

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

安藝, 雄太
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4372223>

出版情報：九州大学, 2020, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 2 年 度

修 士 論 文

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

九州大学大学院総合理工学府
環境エネルギー工学専攻
熱エネルギー変換システム学研究室

安 藝 雄 太

指導教員 宮 崎 隆 彦

提出年月日 令和 3 年 2 月 8 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 蓄熱システムの原理	3
1.4 従来の研究	7
1.5 本論文の概要	8
第2章 実験装置および実験方法	9
2.1 実験装置	9
2.1.1 吸着材の特性	9
2.1.2 実験装置の概要	9
2.1.3 吸着熱交換器	12
2.2 実験手順および実験条件	18
2.2.1 エタノールおよび R134a 吸着における熱量測定実験の手順	18
2.2.2 損失熱量測定実験の手順	19
2.2.3 実験条件	19
2.3 実験データ算出方法	21
2.3.1 実験データの記録方法	21
2.3.2 発熱量の算出方法	21
2.3.3 環境と装置の間における熱交換量の算出方法	22
2.3.4 合計発熱量の算出方法	22
2.3.5 平均発熱量の算出方法	23
2.3.6 吸着量の理論値の算出方法	23
2.3.7 吸着熱および脱着熱の理論値の計算方法	24
2.3.8 COP（成績係数）の算出方法	25
2.3.9 レイノルズ数の計算方法	25
第3章 実験結果および考察	27
3.1 エタノール-12mm×2 熱交換器の実験結果および考察	27
3.1.1 脱着温度が異なるときの性能の比較	27

3.1.2	蒸発温度が異なるときの性能の比較	34
3.1.3	熱媒流量が異なるときの性能の比較	42
3.1.4	まとめ	46
3.2	エタノールを用いたときの、29mm 熱交換器と 12mm×2 熱交換器の比較	49
3.2.1	熱交換器の出入口温度差の比較	49
3.2.2	単位時間当たりの発熱量の比較	51
3.2.3	平均発熱量の比較	54
3.2.4	合計発熱量の比較	57
3.2.5	まとめ	60
3.3	エタノールを用いたときの、25mm 熱交換器、29mm 熱交換器と 12mm×2 熱交換器の比較	61
3.3.1	熱交換器の出入口温度差の比較	62
3.3.2	蒸発器の仕様	63
3.3.3	平均発熱量の比較	64
3.3.4	合計発熱量の比較	66
3.3.5	まとめ	67
3.4	R134a-12mm×2 熱交換器の実験結果および考察	69
3.4.1	脱着温度が異なるときの性能の比較	69
3.4.2	蒸発温度が異なるときの性能の比較	76
3.4.3	まとめ	85
3.5	エタノールと R134a の比較	88
3.5.1	熱交換器の出入口温度差の比較	88
3.5.2	単位時間当たりの発熱量の比較	92
3.5.3	平均発熱量の比較	95
3.5.4	合計発熱量の比較	98
3.5.5	まとめ	101
第4章	総括	103
4.1	吸着質にエタノールを用いたときの運転条件によるシステムの性能の比較	103
4.1.1	脱着温度が異なるときの性能の比較	103
4.1.2	蒸発温度が異なるときの性能の比較	104

4.1.3 熱媒流量が異なるときの性能の比較	104
4.2 吸着質にエタノールを用いたときの，熱交換器の違いによる性能の比較	105
4.3 吸着質に R134a を用いたときの運転条件によるシステムの性能の比較	106
4.3.1 脱着温度が異なるときの性能の比較	106
4.3.2 蒸発温度が異なるときの性能の比較	107
4.4 吸着質にエタノールを用いたときと，R134a を用いたときの性能の比較	107
謝辞	109
参考文献	110

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]
μ	粘度	[Pa·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
s	サンプル (活性炭)
th	理論
total	合計

第1章 序論

1.1 研究背景

産業革命以降，人類の科学技術は飛躍的に発展し，我々の生活を便利にしてきた．しかしその反面，石油，石炭などの化石燃料をエネルギー源として利用し続けた結果，大気汚染，地球温暖化やオゾン層破壊などといった環境問題が引き起こされてきた．また，化石燃料も減少の一途をたどっており，その可採年数は石油が約 50 年，石炭が約 150 年と見積もられている．近年では，世界各国で温暖化に寄与するガスの排出規制が叫ばれており，例えば日本政府は 2050 年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにすると表明している．

これらの問題に対する解決策のひとつとして，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，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く，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．太陽熱にしても同様で，例えば夜間に熱が必要になっても，太陽光が得られないため熱の供給がなされないことになる．

このような熱供給と熱需要の時間差を埋めるための手段として，排熱などが生じたときにその熱を蓄え，必要に応じてその熱を使用する蓄熱技術の確立が注目されている．蓄熱に関する研究は盛んに行われてきたが，基本的に熱源の温度は 100°C 以上が想定されており， 100°C 以下の排熱は研究対象として扱われる機会が少なかった．

1.2 研究目的

そこで我々の研究グループは、 100°C 以下の熱の有効活用として、活性炭の吸脱着現象を蓄熱システムに応用することに注目した。排熱を用いて活性炭から吸着質を脱着させ、熱が必要になった時に吸着させ、その時に生じる吸着熱を利用するという構想になる。活性炭を用いた蓄熱システムは実用化されておらず、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、実際に吸着させ発熱挙動を調べることで、活性炭を用いた蓄熱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2つになる。

1つ目は、形状や活性炭の充填量が異なる吸着熱交換器を用いて吸着実験を行うことで、熱交換器の形状が発熱挙動にどのような影響を与えるのか解析することである。この実験の吸着質にはエタノールを使用した。活性炭とエタノールの吸着量に関する研究は従来から行われており、熱源の温度が 80°C 以下の条件においてこの組み合わせがほかの吸着質に比べて多くの吸着量を見込めることはすでに知られていた。そのため、実際に蓄熱システムを運用することを想定した実験を行う上で、システムの性能解析にはエタノールを用いることが有益だと判断した。

なお、本論文では3種類の熱交換器の比較を記載するが、そのうちひとつは先行研究で使用していたもので、著者はその熱交換器を使用した実験には直接かかわっていない。

2つ目は、吸着質にエタノールを用いた実験とR134aを用いた実験を行うことで、吸着質の違いがシステムの性能にどのような影響を与えるのか解析することである。R134aをはじめとしたフロン系冷媒は温室効果が大きいものが多く、近年その使用が段階的に制限、禁止されている。しかし、基本的にフロン系冷媒は高圧で蒸気密度が大きく、装置の小型化や、吸着速度の増加によって短時間で多くの熱を取り出すことが期待される。

R134aは将来的に使用を規制される見通しだが、活性炭との吸着量に関する研究例があり、高圧冷媒を用いた吸着蓄熱システムの性能を評価するうえで大いに参考になると判断したため、吸着質として採用した。

以上のことから、本研究の目的は、①熱交換器の形状が蓄熱システムの性能に与える影響及び、②吸着質の違いが蓄熱システムの性能に与える影響を解析することである。

1.3 蓄熱システムの原理

吸着現象を利用した蓄熱システムの概略図を図 1.1 に示す。ここでは吸着材に活性炭、吸着質にエタノールを使用した蓄熱システムを例に説明する。

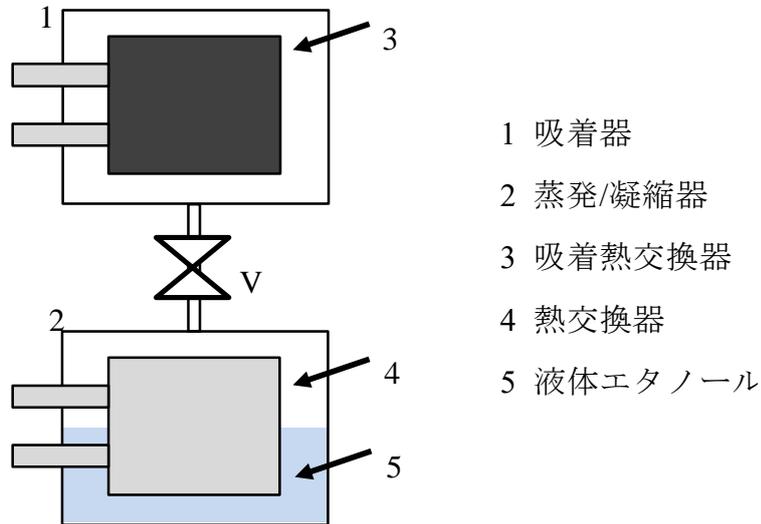


図 1.1 蓄熱システムの概略図

この蓄熱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。吸着器内は蒸気のエタノールで満たされており、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エタノールが存在する。残りの空間は蒸気のエタノールで満たされている。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エタノールと熱交換を行う。このシステムでは、排熱発生時に吸着器で蓄熱を行い、システム全体が環境温度の状態でするときに放熱によって熱を取り出し利用する。

次に、活性炭とエタノールの吸着等温線を図 1.2 に示す。

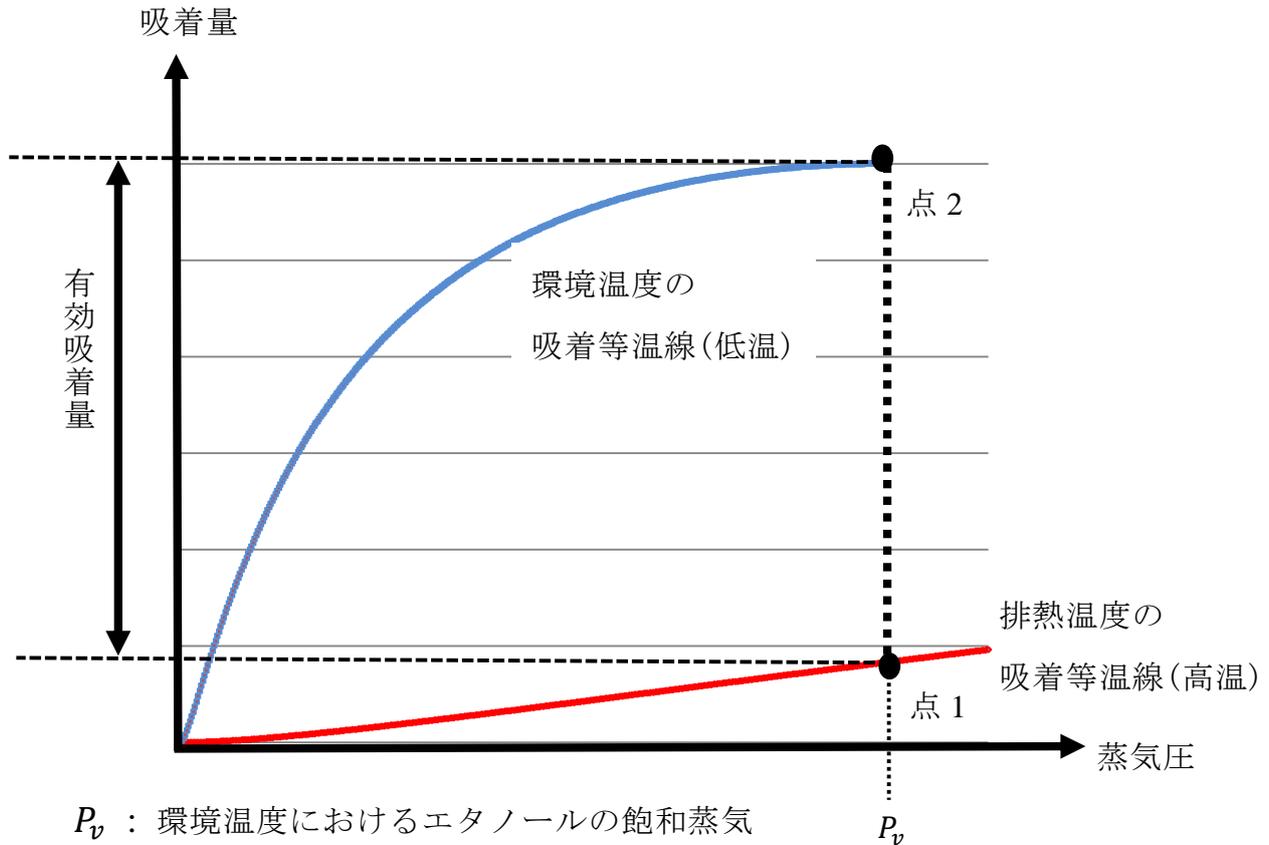


図 1.2 活性炭に対するエタノールの吸着等温線

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、横軸は吸着質の蒸気圧を示す。図 1.2 において、点 1 は排熱温度の活性炭に対するエタノールの吸着量、点 2 は環境温度の活性炭に対するエタノールの吸着量を示す。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/凝縮器内のエタノールの環境温度における飽和蒸気圧と等しい。図 1.2 が示す通り、蒸気圧が等しいとき、活性炭の温度が高くなるほどエタノールの吸着量は小さくなる。これは、エタノール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 [Pa]は吸着質(気層)の圧力, P_s [Pa]は吸着材温度における吸着質の飽和蒸気圧である. 先ほど述べたとおり, 蒸発/凝縮器は常に環境温度に保たれているため, P_v は常に環境温度におけるエタノールの飽和蒸気圧を示す.

ここで, 活性炭に対する蒸気のエタノールの吸着量と相対圧の関係を表した吸着線図を図 1.3 に示す.

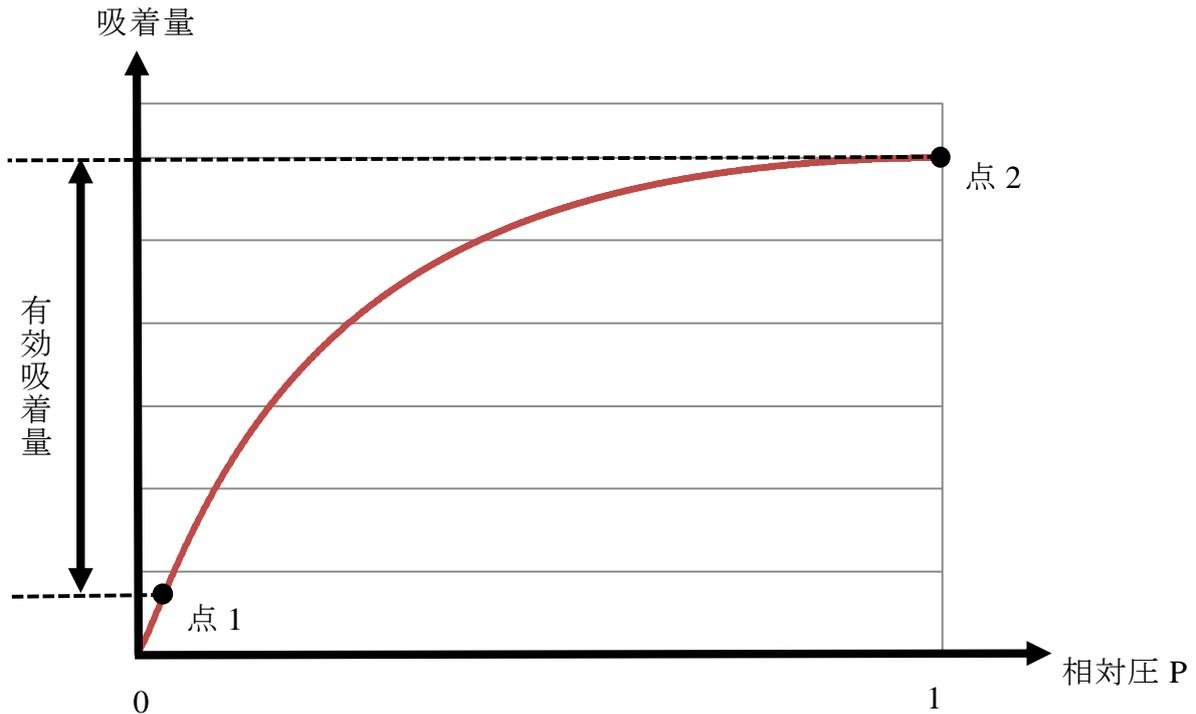


図 1.3 活性炭に対するエタノールの吸着量と相対圧の関係

図 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り, 相対圧が 1 のときが最大吸着量となる. 点 1 において, 活性炭は排熱温度であり環境温度よりも高いため, P_s は P_v よりも大きい値を示す. よって P は 1 より小さい値を示す. 点 2 において, 活性炭の温度は環境温度と等しいため, P_s と P_v は等しい値を示す. よって P は 1 となる. 点 1 において相対圧は環境温度, 排熱温度におけるエタノールの飽和蒸気圧の比率であるため, 排熱温度が一定の場合, 環境温度が低いほど相対圧も小さくなり, 有効吸着量は増加する.

最後に, 蓄熱システムの動作過程を図 1.4 に示す.

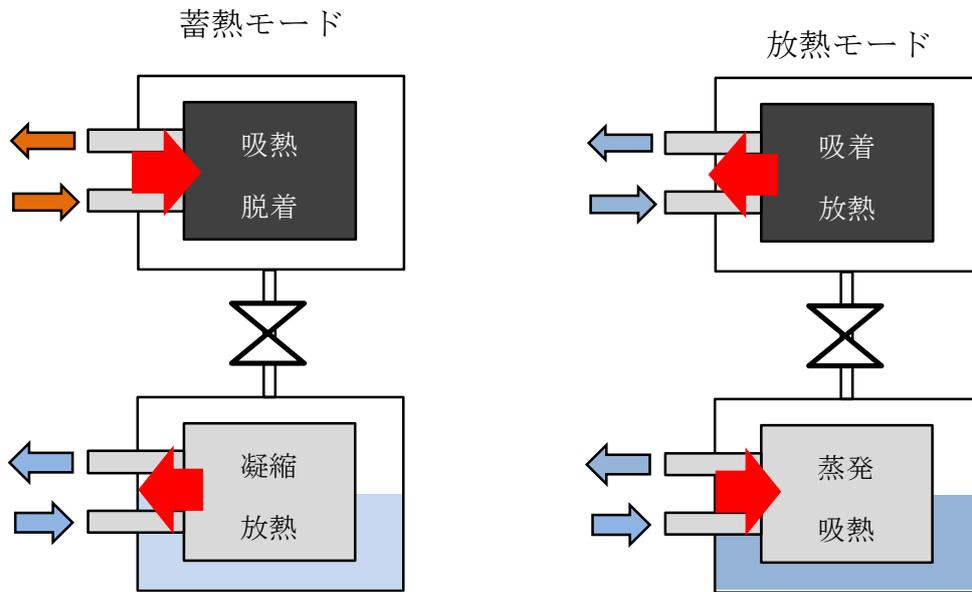


図 1.4 蓄熱システムの動作過程

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エタノールの脱着を行う。このとき脱着したエタノールは蒸発/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。エタノールの脱着が終了すると、エタノール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、エタノールを活性炭に吸着させる。このとき有効吸着量分のエタノールが活性炭に吸着し、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/凝縮器側のエタノールは、熱媒を介して環境から吸熱することで蒸発する。

1.4 従来の研究

Abdel ら^[1]は、活性炭とエタノールを用いた吸着冷凍チューブに付随するフィンについての吸着実験を行い、ジグザクのフィンを用いたときと直線のフィンを用いたときの COP がそれぞれ 0.635, 0.586 になることを明らかにした。

Uddin ら^[2]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^[3,4]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^[5]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。

Brancato^[6]らは、粒径の異なる吸着材とエタノールを用いた吸着実験を行い、吸着材の粒径が最も小さいときは、エタノールの物質異動が阻害され、吸着速度が低下することを明らかにした。

Kil^[7]らは、活性炭 MSC-30 の表面を様々な割合の酸素でコーティングし、エタノールの吸着実験を行うことで、活性炭の表面処理の割合が大きくなるほど、吸着量が小さくなり、吸着平衡の時間が短くなることを明らかにした。

Jribi^[8]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。

1.5 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、吸着蓄熱システムの原理、従来の研究について述べた。

第2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3章では、活性炭を用いた吸着蓄熱システムの性能評価実験の結果についてまとめ、考察を記す。

第4章では、本論文の結論をまとめ、総括を行う。

第2章 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 吸着材の特性

本実験では，粉体状活性炭である 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 2.1.1 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．

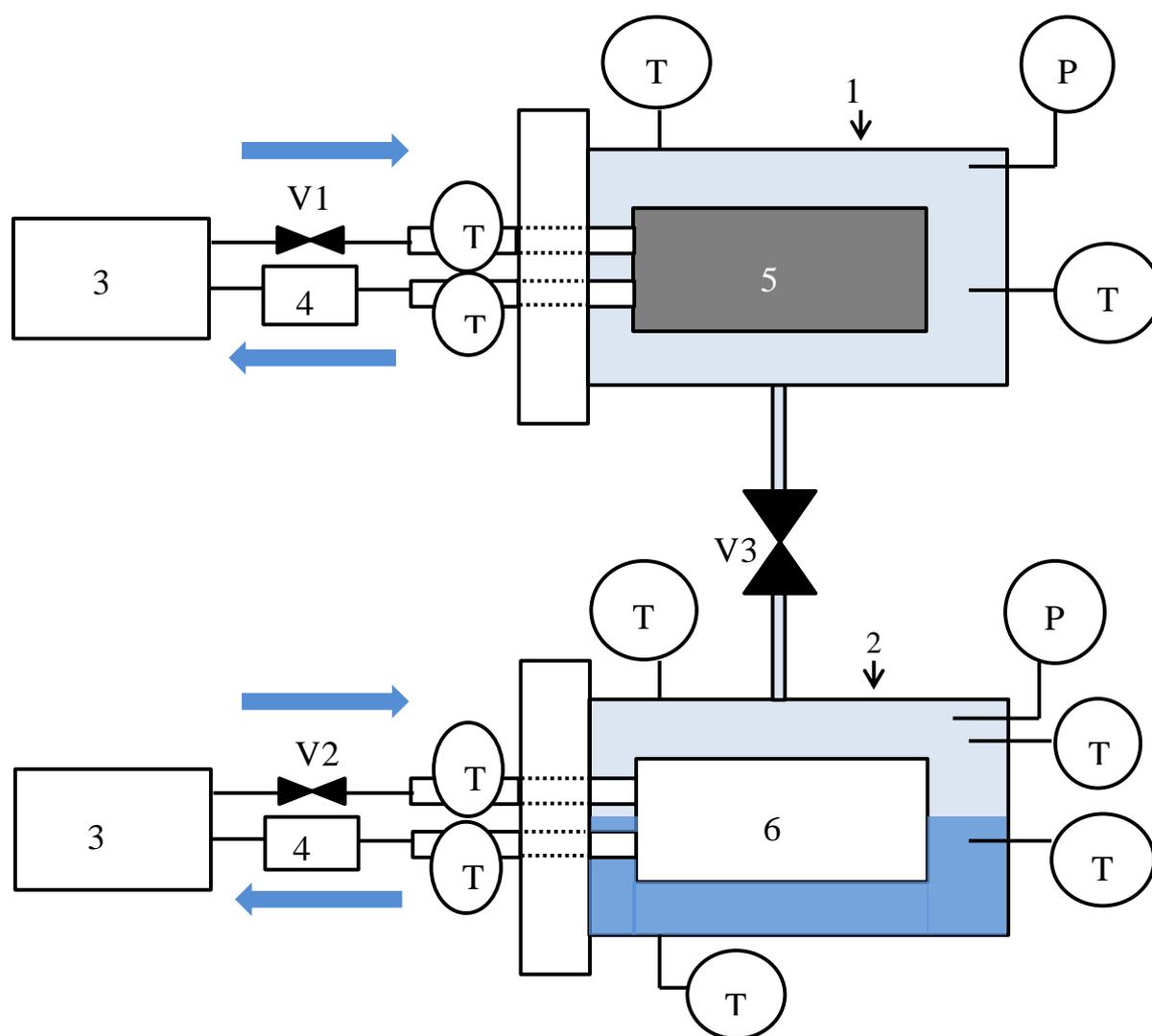
表 2.1.1 吸着材の基礎物性値

	MSC-30 ⁽⁹⁾	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

2.1.2 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 2.1.2(a)に，実験装置全体の写真を図 2.1.2(b)に示す．ここでは，吸着質がエタノールを例に説明する．



1 吸着 2 蒸発/凝縮 3 恒温 4 流量 5 活性炭塗布熱交換 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 P 圧力計

← 不凍液の流れ

図 2.1.2(a) 実験装置全体の概要図

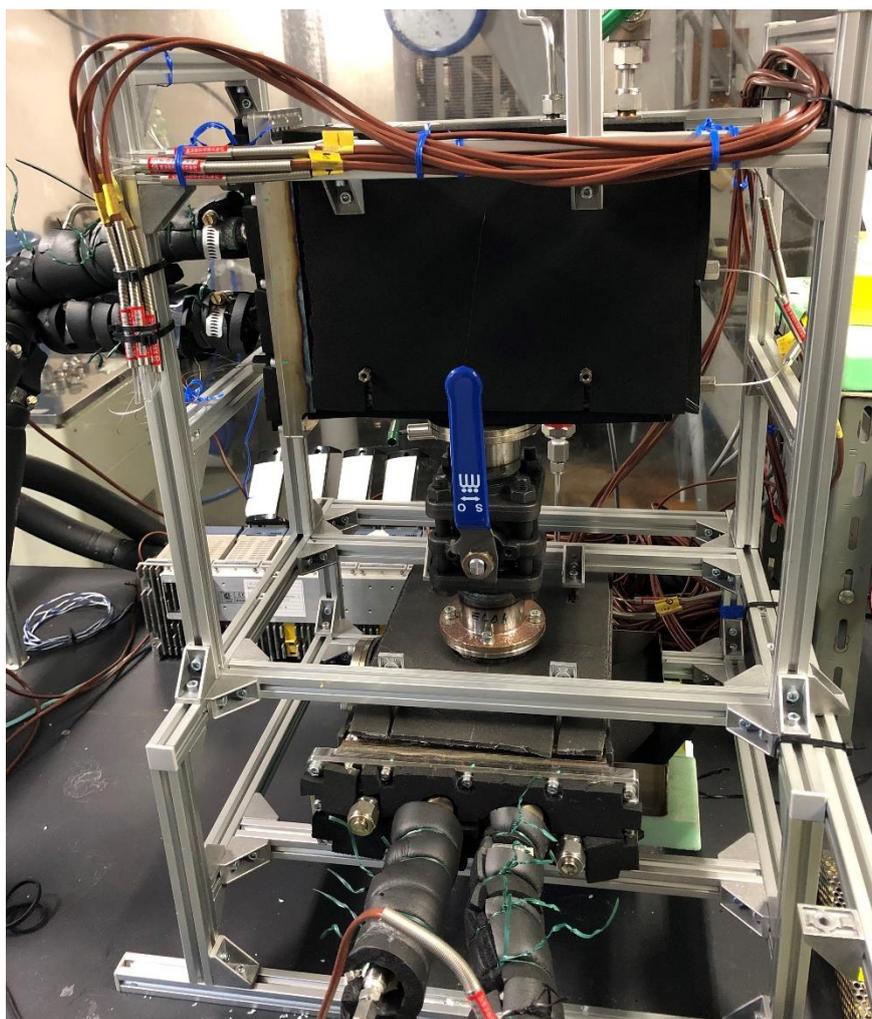


図 2.1.2(b) 実験装置全体の写真

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エタノールが存在し、吸着器と蒸発/凝縮器の残りの空間は蒸気のエタノールで満たされている。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 ADVANTEC 社製の TBF3200DA、蒸発/凝縮器側に LAUDA 社製のアルファ低温循環恒温槽 RA8 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エタノール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、エタノール以外の気体を脱気する。その際、両容器の蒸気圧がエタノール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、蒸気のエタノールの温度、液体のエタノールの温度、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。

2.1.3 吸着熱交換器

エタノールを使用したときの熱交換器による比較実験において、先行研究を含め 3 種類の吸着熱交換器を使用した。

熱交換器の概略図を図 2.1.3(a) に、熱交換器のフィンの概略図を図 2.1.3(b) に、それぞれの熱交換器の外見上の寸法を図 2.1.3(c) に、熱交換器の写真を図 2.1.4(d) に示す。また、それぞれの熱交換器の詳細を表 2.1.3 に示す。

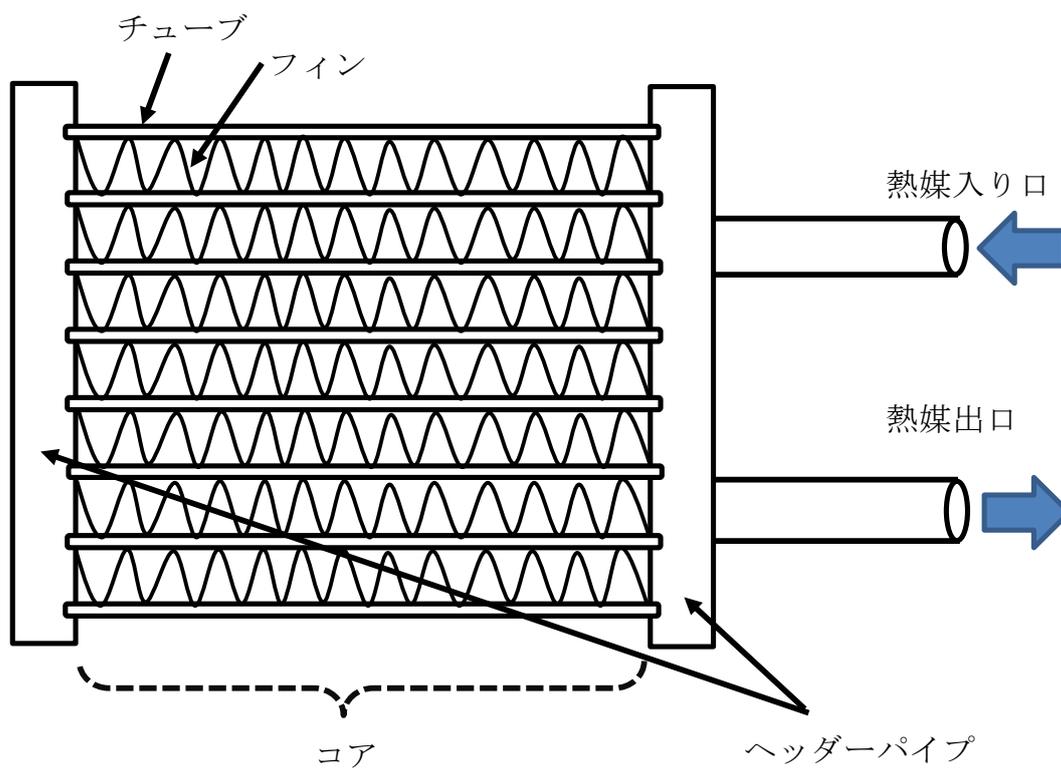


図 2.1.3(a) 熱交換器の概略図

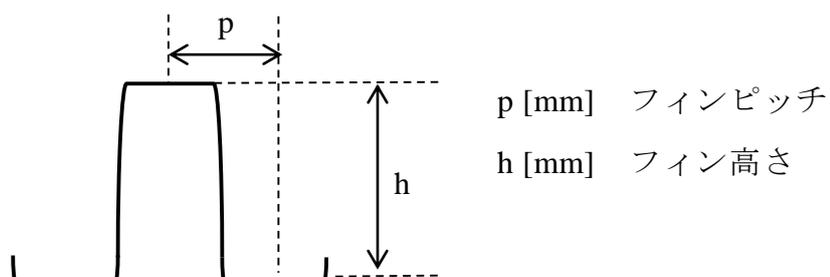
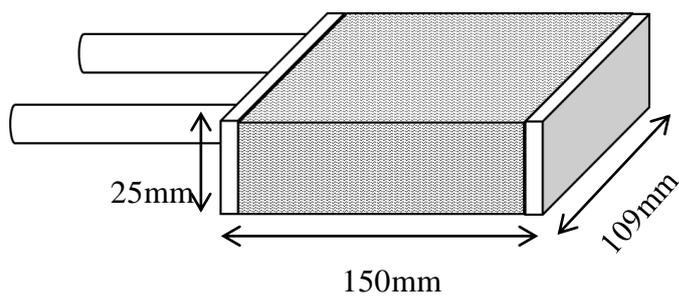
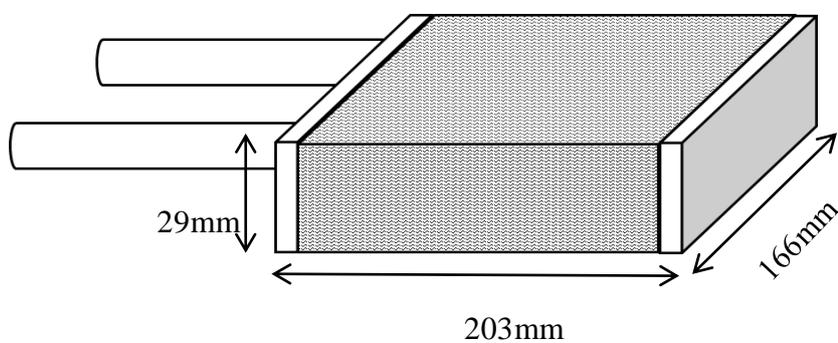


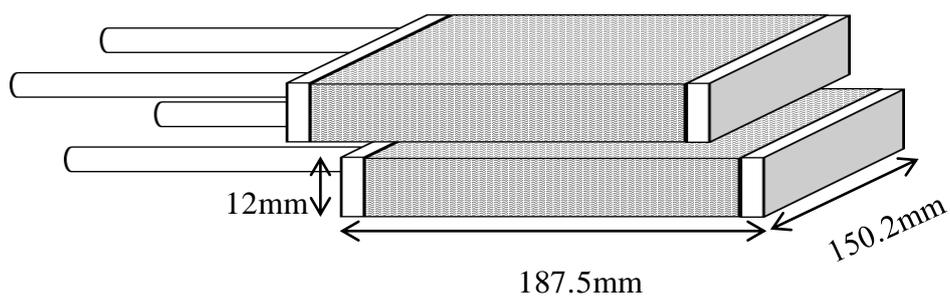
図 2.1.3(b) 熱交換器のフィンの概略図



(1) 厚み：25mm（先行研究で使用）

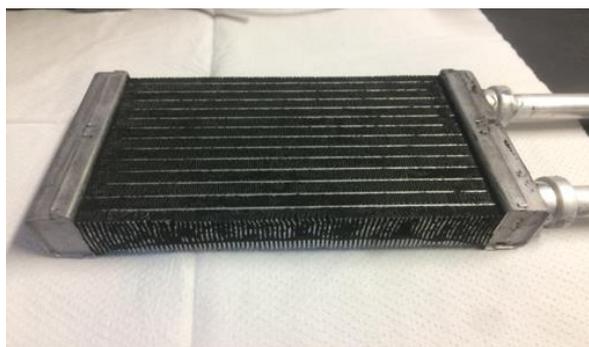


(2) 厚み：29mm



(c) 厚み：12mm×2

図 2.1.3(c) それぞれの熱交換器の外見上の概略図



(1) 厚み：25mm（先行研究で使用）



(2) 厚み：29mm



(c) 厚み：12mm×2

図 2.1.3(d) それぞれの熱交換器の写真

表 2.1.3 熱交換器の詳細

			25mm	29mm	12mm×2
吸着材	塗布液混合比 率 [重量%]	活性炭	100	100	100
		エタノール	470	430	430
		バインダ	50	50	50
	吸着材重量[g]		45.5	113.3	75.3
	担持部容積[cm ³]		292	701	252×2 = 504
	吸着材担持密度[g/cm ³]		0.156	0.164	0.145
チューブ	高さ[mm]		25	29	12
	幅[mm]		1.58	1.5	1.42
	長さ[mm]		150	203	187.5
	本数[本]		13	24	20×2 = 40
	等価直径[mm]		1.86	1.88	0.67
フィン	ピッチ[mm]		0.9	0.95	1.0
	高さ[mm]		6.3	5.28	5.83
	板厚[mm]		0.08	0.07	0.07
コアサイズ (幅×奥行×厚み) [mm]			150×109×25	203×166× 29	187.5×150.2 ×12
コア表面積 (幅×奥行×2) [cm ²]			327	674	563×2 = 1126
容積 (コア and ヘッダーパイプ) [L]			0.514	1.166	0.420×2 = 0.840
熱容量 (吸着材除く) [J/K]			307.7	493.7	244.6×2 = 489.2

上記の表の 12mm×2 の吸着材はエタノールの際の値である。R134a のときは、重量が 84.3g、担持密度が 0.163g/cm³である。それ以外の数値はすべて同じである。

図 2.1.3(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、そのフィン間に粉体状の活性炭が充填されている（図 2.1.3(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 2.1.3 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。

熱交換器の(3)厚み：12mm×2 については、熱交換器の外見上の表面積を増大するために薄く 2 枚重ねとなっている。

以降は、それぞれの熱交換器を 25mm, 29mm, 12mm×2 と表記する。

先行研究で使用した熱交換器は 25mm である。

R134a を使用した実験では、12mm×2 の熱交換器を使用した。熱交換器のボディはエタノールのとおり同じだが、活性炭の充填量および担持密度が異なっている。

2.2 実験手順および実験条件

エタノールおよび R134a の吸着における熱量測定実験，および装置が周囲の環境と熱交換を行うことを考慮し，損失熱量測定実験を行った．ここでは，その実験の手順および実験条件を述べる．

なお，エタノールを使用した実験と R134a を使用した実験は，どちらも同様の手順をふみ行った．

2.2.1 エタノールおよび R134a 吸着における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．そのため先述したとおり，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，凝縮器によって役割が変わる．そのため，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. 吸着器側の恒温循環装置の温度を実験条件の排熱温度に設定する．凝縮器側の恒温循環装置の温度を実験条件の環境温度に設定する．両方の恒温循環装置の温度が定常に達した後，バルブ V3 を開け，冷媒の脱着を開始する．
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，吸着器側の恒温循環装置の温度を凝縮器側と同じ環境温度に設定する．
3. 吸着器の温度，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，バルブ V3 を開けてエタノールの吸着を開始する．
5. 吸着開始 1 時間後，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，記録を終了しバルブ V3 を閉める．吸着開始から 1 時間経過しても吸着開始前と状態が異なる場合は，吸着開始前と状態が等しくなるまで放置し，定常に達したら記録を終了してバルブ V3 を閉める．
6. 手順 1～5 を温度条件，不凍液流量を変えて繰り返す．

2.2.2 損失熱量測定実験の手順

実験手順を以下に示す．なお，この実験は 2.2.1 の手順 3 の後に同時に行う．

1. 両容器の温度，圧力，不凍液流量が一定になったのを確認した後，記録を開始する．
2. 記録開始から 10 分間以上放置した後，2.2.1 の手順 4 を行う．
3. 手順 1，2 を温度条件，不凍液流量を変えて繰り返す．

2.2.3 実験条件

表 2.2.3 に実験条件を示す．

本実験では脱着過程において，吸着器の温度は 60°C ， 70°C ， 80°C で，凝縮器の温度は 0°C ， 5°C ， 15°C ， 25°C の 4 条件で行う．吸着過程において，吸着器と蒸発器の温度はともに凝縮器と同じ温度で行う．

25mm および 29mm の熱交換器を用いた実験では，脱着過程の吸着器温度は 80°C だけで行った．

また，それぞれの熱交換器はそれ自体の容積，不凍液の流路の本数，高さ，幅，長さが異なるため，不凍液流量が同じでも不凍液の流れの様相が異なる．よって不凍液の流れの相似性を考慮するために，先行実験の不凍液の各流量におけるレイノルズ数を求め，その値と等しくなるように本実験における流量を設定した．なお，レイノルズ数の計算の詳細は後述する．

R134 を用いた実験は，12mm×2 の熱交換器を使用したため，実験条件は 12mm×2 と同じである．

表 2.2.3 実験条件

脱着過程	吸着器温度 [°C]	60, 70, 80			
	凝縮器温度 [°C]	0	5	15	25
吸着過程	吸着器温度 [°C]	0	5	15	25
	蒸発器温度 [°C]				
不凍液流量[L/min]		25mm	1, 2		
		29mm	1, 2.16, 4.32		
		12mm × 2	1, 1.25, 2.5		

2.3 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吸着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，および先述したレイノルズ数の計算方法を述べる．

2.3.1 実験データの記録方法

2.2 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．

2.3.2 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．

$$\dot{Q}_{ad,exp} = \dot{m}_{ad} c_{ad} (T_{ad,out} - T_{ad,in}) \quad (2.1)$$

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．

$$\dot{m}_{ad} = \rho_{ad} \dot{V}_{ad} / 60 \quad (2.2)$$

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．

$$c_{ad} = 0.004892735 \overline{T_{ad}} + 3.372991282 \quad (2.3)$$

$$\rho_{ad} = -0.000002 \overline{T_{ad}}^2 - 0.0004 \overline{T_{ad}} + 1.0848 \quad (2.4)$$

$$\overline{T_{ad}} = \frac{1}{2} (T_{ad,out} + T_{ad,in}) \quad (2.5)$$

2.3.3 環境と装置の間における熱交換量の算出方法

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。

$$\dot{Q}_{ad,loss} = \dot{m}_{ad} c_{ad} (T_{ad,out} - T_{ad,in}) \quad (2.6)$$

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。

$$Q_{ad,loss} = \int_1^{600} \dot{Q}_{ad,loss} dt \quad (2.7)$$

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。

$$\bar{Q}_{ad,loss} = Q_{ad,loss} / 600 \quad (2.8)$$

2.3.4 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。

$$\dot{Q}_{ad} = \dot{Q}_{ad,exp} - \bar{Q}_{ad,loss} \quad (2.9)$$

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。

$$Q_{ad} = \int_1^t \dot{Q}_{ad} dt \quad (2.10)$$

ここで、 t [sec]は吸着開始からの経過時間を表す。

2.3.5 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。

$$\dot{Q}_{ad,ave} = \frac{1}{t} Q_{ad} \quad (2.11)$$

2.3.6 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)^[3,4]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。

$$W_{th} = W_0 \exp \left\{ - \left(\frac{R(T+273.14)}{E} \ln \frac{P_s}{P} \right)^n \right\} \quad (2.12)$$

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。エタノールは Ibrahim ら^[10]によって明らかにされた値、R134a は川上、金光ら^[11,12]によって明らかにされた値を使用する。

表 2.3.6 D-A 式のパラメータ

	エタノール	R134a
W_0 [kg/kg]	1.2	1.99
E [kJ/kg]	139.5	72.6
n [-]	1.8	1.28

脱着過程において、脱着平衡のとき P_s [Pa]は吸着器温度、つまり排熱温度のエタノールの飽和蒸気圧、 P [Pa]は凝縮器温度におけるエタノールの飽和蒸気圧を示す。

吸着過程において、吸着平衡のとき吸着器と蒸発器はともに同じ温度であるため、 P_s [Pa]と P [Pa]は同じ値を示す。

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 ΔW_{th} [kg/kg]、吸着過程における平衡吸着量を $W_{th,ad}$ [kg/kg]、脱着過程における平衡吸着量を $W_{th,de}$ [kg/kg]とすると、有効吸着量は以下の式で求められる。

$$\Delta W_{th} = W_{th,ad} - W_{th,de} \quad (2.13)$$

ΔW_{th} [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 $\Delta W'_{th}$ [kg]とすると、以下の式から求められる。

$$\Delta W'_{th} = m_{ca} \Delta W_{th} \quad (2.14)$$

ここで、 m_{ca} [kg]は活性炭の質量である。

2.3.7 吸着熱および脱着熱の理論値の計算方法

宮崎^[13]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 Clausius-Clapeyron の式より算出した。Clausius-Clapeyron の式より、等量吸着熱 h_{st} [kJ/kg]を以下の式で表すことができる。

$$h_{st} = -R \frac{d \ln P}{d(1/T)} \quad (2.15)$$

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

$$h_{fg} = -R \frac{d \ln P_0}{d(1/T)} \quad (2.16)$$

式(2.12)に示す D-A 式より、以下の式が導出される。

$$\ln P = \ln P_0 - \frac{E}{RT} \left[\ln \left(\frac{W_0}{W} \right) \right]^{1/n} \quad (2.17)$$

式(2.17)の両辺を $1/T$ で微分し、式(2.15)および式(2.16)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。

$$h_{st} = h_{fg} + E \left[\ln \left(\frac{W_0}{W} \right) \right]^{1/n} \quad (2.18)$$

式(2.18)の両辺に式(2.14)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。

2.3.8 COP（成績係数）の算出方法

COP とは、投入熱量に対する吸着発熱量の比であり、以下の式より算出される。

$$COP = \frac{Q_{ad}}{Q_{de} + Q_{sh}} \quad (2.19)$$

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 2.5.7 から求めることができる。顕熱 Q_{sh} [J] は以下の式で表される。

$$Q_{sh} = (M_s C_s + M_b C_b + HC_{hex}) (T_{de} - T_{ad}) + \frac{W_{th,ad} + W_{th,de}}{2} \quad (2.20)$$

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^[14] らによって明らかにされた値を、エタノールの比熱は一般社団法人アルコール協会が公表している値^[15] を、R134a の比熱は AGC 株式会社が公表している値^[16] を参考にした。

2.3.9 レイノルズ数の計算方法

先述したとおり、それぞれの熱交換器でレイノルズ数をそろえる計算を以下に示す。レイノルズ数 Re [-]^[17] は、不凍液の密度 ρ [kg/m³]、流れの平均速度 U [m/s]、代表長さ d [m]、不凍液の粘度 μ [Pa・s] を用いて、以下の式で求められる。

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (2.21)$$

式(2.21)は、不凍液の体積流量を F [m³/s]、チューブの高さを h_i [m]、チューブの幅を w_i [m]、チューブの等価直径を d_i [m] を用いて、以下の式で表される。

$$Re = \frac{\rho F d_i}{\mu h_i w_i} \quad (2.22)$$

LLC の密度、粘度はそれぞれ 1071 [kg/m³]、 2.797×10^{-3} [Pa・s] である。チューブの高さ、幅、等価直径は 2.3 の表 2.2 の値を用いる。また、熱交換器内の片道のチューブ 1 本あた

りの流量を考慮するため、12mm×2 熱交換器では片道の本数 $10 \times 2 = 20$ で除して計算し、29mm 熱交換器では片道の本数 12 で流量を除して計算した。25mm 熱交換器においては、チューブが全体で 13 本のため、片道の本数が 6 本のとくと 7 本のとときのレイノルズ数を導出し、その平均値を 25mm 熱交換器のレイノルズ数とした。

先行実験の不凍液の流量をもとにレイノルズ数を導出し、それをもとに 29mm 熱交換器および 12mm×2 熱交換器に相当する流量を導出したものが、以下の表 2.5 になる。また、先行実験と同じ流量における 29mm 熱交換器および 12mm×2 熱交換器のレイノルズ数も記載する。

表 2.3.9 チューブレイノルズ数とそれに相当する不凍液流量

不凍液流量 [L/min]	25mm				1	2
	29mm		1	2	2.16	4.32
	12mm×2	1	1.25	2.5	2.7	
レイノルズ数[-]		28.77	35.99	71.97	83.71	167.43

第3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，5つの小章に分けて活性炭を用いた蓄熱システムの性能評価を行う．

3.1 エタノール-12mm×2 熱交換器の実験結果および考察

この小章では，エタノールと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，活性炭とエタノール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．

3.1.1 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1.25L/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3.1.1-1aは凝縮温度が5°Cのときの脱着温度による比較，図3.1.1-1b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．

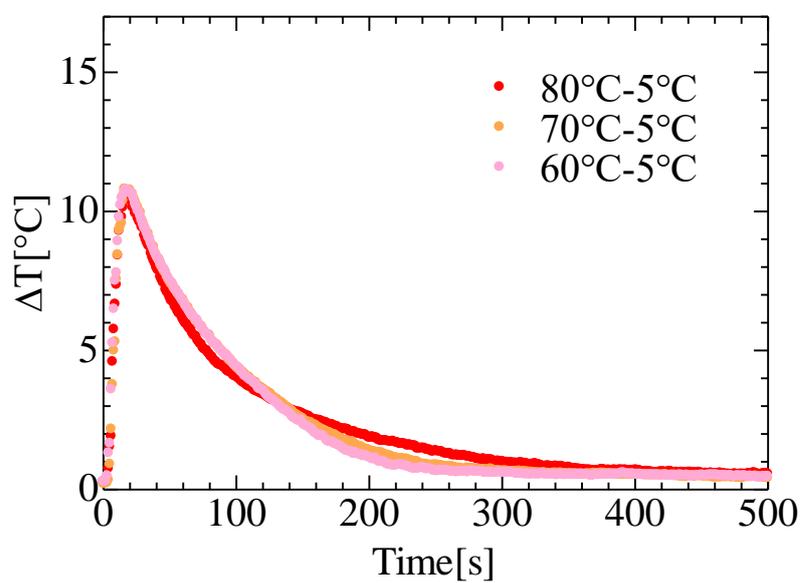


図 3.1.1-1a 凝縮温度が 5°C のときの，熱交換器の出入口の温度差の経時変化

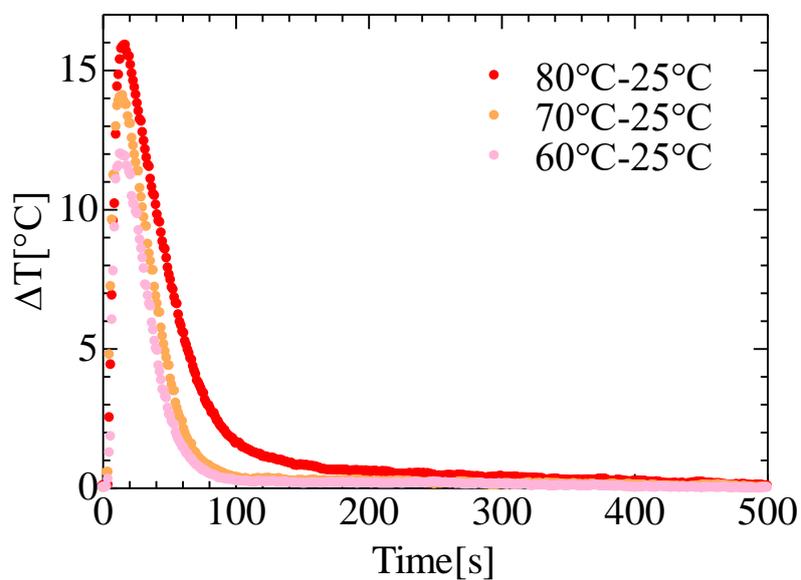


図 3.1.1-1b 凝縮温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口の温度差の経時変化

図 3.1.1-1a からわかる通り，各条件において温度差のピーク値や時間変化に大きな差は見られない．一方で，図 3.1.1-1b 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り，時間が経過してもその大小関係は変わらないことがわかる．

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．各温度条件における，活性炭 MSC-30 とエタノールの有効吸着量を記載したものが，表 3.1.1-1 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 3.1.1-2 のようになる．

表 3.1.1-1 活性炭 MSC-30 とエタノールの有効吸着量

脱着過程		吸着過程		有効吸着量 [g]
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	
60	0	0	0	77.63
70				83.43
80				86.83
60	5	5	5	72.37
70				79.98
80				84.75
60	15	15	15	58.60
70				69.98
80				78.09
60	25	25	25	41.73
70				55.99
80				67.55

表 3.1.1-2 活性炭 MSC-30 とエタノール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	0	0	0	1
70				1.07
80				1.12
60	5	5	5	1
70				1.11
80				1.17
60	15	15	15	1
70				1.19
80				1.33
60	25	25	25	1
70				1.34
80				1.62

表 3.1.1-2 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 3.1.1-2a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較，図 3.1.1-2b 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 3.1.1-1 と図 3.1.1-2 はほとんど同じような関係になることがわかる．

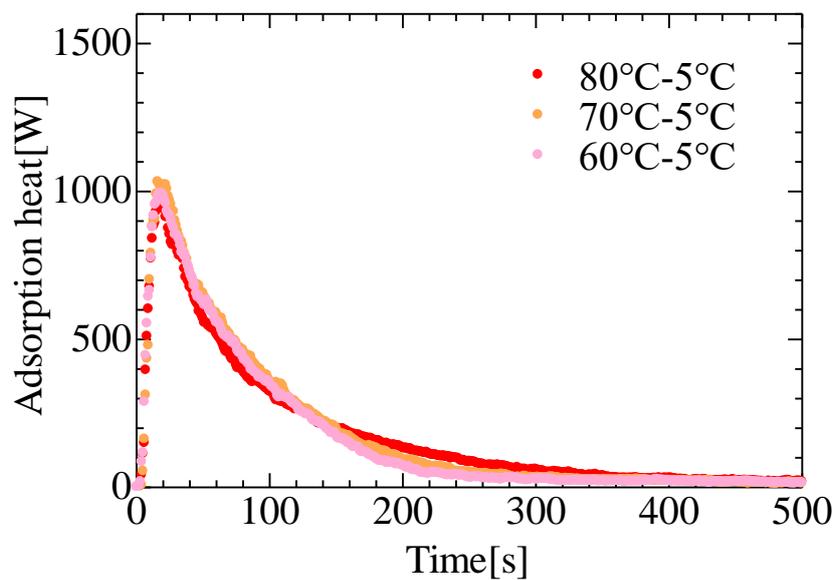


図 3.1.1-2a 凝縮温度が 5°C のときの、単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

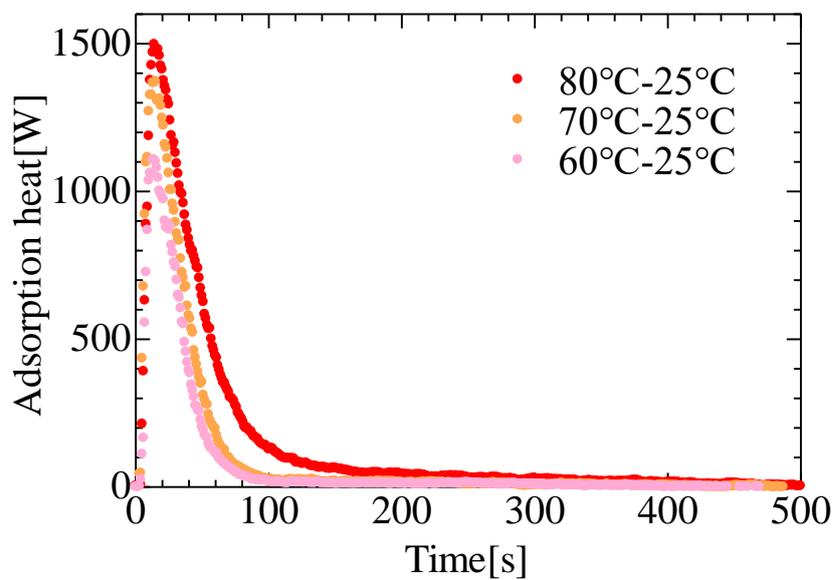


図 3.1.1-2b 凝縮温度が 25°C のときの、単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する。図 3.1.1-3a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較、図 3.1.1-3b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である。

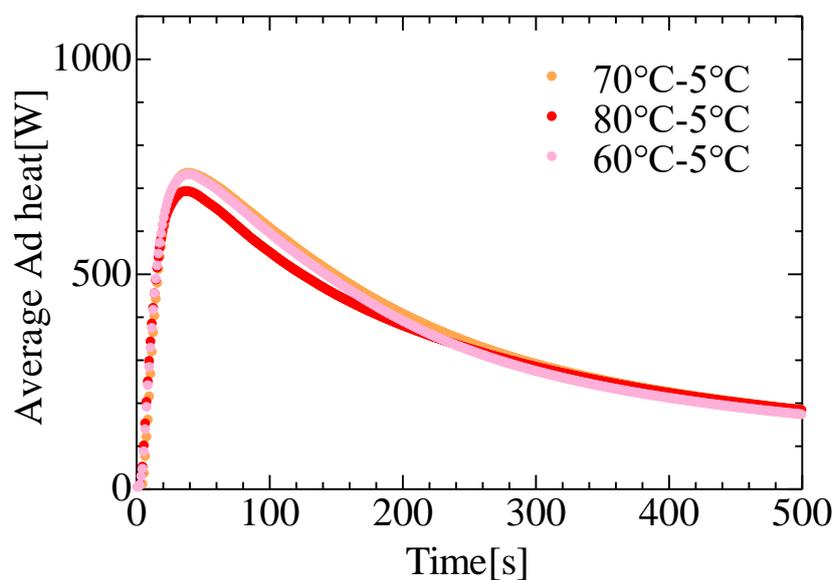


図 3.1.1-3a 凝縮温度が 5°C のときの、平均発熱量の経時変化

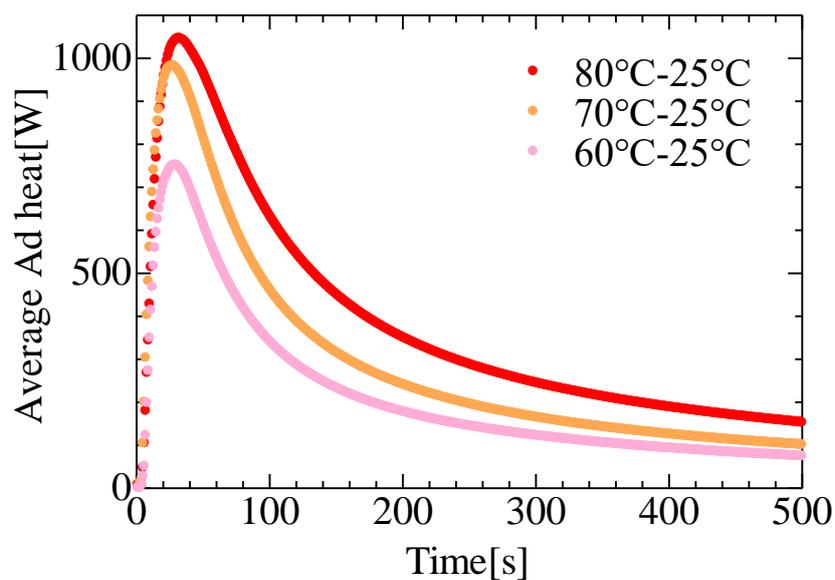


図 3.1.1-3b 凝縮温度が 25°C のときの、平均発熱量の経時変化

図 3.1.1-2 と図 3.1.1-3 を比較すると、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 3.1.1-4a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較、図 3.1.1-4b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である。

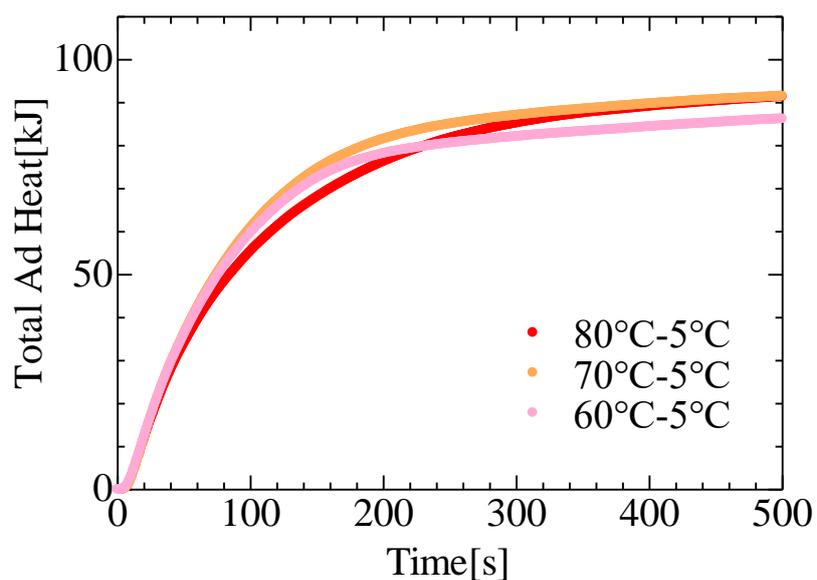


図 3.1.1-4a 凝縮温度が 5°C のときの、合計発熱量の経時変化

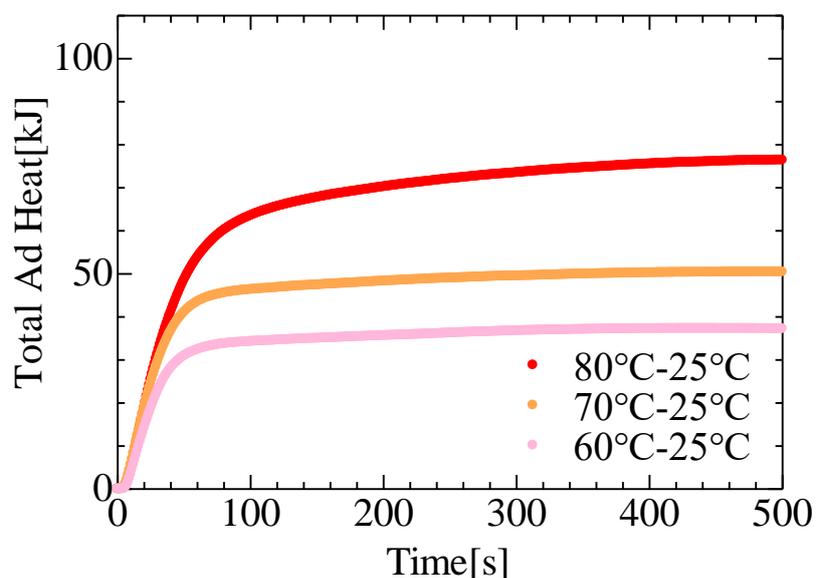


図 3.1.1-4b 凝縮温度が 25°C のときの、合計発熱量の経時変化

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っていることがわかる．これは，先述したように有効吸着量の比率が起因していると考えられる．また，図 3.1.1-3a および図 3.1.1-4a より，脱着温度が 80°C のときの発熱量が途中までほかの 2 つより小さいことがわかる．理論的には 80°C のときの発熱量が常にほかの 2 つより大きくなると考えられるが，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．

3.1.2 蒸発温度が異なるときの性能の比較

ここでは，脱着温度が同じで脱着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 $1.25\text{L}/\text{min}$ 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 3.1.2-1a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 3.1.2-1b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

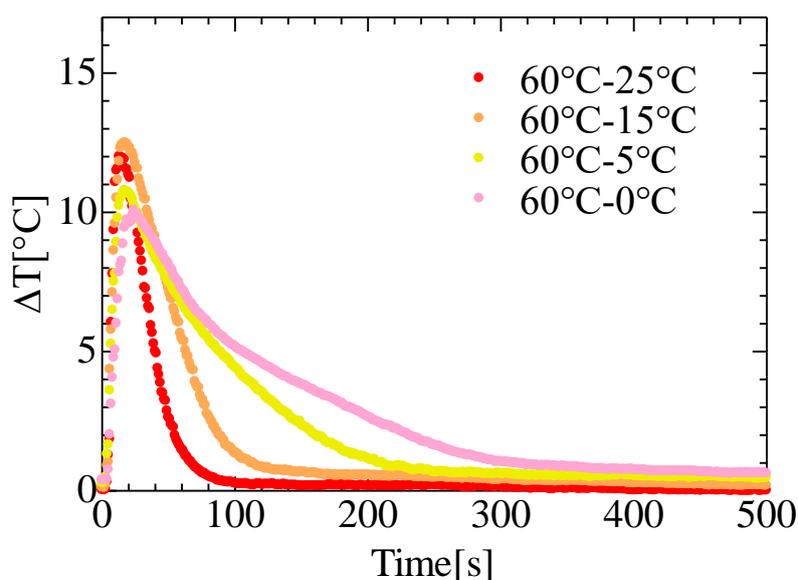


図 3.1.2-1a 脱着温度が 60°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

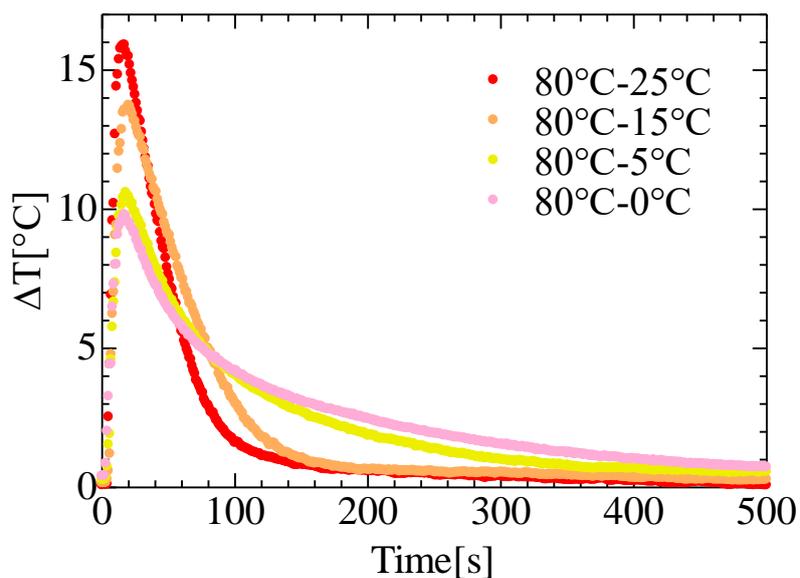


図 3.1.2-1b 脱着温度が 80°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

図より，蒸発温度が高くなるほど，温度差のピーク値が大きくなり，急激に温度差が小さくなっていることがわかる．この原因としては，吸着直前の吸着器と蒸発器の圧力差の関係が考えられる．

図 3.1.2-2a～図 3.1.2-2d は，各蒸発温度における圧力の経時変化である．

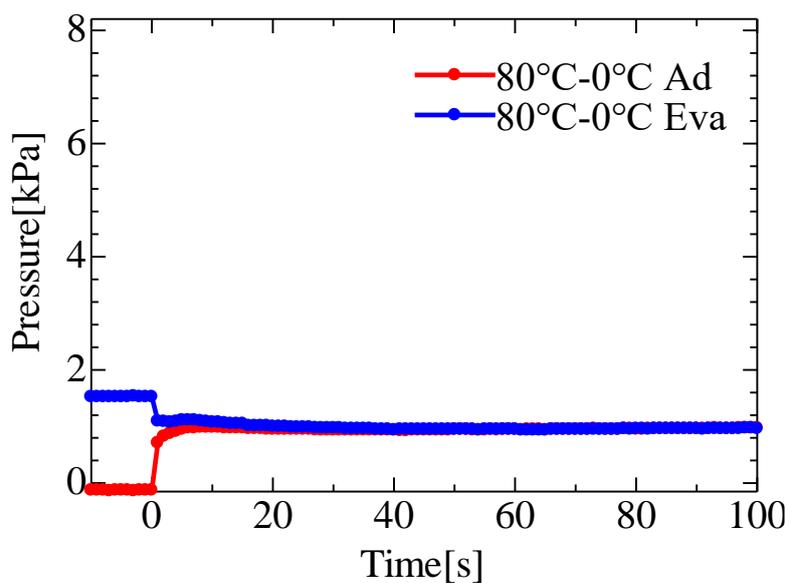


図 3.1.2-2a 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 0°C のときの，圧力の経時変化

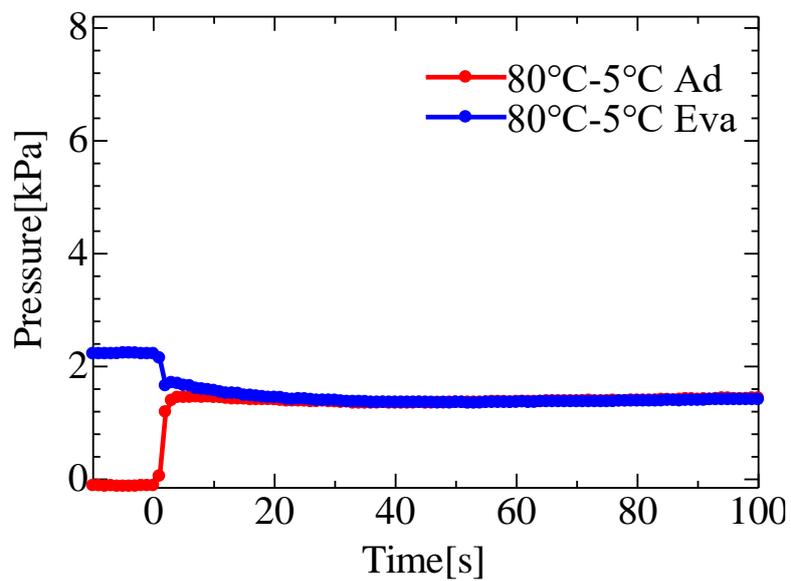


図 3.1.2-2b 脱着温度が 80°C, 蒸発温度が 5°C のときの, 圧力の経時変化

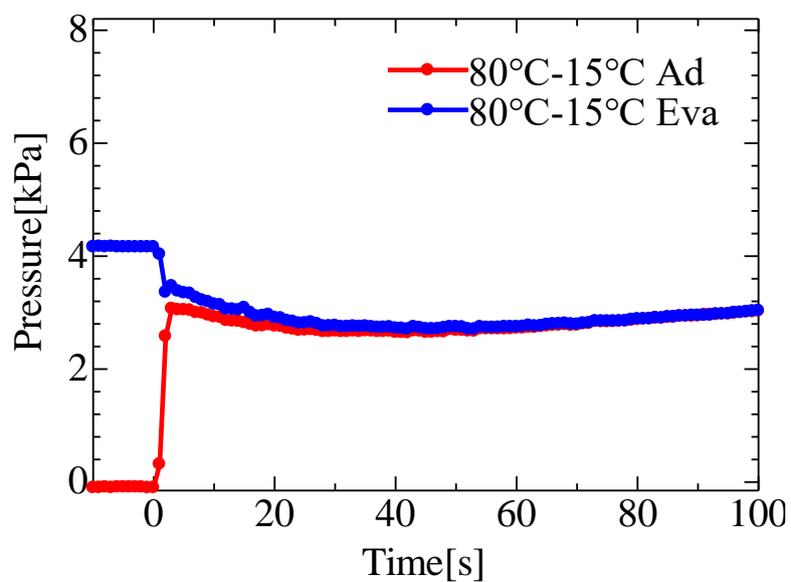


図 3.1.2-2c 脱着温度が 80°C, 蒸発温度が 15°C のときの, 圧力の経時変化

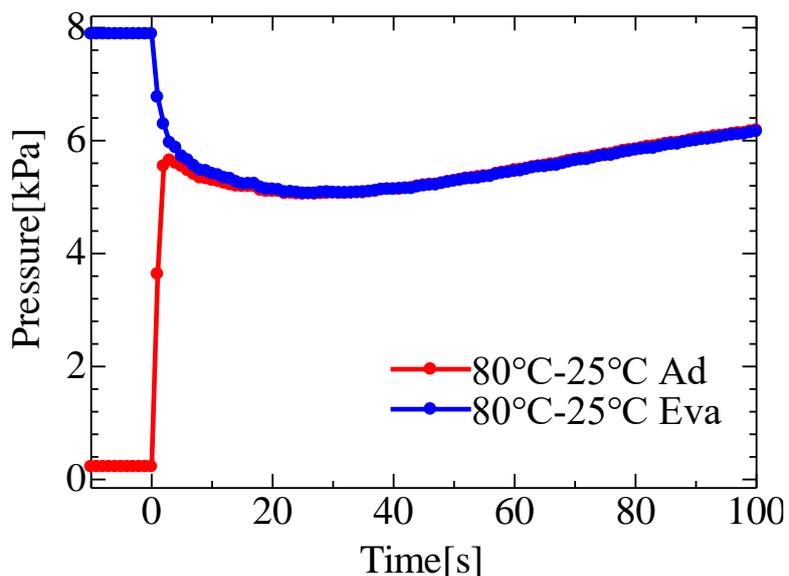


図 3.1.2-2d 脱着温度が 80°C、蒸発温度が 25°C のときの、圧力の経時変化

これらの図より、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。圧力差が大きくなるほど、吸着開始直後の液体エタノールの蒸発が急激に起こり、瞬間的に多くのエタノールが吸着するため、熱媒の温度差のピーク値が大きくなると考えられる。また、エタノールが一気に蒸発すれば、その後の蒸発量は急激に少なくなり吸着量も少なくなるため、出入口温度差も急激に小さくなると考えられる。

また、図より脱着温度が 60°C 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 3.1.2-1 に、各脱着温度において、凝縮温度が 25°C のときの有効吸着量を 1 としたときの、ほかの凝縮温度における有効吸着量の比を示す。

表 3.1.2-1 活性炭 MSC-30 とエタノール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	1.40
	5	5	5	1.73
	0	0	0	1.86
70	25	25	25	1
	15	15	15	1.25
	5	5	5	1.43
	0	0	0	1.49
80	25	25	25	1
	15	15	15	1.16
	5	5	5	1.25
	0	0	0	1.29

この表より、脱着温度が低くなるほど、有効吸着量の比率が大きくなっていることがわかる。蒸発温度が高くなるほど、吸着直前の圧力差は大きくなるが、同時に有効吸着量は小さくなる。有効吸着量の比率が大きくなれば、相対的に圧力差の影響が小さくなるため、脱着温度が 60°C のときの方が、80°C のときより、温度差のピーク値の差が小さくなったと考えられる。

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 3.1.1-3a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較、図 3.1.1-3b 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 3.1.2-1 と図 3.1.2-3 はほとんど同じような関係になることがわかる。

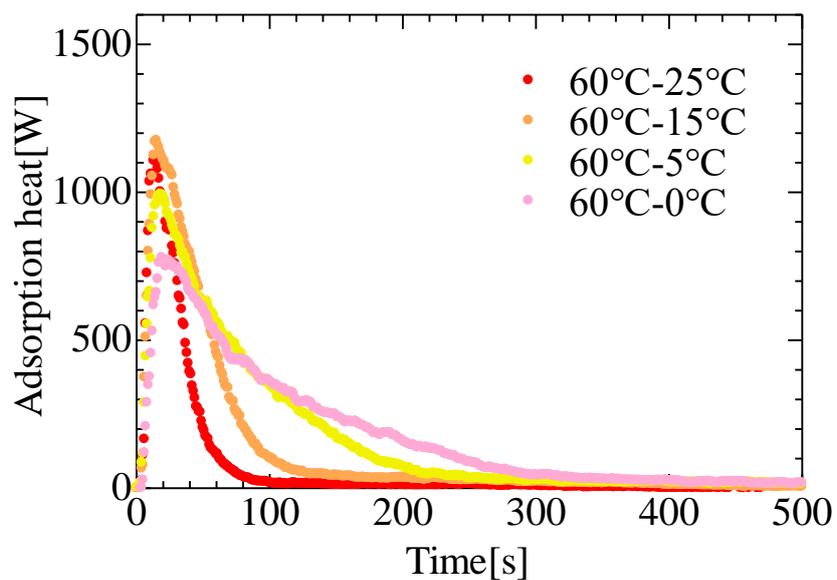


図 3.1.2-3a 脱着温度が 60°C のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

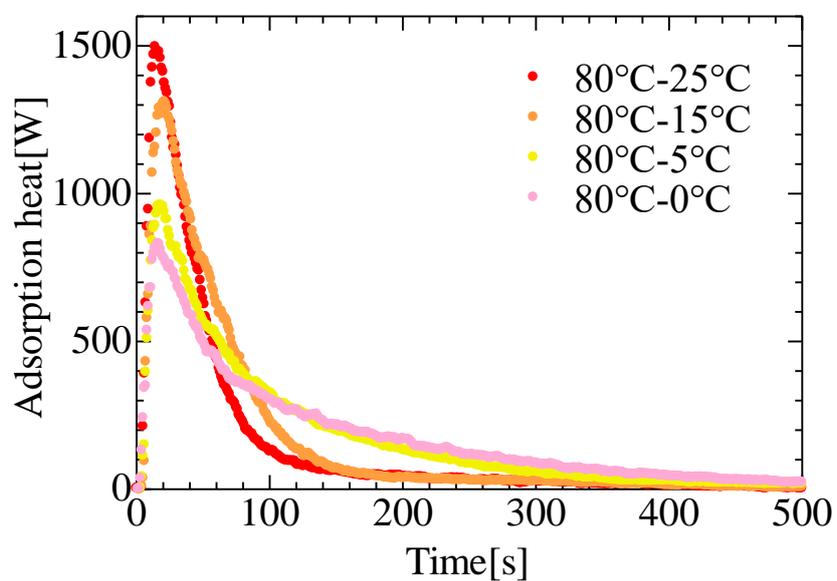


図 3.1.2-3b 脱着温度が 80°C のときの，単位時間当たりの吸着発熱量の経時変化

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する。

図 3.1.1-4a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 3.1.1-4b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である。

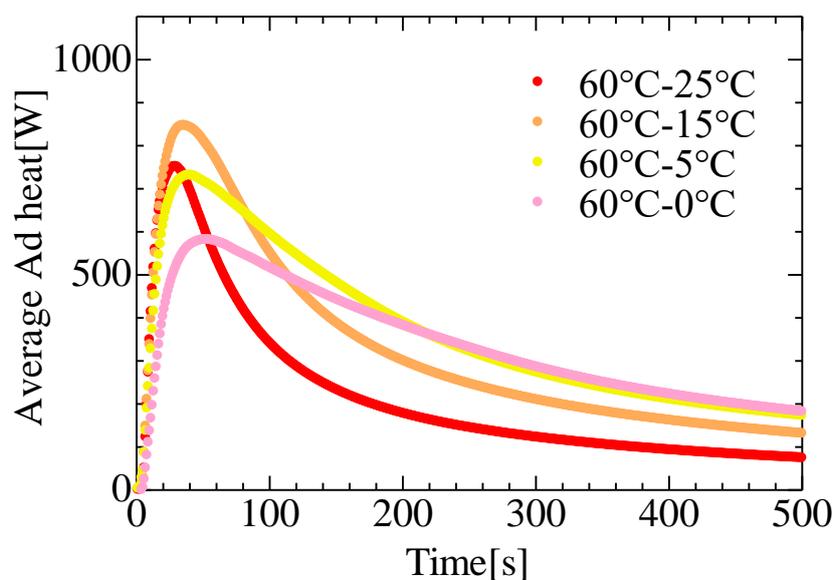


図 3.1.2-4a 脱着温度が 60°C のときの、平均発熱量の経時変化

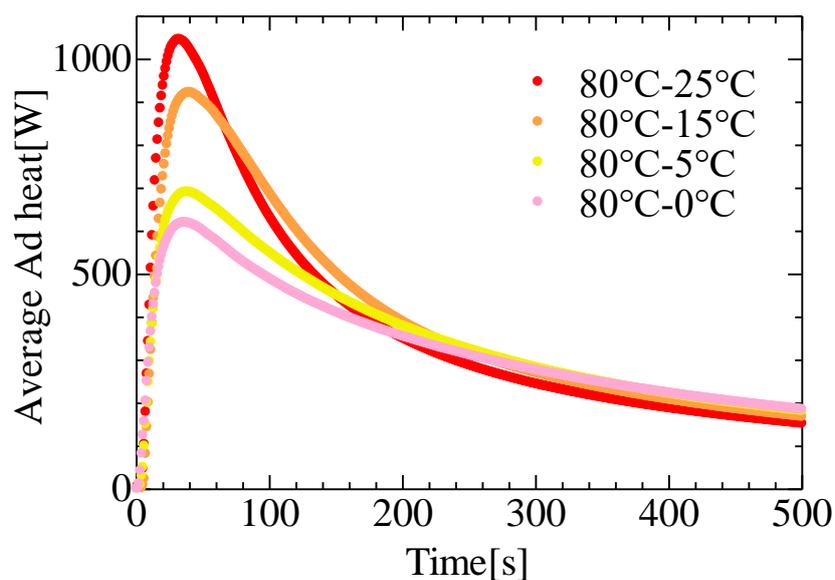


図 3.1.2-4b 脱着温度が 80°C のときの、平均発熱量の経時変化

図 3.1.2-4b より，蒸発温度が高くなるほど，平均発熱量のピーク値が大きくなるが，時間が経過すると途中でその最小関係が逆転していることがわかる．ピーク値については，先ほどの考察の通りだが，途中での大小関係の逆転については，凝縮温度が低くなるほど有効吸着量が大きくなるため，図 3.1.2-5b のように，最終的には合計発熱量の大小関係の逆転が生じると考えられる．

また図 3.1.2-4a より，蒸発温度が 15°C のときに最も平均発熱能力のピーク値が大きくなり， 25°C と 5°C のピーク値がほとんど同じであることがわかる．これは先ほど述べた有効吸着量の比率が関係すると考えられる．単位時間当たりの発熱量のピーク値と平均発熱能力のピーク値の大小関係は，必ずしも一致するとは限らないことがわかる．

最後に，合計発熱量の経時変化について考察する．

図 3.1.1-5a は脱着温度が 60°C のときの蒸発温度による比較，図 3.1.1-5b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

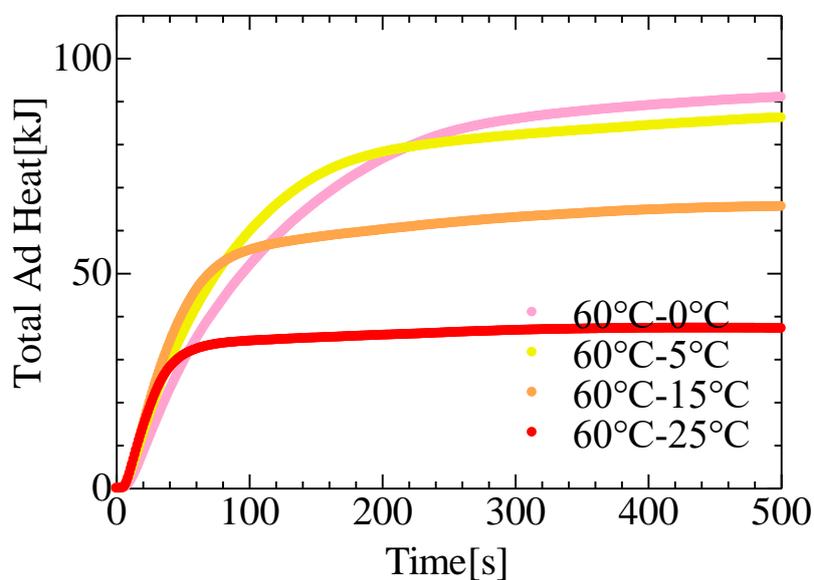


図 3.1.2-5a 脱着温度が 60°C のときの，合計発熱量の経時変化

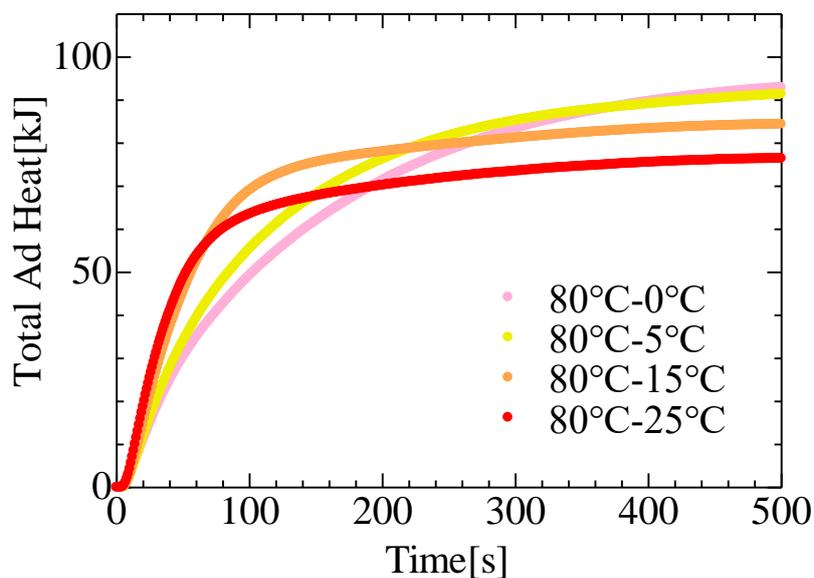


図 3.1.2-5b 脱着温度が 80°C のときの，合計発熱量の経時変化

図 3.1.2-5 より，蒸発温度が高くなるほど，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，蒸発温度が高くなるほど，吸着平衡に達する時間が早くなることがわかる．凝縮温度が高くなるほど有効吸着量が少なくなることや，吸着開始直後に多くのエタノールが吸着することに起因すると考えられる．

3.1.3 熱媒流量が異なるときの性能の比較

最後に，脱着温度および吸着温度が同じで，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．なお，すべての流量条件において，脱着温度は 80°C，吸着温度は 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 3.1.2-3 が，出入口温度差の経時変化である．

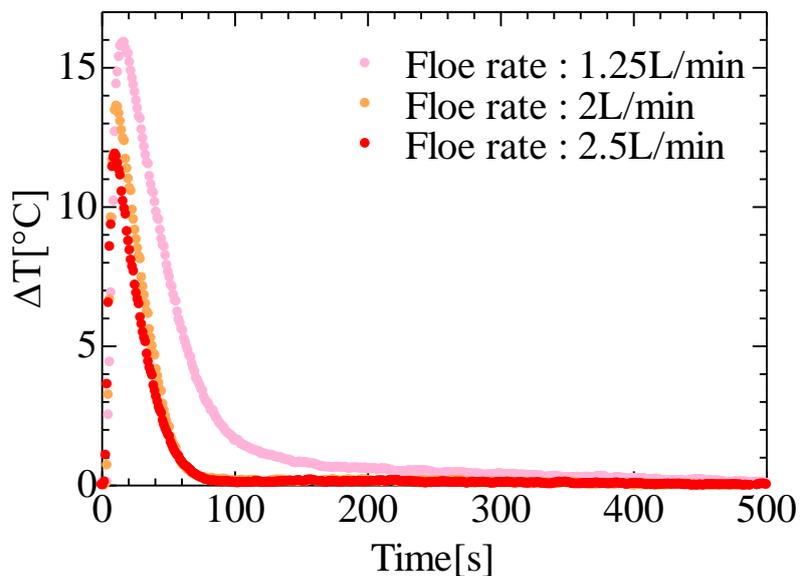


図 3.1.3-1 脱着温度が 80°C，吸着温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

この図より，流量が大きくなるほど，温度差のピーク値が小さくなり，温度差の低下が急激に起こっていることがわかる．流量が大きいと，一定量の熱媒が熱交換器の中を流れる時間も短くなるため，熱媒の温度があまり上昇しないまま熱交換器から出ていくと考えられる．よって，流量が大きくなると，温度が上昇しにく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 3.1.3-2 が，単位時間当たりの発熱量の経時変化である．

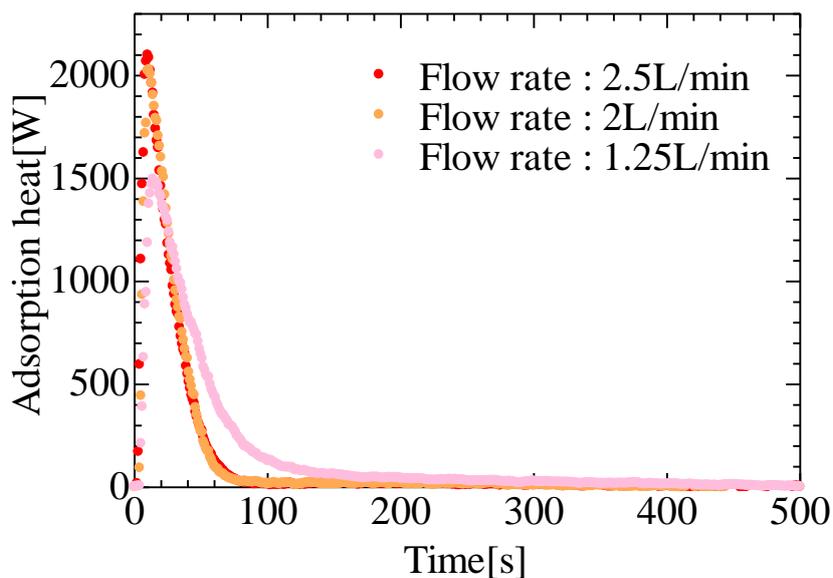


図 3.1.3-2 脱着温度が 80°C 、吸着温度が 25°C のときの、単位時間あたりの発熱量の経時変化

この図より、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、あまり温度が上昇せず吸着が促進されることに起因すると考えられる。

続く図 3.1.3-3 の平均発熱量についても同様のことが考えられる。

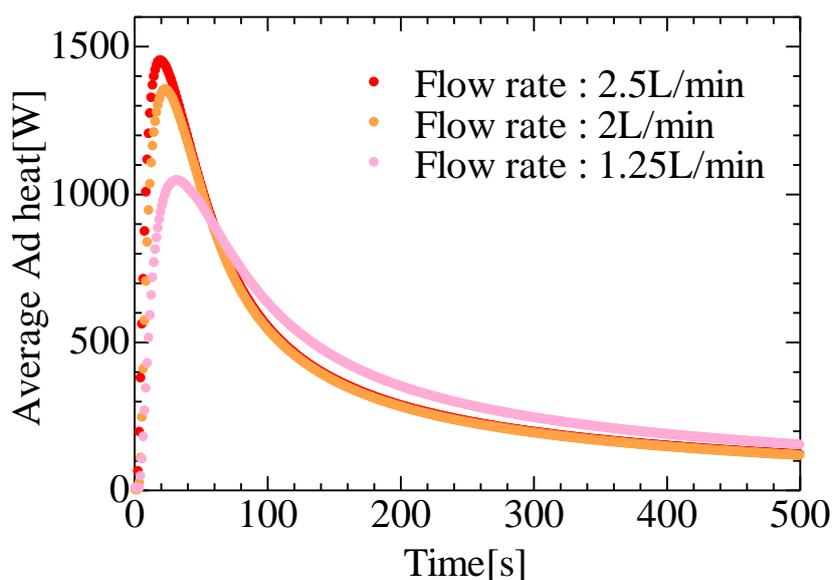


図 3.1.3-3 脱着温度が 80°C 、吸着温度が 25°C のときの、平均発熱量の経時変化

最後に、合計発熱量について考察する。

図 3.1.3-4 が、合計発熱量の経時変化である。

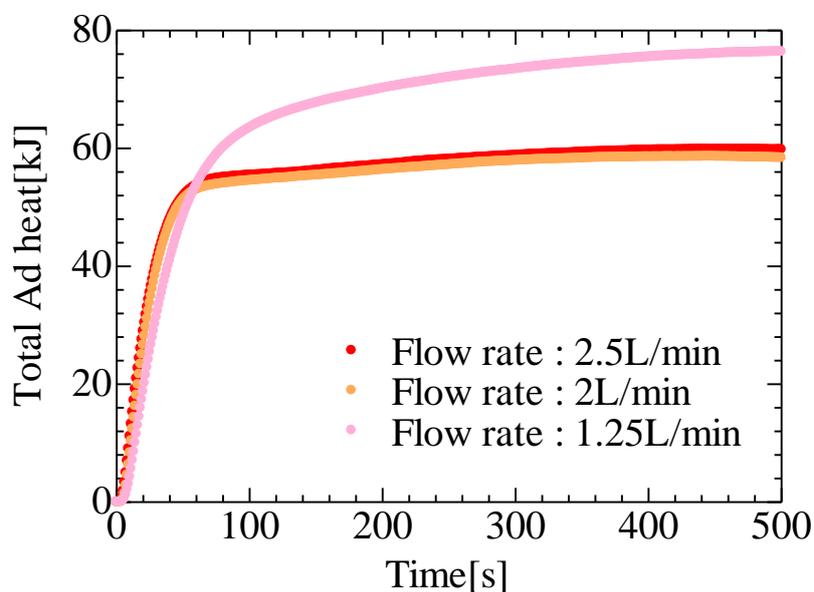


図 3.1.3-4 脱着温度が 80°C 、吸着温度が 25°C のときの、合計発熱量の経時変化

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。先述した通り、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。

また、流量が $1.25\text{L}/\text{min}$ のとき、時間が経過すると発熱量がほか 2 つより大きくなっていることがわかる。これも 3.1.1 の最後で述べたように、計測器の測定誤差や周囲の環境温度の変化による影響だと考えられる。

3.1.4 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 1.25L/min である。

表 3.1.4-1 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	0	0		10.1	24	779.2	19
	5	5		10.8	17	993.9	18
	15	15		12.5	17	1175.3	15
	25	25		12.0	13	1107.3	13
70	0	0		10.6	20	881.6	21
	5	5		10.8	16	1032.7	16
	15	15		14.7	15	1418.8	15
	25	25		14.1	15	1371.8	15
80	0	0		9.8	17	831.0	16
	5	5		10.6	18	962.3	18
	15	15		13.7	20	1311.1	21
	25	25		15.9	17	1497.3	14

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 3.1.4-2 まとめ②

脱着過程		吸着過程		最大 Wave	経過時間	500s 後の Q	理論 Q
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[W]	[s]	[kJ]	[kJ]
60	0	0		581.8	53	91.0	81.7
	5	5		731.1	39	86.2	74.8
	15	15		846.8	36	65.6	58.3
	25	25		751.5	29	37.2	39.9
70	0	0		641.2	41	98.0	89.2
	5	5		734.0	39	91.5	84.3
	15	15		1051.0	31	76.7	71.3
	25	25		982.9	27	50.4	54.8
80	0	0		620.3	37	92.9	93.8
	5	5		691.4	39	91.4	90.6
	15	15		922.7	40	84.4	81.1
	25	25		1046.4	32	76.4	67.7

最大 Wave は、平均発熱量のピーク値を表す。

500s 後の Q は、吸着開始から 500 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。(2.3.7 の計算方法を用いて導出)

表 3.1.4-3 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	0	0		0.776	0.697
	5	5		0.797	0.692
	15	15		0.754	0.670
	25	25		0.583	0.626
70	0	0		0.756	0.688
	5	5		0.748	0.689
	15	15		0.732	0.680
	25	25		0.601	0.653
80	0	0		0.667	0.674
	5	5		0.685	0.679
	15	15		0.707	0.679
	25	25		0.752	0.666

COP の算出において、脱着に必要な熱量は 2.3.7 および 2.3.8 から算出した。
理論 COP は、表 3.1.4-2 の理論 Q を上記の脱着に必要な熱量で除した値である。

3.2 エタノールを用いたときの、29mm 熱交換器と 12mm×2 熱交換器の比較

この小章では、エタノールを用いたときの 29mm 熱交換器と 12mm×2 熱交換器の実験結果を比較することで、熱交換器の形状が吸着蓄熱システムの性能にどのような影響を与えるのかを、解析・考察する。なお、ここで用いるデータはすべて脱着温度が 80°C、熱媒流量は 29mm 熱交換器のとき 1L/min、12mm×2 熱交換器のとき 1.25L/min である。流量が違うのは、2.4.3 で述べた通り熱交換器の相似性を考慮したためである。

以下に、2つの熱交換器の代表的なスペックを記載する。

表 3.2 熱交換器の代表的なスペック

	29mm	12mm×2
吸着材の重量[g]	113.3	75.3
コア表面積[cm ²]	674	1126
吸着材の重量あたりの 表面積[cm ² /g]	5.95	14.95
容積[L]	1.166	0.840
吸着材担持密度[g/cm ³]	0.164	0.145

3.2.1 熱交換器の出入口温度差の比較

ここでは、熱交換器の中を流れる熱媒について、熱交換器の出入口温度差について考察する。図 3.2.1-a は吸着温度が 5°C のときの出入口温度差の経時変化、図 3.2.1-b は吸着温度が 25°C のときの出入口温度差の経時変化である。

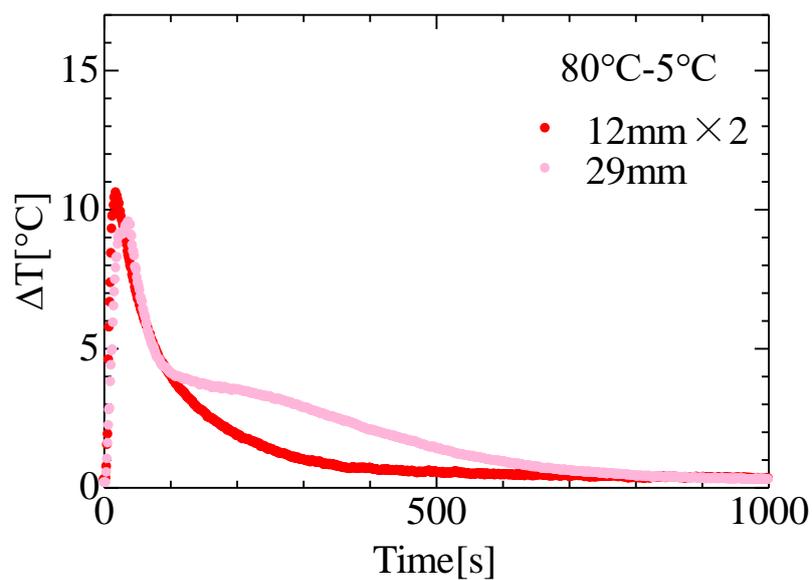


図 3.2.1-a 吸着温度が 5°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

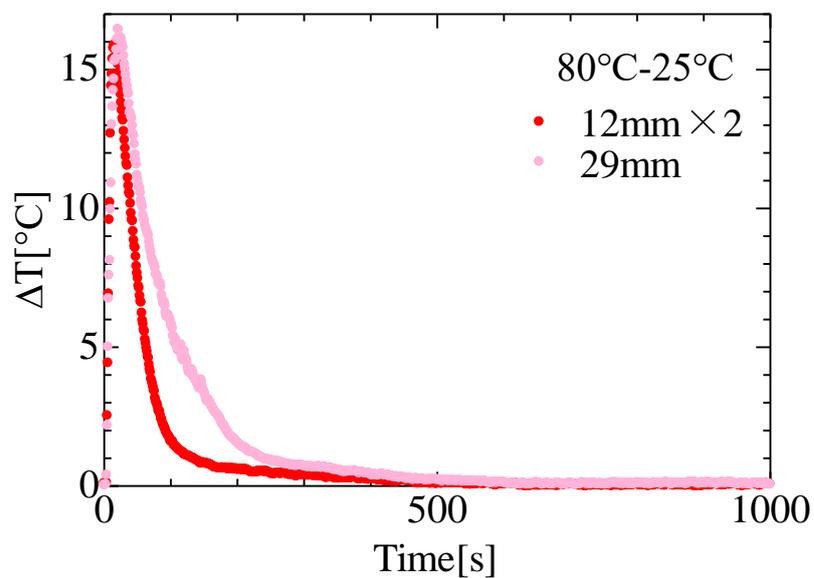


図 3.2.1-b 吸着温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

図より，両熱交換器において温度差のピーク値に大きな差はなく，12mm×2 熱交換器の方が温度差の低下が急激であることがわかる．

ピーク値がほとんど同じことについては，熱交換器の表面積，活性炭の充填量，熱媒流量の大小関係が考えられる．吸着現象は吸着材の表面で生じる．吸着開始直後は，吸着器と蒸発器の圧力差により，急激な吸着現象が生じる．そのため，表面積の大きい熱交換器の方が，瞬間的な吸着量が大きくなると考えられる．しかし，12mm×2 熱交換器の活性炭の充填量は29mm に比べて小さい．また，12mm×2 の方が熱媒の流量が大きく，3.1.3 で述べたように，熱媒の流量が大きい方が出入口温度差のピーク値が小さいことが示されている．これらのことから総括して，出入口温度差のピーク値にあまり差が出なかったと考えられる．

12mm×2 熱交換器の方が温度差の低下が急激であることは，29mm に比べて，吸着開始直後に吸着現象が急激に起こったためだと考えられる．

3.2.2 単位時間当たりの発熱量の比較

ここでは，単位時間当たりの発熱量の経時変化について考察する．2つの熱交換器を比較する際，通常が発熱量と，吸着材 1g あたりの発熱量の2通りで比較する．

通常が発熱量について，図 3.2.2-1a は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化，図 3.2.2-1b は吸着温度が 25°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である．

吸着材 1g 当たりの発熱量について，図 3.2.2-2a は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化，図 3.2.2-2b は吸着温度が 25°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である．

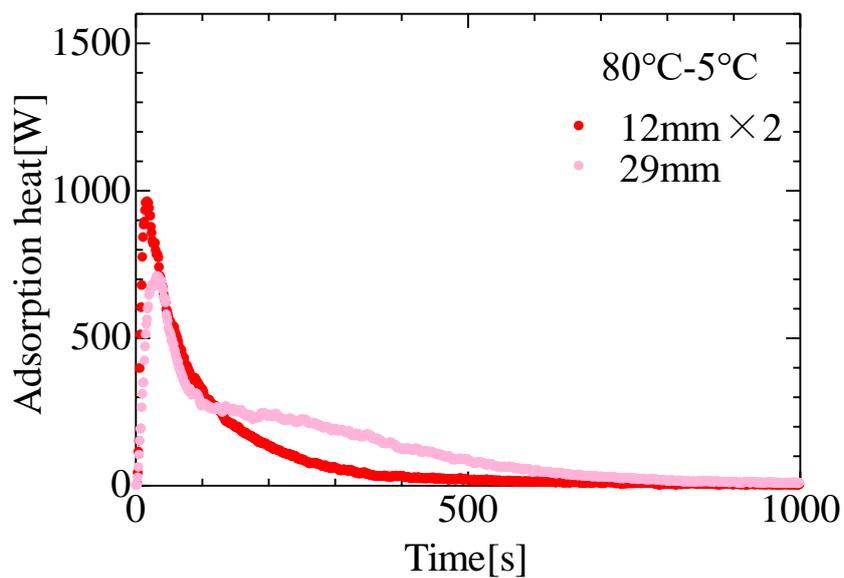


図 3.2.2-1a 吸着温度が 5°C のときの，単位時間当たりの発熱量の経時変化

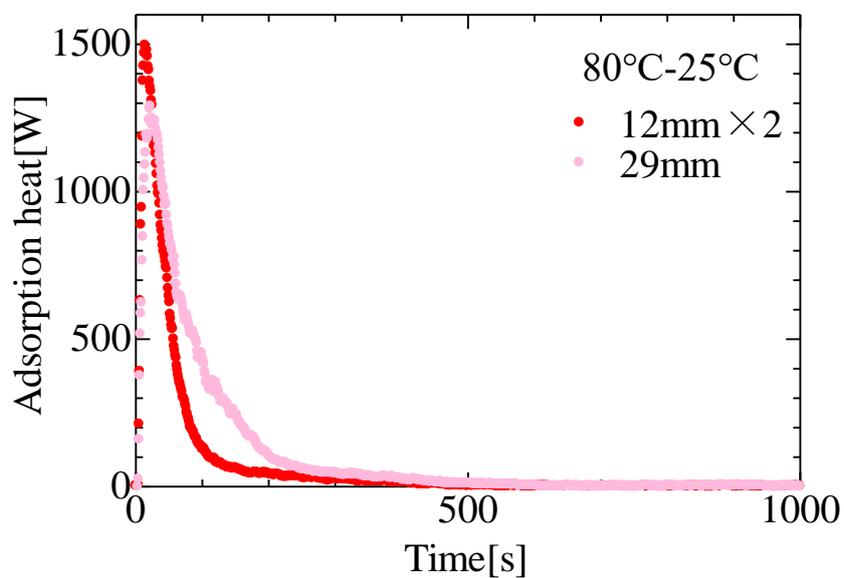


図 3.2.2-1b 吸着温度が 25°C のときの，単位時間当たりの発熱量の経時変化

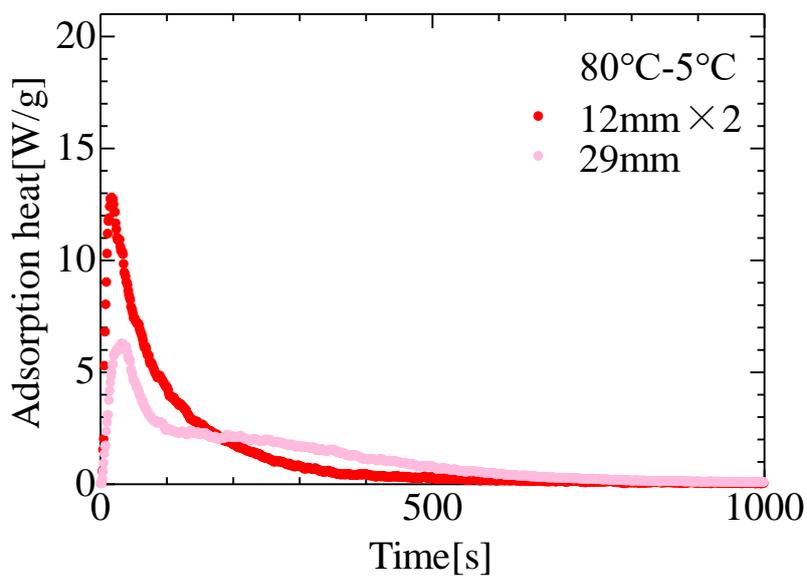


図 3.2.2-2a 吸着温度が 5°C のときの、単位時間当たりの発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

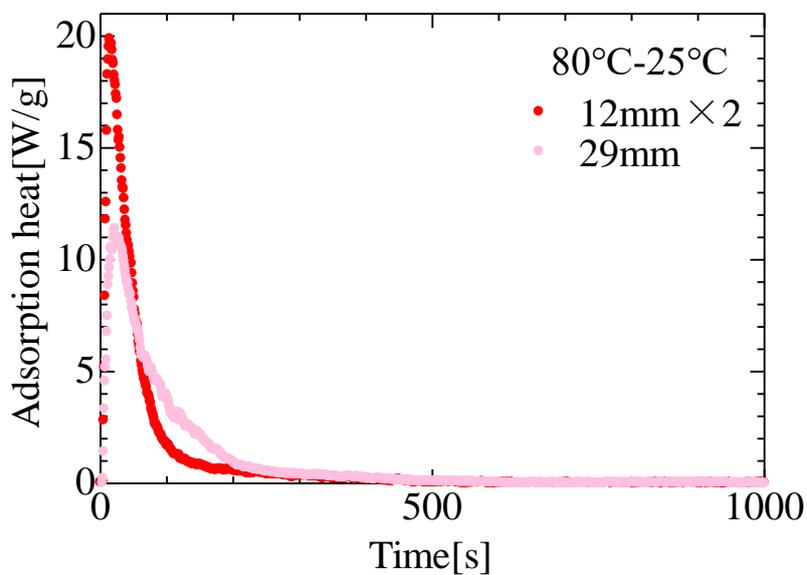


図 3.2.2-2b 吸着温度が 25°C のときの、単位時間当たりの発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

まずは、通常の発熱量について考察する。図 3.2.2-1 より、12mm×2 熱交換器の方が発熱量のピーク値が大きく、発熱量の減少が急激であることがわかる。3.2.1 で示した通り熱交換器の出入口温度差のピーク値があまり変わらないことと、2つの熱交換器の熱媒流量の大小関係が原因と考えられる。3.1.3 で述べた通り、熱媒流量が大きい方が、熱媒が短時間で多くの熱量を回収できる。12mm×2 熱交換器の方が 29mm よりも熱媒流量が大きく、なおかつ2つの熱交換器に出入口温度差があまり見られないため、総括して 12mm×2 の方が発熱量のピーク値が大きくなったと考えられる。

続いて、吸着材 1g 当たりの発熱量について考察する。図 3.2.2-2 より、12mm×2 熱交換器は、29mm に比べて発熱量のピーク値がおよそ 2 倍となることがわかる。吸着材 1g 当たりの表面積は、29mm が $5.95\text{cm}^2/\text{g}$ 、12mm×2 が $14.95\text{cm}^2/\text{g}$ と、12mm×2 は 29mm よりおよそ 2.5 倍大きい。つまり、吸着材の重量が同じなら、熱交換器の表面積が大きくなるほど、ピーク値が大きくなり、発熱量の低下が急激になることがわかる。

ここから、瞬間的に多くの熱量を得るには熱交換器の表面積を大きくし、逆に長時間熱を得続けるには表面積を小さくすることが有効であると考えられる。

3.2.3 平均発熱量の比較

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する。ここでも、通常の発熱量と吸着材 1g 当たりの発熱量で比較する。

通常の発熱量について、図 3.2.3-1a は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.2.3-1b は吸着温度が 25°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

吸着材 1g 当たりの発熱量について、図 3.2.3-2a は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.2.3-2b は吸着温度が 25°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

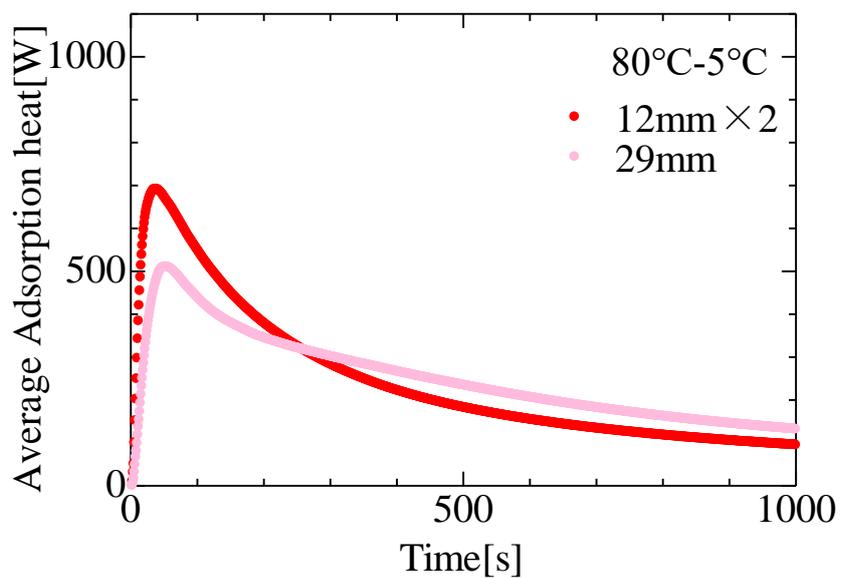


図 3.2.3-1a 吸着温度が 5°C のときの，平均発熱量の経時変化

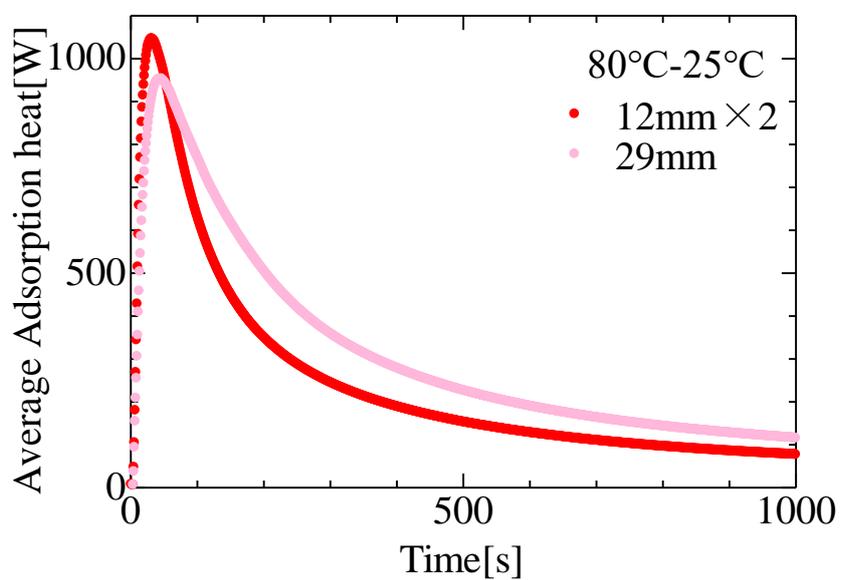


図 3.2.3-1b 吸着温度が 25°C のときの，平均発熱量の経時変化

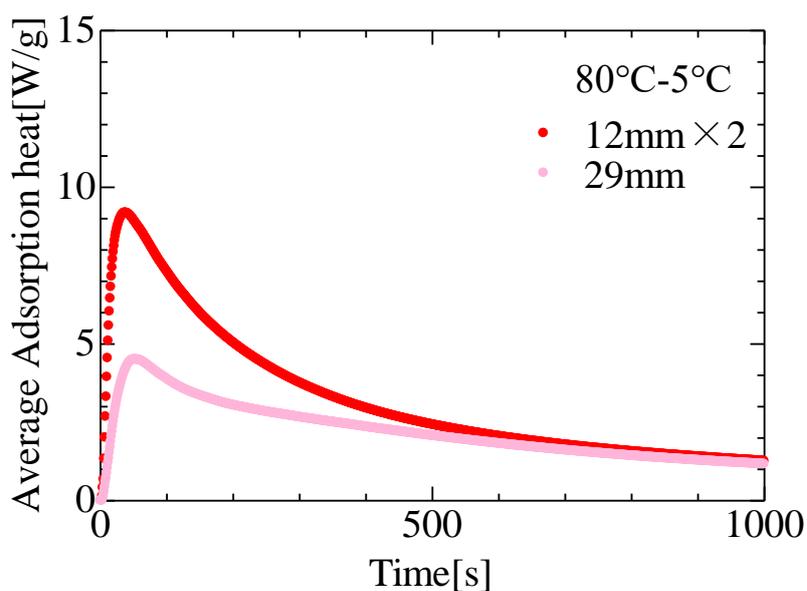


図 3.2.3-2a 吸着温度が 5°C のときの，平均発熱量（吸着材 1g あたり）の経時変化

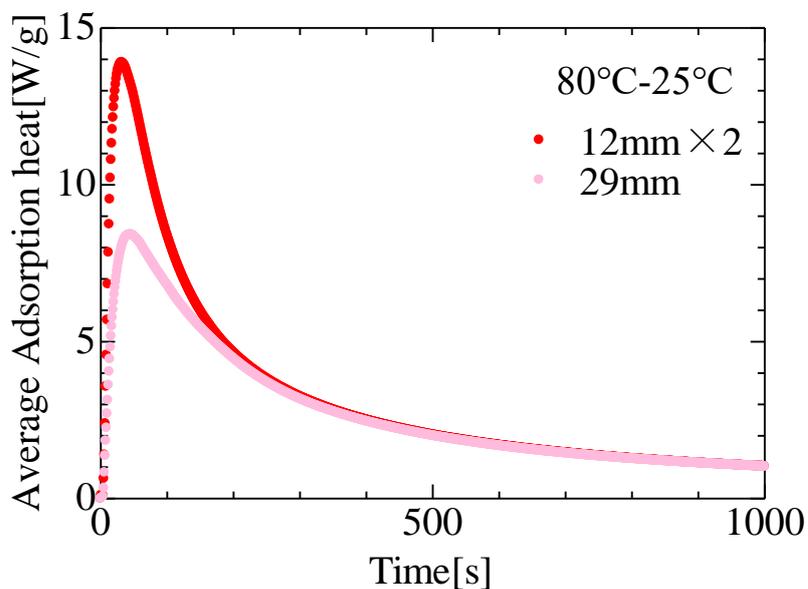


図 3.2.3-2b 吸着温度が 25°C のときの，平均発熱量（吸着材 1g あたり）の経時変化

まずは，通常発熱量について考察する．図より， $12\text{mm}\times 2$ 熱交換器の方が発熱量のピーク値が大きく，時間の経過とともに途中で発熱量の大小関係が逆転していることがわかる． 29mm 熱交換器の方が吸着材の充填量が大きいためだと考えられる．

続いて、吸着材 1g 当たりの発熱量について考察する。図より、12mm×2 熱交換器の方が発熱量のピーク値が大きく、時間の経過とともに発熱量が同値になっていることがわかる。ここから、平均的な発熱能力という観点では、吸着材 1g 当たりの表面積が大きくなるほど、システムの性能が向上すると考えられる。

3.2.4 合計発熱量の比較

最後に、合計発熱量の経時変化について考察する。ここでも、通常発熱量と吸着材 1g 当たりの発熱量で比較する。

通常発熱量について、図 3.2.4-1a は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.2.4-1b は吸着温度が 25°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

吸着材 1g 当たりの発熱量について、図 3.2.4-2a は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.2.4-2b は吸着温度が 25°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

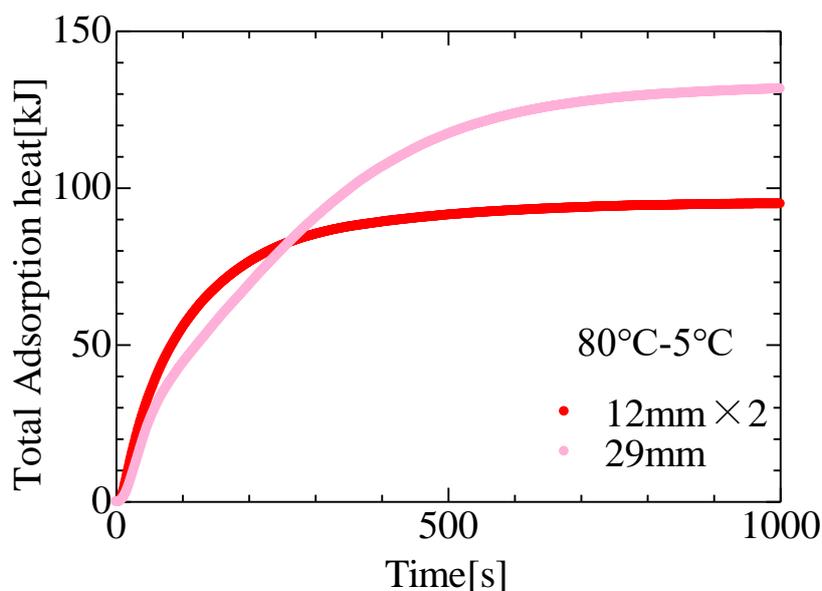


図 3.2.4-1a 吸着温度が 5°C のときの、合計発熱量の経時変化

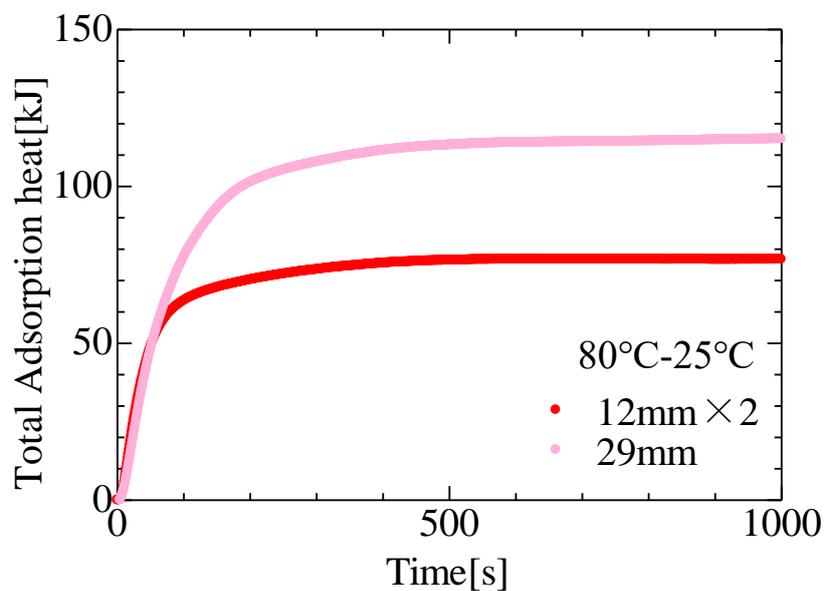


図 3.2.4-1b 吸着温度が 25°C のときの，合計発熱量の経時変化

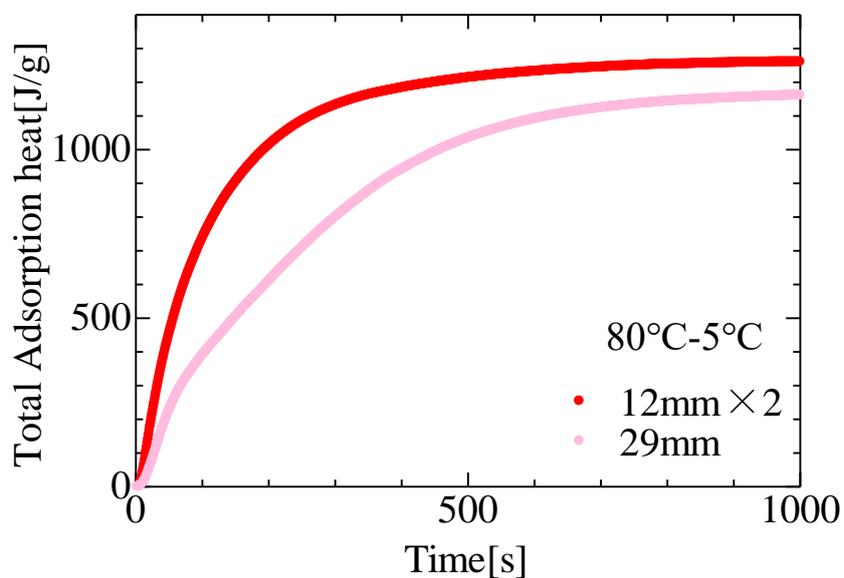


図 3.2.4-2a 吸着温度が 5°C のときの，合計発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

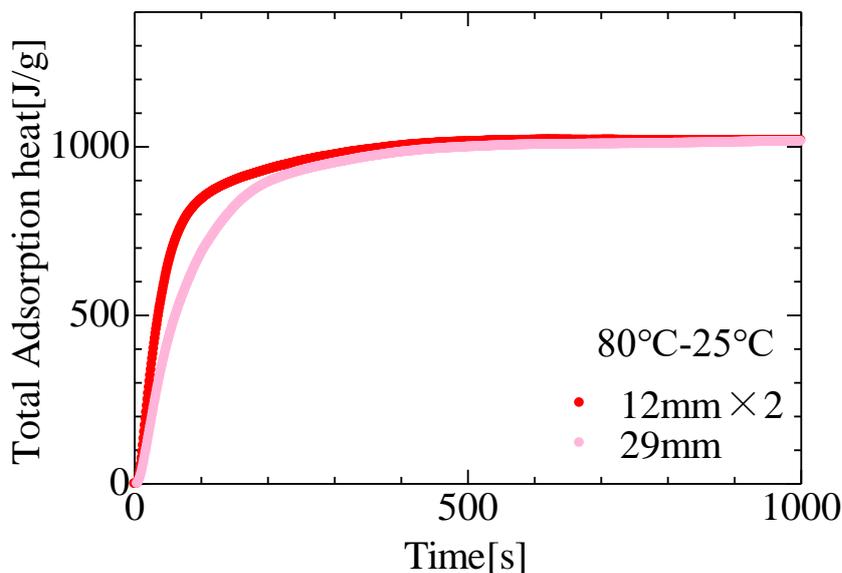


図 3.2.4-2b 吸着温度が 25°C のときの，合計発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

図より，12mm×2 熱交換器の方が 29mm よりも，早い時間で合計発熱量の変化の度合い（接戦の傾き）が小さくなっている．つまり，12mm×2 の方が，吸着平衡に達する時間が早いことがわかる．

この原因として，主に 3 つのことが考えられる．

まず 1 つ目として，3.2.1 や 3.2.2 で述べたように，表面積の大きい熱交換器の方が，吸着開始直後に瞬間的に多くのエタノールが吸着し，残りの吸着量がより少なくなったことが考えられる．

2 つ目としては，29mm 熱交換器の厚みが大きいことが考えられる．吸着開始直後に，エタノールは熱交換器の表面の活性炭に吸着し，その後は熱交換器の厚み方向の中心部に向かう形で徐々に吸着していく．29mm 熱交換器は 12mm×2 に比べて厚みが大きく，エタノールが厚み方向の中心部に届くまでにより多くの時間を要するため，吸着平衡に達するまでの時間が長くなったと考えられる．

3 つ目としては，吸着材の担持密度が考えられる．29mm 熱交換器の吸着材担持密度は 0.164[g/cm³]で，12mm×2 は 0.145[g/cm³]である．12mm×2 熱交換器の担持密度の方が小さく，エタノールの吸着が阻害されにくかったと考えられる．

3.2.5 まとめ

最後に、実験結果をまとめた表を記載する。なお、全条件で脱着温度は 80°C、熱媒の流量は 29mm 熱交換器が 1L/min, 12mm×2 が 1.25L/min である。

表 3.2.5-1 まとめ①

吸着温度	熱交換器	最大 ΔT	経過時間	最大 W	1g あたり	経過時間
[°C]		[°C]	[s]	[W]	[W/g]	[s]
0	29mm	8.1	27	580.2	5.1	26
	12mm×2	9.8	17	831.0	11.0	16
5	29mm	9.6	37	708.6	6.3	34
	12mm×2	10.6	18	962.3	12.8	18
15	29mm	14.6	21	1128.0	10.0	21
	12mm×2	13.7	20	1311.1	17.4	21
25	29mm	16.5	21	1290.7	11.4	22
	12mm×2	15.9	17	1497.3	19.9	14

表 3.2.5-1 まとめ②

吸着温度	熱交換器	最大 Wave	1g あたり	経過時間
[°C]		[W]	[W/g]	[s]
0	29mm	400.4	3.5	68
	12mm×2	620.3	8.2	37
5	29mm	510.1	4.5	53
	12mm×2	691.4	9.2	39
15	29mm	727.4	6.4	41
	12mm×2	922.7	12.2	40
25	29mm	952.6	8.4	46
	12mm×2	1046.4	13.9	32

3.3 エタノールを用いたときの、25mm 熱交換器、29mm 熱交換器と 12mm×2 熱交換器の比較

この小章では、先行研究で使用していた 25mm 熱交換器の実験結果も含め、エタノールを用いた吸着蓄熱システムについて、熱交換器の形状がシステムの性能にどのような影響を与えるか、総合的に考察する。

なお、この小章では全ての実験条件において、脱着温度が 80°C、吸着温度が 25°C である。熱媒流量は、2.4.3 で述べた通り、熱交換器の相似性を考慮し、25mm 熱交換器が 1L/min、29mm 熱交換器が 2.16L/min、12mm×2 熱交換器が 2.7L/min である。

以下に、それぞれの熱交換器の代表的なスペックを記載する。

表 3.3 それぞれの熱交換器の代表的なスペック

	25mm	29mm	12mm×2
吸着材の重量[g]	45.5	113.3	75.3
コア表面積[cm ²]	327	674	1126
吸着材の重量あたりの表面積[cm ² /g]	7.19	5.95	14.95
容積[L]	0.514	1.166	0.840
吸着材担持密度 [g/cm ³]	0.156	0.164	0.145
レイノルズ数をそろえたときの熱媒流量[L/min]	1	2.16	2.7

3.3.1 熱交換器の出入口温度差の比較

ここでは、熱交換器の中を流れる熱媒について、熱交換器の出入口温度差について考察する。図 3.3.1 は、脱着温度が 80°C 、吸着温度が 25°C のときの、出入口温度差の経時変化である。

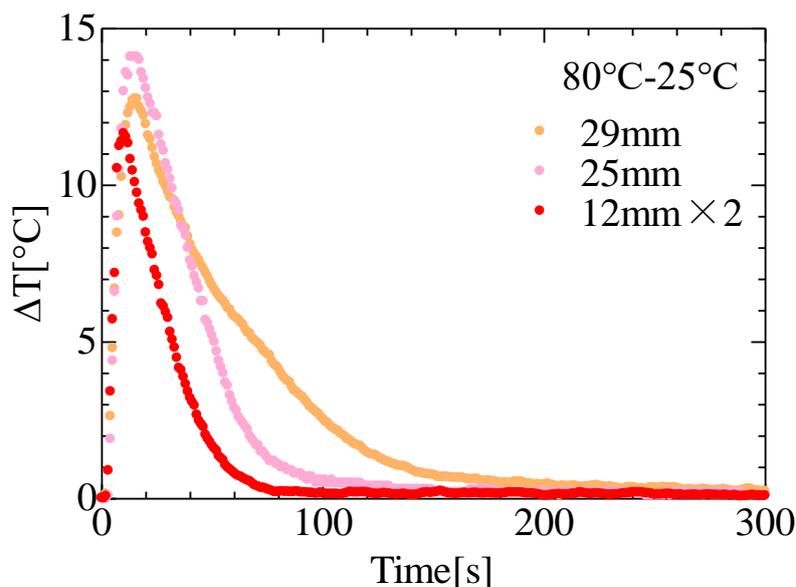


図 3.3.1 熱交換器の出入口温度差の経時変化

図より、出入口温度差のピーク値は、25mm 熱交換器、29mm、12mm×2 の順に大きいことがわかる。これは、熱媒の流量に原因があると考えられる。それぞれの熱交換器を用いたときの熱媒流量は、25mm 熱交換器が 1L/min、29mm が 2.16L/min、12mm×2 が 2.7L/min である。3.1.3 で述べたように、熱媒流量が大きい方が、出入口温度差のピーク値が小さくなる。吸着材の充填量は、多い順に 29mm 熱交換器、12mm×2、25mm であり、熱交換器の表面積は、大きい順に 12mm×2、29mm、25mm だが、相対的に熱媒流量の影響が大きかったと考えられる。

また、25mm 熱交換器と 12mm×2 の温度差の大小関係は変化してないが、25mm と 29mm では、途中で大小関係が逆転している。これは、29mm 熱交換器の吸着材充填量が 25mm の約 2.5 倍の量であり、かつ熱媒流量が 12mm×2 ほど大きくないことによるものだと考えられる。

3.3.2 蒸発器の仕様

ここでは、単位時間当たりの発熱量の経時変化について考察する。ここでも、3.2.2と同様に、通常発熱量と、吸着材 1g 当たりの発熱量の 2 通りで比較する。

図 3.3.2-1 は通常発熱量、図 3.3.2-2 は吸着材 1g 当たりの発熱量の経時変化である。

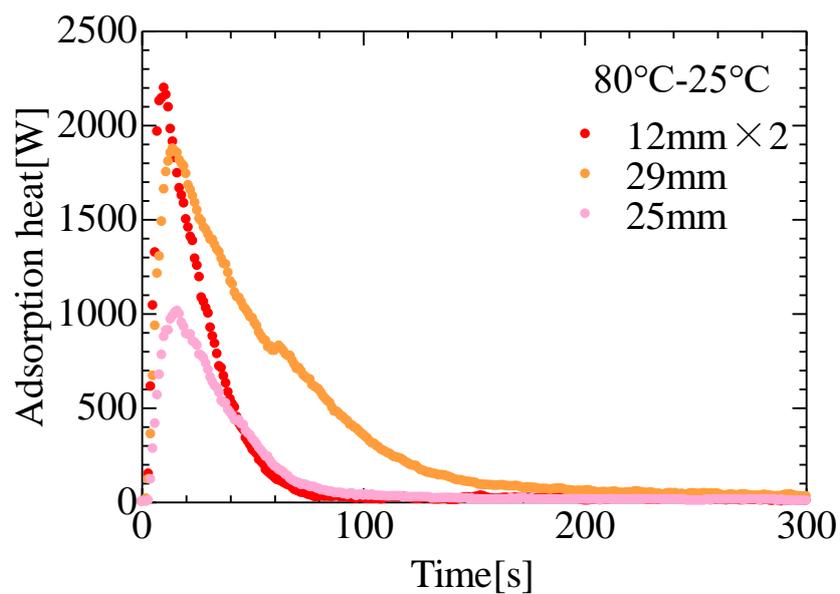


図 3.3.2-1 単位時間当たりの発熱量の経時変化

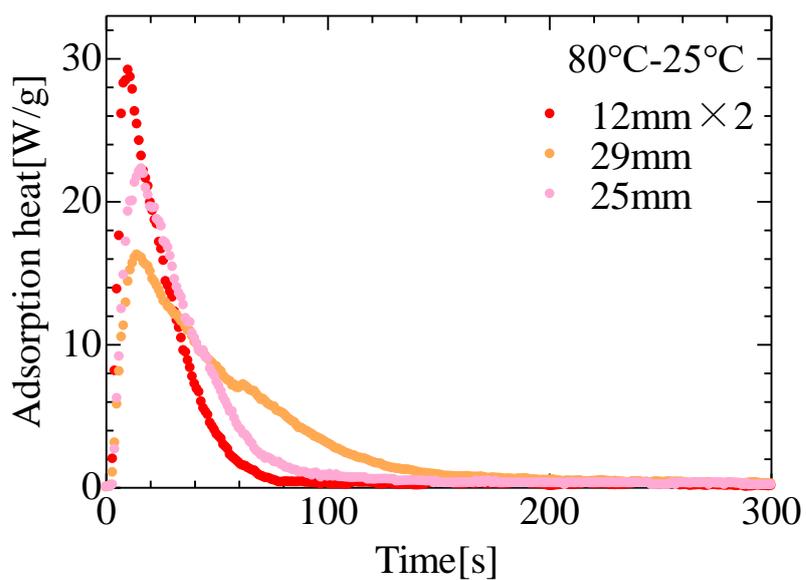


図 3.3.2-2 単位時間当たりの発熱量 (1g 当たり) の経時変化

まずは、通常が発熱量について考察する。図 3.2.2-1 より、発熱量のピーク値は、12mm 熱交換器、29mm、25mm の順に大きいことがわかる。先述した通り、吸着材の充填量、熱交換器の表面積、熱媒の流量の大小関係により、このような結果になったと考えられる。また、25mm 熱交換器については、上記 3 つの要素がすべて他 2 つの熱交換器より小さいため、発熱量が大きく下回ることになったと考えられる。

続いて、吸着材 1g 当たりの発熱量について考察する。図 3.2.2-2 より、発熱量のピーク値は、12mm×2 熱交換器、25mm 熱交換器、29mm 熱交換器の順に大きいことがわかる。吸着材 1g 当たりの表面積は、12mm×2 熱交換器が 14.95cm²/g、25mm が 7.19cm²/g、29mm が 5.95cm²/g となっている。3.2.2 で示した通り、吸着材の充填量が同じなら、熱交換器の表面積が大きくなるほど、ピーク値が大きくなり、発熱量の低下が急激になることがわかる。

また、吸着材 1g 当たりの表面積について、29mm 熱交換器を 1 とすると、25mm は 1.21、12mm×2 は 2.5 となる。一方で、発熱量のピーク値について、29mm 熱交換器を 1 とすると、25mm は 1.26、12mm×2 は 1.66 と、単純な比例関係にはならないことがわかる。

3.3.3 平均発熱量の比較

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する。ここでも、通常が発熱量と吸着材 1g 当たりの発熱量で比較する。

図 3.3.3-1 は通常が発熱量、図 3.3.3-2 は吸着材 1g 当たりの平均発熱量の経時変化である。

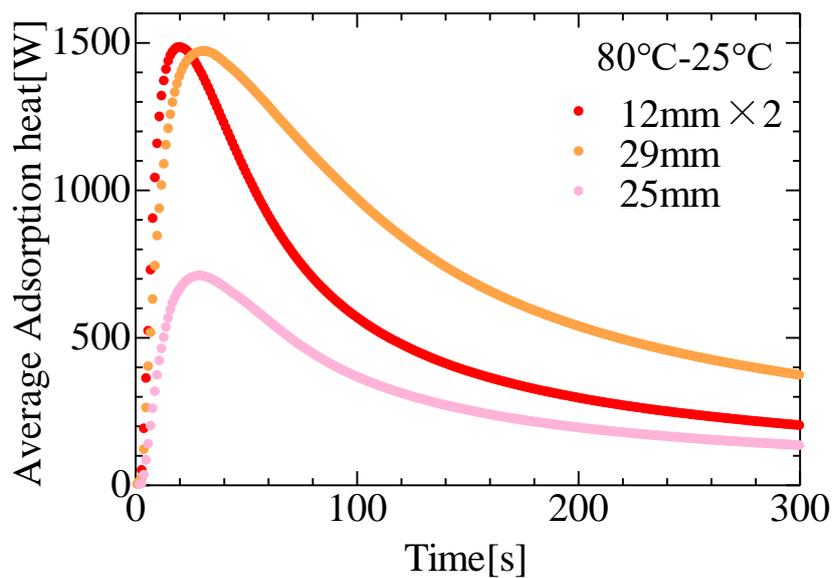


図 3.3.3-1 平均発熱量の経時変化

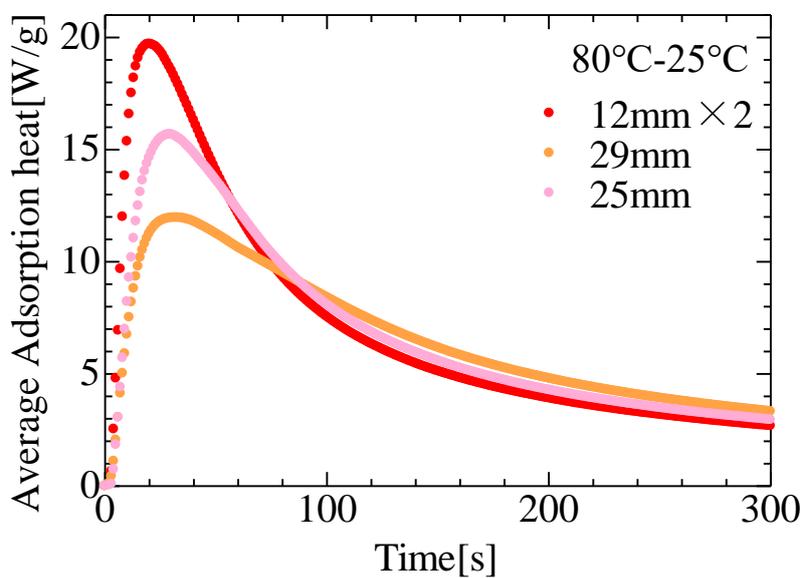


図 3.3.3-2 平均発熱量 (1g 当たり) の経時変化

まずは、通常発熱量について考察する。図 3.3.3-1 より、12mm×2 熱交換器と 29mm の平均発熱量のピーク値はほとんど等しく、25mm は他 2 つのおよそ半分であることがわ

かる。3.3.2の通常発熱量のときと同様に、活性炭の充填量、熱交換器の表面積、熱媒の流量の大小関係によるものだと考えられる。

続いて、吸着材 1g 当たりの発熱量について考察する。図 3.3.3-2 より、平均発熱量のピーク値は、12mm×2 熱交換器、25mm、29mm の順に大きいことがわかる。そして、時間の経過とともに3つの値が同値に近づいていることがわかる。ここから、3.2.3の吸着材 1g 当たりの発熱量のときと同様に、平均能力という観点では、吸着材 1g 当たりの表面積が大きくなるほど、システムの性能が向上すると考えられる。

3.3.4 合計発熱量の比較

最後に、合計発熱量の経時変化について考察する。ここでも、通常発熱量と吸着材 1g 当たりの発熱量で比較する。

図 3.3.4-1 は通常発熱量、図 3.3.4-2 は吸着材 1g 当たりの合計発熱量の経時変化である。

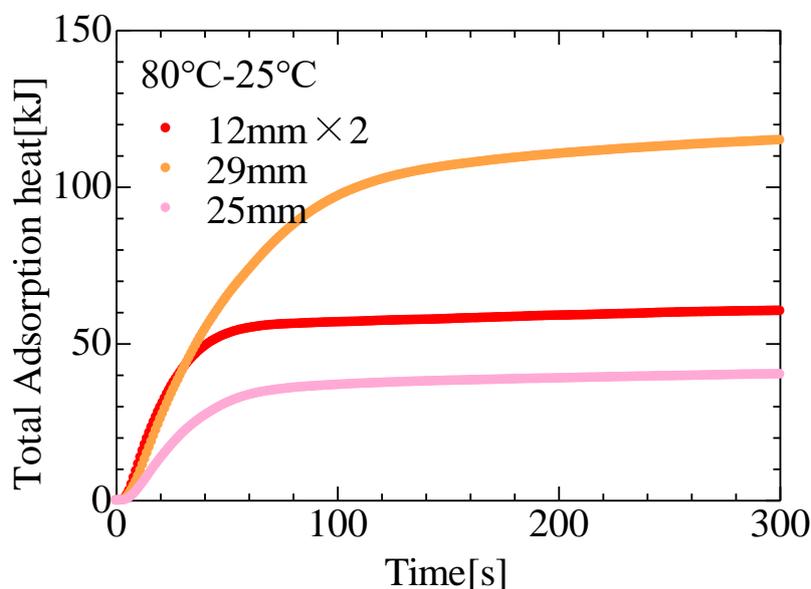


図 3.3.4-1 合計発熱量の経時変化

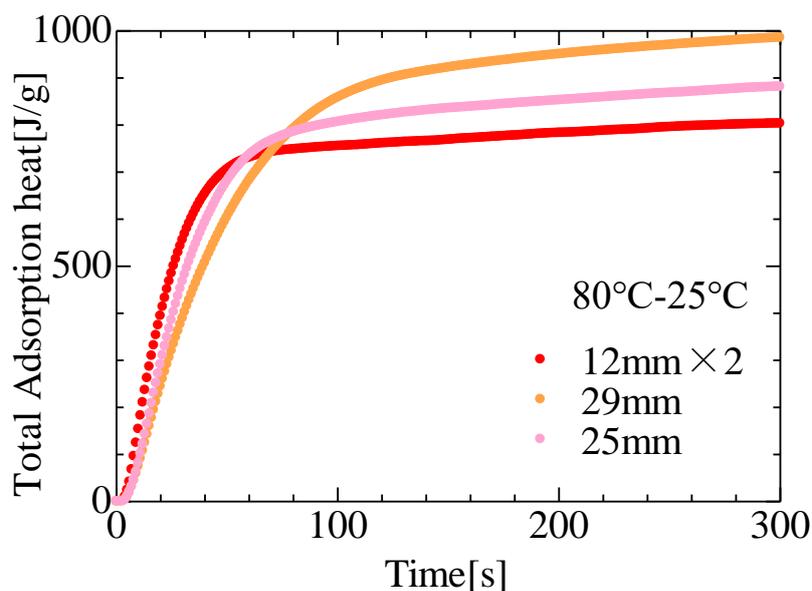


図 3.3.4-2 合計発熱量（吸着材 1g あたり）の経時変化

図より，12mm×2 熱交換器，25mm，29mm の順に早い時間で，合計発熱量の変化の度合い（接戦の傾き）が小さくなっている．つまり，上記の順に，吸着平衡に達する時間が早いことがわかる．

この原因として，3.2.4 で考察した通り，熱交換器の表面積，熱交換器の厚み，吸着材の担持密度の 3 つの要素が影響したと考えられる．

また，図 3.3.4-2 で，吸着開始から 100 秒経過したあたりから，合計発熱量の値にばらつきが見られる．これも，測定誤差が原因だと考えられる．

3.3.5 まとめ

最後に，実験結果をまとめた表を記載する．なお，全条件で脱着温度は 80°C，吸着温度は 25°C，熱媒の流量は 25mm 熱交換器が 1L/min，29mm が 2.16L/min，12mm×2 が 2.7L/min である．

表 3.3.5-1 まとめ①

熱交換器	最大 ΔT	経過時間	最大 W	1g あたり	経過時間
	[°C]	[s]	[W]	[W/g]	[s]
25mm	14.1	21	1008.2	22.2	16
29mm	13.5	15	1995.9	17.6	15
12mm×2	11.7	10	2198.4	29.2	10

表 3.3.5-2 まとめ②

熱交換器	Wave	1g あたり	経過時間
	[W]	[W/g]	[s]
25mm	709.3	15.6	29
29mm	1469.9	13.0	31
12mm×2	1483.7	19.7	20

3.4 R134a-12mm×2 熱交換器の実験結果および考察

この小章では、R134a 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 R134a 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。

3.4.1 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 1.25L/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 3.4.1-1a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較、図 3.4.1-1b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である。

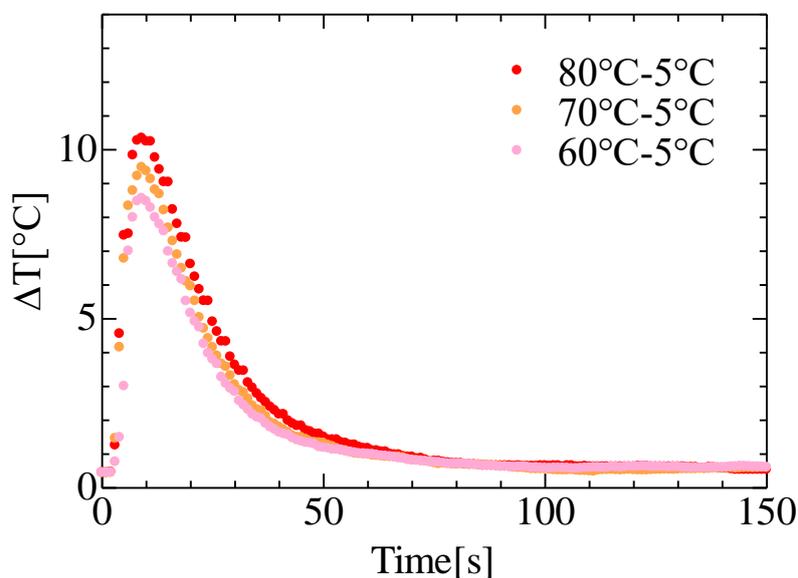


図 3.4.1-1a 凝縮温度が 5°C のときの、熱交換器の出入口の温度差の経時変化

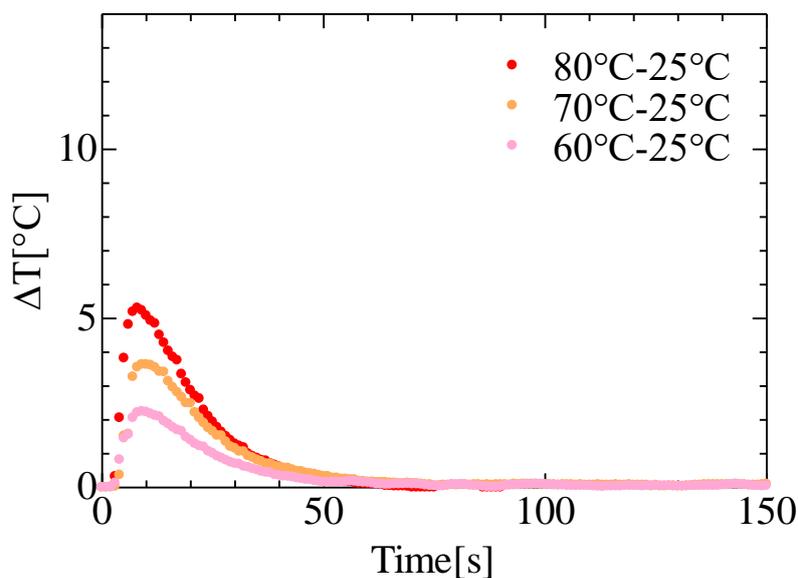


図 3.4.1-1b 凝縮温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口の温度差の経時変化

図 3.4.1-1a からわかる通り，各条件において温度差のピーク値や時間変化に大きな差は見られない．一方で，図 3.4.1-1b 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り，時間が経過してもその大小関係は変わらないことがわかる．

この結果が生じた理由として，3.1.1 の序盤で考察した通り，有効吸着量の違いが考えられる．各温度条件における，活性炭 MSC-30 と R134a の有効吸着量を記載したものが，表 3.4.1-1 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 3.4.1-2 のようになる．

表 3.4.1-1 活性炭 MSC-30 と R134a 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]	
60	0	0	0	73.85
70				84.92
80				95.12
60	5	5	5	66.58
70				78.02
80				88.63
60	15	15	15	52.15
70				64.06
80				75.33
60	25	25	25	38.09
70				50.16
80				61.83

表 3.4.1-1 活性炭 MSC-30 と R134a の有効吸着量の比

脱着過程		吸着過程		有効吸着量 [g]
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	
60	0	0	0	1
70				1.15
80				1.29
60	5	5	5	1
70				1.17
80				1.33
60	15	15	15	1
70				1.23
80				1.44
60	25	25	25	1
70				1.32
80				1.62

表 3.4.1-2 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 3.4.1-2a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較，図 3.4.1-2b 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 3.4.1-1 と図 3.4.1-2 はほとんど同じような関係になることがわかる．

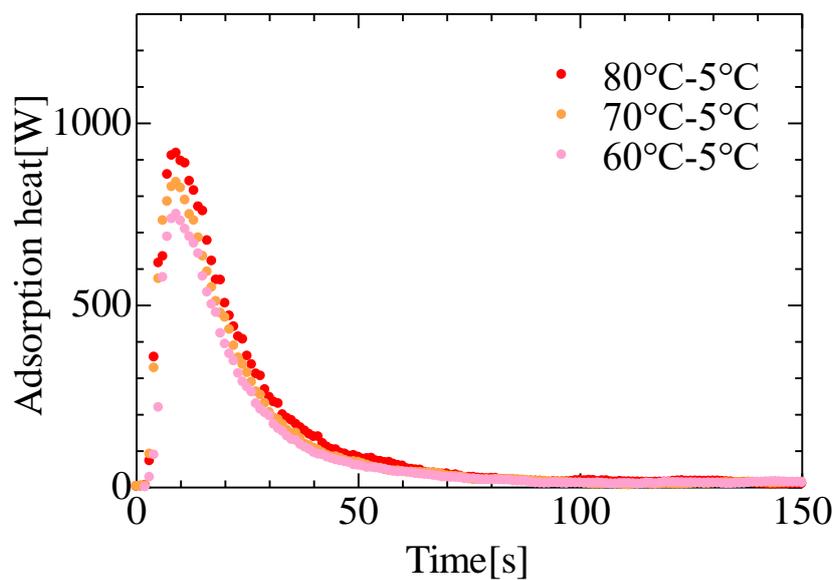


図 3.4.1-2a 凝縮温度が 5°C のときの，単位時間当たりの発熱量の経時変化

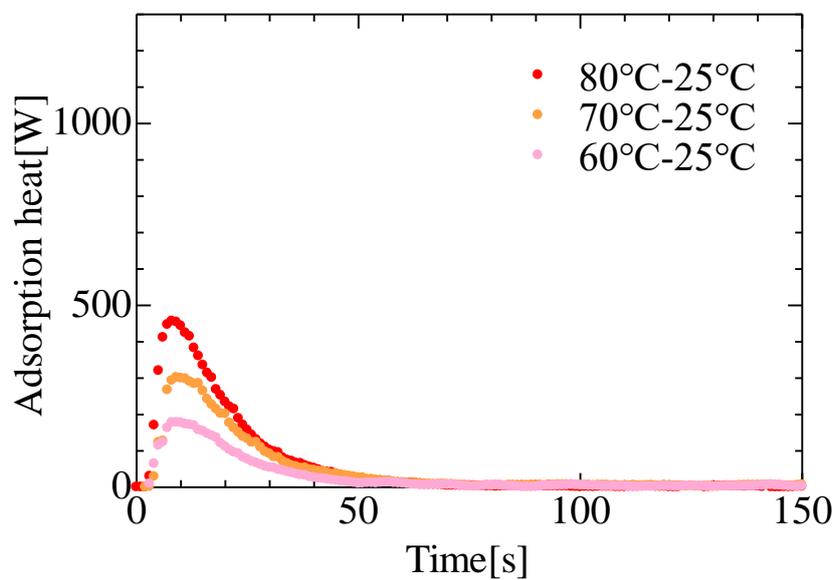


図 3.4.1-2b 凝縮温度が 25°C のときの，単位時間当たりの発熱量の経時変化

続いて、平均発熱量について考察する。

図 3.4.1-3a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較、図 3.4.1-3b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である。

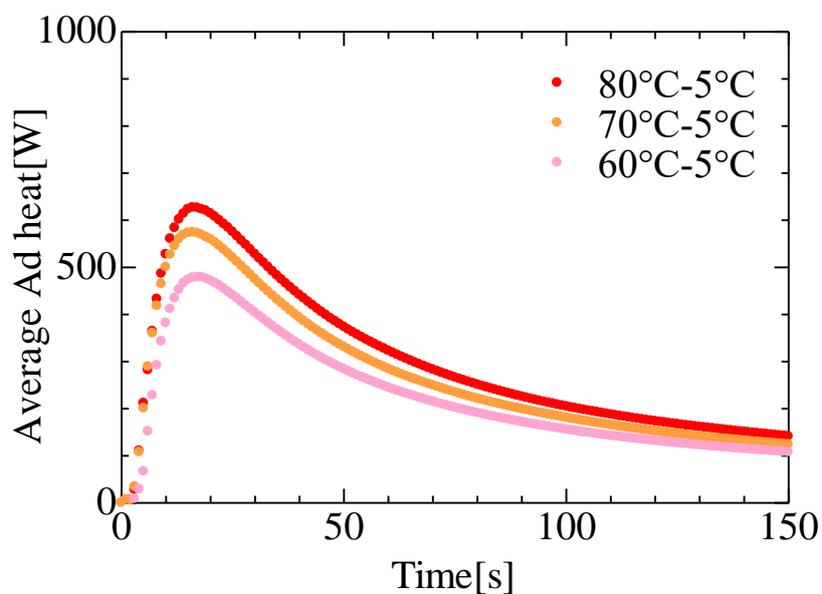


図 3.4.1-3a 凝縮温度が 5°C のときの、平均発熱量の経時変化

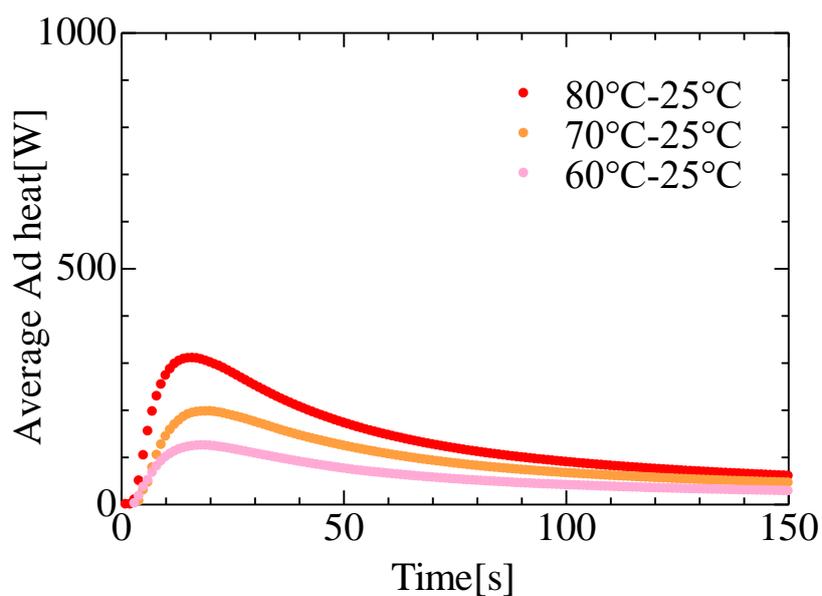


図 3.4.1-3b 凝縮温度が 25°C のときの、平均発熱量の経時変化

図 3.4.1-2 と図 3.4.1-3 を比較すると、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、エタノールのと看と同様に、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 3.1.1-4a は凝縮温度が 5°C のときの脱着温度による比較、図 3.1.1-4b は凝縮温度が 25°C のときの脱着温度による比較である。

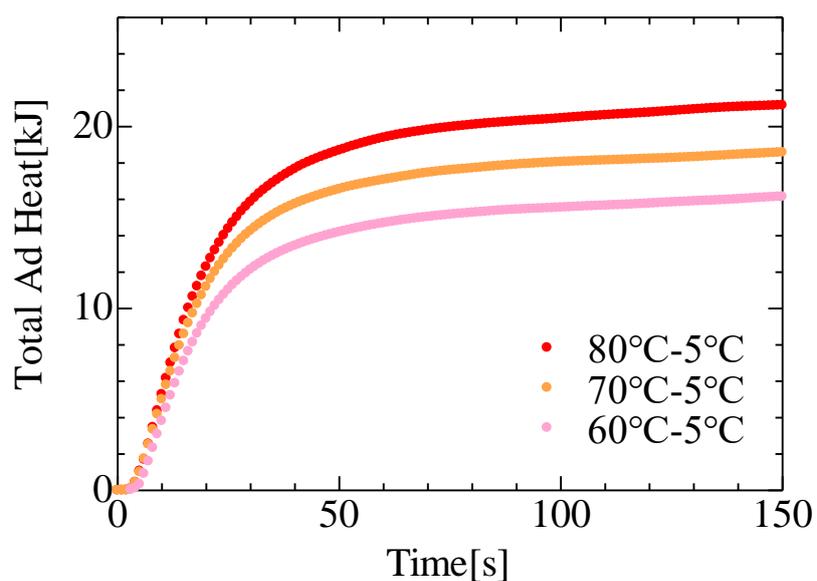


図 3.4.1-4a 凝縮温度が 5°C のときの、合計発熱量の経時変化

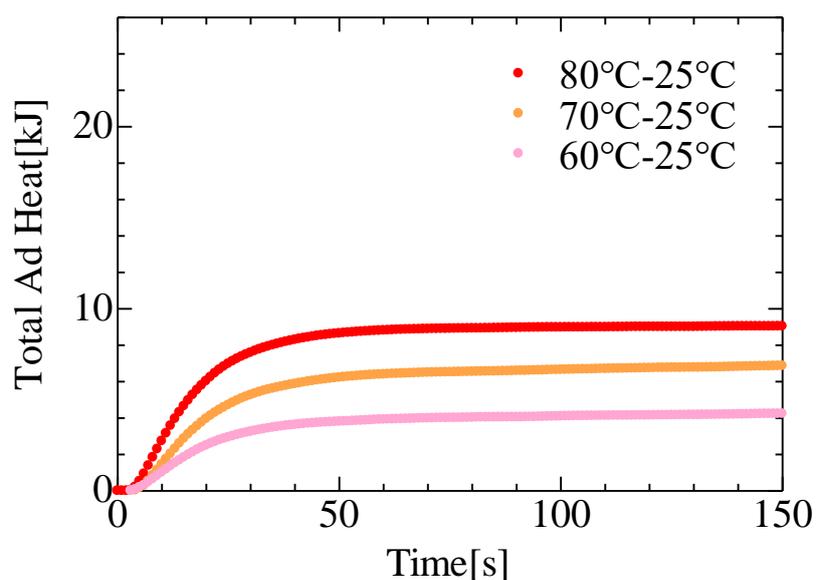


図 3.4.1-4b 凝縮温度が 25°C のときの、合計発熱量の経時変化

図より，凝縮温度が 25°C のときの方が，脱着温度による発熱量の比率の差が大きくなっていることがわかる．これは，先述したように有効吸着量の比率が起因していると考えられる．

3.4.2 蒸発温度が異なるときの性能の比較

ここでは，脱着温度が同じで脱着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 1.25L/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 3.4.2-1a は脱着温度が 70°C のときの蒸発温度による比較，図 3.4.2-1b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

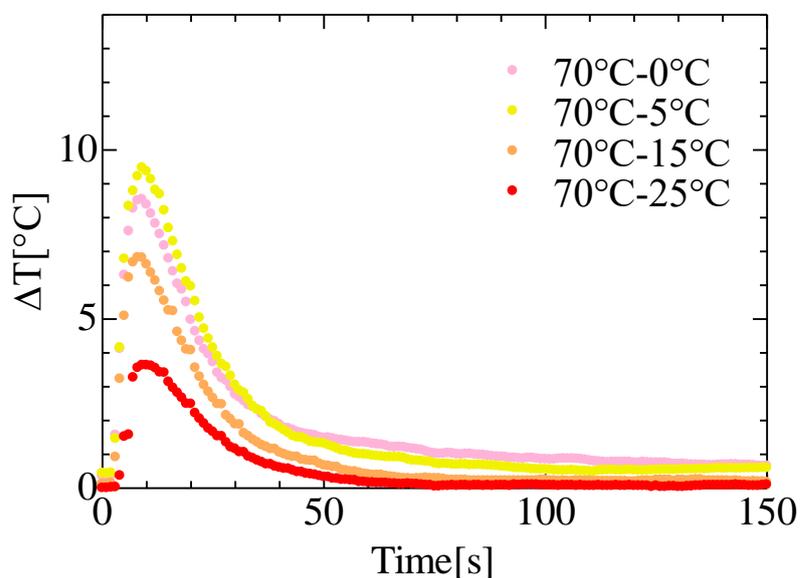


図 3.4.2-1a 脱着温度が 70°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

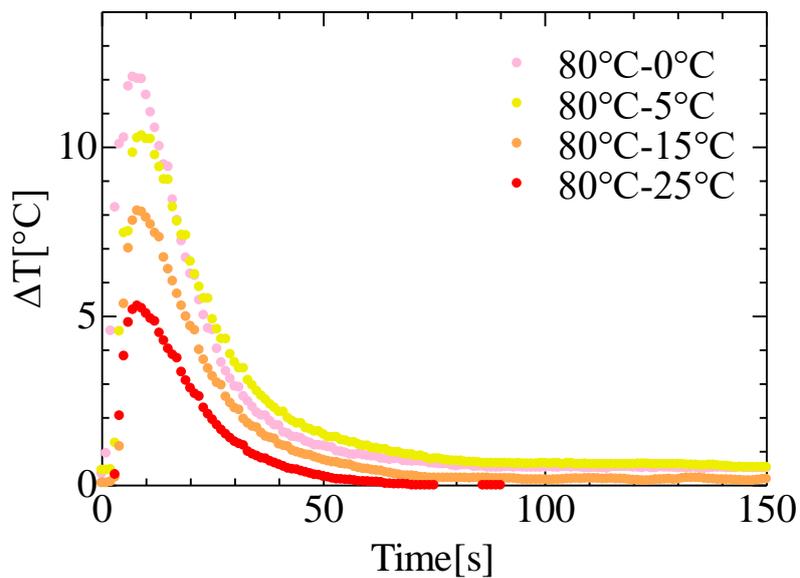


図 3.4.2-1b 脱着温度が 80°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

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っていることがわかる．この原因として，吸着直前の吸着器と蒸発器の圧力差，凝縮温度による有効吸着量の違い，蒸発温度による蒸発潜熱の違いの 3 つの要素で総合的に考察する．

表 3.4.2-1 に，各脱着温度において，凝縮温度が 25°C のときの有効吸着量を 1 としたときの，ほかの凝縮温度における有効吸着量の比を示す．

表 3.4.2-1 活性炭 MSC-30 と R134a 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		1
	15	15		1.37
	5	5		1.75
	0	0		1.94
70	25	25		1
	15	15		1.28
	5	5		1.56
	0	0		1.69
80	25	25		1
	15	15		1.22
	5	5		1.43
	0	0		1.54

図 3.1.2-2a～図 3.1.2-2d は、各蒸発温度における圧力の経時変化である。

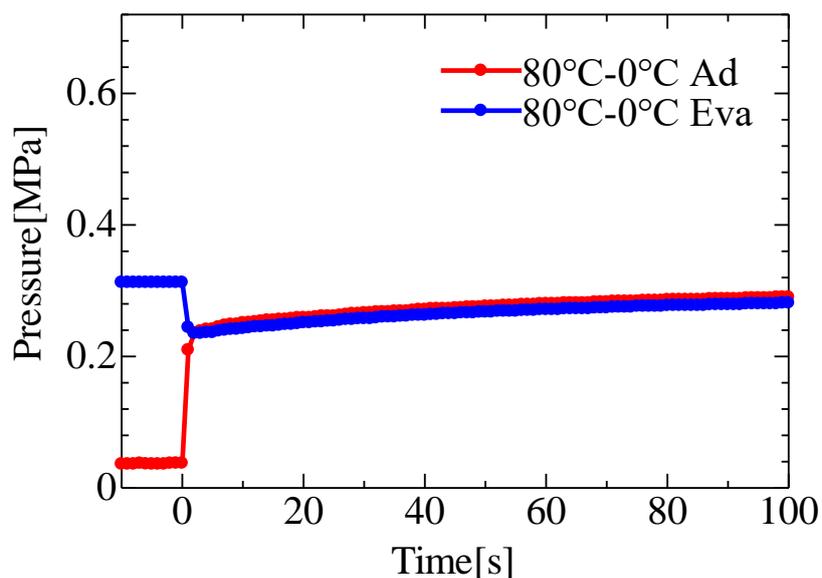


図 3.4.2-2a 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 0°C のときの，圧力の経時変化

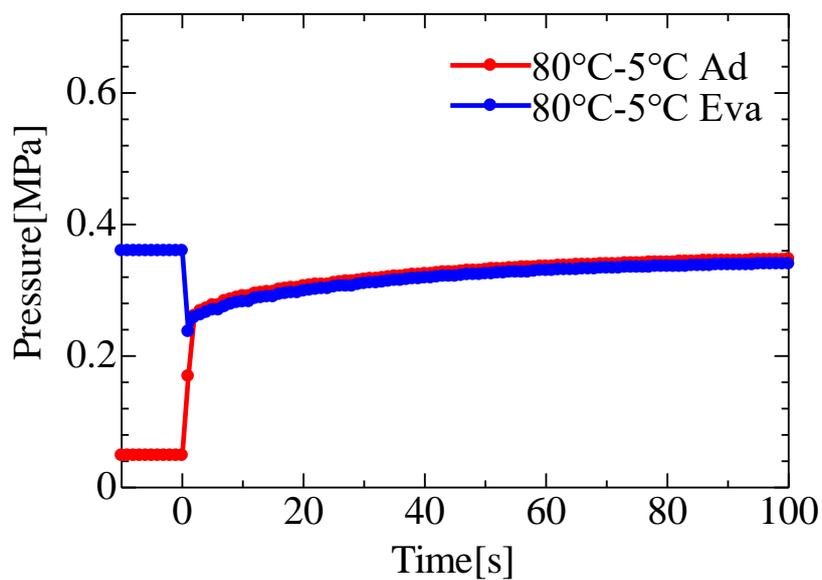


図 3.4.2-2b 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 5°C のときの，圧力の経時変化

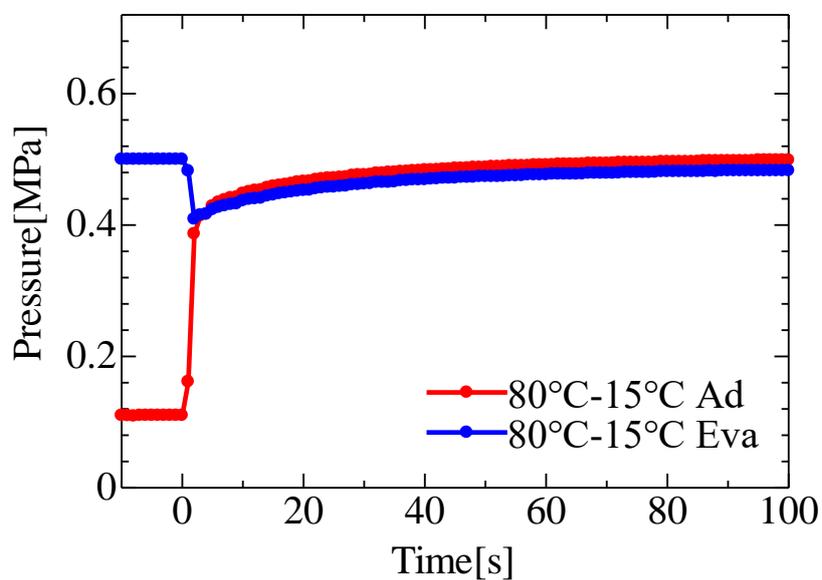


図 3.4.2-2c 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 15°C のときの，圧力の経時変化

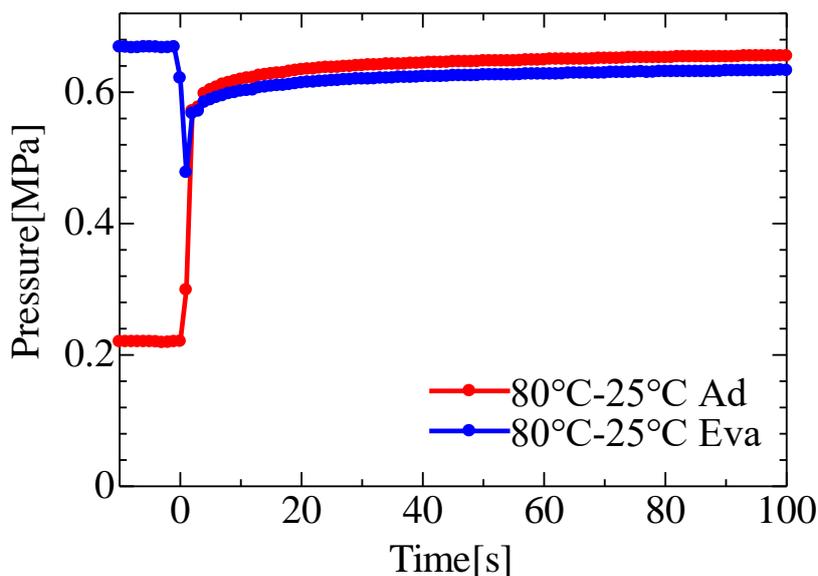


図 3.4.2-2c 脱着温度が 80°C，蒸発温度が 25°C のときの，圧力の経時変化

表 3.4.2-2 は，各蒸発温度における R134a の蒸発潜熱と，25°C の蒸発潜熱を 1 としたときの他の温度の蒸発潜熱の比である。

表 3.4.2-2 R134a の蒸発潜熱

蒸発温度[°C]	蒸発潜熱[kJ/kg]	蒸発潜熱の比
25	177.8	1
15	186.6	1.05
5	194.7	1.10
0	198.6	1.12

3.1.2 で，エタノールを用いたときの蒸発温度による違いを比較したが，図 3.1.2-2 より，凝縮温度によって吸着直前の圧力差に大きな違いが見られた。一方で，図 3.4.2-2 より，R134a を用いたときは，各凝縮温度による圧力差にエタノールほどの顕著な違いは見られないことがわかる。

表 3.4.2-1 より、同じ脱着温度において、凝縮温度が低くなるほど、有効吸着量が大きくなることがわかる。

表 3.4.2-2 より、蒸発温度が低くなるほど、蒸発潜熱が大きくなることがわかる。

以上の3つの要素から、吸着直前の圧力差の違いの影響は相対的に小さくなり、反対に、有効吸着量の違いによる吸着開始の吸着量の違いや、蒸発潜熱の大小関係の影響が相対的に大きくなる。よって、蒸発温度が低くなるほど、熱交換器の出入口温度差のピーク値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 3.4.2-3a は脱着温度が 70°C のときの蒸発温度による比較、図 3.4.2-3b 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 3.4.2-1 と図 3.4.2-3 はほとんど同じような関係になることがわかる。

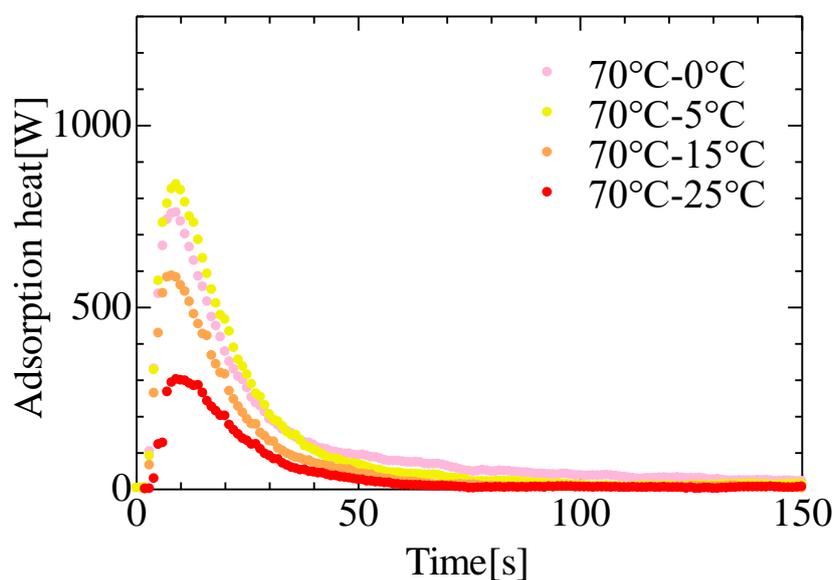


図 3.4.2-3a 脱着温度が 70°C のときの、単位時間当たりの発熱量の経時変化

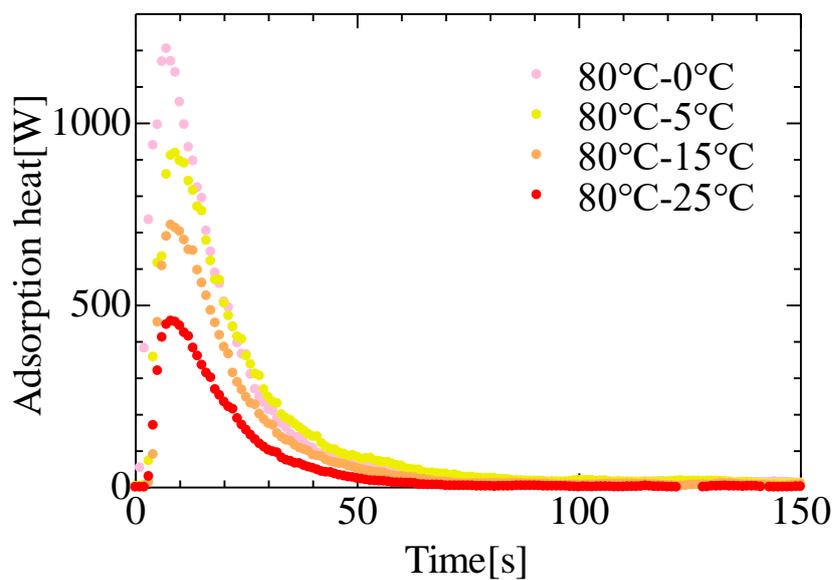


図 3.4.2-3a 脱着温度が 80°C のときの，単位時間当たりの発熱量の経時変化

続いて，平均発熱量について考察する．

図 3.4.2-4a は脱着温度が 70°C のときの蒸発温度による比較，図 3.4.2-4b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

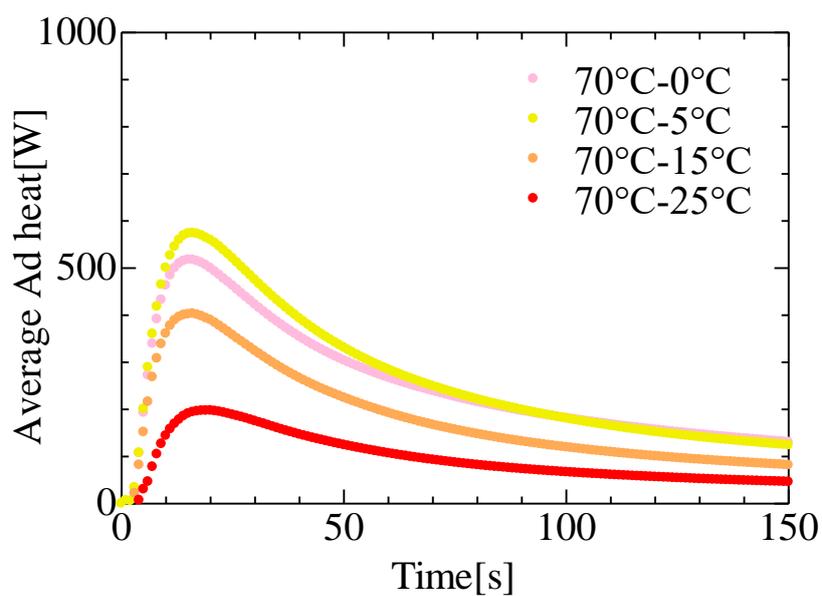


図 3.4.2-4a 脱着温度が 70°C のときの，平均発熱量の経時変化

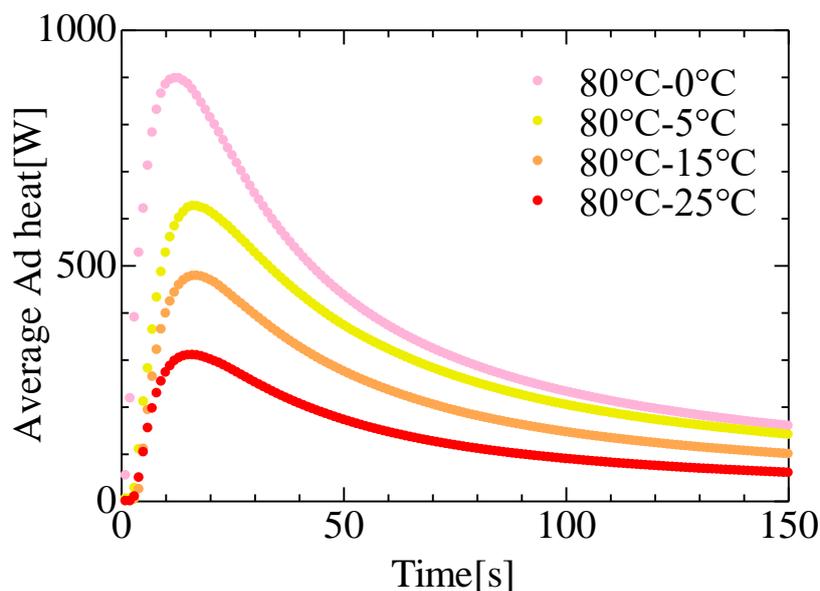


図 3.4.2-4b 脱着温度が 80°C のときの，平均発熱量の経時変化

図 3.4.2-4 より，図 3.4.2-2 と同様に，蒸発温度が低くなるほど，平均発熱量のピーク値が大きくなることがわかる．また，図 3.4.2-4a より，蒸発温度が 5°C の方が 0°C よりピーク値は小さいが，時間の経過とともに途中で大小関係が逆転していることがわかる．これは，凝縮温度が 0°C の方が，5°C のときよりも有効吸着量大きいことに起因すると考えられる．

最後に，合計発熱量について考察する．

図 3.4.2-5a は脱着温度が 70°C のときの蒸発温度による比較，図 3.4.2-5b は脱着温度が 80°C のときの蒸発温度による比較である．

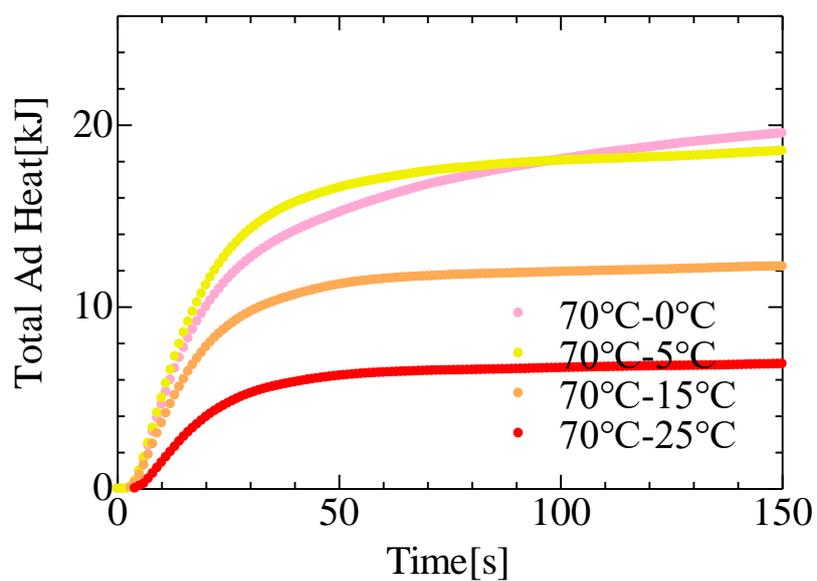


図 3.4.2-5a 脱着温度が 70°C のときの、合計発熱量の経時変化

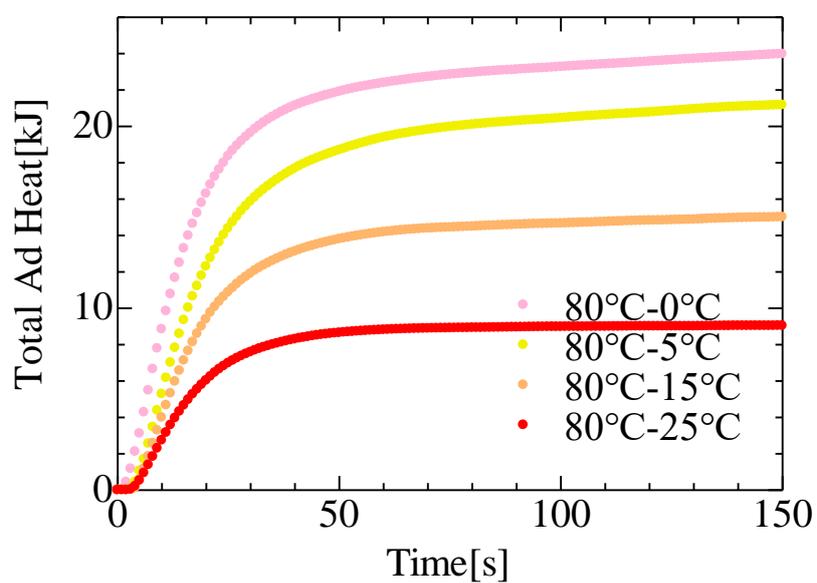


図 3.4.2-5b 脱着温度が 80°C のときの、合計発熱量の経時変化

図 3.4.2-5 より、エタノールを用いたときと同様に、蒸発温度が高くなるほど、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。そのため、蒸発温度が高くなるほど、吸着平衡に達する時間が早くなることがわかる。

3.4.3 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 1.25L/min である。

表 3.4.3-1 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	0	0		5.5	9	458.2	9
	5	5		8.6	9	750.1	9
	15	15		5.2	10	441.5	10
	25	25		2.2	9	177.6	9
70	0	0		8.5	9	760.3	9
	5	5		9.5	9	837.6	9
	15	15		6.8	8	586.7	8
	25	25		3.6	9	301.5	9
80	0	0		12.1	7	1204.0	7
	5	5		10.3	9	917.7	9
	15	15		8.1	8	720.0	8
	25	25		5.3	8	456.4	8

表 3.4.3-2 まとめ②

脱着過程		吸着過程		最大 Wave	経過時間	150s 後の Q	理論値
Tad[°C]	Tcon[°C]	Tad[°C]	Teva[°C]	[W]	[s]	[kJ]	[kJ]
60	0	0		308.9	19	14.8	16.2
	5	5		478.9	18	16.1	14.1
	15	15		289.3	18	9.8	10.3
	25	25		125.0	18	4.2	7.0
70	0	0		517.5	15	19.5	19.3
	5	5		574.0	16	18.6	17.1
	15	15		402.9	16	12.2	13.0
	25	25		197.2	20	6.9	9.4
80	0	0		897.7	12	24.0	22.2
	5	5		626.5	16	21.2	20.0
	15	15		478.4	17	15.0	15.7
	25	25		310.1	16	9.0	11.9

表 3.4.3-2 より，凝縮温度が 25°C のとき，脱着温度が 60°C，70°C，80°C のすべての条件において合計発熱量の実験値が理論値を大きく下回っている．この原因として，脱着過程における R134a の脱着量が起因すると考えられる．

脱着過程で平衡状態になるまで R134a が十分に脱着し，その後吸着器と凝縮器の接続を断つが，一定量の R134a は吸着器の中に残留する．そして吸着器の温度は環境温度（蒸発器の温度）まで低下するが，同時に吸着材の温度も環境温度まで下がることになる．吸着材の温度が下がることで，吸着器の中に残留していた R134a が吸着材に吸着する．

凝縮温度が 25°C のときは，ほかの凝縮温度に比べて脱着量が少なくなる．よって，脱着平衡に達した後に吸着器と凝縮器の接続を断ったとき，より多くの R134a が吸着器の中に残留していることになる．そこから吸着器の温度が下がることでより多くの R134a が吸着し，有効吸着量が理論値よりも少なくなったと考えられる．

表 3.4.3-3 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	0	0		0.261	0.286
	5	5		0.310	0.272
	15	15		0.231	0.243
	25	25		0.128	0.214
70	0	0		0.300	0.296
	5	5		0.308	0.283
	15	15		0.239	0.254
	25	25		0.164	0.225
80	0	0		0.330	0.306
	5	5		0.311	0.293
	15	15		0.253	0.265
	25	25		0.179	0.237

3.5 エタノールと R134a の比較

この小章では、吸着質にエタノールを用いたときと R134a を用いたときの蓄熱システムの性能を比較する。なお、使用した熱交換器は、どちらの吸着質のときも 12mm×2 熱交換器だが、エタノールのときは吸着材の重量が 75.3g, R134a のときは 84.3g である。また、すべての実験条件で脱着温度は 80°C, 熱媒の流量は 1.25L/min である。

以下に、エタノールと R134a の代表的な物性を記載する。

表 3.5 エタノールと R134a の物性値

温度[°C]	吸着質	飽和蒸気圧 [kPa]	蒸発潜熱 [kJ/kg]	蒸気密度 [kg/m ³]
0	エタノール	1.60	945.9	0.033
	R134a	292.8	198.6	14.428
5	エタノール	2.26	941.2	0.045
	R134a	349.7	194.7	17.131
15	エタノール	4.33	931.2	0.084
	R134a	488.4	186.6	23.758
25	エタノール	7.89	920.7	0.147
	R134a	665.4	177.8	32.350

3.5.1 熱交換器の出入口温度差の比較

ここでは、熱交換器の中を流れる熱媒における、熱交換器の出入口温度差について考察する。図 3.5.1-a~図 3.5.1-d は、吸着温度が 0°C, 5°C, 15°C, 25°C のときの、熱交換器出入口の温度差の経時変化である。

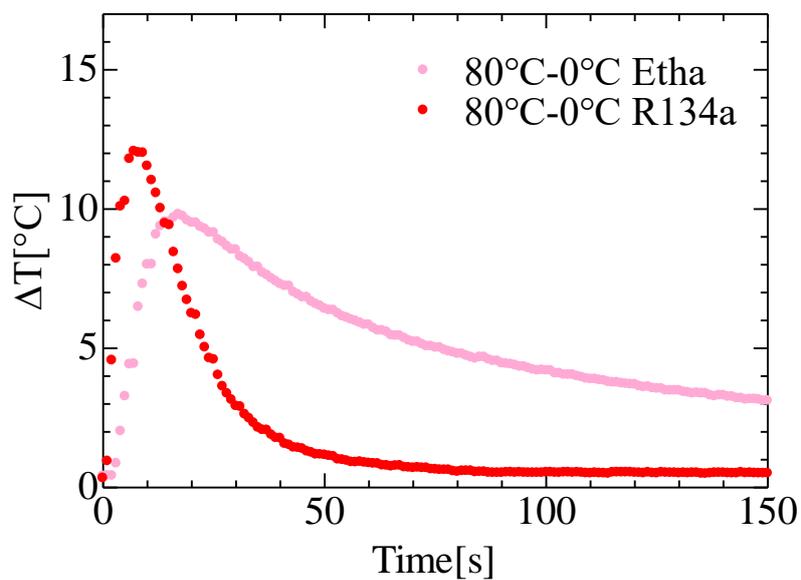


図 3.5.1-a 吸着温度が 0°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

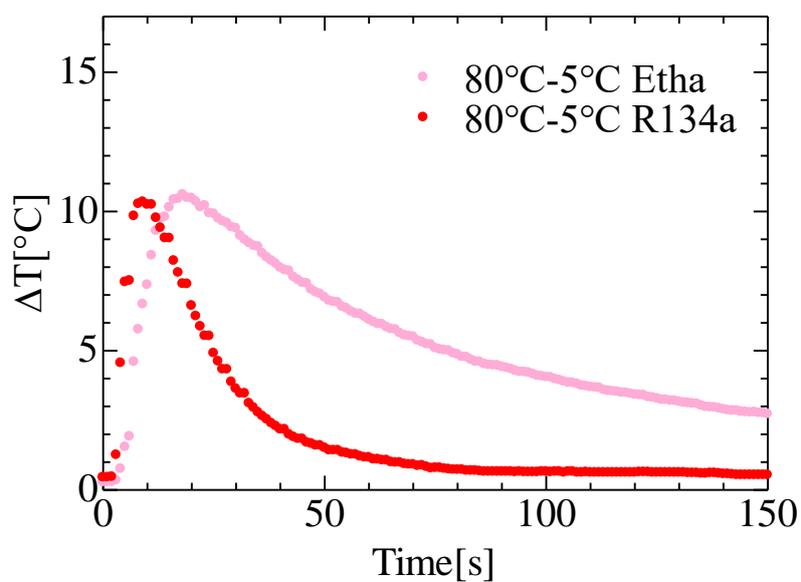


図 3.5.1-b 吸着温度が 5°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

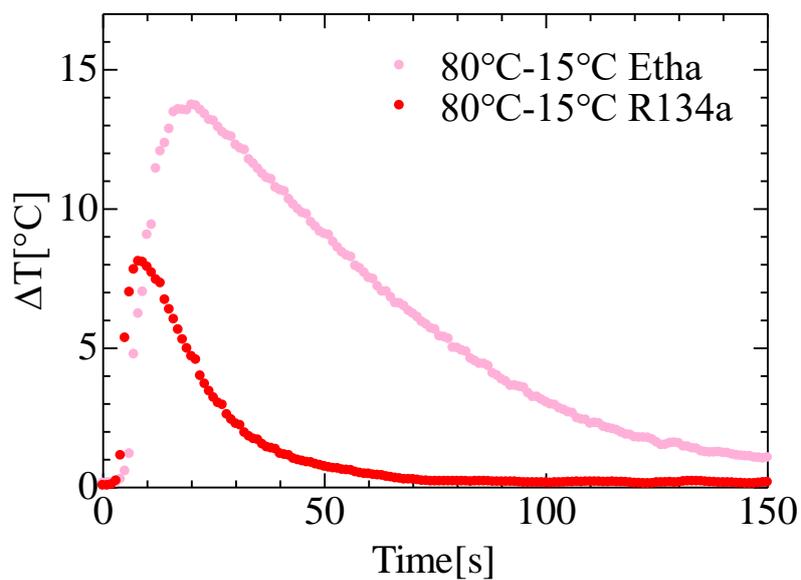


図 3.5.1-c 吸着温度が 15°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

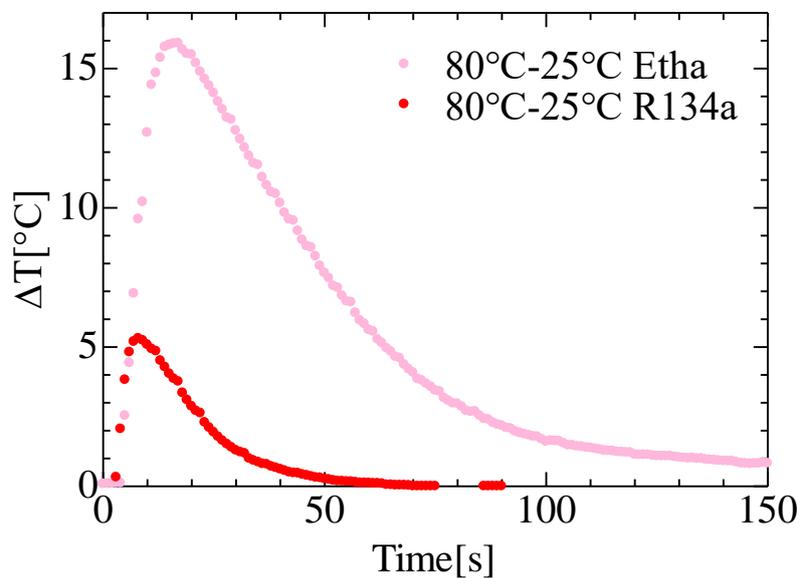


図 3.5.1-d 吸着温度が 25°C のときの，熱交換器の出入口温度差の経時変化

これらの図からわかる通り，出入口温度差のピーク値において，吸着温度が 0°C のときは R134a の方が大きく， 5°C ではほぼ同じ， 15°C と 25°C ではエタノールの方が大きいことがわかる。

また，R134a の方が，吸着開始から短時間でピーク値に達し，そこからの出入口温度差の低下が急激であることがわかる。

これらの原因として，大きく 3 つの要素が考えられる。

1 つ目は，蒸気密度の差である。表 3.5 より，R134a の蒸気密度はエタノールに比べて非常に大きく， 0°C で 437 倍， 5°C で 380 倍， 15°C で 283 倍， 25°C で 220 倍になる。同じ容積において，R134a の方がエタノールよりも質量が大きいため，吸着開始直後の吸着量は R134a の方が大きくなると考えられる。

表 3.5.1-1 各吸着温度における有効吸着量

吸着温度[$^{\circ}\text{C}$]	吸着質	有効吸着量[g]
0	エタノール	86.83
	R134a	95.12
5	エタノール	84.75
	R134a	88.63
15	エタノール	78.09
	R134a	75.33
25	エタノール	67.55
	R134a	61.83

2 つ目は，蒸発潜熱の差である。表 3.5 より，エタノールの蒸発潜熱は R134a に比べて，およそ 5 倍の大きさであることがわかる。つまり，同じ吸着量であれば，エタノールを用いたときの発熱量は，R134a を用いたときに比べて，およそ 5 倍になると考えられる。

3 つ目は，各温度条件における有効吸着量である。表 3.5.1-1 に，各吸着温度における有効吸着量を示す。なお，この吸着量は D-A 式から算出した理論値である。この表より，吸着温度が 0°C ， 5°C のときは R134a の有効吸着量の方が大きく， 15°C ， 25°C のと

きはエタノールの方が大きいですが、4つの温度条件において大きな差は見られない。先ほど、蒸気密度の関係から R134a は瞬間的な吸着量が大きくなると述べたが、有効吸着量に大きな差はないため、温度差がピークに達した後の吸着量は、R134a の方が少なくなると考えられる。

これらの要素を考慮する。この4つの実験条件すべてにおいて、吸着開始からの瞬間的な吸着量は R134a の方が大きい。しかし、3.2.1 で述べたように、エタノールの場合、凝縮温度が高くなると、吸着直前の吸着器と蒸発器の圧力差が大きくなり、吸着開始からの瞬間的な吸着量が大きくなる。さらに、3.4.1 で述べたように、R134a の場合、凝縮温度が高くなると、有効吸着量が小さくなり、吸着開始からの瞬間的な吸着量が小さくなる。よって吸着温度が高くなるほど、吸着開始からの瞬間的な吸着量において、エタノールと R134a の差が小さくなり、蒸発潜熱の大小関係から、15°C 以上でエタノールの温度差のピーク値が R134a を上回ったと考えられる。

3.5.2 単位時間当たりの発熱量の比較

ここでは、単位時間当たりの発熱量の経時変化について考察する。2つの熱交換器を比較する際、通常発熱量と、吸着材 1g あたりの発熱量の2通りで比較する。

通常発熱量について、図 3.5.2-1a は吸着温度が 0°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.5.2-1b は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

吸着材 1g 当たりの発熱量について、図 3.5.2-2a は吸着温度が 0°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.5.2-2b は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

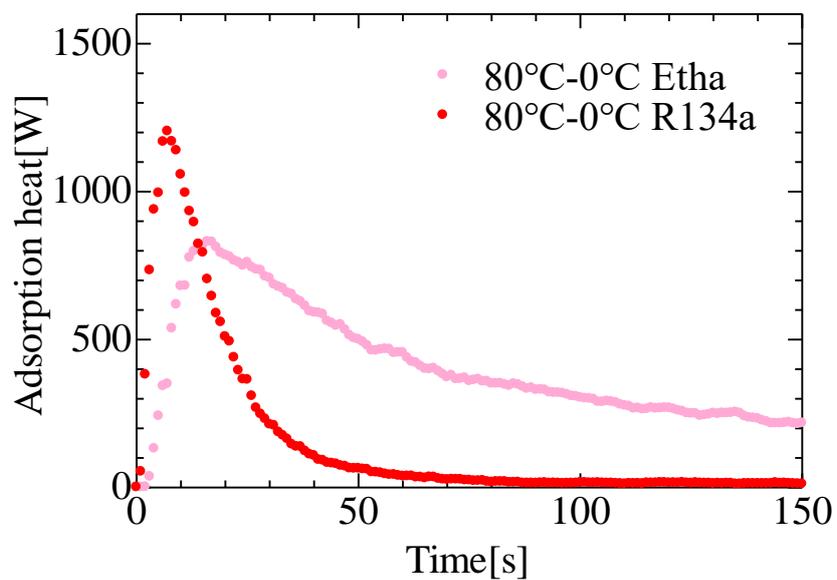


図 3.5.2-1a 吸着温度が 0°C のときの, 単位時間当たりの発熱量の経時変化

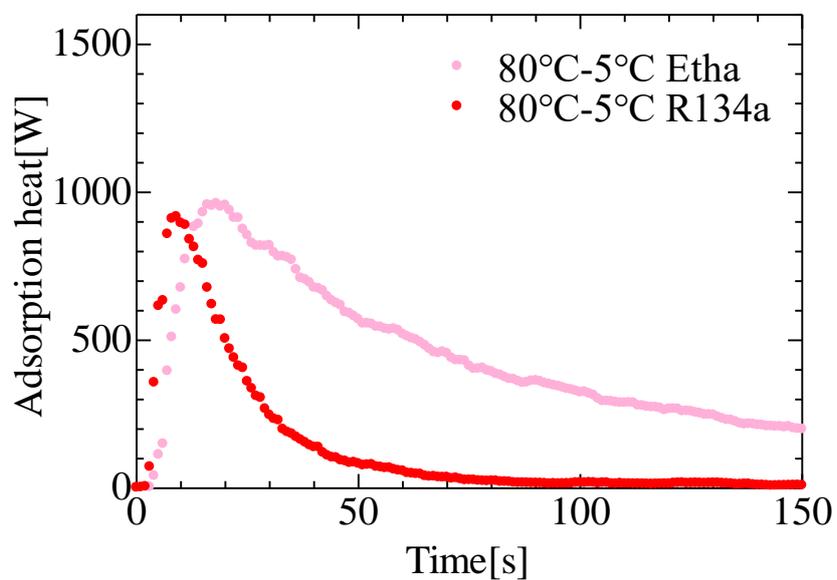


図 3.5.2-1b 吸着温度が 5°C のときの, 単位時間当たりの発熱量の経時変化

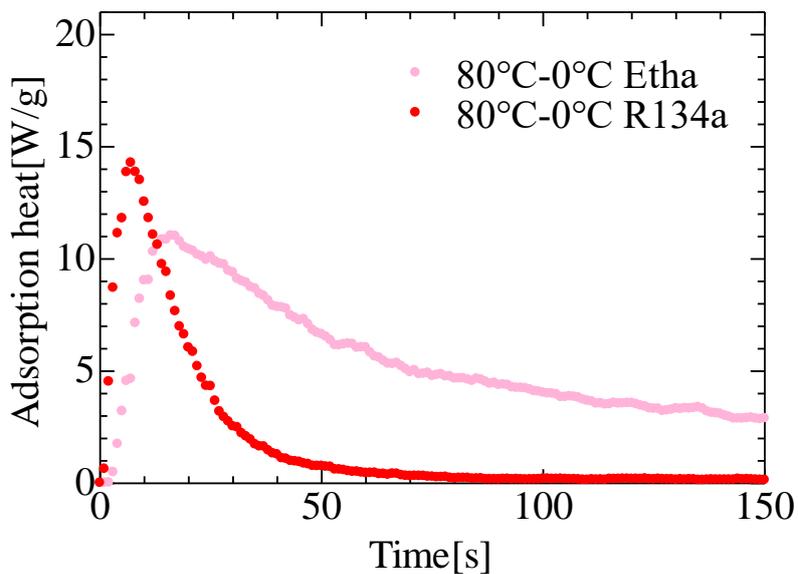


図 3.5.2-2a 吸着温度が 0°C のときの，単位時間当たりの発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

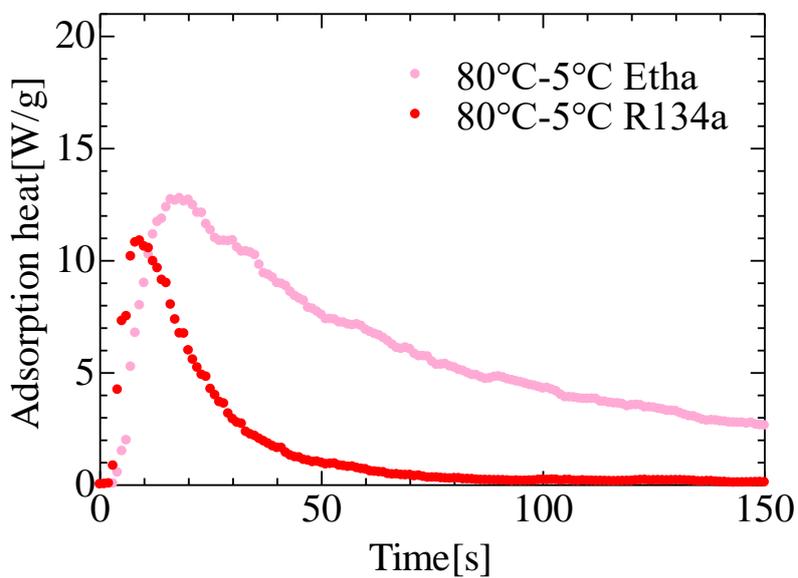


図 3.5.2-2b 吸着温度が 5°C のときの，単位時間当たりの発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

まずは、通常の発熱量について考察する。4つの温度条件で熱媒流量はすべて等しいため、図 3.5.1 と図 3.5.2-1 は同じような形になると考えられる。

続いて、吸着材 1g 当たりの発熱量について考察する。発熱量のピーク値について、図 3.5.2-2 より、吸着温度が 0°C のときは R134a のときの方が大きいが、5°C のときはエタノールの方の方が大きい。エタノールを用いたときの熱交換器の吸着材充填量は 75.3g で、R134a を用いたときの熱交換器の吸着材充填量は 84.3g である。よって、吸着材 1g 当たりに換算すると、エタノールの方の発熱量が相対的に大きくなる。

この結果から、吸着材充填量が等しく、まったく同じ形状、同じ寸法の吸着熱交換機を用いる場合、瞬間的に大きな熱量を得るには、環境温度が低いときは R134a、環境温度が高い時はエタノールを用いることが有効であると考えられる。

3.5.3 平均発熱量の比較

続いて、平均発熱量の経時変化について考察する。ここでも、通常の発熱量と吸着材 1g 当たりの発熱量で比較する。

通常の発熱量について、図 3.5.3-1a は吸着温度が 0°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.5.3-1b は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

吸着材 1g 当たりの発熱量について、図 3.5.3-2a は吸着温度が 0°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.5.3-2b は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

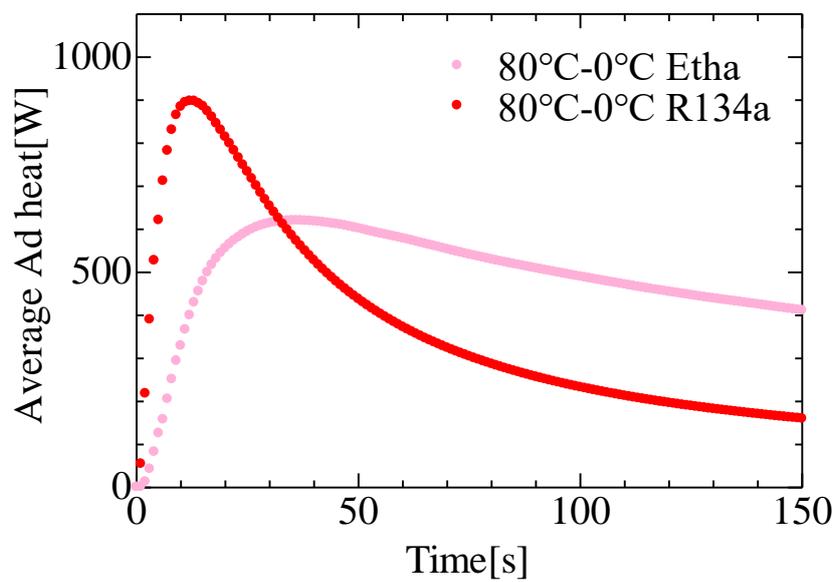


図 3.5.3-1a 吸着温度が 0°C のときの，平均発熱量の経時変化

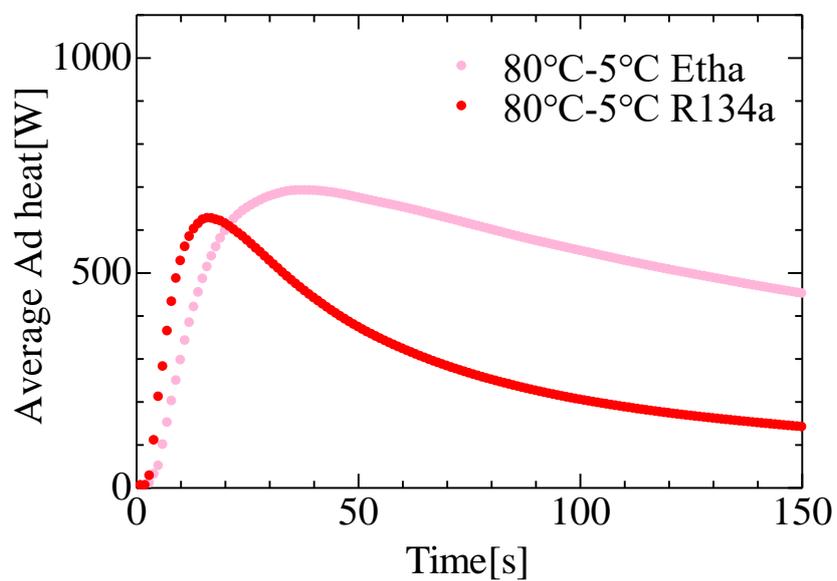


図 3.5.3-1b 吸着温度が 5°C のときの，平均発熱量の経時変化

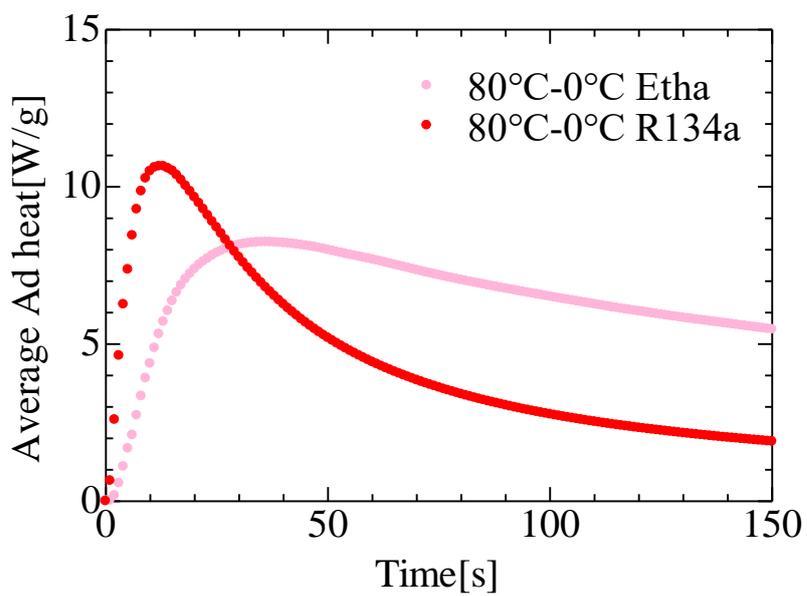


図 3.5.3-2a 吸着温度が 0°C のときの、平均発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

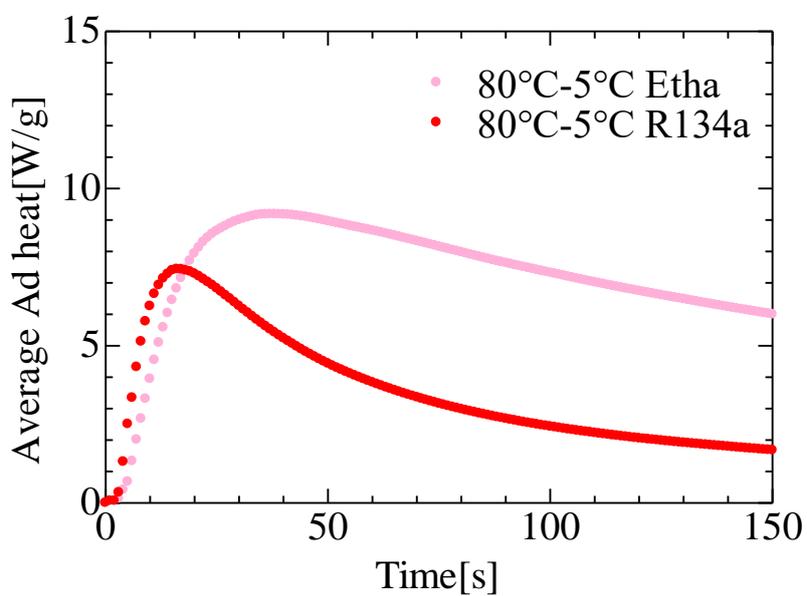


図 3.5.3-2b 吸着温度が 5°C のときの、平均発熱量（吸着材 1g 当たり）の経時変化

まずは、通常が発熱量について考察する。図 3.5.3-1 より、R134a の方がピーク値に達する時間が早いことがわかる。これは、先述したように、R134a の瞬間的な吸着量が大きく、それに伴って短時間で発熱することが原因だと考えられる。

一方で、平均発熱量のピーク値について、吸着温度が 0°C のときは R134a の方が大きく、 5°C のときはエタノールの方が大きい。吸着温度が 0°C のときは、R134a の単位時間当たりの発熱量のピーク値がエタノールのピーク値よりも 1.5 倍ほど大きく、ピーク値に達した時間も早い。吸着温度が 5°C のときは、R134a の単位時間当たりの発熱量のピーク値はエタノールをわずかに下回っており、ピーク値に達した後の R134a の発熱はエタノールほど持続しなかったことが原因だと考えられる。

続いて、吸着材 1g 当たりの発熱量について考察する。図 3.5.3-2 より、平均発熱量のピーク値について、吸着温度が 0°C のときは R134a の方が大きく、 5°C のときはエタノールの方が大きい。また、吸着温度が 0°C のときも、時間の経過に伴って途中でエタノールの平均発熱量が R134a を上回っていることがわかる。

この結果から、吸着材充填量が等しく、まったく同じ形状、同じ寸法の吸着熱交換機を用いる場合、平均的な発熱能力という観点では、環境温度が低いときは R134a、環境温度が高いときはエタノールを用いることが有効であるが、長時間運用する場合は、総じてエタノールの方が有効であると考えられる。

3.5.4 合計発熱量の比較

最後に、合計発熱量の経時変化について考察する。ここでも、通常が発熱量と吸着材 1g 当たりの発熱量で比較する。

通常が発熱量について、図 3.5.4-1a は吸着温度が 0°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.5.4-1b は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

吸着材 1g 当たりの発熱量について、図 3.5.4-2a は吸着温度が 0°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化、図 3.5.4-2b は吸着温度が 5°C のときの短時間当たりの発熱量の経時変化である。

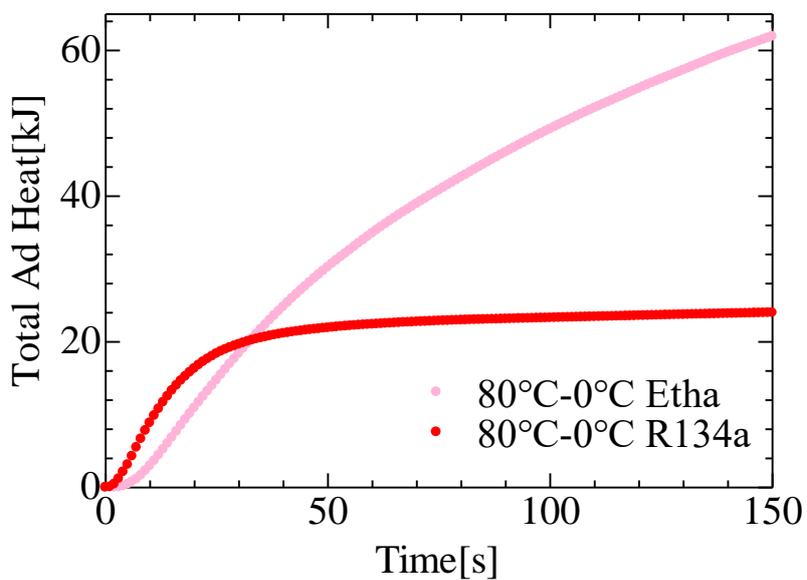


図 3.5.4-1a 吸着温度が 0°C のときの、合計発熱量の経時変化

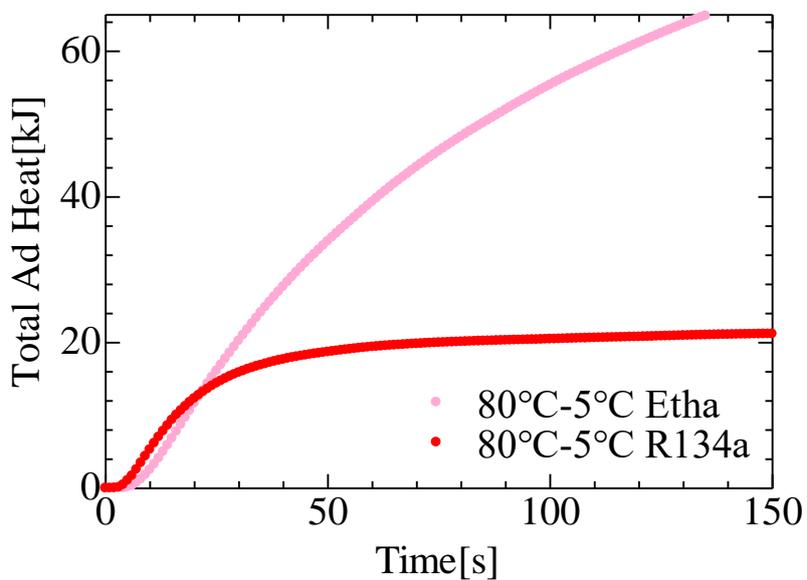


図 3.5.4-1b 吸着温度が 5°C のときの、合計発熱量の経時変化

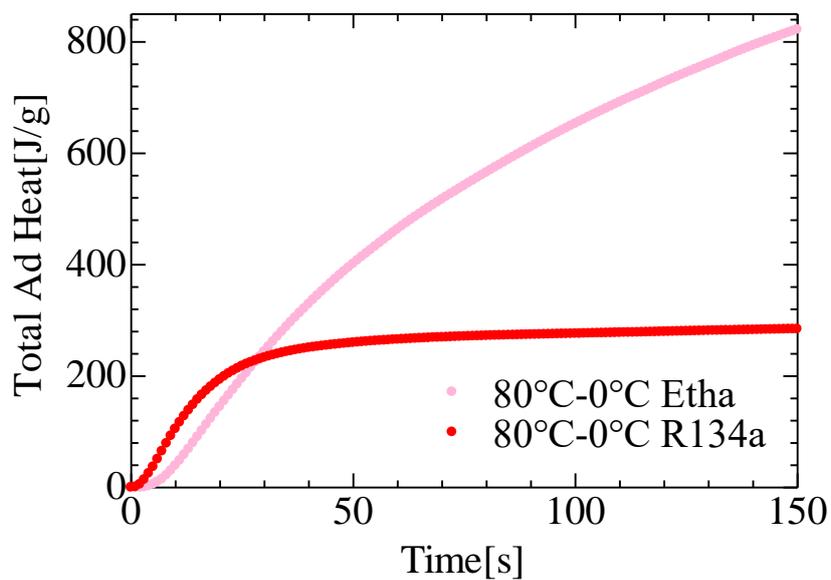


図 3.5.4-2a 吸着温度が 0°C のときの、合計発熱量（吸着 1g 当たり）
材の経時変化

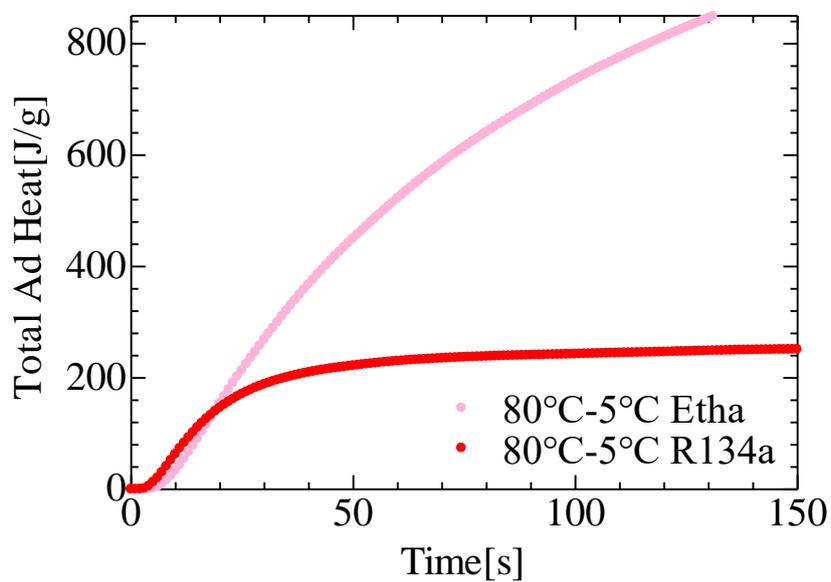


図 3.5.4-2b 吸着温度が 5°C のときの、合計発熱量（吸着 1g 当たり）
材の経時変化

図より、R134aの方がエタノールよりも、早い時間で合計発熱量の変化の度合い（接戦の傾き）が小さくなっている。つまり、R134aの方が、吸着平衡に達する時間が早いことがわかる。

この原因としては、先述したように、R134aはエタノールよりも蒸気密度が大きく、吸着開始直後に多くの蒸気が吸着し、吸着速度がピークに達した後の吸着量が相対的に少なくなることが考えられる。

また、時間の経過とともに、エタノールとR134aの合計発熱量の差が大きくなっていることがわかる。これも先述したように、エタノールとR134aで有効吸着量の差は小さく、なおかつエタノールの蒸発潜熱はR134aのおよそ5倍になることが原因だと考えられる。

この結果からも、比較的短時間で熱を回収するならR134a、長時間熱を回収し続けるならエタノールが適していることがわかる。

3.5.5 まとめ

最後に、実験結果をまとめた表を記載する。なお、すべての実験条件において脱着温度は80°C、熱媒流量は1.25L/minである。

表 3.5.5-1 まとめ①

吸着温度	吸着質	最大 ΔT	経過時間	最大 W	1g あたり	経過時間
[°C]		[°C]	[s]	[W]	[W/g]	[s]
0	エタノール	9.8	17	831.0	11.0	16
	R134a	12.1	7	1204.0	14.3	7
5	エタノール	10.6	18	962.3	12.8	18
	R134a	10.3	9	917.7	10.9	9
15	エタノール	13.7	20	1311.1	17.4	21
	R134a	8.1	8	720.0	8.5	8
25	エタノール	15.9	17	1497.3	19.9	14
	R134a	5.3	8	456.4	5.4	8

表 3.5.5-2 まとめ②

吸着温度	熱交換器	最大 Wave	1g あたり	経過時間
[°C]		[W]	[W/g]	[s]
0	29mm	620.3	8.2	37
	12mm×2	897.7	10.6	12
5	29mm	691.4	9.2	39
	12mm×2	626.5	7.4	16
15	29mm	922.7	12.3	40
	12mm×2	478.4	5.7	17
25	29mm	1046.4	13.9	32
	12mm×2	310.1	3.7	16

第4章 総括

本研究では、活性炭を用いた吸着蓄熱システムについて、吸着質にエタノールを用いたときの運転条件によるシステムの性能の比較、熱交換器による性能の比較、吸着質に R134a を用いたときの運転条件によるシステムの性能の比較、吸着質にエタノールを用いたときと R134a を用いたときのシステムの性能の比較を行った。以下、本研究で得られた知見の総括を行う。

4.1 吸着質にエタノールを用いたときの運転条件によるシステムの性能の比較

4.1.1 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高くなる。また、温度差のピーク値について、凝縮温度が高くなると、脱着温度の違いによるピーク値の差が大きくなる。いずれも、エタノール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。

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。

4.1.2 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、ピーク値が大きく、昇温の低下が急激になった。吸着直前の、吸着器と蒸発器の圧力差による吸着の起動力の差によると考えられる。

また、脱着温度が低くなると、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

蒸発温度が高くなると、ピーク値は大きくなるが、時間の経過とともに、低い蒸発温度のときの発熱量との大小関係の逆転が起きた。有効吸着量の差によると考えられる。

合計発熱量の経時変化について

蒸発温度が低くなると、最終的な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。

4.1.3 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小さくなり、昇温の低下が急激になった。流量が大きいと、熱媒の温度があまり上昇しないまま熱交換器から出ていくことが原因だと考えられる。

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、温度があまり上昇せず、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 1.25L/min の条件で、ほか 2 つの条件より合計発熱量が大きくなった。周囲の環境温度の影響や計器の測定誤差によると考えられる。

4.2 吸着質にエタノールを用いたときの、熱交換器の違いによる性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

昇温が吸着材の充填量に依存するため、ここでは割愛する。

単位時間当たりの発熱量の経時変化について

吸着材 1g 当たりの発熱量について、吸着材 1g 当たりの熱交換器面積が大きくなると、発熱量のピーク値が大きくなった。表面積が大きくなると、吸着開始直後に、瞬間的により多くのエタノールが吸着したことによるものと考えられる。

平均発熱量の経時変化について

吸着材 1g 当たりの平均発熱能力という観点では、表面積が大きくなると、システムの性能が向上すると考えられる。

合計発熱量の経時変化について

表面積が大きくなると、吸着平衡に達する時間が短くなる。表面積が大きいこと、それに伴う熱交換器の厚みの縮小が原因だと考えられる。

4.3 吸着質に R134a を用いたときの運転条件によるシステムの性能の比較

4.3.1 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

4.1.1 と同様に、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高くなる。また、温度差のピーク値について、凝縮温度が高くなると、脱着温度の違いによるピーク値の差が大きくなる。いずれも、R134a 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。

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。

また、吸着温度が 25°C のとき、合計発熱量の実験値が理論値を下回った。脱着時に、ある程度の R134a が吸着器の中に残留していたことが原因だと考えられる。

4.3.2 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

蒸発温度が低くなると、温度差のピーク値が大きくなった。凝縮温度が低くなると有効吸着量が大きくなること、蒸発潜熱が大きくなること、吸着直前の吸着器と蒸発器の圧力差が蒸発温度ごとにあまり変わらないことが要因だと考えられる。

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

上記と同様に、蒸発温度が低くなると、平均発熱量のピーク値が大きくなった。また、凝縮温度が低くなると有効吸着量が大きくなるので、時間の経過による発熱量の逆転は起きなかった。

合計発熱量の経時変化について

蒸発温度が高くなると、吸着平衡に達するまでの時間が短くなることが確認された。

4.4 吸着質にエタノールを用いたときと、R134aを用いたときの性能の比較

熱交換器の出入口温度差の経時変化について

吸着材の充填量が異なるので厳密な比較はできないが、凝縮温度が低くなるとR134aを用いたときの温度差のピーク値の方が大きくなり、凝縮温度が高くなるとエタノールを用いたときの温度差のピーク値の方が大きくなった。基本

的に R134a を用いたときの方が有効吸着量は大きく、また R134a の蒸気密度はエタノールの約 200~400 倍あるため、吸着開始直後の瞬間的な吸着量は R134a の方が大きくなる。しかし、エタノールの蒸発潜熱は R134a のおよそ 5 倍になる。よって、低温下では R134a のピーク値が大きくなるが、温度が高くなると、エタノールのピーク値が大きくなり大小関係が逆転したと考えられる。

単位時間当たりの発熱量の経時変化について

吸着材 1g 当たりの発熱量から、瞬間的に大きな発熱量を得るには、環境温度が低いときは R134a、環境温度が高いときはエタノールを用いることが有効であると考えられる。

平均発熱量の経時変化について

吸着材 1g 当たりの発熱量から、平均発熱能力という観点では、環境温度が低いときは R134a、環境温度が高いときはエタノールを用いることが有効であるが、長時間運用する場合は、総じてエタノールの方が有効であると考えられる。

合計発熱量の経時変化について

吸着平衡に達する時間について、R134a の方がエタノールより短くなることが確認された。R134a の蒸気密度が大きいことが原因だと考えられる。

また、蒸発潜熱の違いにより、最終的な合計発熱量はエタノールの方が大きくなることが確認された。

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特任助教 Frantisek Miksik 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環境エネルギー工学専攻宮崎研究室に所属する、Mr. Ko Jaedeok, Mr. Abirham Yemanebirhan Tadesse, Mr. Colombatantirige Uthpala Perera, Ms. Chairunnisa, Mr. Yang Changru, Mr. Ahmed Youssef, Mr. Purjam Mojtaba, Mr. Seo Sang Won, Mr. Yang Cheng, Mr. Haoulomou Pepe, Mr. Chen Haonan, Mr. Mansoor Abdul Aziz, Mr. Motaz Mabrok Mohamed, Mr. Johnson Yang, Mr. Sagar Saren, Mr. Hao Yu, 金光 聖人氏, 田島 大輝氏, 土井 裕介氏, 竹田 将氏, 井田 晴也氏, 登川 智也氏, 富來 昌哲氏, 中島 隆宏氏, 郡 光春氏, 川喜田 幹太氏, 前城 裕太氏には、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] Ali. A. Abdel Aziz, S.I. Hatab, M. Moawed, A.E. Zohir, Nabil M. Berbish, Applied Thermal Engineering, Vol.131, pp897-909, 2018
- [2] 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
- [3] M. M. Dubinin, Adsorption in micropores, J. Colloid Interface Sci. 23, pp487-499, 1961
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Vincenza Brancato, Larisa Gordeeva, Alessio Sapienza, Angelo Freni, Andrea Frazzica, Applied Thermal Engineering, Vol.105, pp28-38, 2016
- [7] Hyun-Sig Kil, Taegon Kim, Koichiro Hata, Keiko Ideta, Tomonori Ohba, Hirofumi Kanoh, Isao Mochida, Seong-Ho Yoon, Jin Miyawaki, Applied Thermal Engineering, Vol.72, pp160-165, 2014
- [8] Skander Jribi, Bidyut Baran Saha, Shigeru Koyama, Anutosh Chakraborty, Kim Choon Ng, Applied Thermal Engineering, Vol.50, pp1570-1575, 2013
- [9] K.H. Patil, S. Sahoo: Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol.52, pp267-282, 2018

- [10] I.I. El-Sharkawy, K. Uddin, T. Miyazaki, B.B. Saha, S. Koyama, J. Miyawaki, Seong-Ho Yoon: International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.73, pp445-455, 2014
- [11] 川上隼人, 吸着・脱着現象を利用した動力回収サイクルに関する研究, 修士論文, 九州大学, 2018
- [12] 金光聖人, フロン系冷媒による吸着冷凍サイクル挙動の実験的研究, 学士論文, 九州大学, 2018
- [13] 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, October, 2015
- [14] Kutub Uddin, Md.Amirul Islam, Sourav Mitra, Jong-boong Lee, Kyaw Thu, Bidyut Baran Saha, Shigeru Koyama, Applied Thermal Engineering, Vol.129, pp117-126, 2018
- [15] 非定常細線法によるエタノール水溶液の比熱実測値, 一般社団法人アルコール協会, [http://www.alcohol.jp/expert/expert_table/04hinetu.pdf] (最終検索日: 2021年1月5日)
- [16] アサヒクリン AK-124a の熱力学特性, AGC 株式会社, [http://www.agc-chemicals.com/file.jsp?id=jp/ja/products/pdf/ASAHIKLIN_AK-134A_07.pdf] (最終検索日: 2021年1月5日)
- [17] 松尾一康, 流体の力学, オーム株式会社, 2008, pp96-103