

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04383

研究課題名（和文）吸着材の吸着特性がデシカントローター内部の温湿度挙動に及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Study of the effect of characteristics of adsorbent on temperature and humidity distribution inside desiccant rotor

研究代表者

鍋島 佑基（Nabeshima, Yuki）

静岡理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：10738800

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：デシカントローターは連続的に回転しながら吸着と脱着を行うため、吸脱着量は回転に伴って時々刻々と変化する。一方で回転する吸着材内部の温湿度分布の測定は配線が必要で大型な高精度センサーには困難である。そこでIoTセンサー技術を活用し、小型センサーと無線通信機を活用しローター内部の温湿度分布測定を計画した。

デシカントローターを加工し、無線式小型センサーを用いて回転体内部の温湿度測定を試みた。まず計測結果の補正方法について検討し、センサー内蔵ローターを作成し、回転するローター内部の温湿度可視化を行った。8点の温湿度同時無線計測の結果、数種類のデシカントローター内部の温湿度環境について比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、天然材料や合成材料を問わず様々な吸着材を基材としたデシカントローターが市場投入されている。その設計には吸着等温線が用いられることが一般的である。しかし、デシカント空調システム内に収まったデシカントローターの性能を計測することは容易ではなく、除湿量の過不足やそれに伴う仕様変更の必要性などを検討することは不可能に近い。

本研究によって回転体内部の除湿再生過程を可視化することで、吸脱着過程からデシカントローターの設計方針を明らかにすることが出来る。また、回転体や狭所など、これまで計測困難であった場所のデータ計測技術を構築することで種々の建築設備内部の状況把握や改善に応用できることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The desiccant rotor continuously rotates while adsorbing and desorbing, the amount of adsorption and desorption changes from moment to moment when the rotor rotates. On the other hand, measuring the temperature and humidity distribution inside the rotating adsorbent requires wiring for the conventional sensors, which is difficult for high-precision sensors. Therefore, we planned to use IoT sensor technology to measure the temperature and humidity distribution inside the rotor by utilizing a small sensor and wireless communication device. A small wireless sensor was used to measure the temperature and humidity inside the rotor. Firstly, a correction method for the measurement results was conducted, a rotor with a built-in sensor was made to visualize the temperature and humidity inside the rotating rotor. As a result, the temperature and humidity environments inside several types of Desiccant rotors were compared.

研究分野：建築環境工学

キーワード：デシカント空調 デシカントローター 無線計測 吸脱着

1. 研究開始当初の背景

潜熱顕熱分離空調システムは消費エネルギー削減の観点から有力な手段として着目され、多くのシステムが提案されてきた。潜熱処理の手段としては、吸着材ローターを用いた除湿が一般的であり、すでに種々の吸着材・執着材を用いたデシカントローターの研究開発が行われてきた。

既往の研究では、通風試験においてローター通過直後の湿度分布を鏡面冷却式露点計や温湿度プローブなどによって測定がなされている。しかし、デシカントローターは連続的に回転しながら吸着と脱着を行うため、吸脱着量は回転に伴って時々刻々と変化し、さらに回転する吸着材内部の温湿度分布の測定は配線が必要で大型な高精度センサーには困難である。金沢大学の児玉らは、既に回転するデシカントローターの内部に熱電対を埋設し、ローター内部の温度挙動を分析しているが、湿度分布については測定されていないことから、温湿度挙動の把握は独自性があると考えられる。

ローター内の温湿度計測にあたり、近年普及してきた IoT 技術の活用を計画した。既に市場には物理環境測定を無線通信で行えるユニットが供給されている。そこで小型センサーと無線通信機を活用しローター内部の温湿度分布測定を計画し、無線式小型センサーによる回転体内部の温湿度測定結果の補正方法について検討し、センサー内蔵ローターを作成し、回転するローター内部の温湿度可視化を試みた。

2. 研究の目的

本研究の目標は、デシカントローターの設計指針の確立である。処理空気の状態に応じて、種々の吸着材がどのような特性を発揮して優位に除湿出来るかどうかを確認するために、吸脱着過程の可視化を行い、ローターごとにどのような吸脱着過程を示すかを比較する必要がある。

そこでまず、ローター内部の温湿度無線計測技術の構築を行い、最大 8 ポイントの温湿度計測(計 16 点)の計測システムを構築する必要がある。ただし、ローターは絶えず回転しているため、センサーの応答補正方法を検討した。次にロギングシステムを用いてローター内部の温湿度変動を計測し、比較を行った。

3. 研究の方法

3.1 小型センサーによる無線・多点計測システムの構築

本研究で作成した吸着材内部に埋設した温湿度測定用小型センサー(以下、小型センサー)の概要を Fig.1 に示す。小型センサーは基板を入れて 10×3mm の市販の最小型温湿度センサーである。既報で用いたセンサーとセンサー精度棟は同じだが、基板が大幅に小型化されており、直径 4mmφ の横穴をローターに開けることで、容易にローター内部に設置できる。データ通信はマイコンボードを介してロギング用 PC に接続する。通信規格について、当初研究開始当時は IEEE802.15.4 を使用していたが、データ欠損が多く、多点計測結果の分析に問題が生じたため、最終仕様では IEEE802.15.1(Bluetooth)とした。開発ボードは ESP32 を搭載する 25×25mm の小型ボードとした。多点計測に伴い、8 点同時計測が可能な分岐基板を用いた。計測システムの写真と系統図を Fig.1 に示す。Fig.1 内に示す無線通信システムについて説明する。本システムは小型センサーと無線送信モジュールを配線した計測部分と、PC に接続した受信モジュールからなる受信・記録部分で構成される。受信データは汎用プログラミング言語「Python 3.8」を用いて補正や絶対湿度の計算などを行わせて CSV 出力させた。

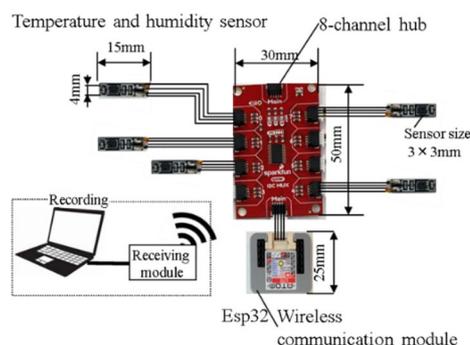


Fig.1 Diagram of a wireless logging system.

3.2 小型センサーの応答特性

本研究ではデシカントローターの回転数をパラメーターの一つとしている。これはローターが 2 分以上をかけて 1 回転することを意味しており、例えば 30 rph では再生と除湿空気が 1 分ごとに入れ替わることになるが、これ以上ローター回転数を速くすると、センサーの応答速度を大きく超えてしまうため補正が困難になることから 30rph を上限とした。温湿度変化に対してセンサーが示す出力値の応答遅れは条件に関わらず一定である場合、応答特性式を用いた補正が可能であると考えられる。実際に生じる温度変化($T_{RA}-T_{OA}$)に対してセンサーが示す値(T_m)の差を標準化すると Eq.(1)で表すことができる。センサーの応答性は温湿度変化量の差に関わらず同じ変化を示しており、単位応答は温度、相対湿度の変化に関わらず一定であることは既に確認されており、本研究では応答特性の計測結果と一致するような温湿度の単位応答式を Eq.(1)によって求めた。これらの処理は 8 本のセンサーそれぞれに実施した。

$$\theta(t) = \frac{T_m - T_{OA}}{T_{RA} - T_{OA}} = \sum_{n=1}^k \alpha_n \cdot e^{-\beta_n t} \quad (1)$$

3.3 ローター内へのセンサー設置

前述の無線センサーをローターに設置するため、ローターの側面から穴開け加工を施してセンサーを挿入した。ローター形状は厚さ 200 mm t, 直径 350 mm Φ である。小型センサーは側面からローター中央部に向かって 68 mm の点に設置した。ローター側面の加工性によって設置点数は異なるが、小型センサーは 5-8 点設置し、それぞれの位置で温湿度を計測することで、ローター厚さ方向の分布を計測できるようにした。センサーはローター内部でローター基材に接触しないように 3D プリンタを用いてセンサーキャップを作成して設置ガイドとして設置した。

Fig.2 に実験装置の概要を示す。処理空気 OA と再生空気 RA はそれぞれ精密温湿度供給装置によって作成した温湿度で供給される。各 OA, RA, SA, EA の温湿度については高精度温湿度プローブを用いて正確な絶対湿度を把握した。ローター通過後直後にも小型センサーを回転方向に設置し、出口直後の温湿度分布を計測した。

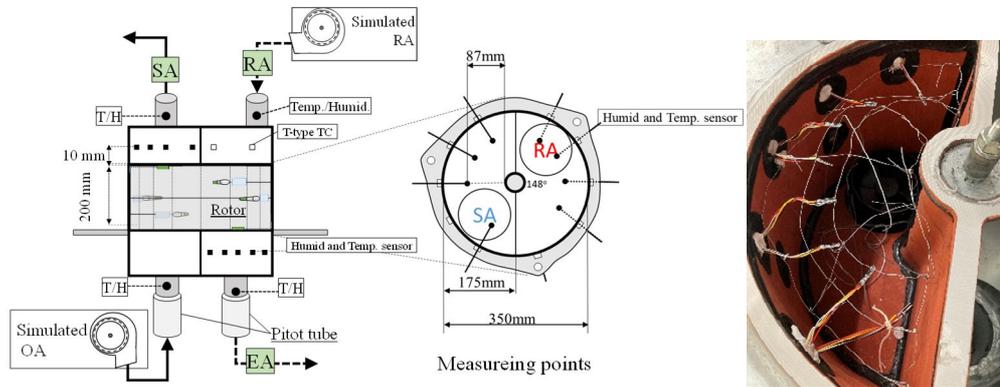


Fig.2 Diagram of the experimental setup.

3.4 ローター内部環境の補正

応答補正の一例としてローター内部の温湿度変化の可視化結果を示す。通風条件について、OA 温湿度が 30°C, 52%, RA 温湿度 35°C, 40%, ローター通過風速 1.1m/s における 10 rph の時の結果である。吸着材は WSS(稚内層珪質頁岩)である。Fig.3 左側の絶対湿度分布において、 x_{SA} は 11.3g/kg_{DA} を示しているのに対し $z=195\text{mm}$ における計測値は 12.1g/kg_{DA} まで低下しており、高精度プローブとずれていることが分かる。このことから、温湿度の補正が必要であることが分かる。そこで、Fig.3 右図にローター回転方向における補正後の温湿度変化と、そこから算出した絶対湿度の分布を示す。本図から、応答補正を行うことで除湿・再生時の絶対湿度変化は概ね一致することが確認できる。WSS ローターでは、 x_{SA} は無次元回転角が 0.2 近傍で最も低い 11.0g/kg_{DA} を示しているが、再生側では x_{EA} が最大である 17.0g/kg_{DA} を示すのは回転角 0.65 近傍であった。このことから、40 °C 再生において、吸着速度よりも再生速度の方が早いことが観測できる。また、内部の除湿状況について、 $z=150\text{mm}$ から 195mm (SA 側) にかけて x_{SA} の変化量が殆ど見られなくなっており、除湿が完了している様子が分かる。同様に、再生側について $z=50\text{mm}$ から 5mm (EA 側) にかけて、再生も失速している。

以上のように、計測システムとその補正方法を構築した。同様の作業を数種類のローターを対象に行い、その評価結果を比較した。

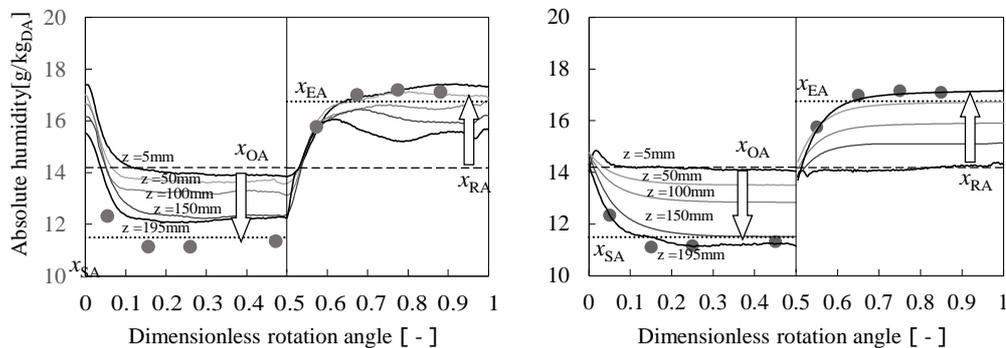


Fig.3 Corrected temperature and humidity distribution in the WSS desiccant rotor.

4. 研究成果

4.1 比較対象のローター概要と実験概要

本報告では4種の吸着剤について評価及び比較を達成した。珪藻土、WSSローターに関しては内部に5個、シリカゲルA型、B型ローターでは内部に8個の小型センサーを等間隔に設置して計測を行った。実験方法については、精密温湿度供給装置によって再生空気RAと処理空気OAを作成し、ローター通風装置内に供給することで除湿量と再生量を計測した。前述の通り、OA,RA,SA,EAの各点には温湿度を計測するため、固定の高精度プローブを設置した。また、ローター通過後の温湿度分布を計測するため、ローター通過直後のSAとEAに小型センサーを設置した。Table1にローター毛状の詳細を示す。各吸着材ローターの直径は350mmφ、厚みは200mmと共通の形状をしている。ただし、ハニカムサイズは珪藻土ローターが段高1.5mm、幅2mmであるのに対し、他3種は段高2mm、幅3mmである。ローターの外観はFig.4に示すとおりである。

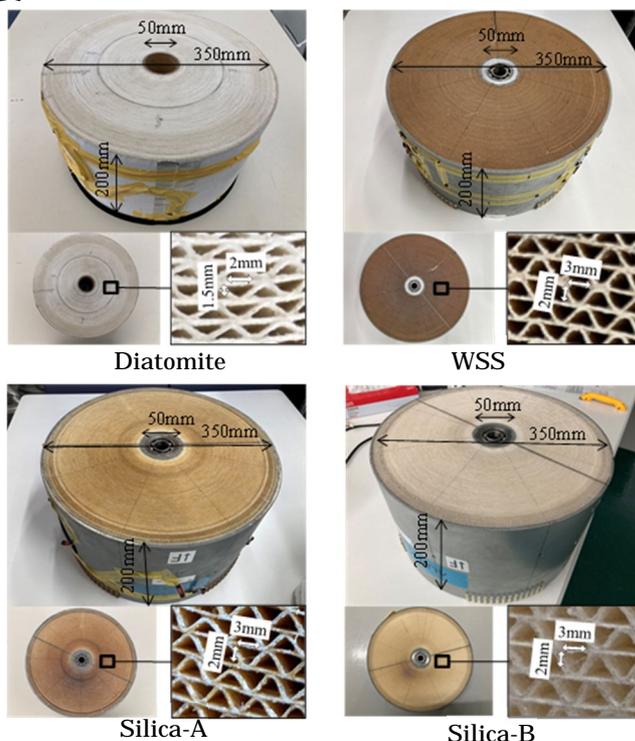


Fig.4 Rotors for comparative test.

Table2には実験条件を示す。ローター内の風速は1.1m/sec(115m³/h相当)としたが、珪藻土ローターは通風孔のサイズが小さく風量が下がるため、送風機で送風できる最大風速0.96m/sec(110m³/h)とした。ローター回転数は7-30rphに変化させてデータを測定した。また、OAの設定温湿度は22°C, 85%(14g/kgDA)、RAの温湿度については55°C, 14%(14g/kgDA)とした。

Table1 Specifications of desiccant rotors

Adsorbent	Diatomite, WSS Silica-A, Silica-B
Diameter[mmφ]	350
Thickness of rotor[mm]	200
Honey-comb pitch[mm]	2 × 3 (Diatomite : 1.5 × 2)

Table2 Experimental condition

OA Condition	RA Condition	Rotation Speed	Air flow Speed
22°C	55°C		
85%	14%	7-30rph	1.1m/sec (Diatomite:0.96m/sec)
14g/kg _{DA}	14g/kg _{DA}		

4.2 吸脱着過程の可視化結果

各ローターの内部状況をFig.5に示す。図は7rph時の結果である。各ローターの上図には温度変化を、下図には絶対湿度変化を示す。図中のプロットは小型センサーの測定値であり、ローター通過直後のSA,EAの空気温湿度分布を意味する。また、図中の破線は高精度センサーの測定値である。次にzはローター内に埋設した小型センサーの測定箇所を意味している。

温度分布について説明する。吸着材の種類に関わらず、吸着側SA温度は55°C近傍から徐々に低下し、無次元回転角0.5において35°Cに達しており20°Cの温度変化が観察できる。内部の小型センサーの値を見ると、各zの位置でローター内部の温度が徐々に上昇していく様子が確認できた。ただし、吸着材によって温度分布が異なるという傾向は示されなかった。

そこで次に絶対湿度について分析する。吸着側において出口側に近い内部センサーの測定値については全ての吸着材で8.5g/kgDA近傍まで減少しており、その後徐々に除湿量が減少している。つまり、ローター回転方向について、除湿量のピーク値については差が生じていないことが確認できる。これは水蒸気の吸着が境界膜近傍で行われているためであると推測できるため、この計測結果を用いて局所物質移動係数などを導出し、今後考察を深めていく必要がある。

除湿量がピークを迎えた後の動向について珪藻土ローターは回転角0.5において約10g/kgDAとなっていた。一方でシリカゲル系に関しては除湿のピーク後は除湿量が急激に減少し回転角0.5では約12g/kgDAとなっている。

次に再生側の絶対湿度分布について、珪藻土ローターは出口側に近い内部センサーの測定値が回転角0.6近傍でピークに達し、その後ピークが0.8付近まで持続していた。一方、他のローターに関しては回転角0.6あたりでピークに達し、その後直ちに減少していることが分かる。珪藻土ローターは通風孔が小さいため除湿、再生に有利であると考えられる。シリカゲルA型は

ピーク時の除湿,再生量が他ローターと比較して低く,回転角 1 においてはほぼ脱着が行われなくなっている.ローターの厚さ方向においては,どのローターも吸着側では出口側に近づくほど吸着が失速し,再生側では出口側でも十分に脱着が行われていることが分かる.

珪藻土は段高が低く,他のローターよりも通風面積が小さく,吸着に有利であることが推測できた.しかし,除湿量の分布は他のローターに比べて比較的大きい程度であった.一方で再生量分布については,再生量ピークの持続が確認できた.珪藻土は体積当たりの吸着材含有量が多く,これが除湿量の差として現れたと考えられる.

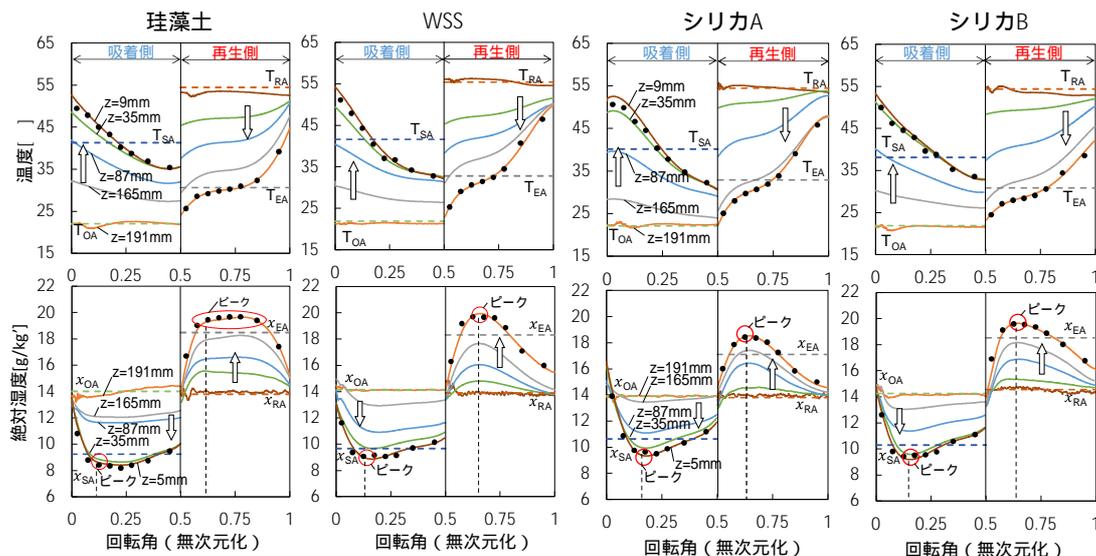


Fig.5 Changes of temperature and humidity distributions in each desiccant rotor.

Fig.8 にローター入口と出口の絶対湿度差をローターごとに比較した.この図は除湿・再生量の分布を意味している.吸着側について,ローターを問わず回転角 0 で除湿が開始してからの傾きに違いはなく,吸着の立ち上がり速度は同じであり吸着速度は OA の相対湿度が駆動力となっていると推測できる.吸着量については珪藻土ローターが常に高い除湿量を維持しており,吸着終盤まで除湿量が持続していることが分かる.一方シリカゲル A ローターについては立ち上がりタイミングが他のローターに比べて著しく遅く,回転角 0.04 からようやく除湿が開始している.これはローター基材の蓄熱性によるところが大きいと考えられる.

次に再生側の分布について,再生量の立ち上がり方も吸着剤を問わず概ね同じであることが分かる.再生量のピークは WSS であり 6.2g/kgDA まで達している.珪藻土を除くローターについては,ピークを迎えた後に再生量が吸着時よりも早く失速し,回転角 0.9 近傍ではピークの 30%程度しか脱着していない.一方,珪藻土ローターが終盤 0.9 近傍までピークに近い再生量を示した.これは通風速度による影響が大きいと考えられる.

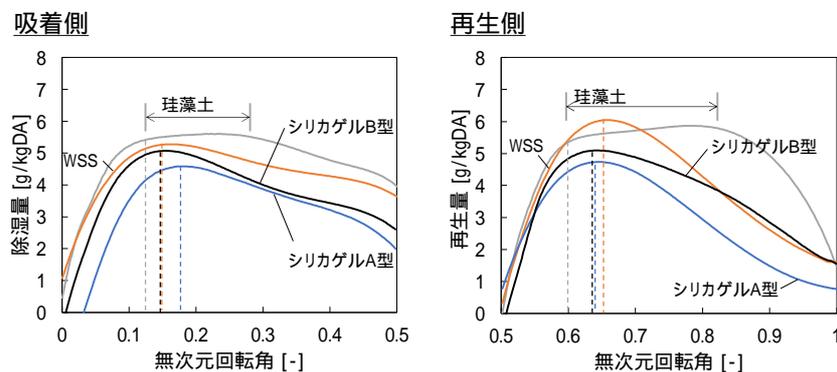


Fig.6 Changes of adsorption and desorption amount of desiccant rotor.

以上から,今後は,ローター基材の蓄熱性やローター基材を含めた細孔分布や吸着等温線の計測を行い,吸着材単体の吸着性能から,パルプ紙やペット紙,ガラス繊維紙などが除湿再生分布に及ぼす影響を実験的に検討する必要があることが明らかとなった.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鍋島 佑基
2. 発表標題 回転する種々のデシカントローター内の温湿度挙動可視化に関する研究
3. 学会等名 2022年度 日本冷凍空調学会 年次大会
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木村 竜士 (Kimura Ryushi) (90571810)	高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・准教授 (56401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------