

# 松山平野における地下水位変動と 泉の湧水量特性

## STUDY ON THE VARIATION OF GROUNDWATER LEVEL AND DISCHARGE FROM SPRINGS IN SHIGENOBU RIVER BASIN

宇高雄輝<sup>1</sup>・カミーロ・ファリアス<sup>2</sup>・門田章宏<sup>3</sup>・鈴木幸一<sup>4</sup>  
Yuki Udaka, Camilo Farias, Akihiro KADOTA and Koichi SUZUKI

<sup>1</sup> 学生員 愛媛大学大学院 理工学研究科博士前期課程 環境建設工学専攻

<sup>2</sup> 学生員 愛媛大学大学院 理工学研究科博士後期課程 環境建設工学専攻

<sup>3</sup> 正会員 博(工) 愛媛大学大学院准教授 理工学研究科生産環境工学専攻

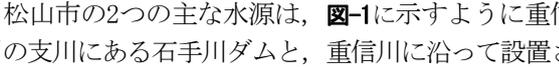
<sup>4</sup> フェロー会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科生産環境工学専攻  
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

Water from springs which are usually scattered around rivers with gravel bed is usually used for irrigation. But, the characteristics of the flow discharge from springs in the field around rivers have not been investigated largely. The water from springs around the Shigenobu river has a possibility to be used for domestic use of Mastuyama City which is suffering from the shortage of water. In this study, water discharges from two springs and groundwater level of a well are measured continuously in order to know the influence of the precipitation on groundwater level and water discharge from springs around the Shigenobu river. It is revealed that the flow discharges from the springs are not clearly influenced by the precipitation although the groundwater level is strongly dependent on the precipitation, and the volume of water from a spring amounts up to 9,000m<sup>3</sup>/day which is more than the average volume of water pumped up by a single well of Mastuyama City.

**Key Words:** groundwater level, discharge from a spring, Shigenobu river basin

### 1. はじめに

本研究で対象とする松山平野は瀬戸内気候区に属し平均年降雨量が1,500mm以下であり、松山市は水不足から発生する問題を定期的に被っている。1994年の7月から8月の期間には、市に給水する石手川ダムの極端な少雨のために貯水率が0%になり、1日5時間給水(19時間断水)が3ヶ月間続き市民生活に深刻な打撃を与えた<sup>1)</sup>。

松山市の2つの主な水源は、-1に示すように重信川の支川にある石手川ダムと、重信川に沿って設置された26カ所の不圧井戸から揚水された地下水(重信川の伏流水)である。流域内では降雨量が少ないことやダムサイトがないことから新たな表流水の開発は困難となっている。ただ、重信川周辺には多くの泉<sup>2)</sup>が存在し、かなりの湧水があり、かつては主に農業用水に使われていた。周辺が急速に都市化する中で、これら

泉から湧き出る豊かな水を、都市用水として用いることも考えられる。そのためには、まず泉の水位や湧水量及びそれらに影響を及ぼす地下水位変動と降雨特性との関係を把握しておくことが必要である。

本研究は、松山平野における降雨と地下水位変動との関係を明確にするとともに、泉の湧水量を定期的に観測することで、今後の松山市の水資源開発の可能性についての基礎的知見を得ようとするものである。このため、地下水位や泉の水位及び泉からの湧水量と降雨量との関係を求めるために、代表地点の地下水位と泉水位を連続的に測定するとともに、泉からの湧水量を定期的に実測している。これらの実測データを解析することによって、日降雨量は地下水位に直接影響していることがわかった。また、泉の水位変動は地下水位変動と比べて小さく降雨量によってほとんど変化しないことと、泉からの湧水量は地下水位変動に強く連動していることがわかった。

これらの観測データに基づいて、天気予報に基づく

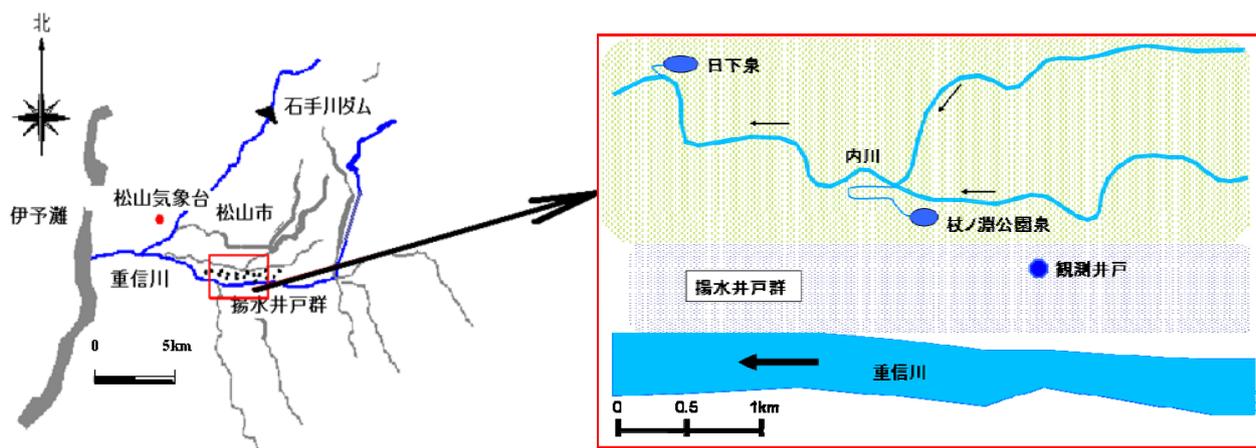


図-1 松山市水源と調査対象地点



写真-1 水位計設置状況 (杖ノ淵公園泉内)



写真-2 流速測定状況 (日下泉直下流)

数日間先の降雨量が精度良く測定できるとして、その間の地下水位と湧水量の短期予測が可能となる方法を提案した。

## 2. 井戸水位及び泉水位・泉湧水量の観測方法

松山平野で重信川沿いの泉の湧水特性を調べるために、図-1に示す2つの泉(杖ノ淵公園泉, 日下泉)および観測井戸(相原邸古井戸)の3地点に水位計を設置し(写真-1), 2007年7月から現在まで水位の連続測定を実施している。2つの泉からの湧水は、重信川の支流である内川へ流れ込み最終的には重信川に流入する。また観測井戸は重信川と内川に挟まれる位置にある。水位計は、水中のセンサー部分の水面までの圧力を測定する圧力式であり、データロガーによる連続記録を行っている。また泉からの湧水量は泉直下流の水路において電磁流速計を用いて流速測定をすることによって求めた(写真-2)。流速の測定は、水路横断方向に断面を8~10分割し、各断面内で水深の2割および8割の高さの位置で測定する2点法による。なお、流量測定は降雨のあるなしに関係なく原則として週1回定期的に行っている。なお、解析に用いた日降雨量は図-1に示す観測泉から5km離れた松山地方気象台での観測データである。

## 3. 地下水位及び泉水位の変動特性

### (1) 井戸水位及び泉水位変動の実測値

図-2に、2007年7月から2009年7月までの2年間について観測井戸(古井戸)の水位変動と日降雨量の関係を示している。なお、対比するために杖ノ淵公園泉と日下泉の水位も併記している。変化の小さい泉の水位と異なって、井戸の水位は変動量も大きく日降雨量に直接的に反応していることが分かる。地下水位を表す井戸の水位は、降雨による水の補給があった場合、泉と異なってすぐに系外に流出しなくて貯留されるので地下水位の上昇として表れる一方、泉は日降雨量に対しては湧水量の増減で反応し、水位の変化はあまり大きくないと考えられる<sup>3)</sup>。2009年5月及び6月には降雨が少なく、地下水位が異常に低下し観測井も枯渇した。また、この時には変化の少ない泉の水位でも両泉共大きく低下した。

地下水位の変動に比して、泉水位あるいは表流水位の変動は小さくなる。それぞれ杖ノ淵公園泉および日下泉の水位と日降雨量との関係の実測値は、両泉とも測定期間内では泉の短期的な水位変動は数センチで1年間の変動でも最大30cm程度である。また、泉の水位を

細かく見ると、水田に水を張る時期(7月~9月(1日~80日), 4月~6月(260日~360日)), 変動幅は小さいものの水位は降雨とは関係なく変動している。これは周辺の水田の水利用の人為的な影響であると考えられる。また、変動量が小さいため当日の降雨量に水位が対応しているかどうかは不明である。

## (2) 水位の1日先予測 (Single-step-ahead) ANNモデル

N日先までの日降雨量が天気予報から予測可能であることを前提として、N日先地下水位を求める。そのためにまず、地下水位が日降雨量に敏感に反応していることから、1日後の地下水位を当日の日降

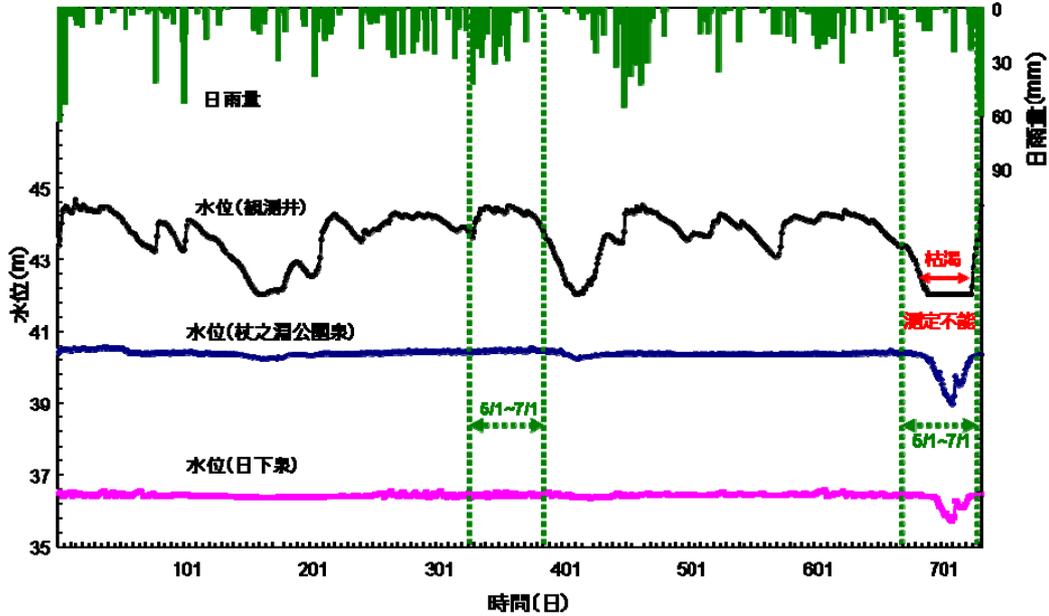


図-2 水位変動と日降雨量の関係

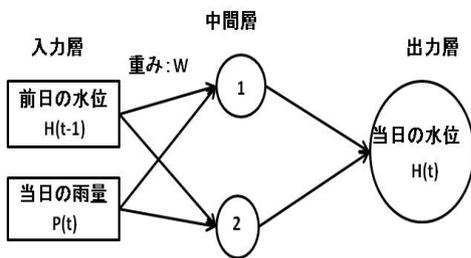


図-3 1日先予測 (Single-step-ahead) ANNモデル

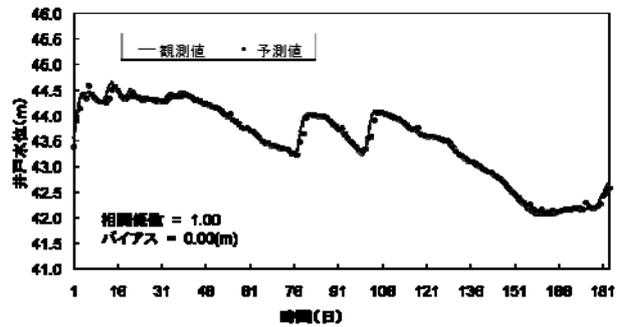


図-4 6ヶ月間の日データを用いた1日先予測の訓練結果

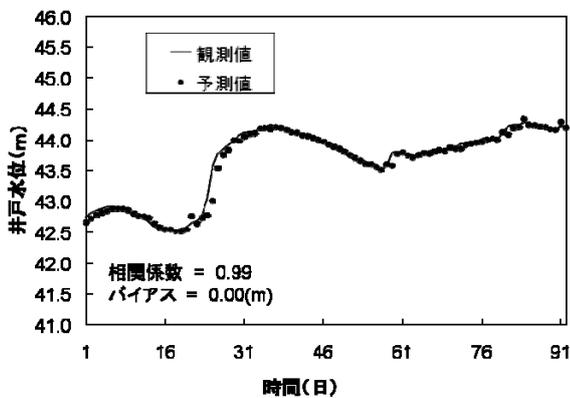


図-5 3ヶ月間の日データを用いた1日先予測の検証結果

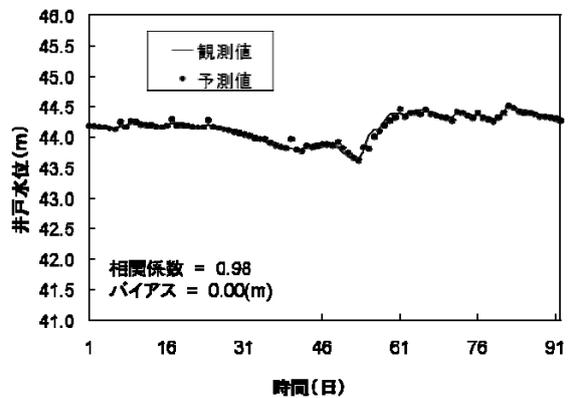


図-6 3ヶ月間の日データを用いた1日先予測の試行

雨量から推定するためのニューラルネットワーク<sup>4)</sup>を構築した。

当日の地下水位 $H(t)$ を特性付ける量は、前日までの日降雨量 $P(t-1), P(t-2), \dots$ あるいは前日以前の地下水位 $H(t-1), H(t-2), \dots$ 等が考えられる<sup>5,6)</sup>。データを詳細に見ると、**図-2**から分かるように当日の水位 $H(t)$ は当日の日降雨量 $P(t)$ に直接応答しているようである。そのためここでは、**図-3**に示すように入力要素を観測値である前日の地下水位 $H(t-1)$ および当日の降水量 $P(t)$ の2つとして、求めるべき出力として当日の地下水位 $H(t)$ を予測する。

**図-4**は、観測開始から181日間のデータを用いて行った当日の水位 $H(t)$ 予測についてのニューラルネットワークの訓練の結果を示している。訓練(Training)によって構築されたニューラルネットワークが正しく実行できるか、次の91日間のデータを用いて行ったニューラルネットワークの検証(Validation)の結果を**図-5**に示しており、検証の結果、高い精度で日降雨量から地下水位を算定できていることが分かった。そこで、実際に観測後半の91日間のデータを用いて予测试行(Test)を行った。**図-6**はその予测试行の結果を示している。なお、日降雨量は約5km離れた松山気象台での観測値を使用している。**図-6**より実測値と予測値がよく一致していることが認められる。これらの図中に示すよう

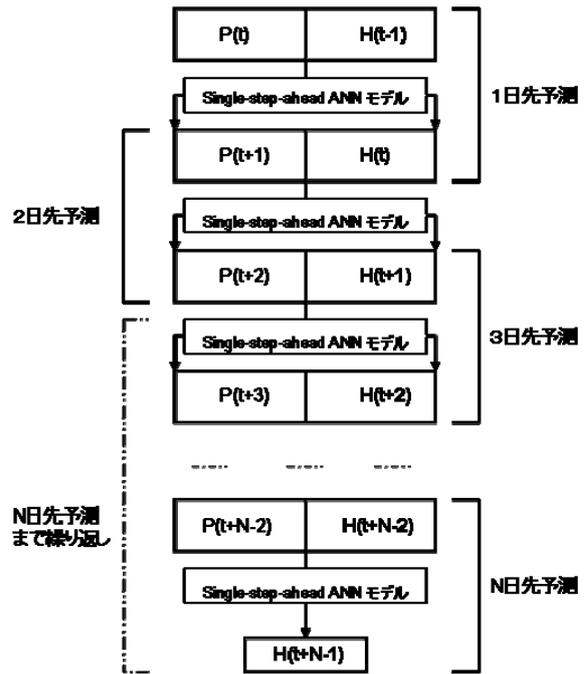


図-7 N日先までの地下水位の予測法

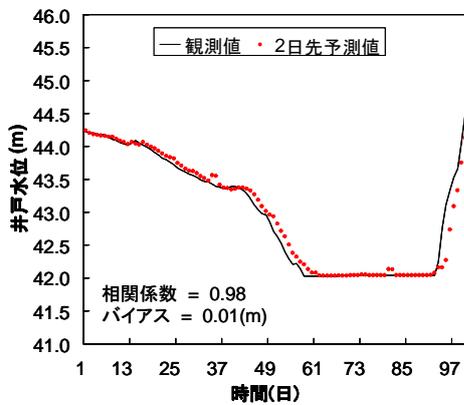


図-8 2日先までの予測

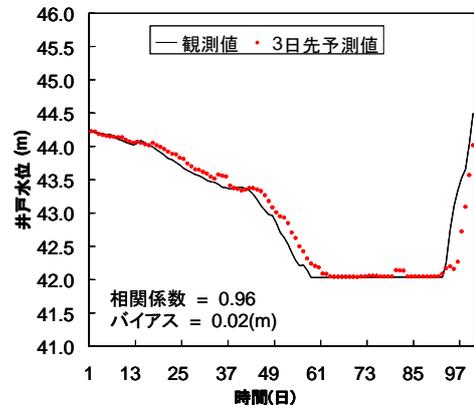


図-9 3日先までの予測

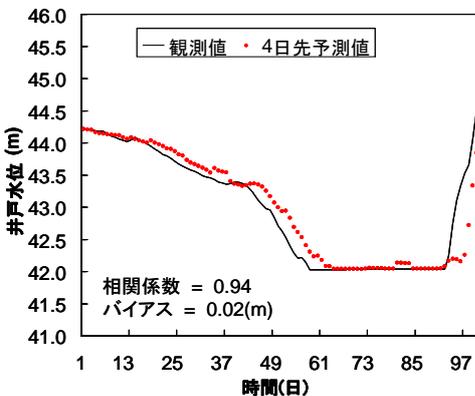


図-10 4日先までの予測

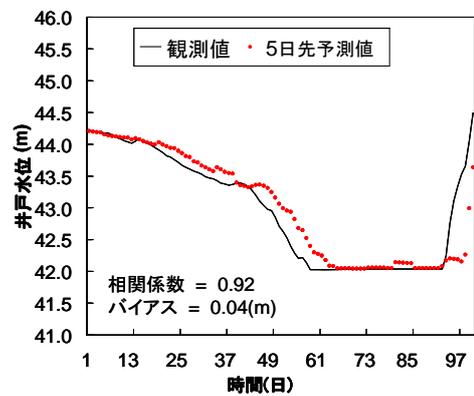


図-11 5日先までの予測

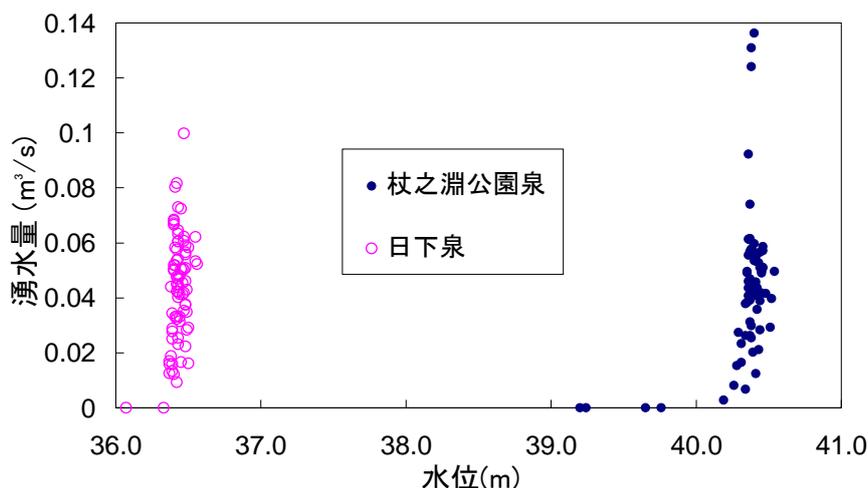


図-12 泉水位と湧水量

に、相関係数は0.96から1.00まで、バイアスはほぼ0mであり、構築されたニューラルネットワークは高い精度で日降雨量から地下水位を算定できることを示している。すなわち、当日の日降雨量と前日の地下水位を与えると構築されたニューラルネットワークにより当日の地下水位が精度よく予測できる。

### (3) 地下水位のN日先までの予測

1日先の地下水位はSingle-step-aheadモデルで精度良く予測されたことから、N日先までの予測降雨量を与えられた場合の地下水位予測を行う。すなわち、図-7に示すように、計算で予測された1日先地下水位と天気予報に基づく予測降雨量から次の日の地下水位を求めることをN回繰り返し、N日先の地下水位を求める。ここでは、N=5と(Single-step-ahead)ANNモデルを5回繰り返して用いることによって、5日先までの地下水位を予測した。

図-8から図-11までは、観測開始から98日間のデータについて、2~5日先までの水位予測の結果を示している。結果を見ると、相関係数0.98~0.92、バイアス0.01~0.04(m)と、予測する目標の日が離れるほど誤差が蓄積されバイアスが大きくなり信頼性は低くなる傾向が見られる。

## 4. 泉湧水量の変動特性

### (1) 泉の水位と湧水量の関係

図-12に、日下泉および杖ノ淵公園泉の水位と湧水量との関係の実測値を示している。泉の水位の変動幅が小さいが、湧水量は大きく変動していることが分かる。

湧水量は大きなものでは、日下泉では0.1m<sup>3</sup>/sで日量9,000m<sup>3</sup>程度、杖ノ淵公園泉では0.14m<sup>3</sup>/sで日量12,000m<sup>3</sup>程度であることが分かる。

平均的に日下泉では約3,670m<sup>3</sup>/日、杖ノ淵公園泉では約3,650m<sup>3</sup>/日程度の湧水量が観測されたことになる。これらは松山市の26ある揚水井の一つの揚水量に匹敵する。松山市の1日の水の使用量は石手川ダムからの給水量を合わせて日量150,000m<sup>3</sup>程度であることから、1つの泉でこの1/40程度をまかなうことができる。

### (2) 地下水位(井戸水位)と泉の湧水量の関係

図-13では、観測井戸(古井戸)の水位変動と日下泉及び杖ノ淵公園泉の湧水量変動との関係の実測値を示している。また、図-14には地下水位と泉からの湧水量との関係を示している。これによると、観測井戸水位と泉の湧水量は直接的に応答していることが分かる。

データにばらつきは見られるが、降雨による水の補給があった場合、観測井の水位上昇は顕著であるが、泉の水位上昇は少なく、湧水量の増加で応答していることが分かる。これは泉面積が泉出口に比べ大きいため泉に水がたまっており、泉の水位は泉から川への出口のところの条件で規定されて変化が少なくなるためと考えられる。湧水量は地下水位と泉水の水頭勾配で決まるため、湧水量と地下水位はほぼ線形の関係になると言える。これは、前に述べたように、天気予報からの予測降雨量から井戸水位を予測することができるため、井戸水位と泉湧水量の関係が明らかになったことより、泉の湧水量も予測できることを示している。このことから、短期間の可能給水計画を建てるのが可能となる。

## 5. おわりに

松山平野での水資源として泉からの湧水量を推定するために、2つの泉を対象に湧水流量の定期観測を継続しているが、平均的に杖ノ淵公園泉で日量6,000m<sup>3</sup>程度、

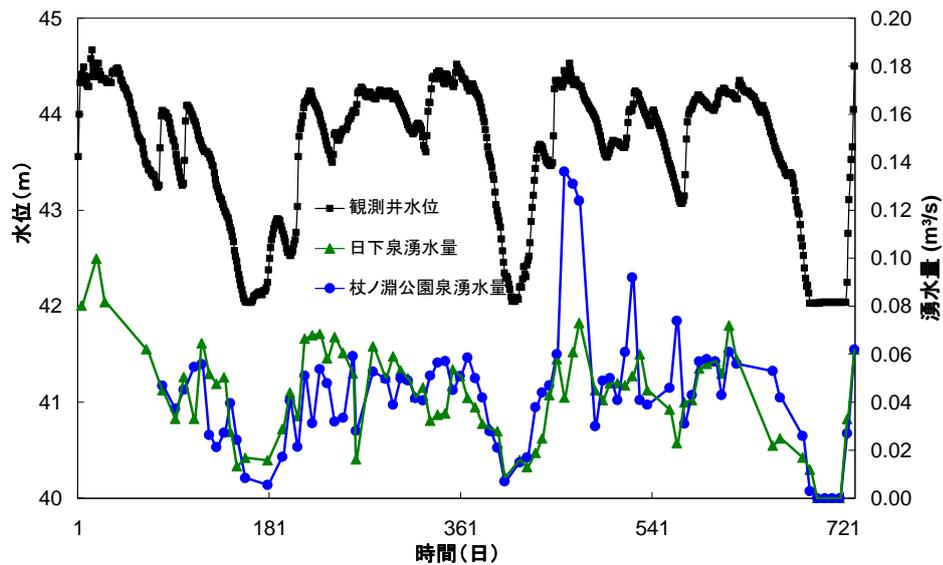


図-13 井戸水位変動と泉の湧水量変動

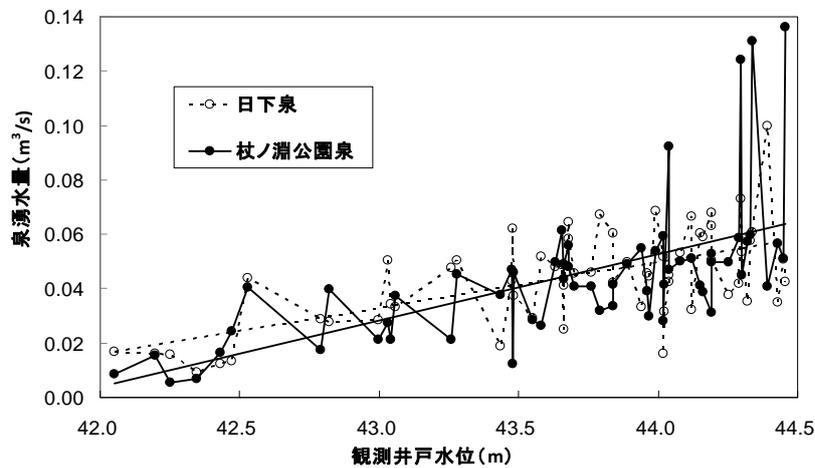


図-14 地下水位と湧水量

日下泉で4,500 m<sup>3</sup>程度の湧水が確認された。また、古井戸を利用した地下水位の連続測定から、地下水位変動は日雨量に依存していることが明らかとなり、地下水位はニューラルネットワークを用いて予測日降雨量から求めることができることを示した。泉の水位と日降雨量とは直接的な関係は認められなかったが、井戸水位と泉の湧水量は直接的に関連性があることが明らかになった。また、天気予報から5日先までの降雨量が予測できるという前提で、5日先の地下水位及び泉の湧水量を予測する方法を示した。

**謝辞**：本研究は河川環境管理財団の平成19～21年度河川整備基金の助成を受けて実施している。

**参考文献**

1) 鈴木幸一・渡辺政宏・栗原 崇：北四国の水事情と1994年夏季の松山渇水について，自然災害科学，Vol. 3，No 3，

pp101-110，1994．

2) 重信川ビオトープネットワーク研究会編：～泉～，重信川ビオトープネットワーク調査報告書，(社)四国建設弘済会，pp. 38-44，2000．  
 3) D.K.Todd.: Ground Hydrology, Chapter3:Groundwater Movement, Chapter5: Water Wells, 1976.  
 4) Haykin, S.: *Neural networks: a comprehensive foundation*, Prentice Hall, Inc., Introduction, pp.1-49, 1999.  
 5) Daliakopoulos, I.N., Coulibay, P., Tsanis, I.K.: Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol.309, pp.367-376, 2005.  
 6) Lettenmain and Wood,F.F. *Hand book of Hydrology* edited by, Maidment,D.R, McGraw Hill, *Hydraulic Forecasting*, pp.26.1-26.3, 1993.

(2009. 9. 30受付)