

# ウォーバーン 地下水汚染解析

2班

指導教官

担当学生

羽田野 祐子

200335237 市坪 夏子

200335243 大島 純弥

200335251 丸山 公輔

200335252 安河内 武志

# 発表内容

- 地下水汚染解析の目的
- ウォーバーン地下水汚染事件の概要
- 地下水汚染の解析方法
- MODFLOW解析
- 解析結果と考察

# 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。
- 神栖町の事例は調査段階  
未だ解明に至っていない。  
井戸水汚染の原因解明に直接つながる情報は得られず。

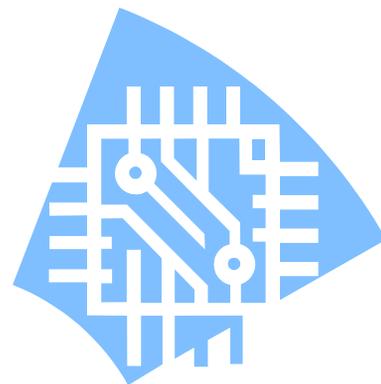
# はじめに

- 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った。
- 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」
- 当時の調査資料は数多く公開され、映画化もされている。

「シビル・アクション」 ジョン・トラボルタ主演

# 第1章

## 地下水汚染解析の目的



# 地下水汚染解析とは

- 地下水汚染解析とは、地下水の汚染の時間的・空間的な広がりを、地質の状態から予測する事である。
- 地下水汚染の原因を特定し、対策を講じる為には、地下水汚染解析は非常に重要である。

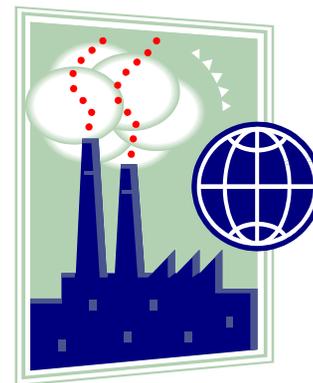
# 地下水汚染解析とは

- しかし、今回取り上げるウォーバーン地下水汚染の事例では、汚染ルートは、地下水流の実験による推測のみだった。

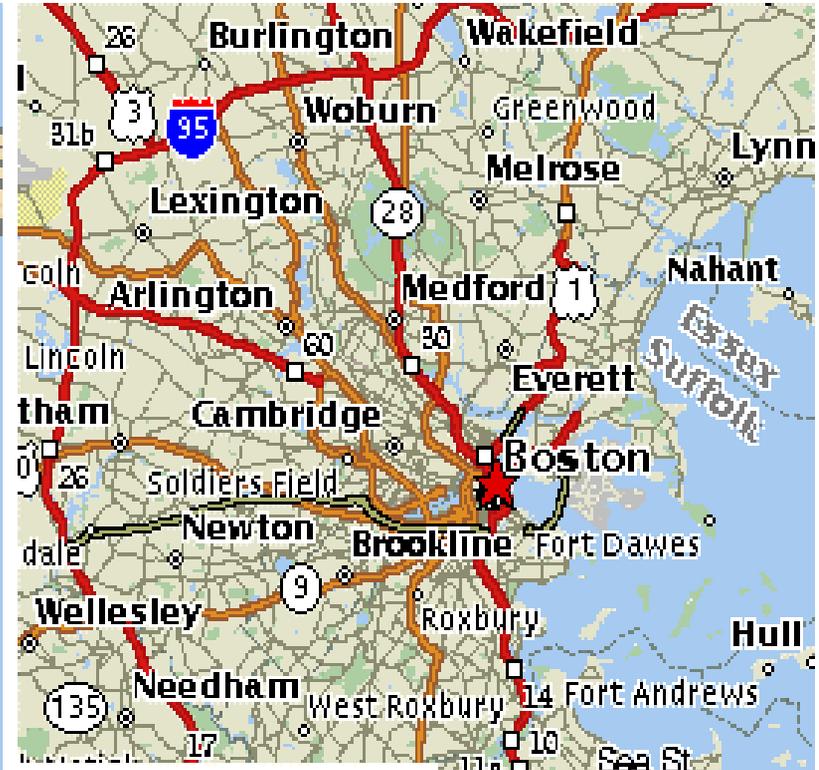
ウォーバーン地下水汚染での、物質の混入の検証を行う事が、今回の演習の目的

# 第2章

## ウォーバーン地下水汚染 事件の概要



# ウォーバーン市



MapQuest.com より

# ウォーバーン市

- アメリカの東海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20kmの所に位置しており、人口は約3万6000人の小さい都市である。
- 古くから製革の町として知られ、大規模な化学薬品工場も建設されていた。
- しかし、第2次世界大戦後、皮革産業は衰退一途で、1966年当時、市内で操業する製革所は1ヶ所のみであった。

# ウォーバーン地下水汚染事件

- 1964年、ウォーバーン市の水道に新しい井戸Gから汲み上げられた水が流れ始める。
- 1967年、同じ帯水層の井戸Hも揚水を開始する。

住民は、まもなく水の味の異変に気づく。

# ウォーバーン地下水汚染事件

- 1966年以降、ウォーバーン市内で白血病が流行する。

市内の比較的狭い範囲で、子供に集中して発病。

白血病に限らず、周辺住民の健康に甚大な影響を与えた。

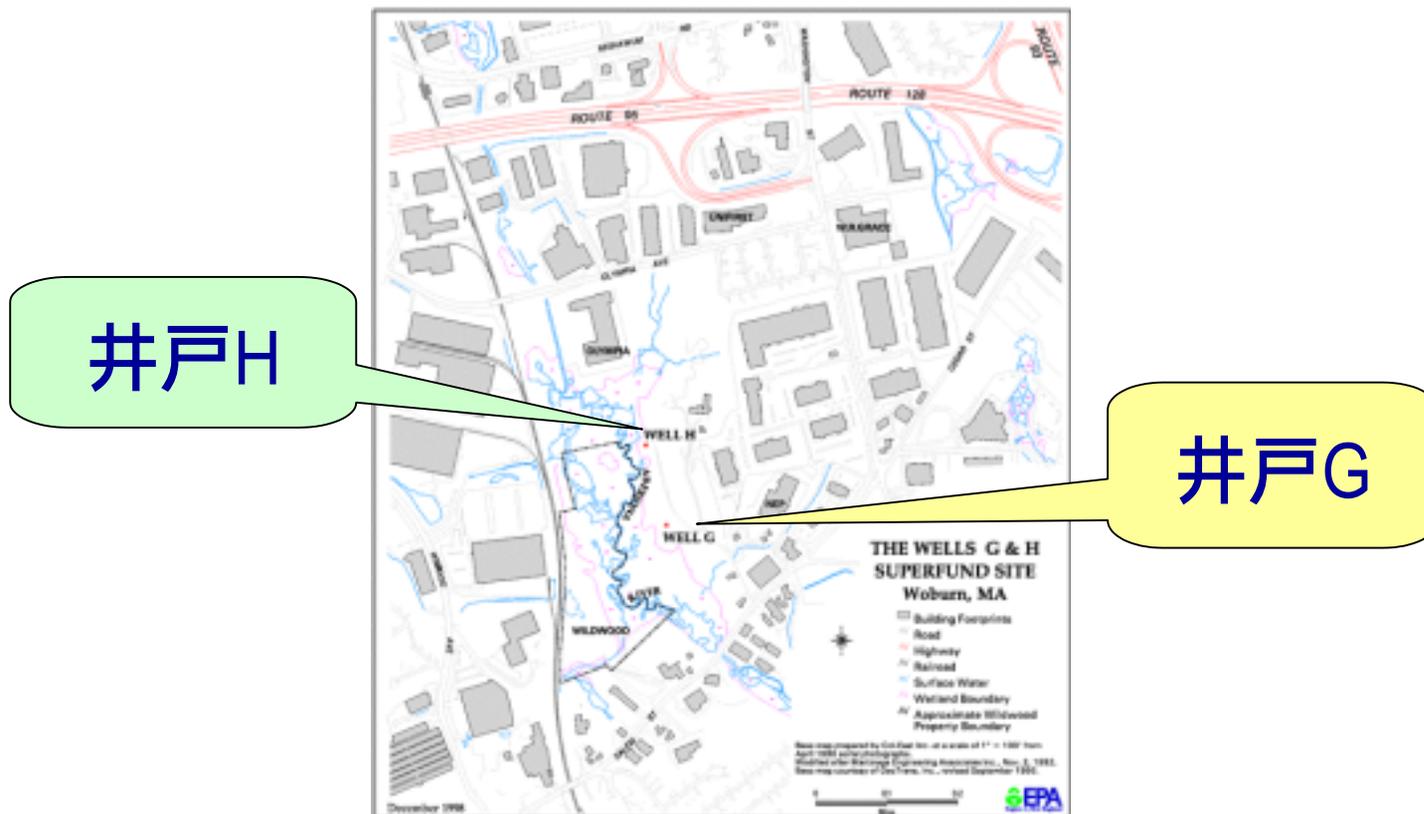
# ウォーバーン地下水汚染事件

- 1979年春、この事件とは別件の、産業廃棄物の不法投棄事件をきっかけに、市の水源となる井戸の水質調査が行われる。

その結果、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に汚染されている事が判明

# ウォーバーン地下水汚染事件

## 井戸の位置図



[<http://www.epa.gov/region01/remed/sfsites/wellsgh/map.gif>]

# トリクロロエチレン

- 発ガンの疑いがある工業用溶剤
- Trichloroethylene  $\text{Cl}_2\text{C} = \text{CHCl}$

## 主な物理的性質

- 無色透明の液体で、比重1.459、沸点は87℃、融点は-70℃。
- エチレン( $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ )を構成する水素原子(H)のうちの3個を塩素原子(Cl)で置換した有機塩素化合物の一種で、クロロホルムのような臭いがする。揮発性である。

# トリクロロエチレン

## 主な用途

- 電子機器や精密機器の部品などの脱脂洗浄剤のほか、溶剤、香料の抽出剤などでも用いられている。

## 人体への影響

- 肝臓や腎臓の機能障害などの恐れがある。また動物実験により発ガン性が見つかっており、その影響が危惧されている。ただし人体へは蓄積はしない為、環境ホルモンとは異なる。

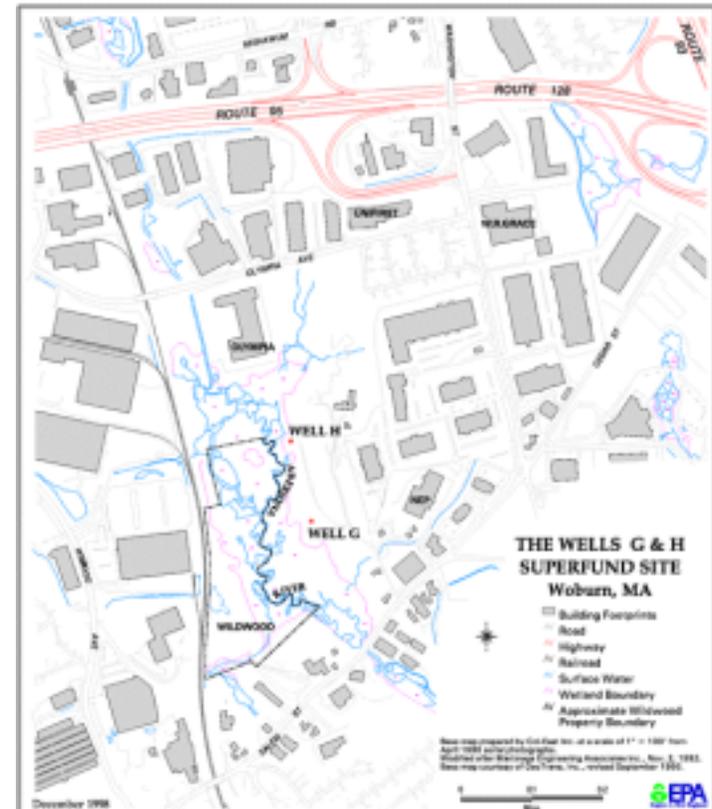
# トリクロロエチレン

## 日本における法例による環境基準

- 年間平均が、大気中では $0.2 \text{ mg/m}^3$  以下、水質では $0.03 \text{ mg/l}$  以下を保たなくてはならない。
- 「有害大気汚染物質」に該当する可能性のある234物質の1つであり、健康リスクがある程度高い22の「優先取組物質」の1つに選定され、さらに、健康被害を防止するためその排出又は飛散を早急に抑制しなければならない4つの「指定物質」の1つに選定されている。

# 地下水汚染の概要

- 環境保護庁が、東ウォーバーンのアバジヨナ川流域の水源GとHの周囲180ha(1.6km<sup>2</sup>)を調査。
- 北東側や西側の地下水から高濃度のトリクロロエチレンを検出。さらに、西側のアバジヨナ川沿いにある6haほどの雑木林の地下からも、高濃度のトリクロロエチレンが検出された。井戸GとHに流れ込んだと考えられた。



[<http://www.epa.gov/region01/remed/sfsites/wellsgh/map.gif>]

# 地下水汚染の概要

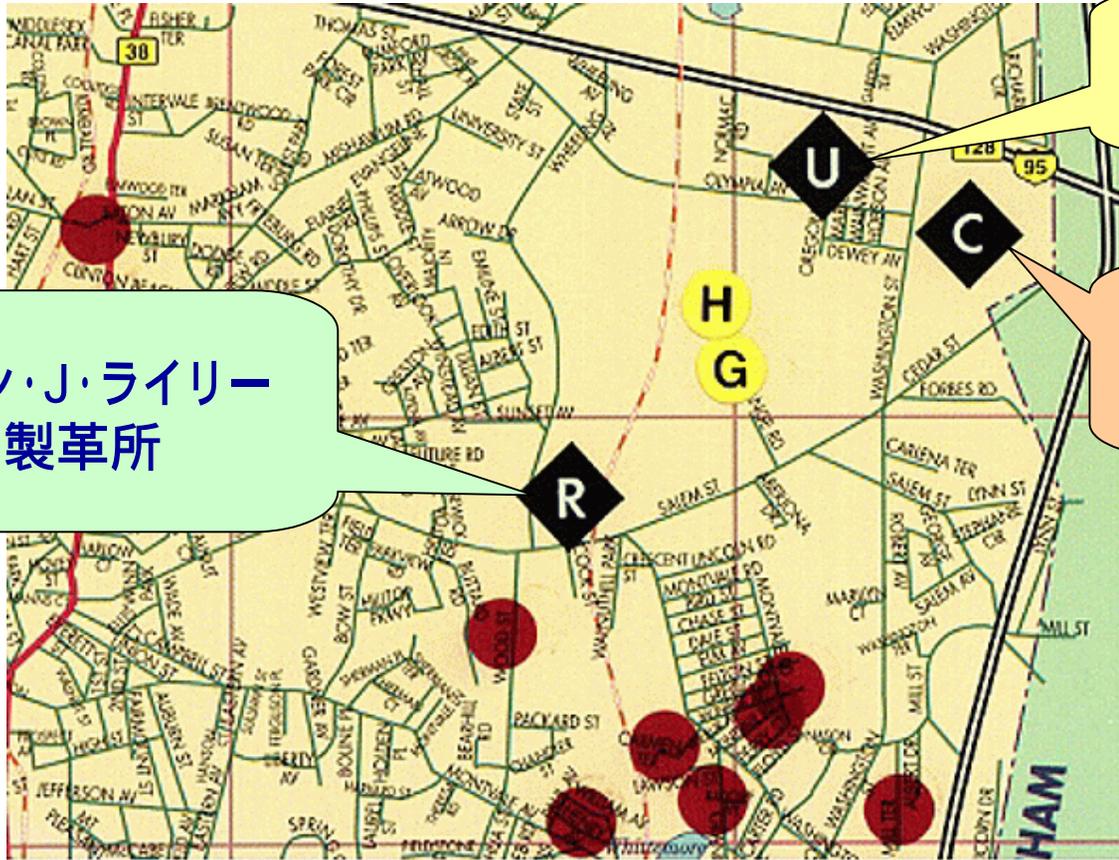
- トリクロロエチレンは、重大な神経系統の病気を発生させ、細胞の突然変異とガンを引き起こす。

今回の白血病多発の原因となり得る。

- 付近にトリクロロエチレンを扱っている工場が複数存在。

汚染源となっている可能性が高い2社を、1982年に訴える。

# 地下水汚染源の会社 - 概要



[<http://www.sph.umich.edu/geomed/grabber/>]

# 地下水汚染源の会社 - 概要

- ユニファースト社

  - 水源の北側に位置するクリーニング屋。

  - クリーニング時に汚染物質を使用していた可能性がある。

- ジョン・J・ライリー製革所

  - 水源の西側に位置する製革所。

  - 革をなめす為に汚染物質を使用していた可能性がある。

- W・R・グレース社

  - 水源の北東に位置する化学製品製造会社。

  - 製品の洗浄の為に汚染物質を使用していた可能性がある。

# 裁判の経緯

- 焦点

誰が地下を汚染したか？

どのように水源を汚染したかが焦点。

- 調査方法 - 誰が地下水を汚染したか？

調査方法は、聞取調査と目撃調査のみ。

- 調査方法 - その汚染物質が水源に流れ込んだか？

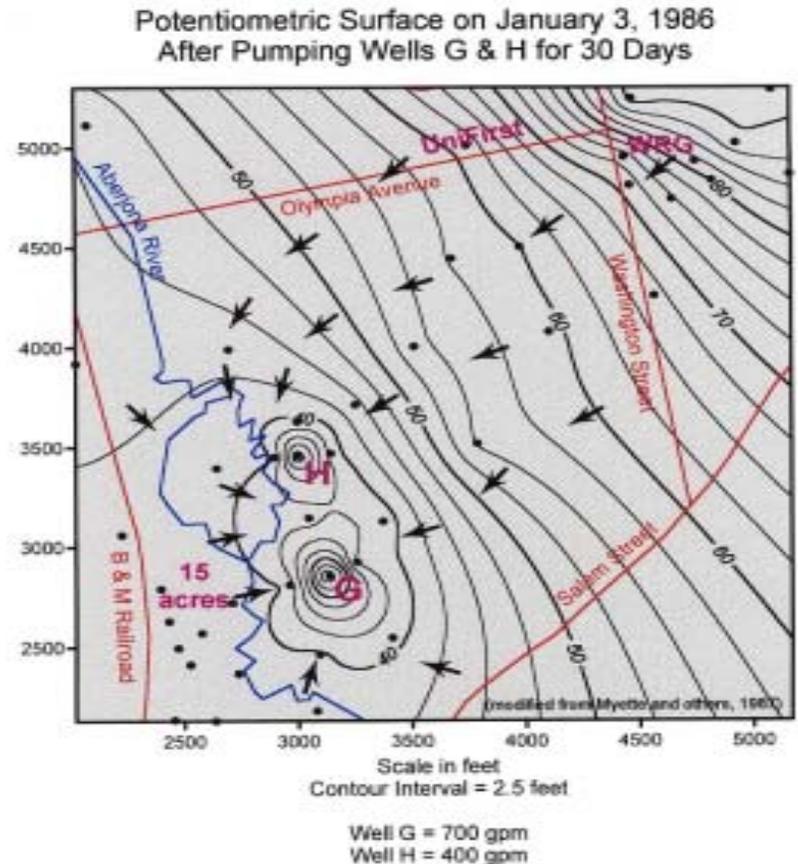
地下水の流れを調査。調査方法は、ある地点から色を付けた水を注入し、その他の地点で水の色や水位を観測する事で、地下水の流れを推測。

# 調査結果 - 汚染物質の投棄

- ユニファースト社について  
それほど汚染に関与していなかったと思われた。
- ジョン・J・ライリー製革所について  
革製品の製造過程や、汚染しているという証言を得られなかった為、地下を汚染したという確証を得られず。
- W・R・グレース社について  
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た為、地下を汚染したという確証を得る。

# 調査結果 - 地下水の流れ

- ジョン・J・ライリー製革会社について  
ライリーの敷地の地下水が、恐らく井戸GやHに流れ込んだ為、水源を汚染したという推論が、調査より得られた。
- W・R・グレース社について  
グレースの敷地の地下水が、恐らく井戸GやHに流れ込んだ為、水源を汚染したという推論が、調査より得られた。



[<http://www.sph.umich.edu/geo/med/grabber/>]

# 裁判結果

- ユニファースト社  
当時、原告の訴訟の相手となっていなかった。
- ジョン・J・ライリー製革所  
地下を汚染したという確証が無かった。  
その為、陪審員が汚染はしていないと判断、審議の継続を拒否。  
その後、原告側は最高裁判所へ裁量上訴状まで出すが、結局却下。
- W・R・グレース社について  
地下を汚染していたという確証があった。  
その為、陪審員が汚染したと判断、審議の継続を可決。  
しかし、原告側の資金不足もあり、800万ドルで和解。

# 第3章

## 地下水汚染の解析方法



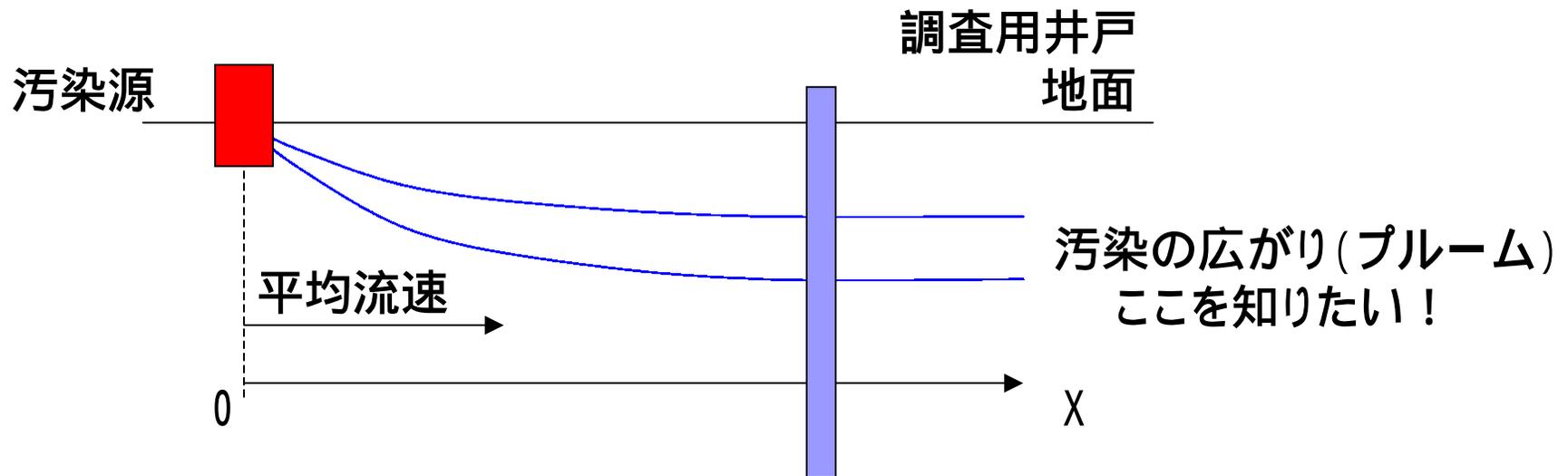
# 地下水汚染の解析方法

- 今回の裁判は、地下水の流れの調査結果からの、推測による確証に基づいて審議された。  
汚染物質は、どうやら井戸に流れ込んだらしいという推測があったのみ。
- 正しい判断を行う為に、汚染源が、地下水を汚染したという証拠が必要。  
解析を行う事で、確かに汚染したという証拠を得る。
- 本演習では、正確な立地場所が入手できたW・R・グレース社からの井戸GとHへの汚染物質の流入について解析を行う。
- 地下水汚染の解析は、どのようにして行うか？  
解析は、MODFLOWというツールを用いて行う。

# MODFLOWとは

- MODFLOWは、業界標準の地下水解析ソフト  
地層内での拡散と、地下水の流れ(移流)に乗る事で、汚染物質が地下水内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。
- 拡散  
流れが全く無くても、汚染物質が溶けて広がって行く現象。
- 移流  
地下水の流れに乗って、汚染物質が移動する現象。

# 実際の汚染物質が拡がるイメージ



# 地下水解析の用語説明

## 透水係数 (K)

- 土層においての水の浸透しやすさを表す値。
- 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。
- 通常、透水係数が $10^{-1}$ cm/sec以上を透水度が高い(例えば、粗粒～中粒のレキなど)、 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ cm/secを普通(砂など)、 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ cm/secを低い(シルトなど)、 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/secを非常に低い(シルト～粘土など)、 $10^{-7}$ cm/sec以下を不透水(均質な粘土など)と称する。

# 地下水解析の用語説明

## 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。特に土全体の体積に対する地下水の割合を有効間隙率という。

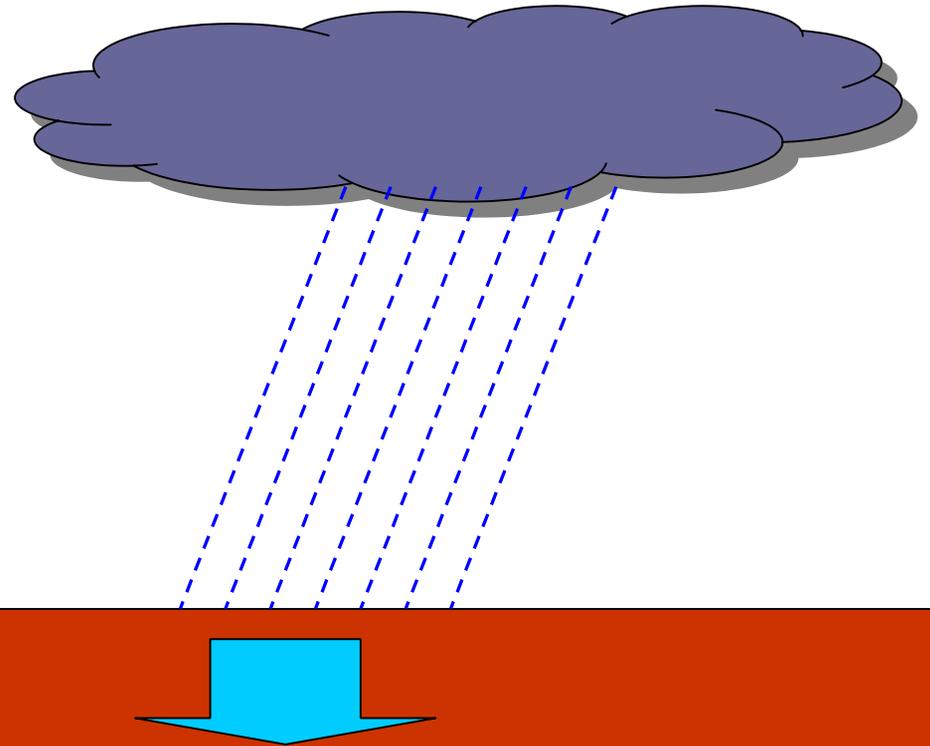
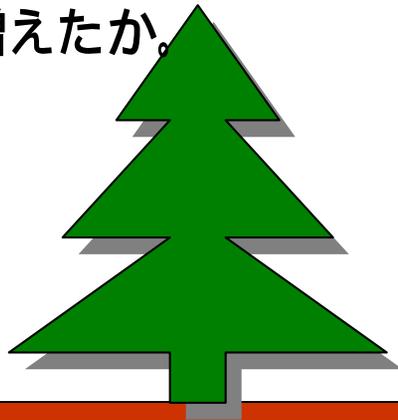
## 貯留係数

- その地層がどのくらい水を貯めうるかの指標を表す値。今回使用する値は層の厚みを考慮した値と単位長さあたりの値の2つ。

# 地下水解析の用語説明

## ・涵養

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



# 地下水解析の用語説明

## 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。

# 地下水解析の用語説明

## 水頭

- ある基準の高さから測定した地下水面の高さ。
- 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 ( $p / g$ )
全エネルギー	全水頭 ( $E = v^2 / 2g + z + p / g$ ): 一定 (ベルヌーイの定理)

# MODFLOWの原理

## ■ Fick の法則

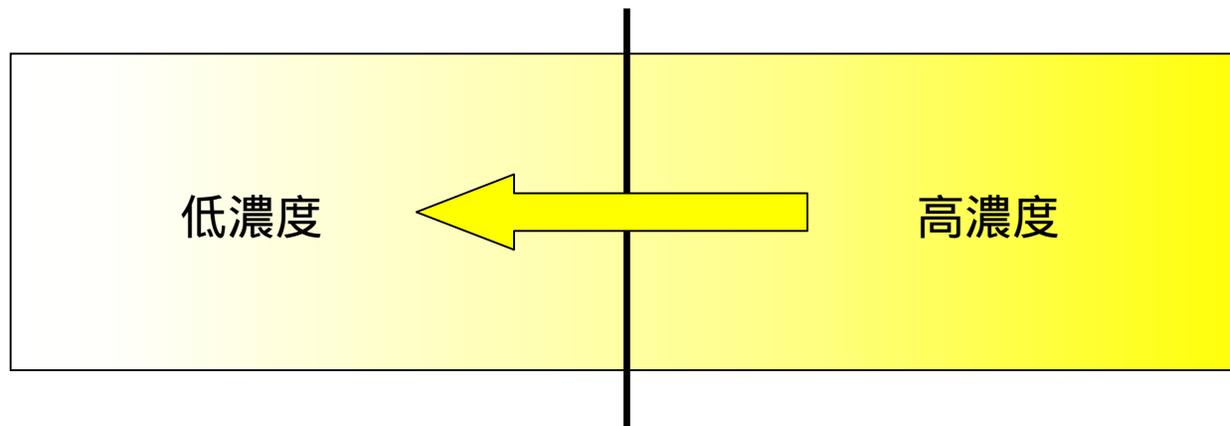
物質のフラックスは濃度勾配に比例するという法則。

フラックス 単位断面積を単位時間に通過する物質の質量。

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法則。

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

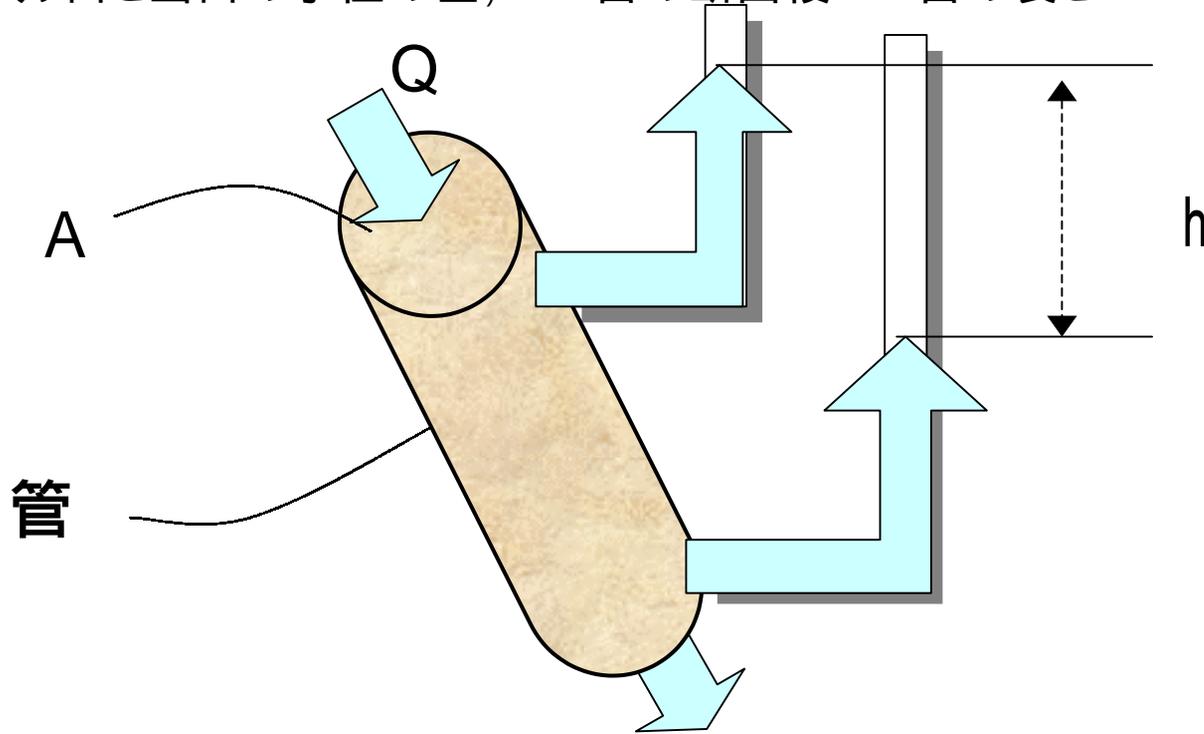
J: フラックス C: 物質の濃度 D: 拡散係数



# MODFLOWの原理

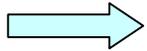
■ ダルシーの法則  $Q = KA \frac{\Delta h}{L}$

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



# MODFLOWの原理

- MODFLOWの基礎になる式は、下記の通り。

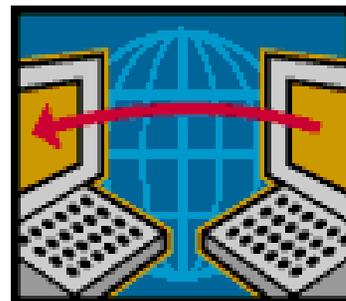


C : 汚染物質の地下水中の濃度 [g/l]    V : 地下水の平均流速 [m/S]  
D : 拡散係数    t : 経過時間 [s]    x : 汚染源からの距離 [m]

- Fickの法則を基にしている。

# 第4章

## MODFLOW解析



# MODFLOW解析の手順

モデルの概念化

モデルの構築

モデルのプロパティと境界条件の入力

粒子追跡位置の指定

MODFLOWとMODPATHの実行

モデル結果の視覚化

不確実性解析

# モデルの概念化



# モデルの概念化

長さ : feet                    涵養 : inches/year  
時間 : days                    質量 : kg  
透水性 : ft/day                濃度 :  $\mu\text{g/L}$

C:\MODFLOW\MODFLOW#woburn9.vmf

Create model using base Map

Map File: C:\MODFLOW\MODFLOW#map.bm

Model Domain

Columns (j): 30                    Rows (i): 30

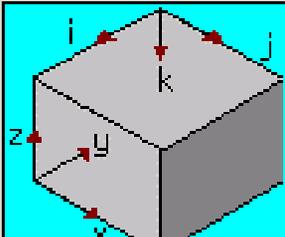
Xmin: 0 [ft]                    Ymin: 0 [ft]

Xmax: 1000 [ft]                    Ymax: 1000 [ft]

Layers (k): 1

Zmin: 0 [ft]                    Zmax: 100 [ft]

Setup Transport Model



Units

Length: feet

Time: days

Conductivity: ft/day

Pumping Rate: US gpm

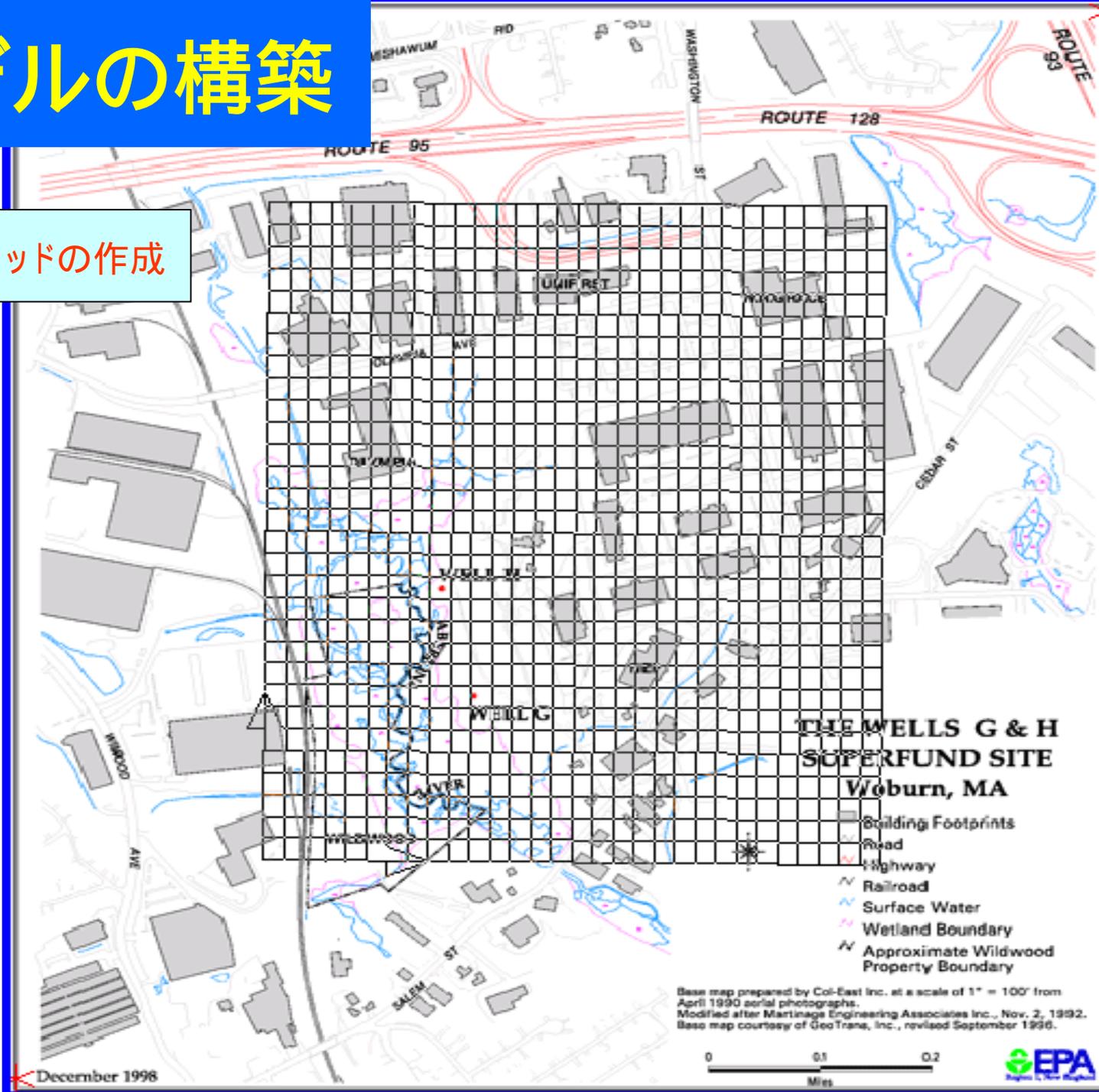
Recharge: inches/year

Mass: kg

Concentration: g/L

# モデルの構築

モデルグリッドの作成



# モデルのプロパティと境界条件の入力

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

Default Property Values

$K_x$ [ft/d]:	<input type="text" value="200.00"/>
$K_y$ [ft/d]:	<input type="text" value="200.00"/>
$K_z$ [ft/d]:	<input type="text" value="20.00"/>
$S_s$ [1/ft]:	<input type="text" value="0.0013"/>
$S_y$ [-]:	<input type="text" value="0.18"/>
Eff.Por [-]:	<input type="text" value="0.2"/>
Tot.Por [-]:	<input type="text" value="0.23"/>

Default Recharge

Start Time [day]	Stop Time [day]	Recharge [in/yr]
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="7300.00"/>	<input type="text" value="15"/>

# モデルのプロパティと境界条件の入力

The image displays a groundwater modeling software interface. The central part is a grid map showing a red boundary line across a grid. Labels on the map include 'UNIFIRST', 'W. GRACE', 'OLYMPIA AVE', 'OLYMPIA', 'WELL I', 'WELL G', 'RIVER', 'WILDWOOD', and 'THE W SUPER'. A dialog box titled 'Assign Constant Head' is open on the left, with the following fields and options:

- Code: [ ]
- Assign to appropriate layer
- Start Time [day]: [0]
- Stop Time [day]: [7300.00]
- OK button

On the right side, there is a legend and a scale. The legend includes 'WELL I', 'WELL G', 'RIVER', 'WILDWOOD', 'THE W SUPER', and 'W'. The scale is labeled 'SCALE' and shows '10 miles', '100 miles', and '200 feet'. A note indicates 'Vertical exaggeration = 10x'. A north arrow is also present.

# モデルのプロパティと境界条件の入力

Assign River

Assign to app

Start

Time [day]

0

UNIFIRST

OLYMPIA AVE

OLYMPIA

WELL I

WELL G

SLIVER

WILDWOOD

THE W

SUPER

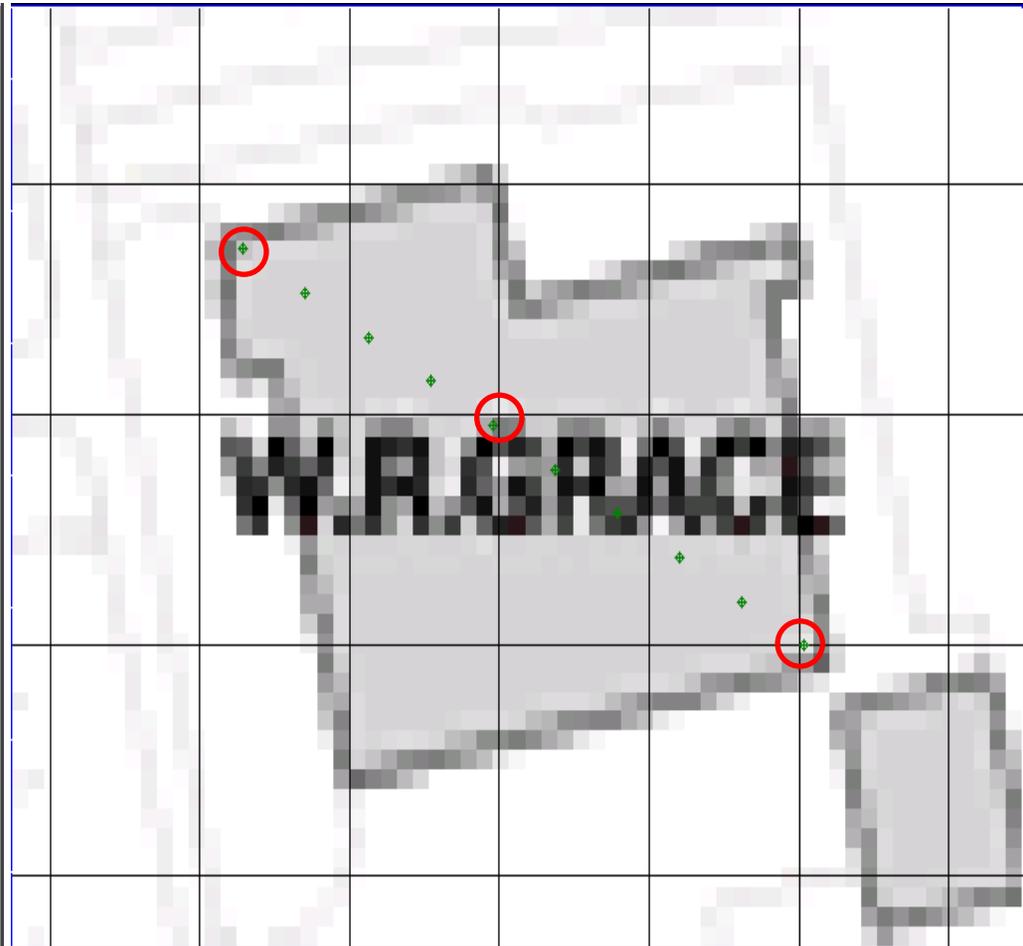
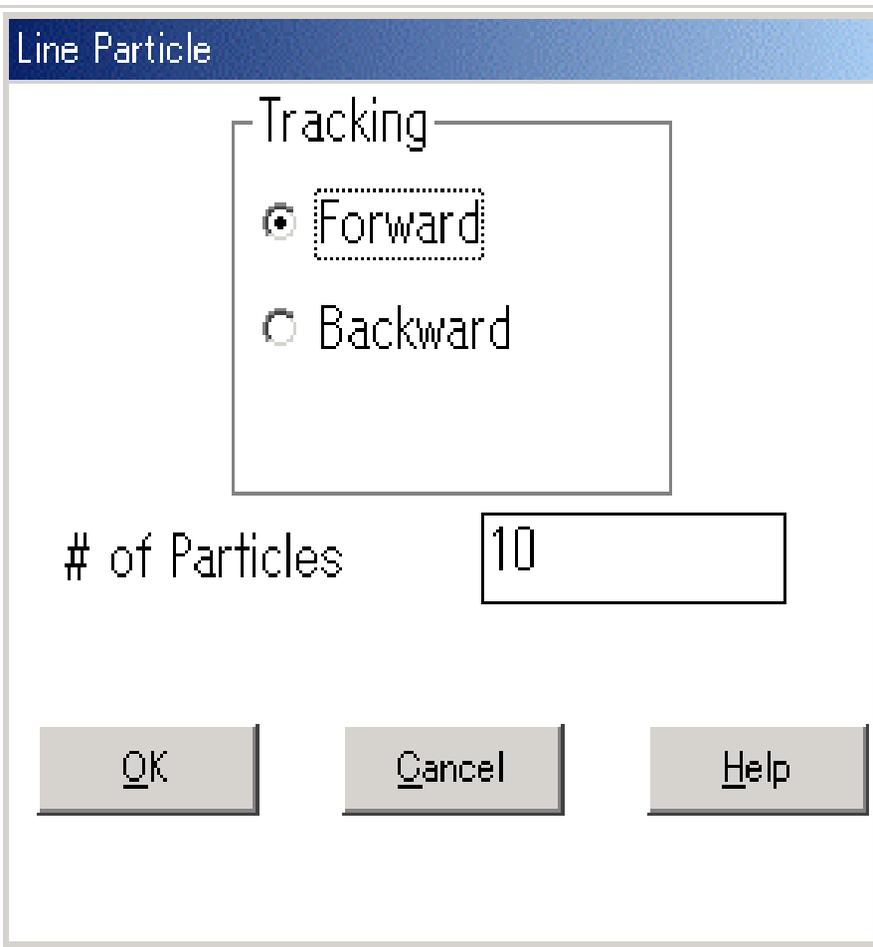
Wo

Bu

R

# 粒子追跡位置の指定

粒子の数の指定、配置



# MODFLOWとMODPATHの実行

The image shows a software interface for running MODFLOW and MODPATH. On the left is a 'Translate/Run' dialog box with the following options:

- MODFLOW
- Modpath
- Zonebudget
- MT3D/RT3D

Buttons at the bottom of the dialog are: Translate & Run, Translate, Cancel, and Advanced >>.

The main window, titled 'WHI ModPath - [C:\#MODFLOW#MODFLOW#woburn8:(Forward tra...', displays the following text:

```
FILE UNIT NUMBER 100 HAS BEEN CONNECTED TO <woburn8.MPT>  
FILE UNIT NUMBER 14 HAS BEEN CONNECTED TO <woburn8.RIV>  
FILE UNIT NUMBER 18 HAS BEEN CONNECTED TO <woburn8.RCH>  
FILE UNIT NUMBER 50 HAS BEEN CONNECTED TO <woburn8.BGT>  
FILE UNIT NUMBER 52 HAS BEEN CONNECTED TO <woburn8.HDS>  
TRAVEL TIME SUMMARY FOR ALL PARTICLES:  
MINIMUM TRAVEL TIME = 0.29388E+03  
MAXIMUM TRAVEL TIME = 0.49546E+03  
AVER 50.0  
0  
10  
0  
0  
0  
0  
10
```

Overlaid on this window is a smaller 'Win32 MODFLOW Suite' window. It contains a diagram of a well system and a tree view with the following items:

- [-] ModFlow
- [-] ModPath(F)

Buttons at the bottom of the 'Win32 MODFLOW Suite' window are: Exit and Minimize All.

# モデル結果の視覚化

View Layer

Goto Previous Next

Pathlines

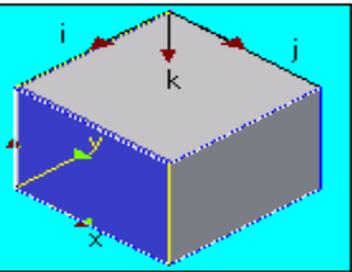
Options

Time Previous Next

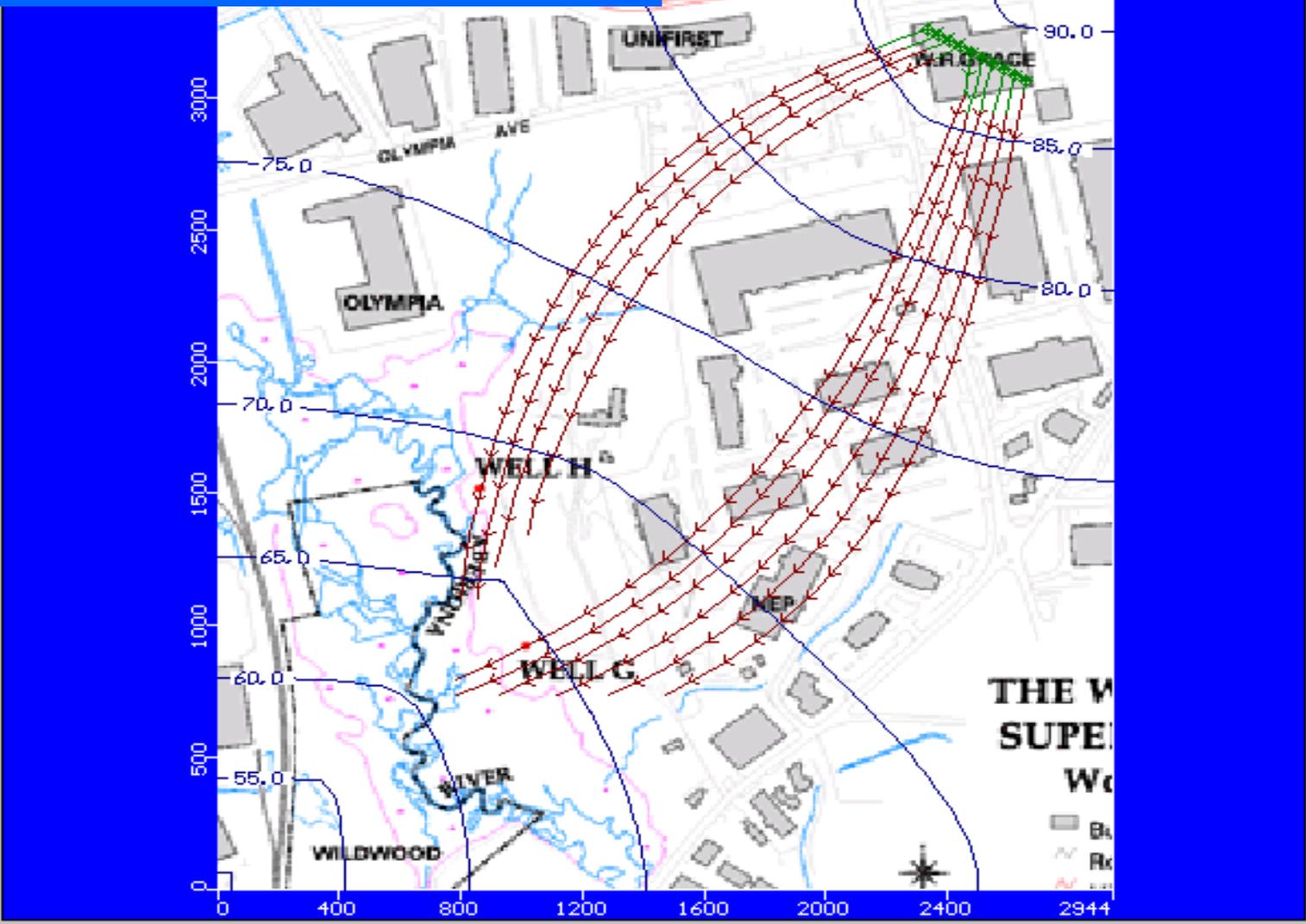
Projections

Segments

Toggle



X: 975.3  
Y: 3392.0  
Z: 50.0  
Row (I): 3  
Column (J): 10  
Layer (K): 1



F1 ? Help F2 3D F3 Save F4 Map F5 Zoom in F6 Zoom out F7 Pan F8 Vert exag F9 Over Lay F10

Output Time : 1.00000 (day) Stress period : 1 Time step : 1

A 般 CAPS KANA

# 不確実性解析

- 使ったパラメータのうち、最も不確実性が高い透水係数Kについての不確実性解析を行う。

透水係数 K (ft/day)	20	200	2000
到達日数 (day)	3500 (約10年)	365 (約1年)	35 (約1ヶ月)

# 第5章

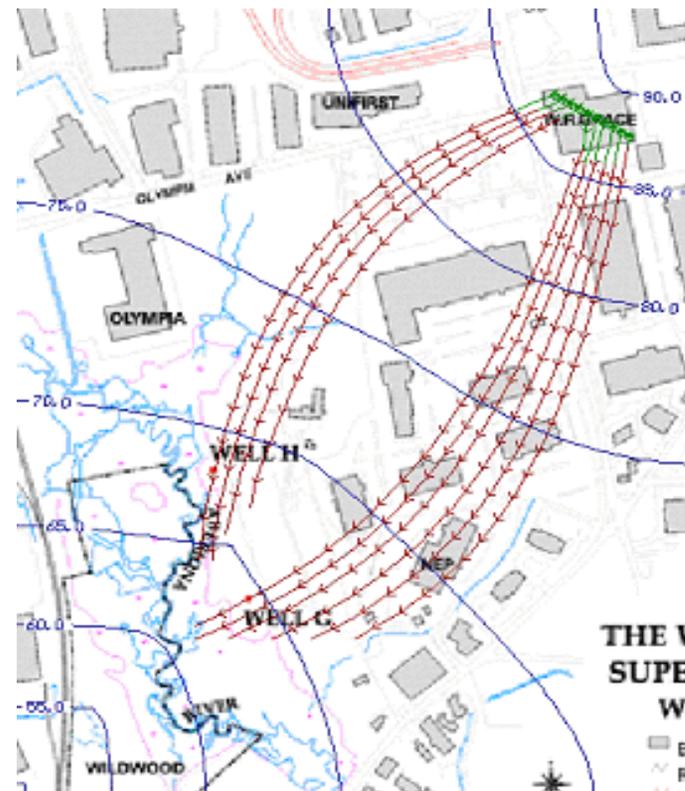
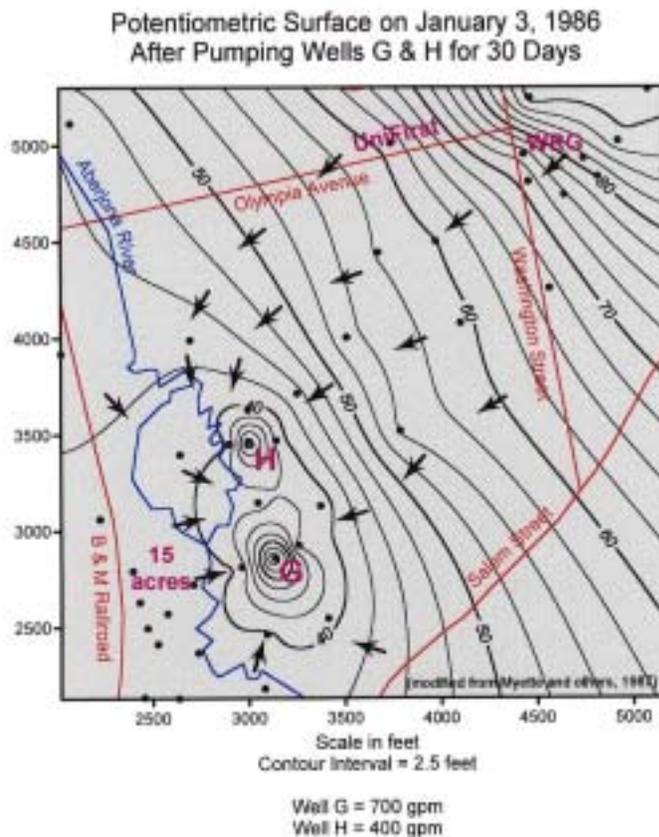
まとめ



# 解析結果

## 1. 範囲

今回分析で得られた汚染範囲と、当時推測された汚染範囲はほぼ一致。



# 解析結果

## 2. 到達日数

- 公開された情報を用いた結果、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。
- 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。  
(約1ヶ月～10年)

# 考察

- 汚染範囲は当時の推測と同じ  
当時の推測は正しい。
- 汚染物質は35日～3500日で到達。
- 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年以降であると予測できる。

# 考察

- グレース社：汚染物質の投棄時期は1960年代～70年代半ばと公表

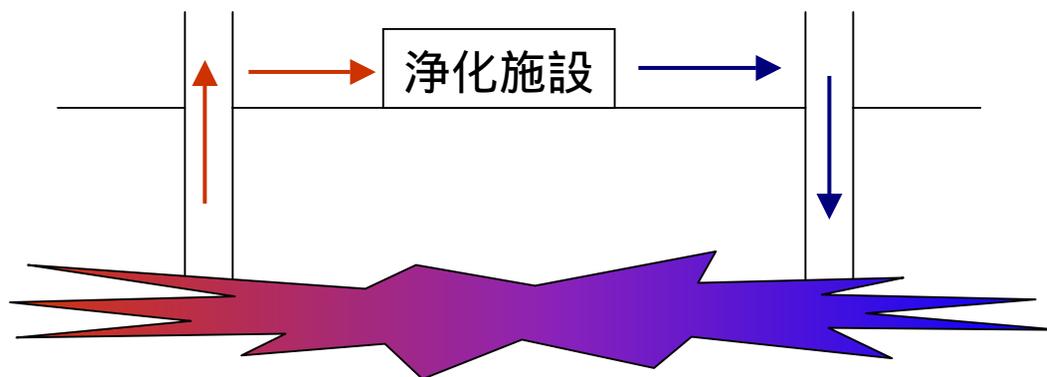
仮に1960年から投棄していたとすると...

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可能。

1966年以降白血病が流行した原因として、十分考えられる。

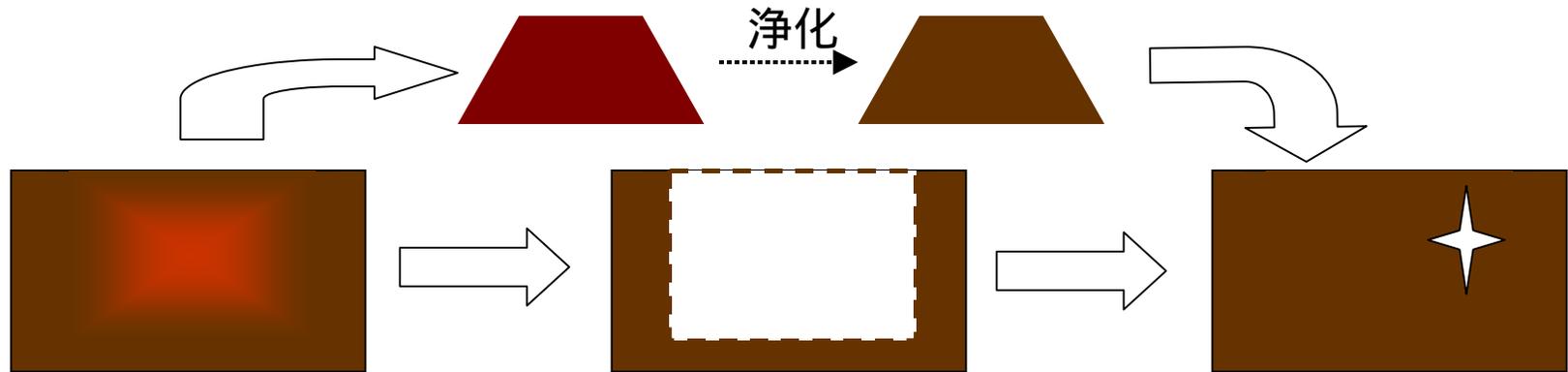
# 考察

- 汚染を除去するには、
  1. 汚染された地下水を吸い上げるための井戸を掘る。
  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。



# 考察

または、汚染された地域の土壌ごと浄化する。



土壌の浄化行程において、浄化が必要な地域を特定するためにも、MODFLOWによる解析は有効。

ありがとうございました

# ウォーバーン 地下水汚染解析

2班

指導教官

担当学生

羽田野 祐子

200335237 市坪 夏子

200335243 大島 純弥

200335251 丸山 公輔

200335252 安河内 武志