

地物データGISを用いた都市流域地下水涵養モデルの構築および実流域シミュレーション

荒木 千博¹・天口 英雄²・河村 明³・高崎 忠勝⁴

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

E-mail: k-araki@ctie.co.jp

²正会員 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 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)

本論文では、都市流域において、水循環系の再生に寄与する雨水浸透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て、不浸透地物と浸透地物に基づいて流域のモデル化を行い、地物一つひとつに設置されている雨水浸透施設の情報に付加して高度な地物データGISを作成し、雨水の地下水涵養過程を忠実に表現する都市流域地下水涵養モデルを構築した。次いで、神田川上流域を対象に実際の雨水浸透施設データを用いてモデル化を行い、実降雨による個別の浸透施設からの浸透量をシミュレーションすることにより、対象流域における浸透施設の地下水涵養および流出抑制に対する効果を評価するとともに、将来増加が予測される雨水浸透施設の設置シナリオを想定し、その効果を予測・評価した。

Key Words : *groundwater recharge model, advanced GIS delineation, urban catchment, Kanda river basin, rainfall infiltration facility*

1. はじめに

都市流域では、山地流域とは異なり、雨水が浸透しない建物、道路、駐車場などの人工的な構造物と住宅地の庭や公園などの浸透域が複雑に分布している。また、道路の側溝や雨水・下水道管路など河川に至る流出経路には、貯留浸透施設や治水施設などが整備されており、その形態は流域の都市化と共に絶えず変化しているため、雨水流出プロセスは非常に複雑となっている¹⁾。また、都市化の進展は緑地や裸地などの浸透域を激減させ、雨水の地下水涵養量の低減による地下水位低下、湧水量減少、河川の平常時流量の減少など、雨水の水循環に関わる問題が発生している。コンクリートやアスファルトで覆われた不浸透域の増大や下水道整備により雨水の流出速度が速まり、集中豪雨時には一度に大量の水が河道に集中し、排水しきれない水が下水道や河道から溢れ出す都市型水害が多発している²⁾³⁾。このような都市の水問題対策として、雨水浸透ます、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施設は設置事例が増えつつあり、洪水流出の抑制効果と平常時の河川流量の確保、地下水位の維持、湧水の保全が期待されている⁴⁾⁵⁾。

都市流域の水循環過程を解明するには、雨水を受ける地表面の浸透特性が都市化の影響によりどのような状態にあるのか、すなわち浸透・不浸透域の分布状況を正確に表現可能であることが重要であり、このような土地利用情報を入力データとして利用できる分布型水循環モデルが必要である。さらに、都市流域の水マネジメントにおいては、行政部局と地域住民の双方が水循環に関する課題と解決策を共有して施策を実施する必要があることを念頭に置くと、意思決定ツールとしての都市の水循環モデルには具体的で分かりやすいことが求められる。そのためには、道路、ビルおよび建物の建設状況など、具体的な都市化の進展の状況をできる限り忠実にモデル化することが可能で、浸透施設や流出抑制施設の効果を個々に検証・予測できるシミュレーションモデルの開発が切望されている。

これまで国内外で提案されている都市流域の雨水流出モデル^{6)~17)}は、対象とする規模や目的、そして水文量の分布の有無により集中型と分布型の2つに大別されるが、都市流域の複雑な流出過程や雨水浸透貯留施設の効果をシミュレーションするには分布型モデルが用いられている。既往の分布型流出モデルは、山地流域など人工物の少ない自然流域に適用されるDEM (Digital Elevation

Model) を活用したグリッド型モデルが用いられている。本来、都市流域は山地流域とは異なり自然要素だけでなく多くの人工的要素を含んでおり、都市流域の複雑な空間情報の記述にグリッド型を用いることは適当ではないが、入力可能なデータ制約上の理由やモデル構築の容易さから、グリッド型のモデルが多用されてきているのが現状である¹⁸⁾。

都市流域の地下水涵養に関するシミュレーションを行うためには、都市特有の特徴を十分に反映可能な土地利用情報が必要であるが、既往の研究の多くは住宅用地、商業用地、工業用地などの土地利用用途に基づく土地利用情報が前提となっている¹⁹⁾。例えば、日本の都市流域では細密数値情報が整備されており、本データをグリッド型モデルに適用するには、先ず土地利用用途毎に不浸透面積率を推定し、次いでグリッド毎に不浸透面積を算定している。グリッド型モデルによる雨水浸透施設の地下水涵養効果については、これまでSHERモデル²⁰⁾、PDEモデル²⁰⁾、WEPモデル²¹⁾等の水循環モデルを用いた算定手法が提案されており、これらはグリッド内の浸透施設をトレンチ長に換算して地下水涵養量が算定されている。グリッド型モデルでは、地下水涵養モデルにおいて建物、道路、駐車場等の地物を個別に表現することは困難であり、個別建物の雨水流出抑制施設や特定の透水性舗装道路を整備した個々の効果についてのシミュレーションを行うなど、具体的な政策評価を詳細に行うことは容易ではない。

これまで著者らは、洪水流出解析モデル¹⁸⁾で作成した高度な地物データGISを活用し、家屋など個々の人工物に浸透施設の実際の形状や浸透能の情報を付与し、簡易な計算手法により浸透施設の地下水涵養に対する効果を検討してきた^{22)~24)}。

本論文では、都市流域における代表的な雨水浸透施設として、浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装を対象に、形状や個数、施設下部の浸透能などの実諸元を個別に組み込み、雨水が施設に貯留し地下に浸透する過程をモデル化することにより直接的に施設毎の地下水涵養量を算定するモデルを提案している。本モデルでは、高度な地物データGISを用いて、建物や施設などの地物毎に実際に設置されている浸透ますと浸透トレンチの個数、長さ、形状、透水性舗装の面積、層厚、浸透施設の直下の土壌浸透能の情報を付与し、浸透施設に流入する雨水の浸透量、貯留量、オーバーフロー量を算定する。浸透施設からの浸透量は、Richardsの方程式²⁵⁾による地下水面までの不飽和浸透計算を経て、地下水として涵養される。

次に、東京都内の代表的な都市河川であり、都市化による不浸透域の増大に伴い自然の水循環系が喪失された神田川上流域を対象に、実際の浸透施設データを用いて現実に即した実践的な詳細モデルを構築し、現況の浸透

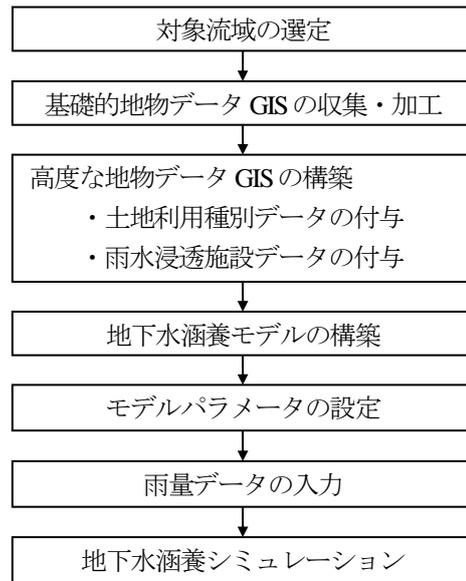


図-1 都市流域地下水涵養シミュレーションの全体ワークフロー

施設からの浸透量を、年間の地下水涵養と洪水時の雨水流出抑制の双方の視点からシミュレーションしている。さらに、将来増加が予想される浸透施設の設置シナリオを想定し、本モデルによりその浸透量をシミュレーションしている。神田川流域の水循環に関する弊害として、昭和40年以降の宅地開発に伴う浸透域の減少・浸透機能の低下により、湧水が枯渇し、河川の平常時の流量が減少していることが挙げられる。また洪水時においては、流域の浸透・保水力が低く、大量の雨水が短時間に河川、下水道に集中する。本論文の提案モデルにより、浸透施設の効果を考慮した地下水涵養量を定量的に算定することが可能となるので、上記の弊害の改善効果の評価に貢献できよう。

なお、著者らの既往研究²⁴⁾との違いは、本論文では、(1)浸透ますと浸透トレンチをより現実の設置実態に近いモデルとするため両者を接続していること、(2)透水性舗装をモデル化したこと、(3)表面浸透能を土壌の飽和度に応じた算定式を用いたこと、(4)神田川上流域における入手可能な浸透施設の最新データを用いて地物データGISを更新したこと、(5)洪水時のシミュレーションを実施したこと、(6)シナリオ分析により本モデルの活用事例を示したこと、である。

図-1に、地物データGISを用いた都市流域地下水涵養モデルを実流域シミュレーションする際の全体ワークフローを示している。すなわち、まず対象流域を選定し、基礎的地物データGISの収集・加工を行う¹⁸⁾。このデータに土地利用種別の情報を付与し、さらに雨水浸透施設のデータを付与することにより高度な地物データGISを構築する。次に、各地物要素の地下水涵養過程を表現す

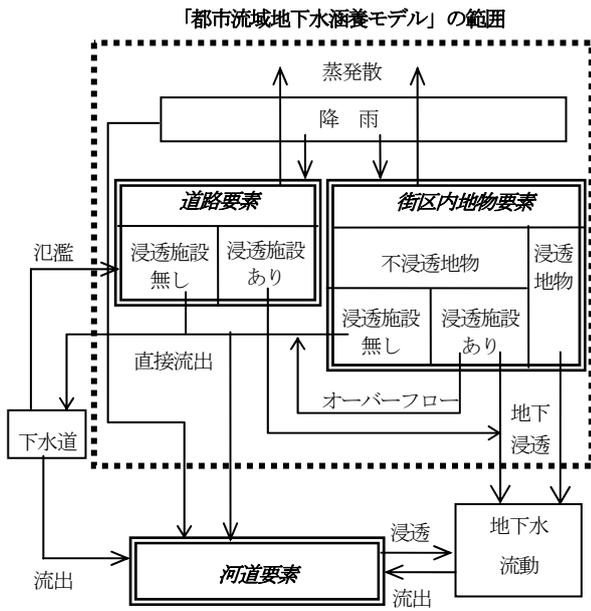


図-2 都市流域における水循環過程と地下水涵養モデルの位置付け

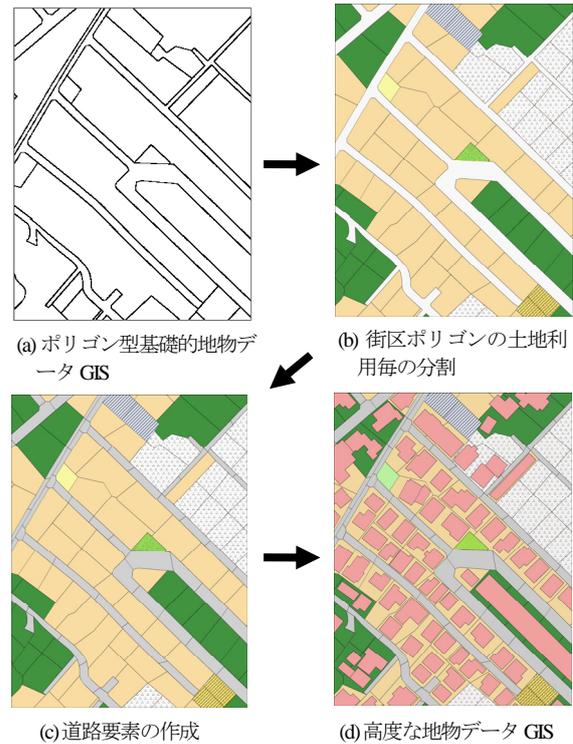


図-4 高度な地物データ GIS の作成

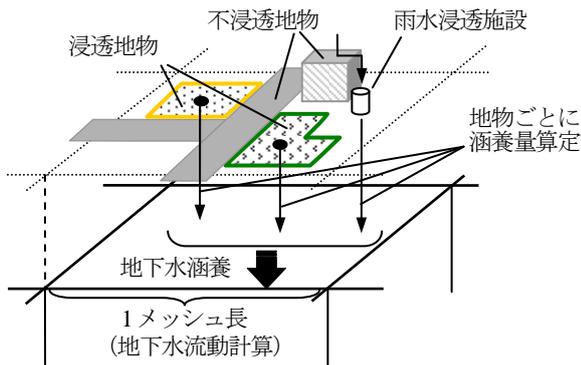


図-3 地物要素からの地下水涵養概念図

る水文モデルを組み込み地下水涵養モデルの構築を行い、モデルパラメータを設定したのち、雨量データを入力して地下水涵養シミュレーションを実行する。

2. 地物データGISを用いた都市流域地下水涵養モデル

(1) 都市流域における水循環過程

都市流域における水循環過程は、図-2に示すフローで表現できる。本論文では、各地物要素への降雨が、不浸透地物では直接流出となり、浸透地物では地下へ浸透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付ける(図-2の点線枠内の部分)。不浸透地物において浸透施設がある場合は、浸透量を計算して地下に涵養し、浸透施設からのオーバーフ

ローを直接流出として扱う。浸透地物および浸透施設からの個別の浸透量は、図-3に示す通り、各地物要素の重心点から該当する地下水流動モデルのメッシュに涵養量として与える。

(2) 地物データGISと浸透施設データの作成方法

都市流域における地物データGISを作成するには、まず、個々の建物の境界線、街区と道路の境界線、河道の境界線などを表す線データ(ポリラインデータ)としての基礎的地物データGIS(3.で適用する神田川上流域では、東京都が作成し、都市計画図等に利用している電子地図データを用いた)から、GISソフトウェアArcGISを用いて図-4(a)に示すポリゴン型の地物データGISに加工する。各地物データGISのポリゴンに対して、1/2,500地形図と空中写真を用いて建物、駐車場、グラウンド、林地などの土地利用毎に図-4(b)のように街区ポリゴンを分割する。道路要素は、対象区域境界を表す外枠のポリゴンから街区要素領域と河道要素領域を除外することにより作成する。道路要素も地形特性や地被特性に応じて、微小要素に分割し、図-4(c)に示す道路要素とする。上記までで作成した街区要素と道路要素に、建物要素と河道要素を合成し、各要素一つひとつに土地利用種別に応じた浸透特性あるいは不浸透特性の設定を行い、さらに国土地理院5mメッシュ(標高)データを用いて、各地物データGISのポリゴンに標高データを付与することにより、図-4(d)に示す高度な地物データGISを作成する²⁾。次いで、建物や道路毎に実際に設置されている浸透施

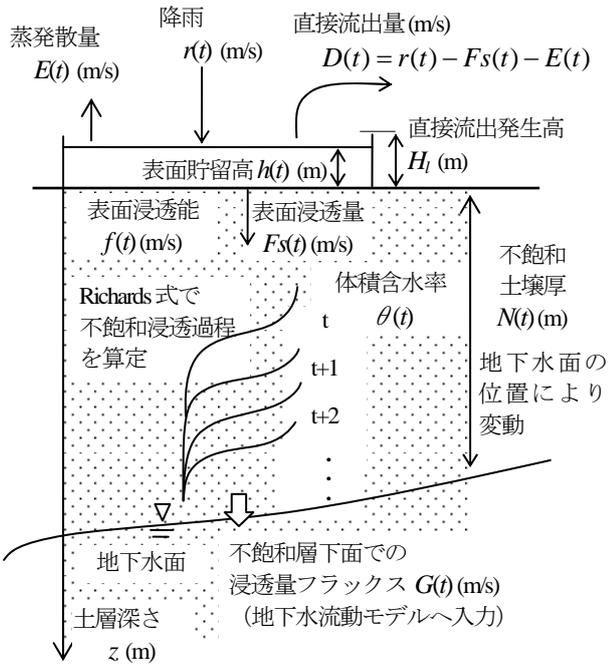


図-5 浸透地物における浸透および直接流出概念図

設の種類と形状や個数, 大きさなどの諸元を, 対応する地物に一つひとつ割り当てる. 本論文の地物データGISでは, 住宅などの区画内における建物と庭(本論文では間地)は別の地物としている. 不浸透地物である建物に降った雨水は, 雨樋などを経由して浸透ますや浸透トレンチに流入し地下に浸透する. 本論文では, 浸透ますと浸透トレンチは, 建物地物にその諸元データを付与し, 建物地物直下に浸透するものとした. 一方, 透水性舗装については, 建物以外の地物(道路, 駐車場などの地物)に諸元データを付与する.

(3) 浸透地物モデル

a) 浸透地物における浸透量・直接流出量の算定

図-5に浸透地物における浸透および直接流出概念図を示す. 時刻 t における表面浸透量 $F_s(t)$ は, 式(1)により算定する. すなわち, 降雨強度 $r(t)$ が表面浸透能 $f(t)$ 以下の場合, $F_s(t)$ は $r(t)$ となり, $r(t)$ が $f(t)$ を超える場合, $F_s(t)$ は $f(t)$ となる. なお, $f(t)$ は後述の式(11)により算定する. 直接流出量 $D(t)$ は, 窪地貯留などによる土地利用種別 l の直接流出発生高 H_l を考慮し式(2)により算定する. 表面貯留高 $h(t)$ の時間変化量は式(3)で表される.

$$F_s(t) = \begin{cases} r(t) & (r(t) \leq f(t)) \\ f(t) & (r(t) > f(t)) \end{cases} \quad (1)$$

$$D(t) = \begin{cases} 0 & (h(t) \leq H_l) \\ r(t) - F_s(t) - E(t) & (h(t) > H_l) \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = r(t) - F_s(t) - D(t) - E(t) \quad (3)$$

ここに, $E(t)$: 蒸発散量 (m/s)で, 後述の適用ではハモン式²⁶⁾を用いて算定した.

b) 不飽和浸透過程と地下水への涵養量の算定

本論文では, 不飽和浸透過程の計算として式(4), (5)に示す鉛直一次元のRichardsの方程式²⁵⁾を採用した.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

$$w = -k_z(\theta) \left\{ \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} - 1 \right\} \quad (5)$$

ここに, θ : 土壌内の体積含水率, z : 地表面からの深さ(下向き) (m), w : 鉛直方向の浸透流速(m/s), $k_z(\theta)$: 不飽和透水係数(m/s), $\psi(\theta)$: 吸引圧水頭(m).

また, $\psi(\theta)$, θ , $k_z(\theta)$ の関係式として, 式(6)に示すHaverkampの式²⁷⁾および式(7)に示すMualemの式²⁸⁾を採用した.

$$\theta = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)}{\alpha + \{\ln(\psi)\}^\beta} + \theta_r \quad (6)$$

$$k_z(\theta) = ks \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \quad (7)$$

ここに, θ_s : 飽和含水率, θ_r : 残留含水率, ks : 飽和透水係数(m/s), α, β, n : 定数.

式(4)と式(5)の数値解法は差分法を用いる. それぞれ差分展開すると, 差分ノード $i-1$ から i への鉛直方向の浸透流速 $w_{i,i-1}$ は式(8)で表され, 時刻 $t + \Delta t$ における差分ノード i での体積含水率 $\theta_{i,t+\Delta t}$ は, 式(9)で表される.

$$w_{i,i-1} = -k_{z,i-1} \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{\Delta z_{i,i-1}} - 1 \right) \quad (8)$$

$$\theta_{i,t+\Delta t} = \theta_{i,t} - \frac{\Delta t}{\Delta z_i} (w_{i+1,i} - w_{i,i-1}) \quad (9)$$

$$\overline{\Delta z_i} = (\Delta z_{i,i-1} + \Delta z_{i+1,i}) / 2 \quad (10)$$

ここに, $k_{z,i-1}$: 差分ノード $i-1$ から i への不飽和透水係数(m/s), ψ_i : 差分ノード i での吸引圧水頭(m), $\Delta z_{i,i-1}$: 差分ノード $i-1$ から i までの鉛直距離(m).

ここで, 連続式の差分式(9)を用いて表面浸透能の導出を行う. 表面浸透量を算定する式(1)における表面浸透能 $f(t)$ は, 地表面での最大の浸透流速すなわち式(9)において地表面直下が飽和状態になるまで浸透するときの流速 $w_{1,0}$ であることから, $f(t)$ は式(9)において地表面直下のノード ($i=1$) の体積含水率が飽和含水率 θ_s となる浸透流速 $w_{1,0}$ に等しい²⁹⁾. よって, $f(t)$ は式(9)を変形し式(11)で表される.

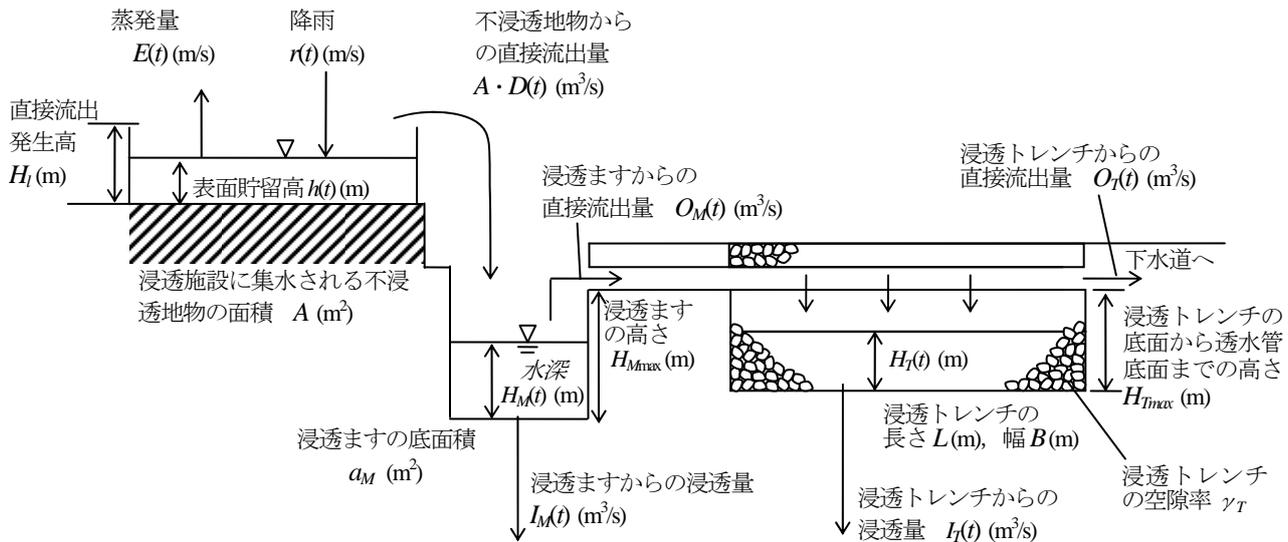


図-6 不浸透地物における直接流出および浸透ますと浸透トレンチからの浸透および直接流出概念図

$$f(t) = w_{2,1} + \frac{\overline{\Delta z_1}}{\Delta t} (\theta_s - \theta_{1,t}) \quad (11)$$

なお、不飽和浸透過程の計算では、図-5 に示す通り不飽和土壌厚 $N(t)$ は地下水面の位置により変動し、地下水面での浸透速度 w が地下水への涵養量 $G(t)$ となる。

(4) 不浸透地物モデル

a) 不浸透地物における直接流出量の算定

図-6 に、不浸透地物における直接流出および浸透ますと浸透トレンチからの浸透および直接流出概念図を示す。図-6 左部より、不浸透地物における直接流出量 $D(t)$ は、表面貯留高 $h(t)$ と窪地貯留などによる直接流出発生高 H_l の関係から式(12)により算定し、 $h(t)$ の変化量は式(13)により算定する。

$$D(t) = \begin{cases} 0 & (h(t) \leq H_l) \\ r(t) - E(t) & (h(t) > H_l) \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = r(t) - D(t) - E(t) \quad (13)$$

ここに、 $r(t)$: 時刻 t における降雨強度(m/s)、 $E(t)$: 蒸発量(m/s)、 $h(t)$: 不浸透域における表面貯留高(m)、 H_l : 土地利用種別 l の直接流出発生高(m)。

b) 浸透ますおよび浸透トレンチからの浸透量・直接流出量の算定

家屋や集合住宅などの個別の建物に浸透施設を設置する際には、浸透ますのみを複数個設置する場合や複数の浸透ますと浸透トレンチを接合して設置する場合がある。本論文では、一つの不浸透地物内の浸透施設間の雨水の移動を図-6 に示すようにモデル化した。すなわち、不浸透地物から式(12)により算定される $D(t)$ が浸透ますに

流入する。浸透ます直下の土壌の浸透能 $f_M(t)$ を超える強度の雨水は浸透ますに貯留される。なお、 $f_M(t)$ は前述の式(11)により算定される。浸透ますの高さ H_{Mmax} を超えた雨水は、浸透トレンチが接続されている場合には浸透トレンチへ流出する。浸透トレンチにおいても直下の土壌の浸透能 $f_T(t)$ に相当する速度で地下に浸透し、それを超える強度の雨水はトレンチ内に貯留する。雨水が浸透トレンチの高さに達した後、接続する下水管に直接流出として流出する。

式(14)により、浸透ますからの浸透量 $I_M(t)$ を算定し、浸透ますからの直接流出量 $O_M(t)$ を、 H_{Mmax} と浸透ます内の水深 $H_M(t)$ との関係から式(15)により算定する。 $H_M(t)$ の変化量は式(16)により算定される。

$$I_M(t) = \begin{cases} A \cdot D(t) & (A \cdot D(t) / a_M \leq f_M(t)) \\ a_M \cdot f_M(t) & (A \cdot D(t) / a_M > f_M(t)) \end{cases} \quad (14)$$

$$O_M(t) = \begin{cases} 0 & (H_M(t) \leq H_{Mmax}) \\ A \cdot D(t) - I_M(t) & (H_M(t) > H_{Mmax}) \end{cases} \quad (15)$$

$$dH_M(t) / dt = (A \cdot D(t) - I_M(t) - O_M(t)) / a_M \quad (16)$$

ここに、 a_M : 浸透ますの底面積(m²)、 A : 浸透ますに集水される不浸透地物の面積(m²)、 $f_M(t)$: 浸透ます底面の浸透能(m/s)。

浸透トレンチは、浸透ますからの直接流出量 $O_M(t)$ を受け、式(17)により浸透量 $I_T(t)$ を算定し、浸透トレンチからの流出量 $O_T(t)$ は、浸透トレンチの高さ H_{Tmax} と浸透トレンチ内の水深 $H_T(t)$ との関係から式(18)により算定する。浸透トレンチ内の水深 $H_T(t)$ の変化量は、トレンチ内の砕石による空隙率 γ_T を考慮し式(19)により算定する。

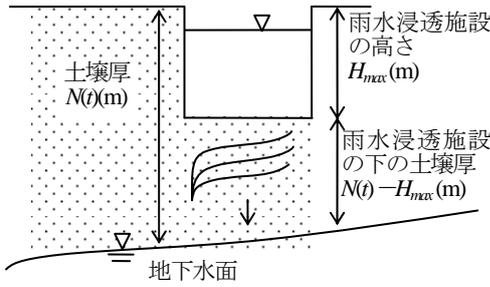


図-7 雨水浸透施設直下における不飽和浸透過程の土層厚

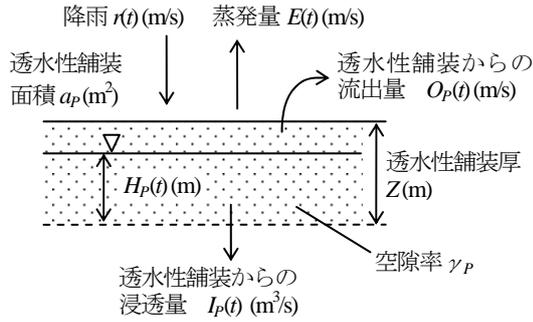


図-8 透水性舗装からの浸透および直接流出概念図

$$I_T(t) = \begin{cases} O_M(t) & (O_M(t)/(L \cdot B) \leq f_T(t)) \\ L \cdot B \cdot f_T(t) & (O_M(t)/(L \cdot B) > f_T(t)) \end{cases} \quad (17)$$

$$O_T(t) = \begin{cases} 0 & (H_T(t) \leq H_{Tmax}) \\ O_M(t) - I_T(t) & (H_T(t) > H_{Tmax}) \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{dH_T(t)}{dt} = \begin{cases} (O_M(t) - I_T(t))/(L \cdot B \cdot \gamma_T) & (H_T(t) \leq H_{Tmax}) \\ (O_M(t) - I_T(t) - O_T(t))/(L \cdot B) & (H_T(t) > H_{Tmax}) \end{cases} \quad (19)$$

ここに、 L ：浸透トレンチの長さ(m)、 B ：浸透トレンチの幅(m)、 $f_T(t)$ ：浸透トレンチ底面の浸透能(m/s)、 γ_T ：浸透トレンチの空隙率。

なお、不浸透地物に設置される雨水浸透施設からの不飽和浸透過程の計算も、浸透地物モデルと同様に式(4)、式(5)、式(6)および式(7)により算定する。ただしこの場合、雨水浸透施設の下の土層厚は、図-7 に示すように雨水浸透施設の高さ H_{max} を減じた厚さとする。

c) 透水性舗装における浸透量・直接流出量の算定

図-8 に透水性舗装からの浸透および直接流出概念図を示す。時刻 t における透水性舗装面積 a_p からの浸透量 $I_p(t)$ は、式(20)により算定する。すなわち、 $I_p(t)$ は、降雨強度 $r(t)$ が透水性舗装の浸透能 $f_p(t)$ 以下の場合 $a_p \cdot r(t)$ となり、 $r(t)$ が $f_p(t)$ を超える場合 $a_p \cdot f_p(t)$ となる。また、透水性舗装からの直接流出量 $O_p(t)$ は、透水性舗装の厚さ Z と透水性舗装内の水深 $H_p(t)$ との関係から式(21)により算

定し、透水性舗装内の舗装底面からの水深 $H_p(t)$ の変化量は、透水性舗装内の空隙率 γ_p を考慮し式(22)により算定する。

$$I_p(t) = \begin{cases} a_p \cdot r(t) & (r(t) \leq f_p(t)) \\ a_p \cdot f_p(t) & (r(t) > f_p(t)) \end{cases} \quad (20)$$

$$O_p(t) = \begin{cases} 0 & (H_p(t) \leq Z) \\ a_p(r(t) - E(t)) - I_p(t) & (H_p(t) > Z) \end{cases} \quad (21)$$

$$\frac{dH_p(t)}{dt} = \begin{cases} (a_p(r(t) - E(t)) - I_p(t))/(a_p \cdot \gamma_p) & (H_p(t) \leq Z) \\ (a_p(r(t) - E(t)) - I_p(t) - O_p(t))/a_p & (H_p(t) > Z) \end{cases} \quad (22)$$

(5) 地下水流動モデル

都市流域地下水涵養モデルに接続する地下水流動モデルの一例として、本論文では以下のようにモデル化する。

地下水は帯水層底面高に沿って流下するので、地下水流れのモデル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う。本研究では、広域地下水平面 2 次元モデル³⁰⁾を適用し、その基礎式を式(23)に示す。なお、地表面上の地物要素からの地下水涵養量 $G(t)$ は図-3 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。

$$C \frac{\partial h(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h(t) - b) \frac{\partial h(t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(h(t) - b) \frac{\partial h(t)}{\partial y} \right) + G(t) + I_R(t) \quad (23)$$

ここに、 $h(t)$ ：ピエゾ水頭（地下水位）(m)、 C ：貯留係数(無次元)、 K ：透水係数(m/s)、 b ：不圧帯水層の底面標高(m)、 $I_R(t)$ ：河道からの補給量(m/s)。

ただし、 $I_R(t)$ は河道があるメッシュにおいて河道からの地下水への補給量であり、式(24)により算定する^{30), 31)}。

$$I_R(t) = \begin{cases} \alpha(h_R(t) - h(t)) & (h(t) \geq H_R) \\ \alpha(h_R(t) - H_R) & (h(t) < H_R) \end{cases} \quad (24)$$

ここに、 α ：漏水係数(1/s)、 $h_R(t)$ ：河道水位(m)、 H_R ：河床標高(m)。

なお、 $I_R(t)$ は河道水位と河床標高の大小関係に依存して帯水層に流入・流出する現象であり、流入・流出時の漏水係数は厳密には異なるが、通常同一の値として扱うのが一般的である^{30), 31)}。

後述の実流域シミュレーションでは、式(23)の数値解析は差分法を用い、時間に関する項は後退差分、距離に関する項は中央差分、計算手法は IADI 法³⁰⁾を用いた。

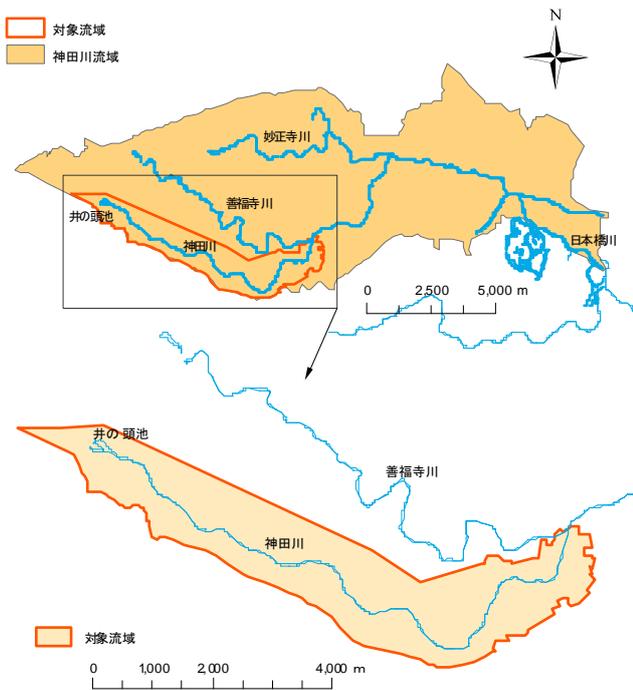


図-9 神田川上流域の位置図

3. 実流域シミュレーション

(1) 対象流域の地物データGISと現況浸透施設

対象流域は、図-9に示す神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの上流域約11.5 km²、流路延長約9kmである。2.の手順に従って構築した地物データGISを図-10および図-11に示す。図-10は1/2,500地形図および空中写真より判別した土地利用毎の地物であり、土地利用種別としては図-10のように20種別に判別した。図-11は2000年時点の浸透施設を付与した地物要素である。対象とした浸透施設は、浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装の3種類である。東京都より収集できた浸透施設のデータは、浸透ますでは建物ごとの設置個数、浸透トレンチでは建物ごとの設置長(m)、透水性舗装では路線ごとの舗装面積(m²)であった。浸透ますと浸透トレンチのデータが、複数の建物群における設置数の合計となっている場合は、1/2,500地形図や空中写真から各建物に浸透施設を振り分けた。道路地物の透水性舗装については、具体的な施工対象範囲すなわち対象とする道路地物要素が特定できなかったため、路線名と住所および透水性舗装面積から該当する道路地物要素を特定した。図-11より、浸透施設の設置が多い箇所は、井の頭公園および3箇所の住宅地である。

表-1に対象流域における地物の種別ごとの要素数、面積、浸透特性、浸透施設の設置数および浸透施設が設置されている地物数を示す。表-1より、流域内の全地物要素数は約10万個、浸透ますの設置個数が約1万個、浸透

トレンチの設置長が約40km、透水性舗装の設置面積が約22万m²となっている。なお、対象流域内の全道路面積約180万m²に対して、透水性舗装道路面積は約17万m²であり、透水性舗装道路面積率は約10%である。また本論文では、地物の種別ごとに浸透域・不浸透域を表-1のように区別したが、住宅地の庭などの間地については、一つの間地内で駐車場などの不浸透面と裸地などの浸透面を個別に区別することは困難である。そこで、本論文ではいくつかの住宅地を調べたところ、不浸透面と浸透面の面積比率がおおよそ半々であったことから、浸透域と不浸透域の面積比率は50%と想定した。以上より、対象流域内の浸透域面積は約3.7km²となり、流域全体における浸透面積率は32%となった。

次に、表-2に対象流域内の建物地物における浸透施設の設置数を示す。表-2より浸透ますのみが設置されている建物地物数は102、浸透トレンチのみが設置されている建物地物数が130、浸透ますと浸透トレンチ両方が設置されている建物地物数は1,581であり、建物地物における浸透施設の殆どが、浸透ますと浸透トレンチの併設となっている。その結果、浸透施設が設置されている建物地物数は1,813であり、表-1より全建物地物数が39,370であることから、建物地物における浸透施設の設置率は約5%となっている。また、浸透ますが設置されている建物地物の面積228,760m²に対し、浸透ますの個数が8,045個であるので、浸透ます一つあたりの平均集水面積は28.4m²/個となる。同様に、浸透トレンチが設置されている建物地物の面積216,905 m²に対し、浸透トレンチの長さが39,625mであるので、浸透トレンチ1mあたりの平均集水面積は5.5m²/mとなる。

(2) 計算条件

本論文は、浸透施設の地下水涵養について、長期的効果のための日単位シミュレーションおよび降雨強度の大きい短期的効果のための時間単位シミュレーションを行う。この場合、日単位シミュレーションでは現況の有無による地下水位変化と個別浸透施設の効果について、時間単位シミュレーションでは浸透施設の設置された不浸透地物のみに着目し、浸透ます、浸透トレンチおよび透水性舗装の効果について検討を行う。浸透施設の諸元について、個別の浸透施設の形状データまでは収集できなかったため、本論文では雨水浸透施設技術指針[案]に示されている標準構造の事例³²⁾を参考に、浸透ますの形状については全て高さ $H_{Mmax}=0.60m$ 、直径0.50mすなわち底面積 $a_M=0.196m^2$ の円筒形とし、浸透トレンチの形状については全て高さ $H_{Tmax}=0.60m$ 、幅 $B=0.60m$ (設置長さ L は実データを使用)の角形としてその空隙率を $\gamma_T=0.35$ とした。透水性舗装についても全て厚さ $Z=0.20m$ 、空隙率 $\gamma_P=0.10$ と設定し、施工面積 a_P は実データを用いた。浸透

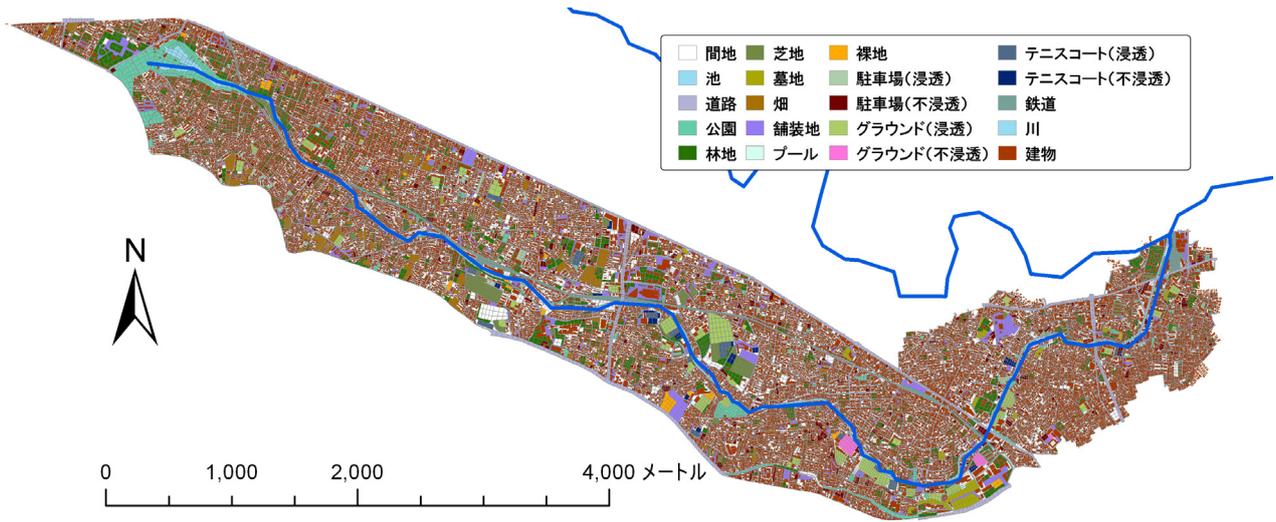


図-10 神田川上流域の地物データ GIS

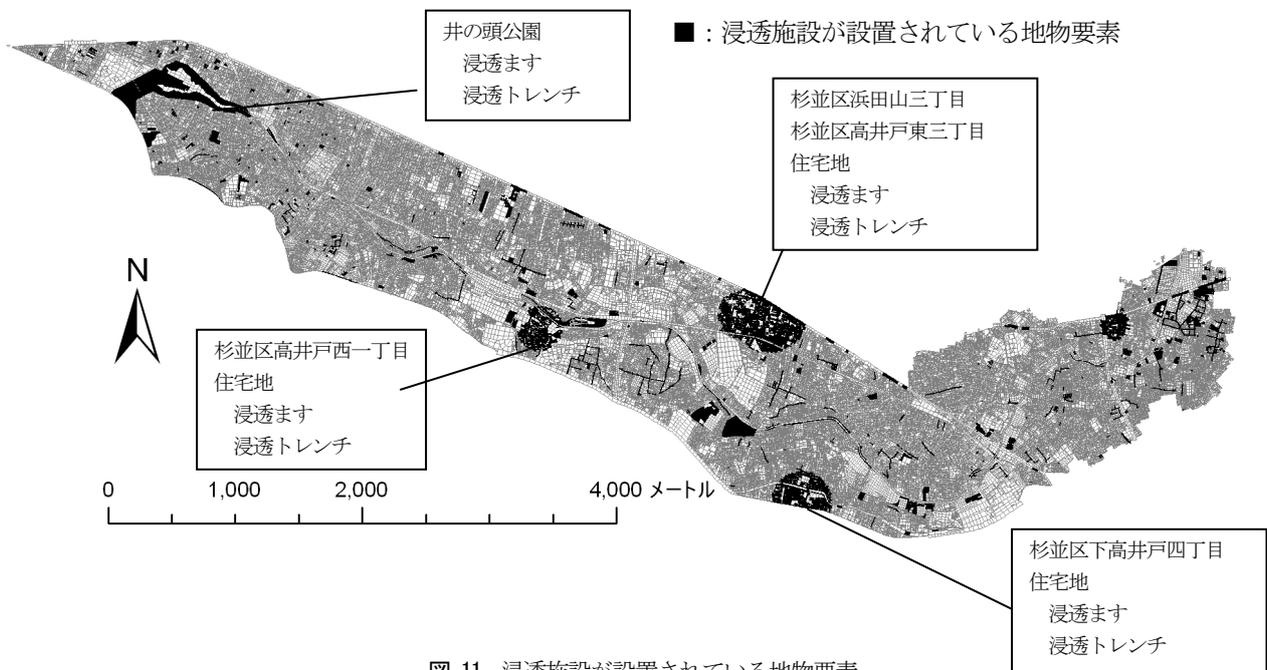


図-11 浸透施設が設置されている地物要素

施設が設置されている公園などの浸透地物においては、通常、締め固めや舗装がなされていることから不浸透地物として取り扱った。

なお、本計算は、不浸透地物に設置された浸透施設の地下水涵養量のシミュレーションに主眼を置くものであり、計算地下水位は概略値として位置付けている。

a) シミュレーション期間

長期シミュレーションは、2000年から2007年までの8年間のシミュレーションに対し、雨量は日単位で与える。不飽和浸透過程の計算は長期間のシミュレーション時間を考慮し、計算時間間隔を120秒、流域の平均的な不飽和帯の厚さ4mに対し空間増分 ΔZ を30cm、地下水流動の計算時間間隔は1日と設定した。

一方、降雨強度の大きい短期シミュレーションは、2002年8月18日1時から8月19日24時までの48時間のシミュレーションに対し、雨量は1時間単位で与え、不飽和浸透過程の計算時間間隔は60秒、鉛直方向の空間増分 ΔZ は20cmとし、地下水流動モデルでの計算時間間隔は1時間と設定した。本降雨は、東京都の河川計画における雨量確率約1年、すなわち毎年起こりうる時間雨量が30mm相当の降雨であり、さらにそれが二山生起した降雨であることからシミュレーション対象とした。

雨量データは、対象流域内に気象庁雨量観測所が存在しないため、最も近傍の気象庁「府中」アメダス観測所の日雨量と時間雨量を用いた。「府中」アメダス観測所は、対象流域上流部の井の頭池から西方約9kmに位置し

表-1 対象流域における地物種別毎の要素数と浸透施設の設置状況

	地物種別	要素数	面積(m ²)	浸透特性	浸透ます		浸透トレンチ		透水性舗装	
					設置個数	設置地物数	設置長(m)	設置地物数	設置面積(m ²)	設置地物数
1	建物	39,370	3,403,546	不浸透	8,045	1,683	39,625	1,711	0	0
2	駐車場(浸透)	169	60,351	浸透	0	0	0	0	0	0
3	駐車場(不浸透)	556	208,420	不浸透	26	2	90	2	4,597	20
4	グラウンド(浸透)	459	225,644	浸透	12	12	122	16	0	0
5	グラウンド(不浸透)	48	23,280	不浸透	0	0	0	0	0	0
6	林地	2,357	874,701	浸透	0	0	0	0	0	0
7	芝地	343	171,492	浸透	0	0	0	0	0	0
8	畑	387	188,809	浸透	0	0	0	0	0	0
9	公園	506	271,073	浸透	1,212	210	3,239	147	7,368	87
10	墓地	116	70,391	浸透	0	0	0	0	0	0
11	舗装地	769	379,203	不浸透	5	3	109	7	6,638	36
12	鉄道	569	149,388	不浸透	0	0	0	0	0	0
13	間地	13,396	3,429,875	50%浸透	15	5	276	13	21,393	129
14	テニスコート(浸透)	86	54,612	浸透	0	0	0	0	0	0
15	テニスコート(不浸透)	46	30,383	不浸透	0	0	0	0	5,350	1
16	裸地	95	52,701	浸透	0	0	0	0	1,832	2
17	プール	27	10,736	不浸透	0	0	0	0	0	0
18	道路	44,756	1,786,119	不浸透	447	124	352	33	175,512	4,685
19	池	36	36,137	不浸透	0	0	0	0	0	0
20	河道	307	99,703	不浸透	0	0	0	0	0	0
	合計	104,398	11,526,565	浸透域面積 3,684,713 m ² 不浸透域面積 7,841,852 m ²	9,762	2,039	43,813	1,929	222,691	4,962

表-2 対象流域の「建物」地物における浸透施設の設置状況

建物地物における浸透施設設置パターン	(1) 浸透ますのみ設置	(2) 浸透トレンチのみ設置	(3) 浸透ます, トレンチ両方とも設置	(1)+(3) 浸透ます設置	(2)+(3) 浸透トレンチ設置	(1)+(2)+(3) 浸透ますあるいはトレンチ設置
浸透施設が設置されている「建物」地物数	102	130	1,581	1,683	1,711	1,813
浸透施設の集水面積合計(m ²)	22,153	10,298	206,607	228,760	216,905	239,058
浸透ますの個数(個)	433	—	7,612	8,045	—	8,045
浸透トレンチの長さ(m)	—	1,087	38,538	—	39,625	39,625

ている。ハモン式による蒸発散の計算で使用する日平均気温も同じ観測所のデータを用いた。なお、本論文では、日雨量10mmを超える日は蒸発量を0mmとして計算した。

b) 水理・水文パラメータ

本論文で設定した水理・水文パラメータを表-3に示す。直接流出発生高は一般的な値³³⁾を採用し、浸透域・不浸透域それぞれ5 mm, 2 mmと設定した。

長期シミュレーションにおいては、日単位雨量を用いているため降雨強度が平滑化され、雨量のほぼ全量が浸透することから、土地利用毎に異なるパラメータを与え

たとしてもほとんど変化が無いことや、不浸透地物に設置された雨水浸透施設からの地下水涵養量は、雨水が施設に捕捉される面積と浸透ますの個数、浸透トレンチの長さ依存するので、地下水涵養量はパラメータの設定値にほとんど影響を受けないことを事前に確かめている。さらに、対象流域内の土壌は概ね均一³⁴⁾であることから、表-3に示す不飽和浸透計算で用いる土壌パラメータは神田川流域において実測された値³⁵⁾および関東ローム層に適用された値³⁶⁾とし、透水性舗装の浸透能は対象流域近傍で施工された時の透水特性検討結果³⁷⁾を参考に設定し

表-3 水理・水文パラメータ一覧

水文過程	パラメータ	設定値
直接流出量算定	直接流出発生高 $H_f(\text{mm})$	浸透域 5 不浸透域 2
	飽和透水係数 $k_s(\text{m/s})$	2.75×10^5
不飽和浸透過程	飽和含水率 θ_s	0.707
	残留含水量 θ_r	0.593
	定数 α	366
	定数 β	4.13
	定数 n	3.11
浸透施設からの浸透	透水性舗装の浸透能 $f_p(\text{m/s})$	0.50×10^5
地下水流動	透水係数 $K(\text{m/s})$	1.0×10^3
	貯留係数 C (無次元)	0.2
	漏水係数 $a(\text{l/s})$	1.0×10^6

表-4 現況の全浸透施設の各年平均浸透量と浸透率

年	観測雨量 (1) (mm/年)	計算蒸発散量 (2) (mm/年)	計算浸透量 (3) (mm ³ /年)	浸透施設集水域換算		全流域換算	
				浸透高 (4) (mm/年)	浸透率 (4)/(1) (%)	浸透高 (5) (mm/年)	浸透率 (5)/(1) (%)
2000	1,597	130	766,623	1,057	66.2	67	4.2
2001	1,533	132	732,495	1,010	65.9	64	4.1
2002	1,707	129	802,003	1,106	64.8	70	4.1
2003	1,768	123	825,781	1,139	64.4	72	4.1
2004	1,747	139	811,313	1,119	64.1	70	4.0
2005	1,237	129	586,796	809	65.4	51	4.1
2006	1,854	124	889,006	1,226	66.1	77	4.2
2007	1,336	132	619,153	854	63.9	54	4.0
平均	1,597	130	754,146	1,040	65.1	65	4.1

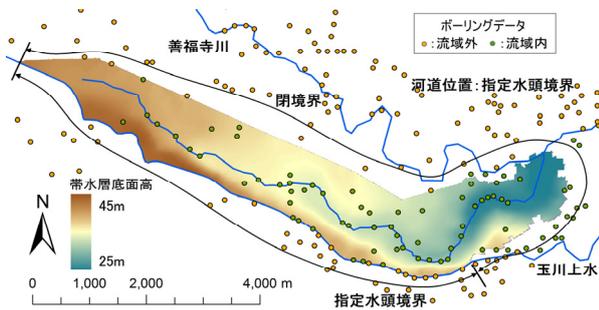


図-12 境界条件

表-5 現況の各浸透施設の年平均浸透量と浸透率

施設	年平均雨量 (1) (mm/年)	年平均計算蒸発散量 (2) (mm/年)	年平均浸透量 (3) (mm ³ /年)	各施設集水域換算	
				浸透高 (4) (mm/年)	浸透率 (4)/(1) (%)
浸透ます	1,597	130	205,746	509	31.9
浸透トレンチ			234,610	710	44.5
透水性舗装			313,790	1,409	88.2

た。また、地下水流動に関するパラメータは、地質構造が近いと考えられる対象流域近傍に位置する国分寺試験流域において同定された値²²⁾を用いた。なお、対象流域の地下水面は地表面下2m程度の位置にあり、本モデルではその高さまで不飽和浸透計算を行っている。対象流域のおおよその地層として、地表から約2mの関東ローム層があり、その下に武蔵野礫層がある。不飽和浸透計算の対象となる関東ローム層の飽和透水係数のオーダーは 10^5 m/s 、地下水流動計算の対象となる武蔵野礫層の飽和透水係数のオーダーは $10^2 \sim 10^3 \text{ m/s}$ とされており³⁸⁾、本論文の設定値と同じオーダーである。

短期シミュレーションでは洪水流出時における雨水浸透施設の効果を検討しており、浸透施設からの地下水涵養量は施設が設置された不浸透地物の面積、浸透ます数、浸透トレンチ長に大きく依存し、水文パラメータを少々変化させてもほとんど影響がみられなかった。具体的には、表-3の水文パラメータのうち浸透量に及ぼす影響が大きいパラメータは、飽和透水係数 k_s と透水性舗装の浸透能 f_p であるが、例えば k_s の値を10%大きくすると、後述する3.(3)b)において浸透ますからの限界浸透量も約10%大きくなるが、総浸透量は3%程度の増加にとどまる。それに比べて、建物に設置する浸透ますが一つから二つに増えれば、その建物地物からの総浸透量も2倍となる。すなわち、浸透量の算定にあたっては浸透施設の数量の

正確な把握が非常に重要である。以上のことから、本研究では浸透施設に関する数量を忠実に入力し、水文パラメータは長期シミュレーションと同様に、流域全体で一定値を設定した。

c) 地下水流れの計算における境界条件と初期値

地下水流れの計算領域は、図-12に示す地表面流域界の範囲とした。境界条件としては、流域南部は玉川上水に接しているため玉川上水の水位をそのまま与える指定水頭境界として設定し、流域北部の善福寺川流域との境界に関しては、地下水位が神田川、善福寺川それぞれの流域の河道に沿って概ね流れていることが観測地下水等高線図^{34), 39)}より読み取れるので、流域界間の地下水流量の移動はほとんど無いと考えられ、閉境界とした。河道要素が存在するグリッドでは、指定水頭境界として河川からの補給量も計算される。神田川上流域の河道は、護岸および河床が主にコンクリートであり、河床から地下水への漏水は少ないと想定される。また、豪雨時の河道水位は、洪水生起後すぐに低下するなど、典型的な都市型河川の特徴を有しているため、本研究では平水位相当を河道水位条件として設定した。

東京都が実施したボーリング調査結果⁴⁰⁾および1974年8月の実測値に基づいて作成された観測地下水等高線図^{34), 39)}より、帯水層底面高を推定し、ArcGISを用いて20m間隔(地下水流動解析のメッシュサイズ)の底面高

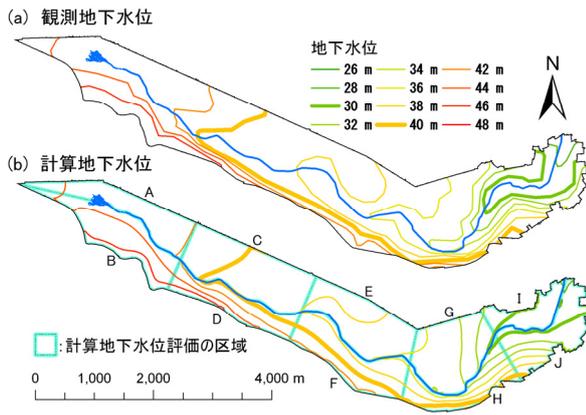


図-13 地下水位等高線図

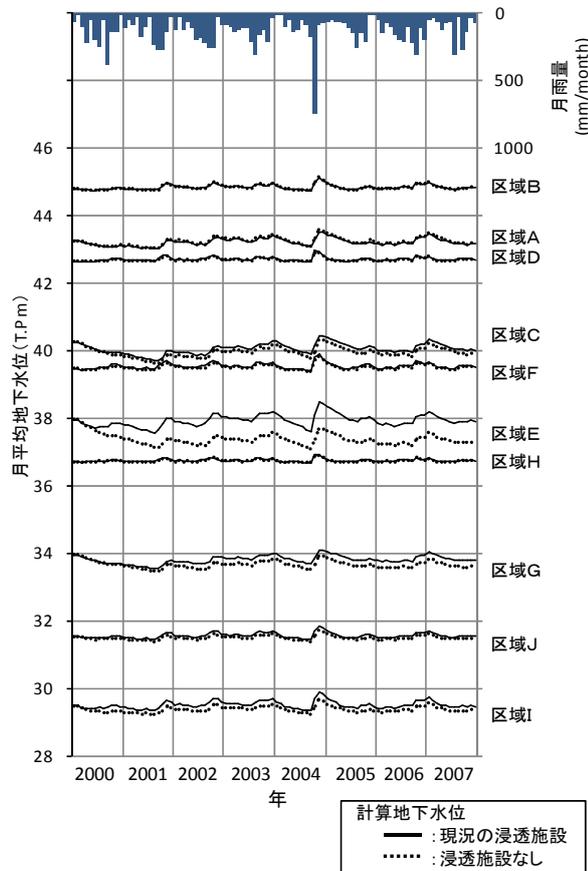


図-14 現況と現況施設無しの計算地下水位比較

グリッドデータを作成するとともに初期地下水位を設定した。

(3) シミュレーションによる現況の浸透施設の効果

a) 長期シミュレーション

表-4に、各年の観測雨量およびシミュレーションによる現況の全浸透施設からの浸透量、その浸透量を浸透施設の集水域で換算した浸透高・浸透率、浸透量を全流域で換算した浸透高・浸透率を示す。また、表-5には現況の各浸透施設からの年平均浸透量および浸透施設の集水

域換算の浸透高・浸透率を示す。なお、神田川流域における浸透試験によって直接的に浸透量が計測され、本論文ではそれから算定された飽和透水係数³⁵⁾を用いてシミュレーションを行っていることから、各浸透施設からの浸透量は適切に算定されていると考えられる。表-4より、2000年から2007年の年平均浸透量は約75万 m^3 という結果が得られ、浸透施設集水域換算の浸透高は、各年の降水量に応じて変化するものの平均1,040mmとなり、その浸透率については各年のばらつきは非常に小さく平均で65%となった。一方、全流域換算の浸透高は平均65mmとなり、その浸透率は約4%と雨水浸透施設設置面積率に相当している。表-5より、年平均浸透量約75万 m^3 の内訳を見ると、透水性舗装が約31万 m^3 と最も多く、次いで浸透トレンチが約23万 m^3 、浸透ますが約21万 m^3 となっている。各浸透施設集水域換算の浸透高は、浸透ます約500mm、浸透トレンチ約700mm、透水性舗装約1,400mmであり、その結果、各浸透施設の浸透率は、浸透ます約32%、浸透トレンチ約45%、透水性舗装約88%となった。これは、浸透ますには不浸透域の雨水が小さな貯留ボリュームのますに流入しオーバーフローが生じやすいため浸透率が小さく、浸透トレンチは浸透ますと比較して貯留できるボリュームが大きいため、浸透ますより浸透率が大きく、さらに浸透面積が大きい透水性舗装では、その浸透能に加え舗装厚相当の貯留高までオーバーフローが生じないため浸透率が大きくなっていると考えられる。

以上、地下水涵養モデルによる各地物からの地下水涵養量がシミュレーションされたが、参考として、接続した地下水流動モデルにより得られた計算地下水位と観測地下水位を比較してみよう。対象流域内においては、シミュレーション期間の地下水位の観測値を入手することが困難であった。そこで、対象流域の観測地下水位に関する文献を種々調査した結果、唯一参考文献³⁴⁾に1974年8月の観測地下水位等高線が掲載されており、それを基に新たに作図した1974年8月の観測地下水位等高線図を図-13(a)に示す。これに対し、2000年から2007年のシミュレーション結果を用いて8月平均地下水位を算出して作成した計算地下水位等高線図を図-13(b)に示す。この場合、1974年の年降水量とシミュレーション期間の平均年降水量の差は20mm程度でほぼ同じであったこと、また、1974年と近年の地味状況および浸透施設の設置状況から両時期の浸透域面積の差は小さいことを確認している。3.(2)で述べた通り、地下水涵養量のシミュレーションに主眼を置く本研究では、地下水流動に関するパラメータとしては、大雑把に近傍流域での値を流域一様として与えたに過ぎないが、図-13に示すように良好な再現性が得られた。再現精度をさらに向上させるとすれば、流域での細かなパラメータの調整が必要と考えられる。

図-14には、2000年から2008年における図-13(b)の区域

表-6 洪水時における全現況浸透施設からの浸透量および浸透率

観測雨量 (1) (mm/2日)	計算浸透量 (2) (m ³ /2日)	浸透施設集水域換算		全流域換算	
		浸透高 (3) (mm/2日)	浸透率 (3)/(1) (%)	浸透高 (4) (mm/2日)	浸透率 (4)/(1) (%)
173	70,720	98	56.6	6	3.5

表-7 洪水時における現況の各浸透施設からの浸透量および浸透率

施設	観測雨量 (1) (mm/2日)	計算浸透量 (2) (m ³ /2日)	各施設集水域換算	
			浸透高 (3) (mm/2日)	浸透率 (3)/(1) (%)
浸透ます	173	5,018	12	6.9
浸透トレンチ		28,970	88	50.9
透水性舗装		36,732	165	95.4

A~J毎の平均地下水位を実線で示す。流域南部の区域B, D, F, Hは、神田川と玉川上水による指定水頭境界条件の影響が大きい。すなわち、指定水頭境界として平水位相当の一定値を与えているため、地下水位の変動が流域北部の区域と比べて小さくなっている。次に、浸透施設が無い場合を想定した2000年から2007年の計算地下水位を図-14の点線に示す。区域Eの地下水の低下が顕著である。これは、この区域に浸透施設が多く設置されており、かつ指定水頭境界条件の影響が小さいためと考えられる。また、8年間の計算地下水位の低下量は区域平均で11cmであった。なお、長期シミュレーションでは計算負荷を軽減するために日単位雨量を用いており、これにより雨量強度が平均化し、次に示す時間単位雨量を用いた短期シミュレーションに比べて浸透量が多くなるものと予想される。このため、長期シミュレーションにより得られた雨水浸透施設の効果は、上限値と見なすことができるであろう。

b) 洪水時のシミュレーション

表-6に、2002年8月18日1時から8月19日24時までの48時間における降水量、シミュレーションによる全浸透施設からの浸透量、浸透施設の集水域換算の浸透高・浸透率、全流域換算の浸透高・浸透率を示す。この浸透量が洪水時における流出抑制量となっている。表-6より、48時間の浸透量は約7万m³であり、集水面積で換算した浸透高は98mm(浸透率約57%)、全流域面積で換算したそれは6mm(浸透率約3.5%)という結果を得た。

次いで、表-7に洪水時の各浸透施設の浸透量と浸透率を示す。表-7の洪水時における浸透ますの浸透率は約7%となり、長期シミュレーションで得られた表-5の年平均浸透率約32%に比べ相当小さくなっている。これは、

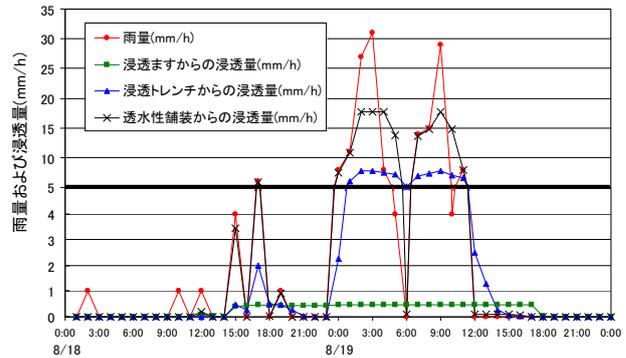


図-15 洪水時の各施設からの浸透量の変化

1時間雨量を用いたことにより洪水時の降雨強度が浸透ますの貯留・浸透能力を上回る時間が長く、雨水の多くはオーバーフローにより直接流出したものと考えられる。浸透ますに接続した浸透トレンチでは、豪雨時に浸透ますからのオーバーフローによる流入量が增大するため、長期シミュレーション結果の年平均浸透率約45%(表-5)に比べ、洪水時の浸透率が約51%(表-7)と大きくなったものと推察される。また、透水性舗装については、長期シミュレーションの場合、蒸発量の影響で小規模降雨を含む年平均浸透率が約88%(表-5)であるのに対し、洪水時には蒸発量がゼロである(前述のように日雨量10mmを超えた日は蒸発量を0mmと設定している)ため、浸透率は約95%(表-7)と大きくなると考えられる。

次に、図-15に洪水時における各浸透施設からの浸透高の時間変化を示す。この図では、5mm/hまでは1mm間隔で、それ以上では5mm間隔としている。これより、浸透ますからの浸透高は降雨開始後数時間で0.46mm/hに達し、その後一定量で継続している。このとき、浸透ます直下は飽和状態であると考えられる。地表面が不飽和状態のときの浸透能は、飽和透水係数より大きくなる。一方、地表面が飽和状態のとき、飽和透水係数に相当する浸透能となり、これが最小の浸透能となっている。すなわち、地表面が飽和に達した段階で限界の浸透量となり、飽和状態が継続する限りそれを下回ることなく一定の浸透量となる。これは、対象流域における現況の浸透ます群の限界浸透高と考えることができる。また、浸透ますの貯留効果により、降雨が終了する8月19日12時から貯留量がなくなる17時までの約5時間、浸透が継続している。浸透トレンチについては、降雨強度の増大とともに浸透高が上昇し、8月19日2時に最大値7.7mm/hに到達後は、降雨強度が強くなっても最大値を超えることはない。この値が対象流域内の浸透トレンチ群の限界浸透高と考えられる。なお、浸透トレンチも浸透ますと同様に、貯留効果として降雨終了後も浸透が継続している。また、透水性舗装については、浸透量は8月19日2時から4時にかけて最大値18 mm/hに達しており、表-3に示した透水

表-8 全建物に浸透施設を設置した場合の年平均浸透量, 浸透高および浸透率

浸透施設	年平均雨量 (1) (mm/年)	年平均浸透量 (2) (m ³ /年)	浸透施設集水域換算		全流域換算	
			浸透高 (3) (mm/年)	浸透率 (3)/(1) (%)	浸透高 (4) (mm/年)	浸透率 (4)/(1) (%)
全浸透施設	1,597	5,268,996	1,355	84.8	457	28.6
浸透ます		2,773,561	777	48.7	241	15.1
浸透トレンチ		2,181,645	621	38.9	189	11.8

表-9 全建物に浸透施設を設置した場合の豪雨時における浸透量, 浸透高および浸透率

浸透施設	観測雨量 (1) (mm/2日)	計算浸透量 (2) (m ³ /2日)	浸透施設集水域換算		全流域換算	
			浸透高 (3) (mm/2日)	浸透率 (3)/(1) (%)	浸透高 (4) (mm/2日)	浸透率 (4)/(1) (%)
全浸透施設	173	566,717	146	84.4	49	28.3
浸透ます		64,070	18	10.4	6	3.5
浸透トレンチ		465,914	133	76.9	40	23.1

性舗装の浸透能 $0.50 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (= 18 mm/h)にほぼ一致する。

(4) シナリオ分析

雨水流出抑制施設設置に関する指導⁴⁾, 雨水貯留浸透施設設置助成制度などにより, 今後, 浸透施設は増加することが予想される。ここでは, 浸透施設の設置シナリオを想定し, 2000年から2007年の日雨量を用いたシミュレーションにより, その浸透施設の地下水涵養量を推定すると共に, 2002年8月18日1時から8月19日24時までの豪雨時の時間雨量を用いたシミュレーションにより流出抑制効果を評価した。

a) 建物全てに浸透ますおよび浸透トレンチを設置するシナリオ

対象流域内の全ての建物に, 浸透ますと浸透トレンチを設置した場合の浸透量の増加を推定する。3.(1)で述べたように, 対象流域において現況の建物に設置されている浸透ます一個あたりの平均集水面積は28.4m²/個, 浸透トレンチ1mあたりの平均集水面積は5.5m²/mと算出され, この数量と現況で浸透施設が設置されていない建物地物の面積を用いて設置される浸透ますの個数および浸透トレンチの長さを求めた。その結果, 浸透ますは112,644個増加し総計120,689個, 浸透トレンチは587,147m増加し総延長626,772mとなり, 浸透ますと浸透トレンチ

表-10 道路全てを透水性舗装にした場合の年平均浸透量, 浸透高および浸透率

浸透施設	年平均雨量 (1) (mm/年)	年平均浸透量 (2) (m ³ /年)	浸透施設集水域換算		全流域換算	
			浸透高 (3) (mm/年)	浸透率 (3)/(1) (%)	浸透高 (4) (mm/年)	浸透率 (4)/(1) (%)
全浸透施設	1,597	3,037,551	1,319	82.5	264	16.5
透水性舗装		2,601,443	1,419	88.9	226	14.2

表-11 道路を全て透水性舗装とした場合の豪雨時における浸透量, 浸透高および浸透率

浸透施設	観測雨量 (1) (mm/2日)	計算浸透量 (2) (m ³ /2日)	浸透施設集水域換算		全流域換算	
			浸透高 (3) (mm/2日)	浸透率 (3)/(1) (%)	浸透高 (4) (mm/2日)	浸透率 (4)/(1) (%)
全浸透施設	173	340,353	148	85.5	30	17.3
透水性舗装		306,365	167	96.5	27	15.6

の合計集水面積は現況の約24万m² (表-2) から約316万m²増加し, 約340万m²となる。

表-8に, 全ての建物に浸透ますおよび浸透トレンチを設置した場合の年平均浸透量, その浸透量を浸透施設集水域と全流域で換算した浸透高・浸透率をそれぞれ示す。表-8より, 8年間における浸透施設からの年平均浸透は約527万m³という結果が得られ, 現況施設からの浸透量約75万m³から約452万m³の増加が期待される。現況の透水性舗装を含む浸透施設集水域で換算した浸透率は, 現況の約65%から約85%に増加し, 全流域換算の浸透率も現況の約4%から約29%に増加する。浸透ますの集水域換算の浸透率は, 現況の32%から49%に増加する一方で, 浸透トレンチの浸透率は45%から39%に減少している。これは, 本シナリオでは浸透ます1個あたりの平均的な集水面積を設定しているが, 現況では公園などの浸透域に設置された施設および個々の建物地物により異なる集水面積が浸透率に影響を与えているものと推察される。

次に, 表-9に豪雨時における結果を示す。この表より, 全浸透施設からの浸透量は現況の約7万m³から約57万m³となり, 約50万m³増の流出抑制効果が期待され, 全流域に対する浸透率も28%となり, 現況の4%と比較し大幅に増加する。

集水域換算での浸透ますおよび浸透トレンチの浸透率は, 本シナリオにより次のように変化する。すなわち, 長期シミュレーションにおける現況の浸透率は表-5より概略値76%(浸透ますと浸透トレンチの集水面積は異な

るので、厳密にはこの値よりも小さいから本シナリオの88%, 短期シミュレーションにおいても同様に、表-7より概略値58%から本シナリオの87%に増加する。

b) 道路全てを透水性舗装とするシナリオ

3.(1)で述べたように、道路の透水性舗装面積率は約10%である。ここでは、道路の透水性舗装面積率を100%としたシナリオを想定し、透水性舗装面積を約160万 m^2 増加させた場合の長期シミュレーションによる結果を表-10に示す。この表より、8年間における全浸透施設からの年平均浸透量は約304万 m^3 という結果が得られ、現況の浸透施設からの浸透量約75万 m^3 (表-4)から約229万 m^3 の増加が期待される。浸透施設集水域換算の浸透率は、現況の約65%から約83%に増加するが、これは透水性舗装の浸透率が浸透ますや浸透トレンチと比較し大きいからである。また、全流域換算の浸透率も現況の約4%から約17%と、道路面積率相当まで増加する。なお、透水性舗装の集水域換算の浸透率は、現況とほぼ同じである。

次に、表-11に豪雨時における結果を示すが、透水性舗装の浸透率は約97%で、現況と同程度である。全浸透施設からの浸透量は現況の約7万 m^3 から約34万 m^3 となり、約27万 m^3 の流出抑制効果が期待され、全流域に対する浸透率は長期シミュレーションと同様に約17%となる。

最後にシナリオ分析a)とb)の比較による考察を行う。シナリオ分析a)の結果より、全建物に浸透ます・浸透トレンチを設置すれば、浸透施設の集水域換算の年平均浸透率は、表-8に示すとおり浸透ますが48.7%, 浸透トレンチが38.9%となる。一方、シナリオ分析b)の結果より、全道路を透水性舗装にすれば、表-10に示すとおり集水域換算の年平均浸透率は88.9%となり、透水性舗装の設置効果は大きい。しかし、全流域換算の年平均浸透率を見ると、浸透ますが15.1%, 浸透トレンチが11.8%, 合わせて26.9%, 一方透水性舗装は14.2%となり、浸透ますと浸透トレンチの組み合わせの効果が大きい。これは、対象流域での道路面積が小さいことが影響していると推察される。

4. むすび

本論文は、都市流域において非常に複雑に形成された、個々の建物、駐車場、道路などの不浸透域、および公園、グラウンドなどの浸透域を正確に抽出できる地物データGISを用いて、個別の雨水浸透施設の形状などの実データを組み込み、雨水が浸透施設に貯留し地下に浸透する過程を詳細にモデル化することによって、浸透施設の地下水涵養量を精度良く評価できるモデルを構築したものである。

まず、建物や道路、公園などの各地物において、直接

流出量、表面浸透量を算定し、設置されている個別の雨水浸透施設の流入量、貯留量、直接流出量、浸透量を算定した上で、時々刻々変化する地下水面までの不飽和浸透計算を経て、地下水涵養量を算出する過程をモデル化した。モデル化した雨水浸透施設は、浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装の3種類であり、個別の形状や浸透性を考慮するとともに、浸透ますと浸透トレンチが接続している場合には、両者間の雨水の移動過程を表現することが可能なモデルとなっている。

次いで、構築した地下水涵養モデルを都市化による不浸透域の増大に伴い自然の水循環系が喪失している神田川上流域(約11.5 km^2)を対象にシミュレーションを行った。まず、対象流域において実際に設置されている浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装のデータを収集し、地物データGISの地物要素一つひとつに雨水浸透施設の情報を付与することにより、対象流域における雨水浸透施設の空間分布と建物や道路、公園などの地物種別毎の設置状況を明らかにした。そして、本都市流域地下水涵養モデルを用いて、対象流域の長期実績降水量に対する地下水涵養量および実績豪雨に対する流出抑制量をシミュレーションした結果、現況の雨水浸透施設により年間降水量および豪雨の約4%を地下に涵養できること、および地下水を約10cm上昇できることを示した。さらに、将来増加が予想される雨水浸透施設の設置シナリオとして、全ての建物に浸透ますおよび浸透トレンチを設置した場合、ならびに道路を全て透水性舗装とした場合を想定し、シミュレーションを行った結果、前者のシナリオでは年間降水量および豪雨の約30%を、後者のシナリオでは約17%を地下に涵養できることを示した。以上のように、本論文では地下水涵養モデルの構築と実流域を対象としたシミュレーションを行った。本モデルの検証として地下水位の再現性の確認によりある程度の妥当性が示されているが、地下水涵養量の算定値そのものは、ある程度の誤差を含んでいる。しかし、その算定値を基にした、浸透施設の増加や地表面の浸透域の増加による地下水涵養量の変化量については、精度良く算定できると考えられる。本論文ではそれをシナリオ分析として実施した。このように、本モデルにより都市流域における個別の雨水浸透施設による地下水涵養増加量や流出減少量を定量的に評価することが可能であると考える。

なお本モデルでは、浸透施設の実形状情報や下層土壌の物性値を地物一つひとつに付与することが可能であるが、今回のシミュレーションにおいては考えられる標準的な値を用いた。今後、可能な限りデータを収集し、また新たな調査結果を追加することにより、モデルの精度向上を図る必要がある。また、モデルの対象範囲を地物間の表面流下や下水道内の流下拡大し、都市域における総合的で精緻な水循環モデルへと発展させていくこと

も可能である。そして、各建物や道路に設置する浸透施設の個別の効果を、浸透量の増加量だけではなく、河川流況や地下水水面の変化によって評価できるツールとして活用することが可能となろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたって科学研究費（基盤研究C、代表：河村 明、課題番号：21560545）を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 豊國永次, 渡辺政広：都市流出シミュレーションモデルとその調査流域への適用, 第29回水理講演会論文集, pp.43-48, 1985.
- 2) 後藤恵之輔：都市水害における地下事故二題, 土木学会誌, 第85巻, 第6号, pp.66-69, 2000.
- 3) 芳村圭, 咲村隆人, 沖大幹：2005年9月4日東京市街地浸水災害における気象水文状況分析, 生産研究, Vol. 58, No.3, pp.319-322, 2006.
- 4) 社団法人雨水貯留浸透施設技術協会編：増補改訂雨水浸透施設技術指針 [案] 構造・施工・維持管理編, p.3, 2007.
- 5) 国土交通省都市・地域整備局下水道部 国土交通省河川局治水課：雨水浸透施設の整備促進に関する手引き（案）～浸透能力の低減を見込んだ効果把握及び維持管理の考え方について～, pp.66-74, 2010.
- 6) 奥田敏昭, 鈴木浩生, 陳活雄, 村岡浩爾：大阪平野地地下水涵養モデルを用いた涵養機構の検討, 地盤工学研究発表会 発表講演集, Vol.JGS39, pp.1167-1168, 2004.
- 7) 国分邦紀：東京の台地における地下水・湧水の特徴と変動の一事例, 水文・水資源学会2004年研究発表会要旨集, Vol.17, pp.92-93, 2004.
- 8) 古米弘明, H. K. P. K. Jinadasa, 村上道夫, 中島典之, 脇岡靖明：分布型モデルを用いた都市域雨水浸透施設の流出抑制効果の検討, 水文・水資源学会2004年研究発表会要旨集, Vol.17, pp.160-161, 2004.
- 9) 片桐由希子, 山下英也, 石川幹子：流域の水循環に視点をおいた小流域の緑地環境の変化に関する研究, ランドスケープ研究, Vol.68, No.5, pp.913-918, 2005.
- 10) 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.
- 11) 天口英雄, 安藤義久：SMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの改良について, 水工学論文集, 第46巻, pp.265-270, 2002.
- 12) 中村茂：グリッド型水循環系解析モデルの開発～海老川流域を対象として～, 水工学論文集, 第45巻, pp.103-108, 2001.
- 13) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博：都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.151-165, 2009.
- 14) Herath, S., Musiak, K. and Hironaka, S.: A simulation study of infiltration facility impact on the water cycle of an urban catchment, Water Resources Systems - Hydrological Risk, Management and Development (Proceedings of symposium HS02b held during IUGG2003 at Sapporo, July 2003), IAHS Publ., No.281, 2003.
- 15) Liu, Y. B., De Smedt, F., Hoffmann, L. and Pfister, L.: Assessing land use impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modeling approach, *Environmental Modeling and Assessment*, Vol.9, pp. 227-235, 2004.
- 16) Thomas, A. and Tellam, J.: Modelling of recharge and pollutant fluxes to urban groundwaters, *Science of the Total Environment*, Vol.360, pp.158-179, 2006.
- 17) Trowsdale, S. A. and Lerner, D. N.: A modeling approach to determine the origin of urban ground water, *Journal of Contaminant hydrology*, Vol.91, pp.171-183, 2007.
- 18) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝：地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.63, No.3, pp. 206-223, 2007.
- 19) 「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－第二編 技術解説, pp.64-65, 2000.
- 20) 19)と同じ, pp.36-58, 2000.
- 21) Jia, Y. and Tamai, N.: Water and heat balances in the middle-reach catchment of Tama river and sensitivity analysis, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.42, pp.151-156, 1998.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 荒木千博, 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝, 土屋大：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, 水工学論文集, 第54巻, pp.559-564, 2010.
- 25) 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.
- 26) Hamon, W. R.: Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961.
- 27) Haverkamp, R., Vauclin, M., Touma, J., Wierenga, P. J. and Vachaud, G.: A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.41, pp.286-294, 1977.

- 28) Mualem, Y.: Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: Generalized macroscopic approach, *Water Resources Research*, Vol.14, No.2, pp.325-334, 1978.
- 29) 斉藤広隆, 坂井勝, Jiri Simunek, 取出伸夫: 不飽和土中の水分移動モデルにおける境界条件, 土壌の物理性, No.104, pp.63-67, 2006.
- 30) W. キンツェルバッハ, 上田年比古監訳: パソコンによる地下水解析, pp.63-78, 森北出版, 1989.
- 31) Anderson, M. P. and Woessner, W. W. (藤縄克之 監訳): 地下水モデル 実践的シミュレーションの基礎, pp.87-100, 共立出版, 1994.
- 32) 社団法人雨水貯留浸透施設技術協会編: 増補改訂雨水浸透施設技術指針 [案] 調査・計画編, pp.7, 2006.
- 33) 19)に同じ, p.58, 2000.
- 34) 東京都: 土地分類基本調査 東京西北部 5万分の1, pp.23-39, 1998.
- 35) 32)に同じ, p.84, 2006.
- 36) 19)に同じ, p.83, p.124, 2006.
- 37) 高崎忠勝, 小林一雄, 峰岸順一, 高橋清: 9. 車道透水性舗装の透水特性, 東京都土木技術研究所年報, pp.105-114, 2005.9.
- 38) 石原成幸, 國分邦紀, 川合将文, 向山公人, 百瀬荘太郎, 榎本亮二, 青木大輔: 14. 野川流域における水文環境, 平21. 都土木技術支援・人材育成センター年報, pp.191-202, 2009.
- 39) 細野義純: 東京付近における不圧地下水の環境地理学的研究, 奈良大学紀要, 第31号, pp.147-166, 2003.
- 40) 東京都土木技術研究所: 東京都総合地盤図 (II) 山の手・北多摩地区, 1990.
- 41) 東京都 総合治水対策協議会: 東京都雨水貯留・浸透施設技術指針, 2009.

(2011.9.21 受付)

DEVELOPMENT OF A GROUNDWATER RECHARGE MODEL FOR AN URBAN CATCHMENT USING URBAN LANDSCAPE GIS DELINEATION AND ITS SIMULATION FOR ACTUAL CATCHMENT

Kazuhiro ARAKI, Hideo AMAGUCHI,
Akira KAWAMURA and Tadakatsu TAKASAKI

A groundwater recharge model is developed and applied for urban hydrological analysis. The set-up of this model is based on urban landscape GIS delineation that faithfully describes the complicated urban land use features in detail. The model consists of an effective rainfall model considering three types of infiltration families, saturated and unsaturated water flow model, and ground water model. The infiltration responses to long/short term rainfalls were simulated considering installed/without infiltration facilities, and assuming additional installation of infiltration facilities for buildings and roads. The simulation indicated that the developed model could quantitatively estimate the efficiency of infiltration facilities.