

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：17301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26550069

研究課題名(和文) 熱画像による地表面温度分布から推定する地下環境中の水みち評価方法の確立

研究課題名(英文) Evaluation of aquifer structure and groundwater flow by using surface temperature data

研究代表者

中川 啓 (NAKAGAWA, Kei)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授

研究者番号：90315135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：熱画像を利用した地下水流動の不均一性と水文地質構造の把握を試みることを目的とし、熱輸送実験および数値シミュレーションを実施した。その結果、地表面の温度分布が地下の不透水性構造の影響を受けることが明らかとなり、土被りが薄いほど、検出率が上昇することが確認された。数値シミュレーションでは、均一場において同定したパラメータを適用し、不透水性構造を持つ場合も、熱輸送の様子を良好に再現できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, thermal transport experiments and numerical simulations were performed to test the proposed method to investigate heterogeneous groundwater flow and hydro-geological structure by the use of thermal imaging of the soil surface. The results of the study clearly showed that the thermal distribution of the soil surface is affected by subsurface impermeable obstacles. However, when a thinner cover was present, it was simple to determine the distribution of the obstacles and the groundwater flow path. Numerical simulation with obstacles could be used to reproduce the experimental results of thermal transport by using parameters determined with the simulation without obstacles.

研究分野：環境地下水学・地盤環境工学

キーワード：地下水流れ 熱輸送 数値シミュレーション 室内実験 現地調査

1. 研究開始当初の背景

自然の帯水層や地表面付近の土壌は、一般に水文地質学的な不均一性を有している。最もよく知られているのは、水の透水性を表す透水係数の不均一な分布である。この不均一性は、地下水の流れとそれによって輸送される物質の移動を制御するので、地下環境中における汚染物質の拡散問題や廃棄物処分場からの有害物質の下方浸透、放射性廃棄物の処分場からの漏洩について検討する際に、評価結果を左右することになる。よって、水文地質構造の不均一性は特に重要な特性と言える。そのため不均一性に着目した研究は、数多く発表されてきた（例えば Dagan, 1987）。研究代表者（中川）は、室内実験と数値計算によって、不均一な多孔媒体中の物質輸送について検討を重ねてきた（中川ら, 1998a, b）。地下水の流れを把握するための一般的かつ直接的な手法は、トレーサー試験である。トレーサー試験では、上流側の注入井戸から検出可能な化学物質を投入し、下流側の観測井戸における検出を行うことで、対象とする帯水層中の流速、透水性、物質の拡がりや把握できる（日本地下水学会, 2009）。中川・神野(2000)は、このトレーサー試験と数値計算を利用して、帯水層の不均一性を評価する手法を提案した。最近では、医薬品や人工甘味料など、これまで認識されていなかった物質が新たな汚染物質として注目されている（Musolf et al., 2008）。よって自然環境に有害かもしれない化学物質をトレーサーとして用いずに、熱(水温)をトレーサーとする提案もされている（Anderson, 2005）。研究代表者も水温を利用した物質輸送のパラメータ評価方法について検討している（中川, 2009）。

2. 研究の目的

本研究では前述の過去の知見をもとに、水温や地温を利用して、地下水流動の不均一性と地下の水文地質構造の把握を試みるものである。研究は、まず地下の地質構造が不均一である場合を想定した熱輸送に関する室内実験を実施する。また地下水流動と熱輸送が解析できるシミュレーターによる数値計算を実施し、数値計算モデルの妥当性を確認したうえで、種々の不均一状態における数値実験を行い、結果を系統的に整理し、地下水流動と地表面温度、地下の地質構造と地表面温度の関係性についてまとめる。得られた結果を基に、地表面（または 1m 深）温度から地下の不均一性を導く手法を検討し、フィールドにおける適用性について議論することを当初の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 熱(水温)輸送実験

室内実験装置の準備。50 x 80 cm の透明アクリル性の水平水槽を準備し、ガラス球および塩化ビニル製ブロックを試料として充填

する。塩化ビニル製ブロックは岩盤や粘土層などの不透水性の領域を模擬し（以下、不透水性ブロックとする）、ガラス球は砂層や礫層などの透水性の領域を模擬する。2 層構造とし、下層は、不透水性ブロックを不均一に配置し、その間はガラス球で満たす。上層は、ガラス球を均一に敷き詰める。浸透層は不圧帯水層を想定し、水平に設置する。下層からの熱伝導の状態を種々検討するため、上層の厚さ（土被り）を何段階か変えて敷き詰めなおし、実験を行った。

実験装置には、温度測定のための熱電対を上層の表面および下層に合計 40 点設置した。

実験は、まず背景水（水道水）を供給し、流出水の流量が十分安定した後上流側から温水を 5 系統から投入し、所定の時間間隔で赤外線サーモグラフィカメラを水槽の上部に設置して水槽(上層)の表面全体を撮影した。

下流側の熱電対を挿入した地点では、温度変化をデータロガーに記録した。

(2) 熱輸送数値シミュレーションモデルによる実験結果の再現および数値実験

熱輸送を計算できる数値シミュレーションコードとして、OGS (Sachse et al., 2015) を採用し、室内実験結果を再現するためのパラメータについて検討した。パラメータの探索は、不透水性ブロックを配置しない均一場のケースにおいて実施した。数値シミュレーションは 3 次元で実施した。また数値シミュレーションを行うにあたり必要となるパラメータを求めるための実験を別途、実施した。たとえばガラス球を敷き詰めた層の透水係数や、比熱などの熱伝導に関する諸係数を求めた。

均一場において実験結果を再現できることを確認した数値シミュレーションモデルにより、下層の不透水性領域（不透水性ブロック）の配置を種々変更したパターンについて、条件を変えたシミュレーションを実行し、モデルの適用性について検討した。

(3) フィールドにおける適用性の検討

本提案手法の適用性を検討するためのデータ取得目的で、フィールドにおける地中レーダーなどによる観測を実施した。

4. 研究成果

(1) 熱(水温)輸送実験

ブロックの配置及び実験開始 360 分後の熱画像の一例（パターン A 及び B とする）を図-1 に示す。これによると、不透水性ブロックの配置の影響を受けて、温水がブロックを迂回する様子が明瞭であった。すなわち不透水性構造が地表面温度分布に影響を与えるこ

とが確認できた。この実験時の不透水性ブロック層（下層）は5cm，上層は4cmとした。

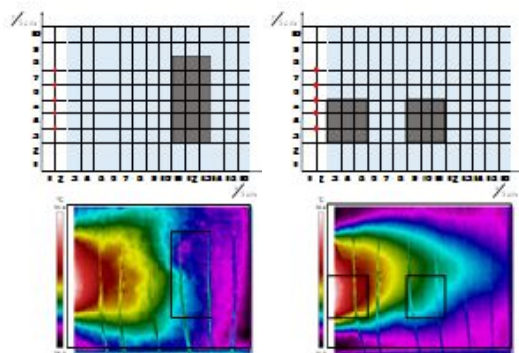


図-1 不透水性ブロックの配置(上段)と地表面の熱画像

上層の厚さ，すなわち土被りを 1～3cm に変更する実験結果は，全てのパターンにおいて各格子の平均温度を 1～2 に基準化した後，各値は不透水性ブロックを設置しないパターン（均一場）の値で除した。不透水性ブロックがある箇所は 1 未満，ない箇所は 1 以上で検出できたとし，検出率の評価を実施した。図-2 にパターン A, B における上層の厚さとブロック配置箇所の検出率の関係を示す。検出率は，上層の厚さが薄いほど上昇する傾向が確認できた。

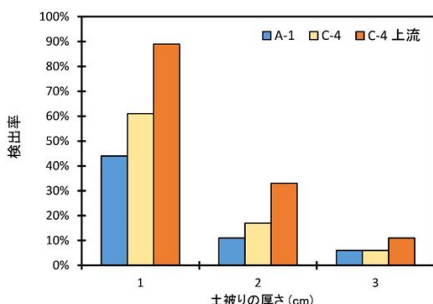


図-2 土被りを変化させた場合の検出率

(2) 熱輸送数値シミュレーションモデルによる実験結果の再現および数値実験

均一場（不透水性ブロックを配置しないケース）への OGS 適用：

熱電対を設置した各観測点における温度変化の実測値と数値シミュレーション結果の例を図-3 に示す。数値シミュレーション結果は実測値を十分な精度で再現しており，OGS の適用性が確認できた。

不透水性ブロック配置ケースへの OGS の適用性の検討：

図-4 は，数値シミュレーション結果の一例を示している。数値シミュレーション結果の太線で囲った範囲は実験結果の撮影範囲を示し，点線で囲った範囲は不透水性ブロックを設置した位置である。この不透水性ブロックの場所で熱が伝わりにくいことが分かる。これは，温水が障害物を避けるように流動す

るためだと推測できる。よって，OGS により実験を再現することができたといえよう。また，図-5 には，各観測点における温度変化の実測値と数値シミュレーション結果の例を示している。実測値を良好に再現していることが確認できよう。すなわち，OGS によって，水平浸透水槽内の地下水と熱の流動を解析することが可能であると考えられる。

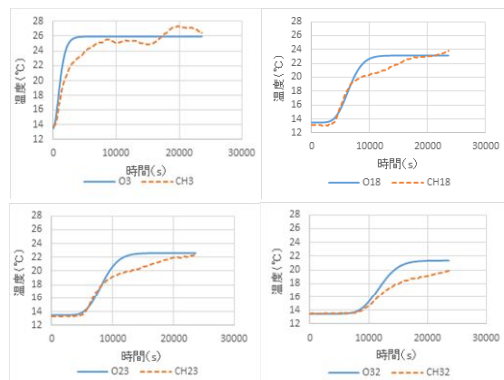


図-3 観測点における温度変化の例(実測:点線(橙)，数値シミュレーション結果:実線(青))

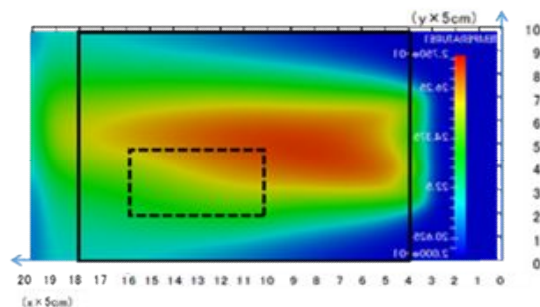


図-4 数値シミュレーション結果の一例

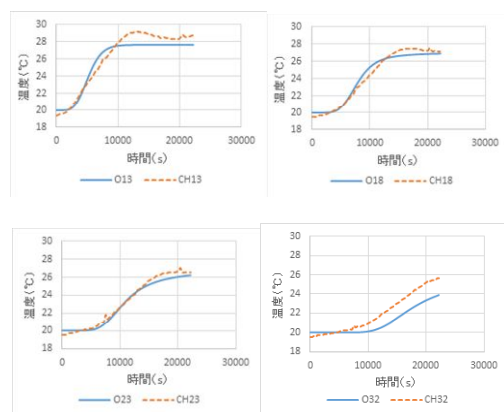


図-5 観測点における温度変化の例(実測:点線(橙)，数値シミュレーション結果:実線(青))

(3) フィールドにおける適用性の検討

地質構造と地下水の水みち位置の関係を明らかにするため，地下流水音探査法（水音探査）・地中レーダー探査法（GPR 法）・2 次元比抵抗映像法（電気探査法）を併用した現地調査を実施した。また，これらと同時に，全地点にて赤外線カメラによる地表面温度測定・地質判定・植生調査を実施した。調査の結果，ほぼ全ての地質構造の境界付近にて，

地下水の集中する水みちが存在することが明らかになった。また、地質構造の風化が激しい地点と未風化の岩体が接している境界では、周囲と比較して地下流水音が極端に大きく、地下水が特に集中する水みちを形成していることが示唆された。しかしながら本提案手法の適用性検討までには至っておらず、今後の検討が必要である。

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)

齋藤雅彦, 倉本拓哉, 中川 啓. 不均一地盤におけるダルシー流速分布の統計的性質と水みち形状に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 73(4), I_49-I_54, 2017 (査読有).

齋藤雅彦, 本田貴之, 古角泰人, 中川 啓. 不飽和・不均一浸透場における巨視的分散長の定量的評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 71(4), I_277-I_282, 2016 (査読有).

齊藤忠臣, 河合隆行, 西本貴之, 笹津杏奈, 糟谷哲史, 猪迫耕二, 安田 裕, 塩崎一郎. 鳥取砂丘におけるオアシス・地下水の水源, 応用水文, 28, 51-60, 2015 (査読無).

[学会発表](計6件)

齋藤雅彦, 倉本拓哉, 中川 啓. 不均一地盤におけるダルシー流速分布の統計的性質と水みち形状に関する研究, 第61回水工学講演会, 九州大学(福岡県・福岡市) 2017.3.15-2017.3.17.

Nakagawa, K. Experimental evaluation of aquifer structure and groundwater flow by using surface temperature data, 2016 AGU Fall Meeting, Moscone Center (San Francisco, USA), 2016.12.12-2016.12.16.

齊藤忠臣, 西本貴之, 河合隆行, 猪迫耕二. 小型 UAV と地中レーダーを用いた砂丘の広域地下水分布の推定, 平成 28 年農業農村工学会大会講演会, ホテル法華クラブ仙台およびハーネル仙台(宮城県・仙台市), 2016.8.30-2016.9.2

中川 啓. 熱画像による熱分散長の評価および地下水流れの推定について, 日本地下水学会 2016 秋季講演会, 多田記念大野有終会館(福井県・大野市), 2015.10.22- 2015.10.23

Saito, M. and K. Nakagawa. Numerical Study on Macroscopic Dispersion in Unsaturated Vertical Infiltration Field, Aqua 2015 - 42nd IAH Congress, Sapienza University of Rome (Rome, Italy), 2015.9.13- 2015.9.18

中川 啓. 地表面温度分布に基づく地下水流動の把握に関する室内実験, 水文・水資源学会 2015 年度研究発表会, 首都大学東京(東京都・八王子市), 2015.9.9- 2015.9.11

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 啓 (NAKAGAWA, Kei)
長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授
研究者番号: 90315135

(2) 研究分担者

齋藤 雅彦 (SAITO, Masahiko)
神戸大学・工学研究科・助教
研究者番号: 40283015

河合 隆行 (KAWAI, Takayuki)
鳥取大学・乾燥地研究センター・プロジェクト研究員
研究者番号: 20437536