

東京大学大学院 学生員 安藤義久
 東京大学生産技術研究所 正会員 虫明功臣
 東京大学工学部 正会員 高橋 裕

1. はじめに

従来、丘陵山地における地下水流出機構に関する研究においては、地下水流出の低減特性からのアプローチが支配的である。本稿では、観点をかえて、丘陵地の不圧地下水の流出機構を地下水貯留量との関係でとらえることを試みる。

2. 丘陵地の不圧地下水の貯留量と流出量の関係式

丘陵地の小河川の流域として、図-1. に示すようなモデル化した流域を考える。即ち、不透水層の上に不圧地下水が存在し、この不圧地下水からの流出が河川の地下水流出となっている。河道の両側にある帯水層の厚行はして幅は B である。不透水層は水平とする。

図-1. のモデル化した流域において単位幅のモデルを図-2. に示すように考える。図-2. においては、河道を原点にとり、水平に x 軸をとる。 $x=L$ は不圧地下水の流域界に相当する。また、ここでは地下水の流動が平衡状態にあると仮定して、地下水面は図-2. の中で $h = f(x)$ という x だけの関数とする。 $x=L$ における地下水位を h_L とし、 $x=0$ における地下水位を h_0 とかくと、丘陵地の場合には h_L に比べて h_0 は無視しうる程小さいので、ここでは $h_0=0$ とおくことにする。

単位幅当りの地下水流出量を q 、地下水流動部の透水係数を k 、帯水層厚を h とかくと、ダルシーの法則より、次式が成り立つ。

$$q = k \frac{dh}{dx} h \quad \dots\dots ①$$

①式の両辺を積分すると、

$$\int q dx = k \int h dh$$

$$qx = \frac{k}{2} h^2 + C$$

ここで、 $x=0$ において $h=0$ であるから、 $C=0$ 。

$$\therefore qx = \frac{k}{2} h^2 \quad \dots\dots ②$$

この式から、この場合の不圧地下水面は放物線であることがわかる。

一方、単位幅の地下水貯留量を Δ とすると、 Δ は次式

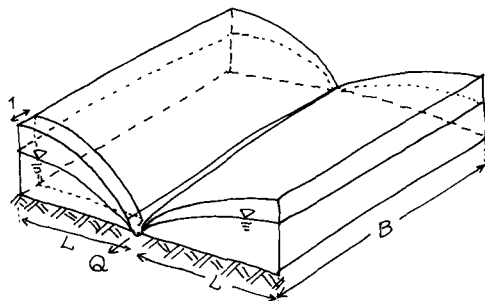


図-1. 丘陵地の流域の模式図

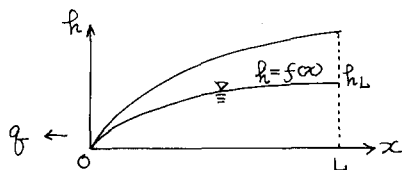


図-2. 単位幅のモデル

で与えられる。但し、 P_a は有効空隙率である。

$$\Delta = P_a \int_0^L h dx \quad \dots\dots ③$$

$$\text{②式から、} h = \sqrt{\frac{2q}{k}} x \quad \dots\dots ③'$$

②式を③式に代入すると、次式が得られる。

$$\Delta = P_a \int_0^L \sqrt{\frac{2q}{k}} x dx = \frac{2}{3} P_a \sqrt{\frac{2q}{k}} L^{\frac{3}{2}} \dots\dots ④$$

④式を変形すると

$$q = \frac{q k}{8 P_a^2 L^3} \Delta^2 \quad \dots\dots ⑤$$

となり、単位幅当りの地下水流出量 q は、地下水貯留量 Δ の2乗に比例することかわかる。

次に、図-1. に示す流域全体の地下水流出量を Q 、地下水貯留量を S とすると、 $Q = 2Bq$ 、 $S = 2B\Delta$ であるから、これらを⑤式に代入すると、

$$Q = \frac{q k}{16 P_a^2 L^3 B} S^2 \quad \dots\dots ⑥$$

となる。また、地下水流出高を Q_g 、地下水貯留高を S_g とすると、 $Q_g = Q/A = Q/2BL$ 、 $S_g = S/A = S/2BL$ であるから、これらを⑥式に代入すると、

$$Q_g = \frac{q k}{8 P_a^2 L^2} S_g^2 \quad \dots\dots ⑦$$

を得る。但し、 A は流域面積を示す。

以上から、立地地の不圧地下水の流出高 Q_g は、地下水貯留高 S_g の2乗に比例するという関係式(①式)が得られた。

3. 多摩丘陵・長池試験流域のデータによる検討

次に、①式を筆者らが設置した多摩丘陵・長池試験流域のデータによって検討する。長池試験流域は、図-3. に示すように、流域面積4.40haで、立地地地形をなしており、流域の大部分がクヌギ・コナラ林でおおわれ、流域の地質は関東ローム層である。このローム層中に不圧地下水が存在し、この流域の無降雨時の流出は、ローム層中の不圧地下水からの流出であることが確認されている。長池試験流域では、図-3. のW-1~12においてボーリング調査が行われ、地下構造が詳細に把握されている。W-1-L~W-12-Lは観測井化され、ローム層中の不圧地下水位の観測が行われている。更に、雨量、流出量、蒸発量、不飽和帯水分量、池の水位の観測も行われている。

無降雨月の流出高を Q (mm/日)、池の貯留量変化を ΔW_s (mm/日)、小型蒸発計蒸発量を E_p (mm/日)とすると、 Q は地下水流出と考えられるが、 Q には池の貯留効果と蒸発の影響が含まれているので、次式によりこれらの効果を除いて真の地下水流出高 Q_g (mm/日)を求めた。但し、0.0591は池の水面積率である。

$$Q_g = Q + \Delta W_s + E_p \times 0.0591 \dots \textcircled{2}$$

一方、地下水貯留高 S_g は、W-1-L, 3-L, 4-L, 6-Lの4観測井の観測結果を用いて算出した。即ち、流域単位の地下水位変化 ΔH は、各観測井の地下水位変化 ΔH_i を各観測井の代表領域面積で重み付けした荷重平均として、 $\Delta H = \sum a_i \Delta H_i / A$ ($i=1, 3, 4, 6$)で求められる。 a_i は各観測井の代表領域面積である。従って、地下水貯留高の変化 ΔS_g は、 $\Delta S_g = \Delta H \cdot P_a$ で与えられる。今回は、1977年8月30日の地下水貯留高を仮に基準として50mmと仮定し、1977年9月24日~1978年5月27日の期間の地下水貯留高を求めた。

図-4. には、こうして求めた地下水貯留高 S_g と地下水流出高 Q_g の相関図を示す。図中の点の分布から、放物線であることが想定される。二次回帰分析を行ったところ、次式が得られた。

$$Q_g = 0.00271 (S_g - 26.6)^2 + 0.18 \dots \textcircled{4}$$

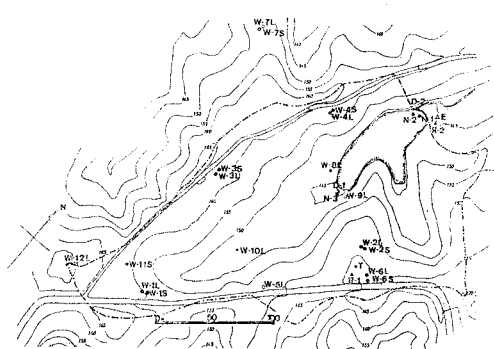


図-3. 長池試験流域の概要

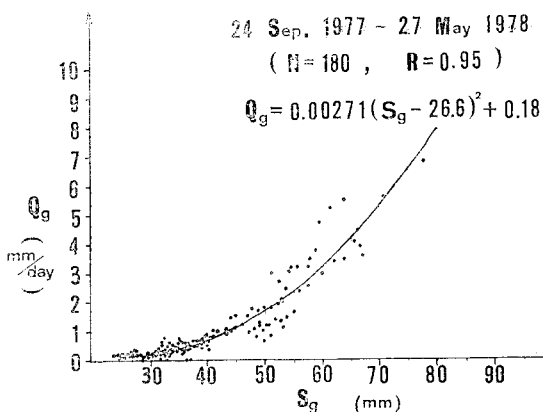


図-4. 長池試験流域における地下水貯留高 S_g と地下水流出高 Q_g の相関図

サンプル数は180で、重相関係数は0.95と高い。従って、長池試験流域では、 $Q_g = C S_g^2$ が成立していることがわかる。この場合 $C = 0.00271$ であるが、①式の $C = \frac{q k}{8 P_a^2 L^3}$ から C の値を算出して両者を比較してみる。 k , P_a , L は実測されており、 $k = 10^2 \text{ cm/s}$, $P_a = 0.04$, $L = 57 \text{ m}$ であり、 $C = 0.002$ となる。透水係数や有効空隙率の測定精度を考慮すると、 C の実測値と計算値は、ほぼ符合しているといえる。

4. まとめ

立地地の不圧地下水の貯留高 S_g と流出高 Q_g との間に $Q_g = C S_g^2$, $C = \frac{q k}{8 P_a^2 L^3}$ の関係があることを見出し、長池試験流域においては、この関係式が成立していることを示した。

(注) ここで L は、ロームで被覆された多摩丘陵のような流域を想定している。