

グリッド型水循環系解析モデルの 多摩川流域への適用

APPLICATION OF A GRID-BASED HYDROLOGICAL CYCLE ANALYSIS MODEL TO TAMA RIVER BASIN

羽田野琢磨¹・高木康行²・中嶋規行³・中村茂²・Srikantha HERATH⁴

Takuma HADANO, Yasuyuki TAKAGI, Noriyuki NAKASHIMA, Shigeru NAKAMURA and
Srikantha HERATH

¹正会員 工修 日本工営株式会社 河川・水工部 (〒330-0801 埼玉県さいたま市土手町1-2JA共済埼玉ビル8階)

²正会員 工修 日本工営株式会社 総合技術開発部 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

³非会員 工修 日本工営株式会社 河川・水工部 (〒330-0801 埼玉県さいたま市土手町1-2JA共済埼玉ビル8階)

⁴正会員 工博 国際連合大学 (〒150-8925 東京都渋谷区神宮前5-53-70)

A grid-based hydrological cycle analysis model, developed and verified in an urbanized small river watershed, is applied to Tama river basin. This model is a physically based distributed one considering not only natural hydrological cycle but also artificial water use. In this paper, a modeling technique is described for the Tama river basin that has 1,240km² and a population of about 3.4 million. Then the model calibration and verification are carried out with several river and ground water observation records. The simulated results show relatively good agreement with the observation. Interflow conductivity is found to be an important parameter for river discharge during the flood and its recession period.

Key Words : Hydrological cycle, physically based distributed model, Tama river basin

1. はじめに

流域の都市化に伴う治水・利水・環境上の様々な弊害に対して、水の機能を適切でバランスのとれた状態とする「水循環系の健全化」を目的に、各種の水施策を総合化する水マスタープランが検討されている^{1), 2)}。水マスタープラン等の検討では、地域住民や関連行政部局等の異なるバックグラウンドを持つ人々が協力して水循環系の健全化に向けて取り組む必要があり、このためには、流域における水循環系の実態や各種施策の効果を定量的かつ分かりやすく説明するためのツールとして水循環系解析モデルが有効である。

本研究の最終的な目的は、多摩川流域を対象に水と汚濁負荷の流れを再現可能な解析モデルを構築し、流域水循環系の実態把握とそれを踏まえた水循環系健全化施策の効果を定量的に明らかにすることである。本論では、その第一段階として水量を対象に、中村ら³⁾の開発したグリッド型水循環系解析モデルを多摩川流域に適用し検証した結果について述べるものである。

2. 対象流域のモデル化

(1) 解析モデルの概要

本研究で用いる解析モデルは、中村ら³⁾が開発したグリッド型水循環系解析モデルである。このモデルは、Herath・虫明らの研究^{4), 5), 6), 7)}を参考に、都市内小河川である海老川流域(流域面積27.1km²)を対象に開発・適

用されたものであり、河川流量及び地下水位に関して良好な再現性を有していることが確認されている。このモデルは、物理パラメータを持つ支配方程式を数値解析することで、地表、表層土壌、帯水層及び河道における水の移動を追跡する分布物理型モデルであるため流域のスケールや土地利用及び地質構造等の条件が異なっても、適切な入力条件を設定すれば、同様の再現性が期待できる。

グリッド型水循環系解析モデルでは、流域を図-1のように一定間隔の正方形メッシュの集合として表現し、それぞれに図-2に示す直方体を設定して解析を行う。また、入力条件として流域の地形、地質、降雨、蒸発散能等の自然条件に加え、雑排水量、下水処理場からの放流、上水道漏水量、下水道浸出水量及び上工水・農業用水の取水量等の人為的な水の流れを考慮できる。出力される結果より、メッシュ毎の浸透、蒸発散、河川への表面・中間・地下水流出及び帯水層内の地下水流動や、数百mの間隔で設置された河道計算断面での時間単位の河川流量といった、流域水循環系に関する詳細な情報を取得することができる。解析モデルは、①地表+表層土壌モデル、②帯水層モデル、③河道モデルから構成され、それぞれに支配方程式を設定し数値解析することで水の流れを追跡する。解析手法の詳細は文献³⁾に示されているため、ここでは多摩川流域のモデル化を中心に以下に述べる。なお、解析に用いたメッシュサイズは、地形条件の再現性と計算時間及び出力ファイルサイズを考慮して200mとした。

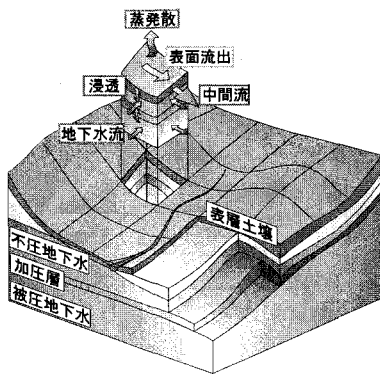


図-1 流域表現の概念図

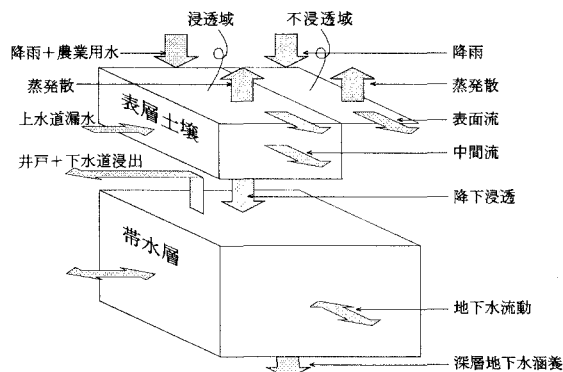


図-2 メッシュ内の概念図

(2) 対象流域の概要

多摩川流域は、その源を山梨県塩山市の笠取山(標高1,953m)に発し、山梨県、東京都、神奈川県を経由して羽田沖の東京湾に流出する幹線流路延長138km、流域面積1,240km²の一級河川である。図-3に示すように流域の土地利用は、上流域に森林が広く分布し、中下流域に市街地が進展している。流域内の人口は約340万人であり、そのほとんどが中下流域の市街地に集中している。

本研究では、市街化の進展した中下流域の水循環系に着目し、解析対象範囲を河口から約80km地点の白丸調整池ダム下流域(流域面積845km²)とした。白丸調整池ダムより上流からの流出量は、ダム放流量及び発電水量の日単位の実測値を境界条件として与えた。

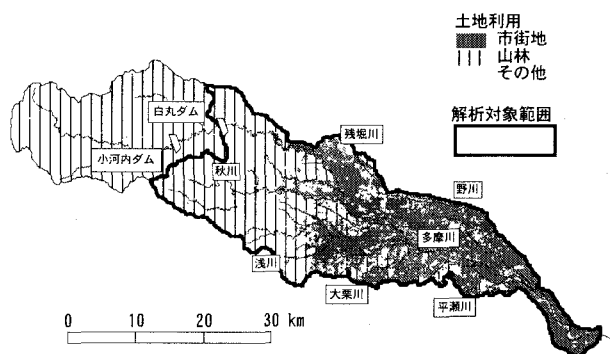


図-3 解析対象流域とその土地利用

(3) 地表+表層土壌モデル

1メッシュの地表面を不浸透域と浸透域に区分し、以下のモデル化を行う。

a) 不浸透域モデル

不浸透域モデルでは、降雨と蒸発散能を入力として、一定の窪地貯留能(2mmと設定)をもつ仮想池の水収支計算より蒸発散量と表面流となる余剰降雨が計算される。

この際、計算メッシュ内に占める不浸透域の割合(不浸透面積率)を設定する必要がある。不浸透面積率は、洪水時のピーク流量や浸透量の計算結果に大きく影響を及ぼす重要なパラメータである。土地利用に関する数値情報が利用可能であることを考えると、土地利用地目毎の不浸透面積率の値を与えることで流域全体の不浸透面積率の分布を設定することが可能となる。

ここでは、文献⁸⁾の方法を参考に、できる限り客観的な地目毎の不浸透面積率の算定を行う。まず、流域を比較的市街地化の進展した下流域・中流域と森林が主要な土地利用である上流域に区分し、表-1に示すサンプリング領域を設定する。次にこの領域で1/25,000の地形図からサンプリングした不浸透域と、土地利用に関する数値情報を重ね合わせて地目毎の不浸透面積率を設定した。なお、下流域では鶴見川流域でサンプリングされた値⁹⁾を用いた。表-2に上記の方法で求めた土地利用地目毎の不浸透面積率を示す。道路用地の不浸透面積率が0.3~0.6となるのは土地利用メッシュ全域が必ずしも道路とは限らないためである。また、下流域と中流域で比較した場合、密集低層住宅(下流域0.50、中流域0.37)と道路用地(下流域0.51、中流域0.61)に違いが見られ、その他について概ね同程度の値となった。この違いは、下流域では住宅密集度が高いこと、中流域では幹線道路が多く土地利用メッシュ内に占める不浸透域が大きいことに起因すると考えられる。

表-1 不浸透域のサンプリング領域

	サンプリング領域	重ね合わせる土地利用情報
下流域	鶴見川流域の約南半分の領域	細密数値情報(1994年)
中流域	1km ² 四方の領域を無作為に10箇所抽出	同上
上流域	同上	1/10細分区分画土地利用

表-2 土地利用地目毎の不浸透面積率

細密数値情報	下流域	中流域	1/10細分区分画土地利用	上流域
山林・荒地等	0.07	0.01	田	0.13
田	0.10	0.12	畑	0.10
畑・その他農地	0.14	0.14	果樹園	0.06
造成中地	0.12	0.08	その他の樹木畑	0.06
空き地	0.25	0.26	森林	0.01
工業用地	0.37	0.38	荒地	0.00
一般低層住宅	0.38	0.35	建物用地A	0.43
密集低層住宅	0.50	0.37	建物用地B	0.20
中・高層住宅	0.33	0.39	幹線交通用地	0.32
商業・業務用地	0.42	0.45	その他用地	0.22
道路用地	0.51	0.61	湖沼	0.00
公園・緑地等	0.13	0.16	河川A	0.20
その他の公共・公益施設	0.21	0.20	河川B	-
河川・湖沼等	0.05	0.03	海浜	-
その他	0.17	0.38	海水域	-

b) 浸透域+表層土壌モデル

浸透域モデルは、地表面の仮想池と地表面下2mまでと仮定した不飽和土壌により構成され、降雨、蒸発散能及び

築を試みる。なお、上流域の森林土壌の下位に分布する基盤岩は不透水層として取り扱った。

帯水層モデルでは、1つの帯水層内における地下水の流動を式(5)を支配方程式として解析する。

$$S \frac{\partial h_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h_g}{\partial y} \right) + \frac{k'}{b'} (H - h_g) - Q_d \quad (5)$$

ここに、 T ：透水量係数 [m^2/s]、 S ：貯留量係数、 Q_d ：鉛直方向の流量条件（浸漏・涵養、降下浸透、井戸揚水など） [m/s]、 h_g ：地下水ピエゾ水頭 [m]、 H ：上又は下層の水頭 [m]、 k' ：他層との間の難透水層の透水係数 [m/s]、 b' ：同層厚 [m] である。透水係数と貯留係数は、帯水層の地質毎に再現計算により同定する。地下水解析の境界条件は、既往の調査結果を踏まえ、多摩川左岸中下流部の被圧地下水流出境界及び河口部で水位固定、その他の境界で水平方向の流動をゼロと設定した。

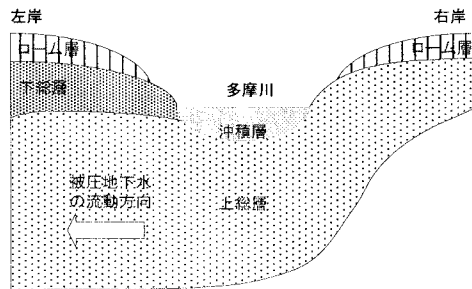


図-6 多摩川流域における帯水層構造の概念図

また、河川と帯水層間の水分移動はMcDonald・Harbaugh (1988) ¹⁵⁾ を参考にして式(6)のようにメッシュ毎の河川水位と地下水位との相互関係により計算する。

$$Q_{dr} = \begin{cases} k_{bed} A_{bed} & ; h_g \leq H_{riv} \\ k_{bed} \frac{h_g - H_{riv}}{b_{bed}} A_{bed} & ; h_g > H_{riv} \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 Q_{dr} ：河川への浸漏又は河川からの涵養 [m^3/s]、 k_{bed} ：河床材料飽和透水係数 [m/s]、 A_{bed} ：浸潤面積 [m^2]、 b_{bed} ：河床材料厚さ [m]、 H_{riv} ：河川水位 [m] であり、 $h_g > H_{riv}$ の場合に地下水流出が生じる。河床材料の飽和透水係数は同定対象とする。

(5) 河道モデル

河川の流れ解析にはKinematic Wave Modelを適用し、計算断面間隔は約500m、Manningの粗度係数は各河川の河道計画資料等を参考に $n=0.03$ とした。河道モデルでは、地表面+表層土壌モデルで求めた地表面流出と中間流出、帯水層モデルで求めた地下水流出、下水処理場からの放流量及び雑排水を横流入として与え、上工水と農業用水の取水量を横流出として与える。

河川へ流入・流出成分の内、多摩川本川では下水処理場からの放流量と取水量が河川流量に与える影響が大

きい。下水処理場は、白丸ダムより下流で支川への放流を含め10箇所存在し、合計の放流量は5~10 m^3/s 程度である。また、多摩川では河川水が高度に利用されており、多摩川本川には、上工水・農水を合わせて数十 m^3/s の水利権量が設定されている。これらは多摩川本川の低水流量と同程度のオーダーである。取排水量の設定は解析精度を大きく左右するため、ここでは、上工水の取水と処理場放流量について日単位の実測値を設定した。また、農業用水については、代表的な取水地点で取水量の実測値が取得できたため、この実測値から灌漑面積当たりの取水量を推定し、これに取水地点毎の灌漑面積を乗じることで、全取水地点の取水量を設定した。

(6) その他入力条件

上記以外を入力条件は文献¹²⁾を参考に表-3に従って設定した。

表-3 その他入力条件の設定方法

条件	設定方法
降雨	地上雨量計(56箇所)の時間雨量を与える。雨量計の代表範囲はティーセン法により設定
蒸発散能	気象観測所(7箇所)の気温データからハーモン式を用いて日毎に与える。代表範囲はティーセン法により設定
人口分布	三次メッシュ毎の人口(平成7年国勢調査)を、土地利用(中下流域：細密数値情報1994、上流域：1/10細分区分画土地利用1989)上の可住区域に配分
雑排水量	下水道未整備地域で生じる汚水の河川流出。下水道未整備区域のメッシュに人口×使用水量原単位を割り当て
地下水用水	市区町村ごとの年平均地下水揚水量を人口分布に従って解析メッシュに割り当て
上水道漏水	上水道から表層土壌中への漏水。市区町村ごとの無効水量を人口分布に従って解析メッシュに割り当て
下水道浸出	帯水層中の地下水から下水道への漏水。下水道整備区域で使用水量の15%が下水道に浸出するとして解析メッシュに割り当て

3. 再現計算

(1) モデルパラメータの同定

図-7に示す検証地点での河川流量と地下水位の連続観測結果を再現対象として、モデルパラメータの同定結果を表-4に示す。ローム層の透水係数は $1 \times 10^{-3} \text{cm}/\text{s}$ となり、隣接する鶴見川流域での現地試験結果¹⁾($1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3} \text{cm}/\text{s}$)とほぼ一致した。また、上総層の透水係数は、一般的な値と同オーダーの同定値を得ることができたが、今後、被圧地下水の平面的な流動を踏まえて精査していく必要があると考えられる。

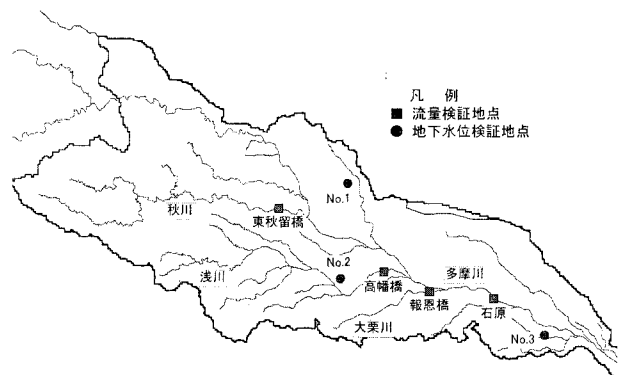


図-7 河川流量及び地下水位の検証地点

表- 4 モデルパラメータの同定結果

設定対象	設定値
表層土壌の鉛直飽和透水係数、 帯水層の飽和透水係数	ローム層 : 1×10^{-3} [cm/s]
	沖積層 : 3×10^{-4} [cm/s]
	上総層 : 3×10^{-3} [cm/s]
	下総層 : 1×10^{-3} [cm/s]
側方飽和透水係数	一律 : 2.0 [cm/s]
帯水層の貯留係数	ローム層: 0.20, 沖積層: 0.15
	上総層: 0.03, 下総層: 0.03
河床材料の透水係数	一律 : 1×10^{-4} [cm/s]

表層土壌からの中間流出を規定する側方飽和透水係数 K_{10} は、2cm/s となり鉛直方向のそれと比べて 10^3 オーダーも大きな値となった。これは、土壌内のパイプ流の影響を反映したものと考えられる。地下水深度の地域的な分布にもよるが、 K_{10} は、そのオーダーから河川流量の再現性に及ぼす影響が大きいと考えられる。図- 8 は、 K_{10} の値を鉛直飽和透水係数と同オーダーの値である 1×10^{-3} 、その100倍の 1×10^{-1} 及び同定値である 2cm/s と変化させ、出水時とその通減部における再現性の違いを示したものである。

$K_{10}=2\text{cm/s}$ とした場合、計算値は観測値を概ね良好に再現している。一方、 $K_{10}=1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ とした場合、表層土壌からの中間流出が減少するため、飽和した一部の土壌からの表面流出が卓越し、ピーク流量が過大に評価されるとともに、通減部では、中間流の減少から河川流量が過小に評価されている。また、 $K_{10}=1 \times 10^{-1}\text{cm/s}$ とした場合には、出水時の中間流出が減少するが、 $K_{10}=1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ のように表面流が卓越する状況に至らず、出水時のピーク流量及び流出ボリュームともに過小に評価されている。通減部では、出水時において表層土壌内に貯留された水分が中間流として緩やかに流出することで、9/24を境に河川流量が過大に評価されている。なお、計算値では、ピーク流量付近で扁平化する観測値のハイドログラフが再現されていない。これは、河道にKinematic wave modelを適用したため多摩川本川等における貯留効果を十分に再現できなかったことに起因すると考えられる。

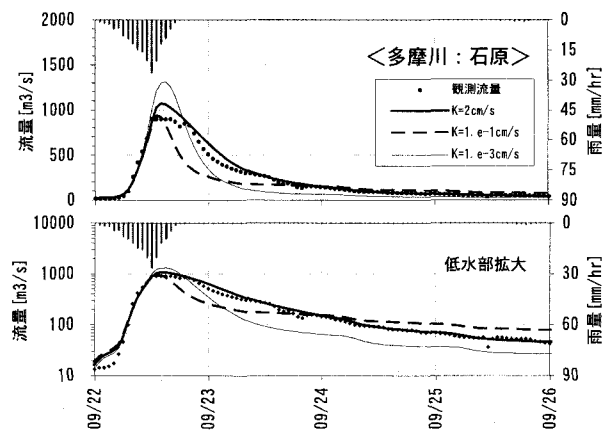


図- 8 側方飽和透水係数が河川流量に与える影響

(2) 河川流量及び地下水位の再現性

同定したパラメータを用いて再現計算を行い、検証地点で河川の日流量及び地下水位の観測値と計算値を比較した結果を図- 9、図- 10にそれぞれ示す。また、河川流量については、計算値と観測値の相対誤差の平均について表- 5に併せて示す。

表- 5を見る限り、河川流量に関しては、この種の解析事例¹²⁾と比較して十分な再現精度が得られたと考える。しかし、図- 8のハイドログラフの比較から、市街地からの流出の影響が大きい石原、高幡橋及び報恩橋では比較的良好な再現結果を得ることができたのに対し、森林域が広く分布する秋川流域、東秋留橋では、計算流量がハイドログラフの通減部を過小に、出水時の流量を過大に評価していることが分かる。この地点の再現性を向上させるためには、森林土壌からの早い中間流出のモデル化、土壌厚さの地域分布の考慮、森林の影響を考慮した蒸発散能の設定が必要と考えられる。

表- 5 観測流量と計算流量の相対誤差の平均

検証地点		R
多摩川	石原	0.19
秋川	東秋留橋	0.26
浅川	高幡橋	0.14
大栗川	報恩橋	0.24

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_{obs}(t_i) - Q_{cal}(t_i)|}{Q_{obs}(t_i)}$$

R: 相対誤差の平均
 $Q_{obs}(t)$: 時刻 t の観測流量
 $Q_{cal}(t)$: 時刻 t の計算流量
 n : 比較するデータ数

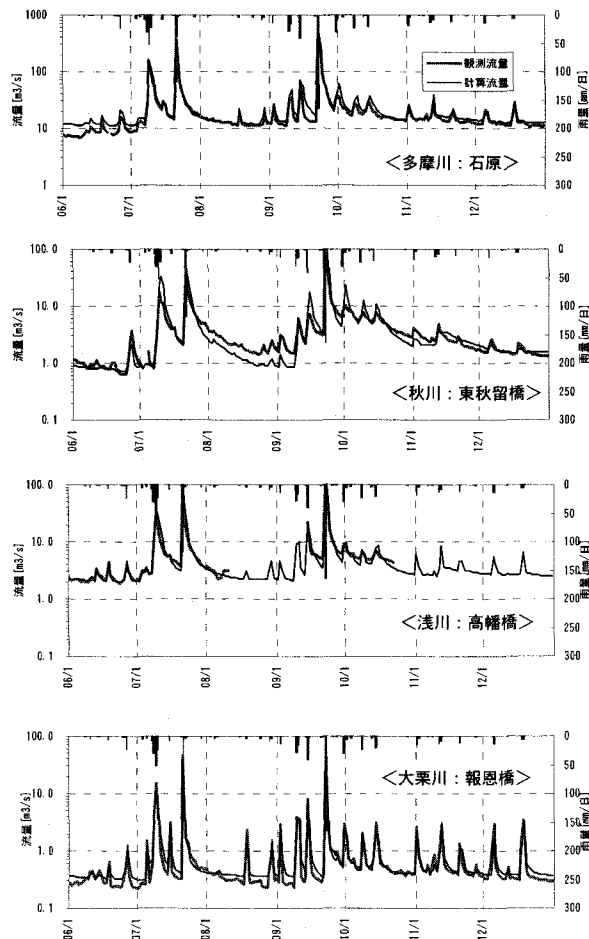


図- 9 河川流量の再現計算結果(日流量)

地下水位については、図-10に示すように、変動傾向及び変動幅を比較的良好に再現することができた。井戸深度が約100mで深い観測井No. 1では、降雨に対して緩やかに増減する地下水位変化を、井戸深度が10～20mと比較的浅い観測井No. 2, No. 3では、降雨に対して鋭敏に反応する地位水位の特徴が計算結果に表れている。

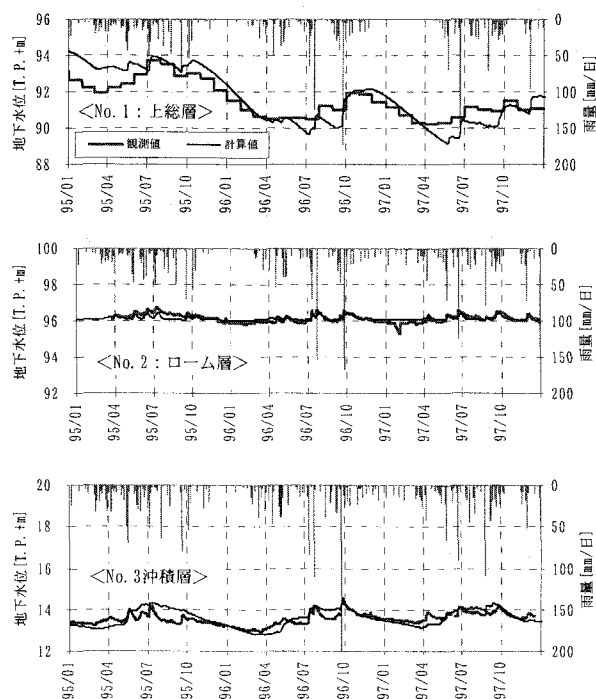


図-10 地下水位の再現結果

4. おわりに

中村ほかによって開発され、都市内小河川である海老川流域で検証されたグリッド型水循環系解析モデルを多摩川流域に適用した。

解析では、河川流量及び地下水位時系列の観測値に対して概ね良好な再現結果を得たが、河川流量の再現結果から流域面積に森林域の占める割合が高い秋川流域で表層土壌内の流出機構及び蒸発散のモデル化において改善すべき点が残った。また、今回検証の対象とした観測井での計算結果の再現性は比較的良好であったが、さらに多くの観測井における地下水位変動や被圧地下水位の平面分布に関する検証を行う必要があると考えられる。

河川流量及び地下水位に関する検証事例を重ねてモデルの信頼性を高めるとともに、本モデルに分布型汚濁負荷流出モデルを用いた河川水質の評価・予測機能を拡張し、流域内の水と汚濁負荷の流れを合わせて評価可能な水循環系解析モデルを構築することが今後の課題である。

謝辞：本検討にあたり種々のご指導を頂いた東京大学生産技術研究所 虫明功臣教授、香川大学 河原能久教授、日本工営株式会社 斎藤庸氏、石原千晶氏に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鶴見川とその流域の再生～鶴見川流域水マスタープラン策定に向けた提言～、財団法人 リバーフロント整備センター、2002。
- 2) 柳瀬川流域水循環マスタープラン 中間取りまとめ、柳瀬川水循環マスタープラン事務局、2002。
- 3) 中村茂・中嶋規行・忌部正博・Srikantha Herath: 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.103-108,2000。
- 4) Ni G., Musiak K., Herath S.: A distributed catchment model and its application to simulate urbanization effect, Proc. 9th APD-IAHR, pp.254-261, 1994。
- 5) Herath, S., Musiak K., and Hironaka S.: Development and Application of a GIS based Distributed Catchment Model for Urban Areas, Proc. 7th International Conference on Urban Storm Drainage, 1695 - 1700, 1996。
- 6) Herath, S., Jha, R., and Musiak K.: Application of IISDHM in Northern Chao Phraya, Thailand, The Third Intl. Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, GAME International Science Panel, pp.125-133, 1997。
- 7) Jha, R., Herath, S. and Musiak K.: Development of IIS Distributed Hydrological Model (IISDHM) and its Application in Chao Phraya river basin: Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, pp. 227-232., 1997。
- 8) 高木康行,中村茂,Srikantha Herath,羽田野琢磨: グリッド型水循環系解析における不浸透面積率の決定手法について,第56回年次学術講演会概要集第2部門, pp.250-251, 2001。
- 9) Harvercamp, R, Vauclin, M., Touma, J., Wierenga, P.J., Vauchad, G.: A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol 41, pp.285-293, 1977。
- 10) Mualem, Y.: Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: Generalized macroscopic approach, Water Resources Research, Vol.14, No.2, pp.325-334, 1978。
- 11) 村井宏,岩崎勇作: 林地の水および土壌保全機能に関する研究 (第1報), 林試研報274,1975。
- 12) 「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, 社団法人 雨水貯留浸透技術協会,2000。
- 13) 橋本建, 長谷川正: 土地利用を評価する流出モデル, 土木技術資料, 19-5, pp.13, 1977。
- 14) 羽田野琢磨,中村茂,高木康行,Srikantha Herath: グリッド型水循環系解析における落水線の作成方法について, 第56回年次学術講演会概要集第2部門, pp.249-250, 2001。
- 15) McDonald, Harbaugh: A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model; Tech, Water-Resources Inv., Bk. 6, Chap. A1; 1988。

(2002. 9. 30受付)