

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560242

研究課題名(和文) 太陽熱駆動エジェクター式ヒートポンプの数理モデル構築と最適設計・制御に関する研究

研究課題名(英文) Mathematical model, and optimum design and control of solar driven ejector heat pump

研究代表者

齋藤 潔 (Saito, Kiyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90287970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、エジェクターを利用することにより太陽熱で加熱された高圧の冷媒の力学的エネルギーを冷媒の圧縮に用いることが可能な太陽熱駆動エジェクター式ヒートポンプの設計手法を明確化した。具体的には、可視化、モデリングによりエジェクターの詳細な特性を明らかにする。同時に太陽熱集熱器の基本特性を実験、解析から明らかにした。そして、エネルギーシステムの統一的解析論を適用してヒートポンプの解析モデルを構築し、その特性を明らかにした。本研究では、再生可能エネルギーを有効活用する新しいヒートポンプサイクルの確立とエネルギーシステム解析論の高度化、汎用化により省エネルギーに貢献する。

研究成果の概要(英文)：This research focused on the ejector heat pump system in which the pressureized refrigerant vapor by solar thermal energy can drive the ejector that can be used instead of the compressor. This research revealed the mathematical model and design method of the solar driven ejector heat pump system.

The detailed performance of the ejector element was clarified with visualization and mathematical analysis. Using the unified analysis theory of the energy system the applicant had focused on for 15 years, the mathematical model of the ejector heat pump was constructed and the system performance was revealed. This results contribute the development of new heat pump system that can be driven by low grade heat source and upgrading of the unified analysis theory of the thermal system.

研究分野：制御工学

キーワード：エジェクター 省エネルギー ヒートポンプ

1. 研究開始当初の背景

民生、業務部門におけるエネルギーの使用量は、我が国におけるエネルギー全消費量の60%を占めるにいたっており、増加の一途をたどっている。民生、業務部門の中でも空調、給湯により消費されるエネルギー量は50%近くに達している。このような中、太陽エネルギーは、再生可能エネルギー法が採択されたこともあり、今後その利用が急増していくことになるであろう。

太陽エネルギーの利用方法は、現在、電気と熱に大きく分類される。太陽光発電は、効率も向上しコストダウンも図られてきた。しかし、変換効率は普及機レベルでは未だに20%にも満たない低いものである。一方で太陽エネルギーを熱として利用する太陽熱集熱器は変換効率が電気と比較すれば2倍以上あり、そのコストも低下してきている。このため、熱として利用可能な低コストで高効率な空調システムが提案できれば省エネルギーに対して極めて有効である。

そこで、本研究ではエジェクター式ヒートポンプを対象とする。本システムは、煩雑な熱・物質移動現象を伴う複数の熱交換器等を有するソープションシステムや熱交換器の性能に悪影響を及ぼすオイルを必要とする圧縮機を利用する蒸気圧縮式ヒートポンプとは異なり、図1に示すようにエジェクターによって太陽熱で加熱した高圧の冷媒の力学的エネルギーを冷媒蒸気の圧縮に利用することにより、サイクルを形成するシステムである。

これまでにエジェクターは、様々な場面で用いられてきたが、近年CO₂ヒートポンプシステムにおいて膨張過程の不可逆損失を回収するデバイスとして成果を上げてきた。

一方で、本研究で対象とするエジェクター式ヒートポンプでは、運転方法が従来の圧縮式ヒートポンプとは異なるだけでなく、エジェクターがサイクルを形成する主要な構成要素となるため、冷媒の選定を含めた機器の設計・制御手法が極めてシビアなものとなる。また、このヒートポンプは太陽熱を利用するため、時間的に変動する運転状態に対する適切な制御手法の確立が大きな課題となる。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、将来性を十分に有する太陽熱駆動エジェクター式ヒートポンプの最適設計・制御手法の確立をエネルギーシステムの統一的非常解析論の高度化、汎用化を目指す一連の研究の一つと捉え研究期間内に次のことを明らかにする。

エジェクター式ヒートポンプの数理モデルを構築するとともに数値解析を行い、システムの詳細な特性を明らかにすると

ともに最適化を実現する。

エジェクター式ヒートポンプ評価試験装置によりその性能を実験により詳細に評価するとともにモデルの妥当性の検証を行う。

エジェクター式ヒートポンプを駆動するための太陽集熱器のモデル化を実施し、ヒートポンプ駆動のための特性を把握する。

今回対象とするエジェクター式ヒートポンプは、新しいヒートポンプサイクルであり、このサイクルの最適化は、学術的にも新規なものである。また、本システムの解析を通じて今後利用が増える太陽熱をはじめとした不安定な再生可能エネルギーを利用するシステムの運用に対して何らかの汎用的な設計・制御指針が確立されれば、省エネルギーに大きな貢献ができる。

3. 研究の方法

(1) エジェクター本体の設計

本研究はCFD解析を用いて、エジェクターの設計値を変更することで実験では観察しえないエジェクター内部の流れの確認を行い、その性能について検討する。このエジェクターの特性評価を行うにあたって、空気を用いた要素でのシミュレーションにより、温度および圧力条件変化における性能予想を行う。

エジェクター単体の解析モデルは理想的な等エントロピ流れが得られたと仮定し、エジェクター内部での流体損失は損失係数及び断熱効率で与える簡易モデルを構築し、熱交換器モデル等と組み合わせたサイクル計算を可能とするモデルの構築を行う。初期の段階では、単純に熱交換器が等圧変化し、冷媒も単純に飽和状態を保ちながら凝縮変化及び蒸発変化するという計算を行う。再生器、蒸発器では大きく過熱状態となることは考えにくく、おおよその性能値は概算できると考える。

(2) エジェクターのモデル化および性能向上検討

本研究を進める上で大きな重点を置く項目として挙げられるのが、エジェクター本体の製作である。また、エジェクター本体の製作だけに留まらず、対象とする熱駆動型エジェクター式ヒートポンプの実験装置の設計・製作も行う。実験装置としては完全気体として扱うことができ、データ解析が比較的容易に行える空気を用いたエジェクター単体の要素実験装置と、実際に冷房システムとしてはたらくために必要な冷媒を用いたシステム実験装置の両方を製作する。研究過程で製作したシステムによって熱駆動型エジェクター式ヒートポンプの特性実験を行い、

性能評価を通して性能向上の要因抽出，及び改善項目の検討を行う。

空気によってエジェクター本体の性能や特性が把握出来たととしても，その性能値と実際に冷媒を用いた場合の性能値に相関性があるかはわからない．そこで，製作したシステムに実際に用いられると想定できる冷媒を充填し，外部環境温度を冷水や温水を用いて再現し，システムの特性実験及び特性評価を行い，エジェクターの有用性を確認する．

(3) 太陽集熱器のモデル化

エジェクター式ヒートポンプは熱駆動であるため，熱を収集する太陽集熱器の特性把握が特に重要となる．そのため，平板型太陽集熱器に着目し，日射量や外気条件から，熱源水生成の特性を明らかにすることで，ヒートポンプ駆動のための特性を明らかにする．

4. 研究成果

(1) エジェクター本体の設計

エジェクターの設計について述べる．高効率なエジェクターを設計するために，エジェクターの各部(駆動流ノズル，吸引部，混合部，ディフューザー)について，理想的な形状にする必要がある．

吸引流形状に関して述べる．混合部における損失をすることを目的として，駆動流と吸引流の速度差を小さくすることに焦点を当てる．そのために，吸引流の形状を出口に向かうに向けてノズル化し，断面面積を小さくすることで加速させ，駆動流出口との速度差を小さくする．

駆動流の検討段階では，吸引部形状は4本の吸引パイプであった．また，この形状で混合部では，渦が発生していた．混合部での渦の発生を抑制する吸引流の形状を4本の吸引パイプのように大きな急拡大部が無い形状を目指す必要がある．このことを踏まえて，吸引流形状を4本の吸引パイプ形状ではなく，駆動流と同心円状のパイプ形状を採用する．これにより，吸引流が混合部に流入する際に生じる急拡大部を抑えることができると考える．吸引部の変更に伴って混合部の形状も限定される．本研究では混合部の形状検討は吸引部の形状に含むものとする．

以下に吸引部に関する3DCADモデルを示す．

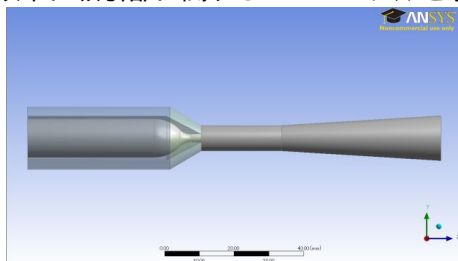


図1 Concentric circle suction model

次に本解析の設計値を以下に示す．

表1 Design value

		Unit	Value
Drive nozzle	Length	mm	50.0
	Inlet diameter	mm	11.1
	Throat internal diameter	mm	2.14
	Outlet diameter	mm	2.50
	Length of level nozzle	mm	47.00
Suction pipe	Length	mm	50.00
	Inlet surface area	mm ²	122.7
	Outlet surface area	mm ²	51.84
Mixing section	length	mm	23.21
	Inlet diameter	mm	8.50
	Outlet diameter	mm	8.50
Diffuser	length	mm	45.79
	Inlet diameter	mm	8.50
	Outlet diameter	mm	13.00
	Extent angle	°	7.0
	mesh number		185876

以下に解析結果を示す．

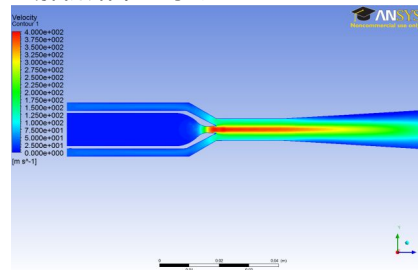


図2 Velocity (suction)

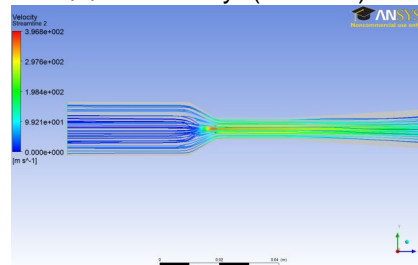


図3 Stream Line (suction)

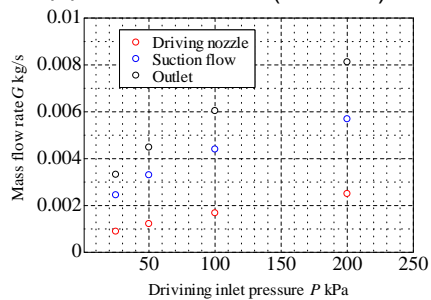


図4 Mass flow rate

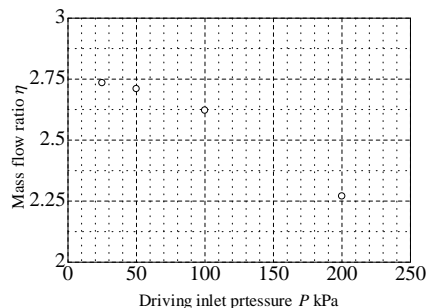


図5 Mass flow ratio

図2, 図3にCFD解析の結果を示す. 図4および図5に解析結果をまとめた質量流量と質量流量比のグラフを示す. 図4は横軸に駆動流入口圧力, 縦軸に質量流量としたグラフである. 図4より, 他のモデルと同様に駆動流圧力が上昇すると駆動流流量, 吸引流流量, エジェクター出口流量がそれぞれ上昇していることが確認できる. 次に図5は横軸に駆動流入口圧力, 縦軸に質量流量比としたグラフである. 図5より, 駆動流入口圧力が上昇するにつれて質量流量比が減少することが見て取れる.

(2) エジェクター要素実験および性能向上検討

理想気体として扱うことができる空気を用いたエジェクター要素実験を行う.

実験結果を図6, 図7に示す. また, 本要素実験において明らかとなった駆動流, 吸引流, 質量流量比, 各種圧力のエジェクターの基本的特性, 実験結果から考察できる内容を実験結果として後にまとめた

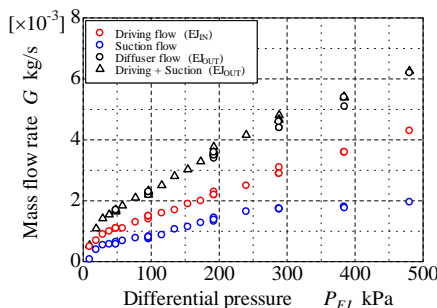


図6 Element experiment result (Condition1)

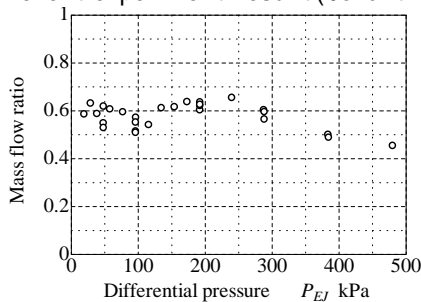


図7 Element experiment result (Condition1)

図6, 図7に示した空気実験結果より, 以下の考察が得られる. 条件4,5で実施した吸引流入口の負荷をパラメータとした特性実験からは, 吸引流入口に負荷を与えた場合に各質量流量や質量流量比が減少することが確認され, システム内で膨張弁などの絞り機構によって性能が著しく低下することが示唆される結果が得られた. この特性実験により, 吸引部の負荷によって著しく吸引流質量流量が減少してしまうことが判明したため, エジェクターおよび, システムを設計する際

には, 絞りによる吸引流の速度増加と流量減少の相反する要素における最適設計の必要性があると思われる.

つぎに, これまでに構築した数値モデルの妥当性を検証するにあたって, 実験条件1における実験フローを想定したシミュレーションを行い, 実験結果と解析結果を比較した.

エジェクターの3Dモデルおよび, メッシュモデルを図8にまとめる. モデル解析条件は要素実験を模した条件で行った. 以下に, 解析条件と境界条件を示す. 解析条件として, 要素実験と同様にエジェクター入口圧力をパラメータとして与える.

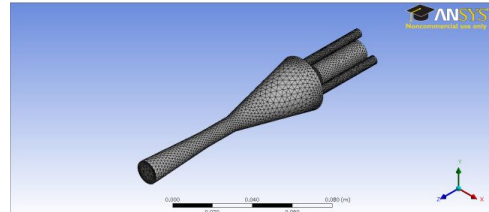


図8 Ejector mesh model

表2 Analysis condition

	Unit	Value
Fluid	-	Air
Number of mesh	-	153853
Driving inlet temperature		19.5
Driving inlet pressure (G)	kPa	29.4, 49.0, 78.5, 98.1, 137.3, 156.9, 196.1, 245.2, 294.2, 392.3
Number of suction pipes	-	4
Suction inlet temperature		0
suction inlet pressure (G)	kPa	0
Diffuser outlet pressure(G)	kPa	0.686, 1.08, 1.47, 1.96, 2.75, 2.94, 4.12, 5.39, 6.67, 7.85
Specific heat	J/kg.K	1007
Thermal conductivity	J/kg.K	0.02614

空気を用いた要素実験結果とCFD解析による解析結果を比較した結果(駆動流質量流量, 吸引流質量流量, 質量流量比)を図9~図12にまとめる. CFD解析においては, 解析結果からエジェクター断面の各状態を抽出することが可能であるため, 駆動流ノズルがラバールノズルとして機能しているかを確認するために駆動流ノズルスロット部と出口部の流速と密度をプロットすることでノズル特性を確認する.

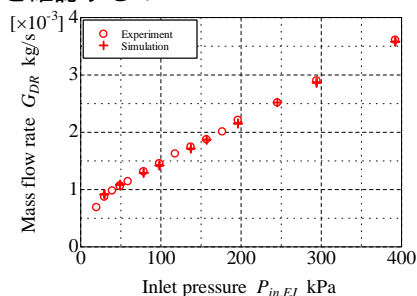


図9 Mass Flow rate (driving flow)

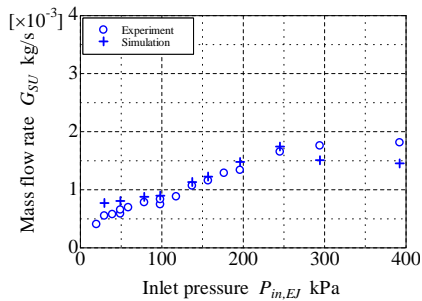


図 10 Mass flow rate (suction flow)

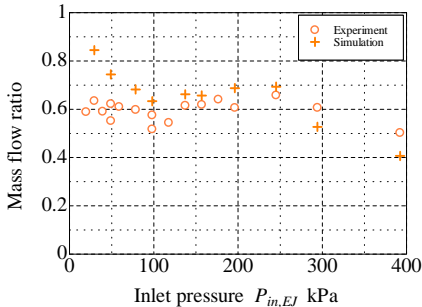


図 11 Mass flow ratio

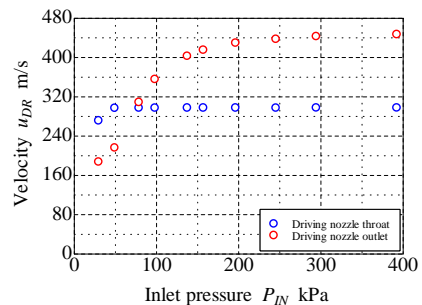


図 12 Velocity

図 9 には、縦軸に駆動流に流れる質量流量、横軸に駆動流の入口圧力をとったグラフであり、丸のプロットがエジェクターの要素実験結果とし、十字のプロットが CFD による解析結果とする。図 9 より、駆動流の質量流量に関して実験と解析結果が非常に高い精度で一致していることが確認できる。この誤差を算出した結果、 $\pm 5\%$ の範囲に収まっている結果が得られた。次に図 10 は吸引流に関するグラフで図 9 と同様の軸およびプロットとする。吸引流質量流量に関しては、入口圧力が 100kPa ~ 250kPa までの範囲で $\pm 10\%$ の精度の結果が得られたが、その前後で誤差の大きいことがわかった。

次に、図 12 より、駆動流ノズルの流れに関する考察が行える。これらのグラフは縦軸を駆動流ノズルのスロート部における流束および密度とし、横軸を駆動流入口圧力としたグラフである。入口圧力がおよそ 78.5kPa の状態で駆動流出口流速がスロート流速を上回り、駆動流出口密度がスロート密度を下回っていることが確認できる。このことから、この駆動流入口圧力が 78.5kPa 以上の圧力条件では駆動流ノズルが超音速ノズルとして機能していると考えられる。

エジェクター要素実験の内部流れを確認するために、CFD 解析を行った。解析結果を図 13 にまとめる。各図の左側の流線を示す図から、混合部において渦が発生していることが確認できる。

本研究で製作したエジェクターの混合部形状に着目すると、渦流れの発生原因に関しては、駆動流ノズルおよび吸引流パイプの各出口から混合部に流入する際に、急拡大管のような形状になっていることに起因すると予想される。本解析で明らかとなった流動特性解析結果はエジェクターの性能向上に向けたモデル検討に生かしていく。

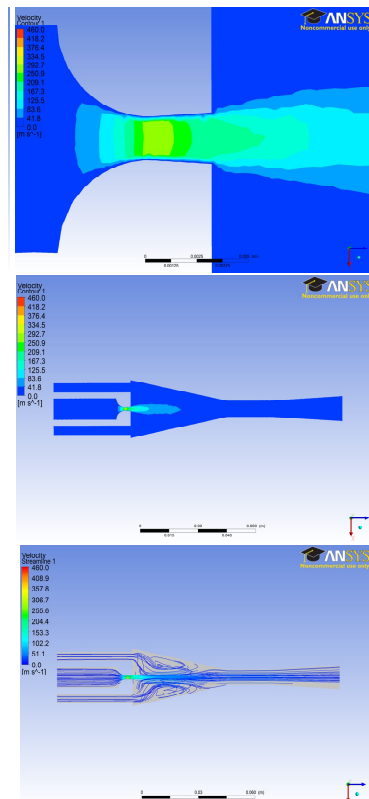


図 13 Analysis result
(Inlet pressure = 29.4 kPa)

(3) 太陽集熱器のモデル化

以下に太陽集熱器のモデル化について述べる。平板型太陽集熱器は受光面積と集熱面積がほぼ等しい非集光式の集熱器であり、比較的安価な集熱器である。平板型はこれまで種々の構造・材料が検討されてきたが、現在の現場設置型ユニット式は図 14 に示すように、透過体として耐久性に優れた強化ガラス、金属製の外装箱の中に、選択吸収面処理された金属製集熱体と裏面に断熱材が納められている。

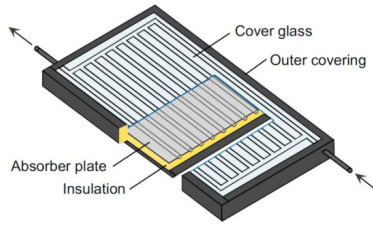


図 14 Flat plate type solar collector

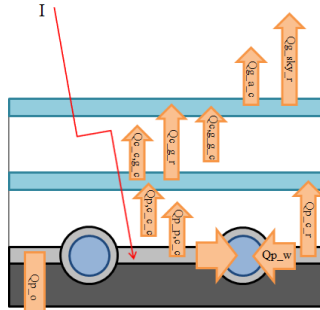


図 15 Flat plate heat balance

シミュレーションにより、月別、入口流量別に、入口温度をパラメータとした結果を図 16、図 17 に示す。

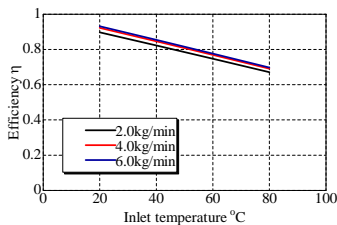


図 16 8月の結果

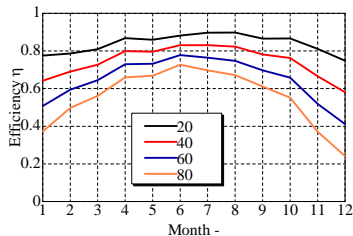


図 17 年間計算結果

結果から、平板型太陽集熱器の特性には、以下の特徴があることがわかる。

- ・ 入口温度が高くなればなるほど、効率が下がる傾向にある。
- ・ 入口条件が液相条件で低温の場合は、流量が大きくなると効率がわずかに上昇する傾向にある。
- ・ 季節が冬になるほど、入口温度、エンタルピーが効率に与える影響は大きくなる。
- ・ 月による特性のグラフから、効率は基本的に6月をピークとして放物線を描くが、10月は効率が上がっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計1件)査読あり

今林 正剛, 齋藤 潔, 太陽集熱器の数理モデルの構築とその特性解析に関する研究, 日本機械学会論文集B編, Vol. 79 (2013) No. 801 p. 814-818.

〔学会発表〕(計1件)

今林正剛, 木村健, 齋藤潔, 太陽集熱器の数理モデルの構築とその特性解析に関する研究, 第23回環境工学シンポジウム, 2013年7月10~12日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 潔 (SAITOH Kiyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 90287970