

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月6日現在

機関番号：24302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560615

研究課題名（和文）蓄熱・調湿性能を備えた高機能パッシブ住宅の開発と省エネルギー効果に関する研究

研究課題名（英文）Development of High Energy Efficiency Passive House Complete with Thermal Storage and Moisture Sorption and Desorption Capability

研究代表者

尾崎 明仁（OZAKI AKIHITO）

京都府立大学・大学院生命環境科学研究科・教授

研究者番号：90221853

研究成果の概要（和文）：本研究では、実験室実験と数値計算により、蓄熱による恒温性と吸放湿による調湿性を併せ持つPCM調湿材を開発し、内装材として使用した場合に室内熱環境へ及ぼす影響について検討した。その結果、①PCM調湿材は恒温性・恒湿性に優れ、吸放湿性能は調湿材と同等であること、②室内の恒温性・恒湿性は躯体の断熱性能にも依存し、熱損失係数の小さい方が優れること、③恒温性・恒湿性の向上には、内装材の温湿度特性（特に熱容量と水分容量）のみならず空間全体の性能改善が必要であること、などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The phase-change characteristic of PCM and the influence of phase-change thermal storage and moisture sorption and desorption capability on indoor hygrothermal environment were examined with the aim of effective utilization of solar heat by model experiments and numerical simulation. The main results obtained are as follows. The construction area of PCM, the temperature difference between melting point of PCM and heating preset temperature, the heat loss coefficient of buildings, the constructed amount of PCM have a profound effect on the hygrothermal environment and then those contributory factors are crucially important in the development of PCM building materials and solar heat utilization houses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築環境・設備

キーワード：建築熱環境，蓄熱，調湿，パッシブ住宅，省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の住宅は、室内熱環境の改善および暖冷房負荷の低減を目的として断熱気密化されている。「住宅の省エネルギー基準」および「住宅性能表示制度」の施行により断熱気密はますます強化される傾向にあり、それに付随して住宅性能が表示され始めている。

(2) 住宅性能は「仕様基準」あるいは「熱損失係数」によることが多く、換気（通風）、日射熱取得、躯体蓄熱、内部発熱などの伝熱現象は反映していない。壁体の吸放湿や熱放射など、快適性に大きく影響する要因も無視されている。このことは、蓄熱や吸放湿による室内温湿度の自然制御効果を喪失させて

いる。

(3) 断熱気密化が原因の湿害（結露・カビ、暖房時の過乾燥など）が危惧されるようになり、躯体の恒温性および調湿性の重要性が見直されつつある。

2. 研究の目的

(1) 相変化熱を利用して蓄熱するとともに、優れた吸放湿特性も有する PCM 調湿材を開発する。

(2) 実験室実験により、PCM 調湿材の材料特性および室内熱環境への影響について検討する。

(3) 熱・水分複合移動現象の詳細な非定常計算により、室内環境の恒温性・調湿性について評価し、PCM 調湿材の効果を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) PCM 調湿材の開発

PCM（潜熱蓄熱材：Phase Change Material）とは、物質が固体から液体、あるいは液体から固体へ相変化する際の潜熱を利用した蓄熱材である。固相 PCM の温度を上昇させると、融点に達して室内から融解熱を吸収する。逆に、液相 PCM の温度を低下させると、凝固点に達して室内に凝固熱を放出する特性を持つ。本研究では、PCM 剤としてパラフィンを使用する。

調湿材は多孔質構造を有しており、周囲湿度が上昇すると周囲空間の水蒸気をその微細孔内に吸着・蓄積し、周囲湿度が低下すると微細孔内の吸着水を脱着・放湿して、室内の相対湿度を一定に保つ特性を有する。なお、調湿材の性能（調湿の範囲、吸放湿速度、水分量）は、材内部の細孔径と細孔容積により変化する。

本研究では、無機質調湿材料を基材として、裏面に PCM を貼り合せた床・壁・天井の内装材を開発する。

(2) 模型実験による PCM 調湿材の効果解析

①気密条件下における温度励振応答

図 1 に模型実験の概要を示す。実験に使用した模型箱は内法 30×30×30cm のアルミ製で、気密および箱内外の断湿が保持できる構造である。床部位はフォームポリスチレン 10cm（アルミ箔仕上げ）で断熱されている。模型箱を環境試験室の中に設置して、環境試験室の温度を変動させることで模型箱に温度励振を与える。石膏ボードと PCM 調湿ボードの 2 種類を模型箱の床に設置した。試験体の寸法は 10cm 角で、側面と裏面は断湿されている。図 2 に示す 24 時間の sin 周期（22.5℃ を中心とした振幅 15℃）で環境試験室の温度を変動させ、試験体の吸放湿にともなう模型箱内の温湿度応答が周期的定常に達するまで温度励振を繰り返した（4 サイクル）。模型

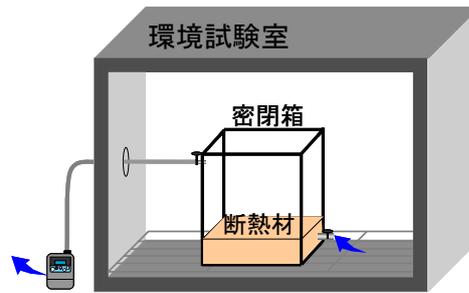


図 1 実験概要図

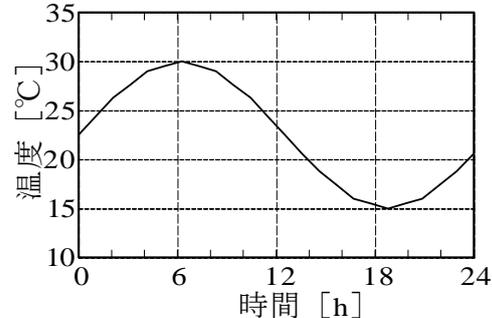


図 2 環境試験室の温度条件

表 1 調湿材の物性値

厚さ	[mm]	6
熱伝導率	[W/(m·K)]	0.077
比熱	[J/(kg·K)]	1067
比重	[kg/m³]	600
湿気伝導率	[kg/(m·s·Pa)]	2.24E-11
水分容量	[kg/m³(J/kg)]	3.91E-01

表 2 PCM の物性値

融点	[°C]	17.6	
凝固点	[°C]	23.7	
比熱	固相・液相	[J/(kg·K)]	700
	相変化熱	[J/(kg·K)]	121500
比重	固相・液相	[kg/m³]	420
容積含有量			0.548

表 3 換気条件下における温湿度励振

恒温恒湿機内		模型箱内		
温度	湿度	温度	湿度	換気
30°C→15°C→30°C*	80%→32%→80%*	成り行き		0.5 回/h

*24 時間サイクルで繰り返す

箱を温度 22.5℃、相対湿度 55%一定の環境下で養生し、内部温湿度が養生条件で安定した後実験を開始した。表 1、2 に実験に使用した調湿材と PCM の物性値を示す。

②換気条件下における温湿度励振応答

模型箱を換気しながら、表 3 に示す条件で環境試験室の温湿度をステップ変化させた。換気回数は常時 0.5 回/h、温湿度の励振範囲はそれぞれ 30℃～15℃と 80%～32%である（絶対湿度は 8.3g/kg' 一定）。本実験では、模型箱の外周も 38mm 厚のフェノールフォームで断熱している。試験体の寸法は 25cm 角で、側面と裏面は断湿している。模型箱の温湿度変化は主に換気に左右され、周期的定常に達

するまでに時間が掛かるため、7サイクル繰り返し実験した。

(3) 数値シミュレーションによる恒温・恒湿性能の評価

前節に示す模型実験を対象として、数値シミュレーションの精度、および調湿材と PCM 調湿材が恒温性と恒湿性に及ぼす影響について検討する。数値シミュレーションには THERB (Simulation Software of the Hygrothermal Environment of the Residential Buildings) を使用した。THERB は、建物入力モデルに応じて、空間を居室(小屋裏、床下、階間懐、階段室を含む)あるいは空気層(並行平板に挟まれたスペース)として任意に分割できるマルチゾーンモデルで、建物全体の熱・水分・空気の連成計算が可能である。THERB には、1)対流による熱・水分伝達の時変性、2)無次元整理式を用いた部位ごとの熱・水分伝達率(自然・強制対流)の計算、3)内外表面における厳密な日照・日影部位の幾何学計算、4)Multi-layer window model による窓面透過日射の計算、5)室内表面における透過日射の多重反射、6)放射熱伝達の非線形性、7)室内表面間の長波放射熱授受、8)Network air flow model による自然・強制換気の計算、などの特徴がある。なお、THERB は熱・水分複合移動モデルとして「P-model」を使用している。P-model はエネルギーと水分の保存則から成る非平衡熱力学モデルであり、水分流の駆動力として外力などの影響(熱力学的な応力ポテンシャル)を考慮した熱力学エネルギー(水分ポテンシャル)を用いることに特徴がある。

調湿材の性能評価(以下、計算 a と称す)と、PCM 調湿材の性能評価(以下、計算 b と称す)を行う。計算 a では、材料面積、熱損失係数(断熱性能および気密性能)を変更した。比較対象材として石膏ボード、パーライト、合板を用いた。計算 b では、材料面積、蓄熱容量(PCM の厚さ)、熱損失係数(断熱性能)を変更した。比較材料は、調湿材と石膏ボードである。表 4 と表 5 に計算条件を示す。

なお、恒温性と恒湿性の評価には模型箱の温度と湿度の日較差を外部温湿度の日較差で除した値(ただし、湿度には平衡含水条件の指標となる不飽和水分ポテンシャルを用いる)を使用する。恒温性評価の値を HSL (Heat Storage Level)、恒湿性評価の値を SDL (Sorption and Desorption Level と称す。HSL および SDL は、数値が小さいほど恒温・恒湿性能に優れることを示す。

4. 研究成果

(1) PCM 調湿材の開発

無機質調湿材料を基材として、裏面に PCM (フィルムでラッピングしたもの)を貼り合

表 4 計算①の条件

励振条件	使用面積 [m ²]	容積比 [%]	断熱材 [mm]	換気量 [回/h]	材料
30°C 32% ↑ ↓ 15°C 80%	0.09	3.33	①30 ②60 ③90	①0.25 ②0.5 ③1.0	調湿(6mm) 石膏(13mm) パーライト(12mm) 合板(12mm)
	0.01	0.37	60	0.5	
	0.03	1.11			
	0.09	3.33			
	0.18	6.66			
	0.36	13.33			
0.54	20.00				

表 5 計算②の条件

励振条件	使用面積 [m ²]	容積比 [%]	PCM厚 [mm]	蓄熱容量 [kJ/m ³]	断熱材 [mm]	換気量 [回/h]	材料
30°C 32% ↑ ↓ 15°C 80%	0.01	0.37	3	-	60	0.5	PCM調湿材
	0.03	1.11		-			
	0.09	3.33		-			
	0.18	6.66		-			
	0.36	13.33		-			
	0.54	20.00		-			
0.36	13.33	3	77.0	①30 ②60 ③90			
		6	102.6				
		9	128.2				
		12	153.8				
		3	-				

水分容量 [kg/m³(J/kg)] 調湿材 : 3.912 × 10⁻¹ 石膏ボード : 2.235 × 10⁻³
 パーライト : 1.775 × 10⁻³ 合板 : 2.200 × 10⁻⁴
 熱容量 [J/(kg·K)] 調湿材 : 1067.0 石膏ボード : 870.0
 パーライト : 870.0 合板 : 1880.0

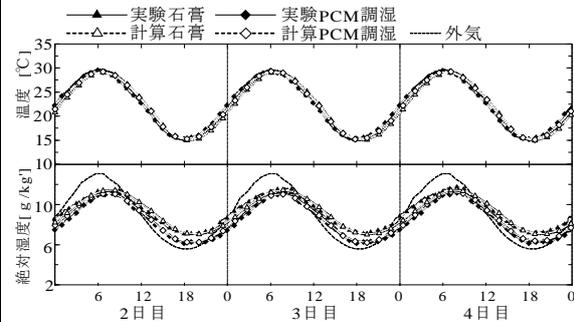


図 3 気密条件下の実験結果と計算結果

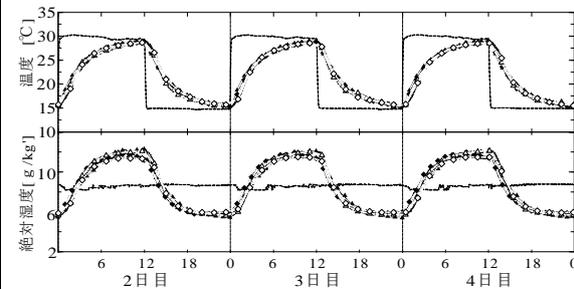


図 4 換気条件下の実験結果と計算結果

せた PCM 調湿材を開発した。建築部位に応じて無機質調湿材料を変更することで、床・壁・天井に適した PCM 調湿材を製造できる。

(2) 模型実験による PCM 調湿材の効果解析

図 3, 4 に、気密条件および換気条件における模型箱内の空気温湿度変化を示す(図中には、数値計算の結果も併記)。空気温度には、試験材料(石膏と PCM 調湿)による差異はほとんどみられない。石膏と PCM 調湿の単位面積あたりの熱容量には大きな違いがあることから、この理由として、気積に対する蓄熱面積(あるいは蓄熱容量)が小さいこと

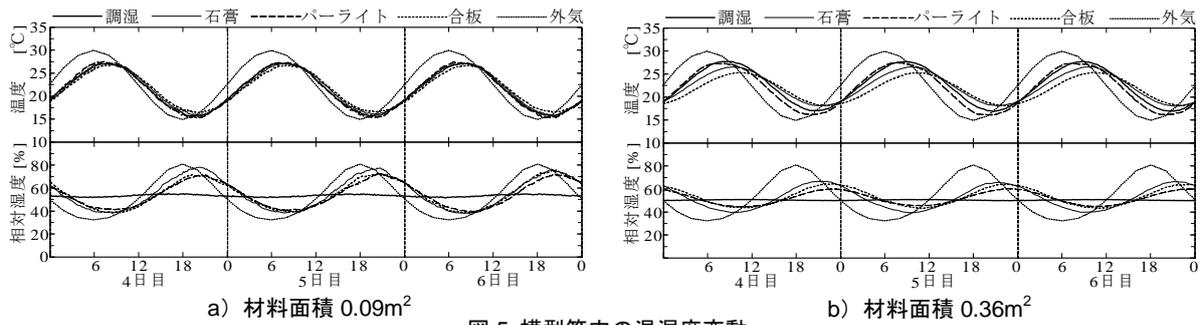


図5 模型箱内の温湿度変動

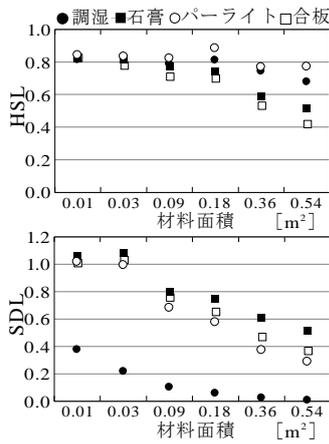


図6 HSL および SDL と材料面積

が考えられる（蓄熱容量による影響については数値計算により検討する）。一方、絶対湿度には明らかな違いが見られ、PCM 調湿の方が石膏に比べて変動幅が大きく吸放湿性能に優れることがわかる。

(3) 数値シミュレーションによる恒温・恒湿性能の評価

模型実験に対する計算結果と実験結果を図3と図4に示す。気密条件および換気条件のいずれの実験においても両者は温湿度ともによく一致しており、数値計算は高い精度で吸放熱および吸放湿に関わる熱・水分複合移動現象を再現している。

②調湿材の性能評価

図5に材料面積を0.09m²および0.36m²とした場合の模型箱内の空気温湿度の経時変化を示す。いずれも模型箱周囲の断熱厚みは60mm、換気回数は0.5回/hである。材料面積を0.09m²とした場合、石膏、パーライト、合板は湿度の日較差が大きく、約35~40%にもなるのに対して、調湿材の日較差は約4%である。これは材料面積0.36m²の石膏、パーライト、合板の湿度の日較差よりも小さく、調湿材は使用面積が小さくても、他の材料よりも恒湿性に優れることが分かる。図6にHSLおよびSDLと材料面積の相関を示す。HSLは材料面積0.36m²以上にした場合に、またSDLは材料面積0.09m²以上にした場合に値が小

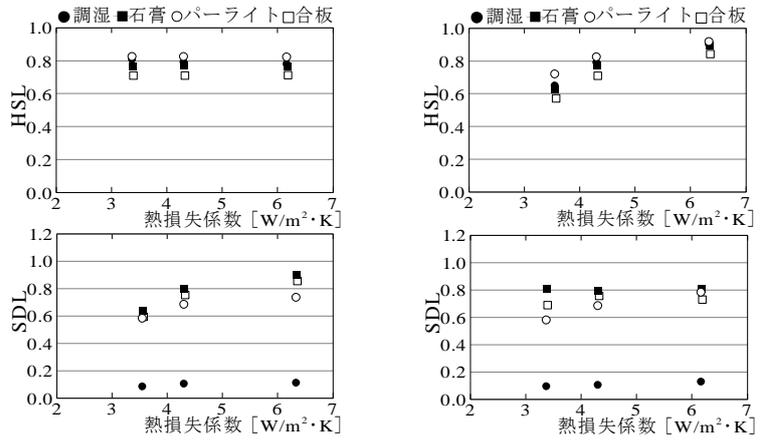


図7 HSL および SDL と熱損失係数

く、恒温性・恒湿性の効果が見られる。

図7はHSLおよびSDLと熱損失係数の相関である。a)は断熱性能（断熱材厚さ）を一定にして、気密性能（換気回数）を変更させた場合、b)は気密性能を一定にして、断熱性能を変更させた場合の結果である。a)では、熱損失係数が小さくなる（気密性能が増す）につれてSDLが小さくなる傾向がある。しかし、HSLはほぼ一定であり、気密性が恒温性に与える影響は小さいといえる。b)では、熱損失係数が小さくなる（断熱性能が増す）につれてHSLは小さくなるが、SDLはa)に比べて、変化が小さい。したがって、恒温性の確保には断熱性能、恒湿性の維持には気密性能を高めることが必要である。また、図6, 7のいずれにおいても調湿材のSDLは、他の材料と比較して小さな値を示しており、恒湿性に優れることが分かる。

③PCM 調湿材の性能評価

図8に材料面積を0.09m²および0.36m²とした場合の模型箱内の空気温湿度の経時変化を示す。いずれも模型箱周囲の断熱厚みは60mm、換気回数は0.5回/hである。材料面積0.09m²の場合、温度は実験結果と同様にPCM調湿、調湿、石膏で差異はほとんど見られない。これは、気積に対する蓄熱面積が小さいためと考えられる。相対湿度の日較差はPCM調湿材と調湿材はほぼ等しく、PCM調湿材は調湿材に劣らない恒湿性を有することが分

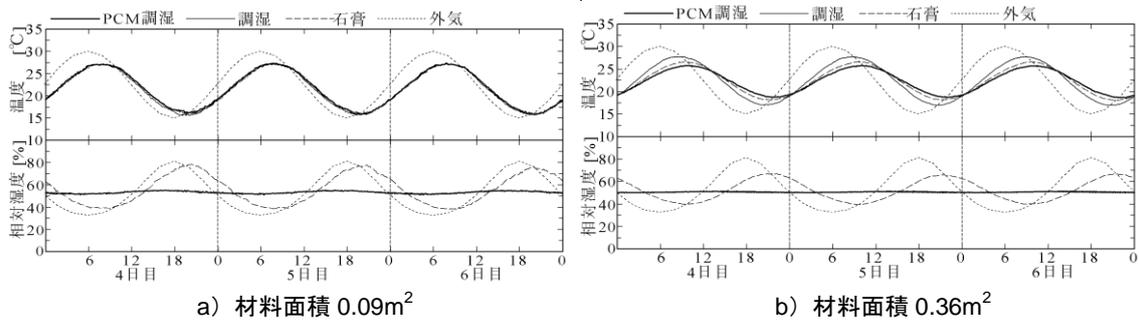


図 8 模型箱内の温湿度変化

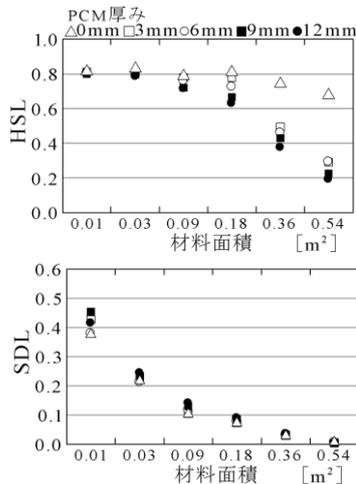


図 9 HSL および SDL と材料面積の相関

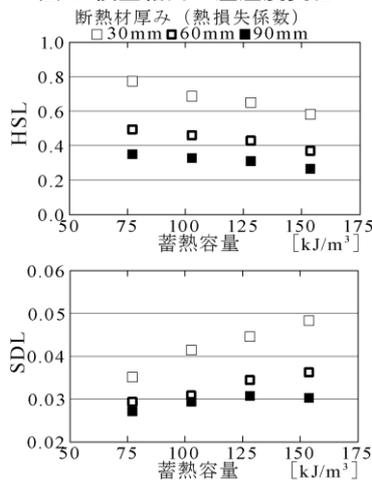


図 10 HSL および SDL と蓄熱容量の相関

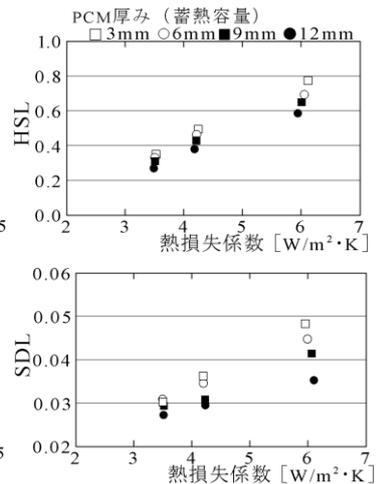


図 11 HSL および SDL と熱損失係数の相関

かる。材料面積 0.36m^2 の場合は、温度に明らかな差異が見られる。PCM 調湿材の温度の日較差は小さく、恒温性に優れることが分かる。

図 9 に PCM 調湿材の HSL および SDL と材料面積の相関を示す。図中の 0mm は PCM を使用していない調湿材である。PCM の有無により、HSL に大きな違いが見られる。特に、 0.36m^2 以上使用することで、PCM の吸放熱により、恒温性が発揮されている。

図 10, 11 に、PCM 調湿材の材料面積を 0.36m^2 で一定とし、PCM 厚を $3\text{mm}\sim 12\text{mm}$ に変更した場合、およびその条件で模型箱の断熱性能（熱損失係数）を変更した場合の HSL と SDL を示す。HSL は蓄熱容量が大きくなるにつれて、また熱損失係数が小さくなる（断熱性能が増す）につれて減少する。一方、SDL は熱損失係数が小さくなると減少するが、蓄熱容量が増加すると僅かではあるが大きくなる傾向がある。恒温性と恒湿性には、内装材の熱容量と水分容量および躯体の断熱性能が相互に影響するため、これらの性能を向上させるには、材料特性のみならず空間全体の性能を改善する必要がある。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 10 件）

① 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 林 禎

彦, 石黒成紀: 潜熱蓄熱内装建材による暖房負荷の削減効果に関する研究—模型箱実験・試験家屋実験および数値シミュレーションによる検討, 日本建築学会環境系論文集, 査読有, 第 77 巻, 第 678 号, 2012 年 8 月 (掲載予定)

- ② Lee M., Ozaki A.: Prediction of Sensory Index Based on Hygrothermal Balance of Human Body in Combination with Heat and Moisture Transfer and Airflow of Whole Buildings, The 5th International Building Physics Conference, 査読有, 2012, 649-655
- ③ Sato Y., Ozaki A., Nakamura T., Hayashi Y., Ishiguro S.: Development and Performance evaluation of Interior Material Fully-Featured Latent Heat Storage Designed at Energy Conservation, The 5th International Building Physics Conference, 査読有, 2012, 697-703
- ④ Ozaki A., Lee M., Kuma Y.: Numerical Simulation on Hygrothermal Environment of Whole Buildings Taking into Account Complete HAM Features, The 12th International Building Performance Simulation Association Conference, 査読有, 2011, 2156-2163
- ⑤ Lee M., Ozaki A.: Numerical Simulation on Hygrothermal Environment of Whole Buildings Based on Detailed Building

Physics on Heat and Moisture Transfer and Airflow, The 7th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, 査読有, Vol. IV, 2011, 1128-1134

- ⑥ 尾崎明仁, 李 明香, 松田千怜, 鈴木香奈子: 事務所ビルの熱負荷シミュレーション—建築物理の数理モデル化に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読有, D-2, 2010, 1277-1280
- ⑦ Ozaki A., Satou Y., Lee M, Matsuda C.: The Effect of PCM Interior Finishing Material with Moisture Sorption and Desorption Characteristics on Hygrothermal Control of Rooms, The 12th International Building Performance Simulation Association Conference, 査読有, 2009, 1822-1829
- ⑧ Nakano S., Ozaki A., Watanabe T.: Efficiency of Solar Radiation on Heating Energy Conservation of Residential Buildings, The 12th International Building Performance Simulation Association Conference, 査読有, 2009, 2085-2091

[学会発表] (計53件)

- ① 坂東 薫, 尾崎明仁, 佐藤友紀, 李 明香: PCM を使用したハイブリッド床蓄熱暖房システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 第41回, 2012, 279-282, 大阪
- ② 重森康太郎, 尾崎明仁, 鈴木香奈子, 野々口義人: 太陽光を利用した Smart EcoEnergy House に関する研究, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 第41回, 2012, 223-226, 大阪
- ③ 李 明香, 尾崎明仁: 熱・水分・空気複合移動を考慮した建築全体の温湿度環境解析—その2 建築系と人体系の連成シミュレーション, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 第41回, 2012, 47-50, 大阪
- ④ 中村哲己, 尾崎明仁, 佐藤友紀, 石黒成紀: 潜熱蓄熱建材の効果に関する研究—その2 模型実験による恒温性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2011, 489-490, 東京
- ⑤ 石黒成紀, 尾崎明仁, 佐藤友紀, 中村哲己: 潜熱蓄熱建材の効果に関する研究—その3 屋外実験棟における暖房負荷削減効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2011, 491-492, 東京
- ⑥ 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 石黒成紀: 潜熱蓄熱建材の効果に関する研究—その4 数値計算による暖房負荷削減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2011, 493-494, 東京
- ⑦ 隈 裕子, 尾崎明仁, 李 明香: 熱・水分・空気連成を考慮した熱環境解析—伝熱モ

デルの違いが計算精度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2011, 353-354, 東京

- ⑧ 樹山竜太, 尾崎明仁, 李 明香: 躯体の吸放湿を考慮した建築全体の温湿度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2011, 131-132, 東京
- ⑨ 佐藤友紀, 尾崎明仁, 李 明香, 松田千怜: PCM 調湿建材の開発と性能評価, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第49号・環境系, 2010, 261-264, 大阪
- ⑩ 佐藤友紀, 尾崎明仁, 中村哲己, 李 明香, 松田千怜: 潜熱蓄熱調湿建材の効果に関する研究—その1 模型実験と数値計算による恒温恒湿性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2010, 279-280, 富山
- ⑪ 李 明香, 尾崎明仁, 松田千怜, 鈴木香奈子: 熱・水分・空気移動の連成を考慮した建築熱環境解析ソフトの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2010, 293-294, 富山
- ⑫ 中野誠司, 尾崎明仁, 渡邊俊行, 赤司泰義, 松田千怜: 自然エネルギーを利用した戸建住宅の暖冷房負荷削減手法の評価—その2 自然風利用による冷房負荷削減効果について, 築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2010, 59-60, 富山
- ⑬ 中野誠司, 尾崎明仁, 渡邊俊行: 自然エネルギーを利用した戸建住宅の暖冷房負荷削減手法の評価—その1 日射熱利用による暖房負荷削減効果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2009, 439-440, 仙台
- ⑭ 尾崎明仁, 李 明香, 松田千怜: 潜熱蓄熱・調湿建材の開発と性能評価, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第48号・環境系, 2009, 277-280, 大阪

[その他]

ホームページ等

<http://www.kpu-ed.jp/html/staff.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 明仁 (OZAKI AKIHITO)

京都府立大学・大学院生命環境科学研究科・教授

研究者番号: 90221853

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし