

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	自然エネルギーを活用したデシカント空調システムに関する研究
氏 名	生田 紀夫
<p>人間の温冷感¹は空気温度のみでは決まらず、湿度、放射温度(周囲の壁等の表面温度)、気流速度、代謝量(活動量)、着衣量にも依存するために、これらに配慮せずに単に空気温度を28℃に設定すると、居住者に我慢を強いることになり、居住者の快適性、知的生産性が低下してしまう。特に、除湿ができていなければ、快適性、知的生産性の低下は著しいものがある。また、現在使われている空調機では結露が発生し、微生物の発生による衛生環境の低下が懸念される。このような中、除湿制御を正確に行うことが可能で空調機内で結露が発生しないデシカント空調システムが着目されている。本研究は、太陽熱を主とした自然エネルギーを有効に活用することで、デシカント空調システムの効率化を図り、実用化に資する技術を確認することを目的としている。高効率化のために①太陽熱を活用したデシカント空調システム、②太陽熱に加えてヒートポンプを組み込んだデシカント空調システムを提案し、試作機による性能評価を行った。また、吸着熱の処理のために太陽熱や地中熱を活用した吸着熱除去方法の検討を行った。</p> <p>第1章「序論」では、研究の背景及び既往の研究から本論文の研究目的を明らかにし、具体的な研究開発項目について述べた。</p> <p>第2章「空気式太陽熱集熱器を用いたデシカント空調システム」では、デシカント除湿機、空気式太陽熱集熱器を柱に、太陽光・風力発電も取り込んだ自然エネルギー主体の冷暖房システムについて、夏期、冬期の晴天日における室内環境、省エネ効果について調べるとともに、夏期・冬期の一定期間におけるエネルギー使用量の試算を行った結果について主に述べた。自然エネルギーを主体とする冷暖房システムにおいて、夏期には乾燥剤の再生に要する熱量の30～90%、システム全体で必要とするエネルギーの20～65%を自然エネルギーで賄えることが分かった。また、システムCOPを算出すると1名分の外気を導入した場合1.55、外気を導入しない場合1.71となる。冬期にはシステム全体で必要とするエネルギーの30～97%を自然エネルギーで賄えることが分かった。</p> <p>第3章「太陽熱を活用したヒートポンプ組み込み型デシカント空調システム」では、自然エネルギーの変動を補うために安定的な熱源であるヒートポンプを組み込み、太陽熱とヒートポンプの排熱で再生熱を賄うデシカント空調システムを提案し、試作機を用いた実験により夏期の外気条件における消費エネルギーと外気処理熱量の実測値によるデシカント空調システム全体のCOPの評価を行った結果について述べた。高負荷条件下(外気絶対湿度20g/kg(DA)以上)では、太陽熱を活用しない場合でもシステムCOPは2.91～3.27、太陽熱を活用した場合には3.84を達成した。また、夏期の期間消費エネルギーを試算した結果について述べた。実測値を用いた試算から、太陽熱活用により夏期の期間消費エネルギーを13.6%削減できることが分かった。</p> <p>第4章「太陽熱・蒸発潜熱を活用した吸着熱の処理方法の検討」では、デシカント空調機のロータ及び冷水コイルを通過した湿球温度の低い空気の一部を冷却塔に導入することで、冷却塔内の水の蒸発を促進させ、より低温の冷水を作る仕組みを設けた小型蒸発促進冷却塔を付加したデシカント空調システムを構築し、パラメータを広い条件で</p>	

振って最適な使用条件を把握した。さらに、その結果を実スケール装置の設計に活用し冷却効果の確認を行った結果について述べた。実スケールの蒸発促進冷却塔を付加したデシカント空調システムでは、蒸発促進冷却塔で作られた冷水によって、ロータ通過後の高温空気（41.6℃）を31.8℃まで冷却できることが確認でき、27℃給気とした場合の冷却熱量の約66%を賄うことができた。さらに、システムの運転に必要な加熱量及び冷却熱量の約70%を空気式太陽熱集熱器と蒸発促進冷却塔によって供給できることが分かった。

第5章「地中熱を活用した吸着熱の処理方法の検討」では、デシカントロータ通過後の高温空気を直接地中熱採熱パイプに導入した場合の地中熱による冷却効果の確認を行った結果について述べた。間欠運転（運転時間：9:00～17:00）の場合、約10～12℃の温度降下が見られた。連続運転の場合、運転開始直後を除いては約8～10℃の温度降下が見られた。間欠運転では地中熱採熱パイプによって、ロータ通過後の高温空気（約52℃）を約40℃まで冷却できることが確認でき、27℃給気とした場合の冷却熱量の約48%を賄うことができた。また、1週間後の冷却能力は間欠運転で3.2～6.0%、連続運転で19.3～26.3%減少し、連続運転の1週間後の冷却能力が間欠運転に比べて大きく低下していることが分かった。さらに、間欠運転を行えば翌日もほぼ同じ冷却能力が得られるので、日中の運転のみでよい建物の場合には間欠運転で対応できる。一方、工場等の24時間空調が必要な場合には同じ採熱パイプに常時空気を流さずに、例えば3本のパイプで間欠運転を行い、常時いずれかのパイプに空気を流す運転を行うことが望ましいと考えられる。

第6章「結論」では、各章で得られた研究成果の要約及び今後の展望・課題について述べた。

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	Study on a Desiccant Air-Conditioning System using Natural Energy
氏 名	SHODA Norio
<p>This study was conducted with the intention of establishing a technology that contributes to the practical implementation of a desiccant air-conditioning system; this is achieved by improving the efficiency of a desiccant air-conditioning system by using natural energy, primarily solar heat, in an efficient manner. To improve the system efficiency, desiccant air-conditioning system that incorporate a heat pump in addition to solar heat were proposed, and performance evaluation were conducted on prototype system. Moreover, the adsorption heat processing method that uses solar heat and geothermal heat is considered.</p> <p>In chapter 1, "Introduction," we clarified the objective of this study based on our research background and existing studies, and described the specific research development items.</p> <p>In chapter 2, "Desiccant Air-Conditioning System with a Solar Air Heater Unit," we described the results of laboratory measurements on the performance of the heating, ventilation and air conditioning (HVAC) system powered by solar air heater, solar cell and wind generator. The experimental results show that 30-90 % of thermal energy to regenerate the desiccant in this system and 20-65 % of the energy to power the system was supplied by natural energy in summer. In addition, the coefficient of performance (COP) of 1.55 was achieved when outdoor air was introduced for one person, and the COP of 1.71 was achieved without outdoor air.</p> <p>In chapter 3, "Desiccant Air-Conditioning System Consisting of Heat Pump and Solar Heat Collector," a desiccant outdoor air-conditioning system that uses high-temperature chilled water (approximately 20 °C) and low-temperature hot water (approximately 55 °C) produced by a high-efficiency heat pump, and hot air produced by solar heat collectors, was proposed. We constructed a prototype of this system and evaluated the COP of the entire desiccant air-conditioning system by using the measured values of electric energy consumption and treated enthalpy between the outdoor air and supply air. In high-load conditions, the system COP was 2.91-3.27 without solar heat and 3.84 with solar heat. In addition, we estimated the period energy consumption during summer. The energy consumption during the summer season was effectively reduced by 13.6 % with the use of solar heat.</p>	

In chapter 4, "Examination of Treatment Method for Adsorption Heat Using Solar Heat and Latent Heat of Evaporation," we considered a desiccant air-conditioning system with an evaporation cooling tower that produced even chilled water by introducing some air at low wet-bulb temperature. This air passed through the rotor and the chilled water coil of the desiccant air-conditioner into the cooling tower, thus encouraging the evaporation of water in the cooling tower. The parameters were set over a wide range of conditions to determine the optimum parameters. Furthermore, we used these results to design the real scale equipment, and evaluated the results of the cooling effects. It was confirmed that the high-temperature air (41.6 °C), after passing through the rotor, can be cooled down to 31.8 °C by using a real scale desiccant air-conditioning system with an evaporation cooling tower, which covered approximately 66% of the cooling heat when air is supplied at 27 °C. In a desiccant air-conditioning system with a real scale evaporation cooling tower, approximately 70 % of the amount of heating and cooling heat required to operate the system could be produced by solar air heater units and an evaporation cooling tower.

In chapter 5, "Examination of Treatment Method for Adsorption Heat using Geothermal Heat," we described the results of the confirmed cooling effects of geothermal heat when high-temperature air, after passing through the desiccant rotor, was directly introduced to a geothermal heat pipe. During intermittent operation at an air flow of 450 m³/h, there was a decrease of approximately 10-12 °C in temperature. During continuous operation at an air flow of 450 m³/h, there was a decrease of approximately 8-10 °C in temperature. It was confirmed that the high-temperature air (approximately 52 °C), after passing through the rotor, can be cooled down to approximately 40 °C by using a geothermal heat pipe, which covered approximately 48% of the cooling heat when air is supplied at 27 °C. Furthermore, one week later, the cooling capacity decreased 3.2-6.0 % with intermittent operation, and 19.3-26.3 % with continuous operation. This indicated that the cooling capacity during continuous operation one week later decreased much more than that of the intermittent operation.

In chapter 6, "Conclusion," we summarized our research results obtained in each chapter, and described our future outlook and challenges.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 720 号	氏名	生田 紀夫
最終試験担当者	主査	小金井 真	
	審査委員	加藤 泰生	
	審査委員	羽田野 袈裟義	
	審査委員	福代 和宏	
	審査委員	藤田 正則	
【論文題目】			
自然エネルギーを活用したデシカント空調システムに関する研究 (Study on a Desiccant Air-Conditioning System using Natural Energy)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>クールビズや節電の取り組みにおいて、オフィスにおける夏期の冷房設定温度として、「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）」の管理基準温度の上限に相当する 28℃が推奨されている。しかし、人間の温冷感には空気温度のみでは決まらず、湿度、放射温度（周囲の壁等の表面温度）、気流速度、代謝量（活動量）、着衣量にも依存するために、これらに配慮せずに単に空気温度を 28℃に設定すると、居住者に我慢を強いることになり、居住者の快適性、知的生産性が低下してしまう。特に、除湿が出来ていなければ、快適性、知的生産性の低下には著しいものがある。また、現在使われている空調機では結露が発生し、微生物の発生による衛生環境の低下が懸念されている。このような中、除湿制御を正確に行うことが可能で、空調機内で結露が発生しないデシカント空調システムが注目されている。しかし、従来のデシカント空調システムは効率が低い（システム COP が 1 以下）ことが課題となっている。本研究は、太陽熱を主とした自然エネルギーを有効に活用することにより、デシカント空調システムの高効率化を図り、実用化に資する技術を確立することを目的としている。高効率化のために、①太陽熱を活用したデシカント空調システム、②太陽熱に加えてヒートポンプを組み込んだデシカント空調システムを提案し、試作機による性能評価を行った。また、吸着熱の処理のために太陽熱や地中熱を活用した吸着熱処理方法の検討を行った。本論文は以下の 6 章から構成されている。</p> <p>第 1 章「序論」では、研究の背景及び既往の研究から本論文の研究目的を明らかにし、具体的な研究開発項目について述べた。</p> <p>第 2 章「空気式太陽熱集熱器を用いたデシカント空調システム」では、デシカント除湿機、空気式太陽熱集熱器を柱に、太陽光・風力発電も取り込んだ自然エネルギー主体の冷暖房システムについて、夏期、冬期の晴天日における室内環境、省エネ効果について調べるとともに、夏期・冬期の一定期間におけるエネルギー使用量及びシステム COP の試算を行った。また、ロータ冷却流路を備えたデシカント空調ユニットについて、夏期の晴天日における除湿能力、省エネ効果を調べた。自然エネルギーを主体とする冷暖房システムにおいて、夏期には乾燥剤の再生に要する熱量の 30～90%、システム全体で必要とするエネルギーの 20～65% を自然エネルギーで賄えることが分かった。システム COP（夏期一定期間の平均値）は外気を導入した場合 1.55、外気を導入しない場合（循環方式の場合）1.71 となった。太陽熱を活用することにより、従来のデシカント空調機の約 2 倍の効率が得られることが分かった。冬期にはシステム全体で必要とするエネルギーの 30～97% を自然エネルギーで賄えることが分かった。また、ロータ冷却流路を設けて室内排気（EA）を供給することにより冷却に要するエネルギーを約 8% 削減することができ、除湿能力を約 6% 向上させることが出来た。</p> <p>第 3 章「太陽熱を活用したヒートポンプ組み込み型デシカント空調システム」では、自然エネルギーの</p>			

変動を補うために安定的な熱源であるヒートポンプを組み込み、太陽熱とヒートポンプの排熱で再生熱を賄うデシカント空調システムを提案し、試作機を用いた実験により夏期の外気条件における消費エネルギーと外気処理熱量を求め、デシカント空調システム全体の COP の評価を行った。高負荷条件下（外気絶対湿度 20 g/kg(DA)以上）において、システム COP は太陽熱を活用しない場合には 2.91~3.27、太陽熱を活用した場合には 3.84 となった。太陽熱のみならずヒートポンプの排熱も活用した場合、従来のデシカント空調機に対して 3 倍以上の効率が得られることが分かった。また、実測値を用いて夏期の期間消費エネルギーを試算した結果、太陽熱の活用により夏期の期間消費エネルギーを 13.6 %削減できることが分かった。

第 4 章「太陽熱・蒸発潜熱を活用した吸着熱の処理方法の検討」では、デシカント空調機のロータ及び冷水コイルを通過した湿球温度の低い空気の一部を冷却塔に導入することにより、冷却塔内の水の蒸発を促進させ、より低温の冷水を作る仕組みを設けた小型蒸発促進冷却塔を付加したデシカント空調システムを構築し、パラメータを広い条件で設定した実験を行い、最適な使用条件を把握した。さらに、その結果を実スケール装置の設計に活用し、冷却効果の確認を行った。実スケールの蒸発促進冷却塔を付加したデシカント空調システムでは、蒸発促進冷却塔で作られた冷水によって、ロータ通過後の高温空気 (41.6 °C) を 31.8 °C まで冷却できることが確認でき、27 °C 給気とした場合の冷却熱量の約 66 %を賄うことができた。さらに、システムの運転に必要な加熱量及び冷却熱量の約 70 %を空気式太陽熱集熱器と蒸発促進冷却塔によって供給できることが分かった。

第 5 章「地中熱を活用した吸着熱の処理方法の検討」では、デシカントロータ通過後の高温空気を直接地中熱採熱パイプに導入した場合の地中熱による冷却効果の確認を行った。地中熱採熱パイプによって、ロータ通過後の高温空気 (約 52 °C) を約 40 °C まで冷却できることが確認でき、27 °C 給気とした場合の冷却熱量の約 48 %を賄うことができた。また、間欠運転 (1 日 8 時間運転) を行えば翌日もほぼ同じ冷却能力が得られるので、日中の運転のみでよい建物の場合には間欠運転で対応できる。一方、工場等の 24 時間空調が必要な場合には同じ採熱パイプに常時空気を流さずに、例えば 3 本のパイプで間欠運転を行い、常時いずれかのパイプに空気を流す運転を行うことが望ましいと考えられる。

第 6 章「結論」では、各章で得られた研究成果の要約及び今後の展望・課題について述べた。

【公聴会における主な質問内容】

(1) デシカント外調機による室内発生潜熱の処理方法；(2) 還気 (Return Air) からの全熱回収の方法；(3) 冬期の室内および外気からの潜熱回収に関する検討実施の有無；(4) デシカントロータ本体における微生物汚染発生の可能性；(5) 蒸発促進冷却塔で発生する騒音の程度；(6) 費用対効果が得られる建物規模；などに対する質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より、本研究は実用性、創造性、有効性、信頼性ともに優れ、博士 (工学) の学位論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格と判定した。

【関連論文の発表状況】

- (1) 小金井真, 生田紀夫, 柏瀬芳昭: 空気式太陽熱集熱器を用いたデシカント空調システムに関する研究, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 59-68, 2012.
- (2) 生田紀夫, 河野仁志, 小金井真, 岩本静男, 趙旺熙, 湯澤秀樹, 加藤信介: 太陽熱を利用したヒートポンプ組み込み型デシカント空調システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 225, pp. 1-11, 2015.
- (3) Norio SHODA, Hitoshi KOHNO, Makoto KOGANEI, Shizuo IWAMOTO, Wanghee CHO, Hideki YUZAWA, Shinsuke KATO: Desiccant Air-Conditioning System Consisting of Heat Pump and Solar Heat Collector, Proc. The International Conference on Power Engineering 2015, CD-ROM, 2015.