

低GWPフロン系冷媒を用いた吸着式蓄熱・ヒートポンプ・AHTサイクルの実験

郡, 光春

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/6788215>

出版情報：九州大学，2022，修士，修士
バージョン：
権利関係：



令和 4 年 度

修 士 論 文

低 GWP フロン系冷媒を用いた吸着式蓄熱・ヒートポンプ・

AHT サイクルの実験

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻

機械・システム理工学メジャー

熱エネルギー変換システム学研究室

郡 光春

指導教員 宮 崎 隆 彦

Kyaw Thu

提出年月日 令和 5 年 2 月 7 日

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 従来の研究	3
1.4 本論文の概要	4
第 2 章 吸着利用の原理.....	5
2.1 吸着現象	5
2.2 吸着蓄熱システムの動作過程	7
2.3 吸着ヒートポンプシステムの動作過程	8
2.4 AHT サイクルの動作過程	11
第 3 章 実験装置および実験方法.....	13
3.1 実験装置	13
3.1.1 吸着材の特性	13
3.1.2 実験装置の概要	13
3.1.3 吸着熱交換器	17
3.2 実験手順および実験条件	21
3.2.1 吸着蓄熱システムおよび吸着ヒートポンプシステムの熱量測定実験の手順	21
3.2.2 AHT サイクルのプロセス再現実験の手順	22
3.2.3 実験条件	22
3.3 実験データ算出方法	24
3.3.1 実験データの記録方法	24
3.3.2 発熱量の算出方法	25
3.3.3 外部環境と装置の間における熱損失の算出方法	25
3.3.4 合計発熱量の算出方法	26
3.3.5 平均発熱量の算出方法	27
3.3.6 吸着量の理論値の算出方法	27
3.3.7 吸着熱，脱着熱および蒸発熱の理論値の算出方法	28
3.3.8 COP（成績係数）の算出方法	29

3.3.9	AHT サイクルのプロセス予測曲線の作成方法.....	29
3.3.10	吸着等量線の作成方法	30
第 4 章	実験結果および考察.....	31
4.1	吸着蓄熱システムの実験結果および考察	31
4.1.1	脱着温度が異なるときの性能の比較.....	31
4.1.2	蒸発温度が異なるときの性能の比較.....	38
4.1.3	熱媒流量が異なるときの性能の比較.....	46
4.1.4	実験条件の違いによる性能比較のまとめ.....	52
4.1.5	R134a を利用したときとの性能の比較	54
4.2	吸着ヒートポンプシステムの実験結果および考察	62
4.2.1	脱着温度が異なるときの性能の比較.....	62
4.2.2	蒸発温度が異なるときの性能の比較.....	70
4.2.3	熱媒流量が異なるときの性能の比較.....	78
4.2.4	実験条件の違いによる性能比較のまとめ.....	84
4.3	AHT サイクルの実験結果および考察	86
4.3.1	それぞれの温度条件で作成したプロセス予測線図.....	86
4.3.2	実験結果と吸着等量線との比較.....	92
第 5 章	総括.....	97
5.1	吸着蓄熱システムの性能の比較	97
5.1.1	脱着温度が異なるときの性能の比較.....	97
5.1.2	蒸発温度が異なるときの性能の比較.....	98
5.1.3	熱媒流量が異なるときの性能の比較.....	98
5.1.4	R134a を利用したときとの性能の比較	99
5.2	吸着ヒートポンプシステムの性能の比較	100
5.2.1	脱着温度が異なるときの性能の比較.....	100
5.2.2	蒸発温度が異なるときの性能の比較.....	101
5.2.3	熱媒流量が異なるときの性能の比較.....	101
5.3	AHT サイクルのサイクル検証	102
5.3.1	それぞれの温度条件で作成したプロセス予測線図.....	102
5.3.2	実験結果と吸着等量線との比較.....	103

謝辭	104
參考文獻	105

記号表

c	比熱	[J/kg/K]
E	吸着特性エネルギー	[J/mol]
$\dot{m}$	熱媒質量流量	[kg/s]
n	フィッティングパラメータ	[-]
Q	熱	[kJ]
$\dot{Q}$	発熱量	[W]
R	気体定数	[J/mol/K]
ρ	密度	[kg/L]
T	温度	[°C]
t	時間	[s]
$\dot{V}$	熱媒体積流量	[L/s]
v	熱媒流速	[m/s]
W	吸着量	[kg]

添え字

ad	吸着
ave	平均
con	凝縮
de	脱着
eva	蒸発
hex	熱交換器
i	内
in	入力
loss	損失
o	外
out	出力
p	圧力
r	冷媒
th	理論

total

合計

第1章 序論

1.1 研究背景

近代の人類の急速な技術発展により、我々の生活は豊かになり続けているが、その反面、様々な環境問題や化石燃料の枯渇を引き起こしている。世界ではこれらの問題を深刻に受け止めており、SDGs(Sustainable Development Goals)の観点に基づき、2030年までに再生可能エネルギーの割合を大きく増やすことや、石炭・石油を使う際も効率を上げることが目標として掲げている。

これらの目標の達成方法のひとつとして、未利用エネルギーや再生可能エネルギーを利用することで、化石燃料の消費量を少なくし、温室効果ガスの排出を抑えることが挙げられる。具体的には、工場、焼却場や発電所などの排熱や太陽熱を熱機器等に利用することでエネルギー消費を抑えることである。

しかし、排出される熱の温度レベルが低いことや、工場等から熱が排出されている時間帯と実際に熱が必要とされる時間帯は一致しないことが多いことから、結果として大量の未利用エネルギーが有効活用されることなく環境に捨てられている。

このような低温排熱を利用する技術として、吸着現象の活用があげられる。吸着の際に発生する吸着熱や圧力変化を利用し、排熱を利用して加熱することで冷媒を吸着材から蒸発させる脱着の運転を繰り返す。吸着現象の圧力や温度変化を、排熱を蓄積し別の時間や場所で利用できる蓄熱システムや、排熱を熱源として利用して空調・給湯などを行えるヒートポンプシステムに利用することができる。

現在、水をシリカゲルやゼオライトに吸着させるヒートポンプシステムは商品化されているが、より高圧下で作動できることで、装置の小型化や、吸着速度の増加により短時間で多くの熱を取り出すことが期待されるフロン系冷媒を用いた吸着実験例は少ない。

また、低温排熱の温度レベルを上げるサイクルである AHT サイクル(Adsorption Heat Transformer cycle)も注目されているが、実際の吸着・脱着運転の実験はほとんど行われていない。

1.2 研究目的

そこで我々の研究グループは、地球温暖化にどれだけ寄与するかを示す GWP の値が低い R1234yf という代替フロン系冷媒に注目した。この冷媒と活性炭を用いた吸着システムのための吸着実験は例が少なく、その性能は予測の範囲にとどまっている。

そのため我々の研究グループは、フィン間に粉末状の活性炭を充填したフィンチューブ熱交換器（以後これを吸着熱交換機と呼称する）を用いて、実際に吸着・脱着させ発熱挙動を調べることで、活性炭を用いた 3 つの吸着システムの性能を解析した。

本研究の目的は大きく分けて 3 つになる。

1 つ目は、吸着蓄熱システムの実験である。R1234yf と活性炭の吸着により、どの程度の性能が期待できるかを吸着実験によって予測した。また、先行研究で行われていた、R134a を用いた実験との比較も行う。

2 つ目は、吸着ヒートポンプシステムの実験である。今回は、冷房運転の条件で実験し、性能の予測を行った。高圧冷媒を用いることで、従来の水を利用したものより小型化が可能になると考えられているが、性能面での影響を検証する。

3 つ目は、AHT サイクルの実験である。今回は、サイクルの一部を実証するために吸着・脱着の実験を行い、サイクルの性能も検証した。

以上のことから、本研究の目的は、R1234yf と活性炭を利用した、①吸着蓄熱システム、②吸着式ヒートポンプシステム、および③AHT サイクルの性能を、実験により予測することである。

1.3 従来の研究

Uddin ら^[1]は、粉体状活性炭（MSC-30）と酸素官能基量を変化させた粉体状活性炭（H₂-MSC-30, KOH-H₂-MSC-30）／エタノールの平衡吸着量を、蒸発器温度 14～77°C、吸着材温度 20～80°C の温度条件で測定し、Dubinin-Astakhov の式^[2,3]を用いて吸着等温式を提案した。また、Clausius-Clapeyron の式と D-A 式を用いて吸着熱を予測した。

Ibrahim ら^[4]は、粉体状活性炭（Maxsorb III）／エタノールの平衡吸着量を吸着材温度 20～60°C の温度条件で測定し、D-A 式を用いた吸着等温式の提案、Clausius-Clapeyron の式を用いた吸着熱の予測を行った。

Jribi^[5]らは、活性炭 MSC-30 とフロン系冷媒 HFO-1234ze(E)を用いた吸着冷凍サイクルのシミュレーションを行うことで、脱着温度が 85°C、活性炭重量が 80kg のとき、最大冷熱が 2kW であることを示した。

Seo ら^[6]は、粉体状活性炭（MSC-30）や球体活性炭（SAC-2）とフロン系冷媒 R245fa を用いた吸着実験を、30～60°C の範囲で行い、Dubinin-Astakhov モデルおよび Tóth モデル^[7]にフィッティングした。

Saren ら^[8]は、シリカゲルと水を用いた Adsorption Heat Transformer サイクル^[9]や、多重効用法（MED）と組み合わせたハイブリッド型の熱脱塩装置のシミュレーションを行うことで、約 58°C の低温排熱から 80°C 程度の高温の熱に変換し、約 2kg/s の生成速度で海水から真水を生成できることを示した。

1.4 本論文の概要

本論文は全 5 章から構成される。

第 1 章では，本研究の背景，各システムの原理，従来の研究について述べた。

第 2 章では，各システムの原理について述べる。

第 3 章では，本研究に用いた実験装置および実験方法についてまとめる。

第 4 章では，活性炭を用いた各システムの吸着実験の結果についてまとめ，考察を記す。

第 5 章では，本論文の結論をまとめ，総括を行う。

第2章 吸着利用の原理

2.1 吸着現象

今回の研究で用いた吸着システムの概略図を図 2.1-1 に示す．ここでは吸着材に活性炭，吸着質に R1234yf を使用した吸着システムを例に説明する．

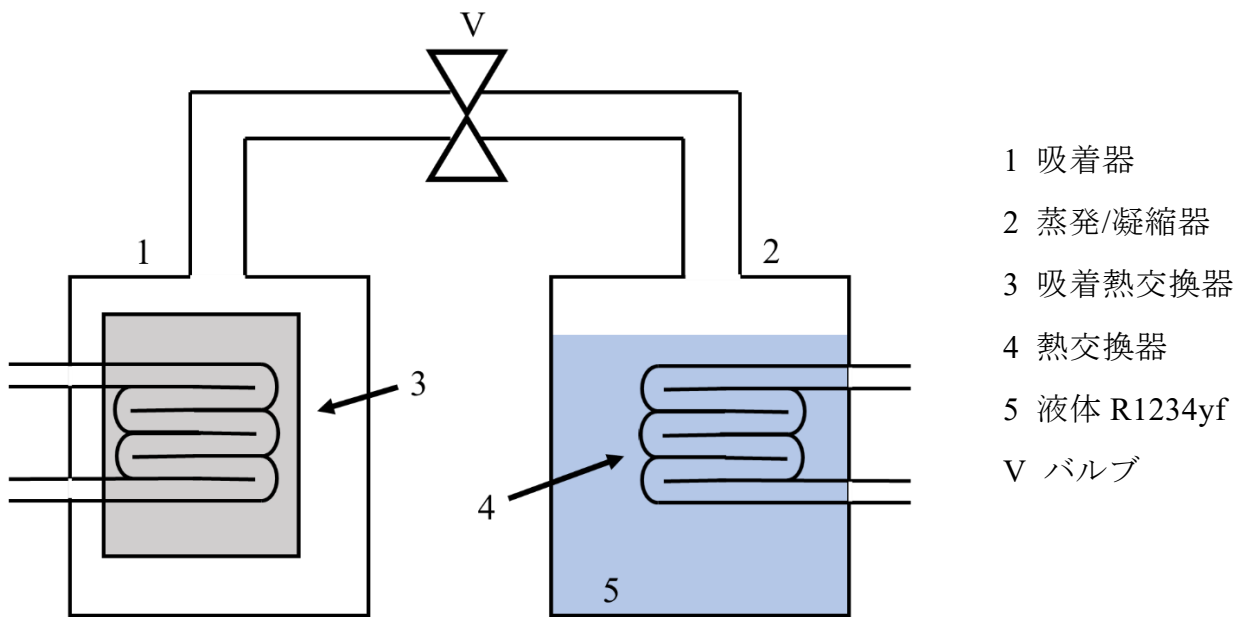


図 2.1-1 吸着システムの概略図

この吸着システムは大きく分けて吸着器と蒸発/凝縮器の 2 つから成り立つ．また，この 2 つはバルブを介してつながっており，バルブの開閉によって両容器の接続を切り替えることができる．吸着器内は蒸気の R1234yf で満たされており，その中に活性炭を充填した熱交換器がある構造となっている．蒸発/凝縮器内には活性炭の充填されていない熱交換器があり，この熱交換器が浸る程度に液体の R1234yf が存在する．残りの空間は蒸気の R1234yf で満たされている．両熱交換器内にはそれぞれ熱媒が循環しており，吸着器内では活性炭と，蒸発/凝縮器内では液体の R1234yf と熱交換を行う．

次に，活性炭に対する R1234yf の吸着等温線の概形を図 2.1-2 に示す．

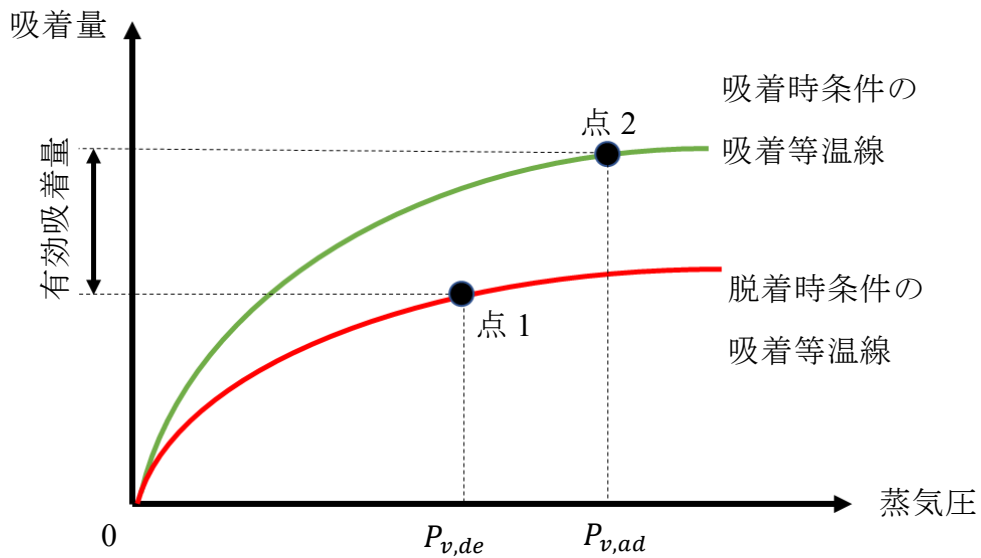


図 2.1-2 活性炭に対する R1234yf の吸着等温線の概形

吸着等温線は等温度の吸着材に対する吸着質の吸着量を表し、縦軸は吸着質の吸着量を、横軸は吸着質の蒸気圧を示す。図 2.1-2 において、点 1 は脱着条件の温度の活性炭に対する R1234yf の吸着量、点 2 は吸着条件の温度の活性炭に対する R1234yf の吸着量を示す。吸着器と蒸発器をつなぐバルブが開いているとき、吸着器内の圧力は、常に蒸発/凝縮器内の R1234yf の飽和蒸気圧と等しい。脱着時の活性炭の温度の方が、吸着時よりも高いため、図 2.1-2 が示す通り、活性炭の温度が高いほど R1234yf の吸着量は小さくなる。これは、R1234yf の吸着量がその相対圧に依存することに起因する。相対圧を $P[-]$ とすると、相対圧は以下のように表すことができる。

$$P = \frac{P_v}{P_s} \quad (1.1)$$

$P_v[\text{Pa}]$ は吸着質(気層)の圧力、 $P_s[\text{Pa}]$ は吸着材温度における吸着質の飽和蒸気圧である。

ここで、活性炭に対する蒸気の R1234yf の吸着量と相対圧の関係を表した吸着線図の概形を図 2.1-3 に示す。

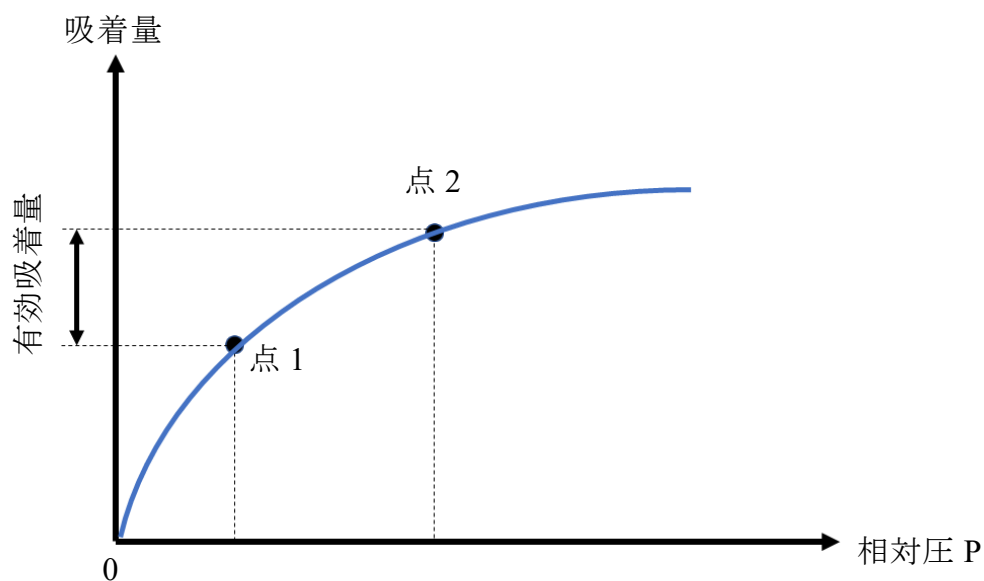


図 2.1-3 活性炭に対する R1234yf の吸着量と相対圧の関係

図 2.1-3 の点 1、点 2 は図 1.2 の点 1、点 2 に相当する．この図が示す通り，相対圧が大きくなるほど吸着量も大きくなる．点 1 において，相対圧が点 2 より下回らなければシステムが動作しないため，吸着と脱着の温度条件は相対圧も考慮に入れる必要がある．

2.2 吸着蓄熱システムの動作過程

吸着蓄熱システムの動作過程を図 2.2 に示す．

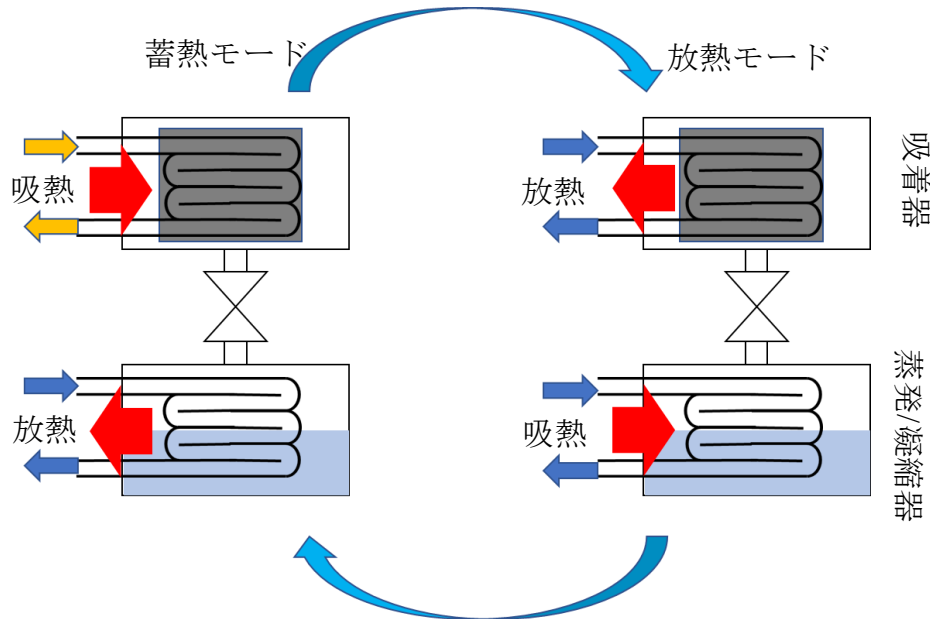


図 2.2 蓄熱システムの動作過程

蓄熱システムには蓄熱モードと放熱モードの2つの動作過程がある。蓄熱モードでは、低温排熱や太陽熱などの高温熱源からの熱を熱媒によって吸着熱交換器に輸送し、その熱を用いて活性炭からの R1234yf の脱着を行う。このとき、脱着した R1234yf は蒸発/凝縮器側で凝縮し、その際発生する凝縮熱は熱媒を介して環境に放出される。R1234yf の脱着が終了すると、R1234yf の再吸着を防ぐためにバルブを閉じて両容器の接続を断ち、システム全体が環境温度になるまで放置する。放熱モードでは、システム全体が環境温度のときにバルブを開けて両容器を接続し、R1234yf を活性炭に吸着させる。このとき有効吸着量分の R1234yf が活性炭に吸着し、その量に応じて発生した吸着熱が、吸着熱交換器内を流れる熱媒によって取り出され利用される。このとき蒸発/凝縮器側の R1234yf は、圧力変化によって蒸発し、熱媒を通じて環境から吸熱する。

2.3 吸着ヒートポンプシステムの動作過程

吸着ヒートポンプシステムの動作過程を図 2.3-1 に示す。本来、蒸発器と凝縮器が別々で設置されるが、今回の実験では同一の容器を使用し、温度のみを変えて再現している。

吸着ヒートポンプシステムは、4つの運転モードを繰り返している。まず、高温熱源からの熱で活性炭から R1234yf を脱着させ、環境温度程度の冷却水で温度を保たれている凝縮器で凝縮させる、脱着モードを行う。続く予冷モードでは、吸着モードに移行するための吸着器の冷却を行う。前述のとおり、活性炭が高温の状態では吸着量が少なくなるた

め、脱着モード後にバルブを閉めた状態で吸着器を冷却水で冷却し、凝縮器は冷房に用いる冷水の温度に調節され、次の吸着モードでは蒸発器となる。吸着モードでは、予冷モードで温度一定になったのちにバルブを開け、R1234yfを活性炭に吸着させる。このとき有効吸着量分のR1234yfが活性炭に吸着し、その量に応じて発生した吸着熱は冷却水によって回収され、蒸発器側ではR1234yfの蒸発により冷水が冷やされ、その冷熱を冷房に利用する。予熱モードでは、脱着を行うために再び吸着器を加熱し、温度を上げていく。

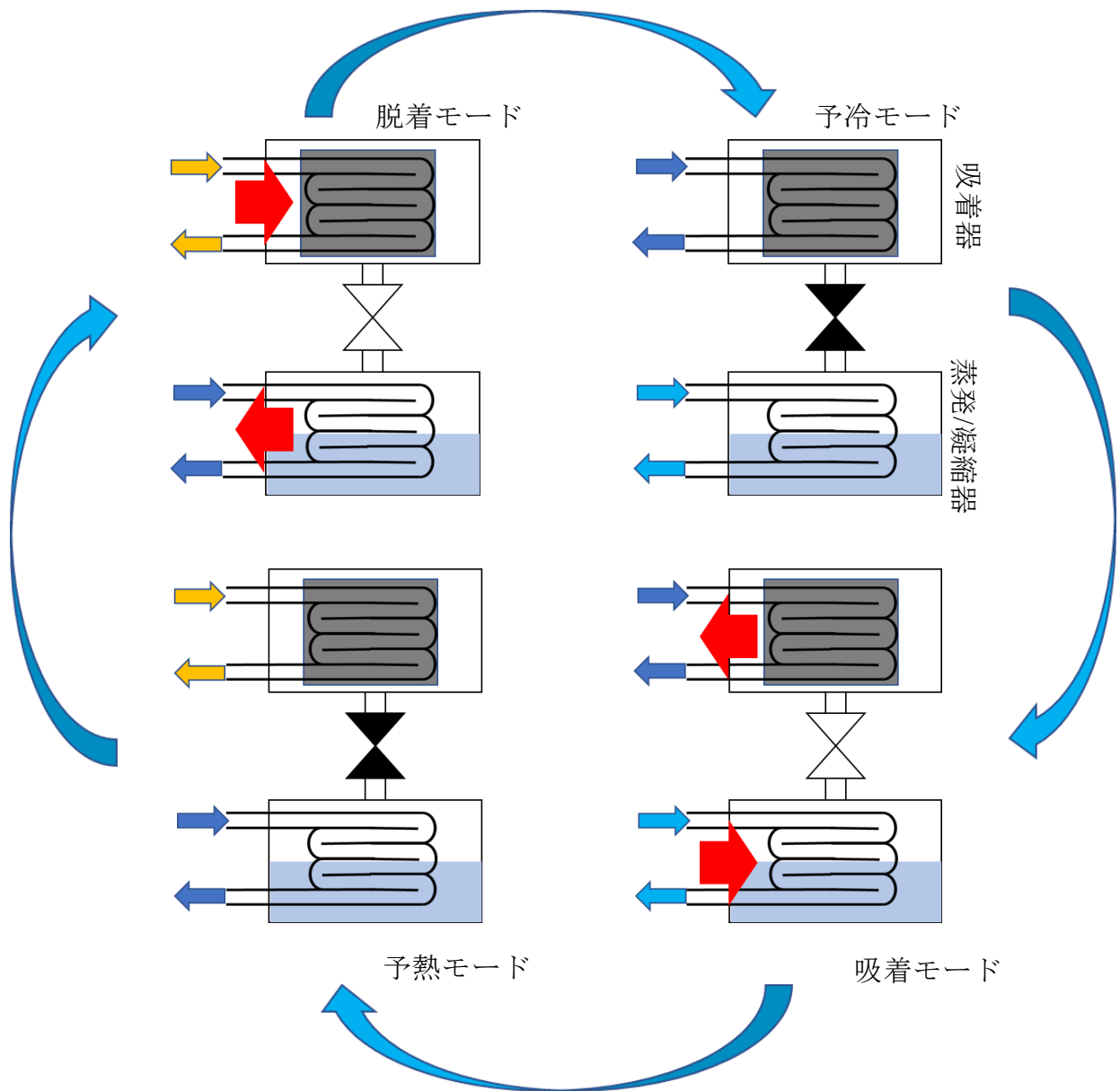


図 2.3-1 吸着ヒートポンプシステムの動作過程

また，図 2.3-2 に，吸着ヒートポンプシステムの理論サイクルの PT 線図を示す．

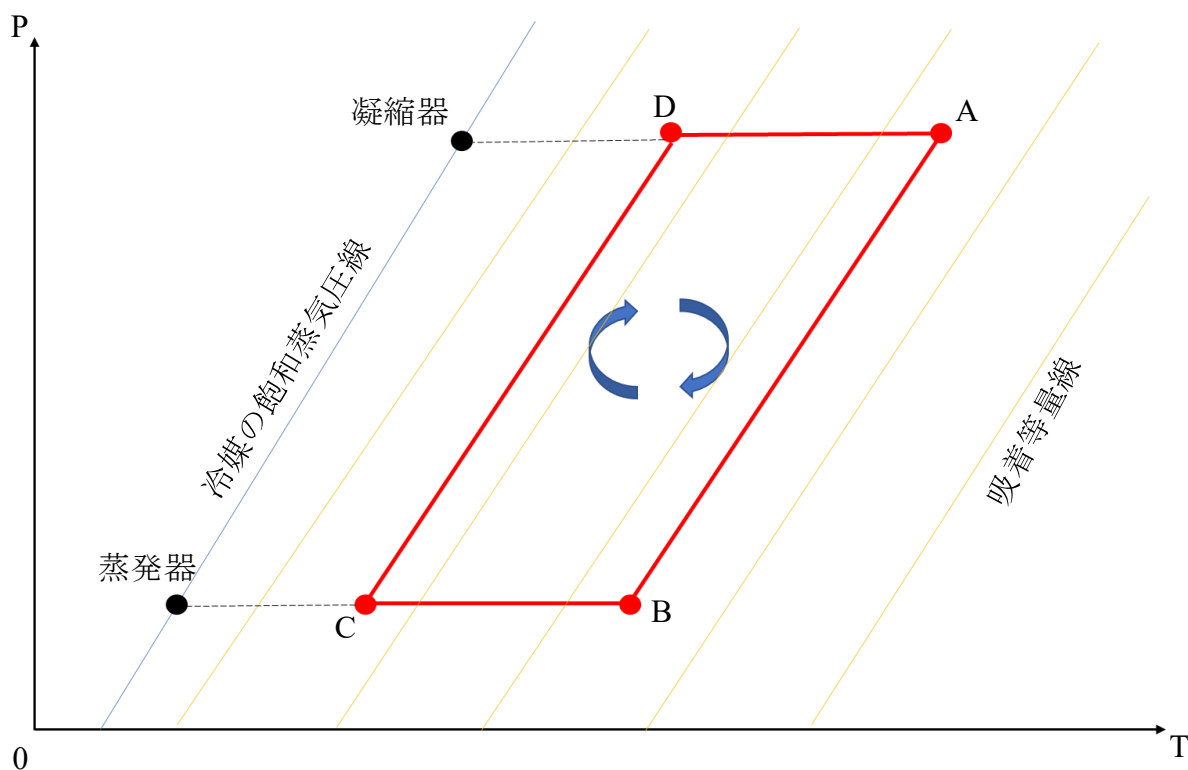


図 2.3-2 吸着ヒートポンプシステムの理論サイクル

まず，脱着が終了した A から，非接続状態で吸着器の温度を下げる A→B の予冷過程を行い，吸着器圧力が蒸発器と同じになったタイミングで蒸発器と接続し，吸着過程 B→Cを開始する．この過程において，蒸発器で吸熱することで，冷房に利用できる．吸着後，両容器の接続を断ち，吸着器の温度を上げる予熱過程 C→Dを行い，吸着器圧力が凝縮器と同じになったタイミングで凝縮器と接続し，冷媒の脱着を行う脱着過程 D→Aを行う．

A→B および C→D の予熱，予冷過程において，温度変化により吸着・脱着がわずかに進むため，この過程はわずかに吸着等量線とは異なる．また，B→C および D→A の吸着・脱着過程では，吸着器は蒸発器や凝縮器と接続されているため，それぞれの容器と同じ圧力で作動している．

2.4 AHT サイクルの動作過程

図 1.3.4 に、AHT(Adsorption Heat Transformer)サイクル^[9]の PT 線図を示す.

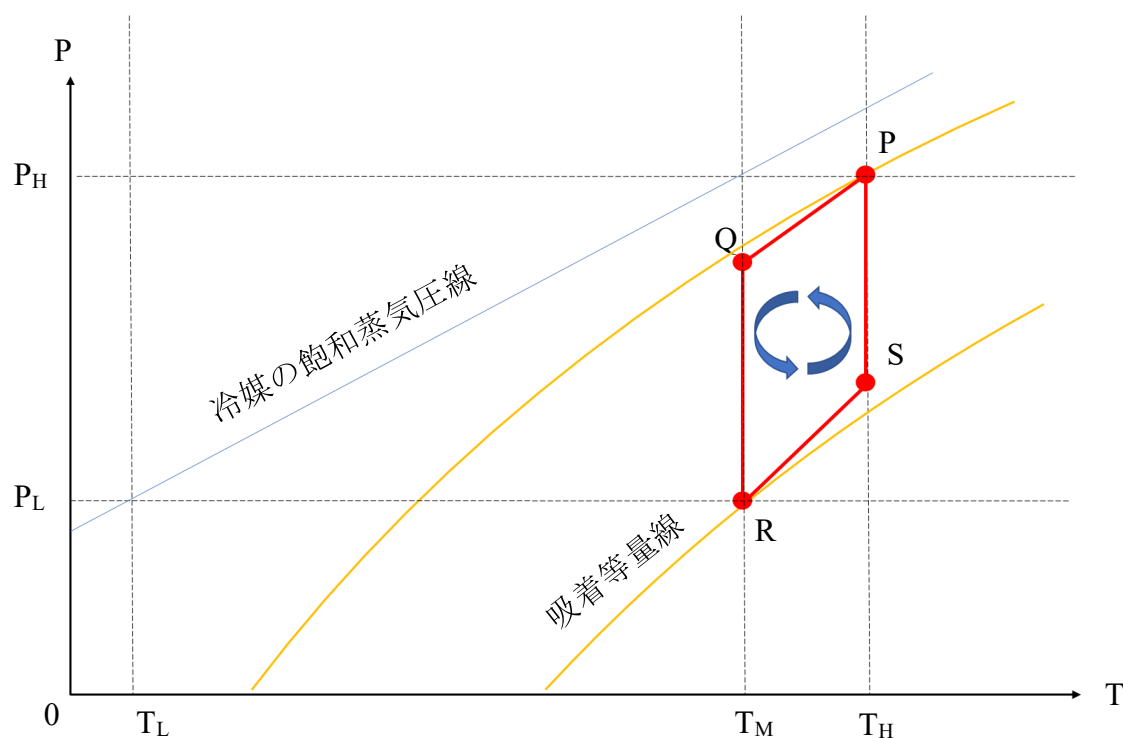


図 2.4 AHT サイクルの PT 線図

AHT サイクルは、低温の排熱の温度レベルを上げるサイクルであり、2つの等温過程と吸着等量過程から成り立つ。吸着器と蒸発器には低温の排熱(T_M)が供給され、凝縮器には常温の冷却水(T_L)が供給される。

吸着器温度 T_M 、凝縮器温度 T_L で脱着が終わった状態で、バルブを閉めて凝縮器温度を T_M まで上げて蒸発器としたのち、吸着器側の熱媒をストップしてからバルブを少し開け、吸着熱によって吸着器を昇温させる $R \rightarrow S$ の過程を行う。温度が T_H まで上がった後、熱媒を流して熱回収を行い、吸着器は等温に保つ等温吸着過程 $S \rightarrow P$ を行う。吸着終了後、バルブを閉め、蒸発器温度を T_L まで下げ、凝縮器としたのちに熱媒を止め、バルブを少し開け、脱着による蒸発熱の放出により吸着器の温度を下げる $P \rightarrow Q$ の過程を行う。温度が下がりすぎると脱着が十分に行えないため、温度が T_M まで下がったら熱媒を流して排熱を供給し、低温での脱着をする $Q \rightarrow R$ の過程となり、サイクルが完了する。

$R \rightarrow S$ や $P \rightarrow Q$ の過程は、吸着等量線に近い過程をたどるが、これは少量の吸着・脱着によって温度を変化させている過程のため、吸脱着が進むにつれてより異なった過程となる。

第3章 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

3.1.1 吸着材の特性

本実験では，粉末状活性炭である MSC-30(関西熱化学製)を吸着材として使用した．吸着反応は主に吸着材の表面で起こる反応である．したがって，質量あたりの表面積が大きくなるほど吸着量が増加し，発熱量も大きくなる．表 3.1.1 に，MSC-30 および比較のためにシリカゲルの基礎物性値を示す．

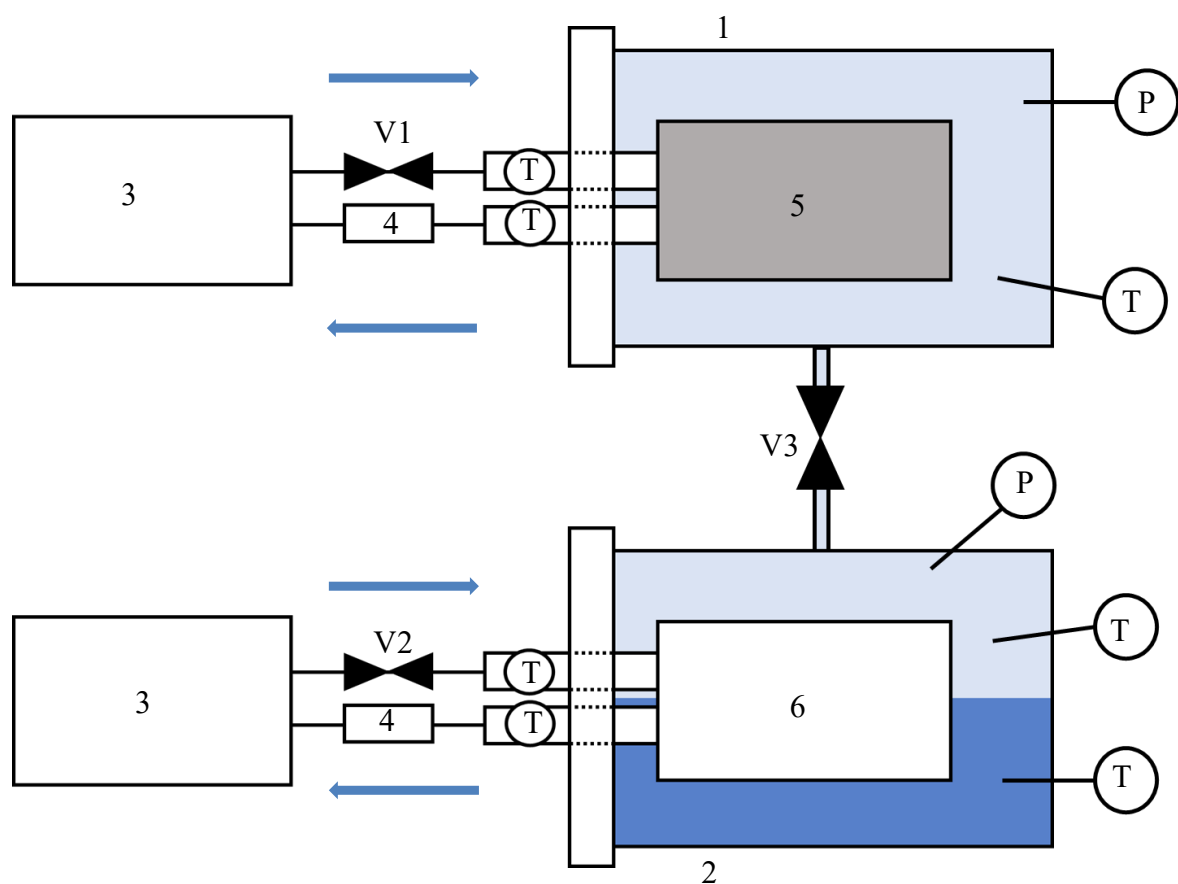
表 3.1.1 吸着材の基礎物性値

	MSC-30 ^[10]	シリカゲル A ^{*1}
比表面積[m ² /g]	3276	700
ミクロ孔容積[cm ³ /g]	1.79	0.46
平均細孔径[nm]	2.09	2.4

*1 日本工業規格(JIS)値

3.1.2 実験装置の概要

本実験に使用した実験装置全体の概略図を図 3.1.2(a)に，実験装置全体の写真を図 3.1.2(b)に示す．



1 吸着 2 蒸発/凝縮 3 恒温 4 流量 5 活性炭塗布熱交換器 6 熱交換器
 V1,V2 流量調節バルブ V3 切り替えバルブ T 熱電対 P 圧力計
 ← 不凍液の流れ

図 3.1.2(a) 実験装置全体の概要図

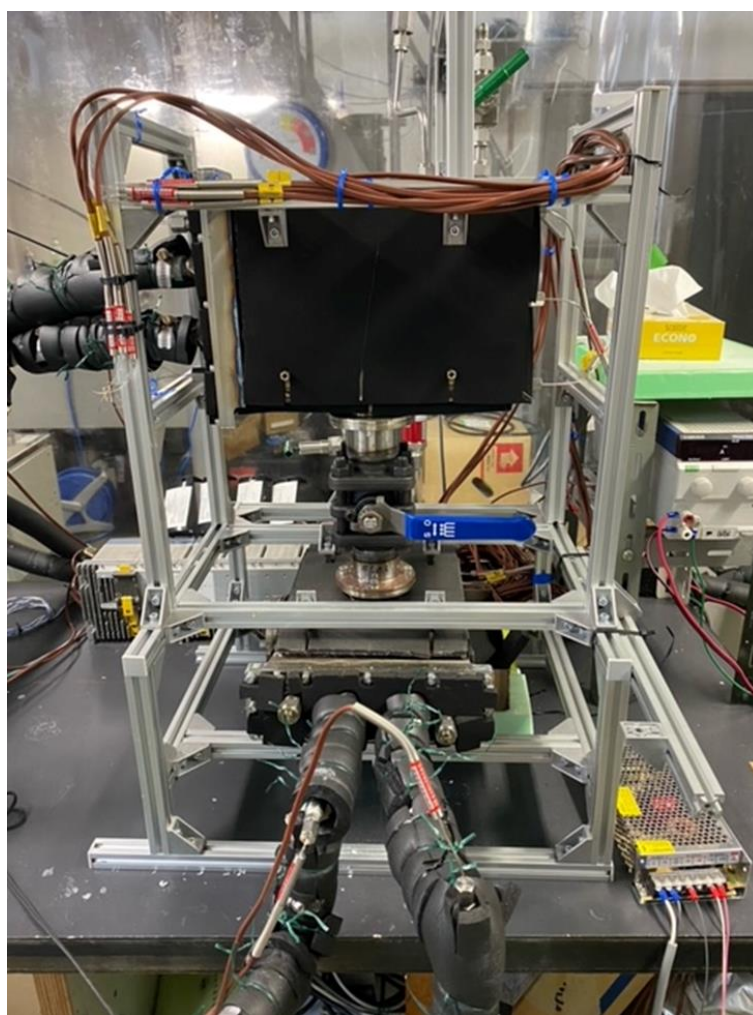


図 3.1.2(b) 実験装置全体の写真

実験装置は主に吸着器と蒸発/凝縮器の2つから成り立っている。吸着器および蒸発/凝縮器はSUS製の容器であり、周囲は断熱材でおおわれている。吸着器と蒸発/凝縮器はバルブを介してつながっており、バルブの開閉によって接続を操作できる。両容器の中にはそれぞれ熱交換器が設置されており、吸着器側の熱交換器のフィン間には活性炭が充填されている。蒸発/凝縮器の中には熱交換器が半分浸る程度に液体のR1234yfが存在し、吸着器と蒸発/凝縮器の残りの空間は蒸気のR1234yfで満たされている。両熱交換器の中には恒温循環装置によって温度制御された不凍液が熱媒として循環し、それによって熱交換器の温度が一定に保たれる。それら恒温循環装置はそれぞれ吸着側にLAUDA社製のIntegral T 2200を、蒸発/凝縮器側にADVANTEC社製のTBF3200DAを使用している。蒸発/凝縮器側について、恒温槽単体では熱媒の流量が小さかったため、補助としてIWAKI PUMPS社のダイレクトポンプRD-12TE24-V12を使用し、流量の増大を図った。不凍液は日産自動車株式会社製の、エチレングリコール50%水溶液と防腐剤からなるLLCを使用している。脱着過程において吸着器内および凝縮器内の気圧を設定温度におけるR1234yfの飽和蒸気圧と等しくするために、実験の前処理として真空ポンプ(GCD-136X, アルバック機工社製)を使用し、R1234yf以外の気体を脱気する。その際、両容器の蒸気圧がR1234yfの飽和蒸気圧であることを確認するために、圧力計(EP201, YOKOGAWA社製)を使用する。両容器の表面温度、蒸気のR1234yfの温度、液体のR1234yfの温度、両熱交換器の表面および出入り口の不凍液の温度は熱電対(T型シース熱電対, 東洋熱科学株式会社製)を用いて測定している。不凍液の体積流量は流量計(FD-MH10A, KEYENCE社製)を使用し測定している。

熱電対、圧力計および流量計の電圧出力値はデータアキュイジションユニット(MX100, 横河電機製)により収集され、そのデータはパーソナルコンピュータ上で作動するソフトウェア「MXLOGGER」によって表示および記録される。

3.1.3 吸着熱交換器

熱交換器の概略図を図 3.1.3(a)に、熱交換器のフィンの概略図を図 3.1.3(b)に、熱交換器の外見上の寸法を図 3.1.3(c)に、熱交換器の写真を図 3.1.3(d)に示す。また、熱交換器の詳細を表 3.1.3 に示す。

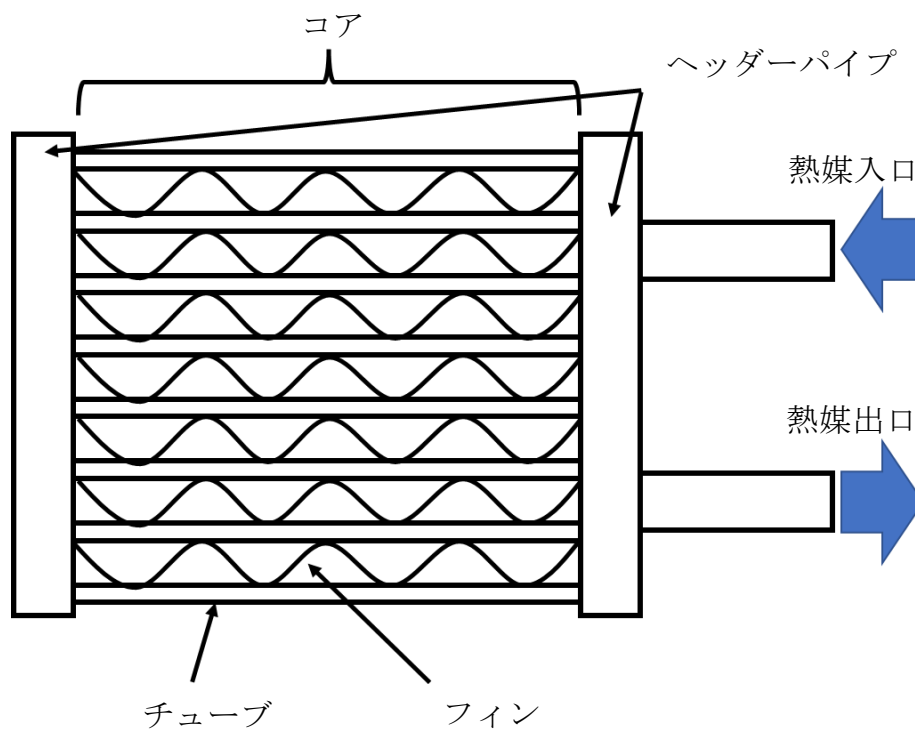


図 3.1.3(a) 熱交換器の概略図

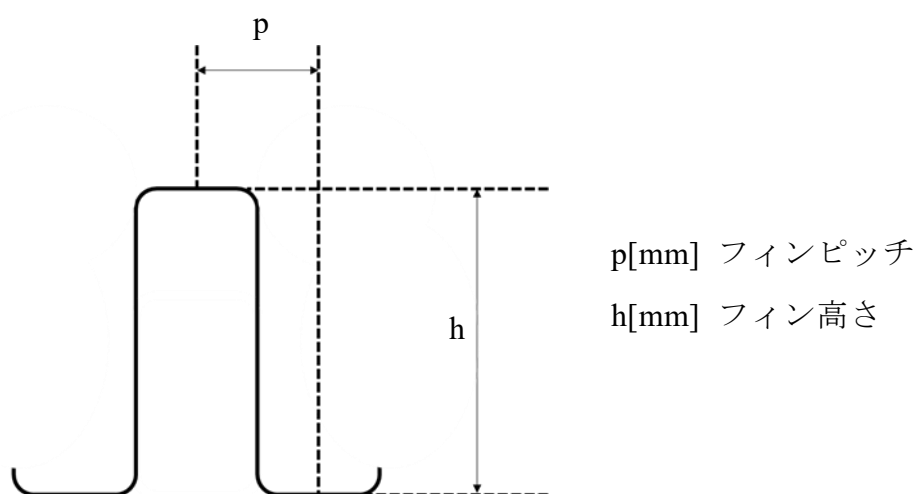


図 3.1.3(b) 熱交換器のフィンの概略図

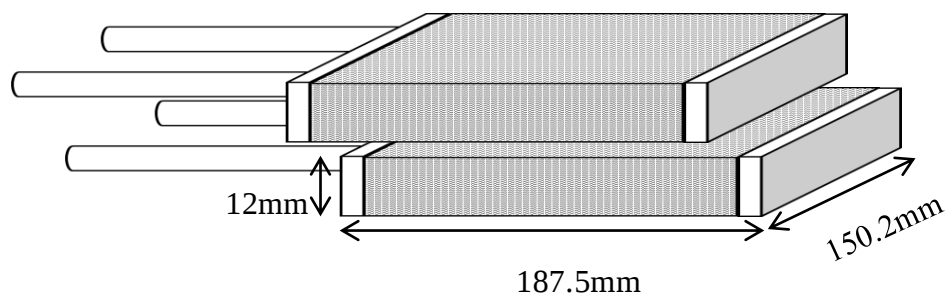


図 3.1.3(c) 熱交換器の外見上の寸法



図 3.1.3(d) 熱交換器の写真

表 3.1.3 熱交換器の詳細

吸着材	塗布液混合比率 [重量%]	活性炭	100
		エタノール	430
		バインダ	50
	吸着材重量[g]		84.3
	担持部容積[cm³]		252 × 2 = 504
	吸着材担持密度[g/cm³]		0.163
チューブ	高さ[mm]		12
	幅[mm]		1.42
	長さ[mm]		187.5
	本数[本]		20 × 2 = 40
	等価直径[mm]		0.67
フィン	ピッチ[mm]		1.0
	高さ[mm]		5.83
	板厚[mm]		0.07
コアサイズ（幅×奥行×厚み）[mm]			187.5×150.2×12
コア表面積（幅×奥行×2）[cm²]			563×2 = 1126
容積（コア and ヘッダーパイプ）[L]			0.420×2 = 0.840
熱容量（吸着材除く）[J/K]			244.6×2 = 489.2

図 3.1.3(a)からわかる通り，熱交換器内には複数本のチューブが通じており，その中で不凍液が流れている．チューブは紙面奥方向に細長い長方形で，その奥方向の長さを熱交換器の厚みとする．それぞれのチューブ間にはフィンが付けられており，そのフィンの中に粉体状の活性炭が充填されている（図 3.1.3(d)参照）．吸着時に発生した吸着熱は，フィンを通して効率的に不凍液に伝えられる．

活性炭を塗布する際，活性炭にエタノールおよびバインダを混ぜ合わせたものを熱交換器に塗布し熱処理を行うことで，実験中に活性炭が熱交換器から剥がれ落ちることを防ぐ．表 3.1.3 に表記されている活性炭，エタノールおよびバインダの重量比は，活性炭の重量を 100 としたときの比で表す．

3.2 実験手順および実験条件

吸着蓄熱システムと吸着ヒートポンプシステムについては、吸着時の吸着器および蒸発器の温度変化から、発生熱量の大小や時間変化を計測した。また、AHT サイクルの実験では、吸着・脱着による温度変化のプロセスの再現のために、吸着・脱着それぞれでの吸着材の温度と圧力の変化量を計測した。ここでは、その実験の手順および実験条件を述べる。

なお、吸着蓄熱システムと吸着ヒートポンプシステムの実験は、温度変化を計測する容器の違いを除いて、どちらも同様の手順で行った。

3.2.1 吸着蓄熱システムおよび吸着ヒートポンプシステムの熱量測定実験の手順

実験手順を以下に示す。なお、本実験において吸着質は不純物を含まない冷媒（吸着質）を使用することが望ましい。そのため、脱着過程において吸着器内および凝縮器内の気圧を設定温度における冷媒の飽和蒸気圧と等しくするために、実験の前処理として真空ポンプを使用し、冷媒以外の気体を脱気した。

蒸発/凝縮器は冷媒の蒸発、凝縮によって役割が変わるため、以降は冷媒が凝縮するときは凝縮器、蒸発するときは蒸発器と呼称する。

1. バルブ V3 を開けた状態で、吸着器側の恒温循環装置の温度を実験条件の脱着時温度に設定する。凝縮器側の恒温循環装置の温度を実験条件の脱着時温度に設定し、冷媒の脱着を行う。
2. 両容器の温度、圧力が一定になったのを確認した後、バルブ V3 を閉じ、吸着器側、蒸発器側の恒温循環装置の温度をそれぞれの実験条件の吸着時温度に設定する。
3. 両容器の温度、圧力が一定になったのを確認した後、バルブ V1, V2 を調節し、実験条件の不凍液流量に設定する。
4. 両容器の温度、圧力および不凍液流量が一定になったのを確認した後、10 分間放置して外部への熱損失を計測したのち、バルブ V3 を開けて冷媒の吸着を開始する。
5. 吸着開始 30 分後、両容器の温度、圧力および不凍液流量が吸着開始前と等しくなったのを確認した後、記録を終了する。
6. 手順 1～5 を温度条件、不凍液流量を変えて繰り返す。

3.2.2 AHT サイクルのプロセス再現実験の手順

実験手順を以下に示す．なお，本実験において吸着質は不純物を含まない冷媒（吸着質）を使用することが望ましい．そのため，脱着過程において吸着器内および凝縮器内の気圧を設定温度における冷媒の飽和蒸気圧と等しくするために，実験の前処理として真空ポンプを使用し，冷媒以外の気体を脱気した．

1. バルブ V3 を開けた状態で，吸着器側の恒温循環装置の温度を実験条件の脱着時温度に設定する．凝縮器側の恒温循環装置の温度を実験条件の脱着時温度に設定し，冷媒の脱着を行う．
2. 両容器の温度，圧力が一定になったのを確認した後，バルブ V3 を閉じ，吸着器側，蒸発器側の恒温循環装置の温度をそれぞれの実験条件の吸着時温度に設定する．
3. 両容器の温度，圧力が一定になったのを確認した後，吸着器側の恒温循環装置を停止し，記録を開始する．
4. 記録開始後，バルブ V3 を可能な限りゆっくりと開け，吸着終了までの間に閉める．
5. 吸着開始 20 分後，蒸発器の温度，圧力および不凍液流量が吸着開始前と等しくなったのを確認した後，記録を終了する．
6. 手順 1～5 を温度条件，バルブ V3 を閉めるタイミングを変えて繰り返す．

なお，脱着過程の実験では，吸着と脱着の順序が逆となる．

3.2.3 実験条件

表 3.2.3(a),(b),(c),(d)に，吸着蓄熱システム，吸着ヒートポンプシステム，AHT サイクル（吸着，脱着）のそれぞれの実験条件を示す．

表 3.2.3(a) 吸着蓄熱システムの実験条件

脱着過程	吸着器温度[°C]	60, 70, 80		
	凝縮器温度[°C]	5	15	25
吸着過程	吸着器温度[°C]	5	15	25
	蒸発器温度[°C]	5	15	25
不凍液流量[L/min]		1.25, 2.5		

表 3.2.3(b) 吸着ヒートポンプシステムの実験条件

脱着過程	吸着器温度[°C]	60, 70, 80	
	凝縮器温度[°C]	30	
吸着過程	吸着器温度[°C]	30	
	蒸発器温度[°C]	15	25
不凍液流量[L/min]		1.0, 1.5, 2.0	

表 3.2.3(c) AHT サイクルの吸着過程の実験条件

脱着過程	吸着器温度[°C]	35
	凝縮器温度[°C]	0, 10, 15
吸着過程	吸着器温度[°C]	35
	蒸発器温度[°C]	35

表 3.2.3(d) AHT サイクルの脱着過程の実験条件

吸着過程	吸着器温度[°C]	40
	蒸発器温度[°C]	35
脱着過程	吸着器温度[°C]	40
	凝縮器温度[°C]	10, 15

3.3 実験データ算出方法

実験によって得られたデータを用いて吸着蓄熱システムおよび吸着ヒートポンプシステムの実験での吸着・蒸発発熱量を算出する方法，吸着量の理論値の計算方法，吸着熱および脱着熱の理論値の計算方法，COP（成績係数）の算出方法を述べる．また，AHT サイクルの実験においてのプロセスの予測曲線の作成方法および比較対象の吸着等量線の作成方法も述べる．

3.3.1 実験データの記録方法

3.2 の実験手順において記録を開始すると，熱電対，圧力計，流量計によって温度，圧力，不凍液流量が 1 秒ごとに記録される．

3.3.2 発熱量の算出方法

吸着器での単位時間当たりの発熱量を $\dot{Q}_{ad,exp}$ [W]とおくと、以下の式から求められる。
ここで、正の値は熱の発生、負の値は冷熱の発生を表す。

$$\dot{Q}_{ad,exp} = \dot{m}_{ad} c_{ad} (T_{ad,out} - T_{ad,in}) \quad (3.1)$$

ここで、 $\dot{m}_{ad}$ [kg/s]は吸着熱交換器内を流れる熱媒の質量流量を表す。 c_{ad} [J/(kg・K)]は吸着熱交換器内を流れる熱媒の比熱を表す。 $T_{ad,out}$ [K]、 $T_{ad,in}$ [K]はそれぞれ吸着器熱交換器内を流れる熱媒の流出温度と流入温度を表す。 $\dot{m}_{ad}$ [kg/s]以下の式から求められる。

$$\dot{m}_{ad} = \rho_{ad} \dot{V}_{ad} / 60 \quad (3.2)$$

ここで、 ρ_{ad} [kg/L]は吸着熱交換器内を流れる熱媒の密度を表す。 $\dot{V}_{ad}$ [L/min]は吸着熱交換器内を流れる熱媒の1分間あたりの体積流量を表す。また、1秒間あたりの流量で表すために60で割っている。 c_{ad} [J/(kg・K)]、 ρ_{ad} [kg/L]はそれぞれ以下の式から求められる。

$$c_{ad} = 0.004892735 \overline{T_{ad}} + 3.372991282 \quad (3.3)$$

$$\rho_{ad} = -0.000002 \overline{T_{ad}}^2 - 0.0004 \overline{T_{ad}} + 1.0848 \quad (3.4)$$

$$\overline{T_{ad}} = \frac{1}{2} (T_{ad,out} + T_{ad,in}) \quad (3.5)$$

ただし、蒸発器での単位時間当たりの発熱量 $\dot{Q}_{eva,exp}$ [W]は、上記の式の添え字 ad を eva に変え、すべて蒸発器内での値に置き換えることで計算する。

3.3.3 外部環境と装置の間における熱損失の算出方法

実験を行っているとき、実験装置と周囲の環境の間には温度差が存在するため、実験装置と環境の間で熱交換が行われる。よって、正味の熱発生量を算出するためには、装置と環境の間の熱交換量を考慮する必要がある。吸着器の環境との単位時間当たりの熱交換量を $\dot{Q}_{ad,loss}$ [W]とすると、以下の式で求められる。

$$\dot{Q}_{ad,loss} = \dot{m}_{ad} c_{ad} (T_{ad,out} - T_{ad,in}) \quad (3.6)$$

ここで、正の値は環境からの熱の流入、負の値は環境への熱の流出を表す。吸着器の環境との10分間の合計熱交換量を $Q_{ad,loss}$ [J]とすると、以下の式で求められる。

$$Q_{ad,loss} = \int_I^{600} \dot{Q}_{ad,loss} dt \quad (3.7)$$

吸着器の環境との単位時間当たりの平均熱交換量を $\bar{Q}_{ad,loss}$ [W]とすると、以下の式で求められる。

$$\bar{Q}_{ad,loss} = Q_{ad,loss} / 600 \quad (3.8)$$

ただし、蒸発器の環境との単位時間当たりの平均熱交換量 $\bar{Q}_{eva,loss}$ [W]は、上記の式の添え字 ad を eva に変え、すべて蒸発器内での値に置き換えることで計算する。

3.3.4 合計発熱量の算出方法

実験装置と環境の間で行われる熱交換を加味した正味の単位時間当たりの吸着器の発熱量を $\dot{Q}_{ad}$ [W]とすると、先ほどの $\dot{Q}_{ad,exp}$ [W]、 $\bar{Q}_{ad,loss}$ [W]を用いて以下の式で求められる。

$$\dot{Q}_{ad} = \dot{Q}_{ad,exp} - \bar{Q}_{ad,loss} \quad (3.9)$$

吸着過程における熱交換を加味した吸着器の合計発熱量を Q_{ad} [J]とすると、以下の式で求められる。

$$Q_{ad} = \int_I^t \dot{Q}_{ad} dt \quad (3.10)$$

ここで、 t [sec]は吸着開始からの経過時間を表す。

また、正味の単位時間当たりの蒸発器の発熱量を $\dot{Q}_{eva}$ [W]とすると、先ほどの $\dot{Q}_{eva,exp}$ [W]、 $\bar{Q}_{eva,loss}$ [W]を用いて以下の式で求められる。

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{Q}_{eva,exp} - \bar{Q}_{eva,loss} \quad (3.11)$$

吸着過程における熱交換を加味した蒸発器の合計発熱量を Q_{eva} [J]とすると、以下の式で求められる。

$$Q_{eva} = \int_I^t \dot{Q}_{eva} dt \quad (3.12)$$

ここで、 t [sec]は吸着開始からの経過時間を表す。

3.3.5 平均発熱量の算出方法

吸着開始から任意の時間までの平均発熱量を $\dot{Q}_{ad,ave}$ [W] とすると，以下の式で求められる．

$$\dot{Q}_{ad,ave} = \frac{1}{t} Q_{ad} \quad (3.13)$$

ただし，蒸発器での平均発熱量 $\dot{Q}_{eva,ave}$ [W] は，上記の式の添え字 ad を eva に変え，すべて蒸発器内での値に置き換えることで計算する．

3.3.6 吸着量の理論値の算出方法

活性炭に対する吸着質の平衡吸着量の算出式は Dubinin-Astakhov の式(D-A 式)^[2,3]が広く用いられている．ある温度，圧力下での活性炭 1kg への吸着質の吸着量を W_{th} [kg/kg] とすると，D-A 式を用いて以下の式で求められる．

$$W_{th} = W_0 \exp \left\{ - \left(\frac{R(T+273.14)}{E} \ln \frac{P_s}{P} \right)^n \right\} \quad (3.14)$$

ここで， W_0 [kg/kg] は活性炭 1kg への吸着質の最大吸着量， R [J/kg・K] は気体定数， T [°C] は活性炭の温度， E [J] は固有エネルギー， P_s [Pa] は活性炭の温度における吸着質の飽和蒸気圧， P [Pa] は吸着質の蒸気圧， n [-] は吸着パラメータを表す． W_0 [kg/kg]， E [kJ/kg]， n [-] は活性炭と吸着質の組み合わせによる固有の値である．これには，表 3.3.6 に示す，Seo ら^[11]によって明らかにされた値を使用する．

表 3.3.6 D-A 式の固有の値

	R1234yf-MS-30
W_0 [kg/kg]	1.91
E [kJ/kg]	83.8
n [-]	1.43

脱着過程において，脱着平衡のとき P_s [Pa] は吸着器温度の R1234yf の飽和蒸気圧， P [Pa] は凝縮器温度における R1234yf の飽和蒸気圧を示す．

吸着過程において、吸着平衡のとき $P_s[\text{Pa}]$ は吸着器温度の R1234yf の飽和蒸気圧、 $P[\text{Pa}]$ は蒸発器温度における R1234yf の飽和蒸気圧を示す。

有効吸着量は、吸着過程における平衡吸着量と脱着過程における平衡吸着量の差である。有効吸着量を $\Delta W_{th}[\text{kg/kg}]$ 、吸着過程における平衡吸着量を $W_{th,ad}[\text{kg/kg}]$ 、脱着過程における平衡吸着量を $W_{th,de}[\text{kg/kg}]$ とすると、有効吸着量は以下の式で求められる。

$$\Delta W_{th} = W_{th,ad} - W_{th,de} \quad (3.15)$$

$\Delta W_{th}[\text{kg/kg}]$ は活性炭 1kg あたりに対する吸着質の吸着量であるため、本実験における有効吸着量を $\Delta W'_{th}[\text{kg}]$ とすると、以下の式から求められる。

$$\Delta W'_{th} = m_{ca} \Delta W_{th} \quad (3.16)$$

ここで、 $m_{ca}[\text{kg}]$ は活性炭の質量である。

3.3.7 吸着熱、脱着熱および蒸発熱の理論値の算出方法

宮崎^[12]は D-A 式を用いた等量吸着熱の算出に、Clausius-Clapeyron の式を用いている。吸着材の温度が同じとき、吸着による発熱量と脱着に必要な熱量は等価である。そこで本研究においても、吸着熱および脱着熱の理論値を Clausius-Clapeyron の式より算出した。Clausius-Clapeyron の式より、等量吸着熱 $h_{st}[\text{kJ/kg}]$ を以下の式で表すことができる。

$$h_{st} = -R \frac{d \ln P}{d(1/T)} \quad (3.17)$$

また同様に、吸着質の蒸発潜熱 $h_{fg}[\text{kJ/kg}]$ は以下の式で表される。

$$h_{fg} = -R \frac{d \ln P_0}{d(1/T)} \quad (3.18)$$

式(3.14)に示す D-A 式より、以下の式が導出される。

$$\ln P = \ln P_0 - \frac{E}{RT} \left[\ln \left(\frac{W_0}{W} \right) \right]^{1/n} \quad (3.19)$$

式(3.19)の両辺を $1/T$ で微分し、式(3.17)および式(3.18)を代入すると、等量吸着熱を算出する以下の式が導出される。

$$h_{st} = h_{fg} + E \left[\ln \left(\frac{W_0}{W} \right) \right]^{1/n} \quad (3.20)$$

式(3.20)の両辺に式(3.16)の有効吸着量を掛け合わせることで、その吸着材の温度における吸着熱および脱着熱が算出される。

また、蒸発器における冷媒の蒸発により奪われる蒸発熱の理論値 $Q_{eva,th}$ は、以下の式で求められる。

$$Q_{eva,th} = \Delta W'_{th} h_{fg} \quad (3.21)$$

3.3.8 COP（成績係数）の算出方法

COP とは、投入熱量に対する発生熱量の比であり、吸着蓄熱システムでは以下の式より算出される。

$$COP = \frac{Q_{ad}}{Q_{de} + Q_{sh}} \quad (3.22)$$

ここで Q_{de} [J]は脱着に必要な熱量、 Q_{sh} [J]は吸着熱交換器および吸着している吸着質を、吸着温度（環境温度）から脱着温度（排熱温度）まで上昇させるために必要な熱量（顕熱）を表す。脱着熱 Q_{de} [J]は 3.3.7 から求めることができる。

また、吸着ヒートポンプシステムの COP は以下の式より算出される。

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_{de} + Q_{sh}} \quad (3.23)$$

顕熱 Q_{sh} [J]は以下の式で表される。

$$Q_{sh} = (M_s C_s + M_s C_r \frac{W_{th,ad} + W_{th,de}}{2} + M_b C_b + HC_{hex})(T_{de} - T_{ad}) \quad (3.24)$$

ここで、 M_s [kg]は活性炭の質量、 C_s [J/kg・K]は活性炭の比熱、 C_r [J/kg・K]は吸着質（液体）の比熱、 M_b [kg]はバインダの質量、 C_b [J/kg・K]はバインダの比熱、 HC_{hex} [J/K]は熱交換器（吸着材を除く）の熱容量、 T_{de} [K]は脱着温度、 T_{ad} [K]は吸着温度を表す。活性炭の比熱は Uddin^[13]らによって明らかにされた値を、R1234yf の比熱は Seo ら^[11]によって明らかにされた値を参考にした。

3.3.9 AHT サイクルのプロセス予測曲線の作成方法

2.4 で説明した通り、AHT サイクルにおいて、温度を変化させる際に少量の吸着・脱着による熱変化を用いる。しかし、この過程が PT 線図上でどのような軌跡をたどるかは明

らかにされていない．ここでは，吸着・脱着実験によってこの過程の概形を明らかにする予測曲線の作成方法について述べる．

3.2.2 の実験手順で得られた吸着器の温度変化のデータのうち，変化量が最大となるときの吸着器の温度と圧力を記録する．これを，バルブを閉めて吸着・脱着を中断するタイミングのみを変えて複数回行うことで，少量の吸着・脱着による温度と圧力の変化のグラフが完成する．1 回の実験での温度変化のみでもグラフは作成できるが，冷媒が高压であるためにバルブでの吸着速度のコントロールが難しいため，同じ温度条件でもそれぞれの実験で誤差が大きく生じてしまう．そのため，複数回の実験データを同じグラフにプロットすることとした．

実際の実験では，バルブを開けた状態のまま最大まで吸着・脱着させる実験を 1 回と，途中でバルブを閉め，中断させる実験を 9 回の，計 10 回行う．

3.3.10 吸着等量線の作成方法

3.3.9 で作成した曲線は，AHT サイクルにおいて図 1.3.4 の中の R→S と P→Q に当たり，前述のとおり吸着・脱着が進むにつれ，吸着等量線との違いが顕著になっていく．そのため，吸着等量線を作成し，比較することは重要になる．

吸着等量線を PT 線図内でプロットするための式は，式(3.14)の D-A 式を変形した以下の式で表される．

$$P=P_s \exp \left[-\frac{E}{R(T+273.14)} \left(-\ln \frac{W_{th}}{W_0} \right)^{1/n} \right] \quad (3.25)$$

この式をプロットした吸着等量線と，3.3.9 で得られたグラフの近似曲線を比較する．

第4章

実験結果および考察

この章では，本研究および先行研究の実験結果から，3つの小章に分けて活性炭を用いた吸着式蓄熱・ヒートポンプシステムの性能評価および AHT サイクルのプロセス検証を行う．

4.1 吸着蓄熱システムの実験結果および考察

この小章では，R1234yf と 12mm×2 熱交換器を用いた吸着実験の結果から，さまざまな条件の違いによって，活性炭と R1234yf を用いた吸着蓄熱システムの性能にどのような影響が及ぼされるのか考察する．

4.1.1 脱着温度が異なるときの性能の比較

ここでは，凝縮温度が同じで脱着温度が異なるときの性能の比較を行う．なお，すべての温度条件において，熱交換器の中を流れる熱媒の体積流量は 2.5L/min である．

まずは，吸着熱交換器の中を流れる熱媒の出入口の温度差の経時変化について考察する．図 4.1.1-1a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較，図 4.1.1-1b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である．横軸は吸着開始から経過した時間であり，縦軸は熱交換器の出入口の温度差である．熱媒が吸着熱を吸収することで温度が上がるため，出入口で温度差が生じる．

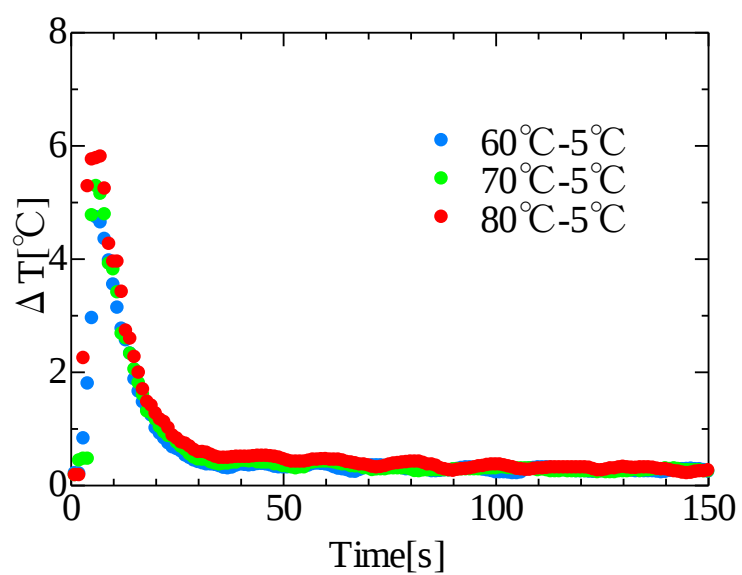


図 4.1.1-1a 凝縮温度が 5°C のときの，熱交換器の出入口の温度差の経時変化

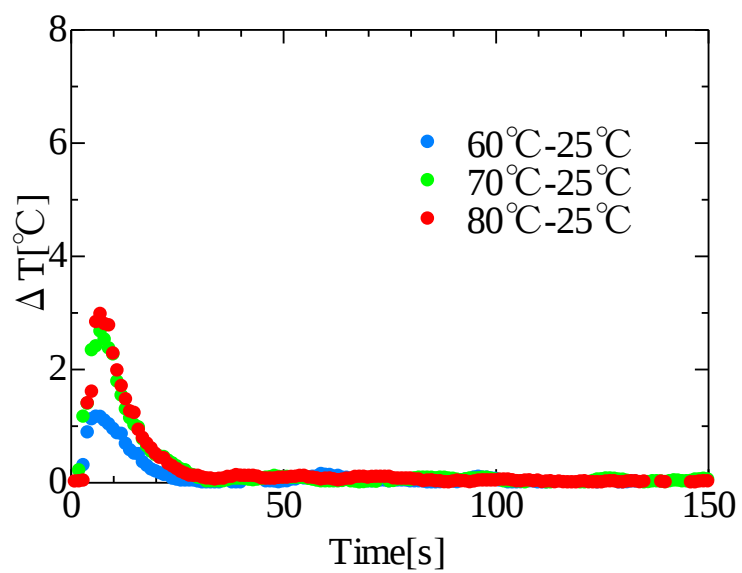


図 4.1.1-1a 凝縮温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口の温度差の経時変化

図 4.1.1-1a, 図 4.1.1-1b からわかる通り, 脱着温度が高くなるほど温度差のピーク値が大きくなることがわかる.

この結果が生じた理由として, 有効吸着量の違いが影響したことが考えられる. 各温度条件において式(3.14)から得られた, 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量を記載したものが, 表 4.1.1-1 である. 各凝縮温度において, 脱着温度が 60°C のときの有効吸着量を 1 とすると, 脱着温度が 70°C, 80°C のときの有効吸着量の比は, 表 4.1.1-2 のようになる.

表 4.1.1-1 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量

脱着過程		吸着過程		有効吸着量
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[g]
60	5	5	5	41.43
70				50.68
80				59.84
60	15	15	15	30.73
70				39.63
80				48.64
60	25	25	25	21.13
70				29.43
80				38.07

表 4.1.1-1 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量の比率

脱着過程		吸着過程		有効吸着量の比 [-]
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	
60	5	5	5	1
70				1.22
80				1.44
60	15	15	15	1
70				1.29
80				1.58
60	25	25	25	1
70				1.39
80				1.80

表 4.1.1-2 より，凝縮温度が高くなるほど，脱着温度の違いによる有効吸着量の比率が大きくなることがわかる．有効吸着量が大きくなるほど，吸着直前の吸着器と蒸発器の圧力差が大きくなるため，吸着を開始したときの瞬間的な吸着量や蒸発量が大きくなると考えられる．

続いて，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化について考察する．図 4.1.1-2a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較，図 4.1.1-2b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である．この熱量は，熱交換器の温度差と熱交換器の中を流れる熱媒の流量から算出し，流量条件はすべて等しいため，図 4.1.1-1 と図 4.1.1-2 はほとんど同じような関係になることがわかる．

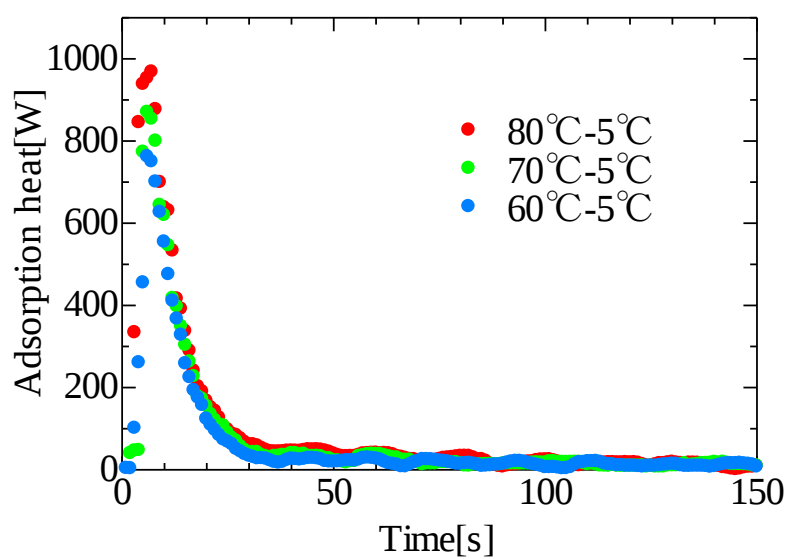


図 4.1.1-2a 凝縮温度が 5°C のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

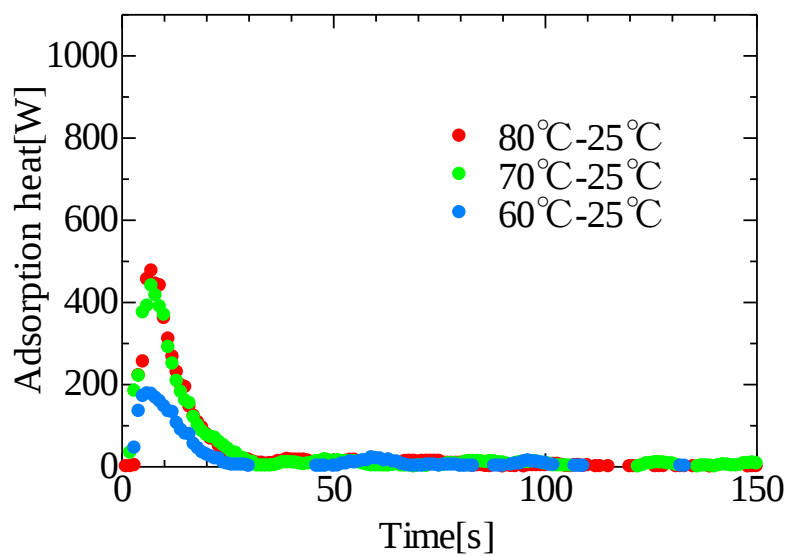


図 4.1.1-2b 凝縮温度が 25°C のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する．図 4.1.1-3a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較，図 4.1.1-3b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である．

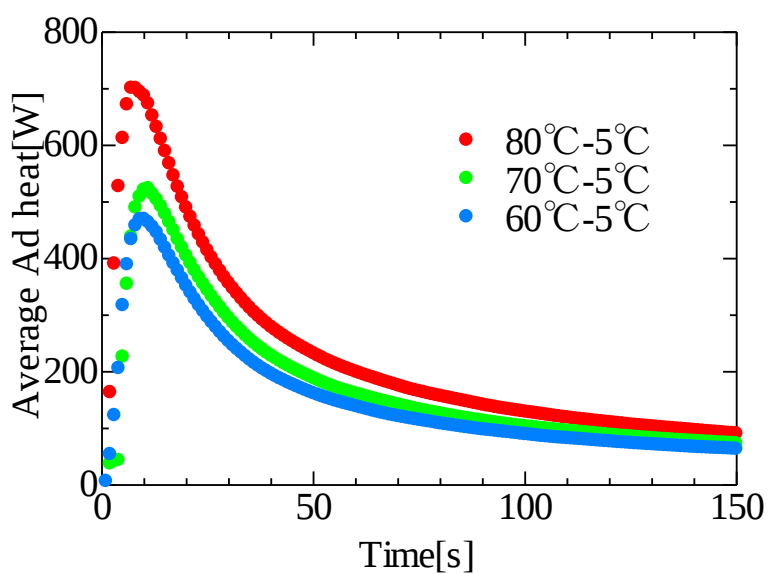


図 4.1.1-3a 凝縮温度が 5°C のときの、平均発熱量の経時変化

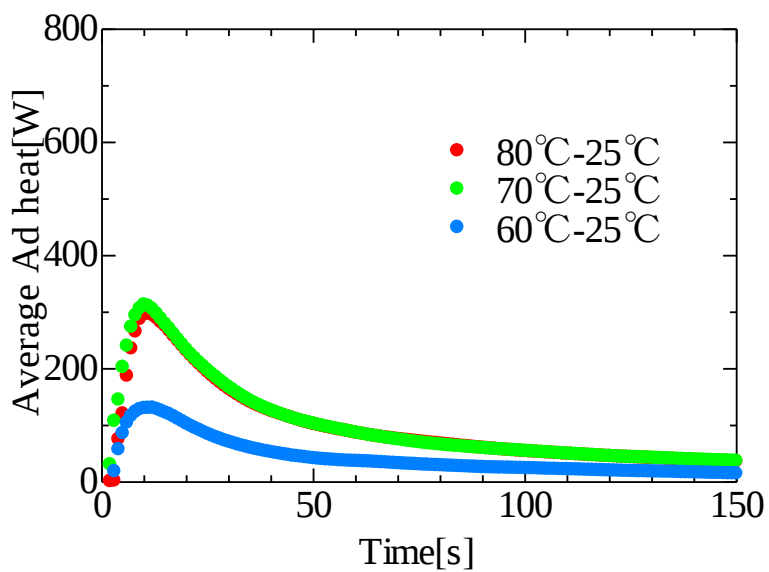


図 4.1.1-3b 凝縮温度が 25°C のときの、平均発熱量の経時変化

図 4.1.1-2 と図 4.1.1-3 を比較すると，ほとんどの条件でそれぞれの大小関係が対応していることがわかる．つまり，この条件においては，単位時間当たりの発熱能力と平均発熱能力が同じような関係になることがわかる． $80^{\circ}\text{C}-25^{\circ}\text{C}$ と $70^{\circ}\text{C}-25^{\circ}\text{C}$ においてはピーク時の大小が逆転しているが，これは瞬間発熱量の大きさの差が小さいことのうえに，吸着後の装置の外部温度の変化や計器の測定誤差などの要因に起因すると考えられる．

最後に，合計発熱量の経時変化について考察する．図 4.1.1-4a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較，図 4.1.1-4b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である．

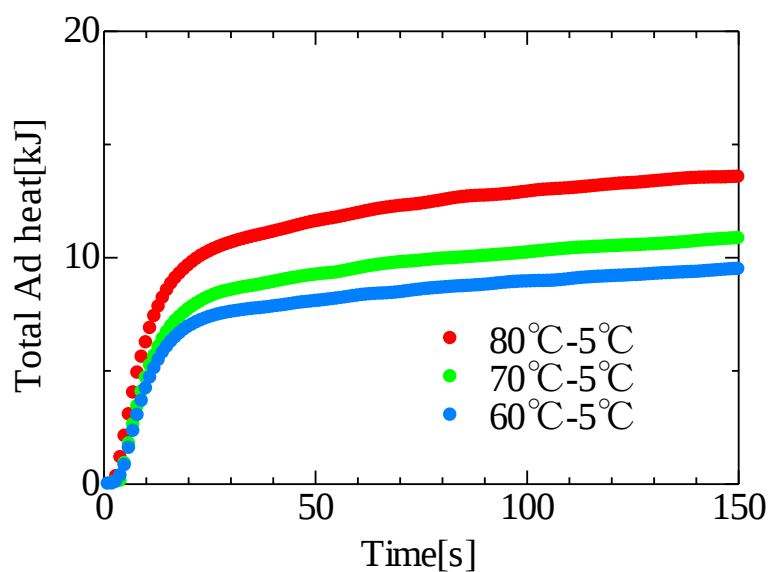


図 4.1.1-4a 凝縮温度が 5°C のときの，合計発熱量の経時変化

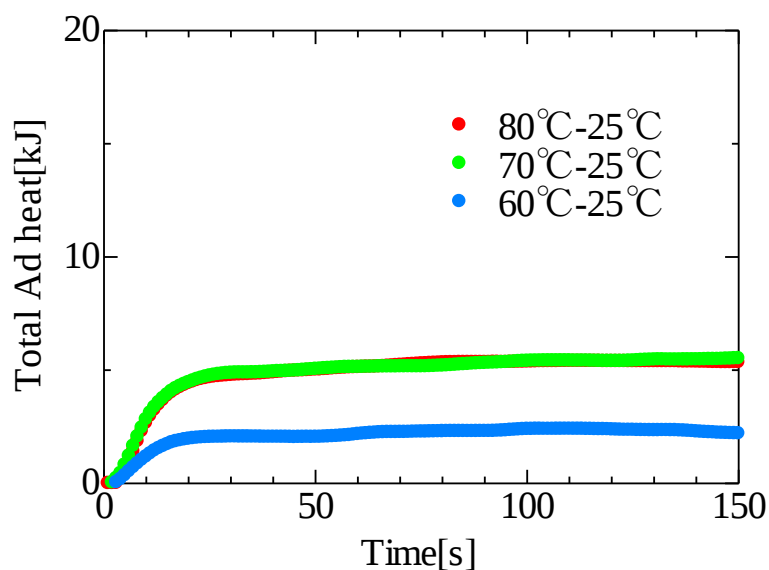


図 4.1.1-4b 凝縮温度が 25°C のときの，合計発熱量の経時変化

有効吸着量の比率を考慮すると，凝縮温度が 25°C のときの方が脱着温度による発熱量の差が大きくなると考えられるが，図 4.1.1-4b において脱着温度 80°C と 70°C での差がほとんどないことがわかる．これは，実験中の外部温度の変化や計器の測定誤差などの要素に起因すると考えられる．

4.1.2 蒸発温度が異なるときの性能の比較

ここでは，脱着温度が同じで蒸発温度が異なるときの性能の比較を行う．なお，先ほどと同様にすべての温度条件において，熱交換器の中を流れる熱媒の体積流量は 2.5L/min である．

まずは，吸着熱交換器の中を流れる熱媒の出入口の温度差の経時変化について考察する．図 4.1.2-1a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.1.2-1b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

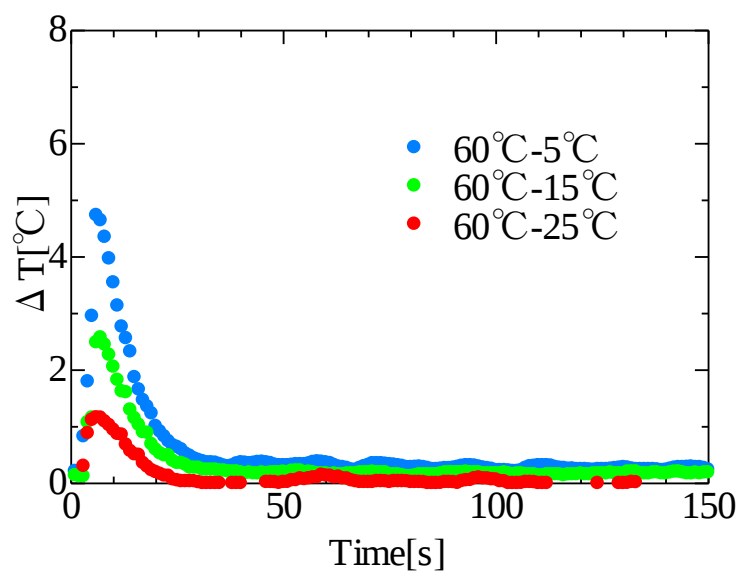


図 4.1.2-1a 脱着温度が 60°C のときの、熱交換器の出入口温度差の経時変化

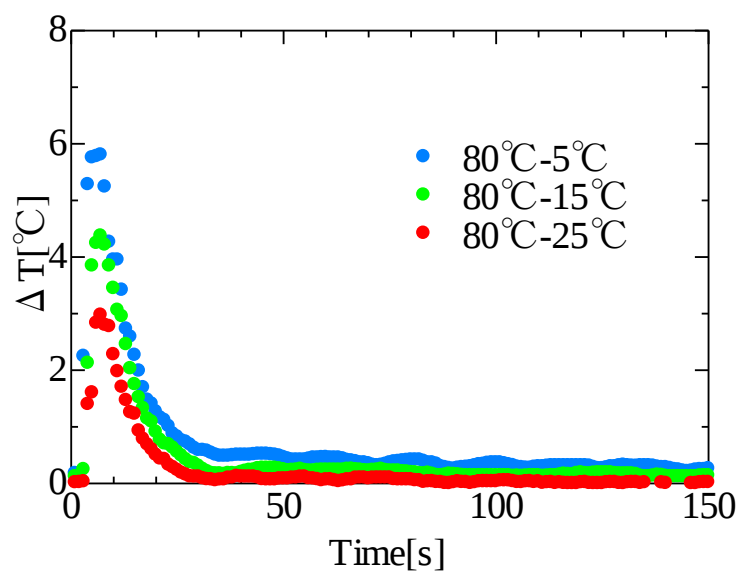


図 4.1.2-1b 脱着温度が 80°C のときの、熱交換器の出入口温度差の経時変化

図より，蒸発温度が低くなるほど，温度差のピーク値が大きくなることがわかる．また，図より脱着温度が 80℃ のときの方が，温度差のピーク値の差が小さくなっていることがわかる．これは，有効吸着量の比が起因していると考えられる．表 4.1.2 に，各脱着温度において，蒸発温度が 25℃ のときの有効吸着量を 1 としたときの，ほかの蒸発温度における有効吸着量の比を示す．

表 4.1.2 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量の比率

脱着過程		吸着過程		有効吸着量の比 [-]
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	
60	25	25	25	1
	15	15	15	1.45
	5	5	5	1.96
70	25	25	25	1
	15	15	15	1.35
	5	5	5	1.72
80	25	25	25	1
	15	15	15	1.27
	5	5	5	1.57

この表より，脱着温度が低くなるほど，蒸発温度の違いによる有効吸着量の比率が大きくなっていることがわかる．また，蒸発温度が低くなるほど有効吸着量は大きくなる．有効吸着量が大きくなるほど，吸着を開始したときの瞬間的な吸着量が大きくなり，温度差のピーク値も大きくなったと考えられる．

しかし，安藝^[14]によると，エタノールを用いた同様の実験では，蒸発温度が高いほど温度差のピーク値が大きくなっている．これは，エタノールでは有効吸着量の変化よりも，蒸発温度が上がったことによるエタノールの蒸気圧の変化の影響が大きいことを示しており，実際に蒸発温度が高いほど吸着直前の圧力差はかなり大きかった．例として，脱着温度 80℃ で蒸発温度 5℃ と 25℃ のときを比較すると，25℃ のときの圧力差の方が 4 倍近

く大きかった．比較のため，R1234yf での各蒸発温度における圧力の経時変化を図 4.1.2-2a～図 4.1.2-2c に示す．

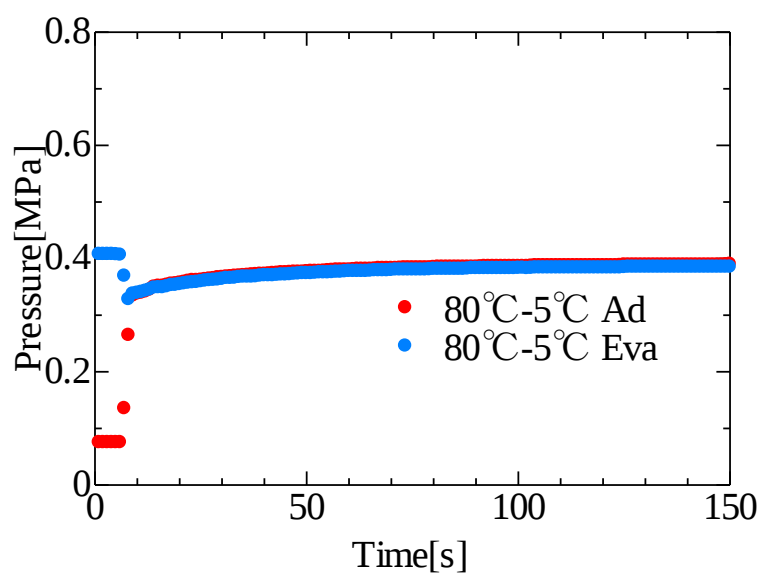


図 4.1.2-2a 脱着温度 80°C，蒸発温度 5°C の圧力の経時変化

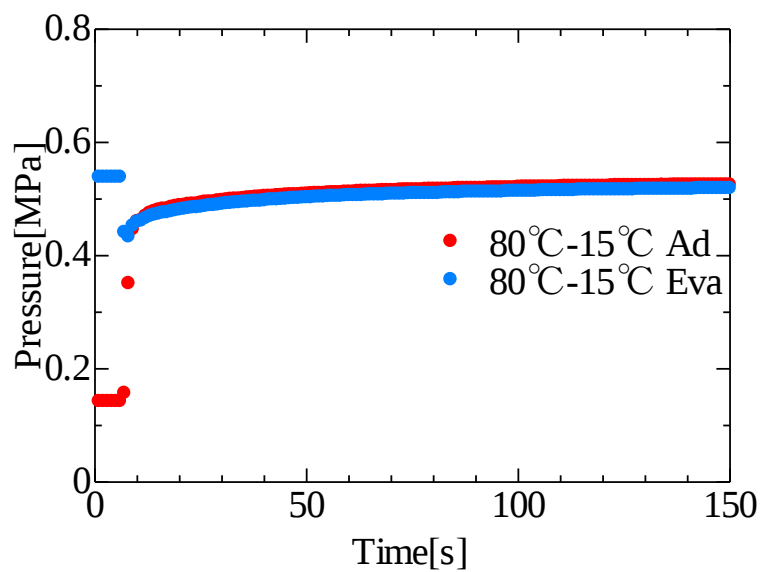


図 4.1.2-2b 脱着温度 80°C，蒸発温度 15°C の圧力の経時変化

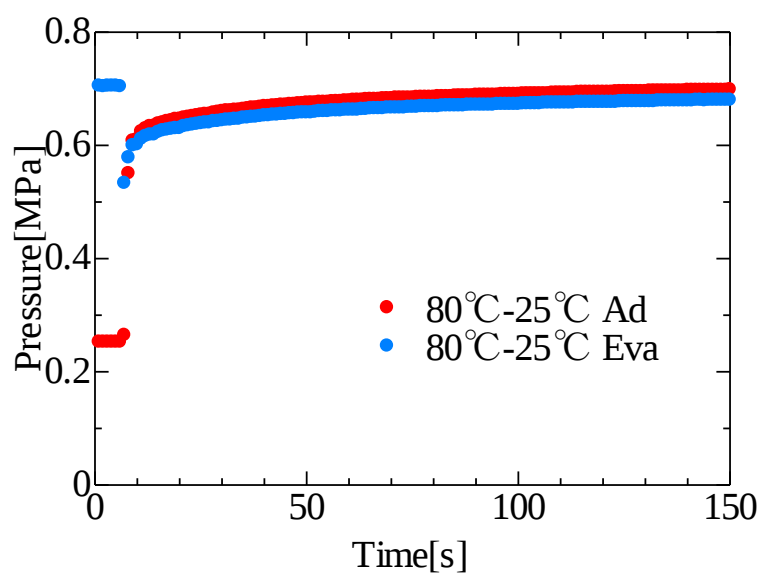


図 4.1.2-2c 脱着温度 80°C，蒸発温度 25°C の圧力の経時変化

これらの図より，R1234yf の場合でも，蒸発温度が高くなるほど，吸着直前の圧力差が大きくなっていることがわかる．しかし，蒸発温度 5°C と 25°C のときを比べても，大きな差はないことがわかる．そのため，R1234yf の実験での温度差のピーク値には，圧力差よりも有効吸着量の差による影響が大きいと考えられる．

続いて、単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化について考察する．図 4.1.2-3a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.1.2-3b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．先ほどと同様に，この熱量も，熱交換器の温度差と熱交換器の中を流れる熱媒の流量から算出し，流量条件はすべて等しいため，図 4.1.2-1 と図 4.1.2-3 はほとんど同じような関係になることがわかる．

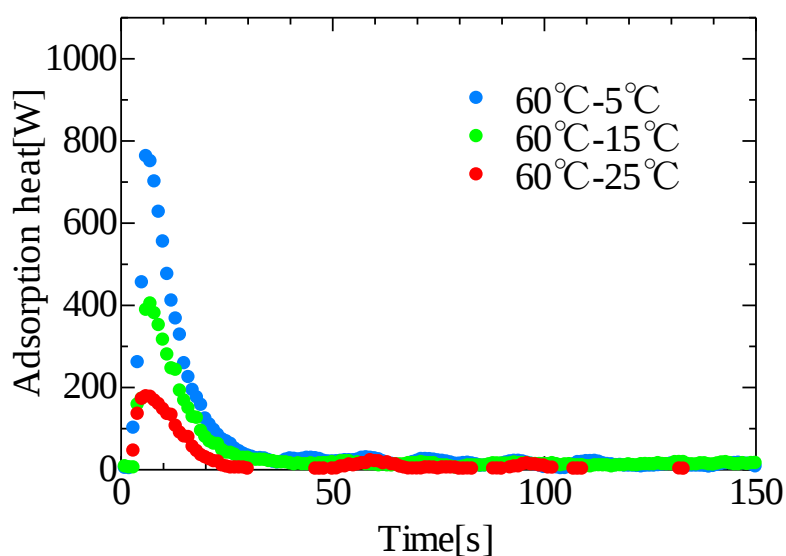


図 4.1.2-3a 脱着温度が 60°C のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

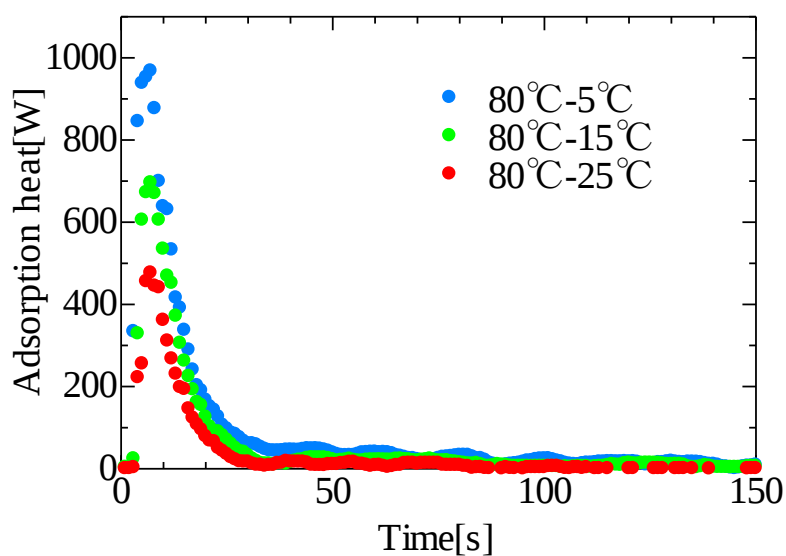


図 4.1.2-3b 脱着温度が 80°C のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する。

図 4.1.1-4a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.1.1-4b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である。

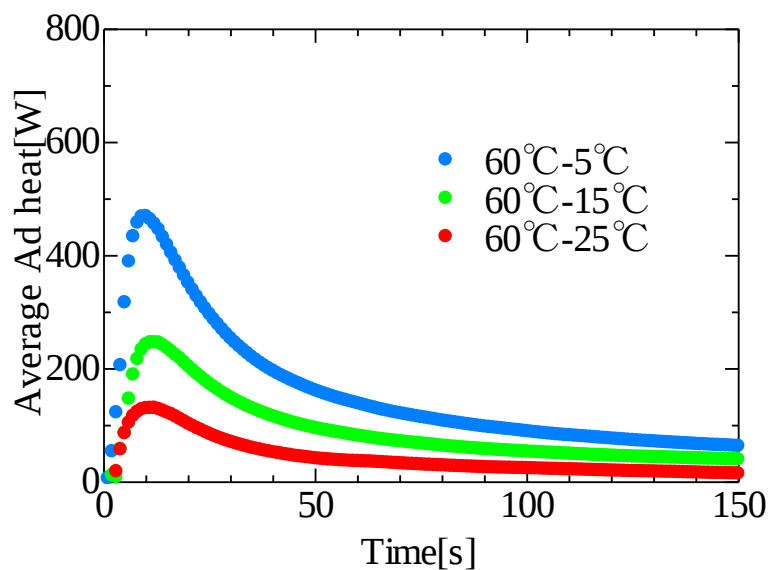


図 4.1.2-4a 脱着温度が 60°C のときの、平均発熱量の経時変化

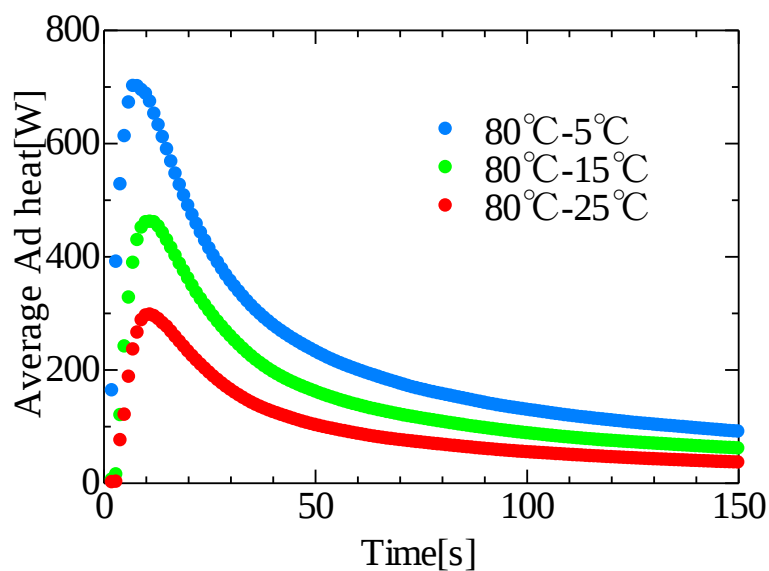


図 4.1.2-4b 脱着温度が 80°C のときの、平均発熱量の経時変化

図 4.1.2-3 と図 4.1.2-4 を比較すると，すべての条件でそれぞれの大小関係が対応していることがわかる．つまり，この条件においては，単位時間当たりの発熱能力と平均発熱能力が同じような関係になることがわかる．

最後に，合計発熱量の経時変化について考察する．図 4.1.2-5a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.1.2-5b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

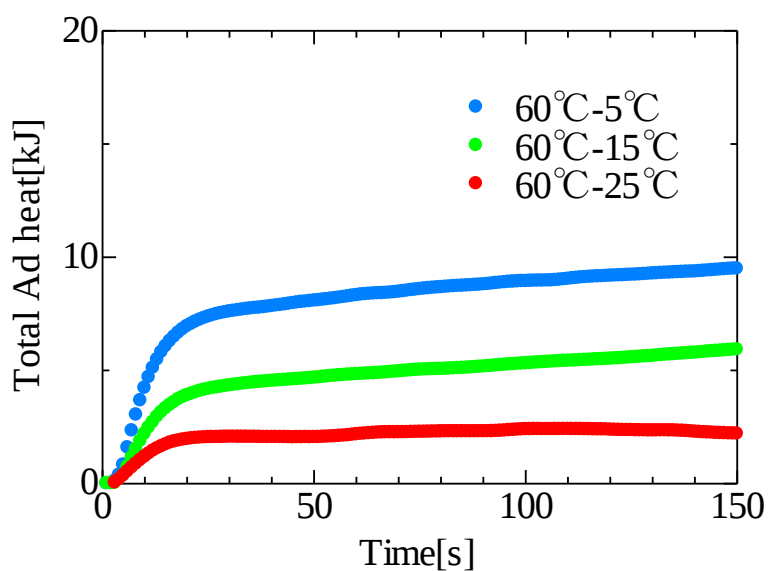


図 4.1.2-5a 脱着温度が 60°C のときの，合計発熱量の経時変化

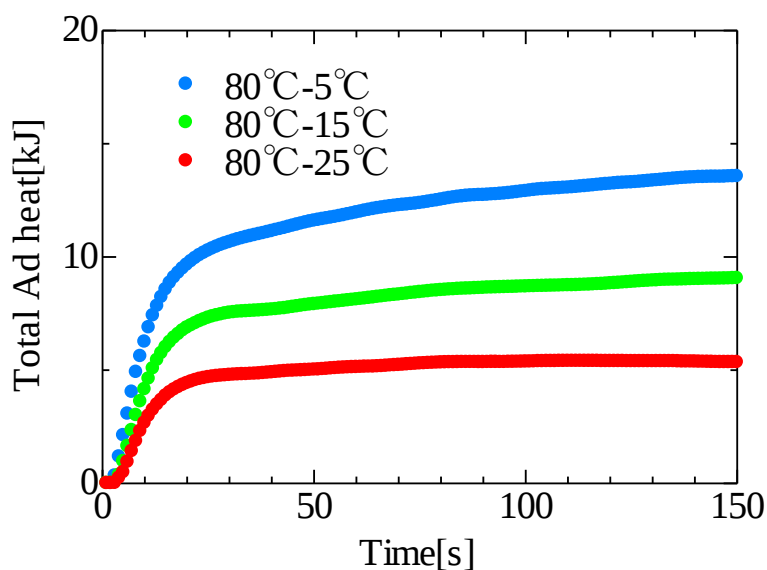


図 4.1.2-5b 脱着温度が 80°C のときの，合計発熱量の経時変化

図 4.1.2-5 より，蒸発温度が低くなるほど合計発熱量が大きくなっている．前述のとおり，有効吸着量の大小で発熱量が決まっていることがわかる．また，有効吸着量の比率を考慮すると，脱着温度が 60°C のときの方が蒸発温度による発熱量の差が大きくなると考えられるが，大きな差は見受けられない．

4.1.3 熱媒流量が異なるときの性能の比較

最後に，温度条件が同じで，熱交換器の中を流れる熱媒の流量が異なるときの性能の比較を行う．温度条件は，脱着温度は 60°C と 80°C，蒸発温度は 25°C である．

まずは，吸着熱交換器の中を流れる熱媒の出入口の温度差の経時変化について考察する．

図 4.1.3-1a が，脱着温度 60°C，蒸発温度 25°C での出入口温度差の経時変化の比較，図 4.1.3-1b が，脱着温度 80°C，蒸発温度 25°C での出入口温度差の経時変化の比較である．

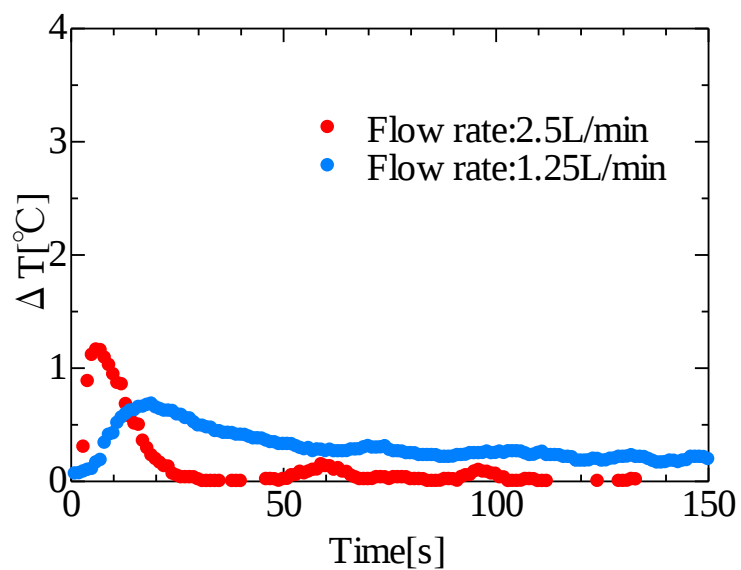


図 4.1.3-1a 脱着温度が 60°C，吸着温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

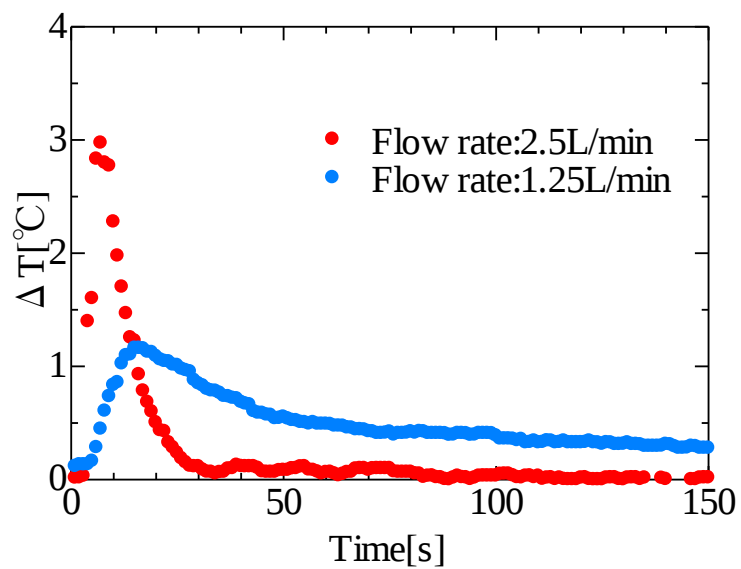


図 4.1.3-1b 脱着温度が 80°C，吸着温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

図 4.1.3-1 より、流量が大きくなるほど、温度差のピーク値が大きくなり、温度差の低下が急激に起こっていることがわかる。流量が大きいのほど、熱媒が吸着発熱を回収する速度が大きくなり、それによって吸着が促進されるため、吸着発熱量の最大値も大きくなると考えられる。また、有効吸着量は変化しないため、吸着平衡に達するまでの時間も早くなると考えられる。

次に、単位時間当たりの発熱量の経時変化について考察する。

図 4.1.3-2a が、脱着温度 60°C 、蒸発温度 25°C での単位時間当たりの発熱量の経時変化の比較、図 4.1.3-2b が、脱着温度 80°C 、蒸発温度 25°C での単位時間当たりの発熱量の経時変化の比較である。

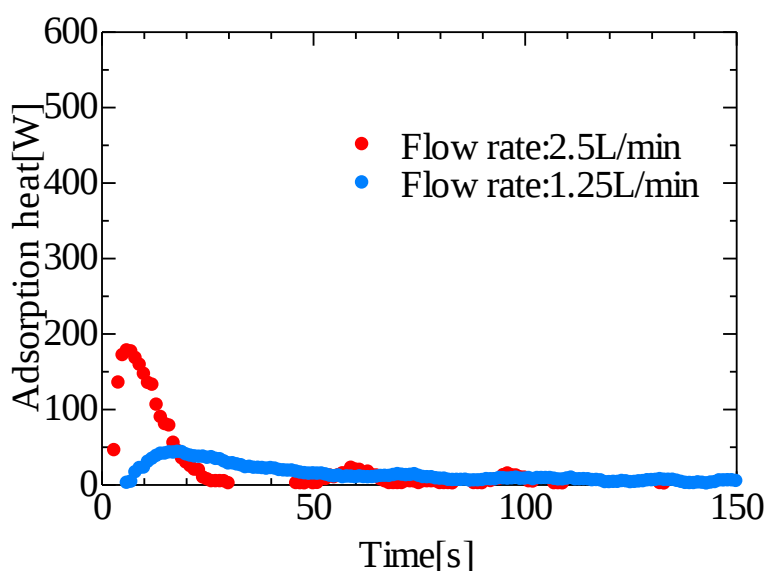


図 4.1.3-2a 脱着温度が 60°C 、吸着温度が 25°C のときの、単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

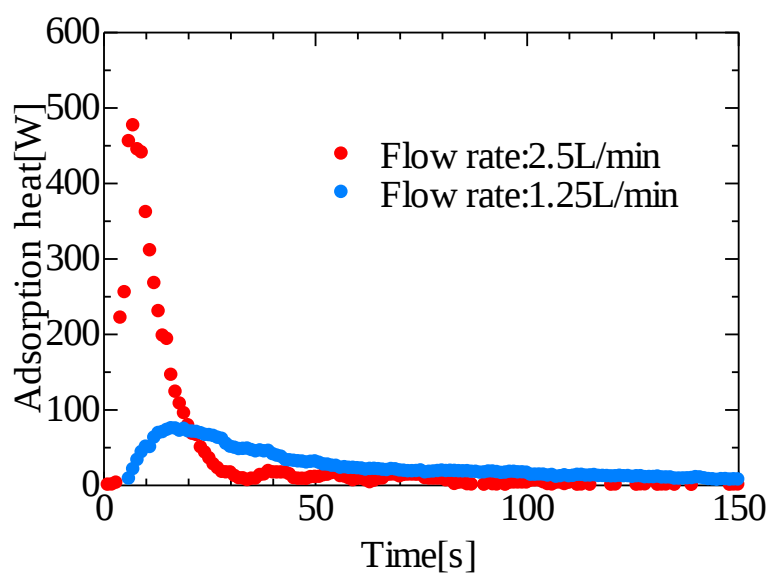


図 4.1.3-2b 脱着温度が 80°C，吸着温度が 25°C のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

この図より，熱交換器の出入口温度差と同様に，流量が大きくなるほど，発熱量のピーク値が大きくなり，発熱の低下が急激であることがわかる．流量が大きいと，熱媒が素早く吸着熱を回収し，吸着が促進されることに起因すると考えられる．

続く図 4.1.3-3a,b の平均発熱量についても同様のことが考えられる．

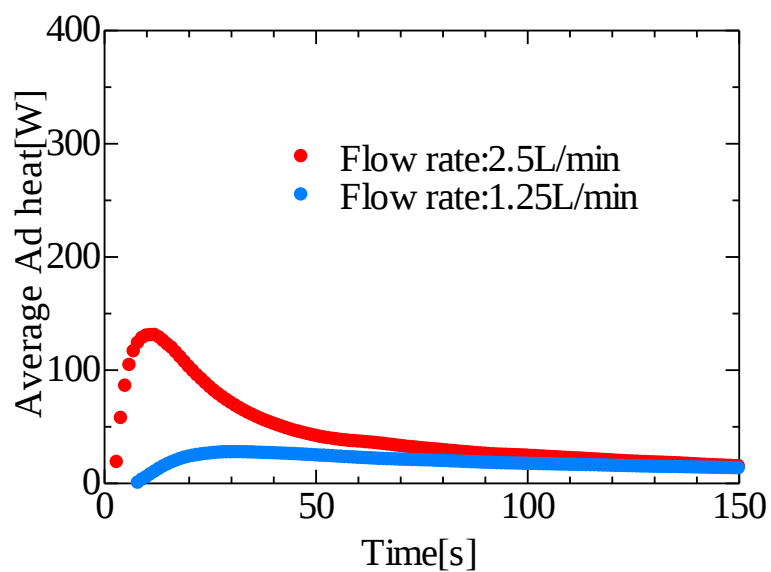


図 4.1.3-3a 脱着温度が 60°C, 吸着温度が 25°C のときの, 平均発熱量の経時変化

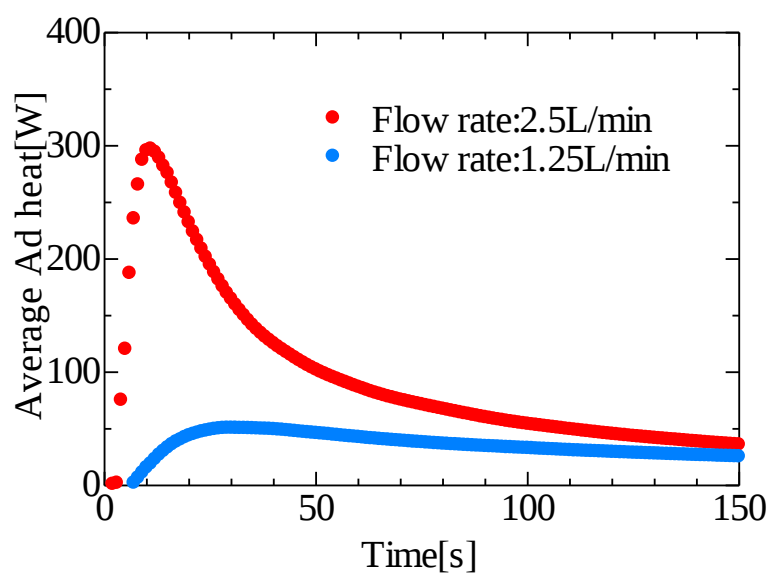


図 4.1.3-3b 脱着温度が 80°C, 吸着温度が 25°C のときの, 平均発熱量の経時変化

最後に、合計発熱量について考察する.

図 4.1.3-4a,b が、合計発熱量の経時変化である.

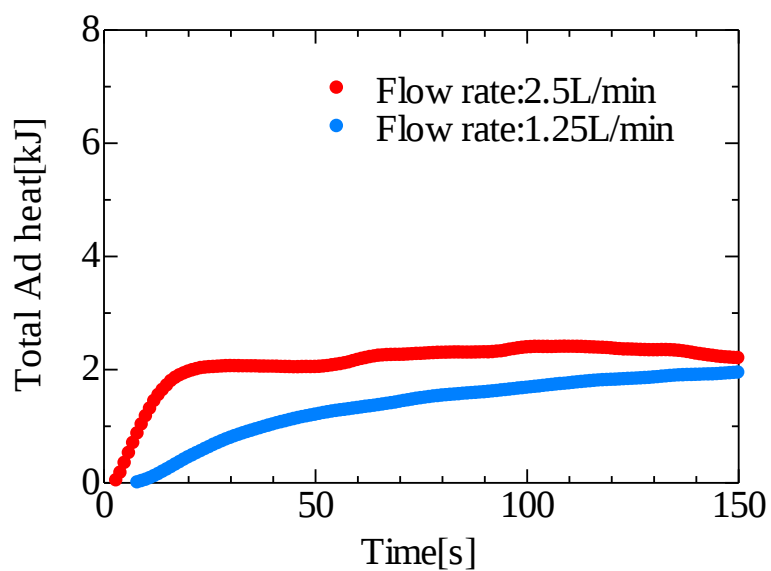


図 4.1.3-4a 脱着温度が 60°C, 吸着温度が 25°C のときの、合計発熱量の経時変化

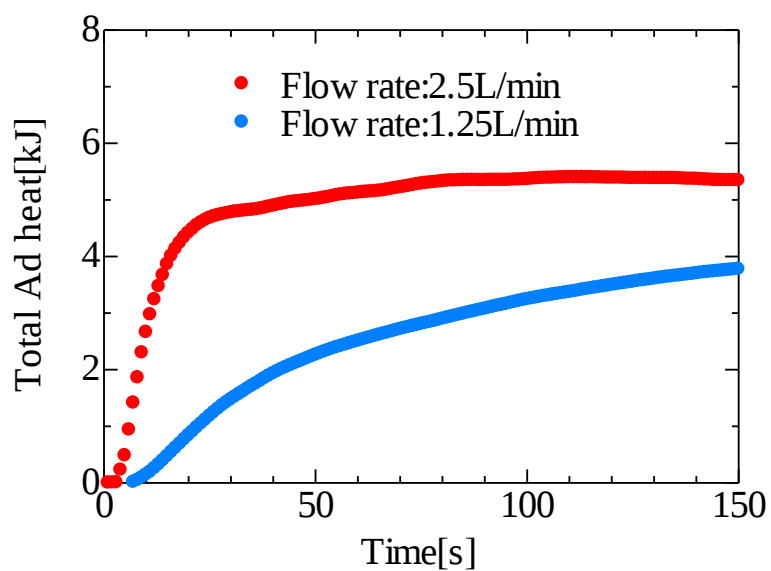


図 4.1.3-4b 脱着温度が 80°C, 吸着温度が 25°C のときの、合計発熱量の経時変化

図より、熱媒流量が大きくなると、合計発熱量の変化の度合い（接戦の傾き）が早い時間で小さくなっていることがわかる。この変化の度合いが 0 になることは吸着平衡に達することを表す。そのため、熱媒流量が大きくなるほど、吸着平衡に達する時間が早くなることがわかる。この原因も先述した通り、熱媒流量が大きくなると、吸着熱が素早く回収されることによるものだと考えられる。

4.1.4 実験条件の違いによる性能比較のまとめ

最後に、実験結果をまとめた表を記載する。なお、熱媒の流量はすべて 2.5L/min である。

表 4.1.4-1 まとめ①

脱着過程		吸着過程		最大 ΔT	経過時間	最大 W	経過時間
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[°C]	[s]	[W]	[s]
60	5	5		4.73	5	762.18	5
	15	15		2.57	6	403.38	6
	25	25		1.16	5	177.76	5
70	5	5		5.28	5	870.15	5
	15	15		3.88	6	629.73	6
	25	25		2.66	6	440.39	6
80	5	5		5.80	6	968.14	6
	15	15		4.37	6	695.92	6
	25	25		2.97	6	476.58	6

Tad は吸着器の温度、Tcon は凝縮器の温度、Teva は蒸発器の温度を表す。

最大 ΔT は、熱交換器の出入口温度差のピーク値を表す。

最大 W は、単位時間当たりの発熱量のピーク値を表す。

経過時間は、それらのピーク値に達したときに、吸着開始から経過した時間を表す。

表 4.1.4-2 まとめ②

脱着過程		吸着過程		最大 Wave	経過時間	150s 後の Q	理論 Q
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[W]	[s]	[kJ]	[kJ]
60	5	5		469.27	10	9.49	7.04
	15	15		246.32	10	5.92	4.88
	25	25		130.71	11	2.19	3.14
70	5	5		523.55	10	10.85	8.83
	15	15		421.34	9	7.68	6.43
	25	25		313.00	9	5.52	4.44
80	5	5		701.00	7	13.57	10.73
	15	15		461.05	10	9.06	8.09
	25	25		297.11	10	5.35	5.86

最大 Wave は、平均発熱量のピーク値を表す。

150s 後の Q は、吸着開始から 150 秒経過したときの合計発熱量を表す。

理論 Q は、吸着開始から吸着平衡までの合計発熱量の理論値を表す。（3.3.7 の計算方法を用いて導出）

表 4.1.4-3 まとめ③

脱着過程		吸着過程		COP	理論 COP
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[-]	[-]
60	5	5		0.227	0.168
	15	15		0.174	0.144
	25	25		0.084	0.120
70	5	5		0.221	0.180
	15	15		0.186	0.156
	25	25		0.164	0.132
80	5	5		0.243	0.192
	15	15		0.188	0.168
	25	25		0.132	0.144

COP の算出において、脱着に必要な熱量は 3.3.7 および 3.3.8 から算出した。

理論 COP は、表 4.1.4-2 の理論 Q を上記の脱着に必要な熱量で除した値である。

COP が理論 COP を少し上回っているのは、吸着後の装置の外部温度の変化や計器の測定誤差などの要因に起因すると考えられる。

4.1.5 R134a を利用したときとの性能の比較

安藝^[14]は、同じ実験装置、同じ実験条件において、フロン系冷媒 R134a を用いて吸着蓄熱システムの吸着実験を行った。R134a は蒸発潜熱が R1234yf より高く、より良い性能が期待されるが、温室効果が大きいため、その使用が禁止されていく可能性がある。

表 4.1.5-1 に、2 つの冷媒の物性値の比較を示す。

表 4.1.5-1 物性値の比較

	R134a の 蒸発潜熱(kJ/kg)	R1234yf の 蒸発潜熱(kJ/kg)	R134a の 蒸気密度(kg/m ³)	R1234yf の 蒸気密度(kg/m ³)
5°C	194.74	160.02	17.131	20.744
15°C	186.59	153.03	23.758	28.266
25°C	177.78	145.37	32.350	37.925

まずは、吸着熱交換器の中を流れる熱媒の出入口の温度差の経時変化について考察する．図 4.1.5-1a は脱着温度が 60°C，蒸発温度 5°C のときの比較，図 4.1.5-1b は脱着温度が 80°C，蒸発温度 5°C のときの比較である．なお，R134a の実験では不凍液流量を 1.25L/min で行っていたため，流量条件は 1.25L/min である．

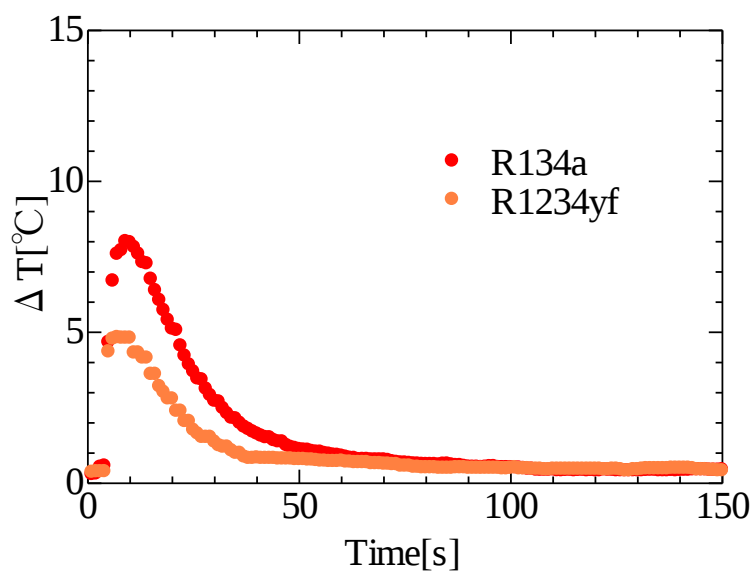


図 4.1.5-1a 脱着温度が 60°C，蒸発温度 5°C のときの熱交換器の出入口温度差の経時変化

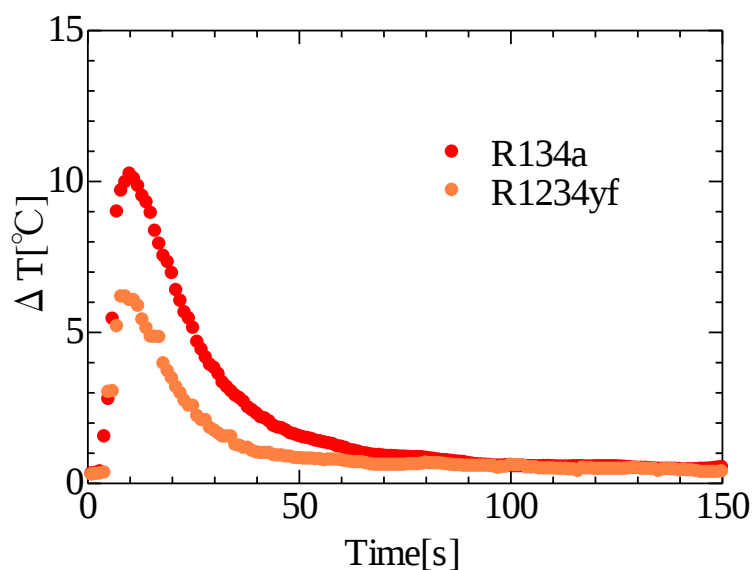


図 4.1.5-1b 脱着温度が 80°C，蒸発温度 5°C のときの熱交換器の出入口温度差の経時変化

図 4.1.5-1 より，R134a を使用したときのほうが，R1234yf を使用したときより出入口温度差が大きいことがわかる．表 4.1.5-1 からわかるとおり，R1234yf のほうが蒸気密度は大きい，R134a のほうが蒸発潜熱は大きいことがわかる．加えて，有効吸着量の差も原因として考えられる．それぞれの温度条件での有効吸着量を表 4.1.5-2 にまとめる．

表 4.1.5-2 それぞれの温度条件での有効吸着量

脱着過程		吸着過程		有効吸着量[g]	
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	R134a	R1234yf
60	5	5	5	66.58	41.43
80				88.63	59.84

なお，R134a の有効吸着量は安藝^[14]によって明らかにされた値を使用した．

表 4.1.5-2 より，有効吸着量も R134a のほうが大きいことがわかる．したがって，蒸発潜熱と有効吸着量の差によって，出入り口温度差の違いが大きくなったと考えられる．

次に，単位時間当たりの発熱量の経時変化について考察する．

図 4.1.5-2a が，脱着温度 60℃，蒸発温度 5℃ での単位時間当たりの発熱量の経時変化の比較，図 4.1.5-2b が，脱着温度 80℃，蒸発温度 5℃ での単位時間当たりの発熱量の経時変化の比較である．

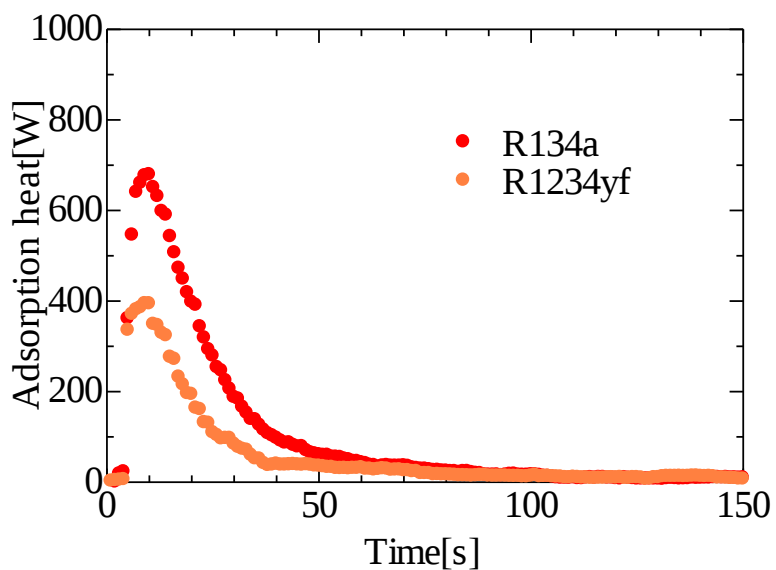


図 4.1.5-2a 脱着温度が 60℃，吸着温度が 5℃ のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

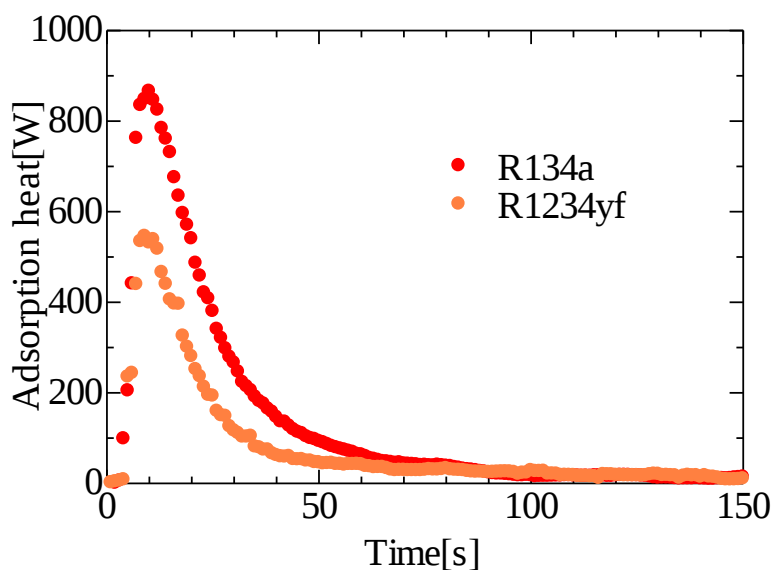


図 4.1.5-2b 脱着温度が 80℃、吸着温度が 5℃ のときの、単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

単位時間当たりの吸着発熱量は、熱交換器の温度差と熱交換器の中を流れる熱媒の流量から算出し、流量条件は両冷媒で等しいため、図 4.1.5-1 と図 4.1.5-2 はほとんど同じような関係になることがわかる。

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する。

図 4.1.5-3a が、脱着温度 60℃、蒸発温度 5℃ での平均発熱量の経時変化の比較、図 4.1.5-2b が、脱着温度 80℃、蒸発温度 5℃ での平均発熱量の経時変化の比較である。

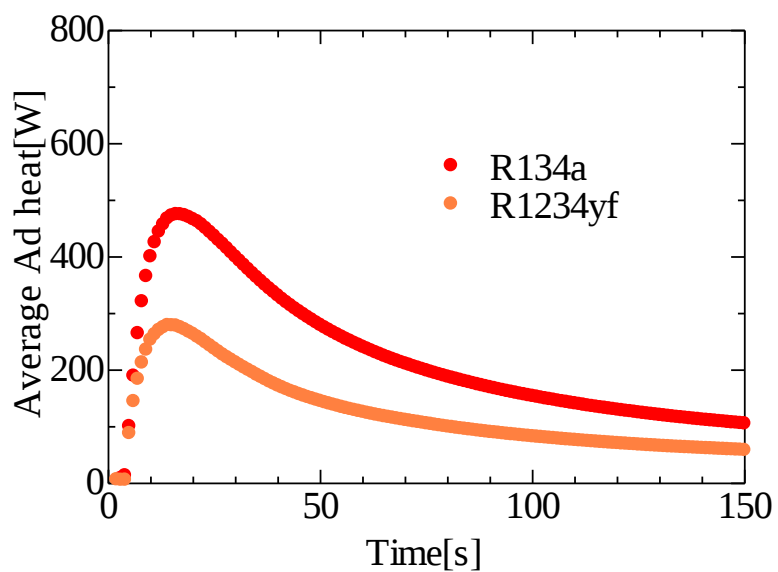


図 4.1.5-3a 脱着温度が 60°C，吸着温度が 5°C のときの，平均発熱量の経時変化

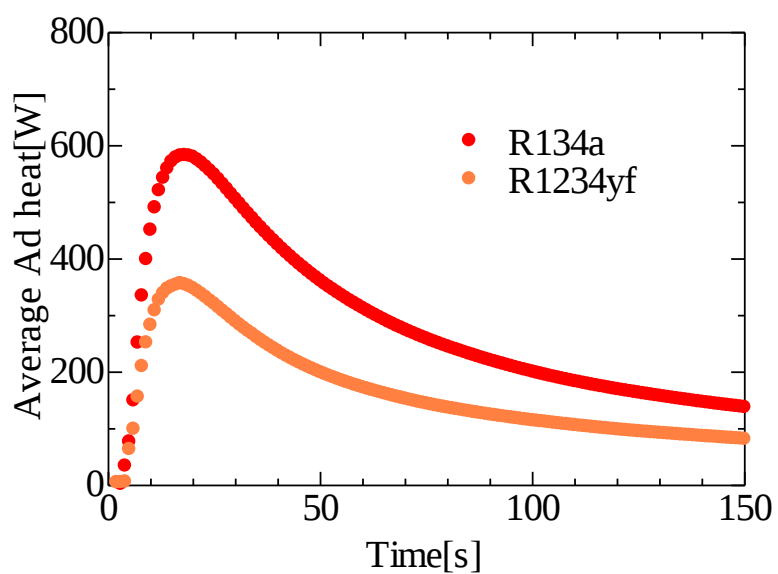


図 4.1.5-3b 脱着温度が 80°C，吸着温度が 5°C のときの，平均発熱量の経時変化

図 4.1.5-2 と図 4.1.5-3 を比較すると，両条件でそれぞれの大小関係が対応していることがわかる．つまり，単位時間当たりの発熱能力と平均発熱能力が同じような関係になることがわかる．

最後に、合計発熱量の経時変化について考察する．図 4.1.5-4a は脱着温度が 60°C，蒸発温度 5°C での合計発熱量の経時変化の比較，図 4.1.5-4b は脱着温度が 80°C，蒸発温度 5°C での合計発熱量の経時変化の比較である．

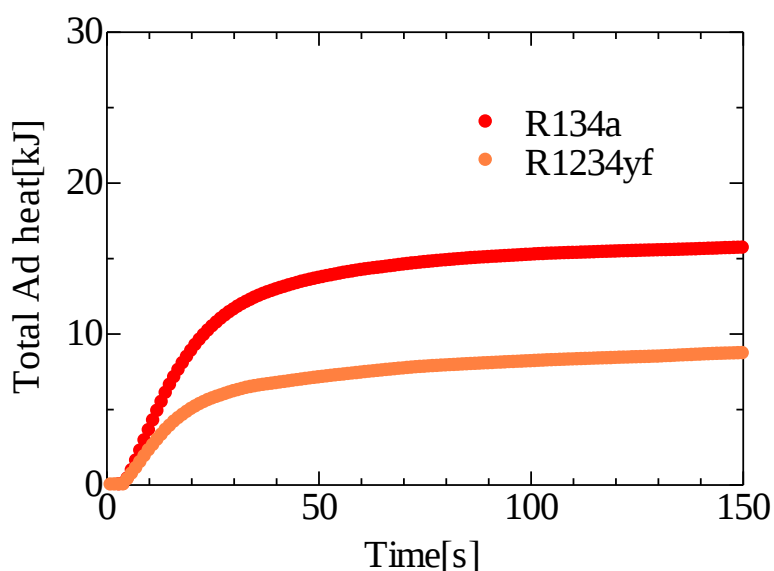


図 4.1.5-4a 脱着温度が 60°C，吸着温度が 5°C のときの、合計発熱量の経時変化

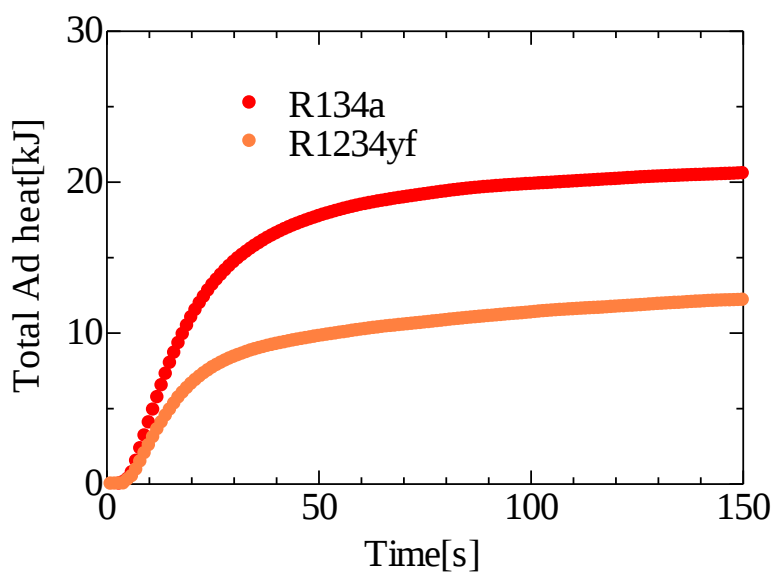


図 4.1.5-4b 脱着温度が 80°C，吸着温度が 5°C のときの、合計発熱量の経時変化

図 4.1.5-4 より，合計発熱量も同様の関係になることがわかる．

したがって，今回の実験装置と実験条件において，R134a は R1234yf よりも優れた吸着発熱特性を持つことがわかった．しかし，前述のとおり R134a には高い温室効果という問題点があるため，吸着材を変更することや，混合冷媒にすることなどの対策によって，R1234yf の使用率を上げる必要性はあると考えられる．

4.2 吸着ヒートポンプシステムの実験結果および考察

この小章では、R1234yf と 12mm×2 熱交換器を用いた吸着実験の結果から、さまざまな条件の違いによって、活性炭と R1234yf を用いた吸着ヒートポンプシステムの性能にどのような影響が及ぼされるのか考察する。

4.2.1 脱着温度が異なるときの性能の比較

ここでは、脱着温度のみが異なるときの性能の比較を行う。なお、すべての温度条件において、熱交換器の中を流れる熱媒の体積流量は 2L/min である。

まずは、蒸発熱交換器の中を流れる熱媒の出入口の温度差の経時変化について考察する。図 4.2.1-1a は蒸発温度が 15°C のときの脱着温度による比較、図 4.2.1-1b は蒸発温度が 25°C のときの脱着温度による比較である。横軸は吸着開始から経過した時間であり、縦軸は熱交換器の出入口の温度差である。熱媒が蒸発熱を放出することで温度が下がるため、出入口で温度差が生じる。

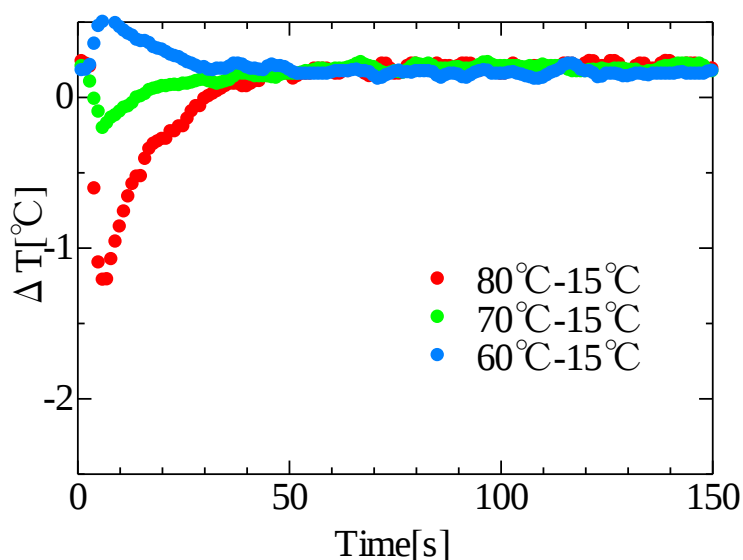


図 4.2.1-1a 蒸発温度が 15°C のときの、熱交換器の出入口温度差の経時変化

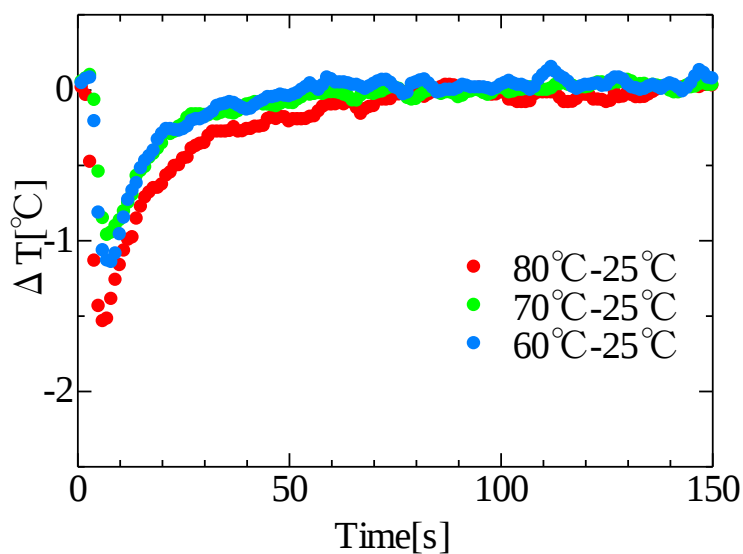


図 4.2.1-1b 蒸発温度が 25°C のときの、熱交換器の出入口温度差の経時変化

図 4.2.1-1a, 図 4.2.1-1b からわかる通り、脱着温度が高くなるほど温度差のピーク値の絶対値が大きくなる傾向があることがわかる。

この結果が生じた理由として、有効吸着量の違いが影響したことが考えられる。各温度条件において式(3.14)から得られた、活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量を記載したものが、表 4.2.1-1 である。各凝縮温度において、脱着温度が 60°C のときの有効吸着量を 1 とすると、脱着温度が 70°C, 80°C のときの有効吸着量の比は、表 4.2.1-2 のようになる。

表 4.2.1-1 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量

脱着過程		吸着過程		有効吸着量
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[g]
60	30	30	15	9.842
70				17.75
80				26.13
60	30	30	25	15.59
70				23.50
80				31.88

表 4.2.1-2 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量の比率

脱着過程		吸着過程		有効吸着量の比
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[-]
60	30	30	15	1
70				1.80
80				2.65
60	30	30	25	1
70				1.51
80				2.04

表 4.2.1-2 より、凝縮温度が高くなるほど、脱着温度の違いによる有効吸着量の比率が大きくなることがわかる。有効吸着量が大きくなるほど、吸着直前の吸着器と蒸発器の圧力差が大きくなるため、吸着を開始したときの瞬間的な吸着量や蒸発量が大きくなると考えられる。

しかし，蒸発温度 25°C の場合，脱着温度 60°C と 70°C の大小が逆転している．両条件の圧力の経時変化を図 4.2.1-2a,b に示す．

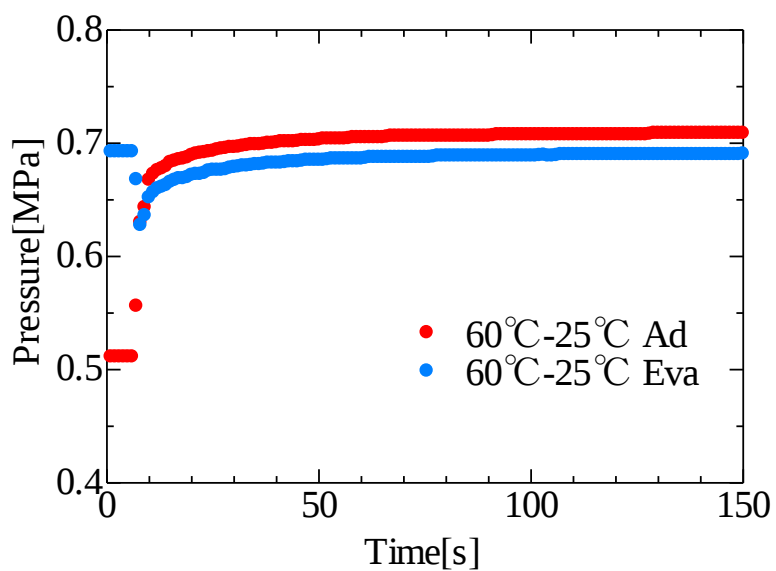


図 4.2.1-2a 脱着温度 60°C，蒸発温度 25°C の圧力の経時変化

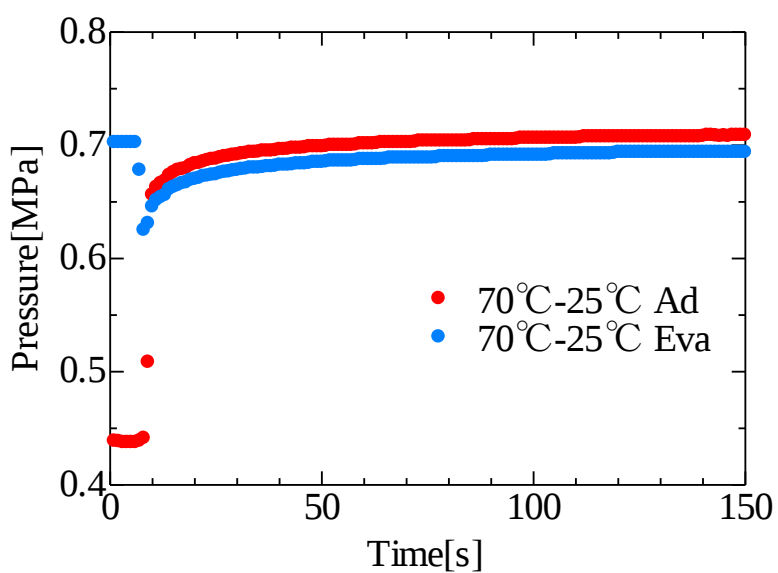


図 4.2.1-2b 脱着温度 70°C，蒸発温度 25°C の圧力の経時変化

図 4.2.1-2 より，脱着温度 70℃の方が，吸着前の圧力差が大きく，吸着開始時により多くの冷媒を蒸発すると考えられる．また，蒸発温度も変わらないため，70℃の方が温度差のピーク値の絶対値は大きいはずである．そのため，実験結果の大小の逆転は，バルブを開ける速さの違いのような実験操作による誤差か，装置の測定誤差によるものと考えられる．

また，図 4.2.1-1a から，脱着温度 60℃の際に温度が下がらず，逆に上がっているため，この条件のみ蒸発器側で凝縮が起きていると考えられる．この原因は，脱着時に吸着器側の死容積に残った R1234yf が，バルブを閉め，吸着器温度条件まで温度を下げた際に吸着材に有効吸着量以上に吸着してしまったことと考えられる．吸着直前の吸着器圧力から算出した，脱着完了後に吸着した吸着量①と，有効吸着量との差を以下に示す．

表 4.2.1-3 死容積内冷媒の吸着量と有効吸着量との差

脱着過程		吸着過程		① [g]	有効吸着量 ②[g]	②-①
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]			
60	30	30	15	11.63	9.842	-1.788
70				15.30	17.75	2.450
80				16.58	26.13	9.550
60	30	30	25	9.89	15.59	5.700
70				14.06	23.50	9.440
80				17.56	31.88	14.32

表 4.2.1-3 より，蒸発温度 15℃のとき，死容積内の冷媒の吸着による有効吸着量の減少割合が大きく，脱着温度 60℃では負になっていることがわかる．負になっているということは，バルブを開けた際に有効吸着量との差だけ活性炭から R1234yf が脱着し，蒸発器内で凝縮してしまうと考えられる．

そのため，今回の実験装置の形状で，この温度条件では吸着ヒートポンプシステムを動作できないと考えられる．

続いて、単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化について考察する．図 4.2.1-4a は蒸発温度が 15°C のときの脱着温度による比較，図 4.2.1-4b は蒸発温度が 25°C のときの脱着温度による比較である．先ほどと同様に，この熱量も，熱交換器の温度差と熱交換器の中を流れる熱媒の流量から算出し，流量条件はすべて等しいため，図 4.2.1-1 と図 4.2.1-4 はほとんど同じような関係になることがわかる．

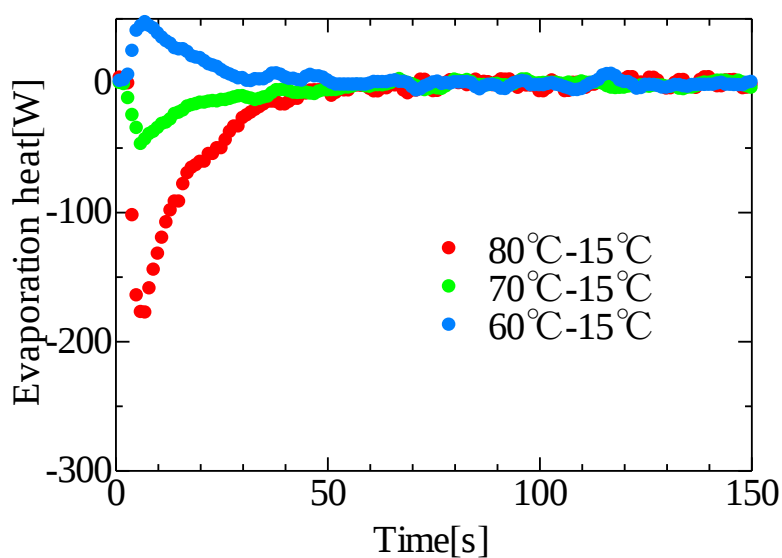


図 4.2.1-4a 蒸発温度が 15°C のときの，単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化

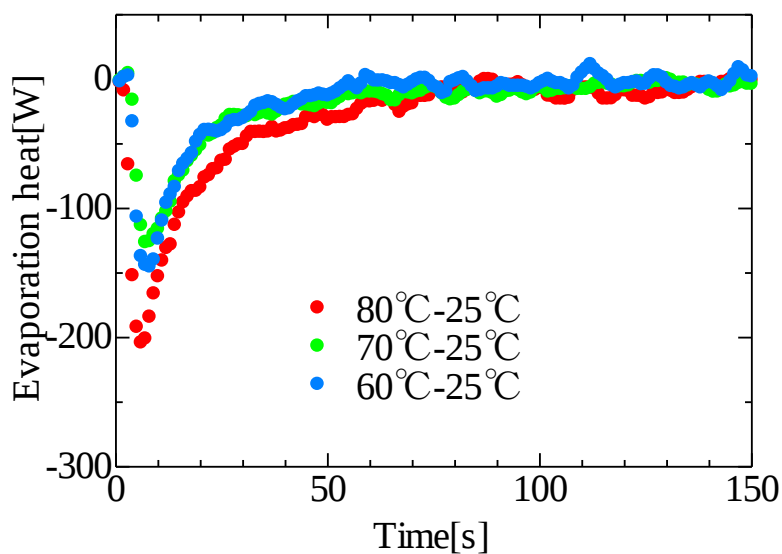


図 4.2.1-4b 蒸発温度が 25°C のときの，単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化

続いて，平均吸熱量の経時変化について考察する．

図 4.2.1-5a は，蒸発温度 15°C のときの脱着温度による比較，図 4.2.1-5b は蒸発温度 25°C のときの脱着温度による比較である．

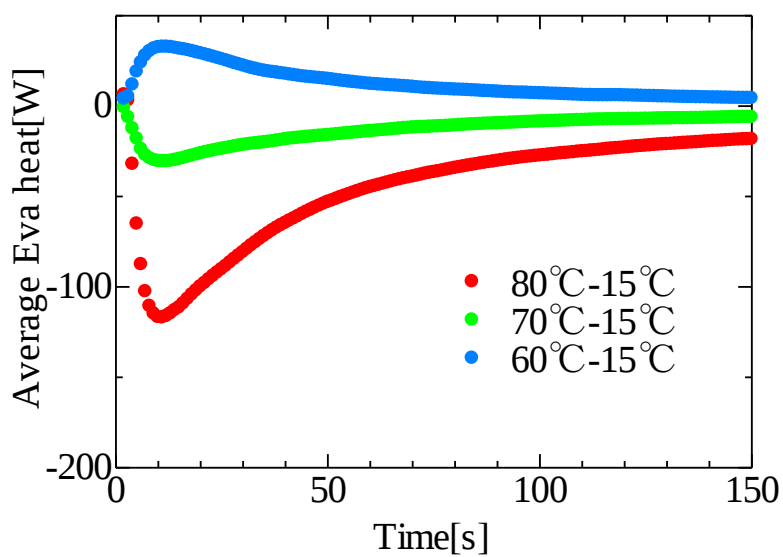


図 4.2.1-5a 蒸発温度が 15°C のときの，平均吸熱量の経時変化

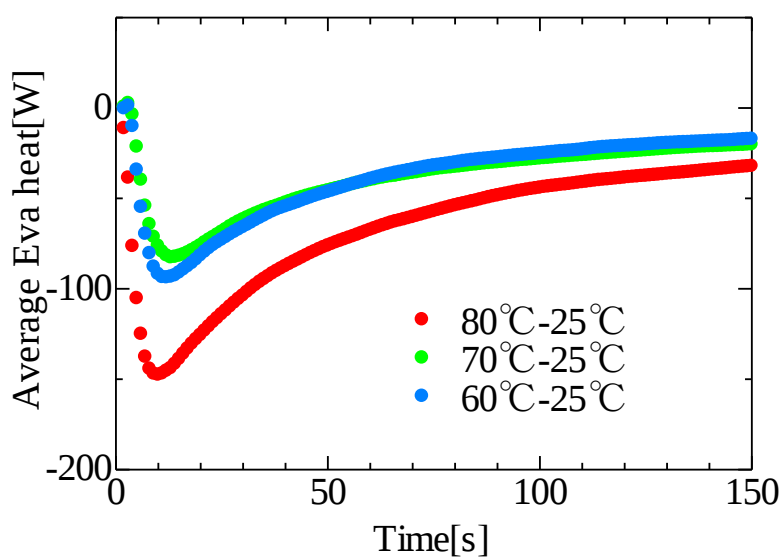


図 4.2.1-5b 蒸発温度が 25°C のときの，平均吸熱量の経時変化

図 4.2.1-4 と図 4.2.1-5 を比較すると，すべての条件でそれぞれの大小関係が対応していることがわかる．つまり，この条件においては，単位時間当たりの吸熱能力と平均吸熱能力が同じような関係になることがわかる．

最後に，合計吸熱量の経時変化について考察する．図 4.2.1-6a は蒸発温度が 15°C のときの脱着温度による比較，図 4.2.1-6b は脱着温度が 25°C のときの脱着温度による比較である．

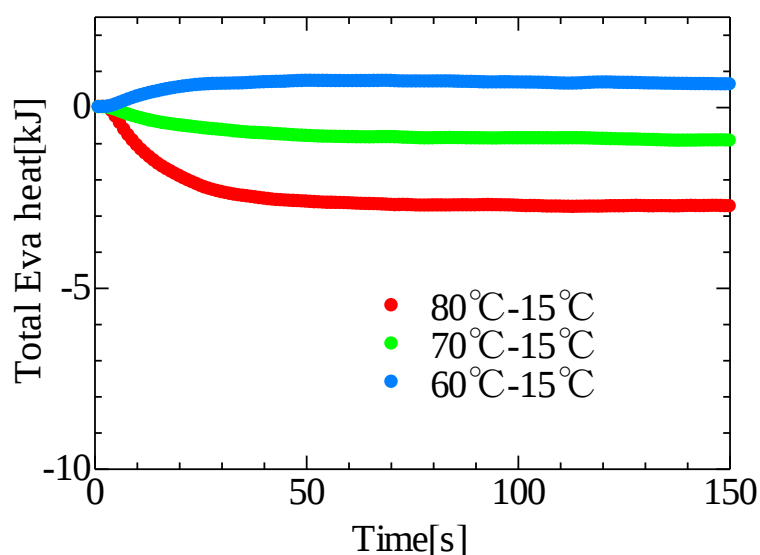


図 4.2.1-6a 蒸発温度が 15°C のときの，合計吸熱量の経時変化

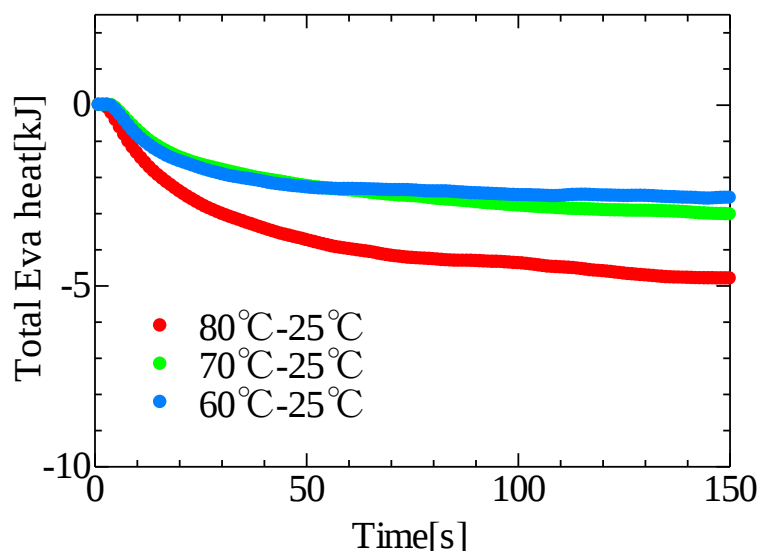


図 4.2.1-6b 蒸発温度が 25°C のときの，合計吸熱量の経時変化

図 4.2.1-6 より，脱着温度が高いほど合計蒸発熱量が大きくなっていることがわかる．前述のとおり，有効吸着量の大小により蒸発熱量が決まると考えられる．また，蒸発温度 25°C の場合，温度差や瞬間吸熱量のピーク値では脱着温度 60°C のときに 70°C のときを上回っていたが，時間の経過とともに大小が入れ替わっている．

また，有効吸着量の比率により，蒸発温度が 15°C のときの方が脱着温度による吸熱量の差が大きくなることがわかる．

4.2.2 蒸発温度が異なるときの性能の比較

ここでは，脱着温度が同じで蒸発温度が異なるときの性能の比較を行う．なお，先ほどと同様にすべての温度条件において，熱交換器の中を流れる熱媒の体積流量は 2L/min である．

まずは，吸着熱交換器の中を流れる熱媒の出入口の温度差の経時変化について考察する．図 4.2.2-1a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.2.2-1b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

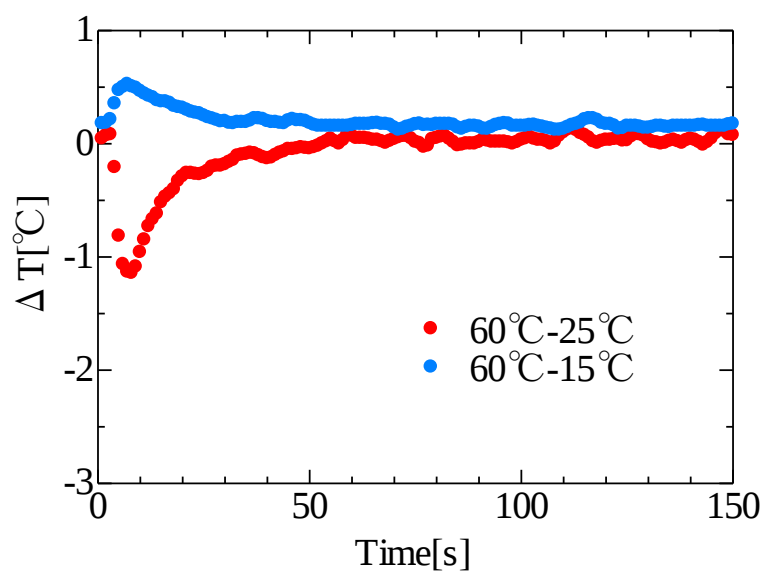


図 4.2.2-1a 脱着温度が 60°C のときの、熱交換器の出入口温度差の経時変化

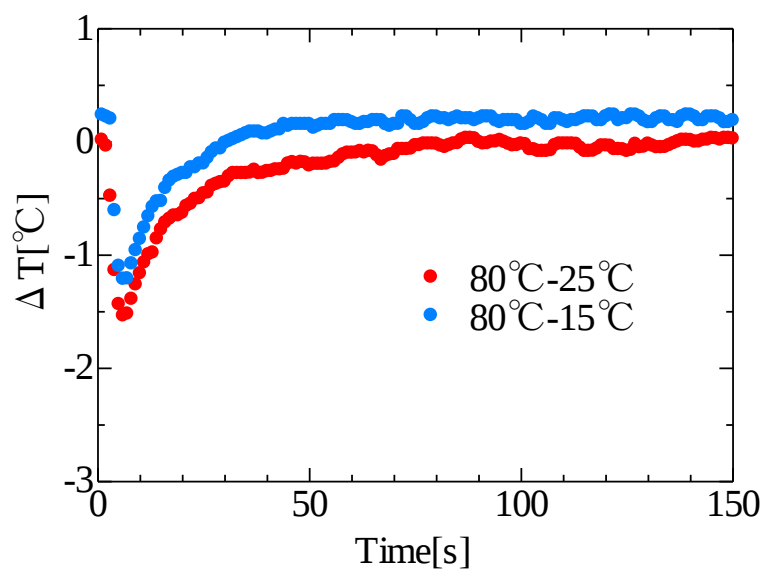


図 4.2.2-1b 脱着温度が 80°C のときの、熱交換器の出入口温度差の経時変化

図 4.2.2-1 より，蒸発温度が高くなるほど，温度差のピーク値が大きくなることがわかる．脱着温度 60℃，蒸発温度 15℃ のときに温度差が正になっているのは，前述のとおりである．また，図より脱着温度が 80℃ のときの方が，温度差のピーク値の差が小さくなっていることがわかる．これは，有効吸着量の比が起因していると考えられる．表 4.2.2 に，各脱着温度において，蒸発温度が 15℃ のときの有効吸着量を 1 としたときの，蒸発温度 25℃ のときの有効吸着量の比を示す．

表 4.2.2 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量の比率

脱着過程		吸着過程		有効吸着量の比 [-]
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	
60	30	30	15	1
			25	1.58
70	30	30	15	1
			25	1.32
80	30	30	15	1
			25	1.22

表 4.2.2 より，脱着温度が低くなるほど，蒸発温度の違いによる有効吸着量の比率が大きくなることがわかる．有効吸着量が大きくなるほど，吸着直前の吸着器と蒸発器の圧力差が大きくなるため，吸着を開始したときの瞬間的な吸着量や蒸発量が大きくなると考えられる．

図 4.2.2-2a は，脱着温度 80℃，蒸発温度 15℃ のときの圧力の経時変化，図 4.2.2-2b は，脱着温度 80℃，蒸発温度 25℃ のときの圧力の経時変化である．

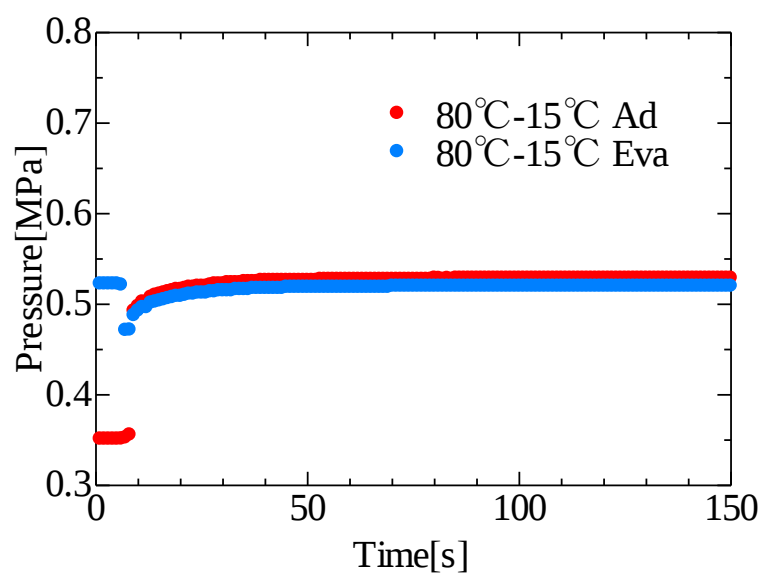


図 4.2.2-2a 脱着温度 80°C, 蒸発温度 15°C の圧力の経時変化

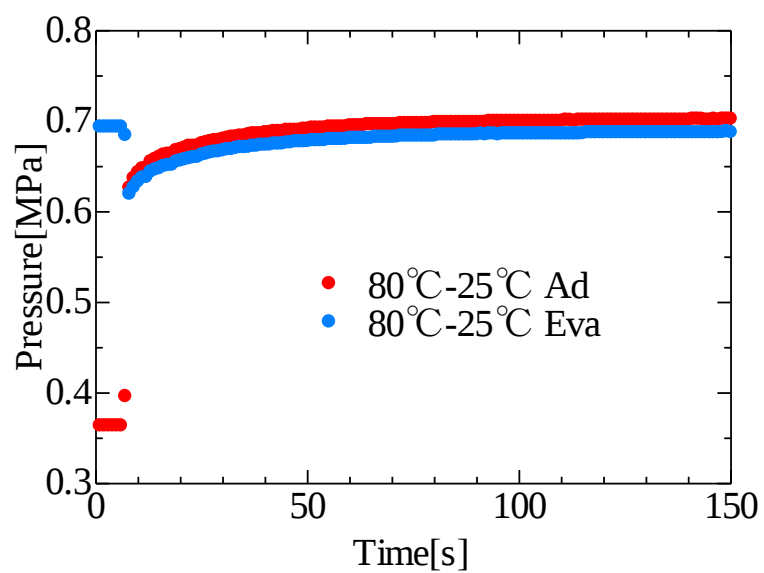


図 4.2.2-2b 脱着温度 80°C, 蒸発温度 25°C の圧力の経時変化

図 4.2.2-2 より，蒸発温度が上がると吸着前の圧力差が大きくなっていることがわかる．

続いて，単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化について考察する．図 4.2.2-3a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.2.2-3b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．先ほどと同様に，この熱量も，熱交換器の温度差と熱交換器の中を流れる熱媒の流量から算出し，流量条件はすべて等しいため，図 4.2.2-1 と図 4.2.2-3 はほとんど同じような関係になることがわかる．

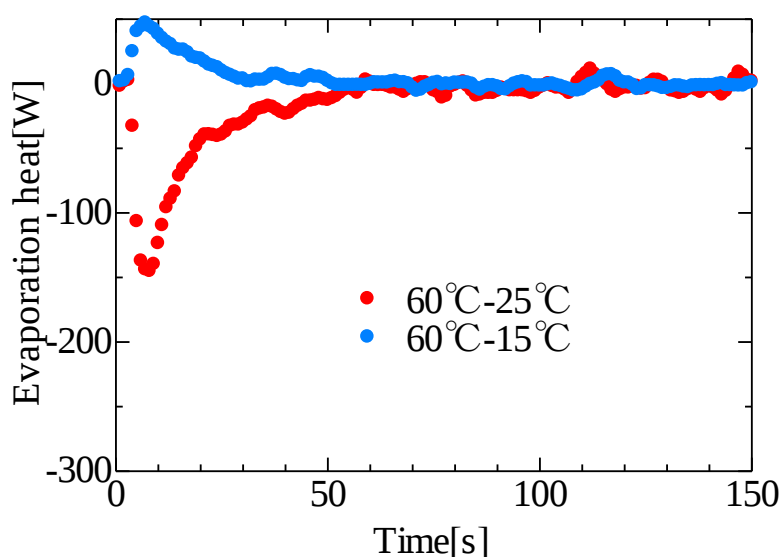


図 4.2.2-3a 脱着温度が 60°C のときの，単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化

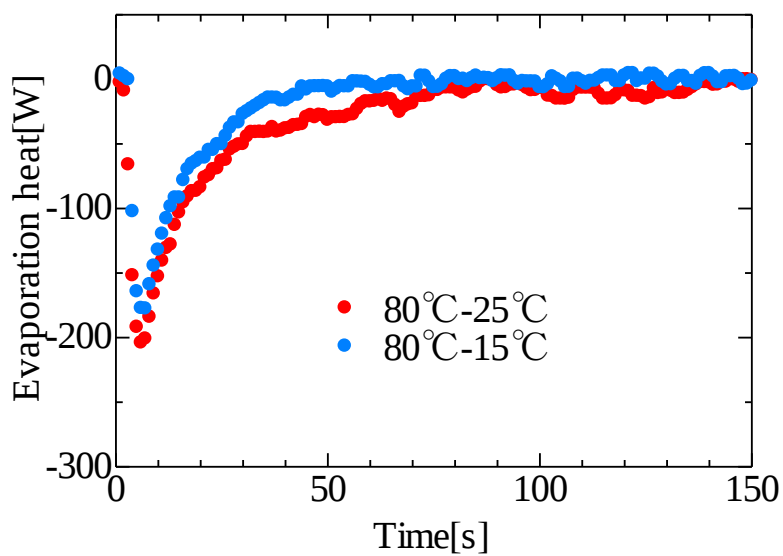


図 4.2.2-3b 脱着温度が 80°C のときの，単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化

続いて，平均吸熱量の経時変化について考察する．

図 4.2.2-4a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.2.2-4b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

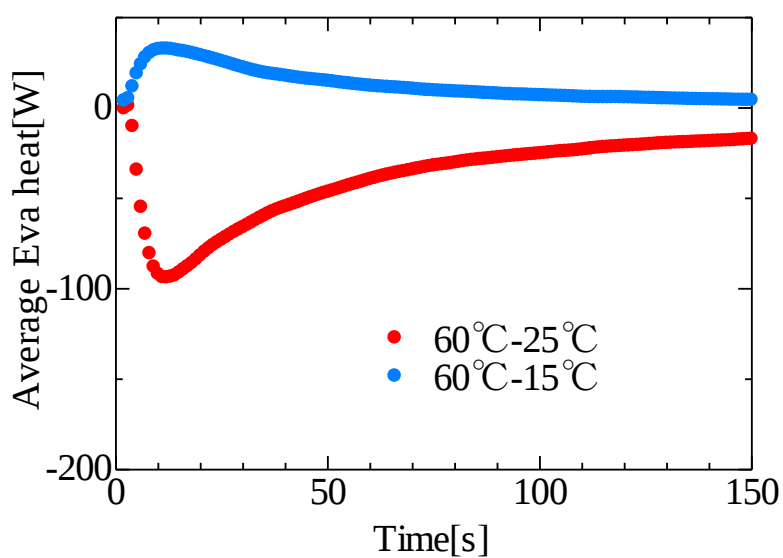


図 4.2.2-4a 脱着温度が 60°C のときの，平均吸熱量の経時変化

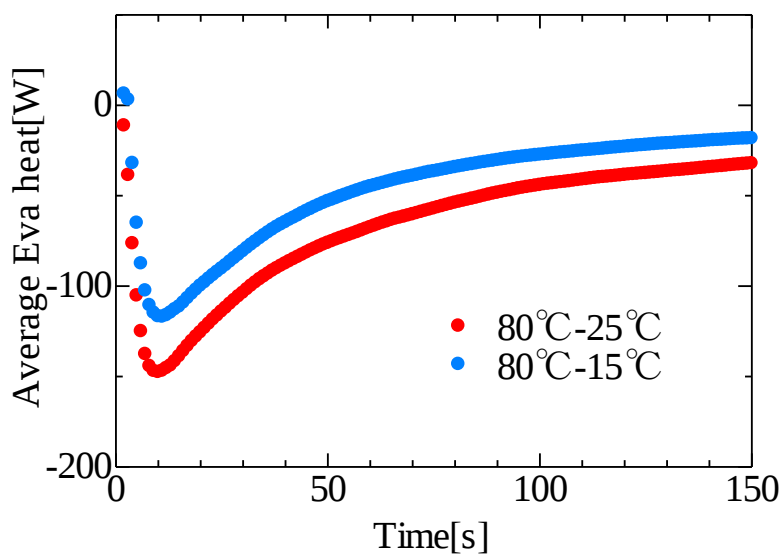


図 4.2.2-4b 脱着温度が 80°C のときの，平均吸熱量の経時変化

図 4.2.2-3 と図 4.2.2-4 を比較すると，すべての条件でそれぞれの大小関係が対応していることがわかる．つまり，この条件においては，単位時間当たりの吸熱能力と平均吸熱能力が同じような関係になることがわかる．

最後に，合計吸熱量の経時変化について考察する．図 4.2.2-5a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 4.2.2-5b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

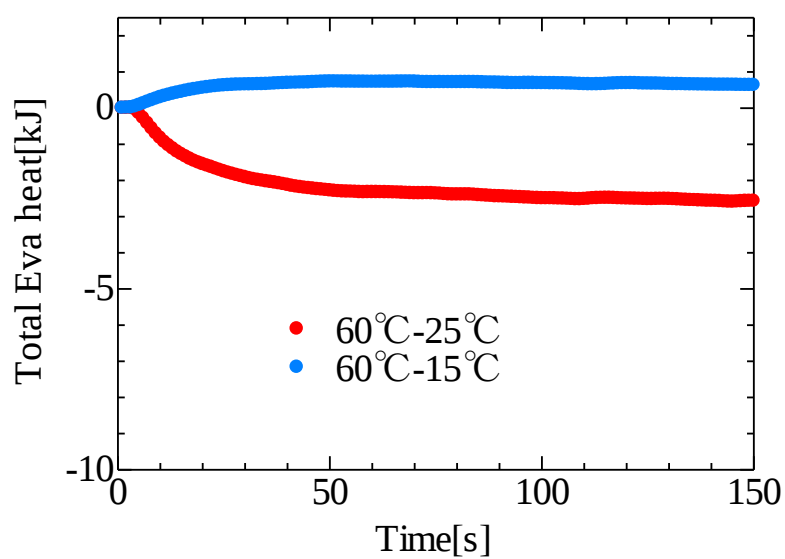


図 4.2.2-5a 脱着温度が 60°C のときの，合計吸熱量の経時変化

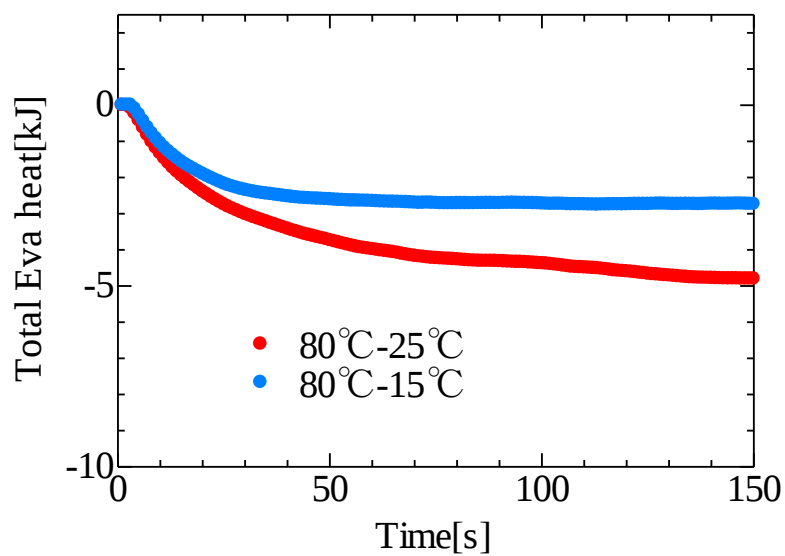


図 4.2.2-5b 脱着温度が 80°C のときの，合計吸熱量の経時変化

図 4.2.2-5 より，蒸発温度が高くなるほど合計吸熱量の絶対値が大きくなっている．前述のとおり，有効吸着量の大小で吸熱量が決まっていることがわかる．また，有効吸着量の比率を考慮すると，脱着温度が 60°C のときの方が蒸発温度による吸熱量の差が大きくなると考えられるが，このことが実験結果からも確認できる．

4.2.3 熱媒流量が異なるときの性能の比較

最後に，温度条件が同じで，熱交換器の中を流れる熱媒の流量が異なるときの性能の比較を行う．温度条件は，脱着温度は 60°C と 80°C ，蒸発温度は 25°C である．

まずは，吸着熱交換器の中を流れる熱媒の出入口の温度差の経時変化について考察する．

図 4.2.3-1a が，脱着温度 60°C ，蒸発温度 25°C での出入口温度差の経時変化の比較，図 4.2.3-1b が，脱着温度 80°C ，蒸発温度 25°C での出入口温度差の経時変化の比較である．

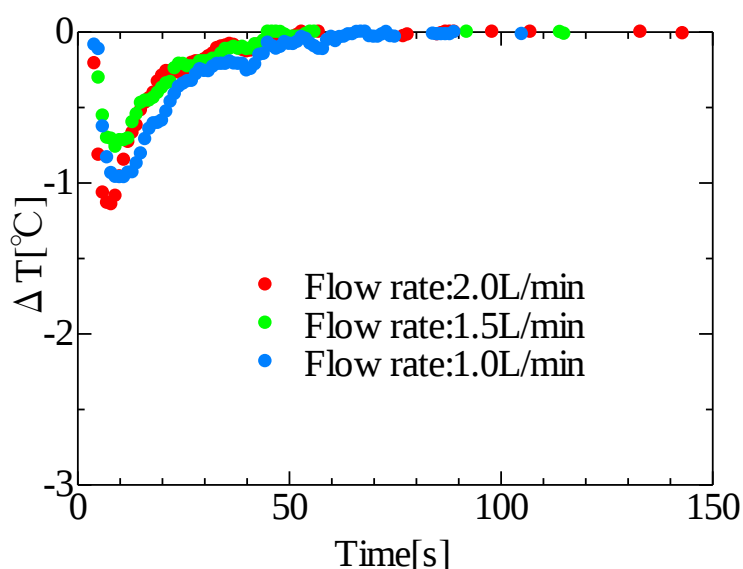


図 4.2.3-1a 脱着温度が 60°C ，蒸発温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

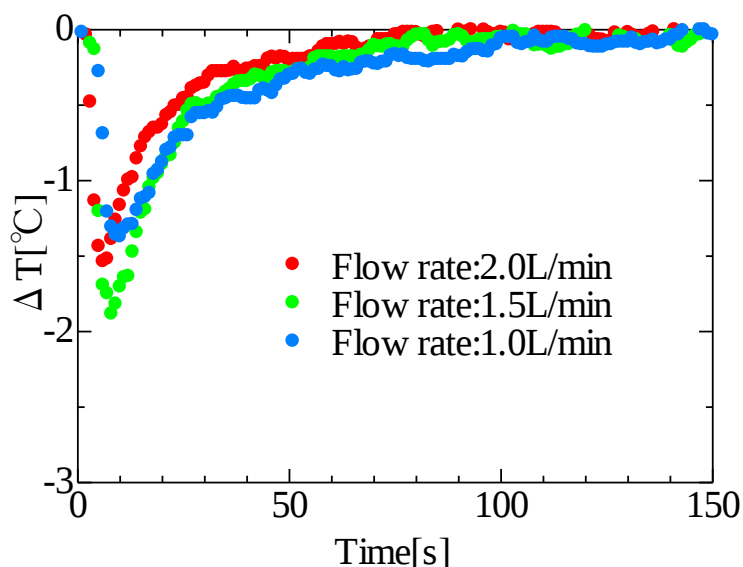


図 4.2.3-1b 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

図 4.2.3-1 から，流量の大小によって温度差のピーク値は変化しているが，流量が大きくなるほどピーク値が大きくなっているわけではないことがわかる．4.1.3 で述べたとおり，吸着器側では流量が大きくなるほどピーク値が大きくなっている．吸着は蓄熱システム同様に促進されていると考えられるため，熱媒の流量変化が蒸発速度に与える影響は，吸着速度に与えるそれより小さいことがわかる．

次に，単位時間当たりの吸熱量の経時変化について考察する．

図 4.2.3-2a が，脱着温度 60°C，蒸発温度 25°C での単位時間当たりの吸熱量の経時変化の比較，図 4.2.3-2b が，脱着温度 80°C，蒸発温度 25°C での単位時間当たりの吸熱量の経時変化の比較である．

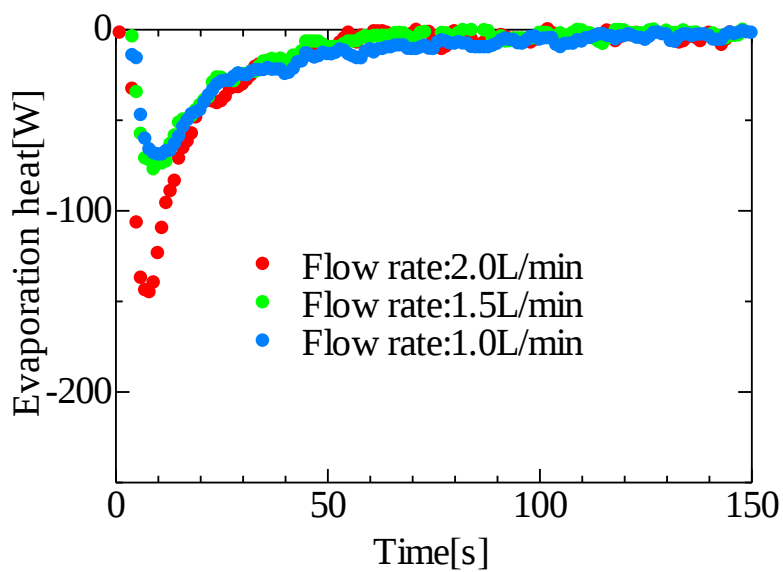


図 4.2.3-2a 脱着温度が 60°C，蒸発温度が 25°C のときの，単位時間当たりの蒸発熱量の
経時変化

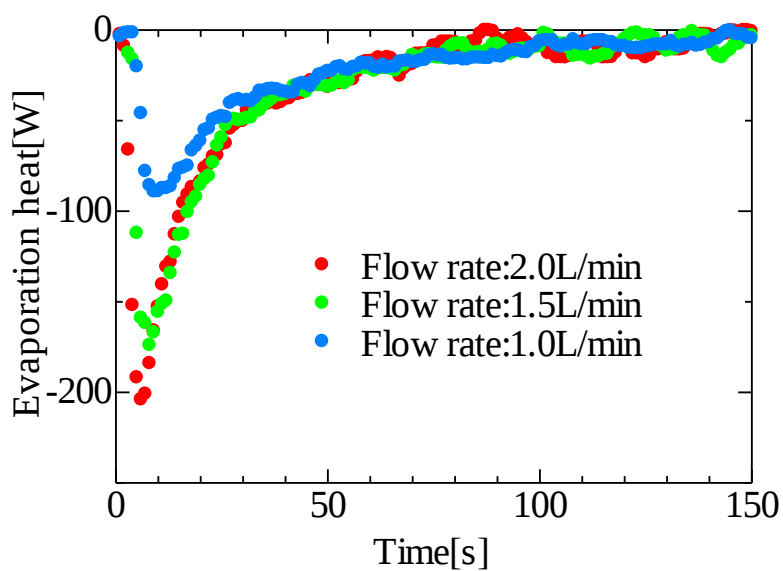


図 4.2.3-2b 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 25°C のときの，単位時間当たりの蒸発熱量の
経時変化

図 4.2.3-2 より，熱媒流量が大きくなるほどピーク値が大きくなっている．そのため，吸着の促進に合わせて蒸発も促進され，より早く，多くの熱量を吸熱したと考えられる．

温度差のピーク値の大小は，得られる熱量が大きくても，流量が大きいために温度が下がる前に熱媒が出口に達したため，瞬間吸熱量のような傾向にならなかったと考えられる．

次に，平均吸熱量の経時変化について考察する．

図 4.2.3-3a が，脱着温度 60°C ，蒸発温度 25°C での平均吸熱量の経時変化の比較，図 4.2.3-3b が，脱着温度 80°C ，蒸発温度 25°C での平均吸熱量の経時変化の比較である．

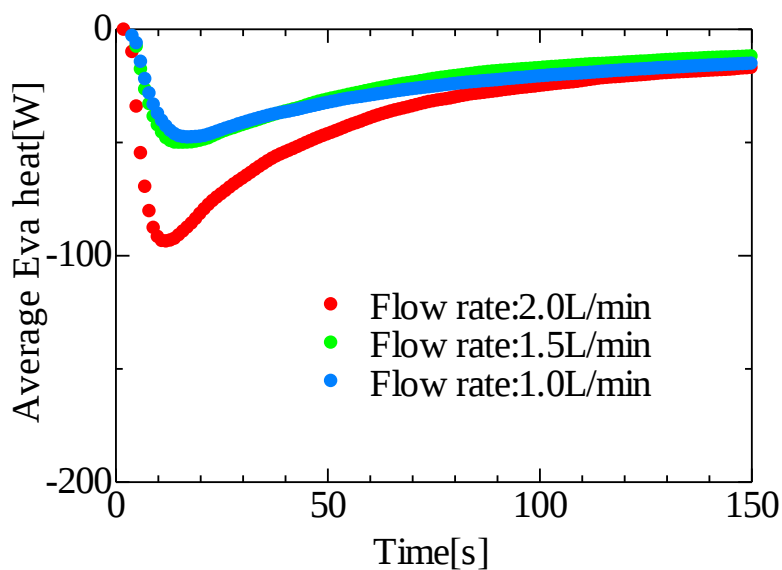


図 4.2.3-3a 脱着温度が 60°C ，蒸発温度が 25°C のときの，平均吸熱量の経時変化

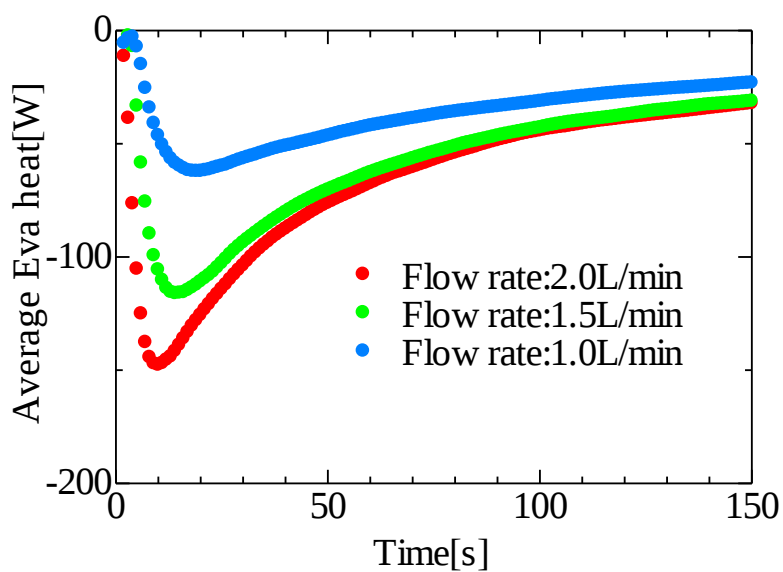


図 4.2.3-3b 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 25°C のときの，平均吸熱量の経時変化

図 4.2.3-3 より，平均吸熱量の変化は，瞬間発熱量の変化と同じような傾向にあることがわかる．また，有効吸着量の大きい脱着温度 80°C のときのほうが，熱媒流量の違いによる瞬間吸熱量および平均吸熱量の変化の割合が大きくなっていることがわかる．

最後に，合計吸熱量の経時変化について考察する．

図 4.2.3-4a が，脱着温度 60°C，蒸発温度 25°C での合計吸熱量の経時変化の比較，図 4.2.3-4b が，脱着温度 80°C，蒸発温度 25°C での合計吸熱量の経時変化の比較である．

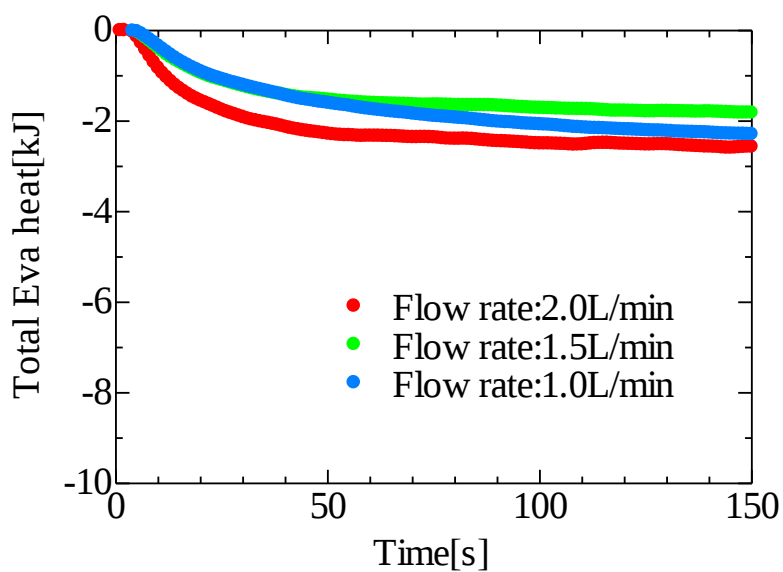


図 4.2.3-4a 脱着温度が 60°C，蒸発温度が 25°C のときの，合計吸熱量の経時変化

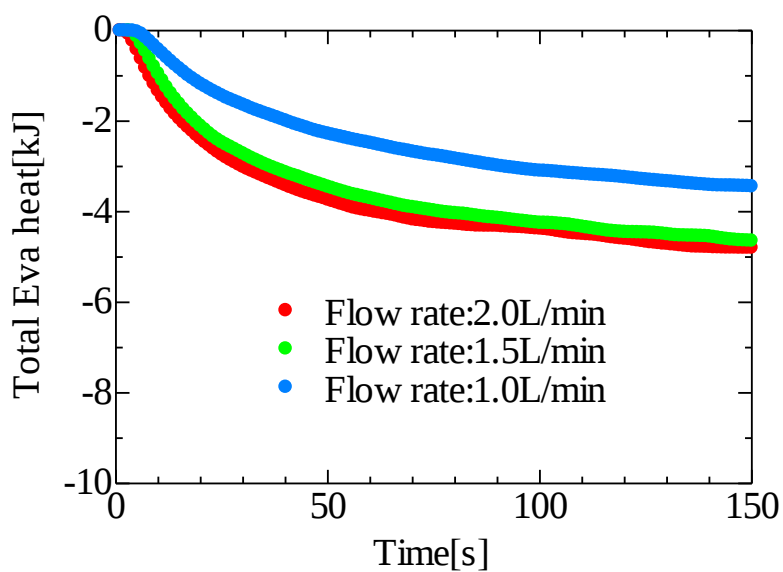


図 4.2.3-4b 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 25°C のときの，合計吸熱量の経時変化

図 4.2.3-4 より，熱媒流量が大きいほど合計吸熱量が増えるのが速いことがわかる．しかし，脱着温度 60℃ の流量 1.5L/min および脱着温度 80℃ の流量 1.0L/min の条件では，合計吸熱量がほかの流量条件と比べて小さいことがわかる．蓄熱システムと同様に，合計熱量は有効吸着量によって決まると考えられるため，この差は計器の測定誤差によるものと考えられる．

4.2.4 実験条件の違いによる性能比較のまとめ

最後に，実験結果をまとめた表を記載する．なお，熱媒の流量はすべて 2.0L/min である．

表 4.2.4-1 まとめ①

脱着過程		吸着過程		最大 ΔT	経過時間	最大 W	経過時間
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[°C]	[s]	[W]	[s]
60	30	15		0.52	6	47.073	6
	30	25		-1.14	7	-145.19	7
70	30	15		-0.20	5	-47.178	5
	30	25		-0.96	6	-126.35	6
80	30	15		-1.21	5	-177.71	6
	30	25		-1.54	5	-204.07	5

Tad は吸着器の温度，Tcon は凝縮器の温度，Teva は蒸発器の温度を表す．

最大 ΔT は，熱交換器の出入口温度差のピーク値を表す．

最大 W は，単位時間当たりの吸熱量のピーク値を表す．

経過時間は，それらのピーク値に達したときに，吸着開始から経過した時間を表す．

表 4.2.4-2 まとめ②

脱着過程		吸着過程		最大 Wave	経過時間	150s 後の Q	理論 Q
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[W]	[s]	[kJ]	[kJ]
60	30		15	32.681	10	0.632	-1.51
	30		25	-93.876	11	-2.57	-2.27
70	30		15	-30.666	10	-0.926	-2.72
	30		25	-82.774	12	-3.03	-3.42
80	30		15	-117.13	10	-2.74	-4.00
	30		25	-147.73	9	-4.81	-4.63

最大 Wave は，平均吸熱量のピーク値を表す．

150s 後の Q は，吸着開始から 150 秒経過したときの合計吸熱量を表す．

理論 Q は，吸着開始から吸着平衡までの合計蒸発熱量の理論値を表す．（3.3.7 の計算方法を用いて導出）

表 4.2.4-3 まとめ③

脱着過程		吸着過程		COP	理論 COP
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[-]	[-]
60	30		15	-	0.070
	30		25	0.060	0.053
70	30		15	0.032	0.094
	30		25	0.060	0.068
80	30		15	0.076	0.111
	30		25	0.084	0.081

COP の算出において、脱着に必要な熱量は 3.3.7 および 3.3.8 から算出した。

理論 COP は、表 4.2.4-2 の理論 Q を上記の脱着に必要な熱量で除した値である。

表 4.2.4-2 と表 4.2.4-3 から、蒸発温度 25°C のときは理論蒸発熱および理論 COP に近い値が得られているのに対し、蒸発温度 15°C のときは理論値より実験値が大きく下回っている。これは、表 4.2.1-3 のとおり、吸着器の死容積に残った冷媒の影響によるものと考えられる。そのため、今回の実験装置の仕様では、蒸発温度 25°C での運転のほうが効率がいいと考えられる。

4.3 AHT サイクルの実験結果および考察

この小章では、R1234yf と 12mm×2 熱交換器を用いた吸着・脱着実験の結果から、活性炭と R1234yf を用いた AHT サイクルがどのような過程をとり、どの程度の温度上昇を得られるのか考察する。

4.3.1 それぞれの温度条件で作成したプロセス予測線図

ここでは、様々な温度条件で吸着・脱着実験を行い、2.4 で前述したサイクルの P→Q, R→S の過程の予測線図を作成する。温度条件および実験手順は、3.2.3 と 3.3.9 で述べた通りである。

図 4.3.1-1a が吸着・脱着温度 35°C、凝縮温度 15°C のときの実験結果、図 4.3.1-1b が吸着・脱着温度 35°C、凝縮温度 10°C のときの実験結果である。

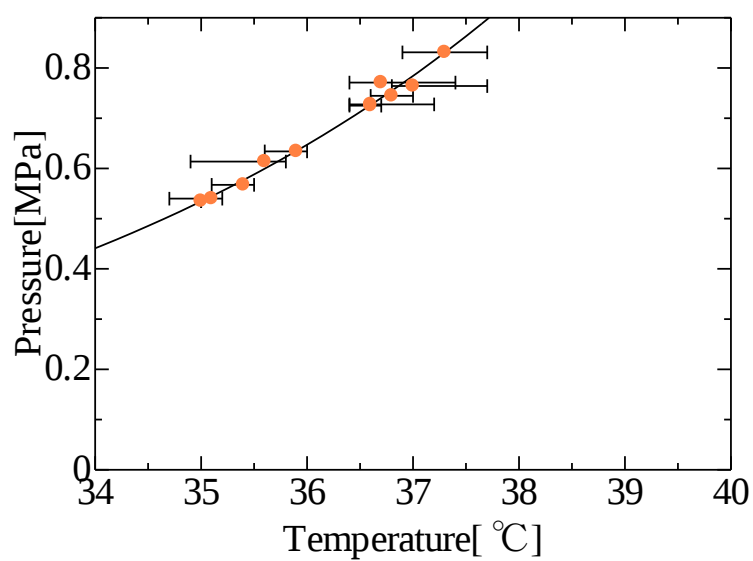


図 4.3.1-1a 吸着・脱着温度 35°C，凝縮温度 15°C のときの吸着線図

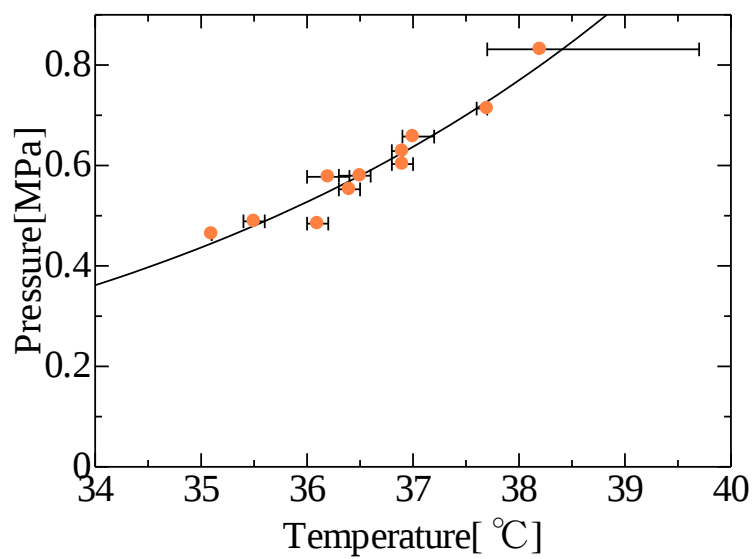


図 4.3.1-1b 吸着・脱着温度 35°C，凝縮温度 10°C のときの吸着線図

なお，吸着器側の熱交換器には 8 個の温度センサーが設置してあり，実験結果の温度はその平均をとっている．そのため，グラフの X 軸方向に最小値と最大値のエラーバーを記載した．

図より，凝縮温度が低い 10℃ のときの方が，グラフの傾きが小さくなっていることがわかる．これは，有効吸着量の差に起因すると考えられる．表 4.3.1-1 は，AHT サイクルの実験条件での有効吸着量である．

表 4.3.1-1 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量

脱着過程		吸着過程		有効吸着量
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[g]
35	0	35	35	27.70
	10			16.80
	15			12.08

表より，凝縮温度 10℃ のときのほうが有効吸着量は大きいため，圧力変化に対し温度変化が大きく，グラフの傾きが小さくなると考えられる．

また，グラフに記載されている近似曲線の式および変数は以下の通りである．

$$\ln y = a + bx \quad (4.1)$$

表 4.3.1-2 近似曲線の定数

脱着過程		吸着過程		a	b
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]		
35	10	35	35	-7.43931397	0.188878592
	15			-7.34213500	0.191864340

続いて、今回の実験装置で得られる最大の温度上昇を計測するために行った、吸着・脱着温度 35°C、凝縮温度 0°C のときの実験結果を、図 4.3.1-2 に示す。

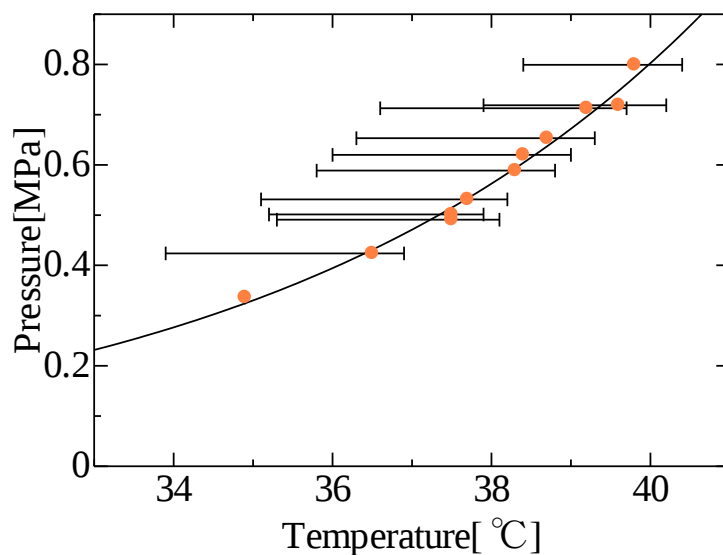


図 4.3.1-2 吸着・脱着温度 35°C、凝縮温度 0°C のときの吸着線図

この条件における近似曲線の定数を、表 4.3.1-3 に示す。

表 4.3.1-3 近似曲線の定数

脱着過程		吸着過程		a	b
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]		
35	0	35	35	-7.32366643	0.177591724

また、前述の 2 条件に比べ、温度センサーの最大・最小値のエラーバーの幅が大きいことがわかる。これは、熱交換器が 2 層の板状に並んでいるため、吸着量が増えると測定位置によって吸着速度に違いが出るからであると考えられる。

続いて、脱着の際の温度下降を計測した。図 4.3.1-3a が吸着・脱着温度 40°C、凝縮温度 15°C のときの実験結果、図 4.3.1-3b が吸着・脱着温度 40°C、凝縮温度 10°C のときの実験結果である。なお、どちらの実験条件も蒸発温度は 35°C である。

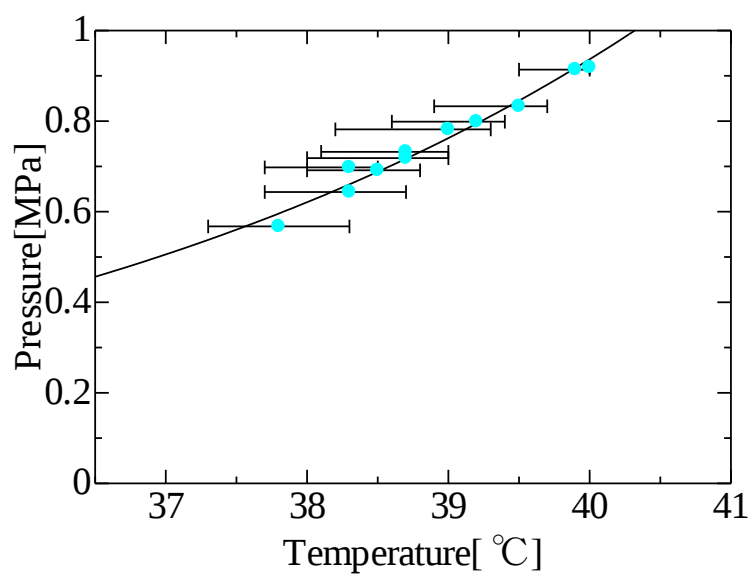


図 4.3.1-3a 吸着・脱着温度 40°C，凝縮温度 15°C のときの脱着線図

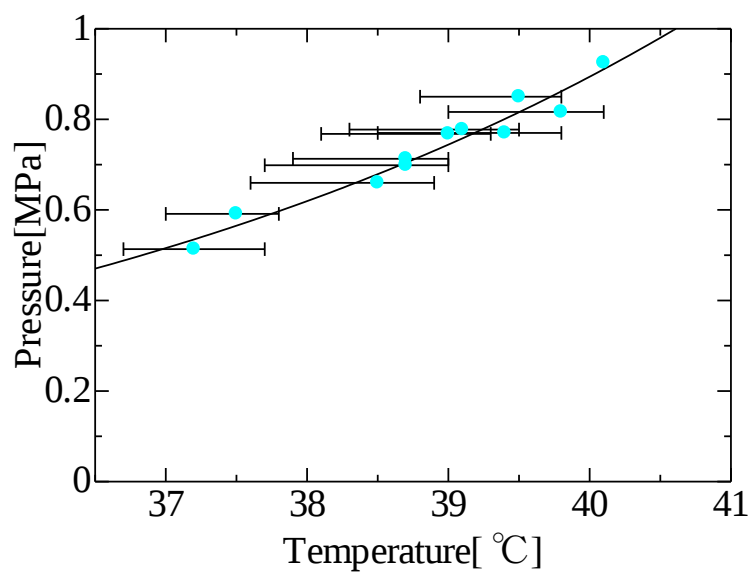


図 4.3.1-3b 吸着・脱着温度 40°C，凝縮温度 10°C のときの脱着線図

図より，凝縮温度が低い 10°C のときの方が，温度下降の幅は大きい，グラフの傾きはほとんど変わらないことがわかる．表 4.3.1-4 は，AHT サイクルの実験条件での有効吸着量である．

表 4.3.1-4 活性炭 MSC-30 と R1234yf の有効吸着量

脱着過程		吸着過程		有効吸着量 [g]
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	
40	10	40	35	19.88
	15			14.82

表より，凝縮温度 10°C のときのほうが有効吸着量は大きいため，温度下降の幅が大きくなると考えられる．吸着の実験結果と比べ，グラフの傾きに差がないのは，冷媒が細孔内に吸着されている状態から始まる脱着は，液体状態の冷媒が蒸発する吸着よりも有効吸着量による吸着・脱着速度の変化が小さいためと考えられる．

また，グラフに記載されている近似曲線の式は式(4.1)と同様であり，変数は以下の通りである．

表 4.3.1-5 近似曲線の定数

脱着過程		吸着過程		a	b
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]		
40	10	40	35	-7.45231508	0.183507739
	15			-8.28398934	0.205459278

4.3.2 実験結果と吸着等量線との比較

ここでは、4.3.1 で求められた吸着線図の近似曲線と、3.3.10 から求められた吸着等量線を比較し、サイクルの運転条件を予測する。

図 4.3.2-1a が吸着・脱着温度 35°C、凝縮温度 15°C のときの比較、図 4.3.2-1b が吸着・脱着温度 35°C、凝縮温度 10°C のときの比較である。

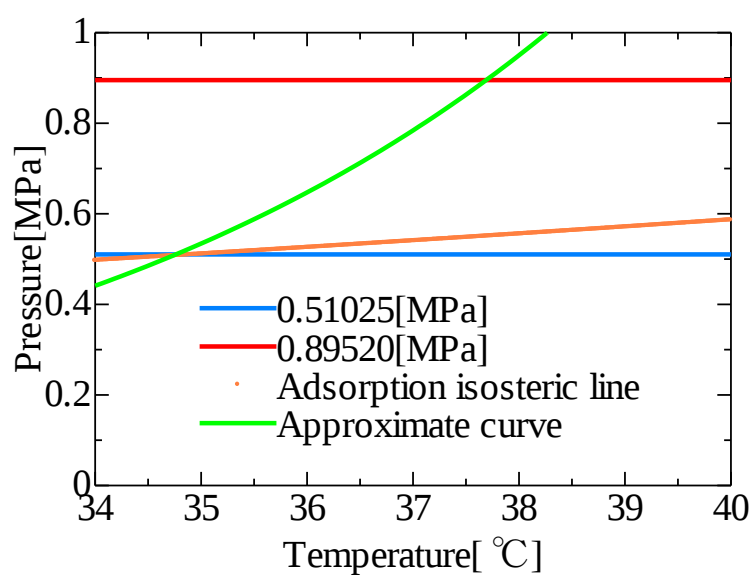


図 4.3.2-1a 吸着・脱着温度 35°C、凝縮温度 15°C のときの比較

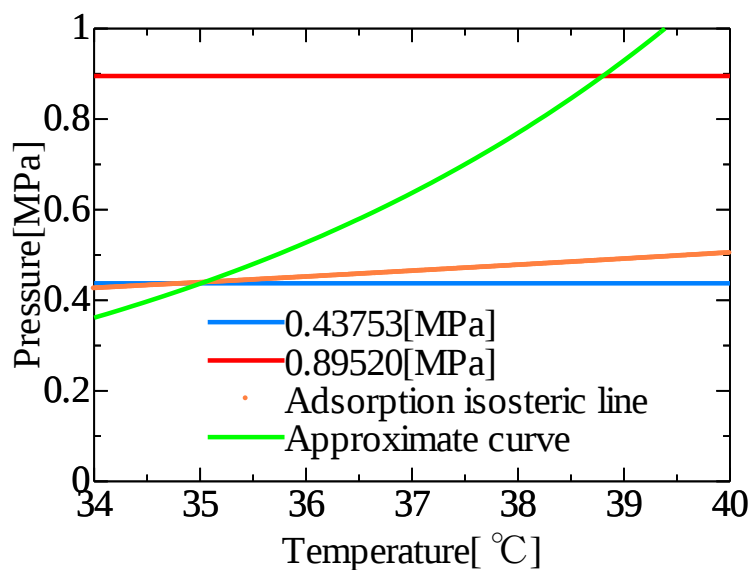


図 4.3.2-1b 吸着・脱着温度 35°C，凝縮温度 10°C のときの比較

なお，青線で示された圧力は凝縮器温度での R1234yf の飽和蒸気圧，赤線は蒸発器温度での飽和蒸気圧である．Adsorption isosteric line は吸着等量線，Approximate curve は近似曲線である．

図より，吸着等量線と近似曲線の差はかなり大きい，凝縮温度が 10°C のときのほうが，近似曲線の傾きが小さく，吸着等量線と近づいていることがわかる．図 2.4 の PT 線図からわかるとおり，この曲線が吸着等量線に近いほど，温度 T_H で多くの熱量が得られる．そのため，有効吸着量が大きいほど，AHT サイクルの出力が大きくなると考えられる．

続いて，図 4.3.2-2 が吸着・脱着温度 35°C，凝縮温度 0°C のときの比較である．

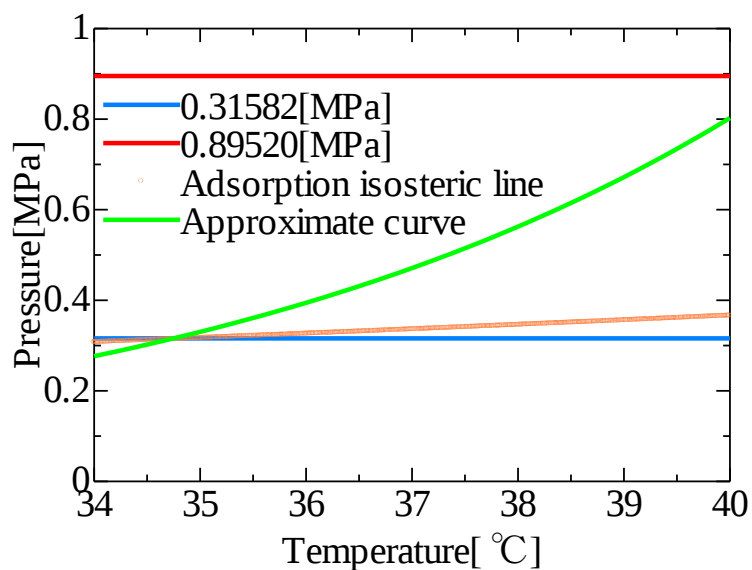


図 4.3.2-2 吸着・脱着温度 35°C，凝縮温度 0°C のときの比較

図より，吸着等量線の傾きは凝縮温度が下がるにつれて小さくなっているが，それ以上の割合で近似曲線の傾きが小さくなるため，両者が近づくことがわかる．

続いて，脱着の際の吸着等量線と近似曲線の比較を行う．図 4.3.2-3a が吸着・脱着温度 40°C，凝縮温度 15°C のときの比較，図 4.3.2-3b が吸着・脱着温度 40°C，凝縮温度 10°C のときの比較である．なお，どちらの実験条件も蒸発温度は 35°C である．

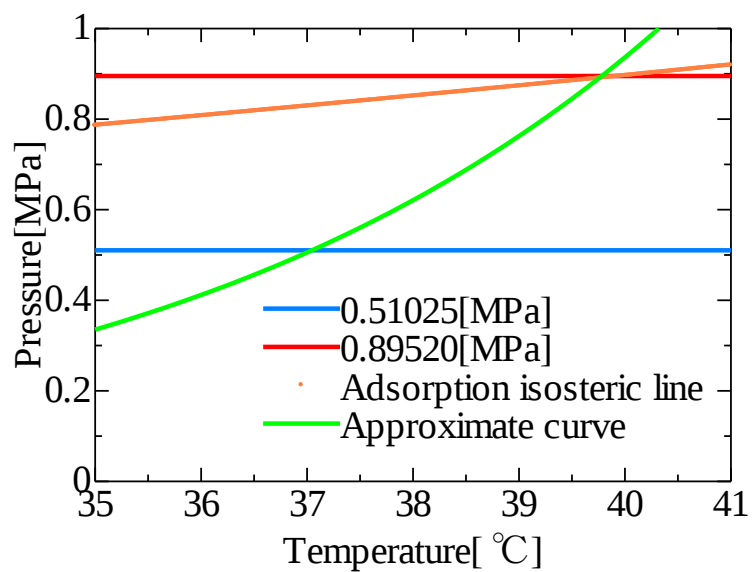


図 4.3.2-3a 吸着・脱着温度 40°C，凝縮温度 15°C のときの比較

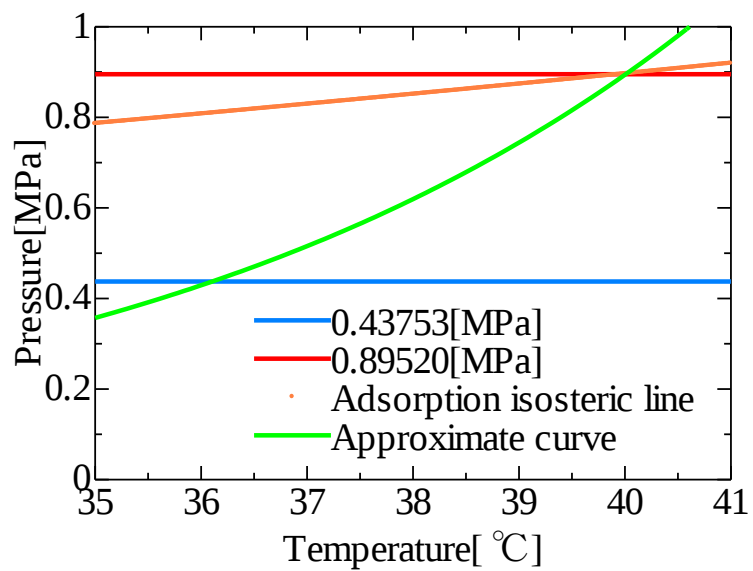


図 4.3.2-3b 吸着・脱着温度 40°C，凝縮温度 10°C のときの比較

なお、青線で示された圧力は凝縮器温度での R1234yf の飽和蒸気圧、赤線は蒸発器温度での飽和蒸気圧である。Adsorption isosteric line は吸着等量線、Approximate curve は近似曲線である。

図より、凝縮温度が 10°C のときのほうが、近似曲線の傾きは変わらないが、 P_L が下がったことで、両者の交点の温度が下がっていることがわかる。図 2.4 の PT 線図からわかるとおり、吸着器の温度は T_M まで下げる必要があるため、凝縮温度が低いほうが、 T_M の温度を低くとれると考えられる。

第5章 総括

本研究では、活性炭を用いた吸着蓄熱・ヒートポンプシステムについて、吸着質に R1234yf を用いたときの運転条件によるシステムの性能の比較を行った。また、活性炭を用いた AHT サイクルのサイクル線図作成、吸着等量線との比較を行った。以下、本研究で得られた知見の総括を行う。

5.1 吸着蓄熱システムの性能の比較

5.1.1 脱着温度が異なるときの性能の比較

熱交換器の出入口の温度差の経時変化について

同じ凝縮温度では、脱着温度が高くなると、温度差のピーク値も大きくなる。これは、R1234yf の有効吸着量に起因すると考えられる。

単位時間当たりの発熱量の経時変化について

すべての温度条件において熱媒流量は同じなので、出入口温度差の経時変化と同じような関係になった。

平均発熱量の経時変化について

上記と同様、ピーク値や発熱量の低下の様相が同じような関係になったが、一部条件で、大小関係が逆転している。これは、周囲環境への熱損失や計器の測定誤差によると考えられる。

合計発熱量の経時変化について

脱着温度が高くなると、合計発熱量も大きくなった。これも、有効吸着量に起因すると考えられる。ここでも一部条件で大小関係が逆転しているが、これは周囲環境への熱損失や計器の測定誤差によると考えられる。

5.1.2 蒸発温度が異なるときの性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

蒸発温度が高くなると、温度差のピーク値が小さくなる。これは、R1234yfの有効吸着量に起因すると考えられる。

また、脱着温度が高くなると、温度差のピーク値において、蒸発温度の違いによるピーク値の差が小さくなった。有効吸着量の比率に起因すると考えられる。

単位時間当たりの発熱量の経時変化について

すべての温度条件において熱媒流量は同じなので、出入口温度差の経時変化と同じような関係になった。

平均発熱量の経時変化について

上記と同様、ピーク値や発熱量の低下の様相が同じような関係になった。

合計発熱量の経時変化について

蒸発温度が低くなると、合計発熱量は大きくなった。これも、有効吸着量の差によると考えられる。

5.1.3 熱媒流量が異なるときの性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

流量が大きくなると、温度差のピーク値が大きくなり、昇温の低下が急激になった。流量が大きいほど、熱媒が吸着発熱を回収する速度が大きくなり、それによって吸着が促進されることで、吸着発熱量の最大値も大きくなるためと考えられる。

単位時間当たりの発熱量の経時変化について

流量が大きくなると、発熱量のピーク値が大きくなった。流量が大きくなると、吸着が促進されることが原因だと考えられる。

平均発熱量の経時変化について

上記と同様に、流量が大きくなると、ピーク値が大きくなった。

合計発熱量の経時変化について

流量が大きくなると、吸着平衡に達する時間が速くなった。これも吸着が促進されることが原因と考えられる。

5.1.4 R134a を利用したときとの性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

グラフの形状（ピーク値のタイミングや減少傾向）は似ているが、総じて R134a を用いたほうが温度差は大きくなる。

単位時間当たりの発熱量の経時変化について

すべての条件において熱媒流量は同じなので、出入口温度差の経時変化と同じような関係になった。

平均発熱量の経時変化について

上記と同様、ピーク値や発熱量の低下の様相が同じような関係になった。

合計発熱量の経時変化について

吸着平衡に達する時間はほとんど変わらず、総じて R134a を用いたほうが発熱量は大きくなる。

5.2 吸着ヒートポンプシステムの性能の比較

5.2.1 脱着温度が異なるときの性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

同じ凝縮温度では，脱着温度が高くなると，温度差のピーク値も大きくなる．これは，R1234yfの有効吸着量に起因すると考えられる．しかし，一部条件で，大小関係が逆転している．これは，周囲環境への熱損失や計器の測定誤差によると考えられる．

また，脱着温度 60°C，蒸発温度 15°C の条件では，他条件と異なり蒸発器出入口温度差が正になっていた．これは，脱着時に吸着器の死容積に残った R1234yf が温度を下げるにつれ吸着し，その吸着量が有効吸着量を上回ってしまったためと考えられる．

単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化について

すべての温度条件において熱媒流量は同じなので，出入口温度差の経時変化と同じような関係になった．

平均吸熱量の経時変化について

上記と同様，ピーク値や吸熱量の低下の様相が同じような関係になった．

合計吸熱量の経時変化について

脱着温度が高くなると，合計吸熱量も大きくなった．これも，有効吸着量に起因すると考えられる．

また，蒸発温度が 15°C のとき，合計吸熱量が理論値を大きく下回っていた．これも前述のとおり，吸着器の死容積に残った R1234yf の影響であると考えられる．

5.2.2 蒸発温度が異なるときの性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

蒸発温度が高くなると、温度差のピーク値が小さくなる。これは、R1234yfの有効吸着量に起因すると考えられる。

また、脱着温度が高くなると、温度差のピーク値において、蒸発温度の違いによるピーク値の差が小さくなった。有効吸着量の比率に起因すると考えられる。

単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化について

すべての温度条件において熱媒流量は同じなので、出入口温度差の経時変化と同じような関係になった。

平均吸熱量の経時変化について

上記と同様、ピーク値や発熱量の低下の様相が同じような関係になった。

合計吸熱量の経時変化について

蒸発温度が高くなると、合計吸熱量も大きくなった。これも、有効吸着量に起因すると考えられる。

5.2.3 熱媒流量が異なるときの性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

流量の大小によって温度差のピーク値は変化しているが、流量が大きくなるほどピーク値が大きくなっているわけではない。吸着は蓄熱システム同様に促進されていると考えられるため、熱媒の流量変化が蒸発速度に与える影響は、吸着速度に与えるそれより小さいことがわかる。

単位時間当たりの蒸発熱量の経時変化について

流量が大きくなると、蒸発熱量のピーク値が大きくなった。流量が大きくなると吸着が促進されることと、出入口温度差と異なり、流量を計算式に含んでいることが原因だと考えられる。

平均吸熱量の経時変化について

上記と同様に、流量が大きくなると、ピーク値が大きくなった。

合計吸熱量の経時変化について

流量が大きくなると、吸着平衡に達する時間が速くなった。これも吸着が促進されることが原因と考えられる。また、一部条件で合計吸熱量が他条件を下回っていた。これも、計器の測定誤差によるものと考えられる。

5.3 AHT サイクルのサイクル検証

5.3.1 それぞれの温度条件で作成したプロセス予測線図

吸着時の比較

凝縮温度が低くなると、PT 線図での吸着線図の傾きが小さくなった。これは、有効吸着量が大きくなることで、圧力変化に対する温度変化の影響が大きくなるためと考えられる。

脱着時の比較

凝縮温度が低くなると、温度下降の幅は大きくなったが、グラフの傾きはほとんど変わらなかった。これは、有効吸着量が大きくなることで、蒸発による吸熱量が大きくなるが、冷媒が細孔内に吸着されている状態から始まる脱着は、液体状態の冷媒が蒸発する吸着よりも有効吸着量による吸着・脱着速度の変化が小さいためと考えられる。

5.3.2 実験結果と吸着等量線との比較

吸着時の比較

吸着等量線と近似曲線の差はかなり大きいですが、凝縮温度が低くなるほど、近似曲線の傾きが小さく、吸着等量線と近づいていた。近似曲線が吸着等量線と近いほど、温度 T_H で多くの熱量が得られる。そのため、有効吸着量が大きいほど、AHT サイクルの出力が大きくなると考えられる。

脱着時の比較

凝縮温度が低いときのほうが、近似曲線の傾きはほとんど変わらないが、 P_L が下がったことで、両者の交点の温度が下がった。吸着器の温度は T_M まで下げる必要があるため、凝縮温度が低いほうが、 T_M の温度を低くとれることで、AHT サイクルの温度幅を広げられると考えられる。

謝辞

九州大学大学院総合理工学研究院教授 宮崎 隆彦先生には、本研究の遂行にあたり、数多くの的確かつ有益な御指導、御鞭撻を賜りました。また、本論文の作成についても、丁寧な御指導、御鞭撻を賜りました。ここに、深く感謝の意を表し御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学研究院准教授 Kyaw Thu 先生には、本研究の遂行に当たり、多大な御協力を賜りました。ここに、心から深く御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学研究院 高田 信夫技術専門職員には、本研究を遂行する上で特に装置、機械、部品などの技術的な面において、数多くの御助言、御協力を賜りました。ここに、心から深く御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻宮崎研究室に所属する, Ms. Noémie Chagnon-Lessard, Ms. Chairunnisa, Ms. Mokete Relebohile, 孟 憲宏氏, Mr. Mansoor Abdul Aziz, Ms. Duha Hammad, Mr. Motaz Mabrok Mohamed Salama, Mr. Sagar Saren, Mr. Zhaosheng Yang, Mr. Yu Hao, Mr. Seo Sang Won, Mr. Marco Reyes Lao, Mr. Haoulomou Pepe, Mr. Sannan Salabat Butt, Mr. Xuetao Liu, Mr. Denis Mutebi, Mr. Mojtaba Purjam, 陳 昊楠氏, Mr. Yang Cheng, Mr. You Cheng, Mr. Li Guangyao, 前城 裕太氏, 川喜田 幹太氏, 伊藤 大芽氏, 益守 航氏, 柴 甲子氏, 申 嘉祺氏, 中津 秀彬氏, 溝部 幸輝氏, 江口 順紹氏, 松尾 康介氏, 盧琛氏, Ms. Alaa Itaiwi, 邢峻溪氏, 周盈辛氏, 磯永 隆志氏, 工藤 徳人氏, 高巢 凌吾氏, Ms. Isha Sameen, Mr. Zhao Peng には、公私に渡り親切な御助言を賜るとともに御激励をいただきました。ここに深く感謝の意を表し、心より御礼申し上げます。

研究室秘書 大和 裕里氏には、事務的な手続きなど多くの便宜を図って頂きました。ここに、心から深く御礼申し上げます。

最後に、私の学生生活を温かく見守り、支えて下さった家族に、心から深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] K. Uddin, I.I. El-Sharkawy, T. Miyazaki, B.B. Saha, S. Koyama, Hyun-Sig Kil, J. Miyawaki, Seong-Ho Yoon: Applied Thermal Engineering, Vol.72, pp211-218, 2014
- [2] M. M. Dubinin: Adsorption in micropores, J. Colloid Interface Sci. 23, pp487-499, 1961
- [3] M. M. Dubinin, V.A. Astakhov: Development of the concepts of volumefilling of micropores in the adsorption of gases and vapors by microporous adsorbents, Bull. Acad. Sci. USSR 20, pp3-7, 1971
- [4] I.I. El-Sharkawy, B.B. Saha, S. Koyama, J. He, K.C. Ng, C. Yap: Experimental investigation on activated carbon-ethanol pair for solar powered adsorption cooling applications, International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp1407-1413, 2008
- [5] S. Jribi, B.B. Saha, S. Koyama, A. Chakraborty, K.C. Ng: Applied Thermal Engineering, Vol.50, pp1570-1575, 2013
- [6] S. Seo, H. Kawakami, F. Miksik, N. Takata, K. Thu, T. Miyazaki: Thermodynamic analysis and impact of thermal masses on adsorption cycles using MaxsorbIII/R245fa and SAC-2/R245fa pairs, International Journal of Refrigeration, Vol. 123, pp 52-62, 2021
- [7] A.A. Askalany, B.B. Saha, K. Uddin, T. Miyazaki, S. Koyama, K. Srinivasan, I.M. Ismail: Adsorption Isotherms and Heat of Adsorption of Difluoromethane on Activated Carbons, Journal of chemical & engineering data, Vol. 58, pp2828-2834, 2013
- [8] S. Saren, S. Mitra, T. Miyazaki, K. Choon Ng, K. Thu: A novel hybrid adsorption heat transformer – multi-effect distillation (AHT-MED) system for improved performance and waste heat upgrade, Applied Energy, Vol. 305, 117744, 2022
- [9] I. Chandra, V.S. Patwardhan: Theoretical studies on adsorption heat transformer using zeolite-water vapour pair, Heat Recovery Systems and CHP, Vol. 10, pp527-537, 1990

- [10] K.H. Patil, S. Sahoo: Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 52, pp267-282, 2018
- [11] S. Seo, F. Mikšík, Y. Maeshiro, K. Thu, T. Miyazaki: Performance Evaluation of an Adsorption Heat Pump System Using MSC-30/R1234yf Pair with the Impact of Thermal Masses, applied sciences, Vol. 11, Issue 5, 2279, 2021
- [12] T. Miyazaki: Thermodynamic Analysis of Adsorption Cooling Cycle based on Adsorption Characteristics of a Newly Developed Activated Carbon, Adsorption News, Vol. 29, No. 3, pp16-21, 2015
- [13] K. Uddin, M.A. Islam, S. Mitra, J. Lee, K. Thu, B.B. Saha, S. Koyama: Applied Thermal Engineering, Vol.129, pp117-126, 2018
- [14] 安藝雄太, 活性炭の吸着現象を用いた吸着蓄熱システムの実験的研究, 修士論文, 九州大学, 2021