



単孔式の多深度希釈試験と数値計算による水理パラメータ分布の推定

中川, 啓

天野, 弘基

齋藤, 雅彦

(Citation)

土木学会論文集B1(水工学), 74(4):I_19-I_24

(Issue Date)

2017

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2017 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005916>



単孔式の多深度希釈試験と数値計算による水理パラメータ分布の推定

中川 啓¹・天野 弘基²・齋藤 雅彦³

¹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

²学生会員 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 (〒52-8521 長崎市文教町1-14)

³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)

数値計算により地下水汚染等について検討する場合、透水係数や分散係数といった水理パラメータの設定が重要である。本研究では、硝酸性窒素による地下水汚染の生じている現場において、単孔式の多深度希釈試験を適用し、地下水の実流速や透水係数、分散係数を評価した。さらに、現場で得られた情報をもとに人工的に発生させた不均一場に対して単孔式の多深度希釈試験について3次元の数値計算を実施した。その結果、不均一性を考慮することで、現場で得られたトレーサー濃度低減の様子を再現できる可能性があることが分かった。

Key Words: Multi level dilution test, Pore velocity, Numerical simulation, Stochastic fractal model

1. はじめに

地下水汚染の対策を講ずるため、数値計算を用いて汚染が拡がってきた過程を再現することや、汚染対策の効果について検討が加えられる^{1,2)}。数値計算により精度の高い再現や予測を行うためには、透水係数や分散係数といった水理パラメータの設定が重要である。しかしながら、自然の地層や土壤が持つ不均一性のため、これらのパラメータを正確に把握することは困難である。トレーサー試験は、原位置において、現場の物質輸送を直接測定できるという点で、パラメータ推定のための現実的かつ信頼性の高い有効な手法である³⁾。トレーサー試験に関して、田中・細谷によるレビューが行われており、単孔式試験(ポイント希釈試験・注入揚水試験)と孔間試験(自然勾配試験・放射状発散試験・放射状収束試験・ダイポール試験)、それぞれについて詳細な説明が加えられている³⁾。

地下水の流向が正確に把握できており、上下流にトレーサーの注入孔と観測孔が設置できる場合や、注入孔の周りに放射状に観測孔をいくつも設置できる場合は、孔間試験が有効であるが、流れ場が複雑である場合や、土地条件や経済的条件から単一の観測孔しか設けることができない場合は、その観測孔内に投入したトレーサーの濃度変化を利用する単孔式試験が現実的であろう。このような単孔式試験による検討として、例えば、Mahler et

al.は、単孔式試験により LNAPL のフラックスについて論じている⁴⁾。また Petrič and Kogovšek は、地下水涵養と帶水層の不均一性の違いが、地下水流速と溶質輸送に与える影響を評価した⁵⁾。さらに、トレーサー濃度の破過曲線から、地下水流速や縦方向および横方向の分散係数を評価した事例がある^{6,7)}。

本研究では、硝酸性窒素による地下水汚染が生じている長崎県島原市を研究対象地として⁸⁾、単一の観測孔の多深度においてポイント希釈試験を行う方法を適用し、地下水の実流速や透水係数、分散係数といった水理パラメータを評価する。また、得られた情報をもとに3次元の数値計算を人工的に発生させた不均一場に対して実施し、現場試験により得られたトレーサー濃度の希釈曲線との整合性について検討する。

2. 研究対象地の概要

研究対象地とした長崎県島原市は、島原半島の北東部に位置し、面積は 82.8 km² である。地形は半島中心にそびえる普賢岳より東の有明海にかけてなだらかな斜面が広がる扇状地である。標高 300-1500 m に森林が広がり、島原市北部の山の中腹では畜産施設や集落が点在し始める。標高が低くなるにつれ、農地があたり一面を占め、道路沿いに民家が建ち並ぶ。市北部の標高 10 m 以下で

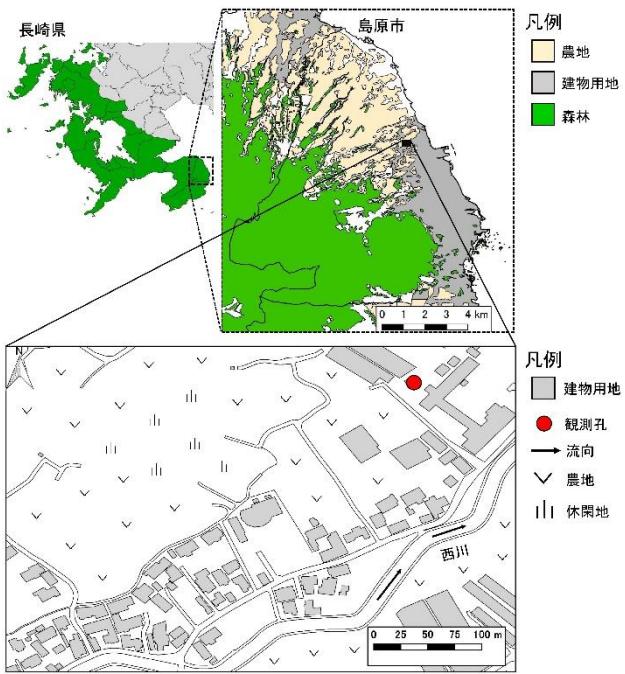


図-1 研究対象地の概要

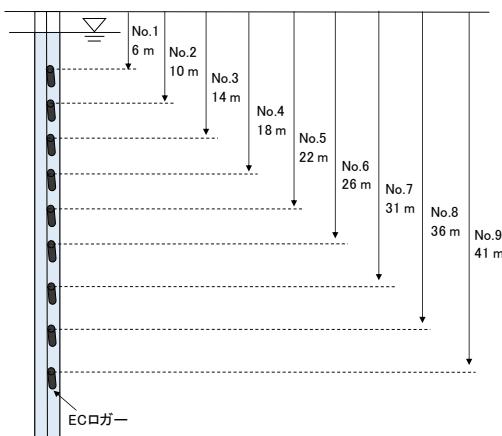


図-2 電気伝導度計の設置

は海岸線近くに民家が建ち並び、南部の標高 50 m 以下では市街地や商業施設が発達する。農業地帯は島原市の北部に集中し、島原市全体の 22.7 % を占める。1977 年から 2013 年における年平均降水量は 2105 mm、年平均気温は 17.3 °C であった⁹⁾。

研究対象地の概要を図-1 に示す。内径 5.1 cm、深度 50 m のフルスクリーンの観測孔を、島原市内の標高 31 m の小学校敷地内に設置した。観測孔内の地下水位は、地表面から深度 3.7 m である。この観測孔周辺は、主に施設園芸や畜産農家、畑地などの農地であり、一部を休閑地や住宅が占め、近傍に河川（西川）が流れる。西川の水位と観測孔内の地下水位との水位差は、地下水位の方が 3.4 m (2015 年 12 月 27 日の測定による) 高い。地下水位の変動幅は年間 1.5 m であるが、著者らの観測によると、本研究で用いた観測孔から 5 m 離れた位置に設置した補

助観測孔内の水位の状況と、河川水位がほぼ河床近傍にあるという状況から、地下水は観測孔から河川へ向かって流下していると推定される。

3. 単孔式の多深度希釈試験と水理パラメータの同定

単孔式の多深度希釈試験は、2015 年に 6 回実施した (6/19, 7/25, 8/25, 9/17, 10/21, 11/23)。各回の試験は次のように行った。まず、各深度の電気伝導度の背景値を知るために、図-2 に示すように、電気伝導度計 (HOBO U24-001) を各深度に吊り下げたケーブルを投入して暫く静置した後、取り出した。次に錘を付けたケーブルに、深度 1 m 毎に、ポリエチレン等の複合繊維による滲出性のパックに、トレーサーとして用いた塩化ナトリウム 1 g を詰め (以降、トレーサーパックとする)、そのケーブルを観測孔に瞬間に投入した。トレーサーが各深度で溶出したと考えられる時間が経過した後に、ケーブルを取り出した。その後、多深度でトレーサー濃度の希釈曲線を得るために、再び電気伝導度計を吊り下げたケーブルを投入して静置した。

トレーサーパックからの滲出は、所定の深度に到達する以前に始まることも考えられ、深度毎の地下水流动による希釈開始時間や濃度が異なることが想定される。そこで本研究で扱う希釈曲線を標準化するため、以下の様に抽出した。解析の対象とするトレーサー濃度の希釈曲線の抽出例を図-3 に示す。実測された電気伝導度からあらかじめ求めておいた校正曲線により塩化ナトリウムの濃度変化に変換して、その濃度変化の 1 次微係数を求め、それが 0 を下回って再び 0 を越えるまでの部分を抽出した。なお、トレーサー投入前に濃度が落ち込んでいるのは、電気伝導度計を一旦取り出したためである。このようにして各深度で得られた希釈曲線を、式 (1) に示す Fujinawa による解析解⁶⁾に、最小二乗法によりフィッティングすることで、実流速 v' (cm/s) と縦方向および横方向分散係数 D_L (cm), D_T (cm) を求めた。なお横方向分散係数は、縦方向分散係数の 1/10 とした。

$$\bar{C} = \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{a - v't}{\sqrt{4D_L t}} \right\} + \operatorname{erf} \left\{ \frac{a + v't}{\sqrt{4D_L t}} \right\} \right] \operatorname{erf} \left\{ \frac{a}{\sqrt{4D_T t}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{C} = C/C_0$: トレーサー濃度の初期値に対する相対濃度 (-), t : 時間 (s) である。また a (cm) は、正方形断面のボーリング孔の場合の 1 辺の長さであり、円形断面のボーリング孔の内径 R (cm) とは、次式の関係となる。

$$a = \frac{1}{2} R \sqrt{\pi} \quad (2)$$

ただし、後の希釈曲線をフィッティングする時に同定す

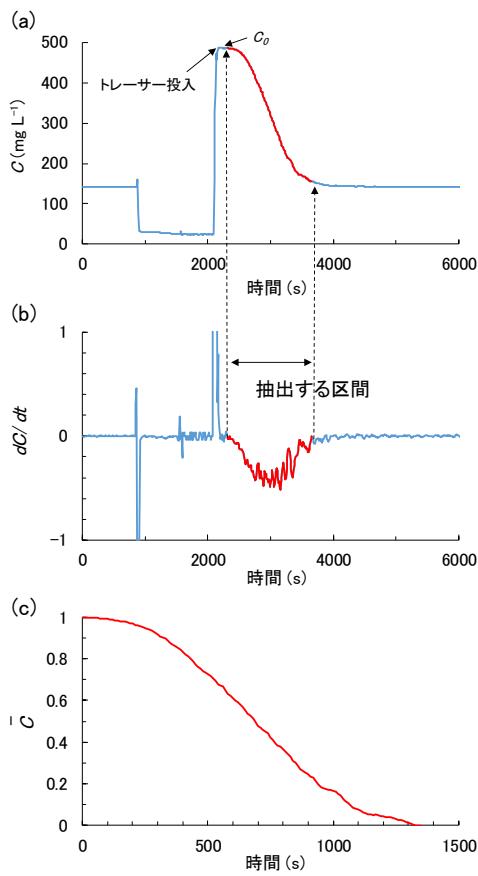


図-3 濃度希釈曲線の抽出例, (a)実測の濃度変化, (b)1次微係数, (c)抽出した濃度希釈曲線

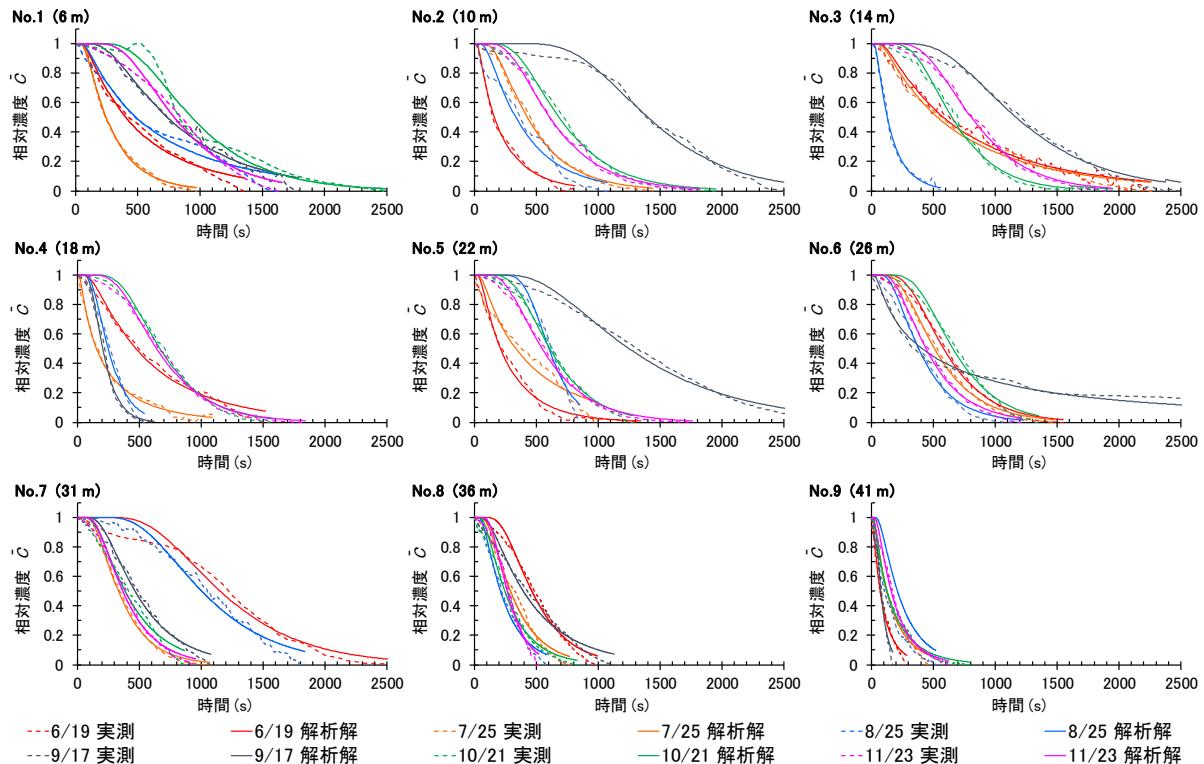


図-4 各深度における濃度希釈曲線への解析解のフィッティングの状況 (No.1 (6 m), No.2 (10 m), No.3 (14 m), No.4 (18 m), No.5 (22 m), No.6 (26 m), No.7 (31 m), No.8 (36 m), No.9 (41 m))

る実流速の推定初期値は、対数相対濃度の変化から、次式(3)により求めた。

$$\ln \bar{C} = -\frac{2v'}{\pi R} t \quad (3)$$

次に、透水係数を求めるために、実流速から有効間隙率を用いてダルシー流速を求めた。このとき、有効間隙率を著者らの研究より 0.227 とした。また観測孔を横切る地下水の流向は、観測孔から河川方向に向いていると仮定して求めた動水勾配を用いた。

相対濃度の希釈曲線に対する解析解によるフィッティング状況を図-4 に示す。解析解は実測値をよく再現したと考える。試験を実施した時期によって希釈曲線の形が大きく異なっており、その時期による形状の違いは、深度 10 m, 14 m, 22 m, 31 m で大きかった。例えば、6 月に実施した試験の場合、深度 14 m と 31 m で濃度が低減するために特に時間を要しており、これらの深度で流速が小さかったことが分かる。10 月実施の試験では、深度 22 m までは濃度低減に時間がかかっていることが分かる。これに対し、深度 36 m や 41 m においては、試験実施時期にかかわらず、素早い濃度低減が認められ、深い位置において流速が大きいことが分かる。

単孔式の多深度希釈試験の実施時期によって相対濃度の希釈曲線が異なることについて検討するため、降雨条件や試験結果の特徴が異なる 6 月と 10 月の結果について、電気伝導度の鉛直分布の変化を図-5 に示す。これ

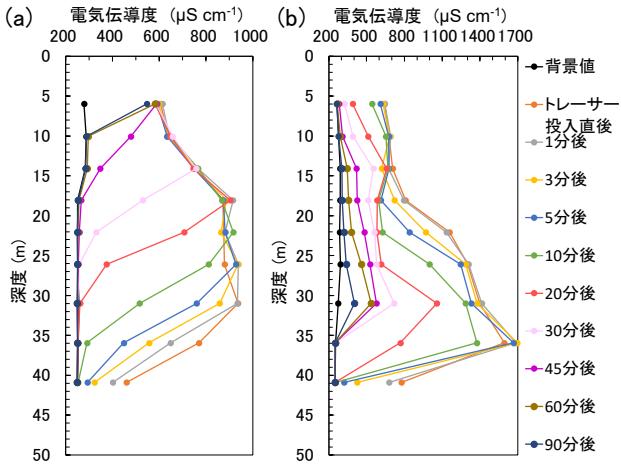


図-5 電気伝導度の鉛直分布の変化, (a)6月, (b)10月

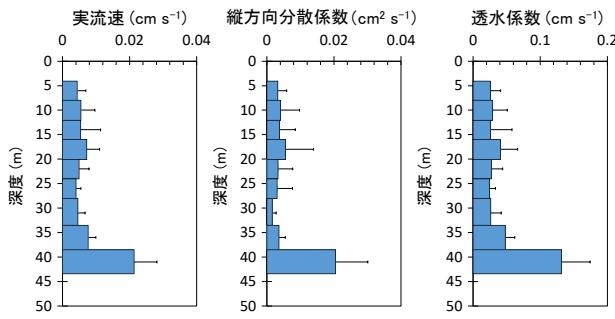


図-6 多深度希釈試験結果から得られた実流速, 縦方向分散係数, 透水係数の鉛直分布

らを比較すると, 地下水面から 18 m までの浅い深度および深度 41 m において変化幅が狭くなっていることから濃度低減が速かったことが分かる。6月は浅い深度において, 試験実施日まで降り続いた合計 102.5 mm の降雨による希釈が特に効いたと考えられる。10月は試験実施日以前に 1週間以上降雨が無く, 深度 41 m を除くと, 濃度低減に時間がかかっていることが分かる。

単孔式の多深度希釈試験の結果から得られた水理パラメータの鉛直分布を図-6 に示す。最も速い実流速 ($2.1 \times 10^2 \text{ cm s}^{-1}$) が最深部 (深度 41 m) で得られた。それより浅い深度においては、深度 18 m と 36 m において比較的大きい実流速が得られた。よってこれらの 3 深度が研究対象とした現場の主な地下水流动の深度であると考えられる。推定された透水係数の範囲は、 $2.64 \times 10^2 \text{ cm s}^{-1}$ から $1.36 \times 10^1 \text{ cm s}^{-1}$ となり、これは砂や礫の範囲内であり、現地の地質が主に中-粗砂を主体とする扇状地堆積物である状況からも概ね妥当な結果が得られたと考えられる。分散係数は流速に依存するため、実流速と同様の鉛直分布傾向を示した。図には標準偏差も示しており、これは試験実施日による結果のばらつきをあらわしているが、実流速の大小と対応しており、流速の大きい深度では、時期的な変化に対応して大きく変動していることが分かる。

4. 数値計算による基礎式

(1) 基礎式

浸透流解析の際に使用した飽和-不飽和浸透流の基礎方程式は以下のとおりである¹⁰⁾。

$$\left(\phi \frac{dS_w}{d\psi} + \beta S_s \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathbf{K} \cdot (\nabla \psi + \nabla Z)] \quad (4)$$

ここに ϕ は間隙率, S_w は飽和度, S_s は比貯留率, \mathbf{K} は透水係数テンソル, ψ は圧力水頭, Z は位置水頭, β は飽和領域で $\beta=1$, 不飽和領域で $\beta=0$ をとる。解析対象に不飽和領域が含まれる場合は不飽和浸透特性を得ることが必要であるが、本研究において不飽和領域内の流れはほぼ無関係であるため、不飽和浸透特性に関する情報は割愛する。

地下水流れによる水溶性物質の輸送過程の基礎式(移流分散方程式)は、以下のように表される。

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{q} \cdot \nabla C \quad (5)$$

ここで、 C は濃度, θ は体積含水率 ($=\phi S_w$), \mathbf{D} は分散係数テンソル, \mathbf{q} はダルシーフlow速ベクトルである。また、式(5)における \mathbf{D} の成分 $D_{i,j}$ は、次式で与えられる¹¹⁾。

$$\theta D_{i,j} = \alpha_T |\mathbf{q}| \delta_{i,j} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{q_i \cdot q_j}{|\mathbf{q}|} + \theta D_m \delta_{i,j} \quad (6)$$

ここで、 α_L は縦方向微視的分散長, α_T は横方向微視的分散長, q_i はダルシーフlow速ベクトル \mathbf{q} の i 方向成分, D_m は分子拡散係数, $\delta_{i,j}$ はクロネッカーデルタである。

(2) 透水係数の空間分布モデル^{12), 13)}

本研究では、透水係数分布モデルとしてパワースペクトル密度関数が $f^{-\zeta}$ 型となる確率的フラクタルモデルを使用した。これは透水係数の対数変換値 ($Y=\log_{10}k$) のパワースペクトル密度関数が次式のように $f^{-\zeta}$ 型となるものであり、実地盤における透水係数の空間分布特性を容易に模擬し得ることが確認されている。

$$S(|f|) \propto |f|^{-\zeta} \quad (7)$$

ここに、 f は空間周波数ベクトル, $S(|f|)$ はパワースペクトル, ζ は空間的な相關性を表すパラメータであり、3 次元モデルの場合、 $\zeta \approx 3$ である。またこのモデルを用いた場合、 $\log_{10}k$ の分散 σ_k^2 と空間解像度 N の関係は以下の式で表される。

$$\sigma_k^2 = \lambda \log_{10} N \quad (8)$$

ここに、 λ は透水係数 k のばらつきの大きさを表すパラメータである。

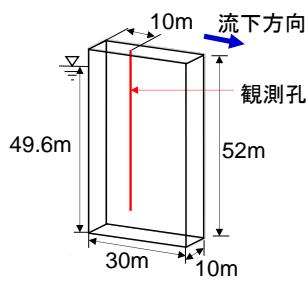


図-7 解析領域の概要

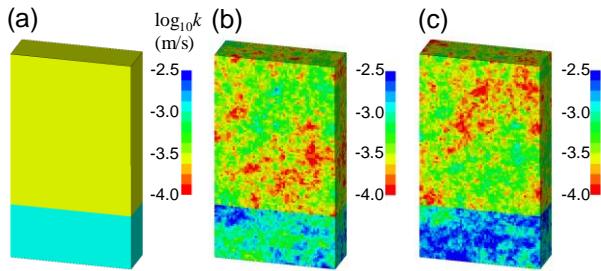


図-8 飽和透水係数分布 (a)均一場 Run 0, (b)不均一場 Run 1, (c)不均一場 Run 2

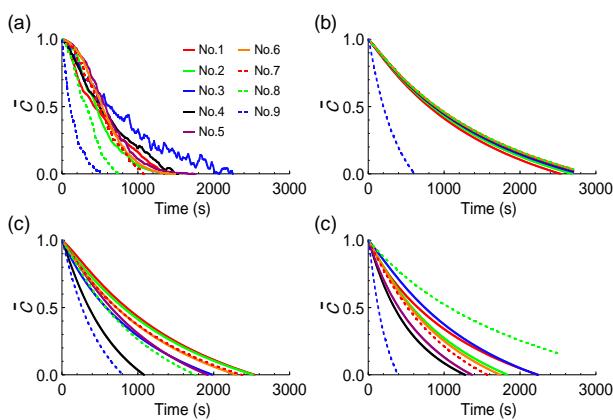


図-9 各深度における濃度希釈曲線の数値計算結果 (a)実測値, (b)Run 0, (c)Run 1, (c)Run 2

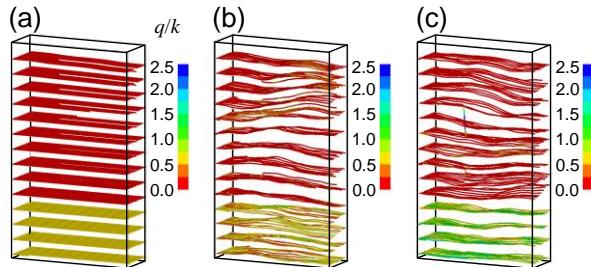


図-10 流線分布 (a)均一場 Run 0, (b)不均一場 Run 1, (c)不均一場 Run 2

(3) 計算条件

図-7 に解析領域の概要を示す。上流側の地下水位は 49.6 m であり、下流側境界との水位差は 1.117 m (平均動水勾配は 0.037) である。また、初期条件は図-7 に示す観

測孔に相対濃度 $\bar{C} = 1.0$ を、上流側の境界条件は $\bar{C} = 0$ を与えた。多深度希釈試験によって得られた分散長は、巨視的分散長であるが、現場の地質が砂礫であることから、砂の一般的な粒径スケールを参考に、要素内分散のみを考慮し、式(6)の縦方向微視的分散長 α_L は 1.0 cm、横方向微視的分散長 α_T は 0.1 cm とした。解析ケースは 3 ケースとした。Run0 は均一場 ($\lambda=0$) とし、現地で得られた各深度間の希釈曲線のばらつきの要因が、場の不均一性と想定し、Run1 および Run2 は飽和透水係数分布の異なる不均一場とした。図-8 に各ケースの飽和透水係数分布を示す。ここで図-6 を参照し、No.1～No.8 までを含む上部 3/4 については、透水係数の推定値のばらつきが比較的小さいため地質的に同一の層と仮定し、下部 1/4 の透水係数は、No.9 の推定値が上部 3/4 と比較して明らかに大きいため、異なった平均値を与えた。また、式(8)で不均一場における飽和透水係数のばらつきの大きさを表すパラメータ、および解析モデルにおける $\log_{10} k$ の分散 σ_{kC}^2 は、No.1～No.8 において推定された透水係数(図-5)に基づいて以下のように得られる。

$$\lambda = \frac{\sigma_k^2}{\log_{10} N} = \frac{9.53 \times 10^{-3}}{\log_{10} 8} = 0.01 \quad (9)$$

$$\sigma_{kC}^2 = \lambda \log_{10} M = 0.051 \quad (10)$$

ここに、 M は解析モデルにおける要素数である。

(4) 計算結果と考察

図-9 に数値計算によって得られた各深度における比濃度の時間変化を示す。ここで、実測値については、図-4 における 6 回の実測結果のうち、平均的な挙動を示したもの (たとえば、No.1 の場合は 6/19 の実測値) を選択している。均一場のケース (Run 0) では、上層 (No.1～No.8) において実測値に見られるような比較的速い濃度の低減、および各観測点間の低減速度のばらつきは再現されていない。一方、不均一場のケース (Run 1, 2) においては、各深度の希釈曲線を直接再現してはいないが、それらのばらつきなどは、現実に近い挙動を示している。図-10 は、各ケースの流線であるが、Run1 および Run2 では流線の蛇行や、局所的に流れの速い部分が見られ、実際の流れ場についても同様の現象が生じているものと推察され、多深度希釈試験によって得られた結果は、場の不均一性によるものであることが分かった。

5. おわりに

本研究では、地下水汚染が生じている地域に設置した深度 50 m のフルスクリーンの観測孔においてトレーサ

一試験の一種であるポイント希釈試験を多深度で実施する単孔式の多深度希釈試験を実施して、各深度における実流速、透水係数や分散係数といった物質輸送に関する水理パラメータを求めた。これによると深度 50 m まで大きく 2 層に分かれ、上層では 2 深度において地下水流れが卓越する層が見られた。試験結果から得られた透水係数は、 $2.64 \times 10^2 \text{ cm s}^{-1} \sim 1.36 \times 10^1 \text{ cm s}^{-1}$ であった。これは砂礫の範囲であり、現地の地質が主に中-粗砂を主体とする扇状地堆積物であることとも整合する妥当な結果が得られた。また数値計算の結果によれば、不均一性を考慮することで、多深度希釈試験によって得られた濃度低減の様子を再現できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP24360194 および JP15KT0120 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田浦雄介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

- Freeberg, K. M., Bedient, P. B. and Conner, A.: Modeling of TCE Contamination and Recovery in a Shallow Sand Aquifer, *Groundwater*, Vol.25, No.1, pp.70-80, 1987.
- 中川 啓, 斎藤雅彦, 朝倉 宏: 硝酸性窒素による地下水汚染過程と修復についての数値的評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 70, No.4, pp.I_1111-I_1116, 2014.
- 田中靖治, 細谷真一: 岩盤を対象とした原位置トレーサー試験の現状, *Journal of MMIJ*, Vol.124, No.10, pp. 601-610, 2008.
- Mahler, N., Sale, T., Smith, T. and Lyverse, M.: Use of single-well tracer dilution tests to evaluate LNAPL flux at seven field sites, *Groundwater*, Vol.50, No.6, pp.851-860, 2012.
- Petrič, M. and Kogovšek, J.: Identifying the characteristics of groundwater flow in the Classical Karst area (Slovenia/Italy) by means of tracer tests, *Environmental Earth Sciences*, Vol.75, 1446, 2016.
- Fujinawa, K.: Asymptotic solutions to the convection-dispersion equation and Powell's optimization method for evaluating groundwater velocity and dispersion coefficients from observed data of single dilution tests, *Journal of Hydrology*, Vol.62, pp.333-353, 1983.
- Pitrak, M., Mares, S. and Kobr, M.: A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow, *Groundwater*, Vol.45, No.1, 89-92, 2007.
- Nakagawa, K., Amano, H., Asakura, H. and Berndtsson, R.: Spatial trends of nitrate pollution and groundwater chemistry in Shimabara, Nagasaki, Japan, *Environmental Earth Sciences*, Vol.75, 234, 2016.
- 天野弘基, 中川 啓, 河村 明: 多変量解析による地下水水質の分類特性-島原市における事例-, 土木学会論文集 G (環境), Vol.72, No.5, pp.I_127-I_135, 2016.
- 赤井浩一, 大西有三, 西垣 誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, No.264, pp.87-96, 1977.
- Bear, J.: *Dynamics of Fluid in Porous Media*, Elsevier, New York, 764p, 1972.
- 斎藤雅彦, 川谷 健: 透水係数の空間分布に関する理論的考察, 土木学会論文集, No.645, III-50, pp.103-114, 2000.
- 斎藤雅彦, 川谷 健: 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察, 土木学会論文集, No.694, III-57, pp.245-258, 2001.

(2017.9.29 受付)

MULTI-LEVEL DILUTION TEST AND NUMERICAL EVALUATION OF THE HYDRAULIC PARAMETERS DISTRIBUTION

Kei NAKAGAWA, Hiroki AMANO and Masahiko SAITO

Numerical evaluation is useful for studying pollution transport in groundwater, and hydraulic parameters play an important role in performing numerical simulation. In this study, multi-level dilution tests were performed to evaluate pore velocity, hydraulic conductivity and dispersion coefficient at a nitrate pollution site. Based on the results obtained from the multi-level dilution test, three-dimensional numerical simulations were conducted, and the attenuation curves of tracer concentration at different soil depths were reproduced. In the numerical simulations, three-dimensional artificial heterogeneous hydraulic conductivity fields generated by the stochastic fractal model were used. Results of the simulations suggest that reproduction of the attenuation curves could be possible by considering field heterogeneity.