

## 6. シミュレーションを行うための調査データに関する考察

シミュレーションを行うためには、調査データが不可欠である。ここで、シミュレーションを行う上での調査項目を整理する。ただし、あくまでも調査の目的はシミュレーションを行うことになってはいけない。汚染状況を把握し、汚染修復を行うことを目的としている。表2-1に地下水流れ場の推定、汚染物質濃度場の推定に必要な調査データを、既存情報として得られるデータと現場調査によって得られるデータ別に整理を行った。ポイントのみ述べると、地下水流れ場の推定は、水みちのような局所的な流れと広域的な地下水流れ両方を常に把握することを心がける必要がある。そのためには、既存情報よりサイト周辺の航空写真や過去のボーリング調査によって得られた地質柱状図や地下水位データの収集が不可欠である。また既存井戸の分布を把握し、地下水位などのデータを効率よく利用することが重要である。現場調査では、上流側と下流側にボーリングを行うことと、できれば基盤深さを把握できるほうが望ましい。そして観測データの信頼性といった観点から、地下水位を測定する際には一斉モニタリングを心がける必要があり、さらに季節変動、降雨との関連、河川との関連も把握する必要がある。また地下水流れをシミュレーションする上で重要なのが境界条件の設定の仕方、計算領域の設定と共に専門家による十分な現地調査が必要である部分である。

汚染濃度場の推定に関しては、その汚染形態によって大きく異なる。基本的には汚染物質の種類、性状、物質名が必要であるが、どのような経路で地下に浸透したかといった汚染機構が明らかにならなければ汚染源のモデル化を行うことはできない。特に汚染物質が水に溶けて地下に浸透しているのか、難水溶性の汚染物質原液が地下に浸透したのか、既に埋められている廃棄物と地下水が接触して汚染が生じたのかによって、大きく汚染源のモデル化が異なると考えられる。表2-2に地下水汚染の解析における汚染源のモデル化のパターンを示す。このパターンを念頭に調査を行うべきである。

表2-2 地下水汚染に対する汚染源のモデル化のパターン

汚染源存在場所	地下水汚染に至るシナリオ	
地上	汚染水が地中に浸透	地下に二次的汚染源として存在(地下の項目へ)
	汚染物質原液が地下に浸透	
地下	地下水面よりも上方(不飽和帯)	廃棄物層、或いは汚染物質原液を通過した汚染水の下方浸透
	地下水面よりも下方(飽和帯)	廃棄物層、或いは汚染物質原液からの溶けだし

次に、シミュレーションに必要な調査の程度に関して考察を行う。調査データが多ければ多いほど正確なシミュレーションを行うことができると考えられがちであるが、100%正確なシミュレーションを行うことを最優先するならば、無限に調査を行わなくてはならず現実的には無理である。また正確な調査データが得られたとしても、モデル化の段階で汚染現場の単純化、抽象化を既に行っており、シミュレーションにより汚染現場を100%模擬することは不可能である。本研究では、このような問題に対して調査の段階とその段階で必要とされるシミュレーションの目的、内容を整理することによって必要とされる調査の質を、(例えばボーリング数といった)数という定量的な議論ではなく、調査のポイントという定性的な議論としてまとめることを試みた。表2-3に調

表2-1 シミュレーションを行うための調査項目

調査項目	調査項目		調査項目		調査項目		調査項目	
	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目
地下水流れ場	地形・地質	地形・地質	地形・地質	地形・地質	地形・地質	地形・地質	地形・地質	地形・地質
	気象条件	気象条件	気象条件	気象条件	気象条件	気象条件	気象条件	気象条件
1	周辺井戸	周辺井戸	周辺井戸	周辺井戸	周辺井戸	周辺井戸	周辺井戸	周辺井戸
	河川等水位	河川等水位	河川等水位	河川等水位	河川等水位	河川等水位	河川等水位	河川等水位
2	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点
	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点

調査項目	調査項目		調査項目		調査項目		調査項目	
	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目	調査項目
汚染物質調査	汚染物質に関する基礎情報	汚染物質に関する基礎情報	汚染物質に関する基礎情報	汚染物質に関する基礎情報	汚染物質に関する基礎情報	汚染物質に関する基礎情報	汚染物質に関する基礎情報	汚染物質に関する基礎情報
	汚染物質	汚染物質	汚染物質	汚染物質	汚染物質	汚染物質	汚染物質	汚染物質
1	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点
	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点
3	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点
	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点	観測点

表2-3 調査データと数値シミュレーションの対応関係

調査段階	調査内容 (情報)	調査特性	シミュレーション結果の内容	シミュレーション結果から判断できること	利用段階
①	現場に関する情報 ・地形地質情報 ・気象条件の情報 ・周辺井戸情報 ・河川水位等の情報 汚染に関する情報 ・現場に関する情報 ・汚染物質の情報	実際に作業・工事が始まる前の段階に得られる情報。	調査データが少なく、シミュレーションは行えない。	汚染現場に対し、シミュレーションを用いるという前提の下で、シミュレーションを考慮した調査の計画・実施の必要あり。	修復対策選択プロセスには利用できない
②	現場・汚染に関する情報 ボーリング調査 測量 水位調査	ボーリング調査をする。	・地質構造は推定できない。 ・大略的な地下水流れ場・汚染濃度場しか推定できない。	適切な位置でのボーリング調査を行い、地質構造の推定、より正確な地下水流れ場と汚染濃度場の推定を目指す。	
③	現場・汚染に関する情報 ボーリング調査	ボーリング調査は ・対象領域の上流、下流 ・境界条件となるポイント ・基盤深さの確認 ・広範囲に考慮して行う。	・地質構造は推定できる。 ・大略的な地下水流れ場が把握できる。 ・汚染状況が把握できる。	・修復対策の必要性が判断できる。 ・修復プロセスの計画段階（技術の比較・検討）に利用できる。	修復の計画策定段階に利用できる。
④	現場・汚染に関する情報 追加ボーリング調査 揚水試験	揚水試験を行い、透水係数等のパラメータの改善を試みる。	汚染分布に関して、より精度の高い結果が得られる。	・設計段階に利用できる。（対策の設計の根拠にするため、前段階より精度をあげる）ことが望まれる。	具体的な修復設計に利用できる。
⑤	現場・汚染に関する情報 モニタリング 実証試験	実証設計し、予測されていた結果と観測結果を比較しモデルを修正する。	より現実的な条件下で、信頼できるシミュレーション結果を得られる。	・シミュレーションの精度はかなり改善されたが現実的な状況下で利用するので、必要であれば更に調査を加え改善する。	対策後の運転管理維持に利用できる。

査データと数値シミュレーションの対応関係をまとめる。調査の段階②においては、ボーリング調査を行っているので、地質構造さえ把握できれば地下水流れ場の推定など数値シミュレーションを行うことができると考えられるが、調査段階②では修復技術選択を目的としたシミュレーションは行うことはできないと考えている。行ったとしてもその結果は信頼できない。その最大のポイントは、同じボーリング調査でも、

- 1) 対象領域の上流、下流側の地層、地下水位を把握していること
- 2) 計算上の境界条件となるポイントでの観測値が存在すること
- 3) 不透水層となる基盤までの深さが確認されていること
- 4) サイト周辺の地層、地下水位も含めた広範囲な測定データを基にしていること

が重要である。この要件がクリアされていればその結果は、修復技術の効果の比較を行うなどの修復計画策定段階に使用できると考えられる。本研究で行おうとしている解析は調査段階③に相当する。調査レベルとしては決して高いレベルにあるとは言えない。また得られたシミュレーション結果もどの程度信頼性があるのか簡単には判断できない。恐らく現場での物理現象を把握するという目的に立てば、結果の信頼性は低いかもしれない。しかし、このような不確定要素の存在を認め、シミュレーションの結果の限界を認識し、次段階へ向けての意志決定をしなくてはならない。完全な調査が済んでから、シミュレーションを行い、修復対策を行ってはいは手遅れになってしまう場合も考えられる。つまりシミュレーションを完全に行うことを最終目的としてしまうの本末転倒であり、修復対策のための意志決定が遅れてしまうのである。

さらに揚水試験を行い透水係数のパラメータの改善を行うことにより、揚水量や揚水位置の決定など具体的な修復技術の設計段階に使用することができる。また実証実験、施行後のモニタリングの結果等を用いて継続的なパラメータの改善を行えば、運転維持管理段階にもシミュレーション結果が使用でき、モデルの事後評価を行うことが可能となる。

## 7. 既往の研究と問題点の整理

これまで広域的な地下水管理のために地下水流動モデルを用いた数値シミュレーションの例は数多く見られる<sup>4)</sup>。また地下水汚染モデルに関しては、藤崎<sup>5)</sup>が整理を行っている(表2-4参照)が、飽和帯における水溶性物質の移流分散輸送シミュレーションに関しては実用段階にあり実施例も多い。但し、これは汚染物質輸送シミュレーションが実用化できる所まで開発され、さらに汚染現場へ適用した実績があることを示しているだけであり、汚染現場へどのように適用するかというところまではきちんとした議論がされていないと考えている。また図よりトリクロロエチ

表2-4 地下水汚染モデルの区分<sup>5)</sup>

汚染物質		水溶性汚染物質				非水溶性汚染物質			
		低濃度(水密度一定)		高濃度(水密度変化)		非揮発性		揮発性	
		保存系	非保存系	保存系	非保存系	保存系	非保存系	保存系	非保存系
地下水	空気のみ					◎			
	水・空気	○	○	○	○	△	△	△	△
飽和帯	定常流	移流のみ	◎						
		移流分散	◎	◎	◎	□	□	□	△
	非常常流	移流分散	○	○	□	□			

注) モデルの発展段階 実用化段階(実施例多)◎ 実用化段階(実施例少)○ 開発段階 □ 研究段階 △

レン原液が地下に浸透する場合のような難水溶性汚染物質（比水溶性汚染物質）の浸透現象や揮発現象、溶解現象を伴うシミュレーションは未だ開発段階であり、現場での実施例は少ないと思われる。

また数値シミュレーションにより様々な最適問題が扱われている。森澤<sup>6)</sup>は埋立地を対象に汚染物質輸送解析を行いモニタリング井戸群の適正配置問題を扱っている。また揚水井戸の最適配置、最適揚水量の決定に関する研究も数多く存在する<sup>7,8,9,10)</sup>。またシミュレーションの実汚染現場への適用に関しては、汚染状況を的確に表現するためのパラメータ同定手法に関する研究が多い<sup>11,12,13)</sup>。しかし、シミュレーションの結果を用いて修復技術の選択を行った例は少ない。Amin et al. (1991)は、スーパーファンドプログラムにおける修復対策技術選択において地下水汚染シミュレーションの結果を用いて技術選択を行っているが、シミュレーションの汚染現場への適用手順については多く触れてはいない<sup>14)</sup>。

以上列挙した既往の研究をまとめると、汚染の拡散予測や解析のためのパラメータ同定を目的としたシミュレーションの適用は多い。また揚水井戸の最適配置に関する研究も多い。しかし、汚染修復技術の選択を目的とした解析例はわずかであると言える。つまり、土壌・地下水汚染対策における目的は本来、汚染を修復するというだけでなくはならないのに、シミュレーションを行うことが目的といった研究報告が数多くなされているということを反映していると考えられる。本研究では、汚染現場の修復にシミュレーションを用いることによって何ができるのか、またモデル化及びシミュレーションを行うためにはどのような条件が必要であるかという観点に立ちその適用方法、手順を明らかにする必要があると考えている。

以下に問題点を整理する。

- 1) 水溶性物質だけではなく、難水溶性の物質に対するモデル化及びシミュレーション技術を開発し、汚染源現場へ適用する必要がある。
- 2) 汚染拡散予測のみを目的とした解析ではなく、汚染現場の修復を目的とした解析を行う必要がある。そのためには修復技術の選択にシミュレーションを使用するための適用条件、適用手順を明らかにする必要がある。

これらの問題に対し、4章及び5章では修復技術の選択を目的として、実汚染現場に対するモデル化を行い、さらに修復技術選択に数値シミュレーションを実際に用いて修復代替案を提案することにより汚染修復対策においてシミュレーションを使用する条件、適用手順を示す。また、6章では難水溶性有機化合物原液の土壌層内における浸透挙動を表すモデルを構築し、その汚染現場への応用性を示すことにする。

## 8. 要約

本章では、汚染修復対策における数値シミュレーションの位置づけ、役割について述べた。特に重要な点を列挙すると、以下にまとめられる。

- 1) 土壌・地下水汚染対策において、数値シミュレーションとは調査と対策の意思決定の間を有機的につなぐという重要な役割を持つ。
- 2) 特に、シミュレーションを行うことにより、予め解析のために必要な調査項目が明らかになっ

たり、再調査しなくてはならない部分が明確になるなど、調査にフィードバックされる部分があること。また修復の必要性、修復効果の比較により修復代替案の選択が行えるなど、修復対策における意思決定にも重要な役割がある。

- 3) 汚染現場に対してシミュレーションを行う上で必要な調査データをまとめることができた。調査項目は大きく、地下水流れ場を推定するための調査と、汚染濃度場を推定するための調査に分かれる。地下水流れ場の推定のためには、常にローカルな流れと広域的な流れ両方を把握しながら調査を進めることが重要であることを示した。また汚染濃度場の推定のためには、汚染源である廃棄物そのものの質や量に関するデータが不可欠であり、汚染機構によってモデル化が異なることが分かった。
- 4) また調査の段階とシミュレーションによって行える意思決定に関する簡単な表を作ることができた。汚染修復技術選択の意思決定を行うためには、ただボーリング調査を行えば良いのではなく、その調査のポイントをおさえることが重要であることを述べた。
- 5) 既往の研究のレビューにより、地下水に溶解する物質の移流・分散解析は実用段階にあるものの、実際の汚染現場に適用され、汚染修復対策の修復技術選択に用いられた例が少ないことが分かった。よって、その適用方法を明確にする必要がある。
- 6) 水には混合しないトリクロロエチレンのような難水溶性有機化合物原液のモデル化は、開発段階であり、研究例が少なく、かつ実汚染現場への適用例も少ないことが分かった。

## 第2章 I市を対象とした汚染修復対策の考え方

### 1. 緒言

本章では、本研究で対象とするI市についての対策方針について、調査結果及び当該サイト特有の汚染状況からどのようなプロセスを経て対策方針が決定されたかを述べる。本研究はシミュレーションの適用に関する研究であるが、何度も述べるようだがシミュレーションを行うことそれ自体が目的ではない。汚染修復のためにシミュレーションを適用するという立場に立てば、何のためにシミュレーションを適用するのかといったことを明らかにする必要がある。本章では、そのような理由により、I市に対する汚染修復対策方針の決定プロセス、そして応急対策の手順、及びシミュレーションを行う必要性が生じた経緯について述べる。

### 2. 汚染概要とこれまでの調査内容<sup>15)</sup>

I市に存在する不適正保管現場には、有機塩素化合物、廃油類が入ったドラム缶が約55000本が不適正に保管されている。昭和60年頃より事業者所有の敷地内に、ドラム缶の野積みが始まり、最大で7段まで積み上げられていた。汚染現場周辺の地図とドラム缶が保管されている箇所区画(1~12)を図3-1に示す。また保管ドラム缶の状況の写真を図3-2、3-3に示す。これまで行われた調査のフローを図3-4に示す。

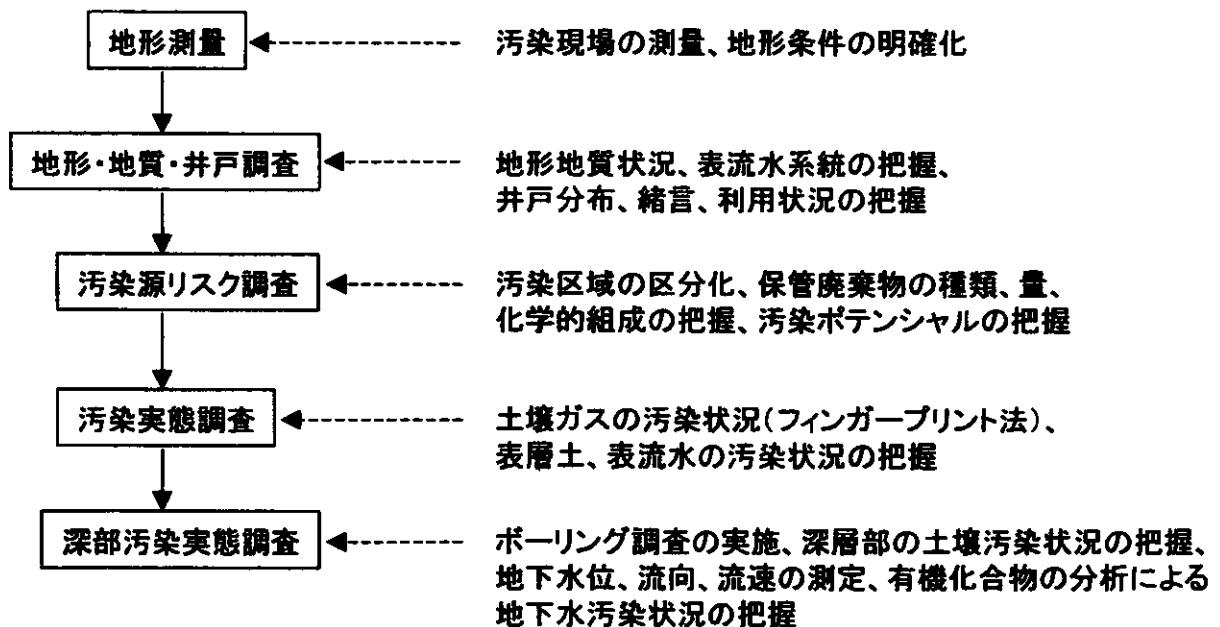


図3-4 I市不適正保管現場におけるこれまでの調査

これまでの調査結果を要約すると、以下ようになる。

#### 1) 汚染源

- ・ドラム缶の保管量が絶対的に多い(約55000本)。
- ・不適正に保管されているドラム缶の内容物は、多種の重金属類及び有機塩素系化合物が溶出試験より確認された。

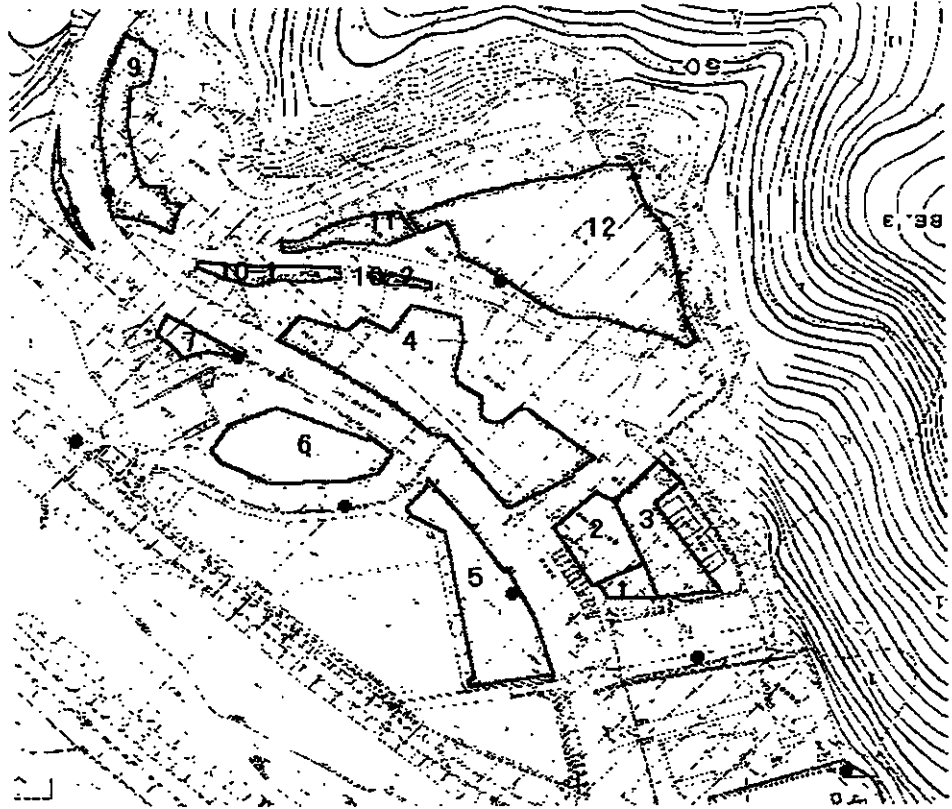


図3-1 I市不適正保管現場周辺地図とドラム缶保管区画図



図3-2 不適正保管現場写真(1)



図3-3 不適正保管現場写真(2)



- ・保管されているドラム缶は、ほとんどが腐食又は孔食し、あるいは座屈し、崩落したりして、内容物が大気中に揮発するとともに、表面流出、地下浸透し、周辺環境への汚染源となっており、現在もそれが防止されずに進行している。
- ・一部の地区では、ドラム缶の埋め込みが行われていた。

#### 2) 表層土壌（深度0m～1mの範囲）の汚染に関する問題点

- ・土壌汚染調査により、保管敷地内の土壌は、広範囲かつ高濃度に汚染していた（テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、トリクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタン等が特に高濃度で検出された）。
- ・保管敷地内土壌は、一部で鉛が土壌環境基準を超過していた。
- ・汚染源物質や既に汚染された土壌が埋められており、表面上汚染が隠されている部分もある。

#### 3) 表流水

- ・保管敷地内の浸出水集水溝の6地点で、最高6物質の有機塩素系化合物が排水基準を超過していた。

#### 4) 深層土壌（深度2m以深）

- ・土壌調査により、保管敷地内の土壌は、一部の地点で7mの深度まで連続して、多種の有機塩素系化合物が高濃度に汚染していることが確認された。
- ・但し、これはドラム缶を土砂で埋め込んだ部分であり、ドラム缶の内容物の可能性が高い。

#### 5) 地下水

- ・表層土壌及び深層土壌の汚染が確認された部分の地下水は、多種の有機塩素系化合物により高濃度に汚染していた。
- ・地下水は、第三紀層の上に堆積する第四紀層に存在する不圧地下水と考えられ、その流向は一部を除き、地形に沿って河川方向へ流れていたが、その流れに沿って汚染物質は容易に敷地外へ流出する条件を備えていると考えられる。

### 3. 汚染修復対策の考え方

このような汚染現場に対して、どのような方針で汚染修復対策を進めるかを述べる。まず汚染現場の修復を行う場合、

- ①複合的物質により汚染されていること。
- ②恒久的な対策を実施した場合、かなりの期間が必要と考えられ、この間にも汚染は着実に進行している状態であること。
- ③廃棄物中には有害物質が多く含まれており、ドラム缶毎に中味の物性が異なっていること。
- ④ドラム缶の数で約55000本と推定され、腐食が著しく、破れて廃棄物が流出したのも多数存在していること
- ⑤保管場所が傾斜地を造成したもので、雨水や汚染水の排水管理が難しいこと。
- ⑥既に隣接民家の井戸の汚染が認められており、その対策は緊急を要すること。

等の問題が存在し、それらを一時に解決していくことは、経済的にも、時間的にも、物理的にも限界がある。このような汚染状況では、2章で述べたように緊急度の高い部分から段階的に対策を講ずることが重要である。そこで、表3-1に示すように3段階に分けて対策を講ずることにし、

表3-1 修復対策マトリックス

段階 媒体	最緊急対策	応急対策	恒久対策
現時点 の目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>・表流水の敷地外への流出を防ぐ(地下水も含む?)</li> <li>・雨水の敷地内への侵入を制限する</li> <li>・汚染された表流水を処理、処分する</li> <li>・汚染された地下水の敷用を防ぐ</li> <li>・サイト内の労働者の安全性を確保する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・敷地内の廃棄物を撤去し、適正な処理、処分を行う</li> <li>・雨水の敷地内への侵入を制限する</li> <li>・汚染された表流水を処理、処分する</li> <li>・汚染された地下水の敷地外への拡散を防止する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土壌、表流水、地下水などの全ての媒体を、それぞれの媒体に適切なる基準を満足するまでに原状を回復する。</li> </ul>
表流水	① モニタリング ② 流出・拡散防止対策 ③ 流出・拡散防止対策+処理・処分対策	流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策 流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策 流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策	流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策 流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策 流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策
地下水	① モニタリング(行政指導) ② 流出・拡散防止対策+処理・処分対策	流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策 流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策	流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策 流出・拡散防止対策 → 処理・処分対策
ドラム缶	① シートを被せる ② シートを被せる ③ シートを被せる 除去(保管)対策	除去(保管)対策 → 処理・処分対策 除去(保管)対策 → 処理・処分対策	除去(保管)対策 → 処理・処分対策 除去(保管)対策 → 処理・処分対策
土壌		拡散防止対策 → 処理・処分対策	処理・処分対策
大気	モニタリング		

評価

効果  
通用性(施工性)  
コスト

各段階、各媒体毎に大略的な対策（モニタリング、流出・拡散防止対策、除去（保管）対策、処理・処分対策）をどのように位置づけて行うか検討した。結果として、以下に示す3段階で対策を進めることにした。

第一段階：最緊急で対策が必要とされるもの（最緊急対策）

- 1) 表流水の敷地外への流出防止対策
- 2) 作業や近隣住民の生活環境に係わる指導

第二段階：応急的な対策として位置づけられるもの（応急対策）

- 1) 汚染源であるドラム缶の撤去、一時保管、処理（主に運搬可能なドラム缶を対象）
- 2) 場内表流水、地下水の遮断による流出拡散防止対策

第三段階：恒久的な対策として位置づけられるもの（恒久対策）

- 1) 第二段階で運搬できなかったドラム缶の処理及び汚染土壌の浄化
- 2) 汚染地下水の浄化
- 3) 跡地の利用対策

このようなマトリックスを作成することで、どの媒体に対して、どのようなタイミングで対策を講じるべきかを整理することができる。また対策の時間的なつながりを考慮することが可能であり、汚染修復の対策方針を具体化するのに役に立つ。

#### 4. 修復技術に関する情報収集

次に、当該汚染現場に適用の可能性のある技術を整理した。表3-1に示した各マトリックスに相当する修復技術を記入すると表3-2になる。これをもとに各段階における修復代替案を考えることにする。

#### 5. 緊急対策の考え方

表3-1の修復対策マトリックス、及び表3-2の技術分類から、最緊急対策の代案の例として表3-3のように考えた。最緊急対策の考え方として、現在の汚染状況から保管敷地内の表流水の汚染が確認されていること、また敷地内の汚染表流水が敷地外へ越流する恐れのあることを最重視し対策を講ずることとした。

また表流水の水処理施設に関する考え方として、早急に施設を設置し適正に水処理を施すことが求められたが、時間的、コスト的制約、そして何よりも今後の対策との関連性において、調査などを行ってから適切な規模の水処理施設を設置した方が、結果的に効率の良い対策が行えるものと判断し、応急対策で水処理施設を講ずることとした。

さらに地下水の汚染拡散防止対策として、遮水壁、地下水揚水等の技術が考えられたが、現段階における地下水に関する情報乏しく、当該現場の地質水文的把握が今後必要と判断されたことから、地下水に関する対策調査も含め、応急対策で行うこととした。但し、基盤深さを把握するためのボーリングのみ先行して行うこととした。

表3-2 修復技術整理

調査 現場地質構造の把握(主として〇川寄り)  
 処理対象物質の濃度  
 処理対象媒体のボリューム・・・地下水面積×降雨量  
 最小限度の地質調査(特に〇川寄り)

媒体	最緊急対策	応急対策	恒久対策
表流水	<p>&lt;流出・拡散防止技術&gt;                      農業用水路を暗渠にする                      雨水集水水路の新設・修復                      斜面上流側にU字溝を設置                      &lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      小規模汚染水貯留槽+処理(凝集分離+砂濾過+活性炭吸着)                      田の終末に排水処理装置                      表流水の処理</p>	<p>&lt;流出・拡散防止技術&gt;                      敷地周辺に排水溝を整備                      &lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      表流水調整地+処理                      集水された汚染水の簡易処理システム</p>	<p>&lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      汚染水(高濃度レベル)の高度処理システム</p>
地下水	<p>&lt;流出・拡散防止技術&gt;                      地下水の遮断                      &lt;汚染媒体の除去技術&gt;                      焼却場付近の地下水揚水                      &lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      水処理</p>	<p>&lt;流出・拡散防止技術&gt;                      アースカット工法(汚染地下水抜散防止)                      連防止水壁工法、薄型止水壁工法                      &lt;汚染媒体の除去技術&gt;                      敷地内の地下水位を下げる+調整地+処理                      &lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;</p>	<p>&lt;汚染媒体の除去技術&gt;                      テュアルポンプによる浮上油の回収                      エアースパージ法                      地下水揚水技術                      &lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      地下水(低濃度レベル)の処理システム                      水処理技術</p>
ドラム缶	<p>ドラム缶にシートを被せる                      &lt;汚染媒体の除去技術&gt;                      ドラム缶の撤去                      ドラム缶のハンドリングに関する提案</p>	<p>&lt;汚染媒体の除去技術&gt;                      クローズドシステム処分場、T&amp;OHシステム                      遠隔操作装置付きドラム缶撤去機械</p>	<p>&lt;汚染媒体からの汚染物質の分離技術&gt;                      &lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      スラッジ射出型ロータリーキルンによる焼却溶融処理                      ロータリーキルン等による焼却/熱分解技術                      不適正保管廃棄物、土壌の焼却処理                      土壌の間接加熱キルンによる熱処理</p>
土壌		<p>&lt;流出・拡散防止技術&gt;                      構設板:ガランパイル工法</p>	<p>&lt;汚染物質の分解/安定化技術(サイト外)&gt;                      &lt;願位置での汚染物質の分解/安定化技術&gt;                      電気化学的汚染土処理工法                      汚染土埋戻位置不溶化処理                      原位置における6価クロムの還元不溶化                      &lt;汚染媒体からの汚染物質の分離技術&gt;                      真空吸引処理                      真空抽出法(土壌ガス抽出法)                      &lt;汚染媒体の除去技術+汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      無人化掘削機械                      油汚染土バイオレメディエーション                      高性能不溶化プラント                      悪臭防止技術:フォームシールド工法                      油汚染土の土壌洗浄                      テラスチーム法(水蒸気蒸留法)                      掘削-地上土壌パイル吸引システム                      &lt;汚染媒体の除去技術+汚染物質の分解/安定化技術(サイト内)&gt;                      封じ込め技術</p>
大気	<p>&lt;モニタリング&gt;                      大気のモニタリング</p>		

表3-3 最緊急対策の代替案の提示

		代替案					
		1	2	3	4	5	6
対象媒体	内容(目標)	各媒体のモニタリングを行い監視する共にドラム缶にシートを被せる	基準+敷地内外の接点に列し、表流水が敷地外に流出しないよう簡易工事を行う	基準+雨水集水路、U字溝を作り、降雨時の表流水を迂回させる	No.3+集水した水を、調整地で貯留し、水処理を施し、仁井田川へ放流	No.3+敷地境界に遮水壁を設け、地下水の敷地外への流出を防ぐ	No.4+敷地内の地下水水位を下げ、さらに敷地外への汚染物質の流出を防ぐ
	要案技術	モニタリングのみ(基準)	基準+簡易工事のみ	基準+雨水迂回	基準+雨水迂回+表流水処理	基準+雨水迂回+表流水処理+遮水壁	基準+雨水迂回+表流水処理+遮水壁+地下水補水処理
表流水	モニタリング	○	○	○	○	○	○
地下水	雨水集水路・U字溝調整池+処理処分	○	●(簡易工事)	○	○	○	○
	モニタリング(行政指導)	○	○	○	○	○	○
ドラム缶	遮水壁	○	○	○	○	○	○
	揚水+処理	○	○	○	○	○	○
土壌	シート	○	○	○	○	○	○
	ドラム缶の撤去(保管)	○	○	○	○	○	○
大気	モニタリング	○	○	○	○	○	○
評価	効果	降雨時に仁井田川に流出する可能性あり 原状と変わらない					
	適用性				水処理量、水質濃度のデータが必要	調査を必要とする	調査を必要とする
	コスト						

○:代替案1の内容 ●:代替案1に追加した内容

注: その他に、作業者の労働環境や住民対策として、行えるものを検討する  
例: 広報活動、関係住民への周知、連絡系統の確認など

## 6. 応急対策の考え方

応急対策代替案の例を表3-4に示す。また応急対策全体の作業を大きく、次の4ステップに分割し、修復媒体とおおよその時間軸をイメージしたものが表3-5である。

- step1: 流出拡散防止対策の施行、ドラム缶撤去準備
- step2: 流出拡散防止対策の実行、効果確認、ドラム缶撤去
- step3: 水処理施設稼働、ドラム缶の処理・処分
- step4: 撤去可能なドラム缶の撤去終了

応急対策を実施する期間は、2~3年程度の短期間を想定しているが、この間に同表に示したような各種調査の詳細な結果も必要としており、それを受けて基本設計、実施設計、施設の建設等多様な対応をする必要がある。

表3-5を中心に議論を進めた結果、応急対策として次に掲げる3つの項目についての対応が必要であることを提案することにした。

### 1) 表流水・地下水対策

- ①場内に浸入する雨水などの表流水を制限する（外周雨水工）
- ②場内及び敷地境界に、遮水壁（又は綱矢板）を設置し、敷地外への汚染物質の流出・拡散を防ぐと共に、場合によってはドラム缶撤去時の非汚染土壌の保護を想定した対策も考慮する。
- ③さらに遮水壁を設置した後、場内の地下水を汲み上げ、汚染表流水とともに水処理を行う。

### 2) ドラム缶撤去対策

- ①撤去すべきドラム缶を同定し、その際運搬の可能性を評価する。
- ②ドラム缶の内容物の洗い出しを最小限に抑えるために、特に緊急度の高いドラム缶が設置されている領域にシートをかぶせる。
- ③ドラム缶を一時保管する場所をサイトまたは近隣に設置し、ドラム缶を一時保管すると同時に、ドラム缶の内容物を適切に処理・処分するために仕分け作業を行う。
- ④又ドラム缶を撤去した後は、汚染の拡大を最小限に止めるために、恒久対策が行われるまで土壌表面をシートで覆う。また運搬が困難であると判断されたドラム缶については、恒久対策でその処理を講ずることとし、シートをかぶせるなどの処置をし、できる限り汚染拡大の防止対策を行う。
- ⑤一時保管されたドラム缶及び内容物に関しては、サイト内または近隣に設置された処理・処分施設（焼却・溶融施設）で処理を行うか、または外部の業者に運搬・処理・処分を委託する。

### 3) 調査

応急対策の一環として、表流水・地下水対策を実施する上での運転条件や、その対策の効果、また今後の恒久対策に向けての基礎的なデータを得る目的で、次の調査を行う。

- ①遮水壁を設置する前に、場内の水理定数を算出する目的で、揚水試験を行う（第一次揚水試験）。
- ②また水処理プラントの設計の修正、最適化を行うために、処理対象水量、水質に関する調査を行う。
- ③遮水壁設置後、その効果を確認するための観測孔を設置し、運転揚水量を決定するために、揚水試験を行う（第二次揚水試験）。
- ④ドラム缶の一時保管場所で作業を行う労働者の健康の保全、周囲環境の二次汚染を防止する目的で定期的なモニタリング調査を行う。

表3-4 応急対策の代替案の提示(例)

対象媒体	内容(目標)目標の設定	代替案				
		1	2	3	4	5
表流水	表流水 pH,COD,BOD,SS,大腸菌数を排水基準以下に処理して、放流する	表流水、地下水 pH,COD,BOD,SS,大腸菌数を排水基準以下に処理して、放流する 地下水の拡散防止対策も同時に行う	表流水、地下水 〇〇の水質基準項目を排水基準値まで処理し、放流する。 地下水の拡散防止対策も同時に行う	No.2に、 サイト内での廃棄物処理を追加 (土壌に綱矢板を打ち込み、ドラム缶撤去時の汚染の拡散を防止する)	No.2に サイト外での廃棄物処理(既存の業者に委託)を追加 (土壌に綱矢板を打ち込み、ドラム缶撤去時の汚染の拡散を防止する)	
地下水	雨水 雨水調整池+水処理	表流水、地下水 基準+遮水壁+地下水標準+処理(低)	表流水、地下水 基準+遮水壁+地下水標準+処理(高)	No.2+ 処理処分(サイト内)	No.2+ 処理処分(サイト外)	
ドラム缶	保管場所の確保 撤去 処理・処分	表流水、地下水 基準+遮水壁+地下水標準+処理(低)	表流水、地下水 基準+遮水壁+地下水標準+処理(高)	No.2+ 処理処分(サイト内)	No.2+ 処理処分(サイト外)	
土壌	綱矢板	表流水、地下水 基準+遮水壁+地下水標準+処理(低)	表流水、地下水 基準+遮水壁+地下水標準+処理(高)	No.2+ 処理処分(サイト内)	No.2+ 処理処分(サイト外)	
評価	効果	表流水による汚染物質の敷地外への流出は防げる。地下水による流出の可能性ある	表流水、地下水による汚染物質の敷地外への流出は防げる。	表流水、地下水による汚染物質の敷地外への流出は防げる。	表流水、地下水による汚染物質の敷地外への流出は防げる。 (ドラム缶撤去時の汚染の拡散を防げる)	
	適用性	項目?				
コスト	ランニングコスト 建設費 運搬費					

○:代替案1の内容 ●:代替案1に追加した内容

代替案の目標設定 → 要素技術の組み合わせにより代替案のフレームを作成する  
 条件設定を統一する → 不明な条件を調査、連絡する

各社要素技術要素ごとに評価項目を埋める → 代替案ごとに評価項目をまとめる

表3-5 応急対策のスケジュールと技術との対応

	表流水	地下水	土壌	ドラム缶	調査
step 1 流出・拡散防止対策の施行 ドラム缶撤去準備(一部撤去)	<p>外漏防止工(UP溝)</p> <p>〈鋼板〉 カンバイ処理 〈運水車〉 アースカット工法 運搬止水壁工法 再搬止水壁工法</p>			<p>ドラム缶にシートを貼る</p> <p>緊急度の判断 運搬の可能性</p> <p>〈ドラム缶撤去〉 運搬用内設置付き ドラム缶搬送機</p> <p>撤去終了後、シートを 巻く</p> <p>撤去終了後、シートを 巻く</p>	<p>モニタリング(○○川出口) → 継続的に実施</p> <p>場内の水運至急の調査(高水試験)</p> <p>運水途中の水質、水量の調査 → 水処理プラント設計修正</p> <p>大気中のモニタリング → 労働者の保護</p>
step 2 流出・拡散防止対策の実行、効果確認 ドラム缶撤去(保管、処理)	<p>水処理施設整備</p> <p>〔切り弁〕</p> <p>地下水取水</p>			<p>撤去</p> <p>〈二期保管(サイト内)〉 クローキルンシステム TeOHシステム</p> <p>〈仕分け作業〉</p> <p>〈処理・処分〉 クローキルンによる焼却処理 クローキルンによる焼却/熱分解</p> <p>0, 1/3, 2/3</p> <p>運搬距離・処分</p>	<p>運水防漏又は、バリア弁の効果確認調査 (モニタリング弁の設置、地下水位、水質調査) → 運搬条件の把握、水処理プラント設計修正</p> <p>保管場所の天気、二次汚染の着床の確認調査</p>
step 3 水処理施設稼働 ドラム缶の処理処分	<p>水処理施設稼働</p>		<p>掘削工事 (一部)</p>	<p>〈処理・処分〉 ローリーキルンによる焼却/熱分解</p> <p>閉鎖加熱キルン処理</p>	<p>周辺環境モニタリング(定期的)</p> <p>知恵・処分により二次汚染の無いことを確認</p>
step 4 撤去可能なドラム缶の撤去終了				<p>ドラム缶撤去終了</p>	<p>土壌・地下水の再調査 (水平、鉛直方向の汚染の広がり、濃度分布、 稼働条件等々の把握)</p>
恒久対策				<p>恒久対策</p> <p>〈原位置での汚染物質の分解、安定化技術〉 〈汚染媒体からの汚染物質の分解技術〉 〈汚染媒体の除去技術+汚染物質の分解、安定化技術〉 〈汚染媒体の除去技術+汚染物質の分解、安定化技術〉 〈原位置での汚染物質の分解、安定化技術〉</p>	<p>監視システムモニタリング等による予測 → 再調査の検討</p>



また以下は、恒久対策を講ずる前に行うことであるが、

⑤土壌・地下水汚染の再調査（汚染物質の空間分布、濃度）を行う。その際、数値シミュレーション技術などを用い、汚染の広がり、修復効果の検討も行い、恒久対策を議論する。

## 7. 恒久対策の考え方

恒久対策としては、現時点では応急対策で撤去できなかったドラム缶の処理及び汚染土壌の浄化や、汚染地下水の浄化、さらには跡地利用対策等を網羅する方法として考えていくことにした。技術として恒久対策として位置づけられるものを抜き出し、処理方法の違いに着目して分類を試みると、表3-6にまとめられる。

恒久対策に関する、現段階の取り組みとしては、まず対応が可能な技術を列挙し、その適用にあたっての実証試験の必要性、適用条件、必要な調査（情報）を整理することにした。そしてこれらの情報を、応急対策で行われる調査等に反映することにした。

## 8. 1市におけるシミュレーションの位置付け

表3-7に現在検討されている応急対策の手順を示す。ドラム缶の撤去作業が応急対策の中心であるが、ドラム缶が撤去されると次段階で考えなくてはならないのが、残された汚染土壌と地下水の修復作業である。これらは恒久対策で行うことを前提としているが、ドラム缶撤去時の汚染物質の漏洩や、撤去期間内における汚染の拡散を危惧して汚染拡散防止対策を講ずることとした。しかし、現段階では地下水流向、流速、地下水汚染濃度コンターなど不明なことが多いため、どのような技術を用いて汚染拡散防止対策を行えば良いのか分からない。よって本研究では、現時点で当該サイトに地下水汚染拡散防止対策を行うとすれば、どのような技術が適切だろうかという視点で解析を行うことにする。つまり、当該サイトにおいて

①地下水汚染拡散防止対策の必要性を評価すること

②地下水汚染拡散防止対策に最も効果的な技術を代替的に提案すること

を目的として解析を行うこととした。つまり当該サイトでの応急対策の検討を目的にシミュレーションを用いることにした。

## 9. 要約

本章では、本研究で当該サイトにおいてシミュレーションを使用するに至ったプロセスを簡単ではあるが述べた。まず当該サイトに対してこれまで行われた調査結果についてまとめ、汚染現場を一時に修復するのは、経済的、物理的に困難であることを示した。このような汚染サイトに対しては、2章で示した診断システムのように段階的に、緊急度、優先順位の高い対策から行っていくことが有効であると考えた。結果として、最緊急対策、応急対策、恒久対策の3段階で対策を講ずることとし、各段階での対策方針を決定した。とくに、応急対策ではドラム缶の撤去の他に、地下水汚染拡散対策の必要性も考えられたが、現時点で得られる調査データが限られており、その対策の必要性の有無や、対策が必要である場合には、どのような技術が適切か判断する必要性が生じた。このような経緯で、本研究で当該サイトの応急対策の修復技術選択を行う目的でシミュレーションを適用することとなった。

表3-6 恒久対策の技術分類

媒体	技術 流出・拡散防止 技術	対象物質 六価クロム	要素技術 腐位置における六価クロムの 還元不溶化 汚染土壌原位不溶化処理 システム	残渣の有無、種類 不溶物	適用条件 地下水面上りは困難 低濃度、広域処理○ 高濃度の場合は、掘削 後プラント処理	必要なデータ 汚染分布 透水系数 汚染物質の濃度分布	実証試験の 必要性
土壌	汚染媒体からの 汚染物質の分離 技術	TCE/PCE 石油系酸化水素 BTX、有機塩素 化合物 BTX、有機塩素 化合物 重金属	汚染土壌の封じ込め 真空抽出法 エアースパージ法 電気化学的汚染土処理工法	活性炭 抽出ガス	不飽和帯、透気係数大 粘性土は困難 ドラム缶を埋め込んだ 場所× 帯水層が砂、砂礫層 海岸近くでは、予め塩除去 が必要	再調査(表層ガス、ポー リング) 汚染濃度分布、地質、 透気係数 真空抽出の諸データ の影響範囲	試験井戸による 影響半径の測定 エアースパージの 影響範囲
	汚染媒体の除去 +汚染物質の分離 技術	有機塩素化合物 水銀、多環芳香 族化合物 BTX、有機塩素 化合物、石油系 の一部	テラソチーム法 (水蒸気蒸留法) 掘削-地上土壌バイル 吸引システム 高性能不溶化プラント	活性炭 凝縮器内の汚染 物質 抽出ガス	真空抽出法と比較し 粘性土○ 真空抽出により除去できな い場合 粘性まで適用可能 粒径100mm以上は 事前に分級 細粒分の多い土は不適 細粒分は、分級ののち 他の処理が必要 高濃度× 地表面、深層の土は 掘り出せることが条件	汚染濃度分布、地質 構成、掘削土壌量 汚染土の性状	
	汚染媒体除去十 汚染物質の処理・ 処分技術	油 有機塩素化合物 油性物質 シアン、水銀 有機塩素化合物 BTXなど	油汚染土の バイオレメディエーション 間接キルンによる熱処理・ ロータリーキルンによる焼却溶融処理・ ロータリーキルン焼却処理・ 地下不飽和帯処理 デュアルポンプによる浮上油 の回収 廃水処理 紫外線による有機塩素 化合物分解装置	処理残渣 溶融スラグ 焼却残渣 回収された油 処理残渣		汚染分布 油の形態 生分解性 水分、掘削土壌量 掘削土壌量、除去でき ないドラム缶量 地下水汚染分布、帯水 層ごとの地下水流速 透水系数 油の存在の有無	適正揚水量の推測 水位低下可能範囲の 推測
	処理・処分技術 処理・処分技術	有機塩素化合物 等 有機塩素化合物			処理水質に適用する		

\*: 焼却-溶融施設は、応急対策の段階で施設を建設すると、恒久対策でも引き続き撤去できなかつたドラム缶と土壌を処理する事になる

表3-7 応急対策の手順

step	表流水	地下水	土壌	ドラム缶	調査
緊急 対策	汚染表流水排水路の整備 [図表3]		土壌改良防止		ポーリング調査
1	汚漏雨水工	集溜工 排水壁		<p>緊急時の判断 避難の可能性</p> <p>ドラム缶にシートをかぶせる</p> <p>撤去</p> <p>ドラム缶の移動</p> <p>撤去終了後、シートを巻く</p> <p>恒久対策まで放置</p>	<p>モニタリング(仁井田川出口)</p> <p>遊水池中の水質、水量の調査 遊水池内の水理定数の調査(構水試験) → 資料集の詳細設計 → 水処理プラント詳細設計</p> <p>大気のモニタリング → 労働者の保護</p>
2	水処理施設稼働	地下水補水		<p>一時設置 内部物の確認 仕分け作業 詰の替え作業</p> <p>運搬</p> <p>直接運び出し</p> <p>緊急処理・処分</p>	<p>運水効果確認のための調査 (構水試験)</p> <p>保管場所の大気、二次汚染の有無の確認調査</p>
3	水処理施設稼働 ドラム缶の処理処分	水処理施設稼働		<p>新たに施設を建設する場合</p> <p>既存施設で処理する場合</p> <p>恒久対策</p>	<p>周辺環境モニタリング (定期的)</p> <p>処理・処分により二次汚染の無いことを確認</p>
4					<p>土壌・地下水の再調査 (水平、鉛直方向)汚染の広がり、濃度分布、 構体構体重量などの把握)</p> <p>施設シミュレーション等による予測 → 修復対策の検討</p>
恒久対策				恒久対策	

### 第3章 汚染修復を行うための汚染現場のモデル化

#### 1. 緒言

本章では、汚染現場のモデル化を行い地下水流れ場の把握を行う。2章でも述べたようにモデル化とは、汚染現場を支配する物理現象に対して、妥当な簡単化、抽象化を行うことにより数学モデルを構築することである。

実汚染現場であるI市（不適正保管現場）、K市（不法投棄現場）を対象にモデル化を行う。K市に関しては、まだ調査途中段階であるので、モデル化ための調査項目を整理するのみとした。

#### 2. I市におけるモデル化

##### 1) 地質構造の推定

これまで得られている9本のボーリング調査による柱状図を基に地質構造の推定を行った。推定に用いたソフトは、Georama（（株）CRC総合研究所）である。サイトの平面図を図4-1に示す。また推定された地質構造の各断面図を図4-2～図4-7に示す。汚染サイトの地質構造の概要は、地表面から盛土、表土、それ以深は、礫層（Ag）と粘土層（Ac）の互層構造となっている。地質構造の模式図を図4-8に示す。但しkmは基盤である。現段階での地質構造の推定は、決してまだ十分であるとは言えないが、基盤深さがわかっていること、広域的な地質構造を考慮して地質構造を推定していることを理由に、解析に用いることにした。

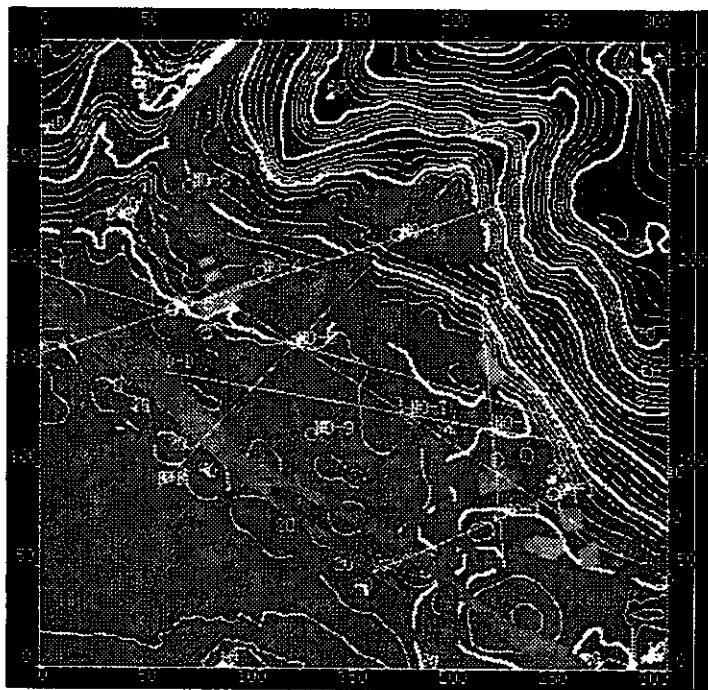


図4-1 I市不適正保管現場のサイト平面図