

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：30108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06329

研究課題名(和文)蓄熱体を用いた呼吸型ハイブリッド熱回収換気システムに関する研究

研究課題名(英文)Heat Recovery Hybrid Ventilation System with a Thermal Storage

研究代表者

福島 明 (Fukushima, Akira)

北海道科学大学・工学部・教授

研究者番号：00536211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：蓄熱体に給気と排気を交互に通し熱を回収する呼吸型の熱回収技術をパッシブ換気に組み合わせ、僅かなファン動力で換気負荷を削減するハイブリッド熱回収換気システムを構築した。珪藻土タイلやパーミキュライト繊維板を、空気層を挟んで重ね合わせることで通気型の蓄熱体を形成し、断熱ボックス内に設置して蓄熱ボックスとした。2室型の高湿恒湿室を用いた実験とモデルシミュレーションから、必要蓄熱量を検討し、内外空気温度による給排気制御のアルゴリズムを構築した。試作装置を実住宅に設置し性能検証を行った結果、熱回収効率60%を実現することができた。今後、改良を進め汎用システムを目指す。

研究成果の概要(英文)：A “heat recovery hybrid ventilation system” is the combination of passive stack ventilation and mechanical push-pull ventilation. Two heat storage boxes are connected to the natural EA stack and the underfloor natural OA duct. The alternation is done periodically in a way of that the outdoor air is drawn through one of 2 boxes contains heat storage material and the indoor air is exhausted through the other box. After the heat in the exhaust air is stored in the box connected to the stack in time of the natural ventilation, the stored heat is recovered by the supply air in a time of the mechanical backward ventilation. The heat capacity of the heat storage box and the control algorithm are decided by the experimental study and the model simulation. The measurement results in the test house show that the heat recovery efficiency is about 60%.

研究分野：建築環境工学

キーワード：ハイブリッド換気 熱回収 蓄熱 シミュレーション 制御システム

1. 研究開始当初の背景

住宅の断熱性能が向上する中で、換気の熱回収への期待は大きい。しかし、これまでの熱回収換気システムは、一次エネルギーで見ると、高性能ファンや熱交換機をもってしても、熱回収エネルギーがファン動力エネルギー消費を上回することは容易ではない。

一方、床下を外気取り入れチャンバーとして利用する計画的な自然換気システム（以降パッシブ換気システム）は、基礎断熱した床下空間を空気取り入れチャンバーとして利用し、煙突効果を使って効率よく自然換気を行うシステムで、空気循環型の床下暖房方式とあわせて研究開発されたもので、湿度感知型の排気量制御によって、デマンドコントロールを行うことで、一部期間を除いてファン動力のない快適で省エネルギーな暖房・換気を実現している。

そこで、本研究ではパッシブ換気システムの外気取り入れ部分と排気部分に蓄熱ボックスを設置し、出入口部分の温度で給気ファンを断続的に稼働し、自然換気時に蓄熱した熱を給気時に回収するハイブリッドシステムを提案した。蓄熱材を用いた呼吸型の換気装置については、熱回収の手法として期待できることが明らかになっており、動力エネルギーの最小化と熱回収効果が期待できる。

また、蓄熱ボックス前後の温度による単純制御が可能で、排気量と同量の給気がファンで行われるため、湿度感知型のデマンドコントロールの特性をスポイルすることなく、微小なファン動力で、高い熱回収効果を持つハイブリッド熱回収換気システムが実現できると考えられる。

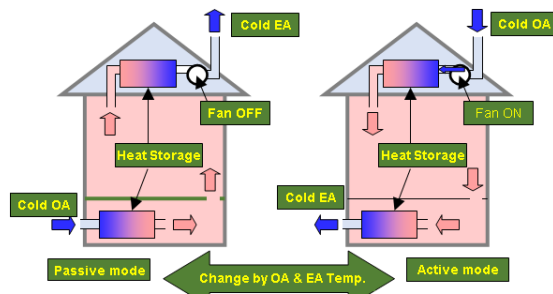


図 1-1 提案システムの概要

2. 研究の目的

蓄熱装置を用いた呼吸型のハイブリッド型換気装置の開発を目的とする。

研究項目とその目的は以下のとおりである。

- ・蓄熱ボックスの必要性能
- ・蓄熱材の選定と蓄熱ボックスの開発
- ・制御アルゴリズムと制御装置の開発
- ・実住宅への定期用と評価

3. 研究の方法

(1) 蓄熱ボックス

ボックスには、EPS（ビーズ法ポリスチレ

ンフォーム）製の既存保温ボックスを用いた。ボックスのサイズは、内法で、約 600×390×195 mm である。

写真 2-1、図 2-1 に、試作した蓄熱ボックスと測定装置を示す。蓄熱体は、長さ 303mm、幅 151mm、厚み平均 6.75mm のセラミックタイル 3 枚を、プラスチック製の高さ 15mm の波板を挟み、10 段積層したものである。

これを住宅上部のパッシブ換気時の排気経路に設置した想定で、室内室と外気室とから成る 2 室の恒温恒湿室の室内側に設置した。試験室では高低差がないので、実際は温度差で自然排気とする時間も、蓄熱ボックスの外気側に設けたファンで強制排気している。風量は、蓄熱体の室内側に熱線式風量測定器を用いて測定した。



写真 2-1 実験装置と蓄熱体

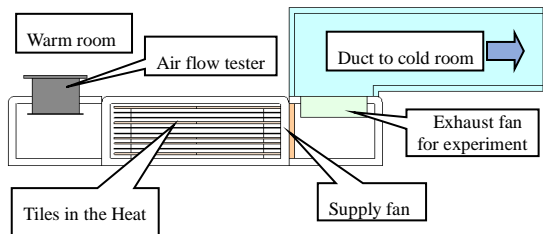


図 2-1 実験の概要

セラミックタイル各層の表面温度、層間の空気温度、蓄熱体の室内側と外気側の空気温度を熱電対で測定しているが、シミュレーションとの比較では蓄熱体の室内側と室外側の空気温度を用いた。

(2) モデルシミュレーション

図 2-2 に、シミュレーションモデルを示す。

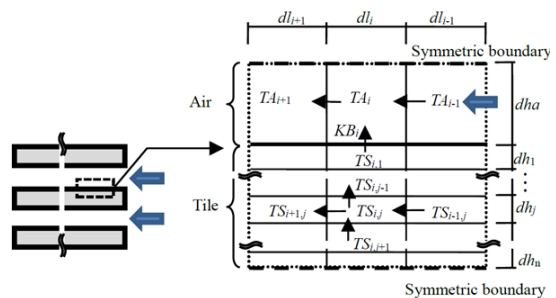


図 2-2 シミュレーションモデル

蓄熱材の間の空気の1セルの単位幅あたりの熱収支は、

$$c \cdot \rho \cdot VA_i \frac{dT_{A_i}}{dt} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot (T_{A_{i-1}} - T_{A_i}) + KB_i \cdot (TS_{i,1} - T_{A_i}) \cdot dl_i$$
... (1)

となる。ここで、

$$VA_i = dl_i \cdot dha \quad \dots (2)$$

$$KB_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{dh_i}{2} / KS} \quad \dots (3)$$

- c : 空気の比熱 [W/kg・K]
- ρ : 空気の密度 [kg/m³]
- α : 表面熱伝達率 [W/m²・K]
- KS : 蓄熱材の熱伝導率 [W/m・K]
- T_{A_i} : 空気セル i の温度 [°C]
- $TS_{i,j}$: 蓄熱材セル (i,j) の温度 [°C]
- dl_i : セル i の長さ [m]
- dha : 空気セルの厚み [m]
- dh_j : 蓄熱材 (i,j) 厚み [m]
- dt : 計算時間間隔 [h]

ただし、空気間の熱伝導は、移流（空気の流れによって移動する熱量）に比べ極めて小さいと考えられるので無視した。表面熱伝達は風速や温度によって変化するが、放射熱伝達率は一定、対流熱伝達率は風速に比例とし、実測と合わせるために数値を調整した。

蓄熱材の1セルの単位幅あたりの熱収支は、

$$CS \cdot VS_{i,j} \frac{dTS_{i,j}}{dt} = HTL_{i,j} \cdot dl_i + KS \cdot \left[\frac{TS_{i-1,j} - TS_{i,j}}{(dl_{i-1} + dl_i)/2} - \frac{TS_{i,j} - TS_{i+1,j}}{(dl_i + dl_{i+1})/2} \right] \cdot dh_j$$
... (4)

となる。ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{j}=1 \text{ のとき} \\ \dot{j}=n \text{ のとき} \\ \text{その他} \end{array} \right. \quad HTL_i = \left\{ \begin{array}{l} KS \cdot \frac{TS_{i,j+1} - TS_{i,j}}{(dh_{j+1} + dh_j)/2} - KB_i \cdot (TS_{i,1} - T_{A_i}) \\ KS \cdot \frac{TS_{i,j} - TS_{i,j-1}}{(dh_j + dh_{j-1})/2} \\ KS \cdot \left[\frac{TS_{i,j+1} - TS_{i,j}}{(dh_{j+1} + dh_j)/2} - \frac{TS_{i,j} - TS_{i,j-1}}{(dh_j + dh_{j-1})/2} \right] \end{array} \right.$$
... (5)

$$VA_i = dl_i \cdot dh_j \quad \dots (6)$$

- CS : 蓄熱材の熱容量 [W/m³]
- n : 蓄熱材の厚み方向分割数

なお、計算時間間隔は 0.0001s とした。

温度のシミュレーション結果から、蓄熱率、熱回収率を以下で求める。

$$\text{蓄熱率} \quad S = \frac{T_R - T_{EA}}{T_R - T_O} \quad \dots (7)$$

$$\text{熱回収率} \quad E = \frac{Q_S \cdot (T_{SA} - T_O)}{Q_E \cdot (T_R - T_O)} \quad \dots (8)$$

- T_O : 外気温度 [°C]
- T_{SA} : 給気時の室内側吹き出し平均温度 [°C]
- T_R : 室内温度 [°C]
- T_{EA} : 排気時の室内側吹き出し平均温度 [°C]
- Q_S : 給気風量 [°C]

(3) シミュレーションと実測の比較

以下の2つの異なる実測結果を、シミュレーション結果と比較する。

- 定常で切り替え: 約5時間毎に給気排気を切替え
 - 温度制御: 排気時に蓄熱体の外気側吹き出し温度 17°C で給気に切替え、給気時に蓄熱体の室内側吹き出し温度 5°C で排気に切替え
- 表 2-1 に、シミュレーションの条件を示す。

表 2-1 シミュレーション条件

		定常	温度制御	
蓄熱材	熱伝導率	W/mK	0.3	
	熱容量	kJ/m ³ K	1620	
	厚み	mm	6.75	
	幅	mm	303	
	長さ	mm	453	
	段数	段	10	
	段の間隔	mm	15	
換気量	排気	m ³ /h	80	80
	給気	m ³ /h	50	100
温度	室内	°C	20	20
	外気	°C	-3	0

図 2-3 に定常で切替えたときの実測結果、図 2-4 に同シミュレーション結果を示す。図は、一度給気の温度が定常になった後に、排気に切り替えたときからの温度である。図を見ると、実測もシミュレーションも排気へ切替え後は約1時間で定常に達し、同様な温度変化をしている。給気へ切替え後は、実測では約2時間、シミュレーションでは約1.5時間で定常に達しており、シミュレーションの方が短い結果となった。これは、蓄熱ボックス室内側での実測の風量が、風量測定器の性質上、排気では吸込みとなるため比較的精度良く測定できるが、給気では吹き出しとなるので、風量が実際より大きく測定されている可能性がある。つまり、シミュレーションの給気の風量が実際より多い設定となったために、温度の変化が速く、定常に達するまでの時間も短くなったと考えられる。

図 2-5 に切替えを温度制御にしたときの実測値、図 2-6 に同シミュレーション結果を示す。図を見ると、排気をしている（外気側の温度が上昇している）時間は実測とシミュレーションでほぼ同じであるが、給気をしている（室内側の温度が低下している）時間は、若干短いように見える。これは、前述同様、実際の給気量が設定した 100m³/h よりも少ない可能性が考えられる。しかし、概ね温度変動を把握することはできており、シミュレーションによる効率や温度変化の予測をすることは可能と考える。

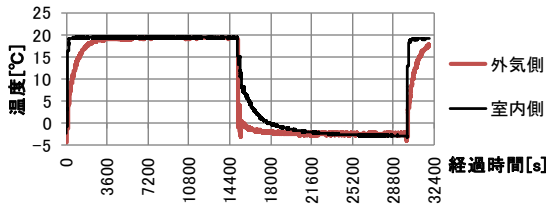


図 2-3 実測結果 (定常で切替)

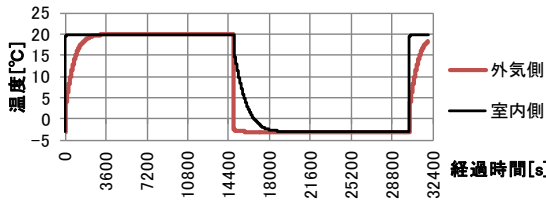


図 2-4 シミュレーション結果 (定常で切替)

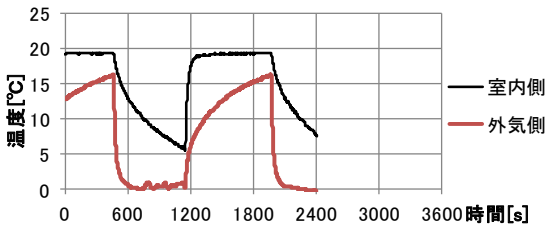


図 2-5 実測結果 (温度制御)

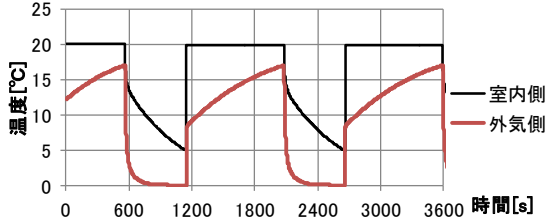


図 2-6 シミュレーション結果 (温度制御)

(4) シミュレーションによる性能設計

図 2-6 の熱回収率を式 (8) で算出すると、約 44% である。切替え温度を下げれば効率は上がるが、室内への吹出し温度が低いと不快となる。しかし、室内側吹出しの切り替え設定温度は変えずに外気側吹出し温度の設定のみ下げると、切替わりが頻繁に起こる。

したがって、より高い回収率を得ながら、頻繁に切替わりが起こらないようにするためには、蓄熱量を増やす必要がある。そこで、現試作蓄熱体を 1 として、蓄熱材量を 2~4 倍にしたシミュレーションを行った。表 2-2 に、蓄熱材量の条件を示す。換気の風量は、給気と排気共に 80m³/h、外気温度は 0°C、室内温度は 20°C とした。

① 蓄熱材量

図 2-7 に、給気と排気の切り替え温度をいずれも 10°C での蓄熱率、熱回収率、排気時間、給気時間を示す。蓄熱量を増やせば、蓄熱率、熱回収率は高くなり、切り替え時間も長くなる。概ね蓄熱量を 3 倍にすると、熱回収率は 60% を超え、切替わり時間も 10 分を超えるので、3 倍程度は必要と推察される。

② 制御方法

蓄熱材 (セラミックタイル) をボックスに収まる最大の段数 24 段、長さ 4 枚分の 604mm、段の間隔を 5mm とし、現状の試作蓄熱材量の 3 倍とした。表 3 に、風量と設定温度の条件を示す。

図 2-8 に、外気 0°C、排気から給気への切

表 2-2 蓄熱材量の条件

		現状 1	2 倍	3 倍	4 倍
長さ	mm	453	453	453	604
段数	段	10	20	30	30
段の間隔	mm	15	7.5	5	5

表 2-3 風量、温度条件

	給気	排気
風量[m ³ /h]	80、(一部 100)	給気と同じ
切替温度[°C]	5、7.5、10	5、10、15
外気温度[°C]	0、-10	
室内温度[°C]	20	

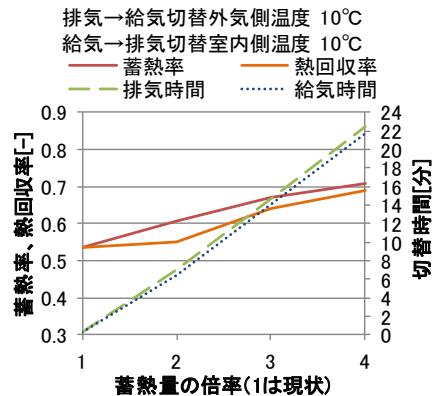


図 2-7 蓄熱材量と効率・切替時間の関係

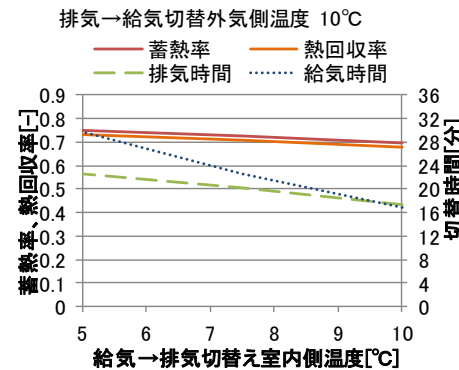


図 2-8 外気温度 0°C の蓄熱率、熱回収率、切替時間

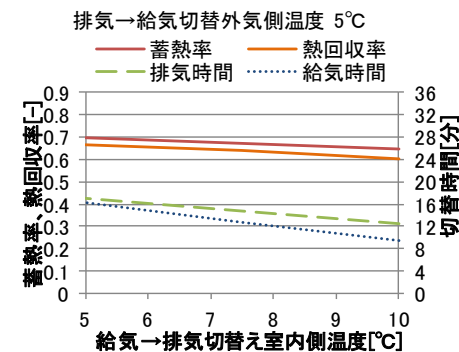


図 2-9 外気温度 -10°C の蓄熱率、熱回収率、切替時間

替え外気側温度が10℃のときの蓄熱率、熱回収率、切り替え時間を示す。熱回収率は70%前後である。切り替え時間は、排気から給気への切り替え外気側温度が低いほど短く、また給気から排気への切り替え室内側温度が高いほど短くなる。給気から排気への切り替え室内側温度が10℃のとき、給気と排気の時間が等しくなっている。

図2-9に、外気-10℃、排気から給気への切り替え外気側温度が5℃のときの蓄熱率、熱回収率、切り替え時間を示す。給気から排気への切り替え室内側温度が5℃のとき、熱回収率は68%程度である。また、給気と排気の切り替え時間がほぼ等しくなるのは、排気5℃給気5℃のときである。

以上から、給気および排気とも切り替え温度を室内(20℃)と外気の間温度に設定すると、熱回収効率が70%程度、給気と排気の間は16~17分になる結果が得られた。

(5) 装置改善

① 蓄熱体の改善

蓄熱体の量の増加を図るため、フラットの珪藻土タイルを5mm厚のスペーサーを挟んで19枚積み上げ、使用蓄熱材量は、初期の約2倍となった。

② 給排気制御

給気ファンと排気ファンの制御を計測する温度センサーを給気側ボックス内と排気側ボックス内に設置し、設定した温度以下の値を計測すると切り替わるシステムとした。温度センサーの制御値を外気温度と室内温度の中間温度に設定し、これらの値を下回る値を計測すると排気になり、上回ると給気に切り替わる設定とした。

③ 実験方法と分析方法

測定条件の設定は以下のとおりである。

- 温度条件：室内温度22℃一定、外気0℃、-5℃、-10℃
- 風量：給気約60 m³/h、排気約50 m³/h、70 m³/h、80 m³/h

温度は蓄熱ボックスの給排気側に設けたチャンパー内で外気側と室内側の温湿度を計測した。また、低温室内および居室側室温を同時に計測し、風量は、風量測定器(KNS-300)により測定した。

④ 実験結果

設定値である外気温度と室内温度、蓄熱ボックスの室内側ボックスの温度により温度交換効率を算出し、蓄熱体の熱回収量や熱回収効果を求める。温度交換効率の算出は(9)式により算出した。

$$\text{温度交換効率} = \frac{(OA - SA)}{(OA - RA)} \times 100(\%) \dots (9)$$

OA: 外気温度

RA: 室内温度

SA: 蓄熱ボックス室内側温度の平均

測定条件「-10℃_70 m³/h」による実測結

果を図2-10に示す。グラフから、給気に約9分半、排気に約7分の時間を要したことがわかる。そして、前述より測定した数値から温度交換効率を算出すると76%という結果となった。これは市場で売られる一般的な換気装置と同等の値を示すことから、数値からは換気装置として十分な性能を有していることになる。

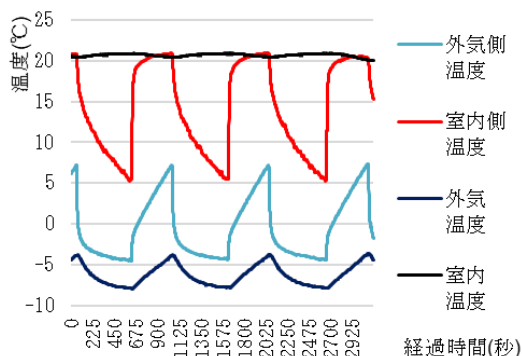


図2-10 測定条件「-10℃_70 m³/h」

(6) 実住宅への適用

装置を設置した実住宅は小樽市にある住宅兼事務所の3階建ての住宅である。気密性能が低いため、排気側に熱回収装置を取り付け、回収装置の実用性や効率を評価することを目的として、実測を行った。住宅の概要は以下のとおりである。

- 1F 面積：79.4976 m² 24 坪
- 2F 面積：80.74 m² 24.46 坪
- 3F 面積：82.81 m² 25.09 坪
- 木造 2F+3F=163.55 m²/49.56 坪
- 相当隙間面積：5.3 cm²/m²隙間特性値：1.61

写真2-3,4に装置の設置状況と実測状況を示す。設置場所は当該住宅3階の屋根裏部分である。

実測結果を図2-11に示す。グラフから給気に約6分半、排気に約14分半の時間を要したことがわかる。実験時より排気に大きく時間がかかっていた。実験時では自然排気の代わりにファンを使用していたので一定の排気量を確保できていたが、実住宅では、湿度制御型の排気口を設置しており、排気量が自動制御された結果と考えられる。

実測結果から、熱回収効率は、70%を超える結果となった。



蓄熱ボックス 実測状況

写真2-3,4 装置の設置状況と実測状況

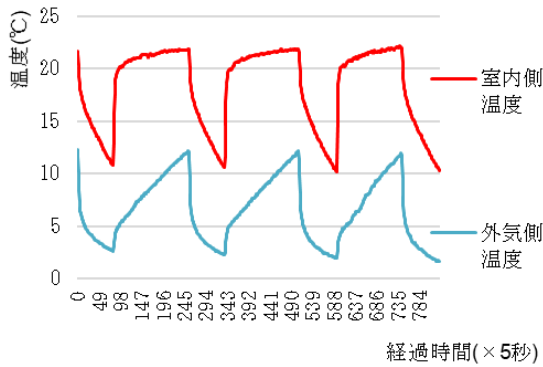


図 2-11 実住宅での実測結果

4. 研究成果

(1) プロトタイプボックスの制作

珪藻土タイルを用いた蓄熱ボックスを製作し、性能を検証した結果、70%以上の熱回収効果を実現した。

(2) 制御装置の開発

内外温度の中間温度で切り替えることで、熱回収効果と室内環境への影響を許容可能な範囲に抑えることが可能なことを明らかにし、これを実現するための制御アルゴリズムを構築した。また、このアルゴリズムを用いた、制御装置を開発した。

(3) 実住宅への適用と評価

パッシブ換気システムを高性能な実住宅に換気システムを設置し、実用性と熱回収性能を実測評価した結果、70%以上の熱回収効果と許容可能な給気温度を実現した。

<引用文献>

- ① 村田さやか・福島明, 蓄熱体呼吸型熱交換換気装置の効率試験法に関する研究, 空気調和・衛生工学論文集, No. 189, pp. 39-46, 2012. 12

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 福島明, 村田 さやか, 蓄熱体を用いた呼吸型ハイブリッド熱回収換気システムに関する研究 (その 1) 装置の試作とシミュレーションモデルの構築 2017, pp. 835-836, 日本建築学会大会学術講演梗概集
- ② Akira Fukushima, Sayaka Murata, Masahiro Uozumi, Heat Recovery Hybrid Ventilation System with a Thermal Storage, 2017, pp. 422-427, 38th AIVC Conference

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他] なし
ホームページ等

6. 研究組織北海道科学大学

(1) 研究代表者

福島 明 (FUKUSHIMA Akira)
北海道科学大学工学部建築学科・教授
研究者番号: 0 0 5 3 6 2 1 1

(2) 研究分担者

村田 さやか (MURATA Sayaka)
地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部北方建築総合研究所・主査
研究者番号: 0 0 4 6 2 3 4 1

月館 司 (TSUKIDATE Tsukasa)
地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部北方建築総合研究所・主査
研究者番号: 1 0 4 6 2 3 2 6

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

絵内正道 (ENAI Masamichi)
野村隆文 (NOMURA Takafumi)