

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14573

研究課題名（和文）太陽熱・低温廃熱を冷熱に変える低温熱源駆動・低環境負荷冷媒エジェクタ冷凍機の研究

研究課題名（英文）Study of an ejector refrigeration cycle with low environmental load refrigerants, driven by solar heat and low-temperature waste heat

研究代表者

國吉 直（Kuniyoshi, Nao）

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号：00781577

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、環境負荷の小さい低圧冷媒であるR1224yd(Z)およびR1336mzz(Z)を作動流体として用いた場合のエジェクタ冷凍サイクルの実験を行った。その結果、同一形状のエジェクタを用いた場合、R1224yd(Z)の方が、COPT（冷凍能力/投入熱量）およびCOP（冷凍能力/送液ポンプの消費電力）が高くなることが分かった。一方で臨界凝縮温度についてはR1336mzz(Z)の方が高くなることが分かった。また、多孔壁キャビティをエジェクタに導入することによる臨界凝縮温度への影響について数値シミュレーションにより検討した。その結果、臨界凝縮温度が改善される可能性があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

60 程度の低温熱源を利用した熱駆動型冷凍機による冷房供給ができれば、冷房による消費電力の削減が期待できる。そこで、本研究では熱駆動型冷凍機の1つであるエジェクタ冷凍機に着目した。本研究では、低環境負荷冷媒であるR1224yd(Z)およびR1336mzz(Z)を用いたエジェクタ冷凍機の実験による性能評価を行った。また、多孔壁キャビティとエジェクタを組み合わせた場合の効果について数値シミュレーションにより検証した。これらの結果はエジェクタ冷凍機の開発に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：This study experimentally investigated the performance difference between an ejector refrigeration cycle with R1224yd(Z) and R1336mzz(Z). The same ejector was used in the experiments with R1224yd(Z) and R1336mzz(Z). As a result, it is confirmed that COPT, cooling capacity divided by heat input, for R1224yd(Z) is larger than that for R1336mzz(Z). On the other hand, it was clear that the critical condensing temperature for R1336mzz(Z) is higher than that for R1224yd(Z). In addition, the effect of combining a porous cavity with an ejector on the critical condensing temperature was numerically investigated. As a result, it was confirmed that the possibility of improving the critical condensing temperature.

研究分野：熱工学，流体工学

キーワード：エジェクタ冷凍機 熱利用 R1224yd(Z) R1336mzz(Z) 数値シミュレーション 多孔壁キャビティ

### 1. 研究開始当初の背景

世界的な冷房需要の増加により、世界の空調機の台数は2050年まで増加することが予想されており<sup>1)</sup>、それに伴う電力需要の増加も予測される。増加する冷房需要を再生可能エネルギーや未利用エネルギーを利用して賄うことができれば、省エネルギー化や温室効果ガスの削減につながり、SDGsにおける目標7(エネルギー)や目標13(気候変動)を達成に貢献する。

世界では、一次エネルギーの約33%が100℃以下の廃熱となっており<sup>2)</sup>、利用可能な100℃以下の熱が多く存在している。これらの廃熱などの熱エネルギーを地域熱供給で利用する場合には、低温で供給することで損失を抑えることができる。地域熱供給が進んでいるデンマークでは50~60℃での供給を目指している。再生可能エネルギーである太陽熱を、太陽熱温水器を用いて利用する場合、夏場には60~70℃程度のお湯を得ることができ、家庭用燃料電池では発生する熱を65℃程度の温水として集熱している。

これらの点から、60℃程度の熱を動力源として駆動することができる熱駆動型冷凍機が実現し、地域や各家庭に普及することができれば、省エネルギーの実現・温室効果ガス削減が期待できる。普及を考える上で、コンパクトでメンテナンス性や運用が容易であることが重要となる。熱駆動型冷凍機の一つであるエジェクタ冷凍機では、エジェクタ自身に駆動部がなく丈夫であり、メンテナンス性がよりという利点があることから、本研究ではエジェクタ冷凍機に着目した。エジェクタ冷凍機では、低環境負荷冷媒を用いて実現することが求められる要件の一つとなる。また、エジェクタ冷凍機では、使用する熱源の温度を低下させた場合、凝縮器で求められる冷却温度もそれに合わせて低下してしまうため、凝縮温度を高く維持できるようにすることが課題の一つである。

### 2. 研究の目的

本研究では、低環境負荷冷媒を用いたエジェクタ冷凍機における低温熱源利用の可能性を検討するため、以下の2点を目的として研究を行った。

1. 低環境負荷冷媒である R1224yd(Z)および R1336mzz(Z)は低圧冷媒であり、冷媒送液ポンプでの消費電力の削減が期待できることから作動流体として選定した。本研究ではこれらの冷媒を用いた場合におけるエジェクタ冷凍機の性能を明らかにすることを目的とする。
2. 多孔壁キャピティと衝撃波の干渉による損失低減効果<sup>3)</sup>に着目した。本研究ではエジェクタに多孔壁キャピティを適用することによる低温熱源利用時の凝縮温度低下の改善効果を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

R1224yd(Z)および R1336mzz(Z)を作動流体として使用した場合の性能評価については、試験装置を用いて実験を行いその評価を行った。図1に実験装置の概略図を示す。R1224yd(Z)と R1336mzz(Z)の実験では同じ形状のエジェクタを用いた実験を行い、冷媒による違いを明らかにする。実験では、蒸気発生器、蒸発器および凝縮器に温水、冷水および冷却水を循環させ、各熱交換器内が任意の温度になるよう調整した。蒸気発生温度、蒸発温度および凝縮温度については、計測した圧力から、各熱交換器が飽和状態であると仮定し REFPROP<sup>4)</sup>を用いて求めた。実験では、蒸気発生温度および蒸発温度を固定し、凝縮器温度を変更させることでエジェクタの性能が急激に低下する点である臨界点を求めた。加熱量  $Q_g$  および冷凍能力  $Q_c$  については、温水および冷水の各熱交換器の入口温度および出口温度と流量から算出した。また冷媒送液ポンプの消費電力  $W$  についても計測を行った。実験結果より、 $COP_T (=Q_c/Q_g)$  および  $COP (=Q_c/W)$  を求め比較を行った。

多孔壁キャピティによる効果については数値シミュレーションにより検証した。図2に多孔壁キャピティを設置した場合のノズルおよび多孔壁キャピティ周りの計算領域の図を示す。数値シミュレーションでは計算負荷を低減するため、2次元軸対称とし、定常計算を行った。その

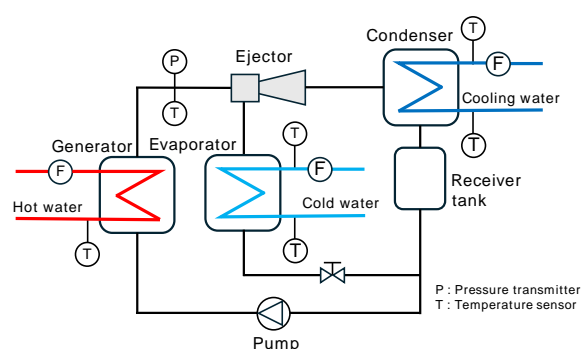


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

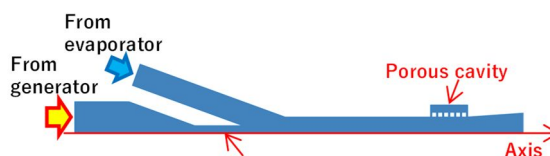


Fig.2 Calculation domain around the nozzle and porous cavity

ため、多孔壁キャビティの多孔壁はスリットとして扱うこととした。数値シミュレーションでは多孔壁キャビティがある場合とない場合のシミュレーションを実施した。対流流束については密度ベースソルバーである Roe スキームを用い、乱流モデルは RNG k- $\epsilon$  モデルを用いた。また、空間離散化には二次精度の風上差分を用いた。作動流体として R1224yd(Z)を用いた。数値シミュレーションでは蒸気発生温度および蒸発温度を 60 °C および 15 °C の場合の条件で解析を行い、凝縮温度を変えた場合の性能を求めた。過熱度については実験結果を基に決定した。数値シミュレーションでは、蒸気発生器からの駆動流質量流量 ( $m_g$ ) と蒸発器からの吸引流質量流量 ( $m_s$ ) から質量流量比  $\omega$  ( $=m_s/m_g$ ) を求め性能を比較した。

#### 4. 研究成果

図 3 は蒸気発生温度 60 °C、蒸発温度 15 °C の場合における COP<sub>T</sub> の結果を示している。比較のため、HFC 系冷媒の低圧冷媒ある R245fa の結果も併せて示す。凝縮温度を高くした場合に急激に COP<sub>T</sub> が低下する点が存在する。この点を臨界点と呼び、その点での凝縮温度を臨界凝縮温度と呼ぶ。臨界凝縮温度が高い方がより高い凝縮温度で安定した運転が可能であるため、高いことが望まれる。結果より、R1224yd(Z)は R245fa に比べ COP<sub>T</sub> および臨界凝縮温度が高くなることが分かった。一方で、R1336mzz(Z)では、R245fa と比べ、凝縮温度が臨界凝縮温度より低い場合における COP<sub>T</sub> はわずかに低下するが、臨界凝縮温度は高くなることが分かった。図 4 は蒸気発生温度 60 °C、蒸発温度 15 °C の場合における COP の結果を示している。R1224yd(Z)が最も高い COP を示しており、最大で 40 以上の値を示している。COP の算出には電力として冷媒の送液ポンプの消費電力のみを考慮しているが、一般的な蒸気圧冷凍機での COP が 6 程度であることを考えると非常に消費電力が少ないシステムであると考えられる。R245fa と R1336mzz(Z)について、臨界凝縮温度以下での COP<sub>T</sub> の差は小さいが、COP ではその差が大きくなっている。これは、R1336mzz(Z)は R245fa に比べて、投入熱量と冷凍能力が低下するが、それに対してポンプの消費電力の低下量が小さいためである。

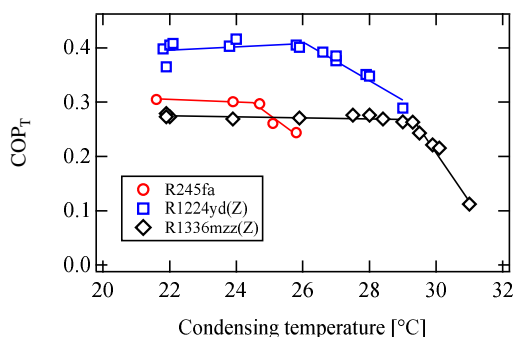


Fig.3 COP<sub>T</sub>

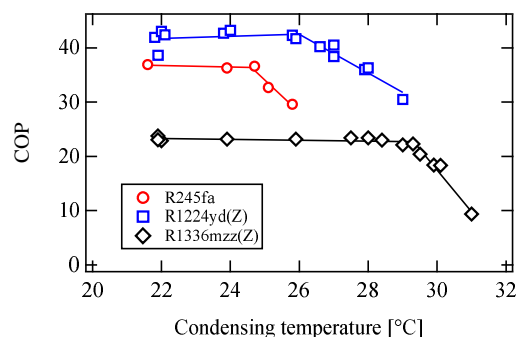


Fig. 4 COP

次に多孔壁キャビティを用いた場合の臨界凝縮温度に与える影響について検討した。数値シミュレーションの結果の一例を図 5 に示す。図

5 は多孔壁キャビティを設置した場合における凝縮温度が 27 °C の場合の結果となっている。ノズルからの噴流が不足膨張噴流となっており、マッハディスクが形成されていることが確認できる。また、衝撃波が多孔壁キャビティのすぐ近くに位置している。図 6 は多孔壁キャビティを設置した場合および設置しない場合における質量流量比の結果を示している。どちらの場合においても凝縮温度が 27 °C から 29 °C にかけて質量流量比  $\omega$  が大きく低下しており、臨界点が 27 °C から 29 °C の間に存在していることがわかる。27 °C から 29 °C までの傾きが多孔壁キャビティを設置した場合の方が小さくなっていることから、多孔壁キャビティを設置しない場合に比べ臨界点はより高い凝縮温度の位置に存在すると考えられる。一方で臨界点より低い凝縮温度では質量流量比への影響はみられない。これらの結果から、多孔壁キャビティを設置したことにより、臨界凝縮温度に影響を与え、臨界凝縮温度を高くできる可能性があることが分かった。

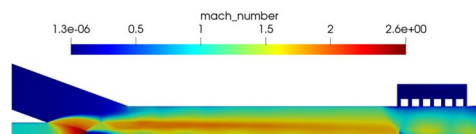


Fig.5 Mach number contour

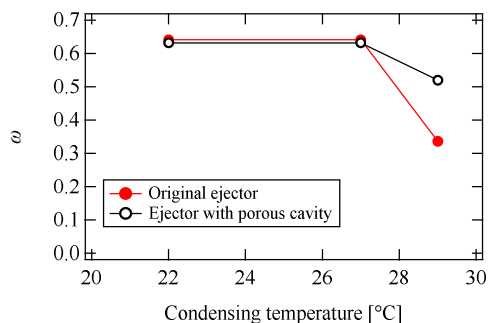


Fig.6 Effect of a porous cavity on the ejector performance

た．詳細な影響を検討するには凝縮温度の刻み幅を細かくし，解析を行う必要がある．また，設置位置や多孔壁の孔のサイズおよび数などを変更することでこれらの影響の大きさ変わる可能性があり，今後の検討課題となる．また，今回は計算負荷低減のため２次元での数値シミュレーションを実施したが，３次元での数値シミュレーションを行い，多孔壁キャビティをスリットではなく多孔壁として扱った場合の検討も今後必要となる．

#### <引用文献>

C. Forman, I. K. Murtala, R. Pardemann, B. Meyer, Estimating the global waste heat potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.57(2016), pp.1568-1579

IEA, The Future of Cooling, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>, (閲覧日：2020 年 10 月 7 日)

奥井英貴，朴明寛，大島修造，山根隆一郎，多孔壁およびバイパスをもつ直感内の疑似衝撃波，日本機械学会論文集（B 編），Vol.65，No.633(1999)，pp.1542-1550

E. W. Lemmon, I.H. Bell, M.L. Huber and M.O. McLinden, NIST Standard Reference Database 23, REFPROP Ver.10.0, (2018)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1 . 発表者名 笹原滉大, 伊藤瑤姫, 國吉直, 小嶋満夫, 寺島康平, 佐藤春樹
2 . 発表標題 エジェクタ冷凍サイクルにおけるエジェクタ内流動のモデル化に関する検討
3 . 学会等名 第57回空気調和・冷凍連合講演会
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 Tamaki Ito, Nao Kuniyoshi, Mitsuo Kojima, Kohei Terashima, Haruki Sato
2 . 発表標題 Experimental Assessment on the Performance Difference between R245fa and R1224yd(Z) as the Working Fluid of an Ejector Refrigeration Cycle
3 . 学会等名 26th IIR International Congress of Refrigeration ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Nao Kuniyoshi, Tamaki ITO, Kodai Sasahara, Mitsuo Kojima, Kohei Terashima, Haruki Sato
2 . 発表標題 Current Results of Our Experimental Development of an Ejector Refrigeration System Using Environmentally Friendly Working Fluids
3 . 学会等名 International Workshop on Environmental Engineering 2023 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 笹原滉大, 伊藤瑤姫, 國吉直, 小嶋満夫, 寺島康平, 佐藤春樹
2 . 発表標題 R1336mzz(Z)を用いたエジェクタ冷凍サイクルの実験結果とその他の低圧冷媒を用いた場合の性能比較
3 . 学会等名 2023年度日本冷凍空調学会年次大会
4 . 発表年 2023年

1．発表者名 笹原滉大，伊藤瑤姫，國吉直，小嶋満夫，寺島康平，佐藤春樹
2．発表標題 環境に配慮した冷媒R1336mzz(Z)を用いたエジエクタ冷凍サイクルに関する性能試験
3．学会等名 第56回空気調和・冷凍連合講演会
4．発表年 2023年

1．発表者名 國吉直，伊藤瑤姫，寺島康平，小嶋満夫，佐藤春樹
2．発表標題 R1224yd(Z)を用いたエジエクタ冷凍サイクルのエクセルギーによる性能評価の検討
3．学会等名 第32回環境工学総合シンポジウム2022
4．発表年 2022年

1．発表者名 伊藤瑤姫，國吉直，寺島康平，小嶋満夫，佐藤春樹
2．発表標題 作動流体R245faあるいはR1224yd(Z)を用いた場合のエジエクタ冷凍サイクル性能の検討
3．学会等名 2022年度日本冷凍空調学会年次大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 伊藤瑤姫，國吉直，寺島康平，小嶋満夫，佐藤春樹
2．発表標題 自然環境に優しい冷媒R1224yd(Z)によるエジエクタ冷凍サイクルの性能試験結果
3．学会等名 第55回空気調和・冷凍連合講演会
4．発表年 2022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
---------	---------