

論文 パラフィン系相変化材料による温度上昇抑制型建材開発に向けた基礎的研究

遠藤 樹*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨：本研究では、相変化材料(PCM)を含有したモルタルを作製し、最終的にはヒートアイランド現象抑制効果を持つ仕上げ材として利用することを目的とした。日射による外壁の温度上昇を想定し、室内を対象とした既往研究よりも高融点の PCM を使用し、PCM の種類および含有率が異なる各供試体の熱特性、強度、含水率および透気性の評価を行った。各試験結果を踏まえ、マイクロカプセル PCM を 20vol% 含有したモルタルが、作製した供試体の中で最も利用目的に適した建材であるという結論を得た。

キーワード：潜熱蓄熱材(PCM)、相変化材料、ヒートアイランド、熱特性試験、見かけの比熱、蓄熱量

1. 研究背景および目的

Phase Change Material (相変化材料または潜熱蓄熱材、以下 PCM) とは、特定の温度で相変化 (固体⇄液体) が発生することにより蓄熱効果および放熱効果を発揮する物質である。この特性を利用し、建物躯体への PCM 混入による周囲熱環境の制御を目的とした研究¹⁾がこれまでに行われている。しかしながら既往研究の多くは、融点が高融点の PCM を用いて室内温度の安定を目的としたものであり、高融点の PCM を利用した研究や、室外環境を対象とした研究は前例が十分とは言えない。

そこで本研究では、①室外熱環境を対象とする、②既往研究よりも高い融点の PCM を利用した実験として、③PCM 混合モルタルのヒートアイランド現象抑制効果の評価を行った。都心部のビル群においては、日射の影響により外気温よりも壁面温度が高くなる傾向があり、この壁面からの放熱がヒートアイランド現象の一因と考えられる。そのため、高融点の PCM を含有させたモルタルを壁面に仕上げることによる日中の温度上昇抑制が有効であると考え、外壁面温度の再現波形を用いた熱特性試験を実施した。また同時に、PCM を混入したモルタルの強度、含水率および透気性に与える影響についても測定し評価した。

これらの結果を用いて、蓄熱効果と仕上げ材としての性能とを両立し得る建材開発のための基礎資料を得ることを目的とした。

2. PCM の物性

実験に使用した PCM の各物性を表-1 に示す。本実験では M 社製のパラフィン系マイクロカプセル(以下、MC)、ボード化パラフィン系マイクロカプセル(以下、ボード)およびゲル化パラフィン系マイクロカプセル(以

表-1 PCM の各物性

PCM 形状	密度 [kg/m ³]	融点 [°C]	昇温過程		降温過程	
			潜熱域 [°C]	ピーク温度 [°C]	潜熱域 [°C]	ピーク温度 [°C]
MC	800	36	30.5~41.1	35.3	28.1~31.1	29.8
					20.6~21.9	21.4
					36.6~39.3	38.1
		44	37.2~49.1	42.6	26.9~32.9	29.2
ボード*1	848	36	28.8~41.0	36.4	29.4~32.4	31.1
					34.2~39.8	36.4
		44	35.6~46.4	43.5	25.2~29.9	27.1
ゲル*2	950	36	32.0~42.0	36.6	25.4~31.8	30.5
						26.8
		44	39.7~49.9	45.0	31.6~40.8	39.3
						33.6

*1：マイクロカプセルを不織布に含浸させボード状にしたもの

*2：マイクロカプセルをゲル化させたもの

表-2 供試体一覧および実験項目

PCM 形状	供試体名称	含有率 (vol%)	実験項目	供試体寸法 (mm)
マイクロカプセル (MC)	N		曲げ強度	40×40×160
	MC3610	0%	圧縮強度	40×40×160
	MC3620	10%	質量含水率	40×40×160
	MC4410	20%	比抵抗	100×100×30
	MC4420	30%	透気性	100×100×30
	MC4430		熱特性	100×100×30
ボード (B)	B36	(19.2%)*	比抵抗	100×100×30
	B44		透気性	100×100×30
			熱特性	100×100×30
ゲル (G)	G36	(19.6%)*	比抵抗	100×100×30
	G44		透気性	100×100×30
			熱特性	100×100×30

※使用したボード、ゲルの体積を供試体の体積で除した割合

表-3 計画調合

供試体		混入量 [kg/m ³]				
		セメント	細骨材	水	PCM	ポリマー
MC	0%	577	1154	375	0	—
	10%	577	893	375	95	
	20%	577	632	375	190	
	30%	577	371	375	285	
ボードおよびゲル		577	1154	353	—	23

*1 東京理科大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科嘱託助教 博士 (工学) (正会員)

下、ゲル)を使用した。表中の融点は製造時に想定されている値である。また、表中に示す各試料の潜熱域およびピーク温度の測定にはTG-DTA(示差熱・熱重量同時測定)を用いた。昇温降温速度5°C/minにて、環境温度から80°Cの範囲で昇温および降温過程の測定を実施し、測定結果を用いてJIS K7121の方法により潜熱域を算出した。

3. 実験概要

3.1 実験計画

実験項目を表-2に示す。供試体名称のMC, B, Gはそれぞれマイクロカプセル、ボード、ゲルを表し、36および44は融点の温度を表す。また、MC供試体名称末尾の10, 20, 30は含有率を表す。全供試体について熱特性試験を実施し、温度変化、蓄熱量および見かけの比熱について評価を行った。また、MC供試体については、PCM含有による強度性能、含水率および透気性への影響も評価した。

3.2 供試体概要

各供試体の計画調査を表-3に示す。ベースとなるモルタルのセメント、細骨材および水の質量比は1:2:0.65とした。MCの含有率は全体に対する体積比とし、細骨材に代替する形で含有させた。いずれの供試体も20°C, 60%R.H.の環境で封緘養生を行い、材齢7日で各試験を実施した。

ボード供試体およびゲル供試体については、モルタルとの付着性向上のため、水の6wt.%をポリマーに代替したポリマーセメントとした。ボードおよびゲル供試体の打設断面を図-1および図-2にそれぞれ示す。

3.3 熱特性試験方法

温度-時間の制御が可能な恒温器を使用し、供試体の昇温および降温過程の制御を行った。既往研究²⁾における測定結果より、日射の影響を最大限受けた場合、外壁面温度は概ね20°C~50°Cで変化すると判断し、温度伝達のズレを考慮して10°C~55°Cの範囲で波形を設定した。既往研究²⁾による外壁面温度の測定結果および恒温器に入力した波形を図-3に示す。

また、外壁面のみが日射を受ける状態を再現するため、供試体の100mm×100mmの1面のみが加熱されるように、断熱材としてスタイロフォームを使用し、PCM建材に関する既往研究³⁾を参考に図-4に示す断熱装置を作製した。図中の位置に熱電対および熱流計を配置し、供試体表面および内部の温度変化を測定すると共に、上下面の流入および流出熱流束の差を用いて蓄熱量を算出した。また、蓄熱量の時間変化から見かけの比熱を算出した。なお、本研究における各数値は草間らの研究⁴⁾で提案された式(1), (2)により算出を行った。

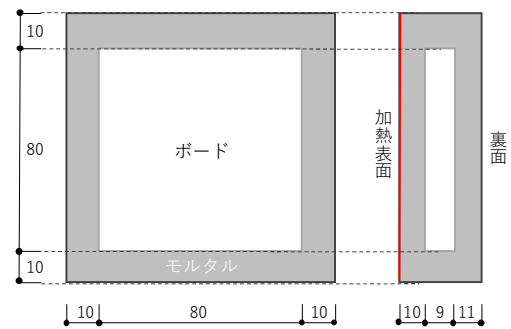


図-1 ボード供試体のPCM混入断面

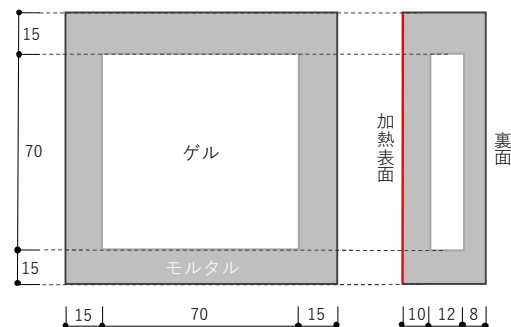


図-2 ゲル供試体のPCM混入断面

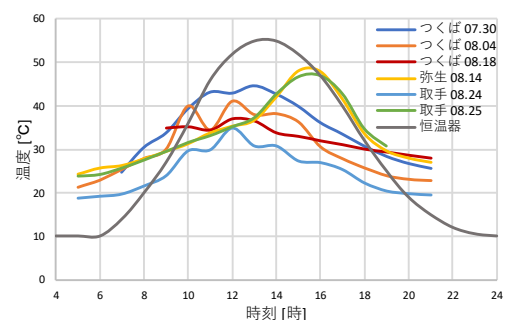


図-3 壁面温度および入力波形²⁾

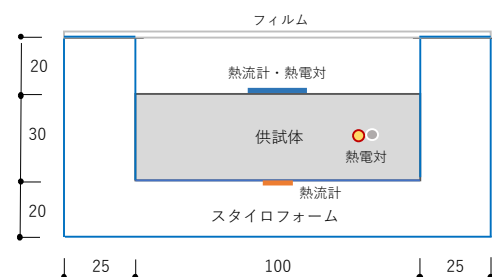


図-4 供試体の断熱処理方法

$$Q_{ST} = \frac{1}{\rho \cdot l} \cdot \sum (q_{in} - q_{out}) \Delta t \quad (1)$$

$$c_{sp}(\theta) = \frac{dQ_{ST}}{d\theta} \quad (2)$$

ここに、

Q_{ST} : 蓄熱量 [J/kg] c_{sp} : 供試体の比熱 [J/(kg・K)]
 q_{in} : 流入熱流束 [W/m²] q_{out} : 流出熱流束 [W/m²]
 ρ : 密度 [kg/m³] l : 試験体の厚さ [m]

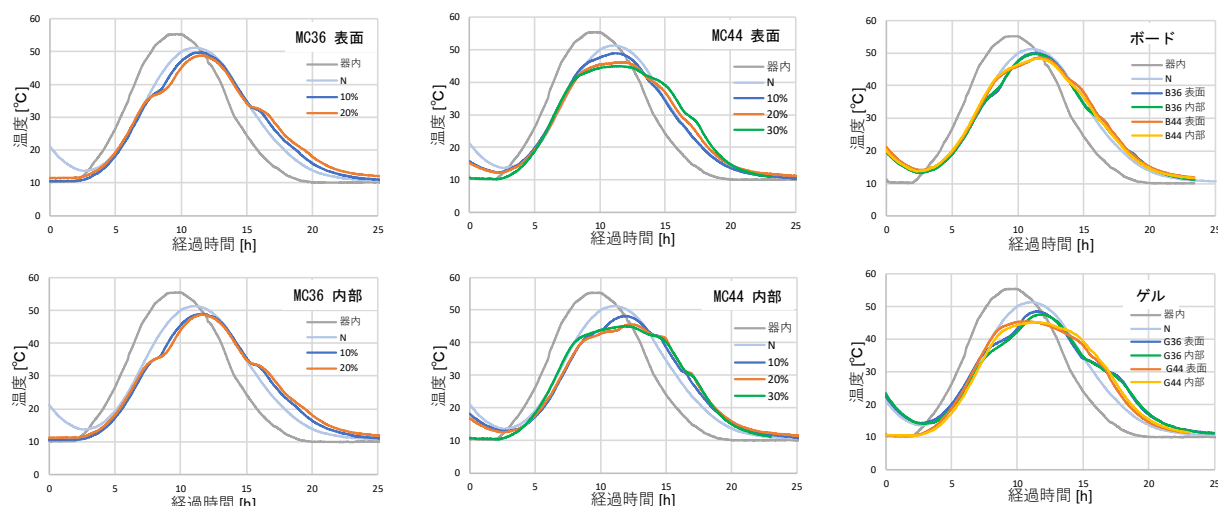


図-5 温度測定結果

3.4 モルタルの物性試験方法

(1) モルタルフロー試験

モルタル練り混ぜ直後に、JIS R 5201 に従ってフローの測定を行った。

(2) 強度試験

JIS R 5201 に従い、MC 供試体に対し材齢 7 日および 28 日で曲げ試験および圧縮試験を行った。

(3) 含水率評価

MC 供試体に対して、含水率を把握する目的で質量含水率の測定を行った。また、含水率を非破壊試験で評価する手法として比抵抗の測定を行った。

(4) 透気性

ダブルチャンバー法を用いて各供試体の透気係数を測定し、供試体表面の緻密さの評価を行った。平滑面に対する測定を想定した方法であるため、供試体の加熱表面および裏面のうち、より平滑と思われる面に対して 2 回測定を実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 熱特性試験

(1) 温度変化

熱特性試験における温度測定結果を図-5 に、加熱表面最高温度を図-6 に示す。MC44 に関しては含有率が大きいほど最高温度が低く、潜熱域にあたる時間が長いという結果が加熱表面および内部の双方に現れている。MC4410, MC4420 については昇温過程における加熱表面の潜熱域がモルタル内部よりも高く、表-1 の測定結果と比較しても高温である。これは、加熱表面は内部と比較して加熱の影響を直接的に受けるため、潜熱域の初期段階において加熱による温度上昇が、温度変化を抑制する効果(以下、潜熱効果)を上回ったことが要因と考えられる。また、潜熱域の差に関わらず最高温度は加熱表面

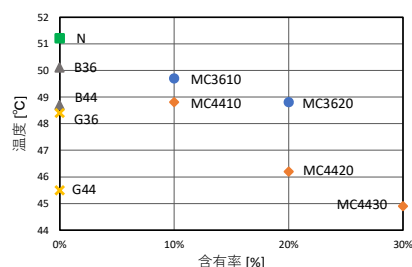


図-6 表面最高温度の測定結果

および内部ではほぼ一致することが確認できる。

MC36 においては、加熱表面および内部で波形が概ね一致し、潜熱効果を発揮する時間(以下、潜熱時間)、および最高温度の含有率ごとの差が MC44 よりも小さい。これは、MC36 の融点付近で入力した加熱速度が MC44 の融点付近よりも大きいため、供試体の時間あたりの蓄熱量が大きくなり、PCM の融解が早く進行することが、含有率ごとの潜熱時間の差が小さい要因と思われる。また、潜熱域後に十分な加熱時間があつたため、両融点とも N とほぼ同等の最高温度まで上昇したと考えられる。

ボード供試体およびゲル供試体の結果を見ると、MC36 と同様に加熱表面および内部で波形はほぼ一致している。ボード供試体の含有率は表-2 に示すように 19.2vol%であるが、両融点とも MC10vol%と同様の波形を示し、MC に比べて蓄熱性能が低い結果が得られている。一方、ゲル供試体の含有率は 19.6 vol %であるが、ゲルは MC が約 90wt. %, ゲル成分が約 10wt. %で構成されているため、MC 含有率に換算するとその値は更に小さくなる。しかしながら、G36, G44 共に MC20vol%よりも潜熱時間が長く、最高温度がやや低いという結果が得られており、ゲルは MC と比べて高い蓄熱性能が期待される。

(2) 蓄熱量

各供試体の流入および流出熱流束の測定結果の差に

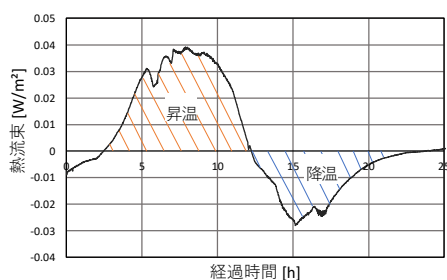


図-7 MC4420 の流入および流出熱流束差

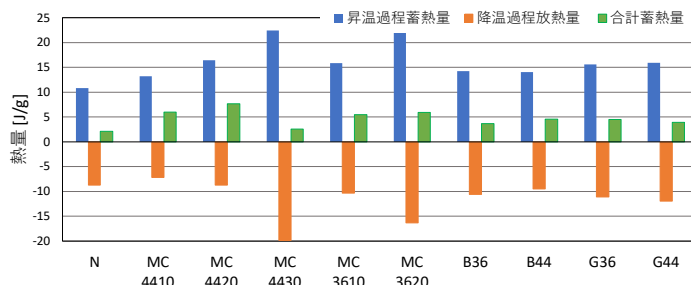


図-8 蓄熱量および放熱量測定結果

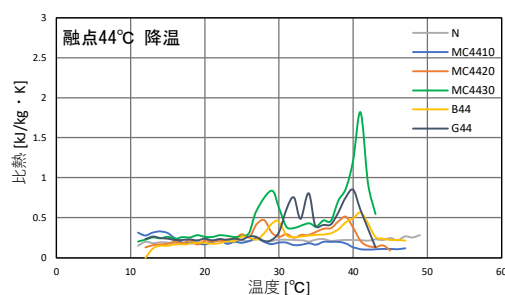
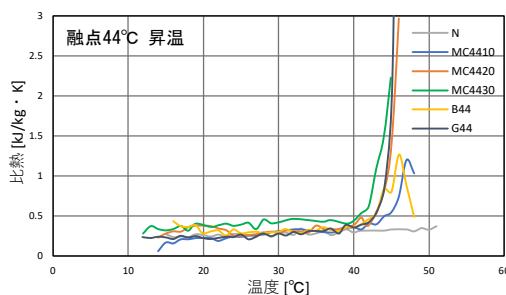
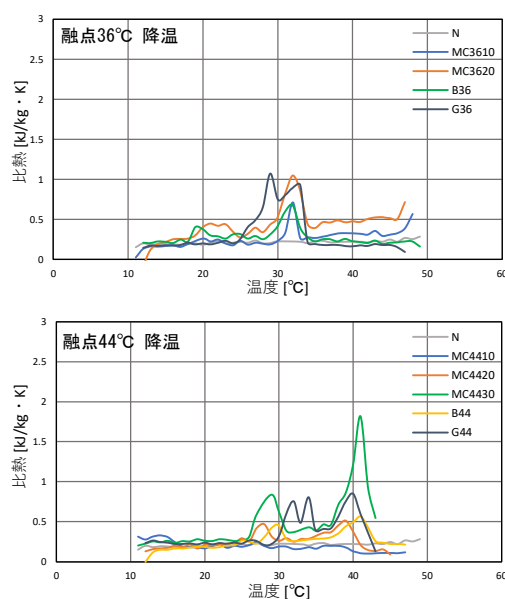
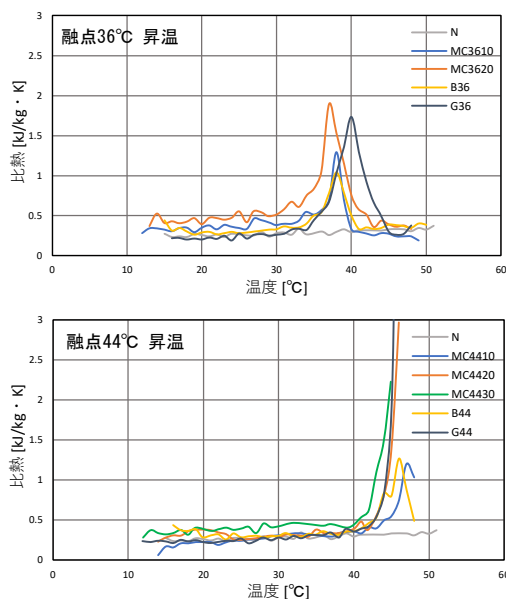


図-9 見かけの比熱の算出結果

対する昇温および降温過程の一例を図-7 に示す。昇温過程の蓄熱量および降温過程の放熱量を式(1)により算出した結果を図-8 に示す。MC36 と MC44 の昇温過程については、含有率が大きいほど蓄熱量が大きい。一方、降温過程では MC36 は含有率増大に伴い放熱量も増加傾向を示しているが、MC4410、MC4420 は N と同等の放熱量となり、MC4430 のみ極端に大きな放熱量となっている。これは含有率が大きいことにより降温過程まで潜熱効果が継続したことを示している。また、図-5 において MC4430 が他の供試体よりも長時間 40°C以上を保っていることも、潜熱効果の継続が要因と考えられる。ボード供試体は融点によらず昇温と降温過程が同等の結果となっており、同量のボードを含有させれば融点に関わらず蓄熱量が安定することが予測される。ゲル供試体についても同様の結果が得られているが、MC20vol%と蓄熱量に大きな差はなく、(1)で期待したような高い蓄熱性能は現れていない。

(3) 見かけの比熱

(1)、(2)の結果に対して詳細な考察を加えるため、式(2)で算出される見かけの比熱について評価を行った。温度間隔を 1°Cとして算出した結果を図-9 に示す。いずれ

の供試体も、表-1 に示した各 PCM の潜熱域と同様の領域で見かけの比熱の増大が見られる。また MC 供試体については、含有率が大きいほど比熱のピーク値が大きくなる結果が現れている。この結果は含有率が大きいと MC の潜熱効果が発現しやすい傾向を示している。このことより、比熱のピーク値が大きい MC4420、MC4430 において、図-5、図-6 における最高温度の抑制効果やピークカット時間の保持が可能になったことが確認できる。

降温過程では、40°C付近で MC4430 が他の供試体と比較して非常に大きなピーク値を示している。この比熱の大きさが、図-8 における MC4430 の大きな放熱量の要因と考えられる。MC4430 以外の供試体については、降温過程の潜熱域での比熱が昇温過程よりも小さい値となっており、降温過程での潜熱効果による高温維持の可能性は小さいと言える。これは図-5 の降温過程において、N と各供試体の波形がほぼ一致したことにも現れている。

ボード供試体は各融点の MC10 vol% と同等の波形を示しており、これが図-5 の MC10 vol% との波形一致に結び付いたと考えられる。ゲル供試体については、昇温過程では G36 のみピーク温度が MC よりも高くなったものの、各融点の MC20 vol% と同様の波形およびピーク値を

示している。降温過程では両融点とも MC20 vol%よりも大きなピーク値を示している。この結果より、特に降温過程で蓄熱性能が発揮されやすいと推測され、これが図-5において主に降温過程での潜熱時間が MC20 vol%より長くなっていることの要因と考えられる。

このことから本実験の範囲内においては、MC と比較してゲルは蓄熱性能を発揮しやすいものの、降温過程においても蓄熱性能を保持することにより、夜間など温度が低下した時に高温維持の要因となり得るため、昇温抑制型建材としての優位性は無いと結論付けられる。

4.2 モルタルの物性試験

(1) モルタルフロー試験

モルタルフローの測定結果を図-10 に示す。一部の供試体は 15 回打撃後の広がりが大きくフローテーブルでの測定不能となったため、打撃前の値で比較を行った。MC36 と MC44 の間に値の差が生じているが、これは実験の都合上、異なる日に打設を行ったためのばらつきであると推測される。いずれの供試体も、含有率 10 vol%では流動性が確保され、20 および 30 vol%では流動性が完全に失われる結果を示している。これより、施工性の面では 20vol%以上の含有は適当でないと考えられる。

(2) 強度試験

強度試験の結果を図-11 および図-12 にそれぞれ示す。図中の実線は材齢 7 日の線形近似を、点線は材齢 28 日の線形近似をそれぞれ表す。材齢 7 日においては、両融点の強度減少の傾向は曲げと圧縮で同様であり、PCM 含有率が高いほど強度が低下することが分かる。特に MC4430 は曲げ試験開始直後に供試体が破断するほど曲げ強度に乏しいという結果が得られている。

材齢 28 日の圧縮強度を見てみると、MC4430 以外は材齢 7 日より強度が約 2 倍に上昇している。MC4430 については材齢 7 日時点からほぼ圧縮強度に変化が無く、30 vol%含有においては強度発現性が乏しい。一方、材齢 28 日の曲げ強度は N および MC10 vol%については約 1/2 倍に低下したものの、MC20 vol%はほぼ変化がなく、MC4430 は上昇している。全供試体の傾向としては含有率ごとの強度差が 7 日より小さくなっており、PCM 含有による曲げ強度への影響は時間経過により小さくなると考えられる。

圧縮強度と曲げ強度の結果を複合して考えると、ばらつきはあるものの PCM 含有による強度低下の傾向が見られる。特に MC4430 においては著しく強度が低下しており、仕上げ材としての利用でもひび割れ等が懸念されるため、今後の検討が必要である。

(3) 含水率評価

図-13 に示す通り、質量含水率の測定値は MC36、MC44 共に PCM 含有率と比例的関係を示しており、PCM

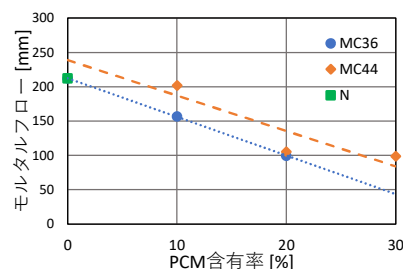


図-10 フロー測定結果

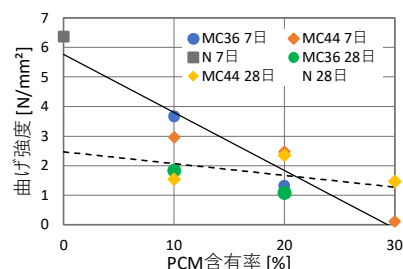


図-11 曲げ試験結果

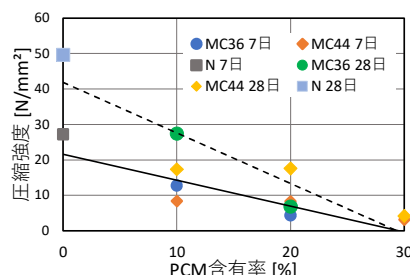


図-12 圧縮試験結果

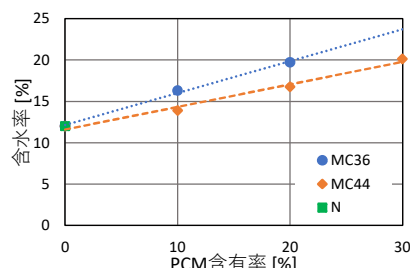


図-13 質量含水率測定結果

含有率の増加が質量含水率増大をもたらすと言える。また図-14 に示す通り、比抵抗の値は MC36 および MC44 で概ね一致しており、PCM 含有率の増加に対して比抵抗値が低下している。両者の関係を図-15 に示す。相関性は高くないが、比抵抗が大きいほど含水率が低下する傾向が現れている。これより、含水率の高低の評価に比抵抗を用いることが有効と考える。これを踏まえて図-14 のボード供試体およびゲル供試体の結果を見ると、いずれも N よりも比抵抗が大きくなっており、N よりも含水率が低いと評価できる。既往の研究⁵⁾によると、セメント硬化体の含水率が低いほど熱伝導率が低いことが示されており、供試体の含水率と蓄熱性能の関係については今後検討していきたい。

(4) 透気性

測定結果の平均値を対数プロットしたものを図-16に示す。なお、測定値が $0.001 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 未満と示されたものは図中の値を $0.001 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ としており、非常に緻密であると評価できる。

測定結果より、MC 含有率 10vol%および 20vol%については透気性への影響が小さい一方で、MC4430 は透気性が N よりも非常に大きく、緻密さに欠けるという結果が示された。原因は別途調査が必要であるが、MC の含有率として 30vol%以上の場合は注意が必要と考える。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 使用する PCM の融点が周囲環境のピーク温度に近いほど(本実験では MC44)、供試体の PCM 含有率が高いほど潜熱効果が大きくなる傾向が示された。しかし降温過程での高温維持というデメリットを踏まえると、含有率 30vol%供試体が含有率 20vol%よりも優れたピークカット能力を有しているとい概に評価することは難しい。
- (2) 曲げおよび圧縮の両軸において、供試体の PCM の含有率が高いほど強度が低下する傾向が確認された。特に MC4430 の強度が極端に低くなっており、仕上げ材としての利用でも脆弱性が懸念される。
- (3) 熱特性試験の結果より、ボード供試体のピークカット性能は MC 供試体に劣ると推測される。また、ゲル供試体の潜熱効果は MC 供試体と同等以上であったが、降温過程で長時間高温を維持したため、本研究の目的に最も適した建材ではないと考えられる。
- (4) (1)~(3)の結果より本研究においては、MC4420 がヒートアイランド抑制効果を持つ仕上げ材として最も実用性が高いと結論付けられる。今後は本実験よりも狭い間隔で融点および含有率を設定し、最適な PCM 含有モルタルの開発を継続すると共に、実大壁への仕上げを行った上での屋外試験の実施を検討する必要がある。

謝辞

本研究は、国際科学技術共同研究推進事業(戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)) 日本-欧州(超空間制御による機能材料)「Functional Porous cementitious nanocomposites for heat storage in buildings using Phase Change Materials」の助成を受けて実施したものであり、関係各位に深謝の意を表します。また実施にあたり、三木理研工業株式会社には試料提供の面で、日本工業大学の田中章夫氏にはDT-TGAの測定時にそれぞれお力添えを頂きました。ここに深く謝意を表します。

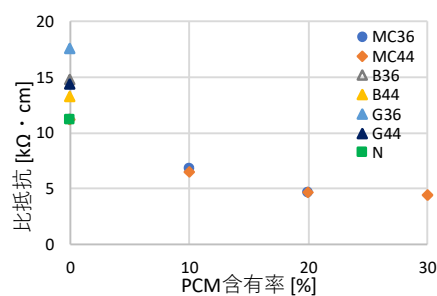


図-14 比抵抗測定結果

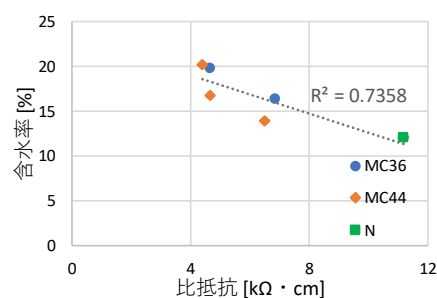


図-15 質量含水率と比抵抗の関係

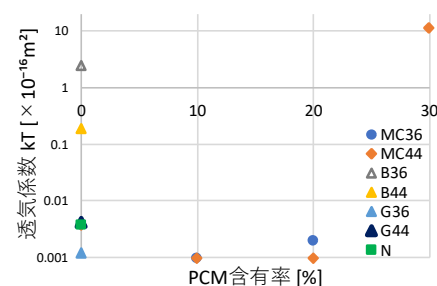


図-16 透気係数の測定値

参考文献

- 1) 佐伯智寛,足永靖信,武田仁,兼松学,土屋直子,猪瀬亮: 外界気象の変動影響を考慮した潜熱蓄熱材の建築利用に関する研究 (その 6)屋外試験体を用いた実証実験,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),2016,pp.151-152,2016.8
- 2) 野島義照,鈴木弘孝: 壁面緑化による夏季の壁面から屋内への熱流および熱流量の軽減効果,日本造園学会誌,journal of the Japanese Institute of Landscape Architecture 67(5),pp.447-452,2004.3
- 3) 佐伯智寛: PCM 建材の熱応答性の評価方法に関する検討,建材試験センター 建材試験情報,Vol.51,pp.10-15,2015.6
- 4) 草間友花,石戸谷裕二: 潜熱蓄熱材(PCM)を適用した内装左官材の基本的熱性能および比熱の定式化,日本建築学会環境系論文集,Vol.81,No.729,pp.931-938,2016.11
- 5) 岸直哉,丸山一平: セメント硬化体の熱伝導率に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.51,No.5,pp.781-786,2009.7