

平成 25 年 9 月 関西大学審査学位論文

京都盆地を対象とした数値解析を用いた
水資源管理に関する研究

北岡 貴文

京都盆地を対象とした数値解析を用いた水資源管理に関する研究

概要：

本論文は、地下水資源の効果的な有効利用かつ最適な維持管理を行うにあたって、それらに関する地下水シミュレーション解析と現位置計測を実施して、地下水を主とした水資源に関する管理手法について検討したものである。本研究にあたっては、古代より地下水の利用が盛んな地域である京都盆地を研究対象とした。地下水の利用は国内外の多くの地域において行われているが、種々の地域において、過剰揚水による地下水障害が発生していることが報告されている。地下水は大変貴重な水資源であるが、その効果的かつ持続的な活用手法は十分確立されていないのが現状である。

本研究では、実際に地下水を多量に様々な用途に利用されている、京都盆地を対象として、多くの上水道用揚水井を有する京都府城陽市と八幡市、ならびに古くから地下水を利用して酒造りを行ってきている京都市伏見地区を対象として、総合的な地下水利用に伴う、地下水流動挙動解析、揚水に伴う地下水水位変動性状、揚水井の揚水に伴う老朽化挙動、地下構造部による地下水流動障害および地下水汚染の浸透・移流分散挙動に関して、現場計測および地下水シミュレーション解析によって定量的な検討を行い、地下水資源に関する管理手法について述べた。

本論文は、京都盆地の地下水資源の最適な維持管理をコンセプトとして、7章から構成されている。

各章の要旨：

第1章は序論であり、本研究の背景を述べた後、様々な地下水障害や地下水シミュレーションに関する数値解析についてまとめ、本研究に関連する地下水の維持管理手法をはじめとする、国内外における地下水の利用実態、地下水流動場の解明、地盤沈下、地下水汚染、地下構造物が地下水に及ぼす影響などに対して行った、地下水管理手法の既往の研究内容をレビューした。最後に、本研究の目的を述べている。

第2章では、本研究の対象地である京都盆地における地下水の利用用途や、揚水量について調べ、地下水利用実態について分析した。研究対象地に関する地勢、地下水の利用用途や、揚水量に関する考察を行った。また、地下水シミュレーション解析を行う上で、地形・地質構造を詳細に解明する必要があることから、京都盆地における地形・地質構造を整理した結果について述べている。

第3章では、1本当たりの揚水量が比較的に多い、上水用水源の適切な維持管理手法の構築を目的とし、地下水利用が盛んな地域である、京都府南部に位置する城陽市と八幡市を対象と

した、揚水シミュレーション解析について、定量的に検討した結果について述べた。対象地にある観測井及び揚水井における、長期的視野に基づいた地下水位変動を整理し、地下水位の変動特性を考察した。そして、複数の揚水井が、水位変動に及ぼす影響を再現するための、揚水シミュレーション解析を実行した。解析手法は、有限要素法とし、非定常における浸透流解析を行った。本章の成果として、多くの揚水井における観測水位と計算水位の整合性が認められた。そして、水資源管理を実施する上では、揚水シミュレーション解析を行うことで、新たに井戸を設ける際の検討材料としても十分に活用できることについて述べている。

第4章では、第3章の解析結果で数箇所の井戸において、観測水位と計算水位が一致しなかった原因を考察した。そこで、揚水以外による影響で水位変動が生じている要因を、井戸の老朽化であると仮定し、揚水シミュレーション解析を実施することで、定量的に検討した結果について述べた。井戸の老朽化現象は、周辺の帯水層に微粒子が目詰まりすることから、数値解析では、経時的に透水係数を低下させることで老朽化を再現した。本章の成果として、井戸の老朽化により水位が低下している、観測水位と計算水位の整合性が認められた。井戸の老朽化を検討することは、老朽化の原因を解明する上でも十分に活用でき、かつ適切な時期における洗浄工事の実施時期について提案できることについて述べている。

第5章では、揚水井が非常に密集した地域で地下水利用が盛んである、京都市伏見区域における地下水流動場を求めるための、地下水流動シミュレーション解析について、定量的に検討した結果について述べた。地下水流動場を解明し、可視化することは、地下水保全を行う上で有用となる。対象地にある観測井において、帯水層ごとの地下水位を計測し、地下水性状を考察した。そして、広域的な範囲における地質モデルを作成した。解析手法は、有限要素法とし、定常における浸透流解析を行った。観測水位と計算水位の整合性を検討した結果、モデルの妥当性を確認することができた。本章の成果として、モデルの妥当性を得た解析結果より、地下水位分布を推定し、広範囲における地下水流動場を求めた。そして、地下水資源管理を行う上で、直接直視することができない地下水の流れを可視化することは、水資源管理を定量的、かつシステムチックに実施できる可能性について述べている。

第6章では、地下水保全に関する手法の適用例として、第5章で作成した地質モデルに改良を加え、地下構造物による地下水流動阻害や、地下水汚染による地下水環境に及ぼす影響を評価するための、シミュレーション解析について、定量的に検討した結果について述べた。地下構造物を再現したモデルでは、解析手法を有限要素法とし、定常における浸透流解析を行った。汚染解析に関しては、懸念される汚染物質の挙動を求めるため、同じく解析手法を有限要素法とし、非定常における移流分散解析を行った。本章の成果として、地下構造物が流動阻害に及ぼす影響の検証と、地下水汚染物質の挙動を、定量的に検討した結果についてまとめた。そして、地下水資源管理を実施する際に数値解析を用いることは、上記で述べたように、地下構造物の建設工事における評価手法としても活用でき、かつ地下水汚染が発生した際の、迅速な対応策や汚染の発生箇所を予測する上でも重要であることを述べている。

第7章は、本研究で得られた結果を総括し、今後の課題について述べている。

以上

目次

第1章. 序論

1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究に関連した既往の研究	6
1.2.1	地下水管理に資する既往の研究	6
1.2.2	地下水シミュレーションの解析法	11
1.2.3	地下水シミュレーションの適用例	15
1.3	本研究の目的と内容	17
	参考文献	20

第2章. 京都盆地の地形・地質と地下水利用

2.1	はじめに	24
2.2	京都盆地の地形・地質ならびに水理地質構造	24
2.2.1	城陽市および八幡市の地形・地質	28
2.2.2	京都市伏見区の地形・地質	29
2.3	京都盆地の地下水利用実態	31
2.3.1	城陽市の地下水利用実態	31
2.3.2	八幡市の地下水利用実態	33
2.3.3	伏見区の地下水利用実態	35
2.4	まとめ	37
	参考文献	37

第3章. 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

3.1	はじめに	39
3.2	城陽市・八幡市における上水道用揚水井と観測井の地下水位変動	39
3.2.1	現位置計測に関する概要	39
3.2.2	上水道用揚水井の揚水量と地下水位変動	43
3.2.3	観測井の地下水位変動	47
3.3	揚水シミュレーションモデル	50
3.3.1	概要	50
3.3.2	有限要素法による浸透流解析の支配方程式	50
3.3.3	広域的な範囲におけるモデル化	52
3.3.4	広域モデルのメッシュ分割	58
3.3.5	局所的な範囲におけるモデル化	59
3.3.6	局所モデルのメッシュ分割	63
3.3.7	広域モデルで用いた入力条件	65
3.3.8	局所モデルで用いた入力条件	66
3.4	解析結果と実測との比較検討	68

3.5	まとめ	70
	参考文献	68

第4章. 井戸の老朽化を考慮した3次元揚水シミュレーション解析

4.1	はじめに	72
4.2	井戸の老朽化に関する調査	72
4.2.1	井戸の老朽化とは	72
4.2.2	老朽化が生じている井戸の諸言	73
4.2.3	老朽化が生じている井戸の洗浄工事	76
4.2.4	老朽化が生じている井戸の水位変動	84
4.3	老朽化を考慮した地下水揚水シミュレーションモデル	87
4.3.1	概要	87
4.3.2	井戸の老朽化を考慮した解析手法	87
4.3.3	入力条件	88
4.4	解析結果と実測との比較検討	90
4.5	まとめ	91
	参考文献	92

第5章. 京都市伏見地域における地下水性状と3次元浸透流解析

5.1	はじめに	93
5.2	伏見地域における観測井の地下水位変動	93
5.2.1	概要	93
5.2.2	観測井の地下水位変動と降雨量	94
5.2.3	観測井の地下水位変動と揚水量	96
5.3	広域的な範囲における地下水流動場を推定したシミュレーションモデル	97
5.3.1	概要	97
5.3.2	広域的な範囲におけるモデル化	97
5.3.3	広域的モデルのメッシュ分割	102
5.3.4	土地利用分布を考慮した3次元地層モデル	103
5.3.5	入力条件	104
5.4	解析結果と実測との比較検討	105
5.5	まとめ	108
	参考文献	109

第6章. 地下水保全に伴うシミュレーション解析

6.1	はじめに	110
6.2	地下構造物を考慮したシミュレーションモデル	111
6.2.1	概要	111
6.2.2	地下構造物を考慮した解析手法	112

6.2.3	地下構造物を考慮したモデルのメッシュ分割	112
6.3	地下水汚染を考慮したシミュレーションモデル	114
6.3.1	概要	114
6.3.2	汚染物質の挙動	114
6.3.3	有限要素法による移流分散解析で用いた支配方程式	116
6.3.4	地下水汚染を考慮したモデル化	116
6.3.5	地下水汚染を考慮したモデルのメッシュ分割	118
6.3.6	浸透流解析で用いた入力条件	118
6.3.7	移流分散解析で用いた入力条件	119
6.4	地下構造物を考慮した3次元浸透流解析	119
6.4.1	地下構造物が地下水流動に及ぼす影響の可視化	120
6.4.2	地下構造物が周辺の地下水位に及ぼす影響の検討	121
6.5	地下水汚染モデルにおける3次元浸透流解析	122
6.6	地下水汚染モデルにおける3次元移流分散解析	124
6.6.1	汚染の初期の位置	124
6.6.2	分配係数の高い物質の移流分散挙動	126
6.6.3	分配係数の低い物質の移流分散挙動	133
6.7	まとめ	139
	参考文献	140
第7章. 結論		141
謝辞		143

第1章 序論

1.1 本研究の背景

水は、全ての生命の源であり、使用したとしても消滅することはない、地球上を常に地表、地下、水蒸気、氷河等に形態を変えて賦存しており、その絶対量はほぼ一定であって減少することはない。しかし、水は自然環境や社会環境によって、それぞれの形態の割合は異なり、水質も変化する。図1-1は、国連などの統計¹⁾による、世界全体の取水量の推移を示している。図に示されるように、1900年には579(km³/年)程の取水量であったのが、2000年には3,973(km³/年)程の取水量まで増加し、人類が使う水の量は、この100年程の間で急激に増えていることが分かる。この傾向は、世界の人口が爆発的に増加したことに加え、生活スタイルが向上し、日常生活で使う水の需要が増えたためである。近年、我々の生命を維持していくために必要不可欠である、人類が利用できる淡水資源の量は、人口増加、水質汚染、地球温暖化など、様々な原因により減少している。この問題は、一人当たりの淡水資源の需要が伸びているので、我々にとって最も危機感を感じなければならないことである。現在では、地球上の10億人以上の人々に、安全な飲料水の供給がなされておらず、30億人以上もの人々が、衛生設備の整っていない状態で暮らしている。私たちがこれまでの生活習慣を改めないかぎり、地球上の人口が26億人増加すると予測されている2025年には、17億人が深刻な水不足に悩まされ、さらに9億人は極限的な水飢餓の生活を強いられると言われている²⁾。特に、今後懸念されるのは、現在悪化し続けている地球温暖化が引き起こす、降雨量の変化による淡水資源への影響である。降雨量は、春と夏に10%の増加、秋には15%の増加、冬には20~60%の増加が予測されている。また、降雨量の増加に伴う蒸発散量の増加や、局所的なエリアでの激しい降雨なども頻繁に発生する可能性についても報告されている³⁾。このように、淡水資源は飲料水だけでなく、衛生設備などの、我々の日常生活にとって無くてはならないものであり、自然環境、社会環境等が

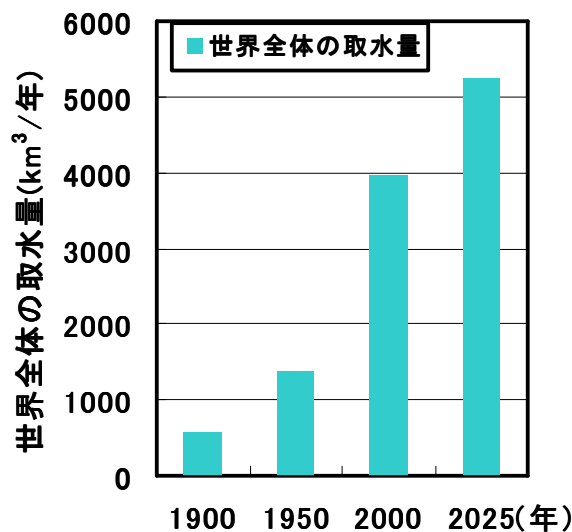
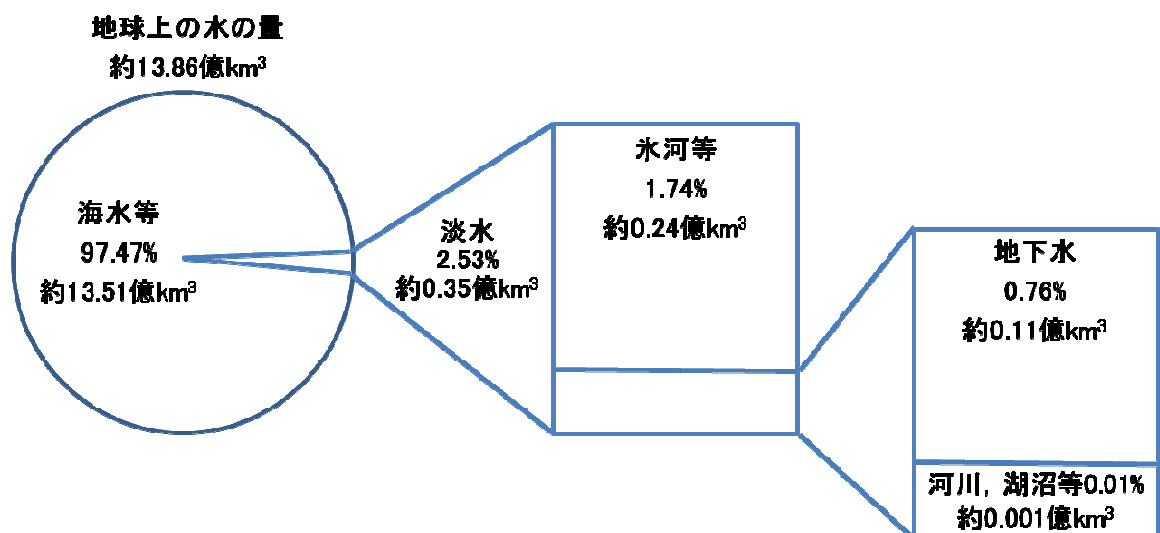


図1-1 世界全体の取水量の推移¹⁾

変わることで、需要が大きく変化することもある。温暖化による自然環境の変化や、人間活動の広範囲化は、淡水資源をさらに必要とするため様々な問題が生じる可能性がある。日本人にとっては、淡水資源を当たり前のように利用することができるので、淡水資源問題の危機に関しての関心が非常に少ないと思われる。また、我々は、農作物などを輸入する際に、海外の水資源を大量に消費しているといった、バーチャルウォーター⁴⁾の問題についても、十分に認識していかなければならない。ここで、地球上には、その淡水資源がどれほど存在しているのかを示す。図 1-2 は、地球上の水の量の割合を示している⁵⁾。図に示されるように、地球上に存在する約 97.5%の水は海水であることが分かる。淡水は、残りの約 2.5%である。淡水に占める地下水の割合は約 30%であるのに対し、河川や湖沼の割合は約 0.3%である。淡水資源の大半は氷河等で占めるが、人類が直接利用するには困難である。世界の水資源は、海水を淡水化する際のコストや、水資源を送水する際のコストが軽減できれば、量的には解決できることになるが、日本国内の淡水でさえ、長距離輸送が実現されていない現状にある⁶⁾。そのため、南極の氷などを水不足に悩む国々へ大量に供給できるのは、現在の技術をもってしても不可能である。以上を理由として、我々の身近に豊富な水量を誇る地下水は、淡水資源として非常に重宝される資源として位置付けされる。

地下水とは、地表から地下に浸透した水の全てを称している⁷⁾。地下水は、トンネル掘削工事などでは湧水の問題が生じ、地下水位が高ければ、地震時において液状化が懸念され、揚水すれば、湧水の枯渇やそれに伴う地盤沈下の心配をしなければならないことから、建設工事においてはやっかいな存在となる。一方で、地下水は、恒温性、良質な水質、経済性にも優れ、古くから現代に至るまで様々な用途に利用されてきており、貴重な水資源として世界各地で利用されている。表 1-1 は、地下水の一般的特性を示している⁸⁾。地下水は、地下水管理を適切に行うことが可能となれば、表に示される問題点・短所を解決できるものと考えられる。



- (注) 1. World Water Resources at the Beginning of 21st Century ; I. A. Shiklomanov and John C. Rodda, 2003 をもとに国土交通省水資源部作成
 2. 南極大陸の地下水は含まれていない

図 1-2 地球上の水の量の割合⁵⁾

表 1-1 地下水の一般的特性⁸⁾

利点・長所	問題点・短所
①水質が良好	①賦存量を把握しにくい
②年間を通して一定温度，低温	②過剰揚水は地盤沈下を招く
③取水費用が安価	③涵養に時間がかかる
④水利権の制限が少ない	④汚染された地下水の浄化が困難
⑤比較的手軽に利用可能	

地下水は，生活用水，工業用水，農業用水として利用されることをはじめ，ここ最近，地下水の特性の一つである恒温性を活かした，地中熱および地下熱を利用したシステムもある^{9),10)}。地中熱とは，U字管により不飽和帯および飽和帯で熱交換させることにより，間接的に利用される熱を示す。地下熱とは，間接方式に加えて地下水を揚水して熱源とする，直接方式により利用される熱も含めたものを示す¹¹⁾。地下水は，水資源として極めて魅力的であり，最も重要な天然資源の一つとして，世界中の多くの国々で認識されている。しかしながら，地下水管理を適切に行わずに利用しつづければ，様々な問題が生じる恐れがある。図 1-3 は，地下水と自然・社会環境の相互関係を示している¹²⁾。図に示されるように，地下水は，資源と環境要素の2つの側面を持ちながら，各種の自然環境や社会環境との相互作用のもとに，その地域における地下水特性を形成している¹³⁾。そのため，地下水は，それぞれの地域における自然環境と社会環境との相互作用が正常に機能せず，水収支のバランスが崩れてしまうと，地下水資源不足による井戸の枯渇や，それに伴う地盤沈下，または豪雨時の地下水位の上昇による斜面崩壊，土石流，地すべり，地震時の液状化など，地盤環境問題や地盤災害問題へと発展する恐れがある。表 1-2 は，地下水の機能・資源と想定される影響例を示している¹⁴⁾。

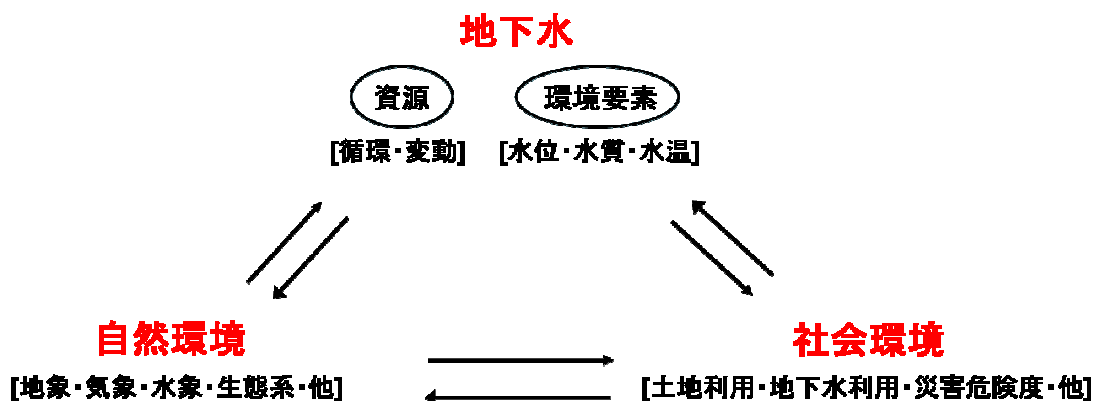


図 1-3 地下水と自然・社会環境の相互関係¹²⁾

表 1-2 地下水と自然・社会環境の相互関係¹⁴⁾

分類	機能・資源	機能・資源の効果役割	想定される影響例
機能的側面	地象・水象	地象の安定（浸食・運搬・堆積などの安定） 水象の安定（流出の維持と平滑化）	斜面崩壊，土石流，風食，構造物の冠水・浮き上がり 平常時表流水（河川水など）の減少，都市型洪水の発生
	気象緩和機能	地上気象の安定， 都市気候の緩和	ヒートアイランド（気温上昇・湿度減少） クールアイランド（気温低下）
	地盤環境維持機能	地盤の維持・安定，海水浸入の防止，地下環境の安定	局地的な地盤沈下，地盤陥没，塩水化，地下環境の酸化
	物質運搬・収容機能	地下水による物質運搬・収容（良好な水の運搬，汚染物質などの浄化）	汚濁物質の移動・拡散・汚水の発生
	生物生息環境維持機能	湖沼・湿地などの形成 湿地性植物の生育	湖沼・湿地などの減少， 湿地性植物の減少・枯死
資源的側面	多種用水資源	農業用水，工業用水，生活用水への利用	揚水井の渇水・水質汚濁・塩水化， 農作物の減少・枯死
	エネルギー資源	冷暖房，消雪，氷室，温泉への利用	揚水井の渇水・水温変化
	アメニティー空間資源	観光地・親水空間，遺跡・史跡・文化財，温泉利用	湧水・湖沼・湿地などの減少・ 枯渇

地下水障害とは、井戸の枯渇、地盤沈下、塩水化、地下水汚染、そして、水位の回復による建築物への被害や液状化などが挙げられる。図 1-4 は、地下水変化と地下水障害について示している¹⁵⁾。図に示されるように、「水量」が減ることによる水資源の枯渇や、有害物質混入による「水質」の悪化といった単体で生じる地下水障害もあれば、海岸地下水において、「水圧」が減圧することによる塩水化問題（「水質」の悪化）など、複雑な問題から地下水障害に発展することもある。ここで、地下水障害の歴史についてまとめる。

地盤沈下は、1900 年代に入り、近代的なさく井技術の普及と、経済発展による水需要の増大に伴って、地下水の過剰揚水により問題となった。日本の地盤沈下問題の歴史¹⁶⁾は、幸か不幸か、第二次世界大戦で、大阪の地盤沈下地域にあった工場が疎開または戦災し、工業用の地下水の汲み上げ量が減少することで地盤沈下が停止し、和達・広野の地盤沈下過剰揚水原因説が実証された。しかし、戦後、経済復興とともに地盤沈下は激しく再発した。現在は、1956 年に制定された「工業用水法」、その 6 年後の 1962 年に制定された「ビル用水法」を初め、各自治体の揚水規制等により、地盤沈下は沈静化しているが、昭和 59 年や平成 6 年に起きた異常渇水対策の「非常用水源」や、豪雪時に「消雪用水」として大量の地下水が揚水されていることから、安心することはできない。臨海部では、地下水の過剰揚水によって帯水層に海水が浸入

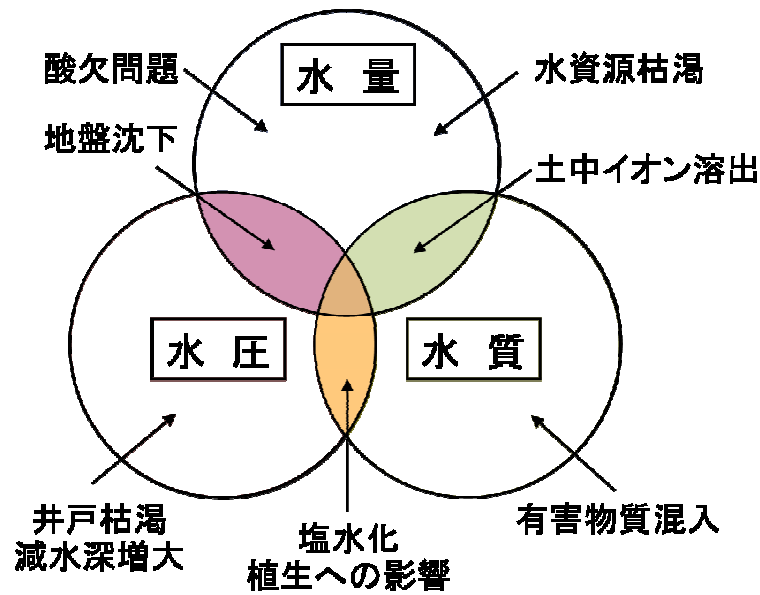


図 1-4 地下水変化と地下水障害¹⁵⁾

し、塩水化が生じている地域もある¹⁷⁾。1980年代後半には、トリクロロエチレン等の有機塩素化合物による地下水汚染が問題となり、その後、農村部における硝酸性窒素汚染の状況が明らかになった。その他、都市化の進展や水田面積の減少などに伴い、湧水が枯渇するなどの問題も生じている。近年、ポンプ性能の向上や井戸掘削技術の進歩によって、小口径で大深度からの揚水が可能になり、従来、規制対象とされていない、多様な用途の地下水利用が広がりつつある。一方、地盤沈下や地下水汚染などとは違い、新たに生じている問題としては、揚水規制の効果によって地下水位が回復したため、地震時の液状化の危険性が高まる可能性が懸念されている¹⁸⁾。また、地下水位の上昇に伴う浮力や水圧の増大は、高度経済成長期に建設された地下構造物が、浮き上がったり漏水したりする原因にもなってくる¹⁹⁾。このように、水位が上昇することは、液状化による地震の被害を増大させることや、地下構造物の建設をより困難にさせているので、必ずしも地下水位が回復したことで地盤環境が良くなるという訳ではない。近年、気候変動に伴う海面上昇や、降水量の変化が地下水に影響を及ぼすことから、新たな地下水障害を生み出す恐れもある。地下水障害は、時代とともに変遷してきていると言える。

以上に示したように、地下水は、水資源としては非常に魅力的な資源であるが、地下水を無作為に利用し続ければ、様々な地下水障害が生じる。地下水障害は、井戸の枯渇や地下水汚染などにより、飲料水として利用できなくなるだけでなく、地盤沈下や地下水位の回復による建造物への影響や、地震時の液状化による社会資本に与える影響など、我々人類にとって非常に甚大な問題を引き起こす。また、今後新たな地下水障害が発生する恐れもあると考えられる。表流水に比べて、地下水に関する情報の蓄積や地下水の管理手法に関する研究は、まだまだ少ないのが現状である。地下水賦存量や利用量に関するデータの不足と、地下水利用者の地下水障害に関する認識度の低さなども、地下水管理を実施する上での共通の課題となっている²⁰⁾。現在、地下水の適切な維持管理の手法は、十分に確立されていないことから、今後地下水障害を生じさせずに、地下水資源を継続的に使用するためにも、どのようにして地下水資源を適切に維持管理していけるのかについて研究していく必要がある。

1.2 本研究に関連した既往の研究

1.2.1 地下水管理に資する既往の研究

地下水管理に資する研究は、地域ごとに様々な分野に亘って行われている。ここでは、それぞれの地域で行われている、地下水資源の利用実態に関する研究、地下水流動場の解明に関する研究、地盤沈下に関する研究、地下水汚染に関する研究、地下工事が地下水に及ぼす影響評価に関する研究に分けて、数値シミュレーションを用いた研究以外の、既往の研究についてまとめる。

(1) 地下水資源の利用実態に関する研究

地下水管理を実施する上で最も基本的でかつ重要なことは、地下水利用の実態を調べることである。地下水利用が盛んな地域では、どのような用途で地下水を利用しているのか、また、どれほどの地下水を汲み上げているのかを調査していく必要がある。その際、水理地質構造を十分に調査した上で、どの層から地下水を利用しているのか、また、各層における地下水の水位変動特性を把握し、それらの水位変動に及ぼす要因を把握することも重要である。地下水位の変動特性を調べることは、地下水流動場をシミュレーション解析で再現する際の、入力データとしても活用でき、また、解析結果の信頼度を評価する上でも有用となる。

楠見(1995, 2009)^{21), 22)}らは、京都府南山城地方における地下水資源の利用実態を明らかにするため、1982年～1992年の期間における聞き取り調査を行い、地下水の揚水量、用途、井戸深度、井戸口径、取水帯水層などを定量的に検討した。その結果、地域別、用途別に検討することで、地下水の利用用途の変化、ならびに取水量の変化について明らかにしている。また、京都盆地の地下構造を3次元的に視覚化するために、反射法地震探査、重力異常データ、ボーリングデータを統合したシミュレーションを行い、京都盆地の地下構造を立体的に把握している。

飯田(2009)²³⁾は、大阪平野における過去と現在の地下水利用状況を分析するため、文献および大阪府・大阪市の地下水の揚水量データ、および地下水位データに基づいて検討した。その結果、地域ごとにおける単位水位低下量に対する揚水量の値をまとめ、豊富な地下水が賦存する地域を示した。また、大阪市と大阪市以外の地域に分けて、帯水層の深度別揚水量から、帯水層ごとの揚水量をまとめ、それらの利用用途を明らかにしている。

神谷(2010)²⁴⁾らは、岐阜市における今後の地下水の有効利用に向けて、蓄積された地下水の水位や、水質等の調査データを活用して、地下水の性状とその利用特性を分析した。特に、岐阜市中心部の長良川による扇状地を対象に、地下水の流動と水質の特徴を整理するとともに、流動・水質への河川による影響関係を考察した。そして、従来の上水道用などの地下水利用に加えて、冷房空調機の熱源としての、冷却水として地下水を利用できるのかについて検討した。その結果、扇状地の地下水流動場や水質は、長良川による影響を受け、特に地下水質は、長良川によるものと同程度の水質が維持されている傾向にあること、冷房空調器の水質基準との関係によれば、地下水を冷却水として利用できる条件にあり、地下水利用型の冷房空調機器の導入に適していることなどを明らかにしている。

越谷(2011)^{25), 26)}らは、地下水関連のデータベースを活用し、日本列島の三次元水文地質モデルを構築した。そして、構築した三次元水文地質モデルを用いて、地下水賦存量を試算した。その結果、全国各地の広範囲の地層の分布を明示することで、地下水盆の全容の把握が可能と

なり、未利用水源の潜在性などを明らかにしている。また、広域の地下水面を推定するため、地形と地質条件とに基づき、地下水面の回帰予測を行った。回帰分析は、地下水位を目的変数、地形・地質のグループをダミー変数、地形量を説明変数とした。その結果、構築した回帰式は、決定係数と分散分析から有意であったため、地形・地質に起因する日本全国の地下水面を、統計的に推定できる手法を確立している。

杉田（2012）²⁷⁾は、千葉県旭市沿岸における地下水利用への津波の影響について、東北地方太平洋沖地震の2ヵ月後に、住民への聞き取りと、水質測定調査を行った結果を報告している。その報告では、井戸本体の破損実態について把握し、また、海水の混入による地下水質への変化を調査することで、津波による塩水化への影響を分析し、報告している。

Timothy（2012）²⁸⁾らは、都市化による水資源への懸念から、ミネソタ州を流れるヴァーミリアン川周辺における、地下水資源の涵養源の変化について調査した。FAO-SCS, FAO-GA, GAと呼ばれるモデルを構築することで、都市開発による地下水資源への影響について、4つのシナリオを立てて分析している。

Samuel（2013）²⁹⁾らは、アメリカとメキシコの国境にあるリオ・グランデ盆地を対象として、2つのシナリオを立て、水資源管理を向上させる方法を提唱している。

Peck（1986）^{30), 31)}らは、アメリカのカンザス州における、地下水管理に関するGMDと呼ばれる、法により制定した社会実験についての仕組みを報告している。

Alfa（2011）^{32), 33)}らは、ガーナのデンス盆地を対象として、将来の気候変動による降雨強度の変化が、地下水資源の涵養量に及ぼす影響について分析している。また、それらのデータを活用しながら、降雨強度の変化を考慮した地下水収支モデルを作成した。その結果は、降雨強度の入力データを、日単位を考慮した値から時間単位の降雨強度を反映させることで、より精度の高いモデルを構築している。

上記したように、地下水利用実態の調査は、それぞれの地域において、地下水の利用用途や揚水量の分析から、水理地質構造の把握、地下水賦存量の把握、水位変動特性の把握、地下水の有効利用への検討など、多岐に亘って行われている。地形・地質構造を正確に把握し、各層ごとの地下水位変動を把握することは、地下水を適切に管理する上での最初のステップである。しかし、地下水利用が盛んな地域においても、現状では、このような広域における、利用実態調査が行われていない地域はまだたくさん存在する。または、水位測定データなどの、既存の資料をまとめきれていない地域は存在する。

(2) 地下水流動場の解明に関する研究

地下水は通常、涵養、流動、流出の過程で循環している。地下水管理を適切に行うには、これらの循環過程を十分に検討する必要がある。地下水流動場は表流水と違い、直接目で見ることができない。そのため、涵養源や流出する場所をあらゆる手法を用いて把握し、それらの途中における地下水流動場を解明する必要がある。また、地下水の流動方向や地下水流速を解明することは、地下水の寿命を知ることでもでき、かつ地下水汚染が発生した場合の汚染源の特定や、汚染の拡散範囲を検討する上で有用となる。地下水流動場の解明は、地域ごとにあらゆる手法を用いて行われている。

中屋（2009）³⁴⁾らは、大阪平野全域の地下水流動経路を、水質からとらえることを目的とし

て、塩素イオン濃度と総陰イオン濃度の空間分布を推定した結果、地下水の流動状態に関する知見をまとめた。その後、大阪盆地の標高-300m以浅の地下水を対象に、水位分布、および地形・帯水層構造と、地下水中の酸素および水素の安定同位体比、トリチウム濃度、硝酸態窒素濃度、主要溶存成分の空間分布を調べた。その結果、地下水の酸素および水素の安定同位体比から、地下水は盆地の周りの山地と丘陵地や台地で涵養されていること、帯水層中を通過して、硝酸が盆地の標高-300mの地下深くまで輸送していることを明らかにしている。また、いくつかの涵養域について、帯水層中の地下水の涵養速度や移動速度を概略的に算定している。

尾方（1995）³⁵⁾らは、岐阜県東濃地域を対象とし、河川水の流量・水質に影響を与える要素として、流域の地質に着目し、渇水期の流量や水質が、流域の地質条件とどのような関係にあるのかを把握するとともに、浅層部における地下水流動場の推定を試みた。解析に当たっては、多変量解析手法である判別分析と、主成分分析を行った。その結果、層ごとにおける流動場と貯留能力および滞留時間を解明することで、溶存物質の多い水と、溶存物質の少ない水を明らかにしている。

神谷（2012）³⁶⁾は、広域における地下水の流動系の実態を把握するため、濃尾平野の北部の揖斐川扇状地を対象として、地下水の溶存イオンデータの統計学的分析に基づき、広域地下水の流動系を判別するための、簡便な手法を究明している。この手法により、地下水の溶存イオンデータを用いて、主成分分析とクラスター分析によって水質グループを分類した結果、地下水位等高線から観測される流動系と整合し、扇状地特有の、河川由来の地下水流動系であることを明らかにしている。

小宮ら（2003）³⁷⁾は、松本盆地の地下水の涵養域や流動場を解明するために、河川水や地下水の水素および酸素の安定同位体比と、水質の空間分布を調べた。その結果、松本盆地中・南部地域の地下水涵養源と、広域の地下水流動場を解明している。

池田ら（1999）³⁸⁾は、複雑な地質構造をもつ火砕流台地が形成されている、北海道美々川を対象とし、対象地における地下水温を調べることで、地下水流動場を推定した。その結果、有限要素法による熱移動拡散解析の結果や、その他の水文資料とも整合する地下水域を推定することを明らかにしている。

上記したように、それぞれの地域における地下水流動場は、地下水の主要な溶存成分や同位体比を分析し、また、地下水温を計測することにより、地下水流動場を解明する手法もある。

(3) 地盤沈下に関する研究

日本の地盤沈下は、関東平野、大阪平野、新潟平野、濃尾平野、筑後・佐賀平野など、地下水を大量に使っていた多くの地域で問題化した。地盤沈下によりゼロメートル地帯が広がった地域では、1934年に起きた室戸台風による高潮を初め、1947年に起きたカスリン台風、1950年に起きたジェーン台風、1959年に起きた伊勢湾台風により、大水害の被害が増大するなど、2次被害による影響も非常に深刻な問題である。また、一度地盤が沈下してしまうと、元に戻ることはない³⁹⁾。

陶野（1988）⁴⁰⁾らは、新潟県南魚沼郡六日町を対象とし、消雪用揚水による地盤沈下の現状を報告している。また、当該地における試料を用いて繰り返し圧密試験を行った。圧密試験結果によると、季節的に地下水位変動が大きい地域では、地下水位変動による、地盤に与える応

力の繰り返し効果で、大きな累積沈下量の可能性があることを推定している。

八谷（1996）⁴¹⁾らは、佐賀平野を対象とし、平成6年の異常渇水により生じた地盤沈下について調査した。調査の結果、農地の不陸、亀裂、道路の段差、水道管の破裂等の、多くの直接的な被害が発生したことが分かった。また、渇水に伴う地下水揚水量の大幅な増加により、年間最大沈下量、沈下面積、沈下体積が本県における観測史上最大の地盤沈下として記録された。

大東（1996）⁴²⁾らは、濃尾平野を対象とし、従来の濃尾平野の地下水管理に関する研究成果と、平成6年の地下水位、地盤収縮量、揚水量などの実測値を基に、平成6年の異常渇水に伴う、濃尾平野の地盤沈下地域の拡大の原因について考察し、将来の渇水時の地下水管理の在り方について提言した。それによると、渇水時の地下水管理手法を確立するためには、地下水位の決め細かな観測や、最適な管理地下水位の設定など、解決することが幾つか残されていることが分かった。またそれらを解決することが、地下水を有効に利用しながら、地盤沈下の被害を防ぐことに繋がることを提言している。

上記したように、地盤沈下による問題は、非常に深刻な問題でありながら、我々はなかなか気付かない問題でもある。現在は、沈下傾向は収まっているものの、異常渇水や豪雪時などにおいてはまだまだ問題となることが多々あり、適切な地下水管理を行っていく必要がある。

(4) 地下水汚染に関する研究

土壌汚染とは、重金属、農薬、有機塩素化合物、現在最も環境基準を超えて検出される割合が高い、硝酸性および亜硝酸性窒素などの、有害化学物質が土壌に侵入し、土壌内に留まることである。地下水汚染は、それらの汚染物質が土壌内を浸透して地下水に達し、地下水の水質を悪化させることである⁴³⁾。

益田（1999）⁴⁴⁾らは、大阪府箕面市と池田市の溪流に湧出する、ヒ素による汚染のメカニズムを解明するために、それらの地下水の形成過程を考察した。その結果、水中のヒ素濃度は、pHが高くなると、ヒ素含有量が高くなる傾向が見られた。岩石中では、岩石の種類によって濃度に差異が見られなかった。土壌中では、土壌により、湧水中のヒ素が取り除かれていることを明らかにしている。

山村（2000）⁴⁵⁾は、世界各地の地下水のヒ素汚染について、地質化学的条件の分類に従って紹介している。報告では、世界各地に見られる自然起因によるヒ素問題の発生は、2種類の特徴的な環境条件下で見られるとされている。すなわち、乾燥地域、半乾燥地域の内陸、または閉鎖性盆地と、沖積土からなる強い還元性の水域であることを明らかにしている。

副島（2007）⁴⁶⁾らは、岐阜県各務原市の畑地を対象とし、実際の硝酸汚染が発生している帯水層に浄化壁を設置し、2000年1月から2003年3月までの期間に原位置浄化工法を行った。その結果、浄化壁の硝酸性窒素の浄化効果が確認され、試験開始3年間を経過した時点においても、浄化壁の浄化効果が持続していることを確認している。

堀越（2007）⁴⁷⁾らは、群馬県を対象とし、平成17年度調査における、硝酸性窒素および亜硝酸性窒素濃度の環境基準超過率の改善について、試料採取地点の水位、調査メッシュ数の変化による影響を検証するとともに、調査地点周辺の土地利用状況や、家畜頭数などのデータを用いて濃度低下の要因を、統計学的に考察した。その結果、当年における硝酸性窒素濃度の低下は、畑面積、家畜頭数、農業人口に関連する何らかの変化と関連していることが示唆され、

条例の施工や畑地への施肥量の減少が、その要因の一つと推定している。

富家（2011）⁴⁸⁾らは、熊本市を対象とし、広域の地下水流域の現地調査を実施し、地下水のNO₃-N汚染実態を明らかにするとともに、農業センサスデータを利用したGIS解析と、窒素安定同位体分析などの手法を活用することにより、窒素の負荷要因を解明した。熊本都市域の地下水におけるNO₃-Nの主な負荷要因は、家畜排泄物や堆肥などの有機態窒素であることを明らかにしている。

Fiorenza（2002）⁴⁹⁾らは、アメリカを対象として、添加剤メチル第3ブチルエーテル（MTBE）による地下水汚染状況について報告している。また、好氣的な環境と嫌氣的な環境におけるMTBEの分解性の理解と、MTBEの自然減衰や、バイオレメディエーションによる除染効果について調査している。

Schmidt（1987）⁵⁰⁾らは、アメリカのカリフォルニア州にある、サン・ホアキン溪谷を対象として、灌漑による地下水水質への影響について調査している。そして、サン・ホアキン溪谷一部の浅層部の地下水において、農薬（DBCP）が地下水汚染を引き起こした影響について報告している。

上記したように、汚染物質の調査をするためには、汚染の現状を把握することや、汚染のメカニズムを解明していかなければならないことが分かる。そのためにも、水質調査を行うことで、経時的に汚染物質の濃度を測定する必要がある。また、汚染物質は、人の健康に害を及ぼす恐れがあるのかどうかで汚染とみなされるため、今後新たな汚染物質が発見される可能性は十分にある。汚染は、広がってから浄化すると、時間とコストが非常に高くなるために、地下水汚染が発生する前に、予防策を講じていく必要がある。

(5) 地下構造物が地下水に及ぼす影響に関する研究

人口増加を背景に、人類は特に、都市部においてより広い空間を求めている。そのため、地下構造物の建設は、避けて通ることができない⁵¹⁾。地下工事を行う上で考慮しなければならないことは、地下工事現場における漏水の問題などと、特に地下水利用が盛んな地域における、周辺の地下水環境への影響である。地盤といった自然環境に、人工構造物を建設することによる地下水への影響は、水収支のメカニズムを狂わせることにも繋がり、地下構造物の規模においては、甚大な影響をもたらす恐れがある。地下構造物が点ではなく線、すなわち、地下鉄、共同溝などを建設後、上流の水位は上昇し、下流の水位は低下することもあり、それにより様々な地下水障害が生じる恐れもある。また、建設工事による地下水汚染などにも十分に留意し、地下水保全に取り組む必要がある。

木佐貫（2002）⁵²⁾らは、東京周辺地盤での公共観測結果を基に、涵養源で特に降雨と地下水位の相関性を明らかにし、再現確立降雨量を基に、性能照査型設計法に適用できる「設計地下水位設定方法」を提案し、考察した。その結果、設計地下水位には、数々の要因はあるが、地下水位と降雨量の相関関係式に、再現確立降雨量概念を用いて設定できることを示している。

西垣（2003）⁵³⁾らは、地下水流動阻害対策の必要性を評価する指標として、地盤環境や周辺環境等を、総合的かつ定量的に評価できる設計指標「許容地下水位変動量」を提案した。また、東京周辺地盤の特徴および地下水位特性を踏まえて適用し、考察している。考察の結果、新設地下構造物による地下水流動阻害の影響を評価する場合、帯水層の地下水位変動経緯と、地下

水位変動量，粘性土層の圧密特性，および既設構造物の安定条件に対して最も留意する必要があることを提言している。

西垣（2003）⁵⁴らは，地下水流動阻害対策工の合理的な設計方法を提案するため，既往の対策検討や設置後の計測結果等の事例を基に，対策工を基本的工法原理で分類し，適用上の留意点について検討した．この留意事項を踏まえた，開削工法での集復水井形式を用いた対策工の設計方法を提案している。

上記したように，地下構造物を建設する上での，設計指針やこれまでの工法についての反省点などが考察されている．近年までの地下構造物は，周辺の地下水に与える影響を考慮せずに建設されていたことから，今後は，周辺の自然環境を破壊することのないように，地下構造物を建設していく必要がある。

1.2.2 地下水シミュレーションの解析法

地下水盆での地下水資源の開発・管理を行うためには，広域的な地下水流動場と，その変化がもたらす社会的な影響について研究が進められてきた．なかでも，水収支シミュレーション技術の発達により，広域的な地下水収支を把握することが可能になり，地下水盆管理は著しく進展することになった⁵⁵．図1-5は，地下水流動場の解法を示している⁵⁶．本研究では，地下水流動場を，数値解析手法により求めている．数値解析法とは，地下水流動場に関する支配方程式を近似的に計算するために，空間・時間について離散化を行い，与えられた境界条件のもとで近似解を得る方法である．図に示されるように，数値解析手法として代表的なものは，有限要素法，差分法，境界要素法がある．ここで，それぞれの特徴についてまとめる．また，図1-6は，数値解析の実務におけるフローの一例を示している⁵⁶．

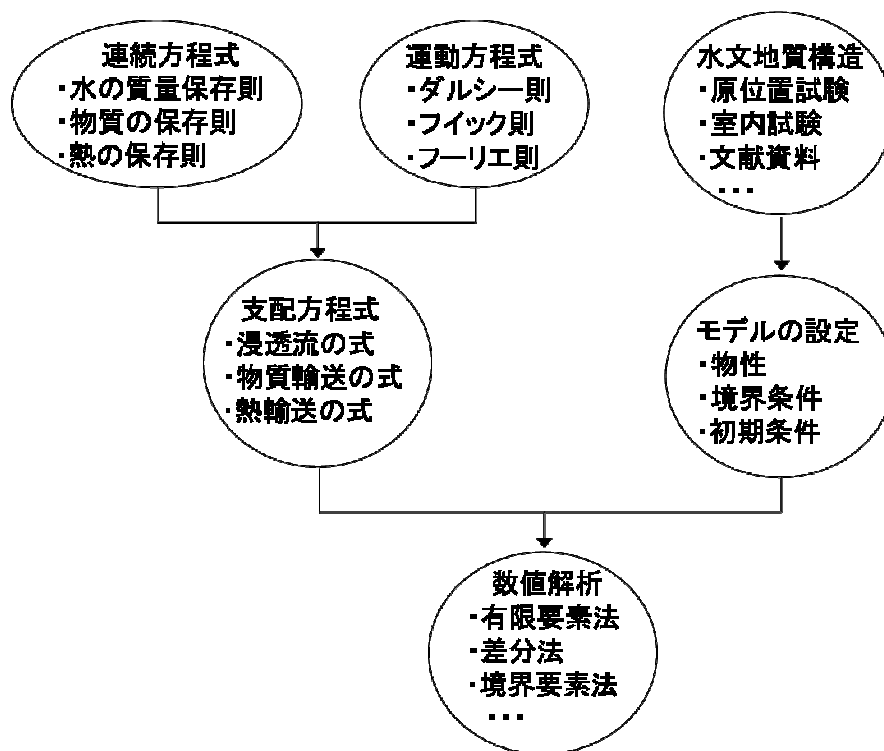


図1-5 地下水流動場の数値解析の一般的な構成（文献56に加筆）⁵⁶

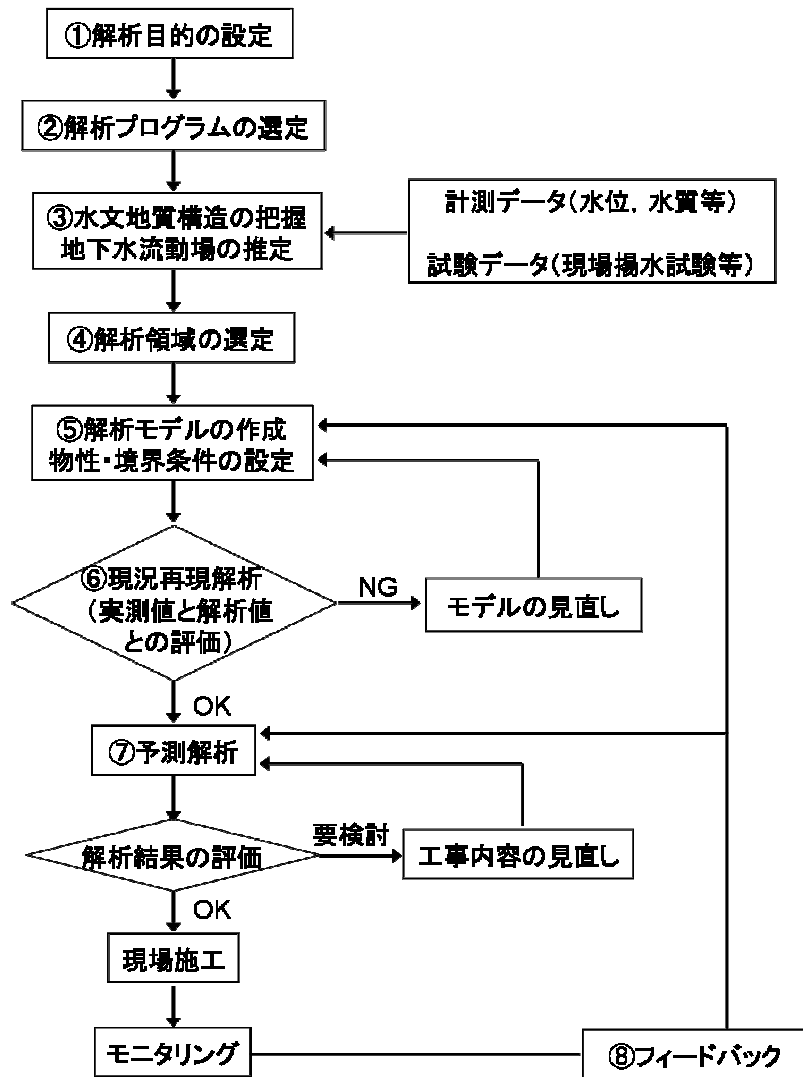


図 1-6 数値解析の実務におけるフローの一例（文献 56 に加筆）⁵⁶⁾

有限要素法は、元来構造解析の分野で発展したものであるが、Zienkiewicz 等によって浸透流解析へ応用されて以来、地下水学の分野でも急速に研究が進展し、今日では差分法や境界要素法とともに、最も重要な数値解析手段となっている。有限要素法と他の数値解析手法との相違は、有限要素法では任意の大きさ、形状の要素を用いることができるなど、領域分割の仕方に大きな自由度がある点で、自由度の小さい差分法と異なっている。従って、水頭変化などが大きな部分では、細かい要素を使うといったきめの細かい解析が可能で、また、領域が異方性あるいは不均質性の帯水層や、複雑な境界形状を持つ場合でも、領域特性に応じた要素分割が可能である⁵⁷⁾。

差分法とは、古くから用いられてきた数値解法であり、地下水の分野でも有限要素法とともに広く使われている。差分法は、有限要素法にくらべて直接的で理解しやすく、取りあつかいも簡単である。このため、初心者にも取りつきやすいと思われる。差分法は、連続関数のある点における微分を、小区間の差分で近似するのが基本的な考え方である。すなわち、ある区間離れた関数値（離散値）を用いて近似するものである。表 1-3 は、差分法と有限要素法の比較を示している⁵⁸⁾。

表 1-3 差分法と有限要素法の比較⁵⁸⁾

項目	差分法		有限要素法
1. 実用性			
メッシュ分割	容易に自動作成	>	手作業ないし自動作成でやや面倒
データ入力	手作業でも容易，メッシュデータの場合には自動作成可能	>	手作業，複雑な要素分割の場合には煩雑
2. 精度			
境界	近似的に再現	<	忠実に表現可能
観測井などの位置	近似的に再現	<	忠実に表現可能
3. プログラム			
作成の容易さ	容易に作成可能	>	やや難しい
普及度	マニュアルの完備したプログラムが多い	=	マニュアルの完備したプログラムも多い
計算機容量	繰り返し解法を利用することで，小さな容量しか必要としない。	>	大きな係数行列ができるため，大きな容量を必要とする．小容量化のためには，特殊な解法が必要．
計算時間	多くの繰り返しステップが必要．ただし，1ステップの計算時間は短い。	=	計算ステップは少なく済むが，大次元の連立1次元方程式を解くため，1ステップの計算時間は長い

境界要素法とは，1970年後半に，第3の数値解析手法として，地下水流の解析に加わってきた．差分法，有限要素法は，微分方程式をもとにした数値解析手法であり，解析領域全体を要素に分割し，各節点の未知量を解析するものである．一方，境界要素法は，微分方程式を積分方程式に変換し（積分は3次元問題では面積分に，2次元問題では線積分になる），その積分を離散化した数値解析手法であることから，解析領域の境界上のみの物理量を未知数として，解析するものである．したがって，境界上の未知量だけを取り扱えばよいことから，計算機の容量を減ずることができ，境界の移動，変形に伴う内部節点の組み替えを行う必要が無い．また，解析領域の境界を，十分な精度で表し得ることから，解の精度が比較的良いことなどの利点を有している．境界要素法は，境界が移動，変動する場合に有利な数値解析手法であるので，地下水流の自由水面や，地下密度流の淡塩境界面の算定に適した手法と言える⁵⁹⁾．

従来の研究では，地下水位の変動を把握するための解析は，差分法による解析が多く用いられてきた．しかしながら，沖積平野が多い日本では，地層が多層地盤であることから，不均質性の導入が困難である差分法は，本質的に解析することが不可能である．差分法でこのような

地層の問題を取り扱う場合には、各層の帯水層定数の平均値を用いて近似解析を行っている。そのため、この手法は、近似的な解法であり厳密には地層に忠実な解析がなされていないと言える⁶⁰⁾。また、境界要素法に関しては、後述するように、本研究で対象とする地下水流動場は、境界が移動することや、変動することが無いことより、除外した。したがって、本研究の手法は、多層地盤を成す各層における地下水位の変動を再現するため、帯水層の不均質性の導入が容易な有限要素法を選択した。

表 1-4 は、移流分散解析の解析手法について示している⁶¹⁾。座標系や離散化などの違いによりいろいろな解析手法がある。以下に各解析手法の概要についてまとめる。

表 1-4 代表的な水溶性汚染物質挙動の解析手法⁶¹⁾

(1) オイラー法 (Eulerian 法)
(2) 粒子追跡法 (Lagrangian 法)
(3) オイリアン・ラグランジアン法(EL 法)
(4) LTG 法 (Laplace Transform Galerkin 法)

オイラー法は、移流分散方程式をオイラー座標（固定座標）系で記述し、差分法や有限要素法で離散化する手法である。長所としては、化学反応や流れの濃度依存性などの、非線形性についても導入しやすい手法であること等が挙げられる。短所としては、移流項を扱うため非対称のマトリックスを解く必要があり、記憶容量や計算効率から大規模な解析には向いていないなどが挙げられる。粒子追跡法は、物質の移動現象を、濃度をおびた粒子の移動として評価する手法であり、座標系が粒子とともに、移動するラグランジュ座標（移動座標）系で記述する手法である。長所としては、オイラー法で見られるような、数値的不安定性が無いことなどが挙げられる。短所としては、粒子分布を空間的な濃度に置き換える際、平均的な濃度分布となるため、局所的な濃度を求めるには粗いモデルである。オイリアン・ラグランジアン法は、移流項に対し、有限要素メッシュの節点を移動粒子に見立てて、時間ステップ毎に節点上に、どこから移流による濃度が運ばれてきたかを、後ろ向きに軌跡をたどる手法を用い、設定した有限要素メッシュを使って、分散項をオイラー法によって求める組み合わせである。長所としては、幅広い流速場に対して、安定かつ精度良く解析が行える。LTG 法は、移流分散方程式の時間軸をラプラス変換することによって、安定な方程式に変換し、ラプラス領域において、オイラー法と同様に解析を行う手法である。長所としては、移流が支配的な問題でも比較的安定して任意の時間での解が同時に求められるため、計算効率が良いことなどが挙げられる。短所としては、地下水流速が時間的に変化する場合や、濃度が非線形項を含むような問題に対応出来ていないため、適応範囲が限られている⁶¹⁾。

本研究では、短所が少ないことを理由として、有限要素法で離散化したオイリアン・ラグランジアン法を用いて移流分散解析を行った。

1.2.3 地下水シミュレーションの適用例

数値シミュレーションの適用例を、地下水流動場の解明に関する研究、地盤沈下に関する研

究、地下水汚染に関する研究、地下構造物が地下水に及ぼす影響に関する研究に分けて、既往の研究についてまとめる。

(1) 地下水流動場の解明に関する研究

長谷川 (2001) ら⁶²⁾は、高レベル放射性廃棄物の地層処分において、沿岸海底下での地下水流動系を評価するために、海底地形勾配の異なる2地域(遠浅な場合と急峻な場合)に対して、海水準変動を考慮した鉛直2次元地下水浸透流解析を実施した。その結果、塩水域では、淡水域に比べて1~2桁流速が遅く、下方向へと流れる傾向があり、天然バリア中での各種の移行時間と移行距離を長くできる可能性が高いことを確認している。

渡辺 (2002) ら⁶³⁾は、水道水源が100%である岐阜県各務原市を対象として、有限要素法による地下水浸透流解析を行った。数値解析では、数値地図データを利用して、地表面高による制限を設定したタンクモデルを、各地点での土地利用形態区分ごとに用いることにより、涵養量の評価を行った。市街地での揚水量を定量的に考慮した結果、実測値との整合性が認められた。また、それらの結果を基に、水田減少が地下水に及ぼす影響について定量的に評価している。

稲葉 (2005) ら⁶⁴⁾は、岐阜県東濃地域を対象とし、深部地下水流動の涵養域から流出域を抽出する手法を開発するため、深部地下水流動系に影響を与えている、後背地地形や大規模な断層、地下水分布を考慮した、差分法による広域地下水浸透流解析を実施した。また、より範囲を狭めた局所的な範囲における流れの再現も試みた。その結果、実測水頭との整合性が認められたことから、局所的な範囲のモデル化領域と、境界条件を正しく設定する手法を明らかにしている。

與田・阿部 (2002, 2007) ら^{65), 66)}は、大阪平野を対象とし、広域地下水流動モデルとそのサブモデルを作成し、それらのモデルを用いて、有限要素による浸透流解析を実施し、地下水盆の広域地下水涵養および流動特性を検討した。その結果、観測地下水位データや統計学的手法、地下水の溶存成分分析などにより明らかにされてきた、涵養・流動経路とよく一致した。そして、揚水を考慮した場合と、考慮していない場合の、広域における地下水の涵養・流動場を明らかにした。また、対象範囲を狭めたサブモデルにより、より詳細な地下水圧分布と、地下水涵養経路を明らかにしている。

Naveh (2004) ⁶⁷⁾らは、イスラエルのフラ湖の水資源管理のために、HDSSと呼ばれるシステムを構築することで、湖周辺の地下水位を管理している。このシステムの目的は二つあり、一つは、目標の地下水位からの離脱を最小限に抑えること、二つ目は、ジョーダン川から用水路への供給を抑えることである。

Majumdar (2009) ⁶⁸⁾らは、インドのマハラシュトラを対象として、山間部の多層地盤における人工涵養の影響を把握するために、地下水収支モデルを構築することで、地下水資源を管理している。

(2) 地盤沈下に関する研究

谷中 (1989) ^{69), 70)}らは、新潟県の六日町盆地を対象とし、帯水層の分布、帯水層の透水性、揚水量、地下水の利用状況、地下水位分布等を調査し、地下水の流動状況について把握した。また、それらのデータを活用して、有限要素法を用いた準3次元モデルによる、地盤沈下予測

計算を実施し、当地区における今後の地盤沈下量分布について予測した。その結果、帯水層の水頭及び地盤沈下量の分布について、計算値は実測値とよく一致した。そして、当モデルを用いて、地盤沈下量の大きい地域を予測している。

坂井（1996）⁷¹⁾らは、佐賀平野と新潟県を対象とし、渇水・豪雪時を含めた地下水位の季節的変動による地盤沈下について、繰り返し圧密を考慮した、有限要素法を用いた地盤沈下解析を行った。その結果、地下水位変動幅の低減が沈下対策に効果的であること、また、地下水位低下期間が短く、水位変動の周期が大きくなるほど沈下が増大していくことを明らかにした。

坂井（2002）⁷²⁾は、農業用水として夏季に過剰な地下水揚水を行っている、佐賀平野白石地区を対象に、季節的な地下水位変動に伴う、地盤沈下の実態と地盤沈下解析の結果を示し、さらに、季節的な地下水位変動量と、地下水揚水量および年間沈下量との関係を明らかにした。それらの結果を踏まえて、地盤沈下防止を目的とした管理手法について検討している。

(3) 地下水汚染に関する研究

藤縄（2000）⁷³⁾は、腐植した地中埋設パイプより、約 3000L の灯油が地下に浸透し、土壌・地下水汚染が引き起こされたことから M 市を対象とし、多孔体間隙への液体灯油の封入、バクテリアの増殖、無機物の沈殿に起因すると考えられる帯水層の目詰まりによる、水理地質定数の経時的变化について考察した。2 年間の修復期間中に一連の揚水試験を実施し、不圧帯水層を対象とした揚水試験に対する、ノイマンの解析解に基づいた標準曲線法を用いて、水位降下データの解析を行った。その結果、特に漏洩の発生した初年に、石油の漏洩により透水係数および貯留係数が、著しく影響されたことを明らかにしている。

石森（2004）⁷⁴⁾らは、反応透過壁工法の最適な形状条件・材料条件（設計パラメータ）を決定するために、設計パラメータと反応透過壁系の性能の関係、反応透過壁系の性能と汚染サイト特性の関係を調べた。前者の関係は、各設計パラメータに対する平面 2 次元浸透流解析によるパラメトリックスタディーの結果から評価した。一方、後者の関係は、汚染地下水と反応壁の化学反応に基づく反応速度解析から評価した。その結果、これらの関係をもとに、反応透過壁工法の最適な設計パラメータを、汚染濃度と汚染範囲に基づいて決定する手法を提案している。

渡辺（2011）⁷⁵⁾は、茨城県神栖市を対象として、当該地で起きた有機ヒ素化合物（ジフェニルアルシン酸、DPAA）による地下水汚染機構を明らかにするために、有限要素法を用いた 3 次元移流分散解析を実施した。数値解析で得られた結果は、野外調査結果を十分に説明するものであり、当該地において発生した、有機ヒ素化合物による地下水汚染機構を明らかにしている。

江種（2011）⁷⁶⁾は、より多くの土壌汚染現場に適用可能な、原位置封じ込め措置として、地下水揚水を併用した技術を提案するとともに、差分法による移流分散解析と浸透流解析を実施して、その汚染拡散防止効果を考察した。その結果、薄い難透水層しか存在しない現場においても、地下水揚水を併用することで、原位置封じ込め措置の適用が可能なことを示している。

(4) 地下構造物が地下水に及ぼす影響に関する研究

西垣（1990）⁷⁷⁾らは、飽和・不飽和領域内の有限要素法による浸透流解析を、記憶容量と演

算時間が少なくなるように、PCG法を用いて改良した。それらのツールを用いて、地下鉄建設による多層地盤内の地下水の挙動を、有限要素法を用いた浸透流解析により予測した。その結果、実測の値との整合性が認められ、地下掘削工事中、また工事完成後の地盤環境の変化の予測に適用できることを明らかにしている。

緒方(2001)⁷⁸⁾らは、福岡市で地下鉄3号線開削区間における地下水保全対策のため、地下鉄が地下水流動に及ぼす影響について、準3次元地下水浸透流解析を実施することで検討した。その結果、実際の地下構造物が地下水位に及ぼした変動量を、的確に予測している。

茂利(2005)⁷⁹⁾らは、第二京阪道路建設工事における、地中連続壁の構築に伴う地下水流動への影響、地下水位低下に伴う圧密沈下解析、および対策工の検討を行った。解析手法は、有限要素法を用いた浸透流解析を実施した。その結果、地下構造物が地下水位に及ぼした変動量を予測し、それらの結果を基に、周辺の圧密沈下について定量的に評価している。

1.3 本研究の目的と内容

本論文は、地下水資源の効果的な利用かつ最適な維持管理を行うにあたって、それらに関する現位置計測と、地下水シミュレーション解析を実施して、地下水の総合的管理手法について検討したものである。本研究にあたっては、古代より地下水の利用が盛んな地域である京都盆地を研究対象とした。図1-7は、本論文のフローチャートと構成を示している。また、各章の概要を以下に述べる。

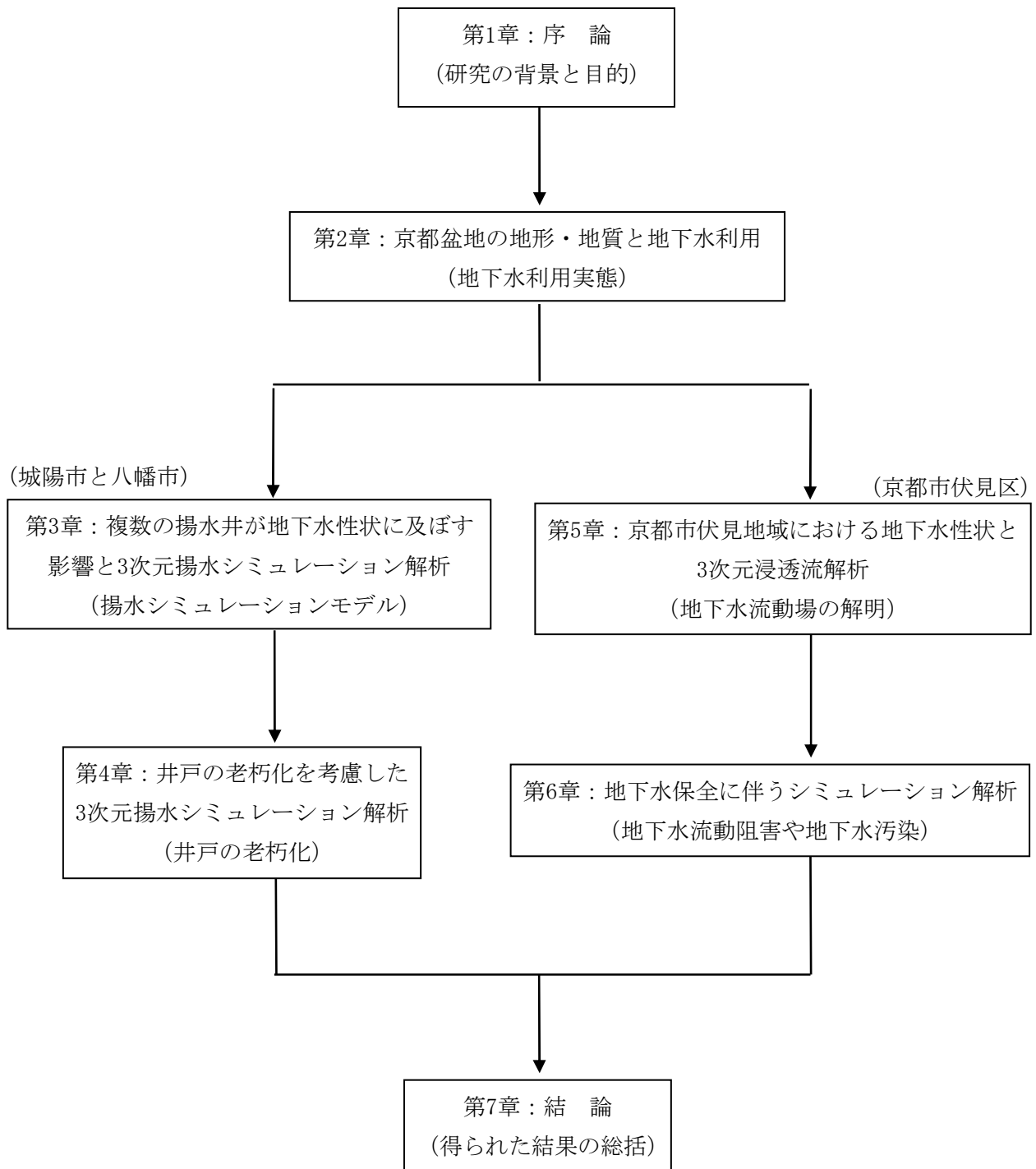


図 1-7 本論文のフローチャートと構成

第2章では、本研究の対象地である京都盆地における地下水の利用用途や、揚水量について調べ、地下水利用実態について分析した結果を記載する。研究対象地に関する地勢、地下水の利用用途や、揚水量に関する考察を行った。また、地下水シミュレーション解析を行う上で、地形・地質構造を詳細に解明する必要があることから、京都盆地における地形・地質構造を整理した結果について述べる。

第3章では、1本当たりの揚水量が比較的が多い、上水道水源の適切な維持管理手法の構築を目的とし、地下水利用が盛んな地域である、京都府南部に位置する城陽市と八幡市を対象とした、揚水シミュレーション解析について、定量的に検討した結果について述べる。対象地にある観測井及び揚水井における、長期的視野に基づいた地下水位変動を整理し、地下水位の変動特性を考察した。そして、複数の揚水井が、水位変動に及ぼす影響を再現するための、揚水シミュレーション解析を実行した。解析手法は、有限要素法とし、非定常における浸透流解析を行った。本章の成果として、多くの揚水井における観測水位と、計算水位が整合した結果について述べる。

第4章では、第3章の解析結果の数箇所の井戸において、観測水位と計算水位が一致しなかった原因を考察した。そこで、揚水以外による影響で水位変動が生じている要因を、井戸の老朽化であると仮定し、揚水シミュレーション解析を実施することで、老朽化の進行具合を定量的に検討した結果について述べる。井戸の老朽化現象は、経時的に透水係数を低下させることで再現した。本章の成果として、井戸の老朽化により水位が低下している観測水位と、計算水位が整合した結果について述べる。

第5章では、揚水井が非常に密集した地域で地下水利用が盛んである、京都市伏見区域における地下水流動場を求めるための、地下水流動シミュレーション解析について、定量的に検討した結果について述べる。地下水流動場を解明し、可視化することは、地下水保全を行う上で有用となる。対象地にある観測井において、帯水層ごとの地下水位を計測し、地下水位性状を考察した。そして、広域的な範囲における地質モデルを作成した。解析手法は、有限要素法とし、定常における浸透流解析を行った。観測水位と計算水位の整合性を検討した結果、モデルの妥当性を確認することができた。本章の成果として、モデルの妥当性を得た解析結果より、地下水位分布を推定し、広範囲における地下水流動場を求めた結果について述べる。

第6章では、地下水保全に関する手法の適用例として、第5章で作成した地質モデルを改良し、地下構造物による地下水流動阻害や、地下水汚染による地下水環境に及ぼす影響を評価するためのシミュレーション解析について、定量的に検討した結果について述べる。地下構造物を再現したモデルでは、解析手法を有限要素法とし、定常における浸透流解析を行った。汚染解析に関しては、懸念される汚染物質の挙動を求めるため、同じく解析手法を有限要素法とし、非定常における移流分散解析を行った。本章の成果として、地下構造物が流動阻害に及ぼす影響の検証と、地下水汚染物質の挙動を、定量的に検討した結果について述べる。

第7章は、本研究で得られた結果を総括し、今後の課題について述べる。

参考文献

- 1) 沖大幹：水の世界地図，丸善，pp. 20-21, 2006.
- 2) モードバーロウ：「水」戦争の世紀，集英社新書，p.3, 2003.
- 3) H. K. Paul：Potential Impacts of Global Warming on Groundwater in Eastern Massachusetts, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.128, No.3, pp.216-226, 2002.
- 4) 井田徹治：見えない巨大水脈，講談社，pp. 27-28, 2009.
- 5) 国土交通省・水資源局水資源部：平成 24 年版日本の水資源，p.60, 2012.
- 6) 高橋裕：水，土と基礎，Vol.41, No.1, p.3, 1993.
- 7) 地盤工学会編：地下水を知る，丸善，p.1, 2008.
- 8) 東京地下水研究会編：水循環における地下水・湧水の保全，信山社サイテック，p.2, 2003.
- 9) 落藤澄：地下熱利用と地下蓄熱の現状と課題，*日本地熱学会誌*，Vol.24, No.4, pp.315-327, 2002.
- 10) 落藤澄，濱田靖弘，中村真人：地盤あるいは帯水層を利用した蓄熱，*日本エネルギー学会誌*，Vol.81, No.8, pp.700-705, 2002.
- 11) 藤縄克之：地下熱利用技術 1.はじめに，*地下水学会誌*，No.53, No.1, pp.81-82, 2011.
- 12) 中村裕昭：地下水位変動と環境影響，第 39 回地盤工学研究発表会（新潟），No.1138, pp.2273-2274, 2004.
- 13) 地盤工学会編：地下水を知る，丸善，p.75, 2008.
- 14) 環境省総合環境政策局編集，大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会編：環境アセスメント技術ガイド「大気・水・土壌・環境負荷」（環境省「平成 17 年度環境影響評価技術手法要素別課題検討調査」報告書），（社）日本環境アセスメント協会，p.390, 2006.
- 15) 河野伊一郎：地下水保全とこれからの技術課題，*土と基礎*，Vol.34, No.11(346), pp.2-3, 1986.
- 16) 植下協：地盤沈下（1）総論，*地下水学会誌*，Vol.29, No.4, pp.183-185, 1987.
- 17) 山口嘉一：総合水資源管理における地下水対策，*地下水学会誌*，Vol.52, No.1, pp.24-25, 2010.
- 18) 是澤裕二：地下水保全行政について，*地下水学会誌*，Vol.52, No.1, pp.29-33, 2010.
- 19) 橋本正：地下水・地盤沈下，*地盤工学会誌*，Vol.57, No.10, p.40, 2009.
- 20) 片岡八束：アジア地域の地下水管理の現状と今後の地下水管理政策研究課題，*地下水学会誌*，Vol.52, No.1, pp.80-84, 2010.
- 21) 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，*地下水学会誌*，Vol.37, No.1, pp.55-67, 1995.
- 22) 井田徹治：見えない巨大水脈，講談社，pp.35-36, 2009.
- 23) 飯田智之：大阪平野における地下水利用の経緯・実態，*地下水地盤環境に関するシンポジウム 2009 発表論文集*，pp.71-80, 2009.
- 24) 神谷浩二，大谷具幸，西本明弘，山崎勲，香田明彦，戸塚雄三：岐阜県の長良川扇状地における地下水の流動・水質からみた利用特性，*地下水地盤環境に関するシンポジウム 2010 発表論文集*，pp.31-38, 2010.
- 25) 越谷賢，丸井敦尚：日本全国の地盤調査ボーリングデータを用いた地形・地質条件に基づく地下水面の推定，*地下水学会誌*，Vol.53, No.2, pp.179-191, 2011.

- 26) 越谷賢, 丸井敦尚, 伊藤成輝, 吉澤拓也 : 日本列島における三次元水文地質モデルの構築と地下水賦存量の試算, 地下水学会誌, Vol.53, No.4, pp.357-377, 2011.
- 27) 杉田文 : 東北地方太平洋沖地震の津波による千葉県旭市沿岸部における地下水利用と地下水水質への影響, 地下水学会誌, Vol.54, No.1, pp.25-37, 2012.
- 28) O. E. Timothy and G. S. Heinz : Natural Groundwater Recharge Response to Urbanization Vermillion River Watershed Minnesota, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.135, No.6, pp.512-520, 2009.
- 29) S. S. Samuel, C. M. Daene, L. T. Rebecca, and P. G. Carlos : Groundwater Banking in the Rio Grande Basin, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.137, No.1, pp.62-71, 2011.
- 30) J. C. Peck : Groundwater Management Institutions in Kansas, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.112, No.3, pp.203-209, 1986.
- 31) J. C. Peck : Kansas Groundwater Management Districts, University of Kansas Law Review, Vol.29, pp.51-91, 1980.
- 32) B. Alfa, B. Hasholt, N. O. Jorgensen and B. Banong Yakubo : Rainfall and Water Resources of a Coastal Basin of Ghana, Vol.16, No.4, pp.316-323, 2011.
- 33) B. Alfa, B. Hasholt, B. Banong Yakubo, and N. O. Jorgensen : Unsaturated Zone Heterogeneity and Land Use / cover on groundwater recharge – A case study of the Densu basin, Proc. IAHS Int. Conf., pp.2581-2592, 2008.
- 34) 中屋眞司, 三田村宗樹, 益田晴恵, 上杉健司, 本館佑介, 日下部実, 飯田智之, 村岡浩爾 : 環境同位体と水質より推定される大阪盆地の地下水の涵養源と流動特性, 地下水学会誌, Vol.51, No.1, pp.15-41, 2009.
- 35) 尾方伸久, 若松尚則, 梅田浩司, 柳澤孝一 : 河川水の流量および水質による表層部の地下水流動の推定—岐阜県東濃地域におけるケーススタディー, 応用地質, Vol.36, No.1, pp.2-13, 1995.
- 36) 神谷浩二 : 地下水質の統計学的分析に基づいた広域地下水の流動系の評価, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2012 発表論文集, pp.19-26, 2012.
- 37) 小宮洋行, 中屋眞司, 益田晴恵, 日下部実 : 酸素および水素の安定同位体比と水質から見た長野県松本盆地中・南部地域の広域地下水流動系, 地下水学会誌, Vol.45, No.2, pp.145-168, 2003.
- 38) 池田光良, 三浦均也, 操上広志 : 地下水温による北海道美々川周辺の地下水流動解析, 応用地質, Vol.40, No.2, pp.70-85, 1999.
- 39) 植下協 : 地盤沈下 (1) 総論, 地下水学会誌, Vol.29, No.4, pp.183-192, 1987.
- 40) 陶野郁雄, 岩田敏 : 地盤沈下 (3) 新潟県南魚沼郡六日町の地盤沈下の現状, 地下水学会誌, Vol.30, No.2, pp.95-101, 1996.
- 41) 八谷陽一郎, 北島淳二, 神野健二 : 佐賀平野における平成 6 年異常湧水と地盤沈下, 地下水学会誌, Vol.38, No.3, pp.181-191, 1996.
- 42) 大東憲二, 植下協 : 濃尾平野の地盤沈下地域を拡大させた平成 6 年異常湧水, 地下水学会誌, Vol.38, No.4, pp.279-294, 1996.

- 43) 小松登志子：土壤汚染と地下水汚染，土と基礎，Vol.50, No.537, pp.45-46, 2002.
- 44) 益田晴恵，伊吹祐一，殿界和夫：大阪府北摂地域浅層地下水の天然由来ヒ素による汚染メカニズム，地下水学会誌，Vol.41, No.3, pp.133-146, 1999.
- 45) 山村尊房：飲料水のヒ素問題に関する世界的関心と WHO の対応，地下水学会誌，Vol.42, No.4, pp.315-328, 2000.
- 46) 副島敬道，伊藤雅子，今村聡，寺尾宏：生分解性プラスチックを利用した硝酸性窒素汚染地下水の原位置浄化実証試験，土木学会論文集 G，Vol.63, No.1, pp.58-67, 2007.
- 47) 堀越壮一，飯島明宏，富岡淳，関順司，加藤政彦，小澤邦壽：群馬県における地下水硝酸性窒素濃度低下に関する考察，水環境学会誌，Vol.30, No.5, pp.283-286, 2007.
- 48) 富家和男，糸満尚貴，松山賢司，柿本竜治，川越保徳：熊本都市域における地下水中硝酸性窒素濃度の現状と地理情報システムおよび窒素安定同位体分析による窒素負荷要因の解明，水環境学会誌，Vol.34, No.1, pp.1-9, 2011.
- 49) S. Fiorenza, M. P. Suarez and H. S. Rifai : MTBE in Groundwater Status and Remediation, Journal of Environmental Engineering, No.128, pp.773-781, 2002.
- 50) K. D. Schmitt and I. Sherman : Effect of Irrigation on Groundwater Quality in California, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.113, No.1, pp.16-29, 1987.
- 51) M. Nishigaki : Geotechnical aspects of groundwater control, Soils and Foundations, Vol.50, No.6, pp.893-902, 2010.
- 52) 木佐貫徹，西垣誠，野田誠司，山下知之：東京周辺地盤における地下構造物の設計地下水位設定方法，土木学会論文集，No.721/VI-57, pp.167-176, 2002.
- 53) 西垣誠，木佐貫徹，野田誠司，渡邊雄二：地下水流動阻害対策のための許容地下水位変動量に関する研究，土木学会論文集，No.742/VI-60, pp.169-180, 2003.
- 54) 西垣誠，木佐貫徹，山下知之，渡邊雄二：地下水流動阻害対策工の設計方法に関する研究，土木学会論文集，No.749/VI-61, pp.49-62, 2003.
- 55) T. Shibasaki and Research Group for Water Balance : Environmental Management of Groundwater basins, Tokai University Press, pp.43-53, 1995.
- 56) 日本地下水学会編：地下水シミュレーション，技報堂出版，pp.22-28, 2010.
- 57) 藤縄克之：地下水数値計算法（2）1-1. 有限要素法による飽和浸透流の解析，地下水学会誌，Vol.32, No.2, p.103, 1990.
- 58) 藤縄克之：地下水数値計算法（6）1-5. 差分法の基礎，地下水学会誌，Vol.32, No.4, p.285, 1990.
- 59) 藤野和徳：地下水数値計算法（8）1-7. 境界要素法の基礎，地下水学会誌，Vol.33, No.1, p.43, 1991.
- 60) K. Akai, Y. Ohnishi, and M. Nishigaki : Finite element analysis of three-dimensional flows in saturated-unsaturated soils, Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, pp.227-239, 1979.
- 61) 菱屋智幸：移流分散解析入門 3. 地盤内の物質移動の支配方程式(その 2)，土と基礎，Vol.50, No.10(537), pp.57-58, 2002.
- 62) 長谷川琢磨，五十嵐敏文，田中靖治，土宏之，小野文彦：沿岸海底下の地下水流動状況に

- 関する数値解析的検討, 地下水学会誌, Vol.43, No.4, pp.289-300, 2001.
- 63) 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, 地下水学会誌, Vol.44, No.3, pp.199-211, 2002.
 - 64) 稲葉薫, 三枝博光: 深部地下水流動系を抽出するための後背地地形の影響を考慮した広域地下水流動解析, 地下水学会誌, Vol.47, No.1, pp.81-95, 2005.
 - 65) 與田敏昭, 阿部信晴, 三田村宗樹, 中屋眞司, 飯田智之: 大阪平野広域地下水シミュレーションモデルの構築, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2002 発表論文集, pp.1-8, 2002.
 - 66) 阿部信晴: 大阪平野の広域地下水流動モデルと涵養機構, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2007 発表論文集, pp.141-154, 2007.
 - 67) N. Naveh and U. Shamir: Managing Groundwater Levels in an Agricultural Area with Peat Soils, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.130, No.3, pp.243-254, 2004.
 - 68) P. K. Majumdar, S. Ram and P. R. Rao: Artificial Recharge in Multiaquifers of a Mountainous Watershed, Journal of Hydrologic Engineering, Vol.14, No.3, pp.215-222, 2009.
 - 69) 谷中隆明, 永野多美雄, 山崎興樹, 水谷宣明: 新潟県六日町盆地の地下水流動, 地下水学会誌, Vol.31, No.3, pp.143-153, 1989.
 - 70) 谷中隆明, 前川統一郎, 永野多美雄: 準三次元モデルによる新潟県六日町の地盤沈下予測, 地下水学会誌, Vol.31, No.3, pp.155-163, 1989.
 - 71) 坂井晃, 三浦哲彦, 陶野郁雄, 八谷陽一郎: 季節的な地下水揚水に伴う地盤沈下, 地下水学会誌, Vol.38, No.4, pp.269-278, 1996.
 - 72) 坂井晃・三浦哲彦, 八谷陽一郎, 陶野郁雄: 佐賀平野における地下水位の季節的変動による広域地盤沈下とその管理手法, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.135-146, 2002.
 - 73) 藤縄克之: 灯油に汚染された不圧帯水層における水理地質定数の経時変化について, 地下水学会誌, Vol.42, No.4, pp.355-371, 2000.
 - 74) 石森洋行, 勝見武, 深川良一: 浸透流解析に基づく反応透過壁工法の性能評価とその最適設計法の提案, 土木学会論文集, No.757/ III -66, pp.203-220, 2004.
 - 75) 渡辺俊一, 江種伸之, 平田健正, 横山尚秀, 山里洋介, 森田昌敏: 茨城県神栖市で起きた有機ヒ素化合物による地下水汚染機構の解明に関する数値解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, pp.383-394, 2011.
 - 76) 江種伸之, 姜学妍, 峠和男, 西田憲司, 平田健正: 地下水揚水を併用した原位置封じ込めによる土壌汚染の拡散防止効果, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, pp.297-304, 2011.
 - 77) 西垣誠, 白石知成, 猪瀬二郎, 河村志朗: 地下鉄建設による多層地盤での複数地下水位変動の3次元浸透解析による予測, 地下水学会誌, Vol.32, No.4, pp.231-240, 1990.
 - 78) 緒方隆哉, 安田秀幸, 川原幸男: 福岡市地下鉄3号線開削区間における地下水保全対策工, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2001 発表論文集, pp.133-138, 2001.
 - 79) 茂利優一, 中野将宏, 原田博志, 西垣誠, 長屋淳一: 第二京阪道路建設工事における地下水流動阻害に関する検討, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2005 発表論文集, pp.55-62, 2005.

第2章 京都盆地の地形・地質と地下水利用

2.1 はじめに

地下水が賦存する地形は、丘陵、段丘、扇状地、氾濫原、後背湿地などが挙げられる。また、地下水は亀裂の多い岩の中にも賦存する。地下水は、一般に広い範囲にわたって連続しており、非常にゆっくりとした速度で地層の中を移動している。地下水の水系は、降雨や地表水の地下浸透によって地下水が「涵養」され、それが地層の中を「流動」し、最終的に海洋や地表部へと「流出」する。そのため、地下水の流動場を再現するにあたり、対象地域の地形および地質構造を把握することは、必要不可欠なことである。また、地下水流動場は、揚水等の人為的な影響により、地下水の流れが大きく変わる可能性があることから、地下水の利用状況について十分に把握しておく必要がある。本研究の対象地域は、京都盆地に位置する、地下水を上水道用の水源等に利用している京都府城陽市および八幡市や、日本酒の名産地である京都市伏見区である。本章では、地下水シミュレーション解析を行う上で必要となる、それぞれの地域における地形および地質構造について調べ、考察した。また、対象地における地下水の利用状況や揚水量について調べ、地下水利用実態について分析した結果について述べる。

2.2 京都盆地の地形・地質ならびに水理地質構造

京都盆地は南北約40km、東西6～13kmの南北性の構造を有する内陸盆地である¹⁾。盆地は、北を丹波高地によって、東部の近江盆地とは比叡山、音羽山、醍醐山山塊によって、西部の亀岡盆地とは愛宕山、小塩山山塊によって隔てられている。近畿三角帯に位置する京都盆地は、上下変位の大きい逆断層性の活断層が密に発達し、盆地東西には活断層によって、山地と平野との境に明瞭な地形境界が存在する。京都盆地の活断層としては、盆地の東縁には滋賀県域に端を発する花折断層が吉田山近傍まで伸びており、その南方延長には桃山断層が続いていることが確認されている。京都盆地と山科盆地の境界には花山―勸修寺断層が、山科盆地の東側醍醐山地との境界には黄檗断層群が確認されている。一方、盆地西縁は三峠・京都西山断層系の南端がかかり、嵐山付近から長岡京市にかけて堅原断層として現れることが確認されている。また、その西側には光明寺断層、走田断層、金ヶ原断層、天王山断層など、複数の断層群が確認されている²⁾。宇治川沿いには、宇治川断層³⁾も確認されている。京都盆地の大部分は、約100万年前の断層を伴う曲降運動によって、沈降を開始した⁴⁾。京都盆地の地質構造は比較的単純で、大局的には、古生層か花崗岩の基盤の上に大阪層群を主体とする洪積層が厚くのり、その上を沖積層が薄くおおっている⁵⁾。なお、本論文では、完新世の層を沖積層とし、更新世の層を洪積層とする。

図2-1は、京都盆地の地質図を示している⁶⁾。図に示されるように、京都盆地の大部分は沖積層が堆積した平野であり、研究対象地域となる京都市伏見区や、城陽市、八幡市にも沖積平野が広がる。盆地の北部と東部には中・古生層、盆地の南部の地域と比叡山から如意ヶ岳に挟

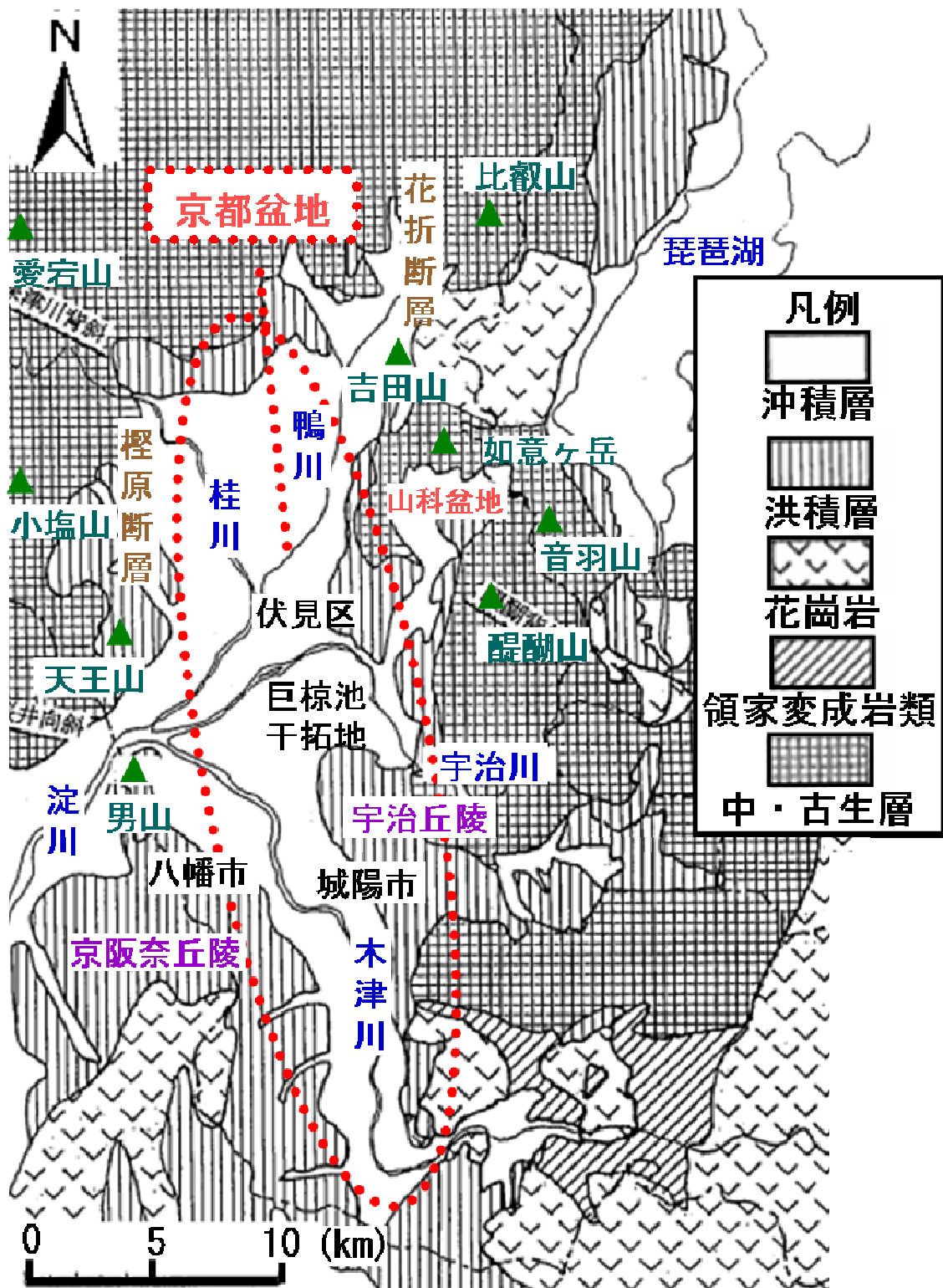


図 2-1 京都盆地の地形図 (文献 6 に加筆)⁶⁾

まれた山地部においては花崗岩，また，盆地南部の一部には，領家変成岩類が分布し，それぞれ基盤岩を形成している．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⁷⁾．すなわち，京都盆地の地層は南部で厚く，約 200 万年前以降に堆積した地層の層厚が最大 800m もの厚さであるのに対し，北部では 100 万年前以降に堆積した地層の層厚が約 300m である．盆地の北部と南部の境は，宇治川沿いに存在する，地下に最大 150m 程度の高度差のある宇治川断層により分けられている．この断層により，大阪層群や，さらに新しい地層が南北において上下にずれている⁸⁾．

中・古生層は，上位に石炭紀後期～三畳紀の堆積物で，ジュラ紀中・後期に付加した丹波帯Ⅱ帯と，下位に三畳紀～ジュラ紀の堆積物で，ジュラ紀後期に付加した丹波帯Ⅰとが積み重なって構成されている．丹波帯の堆積岩は，全体として下位から，塩基性火山岩，遠洋性チャート，その上に厚いタービダイトや，浅海成層が重なって形成されている．領家帯は，高温低圧型の雲母片岩，片麻岩などの変成岩である．この変成岩の原岩は主としては，ジュラ紀の砂岩，泥岩，塩基性火山岩類であり，丹波帯の堆積物と似ている．近畿地方では，変成作用の時代は白亜紀で，8000～7000 万年前後（白亜紀後期）になるとされている．また，ここには大量の花崗岩が貫入して，広い範囲に接触変成作用が起こって形成された地帯であり，京都盆地においては，南部の地域に分布している．また，比叡山から如意ヶ岳に挟まれた山地部における花崗岩は，1 億～6500 万年前（白亜紀後期）の年代に形成された山陽帯の花崗岩で，北白川花崗岩とも呼ばれている．一方，京都盆地の南部に分布する花崗岩は，領家帯の花崗岩である⁹⁾．これらの基盤岩類は不透水層と考えられ，この基盤岩類に囲まれた凹部には，洪積層である大阪層群と，その上には沖積層が分布している．京都盆地に見られる大阪層群は，第四紀前・中期に堆積し，半～未固結の粘土，砂，砂礫からなる河・湖成層である．大阪層群の地層中には，Ma2～Ma6 の 5 枚の海成粘土層が挟まれていることから，氷河性海面上昇による，海水が浸入した形跡がある．また，対比に有効な鍵層となる火山灰が挟まれ，ピンク(0.99±0.03Ma)，アズキ(0.85±0.03Ma)などは絶対年代が測られている．図 2-2 は，京都盆地の地形・地質編年についての層序図を示している¹⁰⁾．

代	紀	世	期	地層	地形面	年代(Ma)		
新生代	第四紀	完新世			扇状地・氾濫源Ⅱ面	0.0117		
					扇状地・氾濫源Ⅰ面			
		更新世	後期	低位段丘層	L3	低位段丘3面	0.126	
					L2	低位段丘2面		
					L1	低位段丘1面		
					中位段丘層	M2		中位段丘2面
			中期	高位段丘層	M1	中位段丘1面	0.300	
					H	高位段丘面		
					大阪層群	上部		丘陵面
						中部		
		下部						
前期				0.781				
	新第三紀 と 古第三紀				2.58			
中生代 と 古生代	白亜紀		花崗岩		655			
	ジュラ と ペルム紀		丹波帯層群 領家変成岩類		140			
					290			

図 2-2 京都盆地の地形・地質編年（文献 10 に加筆）¹⁰⁾

2.2.1 城陽市および八幡市の地形・地質

城陽市は、京都市と奈良市の間のとこに位置する。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つの河川に挟まれている。城陽市域は、東西9.0km、南北5.4km、総面積32.74km²であり2013年1月現在、人口78,625人、世帯数は30,130世帯である。八幡市は、城陽市の西側に隣接しており、北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、その他の地域は概ね平地で形成されている。八幡市域は、東西6.7km、南北8.5km、総面積24.37km²であり、2013年1月現在、人口72,945人、世帯数は31,485世帯である。

図2-3は、城陽市と八幡市における地形分類図を示す¹¹⁾。図に示されるように、城陽市は、東から西に向けて山地や丘陵、そして扇状地が広がり、扇状地が分布している地域の所々に、上位・中位・下位の段丘が見られ、低地においては氾濫原が木津川まで広がる。木津川沿いには、自然堤防が所々に分布している。八幡市は、西から東に向けて山地や丘陵、そして扇状地が広がり、広門から本郷の辺りには、中位の段丘が見られ、低地においては氾濫原が木津川まで広がる。木津川沿いには、城陽市と同様に、自然堤防が所々に分布している。

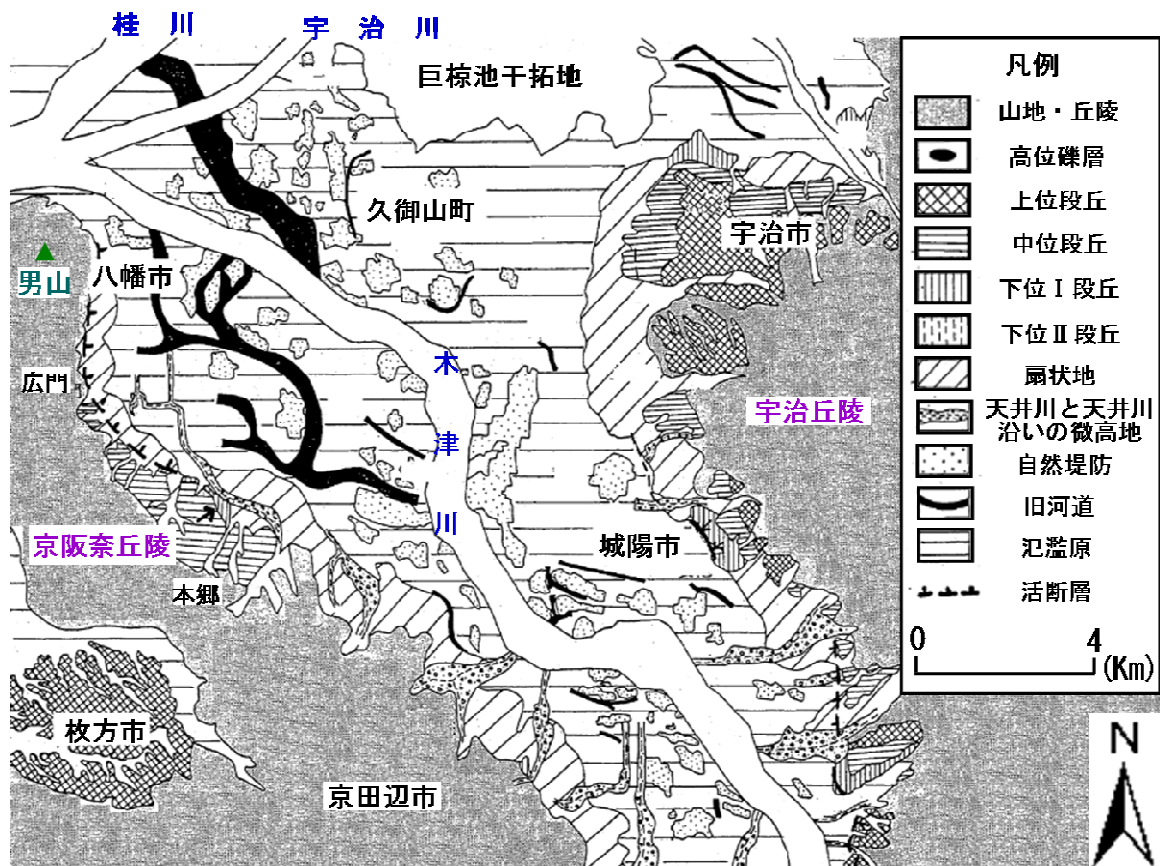


図2-3 城陽市と八幡市の地形図 (文献11に加筆)¹¹⁾

2.2.2 京都市伏見区の地形・地質

京都市伏見区は、京都市の最南部に位置し、北西部からは桂川が、北部からは鴨川が桂川と途中合流し、東部からは琵琶湖を源流とする宇治川が、男山と天王山に挟まれた狭隘部に向かって流れている。伏見区は、東西 15.0km、南北 8.0km、総面積 61.62km²であり 2012 年 10 月現在、人口 283,212 人、世帯数は 124,994 世帯である。図 2-4 は、京都市伏見区の地形図を示している¹²⁾。図に示されるように、北東から稲荷山や大岩山といった山地が並び、南西に下るにつれて凹凸が顕著な丘陵地、高位段丘(H 面)・低位段丘(L 面)、扇状地を経て、平坦地へと広がる。

地質構造は、周辺の山地は丹波層群から構成され、主にチャートや泥岩・頁岩からなる。丘陵地は、前・中期更新世の約 50～100 万年前の、未固結の大阪層群から構成され、砂礫・粘土の互層を成している。また、大阪層群の上には、桃山礫層と呼ばれる風化した砂利の層がのっている。各段丘の具体的な特徴として、高位段丘構成層は厚さ 2～5m 程度のクサリ礫を含む風化した砂礫層で、大阪層群を不整合で覆っている¹³⁾。中位段丘構成層(M 面)は対象地では見られない。低位段丘構成層は、一般的に厚さ 1～5m の砂礫層を主体とする。平坦地は、南部の一部を除く地域に後背湿地が広がり、南部に位置する河川の合流地点は自然堤防や盛土地で構成され、主に砂礫・砂と粘土の互層を成す。

京都市伏見区内には、17 の酒造会社が現在も地下水を利用して、酒造りを行っており、それら酒造会社には、複数の揚水井を保有している。酒造会社が密集する地域の水理地質構造を把握するため、酒造会社が保有する揚水井や観測井のボーリングデータを基に、帯水層と難透水層の分布を検討した。検討結果の一例として、図 2-5 は、図 2-4 の A-A'断面の位置における地質断面図を示している。地表面から砂・粘土・礫(Ascg 層)から成る沖積層、その下方に 3 層の洪積の礫層(Dg1 層～Dg3 層)と、洪積の粘土層(Dc1 層～Dc3 層)が互層を成し、それぞれ帯水層と難透水層を構成している。これより深い層はボーリングデータが乏しいため、洪積の礫・粘土層(Dgc4 層)とし、一つの地層として扱っている。また、酒造会社が集中する場所においては、図 2-5 に示されるような複数の地質断面図を作成することで、難透水層(Dc1 層～Dc2 層)の連続性が非常に良いことを確認した。なお、Ascg 層は沖積層全般を、Dg 層は洪積砂礫を、Dc 層は洪積粘土を表し、上層から順に 1 層、2 層とした。

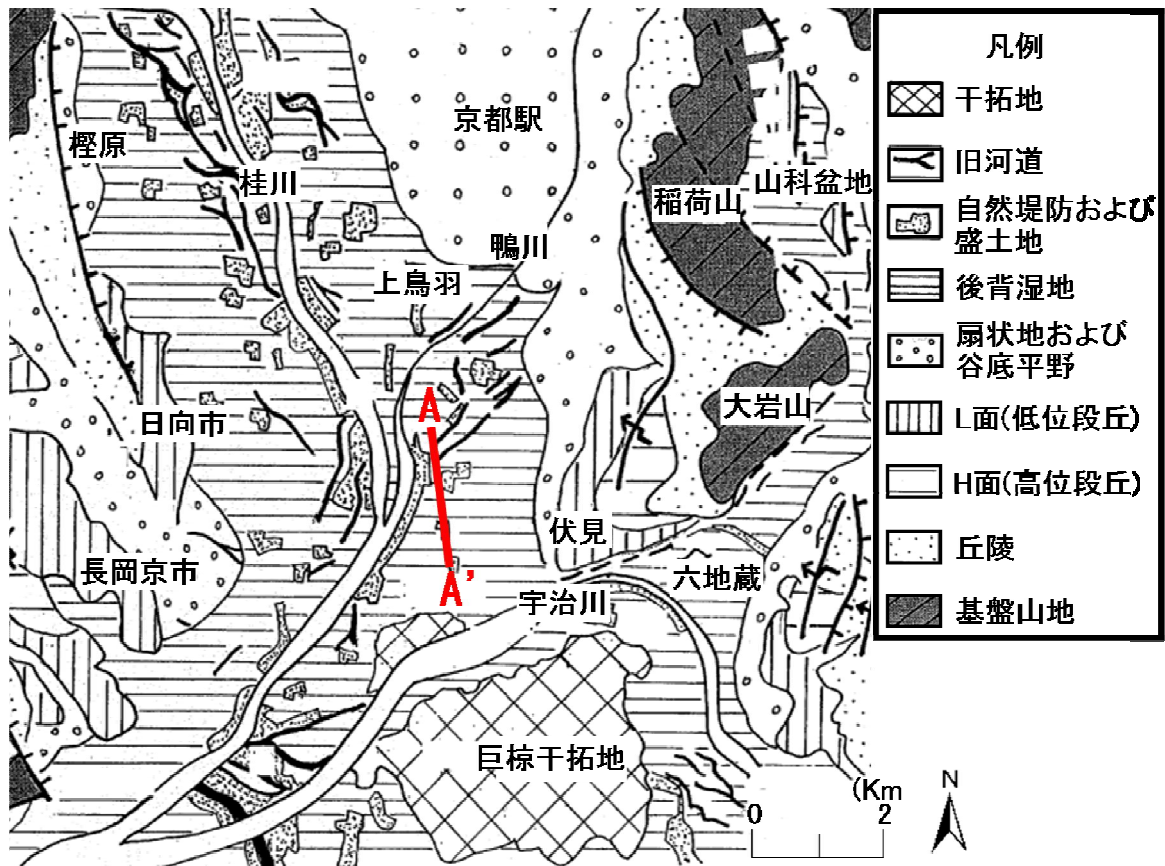


図 2-4 京都市伏見区の地形図 (文献に加筆)¹²⁾

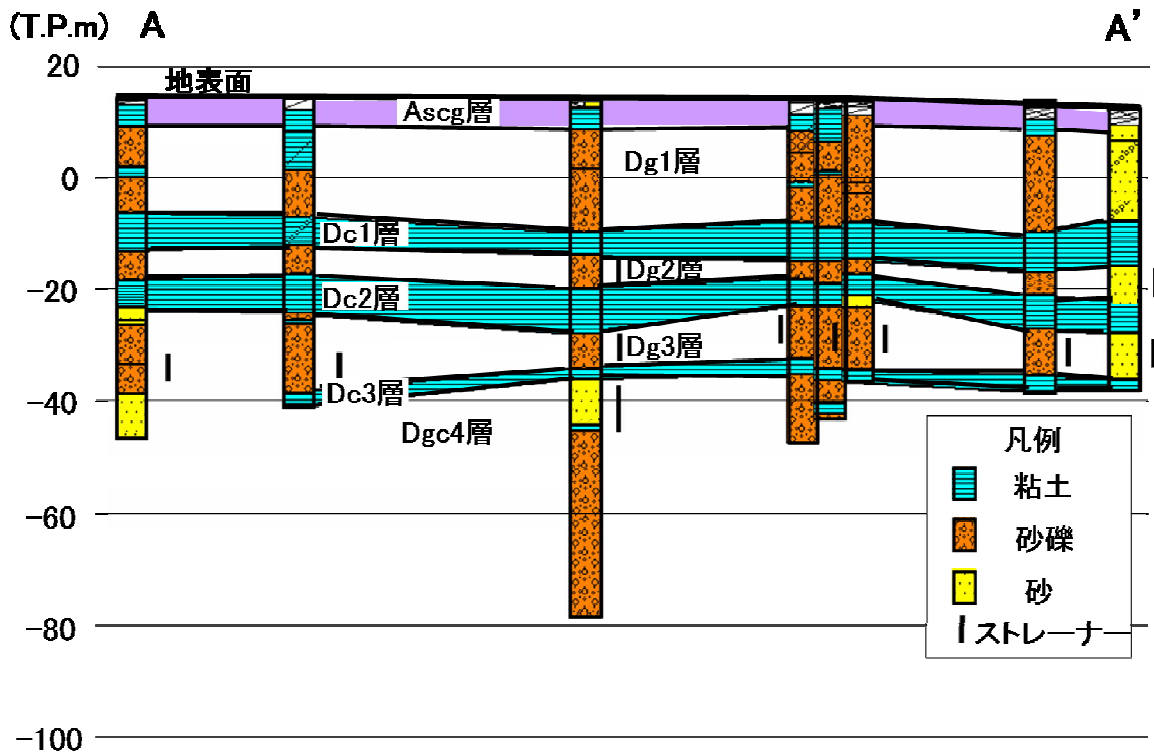


図 2-5 地質断面図(A-A')

2.3 京都盆地の地下水利用実態

2.3.1 城陽市の地下水利用実態

城陽市は、南山城地方において、地下水利用度が最も高い地域である。図 2-6 は、城陽市と八幡市の浄水場の揚水井と、観測井の位置を示している。城陽市の上水道事業は、1962 年に上水道設備創設事業の認可を受けている。人口の増加や市民の生活水準の向上等に伴い、増大する水需要に対応するため、2 次におよぶ拡張事業を実施してきた。第 1 次拡張事業(S43.3~47.3)では主に配水池を整備し、第 2 次拡張事業(S47.3~)では浄水場等の整備を行ってきた。元来、この地域は豊富な地下水があったためにその地下水に注目し、1971 年に第 1 浄水場、1973 年に第 2 浄水場、1978 年に第 3 浄水場に揚水井が設置された。また、各浄水場において、隣接する揚水井の隔離距離は、城陽市の第 1 浄水場で平均 680m、城陽市の第 2 浄水場で平均 280m、城陽市の第 3 浄水場で平均 380m の井戸間隔で設置されている。

図 2-7 は、各浄水場における地下水の揚水量と河川水の取水量の推移、ならびに人口を示している。図に示されるように、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 年頃までは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減少してきたのは、2003 年からである。城陽市の 2011 年における上水道用の総取水量は 880 万 m^3 /年であり、上水道用水の約 82%である 718 万 m^3 /年を地下水が占めている。また、人口と取水量との関係性は、人口が増えると取水量も増え、人口が減ると取水量も減ることが分かる。

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 年と比べて約 35 万 m^3 /年揚水量を増やしたが、それ以降減少している。2011 年における第 1 浄水場の総揚水量は約 84 万 m^3 /年で、依存率は 12%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。2011 年における第 2 浄水場の総揚水量は約 184 万 m^3 /年で、依存率は 26%程であり、第 1 浄水場と比べると依存率は高い。第 3 浄水場は各揚水井の揚水量が他の浄水場と比べて一番多く、2011 年における第 3 浄水場の総揚水量は約 451 万 m^3 /年で、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。

民間の井戸について、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 2-8 は、用途別揚水量の割合を示している。また、図 2-9 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 1,000 m^3 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。これらの結果により得られた、1 日あたりの揚水量から年間に換算すると、民間井戸の総揚水量は、およそ 2,500 万 m^3 となる。一方、上水道用の揚水井は、深度約 100m~300m の地点にストレーナーが設置

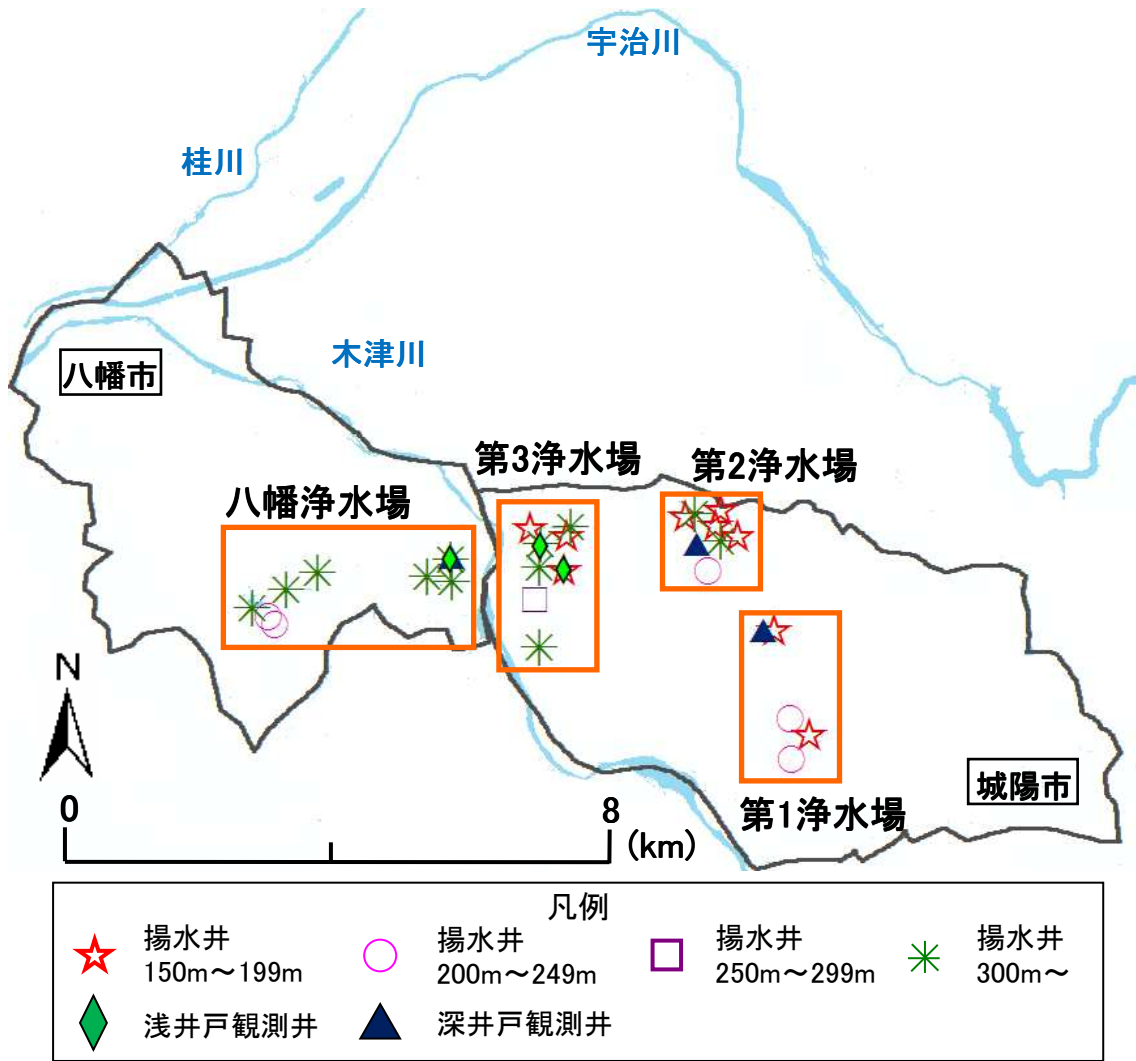


図 2-6 城陽市と八幡市の揚水井と観測井の位置

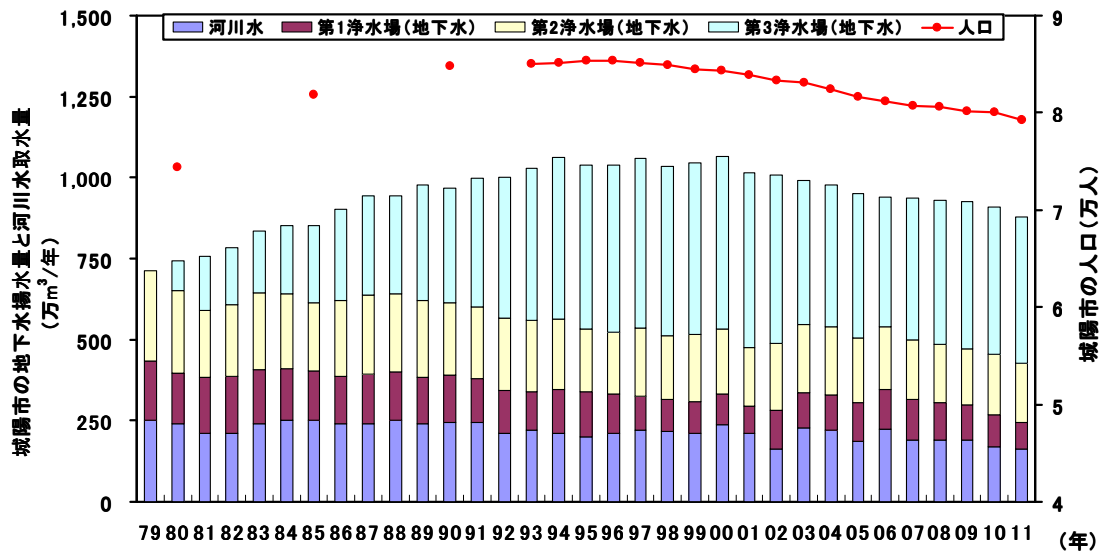


図 2-7 城陽市における上水道の年間総揚水量と河川水の取水量

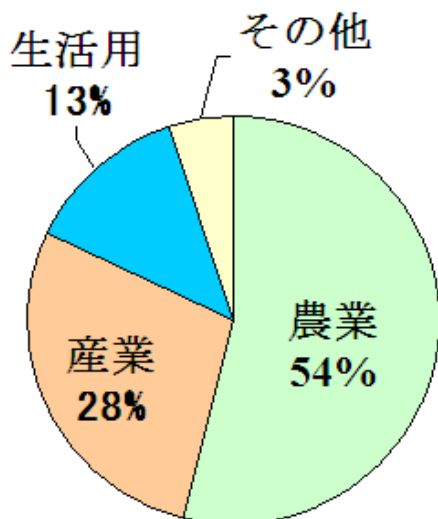


図 2-8 城陽市の民間井戸集計結果による用途別揚水量の割合

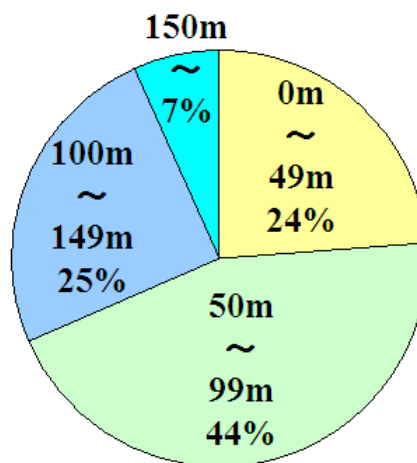


図 2-9 城陽市の民間井戸集計結果による深度別の割合

されているため、民間の揚水量が、上水道用の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 300m^3 程であり、単体の上水道用の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。すなわち、3 割近くの民間の井戸が上水道用の揚水井と同深度の位置にストレーナーが存在していても、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、上水道用の揚水量に対しての影響は少ないと考えられる。

2.3.2 八幡市の地下水利用実態

八幡市における上水道事業は、1956 年に上水道設備創設事業の認可を受け、現在まで数々の上水道事業が行われてきた。美濃山浄水場では、1980 年に 1 号井と 2 号井の揚水を開始し、これに引き続いて 1982 年には 3 号井と 4 号井、1984 年には 5 号井、1987 年には 6 号井、1988 年には 7 号井、と合計 7 本の揚水井が設置された。そして、2003 年 1 月には新たな 8 号井が掘削された。八幡市の浄水場の、隣接する揚水井の離隔距離は、平均 520m である。

図 2-10 は、八幡市における地下水の揚水量と河川水の取水量の推移、ならびに人口を示している。図に示されるように、1994 年までの都市化による人口増加に伴う水需要の増加により、地下水資源への依存度は 2000 年頃まで年々高まっていた。しかし、1994 年頃から 2000 年頃にかけて人口は減少し、その後の人口は横ばいである。地下水の揚水量は、2001 年以降減少傾向にある。八幡市の 2011 年度における上水用の総取水量は 770 万 m^3 /年であり、上水道用水の約 43% である 334 万 m^3 /年を地下水が占めている。

民間の井戸については城陽市と同様に、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 2-11 は、用途別揚水量の割合を示している。また、図 2-12 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 $1,000\text{m}^3$ 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。これらの結果により得られた 1 日あたりの揚水量から、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。一方、上水道用の揚水井は、深度約 150m～300m の地点にストレーナーが設置されていることから、民間の揚水量が及ぼす上水用の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、単体の上水用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。すなわち、1 割近くの民間の井戸が上水道用の揚水井と同深度の位置にストレーナーが存在していても、民間の井戸からの過剰な揚水による、上水道用の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。

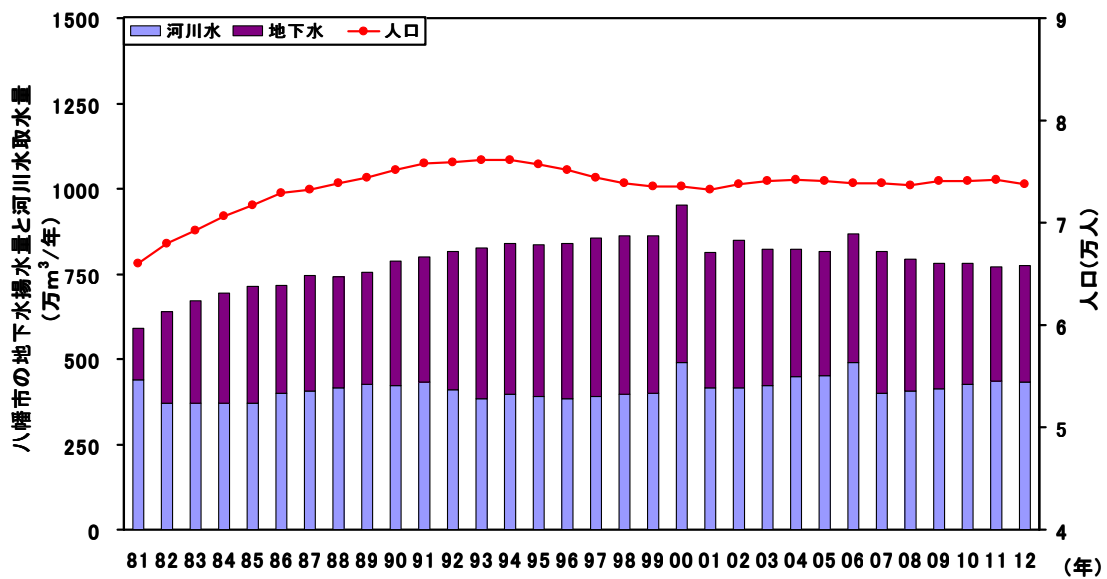


図 2-10 八幡市における上水道の年間総揚水量と河川水の取水量

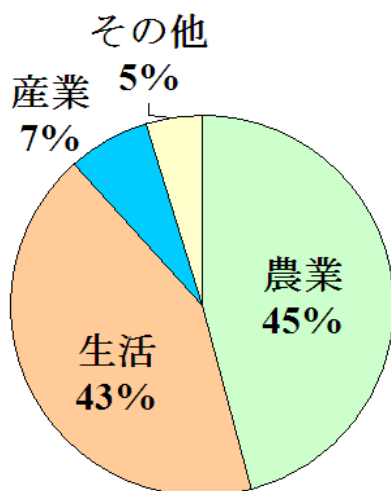


図 2-11 八幡市の民間井戸集計結果による用途別揚水量の割合

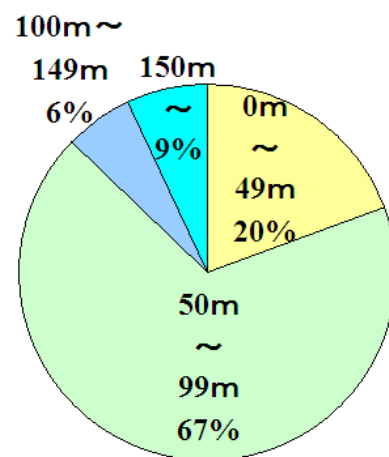


図 2-12 八幡市の民間井戸集計結果による深度別の割合

2.3.3 伏見区の地下水利用実態

地下水は、京都の伝統産業を長年に亘って支えてきた、非常に重要な資源の一つである。良質の酒を造るために地下水が用いられていることが多い。伏見や灘(神戸市)をはじめ、日本酒の84%は地下水に依存し¹⁴⁾、酒造りには欠かせない貴重な資源である。図2-13は、伏見区の酒造会社が集中する場所の周辺における、揚水井と観測井の位置を示している。図に示されるように、対象地は4km²ほどの地域に酒造会社が所有する約50本の井戸が密集し、地下水の利用が盛んな地域である。隣接する揚水井の離隔距離は、平均85mと、非常に密集して設置されていることが分かる。

伏見における酒造用井戸については、過去何度か調査されている。ただし、昭和30年代前半までは、Ascg層内にある浅層地下水の使用が多く、昭和40年頃までに調査された井戸は、いわゆる浅井戸と呼ばれるものがほとんどであった。昭和3年の記録によれば、当時の井戸の深さは、そのほとんどが4~6mで、深いものでも13~14mであった¹⁵⁾。そこで、現在の地下水利用状況と対比するため、H22年の1月から12月の伏見区域の酒造会社から提供を受けた、47本の揚水井の情報について整理した。その結果、Ascg層を除く各帯水層の位置において、ストレーナーが存在していることが分かった。酒造会社が集中する場所では、地表面から深さ0m~5mの層がAscg層、5m~20mの層がDg1層、25m~30mの層がDg2層、35m~50mの層がDg3層、そして、55m以深の層がDgc4層である。

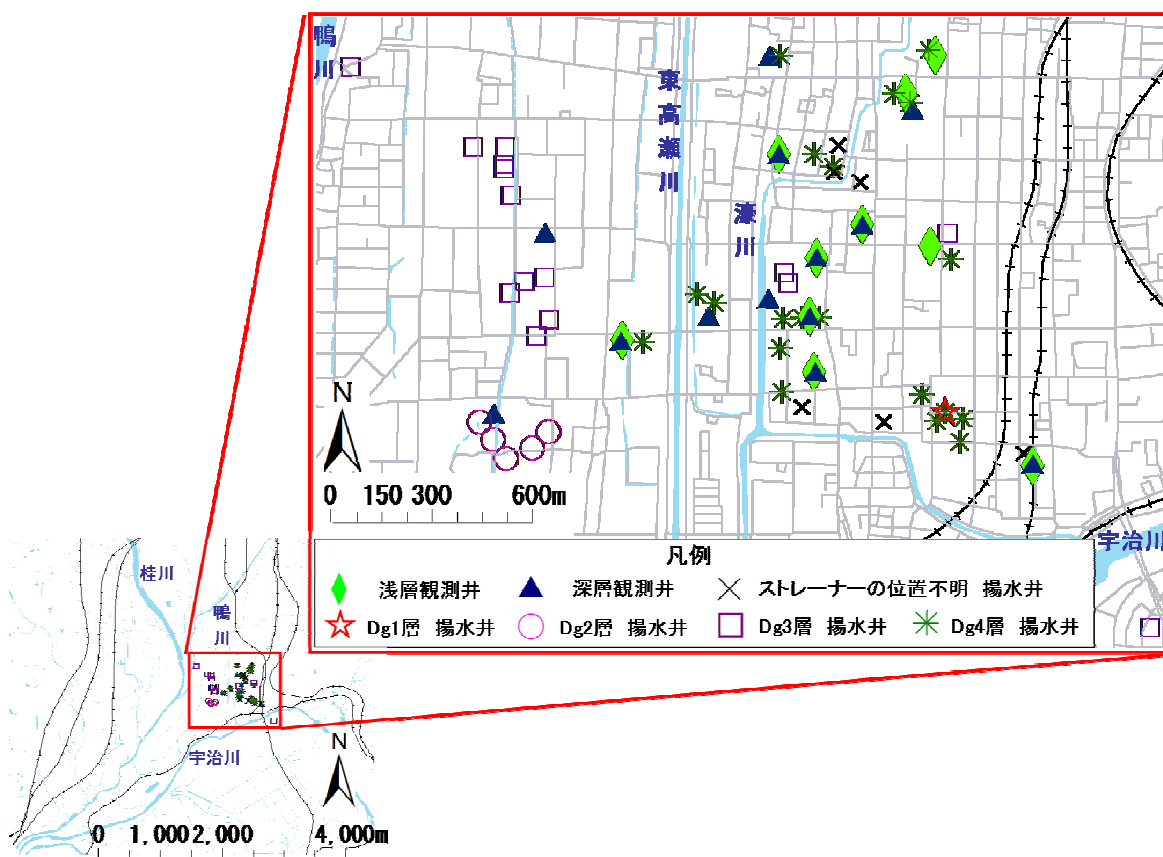
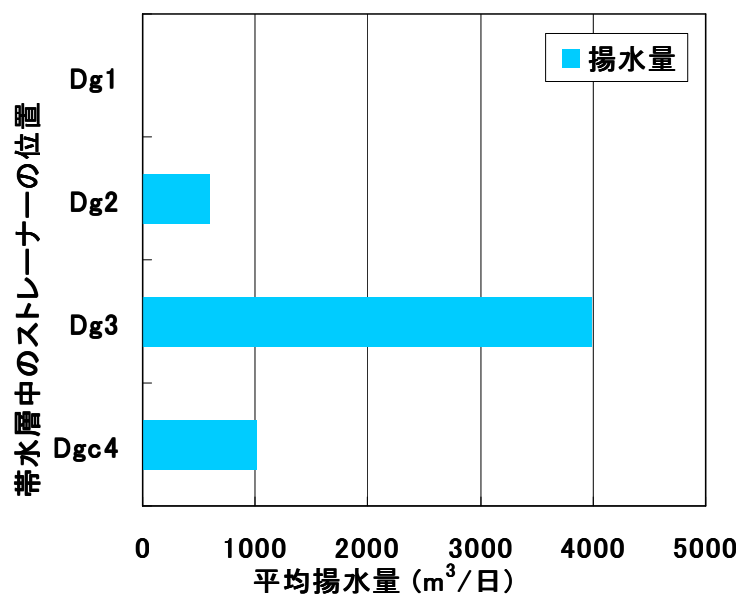


図2-13 京都市伏見区の揚水井と観測井の位置

図 2-14 は、H22 年における酒造会社の揚水している帯水層別の揚水量を示している。図 2-15 は、酒造会社の揚水井戸のストレーナーの長さの割合を、帯水層ごとに示している。図に示されるように、この地域では Dgc4 層にストレーナーの設置されている割合が多い。次いで Dg3 層にストレーナーの設置されている割合が多い。Dg1 層や Dg2 層には、ストレーナーの設置されている割合が少ない。特に、Dg1 層にストレーナーを設置している箇所は、一つの揚水井のみである。ここで、各帯水層の 1 本あたりの一日の揚水量をまとめる。Dg1 層にストレーナーを設置している揚水井は 1 本で、一日当たりの揚水量は、ほとんど 0m^3 に近い。Dg2 層にストレーナーを設置している揚水井は 5 本で、一日当たりの揚水量は、約 100m^3 である。Dg3 層にストレーナーを設置している揚水井は 13 本で、一日当たりの揚水量は、約 300m^3 である。Dgc4 層にストレーナーを設置している揚水井は 20 本で、一日当たりの揚水量は、約 50m^3 である。

以上のことから、現在ではすべて 1~2 層以上の難透水層下の、被圧地下水に依存していることが分かる。また、ストレーナーの設置されている割合が多いのは Dgc4 層であるが、地下水が最も多く揚水されている層は Dg3 層である。現在では、酒の原水を目的として Dg1 層から揚水されることはほとんどない状況であることから、昭和 40 年代より以前の浅層の地下水を利用していた状況とは異なる。



出典：各酒造会社から H22 年の揚水量を集計したデータを参照

図 2-14 酒造会社の揚水している帯水層別の揚水量

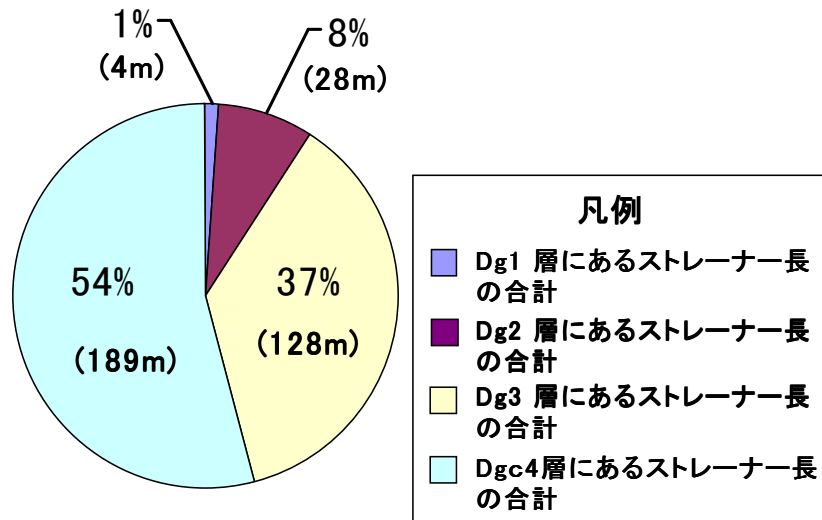


図 2-15 酒造会社の揚水井戸集計結果によるストレーナー深度と長さの割合

2.4 まとめ

本章では、京都盆地の地形および地質構造を把握するため、既存の資料をまとめて考察した。また、対象地における地下水の揚水量や、地下水を揚水している帯水層について分析した。京都盆地は、盆地構造のため、豊富な地下水資源が賦存している。各地域において、揚水量や揚水井の離隔間隔、また利用用途が異なることが分かった。城陽市および八幡市では、上水用を目的として地下水を利用し、各揚水井の離隔間隔は離れているが、1本当たりの揚水量は非常に多い。揚水している層は100m以深と、非常に深い層から揚水していることが分かった。一方、京都市伏見区では、酒造を目的として地下水を利用し、各揚水井の離隔間隔は近接しているが、1本当たりの揚水量は少ない。揚水している層は30m以深と、比較的浅層から揚水していることが分かった。本研究では、対象地の地形および地質構造を把握した結果を基に、地下水位性状の把握や、地下水流動場を再現する際に活用した。

参考文献

- 1) 地下水要覧編集委員会編：地下水要覧，山海堂，pp.712-716, 1988.
- 2) 三村衛，竹村恵二，塩野計司，高野伸栄，谷宏，松岡延浩：京都盆地の構造と地震による地盤災害，自然災害科学，Vol.22, No.3, p.209, 2003.
- 3) 尾池和夫，岡田篤正，竹村恵二，植村善博，吉岡敏和，松井和夫，古澤明，園田玉紀，杉森辰次，梅田孝行，斉藤勝：京都盆地の地下構造を南北に分ける宇治川断層の第四紀断層活動，活断層研究，No.24, pp.139-156, 2004.
- 4) 植村善博：変位地形と地下構造からみた京都盆地の活断層，京都歴史災害研究，Vol.2, pp.7-8, 2004.
- 5) 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, p.18, 1975.

- 6) 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.
- 7) 京都市: 平成 10 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, p.21, 2001.
- 8) 宮地良典, 水野清秀, 尾崎正紀: 京都盆地の第四紀地質, 地質ニュース, No.614, p.44, 2005.
- 9) 太田陽子, 成瀬敏郎, 田中眞吾, 岡田篤正: 日本の地形 6 近畿・中国・四国, 東京大学出版会, pp.11-13, 2009.
- 10) 植村善博: 変位地形と地下構造からみた京都盆地の活断層, 京都歴史災害研究, Vol.2, pp.7-10, 2004.
- 11) 植村善博: 京都の地震環境, ナカニシヤ出版, pp.92-93, 2000.
- 12) 植村善博: 京都の地震環境, ナカニシヤ出版, pp.55-61, 2000.
- 13) 聖母女学院短期大学伏見学研究会: 伏見学ことはじめ, 思文閣出版, pp.2-36, 1999.
- 14) 地盤工学会編: 地下水を知る, 丸善株式会社, pp.10-11, 2008.
- 15) 小谷輝人: 伏見の地下水 (特に酒造用井戸を中心として), 酒研会報, No.23, pp.1-5, 1984.

第3章 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

3.1 はじめに

地下水資源の有効利用と適正な維持管理には、正確な地下水位性状の把握と、地下水障害を回避した地下水利用計画を行っていく必要がある。地下水利用が盛んな地域において、無作為な揚水を続けることは、地下水資源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、群井が及ぼす影響は非常に大きいと考えられる。そのような地下水障害を防止するには、長期的に地下水位を観測することで、水位変動の傾向や水位変動に及ぼす要因を把握し、それらの観測データを分析し、地下水の維持管理を行っていく必要がある。また、経時的に変動する水位や揚水による水位変動に及ぼす影響を、シミュレーション解析で解明できれば、最適な地下水利用計画を行う上で有用である。

本研究は、複数の揚水井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部に位置する最も揚水量の多い城陽市と八幡市を対象とした。本章では、1本当たりの揚水量が比較的が多い上水道用の揚水井を対象とし、複数の揚水井からの揚水が周辺の水位変動に及ぼす影響を、定量的に検討した¹⁾。本章は、最初に上水用水源として利用している揚水井や観測井の地下水位の変動特性を、長期にわたる現位置計測により解明した。次に、揚水による水位変動を定量的に解明するための、3次元地質構造モデルを作成した。最後に、そのモデルを用いてシミュレーション解析を行い、経時的に変動する水位を再現し、観測値と解析値との整合性について検討した。

3.2 城陽市・八幡市における上水道用揚水井と観測井の地下水位変動

3.2.1 現位置計測に関する概要

研究対象地では、多くの揚水井や観測井があり、生活用水、農業用水、工業用水といったさまざまな目的で地下水を利用している。本研究で主に対象とする、上水道の水源として利用している揚水井は27本ある。城陽市には、3つの浄水場に分類され、第1浄水場に4本、第2浄水場に7本、第3浄水場に8本あり、合計19本の揚水井がある。八幡市における浄水場には、8本の揚水井がある。図3-1は、城陽市と八幡市における上水道用の揚水井と観測井の位置を示している。図3-2は、城陽市の上水道用の揚水井と観測井の位置を示している。図3-3は、八幡市の上水道用の揚水井と観測井の位置を示している。表3-1～表3-4は、各浄水場の各揚水井間の離隔距離を示している。各浄水場では、揚水井をさく井した時に揚水試験²⁾を行い、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³⁾。すなわち、適正揚水量にしたがって揚水すれば、水位低下によって引き起こされるポンプ揚程の増加や、ポンプの更新などによる揚水費用の急増や、あるいは地盤沈下や塩水化などの障害を軽減できると考えられる⁴⁾。

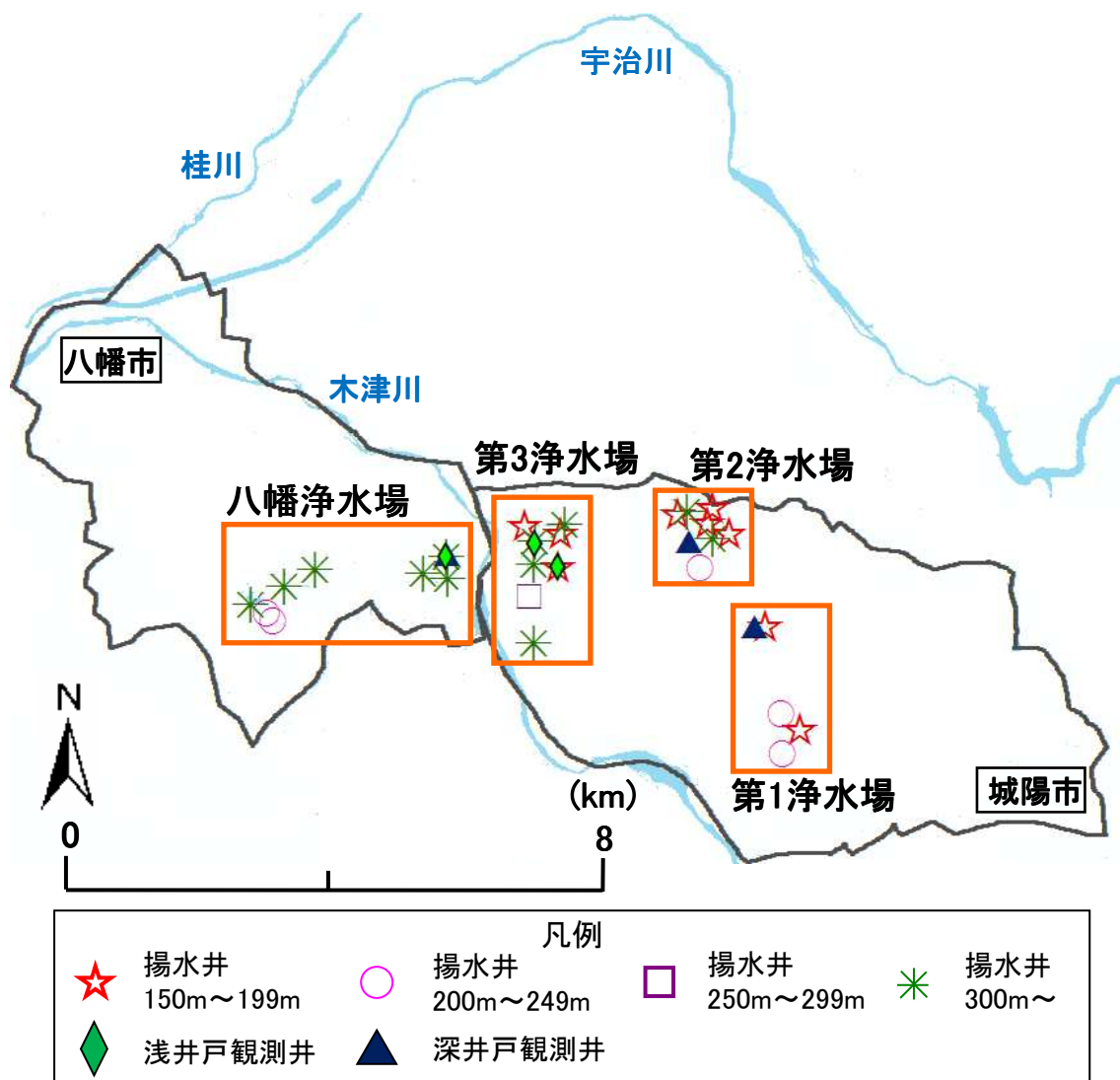


図 3-1 全域における揚水井と観測井の位置

観測井は、地下水位の測定を行うもので揚水は行われぬ。地下水の水位変動は、周囲の井戸からの揚水による影響、気象条件などが現れやすいことから、観測井の水位を測ることによって、帯水層内の地下水位や透水性、貯留性、あるいは、地下水涵養状態を的確に把握することができる。深度による明確な区別はないが、観測井には浅井戸観測井と深井戸観測井がある。そこで、対象地においては、井戸深度 60m より浅い井戸を浅井戸、それ以深の井戸を深井戸と定義した。城陽市は、平坦地に 2 本の浅井戸観測井があり、丘陵地に 2 本の深井戸観測井がある。八幡市は、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ある。

現位置計測では、揚水井と観測井における、それぞれの水位を測定した結果についてまとめた。揚水井においては、揚水が水位変動に及ぼす影響を解明するために、長期的に観測した水位と、各揚水井で揚水している揚水量との相関性について検討した。観測井では、各層における水位の変動特性と、その水位変動に影響を及ぼす要因を解明するため、浅層の水位と深層の水位を測定し、降雨量および対象地の総揚水量との相関性について検討した。

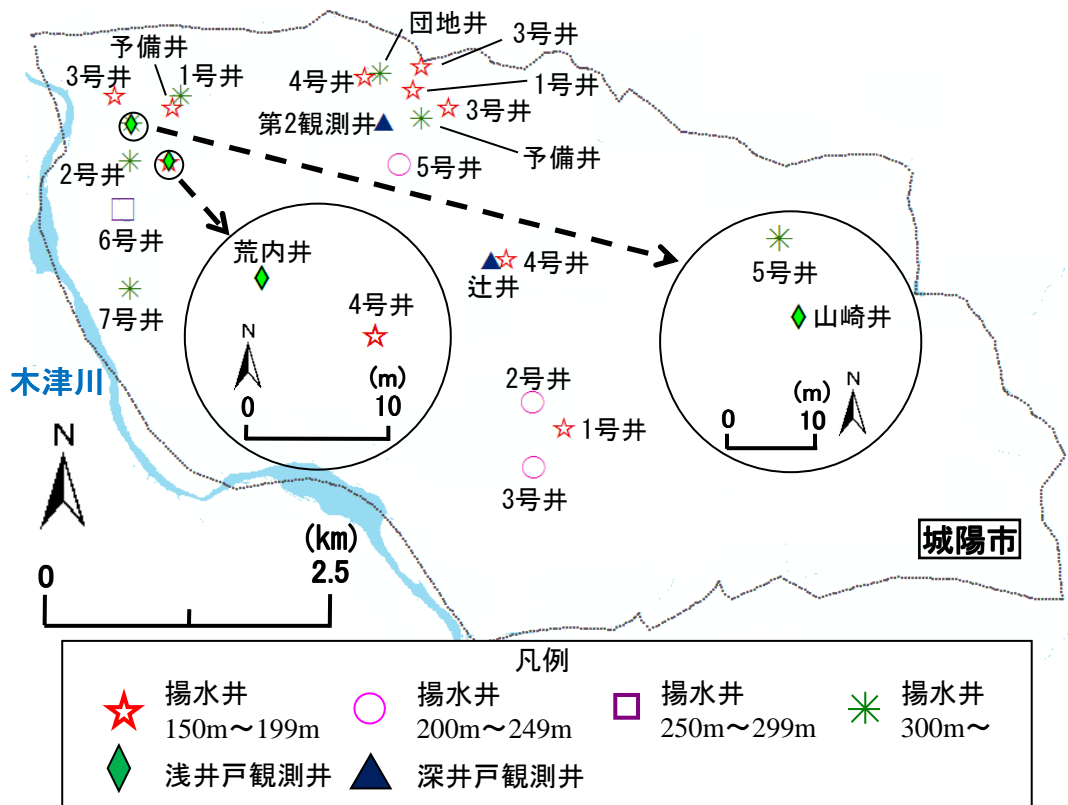


図 3-2 城陽市における揚水井と観測井の位置

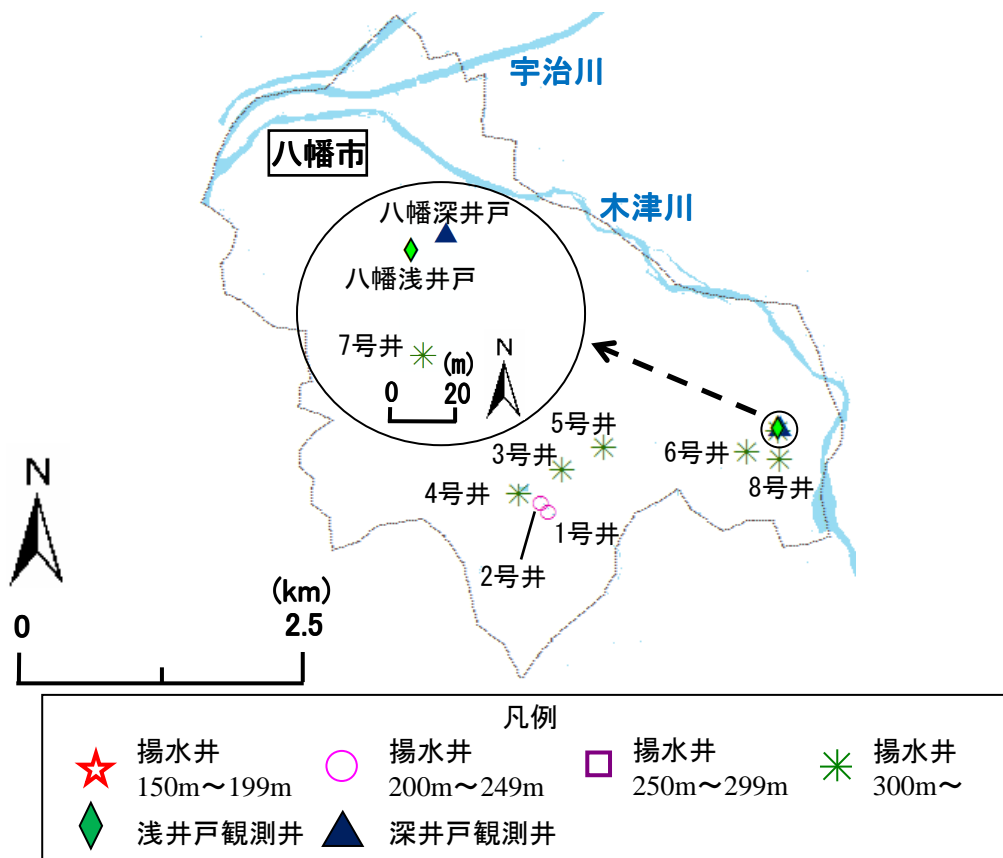


図 3-3 八幡市における揚水井と観測井の位置

表 3-1 第 1 浄水場における各揚水井との距離関係

	1号井	2号井	3号井	4号井
1号井		356m	432m	1,538m
2号井	356m		564m	1,253m
3号井	432m	564m		1,813m
4号井	1,538m	1,253m	1,813m	

表 3-2 第 2 浄水場における各揚水井との距離関係

	1号井	2号井	3号井	4号井	5号井	団地井	予備井
1号井		222m	338m	430m	651m	323m	256m
2号井	222m		430m	493m	871m	367m	456m
3号井	338m	430m		765m	646m	661m	248m
4号井	430m	493m	765m		812m	126m	607m
5号井	651m	871m	646m	812m		800m	439m
団地井	323m	367m	661m	126m	800m		531m
予備井	256m	456m	248m	607m	439m	531m	

表 3-3 第 3 浄水場における各揚水井との距離関係

	1号井	2号井	3号井	4号井	5号井	6号井	7号井	予備井
1号井		710m	567m	578m	483m	1,099m	1,718m	125m
2号井	710m		579m	338m	331m	424m	1,098m	587m
3号井	567m	579m		740m	274m	986m	1,667m	516m
4号井	578m	338m	740m		470m	572m	1,143m	463m
5号井	1,099m	424m	986m	572m		754m	681m	975m
6号井	483m	331m	274m	470m	754m		1,429m	381m
7号井	1,718m	1,098m	1,667m	1,143m	1,429m	681m		1,598m
予備井	125m	587m	516m	463m	381m	975m	1,598m	

表 3-4 八幡浄水場における各揚水井との距離関係

	1号井	2号井	3号井	4号井	5号井	6号井	7号井	8号井
1号井		131m	489m	374m	919m	2,212m	2,605m	2,529m
2号井	131m		440m	250m	909m	2,267m	2,654m	2,592m
3号井	489m	440m		540m	493m	1,955m	2,322m	2,297m
4号井	374m	250m	540m		1,033m	2,464m	2,842m	2,797m
5号井	919m	909m	493m	1,033m		1,512m	1,859m	1,865m
6号井	2,212m	2,267m	1,955m	2,464m	1,512m		407m	358m
7号井	2,605m	2,654m	2,322m	2,842m	1,859m	407m		304m
8号井	2,529m	2,592m	2,297m	2,797m	1,865m	358m	304m	

3.2.2 上水道用揚水井の揚水量と地下水位変動

各浄水場内にある揚水井の地下水位の変動特性を解明するため、長期的に測定している水位と揚水量の相関性を検討した。城陽市の第1浄水場の適正揚水量の平均は約1,800m³/日、ストレーナー長の平均は47mである。第2浄水場の適正揚水量の平均は約1,500m³/日、ストレーナー長の平均は61mである。第3浄水場の適正揚水量の平均は約3,300m³/日、ストレーナー長の平均は59mである。八幡浄水場適正揚水量の平均は約2,400m³/日、ストレーナー長の平均は43mである。図3-4～図3-7は、浄水場ごとにストレーナーが存在する層の地質特性を、ストレーナー長を基に、割合を算定した結果を示している。第1浄水場のストレーナーは、他の浄水場とは異なり、砂礫や粘土混じり砂礫、礫混じり粘土と砂礫の互層といった、砂礫層が70%程を占める層に存在する。第2浄水場のストレーナーは、砂や礫混じり砂、荒砂といった、砂の層が80%程を占める層に存在する。第3浄水場のストレーナーは、砂や粘土混じり砂、粗砂

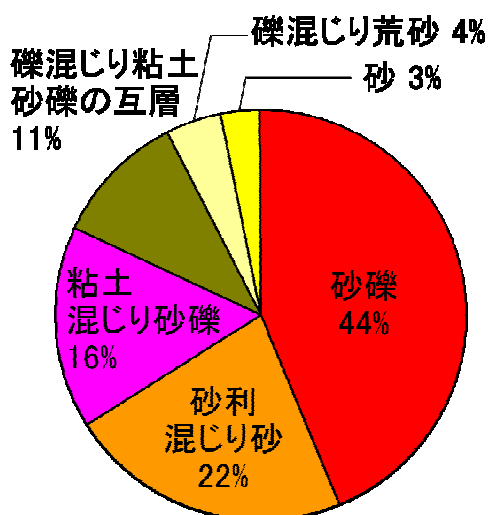


図3-4 第1浄水場のストレーナーの存在する場所の地質特性

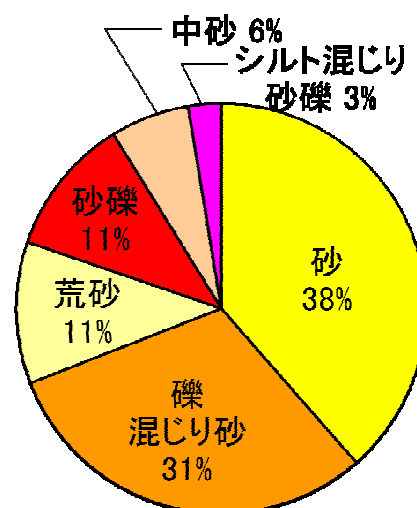


図3-5 第2浄水場のストレーナーの存在する場所の地質特性

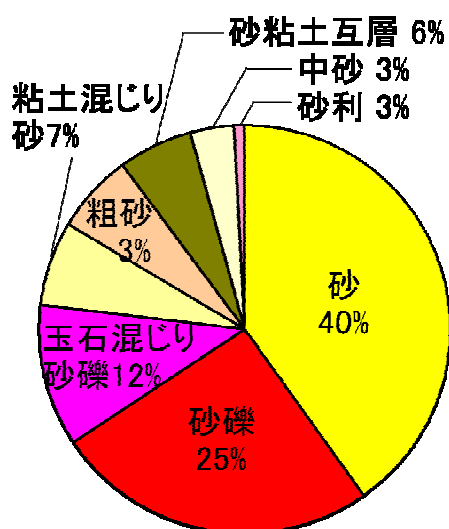


図3-6 第3浄水場のストレーナーの存在する場所の地質特性

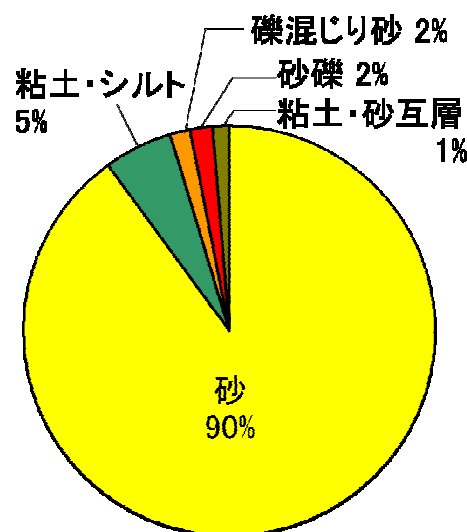


図3-7 八幡浄水場のストレーナーの存在する場所の地質特性

といった、砂の層が 50%程、砂礫や玉石混じり砂礫といった砂礫層が 40%程を占める層に存在する。八幡浄水場のストレーナーは、砂が 90%程を占める層に存在する。また、八幡浄水場のストレーナーは、粘土やシルトといった難透水層に存在する割合が、全体の 5%程を占めているが、これは八幡 1 号井のみで全体の 5%程を占めている。なお、揚水井で計測されている地下水位とは、被圧された地下水の水頭を指す。

図 3-8～図 3-10 は、城陽市の第 1 浄水場、第 2 浄水場、第 3 浄水場における、揚水量と地下水位の関係を示したものである。揚水井の諸元（標高、ストレーナー長、地質特性等）を整理した上で、代表例として 3 つの揚水井における観測結果を示す。第 1 浄水場では、2 号井を例に示す。この井戸は 2001 年に掘られているので、比較的新しく設けられた揚水井である。ストレーナーが存在する帯水層の地質特性としては、砂礫で占める帯水層に、42m の長さのストレーナーを設置している。第 1 浄水場内にある他の井戸との離隔距離は、1 号井で約 350m、3 号井で約 560m、4 号井で 1,250m 程離れている。なお、4 号井においては、2009 年以降揚水を行っていない。図 3-8 に示されるように、第 1 浄水場 2 号井においては、観測を開始してから 2009 年の中頃まで、約 1,200 m³/日の揚水を行っていたが、水位は安定した（ここで、水位が安定するとは、水位が上昇することや低下する傾向が見られないことを指す）。それ以降、約 1,200 m³/日で揚水していた揚水量を抑えて、約 900 m³/日で揚水したことや、近接にある 3 号井の揚水量が約 300 m³/日程抑えたことにより、現在の水位は上昇傾向にある。第 2 浄水場では、2 号井を例に示す。この井戸は 1979 年に掘られているので、比較的古い時期に設けられた揚水井である。ストレーナーが存在する帯水層の地質特性としては、荒砂で占める帯水層に、48m の長さのストレーナーを設置している。第 2 浄水場内にある他の井戸との離隔距離は、1 号井で約 220m、3 号井で約 430m、4 号井で約 500m、5 号井で約 870m、団地井で約 370m、予備井で約 450m 離れている。なお、1 号井においては、1997 年以降、4 号井においては、2009 年以降揚水を行っていない。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。図 3-9 に示されるように、第 2 浄水場 2 号井においては、観測開始以来、揚水量を抑えているにも拘わらず、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い、それ以降、揚水量を約 900m³/日で一定にした結果、水位は安定した。しかしながら、2008 年頃から 2011 年の間に、揚水量の増加は僅かであるが、水位は直近の 3 年間で 4m 程低下している。第 3 浄水場では、4 号井を例に示す。この井戸は 1988 年に掘られているので、比較的古い時期に設けられた揚水井である。ストレーナーが存在する帯水層の地質特性としては、砂の層が 90%を占め、粘土混じり砂が 10%の帯水層に、41.5m の長さのストレーナーを設置している。第 3 浄水場内にある他の井戸との離隔距離は、1 号井で約 580m、2 号井で約 340m、3 号井で約 740m、5 号井で約 580m、6 号井で約 470m、7 号井で約 1,150m、予備井で約 460m 離れている。なお、3 号井においては、2002 年以降揚水を行っていない。揚水量が約 2,000 m³/日の揚水井が、500m 以内に 3 つ存在する程、地下水利用が盛んに行われている場所である。図 3-10 に示されるように、第 3 浄水場 4 号井においては、観測開始以来、揚水量が大きく増減しても、あるいは約 3,000 m³/日の大量の揚水を行っても、水位は安定している。揚水を行わなかった月には、水位は 7m 程上昇している。すなわち、約 3,000 m³/日の大量の揚水を行っても、水位の低下は 10m 未満である。

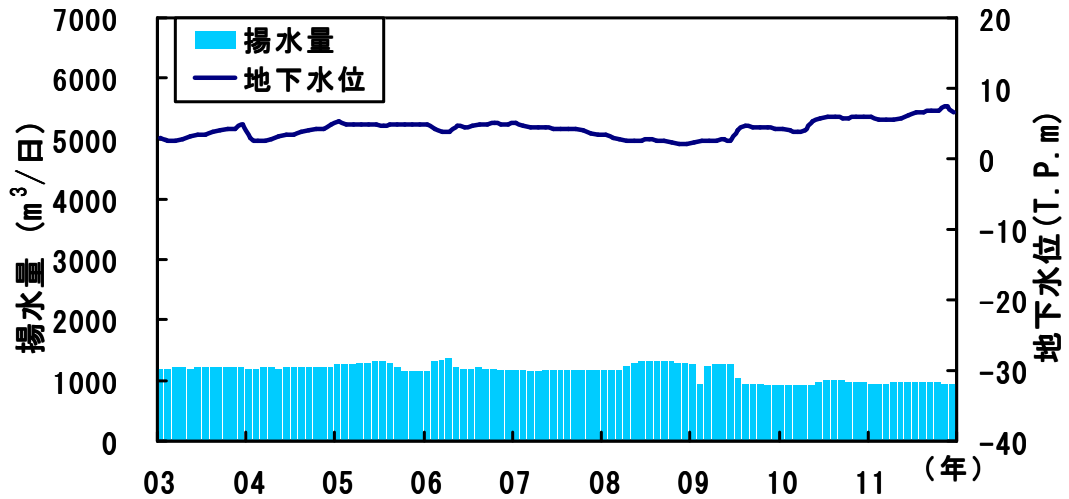


図 3-8 第 1 浄水場 2 号井 (深度 200m) の揚水量と地下水位

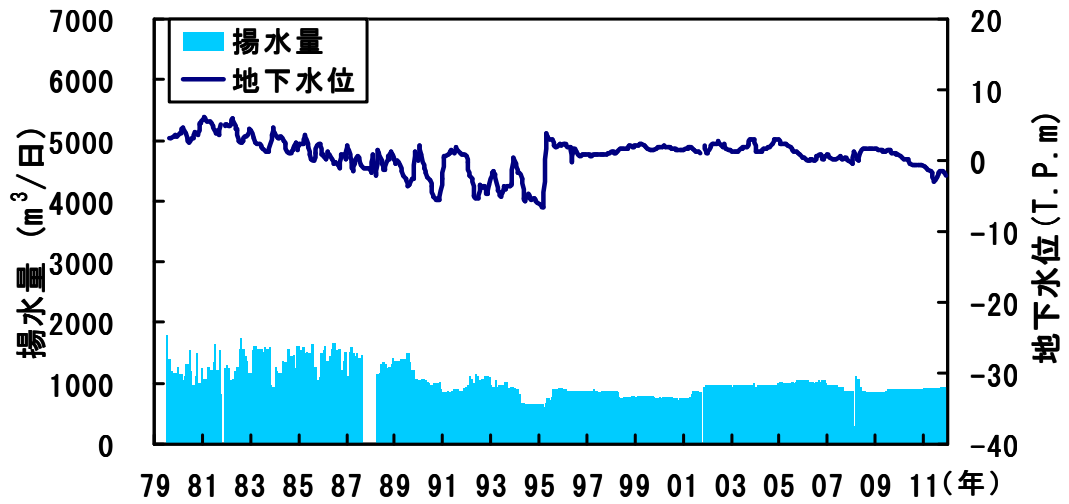


図 3-9 第 2 浄水場 2 号井 (深度 160m) の揚水量と地下水位

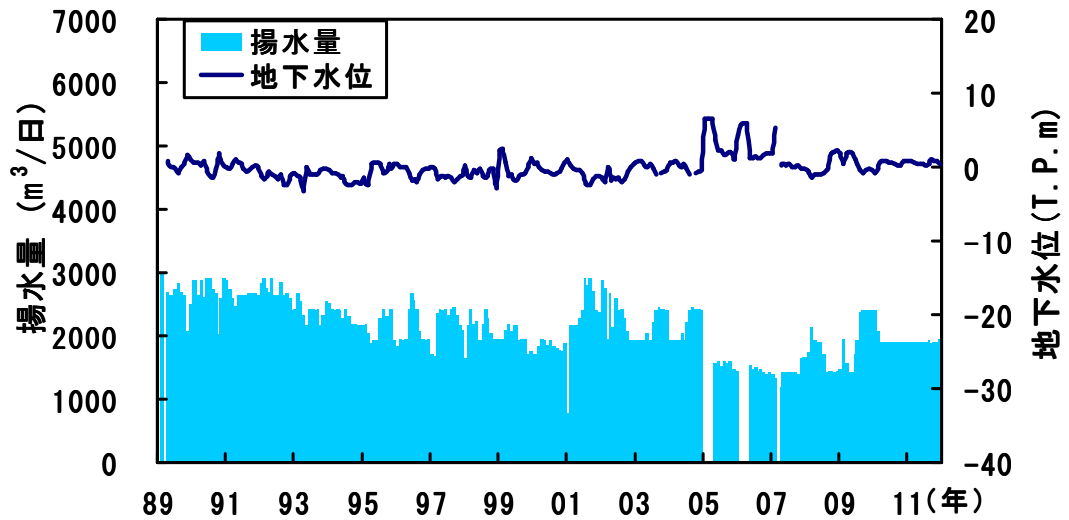


図 3-10 第 3 浄水場 4 号井 (深度 180m) の揚水量と地下水位

図3-11と図3-12は、八幡市の浄水場における、地下水位と揚水量の関係を示したものである。八幡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号井が同じような水位の変動特性を示し、木津川付近の平坦地にある6号井、7号井、8号井とでは水位の変動特性が異なる。そこで、地形に応じて水位の変動特性が異なることから、丘陵地側では5号井、平坦地側では7号井における地下水位と揚水量の関係を示す。5号井は、1984年に掘られているので、比較的に古い時期に設けられた揚水井である。ストレーナーが存在する帯水層の地質特性としては、砂で占める帯水層に、37mの長さのストレーナーを設置している。八幡浄水場内にある他の井戸との離隔距離は、1号井で約920m、2号井で約900m、3号井で約500m、4号井で約1,030m、6号井で約1,500m、7号井で約1,850m、8号井で約1,860m離れている。なお、1号井においては、2003年以降揚水を行っていない。図3-11に示されるように、5号井は、1989年頃から揚水量を増やしていくことにより、2000年までの11年間に約20m水位が低下した。当年に二重ケーシングの工事を行うことにより、2002年の中頃まで水位は安定していたが、その後の半年間で約5mの水位低下が見られた。それ以

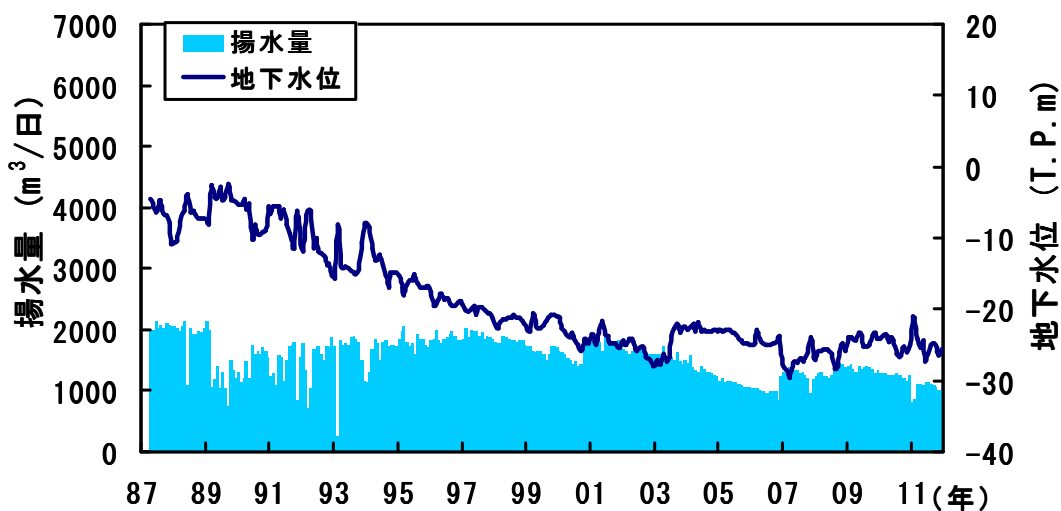


図3-11 八幡浄水場5号井（深度300m）の揚水量と地下水位

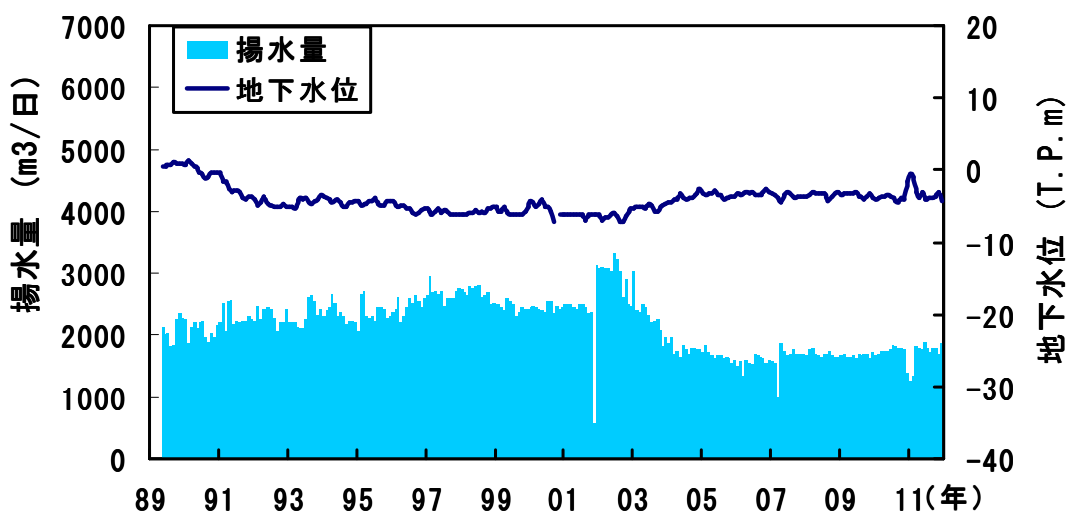


図3-12 八幡浄水場7号井（深度300m）の揚水量と地下水位

降，2007年頃まで揚水量を減らしていくことにより，水位は安定した．2007年頃から揚水量を増やしたことにより水位が一時的に低下したものの，それ以降水位は上昇傾向にある．最後に，木津川付近の平坦地にある，7号井の測定結果を図3-12に示す．7号井は，1988年に掘られているので，比較的古い時期に設けられた揚水井である．ストレーナーが存在する帯水層の地質特性としては，砂で占める帯水層に，42mの長さのストレーナーを設置している．八幡浄水場内にある他の井戸との離隔距離は，1号井で約2,600m，2号井で約2,650m，3号井で約2,320m，4号井で約2,840m，5号井で約1,860m，6号井で約400m，8号井で約300m離れている．揚水量が2,000 m³/日を越える揚水井が，500m以内に2つ存在する程，地下水利用が盛んに行われている場所である．図3-12に示されるように，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年には揚水量が3,000 m³/日を超えても，水位変動は少なく安定している．

ここで，各浄水場の地下水位の変動特性についてまとめる．城陽市の第1浄水場は，1号井においては，揚水量を抑えているにも拘わらず，水位が低下傾向にある．3号井においては，2号井と同様に新たに井戸を掘り変えたので，水位は安定している．第1浄水場で，新たに設けた2号井や3号井の水位は安定しているが，1号井に関しては，井戸の老朽化が生じていると考えられる．第2浄水場は，揚水井と揚水井の距離が最大でも870m程と，1km以内に密集して揚水井が7本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く必要がある．3号井では，2009年頃から揚水量を100 m³/日程増やしたことにより，それ以降，水位が低下傾向にある．一方，5号井や団地井の水位は上昇傾向にある．第2浄水場内で揚水量が多い，5号井と団地井の距離が800m程離れていることにより，井戸の干渉を軽減させていると考えられる．第3浄水場や八幡浄水場の6号井，7号井，8号井は，最も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．その理由として，井戸深度が深いことから，他の浄水場より，さらに下層にある帯水層から揚水していることなどが挙げられる．また，木津川沿いの深層にある帯水層は，地下水が最も集まりやすく，河川からの涵養も考えられ，非常に豊富な地下水資源があると推定される．しかしながら，八幡浄水場の6号井に関しては，揚水量を3,000 m³/日程と大量に揚水していたこともあり，1988年から1993年までの期間と，2002年から2008年までの期間に，水位が低下した．八幡市の丘陵地にある揚水井は，少量の揚水を行うだけで急激な水位低下を起こすことや，経年的に水位が低下していることから，揚水を行う際には，十分に検討して揚水量を決定していく必要がある．

3.2.3 観測井の地下水位変動

図3-13は，浅井戸観測井における水位変動と，八幡浄水場の総揚水量の関係を示している．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3-14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ている．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3-15は，深井戸観測井における水位変動と，八幡浄水場の総揚水量の関係を示している．地下水位は揚水量が多い夏季に低下し，揚水量が少ない冬期に，水位が上

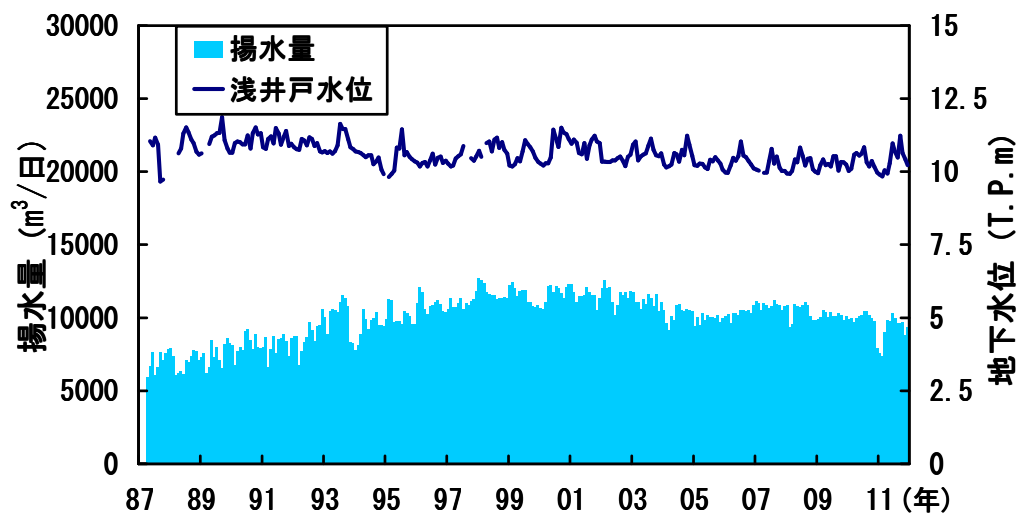


図 3-13 総揚水量と浅井戸観測井（深度 15m）の地下水位

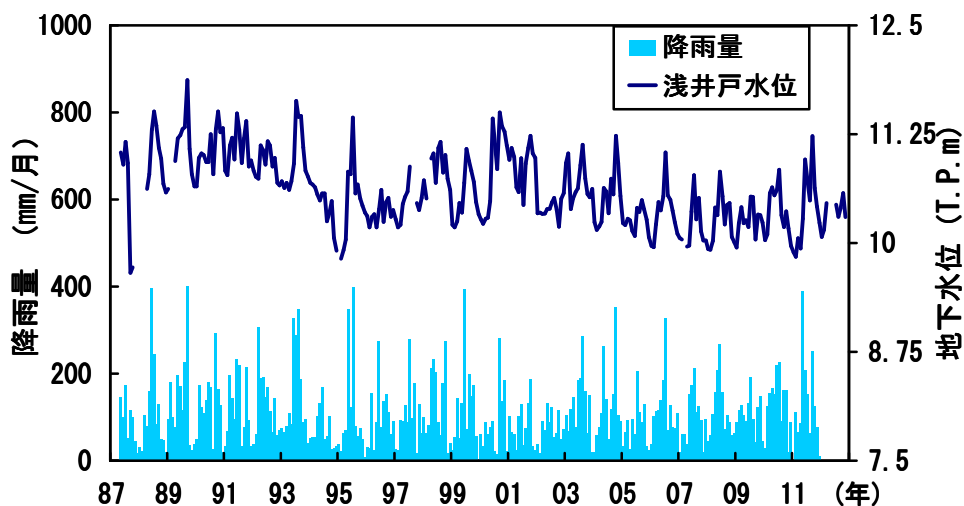


図 3-14 降雨量と浅井戸観測井（深度 15m）の地下水位

昇する傾向が見られる。また、長期的な観測結果から、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、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、若干減らしている程度にも拘わらず、地下水位は急な上昇傾向にある。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、大きく減少した影響があると考えられる。図 3-16 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ている。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。降雨の後に、時間を遅らせて水位が上昇することもあると考えられるが、浅井戸のように顕著には見られないことから、降雨が水位に及ぼす影響は、揚水が水位に及ぼす影響よりも少ないことが分かった。

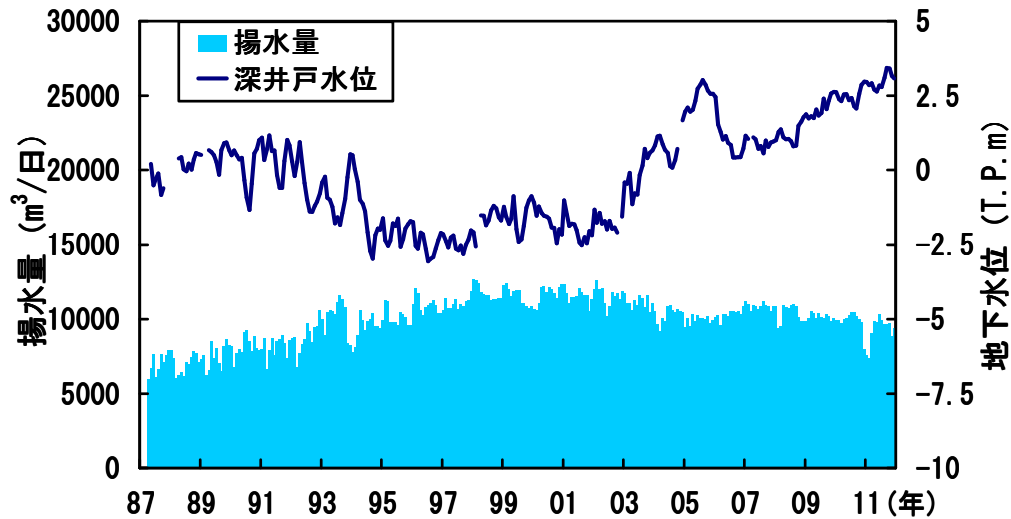


図 3-15 降雨量と深井戸観測井（深度 120m）の地下水位

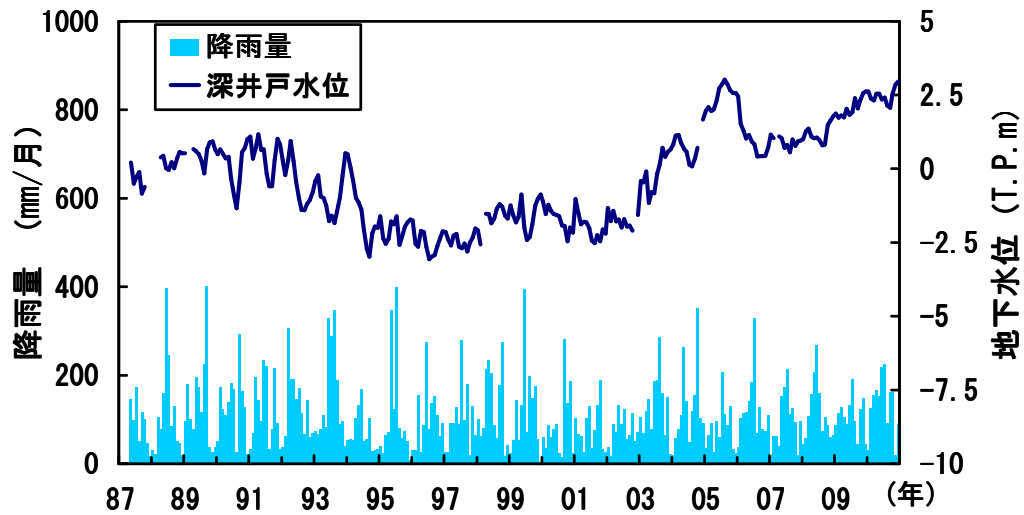


図 3-16 降雨量と深井戸観測井（深度 120m）の地下水位

以上の観測結果から、この地域における観測井の水位変動についてまとめると、浅層においては、降雨量に大きく影響され、揚水による影響は少なく、深層においては、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は異なることが認められた。また、浅層における水位変動と、深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よりも非常に大きいことが認められた。

3.3 揚水シミュレーションモデル

3.3.1 概要

ここでは、複数の上水道用の揚水井からの、揚水による水位への影響を定量的に検討するための、揚水シミュレーションモデルについて述べる。現位置計測では、長期的な水位観測を行い、各揚水井での、水位の変動特性を調べた。各揚水井では、水位変動と揚水量との相関性を分析することで、観測を開始してから現在に至るまでの地下水位の変動特性を、定性的に把握することができた。しかしながら、地下水障害が発生しないように、将来における最適な揚水計画を行う上では、揚水が地下水位変動に及ぼす影響を、定量的に検討していく必要がある。そこで、シミュレーション解析を行うことにより、各揚水井で測定している、経時的に変動する水位を再現することを目的とした、揚水シミュレーションモデルを構築した。解析手法として、研究対象地が多層地盤を成していることから、不均質性を考慮することが可能な手法で地下水の流れを解く必要がある。そこで、透水係数の異なる多層地盤、複雑な境界条件を考慮して解析することが可能である、有限要素法を用いた。

モデル構築の手順として、最初にモデルの境界を、水位測定データがある河川や、地形的な分水界を地下水の分水界と見なし、山頂を通る分水界と河川で囲まれた、広域的な範囲をモデルの境界として決定した。そして、モデルの境界範囲における基盤岩までを対象とした地層において、地質特性を考慮した、3次元地質構造モデルを作成した。モデル作成後、シミュレーション解析を行う上で必要となる地盤物性値は、揚水試験の結果から得られた透水係数などを参考にしながら決定した。境界条件は、既往の論文⁵⁾を参考にしながら決定した。広域モデルを用いて定常解析を行うことで、対象地における広域的な地下水位分布を求めた。そして、地形や地質特性をさらに詳細に考慮した、局所的な範囲における、3次元地質構造モデルを作成した。局所モデルでは、広域モデルにより求めた水頭値を、境界条件の値として設定した。局所モデルでは、局所的な範囲において解析するため、境界条件を適切な位置に決定することができない場合がある。そこで、モデルの境界として妥当性のある位置に境界条件を設定した、広域モデルで求めた水頭値を与えることで、局所モデルの信頼度を高めた。解析は、上水道用の揚水井において、月ごとの一日の平均揚水量を設定し、直近5年間における非定常解析を行った。解析により、上水道用の揚水井のストレーナーが存在する層の節点で求められた水位と、観測水位との整合性を見ることにより、モデルの妥当性を検証した。

3.3.2 有限要素法による浸透流解析の支配方程式

① 質量保存則

本研究では、有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析プログラムの UNSAF を使用した。ここでは、浸透流解析の理論を説明する⁶⁾。図 3-17 は、本研究の媒体物質である地下水のあらゆる特性を有する、control volume と称される微小立方体を示している。この立方体内を流れが通過し、その成分を xyz 直交座標の三成分に分割して整理すると、立方体の各軸直交面に通過する流れは、図 3-17 に示す標記で表す事ができる。上流側から流入した 1 方向成分の流れは、control volume を通過する間に成分方向の増分項 $[(\partial v_x / \partial x) \Delta x]$ だけ変化することを示している。流入側で (ρv_x) の質量流入を有する流れが、微小区間 Δx 間に速度変化を受けた場合、

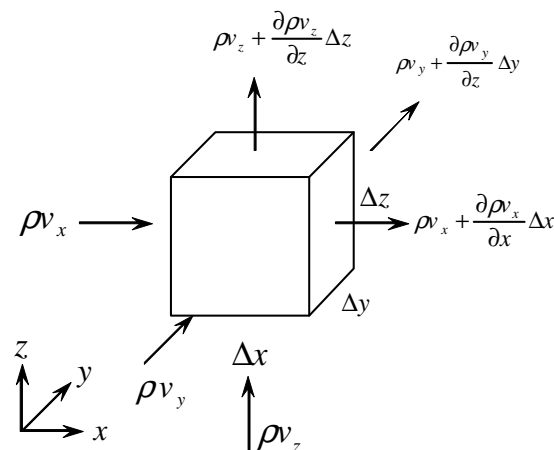


図 3-17 Control volume (3D)

流出側では, Istok (1989) ⁷⁾ の示した Taylor 展開を適用すると, 次式で表す事ができる.

$$\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)\Delta x \quad (3.1)$$

さらに, 体積内で単位体積当たりの排水や注入項を導入し, 単位時間当たりの流出入流量を 3 方向成分について総計すると, この体積内での質量保存則から以下の連続の式が誘導できる.

$$\begin{aligned} & \rho v_x \Delta y \Delta z + \rho v_y \Delta z \Delta x + \rho v_z \Delta x \Delta y \\ & - \left(\left(\rho v_x + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z + \left(\rho v_y + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} \Delta y \right) \Delta z \Delta x + \left(\rho v_z + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y \right) \\ & + \rho q \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (3.2)$$

式 (3.2) を整理し, 単位体積当たりの地下水の収支をみる. 式 (3.3) は, 水収支による質量保存則を示している.

$$-\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} - \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} - \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} + \rho q = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) \quad (3.3)$$

ここで, S_w は飽和度, n は有効間隙率, ρ は流体密度,

q は体積内の単位体積当たりの注水/排水流量(注水時, $q > 0$)

② 運動の式と透水係数テンソル

ここで, Darcy 則を運動の式として左辺流速項 \mathbf{v} に適用して水頭 h を導入する. Bear (1972) ⁸⁾ は, Darcy 則の一般化表現として二次の透水係数テンソルを用いた各方向成分の流速を示している. 式 (3.4) は, 透水係数テンソルを示している.

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

この透水係数テンソルは、対称性 ($K_{xy}=K_{yx}$, $K_{yz}=K_{zy}$, $K_{xz}=K_{zx}$) である。本来、地下水流を定義する場合、モデル座標軸方向に沿った透水成分を考慮すればよいが、試験などで実測される供試体内の透水方向と解析で定義する軸方向が一致しない場合、座標変換を行なって整合させる。この結果、 i, j 方向 ($i \neq j$) 成分の透水係数 K_{ij} が生じる。このような透水係数 K_{ij} ($i \neq j$) 成分は座標変換公式から誘導できる。

③ 浸透流解析の支配方程式

式(3.5)は、流動場のある control volume における、地下水の出入りを考慮した質量保存則(水収支)に、運動方程式として、ダルシー流速の導入により求めた地下水流動の支配方程式を示している^{9) ~14)}。

$$(\beta S_s + C) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_r K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + K_r K_{i3}^s \right) + q \quad (3.5)$$

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または排水量、 $i, j = 1, 2, 3$ ($1: x, 2: y, 3: z$) である。

3.3.3 広域的な範囲におけるモデル化

図3-18は、解析対象範囲を示している。広域モデルでは、モデル化範囲を東西約15km、南北約30kmの、南山城地方の全域を含む範囲とした。東側と西側の境界は分水界を基に、北側の境界は宇治川を基に決定した¹⁵⁾。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、上水道用の揚水井の位置においての、100m以上のボーリングデータを27本利用し、3次元地質構造モデルを作成した。基盤岩上の堆積層モデルは、既往の資料におけるボーリングデータ、井戸のストレーナーの位置、地質特性をもとに整理しながら地層を分け、帯水層と難透水層として9層に分割した。図3-19は、対象地の地質断面図の一例を示している。図に示されるように、ストレーナーは80m以深に設置され、広域的なモデルで9層に分割した地層では、No.5の帯水層や、No.7の帯水層から揚水していることが分かる。基盤岩の形状を把握するために、反射法弾性波探査と重力探査のデータ^{16,17)}を利用した。図3-20は、鉛直方向を10倍に拡大した3次元地質構造モデルを示している。図3-21~図3-24は、地形勾配をさらに詳細に表すため、東西南北から見た10倍に拡大した3次元地質構造モデルを示している。奇数番号を帯水層とし、偶数番号を難透水層として地盤物性値を設定した。

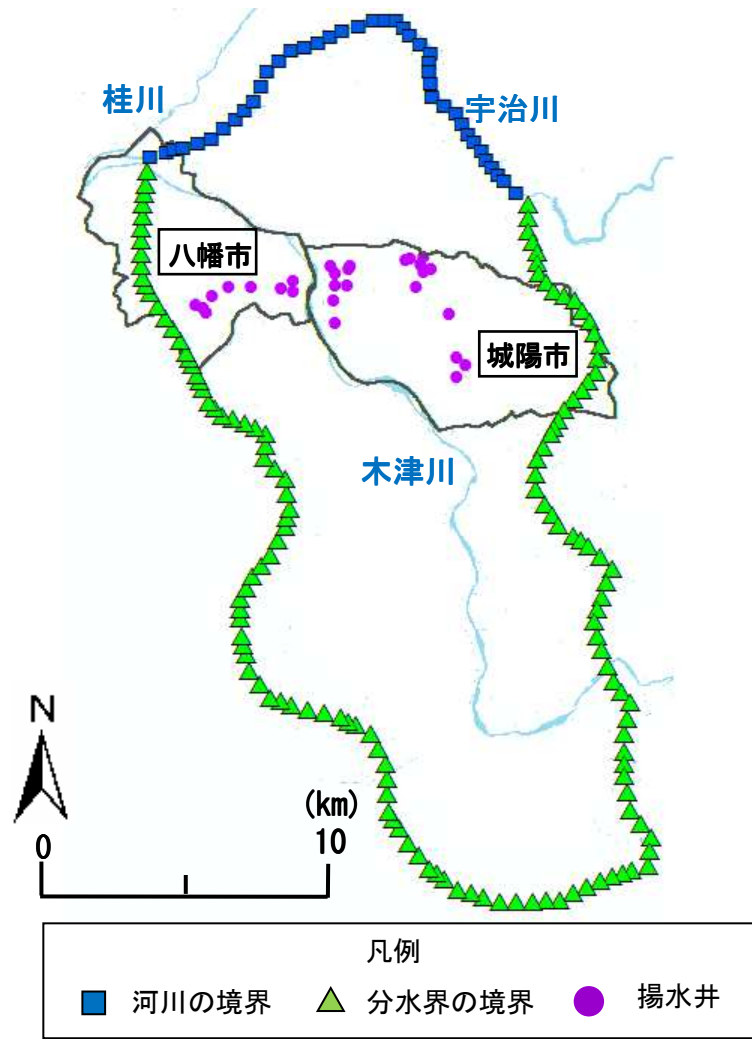
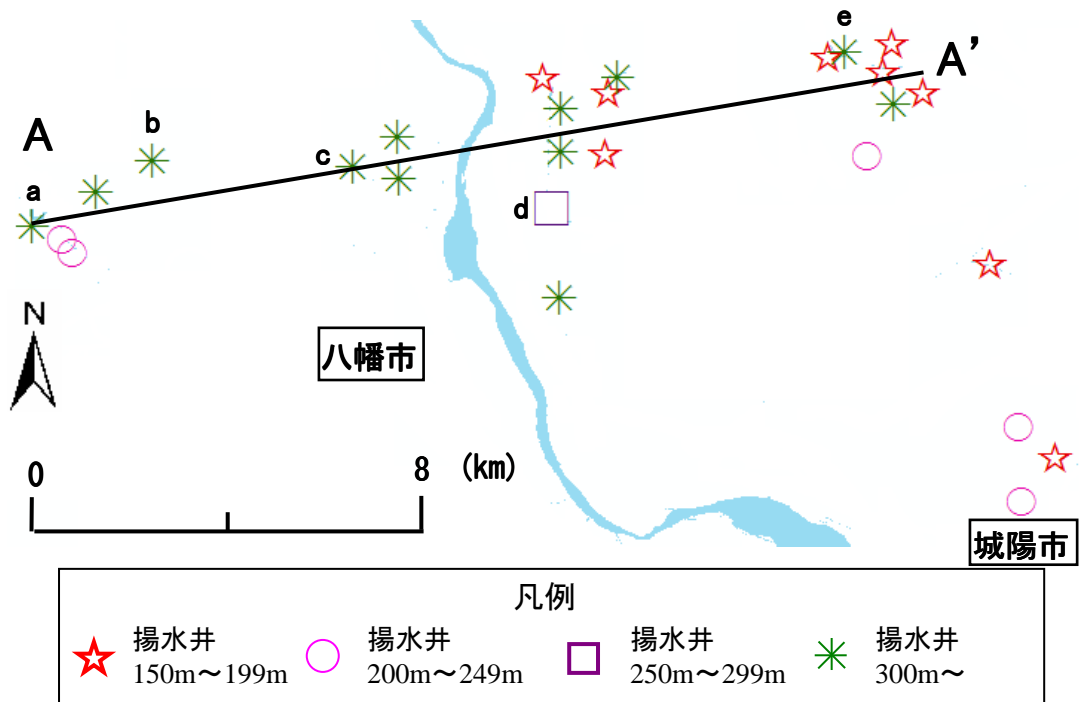
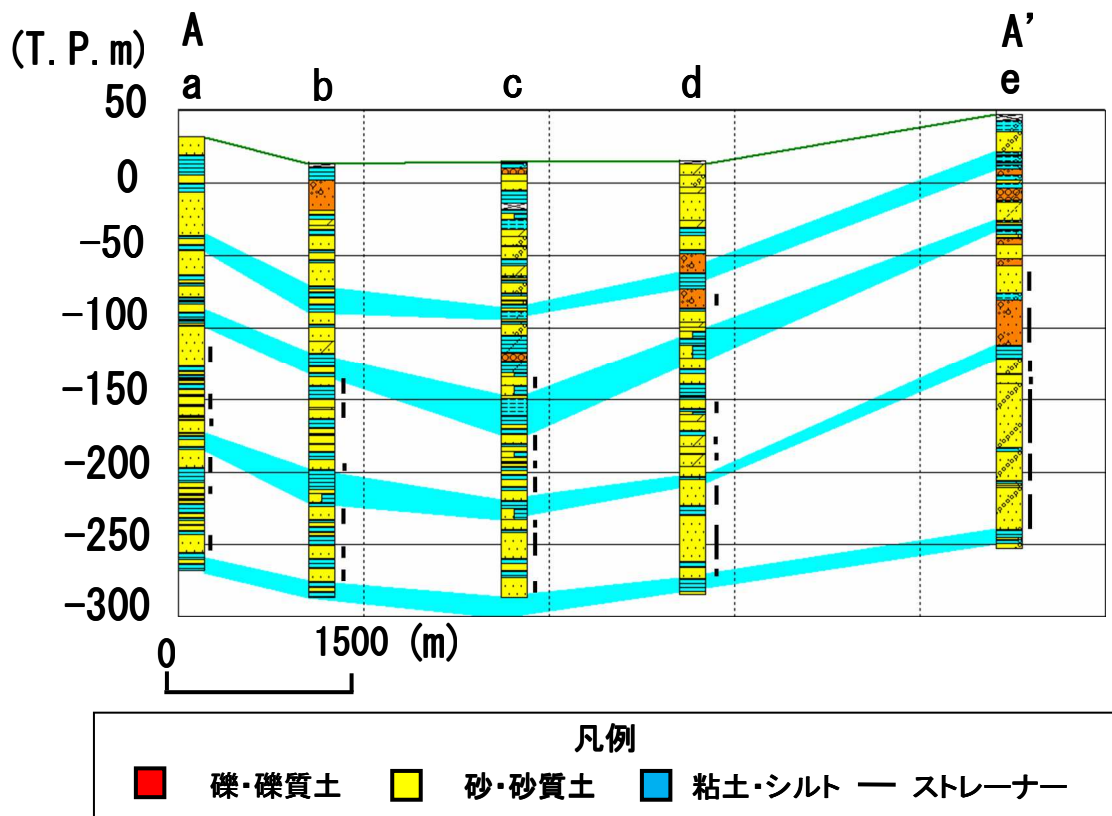


図 3-18 広域モデルのモデル化範囲



(a) 地質断面図の位置



(b) 地質断面図

図 3-19 地質断面図(A-A')

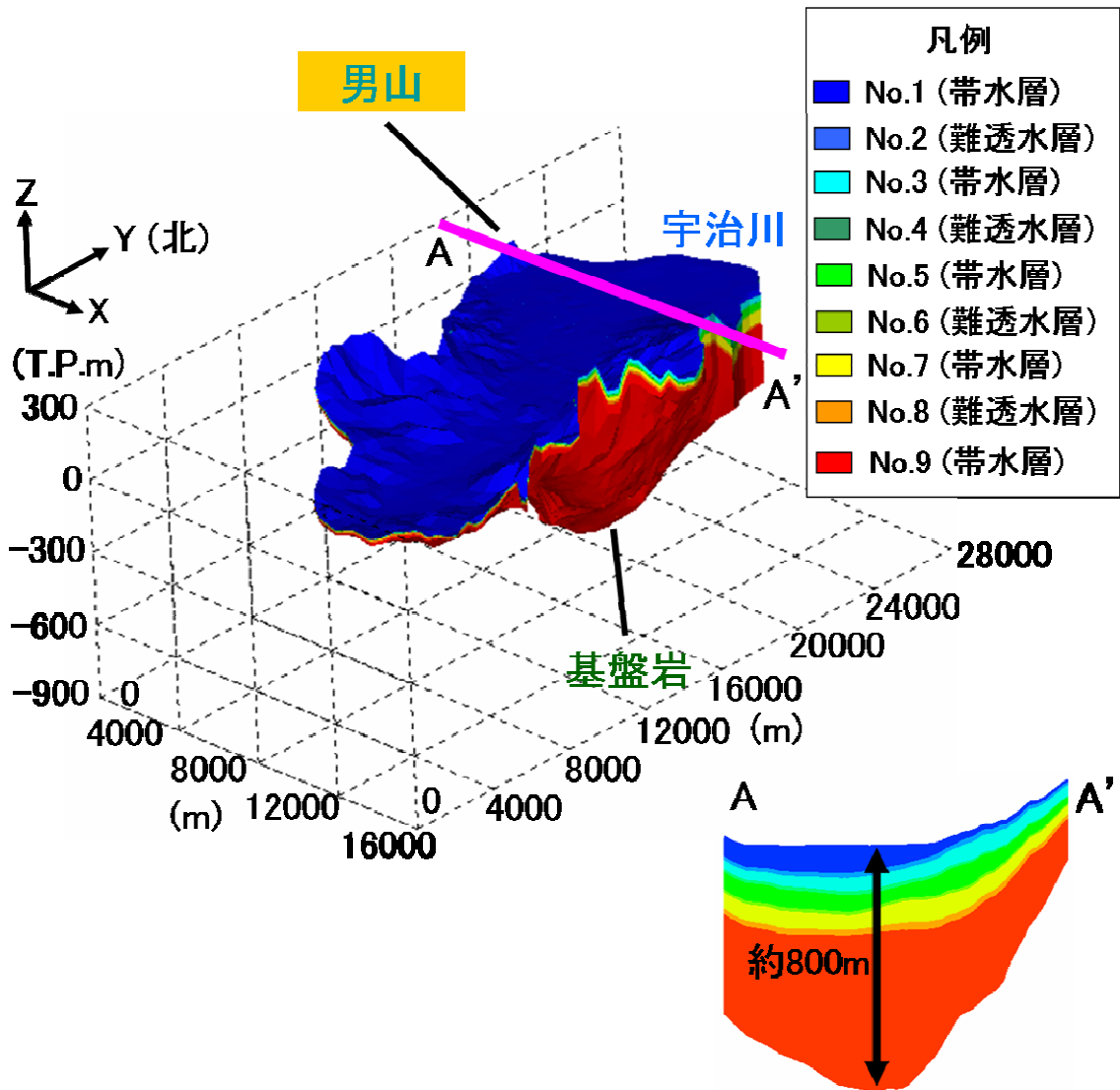


図 3-20 3次元地質構造モデル (鉛直 10 倍表示)

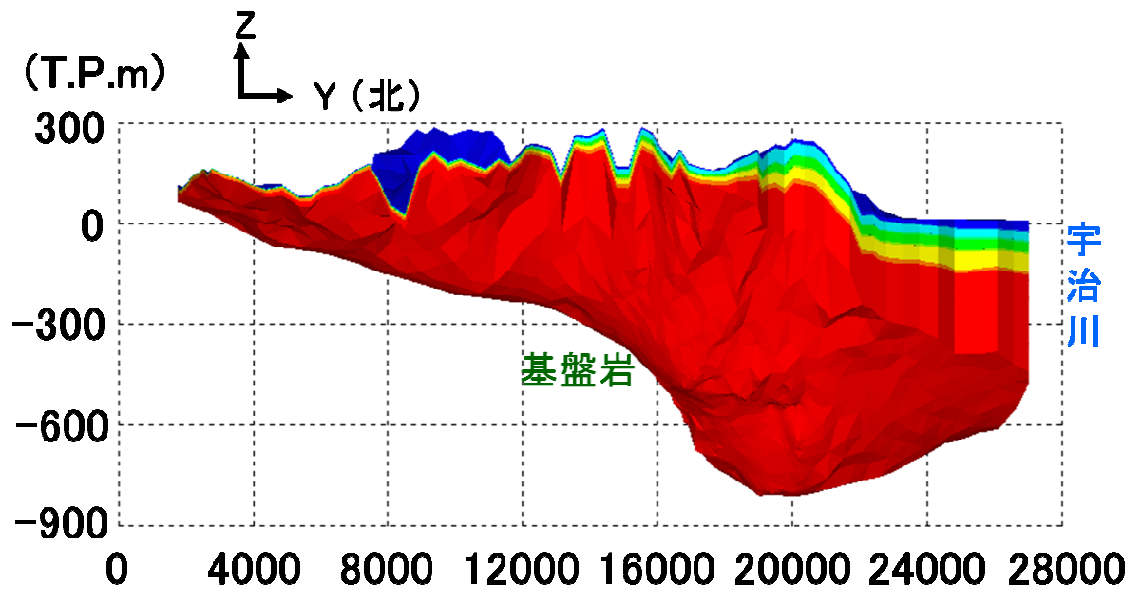


図 3-21 東方向から見た 3 次元地質構造モデル (鉛直 10 倍表示)

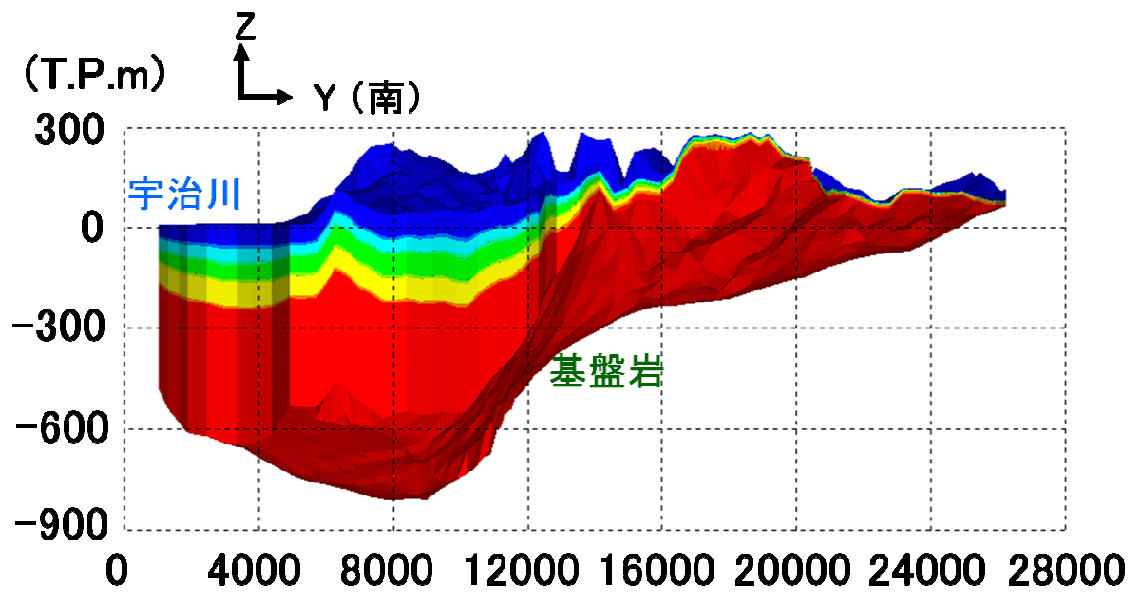


図 3-22 西方向から見た 3 次元地質構造モデル (鉛直 10 倍表示)

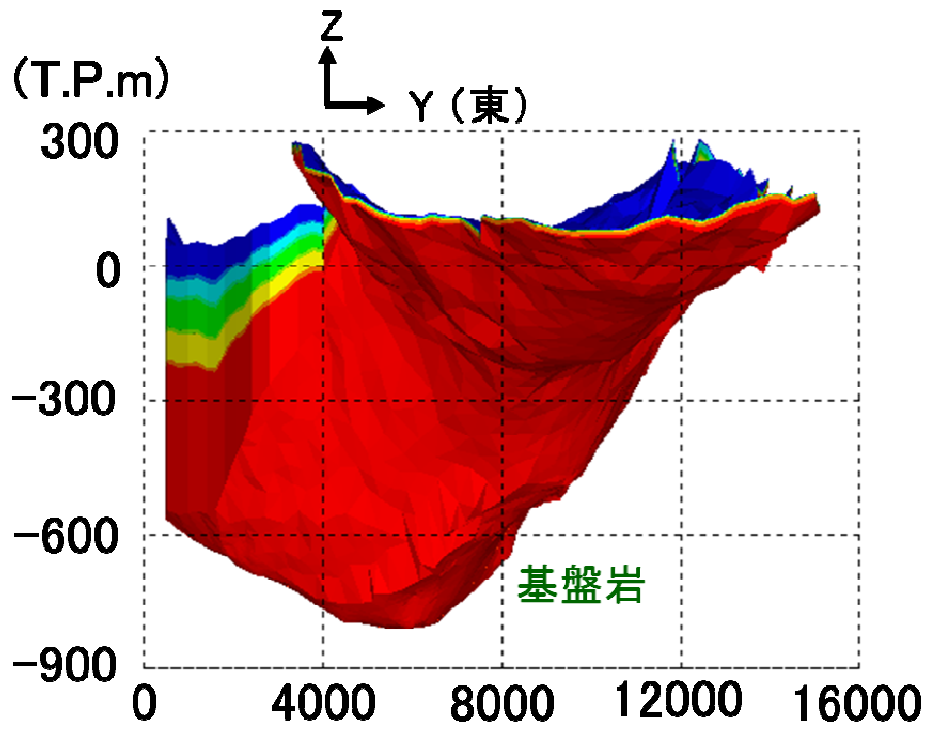


図 3-23 南方向から見た 3 次元地質構造モデル (鉛直 10 倍表示)

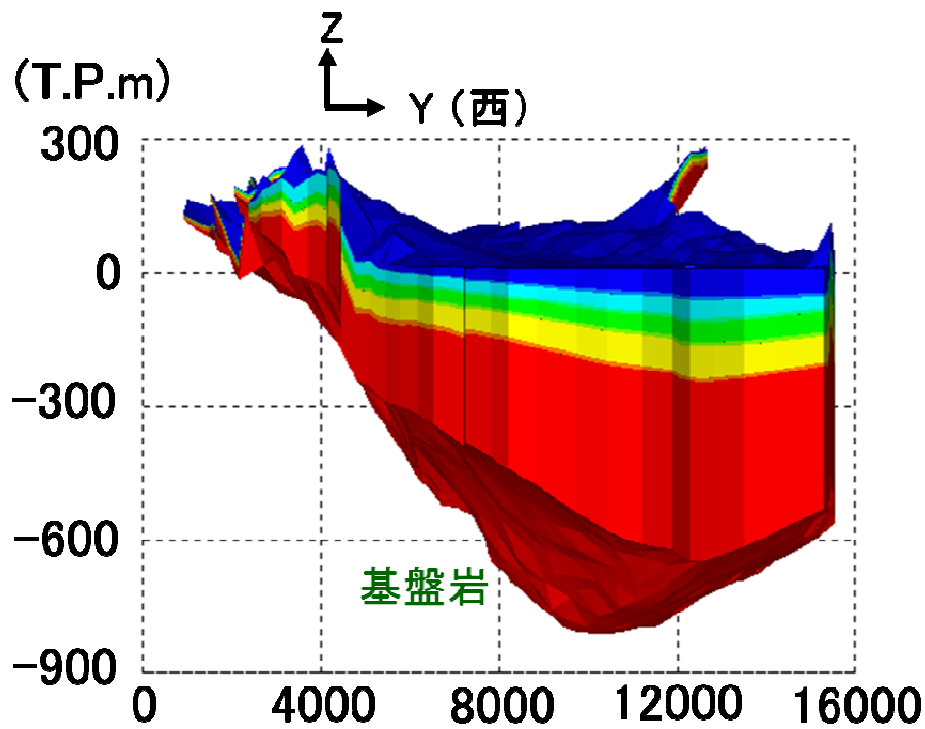


図 3-24 北方向から見た 3 次元地質構造モデル (鉛直 10 倍表示)

3.3.4 広域モデルのメッシュ分割

モデルは、揚水井からの揚水による地下水位への影響を検討するため、揚水井周辺において最も細かくメッシュを分割した。平面的なメッシュ分割は、基本密度半径を 500m 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 200m、上水道用の揚水井では 0.5m と設定し分割した。その結果、平面的な節点数は 3,508、要素数は 6,883 となった。図 3-25 は、平面メッシュ分割の図を示している。鉛直方向については、帯水層においては一層を 3 分割し、難透水層においては 2 分割した。それらを拡張して作成した解析メッシュの節点数は 77,176、要素数 144,543 となった。図 3-26 は、鉛直方向を 10 倍表示した 3 次元メッシュ分割の図を示している。

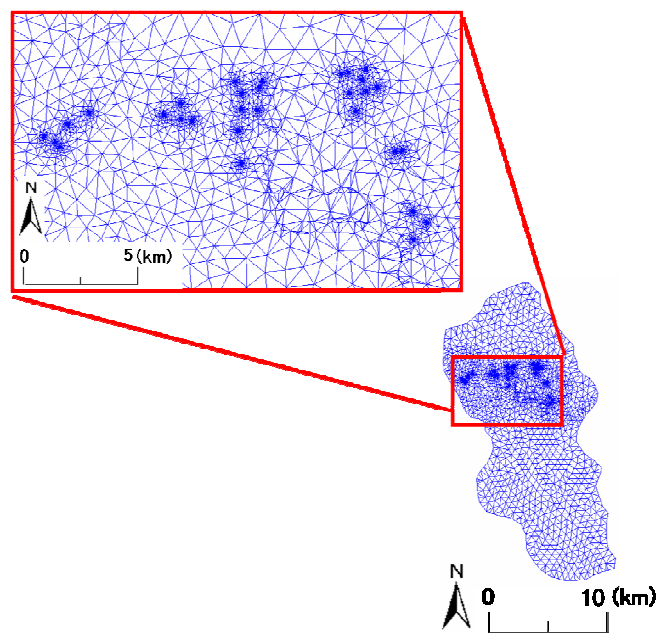


図 3-25 平面メッシュ図

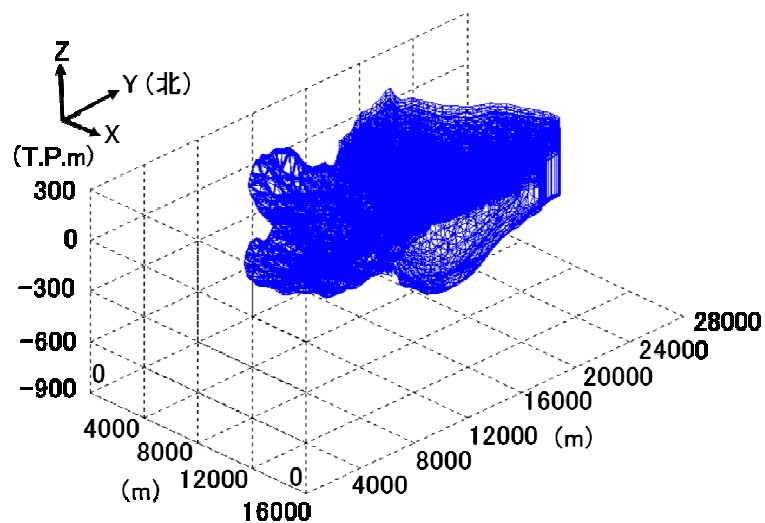


図 3-26 3次元地質構造モデルのメッシュ図（鉛直 10 倍表示）

3.3.5 局所的な範囲におけるモデル化

局所モデルでは、広域モデルでは再現できなかった地形ごとに異なる地質構造を、より詳細に再現するために、局所的な範囲においてモデルを作成したものである。図 3-27 は、局所モデルのモデル化範囲を示している。局所モデルでは、丘陵地と平坦地(モデル A)、平坦地(モデル B)、丘陵地(モデル C)の 3 つの地域に分けた。A のモデルでは、八幡美濃山浄水場の 1～5 号井の 5 本の揚水井を対象に揚水シミュレーションを行った。B のモデルでは、八幡美濃山浄水場の 6～8 号井と、城陽第 3 浄水場の 1～7 号井および予備井の 11 本の揚水井を対象に揚水シミュレーションを行った。C のモデルでは、城陽第 1 浄水場の 1～4 号井と、城陽第 2 浄水場の 1～5 号井、団地井および予備井の 11 本の揚水井を対象に揚水シミュレーションを行った。各モデルの境界は、影響半径の検討結果と広域モデルを用いた解析結果を基に、揚水による地下水位への影響が少ない範囲として決定した。また、鉛直方向については広域モデルと同様に、地下水の流入出が極めて少ない基盤岩までとした。対象地域の地層構造を把握するために、27 本の揚水井のボーリングデータを並べ、各モデルの地質断面図を作成した。

図 3-28 は、各モデルにおいて地質断面図の位置を示している。図 3-29 は、A のモデルにおける地質断面図を示している。図に示されるように、A のモデルの地質特性は、粘土と砂が交互に堆積しているような非常に複雑な地質構造であることが分かる。広域モデルにおいては対象範囲の広さから、節点や要素のバランスを考え、複雑な地質構造であっても同一の帯水層と見なし、詳細に分割するには至らなかった。A のモデルにおいては、複雑な地質特性を考慮するため、15 層に分割した。揚水が行われている帯水層は、No.7, No.9, No.11 である。

図 3-30 は、B のモデルにおける地質断面図を示している。図に示されるように、B のモデルの地質特性は、西側においては A のモデルと同様に、粘土と砂が交互に堆積しているような、非常に複雑な地質構造である。一方、東側においては、砂礫や砂で構成された地質構造を成していることが分かる。西側と東側での地質構造は多少異なるが、同じ帯水層から揚水されていることや、揚水量が最も多い揚水井が密集していることもあり、また全ての揚水井が平坦地にあることを理由として、モデルの境界を決定した。B のモデルにおいては、A のモデルと同様に複雑な地質特性を考慮するため、13 層に分割した。揚水が行われている帯水層は、No.3, No.5, No.7, No.9, No.11 である。主に、No.9, No.11 の帯水層から揚水が行われている。

図 3-31 は、C のモデルにおける地質断面図を示している。図に示されるように、北側は粗い砂や礫混じりの砂で構成され、南側は砂礫で構成された地質構造を成していることが分かる。C のモデルにおいては、地層が複雑ではないことや、砂礫や礫混じり砂といった地質特性が似ているため、広域モデルと同様に 9 層に分割した。揚水が行われている帯水層は、No.3, No.5, No.7 の帯水層である。

これらの地質特性やストレーナーの位置、基盤岩の形状、地表面の標高などを考慮して、各局所モデルの地層を分割した。粘土層に関しては、大阪層群から連続している海成粘土層に加

え、モデルごとに異なる粘土層を反映させることで、上から順に砂礫層を成す帯水層，粘土・シルトを成す難透水層の多層地盤を作成した。基盤岩形状については，広域的なモデルで作成した基盤岩形状と同様である。

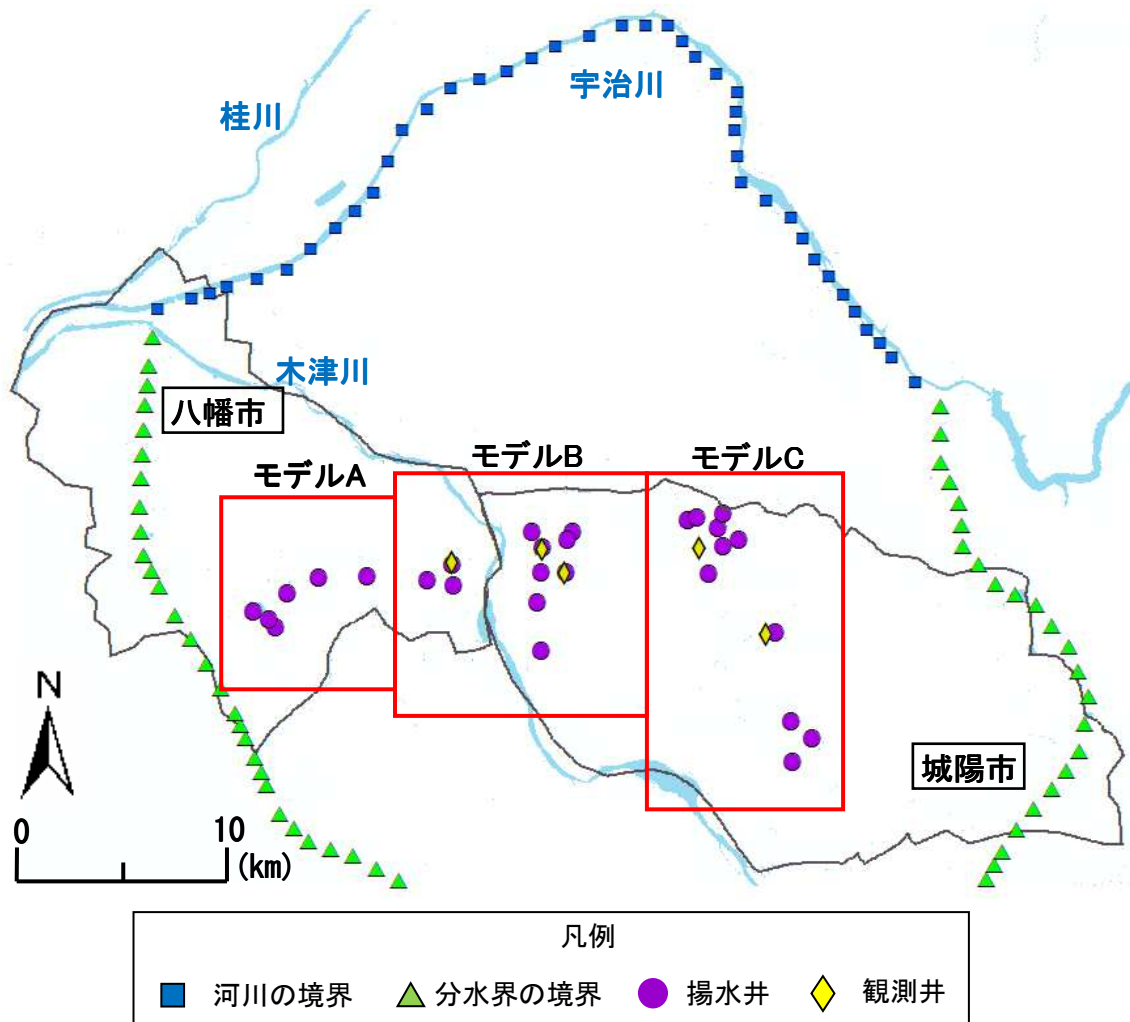


図 3-27 局所モデルのモデル化範囲

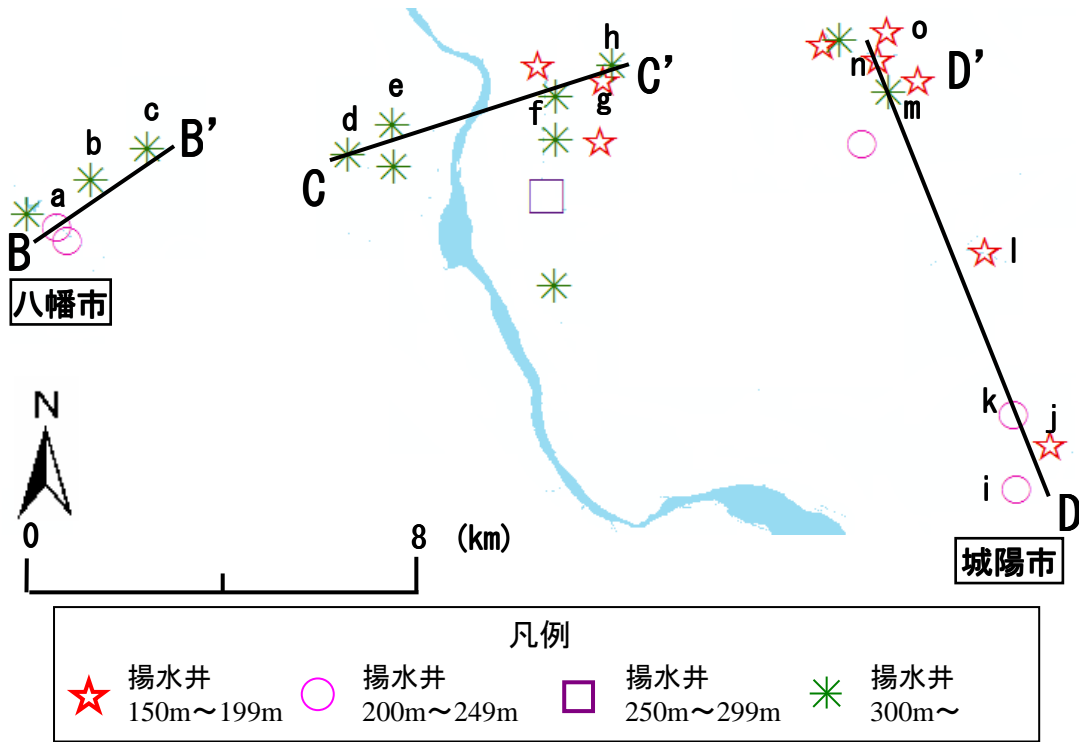


図 3-28 地質断面図の位置

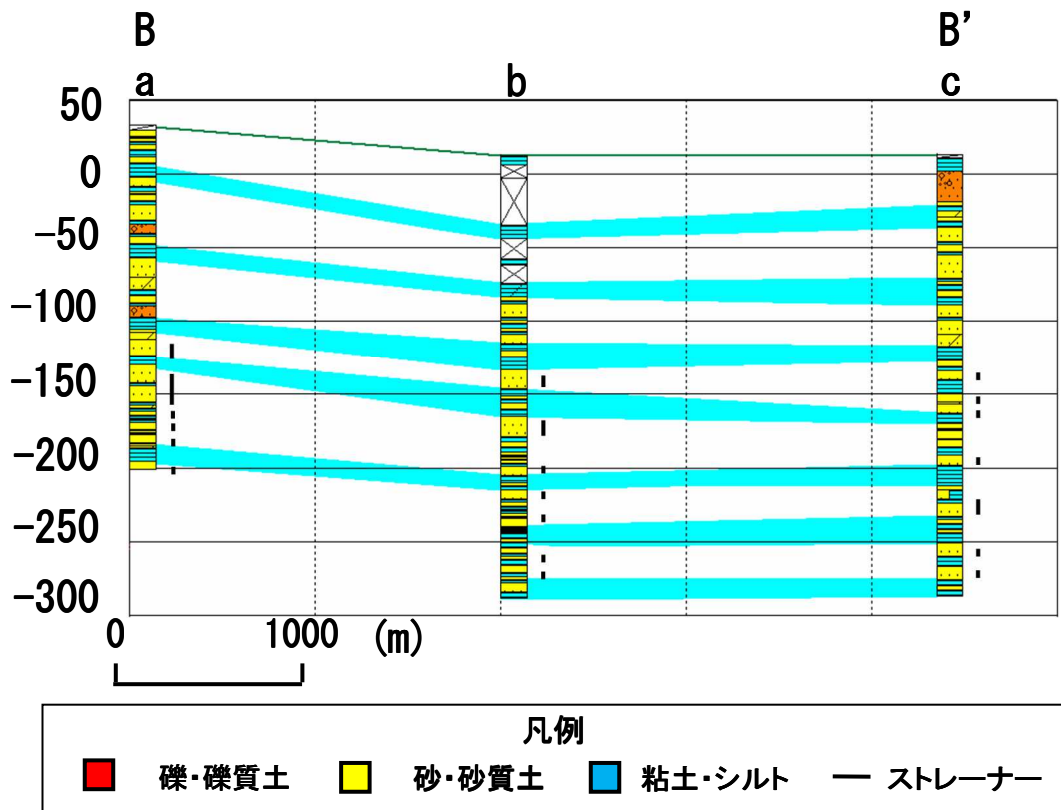


図 3-29 地質断面図 (B-B')

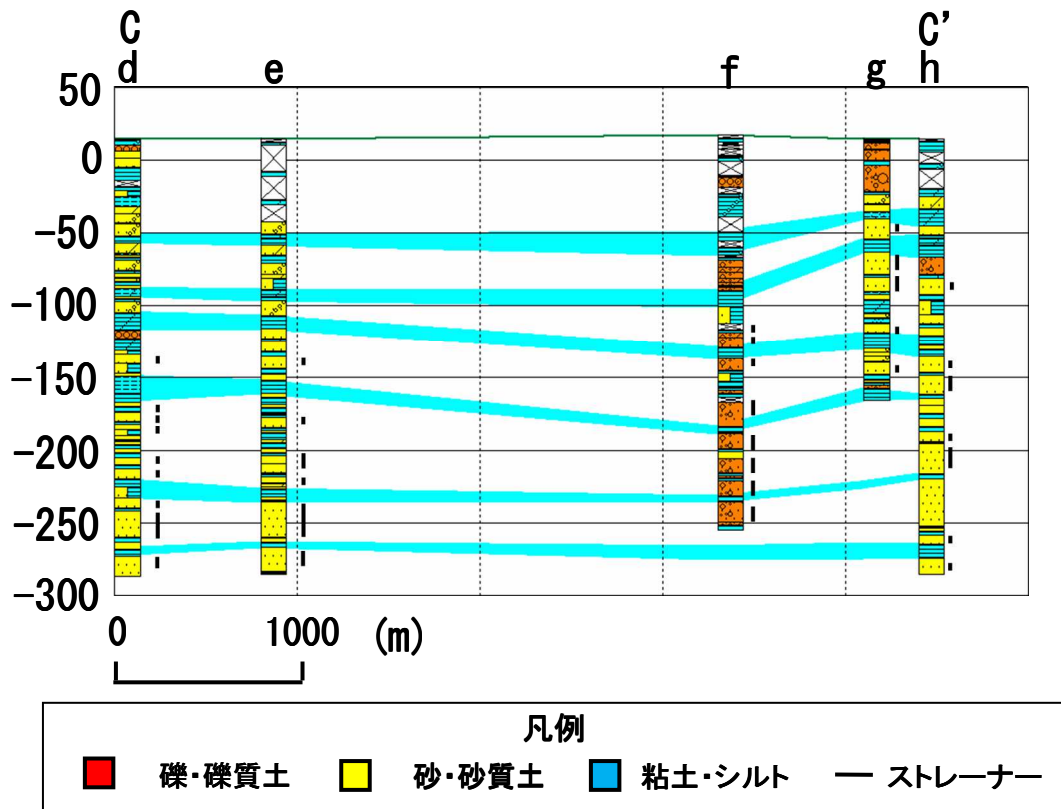


図 3-30 地質断面図 (C-C')

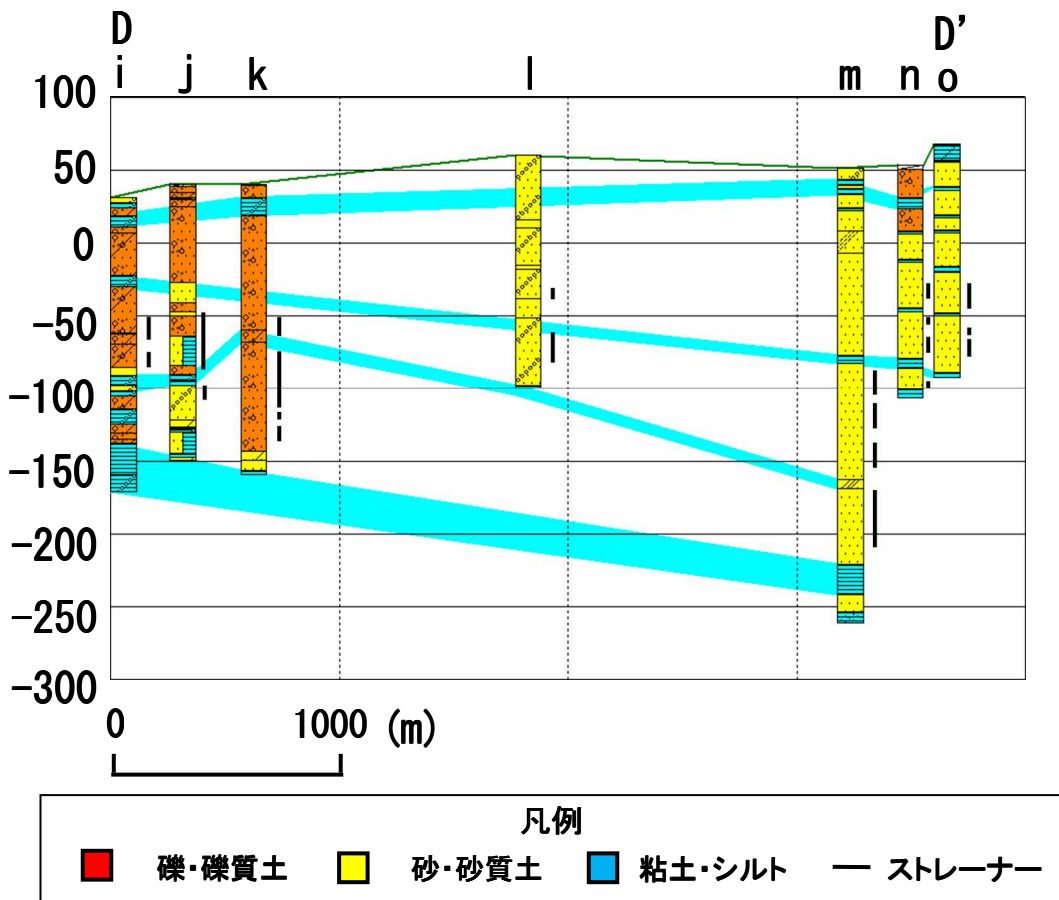


図 3-31 地質断面図 (D-D')

3.3.6 局所モデルのメッシュ分割

図 3-32～図 3-34 は、各モデルで作成した平面的な解析メッシュ図を示している。広域的なモデルのメッシュ分割と同様に、モデルは、揚水井からの揚水による地下水位への影響を検討するため、揚水井周辺において最も細かくメッシュを分割した。平面的なメッシュ分割は、基本密度半径を 100m とし、最小密度半径を揚水井の節点では 0.5m と設定した。また、鉛直方向の分割では、帯水層においては一層を 3 分割とし、難透水層は 2 分割としている。表 3-5 は、各モデルの詳細を示している。

表 3-5 モデルの分類

	モデル A	モデル B	モデル C
モデルの規模(km ²)	5	12	13.5
地層分割数	15	13	9
節点数(平面)	1,369	3,482	3,571
要素数(平面)	2,644	6,818	6,988
総節点数	50,653	111,424	78,562
総要素数	95,184	211,358	146,748

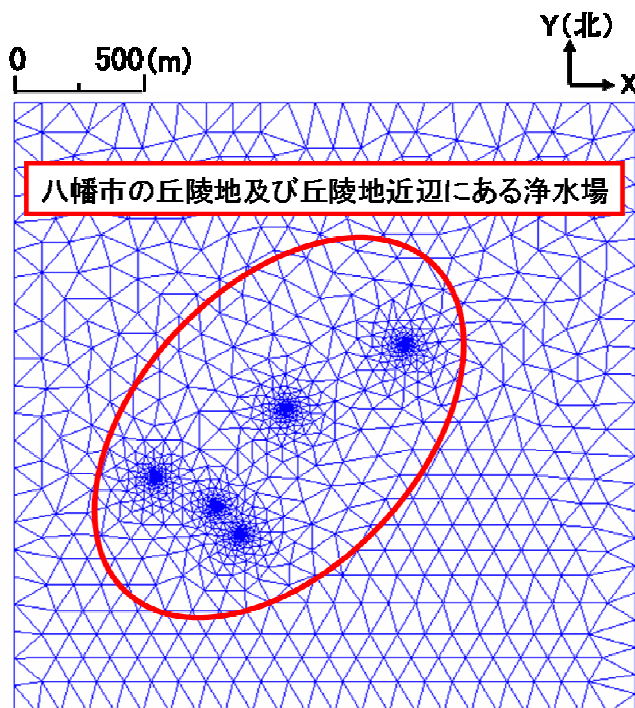


図 3-32 A のモデルのメッシュ分割図

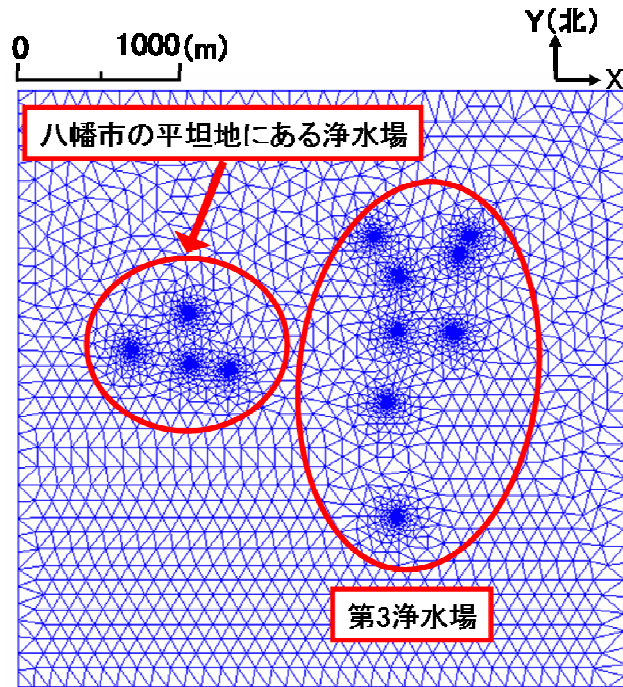


図 3-33 B のモデルのメッシュ分割図

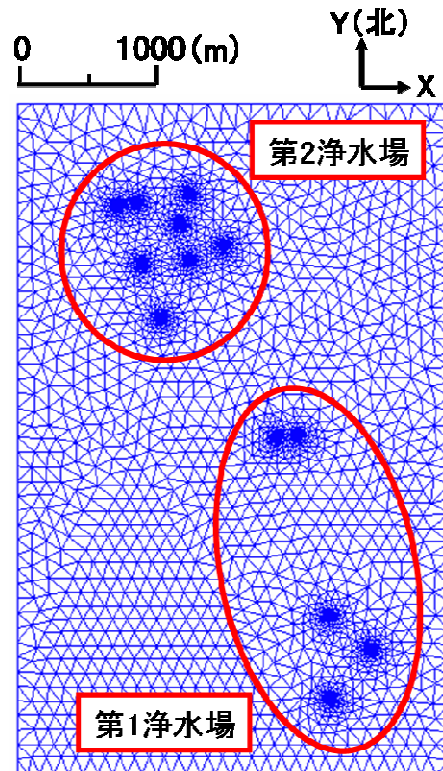


図 3-34 C のモデルのメッシュ分割図

3.3.7 広域モデルで用いた入力条件

① 境界条件

境界条件は、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、東西の分水界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、季節的な降雨量を考慮するため、降雨浸透境界を与えた¹⁸⁾。地下水の涵養量は、一般的に降雨の29～33%程が地下水として涵養されると言われているので、30%に設定した¹⁹⁾。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た。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、上水道用の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、上水道用の揚水井では、月毎の揚水量の平均値を既知流量境界として与えた。民間の井戸は、既往資料に記載されている井戸の深度、ストレーナーの位置より、3次元地質構造モデルの、どの層の節点に揚水量を設定するのかを決定した。しかしながら、民間の井戸に関しては、長期間における揚水のデータを所持していないので、非定常解析をする上では考慮できていない。

② 地盤物性値

表3-6は、広域モデルで浸透流解析を行う際に用いた、地盤物性値を示している。揚水を行っている層に関しては、揚水試験の結果を基に、その他の層については文献²⁰⁾を参考に地盤物性値を決定した。よって、各上水用揚水井での水位変動は、地質特性や揚水量によって大きく変動している揚水井や、水位変動の小さい揚水井があるので、全部の揚水井のストレーナーが存在する帯水層の地質特性を考慮して、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²¹⁾を参考にして設定しているが、降雨が及ぼす各上水用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 3-6 広域モデルで用いた地盤物性値

地層	透水係数<水平>(m/s)	透水係数<鉛直>(m/s)	比貯留係数(1/m)	有効間隙率(%)
No.1	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
No.2	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
No.3	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
No.4	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
No.5	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
No.6	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
No.7	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
No.8	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
No.9	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20

3.3.8 局所モデルで用いた入力条件

① 境界条件

局所モデルの境界条件には、広域モデルで求めた水頭値を入力し、既知水頭境界条件とした。また、河川の流れている箇所には、河川の水頭値を入力して既知水頭境界とした。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。地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されると言われているので、広域モデルと同様に30%と設定した。

② 地盤物性値

表 3-7～表 3-9 は、局所モデルで浸透流解析を行う際に用いた、地盤物性値を示している。最終的な地盤物性値は、直近5年間における各上水道用の揚水井で観測された、月平均の水位変動と解析値との整合性を検討しながら決定した。地盤物性値を検討する際には、透水係数の値を変更して解析を繰り返し、現場揚水試験で得られた結果より1オーダー以上離れないようにし、解析結果が観測値に整合するように、試行錯誤的に決定した。なお、透水係数を低くすると、揚水による水位変動が生じ、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ることが分かった。

表 3-7 モデル A の地盤物性値

層	透水係数<水平> (m/s)	透水係数<鉛直> (m/s)	比貯溜係数 (l/m)	有効間隙率 (%)
1	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
2	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
3	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
4	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
5	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
6	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
7	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
8	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
9	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
10	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
11	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
12	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
13	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
14	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
15	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20

表 3-8 モデル B の地盤物性値

層	透水係数<水平> (m/s)	透水係数<鉛直> (m/s)	比貯溜係数 (l/m)	有効間隙率 (%)
1	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
2	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
3	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
4	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
5	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
6	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
7	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
8	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
9	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
10	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
11	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
12	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
13	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20

表 3-9 モデル C の地盤物性値

層	透水係数<水平> (m/s)	透水係数<鉛直> (m/s)	比貯溜係数 (l/m)	有効間隙率 (%)
1	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}	1.2×10^{-4}	20
2	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
3	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
4	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
5	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
6	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
7	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20
8	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}	2.0×10^{-3}	10
9	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	20

3.4 解析結果と実測との比較検討

モデルの妥当性は、直近5年間において各上水道用の揚水井で観測された月平均の水位変動と、局所モデルを用いて非定常解析を行った結果得た水位変動との、整合性を検証することにより確認した。図3-35～図3-38にモデルごとの代表例として、解析で得た水位変動と観測により得た水位変動との整合性を示している。

Aのモデルの特徴としては、揚水井は丘陵地から丘陵地近辺に位置する平坦地にあり、地質特性が多少粘土混じりの砂で構成されていることもあり、揚水量の増減による水位の変動が激しい地域であることなどが挙げられる。図3-35は、八幡4号井の解析結果を示している。図に示されるように、2009年中頃に揚水を抑えたことにより、約4ヶ月間において水位が10m程上昇していることや、2011年の1月や2月において揚水量を増加したことにより、水位が10m程低下するといった、実際の水位変動を再現できていることが分かる。全体的に水位の変動が他のエリアと比較しても大きく生じている地域であるが、水位変動のトレンドは、正確に再現できていることが認められた。

Bのモデルの特徴としては、中央付近に木津川が通っていることから分かるように、帯水層においても地下水が集まるような、水量を豊富に蓄えている層であると考えられることや、この地域にある揚水井は比較的新しく掘られた井戸が集まり、井戸深度も300m程と、他のエリアと比べても非常に深い地域であることなどが挙げられる。図3-36は、第3浄水場の6号井の解析結果を示している。図に示されるように、観測結果より、揚水量が1,500m³/日～3,000m³/日で増減しているが、水位変動は見られず、解析結果においても同様に、水位の変動がほとんど生じていないことから、実際の水位変動を再現できていることが分かる。全体的に水位の変動が見られない地域であり、解析結果は観測水位を正確に再現できていることが認められた。

Cのモデルの特徴としては、この地域の多くの揚水井は1970年代に設置され、井戸の老朽化により揚水を停止している揚水井が11本中3本あることや、井戸が密集していることから、揚水量を抑えて運転していることなどが挙げられる。図3-37は、城陽第1浄水場3号井の解析結果を示している。図に示されるように、2009年中頃までの実測の水位が減少傾向にあるが、解析結果では、水位低下を再現するには至らなかったが、2009年6月に揚水量を、約200m³/日増やしてからの実測の水位が、3ヶ月程で7m程下っている現象を、解析結果で再現できていることが分かる。それ以降、揚水量を次第に抑えた影響により、水位は上昇傾向が見られ、解析においても同様に、水位の上昇傾向を再現できていることが分かる。図3-38は、城陽第2浄水場予備井の解析結果を示している。図に示されるように、解析値と実測値の水位差はほとんどなく、正確に再現できていることが分かる。2008年3月に揚水量を急に抑えたことにより、水位が2m程上昇しているが、解析結果も2m程の水位の上昇を再現することができていることが分かる。すなわち、全体的に揚水が水位に及ぼす影響は再現できていることが認められた。

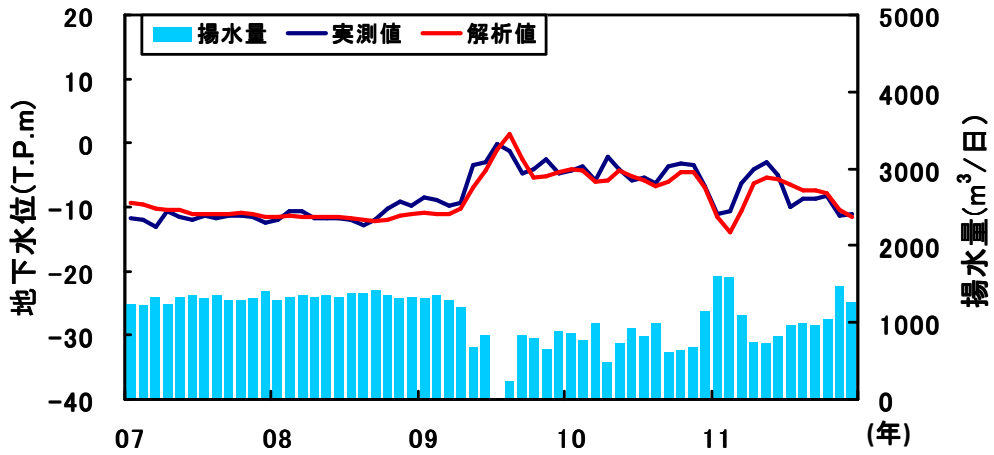


图 3-35 八幡美濃山浄水場 4 号井 (深度 300m)

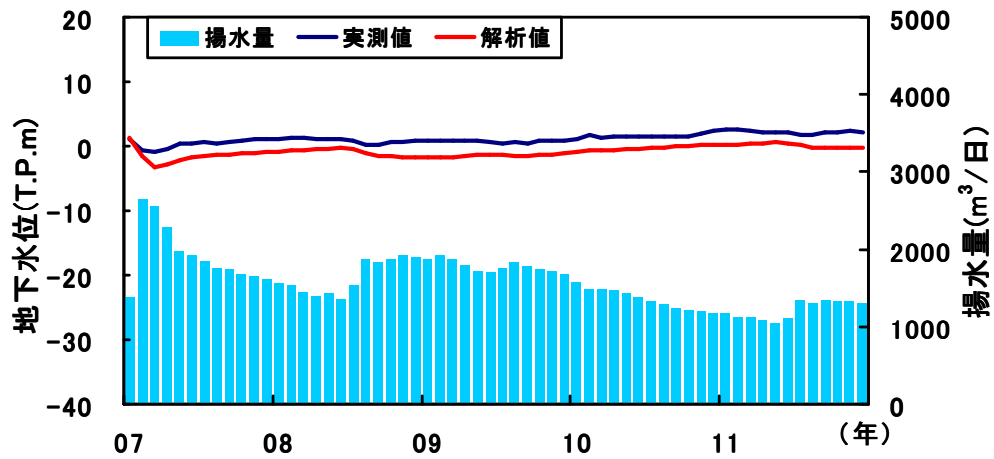


图 3-36 第 3 浄水場 6 号井 (深度 300m)

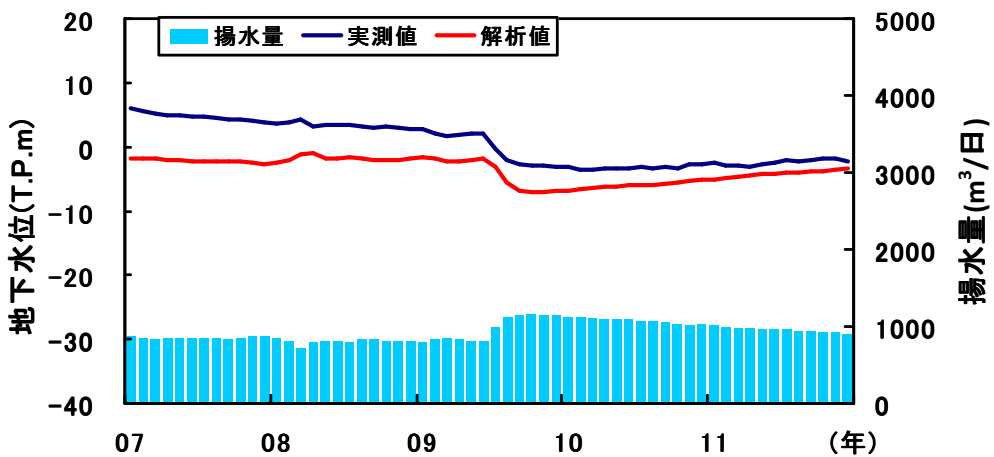


图 3-37 第 1 浄水場 3 号井 (深度 200m)

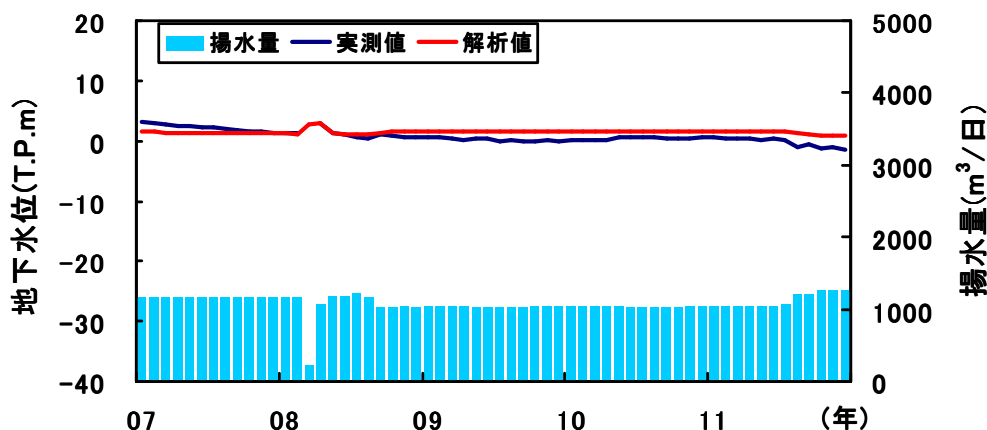


図 3-38 第 2 浄水場予備井（深度 312m）

3.5 まとめ

本章では、複数の揚水井が周辺の水位に及ぼす影響について解明するため、現位置計測とシミュレーション解析により、定量的に検討した。長期間における水位を観測し、揚水量や降雨との相関性を調べることで、地域ごとの水位変動特性を解明した。観測井での観測結果より、浅井戸の地下水位は、降雨の影響を主に受けていることが認められた。また、深井戸の地下水位は、揚水の影響を主に受けていることが認められた。また、各揚水井の水位の変動特性を、浄水場ごとに分析した。それらの観測結果を、シミュレーション解析で再現するため、3次元地質構造モデルを作成し、有限要素法による浸透流解析を行い、複数の揚水井で求めた水位変動と、観測値を比較した。その結果、直近5年間における地下水位変動を、比較的に整合性が良く再現できていることが認められた。しかしながら、揚水以外の要因により、経時的に水位が低下する傾向を再現するには至らなかった。揚水以外の要因により、水位が低下する影響を検討した結果については、第4章で検討した。

参考文献

- 1) 北岡貴文, 楠見晴重, 中村真: 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: 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, p.371, 2011.
- 2) 高坂信章: 最近の地下水調査方法と計測技術-5.2 多孔式揚水試験-, 地下水学会誌, Vol.35, No.4, pp.313-323, 1993.
- 3) 山本荘毅: 揚水試験と井戸管理, 昭晃堂, pp.116-127, 1962.
- 4) 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, pp.50-51, 1976.
- 5) I. Kusaka and H. Kusumi: Pumping Simulation using 3D Ground Water Flow Model in Kyoto, EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering, 2007.
- 6) 日本地下水学会編: 地下水シミュレーション, 技報堂, pp.34-47, 2010.
- 7) J. Istok: Groundwater modeling by the finite element method, Water resources monograph 13,

- AGU, p.495, 1989.
- 8) J. Bear : Dynamics of fluids in porous media, Dover Publications, pp.122-125, 1972.
 - 9) S. P. Neuman : Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., ASCE HY, Vol.99, No.12, pp.2233-2250, 1973.
 - 10) S. P. Neuman, : Galerkin Method of Analyzing Nonsteady Flow in Saturated-Unsaturated Porous Media, Finite Element Method in Flow Problems, edited by C. Taylor, O. C. Zienkiewicz, R. H. Gallagher, John Wiley & Sons, Chap.19, 1974.
 - 11) L. A. Richards : Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums, Physics, 1, pp.318-333, 1931.
 - 12) D. Swartzendruber : The Flow of Water in Unsaturated Soils, Flow through Porous Media, edited by R. J. M. De Wiest, Academic Press, Chap.6, p.217, 1969.
 - 13) A. Klute : A Numerical Method for Solving the Flow Equation for Water in Unsaturated Materials, Soil Sci., 73, pp.105-106, 1952.
 - 14) M. A. Biot : General Theory of Three-dimensional Consolidation, Journ, Appl. Phys., pp.12-155, 1941.
 - 15) 地下水要覧編集委員会 : 地下水要覧, 山海堂, pp.711-720, 1988.
 - 16) 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, 物理探査, Vol.28, No.6, pp.268-276, 1975.
 - 17) 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, pp.1-46, 2001.
 - 18) T. Kitaoka, H. Kusumi, and M. Nakamura : Pumping simulations using 3D analysis on multi-pumping wells, 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics (Harmonising Rock Engineering and the Environment), p.247, 2011.
 - 19) 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, pp.19-25, 1980.
 - 20) 土木学会編 : 水理公式集, 建設産業調査会, pp.339-345, 1999.
 - 21) 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.

第4章 井戸の老朽化を考慮した3次元揚水シミュレーション解析

4.1 はじめに

前章では、1本当たりの揚水量が比較的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を定量的に検討するために、揚水シミュレーション解析を行った結果について述べた。その成果として、多くの揚水井での水位変動を再現することができた。しかしながら、一部の井戸においては、揚水量を一定または抑えているにも拘わらず、水位が低下するという傾向を再現するには至らなかった。揚水井では、長期間に亘って揚水し続けると、地下水位の低下や、必要な水量を確保できない等の様々な地下水障害が表面化してくる。その要因として、経時的な井戸能力の低下は、スクリーンの目詰りに起因することが多いとされる。また、排砂量の増加や急激な水位低下等は、ケーシング、スクリーンの破損といった井戸構造に係るトラブルが基になっていることが多い¹⁾。前章のモデルでは、このような井戸の老朽化による、ストレーナー部分の透水性の低下現象を考慮していない。そこで本章では、前章で構築したモデルを用いて井戸の老朽化を考慮し、老朽化による水位低下特性を、揚水シミュレーション解析により検討を行うとともに、実測値との比較検討も行った。具体的には、最初に対象地における、老朽化が生じている井戸で行われた洗浄工事の結果、および地下水位の変動特性について述べる。次に、井戸の老朽化を、シミュレーション解析で再現する手法について述べる。最後に、井戸の老朽化を考慮したシミュレーション解析を実施し、実測値と解析値の整合性から、井戸の老朽化を定量的に検討した。

4.2 井戸の老朽化に関する調査

4.2.1 井戸の老朽化とは

図4-1は、水中カメラ調査で撮影した、ストレーナー部分の目詰まりの現象を示している²⁾。井戸は、長年の使用によってストレーナー部分に錆が生じることや、地下水中のカルシウム、マグネシウム、鉄などの重炭酸塩が、揚水時の水位低下による圧力降下によって二酸化炭素を



図4-1 目詰まりの現象

放逸して、溶解性の重炭酸塩が難溶解性の炭酸塩に変化し、スケールとなってストレーナー部分に膠着する。その結果、ストレーナーの流路面積が縮小して、井戸内への流入量が減少する。さらに、ストレーナーは、ストレーナー周辺の充填砂利層の流れが一方向であるために、帯水層の細砂や粘土が徐々に詰まり、ブリッジング状態となって採水層の透水性を阻害するため、井戸の取水能力が低下する³⁾。以上より、井戸の老朽化現象とは、ストレーナー周辺部における透水係数の値に着目すると、透水係数の分母の定数にある粘性係数が大きくなることにより、透水性が悪化することで老朽化が進行すると考えられる。老朽化の多くは、微細な土粒子や細菌がストレーナーに付着する目詰まりが原因であることから、目詰まりは洗浄工事等を行うことで除去できると考えられる。洗浄工事を行う時期は、井戸が完成されたときの比湧水量の80%以下に低下しないうちに実施することが良いとされ、50%まで低下した場合には、いかなる策を施しても多くの場合回復不能と言われている⁴⁾。そこで、経時的な水位変動を観察し、井戸の老朽化の進行度合を把握しておくことが重要である。

4.2.2 老朽化が生じている井戸の諸元

対象地域において現在使用されている上水用の揚水井では、直近10年間に老朽化が進行している井戸は2本ある。図4-2は、井戸の老朽化が生じていると考えられる揚水井の位置を示したものである。井戸の老朽化が問題となっている揚水井は、城陽市の第1浄水場1号井と、八幡浄水場の6号井である。(以後、城陽1-1、八幡6とする。)

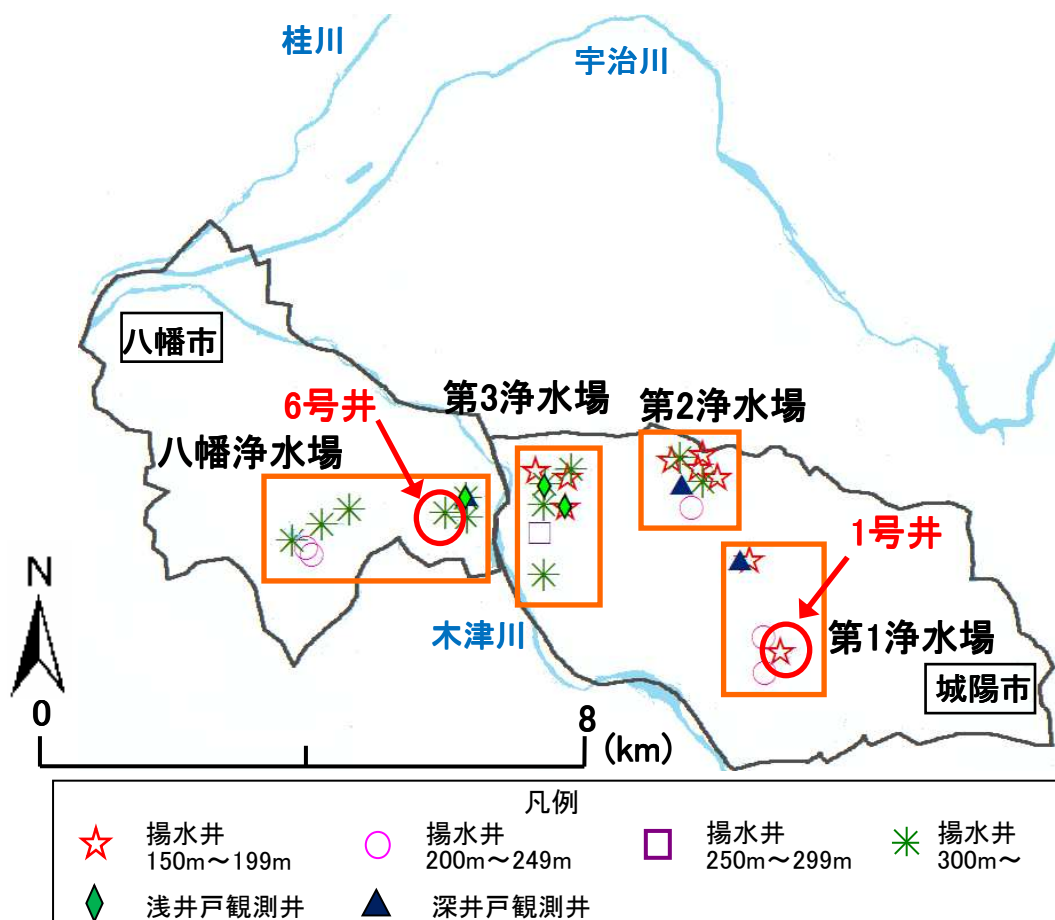


図4-2 井戸の老朽化が生じている揚水井の位置

表 4-1 は、各揚水井における主要資材を示している。表 4-2 と表 4-3 は、各揚水井におけるストレーナーの位置と層厚を示している。表に示されるように、各ストレーナーの最浅部は、城陽 1-1 では、90m 程で、八幡 6 では、150m 程である。各ストレーナーの最深部は、城陽 1-1 では、160m 程で、八幡 6 では、300m 程である。両揚水井は、非常に深い位置から地下水を揚水していることが分かる。図 4-3 は、各揚水井のボーリング柱状図を示している。図に示されるように、城陽 1-1 では、ストレーナーが連続して設置されているのに対して、八幡 6 では、帯水層ごとに分けてストレーナーを設置していることが分かる。図 4-4 は、粒径の区分と呼び名を示している⁵⁾。図 4-5 と図 4-6 は、城陽 1-1 と八幡 6 の、各ストレーナーが存在する層の地質特性を示したものである。図 4-5 に示されるように、城陽 1-1 は、砂礫層を主体としているが、粘土混じり成分が半分程占め、礫混じりの荒砂が 16%程含まれていることが分かる。粘土の粒径は 5 μ m 以下で、荒砂の粒径が 425 μ m～2,000 μ m 程である。粘土の割合等の詳細なデータをボーリング柱状図からは読み取れないが、粘土成分を含むことから、比較的に粒径が小さい層にストレーナーが存在していることが分かる。図 4-6 に示されるように、八幡 6 は、砂の成分が 100%を占めていることが分かる。砂の粒径が 75 μ m～2,000 μ m 程であるが、詳細な土の粒径が既存の資料からは読み取れない。

表 4-1 主要資材

	品名	規格	数量
城陽 1-1	ケーシングパイプ	FRPM	6.0m×22 本 4.0m×2 本
	スクリーン	多板式スクリーン	4.0m×12 本 2.0m×1 本
八幡 6	ケーシングパイプ	FRPM	6.0m×39 本 4.0m×6 本
	スクリーン	多板式スクリーン（巻線型）と スリット	4.0m×9 本 2.0m×4 本

表 4-2 採水深度とストレーナー（城陽 1-1）

深度 (G. L. m-m)	層厚 (m)	ストレーナー長 (m)
90-104	14	2×1 4×10
104-124	20	
124-130	6	
130-134	4	4×2
138-162	24	
計 9 本	70	50

表 4-3 採水深度とストレーナー (八幡6)

深度 (G. L. m-m)	層厚 (m)	ストレーナー長 (m)
148-154	6	4
188-194	6	4
196-200	4	2
204-207	3	2
219-224	5	2
227-234	7	4
247-254	7	4
256-274	18	4×3
287-301	14	6
計 9 本	70	44

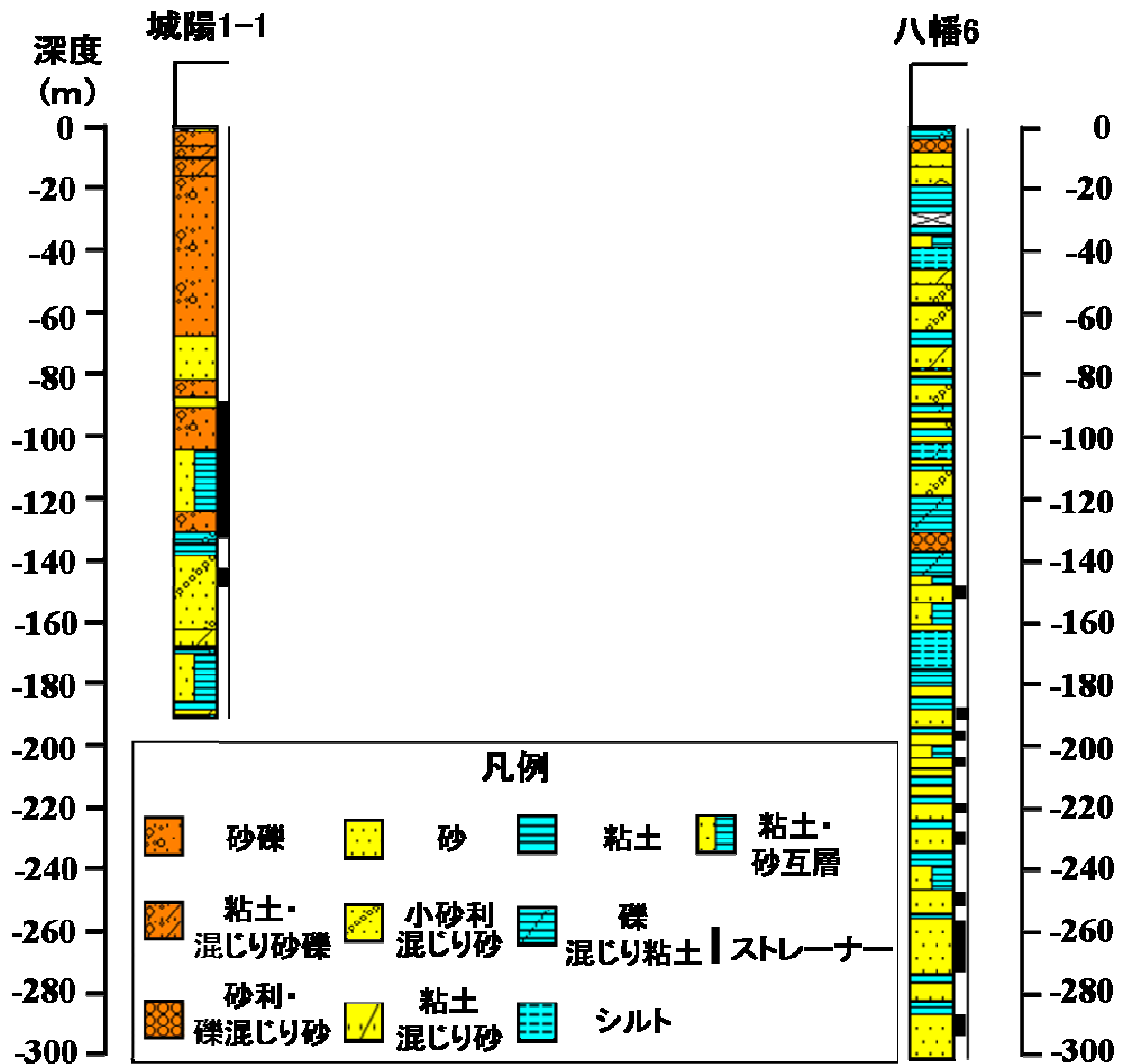


図 4-3 ボーリング柱状図

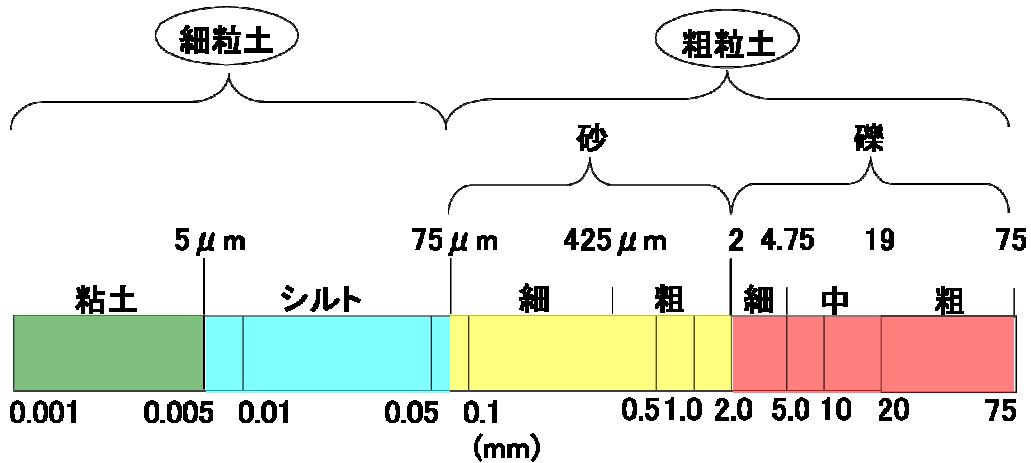


図 4-4 粒径の区分と呼び名

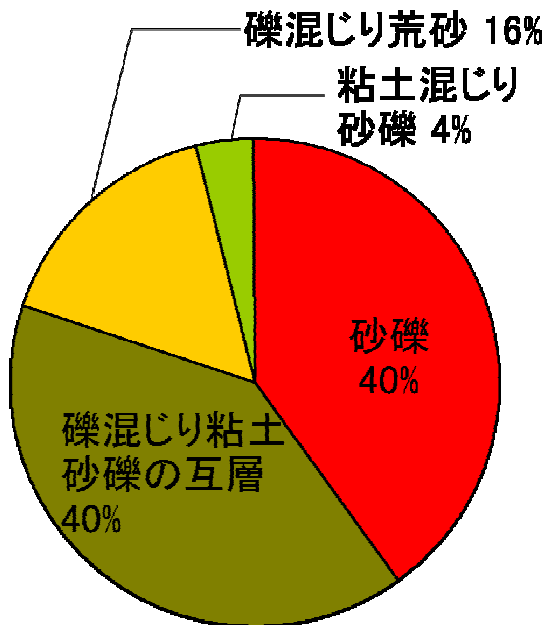


図 4-5 城陽 1-1 の地質特性

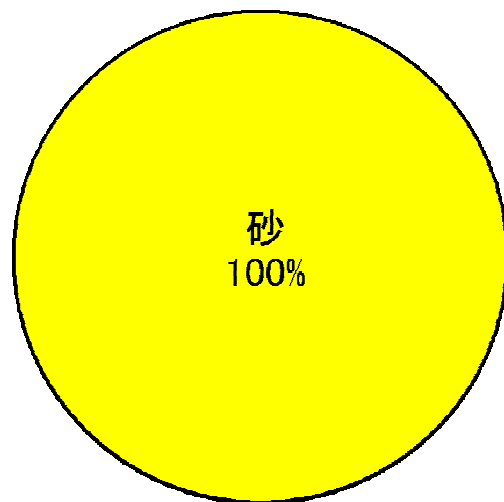


図 4-6 八幡 6 の地質特性

4.2.3 老朽化が生じている井戸の洗浄工事

図 4-7 は、揚水試験の流れを示している。井戸をさく井した場合や洗浄工事を行った場合、通常、井戸の特性を把握するために揚水試験が行われるが、これには段階揚水試験と定量揚水試験、回復試験などがある。段階揚水試験とは、一定時間ごとに揚水流量を段階的に変化させ、揚水流量と揚水井の水位低下量の関係を把握する試験である。それにより、限界揚水量や湧水能力等を求めることができる。定量揚水試験とは、目標揚水流量で揚水を開始し、揚水開始か



図 4-7 揚水試験の流れ

らの経過時間、揚水井および各観測井の水位と揚水流量の関係を把握する試験である。回復試験とは、揚水を終了し、その後の経過時間、揚水井および各観測井の水位を把握する試験である。定量揚水試験や回復試験を行うことにより、透水量係数や貯留係数といった水理定数を求めることができる⁶⁾。ここで、城陽 1-1 と八幡 6 における現場揚水試験の結果^{7)~10)}をまとめる。

表 4-4~表 4-7 は、城陽 1-1 における、さく井時、洗浄前、洗浄後、ポンプの位置変更後に行われた段階揚水試験の結果を示している。2004 年に、城陽 1-1 で行われた洗浄工事では、浚渫・ブラッシング作業を施した。その後、バックウォッシング作業を行った。洗浄後は、ポンプの位置を変更した。表に示されるように、1999 年に行われたさく井時と、2004 年の洗浄前と洗浄後の比湧出量を比較すると、50%から 70%程、湧水能力が低下していることが分かる。2004 年に行われた洗浄工事では、洗浄工事前と、洗浄工事後の湧水能力を比べると、洗浄工事後の湧水能力が低いことから、洗浄工事の効果が見られないことが分かる。そこで、ポンプの位置を変更することで、さく井した当初の湧水能力と同程度の能力を得た。図 4-8 は、城陽 1-1 の $Q-S_w/Q$ 線による損失係数を示している。これは、帯水層の損失係数 B と井戸損失係数 C を求めることができる¹¹⁾。表 4-8 は、損失係数の一覧表を示している。表に示されるように、井戸損失係数の変化はないが、帯水層損失係数が大きくなっていることから、帯水層の目詰まりが年々進行していたと考えられる。

表 4-4 段階揚水試験結果（城陽 1-1 のさく井時）

項目	揚水量		揚水水位 (m)	水位降下量 (m)	比湧出量 (m ³ /day/m)
	m ³ /h	m ³ /day			
第 1 段階	30	720	33.14	3.46	208.1
第 2 段階	50	1,200	35.61	5.93	202.4
第 3 段階	70	1,680	38.70	9.07	186.3
第 4 段階	90	2,160	40.99	11.31	191.0
第 5 段階	113	2,712	44.51	14.83	182.9
第 6 段階	90	2,160	41.67	11.99	182.2
第 7 段階	70	1,680	39.45	9.77	172.0
第 8 段階	50	1,200	36.23	6.55	183.2
第 9 段階	30	720	34.02	4.34	16.9
				平均	185.8

表 4-5 段階揚水試験結果（城陽 1-1 の洗浄前）

項目	揚水量		揚水水位 (m)	水位降下量 (m)	比湧出量 (m ³ /day/m)
	m ³ /h	m ³ /day			
第 1 段階	32	768	38.24	8.08	95.0
第 2 段階	40	960	40.24	10.08	93.6
第 3 段階	48	1,152	42.65	12.49	92.2
第 4 段階	52	1,248	43.85	13.69	89.3
第 5 段階	56	1,344	44.47	14.31	93.6
第 6 段階	52	1,248	43.78	13.62	90.7
第 7 段階	48	1,152	42.95	12.79	90.7
第 8 段階	40	960	41.24	11.08	86.4
第 9 段階	32	768	39.20	9.04	85.0
				平均	90.7

表 4-6 段階揚水試験結果（城陽 1-1 の洗浄後）

項目	揚水量		揚水水位 (m)	水位降下量 (m)	比湧出量 (m ³ /day/m)
	m ³ /h	m ³ /day			
第 1 段階	40	952	46.85	16.76	56.2
第 2 段階	50	1,200	51.95	21.86	54.7
第 3 段階	60	1,440	25.88	25.88	56.2
第 4 段階	65	1,560	58.18	28.09	54.7
第 5 段階	70	1,680	60.47	30.38	54.7
第 6 段階	65	1,560	30.13	29.23	53.3
第 7 段階	60	1,440	28.78	28.12	51.8
第 8 段階	50	1,200	24.34	24.34	49.0
第 9 段階	40	952	18.79	19.23	49.0
				平均	53.3

表 4-7 段階揚水試験結果（城陽 1-1 のポンプ位置変更後）

項目	揚水量		揚水水位 (m)	水位降下量 (m)	比湧出量 (m ³ /day/m)
	m ³ /h	m ³ /day			
第 1 段階	10	240	30.82	0.99	243.4
第 2 段階	20	480	32.47	2.64	184.3
第 3 段階	30	720	33.98	4.15	174.2
第 4 段階	40	960	35.29	5.46	174.2
第 5 段階	50	1,200	37.17	7.34	164.2
				平均	188.6

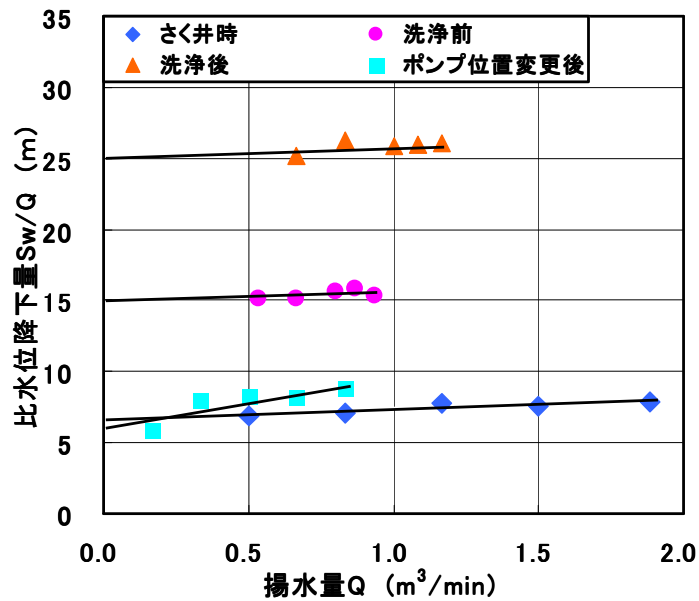


図 4-8 城陽 1-1 の Q-S_w/Q 線による損失係数解析図

表 4-8 城陽 1-1 の損失係数の解析一覧表

	B (帯水層損失係数)	C (井戸損失係数)
さく井時	7.5	0.4
洗浄前	15	0.4
洗浄後	25	0.4
ポンプ位置変更後	6.0	0.5

表 4-9～表 4-11 は、八幡 6 における、さく井時、洗浄前、洗浄後に行われた段階揚水試験の結果を示している。第 1 回洗浄工事として、1995 年に、ブラッシングとスワッピングによるケーシングの目詰まりを除去し、第 2 回洗浄工事として、2002 年に、二重ケーシング工事を行った。なお、第 1 回洗浄工事の揚水試験の結果は入手できなかったため、掘削時と第 2 回洗浄工事の結果についてまとめる。表に示されるように、1987 年に行われたさく井時と、2002 年の二重ケーシング工事後の比湧出量を比較すると、50%程、湧水能力が低下していることが分かる。また、二重ケーシング工事の前後では、湧水能力の変化はほとんど見られない。その理由として、本工事では、パイプの縦割れにより、ストレーナーが破損寸前であったために行われた工事であり、目詰まりが進行していたわけではないことが挙げられる。図 4-9 は、八幡 6 の Q-S_w/Q 線による損失係数を示している。表 4-9 は、損失係数の一覧表を示している。表に示されるように、井戸損失係数の変化はないが、帯水層損失係数がさく井時と洗浄前後で少しの差が見られる。

表 4-9 段階揚水試験結果（八幡 6 のさく井時）

項目	揚水量		揚水水位 (m)	水位降下量 (m)	比湧出量 (m ³ /day/m)
	m ³ /h	m ³ /day			
第 1 段階	61	1,472	8.62	2.585	569.30
第 2 段階	97	2,327	6.88	4.320	538.70
第 3 段階	121	2,900	6.27	4.930	588.20
第 4 段階	155	3,725	4.88	6.320	589.30
第 5 段階	212	5,093	2.23	8.970	567.80
第 6 段階	164	3,941	3.26	7.945	496.00
第 7 段階	138	3,305	4.41	6.790	486.70
				平均	548.00

表 4-10 段階揚水試験結果（八幡 6 の洗浄前）

項目	揚水量		揚水水位 (m)	水位降下量 (m)	比湧出量 (m ³ /day/m)
	m ³ /h	m ³ /day			
第 1 段階	69	1,663	21.39	6.44	258.26
第 2 段階	90	2,164	23.28	8.33	259.82
第 3 段階	108	2,592	25.25	10.30	251.65
第 4 段階	128	3,069	27.29	12.34	248.67
第 5 段階	150	3,594	29.68	14.73	244.10
				平均	252.48

表 4-11 段階揚水試験結果（八幡 6 の洗浄後）

項目	揚水量		揚水水位 (m)	水位降下量 (m)	比湧出量 (m ³ /day/m)
	m ³ /h	m ³ /day			
第 1 段階	69	1,663	20.84	6.24	266.54
第 2 段階	90	2,164	22.72	8.12	266.54
第 3 段階	108	2,592	24.58	9.98	259.72
第 4 段階	128	3,069	26.13	11.53	266.14
第 5 段階	142	3,413	27.70	13.10	260.52
				平均	263.89

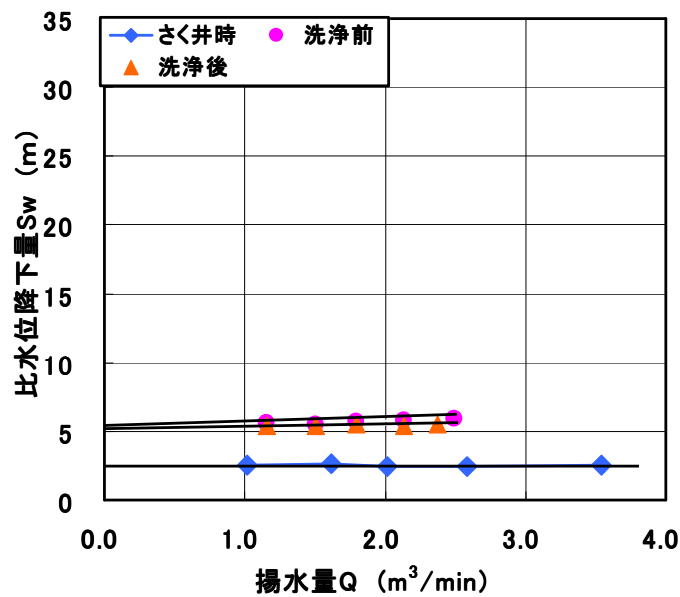


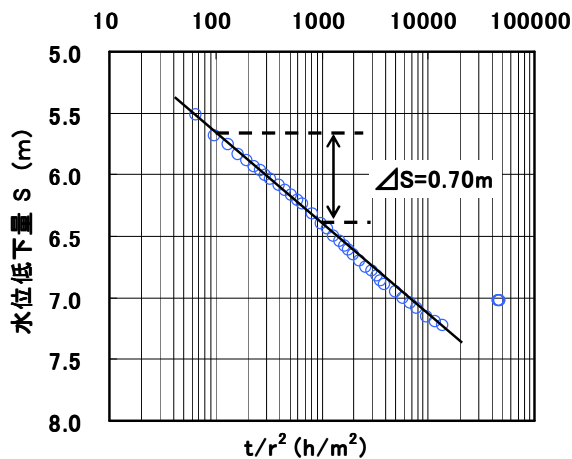
図 4-9 八幡 6 の $Q-S_w/Q$ 線による損失係数解析図

表 4-12 八幡 6 の損失係数の解析一覧表

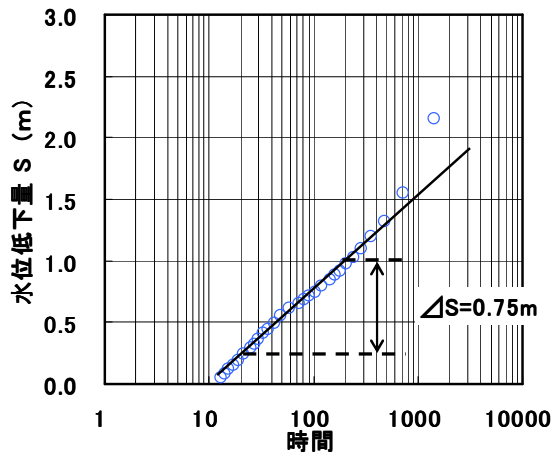
	B (帯水層損失係数)	C (井戸損失係数)
さく井時	2.5	0
洗浄前	5.4	0.5
洗浄後	5.3	0.1

次に、定量揚水試験と回復試験を行った結果により、透水係数を求める。図 4-10～図 4-12 は、城陽 1-1 における、さく井時、洗浄前、洗浄後に行われた定量揚水試験と回復試験の結果を示している。図 4-13～図 4-15 は、八幡 6 における、さく井時、洗浄前、洗浄後に行われた定量揚水試験と回復試験の結果を示している。透水係数は、定量揚水試験の結果を、ヤコブの式¹²⁾を用いて求め、回復試験で得られた値との平均値により算出した。それらの結果を、表 4-11 にまとめる。

城陽 1-1 においては、年々透水係数の値が低くなっていることが分かるが、八幡 6 においては、さく井時と第 2 回洗浄工事の結果を比較すると、透水係数は少し高くなっている。これは、後述するように、八幡市においては、さく井時から第 1 回洗浄工事の間で水位が年々低下していることから、この時点での透水係数は低くなっていると推定される。しかしながら、第 1 回洗浄工事での、洗浄工事の効果が良かったことにより、1995 年から 2002 年の間の水位は安定したと考えられる。第 2 回洗浄工事は、スクリーンの破損により、2000 年の末頃に水位が急激に低下したことから行ったものであるため、目詰まりが生じていた訳ではないと考えられる。

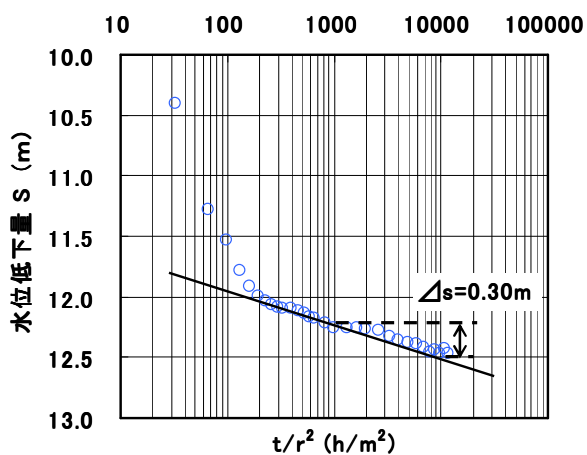


(a) ヤコブの試験

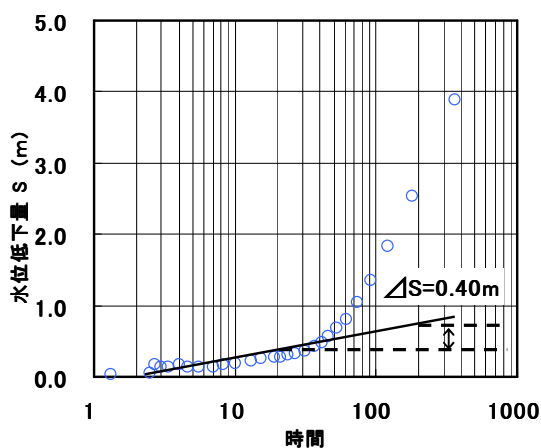


(b) 回復試験

図 4-10 城陽 1-1 さく井時

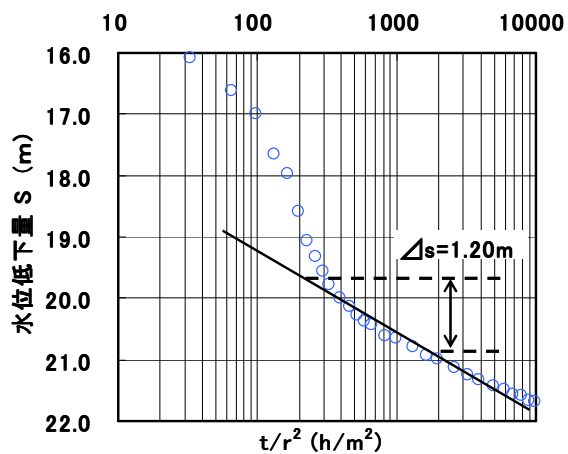


(a) ヤコブの試験

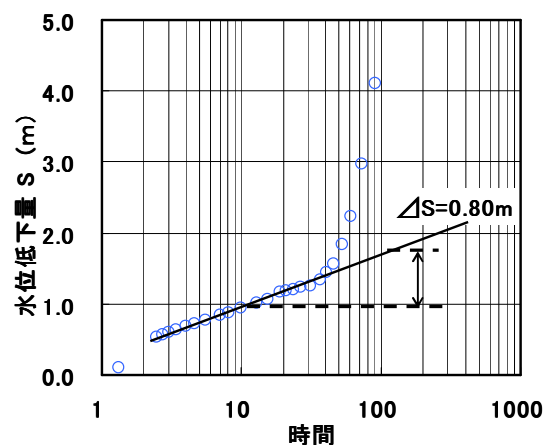


(b) 回復試験

図 4-11 城陽 1-1 洗浄前

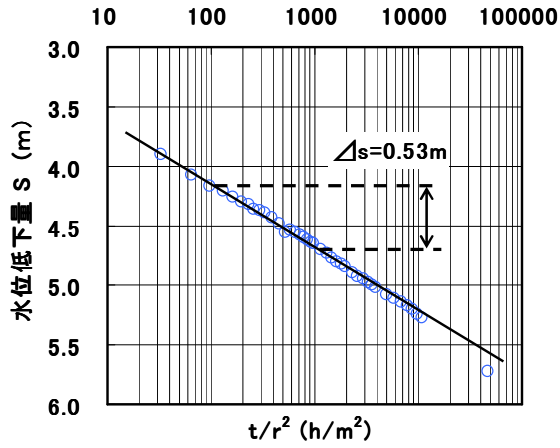


(a) ヤコブの試験

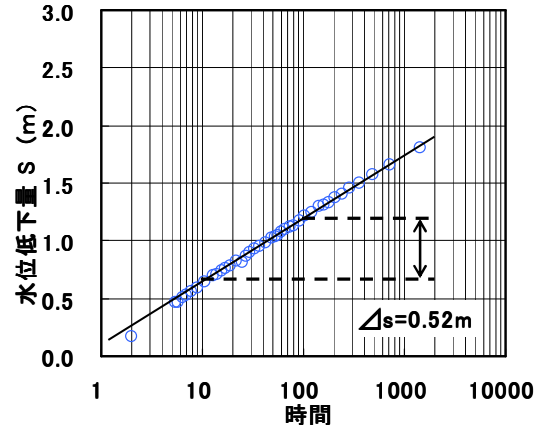


(b) 回復試験

図 4-12 城陽 1-1 洗浄後

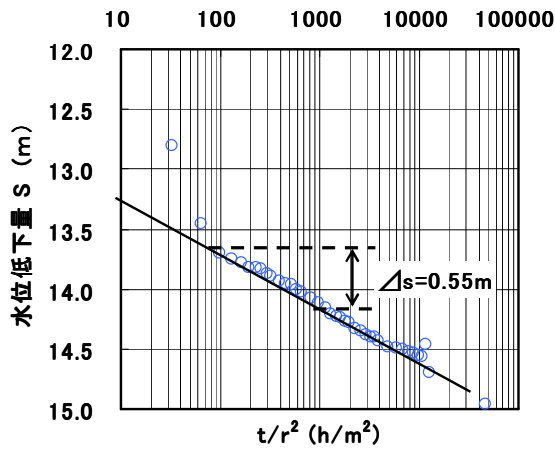


(a) ヤコブの試験

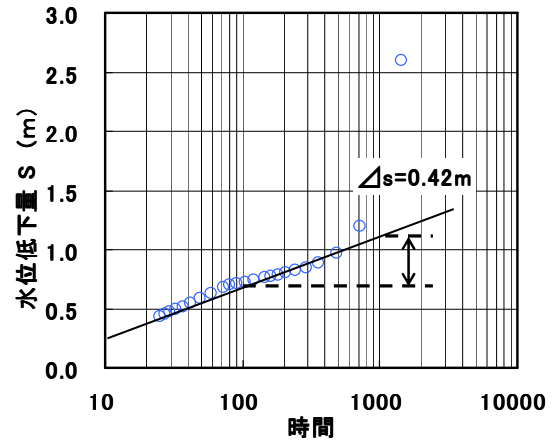


(b) 回復試験

図 4-13 八幡6のさく井時

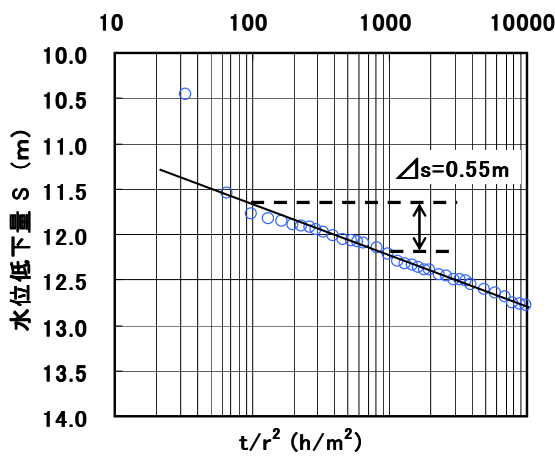


(a) ヤコブの試験

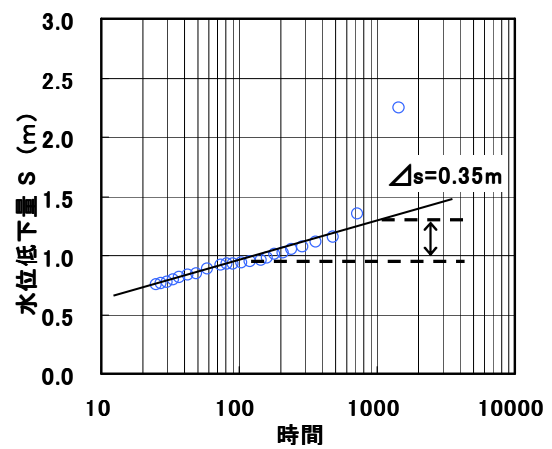


(b) 回復試験

図 4-14 八幡6の洗浄前



(a) ヤコブの試験



(b) 回復試験

図 4-15 八幡6の洗浄後

表 4-11 揚水試験の結果のまとめ

城陽 1-1	諸元		水理定数		鑿井時 (1997)	第 1 回洗浄 (2004 年)		
						洗浄前	洗浄後	ポンプ
	標高 (O. P. m)	40	自然水位(GL.-m)	29.68		7.42×10 ⁻³	5.11×10 ⁻³	不明
	深さ (G. L. -m)	190	透水係数(cm/sec)	8.43×10 ⁻³				
	口径 (mm)	350	適正揚水量(m/day)	2,160				
	ストレーナー長 (m)	50	限界揚水量(m/day)	1,500				
八幡 6	諸元		水理定数		鑿井時 (1987)	第 1 回洗浄 (1995 年)	第 2 回洗浄 (2002 年)	
						不明	洗浄前	洗浄後
	標高 (O. P. m)	14	自然水位(GL.-m)	11.22		不明	2.00×10 ⁻³	2.11×10 ⁻³
	深さ (G. L. -m)	301	透水係数(cm/sec)	1.57×10 ⁻³				
	口径 (mm)	350	適正揚水量(m/day)	3,375				
	ストレーナー長 (m)	44	限界揚水量(m/day)	4,500				

4.2.4 老朽化が生じている井戸の水位変動

図 4-16 は、井戸の老朽化が進行している、城陽 1-1 の水位グラフを示している。図に示されるように、1997 年から揚水が行われているが、水位は、2011 年末までに約 19m 低下し、年間約 1.3m のペースで低下していることが分かる。2004 年に洗浄工事を行い、2005 年の初め頃まで水位は回復しているが、それ以降、洗浄工事の効果が見られず、水位は低下し続けている。揚水量は、1999 年の約 1,300m³/日を最大として、2009 年の中頃までには約 800m³/日の揚水量まで徐々に抑えている。それ以降揚水量を増やして、約 1,000m³/日で揚水しているため、水位はさらに低下している。また、この地域の水位自体が下がっているのかを把握するために、周辺の井戸の水位変動特性を考察した。城陽 1-1 の周辺の井戸に関しては、城陽 1-2 が 350m 程にあり、城陽 1-3 が 400m 程にある。図 4-17 は、城陽 1-2 の水位グラフを示している。図 4-18 は、城陽 1-3 の水位グラフを示している。図に示されるように、城陽 1-2 の水位は、現在上昇傾向にあることが分かる。また、城陽 1-3 の水位は、2009 年の中頃に、揚水量を約 500m³/日増やしたことにより、水位は一時的約 5m 低下しているが、現在は上昇傾向にある。すなわち、この地域における水位が低下していることはない。

図 4-19 は、老朽化が進行している八幡 6 の水位グラフを示している。図に示されるように、1988 年から揚水が行われているが、水位は、2011 年末までに 22m 程低下し、年間 90cm 程のペースで低下していることが分かる。特に、1988 年から 1993 年の 5 年間で、18m 程低下している。1995 年に洗浄工事を行ってから、水位は回復傾向にあったが、2000 年の末頃に急激に 4m 程の低下が見られた。そこで、2002 年に二重ケーシング工事を行い、揚水量も減少させた。水位は現在低下傾向にある。揚水量は 2002 年頃までの 2,600m³/日程を最大として、現在までに 2,000m³/日程の揚水量に徐々に抑えている。周辺の井戸に関しては、八幡 7 が 400m 程にあり、八幡 8 が 300m 程にある。図 4-20 は、八幡 7 の水位グラフを示している。図 4-21 は、

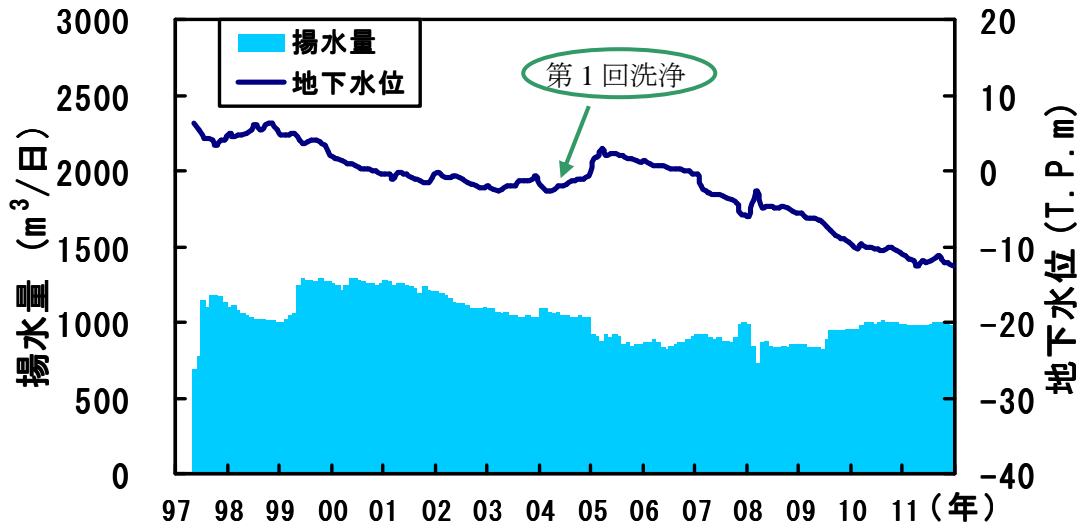


図 4-16 城陽 1-1 の揚水量と地下水位

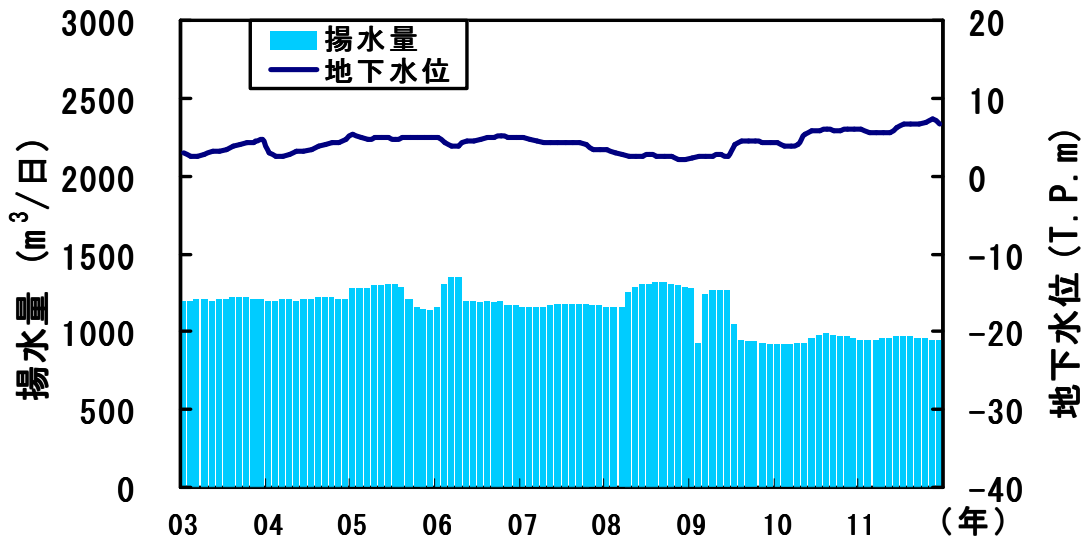


図 4-17 城陽 1-2 の揚水量と地下水位

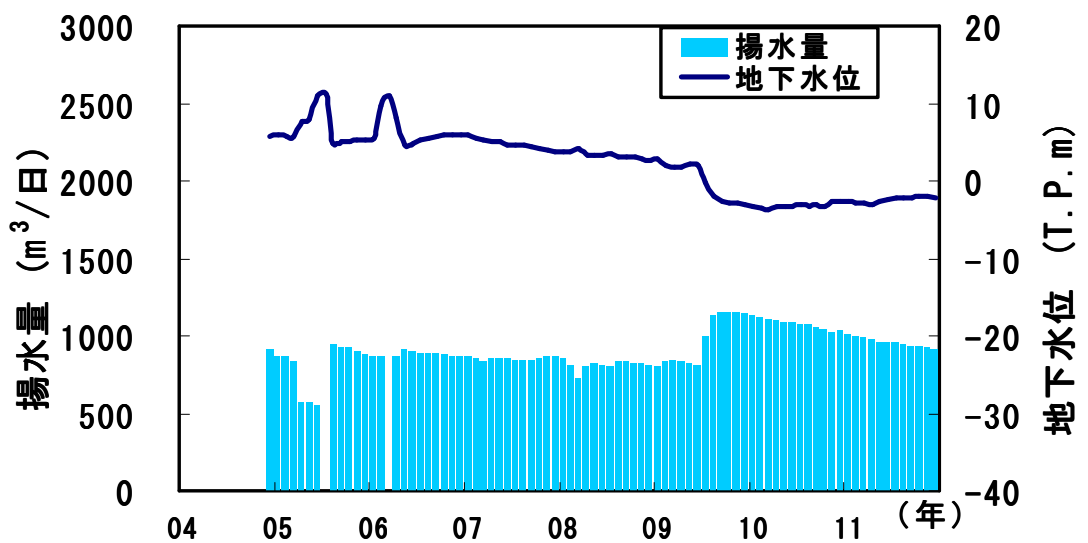


図 4-18 城陽 1-3 の揚水量と地下水位

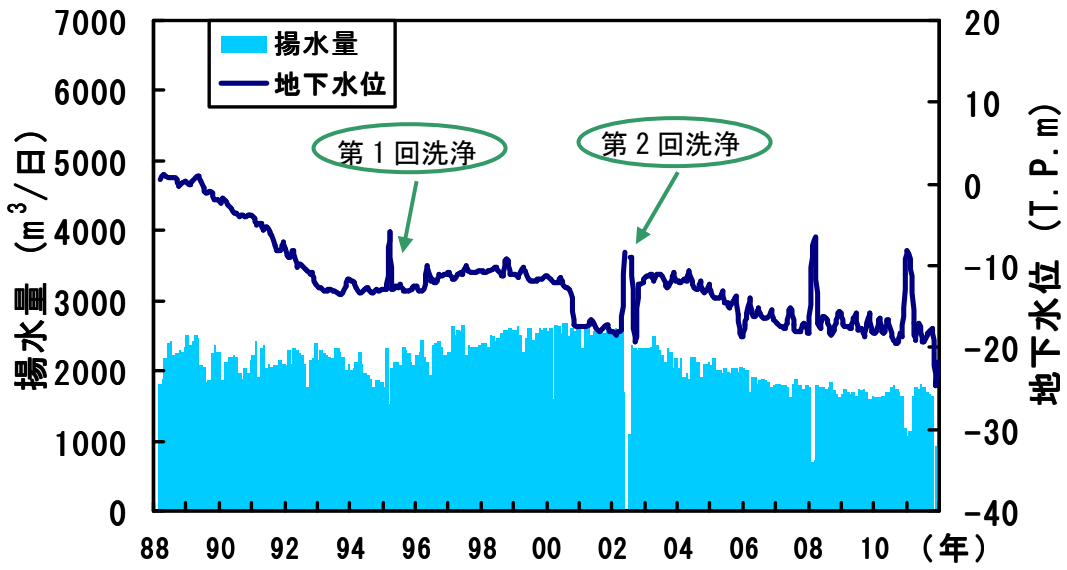


図 4-19 八幡6の揚水量と地下水位

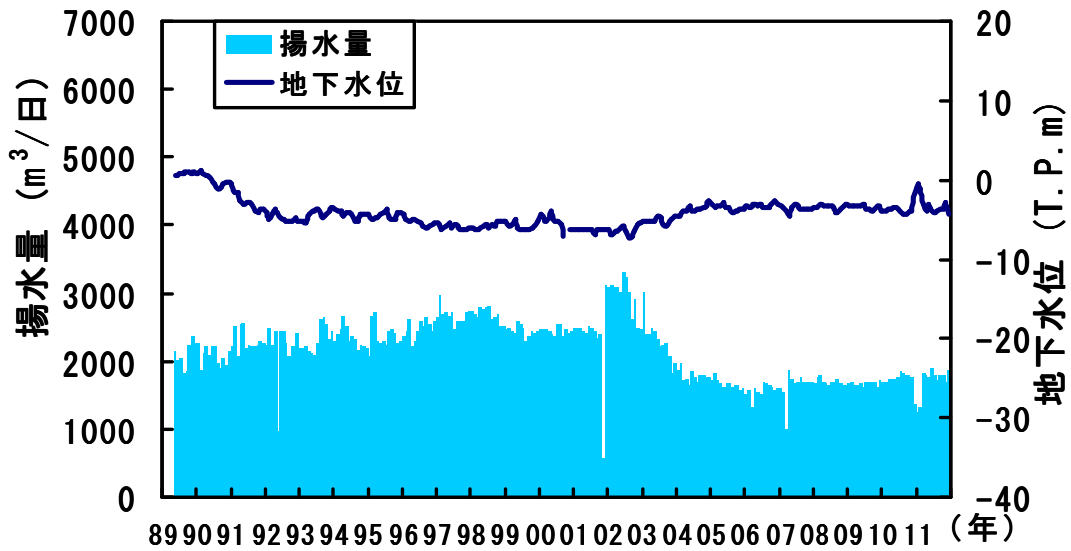


図 4-20 八幡7の揚水量と地下水位

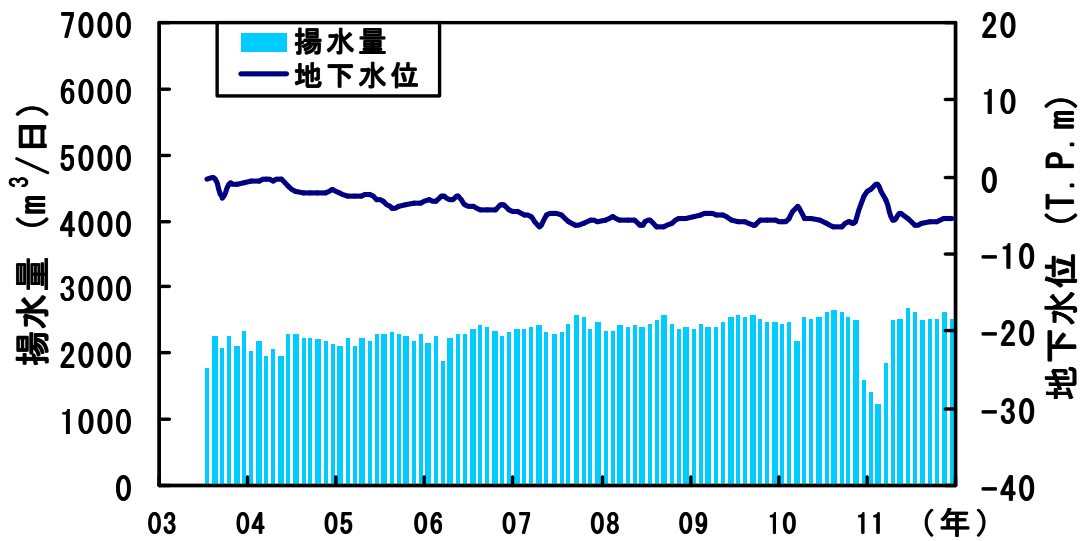


図 4-21 八幡8の揚水量と地下水位

八幡 8 の水位グラフを示している。図に示されるように、八幡 7 の水位は、1989 年から 1992 年までの期間に、約 5m の水位低下が見られるが、それ以降水位は安定している。八幡 8 の水位は、揚水を開始して以来水位は安定している。すなわち、この地域における地下水も、地下水位が低下していることはない。

以上に示したように、周辺の揚水井からの揚水量の増加等も少なく、本井戸における揚水量は一定、または減少させているにも拘わらず、水位が低下する傾向が見られた場合は、井戸の老朽化が進行していると考えられる。ストレーナーが存在する場所における地質特性を、定性的に検討した結果、井戸の老朽化が見られた揚水井のストレーナーが存在する帯水層は、砂質土や、粘土混じりの砂、及び礫で成り立っている地層が多いと言える。また、城陽第 3 浄水場や、八幡 7 や、八幡 8 などの地下水資源が豊富な場所においては、砂成分の帯水層にストレーナーが存在しても、井戸の老朽化は比較的に生じにくいと考えられる。しかしながら、八幡 6 で見られたように、大量に揚水を行っていただければ問題がないとは言えない。

4.3 老朽化を考慮した地下水揚水シミュレーションモデル

4.3.1 概要

井戸の老朽化を定量的に評価するには、老朽化による水位低下を、シミュレーション解析で再現する手法を考案する必要がある。本論文では、井戸の老朽化による水位低下を、シミュレーション上で再現する方法について検討した^{13) 14)}。老朽化を検討した揚水井は、対象地で現在老朽化が最も進行している、城陽 1-1 を対象として、前章で作成した C のモデルを用いて検討した。老朽化により地下水位を低下させるため、解析では、透水係数を経時的に減少させることで反映させた。そして、前章と同様に、解析期間は 2007 年から 2011 年までの直近 5 年間の解析対象期間とした。解析で用いた透水係数の低下率は、堀替え工事を行った際に得た透水係数と、2004 年に洗浄工事を行った際に得た透水係数の結果より、それらの差から透水係数の低下率を算出した。本研究では、5 年間の透水係数の低下率を、月ごとに、平均的に下げて老朽化を再現させたパターン 1 と、実際の水位低下現象に合わせるように老朽化を再現させたパターン 2 の、二通りの解析パターンにより井戸の老朽化の水位の再現性について検討した。パターン 2 は、実際の水位低下を参考にしながら、水位低下の激しい期間には透水係数の低下率を大きくし、水位低下が落ち着いている期間においては低下率を小さくしている。

4.3.2 井戸の老朽化を考慮した解析手法

本解析手法では、井戸の老朽化を解析上で考慮するため、揚水量を設定している節点の周りの要素の材質を経時的に変化させることにより、井戸の老朽化現象を表した。変更した材質は、水位変動に最も影響を及ぼす透水係数である。その理由として、井戸の老朽化は、スクリーンの目詰りに起因して透水性が下がるため、地下水の流入量が減ることに着目し、透水係数を経時的に低下させることで透水性を悪化させた。図 4-22 は、井戸の解析における井戸の老朽化の概念図を示している。図に示されるように、透水係数を変化させているのは、揚水を設定している節点の周りの要素であることが分かる。このように、城陽 1-1 の揚水を設定している節点の周りの要素の透水係数を経時的に低下させることで、井戸の老朽化を再現した。

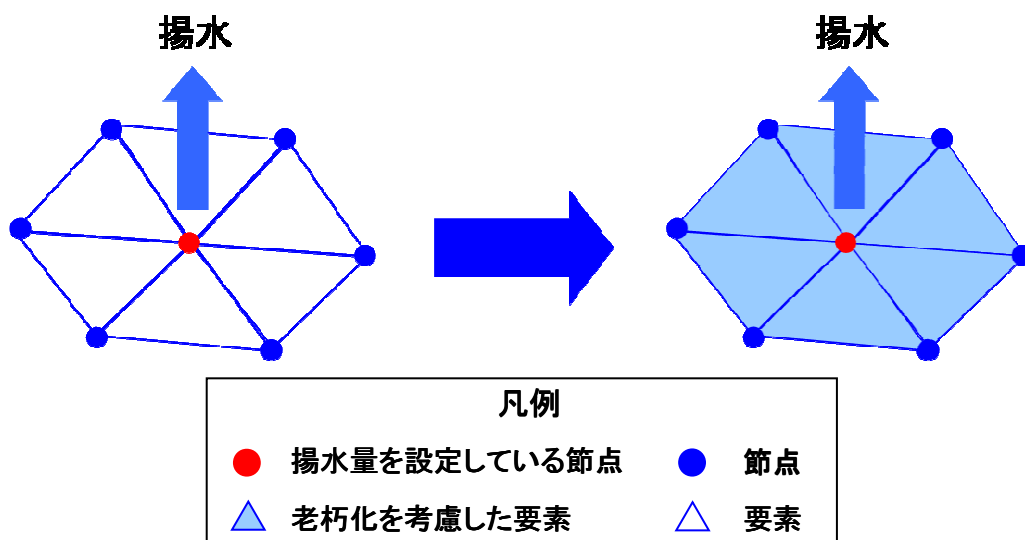


図 4-22 モデル上で揚水井の老朽化を考慮するための概念図

4.3.3 入力条件

モデル C を用いて老朽化を考慮した揚水シミュレーション解析を行う際、地盤物性値や境界条件は、前章で用いた値と同じである。井戸の老朽化により変更した物性値は、揚水量を設定している節点の周りの要素の透水係数である。ここでは、その透水係数の低下率を具体的に述べる。

城陽 1-1 における透水係数の低下率を、1997 年に掘り替え工事と、2004 年の洗浄工事を行った際に実施した現場揚水試験の結果より得た透水係数を用いて求めた。1997 年の透水係数は、 $8.43 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ であった。一方、2004 年の洗浄工事の際に得られた透水係数は、洗浄前では $7.42 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 、洗浄後では $5.11 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ であった。洗浄後の透水係数が、洗浄前の透水係数より悪くなっているが、これは、定量揚水試験で用いた揚水量が少なかったためであると考えられる。そこで、洗浄工事後の透水係数と、さく井時の透水係数を比較すると、透水係数は、7 年間で $3.50 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 程透水係数が悪化したと考えられる。年間当たりでは、 $0.50 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ 程低下していると推定される。一方、解析を実施した 2007 年から 2011 年にかけての現場揚水試験の結果はないので、1997 年から 2004 年の期間に実施した現場揚水試験の結果より得られた透水係数の低下率から、解析で設定する井戸の老朽化を考慮した透水係数を算定した。図 4-23 は、城陽 1-1 の地下水位の低下傾向を示している。図に示されるように、現場揚水試験を実施した 1997 年から 2004 年までの水位低下の近似曲線①と、解析期間である 2007 年から 2011 年までの近似曲線を比較すると、近似曲線②の傾きの方が 1.70 倍大きいことが分かる。揚水量について着目すると、1997 年から 2004 年までの一月当たりの揚水量は $1,150\text{m}^3$ であり、2007 年から 2011 年までの一月当たりの揚水量は 930m^3 であることから、揚水量を抑えているにも拘わらず、水位の低下は大きいことが分かる。すなわち、井戸の老朽化がさらに進行していると考えられる。2007 年から 2011 年までの透水係数の低下率は、1997 年から 2004 年の低下率の 1.70 倍として、年間当たりで $1.15 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 程低下していると算定した。図 4-24 は、解析パターン 1 で設定した透水係数の低下率を示している。解析では、2007 年から 2011 年までに、透水係数の値を $7.0 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ から、5 年後には $1.75 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ になるように下げ、実際の水

位低下の再現を試みた。解析パターン2では、近似曲線②を水位の低下率から均等に透水係数を下げるのではなく、2007年1月から2008年1月までの期間と、2008年1月から2010年1月までの期間、そして2010年1月から2011年12月までの期間の水位低下量を分析することにより、透水係数の低下率を算定した。図4-25は、解析パターン2で設定した透水係数の低下率を示している。図4-23に示されるように、2007年1月から2008年1月までの期間に水位は5.52m程下がり、2008年1月から2010年1月までの期間に水位は3.95m程下がり、10年1月から2011年12月までの期間に水位は2.55m程下がるといったように、水位の低下量がそれぞれの期間に応じて違うことから、それらの水位の低下する程度に合わせて、透水係数の低下率を算定した。

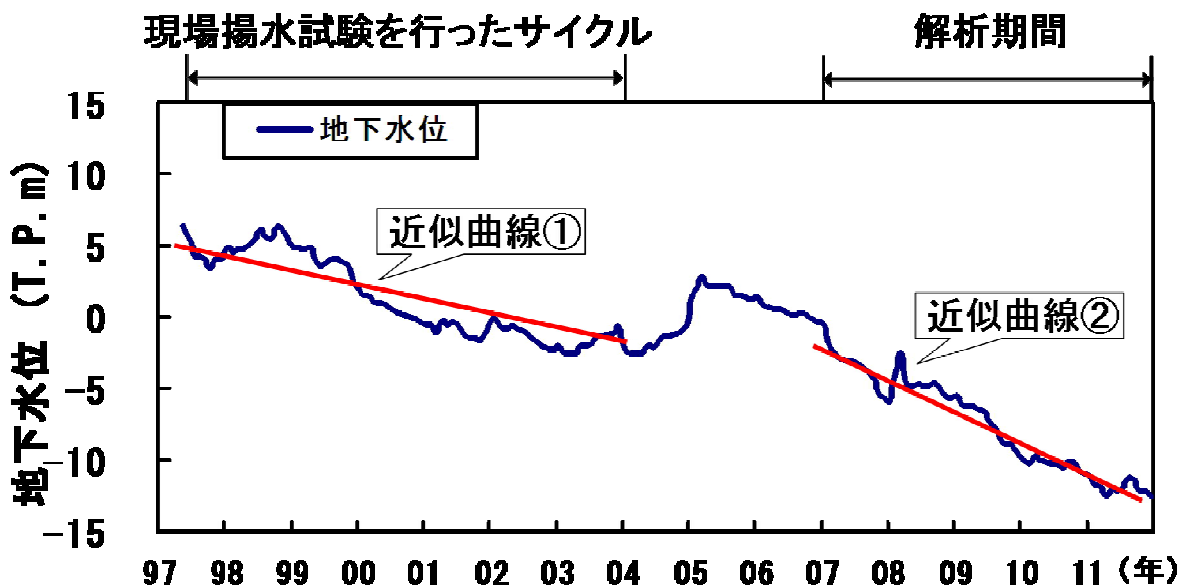


図 4-23 城陽 1-1 の地下水位変動

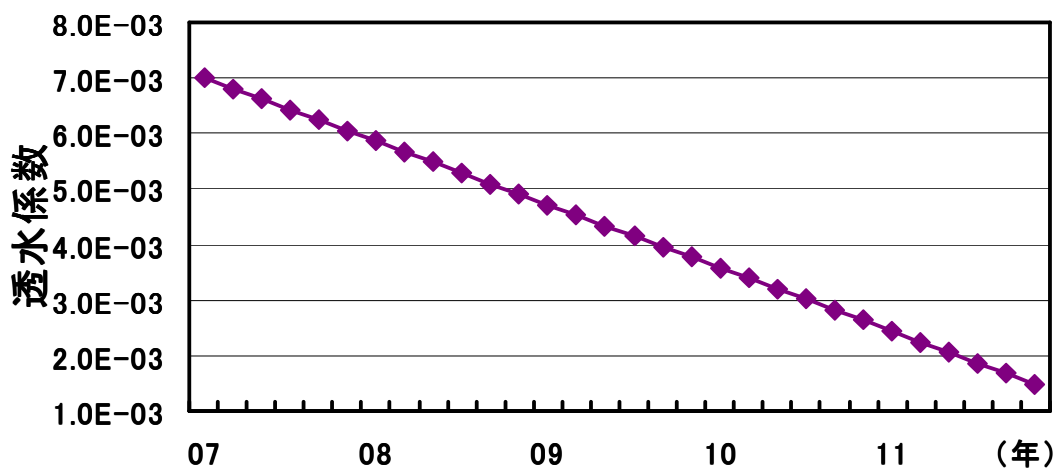


図 4-24 透水係数の低下パターン①

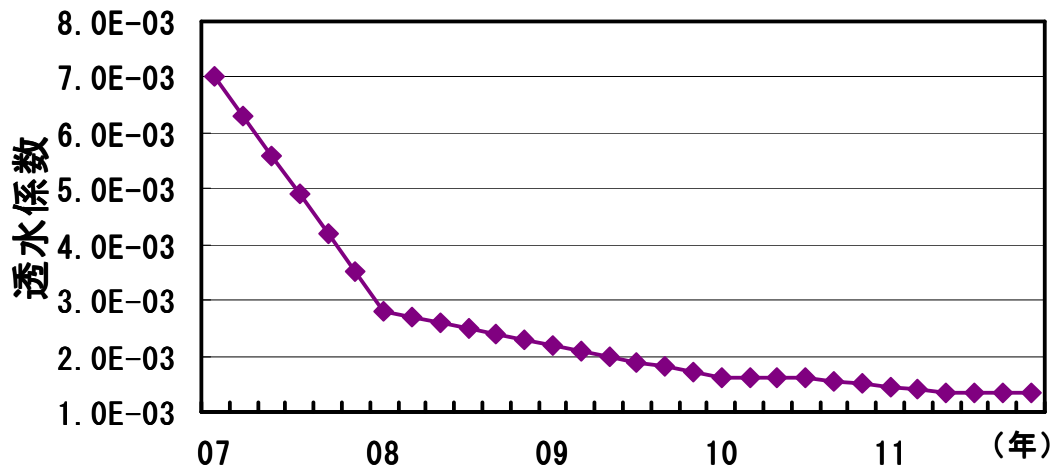


図 4-25 透水係数の低下パターン②

4.4 解析結果と実測との比較検討

図 4-26 は、解析パターン 1 の老朽化を考慮した場合と、考慮していない場合の解析結果を示している。老朽化を考慮していない解析結果では、揚水量が一定であることから、水位は上昇することも低下することもなく、安定していることが分かる。しかしながら、実際の水位変動は図に示されるように、年々低下傾向にあるため、解析結果と実測値の差が年々増加していることが分かる。そこで、前節で示した方法で井戸の老朽化を考慮することにより、水位を低下させた。解析結果より、実測の水位との差は最大 5m 程見られるが、水位の低下を再現させることができ、実際の水位変動に近づけることができた。前節で示したように、透水係数の低下率を一様に低下するように設定しているため、実際の水位低下との整合性は、解析の途中の期間において完全に再現することはできなかった。しかし、最終的に 5 年間で 10m 程の水位が低下するといった結果を再現することはできた。図 4-27 は、解析パターン 2 の老朽化を考慮した場合と、考慮していない場合の解析結果を示している。解析パターン 1 で算定した透水係数の低下率を参考にしながら、透水係数の低下率を、実際の水位の低下率から算定した値を用いて解析を実行した。その結果は、図に示されるように、実測の水位との整合性が非常に良い結果であった。特に、解析パターン 1 では、解析の途中の期間における水位の低下現象を完全に整合させることができなかったのに対して、解析パターン 2 では、途中の期間においても水位の低下現象を再現できていることが分かる。これらの結果により、井戸の老朽化による水位の低下現象は、透水係数を低下率させることで再現できることが分かった。すなわち、井戸の老朽化の進行や将来予測は、透水係数の低下率を十分に検討することで、老朽化を評価することが可能であることが認められた。

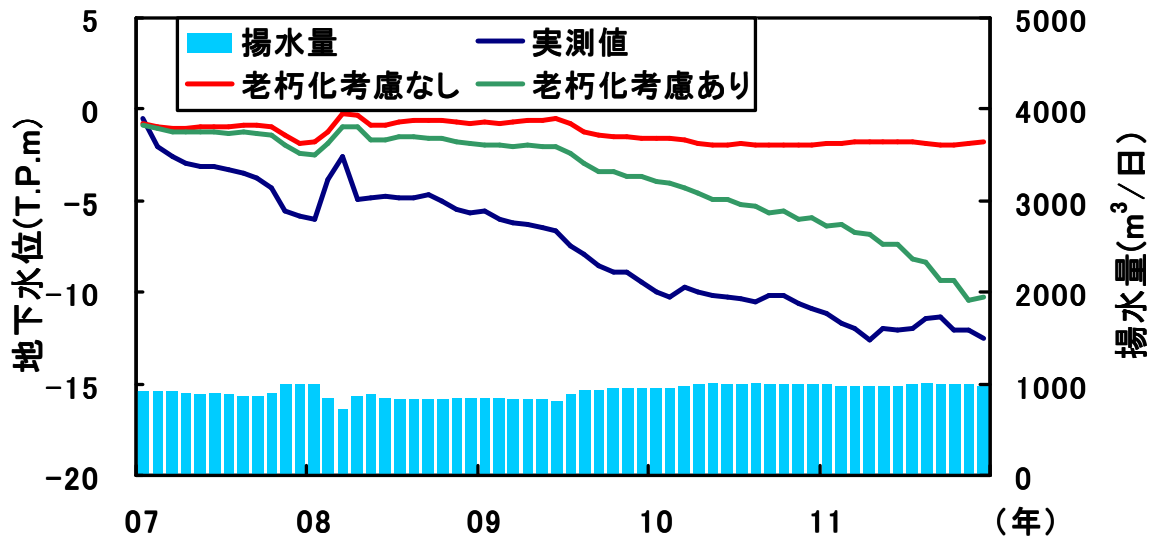


図 4-26 老朽化を考慮した解析パターン 1 の結果

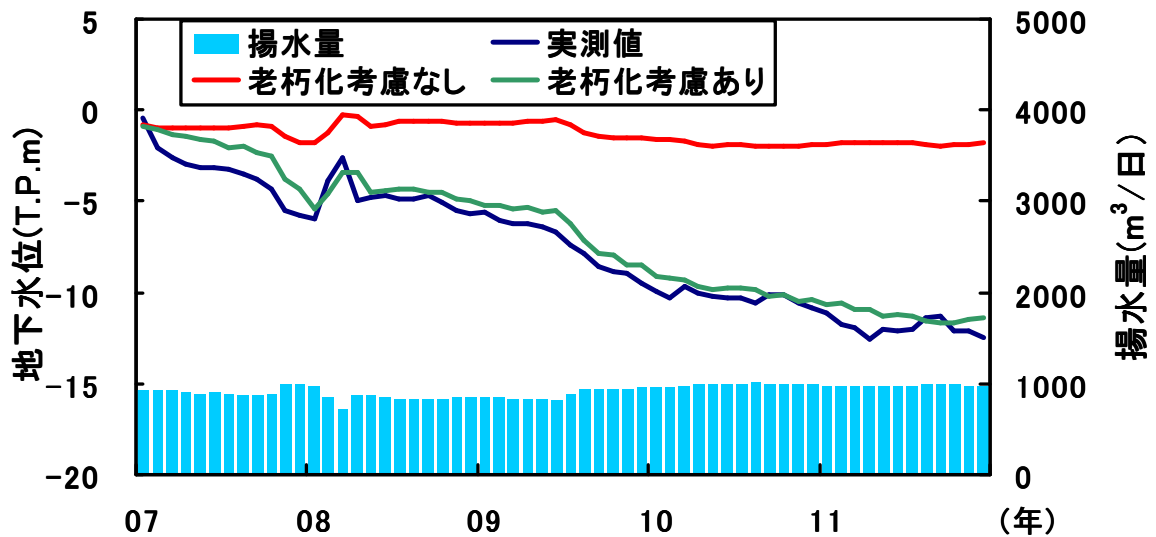


図 4-27 老朽化を考慮した解析パターン 2 の結果

4.5 まとめ

本研究では、揚水以外の要因による水位低下の影響を、井戸の老朽化と仮定し、老朽化による水位の低下を再現する方法について述べた。現在井戸の老朽化が進行している揚水井や、過去に井戸の老朽化が生じていた揚水井を調べると、砂礫成分の地層より、比較的砂成分が多い帯水層にストレーナーを設置している割合が多いことが認められた。シミュレーション解析では、揚水量を設定する節点の周りの要素の透水係数を経時的に低下させ、透水性を悪化させることで井戸の老朽化を再現した。その結果、シミュレーション上で、井戸の老朽化に伴う水位低下を再現することができた。井戸の老朽化は、解析パターン 1 と解析パターン 2 の結果から、透水係数の低下率を十分に検討して設定する必要があることが認められた。しかしながら、現段階で使用した透水係数の低下率は、揚水試験を行った期間のデータを参考に、推定を

基にして決定している。今後の課題として、対象地域で井戸の洗浄工事の際に行われる揚水試験のデータを、さらに分析していく必要がある。また、揚水試験によって求められる透水係数は、試験が行われる条件により、その値の信頼性に不安があるため、計画的に揚水試験を実施していく必要がある。

本手法で構築した揚水シミュレーションモデルと現位置計測の結果を用いて、揚水井の洗浄工事を行う時期などを提案していくことで、経済的かつ地下水障害を生じる事のないように、最適な揚水計画を決定する上で活用していきたい。

参考文献

- 80) 水井寿則：深井戸の洗浄（改修），地下水技術，Vol.50, No.4, pp.13-15, 2008.
- 81) 城陽市上下水道部：第3浄水場6号井洗浄工事報告書，pp.3-8, 2012.
- 82) 宮江伸一，手操能彦，江畑輝雄：深井戸の洗浄工事について，金沢大学工学部紀要，Vol.15, No.2, p.185, 1982.
- 83) 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，pp.414-415, 1980.
- 84) 富田武満，福本武明，大東憲二，西原晃，深川良一，久武勝保，楠見晴重，勝見武：最新土質力学（第2版），朝倉書店，pp.7-8, 2003.
- 85) 地盤工学会編：地盤調査基本と手引き，丸善出版，pp.165-172, 2005.
- 86) 城陽市上下水道部：第1浄水場1号井掘替工事報告書，pp.1-17, 1997.
- 87) 城陽市上下水道部：報告書第1浄水場1号井および第1浄水場4号井洗浄工事，pp.1-51, 2004.
- 88) 八幡市上下水道部：八幡市上水道第5次拡張事業第6号井さく井工事報告書，pp.1-42, 1987.
- 89) 八幡市上下水道部：平成14年度八幡市上水道事業美濃山浄水場第6号取水施設更正工事，pp.1-18, 2002.
- 90) 奥野日出，小山修平：地域地下水管理に関する揚水モデルと井戸損失の提案，地盤工学ジャーナル，Vol.6, No.1, pp.27-37, 2011.
- 91) 山本荘毅：新版地下水調査法，古今書院，pp.215-217, 1989.
- 92) S. Kotani, T. Kitaoka, M. Terada, and H. Kusumi : 3D Seepage Flow Simulation of Groundwater by Divided Ground Models in Kyoto Basin, EIT-JSCE International Symposium on International Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries, 2012.
- 93) 小谷修平，北岡貴文，寺田道直，楠見晴重：被圧帯水層を対象とした揚水シミュレーションおよび揚水井の老朽化の評価法に関する研究，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2012論文集，pp.93-100, 2012.

第5章 京都市伏見地域における地下水性状と3次元浸透流解析

5.1 はじめに

地下水の挙動を定量的に扱い、地下水流動場を可視化することは、地下水保全を行う上で大変有用である。本研究は、日本酒の名産地として知られる京都市伏見地域を対象とした。対象地は4km²程の地域に酒造会社が所有する約40本の井戸が密集し、地下水利用が盛んな地域である。対象地における既往の研究では、松原¹⁾は大規模な地下水調査を実施し、不圧地下水を対象とした水質調査や流動方向について報告した。伏見地区地下水調査委員会^{2), 3)}は被圧地下水までを対象とした水質調査や流動方向を検討した結果について報告した。堀池⁴⁾は京都市内にある名水を紹介し、市内における名水の水質や伏見の地下水の季節的な変動特性を踏まえた水質調査を行った。このように、特に水質分析に着目しながら研究に取り組んできた背景がある。しかしながら、対象地における広域の地下水流動場をシミュレーション解析により再現した経緯はない。本章では、京都市伏見地域における地下水資源を対象とし、周辺の揚水を伴った地下水位挙動を明らかにするために、現場計測ならびにシミュレーション解析を行い、地下水流動場を再現し視覚化した手法について記した。本章の流れは、最初に酒造会社が集中する場所を中心に地下水位の観測を行い、帯水層ごとの水位変動特性を把握した結果について述べる。次に、地下水流動場を求めるための3次元地質構造モデルを作成した経緯について述べる。そして、そのモデルを用いて現況再現解析を行い、実測値と比較的に整合した結果を基に、対象地の浅層部における広域的な地下水流動場を定量的に検討した。

5.2 伏見地域における観測井の地下水位変動

5.2.1 概要

研究対象地における不圧地下水と被圧地下水の水位変動の傾向や水位の変動幅、及び水位変動に及ぼす要因を把握した。ここでは、Dc1層より上部の層を不圧地下水とし、Dc1層より下部にある地下水を被圧地下水とする。なお、Dc層は洪積粘土を表し、上層から順に1層、2層とした。また、これらの実測のデータは後半に論ずる3次元地質構造モデルの検証を行う際にも活用する。図5-1は、酒造会社が集中する場所における観測井と揚水井の位置を示している。各観測井には、自記水位計を設置し、0時、3時、6時、9時、12時、15時、18時、21時の一日8回の水位を測定している。地下水の水位変動に及ぼす要因としては、降雨や揚水などが挙げられる。そこで、各層における地下水の水位変動に及ぼす要因を解明するために、降雨と揚水による影響が、観測している水位とどのような相関性を持つのかについて調べた。降雨と水位の相関性を調べるために、平日において揚水が行われている12時と揚水が行われていない0時における水位変動と降雨量を整理した。観測井の諸元（標高、ストレーナー位置、帯水層等）を整理した上で、各帯水層の代表例としてNo.7、No.4、No.6の観測井における観測水位と降雨量の関係を示す。また、揚水と水位の相関性を調べるために、Dg2層の水位を計測している

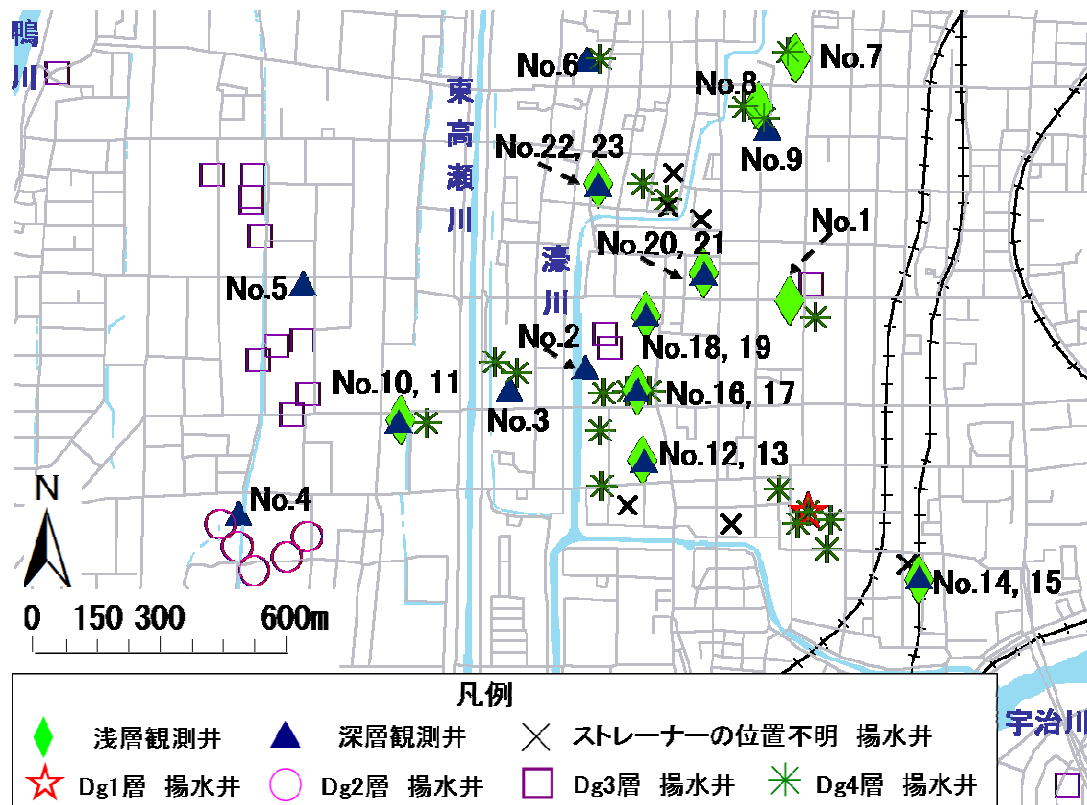


図 5-1 伏見地域にある観測井と揚水井の位置

No.4 の観測井において、各月ごとの 12 時の平均水位と各月ごとの Dg2 層から汲み上げられている総揚水量の関係についてまとめ、観測水位と揚水量の関係を示す。なお、Dg 層は洪積砂礫を表し、上層から順に 1 層、2 層とした。

5.2.2 観測井の地下水位変動と降雨量

図 5-2～図 5-4 は、観測を開始した 2008 年 6 月～2012 年 6 月における No.7、No.4、No.6 の観測井の水位変動と降雨量の傾向を示している。No.7 の井戸の深度が 20m で、水位を測定している層は Dg1 層である。No.4 の井戸の深度が 60m で、水位を測定している層は Dg2 層である。No.6 の井戸の深度が 95m で、水位を測定している層は Dg4 層である。

No.7 の観測井では、地下水位は降雨の影響を主に受けていることが分かる。降雨量が少ない季節に水位は低下傾向にあり、降雨量が多い季節に水位は上昇傾向にある。特に 7 月は降雨量が急に増加するのでそれに伴い水位も顕著に上昇している。観測を開始して以来、一日 24 時間には、大きく水位が変動することなく、近年約 3 年における平均水位は安定して推移している。No.4 の観測井では、平日は酒造会社が地下水を揚水しているので朝方から夕方頃まで水位が低下し、夕方から朝方にかけて水位が上昇する。休日やお盆、年末年始などでは揚水が行われていない時期で、水位が上昇し、一日当たりの変動は見られない。この観測井の周辺にある揚水井からの揚水量は、この辺りでは多く観測井の水位変動幅は一日当たり平均 80cm と大きい。観測を開始して以来、一日当たりの水位の変動は比較的大きいものであるが、直近 3 年間に於ける水位は安定して推移している。No.6 の観測井は、No.4 と同様の水位変動を示すも

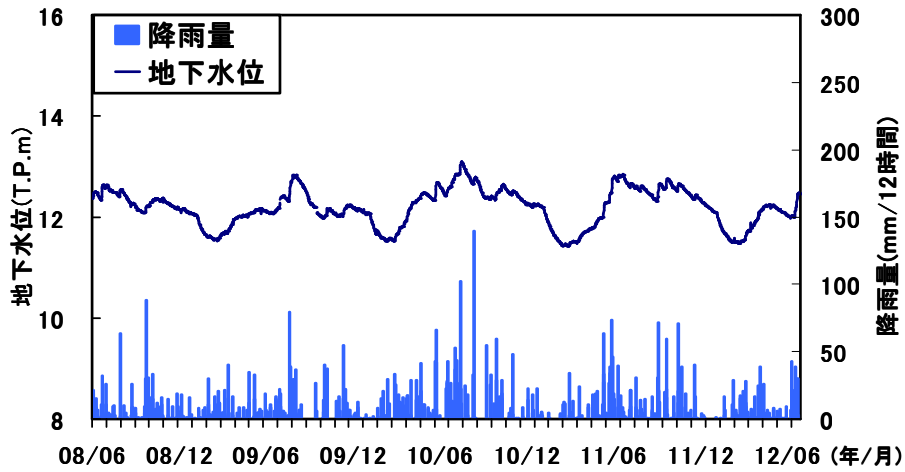


図 5-2 浅井戸観測井(深度 20m)No. 7 の地下水位と降雨量

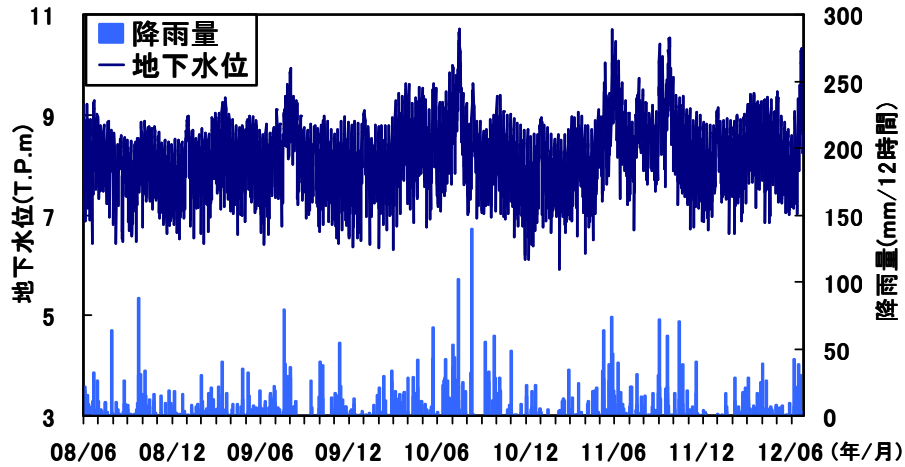


図 5-3 深井戸観測井(深度 60m)No. 4 の地下水位と降雨量

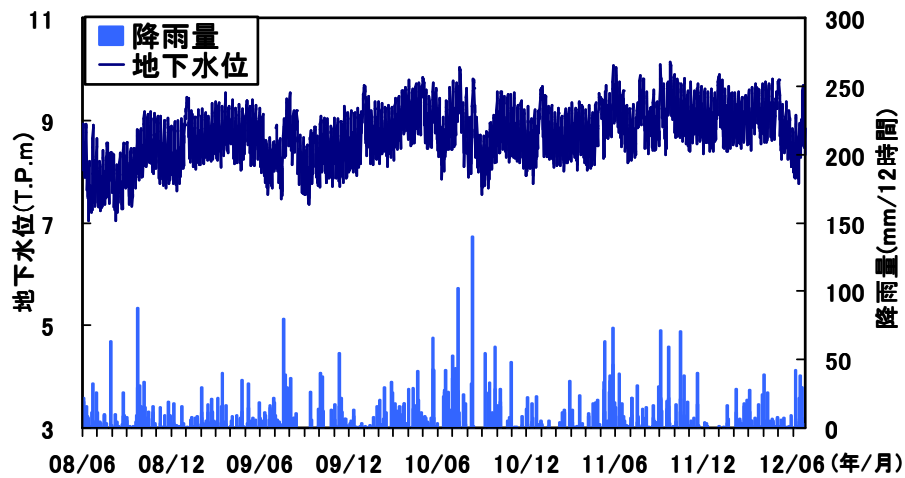


図 5-4 深井戸観測井(深度 95m)No. 6 の地下水位と降雨量

のである。この観測井の周辺にある揚水井からの揚水量は、No.4の周辺にある揚水井と比べると少なく、観測井の水位変動幅も平均 50cm 程である。観測を開始して以来、一日当たりの水位の変動幅は揚水量が多い井戸の近傍にある観測井と比較すると小さい。観測を開始して以来、直近 3 年における水位はやや上昇傾向にある⁵⁾。なお、この地域で最も水位が低下する時間帯は午後 3 時であり、正午の水位よりも 30cm 程の水位低下が見られた。

以上のことから、この地域の不圧地下水は、一日当たりの水位変動が見られないことから揚水による影響は小さく、降雨による影響が主に現れていると考えられる。一方、被圧地下水は、降雨による影響よりも揚水による影響が主に現れていると考えられる。また、直近 3 年間における測定結果から、帯水層ごとの水位変動の傾向は安定しているか上昇しているかで、低下傾向にある井戸は見られない。

5.2.3 観測井の地下水位変動と揚水量

図 5-5 は、観測を開始した 2009 年 2 月～2012 年 6 月における No.4 の観測井の水位変動と揚水量の傾向を示している。揚水量は、観測井の周辺約 300m 範囲にある Dg2 層にストレーナーのある揚水井からの揚水量を合計した。図に示されるように、7 月や 8 月は一年を通して揚水量を抑えていることにより水位が上昇している。9 月から冬場にかけて揚水量が増加する時期には、水位は低下傾向にある。また、最も揚水量が増える月は 12 月でとなっている。すなわち、被圧地下水位は降雨の影響よりも揚水による影響を大きく受けていると考えられる。しかし、2010 年及び 2011 年の揚水量が最も多い 12 月において、水位が最も低下しているが、2009 年 12 月においては、水位がやや上昇傾向にある。地下水変動と揚水量との関係は、長期的視野に基づいて把握することが重要であり、今後も継続してこれらの関係を観測することが必要である。

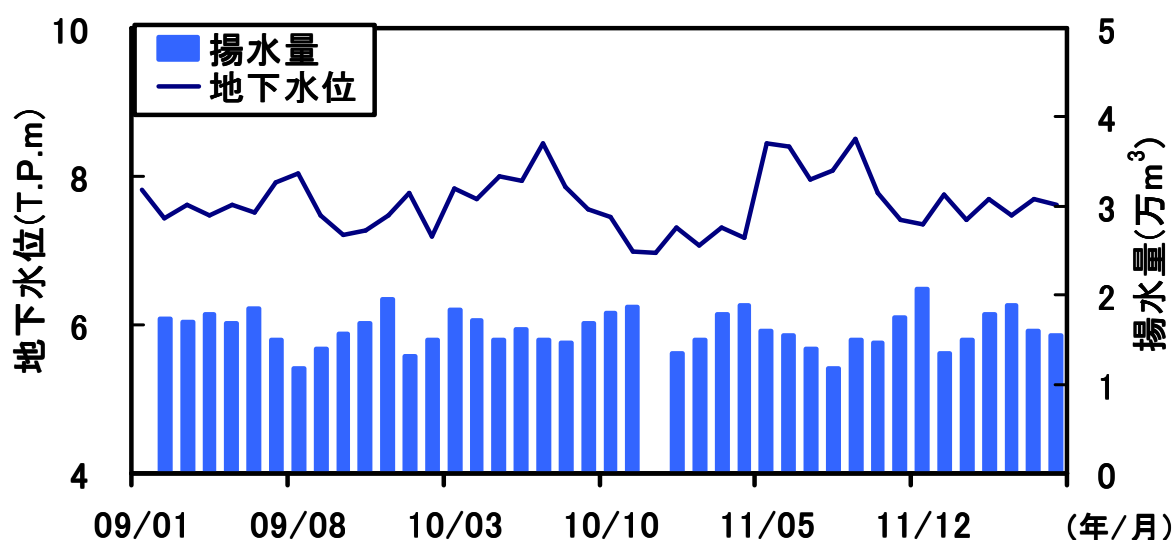


図 5-5 深井戸観測井(深度 60m)No. 4 の地下水位と揚水量

5.3 広域的な範囲における地下水流動場を推定したシミュレーションモデル

5.3.1 概要

ここでは、研究対象地における広域の地下水流動場を求めるために用いた数値解析法について述べる。解析手法として、研究対象地が多層地盤を成していることから、不均質性を考慮することが可能な手法で地下水の流れを解く必要がある。そこで、透水係数の異なる多層地盤、複雑な境界条件を考慮して解析することが可能である有限要素法を用いた。数値解析を実施する上では、地形・地質構成を調査し、正確な3次元地質構造モデルを作成することが非常に重要である。地質構成を正確に把握するため、ボーリングデータを整理して地質断面図を作成し、地質構成及び各層の厚さを把握した。以上に示すように、最初に当該地の地質構成を反映したモデルを作成し、そのモデルを用いて有限要素法による3次元浸透流解析を実行することで広域場の浅層にある地下水流動場を求めた。

5.3.2 広域的な範囲におけるモデル化

図5-6は、京都市伏見地域のモデル化範囲を示している。北から南西に向けて流れる鴨川・桂川と東から南西に向けて流れる宇治川の3河川を境界とした⁶⁾。北東部は、地形的な分水界を地下水の分水界と見なし、稻荷山・大岩山の山頂を通る分水界と河川で囲まれた範囲をモデルの境界とした。解析モデルの面積は約28km²である。

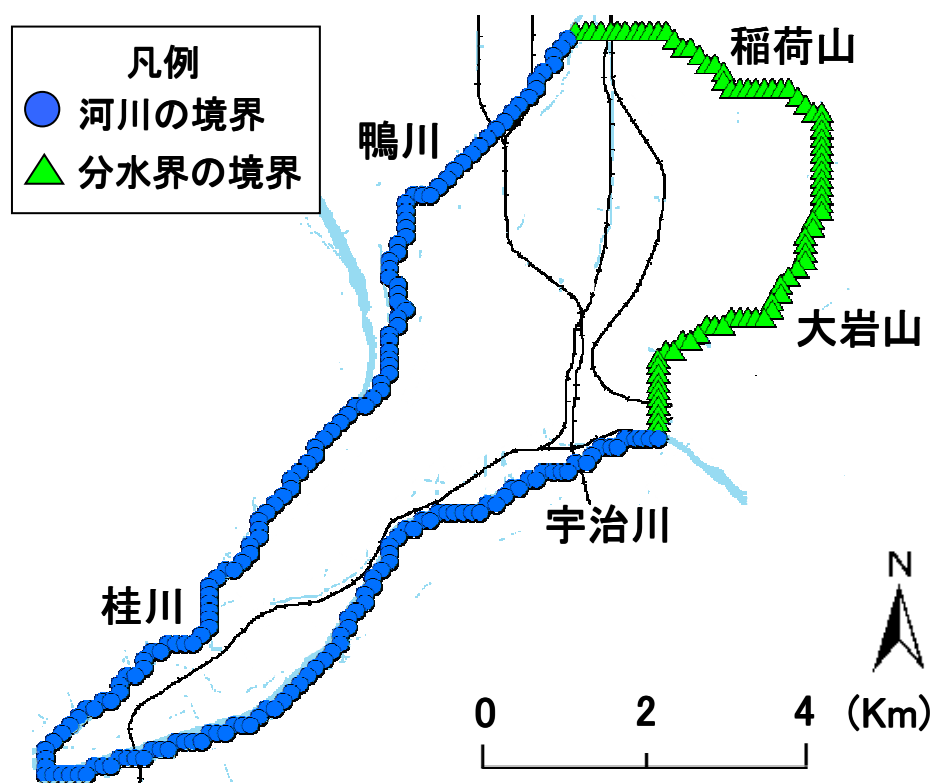


図5-6 広域モデルを作成した範囲

浅層地盤の地質を正確に把握するため、関西圏地盤情報データベース 2010 年度版⁷⁾のボーリングデータを 400 本程抽出し、地質特性や各層の厚さを把握した。図 5-8 は、図 5-7 に示す A-A' の位置における地質断面図を示している。図に示されるように、地表面から Ascg 層、Dg1 層、Dc1 層の 3 層に分割した。一般的に、沖積層の粘性土で N 値 5 以下、砂質土で N 値 10 以下の土層を指すことが多いので⁸⁾、N 値を参考に完新世の層に相当する沖積層と更新層の層に相当する洪積層を分割した。このように、モデルの全域において地質断面図を作成することにより地質構造を把握した。なお、Dc1 層の底面は T.P.-20m 付近であり、非常に連続性の良い粘土層が堆積している。

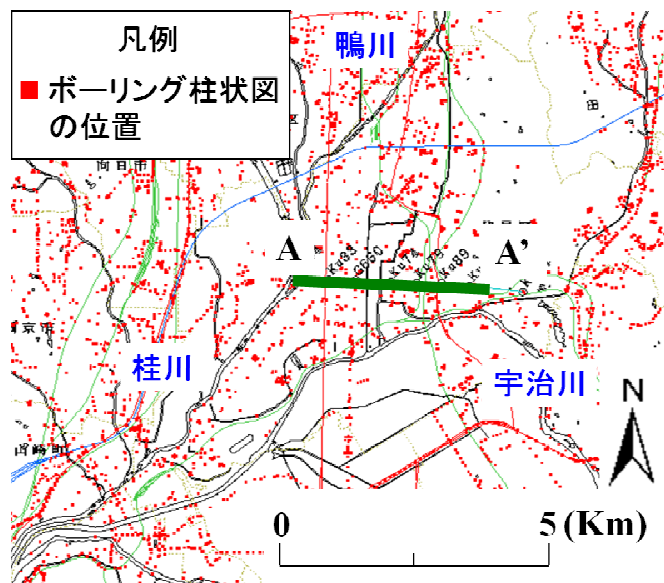


図 5-7 地質断面図を示した位置

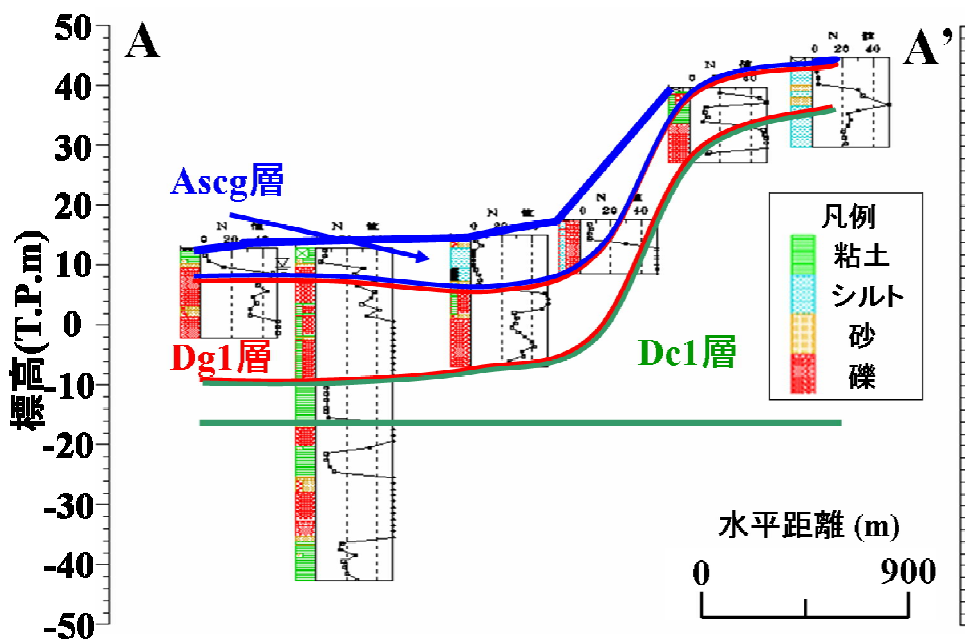


図 5-8 地質断面図 (A-A')

図 5-9 と図 5-10 は、地質断面図を作成して各ボーリングの位置における層厚を解明した結果を基に、クリギング手法を用いて Ascg 層と Dg1 層の面的な層厚分布を推定した結果を示している。図に示されるように、Ascg 層における層厚は平坦地において南西部の河川に挟まれた場所において層厚が厚く、北上するにつれて層厚が薄くなる。Dg1 層における層厚は、平坦地において酒造会社が集中する場所では層厚が厚い。丘陵地から山地にかけては、Ascg 層が薄くなるにつれて Dg1 層が地表面に現われてくるのが分かる。

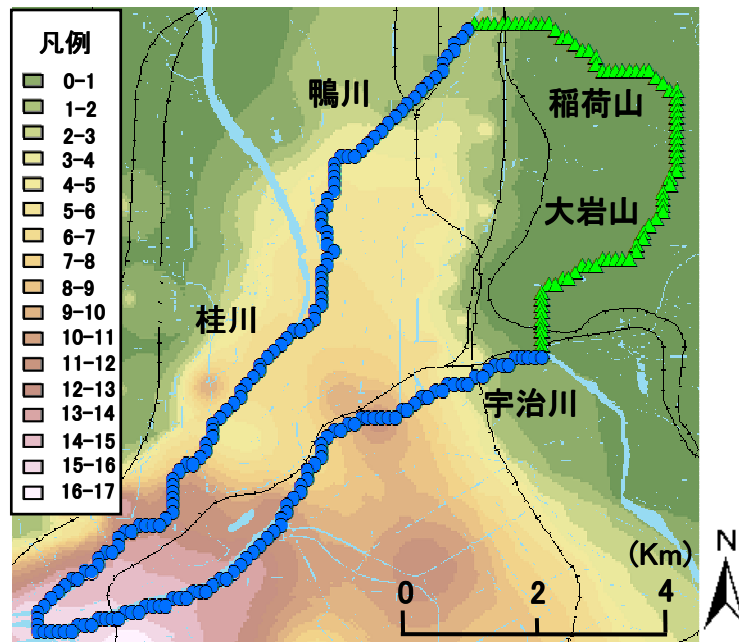


図 5-9 Ascg 層の層厚分布図

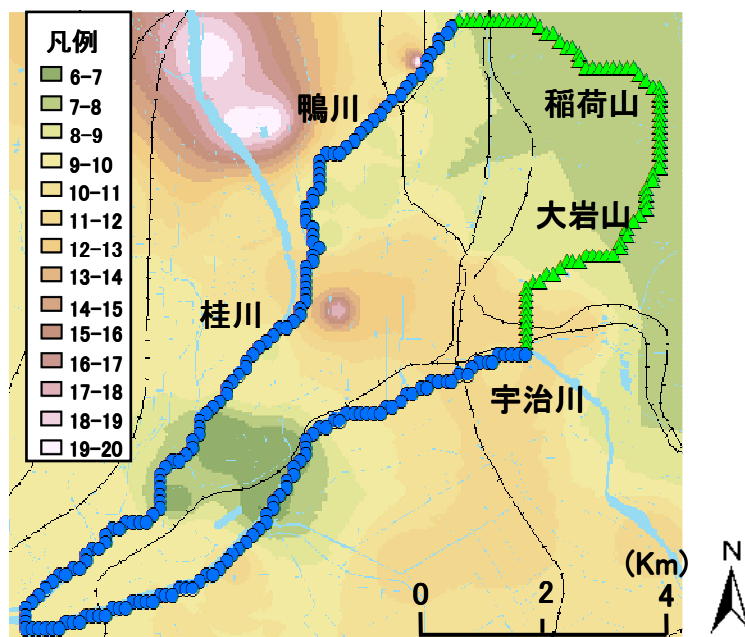


図 5-10 Dg1 層の層厚分布図

図 5-11 は、鉛直方向を 10 倍に拡大した 3 次元地質構造モデルを示している。図 5-12～図 5-15 は、地形勾配などをさらに詳しく表すため、東西南北から見た、鉛直方向を 10 倍に拡大した 3 次元地質構造モデルを示している。沖積層は、関西圏地盤情報データベースにある 150 本程のボーリングデータをランダムに抽出し、各柱状図から各地質の厚さを計算した結果、北側と南側に堆積する地質特性に違いが見られた。北側に堆積する沖積層はシルトや粘土分が 7 割を占め、砂や礫の割合が少ない状態で堆積している。一方、南側では砂分が 6 割を占めており、北側に分布している沖積層とは地質特性が異なる。そのため、沖積層を北側の粘土・シルト層と南側の砂礫層に細分し、4 つの地層構成からなるモデルを作成した。丘陵地から山地においては、地層を分析する際に必要となる深度の深いボーリングデータが十分に確保できなかったことから、深い層における地質特性を十分に把握することができなかった。そのため、モデル上は丘陵地から山地の地表面には Dg1 層が現れ、Dg1 層の下部を全て Dc1 層と見なした。図に示されるように、沖積層の北側と南側の地質構造の違いや丘陵地から山地にかけて Dg1 層が現れるといった、実際の地質構造を反映させた 3 次元地質構造モデルを作成できていることが分かる。本研究では、この作成したモデルを用いて数値解析を行い、対象地における地下水流動場を求めていく。

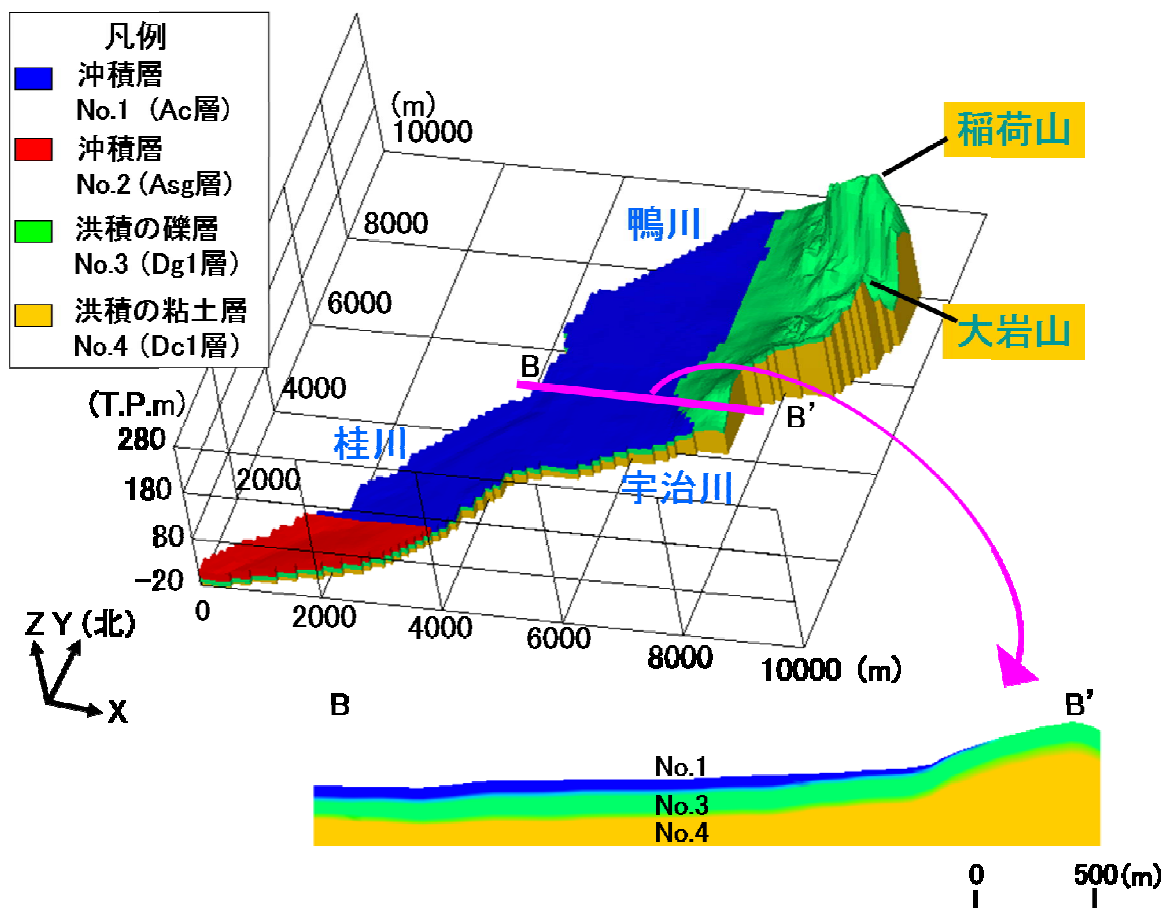


図 5-11 広域的な範囲における 3 次元地質構造モデル (鉛直 10 倍表示)

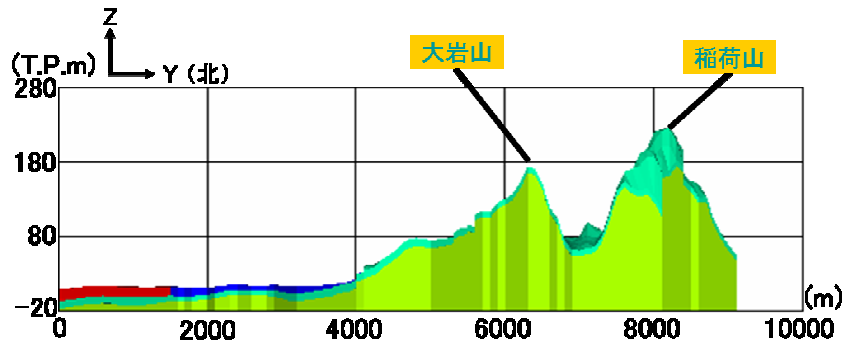


図 5-12 東方向から見た 3 次元地質構造モデル

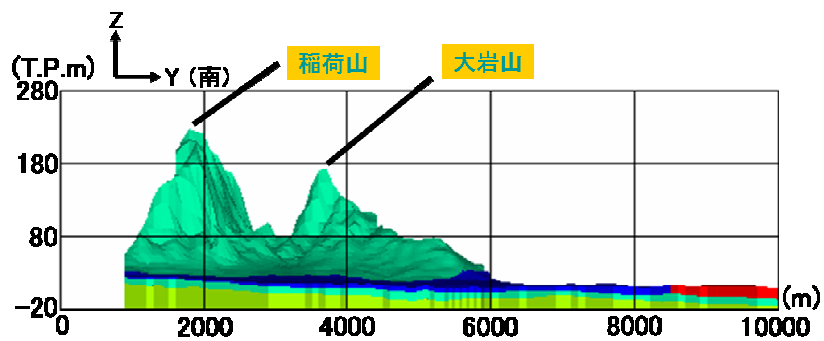


図 5-13 西方向から見た 3 次元地質構造モデル

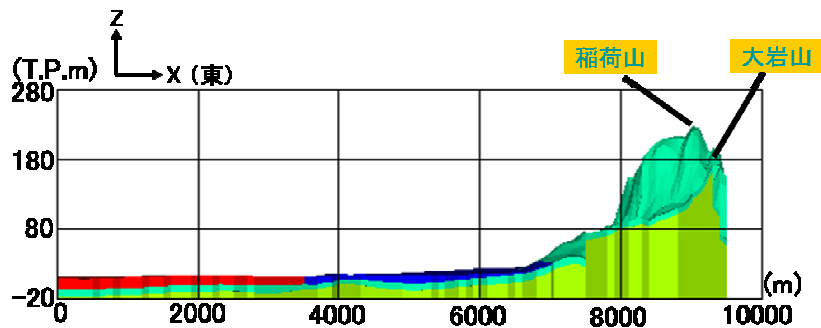


図 5-14 南方向から見た 3 次元地質構造モデル

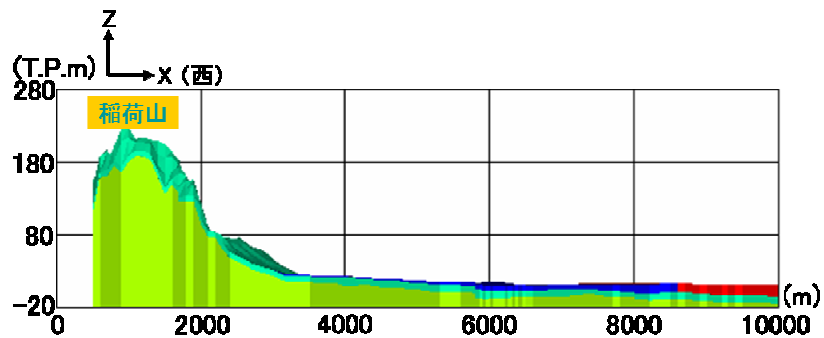


図 5-15 北方向から見た 3 次元地質構造モデル

5.3.3 広域的モデルのメッシュ分割

解析手法は有限要素法を用いることから、モデルのメッシュ分割を行った。対象範囲が広域なモデルを作成するため、平面におけるメッシュ分割は正方形で分割し、一边を 100m として作成した。図 5-16 は、平面メッシュ図を示している。図 5-17 は、3 次元メッシュ図を示している。鉛直方向については、メッシュの大きさは平坦地で 1m 程、丘陵地から山間部では 20m 程で分割した。3 次元メッシュの節点数は 50,649、要素数は 45,683 である。

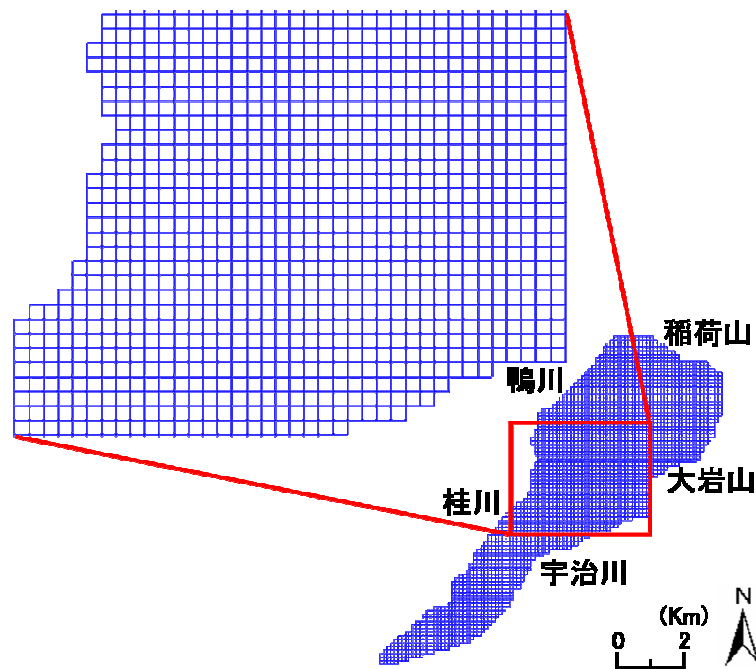


図 5-16 平面的なメッシュ分割図

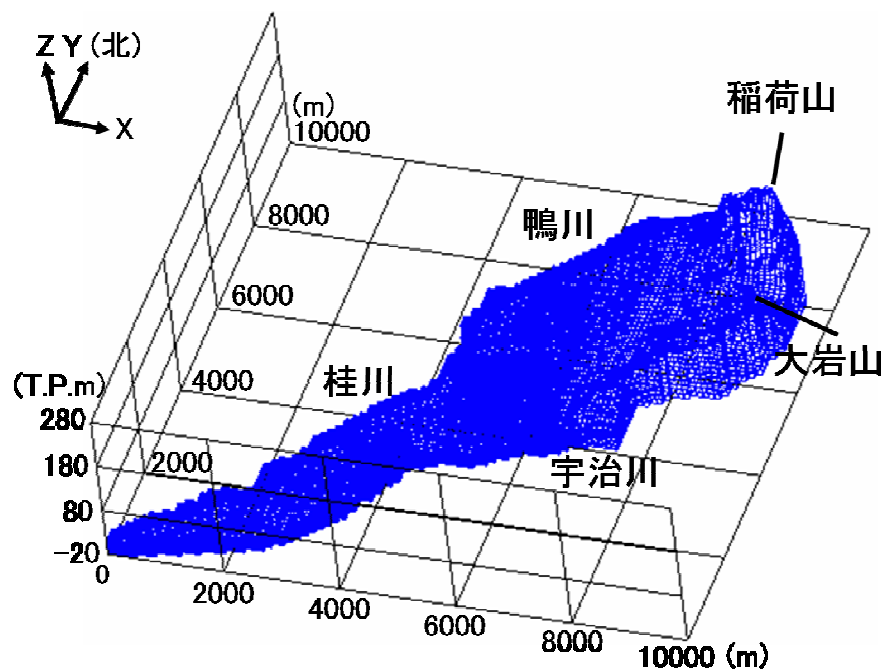


図 5-17 3次元表示によるメッシュ分割図

5.3.4 土地利用分布を考慮した3次元地層モデル

総降雨量から蒸発散量を除いた量は、実際に地盤に浸透する量と地表面を流出して河川に流れ出る量の合計量となると考えられる。そこで、地下水として地面に涵養されない流出量を考慮するために、モデルの全域に降雨が浸透するように設定するのではなく、丘陵地から山地の涵養源となる場所の地表面の要素にのみ降雨を与えるように設定した。そのため、丘陵地や山地の節点を正確に識別しなければならない。その方法として、細密数値情報(10m メッシュ土地利用)を使用し、涵養源となる山側の範囲を特定した。図5-18は、土地利用区分を示している。図に示されるように、円で囲った範囲が丘陵地から山地に位置する。市街地に降雨を設定する上での問題点は、涵養源となる公園や涵養源とならない住宅街が混在するような場所では、涵養源として判断が困難な位置となることが挙げられる。広域における水収支を解いているため、メッシュを粗く作成していることから、そのような位置における要素全てに降雨を加えると実際の水収支よりも多くの量が涵養されると考えられる。以上の理由から、市街地では都市化していることから浸透する箇所は非常に少ないと考え、降雨は山地から丘陵地のみを設定した。

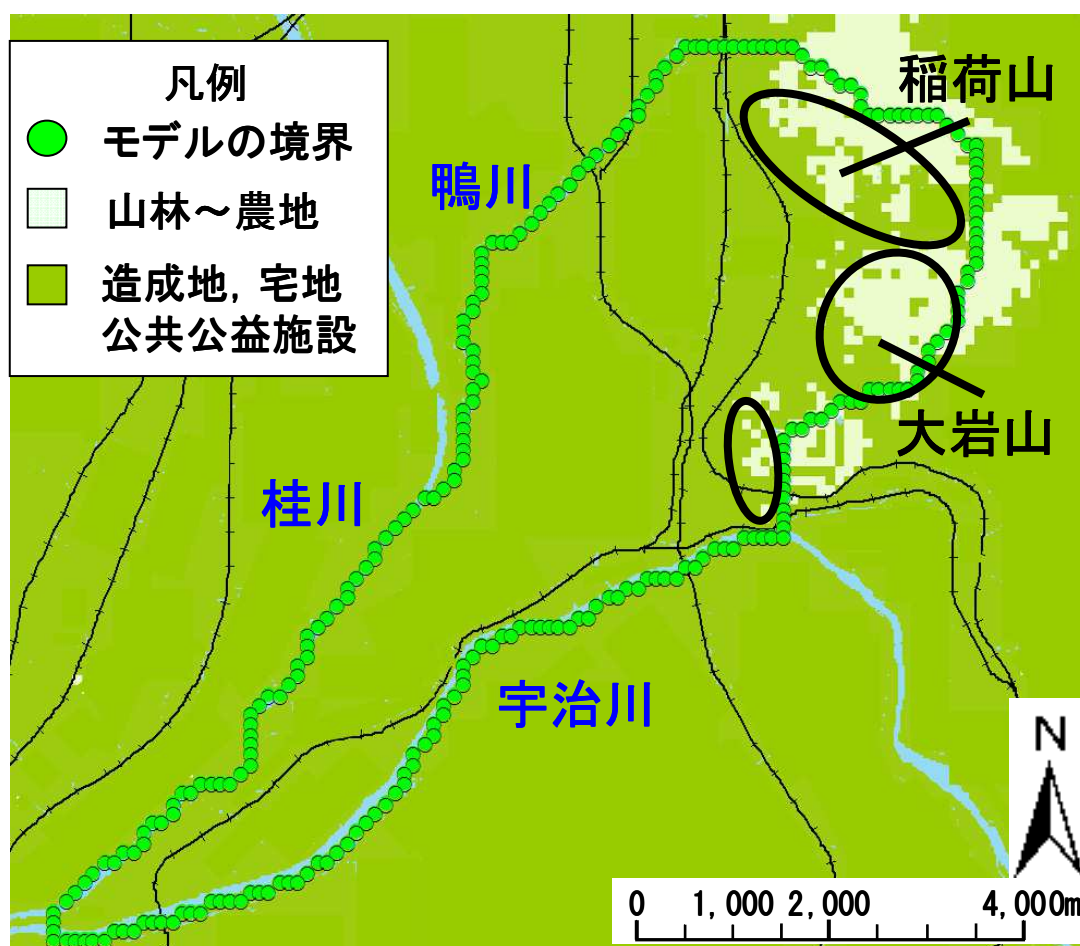


図 5-18 土地利用分類図

5.3.5 入力条件

① 境界条件

境界条件は、3河川には国土交通省の水文水質データベース¹⁰⁾から得た平成21年における平均の河川水位を参照し、河川を構成する節点全てにおいて既知水頭境界を設定した。北東部の分水界には、関西地盤情報データベースより得た地下水位を参照し、分水界を構成する節点全てに既知水頭境界を設定した。そして、モデルの境界を全て既知水頭境界で固定して数値解析を行った結果、分水界の節点において流入量が見られたので、分水界の節点には既知水頭境界条件の解析結果により得た流量を設定し、既知流量境界条件に変更して解析を行った。境界条件を既知水頭境界で固定して数値解析を行った際には降雨を考慮していないが、浅層地下水では水収支の一部として降雨量を設定する必要がある。分水界の境界条件を既知流境界条件に変更した際は、降雨を考慮した。

次に、降雨量と揚水量に関して具体的に設定した値について述べる。伏見地域における平成21年における一日当たりの平均降水量を気象庁の降雨データにより、**図 5-18**に示される丘陵地から山地の箇所を設定した。なお降雨データは、気象庁の京都府京都市観測所¹¹⁾の観測記録を用いた。蒸発散量は、ソーンズウェイトの方法¹²⁾によるわが国の可能蒸発散量の分布から、京都付近におけるデータを読みとった。京都市付近の10年間における総降雨量の平均1,400(mm/年)と、蒸発散量800(mm/年)を上記の参考文献から決定した。この地域の蒸発散率は、蒸発散量を総降雨量で割ることにより、57%と仮定した。揚水量の設定については、この地域で最も揚水が活発に行われている酒造会社の平成22年における揚水量のデータを基に、各帯水層の揚水状況を調べた。その結果、全揚水量が5,600(m³/日)程であるのに対して、Dg1層からの揚水量は3(m³/日)程と、非常に少ないことが分かった。また、水位測定を開始してから3年に及ぶ水位変動を調査した結果、浅層の地下水位の変動は深層の地下水位の変動特性のように日々水位が上下するようなことは見られない。すなわち、Dg2層以深での揚水の影響が、Dg1層の水位変動に現われていないことが分かる。以上のことから、広域な地下水流動場を再現する上では、揚水による水位変動等に及ぼす影響が少ないと判断し、揚水量を設定していない。

② 地盤物性値

表 5-1は、本研究で用いた地盤物性値を示している。**図 5-11**を参考に、沖積層の北側に位置する粘土・シルト成分の割合が多い層(Ac層)をNo.1、南側の砂・砂礫成分の割合が多い層(Asg層)をNo.2とし、洪積層の砂礫成分の割合が多い層(Dg1層)をNo.3、粘土成分の割合が多い層(Dc1層)をNo.4とする。なお、Ac層は沖積粘土や沖積シルトを表し、Asg層は沖積砂や沖積砂礫を表している。地盤物性値を検討する際に、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、透水係数の値のみ変化させて解析を繰り返した。特に解析値と観測水位が整合するまで試行錯誤的に修正し、計算を繰り返すことにより決定した。その他の地盤物性値として、比貯留係数や有効間隙率、不飽和浸透特性を入力しなければならない。比貯留係数と有効間隙率については文献¹³⁾を参考に決定した。不飽和浸透特性についても、**図 5-19**、**図 5-20**に示すような物性値を、文献¹⁴⁾を参考に設定した。以上の方法により地盤物性値を決定した。

表 5-1 地盤物性値

地層	透水係数 <x,y> (cm/s)	透水係数 <z> (cm/s)	比貯留係数 (1/m)	有効間隙率 (%)
No.1	5.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-4}	10
No.2	5.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	7.00×10^{-5}	15
No.3	5.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	7.00×10^{-6}	20
No.4	5.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}	2.00×10^{-4}	10

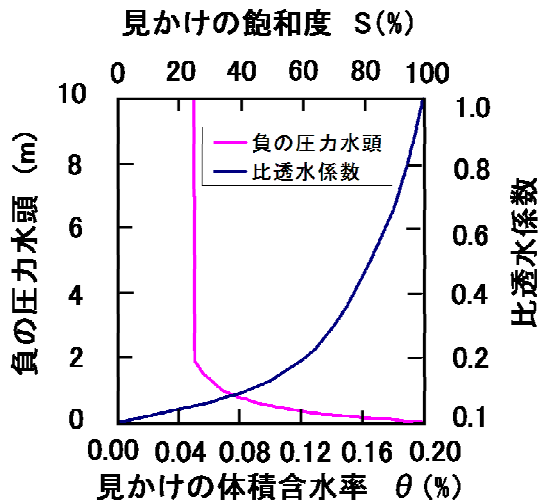


図 5-19 不飽和浸透特性（礫質土）

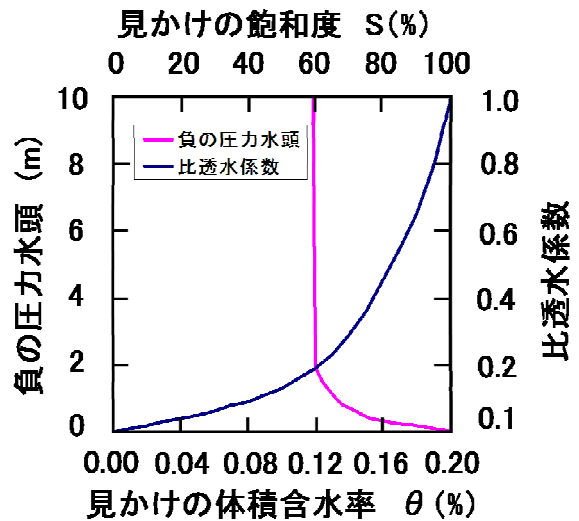


図 5-20 不飽和浸透特性（粘性土）

5.4 解析結果と実測との比較検討

図 5-21 に示す箇所の井戸において、観測した地下水位と解析で求めた地下水位を比較することにより、3次元地質構造モデルの妥当性を検証した。観測値と解析値との整合性は、Dg1層よりも浅い深度にある観測井の地下水位と解析で求めた水位を比較することによって確認した。図 5-22 は、モデルの整合性検討結果を示している。図に示すように、解析で求めた水位はおおよそ実測の水位と整合している。酒造会社が密集する平坦地においては、50cm から 2m程の差があり、丘陵地においては実測の値と数m程の差を最大としている。メッシュを 100m と粗く分割した広域モデルを用いた浸透流解析の結果、実測の値との差が数 m 程であるので解析で求めた水頭はおおよそ実測の水頭と整合していると判断した。以上のことから、特に酒造会社が密集する平坦地における浅層の地下水位を正確に推定できていると考えられる。

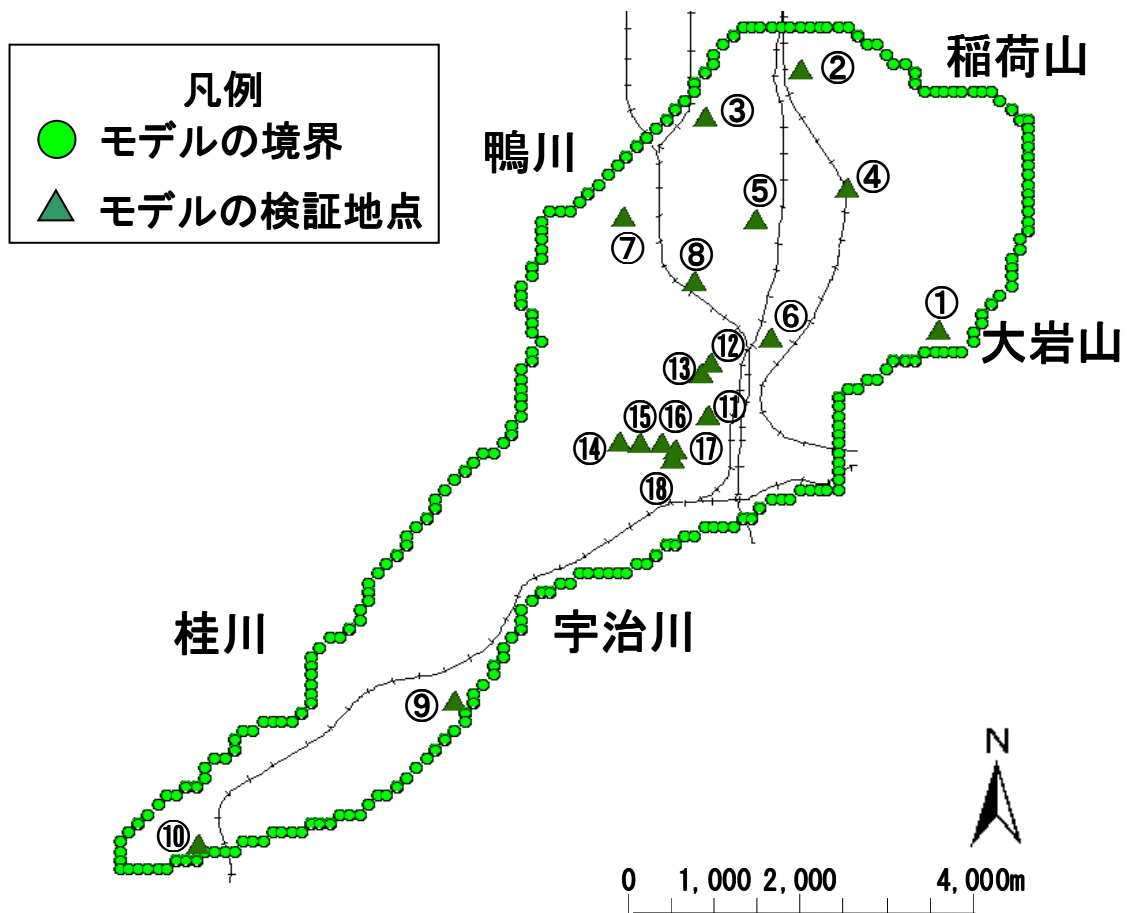


図 5-21 観測結果と解析結果の整合性を検討した地点

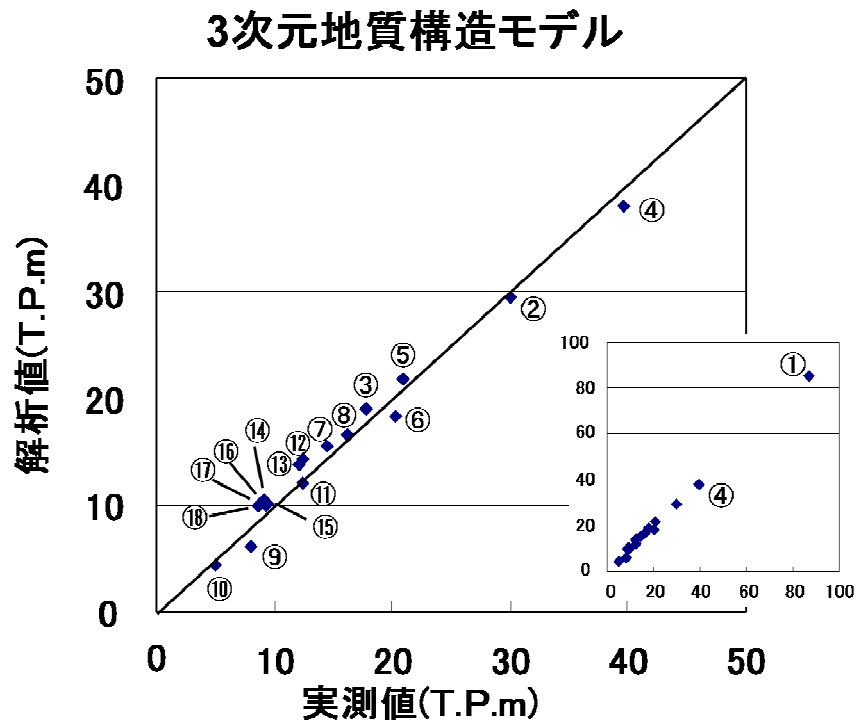


図 5-22 モデルの整合性検討結果

図 5-23 は、広域的な地下水位を解析により推定した結果を、地下水位コンター図として示している。全体的に地下水は、北東部の分水界から南西の桂川と宇治川が合流している所に向けて流れている。桂川と宇治川に挟まれた平坦地においては、地下水は南西への流れの向きを変えて南東に向けて流れている。丘陵地から山地にかけては、地形勾配に応じて地下水位のコンターが密接に分布している。丘陵地から山地が涵養源となり、稻荷山や大岩山付近の山の峰を結んだ分水界を境として、伏見の酒造会社が密集する地に向けて流下する地下水流動場が形成されていることが分かる。平坦地における標高は、北側から南側において低くなっていることから、稻荷山から流出する地下水と大岩山から流出する地下水は、丘陵地と平坦地における境で合流し、河川が合流する南西に向けて流れていることが分かる。これらのことより、概ね地形に沿った流れを形成していることが認められた。図 5-24 は、酒造会社周辺の Dg1 層における解析結果を拡大した図を示している。この図より地下水流速は、山側付近の流速が比較的速く、平野に流れ込むに従い流れが緩やかになっている。地下水の流れは、勾配が緩やかになるに従い流れが遅くなっていることが分かる。

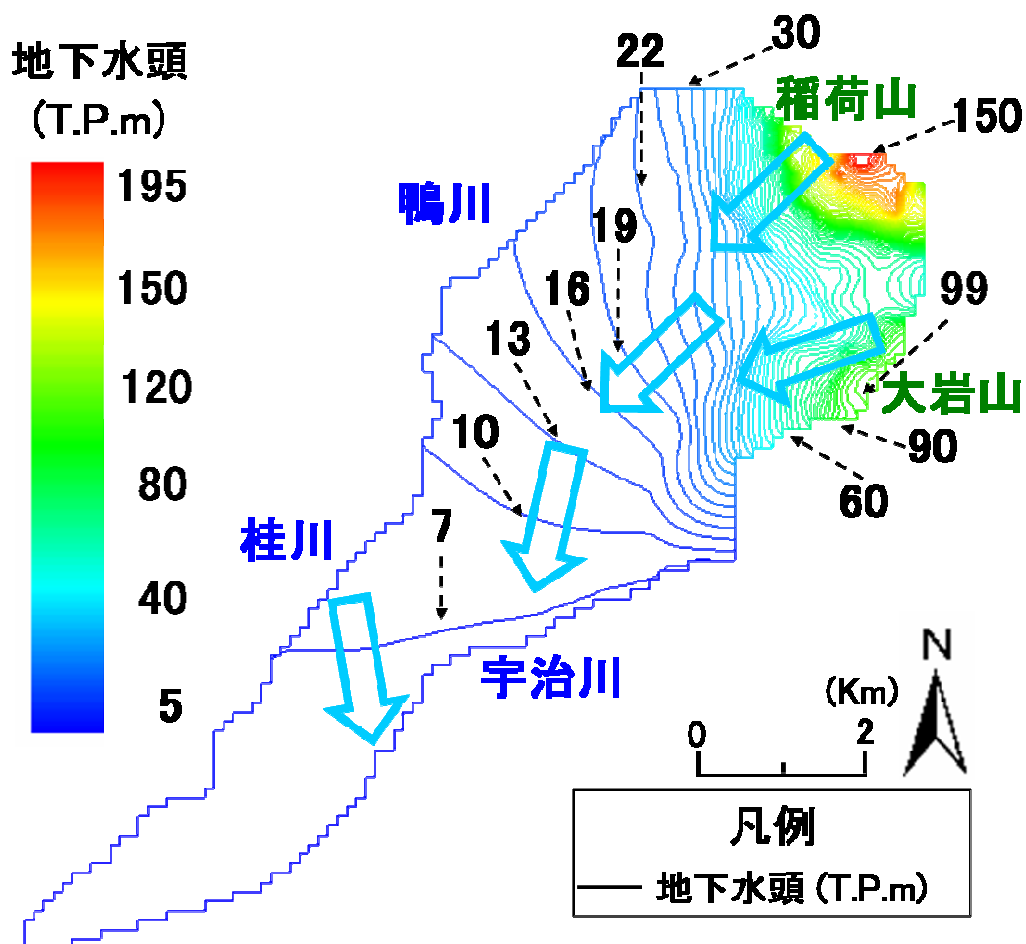


図 5-23 広域モデルで求めた地下水位コンター図

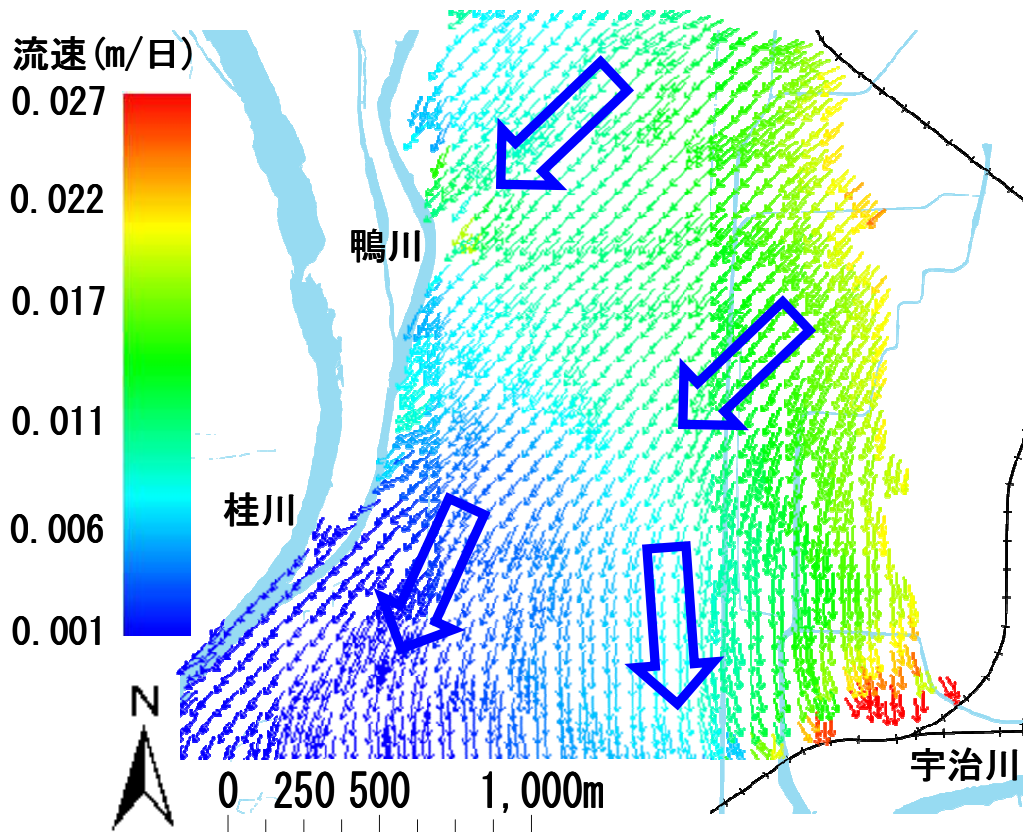


図 5-24 酒造会社が密集するエリアの Dg1 層における地下水流動ベクトル

5.5 まとめ

本章では、京都市伏見区域を対象とし、地下水位計測結果を基にこの地における地下水位の変動特性を考察し、浅層地盤を対象とした地下水位を数値解析により推定した。観測井の観測結果より、地下水位と降雨の関係について整理し、地表面から Dg1 層、Dg2 層、Dg3 層、そして、Dg4 層における帯水層の地下水位の特性を考察した。Dg1 層は降雨量の増減に従い、水位も増減する。Dg2 層、Dg3 層、Dg4 層では降雨の影響よりも、揚水による水位変動の影響が大きいことが分かる。この地域の帯水層は揚水後すぐに水位が回復することから、地下水が豊富に賦存している帯水層であることが分かる。解析では、対象地域の Dc1 層の下部までを対象とし、Ascg 層、Dg1 層、Dc1 層の地層から成るモデルを作成し、数値解析を行った。その結果、伏見区域の浅部の巨視的な流れとしては、北東部の分水界から南西の河川が合流している所に向けて流れていることが認められた。

上記のように、地下水利用が盛んな地域において、数値解析により地下水位を推定することは非常に重要である。このようなモデルを深部に拡張することにより、揚水による水位への影響を推定することも可能となる。次章で述べる地下構造物などが敷設される際に、その構造物が地下水の流れに及ぼす影響を検討する場合や地下水に汚染物質が溶け込んだ場合において、その汚染物質の挙動を予測する場合においても活用できる。

参考文献

- 1) 松原厚：伏見町の地下水に就いて，醸造学雑誌， pp.568-588, 1929.
- 2) 伏見地区地下水調査委員会：伏見地区地下水流動方向調査報告書，伏見醸友会誌， No.4, pp.13-17, 1961.
- 3) 伏見地区地下水調査委員会：伏見地区・醸造環境調査概要報告(Ⅱ)，伏見醸友会誌， No.7, pp.15-46, 1966.
- 4) 堀池昭：京都・伏見の御香水と酒造り，地下水学会誌， Vol.36, No.3, pp.315-325, 1994.
- 5) T. Kitaoka and H. Kusumi：3D model of groundwater diffusion and research of groundwater characterization based on field measurement in Kyoto basin, Proceedings of the 15th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics in Kyoto, pp.19-24, 2011.
- 6) T. Kitaoka and H. Kusumi：Establishing the 3D model of the underground water management system at southern Kyoto-city, Proceedings of EIT-JSCE Joint International Symposium, 2009.
- 7) 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， 2010.
- 8) 地盤工学会編：地盤断面図の読み方と作り方，丸善， pp.57-63, 2005.
- 9) 地盤工学会編：GIS の防災・環境への適用，丸善， p.165, 2007.
- 10) 国土交通省 HP：水文水質データベース <http://www1.river.go.jp/>
- 11) 気象庁 HP:気象統計情報 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 12) 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， pp.19-25, 1980.
- 13) 土木学会編：水理公式集， pp.339-345, 1999.
- 14) (財) 国土研究センター：河川堤防の構造検討の手引き， pp.51-56, 2009.

第6章 地下水保全に伴うシミュレーション解析

6.1 はじめに

地下水環境を脅かす要因の一つとして、地下構造物の建設工事が挙げられる。地下構造物を施工する前に、施工後の地下水環境に与える影響について検討することは、地下水保全を行う上で非常に重要である。本章では、第5章で伏見地域の地下水流動場を再現した結果を基に、地下水保全のための地下水環境への影響評価を定量的に検討した。当該地では平成19年度から酒造会社が密集する地域で、合流式下水道管の改善を目的とした下水管の敷設工事が行われた。図6-1は、下水管敷設工事が行われている位置を示している。下水管は地表面下約15mの位置に、仕上がり内径 $\phi 3,000\text{mm}$ をA線に、仕上がり内径 $\phi 1,800\text{mm}$ をB線に、仕上がり内径 $\phi 1,100\text{mm}\sim\phi 1,800\text{mm}$ をC線にそれぞれ敷設した。それらの幹線の総延長は2,225mである^{1,2)}。

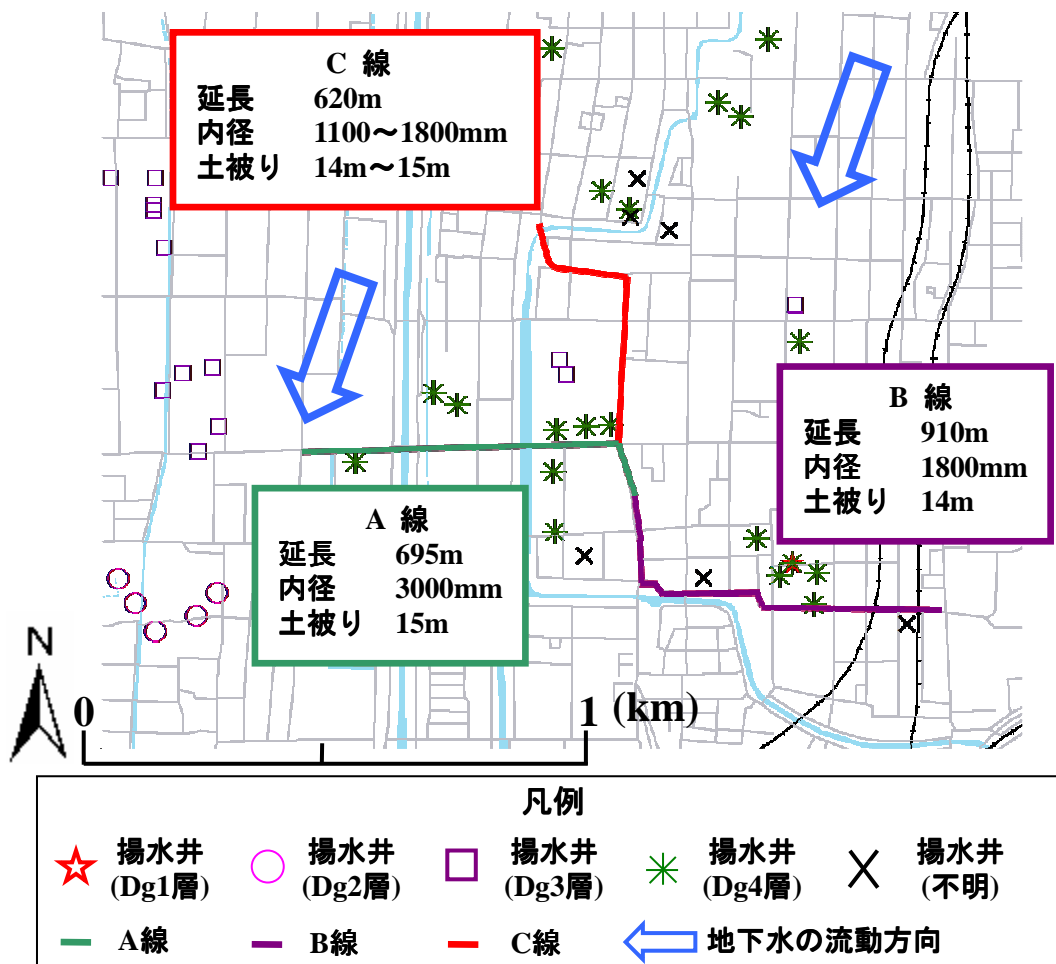


図6-1 下水管が敷設される位置

地下構造物の施工に伴って発生する地下水への問題は、量の問題と質の問題に分けられる。さらに、施工中に発生する問題と施工後に起きる問題に分けられる。表 6-1 は、地下構造物の建設に伴う地下水資源に与える影響を示している³⁾。この地域では、揚水井が密集し、日々揚水が行われているので、下水管より下流側における井戸の枯渇問題等が懸念された。また、揚水が活発に行われている帯水層への汚染物質の侵入による水質悪化問題についても懸念された。土壌地下水汚染の特徴は蓄積性にあり、汚染物質を原位置で分解無害化するか除去しない限り、汚染状態は解消されない。修復対策として、調査手法を含めて様々な技術が開発・実用化されているが、修復には長い時間と経費がかかる⁴⁾。一度汚染されると汚染が長引き、浄化も困難である。したがって、まず汚染を未然に防止することが何より重要である⁵⁾。汚染が発生した場合でも汚染の広がりを最小限に抑える必要がある。万が一汚染が発生した場合に備えて迅速な対応策を講じるためにも、汚染物質の挙動を正確に予測できるモデルを構築することは非常に重要である。土壌・地下水汚染問題では、汚染源位置、汚染拡散範囲、汚染物質濃度などの情報を得ることが重要で、その結果が対策期間やコストに直接影響することが考えられる⁶⁾。

本章では、最初に現況を再現したモデルを改良し、地下構造物が地下水流動阻害に与える影響について定量的に検討した。そして、万が一汚染が発生した場合に備え、汚染物質を想定し、その汚染物質の挙動を予想した解析を実施した。また、この地に連続する粘土層が汚染物質に対して、水理学的バリアの役割⁷⁾を果たしているかについて定量的に検討した。

表 6-1 地下構造物建設に伴う地下水に関連する主な問題³⁾

量の問題	施工中	①揚水に伴う周辺の地下水位の低下による井戸の枯渇、地盤沈下 ②揚水した水の処理
	施工後	①地下水の流動阻害（地下ダム化、井戸の枯渇） ②水位変動による植生などへの影響（湿地化や乾地化の発生）
質の問題	施工中	①濁水汚染（掘削濁水の浸透汚染） ②薬液注入工法を実施することによる地下水汚染 ③海岸近くにおける地盤掘削の際の塩水化
	施工後	①長年にわたる濁水や注入材の浸透汚染 ②地下水位低下による地下水の塩水化

6.2 地下構造物を考慮したシミュレーションモデル

6.2.1 概要

地下構造物が帯水層に建設される問題点として、帯水層の厚さに対する地下構造物の規模や地下水の動水勾配などの違いにより、どの程度地下水位が変動するのか、また帯水層の深さが変化する場合、帯水層をどの程度閉塞すると地下水への影響が見られるのかといった点が不明確である⁸⁾。そこで、地下構造物が地下水流動に及ぼす影響を数値シミュレーションの検討結果を基に事前に影響評価をすることは、地下構造物を建設する際の是非を論ずる上で有益な検

討材料となる。量の問題においては、現在施工されている下水管敷設後における下水管が周辺の地下水流動に及ぼす影響についての検討を行った。

本研究では、第 5 章で作成したモデルの地質の層厚や境界条件及び地盤物性値は同様とし、下水管が敷設される位置においてのメッシュ分割を再検討し、改良したモデルを用いて浸透流解析を実行し地下水流動場を再現した。下水管が敷設される鉛直方向における位置は Dg1 層の中央部に敷設されるので、3 次元地質構造モデルは第 5 章と同様に Dc1 層までのモデルを作成した。

6.2.2 地下構造物を考慮した解析手法

下水管を再現する手法は、下水管が敷設される位置における要素を、正確に取り除くことにより再現した⁹⁾。図 6-2 は、要素を取り除いた後の概念図を示している。図に示されるように、地下水流動ベクトルは要素を取り除いた空洞部分には流れないため、その空洞部分を迂回するように流れると考えられる。それに伴い要素が取り除かれた周辺の節点の水位は、上流側では上昇し、下流側では低下するものである。本解析においては、実際の下水管が敷設される規模と同じ大きさの下水管が敷設された場合の影響を検討するために、下水管が敷設される位置において実際の下水管と同じ程度の大きさの要素を抽出して取り除くことにより下水管を再現した。

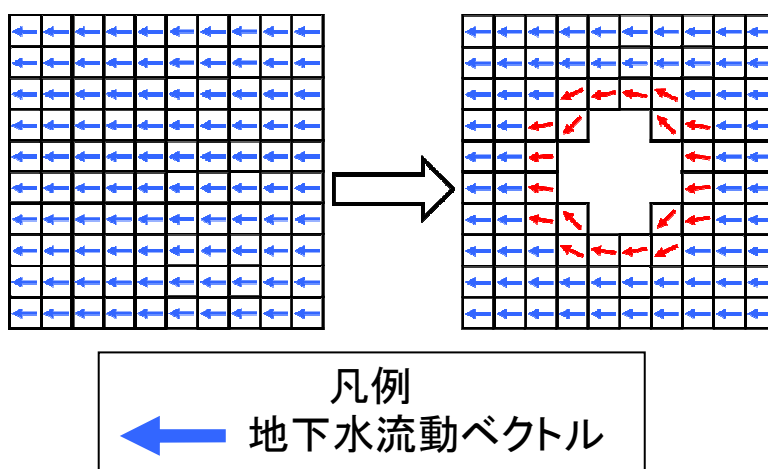
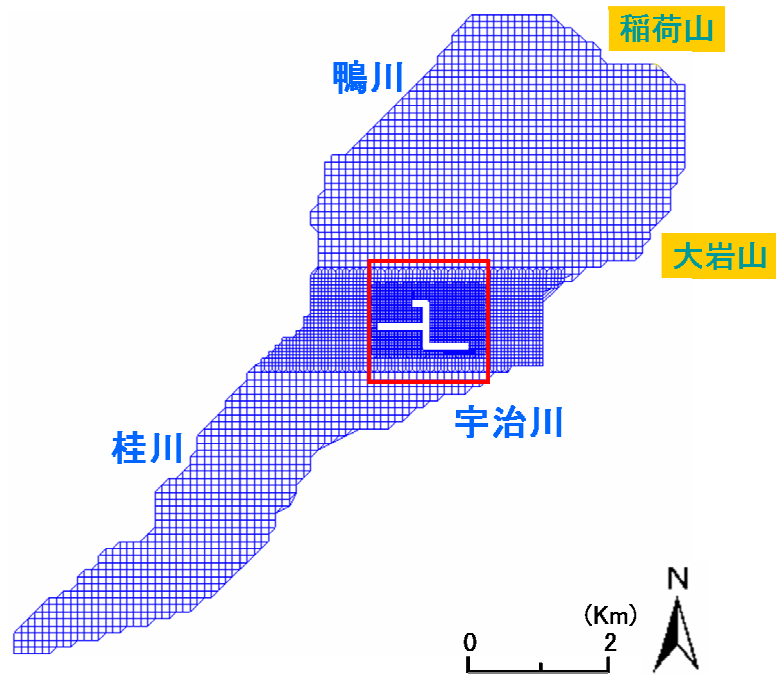


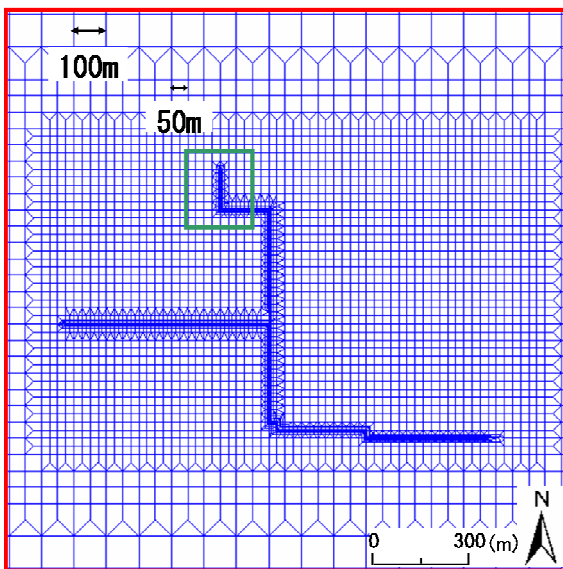
図 6-2 要素を取り除いた箇所の地下水流動ベクトル変化の概念図

6.2.3 地下構造物を考慮したモデルのメッシュ分割

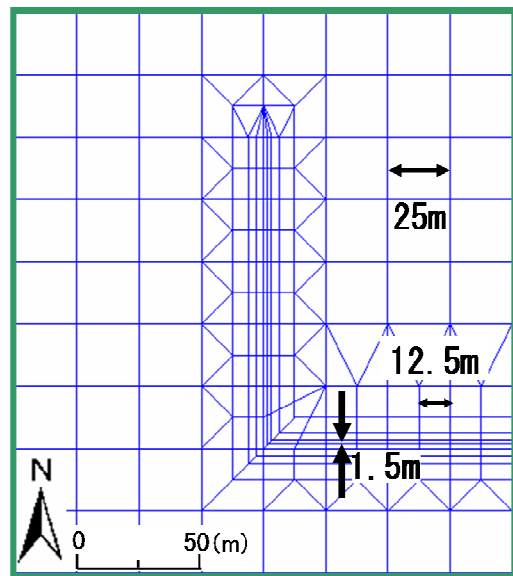
メッシュ分割を除くモデルの作成方法から完成した 3 次元地質構造モデルを用いて浸透流解析を行うといった流れは前章と同様である。しかしながら、メッシュ分割に関しては広域的なモデルで作成したメッシュのサイズでは、対象地に敷設される下水管の大きさよりも非常に大きいため、実際の大きさの下水管と同じ大きさの要素を取り除くことができない。そこで、下水管が敷設される位置において、メッシュを再分割する必要がある。図 6-3 は、メッシュ分割図を示している。下水管が周辺の地下水流動場に及ぼす影響について検討するため、その周辺におけるメッシュを最も細かくして作成した。対象地域に新たに敷設される下水管の外形は



(a) 全体図



(b) 拡大図 1



(c) 拡大図 2

図 6-3 地下構造物を考慮したモデルの平面的なメッシュ分割図

3.0m 程である。よって、最小メッシュサイズを下水管の大きさより小さくする必要があるため、下水管の半径である 1.5m まで細かく分割した。下水管の位置から離れるに従い、メッシュサイズを 3m, 12.5m, 25m, 50m と大きくした。最大メッシュのサイズは 100m として、広域に及ぶ対象地域まで分割した。鉛直方向のメッシュの大きさは、最小 50cm 程で最も大きいメッシュサイズで 20m 程である。最終的に完成したモデルの節点数は 146,384、要素数は 143,912 である。

6.3 地下水汚染を考慮したシミュレーションモデル

6.3.1 概要

地下水汚染は直接目で見ることはできないため、汚染の広がりを把握することは非常に困難である。地下水保全を行う上で、数値シミュレーションを行い汚染物質の挙動を予測することは、地下構造物の建設工事等で発生する有害物質の広がりに対する影響評価などを行うことができる。表 6-2 は、移流分散解析の適用例を示している¹⁰⁾。表に示されるように、移流分散解析の結果は様々な場面で役立つことが分かる。研究対象地においても、万が一汚染が発生した場合に備えて数値シミュレーションにより想定した汚染物質の挙動を予測し、視覚化するシステムを構築することは、迅速な汚染対応策を取る上での有益な検討材料になる。

本研究では、第 5 章で作成した広域的なモデルではメッシュのサイズが大きいことから、汚染の挙動を正確に予測することができないことより、汚染源を想定した場所において、局所的な範囲における 3 次元地質構造モデルを作成した。局所モデルを用いて浸透流解析を行うことで、より詳細な地下水流動場を推定し、局所モデルで再現した地下水流動場の結果を基に、移流分散解析を行うことで汚染物質の挙動を予測した。

表 6-2 移流分散解析の適用¹⁰⁾

(1) 地下水の塩水化挙動の予測
(2) 土壌・地下水汚染物質の挙動の予測
(3) 地下水中のトレーサーの移動の予測
(4) 放射性廃棄物の地層処分における安全性の評価

6.3.2 汚染物質の挙動

土壌内の汚染物質の挙動には、図 6-4 に示されるように様々な場合がある¹¹⁾。表 6-3 は、代表的な地下水汚染物質の例を示している¹²⁾。表 6-4 は、地下水汚染をもたらしやすい物質を示している¹³⁾。地下水汚染の形態を大別すると、汚染物質が地下水に溶け込んで地下水とともに汚染が移動・拡大する水溶性汚染物質挙動と、汚染物質と地下水が非混合でそれぞれ別々に移動する非水溶性汚染物質挙動に分類される¹⁴⁾。対象地で懸念される汚染物質は、下水管敷設時に使用されている鋼製セグメントの腐食による鉄イオンの溶出や、マンガン濃度の上昇である。その理由として、酒造用水の水質要求は厳しく、特に鉄イオン濃度が極めて低いことが重要となる。地下水流に対して暴露された鉄材は、地下水中の酸素と結合して水溶性の鉄イオンとなり、酒造用水の品質を劣化させることが知られている¹⁵⁾。本研究では、この鉄イオンに相当する物質の挙動と、対象地で懸念される物質とは違う、揮発性物質などの比較的汚染の広がりやすい物質の挙動なども定量的に検討し、汚染の挙動を予測できるシステムを構築する。

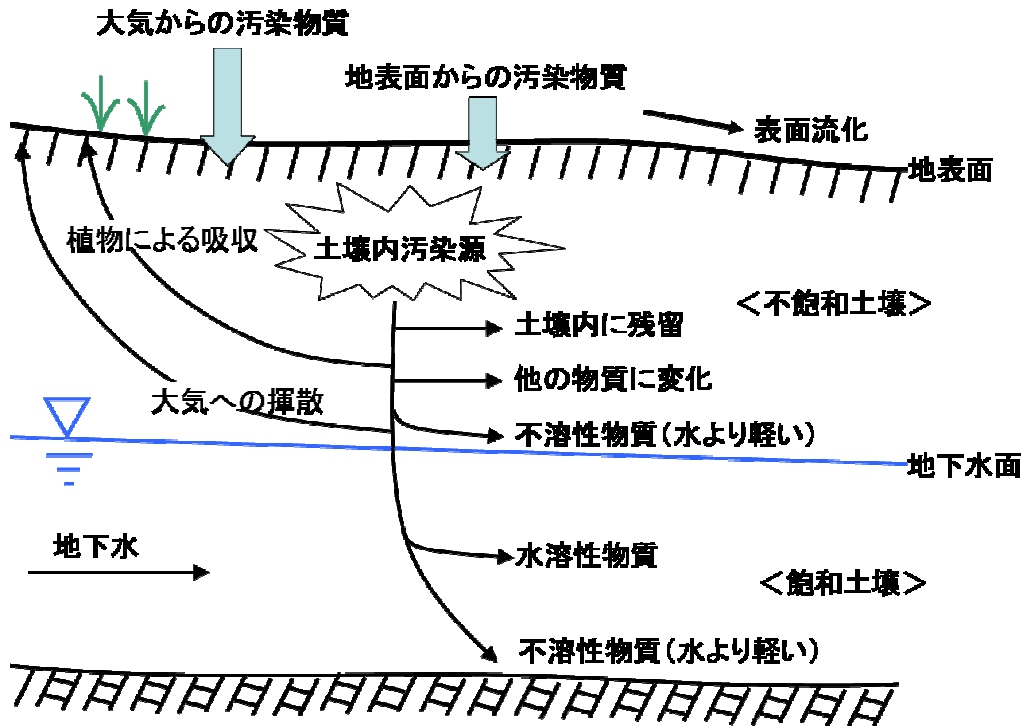


図 6-4 土壌内における汚染物質の挙動¹¹⁾

表 6-3 地下水汚染物質の種類と移動形態¹²⁾

地下水汚染物質種類	溶解性・流れ形態
重金属イオン等 (Cd, Pb, Cr, As, Sb, Hg, 等)	水溶性 単相流れ
農薬 (窒素酸化物)	
塩分 (海岸部の揚水による塩水侵入)	
有機塩素系溶剤 (トリクロロエチレン, テトラクロロエチレン, トリクロロエタン等)	難溶性 多相流れ
液状炭化水素 (石油, ベンゼン, トルエン等)	
気体 (有毒ガス, 軽質炭化水素等)	

表 6-4 地下水汚染をもたらしやすい物質¹³⁾

(1) 多量に使用されている
(2) 開放的に使用され, 外部環境へ侵出しやすい
(3) 地下水に侵入しやすい
(4) 難分解性である
(5) 水に溶ける

6.3.3 有限要素法による移流分散解析で用いた支配方程式

本研究では、有限要素法による移流・拡散プログラムの ADTRANS を使用した。式(6.1)は、本研究で用いた多孔質体中の単相流れにおける、汚染物質の物質輸送を示す支配方程式である。式の左辺は物質の時間的变化、右辺の第1項は分散による物質移行、第2項は移流による物質移行を示したものである。式(6.2)は、遅延係数を求める式を示したものである。固相への吸脱着がなければ $R=1$ となり、吸脱着がある場合は $R>1$ となる¹⁶⁾。

$$R\theta\rho\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\theta\rho D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_j}) - \theta\rho V_i\frac{\partial c}{\partial x_i} - R\theta\rho\lambda c - Q_c \quad (6.1)$$

$$R = 1 + \frac{\rho_d k_d}{\theta} \quad (6.2)$$

ここで、 D_{ij} ：分散係数(m^2/day)、 V_i ：平均流速(m/day)、 C ：液相濃度(g/ml)、 R ：遅延係数、 θ ：体積含水率、 ρ_d ：土の乾燥密度、 k_d ：分配係数(mg/L)、 t ：時間(sec)。

6.3.4 地下水汚染を考慮したモデル化

この地域では、主に Dg3 層から地下水が多く揚水されているため、Dg3 層の下部層である Dc3 層までのモデルを作成した。当該地域の移流分散解析を行う際、広域モデルで作成したメッシュのサイズは汚染の広がりと比較して大きいため、汚染の挙動を正確に予測することができないと考えられる。汚染物質を設定する場所においては、狭い範囲におけるモデルを作成しなければならない。図 6-5 は、局所モデルを作成した範囲を示している。この範囲にある揚水井からの揚水量は、当該地では比較的多い。そのため、解析結果は安全側の結果が得られる場所として選定した。図 6-6 は、局所的な範囲における 3 次元地質構造モデルを示している。モデルは鉛直方向に 2 倍拡大したものである。

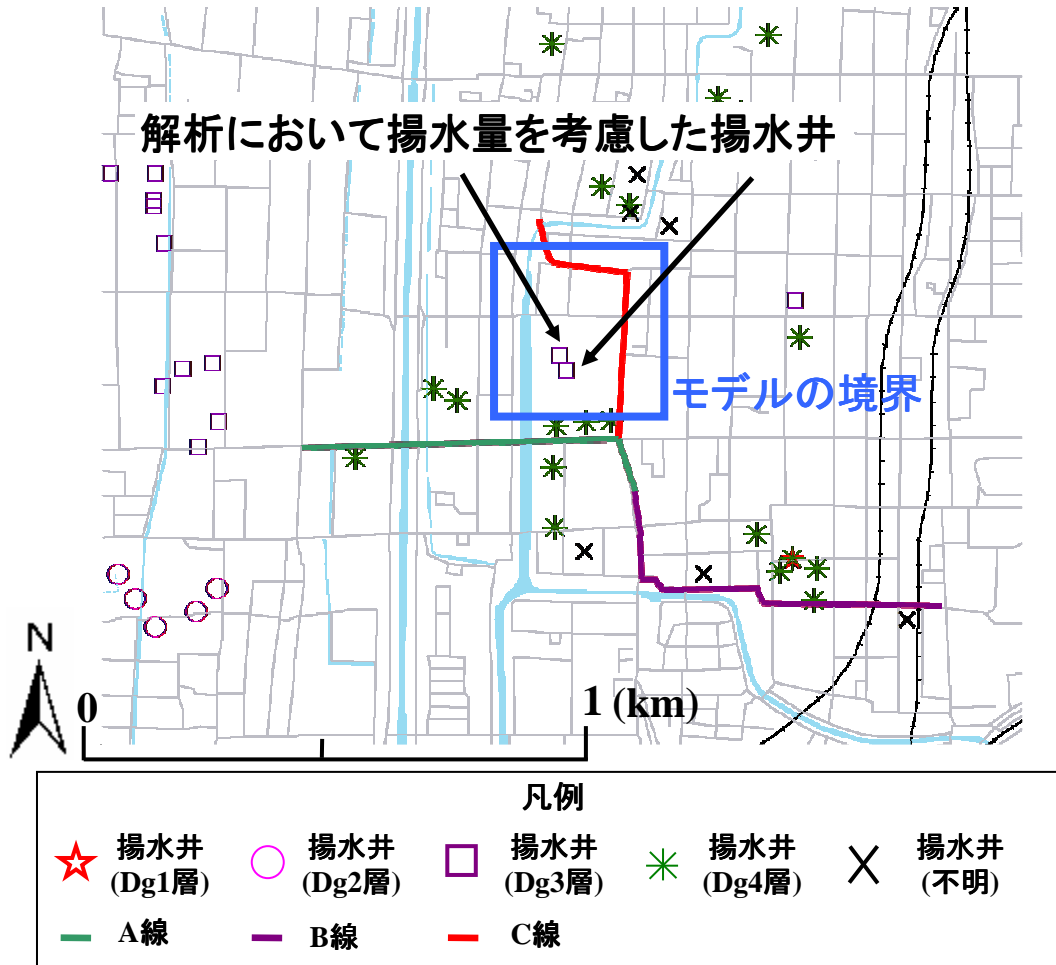


図 6-5 局所モデルを作成した範囲

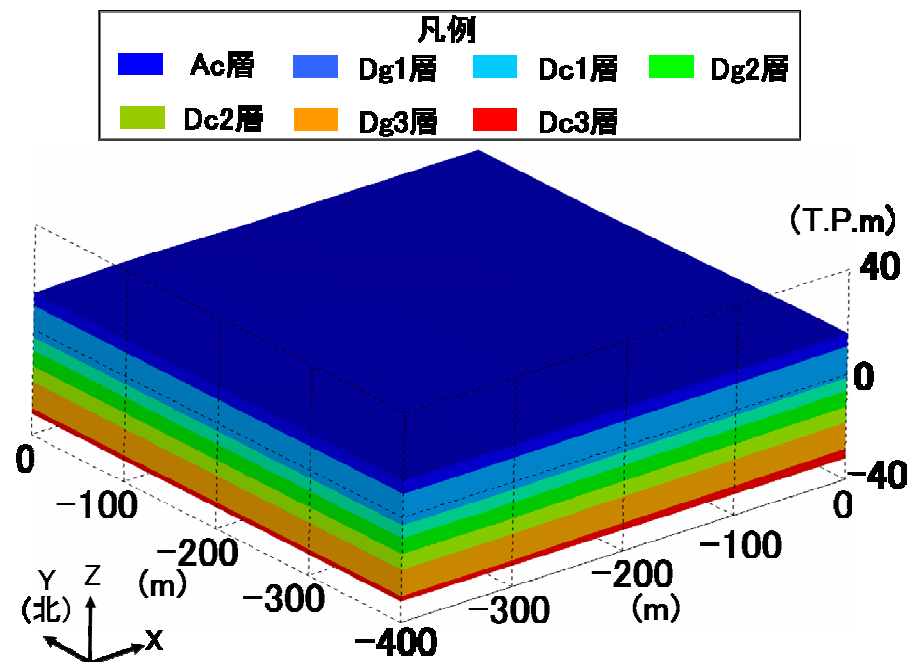


図 6-6 局所的な範囲における 3次元地質構造モデル (鉛直 2倍表示)

6.3.5 地下水汚染を考慮したモデルのメッシュ分割

図 6-7 は、局所的なモデルのメッシュ図を示している。図に示すように、最小メッシュを 2m とし、その位置に汚染が発生したと仮定した。なお、メッシュのサイズは 2m, 5m, 10m, 20m と汚染の発生した位置から離れるにしたがいメッシュのサイズを大きくした。また、汚染源の発生した位置であるモデルの右上においてメッシュを細かくしている理由として、広域モデルの結果から地下水の流れは北東から南西に向けて流れている結果¹⁷⁾を参考にしている。メッシュのサイズは、有限要素法ではペクレ数が 5 を超えると濃度前線において振動が発生すると言われていたため、ペクレ数が 2 になるように設定した¹⁸⁾。

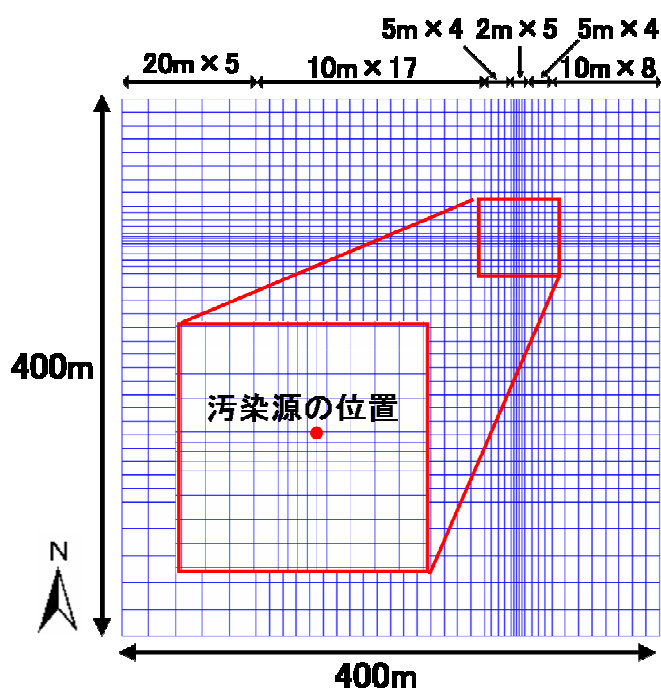


図 6-7 地下水汚染を考慮したモデルのメッシュ分割図

6.3.6 浸透流解析で用いた入力条件

① 境界条件

境界条件は局所モデルの境界に、広域的なモデルにより得た水頭値を入力し、既知水頭境界条件として設定した。広域的なモデルの解析手順と同様に解析を実行した際、流入の見られた境界には既知流量境界に変更して再度解析を実行した。揚水量は、モデルの範囲には Dg3 層から地下水を汲み上げている 2 つの揚水井があるので、その位置における節点において既知流量境界を設定した。揚水量は実際に揚水されている一日当たりの揚水量を設定した。

② 地盤物性値

表 6-4 は、本研究で用いた浸透流解析の地盤物性値を示している。広域的なモデルで浸透流解析を実行した際に用いた地盤物性値と同じ値を設定した。Dg2 層と Dg3 層は Dg1 層と同じ物性値に、Dc2 層と Dc3 層は Dc1 層と同じ物性値に設定した。

表 6-4 浸透流解析で用いた地盤物性値

地層	透水係数 XY (cm/s)	透水係数 Z (cm/s)	比貯留係数 (1/m)	有効間隙率 (%)
Ac 層	5.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-4}	10
Dg1 層	5.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	7.00×10^{-6}	20
Dc1 層	5.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-4}	10
Dg2 層	5.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	7.00×10^{-6}	20
Dc2 層	5.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-4}	10
Dg3 層	5.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	7.00×10^{-6}	20
Dc3 層	5.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-4}	10

6.3.7 移流分散解析で用いた入力条件

① 境界条件

移流分散解析で用いる境界条件は、濃度既知境界条件（第一種）、分散フラックス既知境界条件（第二種）、コーシー型境界条件（第三種）の 3 種類がある。本解析では、汚染が発生したと想定した節点において、常時 1(mg/L)の濃度の汚染物質が発生したと想定し、濃度既知境界条件を与えた。

② 地盤物性値

表 6-5 は、本研究で用いた移流分散解析の地盤物性値を示している。分散長は、移行距離に比例し、おおむね移行距離の 1/10 程度の値となる。また、横方向の分散長は、縦方向の 1/10～1/100 程度になる傾向がある¹⁹⁾。モデルは 400m×400m の領域であるので、一般的な値として表に示すように決定した。本研究では、分配係数の違いによる汚染物質の挙動を比較した。分配係数の高い物質には、鉄やマンガンなどの値として 5.0(ml/g)を設定した。分配係数の低い物質として、遅延現象が生じず非常に汚染が広がりやすい物質として 0(ml/g)を設定した。

表 6-5 移流分散解析で用いた地盤物性値

	Ac	Dg1,Dg2,Dg3	Dc1,Dc2,Dc3
分散長 DL (m)	10.0	10.0	10.0
分散長 DT (m)	1.0	1.0	1.0
屈曲率	1.0	1.0	1.0
間隙率 (%)	50	20	50
土の密度 (t/m ³)	1.65	1.65	1.65

6.4 地下構造物を考慮した 3次元浸透流解析

下水管が地下水の流動阻害に及ぼす影響を検討するために、下水管敷設後と敷設前で下水管近傍の節点における水頭による変化がどの程度生じるのかについて検討した。最初に解析結果が、下水管を再現できているかの確認が必要である。地下水が下水管を迂回している流れを確

認できれば、次に下水管による流動障害に及ぼす影響が最も大きいと考えられる断面において、下水管を再現していない結果と下水管を再現した結果の水頭値を比較する。上流側での水位の上昇がどの程度あるのか、また下流側では水位の低下がどの程度あるのかといったことを検討することにより、下水管が流動障害に及ぼす影響を検討した。

6.4.1 地下構造物が地下水流動に及ぼす影響の可視化

図 6-8 は、下水管による流動障害への影響を可視化した位置を示している。図 6-9 は、流動障害への影響を 3 次元的に可視化した結果と 2 次元断面を可視化した結果を示している。図に示されるように、地下水流動ベクトルは下水管を迂回するように流れていることが分かる。空洞部分が下水管の位置であり、大きさは 3.0m 程である。実際の下水管は円形であるが、本手法では要素を取り除くことにより下水管を再現しているため、メッシュの大きさが粗いことから、長方形に近い空洞ができている。しかしながら、円形型の地下構造物と長方形型の地下構造物が地下水流動に及ぼす影響を比較すると、長方形型の地下構造物の方が流動障害に及ぼす影響が大きいことは明らかである。このことは、解析結果が危険側に計算されるものであると考えられる。再現した地下構造物の形状は異なるが、図に示されるように、実際の下水管の寸法と同じ大きさの地下構造物ができたことが確認できたので、この解析結果を基に周辺の地下水頭に変動があるのかを検討した。

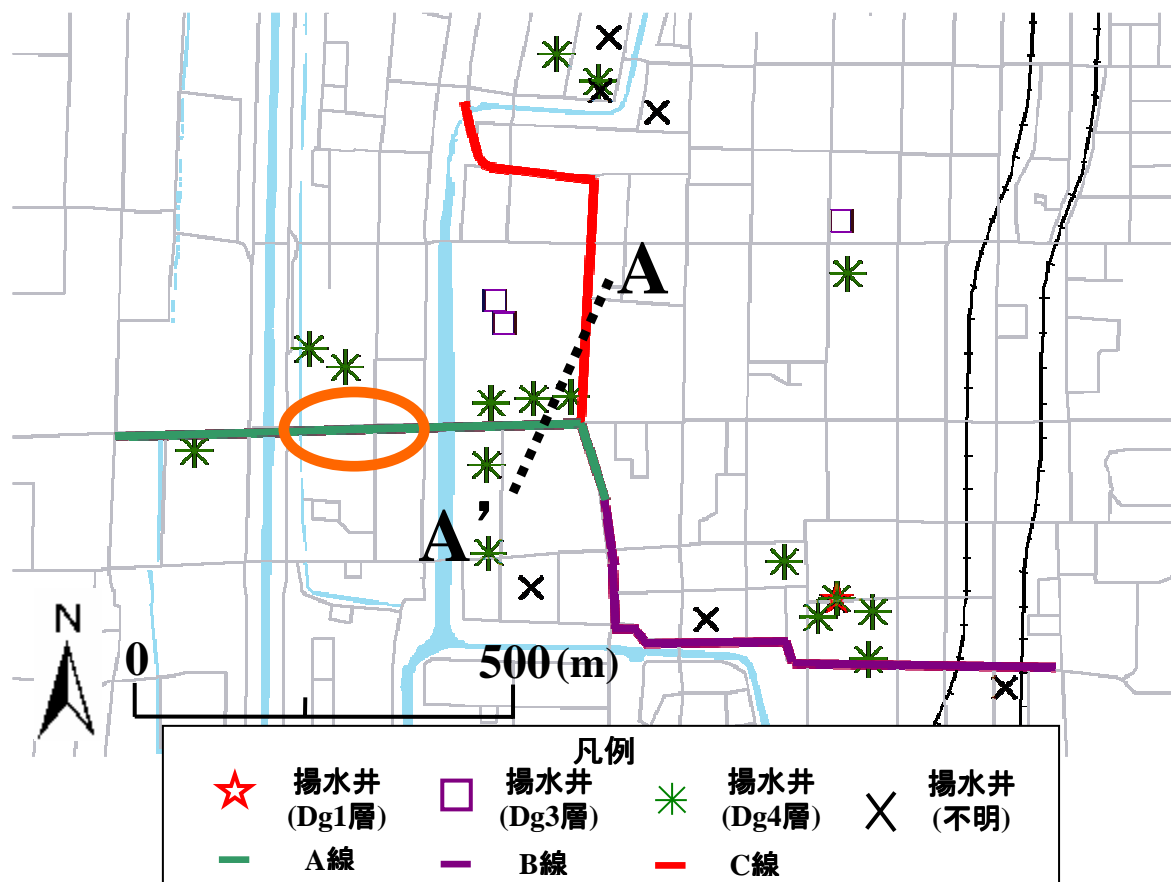


図 6-8 解析結果を示した位置

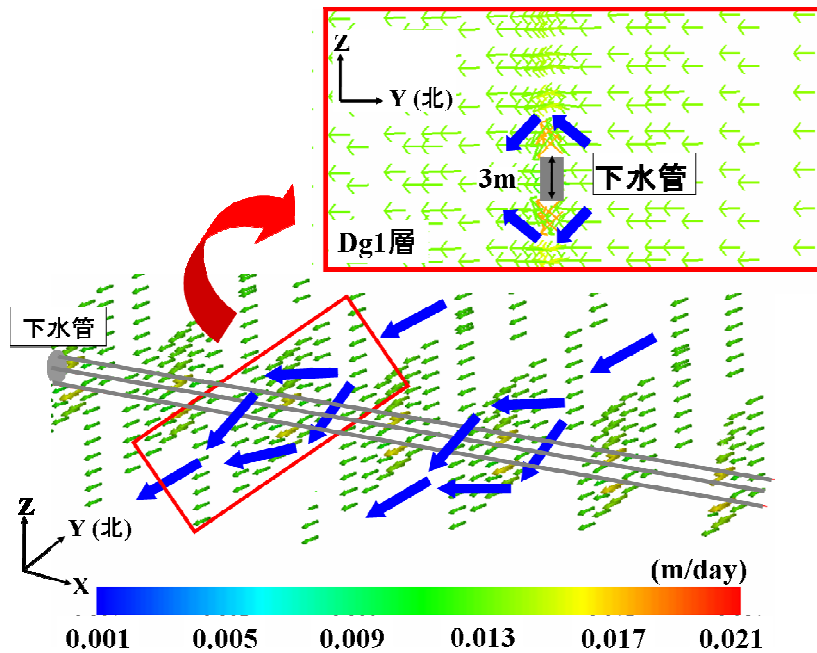


図 6-9 下水管が地下水流動に及ぼす影響を可視化した解析結果（3次元表示）

6.4.2 地下構造物が周辺の地下水位に及ぼす影響の検討

下水管周辺において、地下構造物が地下水位に及ぼす影響を検討した。図 6-10 は、図 6-8 に示す A-A'における位置における地下水頭を示したものである。この図に示されるように、地下水頭は下水管がある場合とない場合でも変化がみられない。すなわち、現在施工されている大きさの下水管を敷設させた場合、地下水流動阻害に及ぼすような影響はほとんど見られないことが認められた。この地域に堆積している Dg1 層は 15m 程の層厚であるので、現在施工されている下水管の大きさの約 5 倍あることも、地下水流動阻害に及ぼす影響を軽減しているものであると考えられる。よって、下水管より下流側にある揚水井の水位低下等の影響は生じないことが分かる。このように、地下水シミュレーション解析を行うことで、下水管などの地下構造物を敷設させた場合、地下水流動に及ぼす影響を事前に評価することができる。

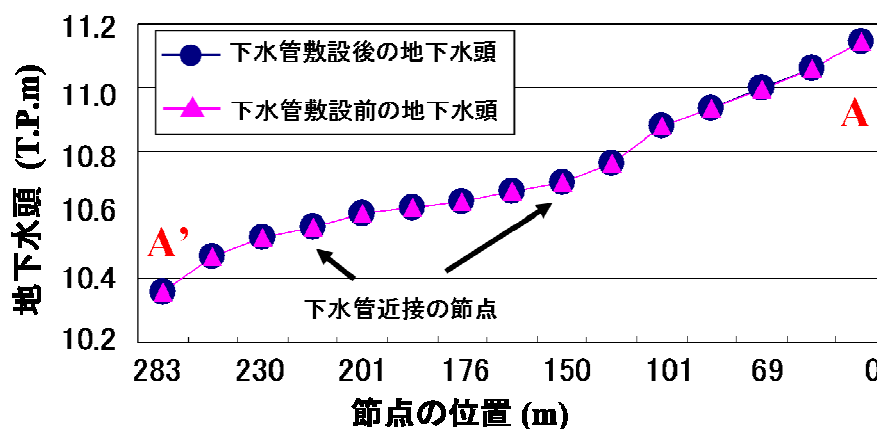


図 6-10 下水管敷設による地下水位変化

6.5 地下水汚染モデルにおける3次元浸透流解析

図6-11は、局所的なモデルを用いて3次的に地下水の流れを再現した結果を示したものである。図6-12は、Dg1層とDg2層とDg3層の各層における地下水の流れを再現した結果をそれぞれ2次元平面図で示したものである。図に示されるように、Dg3層の地下水の流れは揚水井に向けて地下水が流れていることが分かる。しかしながら、Dg1層やDg2層の地下水の流れは、揚水による影響を受けず、地下水位の高い北東から地下水位の低い南西に向けて流れていることが分かる。図6-13は、鉛直断面における流向流速ベクトルの結果を示したものである。図に示されるように、Dg3層においては揚水が行われている付近で地下水が下方方向に流れているが、Dg1層やDg2層ではDg3層からの揚水による地下水流動への影響が少ないことから、揚水による鉛直下方向への地下水の流れは連続する粘土層により遮られていると考えられる。

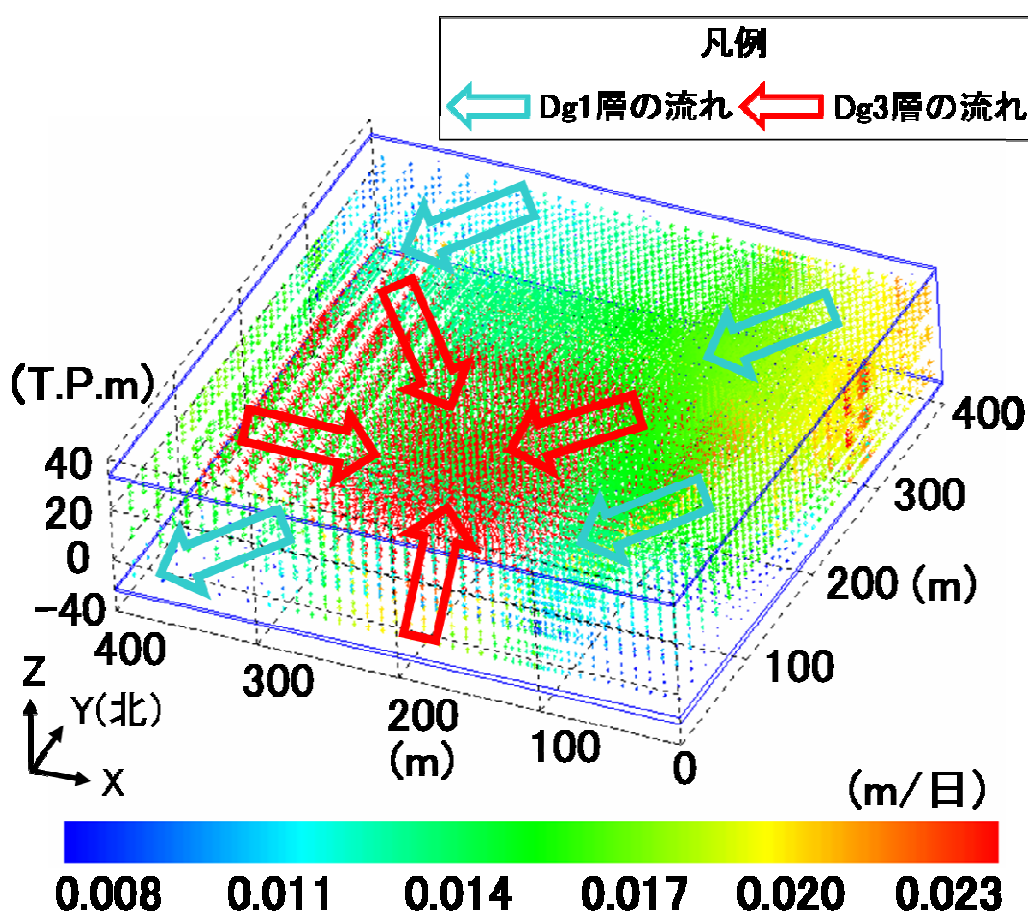
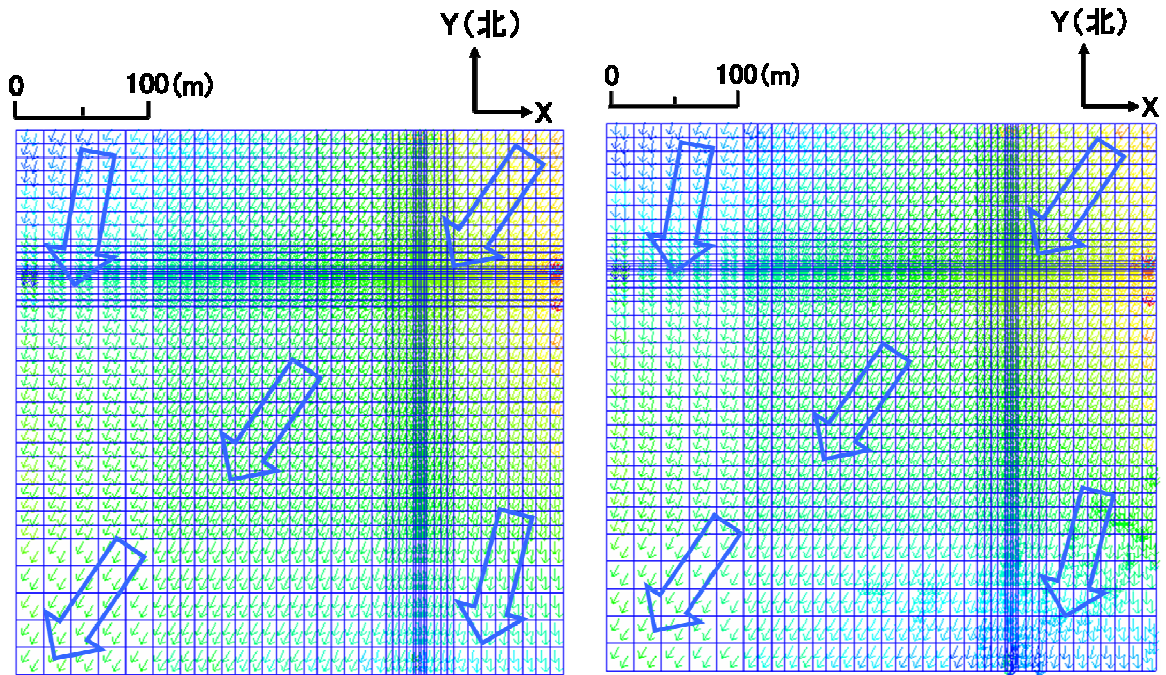
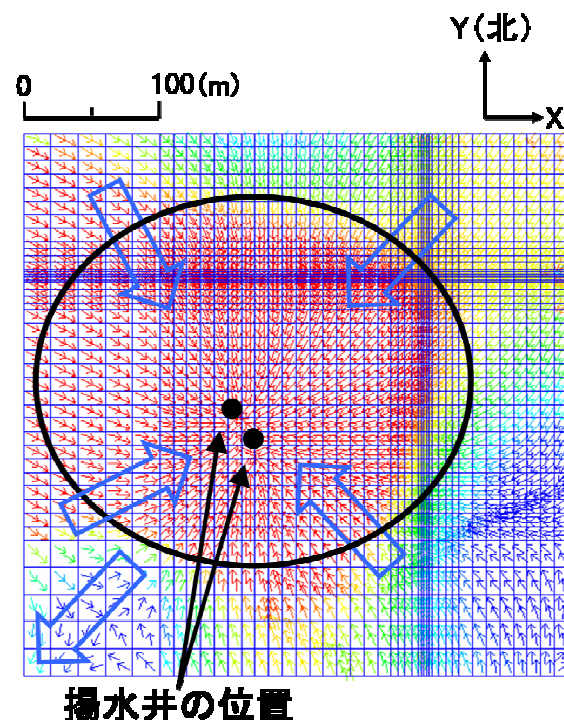


図6-11 局所的なモデルにおける地下水流動挙動 (3次元表示)



(a) Dg1 層の流れ

(b) Dg2 層の流れ



揚水井の位置

(c) Dg3 層の流れ

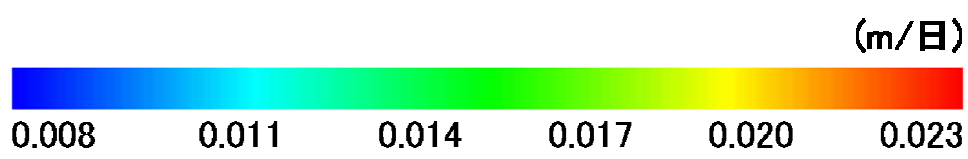


図 6-12 局所的なモデルにおける地下水流動挙動 (2次元平面表示)

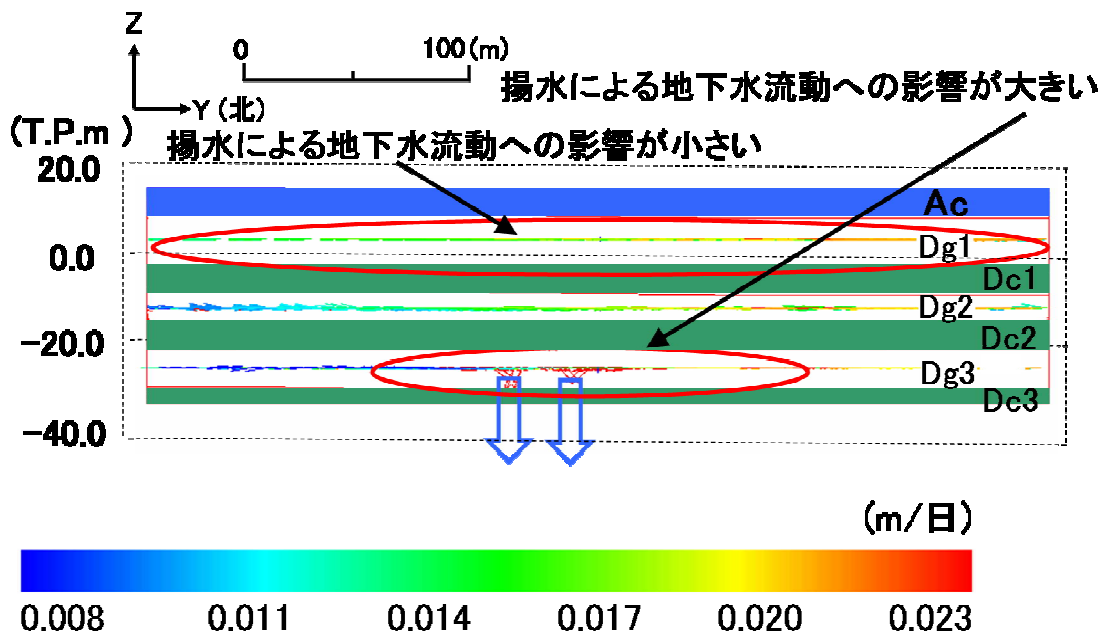
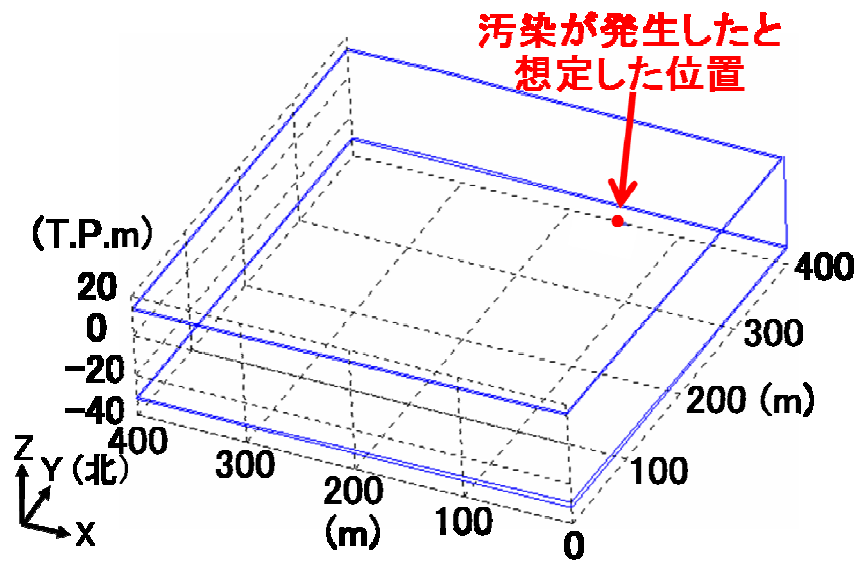


図 6-13 局所的なモデルにおける地下水流動挙動 (2次元鉛直断面表示)

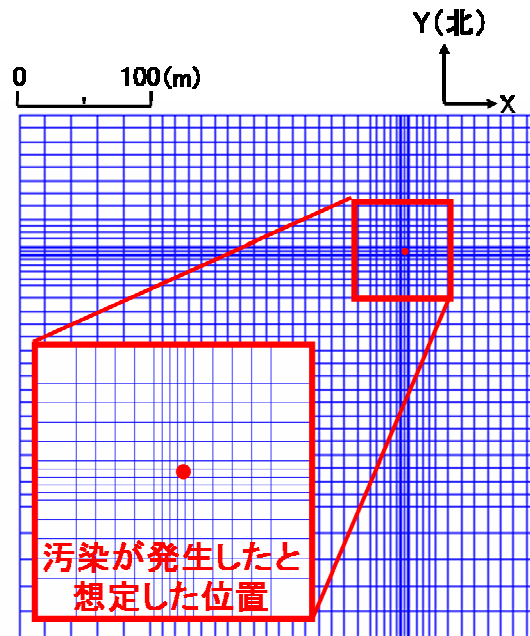
6.6 地下水汚染モデルにおける3次元移流分散解析

6.6.1 汚染の初期の位置

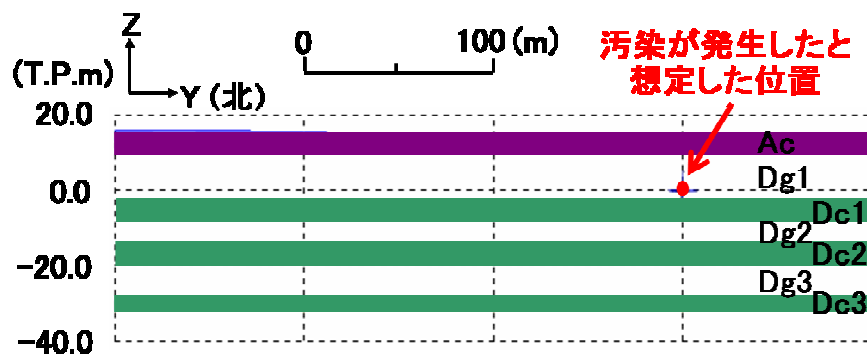
図 6-14 は、汚染が発生したと想定した初期の位置を3次元、2次元平面、2次元鉛直断面表示でそれぞれ示したものである。汚染の濃度は、想定した汚染源が常時 1(mg/L)発生しているので、その濃度の 1/100 である 0.01(mg/L)までの汚染の広がりを予測した結果を示した。本研究では、Dg1 層内の下水管が敷設されている位置と同じく T.P.0m の位置から汚染物質が発生したと仮定した。この地域では、Dg3 層から最も多く揚水されているので、想定した汚染物質の移流分散挙動を予測し、Dg3 層への影響に関して定量的に検討した。



(a) 3次元表示による初期の状態



(b) 2次元平面表示による初期の状態



(c) 2次元鉛直断面表示による初期の状態

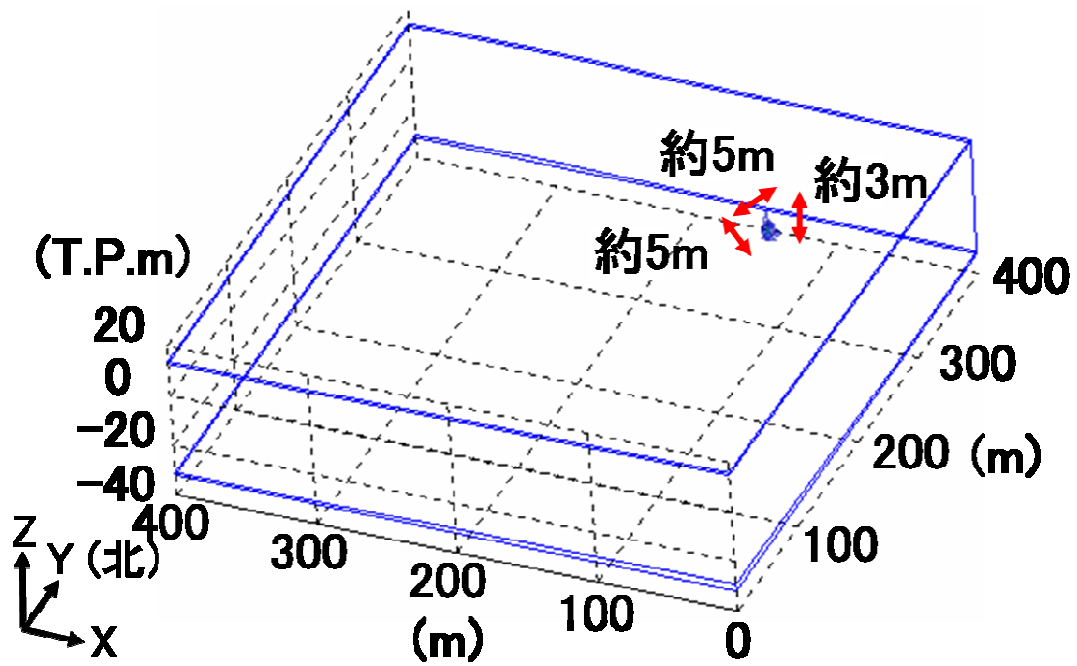
図 6-14 汚染を想定した初期の位置

6.6.2 分配係数の高い物質の移流分散挙動

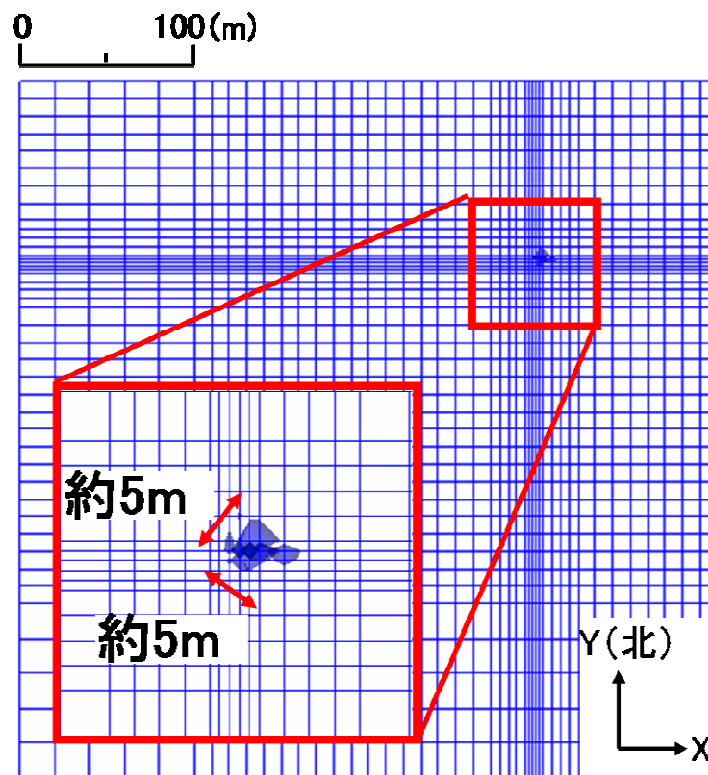
ここでは、鉄やマンガンなどの分配係数が高い汚染物質の挙動について検討した。図 6-15 から図 6-18 は、想定した汚染物質が発生してから 1 ヶ月後、半年後、1 年後、5 年後における汚染物質の移流分散挙動を、3 次元および 2 次元平面で表示した解析結果である。図に示されるように、1 ヶ月程で汚染の拡散は 5m 程であることが認められた。半年程経過すると、地下水の流動方向に 10m 程の拡散が認められた。1 年程経過すると、地下水の流動方向に 20m 程拡散し、地下水の流れと直角方向においては、5m 程の拡散が認められた。5 年程経過すると、地下水の流動方向に 35m 程の拡散が認められ、直角方向には 15m 程の拡散が認められた。

対象地においては、想定した汚染物質が Dg3 層などの帯水層まで侵入し、帯水層における汚染物質の濃度が上昇することが懸念される。そこで、汚染物質の鉛直方向への拡散の詳細について検討した。図 6-19 は、想定した汚染物質が発生してから 1 ヶ月後、半年後、1 年後、5 年後における汚染物質の移流分散挙動を、2 次元鉛直断面で表示した解析結果である。汚染は、5 年間で 6m 程の拡散しか認められず、Dc1 層の上部で汚染が留まっていることが分かる。その理由として、粘土層の透水係数が低いことから、粘土層の地下水の流速が帯水層の流速と比較すると非常に遅く、特に鉛直方向への地下水の流れが非常に遅いことが大きな原因として考えられる。すなわち、Dc1 層は汚染物質の進入を妨げる水理学的なバリアを果たしていることが分かる。この地域では、Dg3 層から活発的に揚水されているので Dg1 層から発生した汚染物質が Dg3 層まで侵入し、Dg3 層において懸念される汚染物質の濃度が上昇するといった可能性は極めて少ないと考えられる。

図 6-20 は、汚染を仮定した位置から汚染の進行方向に約 5m、約 10m、約 15m、約 20m の位置における節点の濃度の経時変化を示したものである。この図に示されるように、5m の地点においては、汚染が発生してから 5 年後において濃度が 0.1(mg/L)以上になることが予測されるが、10m 以上離れると濃度が 0.1(mg/L)以上拡散しないことが認められた。図 6-21 に、汚染を仮定した位置の鉛直真下方向における Dc1 層の中央部と Dg2 層の中央部の位置における節点の濃度の経時変化を示したものである。この図に示されるように、Dc1 層と Dg2 層と伴に濃度の上昇が見られないことが分かる。すなわち、Dg1 層から発生した汚染物質は揚水が行われている帯水層まで広がらないことが定量的な検討結果を基にして認められた。



(a) 三次元表示による分散状況



(b) 平面的な分散状況

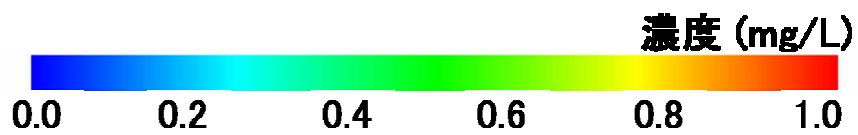
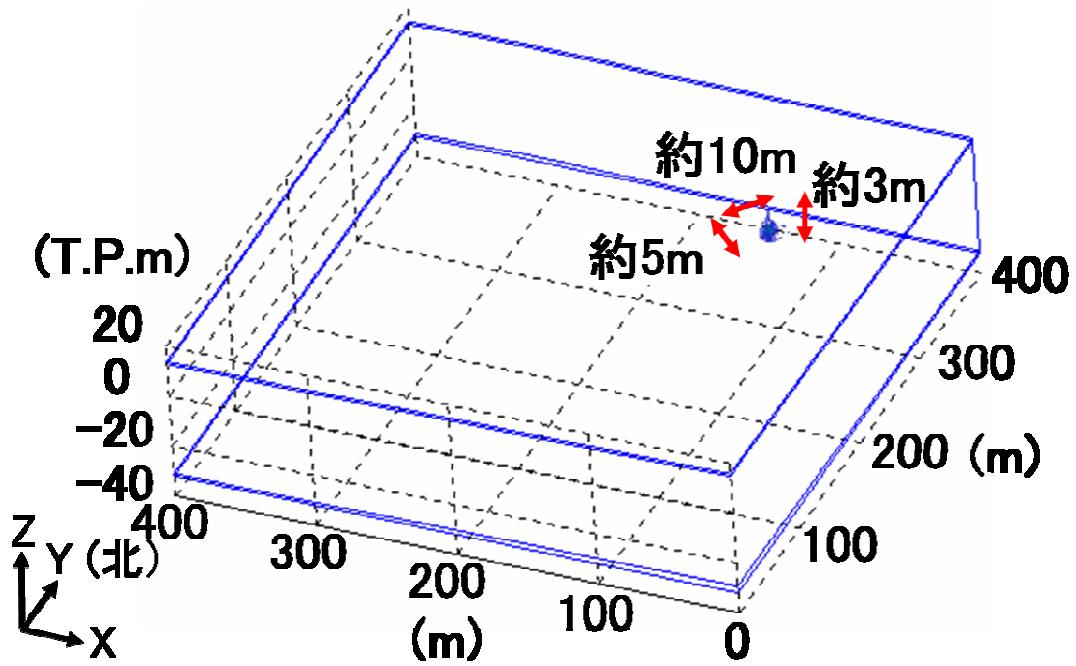
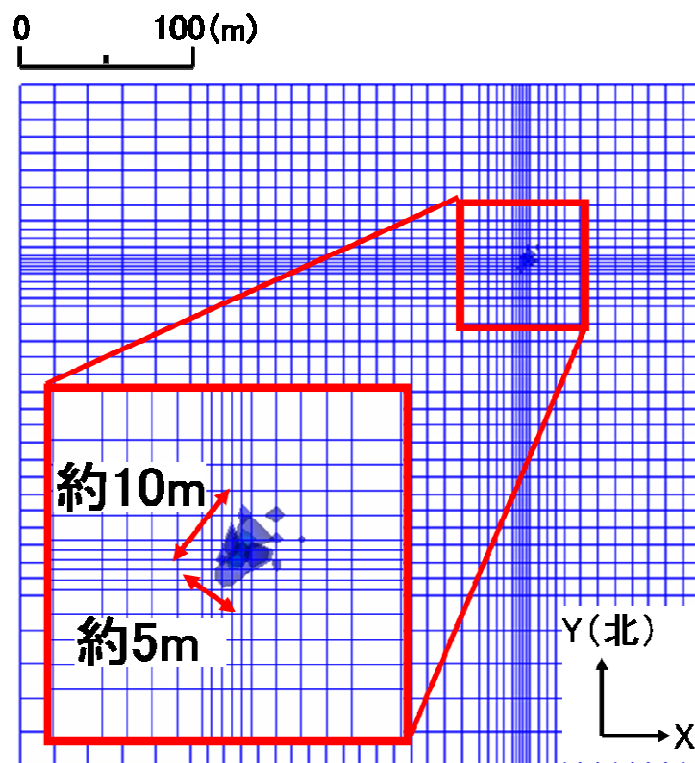


図 6-15 分配係数が高い物質の移流分散解析結果 (1 ヶ月後)



(a) 三次元表示による分散状況



(b) 平面的な分散状況

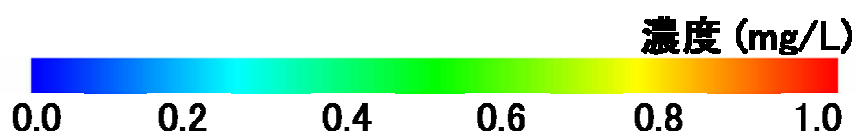
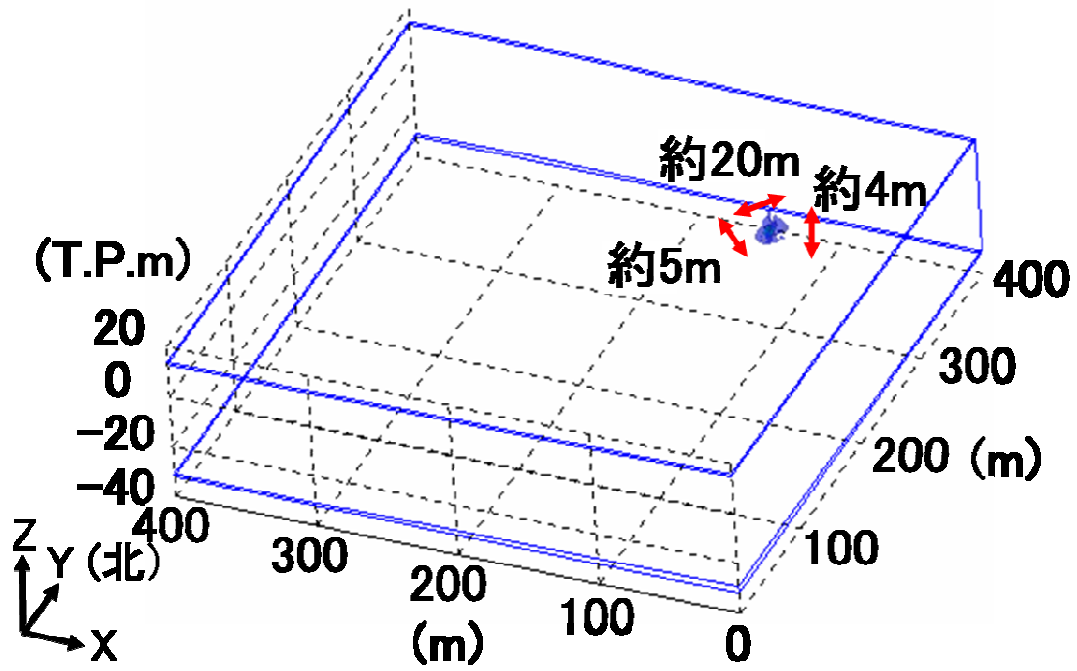
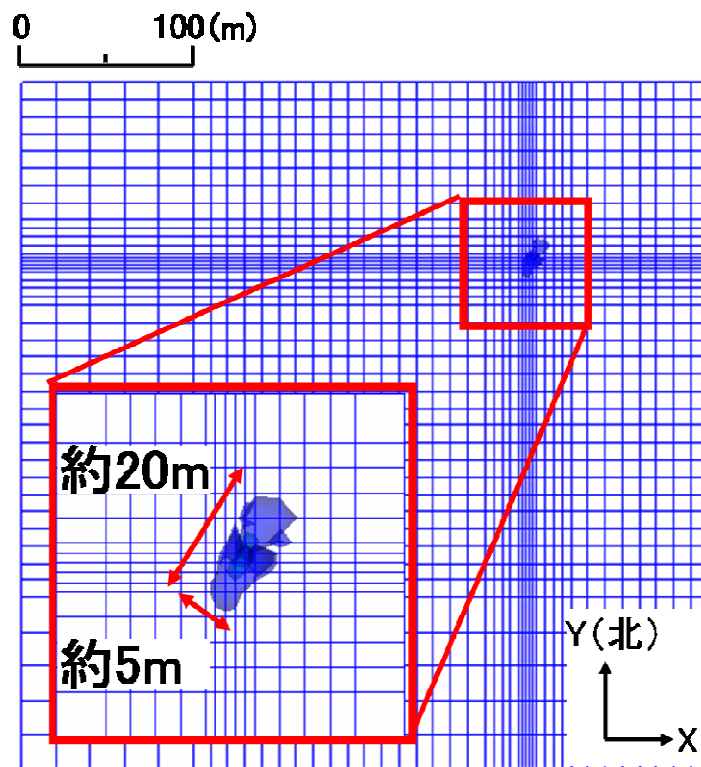


図 6-16 分配係数が高い物質の移流分散解析結果 (半年後)



(a) 三次元表示による分散状況



(b) 平面的な分散状況

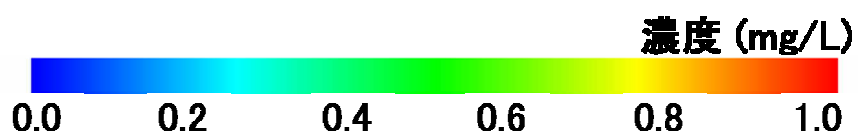
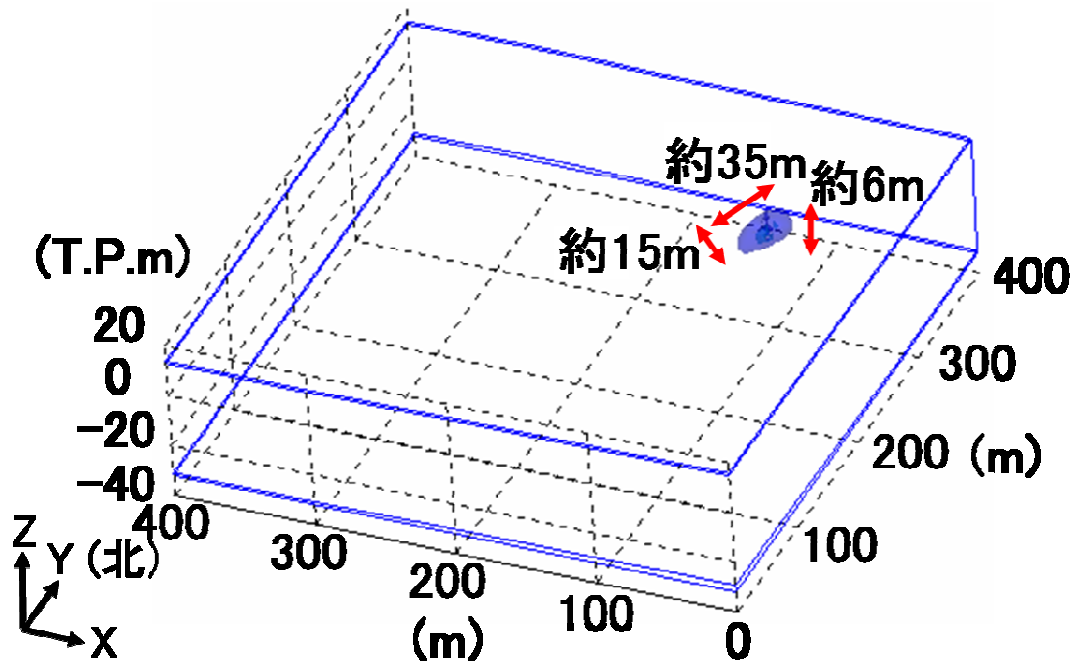
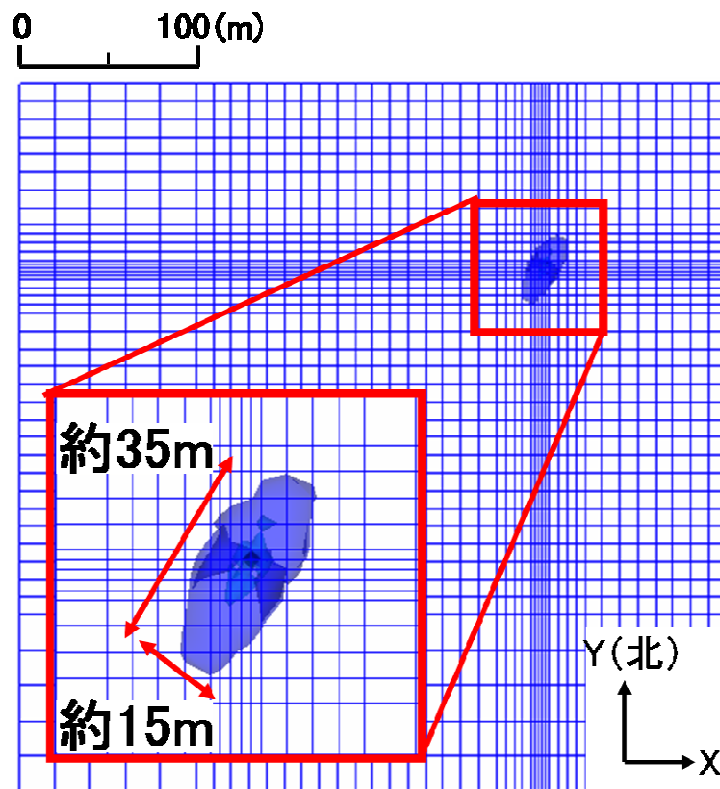


図 6-17 分配係数が高い物質の移流分散解析結果 (1 年後)



(a) 三次元表示による分散状況



(b) 平面的な分散状況

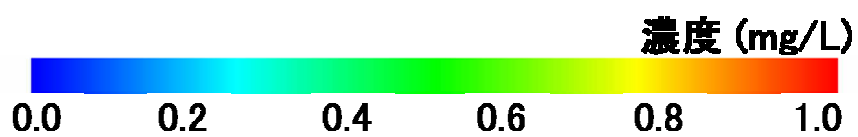
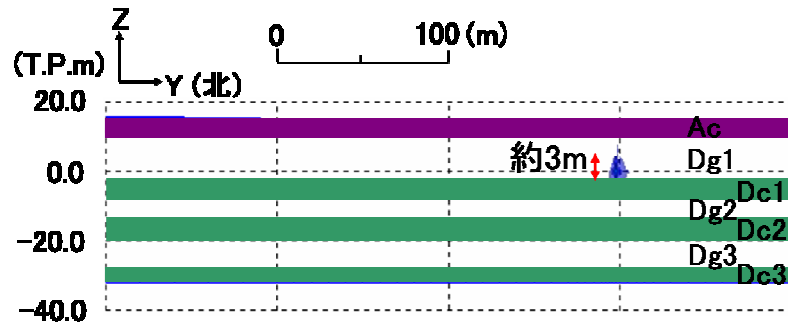
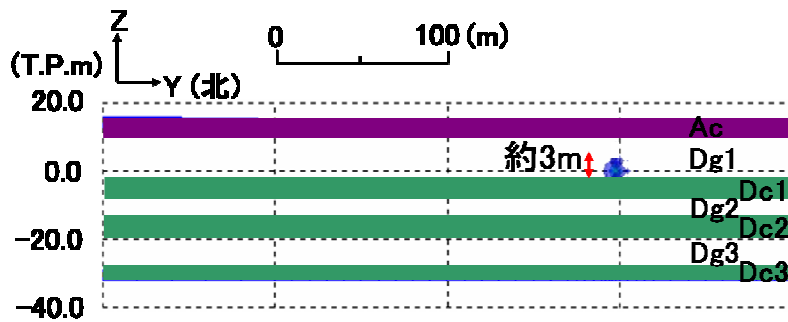


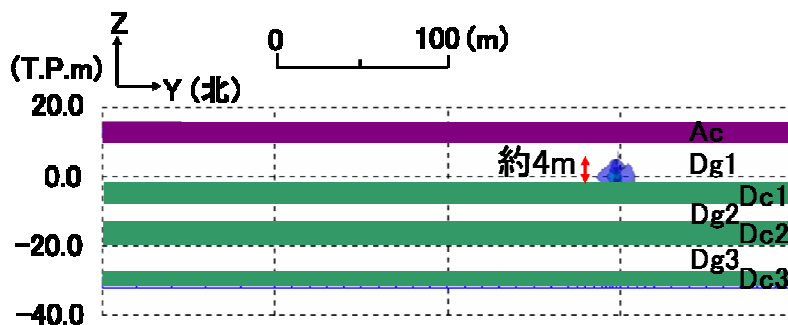
図 6-18 分配係数が高い物質の移流分散解析結果 (5 年後)



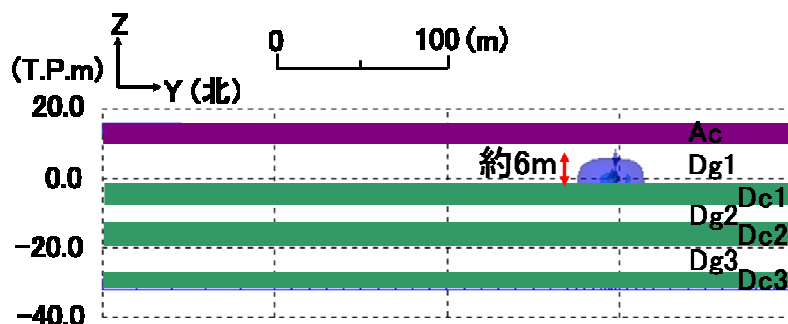
(a) 1ヵ月後



(b) 半年後



(c) 1年後



(d) 5年後

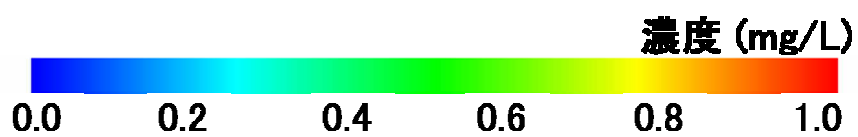


図 6-19 分配係数が高い物質の移流分散解析結果 (鉛直断面図)

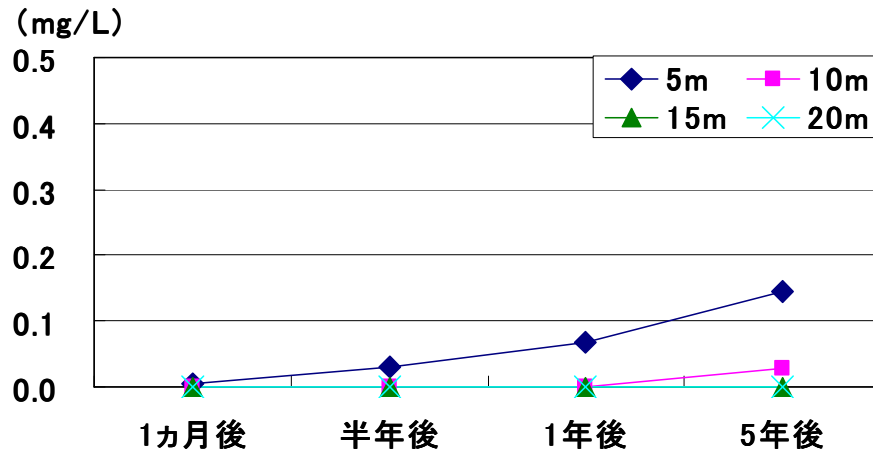


図 6-20 分配係数が高い物質の経時変化（水平方向）

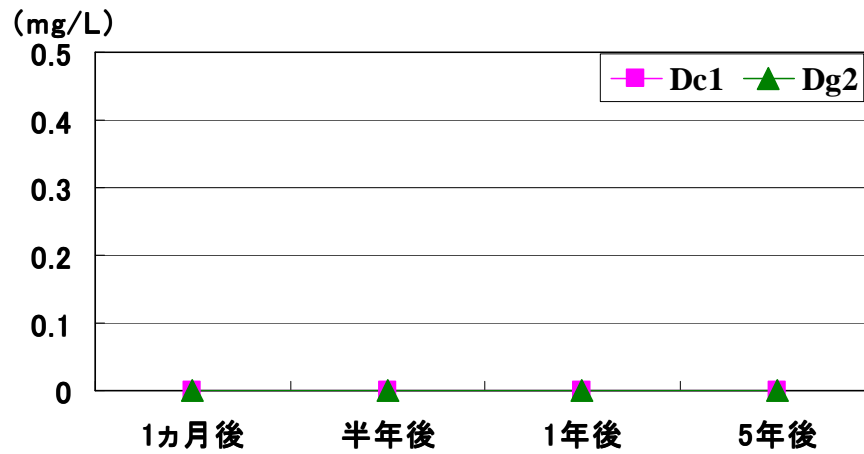


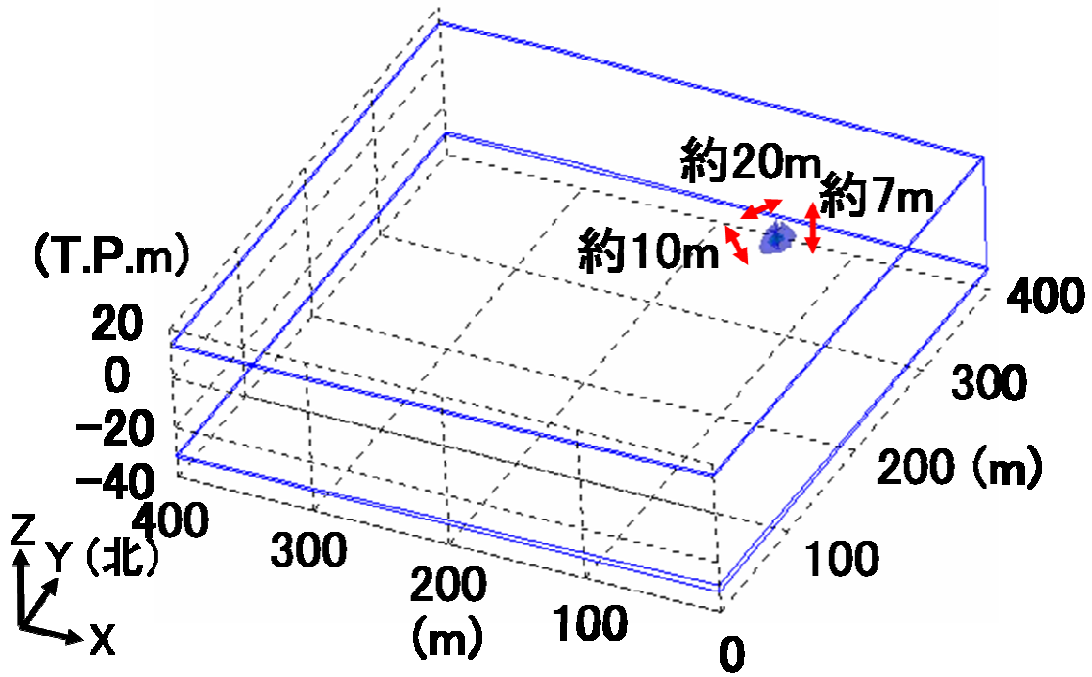
図 6-21 分配係数が高い物質の経時変化（鉛直方向）

6.6.3 分配係数の低い物質の移流分散挙動

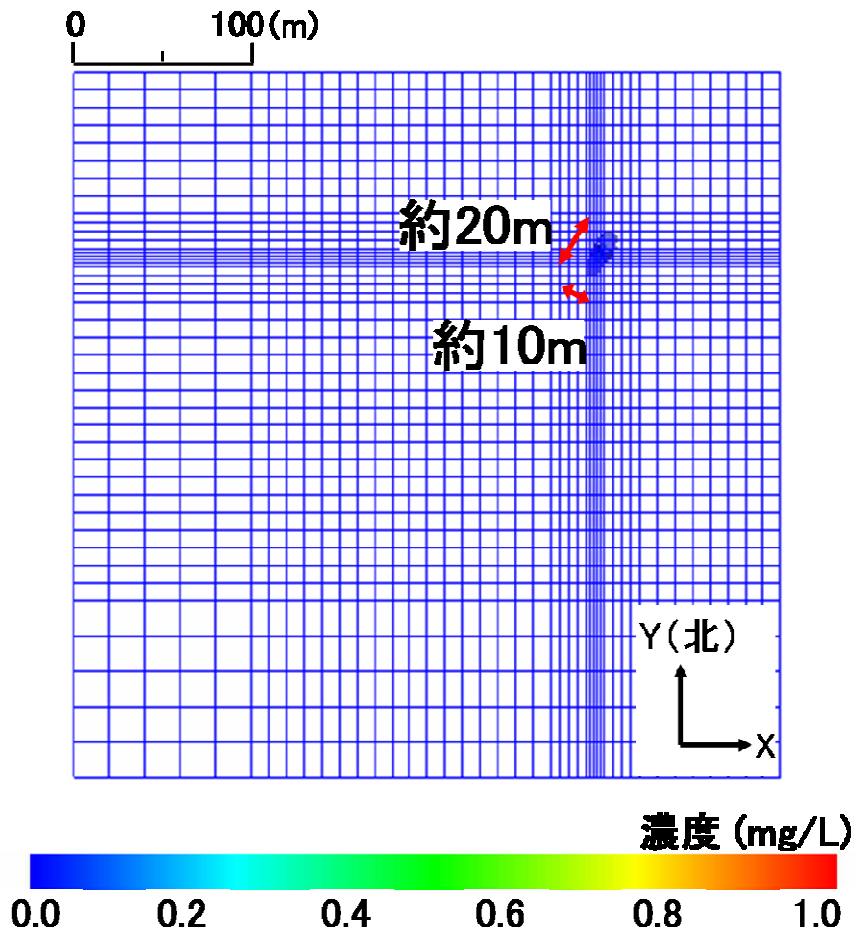
ここでは、土壌への吸着現象が生じないような汚染物質として、分配係数が低い汚染物質の挙動について検討した。懸念される汚染物質よりも汚染の拡散が大きな物質の移流分散挙動を予測することで、危険側の解析結果を求めた。図 6-24 から図 6-27 は、想定した汚染物質が発生してから 1 ヶ月後、半年後、1 年後、5 年後における汚染物質の移流分散挙動を、3 次元および 2 次元平面で表示した解析結果である。図に示されるように、1 ヶ月程で汚染の広がりには 20m 程であり、直角方向においては 10m 程の拡散が認められた。半年程経過すると、地下水の流動方向に 45m 程の拡散し、直角方向においては 15m 程の拡散が認められた。1 年程経過すると、地下水の流動方向に 20m 程の拡散が認められ、直角方向においては 15m 程の拡散が認められた。5 年程経過すると、地下水の流動方向に 150m 程の広がりが認められ、直角方向には 35m 程の拡散が認められた。

対象地においては、想定した汚染物質が Dg3 層などの帯水層まで侵入し、帯水層における汚染物質の濃度が上昇することが懸念される。そこで、汚染物質の鉛直方向への拡散の詳細について検討した。汚染物質の鉛直方向への拡散の詳細について検討した。図 6-28 は、想定した汚染物質が発生してから 1 ヶ月後、半年後、1 年後、5 年後における汚染物質の移流分散挙動を、2 次元鉛直断面で表示した解析結果である。汚染は、5 年間で 16m 程の拡散が認められ、Dc1 層の上部で汚染が留まっていることが分かる。すなわち、Dc1 層は汚染物質の拡散が比較的に大きい物質に対しても進入を妨げるといった水理学的なバリアを果たしていることが分かる。

図 6-29 は、汚染を仮定した位置から汚染の進行方向に約 20m、約 40m、約 60m、約 80m、約 110m の位置における節点の濃度の経時変化を示したものである。この図に示されるように、5 年間で汚染が発生してから 40m 程の地点までは、濃度が 0.1(mg/L)以上になることが認められるが、40m 以上離れると濃度が 0.1(mg/L)以上拡散しないことが認められた。懸念される鉄イオンと比較すると水平方向においては、非常に汚染の拡散が大きいことが分かる。図 6-30 は、汚染を仮定した位置の鉛直真下方向における Dc1 層の中央部と Dg2 層の中央部の位置における節点の濃度の経時変化を示したものである。この図に示されるように、Dc1 層と Dg2 層と共に濃度の上昇が見られないことが分かる。すなわち、遅延の現象を起こさないような比較的に汚染の拡散が大きい汚染物質でも、Dg1 層から発生した汚染物質は揚水が行われている帯水層まで拡散しないことが認められた。

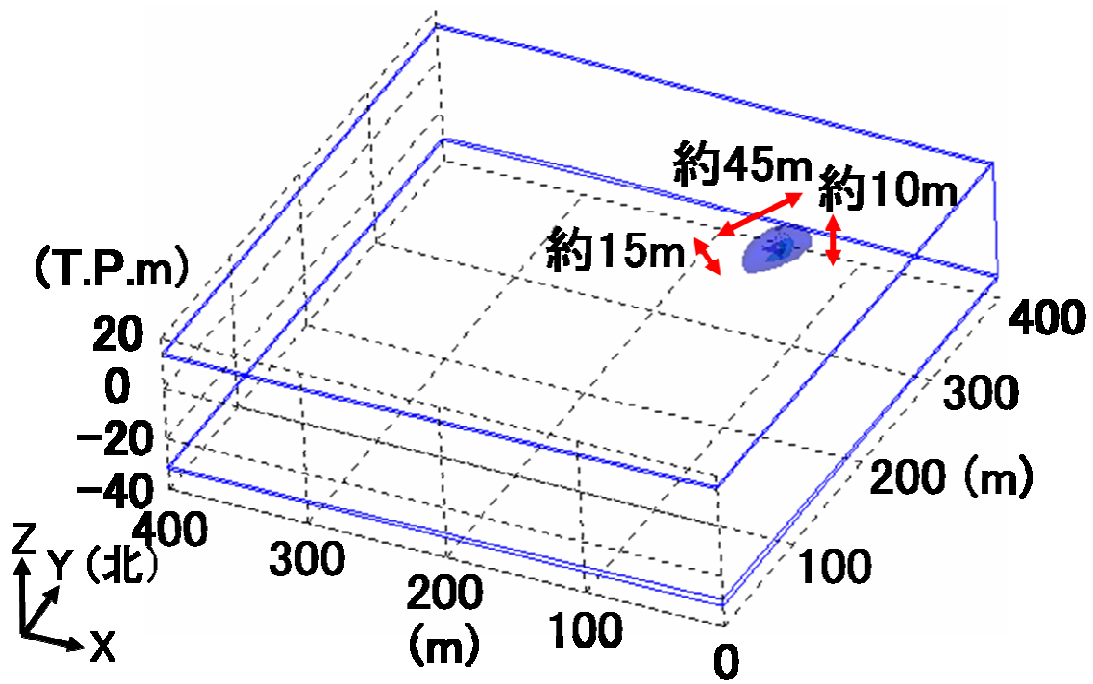


(a) 三次元表示による分散状況

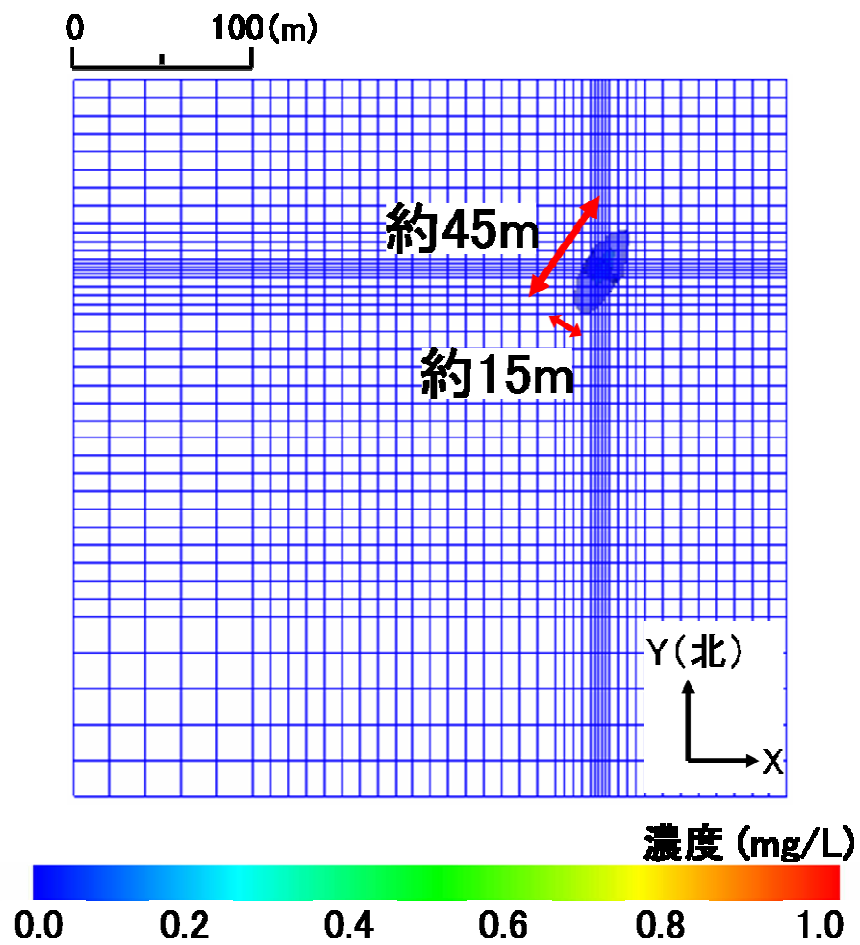


(b) 平面的な分散状況

図 6-24 分配係数が低い物質の移流分散解析結果 (1 ヶ月後)

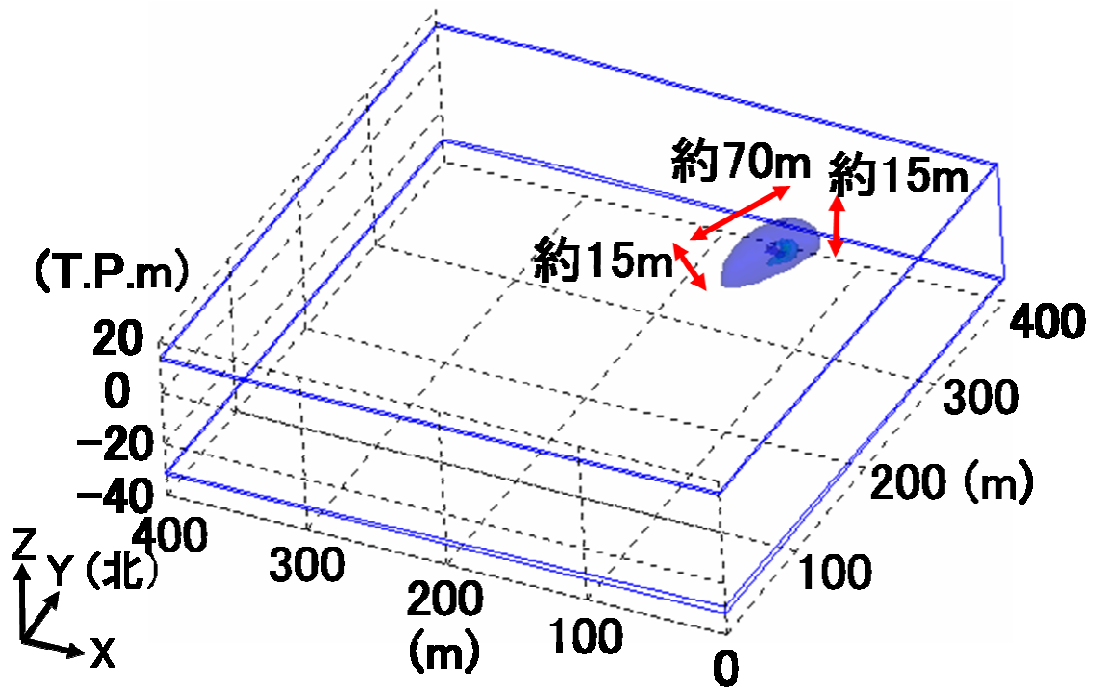


(a) 三次元表示による分散状況

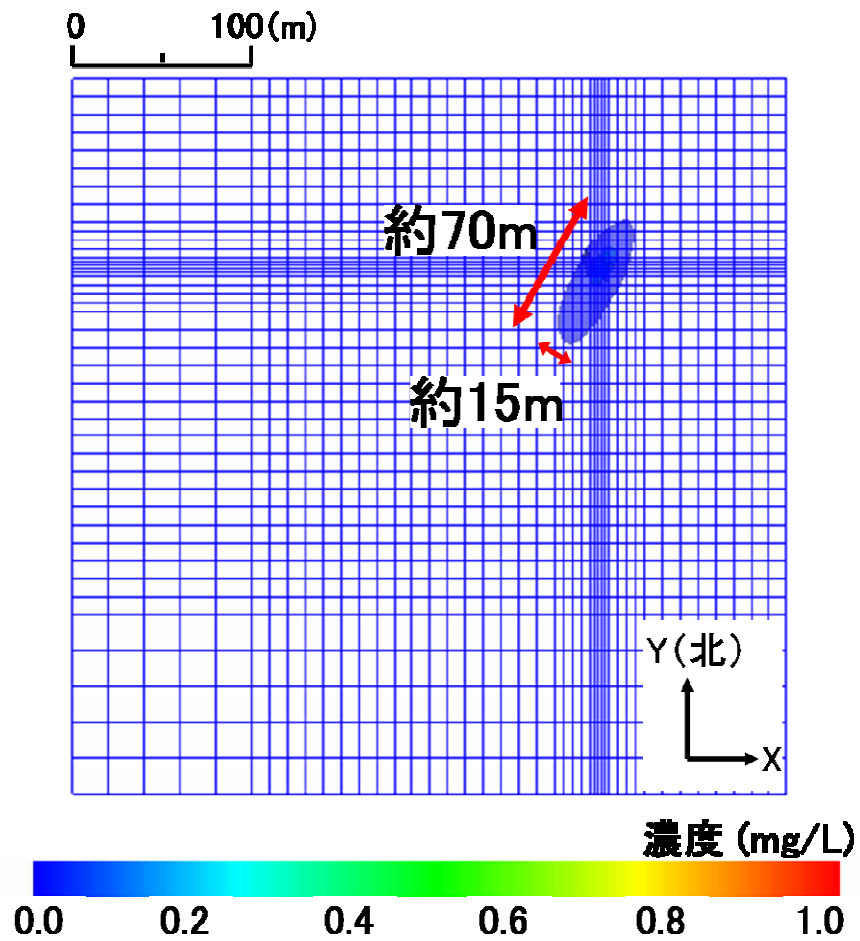


(b) 平面的な分散状況

図 6-25 分配係数が低い物質の移流分散解析結果 (半年後)

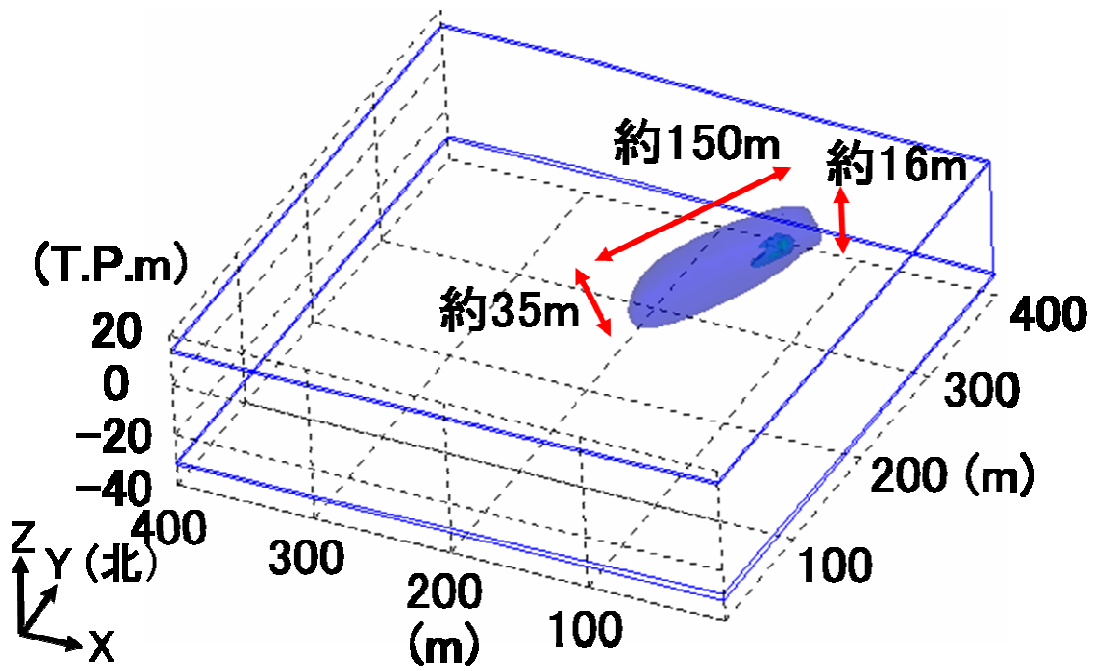


(a) 三次元表示による分散状況

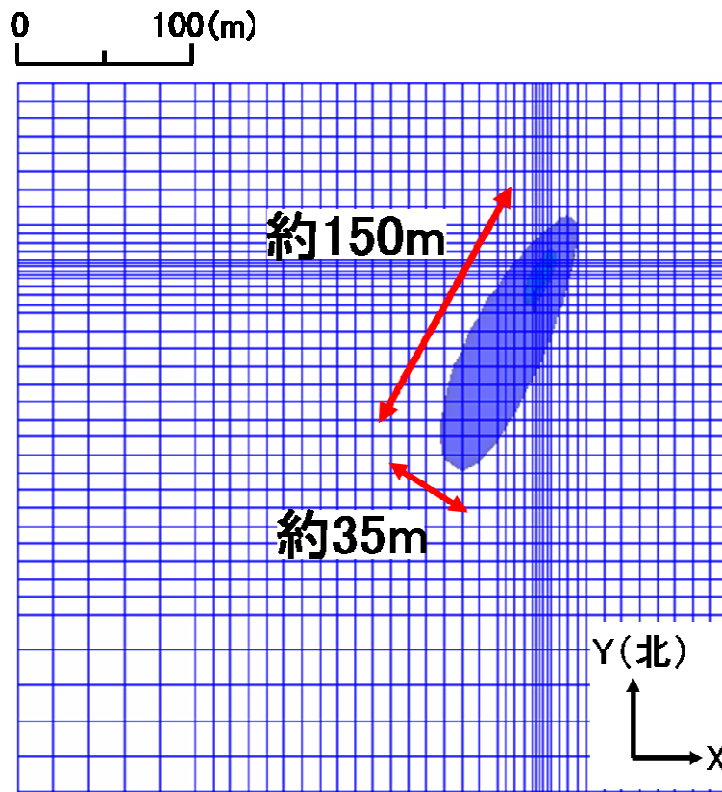


(b) 平面的な分散状況

図 6-26 分配係数が低い物質の移流分散解析結果 (1 年後)



(a) 三次元表示による分散状況



(b) 平面的な分散状況

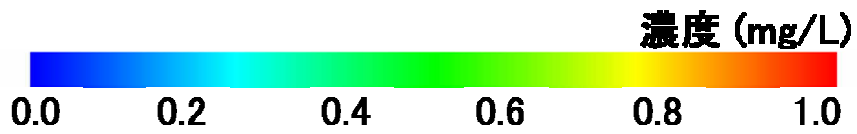
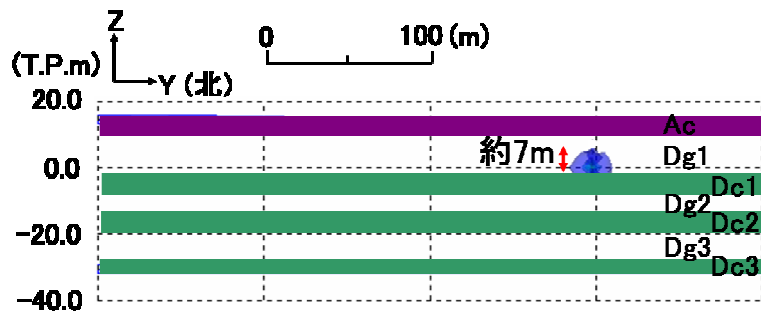
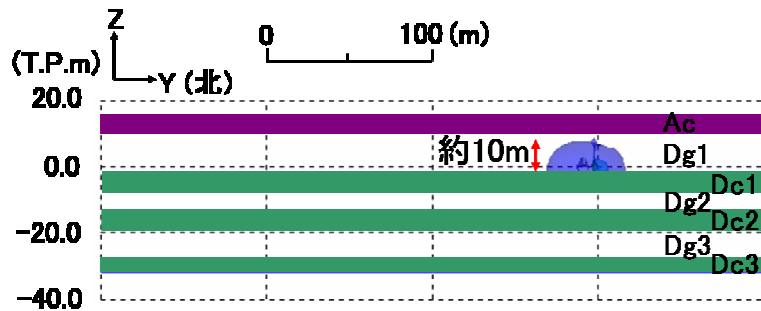


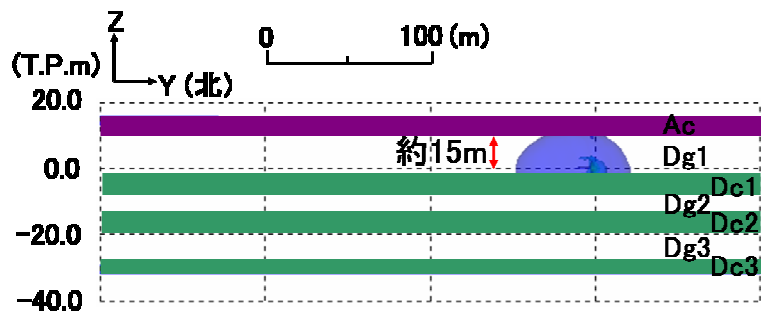
図 6-27 分配係数が低い物質の移流分散解析結果 (5 年後)



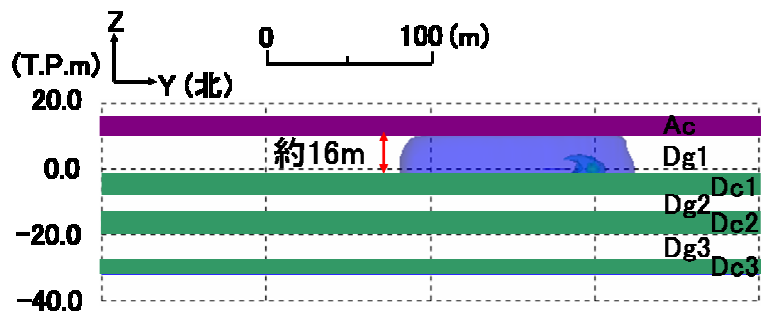
(a) 1ヵ月後



(b) 半年後



(c) 1年後



(d) 5年後

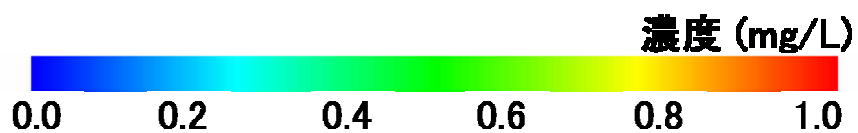


図 6-28 分配係数が低い物質の移流分散解析結果 (鉛直断面図)

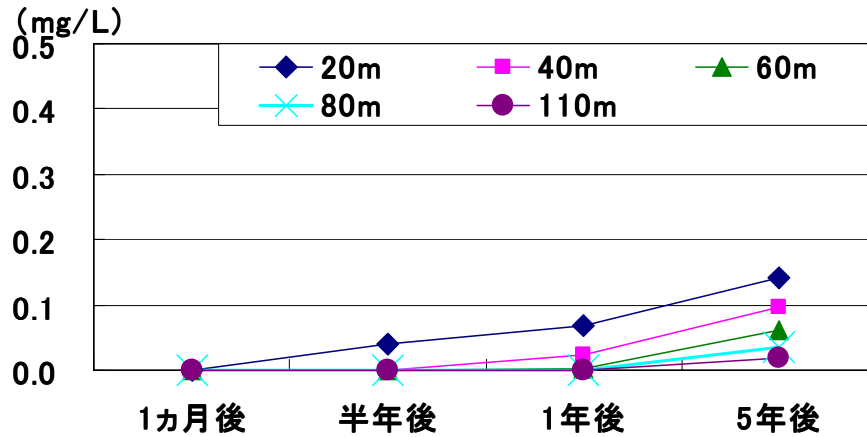


図 6-29 分配係数が低い物質の経時変化（水平方向）

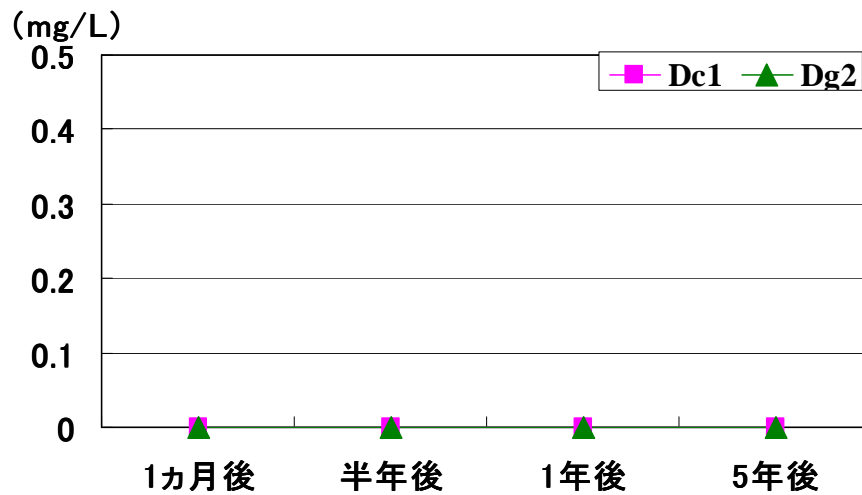


図 6-30 分配係数が低い物質の経時変化（鉛直方向）

6.7 まとめ

本章では、現況を再現した地下水流動場を基に、地下水保全に資するモデルを活用して、地下水流動阻害と地下水汚染の定量的な予測挙動について検討した。現在施工されている下水管径を埋設することによる流動阻害への影響評価を行った結果、地下水流動阻害を及ぼすような影響が少ないことが認められた。また、対象地に連続する粘土層は、地下水汚染物質に対して水理学的なバリアを果たすことが認められた。このように、地下水利用が盛んな地域においての地下構造物を建設する際、地下水流動場に及ぼす影響を定量的に検討することは、地下水保全を行う上での影響を評価することができる。また、汚染が発生した場合に備えて、汚染物質の挙動を定量的に予測することは、浄化対策範囲の決定など、迅速な対応に繋がることが期待される。今後下水管等が伏見地域全域に張り巡らされるようなことがあれば、本研究で構築したモデルを活用し、事前に地下水流動場への影響や懸念される地下水汚染物質の移流分散挙動を予測していく必要がある。

参考文献

- 1) 京都市上下水道局：大手筋幹線（その1）公共下水道工事・大手筋南幹線（その1）公共下水道工事<地下水保全計画書>， pp.1-21, 2007.
- 2) 京都市上下水道局：大手筋北幹線にかかる協議資料， pp.1-17, 2010.
- 3) 西垣誠：地下水に関する環境評価手法，基礎工， p.25, 1992.
- 4) 平田健正：地盤汚染対策の現状と将来，地盤工学会誌， Vol.57, No.7, pp.1-3, 2009.
- 5) 小松登志子：土壌汚染と地下水汚染，土と基礎， Vol.50, No.10, pp.45-46, 2002.
- 6) 地盤工学会編：はじめて学ぶ土壌・地下水汚染，丸善， pp.121-122, 2010.
- 7) 井岡聖一郎，田瀬則雄：地下水中の硝酸イオンに対するシルト、粘土層の役割—水理学的バリアか生物化学的バリアか—，地下水学会誌， Vol.46, No.1, pp.37-50, 2004.
- 8) 古本一司，三木博史：地下構造物の地下水流阻害要因について，基礎工， pp.34-37, 2002.
- 9) T. Kitaoka and H. Kusumi：3D Seepage Flow Analysis using FEM to Examine the Effects on Underground Water Levels of Subterranean Construction in Kyoto-City Japan, Proceedings of the Fifth International Symposium in Science and Technology at Cheng Shiu University, pp.113-118, 2010.
- 10) 西垣誠：移流分散解析入門—1.講座を始めるにあたって—，土と基礎， Vol.50, No.9, pp.59-60, 2002.
- 11) 小松登志子：土壌汚染と地下水汚染，土と基礎， Vol.50, No.10, pp.45-46, 2002.
- 12) 登坂博行，伊藤一誠，蛭原雅之，稲葉薫，伊藤彰，小島圭二：多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析，地下水学会誌， Vol.38, No.3, pp.168-170, 1996.
- 13) 守田優：地下水は語る—見えない資源の危機，岩波新書， pp.127-129, 2012.
- 14) 菱谷智幸：移流分散解析入門—2.地盤内の物質移動の支配方程式（その1）—，土と基礎， Vol.50, No.9, pp.61-64, 2002.
- 15) 奥西一夫：京都市下水道工事と地下水保全について， p.3, 2006.
- 16) 日本地下水学会編：地下水シミュレーション，技報堂， pp.94-104, 2010.
- 17) 北岡貴文，楠見晴重，寺田道直，小谷修平：近接した複数の揚水井が存在する地域の3次元地下水シミュレーション解析，地下水地盤環境に関する研究協議会，地下水地盤環境に関するシンポジウム 2012 論文集， pp.11-18, 2012.
- 18) 長谷川琢磨：移流分散解析入門—11.オイラー法による移流分散解析例（有限要素法）—，土と基礎， Vol.51, No.6, pp.41-46, 2003.
- 19) K. Spitz and J. Moreno：A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, John Wiley and Sons, pp.368-372, 1996.

第7章 結 論

本論文では、地下水資源の効果的な利用かつ最適な維持管理を行うにあたって、それらに関する現位置計測と、有限要素法を用いた地下水シミュレーション解析を実施して、地下水の総合的管理手法について検討したものである。研究の対象地としては、古来より地下水利用が盛んな地域である、京都盆地の地下水資源を対象とした。特に、多くの上水道用の揚水井を有する京都府城陽市と八幡市、ならびに古くから地下水を利用して酒造りを行っている、京都市伏見地区を対象とした。地下水の利用は国内外の多くの地域において行われているが、種々の地域においては、過剰揚水による地下水障害が発生していることが報告されている。地下水は大変貴重な水資源であるが、その効果的かつ持続的な活用手法は十分確立されていないのが現状である。本研究は、実現場を対象とした、総合的な地下水利用に伴う、地下水流動挙動解析、揚水に伴う地下水水位変動性状、揚水井の揚水に伴う老朽化挙動、地下構造部による地下水流動障害および地下水汚染の浸透・移流分散挙動に関して、現場計測および地下水シミュレーション解析によって定量的な検討を行い、地下水の水資源に関する管理手法について検討したものである。

本研究で得られた知見と結論を述べる。

- ① 本研究の対象地である京都府城陽市、八幡市、京都市伏見区における地形・地質構造を調べた。地形としては、それぞれの地域における山地・丘陵地・平坦地等を確認し、解析における境界条件となる分水界や、河川の位置等を把握した。地質としては、帯水層や難透水層、基盤岩形状などを把握することで、観測井および揚水井のストレーナーの位置等を確認した。
- ② 対象地における、地下水の利用用途や揚水量について調べ、地下水の利用実態を明らかにした。それらの結果として、城陽市や八幡市においては、上水道用としての地下水利用を対象としていたこともあり、1本当たりの揚水量は $1,000(\text{m}^3/\text{日})$ 以上と、揚水量が非常に多い。揚水している帯水層は、地表面下 100m 以深である。また、各浄水場において、隣接する揚水井の離隔距離は、平均約 450m の井戸間隔で設置されていることが分かった。一方、京都市伏見区では、酒造用としての地下水利用を対象とし、1本当たりの揚水量は約 $100(\text{m}^3/\text{日})$ で、上水道用の揚水量と比較すると、約 $1/10$ の揚水量である。揚水している帯水層は、地表面下約 $40\text{m}\sim 50\text{m}$ である。また、隣接する揚水井の離隔距離は平均 85m と、非常に密集して設置されていることを確認した。
- ③ 長期的な視野に基づいて地下水位を計測することで、対象地における地下水位性状を明らかにした。特に、両地域で共通していたことは、浅層の地下水位変動に及ぼす要因として降雨の影響が大きく、深層の地下水位変動に及ぼす要因として揚水の影響が大きく現れていることが認められた。
- ④ 現在 10 年以上利用している数本の揚水井においては、揚水量は一定であるが、水位が顕著に低下しているといった現象が見られた。そこで、井戸の老朽化が生じている可能性があると考え、老朽化が懸念されている井戸の周辺にある揚水井からの揚水量や、地下水位を

分析した。その結果、周辺の井戸からの揚水量が増えるといったことや、周辺地域の水位自体が低下しているといったことが見られないことから、対象の井戸において老朽化が生じていることが認められた。

- ⑤ 城陽市と八幡市の上水道水源の適切な維持管理手法の構築を目的とし、複数の揚水井における水位変動を求めるための、揚水シミュレーション解析を実行した。そこで、両地域の地形・地質構造を反映させた、揚水シミュレーションモデルを作成した。そのモデルを用いて揚水シミュレーション解析を行った結果、多くの観測水位と解析水位を整合させることができた。また、井戸の老朽化を考慮した揚水シミュレーション解析では、老朽化による水位の経年的な低下現象を、揚水されている周辺の要素の透水係数を評価することで、井戸の老朽化現象を再現する手法を検討した。その結果、井戸の老朽化が生じている観測結果で見られる水位低下と、解析水位を整合させることができた。本手法の妥当性が確認できたことにより、今後の最適な揚水計画や新規揚水井計画に資するシステムを構築した。
- ⑥ 京都市伏見区における地下水流動場を求めるため、当該地の地形・地質構造を反映させた、広域的な範囲における3次元地質構造モデルを作成し、地下水流動シミュレーション解析を実行した。その結果、観測水位と解析水位を整合させることができた。モデルの妥当性を得た解析結果より、対象地における地下水位分布を推定し、広域における地下水流動場を明らかにした。
- ⑦ 地下水資源管理に関する適用例としては、伏見区において求めた地下水流動場を活用し、地下構造物による地下水流動阻害や、地下水汚染による地下水環境に及ぼす影響を評価するための、地下水シミュレーション解析を行った。その結果、地下構造物が流動阻害に及ぼす影響と、地層内の地下水汚染物質の挙動を、定量的に検討した。本手法の妥当性が確認できたことにより、今後の地下水保全に伴う地下構造物が流動阻害に及ぼす影響や、迅速な汚染対策に資するシステムを構築した。

京都盆地の地下水資源を維持管理する上で、地下水挙動を数値解析により定量的に検討することで、地下水資源の有効利用や適切な維持管理に資するシステムを確立した。本研究で提案した手法を用いて地下水資源の維持管理を行うことは、効率的かつ効果的で、地下水資源を保全する上で非常に有用であるものと考えている。

将来、人口増加や日常生活で使用する水の需要が増えることから、淡水資源として、地下水を利用していく割合がさらに増えていくことが予測される。しかし、地下水を誤って利用すれば、地盤沈下や湧水の枯渇、地下水汚染など、取り返しのつかない様々な地下水障害に悩まされる恐れがある。これからは、地下水利用が計画されている地域において、この研究で行った現位置計測と、様々な目的で行った地下水シミュレーション解析の結果を参考にすることで、地下水の有効利用や維持管理、そして地下水保全を行うことで持続的に地下水を利用していくべきであろう。

謝 辞

本論文は、著者が関西大学大学院博士課程後期在学中に取り組んだ研究成果をまとめたものであり、多くの方々のご支援やご協力、ならびにご助力によって、この論文を完成させることができた。

本論文をまとめるにあたり、学長という激務の中、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました関西大学学長・楠見晴重博士に心より感謝の意を表し、深くお礼を申し上げます。また、本論文に対し有益なご指導とご助言を賜りました、関西大学環境都市工学部都市システム工学科特任教授・大西有三博士、同環境都市工学部都市システム工学科教授・小林晃博士、同環境都市工学部都市システム工学科教授・西形達明博士に厚くお礼を申し上げます。さらに、楠見学長とともに、本論文の細部にわたるご指導をいただきました同環境都市工学部都市システム工学科前特任教授・寺田道直博士（現ハイテック）、元特任准教授・中村真博士（現ニュージェック）に対し厚くお礼申し上げます。

本研究を進めるに際しては、株式会社環境総合テクノスの片山辰雄様ならびに、株式会社日本コンピューターの古川秀明様には、懇切丁寧に浸透流および移流分散解析に関するご指導や、励ましを頂きました。さらに、関西大学大学院工学研究科の平成 19 年度修了の日下郁恵様（現中央復権コンサルタンツ株式会社）には、研究の基礎に関してご指導を頂きました。また、多大なるご協力を頂きました同関西大学大学院理工学研究科平成 24 年度修了生小谷修平様、ならびに関西大学環境都市工学部平成 24 年度卒業生山本卓也様、そして研究生活を支えて頂いた関西大学環境都市工学部地盤環境工学研究室の大学院生、学部生諸氏、研究室秘書勝浦明子様、宇都紀子様に対して心より感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたってご協力頂き、貴重な資料を提供してくださいました、京都府城陽市役所上下水道部、京都府八幡市役所上下水道部、京都市上下水道局ならびに、伏見酒造組合には、心より感謝の意を表し、深くお礼を申し上げます。

本論文をまとめる機会と終始温かい激励ならびにご配慮を頂きました株式会社地域地盤環境研究所の代表取締役社長 橋本正様には感謝いたします。また、取締役技術部統括部長長屋淳一様と次長の譽田孝宏様には入社以来、激励と種々のご配慮を賜り、深く感謝いたします。

論文執筆にあたり数多くの文献を参考にさせて頂き、これらの著者に深く敬意を表します。

最後に、著者をあたたかく見守り支援して下さった両親と兄に対し、心からの感謝の意を表し、謝辞の結びとします。