

1. 背景及び目的

近年、急激な都市開発における地下空間利用に伴う地下水流況阻害や大量の地下水を汲み上げることで帯水層の機能が低下する事例が報告されている¹⁾。中でも、水資源を地下水に頼っている地域では、これらの直接的な影響のみならず、渇水期に涵養量が低下することによって地下水位が低下し、はじめて問題が顕在化する場合がある。本研究で対象とする東広島市に位置する西条は、日本三大銘醸地の一つであり、酒造の全ての工程において地下水を利用している。ところが、近年、JR西条駅南側では急速な都市開発が行われている。東広島市の年間平均降水量は1,500mm/年とされており²⁾、地下水は西条地区の大半を占める水田および山地から涵養されるものと考えられ、都市化によってこれらが減少した場合、水収支が崩れる可能性がある。図-1に都市開発による地下水環境変化の概念図を示す。

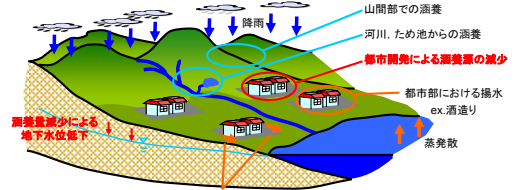


図-1 都市開発による地下水環境変化

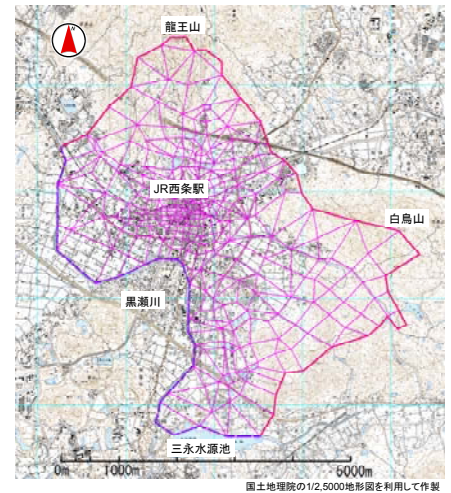


図-2 地表面の要素分割

そこで、本研究では西条地区について現状と都市化が進行した場合の地下水流動を3次元飽和-不飽和浸透流解析コード(UNSAF3D)³⁾の数値解析により把握し、市街地における地下水位変動、揚水井における揚水量の変化、また、涵養源からの涵養量を求めることで、今後の地下水流動保全に役立てることを目的とした。

2. 西条地区の地下水流動に対する3次元飽和-不飽和浸透流解析

既存資料、現地調査より3次元数値解析モデルを作成し、2種類の条件にて数値解析を行った。

(1) 数値解析モデル

解析範囲は図-2のように市街地の地下水環境への影響を考慮し、龍王山から三永水源池の間に設定し要素分割を行った。各要素の土地利用状況を地形図より、山地、水田、市街地、ため池に分類し、面積を表-1のように求めた。西条地区の水田はJR西条駅周辺の市街地を取り囲むように分布しているが、市街地以北に分布する水田からの涵養が市街地の地下水位に影響を与えるものと考えられる。表-1より、解析対象範囲における水田の面積は山間部について広く、都市部の約2倍となっている。また、過去に行われたボーリング調査の結果より基盤高を推定すると共に、西条地区の地層を図-3のようにモデル化した。そして、これらの平面モデル、地層モデルより3次元有限要素メッシュを作成した。なお、作成したメッシュにおける総節点数は28,054節点、総要素数は31,406要素となった。

表-1 各土地利用の面積

土地利用	面積 (m ²)	割合 (%)
山間部	9,721,544	45.2
水田	7,761,437	36.1
市街地	3,743,057	17.4
ため池	271,753	1.3
合計	21,497,791	100.0

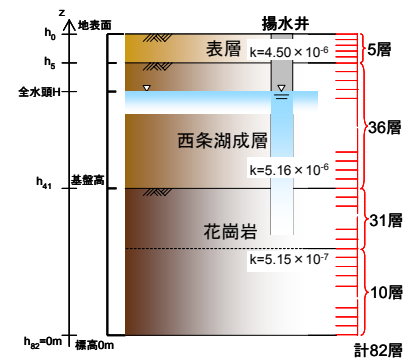


図-3 西条地区の地層モデル

(2) 基礎物性と初期条件

先に示した図-3のように西条の地層を3層にモデル化した。それぞれの材質の透水係数は過去に行われた

ボーリング調査に付随して行われた透水試験の結果より求めた。各材質の透水係数は図-3に示す通りである。また、初期状態における地下水位は2007年8月に西条地区に存在する井戸40箇所で測定した値から、全体の地下水位を推定した結果を用いた。西条駅周辺には酒造会社が集中しており、仕込みの行われる冬季に揚水が行われる。数値解析モデル内ではこれらの揚水井を図-4のように表現した。また、仕込みの行われる10月から3月に段階的に定水頭境界条件数の節点の水頭を低下させた。水田においては灌漑期となる5月から8月にかけて水田表面の節点を定水頭境界条件とし、15cmの圧力水頭を与えた。解析期間は1ヶ月ごとに降雨条件、水田の状態、揚水条件を変更し実施した。降雨量は過去30年間の平均降水量の値を使用し、平均気温のデータより、高橋式⁴⁾によって蒸発散量を求めている。なお、降雨量の月変動を図-5に示す。

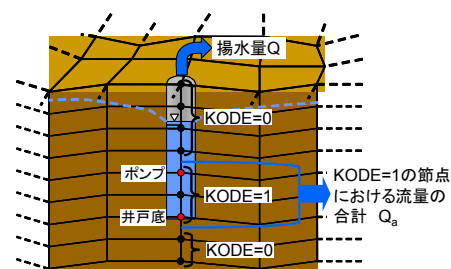


図-4 揚水井の取扱い

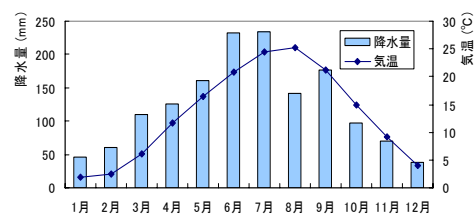


図-5 東広島市の月平均降水量

(3) 数値解析結果

数値解析は現状を再現したcase1と市街地以北の水田を市街地に造成するcase2の2種類で行い、市街地の地下水位変動を比較し、水田の涵養能力を推定した。図-6には市街地における地下水位変動を示す。揚水終了後の図-6(b), (e)の比較ではcase1とcase2に大きな差異は認められない。しかし、解析終了時の図-6(c), (f)の比較ではcase2で明らかに市街地における地下水位が低下している。また、断面北部先に述べたとおり、case1とcase2の違いは市街地以北の水田の有無のみであるため、これらの水田からの涵養によって市街地の地下水位は保たれているといえる。図-7には山地と条件を水田から市街地に変更した箇所における涵養量の月変化を示す。図-5, 7より山地においては降水量に応じて涵養量に変化していることがわかる。また、case1では水田において灌漑期には他の期間に比べて涵養量が大きくなっている。case2では全体を通して流出量が涵養量を上回っており、それに伴い市街地の地下水位が低下するものと考えられる。

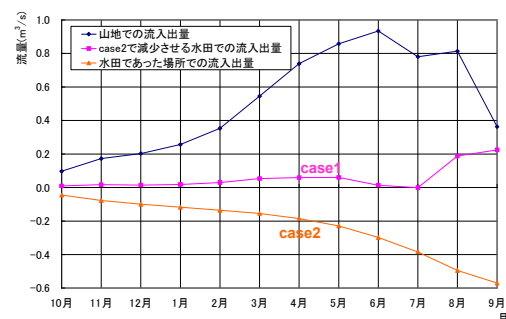


図-7 涵養量の月変化

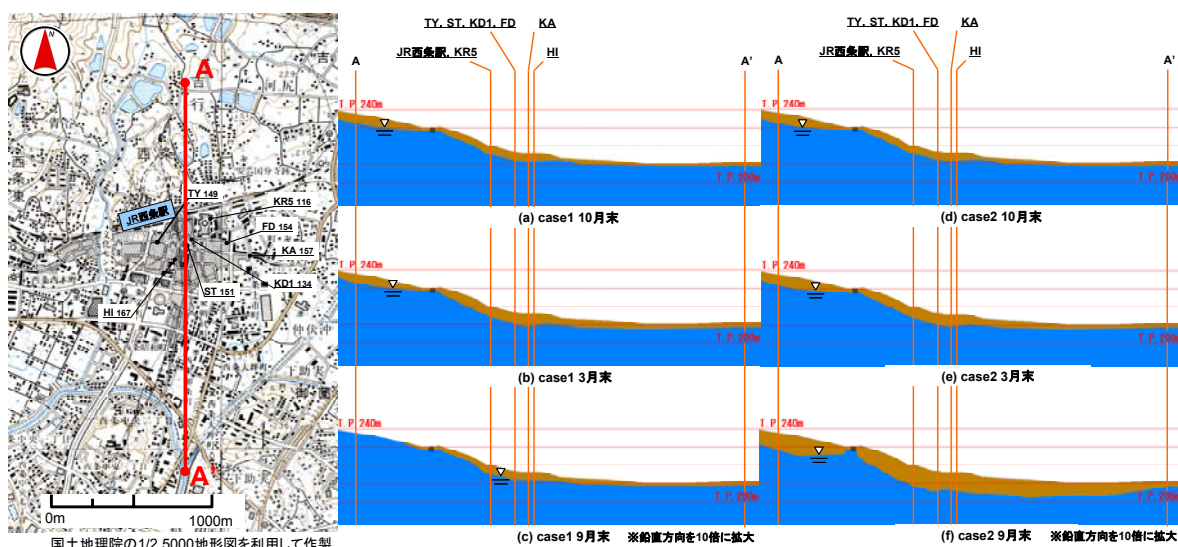


図-6 市街地における地下水位変動

3. 西条地区の地下水流動評価及び課題

各酒造会社の井戸で測定された水位と、揚水量から現状の西条地区の地下水流動を評価し、数値解析結果との比較を行うことで、西条の地下水流動の課題を示した。

(1) 西条地区の地下水流動の現状

各酒造会社にて聞き取り調査を行い、回答を得た箇所について年間揚水量を表-2のようにまとめた。揚水井によって揚水量は異なるが、揚水期間を数値解析と同じ10月から3月の間として揚水量を求めた結果、年間揚水量は概ね2000m³/yearと推測された。また、各揚水井に設置した水位計のモニタリングデータを図-8に示す。5月からモニタリングを開始し、10月まではほぼ一定の水位を保っているが、10月以降水位は減少傾向にある。10月以降の水位変動は1ヶ月毎に約0.5mとなっており、この影響によって周辺市街地の地下水面も低下しているものと思われる。

(2) 数値解析結果と現状との比較

次に数値解析と現状の比較を行った。表-3には各揚水井の流量の数値解析結果を示す。各揚水井の年間揚水量の値にはばらつきがあるが、概ね2000m³/yearという結果が得られた。聞き取り調査での結果と同じ値をとっており、モデル内での

揚水井の再現性は妥当なものであるといえる。一部の揚水井では実際の揚水量と異なる値を得たが、これは数値解析モデル内においてある深度(点)からの揚水としているため、実際にはより長い深度区間(ストレーナー)から揚水しているものと推察される。

図-9, 10に揚水量の月変化を示す。case1, case2共に2年目の揚水量は1年目に比べ減少した。case1で市街地の地下水位が回復しているにもかかわらず揚水量が減少した原因は北側の地域において地下水位が低下したためと考えられる。case1とcase2の2年目を比較すると、case2では揚水量が明らかに減少している。水田の面積が減少することによって市街地での揚水量は大きく減少することが確認された。

(3) 西条地区の地下水流動の課題

数値解析結果より求めた各涵養源での涵養量(流入出量)を表-4に示す。表-4より、単位面積当たりの涵養能力は山地が最も高く、水田、ため池の順となった。水田の涵養能力は山地の4割程度と求まり、この結果より、水田における日減水深を求めると、約3cmとなった。西条地区の水田での日減水深は不明であるが、減水深を測定することにより、水田の涵養能力を推定することが可能である。図-11には西条駅周辺での地下水位変動を示す。数値解析結果では、水田の面

表-2 各揚水井の揚水量

	日揚水量 (m ³ /day)	年間揚水量 (m ³ /year)
TY	6.0	2100
KD1	4.8	870
FD	14.3	2600

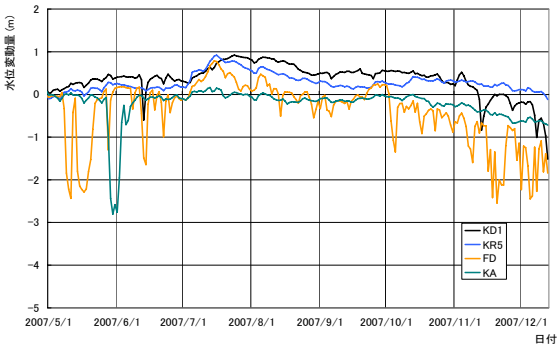
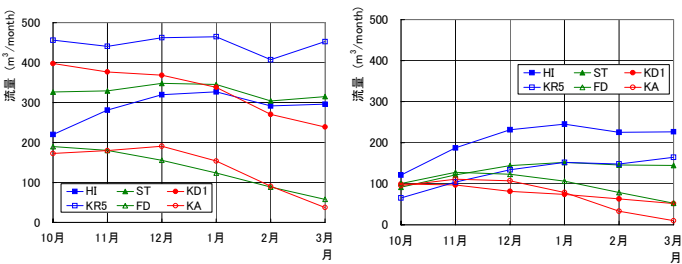


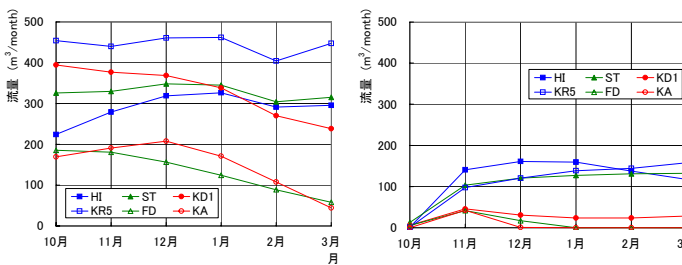
図-8 各揚水井の水位変動

表-3 各揚水井の流量

揚水井		HI	ST	KD1
年間揚水量 (m ³ /year)	case1 (現状)	1736	1969	1992
	2年目	1238	800	467
	case2 (水田面積減少)	1735	1968	1986
	2年目	717	626	157
揚水井		KR5	FD	KA
年間揚水量 (m ³ /year)	case1 (現状)	2685	796	825
	2年目	769	590	436
	case2 (水田面積減少)	2668	794	892
	2年目	660	64	43



(a) 1年目 (b) 2年目
図-9 揚水量の変化(case1)



(a) 1年目 (b) 2年目
図-10 揚水量の変化(case2)

積が減少した場合、市街地の地下水位が低下したことからも、水田は涵養源として大きな役割を果たしている。実際に西条地区における水田面積は年々減少傾向にあり、今後も減少が続くのであればそれに応じた対策が必要となる。

一例として、地下水利用が盛んである熊本県では白川中流域の水田が減反政策や都市開発に伴い、休田、減少したことによって地下水量の継続的低下が観測された。その対策として、減反田に水を張り涵養させる取り組みを行った結果、地下水量は増加方向に転じている⁵⁾。しかし、都市開発によって水田そのものが消失してしまうケースも少なくない。そのために、図-12のように水田を造成する際に地下に涵養パイプを設置し、それにより涵養を行うなどの方法などが必要となる。

4. 結論

本研究において得られた知見を列挙する。

- (1) 西条地区の3次元モデルを作成し、3次元非定常飽和-不飽和浸透流解析を行った結果、1年間を通して安定した解析結果が得られ、解析開始時と終了時の整合性を確認した。
- (2) 涵養源の減少を想定したモデルでの解析を行った結果、市街地北側の水田からの涵養量は約2割程度であるが、水田が消失することによって市街地における地下水位は低下することが判明した。
- (3) 現地揚水井のモニタリングを行った結果、一つの揚水井において12月に約4mの水位低下が確認された。また、各酒造会社の揚水井においても冬季にかけて水位は低下傾向にあることがわかった。
- (4) 水田面積の減少によって生じた地下水位低下は市街地での揚水量にも影響を与え、揚水量は4割から5割程度減少することが数値解析より求まった。
- (5) 水田からの涵養は西条の市街地の地下水位、揚水量に大きな影響を与えることから、都市化により水田などの涵養源が減少した場合、地下水の利用制限の確立や新たな地下水涵養システムの構築を検討する必要がある。

今後の課題としては、より詳細な地盤構成を把握することによる再現性の高いモデルの構築、河川やため池、トンネル等の地表要素のモデル内での表現方法の再検討などが挙げられる。また、モニタリングを長期的に継続し、地下水流動の季節変動を把握していく必要性がある。

【参考文献】

1) 水みち研究会：井戸と水みち，北斗出版，pp. 1-4，pp149-156，2001.
2) 統計でみる東広島 2007，東広島市ホームページ，
<http://www.city.higashihiroshima.hiroshima.jp/icity/>，2007
3) 西垣誠：有限要素法による飽和不飽和浸透流解析-AC-UNSAF3D-，pp. 3-14，2002.
4) 石樽宗寛：西条盆地黒瀬川流域の長期水収支解析，広島大学総合科学部総合科学科，pp. 10-16，2006.
5) 市川勉：白川中流域の地下水涵養による地下水保全の研究，九州東海大学，p. 3，2004.

表-4 涵養量の比較

涵養源	山地	ため池	水田
面積 (km ²)	4.0	0.7	2.8
年間涵養量 (m ³)	47,500,000	1,030,000	13,300,000
単位面積当たりの涵養量 (m ³ /km ²)	11,900,000	1,470,000	4,750,000

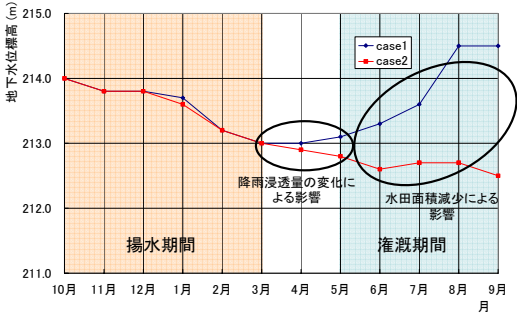


図-11 西条駅周辺での地下水位変動

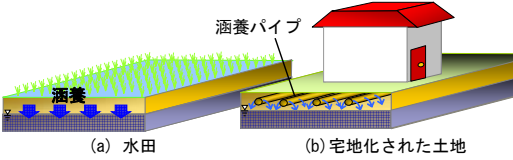


図-12 涵養パイプによる地下水涵養