算出された理論減圧膨張曲線を示している．図 4 より、IHE モデルによる理論減圧膨張曲線に従って減圧された後、混合部に流入する駆動流が約 3.65 MPa 程度まで減圧された後、混合部にて急激に圧力上昇していることが確認できる．その後、ディフューザ一部にて緩やかに背圧 (約 4.5 MPa) まで圧力が上昇していることも確認できる．この時の昇圧量はグラフより、混合部にて混合部入口から約 0.7 MPa、ディフューザ一部にて約 0.15 MPa と読み取れ、結果としてエジェクタにて約 0.85 MPa の昇圧量が得られていることが分かる．本来、吸引流が入ることで運用されるエジェクタであるが、吸引流なしの場合はこのエジェクタにて得られる最大昇圧を表わすことになる．よって、本研究にて設計した Type-1 エジェクタは、駆動流ノズル入口圧力 8.67 MPa、温度 35 °C とした条件において、最大で約 0.85 MPa の昇圧量を得られるポテンシャルを持っていることが分かった．この値は、圧縮効率 0.8、機械効率 0.9、駆動流及び吸引流ノズル効率 0.8、ディフューザ効率 0.8 とした断熱理論計算によって得られた昇圧量 0.91 MPa と近しく、本結果より、製作した実験装置にて目的の性能を示せることが確認された．

(2) 次に、図 5 は、図 4 と同様の入口条件における Type-1 エジェクタ内の飽和圧力分布を示している．なお、飽和圧力は、エジェクタ内に埋め込まれた K 型熱電対によって測定された温度 (飽和温度) を NIST 社の REFPROP 10 にて飽和圧力へと変換したものである．図中にて、○印はエジェクタの流路中央、△はエジェクタ壁面、◇は△とは対の壁面にてそれぞれ測定された温度の飽和圧力を表している．なお、図 5 にも図 4 と同様の IHE モデルにて算出された理論減圧膨張曲線を太線で示している．図 5 を見ると、圧力上昇の傾向は図 4 に示す静圧分布と類似していることが確認できる．一部、壁面での測定点にばらつきがあるが、これは熱電対の挿入深さ不足が考えられるが、壁面に測定点を設けていることに伴う流れへの何らかの影響 (はく離 etc...) も考えられる．いずれにしても、熱電対によって測定された温度から算出した飽和圧力は、圧力計によって測定された静圧と近いことから、傾向はつかめていると考えられる．

(3) 他の条件についても実験を試みたが、熱交換器のブライン液回路における水温制御に問題が生じたため断念した．これは、初年度に導入した開放型低恒温水循環装置 (チラー) の能力不足が要因であると考えられる．研究初年度は、熱交換器のブライン液循環回路が外部 (水道) から連続的に水を供給し、排出する実験環境であった．しかし、研究代表者の所属機関の異動に伴い、研究最終年度は、初年度の環境とは異なり、ブライン液を排出せず、循環させる必要性があった．そのため、熱交換されたブライン液がタンクにて混合されるので、ブライン液の温度制御をせずに放置すると、タンク内のブライン液温度が上昇し続けることとなる．これに対し、初年度にブライン液の精密温度制御用として導入した開放型低恒温水循環装置にて制御を試みたが、結果として、約 2 kW 程度の冷却能力が不足することが判明した．これを解消するためには、新たに約 3 kW 程度の開放型低恒温水循環装置の導入が必要不可欠であると考えられる．

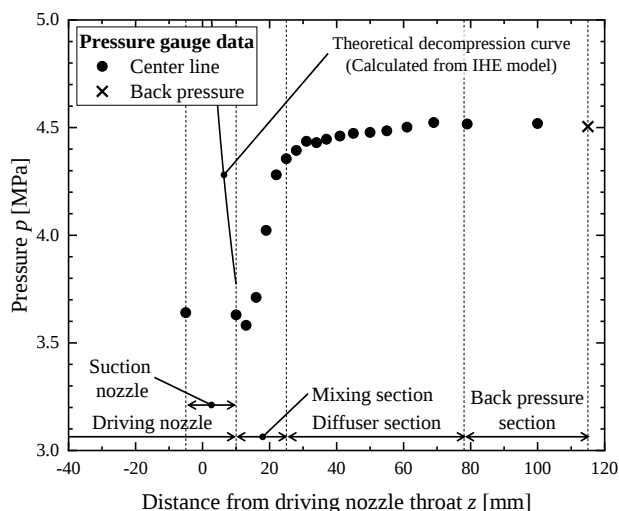


図 4 エジェクタ静圧分布

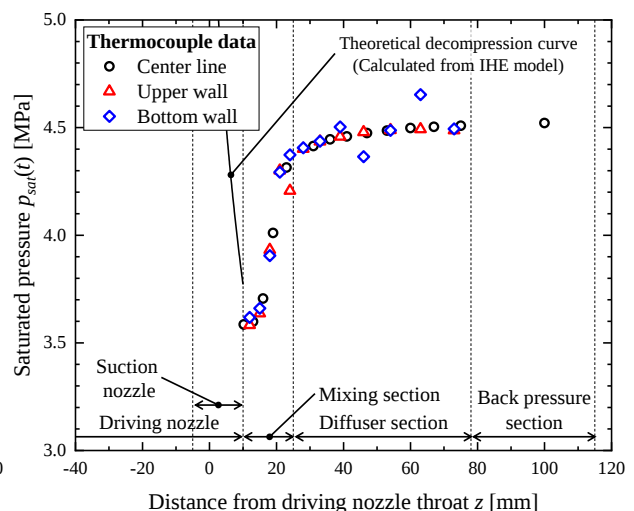


図 5 エジェクタ飽和圧力分布

<引用文献>

- ① 三原ら他 4 名, 高効率 CO₂ 二段圧縮機のコールドチェーンへの適用, Panasonic Technical Journal, Vol.60-No.2, 2014, 90-95.
- ② 中川, 二相流エジェクタ, 冷凍, Vol.79-No.925, 2004, 856-861.
- ③ 中川, 倉科, 炭酸ガス二相流エジェクタの混合特性, 熱工学コンファレンス講演論文集, Vol.07-No.5, 2007, 285-286.
- ④ 川村, 中川, 炭酸ガスの超音速二相流ノズル中に発生する斜め衝撃波, Thermal Science & Engineering, Vol.23-No.2, 2015, 31-39.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 川村 洋介、藤沢 拓弥、中川 勝文	4. 巻 27
2. 論文標題 先細末広ノズル内における炭酸ガス冷媒の可視化に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本伝熱学会論文集	6. 最初と最後の頁 77～85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11368/tse.27.77	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川村洋介
2. 発表標題 先細末広ノズル内における炭酸ガス冷媒の可視化に関する研究
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------