

# 丘陵地における不圧地下水位変動モデル (1)

Simulation models for Fluctuation of Unconfined Groundwater Level in the Upland Underlain by Stratified and Unconsolidated Formations : 1

虫明功臣\*・岡 泰道\*  
Katumi MUSIAKE and Yasumiti OKA

## 1. ま え が き

筆者らは、丘陵地の大規模宅地開発に伴う水循環機構の変化とその制御策について検討するために、多摩丘陵の自然地区(長池試験流域: 4.40 ha)と既開発地区(永山試験流域: 2.81 ha)のそれぞれに水循環過程に沿って一貫した観測体制を備えた試験流域を設定している。

都市化が流域の水循環機構に及ぼす影響を評価するには、降雨一流出解析で従来ブラック・ボックスとして扱われてきた地表面下での水の挙動、とくに不飽和帯水分の動態とそれに支配される地下水涵養機構を明らかにする必要がある。本稿では、こうした観点から、資料の集積が比較的進んでいる長池試験流域の不圧地下水観測井(図1)のうち、尾根付近に位置するW1-L~W4-Lの4観測井を対象とし、タンク・モデルを用いて不圧地下水位変動のシュミレーション・モデルを作成した。そして、モデルのパラメータと流域の土質条件との対応関係、不飽和帯の水分保留量や地下水涵養量などの時間的変動特性について検討し、年間地下水涵養量の算定結果について報告する。なお解析は日単位とし、1977年8月

から80年9月にかけての観測資料を対象とした。

## 2. 試験流域の概要<sup>1)</sup>

この流域の地層層序は、上位から下位に向けて、立川ローム層、武蔵野ローム層、下末吉ローム層、多摩ローム層、水成多摩ローム層、御殿峠礫層、連光寺互層、平山砂層となっている。多摩ローム層から上位のローム層は大きく二つに区分される。上部のローム層は粘土化が弱い風成ローム層であり、その下部のローム層は強度に粘土化が進んでいる。前者をローム層(Ln)、後者を火山灰質粘土層(Lo)と呼ぶ。Lo層の下部が不透水性基盤となっており、Lo層およびLn層中に不圧地下水帯が形成されている。さらに、この不透水性基盤は長池底部に連なり、池の形成条件にもなっている。

また、流域内6地点での電気探査の結果から、地下水面形が地形の起伏にはほぼ相似な形状を示すことが確認され、地表水の流域界と地下水流域界は一致しているとみなされている。

## 3. モデル作成に当たっての考え方

蒸発散、降雨に伴う不飽和帯の毛管飽和とその後の重力による水分の移動、さらに地表付近で浸透能を越えた雨水の表面流出、といった水循環の過程は、非定常かつ非線形なシステムである。非定常・非線形性が強い降雨一流出系に対して従来タンク・モデルが適用され、威力を発揮している。ここでも、不圧地下水位の変動をタンク・モデルによってシミュレートする。ただし、降雨一流出の場合と異なり、本研究では、モデルのパラメータを不飽和帯ならびに帯水層の土質特性と物理的に関連付けようという立場をとる。

丘陵尾根部における観測井を中心とした水循環の概念図とモデルとの対応関係を図2に示す。モデルの適用に当たっての基本的な考え方は以下の通りである。

i) 観測井が尾根部に位置することから、地下水位の変動を支配するのは鉛直方向の地下水涵養と下流方向への地下水流去の二つの要素とする。

ii) 不飽和帯の土湿不足が補われるまでは地下水涵養が行われないと考え、モデルの上段タンクに不飽和帯の

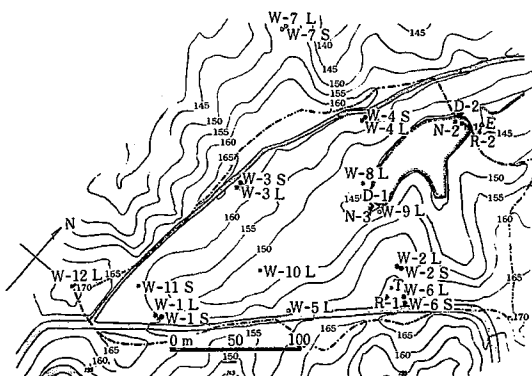


図1 長池試験流域の概要

凡例 R:雨量計, E:蒸発計, N:水位計  
D:三角堰, T:テンシオメーター  
W:地下水位計(S:被圧, L:不圧)

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

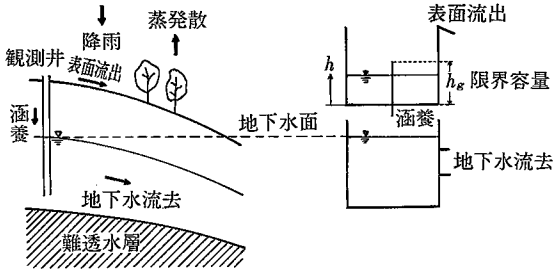


図2 地下水位変動モデルの概念図

限界容量「 $h_g$ 」を設ける。この高さがいわゆる「最小含水量」と「平衡水分量<sup>2)</sup>」との差に相当すると考えられる。上段タンクの高さは不飽和帯の水分保留能に対応し、これを越える降雨は表面流出となる。

iii) 上段からの浸透高を  $m$  倍して下段に入れるという操作を施す。この操作により、算定水位を実測水位に対応させることができるが、 $m$  の逆数は地下水位変動部付近の土層の平均的な有効空隙率に相当する。

iv) 下段の横穴からの流出は地下水流出量に対応する。

v) 蒸発散( $E$ )は負の入力とし、無降雨日に上段タンクから差し引く。 $E$ の値としては、同試験流域におけるテンソ・メータの観測記録の解析結果<sup>3)</sup>を基にして、次のようにモデル化して求める。

Horton<sup>4)</sup>は降雨終了後  $t$  時間後の土湿  $\theta$  に対して次式を提案している。

$$\theta = \theta_h + (\theta_f - \theta_h)e^{-kt} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\theta_f$ : 最小含水量,  $\theta_h$ : 吸着水容量,  $k$ : 定数。  
ここで土湿の減少を蒸発散量  $E$  と考えれば次式を得る。

$$E = k(\theta - \theta_h) \dots\dots\dots (2)$$

この関係はタンクモデル上で表現すると(図2参照)。

$$E = \begin{cases} \alpha E_p & h \geq h_g \\ \alpha E_p (h/h_g) & h < h_g \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $h$ : 不飽和帯水分量すなわち上段タンクの水位。  
 $\alpha$ : 係数で、0.7~0.8の値を使用。

$E_p$ : パンからの月平均蒸発量(無降雨日)

$E_p$ の値は、長池試験流域に近接した東京農工大波丘

地利用実験実習施設におけるパン蒸発量の資料から、表1-1の値を用いた。

vi) タンク・モデルの各種のパラメータの物理的意味を考慮しながら、実測地下水位と計算地下水位が適合するようにパラメータの値を決定する。

4. 各観測井のモデルと特徴

1) W1-L

W1-Lの地下水位は解析の対象とした観測井の中で最も浅く地表から2~6mであり、降雨に対する反応が極めて敏感である。試算の結果決定したパラメータを図3(a)に示す。限界容量  $h_g$  が10mmと極端に小さいが、これは地下水面の浅いことに対応していると推察される。また、W1-Lでは標高154m付近までは上昇が速やかであるが、それ以上になると同程度の降雨に対しても上昇が緩慢になるため、下段タンクを変断面にする必要が生じた。これには二つの物理的理由が考えられる。一つは有効空隙率が上層部では大、下層部では小という土質条件の相違であり、もう一つは安定した地下水面上に形成される毛管水帯の影響により、下層部で有効空隙率が見かけ上小さくなることである。

蒸発散については、前節で述べた  $E$  の値のうち3割を下段から引くという操作を行った。これは、W1-Lでは地下水面が地表から浅いために、不飽和帯水分だけでなく地下水面からも蒸発散成分への供給がなされる、という現象に対応している。さらにこれに関連して、下段の流出孔の係数を季節に応じて3通りに分けた方がよい結果が得られたが、これは地下水温の変化による粘性係数の相違によるのか、あるいは地下水温はあまり変化しないが、現段階では蒸発散の効果が十分反映されていないことによるためかは、今後検討を要する課題である。

2) W2-L

W2-LはW1-Lに次いで水位変動が大きいが、比較的地下水面が深い観測井であり、降雨に対する時間遅れは3~6日と長いうえ、上昇の仕方が特異である。モデルは図3(b)に示す。不飽和帯の限界容量  $h_g$  は160mmに達し、W1-Lと比較してかなり大きくなっている。

表1 月平均パン蒸発量(カッコ内は推定値)

年 \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1977	—	—	—	—	—	—	—	4.91	3.27	2.53	2.12	1.93
1978	2.62	3.40	3.48	4.85	5.06	6.50	6.29	5.99	3.68	2.61	2.03	2.04
1979	2.65	2.78	3.75	4.97	5.30	6.22	4.67	5.28	4.15	2.52	1.67	1.48
1980	(2.64)	(3.09)	(3.62)	(4.91)	(5.18)	(6.38)	(5.48)	(5.39)	(3.70)	—	—	—

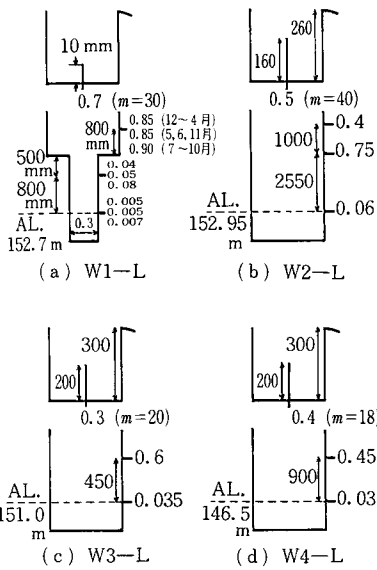


図3 各観測井のモデル

る。この値は後述するように地下水面の位置と土質条件に関係している。

3) W3-LとW4-L

この二つの観測井は全般的に水位変動が小さく、場所的にも近いため、変動の傾向も類似している。そこで図3(c), (d)に示す同型のモデルでシミュレートした。限界容量 $h_g$ はいずれも200mmとして良好な結果を得た。この二つのモデルおよびW2-Lでは上段タンクに溢水部を設けて表面流出成分を組み入れた。W3-L, W4-Lは、切り開かれた道路沿いにある比較的締め固められているため、実際にも表面流出が起こりやすいと考えられる。

5. 計算結果

以上の各観測井のモデルによって計算した結果を図4に示す。図中P, Q, M, R, Hはそれぞれ雨量, 表面流出量, 不飽和帯水分量(上段タンクの水位), 地下水涵養量, 地下水位標高を表す。

W2-Lを除けば、算定水位と実測水位は長期にわたって比較的よく適合している。さらに、表面流出量はほと

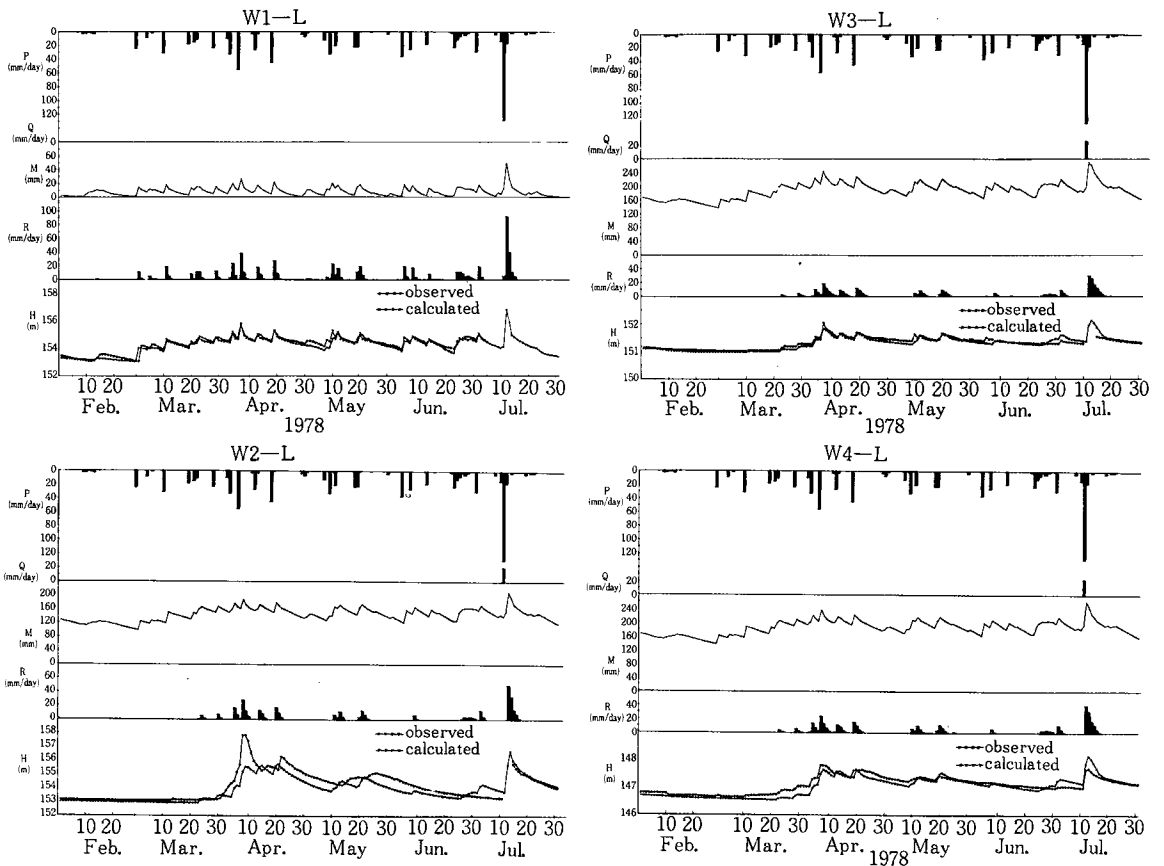


図4 モデルによる計算結果

## 研究速報

んど発生せず、不飽和帯水分量の変動が非常に大きいことが図からわかる。これは現地の尾根付近における表面流出の観測結果<sup>3)</sup>とも対応している。

各観測井毎の地下水涵養量をまとめたものが表2であり、ほぼ年間降雨量の半分程度は地下水に涵養されているという結果を示している。

表2 各観測井の年間地下水涵養量(単位 mm)

年月	'77 Sep ~ '78 Aug	'78 Sep ~ '79 Aug	'79 Sep. ~ '80 Aug
年雨量	1369	1295	1910
W1-L	960	880	1510
W2-L	680	560	1210
W3-L	660	520	1160
W4-L	670	530	1180

## 6. まとめと今後の課題

以上の検討結果より、尾根付近の不在地下水の変動をタンク・モデルによってかなり精度よく再現できることがわかる。以下に、主として各パラメータの物理性に重点を置きながら本研究の要点と今後の課題を列記する。

## 1) 蒸発散

長期間のシミュレーションでは、蒸発散の推定法が結果に大きく影響する。今回用いたモデルには、不飽和帯の水分状態により蒸発散量が異なるという効果が組み込まれており、地下水面が深くそれからの蒸発散への供給がほとんどなくまた地表付近の乾湿の変動が激しい関東ローム被覆丘陵地では、妥当性のある蒸発散予測モデルと考えられる。しかしW1-Lのように地下水面が地表面からごく浅い所にある場合には、地下水から蒸発散への供給をより合理的に取り扱う必要がある。

## 2) 不飽和帯の限界容量

これは、(3)式にみるように蒸発散の推定法とも関連しており、1)の問題と切り離して考えることはできない。深度別テンシオ・メータの観測記録によれば、深度1~1.5m以深の土壤水分は年間を通して極めて変化が少ない<sup>3)</sup>この事実から、蒸発散に関与しかつ土湿不足を生ずるのは1~1.5m以浅の土壤層であると仮定すると、pF-水分曲線より求まる最小含水量とテンシオ・メータ観測記録より推定される平衡水分量との差として、限界容量の値を見積もることができる。

こうして見積もった値と、W2-L~W4-Lの地下水面が深い観測井で用いた限界容量160~200mmとは対応すると推察されるが、この点については現在検討中である。

ただし、W1-Lのように地下水面が地表付近にある

場合には、毛管水帯の効果も評価する必要があり、これは今後の課題としたい。

3) 上段タンクから下段への水分移動の際の倍率  $m$ 

この倍率  $m$  の逆数は、地下水位変動部付近の帯水層の有効空隙率に相当する。この値はモデル上で18~40となっており、有効空隙率にすると2.5~5.6%になる。流域内のボーリング・サンプルの吸引試験より得られた地下水位変動部付近の有効空隙率は4%程度であり<sup>1)</sup>モデル上の有効空隙率とほぼ符合している。すなわち、倍率  $m$  も帯水層の土質条件と対応付けが可能である。

## 4) タンク・モデルの適用性

このように、タンク・モデルは河川の降雨一流出解析だけでなく、不飽和帯の水分挙動、地下水涵養とそれに伴う地下水位変動といった水循環の部分機構の再現にも有効であり、また、各種のパラメータが、土層の物理的特性との関連で決定できる可能性が示された。

## 5) 地下水涵養量と流出量

本報においては、計算された地下水涵養量を表2に挙げるに止めた。この値の妥当性については、他の方法による評価と比較・検証する必要がある。現在、地下水収支による方法、地下水流の基礎式を用いた算定法で検討中である。これらについては、第2報以下で報告する予定である。

## 謝 辞

この研究は、本研究所の昭和53年度選定研究費の援助のもとに始められた。また、日本住宅公団南多摩開発局の各位から甚大な御協力を賜っている。東京農工大波丘地利用実験実習施設からは、蒸発量の貴重な資料を提供して戴いた。調査研究費の一部として財団法人とうきゅう環境浄化財団の助成を受けている。記して感謝の意を表します。

(1981年1月6日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 虫明, 安藤, 村上, 小池, 大矢: 多摩丘陵への試験流域の設置とその水文地質構造, 生産研究, Vol. 30, No. 11, pp. 432~435, 1978.
- 2) 金子良: 農業水文学, 共立出版, p. 11, 1973.
- 3) 虫明, 小池, 内田: 深度別テンシオメータの観測記録に基づく日蒸発散量の推定, 第35回土木学会年講, pp. 590~591, 1980.
- 4) Horton, R. E.: Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity, Trans. A. G. U., Vol. 20, p. 702, 1939.
- 5) 安藤, 虫明: 丘陵地における直接流出の生起領域, 第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp. 129~130, 1979.