

京都盆地における地下水汚染シミュレーション解析 —平面二次元と準三次元解析による汚染影響評価—

バトル アブドレイム*・城戸由能・栗津進吾*・中北英一

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

京都盆地水系における将来的な水資源の利用可能性や水環境の保全対策を検討・実施するためには、地下水利用の現状を把握するとともに、水質汚染状態を管理する必要がある。地下水は一度汚染されると短期間での汚染改善は困難であり、汚染状態の継続は長期間に及ぶため、水資源の安全な利用の観点からも地下水質の継続的な監視が求められる。さらに、地震等災害時の緊急用水としての地下水利用可能性を検討するためには、時空間的な水位・水質分布特性の解析が重要となる。そこで、本研究では、京都盆地水系における平面二次元および準三次元の地下水流動・水質解析を行い、汚染源からの物質伝播の時空間的な影響範囲の予測について検討した。

キーワード： 京都盆地水系，地下水汚染，準三次元解析，水質影響評価

1. はじめに

京都盆地水系における将来的な水資源の利用可能性や水環境の保全対策を検討・実施するためには、地下水利用の現状を把握するとともに、水質汚染状態を管理する必要がある。地下水は一度汚染されると短期間での汚染改善は困難であり、汚染状態の継続は長期間に及ぶため、水資源の安全な利用の観点からも地下水質の継続的な監視が求められる。さらに、地震等災害時の緊急用水としての地下水利用可能性を検討するためには、時空間的な水位・水質分布特性の解析が重要となる。そこで、本研究では、京都盆地水系における準三次元地下水流動・水質解析を行い、汚染源からの物質伝播の時空間的な影響予測について検討する。

京都盆地の地下水は古来から清浄で豊富で、醸造業・染色業等の産業や茶道・華道などの文化を支える重要な水資源として利用されてきた。そのため、名水・名井として有名な井戸・湧水が多く存在するが、近代以降枯渇したものも多く、水質の悪化のために地下水利用を中止して水道水へ転換せざるを得ない場合も見られた（総合研究開発機構，1986）。

京都盆地水系は桂川、木津川、宇治川が京都～大阪府境界である男山と天王山の間で合流する。近

年京都・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高くなってきた。また、地震等災害が起きたとき、緊急用水として確保できるかは重要である。そして、地下水汚染に対しては、十分な対策が必要になる。そして、京都盆地における準三次元地下水浸透解析を行い、汚染源に対して移流・拡散挙動についても検討する。

2. 京都盆地の地形・地質・水文特性

2.1 地形・地質特性

京都盆地は内陸性の盆地であり、東、西及び北の三方を山地または丘陵地によって囲まれ、南に開いている。盆地内では北縁、北大路付近の基盤標高が最も高く地表の勾配も急である。盆地南に向かうにつれて基盤標高は低くなり、地表勾配も緩やかになる。三川合流地点の基盤標高は低くなって、地表とほぼ水平になる。京都盆地周辺部とは京都盆地を取り囲む山地及び丘陵地と京都盆地の境界部分であり、この地域の基盤は、ほとんどの場所に大阪層群が出現することが特徴である。盆地内側北部は地形的みれば段丘と扇状地で、粘土層は薄い、礫層は地表近くから堆積している。盆地南部は地形的みれば、桂川、宇治川及び木津川の氾濫原であり、緩い砂及び

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。盆地南部の支持層も礫が主体であるが、盆地北部に比べて粘土や砂をかなり大きく割合で含んでいる。特に木津川沿いでは砂層の比率が高くなっている。

基盤構造調査によると、東西・北側を山地域に囲まれ、盆地南部地域で深くなっています。帯水層基盤が最大震度となっていますが、盆地南西部のおおやまぎき・おとこやま付近でその深度は30~50mと浅くなっていて、ダム堤体のような構造をしているため、京都盆地の地下水は停滞性が強く、一旦汚染された地下水の水質を回復するためには、長い時間が必要となる。

2.2 京都盆地の堆積構造

第四紀(200万年前以降)、数回にわたって大阪湾を通じて京都盆地内にも海水が浸入して海域になり、海成層が堆積した。この時代の地層は大阪層群に相当する。京都盆地丘陵地で150~200mある(新関西基盤, 2002)。京都盆地は琵琶湖の南西、大阪平野の北東に位置する東・西・北方を山地に囲まれた小規模な盆地であり、京都府の南東端にあたる。盆地の大部分を占める京都市の人口は、京都府全体の半数以上にのぼる。

山地ほとんどは、砂岩・泥岩・チャート・緑色岩などから構成される丹波帯の中・古生層からなる。丘陵地の大阪層群は、主に半固結の粘土・シルト・砂・礫から構成された。その層厚は、京都盆地の丘陵部で150~200mあり、大阪の丘陵部で400mや地下での1500mに比べると、全般に薄い。

深草地域の丘陵に露出する大阪層群は、層厚130mで砂礫層を主とし、4枚の海成粘土層、ピンク、山田、アズキ、深草、八町池など5枚火山灰層を挟んでいる。京都盆地の段丘は北部発達するほか、西山丘陵の東麓や東山の西麓にみられる。河川成あるいは扇状地成の段丘構成層であり、礫層を主体とする。

扇状地・沖積低地とその地下: 京都盆地内の低地部は、南部で標高10~20mであり、巨椋池干拓地付近が最も低くなる。ここを中心にして、沼沢地や後背湿地で堆積したとみられる軟弱な粘土・シルト層が分布する。沖積層厚は北から南へ増加しているが、東西方向ではほぼ同様である。そして南部地域地下水中有機物が多い。

京都盆地東方にある東山山地を境として、標高20~50mの山科盆地が位置している。これらの低地部には、扇状地成の砂礫層を主とする堆積物が分布する。

堆積層は、主に段丘堆積層や大阪層群に属する砂

礫、砂、粘土などよりなり、堆積物の形成年代を特定するために重要な指標となる火山灰層や、海域に堆積した海成粘土層(Ma3~Ma6, Ma9)などが確認された。地質粒子に分類: 礫の粒径2mm以上、砂の粒径は2mm~1/16mm, シルトの粒径は1/16mm~1/256mm, 粘土粒径は1/256mm下になっている。

京都盆地は内陸性の盆地であり、東、西及び北の三方を山地または丘陵地によって囲まれ、南に開いている。盆地内では北縁、北大路付近の基盤標高が最も高く地表の勾配も急である。盆地南に向かうにつれて基盤標高は低くなり、地表勾配も緩やかになる。三川合流地点の基盤標高は低くなって、地表とほぼ水平になる。

京都盆地周辺部とは京都盆地を取り囲む山地及び丘陵地と京都盆地の境界部分であり、この地域の基盤は、ほとんどの場所に大阪層群が出現することが特徴である。盆地内側北部は地形的みれば段丘と扇状地で、粘土層は薄い、礫層は地表近くから堆積している。盆地南部は地形的みれば、桂川、宇治川及び木津川の氾濫原であり、緩い砂及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。盆地南部の支持層も礫が主体であるが、盆地北部に比べて粘土や砂をかなり大きく割合で含んでいる。特に木津川沿いでは砂層の比率が高くなっている。

3. モデル解析用データ

解析対象範囲は京都盆地の南北約30km、東西約15kmの領域とし、水平方向については100mメッシュに分割し、鉛直方向については地質負荷源を考慮して、沖積世砂礫層、沖積世粘土層、洪積世礫層の三層にわけて解析することとした。帯水層の基盤標高は2006年度版関西圏地盤情報データベースから抽出したボーリングデータに基づいて作成した。また、国土細密数値情報の土地利用データおよびAMeDAS日雨量データをもとにHortonの浸透能モデルを用いてメッシュごとに涵養量を設定した。

Fig.1は解析対象地域における国土交通省が実施している観測井戸22本の位置を示す。これらの地点では年1回の標準項目、年3回の簡易項目の水質分析データが公表されている(国土交通省河川局編(1992~2002))。これらの観測では水質変化の経年的な変動は解析できるが、季節的变化および降雨後の地表面浸透や河川からの涵養現象を解析するには不十分である。そのため、筆者らは2009年12月から伏見・桃山地域の5箇所の井戸に自記水位計・自動水質計を設置し、10~20分間隔で地下水水位および地下水水質を自動観測を行うとともに、月2回程程度の頻度で、計測器のメンテナンスおよび地下水採水を実施

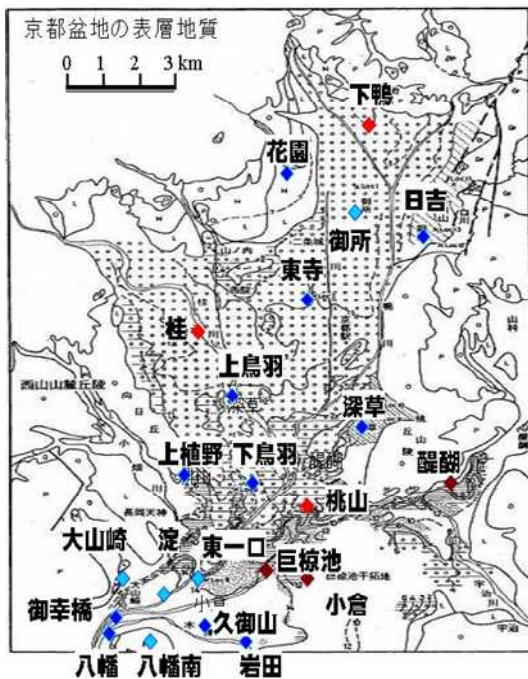


Fig.1 Groundwater observation well spot of analysis area

し、採水試料については実験室内で水質分析を実施している(城戸, 2009)。自己観測データ(2009~2011)は国交省(1992~2002)データに時間的に近い観測点、井戸深度が近い同じ分類地点群を観測した。

関西地盤データベース(KG-NET,2007)のボーリング図から代表的地点のボーリングコアデータを読み取り、準三次元解析のために京都盆地の地層構造に基づいて三層の層厚を決定した。代表地点の層厚を基準として、空間内挿を行うことでグリッドの平均層厚を与えた。まず、地表付近の沖積砂礫層の層厚と、今回の解析で重要となる沖積粘土層の層厚を決定し、既往研究(田中, 2009)で決定した帯水層基盤の標高地と比較して、最下層の洪積砂礫層を決定する。標高データと帯水層厚の不整合がないかを最終的に確認した(Fig.2)。

盆地南部域のボーリングコア図は鮮明であり、三層の層厚を容易に特定できた。しかし、盆地北部と丘陵地域では、ボーリングそのものが浅いために、明確に三層の層厚を特定できなかった点もみられた。京都盆地全域における沖積砂礫層・沖積粘土層・洪積砂礫層の三層の層厚の特徴を以下にまとめる。

伏見・桃山地域では、沖積粘土層は標高7~17mの間に堆積しており、もっと深い地点では標高20m以深の地点もあった。平均層厚は10mであった。京都市域南部では、沖積粘土層は標高6~14m以深に堆積し、その平均層厚は8mであった。八幡・久世地区では、標高-3~10mの間に沖積粘土層が堆積しており、その平均層厚は13m、三川合流地域では、標高-4~8

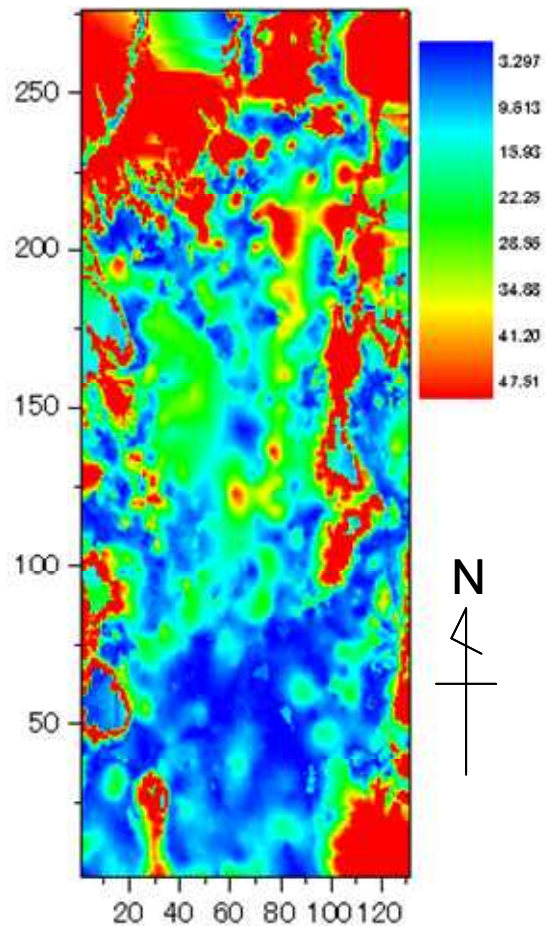


Fig.2 Thickness of Aquifer in Kyoto Basin

mの付近に沖積粘土層が堆積しており、その平均層厚は12mであった。おおそ京都盆地中央部と南部での沖積粘土層厚さは10m程度、これに対して、北部および丘陵部で確認できたボーリングコアデータから算定された沖積粘土層の厚さは1m程度であり、非常に薄い層厚であることが確認できた。北部および丘陵部における沖積粘土層厚の設定は準三次元モデル解析を行う上で重要な要素となる。

4. モデル解析手法

4.1 地下水流動モデル

準三次元地下水モデルを用いて、流動および水質の移流・拡散シミュレーションを実施した。三次元地下水流動基礎式を以下に示す。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_x (h-s) \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_y (h-s) \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_z (h-s) \frac{\partial h}{\partial z} \right\} + \varepsilon \quad \dots (1)$$

ここで、hは水位標高、sは基盤標高、Kx, Ky, Kzはx,y,z方向の透水係数(m/s), λは有効間隙率, εは単位面積あたり流出入量である。

既往研究をもとにして三次元方程式を準三次元方程式に変換した。これは、水平方向の地下水流動が鉛直方向に比較して大きいと仮定できるためである。水平方向の流れを表現するためにモデルシミュレーションした。そして、鉛直方向浸透量を無視している。透水係数に2桁程度の差異があれば、鉛直方向の流れを無視することができる考えた。

さらに、準三次元モデルでの仮定として、任意の平面位置 (x,y) において、z(x₃)方向の全水頭は一定である(静水圧分布)： $\frac{\partial h}{\partial x_3} = 0$ と仮定している。

京都盆地対象透水係数(m/sec)：沖積層は1.0×10⁻⁴、粘土層は1.0×10⁻⁷、洪積層は1.0×10⁻⁵。粘土層の透水係数は沖積層と洪積層の透水係数より小さい、目的は地質の影響を表現する、また八幡のような深層地下水質が河川、表面水の水質特性を持っている、このような河川水の影響を受けている特徴も表現するために、鉛直浸透量を無視してはいかない。第一滞水層から第二滞水層への浸透速度は粘土層の透水係数になる。水平方向の計算結果と組み合わせる。

4.2 地下水水質モデル

同様に三次元地下水水質解析モデルの基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\varepsilon}{h-s} C_e + k_i C \quad \dots(2)$$

ここで、Cは汚染物質濃度、D_x, D_y, D_zはx,y,z方向の拡散係数、u,v,wはx,y,z方向の流速、C_eは流出入物質濃度、k_iは生成消滅項を示す。京都盆地中央部には大阪層群を含む洪積世堆積層の上に沖積粘土層と砂礫層が堆積しており、盆地周辺部では洪積世地層が表層付近に位置している。地下水水質データの解析の結果、盆地中央部に河川水や浅層地下水の水質特性を示す井戸が多く、盆地周辺の丘陵部では地質・地層由来の物質濃度が高い井戸が存在していた。そのため、地質・地層からの水質影響を評価するために、鉛直方向を三層とした準三次元のレイヤーモデルを採用した。

5. モデル解析の結果

モデル解析では各種のパラメータを設定する必要がある。基本的には過去の文献・調査等(北岡他, 2009)

Table 1. The coefficient of permeability of Kyoto Basin

	透水係数(X,Y) (cm/sec)	透水係数(Z) (cm/sec)	有効間隙率(%)	比貯留係数 (1/m)
沖積層	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻⁴	30	4.0×10 ⁻³
粘土層	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁶	10	1.0×10 ⁻⁷
洪積層	4.0×10 ⁻³	1.5×10 ⁻³	30	2.0×10 ⁻⁶

をもとにしてパラメータの数値範囲を設定し、その範囲内でパラメータを調整しながら観測値の再現性が高くなる数値を決定する。今回設定した透水係数・有効間隙率の範囲をTable 1に示す。その前段階として感度解析を実施した。モデルパラメータを設定するための感度解析であるとともに、負荷量等の増減による水質影響の時空間的影響範囲を評価することになる。

5.1 地表負荷量に関する解析

地表浸透負荷量について、標準負荷量を与えたケースで2009年1月1日～12月31日までの降雨データをくり返し入力して10年間の各Gridの濃度分布を計算した。さらに、地表浸透負荷量を増減した場合についても同じ降雨データを入力とした10年間のシミュレーションを実施した。両ケースの各Grid濃度の差を取って、濃度差等高線グラフを作成した。巨椋池地点の濃度負荷量を1.5倍追加した場合のケースの濃度差等高線グラフは下の図です。巨椋池付近は干拓事業により大規模な農地(水田・畑)となっており、農業用肥料の使用状態によって、肥料に含まれる窒素負荷量が増減する可能性が想定される。現況の地表浸透水の窒素濃度に1 mg/L濃度を追加した場合の計算例をFig.3に示す。

三層化した帯水層における地質負荷源として沖積世砂礫層、沖積世粘土層、洪積世礫層にわけて地層土壌と地下水の間で汚濁物質が物理化学的な平衡関係に基づいて移動する現象を解析する。三層モデ

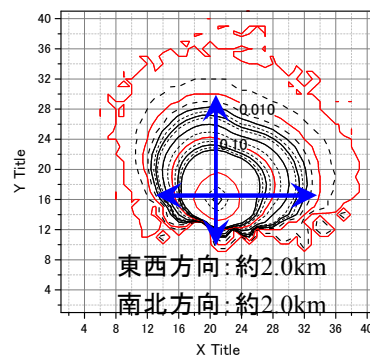


Fig.3 Example of Impact Area Assessment by Additional Surface Pollutant Load

ルでは井戸深度と水質の関係を表現する。平面二次元解析で計算した到達濃度（Grid濃度）は鉛直方向に対して平均値である。三層モデル解析で、到達濃度は二次元解析より大きい。二次元解析で水質濃度が沖積世砂礫層のほうが沖積世粘土層、洪積世礫層より大きいのである。

濃度到達時間は二次元解析で沖積世砂礫層のほうが沖積世粘土層、洪積世礫層より小さい。さらに、濃度到達距離は沖積世砂礫層のほうが沖積世粘土層、洪積世礫層より大きいという特性が明らかとなった。

河川負荷量（T-N,T-P,COD）の影響と地表面負荷量（T-N,T-P,K）の影響を比較すると沖積世砂礫層のほうが沖積世粘土層、洪積世礫層より大きい。地層負荷量（Mn,Fe,SO4）の影響は沖積世粘土層が洪積世礫層より大きくなった。

5.2 帯水層構造に関する解析

三層モデルでは、水平方向の拡散係数は一定であり、鉛直方向の拡散係数は小さく設定している（Table 1）ので、水平方向の移流拡散が卓越する。そこで、拡散係数に関する感度解析を行った。

標準値として設定した拡散係数の値を5, 10, 50, 100倍にして、ほかのパラメータ項目を変化させないで計算した結果と初期条件計算結果の差を取って比較した。100倍という設定は極端ではあるが、傾向を捉えるために用いた。しかし、拡散係数を50倍にして計算した結果は100倍にして計算した結果と、初期条件からの水質濃度上昇の最大値・最小値地点が同じ地点(grid)となり、その上昇濃度も小さくなった。透水係数を大きくすると、当然地下水は早く移動するが、また、地下水位を下がる、その理由として、地下水が領域内に滞留しにくく、境界外部に流出することが挙げられる。

拡散係数を10倍にした計算結果と初期値の差を取った場合、水質濃度上昇の最大値がGrid(X73,Y8)地点で現れ、その地表土地利用は森林であった（滞水層が24）。一方、最小値が現れたのがGrid (X51,Y15)地点で土地利用は同じく森林であった（滞水層が7）。

拡散係数5倍にした計算結果と初期値の差を取った結果、水質濃度上昇の最大・最小値が現れる地点は拡散係数10倍にした結果と同じであった。

拡散係数を大きくするほど、水質濃度上昇の最大値はより大きくなっていくが、最小値の変化は非常に小さかった。

拡散係数を100倍にして計算した結果は、濃度最高値地点滞水層が最小値地点滞水層より小さかった。また、拡散係数10倍では、最高値地点滞水層が最小値地点滞水層より大きくなった。

拡散係数を10倍にした場合、観測評価地点のひとつ

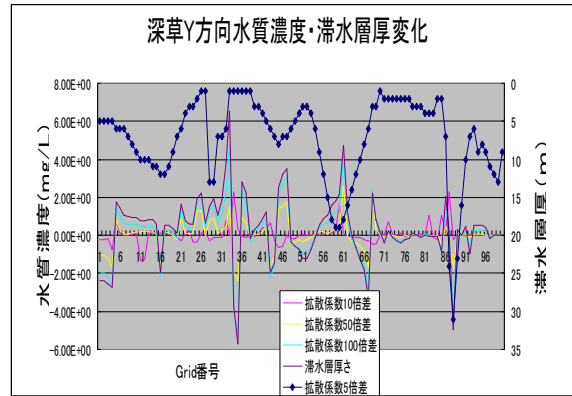


Fig.4 Example of Sensitivity Analysis on Diffusion Coefficient

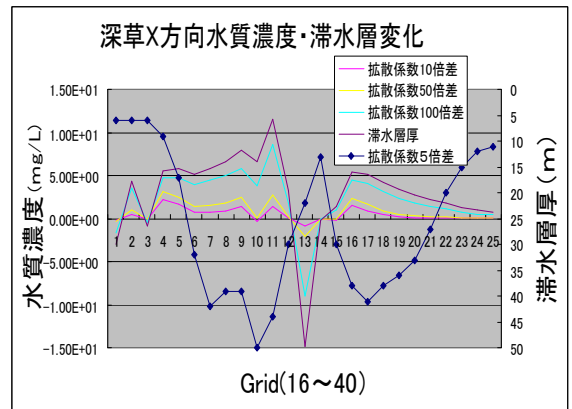


Fig.5 Example of Sensitivity Analysis on Diffusion

つであるGrid(X50,Y85)の地点において水質濃度が0.23mg/L下がった。この地点は土地利用が水田と設定されている区域である。また、水質濃度上昇が最大となった地点（Grid (X73,Y8)）と、最小となった地点（Grid (X51,Y15)）の土地利用はともに森林であった。さらに、これらの地点の滞水層厚との関係性について考察した。その結果、滞水層厚が大きい地点では、拡散係数が大きくなったら水質濃度が下がり、逆に拡散係数が小さくなると水質濃度が上がる。

拡散係数を5倍にした計算結果と初期条件結果との差を取った場合の水質濃度上昇の最大・最小値が発生する地点のGrid番号は拡散係数を10倍にした結果と同じであった。また、拡散係数が大きくするほど水質濃度上昇の最大値はより大きくなり、最小値の変化は非常に小さかった。

5.3 水質影響範囲と滞水層厚との関係

拡散係数を100倍、地表面浸透水中の濃度変化が無い場合と初期条件の差を取ると、水質濃度上昇の最大値が発生する地点（Grid[X73,Y9]）の滞水層厚は8m、土地利用は林であり、水質濃度上昇の最小値が発生

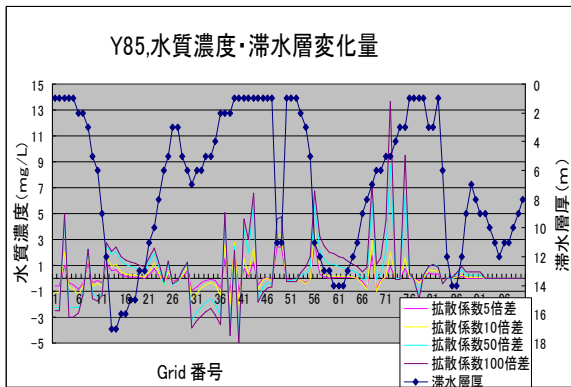


Fig.6 Example of Sensitivity Analysis on Diffusion Coefficient

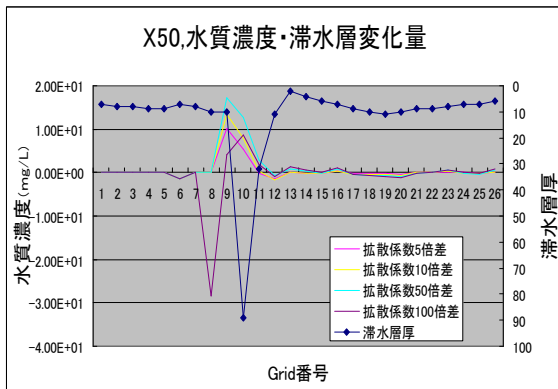


Fig.7 Example of Sensitivity Analysis on Diffusion Coefficient

する地点(Grid[X72,Y3])の滞水層厚は75m、土地利用は森林であった。拡散係数を50倍にして場合は、100倍にした計算と同じ地点で水質濃度上昇が最大・最小となり、その値の変化は微少であった。

つまり、拡散係数を大きくすると、滞水層が薄いところで水質濃度が上昇し、滞水層が厚い地点水質濃度が下がる傾向にある。逆に、拡散係数を小さくすると、滞水層が薄いところで水質濃度が下がり、滞水層が厚い地点水質濃度が上昇する傾向が明らかとなった (Fig.4~Fig.7)。これは、拡散現象によって厚い滞水層のところから滞水層が薄いところへの拡散が卓越して、汚染物質が滞留することで水質濃度が上昇すると考えられる。また、帯水層厚が薄いために地下水位の低下で極端に帯水層内の地下水量そのものが小さくなるため、同じ汚濁物質質量移流・拡散により運ばれてきても、相対的に濃度数値が上昇することも考えられる。

拡散係数が小さくなると、滞水層が薄い地点で水質濃度が下がり、滞水層が厚い地点で水質濃度が上昇した。拡散係数が小さくなると、水質濃度が薄い滞水層から滞水層が厚いところへ拡散されてきた汚

染物質が滞留して水質濃度が上昇し、厚い滞水層の流動速度が遅いことが要因として考えられる。京都盆地水系全体の帯水層厚の分布 (Fig.2) と水質影響の時空間的特性についての解析は不十分であるが、複数の地点での水質影響特性を明らかにした。

6. 結論

本研究では、京都盆地水系を対象とした地下水水位および水質観測結果に基づき、平面二次元および準三次元の地下水流動・水質解析を行い、汚染源からの物質伝播の時空間的な影響範囲の予測について検討した。その結果、特定の地点における地表面からの負荷量浸透が増大した場合と帯水層の拡散係数が変化した場合、領域内の代表的な地点での水質影響の時空間的特性を明らかにした。

今後は、モデル解析を進めて、帯水層厚以外の水質影響の時空間的分布に与える影響要因を特定し、時空間的に連続した影響範囲の特定やその結果に基づいて過去の汚染事例の回顧分析、将来的な負荷量の増減や気候変動の影響を想定した京都盆地水系の地下水水質影響の評価を行う予定である。

謝 辞

観測にご協力いただいた井戸所有者の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- 北岡貴文、楠見晴重(2009)：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、地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム
- 城戸由能・栗津進吾・バトル アブドレイム・鳥井宏之・中北英一(2010)：京都盆地水系における表流水ー地下水間の水・物質収支に関する観測調査、京都大学防災研究所年報、Vol.53、pp.495-505
- 国土技術政策総合研究所資料(2006)：地下水モデルに関する研究報告書、ISSN 1346-7328、国総研資料、第322号
- 国土交通省河川局編(1992~2002)：地下水水質年表。齊藤 泰久・鈴木 章浩・伊藤 覚(2008)：準三次元地下水浸透流解析モデルを応用した分布型水循環モデル(WCAP)の構築、http://www.pacific.co.jp/tech/study/water/files/water_50.pdf
- 田中幸夫・城戸由能・中北英一(2009)：京都盆地水系を対象とした地下水流動および水質解析、京都大学防災研究所年報、Vol.52B(CD-ROM)、pp.607-624

Model Simulation for Groundwater Quality Analysis in Kyoto Basin
-- Impact Assessment by Two and Quasi-three Dimensional Water Quality Model --

BATUER Abudoureyimu*, Yoshinobu KIDO, Shingo AWADSU* and Eiichi NAKAKITA

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

It is important to investigate and analyze the groundwater Quality conservation and utilization of the water resources. Especially, it refers to water resource management for the future and emergency water supply. In former study, analysis of groundwater quality in Kyoto basin indicated water quality of wells located around the basin belongs to different water quality type than surface water. It requires another pollutant sources than surface water recharge for groundwater quality management. So, in this study the quasi three-dimensional model is applied for analysis of groundwater quality in Kyoto Basin.

Keywords: Kyoto Basin, groundwater pollution, quasi-three dimensional model analysis, impact assessment