

令和元年6月13日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06675

研究課題名(和文) 三次元空間情報と土壌 植物 大気系モデルを用いた樹木の微気候調整効果の予測

研究課題名(英文) Predicting The Microclimate Modification Effects by Urban Trees Using 3D Spatial Information and Soil-Plant-Atmosphere Continuum Model

研究代表者

清野 友規 (Kiyono, Tomoki)

東京工業大学・環境・社会理工学院・研究員

研究者番号：20807143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：樹木の微気候調整効果を活かした設計・灌水計画を支援するために、単木の熱・水収支と緑化空間の熱環境予測手法の確立を目指した。特に、計算負荷などの問題から建築環境工学では殆ど扱われてこなかった水文過程(土壌 植物 大気系：SPACの相互作用)について、設計実務への応用を意識した簡便な数値モデルを検討した。更に、既存の商用3D-CADを利用した熱環境シミュレーター上へのSPACモデルの導入を目指したが、残念ながら期間終了時点では完成に至らなかった。日本の街路樹を想定したSPACモデルの予測結果は、自然降雨のみに頼った場合、夏季の大半の期間で蒸発散の効果が十分に活用できない可能性が高いことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で採用した手法は、樹種・土壌容積、気候特性、灌水頻度といった設計・管理条件に基づく工学的な緑化設計の実現に貢献できる。建築環境分野における既存の蒸発散モデルの多くは水収支を考慮しておらず、また、十分に灌水された条件下での実験値を基にパラメタライズしている場合が多かった。本研究では、樹木の水消費のために土壌含水率が低下し、土壌温度が上昇することで熱環境が悪化する事例を示し、更に自然降雨のみでは夏季の大半の期間でこの温度上昇が生じる可能性が高いという予測を示した。既存モデルが蒸発散の効果を過大評価している可能性を示唆し、灌水管理と、地域の降水特性を踏まえた設計の重要性を強調している。

研究成果の概要(英文)：To support the bioclimatic design using urban trees and irrigation planning, this study aimed to develop the predictive methods of tree energy and water balances and urban thermal environment. Especially, I focused on the hydrological processes in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) system that is rarely considered in present studies & practices of architectural environmental engineering, mainly due to its huge computational costs. I evaluated practical mathematical models that can be used for landscape/architectural designs, but regrettably, I couldn't finish implementing the models into a commercial 3D-CAD software-based thermal environmental simulator. The SPAC model simulation results for Japanese street trees indicated that in the summer seasons in Japanese urban areas, we cannot fully utilize the cooling effects of evapotranspiration when only rely on natural rain; irrigation will improve the thermal environment significantly.

研究分野：建築環境工学分野

キーワード：都市緑化 樹木 蒸発散

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

樹木の蒸散・地表面の水文特性は、ヒートアイランド現象や都市型水害を緩和する都市緑地のグリーンインフラ機能と密接な関連がある。特に熱中症は国内死亡者数が年間 1700 人を超えるなど、近年最も深刻な気象災害となっており、強く対策が求められている。

都市域での高木の蒸散・熱収支に関する基礎的な計測データは、特に 2010 年代に入り、水文気象学・植物生理生態学分野を中心に世界的に増加している。しかし、その予測は、放射・気流・水文・植物生理といった広範な学際的知識が必要なだけでなく、単木スケールでの蒸散量の定量的実態と、周辺建物も含めた詳細な空間分解能が必要であるために、国内外・学問領域を問わず、定性的な知見に留まっている。

2. 研究の目的

本研究は、樹木の微気候調整効果を活かした設計・灌水計画を支援するために、単木の熱・水収支と緑化空間の気温予測手法の確立を目的とした。特に、計算負荷の問題などの理由から建築環境工学分野では殆ど扱われてこなかった水文過程(土壌・植物・大気系: SPAC の相互作用)について、設計実務への応用を念頭に置いた最適な数値モデルを検討した。更に、既存の商用 3D-CAD に対応した熱環境シミュレーター上への SPAC モデルの導入を目指した。

3. 研究の方法

蒸散散量は土壌含水率が特定の閾値以下になると急速に減少するため、その熱的效果を活用するためには、閾値以上の含水率の維持が重要である。直接的な解法としては熱・水分同時移動計算があるが、数万メッシュを超える街区スケールの計算には負荷が高い。一方で、土壌容積・灌水頻度などの設計・管理条件を検討する際には、必ずしも経時変化を予測する必要はなく、重要となるのは特定のサイトにおける土壌水分の気候学的平均値である。そこで、土壌含水率、および最大限の蒸散散を期待できる期間長さの簡便な予測手法として、定常的な気候条件下での毎日の水収支パターンの出現頻度を解析的に求められる Rodriguez-Iturbe & Porporato (2004) の確率的な水文モデルに着目し、熱環境評価への応用を試みた。

(1) 時刻  $t$  における土壌水収支は式 1 のように表せる。また、降雨を水文モデルの入力条件として確率的に扱う場合、降雨イベントの発生をポアソン過程、イベント時降雨量を指数分布として一般に近似できることから、含水率  $s$  の確率密度  $p(s)$  の経時変化は Chapman-Kolmogorov 方程式(式 2)となる。 $s$  の気候学的平均値は式 2 について  $t \rightarrow \infty$  の極限を取ることによって得られる。

$$nZ_r \frac{ds(t)}{dt} = R(t) - I(t) - Q[s(t), t] - E[s(t)] - L[s(t)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p(s, t) = \frac{\partial}{\partial s} [p(s, t) \rho(s)] - \lambda' p(s, t) + \lambda' \int_{s_2}^s p(u, t) f_T(s - u, u) du \quad (2)$$

$n$ : 空隙率,  $Z_r$ : 根の在る土壌深さ,  $s(t)$ : 相対含水率,  $R(t)$ : 降雨,  $I(t)$ : 降雨遮断,  $Q[s(t); t]$ : 表面流出,  $E[s(t)]$ : 蒸散散,  $L[s(t)]$ : 排水,  $1/\lambda$ : 降雨イベント間隔の期待値,  $\rho(s)$ : 正規化された水損失量 ( $= \{E[s(t)] + L[s(t)]\} / nZ_r$ )

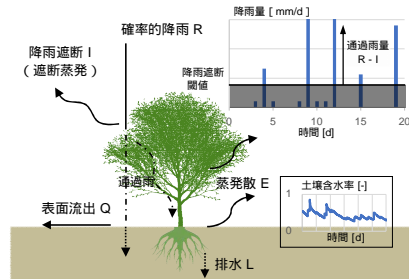


図1 樹冠下土壌の水収支とその確率過程

式 2 の右辺第 1 項は確定的な水損失 ( $E + L$ ) による  $p(s)$  の変化、第 2・3 項は確率的な降雨浸透 ( $R - I - Q$ ) による  $p(s)$  の減少・増加をそれぞれ表す。

予測計算時の境界条件として、降雨量・日射量は名古屋の 2010-2012 年 7-8 月の平均値を用いた。樹木パラメータには、我々が有する樹木 11 種の単木蒸散量データ(清野ら、建築学会環境系論文集、2015)の内、蒸散量が最も多かったケヤキと最も少なかったシラカシの値を用いた。土壌種と根の深さ  $Z_r$  は一般的な街路樹を参考に設定した(ローム土, 60cm)。

(2) 次に、表面温度上昇をもたらす土壌含水率の閾値について、都市域での実態を把握するために、2017 年 9 月中の降雨イベント(計 5 回)の後の期間を対象に都内の緑道で土壌表面温度  $T_s$ ・重量含水率  $\theta$  および気温  $T_a$  を移動観測した。 $\theta$  は近赤外水分計(Kett, JE-100)で表層部を計測した。

4. 研究成果

(1) 緑道内で常に木陰となっていた場所の測定結果を図 2 に示す。降雨日翌日(9/3)では、湿潤箇所( $\theta=25\%$ )は  $T_a$  より 3、乾燥箇所( $\theta=12\%$ )より 2 低温だった。降雨日から 2 日後(9/14)では分布は消えていた。この場所での全降雨イベント後の測定結果をまとめると、 $\theta$  が 15% を下回った時に温度低下効果( $T_s - T_a$ )が顕著に減

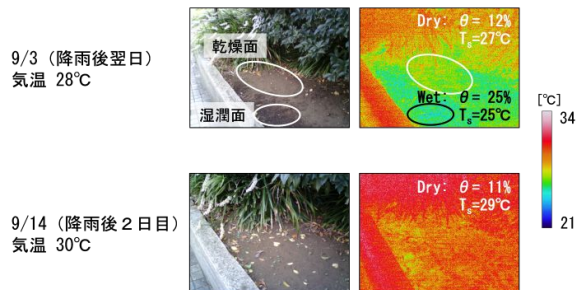


図2 降雨後の緑道内の土壌表面温度・重量含水率

少していたことから、対象土壌は  $\theta=15\%$  を閾値として蒸発量が急激に低下したと判断できた。

(2) 土壌の表面温度上昇をもたらす含水率の閾値  $\theta=15\%$  を下回る期間が、夏季(7-8月)の内どの程度の割合を占めるかを試算した。図3にモデル計算結果を示す。蒸散量の多いケヤキを想定した結果では、樹木が多量の水を消費するために、自然降雨のみでは夏季の内80%以上の期間において土壌の表面温度上昇をもたらすという予測結果となった。

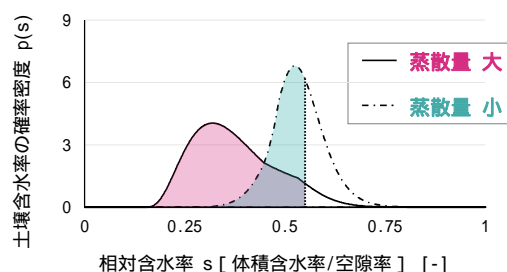


図3 二種の街路樹を想定した、夏季における土壌含水率の確率密度分布  $p(s)$  のモデル計算結果

建築環境工学分野における既存の蒸発散モデルの多くは水収支を考慮しておらず、さらに、十分に灌水された条件下での実験値を基にパラメタライズしている場合が多いが、そのようなモデルを用いた評価では、蒸発散の効果を大幅に過大評価している可能性が示唆される。

(3) 今回、申請時点での目標であった3D-CAD熱環境シミュレーター上へのSPACモデルの導入までには至らなかった。しかし、その基本となる都市環境評価に应用可能な(計算負荷が極めて小さい解析的な)水文モデルの評価検証に取り組み、一定の成果を得ることができたと考える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 3件)

Tomoki Kiyono, Takashi Asawa, Haruki Oshio, Numerical simulation of nocturnal drainage flow from urban trees, *10th International Conference on Urban Climate*, 6-10 August 2018, New York

吉野優実子、清野友規、浅輪貴司、降雨が樹木周辺熱環境に及ぼす影響の評価、日本ヒートアイランド学会第13回全国大会、2018年8月24日~26日、大阪

清野友規、浅輪貴司、都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その19 降雨が樹木周辺熱環境に及ぼす影響、日本建築学会大会(東北)学術講演会、2018年9月4日~6日、仙台

〔図書〕(計 0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:

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:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：該当なし

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：該当なし

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。