

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

A GROUNDWATER RECHARGE MODEL USING THE GEOGRAPHICAL
FEATURE BASED GIS OF KANDA BASIN

荒木千博¹・河村明²・天口英雄³・高崎忠勝⁴・須藤正大⁵

Kazuhiro ARAKI, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI,
Tadakatsu TAKASAKI and Masahiro SUDO

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 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)

³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)

⁴正会員 東京都土木技術センター 技術調査課(〒136-0075 東京都江東区新砂一丁目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 understand the hydrological cycle in an urban catchment, it is important to model natural and artificial elements which are constituents of complex land covers, and to apply them to the hydrological model. A hydrological model composed of a ground recharge model and a two dimensional groundwater flow model using GIS geographical feature data was developed, and was applied to the upper area of Kanda river basin in Tokyo. The effect of the rainfall infiltration facilities in this area was evaluated.

Key Words : *Geographical feature based GIS, groundwater recharge model, urban catchment, Kanda river basin, effect of the rainfall infiltration facilities*

1. はじめに

都市流域の水循環を理解するためには、複雑に分布する自然的・人工的な要素をできる限り忠実にモデリングを行い、これに水文素過程の解析モデルを適用することが必要である。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る、これまで以上に分かりやすい意志決定支援ツールとしての水循環モデリング手法が求められている。

そこで本研究では、これに対応するモデリング技術として、水循環系の再生に寄与する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¹⁾を活用する。具体的には、図-1に示す通り地物データGISを用いて東京都内の代表的な都市河川である神田川上流域をモデル化し、水文素過程の解析モデルである地下水涵養モデルと地下水流動モデルを用いた水循環モデルの基礎を構築して2000年から2007年

の水循環解析を行い、モデルの有用性について検討を行った。そして、対象流域内の浸透施設による地下水上昇の効果を実算した。

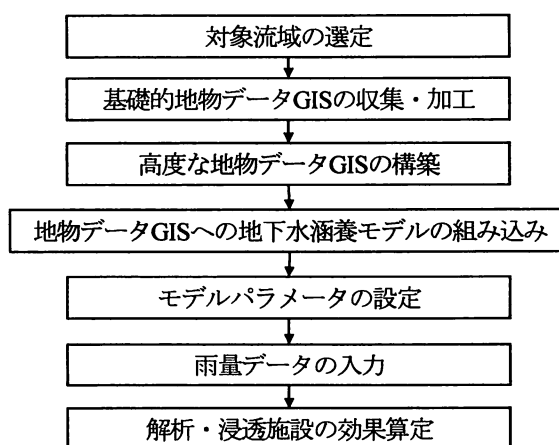


図-1 地物データGISを用いた地下水涵養モデルの構築及び計算フロー

2. 神田川上流域の地物データGISの作成

(1) 対象流域

対象流域は、図-2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11.7km²、流路延長約9kmである。

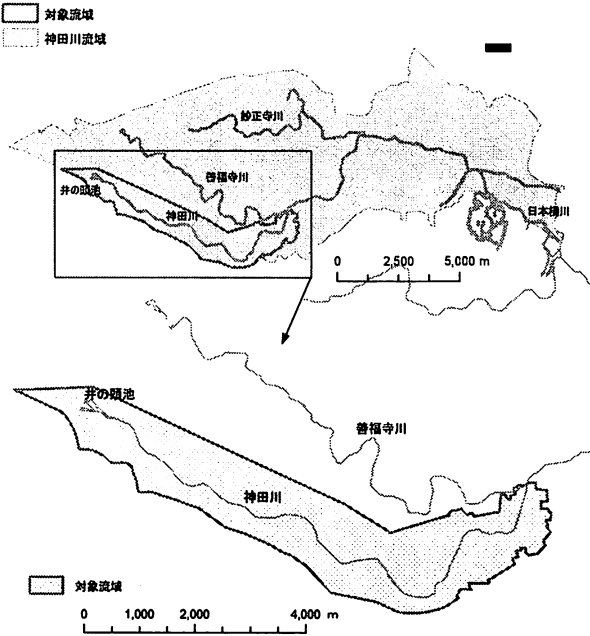


図-2 対象流域の位置図

(2) 地物データGIS作成のためのデータ収集および加工

神田川上流域のモデル化のために収集した基礎データの一覧を表-1に示す。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（ここ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）から、GISソフトウェアArcGISを用いてポリゴン型の地物データGISに加工する。

表-1 地物データGIS作成に必要な基礎データ	
基礎データ	抽出するデータ
東京都基礎的地物データGIS	建物、街区、河道形状（ポリラインデータ）
東京都地形図1/2,500 空中写真	街区内地土地利用
国土地理院5mメッシュ（標高）	街区要素、道路要素の地盤高

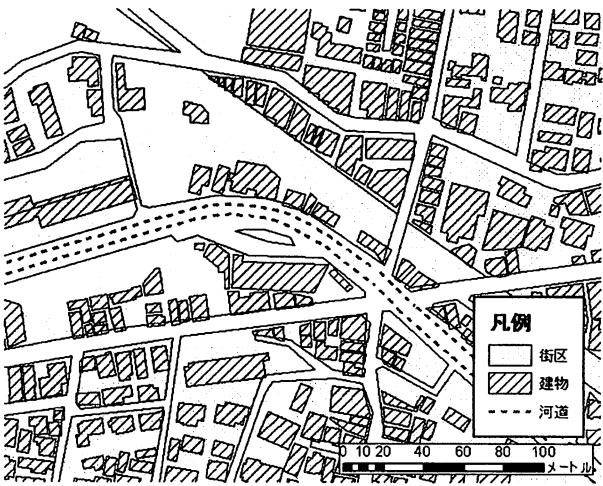


図-3 基礎的地物データGISの例

(3) 街区内土地利用地物要素の作成

図-3に示すポリゴン型基礎的地物データGISで表現される各街区要素を対象として、1/2,500地形図（図-4）と空中写真（図-5）を用いて街区内の駐車場、グラウンド、林地などの土地利用情報を一つひとつ付与し、街区内土地利用地物要素を作成する。土地利用種別に応じて各地物要素の浸透・不浸透特性を設定する。

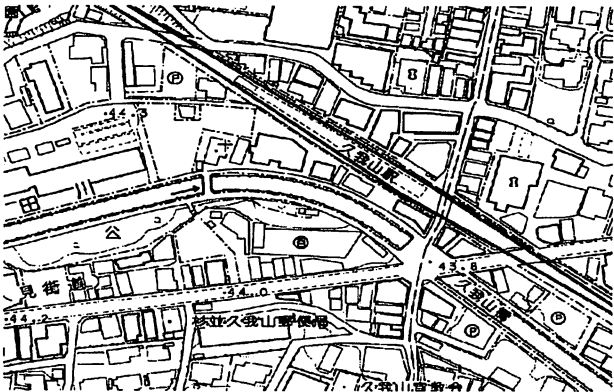


図-4 街区内地物の土地利用抽出のための1/2,500地形図



図-5 街区内地物の土地利用抽出のための空中写真

(4) 道路要素の作成

図-3に示すポリゴン型基礎的地物データGISには、道路に関するデータは含まれていない。本研究では、流域界を表すポリゴンデータ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道路領域を表すポリゴンデータを作成した。

(5) 高度な地物データGISの構築

作成した地物データGIS（図-6及び図-7）による各地物の要素数及び面積を表-2に示す。対象流域内における地物要素の総数は100,418個である。本研究では、駐車場（浸透）、グラウンド、林地、芝地、畑、公園、裸地、間地の50%を浸透性地物として設定した。流域内の浸透面積率は31.5%である。本研究では、浸透域と判定した地物に対し、表-3において浸透パラメータを一様に与えたが、エリア毎あるいは地物毎の詳細な調査データが蓄積されれば、より詳細かつ高精度なデータモデルの構築が可能となる。

表-2 土地利用地物と浸透特性

	地物要素名	要素数	面積(m ²)	特性
街区内地利用地物要素	建物	40,241	3,449,181	不浸透
	駐車場(浸透)	97	60,428	浸透
	駐車場(不浸透)	363	213,180	不浸透
	グラウンド	227	252,218	浸透
	林地	1,667	1,069,470	浸透
	芝地	207	172,544	浸透
	畑	229	188,616	浸透
	公園	146	95,676	浸透
	墓地	73	70,612	浸透
	舗装地	564	384,138	不浸透
	鉄道	435	149,387	不浸透
	間地	9,775	3,518,915	50%浸透
	道路	45,874	1,877,040	不浸透
	河道	367	152,967	不浸透
	合計	100,418	11,654,372	

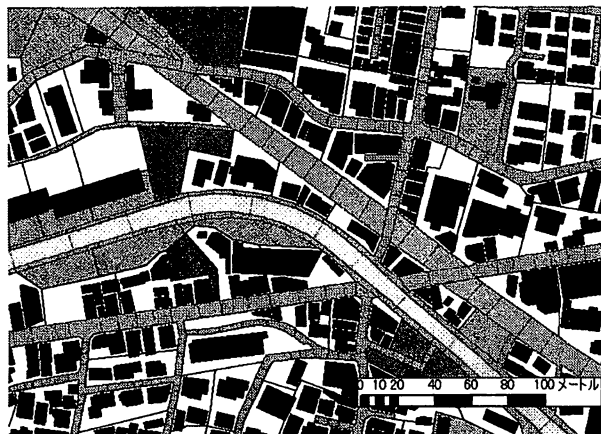


図-6 高度な地物データGIS

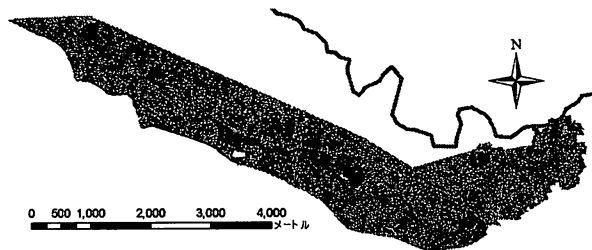


図-7 神田川上流域の地物データGIS

3. 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-8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。この地下水涵養モデルは、各地物からの浸透量を算定する表層土壌モデルと、その浸透量から地下水位を算定する地下水流動モデルから構成される。

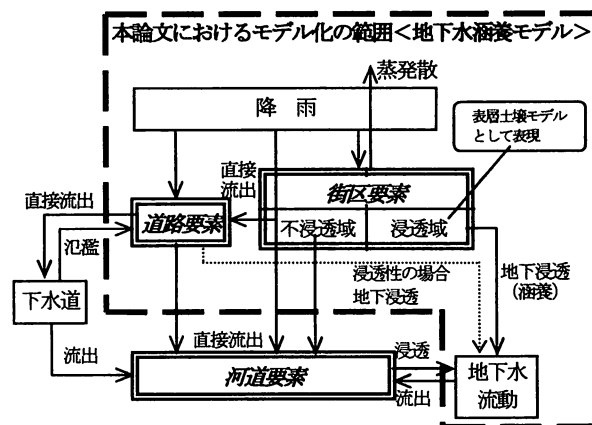


図-8 本論文におけるモデル化の範囲

(2) 表層土壌モデル

本研究では、浸透域のモデルとして図-9に示すSMPTモデル²⁾の浸透域モデルを採用した。SMPTモデルの浸透域モデルは、表層土壌モデルと地下水層モデルの2つで構成される。本研究では、このうち表層土壌モデルのみを採用した。本研究の地下水層モデルについては、(3)で述べる。

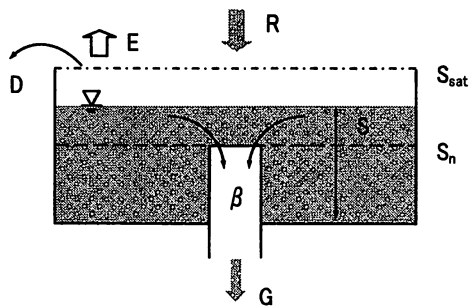


図-9 SMPTモデルの浸透モデル（表層土壌）

図-9で土壌水分量を S とすると連続式は式(1)で表せる。

$$\frac{dS}{dt} = R - E - G - D \quad (1)$$

ここに、 S ：土壌水分量(m), R ：降水量(m/s), E ：蒸発散量(m/s), G ：地下水涵養量（浸透量）(m/s), D ：浸透域の直接流出量(m/s)である。

地下水涵養量 G は、土壌水分量 S と地下水涵養定数 β から式(2)により算定する。

$$G = \begin{cases} 0 & (0 \leq S \leq S_n) \\ \beta(S - S_n) & (S_n < S) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 S_n ：最小容水量(m), β ：地下水涵養定数(1/s)である。

直接流出量 D は、飽和土壌水分量 S_{sat} と現状の土壌水分量 S の関係から式(3)により算定する。ただし、ここでは地表面の流下過程はモデル化せず、計算された直接流出量 D はモデル系外に放出した。

$$D = \begin{cases} 0 & (0 \leq S \leq S_{sat}) \\ S - S_{sat} & (S_{sat} < S) \end{cases} \quad (3)$$

また、蒸発散量 E はハモン式³⁾により算定した。

(3) 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に、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⁴⁾を適用し、その基礎式を式(4)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-10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。

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + G - Q \quad (4)$$

ここに、 h ：ピエゾ水頭（水位）(m), C ：貯留係数(-), T ：透水量係数(m²/s), G ：地下水涵養量（浸透

量）(m/s), Q ：深層への漏水量 (m/s)である。

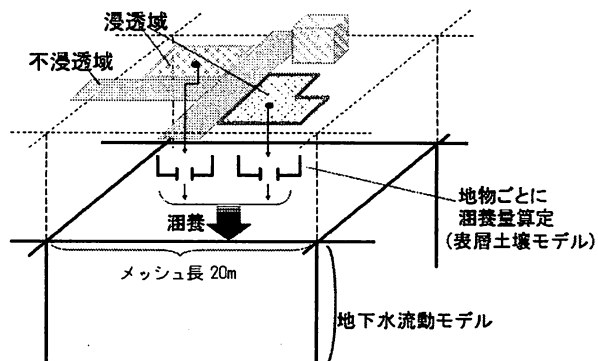


図-10 地物毎の地下水涵養量の算定

また、河道要素から地下層への漏出を考慮するため、既存のモデル化手法¹⁾に加え、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(5)により算定し、式(4)右边に追加する。

$$q_l = l(h_r - h) : h > b_r \\ q_l = l(h_r - b_r) : h < b_r \quad (5)$$

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（水位）(m), h_r ：河道水位(m), b_r ：帯水層底面標高(m)である。

4. 神田川上流域での解析と考察

(1) 計算条件

本研究では、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地下水流動解析を行った。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。

流域界について、神田川上流域の地下水帯水層の範囲と地表面の流域界は必ずしも一致しない。そのため対象流域周辺のボーリングデータ⁵⁾を収集したが、現在、作成している地物GISデータは神田川上流域内であり、今回はその流域と地下水帯水層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-11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⁹⁾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。SMPTモデルに用いる飽和水分量、最小容水量、地下水涵養定数および地下水流動解析に用いる透水量係数及び貯留係数は既往の研究⁹⁾と同じ表-3に示す値とした。また、流域内に存在する浸透施設の設置状況を収集し、設置されている建物地物は浸透性地物

として扱った。現存する浸透施設に該当する地物の合計面積は約0.5km²である。

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。そこで本研究ではボーリングデータ⁹⁾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-11に示す地点①～⑧とした。

表-3 モデルパラメーター一覧

モデル	パラメータ	値
表層土壌モデル	飽和水分量(mm) S_{sat}	250
	最小水分量(mm) S_n	200
	地下水涵養定数(1/s) β	0.8
	初期水量(mm)	180
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}

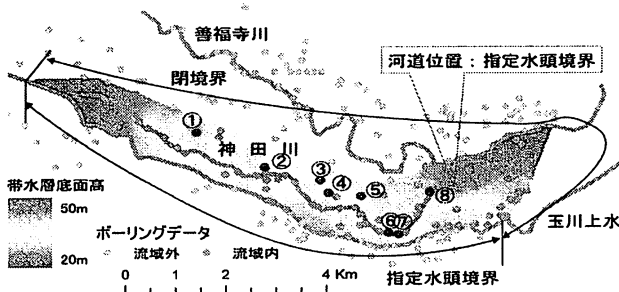


図-11 境界条件とモデル検証地点

(2) 再現結果とその考察

図-13は上から月単位雨量および図-11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を示した。神田川の河道に近い②、⑥、⑦、⑧地点では、河道から離れた他地点と比べて地下水位変動が小さくなっている。これは神田川への漏出を考慮しているためと考えられる。

各地点の計算地下水位は概ね観測の孔内水位近辺を上下しており、再現性は概ね良好であり、本研究で構築した神田川上流域における地物データGISを用いた地下水涵養モデルの有用性は示されたと考える。

(3) 浸透施設設置による地下水上昇効果の算定

再現性が確認された本研究のモデルを用いて対象流域における浸透施設の地下水上昇量に対する設置効果を算定した。8年間平均計算地下水位を表-4及び図-12に示す。

はじめにシナリオ①として、既存の浸透施設（設置面積約0.5km²）の地下水の上昇効果を把握するために、既

存の浸透施設を全てなくした場合を設定した。計算結果を図-14に示す。(2)の地下水再現結果（これをシナリオ②とする）と比較すると、表-5に示す通り既存の浸透施設は平均2cmの地下水上昇効果があると算定された。

次にシナリオ③として、道路の透水性舗装の効果を算定するため、道路要素を全て浸透域に設定した。計算結果を図-15に示す。表-5に示す通り、現状のシナリオ②よりも平均9cmの地下水上昇効果があると計算された。

シナリオ④として、仮に流域内の全ての建物に浸透ます等の雨水浸透施設を設置した場合を想定し、建物要素を全て浸透域に設定した。その結果を図-16に示す。表-5に示す通り、現状のシナリオ②よりも平均19.3cmの地下水上昇効果があると算定された。

本研究では、流域内一様の浸透特性を与えているので、シナリオ③、④の比較から浸透域の増加面積に概ね比例して地下水が上昇する結果となったが、地物毎の浸透特性を設定することで、より詳細な地下水への影響をシミュレートすることが可能となる。また、シナリオ③の結果、道路面積1.877km²に対する地下水上昇効果が9cmであることから、浸透域増分1km²当たりの地下水上昇効果は4.8cmとなる。

表-4 各シナリオによる8年間平均地下水位(T.P.m)

シナリオ	地点①	地点②	地点③	地点④	地点⑤	地点⑥	地点⑦	地点⑧
①浸透施設なし	45.224	44.380	42.220	40.992	39.909	39.014	37.440	36.355
②既存浸透施設	45.258	44.394	42.248	41.021	39.937	39.015	37.462	36.360
③既存浸透施設+全道路透水性舗装	45.374	44.335	42.397	41.154	40.128	39.021	37.620	36.388
④既存浸透施設+全建物浸透ます設置	45.558	44.364	42.520	41.290	40.297	39.029	37.761	36.415

表-5 各シナリオによる地下水上昇効果量(cm)

シナリオ	地点①	地点②	地点③	地点④	地点⑤	地点⑥	地点⑦	地点⑧	平均
シナリオ②-① 既存浸透施設の効果	3.4	1.4	2.8	2.9	2.8	0.1	2.2	0.5	2.0
シナリオ③-② 道路透水性舗装の効果	11.6	-5.9	14.8	13.2	19.1	0.6	15.8	2.8	9.0
シナリオ④-② 浸透ます設置の効果	30.0	-3.0	27.1	26.9	36.0	1.4	29.9	5.6	19.3

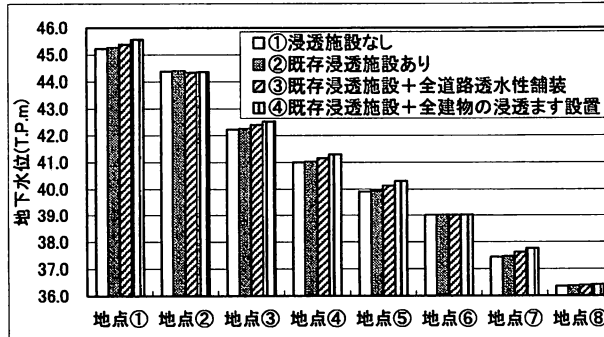


図-12 各シナリオにおける代表8地点平均地下水位

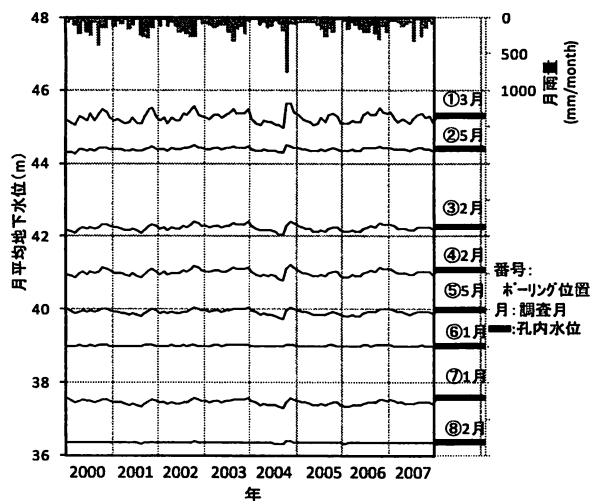


図-13 地下水位再現結果 (シナリオ②: 既存の浸透施設あり)

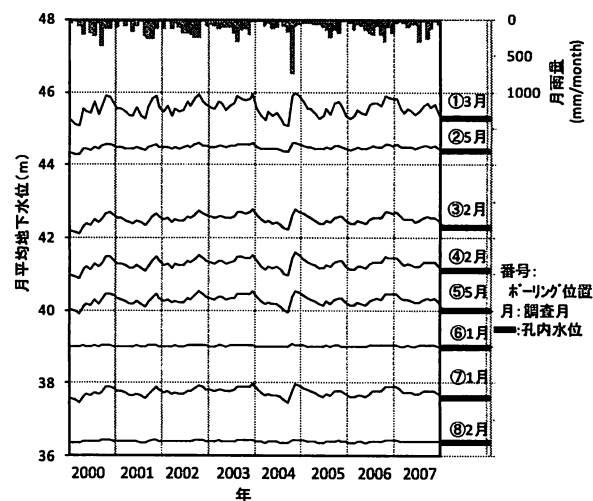


図-16 シナリオ④ (全建物に浸透ますを設置)

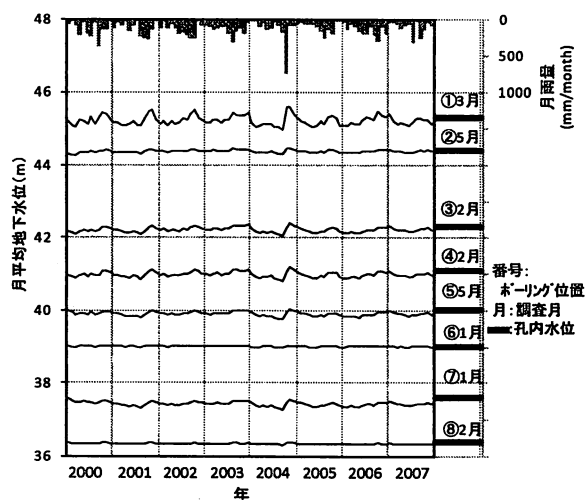


図-14 シナリオ① (浸透施設なし)

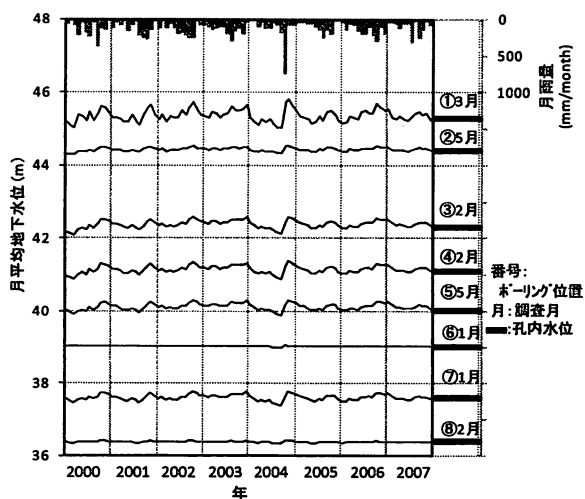


図-15 シナリオ③ (全道路を透水性舗装)

5. 結論と今後の課題

本論文では、都市域における水循環のモデル化においては複雑な地物・地形を精緻に表現することが重要であるとの認識に立ち、神田川上流域において高度な地物データGISを用いた地下水涵養モデルを構築した。このモデルにより、個別の建物の雨水流出抑制施設や特定の透水性舗装道路の効果を詳細に分かりやすく評価できるようになり、水循環系再生に向けた施策立案に利用可能なツールの基礎を構築できた。

今後は、都市域の下水道モデルや表面流モデルなどを組み込み、総合的で精緻な都市域水循環モデルに発展させてゆく予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 安藤義久・虫明功臣・高橋 裕: 丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響, 第25回水理講演会論文集, pp.197~208, 1981.
- 3) Hamon, W.R.: Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 入田昂浩, 河村明, 天口英雄: 地物データGISを用いた国分寺試験流域の地下水涵養モデルについて, 第35回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, II-036, 2009.

(2009. 4. 9受付)