

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 16 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25660197

研究課題名(和文)湿度スイング操作型吸着材デシカントロータを用いた施設園芸用温室の除湿暖房

研究課題名(英文) Experimental study of desiccant dehumidification and heating for agricultural greenhouse

研究代表者

児玉 昭雄 (KODAMA, Akio)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：30274690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：園芸用温室の省エネ除湿技術として、外気との湿度差を駆動源とする吸着式デシカント除湿暖房プロセスを提案した。除湿量は回転数の増加とともに多くなり吸着熱発生量も増加するが、温度上昇度は比較的低い回転数で最大となった。低回転数では、吸着ゾーン途中で吸着破過を生じるために十分な吸着熱が得られず、高回転数では、発生する吸着熱のうちデシカントロータの温度上昇に使われる割合が大きくなる。また、再生空気温度が低下するとロータの全熱交換挙動がより顕著となり昇温幅は減少するが、ロータ出口空気の回転方向分布測定結果から吸着区間の分割が除湿暖房効果の維持に有効であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop the desiccant dehumidification and heating process for agricultural greenhouse. At first, influences of some operating parameters on the adsorption outlet air temperature and humidity were studied. It was found that there were optimum values of the rotation speed and adsorption/regeneration flow ratio at which the temperature in the process outlet air became the largest. Influence of regeneration air temperature on the temperature increase and the amount of adsorption was quite serious since the difference of relative humidity between adsorption and regeneration air became small as the regeneration temperature decreased. Also, the cooled rotor during regeneration step absorbed heat of adsorption which is generated at the beginning of the adsorption zone. Excluding of the low temperature air leaving the beginning of the adsorption zone is useful to obtain higher temperature process outlet air even when the regeneration air temperature is low.

研究分野：吸着応用工学

キーワード：農業工学 施設園芸 除湿 暖房 省エネルギー 植物工場

### 1. 研究開始当初の背景

園芸作物用温室内の湿度制御は重要である。例えば、植物病害であるべト病、灰カビ病やススカビ病などの病原菌は、作物に付着した露を媒介に侵入するため、ハウス内の結露状態が長いほど発病しやすくなる。これらの除湿需要に対して、農業温室用吸収式除湿空調技術の開発や電気ヒートポンプの導入がなされている。いずれも除湿操作に追加のエネルギー消費を伴う。冬場は低温のため温室内の相対湿度が高くなり除湿需要が益々増加し、暖房も必要となる。現行の温室暖房は重油に頼っており、二酸化炭素排出量増加の一因となっている。また、原油価格は園芸作物の値段に大きく影響する。湿度の低い冬季外気との換気によって、温室内の湿度を下げるができるが、熱交換操作を組み入れたとしても温室内の温度低下は避けられず、暖房のためのエネルギー消費が増加する。

研究代表者らはデシカント空調に関する豊富な研究開発実績を持つ。これまで一般空調を対象に研究開発を展開してきたが、園芸用温室は吸着式除湿の特徴である「除湿暖房」が直に利用できる空間であると認識し、「湿度スイング吸着式の除湿暖房」を提案した。これは、温室内の湿潤空気と冬季の乾燥外気との湿度差を駆動力として温室内の除湿を行い、除湿と同時に発生する吸着熱は温室内の暖房に活用するものである。すなわち、本研究で提案する湿度スイングは、自然界に形成される湿度差を利用するものであり、さらに温室暖房用ボイラー排熱や地中熱の活用により相対湿度差(湿度スイング幅)が拡大でき、従来にはない超省エネルギー型の除湿暖房プロセスとなり得る。また、作物育成環境の制御によって作物品質と収量の向上ひいては農業の生産性向上にもつながる。

### 2. 研究の目的

本研究は園芸用温室の省エネ除湿技術として、外気との湿度差を駆動源とする吸着式デシカント除湿暖房プロセスを提案し、その適用可能性を検討するものである。このプロセスでは、通気抵抗が小さく、良好な熱・物質移動特性を有する吸着材デシカントロータを用い、「相対湿度が高い温室内の湿潤空気」と「冬季の乾燥外気」の湿度差を吸脱着推進力として温室内を除湿する。除湿と同時に発生する吸着熱は温室暖房に活用する。まずは、湿度スイングにおける水蒸気の吸脱着挙動を平衡論と速度論の両面から学術的に解釈し、除湿量すなわち吸着熱発生量が最大となる条件を吸着材特性や装置・操作条件と関連付けて明確にする。また、小規模実験を行い、実空間で必要となるデシカントロータ仕様やプロセス構成を明らかにし、温室への適用可能性を探る。

### 3. 研究の方法

Fig. 1 は、本実験で使用したデシカントロ

ータ(直径 320mm×厚さ 100mm, 有効開口面積 0.066m<sup>2</sup>)の一例である。このロータは、セラミクスペーパーを基材としたハニカムマトリクスにシリカゲルが含浸合成されており、シリカゲル含有率は約 50 wt%程度である。これに加えて、合計 4 種類の吸着材ロータを実験対象とした。吸着等温線を Fig. 2 に示す。これらロータを Fig. 3 に示すケーシングで挟み込み、吸着および再生空気を供給する。吸着/再生面積比は 1:1 である。吸着空気条件は温室空気と想定した。再生空気湿度は冬季外気を想定するが、温度は吸着空気と同じとした。図中 T・H の位置で温度、湿度を測定する。なお、吸着空気出口には熱電対を数箇所設置してロータ回転方向の空気温度分布を計測し、湿度測定には鏡面冷却露点計を用いた。

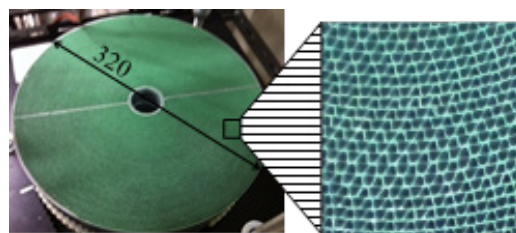


Fig. 1 Photograph of desiccant rotor

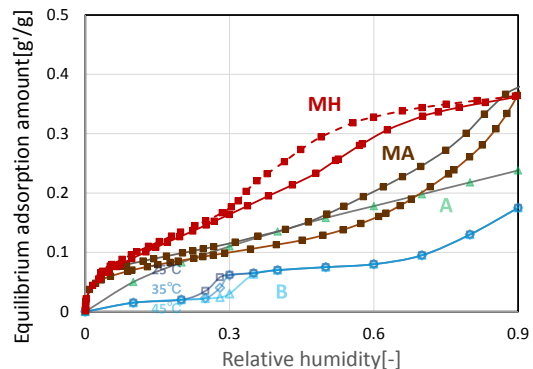


Fig. 2 Adsorption isotherms of tested rotors

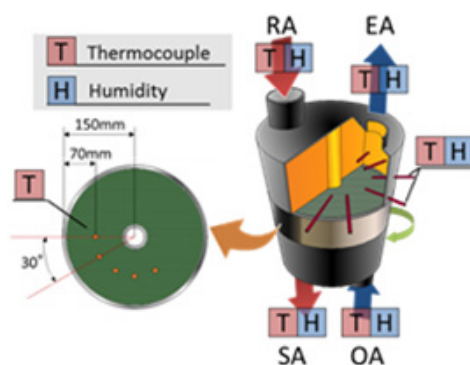


Fig. 3 Rotor casing of experimental apparatus

### 4. 研究成果

#### (1) ロータ回転数の影響

Fig. 4 に温度上昇度と除湿量に与えるデシカントロータ回転数および吸着/再生空気風速比の影響を示す。ここで温度上昇度は吸着空気出入口の温度差である。Fig. 5 は、Fig. 4 で温度上昇度が最大となった吸着/再生空気

流量比 1 : 2 における吸着出口空気状態を空気線図上に示したものである。まず、温度上昇度が最大となる最適回転数が存在する。除湿量は回転数の増加とともに多くなり吸着熱発生量も増加するが、温度上昇度は比較的低い回転数で最大となった。これは、より低い回転数では、吸着ゾーン途中で吸着破過を生じるために十分な吸着熱が得られず、高回転数では、発生する吸着熱のうちデシカントロータの温度上昇に使われる割合が大きくなるためである。Fig. 5 において、高回転数では断熱除湿から逸脱し、吸着出口空気のエンタルピーが減少していることから理解できる。なお、再生空気の相対湿度 17% まで吸着空気が除湿されると仮定すると、断熱除湿では約 15°C の温度上昇度が期待される。実験の範囲では空気流速比 1:2、ロータ回転数 8rph のときに得られた温度上昇度 9.4 °C が最大であった。これは、物質移動抵抗による水蒸気吸着速度の低下やデシカントロータ自体の熱容量の影響が考えられる。

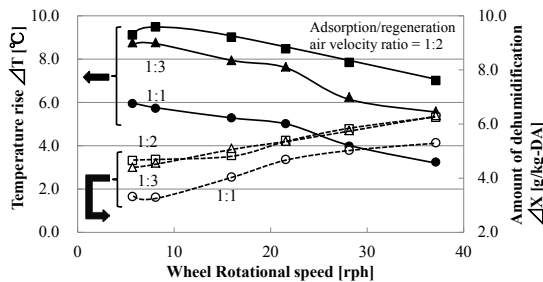


Fig.4 Influences of the rotation speed and adsorption / regeneration air ratio on temperature rise and amount of dehumidification.

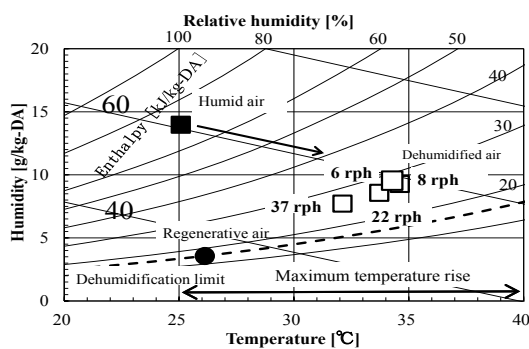


Fig.5 Adsorption outlet air condition at different rotation speeds. (adsorption / regeneration air velocity ratio =1:2)

(2) 吸着出口空気のロータ回転方向温度分布  
Fig. 6 は、吸着出口空気のロータ回転方向の温度分布の一例である。吸着開始直後は、再生区間での水蒸気脱着にともなう気化熱によってロータ自体の温度が低下しており、吸着熱が空気を加熱するよりもロータの加熱に消費される割合が多くなる。吸着区間の後半は、吸着破過に近づくために除湿量が少なくなり、温度上昇度が小さくなる。なお、ロータ回転数が高くなるほど最大の温度上

昇度を示す角度が、吸着区間後半へと移行し、またその角度範囲は拡大する。一方で、低回転数であるほど、温度上昇は狭い角度範囲で顕著に現れ、かつ温度上昇度は大きくなる。低回転数では、ロータの再生が十分に進行し、吸着開始直後の吸着量が増加すること、これにより早期に吸着破過を生じるためである。なお、最大の温度上昇度を示したのは、回転角 60° 付近の 11.8°C であり、いくぶん限界値に近い。

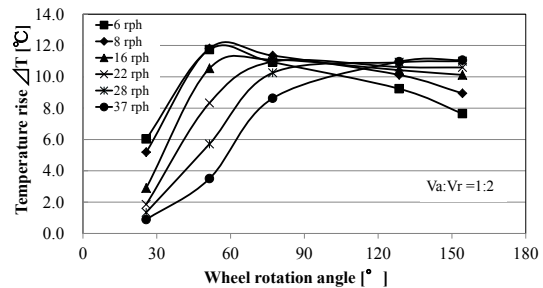


Fig.6 Angular distributions of the temperature rise under various rotation speeds

### (3) 吸着材ロータ種類の影響

ここでは、吸着側空気相対湿度を 90%、再生側空気相対湿度を 50% に固定することで湿度スイング幅一定にして除湿暖房実験を行った。なお、空気流速は、物質収支によって除湿能力が制限されることを回避するため、吸着側面風速 1m/s、再生側面風速 3m/s とした。Fig. 7 は、吸着空気の除湿量および温度上昇度である。除湿量はロータの種類に関係なく、回転数が大きいほど多い。これは、回転数が大きくなると全熱交換挙動を示すようになるためである。また、MA, MH, A, B の順で除湿量が多いが、これは有効吸着量が大きい順に合致する。なお、MH ロータは低回転域において顕著な性能低下を示すが、これは吸着ヒステリシスの存在により MH の有効吸着量が極端に少ないためである。

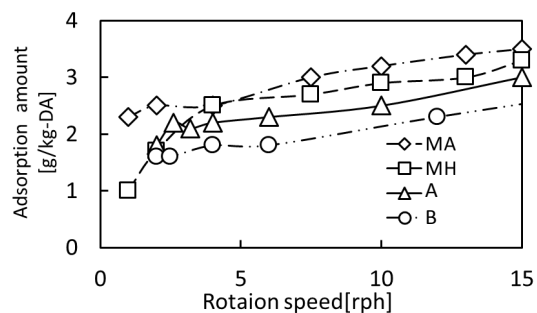


Fig.7 Influence of rotor property on the amount of dehumidification

Fig. 8 は吸着出口空気の温度上昇である。前述したように、昇温幅が最大となる最適なロータ回転数が存在する。ロータ回転数の増加に伴い除湿量(吸着熱発生量)は増加するが、同時にロータ自体の熱容量も相対的に増加するため、最適値が存在することになる。

また昇温幅と吸着等温線形状の関係はロータ回転数によって異なり、低回転数(1-5rph)での昇温幅は概ね除湿量の大小に一致するが、高回転数(6-15rph)では除湿量の順にはなっていない。これはゼオライト系吸着材 B は他のシリカゲル系吸着材に比べて吸着熱が大きいこと、またロータ自体の熱容量 ( $B \approx MA > MH > A$ ) の影響も大きい。

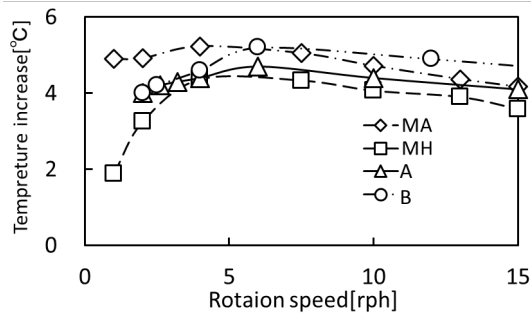


Fig.8 Influence of the rotation speed of rotor on the temperature increase in adsorption outlet air

#### (4) 再生空気温度の影響

ここでも、吸着側空気相対湿度を 90%、再生側空気相対湿度を 50% に固定した。また、空気流速は、前項同様に、吸着側面風速 1m/s、再生側面風速 3m/s である。Figs. 9, 10 に、吸着空気の除湿量および温度上昇度に与える再生空気(OA)温度の影響を示す。この実験では、有効吸着量の最も多い MA シリカゲルロータを用いた。除湿量は再生空気温度の低下に伴い増加を示す。また昇温幅は再生空気温度の低下に伴い減少する。前述のように、ロータが全熱交換挙動を示すため、再生空気が低温低湿であるほど吸着出口空気も低温低湿になる。さらにロータ回転数の増加に伴い全熱交換挙動が明確になり、12°C再生時にはロータ回転数 10rph を超えると暖房効果が得られなくなる。ここで昇温幅、除湿量の差が、最も顕著に現れたロータ回転数 13rph におけるロータ出口空気の温度・湿度のロータ回転方向分布を Figs. 11, 12 に示す。まず、出口空気湿度について、吸着区間前半に大きな差が見られ、再生空気温度が低いほど吸着出口空気湿度は低い。この要因としてロータの持ち込み顕熱(冷熱)が挙げられる。再生区間後半においてデシカントロータは再生入口空気温度まで冷却されており、吸着区間に入った直後は、高温多湿空気と接触し、結露が生じる。また、吸着空気が冷却され吸着空気の相対湿度が上昇して吸着推進力が大きくなり除湿量が向上する。空気温度についても湿度分布と同様、再生空気温度が低いほど吸着出口空気の温度は低い。一方、吸着区間後半では、再生空気温度が違って吸着出口空気温度に差はほとんど見られない。これは吸着区間前半において、水蒸気吸着と同時に吸着熱が発生し、ロータ温度が上昇する。再生空気温度が低いほど吸着区間前半でのロータ温度は低い、それは吸着量増加に伴い、吸着熱発生量が大きくなりロータが

迅速に暖められることになる。この結果、再生空気温度が低い場合でも吸着区間後半では除湿暖房効果が得られる。つまり、冬季外気を再生空気として除湿暖房効果を得ようとする場合、吸着区間の分割が有効である。

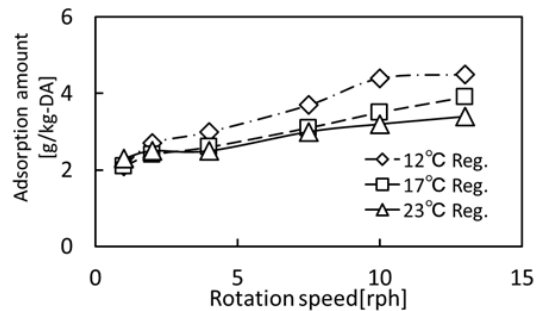


Fig.9 Influence of OA temperature on the amount of dehumidification

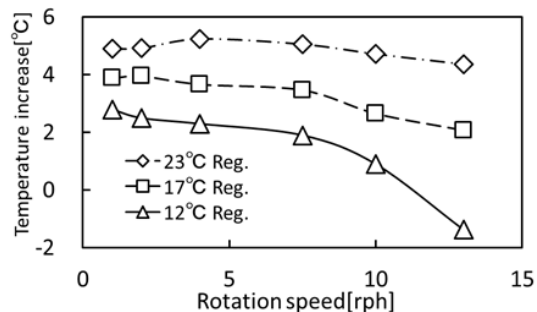


Fig.10 Influence of OA temperature on the temperature increase in adsorption outlet air

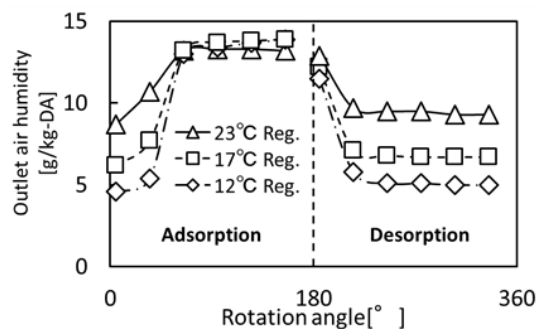


Fig.11 Angular distribution of the outlet air humidity at different regeneration air OA temperature

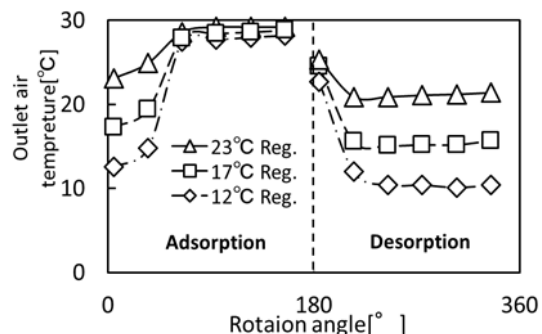


Fig.12 Angular distribution of the outlet air temperature at different regeneration air OA temperature

## (5)総括

本研究は園芸用温室の省エネ除湿技術として、外気との湿度差を駆動源とする吸着式デシカント除湿暖房プロセスを提案し、その適用可能性を検討したものである。このプロセスでは、通気抵抗が小さく、良好な熱・物質移動特性を有する吸着材デシカントロータを用い、「相対湿度が高い温室内の湿潤空気」と「冬季の乾燥外気」の湿度差を吸脱着推進力として温室を除湿する。除湿と同時発生する吸着熱は温室暖房に活用する。

小規模実験装置を用いた除湿暖房試験を実施した。まず、温度上昇度が最大となる最適回転数が存在する。除湿量は回転数の増加とともに多くなり吸着熱発生量も増加するが、温度上昇度は比較的低い回転数で最大となった。これは、より低回転数では、吸着ゾーン途中で吸着破過を生じるために十分な吸着熱が得られず、高回転数では、発生する吸着熱のうちデシカントロータの温度上昇に使われる割合が大きくなるためである。吸着出口空気のロータ回転方向の温度分布を測定した。吸着開始直後は、再生区間での水蒸気脱着にともなう気化熱によってロータ自体の温度が低下し、吸着熱が空気を加熱するよりもロータの加熱に消費される割合が多くなる。吸着区間の後半は、吸着破過に近づくために除湿量が少なくなり、温度上昇度が小さくなる。なお、ロータ回転数が高くなるほど最大の温度上昇度を示す角度が、吸着区間後半へと移行し、またその角度範囲は拡大する。一方で、低回転数であるほど、温度上昇は狭い角度範囲で顕著に現れ、かつ温度上昇度は大きくなる。低回転数では、ロータの再生が十分に進行し、吸着開始直後の吸着量が増加すること、これにより早期に吸着破過を生じるためである。

高相対湿度域で極めて大きな水蒸気吸着量を示すシリカゲル系デシカントロータ2種類を新たに評価対象に加え、シリカゲル系ロータ3種類とAIPO系ゼオライトロータ1種類の合計4つを評価した。デシカントロータを用いた除湿暖房には、大きい有効吸着量、小さい熱容量、大きな吸着熱がデシカントロータの特性として求められる。一方、除湿暖房性能を低下させる要因としてロータの全熱交換挙動がある。また、ロータ回転数の増加に伴い顕熱交換効果が大きくなるため除湿暖房には低回転域での運転が好ましい。さらに再生空気温度が低下するとロータの全熱交換挙動がより顕著となり昇温幅は減少するが、ロータ出口空気の回転方向分布測定結果から吸着区間の分割が除湿暖房効果の維持に有効であることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Takuya Tsujiguchi, Yugo Osaka and Akio Kodama, Study on the Miniaturization of the

Desiccant Wheel by the Optimization of Designing/Operation Concept, J. Chem. Eng. Japan, 査読有, Vol.47, No.7, pp.608-614 (2014)

DOI: <http://doi.org/10.1252/jcej.13we307>

- ② 綾目久雄, 永坂茂之, 神戸正純, 辻口拓也, 児玉昭雄, ドライエア製造条件におけるデシカントロータの除湿挙動—第1報: ロータ回転方向湿度・温度分布の測定と考察—, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, Vol.30, No.4, pp. 353-364 (2013)  
DOI:<http://doi.org/10.11322/tjsrae.30.353>

[学会発表] (計4件)

- ① 児玉昭雄, 神田 優, 辻口拓也, 大坂侑吾, 吸着材デシカントロータを用いた農業温室の除湿暖房に関する研究, 第26回環境工学総合シンポジウム2016, 2016年6月30日, 金沢歌劇座 (金沢)
- ② 神田 優, 辻口拓也, 大坂侑吾, 児玉昭雄, 除湿暖房を目的としたデシカントロータの湿度スイング操作と吸着等温線形状の影響, 第29回日本吸着学会研究発表会, 2015年11月19日, 徳島大学 (徳島)
- ③ Takuya Tsujiguchi, Motoki Hata, Yugo Osaka, Akio Kodama, Fundamental Study on the Temperature Rising for the Low Grade Heat Using an Adsorbent Desiccant Wheel Operated with Humidity Swing, Grand renewable energy 2014 International Conference, Proceedings of Grand Renewable Energy 2014, 6 pages in DVD, Tokyo Big Sight, Tokyo, 31 July (2014)
- ④ 佐伯雅和, 児玉昭雄, 大坂侑吾, 辻口拓也, 岡本久美子, 吸着熱交換器を用いたバッチ式除湿操作—除湿挙動と吸着・脱着工程の切換えに関する考察—, 2013年度日本冷凍空調学会年次大会, 2013年9月12日, 東海大学 (東京)

[その他]

ホームページ等

<http://www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/gijutsu/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

児玉 昭雄 (KODAMA Akio)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号: 30274690