

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420581

研究課題名(和文) 保水性舗装の熱・水分輸送過程を含む非定常温熱環境モデル開発

研究課題名(英文) Development of unsteady thermal environmental model including the process of heat and moisture transport into water retained pavement.

研究代表者

近藤 明 (KONDO, Akira)

大阪大学・工学研究科 教授

研究者番号：20215445

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：都市化された地表面は人工的なアスファルトで覆われ、ヒートアイランド現象を起こし、健康に悪影響を及ぼす。水分を浸透し保水することができる保水性舗装は、降雨を内部に保水し、蒸発させることにより地表面を冷却することができる。この研究では、保水性舗装に対して蒸発効率とマトリックポテンシャルを実験により求め、1次元の熱・水分輸送モデルを開発し、野外実験によりこのモデルの妥当性を検証した。さらに、CFDモデルに組み込み大阪府吹田市江坂の実街区に適用した結果、保水性舗装により地表面温度が低下し、温熱環境を向上することを検証した。

研究成果の概要(英文)：Urbanized land covers such as artificial asphalt have caused urban heat island (UHI) phenomenon, which can lead to adverse effects on human health and quality of daily lives. A water retentive pavement (WRP), in which liquid water can infiltrate and be retained in common with natural soil, enables retained rain water to evaporate and keeps the surface cooler than that of a conventional asphalt pavement. This study developed a one-dimensional numerical model to simulate the heat and moisture transport within WRP, and incorporated it into a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model. The effect of WRP installation for mitigating UHI in a real city block was evaluated by using the coupled CFD model.

研究分野：工学

キーワード：保水性舗装 蒸発効率 マトリックポテンシャル ヒートアイランド 非定常温熱環境モデル 透水係数 潜熱フラックス 顕熱フラックス

1. 研究開始当初の背景

(1)都市ヒートアイランド(UHI)は、日本の主要な都市で観測されており100年間で約2.4℃気温が上昇している。日最低気温が25℃より下がらない熱帯夜も増加し、熱中症などの健康影響も懸念されている。UHIが起因される原因として、地表面被覆の人工化による緑地、水面、農地、裸地の減少による蒸散効果の減少、舗装面、建築物(アスファルト、コンクリート面等)の増大による熱の吸収蓄熱の増大と反射率の低下、建物(オフィス、住宅等)、自動車及び工場等事業活動からの排熱の増加、都市形態の変化による弱風化などが考えられている。UHIの緩和対策として、屋上緑化、壁面緑化、高反射性塗装、保水性舗装などが実際に実施され、UHIの緩和効果が確認されている。

(2)メソ気象モデルWRF(Weather Research Forecasting)やCFD(Computational Fluid Dynamics)を用いたUHIのモデル研究は、筆者らも含めて非常に多く実施され、UHIの緩和対策による温熱環境が評価されている。

2. 研究の目的

人間が温熱環境の快適を感じる要素は、気温、湿度、風速、放射である。屋外では放射の影響を最も強く受ける。日射以外では、地表面からの放射の影響が強い。この観点から、本研究で着目するUHI緩和対策は、保水性舗装とする。保水性舗装は、雨水などで吸収した水分を蒸発させ、気化熱を奪うことにより、道路の表面温度を低下させる効果があり、アスファルト舗装と比べると表面の最高温度は10℃程度下がることが報告されている。

(1)保水性舗装による表面温度の低下に関する測定に関する研究事例は多くある。本研究でも保水性舗装材に対して、保水性舗装材のマトリックポテンシャル、透水係数、蒸発抵抗、熱伝達率を測定し、保水性舗装内の熱・水分移動モデルを構築し、モデル妥当性は屋外実験を通して評価する。保水性舗装への水分供給は降雨により行われるが、降雨の保水性舗装への吸収過程についての研究事例は少ない。そこで、保水性舗装内の水分蒸発過程と水分吸収過程のヒストリシスを表現できるモデルの構築を目指す。

(2)UHIのモデル研究ではWRFとCFDが用いられることを既に述べた。WRFの格子解像度では街区内の保水性舗装のミクロな影響を予測することは難しい。また、CFD研究は、壁面に境界条件を与え、気温が高温となるある時刻の定常計算がほとんどである。定常計算では、保水性舗装内の水分動態を扱うことが出来ない欠点がある。WRFによるマクロな気象条件をCFDの外部境界条件として与え、非定常計算の取り組みも始まっている。本研究でもWRFによるマクロな気象条件をCFDの外部境界条件として与えるモデルに、上述した保水性舗装の熱・水分移動モ

デルを組み込み、温熱環境を評価できるモデルの構築を目指す。温熱環境評価を目的とする多くのCFD計算は、晴天時に限定されている。本研究は降水の保水性舗装材への吸収過程とその水分の蒸発過程を計算できることを目指し、雨天時の保水性舗装の水分吸収過程と晴天時の水分蒸発過程を含むモデル開発を行う。

3. 研究の方法

(1)蒸発効率の測定方法：試料(保水性舗装、アスファルト)の蒸発効率と含水率の関係を明らかにするために、蒸発実験を行い、飽和含水した試料の重量変化からそれぞれを求めた。実験は、気温30℃、湿度50%に設定した暗室のグローブチャンバー(エスペックミック社、型番:TGE)内で行った。用いた保水性舗装は、フライアッシュ製で、サイズは縦横15cm、高さ5cmである。アスファルトも同様のサイズのものを使用した。試料を24時間水に浸すことで試料を完全に含水させた後、水で湿らせた布で包み24時間プラスチック容器の中で放置することにより重力水を取り除いた。本研究では、微小孔隙に表面張力によって保持されている重力水を取り除いた状態を試料の飽和含水状態とした。次にグローブチャンバー内で、重量計(AND社、型番:GX-8K)の上に置き、20秒ごとの重量変化を計測し、そこから蒸発量を測定した。試料の底面、側面での熱交換を遮断し、表面からの熱交換のみを行うため、発泡スチロールで作成した容器の中に試料を入れて実験を行った。同時に、データロガー(グラフテック社、型番:GL800)と熱電対(グラフテック社、型番:JBS-7115-5M-T)を用いて、10秒ごとの試料の表面温度の変化を測定した。1つの試料に対し、3~4本の熱電対を用いて表面温度を計測することで測定誤差を小さくした。

(2)マトリックポテンシャルの測定方法：加圧法によりマトリックポテンシャルの測定を行った。圧力容器に試料を入れ、試料を介さず空気が抜けるのを防ぐために試料と圧力容器の隙間に上部からシリコンを入れて塞ぎ、マンメータで圧力を調整しながらダイヤフラムポンプ(イワキ社、型番:APN-240NAN-1)で加圧した。底面にはセパレータとしての紙を用いた。圧力は絞りで調整することにより一定に保ち、人的誤差が起らないようにした。水分が圧力と平行になるまで加圧を続け、圧力容器の下部から出た水の量を測定し、試料の飽和度を求めた。また加圧時に抜ける空気とともに蒸発することを防ぐため、バブリングを介することで加圧空気を飽和させた。

(3)屋外実験の概要：測定場所は、大阪大学吹田キャンパス旧環境棟屋上で、測定期間は、2014年10月29日5時~10月30日18時である。用いた試料は、保水性舗装とアスファルトである。蒸発量の測定は、重量計(AND

社、型番：GX-8K）を用いて 20 秒ごとの重量変化を、表面温度はデータロガー（グラフテック社、型番：GL800）と熱電対（グラフテック社、型番：JBS-7115-5M-T）を用いて 10 秒ごとの試料の表面温度の変化を測定した。表面温度の測定の際、放射による熱電対との熱交換を防ぐため、アルミ箔で熱電対を覆い、測定した。同時に、計算に用いる外部環境の入力データを得るため、気温、比湿、風速、放射量を測定した。気温は、熱電対を用いて計測した。比湿は、湿度計（T&D 社、型番：TR-7wf）を用いて 1.5m の高さで相対湿度を測定し、そこから計算した。風速は、SAT 型超音波風向風速計（ソニック社、型番：SAT-600）を用いて 2m 高さで水平方向に加えて鉛直方向の風速も測定した。放射は、長短波放射計（英弘精機社、型番：MR-40）を用いることで、短波放射と長波放射を測定した。図 1 に野外実験の様子を示す。

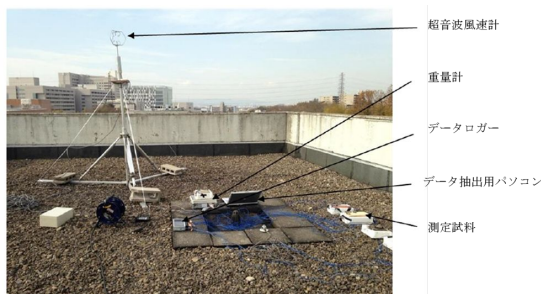


図 1 屋外実験の概要

(4) モデルの概要

保水性舗装の熱・水分輸送モデル：このモデルは鉛直 1 次元の液体水輸送、水蒸気輸送、顕熱輸送モデルから構成される。表面の境界条件は地表面熱収支から与えられる。潜熱（水蒸気）フラックスを評価するための蒸発効率 γ は、蒸発効率実験から水分含水率の関数として与える。保水性舗装内の空隙での水分蒸発についても同様に、蒸発効率実験から水分含水率の関数として与える。また、液体水輸送の拡散係数は、実験より求められた水分含水率の関数であるマトリックポテンシャルを用いて定式化される。このモデルは、屋外実験との比較により妥当性の検討が行われる。

保水性舗装用 CFD モデル：CFD モデルは、一般的な運動方程式、連続の式、熱保存式、比湿保存式から構成される。野外での保水性舗装の効果を評価できるように、上記の保水性舗装の熱・水分輸送モデルの組み込み、道路あるいは建物が受ける太陽放射の 1 日変動を考慮できるモジュールの組み込み、WRF で計算された時間変動する風速と気温の計算結果を CFD の境界条件に設定できるモジュールの組み込みを実施し、このモデルを大阪府吹田市江坂に適用し、保水性舗装を敷設した場合の温熱環境を評価した。

4. 研究成果

(1) 蒸発効率の結果：保水性舗装の蒸発効率の実験結果を図 2 に示す。飽和含水率は 0.09 で、飽和含水率が 0.05 まで蒸発効率はほぼ 1 であるが、その後、飽和含水率が 0.03 まで蒸発効率は急激に低下し、飽和含水率が 0.03 より少なくなると蒸発効率はほぼ 0 となった。

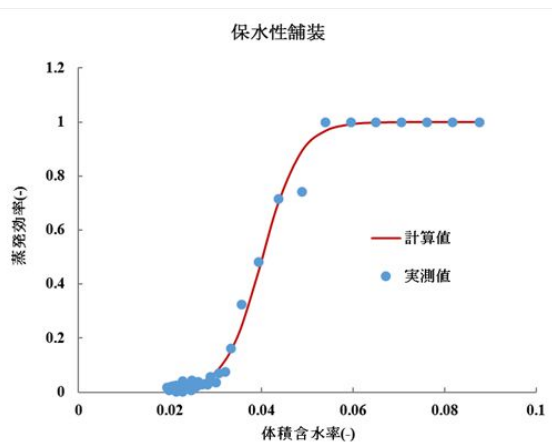


図 2 含水率と蒸発効率の関係

(2) マトリックポテンシャルの結果：保水性舗装のマトリックポテンシャルの実験結果を図 3 に示す。飽和度が 1 より小さくなると急激にマトリックポテンシャルが大きくなる。

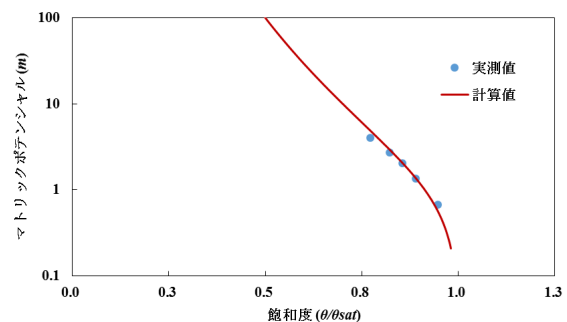


図 3 飽和度とマトリックポテンシャルの関係

(3) 屋外実験とモデルの比較：保水性舗装とアスファルトの表面温度の実験結果と計算結果を図 4 と図 5 に示す。1 日目の測定された表面最高温度は保水性舗装では約 27 度、アスファルトでは約 37 度を示し、モデルでもほぼその状況を再現できている。2 日目の測定された表面最高温度は保水性舗装では約 35 度、アスファルトでは約 40 度を示し、モデルでもほぼその状況を再現できている。1 日目と 2 日目で保水性舗装とアスファルトの表面温度の差が小さくなっているのは、保水性舗装の水分含水率が減少し、蒸発効率が低下してことによる。図 6 に、保水性舗装の蒸発フラックスの測定値と計算値を示す。モデルは、観測値を良く再現しており、2 日目の蒸発フラックスは 1 日目に比べて大きく低下している。これが、2 日目の保水性舗装の表面温度が低下しなかった要因である。

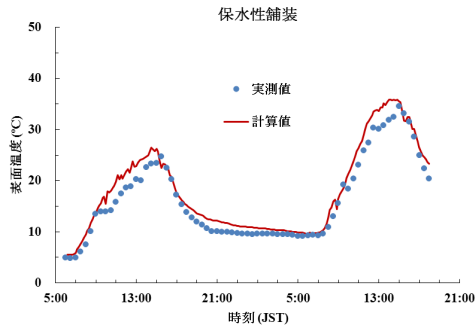


図4 保水性舗装の表面温度

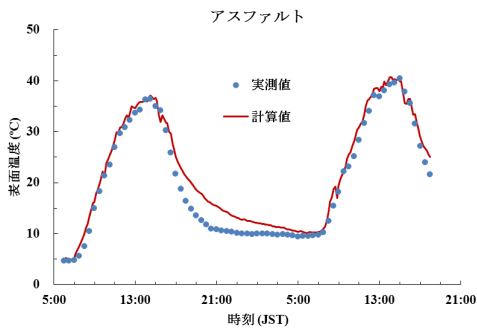


図5 アスファルトの表面温度

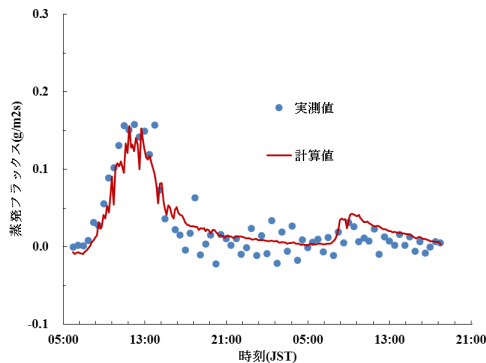


図6 保水性舗装の蒸発効率

(4)実街区への適応：保水性舗装の熱・水分輸送モデルを組み込んだ CFD モデルを実街区に適応した。実街区は大阪府吹田市江坂で（図7参照）計算期間は2011年8月8日5時～9日5時の1日間である。この日は、日本全体が高気圧に覆われた晴天日である。

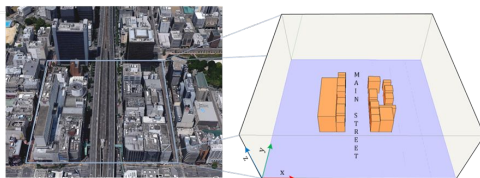


図7 大阪府吹田江坂の写真と計算モデル

計算は、図7に示す中央の道路をアスファルト舗装、または舗装性舗装に設定して実施した。さらに、舗装性舗装に対しては、保水性舗装を飽和含水率にした場合、保水性舗装に降雨量 2mm/h、1mm/h、0.5mm/h、0mm/h 相当の水分を供給した場合に対して計算を実

施した。図8に道路表面温度の時系列変化を示す。保水性舗装を飽和含水率から計算をした場合は、顕著に表面温度の低下が顕れる。降雨量 2mm/h、1mm/h、0.5mm/h、0mm/h 相当の水分を供給した場合は、表面温度の低下は計算開始時には顕れるが、含水量の低下により正午になるとその影響はほとんど見ることができない。より詳しく検証するために図9にアスファルト、飽和含水の保水性舗装、降雨量 2mm/h 相当の水分を供給した保水性舗装の潜熱フラックスの時系列変化を示す。降雨量 2mm/h 相当の水分を供給した保水性舗装の潜熱フラックス量はアスファルトとほとんど違いがないことがわかる。

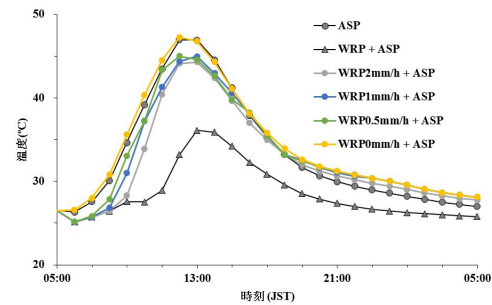


図8 表面温度の時系列変化

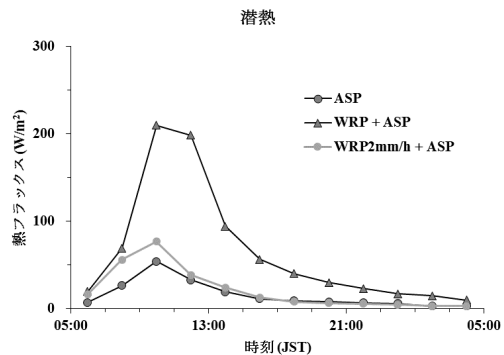


図9 潜熱フラックスの時系列変化

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3件)

Cortes A., Shimadera H., Matsuo T., Kondo A., Evaluation of Water Retentive Pavement as Mitigation Strategy for Urban Heat Island Using Computational Fluid Dynamics, Asian Journal of Atmospheric Environment, 査読有, 10, 2016, 179-189, DOI: 10.5572/ajae.2016.10.4.179

Cortes A., Kondo A., Shimadera H., Hongu S., Numerical Evaluation of the Transport of Heat and Moisture in Water Retentive Pavement, 大気環境学会誌, 51, 2016, 103-110

Cortes A., Murashita Y., Matsuo T., Kondo A., Shimadera H., Inoue Y., Numerical evaluation of the effect of photovoltaic cell installation on

urban thermal environment, Sustainable Cities and Society,19,2015, 250-258, DOI:10.1016/j.scs.2015.07.012

〔学会発表〕(計5件)

倉橋知里、嶋寺光、Aiza Cortes、近藤明、降雨後の保水性舗装の水分吸収特性の推定、第45回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会、2016年3月、大阪

Cortes A., Shimadera H., Matsuo T., Kondo A., Numerical evaluation of the effect of photovoltaic cell installation on urban thermal environment, 第56回大気環境学会年会, 2015年9月、東京

Cortes A., Murashita Y., Kondo A., Shimadera H., Inoue Y., Modeling of the thermal environment of Osaka City and evaluation on the effect of photovoltaic cell installation by CFD analysis, 7th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, 28, October 2014, Hannover

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 明 (KONDO, Akira)
大阪大学大学院・工学研究科・教授
研究者番号：20215445

(2) 研究分担者

嶋寺 光 (Shimadera Hikari)
大阪大学大学院・工学研究科・助教
研究者番号：20647367