Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-05

画像処理による油輸送の定量化手法の開発とホットウォーターフラッシング実験への適用

井上，一哉
竹之内，亮
光田，和希
田中，勉

(Citation)
土木学会論文集B1（水工学）,68(4):I_565-I_570

(Issue Date)
2012

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003324

土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I_565-I_570, 2012.

画像処理による油輸送の定量化手法の開発とホットウォーターフラッシング実験への適用

QUANTIFYING OIL TRANSFER USING IMAGE PROCESSING AND ITS APPLICATION TO HOT WATER FLUSHING EXPERIMENTS

井上一哉[1]・竹之内亮[2]・光田和希[3]・田中勉[4]
Kazuya INOUE, Ryo TAKENOUTI, Kazuki MITSUTA and Tsutomu TANAKA

[1] 正会員　博士(農学)　神戸大学助教 大学院農学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
[2] 正会員　修士(農学)　(株)池田泉州銀行（〒530-0013 大阪市北区茶屋町18番14号）
[3] 学生会員　神戸大学大学院生 大学院農学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
[4] 正会員　農博　神戸大学教授 大学院農学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

Hot water flushing experiments in a two-dimensional sandbox (35 cm × 20 cm × 1 cm) were conducted using dyed salad oil in single and two-layered porous formations under saturated conditions. Based on a calibration relation between the dye concentration and the corresponding pixel brightness an image processing technique in conjunction with spatial moments was developed to quantify not only the spatial distribution of oil but the apparent retardation and dispersion coefficients both in longitudinal and lateral directions. The increase of flooding water temperature resulted in accelerated downward movement of oil because of the reduced viscosity at elevated temperatures. The results also revealed that the variation of the apparent lateral dispersion coefficient depended on the oil saturation within a pore space and exhibited an increasing tendency in a smaller size porous material due to the difference of intrinsic permeability.

Key Words: *image processing, hot water flushing, oil transfer, spatial moment, thermal technology*

1. 緒論

難水溶性物質（NonAqueous Phase Liquids: NAPL）による地下水汚染は健康面に及ぼす影響への懸念から社会的に関心の高い問題である．帯水層中に浸入したNAPLは移動性や溶解性に乏しいため，原液のまま長期間に渡って地盤内に残存し，地下水汚染の長期化を招く危険性を有する．地下水揚水処理は汚染浄化において簡易で実行性の高い方策である[1)]ものの，NAPL原液の粘性係数は高いため，地下水揚水により浄化できる相は主に地下水中へ溶解した相であり，NAPL原液の相を揚水処理の対象とすることは物理的に困難である．そのため，NAPL原液の粘性度やNAPL-土粒子間の相互作用を減弱させ，NAPL原液の移動性を高めることを目的として，界面活性剤を活用する研究が進められている[2)]．

界面活性剤の利用により浄化効率の向上が期待されるものの，地盤内に残存する界面活性剤の地盤環境への負荷が懸念される[2)]．また，大量の界面活性剤に要するコストも懸案事項となることから，NAPL原液の界面張力の低下を図りつつ，地盤環境への負荷とコストを低減する熱利用の研究がなされている[3, 4)]．ホットウォーターフラッシングは熱利用による浄化技術の1つであり，地下水温より高い温水を地盤内へ注入することで，NAPLの粘性の低下，および，移動性の向上を図る技術である[4)]．地盤環境への温水や蒸気の適用は，元々，地中の石油回収量を促進するために開発された技術であり，その後，NAPL汚染サイトの浄化手法として応用研究が続けられている[5, 6)]．ホットウォーターフラッシングによりNAPL回収の効率化が期待されている一方で，その有効性のみならず，NAPL原液の輸送現象については未だ不明な点が多い．また，数値解析手法[7, 8)]を除いて，疎水性流体の空間的・時間的変化を定量化する研究実績は限られているのが現状である[9)]．

そこで本研究では，地盤内における油分の輸送挙動の定量化に向けて，画像処理技術と空間モーメント法を連携した手法の開発を試みる．また，熱利用浄化技術に関する知見を得るため，カラムレベルにてホットウォーターフラッシング実験を実施し，油分布の時間的・空間的変化に及ぼす浸透水温や土質特性の影響について考察する．本研究は多相流挙動に関する基礎研究であり，疎水領域の定量化，ならびに，浄化技術の発展に貢献する1つのステップを築くことを主たる目的とする．

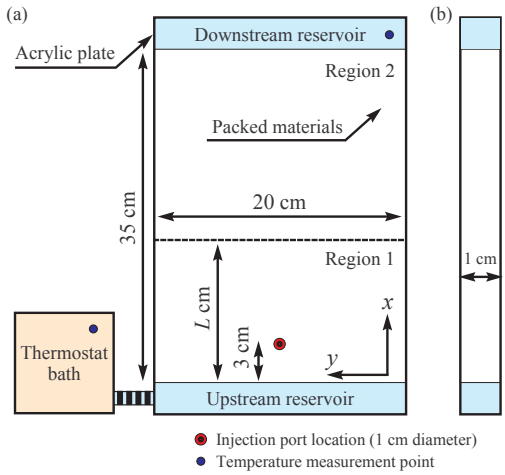

図-1 実験装置概略図：(a) 断面図，(b) 側面図

2. ホットウォーターフラッシング実験

(1) 実験装置

本実験では多孔質体内の油輸送に与える浸透水温の影響を評価するため，浸透水の温度を変えたホットウォーターフラッシング実験を実施した．油輸送の状態を可視化するため，**図-1**に示すように，高さ35 cm，幅20 cm，厚さ1 cmのアクリル製装置を作成した．また，実験装置の上流側と下流側に貯水槽を連結し，供試体への導水部ならびに供試体からの排水部をそれぞれ構成するとともに，排水される浸透水を基に定常流量を計測した．油輸送に与える浮力の影響は小さく，実験方法を勘案して，鉛直上昇の流れ状態を形成した．浸透場内に油分が存在しない場合は一様流状態となり，便宜上，上流から下流方向にx軸，x軸に垂直方向へy軸を設定した．

ホットウォーターフラッシング実験にて浸透水の水温を制御するため，上流側貯水槽に接続したサーモスタット槽にて所定の温水を生成し，上流側貯水槽へ温水を連続的に供給した．浸透場の動水勾配は上流側と下流側の貯水槽の水頭差にて制御し，実験中は一定の動水勾配を保った．また，サーモスタット槽と下流側貯水槽には温度計を設置し，定期的に水温を計測した．さらに，所定量の油，ならびに，水溶液を注入できるように上流部に直径1 cmの孔を設け，シリコン栓とシリンジポンプ，皮下注射針を組み合わせた注入システムを作成した．

(2) 実験試料

本実験では砂質系地盤などの比較的透水性の高い浸透場を対象とするため，浸透場を作成する試料には平均粒径の異なる2種類のケイ砂を採用した．平均粒径の大きい順に，S4，S6と記し，各試料の物性値を**表-1**に示す．各試料の間隙率は実験装置の体積と土粒子密度から間接的に求め，土質試料の充填を完了した時の値を用いた．また，間隙率と有効間隙率は等しいと仮定して，浸透場の動水勾配と流出流量，間隙率を基に，15 ℃補正することで固有透過度と実流速を導出した．

表-1 試料の物性値

試料	平均粒径 (cm)	均等係数 (-)	固有透過度 (cm^2 15 ℃)	間隙率 (-)
S4	0.085	1.80	3.43×10^{-6}	0.389
S6	0.030	1.31	8.77×10^{-7}	0.402

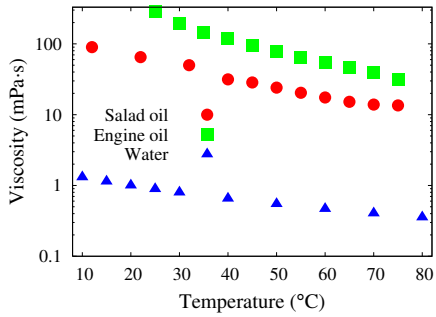

図-2 温度と粘性係数の関係

本研究ではベンゼンなどの水より比重の小さい油系化合物の輸送を想定するものの，油分布の定量化に重きを置くことから，対象とする油には市販のサラダ油を代替使用した．また，油の間隙内挙動を鮮明に可視化するため，赤系油溶性色素であるSudan IVを2.3×10^{-3}g/cm^3の濃度に調整し，サラダ油に混合して使用した．粘度計により計測したサラダ油の粘度と温度の関係を**図-2**に示す．また図中には比較として，水とエンジンオイルの温度と粘度の関係を併記する．

図-2に示すように，温度上昇に伴う粘度の変化はサラダ油とエンジンオイルでは異なるものの，どちらも温度上昇とともに粘度は低下し，両者の差異は小さくなる傾向にあることに加え，安全面と使用の簡便さから本研究ではサラダ油を代用した．また，エンジンオイルよりも全体的に粘度の小さいサラダ油の方がホットウォータフラッシングによる可動性は高くなり，間隙内の油輸送を捉えやすいと期待される点もサラダ油を採用した理由である．サラダ油のような難水溶性流体とは異なり，水溶性物質の間隙内挙動を比較対象とするため，水溶性物質として青系水溶性色素であるBrilliant Blue FCFを4.0×10^{-4}g/cm^3の濃度に調整した水溶液も実験に供した．

(3) 実験方法

均質地盤の条件下にて本実験を実施するため，予め飽和させた試料を3.5 cmずつ水中落下法により均質に充填し，突き固め棒を用いて突き固めることで浸透場を作成した．また，比較的粒度の整った試料による透水場であることから，自然地盤の間隙構成と乖離するものの，油原液の間隙内輸送の定量化を目的の1つとしているため，透水性の高い浸透場を形成した．試料の充填後，上下流部の貯水槽の水位差，ならびに，サーモスタット槽の水温を調整することで浸透場の流速と水温状態を制御した．サーモスタット槽と下流側貯水槽に設置した温度計

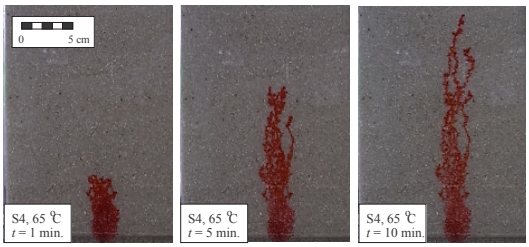

図-3 色素油の空間分布の時系列変動の例（試料S4，水温65 ℃）

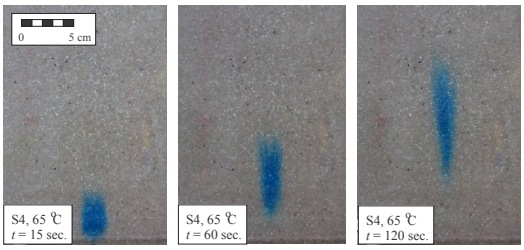

図-4 色素水の空間分布の時系列変動の例（試料S4，水温65 ℃）

にて透水場の水温が定常状態にあることを確認した後，上流部に設けた孔からシリンジポンプを使って色素混合油（以下，色素油と記す），あるいは色素水溶液（以下，色素水と記す）を注入した．色素油と色素水の注入量はともに2 cm^3，注入時間は5秒に統一することで色素油，ならびに色素水の初期分布の相違を無くした．

浸透水の通水過程では最大で約3 ℃の水温低下が計測されたことから，サーモスタット槽と下流側貯水槽の平均値を浸透水の温度と見なした．また，浸透水の温度に応じて厳密には実流速は変化するものの，油輸送への影響は小さいと考えられるため，同一の動水勾配条件にて実験を実施した．さらに，画像の明度の相違を抑えるため，実験室内は所定のライトのみを点灯することで光量を一定にした状態に保ち，実験装置から約30 cm離れた位置に設置したデジタルカメラを用いて色素油，あるいは色素水の輸送挙動を撮影した．実験装置の規模，ならびに実験装置とデジタルカメラの距離は油分の間隙内移動を確実に捉えることができ，油の空間分布の定量化に向けて単位ピクセルあたりの実面積を可能な限り大きくする点を考慮して決定した．浸透場に注入した色素油は部分的に領域内に残存するため，1つの実験を終えるごとに土質試料をすべて取り除き，新しい土質試料を再度充填することで同一の試料で構成される浸透場に対して，浸透水の温度を種々に変化させて実験を実施した．

3. 画像処理による油分布の評価

(1) 油分の見かけの飽和度分布推定

ホットウォータフラッシング実験により得られた時系列画像の一例として，試料S4を対象に，65 ℃の水温条件下にて間隙中を移行する色素油の空間分布変動のRGB画像を**図-3**に示す．また比較として，同一の実験条件下における色素水の輸送状態を**図-4**に示す．色素油は選択流のように土粒子の間隙を縫って移動しており，色素水の挙動と比べると空間的な拡がり度合いのみならず，移動速度に大きい差異が生じていることがわかる．一方で，**図-4**に示す色素水の分布では中心部ほど青の明度が高く，外側ほど明度が低くなるのに対して，**図-3**に示す色素油の空間分布は赤の濃淡部分が不規則に分布している様子が見て取れる．井上ら[10, 11]は色素水を対象として，明度の変化を色素濃度の変化に対応づけることにより，

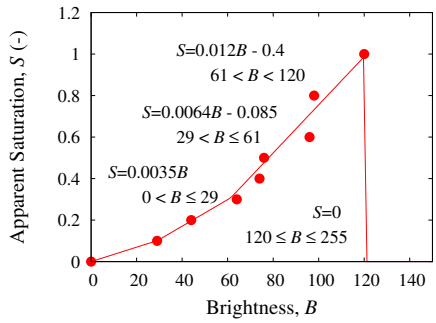

図-5 ピクセル明度Bと見かけの飽和度Sの関係

画像処理を用いた色素水の空間分布を捉えた．そこで同様の手法を色素油の空間分布評価に応用することで，色素油の空間分布の経時変化を定量化することを試みた．

井上ら[10, 11]と同様に，ピクセルの明度を利用して油分布を抽出するものの，色素油は浸透水の相とは異なる液相として存在するため，間隙内には水分と油分が混在している．そこで，間隙を占める水分と油分の飽和度が異なると考えて，ピクセルの明度の濃淡はピクセルに占める油の飽和度に対応すると仮定した．すなわち，油に溶け込んでいる色素の濃度変化はピクセルの明度，ならびに，対象ピクセル内の油の飽和度として反映されると仮定した．この仮定は飽和度としての厳密さに欠けるため，また面積の小さい単位ピクセルレベルでの飽和度計測は困難であるため，本研究では，見かけの飽和度と記す．

上記の仮定に基づき，ピクセルの明度と色素油の見かけの飽和度の関係を表す校正曲線を作成し，色素油の空間分布抽出に用いた．校正曲線の作成過程では，油に混合する色素の濃度を種々に変え，流れの無い浸透場に注入した直後の油分布を画像に収めてピクセル明度を抽出した．油の分布領域の明度に及ぼす実験試料の色相や水温の影響は小さく，また，井上ら[11]が指摘するように，明度の差異は照明やカメラの位置に強く影響を受けることから，実験ごとに前述の手続きにより校正曲線を求めた．一例として，**図-5**にピクセルの明度Bと見かけの飽和度Sの関係を対応する校正式とともに示す．

以上より，解析対象とする画像を構成するすべてのピクセルから明度データを抽出し，校正式を用いて色素油の空間分布を推定した．**図-3**に見られるように，油分布は不規則に拡がることから明度分布を導出する際にはノイズ除去[12]を組み込んだ．

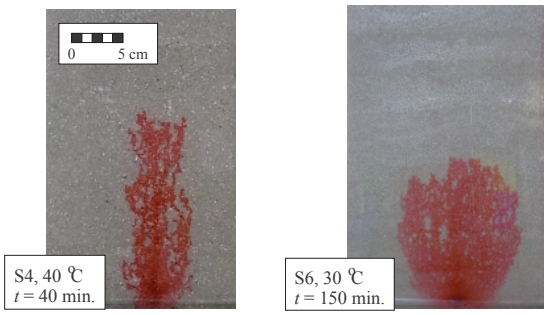

図-6 試料S4とS6の油分布の画像例

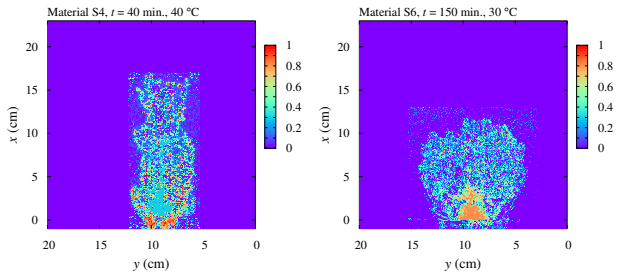

図-7 画像処理による試料S4とS6の見かけの飽和度分布

(2) 空間モーメント法

前述のように，画像データのすべてのピクセルに対して明度を判定すると同時に，色素油の分布を明度分布に関連づけて空間モーメント法と連携することで，色素油の拡がりを次式により定量化した[11]．

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} A(x,y)B(x,y,t)x^i y^j dxdy \qquad (1)$$

ここに，$M_{ij}(t)$は空間モーメントテンソル，xとyは座標，tは時間，$B(x,y,t)$はピクセル明度，$A(x,y)$は単位ピクセル面積であり，約2.1×10^{-3} cm^{2}である．また，油分布の重心位置は空間1次モーメントから求めた．

$$X_G = M_{10}/M_{00}, \qquad Y_G = M_{01}/M_{00} \qquad (2)$$

ここに，X_GとY_Gは油分布の重心のx座標とy座標をそれぞれ表す．また，油分布の重心まわりの空間2次モーメントσ_{ij}は次式で求めた[11]．

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{M_{20}}{M_{00}} - X_G^2 & \dfrac{M_{11}}{M_{00}} - X_G Y_G \\ \dfrac{M_{11}}{M_{00}} - X_G Y_G & \dfrac{M_{02}}{M_{00}} - Y_G^2 \end{pmatrix} \qquad (3)$$

本研究では色素油の挙動評価に空間モーメント法を採用するものの，色素油の挙動は水溶性物質の分散現象とは大きく異なるため，単位時間当たりの色素油の分布変動を見かけの分散係数と定義し，次式にて算出した．

$$\eta_x = \sigma_{11}\gamma_V/2\xi_c, \qquad \eta_y = \sigma_{22}\gamma_V/2\xi_c \qquad (4)$$

ここに，η_xとη_yは見かけの縦・横分散係数，ξ_cは色素油の初期位置と重心間の距離，γ_Vは色素油の移動速度である．本実験では，注入した色素油を地盤内に残存するNAPLと見なし，また，温水による油分布の形状変化をシンプルに評価する手段として，移流分散過程の評価と類似した油輸送過程の定量化を図った．

4. 結果と考察

(1) 色素油の見かけの飽和度分布

異なる土質試料にて取得された油分布のRGB画像と各画像に対して前述の方法により抽出された見かけの飽和度分布の結果をそれぞれ図-6と図-7に示す．図-7に見られるように，図-6のような空間分布を形成する色素油の見かけの飽和度をうまく抽出できていることがわかる．また，試料ごとに色素油の分布形状のみならず，見かけの飽和度の高い領域についても異なることがわかる．取得画像を基にマスバランスを求めると，ノイズや校正曲線の影響によりばらつきを有するものの，油分布画像に関わらず，約0.7から1.1の範囲に収まっており，本手法による見かけの飽和度分布は妥当であると判断される．

(2) 色素油の輸送挙動の定量化

所定の水温状態にある浸透場内に注入した色素油の移動性に及ぼす浸透水温の影響を検討するため，各温度条件にて時系列で得られた見かけの縦分散係数，および横分散係数を図-8に示す．色素油の移動とともに見かけの分散係数は上昇し，全体的に1から2オーダー程度の変化を示すものの，対象領域内における平均的な見かけの分散量として考察を進めるため，図中のプロットは各温度条件下にて得られた見かけの分散係数の平均値を採用している．図-8より，土質試料に関わらず，浸透水温の上昇とともに見かけの縦・横分散係数は増加する傾向にあり，50度程度の水温上昇により，見かけの縦・横分散係数は約1オーダー大きくなることが見て取れる．これは水温の高い浸透場ほど油の粘性の低下に伴い，透油係数の上昇につながることに起因すると考えられる．

前述のように，同一の動水勾配条件にて実験を実施しており，水温の変化により浸透水の粘性も変動することから，見かけの縦・横分散係数を浸透場のレイノルズ数の関数として図-9にプロットする．図-3にて観察されるように，色素油は主に浸透水の流下方向へ移動するため，横方向よりも縦方向の見かけの分散係数が大きくなる結果は極めて自然であり，本手法の妥当性を示していると考えられる．また，レイノルズ数の変化と見かけの分散係数の変化は呼応していることから，浸透水温の高い場ほど色素油の移動性が向上することを示唆している．

色素油の移動性について異なる視点から評価するため，次式により見かけの遅延R_{app}を定義し，浸透水温と見かけの遅延の関係を図-10に示す．

$$R_{app} = v_p/\gamma_V \qquad (5)$$

ここに，v_pは排水流量から間接計測した実流速，γ_Vは空

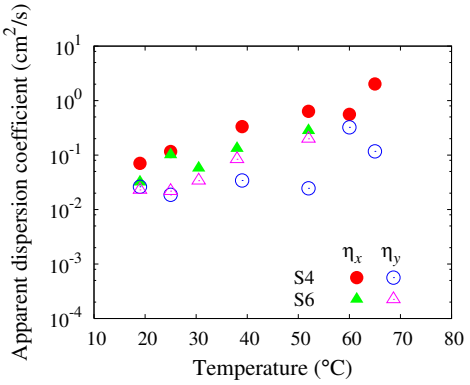

図-8 浸透水温と見かけの分散係数の関係

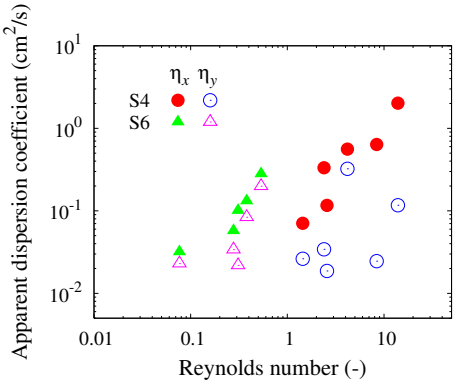

図-9 レイノルズ数と見かけの分散係数の関係

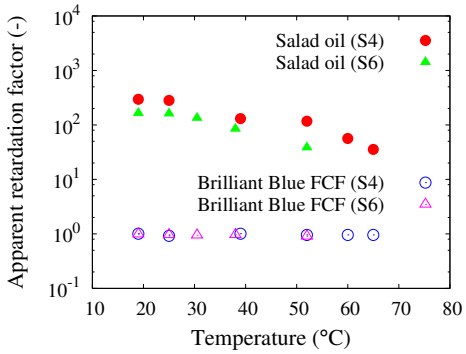

図-10 浸透水温と見かけの遅延の関係

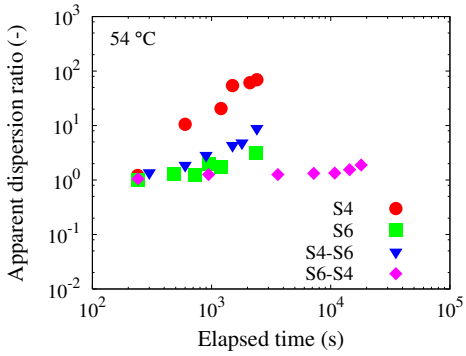

図-11 見かけの分散比の時間変化

間モーメント法から得られる色素油の重心移動速度である．比較として，色素水であるBrilliant Blue FCF水溶液の実験結果についても同様の手法により見かけの遅延量を導出し，得られた値を図中に併記する．色素油と色素水ともに，輸送過程における見かけの遅延はほとんど変化しないため，図には平均値を記す．

色素油の見かけの遅延量は色素水に比べて約40倍から250倍の値になっており，水温の上昇とともに，見かけの遅延量は減少傾向にあることが伺える．これは見かけの分散係数の結果と同じく，水温の上昇により色素油の粘性度や表面張力が変化するため，油分の可動性が高まり，結果として，見かけの遅延量の低下につながると考えられる．また**図-2**より，水とサラダ油の粘性は約2オーダーの差異があり，見かけの遅延の差異と類似していることから，本手法により妥当な結果を推定できると考えられる．したがって，カラムレベルの実験ではあるものの，ホットウォーターフラッシングは地盤内にトラップされた油原液の移動性向上に寄与できる可能性を有していると言える．

(3) 二層地盤における色素油の輸送挙動

これまでの議論より，色素油の間隙内輸送は土粒子粒径に応じて少し異なる挙動を示していることから，試料S4とS6を二層に形成することで色素油分布の変化へ及ぼす地盤構成の影響を評価する．単層地盤と同様に浸透場を形成し，**図-1**に示すRegion 1に層厚$L = 16$ cmで試料S4，またはS6を充填し，下流側のRegion 2を異なる試料にて形成する．浸透水温54 ℃の下で二層地盤内を移動する色素油に対する見かけの分散係数の時間変化を**図-11**に示す．軸方向への拡がりを観察するため，図の縦軸は見かけの縦分散係数と横分散係数の比に設定しており，S4-S6の表記はRegion 1に試料S4，Region 2に試料S6を充填した二層地盤を表し，単層地盤の結果も併記している．

粒径の大きいS4層が上流側にある場では，S6層を上流側に配置した場に比べて，時間経過とともに縦方向への色素油の移動は大きくなる傾向が見られる．**図-10**にて観察されたように，見かけの遅延は試料S4よりもS6の方が少し小さいことを考慮すると，S6層内での色素油の拡がり方はS4層よりも横方向に大きく拡がりながら，浸透水の流れ方向に移動していると推察される．すなわち，S4-S6地盤の空間2次モーメント成分σ_{22}はS6-S4地盤よりも小さく定量化されていると考えられる．

この点を確認するため，色素油分布の重心座標X_Gの変化に伴う空間2次モーメントσ_{11}とσ_{22}の変化を**図-12**に示す．また，15 ℃の水温条件にて得られた結果も合わせてプロットする．図より，x方向への見かけの飽和度分布のばらつきを示すσ_{11}はいずれの地盤においても同様の増加傾向となり，地盤構成による差異は小さいことがわかる．対照的に，y方向への空間2次モーメントσ_{22}には差異が生じており，S4-S6地盤はS6-S4地盤よりも小さい空間2次モーメント量になっている．特に，浸透水温の高いケースでは顕著であり，平均粒径の差は3倍程度

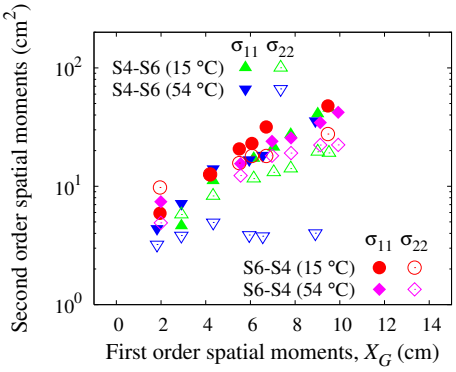

図-12 二層地盤に対する空間2次モーメントの変化

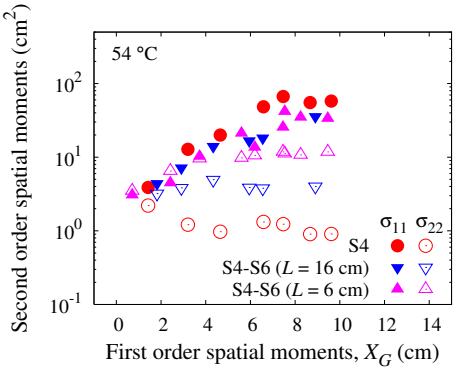

図-13 単層および二層地盤に対する空間2次モーメントの変化

であっても油輸送には影響を与えることを示唆している．平均粒径の小さいS6層はS4層よりも間隙は小さく，比表面積は大きいため，また固有透過度は小さいため，土粒子間隙は油で満たされやすく，x軸方向への輸送量が制限され，y軸方向へ移動量が増加すると推測される．

見かけの横分散量が増える傾向は，S4層を経て，S6層に色素油が流入することでより顕著になると考えられることから，試料S4層の厚さLを6 cmに薄くした場を対象に追加実験を実施し，空間2次モーメントの変化を単層地盤の結果とともに**図-13**に示す．上流側のS4層の厚みLが小さいほど，色素油の見かけの飽和度が高い状態で色素油はS4層から間隙の小さいS6層へ流入することになる．その場合，固有透過度の小さいS6層では油の飽和度が上昇することにより，間隙スペースがさらに縮小するため，y方向への油移動量の増加につながる．したがって，$L = 6$ cmの二層地盤に対するσ_{22}は$L = 16$ cmの場よりも大きくなると結論付けられる．加えて，空間2次モーメントσ_{11}とσ_{22}は一定値に漸近する傾向にある点を考慮すると，油分布の拡大度合いが平衡状態に至る過程は軸方向により異なると考えられる．すなわち，色素油の輸送に伴う全体的な見かけの飽和度の低下により，浸透流による掃流力と土粒子と油に作用する抵抗力がつり合うことで，油分布は平衡状態に達すると推測される．低飽和度の油分に対する輸送挙動の詳細な評価，特に間隙レベルでの土粒子と油の相互作用に関する評価は今後の課題とする．

5. 結論

本研究では多孔質体内を移動する油原液の空間分布を定量化するため，画像処理と空間モーメント法を融合した手法を考案した．また，浸透水温と油原液の移動性の関係について検討するため，ホットウォーターフラッシング実験を実施し，移流分散過程と対比する指標として見かけの分散係数や見かけの遅延を定義し，本手法により導出した．その結果，水温上昇に伴う見かけの分散係数の増加，ならびに見かけの遅延係数の低下を定量化できた．また，色素油の見かけの飽和度が高い段階では，固有透過度の大きさと関連して間隙径が小さくなると推察され，その結果，色素油は横方向へ移動する傾向にあることがわかった．さらに，油の通過する層を構成する土粒子粒径に依存して空間2次モーメント，すなわち見かけの飽和度分布は変化することが確認できた．

参考文献

1) Mackay, D.M. and Cherry, J.A.: Groundwater contamination: pump-and-treat remediation, *Environ. Sci. Technol.*, 23(6), pp.630–636, 1989.
2) Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, B.F.: Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review, *Eng. Geol.*, 60, pp.371–380, 2001.
3) She, H.Y. and Sleep, B.E.: Removal of perchloroethylene from a layered soil system by steam flushing, *Ground Water Monit. Remedi.*, 19(2), pp.70–77, 1999.
4) Alajmi, A.F., Gharbi, R. and Algharaib, M.: Investigating the performance of hot water injection in geostatistically generated permeable media, *J. Pet. Sci. Eng.*, 66, pp.143–155, 2009.
5) Soga, K., Page, J.W.E. and Illangasekare, T.H.: A review of NAPL source zone remediation efficiency and the mass flux approach, *J. Hazard. Mater.*, 110, pp.13–27, 2004.
6) O'Carroll D.M. and Sleep, B.E.: Hot water flushing for immiscible displacement of a viscous NAPL, *J. Contam. Hydrol.*, 91, pp.247–266, 2007.
7) 江種伸之，神野健二，鷲見栄一：ガス拡散を考慮した有機塩素化合物の不飽和-飽和領域における輸送特性解析，土木学会論文集, II-29, pp.167–176, 1994.
8) 平田健正，樫山和男監訳，小林健一郎訳：地下環境での多相流と輸送現象 現象理解の基礎から数値解析まで, シュプリンガー・フェアラーク東京, 270p., 2004.
9) Kechavarzi, C., Soga, K. and Illangasekare, T.H.: Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone, *J. Contam. Hydrol.*, 76, pp.211–233, 2005.
10) 井上一哉，正木一平，小林晃，田中勉：空間濃度分布と空間モーメント解析による分散長推定，水工学論文集, 51, pp.487-492，2007.
11) 井上一哉，小林晃，鈴木克季，竹之内亮，田中勉：色素トレーサと空間モーメント解析を用いたマクロ分散推定法，水工学論文集，55，pp.613–618，2011.
12) 岡崎彰夫：はじめての画像処理技術，工業調査会, 218p., 2001.

（2011.9.30受付）