

京都盆地水系における表流水—地下水間の 水・物質収支に関する観測調査と解析

栗津進吾*・城戸由能・バトル アブドレイム*・中北英一

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

京都盆地水系の地下水は古来より飲料用や産業用に利用され、その良好な水質は多くの名水・名井として保全・活用されてきた。高度経済成長期の工場等の過剰な揚水による盆地南部域での地盤沈下は、その後の規制により沈静化してきたが、現在も湧水の消失や散布肥料・工場排水等による水質汚染などの問題がみられる。本研究では、京都盆地の地下水動態を明らかにし、今後の地下水利用の適正化を図ることで、地下水の持続可能な水資源としての利用を進めるために、表流水と地下水との間における水・物質挙動の解析を行った。まず京都盆地における地下水の既存の水質観測データおよび独自の連続観測のデータを、ヘキサダイアグラムを用いて水質分類し、表流水の地下水への影響を評価した。次に連続観測のデータを用いて数値シミュレーションモデル計算結果のフィードバックを行い、水収支と汚染物質動態の両面からモデルの改良を試みた。

キーワード: 地下水, 水位・水質連続観測, 流動・水質モデル解析, 京都盆地水系

1. はじめに

将来的な水資源の確保や災害時の緊急用水利用のためには、地域内の水資源となる河川表流水や地下水の動態を解明した上で、その利用可能性を検討する必要がある。そのためには、河川流域における水・物質循環を水系一環としてとらえ、その経年的変化や将来変化を調べるのが重要となる。本研究では、京都盆地における地下水の重要度に着目して、既存の地下水観測データとともに、水質特性を把握するための地下水水位と水質の連続観測を開始してデータを分析した。さらに、平面二次元飽和地下水流動モデルと移流・分散を基本とする水質モデルを用いた地下水解析を行って流動および水質特性を明らかにした。

2. 研究対象領域と観測研究の経緯

京都盆地は丹波高地南縁と滋賀県や大阪府との境界付近に展開する山地山麓およびこれらに囲まれた山間盆地であり、六甲山地殻変動・地盤変動により内陸盆地として形成された。周囲を囲む山脈とその

内部への海水の侵入と海域の後退をくり返すことで、洪積層の上部に盆地床のもととなる厚い堆積層が形成され、これらの地層内に地下水帯水層が存在する。その後、桂川・宇治川・木津川など諸河川の流入により扇状地や三角州などの沖積低地が発達してきた。また、反射探査法により中北部の基盤が比較的浅い部分と南部の巨椋池周辺の基盤が深い凹地とが、宇治川断層によって分かれていることが明らかになっている。

京都盆地では、国土交通省・京都府・京都市による河川水・地下水観測が実施されており、自記水位計による連続的水位観測、および定期的な水質観測が行われている。河川の水質観測は月に一度の採水分析、地下水質は基本的に年4回実施され、そのうち8月期においては各種イオン類を含む多項目、他の3回については限定項目についての分析が実施されているが、河川と地下水で共通する分析項目は少ない。しかし、京都市の市街地の地下水では地表水の混入が大きく、塩化物イオンと硝酸イオンが多い傾向が見られたのに対し、郊外部では汚染の少ない良好な水質が見られるといった研究結果も発表されている。また、地下水と河川水との間の水交換現象は近年「交

流現象」と呼ばれ、河床からの河川水の浸透と扇状地扇央および先端部での地下水から河川水あるいは地表への流出（湧水）の両現象が同じ領域で水位変動に伴い発生することが注目されている。京都盆地でも鴨川上流部扇状地（出町橋以北）や、桂川右岸の西羽東師側流域において、表流水系と河床地中水系に関する流動と水質特性の解析が進められている。京都盆地以外でも扇状地において表流水と地下水の交流現象があることが、山中らによって水位・水質観測にもとづいて述べられている。また、一般水質だけでなく同位体比の分析からも同様のことが評価されている。

以上の観測調査・先行研究を踏まえて、京都盆地内部の地下水水質が表流水の影響を強く受けていることにもとづき、地下水と河川水等の表流水間の水および物質挙動特性を解明するために、桂川・鴨川・宇治川に挟まれた盆地南部域の伏見桃山地区を主対象として自記水位計および自動水質計を井戸に設置し、定期的な採水分析と自動観測器による連続観測を実施2009年末から開始した。本研究では、既存観測データと独自の連続観測データにもとづき、地下水の水質分布特性を解析し、地下水－表流水間の水および物質挙動についてモデル解析を実施した。

3. 地下水・表流水観測データの解析

3.1 解析の視点

京都盆地水系内の地下水の主要な供給源は河川や地表からの涵養とともに、上流部山地地層内を長期間通過してきた地下水が挙げられる。それにより、盆地中央部の平地では地下水位が降水量や河川水位に強く影響を受ける地域が存在するとともに、地下水揚水が多い盆地南部域ではその影響が強く、盆地周辺の山麓部および河岸段丘部では、その水質が周辺地域の堆積地層地質の影響を比較的強く受けていることが推定される。このように、地下水には地表地形・土地利用、揚水、帯水層の基盤地形・土壌特性などが影響を及ぼしている。

汚濁負荷源としては、浮遊大気汚染物質等を含む降水負荷、下水道処理水等の排水を含む河川水中汚濁物質、晴天時降水物や路面堆積負荷、農地農薬等の人為活動に伴う散布物質、さらに帯水層内の土壌成分由来の土壌地質負荷が挙げられる。地表から供給される汚濁負荷は基本的に降水の地表浸透と河床からの浸透に伴い流入するので、上述の供給源と関係性が深い。また、地下水帯水層内の移流・拡散等によって長時間地下水帯水層内を通過してきた地下水中の汚濁物質は、移動中に帯水層内土壌成分と物理・化学的反応による溶出や吸着および分解現象を

伴うので、土壌土質特性も汚濁負荷源として重要な役割を果たす。

以上より、地下水の流動および水質特性を明らかにするためには、表流水および土壌堆積構造を考慮して、水・物質挙動を解析する必要がある。表流水からの涵養現象のみで表現することは不十分である。帯水層通過中に水・河川水との交流現象で涵養・湧出する成分、地表からの涵養により供給される成分、土壌土質との物質交換まで考慮して、水量と物質量の両者の収支にもとづいて流動・水質特性を解析すべきである。

そのため、まず既存観測および独自の連続観測データを用いて地下水の水質特性を類型化することで、盆地南部域における空間分布特性を考察する。さらに、集中的な観測データの解析を通して得られる特性に基づいて地下水流動および水質モデルの構造とパラメータの同定を実施する。地下水の水量・水質の両面からパラメータの評価を行うためには、それぞれの連続的な観測データが必須であり、それらを独自の観測によって入手して行うところを本研究の特徴の1つとしてあげる。

3.2 連続観測の概要

本節では現在実施中の地下水位・水質の連続観測と月2回の採水分析の概要について述べる。対象領域は表流水・地下水間の交流現象が見られると推定した盆地南部の伏見・桃山地区とした。京都市内には、現在「京都市災害時協力井戸制度登録井戸」（現在570件以上）を含めて多くの井戸が、家庭用・産業用として利用されている。現地踏査の結果、現在使用中の井戸の多くは、ケーシングパイプを埋め込みその上部にポンプを固定したものが多く、直接計測器を設置することができなかった。そこで、地域内で彫り込み式井戸を探し、それぞれの所有者に観測許可をもらい観測機器を設置した。連続観測井戸は5カ所、河川水観測地点を4カ所設定した。水位観測は自記水位計（HOBO社製のU20-001）で行い、計測項目は水圧、水温、大気圧であり、圧力差から水深が測定できる。水位の測定間隔は10分とした。水質観測は自動水質計（堀場製作所社製のW-23XD）を用いた。計測項目はpH、電気伝導率、濁度、溶存酸素、水温、水深、塩分、全溶存固形物量、海水換算時比重、酸化還元電位[ORP]、 Cl^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} であり、メモリー容量を考慮して測定間隔は20分に設定している。さらに自動計測データの回収時に井戸水を直接採水し、実験室において機器分析を行った。採水分析項目は有機態炭素[TOC, POC, DOC]、窒素[T-N, P-N, D-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$]、陽イオン[Na^+ , Li^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}]、陰イオン[PO_4^{2-} , F^- , Cl^- , Br^- ,

SO_4^{2-} , HCO_3^-], 浮遊性粒子状物質[SS]である。分析装置は全有機態炭素計（島津製作所製:TOC-V/SCN）およびイオンアナライザー（島津製作所製:PIA-1000）である。

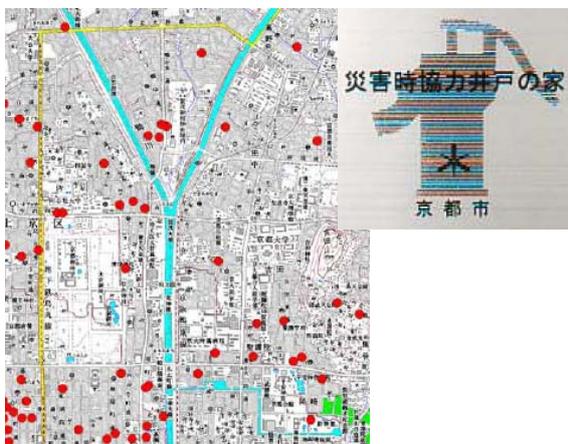


Fig. 1 Distribution map of the wells that can be used in time of disaster



Photo 1 Digging type well



Fig. 2 Distribution map of the points used for analysis

3.3 既存の観測データについて

京都盆地内には、国土交通省による地下水観測が行われており、時間水位および年数回の採水水質分析が行われている。このうち1992～2002年の水質データを解析に用いた（国土交通省、1994～2004）。観測は年4回(2・5・8・11月)、毎年8月に主要な溶存イオン類を含む26項目の水質分析が行われ、他の3回は電気伝導度等の17項目に限定されている。そのため、今回の分析には8月の分析結果のみを用い、盆地南部域の4地点のデータを本研究の観測データとともに解析する。盆地南部域に絞った代わりに、解析地点の空間密度が高いことが本解析の特徴のひとつである(Fig.2)。国土交通省による観測地点では8月の全観測期間平均値を用い、本研究の観測地点は2009年12月～2010年12月末までの2週間に1度の採水データの平均値を用いた。

3.4 水質類型の解析結果

解析にはヘキサダイアグラム法を用いた。ヘキサダイアグラム法は水平の3本の軸と1本の垂直軸を設け、水平軸上の左右それぞれに地下水水質で特徴的な陽イオン(Kation)・陰イオン(Anion)の当量値(mEq/L)をプロットし、各点を結んだ六角形のダイアグラムによって、水の組成や傾向を比較する方法である。図の形状から水質組成や傾向が、図の大きさから溶存イオン濃度構成比率の特性をそれぞれ判定でき、図形が単純なため比較的容易に分類することが可能である(Fig.3)。

- [CaSO₄,CaCl₂型 (非重碳酸カルシウム型)] : 温泉水・鉱泉水および化石塩水等の影響が大きい。一般的な河川水・地下水ではまれであり、温泉水や工業排水等の混入の可能性が考えられる。
- [Ca(HCO₃)₂型 (重碳酸カルシウム型)] : 河川水の影響を強く受けた循環性の地下水に特徴的な類型である。日本の地下水は大半がこの型に属する。特に、石灰岩地域の地下水に多く見られる類型である。
- [NaHCO₃型 (炭酸ナトリウム型)] : 停滞性の強い地下水に見られる類型であり、地表から比較的深い地下水がこれに属する。
- [NaSO₄,NaCl型 (非重碳酸ナトリウム型)] : 温泉水や海水に強く影響を受けた地下水の類型であり、沿岸域の海水が混入した地下水等で多く見られる。
- [中間型] : I～IVの中間の類型であり、河川水・伏流水、循環性地下水の多くが属する。

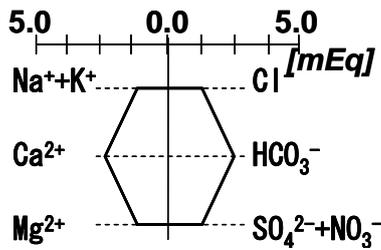


Fig. 3 The legend of Hexa-diagram

Fig.2の観測地点における採水データの平均値を用いてヘキサダイアグラムによる類型分析を行った。分析結果の空間分布をFig.4に示す。なお、Fig.2の赤字A～Eは連続観測の地下水、黒文字F～Iは河川水、緑文字J～Mは既存の地下水観測データである。

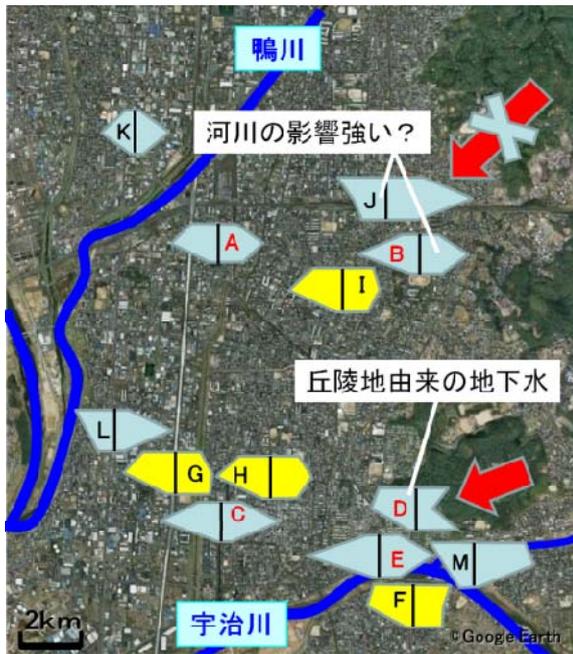
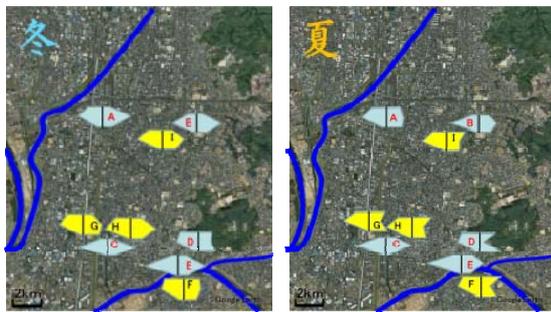


Fig. 4 Result of Hexa-diagram analysis (left-upper : average of winter season, right-upper : average of summer season, under : average of whole period)

地下水のダイヤグラムは水色、河川水のダイヤグラムは黄色にしている。河川に近い地下水の多くは重碳酸カルシウム型に分類されているものが多く、河川の影響を受けていることが分かる。特筆すべき

はB地点で、鴨川からある程度離れた距離にあり、北東の丘陵地から流れてくる地下水の影響が強く出ると予想していたが、そのような結果にはならなかった。逆に非重炭酸型の地点は、河川の影響よりも帯水層内の土壌成分の影響を強く受けていることが多い。D地点は北東の桃山丘陵地由来の地下水の影響が、宇治川からの涵養による影響よりも大きいと考えられる。

また、年間通して水質データのあるA～I地点については、冬季（2009年12月～2010年2月）と夏季（2010年6月～8月）の平均値のヘキサダイアグラムを比較した。結果、どの地点においても夏季は冬季よりも炭酸水素イオンが少ないという季節変動がみられた。これは夏季に水温が上がるため、炭酸水素イオンが気体として出て行ってしまふからと考えられる。

ヘキサダイアグラムによる水質分類の結果、河川に囲まれている盆地南部では河川水の影響を比較的強く受けている地下水が多い一方で、丘陵地近くでは土壌成分由来の地下水の影響が強く出ているところもあることが分かった。ただし、河川水の影響を受けている地域は、上空からの地形図だけでは厳密に特定することができず、地下水の帯水層がどのように分布しているのかを把握した上で、詳細な流動計算にもとづいた水質計算によって評価しなければならない。また、水質の季節変動も見られ、既存観測の年1回の水質データでは特性を把握するためには不十分であると言える。

4. 地下水流動解析

4.1 飽和平面二次元地下水流動モデル

本研究の地下水流動モデルには、先行研究にならない飽和帯だけを対象とした飽和平面二次元の地下水流動モデルを用いた。基礎式は以下の式で表される。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(h-s) \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k(h-s) \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + \varepsilon \quad \dots\dots(4.1)$$

ここで、 λ : 有効間隙率、 h : 地下水位(m)、 k : 透水係数、 s : 帯水層基盤標高、 ε : 涵養量(m)、 x, y : 空間座標、 t : 時間とする。この式で示される涵養量には地表面および河川河床部からの浸透とともに揚水量が含まれており、揚水量については公的な統計データと土地利用データに基づいて地下水からの引き抜き量として与えている。今回、浸透量についてはできるだけ物理的現象を組み込むことを目的として後述するサブモデルを組み込んだ。また、運動方程式はDarcy則に従うとする。数値計算の境界条件

としては、領域部の基盤標高の高低差に従って流入を算定する分水嶺境界条件と流量境界条件の二種類の条件を用いている。初期条件は基盤標高に一定の水位を足した状態で数年間のスピニング計算を行い、その後、揚水量等の入力条件下で本計算を実施した。空間差分間隔は100(m)、時間差分間隔はCFL条件の考え方に基づき 3,600(s)を与えた。また、くり返し前後の水位差の収束判定条件を 1×10^{-5} (m)以下とした。

4.2 帯水層基盤標高設定方法

流動計算では、地下水が通る帯水層をボーリングデータをもとに設定する。ボーリングデータは2006年度版関西圏地盤情報データベースにもとづいて、盆地内2123地点のデータから基盤標高を設定している。これにより、以下のような河川涵養の影響評価も行うことが出来る。

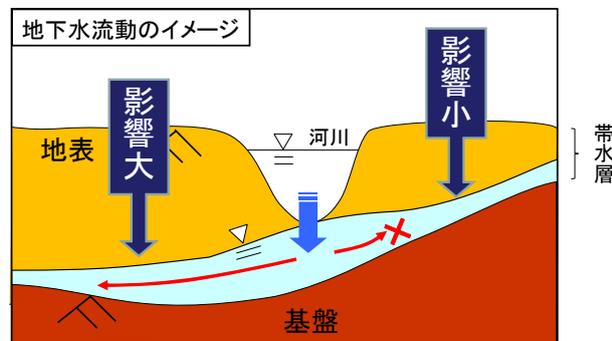


Fig. 5 Influence range of river cultivation caused by aquifer slope

4.3 地表からの地下水涵養量算定方法

先行研究では地表からの地下水涵養量を土地利用毎に降雨浸透率を与えることで表現している。また、一定量以上の強降雨時には表面流出が卓越するため、40(mm/日)以上の降雨は表流水系へ流出し、40(mm/日)分のみが地下浸透すると設定している。さらに、標高90(m)以上の山地域では、斜面流下過程でのいわゆるパイプ流などの地表面浅層部の中間流出が卓越することを考慮して、地下水浸透が無いものとしている。これらの設定は、既往調査研究に基づいてはいるが、降雨浸透現象を簡略化することで地下水流動へ影響を及ぼすこと、また地下水水質を考えた場合、重要な供給源である地表面負荷の評価に影響を及ぼす可能性が高い。そこで本研究では、より物理的なプロセスを表現できるHortonの浸透能式に基づいて涵養量の評価を行った。Hortonの提唱によると、地面は土質や地被条件に応じて決まった浸透能の挙動性質をもっており、地面に到達した雨水はここで浸透分と地表流下分に分けられる。降雨によって浸透能は低下し、降雨強度が浸透能を越すようになる

と、浸透しない部分は地表流下となり、浸透能以上の降雨の地下水への涵養は起こらない。今回用いた浸透能式は、状況によって3つの式で表されるものとする。

I : 降雨強度が浸透能より小さいとき

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\frac{f_c t}{Sm}} \dots\dots\dots(4.2)$$

II : 降雨強度が浸透能より大きいとき

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\frac{f_0 t}{Sm}} \dots\dots\dots(4.3)$$

III : 降雨がないとき (浸透能の回復)

$$f(t) = f_0 + (f_c - f_0)e^{-\frac{f_0 t}{10Sm}} \dots\dots\dots(4.4)$$

ここで、 f : 浸透能、 f_0 : 初期浸透能、 f_c : 最終浸透能、 Sm : 最大表層水分保留量、 t : 降雨時間である。雨水浸透能の評価のために、初期浸透能、最終浸透能、最大表層水分保留量については、文献 (Robert et al. 1939; 平良他, 2003) を参考にして土地利用毎に一定の値を定めた。ただし、水田においては灌漑期と非灌漑期を考慮して、5~8月は雨水による浸透はほとんどないものとした。

また、地面が乾いているときには、初期降雨は地中の水分として保留されて地下に涵養しないので、これを初期損失で表現した。初期損失量は、浸透域と不浸透域を考慮し、土地利用毎に設定した。ただし、1度の降雨イベント時間を考えて、1日あたり設定した初期損失量が発生するものとする。

4.4 河川と地下水間の交流現象モデル

河川メッシュ上では、河川水の一部が地下に涵養すると考えられる。本研究では成戸ら (2000) が用いたモデルを参考にして涵養量を計算する。このモデルは、河床に薄い難透水層が存在することを仮定して、その透水係数から河川の鉛直浸透量を評価する。Fig.6に示す河川水面と地下水面の水位差を Δh 、難透水層の厚さ a 、難透水層の透水係数 k_m をパラメータとして、次式を用いて鉛直浸透量 q_m を求める。

$$q_m = k_m \frac{\Delta h}{a} \dots\dots\dots(4.5)$$

地下水位が河川水位よりも高くなるときは、逆に地下水から河川に流出しているとして、河川・地下水間の双方向の水のやり取りを表現した。また、成戸らは $a=0.1$ [m]、 $k_m=0.4$ [m/h]としているが、成戸らが対象とした河川と研究対象領域の桂川・宇治川で

は河川の規模が異なるので、この数値を基本として感度解析を実施する。上述の河川涵養モデルを適用するためには、計算時間ごとに変動する河川水位を全ての河川メッシュで決める必要があるため、対象領域内の河川メッシュの判定を細密数値情報により厳密に行い、国土交通省水文水質データベースから対象領域内の河川観測所の水位観測値を内挿補間して全河川の水位を算定した。また、河床標高については、厳密な測量が行われている地点がほとんどないので、その他の地形情報等から推定した。

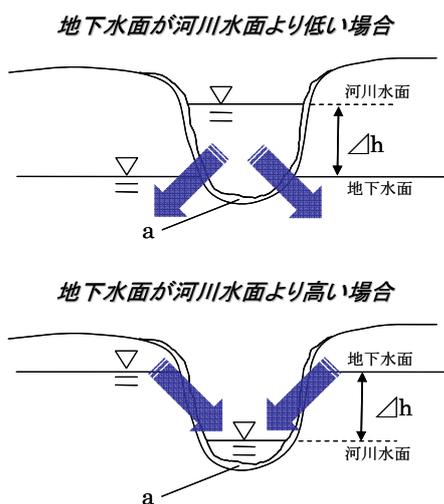


Fig. 6 Image of interchange between river and groundwater

4.5 流動計算結果と考察

今回のモデル計算では、気象庁京都地点のアメダス1時間雨量データを用いて、2009年から2010年までの2年間の地下水流動シミュレーションを行い、2009年12月～2010年11月までの観測結果の再現性を評価した。

また、地表データ・基盤データ・土地利用データを用いて、京都盆地水系における計算条件を設定し、そこに2008年の降雨量を与え、年内変動が定常状態になるまでスピニング計算を行い、その後あらためて、2009年から2010年までの期間についての地下水流動モデルの計算を行い、連続観測の水位観測値と比較・検証した。代表としてB地点とC地点の2地点の水位比較結果を示す。C地点は観測値と計算値の水位差が1m以下であり、変動も概ね合っているのに対し、B地点は水位の誤差が大きく変動も合わない。

原因を調べたところ、B地点の計算水位は地下水水位の上限と設定している地表標高に達していることが分かった。C地点が標高勾配の小さい平野部なのに対し、B地点は標高勾配の大きい山の斜面なので、計算メッシュである100mごとの平均標高を設定すると、上記のような制限がかかってしまう箇所が存在して

いた。山岳部などの勾配が大きい箇所では、計算上このような現象が起こっていることが予想されるので、この問題をいかに克服するかは今後の課題としたい。

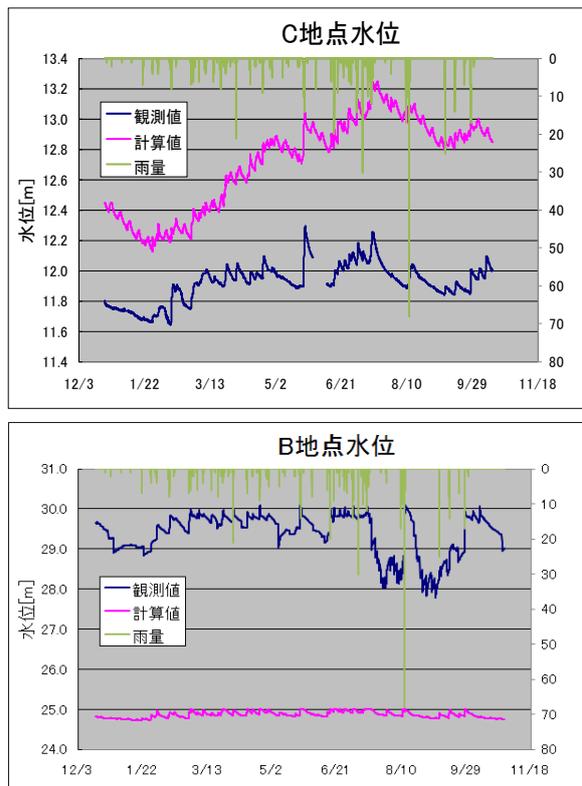


Fig. 7 Comparison with observed value

5. 地下水水質解析

5.1 地下水水質モデル

地下水水質計算には、移流分散を基本とするモデルに揚水・涵養と生成消滅項を加えた次式を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\varepsilon}{h-s} C_\varepsilon + k_i C \quad \dots\dots(5.1)$$

ここで、C：地下水の物質濃度、 D_x, D_y ：x,y方向の拡散係数、 u, v ：x,y方向の浸透流速[m/h]、 ε ：涵養量、 C_ε ：涵養に伴う濃度変化量、 k_i ：生成消滅係数 ($i=1$ ：吸着係数、 $i=2$ ：脱着係数、 $i=3$ ：分解係数)、 t ：時間である。対象物質を全窒素とし、文献値をもとに分散係数や生成項係数、および地表涵養水の水質濃度等の基本値と調整可能な上下限值を設定した。

浸透流速や涵養量は流動計算と連動しており、流動計算と水質計算は同時に行う。各種係数は文献値をもとに設定しているが、現段階では全領域で一様であり、この値を改良するのは今後の課題とする。

5.2 水質計算結果と考察

水質計算は流動計算と連動しているため、流動計算と同様2008年の降雨量でのスピンアップ計算による定常状態を初期濃度分布とする。2009～2010年の全期間平均濃度の空間分布を以下に示す。

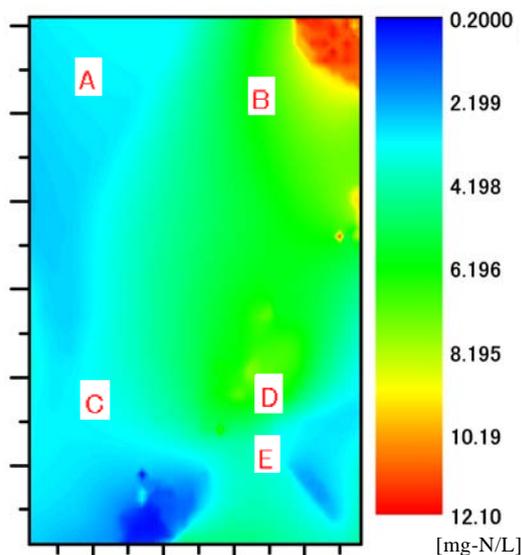


Fig. 8 Spatial distribution of total nitrogen

計算結果では、B地点とD地点の全窒素濃度が高いという結果になった。これらの共通点は丘陵部であるということであり、その影響を強くうけていると考えられる。しかし、採水分析によるヘキサダイアグラム (fig.4) をみると、B地点にはおいては丘陵部にもかかわらず河川の影響が強いという結果になっており、D地点とは異なる水質を示していた。また、採水分析の全窒素平均値 (fig.9) でも濃度が高いのはD地点のみとなっており、まだ計算モデルの再現性が高いとは言えず、今後感度分析を繰り返していく必要がある。

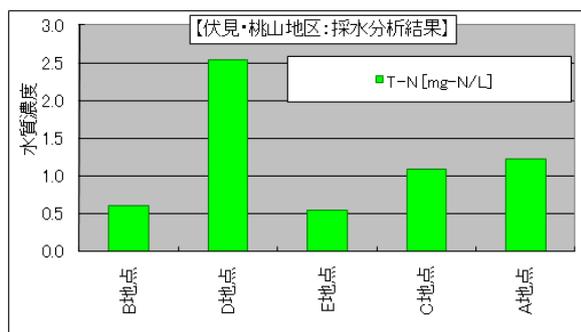


Fig. 9 Average of total nitrogen of each observation point

6. 結論

観測データから京都盆地南部の表流水と地下水の水質特性の類似性を明らかにし、地下水流動・水質

モデルによる解析を行った。現在実施中の連続観測で得られる時空間的に密な水位・水質データに基づいて、水収支および汚濁物質収支を算定評価して地下水流動・水質モデルの再現性を確認し、最終的に京都盆地全体の地下水動態を定量的に評価する。

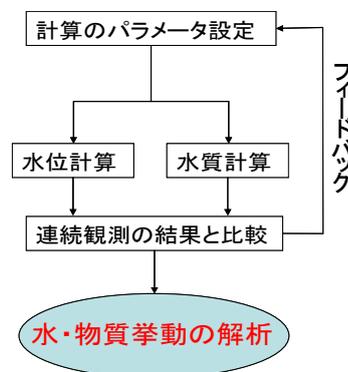


Fig.10 Model improvement process

謝 辞

本研究調査にあたり、こころよく所有井戸での観測を了解いただいた関係者の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- 城戸由能・井口貴正・深尾大介 (2004) : 河床底泥が河川水質に及ぼす影響, 京都大学防災研究所年報, Vol.47B, pp.809-818.
- 城戸由能・川久保愛太・井口貴正・田中幸夫・中北英一(2007) : 鴨川における河川水と地下水間の水・物質循環の解明, 京都大学防災研究所年報, Vol.50(CD-ROM), pp.579-594.
- 城戸由能(2008) : 西羽東師川流域の水文・環境観測と水・汚濁負荷流出解析, 京都大学防災研究所年報, Vol.51(CD-ROM), pp.549-564.
- 城戸由能・鳥井宏之・中北英一(2009) : 賀茂川水系の汚濁負荷流出過程の解析, 京都大学防災研究所年報, Vol.52(CD-ROM), pp.625-636.
- KG-NET・関西圏地盤情報協議会 (2007) : 関西圏地盤情報データベース, 2006年度版.
- 国土交通省河川局編(1992～2002) : 地下水水質年表.
- 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.
- 成戸章典・岡太郎・石井将幸(2000) : 高知県春野町における地下水塩水化の平面二次元解析, 海岸帯水層中の塩水の有効利用に関する研究報告書, pp. 57-69.

バトルアブドレイム・城戸由能・栗津進吾・中北英一
(2010) : 京都盆地水系における地下水水質の時空間特性解析, 土木学会環境工学論文集(投稿中).
平良康貴・藤村和正(2003) : 乞田川流域におけるGISデータを用いた洪水流出解析, 第30回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集.
Kido, Y., Fukao, D. and Nakakita, E.(2006): Pollutant Runoff Impacts on a Urban River Environment through the Combined and Separate Sewerage System, Proc. of the 6th Japan-Taiwan Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation , pp.Session B-7-1 ~ Session B-7-11.

Robert E. Horton(1939): Analysis of runoff-plot experiments with various infiltration-capacity. Trans. Amer. Geophys. Union, pp. 693-711.
Yoshinobu KIDO, Yukio Tanaka, Aita KAWAKUBO and Eiichi NAKAKITA(2009): Water Budget Analysis by Combination Modeling of Groundwater and River water flow in Kyoto Basin, Proc. of 4th Conf. of the APHW, pp.348-353.

Investigation and Analysis on Water Budget and Pollutant Balance between Surface Water and Groundwater in Kyoto Basin

Shingo AWAZU*, Yoshinobu KIDO, Batuer Abudoureyimu* and Eiichi NAKAKITA

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The groundwater in Kyoto basin has been utilized for the domestic and industrial use, because of stable water temperature and good water quality. The ground subsidence in the southern part of the Kyoto basin by an excessive pumping during the high economic growth period has been made quiet by the legal restriction afterwards, but there remain some problems such as spring water depletion and water pollution in present. In this study, water budget and pollutant balance between surface water and groundwater in Kyoto basin are observed and analyzed for sustainable utilization of groundwater resources. The groundwater flow is simulated by the two-dimensional saturation groundwater model, and ground water quality is also simulated by the advection and diffusion water quality model. These numerical simulation models are improved by feedback loop between each model output for the concordance of water budget and pollutant balance.

Keywords: groundwater, continuous observation of water level and water quality, model analysis, Kyoto Basin