

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

A NEW GROUNDWATER RECHARGE MODEL FOR AN URBAN CATCHMENT USING THE GEOGRAPHICAL FEATURE BASED GIS

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

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 工修 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)

A new groundwater recharge model for an urban catchment, an important process in the hydrological cycle, was developed. The model was developed using GIS geographical feature data, which can describe the infiltration area more accurately than the grid-type model, where artificial development of impermeable surfaces such as buildings, roads and parking spaces has formed complex land covers. In this research, the model was applied to the upper area of Nogawa basin in Kokubunji City using the actual GIS geographical feature data. The Infiltration process in the upper soil layer was modeled using SMPT model and the groundwater flow was modeled using a two dimensional model.

Key Words : *Geographical feature based GIS, groundwater recharge model, urban catchment, hydrological model, detailed land use*

1. はじめに

都市流域の雨水流出プロセスは、山地流域とは異なり、建物、道路などの人工的な構造物からなる流出面と、地表面の雨水を河川まで運ぶ道路の側溝、雨水・下水道管路などの流路から構成され、雨水の流出経路は非常に複雑なものとなっており¹⁾、これらの流出面および流路は水循環を構成する素過程の全てに影響を与えている。また、都市域の治水対策は、河道の拡幅に加え、流域内での雨水浸透・貯留施設の設置が進められている。都市域において詳細な水循環系の実態把握と雨水浸透貯留施設設置の効果を評価するためには、人工的に設置され、これから設置する様々な施設を考慮可能な水循環シミュレーションモデルが不可欠である。

これまで提案されている水循環機構の把握を目的とした多くの水循環モデル^{2)~6)}は、集中型あるいは分布型であるが、雨水浸透貯留施設の効果を詳細にシミュレーションするには分布型が用いられる。水循環モデルの中で、地下水涵養モデルは浸透域の雨水浸透、直接流出、蒸発散そして地下水涵養を解析する中核要素で、様々な

数式表現が提案されている。既往の分布型水循環モデルでは、個々の地下水涵養モデルの高度化が進んできてはいるものの、地表面の形状はグリッド型が多用され、都市河川のピーク流量に影響を与える不浸透域あるいは地下水涵養量に強い影響を与える浸透域に関する情報としては、1980年代から依然として流出率あるいは不浸透面積率が利用されている。流出率あるいは不浸透域面積率を用いて個別の建物、道路、駐車場等の地物を表現することはできないので、既往の手法では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を検証するなど現実的な政策評価を詳細かつ精度よく行うことは容易ではない。

近年GISデータの整備が進み、建物や道路などの地物を的確に表現出来る多角形(ポリゴン形状)のベクター型⁷⁾を用いた地物データの作成が行われている。これまで、都市流域は人工的要素を含むため詳細な空間情報の記述が容易ではなかったが、これらの地物データを忠実に表現可能なベクター型土地利用情報を用いることで、特定の建物、道路といった詳細な空間情報を抽出することが可能となった。

著者ら⁸⁾は、このようなGISデータを洪水流出解析モデ

ルへ適用できるように加工した高度な地物データGISの作成を行っている。本論文では、地下水涵養機構に対して精緻な都市空間モデルデータとしての高度な地物データGISを適用した、都市流域の地下水涵養モデルを提案する。

図-1は、提案する地物データGISを用いた地下水涵養モデルの構築及び計算フローである。まず対象とする都市流域の基礎的地物データGISの収集・加工を行い、土地利用情報を付加して土地利用種別毎に要素分割を行う。その分割要素を合成し、高度な地物データGISを作成する。地物データGISの要素一つ一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する。各地物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構造としている。

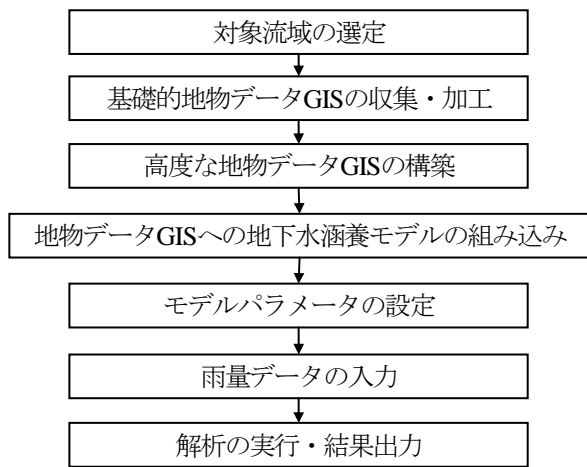


図-1 地物データGISを用いた地下水涵養モデルの構築及び計算フロー

2. 高度な地物データGIS⁸⁾の作成

(1) 地物データGISの収集および加工方法

本研究では、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GIS⁸⁾（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）を収集し、GISソフトウェアを用いてポリゴン型の地物データGISに加工する。このポリゴン型地物データGISに新たに土地利用等の属性情報を付加し、ポリゴンの分割と合成を行うことにより高度な地物データGISを作成する。

(2) 高度な地物データGISの構築

図2-(a)に示す街区要素のポリゴン型地物データに対し、1/2500地形図を参考にして林地、グラウンド、畑などの土地利用情報を手作業で付加する。一つの街区要素に複数の土地利用が存在する場合や1/2500地形図で区画分割されている場合は、街区要素を細分割し個別に属性

を付加することによって、図2-(b)に示す微小な街区要素を作成する。

道路要素は、対象区域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2-(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する。建物要素は街区要素の内部にあり、街区内の土地利用の一種であるので、街区要素の区分の一つとする。こうして図2-(d)に示す高度な地物データGISを構築する。高度な地物データGISの要素区分の例を表-1に示す。

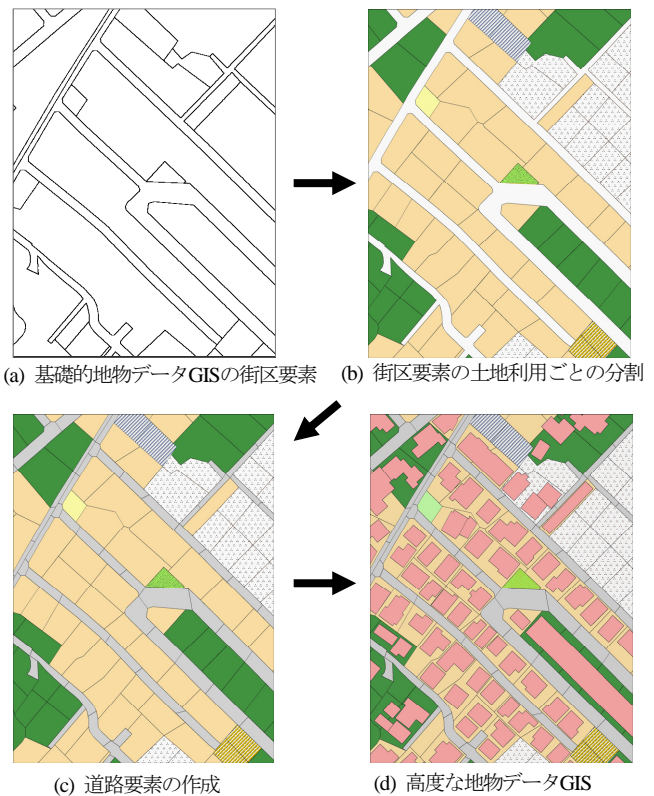


図-2 高度な地物データGISの作成

表-1 地物要素の区分例

		要素名
街区内 土地利用 地物 要素	不浸透域	建物
		駐車場(不浸透)
	浸透域	林地
		芝地
		グラウンド
		畑地
		駐車場(浸透)
		間地
		裸地
	道路要素	
河道要素		河道

作成した地物データGISの地物要素毎の浸透特性に応

じて、地物毎の地下水涵養過程を算定することができる。図-3に示す通り、地物データGISにより浸透域を正確に抽出し、個別にその地物特性に応じた浸透モデルを適用することが可能となる。空間的に複雑な地形・地被特性を有する都市流域においては、地物の実形状をモデル化する意義は大きい。

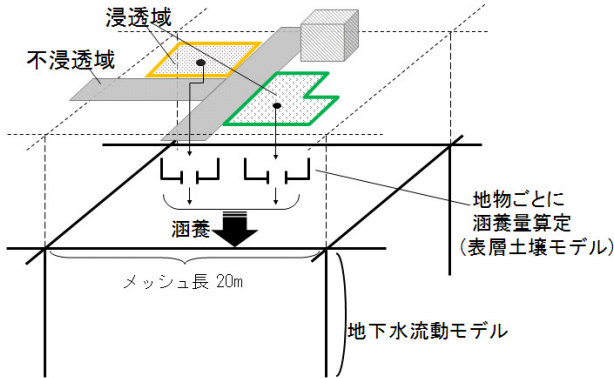


図-3 地物毎の地下水涵養量の算定

3. 地物データGISを用いた地下水涵養モデル

(1) 本研究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-4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。

浸透域は、蒸発散による土壌水分量の減少、土壌が飽和することによる直接流出、及び地下水涵養量の算定を行う表層土壌モデルとして表現する。不浸透域は、そこへの降雨がそのまま直接流出として地下水涵養モデルの系外に流出するとした。

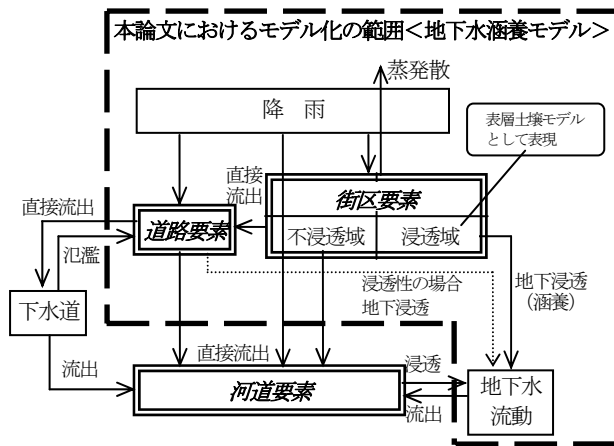


図-4 本論文におけるモデル化の範囲

(2) 本提案モデルで用いた表層土壌モデル

本研究では、浸透域のモデルとして図-5に示すSMPTモデル⁹⁾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。本提案モデルでは、このうち表層土壌モデルのみを採用した。本提案モデルの地下水層モデルについては、(3)で述べる。

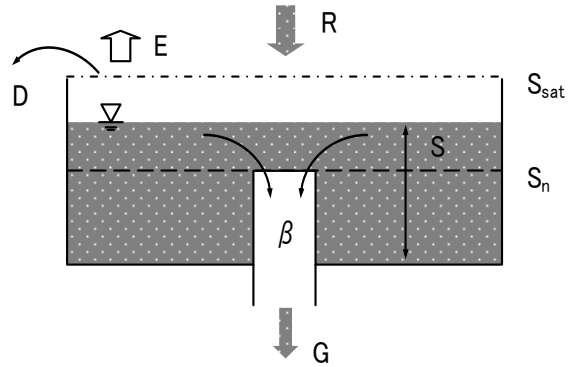


図-5 SMPTモデルの浸透モデル (表層土壌)

図-5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¹⁰⁾により算定した。

なお本研究の目的は、都市域の地形・地物を精緻に扱える地物データGISを用いたモデル構築そのものであり、新たな定式化を目指したものではない。したがって、今後はここで採用した以外の式やモデルを用いることも想定している。

(3) 本提案モデルで用いた地下水流動モデル

本提案モデルの地下水流動モデルにおいては、地質構造を地表面のように地物要素で表現せず、グリッド型のモデル化を行った。本論文では、広域地下水平面2次元モデル¹¹⁾を適用した。基礎式を式(4)に示す。

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

ここに、 h : 透水層底面からの地下水深(m), C : 貯留係数(-), T : 透水係数(m/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。

地表面上の地物要素からの地下水涵養量 G は前述の図-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。

4. 適用例及び考察

ここでは、多摩川水系野川の上流域を対象に、提案した都市流域地下水涵養モデルの適用を試みた。基礎的地物データGISを用いて高度な地物データGISを実際に作成し、地下水涵養モデルによる地下水変動の再現結果と地物要素の属性条件変更に伴う地下水変動の計算結果とから、本提案モデルの有用性を考察する。

(1) 対象流域の概要

対象とした野川上流域は、図-6に示すように多摩川水系野川の源流部で、国分寺市の南部と府中市の北西部にまたがる武蔵野台地上に位置し、流域の南部は国分寺崖線となっている。武蔵野台地の地質断面は約1mの表層の下位に立川ローム層と武蔵野ローム層からなる層厚7~10mのローム層があり、その下位に不圧地下水の帯水層である砂礫層が約5m存在する。さらにその下位に約2mの粘土層が不透水層として存在し、不透水層に沿って砂礫層内を水深0.5~1mで西から東に向かって流下した地下水は、国分寺万葉園内(図-6の赤三角印)で湧水として流出している。

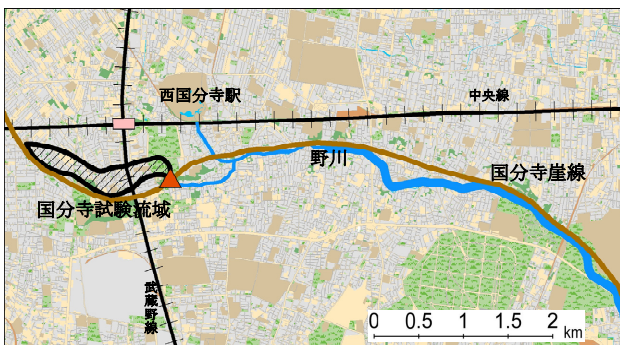


図-6 対象流域の位置図

流域界は、安藤ら¹²⁾によって流域内外の10点のボーリング調査結果を用いて設定された地下水流域界とした。

本研究では、この流域を「国分寺試験流域」と呼ぶ。土屋¹³⁾によると、豊水期では概ねこの地下水流域界に沿った地下水流動であるのに対して、渇水期では流動方向が異なると報告されているが、本研究の目的は地下水流動の詳細な把握ではないので、安藤らによる流域界を採用した。

(2) 野川上流域のモデルデータの作成

2.の方法により作成した野川上流域の地物データGISを図-7に示す。なお、再現する地下水位データが1984年の観測値であるので、当時の地物要素を再現している。表-2は、同流域における地物データの種類の要素数及び面積を示す。浸透域面積率は51%である。図-8は対象流域における地物を浸透/不浸透の2種で表示したものである。

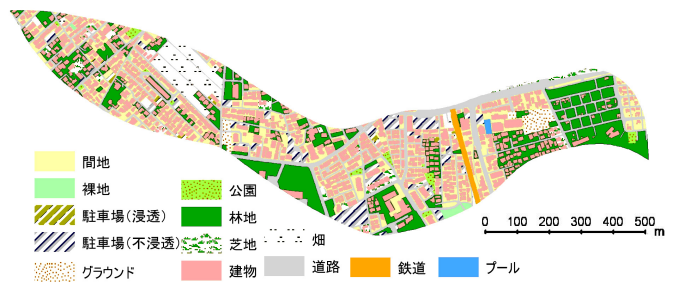


図-7 野川上流域の地物データGIS

表-2 野川上流域の地物要素

	要素名	要素数	面積(m ²)	浸透域
街区内 土地利用 要素	建物	1,043	96,318	
	駐車場(浸透)	14	142	○
	駐車場(不浸透)	107	18,049	
	グラウンド	26	6,440	○
	林地	436	79,647	○
	芝地	49	8,621	○
	畑	56	19,754	○
	公園	20	3,595	○
	プール	2	649	
	裸地	14	1,654	○
	鉄道	33	3,559	
道路要素	間地	658	74,741	○
	道路	746	70,808	
	合計	3,204	383,977	

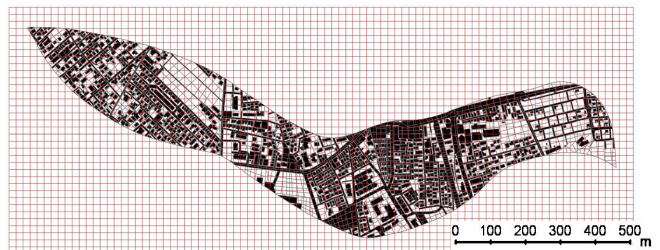


図-8 浸透域/不浸透域図(黒:不浸透域)

図-9に地下水流動モデルにおける帯水層底面高と地下

水位観測地点(W1~W6)を示す。帯水層底面の高さはボーリングデータからArcGISを用いて等高線を作成し、グリッドデータに変換した。なお、国分寺試験流域では20m間隔のグリッドとした。

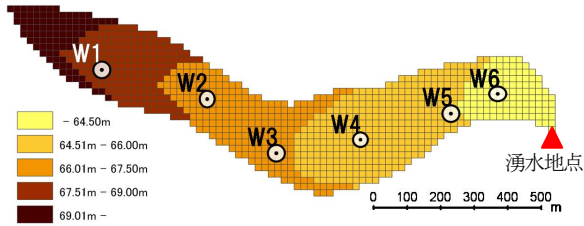


図-9 地下水流動モデルにおける帯水層底面高と地下水位観測地点

(3) 計算条件

地下水位の観測値が入手できた1984年1月1日から12月31日までの1年間を対象に、本提案モデルを用いてシミュレーションを行い、地下水位の実績値と計算値の比較を行った。計算タイムステップは1日とし、日単位降雨および日平均気温として流域近傍の気象庁府中観測所の観測値を用いた。地下水涵養定数、透水係数、比貯留量は、既往の研究¹⁰⁾により得られている値を参考に日雨量を用いて実績地下水位に合うよう調整し、表-3の通り設定した。本来、街区内地土地利用地物要素の種類毎にパラメータ値を設定すべきであるが、ここでは同一とした。

初期地下水位は、計算年の1月1日における地下水観測地点W1~W6の観測値からArcGISを用いて内挿処理を行い、地下水位コンターを作成し、図-10に示すグリッドデータに変換した。境界条件は、涵養された地下水は図-6に示す三角形で示した湧水地点から流出しているの、該当メッシュで指定水頭境界とし、その他の流域界では閉境界として設定した。

表-3 モデルパラメーター一覧

モデル	パラメータ	値
地下水涵養モデル	飽和水分量(mm)	135
	最小水分量(mm)	60
	地下水涵養定数(1/s)	0.000001
	蒸発散定数	0.6
	初期水量(mm)	60
地下水流動モデル	透水係数(m/s)	$1.0 \times 10^{-4} \sim 3.0 \times 10^{-2}$
	貯留係数(-)	0.01

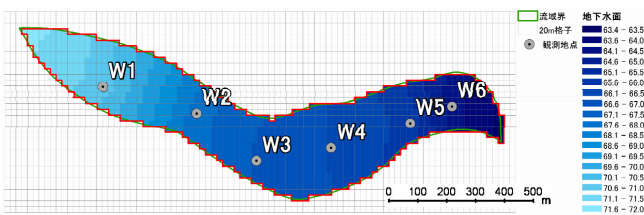


図-10 初期地下水位の平面分布

(4) 再現結果とその考察

図-11に、地下水観測点W1からW6までの観測値(点)と計算地下水位(実線)を順に示す。6月の降雨により上昇した地下水位が7月から低減する部分において、W2~6地点では計算値の低減が実測よりも小さくなっているが、各地点とも再現性は概ね良好である。

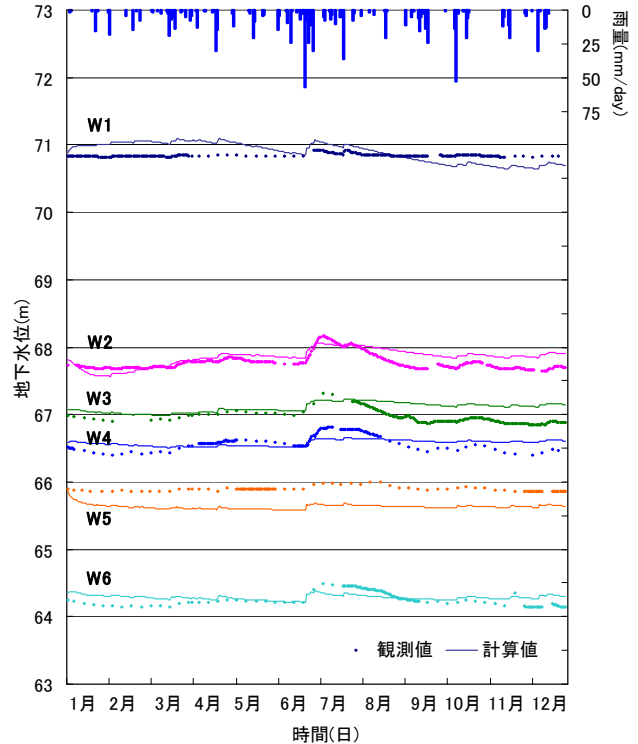


図-11 地下水位再現結果

(5) 浸透域の変化が地下水涵養に与える影響

本提案モデルの有用性を示すため、適用例である野川上流域のモデルを用いて浸透域の増減シナリオを設定し、地下水に及ぼす影響をシミュレーションした。シナリオとして、①道路を全て透水性舗装とした場合、②畑が全て宅地化され不浸透域となった場合を想定した。浸透域面積率は、再現計算における土地利用では51%であったのに対し、シナリオ①では69%に増加、シナリオ②では46%に減少する。各シナリオでの浸透域/不浸透域を図-12に示す。ここでは、土地利用ごとの浸透能を区別せず同じ浸透能パラメータとした。シミュレーション結果を図-13に示す。

シナリオ①では、地点W1~W6で同程度の地下水上昇量となった。浸透域となった道路要素が流域内に偏り無く存在するためであると考えられる。一方シナリオ②では、地点W2、W3での地下水位の低下が他の地点に比べて大きい。これは、宅地化を想定した畑のほとんどが地点W2の西側(左側)に隣接した区域にあるためと考えられる。

このように本研究の地下水涵養モデルは、地表面の地

物・地形条件を適切に組み込み、その影響を評価できるモデルとなっている。

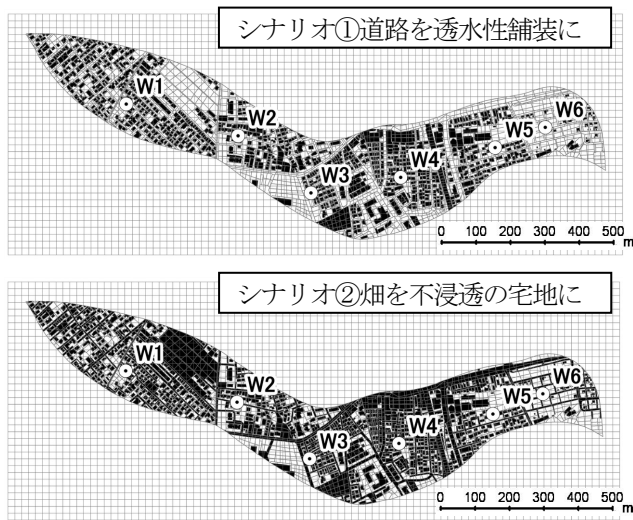


図-12 浸透域／不浸透域の変更シナリオ図

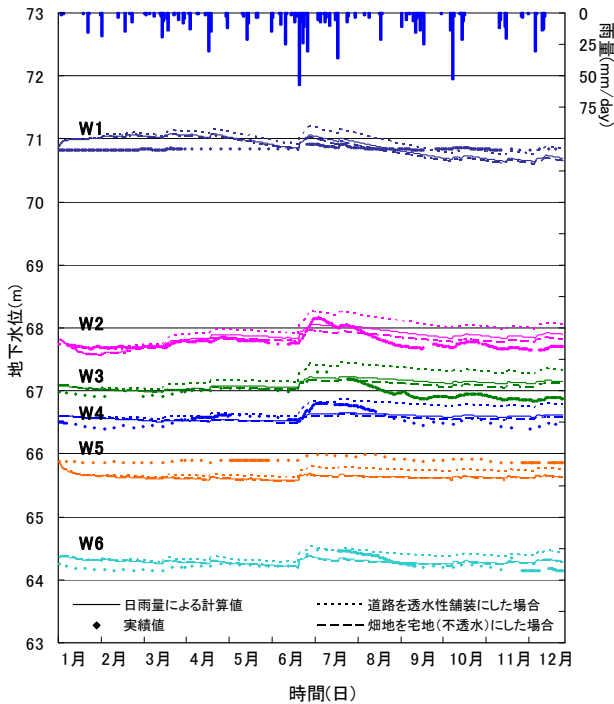


図-13 浸透域の変更が地下水位に及ぼす影響

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、高度な地物データGISの作成とそれを用いた新たな地下水涵養モデルの提案を行い、適用例によって、より詳細なシミュレーションが行えることを確認した。

今後は、都市域の下水道モデルや表面流モデルなどを

組みこみ、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。また、水循環の各過程に対しては様々なモデルが提案されている。本論文の地下水涵養モデルでは、SMPTモデルの浸透モデルを適用したが、今後はその適用限界と他のモデルの適用について検討を行い、組み合わせることによってモデル精度の向上を図る。

謝辞：地物データGISの作成において、東京都立大学工学部土木工学科の入田昂浩氏には多大なるご支援をいただいた。ここに記して心より感謝申し上げます。

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) 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—, 「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, 第一編 概説, pp.45-82, 2000.12.
- 3) 奥田敏昭, 鈴木浩生, 陳活雄, 村岡浩爾：大阪平野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.
- 4) 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.
- 5) 古米弘明, H.K.P.K.Jinadasa, 村上道夫, 中島典之, 舩岡靖明：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.
- 6) 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.
- 7) 高坂宏行：地理情報技術ハンドブック, pp.4-16, 2002.
- 8) 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, Vol.63 No.3, pp. 206-223, 2007.
- 9) 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.
- 10) Hamon, W.R. : Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961.
- 11) 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.
- 12) 安藤義久・長畑範明：台地の湧水の保全に関する研究, 第3回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp.565-566, 1987.
- 13) 土屋十圓：都市中小河川の水文環境(その1) —野川の水量の歴史的視点と涵養域—, 水利科学, No235, pp. 1-16, 1997.6.

(2008. 9. 30受付)