

## 京都府城陽市域における3次元地下水汚染シミュレーション解析

地下水、浸透流解析、移流拡散解析

関西大学大学院工学研究科

○北岡貴文

関西大学環境都市工学部

正会員

楠見晴重

### 1. 背景

京都府南山城地域では、昔から豊富な地下水資源に恵まれ、農業用や工業用、生活用水に地下水を使用してきた。城陽市の位置する京都府南山城地方は、京都盆地の南部に位置し、桂川、木津川、そして琵琶湖を水源とする宇治川の3河川が京都～大阪府境である男山と天王山の間で合流する。近年当該地域では、京都・大阪の都市化が進み、水資源としての地下水への依存度はますます高くなってきた。本研究では、京都府南山城地方でも地下水への依存度が高い城陽市に着目した。城陽市では現在上水道用水のうち地下水の占める割合は約80%にのぼっている。したがって、地下水汚染に対しては、十分な対策が必要となる。ここでは、城陽市域における3次元地質モデルを作成するとともに、3次元地下水浸透流解析を行い、更には汚染を想定した移流・拡散挙動についても検討した。

### 2. 城陽市域の地形地質構造

図-1は京都盆地の地質図を示している。古生層や花崗岩などの基盤岩類の山地や丘陵に囲まれて京都盆地が存在している。周囲の山地と境界部には、洪積層である大阪層群からなる丘陵が存在する。対象地域である京都府南山城地方の城陽市は、緩い砂および軟らかい粘土が互層もしくは単独で表層部を厚く覆っている。この沖積層と呼ばれる地層は、木津川沿いで砂層の比率が高くなっており数mから10m程の厚さである。東の丘陵部に向けてだんだんと薄くなっていき、下部の洪積層が地表面に現れてくる。これらのN値の高い洪積層は礫が主体である。また、城陽市東部は基盤岩類の山地で、その基盤岩類の上に洪積層が厚く堆積し典型的な地下水盆構造を呈すため良質な帯水層となっており、豊富な地下水が蓄えられている。

### 3. 城陽市の地下水

図-2は解析対象地域における観測井の位置を示したものである。計11本の観測井が存在する。農閑期である10月中旬から開始し、約3ヶ月間の水位計測を行った。10本の井戸に水位計を設置し、6時間ごとに地下水位を計測している。No.16は1週間に一度、手で地下水位を計測している。この観測した地下水位を、作成した解析モデルの地下水位として与え、3次元浸透流解析を行う。

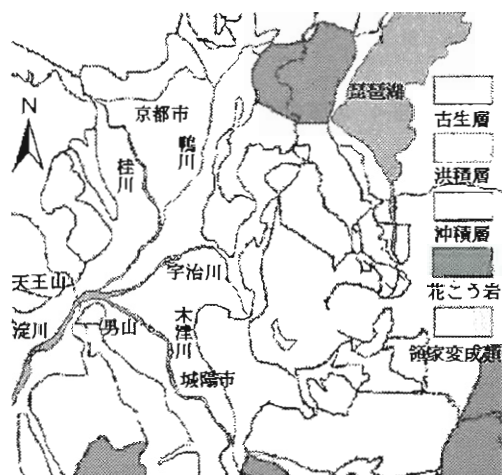


図-1 京都盆地地質図

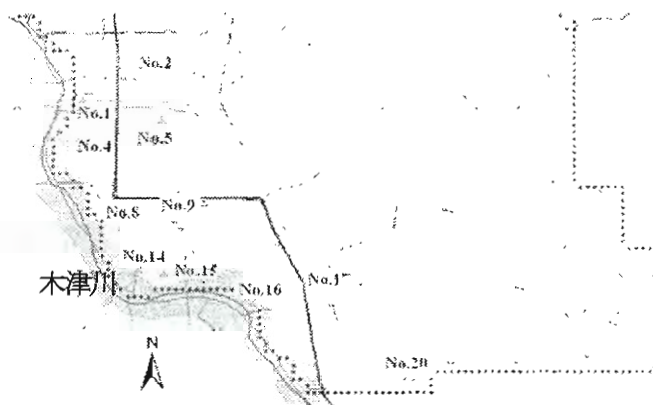


図-2 城陽市域の観測井の位置図

## 4. 地層モデル

### 4.1 地層分割の概要

関西圏地盤情報データベース 2008 年度版<sup>1)</sup>・新関西地盤<sup>2)</sup>・井戸台帳・対象地域からのボーリングデータなどの地盤調査結果によって地層構成や主な帯水層の確認を行った。本研究では、地層を沖積層と洪積粘土層と洪積砂礫層の3層に分割し、モデルを作成した。対象地域の地層構成を把握するために、約230本のボーリングデータを使用した。

### 4.2 解析範囲

本研究における解析範囲は、正方形の100mメッシュに分割し、モデル化を行った。図-3は、本研究の対象地域である京都府城陽市と市外の地域であり、解析範囲を示している。東西約13.5km、南北約11.5kmである。本研究では、浸透流解析において城陽市域の地下水の挙動をより正確な値を得られると判断し、境界を市外まで広げ範囲を拡大した。

### 4.3 層厚の決定と3次元地層モデル

柱状図から地層の層厚をN値および地質により分割した。洪積砂礫層に関しては、下部の境界はT.P-10mの地点で水平にモデルの下部とした。洪積砂礫層は、下部をT.P-10mとしているため、東側の山間部ほど厚い層厚になっている。また、N値が7程の粘土層が沖積層と洪積砂礫層の境に連続性を確認した場合、その地層を洪積粘土層とみなした。例として図-4に解析対象範囲である城陽市におけるモデルの沖積層厚をArc-GISにより作成したラスタデータより示す。図に示すように、城陽市域において、木津川沿いは城陽市北部では沖積層が7m程堆積し、城陽市南部では4m程堆積している。JR沿いから東側の山側には沖積層がほとんど堆積していない。図-5に本研究の3次元地層モデルを示す。

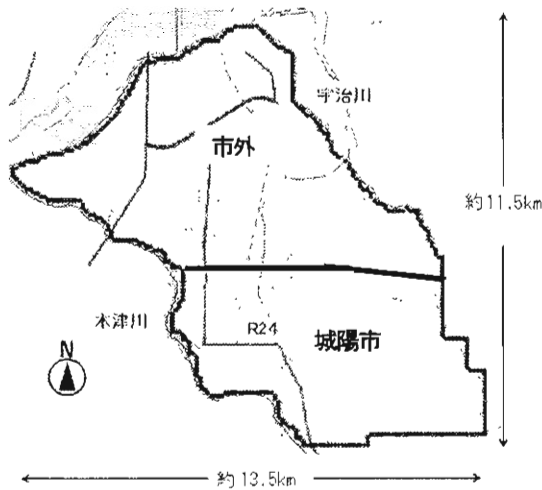


図-3 モデル化範囲

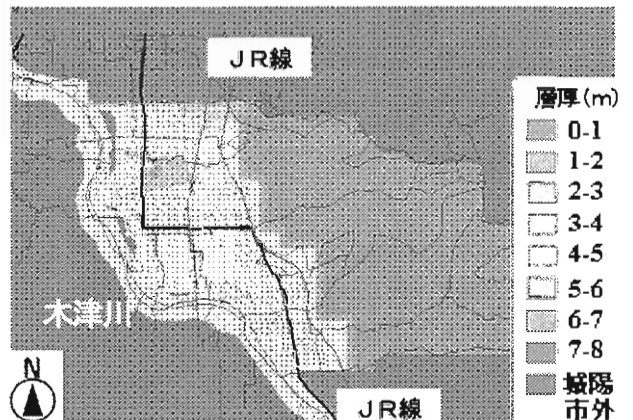


図-4 城陽市域の沖積層厚

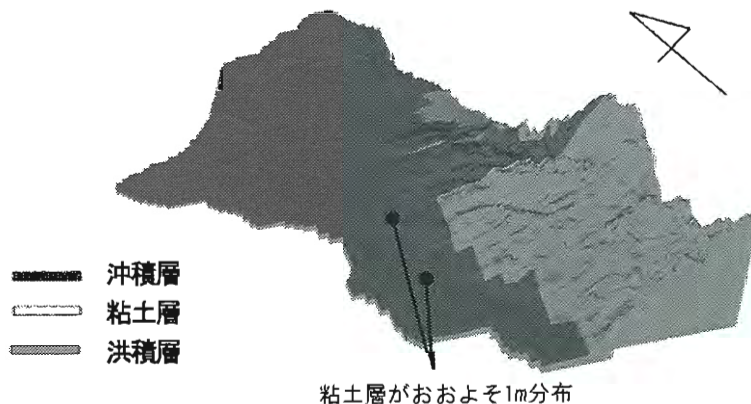


図-5 3次元地層モデル (鉛直方向10倍)

## 5. 浸透流解析

### 5.1 浸透流解析の概要

本研究における3次元浸透流解析では、有限要素法による地下水挙動解析ソフトAC-UNSAF3D<sup>3)</sup>を使用し定常解析を行った。まず、地層モデルの解析範囲全体の広域による3次元浸透流解析を行い、その結果を用いて汚染発生箇所の特域モデルを作成して再度3次元浸透流解析を行った。

### 5.2 地盤物性値

表-1 に浸透流解析における地盤物性値を示す。広域モデルおよび、特域モデルの両方に同じ地盤物性値を与えている。

### 5.3 広域モデルの浸透流解析

#### (1) 広域モデルの解析概要

図-6 に本研究での3次元浸透流解析における境界条件を示す。図-6 に示すように、西側の木津川および北側の宇治川においては河川水位一定境界条件、東側の山間部と南側は地下水位一定境界条件とした。水位においては、木津川・宇治川の河川水位は国土交通省の河川水位データ（T.P基準）を用い、東側・南側の地下水位は観測井で同時刻に採取した地下水データ（T.P基準）を用いて与えた。河川水位はデータが少なく、適切でないと考えられる箇所があったため、標高等を踏まえ水位を低くして決定した。解析時の節点数は図-7 に示したように76329、要素数は67758となっている。

表-1 3次元浸透流解析に用いる地盤物性値<sup>4)</sup>

	透水係数(X,Y) (cm/s)	透水係数(Z) (cm/s)	有効孔隙率 (%)	貯留係数 (l/m)
沖積層	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-3}$	30	$4.0 \times 10^{-3}$
粘土層	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	10	$1.0 \times 10^{-7}$
洪積層	$4.0 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$	30	$2.0 \times 10^{-6}$

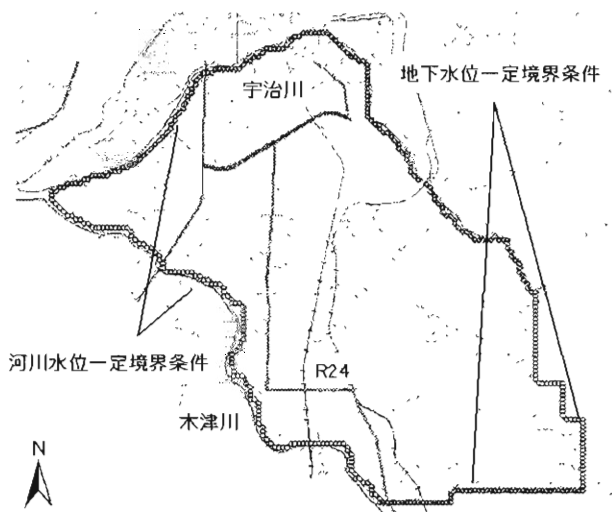


図-6 広域範囲の境界条件

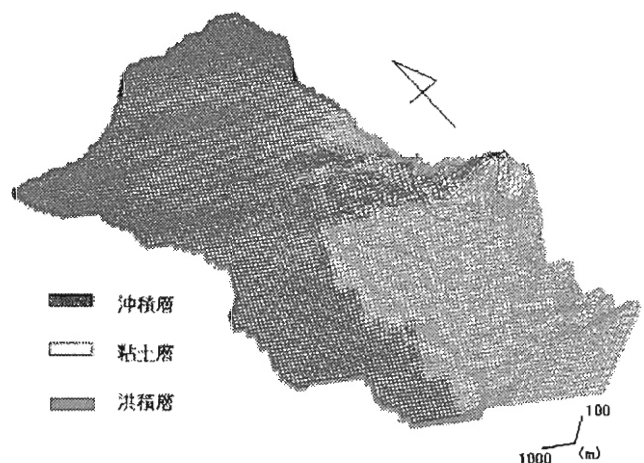


図-7 メッシュ図（鉛直方向10倍）

(2) 広域モデルの解析結果

本研究では定常解析を実行し、地下水の流速ベクトルを 100m×100m の要素内において示した。それらの流速ベクトルを可視化し、全体的な流れベクトルをマクロ的に追記したものを図-8 に示す。図-8 より対象地域の地下水の流れ方向は東の山側から北西に向かって移動する流れとなっている。個々の地下水の流れ方向ベクトルを考察すると、地下水は主に北部では宇治川に流れ込み、対象範囲である城陽市域西部においては木津川に流れこむ。また、図-9 に解析結果の地下水水頭値を示した図を示す。図-9 から東の山側から北西に地下水頭が低くなっていることが認められる。また、流速に関しては、全体的に流速の変化はほとんど見られなかった。そして、その全体的な流速は 0.04m/day で、年間およそ 15m の流速となっている。今回、実測水頭値と解析で得られた水頭値の比較を行い、解析モデルの妥当性を検討した。No. 1・No. 2・No. 4・No. 5・No. 8・No. 9・No. 14・No. 15・No. 16・No. 17・No. 20 の 11 箇所の観測井で、実測値と解析値の比較を行った。その値を表-2 に、その散布図を図-10 に示す。図-10 を見ると、東西約 13.5km、南北約 11.5km の広域において誤差 2m 以内となっており、良い結果であると考えられる。

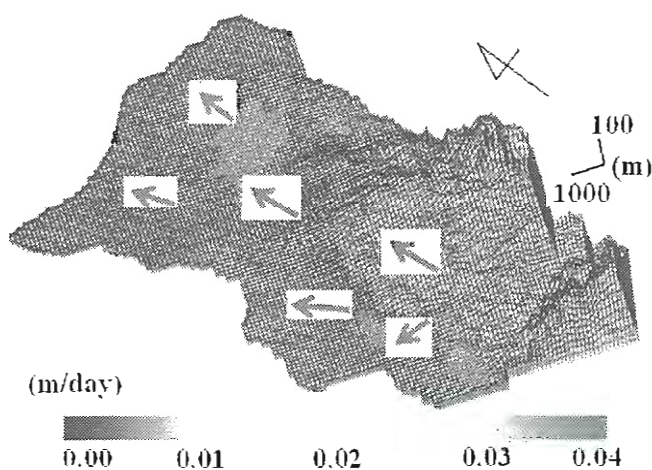


図-8 広域範囲での浸透流結果

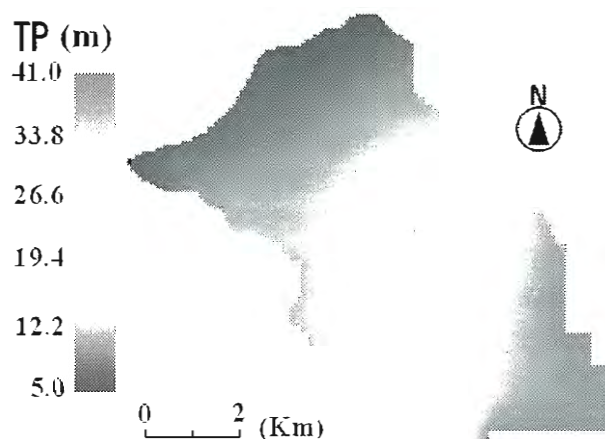


図-9 広域範囲の地下水水頭値

表-2 解析水頭値と実測水頭値の比較

観測井	実測水頭値(m)	解析水頭値(m)
No. 1	11.67	12.01
No. 2	13.89	14.69
No. 4	11.10	12.30
No. 5	14.45	15.51
No. 8	11.69	13.22
No. 9	14.30	15.83
No. 14	12.05	13.79
No. 15	14.78	14.48
No. 16	17.54	17.54
No. 17	21.18	22.47
No. 20	19.87	20.47

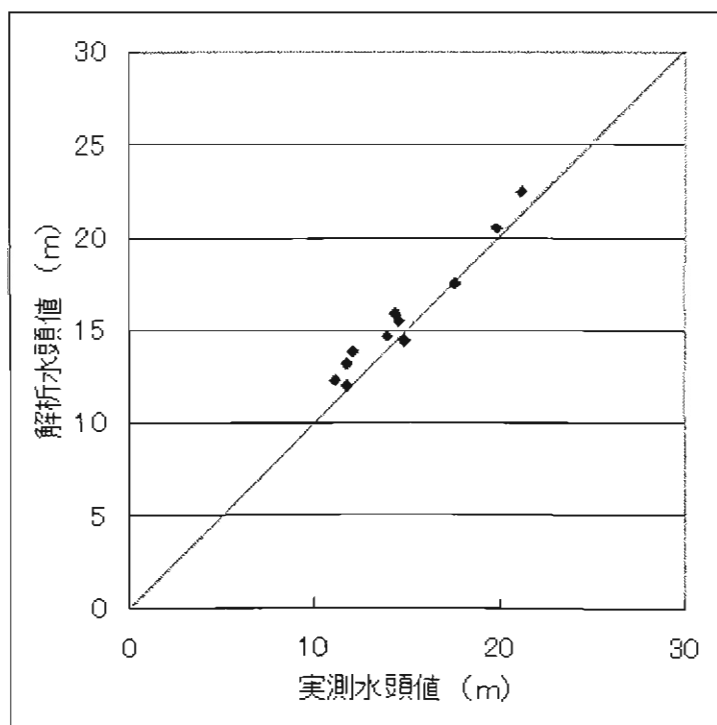


図-10 実測値と解析値との比較

(3) 狭域モデルの解析概要

汚染箇所は 300m×300m の狭域範囲として抽出し、その中に汚染源を設定した。狭域範囲の鉛直方向の下部基準も T.P-10m とした。地下水汚染シミュレーションを正確に実行するために、この狭域範囲において、広域による浸透流解析結果データ（全水頭）を補間し、再度 3 次元浸透流解析を実行した。図-11 は狭域範囲の要素分割を示す。図-11 に示される点は汚染が発生したと仮定した地点である。図-11 に示すように、汚染源近くの分割は細かくし、汚染源から遠くなるに連れて分割は粗くした。図-12 に狭域モデルを示す。節点数は 22400、要素数は 19773 となっている。そして、要素分割をした上で広域範囲での浸透流解析結果および地層モデルデータを用い、3 次元浸透流解析を行った。図-13 に、狭域モデルの境界条件を示す。また、降雨を考慮する際、降雨量は城陽市の過去 10 年間の 1 日当たりの平均降雨量と、降雨の浸透率は 20% とした。そして、狭域モデルの解析は、地盤物性値を広域モデルと同様の値を用いた。図-14 に、狭域モデルの抽出した位置を示す。

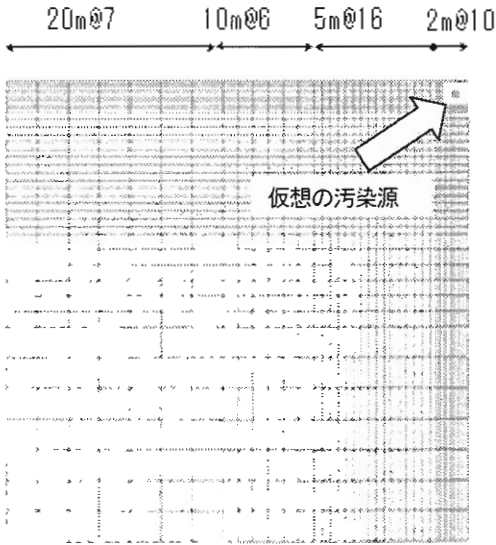


図-11 境界範囲の要素分割（平面）

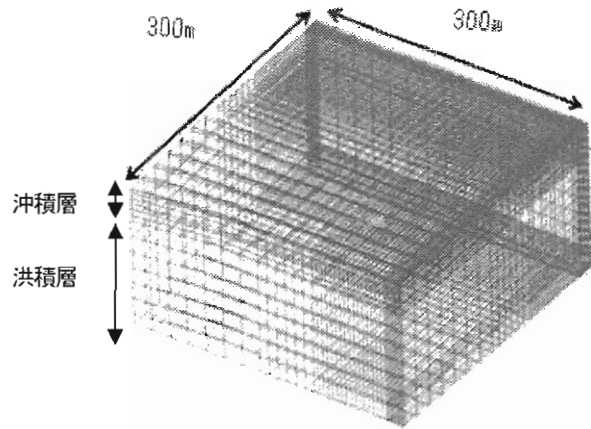


図-12 境界範囲の要素分割（3次元-鉛直方向4倍）

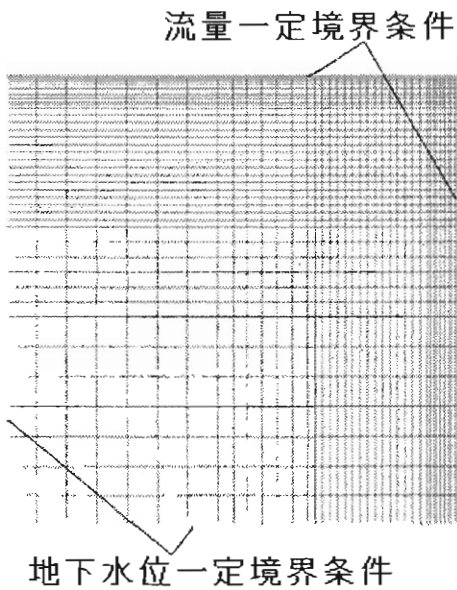


図-13 狭域範囲の境界条件

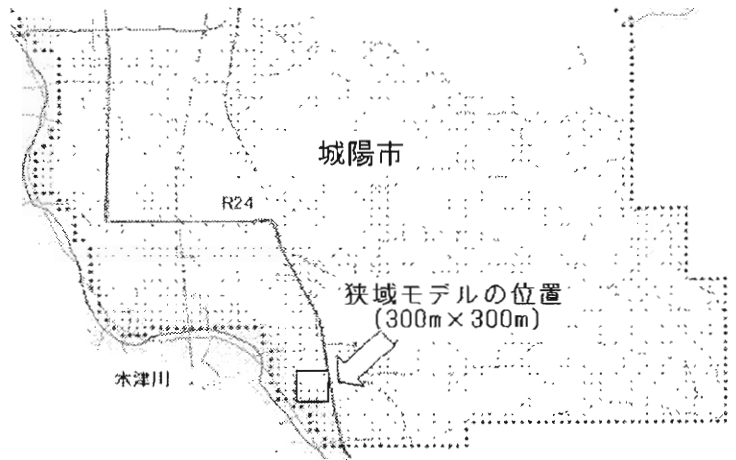


図-14 狭域モデルの位置

(4) 狭域モデルの解析結果

狭域での浸透流解析も広域同様、定常解析を実行し地下水の流速ベクトルを個々の要素内において示した。それらの流速ベクトルを可視化し、全体的な流れベクトルもマクロ的に追記し、真上から見ているものを図-15に示す。狭域範囲での、全体的な流れ方向は北東から南西方向に地下水が流れこむ。個々の地下水の流れ方向ベクトルを考察すると、範囲の西部は西側に流れていく形をとり、南部は南側に流れている形をとっている。流速は全体的に0.03m/dayとなっていた。これは、年間およそ10mの流速となっている。

6. 移流拡散解析

6.1 移流拡散解析の概要

本研究では、300m×300mの狭域範囲において、3次元浸透流定常解析で得られた流速ベクトルを用いて移流拡散解析を実行した。汚染源として、土壌・地下水などを汚染する物質の代表格である重金属類のヒ素と水銀、そして揮発性有機塩素化合物(VOC)であるトリクロロエチレンを選択した。これらの汚染源が狭域範囲の2m×2mの範囲で1mg/lの濃度を常時一定で飽和地下水に発生したと仮定し解析を行った。鉛直方向は地表面から4m(T.P 21m)である洪積砂礫層の上部となっている。また、重金属類、揮発性有機塩素化合物(VOC)それぞれ1年、5年、10年の地下水汚染挙動を示した。表-3に汚染源に設定した分配係数を示す。そして、移流拡散解析に用いた地盤物性値についても表-4に示す。

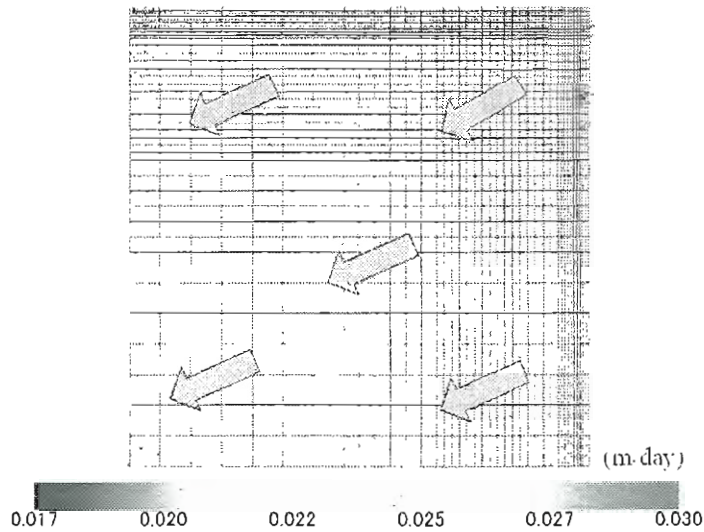


図-15 狭域範囲での浸透流結果(平面)

表-3 分配係数

	トリクロロエチレン	水銀
分配係数(洪積砂礫層)(ml/g)	0.7	5.2

表-4 移流拡散解析に用いる地盤物性値<sup>5)</sup>

	沖積層	洪積粘土層	洪積砂礫層
分散係数縦 DL (m)	0.1	0.1	0.1
分散係数横 DT (m)	0.01	0.01	0.01
屈曲率	1	1	1
間隙率 (%)	30	60	30
土の密度 (t/m <sup>3</sup> )	1.85	1.85	1.85

## 6.2 移流拡散の解析結果

本研究では、解析結果を可視化し汚染挙動を確認した。図-16 はトリクロロエチレンの 10 年後での汚染挙動を平面で示したものである。同様に、図-17 は水銀の 10 年後での汚染挙動を平面で示したものである。図-16、17 から、どの汚染源においても浸透流の流速を支配的に受けており、地下水の流れの方向に汚染源が広がる結果となっている。また、全体を通して揮発性有機化合物（以下 VOC と記す）であるトリクロロエチレンの汚染の広がるスピードが最も速く、重金属類汚染の広がるスピードが遅くなっている。よって、VOC は地下水汚染源として広域に拡散し、重金属類は比較的広域に拡散しないことが確認できる。これは、VOC は土壌に吸着されにくい汚染物質が拡散しやすいという特徴を有している。重金属類は、土壌に吸着されやすいため、汚染物質が拡散しにくいという特徴を掴んだ結果となったと考えられる。

本研究では汚染源からの距離ごとに、濃度分布と時間の関係を平面で検討した。重金属類においては汚染源からの距離を約 5m、10m とした。また、前記に示したように、VOC は重金属類より汚染の拡散スピードが速いと判断したため VOC は平面での汚染源からの距離を約 5m、10m、50m と重金属類より長距離を確認した。そして、グラフにしたものを図-18、19 に示す。図-18、19 を見て取れるように、平面での濃度分布と時間の関係は VOC、水銀とも濃度勾配は低下している。この結果より、10 年後以降は解析で求めているが、どの汚染源でもある一定の距離では、ある程度の時間が経つとそれぞれ汚染濃度が一定の値で収束するのではないかと考えられる。汚染源の広がる範囲として 0.1 mg/l 以上の濃度が確認できる汚染源からの距離は、トリクロロエチレンでは平面に 70m、鉛直に 6m である。また、水銀は平面に 17m、鉛直に 4m となっている。尚、図-16、17、18、19 は地表面より 4m 下 (TP. 21m) の平面図を示す。

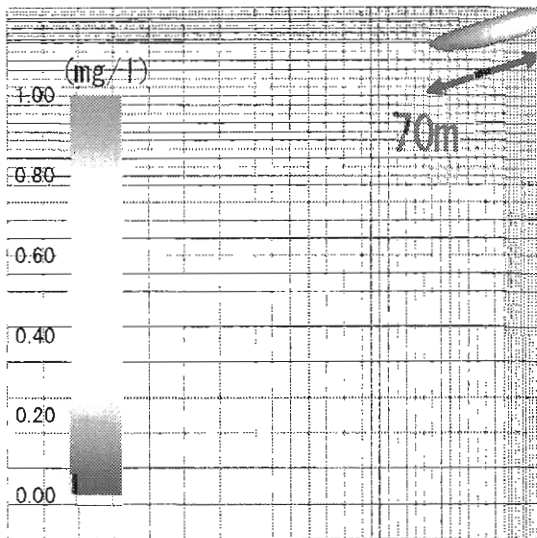


図-16 トリクロロエチレンの汚染挙動—平面-10 年後

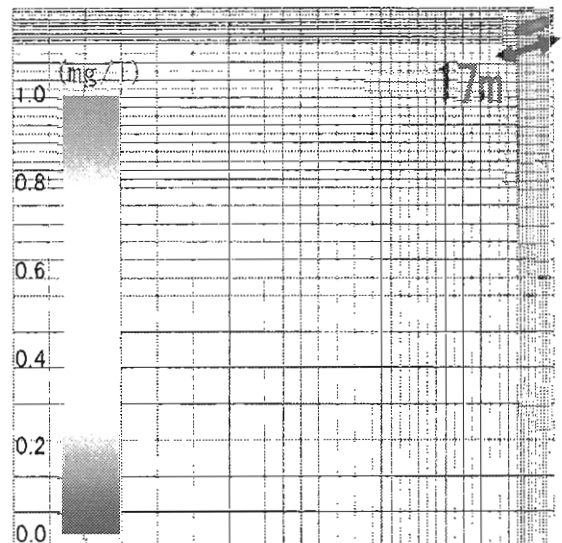


図-17 水銀の汚染挙動—平面-10 年後

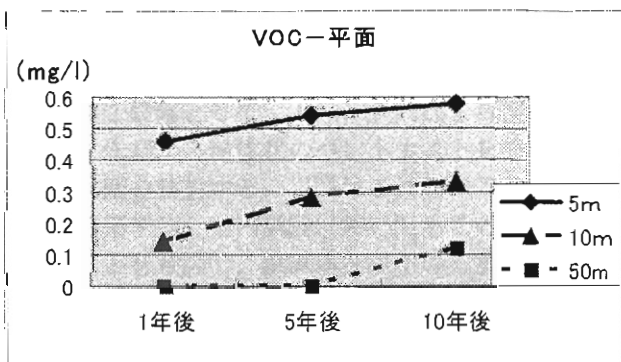


図-18 トリクロロエチレンの汚染分布と時間の関係（平面）

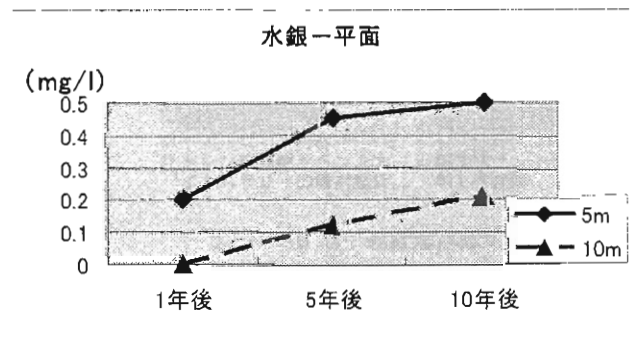


図-19 水銀の汚染分布と時間の関係（平面）

## 7. まとめ

京都府南山城地方は京都府の南部に位置し、宇治川から淀川以南の京都盆地がそれに相当し、木津川、宇治川、桂川の3河川が合流してできた大きな地下水盆を呈している。総貯水量は、水を十分に含む砂礫層の割合や、含水率から211億tと計算され、琵琶湖の水量である250億tに匹敵するものである。このような背景から、南山城地方では地下水に対する依存度が非常に高くなっている。本研究では、南山城地方の中でも特に地下水への依存度が約8割と高い城陽市に着目し、安全な地下水利用を行うために、地下水汚染が発生した際の汚染物質の汚染挙動の予測を目的とした。

そこで、城陽市の地盤調査結果により地層構成や主な帯水層の構成を求めるとともに、これらの地域について、地層を沖積層、洪積粘土層、洪積砂礫層の3層に分割した地層モデルを作成した。そして、境界条件、透水係数、貯留係数などのパラメータ決定を行い、広域範囲・狭域範囲それぞれ3次元浸透流定常解析を行った。さらに、浸透流解析で得られた流速値をもとに幾つかの汚染物質の汚染が発生した時の汚染挙動を3次元移流拡散解析で予測した。

以下に、本研究で得られた所見を示す。

- ①解析対象地域の浅層部である沖積層、また洪積層について、ボーリングデータや井戸資料などから地層特性の把握、整理を行った。これらから、解析対象地域の3次元地層モデルを作成した。
- ②作成した地盤モデルより3次元浸透流解析を行い、地下水流動についての結果が得られた。その結果、多少の誤差は見られたものの、概ね実測水頭値と解析水頭値の一致が確認できた。そして、汚染箇所である狭域範囲での降雨も考慮した3次元浸透流解析の再実行により移流拡散解析で汚染挙動を把握する場の地下水流動を得られた。
- ③浸透流解析により得られた地下水流動をもとにVOCや重金属類を汚染源と想定し、3次元移流拡散解析を行い汚染源の広がりを把握できた。

これらの所見より、汚染源により汚染の広がり具合に変化が見られた。トリクロロエチレンは今回想定した汚染源の中で、平面にも鉛直方向においても最も汚染の広がりが大きいことが確認できた。よって、早急な対策を施さなければならない汚染源の一つであるといえる。地下水利用が盛んな地域において、地下水汚染が発生した場合の迅速な対応が求められるのは当然である。3次元地下水汚染シミュレーション解析を行うことでそれらの対応の手助けになると考えられる。

## 6. 参考文献

- 1) 関西圏地盤情報協議会、関西圏地盤DB運営機構：関西圏地盤情報データベース2008。
- 2) 関西地盤情報活用協議会地盤研究委員会、関西地盤情報活用協議会：新関西地盤-京都盆地-、pp. 73-91、2002。
- 3) 西垣誠、進士喜英：有限要素法による飽和不飽和浸透流解析—AC UNSAF3Dプログラム解析およびユーザーマニュアル、2001。
- 4) 地盤工学会：最新土質力学（第2版）、pp. 49-透水性と試験法の適用性、1990。
- 5) 岡山地下水研究会：実務者のための地下水環境モデリング、pp. 318-352、2003。