

風化花崗岩地帯における 地下水涵養モデルのパラメータの特性

PARAMETERS OF THE GROUNDWATER RECHARGE MODEL AT THE
WEATHERED GRANITE SHALLOW AQUIFER

堤 敦¹・才田進²・神野健二³

Atsushi TSUTSUMI, Susumu SAITA, and Kenji JINNO

¹正会員 フジコンサルタント株式会社 (〒840-0857 佐賀市鍋島町大字八戸3197-2)

²正会員 八千代エンジニアリング株式会社九州支店技術第一部 (〒810-0062 福岡市中央区荒戸2-1-5 大濠公園ビル)

³正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境システム科学研究センター (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

When predicting the impact on the hydrological environment by land development, the surface runoff and groundwater recharge rates are the most important quantities. The change in land use leads to an increase in the flood peaks and a decrease in the rainwater infiltration into the underground. In order to assess the effect of the alteration on the groundwater recharge rate in the weathered granite area, the response of the groundwater level is studied at several observation wells, which are linked with the quasi-three dimensional groundwater flow. As a result, it is found that the maximum surface runoff coefficient, F_{∞} , is the most affective parameter followed by the shape parameter, $(r)_{1/2}$, used in the surface runoff coefficient as a function of rainfall intensity. Besides, it is also found that a change in the ground surface elevation affects the soil water loss height R_0 , which is used in the recharge model. In conclusion, the present approach is useful for predicting the change in the hydrological processes of the land use alteration in the weathered granite area.

Key Words : groundwater recharge model, land use alteration, weathered granite, surface runoff coefficient

1. はじめに

開発に伴う土地利用の変化により浸透域が減少する結果、河川への直接流出量が増大する一方で、地下水への涵養量が減少する。従って、治水や水資源保全対策のためには、開発行為がこれらの水文過程に及ぼす様々な影響やその規模を予測することが非常に重要な課題となる。しかしながら、開発に伴う様々な水文環境の変化は、個々の水文素過程と複雑に絡み合っており、一概に開発と言ってもその影響を予測することは容易ではない。

著者等は、これまで不圧地下水への雨水の浸透域となっている地域の開発が周辺域の水循環機構に及ぼす影響を予測するためのモデルについて検討してきた^{1), 2), 3), 4)}。この中で提案している地下水涵養モデルは実蒸発散量や河川等への直接流出量を計算する機能を有し、併せて、雨水の地下への浸透量と準3次元地下水流動モデルに連結される。このうち、地下水涵養モデルの中で用いられ

るパラメータは降雨初期の地下水位上昇過程における水位観測のデータから同定される。

これまでの研究で、降雨に対する地下水位の変動、地下水中への塩水の侵入状況、更に、流域規模での地下水一表流水系の水収支に関する現況の再現が可能であることや、遮断蒸発あるいは地下水面からの蒸発機能をモデルに取り込むことにより、実蒸発量の分布状況の推定についても検討している。

本報では、これまでに解析した地域と福岡市に近接するO市の自然流域と開発流域において観測された地下水位と河川流量のデータを利用して、提案した地下水涵養モデルで用いられているパラメータが開発によってどのように変わるかについて検討する。

2. 研究対象地の地形・地質の概要

九州大学新キャンパス建設地は福岡市西部の元岡地区

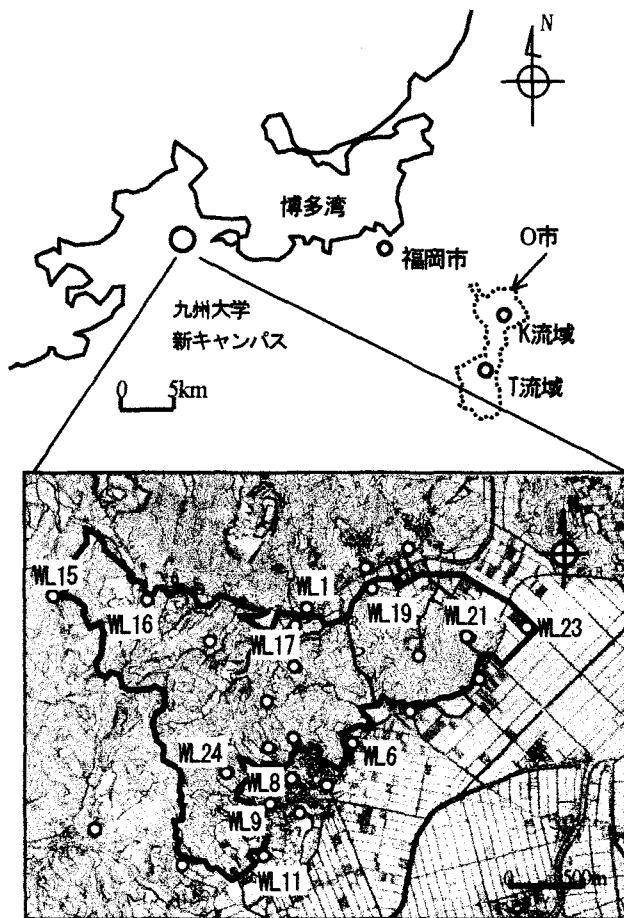


図-1 研究対象地域の概要

に位置する。既に、建設用地のかかなりの箇所で切土あるいは盛土工事が進められており、一部では建築物の建造も進められている。K流域は、福岡市南部のO市において、その東北部に位置する小連山の麓の自然地に属し、周囲にはまだ開発がほとんど及んでいない。これに対して、T流域はO市の南西部に開発された住宅地の一角に当たり、その一帯は家屋が密集し、路面のほとんどは舗装されている。新キャンパス建設地に比べ、高密度に開発された流域での流出特性は自然流域に比して対照的な事例として比較検討する意義があると考え、O市での観測結果も解析する。

新キャンパス建設地は、一部を除いて、糸島型花崗岩と呼ばれる花崗岩の分布域である。掘削工事の結果、事前地質調査で推定されたように、地表面下5～10m付近まで風化が著しく進んでおり、マサ土化していることが確認されている。一方、K流域とT流域はともに早良型花崗岩と呼ばれる同系統の花崗岩の分布域であるが、これは新キャンパス建設地に分布する糸島型花崗岩よりも地質年代が多少新しい地層である。

図-1に新キャンパス建設地とK流域およびT流域との位置関係を示すとともに、新キャンパス建設地内の地下水位観測地点の場所を示す。なお、流域面積はK流域が約0.2km²、T流域が約0.07km²であり、新キャンパス建設地の面積約2.75km²に比べると非常に小さい。

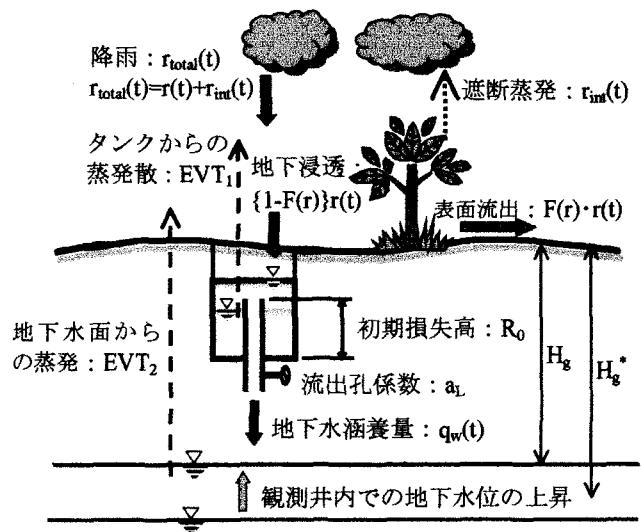


図-2 地下水涵養モデルの概念

3. 地下水涵養モデルの原理

地下水涵養モデルの原理については前報で詳細に説明しているので、ここではその概要を示す。図-2はモデルの概念を示したものである。森林では、降雨量 $r_{total}(t)$ の一部は遮断蒸発量(=降雨遮断量) $r_m(t)$ として大気中に戻されるため、地表面での降雨強度は $r(t) = r_{total}(t) - r_m(t)$ になる。降雨遮断がない森林以外の場所では、 $r(t) = r_{total}(t)$ になる。ここで、 t は時間を表す。図のように、 $r(t)$ のうち、 $F(r) \cdot r(t)$ は直接河川等に流出し、 $\{1-F(r)\} \cdot r(t)$ は地下に浸透する。タンク内には高さ R_0 のパイプが設けられており、地下浸透成分は一時的に貯留され、水深が R_0 を超えると地下水への涵養が始まる。なお、タンク内からの蒸発散量として $EVT_1(t)$ 、また、地表面と地下水面との距離 H_g が H_g^* より小さい地点では、タンクが空の時点に限って、地下水面からの蒸発散量として $EVT_2(t)$ が考慮される。なお、 H_g^* は地下水位がこれよりも低下した場合に、地下水面からの蒸発散が生じない深さである⁵⁾。

地下水涵養モデルの基礎式は下記のとおりである。このうち、式(1)はタンク内の水位 $h_w(t)$ の変化を表すものであり、式(2)は地下水への涵養量 $q_w(t)$ を表すものである。

$$\frac{dh_w(t)}{dt} = \{1-F(r)\} \cdot r(t) - q_w(t) - EVT_1(t) \quad (1)$$

$$q_w(t) = a_L \cdot \{h_w(t) - R_0\} \times Y[h_w(t) - R_0] \quad (2)$$

ここに、 $Y[h_w(t) - R_0]$ は $h_w(t) \geq R_0$ のとき1、 $h_w(t) < R_0$ のとき0をとるステップ関数である。

一方、降雨開始直後で地下水の水平流動が始まる前の観測井内の水位 $h_f(x, y, t)$ の上昇については、地盤の有効空隙率 n_e と式(3)の関係が成り立つ。

$$\frac{\partial h_f(x, y, t)}{\partial t} = \frac{q_w(t)}{n_e} \quad (3)$$

また、表面流出率 $F(r)$ については降雨強度によって変化すると考え、式(4)を適用する。

$$F(r) = \frac{r(t)}{r(t) + (r)_{1/2}} \cdot F_{\infty} \quad (4)$$

ここに、 $(r)_{1/2}$ は $F(r)=F_{\infty}/2$ となるとき $r(t)$ の値である。また、 F_{∞} は $F(r)$ の最大値であり、これは地被条件に依存して決まる値と考え、技術資料等⁶⁾に掲載されているものを使用する。

このモデルを使って地下水涵養量を計算する場合、式(1)～(4)中の a_L 、 R_0 、 n_e と $(r)_{1/2}$ が未知数である。これらの未知数の推定方法については前報で述べている。

4. K流域およびT流域の地下水涵養モデル

前報¹⁾で説明しているように、地下水涵養モデルのパラメータは降雨量のデータのみで同定が可能である。しかしながら、T流域のように路面が舗装されている場合、降雨に対しては河川流量の方が鋭敏に反応する。そこで、降雨量と河川流量の観測データを使って、最初に、表面流出率 $F(r)$ のパラメータである $(r)_{1/2}$ を同定する。続いて、地下浸透量 $\{1-F(r)\} \cdot r(t)$ と地下水位上昇高 (Δh) との関係から R_0 、 n_e 、 a_L の値を同定する。K流域についても、地下水位のほか、河川流量が観測されているので、同様の方法でパラメータの同定を行う。ところで、K流域の大半は森林であるため、地下浸透量の算定に使用する $r(t)$ については降雨遮断を考慮する。この場合、降雨遮断率は前報³⁾での検討結果および他流域における事例⁷⁾を参考に20%とする。すなわち、雨量強度 $r_{\text{total}}(t)$ のうちの20%を降雨遮断量として、 $r_{\text{total}}(t)$ からそれを差し引いた値を $r(t)$ とする。

地下水涵養モデルのパラメータは地下水位観測地点毎に同定が可能である。しかしながら、T流域およびK流域とも小流域であり、また、観測地点が1箇所ずつであるため、それぞれ1つずつのモデルで代表させる。

(1) $(r)_{1/2}$ の同定

まず、前報⁴⁾で説明した図解法を使って、検討流域の河川流量から直接流出量を分離し、そのハイドログラフを求める。次に、 $(r)_{1/2}$ の値を変化させながら、 $F(r) \cdot r(t)$ を算定すると、その値毎に直接流出量のハイドログラフが得られる。これらのうち、図解法によるハイドログラフに最も近似する場合の $(r)_{1/2}$ の値を表面流出率 $F(r)$ のパラメータと考える。

この方法で $(r)_{1/2}$ の値を同定するには式(4)中の F_{∞} の値が必要である。前述したように、 F_{∞} については、技術資料に掲載されている値を用いることを基本としている。K流域のような緩やかな山地の場合は $F_{\infty}=0.3$ 、T流域のような密集した住宅地の場合は $F_{\infty}=0.8$ となる。ところで、

降雨量と河川流量のデータから表面流出率を推定する場合、 F_{∞} と $(r)_{1/2}$ の2つを未知数とすることができる。そこで、本報では、技術資料の F_{∞} の値を用いて $(r)_{1/2}$ の値を同定する場合をcaseAとして、また、 F_{∞} と $(r)_{1/2}$ の両方を未知数として同定する場合をcaseBとして検討する。

次に、河川流量の観測値によれば、K流域では降雨に対して河川流量のピークが1時間程度遅れている。一方、T流域では遅れは見られない。これは、K流域の面積が 0.2km^2 とT流域の 0.07km^2 の約3倍であるためである。このため、直接流出量の時間変動を計算する場合、T流域については時間遅れを考慮しないが、K流域については考慮する必要がある。そこで、K流域についてはタイムエリア法⁹⁾を用いてハイドログラフを求める。すなわち、K流域の主流路長はT流域の4倍程度であるので、先ず、主流路を中心に到達時間間隔が15分間の4つの等到達時間域に区分し、各等到達時間域からのハイドログラフを重ね合わせる。また、本報では1時間雨量を用いて検討しているため、その間における各到達時間内の雨量強度は一定と仮定し、1時間雨量強度を4分割して求める。

図-3は、2000年6月8日の降雨に対して、図解法で推定した直接流出量（以後、「直接流出観測値」と呼ぶ）とcaseAのパラメータを用いて推定した直接流出量を比較したものである。また、図-4はcaseBの推定結果と比較したものである。これらの図によれば、K流域では、式(4)による計算値が直接流出観測値を多少上回る傾向が見られるが、かなり近似した結果が得られており、直接流出量の再現は可能と考える。

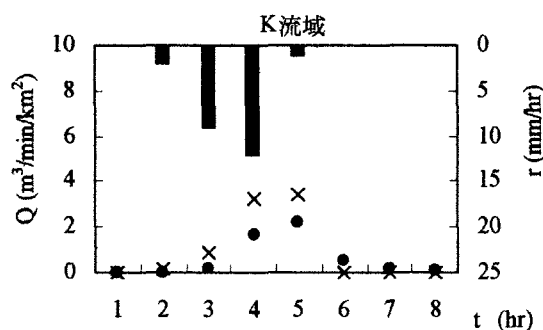
(2) R_0 、 n_e と a_L の同定

検討する各降雨イベントについて、その総降雨量 Σr から前項で推定した直接流出量 $\Sigma F(r) \cdot r$ を引いて地下浸透量 $\Sigma \{1-F(r)\} \cdot r (= \Sigma r_e)$ を求める。これに対応する地下水位上昇高を Δh とする。 R_0 の値は地下水位の上昇が見られない降雨イベントの中で最も大きい降雨量に等しいとする。また、検討する各降雨イベントは一般に数時間から十数時間と短いため、この間の蒸発散量は無視できるものとする。従って、 $\Sigma r_e - R_0$ が地下水涵養量の総量となるので、 $(\Sigma r_e - R_0) / \Delta h$ を算定し、その平均値を有効空隙率 n_e とする。以上の検討から $(r)_{1/2}$ 、 R_0 、 n_e の値が求められる。

次に、 a_L の値はRMSE(Root Mean Square Error, 式(5))を評価関数として決定する。すなわち、 a_L に対して様々な値を仮定し、地下水位の上昇高 (h_{cal}) を計算する。これらと観測による上昇高 (h_{obs}) から評価関数 J が最小になる a_L の値を求める。

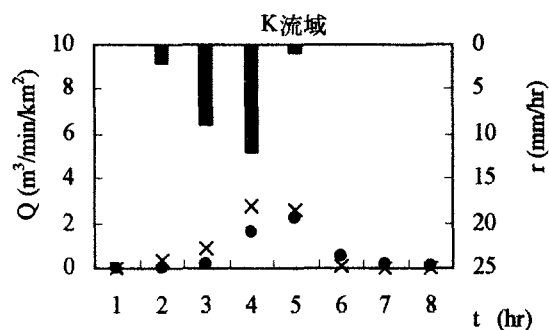
$$J = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{h_{\text{obs}}(t) - h_{\text{cal}}(t)\}^2}{N}} \quad (5)$$

ここに、 N は観測時間数である。



■雨量 ●直接流出観測値 ×式(4)による計算値

図-3 直接流出量の時間変動(2000/6/8)
caseAの場合



■雨量 ●直接流出観測値 ×式(4)による計算値

図-4 直接流出量の時間変動(2000/6/8)
caseBの場合

表-1 地下水涵養モデルのパラメーター一覧表

地区名	井戸番号 (流域名)		H_g (m)	n_e (-)	α_L (1/hr)	R_0 (mm)	$(r)_{12}$ (mm/hr)	F_∞		土地利用	
九州大学新 キャンパス	WL-1		2.24	0.075	0.22	7.0	3.8	0.3	0.3	宅地Ⅰ	
	WL-6		2.59	0.140	0.09	13.0	2.5			宅地Ⅰ	
	WL-8		1.70	0.200	0.17	14.0	1.6			宅地Ⅰ	
	WL-9		3.20	0.225	0.30	19.0	4.5			宅地Ⅰ	
	WL-11		2.89	0.280	0.20	12.0	4.7			宅地Ⅰ	
	WL-15		1.39	0.129	0.44	15.0	5.3	0.3	0.3	裸地	
	WL-16		0.81	0.125	0.11	9.0	5.5			裸地	
	WL-21		1.28	0.080	0.43	7.0	2.5			裸地	
	WL-17		2.06	0.090	0.51	14.0	8.5	0.2	0.2	休耕田	
	WL-19		1.11	0.175	0.39	7.0	9.0			休耕田	
	WL-23		0.27	0.175	0.19	5.0	5.7			休耕田	
	WL-24		4.96	0.225	0.13	17.0	6.6	6.6	0.3	0.3	林地Ⅰ
O市	K流域	caseA	8.89	0.34	0.15	32.9	16.0	16.0	0.3	0.3	林地Ⅱ
		caseB		0.32	0.12	32.7	1.5	1.5	0.1	0.1	
	T流域	caseA	4.22	0.26	0.17	13.6	4.5	4.5	0.8	0.8	宅地Ⅱ
		caseB		0.27	0.11	10.6	0.5	0.5	0.55	0.55	

5. 土地利用の変化と地下水涵養モデルとの関係

表-1は、K流域およびT流域で同定された地下水涵養モデルのパラメータと新キャンパス建設地内の各地下水位観測地点での同定結果を対比したものである。表中には各地点の土地利用状況も示している。

なお、T流域は家屋が非常に密集しており、新キャンパス建設地周辺の住宅地とは密集度が明らかに異なるた

め、これらの図表では、宅地IIとして区分している。

一方、K流域は地下水位がGL-9m付近にあり、新キャンパス建設地内の地下水位観測地点のGL-1～-4mに比べてかなり深く、地下水涵養モデルのパラメータにかなりの違いが見られるため、林地IIとして区分している。

図-5の上の図は $(r)_{12}$ の値について、下の図は F_∞ の値について表-1に示したパラメータの同定結果を基に、土地利用別の平均値を示している。地下水涵養モデルの原理から判るように、同じ強度の雨量に対しては、 F_∞ の値が大きいくほど、また、 $(r)_{12}$ の値が小さいほど直接流出

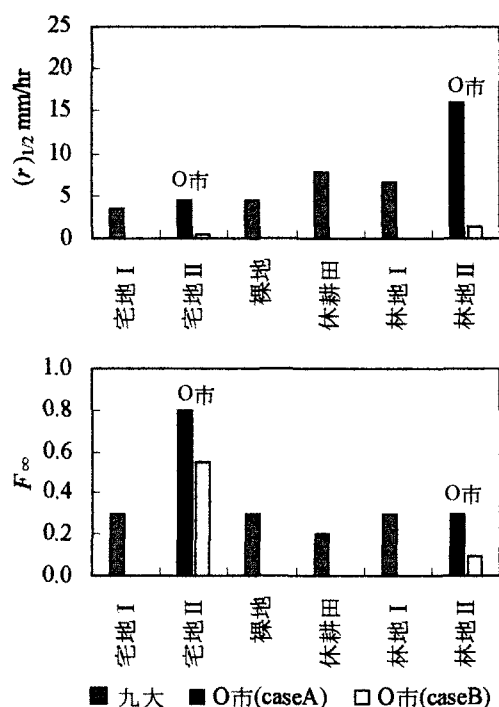


図-5 (r)_{1/2}およびF_∞の比較

宅地 I : まばらな宅地
 宅地 II : 密集した宅地
 林地 I : 地下水面が浅い林地
 林地 II : 地下水面が深い林地

量は多くなる。図-5によれば、T流域のF_∞は0.55 (caseAの検討では0.8に設定している) と、他の土地利用の0.2~0.3 (caseBの検討では林地IIのF_∞は0.1) に比べて明らかに大きな値に同定されており、降雨が地下に浸透しにくい土地利用形態になっていることを反映している。これに対して、(r)_{1/2}の値については、宅地Iと宅地IIで大きな違いは見られない。ただし、林地IIの(r)_{1/2}の値は林地Iに比べてかなり大きく、前者の方が、降雨は地下に浸透しやすいと考えられる。これについては、地表面における花崗岩の風化の程度の違いによるものと考えられ、K流域の地表面の方が風化の程度が強く、降雨が浸透しやすい状態にあることが考えられる。

図-6はH_gとR₀との関係を示したものである。図から、両者の関係は線形関係に近いことが判る。降雨による地下水への涵養が始まるためには、地表面と地下水面との間の不飽和部が十分に湿っていないといけない。ところで、H_gが大きい地点ほど不飽和部の間隙のボリュームは大きい。この場合、不飽和部を十分に湿らせるのに必要な降雨量は多くなる。図の関係はこのようなメカニズムによるものと考えられる。このことは、自然流域を切土して開発した場合、H_gの値が小さくなると同時に、地下水涵養モデルのR₀の値が小さくなり、降雨の地下水への涵養機構が変化することを示している。

6. O市におけるK流域とT流域の地下水位変動の検討

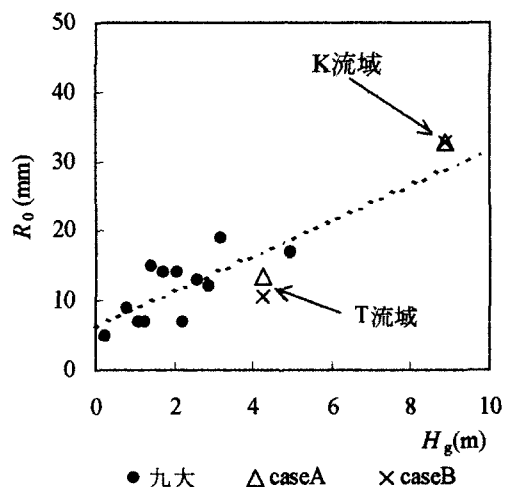


図-6 H_gとR₀との関係

ここでは、比流量が著しく異なるO市のK流域とT流域で降雨に対する地下水位の応答特性について検討する。K流域とT流域は約5km離れているが、両流域の地形・地質条件を比べると、K流域を開発前の自然流域として考え、それを開発した場合、その水循環機構はT流域のように変化することが予想される。そこで、両流域の地下水涵養モデルのパラメータの特性を基に、降雨に対する地下水位の応答パターンがどのように変化するかを検討する。

前項の検討結果から、開発に伴って地下水涵養モデルのパラメータのうち、①F_∞の値を大きくする場合、②切土高さが大きくH_gが小さくなることを想定し、F_∞に加えて、R₀の値も小さくする場合、また、③地表面の状態が開発前よりも締まった状態に変化することを想定し、(r)_{1/2}の値を小さくする場合のそれぞれについて、パラメータの同定に使用した降雨イベントを対象に、K流域における地下水位上昇の変化を予測する。

(1) F_∞のみを大きくする場合

図-7に2002年5月15日の降雨に対するT流域とK流域における水位上昇高の観測値と各ケースの計算結果を示す。図中のcase0は、表-1のK流域 (caseA) の計算結果である。case1はF_∞を0.3から0.8に大きくした場合であるが、F_∞を大きくしているにもかかわらず、地下水位の上昇高さは大きくなっている。これは、降雨遮断がある林地から遮断がない宅地のように土地利用形態が変化する場合には、表面流出率が大きくなっても涵養量が増大することもあることを示している。

(2) F_∞を大きくし、R₀を小さくする場合

T流域の地下水位はGL-4m付近であり、K流域のGL-9mに比べてかなり浅い。図中のcase2とcase3は、図-6に示したR₀とH_gとの関係に従い、case1の条件のうち、R₀の値をそれぞれ1/2と1/3にした場合の変化を示している。

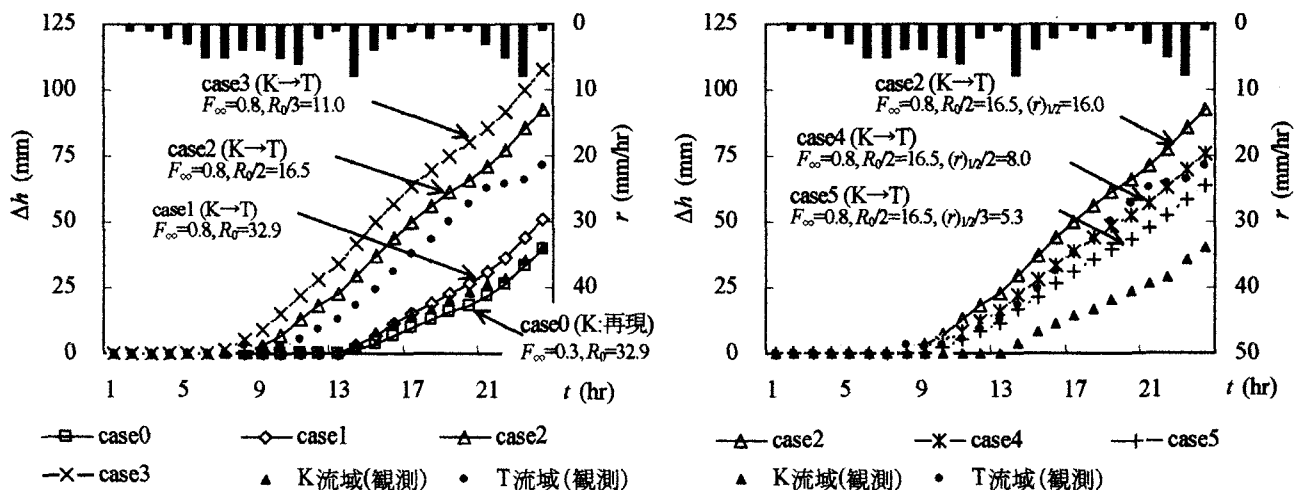


図-7 K流域での開発を想定した場合の地下水位上昇予測計算

両流域の H_g の比率は1.2に近いが、図のように、 R_0 の値をcase1の1/2にした場合（case2）の方がT流域の地下水位の上昇に近づいている。

(3) $(r)_{1/2}$ の値も小さくする場合

図中のcase4とcase5は、case2の条件のうち、 $(r)_{1/2}$ の値をそれぞれ1/2と1/3にした場合を示している。K流域の $(r)_{1/2}$ を1/2にし場合、T流域の地下水位の変化に近づいている。前述したように、地表面の締めり具合が変化した場合、 $(r)_{1/2}$ の値も変化することが考えられる。つまり、K流域で切土が行われ、地表面に現在よりも締まった状態の地層が現れる場合には、この検討結果のように、 $(r)_{1/2}$ の値も小さくすることが考えられる。

7. おわりに

本報では、地下水涵養モデルの開発後の地下水位変動の予測に対する適用性について検討した。その結果、次のような知見が得られた。

- (1) 地表面と地下水面との距離 H_g と地下水涵養モデルの初期損失高 R_0 との間には線形関係が見られる。
- (2) 切土等によって H_g が小さくなる場合には、 R_0 を小さくする必要がある。その場合、開発前後での H_g の比率を目安に R_0 を決めるのが適当である。
- (3) 土地利用の変化によって、降雨遮断がある状態からない状態に変化する場合には、表面流出率 $F(r)$ の最大値である F_∞ が大きくなっても、地下水涵養量が増える場合がある。
- (4) 地表面が締まった状態に変化する場合には、 $F(r)$ のパラメータである $(r)_{1/2}$ が小さくなる。
- (5) O市におけるT流域の地下水位上昇は、 F_∞ を技術指針に従って選定する場合、K流域の R_0 と $(r)_{1/2}$ をとともに1/2程度にすれば、ほぼ再現できることが判った。

なお、検討に使用したデータ量が少ないため、更に、データを付け加え検討する必要がある。この点は、今後の課題としたい。

謝辞：本研究を行うにあたり貴重な資料の提供を頂いた九州大学移転推進室の方々に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 堤敦, 神野健二, 大枝良直：地下水位上昇期の観測値を用いた雨水の涵養モデル検討, 水工学論文集, 第45巻, pp. 367-372, 2001.
- 2) 堤敦, 神野健二, 森牧人：雨水涵養モデルによる準3次元地下水流動解析と流域の水収支評価, 水工学論文集, 第46巻, pp. 187-192, 2002.
- 3) 堤敦, 神野健二, 森牧人, 広城吉成：遮断降雨を考慮した雨水の地下水涵養モデル, 水工学論文集, 第47巻, pp. 277-282, 2003.
- 4) 堤敦, 神野健二, 森牧人, 広城吉成：表流水-地下水系の水循環機構の解析—九州大学新キャンパス建設地を対象として—, 土木学会論文集No.747/II-65, pp. 29-40, 2003.
- 5) Mary P. Anderson, William W. Woessner (藤縄克巳 監訳)：地下水モデル, 共立出版, p. 77, 1994.
- 6) 文部省大臣官房文教施設部技術課：平成9年3月 文部省 土木設計資料, p. 47, 1997.
- 7) 小川滋：森林場における水（量と質）・エネルギー循環の定量化と総合モデルの構築（研究課題番号 10306009）, 平成10年度～平成12年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）研究成果報告書, pp. 70-73, 平成13年3月.
- 8) 福嶋嘉宏, 鈴木雅一：山地小流域を対象とした長・短期両流出モデル, 水資源研報7, pp. 35-52, 1987.
- 9) 土木学会：水理公式集 平成11年版, p. 361, 1999.

(2003. 9. 30受付)