

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月18日現在

機関番号：13301 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560880
 研究課題名（和文） 無機塩・炭素系複合吸着材を適用する高エネルギー密度の水蒸気吸着冷凍機の開発
 研究課題名（英文） Development of high-efficiency water sorption refrigerator using an inorganic salt-supported carbonaceous sorbent
 研究代表者
 汲田 幹夫（KUMITA MIKIO）
 金沢大学・自然システム学系・准教授
 研究者番号：60262557

研究成果の概要（和文）：吸着冷凍機の冷熱出力密度を向上させるために、高密度活性炭素繊維（HDACF）の調製と、その塩化カルシウム CaCl₂との複合化、さらには、HDACF の伝熱促進について検討を行った。その結果、フェノール樹脂繊維を出発原料として、圧縮加熱、炭化、賦活処理により種々の見掛け密度の HDACF が調製可能で、溶液含浸法にて CaCl₂/HDACF 複合材を得ることができ、それらは低水蒸気圧域における水蒸気吸着能を示した。また、HDACF はアルミニウムメッシュ等との複合化も可能で、これらは吸着冷凍機用の蓄水材として機能する可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：To improve a cold output from water sorption refrigerators, we focused on sorption materials, and examined HDACF (High-Density Activated Carbon Fiber) and/or CaCl₂/HDACF composite sorbent for preparation procedures, water sorption performances and heat transfer enhancement. Experimental results showed that HDACFs with various apparent densities could be obtained from phenolic fibers by a hot-briquetting, carbonization and activation treatments. CaCl₂/HDACFs, which were easily prepared by a solution impregnation method, have superior water sorption performance in the lower vapor pressure range. HDACF could be combined with aluminum materials such as fine wires, wire mesh and fine particles. These results indicated that HDACF or CaCl₂/HDACF composite sorbent would be promising materials for high efficiency water sorption refrigerators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：エネルギー変換工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：省エネルギー，吸着冷凍機，金属塩添着，活性炭素繊維，水蒸気吸着

1. 研究開始当初の背景

水やアンモニアなどの液体冷媒と、シリカゲル、ゼオライト、活性炭等の固体吸着材を

作動系とする吸着冷凍機は、冷媒の蒸発・凝縮現象と、冷媒-吸着材間の吸脱着現象を利用して、冷凍、冷房、冷却用の冷熱を生成し得る熱駆動型の熱変換機器のひとつである。

現在、シリカゲル／水系やゼオライト／水系の吸着冷凍機が主に産業用として実用化されているが、競合機器である吸収冷凍機に比べ、装置が大型で重く、さらには高額であるために、省エネルギー効果は認められつつもその普及はあまり進んでいない。

吸着冷凍機では、冷媒の蒸発と吸着材への蒸気吸着の操作工程と、吸着材の加熱再生と蒸気凝縮の工程が交互に繰り返されるため、吸着材を充填した吸着熱交換器が複数必要となる。また、一般に多孔質の固体吸着材は熱伝導性に劣るため、迅速な吸着操作と加熱再生操作を実現する目的で、吸着材充填層内には多くの伝熱フィンが挿入されている。これらが本冷凍機の大型化、つまり、装置単位容積あたりの冷熱出力密度の低下をもたらす最大の原因になっている。

現在、吸着冷凍機の小型高性能化に向けて、冷媒蒸気吸着性能の向上を図るための新規吸着材の設計・製造、既存吸着材の微粒化、他材料との複合化、伝熱フィンとの一体化等の検討が進められている。本研究では、吸着材の高密度充填が実現可能な高密度活性炭素繊維 (HDACF) に着目し、これに水蒸気吸着能を付与することで、HDACF が比較的大きな蒸発潜熱を持つ水を冷媒とする吸着冷凍機に適用可能な吸着材料になり得ると考えるに至った。

2. 研究の目的

吸着冷凍機の冷熱出力密度を向上させるためには、大きな蒸発潜熱を有する冷媒物質と、その蒸気を迅速かつ多量に吸脱着する吸着材を用いるとともに、吸着材層の充填密度と伝熱速度を上昇させることが重要である。

これらの要件を可能な限り満たすために本研究では、大きな比表面積を有し、迅速吸着が可能な活性炭素繊維 (ACF) に着目し、その高密度成形体 (HDACF) の調製を行うとともに、水 (候補冷媒) との反応性に富む塩化カルシウム CaCl_2 との複合化を行うことで高密度に冷媒を収着する新規材料の開発を目指した。調製した CaCl_2 /HDACF 複合材については、その水蒸気収着特性の評価結果に基づいて収着冷凍機の蓄水材としての適用性について検討を行った。また、HDACF のさらなる熱伝導性の向上を図るために、アルミニウム材料 (微粒子, 細線, メッシュ) と HDACF の複合化や、アルミニウム平板と HDACF の一体化についても検討を行った。

なお、本研究では、 CaCl_2 /HDACF 複合材への水分子の物理吸着と、 CaCl_2 の水和・吸収反応を総称して“収着”と表記する。

3. 研究の方法

(1) 原料繊維

本研究では、熱硬化性樹脂のひとつであるフェノール樹脂繊維 (2 denier, 平均一次繊維径 17 μm) を HDACF の出発原料とした。

(2) HDACF の調製

フェノール樹脂繊維 3.0 g を、内径 17 mm のステンレス製鋳型に充填し、油圧式卓上ホットプレスを用いて、試料繊維の上下から所定圧力で圧縮した。この状態を保ちながら試料を 8 K/min で 300°C まで昇温し、その後 20 min 保持することで、繊維が高密度に集合した成形体 (HDACF 前駆体) を得た。

次に、圧縮加熱により得られた前駆体を、電気炉内に設置した石英ガラス製円筒反応管に入れ、窒素ガス雰囲気中にて、120°C で 15 min 乾燥後、10 K/min で 900°C まで昇温し、同温度で 10 min 保持することで前駆体の炭化処理を施した。つづいて、反応管内を炭酸ガス雰囲気に置換した後、950°C にて 2 h 賦活処理を行うことで HDACF を調製した。

(3) HDACF への塩化カルシウム添着

HDACF への CaCl_2 添着には溶液含浸法を採用した。具体的には、HDACF を 200°C で 12 h 乾燥し、真空脱気を行った後に、25°C の CaCl_2 溶液に所定時間振盪させながら浸漬させた。添着液から取り出した試料を 200°C まで昇温焼成し、最後に真空脱気を行うことで CaCl_2 /HDACF 複合材を得た。なお、得られた複合材の CaCl_2 添着量は添着操作前後の試料重量変化から算出した。

(4) CaCl_2 /HDACF 複合材の水蒸気収着特性の評価

上記の手順で調製した CaCl_2 /HDACF 複合材に対する水蒸気の平衡収着量は、ガラス製蒸発・凝縮器を備えた磁気浮遊型天秤を用いて重量法により測定した。

4. 研究成果

(1) 活性炭素繊維の高密度化

本研究で採用した圧縮加熱法とその後の炭化・賦活処理により、フェノール樹脂繊維から見掛け密度の異なる円板状の HDACF を調製することができた。図 1 に、圧縮加熱時の圧力 P と、HDACF およびその前駆体の見掛け密度 ρ の関係を示す。

本図より、HDACF およびその前駆体の見掛け密度は、圧縮荷重の上昇に伴って増大する傾向にあり、前駆体の平均見掛け密度は $P=2$ MPa 時の 0.89 g/cm^3 から、40 MPa 時の 1.10 g/cm^3 まで変化した。一方で、炭化・賦活処理により得られた HDACF の見掛け密度は、試料毎のばらつきが大きいのが、前駆体のそれに比べて小さくなるのがわかる。これは、炭化時の熱分解物質の放出と、 CO_2 賦活時のガス化反応に伴う CO の放出により試料重量が減少することに起因すると考えられる。なお、

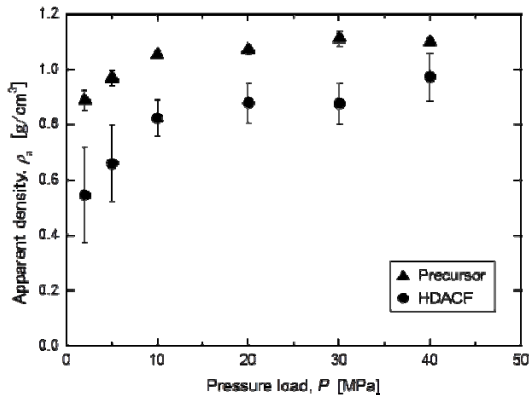


図1 HDACF とその前駆体の見掛け密度に及ぼす圧縮荷重の影響

HDACF とその前駆体の取得収率は、前者で 0.3 ~ 0.4, 後者で 0.9 程度であった。また, HDACF の比表面積がその見掛け密度の増大とともに減少することを確認した。

(2) CaCl₂ と HDACF の複合化

溶液含浸法による添着操作では, 最初に添着液である CaCl₂ 溶液の溶媒と溶質濃度について検討を行った。その結果, 疎水性表面を有する HDACF では, 水溶液よりもメタノール溶液の方が, 若干ではあるが多くの CaCl₂ を添着できることがわかった。また, 溶液中の CaCl₂ 濃度は高い方が添着に有利であることが確認されたため, 本研究では, 25°C における飽和 CaCl₂・メタノール溶液を添着液に採用した。なお, 含浸操作時において常に飽和濃度を維持できるように, 添着液には予め過剰量の CaCl₂ を入れた。次に, 含浸操作時間について検討を行った。その結果, HDACF の含浸時間が長くなるにつれて CaCl₂ 添着量は増大する傾向が得られたが, 12 h 処理において CaCl₂ 添着量がほぼ飽和に達することがわかった。

以上の結果を踏まえて, 0.41~1.06 g/cm³ の見掛け密度の異なる 20 種類の HDACF を, 飽和 CaCl₂・メタノール溶液に 12 h 浸漬させて CaCl₂ 添着を実施した。その結果を図 2 に

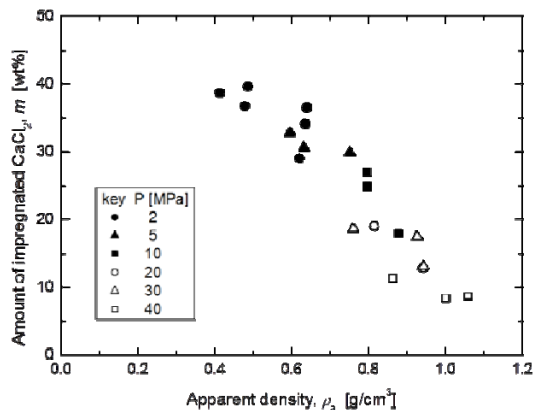


図2 HDACF への CaCl₂ 添着量と見掛け密度の関係

示す。なお, 図中の記号は圧縮荷重の別を表している。本図より, HDACF の CaCl₂ 添着量 m は, その見掛け密度に対して概ね負の相関があり, 見掛け密度が小さな HDACF の方が, より多くの CaCl₂ を添着できることがわかる。

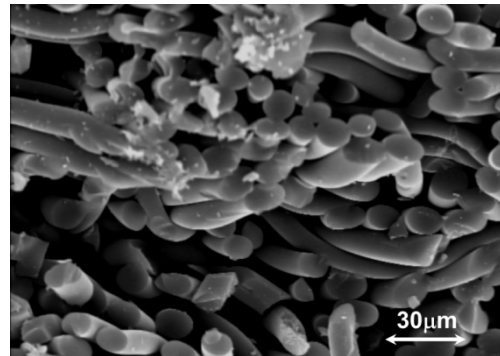


図3 CaCl₂/HDACF 複合材の断面 SEM 像

図3に, 圧縮荷重 2 MPa で調製した見掛け密度 0.48 g/cm³ の HDACF に CaCl₂ 添着を施して得られた複合材 (添着量 36.8 wt%) の断面 SEM 像を示す。これより, CaCl₂ は HDACF の表面だけでなく, その内部まで添着していることがわかる。この観察結果と図2の結果を考え併せると, 見掛け密度が小さな HDACF では, 一次繊維間の間隙が比較的大きいため, 添着液が HDACF 内部まで容易に浸透し, 結果的に多くの CaCl₂ が HDACF に添着されると推測される。また, 前述したように, 見掛け密度の小さな HDACF は相対的に比表面積が大きくなる傾向にあるため, CaCl₂ が HDACF の細孔内部にも添着されると考えれば, このことも添着量増大の一因に挙げることができる。なお, 具体的に本実験では, 圧縮荷重 2 MPa で調製した見掛け密度 0.49 g/cm³ の HDACF を担体として最大添着量 39.6 wt% の CaCl₂/HDACF 複合材 (最終見掛け密度 0.79 g/cm³) を, $P = 40$ MPa で調製した $\rho_a = 1.06$ g/cm³ の HDACF では CaCl₂ 添着量 8.7 wt% の複合材 (最終見掛け密度 1.14 g/cm³) を得た。

(3) CaCl₂/HDACF 複合材の水蒸気収着特性

添着量が異なる 6 種類 ($m = 8.6 \sim 39.6$ wt%) の CaCl₂/HDACF 複合材に対する 30°C における水蒸気の平衡収着量を測定した。その結果を図4に示す。なお, 横軸の相対圧 ϕ は, 30°C における飽和水蒸気圧に対する収着平衡時の水蒸気圧を表し, 本研究では, $\phi = 0 \sim 0.3$ の範囲で収着等温線を作成した。また, 各複合材の焼成時の昇温速度は 10 K/min に固定した。本図より, いずれの複合材も低相対圧域において水蒸気を収着することから, 本来, 疎水性を示す HDACF に CaCl₂ を添着することで, 水蒸気に対する収着能を付与できることがわかる。また, CaCl₂ 添着量の増大に伴い水蒸気収着量が増大する傾向が窺え, CaCl₂ 添着量, すなわち, 添着担体となる HDACF の見掛

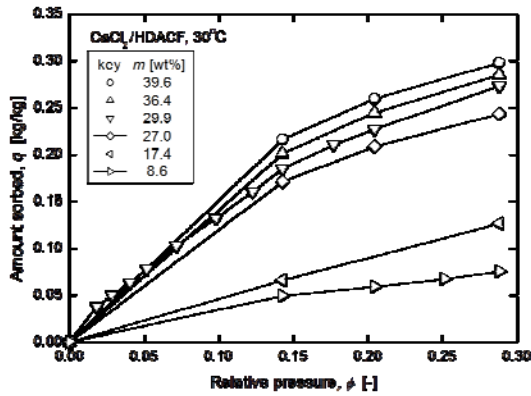


図 4 CaCl₂/HDACF 複合材の水蒸気収着等温線 (30°C)

け密度によって CaCl₂/HDACF 複合材の水蒸気収着能を制御できることが示唆される。さらに、水蒸気系吸着冷凍操作に好適な特性を示すとされている粒状シリカゲル（富士シリシア化学製，RD2560）の 30°C， $\phi = 0.3$ における平衡水蒸気吸着量の測定値が約 0.2 kg/kg であったことから，本研究で調製した CaCl₂/HDACF 複合材の中では，CaCl₂ 添着量 27.0 wt% 以上の複合材がシリカゲルを上回る水蒸気収着能を有することが明らかとなった。

図 5 に，CaCl₂/HDACF 複合材を調製する際の最終操作である焼成時の昇温速度を 1，10 K/min として得られた複合材に対する水蒸気収着量の経時変化を示す。なお，収着温度は 30°C，相対圧は 0.143 に固定した。いずれの複合材においても測定開始後，速やかに水蒸気が収着されるが，10 K/min で昇温焼成した複合材 ($m = 36.4$ wt%) の方が，1 K/min のそれ ($m = 34.1$ wt%) より，迅速に水蒸気を収着することがわかる。これは，焼成時の昇温速度が遅くなると CaCl₂ 結晶の生成と成長が促され，より大きな結晶が形成される，つまり，微細結晶に比べて水との水和反応の界面積が相対的に小さくなることに起因していると考えられる。

(4) 理論冷熱生成量

本研究で調製した CaCl₂/HDACF 複合材を水

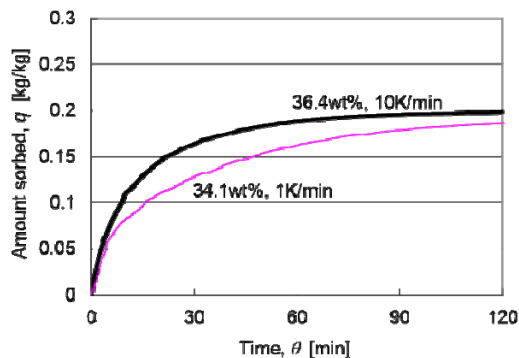


図 5 焼成時昇温速度が異なる CaCl₂/HDACF 複合材に対する水蒸気収着速度の比較

冷媒系の収着冷凍機に適用した場合の理論冷熱生成量を，その水蒸気平衡収着量に基づいて算出した。なお，収着冷凍機の標準操作温度は，収着 30°C，蒸発 10°C，加熱再生 80°C，凝縮 30°C を想定した。つまり，この場合の操作相対圧範囲は $\phi = 0.09 \sim 0.29$ に相当するため，この範囲での有効水蒸気収着量 Δq を図 4 の収着等温線から見積もり，以下の式 (1) および式 (2) から，冷媒水の蒸発に伴う冷熱生成量 CE (cooling effect) を，複合材の重量基準 CE_w と体積基準 CE_v で評価した。

$$CE_w = \Delta H_{ev} \cdot \Delta q \quad (1)$$

$$CE_v = \rho_a \cdot CE_w \quad (2)$$

ここで， ΔH_{ev} は水の蒸発潜熱， ρ_a は複合材の見掛け密度を表す。

表 1 に，見掛け密度 0.41~1.06 g/cm³ の CaCl₂/HDACF 複合材を水蒸気収着冷凍機に適用した場合の冷熱生成量を示す。また，RD2560 シリカゲルの結果も併示する。

本表より，自明のことであるが，有効水蒸気収着量 Δq が増大すれば，理論冷熱生成量 CE も上昇することになるので，シリカゲルの Δq 値を上回る CaCl₂ 添着量 27.0 wt% 以上の複合材は，シリカゲルの CE 値を超える冷熱生成能を示した。また，複合材見掛け体積基準の冷熱生成 CE 値は，添着量 17.4 wt% 以上の CaCl₂/HDACF 複合材において，シリカゲルのそれを上回り，39.6 wt%-CaCl₂/HDACF 複合材では，シリカゲルの値の 1.6 倍に達する。これらの結果は，活性炭素繊維の高密度化成形と成形体への CaCl₂ 添着が水冷媒系収着冷凍機の冷熱出力密度の向上に寄与することを示唆しており，複合材の調製においては，ACF を過度に高密度化するよりも，適度に密度を高め，より多くの CaCl₂ を添着する方が，冷熱生成能の向上には得策と言える。

表 1 CaCl₂/HDACF 複合材の冷熱生成能の比較

m [wt%]	Δq [kg/kg]	CE_w [kJ/kg]	CE_v [MJ/m ³]
8.6	0.044	109	123
17.4	0.084	232	209
27.0	0.135	334	361
29.9	0.156	386	409
36.4	0.157	388	376
39.6	0.161	398	315
silica gel	0.120	297	193

(5) HDACF の伝熱促進

一般の吸着冷凍機の冷熱出力は，吸着材粒子が充填された吸着熱交換器内の伝熱速度に依存する場合が多い。これは粒子充填層の低い熱伝導性に起因しており，冷熱出力向上には吸着熱交換器内の伝熱促進が不可避である。本研究では，HDACF の熱伝導性向上を

図るために、HDACF と伝熱フィンに多用されるアルミニウム平板との一体化と、アルミニウム材料と HDACF の複合化について検討を行った。

① Al 平板と HDACF の一体化

アルミニウム平板と HDACF の一体化では、市販有機系接着剤による接着法と、アルミニウム融解・再固化法について検討を行った。前者においては、エポキシ樹脂/ポリアミド系接着剤を用いて、HDACF を容易に Al 平板上に固着でき、その後の CaCl_2 添着も可能であることを確認した。後者では、厚さ 0.3 mm の Al 平板を HDACF で挟み、これを Al の融点である 660°C 以上に昇温し、一旦 Al を融解させることで HDACF の繊維間隙に Al を浸透させ、その後、冷却・固化することで一体化を試みた。しかし、加熱到達温度、冷却速度を種々変化させ、さらには、Al 平板-HDACF 間に一体化補助材として粒径 $30\ \mu\text{m}$ の Al 微粒子を添加したいずれの場合でも、Al 平板と HDACF の一体化は実現できなかった。これは、主に熔融アルミニウムと HDACF の親和性が乏しいためと推察される。

② Al/HDACF 複合材

アルミニウム材料として粒径 $30\ \mu\text{m}$ の微粒子、線径 0.1 mm の細線、 $5\times 5\ \text{mm}$ 角の開口部を有する厚さ 0.3 mm の平板、線径 0.28 mm の細線で構成される 16/18 mesh (開口率 66%) のメッシュを用い、HDACF との複合化について検討を行った。その結果、Al 微粒子あるいは Al 細線を原料フェノール樹脂繊維に混入させ、圧縮加熱、炭化、 CO_2 賦活の逐次処理を施すことで複合材の調製が可能で、特に、Al 細線の場合、初期 Al 混入率 20 wt% までの Al/HDACF 複合材を得た。しかし、炭化・賦活処理を 900°C および 950°C で施したため、Al が融解し、その痕跡として最終複合材の内部に微細な空隙が生じ機械的強度が低下することが認められた。

高温での炭化・賦活処理を回避して ACF の高密度化を達成する一方法として、水酸化カリウム KOH による低温薬品賦活について検討を行った。KOH/原料重量比 $R = 2\sim 4$ の範囲で変化させ、温度 $400\sim 600^\circ\text{C}$ の条件下で処理した結果、原料繊維および HDACF 前駆体の賦活が可能であり、 $R = 3$ の場合に賦活収率が最大になることがわかった。これを踏まえて、Al 平板に開けた $5\times 5\ \text{mm}$ 開口部に、フェノール樹脂繊維束を通し、これを圧縮加熱することで Al/HDACF 前駆体を調製し、その後、KOH 賦活を施した。その結果、前駆体は容易に作製することができるが、賦活の際の KOH 溶液浸漬時に前駆体中の Al の溶解が確認され、最終的に Al/HDACF 複合材を得ることはできなかった。

そこで、フェノール樹脂繊維を予め KOH 賦活 ($R = 3$, 400°C , 窒素雰囲気) して ACF を

作製し、これで開口率 66% の Al メッシュを挟み、 $P = 5\ \text{MPa}$, $8\ \text{K/min}$ の条件で 300°C まで圧縮加熱することで Al/HDACF 複合材の調製を行った。図 6 に示すように、本法により、Al メッシュが HDACF 層に挟み込まれた複合材の調製に成功した。しかし、本複合材の細孔構造特性を窒素吸着法により評価したところ、BET 比表面積 $3.36\ \text{m}^2/\text{g}$ 、細孔容積 $0.015\ \text{cm}^3/\text{g}$ 、平均細孔半径 $3.4\ \text{nm}$ となり、 CO_2 賦活により調製した HDACF の結果 ($996\ \text{m}^2/\text{g}$, $0.549\ \text{cm}^3/\text{g}$, $1.13\ \text{nm}$) と比較すると、Al/HDACF 複合材は微細孔が十分に発達しているとは言えず、吸着冷凍用に適用するためには、KOH 賦活条件等を見直す必要がある。

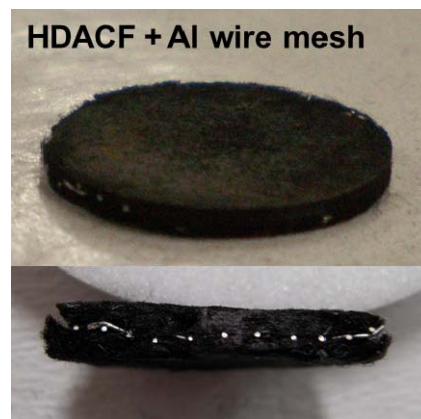


図 6 Al メッシュ/HDACF 複合材

③ Al 平板/HDACF 接着系のエタノール蒸気吸着実験

前述したように、HDACF の簡易かつ確実な伝熱促進法のひとつは、Al 平板と HDACF の接着である。そこで、圧縮加熱 ($P = 10\ \text{MPa}$, $8\ \text{K/min}$, $300^\circ\text{C}\cdot 20\ \text{min}$), 炭化 ($10\ \text{K/min}$, $900^\circ\text{C}\cdot 10\ \text{min}$), CO_2 賦活 ($950^\circ\text{C}\cdot 2\ \text{h}$) により調製した HDACF を極少量の接着剤を用いて Al 平板上に固着させた試料のエタノール蒸気吸着実験を行い、吸着進行時の試料温度の変化を観察した。図 7 に本実験で用いた蒸気吸着装置の概略を示す。Al 平板から上部は一定温度の容器内にあり、He ガスに同伴されたエタノール蒸気が試料上面に吹き付けられる構造になっている。また、試料上部表面には

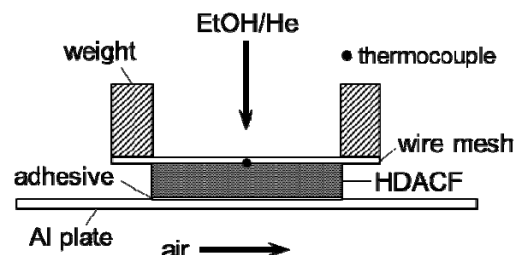


図 7 HDACF に対するエタノール蒸気吸着実験装置の概略図

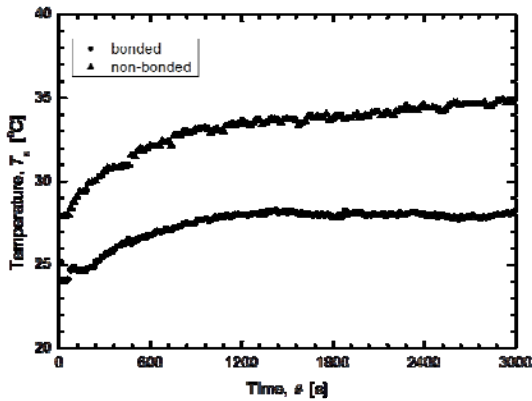


図 8 Al 平板-HDACF 接着系と圧着系のエタノール蒸気吸着時における HDACF 表面温度の経時変化

線径 0.1 mm の K 熱電対を取り付け、さらに、重りにより荷重を加えた。なお、接着剤を使用せず荷重のみで Al 平板上に圧着した場合を比較実験系とした。

図 8 に、エタノール蒸気吸着時の HDACF 上部表面温度の経時変化を、接着系と圧着系で比較して示す。なお、いずれの実験系も初期試料温度は 24°C とした。本図より、実験開始直後から吸着熱の発生により試料表面温度が上昇し、その上昇速度は接着系の方が圧着系に比べて緩やかで、温度上昇幅も小さいことがわかる。HDACF の温度は、エタノール蒸気吸着に伴って発生する吸着熱が HDACF に蓄積される速度と、HDACF から Al 平板を通して装置下部の空気流に伝達される速度に概ね依存するため、接着系では Al 平板と HDACF の接着層における熱抵抗が、圧着系に比べて小さいことから後者の寄与が大きく、その結果、表面温度の上昇が小さくなったと考えられる。したがって、Al 平板と HDACF の接着による一体化は HDACF 層の伝熱促進に効果的であると考えられる。

(6) 今後の展望

本研究では、水を冷媒とする吸着冷凍機の冷熱出力密度の向上を目指し、その蓄冷媒材に見掛け密度を高めた活性炭素繊維成形体 HDACF と水との反応性に富む塩化カルシウムの複合材を用いることを提案した。そして、調製した複合材の水蒸気収着特性を評価するとともに、HDACF の更なる熱伝導性能の向上を図るための材料調製を行い、CaCl₂/HDACF 複合材が水蒸気系収着冷凍機の蓄水材として機能し得ること、アルミニウム材との複合化により HDACF 層の伝熱促進が可能であることなどを明らかにした。現段階では、本研究で得られた成果を発表するには至っていないが、早急に成果をまとめて学会および学術雑誌等で発表したいと考えている。

本研究の実施期間内では、CaCl₂/HDACF 複合材および Al/HDACF 複合材を組み込んだ収着熱交換器の試作とその性能評価まで実施

することができなかった。CaCl₂/HDACF 複合材については、その水蒸気収着能を最大限引き出すための調製条件の最適化を行い、その水蒸気収脱着の繰り返し性能の検証を進めていきたいと考えている。また、アルミニウムを含む金属材料と HDACF の複合化、さらには、これに CaCl₂ 等の無機塩の添着を組み合わせ、高い水蒸気収着能と高熱伝導性を併せ持つ高性能複合蓄水材の実現に向けた検討を行い、最終的に、これら複合材を適用した実験室規模の収着冷凍機による冷熱生成試験を実施して実用化に向けた問題点の洗い出しとその改善に取り組んでいきたい。

5. 主な発表論文等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

汲田 幹夫 (KUMITA MIKIO)

金沢大学・自然システム学系・准教授

研究者番号：60262557

(2) 研究分担者

児玉 昭雄 (KODAMA AKIO)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：30274690