

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 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360084

研究課題名（和文） 自然エネルギーを利用する潜顕熱分離空調の研究

研究課題名（英文） Study on a desiccant air conditioning system driving by solar energy

研究代表者

飛原 英治 (HIHARA EIJI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：00156613

研究成果の概要（和文）：

本研究は、自然エネルギー、特に太陽熱を吸着材の脱着プロセスの熱源として有効利用することで、省エネ性の高い温、湿度分離デシカント空調システムを提案し、その基盤材料、基盤材料を担持した実吸湿ローターの平衡吸脱着性能と吸脱着速度の実験測定とモデリングを行い、その結果を踏まえて夏季の冷房除湿、冬季の暖房加湿できるデシカントサイクルの理論サイクル性能と実証実験を行い、提案したシステムはメソパラスシリカ（TMPS4A）と高分子収着材を用いた場合従来のシステムに比べそれぞれ25%および32%のエネルギー使用削減効果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

A desiccant air conditioning system driven by solar energy is proposed, and the absorption performance of two absorbents which can be regenerated at relatively low temperatures, i. e. mesoporous silica TMPS 4A and organic sorbent Exran, were experimentally studied. Both the experimental study on the absorption capacity and the cycle simulation about the energy saving potential by using solar energy for the generation of absorbents were conducted. Based on the experimental measurements of the absorption capacity and velocity of the two sorbents, cycle simulation were conducted considering a hybrid desiccant and heat pump air conditioning to control the humidity of the room, the solar energy was introduced as alternative energy for generation when available. Cycle simulation results of the hybrid desiccant and heat pump system were compared to that of a conventional cooling dehumidification system, it is shown that the proposed solar heat assisted desiccant air conditioning system has 25.1% or 31.9% higher COP when the TMPS4A or Exran is used, respectively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2012 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	1,230,0000	3,690,000	1,599,0000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：自然エネルギー， デシカント， 湿度調節， ヒートポンプ

1. 研究開始当初の背景

太陽エネルギーの利用では、太陽光発電が目立っているが、太陽熱の集熱効率は 50～60%と高く、設置コストも安価なため、一層の普及が期待される。ただし、わが国の太陽熱利用機器の市中ストックは年々低下し、これは過去の太陽熱給湯器の販売、メンテナンスの方法に問題があり、市場の信頼を失ったことが原因であるが、低炭素社会の実現のためには、冷房機能を有する太陽熱利用機器を開発し、業務分野にも太陽熱の利用拡大を図る必要がある。

従来、除湿を目的としたデシカント空調は、シリカゲルやゼオライトなどの吸湿材を使った乾式が研究されてきたが、COP が 0.5 程度と低いこと、水分の脱着には 100℃以上の熱源が必要なこと、大きな装置が必要でコスト高であるなどの欠点を持っていた。最近メソポーラスシリカ、高分子収着材など新素材が開発され、40℃の温熱でも脱着が可能であることが示された。この温度で脱着可能であれば、太陽熱、ヒートポンプ排熱両方で再生可能であり、COP の飛躍的向上が可能である。

2. 研究の目的

低炭素社会の実現のためには、わが国の一次エネルギー消費の 31.7%を占める民生部門のエネルギー消費の削減が不可欠で、中でも、民生部門のエネルギー消費の 30～40%を占める住宅、業務用ビルの空調・給湯にかかわるエネルギーの削減が必須である。本研究では、太陽熱を空調、給湯に有効に利用し、省エネルギーで快適性に優れた潜熱分離空調システムを研究開発することを目的とする。以下の機能を有するシステムの開発を目指す。

- (1) 年間にわたって太陽熱を有効に利用する上で重要な冷房機能を有すること
- (2) 潜熱処理（湿度の調整）と顕熱処理（温度の調整）を分離することにより、省エネルギーで快適な住環境を提供すること

3. 研究の方法

太陽熱、ヒートポンプ排熱を利用した潜熱、顕熱分離システムの開発のため、まず低温再生可能であるメソポーラスシリカおよび高分子収着材の吸着、脱着特性を実験的に把握し、そしてデシカントロータの実吸脱着特性の実験測定とシミュレーションによる理論解析を行う。さらに、提案したサイクルの省エネルギー能力を従来の冷却除湿システムと比べて評価する。

4. 研究成果

本研究は、自然エネルギー、特に太陽熱を吸着材の脱着プロセスの熱源として有効利用することで、省エネ性の高い温、湿度分離デシカント空調システムを提案し、その基盤材料、基盤材料を担持した実吸湿ロータの平衡吸脱着性能と吸脱着速度の実験測定とモデリングを行い、その結果を踏まえて夏季の冷房除湿、冬季の暖房加湿できるデシカントサイクルの理論サイクル性能と実証実験を行った。

(1) デシカント吸着材平衡吸着特性

本研究は、自然エネルギーである太陽熱の有効利用を旨とし、比較的到低い温度条件でも効率よく吸脱着でき、さらに平衡吸着量の大きいメソポーラスシリカと高分子収着材を選んだ。その基本吸脱着特性の評価を行うために、重量法測定装置を開発した。図 1 には通風時と重量測定時の様子を示す。左側にはデシカントロータを通風し吸着もしくは脱着を行うためにデシカントロータ部の両端が固定されている状態の図である。一方、計測時は、通風状態であると天秤が振動してしまい正確な記録が取れないため、バルブを切り替えてデシカントロータ部には空気が入らないようにしデシカントロータ部の下部に設置された天秤で計量を行う。吸脱着プロセスにおける吸湿ロータの重量変化を 1 分毎に直接計測し、その吸脱着速度および飽和吸脱着量の気流温度、風速による変化を明らかにした。

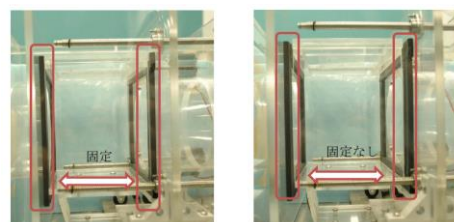


図 1 重量法吸着性能測定装置

本実験で用いる評価用デシカントロータのサイズを図 2 に示す、直径は 120mm、厚みは 40mm である。そのコルゲートサイズは $P=3.2\text{mm}$ 、 $H=1.9\text{mm}$ 、担持した吸着材の厚みは 0.2 mm である。

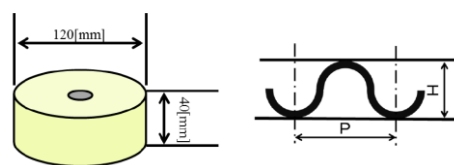


図 2 試験デシカントロータの寸法

吸着材ロータに加工される際の吸着量の変化を評価するために吸着材、シート、ロータそれぞれの形状において、25°Cにおける水蒸気吸着等温線の比較を図3に示す。測定吸着材はTMPS-4.0Aで、吸着材を担持したシートの吸着材含有率は45.7%である。吸着材からシート、ロータへ加工が進むにつれ吸着量が減少する傾向にあることが分かった。これは吸着材をシートに担持させるためのバインダー剤が吸着材の細孔を塞いでいる可能性が考えられ、そのため吸着量が減少してしまったと考えられる。またシートをコルゲート加工し、ロータに成形する際にもバインダー剤が使用されるため、さらに吸着量が減少すると考えられる。以上の結果よりロータの設計を行う際には、粉の状態での吸着量を評価するのではなく、ロータ成形後の吸着量で評価を行う必要である。

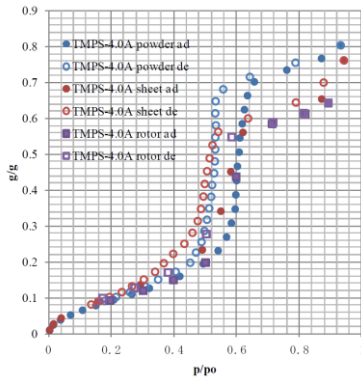


図3 吸着材、シートとロータの平衡吸着量の比較

(2) デシカント材の吸着速度評価

デシカントロータの吸脱着速度を図1に示す重量法測定装置を用いて計測し、また、それへの空気温度、湿度及び風速の影響を調べるために図4の実験サイクルを用いた。

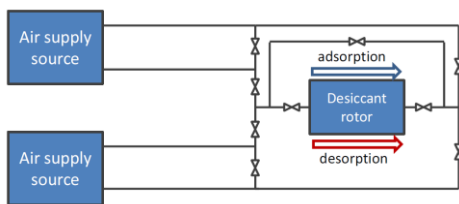


図4 デシカントロータ吸着速度測定サイクル

吸着材の吸脱着速度の評価に気流から吸着材までの総括熱伝達率、総括物質移動係数(或いは時定数)を実験結果から求める手法が多用されるが、それが空気側及び吸着材内部の熱、物質移動の物理現象を反映しないため、適用範囲が限られている。本研究は、図5示すような空気から吸着材表面までの対流熱伝達および物質移動、そして吸着内部の熱伝導、拡散をそれぞれモデリングすることで、

広い温度、風速範囲におけるデシカントユニットの吸着・脱着時の動特性を再現することができた。

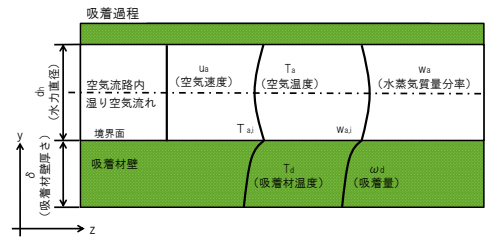


図5 シミュレーションモデル

湿り空気のエネルギ方程式、吸着剤内部の水蒸気の拡散方程式と界面での物質バランスの式をそれぞれ式(1)~(3)に示す

$$\rho_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a c_{pa} u_a \frac{\partial T_a}{\partial z} + \frac{1}{5} \rho_a h (T_a - T_{a,i}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega_d}{\partial t} = D_d \left(\frac{\partial^2 \omega_d}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_d}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho_a h_m (w_a - w_{a,i}) = \rho_d D_d \frac{\partial \omega_d}{\partial y} \Big|_{y=\delta} \quad (3)$$

吸脱着速度の実験測定及びシミュレーションとの比較の一例を図6に示す。乾球温度が25°C、相対湿度は20%と80%の空気を用いて吸着、脱着試験を行った。空気風速は0.6[m/s]、1.0[m/s]と1.5[m/s]三条件における実験とシミュレーションを行った。風速を上げることで吸脱着速度が上がる事が分かる。計算値は風速1.0[m/s]の実測データから吸着剤内部の物質拡散係数・熱伝導率をフィッティングにより求め、定数値として風速0.6、1.5[m/s]の計算にも適用した。結果、実験値と良い一致を見せることから、デシカント内部の熱・物質移動に対し風速は影響していないと考えられる。また、空気側の熱伝達率、物質伝達率は風速の関数になっているが、主な物性移動抵抗は吸着材側にあるため、空気側の熱移動、物質移動の抵抗による影響が少ない、空気風速による吸、脱着性能の変化は、ロータ流路内の空気の状態変化によるものであることを実験およびシミュレーション結果から分かった。

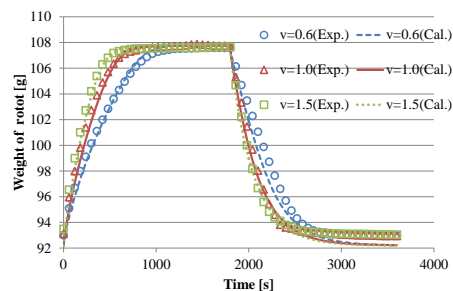


図6 吸脱着速度への風速の影響

また、温度の影響を調べるため空気温度 -5°Cにおいて同様な実験を行った。図7にその比較を示す、マイナス領域において25°Cの時と比べて吸脱着速度が共に大きく低下することが分かる。それは空気側の絶対湿度の減少による供給能力の低下による結果である。またシミュレーション結果からは、25°Cでの物質拡散係数・熱伝導率を適用することで、吸着過程ではある程度の一致を見せるものの、実測の脱着速度は計算値よりも遅くなった。このことからマイナス領域の脱着過程では、周りから吸熱することで局所凍結している可能性が示唆される。

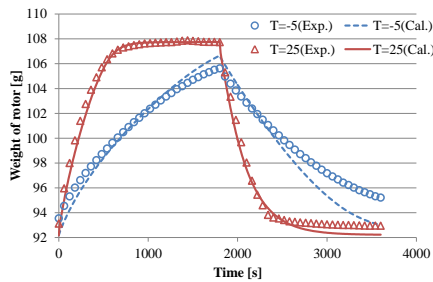


図7 吸脱着速度への温度の影響

(3) 太陽熱利用デシカント空調の性能評価

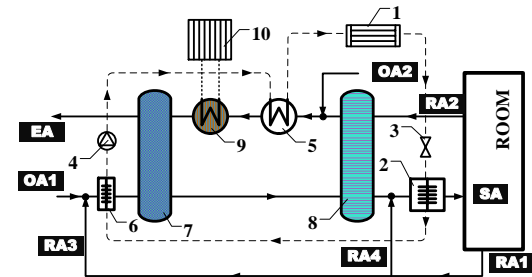
デシカント材の性能実験結果を踏まえて、太陽熱をデシカントロータの再生熱源としたデシカント空調システムのサイクルシミュレーションを行い、更にそのシステムのハード構成（デシカントロータの吸着/脱着面積比率、熱交換器のフィピッチ、圧縮比）の設計検討と最適化運転手法の検討を行った。

提案した太陽熱利用デシカント空調サイクルの概略図を図8に示す。太陽熱の時間変動が避けられないため、太陽熱の容量が不足の時ヒートポンプの凝縮熱を利用するシステムを提案し、その冷房期間のエネルギー効率を評価した。性能比較のために、従来の冷却除湿サイクルと比べ、ヒートポンプの凝縮熱駆動サイクルに顕熱交換器の有り無し、太陽熱利用の有り無しの場合におけるサイクルエネルギー効率のシミュレーションを行った。各比較サイクルの詳細を表1に示す。比較結果の一例を、平均孔径4AのメソポラスシリカTPMA4Aと高分子収着材に対してそれぞれ図9と図10に示す。

2000年7/15~8/15の東京地域の気温、湿度(絶対湿度,相対湿度),日射量の気象データを用いてシミュレーションを行った、冷却除湿システムと比べ、デシカントロータを投入したシステムの性能が大きい結果が得られた。

提案したシステムの省エネ効果は湿度、換気回数などにもよりますが、従来の冷却除湿システムと比べ、メソポラスシリカ(TPMA4A)と高分子収着材を用いた場合従来の

システムに比べそれぞれ25%および32%のエネルギー使用削減効果が得られた。さらに、図11プロトタイプ試験機を製作した。提案したサイクルの実運転性能の評価を行った。



1-凝縮器 2-蒸発器 3-膨張弁 4-圧縮機 5-加熱器
6-冷却器 7-デシカントロータ 8-顕熱交換機 9-加熱器(太陽熱) 10-ソーラコレクタ
図8 太陽熱利用デシカント空調

表1 比較するサイクル

サイクル	顕熱交換器	太陽熱利用
1 (冷却除湿)		
2	NO	NO
3	NO	YES
4	YES	NO
5	YES	YES

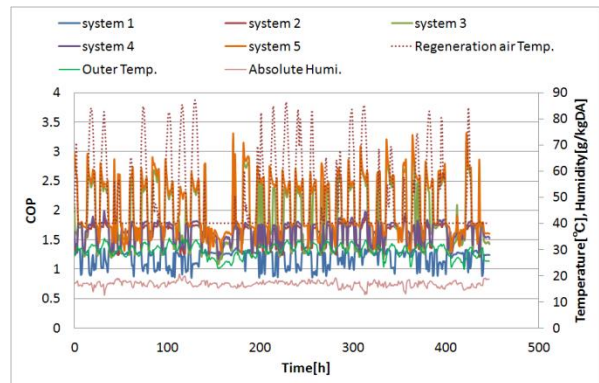


図9 TMPS-4Aを用いた場合のサイクル性能比較

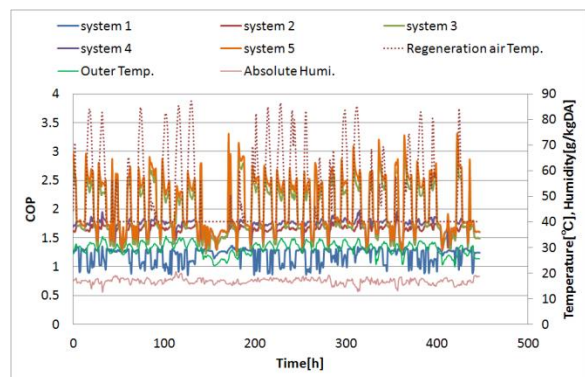


図10 高分子収着材を用いた場合のサイクル性能比較



図 11 プロットタイプ試験機

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 古谷野尅弘, 中川直紀, 飛原英治, 党超鋳, 松岡文雄, デシカントローターの動的特性について, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, 2013 年 5 月 30 日, 仙台
- ② 馮詩愚, Duri Jang, 党超鋳, 飛原英治, 太陽熱利用デシカント空調機に関する研究, 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会, 2013 年 4 月 16 日, 東京
- ③ Chaobin Dang, Dari Jang, Shiyu Feng, Eiji Hihara, Study of a Desiccant Air Conditioning System Driving by Solar Energy, The 5th International Conference on Cryogenics and Refrigeration (ICCR2013), 2013 年 4 月 8 日, 杭州, 中国
- ④ Duri Jang, 党超鋳, 飛原英治, 神戸正純, 太陽熱を利用したデシカント空調システムの研究, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2012 年 9 月 12 日, 札幌
- ⑤ 松岡文雄, 綾目久雄, 黒田尚紀, 神戸正純, 飯野康二, 党超鋳, 大宮司啓文, 飛原英治, デシカント・蒸気圧縮式ハイブリッド型ノンフロストヒートポンプの研究開発 - 第 1 報 全体システムと技術課題 -, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2012 年 9 月 12 日, 札幌
- ⑥ 黒田尚紀, 綾目久雄, 神戸正純, 党超鋳, 大宮司啓文, 松岡文雄, 飛原英治, デシカント・蒸気圧縮式ハイブリッド型ノンフロストヒートポンプの研究開発 - 第 2 報 冷房時におけるノンドレインの検討 -, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2012 年 9 月 12 日, 札幌
- ⑦ 古谷野尅弘, 飛原英治, 松岡文雄, 大宮司啓文, 党超鋳, 神戸正純, 黒田尚紀, 綾目久雄, デシカント・蒸気圧縮式ハイブリッド型ノンフロストヒートポンプの研究開発 - 第 3 報 着霜条件下におけるノンフロストヒートポンプシミュレーション -, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2012 年 9 月 12 日, 札幌

- ⑧ 党超鋳, 清水彰彦, 中村欣貴, 飛原英治, 太陽熱を利用したエジェクタ・蒸気圧縮式ハイブリッド空調に関する研究, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2012 年 9 月 13 日, 札幌
- ⑨ Chaobin Dang, Yoshitaka Nakamura, Eiji Hihara, Study of ejector-vapor compression hybrid air-conditioning system using solar energy, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 2012 年 7 月 18 日, Purdue University, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飛原英治 (HIHARA EIJI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号 : 00156613

(2) 研究分担者

党超鋳 (DANG CHAOBIN)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号 : 30401227