

学位論文題名

稚内層珪質頁岩デシカント換気空調・統合型ヒートポンプ
に関する研究

(A study on desiccant air conditioning system using Wakkanai siliceous shale integrated with heat pump system)

学位論文内容の要旨

建築物の空調に係るエネルギー消費量の削減に有効な手段の一つとして、潜熱・顕熱分離空調がある。このメリットは、一般的な空調機においては処理空気を一度露点温度以下まで冷却して結露をさせながら除湿を行う必要があるが、吸着材を用いた潜熱処理（以降、デシカント空調とする）であれば露点温度以下までの冷却が不要であるので、除湿のために投入するエネルギーをより少なくできることである。しかし、デシカント材としては化学合成により製造されたものが一般的であり、そのコストが普及の大きな障害であった。またエアコンなどからの 40℃以下の排熱を利用して再生が可能なデシカント材は限られる。環境システム工学研究室では、北海道で産出され資源量が豊富で安価な天然メソポーラス材料である稚内層珪質頁岩に着目して、これを基材として 40℃という低温で再生可能なデシカントローターの開発に成功している。

そこで本論文は、この稚内層珪質頁岩を含有するデシカントローターを組み込んだ低温再生可能なデシカント換気空調システムを構築することを目的としている。まず、40℃という低温排熱によりデシカントローターを再生して外気潜熱負荷を全て除去できるデシカント換気ユニットのシステム構成と最適制御方法について実験室実験、そして数値解析による検討から明らかにしている。次いでヒートポンプユニットと統合したデシカント換気空調機を開発して、半年間にわたる実証実験を行い、デシカントローターにより非結露で冷房を行い、快適な室内温度・湿度域を保ち得ることを実証している。最後に、運転・性能予測のための数値計算プログラムを開発して、最適運転条件を示すと共に、期間計算から従来方式に対する本システムの優位性を明らかにしている。

本論文は以下の第 1 章から第 8 章で構成されている。

第 1 章は、民生部門において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について述べている。

第 2 章は、デシカント材やデシカント空調システムに関する既往の研究を分析して、現在の課題を抽出するとともに、本研究の目的を示したものである。

第 3 章は、本研究室における稚内層珪質頁岩を含有するローターを利用したデシカント換気空調に関するこれまでの成果をまとめている。さらに、当研究室で開発したデシカントローターの除湿・放湿過程を再現できる数値解析プログラムを用いてローター形状と除湿量の関係を検討し、開発を進めるデシカント換気ユニットに必要なローター形状などについて予備検討を行っている。

第 4 章は、稚内層珪質頁岩を含有するローターを利用したデシカント換気ユニットの実験である。実験室内に ϕ 400mm の 2 枚のローターを組み込んだデシカント換気空調ユ

ニットを構築して、東京の暑熱日の外気と室内温湿度条件下においてローターや熱交換器の最適構成、ローター回転数、再生と予冷の温度条件について検討を行っている。その結果、それぞれの回転数を 1rpm と 4rpm に設定した場合に最大除湿量 6.5 g/kgDA を得られることがわかったが、40℃空気での再生では目標除湿量を達成することができないために装置の改良が必要であることを示している。

第5章は、まず数値解析により装置改良の方向性を見出している。具体的には、計算結果からローター直径を ϕ 500mm に拡大し、ローター回転数を 0.5rpm とすることで、除湿量を最大 8.2 g/kgDA まで上昇させられることを予測している。次に、この結果に準じて試験装置を改良したところ、最大で 7.6 g/kgDA の除湿量が得られることを示している。

第6章は、デシカント換気ユニットとヒートポンプユニットとを統合したデシカント換気空調機を試作し、それを埼玉県内にある実際の事務所に設置して夏期の冷房・除湿・換気の実証実験を行った結果である。実証実験では、室内空気温湿度として、26℃、12.6 g/kgDA を連続して維持できることを実証している。ただし、このとき予冷用熱交換器に 2.0 g/kgDA 程度の結露が生じていたため、次にデシカントローターだけで非結露で外気潜熱負荷を除去して、高効率で冷房を行うための制御条件を見出している。これよりデシカントローターだけで 7.6 g/kgDA を除湿して冷房を行うことが可能となり、このとき成績効率 (COP) も 6.5 が得られることを示している。

第7章では、数値計算用の汎用プラットフォームである MATLAB-Simulink を用いたシステムシミュレーター構築とこれを用いて夏期の性能予測を行ったものである。機関性能予測に先立ち、種々の外気条件に対して目標除湿量を維持しつつ、再生・予冷投入エネルギーが最小とする再生・予冷温度制御条件を明らかにしている。この結果を用いて、関東における夏期の運転、性能予測を行ったところ、本システムの除湿に必要な冷熱量は従来の冷却除湿方式に必要な例熱量に比べて4割程度削減できることを予測している。

第8章は総括であり、結論を述べるとともに、今後の研究に関する課題と可能性及び将来の展望について述べている。

最後に、本研究によって、北海道で豊富に産出される天然多孔質材料である稚内層珪質頁岩を基材としたローターを搭載したデシカント換気ユニットとヒートポンプを統合したデシカント換気空調機を開発して、実験と数値計算から最適運転条件を見出した。加えて実証実験では、目標除湿量を保ちながら高効率に冷房を行い、設定した室内温湿度環境を保ち得ることを明らかにした。一方、このデシカント換気空調機の運転、性能予測計算プログラムを開発して、年間性能の予測を可能とした。本システムを東京の住宅に導入すれば、除湿に必要な例熱量を従来の冷却除湿に比べて4割程度削減できることを明らかにした。

このように、本研究で得られた稚内層珪質頁岩を基材としたデシカントローターを搭載するデシカント換気空調機は、民生部門のエネルギー消費量削減と室内空気・温熱環境の改善、省スペース、省コストに大きな貢献を果たすものである。これは、建築設備工学、空気調整工学をはじめ環境工学の進展、および省エネルギー、省資源、CO₂排出量の削減、そして地空温暖化防止に寄与するところ大であることを確信するものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長 野 克 則
副 査 教 授 羽 山 広 文
副 査 教 授 秋 山 友 宏
副 査 准教授 濱 田 靖 弘

学位論文題名

稚内層珪質頁岩デシカント換気空調・統合型ヒートポンプ に関する研究

(A study on desiccant air conditioning system using Wakkanai siliceous shale integrated with heat pump system)

建築物の空調に係るエネルギー消費量の削減に有効な手段の一つとして潜熱・顕熱分離空調がある。一般的な空調機においては処理空気を一度露点温度以下まで冷却して結露をさせながら除湿を行う必要があるが、吸着材を用いた潜熱処理(以降、デシカント空調とする)であれば露点温度以下までの冷却が不要であるので、除湿のために投入するエネルギーが少なくすむことである。しかし、従来のデシカント材は化学合成により製造されたものが一般的であり、そのコストが普及の大きな障害であった。またエアコンなどからの40℃以下の排熱を利用して再生が行えるデシカント材は限られる。筆者の研究室では、これまでに北海道で産出され資源量が豊富で安価な天然メソポーラス材料である稚内層珪質頁岩に着目して、これを基材として40℃という低温で再生可能なデシカントローターの開発に成功している。そこで本論文は、この稚内層珪質頁岩を含有するデシカントローターを組み込んだ低温再生可能なデシカント換気空調システムを構築することを目的としている。まず、40℃という低温排熱によりデシカントローターを再生して外気潜熱負荷を全て除去できるデシカント換気ユニットのシステム構成と最適制御方法について実験室実験、そして数値解析による検討から明らかにしている。次いでヒートポンプユニットと統合したデシカント換気空調機を開発して、半年間にわたる実証実験を行い、デシカントローターにより非結露で冷房を行い、快適な室内温度・湿度域を保ち得ることを実証している。最後に、運転・性能予測のための数値計算プログラムを開発して、最適運転条件を示すと共に、期間計算から従来方式に対する本システムの優位性を明らかにしている。

本論文は以下の第1章から第8章で構成されている。

第1章は、序論であり民生部門において空調制御が担う課題と潜熱顕熱分離空調、デシカント空調の特徴を述べている。

第2章は、デシカント材やデシカント空調システムに関する既往の研究を分析して、現在の課題を抽出している。そして、本研究の目的を示している。

第3章は、本研究室における稚内層珪質頁岩を含有するローターを利用したデシカント換気空調に関するこれまでの成果をまとめている。さらに、当研究室で開発したデシカントローターの除湿・放湿過程を再現できる数値解析プログラムを用いてローター形状と除湿量の関係を検討し、本論文で行う実証実験に必要なローター形状などについて予備検討を行っている。

第4章は、稚内層珪質頁岩を含有するローターを利用したデシカント換気ユニットの実験である。実験室内に400 mmφの2枚のローターを組み込んだデシカント換気空調ユニットを構築して、東京の暑熱日の外気と室内温湿度条件下においてローターや熱交換器の最適構成、ローター回転数、再生と予冷の温度条件について検討を行っている。その結果、それぞれの回転数を1 rpmと4 rpmに設定した場合に最大除湿量6.5 g/kg_{DA}を得られることがわかったが、40℃空気での再生では目標除湿量を達することができないために装置の改良が必要であることを示している。

第5章は、まず数値解析により装置改良の方向性を見出している。具体的には、計算結果からローター直径を500 mmφに拡大し、ローター回転数を0.5 rpmとすることで、除湿量を最大8.2 g/kg_{DA}まで上昇させられることを予測している。次に、この結果に準じて試験装置を改良したところ、最大で7.6 g/kg_{DA}の除湿量を得られることを示している。

第6章は、デシカント換気ユニットとヒートポンプユニットとを統合したデシカント換気空調機を試作し、それを埼玉県内にある実際の事務所に設置して夏期の冷房・除湿・換気の実証実験を行った結果である。実証実験では、室内空気温湿度として、26℃、12.6 g/kg_{DA}を連続して維持できることを実証している。このとき、除湿量は最大で8.7 g/kg_{DA}で、外気潜熱負荷を全て処理できていたことを確認している。ただし、このとき予冷用熱交換器に2.0 g/kg_{DA}程度の結露が生じていたため、次にデシカントローターだけで非結露で外気潜熱負荷を除去して、高効率で冷房を行うための制御条件を見出している。これよりデシカントローターだけで7.6 g/kg_{DA}を除湿して冷房を行うことが可能となり、このとき成績効率(COP)も6.5が得られている。

第7章では、数値計算用の汎用プラットフォームであるMATLAB-Simulinkを用いたシステムシミュレーター構築とこれを用いて夏期の性能予測を行ったものである。季節性能予測に先立ち、種々の外気条件に対して目標除湿量を維持しつつ、再生・予冷投入エネルギーが最小とする再生・予冷温度制御条件を明らかにしている。この結果を用いて、関東における夏期の運転、性能予測を行ったところ、本システムの除湿に必要な冷熱量は従来の冷却除湿方式に必要な冷熱量に比べて4割程度削減できることを明らかにしている。

第8章は総括であり、結論を述べると主に、今後の研究に関する課題と可能性及び将来の展望について述べている。

これを要するには、筆者は、北海道で豊富に産出される天然メソポーラス材料である稚内層珪質頁岩を基材としたデシカントローターを搭載したデシカント換気ユニットとヒートポンプユニットとを統合したデシカント換気空調機を開発して、実験と数値計算から最適運転条件を見出した。そして、これを実際に関東圏の事務所建物に導入して実証実験を行い、目標除湿量を保ちながら高効率に冷房を行い、設定した室内温湿度環境を保ち得ることを明らかにした。一方、このデシカント換気空調機の運転、性能予測計算プログラムを開発して、年間性能予測を可能とした。具体例として、本システムを東京の住宅に導入すれば、除湿に必要な冷熱量を従来の冷却除湿に比べて4割程度削減できることを明らかにした。このように、本研究で得られた稚内層珪質頁岩を基材としたデシカントローターを搭載するデシカント換気空調機は、民生部門のエネルギー消費量削減と室内空気・温熱環境の改善、省スペース、省コストに大きな貢献を果たすものである。これは、建築設備工学、空気調整工学をはじめ環境工学の進展、および省エネルギー、省資源、CO₂排出量の削減、そして、地球温暖化防止に貢献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。