

## ウォーバーン地下水汚染解析

指導教官 羽田野 祐子  
担当学生 200335237 市坪 夏子  
200335252 安河内 武志  
200335243 大島 純弥  
200335251 丸山 公輔

### 1. はじめに

2003 年 3 月、茨城県神栖町の井戸水から旧日本軍製の毒ガス由来とみられる有機ヒ素化合物が検出された。旧日本軍の毒ガス関連物質については、神栖町のほか神奈川県などでも相次いで見つかった。しかし、今回の井戸水汚染の原因解明については現在調査段階で未だ解明に至っておらず、直接つながる情報を入手することは困難である。

そこで、地下水汚染解析を行うにあたって、取り組みやすい過去の事例を扱うことにした。

今回扱った事例は、「マサチューセッツ州ウォーバーンにおける地下水汚染事件」である。この事例についての当時の調査資料は数多く公開され、かつて「シビル・アクション」として映画化もされている。

### 2. 目的

地下水汚染解析は、地下水の汚染を地質の状態から予測することで、汚染が発生した際の汚染の原因を特定し、対策を講じるために非常に役立つ重要なものである。

しかし、今回取り上げるウォーバーン地下水汚染では、汚染ルートは、地下水のテストによる推測（例えば、沢山の調査用井戸を掘って、ある地点の井戸から大量に水を注入した際に、別の地点のある井戸の水位が上がるという観測結果等から、水位が上がった井戸と、水を注入した井戸と地下水がつながっているという推測）のみで、汚染物質が混入したという検証がされないまま、裁判が

行われた。

そこで、このウォーバーン地下水汚染事件における、汚染物質の混入の検証を行い、汚染を確認することを、今回の演習の目的とする。

### 3. ウォーバーン地下水汚染事件

ウォーバーン市は、アメリカの東岸沿いにあるマサチューセッツ州の都市ボストンの、北約 20 キロの所に位置しており、人口は 3 万 6000 人の小さい市である。ボストンとの位置関係は、図 1 参照。

この場所で、1960 年代後半に、白血病による死者を多く出した地下水汚染事件が発生した。



Fig1. ウォーバーン市位置図

#### 3.1. ウォーバーン地下水汚染事件の発端

ウォーバーン市で、今回の事件とは全く関係のない、産業廃棄物の不法投棄事件があり、その時に行われた井戸の水質調査で、汚染が発覚した。さらに、市が水源として使用している井戸 A ~ 井

戸Hのうち、井戸Gと井戸Hが、トリクロロエチレンという物質で汚染されていることが判明した。



Fig2. 分析対象地域

### 3.2. 地下水汚染の概要

この汚染されていた井戸Gと井戸Hは、比較的新しく掘られた井戸である。それまでの井戸は、市の中心部に有ったが、このGとHは市の東側の、アバジョナ川という川の近くに、新しく作られた。

汚染が発覚した後、EPA（環境保護庁）がアバジョナ川付近の地下水を調査した所、井戸Gと井戸Hの北東側や、西側のアバジョナ川流域から、高濃度のトリクロロエチレンが検出された。

このトリクロロエチレンとは、重大な神経系統の病気を発生させ、細胞の突然変異やガンを引き起こす事が判っている。よって、今回の白血病多発の原因と考えられた。

ここで、どこからこのトリクロロエチレンが流れてきたのかが、問題となる。EPAの調査では、いくつかの工場の名前を、汚染源の可能性があったとしていたが、断定は出来なかった。

しかし、ウォーバーン市の住民達は、汚染源となっている可能性が非常に高い2つの会社が、地下水を汚染した事は間違いないとして、謝罪を求めて、訴えを起こした。

### 3.3. 地下水汚染源となった会社

住民達が地下水汚染源とした会社は2社である。

一つはジョン・J・ライリー製革所。この会社は、水源の西側に位置し、革製品を製造しており、革製品を製造する際の、革をなめす時に、汚染物質を使用している可能性が高いと思われた。

もう一つは、W・R・グレース社。この会社は、水源の北東に位置する、化学製品製造会社である。この会社は、食品パッケージ用の、ステンレス製の機器を製造している。この機器を製造する際の、洗浄を行う時に、汚染物質を使用している可能性が高いと思われた。

そのため、住民側は、この2社を訴えることにした。



Fig3. 汚染源位置図

(参考文献1より)

### 3.4. 裁判の経緯

裁判の焦点は、誰が地下を汚染したか？そして、その汚染物質が水源に流れ込んだのかが焦点となった。その為、誰が本当に水源を汚染したか否かの証明が、非常に重要となった。

そこで調査を始めたが、誰が地下水を汚染したか否かについては、汚染した時期が1960年代で裁判が始まったのが1980年代であり、その当時の状況が残っていない為、関係者からの証言と汚染していたという目撃情報に頼らざるを得なかった。

次に、汚染物質が水源に流れ込んだかについて、

調査エリア全体の広範囲に渡って、多数の調査用井戸を掘り、ある地点から色を付けた水を注入し、その他の地点に、色の付いた水が到達したか、水位がどれ位変化したか等の実験を繰り返し、その結果から地下水の流れを推測するという方法が、採られた。調査では、計 134 個の井戸が掘られ、各種の試験が行われ、その結果から汚染物質の流れが推測された。

### 3.5. 調査結果

ジョン・J・ライリー製革会社について、その当時の従業員が、革の製造過程を誰一人として証言せず（証言に強制力は無い）、汚染物質を地中に捨てたという証言もしなかったため、地下を汚染したという確証は得られなかった。但し、ライリーの敷地の地下水が、恐らく井戸GとHに流れ込み、水源を汚染したという推論は、調査より得られた。

W・R・グレース社について、関係者より、トリクロロエチレンを使用していたという事実や、不法投棄をしたという証言を得る事が出来、地下を汚染したという確証を得た。又、W・R・グレース社の敷地の地下水が、恐らく井戸GとHに流れ込み、水源を汚染したという推論も、調査より得られた。

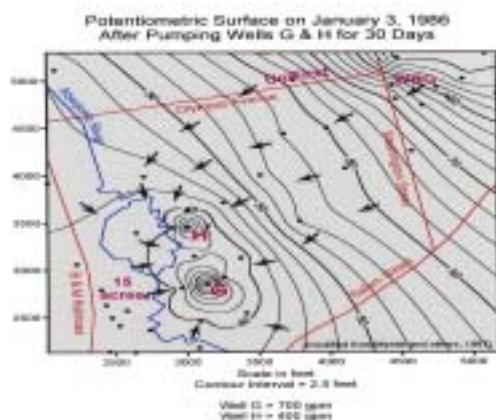


Fig4. 地下水流調査結果（参考文献1より）

### 3.6. 裁判結果

地下水の流れと汚染物質の流出についての調査に基づいて、審議が行われた。アメリカの裁判は、陪審制を敷いているため、まず陪審員による審議が行われた後、裁判が行われた。

ジョン・J・ライリー製革会社については、陪審員は、汚染物質を流しているという確証が無かった為、審議を継続することが拒否した。よって、無罪となった。

W・R・グレース社については、陪審員は、汚染物質を流しているという確証があったため、審議を継続する事を可決した。

しかしその後、原告側の資金不足もあり、（地下水汚染の証拠をもっと集めるには、調査用井戸を大量に掘ったり、長期間に渡る地下水流のテストを行う必要があるため、とてつもない資金が必要となる）結果的に、800万ドルで和解した。

裁判は、このような結果になったが、本当に正しい事実に基づく裁判だったのだろうか。もし、推測が事実と異なっていると、正しい裁判も行う事は出来ないで、今回のような地下水汚染を正確に解析することが重要になる。そこで本研究では、ウォーバーン地下水汚染事例を科学的に分析することとした。

### 4. 地下水汚染解析

今回取り上げたウォーバーンの事例では、裁判は、地下水流の調査結果からの推測のみに基づいて審議された。

正確な判断を行う為には、汚染源が確かに地下水を汚染したという証拠が必要になる。解析手法に基づいて解析すれば、汚染源が確かに地下水を汚染したという証拠を得ることが出来る。

本演習では、正確な立地場所が入りできたW・R・グレース社から井戸GとHに汚染物質が流入したかどうかという点について解析を行うことにした。

地下水汚染の解析は、地層の状態から地下水の汚染を予測する、MODFLOWというツールを用いて解析を行う。

#### 4.1.地下水汚染解析の用語説明

##### 透水係数 (K)

飽和透水係数とは土層の間隙が水で飽和した状態において、その土層が単位断面積・単位時間あたりにどれだけの水量を流し得るか(単位は cm/sec)を表す値である。

通常、透水係数が 10-1cm/sec 以上を透水度が高い(例えば、粗粒～中粒のレキなど)、10-1～10-3cm/sec を普通(砂など)、10-3～10-5cm/sec を低い(シルトなど)、10-5～10-7cm/sec を非常に低い(シルト～粘土など)、10-7cm/sec 以下を不透水(均質な粘土など)と称する。

##### 水頭

水頭とはある基準の高さから測定した地下水面の高さのことをいう。

水の流れに関するエネルギーには、固体と同様に運動エネルギー - と位置エネルギー - が存在する。また、流体特有のものとして圧力エネルギー - がある。この3つのエネルギー - を合計したものを全エネルギー - という。

また、各エネルギーは、水頭で表すことができる。

運動エネルギー 速度水頭 ( $v^2/2g$ )

位置エネルギー 位置水頭 ( $z$ )

圧力エネルギー 圧力水頭 ( $p/\rho g$ )

全エネルギー 全水頭 ( $E = v^2/2g + z + p/\rho g$ )

: 一定 (ベルヌーイの定理)

##### 涵養 (かんよう)

水を地下に投入して地下水の量を増やそうとすること。ここでは単位時間あたりに地下水量がどれだけ増えたかをさす。

##### 拡散係数

物質中の原子あるいは分子が散らばっていく速さ、混ざり易さを示すもの。

##### コンダクタンス

帯水層から河川への流れやすさの度合いを示すための MODFLOW 特有の表現。

$$C = K/B * (AREA)$$

C : コンダクタンス

K : 川底の縦方向の透水係数

B : 川底の厚さ

AREA : 河川幅と河川長の積

##### 定常流

時間に依存せずある一定状態で流れる状態のこと。

##### 間隙率

土全体の体積に対する土粒子以外の間隙の体積の比率のこと。

#### 4.2. MODFLOW 概要

MODFLOWは、土木業界で標準となっている、地下水解析ソフトであり、汚染物質が、地層内での拡散と、地下水の流れ(これを移流と言います)に乗ることで、地下をどのように移動するかをシミュレーションするツールである。このツールは現在、あらゆる機関、地域で、地下水汚染を解析する為に、正式に採用されている。

拡散とは、流れが全く無くても、汚染物質が溶けて広がってゆく現象を言う。コップの中の水に砂糖を入れた時、砂糖は水をかき混ぜたりしなくても、溶けて行く。このような現象を拡散と言う。

移流とは、言葉通り、地下水の流れに乗って汚染物質が移動する現象を指す。

この2つの要素を考慮して、MODFLOWは作られた。

4.3. MODFLOW原理

MODFLOWの原理式を、式 4.3-1 に示す。

$$\frac{C}{t} = -V \frac{C}{X} + D \frac{C}{X^2}$$

C : 汚染物質の地下水中の濃度 [ g / l ]

V : 地下水の平均流速 [ m/S ]

D : 拡散係数

t : 経過時間 [ s ]

(式 4.3-1)

この式の左辺は、汚染物質の地下水中の濃度が、経過時間に比例することを示している。

右辺の第一項は、先の説明にもあった地下水の流れ(移流)による汚染物質の移動による影響を、第二項は拡散による汚染物質の移動による影響を、それぞれ示している。

また、次の法則がこの原理式の基となっている。

Fick の法則

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

J : フラックス

(式 4.3-2)

物質のフラックスは濃度勾配に比例するという法則のことをいう。フラックスとは単位断面積を単位時間に通過する物質の質量のことである。たとえば、水蒸気が乾燥空气中を拡散していく速度は水蒸気の濃度勾配に比例するという現象を説明する。

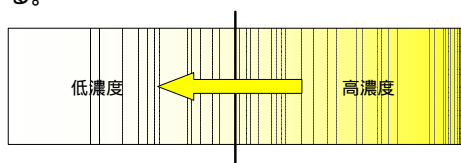


Fig5. Fick の法則のイメージ

ダルシーの法則

$$Q = KA \frac{h}{L}$$

Q : 流量 ( 単位時間あたりに流れる水の体積 )

K : 透水係数 ( 地質媒体に依存 )

h : 水頭差 ( 入り口と出口の水位の差 )

A : 管の断面積

L : 管の長さ

(式 4.2-2)

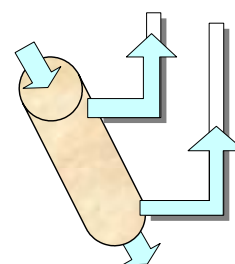


Fig6. ダルシーの法則のイメージ

また、MODFLOWの原理式が表す汚染物質の広がりのイメージは、図7のようになる。

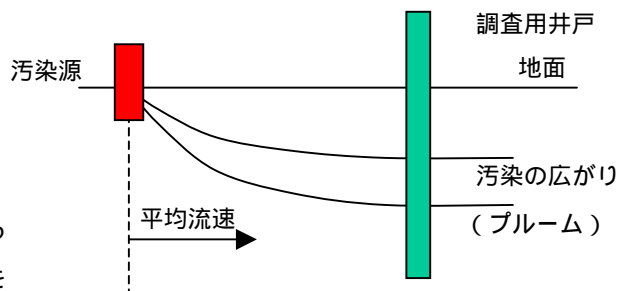


Fig7. 汚染物質の広がり方概要

汚染源から汚染物質が流れ出した場合、地中を拡散しながら、地下水の流れに乗って広がって行き、このように汚染が広がる。これをブルームと言う。

実際には、調査用井戸を掘り、そこから地質の状態や地下水の平均流速が判れば、汚染源から調査用井戸を掘った所までの、汚染の広がりの断面



図が、MODFLOWより得られる。

この原理を使ったMODFLOWの既存のソフトがあり、今回はそのツールを使用する事とした。

### 5. MODFLOW解析

MODFLOWによる解析は、以下の手順で行った。

#### ・モデルの概念化

モデルの設定にあたり、使用した単位は以下の通りである。

長さ：フィート 時間：日  
 透水性：ft/日 涵養：インチ/年  
 質量：kg 濃度： $\mu\text{g/l}$

#### ・モデルの構築

分析対象地域においてモデルグリッドを構築する。



Fig8. 対象地におけるモデルグリッド

また、モデルの構築にあたり、以下の数値を標準値として使用した。

透水係数  $K_x(\text{ft/d}) : 200$   
 $K_y(\text{ft/d}) : 200$   
 $K_z(\text{ft/d}) : 20$   
 貯留係数  $S_s(1/\text{ft}) : 0.0013$   
 $S_y : 0.18$   
 有効間隙率 : 0.20

全間隙率 : 0.23

終了時間(day) : 7300

涵養(in/yr) : 15

#### ・モデルのプロパティと境界条件の入力

図9をもとに定水頭の指定を行う。

水頭(ft) : 開始点 94、終了点 50

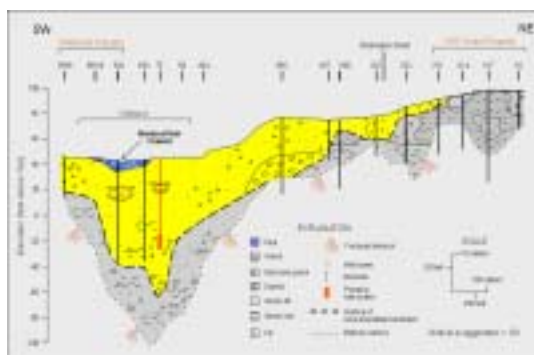


Fig9. 対象地における水頭差

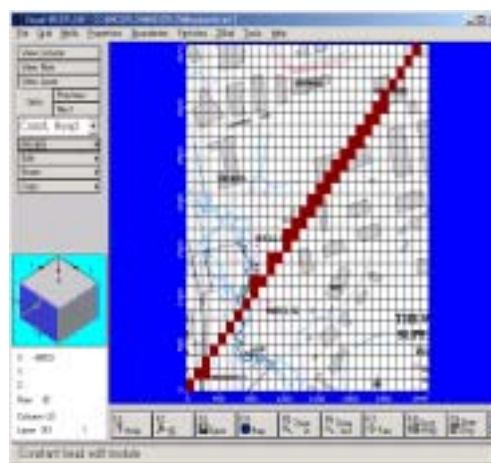


Fig10. 定水頭の設定

さらに、河川を指定する。

	河川	川底	コンダクタンス
	標高(m)	標高(m)	(ft <sup>2</sup> /day)
開始点	94	90	200
終了点	50	46	200

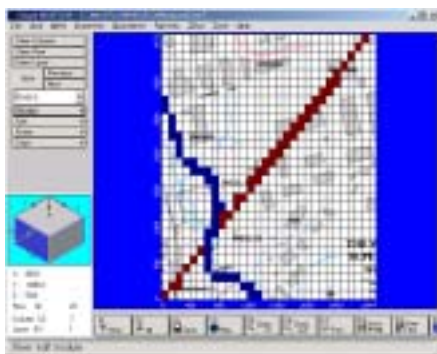


fig11.河川の設定

・ 粒子追跡位置の指定

粒子追跡位置を指定し、流れを定常流に設定する。



Fig12.粒子追跡位置の指定

・ MODFLOWとMODPATHの実行

・ モデル結果の視覚化

標準値を用いた結果、汚染源から井戸までの地下水の到達日数は約1年となった。

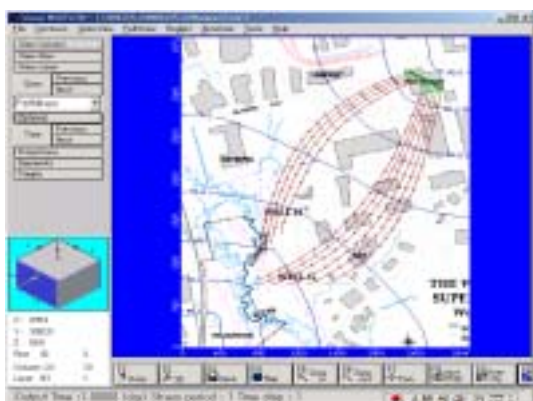


Fig13.結果の視覚化

不確実性解析

さらに、使用した数値のうち不確実性の高い透水係数については、1/10倍～10倍の値の幅を考慮して解析を行った。

この幅を持たせた解析の結果、到達までにかかる時間は約35日～3500日となった。

6. 考察

- ・ 汚染範囲は当時の推測と同じ結果となったことから、当時の推測は正しいと考えられる。
- ・ 汚染物質は35日～3500日(約1年～10年)で到達する結果となった。井戸は1964年～1979年まで使用されていたことから、汚染物質の投棄時期は1954年以降であると推測できる。
- ・ グレース社自身も汚染物質の投棄時期は1960年代～70年代半ばと公表している。仮に1960年から投棄していたと仮定すると、井戸の使用を開始した1964年にはすでに汚染物質は井戸付近の土壌へ到達していたと推測できる。したがって、1966年以降この付近で白血病が流行した原因の事象として、十分に考えられる。
- ・ 汚染を除去するためには、以下の作業が有効と考えられる。

方法 地下水を浄化する。

1. 汚染された地下水を吸い上げ、地下へ戻すための井戸を掘る。
2. 除去された地下水を吸い上げ、処理施設で浄化する。
3. 浄化した地下水を再び地下へ戻す。

方法 土壌ごと浄化する。

1. 汚染された地域の土壌を掘り出す。
2. 汚染された土壌を薬品等により浄化する。
3. 浄化した土壌を再び元の掘り起こした場所へ戻す。

これらの浄化行程においても、汚染された地域を特定するために MODFLOW による解析は有効と考えられる。

#### 7.参考文献

- 1) Spatial Analysis in Public Health:  
<http://www.sph.umich.edu/geomed/grabber/>
- 2) 新潮文庫 シビルアクション
- 3) U.S.GEOLOGICAL SURVEY AREA OF INFLUENCE AND ZONE OF CONTRIBUTION TO SUPERFUND-SITE WELLS G AND H, WOBURN, MASSACHUSETTS
- 4) WHI 社編 VISUAL MODFLOW TUTORIAL