

46．凍結吸引と融解通水によるVOC汚染源の浄化方法

○伊藤 譲（摂南大学）・嘉門 雅史（京都大学）・日置 和昭（不動建設）
野村 忠明（錦城護謄）・伊豆田 久雄（精研）

1．背景

工場等から漏出した VOC 原液は地下深くまで浸透して地下水と土壌を汚染する．VOC は密度が水より大きいので、粗粒土地盤では容易に地下水面下に至り、水と分離して土壌間隙に滞留する．また、細粒土地盤においても、VOC は侵入抵抗の小さいところを探して地下深くまで浸透する．このようにして、土壌間隙に入り込んだ VOC は、いわゆる DNAPL と呼ばれる地下水・土壌の汚染源であり、徐々に溶け出して長期間に渡り地下水を汚染し続ける．汚染源が存在するならば、汚染された地下水をどれだけ汲み上げても、汚染源自体が取除かれない限り根本的解決とはならない．

この解決手段として、凍結吸引と融解通水による浄化技術が提案された．この方法は VOC と水との凝固点の違い、および地盤が凍結融解後に透水係数の増大する効果に着目したものであり、その手順は図 1 に示すとおりである．

まず、準備工事として汚染地盤に、所定間隔で凍結管および吸引回収管を打設する．工事前半では、凍結管に冷却液を循環するなどして汚染地盤を凍結する．汚染地盤全体の凍結が確認されたら、ポンプ吸引等により DNAPL のみを選択的に除去回収する．工事後半では、凍結管に温水を循環させて凍結地盤を融解させる．凍結融解後には地盤の透水係数が増大しているので、ポンプアップ等による通水により汚染源周辺の高濃度汚染域を洗浄することができる．本報告は、この一連の方法による土壌洗浄技術の妥当性を検討するために実施した実験例を紹介するものである．

2．凍結吸引によるDNAPL溜まりの回収実験

この実験では、提案技術の前半部である「凍結吸引」の効果を確かめるため、DNAPL と水とを

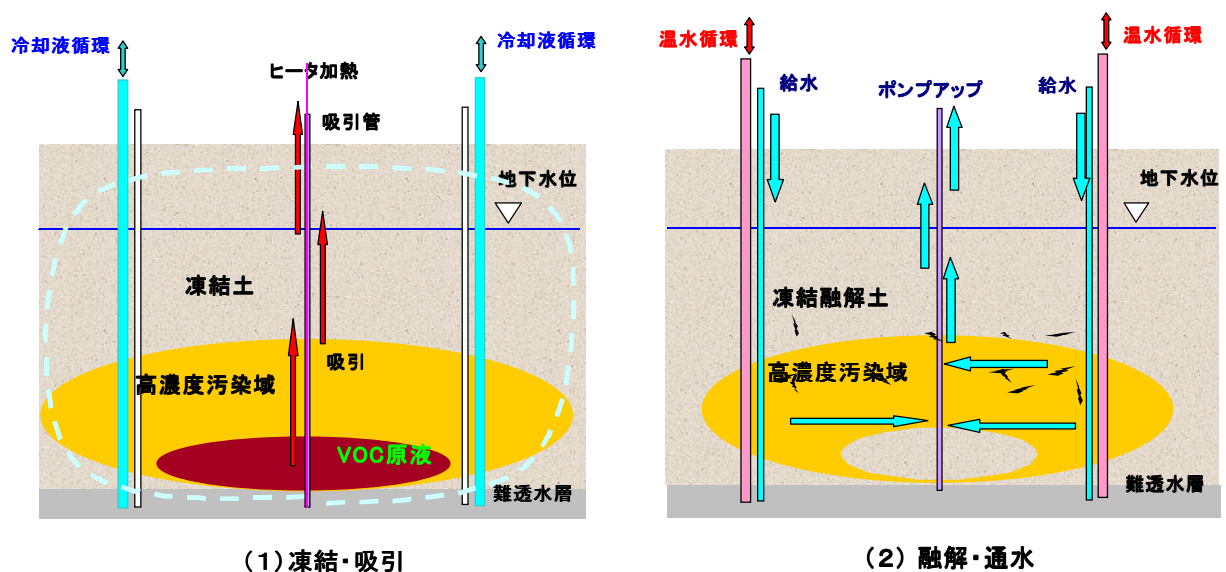


図 1 VOC 汚染源浄化技術の概要

含む模擬汚染土を凍結して、同時に吸引することで DNAPL のみを選択的に取除くことを試みた。

2. 1 実験方法

DNAPL 溜まりを構成する土壌として、粗粒土、細粒土の 2 種類を想定して、表 1 に示す珪砂と藤森粘土を用いた。DNAPL としては、VOC に類似した特性を有する PF5080 (3M 社製、以下「P 剤」) を用いた。試料土は湿潤状態で P 剤と混合した。つまり、珪砂では水浸させた試料の水分を紙タオルで拭った状態とした。藤森粘土では PL 以下の $w=19\%$ の含水比に調整した。

実験容器は、図 2 に示すとおり、 $t=10\text{mm}$ 、 $ID=100\text{mm}$ のアクリル円筒の底部に $t=2\text{mm}$ のアルミ板を取りつけたものである。吸引パイプは、 $ID=5\text{mm}$ 、 $t=1\text{mm}$ のテフロンチューブに $\phi 1\text{mm}$ の孔を 5mm 間隔で 80mm まで開けて、その周囲を不織布で覆ったものである。また、パイプ内には線ヒーターを凍結防止のために設けた。試料土は、実験容器の底から 100mm の高さまでを 5 層に分けて、 $\phi 30\text{mm}$ 、質量 500g のロッドを試料土表面より自由落下させて締固めた。次に、P 剤約 100ml を試料土の表面より流し込んだ。その後、蒸留水を試料土表面より流し込み、表面に余剰水が浮き上がるまで補充を行い、模擬汚染土壌とした。

実験では、模擬汚染土壌を容器ごと、 -15°C の冷却液中に浸して、全体を凍結した。その後、アスピレーターにて吸引を行った。吸引開始直後には、吸引パイプ内の氷を融解するため、ヒーターを加熱した。25~30 分間の吸引の後、トラップに溜まった液体を特定して、その重量を測定した。また、実験前後の容器全体の重量より、気化して取除かれた液体の重量を求めた。さらに、実験後の試料土の含水比、体積と重量より残留する DNAPL 量を推定した。

実験条件を表 2 に示す。C1, C3 は凍結後に吸引を行い、比較実験として、C2, C4 では凍結なしで吸引のみを行った。

2. 2 実験結果

(1) 砂質土の場合

実験結果を図 3 に示す。まず、珪砂試料については、凍結を行った場合 (C1) には、P 剤が液体状態で 43% 回収さ

表 1 試料土の物性値

	珪砂	藤森粘土
$\rho_s (\text{g}/\text{cm}^3)$	2.65	2.69
砂分 (%)	粗砂	0.0
	中砂	98.4
	細砂	1.6
シルト分 (%)	0	70.2
粘土分 (%)	0	27.0
LL (%)	—	46.4
PL (%)	—	24.8

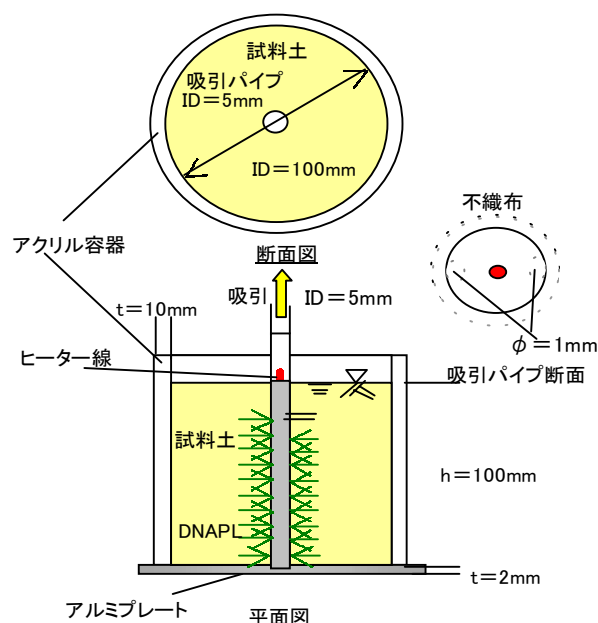


図 2 凍結吸引実験容器

表 2 凍結吸引実験条件

	試料土	凍結の有無	初期条件		加えた DNAPL 量 (g)	加えた 水量 (g)
			$\rho_d (\text{g}/\text{cm}^3)$	$w (\%)$		
C1	珪砂	有り	1.27	4.9	179.7	210.8
C2		無し	1.21	5.1	181.9	210.8
C3	藤の森	有り	0.92	20.2	176.3	121.9
C4		無し	0.92	20.3	177.7	120.8

れた．また，実験前後の重量差より，吸引により供試体から直接またはトラップ内より蒸発した量が 25%と推定され，合計で 68%が除去されている．次に，凍結を行わない場合（C2）は，P 剤が液体状態で 62%回収されて，蒸発により 20%と合計 82%除去された．しかし，C2 では液体の P 剤と同時に加えた水量の 82%相当がトラップ内に確認された．実験はセル内の閉鎖条件で行ったため，吸引水量には限界があるが，実地盤では豊富な地下水が供給されるので限界がない．これより，凍結地盤を吸引すると，単に吸引を行うよりも DNAPL が選択的に回収されることが示された．

（２）粘性土の場合

次に，粘性土試料について凍結を行った場合（C3）は，P 剤はトラップ内に液体状態では認められなかった．しかし，重量差より蒸発により 32%除去されたと推定された．これに対して，凍結を行わない場合（C4）には，蒸発により僅か 2%除去されたにすぎない．これは，C4 では吸引によってパイプ周囲の粘土が圧密されるため，水と P 剤の蒸発量は時間経過により急減するが，凍結を伴う場合は，間隙が圧密により潰れることなく，間隙に連続的に存在する液体状態の P 剤のみが吸引されたためと考えられる．

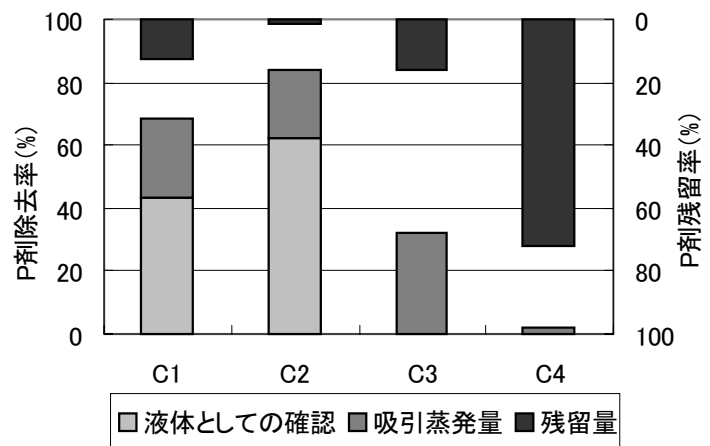
３． 融解通水による高濃度汚染域の浄化実験

ここでは，提案技術の後半部である「融解通水」の効果を確認するため，モデル土槽を用いた実験を行った．

３．１ 実験方法

表 1 に示した藤森粘土に所定濃度の NaCl 水溶液を加えて，含水比約 60%に調整する．そして，図 4 に示す直径 60cm×高さ 80cm の土槽に投入して，中央および側面の 4 箇所より排水可能な条件で，荷重 30kPa で予圧密を行った．予圧密終了後，載荷重を 20kPa とし，土槽中央の給排水パイプを給水タンクに接続して土槽内に通水可能な状態とした．

実験条件の詳細は表 3 に示すとおりである．凍結は土槽壁面の凍結板に冷却液を循環させて，側面部より中心方向へ凍結させた(表 3・C12)．凍結の進行は土槽底面と中心の熱



C2：P 剤の他に水が 172.59g（加えた量の 82%相当）回収

図 3 DNAPL の除去率・残留率

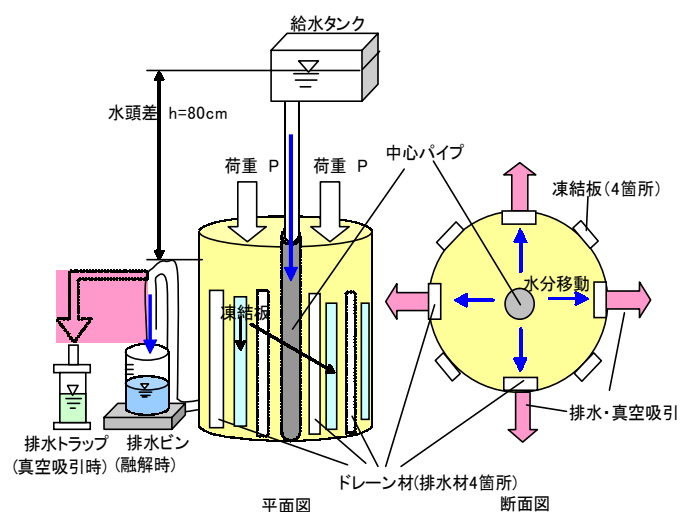


図 4 融解通水実験土槽

電対により確認した。測定温度より、凍結面が土槽中心部に達したと確認された時点で冷却を中止した。

融解時は中心パイプに 40℃の温水を流して、27 時間の融解を行った。その後、3 時間の真空吸引を行った。なお、融解および真空吸引時は、凍結時と同様に給水タンクから通水可能とした。また排水は側面に設置した PBD(t=4mm×b=5cm×h=45cm)より行った。なお、比較実験として、凍結を伴わない真空吸引のみの実験(表 3・C0)を行った。

3. 2 実験結果

融解・真空吸引時における排水の NaCl 濃度は、初期濃度(2%)の 3～6 割であった。融解・吸引時の通水によって、ある程度は薄められているが、予想以上の高濃度の NaCl 溶液が回収された。また、融解時の排水 41.0L と真空吸引による排水 10.0L とを合計すると 51.0L である。この間の給水タンクよりの補給は 45.8L であり、供試体では全体的に含水比は低下した。

図 5、6 に実験後の供試体の NaCl 残留率を示す。凍結融解を行わない C0 (図 5) では洗浄領域が認められなかった。凍結融解を行った C12 (図 6) では土槽中心部より約 10～15cm 付近まで洗浄された。これは、凍結融解後に細粒土の透水性が改善されて、通水時に間隙中の NaCl が洗い流され易くなったと考えられる。真空吸引時の排水量を C0 と C12 とで比較すると、1.5L(6 時間)と 10.0L(3 時間)であり、透水係数は約 13 倍増加していた。

4. まとめ

凍結吸引と融解通水による VOC 汚染源の浄化技術に関して実験が行なわれた。これまでの主な結果は次のとおりである。

(1) 地盤の凍結後に吸引を行うと、凍結を行わない場合と比較して、VOC が選択的に回収できることが示された。(2) 凍結融解を行うと、凍結を行わない場合と比較して通水が容易になることが示された。つまり、従来の原位置洗浄において、ポンプアップ等を単独で実施するよりも前処理として凍結融解を行うと洗浄効率が大幅に改善されることが考えられる。

表 3 融解通水実験条件

No.	C0	C12
凍結状態	なし	あり
初期高さ(cm)	55	55
初期含水比(%)	59.7	58.2
初期NaCl濃度(%)	3.6	2
凍結温度(°C)	—	-3→-12→-9
凍結時間(h)	—	288
融解温度(°C)	—	40
融解通水(h)	—	27
吸引圧力(kPa)	-80	-50
吸引通水(h)	6	3

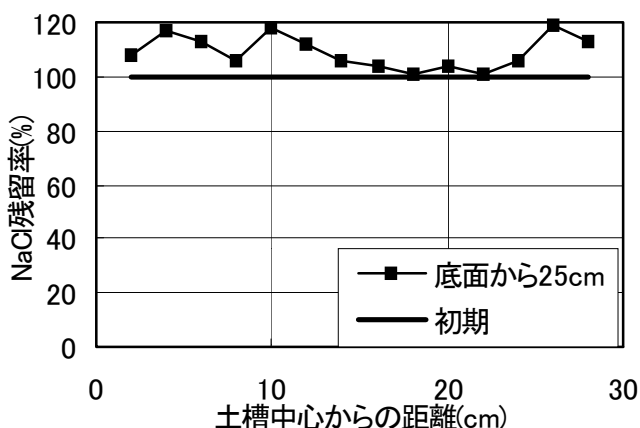


図 5 NaCl 残留率(C0)

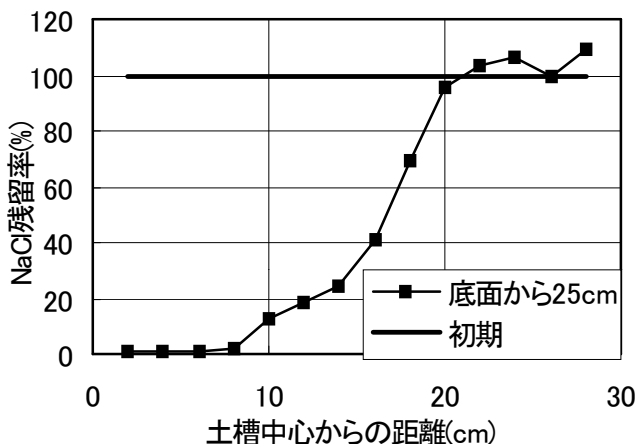


図 6 NaCl 残留率(C12)