

北海道産天然多孔質材料の デシカント空調ユニットへの応用に関する研究

学位論文内容の要旨

潜熱・顕熱分離空調は、建物の空調に係るエネルギー消費量、二酸化炭素排出量の削減に有効な手段のひとつとして、持続可能な建築設備の実現において不可欠な技術となっている。潜熱負荷と顕熱負荷をそれぞれに適した方式で処理・制御することにより快適性と省エネルギーの両立を目指すものであるが、特に潜熱負荷の制御技術が課題となっている。100℃程度の高温排熱が得られる産業部門では、吸着材(以下デシカント材)により潜熱負荷処理を行うデシカント空調システムの普及が進んでいる。このシステムの省エネルギー性で優位な点は、露点温度以下までの冷却が必要なく再加熱も不要であること、デシカント材中の水蒸気を脱着させる再生過程において排熱が利用可能なことにある。しかし既存のデシカント材は高い除湿量を得るには60℃以上の再生熱が必要であるため、排熱温度の低い民生部門での普及には至っていない。そこで、消費エネルギー削減が急務とされる民生部門の空調に省エネルギー性の高いデシカント空調システムの導入を進めるにあたり、空調機の冷房排熱を利用できる、低温再生可能なデシカント材の開発が求められている。現在、実験室レベルでの低温再生が可能な合成材料に関する報告はあるが、価格面で実用途への適用は難しい。また、寿命を考えると耐久性の高い無機物が望ましい。

そこで本論文では低温再生可能なデシカント材として、北海道産天然多孔質材料の稚内層珪質頁岩の適用可能性を検討した。稚内層珪質頁岩は自律調湿機能を発現する4-20nmのメソ孔を有しており、空調排熱を用いて室内空気を40℃まで加温した空気でも放湿が可能であることが予測できる。また無機物の硬質な堆積岩であることから、吸放湿の繰り返しにおける性能劣化は小さいと考えられる。しかし既存の化合物を原料とするデシカント材と比較すると、天然材料であるため飽和吸湿量が270mg/g程度と少ない。本研究では、簡易な処理操作で珪質頁岩の吸湿性能の向上を図るため、塩化物を細孔内に担持させることを試みた。まず、担持させた塩化物が吸湿して生じる水溶液が頁岩表面に溶出しないよう、表面の濡れ性を評価して最適な担持条件を見積もる手法を開発した。次に、その結果をもとに塩化物担持稚内層珪質頁岩配合抄紙を基材としたデシカントフィルターおよびローターを試作し、吸放湿速度の評価と回転時の吸湿・再生試験から除湿性能を明らかにした。一方、最適設計、連続使用時の除湿効果の算定のためデシカントローターの数値計算プログラムを作成し、シミュレーションによりデシカント空調ユニット導入時のエネルギー削減効果を見積もった。

本論文の構成および各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、民生部門における空調制御が担う課題と潜熱・顕熱分離空調、デシカント空調の概要と本研究の目的について述べている。

第2章では、デシカント材、多孔質材料の塩化物担持およびデシカント空調システムに関する既往の研究と課題、本研究の位置付けを示す。

第3章では、天然多孔質材料である稚内層珪質頁岩の特徴と基礎物性、既往の研究について述べ

ている。豊富な賦存量と採掘のし易さと安定した化学組成、吸放湿の繰り返しに対する物性および吸放湿性能の耐久性について示した。

第4章では、稚内層珪質頁岩の飽和吸湿量を増加させるため、水蒸気を吸収する性質をもつ塩化物を細孔内に担持させて飽和吸湿量の向上を図った。その結果、担持させる塩化物の種類によって高い吸湿量を発現する相対湿度域が異なること、特に塩化ナトリウムを珪質頁岩の細孔に担持させることで、相対湿度 50 - 80% 間での吸湿量が増加する結果を得た。また、吸放湿性能試験により塩化物を担持させても原石と比較して吸放湿速度が低下しないことを確認した。一方、塩化物を担持させると吸湿量が増加するが、担持量が過剰な場合、吸湿時に塩化物溶液が試料表面に溶出して濡れた状態になる。このような現象が生じる材料をフィルターに採用して通風させると、水溶液が飛散する可能性が高い。この問題を防ぐためには吸湿した水溶液の表面への溶出が生じないことが大前提となる。そこで、塩化物溶液の飛散が生じない最適な担持条件を見積もるため、吸湿により生じる表面の濡れをデジタルスキャナを用いて色調変化を観察し、上限となる含浸水溶液濃度を見積もる簡便な手法を開発した。担持させた塩化物それぞれの上限含浸水溶液濃度を求めたほか、表面の濡れを生じずに得られる最大吸湿量と細孔直径 2 - 50 nm のメソ孔容積が一致することを明らかにした。

第5章では、塩化物担持稚内層珪質頁岩微粉末を配合した抄紙を基材とするハニカムフィルターを開発し、バッチ式の通風試験を行った。微粉末状 (粒径 0.1 - 20 μm) の頁岩を化学繊維とともに抄いて塩化物溶液に含浸させた珪質頁岩配合抄紙を、コルゲート加工して同心円状に巻いてハニカム状に成形した。東京夏季外気を想定した 30 $^{\circ}\text{C}$ 、75%RH の空気と、ヒートポンプ排熱を用いて室内還気を加熱したと想定した 40 $^{\circ}\text{C}$ 、30%RH の空気を交互に通風させた結果、同形状のシリカゲル、ゼオライトと比較すると、40 $^{\circ}\text{C}$ での除湿再生が可能なのは稚内層珪質頁岩配合フィルターのみであった。

第6章では、実際に直径 0.4 m、厚さ 0.06 m の珪質頁岩配合ハニカムローターを作成し、仕切り板により吸着側と再生側の流路を区切って断熱が施された試験部内に設置して回転させ、外気想定空気と再生用空気を向流で流通させ、除湿性能を評価した。空気流量をそれぞれ 150 m^3/h 、回転数を 0.5 - 22 rpm、再生温度を 30 - 50 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化させた結果、回転数が高いほど除湿量は増加する傾向にあるが、4 rpm 以上に回転数を高めると除湿量は再生温度に依存せずほぼ一定であることがわかった。0.5 - 1 rpm の低回転時には、再生温度が 1 $^{\circ}\text{C}$ 上がるごとに除湿量は 0.12 g/kgDA 増加する結果となった。1 rpm の珪質頁岩ローターで潜熱を除去した後、交換効率 90% の顕熱交換器を併用した場合、従来の冷却除湿と比べると冷房負荷を 38% 削減できる結果が得られた。さらに 26 $^{\circ}\text{C}$ の室内空気を加熱せずに再生側に通風させた場合の性能も同様に評価した結果、回転数が 4 rpm 以上であれば外気の潜熱負荷が低減できていることがわかり、全熱交換器としての機能も見出した。

第7章では開発した珪質頁岩ローターの吸放湿を再現する数値計算プログラムを熱物質同時移動現象モデルをもとに作成し、熱伝達率および物質移動係数を実測から求め、回転数をパラメータとした関数としてプログラムに反映させ、実験結果の高い再現性を確認した。そのモデルを用いてローター内の回転方向および厚さ方向の空気温湿度分布を明らかにし、回転数や形状が除湿性能に与える影響を計算により明らかにした。その結果から最適形状を提案し、デシカント空調ユニットに適用して連続使用した場合の除湿効果の算定を行った。東京に本提案デシカントユニットを導入する場合、夏季外気潜熱負荷を従来の冷却除湿方式の 36% に削減できることを計算から明らかにした。さらに亜熱帯気候である那覇市での導入を想定し、予冷プロセスと組み合わせることで外気潜熱負荷除去効果が得られることを示した。

第8章は本論文で得られた結論を総括し、今後のデシカント空調システムの利用の展望と課題について示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長 野 克 則

副 査 教 授 横 山 眞太郎

副 査 教 授 羽 山 広 文

副 査 准教授 濱 田 靖 弘

学 位 論 文 題 名

北海道産天然多孔質材料の デシカント空調ユニットへの応用に関する研究

潜熱・顕熱分離空調は、空調に係るエネルギー消費量、二酸化炭素排出量の削減に有効な手段の一つとして注目を集めている。産業部門では、100℃程度の高温排熱が容易に利用できるため既に吸着材（以下デシカント材）により潜熱負荷処理を行うデシカント空調の採用事例を多く見ることができる。しかし、高温排熱が得られない民生部門ではデシカント空調は未だ普及しておらず、空調機などから出る40℃程度の低温な排熱を再生プロセスに利用できるデシカント材が求められている。そこで本研究は低温再生可能なデシカント材として、北海道産天然多孔質材料の稚内層珪質頁岩の適用可能性を検討するものである。稚内層珪質頁岩は自律調湿機能を発現する4～20nmのメソ孔を有する鉱物であり、低温排熱でも再生が可能であり、吸放湿速度が速く、吸放湿の繰り返しにおける性能劣化は小さいという長所を持つ。ただし既存の人工デシカント材と比較すると、飽和吸湿量が270mg/g程度と少ない。そこで、本研究では塩化物をメソ孔内に担持させて吸湿性能の向上を図ったが、このとき通風時に担持させた塩化物水溶液が表面から飛散するといった問題を回避できる適正な担持量を見積もる簡便な方法を提案した。次に、塩化物担持稚内層珪質頁岩配合抄紙を基材としたデシカントフィルターおよびデシカントローターを開発し、吸放湿速度と除湿性能を明らかにするとともに、デシカントローターの吸放湿に関する数値計算プログラムを作成し、デシカント空調ユニット導入時のエネルギー削減効果を計算から見積もったものである。

本論文の構成および各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、研究の背景と本研究の目的について述べている。

第2章では、デシカント材、多孔質材料の塩化物担持およびデシカント空調システムに関する既往の研究と課題、本研究の位置付けを示した。

第3章では、稚内層珪質頁岩の特徴と基礎物性、既往の研究について述べている。豊富な賦存量と安定した化学組成、吸放湿の繰り返しに対する物性および吸放湿性能の耐久性について示した。

第4章では、飽和吸湿量を増加させるため、塩化物を細孔内に担持させて飽和吸湿量の向上を図った。その結果、特に塩化ナトリウムを珪質頁岩の細孔に担持させることで、相対湿度50～80%間での吸湿量が増加することがわかった。同時に、吸放湿性能試験により塩化物を担持させても吸放湿速

度が低下しないことを確認した。一方、塩化物を担持した場合、高湿条件では水溶液が試料表面に溶出して通風時にそれが飛散する可能性がある。そこで、デジタルスキャナを用いた表面の濡れが生じない適正な担持条件を見積もる簡便な手法を提案した。このとき、表面の濡れが生じない最大吸湿量は細孔直径 2~50nm のメソ孔容積と一致することを明らかにした。

第 5 章は、塩化物担持稚内層珪質頁岩微粉末を配合した抄紙を基材とするハニカムフィルターを開発し、バッチ式の通風試験から吸放湿性能を明らかにしたものである。粒径 0.1~20 μm に粉碎した頁岩を化学繊維とともに抄き、塩化物溶液に含浸させた珪質頁岩配合抄紙を用いてハニカム状のフィルターを作成した。本フィルターに加えてシリカゲル、ゼオライトを配合した計 3 種類のフィルターを用いて、30℃・75%RH、40℃・30%RH の空気を交互に通風させて吸放湿を繰り返した結果、除湿が可能なのは稚内層珪質頁岩配合フィルターのみという結果を得ている。

第 6 章は珪質頁岩配合ハニカムローターを作成し、その除湿性能を評価したものである。ローター回転数 0.5~22rpm、再生温度 30~50℃の条件下では、回転数が大きいほど除湿量は増加するが、4rpm 以上では除湿量は再生温度に依存せずほぼ一定となった。0.5~1rpm では、再生温度が 1℃上がるごとに除湿量は 0.12g/kgDA 増加した。本ローター (1rpm) と顕熱交換器 (熱交換効率 90%) を併用した場合、従来の冷却除湿と比べて冷房負荷を 38% 削減できる結果が得られた。

第 7 章では開発した珪質頁岩ローターの吸放湿を再現する数値計算プログラムを作成し、それを用いて、実験では測定不可能なローター内の回転方向および厚さ方向の空気温湿度分布を計算し、回転数や形状が除湿性能に与える影響を明らかにすると共に、制約条件の下での最適形状を検討した。次に、本提案デシカントユニットを東京に導入した場合、夏季外気潜熱負荷を従来の冷却除湿方式に比べて 36% に削減できることを示した。

第 8 章は本論文で得られた結論を総括し、今後のデシカント空調システムの利用の展望と課題について述べた。

これを要するに、筆者は低温再生可能なデシカント材として、北海道産天然多孔質材料の稚内層珪質頁岩に着目して、珪質頁岩の吸湿性能の向上のための塩化物担持について、吸湿した溶液が頁岩表面に溶出しない最適な担持条件を見積もる手法を開発すると共に、塩化物担持稚内層珪質頁岩配合抄紙を基材としたデシカントフィルターやデシカントローターを開発、吸放湿速度の評価と回転時の吸湿・再生試験から除湿性能を明らかにするとともに、計算から求めた省エネルギー性からみても、この稚内層珪質頁岩が低温再生可能なデシカント材として実用的に応用可能であることを明らかにした。これは、空気調整工学をはじめ、環境工学、建築工学、化学工学、空間性能工学の進展に寄与するところ大である。

よって、筆者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。