

タンクモデルによる熊本地域における 地下水位の推定

Conjecture of Groundwater Level using Tank Model in Kumamoto Area

桐山 貴文¹・市川 勉²・星田 義治³

Takafumi KIRIYAMA, Tsutomu ICHIKAWA, Yoshiharu HOSHIDA

¹学会員 工修 九州東海大学大学院 工学研究科 (〒862-0970 熊本市渡鹿 9-1-1)

²正会員 博士 九州東海大学 工学部 都市工学科 (〒862-0970 熊本市渡鹿 9-1-1)

³正会員 博士 九州東海大学 (〒862-0970 熊本市渡鹿 9-1-1)

Water supply in Kumamoto area is depended only on groundwater. This urban area spreads for the north and east of Kumamoto city by increasing of houses, roads and factories during the last 25 years. As a results, the impervious area has been increased to 104 km² (about 10% of all the area).

This paper reports relation between rainfall and groundwater level using a tank model which considers recharge of paddy field, lateral flow of groundwater and evapotranspiration. As the results, it is possible to calculate the exchange of groundwater level and quantity of springs using the data of rainfall and temperature.

The parameters using this tank model are calculated from observed data which include effect of rainfall and groundwater flow. So it is necessary that these parameters are determined except the influence of interaction between rainfall and groundwater flow.

Key Words : Rainfall, Groundwater Level, Tank Model, Recharge of Paddy Field

1. はじめに

熊本地域は上水道水源のほぼ100%を地下水に依存しており、地下水による給水人口としては、我国において最大規模の地域である(図-1)。

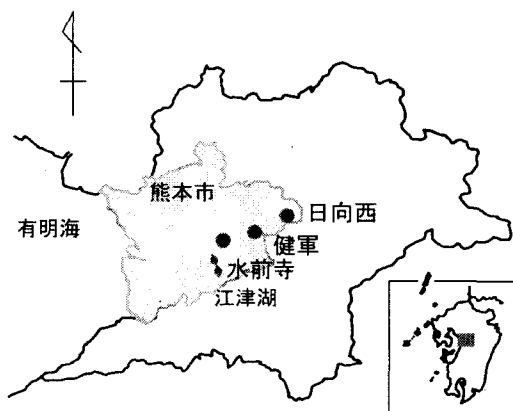


図-1 熊本地域位置図

近年、この地域の地下水をめぐる状況の変化から地下水の枯渇や汚染が懸念されている。この原因の第1は給水人口の増加による取水量増である。地下水利用量は近年横ばいであるが、秋田水源地(現在熊本市内取水量4位の水源地)においては、1998年までに2.5万m³/dayの取水量が、倍の5万m³/day(熊本市内取水量2位)になる。その結果、地下水位が低下し、下流側の著名な湧水地に影響を与える可能性がある。第2に地下水の上流涵養域の減少である。1965年頃熊本市の市街地は、熊本市中心部に集中していたが、1991年頃(約25年後)になると、経済成長とともに北部・東部に拡大し、宅地・工場の造成などによって非涵養域が面積にして約104km²(対総面積比約10%)増加している。

これまで、熊本平野・地域での地下水を主体とした研究は数多く発表されており、地下水機構の解明に貢献してきた。また、熊本県・熊本市が行った地下水流動解析モデルは、大きく4項目(帯水層構造、湧水状況、帯水層間の漏水、地下水涵養)にまとめ、熊本地域を5352のメッシュに分け、メッシュ毎に水収支を計算させ、地下水状況の再現を行っている。

この4項目のうち地下水涵養は、土地利用別面積、土地利用別浸透率、水田減水深、降水量、蒸発散量などのデータを用いて推計している。

地下水流動モデルでは、水理地質構造、地下水位等から準3次元数値シミュレーションモデルを用い、帯水層、加圧層を各々3層に分け15年の各種観測値より計算を行ったものである¹⁾。

以上のように、準3次元数値シミュレーションモデルでは非常に多くの観測値を用いており、これらの観測値を入手して解析を行うには、非常に多額の経費や時間を要する。さらに現在のモデルでは、境界条件が不完全である。すなわち、熊本地域東部に位置する高遊原台地の地下水の存在や地下水の流動、及び、阿蘇カルデラからの地下水流入（涵養源）など、従来考慮されていない要因がある。そのため、地下水位の推定では必ずしも良い結果が得られていない。また、今後の気象条件や土地利用などの変化によるプログラムの変更に関しても、多大な経費と時間を費やすものと思われる。

そこで、著者らは、比較的簡便に利用できる手法として以下のような解析を行った。解析に用いるデータは、月合計降水量・月平均気温・地下水位観測値・湧水量観測値の4種類である。この4種類のデータを用いて蒸発散量を考慮した地下水位と湧水量の関係を統計的手法によって解析し、地下水位と湧水量の相互の変動の推定を行った。この結果から対象地域において水田からの涵養量が非常に大きいものであることが判明した。また、有効降水量（降水量－蒸発散量）と地下水位変動量の関係及び地下水位観測値と湧水量観測値の関係から地下水位と湧水量の変動につい

ての推定は、ほぼ可能になったものと思われる²⁾。しかし、以前の解析では地下水流動などを考慮していない。これらを考慮することによって降水量から地下水位の推定の精度は、更に向上するものと思われる。

本研究ではこれらの成果を用い、熊本地域において降水量から地下水位を推定するための簡便な手法の1つとして、有効降水量と地下水位変動（水田涵養量を除く）の関係をタンクモデルを用いて解析を行ったものである。そして、この方法によって降水量から地下水位がほぼ推定できることを示したものである。

2. 対象地域

今回の研究における対象地域は、熊本地域（18市町村、面積約1014km²、人口約95万人）であり、地形は、上流部から阿蘇、高遊原台地、菊池台地、植木台地、託麻台地、熊本平野で形成されており、その中央部には1級河川である白川が東北東から西に向けて流れている。

この地域は、阿蘇火砕流堆積物と火砕流活動の休止期の堆積物として砥川溶岩や湖成堆積物である花房層・布田層が分布している。本地域の地下水帯水層は、大きく2つに分けられる。今回の対象となる地下水は、下部層の第2帯水層である。下部層は、阿蘇火砕流堆積物と砥川溶岩で構成され、熊本地域の主要な帯水層を形成している。砥川溶岩は、託麻台地から平野部に位置し、表層部に多孔質で割れ目の多い岩質であり、高い透水性を有している。また、高遊原台地付近では、不圧地下水であるが、熊本平野の東部である水前寺・江津湖付近までは被圧している³⁾（図-2）。

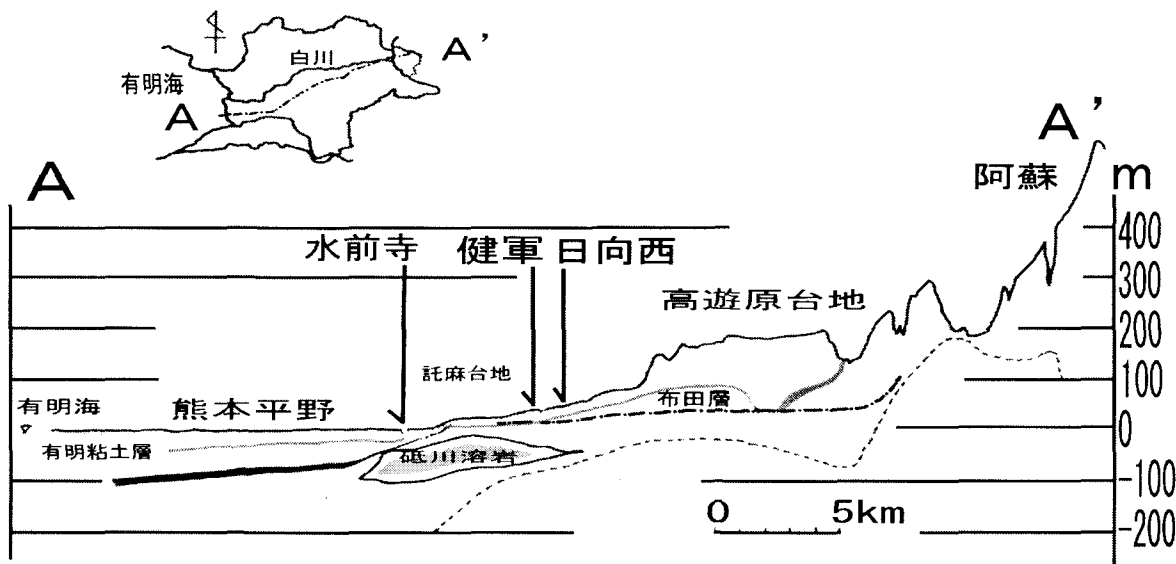


図-2 熊本地域横断面図

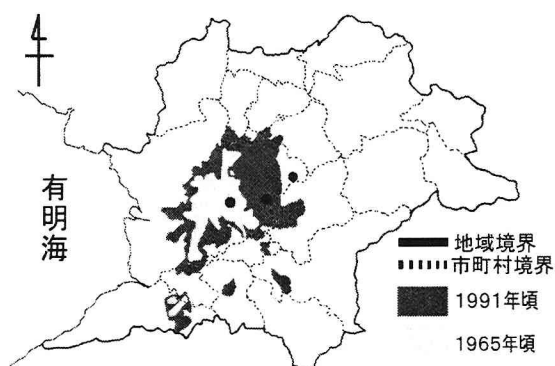


図-3 熊本地域非涵養域変化図

熊本県・熊本市の1994年度熊本地域地下水総合調査報告書¹⁾によると、1965年頃市街地に密集していた建築物が、1991年頃(約25年後)になると都市化により市街地が広がり、熊本市より北東部において宅地化、工場等の造成により非涵養域が面積にして約104km²(対総面積比約10%)増加しており(図-3)、この非涵養域に転化した面積の73.5%が田畑である。

熊本地域における年間地下水総採取量(1993年度)は、2億2928万m³/年であり、1993年度は、1983年度の約85%の採取量で留まっている。しかし、生活用水は1983年頃と比べ9.9%増である。また、熊本県民の1人1日平均上水道使用量は約380リットル/人/日であり九州平均の使用量より約30リットル/人/日も多く、隣接する福岡県の使用量よりは、約125リットル/人/日も多いことが知られている。豊富かつ安価な水資源、渇水知らずの県民性が多量の水使用を引き起こしている

と考えられる。

このような地域において、今回は地下水流向上の3点を上流部から、日向西・健軍・水前寺と流出部として江津湖を設定した(図-4)。

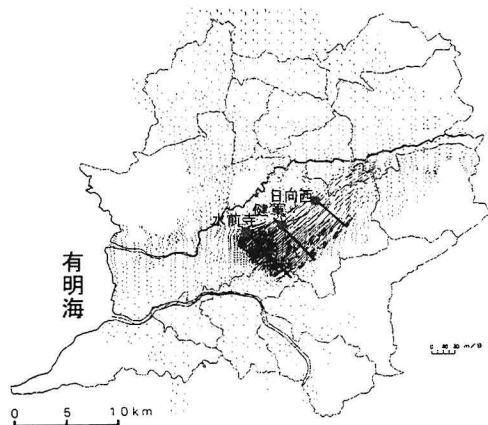


図-4 熊本地域地下水流向¹⁾

観測データは、降水量・平均気温(1992年4月～1998年3月:6年間)は、熊本市内の中心部にあたる熊本観測所(熊本地方気象台)のものを使用し、地下水位観測値(1992年4月～1998年3月:6年間)は、日向西・健軍・水前寺の3箇所、湧水量(1992年4月～1998年3月:6年間)は、著者らが月1度湧水口である江津湖で現地観測を行い、得られたデータを使用した。

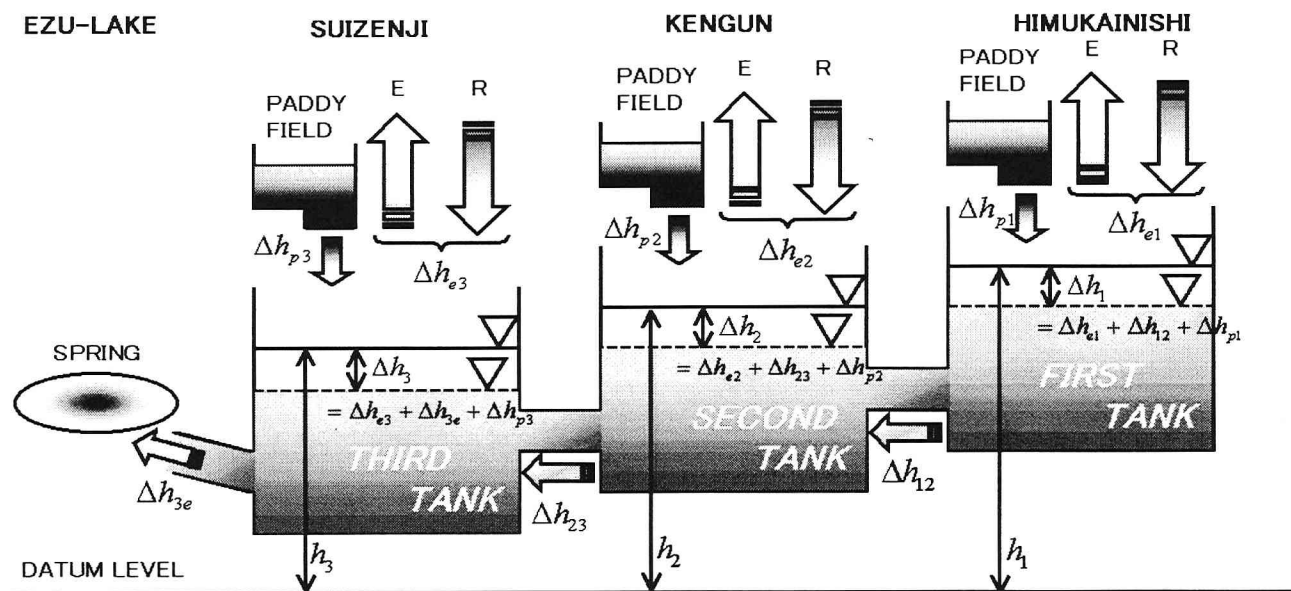


図-5 タンクモデル

3. タンクモデル

(1) タンクモデル化

本研究では、日向西・健軍・水前寺地点の地下水について、降水量から蒸発散量を差し引いた有効降水量による表面からの浸透、6月～10月の水田涵養量、地下水側方流動を流出入として、図-5のような水平方向3段のタンクモデルを構築した。今回は、日向西より上流の地下水位データが得られなかったため、日向西に対する地下水側方流動の流入はないものとして（日向西の地下水位変動の要因は、有効降水量、水田涵養量、下流部への側方流出とした）行った。各地点の水収支を計算する上でパラメータとなる係数は、実測データをもとに推定した。

最下部の水前寺のタンクモデルでは、この位置から下流（有明海）側への地下水流量は低地帯での地下水動水勾配も小さいため、江津湖における湧水量を流出とした。

(2) 降水量による地下水位変動

蒸発散量を推定する方法としては、エネルギー収支式の関係をふまえた経験式とふまえてない経験式に分けられる。前者には、Penman 法やその前進した Penman-Monteith 法があり、後者には、Hamon 法、Thornthwaite 法が良く知られている⁴⁾。本研究では、得られたデータの特性から、月平均気温を用いた Thornthwaite 法⁵⁾を使い、蒸発散量を推定した。

熊本地域は、表面流出・土壌浸透・蒸発散が、年間降水量のおよそ3分の1ずつであり、蒸発散量を無視することは出来ない。また、降雨が地下水の涵養として関与していることは言うまでもない。そこで、月合計降水量から月合計蒸発散量を差し引いた有効降水量と翌月の地下水位変動量の関係は、以下のように考えた。

$$\Delta h_{en} = \alpha(R_e - R_0) \tag{1}$$

ここに、

Δh_{en} : 有効降水量による地下水位変動高(m/mon)

α : $1/n_e$ 有効空隙率の逆数

R_e : 有効降水量(m/mon)

R_0 : 損失降水量(m/mon)

また、損失降水量は、降水量の中の地下水位上昇に影響しない表面流出や土壌中の貯留水の総称を表す。

(3) 水田涵養量の推定

各地下水観測点の地下水位変動で、1994年度の渇水年に注目した。この年度の年間降水量は904mm/y。また、本章(2)節で求めた蒸発散量(Thornthwaite 法)を差し

引いた有効降水量では-42mm/y。と降水量より蒸発散量が多い。しかし、6月から10月で、各観測点の地下水位は上昇している。この原因は、降雨が地下水を涵養したことにより地下水位の上昇に関与したとは考えにくく、以下の3点から、この地下水位上昇の原因を水田からの涵養であると仮定した。

- 1. 各観測点の上流域が水田であること。
- 2. 地下水上昇期と水田の湛水期が同時期であること。
- 3. 各観測点上流域にあたる白川中流域における水田の減水深が200～300mm/day. と異常に大きいこと。

そこで、1993年10月から1994年10月までの各観測点における地下水位降下を指数回帰し、地下水位実測値の上昇と曲線回帰との差を水田からの涵養量(Δh_p)であるとした(図-5, 6)。

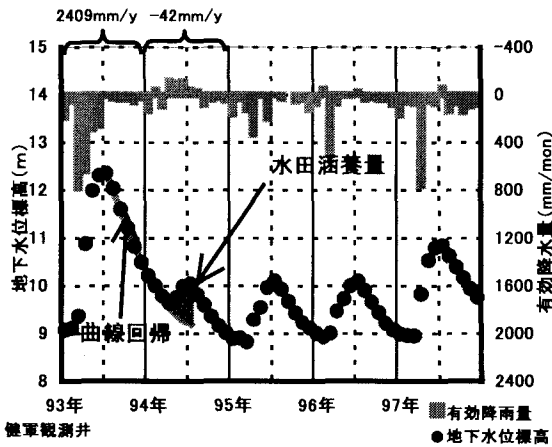
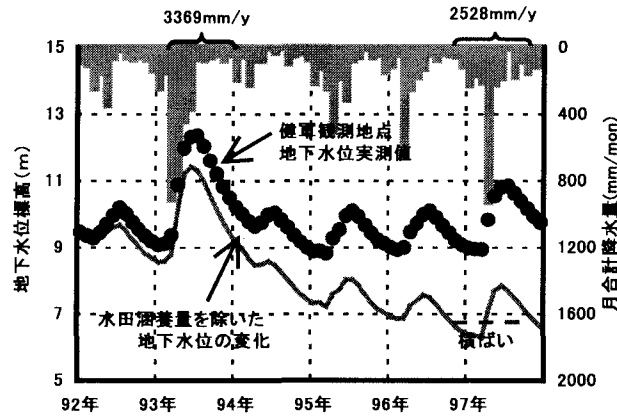


図-6 水田涵養の推定(健軍観測地点)

このことより、健軍地点における地下水は水田涵養が無いときと地下水位実測値には、0.84mもの差が生じることがわかり、熊本の地下水を形成・維持する上で水田は、非常に重要なものであると考えられる。

また、曲線回帰から得られた水田涵養量(期間: 6月から10月)を用いて、1992年4月から1998年3月までの実測地下水位から水田涵養量を差し引いたものを、図-7に示した。ここで、水田からの涵養量は、各年とも同一のものとする。1993年の多雨年があるため1998年3月では地下水位標高が約6.6mに至ったが、1993年が平年降水量であるならば、地下水位は、より低い値を示したに違いない。ただし、海岸付近になると地下水位は、ほとんど一定化し、この水位以下になることはないの、どの程度の低下で停滞するのかは、定かでない。また、図-7で1993年は年間降水量3369mmであり、1年後(1994年4月)の地下水位は0.62mほど

上昇し、1997 年は年間降水量が 2528mm の地下水位の年間変化は、ほぼ横ばいになっており、水田からの涵養がない場合、健軍地点において、この地域での年間降水量が 2500mm 以上なければ地下水位は低下し続ける。1988 年から 1997 年（10 ヶ年）の平均年間降水量は 2037mm であることから、熊本地域における水田からの涵養が非常に重要なものであると言える。



図－7 水田涵養量を除去した地下水位変化（健軍地点）

(4) 地下水流動による地下水位変動
 地下水の側方流動による地下水位変動高は、熊本県・熊本市¹⁾での準 3 次元シミュレーション結果による流向幅・流域面積、地質断面図による帯水層厚を参照し、各地点における地下水位変動差（翌月との変動差）を用いて、以下の関係から求めた。

第 1 段タンク（日向西）

$$\Delta h_{12} = -\beta_{12}(h_1 - h_2) \quad (2)$$

第 2 段タンク（健軍）

$$\Delta h_{23} = \beta_{23}(h_1 - h_2) - \beta'_{23}(h_2 - h_3) \quad (3)$$

第 3 段タンク（水前寺）

$$\Delta h_{3e} = \beta_{3e}(h_2 - h_3) - \beta'_{3e}(h_3 - h_e) \quad (4)$$

ここに、
 Δh_n ：地下水側方流動による地下水位変動高(m/mon)
 h_n ：地下水位(m)
 β ：流出パラメータ

ただし、第 1 段タンクの日向西地点の地下水位は、上流からの流入は、ないものとしている。

4. パラメータの決定

降雨及び地下水流動による地下水位変動の式(1)～(4)に各パラメータ $\alpha, \beta_{12}, \beta_{23}, \beta'_{23}, \beta_{3e}, \beta'_{3e}$ は、実測

のデータから以下のように決定した。

第 1 段タンク（日向西）

$$\Delta h_{e1} = 7.996 \times (R_e - 0.147) \quad (5)$$

第 2 段タンク（健軍）

$$\Delta h_{12} = -0.00567 \times (h_1 - h_2) \quad (6)$$

第 3 段タンク（水前寺）

$$\Delta h_{e2} = 2.250 \times (R_e - 0.114) \quad (7)$$

$$\Delta h_{23} = 0.00489 \times (h_1 - h_2) - 0.00714 \times (h_2 - h_3) \quad (8)$$

$$\Delta h_{e3} = 0.940 \times (R_e - 0.113) \quad (9)$$

$$\Delta h_{3e} = 0.00807 \times (h_2 - h_3) - 0.01227 \times (h_3 - h_e) \quad (10)$$

これらのパラメータ α と β のうち α は、第 3 章(1)節で述べたように、 $\alpha = 1/n_e$ で、有効間隙率の逆数であるので 1 より小さい値にはならない。しかし、第 3 段タンクのパラメータは、1 より小さくなっている。現実的な値ではないが、水位観測データの中に、降雨以外の地下水流動による変動も含まれていることが原因と思われる。

水田涵養による地下水位上昇は、最も水田に近い日向西地点が最も変動が大きく、健軍、水前寺と下流へ下るにつれ変動幅も小さくなり、かつ、変動の割合もほぼ同じである。したがって、最上部の上昇幅によって被圧状態におかれた地下水に圧力伝播によって、下流域へ伝えられていると思われる。その大きさは、表 -1 に示したようになった。

表－1 水田涵養による各月の地下水位累加上昇値 (m)

	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
日向西	0.607	1.791	3.342	5.184	5.602
健 軍	0.051	0.129	0.233	0.363	0.519
水前寺	0.015	0.040	0.074	0.118	0.172

5. 地下水位の推定

第 3 章(2)節～(4)節の地下水位変動要因である有効降水量・水田涵養量（6 月～10 月）・地下水側方流動による水位変動量を前月の地下水位標高値に加算することによって、地下水位を計算した。

$$HI_{n+1} = HI_n + \Delta h_n + \Delta h_{pn} + \Delta h_e \quad (11)$$

ここに、
 HI_n ：地下水位標高(m)
 Δh_{pn} ：水田涵養高(m/mon)（6 月～10 月）

タンクモデルによって、計算した地下水位と実測値の比較を図-8 に示した。各観測点における地下水位の

相関係数は、0.92 以上と非常に高く、第 2 帯水層の地下水位変動は、6 月に最低水位、10 月に最高水位を示すパターンを繰り返している。これに対し、タンクモデルにより推定した各観測点の地下水位変動は、水位の上昇・下降のパターンをほぼ再現している。

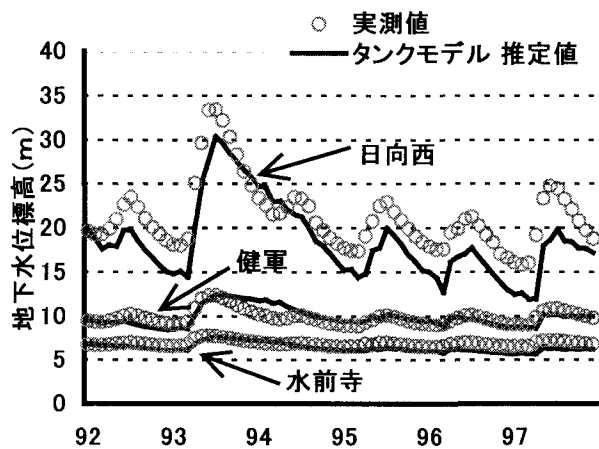


図-8 タンクモデルによる地下水位推定

しかし、日向西は、1994 年 6 月から 1994 年 10 月の水位上昇に対しては、再現出来ずに 1995 年 6 月まで（2 年間）上昇することなく下降し続けている。また、健軍・水前寺は、1993 年 10 月から 1994 年 6 月の水位降下が再現出来ていない。この原因は、観測地点の位置的な条件により地下水流動が、1993、1994 年のような降雨の異常気象に対応出来ていないためと思われる。このことより、健軍より下流域での地下水も、このような降雨の異常気象のときに、側方からの流出が流入より多くなり、降雨の通常期と異なる特性を持っていると思われる。

また、今回は日向西上流域での地下水位データが入手できなかったため、日向西の地下水位推定は、上流域からの流入量をゼロとしたために、実測値に対し全体的に下回った結果となった。

6. まとめ

本研究は、地下水位変動の要因である蒸発散量を除去した降水量、水田からの涵養、地下水側方流動方向での流入出から、タンクモデルを使い地下水位を推定した。

その結果、熊本地域の主要な湧水地点上流での地下水位変動タンクモデルの解析によって、水位上昇下降のパターンをほぼ再現した。最上流タンク（第 1 段タンク）より上流域での地下水位データの入手が困難なことから、地下水側方流動の流入量をゼロとしたため、最上流地点（日向西）地点の地下水位の推定値は、実測値に対し全体的に下回った結果となった。

また、降雨と地下水流動の地下水位変動への影響は、完全に分離評価していない。この影響による誤差も多いものと思われる。

本論文は、水田涵養評価、表面流出評価、有効空隙率評価などの各パラメータには実測データを用いている。この実測データには、降雨や地下水流動の影響が全て入っているため、今後は、その影響を分離して、詳細に検討する必要がある。

謝辞

本研究をすすめるにあたって、熊本市水保全課より貴重なデータを頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 熊本県・熊本市：平成 6 年度 熊本地域地下水総合調査報告書。
- 2) 桐山 貴文、市川 勉、星田 義治：蒸発を考慮した地下水位と湧水量の推定、九州東海大学紀要、工学部、第 24 号、1997。
- 3) 末包 昭彦、榎根 勇：熊本平野における降雨に対する地下水位の応答、地理学評論、53-10、pp666～pp671、1980。
- 4) 水文・水資源学会：水文・水資源学会ハンドブック、朝倉書店。
- 5) 榎根 勇：水文学、大明堂、1980。

(1999.9.30 受付)