

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04236

研究課題名（和文）多孔質体理論に基づく、土砂災害発生モデルの提案

研究課題名（英文）Proposal of sediment-related disaster occurrence model based on porous body theory

研究代表者

桑原 不二朗 (Kawahara, Fujio)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：70215119

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：ヒートアイランド現象に伴う局所的集中豪雨の予測，土壌内の地下水移動の予測を目的とし，数値シミュレーション及びタンクモデル構築に向けた実験を実施した．ヒートアイランド現象を起こす都市部の存在は，局地的前線を都市部の少し山側にとどめ，比較的長い時間に集中的な降水が発生し危険が強まることが判明した．また，タンク内に多孔質体を入れることで地下構造の特徴である気孔率や透過率が導入可能な新たなモデルに基づく多層のタンク内流動の非定常挙動が明らかになった．多孔質体を用いた4段タンクの非定常水流动の実験より，タンクモデルへの多孔質体導入に向け含水性能を示す指標が必要であることが判明した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

局地的集中豪雨の予測とそれに伴う土砂災害の減災に向けて，都市部山側に発生する局地的前線の発生メカニズムにおいて，都市部でのヒートアイランド現象が関与していることが示されたことにより，都市部でのヒートアイランド現象緩和の必要性が示された．また，豪雨に伴う土壌内の水分挙動の予測においては，土壌の透過性などの変化に追従するモデルの提案が必要であり，そのため土壌の含水性能を示す指標を導入することで，水害の予測精度向上が目指せることを示した．

研究成果の概要（英文）：For the purpose of predicting local torrential rain associated with the heat island phenomenon and predicting groundwater movement in soil, we conducted experiments for numerical simulation and tank model construction. It was found that the existence of the urban area that causes the heat island phenomenon keeps the local front slightly on the mountain side of the urban area, and intensive precipitation occurs for a relatively long time, increasing the danger. In addition, the unsteady behavior of the multi-layered in-tank flow was clarified based on a new model in which the porosity and transmittance, which are the characteristics of the underground structure, can be introduced by putting a porous body in the tank. From the experiment of unsteady water flow of the 4-stage tank using the porous body, it was clarified that an index showing the water content performance is necessary for the introduction of the porous body into the tank model.

研究分野：熱工学

キーワード：多孔質体 タンクモデル ヒートアイランド現象

1. 研究開始当初の背景

重大な気象災害をもたらす局地気象現象の要因は多岐に及ぶ。近年、都市化による地表面気温の上昇と上空の寒気大気という不安定状態が強化している。特に地形性降水の危険性が高い都市風下斜面地域では、長時間の降水が土砂災害へと結びつきやすく、災害予測の精度向上が急務である。

土砂災害に対し気象庁では、流域雨量指数と土壌雨量指数により気象警報や避難情報を作成している。土壌雨量指数は、降った雨が土壌にどれだけ貯まっているかを雨量データから「タンクモデル」を用いて指数化したもので、大雨によって発生する土石流・がけ崩れなどの土砂災害が、土壌中の水分量が多いほど発生の可能性が高く、何日も前に降った雨が影響している場合などに留意している。土壌雨量指数そのものが同じ値であっても、土砂災害発生危険度は地域によって異なるため、市町村長による避難勧告などの判断は非常に難しく、時には多くの人命を危険にさらすことになる。

これら指標の精度向上には、これまで経験のない連続した豪雨などにより表面内部構造の時間的変化に注目する必要がある。大量の降水があった数日後の土壌状況の予測には、土壌内の水分量を計算するとともに、土壌成分の流出による一時的な土壌強度低下などが考えられ、その危険性を指標が正確に表現しているとは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、都市風下斜面地域に発生する局所的集中豪雨と土壌内の流動および土壌流出を予測し、以下の点に注目し研究を行う。

(1) 都市化に伴うヒートアイランド現象は、その風下山間部に強い上昇流を引き起こし局地的で継続的な集中豪雨をもたらす。このような都市部をモデル化し地形形成降雨並びに中規模の局地風の予測を行うプログラムを構築する。

(2) 土壌内に浸透する降水は、土壌内の微視的構造によって、流出速度が決まり滞留水量が換算できる。流出速度を決定する透過率は、土壌の粒度や気孔率に強く依存する。古くから地下水の流れ予測に用いられてきたダルシーモデルに多孔質体モデルを導入する。

3. 研究の方法

3-1 ヒートアイランド現象による局所的豪雨予測シミュレーションの構築

都市部近郊に形成されることにより、土砂災害を拡大する要因となる局地的前線(線状降水帯)の形成について、海陸風とヒートアイランド現象の相互作用について2次元数値シミュレーションより明らかにする。

3-1-1 計算方法及び計算条件

本数値計算では、以下の連続の式、水平成分運動方程式、鉛直成分運動方程式、エネルギー式の4つの支配方程式に対し差分コードを用いて、数値シミュレーションを行う。

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(u^* u^* - \frac{1}{Re} \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(v^* u^* - \frac{1}{Re} \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(u^* v^* - \frac{1}{Re} \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(v^* v^* - \frac{1}{Re} \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) = -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{Gr}{Re^2} T^* \quad (3)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(u^* T^* - \frac{1}{RePr} \frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(v^* T^* - \frac{1}{RePr} \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right) = 0 \quad (4)$$

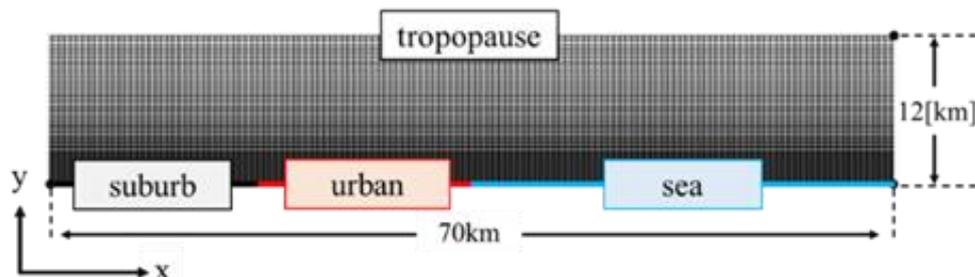


Fig. 1 Calculating area

Table 1 Boundary condition

	u^*	v^*	θ^*
left and right sides	0	$\frac{\partial v^*}{\partial x^*} = 0$	$\frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} = 0$
top side	$\frac{\partial u^*}{\partial y^*} = 0$	0	12
bottom side (suburb)	0	0	$-\cos t$
bottom side (urban)	0	0	$-\cos t + 1$
bottom side (sea)	0	0	0

本数値計算では、計算領域下面の温度差による自然対流を考え海陸風循環を再現した。Fig. 1 及び Table 1 は、ヒートアイランド現象を考慮した計算領域と境界条件である。計算領域下面の右側は海面を示し、左側は陸地である。陸地の海側を都市部、内陸側を郊外とし、都市部の温度を郊外に比べて1だけ高くすることで、ヒートアイランド現象を再現した。

計算は、3日分の計算を繰り返し、海陸風及び局地的豪雨をもたらす局地的前線の形成及び移動を予測する。

3-2 「タンクモデル」への多孔質体土壌モデルの導入

本研究では、「タンクモデル」へ多孔質体モデルを導入し、パラメータを変更することで土壌内部構造の再現を行う。

3-2-1 多孔質体数値モデルと計算モデル

以下に、本モデルに使用する多孔質体流動の支配方程式を示す。

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon^+ \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(u^* u^* - v \varepsilon^+ \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(v^* u^* - v \varepsilon^+ \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \\ &= -\varepsilon^+ \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} v \varepsilon^+ \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial y^*} v \varepsilon^+ \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \\ & - \left\{ \frac{v \varepsilon^+}{K^*/\varepsilon^+} + \frac{C_F}{(K^*/\varepsilon^+)^{1/2}} (u^{*2} + v^{*2})^{1/2} \right\} u^* \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon^+ \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(u^* v^* - v \varepsilon^+ \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(v^* v^* - v \varepsilon^+ \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \\ &= -\varepsilon^+ \frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} v \varepsilon^+ \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{\partial}{\partial y^*} v \varepsilon^+ \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \\ & - \left\{ \frac{v \varepsilon^+}{K^*/\varepsilon^+} + \frac{C_F}{(K^*/\varepsilon^+)^{1/2}} (u^{*2} + v^{*2})^{1/2} \right\} v^* \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、多孔質の透過性を示すモデル係数ダルシー数は以下で定義する。

$$Da = \frac{k}{d^2} \quad (8)$$

計算条件は、上面左半分を流入境界、左面を滑りなし、右面を自由流出境界、下面を滑りなしとする。計算領域の左半分を多孔質体条件とする。上面からの流入条件は一樣流入条件を設定した。参照速度とし平野部の浸透速度 $v_{\text{ref}} = 1.0 \times 10^{-7} [\text{m/s}]$ 、参照長さは土壌の深さ $L_{\text{ref}} = 1.0 \times 10^3 [\text{m}]$ として、 $Re = 100$ と設定した。

3-3 多孔質体内流動場の再現実験

タンク実験モデルを Fig. 2 に示す. 側面及び下面に流出孔を設けた 4 段のタンクを垂直に配列する. 一番上のタンクをタンク 1 とし, 順次番号付けし一番下をタンク 4 とする. タンク内には気孔率の異なる発泡スポンジを設置する. タンクはそれぞれ 4 つの圧力ゲージにより支えられ, 重量の変化を計測する.

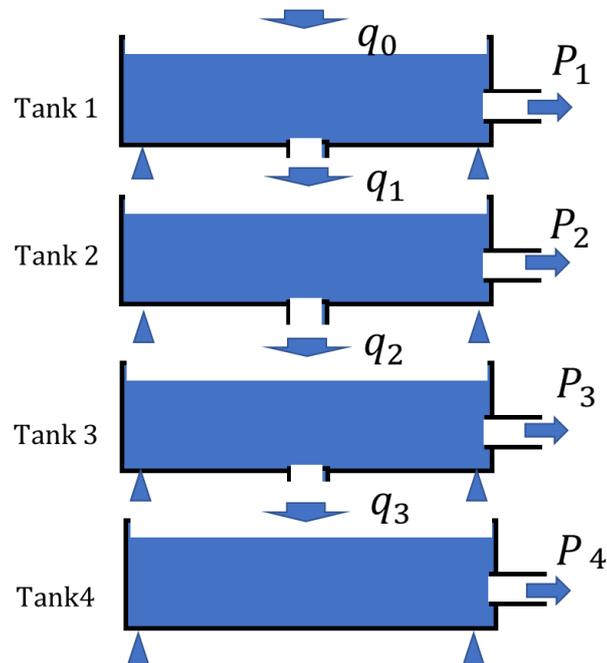


Fig.2 Tank Model

4. 研究成果

4-1 ヒートアイランド現象による局地的前線の停滞予測

都市部でヒートアイランド現象が発生しない場合, 海陸風による局地的前線は都市部に停滞することなく速やかに内陸へと移動することを確認した後, 都市部でヒートアイランド現象が現れた場合の予測を実施した. 結果を Fig. 3 及び Fig. 4 に示す. 海よりの海風は内陸へと侵入するが, 都市部で発生する上昇流とぶつかり速やかに内陸へと進行することができず, 都市の内陸側で停滞することが分かった. つまり, ヒートアイランド現象により都市部山側で比較的長時間にわたる強い降水が発生し, 洪水などの気象災害がもたらされやすい状況が出現する.

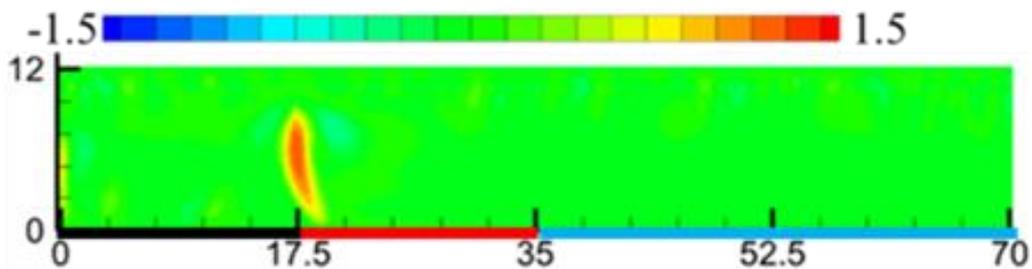


Fig.3 result v^* at 12 P.M.

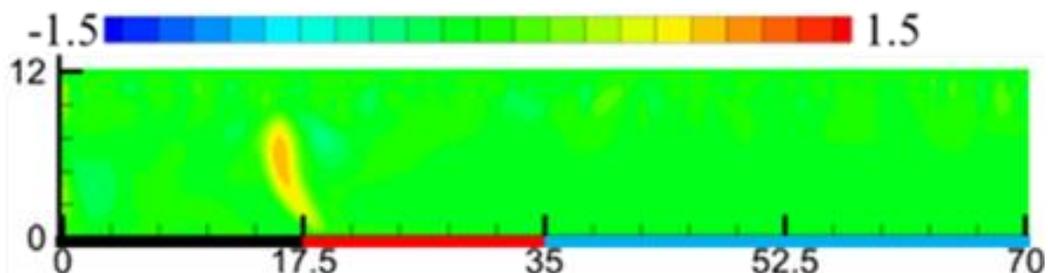


Fig.4 result v^* at 3 P.M

4-2 多孔質体タンクモデル内の流動場の予測

多孔質体タンクモデルを用いたタンク内の流動場の数値予測結果を Fig. 5 に示す。粒径を 80[mm]~1[mm]と、下の層に行くにつれて小さくした。側面からの流出量は下層に行くほど小さくなるが、その差は比較的小さく予測された。4層などの多層タンクモデルから、粒径が連続的に変化するような実際の地層の再現にも拡張が可能である。

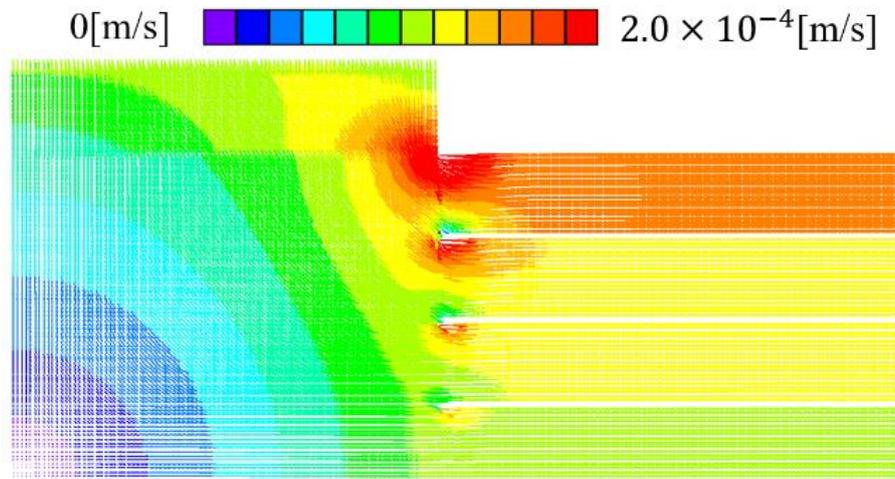


Fig.5 Velocity vector (Re=100)

4-3 4つの多孔質体タンク実験モデル内の流動場の計測

多孔質体タンク実験を実施し、タンク重量の時間変化を計測した。計算結果よりタンクより排出される流量の時間変化を算出し、結果を Fig. 6 に示す。図内 1800 秒において、最上部からの流入を停止した。各タンクへは、その上のタンクより水が流入するが図内直線で示されることで、流出が開始されるとほぼ一定流速で流出が安定することが示された。また、本実験では、多孔質体の含水力が強く側面からの流出は、実験終了の短時間に限られた。実際の土壌の保持率を再現する多孔質構造の選出と保持力に対する新たな指標の導入が必要であることが示された。

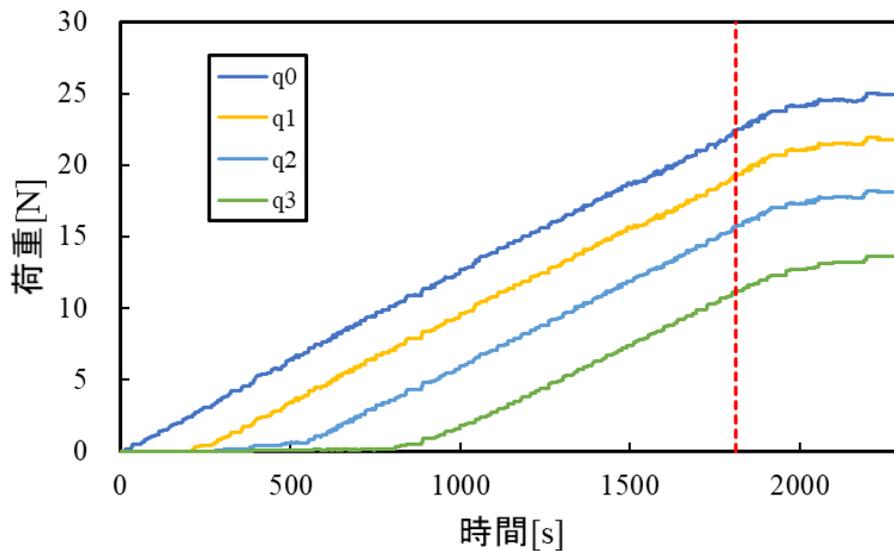


Fig.6 Flow rate from each tank

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 武田竜太郎	4. 巻 1
2. 論文標題 ヒートアイランド現象が海陸風循環に与える影響の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 静岡大学卒業論文	6. 最初と最後の頁 1-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 水谷 太一	4. 巻 1
2. 論文標題 「タンクモデル」への多孔質体土壌モデルの導入	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 静岡大学卒業論文	6. 最初と最後の頁 1-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 C.Y. Wang, M. Mobedi, F. Kuwahara	4. 巻 157-158
2. 論文標題 Analysis of local thermal non-equilibrium condition for unsteady heat transfer in porous media with closed cells: Sparrow number	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 13-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmecsci.2019.04.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	水谷 太一 (Mizutani Taichi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	武田 竜太郎 (Takeda Ryutaroutaro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関