

機関番号：14101  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360260  
 研究課題名（和文）環境自律型バイオミメティック（生物模擬）建築の開発と評価に関する研究  
 研究課題名（英文）DEVELOPMENT AND EVALUATION OF ENVIRONMENTALLY AUTONOMOUS BIOMIMETIC-BUILDING  
 研究代表者  
 石川 幸雄（ISHIKAWA YUKIO）  
 三重大学・大学院工学研究科・特任教授  
 研究者番号：60378312

## 研究成果の概要（和文）：

人体・生物が持つ環境生理機能を建築に模擬応用する「バイオミメティック（生物模擬）建築」を実現するために必要となる要素技術、複合技術、評価法を構築し、その環境・エネルギー性能を評価した。ここでは、有望機能である「発汗機能」、「植物導管揚水機能」、「衣替え機能」の他、「自律調光窓」、「日射制御外壁」を建築要素技術として構築し、実験と解析に基づき性能を確認評価するとともに、人体エクセルギー消費の考え方に基づく室内環境評価結果を示した。

## 研究成果の概要（英文）：

To realize an environmentally autonomous “Biomimetic-Building”, which has the environment physiological functions of human and other organisms, the elemental and composite technologies and evaluation method were constructed. As the promising biomimetic functions, “Perspiration function”, “Changing clothes function” and “Vessel capillary tube function” as well as “Thermo-chromic window” and “Sun control wall” were taken up and experimentally and analytically examined. The energy performance of the building elements of the “Biomimetic-Building” and the indoor environment based on the idea of exergy consumption of the human body were evaluated.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2009年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：建築環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：バイオミメティクス、汗かき建物、衣替え建築、自律調光窓、日射制御外壁、エクセルギー、植物導管揚水、ACO (Ant Colony Optimization)

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 分野の一般的背景：化石燃料や有用天然資源の枯渇、地球環境負荷の増加、建築環境への高度な要求（快適、健康、アメニティー）、原子力施設問題による電力供給の不安定化と電力需要の平滑化、さらに都市のヒートアイランド化などの観点から、建築物お

ては内部環境の高品質化を維持した新たな省エネルギー（CO<sub>2</sub>排出抑制）技術が望まれている。これらのニーズに対応して、各種の建築省エネルギー技術が普及しつつあるが、その効果も概ね頭打ちとなり、さらなる省エネルギーを図るためには、新たな発想に基づく技術イノベーションが必要であ

た。このような背景において、次世代の省エネルギー建築実現の観点から、人体・生物が持つホメオスタシスに基づくバイオミメティクス（生物模倣）の概念の建築における環境共生と自律的環境制御への適用を着想した。（２）研究の学術的背景：建築環境に直接、バイオミメティクスを応用・展開した研究例は国内外ともに見当たらない。関連研究として、自律的環境制御研究として、井上は高分子材を用いて温度によって日射遮蔽・調光する自律応答型調光ガラス窓の開発研究を行い、性能実測結果を示している。さらに、生物の生態構築物における環境を扱った研究として、A.luesterによるアリヅカの環境実測例があるが、これは生物学者の立場での温度とCO<sub>2</sub>濃度の測定結果であり、機構に対する物理的解明や理論解析等を行われていない。また環境評価として、宿谷はヒトの「感覚－運動系」と自然共生建築との関係において脳と建築環境の「快」を考察している。以上の通り、要素技術等の研究例は散見されるが、バイオミメティクスの概念の総合的な建築環境分野等への適用例は見当たらず、当グループの研究が国際的にも先行していた。

## 2. 研究の目的

本研究は、人体・生物が持つ環境生理機能を建築に模倣応用する事により、次世代の環境自律型省エネルギー建築としての「バイオミメティック（生物模倣）建築」を実現するために必要となる要素技術、複合技術、評価法を構築し、性能を評価する。

## 3. 研究の方法

本研究では環境自律性に着目して、まず人体・生物の環境生理機能を広範に調査し、「環境自律型バイオミメティック建築」を構成する建築要素として、有望機能である「発汗機能」、「衣替え・起毛機能」、「植物導管揚水機能」等を工学的機構としてモデル化すると共に自律調光（サーモクロミック）窓、日射制御外壁を建築要素技術として構築し、その環境・エネルギー性能を実験と解析により評価する。さらに、これら機能要素の複合化と最適化の手法を検討し、複合性能を解析的に予測評価するとともに、バイオミメティック型建築の内部環境を人体エクセルギー消費との関連において評価する。

## 4. 研究成果

（１）**発汗機能**：感温性ハイドロゲルを用いて不燃性を強化した自律発汗屋根を構築し、これを敷設した実験小屋を用いて、その自然冷房効果を実験と解析により評価した。実験では構築した２種類の自律発汗屋根（①一体成型屋根、②マット+タイル屋根）を用いた。①一体成型屋根は三層構造〔最外層（第一層）

に不織布（表面保護）、第二層にロックウールと融着繊維（紫外線透過防止）、第三層にロックウールと融着繊維とハイドロゲル（感温吸排水）を配置〕、②マット+タイル屋根はハイドロゲルマットの上に毛細管揚水力の大きいタイル（I社タイル・D社タイル）を配置、したものであり、いずれもこれらを屋根の上に敷設する。実験小屋（一対）の一方の屋根（1.645m<sup>2</sup>、勾配5.9°南下り）に自律発汗屋根を敷設し、同一気象条件の下で、両実験小屋（発汗実験小屋と非発汗実験小屋）の温熱環境を比較した。実験場所：期日は、三重県津市：2008、2009、2010年夏季で、①一体成型屋根では感温点25～30℃のハイドロゲルを、②マット+タイル屋根では20・25・30・35℃のハイドロゲルを重量比で1：3：5：4の割合で配合したものをを用いた。実験結果として、①一体成型屋根では、発汗による各温度低下量は最大値で、内部空気温度（2.4～3.0℃）、内部グローブ温度（2.3～2.9℃）、屋根アルミ板表面温度（23.8～24.9℃）、天井断熱材下表面温度（6.9～8.5℃）であった。また、屋根部分の各温度を解析により予測し、実験結果との整合性を確認した。②マット+タイル屋根では、Iタイル・Dタイルの順に、内部空気温度（4.6、4.5℃）、グローブ温度（4.5、4.4℃）、屋根折板上表面温度（19.4、20.0℃）、天井断熱材下表面温度（11.2、11.0℃）であり、本構成による両屋根とも発汗蒸発冷却による自然冷房効果が大きいことが示された。

（２）**衣替え機能**：季節によって外壁表面の熱特性が自律的に変化する建築壁体の熱効果を実験と解析により評価した。コンクリート壁を想定し、年間を通して外壁表面の熱特性が一定（日射吸収率0.85、長波長放射率0.69）である既存タイプ試験体と４種類の衣替えタイプ試験体（既存タイプ試験体の外気側表面に衣替え方式を変えた衣替えパネルを設置したもの）の計５種類の試験体を作成し、両タイプ試験体の熱的性能を比較検討した。衣替えタイプ試験体は、熱変形金属のトルクにより衣替えパネルが自律回転し、夏季には選択放射面（日射吸収率0.15、長波長放射率0.89）が、冬季には選択吸収面（日射吸収率0.94、長波長放射率0.53）が外気側を向く。タイプ1は細長いアルミ板スラットの表と裏にそれぞれ選択放射材と選択吸収材を塗装し、スラットを外壁に対して平行に等間隔で垂直（地面に対して）に並べて設置したものの、タイプ2は冬季に各アルミ板スラットを外壁に対して垂直に設置し、上面に選択放射材を塗装することにより表面での反射日射を外壁面で吸収しやすい構造としたもの（夏季はタイプ1と同様）、タイプ3はタイプ2と同様であるが外壁表面を選択吸収面としたもの、タイプ4はタイプ1と同様であるが、これを立面的に一枚のアルミ板とみな

し、この表と裏に選択放射材と選択吸収材を塗装したものである。実験場所・期間は三重県津市・2009~2010年の夏季、冬季(各季でパネルは固定)である。実験結果から、夏季には各衣替えタイプ試験体の温度は既存タイプ試験体より最大で約26~29℃低下し、衣替えの効果が大きいことを確認した。冬季には既存タイプ試験体の温度に比べて衣替えタイプ4では約10℃高くなったが、タイプ1では約13℃低下した。タイプ1は各スラットを外壁に対して平行に等間隔に並べて配置したものであるが、このスラット隙間での通気が温度低下を招いていると考えられ、気密性を有する回転機構の検討が必要であることが示された。またタイプ2,3では約8℃低下したが、冬季はスラットを外壁に垂直に配置するより平行に配置(閉じる)する方がよい等の要素構成上の知見が得られた。あわせて、各試験体の各温度を解析により予測し、実験結果との整合性を確認した。

(3) サーマクロミック窓: 気温とともに室内への日射入射量が適切に制御できる熱応答型の自律調光窓材の開発が求められており、その素材として二酸化バナジウム(VO<sub>2</sub>)は有力な候補である。しかしこれを実際の窓に適用するには、室温近傍で調光、可視透過率向上と赤外調光幅拡大の両立などの課題が残されている。本研究では、調光窓材としての設計指針を得るべく、多層膜設計や添加物によりVO<sub>2</sub>の光学特性変化を詳細に調べてきた。

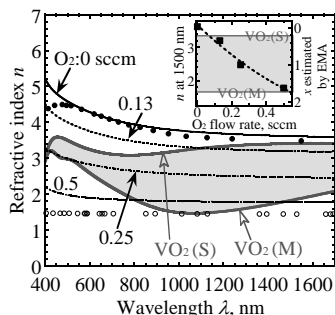


図1 異なるxを持つa-SiOxの屈折率波長分散。低温(S)と高温(M)相でのVO<sub>2</sub>膜の値も示す(相転移による屈折率変化を塗り潰して強調した)。挿入図は波長1500nmでの屈折率とa-SiOx作製時の酸素流量との関係。

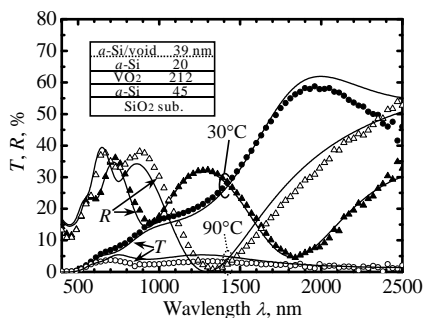


図2 a-SiOx(ここではx=0)とVO<sub>2</sub>の多層膜における透過・反射スペクトルのサーモクロミズムに対する挙動。多層構造で見積もったスペクトルを実線で示す。

具体的には、産業上広く使われるシリコン酸化物(a-SiO<sub>x</sub>)および二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)それぞれをVO<sub>2</sub>と多層膜化およびコンビット化し、窓材への応用の実現性を探った。ここではa-SiO<sub>x</sub>について報告する。a-SiO<sub>x</sub>層でVO<sub>2</sub>膜を挟んだ光学多層構造とし、シリコン酸化数(x)の制御により屈折率を幅広く変えた膜とすることで、サーモクロミック挙動における透過スペクトルの柔軟な制御を試みた。図1はa-SiO<sub>x</sub>単層膜の屈折率の波長分散で、スパッターによる作製時の酸素量を増やすことで屈折率が下がる様子を示している。同図にVO<sub>2</sub>の屈折率も示す。このようにa-SiO<sub>x</sub>層の屈折率はVO<sub>2</sub>の値をほぼカバーして変えられ、これらを多層化することで幅広く透過・反射スペクトルの設計ができる。実際が多層膜形成はVO<sub>2</sub>とa-SiO<sub>x</sub>の材料的整合性などの課題を克服し実現した。作製した膜の一例として、図2に透過と反射スペクトルを示す。また、図中の膜構造モデルで偏光解析法による見積もりも併せて示す。a-SiO<sub>x</sub>層に挟まれてもVO<sub>2</sub>膜はサーモクロミック挙動を発現し、ほぼ設計に近いスペクトル変化が確認された。本結果は、自律制御可能な熱応答型調光窓ガラスの実用化に役立つものである。

(4) 日射制御外壁: 外壁に衣替え機能を持たせる一つの方法として、壁の実効的な色を変化させる等、ダイナミックな方法が有効であるが、スタティックな方法として、夏季と冬季の太陽高度の変化を利用して、夏季には壁全体の日射反射率が高く、冬季には逆に低い壁を構成することが考えられる。こういった壁の形状として、上面と下面がそれぞれ高い反射率と低い反射率を有する、水平方向に設置した三角柱形状の壁要素を多数並べた壁形状を考えることができる。この考え方を実証するために、断面が正三角形となる三角柱形状の壁要素を想定し、この壁が南面を向いた場合の効果についてシミュレーションにより年間の光学的振る舞いを調べた。シミュレーションの結果として、反射率が高い上面の拡散反射率と正反射率の割合が重要であること等が知見として得られた(図3)。

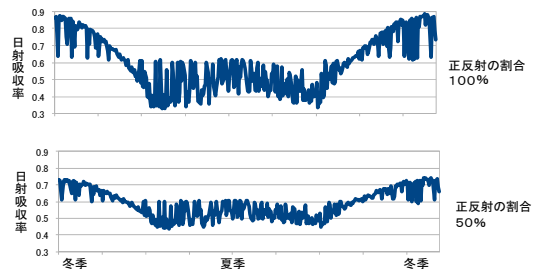


図3 シミュレーションによる壁の日射吸収率の季節依存性

次に実際に建物の外壁にタイル製の壁要素からなる壁面を設置し、その光学特性を1年にわたって調べた結果、通常の平タイルに

比べ、三角柱タイルで構成した外壁は、反射率の季節による変化の幅が広いことが知られた。これらの結果から三角形状壁要素からなる壁面は「環境自律型バイオメティック建築」の一要素となりうると考えられる。

(5) 植物の導管揚水機能：

①浸透圧を利用した揚水システムシミュレーション：管内の自然対流と管上部の水面からの蒸発による自立循環システムが機能するための設計条件を机上計算した。その結果、混合に必要な循環水量を十分確保できるように配管径を大きくし、圧力損失を小さくすることで、現実的な設計条件の範囲内でシステムが機能することを確認できた。

②揚水実験：システムシミュレーションで計算した揚水システムで自立的に揚水現象を持続させるための最適な各パラメーターを検討した。高濃度溶液に液肥、低濃度溶液に純水、フィルターに限外ろ過膜（上部がCE膜、下部が親水性のある多孔質膜となった非対称性の膜）、フィルターホルダーにステンレス製品を用いたものが最も揚水量が多かったため、この条件で自立循環型揚水システムを構築した。

③自立循環型揚水システムの基礎実験：管上部の水面から蒸発を促進する照射ライトとファンを設置した自律循環型システムで電子天秤の減少水量を把握した。漏斗からの溢れを防止するための排水による影響などがあるため、減少重量≠揚水量であるが、低濃度溶液の水位の低下量が通常型よりも自立循環型の方が明らかに多いことを考えると、漏斗面からの蒸発が揚水現象を促進し、持続的な揚水が出来ていると推測できた。

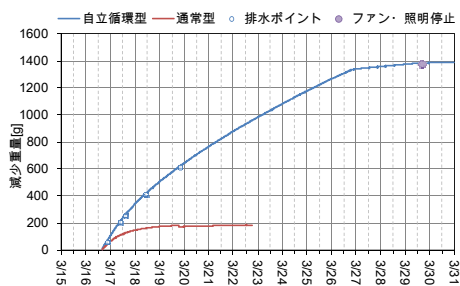


図4 減少水量の経時変化

(6) 蟻の群知能：近年、組み合わせ最適化問題に対する解法の1つとして、社会性昆虫である蟻の採餌行動を模擬したACO (Ant Colony Optimization) とよばれる最適化手法が注目されている。筆者らは、これまでの時間経過とともに揮発する模擬道しるベフェロモンを用いた仕様ではない、新しいACOアルゴリズムを創出したので、その最適化性能について検証を行った。考案したアルゴリズムは以下のような解法フローにより課題解決を行う。まず、複数の節点を含む解決すべき組み合わせ最適化問題を設定し、記憶量に制限のあるエージェントは節点間をラ

ンダムに移動する。エージェントは節点に到達するたびに、記憶の全てを節点に教授し、新たな節点の情報を覚える代わりに、最も古い節点の情報を消去（忘れる）する。これを一定回数以上反復することにより、目的解（節点）に到達するための現在の節点から入手可能な部分解を提供できるデータベースが構築される。ただ、これらのデータベースはそれぞれ独立で、物理的に接続せずユニークである。節点から得られる部分解をたどることによって、最終解を獲得するシステムを俯瞰によらず実現するのが本解法の特徴である。建築物の温熱環境における計画、運用に関わる問題の多くは組合せ最適化問題として扱うことができる。本解法も節点間の距離をエネルギー量や時間に置き換えることによって、温熱環境問題の最適化手法として取り扱うことができると考える。

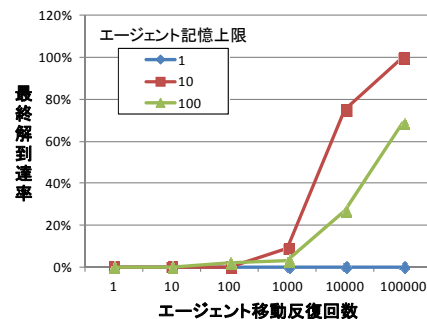
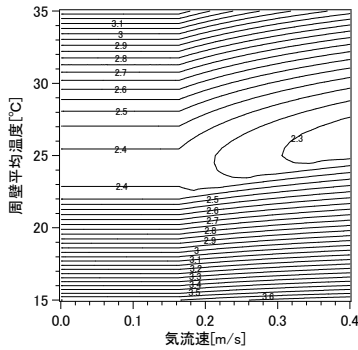


図5 エージェント設定と最終解到達率図

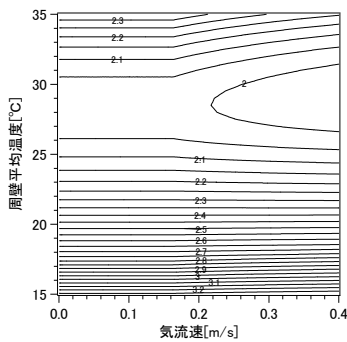
(7) バイオメティック型建築と人体エクセルギー評価：

図6は、夏季（外気温33℃；相対湿度60%）にエアコンによる冷房を行なった室（対流式冷房）と、放射冷却パネルを設けて同時に通風を行なった室（放射冷房＋通風室）における人体のエクセルギー消費が、周壁平均温度（縦軸）・人体近傍気流速（横軸）とどのような関係にあるかを示す。人は長ズボンと半袖シャツを着て、座って書類に目を通していているような状態（着衣の熱抵抗が0.43cloで代謝量が1.1met）を想定している。対流式冷房では、室内の空気温湿度が26℃；50%、放射冷房＋通風室では30℃；65%である。対流式冷房では、気流速を0.1m/s程度に抑えないと、初めはよくてもいずれは不快になる。そこで、気流速が0.1m/sの場合を見ると、最小のエクセルギー消費は、周壁平均温が24℃あたりで現われ、その値は2.4W/m<sup>2</sup>ほどになっている。実際の建物では多くの場合、窓ガラスの室内側にブラインドなどの日除けがあって、その温度が高くなっていたり、天井面にある照明器具・ランプの温度が高くなっていたりして、周壁平均温は29～32℃ということになるが、このような条件では、エクセルギー消費は2.6～2.7W/m<sup>2</sup>となる。もう一方の放射冷房＋通風の場合をしてみる。通風では平均風速が0.2m/sを超えるような、しかもときに大きく揺らぐ風が「涼

しさをもちます。そこで、0.2m/s以上の条件で、エクセルギー消費が最も小さくなる周壁平均温度を探すと、それは外気温 33℃より低い 29~30℃となり、エクセルギー消費の値は 2W/m<sup>2</sup>以下で、対流式冷房の場合よりも 20~30%小さくなる。以上から、パッシブ型の、またバイオミメティック型の建築外皮システムは、人体のエクセルギー消費をほどよく小さくするのに効果があると考えられる。



a) 対流式冷房 (室内空気は 26℃; 50%)



b) 放射冷房+通風 (室内空気は 30℃; 65%)

図 6 夏季の人体エクセルギー消費と周壁平均温度・人体近傍気流速の関係 (外気は 33℃; 60%) (岩松・宿谷, 2008)

(8) **機能複合化**: 「発汗機能」と「衣替え機能」を複合模擬した住宅をモデルとして、我国各地域における環境・エネルギー性能を予測解析した。図 7 に示すモードで年間を通じて外壁で衣替えが可能で、夏季に屋根で感温点が 25℃で発汗機能 (屋根外表面温度が 25℃以上で発汗蒸発冷却が可) を有する戸建住宅 (105m<sup>2</sup>, 5室モデル) を想定した。多数室非常温熱・換気解析理論を用い、各室の温度、圧力、熱量、風量、湿度を解析する。地域は寒冷地 (札幌)、温暖地 (東京・大阪)、暑熱地 (那覇) を選定し、熱負荷計算では冷房期 [札幌・東京・大阪 (6~9月)、那覇 (5~10月)]、暖房期 [札幌 (11~4月)、東京・大阪 (12~3月)、那覇 (12~2月)] とし、拡張アメダス気象データ標準年 (1981-2000年) を用い、地域毎に屋根・壁体の断熱性能と窓種類を変えた。モード A は非衣替えモードで熱特性が年間一定 (日射吸収率 0.89、長波

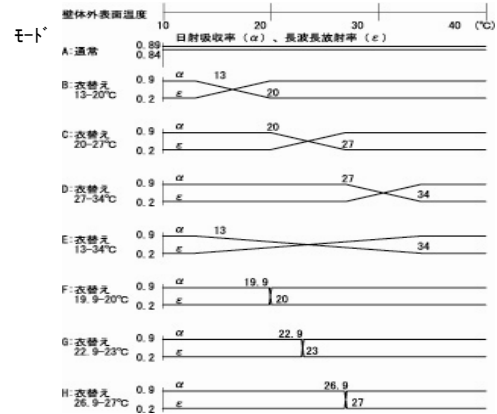


図 7 外壁表面温度と衣替えモード

長放射率 0.84) である。非衣替えモードに対する各衣替えモードによる年間の省エネルギー効果は、住宅顕熱合計で、札幌 3.1% (Gモード)、東京 5.7% (Gモード)、大阪 6.0% (G、Cモード)、那覇 28.1% (Gモード) である。また、夏季の屋根発汗蒸発冷却 (外壁の衣替えはなし) による省エネルギー効果は、札幌 44.6%、東京 35.5%、大阪 35.0%、那覇 18.6% である。さらに、衣替え機能と発汗機能を複合した省エネルギー効果は、札幌 4.0% (C、G、Hモード)、東京 11.4% (Gモード)、大阪 13.5% (Gモード)、那覇 47.3% (Fモード) である。非空調ケースの自然室温の改善効果も同様の傾向がみられ、機能の複合化による環境改善・省エネルギー効果が大きいこと、また各地域で最適となる衣替えモードを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 15 件)

- ① Yukio Ishikawa, Hiroaki Kitano and Takeshi Iwata, Thermal Effect of 'Changing Clothes Building' with Changeable Thermal Property of Wall Surfaces, Proceedings of Eurosun 2010, International Solar Energy Society, 査読有, 2010, 1-8
- ② 垣内田洋, 田澤真人, 杉山豊彦, 吉村和記, 田尻耕治, 石川幸雄, Long-term optical and thermal examinations of ceramic wall system with solar-altitude dependent reflectance, Advances in Science and Technology, 査読有, 68 巻, 2010, 53-58
- ③ H. Kakiuchida, P. Jin and M. Tazawa, Control of optical performance in infrared region for vanadium dioxide films layered by amorphous silicon, International Journal of Thermophysics, 査読有, 31 巻, 2010, 1964-1971
- ④ マーセルシュバイカ (Marcel Schweiker), 宿谷昌則, Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-unit usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic

conditions, Building and Environment, 査読有, 44 巻, 2009, 2137-2149

⑤宿谷昌則, Exergy concept and its application to the built environment, Building and Environment, 査読有, 44, 2009, 1545-1550

⑥Hiroshi Kakiuchida, Kazuki Yoshimura and Akifumi Ogiwara, Thermo-driven solar transmittance controller composed of holographic polymer dispersed liquid crystal, ANZSES2009 Proceedings, 査読有, 2009, 145-1~145-6

⑦宮田弘樹, 平田真規, 東典子, 村上貴弘, 東正剛, Army ant behavior in the poneromorph hunting ant *Onychomyrma hedleyi* Emery (Hymenoptera: Formicidae; Amblyoponinae), Australian Journal of Entomology, 査読有, 48-1 巻, 2009, 47-52

⑧マーセルシュバイカ (Marcel Schweiker), 宿谷昌則, Investigation of the relationship between occupants' individual difference and air-conditioning usage during nighttime in summer, 日本建築学会環境系論文集, 査読有, 73 巻, 2008, 1275-1282

⑨Y. Ishikawa, Development of perspirable roof and evaporative cooling effect of perspirable building, Proceedings of EuroSun 2008, International Solar Energy Society, 査読有, 2008, 75-1~75-8

⑩H. Kakiuchida, P. Jin and M. Tazawa, Optical characterization of vanadium-titanium oxide films, Thin Solid Films, 査読有, 516 巻, 2008, 4563-4567

⑪H. Kakiuchida, P. Jin and M. Tazawa, Control of optical spectral change due to thermo-chromism in VO<sub>2</sub> film by multilayer with amorphous SiO<sub>x</sub>, Solar Energy Materials and Solar Cells, 査読有, 92 巻, 2008, 1279-1284

他

〔学会発表〕 (計 28 件)

①小野間萌, 長沢俊, 徳永佳代, 宿谷昌則, 「涼しさ」感をもたらす熱環境とエクセルギー収支に関する研究(その 1. 実験概要と物理量の測定結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010 年 9 月 9 日, 富山市

②石川幸雄, 梅林慶, 北野博亮, 岩田剛, 三坂育正, 感温性ハイドロゲルを利用した建築外壁の水分蒸発冷却効果に関する研究(その 6) 実験条件を変化させた場合の改良型蒸発冷却屋根の自然冷房効果, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2010 年 9 月 3 日, 山口市

③安藤邦明, 三坂育正, 野崎尚子, 作業所事務所における地下水利用屋根散水システムの実測評価に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 2010 年 9 月 3 日, 山口市

④垣内田洋, 田澤真人, 杉山豊彦, 吉村和記, 田尻耕治, 石川幸雄, Long-term optical and thermal examinations of ceramic wall system with solar-altitude dependent reflectance, CIMTEC 2010 (招待講演), 2010 年 6 月 9 日, Montecatini Terme (Italy)

⑤菊池卓郎, 宮田弘樹, 石川幸雄, 浸透圧を利用した水搬送装置における日射を用いた濃度差維持のためのシステムシミュレーション, 日本太陽エネルギー学会, 2009 年 11 月 6 日, 長崎市

他

〔図書〕 (計 1 件)

①田澤真人, 日本熱物性学会, 建築外皮の熱物性とシステムデザイン研究会研究報告, 2009, 5-10

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石川 幸雄 (ISHIKAWA YUKIO)  
三重大学・大学院工学研究所・特任教授  
研究者番号: 60378312

### (2) 研究分担者

宿谷 昌則 (SHUKUYA MASANORI)  
東京都市大学・環境情報学部・教授  
研究者番号: 20179021

### (3) 研究分担者

田澤 真人 (TAZAWA MASATO)  
独立行政法人産業技術総合研究所・サステナブルマテリアル研究部門・副研究部門長  
研究者番号: 60357423

### (4) 研究分担者

垣内田 洋 (KAKIUCHIDA HIROSHI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・サステナブルマテリアル研究部門・研究員  
研究者番号: 40343660

### (5) 研究分担者

宮田 弘樹 (MIYATA HIROKI)  
株式会社竹中工務店・技術研究所・建設技術研究部・主任研究員  
研究者番号: 90416628

### (6) 研究分担者

北野 博亮 (KITANO HIROAKI)  
三重大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 80293801

### (7) 研究分担者 (平成 22 年度)

安藤 邦明 (ANDO KUNIAKI)  
株式会社竹中工務店・技術研究所 先端技術研究所部・研究員  
研究者番号: 00505349

### (8) 研究分担者 (平成 20、21 年度)

菊池 卓郎 (KIKUCHI TAKURO)  
株式会社竹中工務店・技術研究所 建設技術研究部・研究員  
研究者番号: 00421925