

低温熱源の有効利用を考えたデシカント空調システムに関する基礎研究

古賀 雄樹^{a)}・佐々木 仁^{b)}・川崎 義仁^{a)}・田島 大輔^{c)}・林 則行^{d)}

Basic Research for Desiccant-Based Cooling System in Consideration of Effective Utilization of Low-Temperature Heat Source

Yuki KOGA, Jin SASAKI, Yoshihito KAWASAKI, Daisuke TASHIMA, Noriyuki HAYASHI

Abstract

Co-generation system has become an effective method to solve the global warming and energy problem. The system can achieve high efficiency both by using electric generation and by exhaust heat recovery. The system can produce the recycling society. Two experiments were conducted in this research. Firstly, the basic characteristics of the co-generation and desiccant cooling hybrid system were measured with a basic simulation model of desiccant based cooling system. As the result, it is found that amount of dehumidification increases with a rise in water temperature. Secondly, the measurement of the basic drive characteristics of a desiccant based cooling system was performed. As the result, it is found that amount of dehumidification increased with a rise in water temperature along with simulation. It is also found that amount of dehumidification increases in the case of that relative humidity of regeneration air is low.

Keywords: Co-generation, Desiccant cooling hybrid system

1. はじめに

現在、日本のエネルギー自給率は5%と深刻なエネルギー問題に直面している¹⁾。また、農林畜産廃棄物の適正処理技術が確立されておらず、土壌汚染や大気汚染などといった環境問題も深刻化している。そこで、注目されているのがメタン発酵による嫌気性発酵処理であり、全国各地で、メタン発酵プラントの導入が進んでいる。宮崎大学においても、同プラントを導入し、暖地仕様メタン発酵プラントの開発を行っている。メタン発酵プラントから精製されたメタンガスはガスエンジンに導入することで電気と熱が生成される。

しかし、メタン発酵プラントでのメタンガス精製量は不安定であり、エネルギー密度が小さい、精製コストが高いといった問題を抱えていることから、需要地近傍で発電可能であり、電気と排熱を利用した高効率なガスエンジンコージェネレーションシステムの開発が求められる。だが、年間を通じてコージェネレーションシステムを使用する場合、生成される熱に対して需要が少ないという問題がある。そこで現在、排熱の利用ができる空調システムとして開発が急速に進められているものがデシカント空調シ

テムである²⁾。これまで、排熱の利用方法として、吸収式、吸着式のヒートポンプが開発されてきたが、大型・高価となるため普及は進んでいない。

そこで、ガス管路を用いず、開放系で制御できることからシンプルな構成であるデシカント空調システムは比較的成本を抑えることができる。デシカント空調システムは吸着材を用いる除湿空調システムであり、過冷却再熱方式でないため、温度、湿度を独立して制御できるというメリットを有している^{2,3)}。よって、人間の居住環境だけでなく、低コストで温湿度を制御する技術が求められる農畜産業分野において応用が可能であると考えられる。農畜産業分野においてガスエンジンコージェネレーションシステムとデシカント空調システムのハイブリッド利用ができれば、エネルギーの有効利用ができると共に、地域循環システムの構築が促進できるものと思われる。

本研究では、特に農業用デシカント空調システムの開発に向けた調査と基本シミュレーションモデルによる導入効果の評価を行い、実際にデシカント空調システムの構築及び基礎運転実験を行った結果を述べる。

2. 原理と特徴

図1に一般的な2ロータ式デシカント空調システムの原理図を、図2に空気線図上における状態変化を示す。ま

a) 電気電子工学専攻大学院生

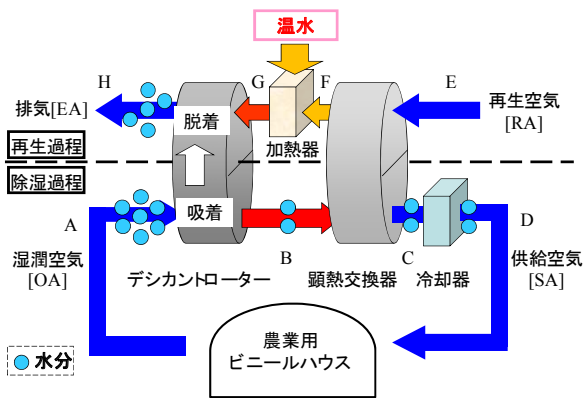
b) 電気電子工学科学部生

c) 宮崎大学 IRO

d) 電気電子工学科教授

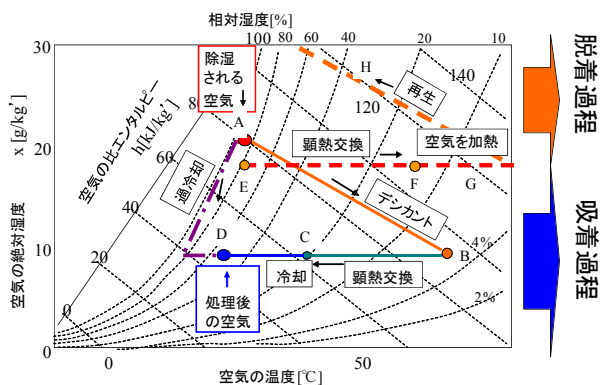
ず、外気（除湿される空気）はデシカントロータの除湿側（図1では下部）を通過する際に吸着除湿される。その際に発生した熱は、顕熱交換器で回収され、その後外部冷熱源とつながった冷却器で温度が制御される。また、再生空気は顕熱交換器にて熱供給され、さらに外部熱源により追加加熱され、デシカントロータの脱着部（図1では上部）を通過する際に湿分を脱着して吸着材を再生する。

特徴として、冷却式（ルームエアコン、除湿機）では、空気を露点温度以下まで過冷却し、湿分が取り除かれた後で温度制御（再熱操作）が行われている。一方、デシカント式では過度に冷却して再加熱する必要がないため、冷却に要するエネルギーを抑えることができる。また、ロータ中の湿分を脱着させる際の温度は高々80℃程度であり、図3に示すように熱駆動ヒートポンプよりも高温を必要とせず、コージェネレーションシステムの排熱や太陽熱を利用する事ができる。さらに、温度と湿度を独立して制御できることから導入効果は、空調システムの省エネルギーだけでなく、一般に病原菌などの繁殖抑制及び冷却しすぎない適切な空調にも期待できる。



A: 湿潤空気 B: 低湿度高温空気 C: 低湿度空気 D: 供給空気
E: 外気 F: 余熱された空気 G: 加熱された空気 H: 排気

図1 デシカント空調システム³⁾



A: 湿潤空気 B: 低湿度高温空気 C: 低湿度空気 D: 供給空気
E: 外気 F: 余熱された空気 G: 加熱された空気 H: 排気

図2 空気線図上における状態変化³⁾

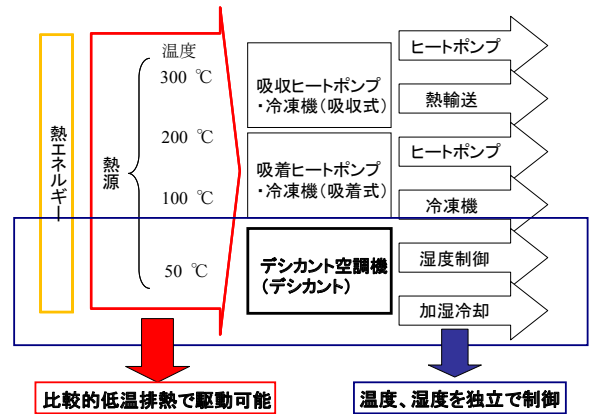


図3 吸収脱着デシカントによるエネルギー変換と熱輸送技術のイメージ³⁾

3. 全体システム

本実験では、再生用熱源である温水の条件を容易にコントロールするため、今回は市販の給湯器を用いた。図4にシステムの全体図を示す。デシカント空調機の前後に空気温湿度を測定するための空気室を設けた。空気室は塩化ビニールパイプと農業用ビニールを用いて、容積1m³のものを作製した。高湿度環境を模擬するために加湿器(型式:KJ-366H)を用いた。最大加湿量は500mL/hである。処理前後の温湿度の測定には、それぞれ熱電対(型式:DW01-DT301)及び湿度センサー(型式:B-530)を用いた。計測範囲は温度-30~+150℃(精度:JIS2)、湿度0~+100%RHである。再生用熱源には日立製のエコキュート(型式:BHP-Z37FU)を用いた。定格加熱能力/消費電力の比は4.5kW/0.92kW、沸き上げ温度は約65~90℃であり、給湯温度は約30~90℃である。

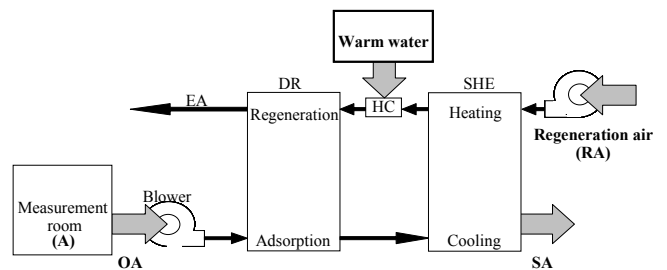


図4 全体システム

4. 導入対象の検討

デシカント空調システムを導入する対象は、農業用ビニールハウスとする。ビニールハウスで野菜や花を栽培する際、作物の葉や、灌水した土壌中の水が蒸発によってハウス内に出てくるのを、フィルムにより密封してしまう。そのため、ハウス内の相対湿度が、高いとき(特に夜間)には100[%]近くまで上昇し病原菌が繁殖しやすい

環境となる．そこで，湿度を制御し生産性を向上する温室環境の改善が強く求められている．特にトマトは，病害の発生が生育環境の相対湿度に依存しているという報告がある．よって，ハウス内相対湿度を，最も病害の発生が抑制される RH55.0~80.0 [%]⁴⁾に制御することを目標として検討を行っていく．

5. 基本モデルにおけるシミュレーション

5.1 基本シミュレーション

図5にデシカント空調システム基本構成モデルを示す．図5に示すように，基本シミュレーションモデルではデシカントロータ(DR)，顕熱交換器(SHE)，再生コイル(HC)，直接気化冷却器(EC)からなる構成である．換気(RA)は外気再生とし，処理，再生風量比($G_{ad}:G_{de}$)は1:1とした．また，再生コイルの再生用熱源にはガスエンジンコージェネレーションシステムの温水を用いると仮定した．除湿過程の出力算出にはロータ内の熱と物質伝達のモデル化による数値計算⁵⁾プログラムを用いた．

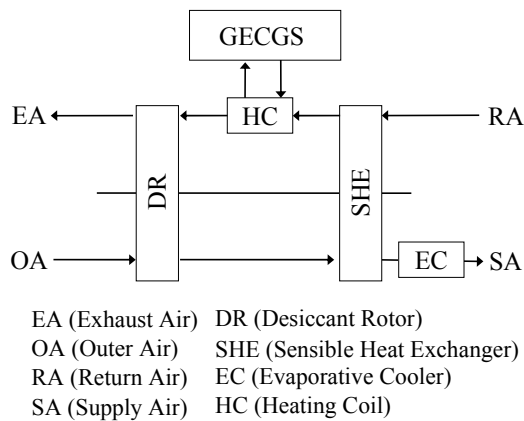


図5 デシカント空調システム基本構成モデル

5.2 シミュレーション条件

夏季の夜間における高温湿度環境を想定したシミュレーションを行った．表1にシミュレーション条件を示す．外気温度は，宮崎県宮崎市2012年8月の夜間平均気温⁶⁾より27.8℃，外気相対湿度は高温湿度環境を想定して90.0%とした．また，ガスエンジンコージェネレーションシステムの定格排熱回収量は11.7kWとした．デシカント空調機の再生コイルに導入する温水温度を40~100℃の範囲で10℃毎に変化させた場合のシミュレーションを行い，温水温度変化に対するデシカント空調システムの除湿量の算出を行った．

表1 シミュレーション条件

Rotor	Length	m	0.2
	Diameter	m	0.3
	Rotational speed	rph	36.0
Amount of air	Adsorption	m ³ /h	60
	Regeneration		
Water temperature		℃	40~100
Outdoor air temperature		℃	27.8
Outdoor air relative humidity		%	90.0

5.3 シミュレーション結果

図6に温水温度に対する除湿量の特性を示す．除湿量は，温水温度が高くなるにつれて増加していくことが分かる．これは，再生コイルに導入する温水の温度が高くなるのに応じて，加熱再生空気の温度が高くなるためであると考えられる．デシカントロータに含まれるシリカゲルは，加熱再生空気を流すことによって細孔内に吸着された水分子が温度上昇することで活動が活発となり，吸着力が断ち切れ細孔より飛び出していくためである．このことから，加熱再生空気の温度が高くなることで，シリカゲルの細孔に吸着された水分子の脱着がより十分に行われるのだと考えられる．その結果，吸着過程でより多くの水分を吸着除去することができ除湿量が増加すると考えられる．

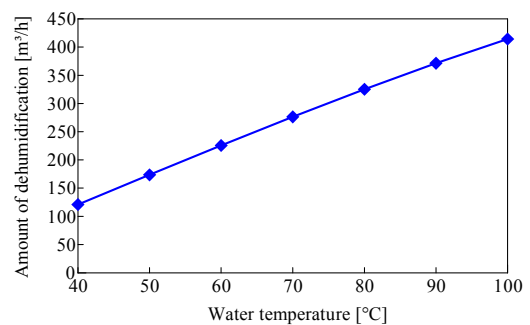


図6 温水温度に対する除湿量特性

6. 基礎運転実験

6.1 実験方法

表2に実験条件を示す．処理対象として，外気を送風機により空気室内に引き入れ，加湿器により外気の相対湿度を90%程度の空気を作成した．その後，デシカント空調システムによって120分間の除湿処理を行った．このとき，再生コイルに供給する温水の温度を40~80℃と変化させた場合において除湿処理を行った．その際，処理前の空気と処理後の空気の温湿度を，それぞれ熱電対及び湿度センサーにて測定した．その後，処理前後の空気の絶対湿度を算出し除湿量を求め，デシカント空調システムの除湿量特性の調査を行った．風量は，小規模のビニールハウスを想定して60m³/hとした．

表2 実験条件

Rotor	Length	m	0.2
	Diameter	m	0.3
	Rotational speed	rph	36.0
Amount of air	Adsorption	m ³ /h	60
	Regeneration		
Warm water	Temperature	°C	40~80
	Flow	L/min	2.0
Outdoor air relative humidity		%	90.0

6.2 実験結果

図7に温水温度に対する除湿量の特性を示す。実験の結果、デシカント空調機へ供給する温水の温度が高くなるにつれて、除湿量が増加するという特性が得られることが分かった。この特性は、5節で行ったシミュレーションにおいても同様の結果が得られた。このような特性が得られた理由として、再生コイルに導入する温水の温度が高くなるのに応じて、加熱再生空気の温度が高くなるためであると考えられる。デシカントロータに含まれるシリカゲルは、加熱再生空気を流すことによって細孔内に吸着された水分子が温度上昇することで活動が活発となり、吸着力が断ち切れ細孔より飛び出していくためである。このことから、加熱再生空気の温度が高くなることで、シリカゲルの細孔に吸着された水分子の脱着がより十分に行われるのだと考えられる。その結果、吸着過程でより多くの水分を吸着除去することができ除湿量が増加すると考えられる。

ただし、図7を見ても分かる通り、温水温度が同じでも除湿量にはバラつきが生じている。再生過程について、実験では外気をそのまま再生空気に利用していることから、再生空気が除湿量に影響しているのではないかと考えた。そこで、再生空気の相対湿度に着目し、処理空気と再生空気の相対湿度の比に対して、除湿量がどのように変化するか検討を行った。図8に処理空気及び再生空気の相対湿度比に対する除湿量の関係を示す。図8は、横軸の値が小さいほど再生空気の相対湿度が低いことを表している。検討した結果、再生空気の相対湿度が低いほど、多くの除湿量を得られることが分かった。再生用空気の相対湿度が低い場合、デシカントロータの水分を脱着する際、湿度が高い場合に比べて脱着量が多くなると考えられる。ゆえに、処理過程でより多くの水分を吸着できるようになり、結果として、除湿量が増加すると考えられる。

また、表3に実験結果の例を示す。実験の結果より、空気の処理前後の絶対湿度の差を求め、その値から除湿量を算出した。その結果、各温水温度の場合で104.4~375.4 g/h程度の除湿量を得られた。この結果を用いて夏季の外気条件である温度27.8 °C、相対湿度90.0 %の空気を処理した場合を検討すると、表3に示すように68.1~83.6 %程度の空気に処理することができるものと考えられる。温水温度50 °C以上の場合は、目標相対湿度の55~80 %に処理す

ることができており、デシカント空調システムを導入することで、夏季におけるハウス内の温湿度制御が可能であることが分かった。しかし、温水温度40 °Cでは目標に達していないため、温水温度80 °Cの場合と同程度の除湿量を得るために実験条件について検討を行う必要がある。

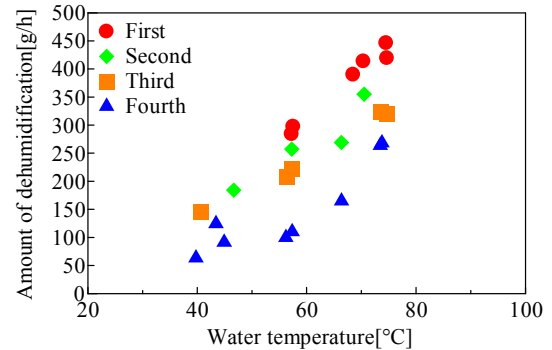


図7 温水温度変化に対する除湿量特性(実測値)

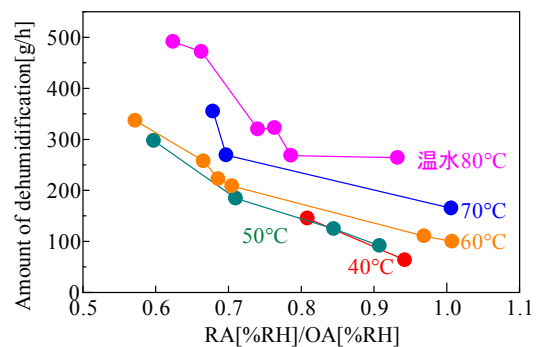


図8 相対湿度比に対する除湿量特性(実測値)

表3 実験結果(例)

温水[°C]	OA-SA[g/kg]	除湿量[g/h]	SA 相対湿度[%]
40	1.4	104.4	83.6
50	2.4	174.4	79.6
60	3.2	227.2	76.6
70	4.4	318.5	71.4
80	5.2	375.4	68.1

7. 風量増加における除湿シミュレーション

6節で行った基礎運転実験において、基礎特性としてデシカント空調機へ供給する温水の温度が高くなるにつれて、除湿量が増加するという特性が得られることが分かった。ここで、デシカント空調機に供給する温水の温度に関らず除湿量を得る方法を検討する必要があると考え、温水温度以外の運転条件を変化させた場合の除湿量変化について検討を行った。本節では、デシカント空調機を運転させる際の風量を変化させた場合についてシミュレーションを行った。

7.1 シミュレーション条件

デシカント空調システムに供給する温水の温度によらず、除湿量を得る方法の一つとして、基本シミュレーションモデルによって風量変化させた場合について検討を行った。シミュレーションモデルについては5節と同様である。表4にシミュレーション条件を示す。まず、実験を行った時の外気条件を基にシミュレーションを行い、その後、同条件で風量を増加させた場合のシミュレーションを行い除湿量の算出を行った。

表4 シミュレーション条件

Outdoor air temperature		°C	Experimental value
Outdoor air relative humidity		%	
Rotor	Length	m	0.2
	Diameter	m	0.3
	Rotational speed	rph	36
Amount Of air	Adsorption	-	×1.2~×10
	Regeneration	-	
Water temperature		°C	40~80
Amount of exhaustheat collection		kW	11.7

7.2 シミュレーション結果

図9にシミュレーション結果を示す。シミュレーションの結果、温水温度60、70°Cの場合において、風量をそれぞれ1.3倍、1.2倍増加させることで温水温度80°Cの場合と同程度の除湿量を得られることが分かった。しかし、温水温度40、50°Cの場合はそれぞれ風量を4倍、3倍と増加させても温水温度80°Cの場合の除湿量に近づくことができていない。図10に温水温度40、50°Cの風量増加に対する除湿量の変化のシミュレーション結果を示す。図10より、40、50°Cの風量は除湿量が最大値を取る場合の倍数を用いて算出したものである。この結果から、風量増加させることが除湿量増加に効果的であることが分かった。ただし、温水温度が低い場合においては、風量を増加させるだけでは不十分であることが分かった。そこで、風量以外の要素としてロータの回転数などを変化させる必要があると考えられる。

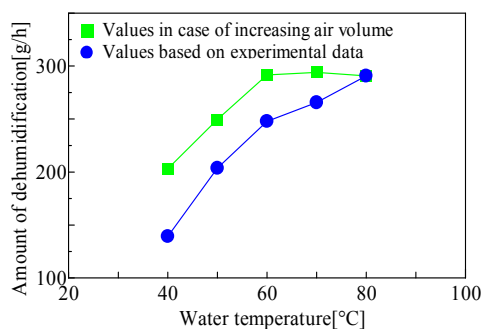


図9 風量増加に関するシミュレーション結果

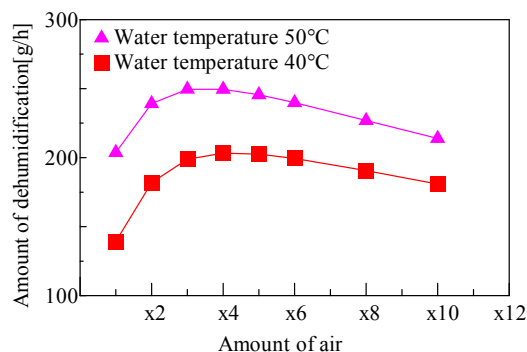


図10 風量変化シミュレーション(温水温度40, 50 °C)

8. 風量増加における除湿シミュレーション

5節、6節においてデシカント空調システムに供給する温水温度が高くなるにつれて得られる除湿量が増加することが分かった。また、7節において同じ温水温度でも風量が増加することで得られる除湿量も増加することが分かった。そこで、本節では、本学のデシカント空調システムを農業用ビニールハウスに導入するにあたり、空気の湿度を目標値まで除湿するための運転条件を選定するために、シミュレーションモデルを用いて温水温度に対する必要風量の検討を行った。

各温水温度の場合で相対湿度を90%から80、70、60%に処理するために必要となる風量の算出を行った

8.1 シミュレーション条件

基本シミュレーションモデルによって温水温度に対する必要風量の検討を行った。シミュレーションモデルについては5節と同様である。シミュレーション条件を表5に示す。外気温度は、宮崎県宮崎市2012年8月の夜間平均気温⁶⁾より27.8°C、外気相対湿度は高湿度環境を想定して90.0%とした。また、再生空気は、同じく宮崎県宮崎市2012年8月の夜間平均気温27.8°C、及び平均相対湿度82.3%とした。目標値を25°C、80~60%として各温水温度における必要風量の算出を行った。

表5 シミュレーション条件

Outdoor air temperature		°C	27.8
Outdoor air relative humidity		%	90.0
Rotor	Length	m	0.2
	Diameter	m	0.3
	Rotational speed	rph	36
Water temperature		°C	40~80
Amount of exhaustheat collection		kW	11.7

8.2 シミュレーション結果

図11に温水温度に対する必要風量のシミュレーション

結果を示す。シミュレーションの結果、目標の空気を得るための各温水温度と必要風量との関係を知ることができた。温水温度が低い場合や目標相対湿度が低い場合、必要風量が大きくなることが分かった。そして、図 11 の結果を参照すると、例えば、温度 80 °C の温水を供給して運転した場合、60 m³/h で相対湿度 80 %程度、114 m³/h で相対湿度 75 %程度、228 m³/h で 70 %程度の空気が得られることが分かる。

しかし、全ての条件について必要風量を算出することはできなかった。今回のシミュレーションにおいて、温水温度 40~100 °Cそれぞれの場合で風量を増加させたときの除湿には限界があり、処理後の空気の気温を 25.0 °Cとしたとき、最も除湿した場合の相対湿度はそれぞれ 97.5 %、91.7 %、84.6 %、77.7 %、71.4 %、65.7 %、60.8 %であった。ただし、温水温度 40、50 °Cの場合については、処理前後で絶対湿度の差がほとんど無いにもかかわらず、処理後の気温を 25.0 °Cとして相対湿度を算出しているため、90 %を超える値となった。風量を増やし続けても、これ以上湿度を下げることは出来ず、条件によっては目標の相対湿度を得ることができなかった。その結果、図 11 より、相対湿度 90 %の空気を処理する場合、80 %に処理するには 70 °C以上、70 %にするためには 80 °C以上、60 %にするためには 100 °C以上の温水であることが望ましいという結果となった。今回のシミュレーションでは、再生空気の条件として宮崎県宮崎市 2012 年 8 月の夜間平均相対湿度より 82.3 %としたことに原因があると考えられる。つまり、再生空気の相対湿度が高かったために、あまり除湿量を得られず、目標の相対湿度まで処理できなかったと考えられる。

今回は、風量についてのみ検討を行ったため、風量以外の条件について検討を行う必要があると考えられる。また、再生空気などの条件によっても除湿量が増えるため、厳密に運転条件を選定するためには、さらに細かい検討が必要である。

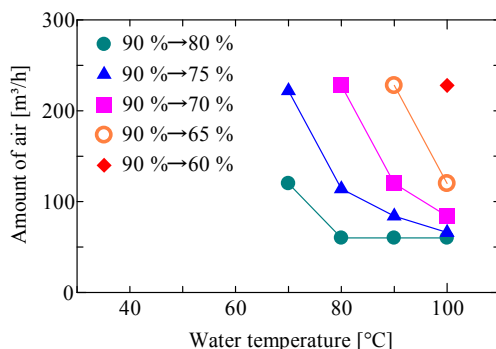


図 11 温水温度に対する必要風量シミュレーション

9. まとめ

本稿では、デシカント空調システムを農業に応用するため、需要地モデルとして農業用ビニールハウスを対象とし、

基礎シミュレーションモデル及び、基礎運転実験による除湿量特性の調査を行った。

- (1) シミュレーションにより、デシカント空調システムに供給する温水の温度を変化させた場合、温水温度が増加するにつれて除湿量が増加することが分かった。基礎運転実験では、シミュレーションと同様、温水温度の増加に応じて除湿量が増加する特性が得られた。また、再生空気の相対湿度が処理空気の相対湿度に比べ十分に低いほど、再生過程でよりデシカントロータの水分を脱着することができ、除湿量増加につながる事が分かった。
- (2) シミュレーションと基礎運転実験の結果を受けて、デシカント空調システムに供給する温水の温度に関わらず除湿量を得る方法として、風量を変化させた場合のシミュレーションにより検討を行った。シミュレーションの結果、温水温度 60、70 °Cの場合において風量を増加させることで、80 °Cの場合と同程度の除湿量を得られることが分かった。しかし、温水温度 50 °C以下では風量を増加しただけでは十分に除湿量を得ることができなかった。よって、他の要素についても検討を行う必要があると考えられる。
- (3) 本学のデシカント空調システムを農業用ビニールハウスに導入するにあたり、空気の温湿度を目標値まで除湿するための運転条件を選定するために、シミュレーションモデルを用いて温水温度に対する必要風量の検討を行った。各温度の場合で相対湿度を 90%から 80、70、60%に処理するために必要となる風量の検討を行った。シミュレーションの結果、温水温度に対する必要風量の関係を知ることができた。しかし、今回想定した再生空気の相対湿度と温水温度によっては目標相対湿度まで処理できる風量を算出することができなかったため、風量以外の条件についても検討が必要である。

参考文献

- 1) 「エネルギー白書 2012」, 経済産業省・資源エネルギー庁, p.89, 2012 年
- 2) 「デシカント空調システム」, 財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター低温排熱利用機器調査研究会, 日本工業出版株式会社, 2006 年 12 月
- 3) 濱本芳徳: 「エネルギーの貯蔵・輸送 第 4 章 吸収・吸着デシカント材による熱輸送技術」, 株式会社エヌティーエス, 2008 年 6 月
- 4) 我孫子和雄: 「トマトうどんこ病の発病に及ぼす温度ならびに湿度の影響」, 関西病虫害研究会報, 第 20 号, pp.49-52, 1978 年
- 5) 辻口拓也, 児玉昭雄: 「吸着材デシカントロータの水蒸気吸脱着挙動 一第 3 報: 吸着等温線形状と粒子内拡散係数の影響一」, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.24, No.3, pp.205-216, 2007 年 3 月
- 6) 気象庁ホームページ
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>