



## 熱画像による地下の不透水性構造の検出

中川, 啓  
天野, 弘基  
齋藤, 雅彦

---

(Citation)

土木学会論文集G (環境) , 73(5):I\_1-I\_8

(Issue Date)

2018-01

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2018 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005914>



# 熱画像による地下の不透水性構造の検出

中川 啓<sup>1</sup>・天野 弘基<sup>2</sup>・齋藤 雅彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 長崎大学教授 大学院水産・環境科学総合研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

E-mail: kei-naka@nagasaki-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 神戸大学助教 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

本研究では、地下水流動の不均一性と水文地質構造を把握する一手法として、地表面温度分布の熱画像を利用する方法について検討した。実験には、ガラス球を充填した水平浸透水槽を用いた。岩盤などの地下の不透水性構造を模擬した塩化ビニル製のブロックを浸透槽の下層に配置した後、ガラス球を充填し、所定の厚さのガラス球層を敷き詰め、60℃に調整し、着色した温水を熱トレーサーとして注入した。実験の結果、熱トレーサーが不透水性ブロックを迂回したり、その影響が明らかなケースが見受けられた。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された。また上層のガラス球層が薄いほど、不透水性構造および水みちの検出が可能であることが示唆された。

**Key Words:** thermal image, heat transport, lab-tracer experiment, heterogeneous structure

## 1. はじめに

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<sup>1)</sup>。中川らは、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<sup>2),3)</sup>。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、物質の拡がり把握できる<sup>4)</sup>。中川・神野は、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<sup>5)</sup>。トレーサー試験には、様々な化学物質が利用されている<sup>6)-9)</sup>。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指標として注目されてきている<sup>10)</sup>。

しかしながら、このような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<sup>11)</sup>。熱トレーサーにより、透水係数分布の不均一性による熱プルームの複雑なふるまいを説明した例もある<sup>12)</sup>。著者ら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<sup>13)</sup>。

本研究ではこれらの過去の知見をもとに、水温や地温を利用して、簡便に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方法を検討する。そのため、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し、地表面温度分布を赤外線サーモグラフィカメラにより撮影した。実験は、幾つかの不透水性ブロックの配置パターンに対して実施し、地下の不透水性構造と地表面温度の関係について調べた。また地表面の熱画像により不透水性ブロック配置の検出可能性について検討を加えた。

## 2. 室内実験

### (1) 実験条件

実験装置の概要を図-1に示す。岩盤などの地下の不透水性構造を模擬した縦5cm、横5cm、高さ5cmの塩化ビニル製のブロック(以下、不透水性ブロッ

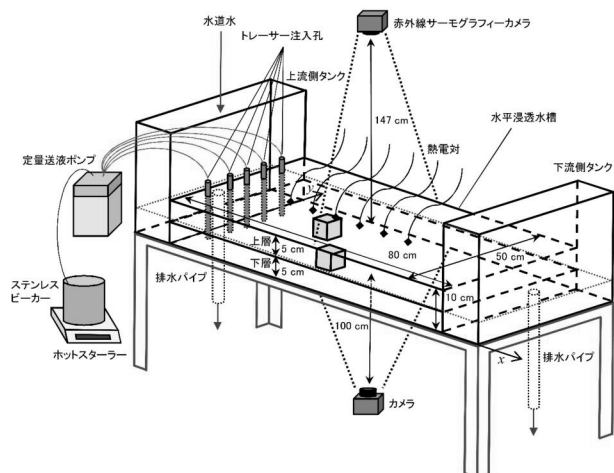


図-1 実験装置の概要

クとする)を、縦 80 cm、横 50 cm、高さ 10 cm の水平浸透水槽の下層に所定のパターンで配置した後、平均粒径 1.38 mm のガラス球を、密度が  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$  になるように充填した。浸透層は、不透水性ブロックを含む下層（不均一層）とガラス球のみの上層（均一層）の 2 層構造とした。水平浸透水槽の両側にタンクを接続し、排水パイプにより上下流の水頭を固定できるようにした。背景水（水道水）の流入により上下流の水頭差を 5 mm に設定した後、ホットスターラーにより水温を  $60^\circ\text{C}$  に調整し、食用色素（赤色 102 号、キリヤ化学）により着色した水道水をトレーサーとして、定量送液ポンプにより 5 点のトレーサー注入孔より、下層に連続的に供給した。実験開始から 5 分おきに上部の赤外線サーモグラフィカメラ（CPA-T400A, CHINO）により地表面温度、下部

のデジタルカメラにより着色したトレーサーを撮影した。サーモグラフィカメラの素子数は  $320 \times 240$  ピクセルである。地表面と下層のそれぞれ 6 点に熱電対を設置し（図-2）、実験開始から 1 分おきに温度を測定した。

## (2) 不透水性ブロックの配置パターン

本研究では、不透水性ブロックの配置による地表面温度分布について調べる実験（以下、実験 I とする）と、特定のパターンの不透水性ブロック配置に対して、土被りの厚さを変化させて地表面温度分布を調べる実験（以下、実験 II とする）の 2 種類の熱輸送実験を実施した。実験 I は、土被りの厚さは 4 cm とし、図-2 に示した 10 パターンの不透水性ブロックの配置について検討を加えた。配置パターンは、不透水性ブロックを  $x$  軸に沿って 15 cm 幅、 $y$  軸に沿って 35 cm 幅を配置したケース A が 3 パターン、 $x$  軸に沿って 35 cm 幅、 $y$  軸に沿って 15 cm 幅を配置したケース B が 3 パターン、2 カ所に  $x$  軸に沿って 15 cm 幅、 $y$  軸に沿って 15 cm 幅を配置したケース C が 4 パターンとした。実験 II では、パターン A-1（図-2 (a)）および C-4（図-2 (j)）において、土被りの厚さを 1~3 cm の間で 1 cm ずつ変化させた。

## (3) みかけの熱分散長の評価方法

多孔媒体中の熱輸送は、固相中の熱伝導、液相中の熱拡散、固相と液相の熱交換、機械的分散による熱移動といったいくつかの現象が組み合わさったものとして生じている。このうち、液相中の熱拡散は

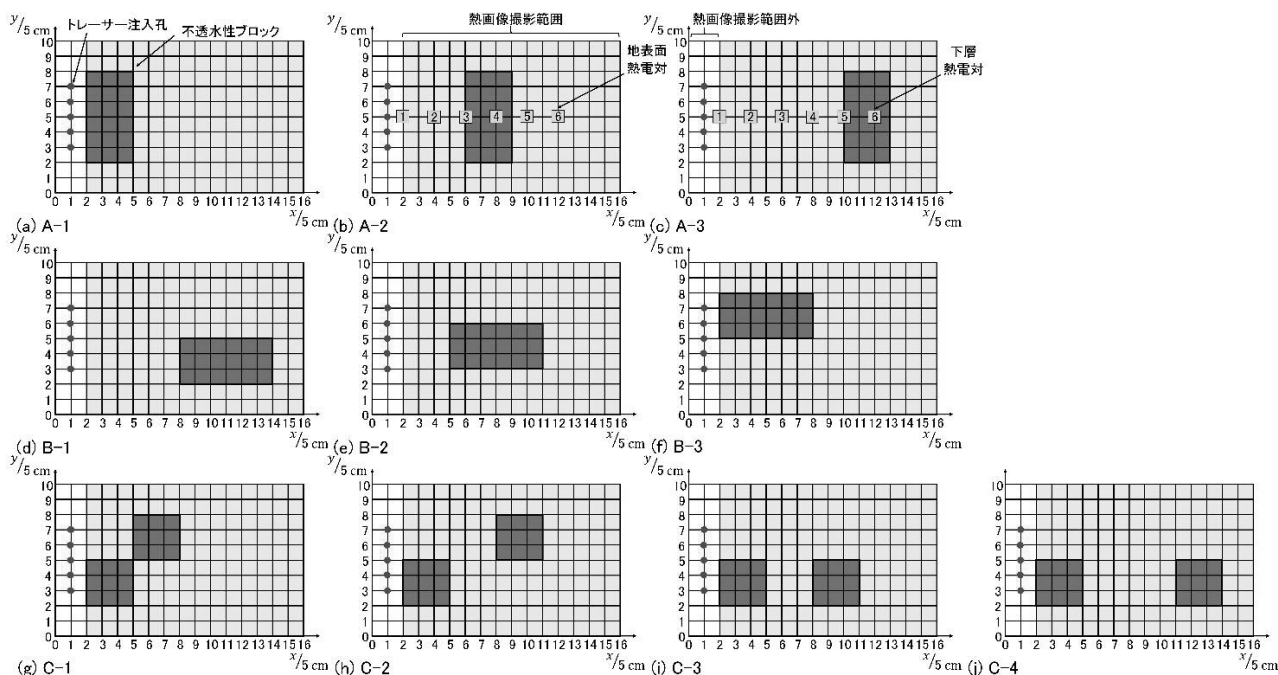


図-2 不透水性ブロックの配置パターン（実験 I）

溶質輸送における拡散と、機械的分散による熱移動は溶質輸送における機械的分散と、それぞれ同等のものとして生じていると考えられる。ここでは、熱輸送実験における温度の拡がりを概括的に捉えるため、熱電対を設置した表層および下層の点①～⑥の温度変化のデータを利用して、熱輸送過程における固相中の熱伝導や固相と液相の熱交換といった現象を含んだ“みかけの熱分散”として、モーメント法によって縦方向の“みかけの熱分散長”  $A_L^T$  を評価する<sup>5)</sup>。まず、実測データをもとに次式により、時間モーメントを計算する。

$$\sigma_t^{T^2} = \frac{\sum C(t)(t-\bar{t})^2 \Delta t}{\sum C(t) \Delta t} \quad (1)$$

ここで、 $C(t)$ は時間  $t$  の温度（解析を行う際は、背景温度とトレーサー温度により基準化した）、 $\bar{t}$ は温度分布の重心時間である。時間モーメントから空間モーメントへの換算は次式による。

$$\sigma_L^{T^2} = \frac{\sigma_t^{T^2} x^2}{\bar{t}^2} \quad (2)$$

ここで、 $x$ はトレーサー注入孔から熱電対までの距離である。次式により縦方向のみかけの熱分散係数を求める。

$$D_L^T = \frac{\sigma_L^{T^2}}{2\bar{t}} \quad (3)$$

よって、縦方向のみかけの熱分散長は次式で求められる。

$$A_L^T = \frac{D_L^T}{V} \quad (4)$$

ここで、 $V$ は浸透層のみかけの流速である。みかけの流速は、温度変化の重心時間と熱電対位置から求めた。

#### (4) 不透水性ブロック検出率の評価

全パターンにおいて、対象領域を、不透水性ブロックと同じサイズの格子（5 cm × 5 cm）により分割した。浸透層表面からカメラレンズまでの距離に対応した熱画像の1ピクセルあたりの長さを算定するために、所定の矩形領域（ $x$ 方向 20 cm ×  $y$ 方向 35 cm）の辺の長さを、対応する熱画像のピクセル数で除した結果、1ピクセルの長さは、土被り 4 cm（浸透層からレンズまでの距離 142 cm）の場合、 $x$ 方向 0.211 cm、 $y$ 方向 0.220 cm、土被り 3 cm（浸透層からレンズまでの距離 143 cm）の場合、 $x$ 方向 0.225 cm、 $y$ 方向 0.207 cm、土被り 2 cm（浸透層からレンズまでの距離 144 cm）の場合、 $x$ 方向 0.215 cm、 $y$ 方向 0.211 cm、土被り 1 cm（浸透層からレンズまでの距離 145

cm）の場合、 $x$ 方向 0.270 cm、 $y$ 方向 0.219 cmであった。これにより実際の熱画像撮影範囲および各格子に含まれるピクセルを特定した。なお、サーモグラフィカメラのレンズから浸透層表面までの距離は、142~145 cmであり、空間分解能は高く、端部に生じる可能性の有る歪は無視できると考えた。熱画像はピクセル単位で温度情報を有しているため、それぞれの格子に含まれる複数のピクセルの温度を算術平均し、その温度を全ての格子における最高温度  $T_{\max}$  と最低温度  $T_{\min}$  を用いて、次式により 1.0~2.0 に基準化した。熱電対と、そのケーブルが写っているピクセルは、算術平均する際に除外した。なお、検出率の評価に利用した熱画像は、トレーサー注入開始 360 分後のものである。

$$T = \frac{(T_0 - T_{\min})}{(T_{\max} - T_{\min})} + 1.0 \quad (5)$$

ここで、 $T$ は各格子における基準化された温度、 $T_0$ は算術平均した各格子の温度である。このようにして基準化した結果の一例を図-3 に示す。次に、それぞれの格子における温度を、不透水性ブロックを配置していない場合の温度で除した（図-3 (c)）。

$$E = \frac{T_a}{T_b} \quad (6)$$

ここで、 $E$ は評価基準値、 $T_a$ は不透水性ブロック有りの基準化温度、 $T_b$ は不透水性ブロック無しの基準化温度である。本研究で扱っている平均間隙流速の範囲（およそ  $1.0 \times 10^{-2} \sim 8.0 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ ）であれば、塩化ビニル製の不透水性ブロックの熱伝導率がガラス球や水のものに比べて小さいため、浸透流により輸送される熱は、一部は不透水性ブロックに熱伝導するものの、ほとんどは浸透流と一緒に不透水性ブロックを迂回し、ブロック上の温度は、周囲の領域より低くなると考えられる。よって、この仮説に従い、不透水性ブロックを配置した格子上の  $E$  は 1.0 より小さくなり、それ以外の領域の  $E$  は 1.0 以上となると考えた。不透水性ブロックの検出率  $R(\%)$  は、次式のようにこのことを満たす領域数（不透水性ブロックを配置した領域で  $E$  が 1.0 より小さい） $D_f$  を、実際にブロックを設置した領域数  $D_s$  で除することで算出した。

$$R = \frac{D_f}{D_s} \times 100 \quad (7)$$

例えば図-3 の場合は、不透水性ブロックを配置した領域数が 18、その領域で  $E$  が 1.0 より小さい領域数は 14 であるため、検出率は 78 % とした。

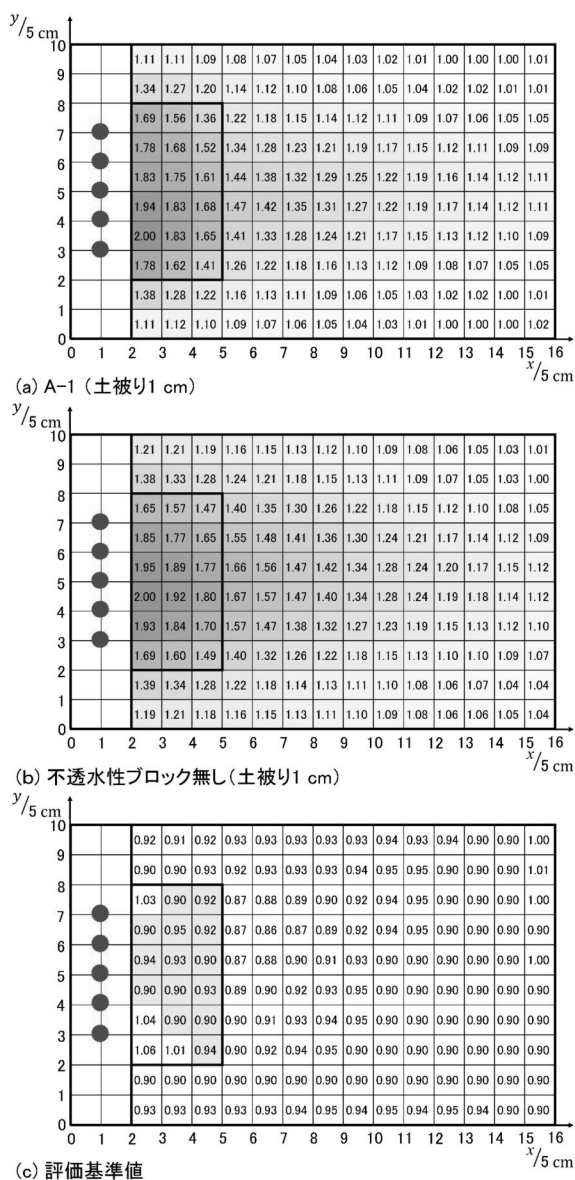


図-3 A-1(土被り 1 cm)および不透水性ブロック無し(土被り 1 cm)の基準化温度分布と評価基準値による不透水性ブロックの検出

### 3. 結果と考察

#### (1) 熱および溶質トレーサー輸送の様子

熱および溶質トレーサー輸送の様子の一例(実験 I, パターン A-1)を図-4 に示す。熱画像は、浸透水槽上面から赤外線サーモグラフィカメラにより撮影した温度分布であり、写真は、浸透水槽下面からデジタルカメラにより撮影した溶質分布を示している。熱画像に示された黒枠線は、不透水性ブロックの位置を示す。両者を比較すると明らかなように、溶質プリュームの方が、熱輸送よりも先行しているのが分かる。例えば、実験開始 43 分後には、溶質プリュームの先端が浸透水槽の 3/4 に到達しているのに対し、熱輸送のプリュームの先端は浸透水槽の 1/2 に到達していない。このように、いずれのトレー

サーも浸透流によって輸送されるものの、溶質は不透水性ブロックやガラス球内部に移動しないことに対し、熱は不透水性ブロックやガラス球内部にも伝導するため、水温をトレーサーとして利用する場合、溶質輸送に対して熱輸送が遅れることに留意しなければならない。

溶質輸送に対して熱輸送が遅れることから、通常の溶質の分散長に対して、ここで評価しているみかけの熱分散長が大きくなることが予想される。実験 I における全 10 パターンのみかけの熱分散長を図-5 に示す。みかけの熱分散長は、地表面に設置した点と下層に設置した点において評価しているが、両者の乖離はあまり見られず、ほぼ同様の値が求められた。A-2, B-1, C-2, C-3 といった不透水性ブロックが、浸透水槽中央付近に配置されたケースにおいて、みかけの熱分散長が小さくなる傾向が見られた。不透水性ブロックを浸透層の中央に縦方向に沿って配置したパターン B-2 において、比較的大きいみかけの熱分散長が得られた。また、ケース間でのみかけの熱分散長の値については、不透水性ブロック 2 つを配置したケース C のみかけの熱分散長が、ケース A および B よりも小さく評価された。ケース A, B および C の最下流点におけるみかけの熱分散長を算術平均すると、それぞれ、13.1 cm, 13.1 cm および 6.9 cm となった。このことから、浸透場における不透水構造の相対的なスケールと関係しており、一種のスケール依存性を示していると考えられる。

#### (2) 不透水性ブロック配置パターンの違いによる検出率の評価(実験 I)

不透水性ブロックを配置した全 10 パターンにおけるトレーサー注入開始 360 分後の熱画像を図-6 に示す。図中の黒枠線は、不透水性ブロックを配置した場所を示している。ケース A では、A-2 および A-3 において、流向に対して直角方向に長辺に配置された不透水性ブロックに対して縦方向( $x$  軸方向)の流れが抑制され、横方向( $y$  軸方向)に温度分布が拡がりながら迂回しようとしている様子が分かる。トレーサー注入点直後に配置された A-1 では、不透水性ブロックへの熱伝導のため、トレーサーが迂回する様子がはっきりしなかった。ケース B では、B-1 において、後方下部に流向に沿って長辺に配置された不透水性ブロックを迂回し、上側へ流動する様子が明瞭に分かる。B-3 においては、A-1 と同様に、トレーサー注入点直後の上側に配置された不透水性ブロックの影響で、下側より熱輸送が遅れている様子が分かる。横長に中央部に配置した B-2 では、プリュームの先端を見ると熱輸送が中央部で遅



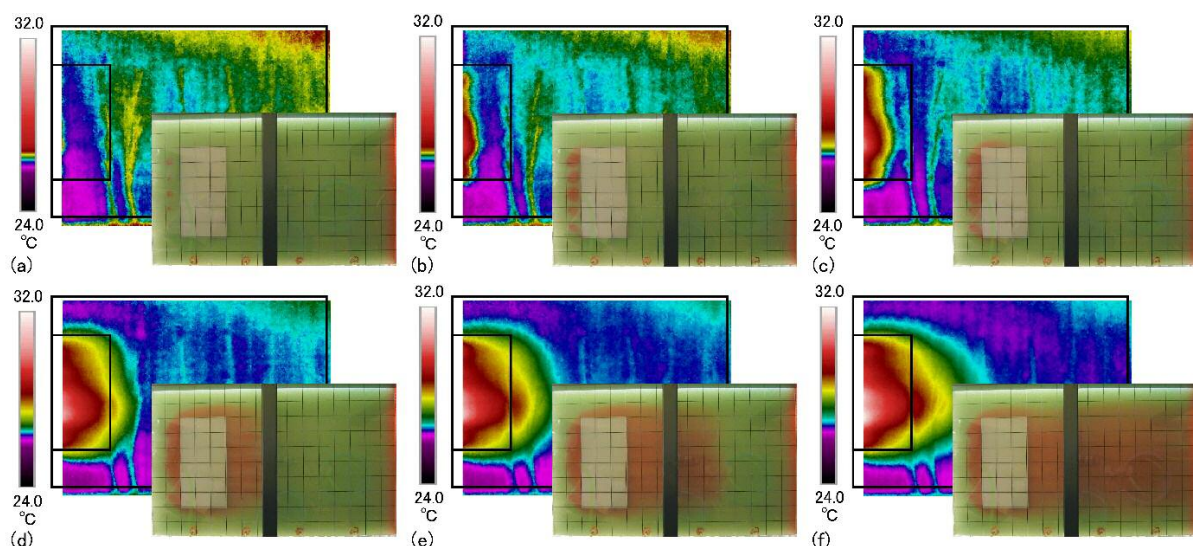


図-4 熱および溶質トレーサー輸送の様子，実験開始 (a) 3 分後，(b) 8 分後，(c) 13 分後，(d) 28 分後，(e) 43 分後，(f) 58 分後

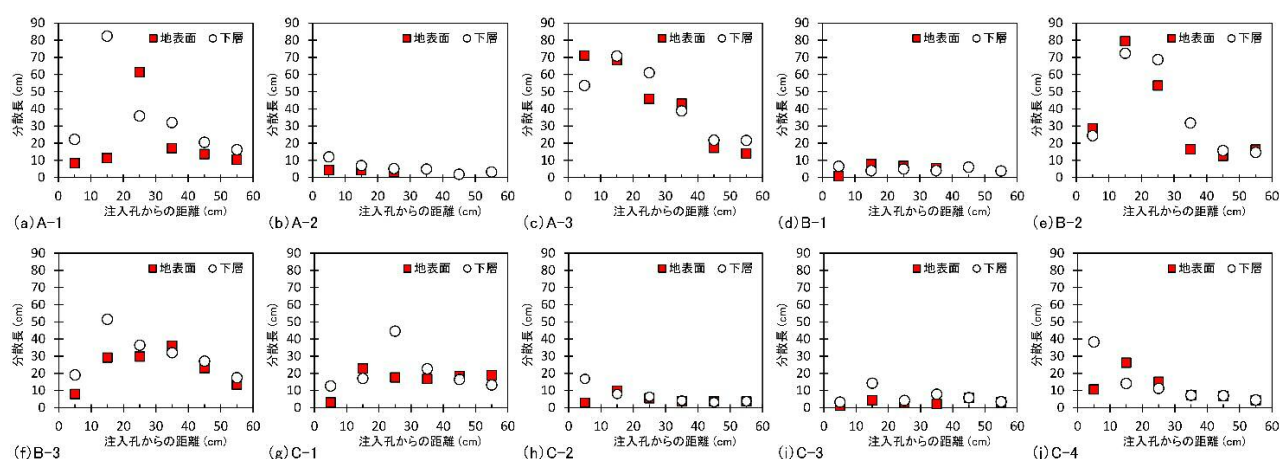


図-5 地表面および下層における縦方向のみかけの熱分散長

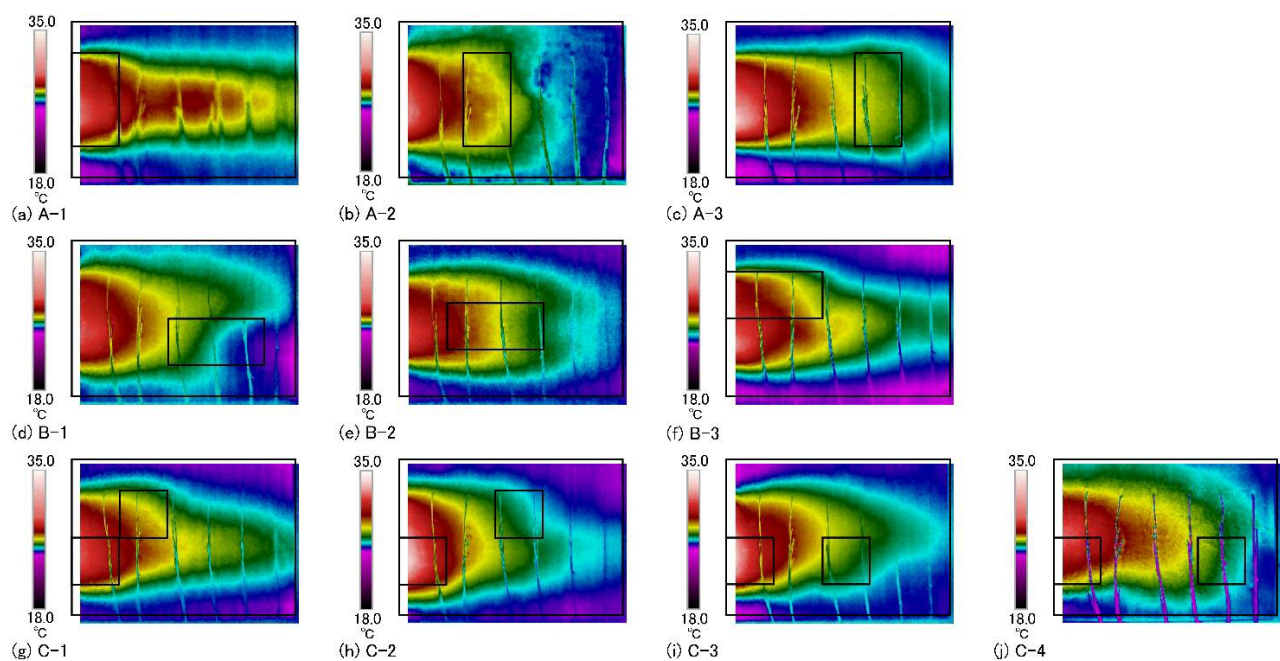


図-6 不透水性ブロックの配置を変化させた場合の熱画像（トレーサー注入開始 360 分後）

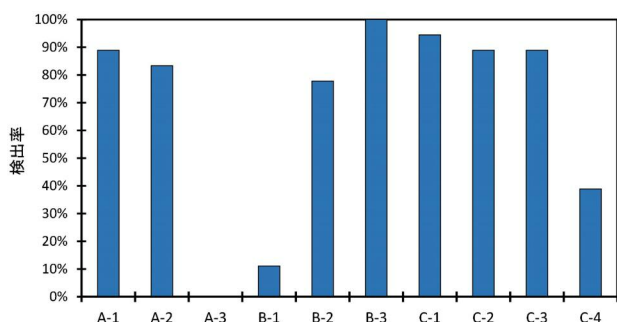


図-7 不透水性ブロック配置を変化させた場合の検出率

れており、不透水性ブロックを迂回する様子が分かる。加えて、A-2 との比較において、縦方向 (x 方向) に沿って不透水性ブロックを長辺に配置したため、A-2 のように流れは抑制されていないことも明らかである。不透水性ブロックを 2 カ所に配置したパターン C では、地表面温度分布は、どちらかという下流側に配置したものの影響を受けている様子が窺える。すなわち C-1 および C-2 では、上側の熱輸送が遅れており、C-3 および C-4 では、下側の熱輸送が遅れている。ただし、C-2 や C-4 では、上流側と下流側のブロック配置が離れているため、最初、上流側のブロックの影響を受け、迂回したトレーサーが上下流のブロックの間隙に流れ込もうとした後、下流側のブロックの影響を受けて再び迂回しようとしているため、流れがうねっている様子が見られる点は興味深い。以上から、トレーサー注入点近傍に不透水性構造がある場合は、目視ではその存在が検出しにくいことが考えられるが、地表面の温度分布は、明らかに影響を受けていることが分かる。また、A-2, 3, B-1, 2 のようにトレーサー注入点から下流側に不透水性構造が単一で存在する場合は、判別しやすく、C-2, 4 のように不透水性構造が離れて複数存在する場合も、特徴的なプルーム形状を示すため、判別のヒントが得られると言えよう。

不透水性ブロックの配置を変化させた場合の各パターンにおける検出率を図-7 に示す。検出率は、不透水性ブロックの配置パターンによって異なり、0~100 % となった。相対的に低い検出率は、A-3, B-1, C-4 であったが、これらのパターンは、共通してブロックが浸透水槽の下流側に配置されている。一方、トレーサー注入孔近傍にブロックを配置したパターンでは、高い検出率が得られた。この結果は図-4 による目視での判別とは異なる結果となったが、この要因は、周囲との温度差よりは、ブロックの有無による温度差に対する感度が高かったからと考えられる。しかし実際のフィールドでは、不透水性構造が無い場合の熱画像は得られないため、今後、検出方法や検出率の評価方法についてのさらなる検討が必要である。

### (3) 土被り厚の違いによる検出率の評価 (実験Ⅱ)

ここで検討を加える 2 例、パターン A-1 (図-2 (a)) および C-4 (図-2 (j)) におけるトレーサー注入開始 360 分後の熱画像を、土被りの厚さごとに図-8 に示す。容易に予想されるように、土被りの厚さが変わることによって、異なる表面温度分布が認められた。なお本研究における実験では、水位は下層+5mm までで設定しているため、上層にはほとんど浸透流は発生していない。パターン A-1 では、上層の厚さが 3 cm の場合に熱が下流まで拡がっているが、1 cm の場合では、より不透水性ブロックの影響を受けて下流への流れが抑制されている様子が明らかである。上層が厚い場合は、下層の上流側に伝わった熱が上層の不飽和帯を熱伝導しながら、より下流側へ伝わっていると考えられ、土被りが厚い場合は、実際の流れの先端位置より過大に評価されると考えられる。パターン C-4 では、上層の厚さが 1 cm の場合、上流側の不透水性ブロックが地表面温度分布に影響を与え

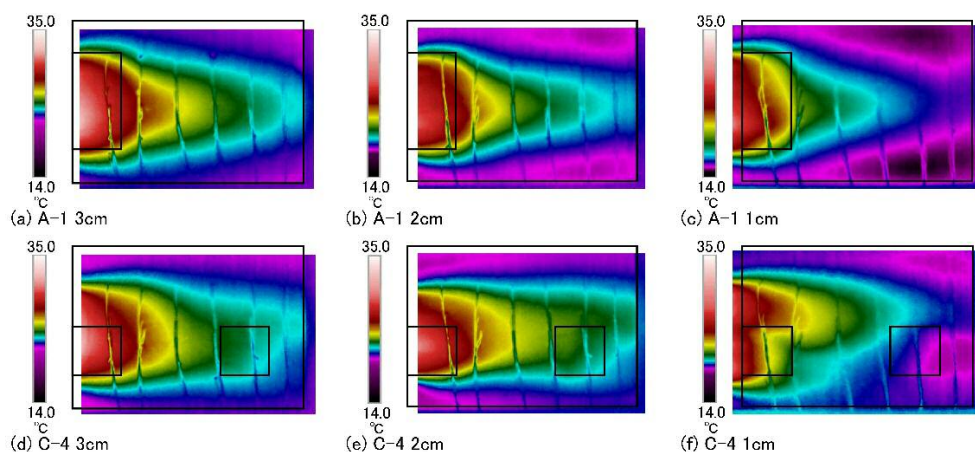


図-8 A-1 および C-4 における土被りの厚さを変化させた場合の熱画像 (トレーサー注入開始 360 分後)

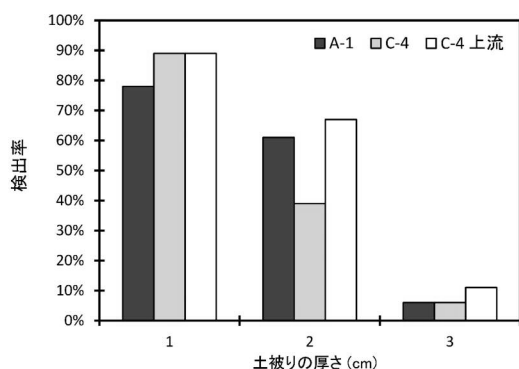


図-9 土被りの厚さを変化させた場合の検出率

ていることが容易に判断できる。土被りの厚さが2 cm, 3 cm の場合においては下流側の不透水性ブロックが、地表面温度分布に影響を与えている様子が分かる。この場合も、A-1 と同様、土被りが薄い方が、飽和帯の流れを正確に反映できると考えられる。

土被りの厚さを変化させた場合の検出率を図-9 に示す。検出率は、容易に予想されるように土被りの厚さが薄いほど、高くなる傾向が確認された。不透水性ブロックを2カ所に配置したパターン C-4 では、不透水性ブロック配置箇所全体およびブロックを配置した上流箇所における検出率をそれぞれ算出したが、図-7 に示した不透水性ブロック配置パターンを変化させた場合の検出率と同様に、トレーサー注入孔近くに不透水性ブロックを配置した場合の検出率が高くなることが分かった。

#### 4. おわりに

本研究では、熱輸送実験により、地下の地質構造が不均一である不圧帯水層を模擬した水平浸透水槽に温水によるトレーサーを注入し、地表面温度の熱画像を赤外線サーモグラフィカメラにより撮影することで、地下の不透水性構造や水みちを評価することを試みた。

溶質輸送と熱輸送の様子を比較したところ、熱輸送が遅れることが確認された。みかけの熱分散長を評価したところ、不透水性ブロック配置の影響を受け、大きさが異なることと不透水性ブロックの相対的なスケールに依存することが示唆された。

地表面温度分布の熱画像によると、不透水性ブロックの配置パターンの影響を受けて、浸透流が抑制されたり、迂回したりする様子が明らかになった。目視による評価では、不透水性ブロックが、トレーサー注入点よりも下流側に配置されている方が、より判別しやすかったが、不透水性ブロックが無い実

験結果との比較による検出率の評価からは、トレーサー注入点近傍に不透水性ブロックが配置されている方が、検出率が高かった。しかし、実際のフィールドにおいては、不透水性構造が無い場合の熱画像は得られないので、地下の不透水性構造の検出方法については、さらなる検討が必要である。

特定の不透水性ブロックの配置に対して、土被りの厚さを1~3 cm 変化させる実験からは、土被りが薄い方が、不均一構造をより明瞭に反映し、また高い検出率が得られることが確認された。

以上の実験から、地表面温度分布の熱画像は、地下の水文地質構造の不均一性を評価する上で、有効である可能性が示唆された。また不透水性構造に対する土被りの厚さが薄いほど、その検出率が高くなると考えられる。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 26550069 および鳥取大学乾燥地研究センター平成 27・28 年度共同研究（一般研究）の助成を受けたものである。また本研究の一部は、長崎大学環境科学部卒業生中村公香氏の卒業研究として実施した。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, *Journal of Fluid Mechanics*, 145, pp. 151-177, 1984.
- 2) 中川 啓, 神野健二, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 亘 真吾: 不均一多孔媒体中の流れと物質輸送特性について, *地下水学会誌*, 40(1), pp. 1-16, 1998a.
- 3) 中川 啓, 神野健二: 不均一場における巨視的分散の遷移状態の特性評価, *地下水学会誌*, 40(4), pp. 485-499, 1998b.
- 4) 日本地下水学会原位置トレーサー試験に関するワーキンググループ編: 地下水のトレーサー試験～地下水の動きを知る～, 396p, 2009.
- 5) 中川 啓, 神野健二: 現地トレーサー試験と数値計算による不均一場の推定, *土木学会論文集*, Vol. 656, II -52, pp. 595-600, 2000.
- 6) Rugh, D. F. and Burbey, T. J.: Using saline tracers to evaluate preferential recharge in fractured rocks, Floyd County, Virginia, USA, *Hydrogeology Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 251-262, 2008.
- 7) Haudi, K., Saravana Kumar, U., Al-Senafy, M., Mukhopadhyay, A., Al-Khalid, A., Al-Fahad, A. and Bhandary, H.: Multi-well and multi-tracer tests to characterize the groundwater aquifers in southern Kuwait, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, 1340, 2016.
- 8) Goldscheider, N., Hötzel, H., Käss, W. and Ufrecht, W.:



- Combined tracer tests in the karst aquifer of artesian mineral springs of Stuttgart, Germany, *Environmental Geology*, Vol. 43, No. 8, pp. 922–929, 2003.
- 9) Chua, L. H. C., Robertson, A. P., Yee, W. K., Shuy, E. B., Edmond, Y. M. and Lo, T. T., Tan, S. K. : Use of fluorescein as a groundwater tracer in brackish water aquifers, *Groundwater*, Vol. 45, No. 8, pp. 85–88, 2007.
- 10) Musolff, A., S. Leschik, M. Möder, G. Strauch, F. Reinstorf and M. Schirmer: Temporal and spatial patterns of micropollutants in urban receiving waters, *Environmental Pollution*, 157, pp. 3069–3077, 2009.
- 11) Anderson, M. P. : Heat as a ground water tracer, *Groundwater*, Vol. 43, No. 6, pp. 951–968, 2005.
- 12) Klepikova, M., Wildemeersch, S., Hermans, T., Jamin, P., Orban, P., Nguyen, F., Brouyère, S. and Dassargues, A. : Heat tracer test in an alluvial aquifer: Field experiment and inverse modelling, *Journal of Hydrology*, Vol. 540, pp. 812–823, 2016.
- 13) 中川 啓, 安部恭平, 齋藤雅彦, 朝倉 宏 : 熱画像から溶質分散長を評価する試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, I\_577–I582, 2013.

(2017. 4. 7 受付)

## DETECTION OF IMPERMEABLE STRUCTURE IN SUBSURFACE USING SURFACE THERMAL IMAGES

Kei NAKAGAWA, Hiroki AMANO and Masahiko SAITO

As one of the methods to evaluate groundwater flow and geological structures that represent obstacles to the flow, a method using thermography images of the soil surface temperature was tested. A laboratory experiment was conducted using a flow tank filled with glass beads. Obstacle blocks were arranged in the bottom of the flow tank. The obstacle block layer (5 cm) was covered with the homogeneous glass beads layer. Tap water was heated to 60 °C and colored with food dye was used as a tracer. The experimental results showed that the distribution of the obstacles had an influence on the surface temperature difference. When there was a thinner cover, it was easier to determine the distribution of the obstacles and the groundwater flow path.