

地盤環境汚染の調査方法(8)

スミコン セルテック㈱ 高 橋 忍

7 対象地詳細調査（続き）

7. 2 揮発性有機化合物に係わる詳細調査

揮発性有機化合物（VOC）による土壤・地下水汚染に係わる詳細調査もボーリング調査による深度方向の汚染機構確認調査であることは、前項に記した重金属等土壤汚染の詳細調査と同様で、その仕様も共通点が多い。

ただし、対象物質が揮発性の非水重液を主とし、汚染の分布や拡散形態が異なるため、ボーリング配置やサンプリング、分析の方法は異なっている。複合汚染の場合、一本のボーリングを利用して両者の調査を兼ねることは可能である。

揮発性有機化合物の詳細調査の進め方についても、環境庁水質保全局「土壤・地下水汚染に係わる調査、対策指針運用基準」（以下「運用基準」と称する）が基本マニュアルで、「揮発性有機化合物に係わる調査・対策」の章に仕様が示されている。「運用基準」は揮発性有機化合物汚染の対象地詳細調査の基本的な基準を下記のように指導している。

揮発性有機化合物の対象地詳細調査は対象地概要調査により表層土壤で汚染が判明した範囲、即ち

- * 対象地の表層土壤の公定分析により環境基準値を超過した測定値が得られた。
- * 表層土壤ガス調査の結果、相対的に高濃度であることが判明した。
- * 対象物質が浸透するおそれがある範囲等において、ボーリング調査を行い、土壤（地下水が採水できる場合は地下水を含む）について深度別に試料を採取、分析測定し、汚染の状況を詳細に把握する。その結果から対策を取るべき範囲を設定する。

対策を取るべき範囲は、土壤環境基準及び地下水環境基準に適合しない土壤及び地下水とする。この場合土壤及び地下水汚染の試料の分析測定は公定法とする。但し対策によっては、対策を取るべき範囲について概ね範囲を絞りこめばよく、この場合適当な簡易測定法を用いてよい。

7. 2. 1 ボーリング調査項目

ボーリング調査の調査項目は下記で、重金属等の詳細調査と同じ項目になる。

- (1) 地質等調査：ボーリングコアについて、地層の状況をできるだけ詳細に観察する共に、地層毎の物理特性を把握するための土質試験を行う。
- (2) 土壤汚染調査：土壤中の対照物質を分析測定する。
- (3) 地下水汚染調査：ボーリング孔を利用して帶水層ごとに地下水の水質を分析測定する。
- (4) ボーリング孔を利用するその他の調査：地下水位測定、地下水流向、流速測定、透水試験、電気検層など。

7. 2. 2 ボーリング調査地点の配置

調査地点はあらかじめ立案した調査計画に基づき、

- (1) 対象地概調査により表層の土壤で汚染が判明した地点（土壤ガス調査などの結果、相対的に高濃度であることが判明した場合を含む。広範囲の場合は濃度センター図からみて最も高濃度に検出された地点。）
- (2) 濃度センター図からみて汚染の境界と思われる地点。
- (3) 地下水の流向からみて高濃度地点を挿

んだ上、下流の地点

(4) 汚染井戸の位置からもて必要と思われる地点等を中心に、対象地の汚染の分布を確実に把握できるように配置する。(図7.4)

重金属の場合は、前章に記したように、概況調査の分析結果で汚染の有無を判定すると、そこに設定したメッシュの交点の位置に、ボーリング地点が定まるようなパターンがほぼ決まっている。しかし、揮発性有機化合物の場合、ボーリング地点の選定には、

- * 概況調査の結果を土壤ガスの分析による相対的濃度分布で汚染の範囲を想定する
- * ボーリングによる地下水計測を実施する前に地下水の流向を想定して、汚染部分にたいする上流、下流を決める

作業が伴う。

調査担当者による対象地の地質の判断、地形、水文（特に地下水頭分布）による大まかな地下水流向の想定が必要になる。

土壤ガス濃度分析結果 (ppmV) と土壤公定分析による溶出量 (mg/l) との換算について質問を受けることがあるが、明瞭な相関性はない。

基本的には汚染の発生からの時間と対象地地質の透水性、水文の状況により検討する。しかし、明瞭な判断が下せないときは、ある程度安全側にたって詳細調査計画を作ることになる。

図7.4 にあるように、一つの汚染ブロックに対し、汚染源を表す高濃度部の中心と汚染境界にボーリングを配置するとともに、地下水が対象地外に拡散していないか（下流側）、あるいは地下水汚染が地域外からもたらされていないか（上流側）を確認する必要があるので、一つの汚染領域に対して5本程度のボーリング調査が必要となる。

しかし、汚染の当事者が市街地の小さい企業体などの場合は、対象面積が小さく、かつボーリングが出来る地点が限定されることが多いので、地方環境行政担当者と打ち合わせを行いな

がら最善のボーリング配置をするように心がける必要がある。

7.2.3 掘削工法

揮発性有機化合物汚染の土壤・地下水汚染のボーリング調査には、下記のような特徴がある。

- ① 汚染発生の契機が工場操業の過程にあるケースが多いので、対象地の調査地点は工場敷地内にあり、建屋内や、屋外でも構造物や機械により制約された狭い空間での作業であること。

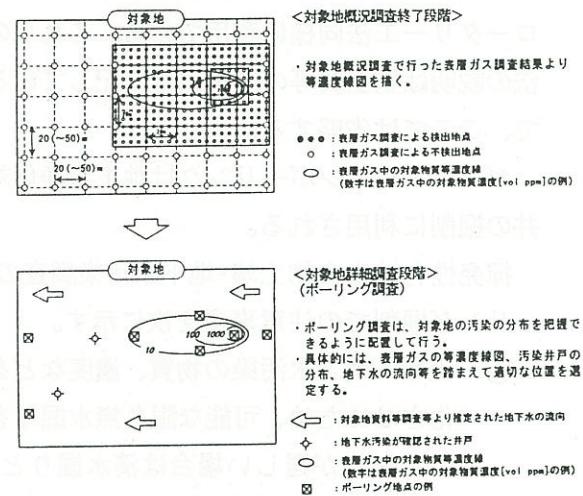


図7.4 挥発性有機化合物のボーリング
調査地点の配置の考え方

- ② 土壤汚染の深度は対象地の地層構成により変化が大きい。基本的に汚染物質の浸透降下を遮る不透水層の深度まで降下する。自由地下水層数mの深度のケースから、丘陵地の砂、砂礫層のように、数層の地下水帯水層に汚染が及び、深度100mを超えることもある。
- ③ 一般に汚染が地下水に及ぶケースが多い。これらの特徴に合わせ、下記の工法の組み合わせを調査対象地の立地状況に合わせて利用している。
 - (1) ロータリー式ボーリング
 - (2) 機械式簡易ボーリング
 - (3) パーカッションボーリング

汚染が地下水層まで及んでいる場合は、試料採取の効率と掘削後の計測を考慮してロータリ一式径86mm以上のフルコアボーリングを用いる。

機械式簡易ボーリングは屋内や狭いスペースの作業及び不飽和帯の汚染範囲確認に適している。手持ちボーリング（SCSC工法）や簡易機械パーカッション工法（GEO PROVE工法）、第1地下水帯水層の汚染分布追跡に細径の採水管を取り付けたGEO PROVE工法が相当する。バイブロ／ロータリー掘削機は、深度15m以内、N値15未満程度の地質であればロータリー工法同様に利用できる。これらの工法の説明は重金属等の詳細調査に記しているので、ここでは省略する。

パーカッションボーリングは地下水浄化対策井の掘削に利用される。

揮発性有機化合物土壌・地下水汚染調査のボーリング掘削での注意事項を次に示す。

- ① 土壌・地下水汚染の物質、濃度などを変化させぬため、可能な限り無水掘りを行い、それが難しい場合は清水掘りとし、やむを得ぬ場合を除き泥水掘りは行わない。コア採取に際し、対象物質をかく乱させ揮発させぬよう可能な限りパックチューブを使用するなどの配慮が求められる。
- ② 掘削に伴い地下水が揚水された場合、簡単な曝気装置や活性炭槽を用意して、揮発性有機化合物を分離吸着して、汚染がないことを確認してから排水する。
- ③ ボーリングによる地下埋設物の破損を防ぐため、あらかじめ水道管、ガス管、電話線、排水管などの埋設有無を調査すると共に、必要に応じて、手掘りやボーリングバーによる試掘を行う。
- ④ 汚染されていない不透水層を貫通するなど、不用意なボーリングを行うと揮発性有機化合物はボーリング孔経由で

下の地下水層へ拡散する。常に拡散防止を意識した計画、作業が求められる。

汚染地層の下位の汚染されていない地層までボーリングを行う必要があるときは、汚染地層とボーリング孔を、ケーシングとセメントミルクなどで完全に遮断してから下位の地層に掘り進む等、汚染の拡散防止を図る。

- ⑤ 高濃度の汚染物質を検出した地点で使用したボーリング機材は、使用後良く洗浄し、他の地点で使用する際に汚染を生じないように注意する。
- ⑥ 孔壁安定化のために泥水を使用する場合は、泥水が孔壁や孔底を目詰まりさせ、透水試験や揚水試験、地下水位測定の障害となるので、清水を用いた孔内洗浄により泥水を十分除去する。

7.2.4 サンプリング手法

土壤・地下水汚染調査は、特殊な場合を除くと、土の「乱さない試料」を必要としない。

一方、分析測定用の試料を十分かつ連続的に採取する必要があり、フルコアボーリングでサンプリングを行うのが通常である。

調査対象となった地層に対しコア採取の効率が最も高い方法を選択することが後に続く業を樂にする。

実際の調査によく用いられているサンプリング手法は下記のとおりである。

- ① スリーブ内蔵二重管サンプラー：パックチューブのコアバレルは、コア採取後の対象物質の気化、発散が防止できるので、汚染土壌調査で最も多用されるサンプリング法である。
- ② シングルコアチューブ：サンプル確保のための”焼き付け”など、試料に熱を加えることがある手法は、対象物質の拡散が行われるので好ましくない。
- ③ 標準貫入用サンプラー（レイモンドサン

（3）サンプラー、スプリットバレルサンプラー）
サンプリングにおける留意点は下記のとおりである。

- ① サンプラーに付着した物質による汚染を避けるため、サンプラーは使用する前に必ず洗浄する。
- ② コアを採取して引き上げた直後に、現地分析をすぐ行う。手早く、試料採取びんにいれ、密閉し、公定室内分析試料は冷蔵により対象物質の揮発を防止して分析室へ送る。
- ③ ボーリング調査を行った残孔は、井戸として利用する場合を除くと、迅速に埋め戻しをすることが望ましい。埋め戻しが不十分な場合には汚染拡大要因となるので十分に注意を払う。

7.2.5 地質等調査

地層及び帶水層の状況の把握し、適切な対策の立案に資するため地質調査を行う。

（1）ボーリングコアの地層観察

地層の色調、土性、混入物（大きさ、形状、分布状況）、軽石などの鍵層、堆積状況、湿潤状況を観察し、地質柱状図にまとめる。

また、臭気などを調査し、層の状況を記録する。

（2）土質試験

コアから適当な試料を採取し、粒度試験、比重、含水率、単位体積重量などの物理試験を実施する。特に粒度試験は、地層の透水性推定に、ボーリング孔透水試験の補助資料として有効である。

7.2.6 土壤汚染調査

（1）土壤試料のサンプリング深度

揮発性有機化合物のボーリングによる土壤サンプリングについて、「運用基準」は下記のように指示している。

基本的に汚染の下限と想定される不透水層の上端まで行う。ただし、不透水層の上端に汚染が認められる場合は、十分注意して不透水層内部まで行う。

該当する不透水層の連続性が乏しい時は、当該不透水層より深いところに汚染が拡散している場合があるので注意する。

地下水調査で、より下位の帶水層が既に汚染していることが判明した場合は当該深度までボーリングを行う。また、不透水層が深く位置している場合には重金属等詳細調査のサンプリング深度(7.1.6(1)章)の考え方を参照にする。

土壤試料の採取にあたっては

- * 現地において適当な簡易測定法を併用し、その結果を参考にしながら公定分析の試料採取を行う。
- * 基本的にはコアの中央部においてコア1m当たり1～2試料を目安とし、適宜採取する。

としている。

実際には、ボーリング掘削が終了すれば、その後引き続き孔内水理測定と井戸仕上げを行うことになる。汚染に対する判断は、時間のかかる公定分析結果を待たずに、現地簡易分析の結果で作業を進めることになる。従って公定分析結果の乖離ができるだけ少ない方法を現地簡易分析に用いることが望ましい。一般に用いられている現地簡易分析方法は、

- ① ポータブルガスクロマトグラフ(PID-GC型)によるヘッドスペース法(中感度法)
- ② ガス検知管によるヘッドスペース法(低感度法)
- ③ モビラボ法など車両搭載ガスクロマトグラフ質量計やガスクロマトグラフによる高感度法

がある。

公定法の分析も基本的にはヘッドスペース法による溶出量分析(EDD型ガスクロナトグラフによる中感度法(JIS 0125))が用いられて

おり、①ポータブルガスクロマトグラフ (PID-GC型) の方法が最も使い易い簡易分析法と筆者達は考えている。

公定法は、分析密度を、「簡易分析の結果を参考にした上で、コア 1 m当たり 1~2 試料」としている。従って、簡易分析のサンプリング密度は、より細かい密度での試料採取が求められる。

筆者達はモデル調査計画では

- * ポータブル P I D - G C による現地簡易分析をコア 1 m当たり 3 試料で行い。
- * 公定分析用試料は、その結果を参考に、コア 1 m当たり 1 試料採取を基準とする

方法を採用している。

また、公定法の溶出量分析試験と含有量分析を適当な密度で行い、回収する揮発性有機化合物の量を予測し、浄化計画作成の参考資料としている。

(2) 土壤採取量（公定分析用）

土壤採取量は 1 試料 100 g を目安とする。

(3) 土壤試料の取り扱い方法

現地で土壤の測定を行う場合は、試料採取後直ちに行う。公定分析のため試料を試験室に搬入する等直ちに測定を行えない場合は、4 °C以下の冷暗所に保存し、できるだけ速やかに行う。また、礫や木片を多く含む土壤は、その含有率を記録する。

試料採取深度を地質柱図に記載するとともに、採取した試料の観察を地質等調査の観察方法で行い記録する。なお、礫、木片、セメント塊などを多含する試料は、その含有率（%）を記録する。

試験室に搬入後溶出試験（公定分析）を実施する場合は、現地で直ちに次のような処理を行い対象物質の損失を防止する方法もある。

あらかじめ、かくはん子をいれたねじ口付三角フラスコに、概ね 5 mm を超える中小礫、木片などを取り除いた土壤試料（重量 g）とその

10 倍量の水（容量 ml）をいれ、速やかに密閉する。このとき三角フラスコのヘッドスペースはできるだけ少なくなるようにする。

(4) 試料の分析測定

公定分析の分析仕様は環境庁による土壤環境基準により物質毎に指定されている。表 7-5 に、測定用の検液作成法を含めて示した。

現地簡易分析では、採取した試料を揮発性物質が発散しないようにただちに分析することが重要なポイントとなる。従って、検液作成も公定分析法を用いると時間がかかりすぎるため簡易法を用いる。

筆者達が用いている方法を表 7-6 に示している。公定分析結果との乖離を小さくする方向で、さらに改良してゆくことが望まれる。

公定分析法は、分析試料を密閉びんに詰めて冷蔵し、対象物質の気化、発散を防止を厳密に実施しないと低い濃度を示すおそれがある。最終的な汚染の判定は、公定分析結果を使用するので、分析作業に経験の浅い地質技術者は、サンプリング方法、試料運搬方法に十分な配慮を心掛ける必要がある。

(5) 調査結果の判定

調査結果の判定は、現地簡易分析法も公定法とともに溶出量分析結果を、土壤環境基準値（表 7-7）に照合して判断する。

同じ試料を、P I D - G C による現地簡易分析と公定分析法で分析した結果の対比例を図

に示した。筆者の経験では一般に現地簡易分析値がやや高濃度に出てくる傾向がある。

公定分析法における試料運搬時、検液作成時の対象物質の気化ロス量の評価は実際には困難である。やや汚染が過大評価になることがあっても安全側にたって P I D - G C による現地分析結果で作業を進めている。

最終的な汚染の判断は当然公定分析結果による。揮発性有機化合物が水にとける溶解度物質によって異なるが、代表的な汚染物質である

トリクロロエチレンが1.07g/l(20°C)、テトラクロロエチレンが0.1g/l(20°C)である。

汚染土壤から汚染された土壤ガスを吸引、抽出して浄化作業を行う場合は、対象となる物質は、公定分析で求めた溶出量だけでなく、土壤ガスにふくまれる全体量が対象となる。そのため対象物質の含有量分析結果が修復機器の規模など浄化計画を立てる時に必要になる。

予算上の都合などで、含有量分析を行えないときは溶出量分析値に経験的な係数を掛けて含有量を求める。通常その係数として10~25を使っている。

7.2.7 地下水汚染調査

ボーリング孔を利用して、帶水層ごとの地下水の水質を分析測定して地下水汚染の分布を把握する。分析は簡易法でよい。

揮発性有機化合物は、その物理的性質から不飽和帯でとどまらず容易に下位層に移行するので、詳細調査計画には必ず地下水調査を組み込む必要がある。

ボーリング掘削直後の孔内水は、地層水の濃度を反映しない場合がある。正確な濃度を把握する必要があるときは、掘削終了後、井戸仕上げを行ってストレーナーを設置し、地下水位が安定した時点で採水する。

また、複数の帶水層ごとに地下水を採取する場合は浅い層から順に行う。より下位の帶水層から採水するときには上位からの地下水混入を避ける必要がある。上位地下水採取区間をケーシング密閉やパッカーにより遮断することが望まれる。

(1) 採水方法

孔内地下水の採取には、採水器による方法と水中ポンプによる方法がある。

採水方法の詳細は7.1.7.(1)と同様であるので、ここでは省略する。前号を参照されたい。

(2) 地下水採取の留意点

この項も前章と同じであるが、揮発性有機化合物の詳細調査のほうが採水を行う機会が多いので再録する。

事前に十分孔内水を汲み出し、新鮮な地下水を孔内に呼び込む。汲み出す水の目安は、井戸有効容積の3~5倍程度である。井戸の性状や地層の状態によっては、水位が井戸底に下がるまで、汲み出す場合がある。汲み出した孔内水の排出方法は、その汚染状況をもとに十分な配慮のもとに決定する必要がある。

- ① 孔内水位が回復した時点で、採水を行う。採水前に温度やpHを測定して水質が安定したことを確認しておくとよい。
- ② 採水はスクリーンの設置区間内で行うように努める。
- ③ 採水器やロープなど採取に用いた道具は、汚染を防ぐため、試料を採取するたびに十分に洗浄する。
- ④ 井戸の設置目的が水質観測井でない井戸や、ストレーナー深度が別目的で決められている井戸の場合、採取した試料が代表試料となっていない場合があることに留意する。

(3) 地下水の分析測定方法

対象物質の測定は、原則として公定法による。ただし、汚染の有無を判断する場合は公定法、汚染範囲を絞り込む場合は簡易法等、目的に応じて使い分けることになる。

公定法は環境庁告示第39号「水質汚濁防止法施工規則第6条の2」に基づき環境庁長官が定める検討方法に準拠する。

簡易測定法として、ヘッドスペース法がある。その精度や測定結果にはバラツキがあるといわれているが、筆者達の経験では、前処理をきちんと行えば、PID-GCによる現地簡易分析法と公定法の分析結果には殆ど乖

離がない。作業によっては公定法の結果がでるまでに、汚染の判断をある程度下して次の作業に進む必要に迫られることがある。この場合、P I D-G C等現地簡易分析結果により作業を進めることもやむを得ない。

7. 2. 8 ボーリング孔を用いた測定

(この項目も重金属汚染詳細調査と重複するが、揮発性有機化合物汚染調査のほうが、揚水処理に進むケースが多いので改めて記す)

対象地の帶水層の透水性や地下水の流動傾向を把握するため、ボーリング孔の水位測定、流向流速測定、透水試験、電気検層を行う。

(1) 地下水位の観測

詳細調査のボーリング孔や既存井の地下水位を測定し、その孔口の標高から各井の地下水頭の標高を求めて、汚染源近傍の地下水流动方向や、水理公式から求まる流速の推定を行う。

ボーリング孔の水位測定は採水前に実施する。複数の井戸の水位測定から地下水流动傾向を知るために、一斉水位測定と一斉採水により、同じ水理水文条件下で水頭分布、汚染濃度分布を求めることが汚染機構解明の上で重要である。

一斉水位観測で求められる地下水流动は対象域の一般的な流动傾向を示すものである。あるポイントにおける汚染物質の移行などを知りたいときには、次項の方法を併用する。

(2) 流向・流速測定

ボーリング孔の各帶水層区間に流向・流速計を挿入し、その帶水層を通過する地下水の流向・流速を測定する。

測定器には、地下水に蒸留水を滴らし、そこに生ずる電位差の動きを 360 度方向に配置した電極で測定する (LD-60) ものやボーリング孔にカメラを挿入し、孔内を横切る微粒子の方向、速度を測定する機器 (PZ1005) がある。前者は、測定精度は高いが測定に時間がかかりコストが高い。後者は手軽に測定できるが、流速の絶対

測定値は水理条件から計算される流速の 10 ~ 1000 倍の測定値が得られることがあり、相対値として判断するにもバラツキが大きすぎる。

現場の状況や調査予算に応じて測定器の使い分けを行うことになる。

いずれも得られる資料は、測定地点、測定深度のベリーポイントの測定値である。現実には同一帶水層の上部、中部、下部で流向、流速が異なったり、構造物基礎によって部分的な流動変化があったりする。従って、測定結果を鵜呑みにして、安易に結論を出すのは危険である。必ず地下水位一斉測定によるより広い範囲の一般流動傾向や、帶水層の透水性と水理公式から求まる流速値、さらに帶水層の地層の状況を検討して、総合的に判断する必要がある。

また、一斉採水濃度分析を繰り返し、汚染源推定ヶ所から下流域の対象汚染物質濃度変化の測定を定期に行うことで、最も信憑性の高い地下水流动傾向が求まることがある。

稼動している工場敷地で流动測定を行う場合は、対象調査域内あるいはその近傍で、揚水している既存井戸があるかどうかを必ず確認する。揚水井が稼動している場合は、揚水ポンプを一定期間停止して、自然の地下水流动が安定した場合の測定と、揚水による水位下降により生じた地下水流动場における測定を重ねて行う必要がある。

(3) 透水試験及び揚水試験

帶水層の透水係数、貯留係数等の水理特性を把握するためボーリング孔において、透水試験あるいは揚水試験を行う。試験結果は、地下水流动解析、流動シミュレーションに用いるほか、揚水処理やバリア井計画を作成するための基礎資料になる。透水試験方法は、水位回復法や注水法を用いるが、これらは土木地質調査で行う方法と同じであるので手法の詳細は省略する。

(4) 電気検層

地層の境界や、互層状態、地下水帶水層の検

出、不透水層の判定などに利用するためボーリング孔の孔壁周辺の電気比抵抗や自然電位を測定する。通常は孔内に挿入する電極間隔を25cm/100cmにとったノルマル検層を用いる。薄い不透水層の把握など詳細のデータが欲しい場合は、ノルマル検層にマイクロ検層を重ねて実施する。

(5) 地下水流動解析と流動シミュレーション

地下水汚染が認められた場合ボーリング孔調査結果と上記の測定結果を用いて地下水水流動解析及び流動シミュレーションを実施する。

地下水水流動解析は次の手順で行う。

地下水汚染領域を汚染境界で囲まれた一つの地下水タンクと仮定して、境界断面における地質構成から地下水帯水層を区分する。

地下水調査による水理計測の結果から個々の帯水層の断面積、透水係数、流向、流速を求める。

汚染領域に対する地下水涵養量、流出量、上部からの浸透量、蒸発散量を求めて、汚染地下水の水収支を算定する。

以上に求めた帯水構造、各水理係数をもとに、地下水の流動傾向、その乗った汚染の拡散傾向を推定する。

地下水水流動解析は、簡単なタンクモデルを使い、手計算でもパソコン計算でも出来る方法である。その結果を立体視すると汚染全体の機構がよく理解できる(図)

地下水水流動シミュレーションは、調査、測定結果から数値モデルを作成し、コンピューターを用いて、地下水水流動シミュレーション、汚染物質移行シミュレーションを行う方法である。

筆者達が利用しているプログラムは、

- ① 詳細調査結果の三次元解析モデル (G E O S T A N) と揮発性有機化合物の不飽和帶真空吸引のための2相系3次元流動シミュレーションモデル (G E O F L O W) の組み合わせ。

- ② 調査結果の3次元解析と汚染量計算シミ

ュレーションと地下水、汚染物質流動シミュレーションモデル (S U R P A C K)

- ③ 三次元地下水流動、汚染物質移行シミュレーション差分プログラム (Visual MODFLOW for Windows)

である。

このなかで汎用的なモデル MODFLOW は、地下水流動と汚染物質移行が統合パッケージになっており、強力なグラフィックインターフェイスを特徴とする。

モデル計算は

- (1) 数値モデルは、対象地域を平面的に正方格子分割したグリッドモデルとする。

鉛直方向をボーリング地質柱状図から地層を表土層、上部透水層、難透水層、下部主帶水槽などに分割した layer モデルを作成する

このモデルにボーリング調査孔、地下水観測井、揚水井をプロットし、実測した水頭分布を参考に境界条件を設定し、実測値で求めた透水係数、貯留係数の領域を設定する。

- (2) (1) の初期モデルを用いて、自然状態における地下水流動を計算する。実測水頭分布に計算水頭分布が合致するように境界条件などの初期モデルの修正を重ね、自然状態における地下水流動を推定し、自然水流のモデルとする。

このモデルに、揚水試験結果から得た揚水井の位置と揚水量を与える。別に与えた透水係数、貯留係数と組み合わせると、揚水による水位変動分布が求められ、揚水時の地下水流動が求められる。

- (3) 汚染物質移動シミュレーションには、汚染物質が地下水中に分散したり、土壤粒子に吸着するため、物質毎の分配係数 (拡散係数)、遅延係数 (吸着係数) が必要になる。これらの測定は簡単にはできないため、計算では既存文献にある物質毎の分配係数、遅延係数を求め、これらを入れて、自然流動状態での物質移行、揚水による浄化処理時の物質移行を求める。図

は自然状態と、揚水を行った場合の、物質移行シミュレーションの計算結果の一例である。

このような解析計算の精度は、当然数値モデルの精度に左右される。信頼性のある3次元モデルを構築するためには、少なくとも10孔程度のボーリング孔の計測結果が必要である。

十分な資料がない場合には、簡単なタンクモデルを使った地質技術者の主観が入る解析のほうが結果として役に立つように思える。但しこれは筆者のような手計算解析時代の地質屋の繩言かもしれない。

7.2.9 調査孔を利用する観測井の設置

詳細調査のボーリング孔は、観測井、地下水揚水井等に仕上げし、地下水観測を継続することが望ましい。その際、帶水層ごとの水位、水質を把握するため、各帶水層毎に独立したボーリング孔で、ストレーナーを設置することが望ましい。

重金属等土壤地下水汚染の場合は、対象物質の溶出、浸透が比較的少ない関係か、調査ボーリングは最上位の自由地下水層で終了するケースが極めて多い。

7.2.10 調査結果の評価

詳細調査の結果は、土壤環境基準及び地下水環境基準に照らして評価し対策をとるべき範囲を設定する。即ち土壤・地下水汚染の三次元分布を把握し、対策に必要な範囲の線引きをすることになるが、その方法は下記の考え方に基づき設定する（運用基準2.1.5.4）

（1） 対策を取るべき汚染土壤の範囲

対策をとるべき汚染土壤の範囲の設定の考え方は、対策により異なる。土壤ガス吸引や地下水揚水など、揮発し易く地中を移動し易いという揮発性有機化合物の性質を利用して原位置抽出を行う場合は、まず、対策範囲の概ねの絞込みを行う。この場合簡易測定値を用いてよい。

汚染土壤の掘削・除去を行う場合は、重金属等にかかる汚染土壤の設定と同様に行う。

（2） 対策を取るべき汚染地下水の範囲

対策を取るべき汚染地下水の範囲は、地下水位環境基準に適合しない範囲を基本に、現地の実情に応じて適切に設定する。

地下水の浄化対策は、揚水井を設置して汚染地下水を揚水し、汚染物質に対応する水処理を行うのが基本である。

揚水処理の目的は汚染源に近い高濃度地下水を揚水して汚染濃度の減少を主目的とする揚水と、汚染地下水の地域外流出による拡散を防止する目的（バリア井）の揚水がある。いずれも、汚染機構と地下水流动に伴う物質の移行の解析結果を勘案して浄化効果の大きい適切な位置に対策井、観測井を設置し、揚水量を設定する。

地盤環境汚染（土壤汚染、地下水汚染）に係わる調査方法の解説は、本章で終了する。

地盤環境調査だけでなく、土木地質調査においても、調査結果を報告し、その成果を生かしてもらうためには、調査の次の段階、工法設計、施工について調査担当者が十分理解して報告しているかどうかが重要である。

特に、地盤環境調査の場合は調査の委託者が次ぎのステップについて、未知であるケースが多いので、調査担当者は次ぎのステップ、浄化対策について知識をもち、調査のあと対策設計、対策手法の検討をどうすればよいかを委託者にアドバイスすることが調査の完結に必要となる。即ち、地盤環境調査のコンサルテーションは浄化対策施工の概要検討を含むもと心得ていて欲しい。

そのような状況で、次号に、地盤環境汚染の修復に係わる対策施工、対策についてその概略を記して、この解説を終わることにしたい。

表7. 1 挥発性有機化合物土壌汚染の公定分析

項目	環境上の条件	測定方法
ジクロロメタン	検液1lにつき0.02mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2又は5.3.2に定める方法
四塩化炭素	検液1lにつき0.002mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2、5.3.1、5.4.1又は5.5に定める方法
1, 2-ジクロロエタン	検液1lにつき0.004mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2、5.3.1又は5.3.2に定める方法
1, 1-ジクロロエチレン	検液1lにつき0.02mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2又は5.3.2に定める方法
シスー1, 2-ジクロロエチレン	検液1lにつき0.04mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2又は5.3.2に定める方法
1, 1, 1-トリクロロエタン	検液1lにつき1mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2、5.3.1、5.4.1又は5.5に定める方法
1, 1, 2-トリクロロエタン	検液1lにつき0.006mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2、5.3.1、5.4.1又は5.5に定める方法
トリクロロエチレン	検液1lにつき0.03mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2、5.3.1、5.4.1又は5.5に定める方法
テトラクロロエチレン	検液1lにつき0.01mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2、5.3.1、5.4.1又は5.5に定める方法
1, 3-ジクロロプロパン	検液1lにつき0.002mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2又は5.3.1に定める方法
チウラム	検液1lにつき0.006mg以下であること。	昭和46年12月環境庁告示第59号付表4に掲げる方法
シマジン	検液1lにつき0.003mg以下であること。	昭和46年12月環境庁告示第59号付表5の第1又は第2に掲げる方法
チオベンカルブ	検液1lにつき0.02mg以下であること。	昭和46年12月環境庁告示第59号付表5の第1又は第2に掲げる方法
ベンゼン	検液1lにつき0.01mg以下であること。	日本工業規格K0125の5.1、5.2又は5.3.2に定める方法
2-ジクロロメタン、四塩化炭素、1, 2-ジクロロエタン、1, 1-ジクロロエチレン、シスー1, 2-ジクロロエチレン、1, 1, 1-トリクロロエタン、1, 1, 2-トリクロロエタン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、1, 3-ジクロロプロパン及びベンゼンについて	これらは揮発性が高いため、採取した土壌は密封できるガラス製容器又は測定の対象とする物質が吸着しない容器に空げきが残らないように収める。試験は土壌採取後直ちに行なう。試験を行えない場合には、4℃以下の冷暗所に保存し、できるだけ速やかに試験を行う。ただし、1, 3-ジクロロプロパンに係る土壌については、凍結保存するものとする。	次のようにする。
(1) 採取した土壌の取扱い	これらの物質は揮発性が高いため、採取した土壌は密封できるガラス製容器又は測定の対象とする物質が吸着しない容器に空げきが残らないように収める。試験は土壌採取後直ちに行なう。試験を行えない場合には、4℃以下の冷暗所に保存し、できるだけ速やかに試験を行う。ただし、1, 3-ジクロロプロパンに係る土壌については、凍結保存するものとする。	次のようにする。
(2) 試料の作成	採取した土壌からおおむね粒径5mmを超える中小礫、木片等を除く。	
(3) 試料液の調製	あらかじめかくはん子を入れたねじ口付三角フラスコに試料（単位g）と溶媒（純水に塩酸を加え、水素イオン濃度指数が5.8以上6.3以下となるようにしたもの）（単位ml）とを重要体積比10%の割合となるようにとり（注1）（注2）、速やかに密栓する。このとき、混合液が500ml以上となるようにし、かつ、混合液に対する口付三角フラスコのヘッドスペースができるだけ少なくなるようにする。	
(4) 溶出	調製した試料液を常温（おおむね20℃）常圧（おおむね1気圧）に保ちマグネチックスターラーで4時間連続してかくはんする（注3）。	
(5) 検液の作成	(1)から(4)の操作を行って得られた試料液を10分から30分程度静置後、ガラス製注射筒に静かに吸い取り、孔径0.45mmのメンブランフィルターを装着したろ紙ホルダー（用いるメンブランフィルターの直径に適合するものであってステンレス製又はこれと同等以上の材質によるもの）を接続して注射筒の内筒を押し、空気及び始めの数mlを排出し、次に共栓付試験管にろ液を分取し、定量に必要な量を正確に計り取って、これを検液とする（注4）。	
(注1)	使用するねじ口付三角フラスコに使用するかくはん子を入れ質量を測定する。これに水を満たして密栓し、その質量を測定する。前後の質量の差からねじ口付三角フラスコの空げき容量（単位ml）を求める。一度空げき容量を測定しておけば、同一容器及び同一かくはん子を用いることとすれば毎回測定する必要はなく、2回目以降は	

表7.2 挥発性有機塩素化合物汚染土壌の現地簡易分析作業手順

作業項目	作業の手順	注意事項
1. 現場簡易溶出試験	<ul style="list-style-type: none"> ① ガス採取孔付き500mlメジウムビンに、市販のミネラルウォーターを200mlはかり取り準備をしておく。 ② 試料採取地点において、所定深度の土壌を金属製ボルなどにできるだけ素早く採取する。ボーリング試料などはコアブロックごと抜き取る方がよい。 ③ 採取した土壌を天秤にて約20gはかり取り、予め用意してある500mlメジウムビンに移し入れ、密栓する。 ④ メジウムビンを1分間手で激しく振とうする。この際水中の土壌がよくほぐれていることを確認する。 ⑤ 25℃に保っている恒温水槽にメジウムビンを入れ、2分間以上入れて平衡状態にする。 ⑥ メジウムビンのガス採取孔より規定量のヘッドスペースガスをマイクロシリンジにより採取する。 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 移植ごてやボールなどは試料採取後、すみやかに水などで洗浄し、他試料への汚染を防止する。 (2) メジウムビンは、原則的に1試料につき1本使用し、再使用は行わない。 (3) ボーリングコア試料よりの採取は、コア内部の試料を採取する。 (4) 土壌以外でも清水の代わりに測定対象水を用いれば、水質試験として適用可能であり。
2. P I D-G C測定	<ul style="list-style-type: none"> ① クロ本体を所定の位置に据え置く。 ② ムオーブンを開き、カラムの状態（折れていないか等）をチェックする。 ③ 電源コードに通電し、高純度N₂ガスボンベ専用レギュレーターを取り付ける。 ④ テフロンチューブとGC本体を接続する。 ⑤ 専用レギュレーターの2次圧調整バルブを左に良く回し、（抵抗がなくなる程度）一次圧のバルブを開く。（一次圧の目盛りが30kgf/cm²以上あることを確認） ⑥ 二次圧の目盛りを5kgf/cm²にあわせる。 ⑦ 注入口を左に回し、中のセプタムを新しいものに交換する。（この時セプタムのかすが残っていることがあるので取り除く） ⑧ 検出器にP I Dランプが装着されているか確認する。 ⑨ キャリヤガス排出口より、ガスが流れているか確認する。（石鹼膜流量計等で流量がわかればB E S T（毎分10～15ml） ⑩ GCの電源を入れる。 ⑪ GCのマニュアルに従って、日付・時間を入力する。続いて注入口（検出器含む）の温度を110℃に設定し、5分間程度放置する。 ⑫ オーブンの温度を75℃に設定し、更に20分間安定させる。（安定時間は目安でありランプ・カラムの状態によって変わる。）理想的には、2時間程度掛かる。 	<p>電源(100v)の使用に当っては、管理者の許可を得ること。</p>

作業項目	作業の手順	注意事項
標準ガス測定及び空試験	<p>⑬ 標準ガスあるいは標準ヘッドスペースガスを2回以上測定し再現性及び感度をチェックする。</p> <p>⑭ 外気を測定し、シリンジ及び外気からのコントミがないか確認する。</p>	
土壤ガス試料測定	<p>⑮ 採取したのヘッドスペースガス測定を行う。時折標準ガスを測定して、ガス流量のずれを修正する。</p>	
測定の終了及び片付け	<p>⑯ 分析を終了させるには、GCの注入口（検出器含む）とオープンの温度を20°Cに設定する。</p> <p>⑰ GCの注入口（検出器含む）の温度が60°C以下になるまで放置する。</p> <p>⑱ 60°C以下になっているのを確認後、ボンベのバルブを閉める。</p> <p>⑲ 二次圧の目盛がゼロになってから、テフロンチューブとGC本体を分離する。</p> <p>⑳ ガスボンベからベギュレーターを取り外して終わる。</p>	
3. 測定結果の整理	<p>① 物質の同定 標準ヘッドスペースガス保持時間（リテンションタイム）と試料ヘッドスペースガスの検出ピークの保持時間を比較して、±2秒以内の場合、当該物質が検出されたと判定する。</p> <p>② 検出物質の簡易溶出量の定量 標準ヘッドスペースガスのピーク面積或いはピーク高さと土壤試料ヘッドスペースガスの検出ピーク面積或いはピーク高さを比較して、検出物質の簡易溶出量の定量を行う。</p> <p>③ 成分毎の定量下限値と定量値を比較して、当該物質の検出の有無を判定する。</p> <p>④ 表の作成 調査地点名、調査深度、測定成分毎の定量結果を一覧表としてまとめる。</p> <p>⑤ チャートの整理 標準ヘッドスペースガス、空試験、土壤試料ヘッドスペースガスの測定チャートを台紙に貼り付ける。</p>	
4. 土質と揮発性有機化合物濃度の鉛直方向濃度分布図の作成	地質柱状図、PID-GC（ポータブルガスクロマトグラフ、光イオン化検出器付きガスクロマトグラフ）現地測定結果、室内分析結果等の相関が分かるような、鉛直方向濃度分布図を必要に応じて作成する。	

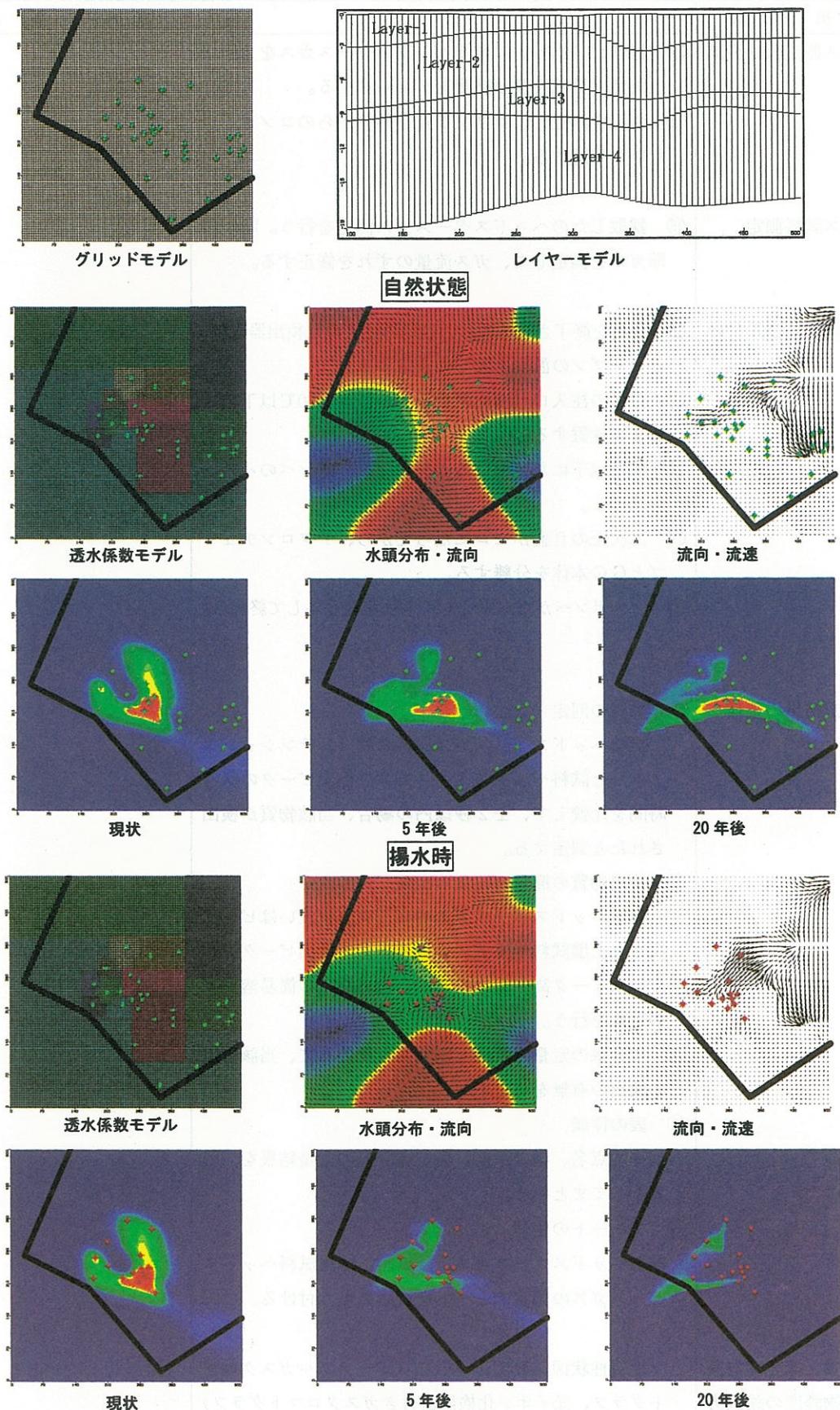


図7.5 地下水汚染、地下水流動、物質移行シミュレーションの例
 (森内博之) スミコン セルテック技術部、地下水汚染に関する水理計測と解析
 住鉱コンサルタント技術会議資料、2000より引用