

夏型結露 冷房 外気
 高湿化 住宅 小屋裏空間

1.はじめに

夏季蒸暑期において住宅内の温熱環境を適切に保つためには、空調機器による冷房が必要となる。しかし、冷房時に、室内側近傍まで夏季の多湿な外気が侵入する部位では結露の発生(以下、夏型結露と呼ぶ)が危惧される。

夏型結露について、権藤ら¹⁾は生産・物流施設の低温冷凍室等において 1981~2000 年の東京の気象データを用い外気露点温度の上昇に伴い結露量が増加することを、齋藤ら²⁾は通気層を有する木造住宅の外壁を対象に、東京の夏季の代表的な晴天日を想定した外気条件(露点 21°C 程度)かつ室温 26°C の場合に室内側防湿層で結露が発生しなかったという実験結果を示している。しかし、近年、夏季における外気湿度の上昇が著しく³⁾、夏型結露発生の危険性が高まっていると考えられる。

本報では、近年の外気高湿化が夏型結露に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、小屋裏空間を対象に数値解析を行った。更に、結露に大きく影響を及ぼすと考えられる室温、住宅仕様(換気方式、気密性能)の違いについて検討した。

2.解析方法

2.1.解析対象 勾配屋根(5 寸)、繊維系断熱材 1 層を有する小屋裏空間(D8m×W8m×H2m)を解析対象とした(図 1)。断熱材が野縁に載ることを想定し、断熱材下には 40mm の空間を設けた。尚、日射の方位による影響を簡単にするため勾配屋根と同じ気積を持つ陸屋根(D8m×W8m×H1m)に置換して 1 次元熱湿流の数値解析を行った。

2.2.計算方法

室を構成する材料内について水分移動は絶対湿度を駆動力とする蒸気拡散支配の熱水分同時移動⁴⁾とし、前進型差分法を用い、 κ 、 ν ⁴⁾は 1 時点前に決定された相対湿度から平衡含水率曲線より求めた。材料表面温度に応じた飽和絶対湿度と空間絶対湿度から瞬時結露量および蒸発量を算定し⁴⁾、結露および蒸発量に応じた凝縮および蒸発潜熱を表面に与え、結露量は表面に蓄積するものとした。小屋裏空間および断熱材下空間の温湿度は 1 質点で扱い熱水分収支式より求めた。小屋裏の換気回数は文献⁵⁾を参考に 12 回/h とし、小屋裏-居室間の換気量は一般的な住宅の隙間分布を想定し圧力仮定法より求め^{註 1)}、小屋裏-居室間の換気は全て断熱材下空間を通過すると仮定した。尚、居室の換気方式について、第 3 種換気では常時 0.5 回/h 排気(160 m³/h)、第 1 種換気では同量の給排気を行うものとする。日射および実効放射の影響は考慮し、外部風および雨水による影響は考慮していない。

2.3.構成材料と物性値

各部位の構成材料と物性値を表 1、平衡含水率曲線を

図 2 に示す。屋根の日射吸収率は 0.8、各部材の長波放射率は 0.9 とした。対流熱伝達率および湿気伝達率について、外気側は 18W/m²K、61.1g/m²h(g/kg⁻¹)、それ以外は熱流上向き 6.4 W/m²K、24.4 g/m²h(g/kg⁻¹)、熱流下向き 1.7 W/m²K、17.1 g/m²h(g/kg⁻¹)とした⁴⁾。

2.4.外気および初期条件

外気は東京の気象データ⁶⁾を用い、大気放射量は文献⁷⁾を参考に雲量および外気温湿度から算出した。東京の 1990~2019 年までの夏季代表月として 8 月の平均外気温および露点温度を図 3 に示す。気温、露点温度のいずれも上昇傾向にあり、特に 2018 年、2019 年の露点温度の上昇が顕著であり、2019 年 8 月の平均露点温度は約 24.5°C と著しく高い。各材料の初期温度は計算開始日 4/1 の外気温、初期含水率は相対湿度 50% 平衡時の含水率とした。

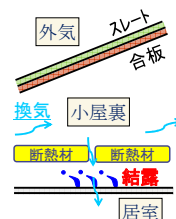


図 1 解析対象

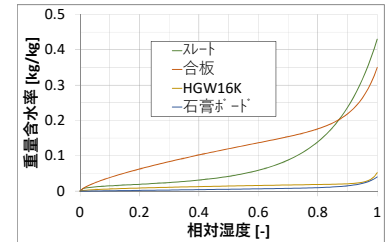


図 2 平衡含水率曲線

表 1 各部位の構成材料と物性値

部位	構成材料	th	ρ	λ	m	C	ϵ
屋根	スレート ⁸⁾	5	1000	0.19	9.8	840	0.43
	アスファルトルーフィング ⁹⁾	-	-	透湿抵抗 0.144m ² sPa/ng			
	合板 ^{8),9),10),11)}	12	500	0.16	1.11	1880	0.59
断熱材	有孔フィルム	-	-	透湿抵抗 0m ² sPa/ng			
	HGW16K ^{8),9),10)}	100	16	0.038	170	840	0.99
	防湿フィルム ¹²⁾	-	-	透湿抵抗 0.038m ² sPa/ng			
天井	防湿シート ⁹⁾	-	-	透湿抵抗 0.144m ² sPa/ng			
	石膏ボード ^{8),9),10)}	12.5	700	0.221	39.7	870	0.70
	クロス ¹²⁾	-	-	透湿抵抗 0.016m ² sPa/ng			

※th:厚[mm]、 ρ :密度[kg/m³]、 λ :熱伝導率[W/mK]、 m :透湿率[ng/msPa]、C:比熱[J/kgK]、 ϵ :空隙率[m³/m³]。スレートは文献中の繊維セメント、防湿フィルムはビニルシート、防湿シートは住宅用プラスチック系防湿フィルム B 種、クロスは一般ビニル壁紙(普通品)を参照。小屋裏を構成する束などは省略。各材料の物性値に対する温度および含水率による影響は非考慮。

3.解析結果

3.1.外気および室温が夏型結露に及ぼす影響

第 3 種換気を採用した気密性能 C 値 3 cm³/m²の住宅について、外気 2019 年、室内 22°C 70%^{註 2)}一定とした場合の初年度における日平均各空間温度、小屋裏-居室間の日平均差圧(正:居室の圧力が高い時)および日平均換気量を図 4 に示す。第 3 種換気のため居室が負圧となり、夏季期間は室温が小屋裏温度および外気温より低い条件のため、小屋裏から居室への空気の流れとなる。また、小屋裏-居室間の差圧は 0~1Pa 程度、換気量は 10~20 m³/h 程度である。代表点の温度、外気露点温度および断熱材下空間の蓄積結露量を図 5 に示す。小屋裏は日射の影響により

45℃程度まで上昇するが、石膏ボード室外側表面温度は断熱材により室温の影響を強く受け 25℃程度までしか上昇しない。小屋裏から居室、つまり小屋裏から断熱材下空間への空気の流れによる湿流によって、小屋裏空間の湿度環境に大きく影響を与える外気の露点温度が石膏ボード室外側表面温度を超える7月中旬頃から結露が発生し始める。そして、外気の露点温度が下がる9月中旬頃から乾燥し始め10月中旬頃に蓄積結露量がゼロとなる。

外気条件(2000、2005、2010、2015~2019年)ごとの室内22℃70%一定とした場合の断熱材下空間の蓄積結露量を図6に示す。他の年に比べ2018年、2019年の結露量は際立って多く、外気露点温度の上昇の影響が現れている。また、いずれの年においても室温26℃では結露がほぼ発生しなかったため、低温運転は夏型結露の危険性を高めることになると言える。しかし、冷房設定温度が高くとも、冷房の低温な風が直接当たる部位では、室内側表面温度が低下するため結露発生の危険性がある。

3.2.換気方式および気密性能が夏型結露に及ぼす影響

外気2019年、室内22℃70%一定の条件で、換気方式(第3種換気、第1種換気)および気密性能(C値1、3、5 cm²/m²)ごとの小屋裏-居室間の日平均差圧および日平均換気量を図7に、蓄積結露量を図8に示す。第3種換気において気密性能が高いほど差圧は大きくなる。第1種換気では気密性能に関係なくほぼ一定の差圧となるが、これは機械換気の給気量と排気量が等しいので各空間の差圧は温度差のみに起因し^{注1}、今回の気密性能差では温度差はほぼ同等であるためである。気密性能が高いほど、また第3種換気に比べ第1種換気の方が、小屋裏空間から断熱材下に流入する換気量は減少するため、断熱材下空間の結露量は減少する。例えば、第3種換気を採用したC値3 cm²/m²の住宅におけるピーク蓄積結露量が0.84kg/m²程度に対し、C値1 cm²/m²にすれば0.34kg/m²程度減少、第1種換気にすれば0.32kg/m²程度減少する。断熱材下空間に流入する換気量が結露量に与える影響は大きい。

4.まとめ

住宅の小屋裏空間を対象に数値解析を行い、外気、室温、換気方式および気密性能の違いが夏型結露に及ぼす影響について検討した。

- ・ 例年に比べ湿度が高い2018年、2019年の外気条件では、室温22℃の場合、断熱材下空間の結露量が多い。一方、室温26℃では結露はほぼ発生しなかった。
- ・ 気密性能が高いほど、また第3種換気に比べ第1種換気の方が、小屋裏空間から断熱材下空間に流入する換気量が少なくなるため、結露量は減少する。

今回は居室を1室で扱うなど簡易的なモデルで換気量を算出しているが、換気が結露に与える影響は大きいので、今後、詳細な検討を行う必要がある。

注1 建物の隙間特性値1.7、隙間分布は文献¹³⁾を参考に天井:床:垂直面=1:1.8とし、居室は1室で扱った。第3種換気の給気口の相当隙間面積は1階合計50 cm²、2階40 cm²とし、隙間特性値はいずれも1.5。隙間、給気口は各階の中央高さに集中すると仮定。小屋裏および床下空間は外気との間に大きな隙間(換気口)が存在するため、外気との差圧はほぼゼロという仮定の元、室内圧力を算出。実住宅において、換気経路によっては室ごとに正圧、負圧と異なる点や、小屋裏-居室間の換気において断熱材下空間を通過せずに間仕切壁内空間を通過する換気が存在する可能性がある点などは今後の検討課題と考える。

注2 冷房設定温度が低い例として22℃とした。文献¹⁴⁾¹⁵⁾によると、約8割の人は冷房設定温度26℃以上であるが、低温に設定する人が一定数存在する。
参考文献 1)権藤尚ら:生産・物流における夏型結露防止に関する研究その2、日本建築学会大会学術講演梗概集,2005.2)齋藤宏昭ら:冷房時における夏型壁体内結露に関する研究その1、日本建築学会計画系論文集,1999.5.3)川田一貴ら:気象観測点周辺における土地被覆状況と気候変化の関係について、日本建築学会環境系論文集,2019.2.4) 鉾井修一ら:エース建築環境工学II-熱・湿気・換気、朝倉書店,2002.5)松岡大介:温暖地における木造住宅の小屋裏湿度形成に関する研究、京都大学博士論文,2016.6)気象庁:過去の気象データ(https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php)7)宇田川光弘:パソコンによる空気調和計算法、オーム社,1986.8)日本建築学会:建築材料の熱・空気・湿気物性値、丸善,2001.9)国土技術政策総合研究所・建築研究所:平成25年省エネルギー基準に準じた算定・判断の方法及び解説III、連合印刷センター、2014.10)住宅性能評価・表示協会:建築物省エネ法第30条・第36条に基づく認定に係る技術的審査マニュアル(2017住宅編),2017.11)安宅勇二ら:水銀圧入法による各種建築材料・吸着剤の有効拡散係数の算出、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集,2003.12)建築環境・省エネルギー機構:住宅の省エネルギー基準の解説,2002.13)齋藤宏昭ら:多数室シミュレーションによる気密性能を考慮した木造住宅の小屋裏防露性能に関する検討、日本建築学会技術報告集,2011.2.14)糸井川高徳:冷房を使用する理由と設定室温、日本建築学会環境系論文集,2016.6.15)糸井川高徳:高齢者の冷房を使用する理由と設定室温、日本建築学会環境系論文集,2017.4.

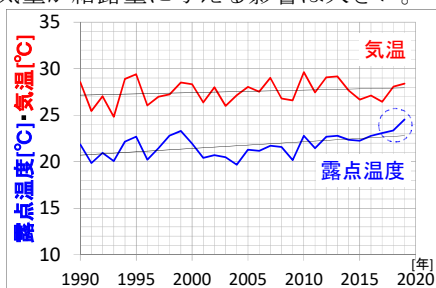


図3 外気温・露点温度(東京8月)

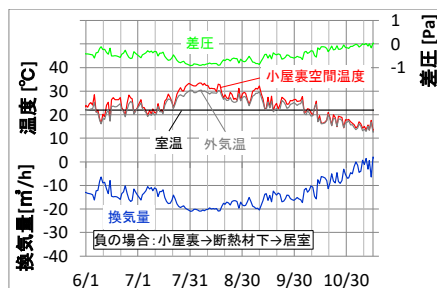


図4 各空間温度および差圧・換気量(小屋裏-居室)

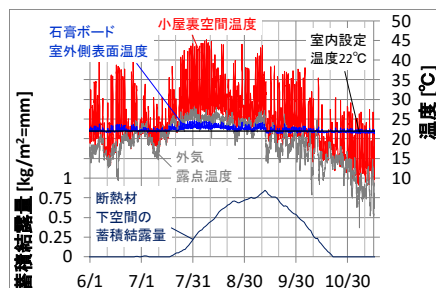


図5 代表点の温度および結露量

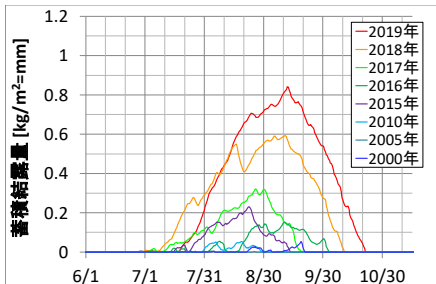


図6 外気条件ごとの結露量

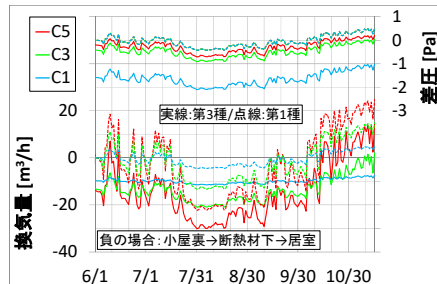


図7 換気方式/気密性能ごとの差圧・換気量(小屋裏-居室)

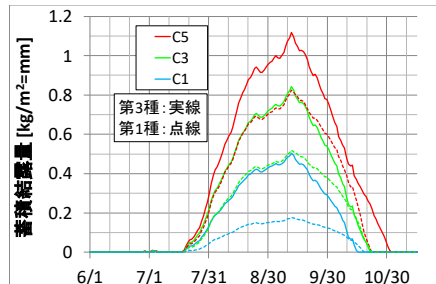


図8 換気方式/気密性能ごとの結露量

*1 積水ハウス 修士(工学)
*2 京都大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)
*3 積水ハウス 博士(工学) *4 積水ハウス 博士(環境学)

*1 Sekisuihouse, M.Eng.
*2 Prof., Graduate School of Engineering Kyoto University, Dr.Eng.
*3 Sekisuihouse, Dr.Eng. *4 Sekisuihouse, Dr.Env.