

Low Dew Point Air Production by Water Vapor Adsorptive Desiccant Rotor and its Operating Concept

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/40518

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



水蒸気吸着材ロータによる低露点空気 製造とその運転指針に関する研究

Low Dew Point Air Production by Water Vapor
Adsorptive Desiccant Rotor and its Operating Concept

綾目 久雄
平成 26 年 8 月

博 士 論 文

水蒸気吸着材ロータによる低露点空気 製造とその運転指針に関する研究

Low Dew Point Air Production by Water Vapor
Adsorptive Desiccant Rotor and its Operating Concept

金沢大学大学院自然科学研究科

システム創成科学専攻

知的システム開発講座

学 籍 番 号	1223122001
氏 名	綾目 久雄
主任指導教員名	児玉 昭雄

目 次

第一章	序章	1
1.1	低露点空気製造を取り巻く環境	1
1.2	除湿技術の変遷と分類	7
1.3	除湿機の高性能化に関する往来研究	18
1.4	本研究の目的	25
	参考文献	27
第二章	吸着材ブロックを用いた基礎検証	30
2.1	緒言	30
2.2	シミュレーション	33
2.2.1	空気層二次元の GSR モデル	34
2.2.2	空気層一次元の GSR モデル	36
2.2.3	計算条件	36
2.3	平衡吸着量の測定	41
2.4	ハニカムブロックでの通風実験	45
2.5	シミュレーション精度の検証	47
2.5.1	実験結果と比較検証	47
2.5.2	除湿性能に関するケーススタディ	49
2.6	数学モデルの妥当性検証	52
2.7	まとめ	57
	参考文献	58
第三章	実測によるロータ部の除湿・再生挙動の把握と考察	60
3.1	緒言	60
3.2	実験装置及び方法	62

3.2.1 実験装置	62
3.2.2 吸着材の水蒸気吸着量と吸着熱	64
3.2.3 実験条件	67
3.2.4 露点計計測精度の検証	67
3.3 実測結果と考察	69
3.3.1 ロータ回転速度の影響	69
3.3.2 再生温度の影響	75
3.3.3 吸着入口絶対湿度の影響	80
3.4 結言	85
参考文献	86
第四章 ロータ内部の熱・物質移動解析	88
4.1 緒言	88
4.2 シミュレーション	89
4.2.1 モデル化のための仮定条件	89
4.2.2 GSSR モデル	90
4.2.3 シミュレーションモデルの簡略化	95
4.2.4 絶対湿度基準の LDF モデル	98
4.2.5 計算条件	99
4.3 各シミュレーションモデルの精度検証	102
4.3.1 GSSR モデルの場合	103
4.3.2 絶対湿度基準の LDF モデルの場合	105
4.3.3 吸着量基準の LDF モデルの場合	107
4.4 実用モデルの詳細精度検証	111
4.5 運転パラメータの最適化	118
4.5.1 運転パラメータの予測計算	118
4.5.2 省エネルギー効果試算	122
4.6 結言	124
参考文献	126

第五章	総括	128
	使用記号	131

第一章 序章

1.1 低露点空気製造を取り巻く環境

国内の各種生産工場では 1960 年代頃から、製品の歩留まり改善などを目的に作業環境のクリーンルーム化が進んだ。クリーンルームとは、コンタミネーションコントロールが行われて空気清浄度が基準値内に確保された部屋のことである。初期は空气中浮遊塵埃除去が主題であったクリーン化技術も、その高度化・細分化に伴ってケミカル汚染対策や除振、精密温湿度コントロールなど様々な要素が求められるようになった。それらの中で空气中的水分から悪影響を受ける製品を取り扱う場合があり、製品の品質を保つため極端に脱湿された乾燥空気（低露点空気）が求められるようになった。図 1.1 に低露点空気が求められる主な生産環境用途と、その管理温湿度の目安を一覧で示す。

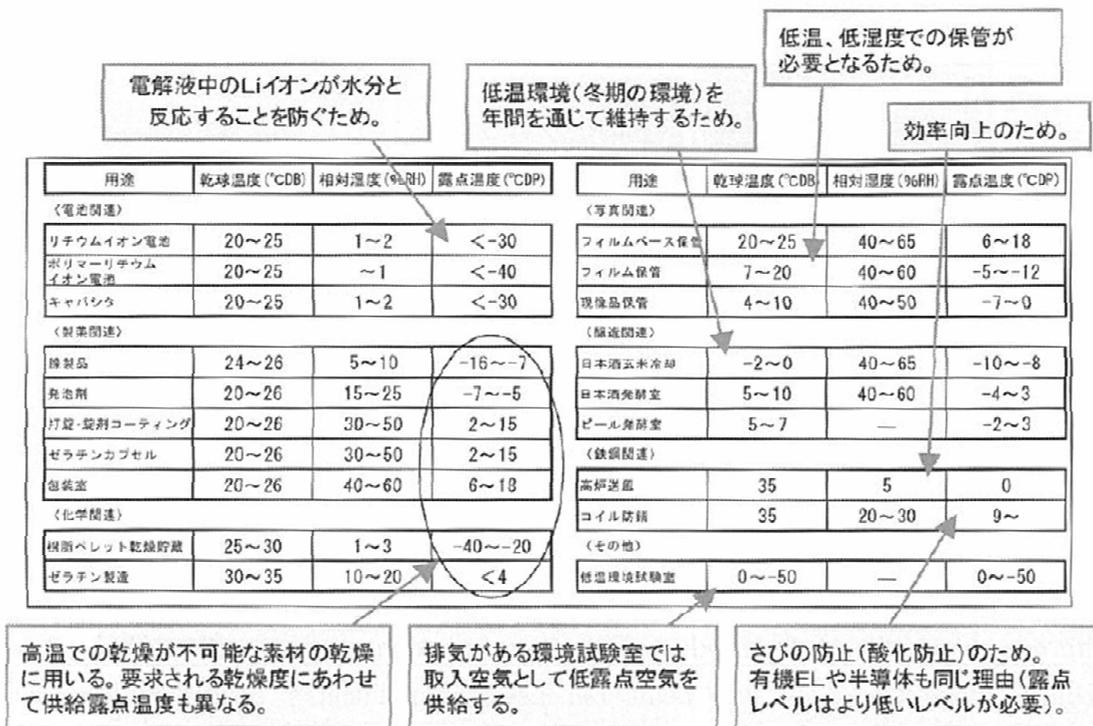


図 1.1 低湿度環境が必要な用途とその理由¹⁾

これらの用途の中でも近年急激に需要が伸び注目を集めているのが、リチウムイオン電池製造用途である。リチウムイオン電池は、蓄電池の一種で蓄放電が可能な電池である。蓄電池の種類は現在上市されているもので 5 種類(鉛蓄電池・ニッカド電池・ニッケル水素電池・リチウムイオン電池・NAS 電池)がある。それぞれの電池が材料・コス

ト・安全性・容量等で異なる特徴を有しており、用途によって使い分けられている。表 1.1 にそれらの特徴をまとめて記した。

表 1.1 蓄電池の種類²⁾

種類	市場規模 (2012年度)	主要な 国内メーカー	エネルギー密度 (括弧内は理論値)	主要な 正極材料	主要な 負極材料	特徴	用途
鉛蓄電池	1兆2,050億円	GSユアサ 古河電池 パナソニック 新神戸電機	40Wh/kg (167Wh/kg)	二酸化鉛	鉛	コストが安い 長年の実績がある エネルギー密度が低い 容量を増やすと重くなる	車載用電池 (起動用) 産業機器用電池
ニカド電池	480億円	パナソニック ソニー 東芝 GSユアサ	60Wh/kg	水酸化 ニッケル	水酸化 カドミウム	出力が大きい エネルギー密度が低い カドミウムを使用	民生用 (減少傾向)
ニッケル 水素電池	3,230億円	パナソニック 川崎重工 FDK	100Wh/kg (196Wh/kg)	水酸化 ニッケル	水素 吸蔵合金	ニカド電池より安全性が高い	民生用電池 (減少傾向) 車載用電池 産業機器用電池
リチウム イオン電池	1兆6,700億円	パナソニック ソニー GSユアサ 日立グループ 東芝	200Wh/kg (583Wh/kg)	遷移金属 酸化物	黒鉛系 炭素材料	エネルギー密度が高いため、 少量で高容量が可能 出力も大きい 小型民生用は技術的に成熟	民生用電池 定置用蓄電池 車載用電池 産業機器用電池
NAS電池	不明 (数百億円規模)	日本ガイシ 東京電力	130Wh/kg (786Wh/kg)	硫黄	ナトリウム	コストが安い コンパクトで長寿命(15年) 運転に高温維持(300℃)が必要 ナトリウムの可燃性が高い	定置用蓄電池 (系統安定化用)

表から分かるとおり、5種類の中でもリチウムイオン電池は最も性能が優れており、市場規模も全体の約45%と、最も大きい。さらに、2020年までの蓄電池産業の世界市場見通しを示した図1.2を見ると、2012年時点での世界市場規模は3.3兆円だが、今後2020年度までに6.5兆円まで成長(年平均8.9%増)する見込みである。内訳を見ると、増加分の多くはリチウムイオン電池が占めており、2020年には約4.3兆円(年平均12.9%増)まで市場が拡大する見込みである。これは既に民生用電池(携帯電話、ノート型PC、タブレット端末などの携帯機器電源)に多く使われているほか、今後さらにパワーツール、自動車、定置型蓄電池など大型の蓄電池としての用途が見込まれているためである。2012年時点でのリチウムイオン電池生産に関する、日本メーカーの世界シェアは約17%であるが、今後大きく増加が見込まれる大型蓄電池分野では求められる技術・性能が高く、日本勢が高い技術力を背景にシェアを維持・拡大することが期待される。こうした状況を踏まえて経済産業省の蓄電池戦略(2012年7月発行)³⁾では、日本企業が2020年に50%の世界シェアを握るべく、国家的に蓄電池産業の発展を後押しする構えであり、蓄電池産業は今後の日本の成長を支える重要産業と見なされていることが伺える。

また、近年注目を集めている再生可能エネルギーのうち、太陽光発電や風力発電などにおいて生じる、発電時間と利用時間とのミスマッチを解消させ同技術の利用を深化するためには、一定量の電気を蓄電可能な設備が必要不可欠である。持続可能な低炭素化社会を実現するためにも、大型高性能のリチウムイオン電池の普及に対する期待と社会

的意義は大きいと言える。

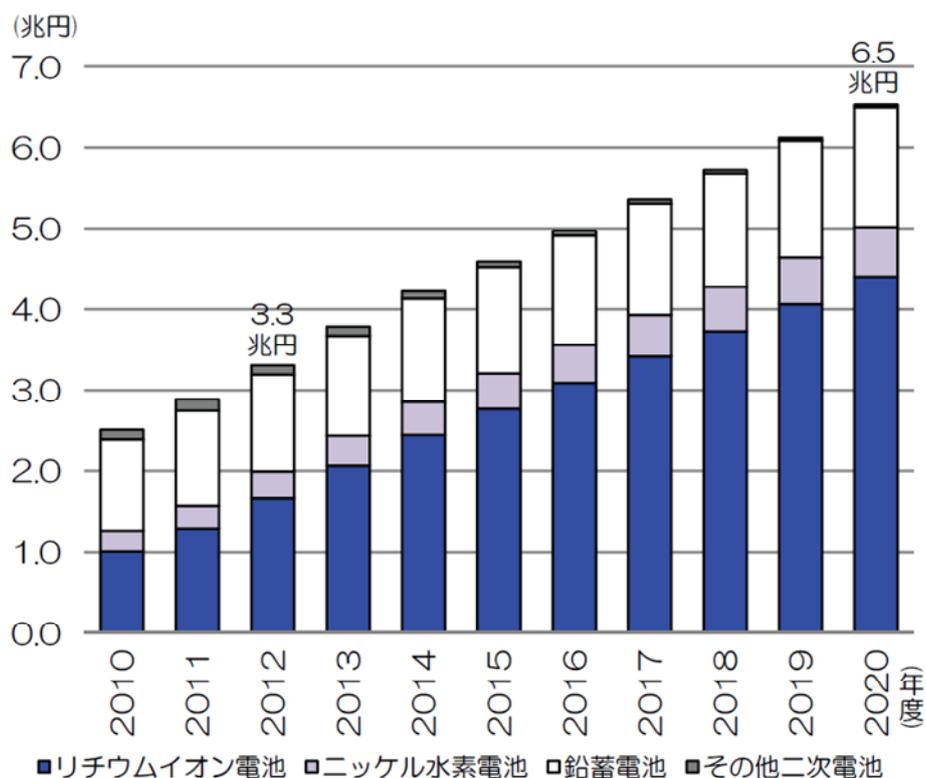


図 1.2 蓄電池産業の世界市場見通し²⁾

家庭用蓄電池は車載用市場の創出後に本格的に普及すると想定されていたが、東日本大震災後のエネルギー問題の顕在化により、顕著に注目が集まった分野である。家庭用蓄電池のユーザーにとってのメリットは、安価な夜間電力を蓄電して日中に使用することで電力料金を削減できることと、急な停電時に際して電力を供給できるという2点が挙げられる。対して、デメリットは、購入コストが高価なこと、メリットの価値が必ずしも明確ではないことがあり、現時点では中々普及が進まず、市場は未だ立ち上がっていない。

例として、家庭用蓄電池の経済合理性について、販売の多い6kWhの製品をモデルに試算した(表 1.2)。購入コスト120万円(補助金勘案後)を前述のメリットのみで回収する場合、全額回収に28年もの期間がかかることが指摘されている。現状蓄電池の寿命が10年程度であることを考えると、メリットのみで回収するためには、11万円/kWh(現在の1/3程度の価格)まで購入コストが下落しなければならない計算となる⁴⁾。こうしたことから、リチウムイオン電池製造に関する国際的競争力の強化、及び大型蓄電池の普及のためには、蓄電池の購入(製作)コストの低減が重要だと考えられる。

表 1.2 家庭用蓄電池の経済合理性（メリットのみで回収する場合）⁴⁾

項目	現状	10年で費用回収する場合
購入コスト	30万円/kwh	11万円/kwh
蓄電容量	6kwh	6kwh
購入コスト総額	180万円	64万円
購入コスト総額 (補助金勘案後)	120万円	43万円
1日あたりの損益	117円	117円
損益分岐点	28.1年	10.0年

前提条件

①電力料金
(夜間) 11.1円/kwh
電力料金
(昼間) 30.6円/kwh

②補助金
購入コストの1/3

(備考)電力料金は、関西電力ホームページ記載数値を使用(300kwh以上の金額を使用)。

リチウムイオン電池製造施設における製造設備費に関する、ある調査を図 1.3 に示す⁵⁾。設備費は主に、製造に直接関わる生産設備本体と、空調設備を含む付帯設備に大別されるが、本調査結果では付帯設備の割合は約 24% という結果である。さらに大型蓄電池の製造ではこの付帯設備費の割合が高くなること指摘されている。空調設備をはじめ付帯設備が全設備費の中で一定割合を占めており、空調設備費のコスト改善が電池製造コストの改善に一定の効果を与えることが示唆されている。

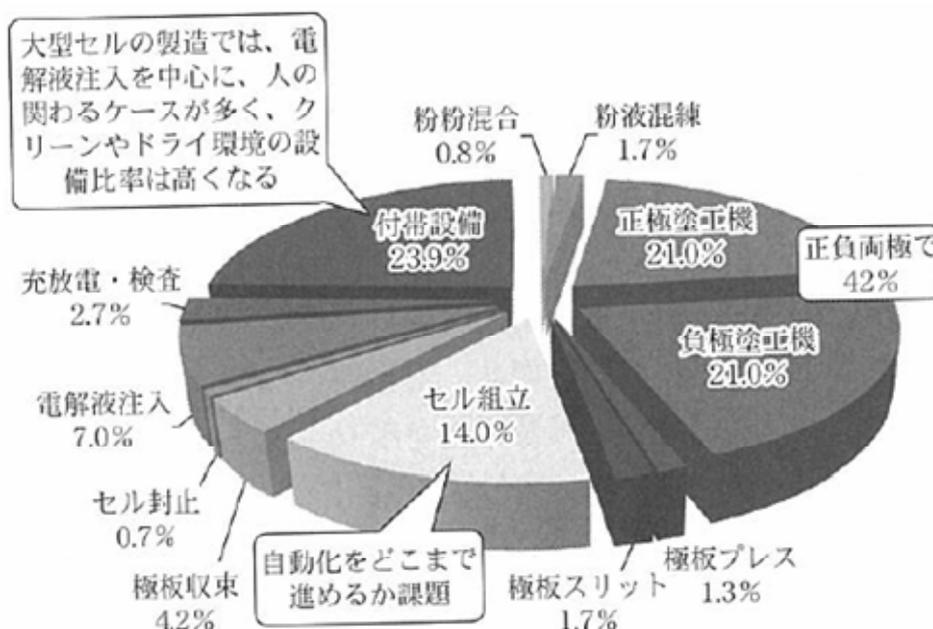


図 1.3 製造設備費の内訳と比率⁵⁾
(装置単価 × 設置台数) / (設備費合計)

リチウムイオン電池はその製造工程において、クリーンでドライな環境が必須であるとともに、異物混入防止による安全性の確保も重要である。特に材料となるリチウム電解液やセパレーター外装品は非常に水分を嫌うため、工程によっては極端な低湿度環境が求められる。リチウムイオン電池を製造するための工程と、それぞれで求められる空調設備のグレードの例を図 1.4 に示す。

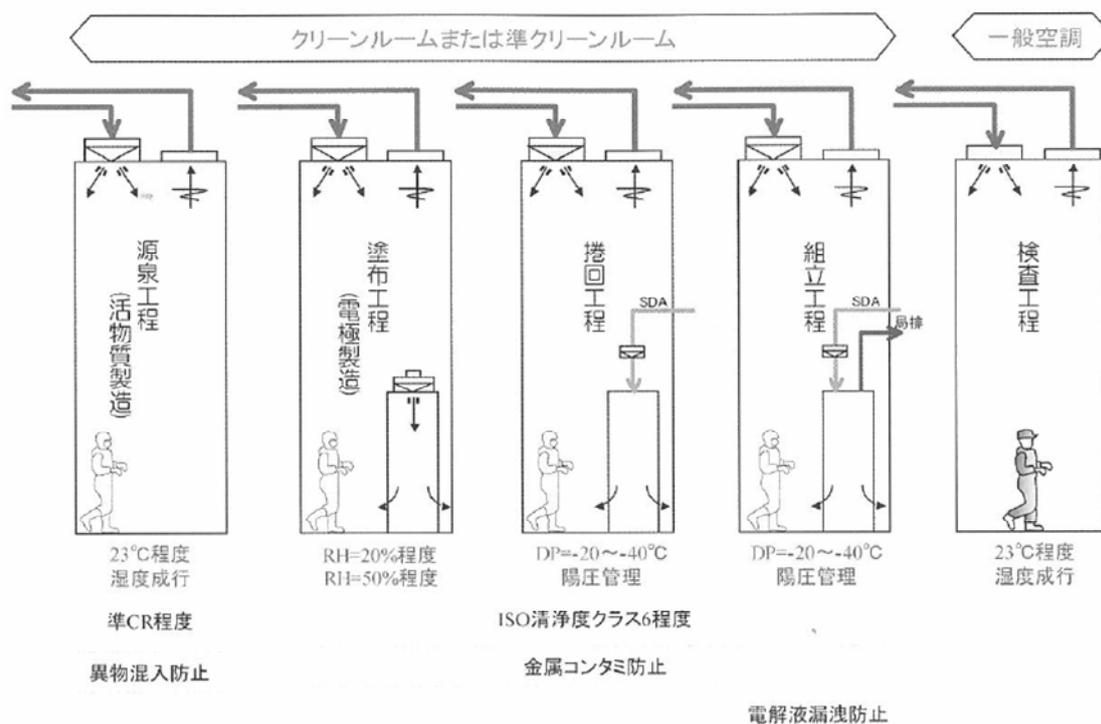


図 1.4 リチウムイオン電池の製造工程の例¹⁾

図 1.4 を見ると、図中の生産装置内はもとより、人間が存在する広範囲の室内環境空間においても、低露点雰囲気（DR）が求められている。ある工場では、実際に製品に触れる空気である生産装置内換気の露点は -60 以下、生産装置外の作業環境の露点も、装置閉時の水分侵入を抑えるため、 -20 以下に管理されている。このように、室内の露点が低湿度に保たれた居室のことをドライルーム(DR)と呼ぶ¹⁾。図 1.5 に、空気露点と絶対湿度（空気中の水分濃度）の関係を示す。標準的な居室内絶対湿度 10.5g/kg に対し、例で示した DR 内湿度の絶対湿度は約 0.64g/kg で、およそ $1/16$ の濃度に該当する。さらに、生産装置内露点 -60 は絶対湿度に換算すると約 0.0064g/kg で、一般居室湿度の $1/1500$ 以下と、極めて低水分濃度に保つことが求められていると分かる。

また、リチウムイオン電池工場で用いられるドライルームは、ほとんどの場合清浄度維持も必要となる。工程の大部分において、ISO 清浄度クラス 5~7 程度のクリーンルームあるいは準クリーンルーム環境が求められることが分かる。

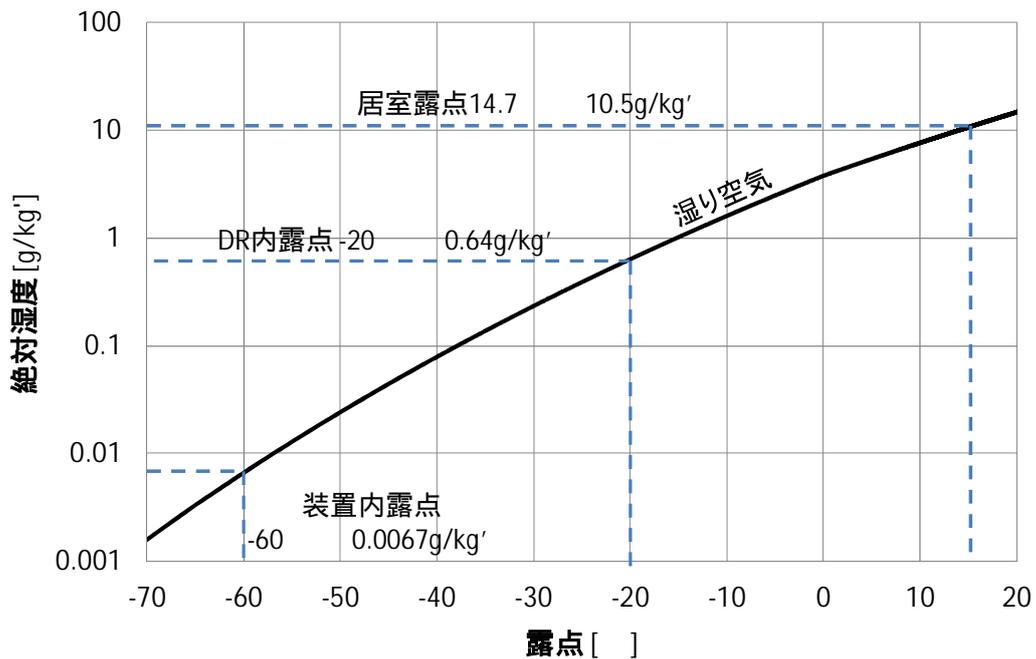


図 1.5 露点と絶対湿度の関係（湿り空気，101.3kPa 下）

これまで低露点環境を保つ方法としては一般的に，高純度の窒素供給が用いられる場合が多かった．しかし，このように低露点空間に人間が存在する場合，窒息の危険性が生じるため使用されない傾向にある．また，このように大規模空間を低露点環境に保つためには，膨大な量の低露点ガスの供給が必要であり，高額の高純度ガスの使用は極力避けられるべきである．こうした背景をもとに，安全で窒素よりも安価な低露点空気を製造可能な技術の開発が進み，製造現場で導入されるようになった．

1.2 除湿技術の変遷と分類

既存の除湿技術とその分類を体系的に説明するため、除湿技術の変遷と合わせて述べることにする。

冷却減湿方式

ウィリス・キヤリア博士 (Willis Carrier、1876年11月26日 - 1950年10月7日)が、世界で初めて安定的に運転可能な空気減湿装置の開発に成功したのは、1903年の事であった⁶⁾。彼は現在の湿り空気線図の考案や、空気湿度の「露点制御」技術の発明者として知られ、空気調和の父とされている。空気中の湿度を調節する事は人類の古くからの懸案であった。それまで、暑い湿った空気から感ずる不快さを克服すべく努めたが、不成功に終わっていた。また、人間を対象とした場合のみならず、工業分野でも調湿技術が求められていた。前述のキヤリア博士が最初に取り組んだ事例も、ニューヨークのサケット・ウィルヘルムズ石板印刷出版会社の工場内の調湿に関するものであった。湿度が多い日と乾燥した日とでは紙のサイズに狂いが生じ、さらにインクの付きや乾燥速度もまちまちとなるため、当時の印刷会社は天候に悩まされていた。キヤリア博士は空気を冷却することで、水蒸気を凝縮させれば除去できることに着目し、冷凍機で冷却したパイプコイルの中に空気を送り冷却する機械を発案/製作して、この問題を解決した。この除湿方法は後に冷却減湿方式と呼ばれ、冷凍技術・空調技術の発展に伴って世の中に広く普及していくことになった。

冷却減湿方式は現在も、保健用空調(対人空調)、産業用空調(工業空調)問わず、主流の除湿方法である。その大きな原因は2つある。1つは、除湿が必要な場合ほとんどのケースで同時に空気冷却が必要なため、その両方を同時に行える冷却減湿方式は合理的であったためである。もう1つは高効率な冷凍機の開発が進んだことにある。現在主流の蒸気圧縮式冷凍サイクルの冷温熱生成効率係数 COP (Coefficient Of Performance) は、一般家庭用の小型の製品でも定格条件で 600% を超える製品が市販されており、これは投入エネルギーの数倍の冷温熱量を得られることを意味している⁷⁾。結果として冷却減湿方式の除湿(空調)装置は、イニシャルコスト・ランニングコストの両面で優れた性能を示すため、特殊なケースを除いてこの方式が採用されている。

冷水を除湿対象空気に直接接触させて除湿するエアワッシャー方式も、同時に除塵が求められる場合などに適用される。しかし、管理の容易さなどの観点から、熱交換器を介して冷却除湿する場合がほとんどである。図 1.6 に代表的な熱交換器の形状を示す。

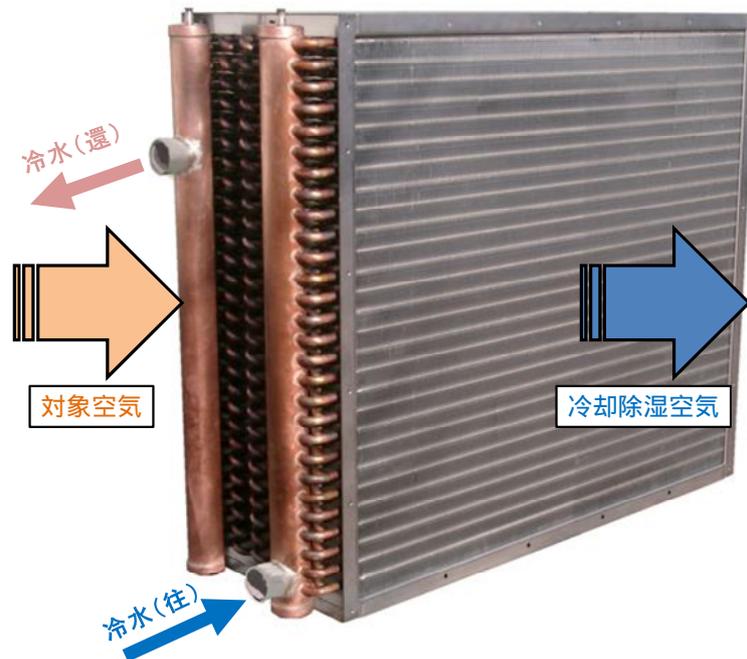


図 1.6 冷却コイルによる除湿

このような熱交換器は一般的にプレートフィンコイルと呼ばれ、冷水（冷媒）が流れるチューブと、その周りに直交する形で取り付けられた伝熱プレートフィンで構成される。熱交換器のフィンの隙間に空気を通すと、冷水との熱交換が行われて冷却される。空気が露点温度以下まで冷却されると、空気中の水分がフィン表面に結露し、除湿される。水滴はフィンを伝って下方へ流れていき、熱交換器下部に設けられたドレンパン及びドレン排出配管にて系外へ排出される。また、チューブ内を流れる水温及び水量を調節することで、出口空気露点（除湿量）を調節することが可能である。大抵の場合、冷水熱交換器入口温度は7℃、出口温度は12℃で設計され、冷却量・除湿量に応じて水量を電磁弁で変化させる制御方式が採用される。

チューブ内を流れる流体の種類によって、冷却減湿方式はさらに冷水方式と直膨方式に分類できる。冷水方式はチューブ内を流れる流体が、水もしくはブライン（不凍液）の場合である。空調機とは別に設置した冷凍機で冷水を生成し、それを空調機内のコイルに通水することでサイクルを構成する。水蓄熱槽と合わせた運用などができることから、比較的大型ビルや工場など大規模な空調方式で採用されることが多い。一方、直膨方式はチューブ内を流れる流体が、フロンなどの冷媒の場合である。空調機のコイルと冷凍機が一体化したタイプで、スペース性や省設備性に優れることから中小規模の物件を中心に広く普及しており、一般家庭用のルームエアコンディショナーもこれに分類される。ただし、熱源一体化タイプのため、空気側熱負荷変動に対する容量制御が難しく、精密もしくは安定的温湿度制御が求められる空調分野では、前述の冷水方式が採用されることが多い。

冷却減湿方式は省設備・省エネルギーで除湿が可能な技術であるが、欠点としてコイル表面温度が氷点下まで下がると、空気中の水分が凍結（フロスト）してコイルが閉塞する事が挙げられる。供給空気を露点温度+5 以下へ連続して除湿するためには、冷媒としてブラインを使用し、さらに複数コイルを併設して、コイル上の霜を解氷（デフロスト）する機能を設けるなどの複雑な対策が必要となる（図 1.7）⁸⁾。さらに、要求される空気の乾球温度が常温である場合、冷却除湿後に大幅な再加熱が必要となり、エネルギー上も無駄が多い。

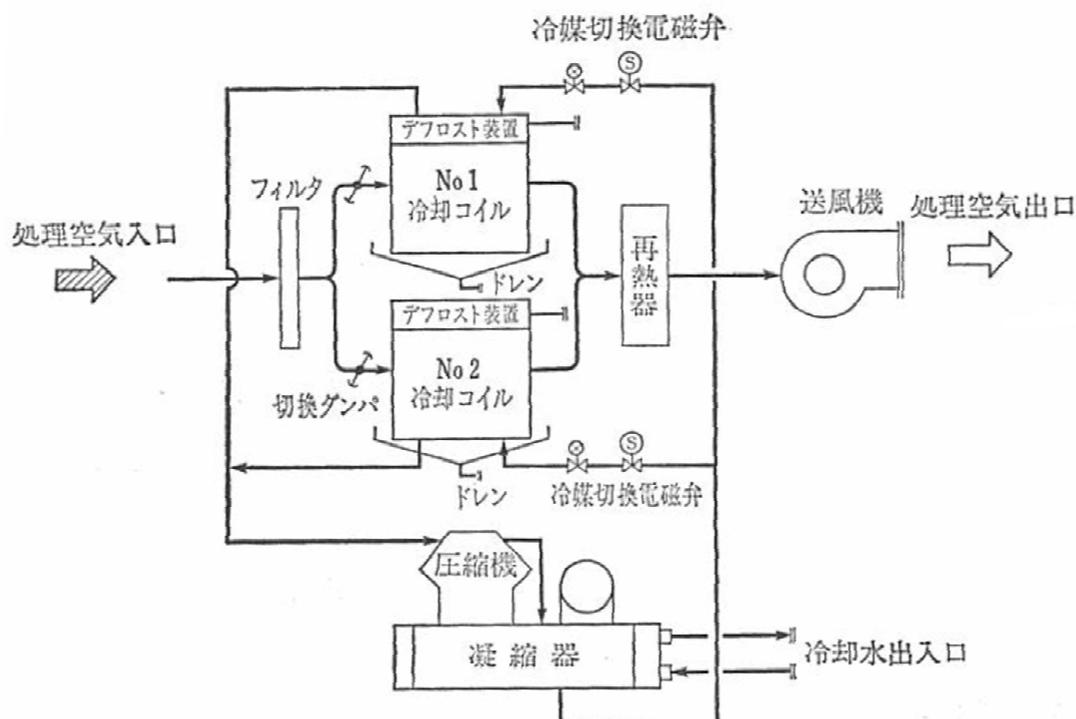


図 1.7 スタンバイ型低露点用冷却除湿機⁸⁾

固定床吸着方式

工業技術の発展に伴って、冷却減湿方式とは異なる除湿方法が検討されるようになった。米国では 1940 年代に空気圧によるプラント制御の自動化が進み、圧縮空気によるプロセスの自動制御技術が著しく発展した。圧縮熱で温度上昇した空気を低温まで冷却すると、圧縮空気中の水蒸気がドレンとして凝縮し、プロセス上に悪影響を及ぼすため、除湿が不可欠な問題となった⁹⁾。これら圧縮空気の除湿には冷却減湿方式の他に一般的に、圧力空気の特徴を生かした固定床吸着式減湿が用いられる。圧縮空気設備のプロセスフローを図 1.8 に示す。

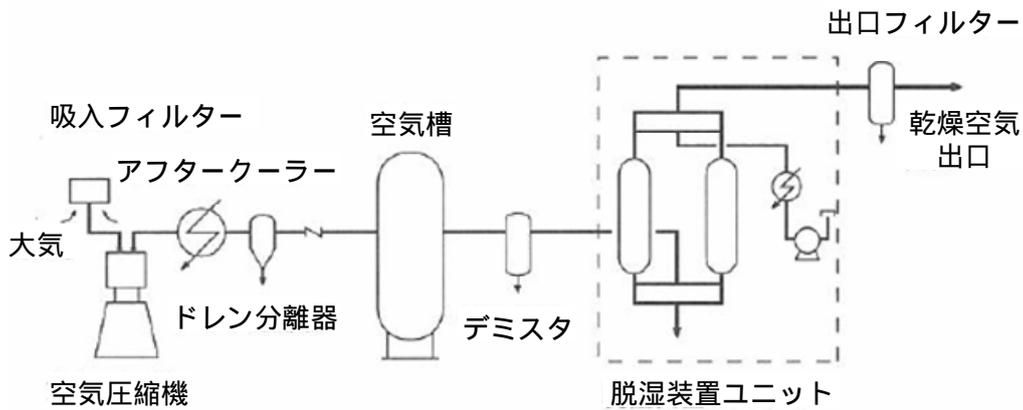


図 1.8 圧縮空気源設備のプロセスフロー⁹⁾

圧縮空気脱湿装置は、活性アルミナ、シリカゲル及び合成ゼオライトなどの粒子状の吸着剤が充填された吸着塔を持ち、さらにその吸着剤をサイクル利用できるような、TSA または PSA のような水分の脱着再生を行うシステムをそのユニット内に有するのが特徴である。TSA とは、thermal swing adsorption の略で、加熱再生式の吸着と再生のサイクルを行う吸着装置である。一方、PSA とは、pressure swing adsorption の略で、圧力スイングサイクル式の再生を行う吸着装置である⁹⁾。まず、TSA 式脱湿装置フローの概略を図 1.9 に、PSA 式脱湿装置フローの概略を図 1.10 に示す。

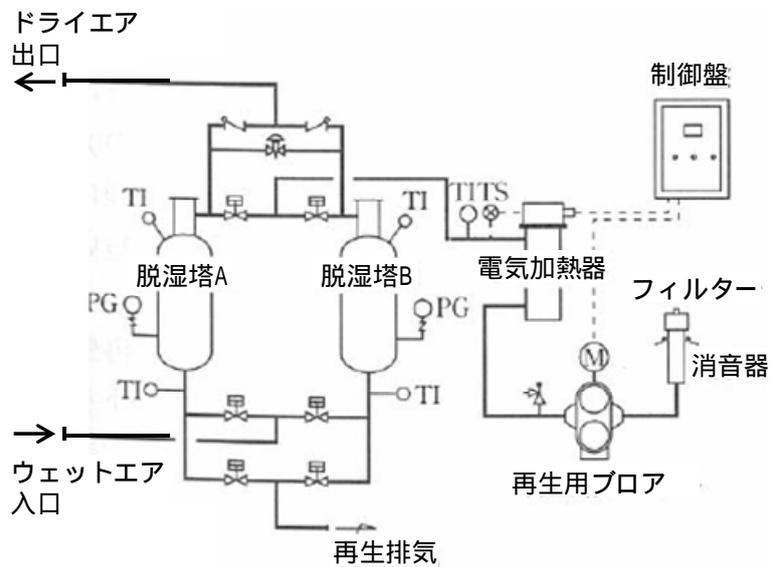


図 1.9 TSA 式脱湿装置フロー⁹⁾

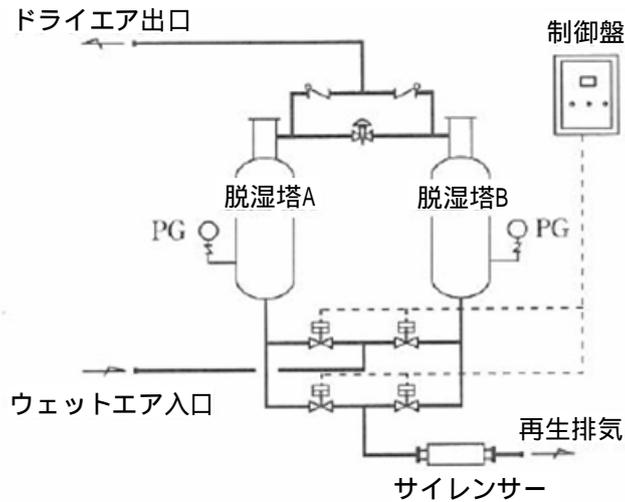


図 1.10 PSA 式脱湿装置フロー⁹⁾

TSA・PSA 方式ともに一般的に、吸着剤が充填された 2 塔以上の吸着塔を備えており、この吸着塔を交互に吸着除湿・再生運転させることで、連続的な除湿運転が可能である。固定床吸着式減湿によって、圧縮空気の状態でも流路内で結露することなく運用することが可能となった。さらに、除湿後の圧縮空気を減圧して常圧まで戻すと、水蒸気分圧の低下に伴って露点は下降し、圧力帯や再生温度にもよるが、露点 $-20 \sim -80$ の乾燥空気を得ることができる。これら圧縮乾燥空気は化学プラントや石油コンビナートのプロセス空気としてや、電車駆動系空気のドレン防止、純窒素ガス同様試験片の保存・分析機器の乾燥用ガスとして使用されるようになった。

固定床吸着方式は冷却減湿方式のように、着霜に伴う供給露点の制約は無く、冷却減湿方式と比較して容易により低い露点まで除湿可能である。このため、圧縮空気の結露対策としてだけでなく、より乾燥した空気を得る手段として用いることが可能である。しかし、前述のリチウムイオン電池製造工場の低露点雰囲気生成などは、圧縮空気である必要がないため、低露点を得るために多大なエネルギーを使用して空気を圧縮するのは、エネルギー上効率が悪い。TSA 方式であれば原理上、常圧環境下でも露点 0 以下まで除湿することが可能であるが、常圧環境では流量の割に装置が大型化し、さらに除湿性能も大幅に低下するため、前述のリチウム電池製造環境のような大風量かつ低露点の空気が必要な用途への適用は不適である。

吸収式除湿方式

以上の背景から、空気を圧縮することなく大風量かつ低露点の空気を生成できる、小型で高性能な除湿システムの開発が求められていた。まず、塩化リチウム、臭化リチウム、トリエチレングリコールなどの吸収液体を用いた吸収式除湿、あるいは湿式デシカント方式と呼ばれる方法が検討された^{8,10)}。装置の代表的な構成図を図 1.11 に示す。

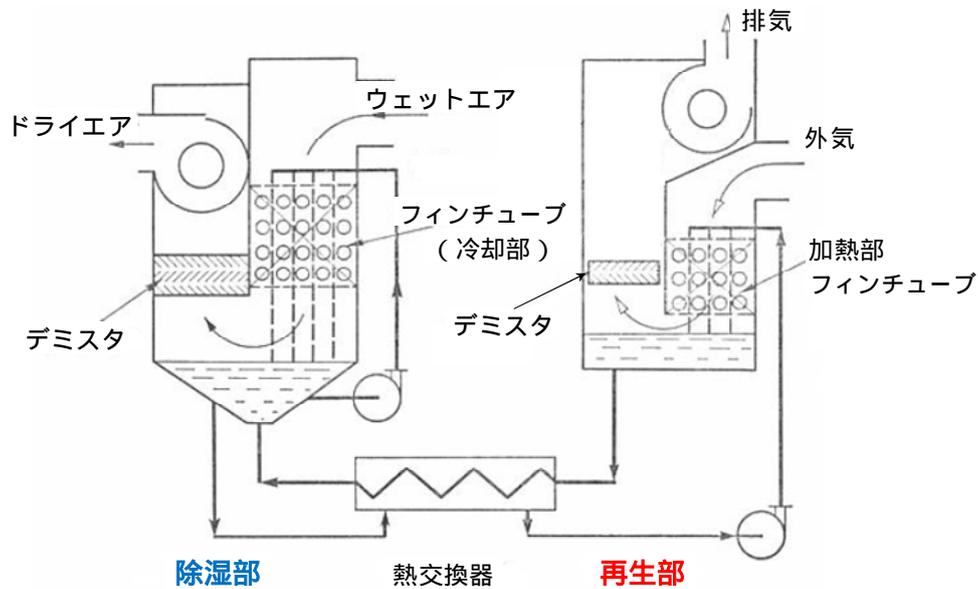


図 1.11 吸収式除湿装置のフローの例⁸⁾

装置は吸収部と再生部に分かれており、吸収部の内部では液状吸湿剤が冷却フィンの上からノズルによって均一に流下している。空気はこの液状吸湿剤に接して除湿される。除湿部は液表面と除湿すべき湿り空気が広い面積で接触することが重要である。また、気液の接触に関して空気流と液体が同じ方向、逆向き、あるいは十字流に接触する場合がある。図 1.11 のように、湿分を含んだ空気が液の流下方向と同じ方向に流れて除湿されるものを順方向接触と呼び、液の流下する方向に対して逆側から湿り空気を通す方法を対向流接触と呼ぶ。処理空気中の水分を吸収して濃度の薄くなった処理溶液は、充填層下部の受液器に溜まる。再生空気中に水分を飛ばして濃度の薄くなった再生溶液は、充填層下部の受液器に溜まる。それぞれの溶液を熱交換器にて熱交換することによって、連続的な除湿運転が可能となる。

これらの吸収液は水より凝固温度が低く、フィンに溶液濃度が保たれた吸収液を散水すると、例えば乾球温度 40°C の低温空気が通風されても、フィン上に着霜が起こることはない。吸収液による水分除去効果もあるので、前述の冷却減湿方式と異なり、比較的容易に露点 0°C 以下まで除湿可能である。また、固定床吸着方式と比較すると、熱交換器部において冷却と除湿を同時に行うことができるため、原理上除湿効率の面で優れる。吸収液自体の熱容量が小さいため、吸着除湿運転時にて温度スイング時に生じるエネルギー損失も小さい。また、液体のため形状を選ばない分、後述のハニカムロータ方式の除湿装置に比べると大型化が比較的容易で、大風量の除湿装置に向いている。吸収液の候補と、各吸収液を使用した際の特徴について、表 1.3 にまとめた⁸⁾。これらのうち一般的な使用例が多いのは、塩化リチウム水溶液及びトリエチレングリコールである。

表 1.3 常用される液体吸収剤⁸⁾

吸収剤	常用露点[]	濃度 [%]	毒性	腐食性	主な用途
塩化カルシウム水溶液	-3 ~ -1	40 ~ 50	無	中	都市ガスの除湿
ジエチレングリコール	-15 ~ -10	70 ~ 95	無	小	一般ガスの吸湿
グリセリン溶液・無水	(3 ~ 6) ~ -15	(70 ~ 80) ~ 100	無	小	工業用ガスの乾燥
リン酸	-15 ~ -4	80 ~ 95	有	強	実験用吸着剤
か性ソーダ か性カリ	-10 ~ -4		有	強	工業用圧縮ガスの吸湿
硫酸	-15 ~ -4	60 ~ 70	有	強	化学装置における吸湿
トリエチレングリコール	-15 ~ -10	70 ~ 95	無	小	空調一般ガス吸湿
塩化リチウム水溶液	-10 ~ -4	30 ~ 40	無	中	空調, 殺菌低温乾燥

吸収液の多くには強い腐食性があるので、吸収液が空気に乗って装置外へ飛散（キャリーオーバー）すると、ダクトや室内施設の金属腐食の原因となるため、十分な対策が必要である。また、表 1.3 を見ると、吸収液の種類によって常用露点に差があるものの、下限値は-15 とされている。この原因について説明するため、塩化リチウム水溶液の濃度と露点の関係図を図 1.12 に示す。

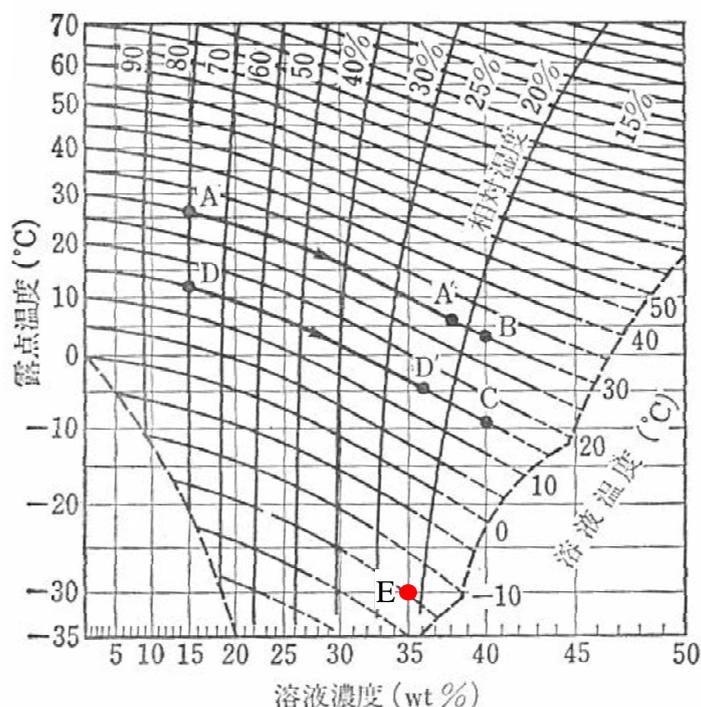


図 1.12 塩化リチウム水溶液 濃度 - 露点温度線図⁸⁾

図中で溶液温度を示す横波線が書き込まれた領域が、塩化リチウム水溶液が液体として存在する領域である。それ以外の範囲、例えば図中左下部分では、濃度が低く凍結が始まるため、水溶液の状態を保つことができていない。一方、図中右下部分では、溶液温度が下がり溶解度が低くなっていくため、溶液濃度の上限が低くなっていくことが示されている。水溶液の濃度が高いほど吸収による除湿効果は高いが、上述の理由で溶液温度が低くなるほど、溶液濃度の上限値が低くなるため、除湿性能は下がってくる。このため例えば、溶液濃度 35% の塩化リチウム水溶液を吸収液として利用する場合、露点 -30 の供給空気を得るためには、図中 E 点 が示すように冷却コイルにて溶液温度を約 -15 まで冷却しなければならないことが読み取れる。

冷水を生成するヒートポンプの効率 は冷水温度が低くなるほど COP が低下するため、-15 まで溶液を冷却するのはエネルギー効率上望ましくない。また、用途によっては再熱が必要となるのも問題となる。結果として湿式デシカント方式は、常圧環境にて一般空調レベルかあるいは -15 程度までの露点の空気を生成するには適した方法であるが、それ以下の低露点空気を製造するには不向きであることが分かってきた。

デシカントロータ方式

上述の湿式デシカント方式を改良する形で開発されたのが、デシカントロータ型の除湿機である。開発初期の製品は、塩化リチウムを含浸させた不燃性もしくは難燃性紙のエレメントを使用した回転型除湿機であり、エレメント部は大きな表面積と強度を両立させるため、ハニカム構造となっている。湿式と区別する意味で乾式デシカントロータ方式あるいは単にデシカントロータ方式とも呼ばれる。図 1.13 に代表的な装置構成図の例を示す。

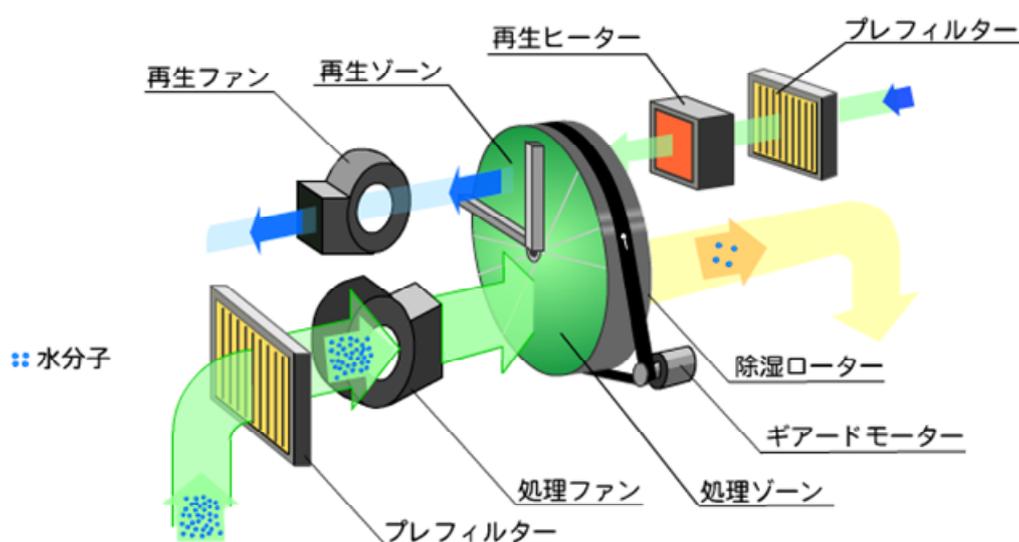


図 1.13 ハニカムロータ式除湿機の概略図¹¹⁾

デシカントロータ型除湿機の作動原理は、デシカントロータがギヤーマーターによってハウジング内を回転駆動する構造になっている。サイクルにおける空気状態量の変化の例を、図 1.14 示す。デシカントロータにおいてハウジング及びセパレーターで区切られた2つのゾーンのうち、片側のゾーンは再生ゾーンと呼ばれ、再生ヒーターにて昇温（ ）された空気が通風される（ ）。デシカントロータに含浸された吸着剤には接する空気の相対湿度（相対圧力）によって、平衡状態で保有する水分量（平衡吸着量）が変化する性質を持っている。高温で低相対湿度となった再生空気にさらされると、吸着剤に吸着された水分が脱離し、吸着剤は乾燥される。一方、再生空気は脱離した水分を含むので、加湿される。デシカントロータのもう1つのゾーンは処理ゾーンと呼ばれ、通常再生空気とは逆方向に除湿対象空気（処理空気）が通風される（ ）。

乾燥した吸着剤が含浸されたデシカントロータを通過することによって、空気中に含まれる水分は除去される。この除湿は吸着剤の相対湿度スイングによるものなので、吸着剤を通過した処理空気は相対湿度が再生運転時より低くなることはない。また、吸着・再生運転は理想条件では等エンタルピー変化なので、理想的な除湿運転が行われた場合の、処理出口空気の状態量は、図 1.14 中のオレンジ点となり、実際の運転でこのオレンジ点より絶対湿度が低くなることはない。ロータが回転することによって、吸着剤の再生と吸着は交互に行われ、連続的な除湿運転が可能となっている。

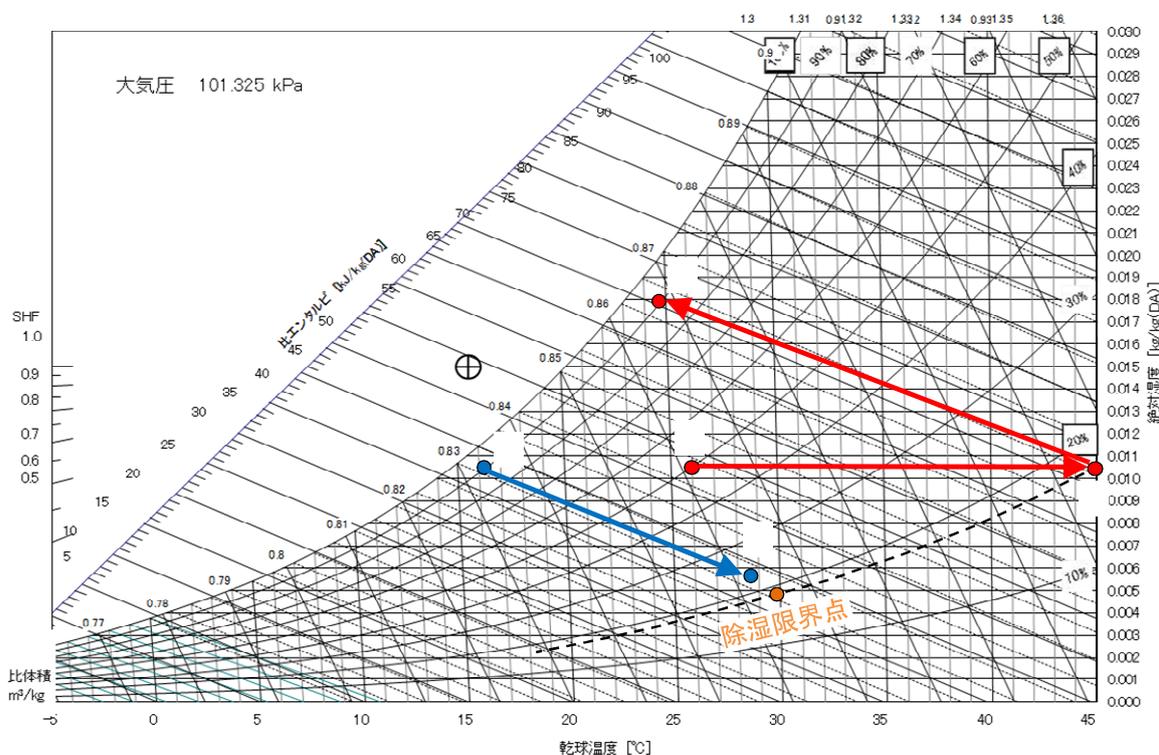


図 1.14 湿り空気線図上での空気状態量の変化

システムの心臓部としての機能を果たすのは、デシカントロータ部分である。デシカントロータは図 1.15 に示すように厚さ 0.2mm 程度のフラットなシートと、コルゲート加工されたシートが交互に積み重なった構造である。

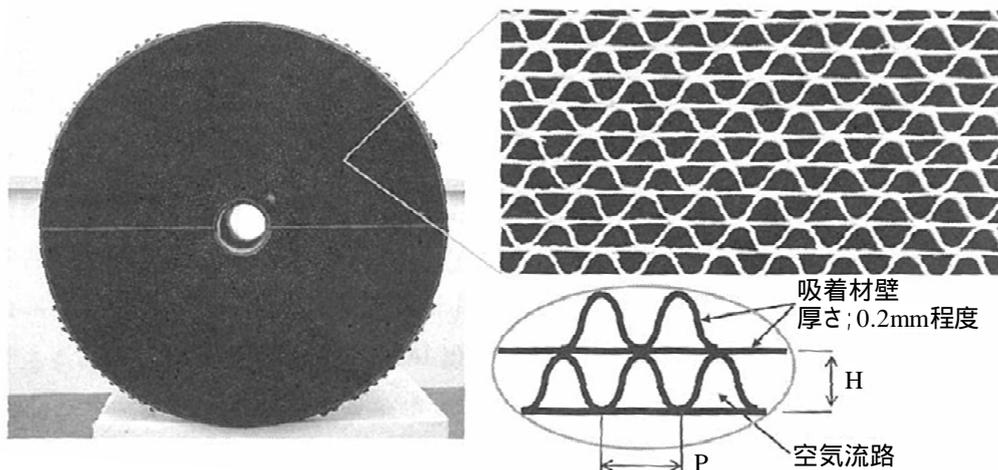


図 1.15 一般的なデシカントロータ¹⁰⁾

このロータはセラミックペーパーあるいはガラス繊維からなるマトリクスに、吸着剤を含浸あるいは担持する手法で製造される。空気流路ピッチは例えば 2mm×0.8mm～9mm×6mm など様々に製作可能である。流路ピッチが小さいほど比表面積が増加して良好な除湿性能が得られるが、圧力損失が大きくなり送風動力も増加する。ハニカム形状の標準的な規格サイズ一覧を図 1.16 に示す。低露点空気製造では除湿性能が重要視されるため、通常コルゲートサイズは図中 AS-31 以下の、高密度なハニカム形状が用いられる。

	AS-20	AS-22	AS-23	AS-24	AS-26	AS-31	AS-42	AS-50	AS-63	AS-85	
P	2.0	2.2	2.4	2.6	2.6	3.4	4.2	5.0	6.1	8.5	(mm)
H	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.9	2.5	2.7	3.8	5.8	(mm)
(表面積)	6,000	5,500	5,000	4,000	3,500	2,600	2,000	1,800	1,300	900	(m ² /m ³)
(セル数)	750	700	500	400	300	180	120	80	50	30	(セル/インチ)

図 1.16 標準ハニカムサイズ一覧⁹⁾

塩化リチウムを担持剤とするデシカントロータ型除湿は、以下の特徴を持っている。
(a) 低露点・低湿度の乾燥空気が連続的に得られる

湿式デシカントと同様，結露水分のフロストの心配がないため，0 以下の低露点空気を比較的容易に得ることができる．また，湿式デシカントの場合，水溶液溶解度の関係で，処理空気の相対湿度下限値は 10～15%程度であったが，乾式デシカントの場合，塩化リチウムは結晶あるいは極めて高濃度の水溶液の状態にあるため，それらの制限はない．したがって再生空気の加熱量を多くして相対湿度をさらに下げることによって，比較的容易に処理空気を相対湿度 1%以下の低湿度空気まで除湿することが可能である．

(b) 吸湿剤のキャリアオーバーがない

従来，湿式デシカント除湿機の最大の欠点であったキャリアオーバー（飛沫の同伴）が全く無く，室内金属の腐食への配慮，吸着剤の充填が不要である．

(c) 大風量処理に向けた原理・構造である

ハニカム型エレメントは単位体積当たりの表面積が広く，同時に通気抵抗が小さいため，除湿部を比較的高い面風速で通風することが可能である．ロータの機械的構造もシンプルで，PSA 装置などに比べると切替え装置などが不要な分，システム構成も簡便である．結果としてスペース性に優れ，大型化・大風量処理も可能である．

上記の塩化リチウム含浸ロータは 1960 年頃 Munters 社¹²⁾にて，アスベスト繊維ペーパーで製作したハニカムに吸湿剤塩化リチウムを含浸した形で製作され，デシカントロータ型除湿機に搭載され市販された．しかし，このロータは処理空気相対湿度などに利用制限があった．吸湿量に対して再生熱量が少ない運転不良が起こると，含浸された塩化リチウム結晶が潮解し，ロータ内に吸湿剤のムラができて性能が著しく劣化するという問題があった^{8,13)}．これを解決するため，それまで主に吸着塔内に粒子状で充填される形で使用されていたシリカゲルやゼオライトと言った無機系の吸着剤を，ロータに担持する手法が開発された．今日ではこれら無機系の吸着剤を用いた除湿ロータが主流であり，塩化リチウムロータは一部の用途を除いて使用されてない．近年では 40～50 の低温廃熱でも再生脱着可能な低温再生用ロータが開発されており，未利用廃熱を利用できる空調方法として，一般空調用途でもデシカントロータ方式が研究開発・利用されている．

以上の変遷が示す通り現在のデシカントロータ方式は，常温常圧下の低湿度空気製造に適した除湿方式であり，それらの用途ではほとんどのケースでこの方式が採用されている．次項ではデシカントロータ方式，特に低露点空気製造技術関連でこれまで行われてきた高性能化に関する研究開発の例を示す．

1.3 除湿機の高性能化に関する往來研究

近年のデシカントロータ型除湿の高性能化に関する研究開発は、主に3つの方向性到大別される。1つ目は、心臓部となるロータに関する研究開発で、デシカント材料合成やロータ加工方法が主題である。2つ目は、ロータ周りの空気フローや付帯設備を含めたシステム構成の改良に関する研究開発である。3つ目は除湿・再生挙動のシミュレーションモデル化と、シミュレーションによる設計/運用条件の最適化に関する研究開発である。本項ではそれらについて、簡単な解説を加えて紹介する。

ロータに関する研究開発

デシカント材料の開発と、その吸着剤を性能劣化させることなく母材への担持する方法に関する研究開発が行われている。1984年に日本のデシカント除湿機・ロータメーカーである(株)西部技研によって、吸湿剤として潮解の問題があった塩化リチウムの代わりに、吸着剤であるシリカゲルをハニカムコルゲートに担持する加工法が開発・商品化された^{10, 11, 14)}。この製法はセラミック繊維紙をコルゲート状に加工した後、円筒状に巻きつけ接着したものをマトリクスとし、これにケイ酸ソーダと金属塩をマトリクス中で反応重合させる形で、ハニカムコルゲートを得るという方法である。それまでも、無機系吸着剤をロータに担持する検討はなされていたが、担持のためのバインダを添加すると、シリカゲル中の細孔が閉塞するなどして、粒子状のときと比較して大きく性能が劣化する欠点があった。新製法ではシリカゲル自身が科学的に合成結合しており、バインダを使用しないので性能劣化させることなく、ロータに担持することができた。シリカゲル高性能化のために、Al, Tiなどの金属イオンを添加する場合もある¹⁵⁾。シリカゲルロータはその後、国内では(株)西部技研とニチアス社、海外ではMunters社、DRI社、Pro Flute社、Novel Aire社など複数のメーカーで生産販売している。

吸着剤のもつ細孔径と水分吸着が起こる相対湿度には密接な関係があることが知られ、細孔径が小さいほどその細孔で吸着が起こる相対湿度は低くなる¹⁶⁾。前述のシリカゲルは大小様々な細孔径を持つため、相対湿度を横軸、平衡吸着量を縦軸とした吸着等温線は特定の変化域を持たず単調増加する特徴を示す。一方、合成ゼオライトは一般的に比較的均質かつ小さい細孔径を持つため、その吸着等温線は低相対湿度域で急激に立ち上がる特性を示し、それ以外の相対湿度域では大きく平衡吸着量が変化しない特性を示す。また、細孔内に吸着できる水分量が比較的小さいことから、飽和水蒸気暴露時の吸着量(最大吸着量)は、大きな細孔径の細孔も含むシリカゲルより小さい傾向がある。結果として吸着剤を有効に利用するためには脱着空気を低相対湿度、つまり高温にしなければならないので、低温廃熱利用を想定する一般空調用途には不向きである。一方、低相対湿度域でも大きな吸着量を有することから、低露点空気製造用途には適している。合成ゼオライトの吸着剤パウダーを担持したデシカントロータの製法には、セラミック

繊維紙などで製作したデシカントロータを、無機系のバインダで調整したスラリー中にディッピング含浸乾燥して吸着剤を担持する方法が一般的である¹⁰⁾。この方法ではバインダの選定、スラリーの調整方法が重要となる。一般的なシリカゲルロータとゼオライトロータの乾球温度 30℃ 下での吸着等温線を図 1.17 に示す¹⁷⁻²⁰⁾。

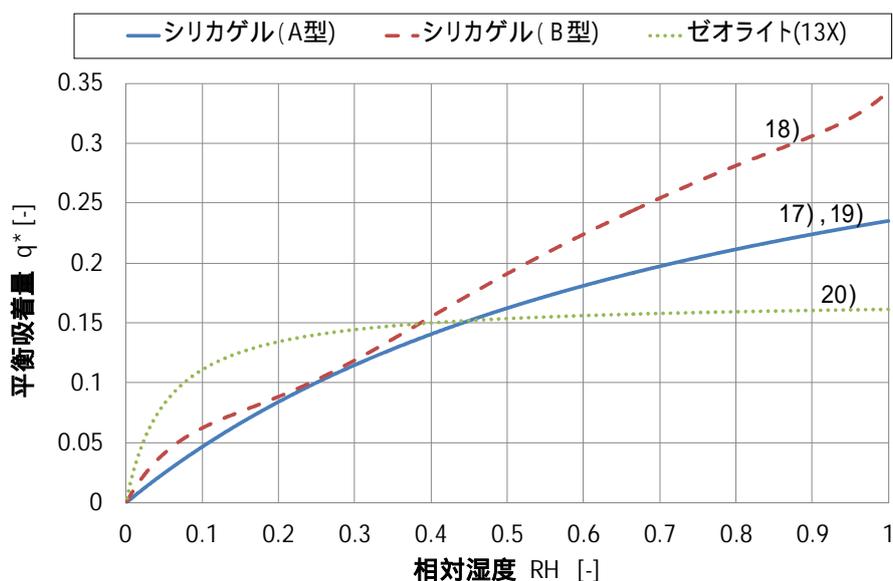


図 1.17 各種デシカントロータの吸着等温線 (30℃)¹⁷⁻²⁰⁾

近年は比較的低温でも再生可能な合成ゼオライトも開発されており、デシカント空調用途向けのデシカントロータに加工され販売されている。例えば、三菱樹脂(株)AQSOA シリーズ²¹⁾は、アルミノフェート系ゼオライトを担持した、低温再生可能なゼオライト系ロータである。図 1.18 にその 1 種類である FAM-Z01 の吸着等温線²²⁾を示す。

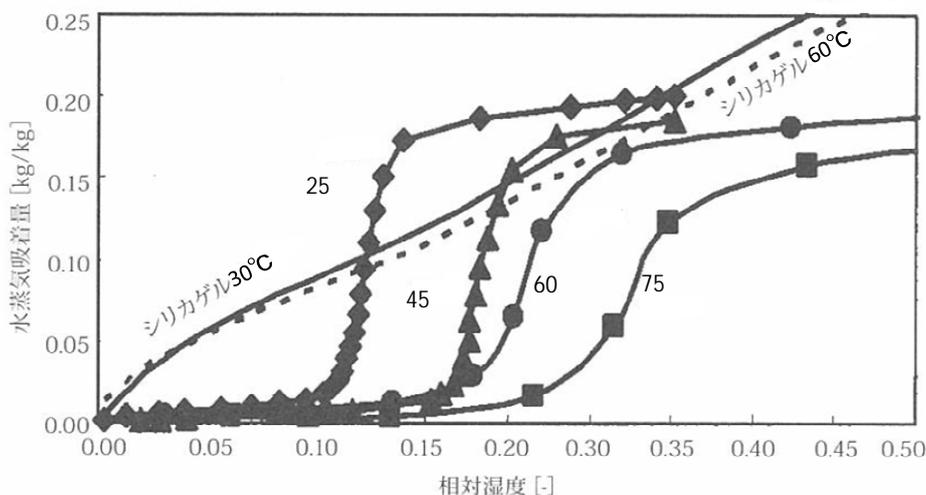


図 1.18 AQDOA FAM-Z01 の吸着等温線²²⁾

相対湿度 10%以下の領域では水蒸気を吸着しないので脱着が容易となる。一方で、除湿が必要となる領域ではシリカゲルと同等の吸着能力を有することが読み取れる。

日本エクスラン工業(株)では、岡山大学との共同研究にて高分子収着剤²³⁾によるデシカントロータを開発し商品化している²⁴⁾。高分子収着剤はポリアクリル酸系高分子主鎖を、親水性の高い特殊な架橋により3次元構造化したものである。気体状水蒸気が高分子収着剤に作用した場合、高分子収着剤の有する高い親水性基により水は収着され、さらに分子鎖間に入り込んで吸収されてゆく。この際、高分子主鎖は柔軟であることから水が吸収されるに従い主鎖自体が膨らんでゆき、多量の水分を収着剤内に取り込むことが可能となっている。本研究で測定した高分子収着剤ロータの吸着等温線を図 1.19 に示す²⁰⁾。図 1.17 に示す A 型シリカゲルに近い相対湿度増加に従って、ほぼ直線状に平衡吸着量が増加している曲線を示すが、温度依存性が比較的大きく、また収着剤ロータ自体が軽量あることもあり飽和空気に曝された際の平衡吸着量は、シリカゲルを大きく上回っている。吸着能力や耐久性の面で優れた特性を示すことから、特に低温再生可能なロータとして、近年注目を集めている。

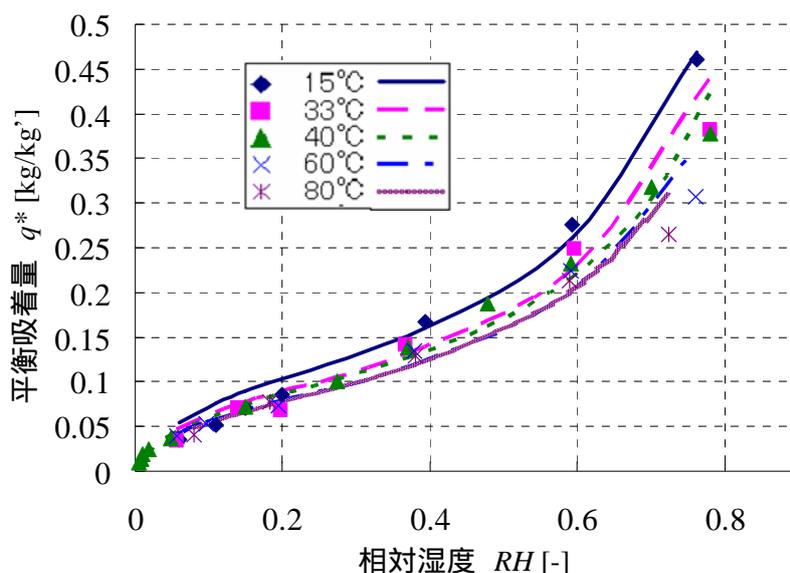


図 1.19 高分子収着剤ロータの吸着等温線²⁰⁾

これまで紹介した以外でも、 SiO_2 を材質として、均一で規則的な細孔(メソ孔)を持つメソポーラスシリカ^{25,26)}や、粘土系無機多孔質ハスクレイ²⁷⁾、スポンジ酸化チタン²⁸⁾などの吸着剤が開発、ロータ化されている。しかし、新規に開発される吸着剤の多くは低温再生可能な一般空調用途をターゲットしているものが多く、低露点空気製造用ロータとして用いられるのは現在でも、低湿度域での吸着性能に優れるゼオライトロータ、もしくはシリカゲルロータが主流である^{29,30)}。

システム構成に関する研究開発

デシカントロータ周りの空気フローや、ファンやヒーターなどの付帯設備を含めたシステム構成の最適化に関しては、様々な試みがなされている。図 1.20 にデシカントロータ周りの空気フローの基本形を示す⁹⁾。代表的な標準型では処理ゾーンのロータ回転角度は 270° に設定される。つまり全体の 4 分の 3 が処理ゾーンとして働き、4 分の 1 が再生ゾーンとして働く。空気流速が処理と再生の両ゾーンで等しいとき、再生ゾーンの体積風量と処理ゾーンの体積流の比は $1/3$ 、すなわち各ゾーンの扇形の中心角の比に等しくなる。この流路で適切な吸脱着を行うためには、再生脱着は処理吸着運転と比較してより素早く行われるべきなので、一般的に標準型の場合 70 以上の空気が求められる。再生空気温度がこれより低い場合、脱着をより時間をかけて行う必要があるため、再生ゾーンの面積を増やし、互いの面積比を $1:1$ とした低温再生型の空気フローが採用される。また、低露点空気製造を意図する場合、再生空気を低相対湿度としなければならない。再生ヒーターでの加熱温度を高くすることも可能だが、ロータの母材の耐熱温度は制限されている場合が多いので、一般的にパージ型と呼ばれる再循環フローが採用される。すなわち、一旦ロータで除湿した空気の一部（パージ空気）をヒーターで加熱して、再生空気として再度ロータに通風するフローである。処理空気入口の絶対湿度や風量によっては、パージ空気に外気を混合して再生空気とするケースもある。ロータの角度分割は処理空気入口絶対湿度や再生温度によって色々なタイプが選択されるが、 150 付近の再生温度の場合、再生ゾーン・パージゾーン・処理ゾーンの分割比を $2:1:5$ （すなわち $90^\circ:45^\circ:225^\circ$ ）としたロータが採用されることが多い。

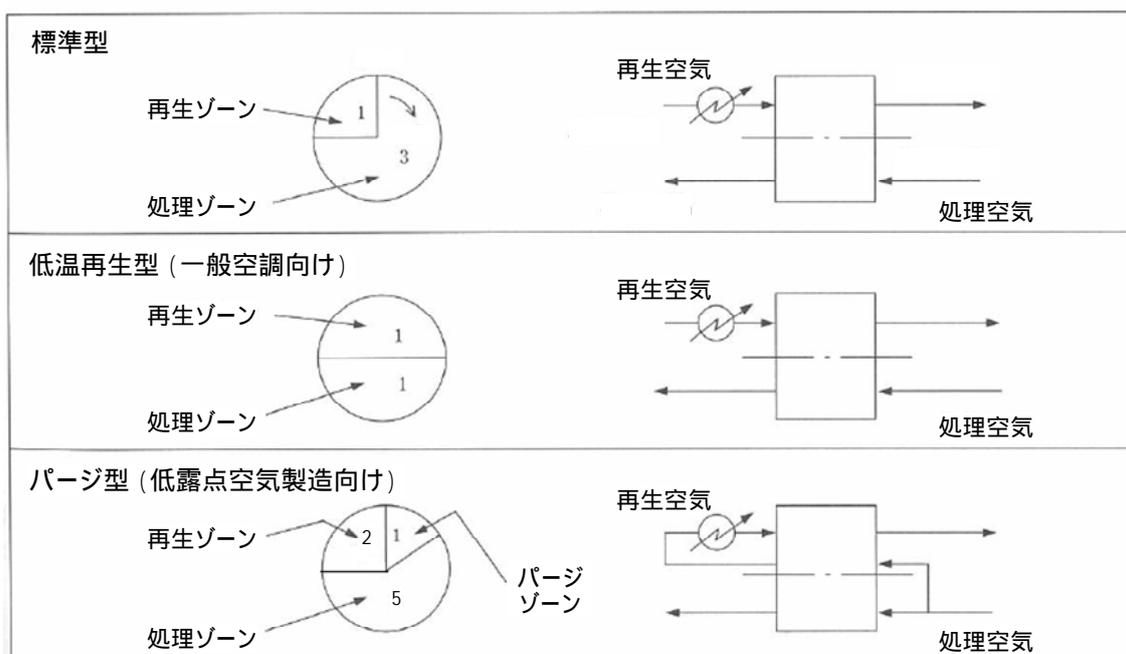


図 1.20 デシカントロータ周りの種々の空気フロー⁹⁾

処理空気の入口空気を予冷した外気のみ（オールフレッシュ方式）とする場合もあるが、低露点室からの排気が汚染されている場合などを除き、還気が得られる場合は省エネルギーのため、予冷外気と還気の混合空気を入口空気とする場合が多い³⁰⁾。また、目標となる供給露点が著しく低い露点の場合、除湿ロータを直列に設置し、各ロータにて段階的に除湿を行う方式（多段ロータ方式）が採用される場合がある。これにより、供給露点温度-100 以下という超低露点空気を製造することもできるが、ヒーターと冷却器ともに、ロータの段数分だけ設置しなければならないので、ロータ段数が増すほど使用エネルギーも大きく上昇する欠点がある³⁰⁻³²⁾。

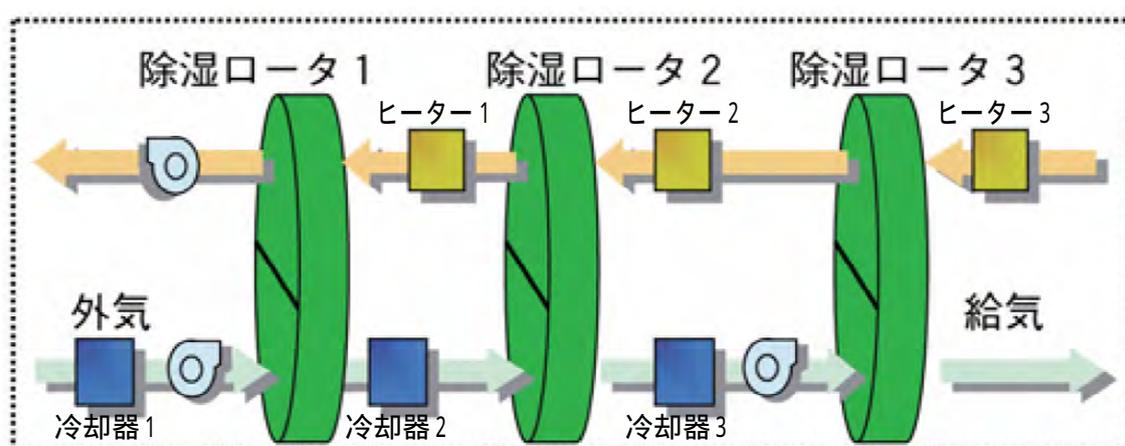


図 1.21 3 段除湿フローの概略図³²⁾

ロータ周りの空気フローの基本型は図 1.20 の通りであるが、高性能化を目的として、流路の改良を検討した事例も多い。菅田ら³³⁾はパージ型流路を一部見直し、低温低湿度の排気の一部を回収してパージゾーン空気とするとともに、再生ゾーンを 2 つに分け予熱部を設け、高温低湿度のパージ出口空気の一部を予熱部入口空気とする空気フローを考案した。パージに使用する処理空気の節約と再生エネルギーの低減がなされ、省エネルギー化を達成している。また、秋山ら³⁴⁾はロータ再生に要するエネルギーを削減するため、パージ型流路の再生ゾーンを 2 段階に分割するフローを考案した。高温低湿度の排気を再循環して再生初期の再生空気に用いることによって、効率良く廃熱を回収して省エネルギー化を図っている。また、一般空調用途では Kodama ら³⁵⁾がロータ周りの空気フローについて、より多彩な流路検討を行い、除湿性能の向上を達成している。このような空気フローパターンの最適化は省エネルギー化に確かな効果を示す一方で、多くの再循環プロセスを伴う除湿システムは、再循環回数を増やすほど、装置が複雑化し機械的負荷の増大を招く。また、処理空気が通過するロータ断面積が減少するため、通過風速を同等とするには大型化は避けられず、一概に装置性能が改善されたとは断言できない。

こうした背景をもとに装置フロー設計からでなく、運用面を改善することで省エネルギー化を図る試みに焦点が当てられている。デシカントロータ型の低露点空気製造装置はシステム上必ず脱着用の排気を伴うため、外気を取り入れて運転を行う。この取入れ外気中の水分こそシステムの除湿負荷のほとんどの割合を占める。このロータに流入する水分負荷は本来、ロータ流入前に冷却コイルにて減湿・制御されるため大きな変動はないはずである。しかし、外気露点が設計上の冷却コイル出口空気露点を下回るようになると、冷却コイルによる調湿はなされず、ロータでの除湿負荷は成り行きになる。同じ供給露点に保つ場合、除湿負荷が小さくなるに従って、ロータの脱着再生に要するエネルギーが小さくなるため、これを削減することが可能である。安定性・信頼性が重要視される産業用途のため、これらの部分負荷運転でも再生ヒーターの出力を絞るなどの積極的な制御は行わないことが通例であったが、近年更なる省エネルギー化のため部分負荷制御による省エネルギー化が注目・検討されている。

山口ら³⁶⁾はシミュレーションを元に、除湿負荷の減少に合わせて再生温度を下げる制御を行った際のコスト削減効果について試算を行い、年間約41%の消費エネルギーの削減が可能であることを示した。一方で同論文ではシミュレーション結果を実際の運転に反映させる方法や、実機での削減効果についてなどは言及されていない。秋山ら³⁴⁾は再生ゾーン出口のロータ周方向温度分布を元に、モータダンパで再生空気の風量を変動させることで部分負荷に対応する方法を提案した。実験にて部分負荷運転時に露点が許容値を満たしていることを実証している。しかしこの制御方法は出口露点を監視してこれを一定に保つことを意図したものでないため、低負荷運転時は出口露点が目標露点より大分低くなるなど、改善の余地を残している。

シミュレーションモデル化と設計/運用条件の最適化

デシカントロータ型の除湿機は、設計・運用の検討に必要なパラメータが多いので、冷却減湿方式のようにその設計・運用思想・手順が、体系立てて整理されていない。このため装置の仕様検討やフロー設計は、除湿機メーカーの経験式に基づいて行われることが多い。しかし、前述のようにシステムが大規模化・複雑化していく中で、経験式を元に設計/運用方法を最適化していくことは困難なため、システムのモデル化とシミュレーションによる最適化に関する研究開発が行われている。

それらの多くは比較的供給露点が高めの、一般空調用途を対象とするものである。これらの露点域にてデシカントロータ内で起こる吸着・脱着現象を、空気層及び吸着材層間の熱・物質移動解析問題としてモデル化し、その妥当性を検証した報告例は多い^{17-19), 37-48)}。計算機の能力向上も伴って、より実現象に近い詳細な数学モデルが提案されている。Geら⁴⁹⁾はそれまで提案されてきた数学モデルを体系立てて分類し、それぞれの特徴について解説している。論文内では既存の解析モデルを、GSR (Gas-side resistance) モデルと GSSR (Gas and solid-side resistance) モデルの2つに大別している。GSR モデ

ルでは吸着材層を非常に薄いものとして、厚み（半径）方向の分布を考慮しない。集中定数法を用いて、吸着材内の平均吸着（含水）量を決定し、空気側の湿度の差を駆動力として、適切な熱・物質移動係数を定義することで、これらの移動特性を評価する。一方、GSSRモデルは吸着層内の物質移動を細孔内の拡散と見なし、適切な等価拡散係数（一般的に実験測定から求める）と拡散距離を選定することで解析を行う。また、一般的に吸着材層内の熱・水分拡散速度より、空気側の拡散速度のほうが速いため、どちらのモデルでも空気層内の厚み方向の分布は考慮されず、集中定数法で定義される場合がほとんどである。双方のモデルのイメージ図を図 1.22 に示す。

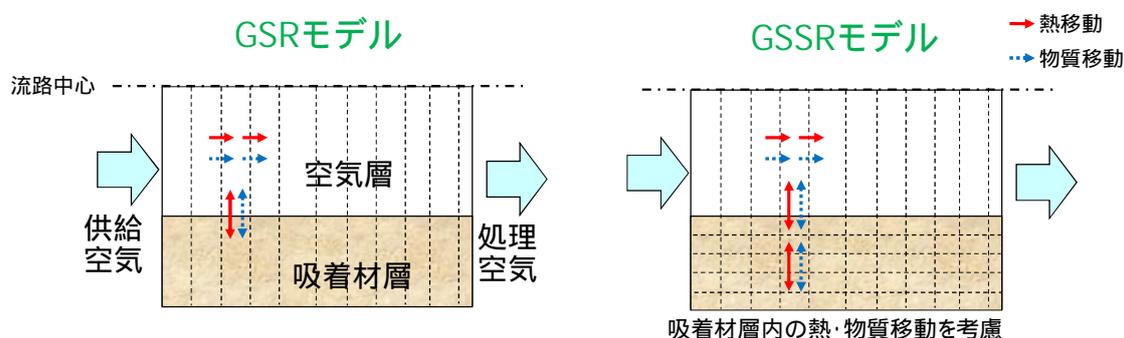


図 1.22 熱・物質移動モデルのイメージ図

Pesaran ら^{50,51)}は GSR モデルと GSSR モデルを用いてシリカゲル充填槽の吸脱着特性の理論解析を行った。適切な等価拡散係数と物質移動係数を選定することで、どちらも物理現象を再現することができたが、GSSR モデルは GSR モデルより若干計算精度が良いと結論付けている。GSSR モデルは GSR モデルより汎用性が高く、吸着ロータの最適化設計、あるいは様々な吸脱着現象の解明に役に立つと期待されている。しかし、計算負荷が高いことや、表面拡散支配領域において等価拡散係数が材料・製法・寸法などに依存することから、汎用性のある解析手法として確立されていない。一方、GSR モデルの汎用性を高めるため、物質移動係数を吸着材層内物質拡散の影響を考慮するよう、理論に基づいて関数化する手法が検討されている^{17,47)}。

一方、産業用の低露点除湿機的设计・性能検証に、数値計算を用いた事例はほとんど見られない。理由として、産業用除湿機の供給空気露点は、一般空調用途と比較して著しく低い、このような露点範囲で、一般空調用途で用いられる計算モデルが適用可能であるか、基礎的検討が行われていないことが挙げられる。また、低露点空気の場合、ロータ周りで生じる空隙からの空気リークが除湿性能に与える影響が相対的に大きく、実機の工作精度抜きに除湿性能を議論することが難しいことも一因である。しかし、近年デシカントロータ周りのシール構造の改善や装置内の静圧管理によって、これら空気リークが除湿性能に大きな影響を与えない工夫がなされてきている。

1.4 本研究の目的 と 論文の概要

リチウムイオン電池の普及が社会に与える効果は大きいですが、同技術が大型蓄電池の分野でさらに普及していくためには、製造コストの削減が不可避の課題である。また、リチウムイオン電池製造過程では品質保持のため製造環境の絶対湿度を、通常の居室の $1/100 \sim 1/10000$ というはるかに低いレベルに保つ必要があるが、これには低露点空気を大量に低コストで製造可能な技術が必要である。これを達成する手法として、デシカントロータ型除湿機が開発され、その有用性ゆえに当該分野にて広く普及している。

開発初期は、システムの主要要素であるデシカントロータの吸脱着性能の向上、及び耐久性の改善などが主題であったが、技術開発が進みロータ製作技術が成熟してきた現在、開発の主眼はさらなる低コスト化のための、デシカントロータの設計/運用手法の改善・最適化へと移ってきている。一例としてロータ吸脱着時に生じる廃熱をうまく利用できるよう、ロータ周りの空気フローを工夫したシステムが考案されている。また、これまで積極的な検討が行われなかった冬季部分負荷運転時の制御手法についても、近年様々な手法が提案されている。これら運用方法の改善に関する検討が進む一方で、ロータ形状及びロータ周りの空気フローを最適化する手法については、十分な研究開発が行われているとは言えない。この原因にはデシカント除湿方式は、設計・運用のパラメータが非常に多い上、ロータ形状や製法、吸湿剤の種類などがメーカー各社で一本化されていないため、定式化や線図による整理が困難であることが挙げられる。

そこで、一般空調用途のデシカントロータについては、吸着材と空気間で起こる吸脱着現象をモデル化したシミュレーション手法が開発されており、これを使用した最適化計算が検討されている。モデル化手法について簡易的な手法からより詳細なものまで数多く提案されており、報告例も多い。一方でこれらの技術を、より汎用的にデシカントロータ方式が採用される低露点製造条件まで拡張しようという動きは、ほとんど見られない。

このような現状を鑑み本研究は、「低露点空気製造条件においてデシカントロータ内の熱物質移動現象を適切に表現するシミュレーションモデルの開発とその応用利用」をその研究目的と定めた。

まず第二章にて、吸着材ハニカムブロックを用いた簡易通風実験と、その実験結果との比較によるシミュレーションモデルの妥当性検証について示した。シミュレーションモデルのコンセプトを述べ、それに基づく支配方程式や境界条件、および物性関数などを提示した。なお、ここで計算対象とする空気水分濃度は一般空調用途とはオーダーが異なるので、従来のモデル化で使用する仮定が妥当でない場合が予想された。そこで、特にハニカム流路内半径方向の温度・湿度勾配を考慮するモデルと、考慮しないモデルの双方で計算を行い結果比較することで、従来モデルの妥当性について検証した。

第三章にて、実際のデシカントロータ型除湿機を低露点製造条件で運転した際の除湿・再生挙動を、正確に測定した結果を示す。同時にその特性を一般空調用途の検討で培われた理論に当てはめて解析し、一般空調用途での運用時と特性に目立った違いがあるか、検証した。また、シミュレーションで必要となる物性値の測定についても、本章で示す。

第四章では、まず前章で得られた実験結果とシミュレーション結果が整合するよう、計算モデルの一部を修正していく過程を示す。実験結果とシミュレーション結果にかい離がある場合、その原因について考察し、モデル修正を行った。また、実験結果と整合する結果を得るシミュレーションモデルを得た後、計算負荷低減と支配要因の特定のために、計算モデルを一部簡易化したケースについて検討を行い、より使い勝手の良いシミュレーション手法を模索した。さらに計算精度が確認されたシミュレーションソフトを用いて、冬季の部分負荷制御手法について検討を行った結果を示す。制御時に操作する有効なパラメータを示すとともに、それらを行うことによる省エネルギー効果を、年間ランニングを試算して示す。

第五章では、本研究を通じて得られた成果についてまとめる。さらに本研究における今後の展望について述べた。

(参考文献)

- 1) 西村浩一：日本空気清浄学会会報，**49** (6) ，32 (2012) .
- 2) 日本エコノミックセンター「一次電池・二次電池業界の実態と将来展望」(2013) .
- 3) 経済産業省「蓄電池戦略」
<http://www.cmaj.jp/news/view/54>
- 4) 株式会社日本政策投資銀行「蓄電池産業の現状と発展に向けた考察」(2013) .
- 5) 菅原秀一：クリーンテクノロジー **24** (2) 日本工業出版 (2014) .
- 6) マーガレット・インゲルス「空気調和の父 ウィリス・ハヴィランド・キヤリア」東洋キヤリア工業株式会社 (1957) .
- 7) 飛原英治，柳原隆司，松岡文雄，桐野周平編「ヒートポンプがわかる本」日本冷凍空調学会 (2005) .
- 8) 鈴木謙一郎，大矢信男「空調技術者のための除湿の実用設計」共立出版株式会社 (1980) .
- 9) 竹内雍監修「最新 吸着技術便覧 プロセス・材料・設計 」NTS (1999) .
- 10) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター低温排熱機器利用研究会「改訂版 デシカント空調システム」日本工業出版 (2013) .
- 11) 株式会社 西部技研ホームページ
http://www.seibu-giken.co.jp/desiccant/dry_save/base/index.html
- 12) ムンターズ株式会社ホームページ
<http://www.munters.co.jp/ja/ja/>
- 13) 特願平 4 - 247212 高砂熱学工業株式会社
- 14) 特開平 4 - 094734 株式会社西部技研
- 15) 村松裕司「産業空調用の高性能除湿ローターハニクル-HY-SG」ニチアス技術時報 **325** (3) (2001) .
- 16) A.Endo , T.Yamamoto , Y.Inagi , K.Iwakabe and T.Ohmori , The Journal of Physical Chemical C , **112** , 9034 (2008) .
- 17) 辻口拓也，児玉昭雄：日本冷凍空調学会論文集，**29** (1) ，110 (2012) .
- 18) ASHRAE「2005 ASHRAE Handbook - Fundamentals. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers」GA (2005) .
- 19) 山口誠一，斎藤潔：日本冷凍空調学会論文集，**29** (1) ，199 (2012) .
- 20) 綾目久雄，木村崇，神戸正純，児玉昭雄：日本冷凍空調学会論文集，**29** (1) ，223 (2012) .
- 21) 三菱樹脂株式会社ホームページ
https://www.mpi.co.jp/products/building_equipment/be005.html
- 22) 日高秀人，垣内博行：空気調和衛生工学会論文集，**82** (8) ，19 (2008) .
- 23) 稲葉英男，木田貴久，堀部明彦，亀田澄広，岡本民雄，徐貞均：日本機械学会論文

- 集(B 編), **67**, 660 (2001) .
- 24) 日本エクスラン工業(株)ホームページ
<http://www.exlan.co.jp/products/desiccantrotor/>
 - 25) 遠藤明：2009 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集，pp.503-506 (2009) .
 - 26) 南部 宏暢，柳正明，藤井亘，笠間勇輝，北畑幸一：2010 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集，pp.169-172 (2010) .
 - 27) 鈴木正哉，前田雅喜：日本冷凍空調学会論文集，**29** (1)，89 (2012) .
 - 28) 特許第 3944233 号 (株)アースクリーン東北
 - 29) 北島大基，金偉力，岡野浩：2011 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集，pp.155-156 (2011) .
 - 30) 金偉力，坂井浅麻美，岡野浩志：日本冷凍空調学会論文集，**29** (1)，81 (2011) .
 - 31) 西村浩一，岡本典明：化学工学会論文集 **26** (3)，332 (2000) .
 - 32) 頭島康博，杉浦匠，花岡秀夫，福井伊津志：日立プラントテクノロジー技報 No.1 (2007) .
 - 33) 菅田大助，海老根猛：平成 24 年度空気調和・衛生工学会大会論文集，pp.2917-2920，(2012) .
 - 34) 秋山貴洋，河岡将行，川上健志，稲葉仁：第 30 回 JACA 年次大会論文集，pp.29-32 (2013) .
 - 35) A.Kodama ,M.Kumita ,H.Asano and T.Asada: Journal of Chemical Engineering of Japan , **42** (12)，930 (2009) .
 - 36) 山口誠一，斎藤潔，伊藤卓，大曲康仁：第 47 回空気調和・冷凍連合講演会論文集，pp.159-162 (2013) .
 - 37) Y.J.Dai, R.Z.Wang, and L.Z. Zhang : International Journal of Thermal Science,**40**, 400 (2001) .
 - 38) X.J Zhang, Y.J. Dai and R.Z. Wang : Applied Thermal Engineering,**23** (8),989(2003) .
 - 39) L.A.Sphair and W.M.Worek : International Journal Heat and Mass Transfer, **47**,3415 (2004) .
 - 40) 辻口拓也，児玉昭雄：日本冷凍空調学会論文集，**22** (4)，417 (2005) .
 - 41) 辻口拓也，児玉昭雄：日本冷凍空調学会論文集，**23** (4)，467 (2006) .
 - 42) 辻口拓也，児玉昭雄：日本冷凍空調学会論文集，**24** (3)，47 (2007) .
 - 43) 濱本芳徳，森英夫，神戸正純，三浦邦夫，渡邊裕，石沢俊彦，高塚威：日本冷凍空調学会論文集，**24** (4)，473 (2007) .
 - 44) 宮崎隆彦，秋澤淳，進藤伸二，神戸正純，高塚威，濱本芳徳，森英夫：日本冷凍空調学会論文集，**26** (4)，521 (2009) .
 - 45) 中林沙耶，長野克則，中村真人，外川純也，黒川真美：日本冷凍空調学会論文集，**26** (4)，551 (2009) .
 - 46) S.D. Antoneills, C.M.Joppolo and L.Moolinaroli : Energy and Buildings, **42**, 1386 (2010) .

- 47) 大坂侑吾, 辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 210 (2012).
- 48) 中川直紀, 古谷野起弘, 党 超鋺, 飛原 英治: 日本冷凍空調学会論文集, **31**(1), 77 (2014).
- 49) T.S. Ge, Y. Li, R.Z. Wang and Y.J Dai: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **12** (6),1485 (2008).
- 50) A. A. Pesaran and A. F. Mills, International Journal of Heat and Mass Transfer, **30**, 1037 (1987).
- 51) A. A. Pesaran and A. F. Mills, International Journal of Heat and Mass Transfer, **30**, 1051 (1987).
- 52) 特願 2008 - 293316 新日本空調(株), (株)アースクリーン東北

第二章 吸着材ブロックを用いた基礎検証

2.1 緒言

低露点空気製造用除湿機は、用途の特殊性から信頼度が重視されるため、実機による性能検証が主である¹⁻⁴⁾。しかし、近年の省エネルギー志向の高まりから、デシカント空調に関しても、ロータの機械的構造を含めたシステムの最適設計を行う要望が生じている⁴⁻⁶⁾。冷却減湿方式における冷却コイル設計と比較して、デシカント除湿方式における除湿ロータ設計はパラメータとなる要素が多く、一般的な計算式や線図による選定が困難である。そのため一般空調用途のデシカントロータ周りの設計・性能検証に、数値計算を用いる検討が行われている⁷⁻¹²⁾。

一方、低露点空気製造用除湿機の設計・性能検証に、数値計算を用いた事例は見られない。理由として、供給空気(ドライエア)の露点は一般空調用途と比較して低くなるが、このような露点範囲で、一般空調用途で用いられる計算モデルが適用可能であるか、基礎的検討が行われていないことが挙げられる。一般空調用途では、デシカントロータを用いた除湿は、除湿対象のロータ入口空気を概ね 3/4 ~ 1/4 程度の水分濃度まで減湿させるものである。これに対し、産業用低露点空気製造用途では、デシカントロータを用いた除湿は、ロータ入口空気を概ね 1/10 ~ 1/100000 程度の水分濃度まで減湿させるもので、原理としては同じである一方、取り扱う水分濃度のオーダーが全く異なる。また、低露点空気の場合、ロータ周りで生じる空隙からの空気リークが除湿性能に与える影響が相対的に大きく、実機の工作精度抜きに除湿性能を議論することが難しいことも一因である。しかし、近年デシカントロータ周りのシール構造の改善や装置内の静圧管理によって、これら空気リークが除湿性能に大きな影響を与えない工夫がなされてきている¹³⁾。

本研究の目的は、デシカントロータを低露点空気製造条件にて運転した際の、除湿性能を予測するシミュレーション手法の開発とその応用利用である。前述の一般空調用途の除湿挙動シミュレーションには、空気層と吸着材層との間の熱・物質移動を非定常計算にて求める解析手法^{6-12),14-16)}が使用される。基本的な原理は両用途とも同様のため、この熱・物質移動解析手法を倣うことにした。

除湿対象空気と乾燥した吸着材が接した時、一瞬にしてその乾燥空気が平衡状態に至るまで吸湿が起こるということはなく、その熱・物質移動が平衡に達するまでには幾らかの時間を要する。この原因には第一に、空気流れ中の吸着材表面付近で境界層と呼ばれる温度・水分濃度分布が形成されることに起因する抵抗(境膜抵抗)が生じることが挙げられる。それに加え、吸着材層厚み方向へ水分が拡散していく過程、あるいは吸着材層内に散在する微小な吸着剤粒子の細孔内に水分が浸透していくまでの過程にも物理的な時間を要するので、こうした吸着材層内の水分濃度分布も、吸脱着に要する時間

に影響を与えうる。計算精度の上では、これらの抵抗全てを考慮したシミュレーションモデルを構築するのが望ましいが、あまり設定項目が多いと計算過程が煩雑となり、また計算負荷も増大するので、各抵抗をそれぞれ省略・簡略化した複数のモデルが提案されるに至っている。

Pesaran ら^{14),15)}はシリカゲル粒子充填槽での吸脱着特性について、この移動抵抗を境界膜部分に限定した GSR モデル (Gas-side resistance) と、それに加えて吸着材層内の水分拡散抵抗を考慮した GSSR (Gas and solid-side resistance) モデルの双方で解析を行い、モデルの妥当性・計算精度について検証した。対象とするシリカゲル粒子の粒径は、0.6 ~ 5mm とした。結果、適切な等価拡散係数と物質移動係数を選定することで、どちらも物理現象を再現することができたが、GSSR モデルは GSR モデルより若干計算精度が良いと結論付けている。しかし、両者に明確な計算結果の違いが生じたのは比較的粒径が大きいときのみで、1mm 以下の粒径では両者の計算結果に有意義な差は認められなかった。GSSR は原理上汎用性が高い一方で、吸着材層内についても計算格子分割を行わなければならない分、計算負荷が大きい。また、デシカントロータの場合、ハニカムを構成する吸着材層の実際の厚みは 0.2mm 以下が標準的なため、拡散距離が短い分、粒子充填槽解析時より吸着剤層内の水分拡散抵抗は小さい。これらの事情によりデシカントロータを用いた吸脱着特性解析にて一般的に使用されるのは、GSR モデルである⁶⁻¹²⁾。

また、空気層内の温湿度分布の扱いについても、異なるシミュレーションモデルが存在する¹⁶⁾。例えば冷却減湿コイルはコイル表面に空気中水分を結露させて除湿を行うが、コイルのフィンピッチが大きくなるとフィン間中心付近を通過する空気が十分に除湿されず通過するため、除湿性能が低下することが知られている¹⁷⁾。同様にデシカントロータにおけるハニカムコルゲートサイズも、大きすぎると流路内の湿度は十分な拡散が行われず分布が生じ、除湿性能が低下すると予想される。実際、低露点空気製造用のデシカントロータを設計する際の注意点として、ハニカム構造体は比表面積が $2800\text{m}^2/\text{m}^3$ 以上となる、コルゲート形状が密なものを選定することが挙げられている⁴⁾。しかし、従来の GSR モデルでは、吸着材層内の拡散速度に比べて空気層の拡散速度は速いため、空気層内半径方向の物理量分布を考慮せず集中定数法を用いて決定した温湿度をもとに、空気層・吸着材間の移動量を計算する。したがってコルゲートサイズが大きい場合や、通過風速が大きい場合など、空気層内に比較的分布がしやすい条件では、正しく現象を再現できない可能性がある。

そこで本章では、従来の空気層半径方向の物理量分布を考慮しない GSR モデル (本章では以降、これを従来モデルと呼ぶ) と、それに空気層流路内半径方向の温度・湿度勾配を考慮するよう、修正を加えたモデル (本章では以降、これを修正モデルと呼ぶ)¹⁸⁾ の双方で計算を行い、シミュレーションモデルの妥当性を検証した。

加えて、計算精度について議論するため、低露点空気製造条件にて吸着材ブロックへ

の通風実験を行い、計算結果との比較を行った。なお、低露点空気製造用除湿機に使用ロータの多くは、無機系の吸着剤であるシリカゲルやゼオライトをその吸湿剤として用いることが多いが、近年一般空調用途に開発された高性能な吸湿剤を産業用途にも使用した製品が注目を集めている¹⁹⁾。そこで、本章では実験と計算の対象とする吸湿剤は、低温再生可能な吸湿剤である高分子吸着剤^{20), 21)}とした。また、同ロータを構成するハニカムエレメントに関して、シミュレーションに必要な低露点環境における吸着等温線を実測した。本章では、これらの検討結果を示す。

2.2 シミュレーション

現在, デシカント除湿挙動のシミュレーションの方法として用いられる熱物質移動解析⁶⁻¹²⁾では, デシカントロータを同一のセル形状を持つハニカム構造体であると考え, それらのうちのある1セルに着目して, セル内での熱物質移動を計算の対象とする. セル内を空気層と吸着材層に分けて考え, それぞれについて空気流れ方向に格子分割を行う. 通常, デシカントロータの空気流路はコルゲート状であるが, 簡略化のため, 空気層は実際のセル形状と水力等価直径が同じとなる平行平板間流路を仮定した. 平行平板間流路の水力等価直径 d_h から空気層半厚さ a_{Air} を設定する. そして吸着材層の半厚さ a_{Obj} は, 吸着材と通風空気の体積比が計算対象と一致するように, 通風実験で用いる吸着材ブロックの空隙率 $(=a_{Air}/(a_{Air}+a_{Obj}))$ と等しくなるよう設定した. 図 2.1 に, 計算対象のモデル化の流れに関する模式図を示す.

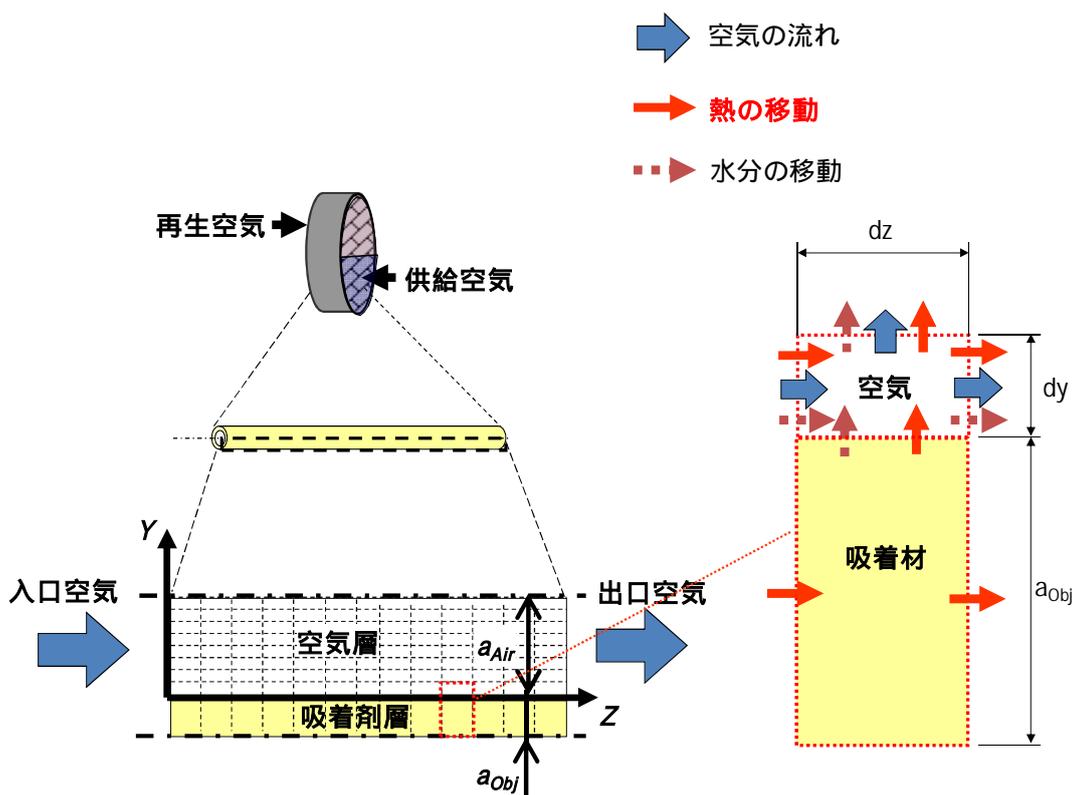


図 2.1 計算対象のモデル化の流れ

計算の要素は, 空気層内の熱物質移動計算部分と吸着材層内の熱物質移動計算部分の2つに大別できる. これら2つの要素は実現象において同時に起こり, お互いに影響し合う. したがって本計算では, これら2つの要素を非定常現象として扱い, 微小時間ステップごとに交互に計算することで, 現象を進行させていく方式とする.

2.2.1 空気層二次元の GSR モデル

空気層内の流路半径方向の物理量移動を考慮する修正モデルについて示す。作動流体である空気を非圧縮粘性流体であると仮定する。空気層内の支配方程式は、流れ（質量・運動量）の保存式(2.1) – (2.3)，エネルギー式(2.4)，水分移動に関する保存式(2.5)の5つである。空気流れ方向の対流拡散を解くため、流れ方向（Z軸方向）に計算格子の分割を行う。さらに空気層において流れと垂直な方向（Y軸方向）の熱物質移動についても考慮するため、Y軸方向での格子分割も行った。微小時間ステップごとに、分割された計算格子内全てで上記の支配方程式を解くことで、局所の状態量の経時変化を得る。なお、式(2.4) – (2.5)中の左辺最終項は、空気層と吸着材層との間の熱・物質伝達を表しており、吸着材との界面においてのみ有効な項である。管内流れであるため、この項における流体温度と物質量（絶対湿度）には、空気層局所断面の混合平均値をとる

22)

質量保存の式

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

Z軸方向の運動量保存式

$$\rho_{Air} \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_{Air} u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho_{Air} v \frac{\partial u}{\partial y} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.2)$$

Y軸方向の運動量保存式

$$\rho_{Air} \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_{Air} u \frac{\partial v}{\partial z} + \rho_{Air} v \frac{\partial v}{\partial y} - \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \quad (2.3)$$

エネルギー保存式

$$\begin{aligned} \rho_{Air} c_{Air} \frac{\partial T_{Air}}{\partial t} + \rho_{Air} c_{Air} u \frac{\partial T_{Air}}{\partial z} + \rho_{Air} c_{Air} v \frac{\partial T_{Air}}{\partial y} \\ - \lambda \frac{\partial^2 T_{Air}}{\partial z^2} - \lambda \frac{\partial^2 T_{Air}}{\partial y^2} - \frac{h}{a_{obj}} (T_m - T_{obj}) = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

絶対湿度の保存式

$$\rho_{Air} \frac{\partial x_{Air}}{\partial t} + \rho_{Air} u \frac{\partial x_{Air}}{\partial z} + \rho_{Air} v \frac{\partial x_{Air}}{\partial y}$$

$$-D_{Air} \frac{\partial^2 x_{Air}}{\partial z^2} - D_{Air} \frac{\partial^2 x_{Air}}{\partial y^2} - \rho_{Obj} \frac{a_{Obj}}{a_{Air}} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

吸着剤層内の支配方程式は、吸脱着速度式(2.6)と吸着剤層内のエネルギー式(2.7)の2つである。まず式(2.5)、及び後述する式(2.7)を解くことで得られる、吸着材との境界に位置する計算格子の空気絶対湿度及び吸着材温度から、局所の平衡吸着量を計算する。平衡吸着量の導出は後述の実験より求める回帰式を使用する。次に平衡吸着量及び現在の吸着量から、吸着する速度を計算する。吸着材と空気間の物質移動速度は、吸着量に関する線形推進力近似²³⁾に従うものとする。また、 K は物質伝達係数であり、この係数の設定方法については後述する。なお、本章の緒言で示した通り、対象とする八ニカムエレメントの厚みは厚み方向に有意義な物理量分布が無いほど十分薄いと考え、吸着材層内の Y 軸方向の吸着量分布、水分移動は考慮しない式としている。同様の理由で、吸着材層内の Y 軸方向の熱移動も考慮しないモデルとしている。

吸脱着速度式

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = K(\bar{q}^* - \bar{q}) \quad (2.6)$$

式(2.7)は吸着材層内の熱収支式である。吸着材層の熱移動は、空気層からの熱伝達及び吸着水分による発熱に加え、 Z 軸方向の熱伝導を考慮するよう、熱伝導に関する項を加えた。また、実際の吸着材層はその吸着量によって熱容量が変わるので、これを表現するため式(2.7)第一項の比熱が、吸着量に比例して増加する式とした。

吸着材層に関するエネルギー式

$$\rho_{Obj} (c_{Obj} + c_w \bar{q}) \frac{\partial T_{Obj}}{\partial t} - \lambda_{Obj} \frac{\partial^2 T_{Obj}}{\partial z^2} - \frac{h}{a_{Obj}} (T_m - T_{Obj}) - \rho_{Obj} Q_k \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

上記の基礎式を有限体積法で離散化し、流体解析はSIMPLE解法で計算を行った。対流項の差分にはハイブリット差分法を使用した²⁴⁾。空気層の Z 軸、 Y 軸方向の格子分割数はそれぞれ40、10とした。非正常計算の時間ステップ幅は0.00002sとした。

2.2.2 空気層一次元のGSRモデル

計算モデル修正の効果を検証するため、従来の計算モデルである空気層を一次元流れ

として扱う GSR モデル (従来モデル) の計算も行った . 従来計算モデルでは , 空気層を非粘性流体として扱うため , 式(2.1) – (2.3)は , 計算を省略できる . また , 式(2.4) – (2.5)の内 , z 軸方向の移動に関する項を省略できるので , 空気層内の支配方程式は式(2.8) 及び式(2.9)となる .

エネルギー保存式

$$\rho_{Air} c_{Air} \frac{\partial T_{Air}}{\partial t} + \rho_{Air} c_{Air} u \frac{\partial T_{Air}}{\partial z} - \lambda \frac{\partial^2 T_{Air}}{\partial z^2} - \frac{h}{a_{obj}} (T_m - T_{obj}) = 0 \quad (2.8)$$

絶対湿度の保存式

$$\rho_{Air} \frac{\partial x_{Air}}{\partial t} + \rho_{Air} u \frac{\partial x_{Air}}{\partial z} - D_{Air} \frac{\partial^2 x_{Air}}{\partial z^2} - \rho_{obj} \frac{a_{obj}}{a_{Air}} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

ここで , 空気層内には流路厚み方向 (半径方向) 温度湿度分布が無いので , $T_m = T_{Air}$ 及び $x_m = x_{Air}$ の関係が成り立つ . 吸着剤層内の支配方程式は , 空気層二次元モデル (修正モデル) と同様に , 吸脱着速度式(2.6)と吸着剤層内のエネルギー式(2.7)の 2 つである . これらの式(2.6)-(2.9)の支配方程式を有限体積法で離散化し , z 軸方向の格子分割数を 40 として計算を行った .

2.2.3 計算条件

本研究における計算目的は , 二つに大別できる . 一つは通風実験を行った条件で修正モデルにて数値計算を行い , 実験結果と比較することで , 修正モデルの計算精度を検証することである . もう一つは , 同一の計算条件にて従来モデルと修正モデル双方で計算を行い , 結果比較することで , モデル修正の効果を検証することである . それぞれの目的について行った計算条件を , 以下に示す .

(a) 実験との結果比較に関する計算条件

低露点空気製造を行うデシカント除湿サイクルは一般的に , サイクル中で起こる温度変化が大きい . 計算精度を高めるため , 空気の熱物性値の変化も考慮すべきである . 特にサイクル中で値が大きく変化する物性値について , それぞれ式(2.10) – (2.12)の補正式を作成し²⁵⁾ , 各ステップにて物性値の補正を加えながら計算を行った .

空気 - 水蒸気間の水蒸気拡散係数に関する補正式

$$D_{Air} = \frac{0.0832(T_m + 273.15)^{1.8}}{3600} \quad (2.10)$$

空気の熱伝導率に関する補正式

$$\lambda_{Air} = \frac{0.0723(T_m + 273.15) + 4.5146}{1000} \quad (2.11)$$

空気の粘性率に関する補正式

$$\mu = \frac{0.0468(T_m + 273.15) + 4.4962}{1000000} \quad (2.12)$$

定数値として扱う物性値 ,及び吸着材ブロックの形状に関する計算時の入力パラメータ入力値を表 2.1 に示す .

表 2.1 試験用吸着材ハニカムブロックに関する特性値

担持吸湿剤種類	高分子吸着剤	
ハニカム材の熱伝導率 λ_{Obj}	0.063 W/(m·)	
ハニカム材の密度 ρ_{Obj}	430 kg/m ³	
ハニカム材の比熱 c_{Obj}	650 J/(kg·K)	
吸脱着発熱量 Q_h	2500 kJ/kg	
空隙率 $a_{Air}/(a_{Air}+a_{Obj})$	0.76	
ハニカムの流れ方向厚さ L	200 mm	
	吸着過程	再生過程
熱伝達係数 h	75 W/(m ² ·)	75 W/(m ² ·)
物質移動係数 K	$1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

吸着材層と空気層間の熱伝達率 h は、対流熱伝達に関する無次元数である Nu 数が 4.0 となるよう決定した¹⁷⁾。一方、物質伝達率は除湿・再生性能に大きな影響を与えるパラメータであるが、吸湿剤の種類やロータ加工時の含浸方法、エレメント材の厚みなどによって変化するので、それらの影響を含めた総括値として設定されるべき値である²³⁾。また、吸着材の置かれた温度や通風面風速などによって値が変化するため、それらの関数として扱うべきであることが、多くの研究者によって報告されている^{7-9,12)}。しかし、吸湿剤の特性やロータ化の方法などがユーザーに公開されない形で逐次改変される現状において、これらの関数系を正確に求めることは困難であると考えられる。これらの実用上の理由で、代表的運転状態においてシミュレーション結果と実験結果が極力一致するよう、フィッティング係数として定数値で設定される場合がほとんどである^{11),14-15)}。

そこで本研究では、表 2.2 に示される通風条件を標準運転とし、計算で求めた 10 分後までの時間平均絶対湿度が、実験値との誤差 1% 以内となるように物質伝達係数を定数値として決定した。以降、標準運転条件以外で計算を行う場合においても、物質伝達率は同様の値を用いた。また、計算モデルの精度検証を目的としているため各運転時に初期状態がそろそろよう、通風時間を十分長く取り、完全破過 (Step 1)・完全再生 (Step 2) を繰り返す運転とした。

表 2.2 実験との結果比較時の計算条件

	吸着過程	再生過程
入口空気温度 T_1	図2.2に示す	
入口空気露点 DP_1	5 DP	-25 DP
吸着材エレメントの面風速 U_1	0.5 m/s	1.0 m/s
水力等価直径 $4 \times a_{Air}$	1.9 mm	

なお、後述の吸着材ブロックへの通風実験においては、運転切替え用のダンパーから吸着材ブロックが設置されたテストセクションまでの流路に、熱容量が存在する。この影響により、実験における吸着材ブロックへの流入空気の温度は、運転切替え後に装置自体への供給空気温度が一定 (吸着運転時: 12℃, 脱着運転時: 70℃) になるまで、時間遅れが生じた。図 2.2 に吸着材ブロック直前に設置した熱電対より得られた、入口空気温度時系列を示す。

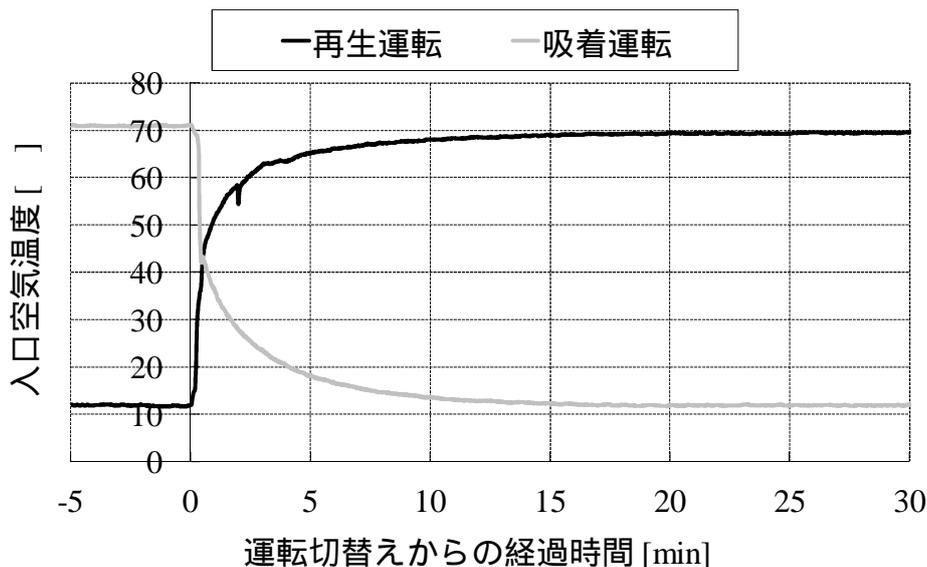


図 2.2 工程切替え後の実際の入口空気温度スイング

本項で示す計算は、実験結果との結果比較を目的としているため、計算における入口空気温度境界条件は、図 2.2 に示す温度時系列を計算ステップ毎に読み込む方法で設定した。また、入口空気露点（絶対湿度）と面風速については、実験において運転切替え後ほとんど時間遅れなく一定値になることが確認されていたため、表 2.2 に示す定数値として境界条件の設定を行い、計算した。

(b) モデル修正の効果を検証のための計算条件

同一の計算条件にて従来モデルと修正モデル双方で計算を行い、結果比較することで、モデル修正の効果を検証した。両モデルの差が顕著となる条件を探すため、数値計算によるパラメータスタディを行った。

計算時に入力値として使用する物性値、及び吸着材ブロックの形状に関するパラメータは、式(2.10) –(2.12)、及び表 2.1 の値とする。通風条件については、表 2.3 の値を使用する。両モデルの差が生じやすいのは、ロータ空気の除湿性能が下がる通過風速が大きいときや、コルゲートサイズが比較的大きいときである。これらの影響を見るため、吸着運転時の面風速、及び空気流路の水力等価直径(ハニカムコルゲートサイズに相当)をパラメータとして変化させた。

なお、前項においては入口空気温度を実データから読み込む方法で設定したが、本項は数値計算のみの検討のため、表 2.3 に示す一定の定数値とした。

表 2.3 数値計算モデルのパラメータスタディ時の計算条件

	除湿運転	再生運転
入口空気温度 T_1	12	70
入口空気露点 DP_1	5 DP	-25 DP
吸着材エレメントの面風速 U_1	0.5 ~ 2.0 m/s	1.0 m/s
水力等価直径 $4 \times a_{Air}$	1.9 ~ 3.8 mm	
吸着材層の厚み a_{Obj}	0.15 ~ 0.3 mm ($a_{Air}/(a_{Air}+a_{Obj}) = 0.76$)	

2.3 平衡吸着量の測定実験

熱物質移動解析⁶⁻¹²⁾を行う上で吸着等温線は、計算精度に関わる最も重要な特性値の一つである。計算サイクル内で起こる吸脱着現象はこれに従って計算されるものなので、このデータは計算サイクル内で生じる温湿度域の全てをカバーしている必要がある。一方、本計算では相対湿度が1%をはるかに下回る極低相対湿度域での吸脱着計算も含まれる。したがって、正しい計算結果を得るためには計算時に入力する吸着等温線データは、これら極低相対湿度域においても吸着材の実性能を再現するデータであることが必須であると考えられる。

しかし、吸着等温線の特性に関して議論されるのは、通常相対湿度1%以上の範囲についてであり、それ以下の範囲について詳しく分析した吸着等温線データの報告は少ない。そこで本項では、通風実験で使用したハニカム材（高分子系吸着材担持品）について、極低相対湿度域を含めた範囲における吸着等温線を、熱重量測定装置(SII社製 TG/DTA6300)にて測定した結果を示す。

測定装置の概略図を図2.3に示す。脱着用の乾燥空気は圧力スイング式のエアードライヤ(IAC社製 QD10-75, 以降 PSA 装置と呼ぶ)からの供給空気を使用した。吸着用の空気は熱重量測定装置用湿度制御ユニット(SII社製)からの高湿度に、必要に応じて PSA 装置供給空気を混合して調湿してから、測定部に流入させた。配管系は配管内表面に吸着する水分量の影響を少なくするため、SUS316L の EP 管を使って構成した。

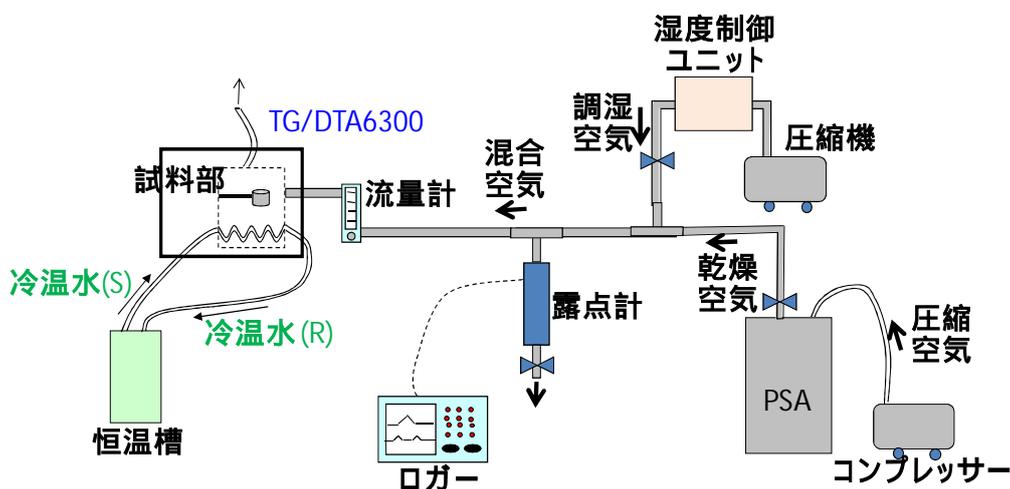


図 2.3 平衡吸着量測定装置概略図

測定装置への供給空気露点は静電容量式の露点計(テクネ計測社製 TK-100)を使用し
て計測した。平衡状態に至った時は、測定部槽内露点 供給空気露点と考え、吸着材雰

囲気の相対湿度は、測定装置付属の乾球温度計測定値及び、平衡状態に至った時の供給露点から計算して求めている。

主な計測条件を表 2.4 に示す。他の吸着材との性能を比較するため、ゼオライト 13X を担持した八ニカム材の測定も行った。

図 2.4 吸着等温線測定条件

吸湿剤種類	高分子吸着剤担持八ニカム ゼオライト13X担持八ニカム
試料重量	4.6 mg (乾燥後)
装置供給風量	0.2 L/min
パージ温度	40
パージ空気供給露点	-72 DP

高分子吸着剤担持八ニカムの平衡吸着量測定の結果を、図 2.4 に示す。

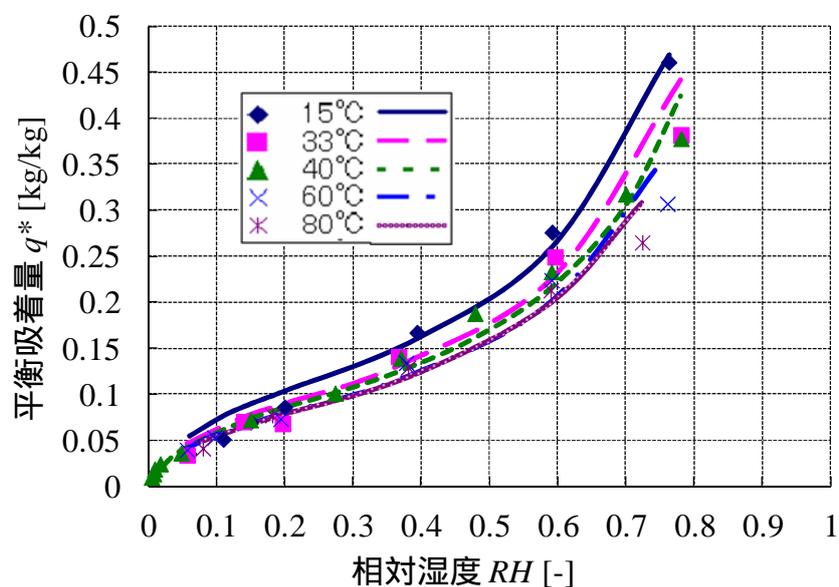


図 2.4 高分子吸着剤担持八ニカムの吸着等温線

図 2.4 は、横軸相対湿度のスケールを 0~100%として、様々な温度帯での吸着等温線を示した結果である。図中のプロットが測定値である。回帰式の種類について検討した結果、相対湿度 0.05~0.8[-]の範囲では、BET 式²⁷⁾に良く従うことがわかった。図中

のプロットが測定値である。また、特に相対湿度 20%以上の湿度域において、温度依存性を示すことが確認された。この材料特性を数値計算に反映するため、平衡吸着量を温度と相対湿度の関数となるよう重回帰分析を行い、BET 式に補正を加えた。求めた回帰式を式(2.13)に示す。この回帰式で描いた曲線を図 2.4 に併記した。

高分子吸着剤担持ロータの吸着等温線の回帰式（吸着平衡式）

$$q^* = f(RH) \times g(T, RH) \quad (\text{ただし, } 0.05 [-] \leq RH \leq 0.8 [-]) \quad (2.13)$$

ここで

$$f(RH) = 1.302 \frac{RH}{(1 - RH)(1 + 12.9RH)}$$

$$g(T, RH) = -0.26T_0^3 + 1.31T_0^2 - 1.47T_0 - 0.85RH^3 + 1.31RH^2 - 0.47RH + 1.38$$

(ただし, $T_0 = T / 100$)

一方、図 2.5 は横軸相対湿度のスケールの最大値を 5%として、より低湿度域での特性について注目した結果である。図中のプロットが測定値である。

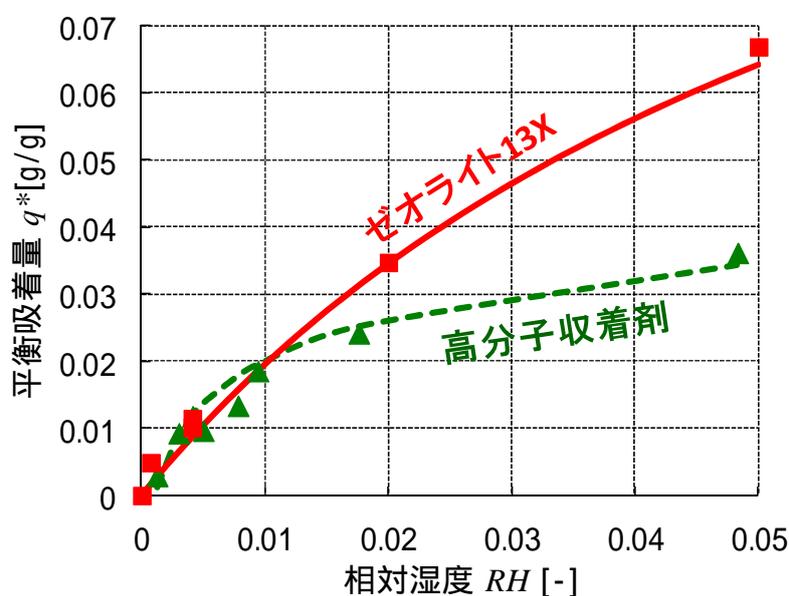


図 2.5 高分子吸着剤及びゼオライト 13X 担持ロータの低湿度域吸着等温線

ここでは設定温度 40 のときの結果のみを表示している。この相対湿度域での吸着等温線の形状は、低露点空気製造の性能を議論する上で極めて重要な領域であるため、

細かく測定を行った。また、吸着剤ごとの特性を議論するため、ゼオライト 13X 担持ハニカムの測定結果についても併記した。

高分子収着剤担持ハニカムの吸着等温線は、相対湿度 0.05[-]以下の低湿度域では上向きに凸の曲線を描くことが分かる。回帰式の種類について検討を行った結果、Langmuir 式²⁷⁾に良く従うことが分かった。求めた回帰式を式(2.14)に示す。この回帰式で描いた曲線を図 2.5 に併記した。

以上の結果を踏まえ、高分子収着剤担持ロータの吸着等温線は、相対湿度 0.05[-]以上では温湿度に関する補正を加えた BET 式を、0.05[-]未満では Langmuir 式を使用して計算した。また、高分子収着剤担持ハニカムとゼオライト 13X 担持ハニカムの平衡吸着量を比較すると、相対湿度 0.01 ~ 0.05[-]の範囲では、ゼオライト 13X 担持ハニカムのほうが大きくなるが、0.001 ~ 0.01[-]の範囲では、両吸着材の平衡吸着量は同程度となる結果が得られた。しかし、高分子収着剤担持ハニカムは他の吸着材と比較して密度が小さく、ゼオライト 13X 担持ハニカムの半分以下である。したがって、同体積（言い換えると同程度の比表面積のハニカムブロック）での吸着容量は、相対湿度 0.001 ~ 0.01[-]の範囲でも高分子収着剤担持ハニカムのほうが小さくなる。

高分子収着剤担持ロータの吸着等温線の回帰式（吸着平衡式）

$$q^* = \frac{2.87 \times RH}{1 + 58.7 \times RH} \quad (\text{ただし, } RH < 0.05 \text{ [-]}) \quad (2.14)$$

2.4 ハニカムブロックでの通風実験

本項では、ハニカムブロックに通風することによる、簡易吸脱着実験の実験装置及び方法について示す。

図 2.6 に実験装置の概略図を示す。試験部は 100mm×100mm×100mm の吸着材ハニカムブロックを内寸法 100mm 角の亜鉛鉄板製ダクト内に収納し、それを 2 つ直列に連結してテストセクションを構成する。テストセクションへの入口空気がハニカムをバイパスし、下流に流れてしまうことを防止するため、ハニカムブロックとダクトの接触面には、コーキング処理を施した。再生用の脱着空気及び、吸着用湿り空気はそれぞれ発生装置を別途設け、ダンパー操作によって運転切替えを行った。テストセクション内へ装置外雰囲気が入り、正しい露点が計測されない事態を防ぐため、試験部への送風は押し込み方式とし、装置内を正圧に保った。

吸着材の前後に熱電対及び湿度測定用のサンプリング配管を設置した。サンプリング配管内を流れてくる空気の露点を、配管下流に設置した露点計で計測し、その位置の計測露点とした。露点の計測には鏡面冷却式露点計(General Eastern 社製 optica 1311-DR)²⁸⁾、及び静電容量式露点計(Vaisala 社製 DMT242)²⁹⁾を用いた。

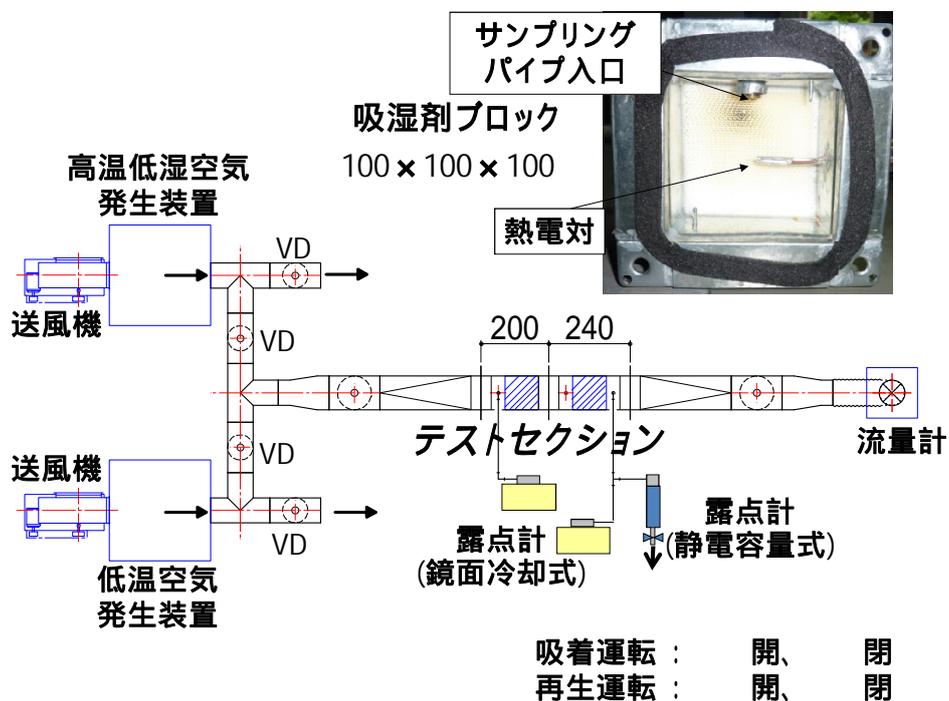


図 2.6 実験装置概略図

ハニカムブロックへは、再生用の高温低湿空気と、吸着除湿用の低温空気を交互に通風する。各通風空気の空気状態などの実験条件を表 2.5 に示す。各通風は運転を切替え

てから，入口空気と出口空気の温湿度がほぼ等しくなり，ハニカムでの吸脱着が完了するまで，十分に時間をとって行った．つまり吸着開始 完全破過（Step 1）と，再生開始 完全再生（Step 2）を繰り返す運転を行った．その時の出口温湿度の変化をロガーで計測し，同条件で計算したシミュレーション結果と比較して，シミュレーション精度を検証する．

表 2.5 ハニカムブロック通風実験の実験条件

吸湿剤種類	高分子収着剤担持ハニカム	
ハニカムのコルゲートサイズ ピッチ×段高さ	3.4mm × 1.7mm (比表面積約2800m ² /m ³)	
	吸着運転	再生運転
入口空気温度 T_1	12	70
入口空気露点 DP_1	5 DP	-25 DP
吸着材エレメントの面風速 U_1	0.5 m/s	1.0 m/s

この実験の結果については，次項にてシミュレーション結果と合わせて示す．

2.5 シミュレーション精度の検証

2.5.1 実験結果と比較検証

標準運転時の出口空気露点の経時変化について、実験結果と数値計算結果の比較を行った。両者とも完全破過状態から再生運転を開始し、再生運転完了後に、完全破過状態になるまで吸着運転を行った。図 2.7 に再生運転時の結果を示す。

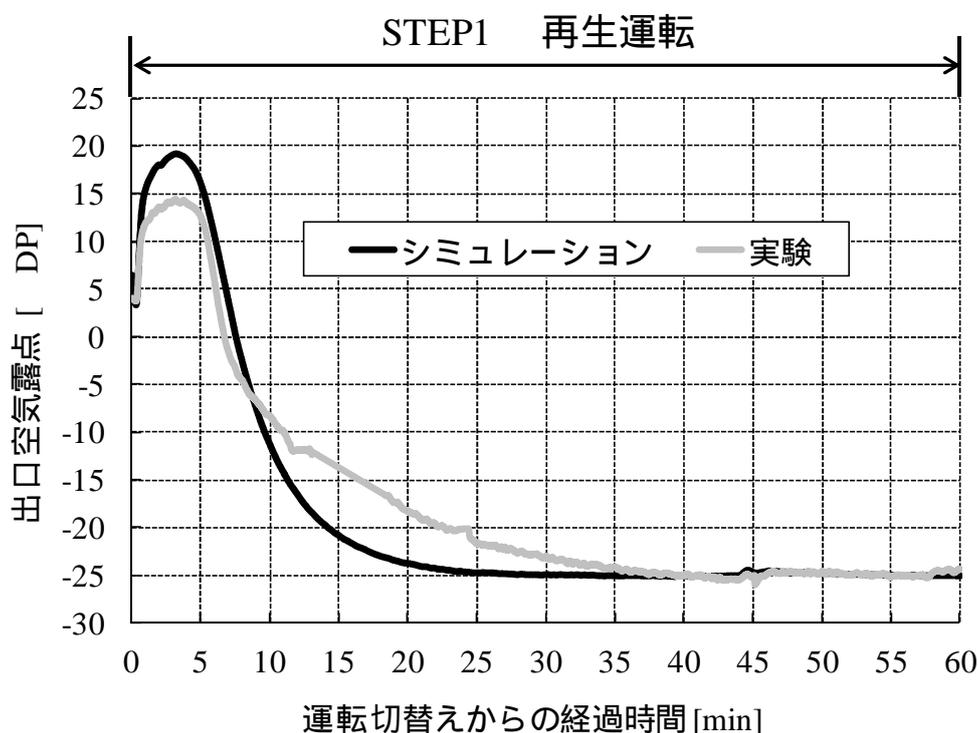


図 2.7 再生運転時における出口空気露点の経時変化の比較

再生運転時の露点変動について比較すると、実験では吸着運転開始から約 3 分後に極大値をとり、その値が約 14.5 DP であったのに対し、計算結果では極大値は約 19 DP であった。また、実験では出口空気露点が入口空気露点と同じ -25 DP となって吸着材再生が終了するまで、通風開始から約 30 分を要するのに対し、計算結果では約 20 分で吸着材再生が終了している。

これらの差異は計算においては完全な断熱系を仮定しているのに対し、実験において試験部ダクトに熱容量が存在していること、加えてテストセクション部での装置自体の熱損失があることが原因であると予想される。図 2.2 に示したように吸着材入口温度すなわち再生温度に経時変化がある。再生開始後、比較的短時間で 60 までに達するが、

所定の 70 に達するには 10 分程度必要となる。このため、再生運転時に露点最大値を示した時間帯の再生温度は 70 よりも低く、70 再生とした数値計算よりも低い露点を示し、また、再生温度が 70 に達する 10 分以降には遅れて水蒸気が脱着するため、数値計算結果よりも緩やかなカーブを描いて再生入口空気露点に漸近することになる。

しかしながら、曲線の描く凹凸の傾向などはよく一致した。再生温度条件を変更した場合においても、ほぼ同様の傾向が確認された。また、実験において再生初期から所定温度の空気を供給できれば、実験値と数値計算結果の差は解消される方向になる。よって、絶対値に関する計算精度には課題を残すものの、再生運転についても提案の計算モデルで、概ね実験結果を再現する計算結果が得られるものと考えられる。

図 2.8 に吸着運転時の結果を示す。

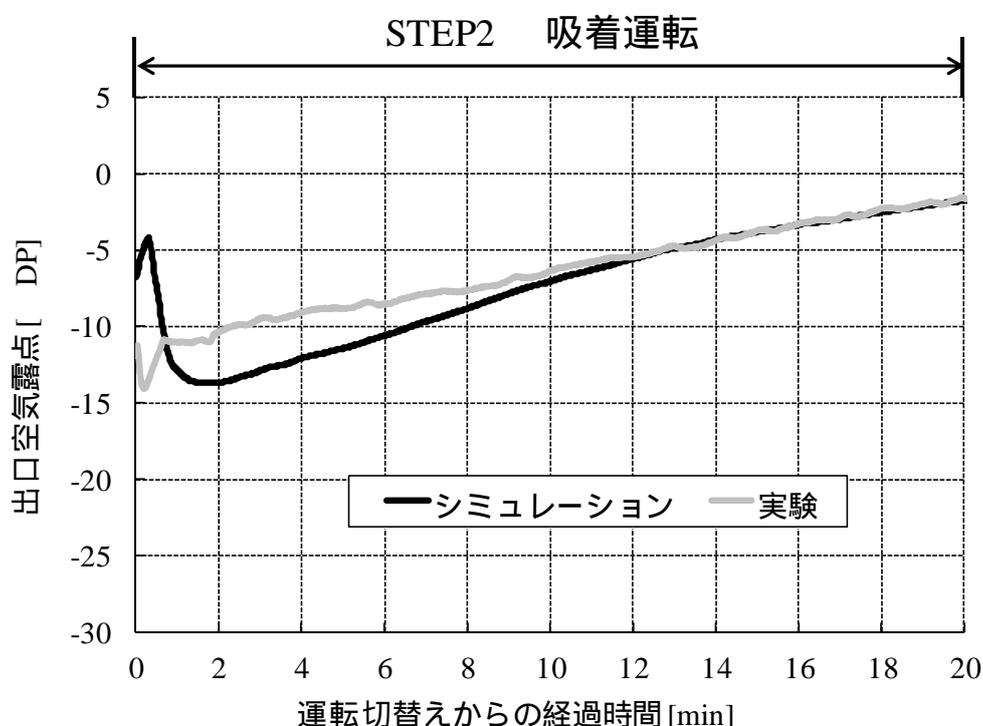


図 2.8 吸着運転時の出口空気露点の経過時間に関する比較

吸着運転時の出口空気の露点は、実験の場合吸着開始と同時に約-14 DP 程度に変化し、その後緩やかに上昇していく結果が得られた。一方、数値計算では吸着開始時の露点は約-5 で、その後約-14 DP まで急激に露点が下がった後、露点が増加していく結果が得られた。物質移動係数をパラメータとして調整を行った結果、通風開始から 10 分後以降の値は、実験と計算結果が良く一致したが、吸着開始から 10 分後までの、露点曲線の描く凹凸の傾向は実験結果と差が見られる。この原因は低相対湿度域での吸着等温線の精度、もしくは物質伝達係数、熱伝達係数の取り扱い、あるいは物質移動に関する線形推進力近似法そのものに問題があるものと予想される。

ロータ型のドライエア製造装置としての使用を考える場合、より低露点の空気のみが得られた切替え開始から5～10分後までの露点変動が重要となる¹⁹⁾。したがって、上記の問題を解決することは、低露点域での数値計算手法を開発する上で必須である。露点変動の傾向に差が出た原因究明に関して、課題を残している。

2.5.2 除湿性能に関するケーススタディ

前項における結果では、吸着運転において八ニカムブロック出口空気の露点下限値が再生空気入口露点より高く、低露点空気を得るための除湿機としては、うまく機能していない。吸着出口空気の除湿限界空気の温湿度は、吸着入口空気と等エンタルピで、再生入口空気と等相対湿度であり、計算すると乾球温度 25.5、露点-45.7 になる。したがって、吸着出口空気露点の下限値は-46 付近まで下がりうるはずであったが、前述の実験・計算結果では下限値は約-15 と理論値を大きく上回った。

この原因として、完全再生状態から吸着運転に切替える際、図 2.2 に示すように吸着材入口空気温度に時間遅れが生じており、吸着運転初期の温度スイング幅が小さくなっていることが考えられる。この影響について議論するため本項では、その他の条件は前述の標準運転と同様として、入口空気温度が吸着運転開始とともに、瞬時に一定値(12)に切替わる(理想的に温度スイングが行われる)ものと仮定してシミュレーションを行った。結果を図 2.9 に示す。

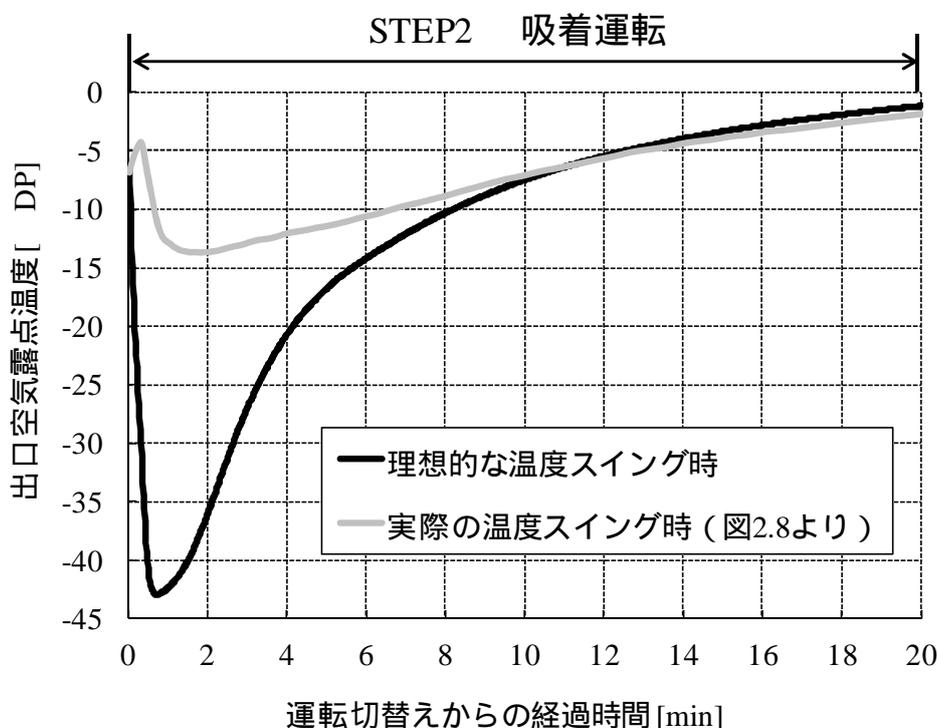


図 2.9 吸着 - 脱着温度スイングの時間遅れが吸着出口空気露点に与える影響

理想的な温度スイングを仮定したシミュレーション結果では、出口空気の露点は約-43 DP まで下がっている。除湿限界の値である約-46 までには届かなかったが、実際の温度スイング特性を基に計算を行った場合と比較して、低露点空気製造装置としての除湿性能が大幅に向上する結果となった。

ただし、理想的な温度スイングが行われた場合でも、露点の下限值を得るのは一瞬で、その後直ちに露点が上昇し始める。また、吸着開始から 10 分後までの露点挙動には両者で大きな違いがあるが、それ以降についてはほぼ同じ曲線で露点が上昇し、吸着破過に近づいていく。リチウムイオン電池製造過程などで一般的に求められる-30 以下の低露点空気を得られるのは、吸着開始から約 2.5 分後以内という、ごく短い期間というシミュレーション結果となった。なお、理想的な温度スイングが行われた場合のシミュレーション結果において、出口空気露点が入口空気露点とほぼ等しい値となるまで、約 60 分を要している。吸着開始から 2.5 分後までと、60 分後までの出口空気露点変化から、その間の出口空気時間平均絶対湿度と、八ニカムブロックによる除湿量を計算した結果を表 2.6 に示す。

表 2.6 理想的な温度スイングにおける除湿量

シミュレーション条件	理想的な温度スイング時	
	2.5分後まで	60分後まで
吸着出口空気平均絶対湿度 x_2	0.19 g/kg' (-31.9 DP)	3.14 g/kg' (-2.3 DP)
吸着開始からの総除湿量	4.5g (右値の約12.5%)	35.8g

表 2.6 の結果から、吸着開始から終了まで 2.5 分というごく短時間で運転切替えを行うことで、吸着開始からの時間平均値で約-32 という低露点を得ることができるが、その間八ニカムブロックで除湿する水分量は全体の約 13%程度であることが分かった。つまり、本運転条件で-32 DP 以下の低露点空気を得る際、吸着剤八ニカムブロックの全吸着容量のうち、13%程度しか有効に使えていないことが分かった。

十分なカラム長さを持つ固定床吸着塔を用いた吸着操作において、充填されたシリカゲル粒子などの吸着剤に完全再生されている場合、槽内に形成される吸着帯はカラム長さより短くなり、吸着開始から一定時間ほぼ一定濃度に分離除去された気体を得ることができる³⁰⁾。しかし、本シミュレーションでは吸着開始から出口空気絶対湿度が少しずつ上昇しており、吸着剤ブロックの流れ方向長さより長い吸着帯が形成されているか、あるいは吸着帯そのものが形成されていないことが考えられる。これらは低露点空気を製造するには不都合な状態である。面風速が 0.5m/s(通常のロータ操作では 1.0~3.0m/s で設計)と小さく、かつ吸着材ブロックの流れ方向長さも 200mm と、現状のロータ型

除湿機とほぼ同等の長さを持っているにも関わらず、安定した低露点空気を得ることができないということは、吸着材の低湿度域における吸湿能力に問題がある。

以上の考察から、一般空調用途の除湿において優れた性能を示す高分子吸着剤を低露点空気製造に用いる検討を行った結果、吸着剤全体のうち有効に吸脱着が行われる割合は低く、また吸着帯の長さも著しく長くなるため、不向きであることが分かった。また、低露点空気製造の方式として常圧におけるバッチ切替え式の TSA 方式を検討したが、吸着塔入口までの熱容量が大きいため良好な温度スイングを行うことができず、低露点空気製造には不向きであることが分かった。

上記結果から、バッチ式通風実験装置の実際の温度スイング特性を基に計算を行うと、低露点空気製造装置としての検討が困難であると考えられる。よって、以降の数値計算による検討では、理想的な温度スイングを仮定した。

2.6 数学モデルの妥当性検証

2.6.1 コルゲートサイズが小さい場合

(a) 標準運転条件での比較

修正モデル，従来モデル双方について，標準運転条件（ただし入口空気温度は，理想的温度スイングとする）で計算を行い，出口空気露点について比較した．図 2.10 に吸着運転時の出口空気露点温度の経時変化を示す．結果を比較すると，修正モデル，従来モデル双方の間で，ほとんど違いが見られない．

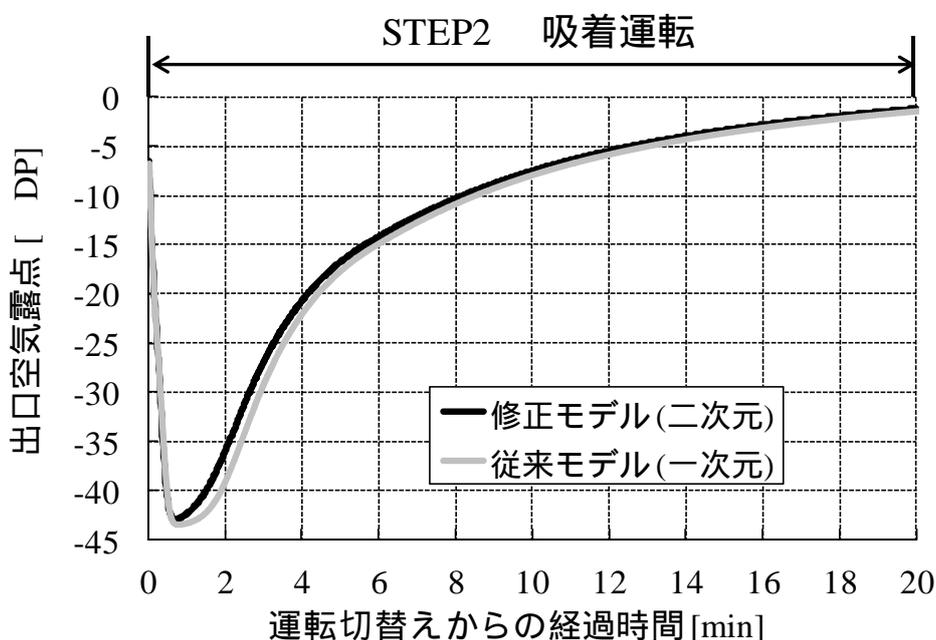


図 2.10 従来モデルと修正モデルの計算結果比較
(コルゲートサイズ小)

図 2.11 に修正モデルにおいて吸着運転開始から 1 分後の，出口空気局所流速 u ，及び露点分布を示す．吸着材界面近傍で最も露点が低くなり，界面から離れ流路中心に近づくにしたがって，露点が上昇していくという物理的に妥当な結果を得ている．しかし， Y 軸方向の露点幅は， 0.44 DP(絶対湿度差に直すと 0.003g/kg)程度となり小さかった．本ケースにおいてはハニカム流路が十分に狭かったため，半径方向に素早く物質拡散が行われた結果だと考えられる．

従来モデルは，空気流路半径方向の温湿度分布を均一とする仮定を行っているため，半径方向に大きな温湿度分布が生じる運転条件においては，修正モデルの計算結果と差異が生じるものと考えられる．上記の計算では，流路内半径方向の湿度分布が小さく，

両モデルの計算結果の違いがほとんど見られない結果となった。

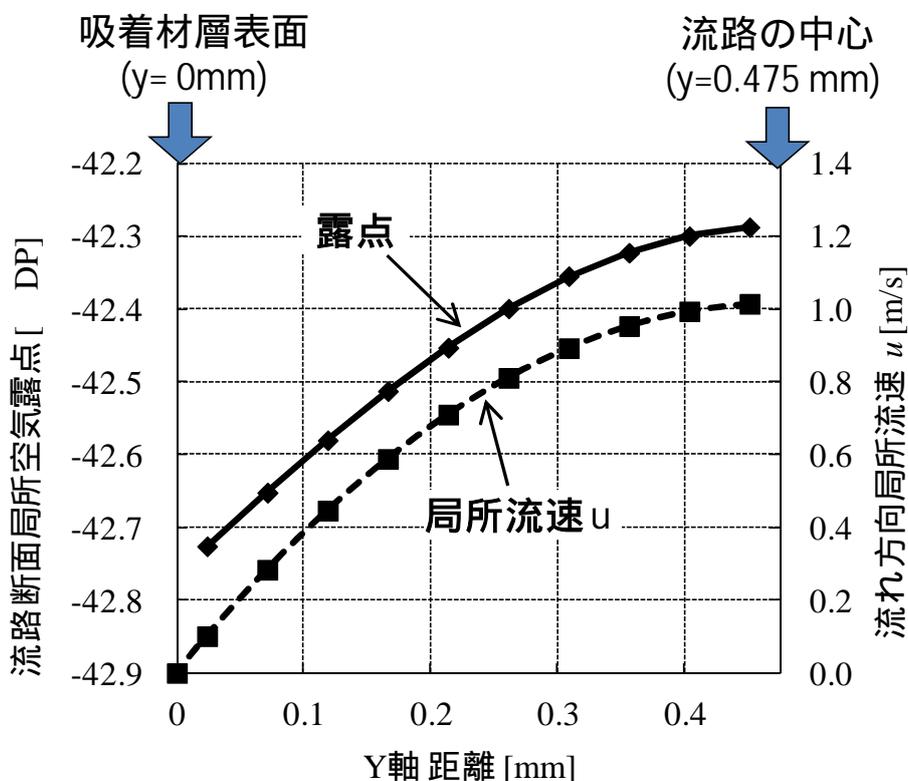


図 2.11 吸着運転における出口空気ハニカム流路半径方向の局所流速と露点の分布 (コルゲートサイズ小、吸着開始から 1 分後)

(b) 面風速の影響

冷却減湿コイルの面風速は、大きいほどコイル通過時に流路内流れと垂直な方向の温湿度拡散が十分に行われず、流路内垂直方向の温湿度分布が大きくなるとされている。デシカントロータのハニカム流路でも同現象が起こる可能性が予想されたため、吸着運転時の面風速を 0.5m/s から 2.0m/s に変更して計算を行った。温湿度の設定値等、その他の計算条件は、(a)と同様の値とした。図 2.12 に、出口空気露点温度の経時変化を示す。

結果を比較すると、修正モデル、従来モデル双方の間で、ほとんど違いが見られない。流路内半径方向の物質拡散速度に与える影響は、流路直径が支配的で、面風速を 2.0m/s という比較的大きな値とした場合においても、両モデルの計算結果に有意な差が生じることは無かった。以上のことから、コルゲートサイズが十分に小さいハニカム構造をもつデシカントロータにおいては、空気流路内半径方向の温湿度分布を均一とする従来の方法は、性能予測を行なう上で妥当な仮定であると考えられる。

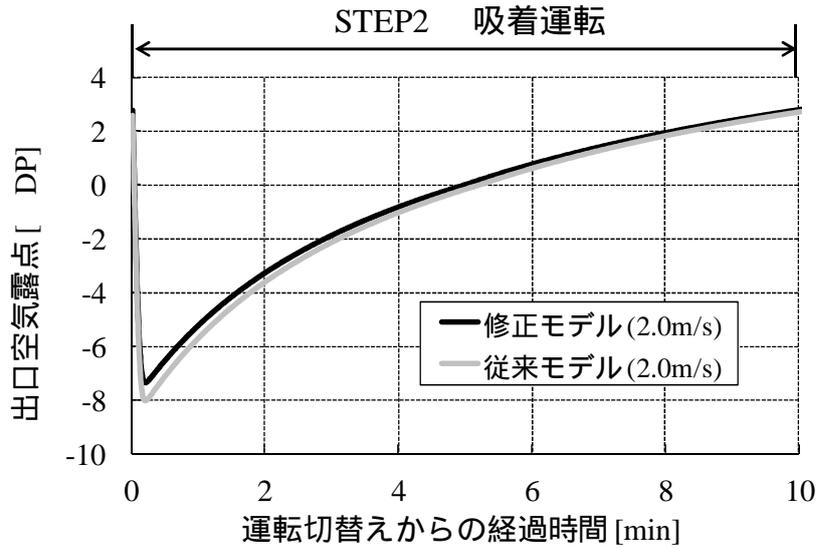


図 2.12 両シミュレーションモデル間の流速による影響の違い
(コルゲートサイズ小)

6.2.2 コルゲートサイズが大きい場合

本項では、空気流路水力等価直径 d_h と吸着材厚さ a_{obj} を前項の値の 2 倍 ($d_h=3.8\text{mm}$, $a_{obj}=0.3\text{mm}$) に変更して、面風速 0.5m/s で同様の検討を行った。図 2.13 に吸着運転時の出口空気露点温度の経時変化を示す。

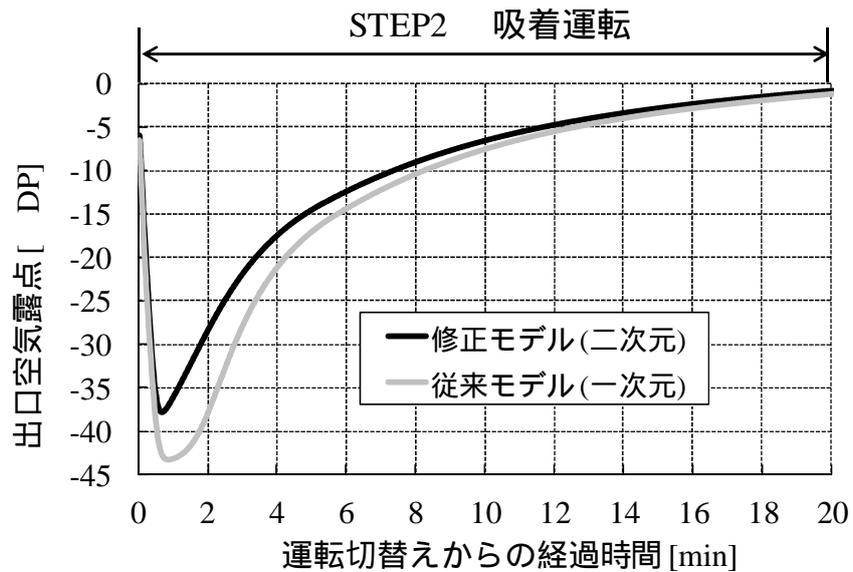


図 2.13 従来モデルと修正モデルの計算結果比較
(コルゲートサイズ大)

比較のため、従来モデルにおいても、空気流路水力等価直径と吸着材厚さを2倍の値 ($d_h=3.8\text{mm}$, $a_{obj}=0.3\text{mm}$)に変更して計算を行った。従来モデルの場合、 d_h と a_{obj} を比例して変更、つまり空隙率一定で計算を行った場合、水力等価直径の大小は直接計算結果に反映されず、図2.10に示される $d_h=1.9\text{mm}$ の結果と一致した。

一方修正モデルは、出口空気の露点が-38 DP程度まで上昇する結果となった。したがって修正モデルと従来モデルの出口空気露点の下限値には、約5 DPの差異が生じており、 $d_h=1.9\text{mm}$ の時と異なり、両モデルの計算結果に有意な違いが見られた。図2.14に修正モデルにおいて吸着運転開始から1分後の、出口空気局所流速 u 、及び露点分布を示す。

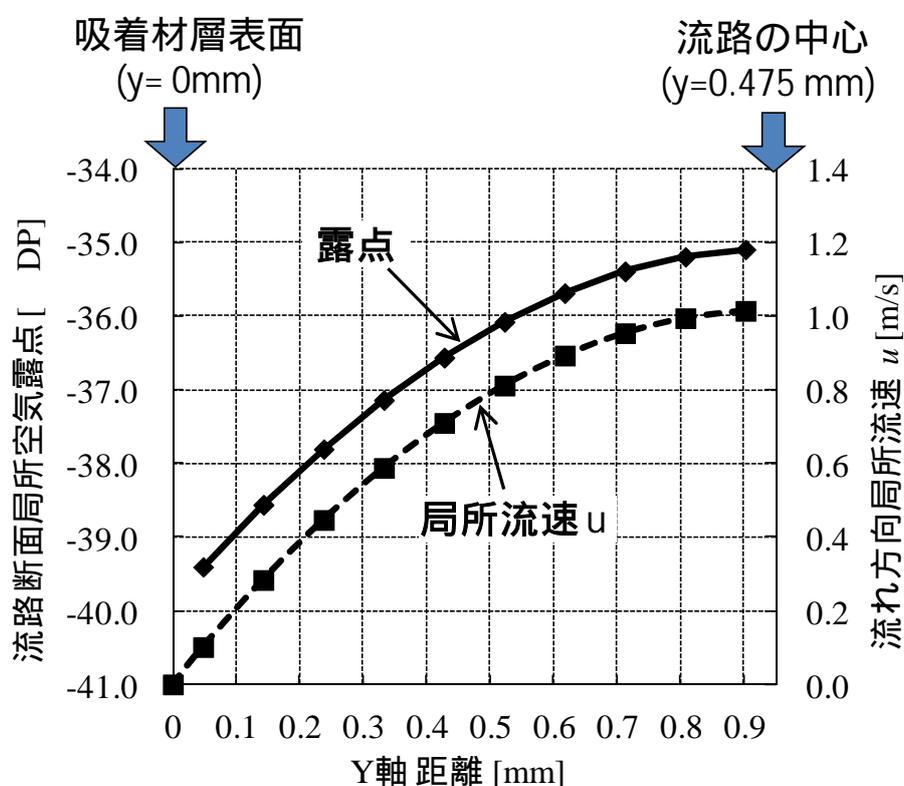


図 2.14 吸着運転における出口空気ハニカム流路半径方向の局所流速と露点の分布 (コルゲートサイズ小、吸着開始から1分後)

Y軸方向の露点幅は、4.5 DP(絶対湿度差に直すと 0.05g/kg)程度となり、図2.11に示される $d_h=1.9\text{mm}$ の結果と比較して、かなり大きかった。

図2.14の結果から、比較的コルゲートサイズが大きなハニカム流路においては、半径方向に無視できない湿度分布が生じていることが分かった。入口空気の温湿度、ロータ厚、吸着材種類などによっては、より小さなコルゲートサイズのデシカントロータで

も同様の現象が生じることが考えられる。

吸着速度を支配する平衡吸着量を計算する際、従来モデルにおいては流路断面平均の絶対湿度を使用しているが、修正モデルにおいては吸着材との界面に位置する格子での絶対湿度を参照しており、より正確な解析が行えるものと考えられる。ドライエア製造装置のように供給空気の露点が重要視されるデシカントシミュレーションにおいては、ハニカム流路内半径方向の温湿度勾配を考慮した計算モデルの適用が有効であると考えられ、実際、コルゲートサイズが大きい場合は、両計算モデル間で除湿性能を議論する上で無視できない程度の差異が生じた。しかし、一般的にドライエア製造用デシカントロータで使用される水力等価直径が 2mm 以下のハニカムコルゲートサイズでは、空気層内半径方向の湿度分布は小さく、計算結果に大きな影響を与えない。したがって、空気内半径方向の温湿度分布を考慮しない従来シミュレーション上の仮定は、ドライエア製造条件においても妥当であると考えられる。

2.7 まとめ

デシカントロータによる低露点空気製造について、数値シミュレーションの高度化を検討し、以下の知見を得た。

- 低相対湿度範囲における高分子系吸着材の平衡吸着量を詳細に測定した結果、0.1～5%の相対湿度範囲において、Langmuir 式に従う吸着等温線が得られた。また、体積当りで比較したとき、0.1～5%の相対湿度範囲での同吸着材の吸着容量は、ゼオライト系吸着材と比較して小さいことがわかった。
- 吸着材と空気間の物質移動が線形推進力近似に従うとする計算モデルにて数値計算を行った結果、供給空気露点が-10 DP 程度の低露点に対して、概ね実験結果を再現する計算結果が得られた。
- 高分子吸着材を用いてドライエア製造を行うとき、再生運転から吸着運転へ切替える際の入口空気の温度スイングが素早く行われぬ場合、吸着出口空気露点温度の下限值は、素早く行われた場合と比較して大幅に上昇する。また、一般空調用途の除湿において優れた性能を示す高分子吸着剤を低露点空気製造に用いる検討を行った結果、吸着剤全体のうち有効に吸脱着が行われる割合は低く、また吸着帯の長さも著しく長くなる、あるいは吸着帯自体が形成されにくいいため、不向きであることが分かった。
- ハニカムの空気層内半径方向の湿度分布幅に与える影響は、ハニカムコルゲートサイズが支配的である。水力等価直径が 4mm 程度の場合、空気層内流路半径方向に計算上無視できない程度の湿度分布が存在する。しかし、ドライエア製造用デシカントロータで一般的に使用される、水力等価直径が 2mm 以下のハニカムコルゲートサイズでは、空気層内半径方向の湿度分布は小さく、計算結果に大きな影響を与えない。したがって、空気内半径方向の温湿度分布を考慮しない従来のシミュレーション上の仮定は、ドライエア製造条件においても妥当であると考えられる。

(参考文献)

- 53) D. La, Y.J. Dai , Y. Li, R.Z. Wang, T.S. Ge: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 130 (2010).
- 54) Kuma T, Okano H: USA Patent No. 4,886,769 (1989).
- 55) 金偉力 ,岡野浩志 ,坂井麻美: 平成 23 年度日本冷凍空調学会講演論文集 ,pp. 157-158 (2011) .
- 56) 竹内雍監修「最新吸着技術便覧」, pp. 248-258 , NTS , 東京 (1999) .
- 57) 高木貞男 ,堀部明彦 ,春木直人 ,仁科裕貴 ,稲葉英男: 冷空論 ,**26**(4) ,489(2009) .
- 58) 浅田敏信 , 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集 , **26** (4) , 511 (2009) .
- 59) 辻口拓也 , 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集 , **22** (4) , 417 (2005) .
- 60) 辻口拓也 , 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集 , **23** (4) , 467 (2006) .
- 61) 辻口拓也 , 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集 , **24** (3) , 205 (2007) .
- 62) 濱本芳徳 , 森英夫 , 神戸正純 , 三浦邦夫 , 渡邊裕 , 石沢俊彦 , 高塚威: 日本冷凍空調学会論文集 , **24** (4) , 473 (2007) .
- 63) 中林沙耶 , 長野克則 , 中村真人 , 外川純也 , 黒川真美: 日本冷凍空調学会論文集 , **26** (4) , 551 (2009) .
- 64) 山口誠一 , 斎藤潔: 平成 23 年度日本冷凍空調学会講演論文集 ,pp. 645-648(2011) .
- 65) 木村崇 , 今野賢一: 「除湿ロータの外周シール構造」特願 2008 - 293316 (2008) .
- 66) A. A. Pesaran and A. F. Mills, International Journal of Heat and Mass Transfer, **30**, 1037 (1987).
- 67) A. A. Pesaran and A. F. Mills, International Journal of Heat and Mass Transfer, **30**, 1051 (1987).
- 68) Ge, T.S., Y.Li. Dai, R.Z. Wang and Y.J. Dai: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **12**, 1485 (2008).
- 69) 鈴木謙一郎 , 大矢信男「空調技術者のための除湿の実用設計」共立出版株式会社 1980 年
- 70) I.D. Yu, G. Luo, and H.F. Zhang: ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 15(3), 209-17 (1994).
- 71) 新晃工業(株)ホームページ
<http://www.sinko.co.jp/product/desiccant/desicondry.html>
- 72) 稲葉英男 , 木田貴久 , 堀部明彦 , 亀田澄広 , 岡本民雄 , 徐貞均 : 日本機械学会論文集(B 編) **67** , 660 (2001) .
- 73) 日本エクスラン工業(株)ホームページ
<http://www.exlan.co.jp/products/desiccantrotor/>
- 74) 日本機械工学会編「伝熱工学資料 改定第 4 版」p.45 , 日本機械工学会 (1991) .

- 75) 化学工学会編「化学工学便覧 改定 6 版」p.715, 丸善株式会社 (1999).
- 76) 荒川忠一「数値流体工学」, pp. 29-65, 東京大学出版会 (1994).
- 77) 熱物性学会編「熱物性ハンドブック」pp. 57-67, 養賢堂 (1990).
- 78) 甲藤好郎「伝熱概論」, pp. 78-81, 養賢堂 (1964).
- 79) 化学工学会編「化学工学便覧 改定 6 版」p.698, 丸善株式会社 (1999).
- 80) General Eastern 社ホームページ
http://www.gesensing.jp/product/moisuture_humidity/
- 81) Vaisala 社ホームページ
<http://www.vaisala.co.jp/jp/Pages/default.aspx>
- 82) 加藤滋雄, 谷垣昌敬, 新田友茂「新体系化学工学 分離工学」pp.114-120, オーム社 (1992) .

第三章 実測によるロータ部の除湿・再生挙動の把握と考察

3.1 緒言

デシカントロータを用いた低露点空気(ドライエア)製造装置は、定格運転条件では、200 程度のロータ再生空気温度が指定されることもあり¹⁻³⁾、装置のエネルギー消費量は総じて大きい。したがって、供給露点の要求値を安定して保ち、かつ負荷に応じて最適運用を行う手法を開発できれば、省エネルギーを図ることが可能となる。

本研究の最終目的は、低露点空気製造時のデシカントロータにおける除湿挙動及び性能を予測する、シミュレーション手法⁴⁻¹²⁾の開発である。前章では、再生空気を低露点空気としたハニカムブロックへの通風実験を行った。出口空気露点の経時変化を測定し、LDF 近似法¹³⁻¹⁴⁾を用いた数値計算結果と比較することで、低露点空気製造条件における計算モデルの妥当性について検証した。しかし、ハニカムブロックへの通風実験の場合、構造上入口空気の素早い温度スイングが困難なことに加えて、実験・シミュレーションで対象とした吸湿剤が結果的に低露点空気製造用には不向きであったこともあり、実際に測定された供給出口空気の露点下限値は予想を大きく上回るものであった¹⁵⁾。さらに、ハニカムブロック出口空気の露点測定は非定常状態での測定となるが、計測器の応答性などが問題となるため、定量的に正確な測定を行うのは困難である。

数学モデルの妥当性を検討するには、実験データとの比較が必須である。吸脱着の挙動を比較するためには、測定が困難なハニカム吸着材出口空気の非定常特性について正確な実験データを得る必要がある。一般空調用デシカント除湿機の場合、シミュレーションモデルの検証用、あるいは実験による吸脱着特性解明のため、デシカントロータ型除湿機のロータ回転方向の露点及び温度分布を実測した報告例が多く存在する^{12),16-19)}。デシカントロータ型除湿機はその構造上、吸脱着運転切替え時の素早い温度スイングが容易である。さらに、対象とする吸着剤を低露点空気製造に向くとされるゼオライトに変更することで、前章の測定データ上の不具合を解決することができると考えた。

一方で、-30 以下の低露点空気製造条件にて、ロータにおける除湿・再生挙動を詳細な議論・解析できるような、ロータ回転方向の出口空気温湿度分布を実測した実例は、国内外の報告を調査しても極少数に限られていることが分かった²⁰⁻²²⁾。この原因は一般空調用除湿機と比較して、低露点空気製造用除湿機は、潜在的な市場が小さいため、研究分野として注視されてこなかったことが背景にあると考えられる。加えて、一般空調用途の湿度レベルと比較して、測定が困難であることもあることも一因として挙げられる。しかし、国内のある空調機メーカーの市場調査によると、現状国内で販売されるデシカントロータ型除湿機のうち、その販売台数の 8~9 割は産業用低露点空気製造が占めていると言われている。したがって、低露点空気製造用デシカントロータの除湿・再

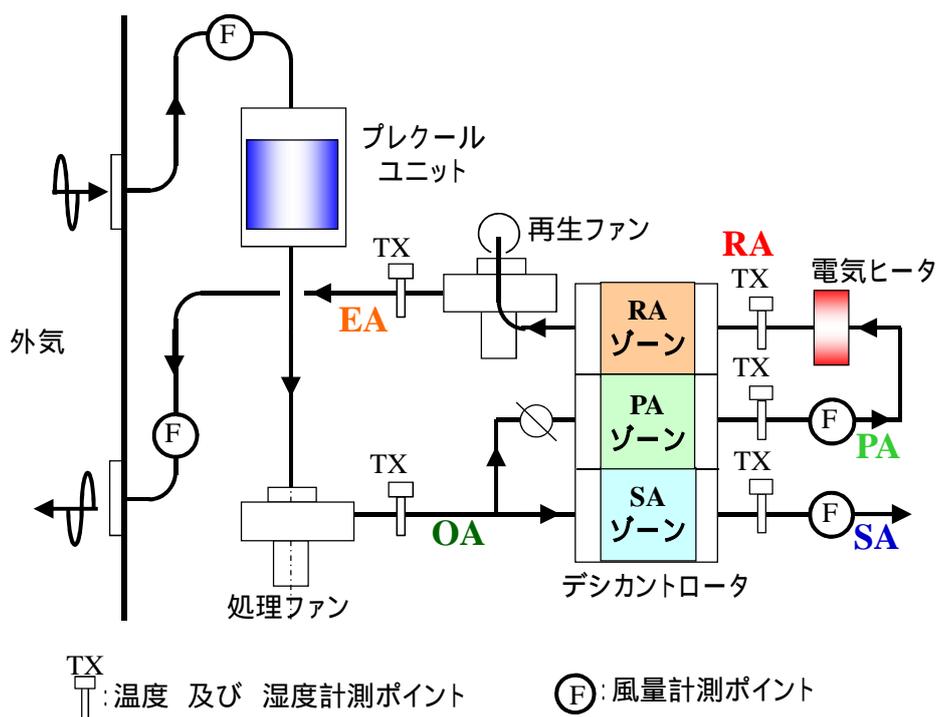
生挙動を詳細な実測したデータは，シミュレーション結果と比較用としてだけでなく，工学的あるいは実用的に重要な意義を持つと考えられる．

そこで著者らは，定常運転状態にある低露点製造用デシカントロータについて，まず，ロータ回転方向の出口空気の露点及び温度を正確に測定する実験を行った²³⁾．実験パラメータはロータ回転速度，再生温度，入口絶対湿度とし，各運転条件で同様の測定を行い，それらの影響の度合いを示した．実験の結果得られた局所出口空気状態量の分布には，デシカントロータ内で生じる吸脱着の特徴を反映しているであろう挙動が見られた．したがって，数学モデルとの比較検証用のみでなく，低露点製造時の除湿・再生挙動を説明し得る，貴重な実測データであると考え，本章でまとめて示す．

3.2 実験装置及び方法

3.2.1 実験装置

図3.1に本実験で用いたドライエア製造用のデシカントロータ性能試験装置の概略図を示す。



	温度	湿度(露点)
TX	Pt100	静電容量式 / HYGRO CLIP (rotoronic)
TX	Pt100	鏡面冷却式 / CR-1A (Buck Research Instruments)
TX	K型熱電対	静電容量式 / DY55 (General Eastern)
TX	K型熱電対	-
TX	Pt100	静電容量式 / HYGRO CLIP (rotoronic)

	流量計
F	複合型ピトー管風量センサ / ニューエアロアイ (Wetmaster)

図 3.1 実験装置と出口空気状態の測定ポイントの概要図

試験装置の主な構成要素は、デシカントロータカセット、ロータ入口空気温湿度調節用プレクールユニット、再生用ヒータ、送風機、風量計、温湿度計、露点計などである。外気を導入してプレクールユニットで入口絶対湿度を制御し、ロータへ通風する。ロータカセットでは、再生(RA)ゾーンと吸着処理(SA)ゾーンの間にパージ (PA)ゾーンを設

け、パージゾーン通過後の空気をヒータで加熱し、再生空気として用いた。

デシカントロータには、低露点用途において良好な吸着特性を示すゼオライト 13X²⁴⁾ が担持されている。ロータの仕様を表 3.1 に示す。なお、本ロータの平衡吸着量と吸着熱については、3.2.2 項にて示す。

表 3.1 試験ロータの特性値

吸着剤種類	ゼオライト 13X ²⁴⁾
材量密度	1046 kg/m ³
比熱	1030 J/(kg·K)
空隙率	0.74
ロータ直径	770 mm
ロータ厚み	400 mm
ゾーン比率	再生：供給：パージ 2：5：1

除湿装置としての効率を測定し、物質収支を確認するため、ロータカセットの各ゾーンに接続するダクトそれぞれに対し、温湿度及び風量センサを設けた。センサ位置と使用した種類を図 3.1 に併記する。

また、デシカントロータ出口空気の温度および湿度分布を得るため、各ゾーンの出口には、ロータ回転方向に温度センサ（熱電対）及び湿度測定用配管を設けた。サンプリングの箇所および方法の概略を図 3.2 に示す。ロータを通過直後の局所空気を採取するよう、湿度測定管の吸込口はロータ面に対し平行に設置し、かつ表面からの距離は 1cm 以内とした。測定管の設置間隔は概ね、再生ゾーンが 17.5° 毎で計 5 点、供給ゾーンが 30° 毎で計 7 点、パージゾーンが 7.5° 毎で計 5 点である。サンプリング位置に温度センサも合わせて設置した。他のゾーンと比較して、再生ゾーンは湿度測定管の多点設置が構造上困難であったため、これを補うべく再生ゾーンには 10° 毎に計 9 点の温度センサを追加設置した。

露点-30 以下の低露点を測定する場合、空気中に含まれる水分量が非常に少ないため、測定には様々な注意が必要であることが報告されている。その 1 つとして、露点計につなぐ配管内部で起こる水分吸着・脱離による影響が挙げられる²⁵⁾。本実験ではこれを考慮して、測定管材質には水分吸着が少ないとされるステンレス EP 管を使用した。

また，再生ゾーンの出口局所露点は 25 以上となることがあり，装置流路内外の測定配管内，容易に結露しうる．これを防ぐため，配管経路全域に保温処理を施し，実験を行った．

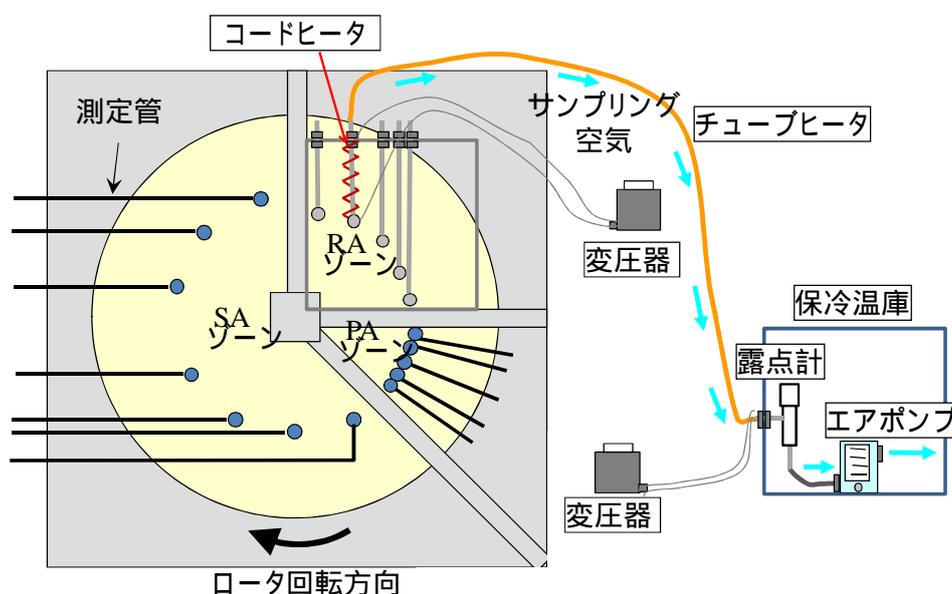


図 3.2 出口空気ロータ回転方向と湿度分布測定装置概略図

3.2.2 吸着材の水蒸気吸着量と吸着熱

吸着等温線は吸脱着現象を表現する上で，最も重要な特性値の一つである．熱物質移動解析⁶⁻¹²⁾を行う上でも必要となり計算精度に関わるので，吸着材の実性能を再現するデータであることが必須である．今回実験で使用したゼオライト 13X 担持ロータは，米国のデシカントロータメーカーである Novel Aire 社²⁶⁾が製作した汎用品であり，同ロータの吸着等温線データは，メーカーから入手することも可能である．しかし，同データは 1～100%の相対湿度範囲で平衡吸着量を測定したもので，本研究が対象とする相対湿度が 1%をはるかに下回る極低相対湿度域での吸脱着計算に用いるには，不十分なデータであることが分かった．そこで，実験に使用するロータと同じ小型サンプルロータを入手し，そこから八ニカムを構成する素材の一部を削って，極低相対湿度域を含めた範囲における吸着等温線を，測定することにした．

測定には，平衡吸着量の測定装置として実績の多い高精度ガス／蒸気吸着量測定装置（日本ベル株式会社製 BELSORP-max）を使用した．横軸相対湿度のスケールを 0～100%の通常スケールとした測定結果を図 3.3 に，同データの低湿度域に着目するため，横軸相対湿度と縦軸平衡吸着量を対数表示としたグラフを図 3.4 に示す．

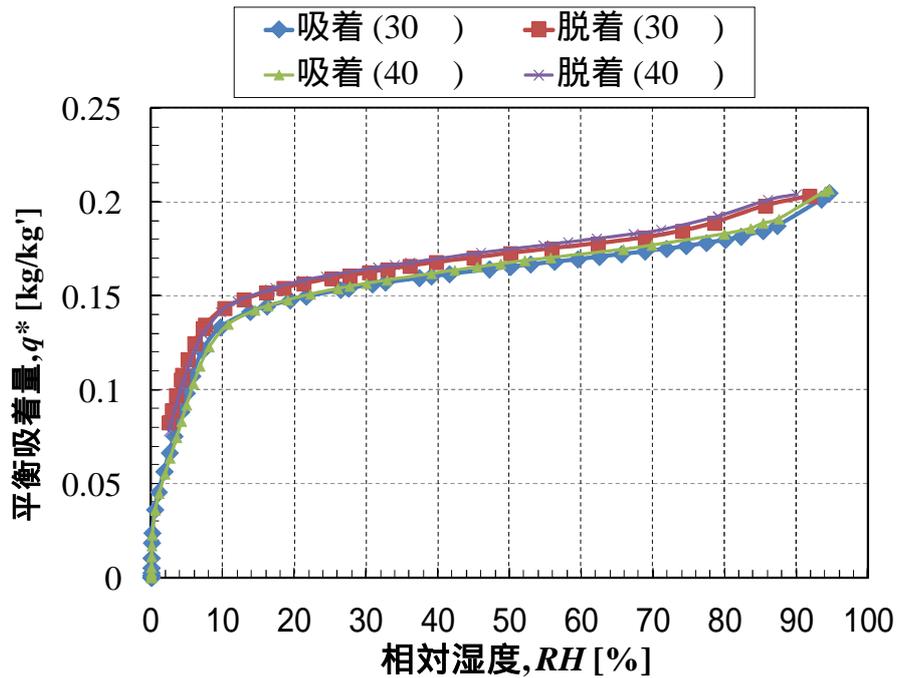


図 3.3 試験ロータの平衡吸着量測定結果（高湿度域に着目）

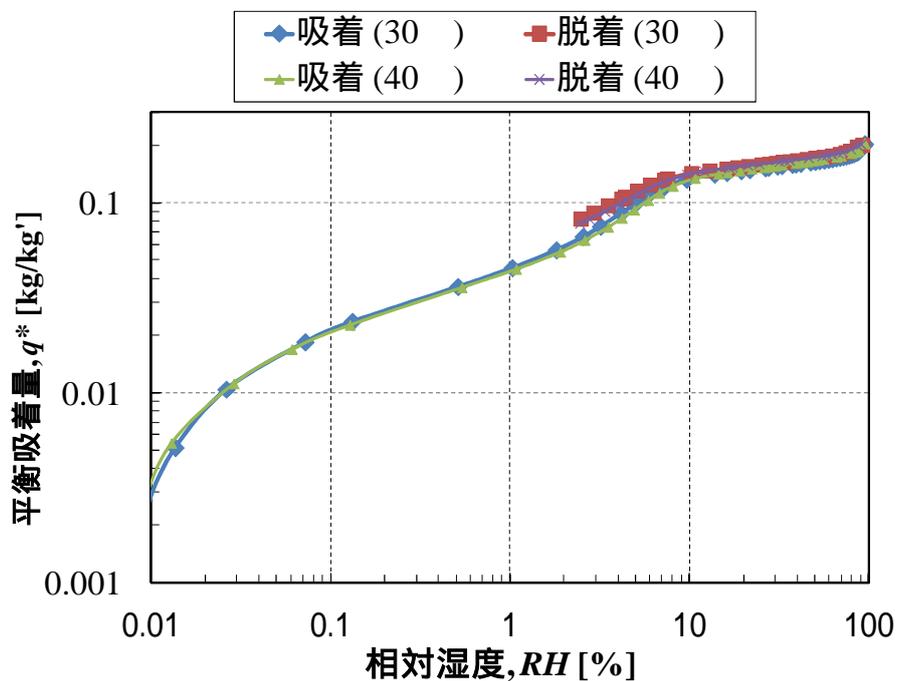


図 3.4 試験ロータの平衡吸着量測定結果（低湿度域に着目）

図 3.3 より，検討対象としたデシカントロータの水蒸気吸着等温線は，10%以下の低湿度で吸着量が急激に変化していることが分かる．この特徴が意味するところは，除湿

供給空気が 10% 以下のときでも、吸着材の有効吸着量²⁷⁾を大きくとれることを意味しており、低露点空気製造に適した特性をもっていると判断できる。また、相対湿度が 80～85%を超えると、平衡吸着量が上昇している。この範囲において毛管凝縮が起こっているものと推察される。また、吸着時と脱着時で平衡吸着量に差があり、と若干の吸脱着ヒステリシスがあることが確認された。一方、平衡吸着量の温度依存性はほとんど確認されなかった。

低湿度域に着目した図 3.4 からは、相対湿度 1%以下の低相対湿度範囲内でも吸着量は大きく変化していることが分かる。これは、相対湿度 1%以下を対象とした相対湿度スイングによる吸脱着運転（例えば、超低露点製造のための多段ロータ方式¹⁾）においても、吸着材として有効に機能することを意味している。また、高湿度域同様に温度依存性はほとんど確認されなかった。なお、これらの測定はサンプルを変えて複数回実施したが、どの測定でも再現性の高い結果を得ることができた。

また、シミュレーションを行う際、吸着熱についても吸着材の実性能を反映した値を入力する必要がある。一般的に、吸着量が減少するほど吸着親和力が大きくなるため、吸着熱には大きくなることが知られている。垣内ら²⁸⁾は Y 形ゼオライトとシリカゲルを対象として、水蒸気吸着熱と吸着量依存性を測定しており、低吸着量領域では吸着熱が著しく大きくなる結果を得ている。低露点空気製造時は吸着量が極めて少なくなる運転を含むので、正確なシミュレーションを行うためには、この吸着熱の吸着量依存性についても考慮する必要があると考えた。そこで、図 2.2 で示す示差熱・熱重量測定装置 (SHI 社製 TG/ DTA6300)にて、相対湿度を変えて吸着熱を測定した。結果を表 3.2 に示す。

表 3.2 試験ロータの吸着熱測定結果

温度 []	40					75				
相対湿度 [%]	10	20	30	50	80	2	10	20	30	50
平衡吸着量 [kg/kg]	0.136	0.148	0.156	0.166	0.179	0.060	0.132	0.149	0.157	0.164
吸着熱 [kJ/kg]	2753	2693	2761	2525	2589	3652	2947	2540	2756	2685

表 3.2 を見ると、吸着熱は総じて水の蒸発潜熱 (2500kJ/kg) より大きい。また、予想通り平衡吸着量が小さい領域では、平衡吸着量が大きいときに比べて増加する傾向が見て取れる。しかし、測定上の難しさから全体的にデータのばらつきが大きかった。特に平衡吸着量が小さくなり、吸着発熱量が減少するに従って原理上測定誤差が大きいため、測定の信頼度が低い。測定装置の特性上これ以上精度のよい測定は困難であるため、シ

ミュレーション時に入力する吸着熱のデータは、より測定精度の機器を使用して測定した文献値を用いることが適切だと考えられる。

3.2.3 実験条件

装置を起動してから供給露点や各温度が安定し、ロータにおける吸着・再生サイクルが定常になった約8時間後から実験を開始した。

除湿およびパージゾーン出口局所の露点測定には、十分に特性検証を行った静電容量式露点計(General Eastern 社製 DY55, 測定範囲: -100 ~ 20 DP, 再現性: ± 1 R.D.)²⁹⁾を使用した。センサオフセットの影響を考慮して、使用する露点計はそれぞれのゾーンで1台のみとし、設置位置を変更することで多点の測定を行った。再生ゾーン出口の露点は場所によって高湿度のため、広範囲の露点域で測定可能な静電容量式露点計(Vaisala 社製 DMT132, 測定範囲: -20 ~ 40 DP, 再現性: ± 1 R.D.)³⁰⁾を使用した。位置を変更してから60分以上は露点計に通風して指示値が安定するのを確認し、それぞれの測定項目に対して測定間隔を5秒として15分間(180点)のデータを記録した。ロータの回転に伴い測定される局所露点と温度は変動を含む³¹⁾。露点変動が顕著にみられる場合は計測された最低露点を、無い場合は時間平均値を採用して整理した。

実験では各ゾーンの風量を固定し、ロータ回転速度 2.5rph, 再生温度 112℃, 入口湿度 4.6g/kg' を基準条件として、これら3つをパラメータとした。全ての条件にて2回以上実験を行って再現性を確認し、実施データ全ての平均値を実験結果とした。詳細は3.3項にて述べる。

3.2.4 露点計計測精度の検証

表 3.3 に、水分濃度調整済みの標準窒素ガスを通風した際の、2台の DY55 プローブと の測定値を示す。調整された濃度を真値とすると、静電容量式は ± 1 程度の精度で測定可能であることと判断できる。

表 3.3 標準ガスを使用した静電容量式露点計の制度検証

単位: DP

標準ガスの露点	DY55		DY55	
	出力	誤差	出力	誤差
-40	-40.1	(-0.1)	-40.0	(+0.0)
-50	-49.5	(+0.5)	-49.6	(+0.4)

しかしながら静電容量式では、検出部（酸化アルミ膜）の水分脱着が応答性に大きく影響するので、露点変動に対し真値を指示するまでの通風時間を明らかにする必要があると考えられる。そこで、水分濃度調整済みの窒素ガスを用いて応答性を検証した。用意した窒素ガスの露点は-56 DP、-50 DP、-40 DPの3種類で、露点計に通風する空気をバルブにて瞬時に切り替えた際の、露点計出力の経時変化を検証した。図 3.5 に検証結果を示す。

図 3.5 より、高露点から低露点への変化に対する時定数が大きいことが分かる。一方、低露点から高露点への応答は速く、これらは検出部分への水分吸着と脱離の速度の違いが現れていると考えられる。仮にプローブの公称精度範囲である設定露点 ± 2 になった時間を以って測定可能と判断すると、応答性に時間を要する高露点から低露点への変化の場合でも、測定開始から約 60 分経過後には精度を満たしている。そこで本実験では低露点域の露点測定時に、センサ位置を変更して通風後 60 分以上経過してから、記録を行うこととした。

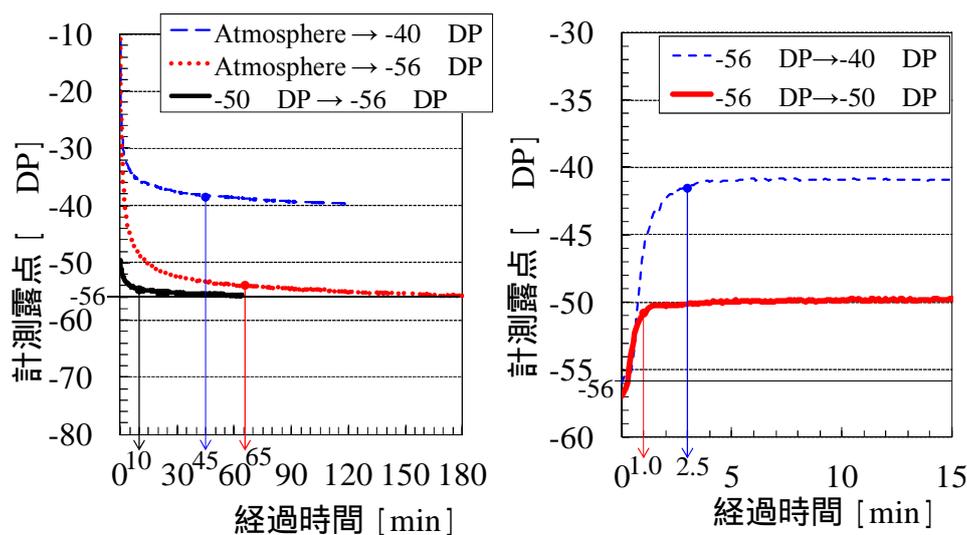


図 3.5 露点計の応答 (左: 高露点 低露点, 右: 低露点 高露点)

3.3 実測結果と考察

3.3.1 ロータ回転速度の影響

実験条件を表 3.4 に示す。図 3.6 は、ロータ回転速度と吸着工程であるパージおよび除湿出口空気露点の関係である。最終製品空気 SA の露点は極小値を有し、最適な回転速度が存在することが分かる。

表 3.4 ロータ回転速度の影響を検証するための実験条件

	再生ゾーン	供給ゾーン	パージゾーン
流量	480 kg/h	1180 kg/h	480 kg/h
面風速	1.6 m/s	1.6 m/s	3.3 m/s
入口空気温度	112	6.1	
入口空気絶対湿度	Purge outlet	4.6 g/kg'	
ロータ回転速度	1.2rph , 2.5rph , 4.0 rph , 6.0rph		

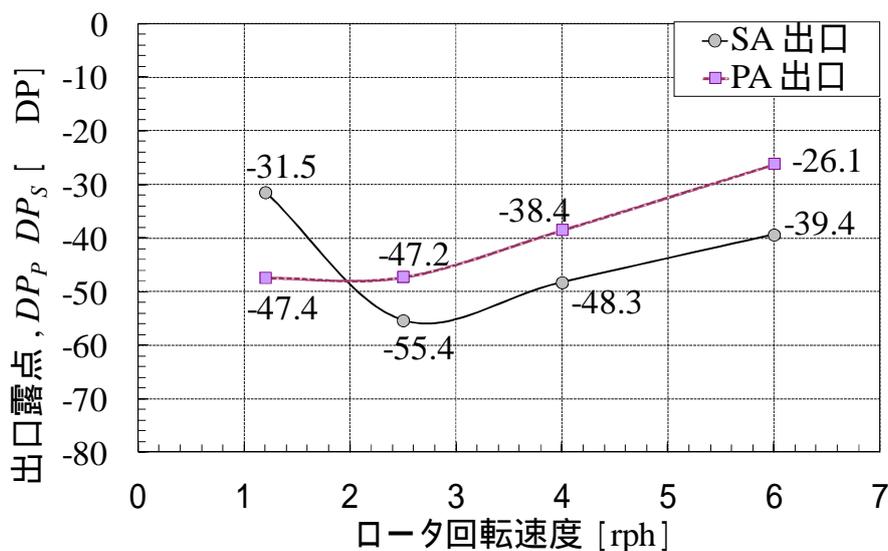


図 3.6 各出口空気露点に対するロータ回転速度の影響

以下に、各ゾーン出口空気のロータ回転方向分布を観察し、ロータ回転数の影響を考察する。図 3.7 (a)(b)は、パージおよび除湿出口空気のロータ回転方向露点・温度分布である。ここで $\theta = 0 \sim 45^\circ$ がパージ過程、 $\theta = 45 \sim 270^\circ$ が除湿過程である。図 3.7(b)より、再生過程から吸着過程に移行した直後の顕熱冷却は比較的早く、例えばロータ回転速度が 1.2rph のとき、 $\theta = 10^\circ$ 時点で出口空気温度は既に平衡に達しており、露点も約-76まで到達している。その後、吸着ゾーンに入って間もなくは、ほぼ同程度の出口空気露

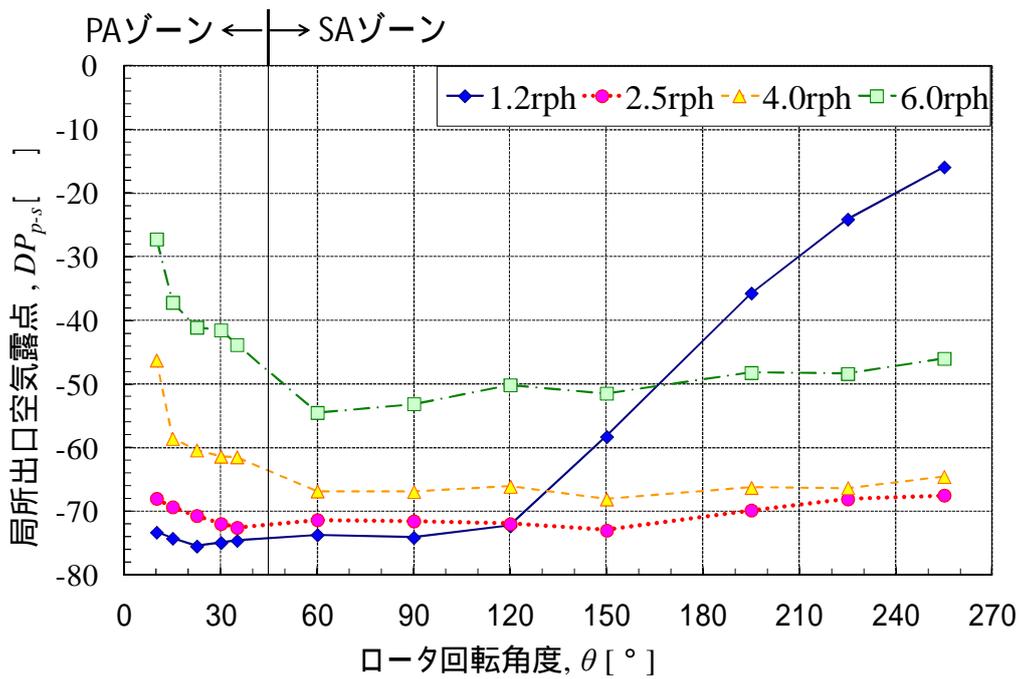
点が得られ、120°付近から露点が上昇している。吸着ゾーン前半で露点が上昇を始めたことから、ロータ内で形成された吸着帯はロータ厚み(400 mm)の半分以上の長さを有していると推察される。出口空気温度の低下は、吸着帯全体がロータ出口に到達したと思われる 195°付近から始まる。ロータ回転速度が 2.5rph 以上の結果では、処理ゾーン途中で吸着破過が生じることは無く、概ね一定の露点を維持している。

図 3.8 (a)(b)に、再生ゾーン出口空気のロータ回転角度方向露点・温度分布を示す。図 3.8(a)より、吸着過程から再生過程に移行後、局所露点は上昇する。露点が上昇する回転角度はロータ回転速度が遅いほど早い。最大露点は回転速度によらず 26~27 程度でほぼ一定である。最大露点を示した後はほぼ一定露点を示す区間が続き、4.0rph 及び 6.0rph の場合、そのままパージ過程へ移行する。温度分布も露点分布と同様に、約 29 のほぼ一定温度のまま、吸着過程に移行する。一方 1.2rph 及び 2.5rph の場合、=315°付近から露点が下降を始める。同時に、温度は上昇を始め、局所空気の状態は再生入口空気状態に近づく。

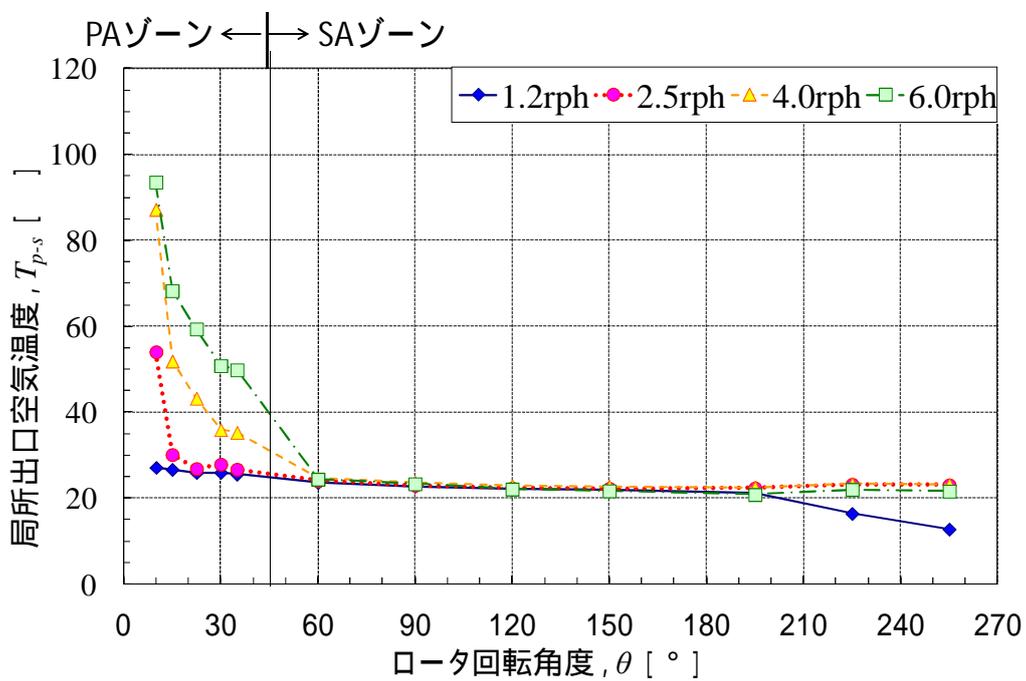
ロータ回転速度が遅すぎる場合(1.2rph)は、再生空気となるパージ出口空気の露点が下がり、また再生時間も長くなることから、パージあるいは処理ゾーン初期に得られる空気露点は低くできる。その一方で、処理ゾーン途中で吸着破過が生じるため、製品として得られる乾燥空気の露点は高くなる。

ロータ回転速度が速すぎる場合(6rph)は、再生時間が短く再生が不十分になることに加えて、パージ出口空気露点が下がらず、低露点の製品空気を得るのに不都合な状態となる。

ロータ回転速度 2.5rph で示される出口空気状態が最も好ましい。この場合、露点下限値は 1.2rph の-76 よりも若干高い-73 となった。しかし、処理ゾーン途中で吸着破過を生じることは無く、製品空気の局所露点は概ね-70 を維持している。

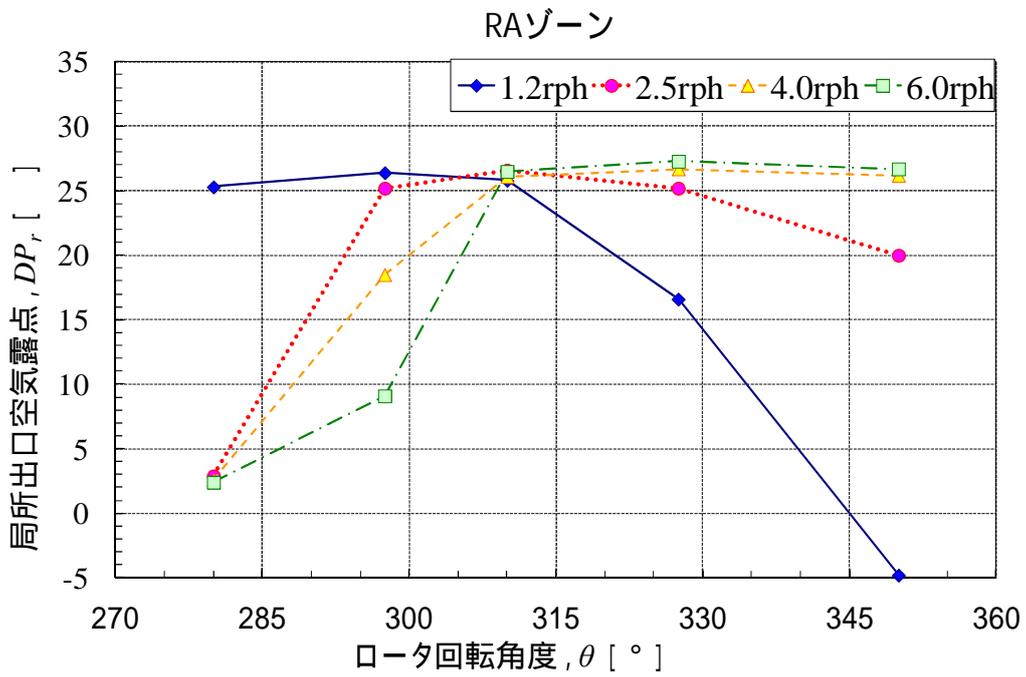


(a) パージ及び供給出口空気局所露点

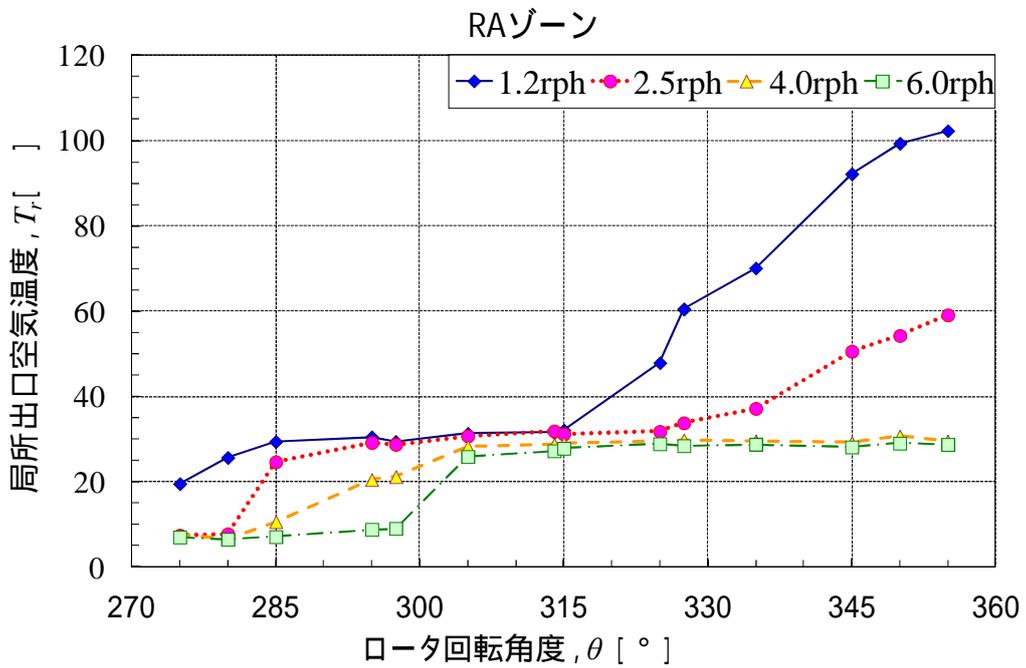


(b) パージ及び供給出口空気局所温度

図 3.7 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に与えるロータ回転速度の影響 (吸着ゾーンに関して)



(a) 再生出口空気局所露点



(b) 再生出口空気局所温度

図 3.8 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に与えるロータ回転速度の影響 (再生ゾーンに関して)

ロータの角度分布をより詳しく考察するため、図 3.9 に示すように再生過程の局所出口空気状態の回転方向変化を空気線図にプロットした。図中 印と点線で示す 4.0rph の場合、出口空気局所状態は回転角度が進むに従って、相対湿度をほぼ維持したまま、絶対湿度が上昇していく。そして温度 30℃、比エンタルピー 86kJ/kg' 付近で絶対湿度の最大値(22g/kg')を得て、その後吸着運転に切り替わるまで、ほぼこの空気状態を維持する。回転速度が異なる場合も、絶対湿度の最大値を得るまでの状態変化の過程は、ほぼ同様であった。

デシカント脱着過程において通風空気の状態変化は、理想状態では等エンタルピー変化である³²⁾。熱力学理論上の出口空気絶対湿度最大値を得るのは、空気線図上で再生入口空気と等しいエンタルピー線と吸着入口空気と等しい相対湿度線の交点で¹⁶⁾、図 3.9 中では A 点で示される。A 点の絶対湿度は約 30g/kg' であるが、実験における再生出口空気の最大湿度は、A 点と比較して 8 g/kg' 程度低い。再生パーシジョンを設けない一般除湿用途でも、実際の局所絶対湿度最大値が理論上の限界点より低くなる現象が確認されている¹⁶⁾。再生空気湿度上昇に伴う水蒸気の脱着速度の低下に加えて、水の蒸発潜熱よりも大きい吸着熱の影響が考えられる。

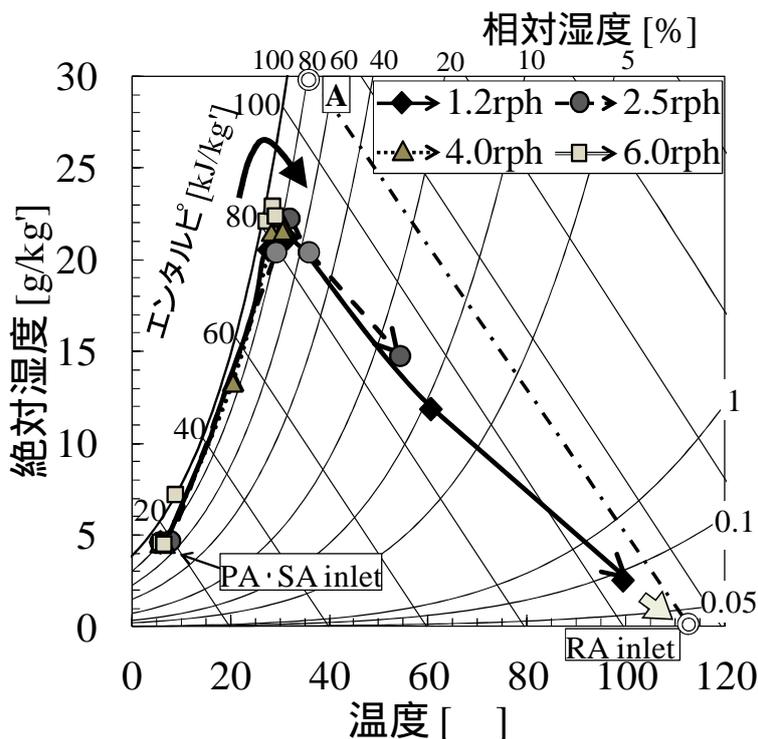


図 3.9 異なるロータ回転速度におけるロータ回転角度進行に伴う局所再生出口空気の状態変化

実際のデシカント脱着過程において、再生出口で最大湿度を示す回転角における再生

空気流れ方向の空気状態は、再生空気入口から最大湿度状態に向かって比エンタルピが減少しながら変化する³³⁾。これはロータの熱容量による比エンタルピ減少に加え、水蒸気自体の脱着に要するエネルギーすなわち脱着熱の吸着量依存性が関連していると考えられる。吸着材、特にゼオライトは吸着量が少ないほど吸脱着熱が大きくなることが知られている²⁸⁾。吸着剤の吸着量が極めて小さくなる低露点の除湿・再生過程では、これら吸脱着熱の吸着量依存性を考慮して、数学モデルを構築する必要性が考えられる。

回転速度が遅い 1.2rph 及び 2.5rph の場合、さらに回転角度が進むと、再生出口空気湿度が上記最大湿度から離れ、ほぼ等エンタルピ線に沿って下降し始める。最終的に最も再生が進む 1.2rph の場合、ある回転角度から比エンタルピが上昇し、最終的に再生入口空気状態点へと近づいていく。以上のように、ロータ回転の進行に伴う局所再生出口空気の状態変化は、比較的報告例が多い一般除湿用途のデシカント再生挙動と定性的に一致していることが分かる^{12,16)}。

次に図 3.10 は、除湿過程の局所出口空気状態のロータ回転方向変化を空気線図にプロットしたものである。

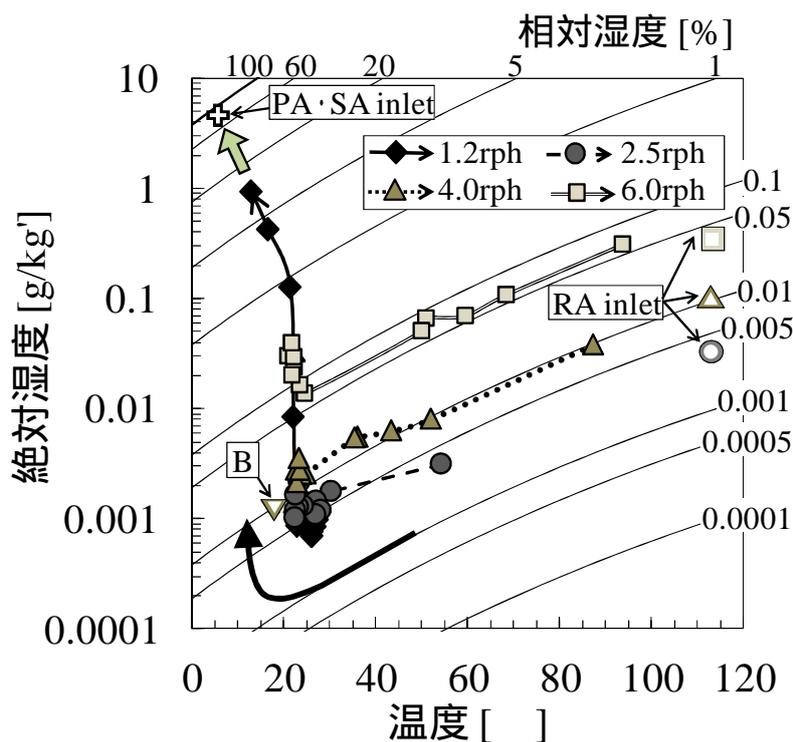


図 3.10 異なるロータ回転速度におけるロータ回転角度進行に伴う局所除湿出口空気の状態変化

除湿過程出口空気の絶対湿度は常湿環境よりはるかに小さく、通常の空気線図では現象を把握しにくいいため、縦軸を対数表示とした。図中 印と点線で示す 4.0rph の場合、

除湿出口の局所空気状態は回転角度が進むに従って、再生入口空気にはほぼ等しい相対湿度線に沿う形で、絶対湿度が下降していく。そして温度 22 付近で絶対湿度の下限値 (0.0026g/kg') を得て、その後は再生運転に切り替わるまで、ほぼこの空気状態を維持する。

デシカント除湿過程において吸着等温線に温度依存性等が無い場合、平衡理論及び熱力学理論上の出口空気絶対湿度最小値を得るのは、空気線図上で吸着入口空気と等しいエンタルピ線と再生入口空気と等しい相対湿度線の交点で¹⁶⁾、図 3.10 中では B 点で示される。B 点の露点は-72 であるが、実験で得られた最小露点は、B 点と比較して 5 程度高い。これは、特にゼオライト系吸着剤では水蒸気吸着に伴う吸着熱が水の蒸発潜熱より大きく、また本実験のように除湿量が多い場合には、デシカント通過時に被除湿空気の比エンタルピが、無視できない程上昇したことが一因であると考えられる。

設定回転速度によって再生入口空気の相対湿度が変化するため、除湿空気が成り得る最小湿度も異なるが、上述の通り、再生入口空気と等しい相対湿度を維持したまま、ある比エンタルピ値に達するまで除湿出口空気湿度が下降する挙動は、どの回転速度でも同様に確認された。

回転速度が遅い 1.2rph 及び 2.5rph の場合、さらに回転角度が進むと、吸着剤が破過し絶対湿度が上記最小値から離れ、ほぼ等エンタルピ線に沿って上昇し始める。最も小さい回転角度で破過する 1.2rph の場合、ある回転角度から比エンタルピが下降し、最終的に除湿入口空気状態へと近づいていく。

以上、局所除湿出口空気が空気線図上で描く状態変化も、比較的報告例が多い一般除湿用途のデシカント除湿挙動と定性的に一致していることがわかった^{12,16)}。

3.3.2 再生温度の影響

表 3.5 に実験条件を示す。

表 3.5 再生温度の影響を検証するための実験条件

	再生ゾーン	供給ゾーン	パージゾーン
流量	480 kg/h	1180 kg/h	480 kg/h
面風速	1.6 m/s	1.6 m/s	3.3 m/s
入口空気温度	87 , 112 , 135	6.1	
入口空気絶対湿度	Purge outlet	4.6 g/kg'	
ロータ回転速度	2.5rph		

まず、図 3.11 に再生空気温度と吸着工程であるパージおよび除湿出口空気露点の関係を総括する。再生温度が高いほど、より低露点空気を製造可能であるが、再生温度が

高いほど低露点化の傾向が緩やかになる。また、87 再生時は製品である除湿出口空気の露点がパージ出口空気よりも高く、低露点空気製造装置として好ましくない運転状態である。

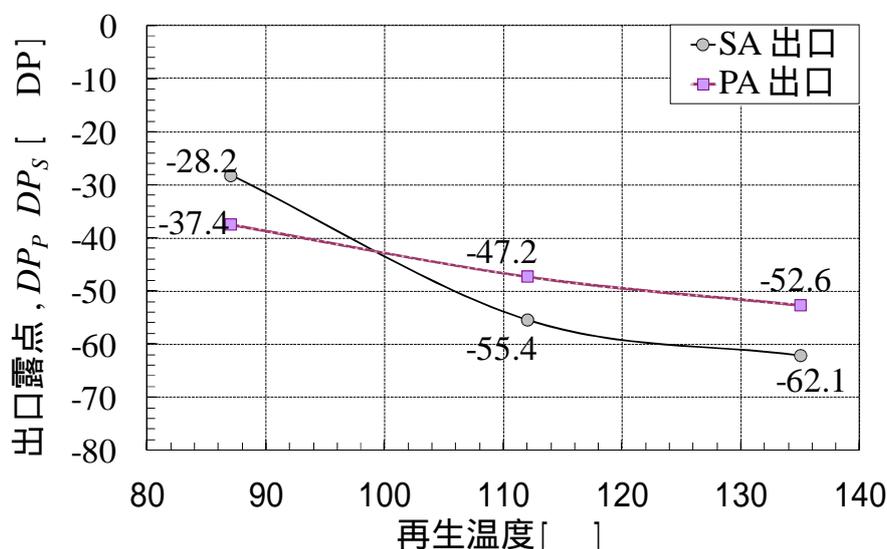
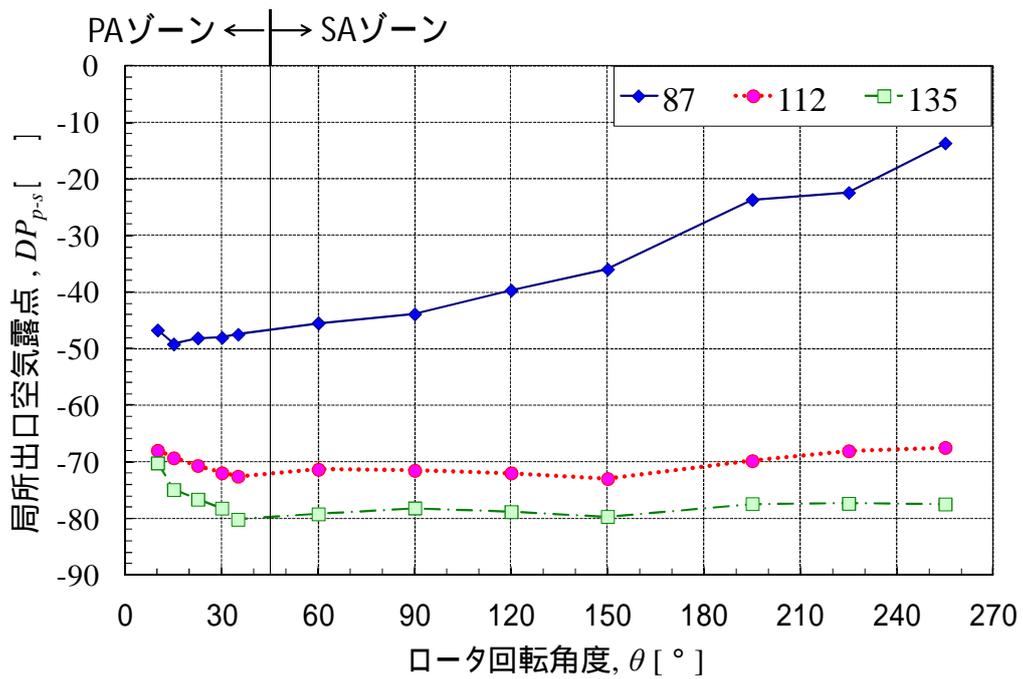


図 3.11 各出口空気露点に対する再生温度の影響

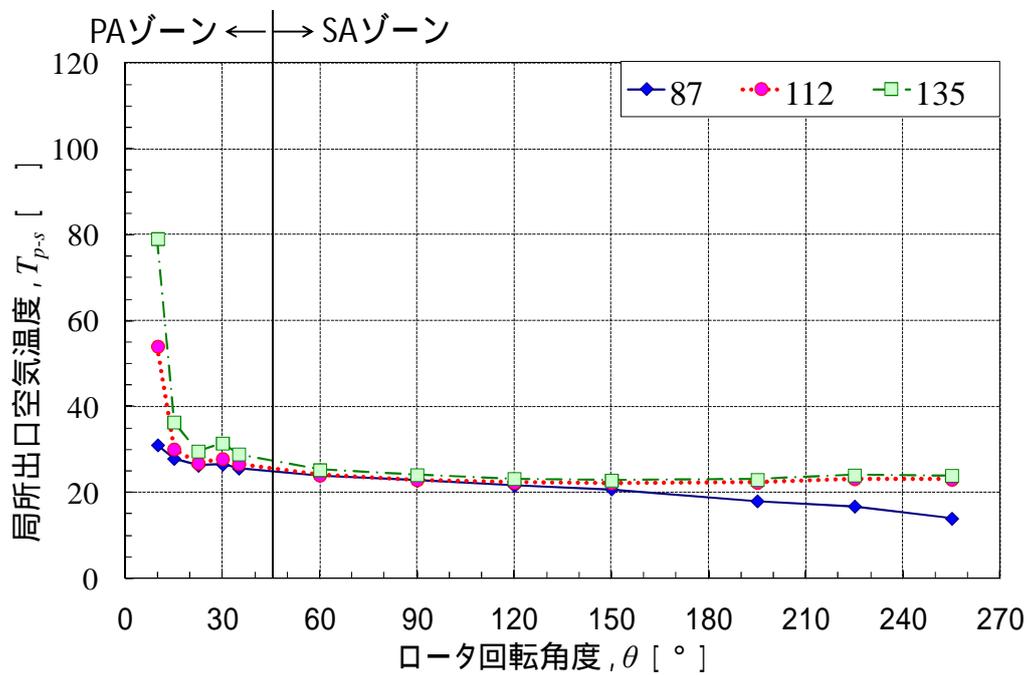
これらの除湿挙動について、以下に出口空気温湿度の回転方向分布を観察し、解釈する。図 3.12(a)(b)は、パージおよび除湿ゾーン出口空気のロータ回転方向露点・温度分布である。再生温度が 112 以上の場合、処理ゾーン途中で吸着破過が生じることは無く、除湿ゾーン出口すなわち製品空気の局所露点はほぼ一定の低露点を維持している。135 再生時は、吸着ゾーン全域で 112 再生時より局所露点が低く、除湿ゾーン出口では約 -80 付近で推移する。再生空気が高いと再生空気の相対湿度も低く、またデシカントロータに投入される再生熱量も大きくなる。これら二重の効果で水蒸気脱着が十分に進んだ結果である。

一方、87 再生時は、再生空気となるパージ出口空気の露点が -50 程度にしか下がらず、除湿ゾーンに移行する前から緩やかに露点が上昇する結果を得た。このことから吸着除湿負荷に対して、十分な再生熱量が供給されない場合、再生過程終了時にロータには水分が多く残り、結果として低露点空気を製造する性能を著しく損なうと考えられる。また、図 3.12(a)(b)を合わせ見ると、吸着除湿量の減少に呼応して吸着熱発生量が減少し、 $\approx 150^{\circ}$ 付近から除湿出口空気温度が緩やかに下降している。

図 3.13(a)(b)は、再生ゾーン出口空気のロータ回転方向露点・温度分布である。ロータ回転数が異なるものの再生温度が等しい前節の実験では、図 3.10(a)に示したように最大露点は 26~27 程度で差が無いが、再生温度が異なる図 3.13(a) では、再生温度が高いほど最大露点が高くなる結果を得た。また、回転角度が進むにつれて再生出口空気の

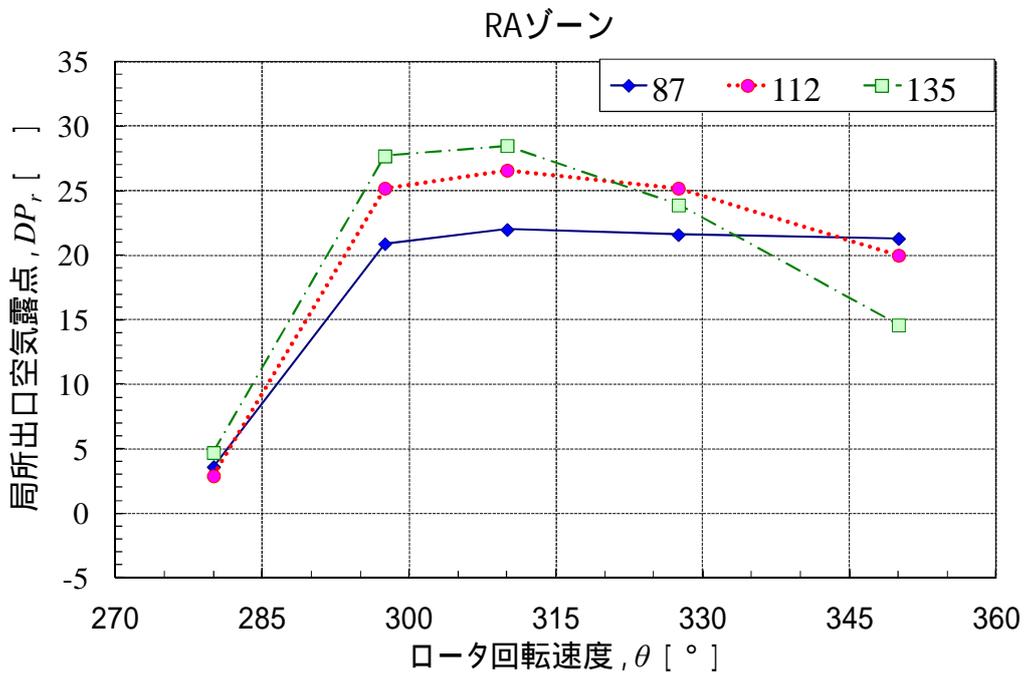


(a) パージ及び供給出口空気局所露点

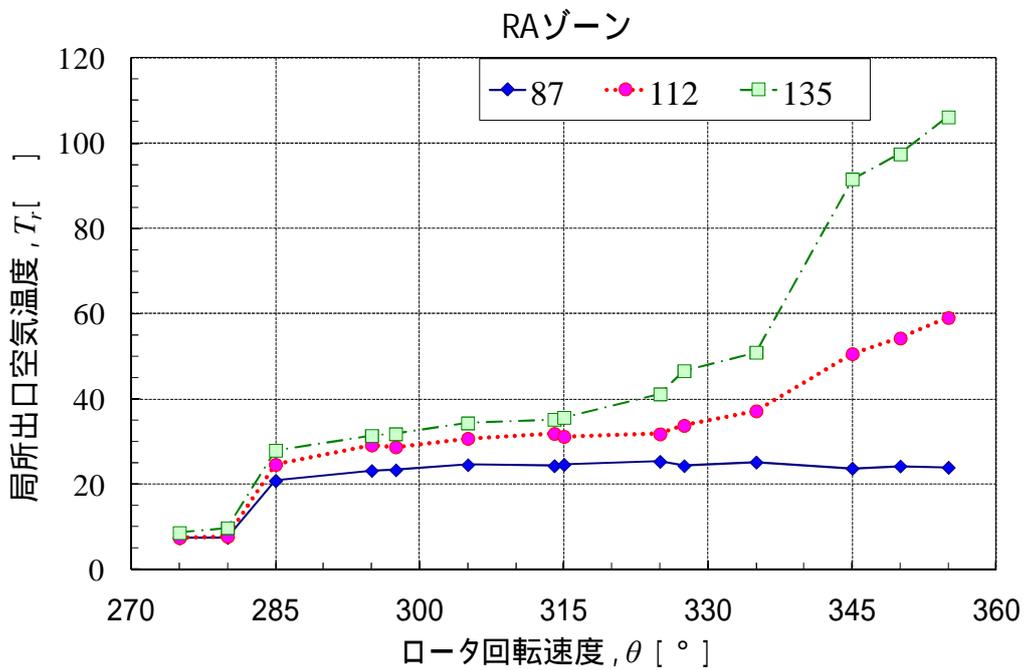


(b) パージ及び供給出口空気局所温度

図 3.12 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に与える再生温度の影響 (吸着ゾーンに関して)



(a) 再生出口空気局所露点



(b) 再生出口空気局所温度

図 3.13 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に与える再生温度の影響 (再生ゾーンに関して)

露点が下降し、温度は上昇し始めるが、再生温度が低い87 再生では、露点 22 ，温度 24 の低温高湿度のまま、吸着領域に移行する。

ここで、前節同様、ロータ回転角度の増大に伴う再生出口空気状態の推移を空気線図にプロットする(図3.14)。

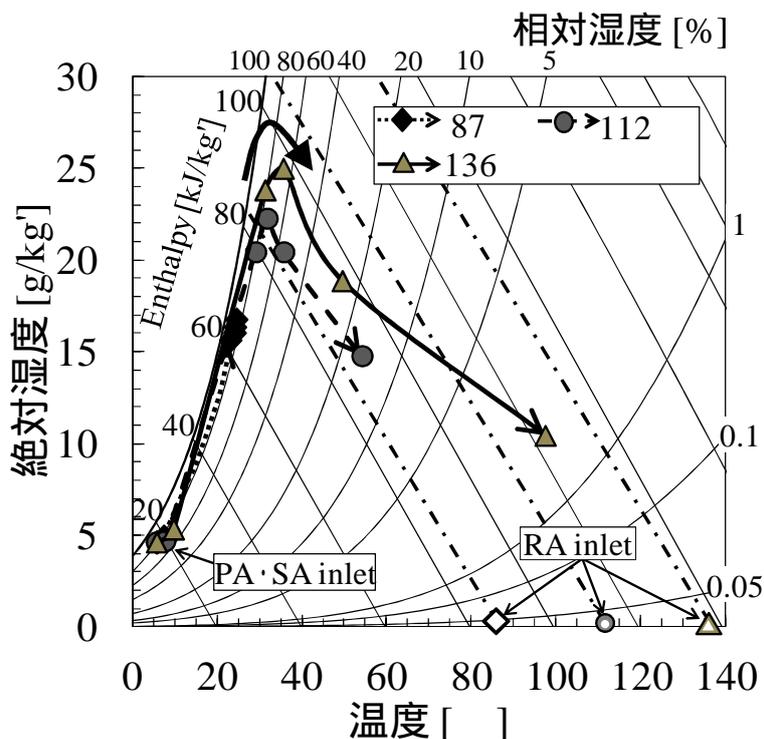


図 3.14 異なる再生温度におけるロータ回転角度進行に伴う局所再生出口空気の状態変化

再生開始後、回転角度が進むにつれて再生出口空気は、吸着入口空気と等しい相対湿度をほぼ維持しつつ、その絶対湿度は、ある比エンタルピ値に至るまで上昇し、最大湿度を示す。この空気状態をしばらく維持した後、再生が十分に進行する条件においては、再生出口空気湿度が下降し始め、空気状態は再生入口空気の値に近づく。なお、再生出口空気の最大湿度は、再生温度が高いほど大きい。これは、再生出口空気になり得る湿度上限が高まったことによる。再生空気温度を変化させた実験でもロータ回転に伴う再生出口空気の状態変化は、やはり一般除湿用途のデシカントロータにおける再生挙動と定性的に一致することが確認できた。

ここで、87 再生時の性能不足の原因は前述の通り、吸着除湿負荷に対して不十分なロータ再生にある。87 は低露点製造では比較的低い再生温度である。この温度域の再生空気を用いてより低露点の空気を製造するには、ロータに投入する熱量を増加させることが肝要である。単純に再生空気量を増加させてもよいが、本研究の対象とする流

路構成ではパージ空気量も増加するため、性能向上につながらない可能性もある。ロータ回転速度を下げて再生時間を長くする対策も考えられるが、同時に吸着時間も長くなり、除湿ゾーン途中で吸着破過を生じるため、再生 - パージ - 除湿ゾーン比率の調整が求められる。装置構造と再生熱量を変えずに製品空気露点を下げるには、プレクール湿度を下げるか、あるいは除湿風量を減らして吸着負荷を小さくする必要がある。

3.3.3 吸着入口空気絶対湿度の影響

表 3.6 に実験条件を示す。図 3.15 は、吸着入口空気湿度と吸着出口空気露点の関係である。吸着入口空気の絶対湿度が低いほど、より低露点空気が製造可能である。また、この操作条件では、吸着入口空気湿度が $5.3\text{g/kg}'$ を超えるとパージ出口空気露点が除湿出口空気すなわち製品空気露点を下回り、低露点空気製造装置として好ましくない運転状態となる。

表 3.6 吸着入口空気絶対湿度の影響を検証するための実験条件

	再生ゾーン	供給ゾーン	パージゾーン
流量	480 kg/h	1180 kg/h	480 kg/h
面風速	1.6 m/s	1.6 m/s	3.3 m/s
入口空気温度	112	6.1 , 8.7 , 10.8	
入口空気絶対湿度	Purge outlet	4.6 g/kg' , 5.6 g/kg' , 6.6g/kg'	
ロータ回転速度	2.5rph		

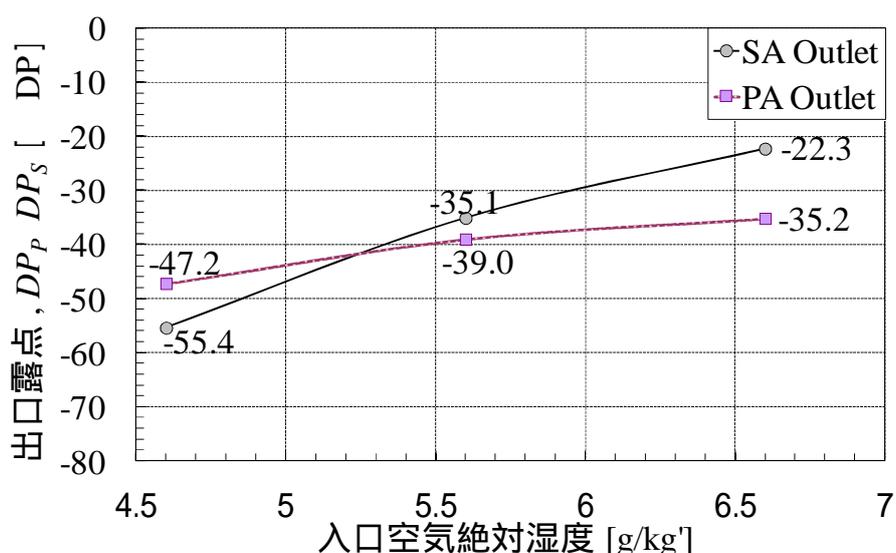
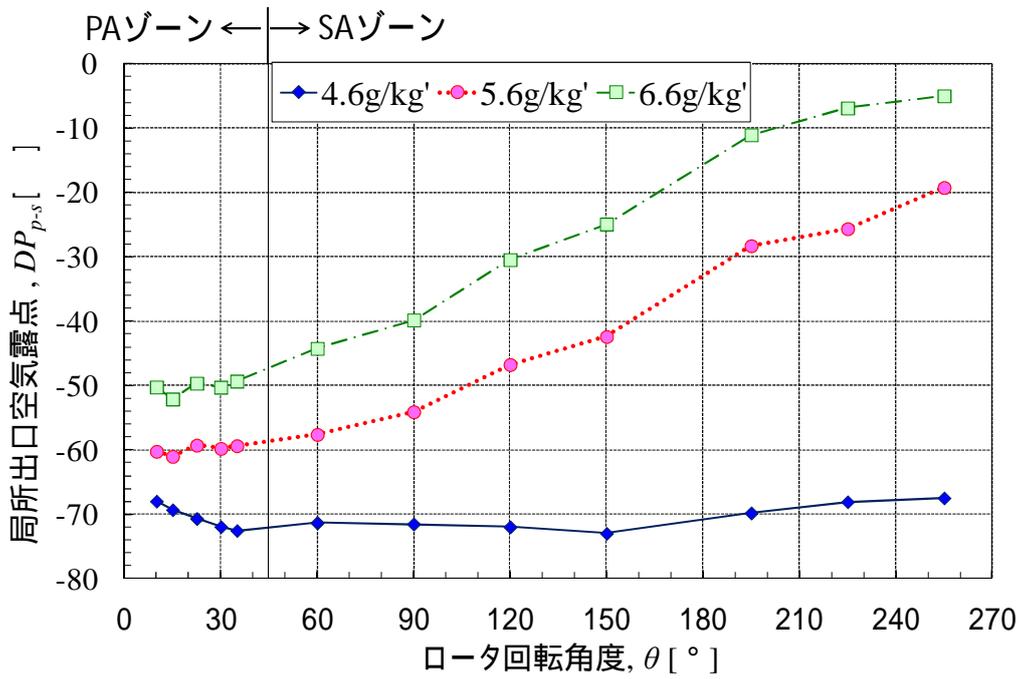


図 3.15 各出口空気露点に対する再生温度の影響

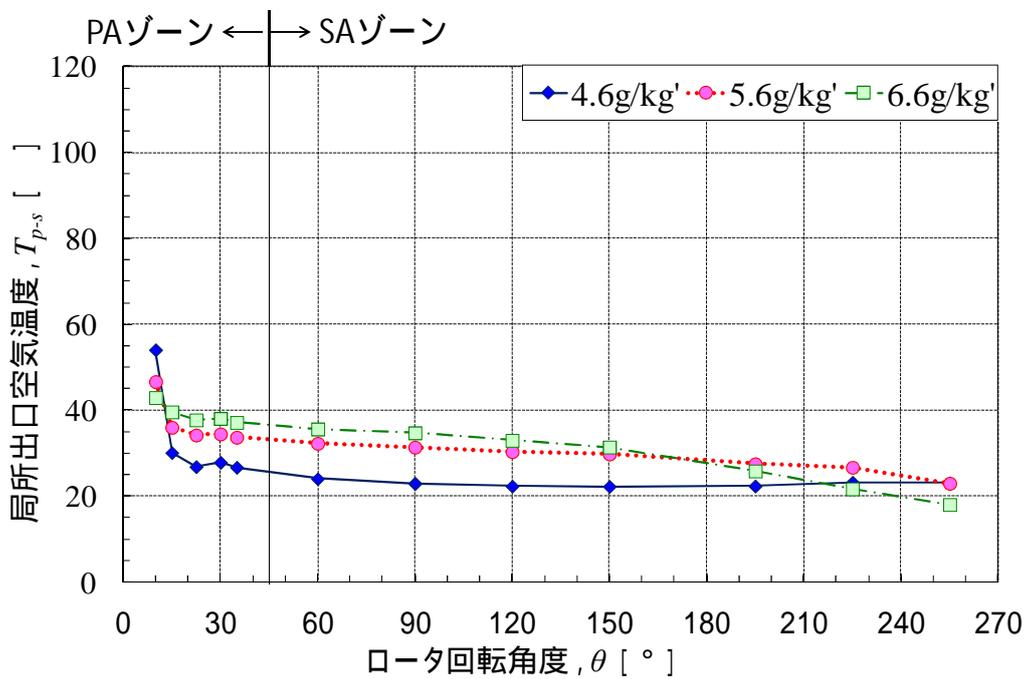
図 3.16(a)(b)に、パージおよび除湿ゾーン出口空気のロータ回転方向露点・温度分布を示す。吸着入口空気の絶対湿度が 4.6g/kg のとき、吸着ゾーン全域で露点が低く保たれるのに対し、より吸着負荷の大きい 5.6g/kg と 6.6g/kg の空気が吸着ゾーンに供給される場合には、デシカントロータがパージゾーンにあるうちに露点上昇が始まる。本実験条件では再生熱量は同一であることから、吸着入口絶対湿度が高くなると再生過程終了時にロータに残存する水分量は多くなる。また、吸着水分量の増加に伴うロータの熱容量の増加も脱着できずに残る水分量増加の一因となる。この結果として、低露点まで製品空気湿度を下げることができなくなる。

また、図 3.16(b)を見ると吸着入口空気の絶対湿度が高いほど、除湿量が多いことから吸着熱発生量も大きく、 $\approx 15 \sim 150^\circ$ の吸着初期は吸着入口空気の絶対湿度が低い場合よりも局所的に出口空気温度が高い。しかし、回転角度が進み吸着破過に至って除湿量が減少すると、吸着熱発生量が少なくなり、出口空気温度は、除湿ゾーン後半部でも吸着が継続する 4.6g/kg を下回るようになる。

図 3.17(a)(b)に再生ゾーン出口空気のロータ回転方向露点・温度分布を示す。図 3.17(a)より、最大露点は吸着入口空気湿度に関係なくほぼ一定で $26 \sim 27$ 程度ある。その後、ほぼ一定露点を示す区間が続き、吸着負荷の大きい 5.6g/kg および 6.6g/kg の空気を処理する場合には、そのまま吸着過程に移行する。温度分布も露点分布に呼応し、約 29 でほぼ一定温度のまま、吸着過程に移行する。吸着入口空気の絶対湿度が大きくなり吸着負荷が増大すると、再生初期の露点が上昇するなど水分脱着量も増えるが、上述のように再生終了時にロータに残存する水分量の多さが低露点空気製造の支障となる。

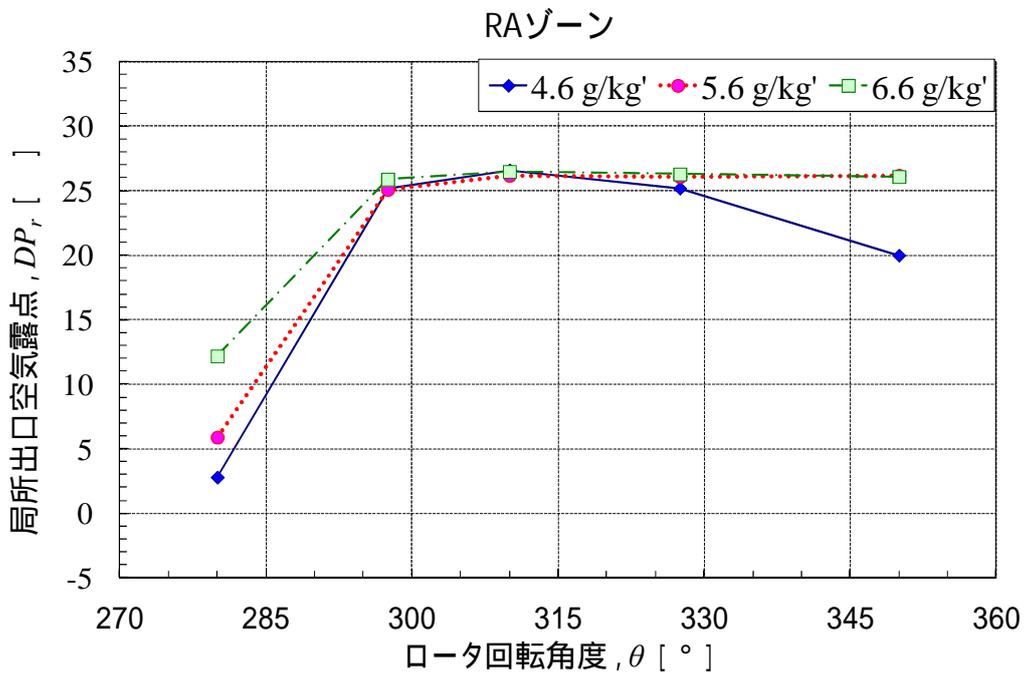


(a) パージ及び供給出口空気局所露点

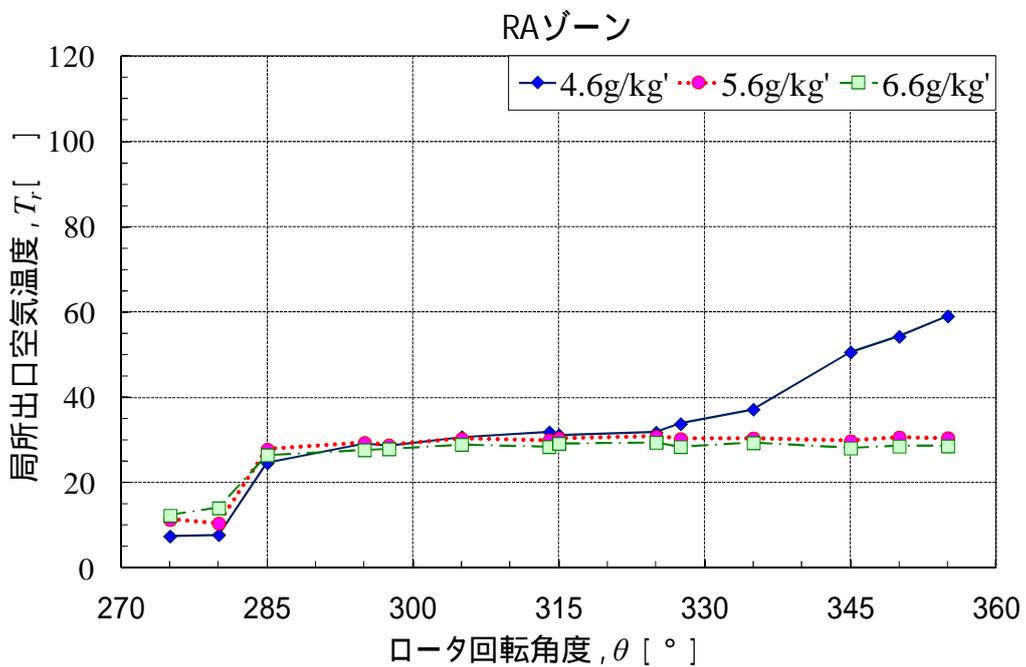


(b) パージ及び供給出口空気局所温度

図 3.16 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に与える吸着空気絶対湿度の影響 (吸着ゾーンに関して)



(a) 再生出口空気局所露点



(b) 再生出口空気局所温度

図 3.17 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に与える吸着空気絶対湿度の影響 (再生ゾーンに関して)

図 3.18 は、ロータ回転に伴う再生出口空気の状態変化を空気線図にプロットしたものである。ロータ回転速度、再生温度が変化した場合と同じく、吸着入口空気湿度が変化したときも、再生出口に形成されるロータ回転方向の空気状態変化は、一般除湿用途のデシカントロータの再生挙動と定性的に同じである。なお、再生出口空気の最大湿度は、吸着入口空気湿度に依存せず、ほぼ一定であった。これは、本実験では冷却コイルを用いて吸着入口空気湿度を調整したため、空気湿度低下とともに温度も低下し、結果的に吸着入口空気の相対湿度がほぼ一定になったことに起因する。

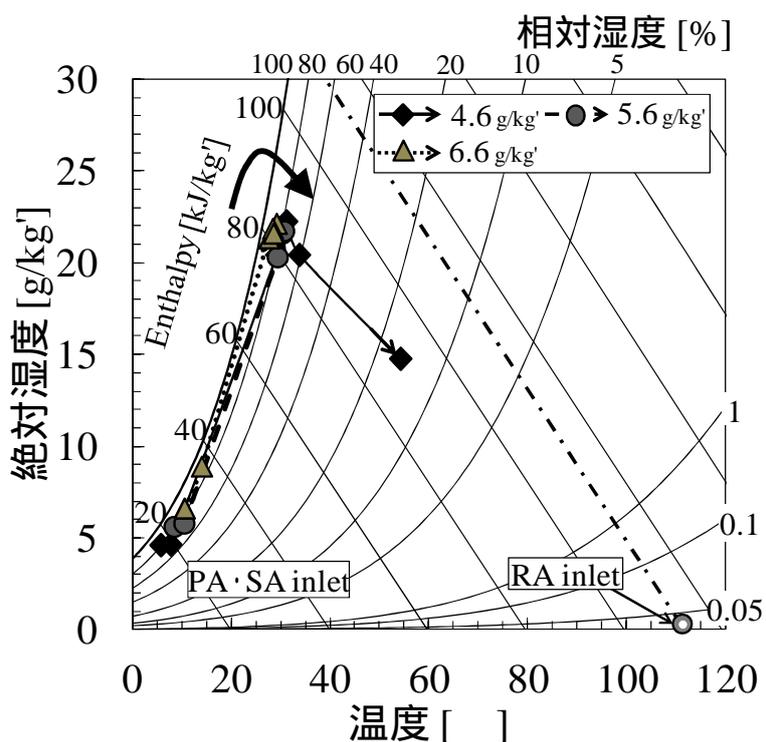


図 3.18 異なる吸着入口絶対湿度におけるロータ回転角度進行に伴う局所再生出口空気の状態変化

3.4 結言

低露点製造条件・流路構成におけるデシカントロータの数学モデルの構築と数値計算の信頼性向上に資することを第一の目的として、ロータ回転数、再生温度および吸着入口空気の絶対湿度を変化させながら各ゾーン出口のロータ回転方向空気状態分布を詳細に測定した。まず本稿では、得られた空気状態分布よりデシカントロータの運転挙動を考察し、以下の知見を得た。

- ロータ回転速度が遅く、再生時間が十分に長い場合、デシカントロータの空気流れ方向の全域が再生温度まで加熱され、平衡まで水蒸気脱着が進むため、吸着ゾーンではロータ内に明確な吸着帯が生じる。本実験で対象としたゼオライト系のロータでは、面風速 1.6m/s、ロータ厚 400mm に対して半分以上の吸着帯長さが示唆された。
- 吸着負荷に対して再生熱量が不足する場合、再生過程終了時にロータ内には水分が多く残存し、低露点空気を製造する能力を著しく損なう。
- 処理ゾーン途中で吸着破過を生じると製品空気の露点が大きく上昇する。よって、露点-50 以下の低露点空気製造を目的とする場合、処理ゾーン終端近くまで出口空気の露点を低く維持する、運用及び装置設計が求められる。
- 今回の実験では全ての条件において、再生出口および吸着除湿出口空気状態のロータ回転方向変化は、比較的報告例が多い一般除湿用途のデシカントロータの除湿/再生挙動と同様であることがわかった。よって、製品空気の水分濃度が、常湿環境よりはるかに低い低露点空気製造条件でも、既存のデシカント除湿・再生の理論及び数学モデルが適用できると考えられる。
- 低露点製造を対象とする数学モデルで注意すべきは、正確な吸着等温線の測定と吸着熱の算出である。これらに関して、低湿度域での物性値変化を計算に反映しないと、実測とは異なる結果を与える可能性が高い。

(参考文献)

- 83) 西村浩一, 岡村典明: 化学工学会論文集, **26** (3), 332 (2000).
- 84) 金偉力, 坂井麻美, 岡野浩志: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 81 (2012).
- 85) 竹内雍監修「最新吸着技術便覧」, pp. 255-258, NTS, 東京 (1999).
- 86) Y.J. Dai, R.Z. Wang, H.F. Zhang: International Journal of Thermal science, **40**, 400 (2001).
- 87) L.A. Sphaier, and W.F. Worek: International Journal of Heat and Mass Transfer, **47**, 3415 (2004).
- 88) 濱本芳徳, 村瀬壮介, 岡島次郎, 松岡文雄, 秋澤淳, 柏木孝夫: 日本冷凍空調学会論文集, **21** (1), 63 (2004).
- 89) 辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **23** (4), 467 (2006).
- 90) 辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **24** (3), 47 (2007).
- 91) 宮崎隆彦, 秋澤淳, 進藤伸二, 神戸正純, 高塚威, 濱本芳徳, 森英夫: 日本冷凍空調学会論文集, **26** (4), 521 (2009).
- 92) 辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 107 (2012).
- 93) 山口誠一, 斎藤潔: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 195 (2012).
- 94) 大坂侑吾, 辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 207 (2012).
- 95) Ge, T.S., Y.Li. Dai, R.Z. Wang and Y.J. Dai: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **12**, 1485 (2007).
- 96) 岡本久美子, 大島一典, 竹脇隆彦, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 97 (2012).
- 97) 綾目久雄, 木村崇, 神戸正純, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 217 (2012).
- 98) Kodama, A., M. Goto, T. Hirose and T.Kuma: Journal of Chemical Engineering of Japan, **28** (1), 19 (1995).
- 99) 藤田侑佑, 山口誠一, 斎藤潔: 平成 23 年度日本冷凍空調学会講演論文集, pp. 309-312 (2011).
- 100) 小金井真, 加藤信介, 大岡龍三, 趙旺熙, 川本光一: 平成 20 年度日本建築学会講演論文集, pp. 343-344 (2008).
- 101) 堀部明彦, 春木直人, 仁科裕貴, 宮内裕昭: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 119 (2012).
- 102) D. La, Y.J. Dai, Y. Li, R.Z. Wang, T.S. Ge: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **14**, 130 (2010).
- 103) 橋本洋城: 金沢大学工学部人間・機械工学科 卒業論文 (2009).
- 104) Hirose, T. and T.Kuma: Memoirs of the Faculty of Engineering, Kumamoto University, **40**, 273287 (1995).

- 105)綾目久雄，永坂茂之，神戸正純，辻口拓也，児玉昭雄：日本冷凍空調学会論文集，
30 (4), 13 (2013) .
- 106)B. A. Buffham, G. Mason, and M. J. Heslop, Industrial & Engineering Chemistry Research,
38 (3), 1114 (1999).
- 107)山口徹，井端一雅，中垣内直美，金井良之: azbil Technical Review ,pp. 60-69(2011) .
- 108)Novel Aire 社ホームページ
<http://www.novelaire.com/>
- 109)吉田智，伊藤雪夫，小川宏：東ソー研究・技術レポート Vol.54 (2010) .
- 110)垣内博之，下岡里美，岩手美紀，大島一典，山崎正典，寺田秀，渡辺展，武脇隆彦：
化学工学会論文集，31 (4), 273 ,(2005) .
- 111)General Eastern 社ホームページ
http://www.gesensing.jp/product/moisuture_humidity/
- 112)Vaisala 社ホームページ
<http://www.vaisala.co.jp/jp/Pages/default.aspx>
- 113)今若直征，舟里忠益，永田雄二: 平成 22 年度日本冷凍空調学会講演論文集，pp.
157-160 (2010) .
- 114)日本冷凍空調学会編:「湿度制御設計ガイド」,pp. 151-152 ,日本冷凍空調学会(2006) .
- 115)Kodama, A., M. Goto, T. Hirose and T.Kuma: Journal of Chemical Engineering of Japan,
27 (5), 644 (1994) .

第四章 ロータ内部の熱・物質移動解析

4.1 緒言

第二章にて、吸着材と空気間の物質移動が吸着材層吸着量基準の LDF (Linear driving force) 近似¹⁾に従うとする計算モデルを作成して、ハニカムブロック通風を対象としたシミュレーションを行った結果、供給空気露点が-10 DP 程度の低露点空気に対して、概ね実験結果を再現する計算結果が得られた。より露点の低い空気に関して検討を行うため、第三章にて局所露点が-70 DP 以下で駆動する低露点空気製造条件におけるデシカントロータ周りの回転方向湿度・温度分布の測定を行い、シミュレーション結果と比較しうる実測データを揃えることができた。

本章では最初に、モデル化を行う上での仮定を整理した。次にそのモデル化の条件に適合し詳細な計算を行う、GSSR(Gas side and Solid side Resistance)モデルを用いて²⁻¹³⁾、デシカントロータで-70 DP 以下の低露点空気を製造する条件にてシミュレーションした。結果、実験結果と整合するシミュレーション結果を得るか比較検証した。また、その計算結果を精査し、シミュレーションモデルが妥当か検証した。結果、計算量の大幅な削減を可能とする、簡略可能な部分が見受けられたためシミュレーションモデルについて再考し、LDF 近似の推進力を空気層絶対湿度基準とした LDF モデルにて、再度検証を行った。この絶対湿度基準の LDF モデルを用いた場合、予想通り詳細 GSSR モデルのときとほぼ同様の計算結果を得ることが可能で、簡易モデルながら実用上十分な精度を備えているシミュレーションモデルを構築することができることが分かった。また、LDF モデルの推進力の表現方法には、前述の絶対湿度基準とする場合の他、吸着材層吸着量基準とする場合がある¹⁴⁻¹⁵⁾。参考としてこの吸着材層吸着量基準の LDF モデルを用いた場合の計算精度についても言及した。

最後に、計算精度が確認されたシミュレーションモデルを用いて、低露点除湿機の省エネルギー化でしばしば問題となる、冬季部分負荷制御¹⁶⁻¹⁸⁾の検討を行った。シミュレーションによる検討の特徴を生かし、システムの消費動力を最小とする複数パラメータの組み合わせについて検討した事例を示した。結果、ロータ吸着負荷に合わせてロータ再生温度を変化させることで、冬季部分負荷時の再生エネルギーが計 37%削減可能になる試算結果を得た。

4.2 シミュレーション

4.2.1 モデル化のための仮定条件

デシカントロータの性能シミュレーションには、ロータ内部の熱・物質移動解析による方法が用いられることが多く²⁻¹³⁾本章でもこれを用いることにした。この方法では、デシカントロータを同一構造のハニカム構造体であると考え、その中からある一セルを抜き出す。流路を空気層と吸着材層に分けて考え、熱・物質移動計算を行い、除湿再生挙動をシミュレーションする(図4.1)。

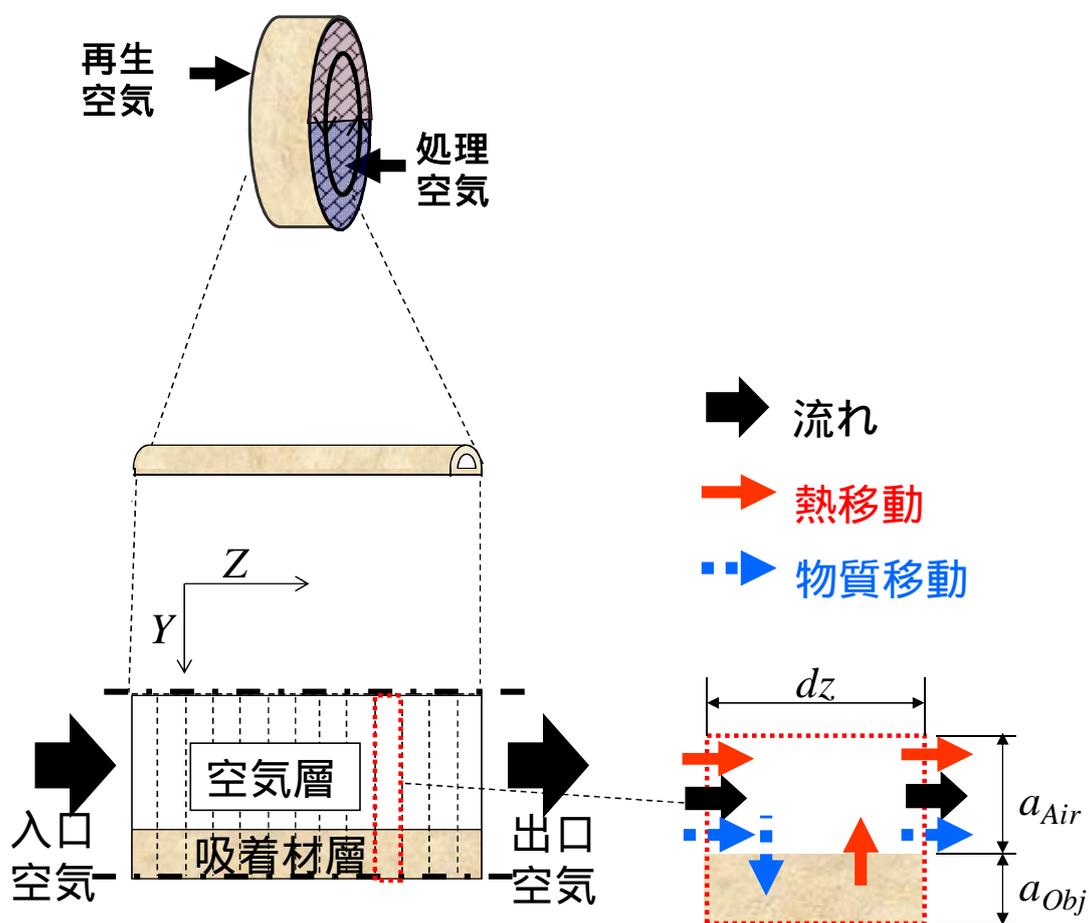


図 4.1 モデル化のイメージ

数学モデル化に際し、仮定条件を整理する必要がある。モデル化の主な条件を以下にまとめた。

- (1) ロータ円周方向の熱・物質移動は存在しない

つまり、実際の装置にてロータ外周部で存在すると予想される、装置外への熱ロス等は、考慮しない

- (2) 計算上通風経過時間をロータ回転角度に置き換える
- (3) 空気層内の熱・物質移動は、流れ方向 Z 方向のみ考慮する
非粘性流体の仮定で、計算を行う
- (4) 空気層内 Z 方向の熱・物質移動は、対流によってのみ起こるものとする
空気流速が 1.5 ~ 3m/s と速いため、対流支配と仮定できる
- (5) 吸着材層内の熱・物質移動は厚み Y 軸方向のみとする
吸着材層の厚み 0.12mm に比べ、ロータ厚さは 400mm と厚く、かつ吸着材の熱伝導率も悪いことから
- (6) 両層間の熱・物質移動は層流・発達領域の値を採用する
コルゲートの水力等価直径が小さい割に、ロータ厚さが厚いため、入口区間が計算結果に与える影響は小さいと考えたため
- (7) 空気を非圧縮性流体とする
流体温度が変化した場合も、空気密度の変化は考慮しない。

(1)の仮定の妥当性を検証するため、検討対象とする実機において、ロータ断面の温度分布をサーモカメラで撮影した写真を図 4.2 に示す。ある運用条件における再生出口側において、運転が定常状態に至った後に撮影したものである。ロータ回転角度が進行するに従って吸着材再生が進み、回転角度の後半から吸着材温度が上昇していることが分かる。ロータ円周方向の温度分布が大きい場合、装置外への熱ロスの影響が無視できず、(1)の仮定は成り立たないことになるが、写真を見ると円周方向の温度分布は小さく、仮定は妥当なものであると判断した。

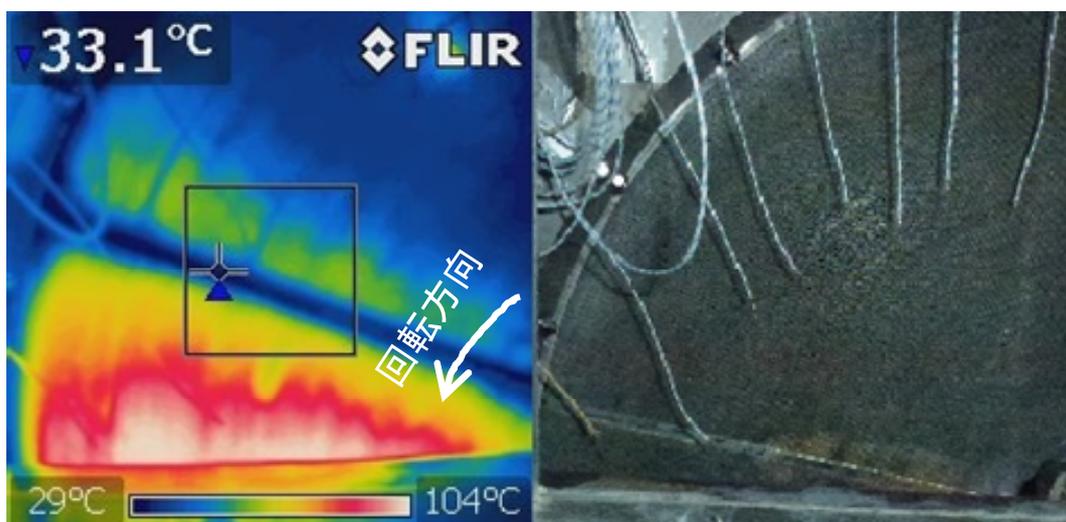


図 4.2 ロータ再生出口断面の温度分布測定写真

4.2.2 GSSR モデル

4.2.1 項の仮定を数式化したシミュレーションモデルについて説明する。本モデルでは空気 - 吸着材層間の物質移動機構について、境膜抵抗と吸着材層内拡散抵抗の両方を考慮しており、一般的には GSSR モデルと呼ばれるシミュレーションモデルである。本研究でも、その他のシミュレーションモデルと区別するため、同様に呼ぶ。物質移動及びモデル化のイメージを図 4.3 に示す。このとき、境膜移動部分の吸着速度式は式(4.1)で示される。なお、以降に出てくる絶対湿度、吸着量の下部記号 i は界面の値、上部記号 $*$ は平衡値、 $-$ を付した値は吸着材層の着目した断面あたりの平均値を意味する。



図 4.3 GSSR モデルの吸着速度式のイメージ

吸着速度式（吸着材層厚み方向温湿度分布を考慮する場合）

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{k_F}{a_{Obj}} \frac{\rho_{Air}}{\rho_{Obj}} (\bar{x} - x_i) + D_{Obj} \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \quad (4.1)$$

GSSR モデルは物質移動プロセスを境膜移動と吸着材層内拡散移動の 2 つに分けた計算方式で、実現象に近いモデルである。吸着材層の界面最近傍の位置での吸着量と温度を直接参照できるので、それらから同位置での絶対湿度 x_i を得ることができる。式(4.1)は空気層内断面平均絶対湿度 \bar{x} と、界面位置での絶対湿度 x_i の差分が、吸脱着が起こる推進力になるとする計算式であるが、これは伝熱機構とのアナロジー¹⁹⁾が成り立つ一般的な計算式である。したがって、この際の物質移動係数 k_F は、既存の文献が多い管内 Sh 数²⁰⁾から導出した値を直接使用することができるメリットを持っている。

吸着材表面の吸着量に相当する仮想的な絶対湿度 x^* を導出するための計算は、吸着材界面の近傍の吸着量（図 4.3 にて q_1 で示される）と同位置での吸着材層温度から、吸着等温線を元に導出する。また、物質移動係数 k_F は以下の式(4.2)で計算される。

物質移動係数 k_F の導出式

$$k_F = Sh \cdot \frac{D_{Air}}{d_h} \quad (4.2)$$

なお，式(4.1)の第一項が有効なのは，空気層との界面に位置する計算格子においてのみで，それ以外の計算格子では右辺は，吸着材層内の吸着量 q を基準とした物質拡散を示す第二項のみとする．

その物質拡散項の拡散係数 D_{Obj} は通常，理論に基づく推定式で導出される．山口²³⁾は吸着材層内の拡散メカニズムをさらに幾つかのプロセスに分けて考え，電気回路とのアナロジーを利用して，正味の吸着材層内拡散係数 D_{Obj} を導出する方法を示している．物質拡散は，大きく分けて細孔拡散と表面拡散に分類され，細孔拡散はさらに，分子拡散と Knudsen 拡散に分けられる．山口²³⁾は吸着材層内において，細孔拡散と表面拡散は並列に生じると仮定し，細孔内の分子拡散と Knudsen 拡散は直列に生じていると仮定した．これらの拡散抵抗の関係は電気回路のアナロジーを利用して表現すると，図 4.4 の関係にある．

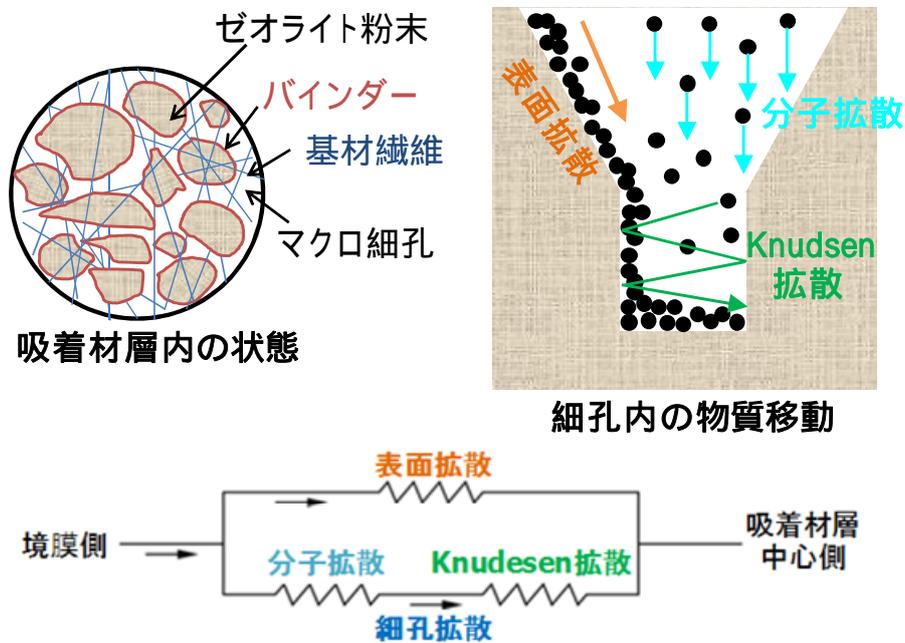


図 4.4 吸着材層内の物質拡散メカニズム

ここで言う分子拡散とは，湿り空気中の物質濃度の偏りによって生じる通常の拡散の

ことである．つまり，式(2.10)で示される²⁴⁾．

Knudsen 拡散とは，多孔質固体内の細孔のような，非常に狭い空間に特有の拡散現象である．注目したガス分子の自由行程よりも細孔径が小さい場合，ガス分子は，他のガス分子の衝突頻度よりも，細孔壁との衝突頻度の方が相対的に多くなる．これによって生じる抵抗が Knudsen 拡散による抵抗である．したがって，Knudsen 拡散係数の大きさは，その多孔質固体の持つ細孔の平均細孔径に強く依存している．Knudsen 拡散係数 D_k は次式のように表される²⁵⁾．なお， r は吸着剤の平均細孔径で，本実験で用いたゼオライト 13X は $r = 10$ である²⁶⁾．また， M_w は水の分子量なので 18 を代入する．

Knudsen 拡散係数 D_k の計算式²⁵⁾

$$D_k = 97\gamma \cdot \left(\frac{T + 273.15}{M_w} \right)^{0.5} \quad (4.3)$$

求めた D_m と D_k から，次式の関係を用いて細孔拡散係数 D_p を計算する．

細孔拡散係数 D_p の計算式

$$\frac{1}{D_p} = \frac{1}{D_{Air}} + \frac{1}{D_k} \quad (4.4)$$

次に，表面拡散について説明する．表面拡散は，吸着材層内部の固体表面上で生じる拡散現象である．表面拡散の推進力は，吸着材層内の吸着量勾配であり，Sladek ら²⁷⁾ は，表面拡散係数 D_s を表す式として次式を提案している．

表面拡散係数 D_s の計算式

$$D_s = D_0 \cdot \exp \left\{ -a \frac{Q_h}{R_w(T + 273.15)} \right\} \quad (4.5)$$

ここで，係数 D_0 と a は，拡散物質と吸着剤の種類によって様々であるが，水 シリカゲル系においては， $D_0 = 1.6 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ および $a = 0.45$ が提案されており，本研究ではこの値を用いた．また，水蒸気の気体定数 $R_w = 461.7 [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ を代入する．

次に，細孔拡散と表面拡散を合わせた，トータルの拡散について考える．ゼオライトは均質の細孔径を持つ吸着剤だが，デシカントロータはバインダー，ハニカム基材との複合体であり，ゼオライト単体とは異なる細孔径分布・細孔構造をもつ．そこで，3 つ

の拡散機構全てが存在し、表面拡散と細孔拡散が並列して起こることを仮定した、汎用的な抵抗モデルを採用した。また、細孔拡散と表面拡散は、並列的に生じているが、それぞれの推進力が異なっている。細孔拡散では、細孔内に満たされている湿り空気中の水蒸気濃度勾配を推進力としているが、一方で、表面拡散では、多孔質後退内部の固体表面上に吸着した物質の濃度勾配を推進力としている。山口²³⁾は、吸着材層の空隙率と、細孔の屈曲度を用いて、トータルの拡散係数 D_{Obj} を次式のように1つの式にまとめており、本シミュレーションでも同様の方法を用いる。

吸着材層内物質拡散係数 D_{Obj} の計算式²³⁾

$$D_{Obj} = \frac{D_s}{\tau} + A \frac{D_p}{\tau} \quad (4.6)$$

ここで

$$\begin{aligned} A &= \varepsilon \left(\frac{\rho_{Air}}{\rho_{Obj}} \right) \left(\frac{\partial x}{\partial q} \right) \\ &= \varepsilon \left(\frac{a_{Obj}}{a_{Air}} \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

である。なお、屈曲度は、細孔が完全にランダムに配向している場合に3となり、ここではこの値を用いることとする。また、吸着材層の空隙率は、吸着材層体積のうち吸着剤そのもの（ここではゼオライト 13X）の体積が占める割合で、ロータ製造メーカーから入手した値 0.7 を使用する。

表面拡散係数 D_s 及び細孔拡散係数 D_p は、ともに温度の関数なので、吸着材層内物質拡散係数 D_{Obj} は局所温度によって、その値が変化する。温度による変化の大きさを示すため、使用範囲温度での D_{Obj} の変化を図 4.5 にグラフで示した。図の通り温度にほぼ比例する形で大きくなるが、実用温度範囲では 10^{-10} オーダーの拡散係数となる。

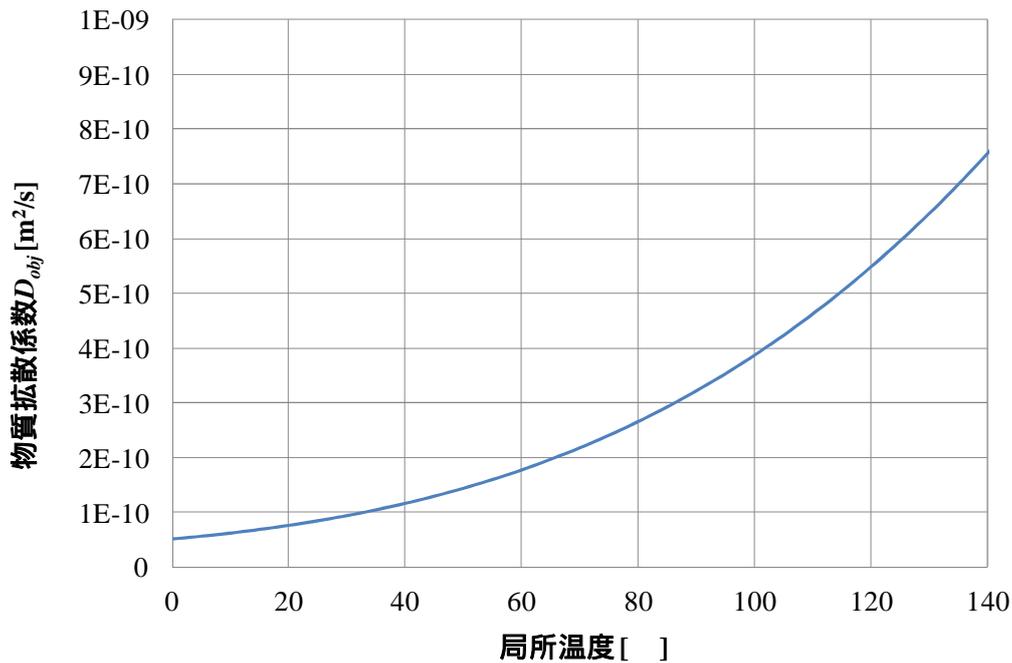


図 4.5 吸着材層内物質拡散係数 D_{Obj} の温度依存性

なお，吸着材層内の Y 軸方向の熱移動も考慮しなければならないので，吸着材層に関するエネルギー式も一部変更する． Y 軸方向の熱伝導を考慮するよう熱伝導に関する項を加えた式(4.8)を使用する．

吸着材層に関するエネルギー式

$$\rho_{Obj}(c_{Obj} + c_w \bar{q}) \frac{\partial T_{Obj}}{\partial t} - \lambda_{Obj} \frac{\partial^2 T_{Obj}}{\partial z^2} - \lambda_{Obj} \frac{\partial^2 T_{Obj}}{\partial y^2} - \frac{h}{a_{Obj}} (T_m - T_{Obj}) - \rho_{Obj} Q_k \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0 \quad (4.8)$$

吸着速度式(4.1)とそれに関連する式(2.10)及び式(4.2)～(4.7)，吸着材層のエネルギー式以外の支配方程式は式(2.8)～(2.9)を使用する．これらの式(4.1)及び式(4.8)及び式(2.8)～(2.9)の支配方程式を有限差分法で離散化し， Z 軸方向の格子分割数を 40，吸着材層 Y 軸方向の格子分割数を 10 として計算を行った．対流項の差分は風上差分とした．

4.2.3 シミュレーションモデルの簡略化

GSSR モデルは詳細なシミュレーションモデルであるが，計算負荷が大きいという欠点がある．モデル化の仮定条件を重ねて，シミュレーションを簡略化して計算負荷を削減する手法が考えられる．現状の熱・物質移動解析手法は，GSSR モデルの他，LDR (Linear

driving force) モデル⁹⁾がある。LDF モデルでは吸着材層を非常に薄いものとして、吸着材層内の厚み(半径)方向の温度・湿度分布を考慮しない。一方、GSSR モデルは吸着材層内の厚み方向の温度・湿度分布を考慮するモデルである。また、どちらのモデルでも空気層内の厚み方向の分布を考慮しない場合が多い。

実現象において吸着剤による除湿が行われる際は、空気中の物質は境膜移動、表面拡散、及び吸着材粒子内の細孔拡散を経て、吸着剤細孔に吸着される。どの移動プロセスでもそれぞれ移動抵抗があるため、実性能を正確に再現するシミュレーションを行うためには、これらそれぞれの移動抵抗を何らかの形で計算に反映するべきである。LDF モデルはこの移動プロセスを1つの方程式で示した簡易モデルで、一般的に線形推進力(LDF)近似¹⁾と呼ばれる計算手法が使用される。その表現方法は物質移動の推進力を吸着量基準とする場合と、空気層濃度(絶対湿度)基準とする場合とに分けられる。両者をそれぞれ式(4.9)と式(4.10)に示す。

吸脱着速度式(吸着材層吸着量基準)

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = \frac{K_S}{a_{obj}} (q^* - \bar{q}) \quad (4.9)$$

吸脱着速度式(空気層絶対湿度基準)

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = \frac{K_F}{a_{obj}} \frac{\rho_{Air}}{\rho_{obj}} (\bar{x} - x^*) \quad (4.10)$$

どちらも複雑な移動プロセスを1つの簡易な方程式で表現しようとするもので、移動係数である K_S もしくは K_F を、全ての移動抵抗を含めた総括値とすることで、実験値との整合を図っている。

式(4.1)は吸着材層内断面平均吸着量 \bar{q} と平衡吸着量 q^* の差分が、吸脱着が起こる推進力になるとする計算式である。平衡吸着量 q^* を導出するための計算に、局所の温度と絶対湿度が必要となるが、通常空気層・吸着材層ともに厚み方向に格子分割を行わないため、温度は吸着材温度の断面平均値を、絶対湿度は空気層の断面平均値を参照する。ここで、空気層及び吸着材層の厚み方向の分布を考慮しないということは、空気層・吸着材層ともに断面平均値は吸着材界面位置での値と同義ととらえることができる。この解釈に従うと、式(4.1)は吸着材界面での吸着量 q_i と吸着材層内断面平均吸着量 \bar{q} の差分が、吸脱着が起こる推進力になっていると捉えることができる。その意味では、式(4.9)は一連の吸着プロセス全体のうち、特に吸着材層内の物質移動に重点を置いた形式であると解釈でき、全吸着抵抗のうち吸着材層内の抵抗の影響が相対的に大きい場合、本式

の適用が適していると考えられる。

一方，式(4.10)は空気層内断面平均絶対湿度 \bar{x} と，吸着量に相当する仮想的な絶対湿度 x^* の差分が，吸脱着が起こる推進力になるとする計算式である．仮想絶対湿度を導出するための計算に，温度と吸着量が必要となるが，通常空気層・吸着材層ともに厚み方向に格子分割を行わないため，温度は吸着材温度の断面平均値を，吸着量は吸着材層の断面平均値を参照する．前述の式(4.9)同様，空気層・吸着材層ともに断面平均値は吸着材界面位置での値と同義ととらえることができる．この解釈に従うと，式(4.10)は空気層内断面平均絶対湿度 \bar{x} と吸着材界面での絶対湿度 x_i の差分が，吸脱着が起こる推進力になっていると捉えることができる．その意味では，式(4.10)は一連の吸着プロセス全体のうち，特に境膜での物質移動に重点を置いた形式であると解釈でき，全吸着抵抗のうち境膜抵抗の影響が相対的に大きい場合，本式の適用が適していると考えられる．式(4.9)(4.10)が示す LDF 近似による物質移動のイメージを図 4.6 に示す．

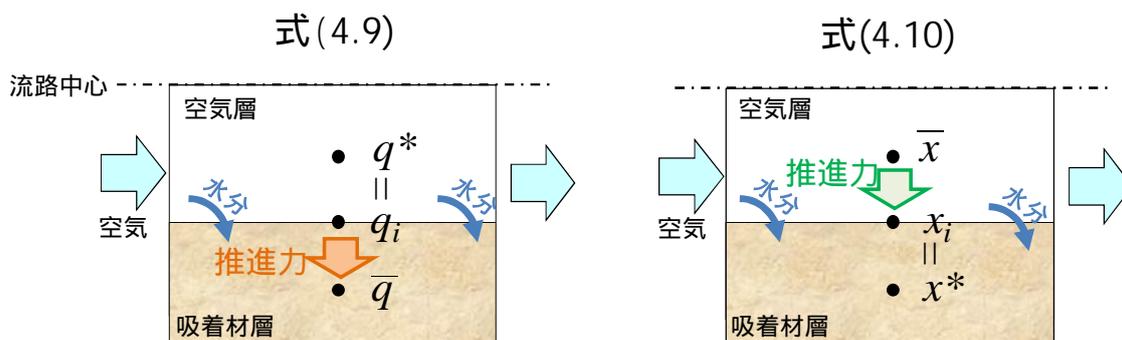


図 4.6 LDF モデルの吸着速度式のイメージ

また，空気層内厚み方向の分布を考慮した計算式の場合，空気層界面最近傍の位置での絶対湿度と吸着材層断面平均の温度から，界面における吸着量 q_i を直接求めることができる．この場合，物質移動（境膜移動）は，式(4.3)で示される¹⁾．

吸着速度式（空気層厚み方向温湿度分布を考慮する場合）

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = \frac{k_s}{a_{obj}} (q_i - \bar{q}) \quad (4.11)$$

一般的に使用される吸着速度式は，式(4.1)および式(4.9) ~ (4.11)である．それぞれの計算式で表現される推進力の関係を図 4.7 に示す¹⁾．

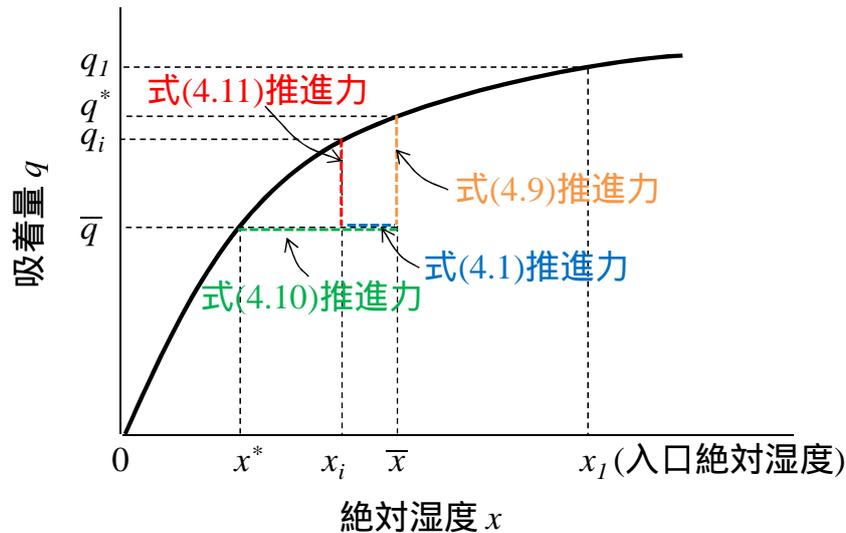


図 4.7 吸着速度式(4.1)および式(4.9)～(4.11)の推進力¹⁾

図 4.7 に示す通り，一般的に絶対湿度と吸着量の関係は線形でなく，さらに温度によっても変化する．したがって，それぞれの推進力はその温湿度域によって大小関係が変化する．複雑な計算過程が必要で計算負荷が大きいものの，実現象に近く計算精度が良いのは式(4.1)であるので，上記の非線形が強い場合，移動係数 K_S, K_F, k_S を温度あるいは湿度の関数として推進力を補正する必要があることが分かる．一見，絶対湿度基準の吸着速度式のほうが合理的なように見受けられるが，吸着量基準の吸着速度式の場合，通常測定が困難である移動係数を，マイクロ試験にて実験的に求めることができるという利点を持っている²¹⁻²²⁾．現状ハニカムロータ型除湿機のシミュレーションに関する報告例の多くは，吸着速度式に式(4.9)あるいは式(4.10)を用いた LDF モデルを採用している．

第二章でデシカントハニカムブロックでの吸脱着を対象としたシミュレーションを行った際，使用した吸着速度式は式(4.9)及び式(4.11)である．検討の結果，デシカントロータ型の低露点除湿機で通常用いられるコルゲート水力等価直径 $d_h=2\text{mm}$ 以下のハニカムでは，両者に有意な計算結果の違いが生じないことが分かった．また，高分子吸着剤担持ハニカムの場合，これらの移動式を使用することによって， -10 DP 程度の低露点空気に対して，概ね実験結果を再現する計算結果が得られた．

計算負荷低減の可能性を検討するため，前述の GSSR モデルに加え，式(4.9)および式(4.10)の吸着速度式を用いたシミュレーションモデル，つまり吸着量基準の LDF モデルと絶対湿度基準の LDF モデルの適用も検討した．

4.2.4 絶対湿度基準の LDF モデル

2.2 節で述べたシミュレーションモデルは、吸着量基準の LDF モデルである。本章で新たに適用する、絶対湿度基準の LDF モデルについて説明する。

吸着速度式は式(4.10)に示した通りである。現吸着量に相当する仮想的な絶対湿度 x^* を導出するための計算は、現吸着量と吸着材層温度から吸着等温線をもとに導出する。吸着速度式以外の基礎式は、基本的に式(2.7)~(2.9)と同じである。式(4.10)及び式(2.7)~(2.9)の支配方程式を有限差分法で離散化し z 軸方向の格子分割数を 40 として計算を行った。対流項の差分は風上差分とした。

なお、ここで用いる総括物質伝達係数 K_F は、後述の境膜での物質移動係数 k_F に、吸着材層内の拡散抵抗に関する補正を加えた値である。実験的に直接測定するのは難しい物理量のため、通常フィッティング係数として扱われることが多いが、吸着材層内の抵抗を含む分だけ k_F より小さくなるはずである。しかし、吸着材層内の拡散抵抗が十分小さい場合、総括物質移動係数を境膜のみを考慮した値、つまりに k_F と同等の値に設定する。

4.2.5 計算条件

本章では 3 つの段階に分けてシミュレーションを行った。

1 つ目は、特に吸着速度式に関して複数候補があるシミュレーションモデルの、それぞれの計算精度を検証するため、代表的な運転条件において、それぞれのシミュレーションモデルを適用したとき、実験値に近い計算結果を得るか検証した。この時の計算条件を以降の「(a) モデルごとの精度検証時」に、計算結果を 4.3 節に示した。

2 つ目に、検証したシミュレーションモデルの中で、計算精度・計算負荷の観点から、本実験系に適しているモデルを 1 つ選び、実用モデルとして、第三章で実験を行った複数の運転条件で計算を行い、パラメータ変化に対して実験結果を追従する計算結果が得ることができるか検証した。この時の計算条件を以降の「(b) 適用モデルの精度検証時」に、計算結果を 4.4 節に示した。

3 つ目は、精度が検証されたシミュレーションモデルを用いて、除湿機として運用した際の運転パラメータの最適化を検討した。運用時に操作される複数のパラメータについて、それぞれ広い範囲で値を変化させて、それらの組み合わせで除湿機の性能がどのように変化するか試算した。この時の計算条件を以降の「(c) 運転パラメータの最適化検証時」に、計算結果を 4.5 節に示した。

(a)~(c)のどの運転条件も、対象のデシカントロータの仕様は同じで、第三章の実験で用いたものとした。計算で使用したロータの特性値は表 3.1 に示す通りである。なお、第三章で測定した吸着等温線データ及び、吸着熱のデータをシミュレーションに反映させるため、以下の回帰式を作成して使用した。

測定の結果吸着等温線は、吸脱着時のヒステリシス、温度依存性ともに影響が小さかったので、40 における吸着過程での平衡吸着量を元に、相対湿度 RH [%] の関数として回帰式を作成した。なお、非線形の強い吸着特性を正確に数式化するため、回帰式を作成する際、相対湿度域に応じて 5 個の場合分けを行った。

一方、吸着熱に関しては吸着量依存性が確認されたため、吸着量の関数として回帰式を作成した。この時、示差熱・熱重量測定装置を用いて測定した結果は、測定精度にやや難があったため、類似した吸着材である X-Y ゼオライトに関する文献値²⁸⁾を採用した。こちらについても正確に数式化するため、回帰式を作成する際、吸着量に応じて 2 個の場合分けを行った。

吸着等温線の回帰式 (ここで、 $RH_n = RH/100$ とする)

$$\begin{aligned}
 q^* &= 0.0522RH_n + 0.1378 && (75 < RH < 100) \\
 &= 0.1345RH_n^3 - 0.2191RH_n^2 + 0.1594RH_n + 0.1239 && (13 < RH < 75) \\
 &= -0.0007RH^2 - 0.0179RH + 0.0264 && (0.5 < RH < 13) \\
 &= -0.6511RH^4 + 1.1443RH^3 - 0.7371RH^2 && (0.01 < RH < 0.5) \\
 &\quad + 0.238RH - 0.00135 && \\
 &= 27.3884(RH)^{2.2282} && (RH < 0.01)
 \end{aligned}$$

(4.12)

吸着熱に関する回帰式²⁸⁾

$$\begin{aligned}
 Q_h &= (-990.7q^3 + 386.7q^2 - 51.5q + 5.05) \times 10^6 && (q < 0.1) \\
 &= 2800 \times 10^3 && (0.1 < q)
 \end{aligned}$$

(4.13)

(a) 各シミュレーションモデルの精度検証時

第三章で行った実験条件の中でも、最も吸脱着現象の特性が顕著に表れる運転例であった、ロータ回転速度を低く設定してハニカム内の吸脱着が、完全破過 完全再生に近い運転を繰り返すようにした運転条件(ロータ回転速度 1.2rph の時)に着目した。その時の運転条件を表 4.1 に示す。これは第三章における標準条件から、ロータ回転速度のみ 1.2rph に変更した条件であり、この運転条件において各シミュレーションモデルで計算を行い、結果を比較した。

適用を検討するシミュレーションモデルは、詳細手法として 4.2.2 項で示した GSSR モデル、簡易手法として 4.2.4 項で示した絶対湿度基準の LDF モデル、第二章で示した吸着量基準の LDF モデルの順で計 3 種類を対象とした。

表 4.1 モデルごとの計算精度検証時の運転条件

	再生ゾーン	供給ゾーン	パージゾーン
流量	480 kg/h	1180 kg/h	480 kg/h
面風速	1.6 m/s	1.6 m/s	3.3 m/s
入口空気温度	112	6.1	
入口空気絶対湿度	Purge outlet	4.6 g/kg'	
ロータ回転速度	1.2rph		

なお，熱伝達係数 h はどのシミュレーションモデルでも $Nu=3.6$ となる値を入力値とした．また，GSSR モデルにおける物質移動係数 k_F は， $Sh=Nu=3.6$ として，式(4.2)から値を決定した．絶対湿度基準のLDFモデルにおける総括物質移動係数 K_F は，本来フィッティング係数として決定するが，後述 4.3 節の検討で吸着材層内の拡散抵抗は，十分小さいことが予想されたため，境膜抵抗のみを考慮するよう $K_F=k_F$ とした．吸着量基準のLDFモデルにおける物質移動係数 K_S は，トライ&エラーで値を決定した．それぞれの計算結果は 4.3 節に示した．

(b) 実用モデルの詳細精度検証時

後述の 4.3 節で述べられる通り 絶対湿度基準のLDF近似モデルが最も実用であったため，このモデルについて重点的に精度検証を行った．第三章で実験を行った全ての条件について，シミュレーションを行った．すなわち，表 3.4 - 3.6 に記載される運転条件を対象とした．計算結果は 4.4 節に示した．

(c) 運転パラメータの最適化計算時

これまで検討対象としてきた図 3.1 に示される装置フローにおいて，ロータでの除湿負荷が変化した際の最適制御方法について，精度検証されたシミュレーションモデルを用いて検討した．再生温度とロータ回転速度を最適化対象の操作パラメータとした．部分負荷運転を想定した 5 つのロータ入口湿度に対して，再生温度を 14 パターン，ロータ回転速度を 10 パターン変化させ，計 700 条件にて計算した．計算結果を用いて供給露点の要求を満たしながら再生エネルギーが最小となる，操作パラメータの組み合わせを検討した．表 4.2 に計算時の入力パラメータを示す．計算結果は 4.5 節に示した．

表 4.2 運転パラメータ最適化計算時の運転条件

	再生ゾーン	供給ゾーン	パージゾーン
流量	480 kg/h	1180 kg/h	480 kg/h
面風速	1.6 m/s	1.6 m/s	3.3 m/s
入口空気温度	55 ~ 145	6.1	
入口空気絶対湿度	Purge outlet	2.1 ~ 5.6 g/kg'	
ロータ回転速度	0.9 ~ 4.5 rph		

4.3 各シミュレーションモデルの精度検証

第三章での空気線図を用いた考察によって、低露点空気製造を対象とした本運転条件でもそこで起こる吸脱着現象は、通常のデシカント除湿サイクルと同様であることが分かっている。図 3.7 及び図 3.8 に示したロータ回転方向の出口空気温湿度分布を、これまで実測・提唱されてきたデシカント除湿メカニズムに照らし合わせて考察することで、対象運転条件にてデシカントロータのハニカム内に形成される露点分布を、ある程度推察・逆算することができる。図 4.8 及び図 4.9 に、各回転角度でロータハニカム内に形成されていると実験結果から予想される、露点に関する吸着帯²⁹⁾及び脱着時の流れ方向の露点分布を示した。ロータ内の熱物質移動解析によるシミュレーションでは、出口露点に加えて、各回転角度におけるロータ内の露点分布（吸着帯）を得ることができる。通常、吸着帯及び脱着時の露点分布の形状は、吸脱着の性質を反映したものとなるため、出口露点に加えて、これを比較できれば、より明確にシミュレーションの妥当性を検討することができると思う。

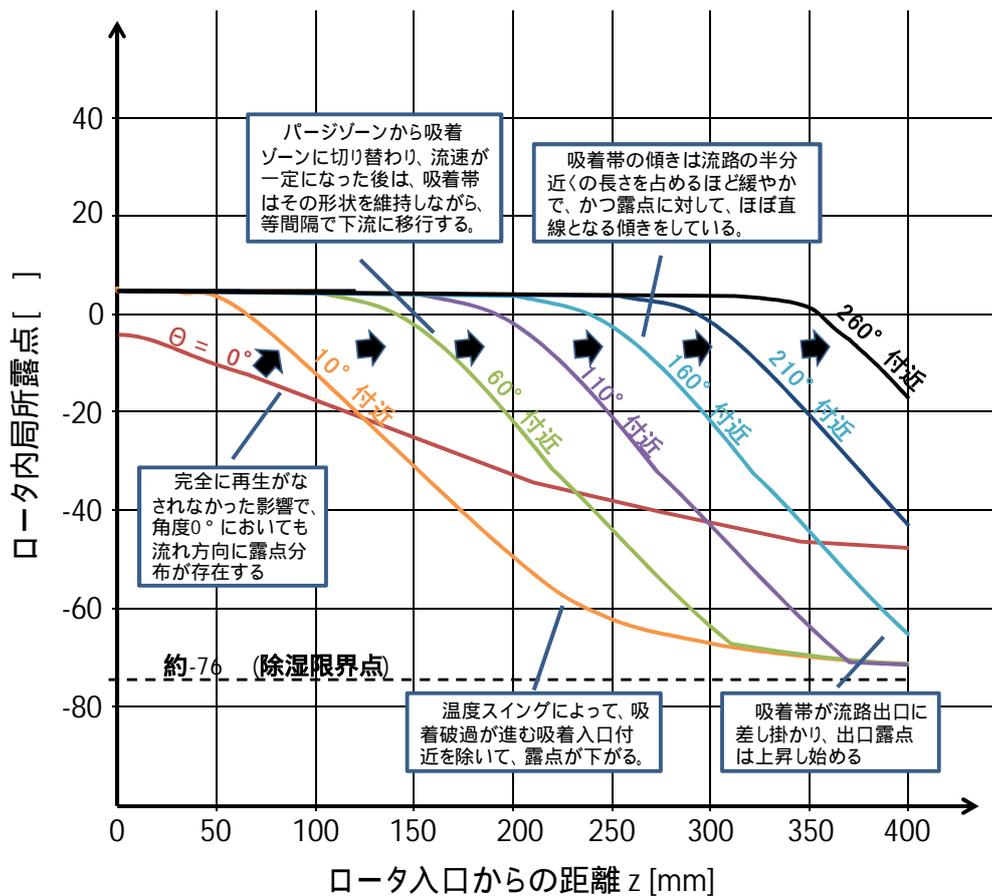


図 4.8 吸着ゾーンロータ内に形成される露点分布の概略

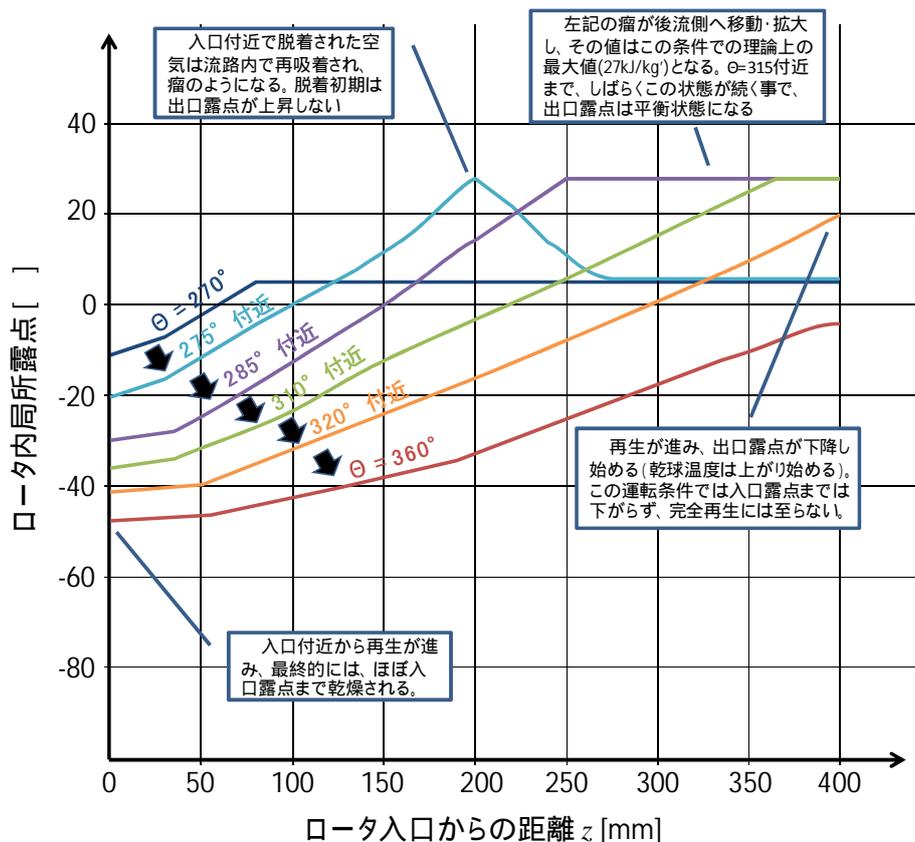


図 4.9 再生ゾーンロータ内に形成される露点分布の概略

図中には、露点分布の特徴を判断するためのポイントを併記した。各シミュレーションモデルの妥当性や精度を議論する際、出口温湿度分布が実験結果と一致しているかということに加え、ハニカム内に形成される露点分布が、図 4.8 及び図 4.9 の特徴を満たしているかも判断基準とした。

4.3.1 GSSR モデル

図 4.10 に吸着運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較結果を示す。比較対象は実験結果とした。図 4.10 を見ると、実験値に近い値を得ている。また、 $\theta = 130^\circ$ 付近から開始する吸着破過時の露点上昇については、一部実験値とのずれは生じているものの、ある回転角度を過ぎると角度進行にほぼ比例して露点が増加していくという曲線特徴をよく再現している。このことからロータ内に形成される吸着帯の傾きを良く再現しているものと推察される。

図 4.11 に吸着運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較結果を示す。実験ではロータからの脱着量が多い回転角度 $\theta = 280 \sim 315^\circ$ 付近では、回転角度

進行に対して出口温度がほぼ平衡状態となる特徴的な現象が確認されている。一方，GSSR モデルによる計算結果では，その平衡状態が開始・終了するタイミング，平衡状態時の温度とともに良く再現している。回転角度 $\approx 315^\circ$ 以降局所出口温度が上昇していくが，その際の曲線の傾きに関して，一部実験値との乖離が確認された。

以上のように GSSR モデルを用いたシミュレーションは，定量的には一部改善の余地があるものの，実験における定性的な特徴は良く捉えていた。ゼオライトのように非線形性が強い吸着剤を用いたデシカントロータの場合でも，ロータ内の吸脱着現象を実用上十分な精度で再現可能な計算モデルであることが確認できた。

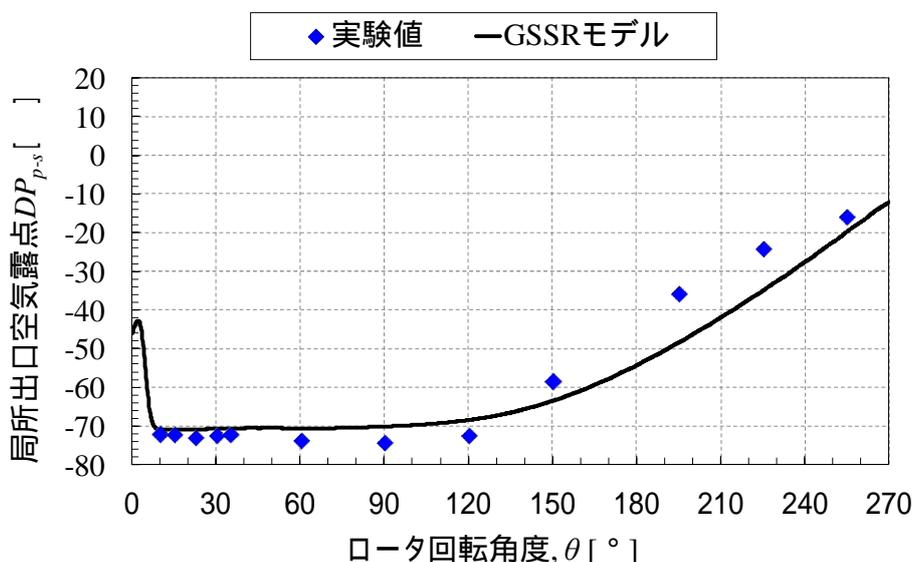


図 4.10 吸着運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較

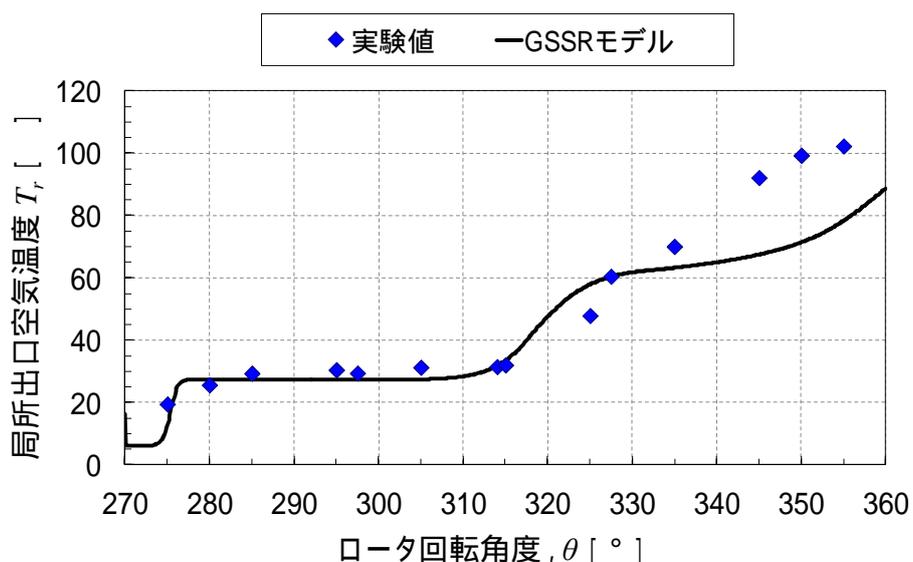


図 4.11 再生運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較

次に GSSR モデルでの計算結果のうち，吸着材層内の吸着量分布について考察する．
 図 4.12 に回転角度 $\theta = 130^\circ$ のときの，吸着材層内流れ方向及び厚み方向の吸着量分布を等値線で示した．

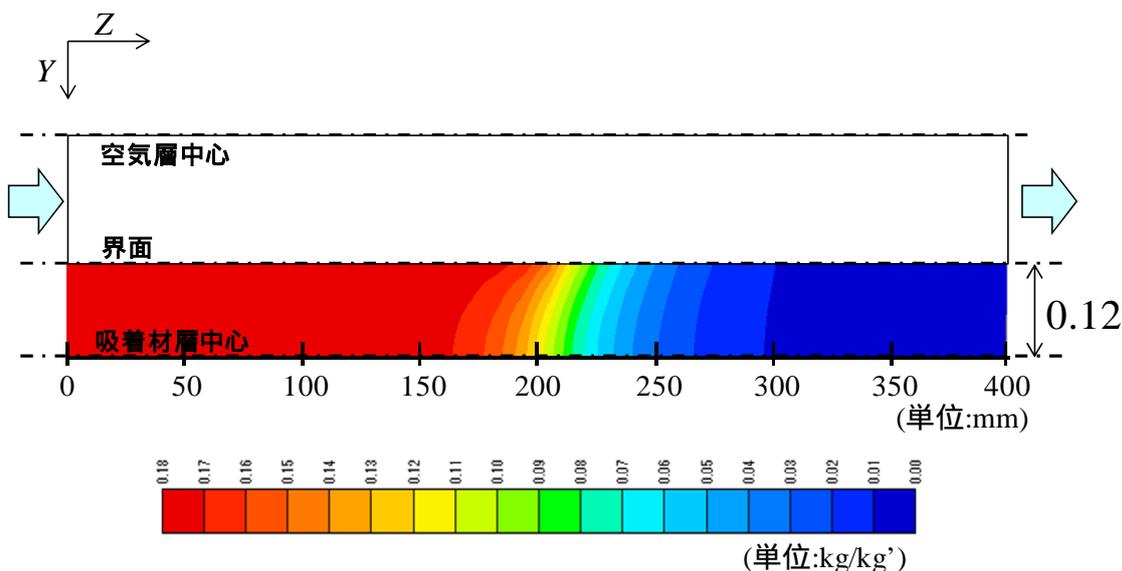


図 4.12 GSSR モデルにおける吸着材層内吸着量の等値線図 ($\theta = 130^\circ$ 地点)

吸着材厚み(Y 軸)方向の吸着量分布に着目すると，流路断面の平均値と比較して，界面付近の吸着量がやや大きい分布になっていることが確認できる．しかし，例えば図中の $z=170\text{mm}$ 付近の吸着量が高い領域を除いて，厚み方向の分布は総じて小さい．これらの計算結果から，吸着材層半厚さが 0.12mm と薄い本ロータでは，結果的に吸着材層内の物質拡散抵抗の影響は小さいものと予想される．吸着材層内の物質拡散抵抗が小さいのであれば GSSR モデルではなく，それらを簡易に表現する絶対湿度基準の LDF モデルでもほぼ同様の計算結果を得られる可能性がある．そこで同様の計算を簡易モデルである絶対湿度基準の LDF モデルでも行い，結果を比較することで LDF モデルの妥当性を検討することにした．

4.3.2 絶対湿度基準の LDF モデルの場合

絶対湿度基準の LDF モデルにて，同様の条件で計算を行った．なお，LDF モデルの場合，計算結果を整合させるため，吸着材層内の抵抗を加味した総括物質移動係数を決定しなければならないが，前節での検討でこれが小さいことが明らかとなっていたので，本節では総括物質移動係数 K_F を，GSSR モデルにおける境膜抵抗の身を考慮した物質移動係数 k_F と同等とした．図 4.13 に吸着運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点

分布に関する比較結果を示す．比較対象は実験結果と，前節で示した GSSR モデルでの計算結果としている．図 4.14 に吸着運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較結果を示す．

図 4.13 及び図 4.14 とともに，両モデルの計算結果はほぼ同等の値を示し，有意な違いは見られなかった．本ロータにおいて吸着材層内の物質拡散抵抗は極めて小さく，その影響を省略した絶対湿度基準の LDF モデルでも，実用上十分な精度のシミュレーション結果が得られることが分かった．

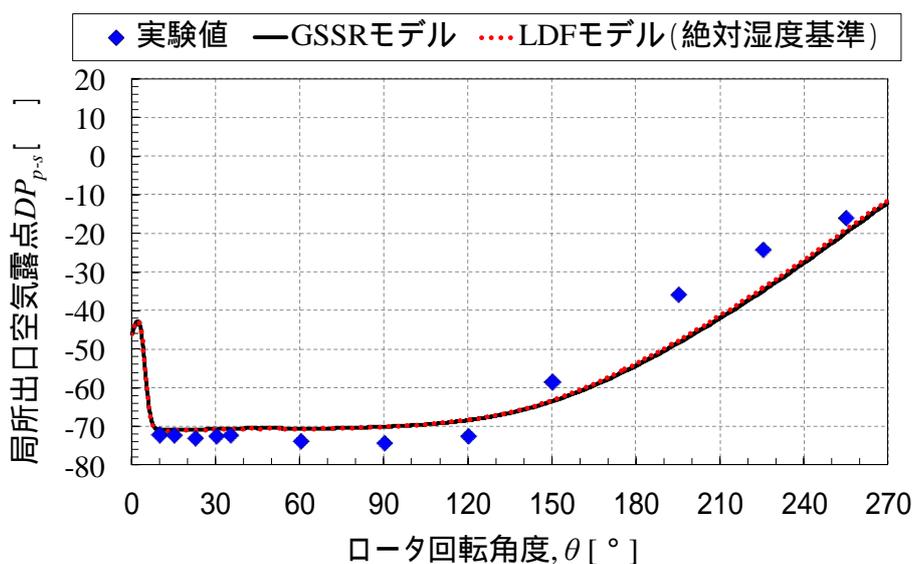


図 4.13 吸着運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較

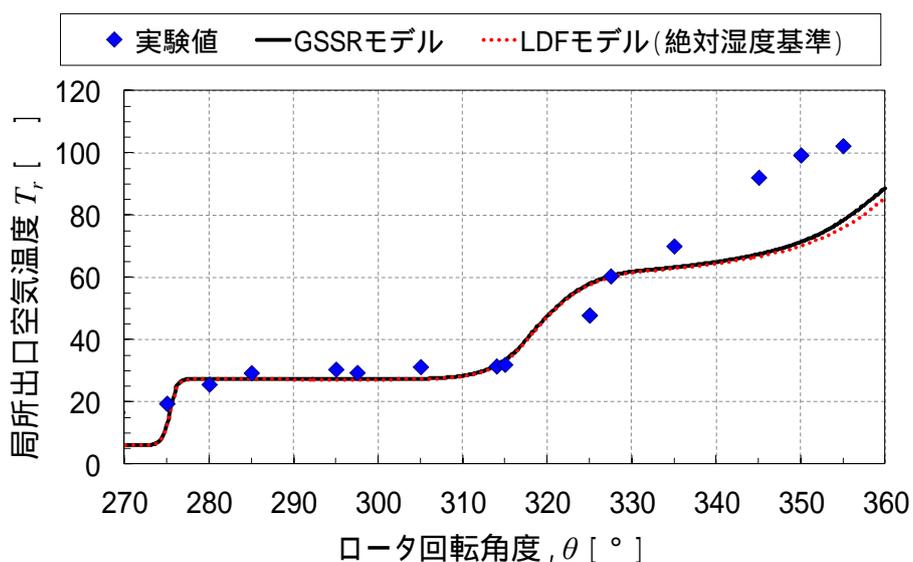


図 4.14 再生運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較

4.3.3 吸着量基準のLDFモデルの場合

総括物質移動係数 K_S を定数値として扱い、フィッティング係数としてこれを変更したときの局所出口空気露点のロータ周方向露点分布について、比較検討した結果を図4.15に示す。図4.15において K_S 設定値を大きくするほど、出口露点の下限値が低くなることが分かる。なお、最も大きく K_S を設定した $K_S=6.0 \times 10^{-7} [\text{m/s}]$ のケースでも、露点下限値は実験に比べて高くなっている。

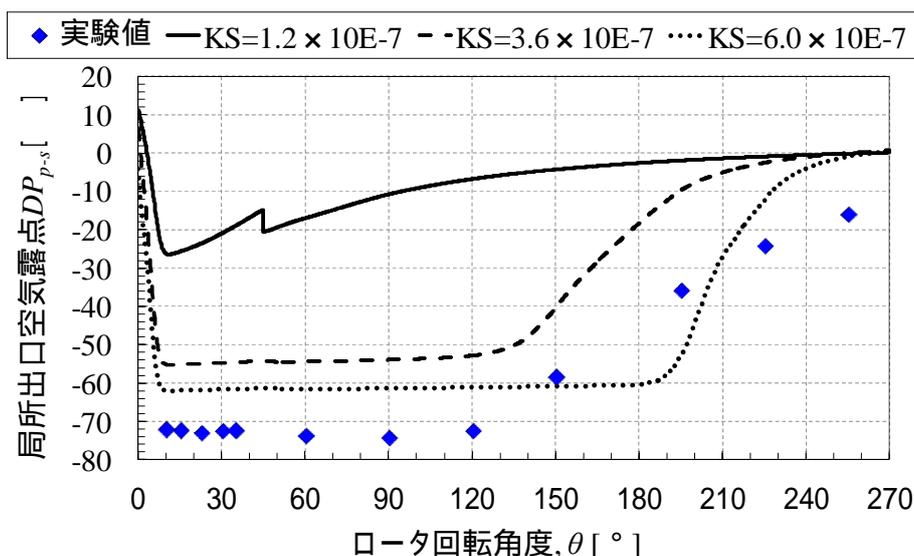


図 4.15 吸着運転時のロータ回転方向の局所出口空気露点分布に関する比較

吸着速度式(4.9)を含めてシミュレーションモデルが妥当であると仮定する場合、実験値より露点下限値が高くなっている原因は、次の2つの要因が考えられる。1つは上述の K_S に関する感度特性から判断して、総括物質移動係数が実験時より小さく見積もられている可能性である。そしてもう1つは再生運転時の脱着速度が再現できておらず、実験時より再生が不十分な状態となっているため、露点が高くなった可能性である。どちらが原因であるかを議論するため、吸着運転時の八二カム内の露点分布に関する計算結果を示す。

図4.15にて最も実験結果と近い計算結果を得た、 $K_S=6.0 \times 10^{-7} [\text{m/s}]$ での八二カム内露点分布に関する計算結果を図4.16に示す。一見、期待される計算結果である図4.8と同様に、緩やかな吸着帯が形成されているように見受けられるが、着目する露点域を絞って比較すると、両者には大きな違いが見受けられる。例えば図4.8では、ある吸着帯において露点が-10の個所から-60の個所までの距離は約110mm程度を見込んでいる。一方、図4.16では、例えば紫線で示される $\theta=190^\circ$ において同様の距離を概算すると、50mm以下となっている。

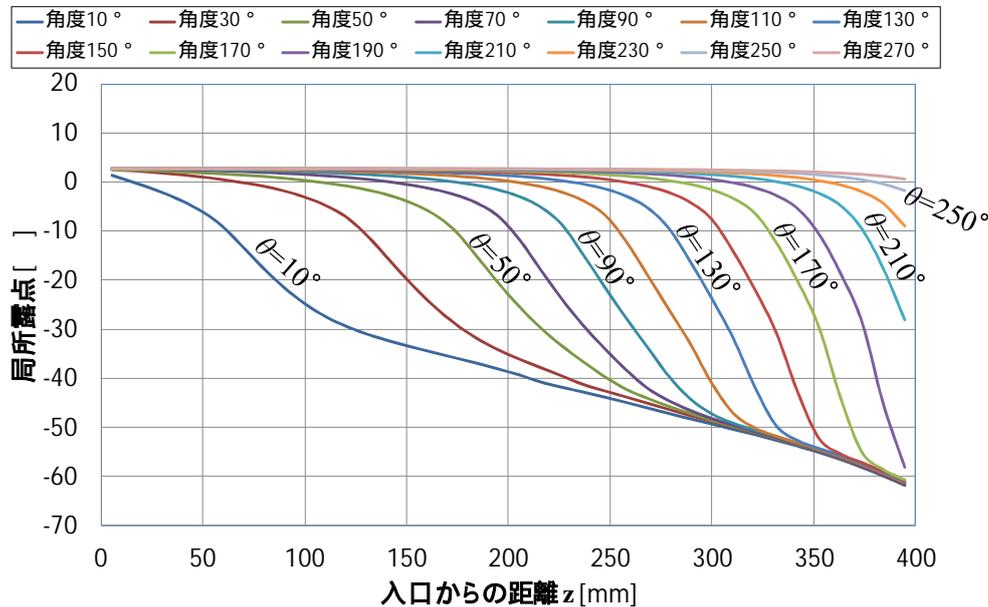


図 4.16 吸着運転時八二カム内局所露点の流れ方向分布 ($K_S=6.0 \times 10^{-7}$ [m/s])

既存の研究³⁰⁾から、吸着帯の傾きには物質移動係数の設定値が大きく影響を及ぼしており、吸着運転時は総括物質移動係数を大きく設定するほど、吸着帯の傾きが急になることが分かっている。上述の吸着帯長さに関する比較結果から考察と、実現象における総括物質移動係数 K_S は 6.0×10^{-7} [m/s] より小さいことになる。以上の考察から、図 4.15 において露点下限値について計算値が実験値より高くなった原因として、少なくとも $K_S=6.0 \times 10^{-7}$ [m/s] と設定したケースでは、総括物質移動係数が実現象より小さく見積もられている可能性は低いと考える。

次に、もう 1 つの要因として考えられる、再生運転時の脱着が実験をうまく再現できておらず、実験時より再生が不十分な状態で計算されたため、露点が高くなった可能性について検証する。まず、 K_S をフィッティング係数として変更したときの再生時出口空気乾球温度のロータ周方向出口空気温度分布について、比較検討した結果を図 4.17 に示す。

図 4.17 において実験値と計算値を比較すると、全体的にどのフィッティングパラメータ設定値においても両者の乖離は大きい。特に総括物質移動係数を比較的小さく設定した $K_S=1.2 \times 10^{-7}$ [m/s] のときは、実験において $\approx 285 \sim 315^\circ$ 付近で確認される、出口温度が 30° 弱で平衡状態になるという特徴的な挙動が全く確認できず、定性的な特徴を再現していない。この計算では $\approx 295 \sim 360^\circ$ まで、局所出口空気温度は $80 \sim 90^\circ$ 前後で推移しており、実験において $\approx 285 \sim 315^\circ$ で計測された出口温度約 30° 弱より大分高くなっている。実験では再生運転時に高温で流入する入口空気は、八二カム通過中に

大量の水分を脱着するためその分温度降下するが、この計算では実験より脱着される水分量が少なかったため、脱着熱による温度降下量も少なく、結果として出口温度が高くなっているのだと考えられる。総括物質移動係数をもう少し大きく見積もった残り二つの計算条件($K_S=1.2 \times 10^{-7}$ 及び 6.0×10^{-7} [m/s])においては、脱着速度が増加することで脱着量が増えるためか、物質移動係数を大きくするほど、前述の $K_S=1.2 \times 10^{-7}$ [m/s]の時に比べて、実験結果に近づく傾向はみられるは見られた。しかし、依然 $=285 \sim 315^\circ$ 付近の出口空気温度は、実験値と比較して $20 \sim 30$ 程度高く（言い変えると、その間の出口露点は低く）、両者の乖離は大きい。

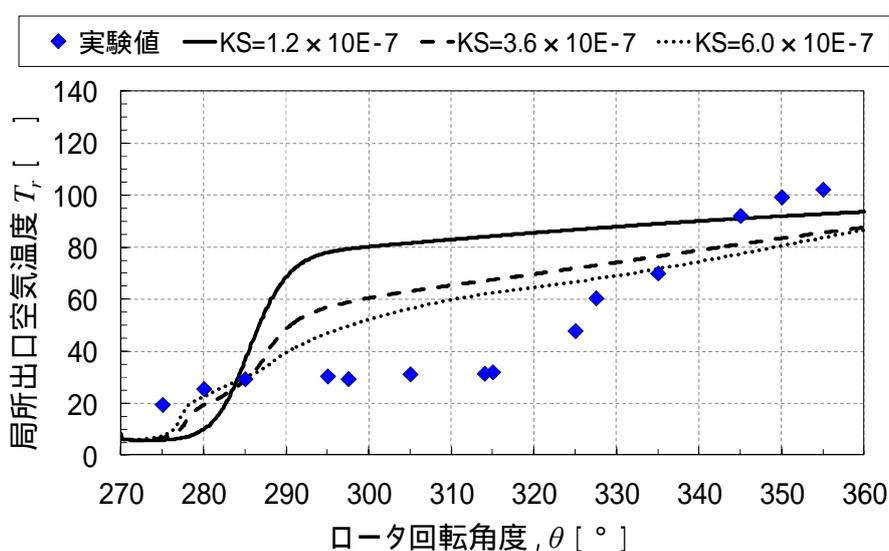


図 4.17 再生時出口空気乾球温度のロータ周方向出口空気温度分布

より詳しく計算結果を検証するため、再生挙動に関して最も実験結果と近い計算結果を得た、 $K_S=6.0 \times 10^{-7}$ [m/s]設定時の八二カム内露点分布に関する計算結果を図 4.18 に示す。

図 4.18 を見ると前述の考察通り、流路全体において脱着速度が遅いため、結果として流路流れ方向にできる露点分布は図 4.9 の予想より緩やかになっている。回転角度が小さい時は、出口露点は高い値となるが、予想と異なり平衡状態をキープすることがなく、回転角度の進行とともに露点が低くなっていく。結果、再生運転全体で脱着できる水分量は、実験値より小さい計算結果となるため、実験結果に比べて吸着材の再生が不十分な状態となる。このため図 4.15 で示す計算結果において、実験値より除湿性能が低い結果となっていることがわかる。

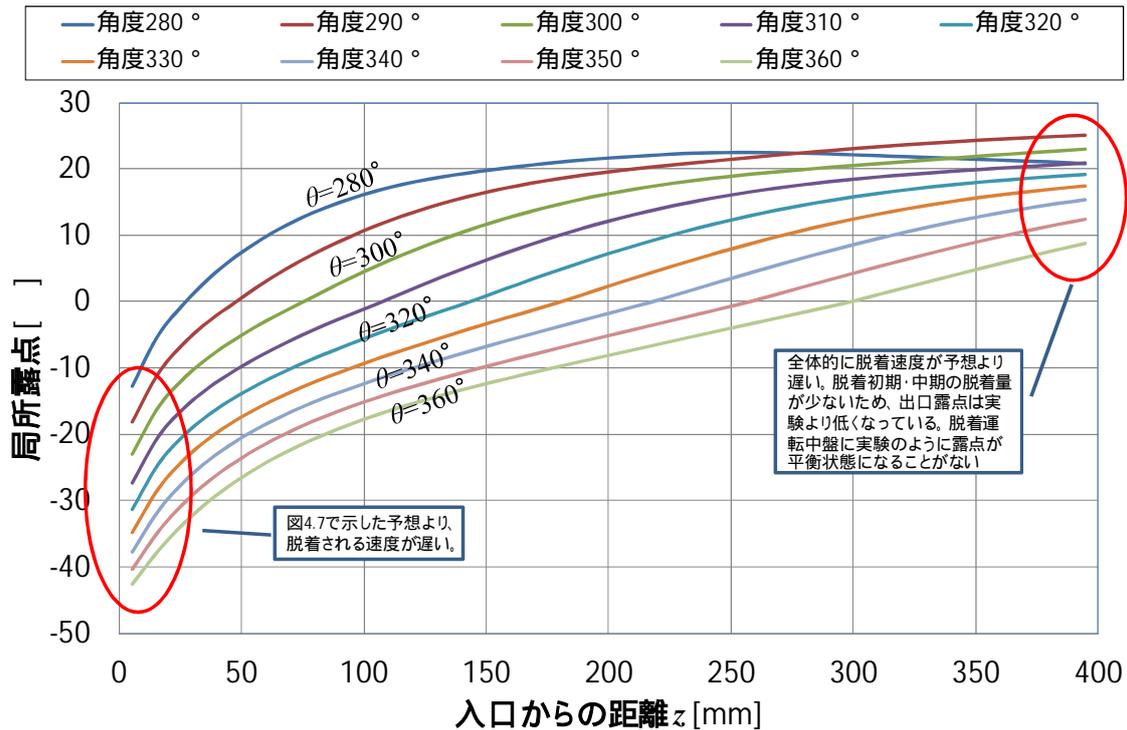


図 4.18 再生運転時八ニカム内局所露点の流れ方向分布 ($K_S=6.0 \times 10^{-7}$ [m/s])

以上，再生運転時の挙動を解析すると，総括物質移動係数 K_S を定数値として定めるとき， K_S は物質移動速度を現状より速くするため， 6.0×10^{-7} [m/s] より大きな値に設定するべきであることが示唆された．一方，吸着挙動を解析した際は吸着帯の長さから K_S は 6.0×10^{-7} [m/s] より小さな値に設定するべきであることが示唆されている．吸着時と脱着時で総括物質移動係数を異なる値に設定することで整合性を得られる可能性はある．しかし，1 条件での実験・計算結果をもとにフィッティング係数を調整することでは，様々な運転条件で適応可能な計算モデルを構築する困難であると考えられる．

第二章では高分子収着剤担持ロータを対象に吸着量基準の LDF モデルを用いたシミュレーションモデルで計算を行った結果，実験結果に概ね適合する結果が得られた．しかし，本節では同様のモデルを用いても，実験結果をうまく再現することができなかった．この原因は高分子収着剤担持八ニカムと異なり，本計算で対象としたロータの吸着等温線は著しく非線形性が強く，この LDF モデルでは吸脱着の速度をうまく表現されなかったためだと推察した．

以上，吸着速度式ほかいくつかの前提条件が異なる 3 つのシミュレーションモデルを検証した結果，計算精度および計算負荷の観点から，吸着速度式に式(4.10)を使用する絶対湿度基準の LDF モデルを，本システムの解析を行うための実用モデルと判定した．

4.4 実用モデルの詳細精度検証

図 4.19 及び図 4.20 に、運転パラメータとしてロータ回転速度を変化させたときのシミュレーション結果を、実験結果と合わせて示す。図中のプロットが実験値、曲線が計算値を示す。図 4.19(a)は除湿出口空気のロータ回転方向局所露点分布を、(b)が温度分布を示す。図 4.20(a)は再生出口空気のロータ回転方向局所露点分布を、(b)が温度分布を示す。

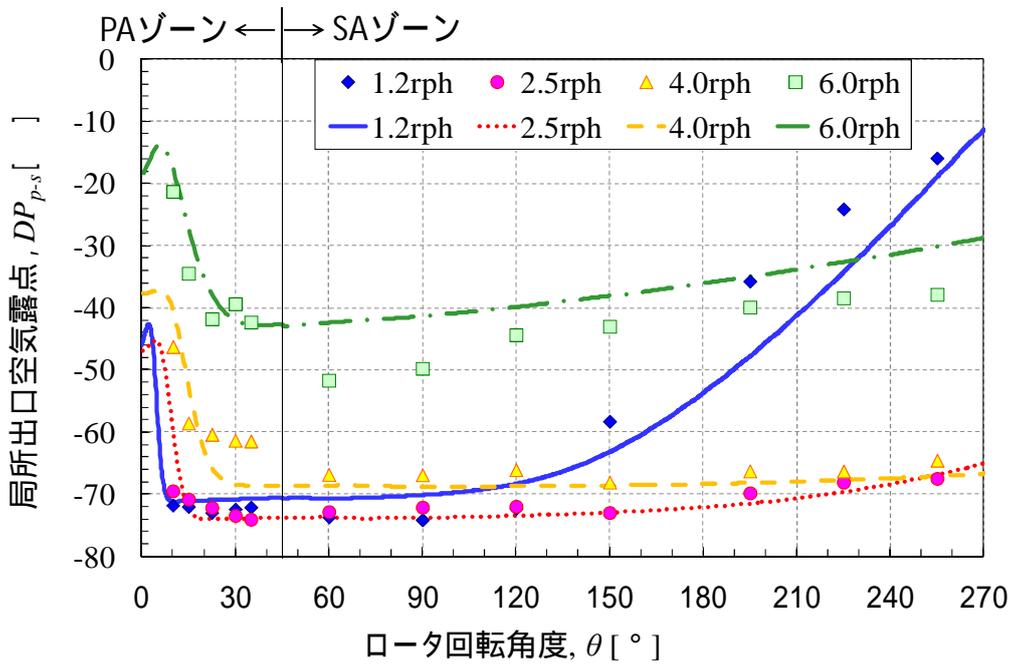
同様に、再生空気入口温度を運転パラメータとして変化させたときの計算及び実験結果を図 4.21 及び図 4.22 に示す。図 4.21(a)は除湿出口空気のロータ回転方向局所露点分布を、(b)が温度分布を示す。図 4.22(a)は再生出口空気のロータ回転方向局所露点分布を、(b)が温度分布を示す。

さらに、処理入口空気絶対湿度を運転パラメータとして変化させたときの計算及び実験結果を図 4.23 及び図 4.24 に示す。図 4.23(a)は除湿出口空気のロータ回転方向局所露点分布を、(b)が温度分布を示す。図 4.24(a)は再生出口空気のロータ回転方向局所露点分布を、(b)が温度分布を示す。

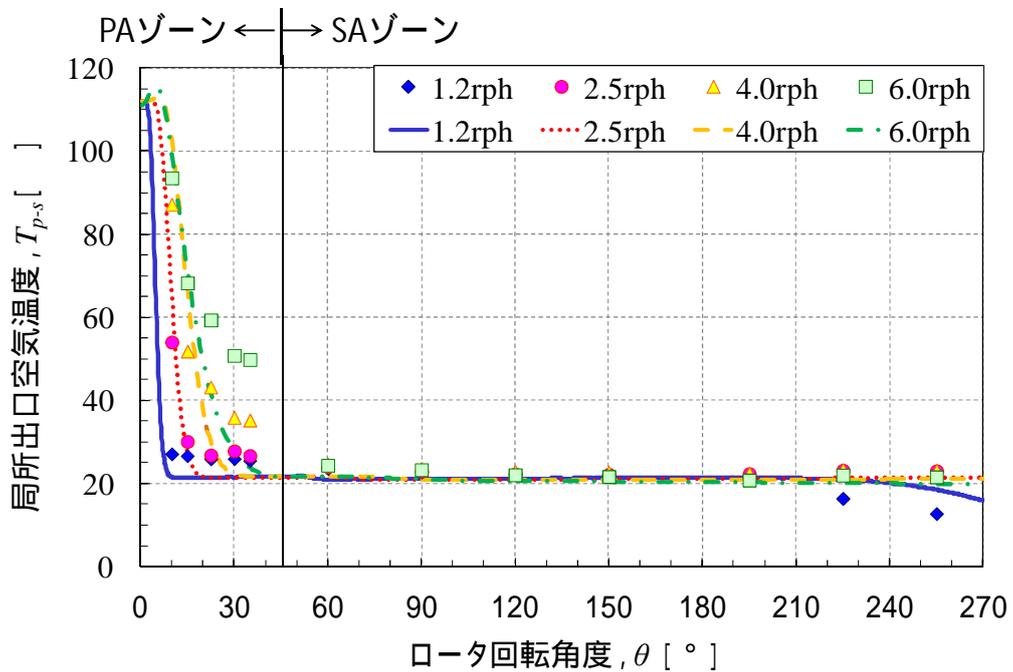
図 4.19 ~ 24 において実験と計算の結果を比較すると、グラフが描く凹凸などの定性的性質は、どのパラメータ変化に対しても、概ね一致した。簡易モデルである絶対湿度基準の LDF モデルでも、デシカントロータ内で起こる除湿・再生挙動を概ね正しく再現できていると考えられる。定量的視点で比較すると、例えば図 4.20 中の 1.2rph の場合、回転角度 $\approx 310^\circ$ 以降の出口空気温湿度の変化において、両者の差異が比較的大きい。また、図 4.23(a)において、入口絶対湿度が比較的高い 5.6g/kg や 6.6g/kg の場合、処理ゾーンにおいて角度進行に伴って局所出口露点が緩やかに上昇するが、その曲線の傾きに関して、実験値と計算値の乖離がやや大きかった。

以上のように、ロータ回転速度が適正值より極端に遅い場合や、再生エネルギーの投入量に対して除湿負荷が大きすぎる場合などでは、除湿ゾーンにおいてロータ内に形成される吸着帯が、回転角度が進行するに従ってロータ終端に差し掛かる運転状態となっている。このとき実際に生じている吸着帯の傾きを、シミュレーションにて厳密に再現できていないため、両者の違いが比較的大きく出ていると考えられる。

一方、最適化計算の解となるのは、吸着負荷と再生エネルギーがバランスされる条件であると予想される。それらの条件では良好なシミュレーション精度が確認されたため、実用的な解析モデルが構築されたと考え、次節にて精度が確認された同モデルを使用して運転パラメータの最適化検討することにした。

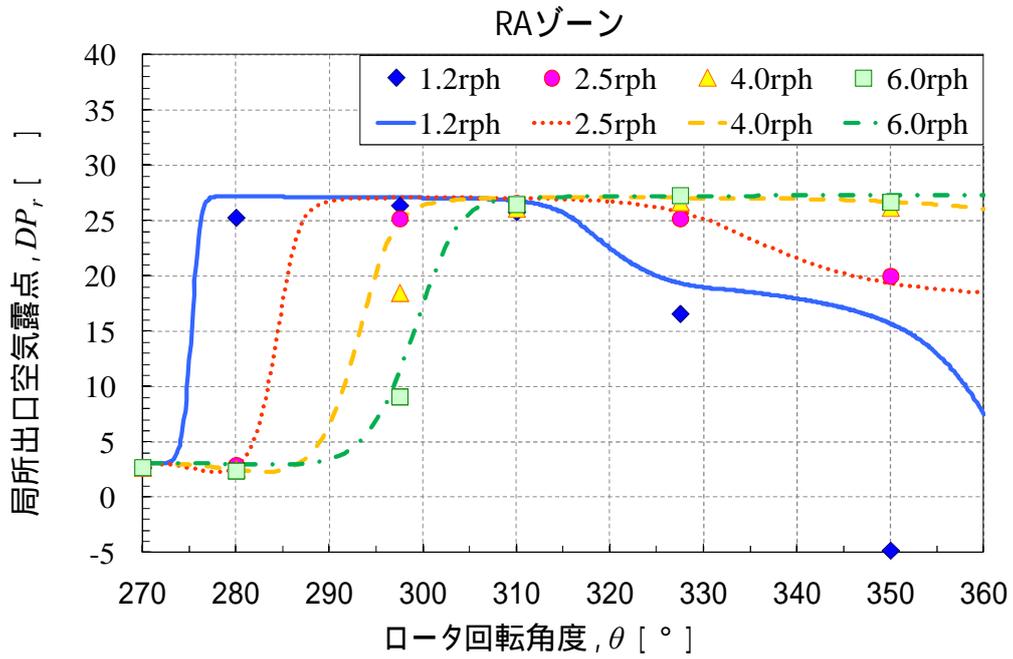


(a) パージ及び供給出口空気局所露点

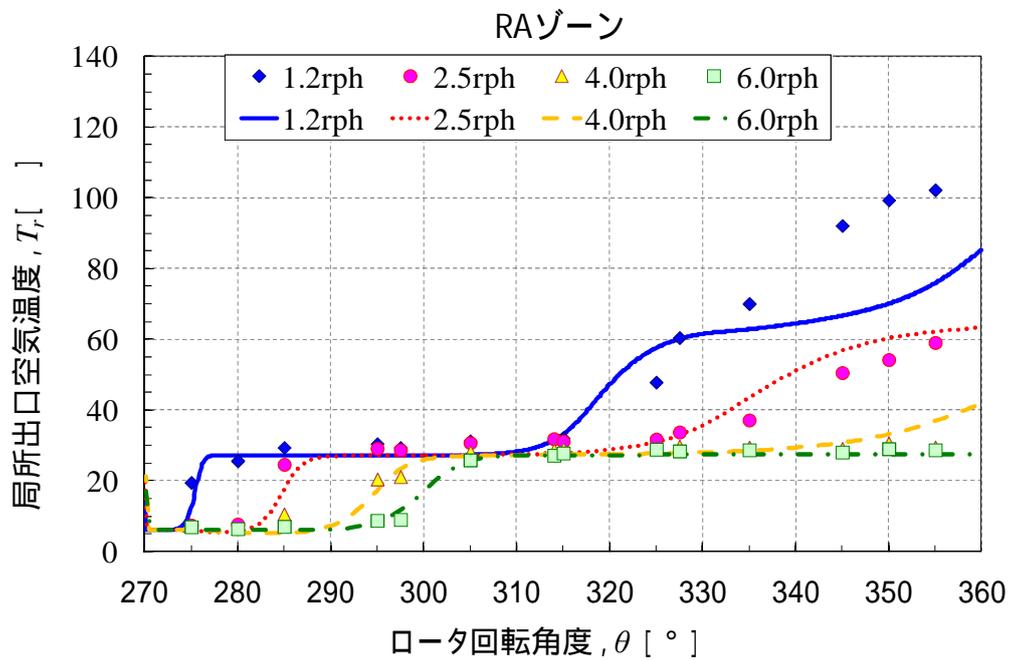


(b) パージ及び供給出口空気局所温度

図 4.19 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に関する実験結果との比較
(ロータ回転速度変化, 吸着ゾーンに関して)

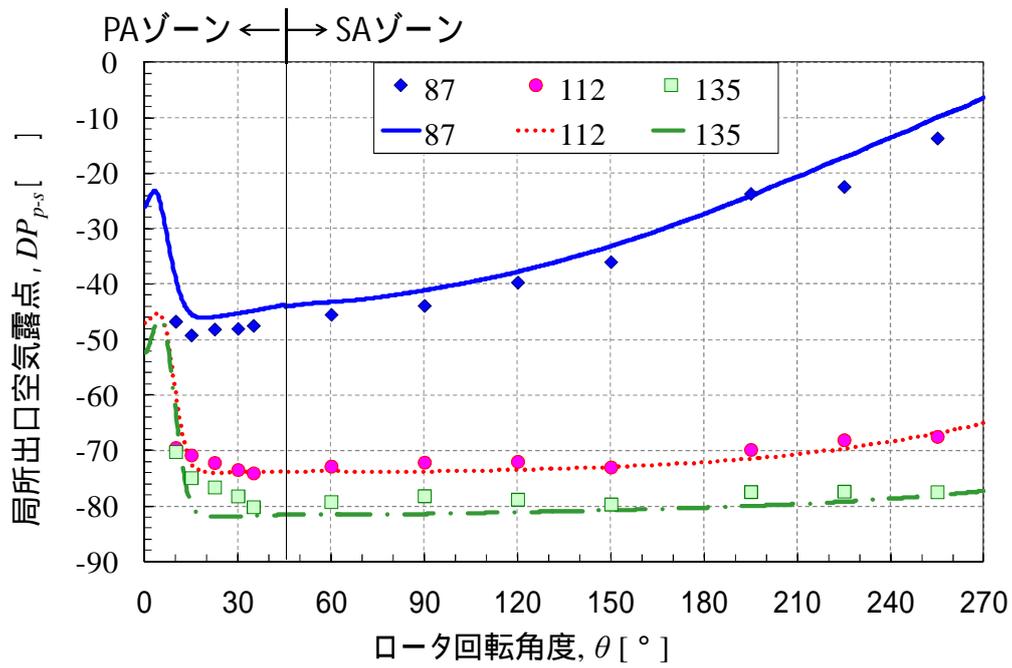


(a) 再生出口空気局所露点

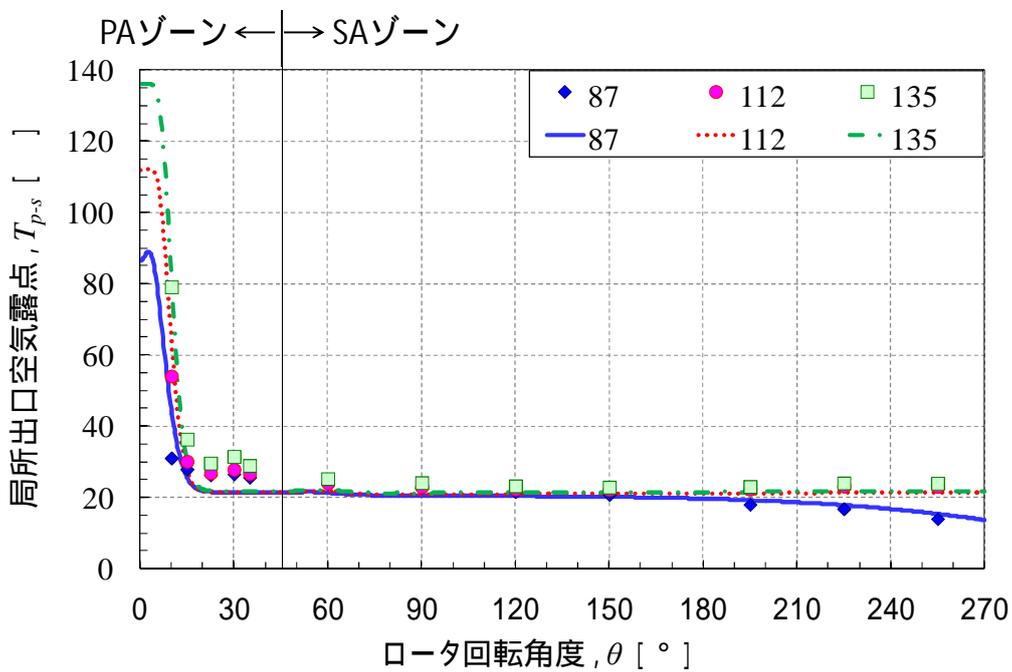


(b) 再生出口空気局所温度

図 4.20 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に関する実験結果との比較
(ロータ回転速度変化, 再生ゾーンに関して)

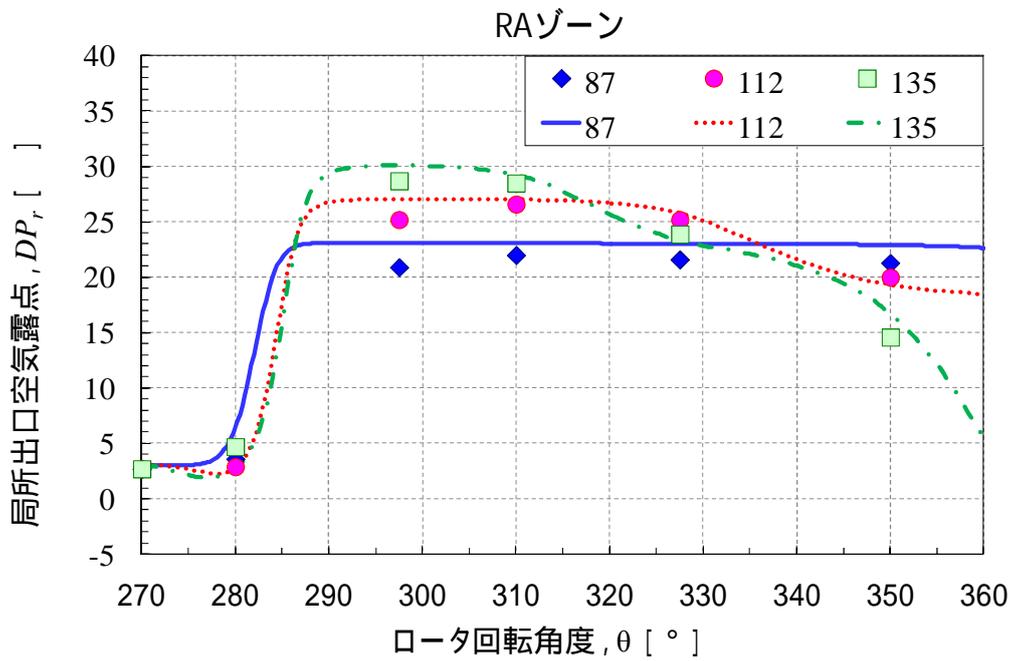


(a) パージ及び供給出口空気局所露点

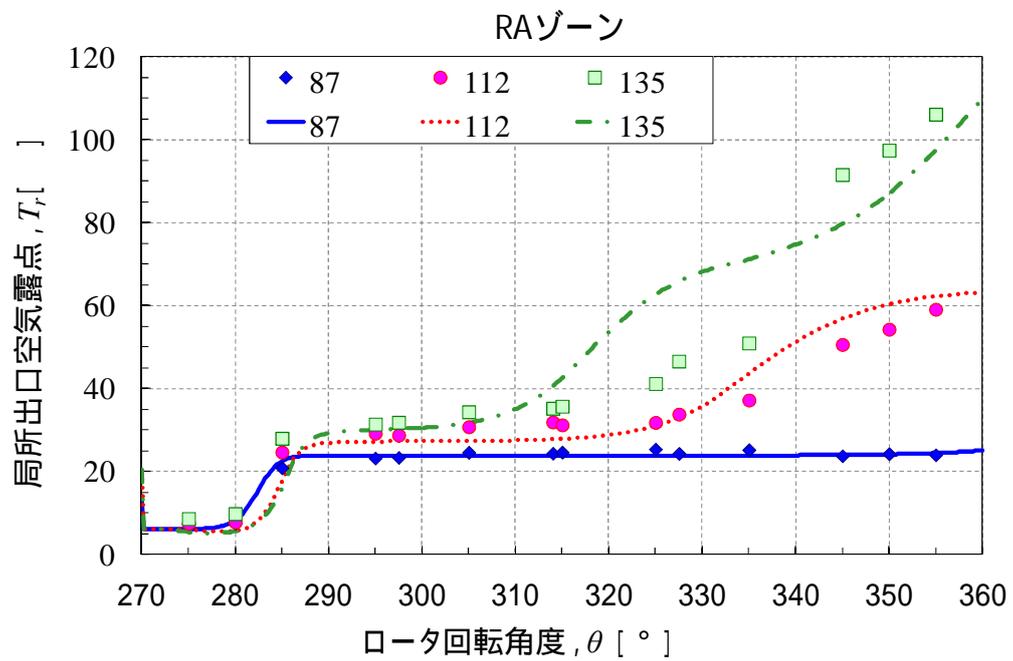


(b) 再生出口空気局所温度

図 4.21 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に関する実験結果との比較
(再生温度変化, 吸着ゾーンに関して)

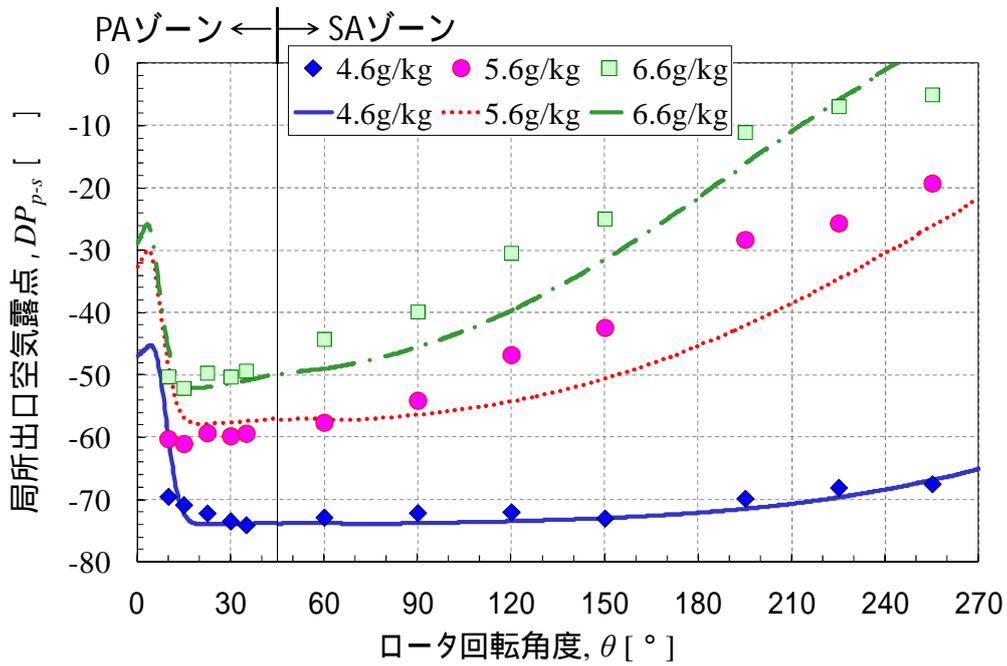


(a) 再生出口空気局所露点

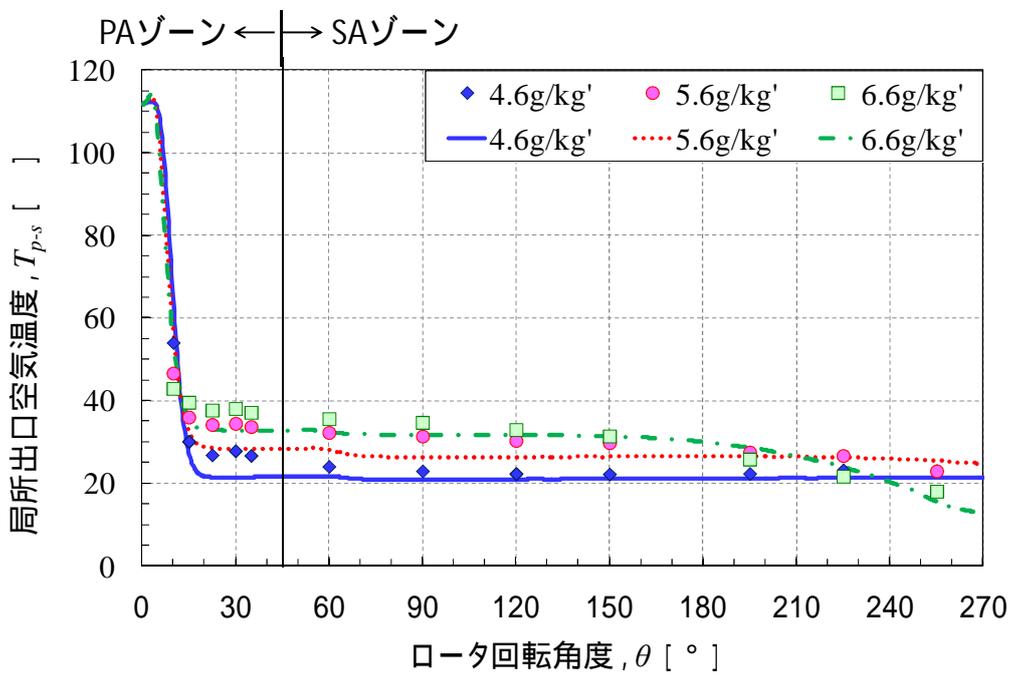


(b) 再生出口空気局所温度

図 4.22 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に関する実験結果との比較
(再生温度変化, 再生ゾーンに関して)

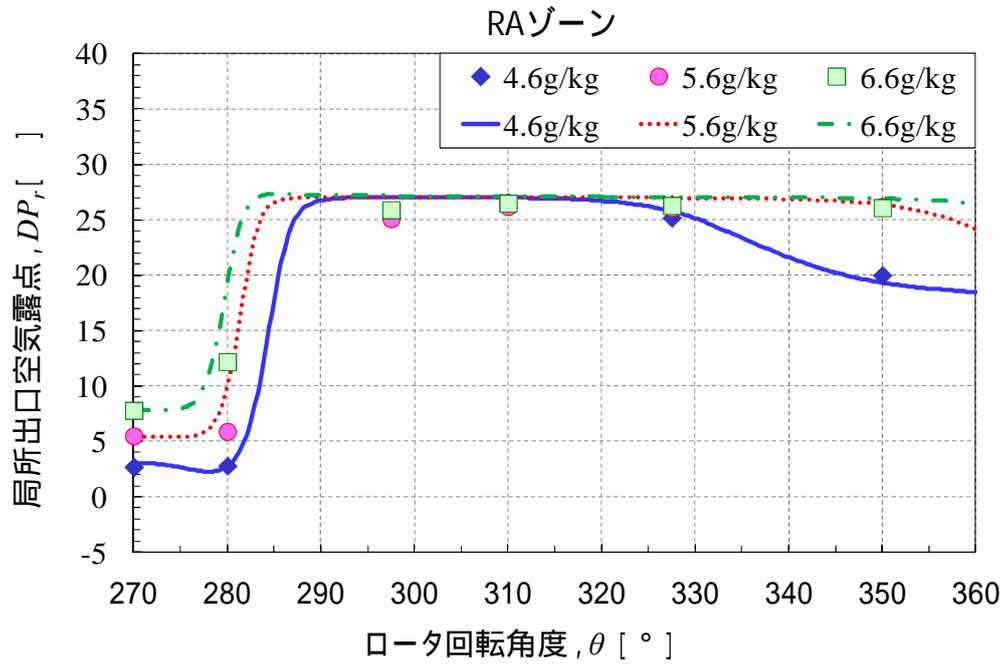


(a) パージ及び供給出口空気局所露点

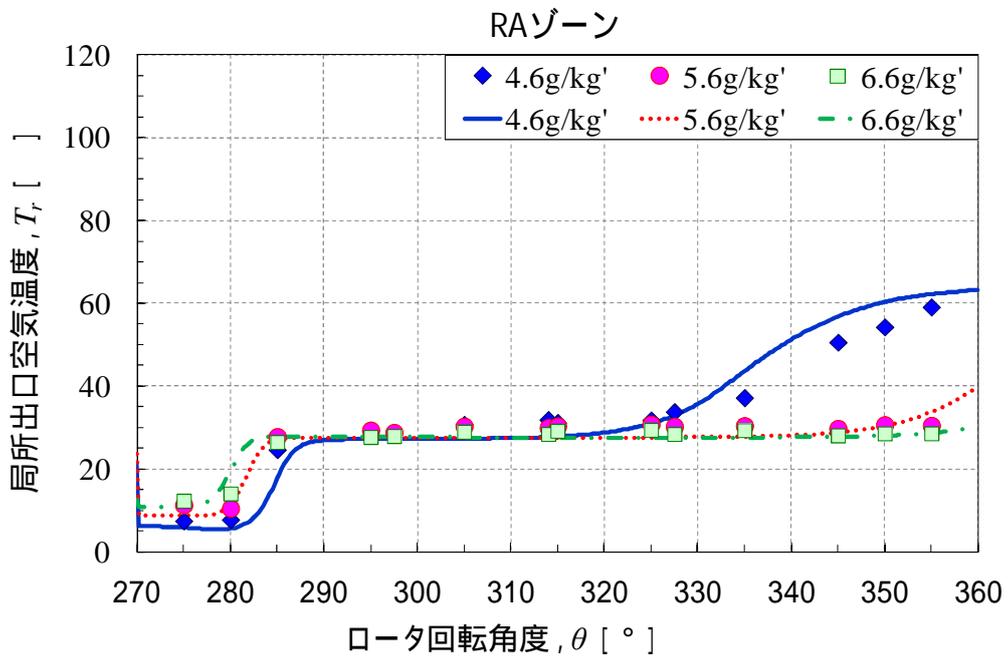


(b) 再生出口空気局所温度

図 4.23 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に関する実験結果との比較
 (ロータ入口絶対湿度変化, 吸着ゾーンに関して)



(a) 再生出口空気局所露点



(b) 再生出口空気局所温度

図 4.24 ロータ回転方向局所出口空気露点及び温度分布に関する実験結果との比較
(ロータ入口絶対湿度変化, 再生ゾーンに関して)

4.5 運転パラメータの最適化

4.5.1 運転パラメータの予測計算

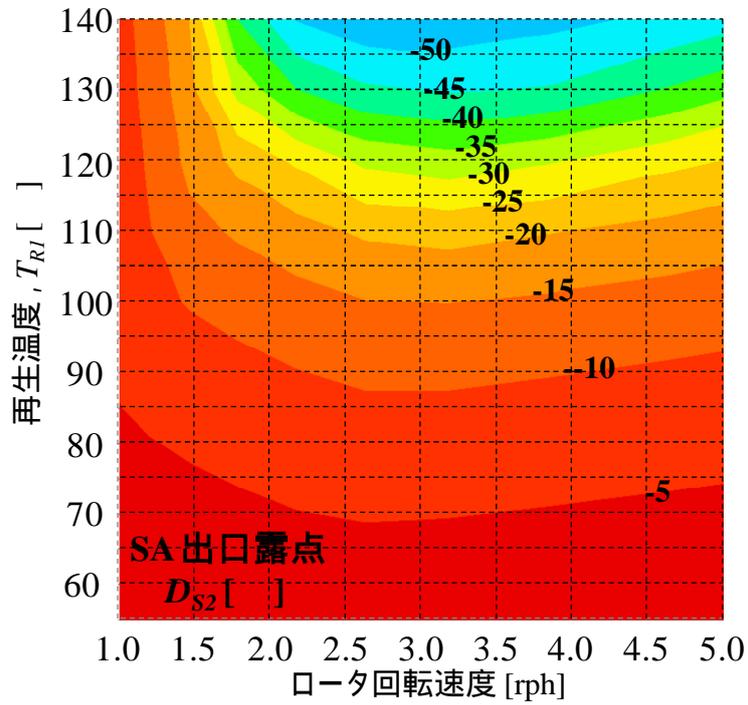
図 4.25 及び図 4.26 に再生温度とロータ回転速度を変化させた際の、供給空気露点に関する等値線図を示す。図 4.25 が処理入口絶対湿度 5.6g/kg (露点+5.5)とした結果、図 4.26 が 2.1g/kg (露点 - 7.0)とした時の結果である。また、両図とも(a)は供給空気出口露点に関する等値線図で、図中の数字が供給露点を示す。一方、(b)は再生消費エネルギーに関する等値線図で、図中の数字が再生ヒータでの加熱量を示す。

まず、図 4.25 及び図 4.26 の(a) に着目すると、両図から再生温度が高くなるに従って、供給露点が低くなる傾向が確認できる。ただし、同時供給露点で比較すると、入口絶対湿度が低いほど、再生温度が低くなっている。例えば比較的入口絶対湿度が高い条件の図 4.25(a)では、供給露点を-50 とするには最低 135 の再生温度を要している。一方、入口絶対湿度が比較的低い、つまり部分負荷条件の図 4.26(a)では、同供給露点とするのに必要な最低の再生温度は約 73 程度となっており、部分負荷条件では再生温度を大幅に下げることができる様子が伺える。

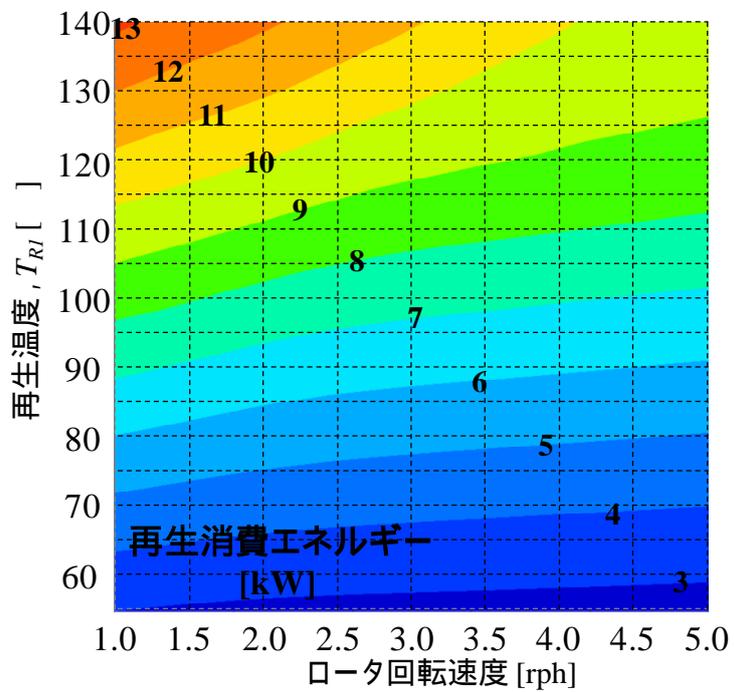
また、同図からロータ回転速度によっても、供給露点が変わることも読み取れる。同じ供給露点で比較した場合、比較的入口絶対湿度が高い条件の図 4.23(a)では、再生温度を最も低く設定出来るのは、ロータ回転速度 3.0rph 付近である。一方、部分負荷条件の図 4.26 では、再生温度を最も低く設定出来るのは、ロータ回転速度が 1.3rph 付近となっている。この再生温度を最も低く設定出来るロータ回転速度は、ロータでの除湿負荷が小さくなるほど、低速度に移行していく傾向が確認された。

次に、図 4.25 及び図 4.26 の(b) に着目すると、両図から再生温度が高くなるに従って、再生消費エネルギーが増加していく傾向が確認できる。また、処理入口絶対湿度(ロータ吸着負荷)に依らず、ロータ回転速度を速くするほど、再生に要する熱量が小さくなる傾向が確認された。これはロータ回転速度が速いほど、ロータ熱容量による持込み熱量の影響が顕著に生じ、パージゾーン出口空気、つまりヒータ入口空気温度が高くなるためである。

また、両図を見比べると、供給露点と異なり吸着負荷の大きさが再生消費エネルギーが大幅に変化するということはなく、本試算条件では、運用パラメータである再生温度とロータ回転速度によって、再生消費エネルギーがほぼ決定されている様子が伺える。通常の除湿機ではロータの再生温度は一定である。しかし上記の結果は、吸着負荷に応じて再生温度やロータ回転速度などの運用パラメータを意図的に変更しない成り行き運転では、部分負荷運転時に再生消費エネルギーを削減することができないことを意味している。

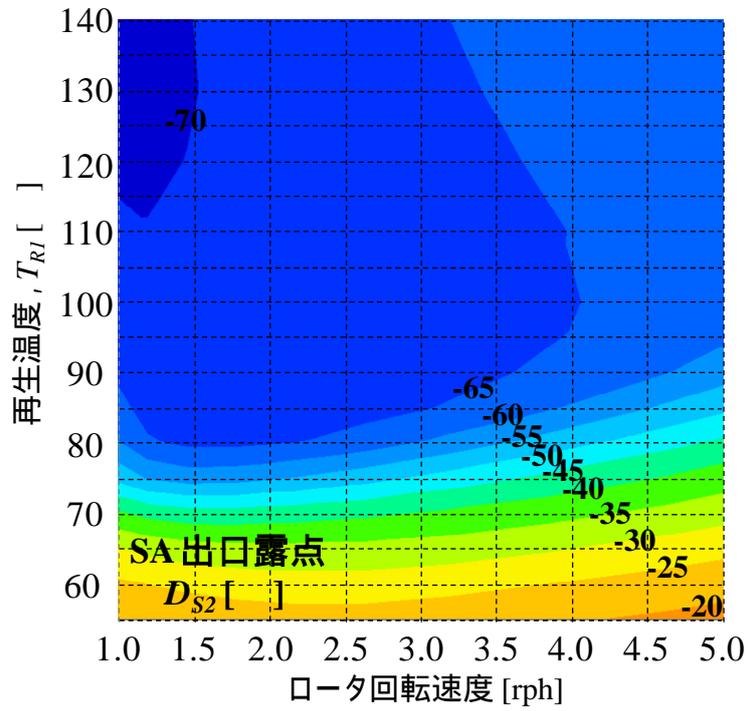


(a) SA 出口露点の等値線図

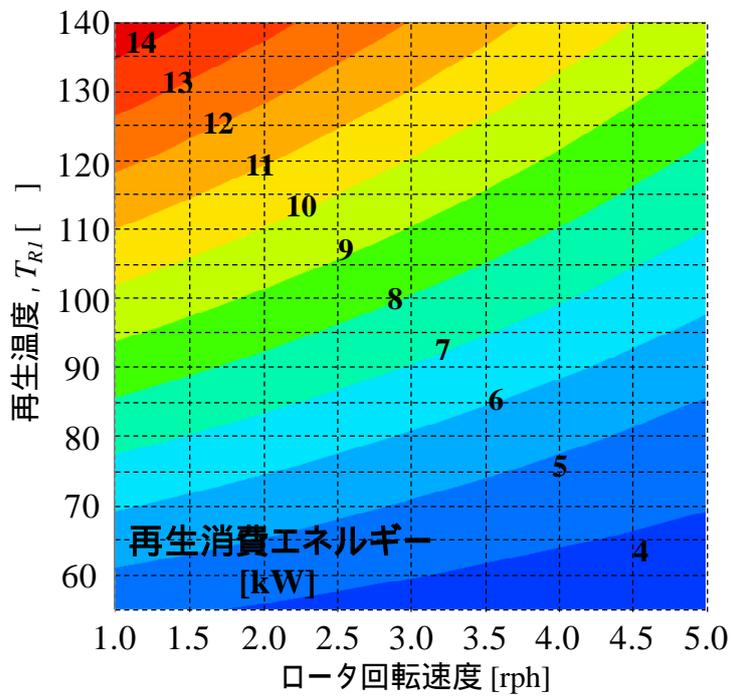


(b) 再生消費エネルギーの等値線図

図 4.25 入口絶対湿度 $X_{S1}=5.6\text{g/kg}$ での再生温度およびロータ回転速度の影響



(a) SA 出口露点の等値線図



(b) 再生消費エネルギーの等値線図

図 4.26 入口絶対湿度 $X_{S1}=2.1\text{g/kg}'$ での再生温度およびロータ回転速度の影響

等値線図を用いた運転パラメータ最適化とは、所定の供給露点となる運転パラメータの組み合わせのうち、要するエネルギーが最も小さくなる条件を選ぶことである。図 4.25 及び図 4.26 において、製品空気露点が -50 となる運転パターンの組み合わせを読み取り、図 4.27 の左右のグラフにまとめた。左グラフが除湿負荷の大きいときの結果を、右側が除湿負荷の小さいときの結果である。グラフの横軸はロータ回転速度、縦軸は第一軸が再生消費エネルギー、第二軸が再生温度を示す。供給露点は同じ値であるが、再生消費エネルギーにはこれらの条件の中で差が生じている。ここで運転パラメータの最適化とは、茶色実線が示す再生消費エネルギーが最も小さい、再生温度とロータ回転速度の組み合わせを選ぶことである。

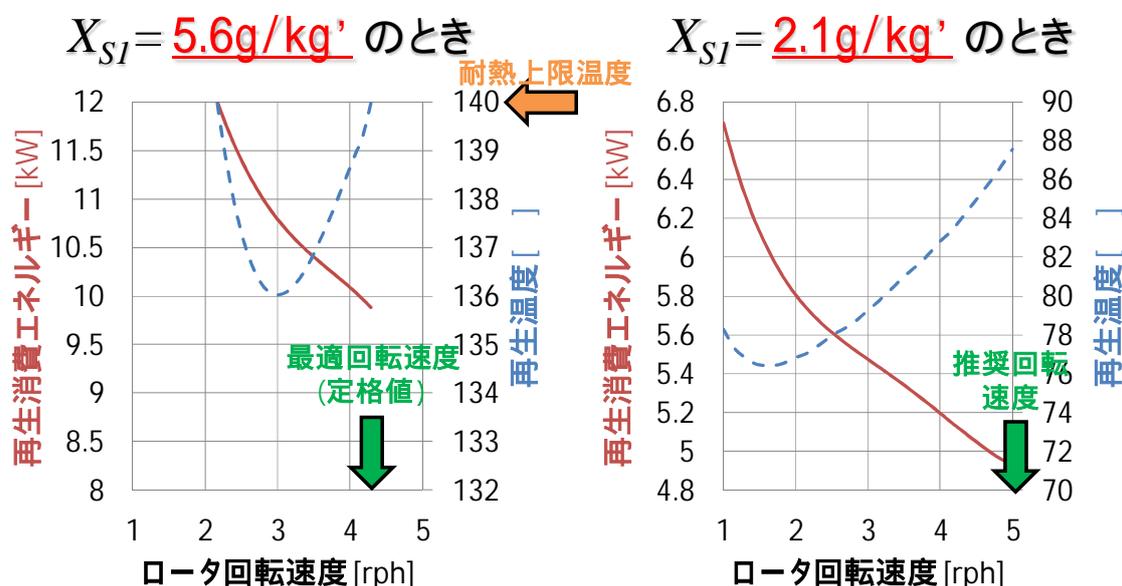


図 4.27 運転パラメータの組み合わせが再生消費エネルギーに与える影響

グラフをみると、両負荷条件ともロータ回転速度を高く、再生温度を高く設定したときのほうが、再生消費エネルギーは減少する結果を得た。しかし、ロータの耐熱上限温度はこちら 140 のため、除湿負荷が大きい左側の条件では、140 ・4.2rph が最適な運転パラメータの組み合わせとなる。一方、除湿負荷が小さい右側の条件では、全体的に再生温度が低いため、ロータ回転速度を 4.2rph より高い値に設定することができる。図 4.27 ではロータ回転速度 5rph 以上の結果は示していないが、再生熱量を最小とするロータ回転速度は 5rph より高い値になる。負荷に応じてロータ回転速度を変化させることで、再生温度のみを変更する制御より大きな省エネ効果を得ることが示唆された。

4.5.2 省エネルギー効果試算

低露点空気製造用除湿機の省エネルギー化手法として、外気絶対湿度(ロータ除湿負荷)に応じて、再生温度や風量を調節してロータ再生に要するエネルギーを削減する手法がある¹⁶⁻¹⁸⁾。しかし、再生条件変更による供給露点の変化は応答性が遅く、一般的なフィードバック的手法のみで、供給露点を要求値に安定的に保つのは困難である。除湿機が使用される生産設備施設では供給空気露点に対する要求が厳しいため、安全率を大きくとった制御がなされるか、定格条件から変更せずに運用されることが多く、省エネルギー化の妨げになっている。そこで供給露点の要求値を安定的に保ち、かつ負荷に応じて最適運用を行う手法の開発を目的に、ロータ除湿負荷と要求露点に対応する事前予測パラメータをシミュレーションから得て運転する、フィードフォワード制御を提案する。本稿では実施した際の省エネルギー効果を試算し、提案手法の実用性を検証した。

(a) 試算条件

想定するフロー図は前節で示した図 3.1 とする。再生温度を操作パラメータとして、負荷(ロータ入口絶対湿度)変動があった場合でも、供給露点を一定とする制御として、除湿機周りの補機を含めたシステムランニングコスト試算した 24 時間運転を想定し、外気温湿度は東京標準気象年³¹⁾の月単位時間平均値を使用した。再生用熱源は電気ヒータを仮定した。

その他の試算条件を 1)~7)に示す。

- | | | | |
|--------------|---------------------|-----------|-------|
| 1) 供給空気露点 | : 部分負荷制御あり | -50 | |
| | 部分負荷制御なし | -50 | 以下成行き |
| 2) ロータ入口絶対湿度 | : 外気湿度 5.6g/kg ' 以上 | 5.6g/kg ' | |
| | 5.6g/kg ' 未満 | | 外気湿度 |
| 3) 再生空気温度 | : 操作パラメータ | | |
| 4) ロータ回転速度 | : 2.5rph 一定 | | |
| 5) 冷水熱源 COP | : 3.0 | | |
| 6) 冷水ポンプ動力 | : WTF=20 で試算 | | |
| 7) ファン動力 | : 処理ファン | 計 1000Pa | |
| | 再生ファン | 計 500Pa | |
| | ファン効率×力率 | 0.25 | |

(b) 試算結果

部分負荷制御をすることで外気の絶対湿度が 5.6g/kg ' を下回る 12 月~3 月の再生熱源の負荷が低減され、同時期の再生熱源の消費電力は、従来の再生温度一定制御と比較

して計 37%減少した .フラットレートで同程度の割合でランニングコストの削減が見込める . 図 4.28 に月ごとの消費電力を項目別で示した .

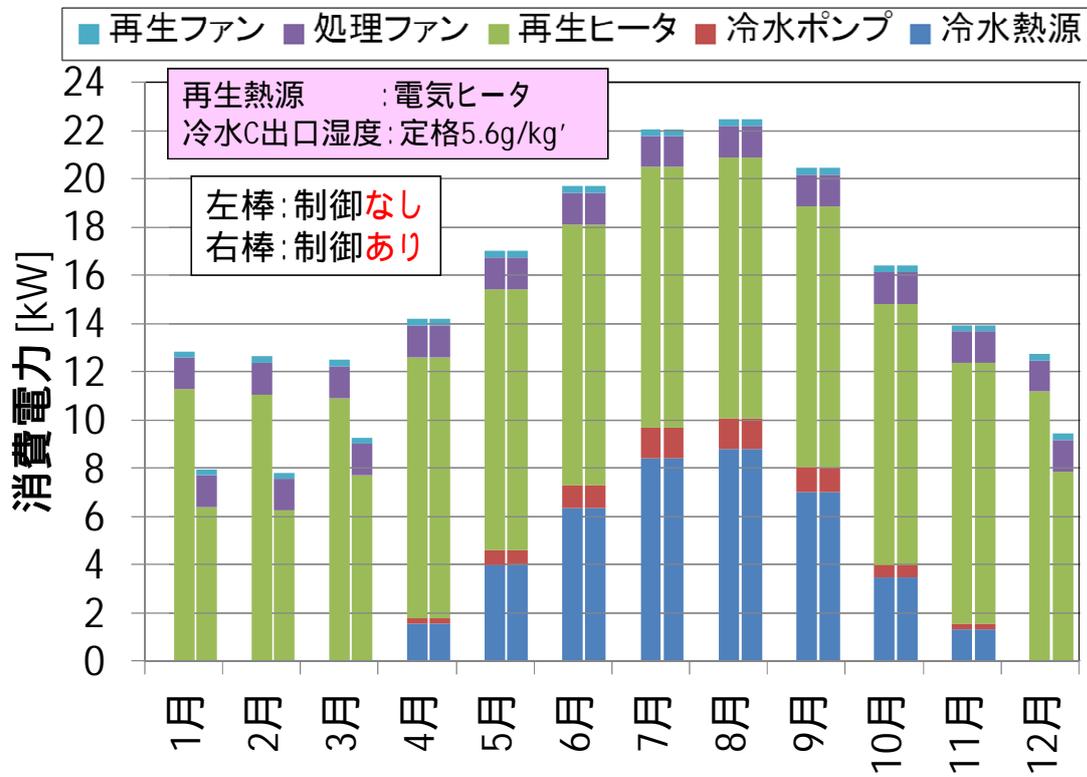


図 4.28 項目ごとの月別消費電力

4.6 結言

低露点空気製造条件におけるゼオライト担持デシカントロータの数学モデル・数値シミュレーションに関する検討を行った結果、以下の知見を得た。

- ゼオライト担持デシカントロータの解析に、吸着量基準のLDFモデルを適用して計算精度を検証した結果、特に再生運転時の脱着速度に関して実験値との乖離が大きく、実機の定性的・定量的性質を再現する結果を得られなかった。非線形性の強い吸着等温線を持つゼオライトロータの場合、同シミュレーションモデルの適用は不適と考えられる。
- 理論式より吸着材層内物質拡散係数を導き、これを使用して吸着材層内厚み方向の物質拡散抵抗を考慮した、より詳細なシミュレーションモデル(GSSRモデル)を構築した。1つの運転条件を例にとり、構築したシミュレーションモデルを用いて解析を行った結果、上述の吸着量基準のLDFモデルに比べ大幅に計算精度が向上し、実験値をほぼ再現する結果が得られた。これまでほとんど報告例が無い低露点空気製造条件でのデシカントロータの除湿挙動解析に関して、適用可能なシミュレーションモデルを示すことができた。
- 詳細モデルの計算結果を精査した結果、吸着材層内の物質拡散抵抗は、境膜抵抗に比べて非常に小さいことが分かった。吸着量基準のLDFモデルから詳細モデルに変更した際、計算精度が向上したのは、吸着材層内厚み方向の物理量分布を考慮したからではなく、境膜抵抗の大きさを示す吸着速度式の精度に関して改善があったためだと考えた。そこで詳細モデルで採用した絶対湿度基準の吸着速度式を用いたLDFモデルを検討した結果、詳細モデルとほぼ同様の計算結果を得ることができた。結果的に計算負荷の小さいより実用的な計算モデルを提案することができた。
- 精度が確認されたシミュレーションモデルを用いて、同システムの部分負荷運転時の制御手法に関して、再生温度とロータ回転速度という2つのパラメータの設定値を、最適化する検討を行った。結果、部分負荷運転時は再生温度を所定の値まで下げることによって、供給露点を要求値に保ったまま省エネルギーを図ることが出来ることが分かった。一方、パージ出口空気を加熱して再生空気に用いるシステムフローにおいて、除湿負荷に応じてロータ回転速度を変化させることで、再生温度のみを変更する制御より大きな省エネ効果を得ることが示唆された。
- 部分負荷運転を含む年間の運用コスト試算を行った。外気絶対湿度に合わせて再生

温度を変更する部分負荷制御を行うことで、外気の絶対湿度が 5.6g/kg ' を下回る
12月～3月の再生熱源の負荷が低減され、同時期の再生熱源の消費電力は、従来の
再生温度一定制御と比較して計 37% 減少する試算を得た。

(参考文献)

- 116)竹内雍監修「最新吸着技術便覧」, pp. 760-769 , NTS (1999).
- 117)J.Y.San and S.C. Hsiau: International Journal of Heat and Mass Transfer, **36**(8), 2059 (1993).
- 118)Y.J. Dai ,R.Z. Wang ,H.F. Zhang: International Journal of Thermal Science, **40**, 400 (2001).
- 119)L.A. Sphaier , and W.F. Worek: International Journal of Heat and Mass Transfer, **47**, 3415 (2004).
- 120)濱本芳徳, 村瀬壮介, 岡島次郎, 松岡文雄, 秋澤淳, 柏木孝夫: 日本冷凍空調学会論文集, **21** (1), 63 (2004).
- 121)辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **22** (4), 417 (2005).
- 122)辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **23** (4), 467 (2006).
- 123)辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **24** (3), 47 (2007).
- 124)Ge, T.S., Y.Li. Dai, R.Z. Wang and Y.J. Dai: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **12**, 1485 (2008) .
- 125)宮崎隆彦, 秋澤淳, 進藤伸二, 神戸正純, 高塚威, 濱本芳徳, 森英夫: 日本冷凍空調学会論文集, **26** (4), 521 (2009).
- 126)辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 107 (2012).
- 127)山口誠一, 斎藤潔: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 195 (2012).
- 128)大坂侑吾, 辻口拓也, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 207 (2012).
- 129)A.A. Pesaran and A. F. Mills: International Journal of Heat and Mass Transfer, **30**, 1037 (1987).
- 130)A.A. Pesaran and A. F. Mills: International Journal of Heat and Mass Transfer, **30**, 1051 (1987).
- 131)菅田大助, 海老根猛: 平成 24 年度空気調和・衛生工学会大会 ,pp.2917-2920 ,(2012) .
- 132)秋山貴洋, 河岡将行, 川上健志, 稲葉仁: 第 30 回 JACA 年次大会 ,pp.29-32 (2013) .
- 133)山口誠一, 斎藤潔, 伊藤卓, 大曲康仁: 第 47 回空気調和・冷凍連合講演会論文集 , pp.159-162 (2013) .
- 134)甲藤好郎「伝熱概論」 pp. 226-231 , 養賢堂 (1964).
- 135)日本機械工学会編「伝熱工学資料 改定第 4 版」 pp.50-54 , 日本機械工学会 (1991) .
- 136)鷺尾康子, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **26** (4), 89 (2009).
- 137)岡本久美子, 大島一典, 竹脇隆彦, 児玉昭雄: 日本冷凍空調学会論文集, **29** (1), 97 (2012).
- 138)山口誠一, 早稲田大学大学院博士論文, pp.50-62 ,(2010).
- 139)熱物性学会編「熱物性ハンドブック」 pp. 57-67 , 養賢堂 (1990) .
- 140)D.M. Ruthven「Principles of adsorption and adsorption processes」Wiley-interscience, p136

(1984).

141)Molecular Sieves Sigma-Aldrich

<http://www.sigmaaldrich.com/chemistry/chemical-synthesis/learning-center/technical-bulletins/al-1430/molecular-sieves.html>

142)K. J. Sladek, E. R. Gilliland and R. F. Baddour: Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, **13**(2), pp.100-105 (1974).

143)垣内博之,下岡里美,岩手美紀,大島一典,山崎正典,寺田秀,渡辺展,武脇隆彦:
化学工学会論文集, **31**(4), 273,(2005).

144)竹内雍監修「最新吸着技術便覧」p27, NTS (1999).

145)慶伊富長「吸着」pp.167-168, 共立出版(1965).

146)MICRO-PEAK 東京標準気象年データ

第五章 総括

リチウムイオン電池製造過程では品質保持のため製造環境の絶対湿度を、通常の居室の $1/100 \sim 1/10000$ というはるかに低いレベルに保つ必要があるが、これには低露点空気を大量に低コストで製造可能な技術が必要である。これを達成する手法として、デシカントロータ型低露点空気製造用除湿機が開発され、その有用性ゆえに当該分野にて広く普及している。しかし、一般空調用途では、デシカントロータを用いた除湿は、除湿対象のロータ入口空気を概ね $3/4 \sim 1/4$ 程度の水分濃度まで減湿させるものであるのに対し、原理としては同じである一方、取り扱う水分濃度のオーダーが全く異なるので、その除湿・再生挙動には、既存のシミュレーションモデルが適用できない可能性があると考えた。本研究は、「低露点空気製造条件においてデシカントロータ内の熱物質移動現象を適切に表現するシミュレーションモデルの開発とその応用利用」を研究目的と定め、以下の検討を行った。

まず、一般空調用途の除湿において優れた性能を示す高分子収着剤を担持したハニカムブロックへの通風実験を、低露点空気を製造条件とする運転条件にて行い、シミュレーション結果との比較を行った。加えて、空気層及び吸着材内の半径（厚み）方向の物理量分布を考慮せず集中定数法を用いるモデルと、それに空気層流路内半径方向の温度・湿度勾配を考慮するよう、修正を加えたモデルの双方で計算を行い、シミュレーションモデルの妥当性を検証した。結果、高分子収着剤は低露点空気製造で運用した場合、系内吸着剤全体のうち有効に吸脱着が行われる割合は低く、また吸着帯の長さも著しく長くなる、あるいは吸着帯自体が形成されにくいいため、不向きであることが分かった。また、ハニカムの空気層内半径方向の湿度分布幅に与える影響は、ハニカムコルゲートサイズが支配的であり、一般的に低露点空気製造用デシカントロータで使用される、水力等価直径が 2mm 以下のハニカムコルゲートサイズでは、空気層内半径方向の湿度分布は小さく、計算結果に大きな影響を与えないことが分かった。したがって、空気内半径方向の温湿度分布を考慮しない従来のシミュレーション上の仮定は、低露点空気製造条件においても妥当であることが分かった。

次に、低露点製造条件・流路構成におけるデシカントロータのシミュレーションモデルの構築と数値計算の信頼性向上に資することを第一の目的として、ロータ回転数、再生温度および吸着入口空気の絶対湿度を変化させながら、各ゾーン出口のロータ回転方向空気状態分布を詳細に測定した。デシカントロータを用いた低露点空気製造用除湿機は、一部の工業分野において重要な役割を担っている、一定の需要がある技術であるにも関わらず、その除湿・再生挙動を詳細に実測したデータはほとんど報告されていない。したがって測定したデータは単なるシミュレーションとの比較検証用としてだけでなく、工学的あるいは実用的に重要な意義を持つと考えた。結果、処理ゾーン途中で吸着

破過を生じると製品空気の露点が大きく上昇するので、露点-50 以下の低露点空気製造を目的とする場合、処理ゾーン終端近くまで出口空気の露点を低く維持する、運用及び装置設計が求められることが分かった。また、今回の実験では全ての条件において、再生出口および吸着除湿出口空気状態のロータ回転方向変化は、比較的報告例が多い一般除湿用途のデシカントロータの除湿/再生挙動と同様であることがわかった。よって、製品空気の水分濃度が、常湿環境よりはるかに低い低露点空気製造条件でも、既存のデシカント除湿・再生の理論及び数学モデルが適用できると考えた。そして、低露点製造を対象とするシミュレーションモデルで注意すべきは、正確な吸着等温線の測定と吸着熱の算出であり、これらに関して、低湿度域での物性値変化を計算に反映しないと、実測とは異なる結果を与える可能性が高いことが示唆された。

次に、デシカント性能シミュレーションにて一般的に用いられる数種類のシミュレーションモデルを用いて、ロータ周りの実測データ得た条件にて計算を行い、実験結果と整合するシミュレーションモデルはどれか検証した。最後に、シミュレーションを用いて、低露点除湿機の省エネルギー化でしばしば問題となる、冬季部分負荷制御の検討を行った。結果、吸着材層内の物質拡散抵抗に関して物質移動係数を総括値とすることで表現する、吸着量基準の吸着速度式を用いた LDF(Linear Driving Force)モデルでは、非線形性の強い吸着等温線を持つゼオライト担持ロータの場合、適切に吸着速度を表現できないことが示唆された。また、吸着材層内厚み方向の物理量分布を考慮した、より詳細なシミュレーションモデルを用いた場合、上述の吸着量基準の LDF モデルに比べ大幅に計算精度が向上し、実験値をほぼ再現する結果が得られることが分かった。しかし、計算結果を精査した結果、吸着材層内の物質拡散抵抗は、境膜抵抗に比べて非常に小さいことが分かった。前述の LDF モデルから詳細モデルに変更した際、計算精度が向上したのは、吸着材層内厚み方向の物理量分布を考慮したからではなく、境膜抵抗の大きさを示す吸着速度式の妥当性に関して改善があったためだと考えた。そこで詳細モデルで採用した絶対湿度基準の吸着速度式を用いた LDF モデルを検討した結果、詳細モデルとほぼ同様の計算結果を得ることができた。つまり、一連の検討によって、これまでほとんど報告例が無い低露点空気製造条件でのデシカントロータの除湿挙動解析に関して、妥当なシミュレーションモデルを示すことができた。

さらに、精度が確認されたシミュレーションモデルを用いて、同システムの冬季部分負荷運転時の制御手法に関して、再生温度とロータ回転速度という2つのパラメータの設定値を、最適化する検討を行った。結果、部分負荷運転時は再生温度を所定の値まで下げることによって、供給露点を調整し省エネルギーを図ることが出来ることが分かった。一方、パージ出口空気を加熱して再生空気に用いるシステムフローにおいて、負荷が小さくなるほど最適回転速度が高いため、負荷応じてロータ回転速度を変化させることで、再生温度のみを変更する制御より大きな省エネ効果を得ることが示唆された。最後、部分負荷運転を含む年間の運用コスト試算を行った。外気絶対湿度に合わせて再生温度を

変更する部分負荷制御を行うことで、外気の絶対湿度が所定値を下回る冬季の再生熱源の負荷が低減され、同時期の再生熱源の消費電力は、安全性を重視する従来の再生温度一定制御と比較して計 37% 減少する試算を得た。

以上、一定の工業的需要があるにも関わらず、これまで学術的研究報告がほとんど行われなかった、水蒸気吸着材ロータによる低露点空気製造とその運転指針について、実験とシミュレーションを交えた研究事例を示した。本研究結果が同分野の今後の発展と応用展開の一助になれば幸いである。

使用記号

a	半厚さ	m
c	比熱	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
D_{Air}	空気層内水蒸気拡散係数	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_k	細孔拡散係数	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_{Obj}	吸着材層内物質拡散係数	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_p	Knudsen 拡散係数	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_s	表面拡散係数	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
DP	露点	
d_h	水力等価直径	mm
h	熱伝達係数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
K	物質伝達係数	s^{-1}
k_F	物質移動係数	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
K_F	総括物質移動係数 (絶対湿度基準)	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
K_S	総括物質移動係数 (吸着量基準)	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Nu	ヌセルト数	-
q	局所吸着量	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
\bar{q}	流路断面平均の吸着量	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
q^*	平衡吸着量	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q_h	吸脱着発熱量	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Sh	シャーウッド数	-
t	時間	s
T	温度	
u	z 方向の空気流速	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v	y 方向の空気流速	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
RH	相対湿度	-
x	絶対湿度	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
y	流れと垂直方向の距離	m
z	流れ方向の距離	m

ギリシャ記号

屈曲度	-
吸着材層空隙率	-

	熱伝導率	$W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
μ	空気の粘性係数	$Pa \cdot s$
	密度	$kg \cdot m^{-3}$
	ロータ回転方向角度	$^{\circ}$

添字

<i>Air</i>	空気に関する値
<i>m</i>	流路における混合平均値
<i>Obj</i>	吸着材に関する値
<i>w</i>	水蒸気に関する値
<i>1</i>	流路入口
<i>2</i>	流路出口
<i>p</i>	ページ流路出口局所空気
<i>P</i>	ページ空気
<i>r</i>	再生流路出口局所空気
<i>R</i>	再生空気
<i>s</i>	除湿流路出口局所空気
<i>S</i>	除湿空気

謝 辞

本論文を終えるにあたり、研究遂行及び論文の作成において終始一貫して丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました、金沢大学理工学域機械工学類教授 児玉 昭雄先生に、まず以て心からお礼申し上げます。不出来若輩の身である私が、何とか学位論文を纏めることができましたことは、先生の寛大かつ的確なご指導あってのものであったと確信しております。

学位論文審査の労をお執り下さいました金沢大学理工学域機械工学類教授 川端 信義先生、山田 良穂先生、同准教授 多田 幸生先生、金沢大学理工学域自然システム学類准教授 汲田 幹夫先生には、暖かいご支援と多くの貴重なご助言を賜りました。記して感謝申し上げます。

金沢大学理工学域機械工学類助教 大坂 侑吾先生には、研究への取り組み方や論文作成方法などについて、貴重なご助言を頂きました。同 辻口 拓也先生には本論文作成に必要な分析データの採取・ご提供を頂きました。また、環境科学研究室の皆様には懇親会の場などで、貴重なご意見を頂きました。深く感謝致します。

3年という会社業務としては長い期間本研究に携わることをご許可を頂き、在学中多方面でご協力頂きました新日本空調株式会社 技術開発研究所 柳沢 昌行所長、進藤 伸二前所長に、厚くお礼申し上げます。また、社会人ドクターコース入学という過大な機会を下さいました神戸 正純主席研究員に深く感謝致します。そして、本研究全般に渡り実務的なご指導・ご協力を頂きました永坂 茂之副主席研究員に心より感謝申し上げます。また、本研究の着想アイデアを下さいました、同社技術本部技術企画課の木村崇氏に厚くお礼申し上げます。また、所員の方々並びに関係者の皆様には、随所でご協力頂きました。本当にありがとうございました。在学中学んだことを、実務に発揮できるよう精進して参ります。

最後に、遠方より私を支え激励してくれた家族に、心から感謝致します。ありがとうございました。

2014年10月

綾目久雄