

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Study on Thermal Performance of Sunagoke Moss Green Roof in Mitigating Urban Heat Island (ヒートアイランド現象の緩和の為のスナゴケ屋根緑化法の熱的性能に関する研究)
氏 名	ムハマド アミル アイサル ビン カリド Muhammad Amir Aisar Bin Khalid
<p>In order to mitigate the Urban heat island (UHI) effects, green roof is proposed to be a technique to increase the green region in urban area, as it is a method where the unused part of the roof of buildings is utilised for vegetation. A type of moss identified as Sunagoke (<i>Racomitrium Canescens</i>) was found to be the only truly draught tolerant species, and started to gain its popularity as a green roof candidate.</p> <p>However, the discovery on thermal performance of Sunagoke moss green roof are insufficient. Therefore, the objective of this dissertation is to deliver the evaluations on thermal performance of Sunagoke moss green roof in addressing UHI. Previous researches have been surveyed and organized in Chapter 1 to increase the comprehension relating to the role of plants in green roof application. This dissertation aimed to explore the thermal performance of Sunagoke moss green roof with two different experimental approaches: laboratory based indoor experiment, and the actual outdoor experiment.</p> <p>In Chapter 2, the green roof implementation method utilised in this research has been explained. Several conditions of model houses made from box-shaped Polystyrene foams were utilized throughout the experiments. A model house which was installed with a naturally dry Sunagoke moss green panel on the top, was used as the main experiment subject. The Sunagoke moss green panel was made by attaching 3 mm thickness of Sunagoke moss-mat on a galvalume steel plate. There was no substrate layer since Sunagoke does not require them. Besides, model houses with 30mm thickness of Sunagoke moss, 30mm thickness grass and soil, and a control model house were also used as the comparison subjects.</p> <p>Chapter 3 reviewed the green roof thermal performance evaluation method. Temperature analysis was conducted by examining the changes of surface, and interior temperature of each model house. Moreover, the heat energy balance were determined to analyse the heat contribution on model houses. The heat balance equation consists of irradiance, reflected radiation, latent heat, convection heat, and conduction heat.</p> <p>Chapter 4 presented the main results for indoor experiment: effects of convection heat transfer on Sunagoke moss green roof. The indoor experiments were piloted in an enclosed Artificial Climate Chamber, facilitated at Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute where the measurement environment can be adjusted so that naturally changing external factors will not affect the experimental result. Important parameters that influence the thermal exchange between roof surface and environment: wind velocity, irradiance, and evaporation were altered to simulate an average summer condition in Japan. Here, the dry and moist model house with 3mm Sunagoke</p>	

moss, and control model house were utilised.

As the results, the convection heat was found to dominate the whole heat transfer in dry Sunagoke moss and control roof surfaces which lack evaporation. Contrarily, the latent heat of moist Sunagoke green roof governed and diverted 70% in natural, and 91% in forced convection from the whole heat transfer process, individually. Besides moist Sunagoke moss in combined and forced convection, there were no correlation between irradiance and convection heat transfer coefficient. Nevertheless, the effects of wind velocity on Sunagoke moss green roof above 2 m/s were clarified identical since no significant changes were found in the convection coefficient, surface and interior temperature afterwards.

In Chapter 5, the relationship between the irradiation angle of radiation device which considered as sunlight, and the Sunagoke moss green roof has been examined in a similar indoor experimental setup as in previous chapter. In the experiment, the changes of model houses surface temperature were measured under irradiance strength of 200 to 1000 W/m², and irradiance angle of 30 to 90°. The experiment was conducted in a windless condition, and with the change of the angle of sunlight, it was possible to know the basic characteristics of irradiance angle and surface temperature.

Meanwhile, the results for experiment performed at the main office building rooftop of Yamaguchi University Engineering Campus were discussed in Chapter 6. This time, four dry model houses of 3mm Sunagoke moss, 30mm Sunagoke moss, 25mm grass with 5mm soil layer, and control were utilised as the test subjects. The three green panels displayed better convection heat transfer coefficient than the control roof, however, the thinnest Sunagoke moss was the highest. The 30mm thickness Sunagoke moss did not deliver heat as good as 3mm Sunagoke moss and 25mm grass in term of convection heat, but the suppression of interior temperature was the most superior. Despite the absence of soil, both Sunagoke moss green roofs showed decent insulation effect and provide thermal comfort comparable to grass.

Chapter 7 describes a summary of the effectiveness of the basic characteristics obtained in indoor experiments, and their relationship with outdoor experiments. With a certain degree, the corresponding results in outdoor environments can be interpreted in detail by referring to the results of forced and complex convection in indoor experiments. In addition, it is possible to quantitatively select appropriate heat insulation performance and evaporative cooling performance when adjusting the heat balance equation on the roof surface, regardless of whether the Sunagoke moss green panel is dry or wet. These results are extremely useful for establishing the Sunagoke Moss Green Roof Control System, and are expected to be used especially when conducting a theoretical approach (three dimensional thermal fluid numerical simulation).

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 739 号	氏名	Muhammad Amir Aisar Bin Khalid
最終試験担当者	主査	委員	加藤 泰生 望月 信介 小金井 真 田之上 健一郎 葛山 浩
<p>【論文題目】 Study on Thermal Performance of Sunagoke Moss Green Roof in Mitigating Urban Heat Island (ヒートアイランド現象の緩和の為のスナゴケ屋根緑化法の熱的性能に関する研究)</p> <p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>地域気候の特質にかかわらず世界中の巨大な都市で発生するヒートアイランド現象(UHI: Urban Heat Island)は、いかなる手法を用いても解決すべき環境問題の一つである。屋根緑化法は建物や家屋の屋根の未使用の部分に植物等を植生し活用する方法で、UHIの影響を緩和させ、都市部の緑地を増やすことで癒し効果など期待できる理想的な手法である。この屋根緑化法に、メンテナンスフリーで且つ、唯一、干ばつ耐性種であるスナゴケ(<i>Racomitrium Canescens</i>)と称されるコケの一種を用い、熱的性能に関する観点から、新たな評価法に基づき評価検討し、その結果その優位性、有効性を裏付けることができた。</p> <p>第1章では、屋根緑化法に関するその役割と期待される性能との理解を深めるために多くの屋根緑化関連の先行研究の文献を調査整理し、その内容などから本研究の意義などを述べている。特に本論文では二つの異なる実験手法(実験室ベースの屋内実験と実環境における屋外実験)の得失から、スナゴケ屋根緑化の熱的性能評価へと研究展開することを目指した。</p> <p>第2章では、屋根緑化法の実験装置、方法に関して説明した。屋内外の実験では、主たるパラメーター(照射量、風速、温度、湿度)に基づき4種の条件下で箱型モデル筐体を用いた。屋根上に自然乾燥したスナゴケ緑化パネルの有無(2つの条件、後者を特にコントロールパネルと称す)のモデル筐体が特に主実験対象である。スナゴケ緑化パネルは、スナゴケと有機接着剤にてガルバニウム鋼板の上に任意の厚み(この場合3mm、30mm)で貼り付けることで製作している。その他、芝生30mm厚(土壌の厚みを含む)の条件も比較対象のため実験を実施した。</p> <p>第3章では、屋根緑化の熱性能評価方法の詳細を検討したことを述べている。特に各モデル筐体の表面・筐体内温度の変化を調べることによる温度解析や、さらに、モデル筐体における各種熱の寄与度を分析するため熱収支式の作成とその構成などを検討した。式中の熱は、ここでは全受熱、反射熱、放射熱、蒸発潜熱、対流熱および伝導熱から成り立つと考えている。</p> <p>第4章では、屋根表面温度に対流熱伝達が及ぼす影響に限定して実施した屋内実験の結果に対する考察を記述している。自然に変化する様々な外的要因が実験結果に影響を与えないように、屋内実験を山口県産業技術センター密閉型人工気候室で実施した。ここでは計測環境の調整が可能でかつ風速、受熱および蒸発である屋根の表面と環境の間の熱交換に影響を与える重要なパラメータを、日本の平均的夏の環境を再現するように変更できた。評価の1つとして、熱収支を構成する各熱の全熱に対する割合を知ることによって、顕熱が蒸発を伴わない乾燥スナゴケ、またはコントロールパネルの全ての熱輸送を支配することが分かった。また、一方、湿ったスナゴケ屋根での蒸発潜熱は、それぞれ全熱の熱輸送から自然対流では70%、強制対流では91%を支配し熱輸送に極めて抑制的であることも知ることができた。さらには複合対流と強制対流における湿ったスナゴケの場合、風速(2m/s)以上では受熱と対流熱伝達係数には然したる相関はないことも知ることができた。全般に対流熱伝達係数、表面温度、伝導熱流束、室内温度などへの風速の影響が小さく、2 m/s以上の風速領域における対流熱伝達がスナゴケ屋根緑化の場合、同等程度の影響</p>			

しか及ぼさない事も明らかにした。

第5章では、太陽光に見立てた照明器具の照射角度とスナゴケ屋根緑化の関係について、室内実験にてその影響を調べた結果を考察している。実験は、照射強度(200,400,600,800,1000w/m²)の下、照射角度を30°~90°と変えながら、筐体表面温度の変化を測定した、実験は無風状態にて行い、太陽光角度の変化に伴い、夏場から、冬場にかけての照射角度と表面温度の基本特性を知ることができた。

第6章では、山口大学工学部本館屋上における屋外実験結果に関する考察を記述した。屋外実験ではスナゴケ厚さ3ミリと30ミリ、土壌を含んだ芝生厚さ30ミリ、コントロールパネルの4種の条件を有するモデル筐体を試験対象とした。環境変化での影響は否めないが3種の緑化パネルはコントロールパネルよりもより高い対流熱伝達係数を示し、とりわけ厚さ3ミリの場合が最も高い値を示した。スナゴケパネルの厚さ30ミリは厚さ3ミリや芝生のパネルに比べ、対流熱輸送に関しては劣るが、筐体内温度では最も低く安定した温度を示しており、抑制性能が最も優れていることがわかる。厚みの大小にかかわらずスナゴケ屋根緑化は適度な断熱効果を示し、土壌を有する芝生に匹敵する熱的快適性を提供できることが確認された。

第7章では、第4章、第5章での屋内実験で得られた基本特性の有効性と第6章での屋外実験のそれらとの関係などをまとめたものである。これらの成果は、将来的にスナゴケ屋根緑化制御システムを確立する上に極めて有用であり、とりわけ理論的アプローチ(3次元熱流体数値シミュレーション)を行う際に、利用されることを期待している。

本審査会や公聴会における主な質問内容は、1. スナゴケを用いた屋上緑化法で、ヒートアイランド現象をどの程度、緩和できるのか、2. 本法は、どの程度、事業として成り立つのか、3. 屋上緑化法にスナゴケを選択したのは、いかなる理由なのか、4. 本法が、主に適用できる建屋の種類にはどんなものがあるのか、5. 本法の利点の1つであるメンテナンスフリーについて、どう理解しているか、6. 複合対流伝熱領域での強制対流伝熱量と自由対流伝熱量のそれぞれの値はどのようにして求めたのか、7. 朝夕の環境温度変動時でのスナゴケ表面での熱バランスにおいて顕熱量をどう取り扱っているのか、 などであった。いずれの質問に対しても、発表者から丁寧で、かつ的確な回答がなされた。

以上より、本研究は、独創性、信頼性、有効性、実用性に優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 (a),(b) 総計5編)

(a) 査読のある雑誌

- 1) Muhammad. Amir Aisar Bin Khalid, Yasuo Katoh, Hiroshi Katsurayama, Makoto Koganei, Makoto Mizunuma, Yusuke Awata, Muhammad Wafyuddina Amin Senin, Thermal Relaxation by Sunagoke Moss Green Roof in Mitigating Urban Heat Island, IJENS, International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol.17, No.6, pp. 1-14 (2017-12)
- 2) Muhammad. Amir Aisar Bin Khalid, Yasuo Katoh, Hiroshi Katsurayama, Makoto Koganei, Makoto Mizunuma Effects of Convection Heat Transfer on Sunagoke Moss Green Roof A Laboratory Study, Elsevier, J. of Energy and Buildings, Vol. 158, Issue: 1, pp. 1417-1428 (2018・1)

(b) 査読のある国際会議の会議録

- 1) Muhammad. Amir Aisar Bin Khalid, Yasuo Katoh, Hiroshi Katsurayama, The Study on Thermal Effect of Sunagoke used in Roof Greening Application by Indoor Experiment, The 25TH International Symposium on Transport Phenomena, (ISTP-25), No.131, USB (2014-11)
- 2) Muhammad. Amir Aisar Bin Khalid, Yasuo Katoh, Hiroshi Katsurayama, Makoto Koganei Evaluation on Thermal Effect of Sunagoke in Roof Greening Application by Indoor Experiment, The 26TH International Symposium on Transport Phenomena, (ISTP-26), No. 41, USB (2015-9)
- 3) Muhammad. Amir Aisar Bin Khalid, Yasuo Katoh, Hiroshi Katsurayama, Makoto Koganei, Effects of Convection Heat Transfer on Sunagoke Moss Green Roof 27TH International Symposium on Transport Phenomena, (ISTP-27), No:165, USB (2016-9)