

## 外壁冷却タイル及び通気層を有する壁面工法の熱負荷低減効果の検証

創造理工学専攻 環境都市コース 6164090027-9 西谷 太一  
(指導教員 近本智行)

### 1. はじめに

近年建物に対する熱負荷を軽減するため、有効な技術の開発・普及が求められている。夏期では日射により壁体温度が上昇することで室内への熱負荷となり、冬期では室内から屋外への熱損失が問題であることから、壁面部材、壁面工法において対策が必要であると言える。

その対策となる技術に外壁冷却タイル(図1)がある。外壁冷却タイルはタイル内部に中空層を設け、表面に打水を拡散する特殊釉薬を塗布していることから、建物内外の温熱環境の緩和が期待できる。また、タイルの施工方式が通気層を持つ壁面工法(図2)にすることで、夏期は通気層内の温度差で起こる重力換気による排熱効果、冬期はダンパーで外気の流入出を制御することで、空気層による壁体の保温効果が期待できる。

これら外皮技術を実建物への普及を図るには、設計者が技術導入による建物への熱負荷を算出する必要がある。しかし、一般的に用いられている熱負荷計算では上記の性能を再現することは難しい。

そこで本研究では、部材・実験棟を対象とした実測結果をもとに、外壁冷却タイルと通気層工法による建物への熱負荷<sup>注1)</sup>を算定できるシミュレーションツールの構築を行った。また、既存の工法に加え、より性能向上が図れる壁面工法を提案し、ツールを用いて検証を行った。

### 2. 研究概要

対象となる壁面工法の環境負荷低減効果を算出するために、屋外から室内までの壁体の温度分布と室内への熱負荷を算出することができる、ツールを構築する。

研究フローを図3に示す。これまでの研究成果ではタイルを導入した際の室内温熱環境の解析<sup>文1)</sup>やタイルに吸音効果の付加価値を持たせた際の効果検証<sup>文2)</sup>を行ってきた。本研究では外壁冷却タイルの部材性能を実測、CFD(熱流体解析)で検証、建物規模での実測として、屋外暴露試験棟(図4)を用いて、年間の壁体温度、室内温度の実測を行った。これらの検証結果を物性値、境界条件に用いて、一次元の非定常熱伝導計算で、夏期、冬期の代表日における壁体温度分布と室内への流入出する熱量を算出するツールを構築した。対象とする壁体モデルは屋外暴露試験棟を再現し、そのツールの精度確認として、試験棟の実測で得た、壁体温度と解析値との比較を行った。また、既存の通気層工法に加え、熱負荷低減性能を

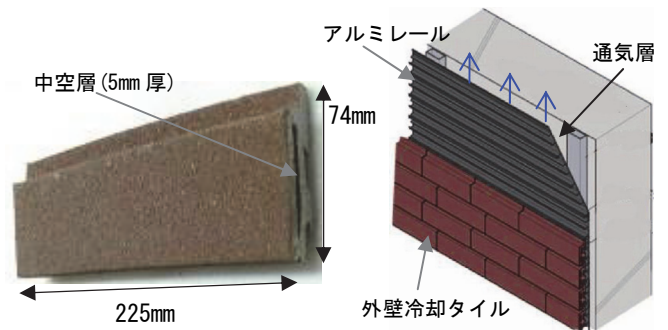


図1 外壁冷却タイル

図2 通気層工法

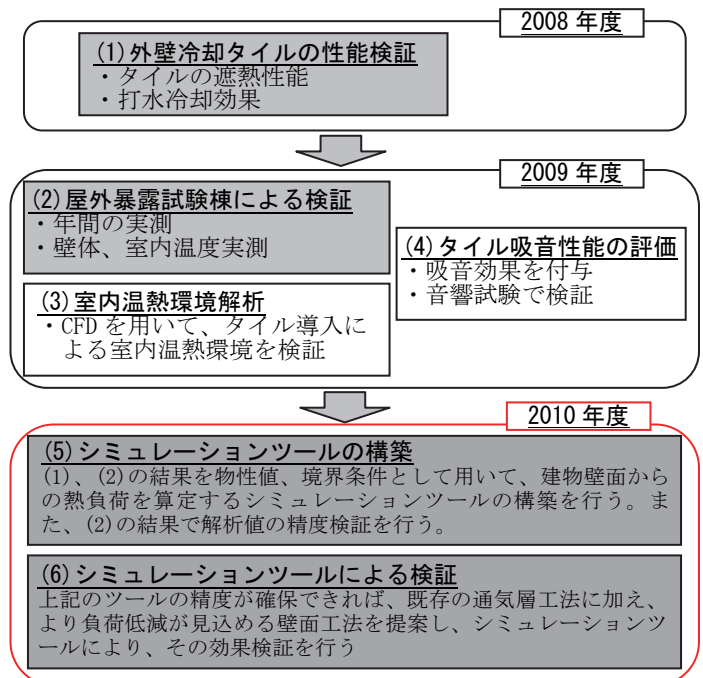


図3 研究フロー



図4 屋外暴露試験棟

表1 実測項目

[1]	各壁面層温度
[2]	試験棟内室温
[3]	外気温度、相対湿度
[4]	屋外風向・風速
[5]	全日日射量

さらに向上させる技術を導入した壁体工法の仕様を提案し、シミュレーションツールで検証を行った。

### 3. 屋外暴露試験棟による建物規模の検証

#### 3.1 実測概要

外壁冷却タイルの性能を評価するために、壁面温度、室内温度などを測定項目（表 1）とした、鉄骨造の屋外暴露試験棟（図 4）を 3 棟設置した。試験棟は鉄骨の骨組みにセメント板を施工し、その外側にアルミレールとタイルを施工した。また、試験棟は各面を東西南北の方位に向けており、窓面は設置しておらず、タイルを全壁面に施工している（北面のみ扉を設置）。以下は夏期と冬期の日射量が十分あり、室内空調を行っていない日を代表日として、試験棟内の自然室温について考察を行った。

#### 3.2 実測ケース

対象となる壁面部材の構成を図 5, 6、表 2 に示す。実測ケースは表 3 に示す。夏期は通気層工法とその壁面に定期的に打水を行ったケース、そして比較対象となるモルタル工法の 3 ケースを行った。冬期は通常通気層工法に通気層の流入出口にダンパーを取り付けた工法について検証を行った。

#### 3.3 実測結果、考察

図 7 に夏期、図 8 に冬期の各ケースの室内温度と外気温度の日変動を示した。

まず、夏期では日射のない夜間では各ケースに大きな差は見られないが、外気温度が上昇することで徐々に差が開き、日没前でその差はピークに達した。モルタル工法と比べ、通気層工法で最大 3.6℃の温度緩和が見られた。さらに打水を行うことで最大 7.5℃の低下が見られ、通気層工法と打水による効果が顕著に表れた。

冬期では日射のある時間帯ではモルタル工法の方が日射の影響を受けやすいため、室温が高くなったが、夜間では通気層工法の室温が高く、夜間の熱損失が緩和されていると言える。特に、ダンパー制御を行った方がその効果が顕著であり、冬期は通気層に外気を取り入れることが、負荷なるとことが確認できた。

### 4. シミュレーションツールの構築

#### 4.1 解析概要

外壁冷却タイルと通気層工法による効果を定量化するため、夏期と冬期の代表日の壁体内温度変化と壁体から室内への熱負荷を算出するために、一次元非定常熱伝導方程式<sup>注2)</sup>を差分法し、陽解法により非定常熱伝導計算を手法として、算出ツールの構築を行った。

#### 4.2 対象壁体工法

##### 4.2.1 解析ケース

解析対象とする壁体工法の組み合わせを、表 4 に示す。壁体モデルは通気層工法（図 5）とモルタル工法（図 6）を再現した。また、熱負荷低減性能をさらに向上させるために実測でも用いた、夏期の「打水」、冬期の「通気層のダンパー制御」、さらに「反射材アルミレール」、「潜熱蓄熱材（Phase Change Material 以降 PCM）」を導入し

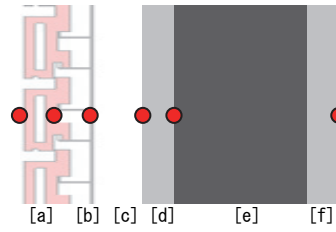


図 5 通気層工法

表 2 壁面部材詳細

[a]	外壁冷却タイル(24mm)
[b]	アルミレール(1.4mm)
[c]	通気層(25mm)
[d]	繊維混入セメント(12mm)
[e]	グラスウール(100mm)
[f]	石膏ボード(12.5mm)
[g]	通常タイル(9mm)

●: 壁面温度測定点

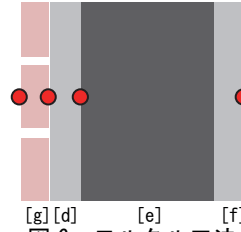


図 6 モルタル工法

表 3 実験ケース

1	夏期	通気層工法
2	夏期	通気層工法 (打水あり)
3	夏期	モルタル工法
4	冬期	通気層工法 (ダンパー)
5	冬期	通気層工法
6	冬期	モルタル工法

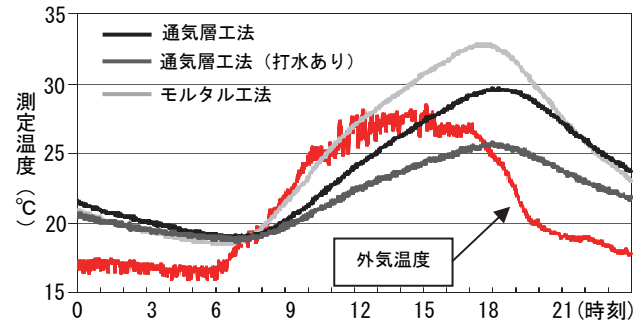


図 7 屋外暴露試験棟-室内温度比較 (夏期)

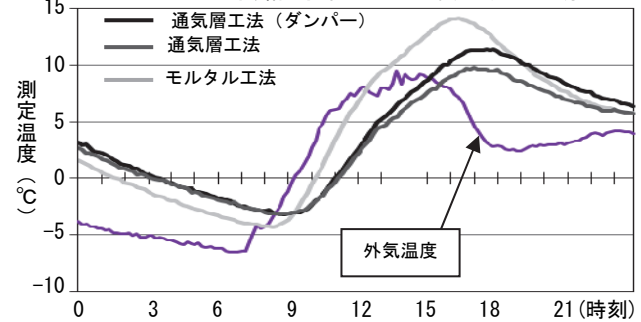


図 8 屋外暴露試験棟-室内温度比較 (冬期)

表 4 解析ケース (以下を夏期・冬期、東西南北の鉛直面で解析)

CASE	使用タイル	壁体工法	性能向上技術
①	通常タイル	モルタル工法	
②			
③			ダンパー制御(冬期のみ)
④	外壁冷却タイル	通気層工法	打水※1 (夏期のみ)
⑤			反射材アルミレール※2
⑥			潜熱蓄熱材導入※2,3

※1 打水是東面 (10, 12 時)、南面 (12, 14 時) 西面 (14, 16 時) で行うように制御する。(北面では実施しない。)

※2 冬期はダンパー制御のケースを行う。

※3 潜熱蓄熱材の解析ケースを以下に示す。

通気層内の屋外側設置モデル: 相変化温度 33, 35℃

通気層内の室内側設置モデル: 相変化温度 20, 25, 33℃

以降、PCM 屋外設置モデル、相変化温度 33℃を「⑥外 33」と表記する

た壁体システムのモデル条件に加えた。以上の各ケースを東西南北の 4 方位の鉛直面で解析を行う。

#### 4.2.2 性能向上技術

「反射材アルミレール」は試験棟で用いている、アルミレールが黒色の素材のため、輻射熱の影響を受けるため、アルミレールを輻射率の低い素材で検討した。

「PCM」は設定温度域で相変化が起きることで、その潜熱量によって蓄熱量を増加させる特徴がある。そのため、通気層内に導入することで、日射熱による壁体内蓄熱量を増加させ、夜間の蓄熱応答遅れによる夏期の排熱効果と冬期の保温効果を向上させることが期待できる。本研究では有効な相変化温度域と通気層内の設置位置について検証しており、その結果を踏まえて、PCMの解析ケースを選定している。また、その予備検証とは違い、通気層内の熱収支(4.4.2で記述)について考慮しているため、より実現に近い解析となっている。

#### 4.3 解析モデル

解析対象とした壁体構成モデルを図9、表5に示す。

#### 4.4 計算モデル

表6に計算に用いた各条件を示す。

##### 4.4.1 外壁冷却タイルの物性値

タイルの物性値は遮熱性能実験で算出した。実験はタイル表面に面状発熱体を用いる伝熱実験<sup>注3)</sup>を行い、その結果から中空層も含めた部材の熱伝導率を求めた。

##### 4.4.2 通気層の熱収支

通気層は排熱による冷却効果が期待できるが、逆に外気温を取り込むことで加熱させる恐れもある。この通気層の熱収支を考慮させるため、通気層に流入してくる外気温の熱量と通気層内温度の熱量の差を排熱量<sup>注5)</sup>として、通気層の熱伝導方程式に与えた。

##### 4.4.3 打水の冷却効果

打水冷却効果は実験で潜熱除去熱量<sup>注6)</sup>を実験で定量的に検証を行った(表7)。その結果、水蒸気圧差(ある空気の飽和水蒸気圧と水蒸気分圧との差)と除去熱量に相関が有意であることが確認できた(図10)。そこで、屋外温度と相対湿度を入力することで、打水による潜熱除去熱量を算出し、壁体への流入熱量にその除去熱量を与えた<sup>注7)</sup>。また、表4に打水の壁面方位別の設定を示す。

##### 4.4.4 潜熱蓄熱材(PCM)

PCMは相変化による蓄熱量の増加を再現するため、本来の比熱に加えて、見かけの比熱<sup>注3)</sup>を用いる。相変化の中心温度を基準とし、その温度から±1Kの温度域で相変化が起こると設定し、PCMの部材温度がその温度域に達すると、図11のように比熱が増減し、蓄熱量を変化させた。PCMの仕様ケースは表4に示す。

#### 4.5 境界条件

境界条件として、室内側の壁表面温度は空調による一定室温を想定し、夏期26℃、冬期22℃に設定した。屋外側は日射量が十分な日を選定し、屋外暴露試験棟の各方位の外壁表面温度の測定値を与えた。

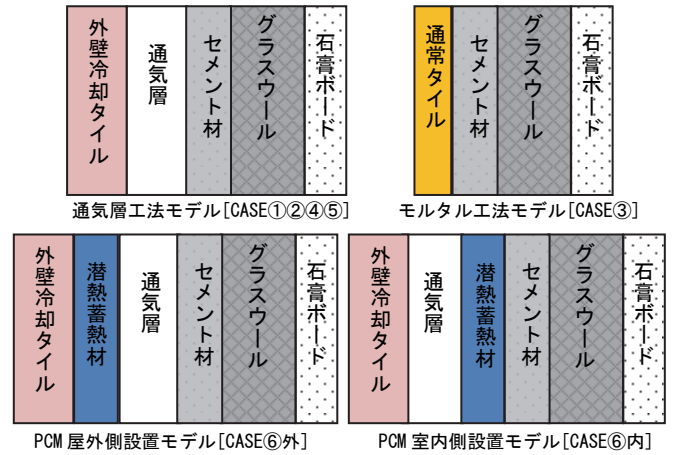


図9 解析モデル

表5 部材条件

材料名	厚み [mm]	メッシュ幅dx [mm]	分割数
外壁冷却タイル	24	1	24
通常タイル	9	1	9
通気層	25	25	1
潜熱蓄熱材	15	1	30
セメント板	12	1	12
グラスウール	100	1	10
石膏ボード	12	1	12

表6 計算条件

部材	熱伝導率 λ [W/m·K]	密度 ρ [kg/m³]	比熱 cp [kJ/kg·K]
外壁冷却タイル	0.37	1032	0.84
通常タイル	1.27	2400	0.84
セメント板	0.21	1100	1.68
グラスウール	0.051	10	0.837
石膏ボード	0.22	750	1.13
潜熱蓄熱材	0.37	860	1.9
潜熱蓄熱材の蓄熱量		100 [kJ/kg]	
通気層熱伝達率 <sup>注4)</sup> [W/m²·K]		CASE①④⑥(夏) 14.3, ②⑥(冬) 10.4 CASE⑤(夏) 10.3, ⑤(冬) 6.4	
計算時間刻み [s]		0.005	
室温 [°C]		夏期: 26.0、冬期: 23.0	

表7 ケース別打水潜熱除去量 [W/m²]

外気温	30°C		
相対湿度	50%RH	60%RH	70%RH
外壁冷却タイル	78.4	67.7	58.0
通常タイル	42.8	41.3	34.2

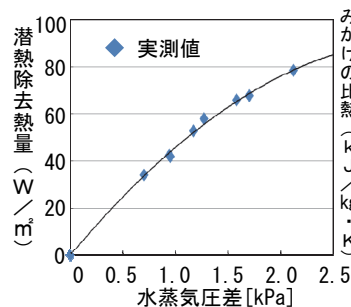


図10 潜熱除去熱量

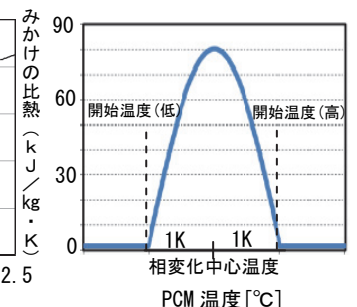


図11 みかけの比熱

#### 4.6 精度検証

シミュレーションツールの精度を確かめるために、CASE1 の算出結果と同一日の同じ壁面仕様の試験棟壁面温度分布を比較した。夏期の西面の結果を図 12 に示す。

夏期の 11, 17, 20 時の 3 時刻で比較する。昼間、夜間に問わず、概ねどの時間帯でも実測結果に沿った、温度変動を示していることから、概ねツールの計算精度が確保できた。

#### 5. シミュレーションツールによる評価

前章でツールの精度の確認ができたことから、各ケースについても計算を行った。

図 13 に夏期の西面、図 14 に冬期の北面における代表日の室内流入熱量の変動を表す。夏期では既存の通気層工法よりも反射材アルミレールを導入することで熱負荷が緩和されている。また、日射のピーク時に打水を行うことで、夜間の蓄熱応答遅れによる室内への流入量が減少していることが分かる。冬期では、通気層のダンパー制御を行うことで、熱損失を抑えている。また、夏期、冬期ともに有効な PCM の温度域を導入することで、熱負荷平準の効果を得られた。

各ケースの負荷となる、日積算熱量を 4 方位の合計値で示す。反射材アルミレールや PCM (室内側・33℃) を導入すると、夏期では既存の工法より熱負荷を半減させる効果があった。逆に、PCM の仕様を間違えると、CASE②の通気層工法に比べ熱負荷が増大する方位があった。これは夜間に蓄熱量が増加することで、放熱現象が停滞したからだと考えられる。冬期は夏期に比べモルタル工法と通気層工法の差が小さかった。また、PCM (室内側・20℃) 導入することで、熱損失を抑えることができ、冬期に最適な PCM の仕様と言える。

#### 6. まとめ

本研究では、部材から建物規模までの性能実験を行い、その結果を用いることで、対象の壁体工法の定量的な効果を算出できるツールの構築を行った。それにより、通気層工法の性能をさらに向上できる工法の検討、評価を行った。今後は建物全体、年間計算を行えるように拡張を行う。また、本研究の結果の実証実験を行っていく。

注 1) 一般的に屋外からの熱負荷は外壁面からの熱取得だけでなく、開口部や隙間風があるが、本研究では外壁面のみを考慮する。

注 2)  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right)$   $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$  a: 温度伝導率 [m<sup>2</sup>/s], λ: 熱伝導率 [W/m・K], c<sub>p</sub>: 比熱 [kJ/kg・K], ρ: 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

注 3) 面状発熱体を用い 40℃の熱をタイル表面に与え、対象物の定常状態時の温度を結果とする。裏面に全ての熱が伝わるように、タイル裏面以外の面にスタイロフォームを貼り付けて断熱させた。

注 4) 通気層内の熱伝達率はユルゲスの式により求めた。

注 5) 通気層内排熱量  $\Delta q [W/m^2] = C_p \rho \times \Delta \theta \times A \times v / L_h / L_d$   
 空気容積比熱: C<sub>p</sub> ρ [J/m<sup>3</sup>・K], 外気と通気層の温度差: Δθ [K],  
 通気層の開口部面積 A [m<sup>2</sup>], 通気層高さ: L<sub>h</sub> [m], 胴縁間隔: L<sub>d</sub> [m]  
 通気層内風速: v [m/s] (風速を昼間は 1.0、夜間は 0.5 と定めた。)

注 6) 測定した蒸発水分重量を水の蒸発熱 2.5kJ/g より求めた。

注 7) 打水蒸散の制御として、本解析ではタイル表面の最大湿潤水分重量 200g/m<sup>2</sup> から一回の打水での最大積算潜熱除去熱量を 500kJ/m<sup>2</sup> とし、積算値がそれを超えると冷却熱量を 0 とした。

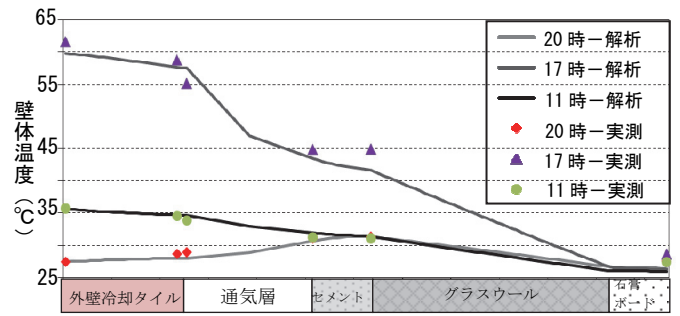


図 12 解析・実測壁体温度分布比較

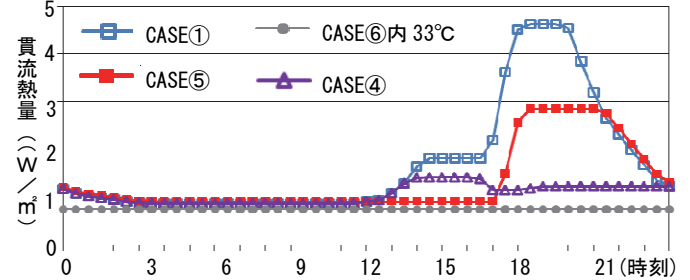


図 13 室内流入熱量の変動 (夏期・西面)

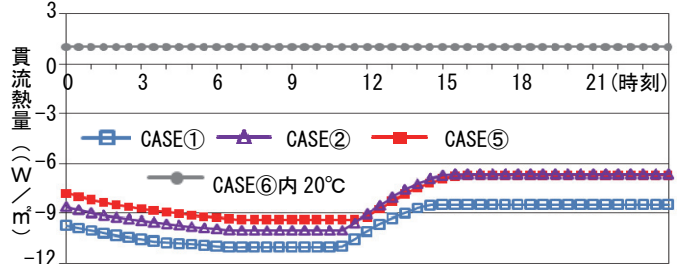


図 14 室内流入熱量の変動 (冬期・北面)

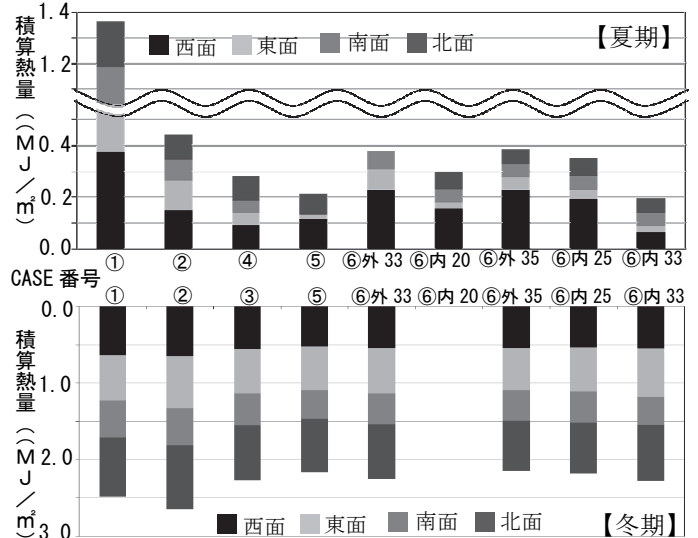


図 15 各ケースの日積算熱負荷 (上: 夏期、下: 冬期)

#### 参考文献

- 文 1) 西谷、近本：信楽焼タイルの製造技術による外壁冷却タイルの開発 (その 6), 空気の調和・衛生工学会学術講演論文集 pp. 281-284, 2010 年 9 月
- 文 2) 白尾、近本、西谷：信楽焼タイルの製造技術による外壁冷却タイルの開発 (その 5), 日本建築学会学術講演論文集 pp. 427-428, 2010 年 9 月
- 文 3) 北野、相良：躯体蓄熱への潜熱蓄熱材適応可能性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 pp. 1015-1016, 2000 年 9 月