

潜熱・顕熱蓄熱建材の高断熱木質住宅における有効性

Validity of Latent and Sensible Thermal Storage Materials in Highly Insulated Wooden Houses

佐藤理人*

1. はじめに

木質系住宅は、居室の熱容量がRC造（外断熱）住宅と比較して小さいことが知られており、断熱層室内側の単位床面積当りの熱容量は1/4程度となることもある。こうした熱容量の違いは室温変動の違いとなって現れ、高断熱・高气密住宅が普及しつつある現在でも木質系住宅の室温変動は依然として大きい。そのため、冬季においてもオーバーヒートを起こし、日中窓を開放しておきながら、最低室温は依然として15℃を下回るといった事例も発生しており、適切な熱容量を付加することが蓄熱効果を最大限活かすためには必要である。

高断熱木質住宅の単位床面積当りの熱容量（家具等の熱容量は除く）は、居室面積にもよるが50～80kJ/m²K程度である。しかしながら適切な熱容量程度については、主目的とする効果や地域特性、日射条件にもよるが、単位床面積当りの熱容量が150～250kJ/m²K付近で暖房負荷削減や快適温度域での室温安定化といった効果が得やすいといわれており⁽¹⁾、このような熱容量の付加方法についてこれまで検討を行ってきた。

熱容量を付加する方法としては、昔ながらの方法として居室南側にダイレクトゲインによる顕熱蓄熱を想定した土間コンクリートを敷設する手法等もあるが、蓄熱効果を発揮できるコンクリートの厚みには限界があるため、広範囲に薄く熱容量を付加する方が蓄放熱量が大きくなり、室温安定化や顕熱負荷削減等の効果が年間を通して得やすくなる。

但し熱容量の付加によって、室温が必ずしも人の快適温度域で推移するとは限らず、どの室温域で推移するかは住まい方によって変化するため、理想的には人の快適温度域のみで熱容量が増大し、それ以

外の低温域や高温域では「熱し易く冷め易い」低熱容量であることが望ましい（図1）。

このような快適温度域でのみ熱容量を増大させるための手法として、近年、潜熱蓄熱建材を用いた躯体蓄熱技術の開発が進められており、主には床暖房と併用させることを前提としたアクティブ利用を想定したものと、設備の利用を前提としないパッシブ利用を想定した潜熱蓄熱建材が存在する。

アクティブ利用時は、例えば温水床暖房等の放熱温度があらかじめ決定可能なため、PCMの融解・凝固温度域が比較的広い場合も完全融解に近い状態を実現でき、潜熱を十分に利用できる。但し熱容量が過大だと床暖房の立ち上りの遅延や暖房負荷増大を招くため、温度帯の選定や付加する量には注意が必要である。

またパッシブ利用の場合は、日射取得や室温との温度差を利用してPCMの融解・凝固を行うため、PCMと室温の温度差が確保しづらいことから、過

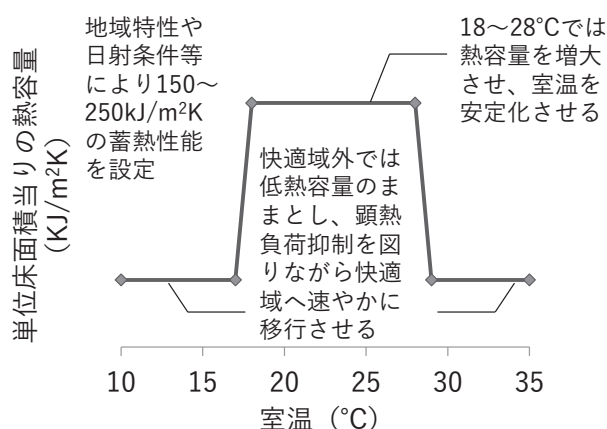


図1 木質住宅における理想的な熱容量例

* 株式会社ミサワホーム総合研究所

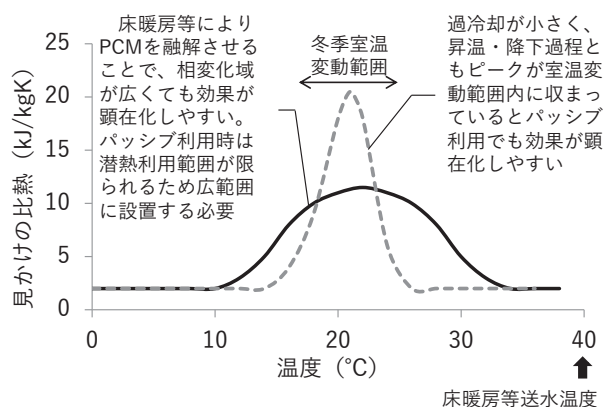


図2 潜熱蓄熱建材の相変化タイプ別利用例

冷却が起きにくく、相変化ピーク温度が室温変動域内にあると効果を顕在化させやすい。またPCMの融解・凝固温度域が比較的広い場合は、薄層で広範囲に設置できると、効果を顕在化させやすい(図2)。

こうした潜熱蓄熱建材の利用は機能性建材の一つとして今後普及が見込まれるが、価格が高額であることや、防火性能を高めづらい成分のものが多いため、居室の広範囲にそのまま適用することは困難である。そこで、防火性能を高めつつ熱容量を高める方法として、壁・天井には石膏ボード等の不燃・準不燃材料と組み合わせて使用する方法等をこれまで試行してきた。

つまり、ある程度の熱容量は安価な顕熱蓄熱材を使用して確保し、快適温度域内に留めるための閾値を超えないようにする場面で潜熱蓄熱建材を活用すると、対費用効果の高い蓄熱効果を得ることができる。

次章以降では住宅における蓄熱効果を予測・評価した事例、実物件において冬季最低室温向上効果や夏季ナイトバージによる蓄冷効果を実施した事例を示す。

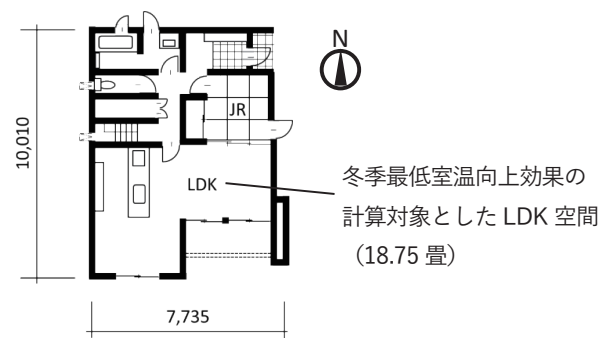
2. 数値解析による冬季蓄熱効果の予測・評価⁽²⁾

2.1 数値解析概要

木造住宅に適切な熱容量を付加する上で重要な要件としては、求める蓄熱効果とともに、断熱性能や季節、日射条件そして地域特性があげられる。

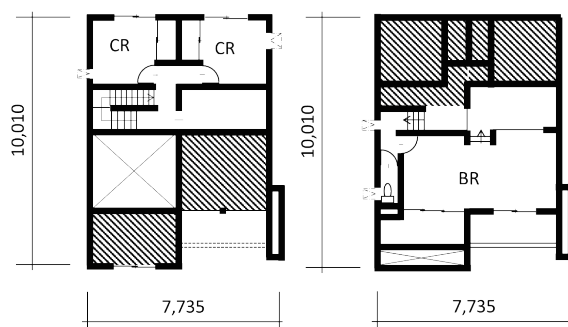
ここでは1階LDKの冬季最低室温向上、暖房負荷削減、室温安定化を目的として、地域別、断熱性能別、熱容量別に数値解析を行い、蓄熱効果を整理した事例を示す。数値解析に用いたモデルプランを図3に示す。

想定する建設地は4都市であり、断熱地域区分では盛岡(3地域)、仙台(4地域)、東京(5, 6地域)、鹿児島(7地域)に相当する。



*LDK空間の床面積当り南面開口率：38%

1st Floor



2nd Floor(1)

2nd Floor(2)

図3 計算用戸建住宅モデル平面図

断熱に関しては、3つの仕様を想定する。断熱グレードⅠは断熱地域区分6地域において住宅性能表示制度の省エネルギー対策等級4(最高等級)レベル($U_a = 0.61\text{W/m}^2\text{K}$)、断熱グレードⅡは同6地域でZEH基準相当レベル($U_a = 0.51\text{W/m}^2\text{K}$)、断熱グレードⅢはHEAT20のG2グレードレベルの仕様($U_a = 0.38\text{W/m}^2\text{K}$)である。

また熱容量についても以下の3つの仕様を想定する。蓄熱グレードⅠはLDK床面積当たりの熱容量を $61.3\text{kJ/m}^2\text{K}$ とした。これはモデルプランのLDKにおいて、標準的な壁・天井・床の断熱仕様を想定し、各部断熱材よりも室内側にある部材を蓄熱部材として見込んだ値である。蓄熱グレードⅡはLDK床面積当たりの熱容量を $110.2\text{kJ/m}^2\text{K}$ とした。これはモデルプランのLDKにおいて、天井・床に対して蓄熱部材を追加した仕様である。蓄熱グレードⅢはLDK床面積当たりの熱容量を $178.4\text{kJ/m}^2\text{K}$ とした。これはモデルプランのLDKにおいて、天井・床に対して蓄熱部材を蓄熱グレードⅡよりさらに追加した仕様である。

その他にも室の家具等の熱容量として単位容積当たり $18.8\text{kJ/m}^3\text{K}$ の熱容量を付加している。暖房時間は7時～14時、16時～24時とし、日中の室温

で蓄熱し、夜間に放熱するパッシブタイプの蓄熱効果を想定している。また暖房温度は日本健康住宅協会が推奨する 22℃とした。また内部発熱については住宅事業主の判断基準の設定と同じとした。

計算は温熱環境シミュレーションプログラム (AE-SIM/HEAT Ver.4) を用いて行い、各都市の気象条件は、拡張アメダス気象データの標準年 EA 気象データ (2000 年版) を用いた。AE-SIM/HEAT では特定の融点での融解凝固を模擬できないため、潜熱量を含めた相変化ピーク温度 (21.2℃) を含む冬季室温域 (18～22℃) の見かけの比熱を入力値とした。また蓄熱グレードⅡ、Ⅲで想定した床と天井に使用する潜熱蓄熱材を用いた蓄熱建材は、各部の蓄熱厚さを有効蓄熱厚さ以下に抑えながら必要な蓄熱量を確保することを想定し、予備実測において日中 22℃ 設定でエアコン暖房した場合に仕上げ材直下の潜熱蓄熱材が完全に融解することを確認できた厚みとした。

2.2 冬季日最低室温向上効果

各都市の 2 月の日最低室温平均値を断熱と蓄熱の仕様ごとにまとめたものを図 4 (a)～(d) に示す。断熱性能向上あるいは蓄熱性能向上に伴って、日最低室温平均値が改善されることが判る。また、断熱と蓄熱を組み合わせることが日最低室温を高める上で有効であり、例えば (b) 東京では断熱・蓄熱のグレードを共にⅡとすると、18℃以上を実現できる

ことが示されている。

2.3 暖房負荷削減効果

図 5 は、東京の年間暖房負荷削減効果を断熱・蓄熱性能別に整理した結果である。断熱性能が向上するにつれて暖房負荷削減効果が高くなるが、さらに蓄熱性能を追加することで、今回のモデルの場合は、断熱性能向上による効果に加えて、更に蓄熱効果により－9～16%程度の負荷削減効果が得られる。但し暖房負荷が最小となるのは、今回の建物モデルにおいてはいずれの断熱グレードの場合でも蓄熱グ

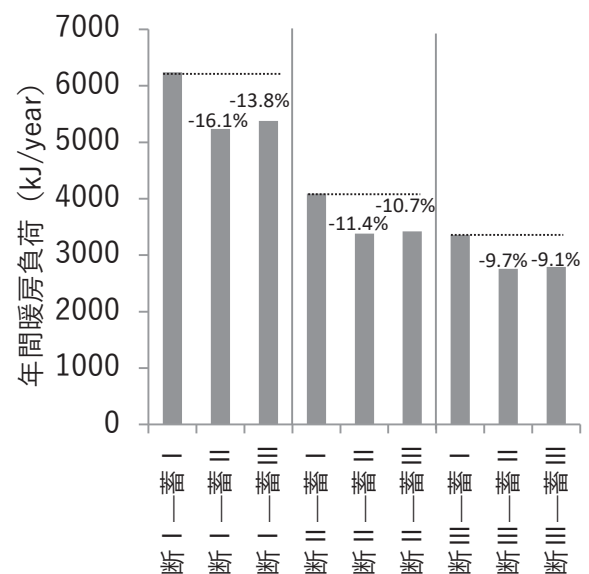


図 5 年間暖房負荷削減効果 (東京)

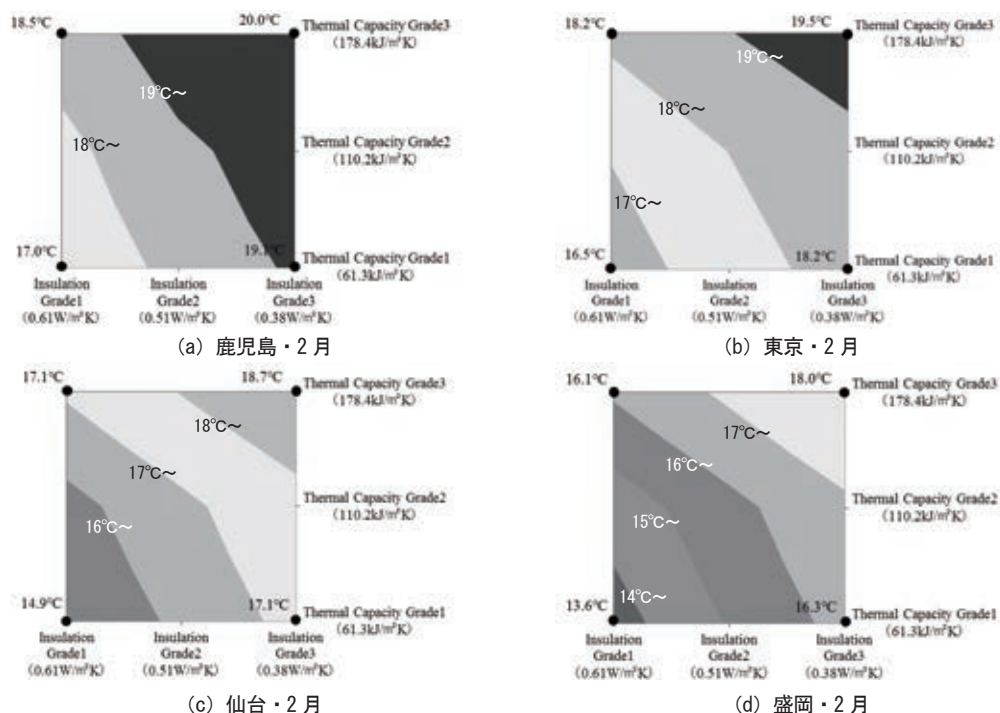


図 4 断熱・蓄熱仕様別日最低室温算出結果

レードⅡの場合であり、目的とする蓄熱効果のバランスをみながら最適な熱容量を設定していく必要がある。

今回の結果はあくまで一例であり、地域や住宅プラン、周辺環境の違いによって日射熱取得量が異なる場合には蓄熱による省エネルギー効果は増減する。

また断熱性能の低い建物において蓄熱性を高めると、かえって快適性を損ねたり、暖房負荷増大につながる恐れがある。

しかし、新築住宅の断熱・気密性能が大幅に向上した現在においては、蓄熱性能を付加することのデメリットは小さく、むしろ室温の安定化と省エネルギー化に有効な手段となり得る。

3. 蓄熱性能等を利用した温熱環境改善効果

3.1 数値解析概要

前章では断熱・蓄熱性能のみに着目した数値解析事例を示したが、断熱・蓄熱性能向上に加え、様々な要素技術を付加することによって、更にその効果を高めることができる。一般的に日射取得性能の高い居室の断熱や蓄熱性能を高めることは、夏季の冷房負荷増大を招く恐れがあるが、日射遮蔽や夜間外気冷房（ナイトパージ）を実施することで夏季においても断熱・蓄熱性能の効果を得ることができる。

ここでは冷暖房設備の利用を想定しない自然室温にて評価した事例を示す。自然室温による評価は建

物本来の性能を表現しているともいえ、停電等災害発生時のレジリエンス機能を評価する上でも参考となる数値である。

今回は図6に示すように①標準モデルを断熱・蓄熱性能がグレードⅠの建物として、②断熱性能向上（断熱グレードⅡ）③蓄熱性能向上（蓄熱グレードⅢ）との相乗効果が得やすい要素技術である、④夏季日射遮蔽性能向上（夏季のみ南側開口部への外部スクリーン設置）、⑤夏季外気冷房性能向上（ナイトパージ（夏季夜間のみ7時間 自然換気回数5回/h 想定））を導入し、各技術の組み合わせの中でも効果が高いと思われる組み合わせを中心に合計16パターンの計算を行い、自然室温による温熱環境改善効果を評価した。

計算は前章と同様に温熱環境シミュレーションプログラム（AE-SIM/HEAT Ver.4）を用いて行い、内部発熱、気象データ（東京）も同一条件で実施した。

3.2 評価結果

(a) 夏季最高室温及び冬季最低室温改善効果

図7に夏季日平均最高室温及び冬季日平均最低室温を算出した結果例を示す。個別の要素技術を導入する場合よりも要素技術を組み合わせることで、夏季・冬季ともより高い効果が得られており、夏季最高室温は約25℃低下し、冬季最低室温は約2℃向上した。こうした断熱・蓄熱以外の技術の導入も蓄熱（蓄冷）による効果を高め、木造住宅に熱容量を付加することの価値を高めるために有効な手段である。

(b) 許容温度時間率増加及び日較差低減効果

図8に年間8760時間の中で自然室温がどの程度許容可能な室温域（15℃～30℃）に保たれる時間

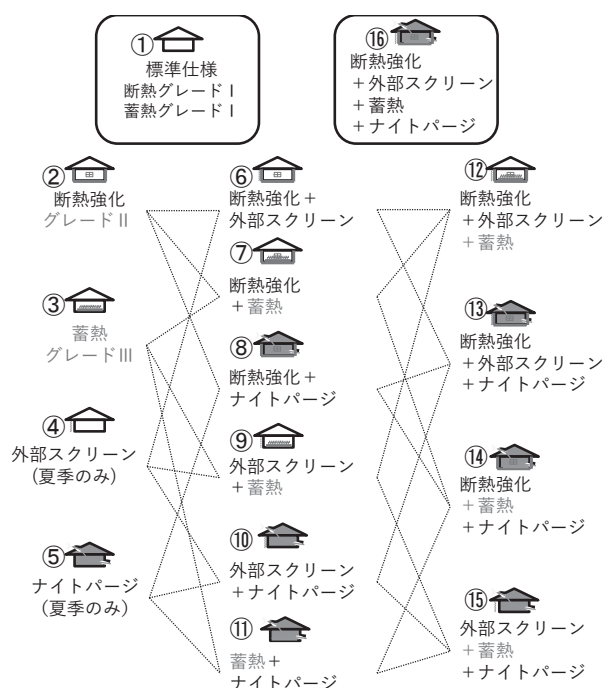


図6 評価技術及び計算した評価モデル（16パターン）

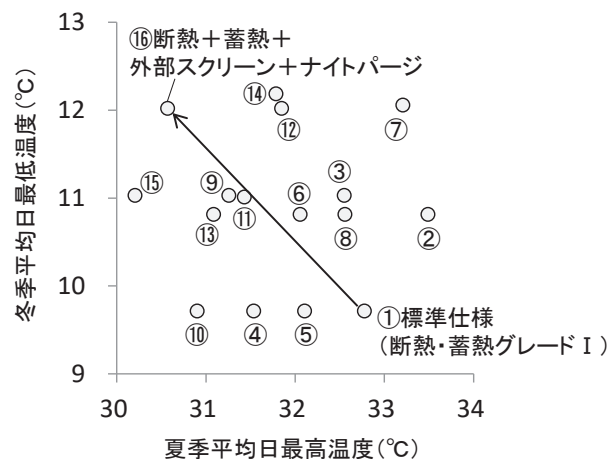


図7 自然室温計算時における夏季最高・冬季最低室温

の割合があるかを算出した年間許容室温時間率と、年間平均日較差を算出した結果を図9に示す。

①標準仕様と⑯全ての技術要素を追加した場合では、年間許容室温時間率は約13%上昇し、年間平均日較差は約1.6℃小さくなる。

今回取り上げた熱的な要素技術以外にも吸音材として使用される断熱材や面密度の大きい遮音マット等防音性能向上技術とは相性が良く、双方の効果が得られるような仕様の開発も期待される。

4. 実測による蓄熱仕様の評価例⁽³⁾

4.1 蓄熱建材設置概要

本章では具体的な蓄熱仕様を評価した事例として、東京都武蔵村山市に建設された木質パネル住宅に顕熱・潜熱蓄熱建材を導入し、実測を行った事例を示す。実測対象建物は、1階LDKの断熱仕様がGrade I、蓄熱仕様がGrade II相当で、図9に示すようにLDKの中でも特に受熱日射を得やすい位置としてリビングの南側開口部を中心とした床面（概ね対象居室面積の40%程度）にのみPCM蓄熱シート（ $t = 6\text{mm}$ ）を敷設し、その他Grade II相当の

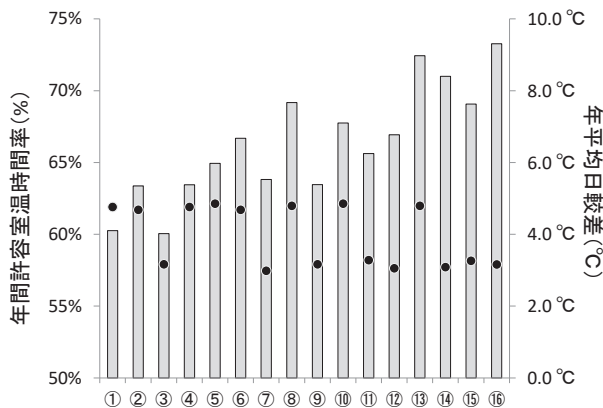


図8 パターン別許容温度時間率及び年間日較差

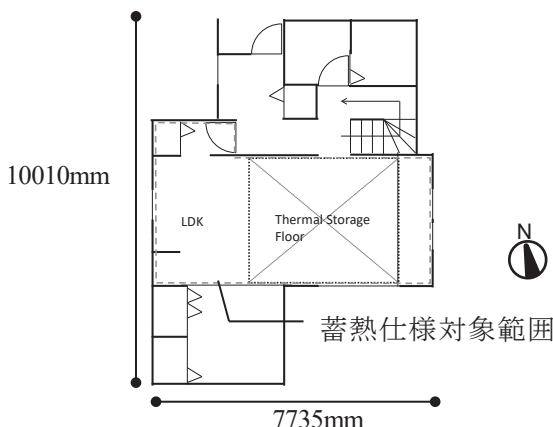


図9 1F 平面図及び蓄熱材敷設位置

熱容量を確保するために必要な顕熱蓄熱材（石膏ボード等）を主に天井と床に付加した。PCM蓄熱シートは、ゲル化パラフィンで相変化ピーク温度約21℃（過冷却はほぼ無し）のものを使用した。図10に施工時の床断面の様子を示す。

4.2 実測概要

測定は2017/2/19～2/27に実施し、全熱交換機有（顕熱交換効率0.7、0.6回/h）、カーテン・家具等の設置有、内部発熱40Wの条件で測定した。また暖房設定温度22℃、暖房時間は7時～14時、16時～24時とし、日中の日射熱や暖房で蓄熱し、夜間に放熱することで冬季早朝（7時）の最低室温向上効果を実現することを目的とした。

またPCM蓄熱シートの表裏面にT型熱電対及び熱流計を設置し、融解・凝固程度について測定した。

4.3 実測結果

図11に一例として2017/2/21朝7時の室温及び床断面温度分布を測定した結果を示す。午前0時に暖房を停止し7時間後の室温は17.1℃であり、床表面温度は室温よりも1℃高い18.1℃を維持している。またPCM蓄熱シートの温度は19.6℃を維持しており、蓄熱効果が表れている。PCMを敷設していな

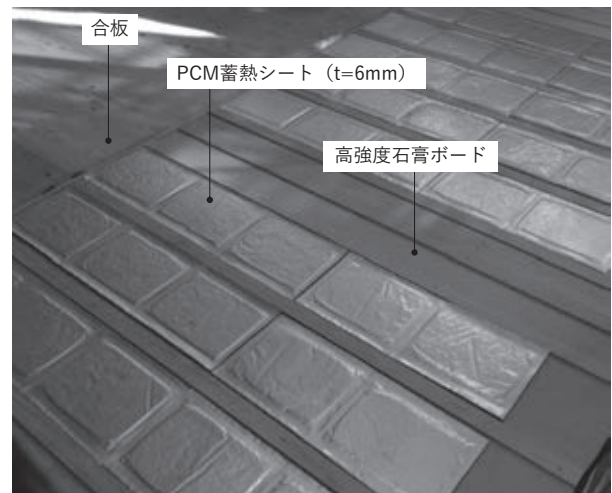


図10 PCM蓄熱シート敷設例

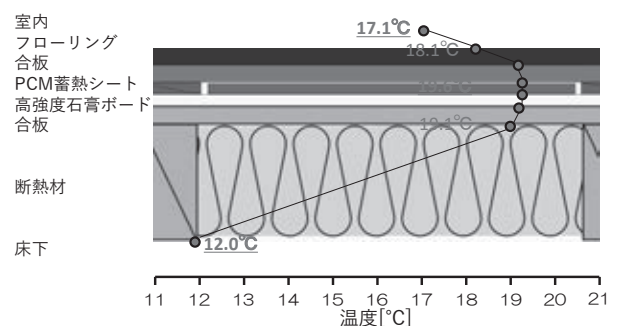


図11 断面温度分布（2017/2/21 7時）

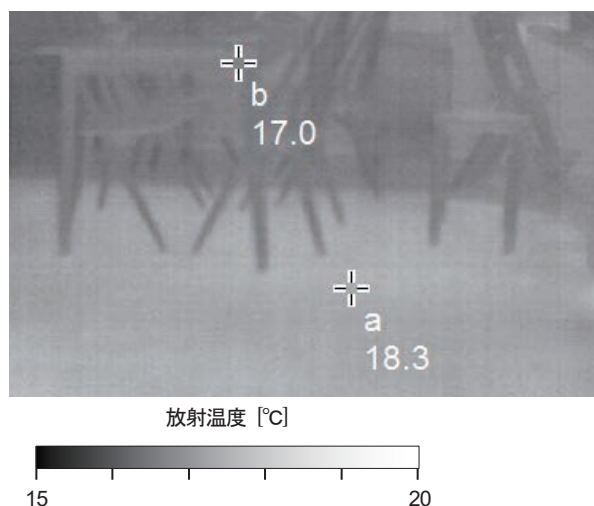


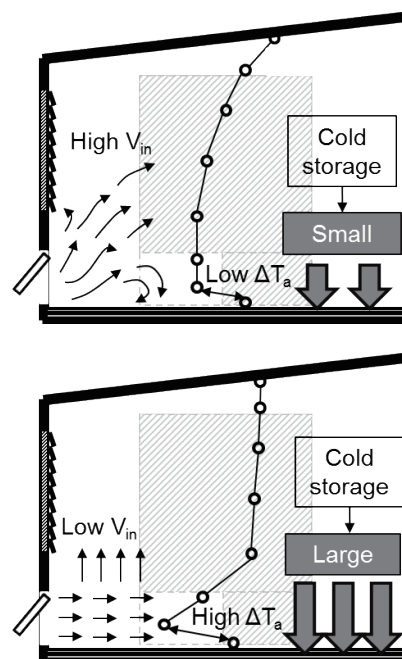
図 12 放射温度分布測定結果 (2/28 7 a.m.)

い通常床部分の表面温度は室温相当であり、最低室温向上に加え、床表面温度は更に室温よりも 1°C 高く維持できることを確認した (図 12)。また本建物はフローリング一体型温水床暖房も敷設されており、床暖房との併用事例では早朝の床表面温度は室温 $+2^{\circ}\text{C}$ の効果が得られる等、接触温感の向上にも寄与する。

このような PCM 蓄熱シートの他にも石膏ボード一体型の PCM 蓄熱シートを天井に敷設した事例や、断熱リフォームと併用した事例等も仙台や金沢等で測定を行い、同様の効果が得られることを確認しているが、開口部近傍の床表面温度はコールドドラフトの影響も受けやすいこと、最低室温向上には熱交換型の 24 時間換気の利用も重要であることから、蓄熱効果を維持する工夫も合わせて実施することが肝要である。

5. ナイトパージによる夏季蓄冷効果⁽⁴⁾

夏季における夜間外気冷房 (ナイトパージ) は、低温な外気を室内に取り入れることで建物内部に滞留した熱の排気、躯体蓄冷による日中の冷房負荷削減に寄与できることから、オフィスなどでは躯体熱容量が大きいことを活かしたナイトパージによる躯体蓄冷を実施する事例は多くみられる。しかしながら熱容量が小さい木造住宅においては、これまでナイトパージによる蓄冷を実施した事例は少なかった。他方で 3 章で示したように日射遮蔽・夜間換気と熱容量を付加した組み合わせは、夏季日中の快適性向上に有用であり、省エネルギー性とともに災害・停電発生時のレジリエンス機能向上としても有用である。

図 13 外部流入風速 (V_{in}) が床近傍空気温度と床表面温度との温度差 (ΔT_a) に与える影響

今後、ナイトパージをより効果的に利用するためには、室温を外気に近づける自然換気量を確保することも重要であるが、外気の取り入れ方についても、特に内外温度が小さい場合等では、図 13 に示すように低温外気を室内空気と極力混合させずに床近傍空気温度と床表面温度の温度差を確保し、安定した蓄冷量を得る工夫も重要である。

6. おわりに

今回取り上げた潜熱・顕熱蓄熱建材による躯体蓄熱事例は蓄熱の持つ効果の一例に過ぎず、一つ一つの効果はそれほど大きなものではないが、この他にも人の快適性や健康性、省エネ性等幅広く寄与できる部分は多い。こうした効果の一つ一つ定量的に明らかにしていくことが更なる普及には重要であり、それらを明示していくことに引き続き取り組んでいきたい。

7. 参考文献

- 1) 桑沢保夫, 峰野悟, 澤地孝男: 戸建て住宅における蓄熱が暖房熱負荷に与える影響の評価手法, 日本建築学会環境系論文集 Vol.80 No.717, pp.1045-1052, 2015
- 2) 太田勇, 佐藤理人, 守谷一希: 高断熱木質住宅の冬季最低室温向上を目的とした熱容量に関する研究その 1 研究目的と概要, 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.72-82, 2017

- 3) 佐藤理人, 太田勇, 守谷一希: 高断熱木質住宅の冬季最低室温向上を目的とした熱容量に関する研究その2PCMを使用した建材開発とプレ実測結果, 太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.83-86, 2017
- 4) 李泰徹, 佐藤理人, 浅輪貴史他: 地窓を利用した夜間自然換気による潜熱蓄熱材の蓄冷効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 Vol.82 No.742, pp.1025-1024, 2017

著者紹介



佐藤 理人

2008 年, 東京工業大学大学院博士課程修了, 博士 (工学). 2008 ~ 2011 年, 東京工業大学大学院特別研究員. 2011 年~, ミサワホーム総合研究所主任研究員. 蒸暑地域における省エネ住宅開発, パッシブ技術, 太陽熱利用技術開発等に従事.