

機関番号：12605

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760150

研究課題名 (和文) トップランナー性能を持つ温水駆動冷凍機の開発

研究課題名 (英文) Development of the hot water driven refrigerator with a top-runner performance

研究代表者

宮崎 隆彦 (MIYAZAKI TAKAHIKO)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：70420289

研究成果の概要 (和文)：本研究では、80℃以下の温水を利用して10℃前後の冷水を供給する吸着冷凍機の高性能化を目的とし、新たな吸着冷凍サイクルの提案・実証を行った。シミュレーションによる性能予測から、提案する二段蒸発型吸着冷凍機は従来型の1.5倍の冷凍能力、1.7倍のCOPとなることが予測された。実験機による性能検証の結果、想定した温度・圧力範囲で動作することを確認し、温水温度80℃の条件においてCOPが約1.5倍となることを実証した。

研究成果の概要 (英文)：The study aims at the improvement of the hot water driven adsorption chiller by the proposed innovative adsorption chiller. The cooling capacity and the COP of the proposed chiller were predicted by simulation, and they were increased by 50% and 70%, respectively, compared with the conventional adsorption chiller. The new adsorption cycle was examined by experiment and it was verified that the improvement of the COP was by 50%.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：冷凍・空調、吸着冷凍機、吸着、排熱利用

1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスの排出抑制が世界的な課題であり、地球温暖化対策としての省エネルギーが求められている。化石燃料の燃焼によって得られる高温のエネルギーを環境温度付近まで無駄なく使い尽くすためには、従来は環境に放出されていた低温熱 (40～80℃程度) を有効活用する技術が必要である。

吸着冷凍機は、低温熱を冷熱に変換する装置であり、排熱や太陽熱を利用した空調や産業用冷水製造を可能にする。一方で、吸着冷

凍機の普及には小型・高性能化が求められており、特に COP の向上、装置容積あたりの冷凍能力の向上が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、吸着冷凍機の性能向上を目的に新たな吸着冷凍サイクルを提案し、シミュレーションによる性能予測と実験によるサイクルの実証、性能の検証を行う。それらの結果から、高性能型吸着冷凍機の開発指針を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 二段蒸発型吸着冷凍機の概要

二段蒸発型吸着冷凍機の概略図を図1に示す。この冷凍機は、3つの吸着器、1つの凝縮器、2つの蒸発器で構成される。2つの蒸発器には冷水が連続して流入するが、先に流入する蒸発器で冷却された分、後に流入する蒸発器は器内の冷媒蒸発温度が低くなる。両器内は器内温度に対応した飽和蒸気圧となっているため、この温度差により器内の圧力差が生まれ、高压蒸発器と低压蒸発器に区別される。吸着材は、相対圧が高いほど平衡吸着量が増加するため、2つの圧力レベルによる二段階の吸着によってサイクルの吸着濃度幅が拡大する。

二段階の冷却について、図2の二段蒸発型吸着冷凍サイクルと単段型吸着冷凍サイクルのP-T-X線図を用いて説明する。P-T-X線図は、横軸が吸着器の吸着材温度[°C]、縦軸が蒸気圧[Pa]である。また、斜線は吸着材の吸着濃度を示しており、グラフの左にいくほど吸着濃度は高くなる。図2は従来型吸着冷凍サイクルと二段蒸発型吸着冷凍サイクルにおける1つの吸着器内の状態変化をそれぞれ破線と実線で表している。2つのサイクルの違いは、吸着過程(②-③)の後の過程である。従来型においては、予熱過程(③-④)が行われる。しかし、二段蒸発型においては、吸着器の接続先を低压蒸発器から高压蒸発器に切り替えることで、さらに高压吸着(⑤-⑥)を行う。この高压吸着過程は、低压吸着過程時に比べ相対圧が上昇しているため、吸着材の平衡吸着量が増大している。このことから、従来型に比べ、温水温度や冷却水温度を変えることなく吸着濃度幅が拡大されるため、性能の向上が期待できる。また、従来型に比べ、二段蒸発型は冷水の入口出口温度の差が大きくなり、大温度差の冷水搬送となる。したがって少ない流量で必要な冷凍能力を得ることができ、ポンプ動力の削減が期待できる。

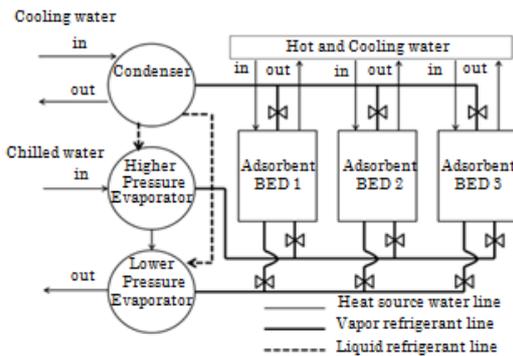


図1 二段蒸発型吸着冷凍機の構成

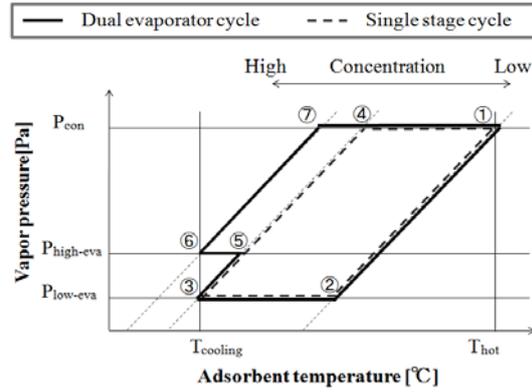


図2 P-T-X線図によるサイクルの表現

(2) シミュレーションによる性能予測

各熱交換器内の熱・物質収支から温度、吸着量変化を計算するシミュレーションプログラムを作成し、冷凍能力およびCOPを予測した。

シミュレーションの条件を表1に表す。

表1 シミュレーションの条件

吸着剤	シリカゲル
冷媒	水
温水入口温度	75°C
温水流量	1.3kg/s
冷却水温度	30°C
冷却水流量	1.3kg/s (吸着器) 1.6kg/s (凝縮器)
冷水入口温度	16°C
冷水出口温度	7°C (平均)
脱着時間	420s
予熱/予冷時間	30s

(3) 実験による性能検証

① 単ベッドによるサイクル挙動の解析

実験装置概略図を図3に示す。本実験では一つの吸着器の挙動に着目する。実験装置は凝縮器、吸着器、高压蒸発器、低压蒸発器で構成されており、それぞれの器内温度、圧力、循環する冷水温水の流量及び入口出口温度を計測する。また吸着器のシリカゲル充填部には吸着温度を測定するための熱電対が挿入されている。図中のConは凝縮器、Ad-BEDは吸着器、H. Evaは高压蒸発器、L. Evaは低压蒸発器を示す。

初めに、二段蒸発型吸着冷凍サイクルの動作試験を行った。その後、表2の条件で二段蒸発型吸着冷凍サイクルが従来型吸着冷凍サイクルよりも高性能であることを確認するための性能比較実験を行った。

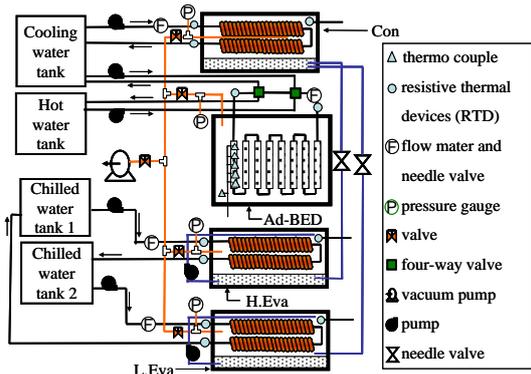


図 3 単ベッド型実験機の概略図

表 2 単ベッド型サイクル実験条件

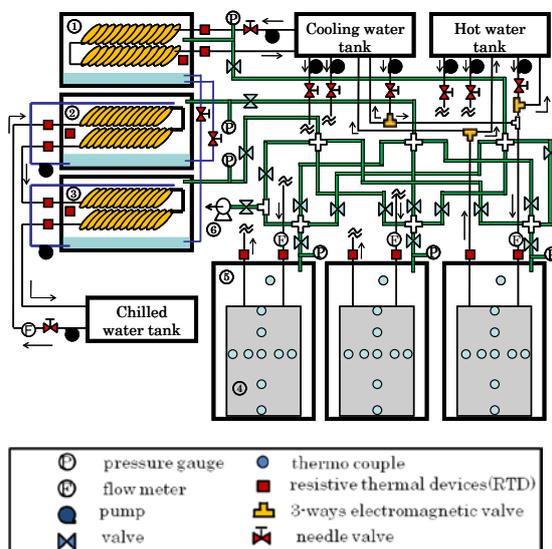
Hot water	Inlet temperature	80 °C	
	Mass flow rate	0.6 kg/min	
Cooling water	Adsorber	Inlet temperature	35 °C
		Mass flow rate	0.6 kg/min
	Condenser	Inlet temperature	30 °C
		Mass flow rate	0.3 kg/min
Chilled water	Inlet temperature	16, 20, 24 °C	
	Mass flow rate	0.2 kg/min	
Cycle time	Lower Adsorption	1200 s	
	Higher Adsorption	600 s	
	Desorption	600 s	
	Pre-heat, cool	600 s	

② 3ベッド型実験機による性能検証

製作した実験装置の概略図を図4に、装置の写真を図5に示す。装置は、吸着材が充填された熱交換器を入れた吸着器が3つ、凝縮器1つ、蒸発器2つで構成されている。吸着熱交換器には、低温再生型のゼオライトが塗布された熱交換器を用いた。それらをつなぐよう配管し、サイクルを制御するためにバルブを取り付けた。また、各器内へ冷水、温水及び冷却水を送る循環系を形成した。循環系は1つの吸着器あたり3つの電磁三方弁が連動することで制御しており、電磁三方弁を作動させると対応する吸着器に温水が流れる仕組みとなっている。各器内圧力を測定できるように圧力センサ（測定精度 ±0.25%）が取

り付けた。真空ポンプで器内の空気を抜き、各器内を低圧にして実験を行う。

各器の入口出口温度及び器内温度を測定できるよる測温抵抗体(RTD)を各部に取り付けた。測温抵抗体はJISクラスAであり、許容差は本実験で利用する範囲において最大で±0.31°Cである。また、吸着器内の吸着材温度を測定できるようK型熱電対を取り付けた。循環系は各器の入口前に流量計及び流量調節用のニードルバルブを取り付けた。流量計は、凝縮器には測定誤差±8%、蒸発器には測定誤差±5%の羽根車式流量計、吸着器には測定誤差±4%のコリオリ式流量計を用いた。流量以外の測定値はデータロガを介してコンピュータに出力した。



- ① Condenser ② High pressure evaporator
- ③ Low pressure evaporator
- ④ Heat exchanger filling with an adsorbent
- ⑤ Adsorption BED ⑥ Vacuum pump

図 4 3ベッド実験装置の概略図



図 5 実験装置の写真

4. 研究成果

(1) シミュレーション結果

図 6 に冷水出入口温度の時間変化を示す。16°Cで高压蒸発器に流入した冷水は、1段目で10~12°C程度まで冷却され、2段目で6~8°C程度まで冷却される。蒸発器の性能および冷水条件を適切に設定すれば、それぞれの蒸発器で効果的な冷却がなされることが確認できた。

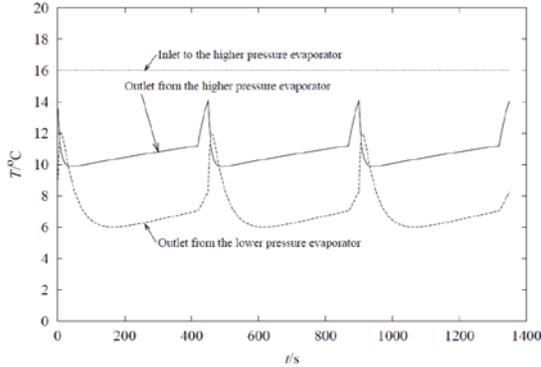


図 6 冷水出入口温度

従来型吸着冷凍機との比較について、図 7 に COP を、図 8 に単位吸着剤質量当たりの冷凍能力 (SCC) を示す。温水入口温度をパラメータとした。65°C~85°Cの範囲において、二段蒸発器型吸着冷凍機の COP、SCC は従来型を上回っている。温水温度 75°C の場合では、COP が約 1.7 倍、SCC が約 1.5 倍であった。

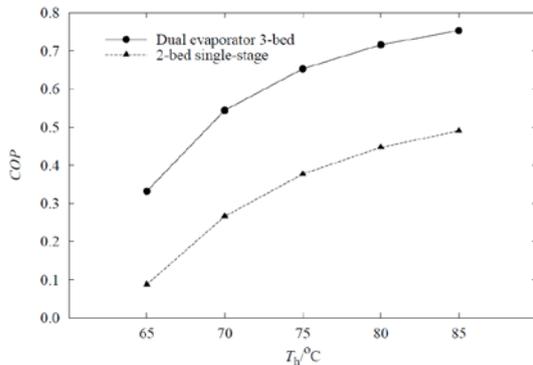


図 7 COP の比較

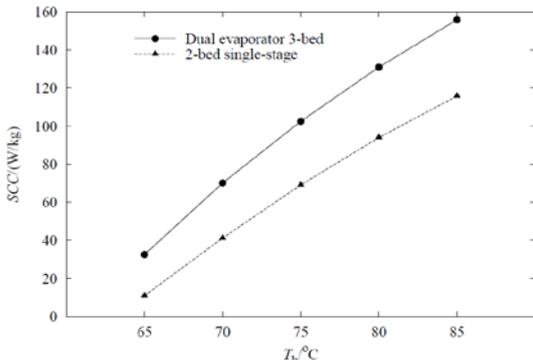


図 8 SCC の比較

(2) 実験結果

① 単ベッド型実験装置による実験

吸着剤にシリカゲル、冷媒に水を用い、単ベッド型の実験装置を用いて二段蒸発器型吸着冷凍サイクル運転を行った。

凝縮器及び2つの蒸発器の冷水、冷却水入口出口温度の時間推移を図 9 に示す。この図より脱着過程では凝縮器出口温度が上昇し、低压吸着過程、高压吸着過程では、それぞれ低压蒸発器及び高压蒸発器の出口温度が低下していることがわかる。また吸着器内のシリカゲル温度及び、吸着器の冷却水入口出口温度の時間推移を図 10 に示す。脱着過程における温水で入口温度の変化、吸着過程における冷却水出入口温度の変化から、脱着による吸熱、吸着による発熱も確認出来る。これらの結果から、吸脱着現象による冷媒の移動が確認でき、二段蒸発器型吸着冷凍サイクルとして動作していることが予測される。

今回の実験における COP は 0.098、SCC は 58W/kg という結果が得られた。この値は設計上での冷熱出力の値よりも低い値を示している。この原因としては蒸発器における冷媒の散水構造に問題があると考えられる。本実験装置では冷媒を散水するために一度冷媒を器外に出し、ポンプによって散水を行っている。この際に配管に断熱を施してもポンプ内部から熱を取り込んでしまっている。そのためポンプ内で冷媒が蒸発し、ポンプが空転してしまい、さらなるポンプの発熱が起き、結果としてさらに散水が上手くなされなくなっていくという悪循環が生じていると考えられる。散水構造の改良は今後の課題である。

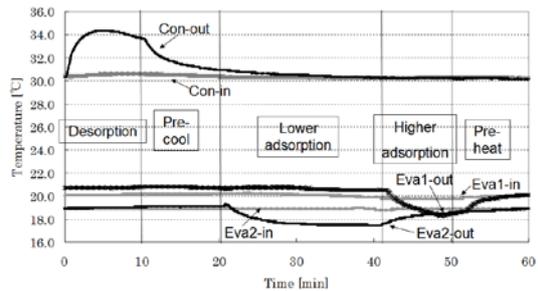


図 9 凝縮器冷却水、蒸発器冷却水の出入口温度変化

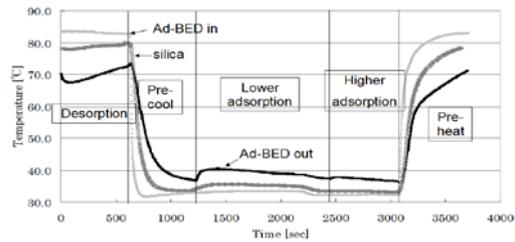


図 10 シリカゲル温度および吸着器熱媒の出入口温度変化

5. 2 単段型吸着冷凍サイクルとの比較実験
二段蒸発器型吸着冷凍サイクルと単段型吸着冷凍サイクルを比較するために、単段型吸着冷凍サイクルの実験を同一実験装置で行い、得られた各器の入口出口温度差及び流量から COP、SCC を算出した。なお脱着過程の時間を揃えて比較実験を行った。

実験の結果単段型吸着冷凍サイクルの COP は 0.045、SCC は 29 W/kg となった。一方、二段蒸発器型吸着冷凍サイクルの COP 及び SCC は前項の通りである。これらの結果を比較したものを図 11 に示す。二段蒸発器型吸着冷凍サイクルは単段型吸着冷凍サイクルと比較して、COP は 2.2 倍、SCC は 1.9 倍になることがわかった。このことから二段蒸発器型吸着冷凍サイクルは脱着時間一定で単段型吸着冷凍サイクルと比較すると、性能が向上することが確認できた。

COP が増加したのは二段蒸発器型吸着冷凍サイクルが単段型吸着冷凍サイクルよりも吸着過程を長く取れるサイクルであるためであると考えられる。SCC が増加したのは二段蒸発器型吸着冷凍サイクルの冷水は 2 つの蒸発器を通るため、出力が向上したと考えられる。

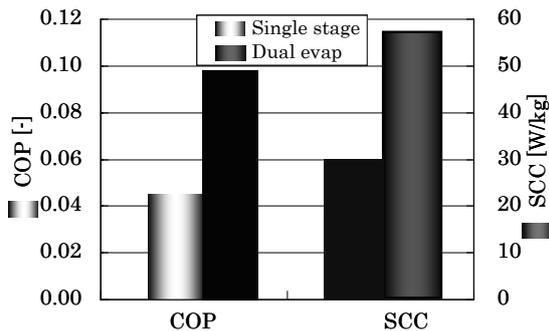


図 11 単ベッド実験装置による従来型と二段蒸発型の COP、SCC の比較

② 3 ベッド型実験装置による実験

2 つの蒸発器及び凝縮器の入口出口温度を図 12 に示す。

脱着開始時には凝縮器出口温度が上昇していることが観測できる。このことから脱着過程は動作しているものと考えられる。また、吸着開始時には両蒸発器でそれぞれの出口温度が低下していることが確認できる。なお、吸着過程時以外も冷水は冷えて出てきているが、蒸発器内温度が冷水入口温度よりも冷えているためであると考えられる。

実験から得られた値から COP と冷凍能力を算出した結果 COP 0.076、冷凍能力 53.8W であった。本実験装置は設計上では各蒸発器で 4℃以上冷える設計がなされているが、実際には蒸発器 1 つあたりの平均低下温度は

2℃程度である。これは、散水管きちんとと冷媒が散水されておらず濡れ面積が設計値を下回っている事が原因であると考えられる。また、1 度散水した後、散水しなくても 2 分間冷却が続いていることから、濡れた分が蒸発するまでには多少の時間が必要である可能性がある。熱を奪う対象である冷水の温度や流量などの条件を変えて実験を行い、最適化を行う必要がある。また、各器を繋ぐ銅管は長く 3/8 インチと細いため、管内で圧力損失が起り、気体冷媒の移動がうまく行われなかった可能性がある。

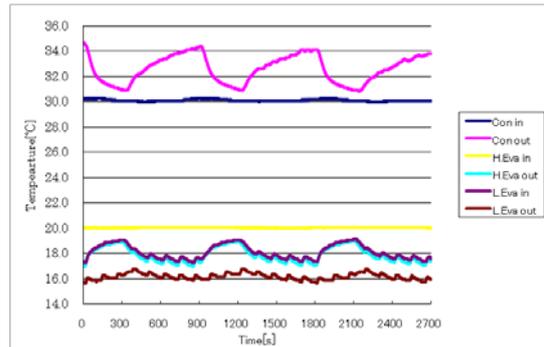


図 12 凝縮器、蒸発器の熱媒出入口温度変化

二段蒸発型吸着冷凍機の特徴の一つは、脱着時間に比べて吸着時間を長くとれることにある。従来型吸着冷凍機との比較するうえで、境界条件として脱着時間を揃える場合と吸着時間を揃える場合について従来型吸着冷凍機の性能をそれぞれ測定し、二段蒸発型吸着冷凍機の性能と比較した。

二段蒸発型吸着冷凍機

COP 0.076
冷凍能力 53.8W

従来型吸着冷凍機

i) 脱着時間を一致させる場合

COP 0.050
冷凍能力 33.0W

ii) 吸着時間を一致させる場合

COP 0.075
冷凍能力 38.17W

以上の結果から、脱着時間を揃えた条件において、COP が約 1.5 倍となることが確認できた。吸着時間を揃えた条件では従来型と二段蒸発型の COP は同等であるが、この場合の脱着時間は従来型のほうが二段蒸発型よりも長くなっており、吸着剤の加熱条件としては従来型に有利になっている。

冷凍能力の比較では、二段蒸発型が約 1.5 倍となっているが、ベッド数を考慮すると単位吸着剤あたりの冷凍能力はほぼ同等といえる。

③ 今後の展望

シミュレーションと実験によって、二段蒸発型吸着冷凍機が従来の吸着冷凍機に比べて高いCOPを実現できることがわかった。吸着冷凍機の重要な課題の一つであるCOPの向上へ向けた開発指針を得たことは大きな成果といえる。ただし、実験レベルのCOPは実用化されている吸着冷凍機のCOPには遠く及ばないため、実験機の改良が必須である。また、実験においてシリカゲルと低温再生型ゼオライトを吸着剤として用いた結果、二段蒸発による吸着量の拡大効果は、吸着剤の特性に強く依存することが予測された。

今後、多種の吸着剤-冷媒の組み合わせについて二段蒸発の効果を解析し、より効果的な吸着剤-冷媒の組み合わせを明らかにする必要がある。

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3件)

- ① Takahiko Miyazaki et al., The experimental investigation of the dual evaporator type adsorption chiller, Proceedings of the 10th IEA Heat Pump Conference 2011, 2011, 掲載決定 (査読有)
- ② Takahiko Miyazaki, Atsushi Akisawa, The effect of mass and heat recovery on the dual evaporator three bed adsorption chiller, Innovative Materials for Processes in Energy Systems, 2010, pp.400-404 (査読有)
- ③ Takahiko Miyazaki, Atsushi Akisawa, Bidyut Baran Saha, The performance analysis of a novel dual evaporator type three-bed adsorption chiller, International Journal of Refrigeration, Vol. 33, 2010, pp.276-285 (査読有)

[学会発表] (計3件)

- ① 谷 優也、宮崎隆彦、上田祐樹、秋澤 淳、3ベッド二段蒸発型吸着冷凍サイクルの性能に対する吸脱着時間の影響、第44回空気調和・冷凍連合講演会、2011年4月、東京
- ② 谷 優也、宮崎隆彦、上田祐樹、秋澤 淳、二段蒸発型吸着冷凍機の実験による性能評価、日本機械学会関東支部第17期総会講演会、2011年3月、神奈川
- ③ 高久将人、宮崎隆彦、上田祐樹、秋澤 淳、二段蒸発器型吸着冷凍サイクルの実証～二段階吸着における吸着器挙動の実験的解析～、第44回空気調和・冷凍連合講演会、2010年4月、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 隆彦 (MIYAZAKI TAKAHIKO)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：70420289