

京都盆地における複数の揚水井が地下水性状に及ぼす影響と 3次元揚水シミュレーション解析

北岡貴文¹, 楠見晴重², 中村真³

- 1 関西大学・大学院理工学研究科
2 関西大学
3 関西大学・環境都市工学部

概要

本研究は、京都府南山城地方を対象とし、複数の揚水井が及ぼす地下水性状への影響について、主として現場計測ならびに解析的に検討したものである。京都府南山城地方は京都盆地の南部に位置する。地質構造は、基盤岩上に砂礫層が厚く堆積しており、周囲を山地に囲まれた典型的な盆地構造を呈し、良質な地下水が豊富に賦存している。しかしながら、無作為な揚水を続けると、地下水の枯渇や地盤沈下といった問題を引き起こす恐れがあり、特に狭い範囲から多くの取水を行う群井の及ぼす影響は大きいと考えられる。そこで本研究では、1本当たりの揚水量が比較的に多い上水道用の揚水井を対象とし、揚水による地下水位への影響評価のためのシミュレーションを行った。その結果、本研究で作成した地層モデルを用いて、精度よく群井が及ぼす水位変動について推定することができた。

キーワード：京都盆地，地下水，群井，水位変動，浸透流解析

1. はじめに

地下水資源の有効利用と適正な維持管理には、正確な現状把握と将来ビジョンの構築が必要であり¹⁾、**地下水利用が盛んな京都府南山城地方においても取り組んでいく必要がある**。地球上に存在する水の量は、およそ14億km³であると言われており、そのうちの約97.5%が海水であり、淡水は約2.5%である。淡水に占める地下水の割合は約31%であるのに対し、河川や湖沼の割合は約0.2%である²⁾。残りの淡水資源の大半は氷河等であるが、人類が直接利用するには困難である。そのため、水量が豊富な地下水は、淡水資源として非常に重宝される資源として位置づけされる。しかし、過剰な揚水を続ければ地下水資源の枯渇、及びそれに伴う地盤沈下といった問題を引き起こすことになる³⁾。水資源が復元される平均期間は、地下水で1400年、湖水で17年、河川水で16日、大気中の水蒸気で8日となっており⁴⁾、地下水は河川水や湖沼水などと比べて極めて復元期間が長いため、短期間に汲み上げた地下水位は回復しにくい性質がある。そのため、周辺環境へ配慮した地下水の持続的な利用方法の策定が求められている。

本研究の対象地域である京都府南山城地方は、地下水の利用が盛んに行われている地域である。既往の研究では⁵⁾、上水道事業における持続的な地下水利用の提案を行うに際して、京都盆地全体が利用する帯水層に対し、1つの自治体単位で検討した。本研究ではさらに、複数の自治体の

揚水における相互の影響を検討するために、京都府南山城地方の中心に位置する最も揚水量の多い城陽市と、上水道用としての揚水密度の最も高い八幡市を対象として検討を行った。図1に城陽市と八幡市の位置を示す。城陽市は、京都府の南部に位置し、西側と南側で木津川と接する。八幡市は、京都府南西部の木津川、宇治川、桂川の3河川が合流して淀川となる地点の南に位置する。城陽市では上水道としての水源を地下水に約80%、八幡市では約50%を依存している。この地域の地下水資源の有効利用を行うため、特に1本当たりの揚水量が比較的に多い、複数の上水道用揚水井からの揚水が及ぼす周辺の地下水性状への影響を検討し、周辺の地下水環境を保全するための手法として活用することを目指している。



図1 城陽市と八幡市の位置

2. 京都盆地の地形、地質

2.1 地形、地質構造

京都府南山城地方の位置する京都盆地は、幅 3.5~10km、長さ 36kmの南北に細長い盆地である⁶⁾。京都盆地の東部には鴨川流系の扇状地堆積物が厚く堆積している。西部の桂川流系は扇状地が発達していないため、盆地全体としては東が西より高いという特徴を有している⁷⁾。盆地東西には花折断層や檜原断層が南北に延びた活断層によって、明瞭な地形境界が存在する。その間に挟まれた地域が沈降して、盆地が形成されている。図 2 は、京都盆地周辺の地質分布を示している。図から明らかなように盆地の北部と東部は古生層、南部は花崗岩類が分布しており、両者とも基盤岩を形成している。これらの基盤岩類は難透水層と考えられ、この基盤岩類に囲まれた凹部には、新第三紀鮮新世から第四紀洪積世の間に堆積した大阪層群と、その上には沖積層が分布している。京都盆地全域における基盤岩の最深部は、南山城地方内にある巨椋池干拓地周辺で約 800mである⁸⁾。この最深部の巨椋池干拓地において、基盤面が著しく落ち込んでいる。地形に伴い北部にかけて緩やかに上昇する傾向が見受けられ、基盤岩上面は全体的に起伏に富み、北側の広い領域において深さ約 200~400mの谷地形を形成している⁹⁾。

京都盆地の大きさは、北の京都市北郊から南の木津川市まで南北約 35km、東西は八幡市から城陽市にかけて約 10km、深さは最深部で 0.8km とする。簡単のために、ラ

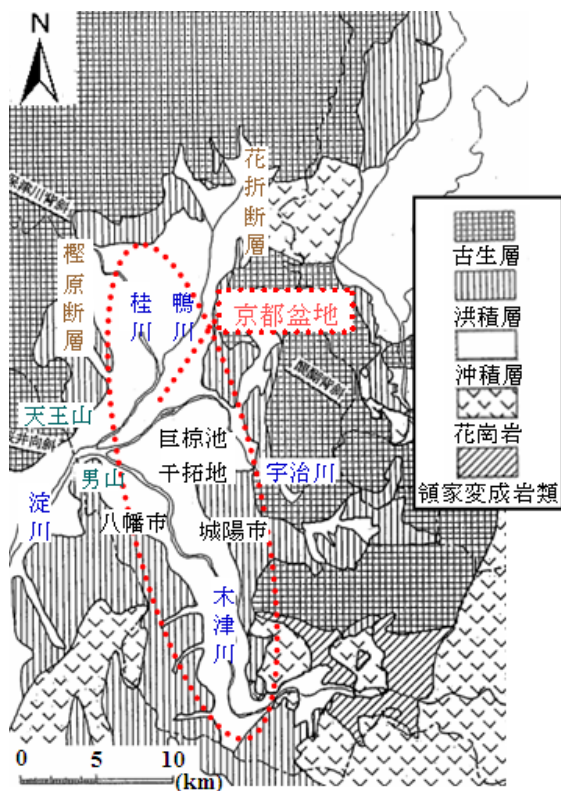


図 2 京都盆地の地質分布 (文献8)に加筆

クビーボールの一部を切り取ったような形と仮定すれば、その体積は約 125km³となる。水盆の中で、これまでに数多く行われたボーリングのデータを総合すると、砂礫層と粘土層との割合は 56:44 となる。ここで、地下水利用の対象となる砂礫層の水分を計算する。砂礫層の平均間隙率を 30%とし、この間隙に水が満たされているとすれば、京都盆地の貯水量は 211 億となる¹⁰⁾。以上のような地形、地質構造を有する京都盆地には、多量の地下水が存在していると考えられる。

2.2 南山城地方の地下水利用

1992 年夏から 1993 年春にかけて、南山城地方を対象として、地下水の利用用途の変化ならびに取水量の変化等について定量的に把握した。その結果¹¹⁾によると、南山城地方では、年間約 8,000 万tの地下水が、上水道用で 38.4%産業用で 22.0%、農業用で 39.6%と、産業用が僅かに少ないものの、ほぼ 1/3 ずつ揚水されている。1993 年の時点で、南山城地方において揚水量が一番多い自治体は、城陽市である。

3. 城陽市の地下水利用状況

3.1 城陽市の地勢

城陽市域は、東西 9.0km、南北 5.4km、総面積 32.74km²である。西側に木津川が流れ、北側には琵琶湖を源流とする宇治川が、宇治市を介して流れており、木津川と宇治川の 2つの河川に挟まれ、また、南山城地方も京都盆地の一部であるので、地下水は豊富であると考えられる。南山城地方において、城陽市は地下水利用度が最も高く、上水道給水量の約 80%を地下水に依存している。2010 年 11 月現在で、城陽市の人口は 79,918 人、世帯数は 31,026 世帯である。

3.2 民間の井戸の利用状況

城陽市から提供を受けた井戸に関する既往の資料を整理した結果、486 本の民間の井戸を確認した。図 3 は用途別揚水量の割合を示している。また、図 4 は深度別の割合を示している。これら 486 本の井戸のデータを利用した結果によると、揚水量別では全体の約 5 割弱が農業用水で占めている。民間の井戸におけるデータは、「各井戸の位置」と「井戸深度」と「1日平均揚水量」である。「1日平均揚水量」は、長期にわたって計測されているデータではないことから、民間の井戸の揚水量における季節変動の特性を把握することはできていない。しかし、平均的な値を用いて 1日あたりの揚水量でみると、ほとんどの井戸が 1,000m³以下で、深度別では約 7 割の井戸が 100mより浅くなっている。これらの結果より得られた 1日あたりの揚水量より年間に換算すると、民間井戸の総揚水量は、およそ 2,500 万m³となる。この量は、城陽市上水道における年間地下水揚水量の約 3.4 倍にあたる。一方、上水道用揚

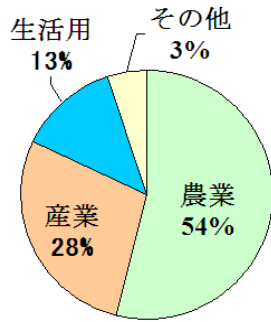


図3 城陽市の民間井戸集計結果による用途別揚水量の割合

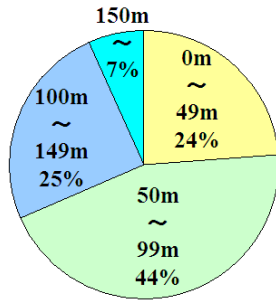


図4 城陽市の民間井戸集計結果による深度別の割合

水井は深度約100m~300mの地点にストレーナが設置されているため、民間の揚水量が上水道揚水量に及ぼす影響は少ないと考えられる。その理由として、民間の井戸一つ一つから汲み上げられる揚水量は300m³程であり、単体の上水道揚水井から汲み上げられる揚水量と比べて少ないことが挙げられる。つまり、3割近くの民間の井戸が上水道揚水井と同深度の位置にストレーナが存在していても、そこから汲み上げられる一つ一つの井戸からの揚水量が少ないことも考慮すると、民間の井戸からの過剰な揚水による上水道揚水量に対する影響は少ないと考えられる。

3.3 上水道用揚水井の利用状況

図5は城陽市浄水場における揚水井、および観測井の位置を示したものである。1971年に第1浄水場、1973年に第2浄水場、1978年より第3浄水場の揚水井が設置された。第1浄水場は丘陵地に4本、第2浄水場も同じく丘陵地に7本、第3浄水場は平坦地に8本の揚水井を設置している。観測井は、第1浄水場の付近に1本、第2浄水場の付近に1本、第3浄水場の付近に2本設置して、地下水位を測定している。全ての井戸深度は60m以上である。図6は、1979年からの河川水の取水量と各浄水場における地下水の揚水量の推移を示したものである。

このグラフから、1980年から第3浄水場が揚水を開始しており、第3浄水場からの揚水量が増えるに比例して、1994年頃まで総取水量も増加している。その後、総取水量は2000年頃まで一定の量を取水していたが、2001年からは徐々に抑えている。一方、地下水のみの揚水量が少な

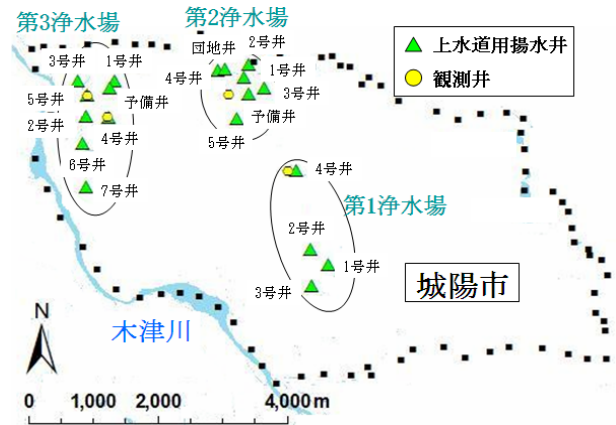


図5 城陽市の上水道用揚水井の位置

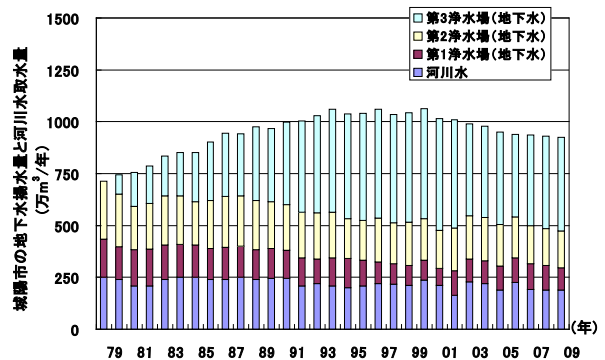


図6 城陽市における上水道の年間総揚水量と河川水の取水量

くなってきたのは2003年からである。2009年における上水道の総取水量はおよそ925万m³/年であり、上水道の約80%である736万m³/年を地下水が占めている。各浄水場についての考察を以下に示す。

第1浄水場からの地下水揚水量は、井戸の老朽化等もあり年々減っている。特に1997年から2001年にかけては、揚水量を抑えた。2002年には2001年と比べて35万m³/年程揚水量を増やしたが、それ以降減少している。2009年における第1浄水場の総揚水量は108万m³/年程で、依存率は15%程である。第2浄水場からは、多少の増減はあるものの、年々揚水量が減少している。2009年における第2浄水場の総揚水量は175万m³/年程で、依存率は25%程であり、第1浄水場と比べると依存率は高い。第3浄水場は井戸数や各揚水井の揚水量が他の浄水場と比べて一番多く、2009年における第3浄水場の総揚水量は452万m³/年程で、依存率が60%以上を占めており、城陽市における主要な浄水場である。

3.3.1 上水道用揚水井の揚水中の水位

各揚水井では、定期的に水位測定を行い、長期的な水位変動を把握している。また、各浄水場の揚水井をさく井した時に揚水試験を行い¹²⁾、透水係数、比湧出量、限界揚水量、適正揚水量等を求めた。ここで、適正揚水量とは帯水

層の物理変化を生じさせない程度の揚水量のことである¹³⁾。つまり、水位低下によって引き起こされるポンプ揚程の増加、あるいはポンプの更新などによる揚水費用の急増、地盤沈下や塩水化などの障害を発生させない揚水量のことである¹⁴⁾。第1浄水場の適正揚水量の平均は約1,300m³/日、第2浄水場では約1,500m³/日、第3浄水場では約2,800m³/日である。図7～図9は、それぞれ第1浄水場、第2浄水場、第3浄水場において、各揚水井の揚水量と地下水位の関係の一例を示したものである。

第1浄水場では、4号井を例に示す。2000年7月から2001年5月までは揚水を停止している。観測開始以来、揚水量が減少しているにもかかわらず、1995年までの10年間に水位が17m程低下した。そのため、当年に洗浄工事が行われてから、水位は14m程回復した。その後、揚水量の増加により、水位は再び低下傾向にあったため、1997年頃から揚水量を抑え、2001年から約500m³/日で揚水することにより水位は安定した。2008年2月と3月頃

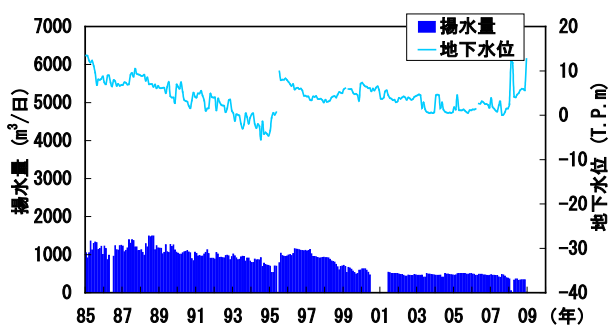


図7 第1浄水場4号井の揚水量と地下水位 (丘陵地)

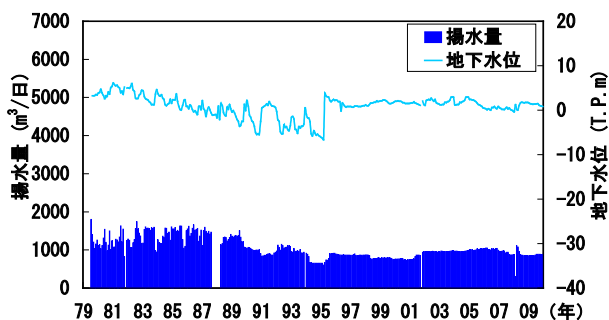


図8 第2浄水場2号井の揚水量と地下水位 (丘陵地)

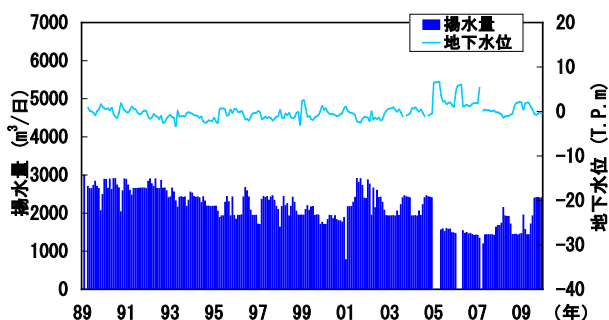


図9 第3浄水場4号井の揚水量と地下水位 (平坦地)

に揚水を中止した際には、水位は10m程回復した。その後、数ヶ月間は揚水量を約300m³/日まで減らすことにより、水位は回復傾向にあったが、2009年以降は揚水を中止している。第2浄水場では、2号井を例に示す。1987年9月から1988年3月までの揚水量の空白部分は、欠測期間である。第1浄水場の4号井と同様に、観測開始以来、揚水量が減少しているにもかかわらず、1995年までの16年間に水位が10m程低下した。そのため、当年に洗浄工事を行った結果、水位は11.5m程回復した。それ以降、揚水量を多少の増減はあるものの、約900m³/日で一定にした結果、水位は安定している。第3浄水場では、4号井を例に示す。観測開始以来、揚水量が大きく増減することや、約3,000m³/日の揚水を行っても水位は安定している。揚水を行わなかった月には水位は5m程回復している。揚水を行うと水位は多少下がるものの、地下水位はT.P.0m付近で安定している。

全体的に、揚水量に合わせて水位変動している。第1浄水場は、2号井と3号井においては新規井戸を設けてから水位は安定している。1号井においては、揚水量を抑えているにもかかわらず、水位が低下傾向にある。第2浄水場は、全体的に揚水量を減らし、現在は一定の量で揚水していることから、水位は回復している。しかし、城陽市で最も密集して揚水井が設置されているため、井戸干渉を考慮しながら揚水していかなければならない。第3浄水場は、城陽市では一番揚水が盛んに行われているが、全体的に地下水位は安定している。これは他の浄水場とは異なり、深度300mの揚水井が8本中4本設置されていることに起因すると考えられる。

3.3.2 観測井の地下水位変化

図10は、城陽市の第1浄水場近くにある深度100m程の深井戸観測井における水位変動と、1日平均の城陽市上水道用の総揚水量との推移を示したものである。1981頃から1996年の中頃まで水位が長期的に下がっている。特に、1991年から1994年までの水位は安定しているが、1995年から1996年の中頃までの水位が大きく低下している。1998年から1999年までの水位は回復傾向にあるが、2001年の中頃から2002年の中頃までは水位が低下している。

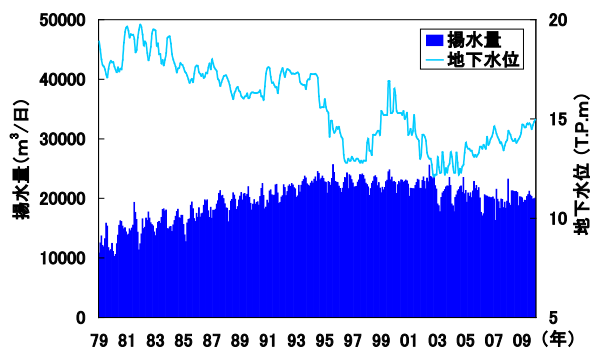


図10 上水道用の揚水量と深井戸観測井の地下水位

2003 年頃からの水位は回復している。これらの理由として、1991 年から 1994 年は、全体での揚水量は増加傾向にあるが、観測井の一番近くに存在する揚水井の第 1 浄水場 4 号井からの揚水量が抑えられていることから、水位は安定していると考えられる。1995 年から 1996 年の中頃は、第 1 浄水場の 4 号井からの揚水量が増加したことから水位は低下したと考えられる。2003 年以降は、全上水道揚水量を抑えていることから水位が回復傾向にあると考えられる。すなわち、この観測井は、この地域における上水道揚水井全体の揚水による影響を大きく受け、全体の揚水量が安定している時は、観測井の近くにある揚水井からの影響を受ける傾向が見受けられる。

4. 八幡市の地下水利用状況

4.1 八幡市の地勢

八幡市域は、東西 6.7km、南北 8.5km、総面積 24.37km²である。京都市、久御山町、京田辺市の区域内に飛地を有している。西部の男山から南部の美濃山地域にかけては、なだらかに起伏した丘陵地で、その他の地域はおおむね平地で形成されている。2010 年 11 月現在で、八幡市の人口は 74,240 人、世帯数 30,934 は世帯となっている。

4.2 民間の井戸の利用状況

城陽市と同様に、八幡市から提供を受けた井戸の利用に関する既往の資料を整理した結果、109 本の民間の井戸を確認した。図 11 は用途別揚水量の割合を示している。また、図 12 は深度別の割合を示している。これら 109 本の井戸のデータを項目別に整理した結果、揚水量別には、全体の約 9 割が農業と生活の利用目的で占められている。1 日あたりの揚水量別では、ほとんどの井戸が 1,000m³以下である。また深度別では、約 9 割の井戸が 150m より浅くなっている。これらの結果より得られた 1 日あたりの揚水量より、年間に換算して井戸の総揚水量を求めると、およそ 1,660 万 m³となる。この量は、八幡市上水道における年間地下水揚水量の約 4 倍にあたる。一方、上水道用揚水井は、深度約 150m～300m の地点にストレーナが設置されていることから、民間の揚水量が及ぼす上水道揚水量に及ぼす影響は少ないと考えられる。その理由として、民間の井戸一つ一つから汲み上げられる揚水量は 450m³程であり、単体の上水道揚水井から汲み上げられる揚水量と比べて少ないことが挙げられる。つまり、1 割近くの民間の井戸が上水道揚水井と同深度の位置にストレーナが存在していても、そこから汲み上げられる一つ一つの井戸からの揚水量が少ないことも考慮すると、民間の井戸からの過剰な揚水による上水道揚水量に対しての影響は、城陽市と同様に少ないと考えられる。

4.3 上水道用揚水井の利用状況

図 13 は八幡市浄水場における揚水井および観測井の位置を示したものである。図 14 は 1981 年からの河川水の取水量と浄水場における地下水の揚水量の推移を示したものである。このグラフから、1981 年から 2000 年にかけて

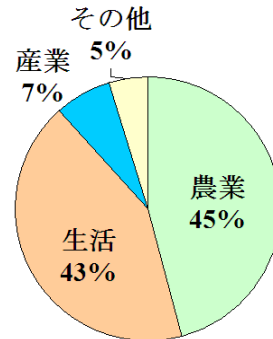


図 11 八幡市の民間井戸集計結果による用途別揚水量の割合

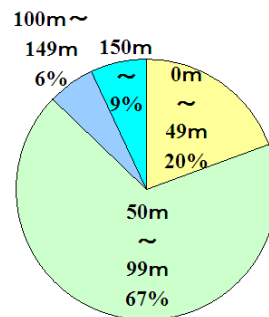


図 12 八幡市の民間井戸集計結果による深度別の割合

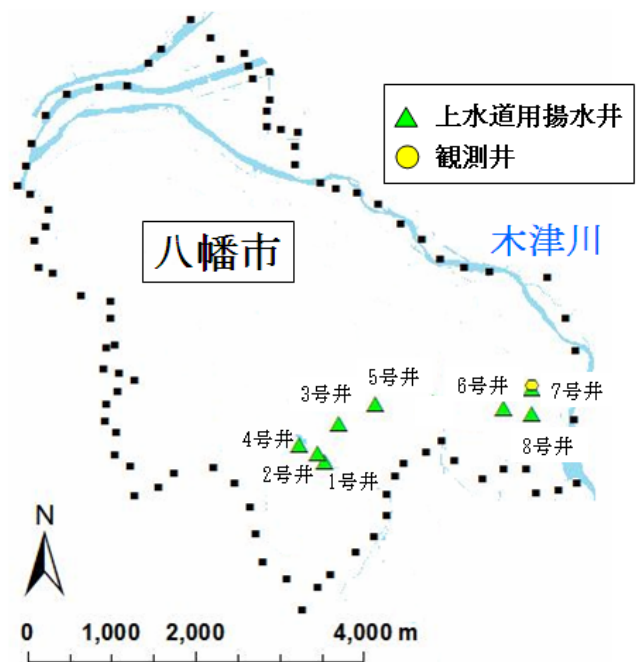


図 13 八幡市の上水道用揚水井の位置

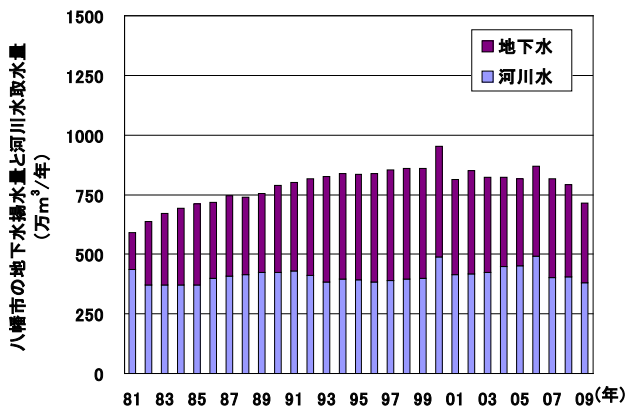


図 14 八幡市における上水道の年間揚水量と河川水の使用量

て総取水量が増加しているが、2001年に総取水量が減少する。それ以降、2006年までの総取水量は安定しているが、2007年からは減少する傾向にある。2009年における総取水量は約714万m³/年であり、上水道の約50%である335万m³/年を地下水が占めている。

4.3.1 上水道用揚水井の揚水中の水位

八幡市浄水場における水位変動は、丘陵地から丘陵地付近の平坦地にある1号井、2号井、3号井、4号井、5号井が同じような特性を示す。木津川付近の平坦地にある6号井、7号井、8号井とでは水位変動が異なる。八幡浄水場の適正揚水量の平均は約2,500m³/日である。図15と図16に5号井、7号井においての揚水量と地下水位の関係を示す。グラフに示す2009年以降の水位は、測定方法が異なるために色分けしている。従来は、揚水を行っている午前8時の時点の水位を測定していたが、2009年以降は一日平均の水位を読み取っているため、地下水位が全体的に高くなっている。

丘陵地付近の平坦地にある5号井は、1987年から1989年まで揚水量を約2,000m³/日汲み上げると水位は低下傾向にあったため、1989年からは揚水量を半減させることにより、水位は回復した。しかし、年々揚水量を増やしていくことにより、観測開始当初から2003年までの16年間に、25m程水位が低下した。それ以降、2007年までは揚水量を減らしていくことにより、水位は安定したが、2007年から急に揚水量を上げたことにより水位が低下した。しかし、水位の低下は一時的なものであり、水位は回復傾向にある。木津川付近の平坦地にある7号井は、1989年から揚水量を増やしていき、1992年頃までには水位が5m程低下している。しかし、それ以降水位は安定している。2002年には揚水量を3,000m³/日を超えても水位変動は少なく安定している。

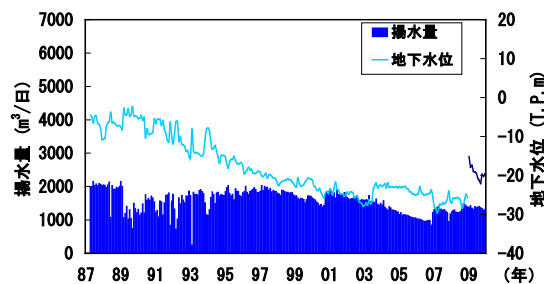


図 15 5号井の揚水量と地下水位（丘陵地付近にある平坦地）

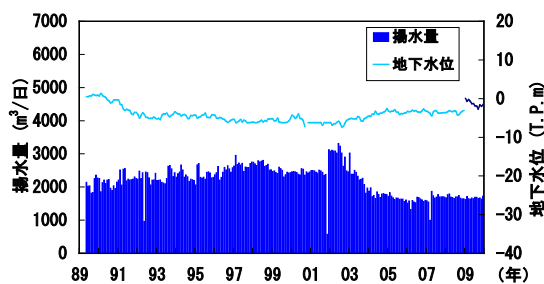


図 16 7号井の揚水量と地下水位（木津川付近にある平坦地）

4.3.2 観測井の地下水位変化

八幡市には木津川沿いにある7号井の近くに、井戸深度15m程の浅井戸観測井と井戸深度120m程の深井戸観測井が各1本ずつ設置されている。この2本の観測井は1987年5月より観測が行われている。浅い層にある水位と、深い層にある水位を観測し、降雨量および八幡市浄水場の総揚水量と比較することにより、それぞれの層における水位変動の特性と、その水位変動に及ぼす要因を、観測結果より考察した。

(1) 八幡市浄水場の総揚水量が及ぼす水位変動の考察

図17は、浅井戸観測井における水位変動と、八幡市浄水場の総揚水量の関係を示したものである。浅井戸観測井の水位変動は、揚水量が増えることによる水位の低下傾向などが観測されていないことから、揚水の影響をあまり受けていないことが分かる。図18は、深井戸観測井における水位変動と、八幡市浄水場の総揚水量の関係を示したものである。地下水位は揚水量が多い夏季に低下し、揚水量が少ない冬季に水位が回復する傾向が見られる。また、長期的な観測結果から読み取れることは、1987年から1998年頃までの間に、揚水量を徐々に増やしたことにより、地下水位は3m程低下した。その後、1998年頃から2003年頃までの揚水量が一定であることから、水位は安定している。2003年以降は、八幡市の全浄水場における揚水量を若干減らしてはいる程度にもかかわらず、地下水位は急な回復傾向にある。その理由として、観測井の一番近くで揚水を行っている7号井の揚水量が、八幡市浄水場の総揚水量の変動と比較して、減少した影響があると考えられる。

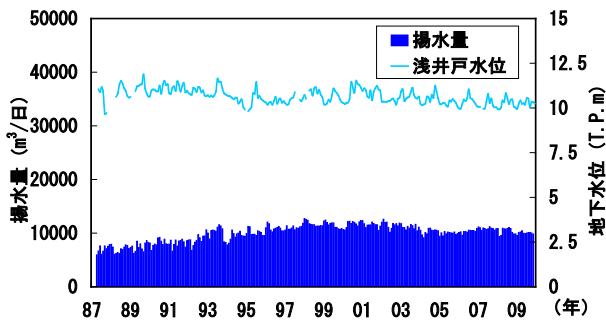


図 17 総揚水量と浅井戸観測井の地下水位

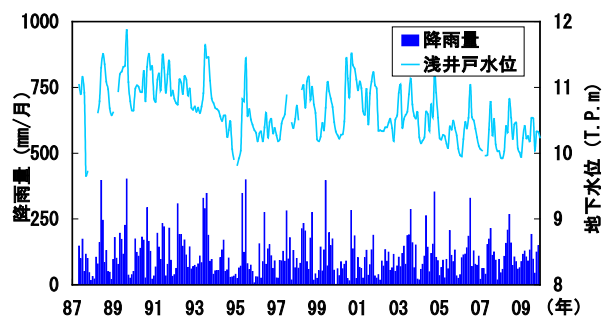


図 19 降雨量と浅井戸観測井の地下水位

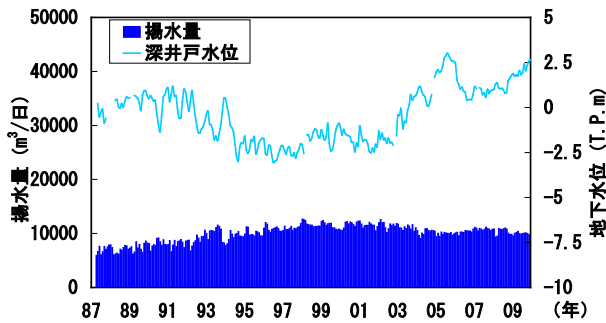


図 18 総揚水量と深井戸観測井の地下水位

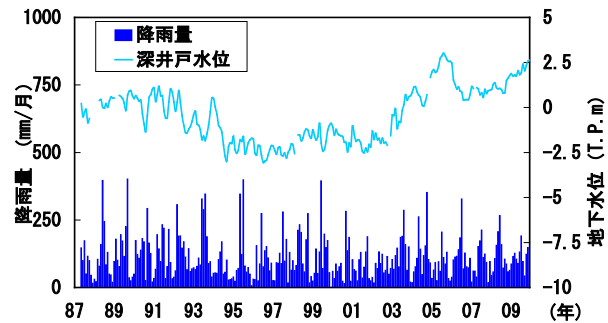


図 20 降雨量と深井戸観測井の地下水位

(2) 降雨量が及ぼす水位変動の考察

図 19 は、浅井戸観測井における水位変動と、降雨量の関係を示したものである。浅井戸観測井の水位変動は、降雨量の影響を大きく受けており、地下水位は降雨量の多い夏季に上昇し、降雨量の少ない冬季に低下している傾向が見られる。図 20 は、深井戸観測井における水位変動と、降雨量の関係を示したものである。深井戸観測井の水位変動は、浅井戸観測井で観測された、降雨量が多い時期に水位が上昇するといった傾向が浅井戸のように顕著には見られない。降雨が降った後に、時間を遅らせて水位が上昇することもあるが、浅井戸のように常に見られないことから、降雨が及ぼす影響はあまりないことが分かる。

以上の観測結果から、この地域における水位変動は、浅い層においては降雨量に大きく影響され、深い層においては揚水量に大きく影響されるといった、各層における水位変動に及ぼす要因を把握した。また、浅い層における水位変動と深い層における水位変動を比較すると、揚水が地下水位に及ぼす変動は、降雨が地下水に及ぼす変動と比較すると、大きいことが分かる。よって、揚水が及ぼす地下水位への影響を、正確に把握しておくことが重要である。

5. 地下水揚水シミュレーションモデル

5.1 概要

ここでは、当該地域にある複数の上水道用揚水井からの揚水による水位への影響を検討するための、地下水揚水シ

ミュレーションモデルの作成方法について述べる。地下水流動モデルの入力データとなるのは透水量係数、揚水量、降雨量、地表面の標高、境界条件などである¹⁵⁾。本研究では、始めに当地域の地質特性を考慮した地層モデルを作成した。地層モデルの作成は、上水道揚水井の位置においての 100m以上のボーリングデータを利用した。モデルは、ボーリングデータを整理しながら地層を分け、透水層と難透水層として 8 層に分割した。そして、有限要素法による浸透流解析を行う上で必要となる地盤物性値は、揚水試験の結果で得られた透水係数などを参考にしながら、至近 5 年間における解析値と実測水位が一致するまで試行錯誤的に修正し、計算を繰り返し決定した。特に、実際の水位変動と解析で得られた水位変動が最も整合することを優先し、地盤物性値を決定した。境界条件は、定常解析を行う際に論文を参考にしながら¹⁶⁾、水位測定データがある河川や分水嶺に設けた。そして、定常解析で求めた結果に、各上水道揚水井における月単位の揚水量から、各月ごとの 1 日の平均揚水量として設定し、至近 5 年間における非定常解析を行った。各上水道揚水井において、各月ごとに得られた解析値と各揚水井で観測された各月単位の 1 日の平均水位が整合することを試みた。解析結果を検討した節点は、上水道揚水井の実際のストレーナがある層の節点で求められた水位と実際の水位を整合させた。その解析結果を考察しながら透水係数の値に着目し、検討した。そして、再度定常解析から初期条件を求め、非定常解析を行うことを繰り返し、実際の水位変動を再現することを試行錯誤的に試みた。

5.2 基本式

地下水流動の基礎方程式は、流動上のある微小空間における物質の出入りを考慮した連続方程式に、運動方程式としてダルシー流速の導入により求めた支配方程式を次式に示す¹⁷⁾。

$$(\beta S_s + C) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_r K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + K_r K_{i3}^s \right) + q \quad (1)$$

ここで、 $\beta=0$ なら不飽和領域、 $\beta=1$ なら飽和領域とする。 S_s は比貯留係数、 $C(\psi)$ は比水分容量($d\theta/d\psi$)、 ψ は圧力水頭、 K_r は相対透水係数、 K^s は飽和透水係数、 q は単位時間当たりの揚水量となる。

5.3 モデル化

図 21 に解析対象範囲を示す。東側と西側の境界は分水嶺をもとに設定した¹⁸⁾。北側の境界は宇治川をもとに設定した。メッシュの粗いモデルを用いて、南側の境界条件としてどのような境界条件を与えるべきかを検討を行った。そして、上水道揚水井からの揚水による水位低下の影響がでない範囲を確認した。南側では、特に境界条件を設けず、北側と東側と西側の境界条件の計算結果に支配されている。また、この南側の位置は、東側と西側の分水嶺の幅が最も狭くなる場所でもある。鉛直方向に関しては、基盤岩上の堆積層をモデル化の対象とし、その堆積層を対象地域における既往資料におけるボーリングデータ、井戸のストレーナの位置、地質特性をもとに、8つの層で作成した。奇数番号を透水層とし、偶数番号を難透水層として地盤物性値を与えている。基盤岩形状については反射法弾性波探査と重力探査のデータ¹⁹⁾²⁰⁾を基に作成した。

5.4 メッシュ分割

平面的なメッシュ分割は、基本密度半径を 400m に設定して作成した。民間の井戸周辺の節点では最小密度半径を 100m、上水道用揚水井では 0.5m と設定し、分割している。

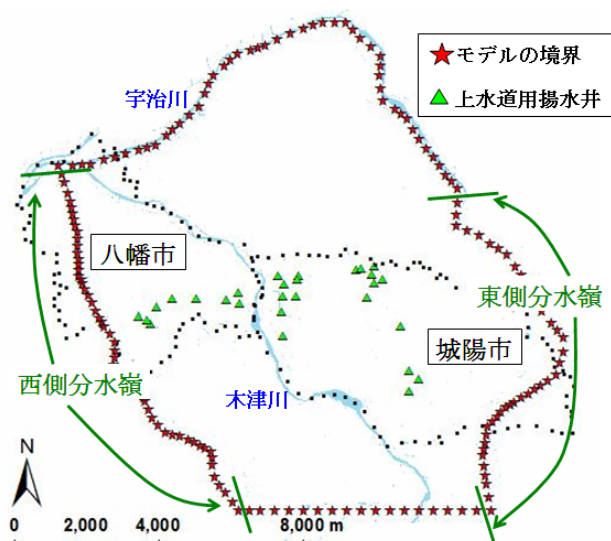


図 21 モデル化範囲

その結果、平面的な節点数は 4,490、要素数は 8,813 となった。図 22 に平面メッシュ分割の図を示す。鉛直方向については、帯水層、難透水層共に 2 分割している。それらを拡張して作成した解析メッシュの節点数は 71,840、要素数 13,2195 となった。図 23 に鉛直方向を 10 倍表示した 3 次元メッシュ分割の図を示す。

5.5 入力条件

(1) 境界条件

宇治川と木津川共に、地表面の節点に河川水位で既知水頭境界、東西の分水嶺では、全ての節点を不透水境界として設定した。底部の基盤岩についても、それを構成する全ての節点を不透水境界として設定した。地表面を構成する節点には、経時変化する降雨浸透境界を与えている²¹⁾。降雨が地下水水位の変動に及ぼす影響は、揚水による影響と比較すると少ないと先述したが、解析で降雨量を設定している理由として、水収支の一環としては重要であると考えているからである。地

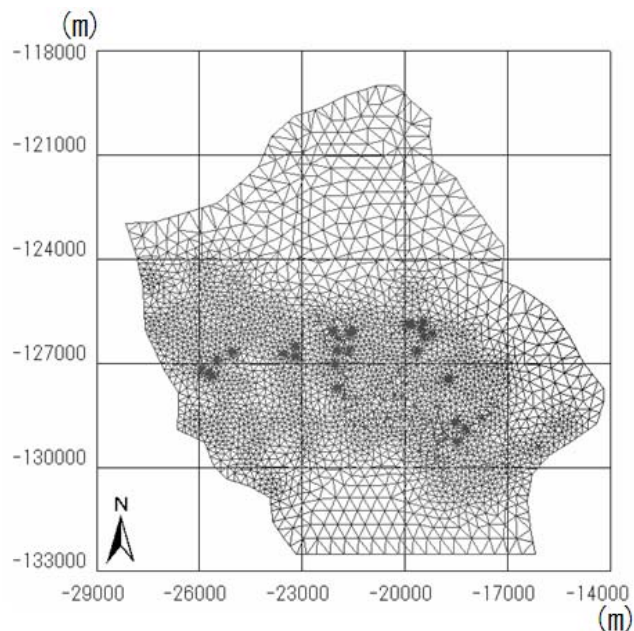


図 22 平面メッシュ図

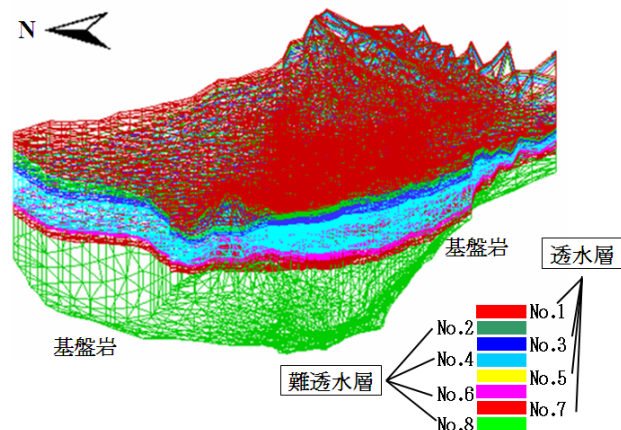


図 23 3次元メッシュ図

下水の涵養量は一般的に、降雨の29～33%程が地下水として涵養すると言われているので、30%と設定した²²⁾。降雨量データは気象庁の京都府京田辺観測所の観測記録を用いている。また、民間の井戸の揚水量は、一つ一つの揚水量は少ないものの、上水道揚水量よりも総揚水量は大きいこともあり、初期条件を求めるための定常解析を行う際に設定した。民間の井戸については既往資料に記載されている揚水量を既知流量境界として、上水道用揚水井戸では月毎の流量の平均値を同じく既知流量境界として与えている。民間の井戸は既往資料に記載されている井戸の深度データ、ストレナーの位置データより、地層モデルのどの層の節点に揚水量を設定するかを決定している。しかし、民間の井戸に関しては、長期的に計測した揚水量のデータがないため、非定常解析をする上では設定できていない。上水道用揚水井戸については、ストレナーの位置より、No.3層、No.5層、No.7層における節点で揚水量を流量境界条件として設定している。定常解析では、民間による井戸からの揚水量を設定している。その結果得られた初期条件を基に、上水道用の揚水量を、非定常解析を行う際に設定し、複数の井戸からの揚水による水位への影響を検討した。

(2) 地盤物性値

表1に本研究で用いた実測の水位と解析値が最も整合した地盤物性値を示す。揚水を行っている層に関しては揚水試験の結果を、その他の層については文献²³⁾を参考に地盤物性値を決定して同定計算を行った。定常解析で地盤物性値を決定し、その後、非定常解析を行い至近5年間における各上水道揚水井で観測された月平均の水位変動の整合性を評価した。地盤物性値の検討する際には、透水係数の値のみ変更させて解析を繰り返した。透水係数を低くすると、揚水による水位変動の幅が大きくなり、透水係数を高くすると、揚水による水位変動が生じにくくなった。よって、各上水道揚水井での水位変動は場所によって大きく変動している箇所や、それほど変動していない箇所があるので、全体の水位変動がとれるように透水係数を決定した。また、不飽和浸透特性については、文献²⁴⁾を参考にして設定しているが、降雨が及ぼす各上水道揚水井の水位への影響は少ないことから、現段階では不飽和特性が解析結果に与える影響については議論の対象としていない。

表1 地盤物性値

地層	透水係数 (水平) cm/s	透水係数 (鉛直) cm/s	比貯留係数 1/m	有効間隙率%
No.1	5.00×10^{-1}	5.00×10^{-2}	1.20×10^{-4}	20
No.2	7.50×10^{-4}	7.50×10^{-5}	1.95×10^{-3}	10
No.3	5.00×10^{-2}	5.00×10^{-3}	1.20×10^{-4}	20
No.4	7.50×10^{-5}	7.50×10^{-6}	1.95×10^{-3}	10
No.5	5.50×10^{-3}	5.50×10^{-4}	1.20×10^{-4}	20
No.6	7.50×10^{-5}	7.50×10^{-6}	1.95×10^{-3}	10
No.7	8.50×10^{-3}	8.50×10^{-4}	1.20×10^{-4}	20
No.8	7.50×10^{-5}	7.50×10^{-6}	1.95×10^{-3}	10

5.6 結果と考察

同定計算を行った結果を示す。図24～図27に、八幡浄水場7号井、城陽第1浄水場3号井、城陽第2浄水場団地井、城陽第3浄水場4号井の解析で求められた水位と実測水位を比較した結果を示す。八幡7号井の解析結果は、実測値の水位が解析値より数m高くなっているが、おおよそのトレンドはとれている。比較的揚水量が安定しているので、実測の水位と解析値ともに安定している。城陽第1浄水場3号井の解析結果は、2005年から2009年6月までトレンドはとれているが、それ以降、揚水量を約200m³/日増やしてからの実測水位が5m程下がっているのに対し、解析で求められた水位は1m程しか下がっていない。一方、城陽第2浄水場団地井の解析結果は、地下水位がT.P.6m程で安定し、精度良く求められている。城陽第3

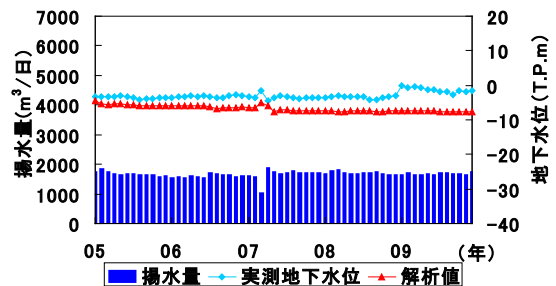


図24 八幡7号井の解析結果と実測地下水位の比較

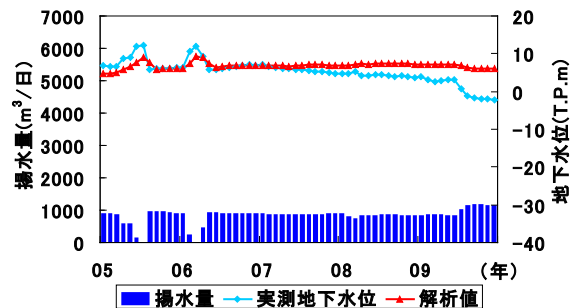


図25 城陽第1浄水場3号井の解析結果と実測地下水位の比較

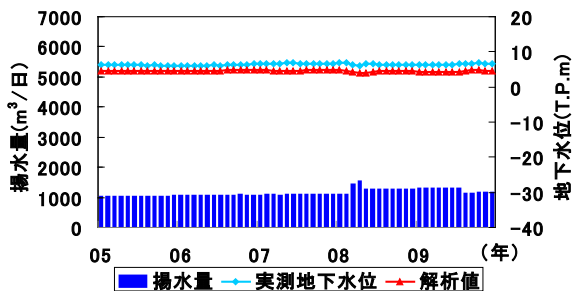


図26 城陽第2浄水場団地井の解析結果と実測地下水位の比較

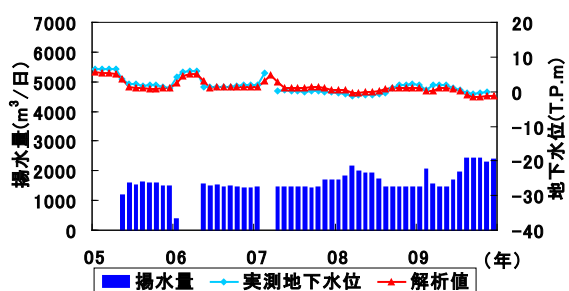


図 27 城陽第3浄水場4号井の解析結果と実測地下水水位の比較

浄水場4号井における解析結果は、非常に高い精度で再現できている。揚水を行われていない期間に5m程水位が回復している傾向など、水位変動を精度良く再現できている。

なお、各浄水場におけるその他の揚水井の解析結果は、凡そ同じ傾向を示していた。解析結果が7~8m以上の誤差がでているものが見られる理由として、今回のモデルは水平方向に一律に地盤物性値を設定していることが挙げられる。本来は不均質性のある地盤の特性を、モデルでは水平方向に平均的な地盤物性値を設定しているため、精度の良い箇所と精度の良くない箇所がある。つまり、試行錯誤的に求めた透水係数の値が、十分最適化されていないことが原因となる。今後の課題として、平野部や山間部での透水係数の値の違いなどを詳細に検討し、透水係数の値を検討する必要がある。また、井戸損失についても、現状の解析では再現するところまでには至っていない。そのため、揚水量が変化しない場合における水位は一定であり、実際問題としての井戸損失による水位低下を再現することはこれからの課題である。最後に、観測井における水位変動の検討を行うと、地下水盆の水位を再現できていると判断するよりは、揚水井の能力等の評価のために、揚水井での水位を再現しているのが現状である。

6. おわりに

本研究では、複数の揚水井が及ぼす周辺の水位への影響を推定した。モデルは基盤岩までの十分に深い地域を対象としている。検討では、地層モデルを詳細に構築し、有限要素法による浸透流解析を行い、複数の揚水井が及ぼす地下水水位の変動を実測値と比較した。その結果、構築した地層モデルにおいて地下水流動の傾向を再現できるモデルが構築できたと考えられる。

今後、本研究で行っている20年間以上に亘り水位を測定した結果を基に、このモデルを用いて新設される揚水井が及ぼす地下水水位の影響を予測していき、この地域における地下水が将来も永続的に利用できるための、また、井戸障害や地盤沈下を予防することや、最近問題となっている地下水水位の上昇に伴う地盤の浮き上がり等を未然に回避するための、適切な地下水管理を提案していけるモデルとして活用していきたい。

謝辞

本研を遂行するにあたって、貴重な資料の提供を受けた京都府城陽市上下水道部ならびに京都府八幡市上下水道部に、感謝の意を表し、深く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 谷口真人: 気候変動と地下水, 地下水学会誌, Vol.47, No.1, pp.5-17, 2005.
- 2) 国土交通省土地・水資源局水資源部: 平成19年版日本の水資源, pp.50-255, 2007.
- 3) 大津宏康, Noppadol, P., Nutthapon, S., 高橋健二, 泉裕昭: バンコクにおける地下水揚水量の不確実性を考慮した地盤沈下推定, 土木学会論文集, Vol.62, No.1, pp.25-40, 2006.
- 4) 藤縄克之: 環境地下水学, 共立出版, 2010, 354pp.
- 5) Kusaka, I. and Kusumi, H.: Pumping Simulation using 3D Ground Water Flow Model in Kyoto, EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering, Bangkok, Thailand, 2007.
- 6) 農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会: 日本の地下水, 地球社, 1983, 1043pp.
- 7) 宮地良典, 水野清秀, 尾崎正紀: 京都盆地の第四紀地質, 地球ニュース, No.614, pp.43-45, 2005.
- 8) 谷口敬一郎: 京都府南山城地方の地下水資源について, 物理探鉱, Vol.45, No.1, pp.55-62, 1992.
- 9) 京都市: 平成11年度 地震関係基礎調査交付金 京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書, 2000.
- 10) 谷口敬一郎: 京都府南山城地方の地下水資源について, 物理探鉱, Vol.45, No.1, pp.55-62, 1992.
- 11) 楠見晴重, 西牧晋志, 富留宮直: 京都府南山城地方における地下水資源の利用実態に関する研究, 日本地下水学会誌, Vol.37, No.1, pp.55-67, 1995.
- 12) 高坂信章: 最近の地下水調査方法と計測技術~5.2 多孔式用水試験~, 日本地下水学会誌, Vol.35, No.4, pp.313-323, 1993.
- 13) 山本莊毅: 揚水試験と井戸管理, 昭晃堂, 1952, 180pp.
- 14) 水収支研究グループ: 地下水盆の管理[理論と実際], 東海大学出版会, 1976, 242pp.
- 15) 渡辺仙州, 米田稔, 森澤眞輔, 横山卓雄: 岐阜県各務原地域における地下水シミュレーション, 日本地下水学会誌, Vol.44, No.3, pp.199-211, 2002.
- 16) Kusaka, I. and Kusumi, H.: Pumping Simulation using 3D Ground Water Flow Model in Kyoto, EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering, Bangkok, Thailand, 2007.
- 17) 日本地下水学会: 地下水シミュレーション, 技報堂, 2010, 232pp.
- 18) 地下水要覧編集委員会: 地下水要覧, 山海堂, 1988, 1069pp.
- 19) 村上寛史, 里村幹夫, 竹内文朗, 後藤典俊, 吉川賢一: 京都盆地南部における重力探査, 物理探鉱, Vol.28, No.6, pp.268-276, 1975.
- 20) 京都市: 平成12年度 地震関係基礎調査交付金 京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書, 2001.
- 21) Kitaoka, T., Kusumi, H. and Kusaka, I.: Semi 3D simulation of ground water advection and diffusion for alluvial layer in part of Kyoto basin, Proceedings of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, Japan, pp.417-422, 2009.
- 22) 地下水ハンドブック編集委員会: 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, 1980, 1547.
- 23) 土木学会編: 水理公式集, pp.365-366, 1974.
- 24) 地下水涵養研究委員会: 大阪平野地下水涵養機構に関する研究-II. 涵養モデルの作業報告, 地下水地盤環境に関するシンポジウム2003発表論文集, pp.65-80, 2003.

Influence on groundwater properties and pumping simulations using 3D analysis of multi-pumping wells in Kyoto basin

Takafumi KITAOKA¹, Harushige KUSUMI², Makoto NAKAMURA³

1 Graduate school of Science and Engineering, Kansai University

2 Kansai University

3 Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

Abstract

In this research, we chiefly proceed on-site measurement and analysis to examine how the pumping wells influence groundwater properties. The area of the analytical model is located in the southern part of Kyoto prefecture. The examined region is surrounded by mountains formed by a bowl shaped depression in the basin rock, which forms an impermeable bed upon which there is permeable sand and gravel. It is estimated a lot of groundwater is saved. However, if excessive pumping is continued, it may exhaust the groundwater and result in subsidence. This is especially true when multiple wells take a large amount of water in a small area causing considerable impact. We established a 3D model for groundwater and made suggestions for the adequate management of the groundwater based on pumping simulation analysis. The subject of this simulation was a pumping well for water service - water levels for one pump were a particularly large pump pumped a large amount of water compared to the other pumps. As a result, by using our model for this present study it can be seen from this simulation that the fluctuation of water level group wells affect accuracy.

Key words: Kyoto basin, groundwater, group of wells, fluctuation of water level, seepage analysis