

天然メソポーラス材料を用いた低コスト吸着式ヒートポンプの研究開発  
(その19) コルゲート熱交換器とプレートフィンチューブ熱交換器の性能比較

Research and Development of Low-Cost Adsorption Heat Pump  
using Natural Mesoporous Material

19<sup>th</sup> Report: Performance Comparison of Corrugate and Plate Fin-tube Heat Exchangers

○賀方 (北海道大学) 正会員 長野 克則 (北海道大学)

正会員 外川 純也 (日本熱源システム)

Fang HE\*<sup>1</sup> Katsunori NAGANO\*<sup>1</sup> Junya TOGAWA\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Hokkaido University \*<sup>2</sup> Nihon Netsugen Systems Co. Ltd.

This study aims to improve the cooling performance of adsorption heat pump (AHP). Two types of heat exchangers (HEX), which are corrugate HEX and plate fin-tube HEX, are employed in a 100 W scale AHP and the cooling performance are evaluated. The temperature distributions of different types of HEXs are measured and the effect on the cooling performance is analyzed. It was found that corrugate HEX shows better heat transfer performance than plate fin-tube HEX at the surface of adsorbent and higher SCP can be obtained, though COP of corrugate HEX than those of fin-tube HEX due to larger water amount and heavier HEX.

## はじめに

吸着式ヒートポンプ(AHP)は、再生可能エネルギーの利用及び省エネルギーの、その開発も進まれてきた。80℃以下の低温排熱や太陽集熱器による温水を利用できる反面、効率は0.5程度と高くはなく、システムコストが高く、筐体も大きいなどのデメリットがあり、広い普及は至っていない。

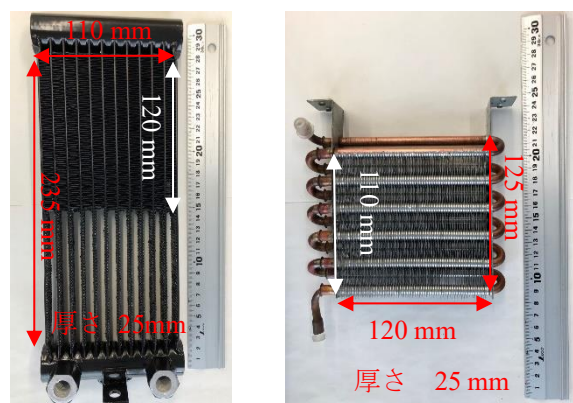
本研究室では、安価な天然メソポーラス材料である稚内層珪質頁岩(WSS)に塩化リチウムを担持することで、低コスト化と高性能化を両立できる吸着式ヒートポンプの開発を目指している。前報では、ラボスケールのAHP試験機を試作し、熱回収・物質回収を用いて性能向上を行った[1][2]。特注した12mm厚さのコルゲート熱交換器に吸着材を充填して吸着器として使用し、AHPの冷熱性能を評価した。

本研究では、同等の吸着材を持つ同じ寸法のコルゲート熱交換器とプレートフィンチューブ熱交換器を試作し、AHPを用いて性能評価を行った。吸着・再生過程を切り替える際の温度変化を測定し、熱交換器の伝熱性能を明らかにすることを研究目的とした。

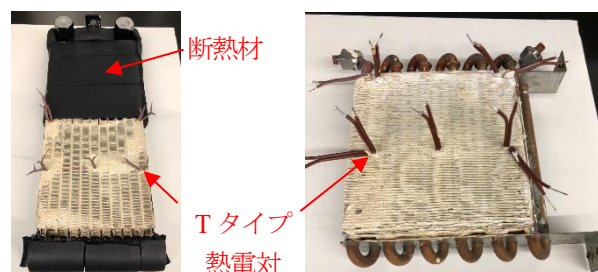
## 1. 実験装置と評価方法

### 1.1 熱交換器

吸着器はAHPの核であり、AHPの性能と特徴を決めている。吸着器として使われる熱交換器は吸着・脱着のスピードへ大きく影響を与え、熱交換器タイプによるAHP



(a) コルゲートタイプ (b) フィンチューブタイプ  
図-1 吸着器用熱交換器



(a) コルゲートタイプ (b) フィンチューブタイプ  
図-2 吸着材充填熱交換器(ad-HEX)

の冷熱性能変化の検討が必要となる。本研究の対象である市販されているコルゲート熱交換器(235 mm × 110 mm × 25 mm)とフィンチューブ熱交換器(125 mm × 120 mm ×

表-1 吸着材充填熱交換器

タイプ	熱交換器	吸着材	充填密度	水保有量
	重量 [g]	重量 [g]	[g/L]	[g]
コルゲート	493	111.4	337.6	165.6
フィンチューブ	238	109.3	331.2	61.7

25 mm)は図-1 (a), (b) を示し, 一部分のフィンを除去し, 充填部分の寸法は同じの 120 mm × 110 mm × 25 mm に調整した. 20%の塩化リチウムが担持した WSS 塗液を熱交換器フィンの中に流し込み, 120°Cのオーブンによって乾燥する. 吸着材がない部分は断熱材を用いて断熱処理し, 吸着器用吸着材充填熱交換器(ad-HEX)が得られた(図-2). T タイプの熱電対は吸着材を充填する際に吸着材の内部及び表面に差し込み, 実験中の温度変化を測定する. Ad-HEX の情報を表-1 に示す. 熱交換器の冷媒通路に水の最大重量は水保有量である. コルゲート熱交換器とプレートフィンチューブ熱交換器に充填する吸着材を調整し, 充填密度が同等の 335 g/L 程度となった.

### 1.2 実験装置

本研究で用いる小型 AHP は図-3 を示す. ステンレスバケツを各チャンバーの容器として使われている. 吸着器チャンバーは直径 270 mm, 深さ 270 mm であり, 1つの吸着器に 1つの ad-HEX を設置しておく. 蒸発器チャンバーの直径と深さはそれぞれ 140 mm, 70 mm であり, 凝縮器チャンバーの直径と深さはそれぞれ 140 mm, 140 mm となる. 熱損失を削減するため, 各チャンバー及び配管を断熱材で断熱処理した.

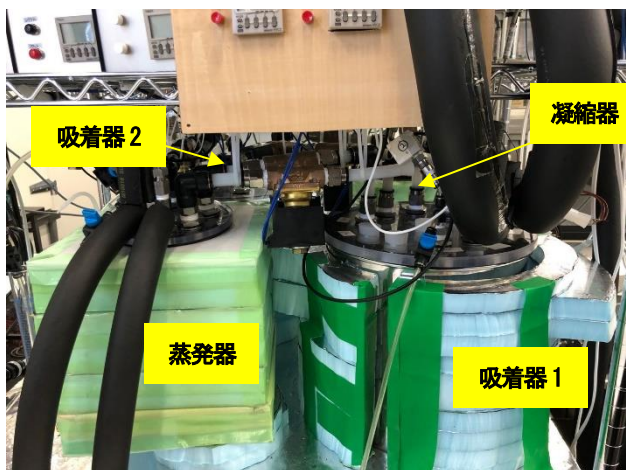


図-3 実験装置

### 1.3 実験操作方法

図-4 に本研究の実験系統図をしめす. 再生温水, 吸着・凝縮冷却水及び蒸発器の冷水は 1kW 加熱・冷却能力を持つ循環恒温槽によってそれぞれに供給する. 各チャンバーと循環恒温槽は電バルブで繋ぎ, タイマーによって開閉の制御を行う. 各チャンバーの出入口に温度センサーを設置して温度を測定する. 凝縮器に凝縮して貯まると

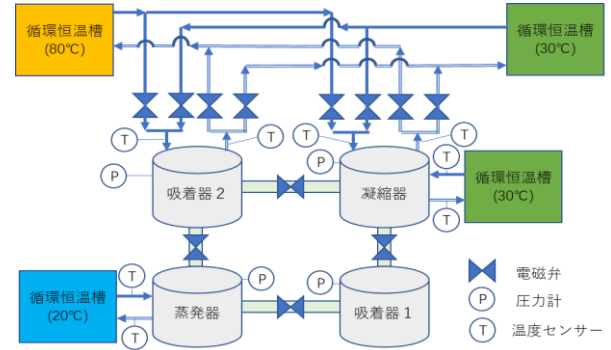


図-4 実験系統図

同等の水を吸着・再生過程切り替える際に蒸発器に補充することで, 蒸発器にの水を一定に維持する.

実験操作方法は, 実験開始前に, 容器内を吸引するとともに, 2つの吸着器に 80 °C の温水を供給して十分に乾燥する. その後, 凝縮器, 蒸発器には一定温度の冷水をそれぞれ供給するとともに, 吸着器 1 を温水から冷却水に切り替えることで, 吸着過程が開始する. 一定時間経過後, 吸着器 1 と吸着器 2 の温水と冷却水を切り替える. これを交互に繰り返すことで, 吸着-再生サイクルとした.

### 1.4 評価指標

冷熱量  $Q_c$  および再生熱量  $Q_h$  は(1), (2)式よりそれぞれ求めた. COP は(3)式のように, 冷熱量を再生熱量で除して求めた. 吸着材重量あたりの冷熱性能 SCP は, (4)式で示したように, 冷熱量  $Q_c$  を吸着材の重量  $m_{dry}$  と, 吸着-再生時間を 1 サイクルとしたサイクルタイム  $t_{cycle}$  で除して求めた.

$$Q_c = \int_0^{t_{sor}} \dot{V}_{evp} \rho_w c_{p,w} (T_{in,evp} - T_{out,evp}) dt \quad (1)$$

$$Q_h = \int_0^{t_{reg}} \dot{V}_{ads} \rho_w c_{p,w} (T_{in,ads} - T_{out,ads}) dt \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_c}{Q_h} \quad (3)$$

$$SCP = \frac{Q_c}{m_{dry} \cdot t_{cycle}} \quad (4)$$

## 2. 冷熱性能

AHP の基本性能を把握するため, 表-2 に示す実験条件でそれぞれに行った. 再生温水流量と吸着冷却水流量をそれぞれ 1.48 L/min, 1.69 L/min に維持した. なお, サイクル時間は 2 分間隔で 10~18 分(吸着時間 5~9 分)まで変化させた. 結果を図-5 に示す. すべてのケースはプレートフィンチューブの COP がコルゲートのより高く見

表-2 実験条件

温度	再生	吸着	凝縮	蒸発器送水
[°C]	80	30	30	20

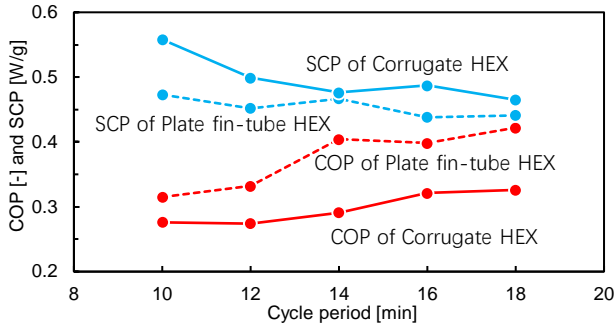


図-5 サイクル時間変化の実験結果

られる。14 分間サイクルの場合、コルゲートとプレートフィンチューブの COP がそれぞれ 0.29, 0.44 となる。一方、コルゲートはプレートフィンチューブより高い SCP が得られ、特に 10 分間サイクルでは最大差になる。サイクル時間を 14 分とするケースで、コルゲートはプレートフィンチューブの と SCP はそれぞれ 0.48 W/g, 0.47 W/g であった。

14 分間サイクルのケースの再生熱量、冷熱量、COP 及び SCP を表-3 に示す。同等の吸着材を充填したコルゲートは冷熱量が 1726 J 多いが、再生熱量が 47238 J 程度多く、結局 COP が低い 0.29 であった。その原因は、本研究で使用するコルゲート熱交換器は元々のサイズが大きい、余計な部分が多いこと。表-1 に示すように、吸着材重量に対する熱交換器の重量と水保有量がプレートフィンチューブと比べて明らかに多いであり、再生の場合にコルゲートにはより多い顕熱がかかる。(2)式を用い、この部分の熱交換器と冷媒の水を 30 °C から 80 °C まで加熱するため約 32000 J の熱量が必要となる。前記の熱量を削減することができれば、プレートフィンチューブと同等の COP をえることが期待できる。なお、プレートフィンチューブ熱交換器はコルゲート熱交換器の吸着材重量に合わせて少なめに充填した。軽量化の特徴を持つプレートフィンチューブ熱交換器の吸着材を増やす場合、さらに高い COP が得られると予測できる。

$$Q_{h,s} = m \times C_p \times \Delta T \quad (5)$$

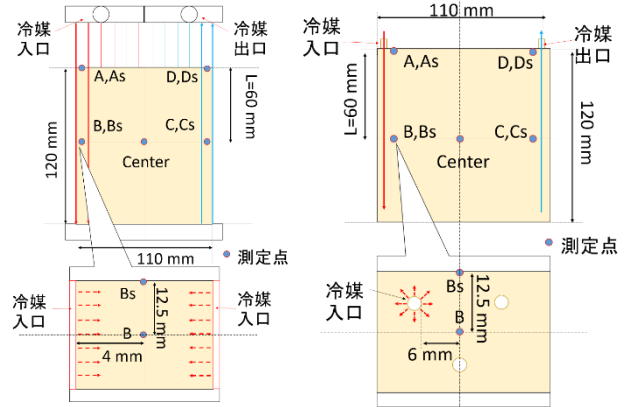
### 3. 温度変化特性

#### 3.1 熱交換器

冷熱性能実験結果により、コルゲート熱交換器はプレートフィンチューブ熱交換器より高い SCP を示す。コル

表-2 7分間サイクルの実験結果

	コルゲート	プレートフィンチューブ
冷熱量	45571 J	43845 J
再生熱量	157346 J	110108 J
COP	0.29	0.4
SCP	0.48 W/g	0.47 W/g



(a) コルゲート (b) プレートフィンチューブ

図-6 熱電対の設置

ゲート熱交換器が良い伝熱性能を持つことが原因と考えるが、それを明らかにするため、再生・吸着過程の吸着材温度変化を測定した。

ad-HEX に設置した熱電対を図-6 に示す。吸着材が充填する際に熱電対を設置し、オープンで乾燥して固定する[3]。一つの測定点では、隣の冷媒通路の真ん中に深さ 12.5 mm の位置に内部のセンサー A, B, C, D, 及び表面のセンサー As, Bs, Cs, Ds を設置した。冷媒が流れる方向に A, B, C, D を順番に設置し、A と As が冷媒の入口付近であり、B と Bs は A と As から 60 mm のところにある。D と Ds が冷媒の出口付近であり、C と Cs は D と Ds から mm のところにある。なお、ad-HEX の中央、深さが 12.5 mm の位置にセンサー center を設置し、中央温度を測定する。

温度条件が表-2 が示すように、サイクル時間を 14 分間に設定して実験を行った。1 つ代表的なサイクルの実験結果は図-7 を示す。実線と点線がそれぞれにコルゲート熱交換器とプレートフィンチューブ熱交換器を表し、赤線と青線がそれぞれに内部の温度と表面温度を表す。前半(0~7 分間)は吸着過程であり、後半(7~14 分間)が脱着過程である。内部の温度(赤線)は吸着・再生過程を問わず、プレートフィンチューブのほうが速く変化する。予測と異なる原因は前述と同じく、コルゲート熱交換器を加熱・冷却する場合により多い熱量・冷熱量が必要であり、切り替えてからしばらくの間に顕熱に熱量・冷熱量をかけ、温度変化がプレートフィンチューブより遅いとなる。表面温度(青線)は再生・吸着過程切り替えてしばらくの間に、プレートフィンチューブの上昇・低下が速いが、再生・吸着過程終了時では、コルゲート熱交換器の表面温度がより上昇・低下となる。それはコルゲート熱交換器はもっと良い伝熱性能を持っていることを表すと思われる。同じ測定点の内部温度と表面を比較し、再生過程の温度差が吸着過程より大きく見えられ、再生速度が吸着速度より速いことがわかる。そこで、再生過程終了時では、内部温度と表面温度が明らかに温度差がある。実験準備の段階



で充分再生後の内部と表面温度も 2~5°Cの温度差があるため、まだまだ熱損失があると表される。ad-HEX の中央部温度を代表的な温度とし、**図-8** を示す。中央部温度は吸着過程でほぼ重ねて低下するが、再生過程では前述と同じく、顕熱に熱量をかける場合にコルゲートの温度が低い、後半ではより高い温度になった。

以上の結果から、熱交換器の重量及び水保有量はシステムの冷熱性能、伝熱性能効果に大きく影響を与えていることが分かる。プレートフィンチューブ熱交換器は吸着材重量に対し、熱交換器重量と水保有量が少ないため軽量化の特徴があり、吸着材充填量を増やしてサイクル時間を伸ばすと、さらに高いCOPが期待できる。コルゲート熱交換器は吸着材重量に対する熱交換器充填量と水保有量が大きいため軽量化が難しいが、良い伝熱性能を持ち、高いSCPを求めることができる。そこで、プレートフィンチューブ熱交換器の厚さが銅管によって制限され、市販されているものは大体 25 mm まで溜まっている。コルゲート熱交換器はもっと薄くなることできる。市販品は 16 mm であり、本研究室の特注品が 12 mm まで薄くなることでき、さらに高いSCPが期待できる。12 mm コルゲート熱交換器との比較は今後行うとなる。

5. 結論

同じ寸法のコルゲート熱交換器とプレートフィンチューブ熱交換器を試作し、AHP の冷熱性能と伝熱性能性能を評価した。

- 1) 80 °C-再生, 30 °C-吸着, 30 °C-凝縮, 20 °C-蒸発器送水の条件で実験を行い、コルゲート熱交換器は高いSCPを得たが、低いCOPを示した。熱交換器重量と水保有量により、冷熱性能に多く影響を与えている。
- 2) 吸着材の温度変化を基づいて、コルゲート熱交換器がよりいい伝熱性能を持っている。
- 3) コルゲート熱交換器は高いSCPを得ることができ、プレートフィンチューブ熱交換器を用いて高いCOPを求めることができる。

記号一覧

$C_{p,w}$ : 水の定圧比熱 [J/(g・K)]	$m_{dry}$ : 吸着材乾燥重量 [g]
$C_p$ : 定圧比熱 [J/(g・K)]	$m$ : 重量 [g]
$Q_c$ : 冷熱量 [J]	$Q_r$ : 再生熱量 [J]
$Q_{hs}$ : 顕熱量	$\dot{V}$ : 流量 [L/min]
$T$ : 温度 [K]	$t$ : 時間 [s]
$\rho_w$ : 水の比重 [g/m <sup>3</sup> ]	
ads: 吸着器	cycle: 吸着再生サイクル
evp: 蒸発器	in/out: 入口/出口
reg: 再生過程	sor: 吸着過程

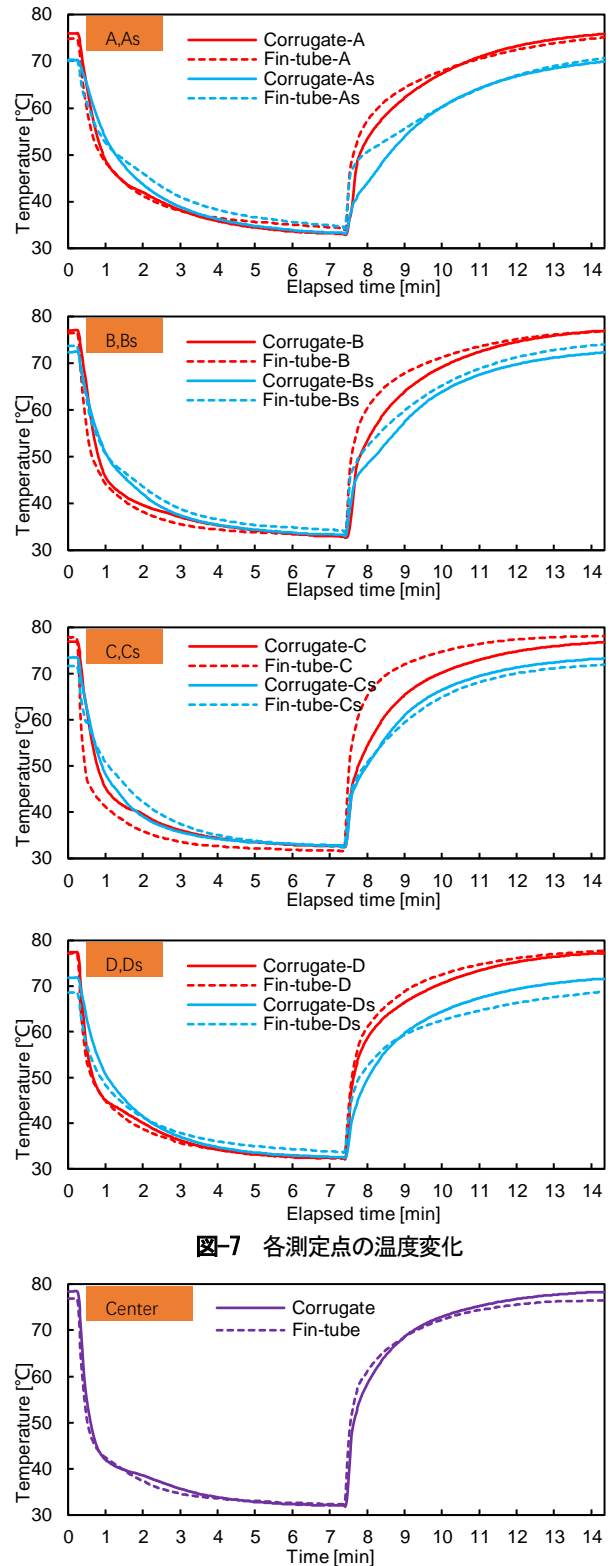


図-7 各測定点の温度変化

図-8 中央測定点の温度変化

参考文献

- 1) 賀方, 長野克則, 外川純也, 空気衛生学会・北海道支部第 52 回学術講演要旨集(2019)
- 2) 平田隆介, 長野克則, 外川純也, 黒川麻美, 空気衛生学会・北海道支部第 52 回学術講演要旨集(2019)
- 3) M. M. Saleh, et al. (2020), Int. J. Applied Thermal Engineering. 164, 114426