

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04457

研究課題名(和文) 吸脱着交互運転により稼動する吸着式冷凍機の冷水出口温度一定化に関する研究

研究課題名(英文) Study on maintaining a constant cold water outlet temperature of an adsorption refrigerator with two adsorbent-coated heat exchangers that alternatively adsorb and desorb the water

研究代表者

小金井 真 (Koganei, Makoto)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：60555738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：吸着式冷凍機は、吸着材が塗布された2つの熱交換器を用いて吸着・脱着を交互に行う方式であるため、出力である冷水温度が大きく変動する(4～5℃)ことが課題となっている。本研究では装置内部で冷却水量を調整することにより吸着速度の制御を行い、冷水出口温度の一定化を試みた。その結果、定格稼動時の冷凍能力に対して80～90%の出力とすることにより、冷水出口温度の平均偏差を±0.2℃以内(一般空調では十分な精度)に改善できることが確認できた。また、吸脱着モデルに用いた解析により、冷却水流量を変化させることによって冷水温度の一定化をはかるロジックを構築し、実験値との比較により妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

吸着式冷凍機は、低温の温水(50～80℃)を利用して冷水を作ることができる冷凍機であるため、太陽熱をはじめ、生産工程で発生する熱、燃料電池の排熱等の様々な低温排熱利用が可能であることから、その有効利用に対する期待は大きい。出力(冷水出口温度)の変動が普及阻害要因の一つになっている。本研究により、吸着式冷凍機の出力(冷水出口温度)を一定化するための制御法が明らかになったので、吸着式冷凍機の普及促進に繋がることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Because an adsorption refrigerator employs two adsorbent-coated heat exchangers that alternatively adsorb and desorb the water, the large fluctuations of the output temperature of the cold water (between 4 and 5 °C) have remained an issue. In this study, the amount of cooling water supplied to a heat exchanger coated with an adsorbent was varied to maintain a constant cold-water temperature at the outlet. We confirmed that the mean deviation of the cold-water outlet temperature could be improved to within ±0.2 °C by reducing the output to 80-90% of the steady-state cooling capacity. This study also conducted a logical analysis that attempts to maintain a constant temperature of cold water in an adsorption/desorption model by varying the flow rate of the cooling water in the apparatus. The validity of the theoretical formula was confirmed by comparison with experimental data.

研究分野：建築設備工学

キーワード：吸着式冷凍機 出力変動 出力一定化 サイクルタイム 吸着材 制御 冷凍能力 冷水温度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 吸着式冷凍機は、低温の温水(50~80℃)を利用して冷水を作ることができる冷凍機である。太陽熱をはじめ、生産工程で発生する熱、燃料電池の排熱等の様々な低温排熱利用が可能であることから、その有効利用に対する期待は大きい。

(2) 吸着式冷凍機は、吸着材が塗布された2つの熱交換器を用いて吸着・脱着を交互に行う方式であるため、出力である冷水温度が大きく変動する(4~5℃)ことが課題となっている。そのため吸着式冷凍機で作られた冷水を空調用熱交換器や温度成層型蓄熱槽に直接送ることが困難で、これらの手前にバッファータンクを設置しなければならず、設備増設、スペース増大がその普及の阻害要因となっている。

(3) 一般の圧縮式冷凍機は膨張弁による冷媒流量制御や圧縮機の回転数制御でその出力を制御しているが、吸着式冷凍機ではこのような装置内部での制御法が確立されていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、装置内部で冷却水流量を変化させることにより、設備の増設無しに、吸着式冷凍機単体で冷水温度の一定化をはかるロジックを実験とシミュレーションにより確立し、吸着式冷凍機の出力制御法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 試作機実験による冷水出口温度変動最小化のための冷却水量増減パターンの把握

図1に試験システムの概要を示す。吸着時に熱交換器へ冷却水を送水する途中に凝縮器へと繋がるバイパス配管を設け、冷却水量を調整する手動レバーを設置した。この手動レバーを調整することで熱交換器に送水する冷却水量の調整を行うが、熱交換器に供給される冷却水が減少した際に、その減少分がバイパス配管によって凝縮器に送水される仕組みになっている。これにより凝縮器への冷却水量が減少せずに一定量を送水することが可能となる。冷却水温度27、30、32℃の3条件の場合について冷却水量を10~100%に変化させて冷水出口温度のデータを取得した。冷却水流量、冷却水温度以外のパラメータは定格値に固定した。サイクルタイム(吸着から脱着、または脱着から吸着に切り替わる時間)は定格条件時に冷凍能力が最大となる4分、及び熱COPが最大となる8分を選定した。

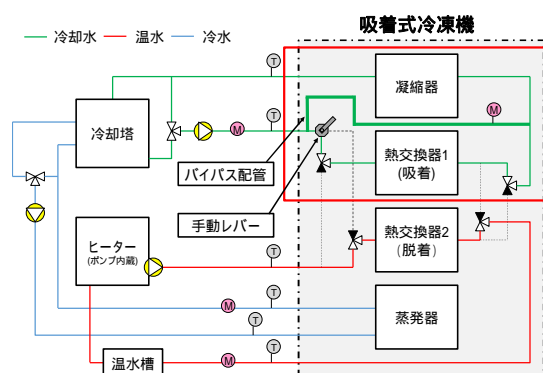


図1 試験システムの概要

(2) 吸脱着シミュレーションによる冷水温度一定化のためのロジックの確立

吸着材の吸着等温線、装置内部の熱授受を基に冷水出口温度一定化をはかるロジックを構築した。(吸着器における冷却水による熱除去量) = (蒸発器から移動する潜熱量 + 脱着時熱交換器蓄熱量)を満足する冷却水流量を求めることにより、その条件の時の最適冷却水流量を求めた。連続推移する冷却水流量は試作機実験の結果からサイクルの序盤は流量が少なく、終盤は流量が最大となるため、特異なS字カーブを描くことが予想される。よって、式(1)に示すロジスティック関数を用いて冷却水流量 m_{cdw} を近似することにした。それぞれ y :流量 [ℓ/min], k :無次元数, t, t_0 :時間 [s]である。

$$m_{cdw} = \frac{127 - y}{1 + e^{-k(t-t_0)}} + y \quad (1)$$

(3) 上記(1)(2)の比較・検討によるシミュレーション中のパラメータ補正

シミュレーションでは、容器、配管の熱容量等の影響を詳細に反映できないため、実験値との偏差が生じる。これを補正して、性能予測可能なシミュレーション手法を確立する。

(4) 冷水出口温度をフィードバックするPID制御を行った場合の制御追従性の確認

実運転時には外気条件に応じて、冷却水をつくる冷却塔の能力が変化し、冷却水温度に変動が生じる。そこで実運転時と同様に、冷却水温度に変動を与えて冷却水量のPID制御を行い、冷却水温度変動時においても冷水出口温度一定化のためのPID制御が有効であることを確かめる。図2に示すように試験システムを改良し、熱交換器手前に電動三方弁を設置した。PID制御では、制御コントローラに実際の冷水出口温度と目標温度設定値を与え、冷水出口温度が設定値になるように電動三方弁で冷却水量を自動制御した。基準冷却水温度27、30、32とし、それぞれの場合について冷却水温度変動なしの場合、冷却水温度にサイクルタイム(240s)内で1.0刻みで変動を与えた変動パターン1の場合、1.5刻みで変動を与えた変動パターン2の場合の計9条件について冷水出口温度一定化を試みた。

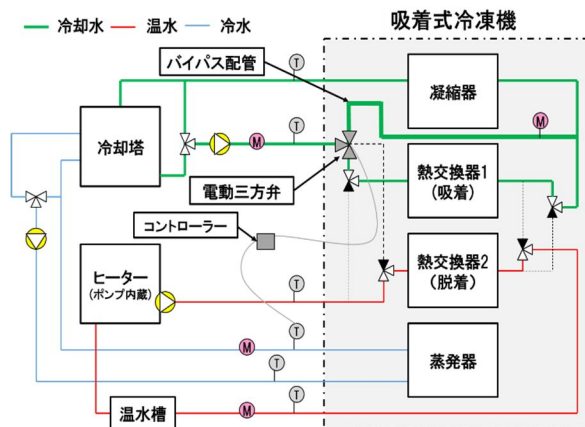


図2 改良試験システムの概要

(5) 期間シミュレーションの実施

気象条件に応じて変化する冷却水温度の影響を考慮した期間シミュレーションを実施する。試算場所は東京、試算期間6/2~9/21、運転時間6:00~24:00とし、冷却水以外のパラメータは定格値を与える。

4. 研究成果

(1) 試作機実験による冷水出口温度変動最小化のための冷却水量増減パターンの把握

図3にサイクルタイム4分とした場合の冷却水温度27における冷水温度出力の結果(1サイクル)を示す。サイクルタイム4分の場合には1サイクルで流量を3段階変化させた。冷凍能力6.87kW、平均偏差0.18となり、定格時の冷凍能力に対して81%の出力で平均偏差0.2程度に抑えることができた。

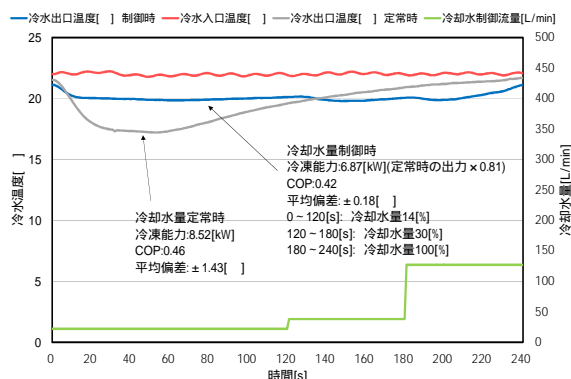


図3 冷却水量制御時と定常時の比較 (冷却水温度27、サイクルタイム4分)

図4にサイクルタイム8分とした場合の冷却水温度27における冷水出口温度出力の結果を示す。サイクルタイム8分の場合には1サイクルで流量を6段階変化させた。冷凍能力、平均偏差はそれぞれ6.84kW(定格の88%)、0.19となった。

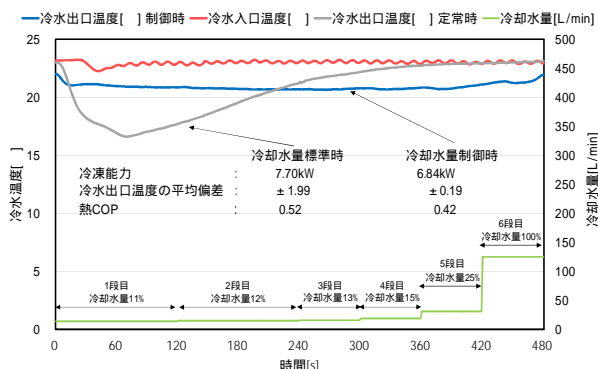


図4 冷却水量制御時と定常時の比較 (冷却水温度27、サイクルタイム8分)

(2) 吸脱着シミュレーションによる冷水温度一定化のためのロジックの確立

冷却水温度27、30及び32における冷水温度一定化時の冷却水流量の解析結果をそれぞれ図5、図6及び図7に示す。いずれの冷却水温度においても、サイクルタイムの序盤と終盤において実験値と近い値となり、S字カーブを描くような形となっている。ロジスティック関数で近似した場合にも、冷却水流量は序盤で少なく、終盤で定格の流量となることが分かった。

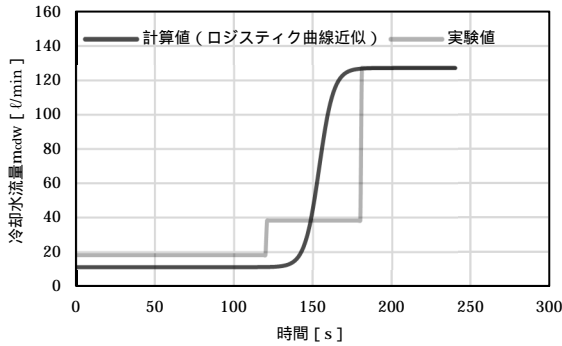


図5 冷水温度一定化時の冷却水量の推移
(冷却水温度 27)

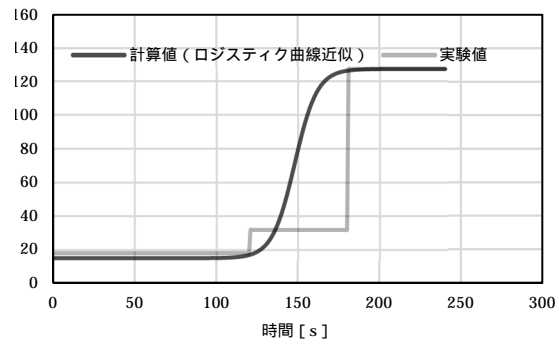


図6 冷水温度一定化時の冷却水量の推移
(冷却水温度 30)

(3) 上記(1)(2)の比較・検討によるシミュレーション中のパラメータ補正

シミュレーションで考慮できない容器、配管の熱容量による蓄熱の影響については実験値との偏差が出ることが予測されたが、吸脱着準備期間を設けている本実験装置の場合、その影響が極めて小さいことが実験で明らかになった。また、シミュレーションにおいて熱交換器蓄熱量の項をゼロとした計算を行った結果が実験値とほぼ一致することからもこの蓄熱の影響を補正する必要が無いことが分かった。

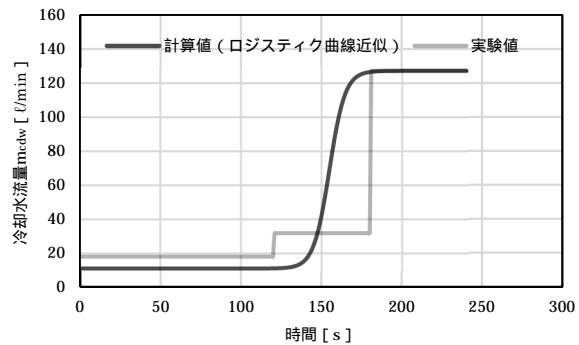
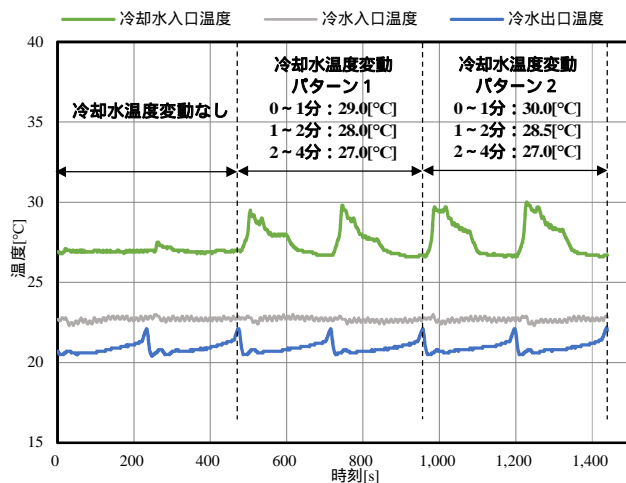


図7 冷水温度一定化時の冷却水量の推移
(冷却水温度 32)

(4) 冷水出口温度をフィードバックするPID制御を行った場合の制御追従性の確認

図8に基準冷却水温度 27 時における冷却水量 PID 制御時の冷却水入口温度、冷水出入口温度の時間推移を冷却水温度変動なし、冷却水温度変動パターン1、冷却水温度変動パターン2の3条件の比較で各2サイクル毎に示す。下の表に各サイクルにおける冷凍能力、熱 COP、冷水出口温度の平均偏差、平均冷却水温度、平均冷却水量の値を示す。条件 ~ における冷凍能力、熱 COP および変動値平均偏差はほぼ同等の値となった。いずれも平均偏差の値は 0.26 以下となり一般空調において十分高精度な制御であることが確認できた。冷却水基準温度 30、32 の場合も同様の結果であった。



	冷却水温度変動なし		冷却水温度変動パターン1 (T=1.0°C)		冷却水温度変動パターン2 (T=1.5°C)	
	サイクル1	サイクル2	サイクル1	サイクル2	サイクル1	サイクル2
冷凍能力[kW]	6.8	6.9	6.9	6.5	6.6	6.4
熱 COP	0.43	0.43	0.45	0.42	0.44	0.42
平均偏差[°C]	0.26	0.26	0.24	0.23	0.23	0.26
平均冷却水温度[°C]	26.9	27.0	27.6	27.5	27.7	27.8
平均冷却水量 [L/min]	27.1	28.3	29.0	27.9	28.9	30.2
(サイクル前半2分)	(17.9)	(18.7)	(20.4)	(20.1)	(20.8)	(21.6)
(サイクル後半2分)	(36.3)	(37.9)	(37.6)	(35.6)	(37.0)	(38.9)

(5) 期間シミュレーション結果

図9に冷水出口温度一定化時及び定格稼働時の冷水出口温度変動の偏差(標準偏差:日平均)の時間推移を示す。試算期間(6/2~9/21)において、定格稼働時の偏差は約 1 ~ 1.7、冷水出口温度一定化時の偏差は約 0.1 となった。一般的な水冷チラーでは偏差 0.5 程度の制御で高精度とされて

図8 PID制御時の冷却水入口温度、冷水出口温度の時間推移(基準冷却水温度 27)

いるため、冷水出口温度一定化時の冷水出口温度の偏差は冷房期間中、問題ないことが分かった。

試算期間(6/2~9/21)において、定格稼働時の冷却水量は127ℓ/min一定であるが、冷水出口温度一定化時は平均で約68ℓ/minとなり、定格稼働時の53%程度となった。これにより冷却水搬送動力の日平均削減率は約72%(期間平均)となった。また冷凍能力の日平均低下率は約20%(期間平均)であることが分かった。冷水出口温度一定化を行うことにより、冷凍能力は約20%低下するが、冷水タンクなどの設備を増設する必要がなくなり、冷却水搬送動力を約72%削減できることが分かった。

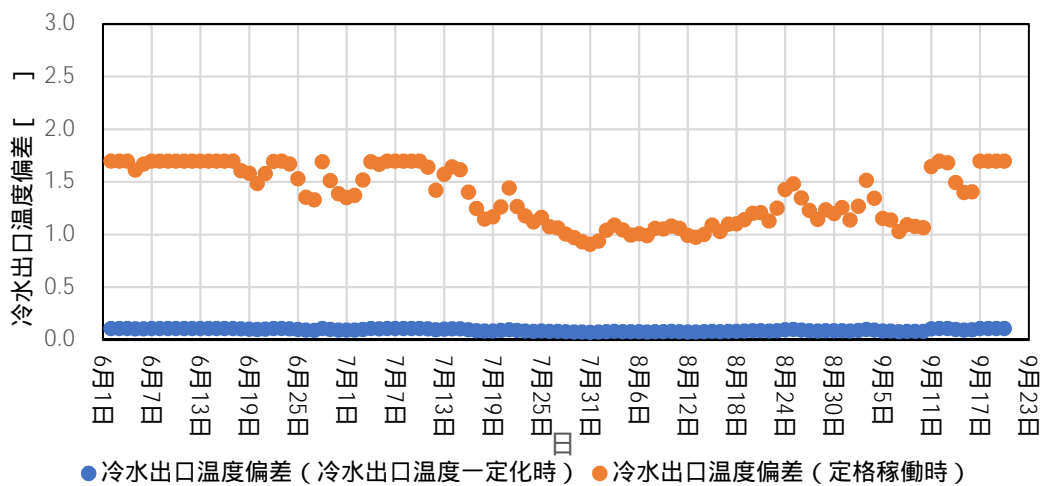


図9 冷水温度一定化時および定格稼働時の冷水出口温度偏差(日平均)の推移(冷却水温度:気象条件より算出)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 小金井真、山下哲生、樋山恭助、近藤武士、加藤信介	4. 巻 46
2. 論文標題 低温再生型吸着材を用いた吸着式冷凍機の開発 第4報－吸脱着モデルを用いた解析による冷水出口温度一定化の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会論文集	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 松田 祐貴、小金井 真、山下 哲生、樋山 恭助、近藤 武士、加藤 信介	4. 巻 44
2. 論文標題 低温再生型吸着材を用いた吸着式冷凍機の開発 第3報－冷却水バイパス流路による冷水出口温度一定化の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会 論文集	6. 最初と最後の頁 15～21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18948/shase.44.262_15	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松田匠海、小金井真、金炫兌、山下哲生
2. 発表標題 低温排熱利用吸着式冷凍機の冷水出口温度一定化のための自動制御に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下哲生、金炫兌、小金井真
2. 発表標題 低温排熱利用吸着式冷凍機の冷水出口温度一定化のための自動制御に関する研究
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田祐貴、小金井真、山下哲生、桑原亮一、金ヒョンテ、近藤武士
2. 発表標題 低温排熱駆動型吸着式冷凍機の冷水出口温度一定化及び性能向上に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田祐貴、小金井真、山下哲生、近藤武士
2. 発表標題 低温排熱駆動型吸着式冷凍機の冷水出口温度一定化に関する研究
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2018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
---------	---------