

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04811

研究課題名（和文）小ボリューム住宅の湿害防止に資する躯体透気型換気システムの開発

研究課題名（英文）The development of the air permeable ceiling ventilation system that contributes to moisture damage prevention of small volume housing

研究代表者

本間 義規（Honma, Yoshinori）

国立保健医療科学院・その他部局等・統括研究官

研究者番号：90331272

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、小容積空間の結露防止と微生物汚染を確実に防止できる熱湿気回収型住宅換気システムの構築にある。透気性断熱材でこの機能を実現するが、これをBVI（Breathing and Ventilating Insulation）と称し、BVIのフィルタリング性能を実験室及びフィールド簡易実験で確認するとともに、シミュレーションによる湿度性状シミュレーションについて検討を行った。以上の結果、応急仮設住宅を念頭に置き、小屋裏給気による小屋裏結露防止とBVIを透過することによる熱回収およびフィルタリング効果はあること、また、結露を防止しながらの換気方法としてのBVIの可能性は高いことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2003年の改正建築基準法（シックハウス法）以来、住宅には0.5ACHを実現可能な換気システムが設置されることとなった。しかし、新型コロナウイルス感染症がまん延するにつれ、自宅内感染が問題視されており、今後も引き続き適切な衛生環境を維持できる換気システムの研究開発は必要である。本研究はそうした課題に対する一提案として、災害時に利用される応急仮設住宅の室内及び小屋裏結露の解消を念頭に、透気性繊維断熱材を活用した躯体換気システムを開発した。実装段階までにはまだハードルがあるが、小ボリューム住宅のみならず一般戸建住宅にも有効な換気システムになり得ると考えている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to construct a heat and moisture recovery residential ventilation system that can reliably prevent condensation and microbial contamination in attic space. This function is realized by a permeable insulation called BVI (Breathing and Ventilating Insulation). It is confirmed that the filter performance of the BVI through simple experiments in the laboratory and in the field, also is examined hygrothermal condition in the attic space using HAM simulations.

As a result of the above, assuming temporary housing, it is possible to prevent condensation in the attic by supplying air to the attic, and to collect and filter heat by passing it through the BVI.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：透気性断熱材 換気 結露

1. 研究開始当初の背景

建築基準法に基づく住宅換気量は、居住空間の気積に対する換気回数（0.5ACH）で規定されており、基本的にこの換気回数を満たす換気装置が設置される。しかし、空間ボリュームで換気量を規定すると、小ボリューム住宅になればなるほど換気量が不足することになってしまうことになる。これまで多くの災害で応急仮設住宅が建設・運用されてきているが、応急仮設住宅の結露被害と真菌汚染が深刻であることはよく知られている。限られたスペースでの多人数での生活は水分発生密度が大きいこと、そのため換気量が不足し（0.5 回/h 換気の応急仮設住宅に 4 人家族が居住するとなると換気充足率は 30%程度）、小屋裏（折板屋根）や開口部で結露被害が多数発生してきた。応急仮設住宅のような小空間における換気は、換気量自体を大容量化すると低温気流に伴う不快感や温熱環境の悪化だけでなく、換気騒音等も生じるため、積極的な換気行動を阻害する要因となる。また、外気空気質（噴火火山灰や放射線物質等）が問題となるような事案では、換気設備によるフィルタリング以外の対応はむしろ健康を害する原因にもなる。

過去の応急仮設住宅では、結露被害とそれに伴う室内浮遊菌濃度が高いことが指摘されており（東日本大震災時の仙台市における応急仮設住宅では、2012 年夏に測定した全ての住宅で 1000cfu/m³超、阿蘇市の応急仮設住宅でも夏期・冬期ともに測定した全ての住宅で 1000 cfu/m³超であることが調査の結果明らかとされている）、実際にアレルギー性気管支肺アスペルギルス症（ABPA）と診断されたケースも報告されている。

こうした結露被害のリスクは、換気習慣が徹底していない日本では、応急仮設住宅に限らず一般住宅においても同様に存在し得る。気流速度、気流温度、換気騒音を低減する方法は面風速を大きくすることが肝要であること、また応急仮設住宅で問題となっていた小屋裏結露も同時に改善する手法として、令和元年度の研究申請時は、BVI（Breathing and Ventilating Insulation）；小屋裏給気+天井面断熱層透過の機能性断熱外皮）を計画していた。しかし、研究開始の令和 2（2020）年度に、新型コロナウイルス感染症が流行し、DCV（Diffused Ceiling Ventilation）は感染リスクが高いことが Melikov らによって明らかにされたため、換気に関する考え方・意識が大きく変化する要因にもなっている。従って、研究開始当初の背景は、研究を進める中で変化せざるを得なかったことを予め述べさせていただく。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小容積空間の結露防止と微生物汚染を確実に防止できる熱湿気回収型住宅換気システムの構築にある。構造躯体を利用する 2 種換気システムは、非住宅の天井チャンバー方式やハウスメーカーの天井懐あるいは床下給気等でこれまでもいくつか提案・実施されているが、室内負圧が前提であることから、あくまで設備設置スペースの有効利用もしくは既存ダクトの代替としての利用としての位置づけにしか過ぎない。透気性断熱材を用いた本システムは、既存技術に熱回収技術をプラスすることで付加価値を高めるとともに、湿害リスクを低減しながら居住者換気調整行動に依存しない換気システムを構築する点に、学術的な独自性を有し、かつ室内空気環境の適正化に資する創造性を有する。

3. 研究の方法

研究方法として、実験室における BVI の性能実験及びフィールド実験を実施するとともに、移流を考慮した多数室熱湿気性状シミュレーションを実施する。

給気量を増加させつつも省エネルギー性を確保する方法として排気熱回収（熱交換）が主流である。今回の研究提案では、熱交換器以外の方法としての透気性断熱材からの熱回収を検討する。繊維系断熱材内部を経由する給気方式は、断熱材自体がフィルターとして機能することになるが、フィルタートラップでの微生物増殖やそれに伴う MVOC の室内流入のリスクも高い。従って今回のフィールド実験では、小屋裏ではなく床下に設置して BVI のフィルタリング効果を確認した。また、DCV 方式ではなく DV（Displacement Ventilation）方法について多数室熱湿気性状シミュレーションより実施することとした。

4. 研究成果

(1) BVI（Breathing and Ventilating Insulation）のフィルター効果実験

BVI（Breathing and Ventilating Insulation）は、空気透過性のある繊維系断熱材やフィルターである。いずれも建築材料として入手が容易なものとした。材料性能としての確認事項は①フィルター性能、②捕集される物質の確認、③浮遊微生物の捕集率である。①に関しては、パーティクルカウンターを用いて繊維系断熱材侵入前後の捕集率の測定を行った。また②に関して、繊維系断熱材内で捕集される微粒子を、粒径バルク FP 法を利用する EDXRF 型蛍光 X 線分析装置を用いて分析した。さらに③に関して、外気透過後の BVI を滅菌水で超音波洗浄したものを PDA 培地上で培養を行った。BVI として次に示す 3 種類を実施した。すなわち、A：HGW16K100mm+網戸メッシュ 40、B：GWB32K100mm+網戸メッシュ 40、C：MEPA フィルター10mm+プレフィルター100mm 厚である。

(2) BVI 実験結果

結果の一例を図 1 に示す。また蛍光 X 線分析結果の 1 例（BVI_A）を表 1 に示す。この値は、検出された元素のみを対象とし、試料が均一であるという仮定のもとでスペクトル強度（cps）から算出した値（mass%）である。繊維系断熱材には Si、Fe が比較的滞留するが、測定結果は

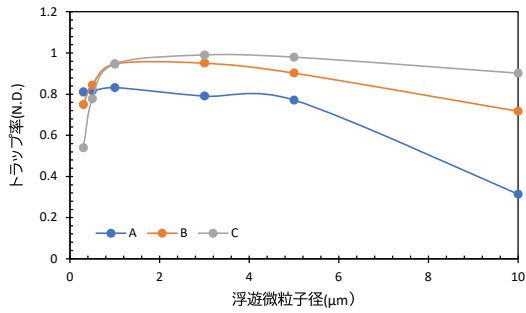


図1 実験用 BVI のトラップ率

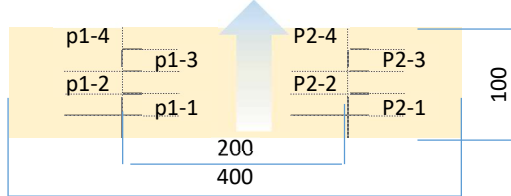


図2 BVI サンプルング箇所

これら以外に Na, Al, Ca, Mg の含有量が多い結果となっている。材料内の微生物に関しては、サンプルを 1g 切り出して滅菌希釈水に注入し、超音波加振したあと ATP 値を測定するとともに CP 添加 PDA 培地上に分注して培養を行った。分析結果を表 2 に示す。BVI 流入側から流出側に向かうに従い、菌数は少なくなることがわかる。また培養されない真菌以外の汚染度を図るため ATP も測定した。

(3) BVI のフィールド実験

BVI の効果を確認するため実住宅を利用して実証実験を行った。本来は BVI の面積を十分に確保して室内に吹き出す方法を取ればよいが、居住中の住宅のため、フィルタリング効果の検証のみにとどまっている。床下エアコン暖冷房の住宅であり、BVI を床下に設置して実験を行っている。従って室内循環した空気が床下に戻る流れがある状態である。CO₂ をトレーサースガスとした濃度応答を基に各室の風量を同定するとともに、各室での浮遊微粒子個数濃度を測定した。BVI を全面に設置したかたちではないが、BVI のフィールドでの基礎的な性状について確認することができた。

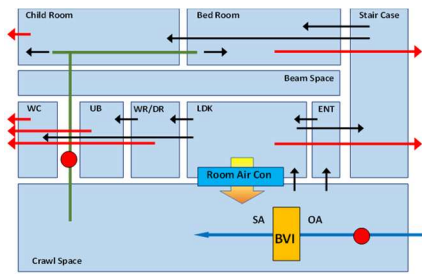


図3 フィールド実験住宅の換気経路図

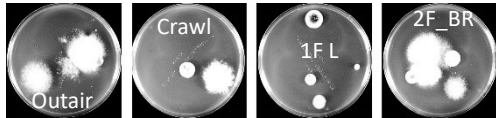


図4 各室の浮遊微生物培養結果

表1 蛍光 X 線分析結果

	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
p1-1	1.259	0.136	0.466	5.69	0.074	0.196	1.309	0.013	0.092
p1-2	1.337	0.176	0.503	5.82	0.18	0.221	1.476	0.023	0.095
p1-3	1.448	0.247	0.523	5.901	0.296	0.264	1.556	0.116	0.131
p1-4	1.515	0.248	0.519	5.901	0.313	0.253	1.609	0.033	0.103
p2-1	1.063	0.078	0.488	4.695	0.059	0.232	1.124	0.025	0.091
p2-2	1.199	0.124	0.602	5.429	0.248	0.25	1.46	0.049	0.338
p2-3	1.303	0.237	0.819	5.718	0.459	0.271	1.606	0.143	0.739
p2-4	1.328	0.154	0.887	5.836	0.483	0.291	1.674	0.098	1.009

表2 浮遊微生物の培養結果及び懸濁液の ATP 量

Serial ID	p1-1	p1-2	p1-3	p1-4	p2-1	p2-2	p2-3	p2-4
試料質量 (g)	0.97	0.97	0.95	0.95	0.67	0.48	0.66	0.94
滅菌希釈水 (g)	95.65	95.46	95.43	95.52	67.28	47.64	66.15	94.65
質量比 (%)	1.011	1.018	0.993	0.992	0.998	1	0.993	0.996
平均ATP量 (RLU)	98.5	90	93.5	15.5	224	417	28.5	54
PDA実測真菌数(CFU)	2	3	1	0	5	1	1	0

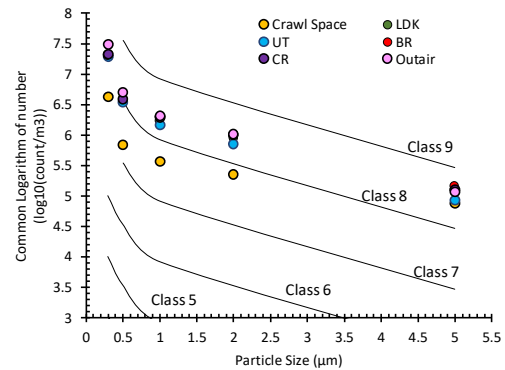


図5 各室での浮遊微粒子個数濃度

(4) 移流を考慮した多数室熱湿気性状シミュレーションによる検討

空間の温湿度シミュレーションは、壁体を 1 次元非定常熱水分同時移動で扱い、かつ VNS(換気回路網)を連成することにより空間移流量を算出する。BVI についても 1 次元透過を想定し、各節点のコントロールボリューム収支に移流項を追加している。計算モデルは標準的な応急仮設住宅プラン (2DK、W5.4m×D5.4m) を対象として、床下、ダイニングルーム (DR)、リビング (LR)、寝室 (BR)、WC、UB、小屋裏の 7 室モデルとしている。各部の断熱仕様を表 1 に示す。また、仮設住宅の気密性能は $C=6\text{cm}^2/\text{m}^2$ と設定し、各部位に割り振っている。水分発生量は大人 2 名 (5.865kg/day) とした。なお、冒頭でも述べたように感染症のリスクを低減するためには DCV としない方がよいが、応急仮設住宅の小屋裏結露防止と流入空気のフィルタリングおよび室内での微生物汚染防止という観点から、現在の応急仮設住宅の枠組みを変更せずに検討を進める。小屋裏給気時 (小屋裏が陽圧になるので、小屋裏から室内に給気、DCV に相当、

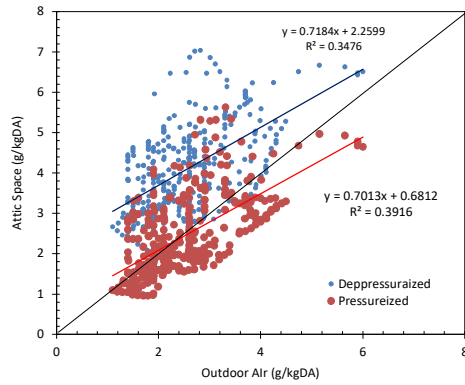


図6 小屋裏給気及び排気の場合の
小屋裏絶対湿度

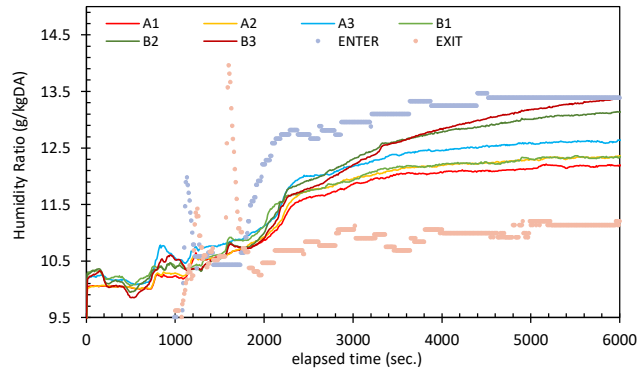


図7 BVI内の絶対湿度変動シミュレーション結果(DV時)

ファン風量 $30\text{m}^3/\text{h}$ 設定)の場合と小屋裏排気時(BVIを經由して室内空気が排気されるため、Displacement Ventilation: DVに相当、ファン風量 $30\text{m}^3/\text{h}$ 設定)の場合の解析結果(ここでは絶対湿度)を図6に示す。また、このときのBVI内の絶対湿度変化を図7に示す。

小屋裏排気方法(DV,図6,青マーカー)は室内外気よりも $2\text{g}/\text{kgDA}$ 程度大きくなるが、外気の変動幅に比べ振幅が小さくなる。一方、小屋裏給気方法(DCV,図6,赤マーカー)は外気よりも低くなるタイミングもあるが、変動幅はDVより大きくなるのがわかる。

図7はDV時のBVI内の絶対湿度変化である。BVIの素材は繊維系断熱材を想定しており、湿気容量の効果(調湿効果)が伺える。

(5)まとめ

BVIのフィルタリング性能を実験室及びフィールド簡易実験で確認するとともに、シミュレーションによる湿度性状シミュレーションについて検討を行った。応急仮設住宅を念頭に置き、小屋裏給気による小屋裏結露防止とBVIを透過することによる熱回収およびフィルタリング効果の確認を行い、結露を防止しながらの換気方法としての可能性は高いことがわかった。一方、感染症対策という意味では人体周りは上方排気となるDV(Displacement Ventilation)であることが望ましい。DVは従来の小屋裏排気と同等であり、BVIによる調湿効果がどの程度期待できるかについても検討を実施した。シミュレーション上はBVI自体の湿気容量を確認することができたが、BVIが平衡状態になってしまうと調湿効果は失われることや、そもそも材料内の結露リスクや微生物汚染リスクが高まってしまふ点については言及できなかった。今後、材料内の微生物増殖の数理モデル開発などを行い、応急仮設住宅等に应用できるようさらに検討を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

新型コロナウイルス感染症感染拡大のため、また研究実施途中で異動があったため、研究発表が十分に行えていなかった。今後順次この研究成果を発表していく予定である。

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------