

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21510031

研究課題名（和文） 山腹斜面における廃棄物の不法投棄に伴う汚染物質の拡散挙動の解明

研究課題名（英文） Study on groundwater pollution processes in a mountainside slope caused by illegal waste disposal

研究代表者

齋藤 雅彦 (SAITO MASAHIKO)

神戸大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40283915

研究成果の概要（和文）：本研究では、山腹斜面における有害廃棄物等の不法投棄に起因する地下水汚染問題に対して、3次元斜面における水溶性物質の拡散・分散挙動の評価のためのシミュレーションコードを開発するとともに、周期的な降雨条件における汚染物質の挙動の解析、模型実験による斜面内の水分変化と溶質の輸送挙動の検討、および移流分散解析において重要となる巨視的分散長の定量的評価方法の検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Illegal waste disposal at the mountainside is one of serious problem in Japan. However, the conventional approaches to the groundwater pollution problem mainly focus on the urban area or flat land. In this study, 3D numerical simulations of the advection dispersion phenomena in the simple slope under cyclic rainfall were carried out to investigate the affects of hydraulic conductivity or geometric relation between the source area and pumping well. In addition, it was investigated that the change of water content and solute transport caused by rainfall infiltration in the model slope by experiment and numerical analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学，環境影響評価・環境政策

キーワード：陸圏・水圏・大気圏影響評価，不法投棄

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

産業廃棄物，医療廃棄物，一般廃棄物等の不法投棄が多発している。不法投棄は，監視の目が届きにくい山林や河川敷にて多発しているが，特に山腹斜面等に投棄された廃棄物に有害物質が含まれていた場合，水源地の土壌および地下水を汚染することから，生態

系への悪影響，および最悪のケースでは健康被害も懸念されていた。

(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た。しかし，一旦自然環境（とくに山間部）に排出された後の汚染物質の拡散挙動については，未解明な部

分が極めて多く、残念ながら「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。これは、地形・地層の複雑さ、土壌の不均一性、降水履歴の不規則性等、多くの未知な、あるいは測定が困難なファクターに現象が支配されているためである。

(3) 着想に至った経緯

申請者は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。加えて、3次元斜面内における地下水・浸透流のシミュレーション手法を開発しており、これらの成果を応用することにより、山腹斜面内の汚染物質の挙動については、高精度の予測・推定は依然として困難としても、いくつかの想定し得るシナリオのもとに濃度分布の時空間変化を、ある程度定量的に予測・推定することは不可能ではないと考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者がこれまでに取り組んできた地盤内の流れ、および物質移動の数値シミュレーションに関する研究を発展・融合することにより、従来に無い山間部における廃棄物の不法投棄の影響について、定量的に予測・推定する手法を確立すること、すなわち、複雑な地形・地質と断続的な降雨のもとで、汚染物質がどのように拡散・分散するのかを定量的に把握するために、どの要因がどのような影響を与えるかを明らかにすることとした。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションコードの開発

申請者らは、これまでにヒステリシスを考慮した3次元気液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、3次元地形ジェネレータ等をすでに開発しており、これらを統合・発展させることによって、自然斜面における汚染物質の挙動をより適切に再現可能なシミュレータの作成を行った。

(2) 模型実験による数理モデルの検証

斜面内では、断続的な降雨により流れ場の様子は時間的に大きく変化する。つまり、降雨により鉛直浸透が生じ、これが地下水面に到達すると地下水位の上昇および斜面方向の流れが生じる。さらに降雨がなくなると地下水位が低下し、斜面方向の流速も小さくなる。このような流れ場の変化による汚染物質の挙動の変化を模型実験によって定量的に捉えるとともに、シミュレータによって再現解析を試み、その有効性と問題点について検

討した。

(3) 地盤の不均一性の影響（巨視的分散長の定量的評価方法に関する検討）

フィールドスケールにおける移流分散解析を行う際に重要となるのが巨視的分散長であるが、この値を適切に設定する方法は十分確立されていない。本研究では、自己相似型不均一地盤モデル ($f^{-\zeta}$ 型モデル) を用いて疑似的な不均一場を発生させ、無次元化された2次元場および3次元場における移流分散解析を行い、そこから同定される平均的な巨視的分散長を用いて、その性質に関する考察を行った。

4. 研究成果

(1) 山腹斜面内の移流分散過程に関する研究成果

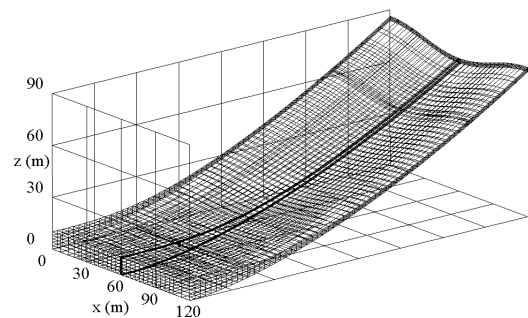


図1 モデル斜面の概要

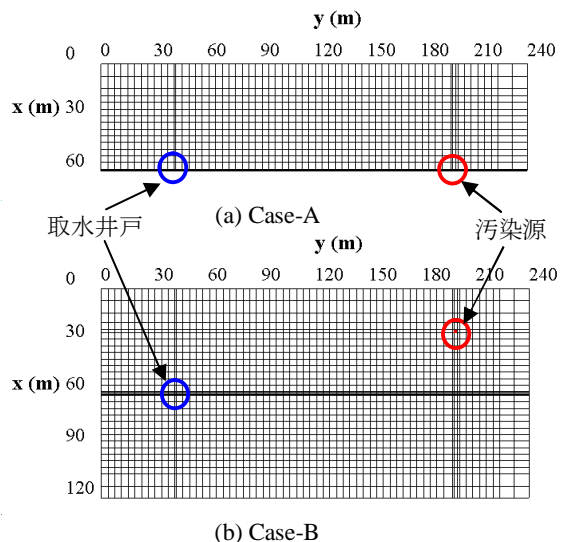


図2 汚染源および取水井戸の平面配置

図1および図2に示したモデル斜面において、周期的な降雨条件を与え、斜面の透水性、および汚染源と取水位置の関係が、斜面内の汚染物質の輸送状況に与える影響等について数値シミュレーションにより検討した。

図3は取水井戸における浸出水濃度の時間変化である。ここに、Case-A1およびCase-B1は、高透水性（透水係数=10⁻⁴ m/s）、Case-A2およびCase-B2は、低透水性（透水係数=10⁻⁵

m/s) のケースである。

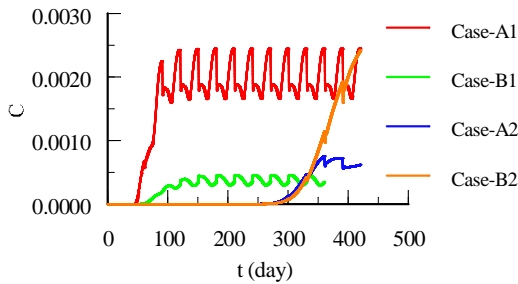


図3 取水井戸における浸出水濃度の時間変化

これより、汚染物質が取水井戸に到達した後の濃度の上昇過程については、汚染源の違いによって全く逆の傾向が見られ、Case-Aについては、透水係数の大きいCase-A1の方が濃度の上昇が大きいのにに対し、Case-Bでは逆に透水係数の小さいCase-B2の濃度が大きく上昇している。このような現象が生じるメカニズムについて詳細に検討した結果、以下のような知見が得られた。

- ① 飽和透水係数が比較的小さい場合は、地下水位が上昇しやすく、谷部からの浸出が生じることがあり、一度地中に浸透した汚染物質が、表流水として再び地表に流出する可能性があることを示した。
- ② 飽和透水係数の違いによって、水位・水頭分布（すなわち流線）が異なり、これに伴ってプリュームの形状も変化するため、下流部への到達状況が大きく異なる可能性があることを示した。
- ③ 取水井戸や観測井戸において得られる濃度の観測結果は、斜面途中における浸出の有無や流線の微妙な変化に敏感に反応するため、まず流れ場の性質を十分に把握することが重要であることを示した。

(2) 降雨に伴う斜面内の水分変化および物質移動に関する模型実験と数値解析

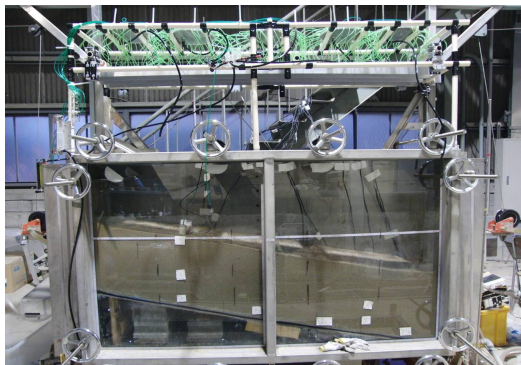


写真1 模型斜面及び降雨発生装置

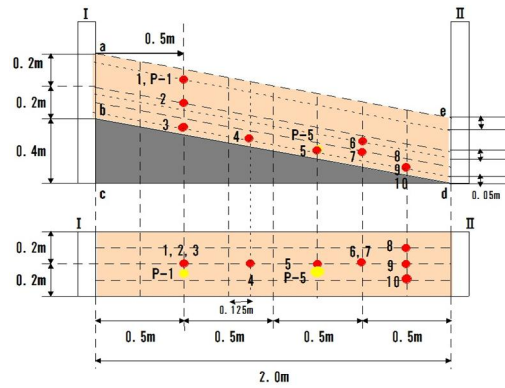


図4 模型斜面及び各種センサ埋設位置

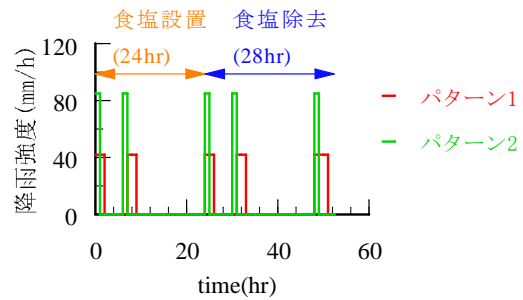


図5 降雨パターン

写真1 および図4に示す実験装置を用いて、図5に示す降雨パターンを与え、それぞれ斜面内の水分挙動を調べるとともに、地表面（地点1上）に設置された汚染物質（食塩）の物質輸送過程について検討した。ここで、測定項目は体積含水率、電気伝導率及び間隙水圧であり、体積含水率及び電気伝導率を計測可能なセンサは図4における1~10、間隙水圧センサはP-1およびP-5である。また、数値解析による実験結果の再現を通じて、斜面内の水分変化および物質移動の全体像を把握することを試みた。

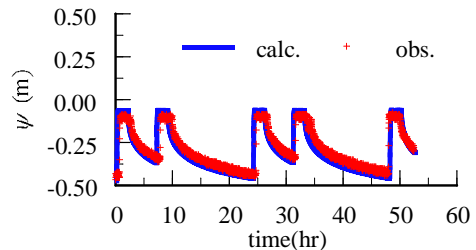
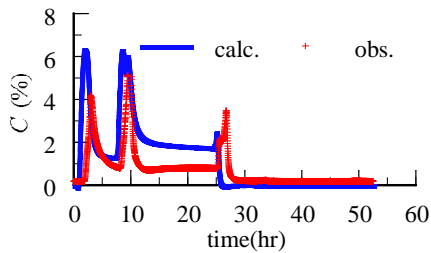
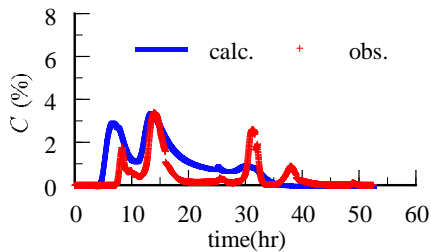


図6 間隙水圧の時間変化(P-1, パターン1)

図6は、降雨パターン1におけるP-1の圧力水頭の測定結果と数値解析による再現結果を比較したものである。再現計算では測定値の再現性が良い飽和透水係数を試行錯誤的に求め、得られた飽和透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ であった。また、図6と同様にP-2における圧力変化および降雨パターン2における圧力変化についても数値解析による再現性は非常に良好であったことから、流れ場については概ね再現されたと考えられる。

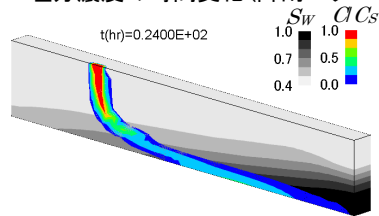


(a) 地点 2

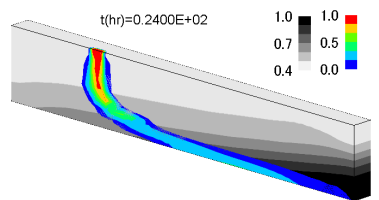


(b) 地点 4

図 7 塩分濃度の時間変化(降雨パターン 1)



(a) 降雨パターン 1



(b) 降雨パターン 2

図 8 飽和度および塩分濃度分布

図 7 は、それぞれ地点 2、4 における降雨パターン 1 について、塩分濃度の時間変化の測定結果と数値解析による再現結果を比較したものである。地点 2 について、降雨パターンによる相違は実験結果では顕著には現れなかったが、解析結果ではパターン 1 の方がややピーク時の濃度が大きく評価された。また、2 回目の降雨終了後に着目すると、実験値では 1~2% 程度まで濃度が低下するのに対し、再現結果では 2~3% 程度となっている。ただし、ピーク時の濃度については、ほぼ実験結果と一致していると思なしてよいだろう。

地点 4 についても、地点 2 と同様の傾向が見られ、ピーク時の濃度は数値解析により概ね再現されているが、全体的に実験結果よりも解析結果の方が降雨終了後の濃度低下が緩やかである。このような実験結果と解析結果の相違は、シミュレーションでは汚染源における溶出濃度を常に一定と仮定していることが関係していると思われる。

図 8 は、3 度目の降雨開始直前のタイミングにおける飽和度分布と塩分濃度分布の計算結果を示したものである。これより、降雨パターンによる飽和度分布の相違は見られず、この時点ではプリュームの形状にも顕著な違いは見られない。つまり、降雨終了から一定期間が経過すると、地盤内の水分状態は降雨パターンにかかわらず同様の状態に近づくため、プリューム形状も同様になると考えられる。

これらの結果を以下のようにまとめる。

- ① 間隙水圧の時間変化については、水分特性曲線のヒステリシスを考慮することにより、実験結果は数値解析により良好に再現された。
- ② 塩分濃度の時間変化については、比較的高濃度の地点(汚染源に近い地点)におけるピーク濃度は、概ね数値解析により再現された。しかし、ピーク時以外では汚染源に近い地点における解析値は濃度を大きく評価する傾向が見られ、一方、汚染源から離れた地点においては、解析結果はやや過小評価となった。
- ③ 塩分濃度の空間分布については、降雨パターンの違いにより、プリューム形状もその影響を受けるものの、降雨終了後一定期間が経過すると、降雨パターンの違いによる影響はほぼ解消されることを示した。

(3) 巨視的分散長の定量的評価

1 次元的な流れ場に対し、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多数発生させ、有限要素法による数値シミュレーションで 2 次元および 3 次元の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に関する考察を行った。その際、透水係数分布の自己相似性を利用して無次元場における解析を行い、より普遍的な性質の解明を試みた。また、この結果に基づいて巨視的分散長を簡易に推定する方法を提案した。

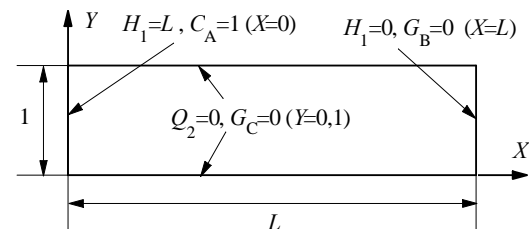


図 9 解析領域と境界条件(2次元モデル)

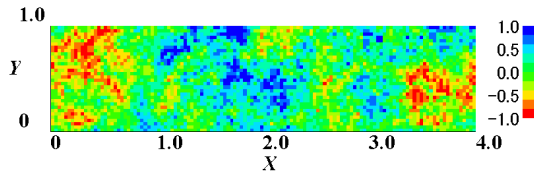


図 10 透水係数分布の一例

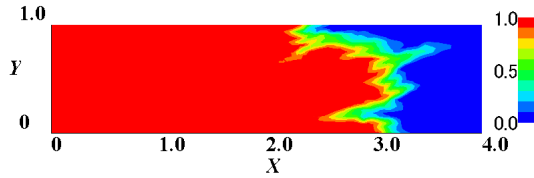


図 11 移流分散解析の一例

図 9 から図 11 は、2次元モデルで用いた解析領域、透水係数分布の一例、および移流分散解析の一例である。本研究では、解像度および地盤のばらつきを表すパラメータ (λ) を変化させて、それぞれについて 1000 個の場を生成して濃度の時空間変化を計算し、1000 回分のアンサンブル平均を求めた。また、濃度分布のアンサンブル平均から得たいくつかの断面における断面平均濃度の時間変化から一次元移流分散方程式の理論解を用いて、得られた濃度の時間変化を再現する見かけの分散長 (無次元巨視的分散長= α_L') を各断面について同定した。

この結果、2次元モデルでは巨視的分散長 α_L' は以下のような簡潔な式によって表現可能であることを明らかにした。

$$\alpha_L' = l_0 \gamma_0 \log \left(\frac{x}{l_0 \delta} \right) \quad (1)$$

ここに、 x は流下距離、 l_0 は汚染源長さ、 γ_0 、 δ ($0.04 < \delta < 0.05$) はパラメータであり、 γ_0 については、以下の関係が得られている。

$$\gamma_0 = 1.74 \times \lambda^{1.16} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_{KS}^2}{\log_{10}(V_A/V_S)} \quad (3)$$

ここに、 σ_{KS}^2 は飽和透水係数の対数変換値の標本分散、 V_A は解析領域またはサンプリング範囲のボリューム、 V_S はサンプルのボリュームである。

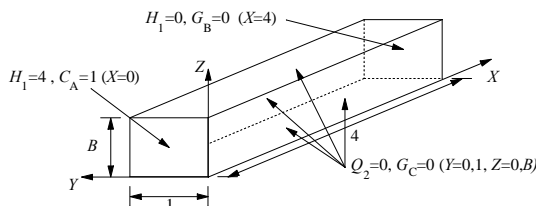


図 12 解析領域と境界条件 (3次元モデル)

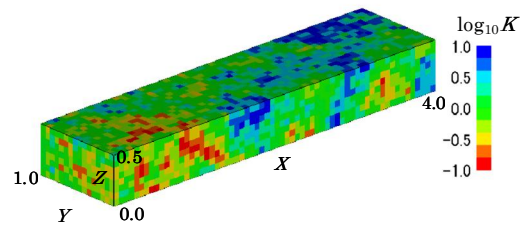


図 13 透水係数分布の一例

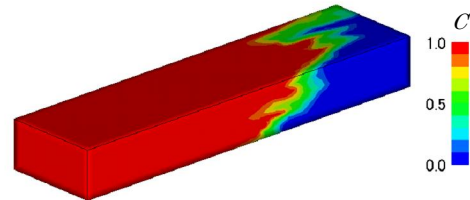


図 14 移流分散解析の一例

図 12 から図 14 は、3次元モデルで用いた解析領域、透水係数分布の一例、および移流分散解析の一例である。これらを用いて2次元モデルと同様の検討を行い、巨視的分散長 α_L' について、以下のような評価式を得た。

$$\alpha_L' = \gamma_0 (l_0 + 1.4b) \log_{10} \left(\frac{x}{0.03(l_0 + b)} \right) \quad (4)$$

ここに、 b は汚染面の短辺長さである。

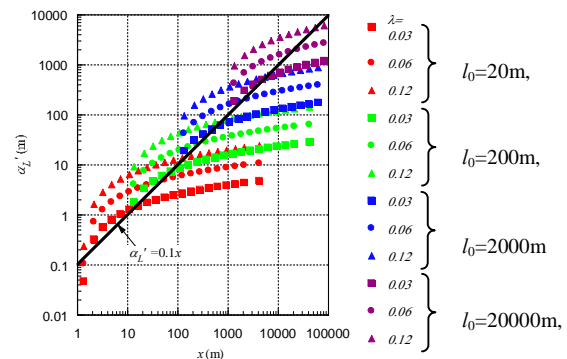


図 15 実スケールにおける巨視的分散長の推定

図 15 は、実スケールにおける流下距離 x と、巨視的分散長 α_L' の関係について、いくつかの l_0 , b , および λ の組み合わせについて、式 (4) を用いて求めたものである。

これらの検討により得られた結果を以下のようにまとめる。

- ① 不均一場における巨視的分散長は「汚染源の長さ」と「流下距離」の二つのスケール、および「透水係数のばらつき」という地盤の性質に依存することを示し、これらの関係から巨視的分散長を定量的に評価するための簡潔なモデルを提案した。

- ② 本研究で提案したモデルによって得られた流下距離と巨視的分散長の関係は、これまでに報告されている実測結果と同様の傾向を示した。
- ③ 従来から巨視的分散長の推定の際に用いられている $\alpha_L' = 0.1x$ という概算値の妥当性について検討し、流下距離が汚染源長さの数倍以上の地点では、過大評価となる可能性を指摘した。
- ④ 流下距離および透水係数のばらつきと、巨視的分散長の関係を図化することによって、粗い推定値をきわめて容易に得る方法を提案した。

これらの研究成果は、本研究によって独自に開発された解析コードを用いて実施され、斜面内の汚染物質の輸送挙動を理解する上で有用な知見を提供したものと考える。とくに巨視的分散長の評価方法については、従来の経験式に基づく推定法と比較して理論的整合性を持つものであり、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4件)

- ① 齋藤雅彦, 本田貴之, 中川啓, 降雨に伴う斜面内の水分変化および物質移動に関する模型実験と数値解析, 水工学論文集, 査読有, 第56巻, 2012, I_535-I_540.
- ② 齋藤雅彦, 西村由紀子, 中川啓, 自己相似型不均一地盤モデルを用いた巨視的分散長の定量的評価に関する研究, 地下水学会誌, 査読有, 第53巻第4号, 2011, 343-355, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jagh/53/4/53_4_343/ pdf
- ③ Masahiko SAITO, Takumi ISHIHARA and Kei NAKAGAWA, Numerical Simulation on Advection Dispersion Processes in A Mountainside Slope, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 査読有, Vol.29/No.1, 2011, 47-56.
- ④ 齋藤雅彦, 石原匠, 中川啓, 数値シミュレーションによる山腹斜面内の移流分散過程に関する基礎的研究, 水工学論文集, 査読有, 第54巻, 2010, 601-606.

[学会発表] (計7件)

- ① 齋藤雅彦, 層状異方性不均一場における巨視的分散長の性質に関する検討, 第11回

地下環境水文学に関する研究集会, 2011.11.13, 長崎大学 環境科学部 雲仙 E キャンレッジ交流センター

- ② M. SAITO, Y. NISHIMURA, D. HOSHINO, K. NAKAGAWA, Quantitative Evaluation of Macroscopic Longitudinal Dispersivity for One-Dimensional Flow, ModelCARE2011 held at Leipzig, Germany, 2011.9.19, Helmholtz Centre for Environmental Research 6UFZ

- ③ 西村由紀子, 星野大介, 齋藤雅彦, 異方性不均一場における巨視的分散長の性質について, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9.9, 愛媛大学

- ④ 本田貴之, 西田広大, 齋藤雅彦, 斜面内の移流分散過程における降雨パターンの影響について, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9.9, 愛媛大学

- ⑤ 齋藤雅彦, 西村由紀子, 不均一地盤モデルを用いた巨視的分散長の推定方法に関する研究, 第11回地下環境水文学に関する研究集会, 2010.10.17, 琉球大学

- ⑥ 西村由紀子, 齋藤雅彦, 一次元移流分散現象における巨視的分散長の性質に関する一考察, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9.3, 北海道大学

- ⑦ 西田広大, 齋藤雅彦, 斜面内の降雨浸透および移流分散過程に関する模型実験と数値シミュレーション, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9.3, 北海道大学

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・助教
研究者番号: 40283915