

て全て除外。

- ③物理化学的処理Ⅱに対しては、汚染現場のドラム缶が保管され、また高濃度汚染分布が分からない現時点では、土壌ガス吸引法、土壌洗浄法では直接的な地下水汚染拡散防止にはならないことから除外し、残りの揚水曝気法を地下水揚水処理として採用する。
- ④熱処理は、撤去後のドラム缶内容物の熱処理は行われているが、直接地下水汚染拡散防止にはならないことから除外。
- ⑤固化・不溶化処理封じ込めに対しては、遮蔽（遮水壁）以外は揮発性塩素化合物に効果がないことから除外。

以上より、一次スクリーニングで揚水による地下水汚染拡散防止対策を目的として残った技術は、バリア井戸、遮水壁+揚水処理（地下水位制御）、バイオレメディエーションである。

このように、技術のスクリーニングを行う作業とその際に参照する技術分類表とは密接な関係にあると考えられる。そういう意味において、本研究で用いた技術分類表は今後改善する必要がある。

## 2) 二次スクリーニング

次に、その技術の信頼性、実績という観点からさらに絞り込む。バイオレメディエーションは、米国においては実績のある技術であるが、国内ではその適用にまだ問題がある。またバイオレメディエーションは汚染拡散防止対策にも適用できるが、短期間での効果はさほど期待できない。今回のI市の問題設定として、地下水汚染拡散防止という応急対策の選択という観点から、バイオレメディエーションはこの段階で除外した。従って、I市における不適正保管現場の汚染拡散防止対策として、①バリア井戸、②遮水壁+揚水処理（地下水位制御）を検討することにした。

## 3) 計算条件

次に、上記①、②の技術に関して数値シミュレーションにより修復効果の検討を行う。計算条件を表5-2に示す。揚水井戸数は、1~4ヶ所設定し、配置は地質構造や地下水流れ場を勘案して、特に基盤深さが深く地下水流速が大きいところに設置したパターンA、河川境界に沿って配置したパターンBとした。遮水壁の大きさに関しては2種類（小、大）設定した。遮水壁（小）は地下水流速の大きい部分のみ遮水壁を施工し、地下水位制御とバリア井戸を兼ねた井戸を配置する事によって汚染拡散抑制を図ったものである。一方遮水壁（大）は、汚染現場全体が遮水壁に入るように設定したものである。次に、遮水壁施工のタイミングであるが、計算上、揚水と同時に遮水壁を施工する場合と、揚水のみを先行的に開始した後、1年後に遮水壁を施工する両方の場合の計算を行った。

また揚水量に関しては、計算領域の山側の境界を水位一定条件にしているため、地下水を汲み上げた分だけ山側境界、あるいは川側の境界から水が流入することになる。従って、今回は揚水量に関しては、かなり大きめに設定した。実際の修復対策では、山側境界部分に鉛直遮水工や表面水排水溝を施すなど、汚染現場に流入する水量を抑制する対策を採用している。今後は、山側からの流入流量を実測し、汚染現場全体の水収支を把握した上で詳細な解析をする必要がある。このような理由で今回は、揚水総量を10000m<sup>3</sup>/dayと設定し、揚水井戸一本あたりの揚水量は、揚水総量を揚水井戸数で除した均等配分とした。遮水壁を施工すると地下水位は上昇しやがて地表面

表5-2 計算パターンと計算条件

No.	適用技術	オプション			
		揚水井戸数	配置パターン	遮水壁の大きさ	遮水壁施工タイミング
1	バリア井戸	1		—	—
2		2	パターンA	—	—
3		2	パターンB	—	—
4		3	パターンA	—	—
5		3	パターンB	—	—
6		4		—	—
7	遮水壁+揚水処理 (地下水制御)	1		小	揚水と同時に施工
8		2		小	揚水と同時に施工
9		3		小	揚水と同時に施工
10		1		大	揚水と同時に施工
11		2		大	揚水と同時に施工
12		3	パターンA	大	揚水と同時に施工
13		3	パターンB	大	揚水と同時に施工
14		4		大	揚水と同時に施工
15		1		大	揚水開始後1年後に施工
16		2		大	揚水開始後1年後に施工
17		3		大	揚水開始後1年後に施工

から地下水が浸出してくる。地下水位が地表面よりも高くない程度に地下水位を設定できる揚水量として10000m<sup>3</sup>/dayと設定した。

計算格子と遮水壁（小、大）の配置を図5-2と5-3に示す。

#### 4. 計算結果及び考察

まず修復対策を行わなかった場合の汚染状況を改めて図5-4に示す。なお透水係数はパターンCである。相対濃度で10%の線が敷地境界付近に存在する。これを比較の基準として以下の考察を行う。

バリア井戸による地下水流れ場、汚染濃度コンター図を図5-5～図5-10にそれぞれ示す。いずれも揚水を開始してから3年後の結果であり、ほぼ定常状態になっている。一ヶ所だけの揚水（図5-5）では、ほとんど汚染拡散抑制効果（以下効果とする）が見られない。また二ヶ所に増加すると、パターンA（図5-6）では一ヶ所の場合よりも効果が増加するが、パターンB（図5-7）の場合には逆効果であった。さらに揚水を三ヶ所行うとパターンA（図5-8）では効果は大きくなるが、二ヶ所の場合同様パターンB（図5-9）では効果が見られない。つまり基盤が深く、地下水流速の大きい部分で揚水を行うことが汚染拡散抑制のためには重要であることが確かめられた。さらに四ヶ所（図5-10）にすると、ほぼ境界付近の相対濃度をほぼ1%程度にまで減少させる効果のあることがわかった。

次に、遮水壁（小）と揚水井戸を施工した場合の結果を図5-11～5-13に示す。いずれの揚水井戸数の場合も、遮水壁（小）では汚染拡散抑制の効果が見られないことが分かった。汚染源が遮水壁の外側にも存在しているのが理由であると考えられる。

次に、遮水壁（大）と揚水井戸を施工した場合の結果を図5-14～5-18に示す。遮水壁（大）の場合は、遮水壁で汚染物質の輸送が遮られるためこれまでの計算結果のなかでは、揚水井戸数の数に関係なく敷地境界での汚染拡散抑制効果が一番大きい。しかし、揚水井戸数が少ない場合、

特に一ヶ所（図5-14）、二ヶ所（図5-15）の場合は一部地下水位の制御が困難で地表面から地下水が浸出してしまふ可能性が考えられた。総揚水量を同じに設定して、揚水井戸を増やした方が地下水位を低く制御できることが確認することができた。敷地境界での汚染拡散抑制効果は一番大きかったが、遮水壁を施工する前に下流側に広がってしまった汚染物質は回収することができない。そこで、揚水処理を先行して行い、1年後に遮水壁を施工する対策を試行してみた。結果を図5-19～5-21に示す。特に揚水井戸を三ヶ所した場合、敷地境界地下水の相対濃度が1%にまで減少することが確かめられた。バリア井戸（四ヶ所）では部分的に敷地境界地下水相対濃度が10%を超える部分があったので、図5-21の対策が最も汚染拡散抑制効果があることが分かった。

また、揚水処理を先行して行い2年後に遮水壁を行った結果を図5-22に示すが1年後に遮水壁を施した場合と違いは見られなかった。また透水係数パターンDについて、最も効果が得られた揚水井戸（三ヶ所）を施工した後1年後に遮水壁（大）を施工した場合の結果を図5-23に示すが、透水係数のパターンによる修復効果の違いは、今回の計算例では見られなかった。

## 5. 代替案の提案と今後の調査の課題

現時点での調査結果及び国内における修復技術から判断して、I市の汚染拡散防止対策に関しては、遮水壁（大）+揚水井戸（三ヶ所）、又は揚水井戸（四ヶ所）を想定する必要がある。特に揚水を先行して行うことが重要である。またバリア井戸のみよりも遮水壁を施工した方が汚染拡散抑制効果が大きいことが確認された。

今後、図5-1に示したフェーズIIにおける遮水壁の工法、及び水処理方式に関して技術選択を行い、フェーズIIIで代替案を構築する必要がある。

ドラム缶が撤去された後の調査の課題として、

- ①山側の地下水流量、地下水位を測定し境界条件を明確にする。これにより揚水量の定量的な議論も可能になる。また地形、地質条件を明確にする必要がある。今回の地下水流れ場の推定では、まだ地下水汚染の説明の不可能な場所が存在する。
- ②敷地外へ汚染が拡散していないか確認する。拡散している場合には、揚水処理によって汚染を低減させてから、遮水壁などの対策を行う必要がある。
- ③ドラム缶撤去後における高濃度汚染領域の確認、地下水濃度コンターの把握、並びに地質構造の更なる把握、地下水位の経時的測定を行うことで、より確度の高い解析が可能となる。
- ④今回は、汚染拡散防止という観点からの選択であったが、積極的に汚染を修復するという観点に立てば、さらに揚水井戸の配置も変わってくる。地下水汚染コンターが明らかになるとともにこの解析を行う必要がある。

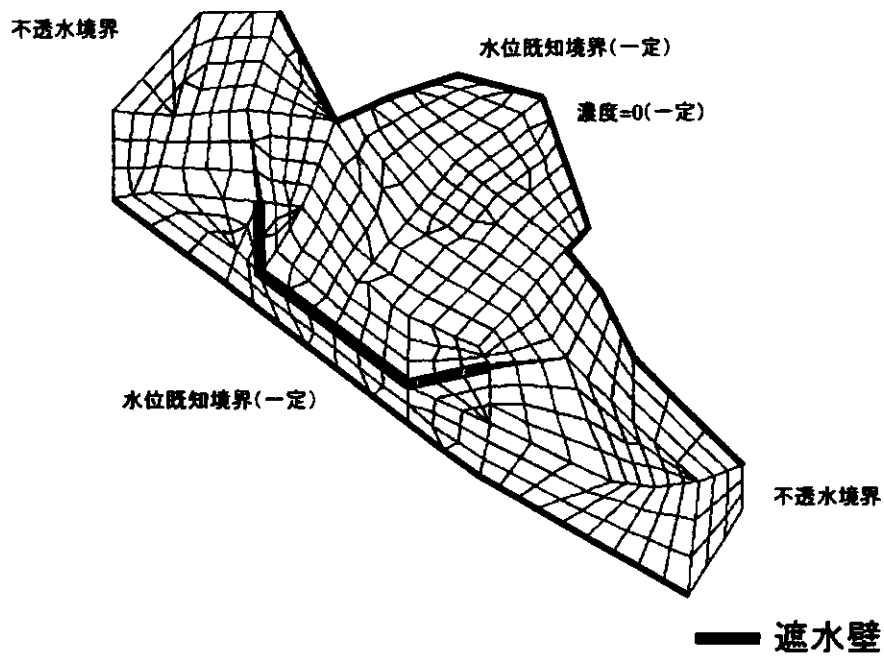


図5-2 遮水壁(小)の配置

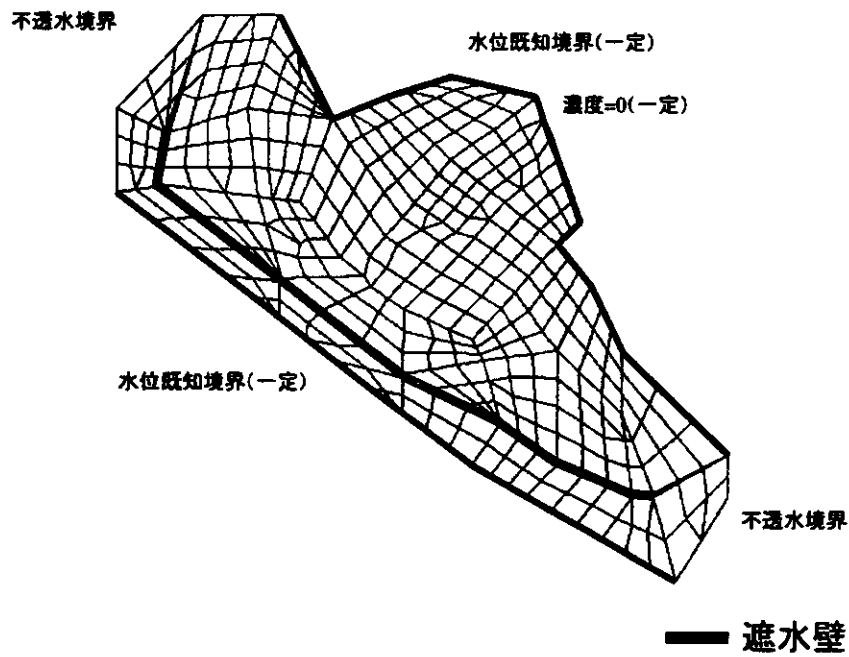


図5-3 遮水壁(大)の配置

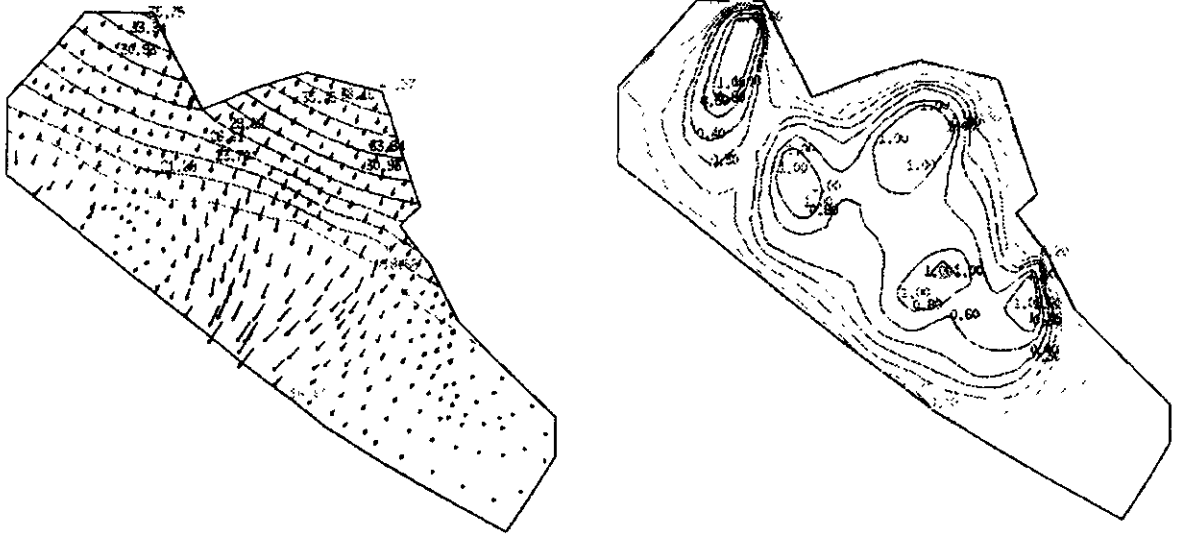


図5-4 修復を行わなかった場合（現在）

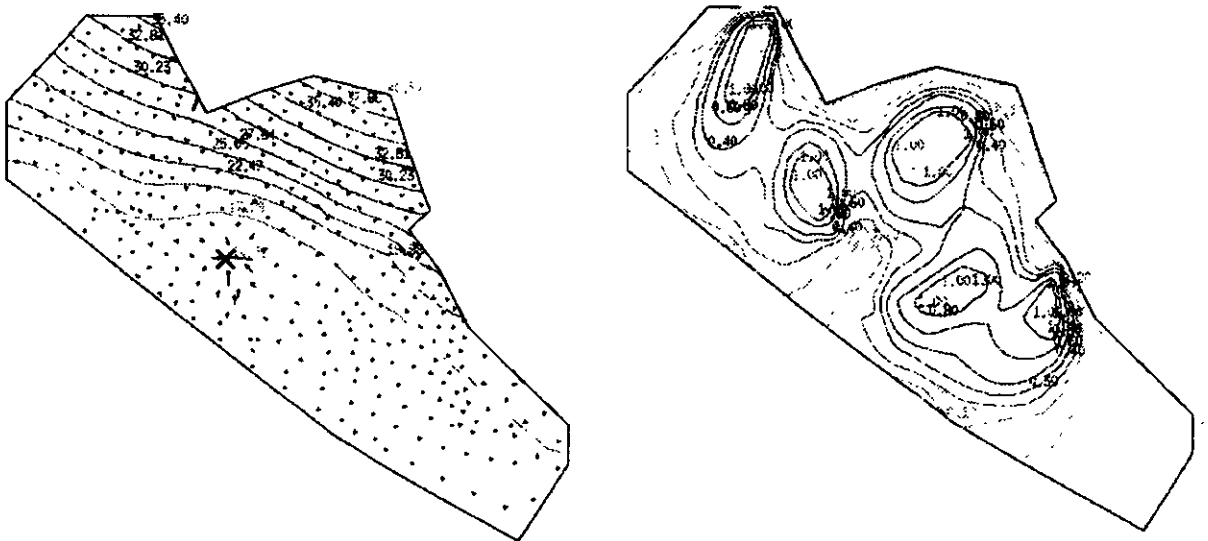


図5-5 バリア井戸1ヶ所の場合（3年後）

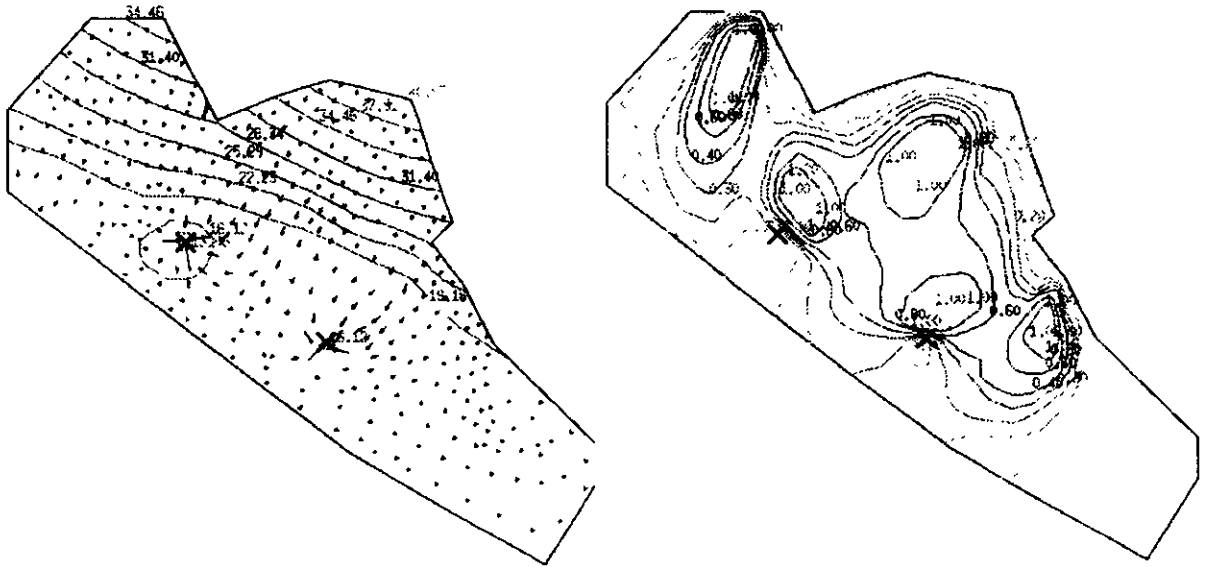


図5-6 バリア井戸2ヶ所の場合(3年後)  
(配置パターンA)

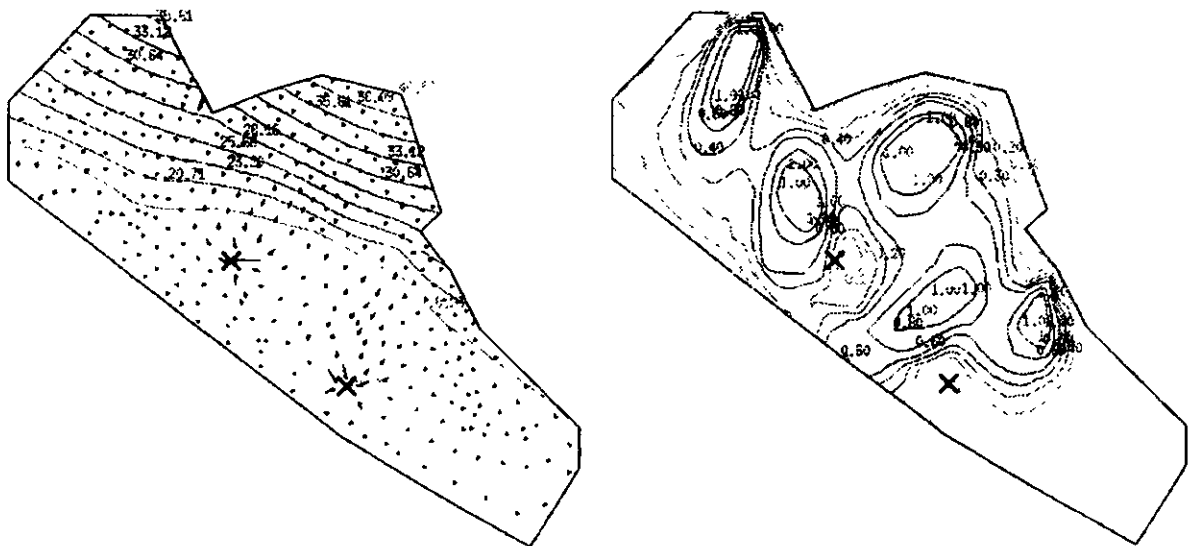


図5-7 バリア井戸2ヶ所の場合(3年後)  
(配置パターンB)

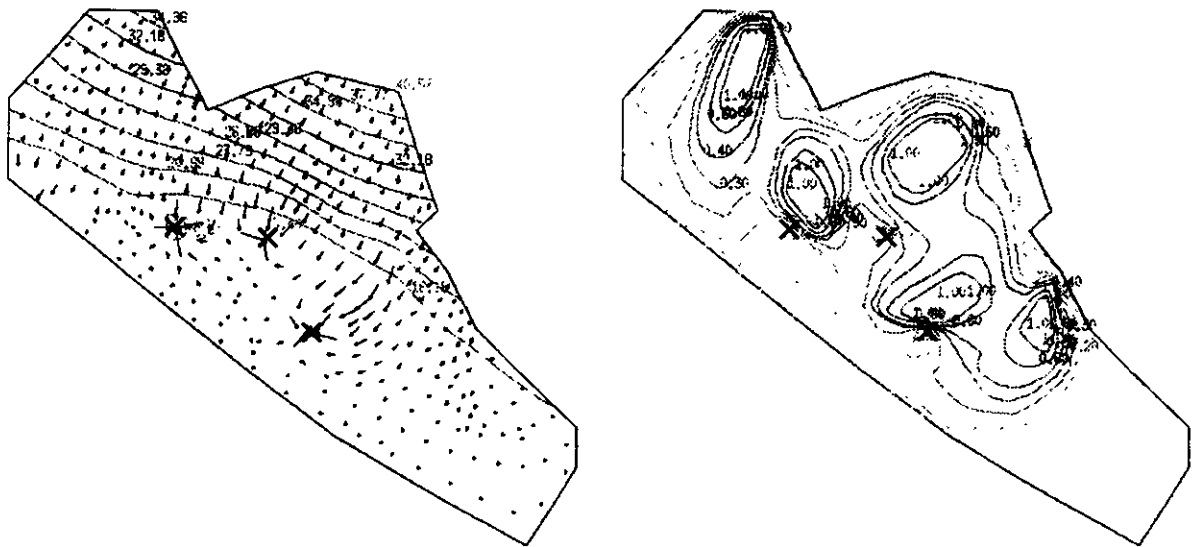


図5-8 バリア井戸3ヶ所の場合(3年後)  
(配置パターンA)

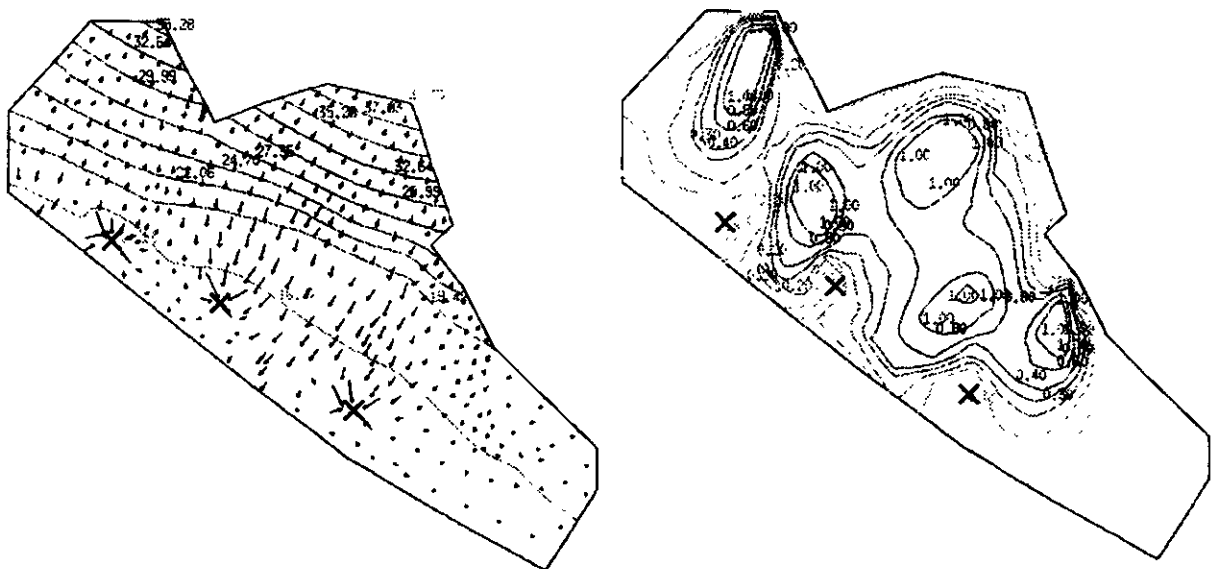


図5-9 バリア井戸3ヶ所の場合(3年後)  
(配置パターンB)

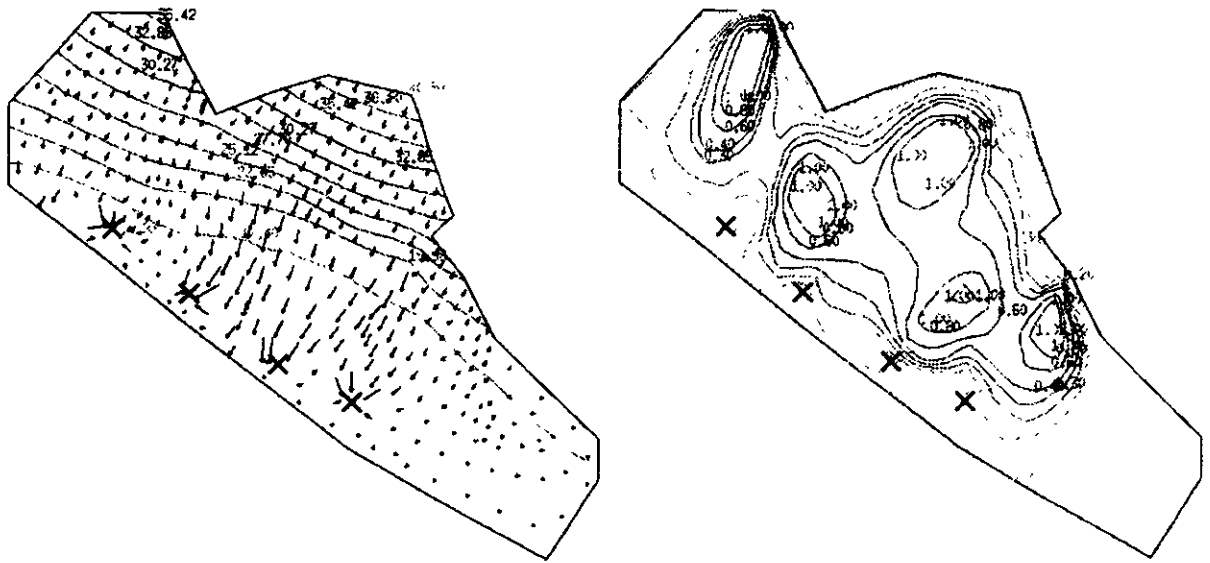


図5-10 バリア井戸4ヶ所の場合(3年後)

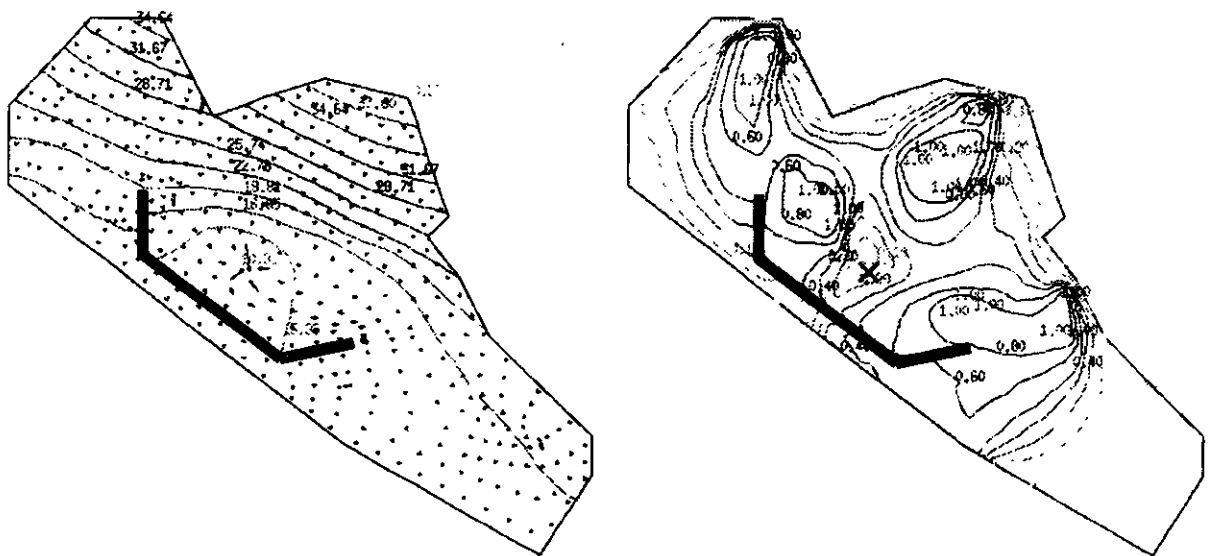


図5-11 遮水壁(小)+揚水井戸1ヶ所の場合(3年後)



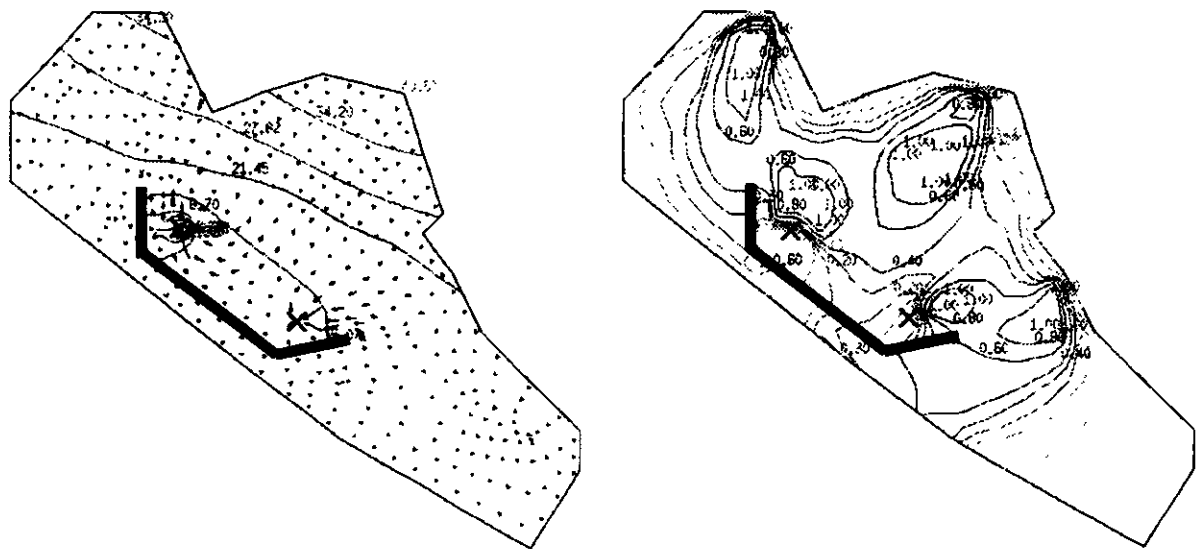


図5-12 遮水壁（小）+揚水井戸2ヶ所の場合（3年後）

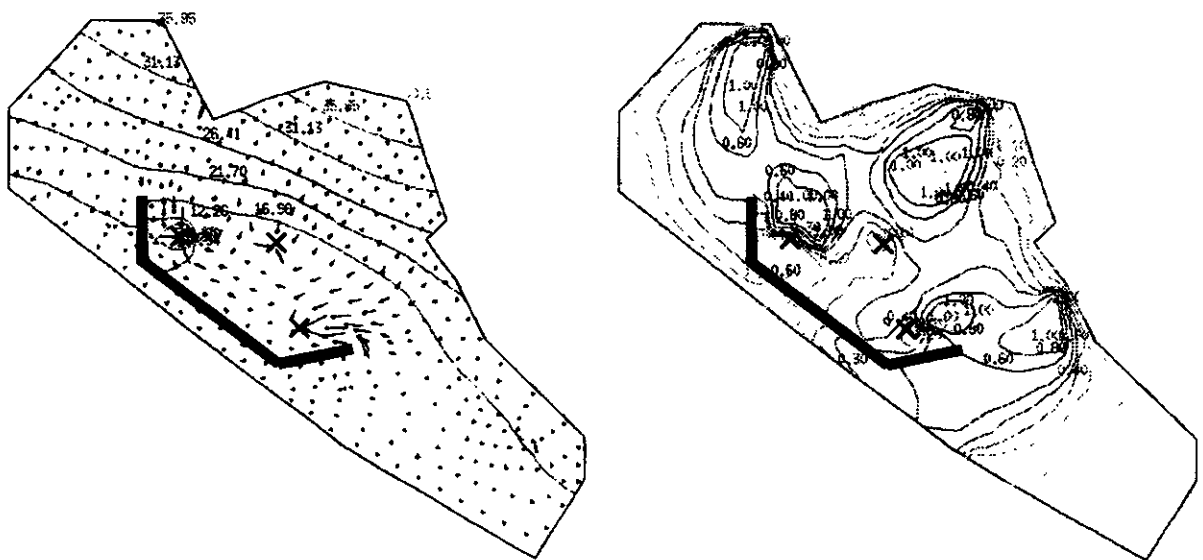


図5-13 遮水壁（小）+揚水井戸3ヶ所の場合（3年後）

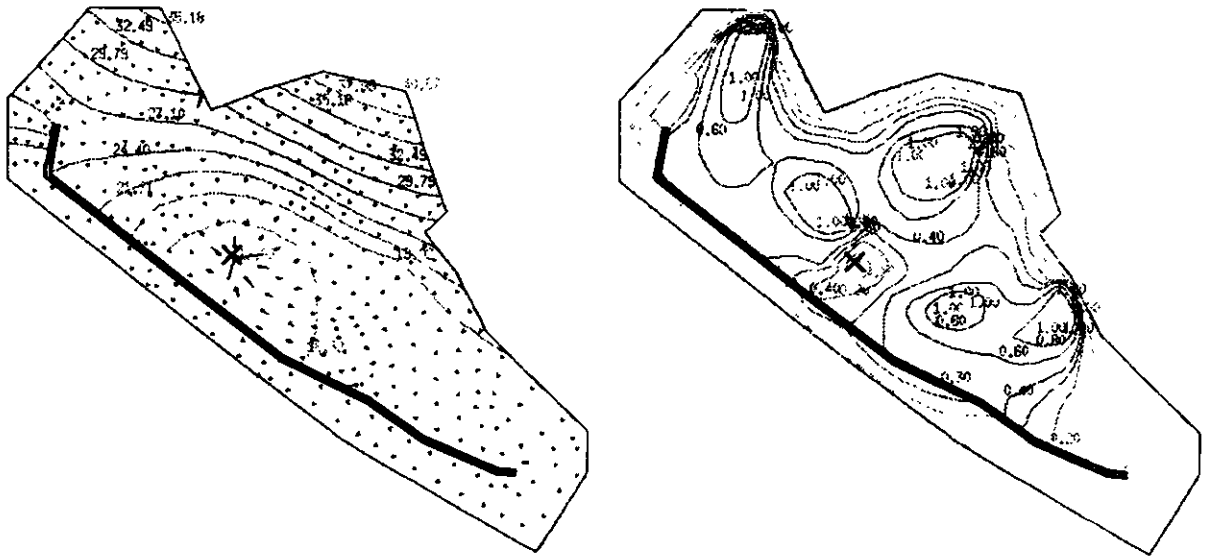


図5-14 遮水壁（大）+揚水井戸1ヶ所の場合（3年後）

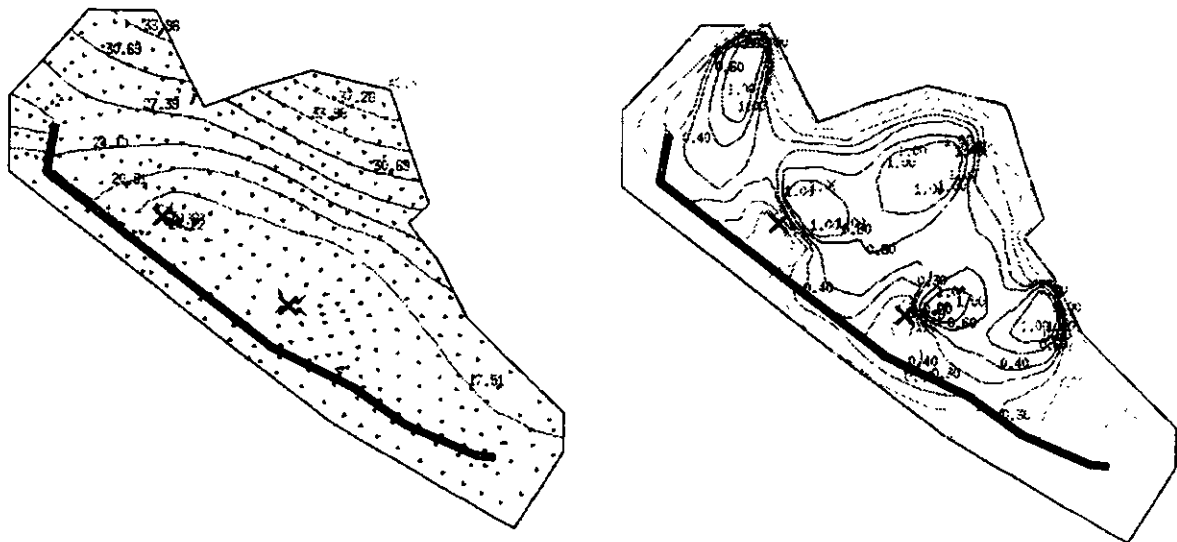


図5-15 遮水壁（大）+揚水井戸2ヶ所の場合（3年後）

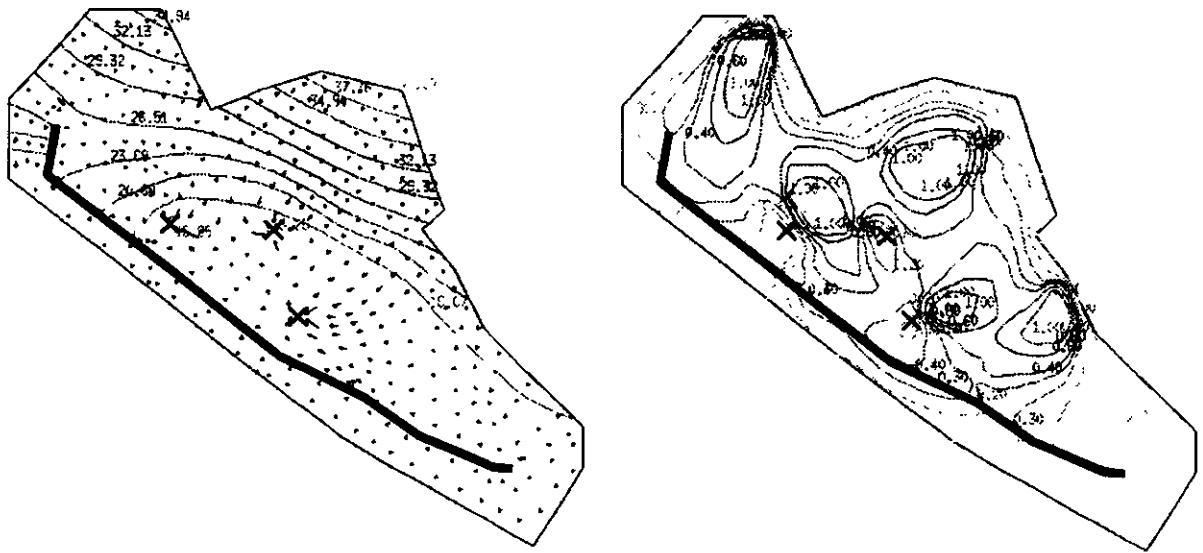


図5-16 遮水壁（大）+揚水井戸3ヶ所の場合（3年後）  
（配置パターンA）

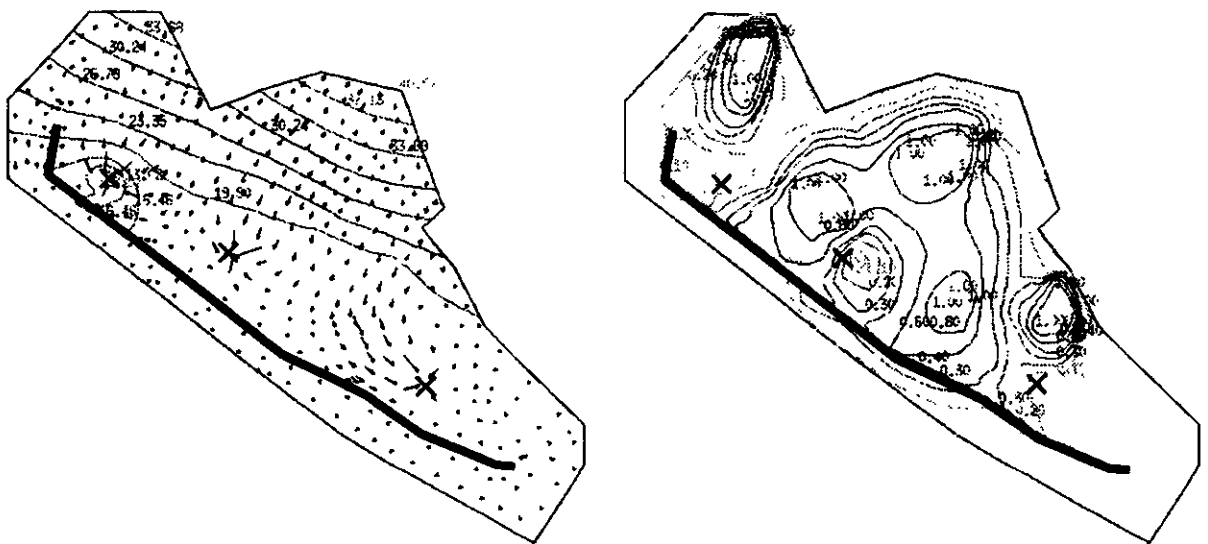


図5-17 遮水壁（大）+揚水井戸3ヶ所の場合（3年後）  
（配置パターンB）

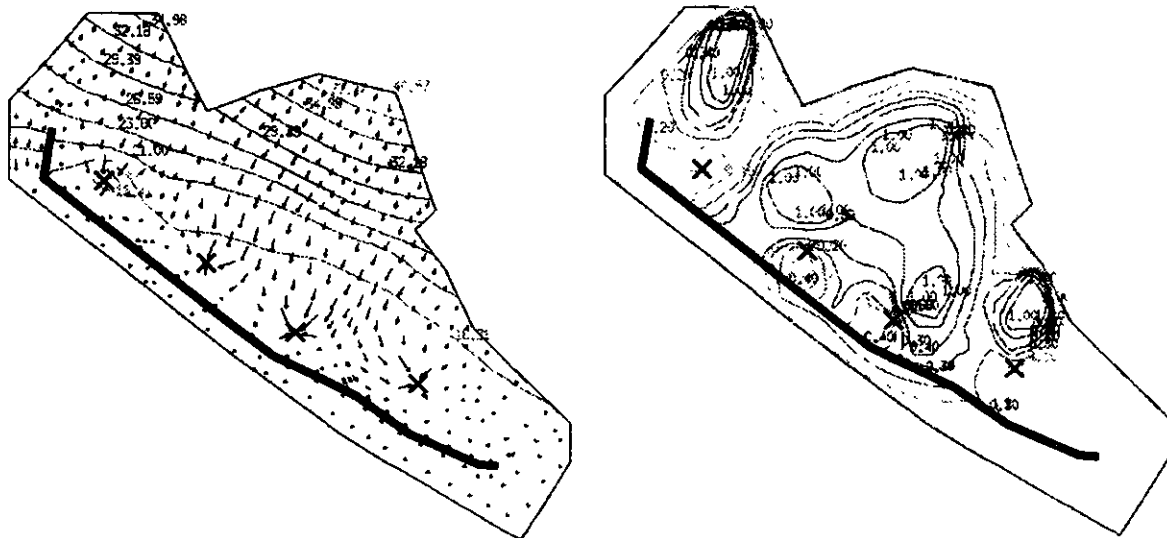


図5-18 遮水壁（大）+揚水井戸4ヶ所の場合（3年後）

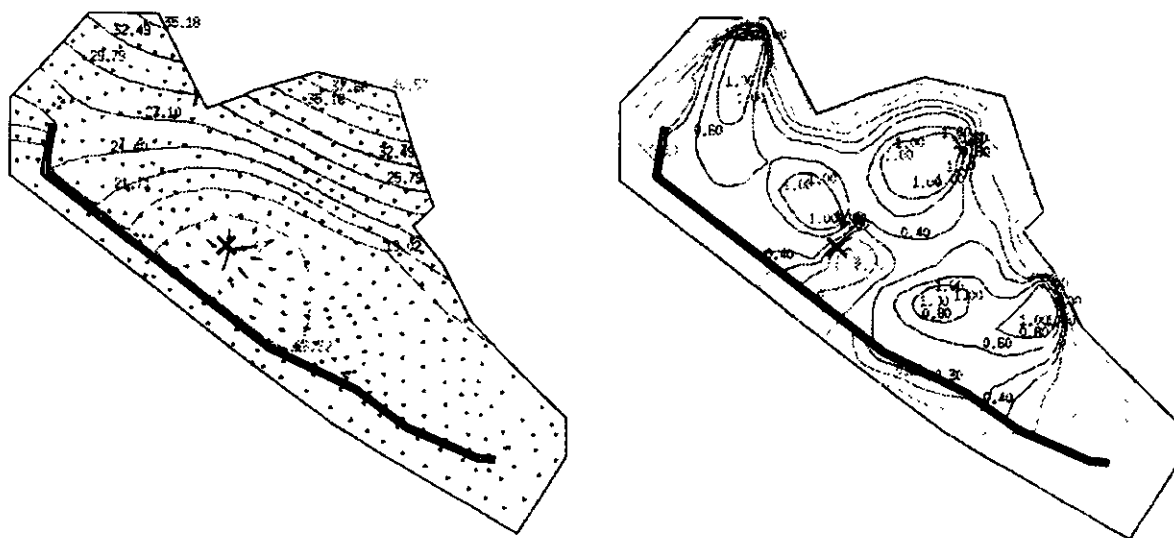


図5-19 揚水井戸1ヶ所を行ったの後1年後に遮水壁（大）  
を施工した場合（3年後）

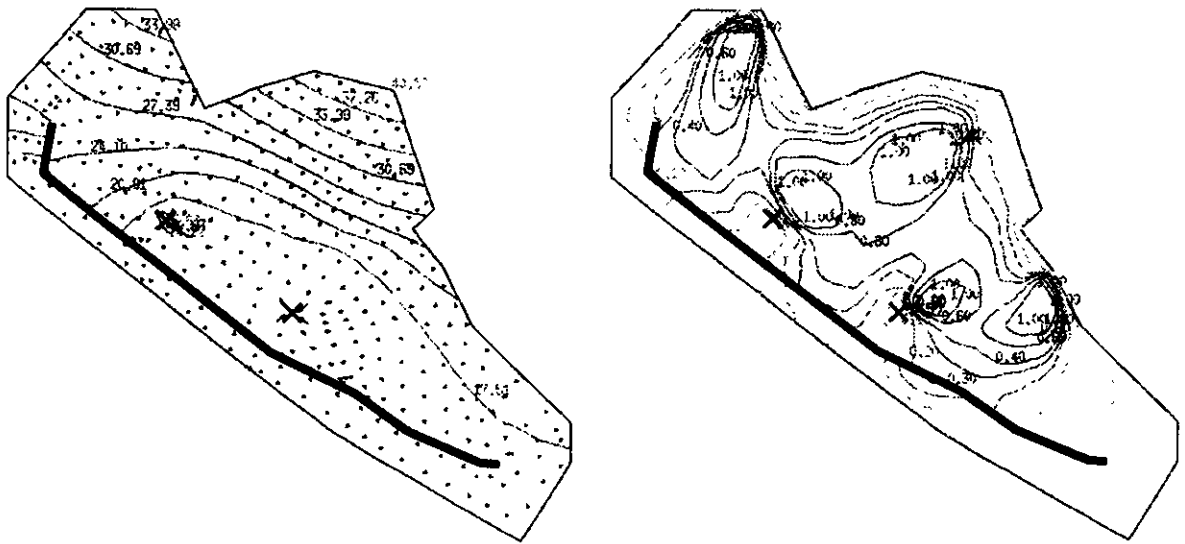


図5-20 揚水井戸2ヶ所を行ったの後1年後に遮水壁（大）  
を施工した場合（3年後）

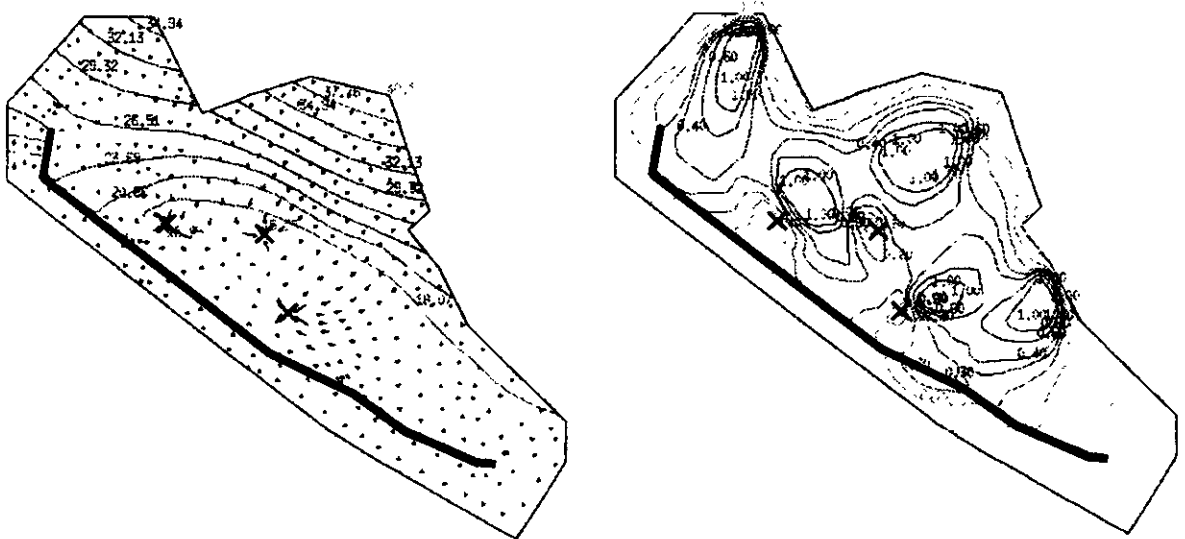


図5-21 揚水井戸3ヶ所を行ったの後1年後に遮水壁（大）  
を施工した場合（3年後）

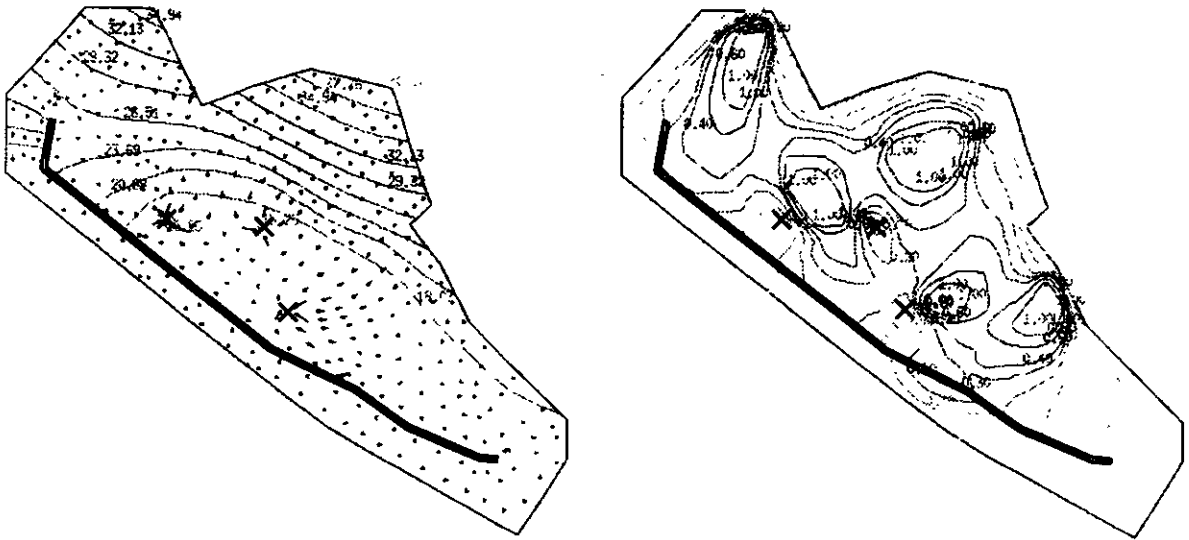


図5-22 揚水井戸3ヶ所を行ったの後2年後に遮水壁(大)を施工した場合(3年後)

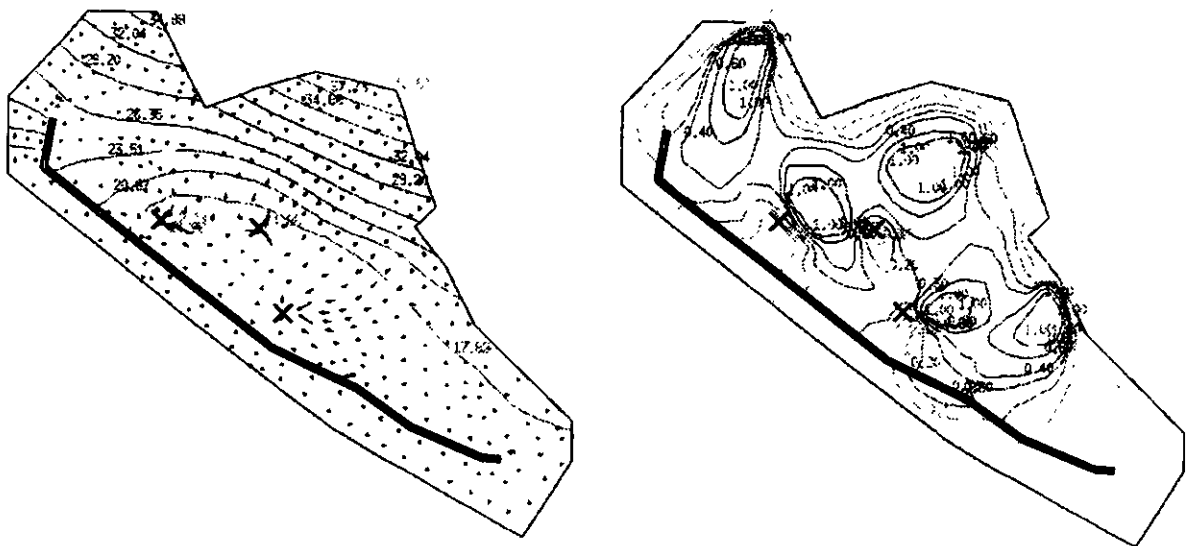


図5-23 揚水井戸3ヶ所を行ったの後1年後に遮水壁(大)を施工した場合(透水係数パターンD)(3年後)

## 6. 要約

5章では、I市の不適正保管現場を対象に地下水汚染拡散防止対策を想定した修復技術の選択を数値シミュレーションを用いて行った。本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 修復技術選択フローを提案し、本研究ではそのフェイズIを実践した。評価の考え方、絞り込み時に使用した技術分類に関してはまだ改善の余地があり検討が必要である。
- 2) I市を対象にした場合には、バリア井戸と遮水壁+地下水揚水が抽出され、井戸の数、配置、遮水壁の大きさと施工するタイミングに関して数値シミュレーションにより効果を比較、検討を実際に行うことができた。
- 3) 結果として、I市の汚染現場では、敷地境界では現在の所汚染は確認されていないが、今後モニタリングが必要であること、また汚染拡散対策としては、バリア井戸（4ヶ所）又は遮水壁（大）+地下水揚水（3ヶ所）を想定する必要があることが分かった。
- 4) 施工のタイミングとしては、汚染が敷地外へも拡散している場合には、まず揚水処理を先行して行い、それから遮水壁を施工するのが最も汚染拡散を防止できることが分かった。
- 5) 今後の調査のポイントとして、山側のボーリングを行い、地下水位、地下水流量の調査を行う必要性のあることを指摘した。

## 第5章 難水溶性有機化合物原液による土壤・地下水汚染対策に関するモデル化

### 1. 緒言

土壤・地下水汚染機構の分類として、2章において水に溶けた状態の汚染物質が地下水と共に輸送される機構と、水に溶けづらい液体、例えばトリクロロエチレン (TCE) のような難水溶性有機化合物原液が直接土壤層内に浸透することによって引き起こされる汚染もあることを説明した。このような解析を行うためのモデル化は現在開発段階であり、いくつか方程式は提案されているが、その妥当性、パラメータの設定の仕方に関する知見はまだ少ないと考えられる。

本章では、難水溶性有機化合物原液 (NAPL 原液と呼ぶこともある) の解析の必要性を明確にした後、モデルの構築を行う。本研究で構築したモデルは、従来の capillarity model<sup>18)</sup> に揮発項を加えたこと、そして残余 NAPL 飽和度に関するパラメータの設定法を工夫したという点で新しいものである。さらに、既往の実験値との比較を行い本モデルの検証を行う。さらに、実汚染現場への応用性や今後の発展性に関して述べる。

### 2. 原液挙動特性と解析の必要性

TCE、PCE、油類は基本的には水とは混じり合わない流体であり、NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) と呼ばれている。水よりも比重の大きなものを DNAPL (Dense NAPL)、水よりも比重の小さいものを LNAPL (Light NAPL) と称している。これら NAPL は、図6-1に示したように、地中に原液状態で浸透し、浸透した NAPL は揮発し一部は大気へ、一部は土壤水へ溶解し、土粒子に吸

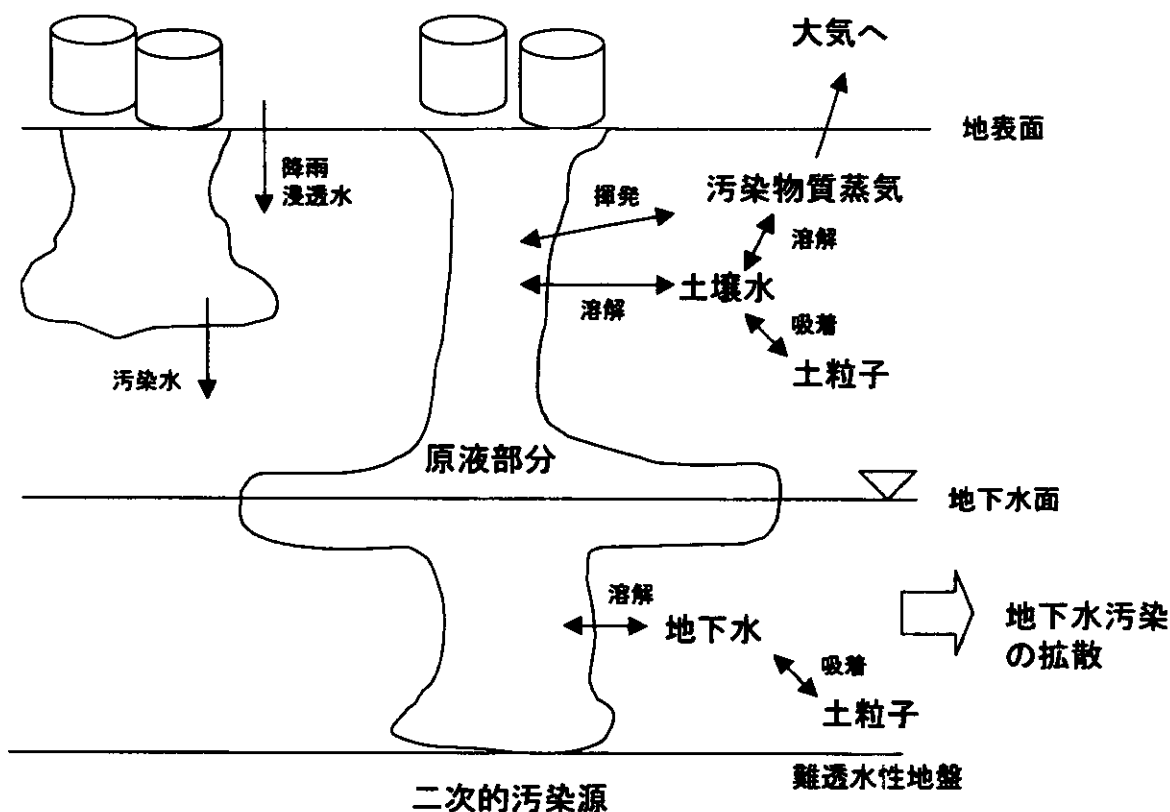


図6-1 土壤層内におけるNAPLの挙動(DNAPLの場合)



着する。そして地下水面まで達した原液は、わずかであるが水に溶けだし地下水汚染を引き起こす。また不飽和帯に停滞した NAPL に、降雨浸透水が通過することによって汚染水がさらに下方に浸透し、地下水汚染を引き起こす場合もある。原液相から水相への溶け出し速度は遅いので、長期的な地下水汚染の二次的汚染源となりうる。これまでの土壌・地下水汚染の解析では、5章における移流・分散解析のような水に溶けてしまった物質の輸送解析が主流であったが、実際の汚染現場の解析を行うにあたって、汚染物質原液の挙動も考慮する必要があるが以下の点を理由にあると考えられる。

- ・汚染物質原液の浸透深さ（不飽和帯に存在するか、飽和帯に存在するか）によって、大きく調査や修復対策の方針が異なる。例えば、不飽和帯に存在する場合、土壌掘削が可能な深さであれば、土壌掘削を行えばよい。また土壌掘削が不可能であればガス吸引法を行う必要がある。また飽和帯にまで浸透してしまった場合には、地下水汚染の拡散防止対策を中心に調査を広域的に行う必要があるし、修復対策も地下水の揚水等も含めた対策、長期的にはバイオレメディエーション等の対策が必要となってくる。したがって対策の初期段階においては、汚染物質原液の浸透深さを知ることが重要である。
- ・従来の数値シミュレーションの解析では、汚染源濃度を一定として扱う場合が多かった。しかし汚染物質原液挙動を明確にすることにより、具体的な地下水汚染の負荷量として定量的に汚染源を与えることが可能になる。また修復するに従い、汚染物質が回収され減衰していく様子を汚染物質の物質収支を考慮することにより表現可能となる。つまり、おおよその修復時間の推定を行うことが可能となる。汚染修復対策を講じる上で、修復費用の見積もりという観点からはおおよそ年オーダーで修復時間を見積もる必要がある。

### 3. 汚染物質原液挙動のモデル化

#### 1) 土壌層内における NAPL の存在形態

土壌層内における NAPL の存在形態は主に4つ考えられる（図6-2参照）。

- ①間隙内に原液として存在
  - ②間隙内に蒸気として存在
  - ③土壌水に溶解して存在
  - ④土壌粒子に吸着して存在
- さらに、物理化学的分解、微生物による分解による分解生成物が存在する。

本研究では、①と②の状態にある NAPL の挙動のモデル化を行う。つまり、地表面から汚染物質原液が下方へ浸透すると同時に、原液相から気相への揮発現象により原液相は減少し、間隙内を拡散して地表面から大気へ放出

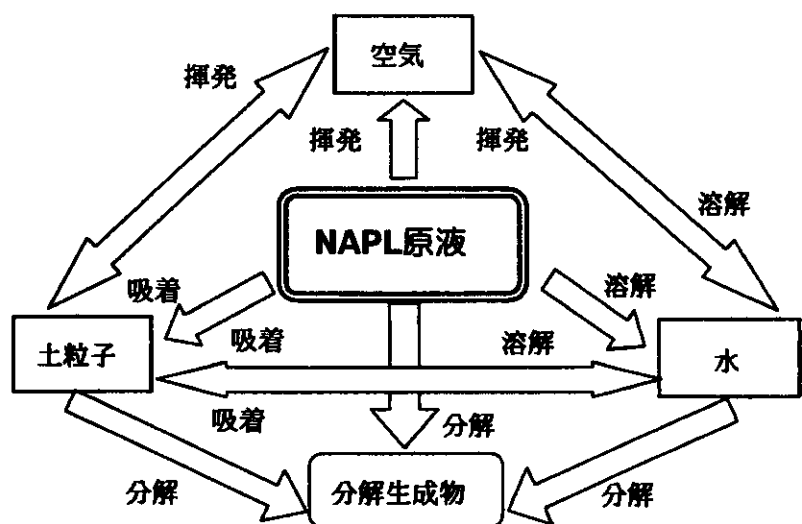
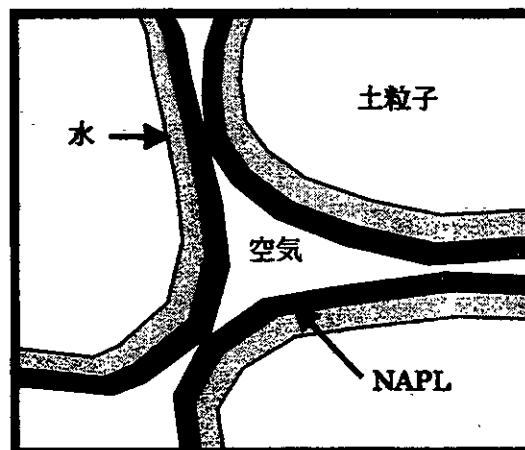


図6-2 土壌層内のNAPL原液の存在形態

する現象をモデル化した。土壌水や地下水への溶解、土粒子への吸着、降雨による溶けだしは考慮しなかった。

間隙内において NAPL 原液として存在する場合、図6-3に示すように土粒子の周りには水が存在する。ある領域の含水率が極めて小さい場合でも自然状態にある土粒子の周りには水膜としての水が存在する。また濡れ性(wettability)の順が、水-NAPL-空気の順であるので、水の周囲に NAPL が存在する。



NAPL 飽和度が十分大きいときは、間隙内を連続状態で存在するが、飽和度が小さくなると

図6-3 間隙内のNAPLの存在形態

間隙内での連続性が保たれなくなる。さらに滴となって間隙に存在し、間隙内に残り残されて不動となってしまう場合もある。このような状態にある NAPL のことを、残余 NAPL と呼んでいる。

## 2) 物質収支式

NAPL の土壌層内での挙動は、ダルシーの法則に従うと仮定されている<sup>18,19)</sup>。各相の物質収支式は、以下に示すとおりである。なお気相の圧力は大気圧で一定としている。従って気相は移動しない。

$$\text{NAPL 物質収支式} \quad \varepsilon \frac{\partial S_n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_s k_{rn}}{\mu_n} \rho_w g \left( \frac{\partial h_n}{\partial x} - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right) \right\} - \frac{\varepsilon S_a}{\rho_c} Q_{vol} \quad (1)$$

$$\text{水の物質収支式} \quad \varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_s k_{rw}}{\mu_w} \rho_w g \left( \frac{\partial h_w}{\partial x} - 1 \right) \right\} \quad (2)$$

また、ガス中に揮発した NAPL の物質収支式は、

$$\varepsilon S_a \frac{\partial C_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon S_a D'_a \frac{\partial C_a}{\partial x} \right) + \varepsilon S_a Q_{vol} \quad (3)$$

で与えられる。そして NAPL 原液からガス相への揮発量は、非平衡式<sup>20)</sup>を採用して、

$$Q_{vol} = -k_0 (C_a - C_s) \quad (4)$$

とした。ここで、添字、n : NAPL 相、w : 水相、a : 気相として、

$S_i$  : i 相の飽和度

$k_s$  : 固有浸透係数

$k_{ri}$  : i 相の相対浸透係数

$\mu_i$  : i 相の粘性係数

$\rho_i$  : i 相の密度

- $h_i$  :  $i$  相の圧力 (水頭換算)  
 $g$  : 重力加速度  
 $t$  : 時間  
 $\varepsilon$  : 間隙率  
 $C_g$  : ガス相における飽和 NAPL 濃度  
 $C_a$  : ガス相における NAPL 濃度  
 $k_0$  : 総括物質移動係数  
 $D'_a$  : 土壌層内における NAPL の拡散係数

### 3) 特性曲線

次に各流体の圧力と飽和度の関係 (特性曲線) について述べる。濡れ性の順序が、水、NAPL、空気の時以下の仮定が成り立つ<sup>21)</sup> (図5-3 参照)。

- ①空気-NAPL-水の3相が存在する時の水の飽和度は、水-NAPL間に働く毛管圧の関数であり、その関数関係は、NAPL-水の2相だけが存在する時の、水の飽和度と毛管圧の関数関係に等しい。  
 ②同様の条件の下、全液体飽和度は、NAPL-空気間に働く毛管圧の関数で、その関数関係は、NAPL-空気の2相だけが存在する時の、NAPLの飽和度と毛管圧の関数関係に等しい。

これらの仮定を、定式化すると、

$$S_w(h_{nw}) = S_w^{n-w}(h_{nw}) \quad (5)$$

$$S_i(h_{an}) = S_n^{a-n}(h_{an}) \quad (6)$$

$$S_t = S_w + S_n \quad (7)$$

ここで、上付文字は系を表す ( $n-w$ : NAPL-水系、 $a-n$ : 空気-NAPL系)  $S_t$ : 全体液体飽和度である。また、空気-水系の特性曲線が既知である場合は、スケーリングにより空気-NAPL系、及びNAPL-水系の各2相の系の特性曲線 ((5) 式、(6) 式の右辺部分) の推測が以下の定式化により可能である。

空気-水系の特性曲線 
$$S_{we} = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} = \left\{ 1 + (\alpha h_w)^n \right\}^{-1+1/n} \quad (8)$$

空気-NAPL系の特性曲線 
$$S_{ne} = \frac{S_n - S_{rn}}{1 - S_{rn}} = \left\{ 1 + \left( \alpha \frac{\rho_w}{\rho_n} \frac{\sigma_{an}}{\sigma_{aw}} h_w \right)^n \right\}^{-1+1/n} \quad (9)$$

NAPL-水系の特性曲線 
$$S_{we} = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} = \left\{ 1 + \left( \alpha \frac{\rho_w}{\rho_n} \frac{\sigma_{nw}}{\sigma_{aw}} h_w \right)^n \right\}^{-1+1/n} \quad (10)$$

ここで、

$S_{ie}$  :  $i$  相の有効飽和度

$S_{ri}$  :  $i$  相の残余飽和度

$\alpha, n$  : van Genuchten のパラメータ<sup>22)</sup>

(8) 式から (9) 式への変換は、石井ら<sup>23)</sup> によって TCE、TCA (1,1,1-トリクロロエタン)、トルエンで成り立つことが確かめられている。また Lenhard ら<sup>24)</sup> も、(8) 式から (9) 式、(10) 式への拡張性について実験で soltrol を用いて確認している。つまり、空気-水の特曲線が求められると、NAPL の密度と表面張力により、空気-NAPL 系の特曲線、及び NAPL-水系の特曲線を求めることができる。さらに (5) 式、(6) 式の関係より、空気-NAPL-水の 3 相が存在する時の特曲線が推測できるということである。

#### 4) 相対浸透係数

次に相対浸透係数に関して述べる。空気、NAPL、水の 3 相が存在する場合の各相の相対浸透係数に関しては、Parker ら<sup>25)</sup> がまとめている。以下の式を採用した。

$$\text{水の相対浸透係数} \quad k_{rw} = S_{wc}^{1/2} \left[ 1 - (S_{wc}^{1/m})^m \right]^2 \quad (11)$$

$$\text{NAPL の相対浸透係数} \quad k_{rn} = S_{nc}^{1/2} \left[ (1 - S_{wc}^{1/m})^m - (1 - S_{ic}^{1/m})^m \right]^2 \quad (12)$$

#### 5) 数値計算手法

数値計算は、(1) 式、(2) 式を以下のように変形する。

$$\varepsilon \left( \frac{\partial S_i}{\partial h_{an}} \frac{\partial h_{an}}{\partial t} - \frac{\partial S_w}{\partial h_{nw}} \frac{\partial h_{nw}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_s k_{rn}}{\mu_n} \rho_w g \left( \frac{\partial h_{an}}{\partial x} - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right) \right\} - \frac{\varepsilon S_a}{\rho_c} Q_{vol} \quad (1')$$

$$\varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial h_{nw}} \frac{\partial h_{nw}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_s k_{rw}}{\mu_w} \rho_w g \left( \frac{\partial (h_{an} - h_{nw})}{\partial x} - 1 \right) \right\} \quad (2')$$

(1') 式、(2') 式において、 $h_{an}$ 、 $h_{nw}$  を変数として解く。また (3) 式も連立して解いた。数値解法は、計算領域に関して差分近似により離散化を行った後、陽解法により解いた。

## 4. モデル化の検証

### 1) 残余 NAPL 飽和度の設定

モデルの検証の前に、残余 NAPL 飽和度に関して述べる。残余 NAPL 飽和度とは、NAPL が間隙内を浸透する際に間隙中に取り残されてしまう量を飽和度で表現したものである。取り残された NAPL は、X 線解析により不連続な流体として間隙内に存在することが確かめられている<sup>26)</sup>。また水の上に NAPL がまかれたときの存在形態を表す広がり定数 (spreading coefficient:  $\Sigma = \sigma_{av} - \sigma_{an} - \sigma_{nw}$ )<sup>27)</sup> を考える。この値が正の時は NAPL は水の上に薄い膜を形成し広がる。一方負の場合は、広がらずに水の上で球状に存在する<sup>27)</sup>。ちなみに TCE の場合  $\Sigma$  の値は 8.25 であり、水と TCE が接触した瞬間は水の上に薄い膜として TCE は存在する。しかし、接触している間に TCE 相から水相へ溶