

# STUDY ON EVAPORATIVE COOLING OF NATURAL MESO-POROUS MATERIAL TO MODERATE THE URBAN HEAT ISLAND EFFECT

(天然メソポーラス材料の蒸散冷却による  
ヒートアイランド現象の低減に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

The ambient temperatures in urban areas like Tokyo are higher than the temperatures of the surrounding areas, caused by the Heat island effect. Increases of the urban temperature also have a serious impact on the electricity demand especially for the air conditioning. One of the contributory factors is from the reduction of wind flow, thus, wind channel development by widening the road, building the stream course inside buildings has been developed in the recent date. Use of appropriate surface materials could also reduce the surface temperature as well as energy consumption. To encounter the heat island, Tokyo metropolitan government proposed the “Green Tokyo Plan”, requiring new buildings to green at least 20 percent of their roof space. Additionally, water spraying to the road to increase the evaporation is promoted as the propaganda to cool the city especially in the hot city during summer time.

This thesis proposes the approach to moderate the urban heat island effect by employing the evaporative cooling ability of natural meso-porous materials without supplying the water and low-maintenance unlike the case of green roofs. To accomplish the continuous evaporative cooling effect, liquid water storing as well as the moisture adsorption with the smooth desorption capabilities are required. The author focused on the natural meso-porous material produced from Hokkaido so called Wakkanai siliceous shale since it includes mesopores appropriate for adsorbing, retaining and releasing higher amount of moisture than that of other natural porous materials. Wakkanai siliceous shale has low maintenance, long utilization time with the reasonable price. In addition to above, it derives the indirect benefit to conserve energy consumption from reducing the cooling loads. This idea can be applied to the building roof top material or exterior material to reduce surface temperature. Apart of that, Wakkanai siliceous shale could be used also for the purpose of site decoration such as in the garden or park.

Chapter 1 starts with the introduction of the research. The background of the heat island problem as well as the recent solutions and their difficulties are summarized. The objective of the current study with the introduction of the proposed method is presented here.

The objective of chapter 2 is to give a brief survey of the study related to the urban heat island strategies.

The experimental results from the previous research are summarized, as well as the results obtained from numerical modeling of heat and moisture transportation. To date, none of the previous research shows the application of meso-porous materials such as siliceous shale to encounter the heat island.

Chapter 3 gives the fundamentals of physical properties of porous materials and the introduction of Wakkanai siliceous shale. The measured vapor sorption isotherms derived from the sorption analyzer are compared. Among the examined materials, Wakkanai siliceous shale adsorbs vapor as much as 242 mg when relative humidity is increased from 60 to 90 percent, while other natural porous minerals and wood charcoals can only adsorb in much smaller values.

Chapter 4 deals with the investigation of thermal and moisture behavior of porous materials by chamber experiments, under high-controlled environment conditions, evaluated with the wind tunnel apparatus. From the cyclic experiments which hired the variations of temperature; relative humidity and simulated solar radiation, thermal and moisture behaviors including heat flux analysis suggested that Wakkanai siliceous shale can satisfactorily lower surface temperature with the great latent heat releasing when compared to other natural porous samples.

In order to ensure the possibility to be applied under the actual weather, the field experiment is carried out during rainy season and summer season and discussed in chapter 5. Two of experiments are conducted in Sapporo city and Mie prefecture. The results obtained from the field experiments confirmed the effective performance of Wakkanai siliceous shale in particular with large size particles which have the diameter in between 10-20 mm of sintered siliceous shale. The fact is that large size particles allow the ventilation occur in the air space between particles which enhance evaporation from the inside to the atmosphere including the vapor adsorption. The sintered type of siliceous shale (burned siliceous shale at 800 degree for 2 hours) is effective due to its strong to degradation. It could reduce bottom temperature about 19 degree whereas grass could reduce about 17 degree in summer season. Furthermore, moisture storage content and heat flux analysis are discussed in this chapter.

Chapter 6 presents the numerical evaluations of simultaneous heat and moisture effect from using Wakkanai siliceous shale to ascertain the experiment results. The experiment to determine the wind flow inside the depth of materials by using Naphthalene is carried out, and the obtained wind speed profiles are used in the calculation. Finally, the influence of the weather conditions and material moisture adsorption ability is investigated. The sorption ability strongly influenced the surface temperature reduction as well as the space between particles. Coarse materials are likely to lower the temperature better than the fine materials due to the ventilation inside. Additionally, such a windy weather condition accelerated the vapor movement inside the material layers.

Conclusions are made and recommendations for further research are presented in chapter 7. Throughout the experiment, Wakkanai siliceous shale revealed that it can lower surface and bottom temperature with the continuously latent heat releasing without supplied water. Especially the better temperature reduction than grass was observed with the large sized particles, this is caused by the inside evaporation and vapor adsorption. The experimental and numerical study also determined that wind effects including the particle size and porosity affects the thermal performance. This research has confirmed that Wakkanai siliceous shale is effective to be used as the roof covering material to reduce heat island effect as well as the energy consumption thanks to the appropriate pores size to retain and release moisture from air.

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長 野 克 則

副 査 教 授 繪 内 正 道

副 査 教 授 秋 山 友 宏

副 査 准教授 濱 田 靖 弘

## 学 位 論 文 題 名

# STUDY ON EVAPORATIVE COOLING OF NATURAL MESO-POROUS MATERIAL TO MODERATE THE URBAN HEAT ISLAND EFFECT

(天然メソポーラス材料の蒸散冷却による  
ヒートアイランド現象の低減に関する研究)

近年、東京などの大都市中心部の気温が周辺地域よりも非常に高くなる現象が顕著になってきている。これをヒートアイランド現象と呼んでいるが、新たな都市環境問題の引き金となっており、各自治体において本格的な対策が取られはじめている。ヒートアイランド現象の主な原因は、(1) 高層建物の林立による都市内への風の侵入低下、すわなち、対流冷却能力の低下、(2) 地表面被覆物の変化や地上の熱容量の増加、(3) 高密度な人工排熱の放出による。したがって、ヒートアイランド現象緩和のためには、(1) 運河や緑道など都市内に風の通り道の確保、(2) 地表面や屋上の緑化の促進、または透水性や保水性のある被覆材への転換、(3) 高効率機器への転換や省エネルギーの推進、自然エネルギーや未利用エネルギーの活用、交通量の抑制などによる人工排熱の削減が効果的である。そこで本研究の目的は、北海道北部で産出される天然メソポーラス材料である稚内層珪質頁岩を建物の屋上や歩道に適用して、本材料がもつ保水性や水蒸気の吸着能力を利用した蒸散冷却により、ノーマンテンスかつ持続的な表面温度低減効果を工学的に明らかにして、ヒートアイランド現象の低減に期するものである。

第1章は序章であり、研究の背景と目的を述べた。

第2章ではヒートアイランド現象緩和に関するこれまでの研究成果や技術開発の状況を整理してまとめた。その上で現在までに本論文で提案する珪質頁岩のような天然メソポーラス材料をヒートアイランド現象緩和に適用しようとする研究例は未だ見当たらないことを示した。

第3章ではメソポーラス材料の吸放湿メカニズムについて説明した後、本論文で対象とする稚内層珪質頁岩の物理特性と水蒸気吸脱着特性について、種々の代表的な天然多孔質材料と比較して論じた。実測から、稚内層珪質頁岩は相対湿度 60~90 % で水蒸気吸脱着量が 242 mg/g と他の天然多孔

質材料と比べて格段に大きな吸放湿性能があることを明らかにした。また、比表面積や細孔容量も国内で産出される一般的な珪藻土に比べて7倍程度であることを示した。

第4章は稚内層珪質頁岩、および他の多孔質材料や屋上緑化に使用される植物の蒸発と水蒸気の吸脱着特性に関する室内実験である。恒温・恒湿庫内に小型風洞内を設置して、そこで一定温湿度条件下で飽和状態からの蒸発実験を行った。次いで庫内の温湿度を実際の日変化に模して24時間周期で変化させた繰返し実験を行った。蒸発実験から、多孔質材料の蒸発特性は毛管現象が支配的なことを示した。また繰返し実験結果から、持続的な冷却効果の維持には湿度変動下の水蒸気吸脱着特性が重要な役割をもつことを明らかにした。特に、碎石状の稚内層珪質頁岩敷設層の表面温度は、珪砂に比べて最大15℃低く維持されており、屋上緑化に使用される典型的な植物であるセダムと同等な温度低減効果を有することを明らかにした。

第5章はフィールド実験である。2006年夏には札幌において4種類のサンプルを用いて、さらに2007～2008年には三重県にて12種類のサンプルを暴露して、表面温度低減効果に関する実証実験を行った。梅雨明け後の8月中旬においても、天然および焼結処理碎石状頁岩の表面温度は芝生と同等にモルタルや砂利に比べて20℃程度低く保持されており、また底部の温度は芝生よりもさらに3℃程度低く維持されることを明らかにした。また、1年間暴露した天然頁岩は風化が見られたものの、焼結頁岩は外観上の劣化が見られず、また物理特性なども初期の値を維持することを確認した。

第6章は大間隙を有するメソポーラス材料敷設層内の通風効果を考慮した熱水分同時移動計算プログラムの開発、および本プログラムを用いた国内外の大都市におけるヒートアイランド緩和効果と冷房負荷削減効果の予測に関するものである。まず、敷設層の上中下位置に錠削形状ナフタリンを挿入し、その昇華速度が風速の関数で与えられることを利用して敷設層内部の風速分布を明らかにした。実際の気象条件を与えた計算結果が実測された各部の温度変化や質量変化を良く再現することを確認した。このとき、大間隙を有する碎石状稚内層珪質頁岩敷設層においては、通風効果により内部層まで水蒸気の吸着・脱着が活発に行われ、そのために敷設層表面だけではなく、内部や底部の温度も低下するメカニズムを明らかにした。既築建物屋上の改修時の表面被覆材として、通常のアスファルト防水シートを用いた場合とその上に碎石状稚内層珪質頁岩を敷設した場合について計算を行った。その結果、東京や大阪では表面および底部温度の低減効果は37℃前後、タイのバンコクにおいては42℃以上に達することを明らかにした。このとき、日中の天井面から建物内への侵入熱量は3分の一から10分の一程度まで削減されることを示した。

第7章は終章であり、本研究で得られた結論を総括し、ヒートアイランド現象緩和に対して稚内層珪質頁岩の適用の有効性について展望を述べた。

これを要するに、筆者は水蒸気吸脱着性能に優れた天然メソポーラス材料である稚内層珪質頁岩の碎石を建物の屋上などに厚さ50～100mm敷設することで、我が国の温暖地域や東南アジア諸国の気候下において散水などを行わずとも長期間にわたり夏期のヒートアイランド現象の低減や冷房負荷削減に有効であることを実測と数値計算から明らかにした。さらに、この効果を発現させるためには敷設層内部までの通風を確保することが重要な鍵を握ることも解明した。これは、都市環境工学をはじめとして、建築工学、設備工学、空間性能工学の進展に寄与するところ大である。

よって、筆者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。