

均質地盤における有限熱・物質源周辺の拡散に関する実験的研究 Experimental study on dispersion of solute substance accompanied with heat current in groundwater

(熊谷組 (埼玉大学 研究生) 正員 ○伊藤 洋
 埼玉大学 工学部 正員 佐藤 邦明
 (熊谷組 正員 清水 昭男

はじめに

地下の物質分散・拡散現象は、地下水の汚染の問題や放射性廃棄物を含めた産業廃棄物処理に係る問題を考える際、その重要性は増しつつある。地下水流がある地盤中に拡散物質が投入された場合、その周辺で拡散物質が熱と流れとを受けた場合の分散、および物質濃度の経時変化がどのようになるかを知ることは、複合密度流現象を理解する上で大切となろう。

本研究は、従来ほとんど実験的研究がなされていない、拡散物質が熱を伴う分散・拡散現象に注目して、大型地盤モデルを室内で再現し、それらの水理学的な基本的性質を実験的に明らかにしようとしたものである。

1. 実験装置と方法

本研究に用いられた実験装置は、図-1に示したように機能別に分けると、①多孔体充てん槽、②拡散物質源(熱源)、③加热水槽・温度調節装置、④塩分濃度測定記録部、⑤温度測定記録部、⑥砂洗浄槽、となっている。

まず、①の多孔体充てん槽は、平面水槽で二つの側壁および底版は断熱材で覆われ、内寸法 $2.1\text{ m} \times 2.2\text{ m}$ 、深さ 0.67 m である。充てん槽中には、あらかじめ温度測定プローブ針、および塩分濃度を測定するための導電率計測プローブがセットされており、各々自動記録装置に結ばれている。また、塩分濃度測定が、最大6点しか測定できないため、それを補足および鉛直方向(z 方向)濃度分布を知る目的で塩分濃度観測孔を4ヶ所に設けた。充てん槽内には、炉過砂(50%粒径 $d_{50} = 0.38\text{ mm}$ 、均等係数 1.12)が充てんされ、流れは一方のオーバーフロー装置の高さを他方のそれより低くすることによりDupuit準一様流が設定される。②は、フィルター付の円筒管であり、塩水で満たし拡散物質源として用いる。円筒管は、地下水位より上側は止水されるが、地下水位より 0.19 m 高い位置にはオーバーフロー装置を取り付けて内外の水頭差を一定に保ち、塩水のフィルタ

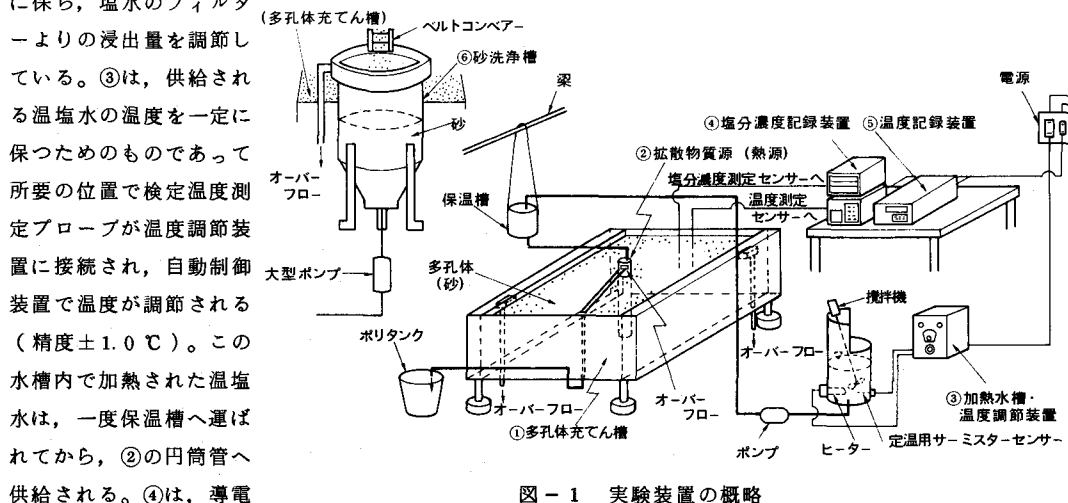


図-1 実験装置の概略

率の記録が行われる。⑤は、温度自動記録装置であり、必要な時間間隔でデジタル温度記録が行われる。⑥は、一度実験に使用した充てん槽内の砂を洗浄するための大型容器であり、下から水を吹き上げ、上部よりオーバーフローさせることにより洗浄を行う。また、拡散物質は取り扱いが便利で、砂に比較的吸着されにくく、無害であることを考え、濃度の小さい1%の塩水を用いた。

実験は、拡散物質（塩水）が熱を伴う場合（加熱）と伴わない場合について行われるが、実験手順は次のようである。

まず、飽和水（水道水）で、地盤表面下0.01mまで飽和させるが、所定の位置に予めサーミスターセンサー（長さ0.30m、直径3mm、先端シャープ）、および導電率センサー（長さ0.56m、直径4mm）が設定されているため、センサープローブの周辺に空隙ができないよう一度水締めを行った。つぎに、充てん槽の一方のオーバーフロー装置を調節することにより、0.06mの水位差をつけ流れを設定する。流れの設定が終わると、まず加熱水槽内に1%濃度塩水を作り70℃に加熱する（熱を伴わない場合は、常温にて行う）。塩水は、上述したように一度断熱材で覆われた保温槽にポンプにより供給され、そこから充てん槽中央に設置された円筒管内へ供給される。実験開始時は、円筒管内の既存水道水と混合して塩分濃度が1%となるような高濃度塩水を供給し、初期条件（ $t=0$, $C=C_0$ ）が設定されるようにした。ただ、熱を伴う塩水を用いる場合、設定した温度（ $T_0=56\pm1^\circ\text{C}$ ）に達するまでやや時間を要した。円筒管内の塩水は、地下水面上0.19mの位置でオーバーフローさせるが、オーバーフローした塩水は、充てん槽外のポリタンクに導びかれ、所定の塩水濃度になっていることを確認した上で再利用した。温度測定は所定の時間間隔で記録される。一方、導電率は連続的に記録され、実験開始後4時間継続された。図-2は、実験帯水層中の計測機器の設置状況を示したものであって、上図は温度センサーと濃度測定プローブの平面分布を示し、下図はそれらの鉛直断面内分布を示すものである。

なお、写真-1は拡散物質源とした円筒管周辺の実験装置の状況を示したものである。

2. 実験結果と検討

(1) 実験結果

実験に先立って、砂層中での導電率計の温度特性を調べるため、ピーカー内に砂を充てんして0.5%~1.0%濃度の塩水で飽和させて、温度を10~60℃と変え、その特性試験を行った。また、多孔媒体（砂層）の透水

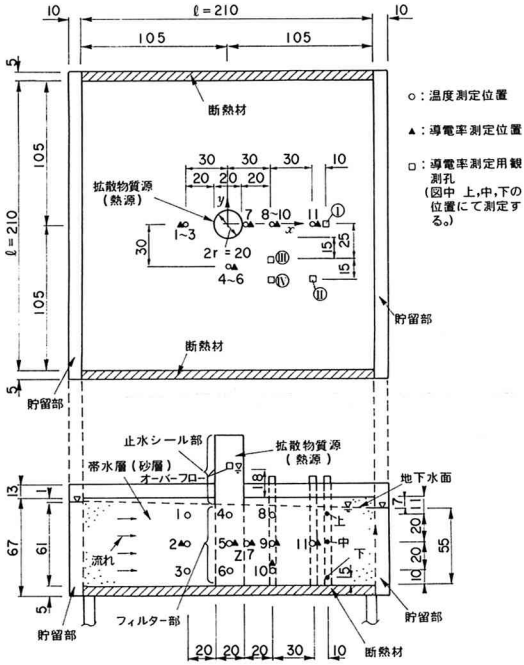


図-2 帯水層中の導電率および温度測定位置と分布
(単位: 10^{-2}m)

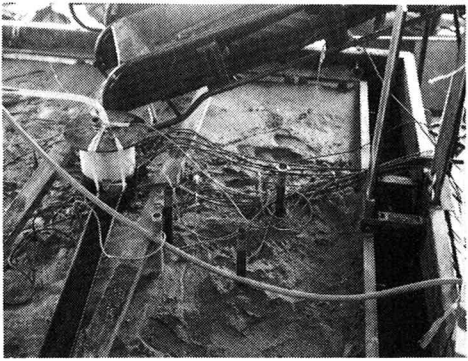


写真-1 円筒管周辺の実験装置状況

係数 k は、定水位透水試験を行った結果、 $k = 8.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (15°C) であり、間隙率は、 $\lambda = 4.3\%$ であった。これより、実験での x 方向の浸透移流速度 (v_x : 見掛け流速を間隙率で割った値) を求めると、 $v_x = 5.32 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ となる。熱を伴わない場合の帯水層温度は、 $15 \pm 2^\circ\text{C}$ 程度であり、熱を伴う場合の円筒管内の温塩水の温度は、 $56 \pm 1^\circ\text{C}$ に設定された。

実験結果を示しつつ、分散・拡散現象の基本的性質を吟味することとする。まず、導電率計によって計られたすべての塩分濃度の経時変化を示したものが図-3である。図中、 C : 拡散物質の濃度、 C_0 : 円筒管表面での拡散物質源の濃度、 t : 時間である。熱を伴う塩水を用いた場合の実験結果は実線で、熱を伴わない場合のそれは点線で同時に示した。これらより、塩分濃度は円筒管の下流側の測定点⑨、⑩、⑪のみで増加しており、上流側および側方側の測定点②、⑤では、それはまったく変化していないことがわかる。これは、

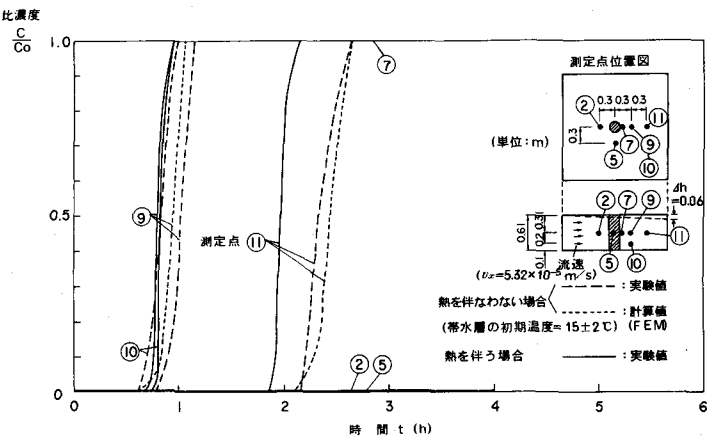


図-3 流れを伴う場合の拡散物質周辺各位置の塩分濃度の経時変化

本実験では分散より移流によって分散・拡散場が支配されていることを示している。そこで、熱を伴う場合と伴わない場合の測定点⑨、⑩、⑪の濃度を比べてみると、熱を伴う場合のそれの方が伴わない場合より分散・拡散速度が明らかに大きくなっていることが判読できる。これは、温度上昇による水の粘性低下や熱による付加拡散効果によるものと考えることができる。つぎに、鉛直方向位置の異なる測定点⑨と⑩の濃度経時変化に注目してみよう。熱を伴う塩水を用いた場合は特に違いは認められないが、熱を伴わない塩水を用いた場合、下側の測定点⑩の方が中段の測定点⑨に比べ塩分到達時間が速くなっていることがわかる。このことは、塩水・淡水とその混合状態で密度が一様ではなく密度流が発生していることを示唆している。

そこで、上述したことをさらに検討するため、観測孔における鉛直方向濃度の経時変化を示した図-4に注目しよう。まず、観測孔①についてみると、全体的に熱を伴う塩水を用いた場合の方が伴わない場合に比べ分散・拡散速度が速いことが確認できる。また、同孔の鉛直方向 (z 方向) 濃度は熱を伴う、伴わない場合共に一様でなく、まず下側より増加し始め、中段、上側の順に増すことが同時に読みとれる。このような傾向は、放射性核種を用いた井上らの実験¹⁾においてもみることができる。つぎに、円筒管斜め流下方向にある観測孔⑩、⑪に着目すると、熱を伴わない塩水を用いた実験では、濃度はほとんど増加していないが、熱を伴う場合のそれは高濃度にはなっていないものの明らかに増加しており、分散・拡散域に入っていることがわかる。これは、熱密度差による自然対流の発生に起因しているものと思われるが、分散係数そのものも熱を伴うことによって変化する可能性もある。⑩の観測孔では、いずれの場合においても塩水は到達していない。

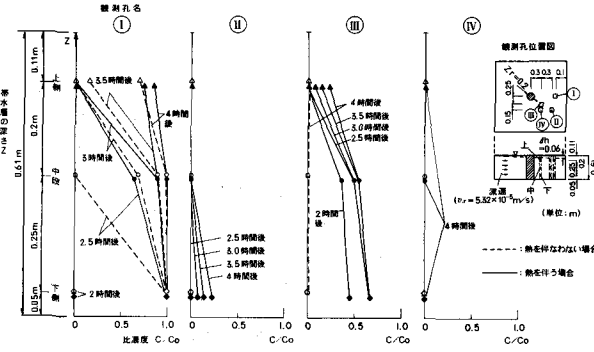


図-4 観測孔における鉛直方向濃度分布とその経時変化

つぎに、熱を伴う塩水を用いた場合の代表的な測定点における帯水層中の温度経時変化を図-5に示す。塩分濃度の場合と同様、流下方向の測定点において温度は上昇している。同図で興味深いのは円筒管より等距離の鉛直断面内の測定点⑧、⑨、⑩において、下側の測定点⑩が最も温度上昇速度が遅い。つまり、上側や中段のそれより常に温度が低くなっていることである。これは、塩分濃度の分布性状とは逆の現象であって、温度差に伴う密度変化による自然対流が発生しているものと考えられる。中段⑨と上側⑩における温度に差がみられないのは、帯水層表面よりの放熱による影響と思われる。また、測定点⑤に注目すると、図-3（上述）の同位置の塩分濃度がほとんど増加していないのに比べ温度上昇が見られる。

図-6は、塩分の分散・拡散状態をわかりやすくするため、実験開始より2時間後の底面より30cmの水平断面内における濃度分布を示したものである。左右対称であるので、左側には熱を伴わない塩水を用いた場合の等濃度コンターを、右側には熱を伴う場合のそれを示した。同図より、等濃度コンターは熱を伴う塩水を用いた場合の方が、伴わない場合のそれに比べ、縦方向（ x 軸方向）にも横方向（ y 軸方向）にも大きく広がっていることがよくわかる。また円筒塩水源より上流側には、いずれの場合もほとんど分散・拡散していないことが確認できる。一方、図-7は熱を伴う塩水を用いた場合の底面より30cmの水平断面内の温度分布を示したものである。図の左側には実験開始より2時間後の温度分布を、右側には3時間後のそれを示した。また、流れのない場合（飽和多孔体中）の実験結果も合わせて示した。これより、伝熱は塩分の分散・拡散と同様に移流によって支配されていることが認められる。また、流れのない場合の等温度コンターに注目すると、同心円でなく y 軸方向にやや突出した楕円形状となっていることがわかる。このことは、地盤が完全均質とはなっていないことを示している。

つぎに、流れのない場合の実験結果を示す。図-8は、拡散物質周辺各位置の塩分濃度の経時変化を示したものであり、図-9は、熱を伴う場合の帯水層中の温度経時変化を示したものである。流れがある場合の流下側の測定点⑨、⑩、⑪の塩分濃度、温度と流れのない場合のそれを比べると、流れのある場合の方が分散・拡散、および伝熱速度が大きくなっていることが確認できる。また、円筒塩水源より等距離にあるが、鉛直方向位置の異なる測定点⑨、⑩の熱を伴う場合の塩分濃度経時変化（図-8）に注目すると、流れのある場合とは異なり、下側の測定点⑩の方が中段の測定点⑨に比べ塩分到達時間が遅くなっていることがわか

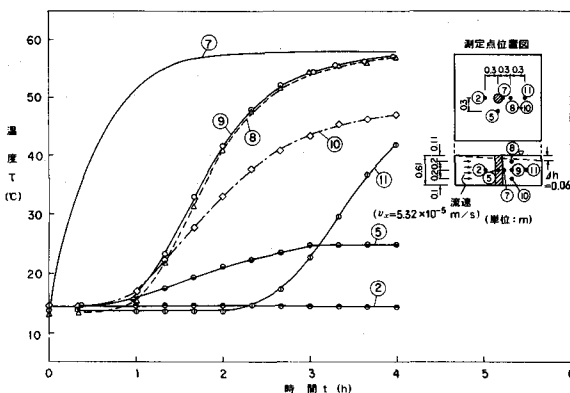


図-5 拡散物質が熱を伴う場合の帯水層中の温度経時変化

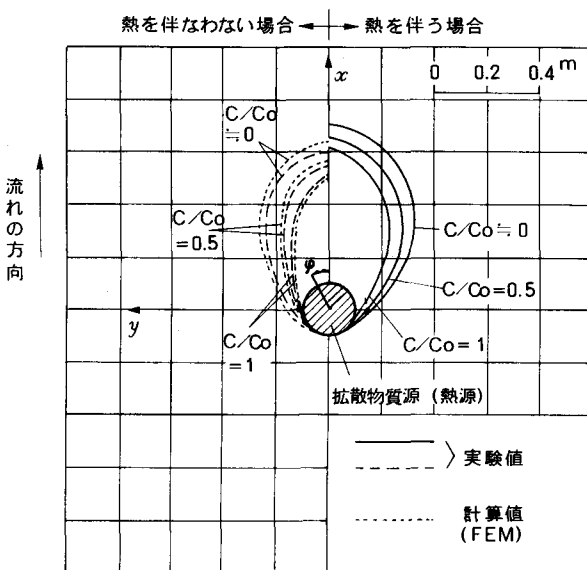


図-6 底面から30cmの水平断面内の濃度分布
($t = 2$ 時間後)

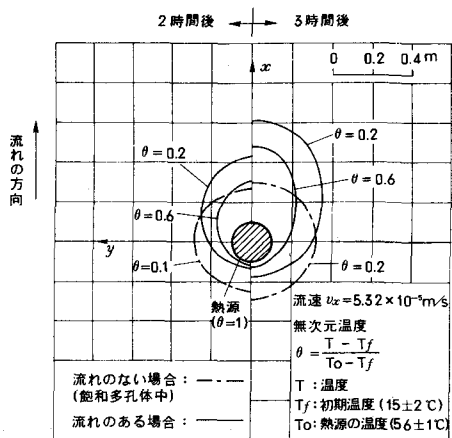


図-7 底面から30 cmの水平断面内の温度分布

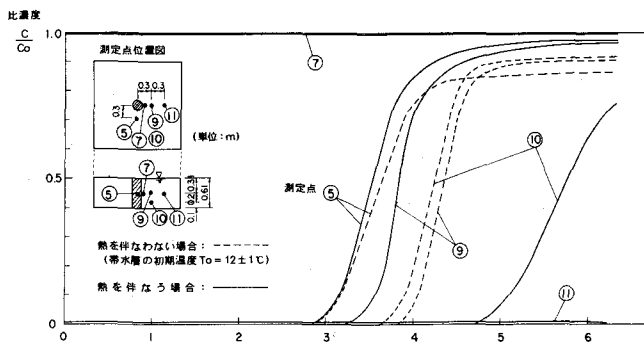


図-8 流れのない場合の拡散物質周辺各位置の塩分濃度の経時変化

る。一方、温度経時変化における測定点⑧、⑨、⑩についてみると、帯水層底面より高い位置にあるほど温度が高くなっており、熱対流が発生していることが認められる。これらより、流れのない場合の本実験では淡・塩水の密度差による影響より、温度差に伴う密度差による熱対流が卓越しているものと考えることができよう。ただ、本実験では円筒管より等距離にあり、地盤が均質ならば同様の結果となるはずの測定点②、⑤、⑨において無視できない差が生じており、均質多孔媒体を設定するような実験は難しいことを示唆している。

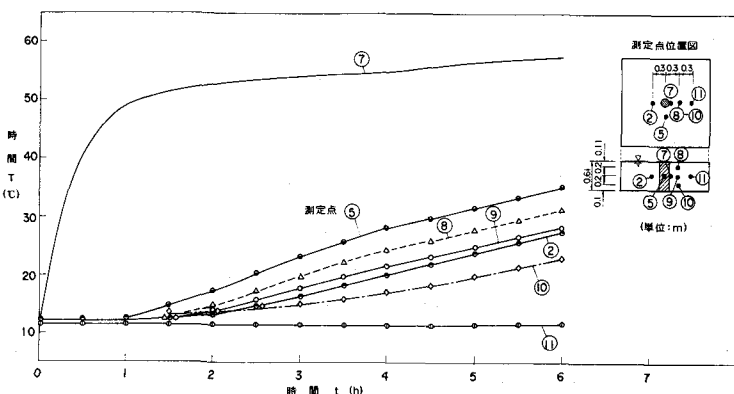


図-9 流れのない場合で拡散物質が熱を伴う場合の帯水層中の温度経時変化

(2)理論的検討

移流がある場合の物質分散・拡散現象が次の移流分散方程式によりどの程度説明できるか、また、分散係数Dが本実験の場合どの程度になるのか、について検討してみることとする。

いま、帯水層の非圧縮性を仮定すると、質量保存則より基礎式は、

$$\text{div}(D \cdot \text{grad} C) - \text{div}(V \cdot C) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

となる。ここで、D：分散係数、C：拡散物質の濃度、V：浸透移流速度、t：時間である。

濃度の平面分布に注目して、数値解析(有限要素法)によって解析すると、熱を伴わない場合について条件は、

$$\begin{aligned} C(x, y, t) &= C_o & |x| \leq r |\cos \varphi| \text{ and } |y| \leq r |\sin \varphi| \\ C(x, y, 0) &= 0 & |x| > r |\cos \varphi| \text{ or } |y| > r |\sin \varphi| \end{aligned}$$

$$\lim_{|x|, |y| \rightarrow \infty} C(x, y, t) = 0$$

である。ここで、 r : 円筒管の半径 である。

しかし、この条件では解くことができないので、さらに式(1)を $X = x - vx \cdot t$, $Y = y$ を用いて変換すると、

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(D \frac{\partial C}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(D \frac{\partial C}{\partial Y} \right) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

と書ける。²⁾ここで、分散係数 D は、包括的な係数を考え $D_x = D_r = D$ と仮定する。

式(2)は、周辺境界 ($|x| = \ell/2$, $|y| = \ell/2$) に影響されるより前の時間スラップでは、上述した条件を満たすことができる。

いま、浸透移流速度 $v_x (= 5.32 \times 10^{-5} \text{ m/s})$ はわかっているので、式(2)の解を得て座標変換することにより、濃度分布を求めることができる。分散係数は、Harleman-Rumer の実験式³⁾ $D/\nu = 0.66 \text{ Re}^{1/2}$ (ν : 水の動粘性係数 $= 1.15 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, 15°C) により求めると $D = 5.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ となる。また、種々な岩石について佐藤らが行った実験⁴⁾ では、 $D = 4.88 \times 10^{-9} \sim 1.33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ となっている。これらの値を参考にして、実験結果とシミュレーションした結果を図-3、図-6の実験結果に合わせ示した。分散係数は、 $D = 6.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いたが、計算値は実験値と比較的よく一致していることがわかる。ただし、ここでは分散・拡散場の代表値として底面より30cmの中段水平断面における濃度を用いたが、実際には密度流が発生しているため、鉛直濃度分布は一様ではない。

むすび

本研究では、地下水流中に熱を伴う、あるいはそれを伴わない物質(塩水)が投入された場合の分散・拡散現象の基本的性質を明らかにしようとしたわけである。その結果、拡散物質が熱を伴う場合、伴わないそれに比べ移流方向、横方向(移流方向と直角方向)共に大きく広がることが判明した。また、本実験の場合、淡・塩水とその混合状態で密度が一様でなく密度流が発生していることが確認され、熱を伴う場合はそれに加えて温度差に伴う密度変化による自然対流が同時に発生していることもわかった。実用上、このような複合密度流現象を理解することは大切となるので、今後は、これらの密度流を考慮した分散・拡散現象のシミュレーション手法の確立をめざしていきたいと考えている。最後に、本実験を進めるに際し協力していただいた埼玉大学工学部学生 高橋誠氏、および懶熊谷組 坂口雄彦氏にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 井上・森澤：帯水層における放射性核種の移動、(II)，日本原子力学会誌，Vol.18，No.1，1976
- 2) K. FUJINAWA：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*，62(1983)
- 3) Harleman, D.R.F. and Rumer, R.R.：Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium，*J. Fluid Mech.*，Vol.16，1963
- 4) 佐藤・佐々木：岩の溶質分散・拡散係数の実験的研究，第27回水講論文集，1982.2