

廃シリカゲルを再利用した セラミック基盤を持つコケ緑化基盤材の開発

田中 絢子^{a)}・安井 賢太郎^{b)}・伊藤 健一^{c)}
藤崎 稔^{d)}・木之下 広幸^{e)}

Development of Greening Material Composed of Moss and Porous Ceramic Containing Waste Silica

Ayako TANAKA, Kentaro YASUI, Kenichi ITO,
Minoru FUJISAKI and Hiroyuki KINOSHITA

Abstract

To recycle silica byproducts and to moderate the heat-island phenomenon, a porous ceramic was prepared by mixing waste silica powder with clay and then firing the resultant mixture. The high water-absorption capacity of the ceramic was used to produce a greening material: a moss-covered porous ceramic. To examine the restraining ability of the temperature increase caused by solar-radiant heat on the moss-covered ceramic, the surface-temperature change of a moss-covered sample during solar-radiant-heat reception and the amount of water evaporated from the sample were measured simultaneously. To quantitatively investigate the influence of the water-evaporation heat on the temperature change of the moss-covered sample, the sample temperature change was simulated by performing a thermal-conductivity analysis and by considering the heat of evaporation using finite-element-methods analysis. The experimental results confirmed that the moss-covered sample that could absorb sufficient water could constrain the temperature increase caused by solar-radiant heat for a longer duration than the ceramic sample. The finite-element-simulation results indicated that the restraining effect on the temperature increase by the moss-covered sample resulted from heat of water evaporation.

Keywords: Waste silica, Recycling, Moss-greening material, Radiant heat reducing effect

1. はじめに

シリカゲルは乾燥剤など様々な製品に用いられている。しかし、製品の製造過程において副産物が生じており、その有効利用が望まれている。一方、日本ではヒートアイランド現象の緩和が重要な課題となっている。

現在、ヒートアイランド現象の緩和策として、建築物の屋上緑化が推進されているが、緑化プラントの重量に制限があること、設置コストが高いこと、植物の保守管理に手間がかかること、さらに建築物の腐食防止対策を施す必要があることなどの課題があり、その普及率は低い。

このような状況から、著者らは、粘土と廃シリカゲルを混合・焼成した高吸水性セラミックにコケを貼り付けた緑化基盤材の開発を行った。コケによる緑化材は軽量である。

また、セラミック基盤にコケを貼り付けることで、屋上に接着工法での設置が可能となると共に、コケによる建物の腐食を防止できると考えられる。

本報ではコケ緑化基盤材の特徴と課題、及び日射熱低減効果について報告する。

2. コケ緑化基盤材及び屋上緑化模擬試験設備

2.1 コケ緑化基盤材の作製

図1はコケ緑化基盤材の作製方法を示す。粘土には緑泥石を主要鉱物とする宮崎県産の粘土を用い、廃シリカゲルには製品の製造過程で生じた副産物を用いた。

まず、粘土に0.2 mm以下の廃シリカゲルを20%(mass%)混合し、金型で圧縮成形した後、1000℃で焼成することによりセラミック板を作製した。次に、セラミック板の表面に生分解性接着剤(クリコートC710)を塗布し、5 mm程度の大きさのコケ粒を1 m²当たり500 g貼り付けることでコケ緑化基盤材を作製した。

図2は粘土と廃シリカゲルを混合・焼成したセラミックの気孔率および吸水率を示す。粘土に廃シリカゲルを混合

a) 大学院工学研究科機械・情報系コース
b) 工学部教育研究支援技術センター技術職員
c) 国際連携センター准教授
d) 富士シリシア化学(株)
e) 工学教育研究部准教授

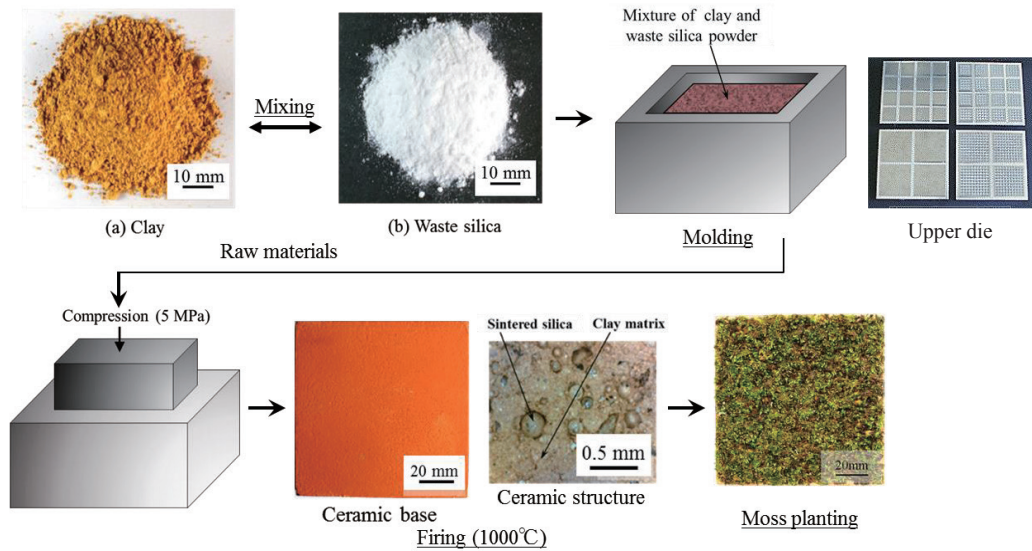


Fig. 1 Manufacture of a moss-greening material

したセラミックは、廃シリカゲルの混合率が高くなるにつれて、気孔率ならびに吸水率が高くなる。この理由としては、シリカゲル粒子が焼成・冷却過程において母材(粘土)よりも収縮したことで、母材との間に空隙が生じたことが考えられる。

図3は粘土と廃シリカゲルを混合・焼成したセラミックの熱伝導率を示す。粘土と廃シリカゲルを混合・焼成したセラミックはモルタルや粘土のみから作製したセラミックよりも熱を通しにくい材料であることがわかる。このセラミックをビルの屋上に設置した場合、その断熱性により日射熱を屋内に通しにくくなる利点がある。

セラミック成型用金型

コケ緑化基盤材には耐風雨性が求められる。すなわち、多少の風雨があってもセラミック基盤材からコケが脱落しないようにする必要がある。しかし、コケは明確な根を持たないので、セラミック基盤材から剥がれやすいという欠点がある。そこで、セラミック基盤材の表面形状について検討した。

試行錯誤の結果、セラミック基盤材の表面に細かい凹凸を設けると共に、周囲に縁を設けることで耐風雨性の向上を図ることとした。しかし、まだ十分とは言えない状況にあり、さらなる工夫が必要である。

また、凹凸のある金型を用いたことにより、型の転写性や離型性の悪化、成型時間の増加等の新たな課題が生じた。そのため、離型剤の効果や金型コーティングの効果、生産性の高いセラミック基盤材のサイズについても検討する必要があった。

接着剤の選定及び使用条件

本研究では、生分解性接着剤を用いてセラミック基盤材にコケを貼り付けている。生分解性接着剤の役割は、コケ

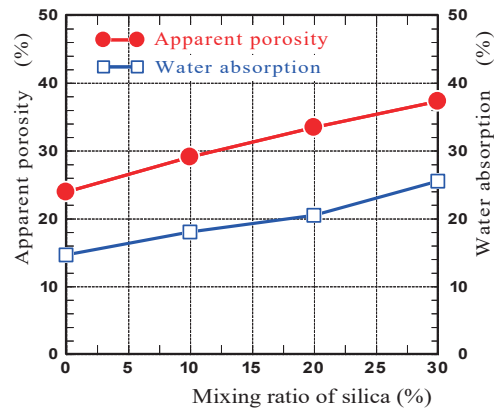


Fig. 2 Apparent porosities and water absorption of ceramics

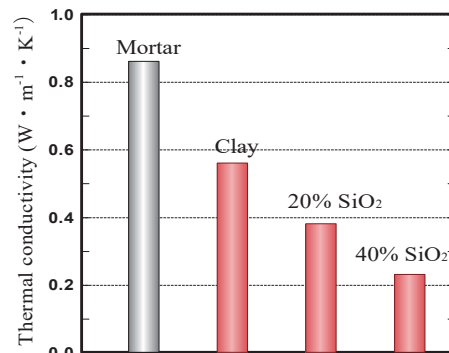


Fig. 3 Thermal conductivities of ceramics

緑化基盤材の作製当初において、コケを強制的にセラミック基盤材に接着することである。コケ緑化基盤材を作製後、コケが成長しだしてからは、コケ自身がセラミック基盤材に活着することを期待している。

接着剤の選定とその使用条件が非常に重要である。コケが容易に剥がれないようにするためには接着力が強いほ

うが良いが、接着力が強すぎるとコケが枯れてしまう、或いは成長しない等の不具合が生じる。本研究では、4種類の接着剤について、接着剤の水溶液の濃度を数通り変えてコケの接着試験を行い、比較的にコケの生育状態が良かったものを選定した。しかし、接着剤の最適な使用条件を見出すまでには至っておらず、今後の課題として残っている。また、コケを貼り付ける作業の省力化も今後の課題である。

2.2 屋上緑化模擬試験設備の作製

試作したコケ緑化基盤材の日射による温度上昇抑制効果を確認するため、また、先に述べたコケ緑化基盤材の課題について検討するために、建築物の屋上緑化模擬試験設備を作製した。図4はその外観を示す。

図4(a)に示すように、同構造物は4つの小部屋からなる。各部屋の隔壁には断熱材を貼り、部屋間及び周囲との熱移動ができるだけないようにしている。図4(b)は屋上緑化模擬試験設備が完成した状態の写真を示している。構造物の上部(天板)は厚さ30mmのモルタル材である。

天板の4つの区画にコケ緑化基盤材などの試料を設置して、試料の表面や裏面の温度、構造物内部の温度、試料から構造物内部への熱流などを測定する。図4(c)の写真では、コケの種類が異なる緑化基盤材を構造物の3区画に設置している。

なお、コケ緑化基盤材を屋上に設置した場合の日射による温度上昇抑制効果を確認するために、コケ緑化基盤材を設置しない場合と比較する必要があるため、一区画にはコケ緑化基盤材を設置していない。

屋上緑化模擬設備には、日射計(LPPYRA02、デルタオーム社製)及び自動散水を取り付けている。日射計により、全天日射量と気温を常時測定できる。また、自動散水装置により、任意の時刻に設定水量を無人で散水できる。

3. 実験方法及び有限要素解析の方法

3.1 実験及び有限要素解析の概要

コケ緑化材の日射による温度上昇抑制効果は、コケ緑化材が乾燥している時と水分を含んでいる時では異なる¹⁾。この効果の違いは、コケ緑化材が水分を含むことで、比熱や熱伝導率などの物理特性が変わること、及びコケ緑化材に水分の蒸発熱が作用することが原因として考えられる。

そこで本研究では、まず、水分を含ませた試料と乾燥させた数種類の試料について、日射熱を受けている間の表面と裏面の温度、及び裏面と床面間の熱流束の測定を行った。また、試料温度に及ぼす水分の蒸発熱の影響について検討するため、試料からの水分の蒸発量を同時に測定し、さらに水分の蒸発率から蒸発熱を概算した^{2)~3)}。

次に、水分を含んでいる試料の温度変化と蒸発熱との関係について検討するため、実験から得られた蒸発熱に相当する熱量が試料から熱交換により奪われるものと仮定して、有限要素計算により試料の温度をシミュレートし、水

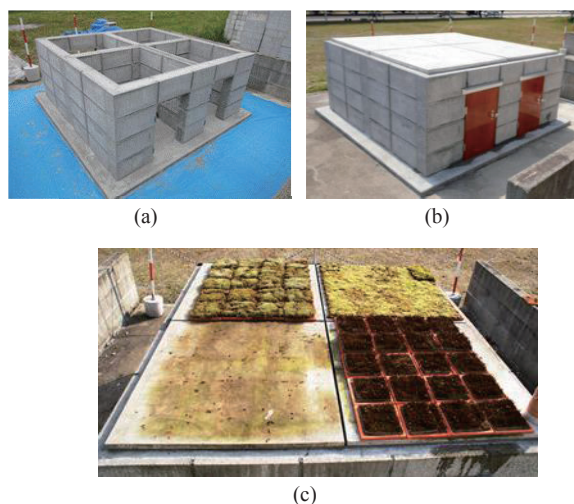


Fig. 4 Rooftop greening model

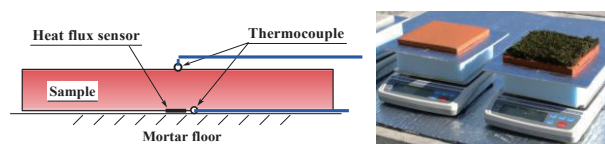


Fig. 5 Measurement of sample temperature, heat flux between the sample and floor, and mass changes

分の蒸発熱による試料温度の低下幅について検討した。

3.2 試料の表面温度及び水分の蒸発量の測定

実験には、吸水させたコケ緑化基盤材及びセラミック板、乾燥状態のセラミック板及びモルタル板の4種類の試料を用いた。試料の寸法はいずれも150×150mm、厚さ約10mmである(コケ緑化基盤材については、コケの厚さは含んでいない)。

吸水させた試料は、屋外でほぼ飽和吸水させて実験に用いた。コケ緑化基盤材とセラミック板の吸水量は、コケ緑化基盤材が150g以上、セラミック板が約60gである。セラミック板にコケを貼り付けることにより、吸水容量が大幅に増加する。

図5は日射熱を受けている試料の表面と裏面の温度、裏面と床面間の熱流束、及び水分の蒸発量の測定方法を示す。試料の表面と裏面に被覆熱電対(DG-K-5m-Y端子、アズワン社製)を取り付けることによりその温度変化を測定した。また、試料直下の床面に熱流束センサー(HIOKI, Z2017)を取り付けることにより、試料の裏面と床面間の熱流束を測定した。なお、試料を設置した床面は厚さ30mmのモルタル材で、その下は高さ約800mmの空間である。

日射を受けている間の試料からの水分の蒸発量の測定は、質量計(電子天秤EK-6100i-K、エー・アンド・アイ社製)の上に断熱材および遮熱シート(アルミ遮熱シート、250×250mm、厚さ4mm、アドホック社製)を敷いた上で試料を置き、その質量変化を測定することで行った。測

定間隔は 10 分である。その他に、日射計を用いて全日射量と気温を測定した。なお、試料周辺にアルミ遮熱シートを敷くことにより、試料以外の温度上昇をできるだけ抑えている。

3.3 有限要素解析の方法

図 6 は有限要素解析モデルを示す。また、表 1 は計算条件を示す。有限要素解析には汎用有限要素法コード Marc-Mentat を用いた。解析モデルは実験に用いた試料の断面に相当する。AB 間に日射による一様熱流束 Q_1 を、AB、BC、DA 間に試料と空気との熱伝達による一様熱流束 Q_2 、及び水分の蒸発により吸収される熱流束 Q_3 を分布させている。水分の蒸発による熱流束 Q_3 は、まず単位質量当たりの水の蒸発熱を 2400 kJ/kg と近似し、実験から得られた水分の蒸発率と単位質量当たりの蒸発熱を掛け合わせることで単位時間当たりの蒸発熱を求め、さらに、試料の底面を除く面積で単位時間当たりの蒸発熱を割ることにより求めた。

4. 結果及び考察

4.1 コケ緑化基盤材の日射熱低減効果

図 7(a)、(b) は試料の表面と裏面の温度変化を示している。図中には、外気温ならびに日射強度 (GHI) を併せて示している。この日の午前中は晴れで、午後は曇り時々晴

れであった。各試料の表面温度変化を比較すると、乾燥状態のセラミック板とモルタル板の表面温度は全期間同等である。一方、吸水状態のセラミック板は、5 時間程はコケ緑化基盤材と同等の温度であるが、その後はコケ緑化基盤材よりも高い温度になっている。試料の裏面温度は概ね表面温度と同じように変化しているが、コケ緑化基盤材と他の試料との温度差は相対的に大きくなっている。以上の

Table 1 Computational conditions

	Mortar	Ceramic
Density (kg m ⁻³)	2238	1800
Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	900	620
Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.86	0.38
Coefficient of heat transfer between a sample and air (W m ⁻² K ⁻¹)	55	
Solar radiation (W m ⁻²)	measured values	
Air temperature (K)	measured values	
Thermal emissivity	0.9	

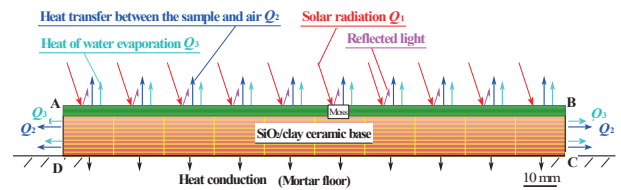


Fig. 6 FEM model

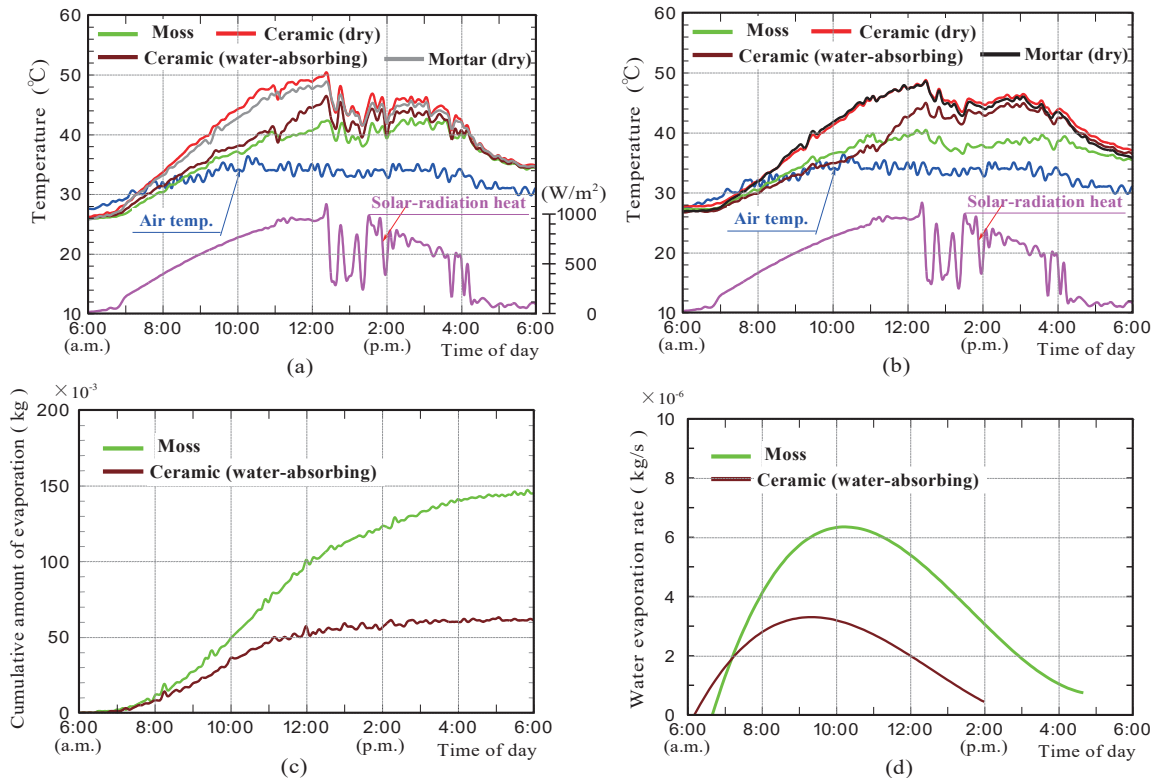


Fig. 7 (a) Front and (b) rear surface-temperature changes of samples, (c) amount of water evaporated from samples and (d) water evaporation rate

結果から、コケ緑化基盤材の日射による温度上昇抑制効果を確認できた。

図 7(c)、(d)は、コケ緑化基盤材及びセラミック板の水分の累積蒸発量及び蒸発率を示す。コケ緑化基盤材では日中を通して水分の蒸発が起こっているが、セラミック板では 8 時間程度で水分の蒸発が止まったことがわかる。これは試料の吸水容量の違いによる。この結果から、吸水させたセラミック板の表面温度が途中から急激に上昇し、乾燥状態のセラミック板とほぼ同じ温度になった原因は、試料の水分が蒸発してしまい、蒸発熱が作用しなくなったことが考えられる。

図 8 は試料の裏面と床面間の熱流束の測定結果を示す。乾燥状態のセラミック板とモルタル板は日射強度に依存して裏面と床面間に比較的大きな熱流が生じている。一方、吸水状態のセラミック板は 5 時間程度、コケ緑化基盤材は全期間を通して裏面と床面間にはほとんど熱移動がないことがわかる。この結果から、コケ緑化基盤材をビルの屋上に設置することで、屋内温度の低減を図ることができるものと考えられる。

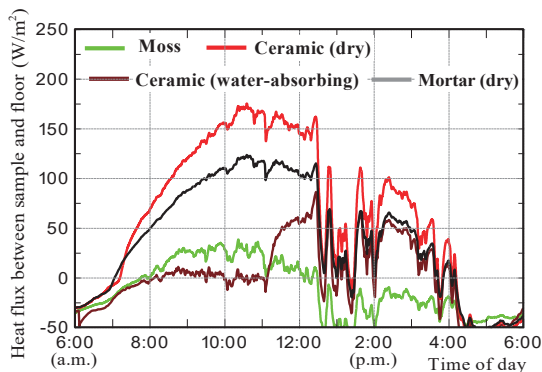


Fig. 8 Heat flux between the sample and floor

4.2 コケ緑化基盤材の蒸発熱による温度低減効果

図 9(a)は吸水させたコケ緑化基盤材とセラミック板についての単位時間、単位面積当たりの水分の蒸発熱を示す。先に述べたように、水分の蒸発熱は、まず単位質量当たりの水の蒸発熱を 2400 kJ/kg と近似し、実験から得られた水分の蒸発率と単位質量当たりの蒸発熱を掛け合わせることで単位時間当たりの蒸発熱を求め、次に、試験片の底面を除く表面積で単位時間当たりの蒸発熱を割ることにより求めている。

この水分の蒸発熱が試験片から奪われるものと仮定して、FEM 計算により試料温度をシミュレートした。その結果を図 9(b)に示す。FEM 計算結果は実験結果と概ね一致していることがわかる。この結果から、コケ緑化基盤材の表面温度が他の試料よりも低くなった原因は、蒸発熱の作用であると考えられる。また、試料からの水分の蒸発率を測定することにより水分の蒸発熱を概算し、その蒸発熱に相当する熱量が熱交換により試料から奪われるものと仮定して FEM 計算により試料の温度変化をシミュ

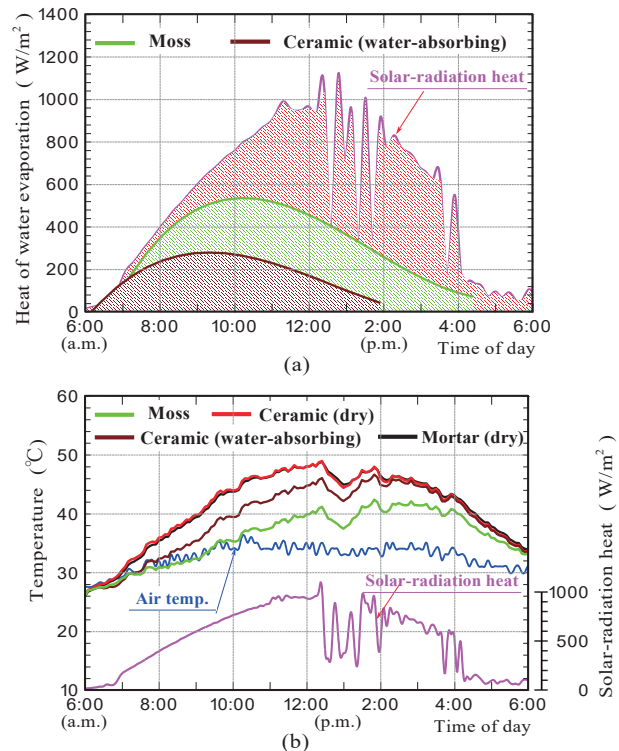


Fig.9 (a) Heat of water evaporation on samples and (b) sample-surface-temperature simulated by FEM analyses

レートすることで、水分を含んでいる試料の蒸発熱による温度低減効果を定量的に明らかにすることができるものと考えられる。

5. おわりに

粘土と廃シリカゲルを混合・焼成したセラミックにコケを貼り付けた緑化基盤材の日射による温度上昇抑制効果を明らかにした。

本研究の一部は公益財団法人宮崎県産業振興機構による平成 27 年度「環境リサイクル技術開発・事業化支援事業」によることを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋田 他：壁面コケ緑化が温熱環境に及ぼす影響に関する実測研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (2009)，pp. 2219-2222.
- 2) 王 他：廃シリカゲルを再利用したコケ緑化基盤材の温度変化の有限要素シミュレーション，日本機械学会講演論文集，No.178-3 (2017)，pp.145-146.
- 3) 田中 他：廃シリカゲルを再利用したコケ緑化基盤材の表面温度上昇の抑制能力，日本機械学会講演論文集，No.178-3 (2017)，pp.147-148.