

リキッドデシカントユニットにおける加湿性能の 基本特性の把握

澁澤朱音・馬場大輔・川上理亮
谷野正幸・三宅友香・原田政利*¹

Verification of Humidification Performance on Liquid Desiccant Unit without Heat Exchanger

Akane Shibusawa・Daisuke Baba・Yoshiaki Kawakami
Masayuki Tanino・Tomoka Miyake・Masatoshi Harada

本報では、省エネおよび室内環境向上を達成する新たな加湿システムの開発を目的とし、従来のリキッドデシカント空調システムから気液接触器部のみを抽出したリキッドデシカントユニットの定常・非定常状態の加湿性能試験を行った。定常状態の種々の給気条件において、乾球温度の標準偏差は0.1°C以内、相対湿度は0.09%RH以内であり、高い温湿度制御性を確認した。また非定常状態においても、乾球温度の標準偏差は0.22°C以内、相対湿度は0.22%RH以内であり、高い温湿度制御性を確認した。

1. はじめに

従来、蒸気加湿は高い加湿量と加湿効率を有している点から、外気の加湿処理等に用いられている。しかしながら、他の加湿方式と比較して、蒸気生成における消費エネルギーが大きいため、CO₂排出量も多くなる¹⁾。地球温暖化防止の観点から、省エネかつ脱炭素化を目指した加湿システムの開発が望まれる。近年は、脱炭素を目指した加湿技術として、比例制御を用いた気化式加湿器²⁾や二流体加湿³⁾の開発が行われているが、設備運用者または生産技術者が望む蒸気式加湿と同程度の加湿性能までは至っていない。また、近年の新型コロナウイルスの感染対策として、室内空気の湿度の維持⁴⁾と換気量の増加⁵⁾が挙げられるが、それらに伴い、空調機器の消費エネルギーが増加するという課題が顕在化してきている。

我々は、45~60°C程度の低温排熱を利用し除湿・加湿が可能なリキッドデシカント空調システムに着目した^{6,7)}。その空調システムの基本原理は、液体調湿剤と空気を接触させることで、液体調湿剤の温度と濃度により供給空気の温湿度を制御するものである。また、液体調湿剤である塩化リチウム水溶液は除菌作用を有しており、空気と接触させることによる空気清浄効果が期待できる^{8,9)}。**図1**に一般的なりキッドデシカント空調システムの概略図と今回の検証範囲を示す。このシステムは除湿および加湿を行う処理部と、除湿時に希釈された塩化リチウム水溶液を濃縮する再生部から構成されている¹⁰⁾。液体調湿剤として使用する塩化リチウム水溶液は、高い金属腐食性を有するため¹¹⁾、熱交換器と配管は耐腐食性とする必要がある。そのため、従来のリキッドデシカント空調システムは、機器サイズおよび機器コストが大きという課題がある。そこで我々は、それらの課題を解決するべく、**図1**の赤枠内の処理部における加湿機能のみ

*¹ ダイナエア株式会社 製品開発部門

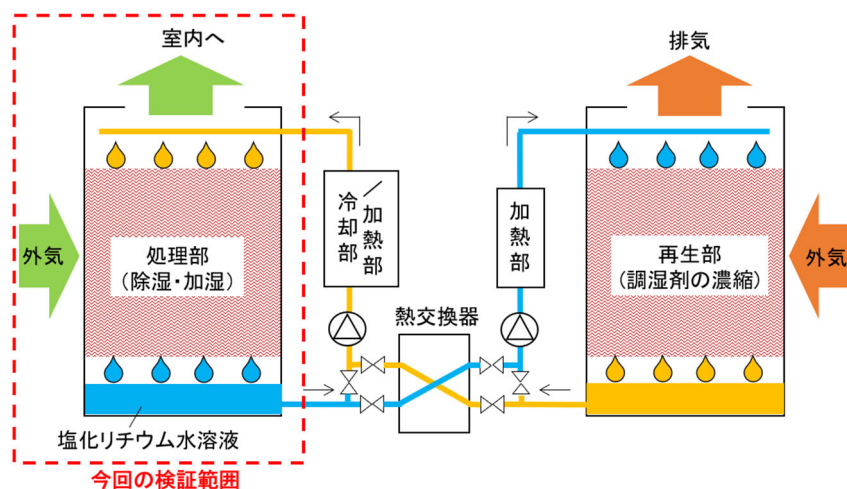


図1 一般的なリキッドデシカント空調システム概略図と今回の開発範囲

の活用可能性を検討すべく、気液接触器部のみ（リキッドデシカントユニット：LDU）の加湿性能を実験的に検証した。なお、本検証はリキッドデシカント空調機メーカーであるダイナエア株式会社と共同で行った。

2. 検証試験の概要

2.1 LDU の原理

写真1に検証用 LDU の外観、図2に概略図を示す。検証用 LDU は、気液接触部、塩化リチウム水溶液、循環ポンプ、給水配管から構成されている。加湿時には、循環ポンプにより塩化リチウム水溶液が上部から散布され、気液接触部を液膜状に流下する。気液接触部は吸水性に優れたセルロース系の材料から成っており、塩化リチウム水溶液と空気が十分に接触するように形状が設計されている¹²⁾。そして、導入空気と塩化リチウム水溶液が接触することで、両者の水蒸気圧の大小関係により空気が除湿されるか加湿されるかが決定する。すなわち、空気の水蒸気圧が塩化リチウム水溶液の蒸気圧よりも高い場合、空気は除湿され（空気中の水蒸気が塩化リチウム水溶液に吸収される）、反対に低い場合には空気は加湿される（塩化リチウム水溶液中の水が空気中に水蒸気として放出される）。塩化リチウム水溶液の気液平衡水蒸気圧は濃度



写真1 LDU 外観

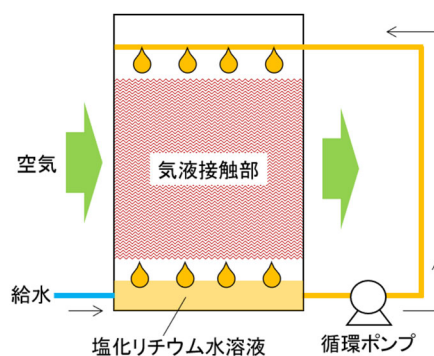


図2 LDU 概略図

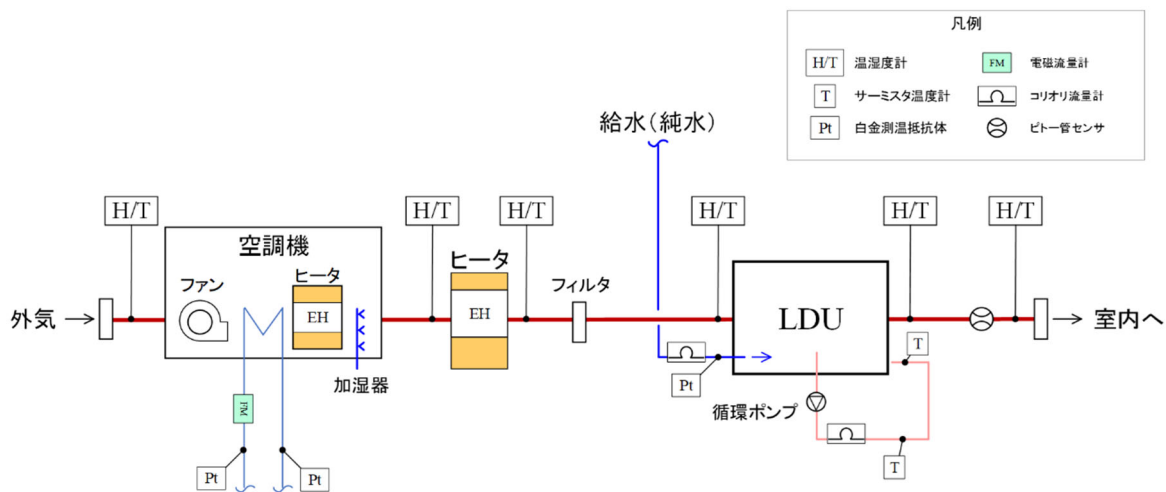


図3 加湿性能検証試験装置の系統図

が高いほど、そして温度が低いほど低下して空気中の水分を吸収しやすくなるという性質を持つ。リキッドデシカント空調システムはこの原理を利用することで供給空気の調湿を行っている¹³⁾。図1のような、一般的なリキッドデシカント空調システムでは、再生器により水溶液を濃縮し、給水により水溶液を希釈することで濃度の調節を行っている。気液接触部において水溶液中の水分は空気側へ移動するため、濃縮する方向に進んでいく。そのため、供給空気の相対湿度を制御ターゲットとし給水量を調節することで水溶液濃度を一定に保ち、加湿量を制御する。また、供給空気の温度は、水溶液を加熱しつつ加湿を行うことから、運転濃度に対応した気液平衡線に沿って移動する。一方、本気液接触部のみのLDUの場合、加湿時に溶液の加熱を行わないため気化冷却により加湿が行われ、空気線図上の動きは等エンタルピー変化となる。

2.2 試験装置

本報では、LDUからの供給空気を種々の条件で設定し、各条件における供給空気の乾球温度および相対湿度を測定することで加湿性能を検証した。LDUのサイズおよび塩化リチウム水溶液の流量は、物質伝達率、圧力損失、塩化リチウム水溶液の循環流量を事前に確認し、決定した。図3に試験装置の系統図を示す。本試験装置は、加湿装置内蔵の空調機、ヒーター、LDU、切替ダンパ、それらを接続するダクトから構成されている。LDUに供給される空気の乾球温度と相対湿度の調整は、ヒーターと空調機内のブラインが流れる熱交換器によりなされ、風量の調節は、空調機内のファンの回転数制御より行われる。LDUの出口相対湿度は、LDU下流側に設置した相対湿度計の値をもとに給水量を決定することで、塩化リチウム水溶液の濃度調整を行い、設定の相対湿度に調整する。試験装置に用いたセンサの精度は、温湿度センサ 測定精度 $\pm 0.8\%RH$ 、 $\pm 0.1^\circ C$ 、定置式複合ピトー管センサ 測定精度 $\pm 2\% RD$ となっている。

2.3 試験条件・手順

表1に試験条件を示す。LDUからの各出口空気温度・湿度条件は、条件1は一般的な夏季の室内空気、条件2は夏季において空調を省エネ設定とした場合の室内空気、条件3は一般的な冬季の室内空気の温湿度条件を想定している。なお、LDUへの導入空気(入口空気)の乾球温度は $35^\circ C$ とし、相対湿度は入口空気と出口空気の比エンタルピーが等しくなる値に調整した。

試験手順は、初めにLDUを起動して相対湿度の目標値を入力することで、制御ターゲットの設定を行う。

表 1 加湿性能試験の条件

	出口空気 目標値			入口空気	
	乾球温度[°C]	相対湿度 %RH	比エンタルピー [kJ/kg']	乾球温度 [°C]	相対湿度 %RH
条件 1	25	50	50.3	35	16.9
条件 2	27	60	61.4	35	29.1
条件 3	22	50	43.1	35	8.9

次に空調機ファンの周波数を調節し風量を調整した。そして、ヒーターの出力、ブライン温度、ブライン流量を調節することで表 1 の入口空気を再現した。検証試験は、各装置の出力が安定し、入口空気の乾球温度および相対湿度が定常状態に達したことを確認した後にデータを取得した。

2.4 計算方法

乾球温度および相対湿度の測定データから測定時間 0 ~ 60 min の時間平均 \bar{x} と標準偏差 S を算出した。標準偏差 S は式(1)から求めた。 n はデータ総数、 x_i は 1 秒ごとの測定データである。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

風量は以下の式(2)により算出した。 Q は風量[m³/h]、 P_v は差圧[Pa]である。定数 A , α , ρ はそれぞれ断面積[m²]、センサー係数、空気密度[kg/m³]である。

$$Q = 3600 \times A \times \alpha \times \sqrt{\frac{2}{\rho} \times P_v} \quad (2)$$

また、下記の手順により乾球温度 T_d °C および相対湿度 %RH から空気の比エンタルピーを算出した。

① Wexler-Hyland の式¹⁴⁾より T_d から飽和水蒸気圧 P_s [Pa] を算出する。

② 式(3)に P_s と空気の全圧 P_t [Pa] を代入し、絶対湿度 X [kg/kg'] を算出する。

$$X = 0.622 \times \frac{P_s}{P_t - P_s} \quad (3)$$

③ 式(4)に X と T_d を代入し、比エンタルピー h [kJ/kg'] を算出する。

$$h = 1.006T_d + (1.86T_d + 2501)X \quad (4)$$

3. 検証試験結果

3.1 空気線図上の挙動

図 4 に各条件の入口空気と出口空気をプロットした空気線図を示す。図より、いずれの条件においても入口比エンタルピー h_{in} と出口比エンタルピー h_{out} はほぼ同じ値であり、同一エンタルピーのライン上を移動していることがわかる。また、比エンタルピーの変化率を式(5)により算出すると、すべての条件で変化率は 4% 以内であった。このことから、塩化リチウム水溶液と空気接触による加湿過程は、等エンタルピー的に変化することがわかった。

$$\text{変化率\%} = \frac{h_{out} - h_{in}}{h_{in}} \times 100 \quad (5)$$

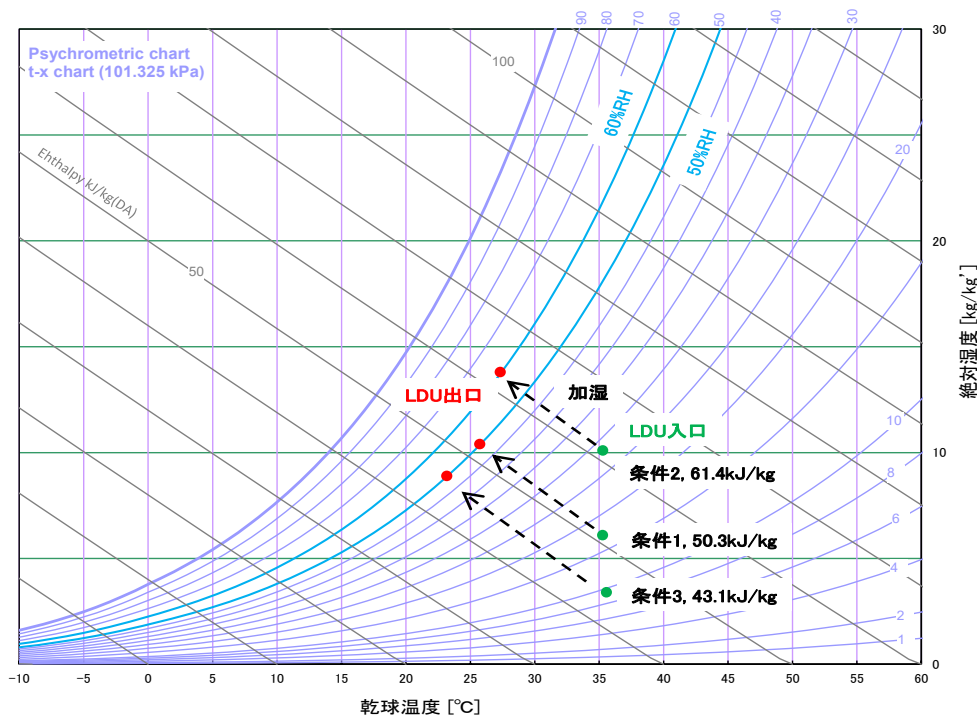


図4 各条件における空気線図上の挙動

表2 条件1におけるLDU出口空気の乾球温度および相対湿度

		試験結果
乾球温度 [°C]	時間平均	25.7
	標準偏差	0.10
相対湿度 [%RH]	時間平均	50.6
	標準偏差	0.07

3.2 LDUの加湿制御性の検証

LDUの性能検証のため、定常状態の各条件における出口空気の時間変化を測定した。表2に条件1における出口空気の乾球温度および相対湿度の測定結果を、図5にその条件下での時間変化を示す。

表2より、LDU出口空気の相対湿度の標準偏差は0.07%RHと非常に小さく、図5においても乾球温度と相対湿度はほぼ変動することなく一定の値で安定する結果となった。条件2,3においても同様の結果が得られた。また、本試験にて、単純に液体調湿剤の濃度を調整することで出口条件に制御することを確認した。したがって、任意の飽和効率で制御が可能であることが検証された。

今回、LDUの乾球温度は目標値より0.7°C高い値で安定したが、この理由としてはLDU入口空気の比エンタルピーをターゲットとした温度制御を行ったことが挙げられる。比エンタルピーは乾球温度と相対湿度から算出されるため、相対湿度・温度プローブの測定精度(±0.8%RH, ±0.1°C)により比エンタルピーは±1.0 kJ/kg'の誤差を取る。今回の試験では、入口空気の比エンタルピーの時間平均は51.3 kJ/kg'であり目標値より+1.0 kJ/kg'高い値であったため、出口空気の乾球温度は目標値よりやや高い値となったと考えられる。これについては、LDU出口空気の乾球温度をターゲットとした温度制御を行うことで、目標値と非常に近い値(時間平均25.1°C)で安定することが確認できている。以上の結果から、LDUは安定した乾球温度および相対湿度の給気が可能であることが検証された。

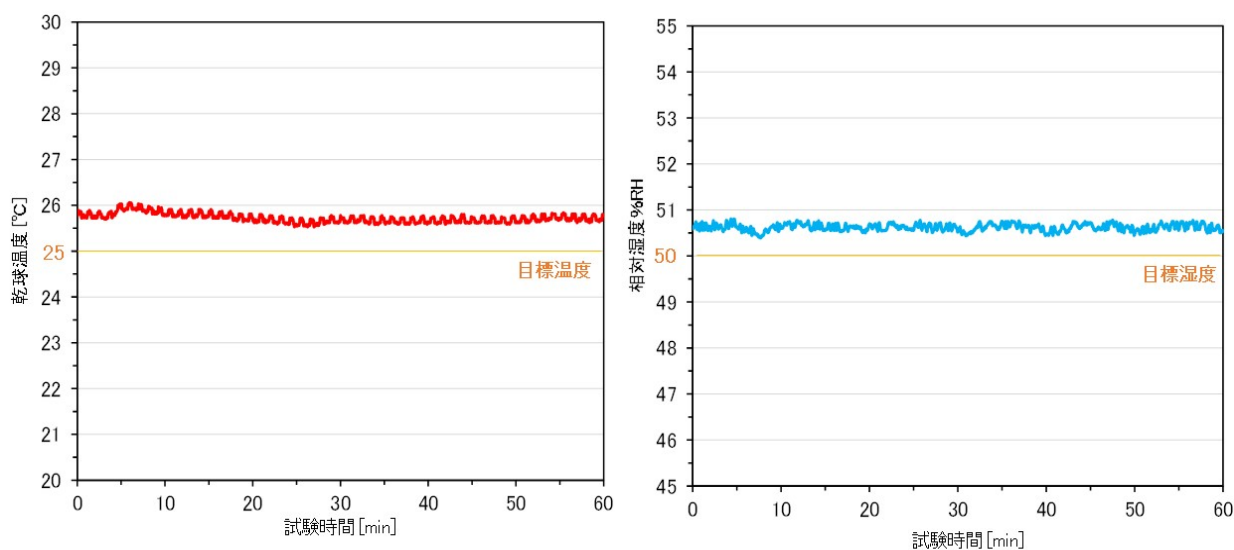


図 5 LDU 出口空気の乾球温度・相対湿度の時間変化

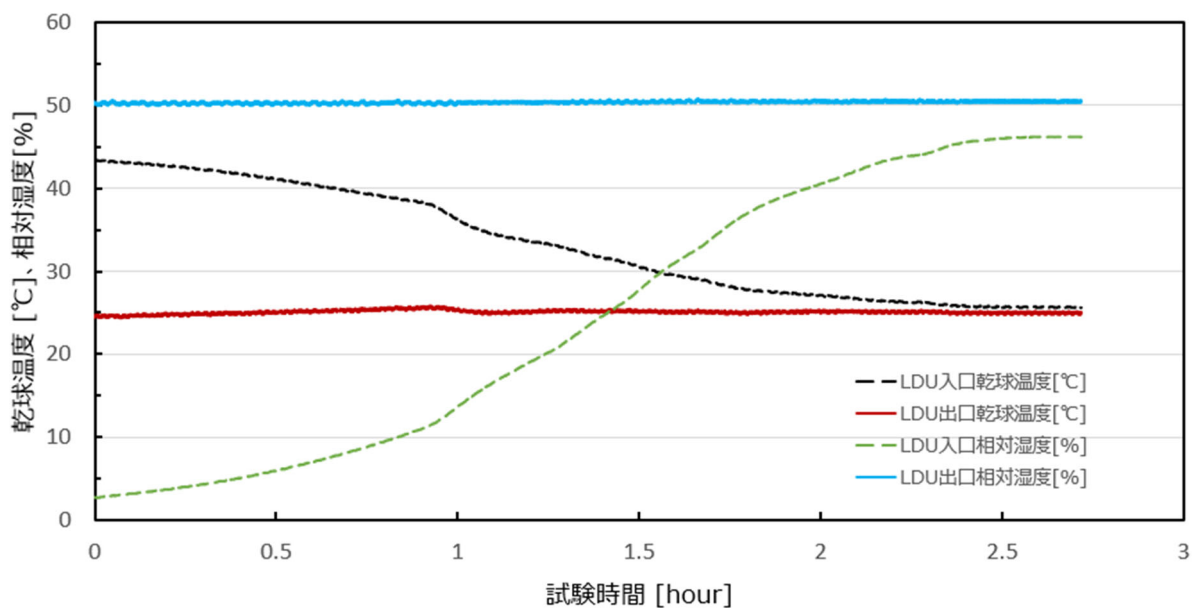


図 6 LDU 入口空気と出口空気の相対湿度, 乾球温度の時間変化

3.3 非定常状態における加湿制御性の検証

入口空気を非定常状態とした場合の LDU の加湿制御性を調べるために、LDU 入口空気の乾球温度と相対湿度を時間的に変化させた。図 6 に LDU 入口空気の乾球温度、相対湿度の時間変化および出口空気における相対湿度の時間変化を示す。出口空気の相対湿度の時間平均は 50.4%RH、標準偏差は 0.11 であり、LDU は入口空気の温度および湿度変化に関わらず相対湿度を安定に制御することが確認できた。したがって、相対湿度は LDU により制御し、乾球温度はヒーターにより制御することで、湿度と温度を独立させた制御ができることがわかった。これにより、入口空気の負荷変動に対して安定した温湿度制御が可能となることを確認した。なお、出口空気の乾球湿度の時間平均は 25.1°C、標準偏差は 0.22 であった。

4. おわりに

本報ではリキッドデシカントユニット (LDU) の加湿性能の基本特性把握のため、種々の給気条件における加湿性能の検証を行った。その結果、以下の結論を得た。

・ LDU の空気線図上の動作を確認するため、LDU 入口空気と出口空気の比エンタルピーを比較したところ、いずれの条件においても変化率は 4.0%以内であった。このことから、LDU は等エンタルピー変化により加湿が行われることを確認した。

・ LDU の制御性の検証のため、種々の条件における出口空気の乾球温度および相対湿度の時間変化を測定した。いずれの条件においても乾球温度と相対湿度の標準偏差の値は 0.1 以下であり、時間変化のグラフにおいても一定の値で安定していた。また、単純に液体調湿剤の濃度を調整することで出口条件に制御できることを確認し、任意の飽和効率で制御が可能であることを検証した。

・ 非定常状態における加湿制御性を検証するために、LDU 入口空気の乾球温度を変化させ、出口空気の相対湿度変化を確認した。その結果、入口空気の負荷変動に依らず相対湿度が安定して給気されることを確認し、その試験条件の相対湿度の時間平均は 50.4%RH、標準偏差 0.22 であった。

以上の結果から、本検証で使用した LDU は高い加湿制御性を有することを確認した。引き続き、蒸気加湿に代わる省エネかつ精密空調を実現できる加湿空調システムの開発を進めていきたいと考える。

文 献

- 1) 武田尚吾, 古賀修, 熊田瑤子, 丹波英治, 高橋直樹, 進藤宏之: 次世代都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価研究 (第 4 報) 加湿方式によるエネルギー性能評価, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, 345-348(2014).
- 2) ウェットマスター株式会社 HP: <https://www.wetmaster.co.jp/product/vapor/vhr/>.
- 3) 東芝三菱電機産業システム株式会社 HP: <https://www.tmeic.co.jp/product/innovation/tmfog/>.
- 4) A. Ahlawat, A. Wiedensohler, S. K. Mishra: An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments, *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 1856-1861(2020).
- 5) J. Biryukov, J. A. Boydston, R. A. Dunning, J. J. Yeager, S. Wood, A. L. Reese, A. Ferris, D. Miller, W. weaver, N. E. Zeitouni, A. Phillips, D. Freeburger, I. Hooper, S. R. Shumate, J. Yolitz, M. Krause, G. Williams, D. G. Dawson, A. Herzog, P. Dabisch, V. Wahl, M. C. Hevey, L. A. Altamura: Increasing Temperature and Relative Humidity Accelerates Inactivation of SARS-CoV-2 on Surfaces, *Applied and Environmental Science*, 5(4), 1-9(2020).
- 6) X. Chen, S. Riffat, H. Bai, X. Zheng, D. Reay: Recent progress in liquid desiccant dehumidification and air-conditioning, A review, *Energy and Built Environment*, 1, 106-130(2020).
- 7) A. Giampieri, Z. Ma, A. Smallbone, A. P. Roskilly: Thermodynamics and economics of liquid desiccants for heating, ventilation and air-conditioning – An overview, *Applied Energy*, 220, 455-476(2018).
- 8) 柚本玲, 田中辰明: リキッドデシカント空調機による浮遊真菌除去効果, “第 24 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会”, 78-79(2006).
- 9) H. X. Fu, X. H. Liu: Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality, *Building and Environment*, 116, 158-172(2017).
- 10) 小西雄大, 外山裕貴, 山口誠一: リキッドデシカント空調システムの除湿区間における性能評価, “2021 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集”, 1-5(2021).
- 11) 山田治夫: 液体調湿剤による除湿について, *化学工学*, 22(8), 513-519(1958).
- 12) 渡辺拓也, 山口誠一, 齋藤潔, 宮内彦夫, 原田政利: リキッドデシカント用除湿メディアにおける熱・物質移動特性, “第 44 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集”, 95-98(2010).
- 13) 七尾龍一, 原田政利, 丹波英治, 河野匡志: 液式デシカント空調システムの高度化と適用性向上に向けた研究 液式デシカント空調機の概要と加湿時エネルギー性能評価, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, 193-196(2020).

14) R. W. Hyland, A. Wexler: Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K, ASHRAE Trans, 89(2A), 500-519(1983).

15) 間宮啓介, 田中英, 有村哲郎: 制御性の高い滴下浸透気化式加湿器に関する研究 (第2報) 二段加湿時の制御性の検証, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, 161-164(2020).

ABSTRACT

In this paper, we report on the development of a new humidification system that saves energy and improves the indoor environment. We tested the steady-state and non-steady-state humidification performance of a liquid desiccant unit, in which only the gas-liquid contactor part was extracted from a conventional liquid desiccant air-conditioning system. Under various steady-state air supply conditions, the standard deviation of the dry bulb temperature was within 0.1°C and the relative humidity was within 0.09%RH, confirming the high controllability of temperature and humidity. Under non-steady-state conditions, the standard deviation of dry bulb temperature and relative humidity were within 0.22°C and 0.22%RH, respectively, confirming high temperature and humidity controllability and stability.
