

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420504

研究課題名(和文) 不飽和・不均一地盤における巨視的分散長の定量的評価方法に関する研究

研究課題名(英文) Study on quantitative evaluation of macroscopic dispersivity in unsaturated / nonuniform fields

研究代表者

齋藤 雅彦 (SAITO, Masahiko)

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：40283915

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、深刻な地下水汚染が各地で発生している。このとき、地表面付近の汚染物質の挙動は、不飽和帯における移流分散現象として取り扱われるが、巨視的分散長は不均一な不飽和帯における汚染物質の挙動を解析する上でとくに重要な物性値である。しかしながら、この巨視的分散長を適切に設定する方法は確立されていない。また、不飽和帯において浸潤線が不安定となるフィンガー流が発生した場合の分散長の性質についてもほとんど解明されていない。本研究では、不飽和帯における鉛直浸透時の移流分散現象に対し、模型実験および数値シミュレーションによって巨視的分散長の性質について明らかにするとともに、定量的評価法の提案を試みた。

研究成果の概要(英文)：In recent years, serious groundwater contamination has occurred in various places. At this time, the behavior of contaminants near the ground surface is handled as advection dispersion phenomenon in the unsaturated zone, macroscopic dispersivity is very important physical property for analyzing the behavior of pollutants in the heterogeneous unsaturated zone. However, there is no established method for appropriately setting this macroscopic dispersivity. In addition, the property of the dispersivity in the case of a fingered flow in the unsaturated zone has been hardly elucidated. In this study, we tried to clarify the property of macroscopic dispersivity and propose quantitative evaluation by model experiment and numerical simulation for the advection dispersion phenomenon during vertical infiltration in unsaturated zone.

研究分野：地盤水理学，地盤環境工学

キーワード：地下水汚染 不飽和浸透流 移流分散解析 巨視的分散長 フィンガー流 不均一地盤モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

有害物質による土壌・地下水汚染が後を絶たない。これらは、廃棄物の不法投棄など地表面付近を汚染源とするケースが多く見られるが、この場合、汚染物質は降雨の浸透に伴って不飽和帯を鉛直方向に移動し、地下水面に到達すると地下水の流れに沿って汚染域が拡大していく。また、このような汚染物質の挙動を定量的に評価するにあたり、一般に移流分散解析が用いられているが、このときに必要となるパラメータの一つである分散長（あるいは分散係数）を適切に設定することが重要である。この分散長は、土粒子スケールで観察される微視的分散長と、フィールドスケールで観察される巨視的分散長に大別されるが、移流分散解析を実際の土壌・地下水汚染問題に適用するにあたって必要となるのは後者である。しかしながら、この巨視的分散長は、観測スケールや地盤の不均一性に依存することが知られているものの、適切な設定方法は確立されていない。

(2) 国内外の研究動向

土壌・地下水汚染に関する研究は、国内外を問わず活発に行われている。とくに、汚染物質の溶出挙動や化学的性質については、おもに室内実験から多くの知見が得られている。また、拡散・分散過程については、多種の数理モデル（移流分散解析、多相流解析等）が提案されており、実用にも供されている。また、巨視的分散長については、観測スケールに強く依存することが知られており、統計的なアプローチによる設定方法もいくつか提案されている。さらに、申請者らは、自己相似型不均一地盤モデルを用いた数値シミュレーションによる詳細な検討により、飽和透水係数が不均一に分布する飽和浸透場における巨視的分散長の性質について明らかにするとともに、比較的簡易な定量的評価方法を提案していた。しかし、地表面から地下水面に至る不飽和帯については、いくつかの実験例は報告されているものの、不飽和浸透特性や浸透強度など、飽和浸透問題と比較して、より多様な要因が関係すると考えられ、残念ながら現時点では「現地で測定してみなければわからない」というのが実情であった。つまり、移流分散解析の信頼性の向上を図る上で、不飽和帯における巨視的分散長を適切に評価する方法は不可欠である。

(3) 着想に至った経緯

申請者は、これまでに不均一地盤のモデル化、および不均一地盤内の流れや物質移動の性質について研究を重ねてきた。とくに、降雨浸透や鉛直浸透問題については、間隙空気による浸透阻害やフィンガー流の数値シミュレーションといった問題に取り組み、一定の成果を挙げているとともに、その過程においてヒステリシスを考慮した気液 2 相流お

よび飽和・不飽和浸透解析、密度依存性及び非線形吸脱着を考慮した 3 次元移流分散解析、自己相似型透水係数分布モデルを用いたジェネレータ等をすでに開発している。また前述の通り、飽和浸透場における巨視的分散長の定量的評価方法の提案も行っている。これらの成果を応用することにより、地表面汚染における不飽和帯内の巨視的分散長の性質について、高精度の推定は依然として困難としても、不飽和浸透解析に用いられる様々なパラメータと巨視的分散長の関係をより明確にすることは決して不可能ではなく、それに基づく定量的評価手法を提案することも十分可能であると考えに至った。

2. 研究の目的

飽和不均一浸透場の場合、流れ場の水頭分布や流速分布は、主として飽和透水係数分布に依存するのに対し、不飽和浸透場では、不飽和浸透特性や浸透強度にも強く依存すると考えられる。また、浸潤線が不安定になるフィンガー流の発生時には、通常の浸透流とは物質輸送の評価も異なる。本研究では、巨視的分散長に影響を与えたと考えられるファクターとして、透水係数分布と解析スケール（汚染源の大きさや地下水面の深さ）に加えて、水分特性曲線および浸透強度を考慮し、これらと巨視的分散長の関係を明確に把握すること、および得られた結果に基づいて、不飽和・不均一地盤における巨視的分散長の定量的評価方法を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 模型実験

室内模型実験により、鉛直浸透時の浸透挙動について把握する。試料はガラスビーズおよび豊浦標準砂を用い、粒度分布、透水性とフィンガー流発生の有無について検討した。

(2) 数値モデルによる検討

これまでに申請者らは、すでに飽和不均一地盤における巨視的分散長の定量的評価方法を提案しているが、この手法を不飽和領域に応用することを試みた。ただし、飽和領域ではスケール依存性と飽和透水係数分布を考慮すれば十分であるのに対し、不飽和領域では不飽和浸透特性のばらつきや浸透流量も考慮しなければならない。これは、数値モデルによって評価するが、申請者が開発したシミュレーションコードは、不飽和帯特有のフィンガー流や間隙空気の流れも考慮することが可能である。

4. 研究成果

(1) 模型実験について

試料としてガラスビーズおよび豊浦砂を使用し、地盤の模型を製作し、鉛直浸透時に発生するフィンガー流の発生を実験的に把握することを試みた。ここでは粒径の異なる

ガラスビーズを混合したいくつかの試料と豊浦砂をアクリルケース内に詰め、降雨による浸透の状況を確認した。その際に粒度分布および透水性の関係について考察した。

写真1は実験に用いた透水試験装置、写真2は実験結果の一例を示したものである。

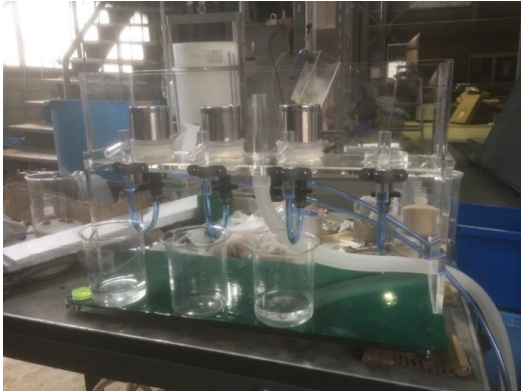


写真1 透水試験装置



写真2 実験結果の一例

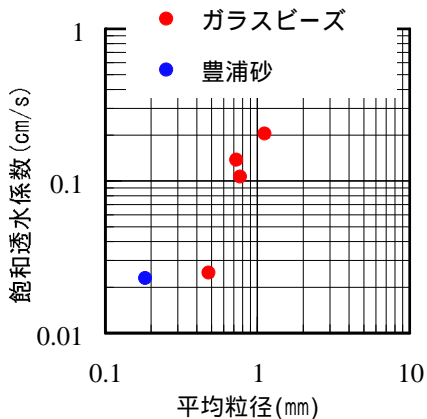


図1 平均粒径と飽和透水係数

また、図1は用いた試料の平均粒径と飽和透水係数の関係を示すが、この中でフィンガー流が発生したものは平均粒径が0.7mm以上、また飽和透水係数が0.1cm/s以上のケースであり、これに該当するものはフィンガー流の発生を想定すべきであることを確認した。

(2) 不飽和浸透特性および浸透強度と巨視的分散長の関係について

1次元的な鉛直浸透場に対し、自己相似型空間分布モデルを用いて一定の統計的性質を持つ疑似的な等方性不均一場を発生させ、有限要素法による数値シミュレーションで2次元移流分散解析を行い、そこから算出される平均的な巨視的分散長を用いてその性質

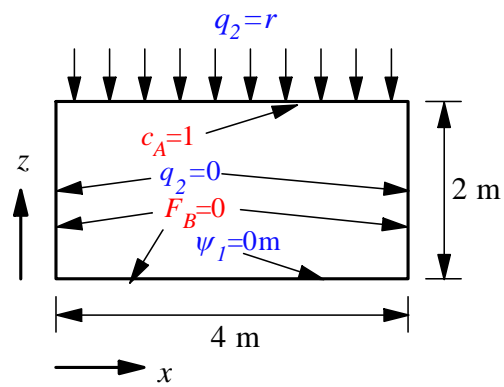


図2 解析領域と境界条件

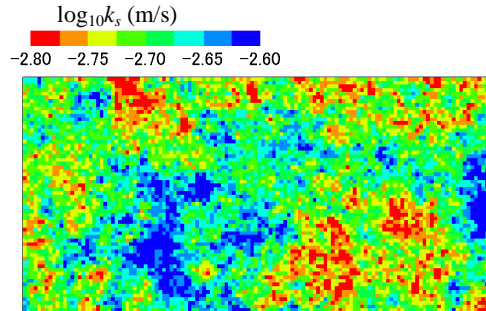


図3 透水係数分布の一例

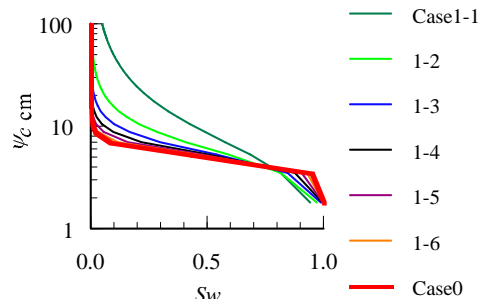


図4 水分特性曲線の一例

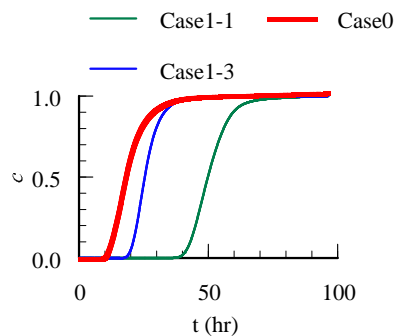


図5 下端面の断面平均濃度の時間変化

に関する考察を行った。図2に解析領域および境界条件を示す。また図3は発生させた飽和透水係数分布の一例である。本研究では、不飽和浸透特性および浸透強度と巨視的分散長の関係を定量的に把握するため、これらに関するパラメータを変化させ(図4)、下端面における断面平均濃度の時間変化(図5)から同定される見かけの間隙流速 v' と巨視的分散長 α_L' との関係について考察した。ここで、水分特性曲線モデルとしては式(1)の van Genuchten の式を用いている。

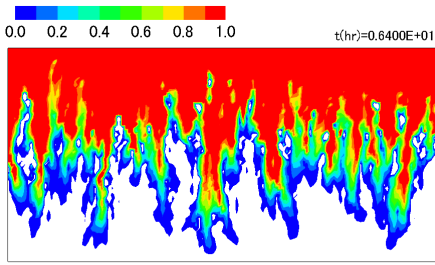


図6 濃度分布の一例

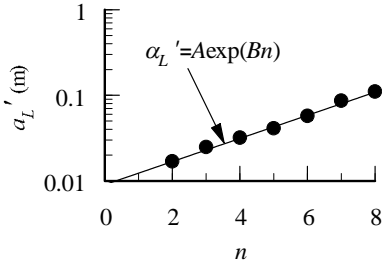


図7 n と α_L' (巨視的分散長) 関係

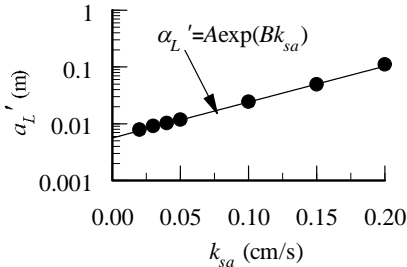


図8 k_{sa} (飽和透水係数) と α_L' の関係

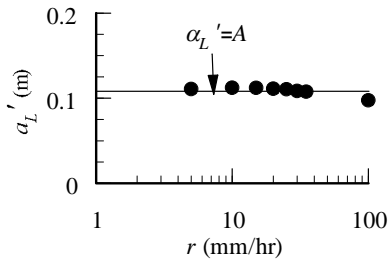


図9 r (浸透強度) と α_L' の関係

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \left\{ 1 + (\alpha \psi_c)^n \right\}^{-m} \quad (1)$$

図6は、濃度分布の一例、図7～図8は各パラメータと巨視的分散長の関係を整理したものである。これらの結果より、水分特性曲線のパラメータ n 、および飽和透水係数の平均値 k_{sa} と巨視的分散長 α_L' の関係は、比較的単純な関係で表現可能であることを明らかにした。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

水分特性曲線のパラメータ n がフィンガー流の発生に大きく関わり、巨視的分散長 α_L' は n および k_{sa} に対して指数関数的に増加する。

飽和透水係数と水分特性曲線のパラメータ α に強い相関を仮定すると、高透水性($k_{sa} > 0.1 \text{ cm/s}$)の場合にフィンガー流が発生しやすく、これは先に述べた実験結果とも整合する。また、体積含水率の低下

により見かけの間隙流速は飽和時の5倍以上となる可能性がある。
鉛直浸透量が飽和透水係数よりも十分小さい場合、濃度分布の形状はほとんど変化しない。

(3) 浸透場のスケールおよび浸透場のばらつきと巨視的分散長の関係について

本研究では不飽和・不均一鉛直浸透場の巨視的分散現象について、透水係数の空間分布モデルを用いて不均一場を模擬し、これを用いた数値シミュレーションによって浸透場のスケールや、浸透場のばらつきの影響について考察した。まず、透水係数分布に関して統計的に同一の性質をもつ正方形領域を、FFTを用いて30個または50個生成した。飽和領域を対象とした検討では、巨視的分散長は汚染源の幅、流下距離、透水係数のばらつきに依存することが明らかにされていることから、生成した正方形領域からアスペクト比が $b:d$ になるよう長方形領域を切り出し、幅 b (m)、地下水面までの深さ d (m)の解析領域とした(図10)。図11は、生成された飽和透水係数分布、ダルシー流速ベクトル分布、濃度分布の一例、および濃度分布50個のアンサンブル平均の一例である。

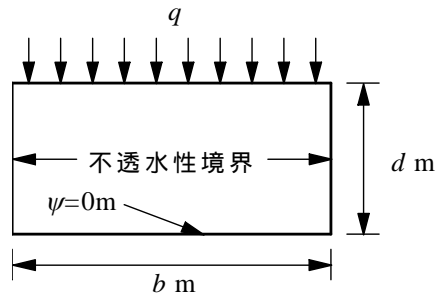


図10 解析領域と浸透流解析の境界条件

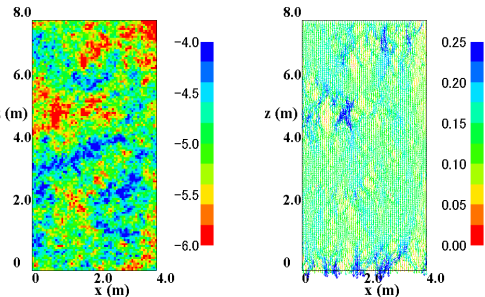


図11 透水係数分布 図12 流速ベクトル分布

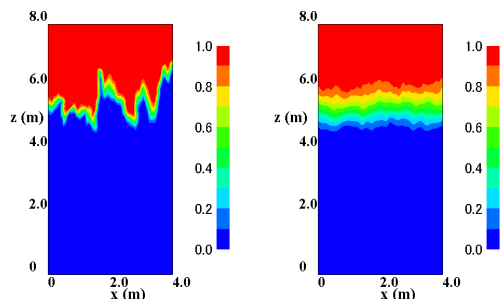


図13 透水係数分布 図14 アンサンブル平均

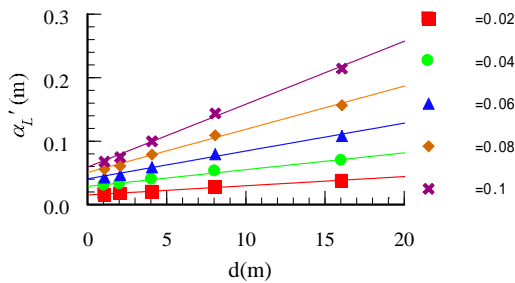


図15 地下水面の深さ d と巨視的分散長の関係 ($b=4m$)

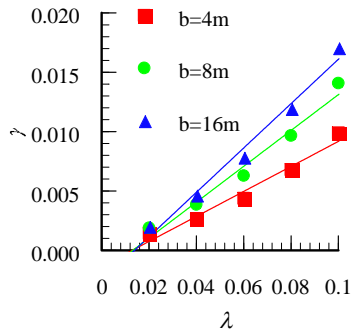


図16 λ と γ の関係 ($k_a=0.001\text{cm/s}$)

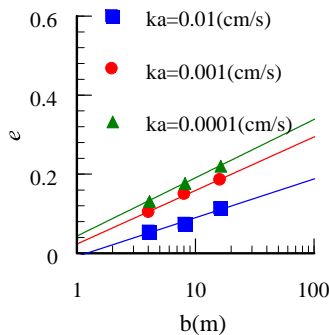


図17 b と e の関係

図15は、地下水面までの深さ d と同定された巨視的分散長 α_L' との関係、およびそれらの回帰直線を示したものである。この結果から両者の関係は以下のように簡単な線形関係で近似することが可能であると考えられる。

$$\alpha_L' = \gamma d + \beta \quad (2)$$

ここに、 γ, β はフィッティングパラメータである。

まず直線の傾きを表すパラメータ γ の値については、透水係数のばらつきを表わす値である λ に依存していることがわかった。図16は λ と γ の関係を求めた結果であるが、多少のばらつきはあるものの概ね直線で近似することができる。この直線は以下の式で表わすことができる。

$$\gamma = e\lambda + f \quad (3)$$

e, f は新たに得られたフィッティングパラメータである。また、図17は b と e の関係を求めた結果であるが、これも片対数紙上で概ね

直線近似が可能であり、次式が得られた。

$$e = i_2 \log_{10} \left(\frac{b}{i_3} \right) \quad (4)$$

ここに、 i_2, i_3 はフィッティングパラメータである。

他のパラメータに対しても、このような操作を繰り返すことによって、順次パラメータを同定した結果、対象スケール、浸透場のばらつき、および飽和透水係数の平均値と巨視的分散長の関係は、比較的単純な推定式の組み合わせによって表現可能であることを明らかにした。

(4) 表層地盤におけるフィンガー流の発生と物質輸送に関する数値実験について

本研究では、地表面付近の不飽和帯における鉛直浸透過程ならびに物質輸送過程について、飽和・不飽和浸透流解析および移流分散解析と、不均一地盤モデルを用いた数値シミュレーションを行い、フィンガー流発生時における巨視的分散長の定量的評価を試みるとともに、その性質について考察した。図18に、設定した解析領域と境界条件を示す。フィンガー流は成層土への浸潤時に発生しやすいことも知られているため、地表面から0.375mについては、表層地盤としてより小さい飽和透水係数の平均値を与え、不飽和帯は2層構造とした。

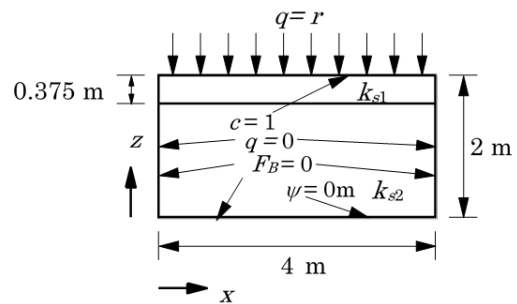


図18 解析領域と境界条件

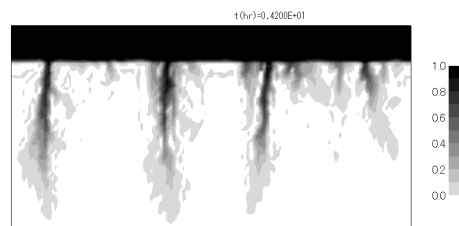


図19 濃度分布の計算結果の一例

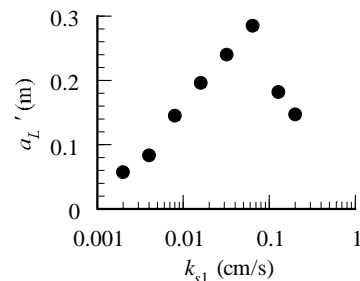


図20 k_{s1} と α_L' の関係

図 19 は濃度分布の計算結果の一例，図 20 は巨視的分散長 α_L 'の同定結果を示したものである．これらの検討により，明瞭なフィンガー流が発生する場合には，これに伴って α_L 'も大きく評価されており，巨視的分散長とフィンガー流の形状は密接に関係していることを明らかにした．本研究で得られた結果を以下にまとめる．

表層部とその下部の地盤の平均的な透水性が異なり，かつ下部の透水性が大きく，保水性が小さい場合には，とくにフィンガー流が形成されやすい透水性の比率が存在する可能性がある．フィンガー流の形状は，巨視的分散長に概ね定量的に反映される．不飽和帯を一体として評価した場合，見かけの飽和度が0.2付近に巨視的分散長のピーク値が存在し，0.3より大きくなると大きく低下すること，また，0.4以上では顕著なフィンガー流は形成されず，巨視的分散長は極めて小さくなる．地表面からの浸透強度が大きくなると，飽和度が上昇し，飽和浸透流に近くなるため，フィンガー流は発生しにくくなる．

これらの研究成果は，本研究によって作成された解析コードを用いて実施され，不飽和帯における汚染物質の輸送挙動を理解する上できわめて有用な知見を提供したものと考える．また，不飽和帯を対象とした移流分散解析を実施する際の巨視的分散長の設定法について，今後の実務への応用・発展が十分期待できるものとする．

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，中川啓，表層地盤におけるフィンガー流の発生と物質輸送に関する数値実験，*土壌の物理性*，査読有，第132号，2016，13-21，<https://js-soilphysics.com/downloads/pdf000/132000.pdf>

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)*，査読有，Vol.72，No.4，2016，p.I_277-I_282，http://doi.org/10.2208/jscejhe.72.I_277

齋藤雅彦，山北和之，中川啓，不飽和帯における鉛直浸透時の移流分散現象に関する研究，*土木学会論文集 B1 (水工学)*，査読有，Vol.71，No.4，2015，p.I_223-I_228，http://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_223

[学会発表](計6件)

Masahiko Saito，Numerical simulation of solute transport in heterogeneous porous media using the stochastic fractal model，Collaboration among mathematics, engineering and industry on various problems in infrastructure and environment held at Fukuoka, Japan, 2016.10.27, Kyushu University

Nakagawa Kei, Saito Masahiko and Amano Hiroki, Point dilution test and numerical evaluation of the hydraulic conductivity distribution, 43rd IAH International Congress held at Montpellier, France, 2016.9.26, Palais des congrès- Corum Montpellier

齋藤雅彦，表層地盤におけるフィンガー流の発生形態と巨視的分散長の評価，第16回地下環境水文学に関する研究集会，2015.11.22，大同大学

Masahiko Saito，Kei Nakagawa, Numerical Study On Macroscopic Dispersion In Unsaturated Vertical Infiltration Field, Aqua 2015 - 42nd IAH Congress held at Rome, Italy, 2015.9.14, Sapienza University of Rome

齋藤雅彦，山北和之，フィンガー流発生時における不飽和帯の分散長の性質について，第15回地下環境水文学に関する研究集会，2014.10.4，富山国際会議場

齋藤雅彦，不飽和地盤内の巨視的分散長の性質について，第14回地下環境水文学に関する研究集会，2013.10.6，キャンパスイノベーションセンター東京

6．研究組織

(1)研究代表者

齋藤 雅彦 (SAITO MASAHIKO)
神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻・助教
研究者番号：40283915