

個別の浸透施設の効果を組み込んだ 地下水涵養モデルの構築

A GROUNDWATER RECHARGE MODEL THAT CAN EVALUATE THE EFFECT
OF INDIVIDUAL RAINFALL INFILTRATION FACILITIES

荒木千博¹・天口英雄²・河村明³・高崎忠勝⁴・土屋大⁵
Kazuhiro ARAKI, Hideo AMAGUCHI, Akira KAWAMURA,
Tadakatsu TAKASAKI and Dai TSUCHIYA

¹正会員 工修 (株)建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

²正会員 博(工)首都大学東京大学院助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 工博 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴正会員 東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)

⁵学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

In order to evaluate the effect of individual rainfall infiltration facilities in an urban catchment, a hydrological model composed of a rainfall infiltration facility model, an unsaturated infiltration model and a two dimensional groundwater flow model was developed. The model was applied to artificial elements such as buildings and houses with rainfall infiltration facilities in the upper area of Kanda river basin in Tokyo. The artificial elements were based on GIS geographical feature data. The infiltration volume from rainfall infiltration facilities and groundwater flow in the area were simulated for the period of 2000 to 2007.

Key Words : *effect of each rainfall infiltration facility, groundwater recharge model, Geographical feature based GIS, urban catchment*

1. はじめに

都市流域においては、洪水流出の抑制効果を期待して、浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装などの、地中の浅い部分に雨水を浸透させる浸透施設の設置事例が増えている。また、浸透施設は洪水流出の抑制効果だけでなく、平常時の河川流量の確保、地下水位の維持、湧水の保全など、都市流域の水循環改善への効果が期待されている。都市流域水マネジメントの現場では、行政部局と地域住民からなる異種の背景を持つ人々が共通認識を共有する必要があり、これら個別の浸透施設をできる限り忠実にモデル化し、その効果を定量的に評価できる水循環モデリング手法が求められている。これまで、SHERモデル¹⁾、PDEモデル¹⁾、WEPモデル²⁾等の水循環モデルにおいて、浸透施設の地下水涵養効果を算定する手法が提案されている。これらは、浸透ますや浸透トレンチ等の浸透施設を全て浸透トレンチと置き換えて、その長さに換算し、分割流域あるいはグリッド内にトレンチ全長を与えて地下水涵養量を計算するモデルであり、個別の浸透施設の

形状や浸透能を組み込んではいない。

著者らは、浸透施設や流出抑制施設が家屋などの個々の人工物に設置されることに着目し、都市流域を家屋、道路などの地物(地物データGIS)に基づいてモデル化する手法を提案³⁾し、神田川上流域に適用した⁴⁾。この手法は、地物データGISの要素一つひとつに地下水涵養の数理モデルを組み込み、モデルパラメータを設定し、各要素に雨量データを入力すれば、地下水涵養、蒸発散、直接流出、地下水流動の各水循環過程を計算できることに特徴がある。参考文献^{3),4)}においては、地下水涵養モデルとしてSMPTモデルを採用し、地下水涵養定数 β をパラメータとして地下水涵養量と地表面への直接流出量を算定した。しかし、地下水涵養定数 β は経験的に設定されるものであり、一つひとつ個別の浸透施設の浸透量を直接算定しているものではなく、また表層土壌の透水係数など物理特性を直接的に表現しているものではないので、個別の浸透施設の効果を評価することは困難であった。

現在、個別の浸透施設に対して、周辺地盤の資料調査、現地浸透試験、土質調査から、その浸透能力を透水係数

などの物理的指標を用いて調査されてきており、その結果をモデルデータとして利用できる環境が整っている。

そこで本研究では、著者らが水循環モデルの基礎として構築した神田川上流域の地物データGISを用いた地下水涵養モデル⁴⁾において、浸透ます及び浸透トレンチの浸透モデルを追加し、実際に設置されている浸透ますの個数と浸透トレンチの長さから浸透量を算定し、地下水涵養に対する個別の評価を行うモデルを構築した。この場合、浸透施設および浸透域の表層土壌における不飽和浸透の計算においてはSMPTモデルではなくRichardsの方程式⁵⁾を採用し、土壌層の物理特性の試験値を直接モデルに用いた。本モデルを神田川上流域に適用し、2000年から2007年の地下水涵養計算を行い、浸透施設の効果を算定した。

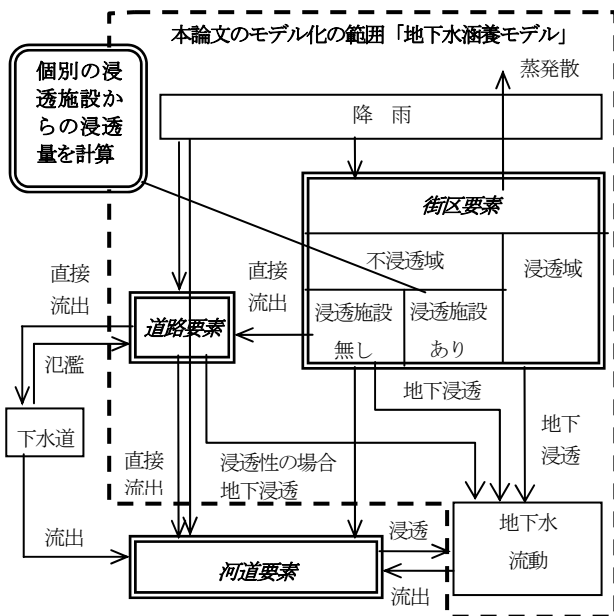


図-1 本論文におけるモデル化の範囲

2. 地下水涵養モデル

(1) 水循環過程における地下水涵養モデルの位置づけ

都市流域における水循環過程は、図-1に示すフローで表現できる。本研究では、街区要素と道路要素への降雨が、不浸透域要素では直接流出となり、浸透域要素では地下へ浸透し地下水として流動する過程をモデル化の範囲とし、これを本研究における地下水涵養モデルとして位置づける。筆者らの従来のモデル⁴⁾では、不浸透域とした地物に浸透施設が設置されていた場合、それを浸透域に置き換えたモデルとしていた。本論文では、浸透施設が設置されている地物データGISの要素一つひとつに、浸透施設の形状データを与え、浸透量を算定する。

(2) 浸透域／不浸透域モデル

街区要素の浸透域および不浸透域のモデル図-2に示す。ただし、不浸透域の浸透施設は別途モデル化している。

a) 不浸透域（浸透施設無し）のモデル

降雨初期に生じるコンクリートやアスファルト面における吸収や窪地貯留などの初期損失高を考慮し、式(1)及び式(2)により直接流出量 $D(t)$ (m/s)を算定する。

$$D(t) = \begin{cases} 0 & (h(t) \leq L_l) \\ r(t) - E(t) & (h(t) > L_l) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{dh(t)}{\partial t} = r(t) - D(t) - E(t) \quad (2)$$

ここに、 t : 時刻(sec), $r(t)$: 時刻 t における降雨強度(m/s), $E(t)$: 蒸発散量(m/s), $h(t)$: 不浸透域における貯留量(m), L_l : 土地利用種別 l の初期損失高(m)である。蒸発散量 $E(t)$ (m/s)については、ハモン式⁶⁾により算定した。

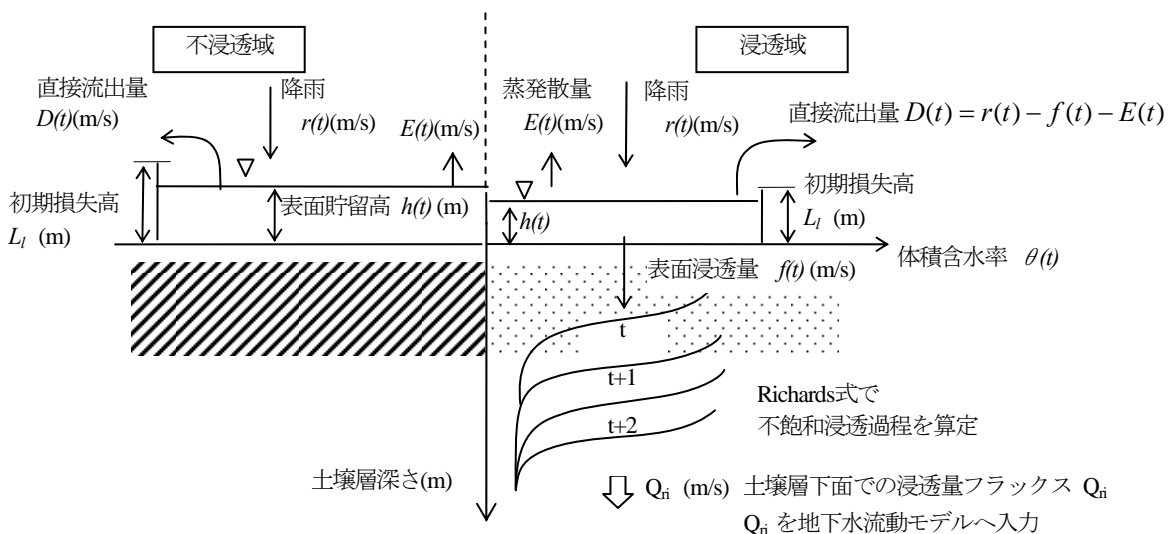


図-2 浸透域／不浸透域モデル

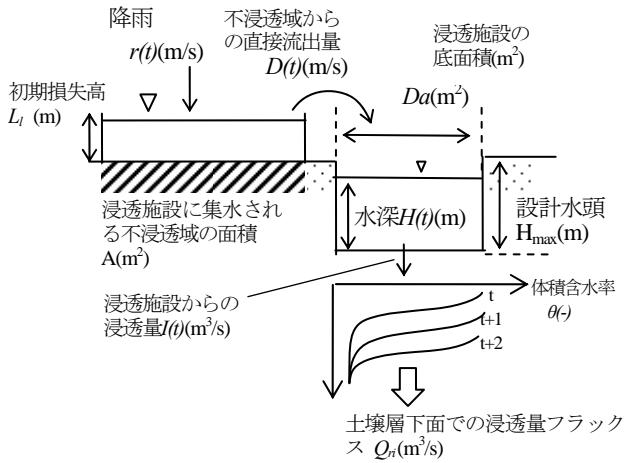


図-3 浸透施設モデル

b) 浸透域のモデル

降雨強度 $r(t)$ (m/s)が、地表面の浸透能 ks (m/s)未満であれば、降雨強度相当分の表面浸透 $f(t)$ (m/s)が発生し、浸透能以上であれば、浸透能相当分の表面浸透が発生するとして、式(3)により算定する。湛水した後は、浸透能相当分の表面浸透となる。地表面の浸透能は、表層土壌の飽和透水係数と等価とした。直接流出量 $D(t)$ (m/s)は、不浸透域のモデルと同様に、式(4)により算定する。また、降雨強度 $r(t)$ (m/s)、表面浸透量 $f(t)$ (m/s)、直接流出量 $D(t)$ (m/s)、湛水深 $h(t)$ (m)及び蒸発散量 $E(t)$ (m/s)は、式(5)の関係となる。

$$f(t) = \begin{cases} r(t) & (r(t) \leq ks) \\ ks & (ks < r(t)) \end{cases} \quad (3)$$

$$D(t) = \begin{cases} 0 & (h(t) \leq L_i) \\ r(t) - f(t) - E(t) & (L_i < h(t)) \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = r(t) - f(t) - D(t) - E(t) \quad (5)$$

(3) 浸透施設モデル

本論文では、浸透施設として浸透ますと浸透トレンチを対象とし、図-3に示すモデルとした。

浸透施設からの浸透量 $I(t)$ (m³/s)は、式(6)により浸透施設個別に算定する。

$$I(t) = \frac{H(t)}{H_{\max}} \times Q \quad (6)$$

ここに、 Q ：浸透施設の単位設計浸透量（浸透ますの場合 $\text{m}^3/\text{s}/\text{個}$ 、浸透トレンチの場合 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ）、 $H(t)$ ：浸透施設内の水深(m)、 H_{\max} ：浸透施設の設計水深(m)である。

浸透施設内の水深 $H(t)$ (m)の変化量は、式(7a) あるいは式(7b)により算定する。

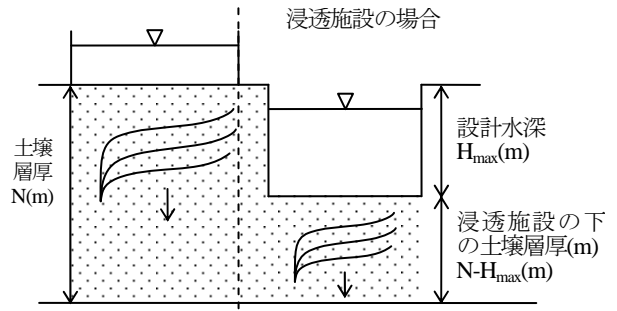


図-4 不飽和浸透過程の土壌層厚

いは式(7b)により算定する。

$$\text{浸透ますの場合} \quad \frac{dH(t)}{dt} = \frac{D(t) \times A - I(t)}{Da} \quad (7a)$$

$$\text{浸透トレンチの場合} \quad \frac{dH(t)}{dt} = \frac{D(t) \times A - I(t)}{L \times B} \quad (7b)$$

ここに、 A ：浸透施設に集水される不浸透地物の面積(m^2)、 Da ：浸透ますの底面積(m^2)、 L ：浸透トレンチの長さ(m)、 B ：浸透トレンチの幅(m)である。

(4) 不飽和浸透計算

本論文では、不飽和浸透過程の計算として式(8)に示す鉛直一次元のRichardsの方程式⁹⁾を採用した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ kz(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} \right\} - \frac{\partial kz(\theta)}{\partial z} \quad (8)$$

ここに、 θ ：土壌内の体積含水率(-)、 Z ：地表面からの深さ(m)、 $kz(\theta)$ ：不飽和透水係数(m/s)、 $\psi(\theta)$ ：吸引圧水頭(m)である。

また、吸引圧水頭 $\psi(\theta)$ 、体積含水率 θ 、不飽和透水係数 $kz(\theta)$ の関係式として、式(9)に示すBrooks-Coreyの式³⁾を採用した。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda, \quad kz(\theta) = ks \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^{2+3\lambda} \quad (9)$$

ここに、 Se ：有効飽和度(-)、 θ_s ：飽和含水率(-)、 θ_r ：最小含水量(-)、 ψ_b ：限界吸引圧水頭(m)、 λ ：土壌による定数、 ks ：飽和透水係数(m/s)である。

不飽和浸透過程は、土壌層厚を N (m)とし、土壌層下面を自由流出境界としてフラックス Q_{ri} (m³/s)を算定し、その値を地下水流動モデルの式(10)への涵養量 G (m³/s)とした。ただし、浸透施設が設置してある場合、図-4に示す通り設計水深 H_{\max} (m)を減じた層厚とし、不飽和浸透距離の差による地下水涵養時差を表現している。

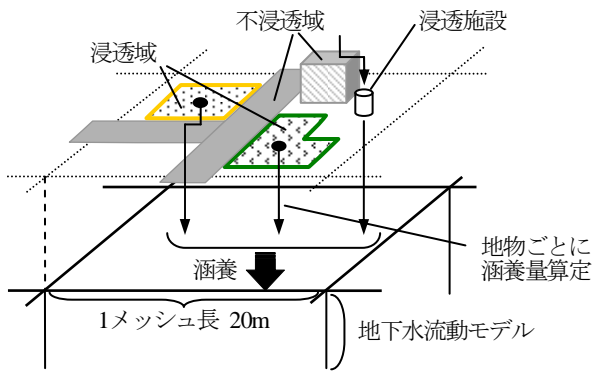


図-5 地物毎の地下水涵養量の算定

(5) 地下水流動モデル

地下水は帯水層底面高により流下するので、地下水流動モデルの計算格子形状は地表面のように地物要素で表現せず、グリッド型を用いてモデル化を行った。本研究では、広域地下水平面2次元モデル⁷⁾を適用し、その基礎式を式(10)に示す。また、地表面上の地物要素からの地下水涵養量 G は図-5に示すように、各地物要素の重心点が含まれるメッシュに与える。なお本研究の神田川上流域では20mグリッドとした。

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + G \quad (10)$$

ここに、 h : ピエゾ水頭 (水位) (m), C : 貯留係数 (-), T : 透水量係数(m^2/s), G : 地下水涵養量 (浸透量) (m/s) である。

また、河道要素から地下層への漏出を考慮するため、河道のあるグリッドにおいては単位面積あたりの漏水量 q_l (m/s)を式(11)により算定し、式(10)右辺に追加する。

$$\begin{aligned} q_l &= l(h_r - h) : h > b_r \\ q_l &= l(h_r - b_r) : h < b_r \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 q_l : 単位面積あたり漏水量 (m/s), l : 漏水係数($1/S$), h : ピエゾ水頭 (地下水位) (m), h_r : 河道水位(m), b_r : 河床標高(m)である。

3. 神田川上流域への適用と考察

(1) 計算条件

本論文では、筆者らが作成した神田川上流域 (流域面積 $11.5km^2$) の地物データGIS⁴⁾に、2. で作成した地下水涵養モデルを組み込み、2000年から2007年までの8年間を対象に、構築した地下水涵養モデルを用いて日単位の浸透計算と地下水流動計算を行った。日降水量およびハモン式に用いる日平均気温は、対象流域近傍の気象庁府中観測所の観測値を用いた。

表-1 浸透施設の諸元

施設	諸元	設定値
浸透ます (24,346 個)	設計水深(m)	0.6
	底面積(m^2)	0.126 径0.4mの円形相当
	比浸透量(m^2)	6.7
	影響係数(-)	0.81
浸透トレンチ (37,988 m)	設計水深(m)	0.6
	トレンチ幅(m)	0.6
	比浸透量(m^2)	3.4
	影響係数(-)	0.81
集水面積 (m^2)		515,066
流域面積 (km^2)		11.5
浸透施設の面積率 (%)		4.5
飽和透水係数 k_s (m/s)		2.75×10^{-5}

対象流域内の各地物要素に設置されている浸透ますと浸透トレンチについて収集できたデータは、地物毎の浸透ますの個数と浸透トレンチの延長のみであった。そこで本論文では、標準的な浸透ますと浸透トレンチの形状および諸元として、表-1を想定した。流域内において浸透施設が設置されている地物要素数は5,126個である。図-6に浸透施設が設置されている地物要素の位置を示す。浸透ますは24,346個、浸透トレンチは37,988mである。

本モデルでは、Richards式による不飽和浸透計算で用いる土壌パラメータを、個別の浸透施設直下の土壌特性に応じて設定することが可能である。しかし、本適用では、モデルの有用性の提示を主目的とすること、及び個別の土壌パラメータの調査結果が得られなかったことから、表-2に示す値を用いた。土壌層厚 N (m)は、適用流域の実績地下水位より2.0(m)とした。また、地下水流動モデルのパラメータは、既往の研究⁴⁾において同定した表-2に示す値とした。

流域界について、神田川上流域の地物データGISに地下水涵養モデルとしてSMPTモデルを組み込んだ適用⁴⁾と同様に、地下水帯水層の範囲と地表面の流域界が一致していると想定してシミュレーションを行った。帯水層の境界条件は図-7に示す通り、玉川上水に接する流域南部では指定水頭境界とし、その他の流域界では閉境界として設定した。帯水層底面高は、東京都が実施したボーリング調査結果⁸⁾より抽出し、ArcGISを用いて20mグリッドのデータを作成した。河道が存在するメッシュでは、表面水の漏出を考慮した。

対象流域は荒川と多摩川に挟まれた武蔵野台地上に位置し、現在も多く家庭用井戸が存在している。そこで著者らは、検証データとして家庭用井戸での地下水観測を約150ヶ所試みたが、全ての井戸でポンプが固定してあるなど観測地下水位は得られなかった。そこで本論文ではボーリングデータ⁸⁾に記載されている孔内水位を概略値として用いた。検証地点としてのボーリング位置は図-7示す地点①~⑧とした。

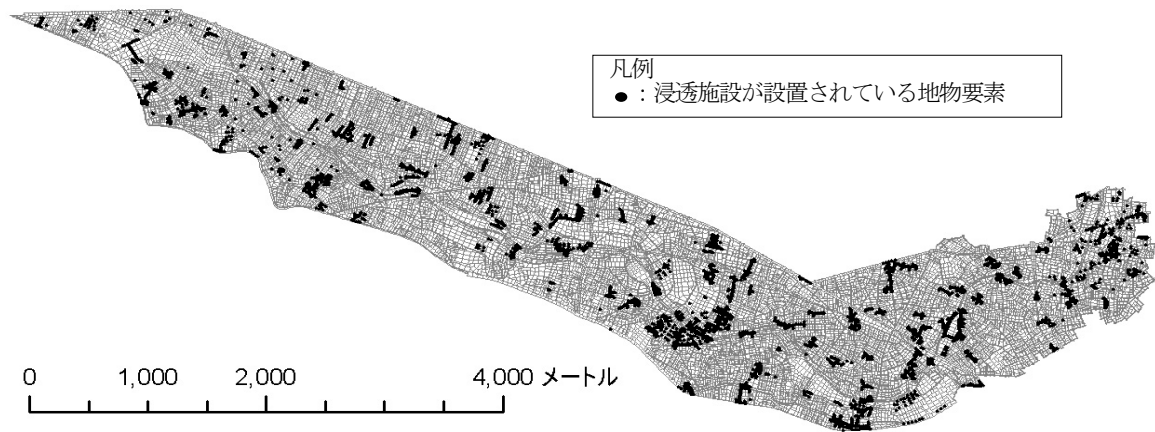


図-6 浸透施設が設置されている地物要素

表-2 モデルパラメーター一覧

モデル	パラメータ	値
Richards の不飽和 浸透モデル	飽和透水係数(m/s) k_s	2.75×10^{-5}
	限界吸引圧水頭(m) ϕ	-0.4
	飽和含水率(-) θ_s	0.8
	最小含水量(-) θ_r	0.2
	定数 λ	0.3
地下水流動モデル	透水量係数(m ² /s) T	1.0×10^{-3}
	貯留係数(-) C	0.2
	漏水係数(1/s) l	1.0×10^{-6}

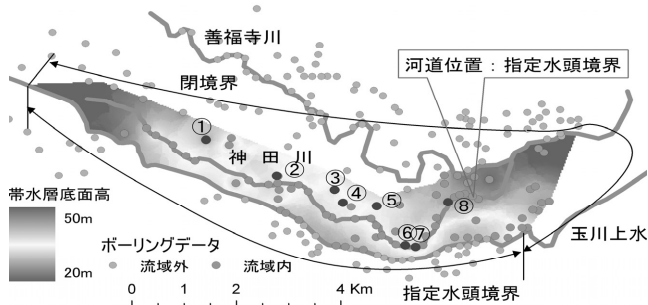


図-7 境界条件とモデル検証地点

(2) 結果と考察

図-8は、上から月単位雨量及び図-7に示す番号を付加したボーリング地点の計算地下水位変化を示したものである。また、同図の右端には該地点のボーリング調査月と孔内水位⁸⁾を示した。現状の浸透施設を考慮した計算結果が実線、浸透施設が無い場合の想定が点線である。8年間における8地点の両地下水位の差は平均1cmであり、既存の浸透施設による地下水位上昇効果は小さい。

全浸透施設からの計算浸透量を表-3に示す。2000年から2008年の年間浸透量の平均値は、7,652 m³/年あった。これを浸透施設の集水面積により換算すると14.8 mm/年である。2000年から2007年の平均年雨量は1,597mm/年であるから、0.93%の浸透効果と小さい結果となった。

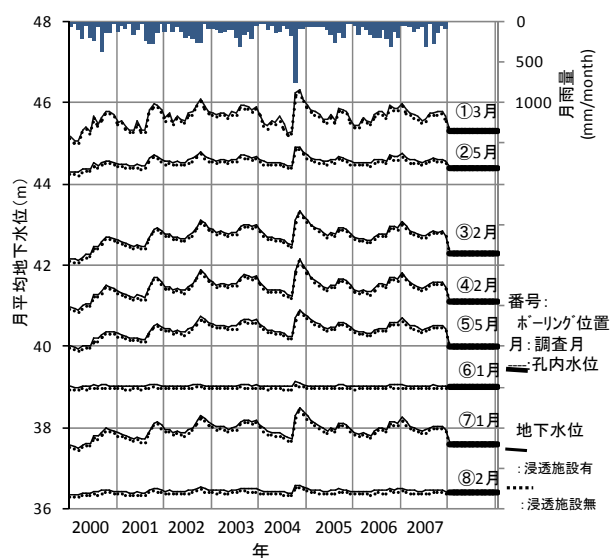


図-8 現浸透施設あり/なしの地下水位計算結果

表-3 浸透施設の効果量

年	①雨量 (mm/年)	②浸透量 (m ³ /年)	③浸透高 (mm/年)	④浸透効果 ③/①(%)
2000	1597	7,676	14.9	0.93
2001	1533	7,407	14.4	0.94
2002	1707	7,905	15.3	0.90
2003	1768	8,520	16.5	0.93
2004	1747	7,803	15.1	0.86
2005	1237	6,387	12.4	1.00
2006	1854	8,773	17.0	0.92
2007	1336	6,743	13.1	0.98
平均	1597	7,652	14.8	0.93

次に、地下水涵養モデルとしてSMPTモデルを組み込んだ既往の適用結果⁴⁾と本論文の計算地下水位を比較すると、図-9に示す通り、本論文のモデルによる地下水位が高く変動も大きい傾向がある。個別の浸透施設をモデル化したことと、不飽和浸透過程をSMPTモデルからRichards式に変更したことによる相違と考えられる。

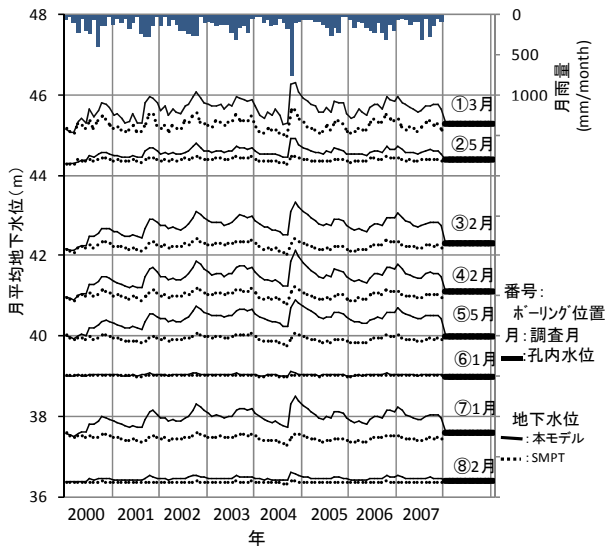


図-9 SMPTモデル^{A)}と本モデルの地下水位計算結果

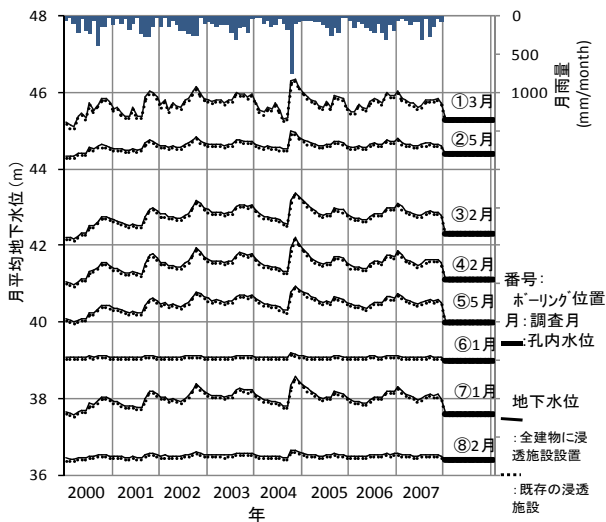


図-10 全建物に浸透施設を設置した場合の地下水位計算結果

次に、浸透施設が未設置の建物地物に全て浸透ますを設置した場合の効果量をシミュレートした。新規に設置する浸透ますは建物当たり5個を想定した。浸透ますは合計218,898個となる。地下水位の算定結果を図-10に示す。既存の浸透施設を考慮した地下水位からの上昇量は、8年間で8地点平均1cmであった。また、全浸透施設からの計算浸透量を表-4に示す。現況の施設に比べ、浸透量で年平均57,880(m³/年)、浸透高で2.4(mm/年)の効果量を増大させるものの、地下水位への影響は小さいシミュレーション結果となった。

4. 結論と今後の課題

都市流域において、洪水流出の抑制効果だけでなく、平常時の河川流量の確保や地下水位の維持の効果が期待される浸透施設を一つひとつ個別に忠実にモデル化し、

表-4 全建物に浸透施設を設置した場合の効果量

年	①雨量 (mm/年)	②浸透量 (m ³ /年)	③浸透高 (mm/年)	④浸透効果 ③/①(%)
2000	1597	66,644	17.4	1.09
2001	1533	62,969	16.5	1.08
2002	1707	68,609	18.0	1.05
2003	1768	73,649	19.3	1.09
2004	1747	67,603	17.7	1.01
2005	1237	52,333	13.7	1.11
2006	1854	75,621	19.8	1.07
2007	1336	56,829	14.9	1.11
平均	1597	65,532	17.2	1.08

また、土壌・地質の試験値を直接的に用いることが可能な地下水涵養モデルを構築した。本論文の適用では、個別の浸透施設や土壌の試験値について不明な点は、想定値や既往の研究結果を用いたが、可能な限りデータを収集し、今後の調査によるデータ整備によって、モデルの精度を向上させることが必要である。また、本論文で対象としなかった貯留池や透水性舗装道路のモデル化も必要である。

本モデルは、浸透施設の位置だけでなく、個別の施設の形式や規模が都市流域の水循環に及ぼす影響を定量的に評価することが可能であり、都市域の水マネジメントにおける施策評価の強力なツールとなる。今後は、モデルの範囲を表面流下や下水道、地下街に拡大し、総合的で精緻な都市域水循環モデルを構築する予定である。

参考文献

- 1) 「都市小流域における雨水浸透、流出機構の定量的解明」研究会、都市域における水循環系の定量化手法—水循環系の再生に向けて—、第一編 概説, pp.36-58, 2000.12.
- 2) 賈仰文, 倪广恒, 河原能久, 末次忠司: 都市流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価, 水工学論文集, 第44巻, pp.151-156, 2000.2.
- 3) 荒木千博, 河村明, 天口英雄, 高崎忠勝: 地物データGISを用いた新たな都市流域地下水涵養モデルの提案, 水工学論文集, 第53巻, pp.493-498, 2009.2.
- 4) 荒木千博, 河村明, 天口英雄, 高崎忠勝, 須藤正大: 神田川流域の地物データGISを用いた地下水涵養モデルの構築とその適用, 河川技術論文集, 第15巻, pp.371-376, 2009.6.
- 5) 土木学会 水理委員会 水理公式集改訂小委員会: 水理公式集 [平成11年版], pp.22~23, 1999.
- 6) Hamon, W.R.: Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961.
- 7) W.キンツェルバッハ: パソコンによる地下水解析, 森北出版, pp. 63~78, 1989.
- 8) 東京都総合地盤図(Ⅱ) 山の手・北多摩地区, 東京都土木技術研究所, 1990.

(2009. 9. 30受付)