

水循環解析技術に関する研究

Study on water cycle analysis technology

水循環・まちづくりグループ 研究員 石徹白 伸也

水循環・まちづくりグループ グループ長 柏木 才助

水循環・まちづくりグループ 研究員 立田 潤一郎

気候変動による渇水リスクの高まり、さらに災害時における緊急水源の確保などが懸念される中で、貴重な水源である地下水利用に注目が集まっている。地下水の持続可能な保全と利用を進める上では、従来の揚水規制による管理だけでなく、表流水と一体となった水循環の視点による水の動態を理解した上での管理が不可欠である。そのためには、現状および将来の水循環構造を定量的かつ視覚的に把握するための解析技術の確立と、精度の向上が求められている。本研究では、一級水系千代川流域をケーススタディとして、表流水・地下水を一体に取り扱える水循環解析モデルを構築して現状の水循環構造を把握するとともに、将来の気象状況を踏まえた地下水の変化を試算し、モデルの有用性、解析精度に係わる課題を整理した。検討結果から、水循環解析により、観測では捕捉しにくい広域的な水循環系での可視化や定量化、あるいは注視箇所の抽出に資する基礎情報を得られることが確認された。水循環解析モデルは地下水管理を進めていく上で強力なツールであるといえる。今後、地域特性を反映した水循環構造を解明するためには、地下水解析の精度向上に資する揚水量の把握と地質構造の解明が望まれる。

キーワード：水資源管理、地下水解析、地下水、表流水、気候変動

As we face higher risks of drought due to climate change and moreover, we have concerns of maintaining sources of water during crisis. Use of underground water, which is a valuable source of water, is getting more attention recently. In the interest of sustainable preservation and use of groundwater, not only the management by conventional regulations of groundwater withdrawal, but management by understanding water movement from the perspective of water cycle, along with surface water, is indispensable. In order to implement such management, it is necessary to establish analytical skills to understand quantitatively and visually the current and future water cycle structures and to increase their accuracy thereof. In this research, we proposed a water cycle analysis model, incorporating both surface and ground water as a unit in a case study in the first-tier river system of Sendai in an attempt to calculate groundwater changes in future climatic situations and to discuss efficacy of the model and issues of analytical accuracy as well as to understand current water cycle structure. Results confirmed that water cycle analyses provide visualization, quantification or fundamental information contributing to obtaining points of attention in an area-wide water cycle, which is difficult to grasp by observation. It is fair to say that water cycle analysis model, in an effort to proceed with groundwater management, is a strong tool. In the future, understanding of water withdrawal volume and geological structure that help contribute to increase accuracy of groundwater analyses is desirable to elucidate water cycle structure, reflecting regional characteristics.

Key Words: water resource management, groundwater analysis, surface water, climatic change

1. はじめに

気候変動による湧水リスクの高まり、さらに災害時における緊急水源の確保などが懸念される中で、貴重な水源である地下水利用に注目が集まっている。地下水の持続可能な保全と利用を進める上では、従来の揚水規制による管理だけでなく、表流水と一体となった水循環の視点による水の動態を理解した上での管理が不可欠である。そのためは、現状および将来の水循環構造を定量的かつ視覚的に把握するための解析技術の確立と、精度の向上が求められている。

本研究では、一級水系千代川流域をケーススタディとして、表流水・地下水を一体に取り扱える水循環解析モデルを構築して現状の水循環構造を把握するとともに、将来の気候状況を考慮した地下水位の変化を試算した。併せて、地下水観測が開始された1975年から2011年までの長期的な解析を通じて、解析精度に係わる課題を整理した。

2. 千代川流域の概要

千代川は、その源を鳥取県八頭郡智頭町の沖ノ山(1,319m)に発し、佐治川・八東川・砂見川・袋川・野坂川等の支川を合せながら、北流し、鳥取平野の中央を貫流して、日本海に注いでいる。流域面積は1,190 km²で、流域人口は約20万人に及び、鳥取県東部地域における社会・経済・文化の基盤をなしている。

上流域は中国山地の脊梁部をなし、急峻な標高1,200~1,500m級の山地に取り囲まれ、河川沿いには低平な鳥取平野、河口付近の沿岸部には、千代川により運搬された土砂が潮流と風により集積した砂丘群(鳥取砂丘)が発達している。



図-1 千代川流域図

3. 地下水位の応答特性の整理

千代川流域では、鳥取平野を中心に8箇所の地下水観測井が設置されており、地下水位は「浅層帯水層(不圧地下水)」と「深層帯水層(被圧地下水)」が計測されている。鳥取平野の地下水位変化は以下の通りである。

長期変動としては、不圧地下水位の安定傾向、被圧地下水位の上昇傾向が示され、1975年頃に-8mであった水位が現在は0m程度まで回復している。

季節変動について、不圧地下水位は当日降水量、累積降水量及び河川流量とのある程度の相関性が確認された。被圧地下水位では、過去は夏季に低下したが、近年では冬季に局所的な低下が確認された。これは、降雪地帯特有の消雪による揚水が原因の可能性がある。

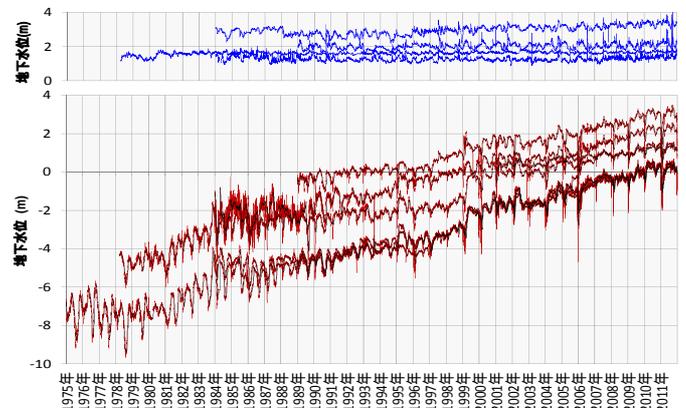


図-2 地下水位観測の変化(上図:浅層、下図:深層)

次に、表-1に示す分析手法・評価項目を用いて、地下水位との応答特性を把握した。

土地利用と不圧、被圧地下水位との関係性を検証したところ、二つの浅井戸観測井と二つの深井戸観測井において、流域の水田面積と、有意に-0.92~-0.58程度の負の相関がみられた。流域の水田面積の減少と共に、水田用の地下水揚水量が減少し、地下水位の回復に寄与してきたものとみられる。

地下水揚水量(浅層・深層)と地下水位(不圧・被圧)の関係性を年平均データで検証したところ、標準化された偏回帰係数及びピアソン相関係数は正負が混在する結果となった。これは、地下水揚水量の集計値が観測井の周辺域ではなく、流域全体や鳥取市全体の揚水量データを利用していること、地下水揚水量は事業主による報告値であり、必ずしも十分な精度を確保しているものでないことに起因していると考えられる。

表-1 応答分析手法・評価項目

	長期変動	季節変動
応答分析	OLSによる重回帰分析	相関分析
集計単位	年(37年間)	日(湧水年)
評価項目	降水量/河川流量/揚水量/ 土地利用/人口/産業出荷額	降水量/河川流量/ 揚水量

4. 水循環解析モデルの確立

4-1 解析モデルの基本条件

水循環解析モデルは、以下の条件を勘案して表流水と地下水を一体的に解析可能な「統合型水循環シミュレータ」(以下、「水循環モデル」と記載)を用いた。

- ・地形、地質、土地利用等条件を不定形の格子で忠実にモデル化でき、降雨、蒸発散量を入力条件として、表流水、地下水間の伏没、湧出などの相互関係を完全連成で解くことが可能である。
- ・地盤中は空気と水の2相系の流れを扱い、地表付近の地盤不飽和特性を的確に表現することができる。
- ・降雨、蒸発散、海面などの条件を設定することにより、気候変動による影響予測を行うことができる。
- ・表流水と地下水の流れからなる水循環の全体像を3次元で捉えられる。

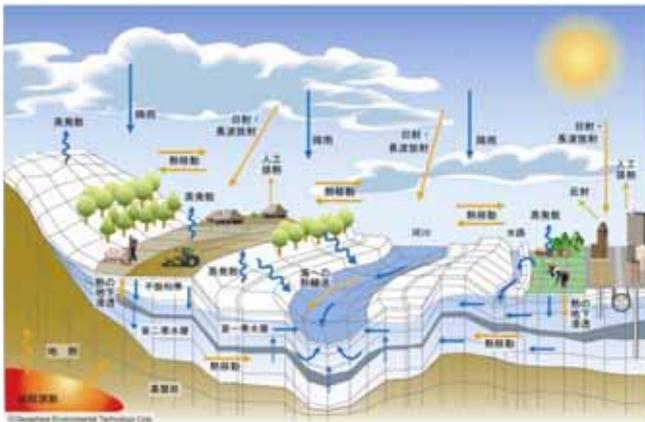


図-3 「統合型水循環シミュレータ」の概念

4-2 解析モデルの構築

モデルの構築にあたっては、表-2に示す詳細情報およびモデル化手法を用いて、当該流域の地下水流動を可能な限り忠実に再現した。

(1) 解析対象範囲

地下水揚水量の利用が集中する鳥取平野での地下水の流れを捉えるため、解析対象範囲は千代川流域に加えて、地下水の海域への流れ込みが想定される沿岸地域を含めた領域を設定した(図-4)。対象面積は1,300km²程度である。

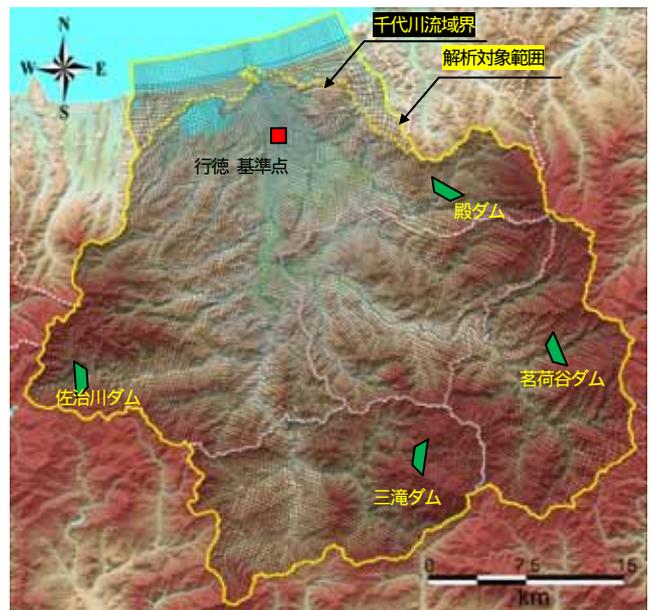


図-4 解析対象範囲

表-2 水循環モデルに用いたデータ及びモデル化手法

項目		データ	モデル化手法
気象	降水量・積雪深	気象庁アメダス 国土交通省テレメータ	[降水量] 等雨量線法(Kriging)により陸面分布データ化 [融雪量] 降水量、気温(気温減率考慮)から菅原の手法により融雪量を推定。融雪量は積雪深データにより検証
	気温	気象庁アメダス	[蒸発散量] 気温データ(気温減率考慮)を用いて、ハーモン法により蒸発散量を推定。
地形	陸域	国土地理院数値地図 (5m/10m 格子)	[地形] 水平解像度の異なる標高データセットを合成し、自然近傍補間法により陸面分布データ化
	河道断面	国土交通省横断測量・航空レーザ測量 L P	
土地利用	利用区分	国土交通省国土数値情報 (100m 格子)	[等価粗度] 土地利用データ(数値情報)を用いて領域内の地表面での等価粗度係数を陸面分布データ化
地質	表層地質	産業総合技術研究所 20 万分の 1 地質図 国土交通省 20 万分の 1 地質図土地分類図	[地質] 既往調査資料に基づき、解析対象範囲の水利地質区分、層序を設定し、GIS を用いて 3 次元空間分布データ化
	地下地質	日本地質学会・国土交通省・研究機関等による既往調査資料・文献	
水文	河川流量	国土交通省テレメータ	[水位・流量] 解析結果の検証用に実績データを使用
	地下水位	国土交通省観測井	
水利用	ダム諸量	国土交通省等運用実績	[放流量] 解析への入力用に実績データを使用 [流入量] 解析結果の検証用に実績データを使用
	河川水取水量	河川水取水実績・水利権量 (上水、工水、農水、発電)	[河川取水量] 解析への入力用に実績データを使用(実績データがない場合は水利権量を使用)
	地下水揚水量	地下水揚水実績・届出値・アンケート調査結果 (上水、工水、農水、温泉)	[地下水揚水量] 解析への入力用に実績データを使用(農水は実績がないため、既往アンケート調査結果により推定) 深度情報がない工水は既往検討資料、農水は既往調査資料により推定

(2) 陸面分布のモデル化

陸面モデルは河道網や地形を反映するため変形格子を採用した。格子は鳥取平野や主要河川では微地形や河川流れを捉えることに留意して細かく分割し、反対に上流域の山地部ではやや粗い分割としている。

水循環解析の入力情報となる降水量、気温、土地利用、地形、水利用等については、不規則に配置された点データを補完し、解析格子の平面解像度に合わせて陸面分布データを作成した。なお、モデルの平面分解能は、鳥取平野での千代川の川幅規模を考慮して約 250mメッシュ(平均)を基本とした。

(3) 水理地質構造のモデル化

表層地質は産業総合技術研究所で公開している 20 万分の 1 シームレス地質図を基本とし、地質区分を設定した。地下地質については、地質文献や鳥取大学・鳥取県共同研究の調査資料等を踏まえて、水理地質の層序を設定した。次に水理地質構造の 3 次元化は、各地質区分に対して分布範囲と基底面等高線、層厚コンター図を作成し、主要帯水層の連続性に着目して GIS 上で構築した(図 - 5)。

鳥取平野は、第四紀完新世の上部砂礫層からなる「浅層帯水層」と下部粘土層(中間遮水層)を挟んで更新世の後期更新世堆積物、高透水路からなる「深層帯水層」をモデル化している。

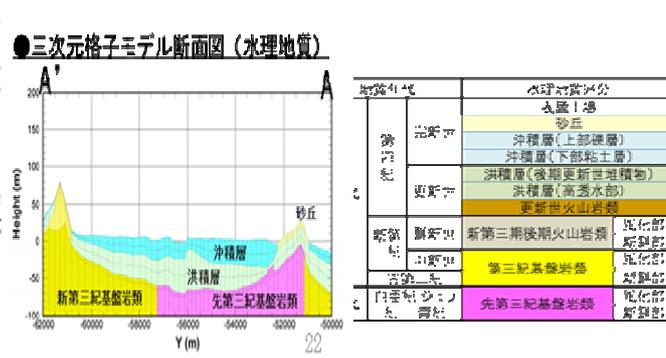
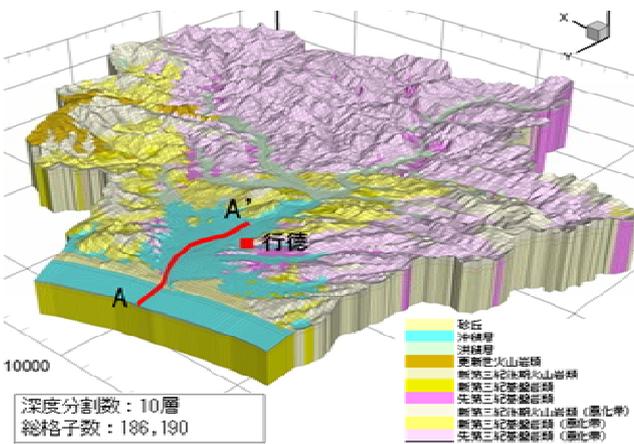


図 - 5 3次元水理地質のモデル化

(4) 水利用のモデル化

河川水の取水は、当該地での利用実態を考慮し、工業、発電、水道については河川からの総取水量の 95%を占める施設、農業は慣行水利を含む大規模な農業用水を対象とした。

地下水の揚水は、浅層・深層滞水層における水収支の大きな要素の一つであるが、詳細に把握されていることは少なく、解析精度に及ぼす不確かさの要因ともなっている。鳥取県では、平成 25 年 4 月 1 日に施行された条例により、新規揚水者に対して、報告義務を課すこととしているが、現状ではデータの蓄積がないこともあり、表 - 3 に示す方法により、過去の統計調査やアンケート調査に基づき推定した。千代川の地下水揚水の特徴としては、水道水源の地下水への依存割合が高く、水道用水としての取水が大きいこと、また、工業用水は大口の 2 者の占める量が大きい点が挙げられる。図 - 6 に、推定した地下水揚水量の用途別の経年推移を示す。

表 - 3 地下水揚水量の推定手法

用途	揚水量の整備状況			地下水揚水量の推定			出典資料 資料名	
	地点	経年変化	深度	地点	経年変化	深度		
水道用水	無し	無し	無し	現在の水道地点を反映	・鳥取水道給水人口の変遷と、揚水量比(各市町村/鳥取県)から市町村別揚水量を推定し、さらに地点揚水量にて按分	H5の揚水深度(浅井戸・深井戸)の割合から推定	鳥取県の水道の現状	
工業用水	有り	隔年	無し	メッシュ別揚水量分布	・使用量の多いA社・B社は実測値を設定、欠測期間は前後年より按分、その他は平野全体から上記2地点を除外して、メッシュ別の揚水量で按分	H2以前	鳥取大学・鳥取県共同研究	
	有り	有り	無し			H17以降	全揚水量を深層から揚水	鳥取大学・鳥取県共同研究報告書
	有り	有り	無し			H3-16:直線近似	全揚水量3割を浅層から揚水	工業統計調査(鳥取県・経産省)
農業用水	無し	無し	無し	過去の調査成果「農業用地下水利用実態調査(農水省)」を用いて、「耕作面積×揚水量原単位」により揚水量を推定	・過去の実態調査(農水省)「鳥取県全体の深度別井戸数」を用いて推定	農業用地下水利用実態調査(農林水産省)		
温泉	有り	適年	有り	取水開始以降、一定量で揚水			県提供資料	

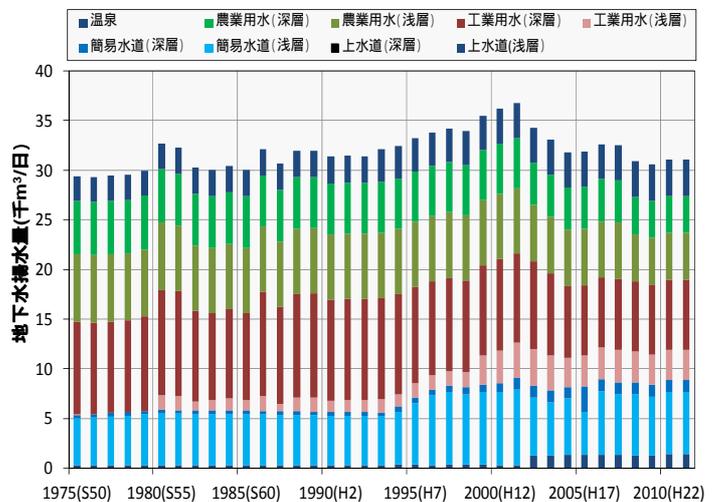


図 - 6 地下水揚水量の推定結果

4 - 3 解析モデルの再現性

(1) 解析手順

水循環の再現性は、地下水観測が開始された1975年から2011年までの37年間を対象に、日単位での非定常解析により確認した。なお、解析の初期流動場は人間活動の影響のない過去の状態（表流水と地下水が完全に平衡した状態）を試算し与えている。

モデルの再現性は、河川流量、ダム流入量、地下水位などの観測値と比較し、透水係数や有効間隙率などの物性パラメータを調整することで確保している。

(2) 再現結果

河川流量は流域内の10箇所の観測所で、洪水時のピーク流量や出水後の減水傾向などを確認し、概ね良好な再現性が得られた。ただし、平野部では湧水時のかんがい期(4~7月)において観測流量と乖離する傾向がみられ、水利用実態が明らかでない慣行水利や、低水時の河川での伏設機構が影響していると想定される(図-7千代川の基準点_行徳の結果を例示)。

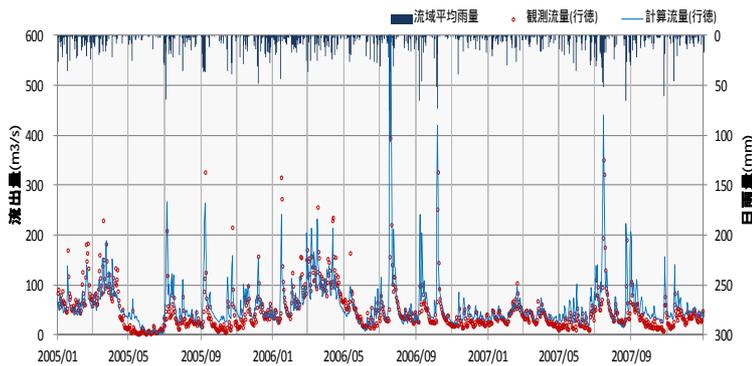


図-7 河川流量の解析値と計算値の比較(行徳)

浅層地下水位は、季節変化および長期的変化を概ね再現できた。しかし、降雨によると思われる上昇の傾向は捕捉できたが、ピーク水位は観測値よりも大きくなっている(図-9上図)。広域的な視点でみた場合には、観測値を全体的な傾向を捉えていることから(図-8)、地下水流動を規定する平野部の地質構造(帯水層の分布や水理パラメータ等)の情報が十分に把握されていないことが原因の一つに挙げられる。

一方、深層地下水位は、近年(1990年以降)において概ね再現できているが、それ以前では観測値との乖離が著しい(図-9下図)。水循環モデルの地下水挙動はダルシー則に基づくシンプルな物理モデルで構成され、パラメータの少ない点の特徴であり、調整する要素は少ない。そのため、乖離の原因として1980年代以前の揚水量の推定誤差が推測される。仮に、推定値の1.5~2倍程度の揚水があったものであれば、1975年の地下水位を再現できる。

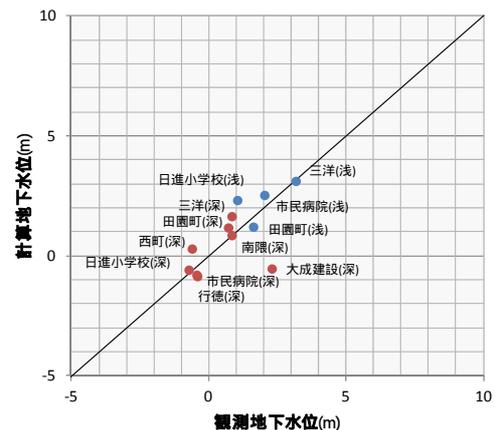


図-8 年平均地下水位の解析値と計算値の比較

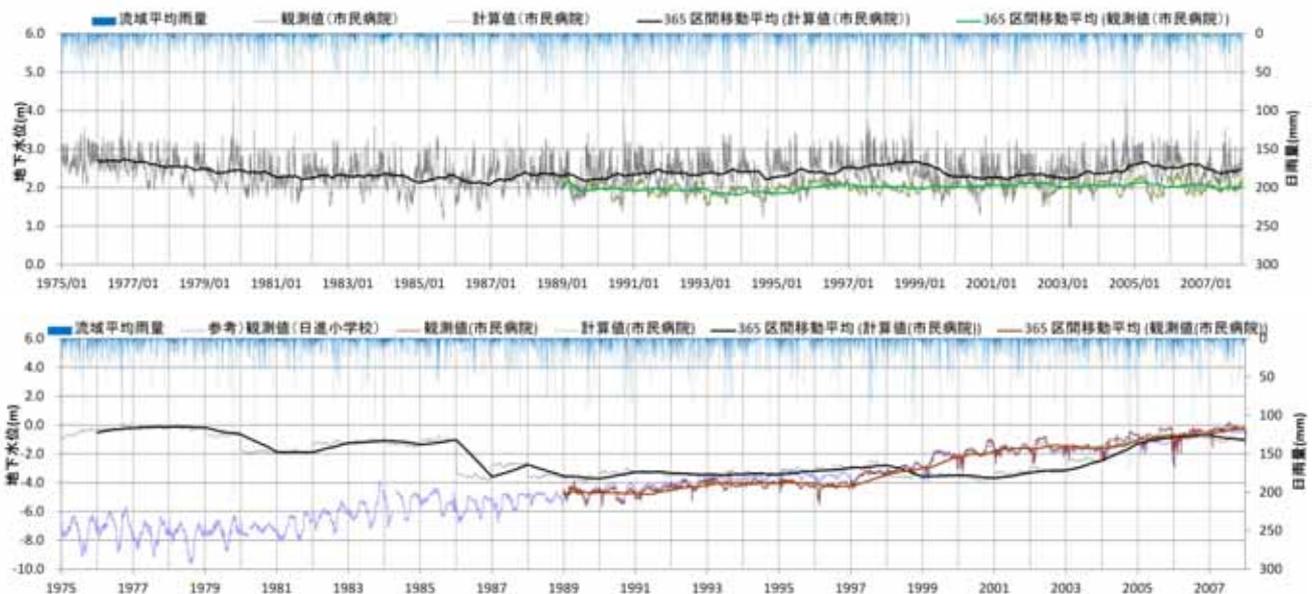


図-9 地下水位の解析値と計算値の比較(市民病院)[上図:浅層、下図:深層]

5. 現状の水循環構造の分析

地下水利用が現状の水循環に与える解析結果の一例として、表-4、図-10に鳥取平野における浅層帯水層(沖積層)、深層帯水層(洪積層)に流入・流出する水量、および時間変化を示す。

- ・沖積層(浅層帯水層)の流入出の変動は洪積層に比べて大きく、その水量も大きい。また揚水量は流出量の約1/5程度である。これは河川からの伏没・還元など、河川水(表流水)との交流が多いことを示している。また、沖積層の帯水層能力に対して、現在の揚水量規模はまだ余裕はあるとみられる。
- ・一方、洪積層(深層帯水層)の流入量は沖積層の約半分程度と少なく、また、揚水量は流出量を上回っている。このことは、現在の揚水量規模が洪積層の帯水層能力の限界に近いものと判断される。

表-4 帯水層毎の水収支(年間)

帯水層	水量(百万 m ³)			貯留変化量 (- -)
	流入 ()	流出 ()	揚水量 ()	
沖積層	10.4	8.2	2.2	0
洪積層	5.0	2.2	2.8	0
合計	15.4	10.4	5.0	0

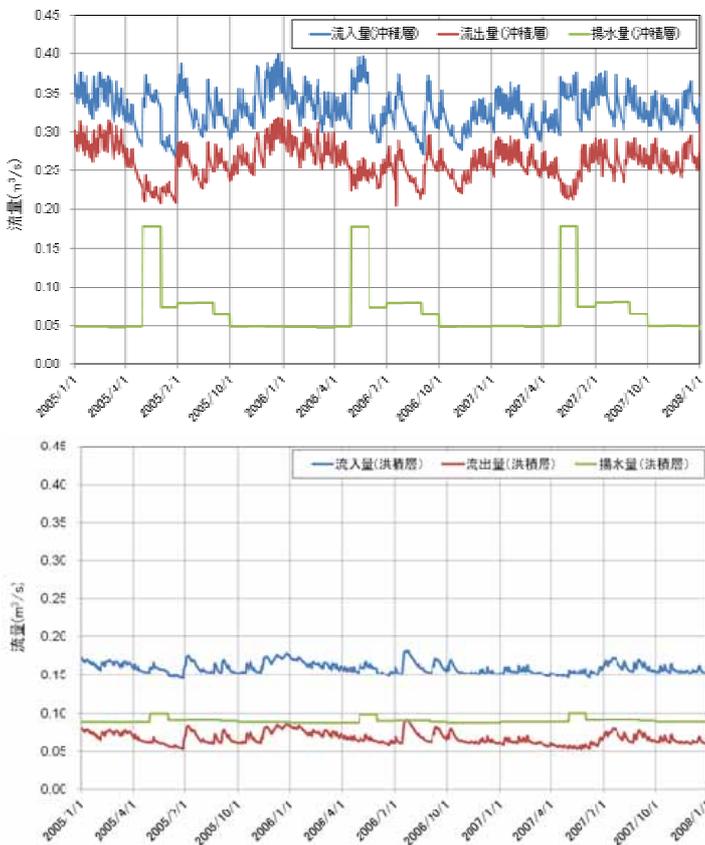


図-10 地下水流入量と流出量[上図:沖積層、下図:洪積層]

次に、鳥取平野における地下水揚水地点と解析から得た地下水流動との関係を把握する。図-11は、帯水層規模に対して揚水量の大きい深層地下水を出発点とした流線軌跡である。

- ・「仮想(揚水の無い場合)」では、帯水層が千代川河口部付近に基盤岩のマウンドを有する盆状のため、海に向かう地下水の流れは弱く、近場の河川へ流出する流れが表現された。
- ・「現状(揚水が有り場合)」では、揚水地点を中心に遠方の地下水を引き寄せる流れが表現された。流線軌跡図の妥当性については更に多角的な検証が必要であるが、こうした地下水流動の視覚的な表現は、普段目にしない地下水が、自然現象や人間活動に大きく影響を受ける水循環を構成する一つの要素との理解に有用と思われる。

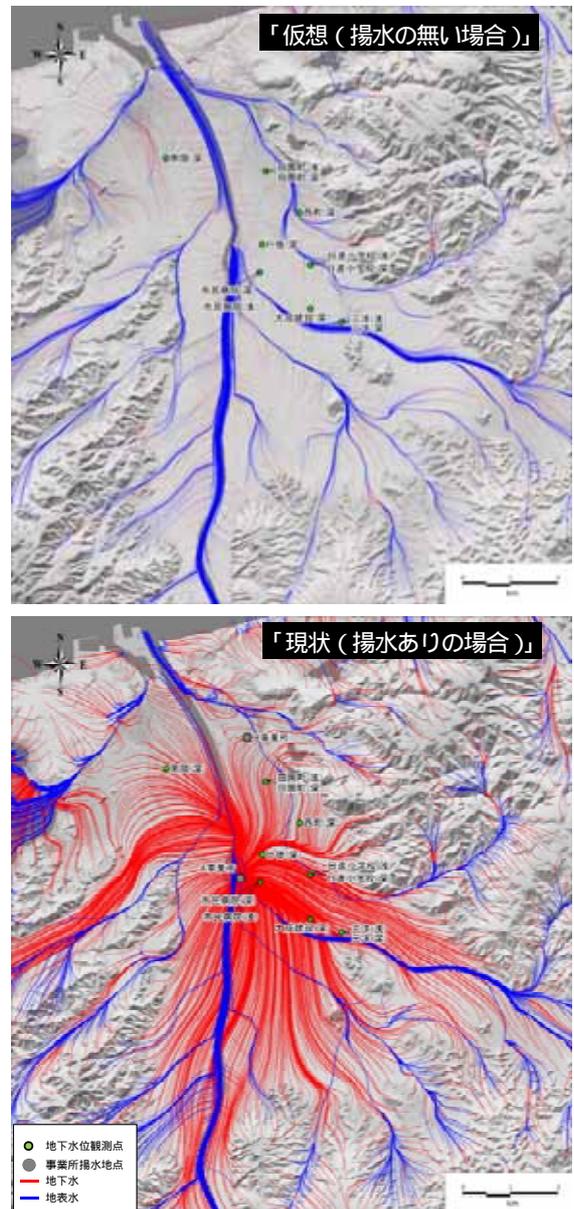


図-11 表流水・地下水の流線軌跡(鳥取平野)

6. 地下水位の将来予測の試算

将来予測では、解析値の妥当性を評価するため、水循環モデルとは別に、全国ベースで整備されている情報レベルを用いた簡易的な水収支モデルを構築し、比較を行った。水収支モデルはダム流域、残流域及び帯水層（浅層、深層）で構成される集中型のタンクモデルである（図 - 13）。

6 - 1 将来シナリオ

将来シナリオは以下のとおりである。

将来外力：

- ・気象庁気象研究所が作成したMRI-AGCM3.2S（21世紀気候変動予測革新プログラムにおける後期モデル）の1kmメッシュデータ（降水量・気温 バイアス補正済）を使用。

予測期間：

- ・気象予測の解析年次を踏まえて、近未来（50年後）：2015年～2039年、将来（100年後）：2075年～2099年とする。なお、現況は1979年～2003年である。

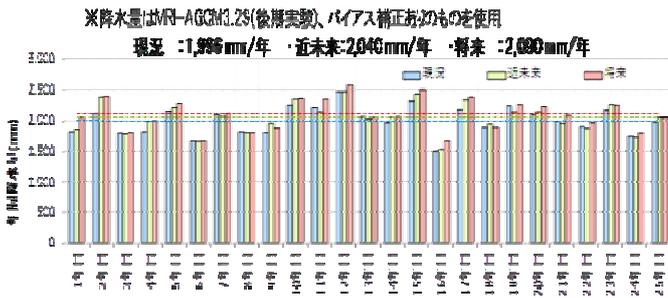


図 - 12 降水量の比較（現況・近未来・将来）

6 - 2 地下水位の将来予測

(1) 降水量による変化

- ・河川流量は、出水ピークが現況、近未来、将来になるほど徐々に大きくなり、逆に低水では気温上昇による蒸発散量の増加による影響で小さくなる傾向にある。また、冬季（1月から4月）では融雪出水の早期出現がみられる（図 - 14）。

- ・浅層地下水位は、現況、近未来、将来の25年間平均水位が水循環モデル、水収支モデルともにほとんど変化しないと結果となった（図 - 15）。深層地下水位では水循環モデルで平均水位差が20cm程度、水収支モデルで30～70cmであった（図 - 16）。過去の水位変化量800cm（地下水位観測開始年1975年から25年間の水位差）からすれば将来の水位差は小さい。

以上、気候変動による降雨パターンの変化は、河川の流出特性に影響を及ぼす要因の一つとなっているが、地下水ではゆっくり浸透・流動する間に平滑化されるために、直接的な影響を受けにくいといえる。

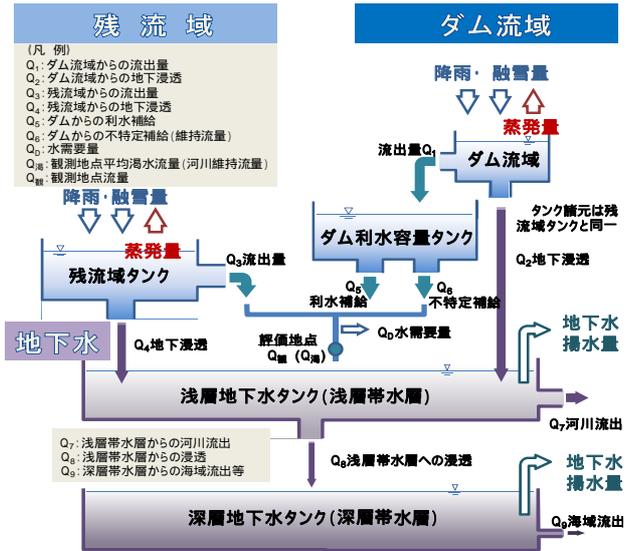


図 - 13 水収支モデル(タンクモデル)の概念図

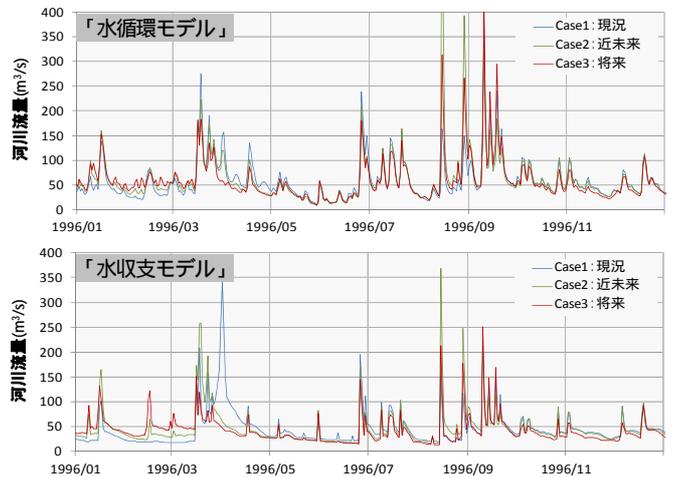


図 - 14 河川流量の予測結果の比較

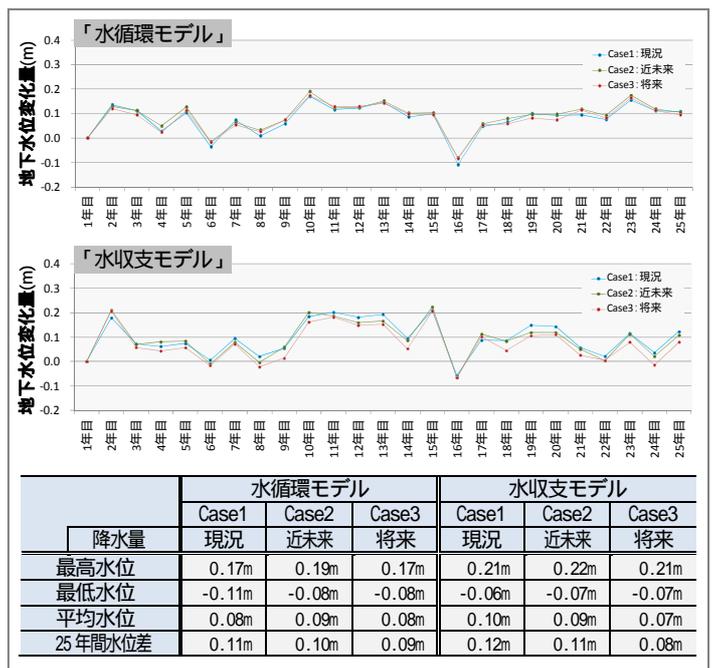


図 - 15 浅層地下水の予測結果（現況・近未来・将来）

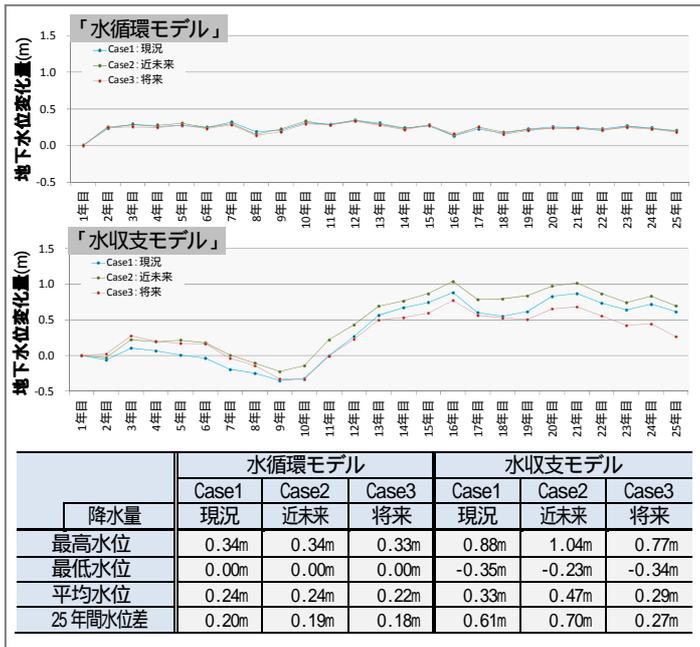


図 - 16 深層地下水の予測結果(現況・近未来・将来)

(2) 揚水量増加時の地下水位変化

地下水揚水量を増加した場合の地下水位の応答について感度解析を実施し、各モデルの適応性を確認した。

- ・浅層帯水層の地下水揚水量を増加したケースでは、水循環モデル、水収支モデルともに増加時の水位変化はあまりみられず、増量による影響はほとんどない。これは、地下水揚水量に対して降水量や河川からの供給が大きいためと想定される(図 - 17)。
- ・深層帯水層では現状水位から 2m程度低下させる揚水量を一定期間あたえ、停止後の水位変化を確認した。その結果、水循環モデルでは増量開始時に急激に水位低下し、停止後は1カ月程度でほぼ元の水位に戻る。この水位変化は、降雪水の揚水とみられる冬季の局所的な地下水位の低下と回復によく似ている。一方、水収支モデルは増量開始時には水位が急激に低下するが、停止後は回復することなく推移しており、急激な揚水に対する周辺地下水の3次元的な流れ込み現象がうまく表現できていない(図 - 18)。

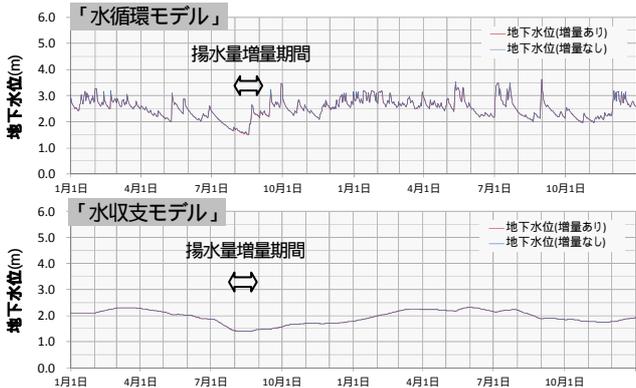


図 - 17 揚水量増加時の浅層地下水の変化(感度分析)

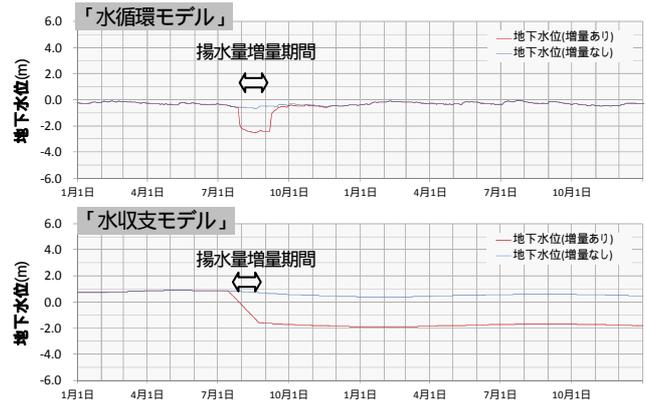


図 - 18 揚水量増加時の深層地下水の変化(感度分析)

7. おわりに

本研究では、千代川流域を対象として水循環解析モデル(水循環モデル)を構築して、現況再現および将来予測から、モデルの有用性を確認した。

- ・現況再現では、空間的な地下水の流動、さらには降雨や揚水による地下水位の敏感な応答を表現することができるため、平常時と渇水時の地下水の流動の違いや、揚水による周辺地下水への影響といった、観測では捕捉しにくい広域的な水循環系での可視化や定量化、あるいは注視箇所の抽出が可能となる。
 - ・将来予測では、降雨パターンの変化や気温の上昇、揚水量の増量による地下水位の応答関係を表現することができるため、現在から将来にわたっての長期的、渇水時等の短期的な地下水利用可能量など、地域特性を反映した有用な基礎情報を与えてくれる。
- 今後の持続可能な地下水管理を進めていく上では、地域特性を反映した地下水解析は強力なツールであり、地下水解析の精度向上に資する揚水量の把握と地質構造の解明が望まれる。

本報告は、「地下水解析モデル構築及び試算業務、平成24年度、国土技術政策総合研究所発注」の成果よりとりまとめたものである。

<参考資料>

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：千代川水系河川整備基本方針、(2006)
- 2) 登坂博行：地圏水循環の数理、東京大学出版会、(2006)
- 3) 国土技術政策総合研究所河川研究部水資源研究室：国総研資料 No.322，地下水モデルに関する研究、(2013)
- 4) 鳥取県生活環境部水・大気環境課：とっとり豊かで良質な地下水の保全及び持続的な利用に関する条例、(2013)
- 5) 鳥取大学・鳥取県共同研究：鳥取平野・大山周辺地域における地下水の収支・動態について、(2010)