

## 京都盆地水系を対象とした地下水流動および水質解析

田中幸夫\*・城戸由能・中北英一

\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

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と利用可能性を検討する必要がある、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予測を行うことが重要となる。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、既存観測データを基に水質特性の分析を行うとともに、平面二次元飽和地下水モデルを用いた地下水の流動解析を行って流動特性を明らかにした。

キーワード：平面二次元地下水流動解析，水質解析，地下水利用，京都盆地

### 1. 研究の背景と目的

京都は古代から人口が集中し経済活動が盛んに行われ、長い年月にわたって都市化が進んできた地域であり、住民生活や産業と水との関わりは深い。特に井戸水は京都の伝統的産業にとって重要な水源であるとともに、神社仏閣にある井戸・湧水は名水・名井として祀られ、神事用として利用されてきた。近代以降、生活用水のほとんどが上水道システムにより供給されるようになり、人々と地下水の関わりは絶たれたが、染色業や醸造業などの一部の伝統産業では地下水の水量・水質特性を考慮して引き続き利用されてきた(システム科学研究所, 1984)。1970年代に国内の多くの地域で地盤沈下が問題となり、京都盆地においても南部地域は要監視区域に指定され地下水利用の制限とモニタリングが実施されている(環境省, 2002)。しかし、盆地中央部や北部域では顕著な地盤沈下が観測されなかったために、地下水利用についての規制は緩やかである。最近では、市水道・府営水道の業務用利用量が減り、減収が報道されているが、その原因は水使用量そのもの減少ではなく、既存の井戸の再利用など自前水源の活用が原因であると考えられている(京都新聞, 2008)。さらに、歴史遺産・自然遺産としての名水・名井の水量減少や枯渇も顕在化しており、現状および将来の京都盆地の地下水の挙動については、水量・水質の両面から評価する必要がある。

現在、京都盆地は鴨川・桂川などの自然河川が流入するとともに、琵琶湖疏水を通して人工的な導水が行われている。都市における水利用を考慮すると、河川や地下水を通じた自然系における水・物質の循環とともに、上下水道などの人工的な水・物質の流動構造を解明する必要がある(城戸他, 2002)。そこで、筆者らは、まず洪水現象を含めた降雨流出過程を明らかにし、都市化による流出特性の変化を解明してきた(山形他, 2004)。また、人為的と自然系の汚染源の両方を考慮した汚濁物質の流出過程を解明し、集水区域から流入した汚濁物質が、降雨流出の前後で河床に堆積したり巻き上げられたりするプロセスに着目して河川水質の流下過程と経時的な変化を明らかにするとともに、下水道などの汚濁負荷削減効果を評価するための河川水質解析を行ってきた(城戸他, 2004)。さらに、長期的および広域的な水循環構造の解明のために、地下水流動を含めた解析を行ってきた(城戸他, 2007)。

京都盆地水系における地下水流動に関しては2章で後述するような知見が得られているが、気候変動などの最近明らかになった状況に基づく将来予測や近年の開発技術に基づく対策評価といった視点での研究は少なく、特に地下水水質に関するものは皆無といえる。そこで本研究では、水・物質の流出・流下過程が集約される地下水の挙動に着目し、京都盆地水系の地下水の自然系における流動特性ならびに水質の空間的分布を明らかにすることを目的とする。

## 2. 京都盆地の地下水に関する既存調査研究

京都盆地水系における地下水流動特性に関する過去の文献の記述を整理すると、京都盆地の地下には豊富な地下水脈があり、おおよそ北東から南西方向に流れ、桂・宇治・木津の三川合流地点付近を通過して大阪平野に向かって流出していると記述されている。風水に基づく伝承として、二条城の近くにある神泉苑は八坂神社の底なしの井戸や現在では干拓された巨椋池は地底の竜の道で繋がっているといわれていることと整合する。過去の京都盆地全域における地盤構造調査(地下水マップ, 2008)によると、京都盆地は全体的におわん型の構造をなし、盆地南部域で最大深度となり、盆地南西部の大山崎・男山付近で帯水層基盤深度が30~50m程度と浅く、この部分がダム堤体のような構造となっている。帯水層が狭まり、水が流れ出にくくなっているため帯水層上部地盤の亀裂などを通して上に向かって地下水が地表に湧き出す可能性は大きく、古くから有名な湧水・名井がこの付近に存在することとも整合する。

京都盆地は洪積層基盤が沈降しながら大阪層群と呼ばれる沖積層が何層にも堆積しており、最大700~800mに達する。盆地周辺部の丘陵部には初期に堆積した大阪層群の一部が隆起により一部露出している。京都盆地において取水対象となっているのは、深度150~200mまでの大阪層群の被圧地下水帯である(国土交通省, H13)。また他の資料においても利用可能な地下水帯の深度は60~150mと記述されている(近畿農政局, 1979)、近年の電磁探査調査によって京都盆地には琵琶湖の2/3に匹敵する地底湖が存在していることが指摘されている(楠見, 2002)。産業総合研究所の調査(産業総合研究所, web)でも同様の地下水盆構造が特定されているが、この地底湖については帯水層基盤が地表から1,000m程度の深度にあり、被圧地下水帯を対象としており、人間活動で通常使用できる地下水とは考えにくい。

1970年代の公害激化の時代に、京都盆地南部域でも地盤沈下が大きな問題となり、地下水揚水の規制対象区域に指定され、その後も定期的な地下水位・水質および地盤標高の詳細なモニタリング対象となっている(環境省, 2007)。しかし、市街地が広がる盆地北部や中部では当時の地盤沈下が小さく、規制対象とならなかった。京都盆地全域を対処として国土交通省は観測井戸の水位および水質モニタリングを昭和??年から継続的に実施しており、日平均水位および年2~4回程度の水質分析結果を公表している(国土交通省, 1988~2005)。このような定期的なモニタリングに加えて、井戸水の水銀汚染検出

に伴う調査調査(応用地盤研究所, 1983)、地下水利用可能性に関する調査(大山崎町, 1983)などが行われてきたが、いずれも1980年代のもので、近年同様の詳細な調査が行われたということは確認できなかった。

## 3. 解析のための基礎データ

本章では、本研究で行った地下水解析に用いた各種データの概要と利用方法についてまとめる。

### 3.1 地表標高および土地利用

地表標高データとして、国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)(国土地理院, 2002)を用いた。まず数値地図情報を2次メッシュ単位で読み取り、50mグリッドの地表標高データファイルを作成した。さらに地下水流動モデルの空間スケールにあわせるために、4つの50mグリッドの地表標高平均を100mグ

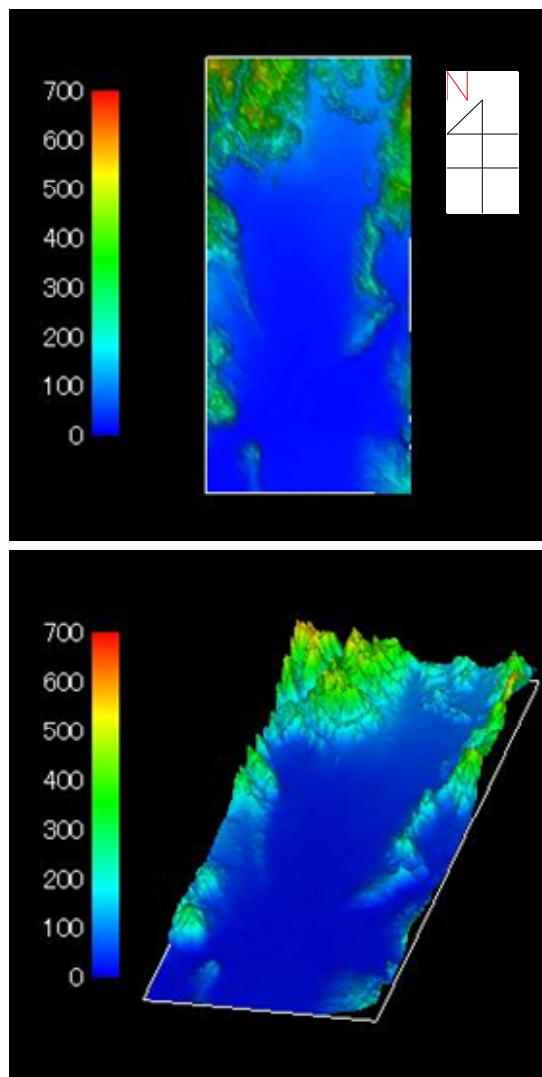


Fig.1 Land Surface Elevation of Kyoto Basin

リッドの地表標高データとして与えた。作成した100mグリッド地表標高データは後述の計算領域の範囲に合わせて整理した。地表標高分布図をFig.1に示す。地表標高データは基盤標高データとともに、計算グリッド毎の透水層厚(透水層厚 = 地表標高・基盤標高)を算定するとともに、急斜面地等での涵養量評価のための基礎データとなる。

### 3.2 地表土地利用データ

地表土地利用データとして、国土地理院の国土数値情報土地利用メッシュ(100m×国土地理院,1976,1987,1991,1996)を用いた。解析期間を1987年~1998年としているので、土地利用データとして、1976年,1987年,1991年,1996年の4期のデータを用いた。地表標高と同様に2次メッシュ単位で各年の国土数値情報を読み取り各期ごとに作成した。地表標高データと違い、元データが100m単位のためグリッドの結合や平均化は行っていない。土地利用データも地表標高データと同様に計算領域の範囲に合わせて整理した。ただし、対象領域内の各年における土地利用別面積を比較すると1991年の水域データが他の年と異なり明らかに少ない。これは土地利用分類をこの年だけ異なる基準で実施された可能性が高い。そこで、本研究では、1987年、1996年の両方ともに水域データとなっているメッシュは、1991年においてもそのメッシュは水域の土地利用とした。補正後の土地利用をFig.2に示す。

### 3.3 細密数値情報データ

本研究では、揚水の影響をより厳密に評価するために、工業用地、農業用地の詳細なデータが必要となるため、上記で述べた土地利用データよりも、さらに詳しく土地利用が判断できる細密数値情報を用

いた(国土地理院,1991)。本研究の計算メッシュの大きさは、国土地理院などで用いられる第3次地域区画に基づいて経度・緯度によって区分され、東西4.5秒、南北3秒のともに約100mとしている。細密数値情報は緯度・経度の間隔ではなく距離によって区分されており10mメッシュのデータであった。そのため、細密数値情報における10mメッシュの中心が、計算領域内のどのメッシュに含まれるかを判定して利用した。作成したデータを用いて解析領域内の各メッシュ中の工業用地、水田およびその他の農地の存在割合を算定した結果をFig.3に示す。これらの算定値は3章で揚水量を算定する際に用いた。また、工業用水などは市区町村別のデータとなっており、対象領域内の行政区域を判断する必要があるため、細密数値情報を用いて行政区域区分を作成した。簡便化のため計算メッシュにおける行政区域の判断は計算メッシュに一番多く存在する細密数値情報の行政区域を用いた。さらに、今回河川水位の変動を計算条件としてとり入れるために計算領域内の河川メッシュを判定する必要があり、その際に細密数値情報を用いた。

### 3.4 帯水層基盤標高および帯水層特性に関するデータ

基盤標高とは、地下水帯の下部境界を形成する不透水層の標高である。実際には、同一性状の土層が広範囲で堆積しているわけではなく、砂礫や粘土が入り混じった土層を形成しているため、対象領域全体で不透水層が完全に連続して存在するわけではないが、地下水流動解析のためには下部境界の設定が必要であり、基盤標高以深には直接的に流下しないものとする。ただし、その設定方法は計算結果に大きく影響することには十分留意する必要がある。

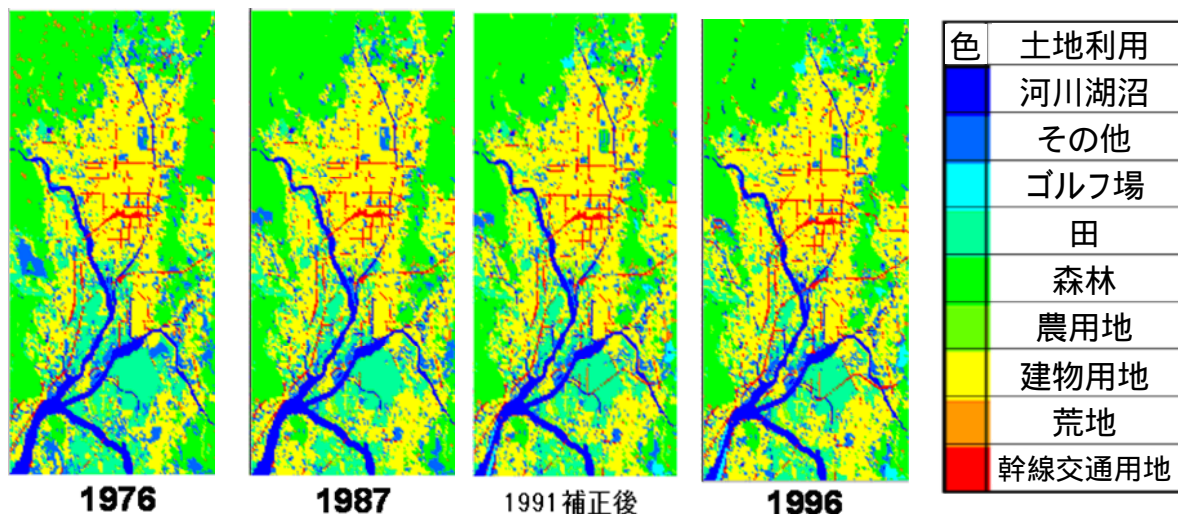


Fig.2 Land Use of Study area in Kyoto Basin

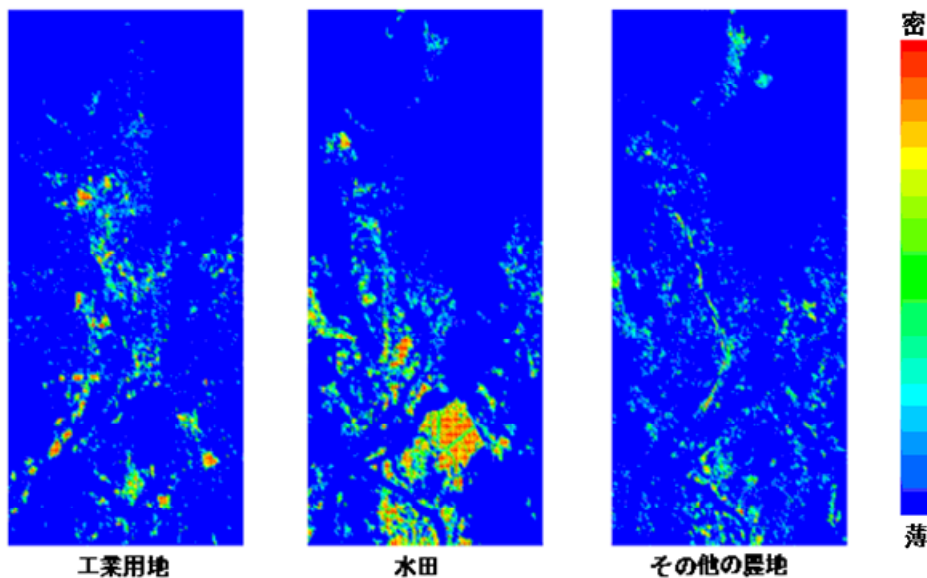
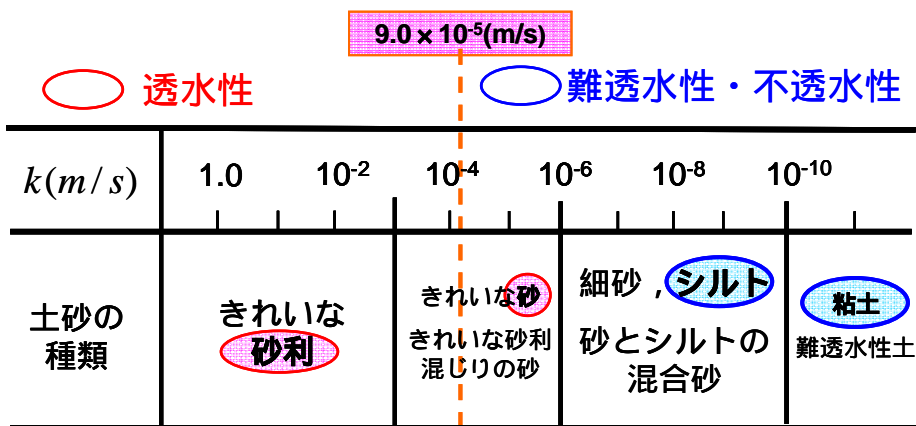


Fig.3 Industrial use, paddy area and agricultural land use in study area

本研究では2006年度版関西圏地盤情報データベース（関西地盤情報協議会・関西圏地盤DB運営機構、2006）に基づいて基盤標高データを作成した。関西圏地盤情報データベースの目的は、過去30年におよび実施された地盤調査によって得られた多くの情報項目と情報量をもったボーリングデータをデータベース化し、関西圏地域の地盤特性を究明する基礎とするとともに建設活動をはじめ地域の地震防災検討等にも活用することである。1995年の兵庫県南部地震以降には、地域防災計画の見直しにおけるハザードマップの作成や諸施設の耐震性評価など、地震防災検討に関して様々に関西圏地盤情報データベースが活用されている。掲載されているボーリングデータは地下鉄工事等に伴い実施されたものを集約したものである。基盤標高については地表標高・土地利用等のように一定の空間メッシュに基づいた整備がなされておらず、有限数のボーリングデータを基に

対象領域全体の基盤標高データを作成する必要がある。本研究における基盤標高設定の手順を以下に説明する。

まず、解析対象範囲内およびその近傍外部に存在するボーリングデータを選定した。選定範囲は、東経135° 39'3.59"から135° 50'26.83"であり、北緯34° 50'15.36"から35° 06'28.11"となり、ボーリングデータの総数は3,653個であった。次にボーリングコアの層構造データから基盤と見なせる不透水層の標高を決定する。ボーリングコア層はFig.4に示すように礫層から岩盤までの7種類の土質に分類されており、不透水層と見なせる土層の透水係数として $9.0 \times 10^{-5} (m/s)$ を採用した。ボーリングコアデータの地表から不透水層と見なせる土層が現れるまでの標高を計測して基盤標高とした。さらに、土層は単一の土質分類で表記されているとは限らないのでボーリングコアデータから得られる情報の信頼性を表1に示



(出典：浸透型流出抑制施設の現地浸透能力マニュアル)

Fig.4 Hydraulic conductivity of soil conditions

Table 1 Classification criteria of aquifer bottom layer

分類	基盤と判断する際の指標
1	岩盤
2	2m 以上の粘土層
3	1m 近くの粘土層か長いシルト層
4	砂の混じった粘土層のようなもの
5	礫層が 30m 以上出てきて、しかも基盤が設定できない (そのボーリングコア長の 1.5 倍地表から深い所を基盤とする)
6	基盤を特定できない

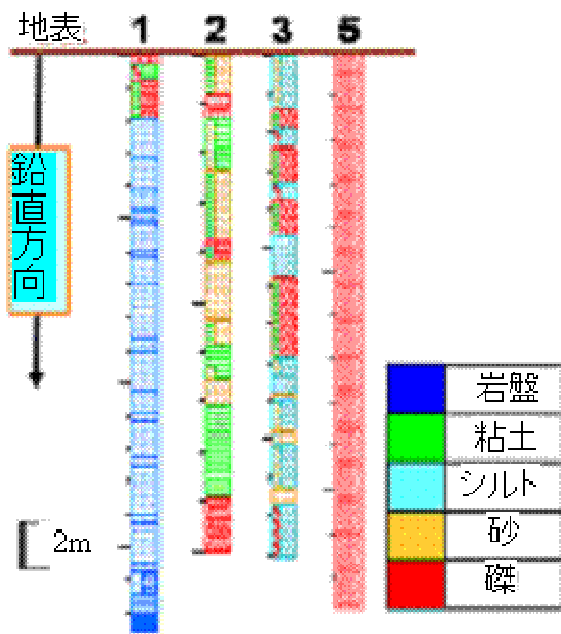


Fig.5 Sample of boring core

す基準に従い6段階に設定して対象空間メッシュの基盤標高を決定した。分類1は岩盤が出てくる場合であり不透水層であることが十分信頼できる。分類2は長い粘土層を基盤とする場合であり粘土の透水係数を考慮すると不透水層ですることは妥当である。分類3は1m程度の粘土層または長いシルト層が存在する場合であり不透水層と見なすには不十分であるが、これより深い層に分類2までの土層が現れない場合には基盤として採用することとした。分類4は砂の

混じった粘土層を基盤とする場合である。分類5は礫層が30m以上の深さで堆積しており、しかも分類4までの基盤が設定できない場合である。この場合地表からボーリングコア層厚全体の1.5倍の深さに基盤があると仮定した。これは、ボーリング深度が浅いことにより、より深いところにあるはずの基盤を計測できていないためであり、浅いボーリング深度に基づいて薄い透水層に基づいた計算を行った場合に計算が困難になるのを防ぐためである。また、1.5という数値を仮定したのは、近くにあるボーリングデータとはある程度の特異性を持たせつつも、極端に透水層厚を過大にしないためである。最後の分類6は、ボーリングコアデータから基盤標高を特定できない場合である。分類4,6以外のボーリングコアの例をFig.5に示す。これらの分類に基づき、領域内のボーリングデータ3,653地点のうち2,123地点を選別し、基盤標高を決定するために使用した。

次に、対象領域全体の帯水層基盤標高を決定するためにティーセン法とKriging法の二つの空間補間法を用いた。両手法は点情報から空間情報を算定する手法であり、ティーセン法はデータが存在する点同士を直線で結び各辺の垂直二等分線によって区分される対象点を含む多角形がその点が支配する面積とするものである。Kriging法は、観測されたデータから任意の位置での確率場の値を予測するものであり、精度の高い応答曲面を得ることができるものである（鈴木他，2005）。しかし、基本となるボーリングコアデータはその地点で取得された固有のデータであり、これに基づいて単純に数学的内挿補間した場

合には、基盤標高が当該地点の地表標高を上回るような矛盾を生じる場合や極端に透水層厚が過大に評価される場合がありうる。今回の内挿補間の結果、透水層厚が負の値つまり基盤標高が当該地点の地表標高を上回る地点は山麓周辺部に存在し、透水層厚が過大になる地点は標高の高い山地部に存在した。前者は基本となるボーリングコアデータが離散的であり、より空間的に密度の高い地表標高データとの整合性がとれていないことが原因である。後者については、標高の高い山地部でのボーリングコアデータが少ないため、山麓部近傍の平野部でのボーリングデータを基に内挿したため急激に標高が高くなる山地部の地表標高勾配に対して基盤標高勾配が緩やかに評価された結果である。これらの異常値についてはボーリングデータの空間的密度の限界であり、根本的な解決策としてはより高密度なボーリングデータの蓄積しかない。このため、現時点で得られるボーリングコアデータに基づいて基盤標高を決定するには基本的にはボーリングコアデータから得られる基盤標高の内挿補間を実施するが、異常値が発生する地点については、周辺部の基盤標高と地表標高から得られる透水層厚についてKriging法を用いて内

挿補間を行い、地表標高値から差し引くことで基盤標高を算定した。それでもなお異常値が発生する場合にはKriging法に加えてティーン法により求めた透水層厚を用いて内挿を行い、異常値がなくなるように調整を行った。

最終的に、6段階に分類したボーリングデータを組み合わせて、さまざまなパターンで基盤標高を作成したが、その内、分類1, 2, 3, 5, のボーリングデータから求めた基盤標高を補間して基盤を作成した場合に盆地水系全体で最も妥当性の高い基盤標高を得られた。その判断基準としては分類1および2は十分に基盤と考えられるので基本的に用いることにし、分類5を採用しない場合には透水層厚を過小評価する危険性があるために用いることにした。さらに分類3を含めることで、Fig.6に示すように解析範囲内ほ

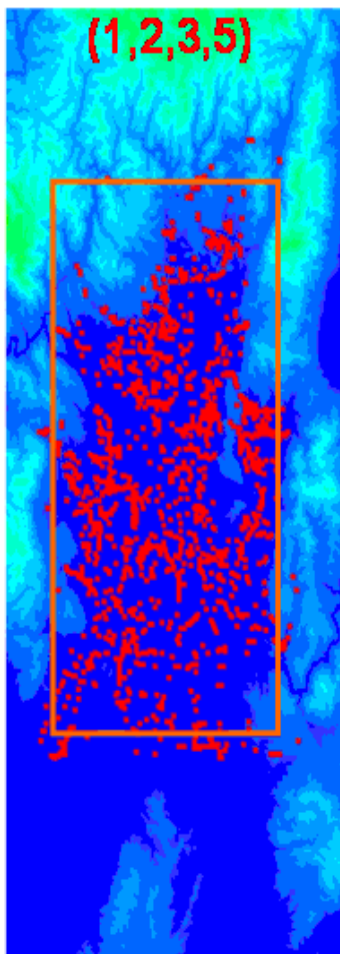


Fig.6 Boring points in study area

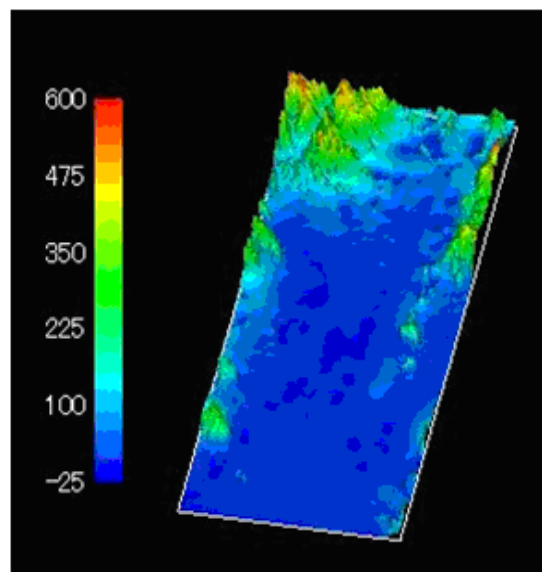
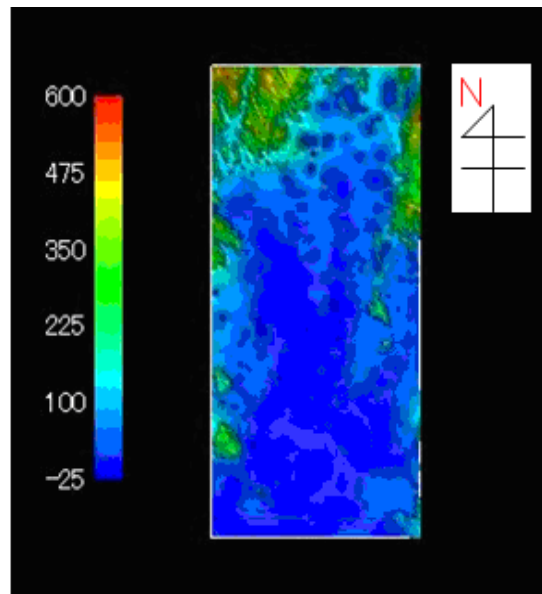


Fig.7 Aquifer bottom elevation

ば全域にボーリングコアデータが存在させることができ。以上の作業により作成した地下水帯水層基盤標高分布をFig.7に示す。

### 3.5 降水量

降水データ(気象庁,1982~1999)に関しては1981年から1998年における気象庁京都地点(京都气象台)のアメダス雨量データを用いた。降水データは計算時間間隔である1時間毎のデータとした。1981年~1986年の雨はスピニングのため用い、それ以降の降雨によって実際の地下水再現計算を行った。

## 4. 京都盆地の地下水水質特性

京都盆地における地下水水質を1987年~2004年まで経年的にまとめたデータについて分析した(国土交通省,1988~2005)。対象領域内の観測地点はFig.8に示す18箇所の観測井戸において、観測項目毎に異なるが、基本的に年4回(2・5・8・11月)の水質調査の結果がまとめられている。4回の調査のうち基本的に8月は多くの水質項目に関して詳細な分析をおこない、他の期間については限定された項目のみの分析を行っていた。水質調査項目については表2にまとめる。観測データの解析では、空間的・経年的に変化している項目、汚染源がある程度明確である項目に着目した。水質解析の一般的な手順として、

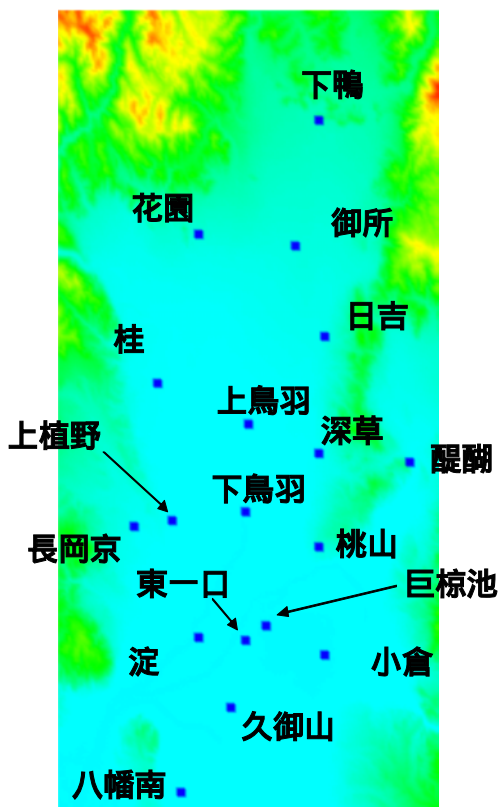


Fig.8 Water quality observation points in study area

地下水の流動過程において移流・拡散が主要な濃度分布の規定要因となる保存性の高い物質と、分解性や供給源からの影響が顕著に現れる有機性汚濁物質であるTOCやT-Nなどについて解析を行う。地下水水質年表のデータを、水質項目別、観測地点別に如何にまとめる。

#### a)全窒素および硝酸態窒素

地下水においては農地からの涵養によって供給されることが一般的であるので、農地が多く存在する南部に高い値があると考えられる。しかし、観測値では盆地南部域の淀や長岡京などの観測地点以外にも、下鴨や御所、桂などでも高い値を示しており、農地以外の供給源についても考えられるが、これらの明確な供給源は特定できなかった。ただし、全窒素および硝酸態窒素は空間的にひろく分布する特性を明らかにできた。

#### b)カリウムイオン

肥料の三大要素のひとつであり、そのため上述の窒素と同様に基本的には農地由来であると考えられるが、一般土壌中にも多く存在する。水質調査のデータによると、特に淀、長岡京において高い値を示していた。しかし、それ以外の地点においては、値に大きな差がなかった。

#### d)炭酸イオン

炭酸イオンは大気中の二酸化炭素が河川水に曝気される過程で溶け込むため、河川水から地下水への浸透量を示す指標となる。今回の解析の結果からも河川付近の観測地点である下鳥羽や深草、淀などの地点で高い値を示していた。

#### e)塩化物イオン

塩化物イオンは人為由来の汚染源と考えられており、合流式下水道越流水などにより河川へ供給され、流下に伴い河床に蓄積し、その後地下水へ浸透することにより地下水の塩化物イオン濃度を高めると考えられる。今回の解析の結果では深草と長岡京が高い値を示しており、前者は合流式下水道雨水吐きが多く設定されている鴨川下流部にあるためと考えら

Table 2 Observation items of water quality

pH	Cl <sup>-</sup>
電気伝導度	溶解性鉄
DO	溶解性マンガン
COD	Na <sup>+</sup>
総硬度	Ca <sup>2+</sup>
NO <sup>3</sup> -N	Mg <sup>2+</sup>
T-N	K <sup>+</sup>
T-P	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
pH4.3アルカリ度	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

れる。長岡京地点周辺は分流式下水道が整備されており、人為的汚染源による影響とは考えにくく、他の汚染源を検討する必要がある。

### 5. 京都盆地水系における地下水流動解析

本章では、地下水流動モデルに関する基本的な考え方について述べるとともに、モデル計算値と計算領域内に点在する国土交通省の観測井戸の水位を比較・検討し、モデルの再現性の検証を行う。以下、5.1では地下水流動モデルに関する基本的な考え方を整理し、5.2では計算のための諸条件の設定方法を説明する。5.3では計算条件として取り入れた揚水量算定の方法について述べる。5.4では現況再現結果と観測値とを比較・検討し、モデルの再現性の検証および考察を行う。5.5では、モデルの妥当性について検討し、本章のまとめを述べる。

#### 5.1 平面二次元地下水流動の基礎式およびその解法

本研究では広領域を対象とした総合的な地下水流動特性の把握を主要な目的としており、地下水流動モデルには Richards 式などを用いた不飽和帯における水の挙動は考慮せず、飽和帯だけを対象とした飽和平面二次元流出モデルを用い、基礎式として連続式と Darcy 則を用いた。連続式は、

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

と表される。ただし、 $\lambda$ ：有効間隙率、 $h$ ：水位(m)、 $k$ ：透水係数(m/s)、 $s$ ：基盤標高(m)、 $\varepsilon$ ：涵養量(m/s)、 $x,y$ ：空間座標、 $t$ ：時間(s)とする。本研究では差分法を用いて数値解析を行うため、式(1)を差分展開する。その際、空間パラメータ、時間パラメータはともに 0.5 とした。時間・空間パラメータについては後述する。式(1)を差分展開すると、

$$\lambda_{x,y} \frac{h_{t+\Delta t,x,y} - h_{t,x,y}}{\Delta t} = \frac{k_{x+\Delta x/2,y} \left( h_{t+\Delta t/2,x+\Delta x/2,y} - s_{x+\Delta x/2,y} \right) \frac{h_{t,x+\Delta x,y} - h_{t,x,y}}{\Delta x}}{\Delta x} - \frac{k_{x-\Delta x/2,y} \left( h_{t+\Delta t/2,x-\Delta x/2,y} - s_{x-\Delta x/2,y} \right) \frac{h_{t,x,y} - h_{t,x-\Delta x,y}}{\Delta x}}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots(2)$$

と表される。これにより時間  $t + t$ 、地点  $x, y$  における水位  $h_{t+\Delta t,x,y}$  は、式(2)の右辺を有効間隙率  $\lambda_{x,y}$  で

除し  $t$  をかけることにより求められる水深の変化量に時間  $t$ 、地点  $x,y$  における水位  $h_{t,x,y}$  を足せば求められる。また、運動方程式は Darcy 則に従うとし、 $x$  方向の流速  $v_x$ 、 $y$  方向の流速  $v_y$ 、および流量  $q$  は、

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$q = kiA = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} A_x - k_y \frac{\partial h}{\partial y} A_y \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表される。ただし、 $q$ ：流量(m<sup>3</sup>/s)、 $A$ ：流下断面積(m<sup>2</sup>)とする。流速  $v_{x1}, v_{x2}$  および流量  $q_{x1}, q_{x2}$  は空間パラメータ・時間パラメータとともに 0.5 としているので、

$$v_{x1} = -k \frac{h_{t,x+\Delta x,y} - h_{t,x,y}}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$v_{x2} = -k \frac{h_{t,x,y} - h_{t,x-\Delta x,y}}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$q_{x1} = -k \frac{1}{2} \left( h_{t+\frac{1}{2}\Delta t,x,y} - s_{x,y+\frac{1}{2}\Delta y} \right) \frac{h_{t,x+\Delta x,y} - h_{t,x,y}}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$q_{x2} = -k \frac{1}{2} \left( h_{t+\frac{1}{2}\Delta t,x,y} - s_{x,y-\frac{1}{2}\Delta y} \right) \frac{h_{t,x,y} - h_{t,x-\Delta x,y}}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots(9)$$

と表される。 $y$  方向の流速および流量に関しても同様の差分展開を行った。

#### 5.2 計算条件の設定

本節では、透水層の性状を示す透水係数や有効間隙率、計算領域における外部境界条件の与え方、土地利用データに基づく涵養量の算定方法、河川水位観測値を用いての河川メッシュにおける水位の与え方、時間・空間差分間隔および収束条件などの計算のための条件設定について説明する。

##### 5.2.1 透水係数の空間分布

本研究では、第2章で説明したように、以下の土壌層を基盤と設定し、その基盤と地表の間を飽和透水層と考えている。そのため、透水層に砂礫といった透水性の土壌と、粘土・シルトといった不透水性の土壌が混在するので、ボーリングコアデータが存在する地点ごとの土壌種の構成比率に基づいて透水係数値を算定した。具体的な加工方法として、まずボーリングコア図を基に透水層における砂礫土壌と



粘土・シルト土壌の混合割合を求め、砂礫土壌は、粘土・シルト土壌はと透水係数を設定して加重平均を行いボーリング地点ごとの透水係数を算定し、最後に透水係数を対象領域全域に基盤同様Kriging法を用いて内挿補間して、透水係数の空間分布を求めた。結果をFig.9に示す。対象領域内の平均的透水係数はとなっており、既往研究で用いられていたよりも大きな値となっている。これについては後述の感度分析で詳しく考察する。

### 5.2.2 有効間隙率の空間分布

透水係数同様、有効間隙率もボーリングコアデータの透水層における砂礫土壌と粘土・シルト土壌の混合割合を基に加重平均を行って、ボーリングコアデータがある地点ごとの値を算定し、最後に対象領域全域に補間して、有効間隙率の空間分布を求めた。その際用いた、それぞれの土壌の種類による有効間隙率の参考値を表3に示す。これに基づき砂礫土壌は0.2、粘土・シルト土壌は0.05と設定した。算定した有効間隙率の対象領域内の平均値は約0.13となっており、既往の研究で用いられていた0.1の値よりもやや大きなものとなっている。有効間隙率の平均値に関しても後述の感度分析で詳しく考察する。

### 5.2.3 外部境界条件設定の考え方

外部境界条件設定として、分水嶺の境界条件と流量境界条件の二種類の条件を用いた。これは、境界線外部地点の基盤標高と境界部の基盤標高との高低関係により地下水の流動方向が変わることを考慮するためである。境界において、計算領域の外部地点の基盤標高が境界部より高い場合は境界外部から水は流入するため分水嶺の境界条件を用い、外部地点

の基盤標高が境界部より低い場合は境界外部から水は流出するので流量境界の条件を用いた。具体的には、計算領域における境界部グリットの標高が、一つ内側のグリット標高より高い場合はとした。逆に境界部グリットの標高が内側のグリットの標高以下である場合はとした。ここには一番端の地点の透水係数であり、一つ内側のグリットの水深である。

### 5.2.4 土地利用データに基づく涵養量算定

計算領域内におけるメッシュ毎の土地利用データに基づいて涵養量を算定する。今回の計算では、地表標高が90m以上の殆どが山地斜面であるメッシュには、降雨による涵養がないものとした。この条件を設定した理由として、山の基盤はボーリングデータによると、基盤の分類として岩盤が多く、しかも地表付近の比較的浅い深度に存在していることが挙げられる。つまり、岩盤という不透水層が地表近くに出ていることにより、山地斜面部の透水層厚が薄くなっているとともに、勾配が急なため地表付近の浅層部を速く流下するため表面流になる可能性が高く、河川に流出して地下帯水層への浸透が非常に少なくなるためである。さらに、クラックの存在により地下空間内に滞留して自由地下水として存在しなくなる可能性も十分に考えられるので、一定標高以上の山地部からの地下帯水層への浸透をカットした。これは、ポテンシャルの高い流れをカットすることに繋がるので、水位を下げることに寄与すると考えられる。また、単純に地表標高が90m以上の地点における涵養量がないとすると、領域全体の地下への涵養量が少なくなるため、他の領域において実際の文献などで与えられている涵養割合よりも大きな値を、Fig.10に示すように土地利用別に計算条件として

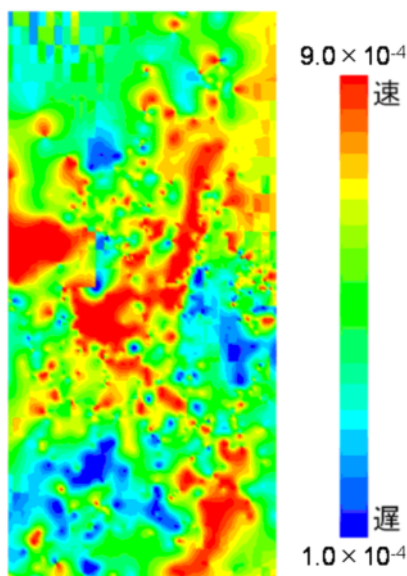


Fig.9 Hydraulic conductivity distribution in study area

Table 3 Effective porosity

地層	間隙率	有効間隙率	地盤	間隙率	有効間隙率
沖積礫層	35	15	洪積砂礫層	30	15~20
細砂	35	15	砂層	30~40	30
砂丘砂層	30~35	20	ローム層	50~70	20
泥粘土質層	45~50	15~20	泥層粘土層	50~70	5~10

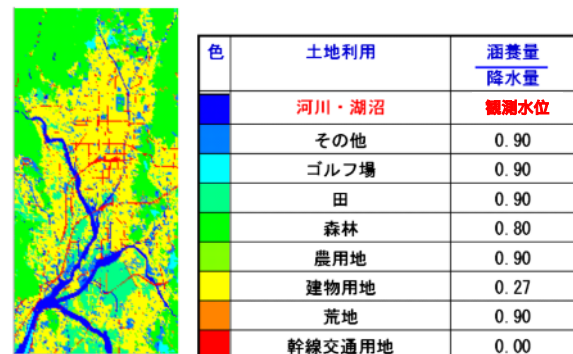


Fig.10 Permeable ratio of each land use

与えた。また、河川や湖沼といった水面が主要な土地利用となっているメッシュには水位を境界条件として与えた。河川に関しての詳細な設定方法については次に述べる。

### 5.2.5 河川メッシュにおける水位条件設定

先行研究(井上, 2005)では、賀茂川や高野川、桂川の水位は地表標高からそれぞれ6m, 8m, 10mに設定されており、その値を一定として地下水計算の境界条件としていた。しかし、本研究では、河川メッシュに常に一定の値を与え続けるのでは周辺の地下水水位がその定水位に強く依存することを改善するために時間ごとに変化する河川水位の影響を地下水計算に導入した。そのために行った作業を以下に簡単に示す。

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った。

主要河川のみを抽出し、さらに河川に繋がる細かい用水路などを取り除いた

さらに、細密数値情報の範囲外の高野川を他の地理情報に基づき追加した。

国土交通省水文水質データベースに記載されている、対象領域内の日単位の河川水位観測値を用いて、

で選定した河川メッシュの河川水位を線形補間によって算定した。

具体的に述べると、まず  $\alpha$  に関しては既往研究などに定水位条件算定のため用いられ、本研究でも涵養量を算定する際に使用した国土地理院の土地利用データに基づいて河川メッシュを判定すると、それぞれの100mメッシュに一番多く含まれる土地利用しか判断できないため、主要な河川でも空間的に繋がらない場合がある。しかし、細密数値情報を用いれば10mメッシュにおける土地利用なので、主要な河川であれば空間的に連続した河道を設定できた。よって、細密数値情報を基に、まず河川を含む水域を判定した。次に  $\beta$  に関しては、細密数値情報では河川は水域として分類されており、湖や用水路など同一の分類となっていたため、それらを選別する必要がある。選別の方法は基本的には、水域メッシュを図示し、それを基に主要河川以外を目視で確認した上で除去した。  $\gamma$  に関しては、細密数値情報では左京区のデータが一部欠けており、高野川付近のデータが途中でなくなっていたため、緯度、経度の分かる地形図を用いて、高野川を計算メッシュにおいて再現できるようにした。

最後の  $\delta$  に関しては、対象領域内に点在する河川水位観測所における日単位の観測値を基に線形補間した。線形補間の方法は、まず河川メッシュと判断されているメッシュには基本の水位条件として、既

往研究同様、賀茂川や高野川、桂川の水位は地表標高からそれぞれ6m, 8m, 10m低い所を設定し、その値に、観測値に基づいて時間ごとに算定された変動量を加えることによりそれぞれの河川メッシュにおける水位条件を評価した。変動量を算定するために、対象領域内の河川を桂・淀川水系、賀茂川水系、木津川水系、宇治川水系、山科川水系に区別し、それぞれの水系に含まれる観測所のデータだけを用いた。例えば、桂・淀川水系において、河川水位観測所である高浜と納所に挟まれた河川メッシュでは、これら二つの観測所における観測値を内挿補間することによって求め、高浜より南の河川メッシュなど外挿補間になる箇所については、高浜のデータのみを基に求めた。

### 5.3 計算条件

$x$ ,  $y$ は今回の計算が広域を対象としていることによる計算負荷を考慮して100(m)と設定し、 $t$ は  $x$ ,  $y$ の値からCFL条件の考えに基づいて計算が発散しない範囲で3,600(s)を与えた。収束条件として全グリッドにおける水位の計算出力結果がくり返し計算の前後で $1.0 \times 10^{-3}$ の差で収まれば収束したものとした。収束条件の根拠はモデルの妥当性を評価する際に用いる観測井戸データが $1.0 \times 10^{-2}$ までの精度で観測されており、その10分の1の精度を基準とした。

#### 5.3.1 時間・空間パラメータの導入

今回の計算手法の特徴のひとつは、時間パラメータ( $\alpha$ )と空間パラメータ( $\beta$ )の導入である。このパラメータは流量を過大評価もしくは過小評価しないために用いるものであり、今回の計算ではそれぞれ0.5という値を用いた。時間パラメータについては、時間における水位から時間 $t + \alpha$ における水位を求める際に、その中間時間 $t + \alpha/2$ の水位を用い、空間パラメータも同様に、地点 $(x, y)$ と地点 $(x + \beta, y)$ の間における水のやり取りを考える際に、地点 $(x + \beta/2, y)$ の値を考慮することを意味する。しかし、空間パラメータを導入することにより、水が無い所から水が流れ出るとい現象が計算上起きうる。これは、本来水深が存在しないグリッドにおいても、空間パラメータの導入によって隣接するグリッドに水深があれば、計算上水深が存在してしまうことになり、Darcy則に従って水が流れ出てしまう可能性が出てくる。これを防ぐために、水位が基盤を下回ったとき、その水位を基盤と同じ標高値として、隣接グリッドの水位と基盤の高さを比較し、当該グリッドからの流出は無いものと考え、当該グリッドへの流入だけを評価するようにした。Fig.11に具体的に示す。

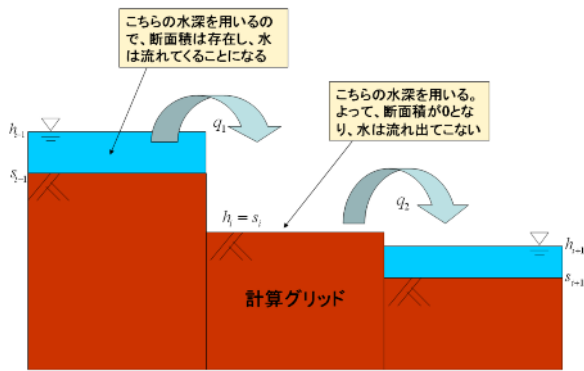


Fig.11 Calculation scheme of this study

## 5.4 揚水量の設定方法

### 5.4.1 工場揚水量の設定方法

工場揚水量に関しては京都府の統計データを基に作成した。データは1975年から2005年まで、各年において京都府の市区町村別に分かれて存在していた。

計算メッシュにおける工業揚水量の算定のための手順を以下に示す。

市区町村別の工業用地面積と揚水量から単位面積あたりの揚水量を算定する。

次に、細密地理情報から10mメッシュの工業用地の割合を求めて、100mの計算メッシュ内の工業用地割合を算定する。

それぞれの値を掛け合わせるにより、計算メッシュにおける工業揚水量を算定する。

上記の作業を詳しく述べると、まず 京都府の統計データから分かる市町村別工業揚水量を、細密数値情報から求めたそれぞれの市区町村内に含まれる工業用地面積で割ることによって、市区町村別の工業用地単位面積からの揚水量を決定した。については上記の通りであり、の算定方法の例を用いて説明すると、伏見区の工業用地単位面積からの揚水量をA、伏見区に含まれる計算メッシュの一つにおける工業用地の割合がそのメッシュの半分だとすると、そのメッシュからの工業揚水量は0.5Aとなる。また、工業揚水については工業用地が密集する地域付近の地下水位観測値が週変動することを考慮して、計算においては平日のみ与える条件とした。工業揚水量の空間分布についてはFig.12に示す。

### 5.4.2 農業揚水量の設定方法

農業用水に関しては、農林水産省によって1993年に行われた農業用地下水の利用実態調査のデータを用いた。このデータは工業揚水と異なり市区町村別ではなく京都盆地全域をまとめたのものであったが、こちらは年ではなく、月別となっていた。また、水田に用いられる地下水量とその他の農地などに用い

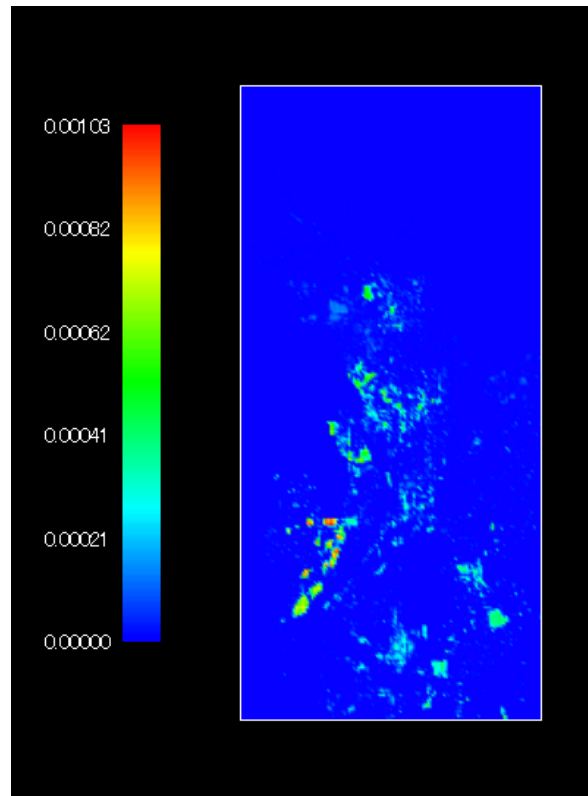


Fig.12 distribution of industrial groundwater use

Table 4 Agricultural groundwater use

		年間揚水量(千m <sup>3</sup> /年)		面積(ha)									
水田		43,166		3,722									
畑		916		218									
その他の農地		307		75									
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
水田		0	0	0	0	5,559	13,097	14,535	9,976	0	0	0	0
その他の農地		208	200	36	229	134	33	48	30	27	178	155	241

単位(千m<sup>3</sup>)

\*その他の農地⇒畑、樹園地、施設園芸

られる地下水量が区別されていた。農業揚水量および水田に関する基礎データは表4に示すとおり灌漑期と非灌漑期を考慮する計算となっている。

水田からの揚水量を計算メッシュごとに算定する方法は、工業揚水量を算定する方法と同様である。まず、京都盆地全域における水田からの揚水量を計算領域内に含まれる水田の面積で除し、水田単位面積当たりの農業揚水量を算定し、次に、計算メッシュにおける10m水田用地の割合を求め、それらを掛け合わせるによって計算メッシュ内の農業揚水量を決定する。その他の農地からの揚水量に関しても、同様の手法によって求めた。水田、その他の農地からの8月におけるそれぞれの揚水量の空間分布をFig.13に示す。また、1993年のみ詳しいデータが存在したので、このデータに基づいて算定された農業揚水量を各年の計算で用いた。

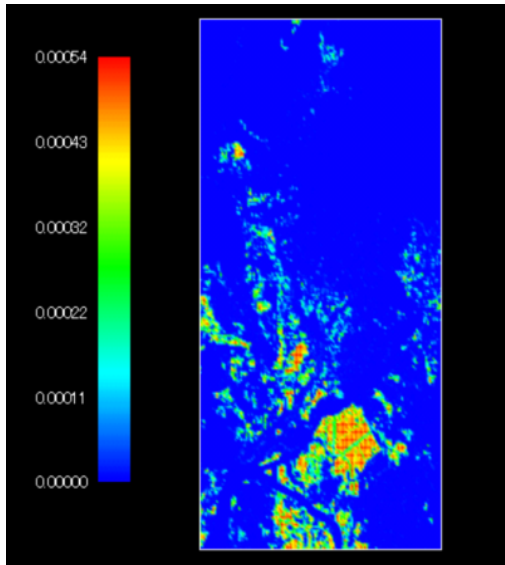


Fig.13 Agricultural groundwater use

### 5.4.3 上水道揚水量の設定方法

上水道揚水量はFig.14に示す京都府の統計データを基に作成した。工業揚水同様、1975年から2005年まで市町村別のデータが収められている。なお、京都市は上水道用として地下水を揚水していないので、京都市域はこの算定から除いている。

上水道の揚水量算定方法は、各年の市町村別の揚水量をその市町村の面積で除して市町村別単位面積当たりの揚水量を決定した。工業用地や農業用地と違って、細密数値情報などでは計算メッシュについての具体的な位置が判断できなかったため、この方法で算定した。

## 5.5 現況再現結果と考察

今回のモデル計算では、1981年から1998年にお

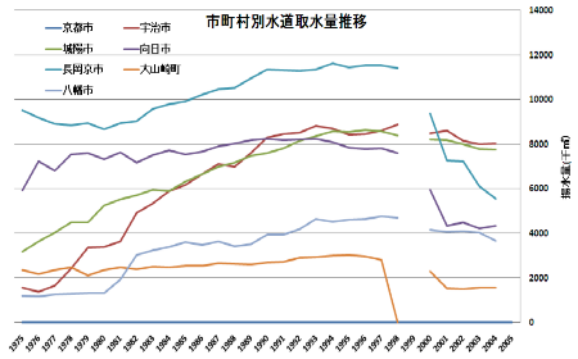


Fig.14 Municipal water supply data

る気象庁京都地点のアメダス1時間雨量データを用いた1987年から1998年における12年間の地下水流動シミュレーションを行い、観測結果の再現性を評価した。

### 5.5.1 現況再現の手順

第2章で説明したように、作成した地表データ、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1981年から1986年の雨をワンサイクルとして与え、年内変動が定常状態になるまでスピナップ計算を行い、その後で、1987年から1998年までにおける雨を与えて計算値を出力し、井戸水位観測値と比較・検証した。1987年から地下水位シミュレーションを行った理由としては、1987年以前の5年から10年程度の降水データを用いて1987年からの経年的な地下水位変化を同定するのが理想的であるため、1981年から1986年の降水データをスピナップのために用いたことと、下賀茂観測地点において明らかに1986年までの水位と1987年以降の水位が異なり、水位計の交換等が行われた可能性が高いことから、下賀茂の水位が大幅に変動していることが挙げられる。ただ、得られた結果は12年間という経年的かつ全体的な地下水流動特性を示しており、本研究の目的を満たすものと考えた。

### 5.5.2 現況再現結果の評価方法

対象領域内に含まれる井戸観測地点は全部で20点存在する。これら全ての観測データと整合した再現計算を行うことは容易ではなく、また観測地点の中には明らかに被圧地下水帯まで到達している深井戸が含まれているので、再現目標とする井戸観測地点を選定した。京都盆地水系全体の地下水流動特性を確認するためには、北東から南西にかけて存在すると考えられている地下水流を重要視して、計算領域内における北東から南西にかけて存在する観測地点を選定する必要がある。さらに、今回の計算で導入した揚水の影響を比較、検討するためにも工業用地



Fig.15 Estimation points of groundwater flow simulation

や農用地の密集地域付近にある観測地点を重要視した。以上の条件によって観測地点として、北東から南西にかけて順に、御所、桂、上鳥羽、上植野、久御山を取り上げた。解析範囲内における選定した観測地点の位置をFig.15に示す。これら5つの観測地点における井戸水位観測値とモデル計算によって求められた5つの観測地点が位置するグリッドの地下水水位計算値を、年平均水位、年内変動、位相、揚水の影響などに注目して評価した。

### 5.5.3 感度解析

現況再現のためにモデルにおける地下水流動に変化を与えるパラメータである透水係数と有効間隙率の両方に関して感度解析を行い、地下水流動特性の変動についてまとめる。感度解析の結果を参考にして、3.3.1と3.3.2で説明した本研究で同定したそれぞれのパラメータが既往研究で設定した値と異なることで地下水流動の計算結果に与える影響について考察する。

まず透水係数に関して感度解析を行う。透水係数以外の条件は同じとして、解析範囲全域の透水係数の値をの場合との場合を比較・検討した。結果をFig.16に示す。透水係数を上げると、もちろん地下水はより早く移動するが、それだけでなく、結果からも全体的に水位を下げる役割を果たしていると考えられる。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。

次に有効間隙率に関して感度解析を行う。透水係数同様、有効間隙率以外の条件は同じとして、解析範囲全域の有効間隙率の値を0.1の場合と、0.3の場合

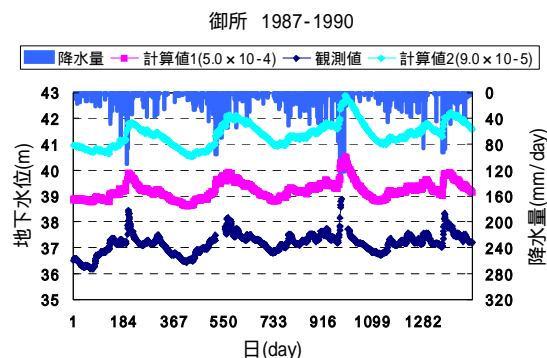


Fig.16 Sensitivity analysis (hydraulic conductivity)

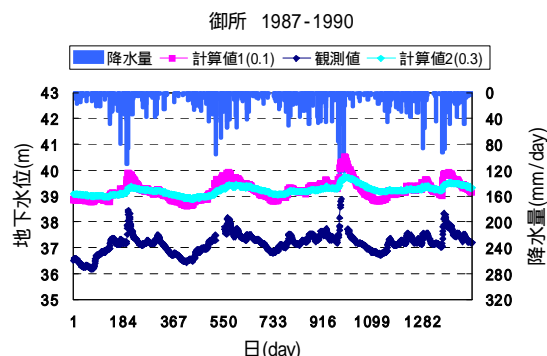


Fig.17 Sensitivity analysis (effectiveness polo city)

について比較・検討した。結果をFig.17に示す。図に示すように有効間隙率は降水浸透による地下水水位の増加量に大きく関係していると考えられる。有効間隙率はもともと土壌層全体に占める地下水の割合を表すものであるが、連続式における有効間隙率は地下水水位の変動幅に影響を与えるパラメータである。なぜなら、ある地点における毎の地下水水位変化量は有効間隙率で割った値に反比例するからである。また、今回の計算の収束計算においては空間パラメータの存在により動水勾配による地下水水位の変化量は大きく影響しなくなり、降水による変動幅が顕著になることが考えられる。なぜなら降水は涵養量として直接地下水水位の増加量に比例するからである。よって、計算の手法から考えても、有効間隙率の値は降水による地下水水位の増減量に大きく影響していると考えられる。

以上の結果を踏まえて、今回ボーリングコアデータを基にして作成した透水係数と有効間隙率の空間分布について考察する。透水係数に関しては、既往研究で用いられた値を解析範囲全域の透水係数として地下水水位の計算を行うと、観測値と比べて全体的に水位を高く評価した。よって、既往研究で用いられていた透水係数よりも平均的にみても大きな値をもつ今回作成した透水係数の空間分布は、観測値の再現性を高めることに寄与するものと考えられる。有効間隙率に関しては、既往研究で用いられていた

0.1の値を解析範囲全域に与えて計算しても、降水の変動幅を観測値より大きく算定している地点と、逆に少なく算定している地点があった。そのため、平均的に0.13と既往研究よりも大きな値を示す今回作成した有効間隙率の空間分布が計算の再現性を高めるかについてはここでは言及できない。しかし、透水層における土壌分布を反映して、有効間隙率の空間分布を作成したことには、現実にはありえない京都盆地全域に一樣という考え方よりは意義があるものである。

#### 5.5.4 河川設定の影響

3.2.5で説明した、実際の河川水位観測値を用いて河川メッシュにおける条件を設定した影響について、定水位条件と比較することによって考察する。結果をFig.18に示す。河川水位観測値を導入することによって降水による地下水位の変動をより大きく評価するものとなった。降水によって河川水位が上昇し、それが地下水位の計算条件として反映されている。簡易的ではあるが、降水時に河川水位が地下水位に及ぼす影響を評価できた。

#### 5.5.5 揚水の影響

3.3で述べた揚水の影響を評価するために、他の条件は固定して揚水条件を考慮した計算と考慮していない計算を行い比較し、揚水を考慮した場合、対象領域内の空間的な水位低下が及ぼす影響について検討した。工業用地もしくは農業用地が密集している観測地点、上植野と久御山それぞれの水位変化をFig.19に示す。また、揚水を取り入れた場合、年平均水位低下がどの程度かについてFig.20に示す。図に示すように、地点によっては2メートル以上の年平均水位低下が起こっていた。揚水の影響を定量的に評価することができた。

#### 5.5.6 現況再現結果と考察

以上の条件を用いて行った計算の結果をFig.21,22に示す。図に示すように年変動や位相はかなりの精度で再現されていることが明らかである。しかし、年平均水位に関しては、その絶対値がほぼ再現している地点と大きなバイアスが存在する地点が存在する結果となった。年平均水位が再現できない原因として、ひとつには基盤データと現実との誤差が挙げられる。また、計算格子を100mメッシュで計算していることも場の不均一性からみると重要であり、計算では100mメッシュの中心を代表点としてとっているのに対し、現実には100mメッシュの範囲内にはその代表点とは大きく異なる値を持つものがあることも十分考えられる。年変動と位相がかなりの精度

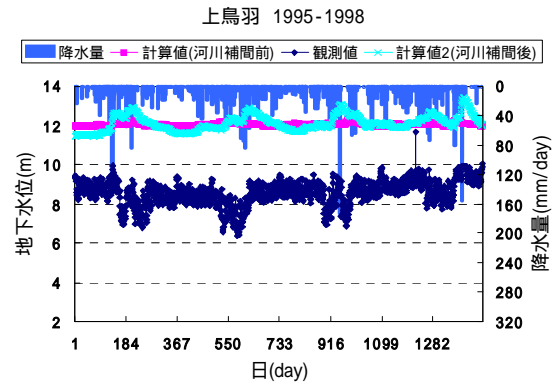


Fig.18 Sensitivity analysis (river water level)

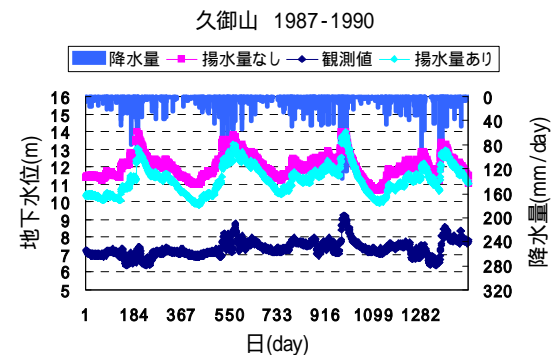
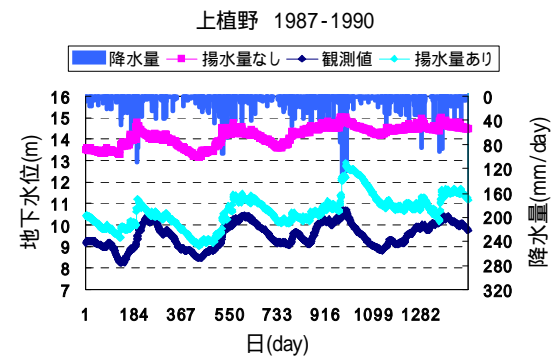


Fig.19 Groundwater level at Kamiueno and Kumiyama

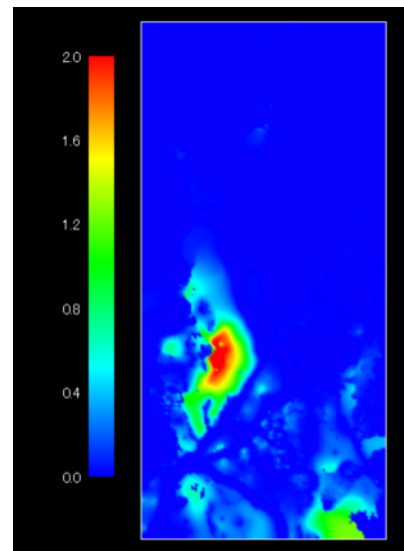


Fig.20 Annual decreasing level of groundwater

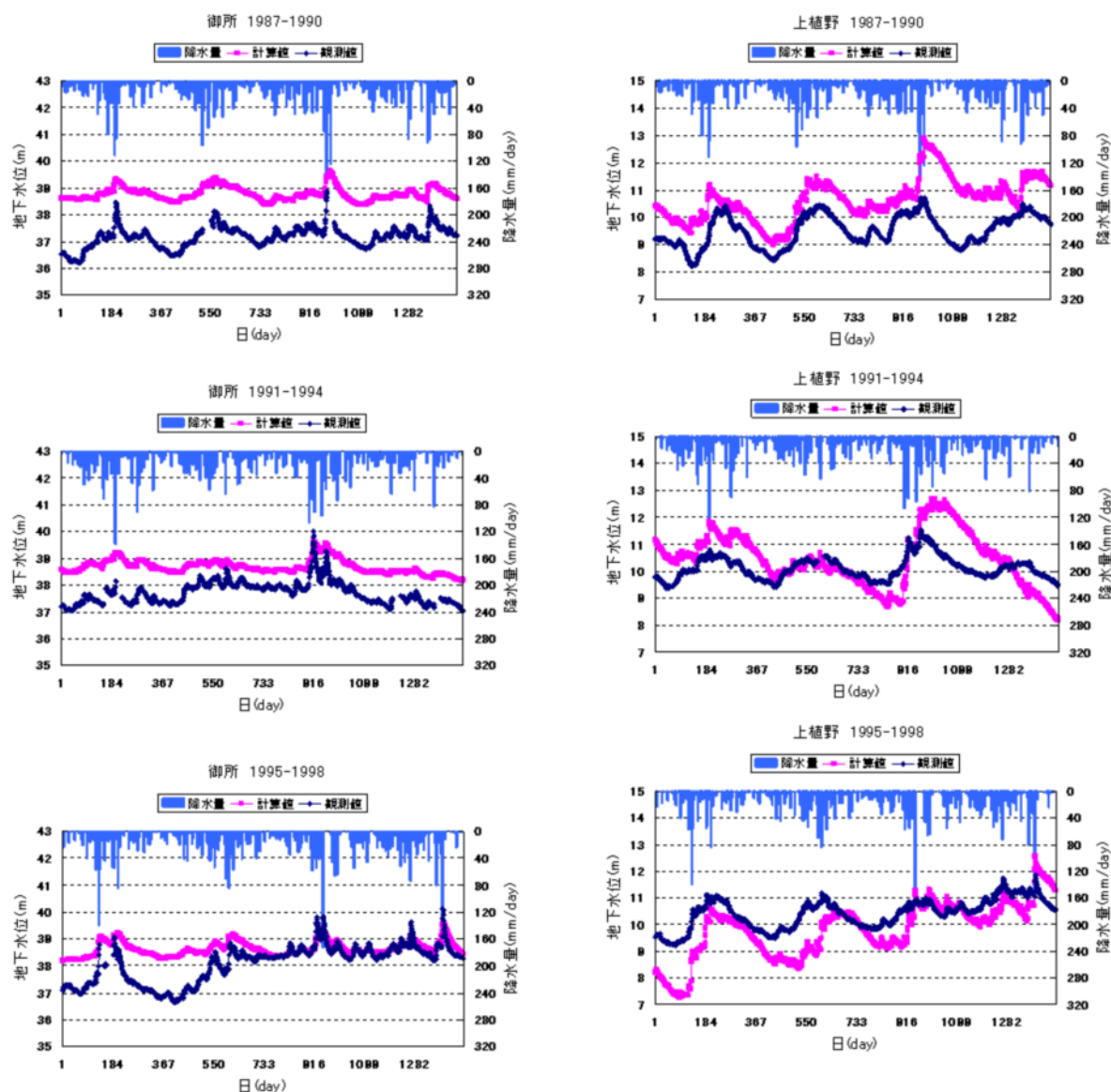


Fig.21 Example of simulation results

で合っている原因として考えられるのが、実際の1987年から1998年における地下水位観測値の増加が、降水のすぐ後にできてきていることと、モデル計算において地下水流動をシミュレーションする際、降水の直後にタイムラグなしで飽和帯に涵養量として降水が地下水位に影響を及ぼすようなプログラムにしているために、計算結果自身も降水の影響を受けやすい結果になっていることが挙げられる。つまり、観測地も計算値も降水の影響を色濃く表すようになっているため、結果的に年変動や位相が合うことになったと考えられる。降水の影響があまり見受けられない観測地点における、観測値と計算値を比較するとあまり位相があっていないことから同様のことが考えられる。

また、Fig.23に示す流動ベクトルから分かるように、盆地内における北東から南西の地下水の流れを流動

モデルによって再現できており、年変動、位相とあわせて、全体的な地下水流動は評価できた。

## 5.6 まとめ

本章でのまとめを以下に簡単に示す。

地表と基盤の間に設定した透水層の土壌分布をボーリングコア図に基づき、砂礫土壌と、粘土・シルト土壌との混合割合を判定し、透水係数および有効間隙率の値を設定した。ボーリングコアデータの無いメッシュに関しては補間をし、解析範囲内における空間分布を求めた。また、解析対象範囲である京都盆地水系における平均的透水係数 および有効間隙率0.13という値を算定した。

対象領域内にある11箇所の観測地点における1時間ごとの河川水位の観測値を線形補間することによ

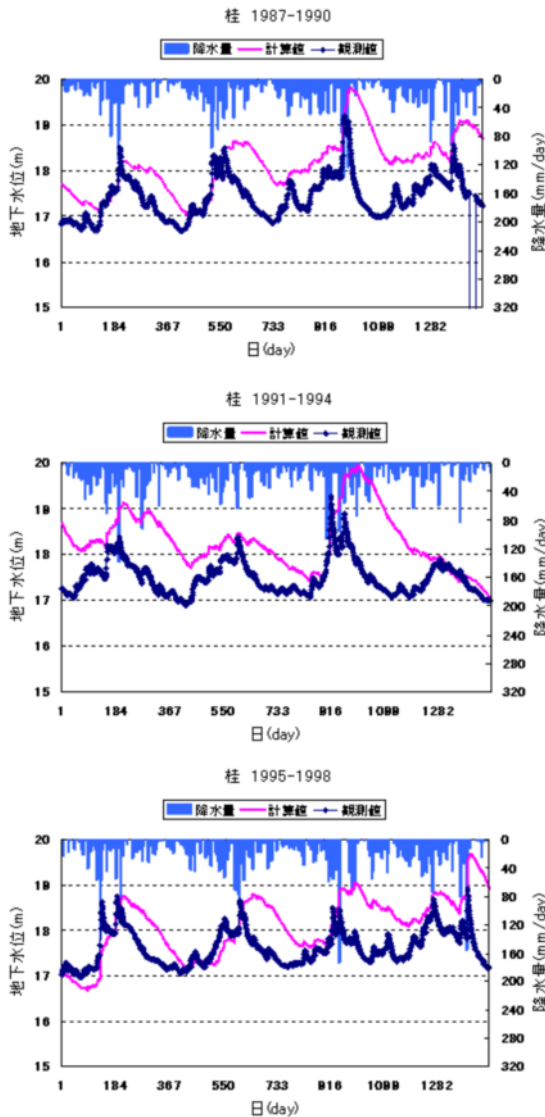


Fig.22 Example of simulation results

り、既往研究で用いられていた河川メッシュの定水位の条件を改善し、簡易的ではあるが河川と地下水との連動を表現した。その結果、降水時における河川水位の増加、および降水後の河川水位の低下といった現象による地下水水位の影響を評価できた。

工業・農業・上水といった用途別の揚水量を統計データに基づき、時間ごと、計算メッシュごとに算定した。揚水量の影響を計算の条件として取り入れることにより、工業用地や農業用地が密集している地域付近の観測値のバイアスが改善された。また、揚水量を取り入れた場合、年内平均水位が2メートル以上低下する地点も存在した。揚水量が地下水水位に与える影響を定量的に評価できた。

感度解析により、透水係数および有効間隙率が地下水の流動にどのような影響を及ぼすかについて考察を行い、本研究で作成した透水係数と有効間隙率の空間分布について評価を行った。

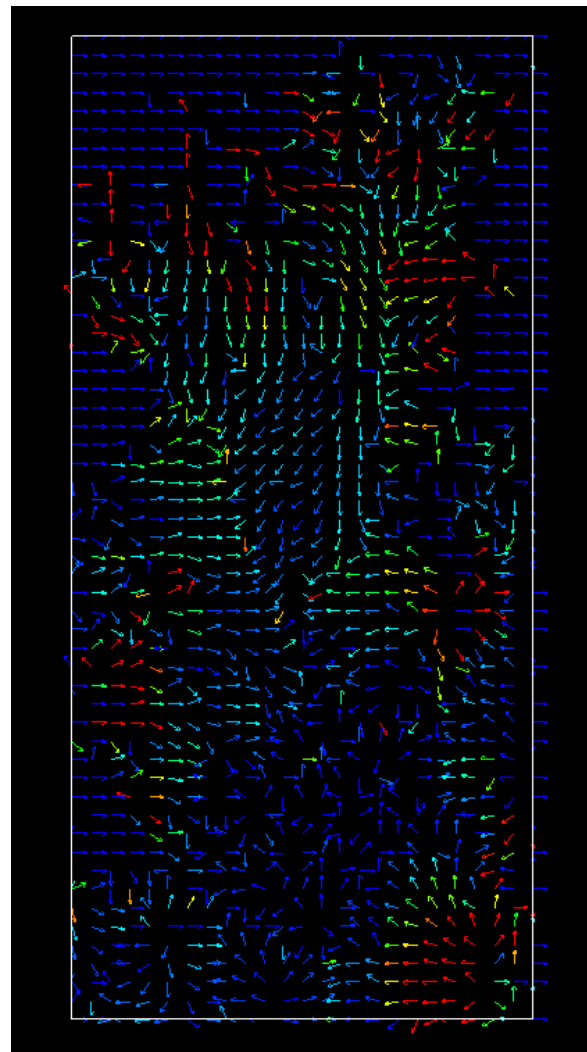


Fig.23 Simulation result of groundwater flow vector

飽和平面二次元流動モデルを用いた解析によって、地下水水位の年変動および位相について精度良く再現できた。また、流動ベクトルに示すように、盆地水系の北東から南西への地下水の流動を再現でき、京都盆地水系における全体的な流動特性を示した最後に改善点についてまとめる。

現況再現結果と実際の観測値を比較して判断をするなら、このモデルはある程度の信頼性は持てることが実証されていることになる。しかし、より現実に近い状況を作るためにも、降水データに関して言えば、今回のように1箇所の降水観測データを用いるのではなく、計算領域内に点在する、いくつかの観測地点の降水観測データをティーン分割して計算場に与える、もしくは、さらに改善するにはレーダー情報を用いる必要があるはずである。つまり、計算領域内における地点毎の降水データを用いて、実際の降水をより正確に再現し、経年的に地下水水位の変動シミュレーションを行い、経年的変化を踏まえてモデルの妥当性を評価する必要があると考えられる。



そして、計算場を作成するにあたって、最も現実の値と合わせにくいのは基盤である。地下の構造である基盤はボーリングデータに基づいて算定するしかなく、そのため、基盤をより精度よく表現するには、やはり、ボーリングデータがより増えるしかない。しかし、ボーリングデータが広域にわたる計算領域において設定するグリッドすべてに満遍なくあるようなことは現実的には有り得ない。そのため、より精度よく基盤を設定する何らかの工夫を考え出さなければならない。基盤の構造に寄与する他のデータ、基盤構造と相関のあるなんらかの指標があるのか慎重に検討する必要がある。

## 6. 結論

本研究の成果として以下のことが挙げられる。解析範囲内に点在する3653点のボーリングコアデータに基づき、基盤標高を決定した。ボーリングコアデータの無いメッシュに関してはKriging法を用いて補間をし、解析範囲内における基盤標高データを独自に作成した。地表と基盤の間に設定した透水層の土壌分布をボーリングコア図に基づき、砂礫土壌と、粘土・シルト土壌との混合割合を判定し、透水係数および有効間隙率の値を設定した。基盤標高データ同様、ボーリングコアデータの無いメッシュに関しては補間をし、解析範囲内における空間分布を求めた。また、解析対象範囲である京都盆地水系における平均的透水係数および有効間隙率の値を算定した。対象領域内にある11箇所の観測地点における1時間ごとの河川水位の観測値を線形補間することにより、既往研究で用いられていた河川メッシュの定水位の条件を改善し、簡易的ではあるが河川と地下水との連動を表現した。その結果、降水時における河川水位の増加、および降水後の河川水位の低下といった現象による地下水位の影響を評価できた。工業・農業・上水といった用途別の揚水量を統計データに基づき、時間ごと、計算メッシュごとに算定した。揚水量の影響を計算の条件として取り入れることにより、工業用地や農業用地が密集している地域付近の観測値のバイアスが改善された。また、揚水量を取り入れた場合、年内平均水位が2メートル以上低下する地点も存在した。揚水量が地下水位に与える影響を定量的に評価できた。感度解析により、透水係数および有効間隙率が地下水の流動にどのような影響を及ぼすかについて考察を行い、本研究で作成した透水係数と有効間隙率の空間分布について評価を行った。

飽和平面二次元流動モデルを用いた解析によって、地下水位の年変動および位相について精度良く再現できた。また、流動ベクトルに示すように、盆地水系の北東から南西への地下水の流動を再現でき、京都盆地水系における全体的な流動特性を示した。

水質解析によって、解析範囲内における物質ごとの傾向について考察した。また、流動モデルと連動させるための水質モデル解析を行う条件として、まず空間的、経年的にある程度変化しており、供給源がある程度明確である全窒素を解析対象物質に選定し、初期値をティーセン分割により与え、外部境界条件を設定した。

本研究では、ボーリングコアデータを基に、現存しない地下の詳しい構造を表現した。また、河川水位の変動が地下水位に及ぼす影響、ならびに揚水量の影響をモデルで表現した。それらの結果、地下水流動モデルでは年変動や位相といった全体的な流動特性を評価できた。水質に関しては、既存の水質調査に基づく観測データを解析することにより、物質ごとに解析範囲内における特性について簡単な考察を行った。また、地下水流動モデルと連動させて水質を評価できるモデルの設定を行った。

## 参考文献

- 井上 雄一郎(2005): 人間活動が地下水の空間変動に及ぼす影響について, 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士論文.
- 環境省 水・大気環境局(2008): 平成19年度全国の地盤沈下地域の概況, 環境省.
- 関西地盤情報協議会・関西圏地盤DB運営機構 (2006): 関西圏地盤情報データベース (CD-ROM, 2006年度版), (財)地域地盤環境研究所.
- 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.
- 近畿農政局 (1980): 京都府水文地質図および説明書, 近畿農政局.
- 気象庁(1988~2005): 京都地点におけるアメダス1時間観測データ, 気象庁
- 国土交通省(1988~2005): 地下水質年表, 国土交通省
- 国土交通省 土地・水資源局 国土調査課 (2001): 平成12年度京都地域地下水マップ作成調査業務報

- 告書，国土交通省。
- 国土地理院(1976, 1987, 1991, 1996)：国土数値情報  
土地利用メッシュ，国土地理院。
- 国土地理院(1991)：細密数値情報(10mメッシュ土地  
利用)，国土地理院。
- 国土地理院(2002)：数値地図50mメッシュ(標高)，国  
土地理院。
- 仲上健一・大橋 浩・小幡範雄・千頭 聡・河野 泰  
(1986)：地下水管理における「京都方式」の研究～  
地下水の活用管理をめざして～，NRS-84-28総合研  
究開発機構助成研究報告書，システム科学研究所
- 岡 太郎・城戸 由能・浜口 俊雄(2004)：都市型盆地  
水系における水・物質循環の解明，水資源研究セン  
ター研究報告，第24号，pp.75-76.
- 大山崎町水道課・大阪通商産業局(1982)：桂川下流地  
域，地下水利用適正化調査報告書。
- 大山崎町・応用地学研究所(1982)：地下水汚染に関す  
る調査委託報告書。
- 政経調査会(2006)：京都市上下水道局：年5億7千万  
円収入減！：  
<http://tyousakai.hp.infoseek.co.jp/06-0326-t1.htm>，作成  
日：2006/03/26，(参照：2008/04/21)。
- 鈴木和徳・廣安知之・三木光範(2005)：Kriging法  
の調査，ISDL Report No.20050717008，  
<http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/research/report/2005/0717/008/report20050717008.html>，作成日：2005年 10  
月 31日，参照日：2008/08/20。
- 鳥井宏之(2009)：賀茂川水系の汚濁負荷流出過程の解  
析，京都大学工学部地球工学科卒業論文。
- 植田和弘・大橋 浩・小幡範雄・吉田穂見・千頭 聡・  
河野 泰(1984)：地域の「味」形成に果す地下水の  
役割～地下水管理のあり方についての基礎的研究  
～，NRS-82-26総合研究開発機構助成研究報告書，  
システム科学研究所
- 山形景子・城戸由能・岡 太郎(2004)：鴨川における  
昭和10年大洪水とその後の流出特性変化，土木学会  
関西支部年次学術講演会講演概要，pp. -8-1～  
-8-2。
- 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。

## Fundamental Study on Groundwater Flow and Water Quality Analysis in Kyoto Basin

Yukio TANAKA\*, Yoshinobu KIDO and Eiichi NAKAKITA

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

### Synopsis

It is important to investigate and analyze the water budget and the material balance in comprehensive basin-wide for conservation and utilization of the water resources. Especially, it refers to water resource management for the future and emergency water supply. In this study, hydrodynamics of underground water system in Kyoto Basin is simulated by the two-dimensional saturation groundwater model. For analysis, aquifer layer in whole basin is defined based on boring core data. In addition, it is considered water pumping from under the ground and simple coordination with groundwater and river. As a result, the calibration for general groundwater level has good performance especially on the term of fluctuation of groundwater level after rainfall events. The groundwater quality is estimated by same model.

**Keywords:** two-dimensional saturate groundwater flow analysis, water quality analysis, groundwater use, Kyoto basin