

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760376

研究課題名(和文) 熱をトレーサとする非破壊・分散長評価法の確立

研究課題名(英文) Non-destructive method to evaluate dispersivity  
by thermal tracer technique

研究代表者

中川 啓 (NAKAGAWA KEI)

鹿児島大学・農学部・准教授

研究者番号：90315135

研究成果の概要(和文)：室内において熱をトレーサとして、熱画像を利用して、非破壊で溶質分散長を評価する方法を提案した。実験では、まずガラスビーズを充填した水平浸透水槽を用いて、所定の水頭差で流れを起こし、塩化カリウム溶液を温めたものをトレーサとして投入し、下流側での5点で電気伝導度と温度の変化を測定した。この実験により周囲への熱拡散率を評価した上で、同様のトレーサ試験において、熱画像を撮影し、溶質分散長を評価する方法を検討した。

研究成果の概要(英文)：The non-destructive method to evaluate solute dispersivity by the thermal image of the thermal tracer test was proposed. Heated sodium chloride was used as tracer injected into the flow tank packed glass beads. Electrical conductivity and temperature change were observed at the 5 points of the downstream. According to the results of this experiment, thermal diffusivity of this system was evaluated. The thermal images were photographed at the tracer experiment under the same conditions. The method to evaluate solute dispersivity from this thermal image was examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度			
2007年度			
2008年度			
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地盤環境工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：熱画像, 分散長, 室内実験, トレーサ試験

## 1. 研究開始当初の背景

近年、有害物質による地下水・土壌汚染が広く報告されている。帯水層中や土壌間隙中に溶存している物質や土壌より溶出した物質は、地下水の流れにより輸送され地下環境中に拡がるのが知られており、汚染の現況評価や修復評価において数値シミュレーション

を行う際には現場の分散長を適切に与えることが重要である。また、産業廃棄物の埋立処分や高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分場からの有害物質や放射性物質の漏洩について事前に十分検討しておく必要がある。この場合、やはり岩盤中の地下水流れと物質輸送を検討する際には、慎重に分散長を設定する必要がある。以上のよ

うに、分散長は帯水層の重要な特性値である。この分散長は、一般に現場では、現地トレーサ試験の結果であるブレイクスルーカーブ（破過曲線）を用いて、移流分散方程式の解析解とのフィッティングにより決定される。応募者は現場および実験室スケールでの分散長の評価研究についてのレビューを行い、分散長評価の重要性を指摘している（中川、地下水学会誌、50(3),2008）。

研究代表者はこれまでの研究において、透水性の不均一分布にもとづく巨視的分散メカニズムについて室内実験と数値シミュレーションにより説明した（中川ら、地下水学会誌、40(1), 1998）。分散長を規定するスケールの定義が曖昧であることを指摘し、スケールとして場の積分特性距離を適用することを提案し、積分特性距離の3倍程度の距離を物質が流下すれば、一定の分散長を適用できることを示し（中川ら、水工学論文集、42, 1998）、十分な距離がとれない場において、透水係数分布を推定する方法を提案し、現場適用を行った（中川・神野、地下水学会誌、40(4), 1998, 土木学会論文集、656(II-52), 2000）。以上のような物理性の不均一性に加え、吸着特性などの化学性の不均一性も考慮した分散長の評価についてさらに研究を進めている（中川ら、水工学論文集、50, 2006; Nakagawa et al., *Environ. Model. Assess.*, 13(1), 2008）。

ところで、実験的に分散長の評価を行うにあたっては、これまで一般には、限られた地点における電気伝導度の測定による。このような任意の点における測定では、溶質プルーム全体の拡がりを容易には把握できない場合もあるし、そもそも電気伝導度の精度の問題や正しく水（間隙溶液）の伝導度を測っているかは曖昧で、誤差を生ずる可能性がある。また電気伝導度計のプロブを直接挿入することにより、流れ場を乱してしまうことは避けられないと考えられる。

## 2. 研究の目的

前述のように、地下環境中における物質輸送を評価する上で、溶質の分散長は重要なパラメータの一つである。この分散長を実験室で決定するにあたっては、電気伝導度の測定によるものが一般的であるが、精度や流れ場を乱してしまうなどの問題点も残されている。そこで本研究では、室内実験において多孔性媒体の分散長を流れ場を乱すことなく非破壊で測定する方法として、赤外サーモグラフィカメラを用いた温度による溶質の分散長を評価する方法を確立することを目的とした。

## 3. 研究の方法

研究期間は2年間とし、まず本研究で用いる水平浸透水槽における溶質分散長評価の妥当性確認のための予備的なトレーサ試験を行った。続いて、静電容量式のセンサーを用いて温度と電気伝導度の同時測定を行い、周囲への熱拡散率を評価し、サーモグラフィカメラによる熱画像測定から溶質の分散長を評価する方法を検討した。

### (1) 水平浸透水槽を用いた溶質分散長評価

図-1に実験装置の概要を示す。浸透層部分は、縦80 cm、横50 cm、高さ10 cmとし、浸透層内には平均粒径1.38 mmのガラスビーズを、密度 $1.58 \text{ g cm}^{-3}$ となるように充填した。浸透層部分の両側にはスクリーンを介してタンクを接続し、それぞれにオーバーフローにより水位を固定するための任意の高さに設定できる排水パイプを設けた。上流側のタンクには、イオン交換水を注水するようにした。浸透層の上蓋には、上流側に注入孔を設け、その位置から下流側に向かって上蓋中央部に、10 cmごとに5点観測点を設け（CP1～5）、静電容量式の土壌水分・電気伝導度計を鉛直に挿入・固定できるようにした。この静電容量式センサーは、浸透層内の部分の長さが6.7 cmで、水槽の鉛直方向（深さ方向）の値の代表値を取得できると考えた。トレーサ注入孔は、金網を巻いた直径5 mmの多孔パイプとして、シリンジにより水槽上面から下面まで一様にトレーサが投入できるように工夫した。

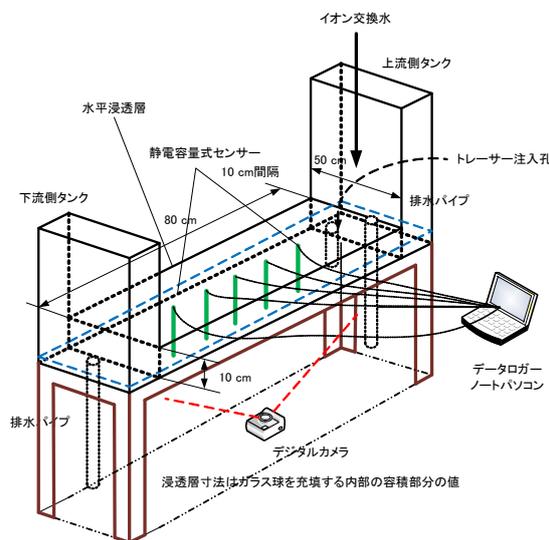


図-1 室内トレーサ試験の概要

実験は以下の手順で行った。トレーサ注入孔から塩化カリウムを $0.7 \text{ g l}^{-1}$ の濃度でシリンジを用いて60 mlを瞬間投入した。なおトレーサは浸透層下面からデジタルカメラ

ラにより写真撮影するために、食用色素（赤色 102 号，キリヤ化学）により赤色に着色した。トレーサの瞬間投入の後，各測定点における土壌水分と電気伝導度を 1 分ごとに測定した。静電容量式センサーによる測定は，土壌水分量と電気伝導度についてそれぞれの Unprocessed Data（出力される生データ）を抽出し，あらかじめ求めた校正式によりそれぞれの値を得ることによった。

浸透層上面から挿入したセンサーでの測定と同時に浸透層下面から目視できるトレーサプリュームをデジタルカメラにより 1 分間隔で撮影した。実験は，浸透層を一度飽和した後，排水して上下流タンクの水位が低い低水分状態から水位を上げながら水分状態の異なる条件で 5 段階実験を行い，それを 3 回おこない計 15 ケースに対して実験結果を解析して，それぞれのケースのセンサーを挿入した 5 点に対して体積含水率と分散長を評価した。よって評価した点はトータルで 75 点である。なお，このときガラスビーズは入れ替えていないので，充填状態は変化していない。よって飽和体積含水率は約 0.4 で一定である。

実験で得られた各センサー位置における破過曲線より，分散長の評価を行った。2 次元の物質輸送方程式の解析解が実測値によくあうように縦方向および横方向の分散長を非線形最小自乗法により求めた。このとき破過曲線のピーク濃度到達時間より間隙流速の値を求めた。なお，上下流で水位差をつけているので，厳密には空間的に体積含水率が一定とは言えないが，80 cm の水平距離に対して最大で 0.6 cm の水位差であるから，上記の方法で近似的には問題ないと考えた。

## (2) 熱画像による溶質分散長評価方法の検討

室内トレーサ試験は，前述と同様の水平浸透水槽を用いて，基本的には同様の手順により実施した。

### ① 周囲への熱拡散率の評価

トレーサとして，塩化カリウム溶液を温めたものを投入し，下流側の静電容量式センサーを挿入している 5 点で，温度および電気伝導度の変化を測定した。電気伝導度は，塩化カリウムの濃度として得るため，予め校正式を求めており，温度に関しても同様に校正式を求めた。塩化カリウムの濃度と温度の破過曲線より，見かけの分散長（溶質分散長および熱分散長とした）を求め，両者の差から多孔質媒体周囲への熱拡散率を評価した。このときの水頭差は，0.4 cm～3.2 cm の 0.4 cm 刻みの 8 段階で実施した。トレーサの濃度は 1.0 g l<sup>-1</sup> で 60 ml を瞬間的に投入した。以上を実験 A とする。

### ② 熱画像から溶質分散長を評価する方法の検討

この実験では，①と同じトレーサを 100ml 瞬間的に投入した。浸透水槽表面の温度を赤外線サーモグラフィカメラで捉えるので，水槽の上蓋を外して実験を行った。よって水頭差は 0.8 cm と 1.2 cm の 2 段階としてあまり大きな水頭差をつけないようにした。トレーサ投入から，所定の時間間隔で熱画像を撮影した。以上を実験 B とする。

熱画像における温度の拡がりから，熱分散長を評価した。この熱分散長からガラス球と間隙水に伝わる熱を①で評価した周囲への熱拡散率として分離し，溶質分散長を評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 水平浸透水槽を用いた溶質分散長評価

図-2 に一例として各測定点で得られた破過曲線を示す。上流側から順に濃度が立ち上がりピークに到達することとピーク濃度が注入点から遠方になるに従い低減することが分かり，ほぼ正確に測定されたことが窺える。図-2 にはまた同定された分散長を適用した解析解（式 6）をプロットし，その位置の体積含水率の値を示した。いずれもよく実測値に一致しており，分散長の評価が概ね正しく行われたと判断できよう。

図-3 には，トレーサ注入孔からの距離毎にまとめた体積含水率と評価された縦方向分散長をプロットしている。土壌水分量が多いところでのバラツキが大きい，全体的な傾向を見るため，直線をあてはめるといずれの位置でも土壌水分量が少ないと大きくなる傾向が窺える。このことは従来の知見とも相違せず，間隙空気が増加が，水とそこに溶解している物質の移動を妨げる確率を高め，移動しやすい部分と移動しにくい部分の差が大きくなることがその一因と考えられる。

図-4 には，縦方向分散長をトレーサ注入孔からの距離に対してプロットしている。幾つかのケースで逆の場合も見られるが，概ね流下距離に応じて縦方向分散長が大きくなる傾向（スケール依存性）の存在が示唆された。一般に分散長のスケール依存性は現場スケールについて言われることであるが，不飽和条件下であれば，実験室で均一にガラス球を充填した水槽であっても，スケール効果が見いだされたことになる。これは不飽和の場合，水の移動と物質の輸送の障害物となる空気が不均一に分布することと，飽和-不飽和の界面が均一にはならないことがその要因と考えられる。x=10 cm での値が他に比べてバラツキが大きいのは，トレーサ注入点に近いので，安定したトレーサ移動に至るまで

に時間や距離を要することがその一因と考えられる。

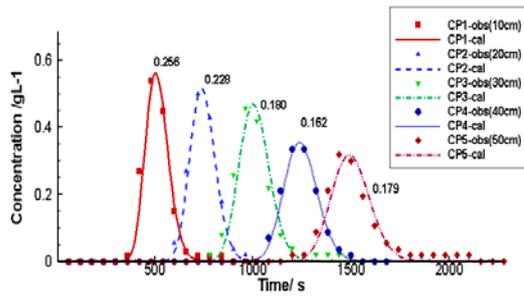


図-2 不飽和条件下でのトレーサの分散

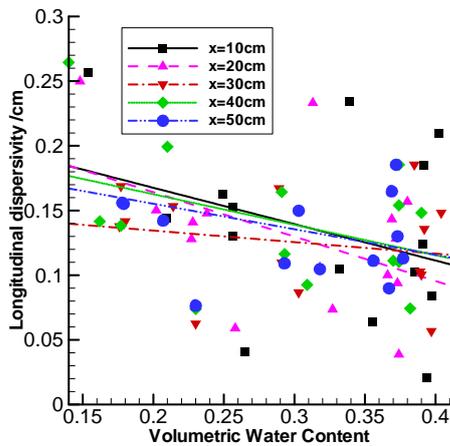


図-3 体積含水率に対する縦方向分散長

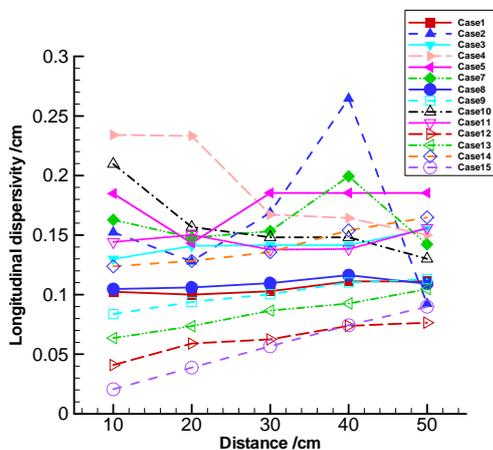


図-4 流下距離に対する縦方向分散長

(2) 熱画像による溶質分散長評価方法の検討  
まず実験 A のデータを用いて、2次元の物質輸送方程式の解析解が実測値によくあうように溶質分散長と熱分散長を決定した。図-5 におよび図-6 に縦方向の溶質分散長と熱分散長の一例をそれぞれ示す。あまり流下距離による変化は見られないようであり、溶質分散長は、0.06~0.12 cm の範囲に収まっている。

る。水頭差による違いが見られ、水頭差が大きく流速が大きい場合は分散長が小さめに評価された。一方、熱分散長は、周囲への熱拡散を含む見かけの分散長であるから、溶質分散長よりも大きく、概ね 0.2~0.4 cm の範囲に収まった。溶質分散長よりも 4 倍程度大きく評価された。

図-7 に実験 B における赤外サーモグラフィーカメラで撮影した熱画像の一例を示す。ピクセル単位で温度が得られるので、温度の拡がりから熱分散長を評価した。さらに熱拡散率を考慮して溶質分散長の評価を試みた。図-8 に実験 A および B において評価された縦方向の溶質分散長の一例を比較して示す（水頭差 0.8 cm のケース）。トレーサ投入位置近傍から離れた位置では、ほぼ同様の値（0.1 cm）が得られており、よって予め熱拡散率が正しく評価できれば熱画像から溶質分散長を評価することが可能と考えられた。ただし、横方向については検討の余地が残された。

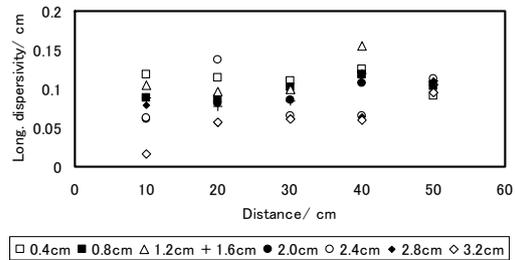


図-5 縦方向の溶質分散長の一例

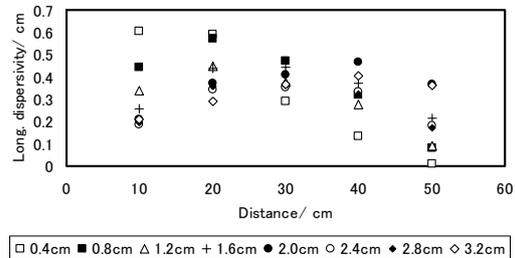


図-6 縦方向の熱分散長の一例

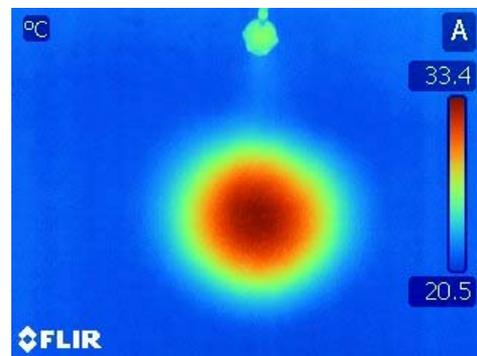


図-7 赤外サーモグラフィーカメラで撮影した熱画像の一例

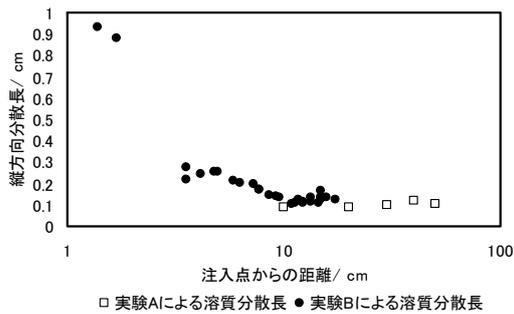


図-8 縦方向の溶質分散長評価比較の一例

## 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 9 件)

- 1) 中川 啓・齋藤雅彦ほか 1 名：同じ流域内の 2 つのシラス台地における地下水汚染機構についての数値計算, 水工学論文集, **55**, pp.583-588, 2011, 査読有.
- 2) K. Nakagawa, S.-I. Wada ほか 1 名：Reactive transport column experiment in volcanic ash soil and numerical modelling with anion and cation exchange reactions, *IAHS Publication* **342**, 2011, 459-462, 査読有.
- 3) 齋藤雅彦・中川 啓:不飽和・不均一鉛直浸透場の物質移動現象に関する室内実験と数値シミュレーション, 土木学会論文集 B, **66**(3), 2010, 248-257, 査読有.
- 4) K. Nakagawa, T. Hosokawa ほか 4 名：Modeling reactive transport from groundwater to soil surface under evaporation, *Hydrological Processes*, **24**, 2010, 608-617, 査読有.
- 5) 中川 啓・中川原尚子ほか 1 名：水平浸透水槽を用いたトレーサー試験による不飽和分散長の評価, 水工学論文集, **54**, 2010, 595-600, 査読有.

[学会発表] (計 16 件)

- 1) 中川 啓・齋藤雅彦ほか 1 名：同じ流域内の 2 つのシラス台地における地下水汚染機構についての数値計算, 第 55 回水工学講演会, 2011 年 3 月 10 日, 東京大学 (東京都) .
- 2) 中川 啓・齋藤雅彦：シラス台地における硝酸性窒素汚染進行メカニズムについての一考察, 土木学会年次学術講演会第 65 回, 2010 年 9 月 3 日, 北海道大学 (札幌市) .
- 3) K. Nakagawa, S.-I. Wada ほか 1 名:Reactive transport column experiment in volcanic ash soil and numerical modelling with anion exchange and cation exchange reactions, 7th

IAHS International Groundwater Quality Conference (GQ10), 2010 年 6 月 15 日, スイス連邦工科大学(チューリッヒ).

- 4) 中川 啓, 中川原尚子, 齋藤雅彦：水平浸透水槽を用いたトレーサー試験による不飽和分散長の評価, 第 54 回水工学講演会, 2010 年 3 月 4 日, 北海道大学 (札幌市).
- 5) 中川 啓, 和田信一郎：火山灰土における反応輸送カラム実験と陰イオンおよび陽イオン交換を考慮したモデル化, 土壤物理学学会シンポジウム, 2009 年 10 月 24 日, 明治大学 (川崎市).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中川 啓 (NAKAGAWA KEI)

鹿児島大学・農学部・准教授

研究者番号：90315135