温度が土壌中の VOCs の溶出及び拡散特性に与える影響に関する研究

大成建設（株）正会員　○大久保英也　　須網　功二
大成建設（株）正会員　　高畑　陽　　樋口　雄一

１．目的

揮発性有機塩素化合物（以下 VOCs）は，地盤に漏洩すると地下深部まで浸透し，低透水層（シルト層や粘土層）に蓄積される場合がある．帯水層を対象とした従来の原位置浄化技術を適用しても，低透水層に VOCs が残存するため，低透水層からの長期的な VOCs の溶出によって帯水層が再汚染され，浄化期間が長期化するという課題があった．その解決策として，筆者らは，土壌を発熱させて低透水層からの VOCs の溶出を促進させることにより，帯水層の再汚染を抑制し，短期間で浄化を完了させる方法（加熱脱着法）[1]について検討している．図-1 は以上に述べた透水層における VOCs 汚染の課題と解決策を整理したものである．

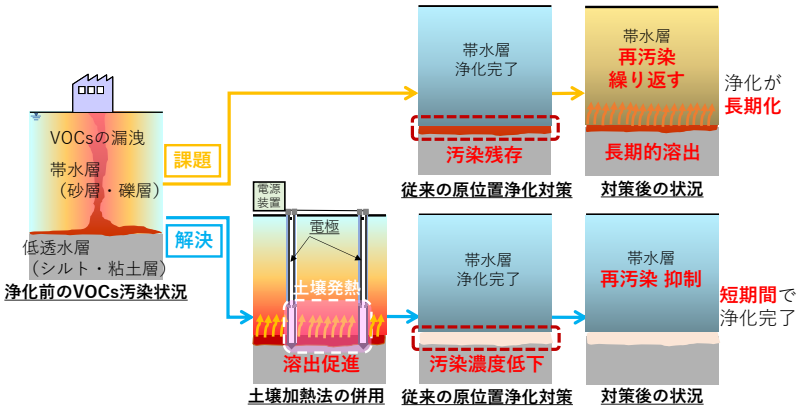

図-1　低透水層における VOCs 汚染の課題と解決策

低透水層の VOCs 汚染を対象に加熱脱着法を適用するためには，帯水層への VOCs の溶出や拡散を考慮した設計が必要となるが，現状では設計に必要な分配係数や拡散係数の温度依存性に関するデータが不足している．そこで，本報では，異なる温度条件下で模擬汚染土壌を用いた室内試験を実施し，温度依存性について検討した結果を報告する．

２．試験方法

２．１　模擬汚染土壌の作成

実汚染地盤から採取した試料は，採取する位置や深度等により土質性状や汚染状況が異なり，同一条件の試験体を確保することが難しい．そのため，供試土壌として，VOCs の吸着性を考慮するため，市販の黒ボク土を使用した．50ml のガラス製遠沈管の中に粒度調整した黒ボク土（表-1）の湿潤試料 20g と VOCs 模擬汚染水 40ml を添加後，回転振とう機を用いて 24 時間混合撹拌して，土壌を汚染水に馴染ませた．その後，VOCs の吸着水への捕捉を再現するために遠心分離機を用いて圧密し，圧密後に上澄み液を取り除いたものを模擬汚染土壌（図-2）とした．模擬汚染水はトリクロロエチレン（TCE），シス-1, 2-ジクロロエチレン（*cis*-1,2-DCE），クロロエチレン（VC）の 3 種類とし，3 種類の濃度で添加した．

表-1　黒ボク土の性状

土粒子密度	2.522g/cm^3
最大粒径	0.425mm
含水比	55.3%
有機炭素含有量	5.93%

図-2　模擬汚染土壌

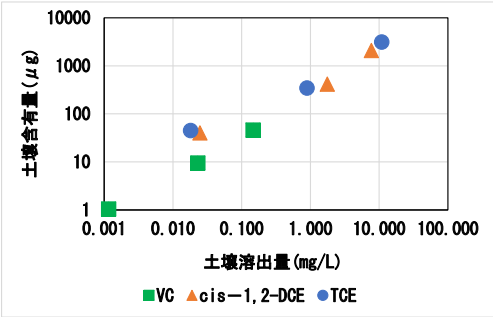

図-3　模擬汚染土壌の汚染濃度

模擬汚染土壌の土壌溶出量および土壌含有量の測定結果を図-3 に示す．添加する模擬汚染水の濃度を変えることにより，濃度が異なる模擬汚染土壌を作成した．室内試験では，土壌溶出量基準の 10 倍程度までの汚染土壌（低濃度汚染土壌），100 倍以上の汚染土壌（高濃度汚染土壌）の 2 種類を使用した．なお，土壌溶出量は環告 18 号，土壌含有量は底質調査法に準じて測定した．

キーワード　VOCs，加熱脱着，溶出，拡散，温度依存性，
連絡先　　〒163-0606　東京都新宿区西新宿 1-25-1　大成建設（株）環境本部　TEL 03-5381-5194

© Japan Society of Civil Engineers

２．２　バッチ試験

模擬汚染土壌を準備した遠沈管に，ほぼ満水状態になるまで蒸留水（40ml）を満たし，恒温槽で所定の温度条件（15℃，30℃，45℃，60℃）を維持し 7 日間往復振とうした．その後，遠心分離機で液相と固相を分離し，上澄み液の濃度と模擬汚染土壌の含有量より吸着等温線を求め，その傾きから分配係数を算定した．

２．３　溶出試験

バッチ試験と同様，模擬汚染土壌と蒸留水を含む遠沈管を同様の温度条件下で 7 日間静置し，3 日後，7 日後に上澄み液の VOCs 濃度を測定した．拡散係数は，上澄み液の VOCs 濃度の経時変化をフィックの法則に基づく拡散解析でフィッティングして求め，温度が拡散係数に与える影響を把握した．

フィックの法則 $J = D\frac{dCw}{dX}$　J:単位時間に単位面積を移動する汚染物質量，$\frac{dCw}{dX}$：液相濃度の勾配，D：拡散係数

３．試験結果

３．１　バッチ試験

試験で得られた温度と分配係数の関係より，15℃の分配係数を 1.0 とした場合の分配係数の比率を求めた結果を図-4 に示す．高濃度汚染土壌を使用した *cis*-1,2-DCE に関しては，信頼できるデータを得ることができなかったが，その他の条件における分配係数は，概ね同じように直線的に減少しており，温度 60℃では約 0.5 になる．当面の間，低濃度汚染土壌の試験結果を用いて分配係数を設定することとした．

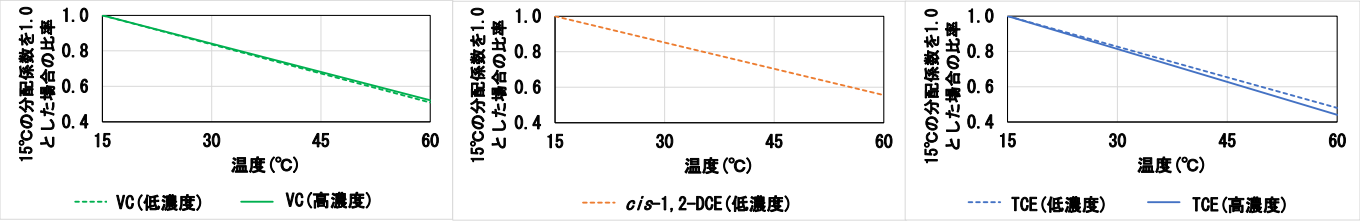

図-4　15℃の分配係数を 1.0 とした場合の比率

３．２　溶出試験

試験や解析で得られた温度と拡散係数の関係より，15℃の拡散係数を 1.0 とした場合の拡散係数の比率を求めた結果を図-5 に示す．VC に関しては信頼できるデータを得ることができなかったが，その他の条件における拡散係数の増加比率は，高濃度汚染土壌の条件の方が小さい傾向を示し，温度 60℃における増加比率は，TCE で 4，*cis*-1,2-DCE で 10 程度となる．各温度における分配係数の比が TCE : *cis*-1,2-DCE : VC≒1 : 0.5 : 0.25 であったことより，土壌から間隙水への溶出し易さの比は TCE : *cis*-1,2-DCE : VC≒1 : 2 : 4 といえる．これより，前述の拡散係数の増加比率の比（4 : 10＝1 : 2.5）は概ね妥当と考えられる。このことから，温度 60℃における VC の拡散係数の増加比率は 16～20 程度になると思われる．

今後，追加試験を行いたいが，安全側の評価として，高濃度汚染土壌の試験結果を用いて拡散係数を設定することとした．

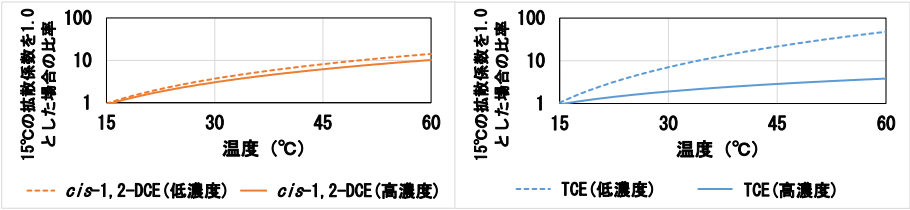

図-5　15℃の拡散係数を 1.0 とした場合の比率

４．おわりに

本研究では，室内試験や数値解析より VOCs で汚染された土壌の分配係数と拡散係数の温度依存性を検討した．再検討の余地を残すが，試験結果を用いることによって，サイトの汚染状況に応じた加熱温度に対し，適切なパラメータを設定したシミュレーションを行い，浄化予測することが可能となる．今後，実証試験を通じ，原地盤の不均質性や拡散係数のスケール効果の影響度合いについて確認していく予定である．

参考文献

1) 佐藤徹朗，瀬野光太，長曽哲夫：VOC 汚染サイトにおける電気発熱による原位置浄化対策への影響について（その 5），第 23 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.634-639，2017.

© Japan Society of Civil Engineers