

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02294

研究課題名(和文) 導電性ポリマーを新たな吸湿材とする通電再生型デシカント空調システムの開発

研究課題名(英文) Development of an energization-regeneration desiccant air conditioning system using a conductive polymer as new moisture absorbing material

研究代表者

小林 光 (Kobayashi, Hikaru)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：90709734

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は空調省エネ化への寄与が期待される、デシカント空調システムの新方式の開発を目的とした。吸湿媒体として導電性ポリマーPEDOT:PSSを用いることを特徴とし、その再生は通電による。温風によらず電氣的に最適な再生を行い、従来に比して効率や制御性に優れたシステムの可能性を探る為、以下目的と課題を掲げた。【目的1】導電性ポリマーによるデシカントロータ開発【目的2】導電性を利用したデシカントエレメントの再生法開発。課題1：吸・脱着性能の優れたデシカントロータの開発、課題2：通電再生による最適再生方法の開発、課題3：実験及び数値解析によるロータ形状検討、課題4：試験機による実験と解析による運転法検討

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温多湿地域の発展と人口増に伴う冷房需要の増加で、空間の冷却に要するエネルギーの大幅な増加が予想されている。また温暖化による温度上昇のインパクトも大きい。冷房は冷却と除湿を行うが、湿度処理は低温を必要とし、これが冷房効率化の妨げになる。また、室内の湿度は人が発生する水蒸気と人の為の換気が主因で今後も減少しないが、省エネの進展で冷却の対象となる熱は減少する為、相対的に湿度処理のエネルギーは増加する。湿度を処理するためにデシカント空調が期待されるが、経済性や装置の大きさ等を理由にあまり普及していない。そこで本研究は通電再生型の実現で最も簡便で普及し易いデシカント空調の実現に寄与することを目指した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop a new desiccant air conditioning system that is expected to contribute to energy conservation in air conditioning. It is characterized by the use of the conductive polymer PEDOT:PSS as a desiccant medium, and its reactivation is done by energization. The following objectives and issues were set to explore the possibility of a system that does not use hot air and is more efficient and controllable than conventional systems. Objective 1: Development of a desiccant element using PEDOT:PSS, and Objective 2: Development of a desiccant rotor regeneration method using conductivity. Subject 1: Development of a desiccant rotor with excellent absorption and desorption performance, Subject 2: Development of an optimal reactivation method using electric current, Subject 3: Investigation of desiccant element shape through experiments and numerical analysis, Subject 4: Investigation of operation method through experiments using an experiment and analysis.

研究分野：建築環境工学

キーワード：デシカント空調 導電性ポリマー PEDOT:PSS 通電再生

1. 研究開始当初の背景

先進国のエネルギー消費の4割程度を占める空調エネルギーの削減は脱炭素において主要テーマの一つである。更に、たとえばIEAはレポート“ The Future of Cooling ”の中で、高温多湿地域の経済発展と人口増加に伴う冷房需要の増加で、2050年には全世界で空間の冷却に要するエネルギーが現在の3倍になると予測しており、冷房の効率改善はこれまで以上に重要な課題となる。空間の冷房は通常「冷却」と同時に「除湿」を行う冷却除湿方式で、冷房時の空調コイルの温度は、冷却のみであれば15程度でも可能だが、除湿のために7程度の低温に維持されている。更に、除湿負荷が大きい場合には湿度調整、即ち除湿のための冷却に加え、温度調整のために再加熱が必要になり、エネルギー消費が増大する。そこで、除湿を冷却から分離して効率よく実現することが望まれる。同時に空調コイルの温度を高くすることが可能になり、冷却のエネルギー効率も向上する。

このような目的により、湿度管理を専門に行うデシカント空調機が上市されているが、費用対効果や装置サイズ、制御性など様々な要因で広く普及するには至っておらず、デシカント空調機の普及に資する提案が望まれる。その方向性の一つとして、システムが単純で小型、安価なシステムの研究開発が考えられる。単体の除湿性能や効率は従来と同等或いは若干劣っても、導入しやすいシステムが実現することでトータルな冷却エネルギー削減に寄与できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究はデシカント空調システムの簡便化、低価格化に資する新方式の開発を目的とした。吸湿媒体として吸湿性を有する導電性ポリマーPEDOT:PSSを用いることを特徴とし、その再生は通電によるジュール熱で行う。再生を温風によらず電氣的に最適に制御することで、従来に比して効率や制御性に優れた簡易なシステムの可能性を探る為、以下の目的と課題を掲げた。計画当初はデシカント媒体についてロータ式を中心に検討したが、研究に伴う通電方法の見直しで“ロータ式”から固定エレメントによるパッチ式とした。このため当初“ロータ”とした部分を“エレメント”としている。

- 【目的1】導電性ポリマーによる除湿エレメント開発、
- 【目的2】導電性を利用した除湿エレメント再生法開発
- 課題1：吸・脱着性能の優れた除湿エレメント開発
- 課題2：通電再生による最適再生方法の開発
- 課題3：実験及び解析によるエレメント形状検討
- 課題4：試験機による実験と解析による運転法検討

3. 研究の方法

(1)導電性ポリマーを用いた除湿エレメント及び実験装置の構築

導電性ポリマーPEDOT:PSSは水分散液で供給され、これをコルゲート基材に添着することで除湿エレメントを製作した(図1)。分散液の添着には真空含浸を採用した。PEDOT:PSS分散液は、PEDOT:PSSの添着量を多くすることを意図してバインダーの添加を試行したほか、PEDOTとPSSの組成比の調整で電気伝導度と共に吸湿性が異なる調製等を行った。コルゲート基材は100×10×30mm又は33×33×33mmを基本とした。除湿エレメントには含浸後に通電用の電極を取り付け、これを流路方向に1~3個並べた実験用の除湿ユニットを構成した(図2)。除湿実験は、除湿ユニットに高温多湿の外気を想定した湿潤空気を流通させて吸湿(除湿)させた後、建物の排気を想定した空気を流通させて乾燥

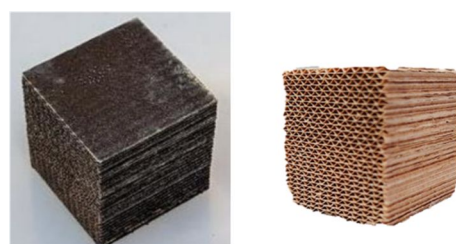


図1. 除湿エレメント (左:含浸後、右:基材)

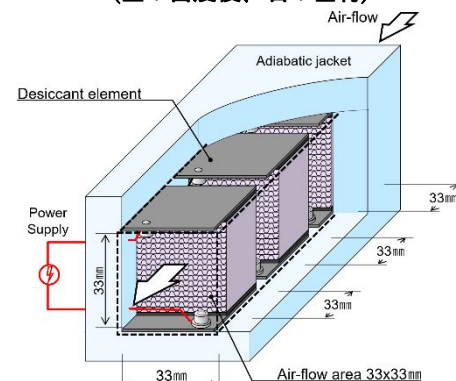


図2. 除湿ユニット

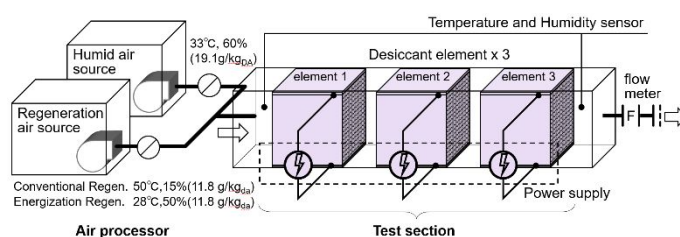


図3. 実験システム

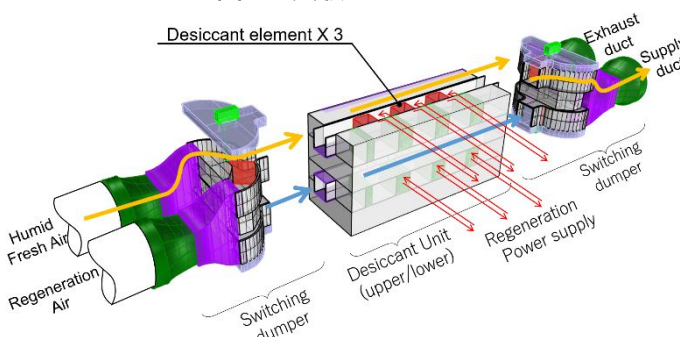


図4. 小型試験機

(再生)させる実験システムを構築した(図3)。実験は除湿と再生を数十秒~数分サイクルで繰り返した。供給する2条件の除湿空気、再生空気は精密空調機を用いて調整した。本実験装置を用い、PEDOT:PSSの異なる除湿エレメント、通電条件、サイクル時間など除湿・再生条件を変更して測定を実施した。水蒸気の除湿再生量は、除湿ユニットの入出空気の温度・相対湿度から算出する入出の絶対湿度差と風量から算出した。温湿度計測は最も応答が早いと考えられるチップセンサ(SENSIRION SHT85他)を用いた。供給空気及び再生電力ON/OFFは当初手動であったが、サーボモータ、ソリッドステートリレーをマイコンで制御し、また、温湿度センサも同じマイコンを用いて運用することで、条件変更の完全な整合を図った。

(2)再生用通電方法の検討

本実験に用いた除湿エレメントの検討過程で通電法と電極及び劣化を検討した。通電はDC、ACについて実験し、DCは安定化直流電源、ACは50Hzはスライダック、周波数を变化させた実験はファンクションジェネレータとアンプを使用した。電力測定はパワーテスタ、電流波形等はデジタルオシロスコープを用いた。

(3)小型試験機の製作及び再生法の検討

本研究では、前述の33mm角の除湿ユニット2システムを用いた小型試験機を作成した(図4)。試験機では短周期の除湿再生実験を実施する為、試験機周りの気積を極力小さくし、除湿・再生切替え時に空気を即座に切換え可能とするダンパを3Dプリンタで製作するなどして、実験の精度確保に十分に配慮した。

4. 研究成果

(1)吸・脱着性能の優れた除湿エレメント開発

本研究初期の検討で、除湿エレメントの構成及び製作方法を、無機材料を基本とするデシカント空調に用いられる既成コルゲートへのPEDOT:PSSの真空含浸によることを決定し、3回の含浸の繰り返しで一定量のPEDOT:PSSを添着させた。この方法を基本とし、水蒸気吸脱着性能を向上する方向性として、PEDOT:PSSの吸湿性を向上すること及び基材への添着量を増加することを検討した。PEDOT:PSSは組成を変えることで、導電性を下げながら吸湿性を向上することが温風による事前の研究でも確認されている。通電再生にて150S/cmを発現する分散液(市販)を基本とし30S/cm、10S/cmについて実験を行った。また添着量を増やすため、PEDOT:PSSに添加剤を加えた検討を行った。

PEDOT:PSSの組成変更と吸湿性

表1、図5に組成の変更による吸湿性能の変化を示す。導電性が下がる組成の変更によって吸湿性能の向上が確認された。一方、電気抵抗は高くなり通電再生には高電圧をかける必要が生じた。この条件下で当初電極取り付けに採用した導電性の金属系ペーストを介した金属電極にてDCを印加すると、通電に伴って電気的な劣化(電気抵抗上昇)が生じ、連続した実験が出来なかった。このため、本研究期間では組成変更したPEDOT:PSSを用いた通電再生によるデシカント性能の確認には至らず、今後の継続的な課題とした。電極及び電源について後述する。

基材への添着量増加に関する検討

メーカーによる材料選定にて、複数種類の添加剤を含むPEDOT:PSS分散液を調製し、これを用いた除湿エレメントを作成した。基本的な吸湿に関する実験を経て、親水性のバインダーを選定した。同分散液は粘性が低く、本研究着手以前の分散液に比してより深部に含浸しやすい性質を有した。なお、バインダーには様々な選択肢があるほか粘性も様々で、本検討を通じ、好適な条件の探索には更なる検討を要することも明らかになった。添着量を増加した場合でも、粘度の異なる従来の分散液と比較した場合吸湿量は増加しなかった(表1、図5、a、b)。

本研究では、様々な条件を検討したが、当初の想定と比較して、検討すべき条件は多岐にわたり、優れた除湿エレメントの条件を見出すに至っていない。しかし、以上の結果に加え、PEDOT:PSS単体の吸着量は十分に大きいことが分かっており、基材選定や形態の異なるエレメントについて検討することで、基本性能の優れた除湿エレメントが可能であると考えられる。今後、本研究を踏まえ、エレメントの形態及びPEDOT:PSSの担持方法を継続検討する。

表1 PEDOT:PSS条件

	P/P150 +バインダ	P/P150	P/P10
粘度	小	大	大
充填率[%]	26.3	10.3	7.4
含浸の特徴	深部	表面	表面

充填率：基材重量に対する添着重量の比

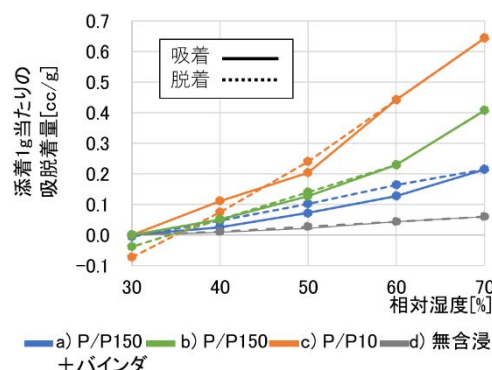


図5 エレメントの吸湿量比較

(2)再生用通電方法の検討

本研究では、除湿エレメントに電極を取り付け、DC・ACを印加した試験を実施した。DCを印加した場合、試料によっては急速にインピーダンスが上昇して実験不能となった。こうした試料では陽極の腐食が確認された。印加電流をACにすることでこの傾向は大幅に改善されたが、ACであっても電極部の劣化に伴い、印加する電圧と電流が比例しないケースがみられ、また、周波数によるインピーダンスの違いなどが確認された。即ち、この劣化は単純抵抗の増加ではない挙動を示した。また、含浸コルゲートと電極の間にカーボンペーストを用いることで電極の劣化は大きく改善する。表1、図6、7に導電性ペーストを条件とした除湿エレメントのインピーダンスに関する比較を示す。電極部に金属系の導電ペーストを用いたCase-Aは周波数によってインピーダンスが変化し(図6)、また、電流波形が印加した電圧に比例しない(図7A)。一方、カーボンペーストを用いたCase-Bは周波数による明確な影響は確認されず、電流波形に著しい変化は確認されなかった(図7B)。

表2 除湿エレメント条件

CASE	サイズ	使用電源(Hz)	導電性ペースト
A	W:100 H:100mm L:30mm	20V, 50Hz~500kHz	銀銅ペースト
B		20V, 50Hz~500kHz	カーボンペースト

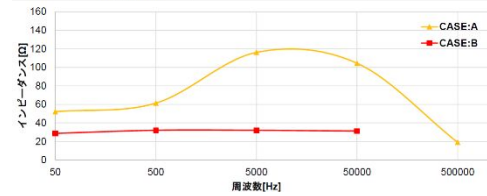
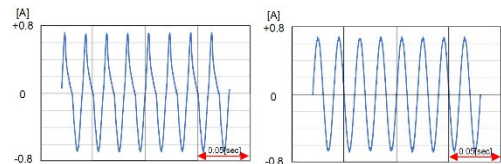


図6 周波数とインピーダンス



A) 銀銅ペースト B) カーボンペースト

図7 電流波形比較

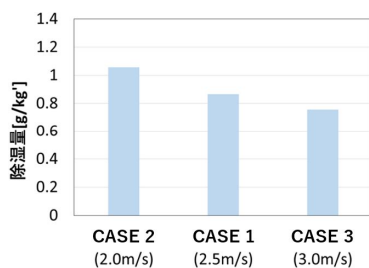
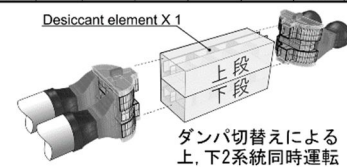
以上の結果から、本研究では実験の安定性を重視し、以降電極自体を金属からグラファイト板にするとともに、電源にはAC(50Hz)を用いることとした。金属電極とPEDOT:PSSの接触による劣化を避けることは本技術を実用化する上で極めて重要な点であり、今後の展開の中で十分に考慮する必要がある。

(3)小型試験機の製作及び再生法の検討

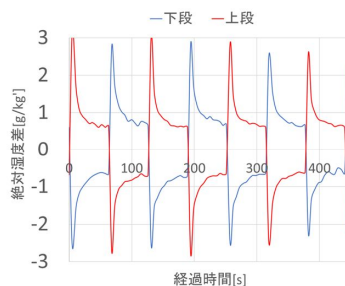
本研究では、未だ基本性能の優れた除湿エレメントの条件を完成していないものの、現時点での除湿エレメントを用いた実験により、除湿再生に関する特性把握を行った。ここでは小型試験機による実験結果より一例を掲載する。表3に示す通電再生条件で、除湿エレメント通過風速、除湿・再生切り替え時間をパラメータとした結果を示す。図8に除湿エレメント面風速と絶対湿度差の関係を、図9に除湿・再生切替周期と絶対湿度差の関係を示す。図8(a)、図9(a)より、除湿ユニット入出空気絶対湿度差は1g/kg程度であり、目標となる5~7 g/kgには及んでいないものの、条件の組み合わせ、多段化等で性能の向上を目指すことが考えられる。図8(b)(c)より除湿、再生切替え時の時間経過は、切替え直後は入出湿度差が大きい、その差はすぐに減少した。この事は、除湿エレメントの水蒸気吸脱着に寄与する部分の速度が比較的速いこと、同部分のキャパシティが小さいことによると考えられる。また、通過風速が低いほど切替え時の絶対湿度差は大きくなった(図8(b)>(c))。切替え直後の吸脱着(絶対湿度差の+/-)は共にほぼ同様の速度を示すため、図9に示すとおり、切替えの周期を短くすると、除湿性能は向上した。

表3 実験条件

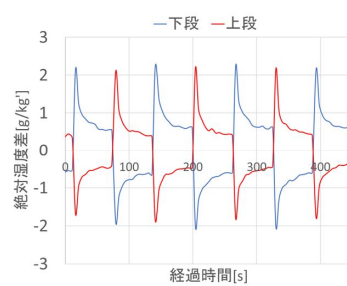
CASE	通電 [W]	再生空気		処理空気		面風速 [m/s]	切替時間 [sec]	
		温度 °C	湿度 g/kg'	温度 °C	湿度 g/kg'			
1	5	28	11.8 (50%)	33	19.1 (60%)	2.5	15	
2							30	
3							2.0	60
4								
5								



(a) CASE 毎の除湿量



(b) 入出絶対湿度差 CASE2



(c) 入出絶対湿度差 CASE3

図8 除湿エレメント面風速と除湿量の関係

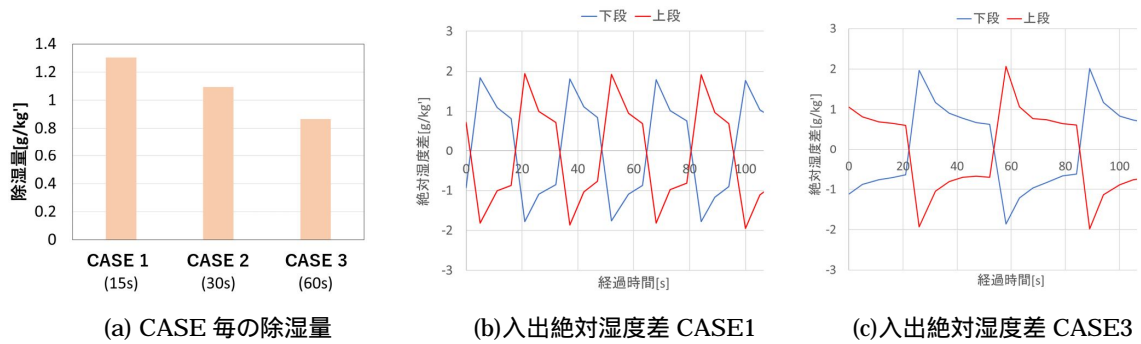


図9 除湿・再生切替周期と除湿量の関係

これらの成果により、除湿性能を確保するための運転（再生方法）の方向性が明らかになった。但し、今回得られた結果は、現在の除湿エレメントが持つ吸放湿の特性、キャパシティに基づくものであり、その改善によってトータルな性能向上が期待される。また、運転方法にも影響する可能性が考えられる。

(4)達成した成果と課題

本研究により、導電性ポリマーを用いて、除湿エレメントと通電のみでデシカント空調を実現できる可能性を確認した。また、通電による除湿媒体の再生の為の電極、通電に伴う注意点、対策などが明らかになった。本研究による試験体を用いた除湿再生実験により、現状の除湿エレメントを用いたデシカント空調を構成する際に適した運転方法に関する知見を得た。また、小型試験機の製作と実験適用を通じて、実際に空調機を構成する際の知見を得た。

一方で、吸湿材料としての PEDOT:PSS には十分なポテンシャルがあると考えられるものの、その性質を十分に利用する除湿エレメントの条件を見つけることができていない。今後、本研究の成果をベースとして、除湿エレメントの形態や添加剤等を含む検討を進め、除湿再生に優れる除湿媒体を追求する。また、研究の過程で当初想定した形態以外の吸放湿機器の着想等も得ており、除湿媒体の性能向上と併せて簡易な除湿システムの実現を目指した検討を継続する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 白須公二郎, 小林光, 伊藤健允, 楊子揚, 小林大, 川勝英樹
2. 発表標題 導電性ポリマーを用いた通電再生型デシカント空調に関する研究 その4: 導電性除湿エレメントの通電再生に関わる電気的特性及び除湿性能評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤健允, 小林光, 白須公二郎, 金井文彦, 川勝英樹, 小林大
2. 発表標題 導電性高分子ポリマーを用いた交流による 通電再生型デシカント空調システムに関する研究
3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hikaru Kobayashi, Kentaro Matsuda, Kojiro Shirasu
2. 発表標題 Optimization of the energization-regeneration desiccant air-conditioning system using a conductive polymer
3. 学会等名 The 16th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白須公二郎, 小林光, 松田健太郎
2. 発表標題 ポリマーの成分組成に由来する吸脱着特性分析 その1: 除湿エレメントの最適化及び除湿性能評価
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田健太郎、白須公二郎、小林光、五十嵐豪
2. 発表標題 ポリマーの成分組成に由来する吸脱着特性分析 その2 : 導電性ポリマーを用いた通電再生型デシカント空調に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白須公二郎、小林光
2. 発表標題 導電性高分子ポリマーを用いた通電再生型デシカント空調における 除湿エレメントの除湿性能と平衡状態における吸着挙動に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西山 陽歌、小林 光、川勝 英樹、小林 大、金井 大介
2. 発表標題 導電性ポリマーを用いた通電再生型デシカント空調に関する研究 その5 : 振動式質量測定器を用いた通電式デシカント空調用除湿媒体の水蒸気吸脱着量と吸脱着速度の測定及び評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋口 陽太、小林 光、楊 子揚、小林 大、川勝 英樹、金井 大介
2. 発表標題 導電性高分子材料 PEDOT/PSS を用いた通電再生型デシカント空調の開発 その 6 : 最適な運転方法・装置形状の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西山陽歌, 川勝英樹, 小林大, 金井大介, 小林光
2. 発表標題 振動式質量測定器を用いた通電式デシカント空調用除湿媒体の水蒸気吸脱着量と吸脱着速度の測定 及び評価
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会東北支部
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋口陽太, 川勝英樹, 小林大, 金井大介, 小林光
2. 発表標題 導電性高分子材料 PEDOT/PSS を用いた通電再生型デシカント空調の開発 -最適な運転方法・装置形 状の検討-
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会東北支部
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川勝 英樹 (Kawakatsu Hideki) (30224728)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	
研究分担者	小林 大 (Kobayashi Dai) (30312036)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	
研究分担者	高木 理恵 (Takaki Rie) (30466536)	東北工業大学・ライフデザイン学部・准教授 (31303)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	大風 翼 (Okaze Tsubasa) (40709739)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関