

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 200)

除湿システムの投入エネルギー評価に関する検討

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST(Part 200)

Study on the Energy Evaluation of the Dehumidification System

正会員 ○小林 信裕 (前田建設工業) 特別会員 村上 周三 (建築環境・省エネルギー機構)
技術フェロー 石野 久彌 (首都大学東京) 技術フェロー 郡 公子 (宇都宮大学)

Nobuhiro KOBAYASHI*¹ Syuzo MURAKAMI *² Hisaya ISHINO *³ Kimiko KOHRI *⁴

*¹ Maeda Co *² Institute for Building Environment and Energy Conservation

*³ Tokyo Metropolitan University *⁴ Utsunomiya University

This paper is investigation of the trend of research on dehumidifying system and the characteristics of the calculation method of dehumidifying system, and organized input and output parameters. In addition, adsorption type dehumidifying system of the rotor shape is reported as an example, and the evaluation results of the input heat quantity and the heating cooling temperature in the ideal state are reported.

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、除湿システムは開発者により異なる。設計者が採用する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等で、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、これらの評価・比較を可能とする計算法の開発を目的とする。本報では、近年の除湿システムの調査分類、除湿システムの研究動向調査、除湿方式に応じた計算法の特徴と入出力パラメータの整理を行った。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想状態で評価した結果を報告する。

1. 近年研究された除湿システム

表 1 に近年研究対象となった建築分野における除湿システムの例を示す。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。

2. 除湿システムの研究動向

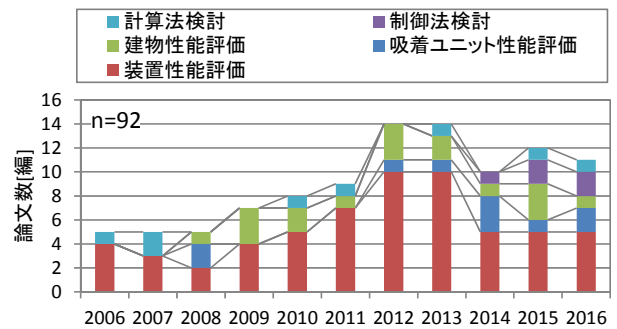
図 1 に 2006 年～2016 年の、除湿システムに関する研究の論文数の調査結果を示す。論文数は 2012、2013 年でピークを迎え 14 編まで増加、その後は 10 編強で推移している。全体では増加傾向と言える。また、2013 年までは装置性能評価の研究が増え続けていたが、近年は 5 編程度で推移し、研究の種類が多用化している。図 2 に除湿方式別の論文数の割合を示す。全体では、吸着除湿ロータの割合が多いが減少傾向にある。2015 年から吸収式除湿の研究が増え、多様な除湿方式が研究されている。

表1 近年研究された建築分野における除湿システム

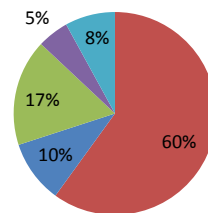
研究開発者	除湿方式	除湿方法の概要	構成機器	冷熱源	温熱源	処理側流路	再生空気				
A社	冷却式除湿	顕熱交換器と冷却コイルで冷却除湿後、顕熱交換器で再熱	冷却コイル	顕熱交換機	-	-	HP	-	2種換気	-	
B社		露点温度の冷水を散水し冷却除湿後、加熱コイルで再熱	冷水散水	加熱コイル	-	-	HP	HP	2種換気	-	
C社	吸着式除湿	ロータ式	吸着材(ロータ状)で除湿後、顕熱交換器、気化冷却器の順で冷却	吸着材(ロータ状)	気化冷却器(除湿後冷却)	顕熱交換機	加熱コイル	HP	太陽熱	1種換気	RA
D社			全熱交換器、冷却コイルの順で冷却後、吸着材(ロータ状)で除湿	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		2塔式(パッチ式)	吸着材内に敷設された冷却コイルで吸着熱を除去しながら、吸着材(粒状)で除湿	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	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	

3. 除湿方式別の計算法の特徴

表2に既往の除湿システム別の計算法の特徴、表3に吸着式除湿、吸収式除湿の性能予測手法をピックアップし、その入出力パラメータを示す。吸着式除湿方式(ロータ式)は、義江らにより吸着量に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た出口空気状態を計算できる。本計算法は吸着除湿方式(パッチ式)にも適用できると考えられる。近年、吸着式除湿(パッチ式)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湿システムの計算法を開発している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、森谷らにより計算法が開発されている⁹⁾。前述の計算法に比べ、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⁾。吸着式除湿の理想状態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



a) 年別の論文数の推移



【凡例の補足説明】
 装置性能評価: 除湿装置を対象とした性能評価の研究。
 建物性能評価: 除湿装置を導入した建物の性能評価の研究。
 吸着ユニット性能評価: 除湿装置の吸着ユニット部分の性能評価の研究。

b) 研究内容の内訳

図1 除湿システムに関する研究の論文数と内訳

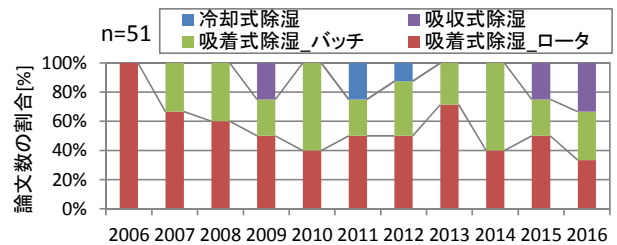
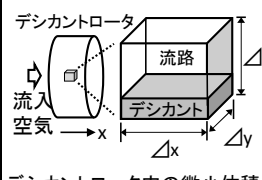
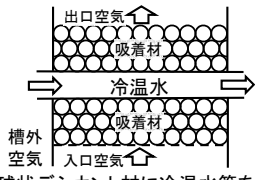
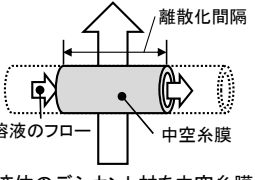
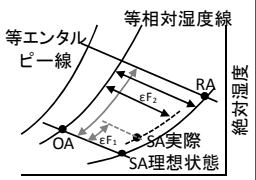


図2 除湿方式別の論文数の割合

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。

表2 除湿システム別の計算法の特徴

番号	1	2	3	4
代表者	義江	趙	森谷	JURINAK
研究で対象とした除湿方式	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	吸収式除湿	吸着式除湿 ロータ式
適用方式	吸着式除湿 ロータ式	○	×	○
	吸着式除湿 バッチ式	○	○	△ (吸着剤の含水量の変化は未考慮)
	吸着式除湿 バッチ式 冷却しながら除湿	×	○	×
	吸収式除湿	×	○	×
計算モデル				
解法の説明	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。	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糸膜内に流す方式をモデル化	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	熱伝達率・湿気伝達率は実験結果から同定、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。	
計算負荷	高	中	高	低
空間の離散化方法	空気の流路方向+ロータ回転方向	無し	吸着液の流路方向	無し
年間計算の利用例	無	有	無	有

【計算負荷の補足説明】高:空間の離散化有り、年間計算の利用例無し。 中:空間の離散化有り、年間計算の利用例無し。 低:空間の離散化無し、年間計算の利用例有り。

4. 投入エネルギーの比較方法の提案

除湿システムの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・潜熱効率など、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の理想状態で各方式を評価する。

②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. 除湿システムの理想状態の投入熱量の計算

表3に、表1の除湿システムのうち、A社、C社、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、理想状態で計算している。各ケースとも真夏日の外気処理を想定し、OA:33°C60%、SA:24°C43%、RA:24°C54%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°Cとなった。Case2は顕熱交換器で、

表3 計算法別の入出力パラメータ

パラメータ名称	単位	計算法の番号				
		1	2	3	4	
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 デシカント材⇄装置外部空気	W/(m ² ·K)	-	○	-	-	
熱貫流率 冷温水⇄流路空気	W/(m ² ·K)	-	○	-	-	
熱貫流率 冷温水⇄デシカント材	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 冷温水⇄デシカント材	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	kg/dm 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'	-	-	○	-

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、装置の性能が理想状態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。

まとめ

除湿システム別の投入エネルギーを统一的に評価・比較する手法を提案することを目的とし、近年の除湿システムの研究動向調査、除湿方式別の計算法の特徴・入出力パラメータを整理した。また、吸着式除湿方式（ロータ式）を例に、投入熱量と加熱・冷却温度を理想状態で評価した。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現状装置の効率を考慮した評価を行う。

【謝辞】本報は（財）建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「BEST 企画委員会（村上周三委員長）」および専門版開発委員会（石野久彌委員長）、統合化WG（石野久彌主査）の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。

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、バ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

