

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760444

研究課題名(和文)セメント薄膜硬化体による太陽熱制御型コンクリートの開発とCO<sub>2</sub>削減効果の定量評価研究課題名(英文)Patterned cementitious surface controlling sunlights reflection and its effect of CO<sub>2</sub> reduction

研究代表者

北垣 亮馬 (Kitagaki, Ryoma)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：20456148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート表面に微細凹凸を施すことで太陽からの日射における短波反射率を制御し、これによって、太陽から入射する熱を夏期には反射し、冬期には吸収できる熱収支に太陽光の角度依存性を織り込んだ、季節を問わずに省エネを実現できる建材表面の設計と熱収支のモデル化を行った。具体的には、セメント硬化体表面の反射率の角度依存性によって、熱移動にどのような影響を与え、結果として建築空間に適用された場合の空間の熱環境性能を評価するために、材料表面の凹凸に伴って変化する短波反射を含んだ熱収支モデルを提案し、その妥当性を実験とモデルの比較によって検証した。

研究成果の概要(英文)：Patterned cementitious surface controlling sunlight reflection were designed and developed to increase heat transfer from sunlight in winter and decrease in summer. A heat transfer model for the concrete surface considering heat irradiation on the surface microstructure is proposed and compared with the experimental results.

As a results the surface of the concrete, which has seasonal heat selectivity, is developed and the effects of CO<sub>2</sub> reduction are calculated quantitatively based on degree-day methods.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：日射 短波反射 熱収支 建築材料

### 1. 研究開始当初の背景

我が国は、これまでに様々な省エネルギー技術を開発し導入に務めてきた結果、環境的に高効率な国家としての実績を有している。

しかしながら、民生部門の消費エネルギー60%を占める建築物の供用においてはむしろ増加しており、GDPあたりのCO<sub>2</sub>排出量も増加している。また、東日本大震災に端を発する原子力発電所の事故によって、火力発電の利用が促進された場合、沖縄を除く全電力会社の電力のCO<sub>2</sub>排出係数が、2010年度実績比で最大140%程度に上昇する計算になる。このような事態によって、「室内で節電や省エネをしているのに国家全体のCO<sub>2</sub>排出量が増加していく」といった状況に陥る可能性もあることから、建築物の供用において省エネルギー、CO<sub>2</sub>排出抑制を達成できる技術を導入することで、CO<sub>2</sub>排出量削減を実現していくことが極めて重要であると考えられる。

### 2. 研究の目的

近年、研究機関・メーカーで建築物の光や熱の流入の制御を行い、供用期間の省エネを実現するフィルムや断熱材を研究開発しているが、その多くは紫外線や環境劣化因子に弱い樹脂で構成されているため、耐用年数が数年であり、高頻度のメンテナンスが必要になることが指摘されている。また、省エネを実現するためには、冬には太陽光を熱として取り込み、夏には遮断できる建材が求められるが、既存の無機建築材料ではそのような性能を持たせることができていない。これまで申請者は、リサイクルが困難であったセメント系、セラミック系の無機建築材料を(1)原料ごとに材料分離する易解体技術、(2)それを再度組み合わせて再び建材としてリサイクルする技術と(3)最適化設計手法<sup>7)</sup>を開発し、建築物のライフサイクルCO<sub>2</sub>の20%以上を占める製造・建設・解体・廃棄段階におけるゼロ・エミッション化に迫るために必要な技術を実現するとともに、処理プロセスの省エネ化によって低炭素化にもつなげる兆候を認識することができた。本研究では、これらの技術的蓄積をうまく使い、建築物の供用期間におけるCO<sub>2</sub>吸収促進、断熱制御、日射熱の吸放出制御が行えるとともに、高耐久性を備え、ライフサイクルを通じて建築物のCO<sub>2</sub>排出量がゼロ、またはマイナスを実現できるカーボン・ニュートラル(またはカーボン・マイナス)建築物の実現に資する建築材料を開発するとともに、CO<sub>2</sub>削減効果が高い建築材料を実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、まず、無機建材の作成手法の確認と無機建材バリエーションごとのカーボン・ニュートラル性能(CN性能)評価試験を実施し、これに基づいて無機建材のデータベースを作成、各種物性の依存関係にもとづく

CN性能の整理を行い、供用期間30年でカーボン・ニュートラルを達成するCN建材を完成させる。そして、これまでの成果を踏まえて、CN建材の建築物への適用を考慮し、ライフサイクルの観点で、建築物としてカーボン・ニュートラルを実現する日射制御を行う建築材料の具体的提示を行う。

### 4. 研究成果

#### 4.1 はじめに

図1のような断面を持つ表面形状による選択的日射制御について考察する。単位凹凸の幅を $h$ 、下面の角度を $\theta_1$ 、上面の角度を $\theta_2$ とする。また、夏期及び冬期を代表する入射角をそれぞれ $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ とし、季節ごとに求められる性能を満たす条件を凹凸の内部で発生する鏡面反射光によって考察すると、表1のようになる。これらの条件を満たす $\theta_1$ 、 $\theta_2$ は複数存在するが、年間の太陽高度及び日平均温度のデータから $\alpha_1 = 22.5^\circ$ 、 $\alpha_2 = 0^\circ$ を採用した。

#### 4.2 材料の仮想厚さに基づく熱性能評価試験

##### 4.2.1 概要

太陽高度に応じた選択的熱制御が予想される凹凸をセメント硬化体製試験体の表面に付与し、実際の建物外壁周辺の環境を模擬した環境模擬試験装置を用いた試験を行うことで熱伝達に関する評価を行った。一般に材料の熱伝達を評価する際、材料の表面温度が重要なパラメータとなるが、本研究で扱う材料は比較的大規模の大きい凹凸を持つため表面温度にばらつきが存在する可能性がある。また、凹凸が存在するため材料の厚さは自明ではない。そこで本実験では凹凸を持つ材料に対して、材料の厚さとは凹凸の形状によらず材料の質量によって定義される見かけ上の厚さであると仮定した。これに従い、材料の表面はその反対側の面からこの見かけ上の厚さの距離に位置する仮想面であると定義した。

図2～5のように平滑な鉄板I0及び単位凹凸の幅 $h$ がそれぞれ1, 2, 4, 8mmとなるよう形状加工を施した鉄製型枠I1, I2, I4, I8をシリコン樹脂で型取りし、さらにそのシリコン樹脂を型枠として用いることで表面が同形状であるセメント製試験体C0, C1, C2, C4, C8を作成した。各試験体は幅が200mm×200mmである。見かけ上の厚さ $d$ は試験体C0の質量からセメント硬化体の密度を求め、これを用いて他の試験体の質量から算出した。

##### 4.2.2 試験装置

図5の環境模擬試験装置による熱性能測定を行なった。試験装置内部は屋外及び屋内を想定した2室からなっており、各室はペルチェユニットにより温度制御が可能である。試験体は両室の間に下面が下を向くよう設

置され、試験体裏面に取り付けられた熱流計により貫流熱量と裏面温度を測定することができる。また、試験体表面・裏面の上部には流速 6.0m/s のクロスフローファンが設置され、凹凸部分の上面に向かって対流を起こす(図2における右から左方向)。さらに、日射による熱取得について考察するため装置外部にハロゲンランプを設置した。ハロゲンランプからの短波長放射は屋外側の室の壁面に取り付けられたフレネルレンズを通して平行光となって試験体に入射する。なお試験体に入射する放射照度は入射角が  $0^\circ$  のとき  $I=3071\text{W/m}^2$  である。

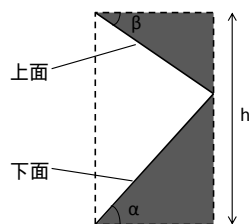
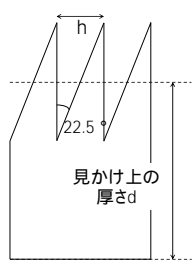


図1 単位凹凸の断面図

表1 要求性能を満たす性能と条件

	要求性能	条件
夏期	上面に直射光が入射しない	$\beta \leq \theta_1$
	下面からの鏡面反射光が全て外部に出ていく	$\alpha \geq 90^\circ - \theta_1$
中間期	なし	なし
冬期	上面からの鏡面反射光が全て下面に入射する	$\beta \leq 45^\circ$
	下面からの鏡面反射光が全て上面に入射する	$\alpha \leq -\frac{\theta_2}{2} + 45^\circ$
	下面からの二次鏡面反射光が全て上面に入射する	$\alpha + 2\beta \leq 90^\circ$
	上面からの二次鏡面反射光が全て下面に入射する	$2\alpha + \beta \leq 90^\circ - \theta_2$



$h=1, 2, 4, 8\text{mm}$

図2 試験体断面図

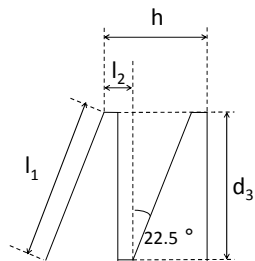


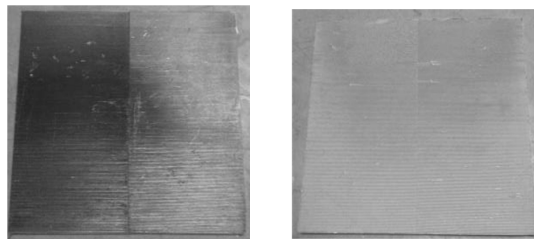
図3 実際の試験体の凹凸断面

#### 4.4 結果

表3に各試験体の熱抵抗及び対流熱伝達率を、図6に反射率の算出結果を示す。

#### 4.5 考察

対流熱伝達率については表面が平滑な物質と比べて表面が粗いものほど大きな値となっており、ユルゲスの式を代表とする既知の法則と一致した。しかし同一の形状の表面に対してスケールが及ぼす影響については相関性が見いだせなかった。短波反射率については試験体C1,C2と試験体C4,C8の2つのグループの間で、平滑な表面を持つ試験体C0を挟んで大きな差がある。一般にどの波長域においても物質の表面が粗いほど放射率が上昇し、反射率は低下するため、試験体C4とC8に関しては精査を行う必要がある。今回短波反射率を算出するために用いた値は放射率 試験体屋外側表面温度の2つを元としているが、放射率に関してはいずれの試験体もC0以外のものは値がほぼ同じであ



型枠 II

試験体 C1

図4 型枠と試験体

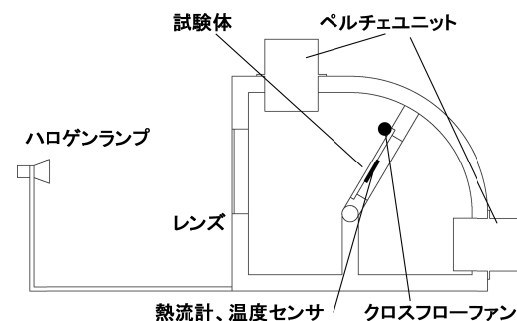
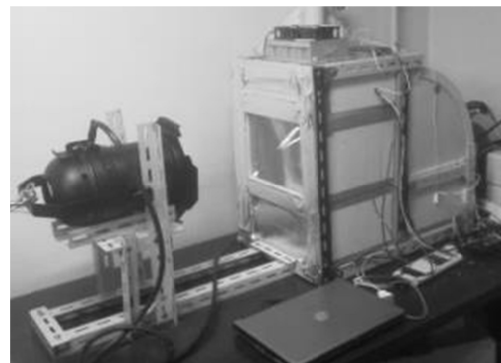


図5 環境模擬試験装置

るため、反射率の算出結果にはさほど影響を及ぼさないと考えられる。一方で試験体屋外側表面温度については算出の過程で仮想の値である見かけ上の厚さを定義しており、この値が反射率に影響を及ぼしていると思われる。すなわちスケールが小さい試験体については概ねこの値を適用可能であるが、スケールが大きくなるほど表面における温度分布が広がるため、一概に表面温度を決定することが不可能になると考えられる。

表 2 各試験体及び型枠の寸法

試験体ID	凹凸の幅	試験体の厚さ	本体部分の厚さ	凹凸部分の厚さ	表面積 S[m <sup>2</sup> ]
	h[mm]	d1[mm]	d2[mm]	d3[mm]	
C0		11.79			
C1	1	10.37	8.87	1.5	0.140091
C2	2	11.75	8.74	3.01	0.140424
C4	4	15.58	8.77	6.81	0.153603
C8	8	22.39	8.79	13.6	0.153436
I1	1	10	8.5	1.5	0.140091
I2	2	11.32	8.31	3.01	0.140424
I4	4	15.39	8.58	6.81	0.153603
I8	8	25.32	11.72	13.6	0.153436

表 3 仮想厚さに基づく熱性能評価結果

試験体ID	熱抵抗	放射率	対流熱伝達率
	R[m <sup>3</sup> K/W]	[-]	[W/m <sup>2</sup> K]
C0	0.0067	0.96	13.23
C1	0.0063	0.988	15.09
C2	0.0077	0.988	16.39
C4	0.0082	0.989	19.18
C8	0.0116	0.989	16.7

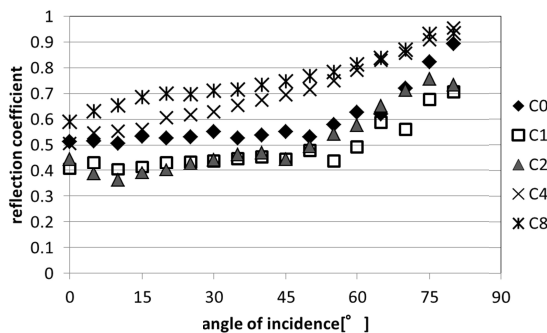


図 6 仮想厚さに基づく反射率の算出結果

#### 4.6 材料の仮想表面温度に基づく

##### 熱性能評価試験

##### 4.6.1 概要

仮想厚さに基づく熱性能評価の問題点の解決策として、図 7 に示すように、試験体を凹凸部分と凹凸部分ではない部分（以下本体部分と呼ぶ）から成る複合材料と見なし、試験体の凹凸部に対して仮想表面温度を設定した。これらの値はセメント硬化体を作成する際用いた鉄製の型枠を試験体として利用し、セメント硬化体に関する対流熱伝達の実験との比較試験を行うことによって算出した。また、仮想表面温度に基づき対流熱伝達率及び短波長反射率の評価を行った。

#### 4.6.3 実験

##### (1) 試験体

鉄製試験体 I1, I2, I4, I8 の寸法を表 2 に示す。いずれの試験体も幅は 200mm × 200mm である。

##### (2) 有効放射率

鉄製試験体についても、有効放射率を求めた。なお平滑な鉄の放射率は 0.35 とした。

##### (3) 対流熱伝達率及び K 値の算出

仮想厚さに基づく対流熱伝達率の実験と同様の実験を鉄製試験体に対して行い、セメント製試験体について得られた結果と合わせて K の値及び対流熱伝達率  $\alpha_c$  の値を求めた。なおセメント製試験体の本体部分の熱伝導率  $\lambda$  を 1.5W/mK、鉄製試験体の本体部分の熱伝導率  $\lambda'$  を 48.05W/mK とした。また、セメント製試験体の凹凸部分の熱抵抗 R[m<sup>2</sup>K/W] を算出した。

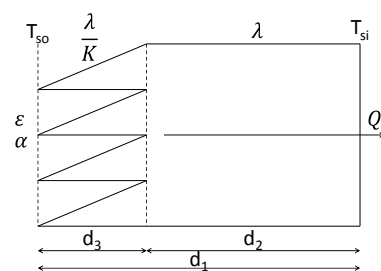
$$R = \frac{Kd_3}{\lambda}$$

##### (4) 短波長反射率の算出

得られた K と  $\alpha$  をから、試験体の屋外側仮想表面温度  $T_{so}$  を求め、これによって短波長反射率  $\rho$  が求まる。

#### 4.6.4 結果

表 5 鉄製試験体の放射率の計算結果を示す。表 6 に K の値と熱抵抗及び対流熱伝達率の結果を示す。K の値は試験体のスケールが大きくなるほど小さくなり、言い換えるとスケールが大きいほど熱伝導率 ( $= \frac{1}{\lambda}$ ) が高いという結果になった。凹凸部分全体での熱抵抗については試験体 C8 で最も大きい値とな



- $d_1, d_1'$ : セメント/鉄製試験体の厚さ[m]
- $d_2, d_2'$ : セメント/鉄製試験体の本体部分の厚さ[m]
- $d_3$ : 両試験体の凹凸部分の厚さ[m]
- $Q, Q'$ : セメント/鉄製試験体における貫流熱量[W/m<sup>2</sup>]
- $T_{so}, T_{so}'$ : セメント/鉄製試験体の屋外側仮想表面温度[K]
- $T_{si}, T_{si}'$ : セメント/鉄製試験体の屋外側表面温度[K]
- $\lambda, \lambda'$ : セメント/鉄製試験体の本体部分の熱伝導率[W/mK]
- $\epsilon, \epsilon'$ : セメント/鉄製試験体の有効放射率[-]
- $\alpha$ : 両試験体の屋外側対流熱伝達率[W/m<sup>2</sup>K]
- K: 両試験体の凹凸部分の熱伝導に関する係数[-]

図 7 試験体断面図と仮想表面

った。また、いずれの試験体も平滑な試験体 C0 と比較して $\alpha_c$ の値は大きい、試験体 C1 と C2 はほぼ同じ値となった。また、試験体 C4 において最も $\alpha$ の値が大きくなるという結果が得られた。図 8 にセメント製試験体の短波反射率の算出結果を示す。

試験体 C1, C2, C4 は入射角が小さいときに試験体 C0 と比較して低い反射率をとり、入射角が大きくなるにつれ試験体 C0 の反射率に漸近するという結果となった。一方で試験体 C8 に関しては入射角が小さいときには試験体 C0 と比較して反射率は小さい値をとるものの、入射角 20° 付近から極めて近い値をとるという結果となった。

#### 4.7 凹凸のあるコンクリート表面の 日射反射挙動に伴う熱収支のモデル化

##### 4.7.1 概要

前章では、凹凸のある材料の熱移動に関する実験データから、材料の凹凸部分の仮想表面温度を定義し、C0~C8 の各凹凸状態ごとの表面温度データと熱収支から、より確からしい短波長反射率の実験値を得ることができた。これまでの経緯を踏まえ、材料の凹凸表面における日射反射挙動に伴う熱収支をモデル化し、実験値と比較する。

##### 4.7.2 仮定

まず、凹凸部分に入射した光は下面で反射するが、反射光は鏡面反射成分と拡散反射成分に分けられる。ここでは各成分の量を日射の入射角ごとに調べ、計算によって形状加工を施したセメント硬化体の反射率を求めることを考える。また、下面における鏡面反射率 $\rho_s$ 及び拡散反射率 $\rho_d$ は試験体 C0 の全反射率の実験値と光沢度測定から求めた。なお反射光が再度材料に入射した場合は全熱量が吸収されるものとした。

##### 4.7.3 鏡面反射光

単位長さ当たりの凹凸一つにおける鏡面反射光の内、外部へ出ていく熱量 $q_s$ は入射角によって表 4 のようになる。

##### 4.7.4 拡散反射光

凹凸部分の下面に入射した光の拡散反射成分のうち、どれだけ量が上面まで届くかはした入射面から見た上面の形態係数によって決定される。しかし入射角によって入射面は変化するため形態係数は異なる。そこで凹凸部分が水平方向に無限遠まで存在すると仮定したときの下面上の任意の点  $A_0$  から見た上面の形態係数を入射角ごとに算出し、入射面から上面を見たときの平均形態係数を求めた。このとき形態係数  $U$  は以下の式で求められる。

##### 4.7.5 形態係数の計算結果

単位長さ当たりの凹凸一つにおける鏡面反射光の内外部へ出ていく熱量 $q_d$ は

$$q_d = Jh(1 - \bar{U})\cos\theta\rho_d(|\alpha+\theta-90^\circ|)$$

#### 4.7.6 反射率の算出

鏡面反射成分及び拡散反射成分から凹凸部分外に出ていく熱量を求め、反射率を算出した結果を図 8 の theoretical に示す。このモデルでは、凹凸の大きさが異なっても、凹部下面の任意の点から、凹部上面に対する形態係数はかわらない上に、凹部下面の日射が当たる面積比率も一定なので、凹凸の大きさによらず短波長反射率は等しくなる。これを踏まえて考察すると、C1~C4 と行った凹凸の細かい試験体の低日射角度の反射率の実験値とモデルの値が一致している一方で、凹凸部が大きい C8 の反射率はどの角度においてもあまり一致しない。また、日射角度が高くなり日射からの熱入力小さくなるとモデルと実験値の差異が大きくなっている。このことから、凹凸が大きい場合に、対流熱伝達率にかかわる未知の熱収支が含まれているものと考えられる。ただし、凹凸が十分小さければ低日射角度の反射率は通常の平滑面に比べて半分程度になり、凹凸形状によって日射を理論的に熱制御する可能性は高いものと考えられる。

表 4 入射角別の外部へ出ていく熱量

$\theta$ の条件	外部へ出ていく熱量
$\theta \geq 90^\circ - \alpha$	$q_s = Jh\rho_s( \alpha+\theta-90^\circ )\cos\theta$
$90^\circ - \alpha \geq \theta \geq 90^\circ - 2\alpha$	$q_s = Jh\rho_s( \alpha+\theta-90^\circ )\cos(2\alpha + \theta)$
$90^\circ - 2\alpha \geq \theta$	$q_s = 0$

表 5 鉄製試験体の放射率

試験体ID	放射率
	[-]
I1	0.653
I2	0.654
I4	0.674
I8	0.674

表 6 仮想表面に基づく熱性能評価結果

試験体ID	凹凸部分の熱抵抗 対流熱伝達率		
	K[-]	R[m <sup>2</sup> K/W]	[W/mK]
C0			13.37
C1	18.2	18.2	25.38
C2	8.17	16.39	25.36
C4	5.31	24.1	44.79
C8	2.78	25.23	32.07

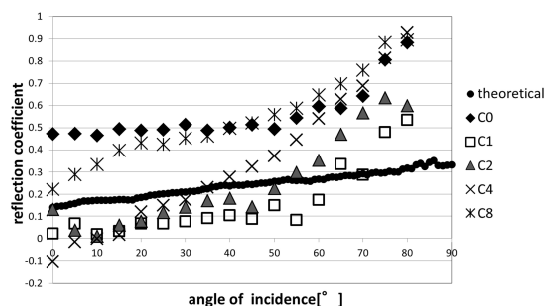


図 8 仮想表面に基づく反射率の算出結果と理論値の比較

以上より得られた成果は次のとおりである。

1) 太陽熱を制御できるセメント硬化体表面設計技術の確立。季節によって太陽熱を制御できるセメント硬化体薄膜は、それぞれの手法や用途によってCO2削減効果が異なると考えられる。本研究では、凹凸の制御によってセメント硬化体表面の太陽熱反射率の角度依存性が生まれることに着目し、既存の薄膜作成技術と凹凸設計技術をセメント硬化体に用い、表面微細凹凸にバリエーションをつけた厚さ50mmのコンクリート供試体を作成した。その結果、セメント硬化体表面への入射光に対して、反射率が角度依存性をもつ表面形状を考案し、実際に、精密切削機器を用いて、50 $\mu$ m幅、深さ100 $\mu$ m程度の凹凸形状をセメント硬化体表面に作成できる手法を確立した。

2) 太陽光を考慮した建築材料の熱収支・熱物性測定装置の完成。一般に建築物の熱移動は太陽光、気温、風雨などの変動条件下で実施され、実大のモデルハウスを用いた暴露実験によって検証される。しかし、材料サンプルレベルでこれらの複合要因を精密に(太陽光角度、内外気温差、湿度差)を制御して熱移動を模擬できる測定装置は少ないため、小型の専用測定装置を開発した。

3) 1), 2)を踏まえ、建築材料表面のそれぞれの手法や用途によってCO2削減効果が異なると考えられる。そこで、セメント硬化体表面の反射率の角度依存性によって、熱移動にどのような影響を与え、結果として建築空間に適用された場合の空間の熱環境性能を評価するために、材料表面の凹凸に伴って変化する短波反射を含んだ熱収支モデルを提案し、その妥当性を実験とモデルの比較によって検証した。

#### 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 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

八重樫 涼, 北垣亮馬: 中空セラミックビーズ塗料を塗布したロールカーテンの遮熱性・断熱性に関する研究, 日本建築学会大会梗概集, 2013年08月30日, 北海道札幌市

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

東京大学・大学院工学系研究科・講師・北垣 亮馬 (Ryoma KITAGAKI)

研究者番号: 20456148

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: