特集号論文

宮崎市における地表面の被覆状況変化に伴う不圧地下水位の低下

杉尾 哲*・衛藤美佳*・今山 清*・出口近士*・A. SUHARYANTO**

Fall of Unconfined Groundwater Level Caused by Change of Ground Cover Condition in Miyazaki City

Satoru SUGIO*, Mika ETO*, Kiyoshi IMAYAMA*,
Chikashi DEGUCHI* and A. SUHARYANTO**

Abstract

In the center part of Miyazaki City, urbanization is advanced. On the other hand, the observed unconfined groundwater level gradually falls though there is no falling tendency to precipitation. The fall of the groundwater level shows that the hydrological cycle has been changed due to urbanization. However, the relation between the change in the ground cover condition and the change of the groundwater level has not been clarified analytically.

In the present study, it was examined to prove the fall of the groundwater level in the center part of Miyazaki City, which originated in the change of the ground cover condition, by using the percent imperviousness of the area and by the modified tank model. The change of unconfined groundwater level was analyzed for the period from 1982 to 1996 when the percent imperviousness was measured. As a result, it was confirmed that fall of the unconfined groundwater level during the period can be explained by changing only percent imperviousness and using same tank parameter.

Key Words: unconfined groundwater level, urbanization, ground cover condition, percent imperviousness, tank model

* 宮崎大学工学部 (

e-mail:)

** Brawijaya University, Faculty of Engineering ()

要 旨

宮崎市の中心部においては都市化が進んでいる。一方、降水量の減少傾向はないにもかかわらず、観測された不圧地下水位は徐々に低下している。この不圧地下水位の低下は、都市化によって水循環が変化していることを示すものである。しかし、宮崎市における地表面の被覆状況の変化と地下水位変動の因果関係は解析的に明らかにされていない。

そこで本論文では、宮崎市中心部の不圧地下水を対象にして、修正したタンクモデルと不浸透面積率を用いて、不圧地下水の水位低下が地表面の被覆状況の変化に起因することの立証を検討した。不浸透面積率が測定されている1982年から1996年までの期間について不圧地下水の変動が解析された。その結果、同一のタンクパラメータを用い、不浸透面積率だけを変えることで、この期間の不圧地下水の水位低下を説明できることが確かめられた。

キーワード：不圧地下水、都市化、地表面の被覆状況、不浸透面積率、タンクモデル

1. はじめに

わが国においては、今世紀後半以降の都市への人口集中に伴う急速な都市域の拡大が進んでいる。その結果、都市域の水循環が部分的に損なわれ、都市河川流量の不安定化や湧水の枯渇、生態系の劣化など様々な障害が生じている(虫明ほか、1987)。宮崎市においても都市域の拡大は例外ではなく、近年は特に中心部の高密度化が進んでいる。

一方で、宮崎市の中心部で観測された過去20年間の地下水位のデータからは、不圧地下水位に低下傾向が見られる。不圧地下水位が低下する原因は水収支の不均衡であり、一般的には地下水揚水量の増加と地下水かん養量の減少が考えられる。ここに、地下水かん養については、地表面の被覆状況のほか、地形、地質、水域からの供給などの多くの要因が関係する。これまでの都市化による地下水かん養への影響については、丘陵地を対象に都市流域と自然流域での水循環を対比させた安藤(1979)、安藤・虫明・高橋(1981)の研究などがあり、自然流域に比べて都市流域の地下水かん養が少なくなっていることが明らかにされている。しかし、都市化の進行に伴う地下水かん養への影響を定量的に明らかにするには、同一地点での地下水状況の経年変化を解析的に検討する必要がある。

そこで本論文では、宮崎都市域の不圧地下水を対象にして、都市化の進行に伴う過去の地下水かん養状況の変化を不浸透面積率(出口・杉尾、1993)の変化で表現して不圧地下水位の変動を解析することによって、宮崎市中心部での不圧地下水位の低下の原因が都市化に伴う地表面の被覆状態の変化であることを立証し、地表面の被覆状態が地下水位低下に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを検討した。

2. 研究対象領域と地下水位

大淀川河口を中心とする日向灘沿岸には、広い海岸平野が形成されている。宮崎市街地はその沖積低地の西寄りに位置していて、西側では比高1～3mの明瞭な段丘崖を有している。この段丘崖に沿って大淀川が蛇行して流下し、これと並行するように小松川が北から南へ流れている。

小松川は、流域面積が3.54km²であり、晴天時には環境維持用水を大淀川から揚水して流しているほど自己流量の少ない典型的な都市河川である。これまでのボーリング調査結果を参照すると、小松川流域においては、地表部に約13mの厚さで砂層と砂礫層が分布していて、不圧地下水の帯水層になっている。ボーリング調査時の自然水位から描かれた宮崎市全域の地下水面の等高線図(宮

崎市都市計画課、1998)から一部を取り出して示したものが図1である。各ボーリング調査の実施年および季節が異なるため、厳密には実際の地下水面等高線ではないが、この図から小松川流域の不圧地下水が全体的に西および南に向かって流下している様子が分かる。

この地下水面等高線によると、小松川流域の東側境界と地下水位の尾根の位置が大部分で重なっていて、小松川流域の東側境界を不圧地下水流の境界とみなすことができる。このことから、本論文においては、宮崎市の中心部に位置する小松川流域を研究対象領域とする。

小松川流域においては、古くは不圧地下水が雑用水や農業用水などに利用されていたようであるが、現在では日常的には利用されていない。不圧地下水位の変動は、建設省宮崎工事事務所によって事務所敷地内に設けられた深度13.5mの観測井戸で1975年から観測されている。図2に1977年から1996年までの3月1日と7月1日の不圧地下水位(標高)および宮崎地方気象台で観測された年降水量の変動を示している。年降水量が明瞭な減少

傾向を示していないにもかかわらず、地下水位が次第に低下している傾向が認められる。

3. 不浸透面積率の変動

不浸透面積率は都市化の程度を表す指標の一つで、対象領域の全地表面に対する不浸透性地表面の面積割合で定義される(新井ほか、1987; 出口・杉尾、1993)。小松川流域においては、流域内を14ブロックに分割して、それぞれのブロックでの地表面上の舗装道路と建物、舗装駐車場などの不浸透性地表面が占める面積を航空写真や探査衛星画像を用いて求めて、1962年から1995年までの不浸透面積率を算定している(Suharyantoほか、1997; 花木ほか、1999)。図3に、航空写真から不浸透面積率を算定する際に作成した白黒マップを示す。図中において、黒く塗りつぶした部分が、不浸透性地表面と目視で判定した部分である。本論文においては、小松川流域の不圧地下水が図1に示したように全体的に西および南に向かって流下していて、地下水位が流域の南側で観測されていることから、小松川流域全体の不浸透面積率を解析に用いることとする。図4にその流域全体の不浸透面積率の経年変化を示している。

4. 地下水タンクモデル

4.1 かん養モデル

地下水かん養量の算定には種々の方法がある(平山、1990)。最近は雨水の不飽和浸透流を数値解析する(岡・菅原、1994)方法も用いられている

図1 研究対象領域と地下水面等高線

Fig. 1 Research area and contour lines of groundwater level

図2 小松川流域の不圧地下水位の変動

Fig. 2 Change of unconfined groundwater level in Komatsugawa watershed

図3 不浸透面積率算定用の白黒マップ

Fig. 3 Monochrome maps for calculation of percent imperviousness

図4 小松川流域の不浸透面積率の変化

Fig. 4 Change of percent imperviousness in Komatsugawa watershed

が、解析期間が長い場合には、低水流出解析に用いられているタンクモデル(菅原、1972)が適用される(虫明・岡、1981; 安藤・長畑、1987)。本論文においても、数年間に渡って解析することから、対象領域の不圧地下水には浸透性地表からの降水によるかん養が支配的であると単純化し、タンクモデルを適用することとする。

自然流域を対象とした地下水かん養量の算定では、降水量や蒸発散量などをタンクに与えて、タンク貯留高からかん養量を算定している(藤野、

1998など)。しかし都市域においては、不浸透性地表への降水があり、そのほとんどが雨水排水系統から河道に流出していて、地下水かん養には直接的に寄与しないとみなすことができる。そこで、不浸透面積率を用いて、1段目のタンクを不浸透域タンクと浸透域タンクの2つに分割し、浸透域タンクに与える降水だけが地下水をかん養すると考える。すなわち、図5に示すように、浸透域タンクからの浸透が2段目以降のタンクに流下して地下水をかん養すると考える。

4.2 地下水位の再現計算

タンクモデルによる流出解析では、各タンクの流出孔からの計算流出高の合計と実測流出高が一致するように、タンクのパラメータを同定する。これに対し、本論文においては、3段目のタンク幅を帯水層の有効間隙率に設定して、3段目のタンク内の貯留高が不圧地下水位を表していると考え、この計算地下水位が観測地下水位と一致するようにタンクパラメータを同定する(虫明・岡、

図5 地下水タンクモデルの概要図

Fig. 5 Schematic diagram of groundwater tank model

表1 再現計算期間

Table 1 Periods for simulation

再現期間	計算期間	不浸透面積率 の算定年
1982 年～1984 年	1981 年～1984 年	1983 年
1987 年～1989 年	1986 年～1989 年	1988 年
1990 年～1992 年	1989 年～1992 年	1991 年
1994 年～1996 年	1993 年～1996 年	1995 年

水は一樣であるとして、入力する降水量は解析対象地域内に位置する宮崎地方気象台で観測した日降水量を用いた。このうち、浸透域タンクに与える降水量 R は、日降水量を r 、不浸透面積率を D で表すと、(1)式のように表される。

$$R=r(1-D) \quad (1)$$

(3) 蒸発散量

蒸発散量は可能蒸発散量から次のように推定した。月毎の日平均可能蒸発散量を(2)式の Thornthwaite 式を用いて算定し(Thornthwaite、1948)、日降水量が 5 mm 以下の日は可能蒸発散量を蒸発散量とし、5 mm 以上の日は蒸発散量を 0 とした。

$$E_p=0.533D_0(10t_j/J)^a$$

$$a=0.000000675J^3-0.0000771J^2+0.01792J+0.49239$$

$$J=\sum_{j=1}^{12}(t_j/5)^{1.514} \quad (2)$$

ここに、 E_p ：日平均可能蒸発散量(mm/day)、 D_0 ：可照時間(12hr/day)、 t_j ： j 月の月平均気温(℃)であり、可照時間には北緯32度の値を用いた。

この方法で算定した再現計算期間における年蒸発散量の年降水量に対する割合を示すと図6の様になり、年降水量の30%程度の値を年蒸発散量として与えていることが分かる。このうち、浸透域タンクに与える蒸発散量 E は、日降水量と可能蒸発散量から判定された蒸発散量を E_r で表すと、(3)式のように表される。

$$E=E_r(1-D) \quad (3)$$

1981；杉尾、1987など) (以下において、1 段目のタンクを不浸透域タンクと浸透域タンクに分割し、3 段目のタンク幅を有効間隙率に設定したタンクモデルを地下水タンクモデルと呼ぶ)。ここに、不圧地下水位の変化が都市化に伴う不浸透面積率の変化だけに依存するのであれば、地下水タンクパラメータを固定して、不浸透面積率だけを変化させれば、不圧地下水位の変動を再現できることになる。なお、不浸透域タンクのパラメータは同定しない。

(1) 再現計算期間

地下水位の計算は不浸透面積率が算定されている年をはさんで3年間の地下水位の変動を再現することとし、計算期間内は不浸透面積率を一定値とした。地下水位は1975年から観測されているが、それ以降で不浸透面積率が算定されているのが1983年であることから、再現期間と計算期間を表1の様に設定した。計算では、タンク貯留高の初期値として、1 段目と2 段目には 0 mm を、3 段目には2000mmを与え、これらの初期値の影響を取り除くために、準備計算として1年前から計算を開始している。

(2) 降水量

小松川の流域面積は3.54km²と小さいので、降

なお、浸透域タンクの1段目から蒸発散量を差し引けない場合は、通常のタンクモデルと同様に、2段目のタンクから不足分を差し引いている。

(4) 再現計算結果

本解析においては、同定作業の指標として(4)式に示す地下水位の観測値と計算値の残差2乗和を用い、この値が最小になるように繰り返し計算によって地下水タンクパラメータを同定した。なお、地下水位の観測値に欠測がある場合には、その分は除いて計算している。

$$\alpha = \sqrt{\sum_{i=1}^n (meas._i - anal._i)^2 / n} \quad (4)$$

ここに、*meas.*: 観測地下水位、*anal.*: 算定地下水位、*n*: 日数である。

表2に最終的に得た地下水タンクパラメータを示し、不圧地下水位の計算値を観測値と比較して図7に示している。再現計算結果は、1994年11月～1995年7月の計算水位が観測水位を下回っているほかは、観測水位の降水との応答を精度よく表現できていて、全体的によく一致している。

1994年～1995年の不一致の原因を検討するために、1991年の不浸透面積率を用いて計算したが、最低値を示した1995年3月12日の計算水位は図7の1.07mから1.15mに高く算定されたものの、観測水位の1.44mとの相違は大きかった。そこで、

図6 年蒸発散量の年降水量に対する割合
Fig. 6 Ratio annual evapotranspiration to annual precipitation

モデル以外の外的な条件の変化について調査したところ、小松川の上流域で放水路の新設工事を伴う河川改修事業が1993～1996年度に行われていることが分かった。この事業において、放水路はコンクリート三面張りで建設されたが、小松川の河床は在来土のままであり、放水路取付け部の小松川の約400m区間を拡幅して河床を約1m掘り下げている。また、小松川においては大淀川から揚水した環境維持用水を流下させている。したがって、新たに掘削した河床部分から河川水が漏水して地下水を別途にかん養していたのが1994年11月～1995年7月の時期であり、その後は上流側の河床の泥が掘削部分に次第に堆積して漏水が少なくなって、元のかん養状態に戻ったのであろうと考えられる。

以上のように、計算水位と観測水位に一時期相違が生じているが、1982年から1996年までの全体的な地下水変動はよく再現できていることから、地下水タンクパラメータを固定して、地表面の不浸透面積率だけを変化させることによって、地下水位変動の経年変化を再現する解析手法の妥当性が確認できたと考える。

5. 都市化に伴う不圧地下水位の低下

タンクモデルは線型モデルなので、基本的には都市化に伴って不浸透面積率が増加して(1)式の入力値*R*が減少すれば、それに比例して地下水かん養量が減少して、不圧地下水位が低下することになる。実際の降水量に対して地下水位がどのように変動するかを、以上の地下水タンクモデルを用いて、不浸透面積率を48.5%から53.3%、61.6%、66.1%と変化させて1982年～1984年の不圧地下水位について算定した。その結果を図8に示している。したがって図8は、1982年～1984年当時に以後と同様の不浸透面の拡大が進んでいたと仮定した場合の、不圧地下水位の推定結果を示

表2 同定した地下水タンクパラメータ
Table 2 Identified groundwater tank parameters

<i>K</i> 1	<i>K</i> 2	<i>K</i> 3	<i>K</i> 4	<i>K</i> 5	<i>S</i> 1	<i>S</i> 2
0.5	0.2	0.15	0.17	0.0067	0.3	0.3
<i>F</i> 1	<i>F</i> 2	<i>F</i> 3	<i>F</i> 4	<i>n</i>		
150	50	50	2500	0.125		

していることになる。この結果をみると、本対象領域での不浸透面積率の増加に伴う不圧地下水位の低下は、大まかには、冬から春にかけて顕著に現れて、梅雨期から秋にかけては明確に現れない傾向にあることが分かる。また、顕著に現れる時の地下水位の低下は、不浸透面積率が48.5%から66.1%へ17.6ポイント増加することで0.75m程度にもなることが分かる。

さらに、1982年と1983年の夏季には上昇した地下水位が不浸透面積率によって相違していないのに対して、1982年の梅雨期と1984年は不浸透面積率の増加に伴って地下水位が低くなっている。そこで、2月1日からの90日間とその後の90日間の降水量を求めて、不浸透面積率が48.5%と66.1%の場合の地下水位の差がどのように変化するか

について調べると、表3のようになる。ここに、水位差の変化が負の場合は、90日間に水位差が大きくなること、つまり不浸透面積率の増加に伴って地下水位の上昇が小さくなることを示している。これから、不浸透面積率の増加に伴う冬から夏にかけての不圧地下水位の上昇不足は、3ヶ月間の月降水量が平均してほぼ300mm 以上の場合には現れないが、ほぼ200mm 以下と少ない場合には顕著に現れると推定される。したがって、3ヶ月間の平均月降水量がほぼ300mm 以上の場合には、地表土壌が飽和に近い状態に湿潤化されるために、河川への流出や地下水かん養の状況が、流域の地形や地質などの固有の状態に左右されて、不浸透面積率の増加にあまり関わらなくなるものと考えられる。

図7 地下水位の再現計算結果 (その1)

Fig. 7 Simulated results of unconfined groundwater level (1)

図7 地下水位の再現計算結果 (その2)

Fig. 7 Simulated results of unconfined groundwater level (2)

図8 不圧地下水位の推算結果

Fig. 8 Predicted results of unconfined groundwater level

表3 降水量と地下水位差の比較

Table 3 Comparison between precipitation and difference of groundwater level

年	期 間	期間内の 降水量	平均月 降水量	初期の 水位差	終期の 水位差	期間内 の変化
1982 年	2/1~5/1	564mm	188mm	0.454m	0.752m	-0.298m
1982 年	5/2~7/30	976mm	325mm	0.757m	0.260m	0.497m
1983 年	2/1~5/1	961mm	320mm	0.232m	0.059m	0.173m
1983 年	5/2~7/30	909mm	303mm	0.056m	0.047m	0.009m
1984 年	2/1~4/30	415mm	138mm	0.069m	0.430m	-0.361m
1984 年	5/1~7/29	790mm	263mm	0.432m	0.391m	0.041m

* 水位差は、不浸透面積率が48.5%と66.1%の場合の地下水位の差

図9 地下水流出量の推算結果

Fig. 9 Estimated results of groundwater discharge

6. 不圧地下水と河川水との関係

本論文においては、対象領域の不圧地下水に対して浸透性地表面からの降水によるかん養が支配的であると単純化して地下水位の変動を解析した。しかし小松川からの地下水へのかん養が発生していると考えられる。そこで、地下水タンクモデルの解析結果を用いて、対象領域における不圧地下水と河川水との関係を検討してみよう。

地下水タンクモデルからは流出高も算定される。ここに、不浸透域タンクのパラメータは同定していないので、1段目のタンクからの流出に相当する表面流出については検討できないが、2段目と3段目のタンクからの流出が、河川への中間流出と地下水流出に相当することになる。しかし、これらの流出先は小松川だけとは限らず、大淀川へも流出していると考えられる。1987年からの3年間について算定した2段目と3段目の流出高の総和に河川水位観測点の流域面積 3.03km^2 を乗じ

て算定した流出量を図9に示す。図中には、流量観測を行って求めたH-Q式を用いて小松川水位の日平均値から算定した河川流量と一緒に示している。

上述したように晴天時には大淀川から揚水した環境維持用水が流下しているため、小松川の河川流量はほぼ一定している。これに対して算定流出量は、ほぼ全期間で河川流量より少ないが、大きな降雨の発生時に河川流量を上回ってゆっくりと減少している。この降雨時に、河川流量もいっしょに増加しているが、すぐに減少していて、減少傾向が算定流出量と全く異なっている。地下水が小松川へ豊富に流出しているのであれば河川流量もゆっくりと減少すると考えられる。ここに、小松川は掘り込み河川であるが、全延長で両岸にブロック護岸等が設けられており、河床には泥が堆積している。これらを考慮すると、通常の河床状態の場合には、地下水から小松川への流出および小松川から地下水へのかん養はきわめて少ないと

考えられる。

7. おわりに

以上のように、宮崎市中心部の不圧地下水を対象にして、都市化に伴う過去の地下水かん養状況の変化を不浸透面積率の変化で表現し、1段目に浸透域タンクを持つ地下水タンクモデルによる地下水位変動の解析を行って、宮崎市中心部での不圧地下水位の低下の原因が都市化に伴う地表面の被覆状態の変化であることを立証し、不浸透面積率の変化が地下水位低下に及ぼす影響を定量的に明らかにした。

小松川流域を対象とした地下水位低下についての検討結果をまとめると、以下のようである。不浸透面積率の増加に伴う不圧地下水位の低下は、大まかには、冬から春にかけて顕著に現れて、梅雨期から秋にかけては明確に現れない傾向にある。また、顕著に現れる時の地下水位の低下は、不浸透面積率が48.5%から66.1%へ17.6ポイント増加することで0.75m程度にもなる。さらに、不浸透面積率の増加に伴う冬から夏にかけての地下水位の上昇不足は、3ヶ月間の月降水量が平均してほぼ300mm以上の場合には現れないが、ほぼ200mm以下と少ない場合には顕著に現れる。

本論文において確認した解析手法は、近年の不圧地下水位の変動から地下水タンクパラメータを同定し、過去の航空写真や探査衛星画像から不浸透面積率を測定することによって、かん養状態が同じ場合の過去の不圧地下水位を再現することに利用できる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、建設省九州地方建設局宮崎工事事務所から地下水位と河川水位の観測結果を提供していただいた。また、文部省科学研究費(基盤研究(C)(2)(課題番号09650569))の補助を受けた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 新井 正・市川 新・新藤静夫・吉越昭久(1987): 都市の水文環境、共立出版、8~14.
- 安藤義久(1979): 多摩丘陵の小河川の地下水流出に対する都市化の影響、地下水学会誌、21-3、91~99.
- 安藤義久・虫明功臣・高橋裕(1981): 丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響、土木学会第25回水理講演会論文集、197~208.
- 安藤義久・長畑範明(1987): 台地の湧水の保全に関する研究、第3回水資源に関するシンポジウム前刷集、565~570.
- 岡 太郎・菅原正孝(1994): 都市の水環境の新展開、技報堂.
- 菅原正巳(1972): 流出解析法、共立出版.
- 杉尾 哲(1987): 海岸地盤における地下水流動の数値解析、土木学会海岸工学講演会論文集、34、207~211.
- 出口近士・杉尾 哲(1993): 衛星画像を利用した都市域の不浸透面積率の推定、日本地下水学会誌、35-1、1~10.
- 花木俊幸・A. Suharyanto・杉尾 哲・出口近士・今山清(1999): 都市河川流域における雨水浸透施設による洪水流出制御の検討、水工学論文集、43、37~42.
- 平山利晶(1990): 地下水数値解析法(5) 1-4. 有限要素法の広域的な地下水流動解析への応用、地下水学会誌、32-4、273~284.
- 藤野和徳(1998): 地下水位と地下水パラメータの推定、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、第2部、100~101.
- 宮崎市都市計画課(1998): 宮崎市地盤図、105.
- 虫明功臣・岡泰道(1981): 都市化流域における不圧地下水涵養機構、土木学会第36回年次学術講演会講演概要集、651~652.
- 虫明功臣・石崎勝義・吉野文雄・山口高志編著(1987): 水環境の保全と再生、山海堂、11~25.
- A. Suharyanto, S. Sugio, C. Deguchi, M. Kunitake (1997): Simulation of flood control by rainwater storage facilities in urbanized watershed、土木学会論文集、572/II-40、95~104.
- C.W. Thornthwaite (1948): An approach toward a rational classification of climate, Geograph. Rev., 38, 55~94.
- (受付: 1999年5月27日、受理: 1999年10月2日)