

除湿システムの投入エネルギーの評価に関する研究

冷却式除湿 吸着式除湿 吸収式除湿
デシカント空調 エネルギー評価

正会員 ○小林 信裕*1 同 郡 公子*2
同 石野 久彌*3

1. はじめに

除湿方式は冷却式除湿、吸着式除湿、吸収式除湿、圧縮式除湿に大別されるが¹⁾、装置の組み合わせまで分類すると多くの除湿システムが存在する。省エネを意図した除湿システムとして、冷却式除湿方式では、佐藤らは顕熱交換器と汎用の空冷 PAC を組み合わせ、再熱の投入熱量を削減し省エネを図ったシステムを提案している²⁾。吸着式除湿方式では、小金井らはロータ式のデシカント空調機で CO₂ ヒートポンプを組み込み、蒸発器で予冷、凝縮器で再生を行うシステムを提案し³⁾、池上らはデシカント空調機をバッチ式とすることで蒸発器、凝縮器に吸着材を塗布し除加湿性能を向上させたシステムを提案し⁴⁾、吉野らは吸着材の再生に太陽熱を用いて省エネを図ったシステム⁵⁾を提案している。吸収式除湿方式では、比較的高い除湿性能が得やすいとされており、小林らは問題となる吸収液の飛散防止のための構造を検討したシステムを提案している⁶⁾。このように省エネを意図しても、採用する除湿システムは開発者により異なる。設計者が除湿システムを適切に選定するには、全ての除湿システムを統一的に評価・比較する必要があるが、その手法は明確化されているとは言い難い。同一空気条件のもと、除湿方式毎の消費電力を比較している文献もあるが、吸湿材の吸脱着性能や、ヒートポンプの効率の設定次第で消費

電力は異なると考えられる。このように、装置の性能、熱源の方式、投入する熱エネルギーを排熱と考えるかで、省エネルギー性の比較結果が異なる。そこで、本研究では除湿システム別の投入エネルギーを統一的に評価・比較し、設計時の除湿システムの選定方法を明確にすること目的とする。本報では、既往の除湿システムを調査分類、除湿方式に応じた性能予測手法をピックアップし特徴を分析して、既往の計算法により除湿方式別に何をパラメータとして除湿性能を予測可能か明らかにする。また、ロータ式の吸着式除湿方式を例に、投入熱量と加熱冷却温度を理論限界で評価した結果を報告する。

2. 既往の除湿システムの動向

表 1 に建築分野における既往の除湿システムの調査結果を示す^{注 1)}。それぞれ省エネを意図して提案された除湿システムであるが、除湿方式、機器構成、熱源、流路構成等が違い、多様なシステムが存在する。他にも多数の除湿システムが存在するが、比較範囲の拡大は今後の検討課題とし、本論では評価・比較方法の説明に注力する。

3. 除湿方式に応じた性能予測手法の比較

表 2 に既往の除湿システム別の性能予測手法の調査結果を示す。吸着式除湿、吸収式除湿の性能予測手法をピックアップし、その特徴と入出力パラメータを整理した。吸着式除湿方式（ロータ式）は、義江らにより吸着量に

表 1 建築分野における既往の除湿システムの調査結果

研究開発者	除湿方式	除湿方法の概要	構成機器			冷熱源	温熱源	処理側流路	再生空気	
A社	冷却式除湿	顕熱交換器と冷却コイルで冷却除湿後、顕熱交換器で再熱	冷却コイル	顕熱交換機	-	HP	-	2種換気	-	
B社		露点温度の冷水を散水し冷却除湿後、加熱コイルで再熱	冷水散水	加熱コイル	-	HP	HP	2種換気	-	
C社	吸着式除湿	吸着材(ロータ状)で除湿後、顕熱交換器、気化冷却器の順で冷却	吸着材(ロータ状)	気化冷却器(除湿後冷却)	顕熱交換機	加熱コイル	HP	太陽熱	1種換気	RA
D社			吸着材(ロータ状)	冷却コイル(予冷、除湿後冷却)	全熱交換機	加熱コイル	HP	HP	1種換気	RA
E大学			吸着材(粒状)	冷却コイル(吸着材内敷設)	加熱コイル(吸着材内敷設)	-	HP	HP	室内循環	RA
F社	2塔式(バッチ式)	冷却コイルで吸着熱を除去しながら、冷却コイルに塗布された吸着材で除湿	吸着材(コイル表面に塗布)	冷却コイル	加熱コイル	-	HP	HP	1種換気	RA
G社						-	井水	太陽熱	1種換気	RA
H社	吸収式除湿	吸収液で除湿。空気の冷却は周辺空気を利用。	吸収液散水	再生器	-	HP	HP	室内循環	OA	
I大学		吸収液で除湿。吸収液は浸透膜内を循環させ、空気への吸収液の飛散を防止。	浸透膜内吸収液循環	冷却コイル(吸収液冷却用)	-	HP	HP	室内循環	OA	

応じて変化する湿気伝達率を、簡易な実験から同定し、除湿性能を精度良く予測できる数値解析手法が開発されている⁷⁾。本計算手法はロータの回転を考慮するために、回転方向に要素分割を行い、各分割要素に対して独立して出口空気状態を計算する。各分割要素は時間経過と共に

座標位置を回転させ、それが吸着側に位置するか、脱着側に位置するかで流れ方向と流入温湿度を切り替えて、吸着過程と脱着過程を再現する。吸着側に位置する分割要素の出口空気温湿度を平均することで、ロータの回転を考慮している。このことから、本計算手法は吸着除湿方

表 2 除湿システム別の性能予測手法の特徴と入出力パラメータ

著者		義江	趙	森谷	JURINAK	
対象とする除湿方式		吸着式除湿(ロータ式)	吸着式除湿(バッチ式) 冷却しながら除湿	吸着式除湿	吸着式除湿(ロータ式)	
計算モデル		 デシカントロータ内の微小体積をモデル化	 球状デシカント材に冷温水管を敷設した方式をモデル化	 液体のデシカント材を中空系膜内に流す方式をモデル化	 等エンタルピー線、等相対湿度線、乾球温度	
解法		流路空気、熱・水蒸気収支、シリカゲル材の熱収支、デシカント材の湿気伝達を解く。デシカント材表面の絶対湿度と質量含水率は瞬時に平衡含水率に従うと仮定し吸着量を計算。	流路空気とデシカント材の熱・水蒸気収支、冷温水と装置内外の熱収支を解く。デシカント材表面の絶対湿度と質量含水率は瞬時に平衡含水率に従うと仮定し吸着量を計算。	流路空気とデシカント材の熱・水蒸気収支を解く。中空系膜内外とも定常状態・完全拡散と仮定。	吸着式除湿の理論限界のプロセスからのずれを、エンタルピーに関する除湿係数と、相対湿度に関する除湿係数で表現し計算。	
計算の特徴		湿気伝達率は一定でなくデシカント材の含水率の関数で扱い、計算精度を向上している。	熱伝達率・湿気伝達率は一定。装置内外の熱収支も解いている。	湿気伝達率は一定。熱貫流率は液体を層流と仮定しレベックの式で、気体をヌッセルト数の近似式により計算。	再生温度によらず計算できるが、風量やロータ回転数で除湿係数が変化する。	
入力	計算条件	処理側空気入口温度	°C	○	○	○
		処理側空気入口絶対湿度	kg/kg'	○	○	○
		処理側空気質量流量	kg/s	○	○	○
		再生側空気入口温度	°C	○	○	○
		再生側空気入口絶対湿度	kg/kg'	○	○	○
		再生側空気質量流量	kg/s	○	○	○
		装置外部の空気温度	°C	-	○	-
		冷温水入口温度	°C	-	○	-
		冷温水質量流量	kg/s	-	○	-
		デシカント溶液の入口温度	°C	-	-	○
	デシカント溶液の入口平衡絶対湿度(濃度)	kg/kg'	-	-	○	
	ロータ回転数(切り替え周期)	RPH (s)	○	○	-	
	除湿係数(エンタルピー)	-	-	-	-	○
	除湿係数(相対湿度)	-	-	-	-	○
	湿気伝達率 デシカント材⇄流路空気	kg/(s·m ² ·(kg/kg'))	○	○	○	-
	熱伝達率 デシカント材⇄流路空気	W/(m ² ·K)	○	○	○	-
	熱貫流率 冷温水⇄流路空気	W/(m ² ·K)	-	○	-	-
	熱貫流率 流路空気⇄装置外部空気	W/(m ² ·K)	-	○	-	-
	伝熱面積 デシカント材⇄流路空気	m ²	○	○	○	-
	伝熱面積 冷温水⇄流路空気	m ²	-	○	-	-
伝熱面積 流路空気⇄装置外部空気	m ²	-	○	-	-	
デシカント材流路の空隙率	-	-	-	-	-	
材料特性	デシカント材の比熱	J/(kg·K)	○	○	○	-
	デシカント材の密度	kg/m ³	-	○	○	-
	デシカント材の充填密度	kgd/m ³	○	-	-	-
	デシカント材の有効熱伝達率	W/m ² ·K	○	-	-	-
物性	空気の定圧比熱	J/(kg·K)	○	○	○	-
	空気の熱伝達率	W/m ² ·K	○	-	-	-
	吸脱着熱/蒸発潜熱	J/kg	○	○	○	-
	水の比熱	kJ/(kg·K)	-	○	-	-
出力	処理側空気出口温度	°C	○	○	○	○
	処理側空気出口絶対湿度	kg/kg'	○	○	○	○
	再生側空気出口温度	°C	○	○	○	○
	再生側空気出口絶対湿度	kg/kg'	○	○	○	○
	冷温水出口温度	°C	-	○	-	-
	デシカント溶液の出口温度	°C	-	-	○	-
	デシカント溶液の出口平衡絶対湿度(濃度)	kg/kg'	-	-	○	-

式（バッチ式）にも適用できると考えられる。近年、吸着式除湿（バッチ式）で、吸着熱を除去するために、吸着材を冷却しながら除湿する方式が開発されている。趙らは球状の吸着材に冷温水配管を敷設した除加湿シスムの性能予測手法を開発している⁸⁾。吸収式除湿方式のシステムは、吸収液の飛散防止のため、吸収液を中空糸膜内に循環させる方式について、森谷らにより性能予測手法が開発されている⁹⁾。前述の性能予測手法に比べ、簡易に除湿能力を予測する手法として、JURINAK の除湿係数を用いた手法がある¹⁰⁾。吸着式除湿の理論限界のプロセスからのずれを、エンタルピーに関する除湿係数と、相対湿度に関する除湿係数で表現し計算するもので、2つの除湿係数と処理側、再生側空気の温湿度条件のみで除湿量を予測できる。エンタルピーに関する除湿係数は小さいほど、相対湿度に関する除湿係数は大きいほど良いと言え、除湿特性を分かり易く表している。また、本手法は計算負荷が小さいことから、年間シミュレーションに適する。しかし、風速やロータ回転数によって除湿係数が変わることや、除湿方式が限定されることから、普遍化が必要と考えられる。

4. 投入エネルギーの比較方法の検討

投入エネルギーを統一的に比較するために以下の2つの考え方を採用した。

① 理論限界による比較の考え方

吸着材の吸着速度、加熱・冷却コイルの伝熱性能、熱交換器の顕熱効率^{注2)}、潜熱効率^{注3)}など、その時代の技術の発展により、除湿システムを構成する機器の性能は異なり、除湿性能も異なる。この影響を除くため、吸着過程は等エンタルピー変化で再生空気の相対湿度まで吸着する、熱交換器は顕熱効率1、潜熱効率1とした理論限界で各方式を評価する。

② 除湿システムと熱源を分離した比較の考え方

除湿のためには冷熱・温熱を投入する必要があるが、ヒートポンプを利用する、排熱を利用するなど、熱源の方式によって投入するエネルギー（電力、熱）が異なる。そのため、除湿システムに投入する冷熱・温熱と、その冷熱・温熱を生成するために投入するエネルギーは分けて考える。

5. 除湿システムの分類と計算方法

表3に、表1の除湿システムのうち、A社、C社^{注4)}、D社の方式（それぞれCase1,2,3とする）の加熱冷却温度と投入熱量の計算手順、図2に計算結果を示す。表1の計算は章4①の仮定を用い、理論限界で計算している。各ケースとも真夏日の外気処理を想定し、OA：33℃60%、

SA：24℃43%、RA：24℃54%で計算した。Case1は冷熱投入熱量が37.6kJ/kgで、冷却に必要な最大温度（以降、冷却温度という）は10.7℃となった。Case2は顕熱交換器で、処理側空気は冷却され、再生側空気は加温されるため、温熱投入熱量が4.9kJ/kgと少なく、加温に必要な最低温度（以降、加熱温度という）は65.7℃となった。Case3は全熱交換器により吸着除湿の寄与率を低く抑え、39.1℃の低温の温熱で除湿できている。本検討方法で、任意の温湿度条件下において、装置の性能が理論限界まで向上した時の投入熱量を定量的に把握できた。次に、装置の効率を加味し、建物の熱需要に応じた熱源を検討することで、省エネな除湿システムを計画できると考えられる。

6. まとめ

除湿システム別の投入エネルギーを統一的に評価・比較する手法を提案することを目的とし、除湿方式別の既往の性能予測手法をピックアップし、入出力パラメータと計算法の特徴を整理した。また、ロータ式の吸着式除

表3 除湿システム別の加熱冷却温度と投入熱量の計算手順

Case1 冷却式除湿（冷却コイル+顕熱交換機）

- 1) 相対湿度100%、絶対湿度が X_4 と等しい点を③とする。
- 2) $h_1-h_2/(h_4-h_3)=1$ を満たし、 X_1 と等しい、若しくは、相対湿度100%となる点を②とする。
- 3) 冷熱投入熱量は h_2-h_3 、冷却温度は T_3 と求まる。

Case2 吸着式除湿（吸着材ロータ式+顕熱交換器）

- 1) $h_1=h_2$ を満たし、絶対湿度が X_3 と等しい点を②とする。
- 2) $t_5-t_4/(t_2-t_4)=1$ を満たし、絶対湿度 X_4 と等しい点を⑤とする。
- 3) 絶対湿度が X_5 と等しく、相対湿度が Rh_2 となる点を⑥とする。
- 4) 温熱投入熱量は h_6-h_5 、加熱温度は T_6 と求まる。

Case3 吸着式除湿（全熱交換器+吸着材ロータ式）

- 1) 顕熱効率=1、潜熱効率=1のため、点①=点⑥、点②=点⑤となる。
- 2) 相対湿度が Rh_4 と等しく、絶対湿度が X_6 と等しい点を⑦とする。
- 3) 温熱投入熱量は h_7-h_6 、加熱温度は T_7 と求まる。
- 4) 絶対湿度が X_2 と等しく、エンタルピーが h_4 と等しい点を③とする。
- 5) 冷熱投入熱量は h_5-h_2 、冷却温度は T_3 と求まる。

記号

t：空気温度[℃]、Rh：空気相対湿度[%]、
X：空気絶対湿度[kg/kg]、h：空気エンタルピー[kJ/kg]

添字

添字番号は図2の空気線図上の番号と対応する

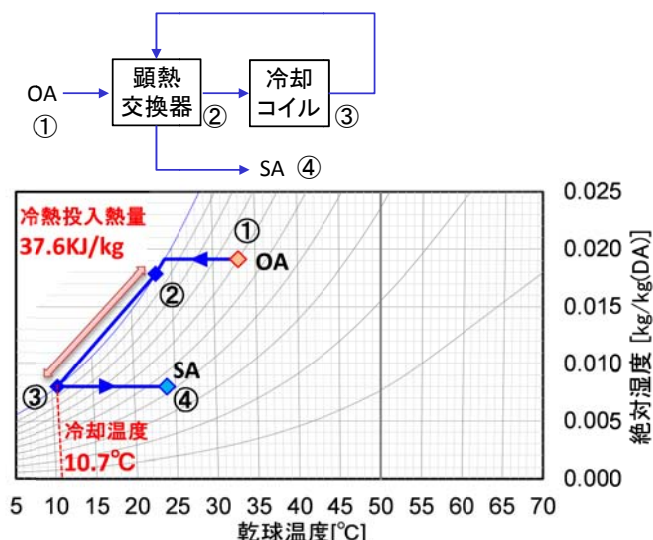
湿方式を例に、投入熱量と加熱冷却温度を理論限界で評価した。今後、多様な除湿システムに対応し、除湿性能予測が可能な計算法を検討する。更に、多様な除湿システムを対象に装置の効率を調査し、効率を考慮して評価を行う。また、搬送動力等を含めた一次エネルギーの評価、投入熱エネルギーのエクセルギー評価を検討する。

【参考文献】

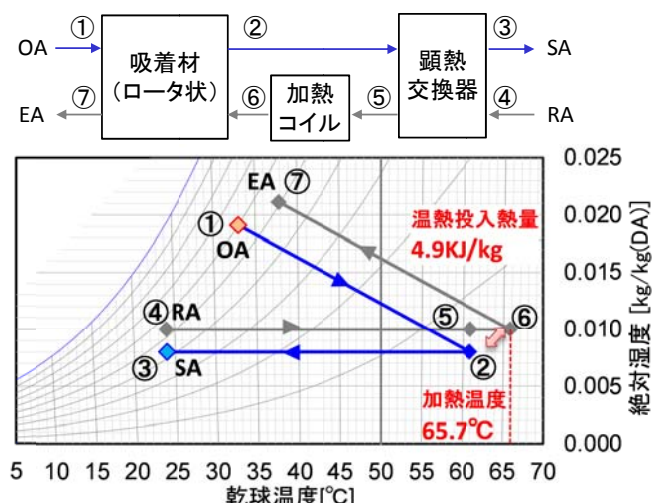
- 1) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター、改訂版 デシカント空調システム 低温排熱利用による省エネ空調と快適空間の創造
- 2) 佐藤英樹 他、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 805-808, 2012. 9
- 3) 小金井真 他、非結露型次世代空調システムに関する研究その 1~4, 空気調和衛生工学会論文集, pp. 1-8 2006. 5, pp. 51-57, 2006. 11, pp. 11-18, 2007. 9, pp. 1-11 2009. 5
- 4) 池上周司 松井伸樹、ヒートポンプの熱を利用して駆動する高効率かつコンパクトなデシカント外気処理調湿ユニット, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 pp. 113-116 2007. 3
- 5) 吉野博, 持田灯, 義江龍一郎, 佐竹晃, 桃井良尚, 三田村輝章, 高木理恵, 米倉洋, Enteria Napoleon 他、通年利用型ソーラー給湯・空調換気システムの研究開発 1~10, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 621-630, 2007. 8, pp. 460-466, 2008. 8, pp. 477-478, 2009. 8
- 6) 小林光 他、密閉型調湿膜ユニットを用いた湿式デシカント空調システムの開発 その 1 研究の目的及び実現可能性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015. 9
- 7) 義江龍一郎, 山口福太郎, 星野一人, 桃井良尚, 佐竹晃, 吉野博、ロータ式デシカント空調機の除湿性能予測を目的とした数値シミュレーション手法の開発, 日本建築学会環境系論文集, No686, pp. 341-349, 2013. 4
- 8) 趙ら、パッチ式デシカント空調システムの概要及びその加湿暖房性能 (その 1) 住宅用デシカント空調システムの開発及び性能評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No655, pp. 835-844, 2010. 9
- 9) 森谷晃士 他、液体デシカントを用いた除湿空調用中空系式調湿膜ユニットの研究, 空気調和・衛生工学会大会講演論文集, 2015. 9
- 10) JURINAK. J. J.、Open Cycle Desiccant Cooling-Component Models and System Simulations, Ph. D. thesis, University of Wisconsin-Madison, 1982

【注記】

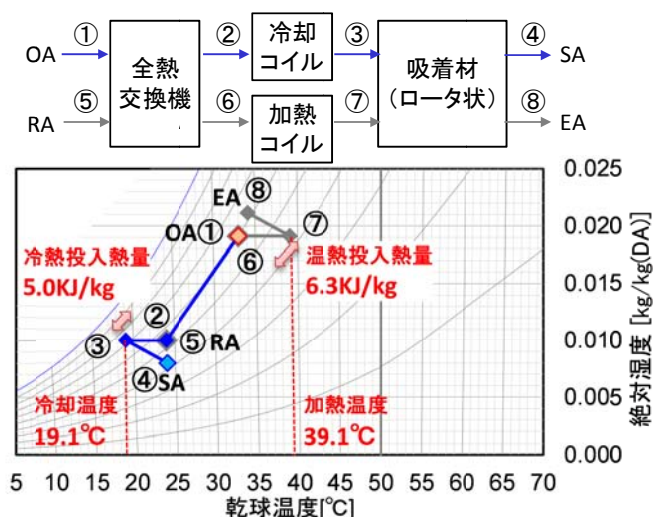
- 注 1 本調査では建築学会学術講演梗概集の過去 5 年分の発表論文を調査した。
- 注 2 顕熱効率[-] = (OA の乾球温度 - SA の乾球温度) / (OA の乾球温度 - RA の乾球温度)
- 注 3 潜熱効率[-] = (OA の絶対湿度 - SA の絶対湿度) / (OA の絶対湿度 - RA の絶対湿度)
- 注 4 今回の RA 空気の状態では、顕熱交換後の冷却が不要のため、機器構成から気化冷却器を除いている。また、4 章②の考え方では、除湿システムに投入する熱量は冷却コイルも気化冷却器も変わらない。



a) Case1 冷却式除湿(冷却コイル+顕熱交換器)



b) Case2 吸着式除湿(吸着材ロータ式+顕熱交換器)



c) Case3 吸着式除湿(全熱交換器+吸着材ロータ式)

図 2 除湿システム別の加熱冷却温度と投入熱量

*1 前田建設工業(株) 技術研究所
 *2 宇都宮大学 教授 工博
 *3 首都大学東京 名誉教授 工博

*1 Technical Research Institute of Maeda Corporation
 *2 Prof., Utsunomiya University., Dr.Eng
 *3 Emeritus Prof., Tokyo Metropolitan University., Dr.Eng