

〈技術レポート〉

シミュレーションを用いた除湿ロータの設計手法

工業製品事業本部 環境事業推進室 環境部品開発課 山名和樹

1. はじめに

電子部品、エンジニアリングプラスチック、食品などをはじめとする高度化した製造工程においては湿度管理が必須であり、さまざまな方式の除湿装置が用いられている。主として(1)冷却除湿、(2)圧縮除湿、(3)バッチ式(=吸着材充填塔切り替え式)除湿、(4)ロータ回転式除湿といった方式に分類され、このうち当社は(4)の主要部位となる除湿ロータを製品として取り扱っている。ロータ回転式除湿は機構の簡単さ、メンテナンスの容易さに加え、条件によっては比較的低温の排熱を用いた運転が可能であることから空調における省エネルギー化の観点からも関心が高まっている。

本稿では除湿ロータの概要と、その開発および設計に係る除湿性能シミュレーション技術について報告する。

2. 概論

2.1 除湿ロータの構成

除湿ロータはガラス繊維などの無機繊維ペーパーをコルゲート加工したのち成巻(=巻き取り)することで製造されるハニカム構造体に各種吸湿材を担持させたものである。概略の構成を図1に示す。ハニカム構造体の壁を形成する無機繊維ペーパーは体積比率として90%以上の空隙を有しており、当社独自の製法によりその内部まで吸湿材が高密度に担持されている。この吸湿材の作用によって、空気がハニカムの流路を通過

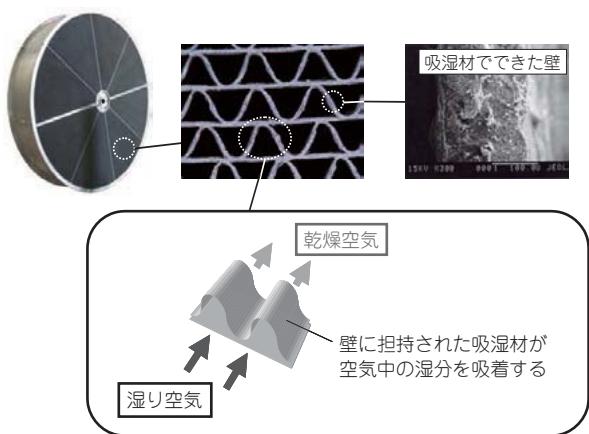


図1 除湿ロータ外観および拡大写真

する間に水蒸気が吸着され、その結果乾燥した空気が供給される。

2.2 除湿ロータの使用方法(フロー)

除湿ロータの最も一般的な使用例を図2に示す。シール構造によって「処理ゾーン」と「再生ゾーン」に区画された機構で用いるのが一般的である。「処理ゾーン」では、除湿ロータに担持された吸湿材によって空気中の湿分が吸着・除去され、乾燥した空気が製造される。除湿ロータは駆動モータによって一定の速度で回転しており、湿分を吸着した領域はやがてヒータで加熱された熱風が通気されている「再生ゾーン」に達する。水分子は物理吸着に起因する弱い結合力によってロータ中の吸湿材に捕捉されているため、熱風のエネルギーによって吸湿材から脱着し外部へと排気される。これによりロータは再び吸湿性能を回復した状態で処理ゾーンに

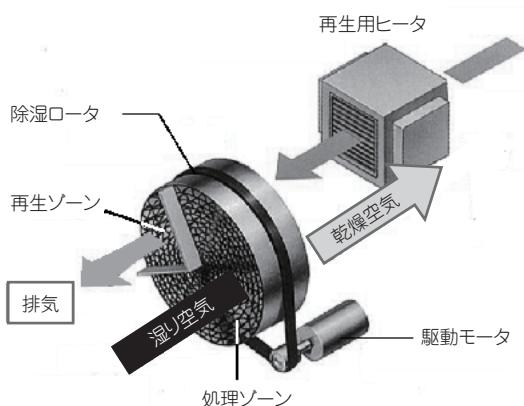


図2 除湿ロータのフロー例

戻るので、連続的に乾燥空気の製造が可能なシステムが成立する。

2.3 吸湿材

除湿ロータに吸湿性能を付与している吸湿材にはさまざまな特性のものが開発・製造されており、図3に示されるような相対湿度と吸湿量の関係を表した水蒸気吸着等温線と呼ばれる線図によって個々の特徴が明らかになる。

たとえば、A型シリカゲルや高分子吸湿材は相対湿度に対して吸湿量が直線的に変化し、ほぼ全ての湿度領域にわたって吸着等温線が勾配を持つ。そのためわずかな相対湿度の変化を与えるだけでも吸・放湿量が変化するので、低い再生温度でも高い除湿性能を示す除湿ロータを得ることができる。いっぽう、親水性ゼオライト

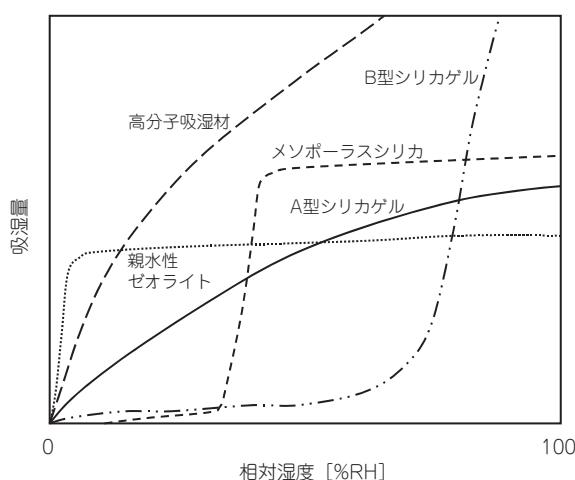


図3 種々吸湿材の平衡吸着量（吸着等温線）模式図

は吸湿力が非常に強く、低湿度領域にあっても飽和に近い吸湿量を示すので、比較的大きい再生エネルギーが必要ではあるが、条件によっては単段式で露点 -80°Cにも達する超低露点空気を生成することもできる。また、近年ではメソポーラスシリカのように低湿度域ではほとんど吸湿しないが、ある相対湿度を境に急激に吸湿量が増大する材料についての研究も進められている。除湿ロータ用途にどの吸湿材が適するかは目標除湿量、風量、再生熱源として準備可能なエネルギー量により異なるため、最適な吸湿材・最適な運転条件でロータを使用するためには「設計」の技術が非常に重要な要素となる。

3. 除湿性能シミュレーション方法について

3.1 目的

前述したように、除湿ロータを用いたシステムを構築するには、処理すべき風量の空気をどのレベルまで除湿するかという目標除湿量に対し、再生熱源として準備可能なエネルギー量を加味して吸湿材の種類を選定する必要がある。さらにロータのサイズ、フローの取り回し、各ゾーンの角度などを決定する設計作業が必要となる。しかし、図4に示すように除湿性能はロータに担持された吸湿材の物性、ハニカムの開口率や幾何学表面積（＝セルの細かさ）といったハニカム構造に関するパラメータ、さらには空気の温湿度や通過面風速、ロータ回転数をはじめとする操作条件など数多くの因子が複雑に影響しあって決まるものである。そのため多種多様な条件に対して最適設計を行うためにはあらかじめこれらの因子を多水準に振った実験デー

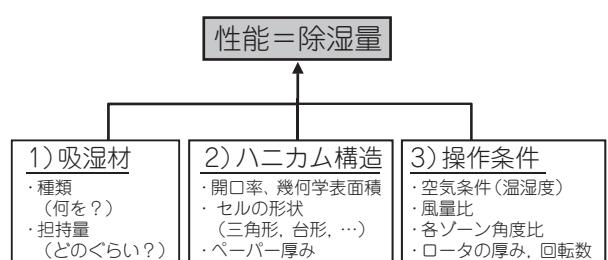


図4 除湿性能に寄与する因子

タを取得しておくことが不可欠である。しかしこの設計データの蓄積には膨大な手間と時間を必要とするうえ、ロータの仕様を変更したり、あるいは新しいロータを開発したりした場合は初めから取得作業をやり直す必要があるなど、迅速さという意味で難点があるのは否めない。

そこで、当社ではこの膨大な工数を要する実験作業を理論計算で代用する手法を導入している。具体的には除湿ロータの内部で生じている物質移動・熱移動現象を数式としてモデル化し、これを解くことで操作条件と吸湿材の物性から除湿性能の理論値を直接推算する手法である。

3.2 基礎方程式（計算モデル）

計算モデルは固定層吸着破過曲線の数値解析法^{1, 2)}と同様の考え方に基づき、ロータ内部の微小体積要素内における熱と物質の収支を取ることで数式として導き出している。このとき、より広範な操作条件に対応可能な計算モデルとなるよう、各種物性についても一定値として扱うのではなく温度や吸着量などに依存する関数として扱うことで、実際の現象に近づけるよう配慮した。

これらの基礎方程式群を有限差分法によって非線形連立方程式に変換し、Gauss-Newton法系の反復計算法で数値解を求めるアルゴリズムにより除湿性能シミュレータを構築している。これにより、吸着等温線パラメータ／吸着熱／ハニカム構造定数／ロータサイズ／操作条件を入力事項として、それに対応する動的除湿性能および空気温度の理論値を計算することが可能となる。

3.3 検証実験

3.3.1 ロータサンプルの作製

上述のシミュレーション計算により得られる除湿性能の妥当性・精度を検証するため、さまざまな吸湿材を担持したロータを試作した。試作ロータの内容を表1に示す。試作ロータAはゾルゲル法によってハニカム上にメソポーラスシリカ³⁾を直接合成したものである。また、試作ロータB～Dは市販のシリカゲル、親水性ゼオライトを無機の結合材（バインダ）によってロータに担持したものである。これらの水蒸気吸着

表1 試作ロータの内容

試作ロータ	吸湿材
A	メソポーラスシリカ
B	シリカゲル1
C	シリカゲル2
D	親水性ゼオライト

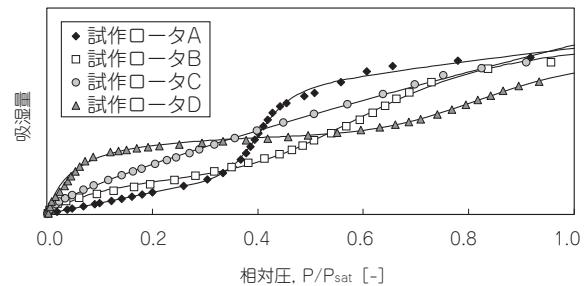


図5 作成したサンプルの吸着等温線

等温線は図5に示すとおりであり、異なる吸湿特性を持つことを確認することができる。

3.3.2 除湿性能の実測値とシミュレーション値の比較検証

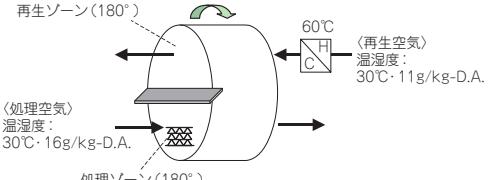
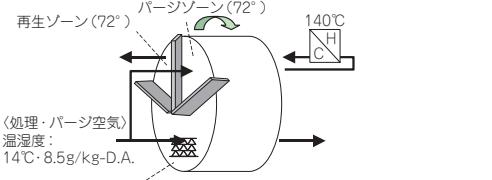
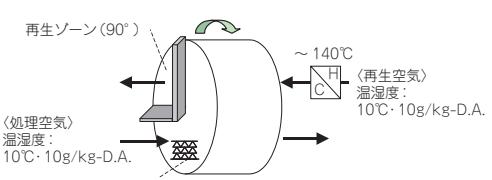
試作ロータの物性をもとに計算した動的除湿性能を実測と比較した。測定条件を表2に、結果を図6～8に示す。これらは比較検証を行ったデータの一部であるが、吸湿材の種類／ハニカム構造／ロータ厚み／空気条件／その他操作条件がさまざまに変わってもシミュレーション結果と実測値は良好に一致することを確認している。特に、水蒸気吸着等温線の形状が異なる材料にあっても、ロータ化した際の動的除湿性能を予測できる点は有用と思われる。数g程度の吸湿材粉末もしくはそれを担持したハニカムの小片から得られる基礎物性（主として吸着等温線と等量微分吸着熱）をもとにその用途に対する材料の有用性が判断できるためである。

4. 適用事例

4.1 製品開発への応用

前述のとおり、本稿で報告したシミュレーション法はさまざまな吸着等温線形状の吸湿材に対応可能であることが示唆されたので、これを利用した製品開発の事例を紹介する。これは概ね(1)

表2 試作ロータの性能試験条件

条件No.	フロー
1	 <p>再生ゾーン(180°) 〈処理空気〉温湿度: 30°C・16g/kg-D.A. 処理ゾーン(180°)</p>
2	 <p>再生ゾーン(72°) バージゾーン(72°) 140°C 〈処理・バージ空気〉温湿度: 14°C・8.5g/kg-D.A. 処理ゾーン(216°)</p>
3	 <p>再生ゾーン(90°) 〈処理空気〉温湿度: 10°C・10g/kg-D.A. 処理ゾーン(270°)</p>

※いずれも風速は20°C換算値

～(4)に示した手順により開発品の仕様を決定したものである。

(1) 吸湿材選定

さまざまな吸湿材について測定した物性パラメータ（吸着等温線と等量微分吸着熱）を用い、ロータ化した際の動的除湿性能を推算して比較評価後吸湿材を選定。

(2) ハニカム構造、担持量の決定

(1)と同時にセルサイズおよび吸湿材担持量が除湿性能に与える影響も推算し、最適化を実施。

(3) 最終仕様の決定

コスト計算および別途実施の耐久性評価試験結果と併せて最終仕様を決定。

(4) 確認試験

実機にて除湿性能を確認。

この手法により開発された製品「ハニクル®AC-SG」の試験条件を表3に、その結果を図9および10に示す。目論見どおりの除湿性能を有していることを確認した。

この製品は低露点空気の生成用途から排熱を

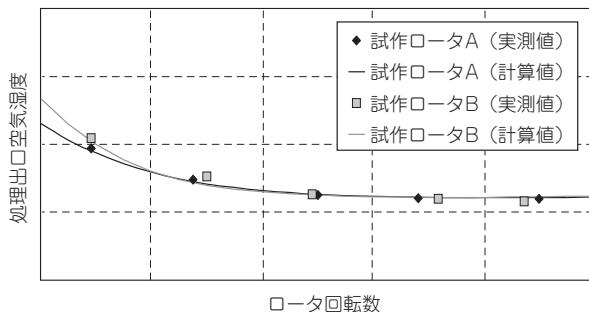


図6 「条件1」における除湿性能の実測値と計算値の比較

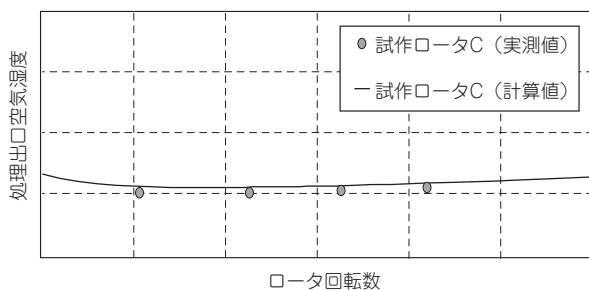


図7 「条件2」における除湿性能の実測値と計算値の比較

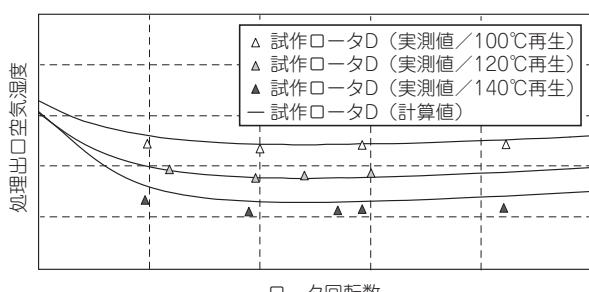


図8 「条件3」における除湿性能の実測値と計算値の比較

熱源とした空調用途に至るまで幅広く適応可能な除湿ロータである。また、製造工程内で吸湿材を化学処理して水熱耐久性を強化しているため長期的に安定した除湿性能が得られる点も特長の一つである。

4.2 最適条件の探索

シミュレーションにおいては操作条件を任意

表3 試作ロータの性能試験条件

条件No.	フロー
4	<p>再生ゾーン(90°) 温度: $t_{p,in}$ [°C] 湿度: $x_{p,in}$ [g/kg-D.A.] 面風速: 2.0m/s 处理ゾーン(270°)</p>
5	<p>再生ゾーン(180°) 温度: 30°C 湿度: 16g/kg-D.A. 面風速: 1.64m/s 处理ゾーン(180°)</p>

※風速はいずれも20°C換算値

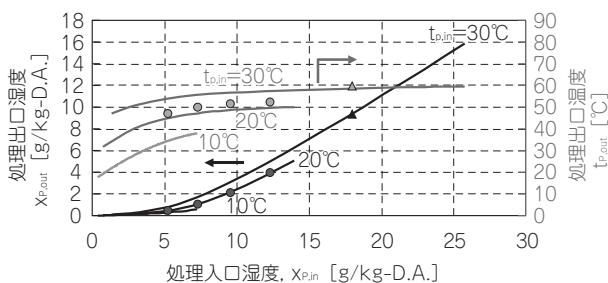


図9 「条件4」における開発品（ハニクル®AC-SG）の除湿性能曲線（実線は計算値、プロットは測定値）

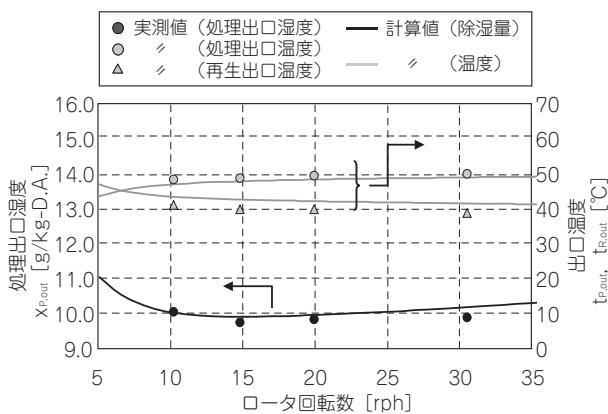


図10 「条件5」における開発品（ハニクル®AC-SG）の除湿性能および温度曲線

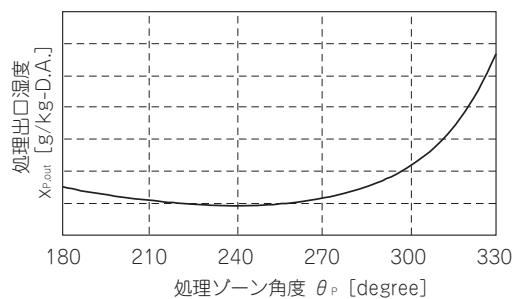


図11 処理ゾーン最適角度の試算例

に設定して除湿性能を推算することができるため、最適条件の探索に係る労力を大幅に低減できる。簡単な一例を図11に示した。これはある風量の条件に対して処理ゾーン角度の最適値がどこに存在するかを試算した一例である。この事例では240°近辺にその最適値が存在し、残りを再生ゾーンにあてることが望ましいことがわかる。実測でこれを実施しようとした場合、実験治具の作製から測定に至るまで多くの工数とコストを伴うがシミュレーションを用いることによりそれを大幅に削減することが可能となる。

5. おわりに

本稿では除湿ロータの原理と、その操作設計に係る性能シミュレーション技術について報告し、製品開発に応用した事例を紹介した。除湿ロータは担持された吸湿材に起因する吸湿特性と、与えられた条件の中でその最大のパフォーマンスを引き出す最適設計が非常に重要な要素技術であり、除湿性能シミュレーションはその有力なツールになりうると考えられる。

近年は空気品質の高度化とそれに係る消費エネルギーの低減化を両立する需要がありますます高まっており、当社としてもこれらのニーズに対して迅速な設計提案ができるよう努力してゆく所存である。

<基礎方程式>

$$\text{厚み方向の物質収支: } u_{STP} \rho_{STP} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \gamma \frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} = 0 \dots (1)$$

$$\text{境膜拡散過程: } \gamma \frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} = k_F a_v \rho_F (\bar{c} - c) \dots (2)$$

固相拡散過程:

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} = \frac{24}{L^2} \left[\frac{D_p(T_s)}{RT_s \rho_s (\partial q / \partial c)} + D_s(T_s, Q_{st}) \right] (q - \bar{q}) \dots (3)$$

$$\text{吸着平衡: } q = f_1(c, T_s) \dots (4)$$

$$\text{等量微分吸着熱: } Q_{st} = f_2(q) \dots (5)$$

熱収支(気相):

$$-u_{STP} \dot{p}_{STP} \frac{\partial (C_p T_F)}{\partial z} + h_F a_v (T_s - T_F) = 0 \dots (6)$$

熱収支(吸着材相):

$$\gamma \frac{\partial (C_{ps} T_s)}{\partial \tau} + \gamma \frac{\partial (C_{pw} \bar{q} T_s)}{\partial \tau} = \gamma \frac{\partial (\bar{q} Q_{st})}{\partial \tau} - h_F a_v (T_s - T_F) \dots (7)$$

$$\text{空気比熱: } C_p = A + B T_F + C T_F^2 \dots (8)$$

<使用記号>

 a_v : ハニカムの幾何学表面積 [cm²/cm³] c : 界面における水蒸気濃度 [mol/mol-流体] \bar{c} : 流体中の平均水蒸気濃度 [mol/mol-流体] C_p : 空気比熱 [J/mol · K] C_{ps} : 素子の比熱 [J/g · K] C_{pw} : 水の比熱 [J/mol · K] D_p : 細孔拡散係数 [cm²/s] D_s : 表面拡散係数 [cm²/s] h_F : 境膜伝熱係数 [J/cm · s · K] k_F : 境膜物質移動係数 [cm/s] L : ハニカム構造の壁厚み [cm] q : 界面における吸着量 [mol/g-素子] \bar{q} : 平均吸着量 [mol/g-素子] Q_{st} : 等量微分吸着熱 [J/mol] t : セルシウス温度 [°C] T : 絶対温度 [K] u_{STP} : 面風速 [cm/s] x : 乾き空気1kg中に含まれる水蒸気量

(=絶対湿度) [g/kg-D.A.]

 z : ロータの厚み方向座標 [cm] γ : 素子密度 [g/cm³] ρ : 空気密度 [mol/cm³] τ : 操作時間 [sec]

<下付き記号>

F: 流体相

s: 固相

STP: 標準状態

P: 処理ゾーン

R: 再生ゾーン

in: 入口空気

out: 出口空気

参考文献

- 1) 竹内雍ら:最新吸着技術便覧, エヌ・ティー・エス (1998)
- 2) 竹内雍: 吸着分離～入門から操作設計まで～, 培風館 (2000)
- 3) 公開特許公報: 特開 2007-182341

筆者紹介

山名和樹

工業製品事業本部 環境事業推進室
環境部品開発課