

令和 3 年 4 月 5 日現在

機関番号：33803

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15149

研究課題名（和文）回転するデシカントローター内部の温湿度挙動の解明

研究課題名（英文）Study on internal temperature and humidity distribution of desiccant rotor

研究代表者

鍋島 佑基（Nabeshima, Yuki）

静岡理科大学・理工学部・講師

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）：本研究では稚内層珪質頁岩（WSS）デシカントローターの最適化を目的に、IoT用無線式小型センサーによるローター内温湿度測定を試みた。小型センサーを用いて間断なく回転するデシカントローター内部で生じている熱・物質移動現象を測定するため、本報ではまず、温湿度変化に伴うセンサー応答遅れの補正を行った。次に直径350mm、厚み200mmのデシカントローターの各表面から5点にセンサーを埋設して通風試験を行った結果、ローター内部の除湿再生量の推移を確認できた。再生温度50℃において除湿のピークは吸着ゾーン初期に確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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ており、既往の研究では通風試験による除湿量評価、数値計算によるローター形状や通風路の最適化を進めてきた。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、除湿再生量は回転に伴って時々刻々と変化し、さらに回転するローター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。そこで近年発達してきたIoT技術を活用し、IoT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手法を構築すれば、ローター形状や吸着材の違いによるローター運用の最適化が可能になることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to clarify the temperature and humidity distribution in the desiccant rotor. Thus we focused on the small sensors for "IoT". By installing the small sensor in the desiccant rotor, continuous measurement inside the rotating material become possible. Firstly, correcting method for sensor response delay when temperature and humidity input were changed was examined. We conducted an evaluation test to obtain the delay characteristics of the small sensors. The results of the test, the response delay showed the same characteristics regardless of the differences in air temperature and humidity. The correction equations for the temperature and humidity were obtained. Adsorption/desorption measuring test was conducted. To clarify the humidity distribution, a desiccant rotor with small sensors was created. Two sensors were buried at 5mm points from each surfaces of rotor. The distributions of absolute humidity due to the change in rotational speed was clarified.

研究分野：建築環境工学

キーワード：潜熱顕熱分離空調 デシカントローター 温湿度可視化 応答補正 無線計測

### 1. 研究開始当初の背景

業務用建物などの消費エネルギーの30%は空調に要しており、民生部門における空調消費電力削減は最重要課題の一つといえる。その対策としてデシカント空調の導入が進んでいる。本システムは潜熱負荷を吸着材に処理させることで、エアコンやチラーの高効率化を可能とする。一方でデシカントシステムは設備導入費用が高く、デシカントユニットの高性能化、高価な吸着材が使用される除湿ローターのコンパクト化などによる導入費用低減が必要である。特に業務用ビルでは除湿を担うデシカントローターのサイズも大型化しやすく、ローターの小径化による材料費の低減・ユニット小型化が期待できる。既に種々の吸着材開発とその吸脱量評価が多く行われているが、デシカントローターは運用上回転し続ける必要があり、ローター内部の温湿度分布を測定することは物理的に困難なことから、数学モデルによる予測が行われている。他方で、近年の測定技術の進歩によってセンサーの無線化、小型化が進んでおり、従来の技術では成しえなかった狭所の物理量計測が可能になってきた。これらセンシング技術によってローター内部の温湿度環境が可視化されれば、吸着材の特性が除湿・再生にどのように寄与しているか解明が可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的はデシカントローター内の温湿度分布測定による吸脱着特性の解明と、それによるローター形状の最適化である。そこで以下の事为目标に研究を行った。

- ・応答遅れを考慮したローター内温湿度計測技術の構築
- ・ローター内部の温湿度分布測定とその補正方法の検討
- ・ローター内部の吸脱着過程の可視化

### 3. 研究の方法

1) 通常のローター性能評価では、高精度静電容量型センサーを用いているが、本研究では市販小型センサーと無線ユニットを組合せた測定システムを作製した。小型センサーは、市販の超小型温湿度計と無線通信タグをローター内に埋設する。市販センサーを用いるにあたり、測定精度の確認が必要であるため、測定精度校正と応答遅れ補正の検討をとしてセンサーの単位応答試験を行い、ローター内のセンサーが除湿から再生に移行する際の遅れを補正する。

除湿ローターは常に回転しているため、ローターを通過する空気は低温高湿条件と、高温低湿条件が連続的に切り替わっている。この時、温湿度条件が急激に切り替わることで、センサー特性や蓄熱性によって、入力の変化値に対する応答遅れが生じる。

2) 申請者は天然材料である稚内層珪質頁岩(WSS)を基材としたデシカントシステムの研究開発を行っており、WSSローターを対象とした吸脱着性能評価を行ってきた。そこでまず、同ローターに小型センサーを埋設し、ローター評価装置を用いた通風試験を行う。

まず、通風空気温度や風速をパラメーターとした回転方向と奥行き方向の温湿度分布を測定し、ローター内部の温湿度環境を測定し、従来の代表点における除湿量測定結果と小型センサーの測定結果を比較し計測結果の補正方法を検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) IoTセンサーを活用した無線計測システム

本研究でローター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。本研究では Sensirion 製の温湿度センサー「SHT25」を使用した。本センサーは基盤を入れて15×10mm、電池駆動型の無線モジュールは25×25mmだが薄型のためローター内部に取り付けられる。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 3.0」を用いて補正や絶対湿度の計算などを行わせてテキストデータとして出力させた。また、実験前に事前に定常環境下で高精度温湿度プローブを用いて精度を比較し、測定精度が正確な個体を選定した。単位応答遅れの補正方法については既往の研究において報告済みであり、本研究ではそれに則って補正を行った。

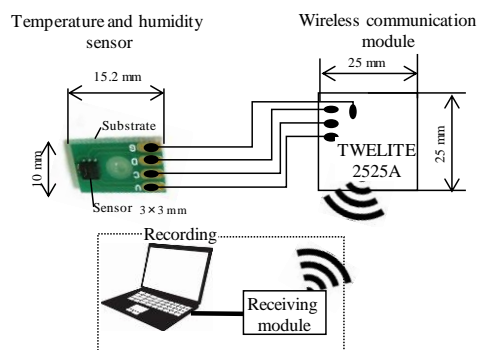


図1 無線計測システム

#### (2) ローター内部の温湿度計測方法

実験では、デシカント空調のローター内に気流を障害しない小型の無線センサーを設置し、デ

シカントローター内部の温湿度分布の測定を行った。図2にデシカントローター試験装置の概要および、無線センサーの設置位置を示す。設定室内空気(RA)から排気(EA)の空気流れの領域を再生域、設定外気(OA)から供給空気(SA)の空気流れの領域を吸着域として、再生域と吸着域の面積比は本研究では1:1とした。計測はOA, SA, RA, EAの温湿度、EA, SAの風量について行った。また、ローター通過後のSAとEAの湿度分布を計測するために、図1の位置にT型熱電対と温湿度計をSA側、EA側に5点ずつ設置した。表1に実験条件を示す。実験は3ケース行い、RAの温度を40~60℃、回転数7.5~30 rphとして、計27条件の実験を行った。ローターをモーターにより断続的に回転させ吸脱着を繰り返し、温湿度・風量の計測を行った。ローター1回転を1サイクルとし、データが安定した1サイクルを抽出し分析に使用した。

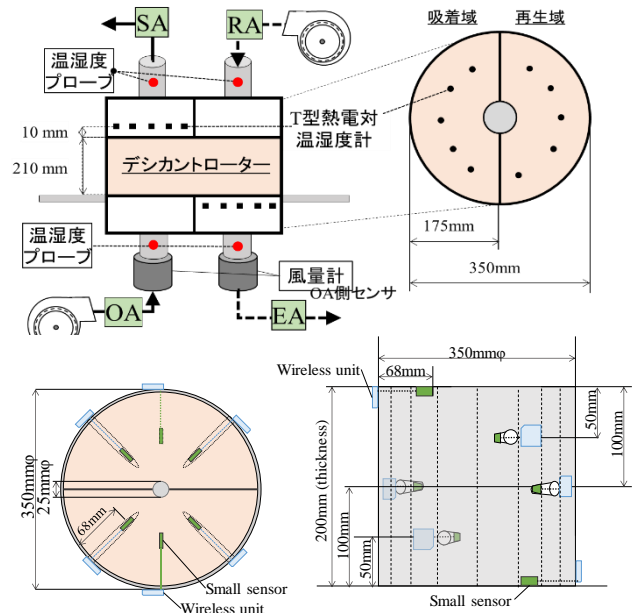


図2 ローター評価装置とセンサー設置状況

表1 実験条件

case	OA		RA		風量 [m³/h]	回転数 [rph]
	温度[°C]	絶対湿度[g/kgDA]	温度[°C]	絶対湿度[g/kgDA]		
1	30	20	40, 50, 60	20	105 (1.0m/s)	7.5, 15, 30
2		14	40, 50, 60	18		
3		12	40, 50, 60	12		

回転角を基準化するため、再生域入口を0または1、吸着域入口を0.5とおいた無次元回転角を用いた。

### (3) SA 温湿度変動と除湿量

各ケースのSA温度、相対湿度、絶対湿度の平均値を図3に示す。本結果はダクト内で設置された高精度プローブにより測定された平均絶対湿度と、熱電対で計測したローター通過後の平均温度を整理したものである。case2の再生温度(RA温度)60℃、回転数15rphは実験条件が設定できなかった。

図3より、case1, 2, 3の条件に共通して、回転数の増加に伴いSA温度の上昇、相対湿度の減少が確認された。また、再生温度の増加に伴い、除湿量の増加が確認された。case1の再生温度40, 50℃においては、回転数の増加によって除湿量は微減しているが、再生温度60℃において回転数15rphが除湿量のピークとして表れていることが確認された。case2, 3においては、再生温度40, 50, 60℃において回転数15rphに除湿量のピークを迎えていることが確認された。このことから、除湿域と再生域の面積比が1:1とした場合、15rph近傍にすることでローター回転数は最適となることが明らかとなった。

また、Case3の再生温度60℃の条件において、再生温度に関わらず回転数が15rphから7.5rphになることで除湿量が減少していることがわかる。これは、回転途中でローターの吸脱着が殆ど完了したことで、除湿量が低下したためと考えられる。他のCaseにおいても60℃以上の再生条件の時に同様の傾向が確認された。処理空気OAの絶対湿度が低く、ローターの処理水分量に対して再生温度が高すぎる場合にこのような結果となることが考えられる。このことから、OA絶対湿度に応じて再生温度やローター回転数を任意に変更することが必要であることがわかった。

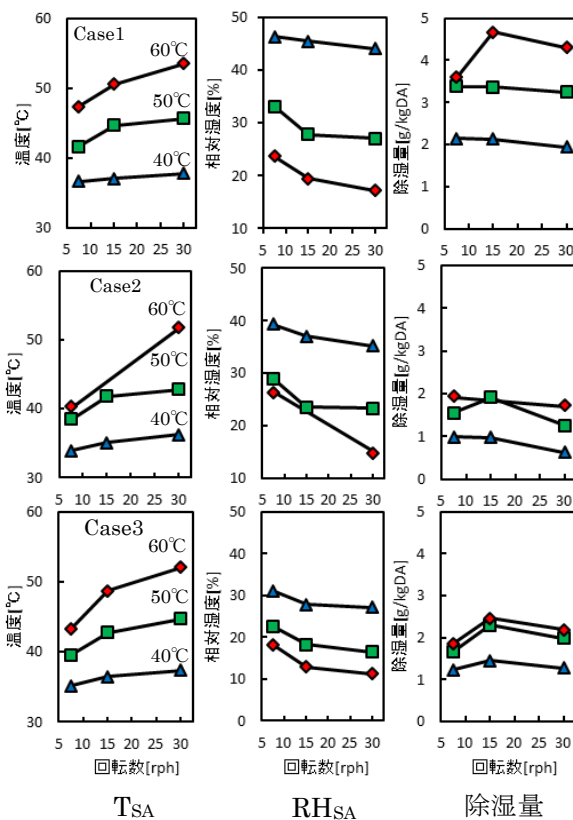


図3 SA 温湿度及び除湿量

#### (4) ローター表面の温湿度変動

次に、図3で見られた除湿量の減少理由を考察するため、無線センサーによって測定したローター表面の温湿度変動を比較する。図4にcase1 再生温度 60°C, 回転数 7.5, 15rph におけるローターの温度と絶対湿度の回転角方向の分布を示す。また図中のプロットは、ローター通過直後に設置した T 型熱電対及び温湿度計から求めた絶対湿度の値である。

図4の温度分布より、回転数 7.5rph において  $T_{RA}$  は 48°C から 60°C に上昇しているが、15rph を見ると、55°C から 60°C に上昇しており、回転数の上昇によって RA 導入時の温度が 7°C 上昇した。これは回転数の増加による顕熱の移行が増加したことを示しており、図3で示した傾向と一致する。一方、 $T_{EA}$  に着目すると、再生完了時の  $T_{EA}$  は、7.5rph では 53°C に到達しているのに対して 15rph では 42°C であった。このことから回転数の増加によって加熱時間が半減したことにより、再生時のローターの温度が低下していたことが観察できた。次に絶対湿度の変動を見ると、回転数 15rph では、RA 側の絶対湿度はどちらの回転数でも比較的早い段階で一定となっており、脱着の完了が確認できる。EA の絶対湿度については、7.5rph では回転角 0.5 近傍において EA と RA の差が無くなっており、脱着が完全に完了していることがわかる。一方 15rph では、0.5 近傍でも脱着は完了していない。このことから、低回転のケースではローター回転途中で脱着が完了したことによって除湿量の低下に繋がっていたことを確認できた。また、回転数が低い場合、吸着・再生後のローター温度が導入空気になくなってしまい、吸脱着の切り替え時にローターの加熱/冷却に必要な熱量を増やしてしまったことが除湿量低下のさらなる原因となっている。

#### (5) ローター内部の可視化

ローター内部の可視化にあたって、各小型センサーでは測定値を連続的に取得しているため、測定位置合わせを行った。図2において示す通り、センサー設置位置は  $\pi/6$  毎にずれているため、これを修正して 1 サイクル分を抽出し、時間のずれを補正した。結果を図5に示す。本図は 40°C 再生、7.5rph の時の温度、相対湿度、絶対湿度の内部分布である。

温度分布をみると、吸着側では OA から SA にかけて、温度が徐々に上昇している様子がわかる。特に、OA から厚み 100mm までは温度が一定間隔で上昇しているが、それ以降の変化はほとんど見られない。一方で再生側では温度変化は常に一定であった。この傾向は相対湿度、絶対湿度も同様であった。このことから、厚さ 200mm のローターでは再生は完了していない一方で、除湿は 100mm 地点でほぼ完了していることが確認できる。200mm のロ

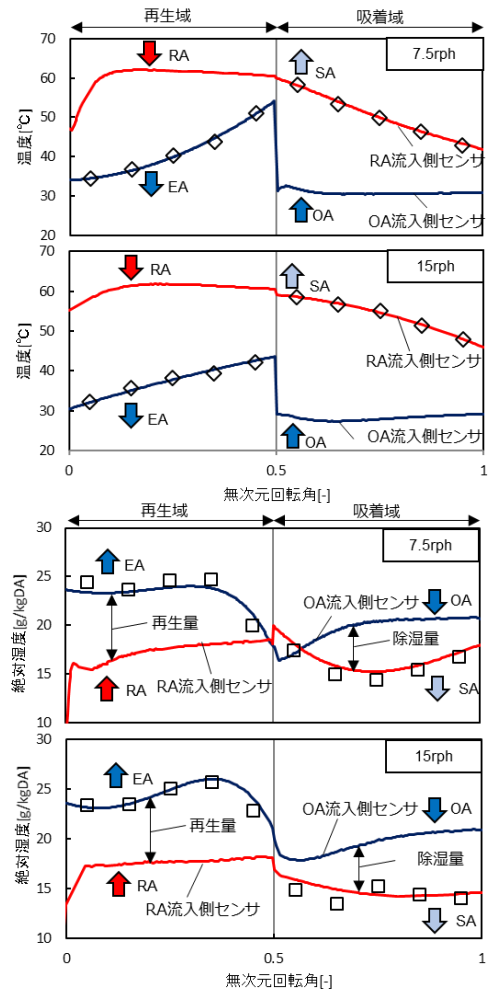


図4 ローター表面の温度と絶対湿度の変化

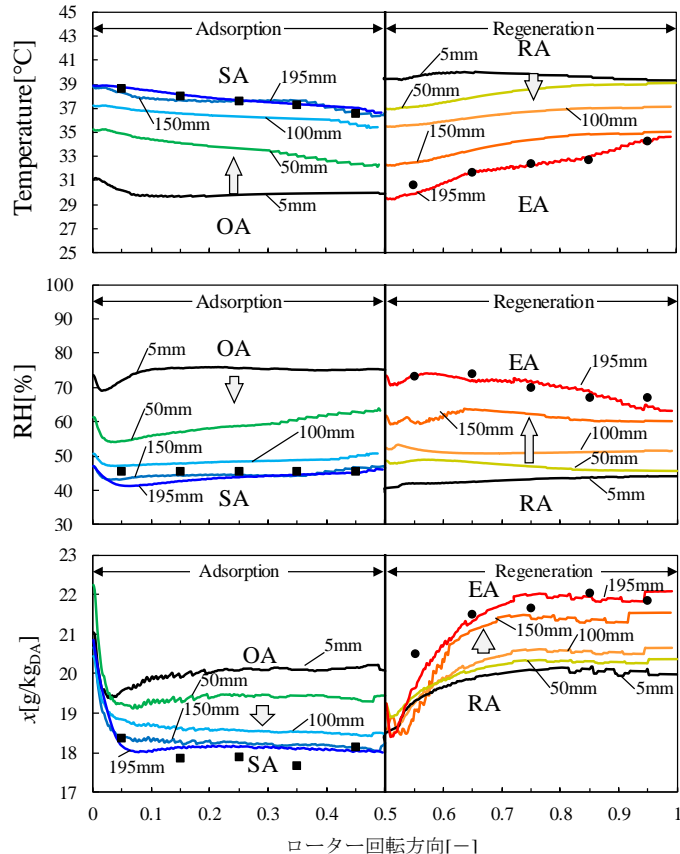


図5 ローター内部の温湿度可視化結果

ーターの場合、除湿域は現在の半分とし、再生域を増加した方が除湿量確保に有利であると推測できる。このように、除湿、再生過程を可視化することで、ローター運用の改善案を容易に推測できるようになった。

今後の展望として、この補正を他の実験ケースにも適用し、分析を進めるとともに、同形のシリカゲルローターやゼオライトローターを対象に測定を行い、その結果を比較することで、吸着材毎に最適なローター回転数や面積比を検討していく予定である。

#### (6) 結論

小型 IoT センサーを用いた除湿ローター内部の可視化を試みた結果以下のことを達成した。

1) 小型センサーと無線タグを活用した無線計測システムを構築し、ローター内部の温湿度の測定を達成した。

2) 無線計測システムを6つ用いてローター内部環境の測定を実施し、測定結果を補正することで、ローター表面の温湿度変動とローター通過直後の温湿度変動を一致させることができた。また、ローター回転数や再生温度によって、除湿/再生の状態が確認できたことで、従来の研究では数値計算プログラムによって考察されていたことを測定結果によって直接考察できるようになった。

3) ローター内部環境の可視化を行い、除湿課程と再生過程の違いを可視化することができた。本結果から、ローターの再生速度と除湿速度の違いを観測できたことから、除湿域と再生域の面積比の見直しが必要であることが確認できた。

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 榊原裕剛, 鍋島佑基, 都築和代
2. 発表標題 デシカントローター内部温湿度分布に関する研究
3. 学会等名 中部支部第21回学術研究発表会
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------