

農地と都市が混在する流域における WEP MODELを用いた水循環解析

APPLICATION OF WEP MODEL TO A WATERSHED WITH MIXED AGRICULTURE AND URBAN LAND USES

木内 豪¹, 賈 仰文², 戸嶋光映³, 吉谷純一⁴, 倪 广恒⁵

Tsuyoshi KINOUCHI, Yangwen JIA, Koei TOJIMA, Junichi YOSHITANI and Guangheng NI

- ¹正会員 工修 土木研究所水工研究グループ水理水文チーム主任研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)
²正会員 工博 科学技術振興事業団特別研究員/土木研究所水理水文チーム (同 上)
³正会員 工修 土木研究所水工研究グループ水理水文チーム交流研究員 (同 上)
⁴正会員 工修 土木研究所水工研究グループ水理水文チーム上席研究員 (同 上)
⁵正会員 工博 日本工営株式会社 (前土木研究所交流研究員) (〒330-0801 埼玉県さいたま市土手町1-2)

WEP MODEL, the physically based distributed model developed at PWRI, was applied to a watershed with mixed agriculture and urban land uses. The watershed is 166km² in total area having a population of more than 0.12 million, and feeds two main streams flowing into a downstream lake. Paddy field is a dominant type of land use along the rivers, whereas urbanized area scatters over the watershed. Some recent modifications to WEP MODEL and parameter settings were briefly described, and the application results were verified using records of river discharge and groundwater level of the unconfined aquifer. It was found that the groundwater level in the unconfined aquifer is much more sensitive to its hydraulic conductivity than the conductivity of the river bed. The irrigation of the paddy fields plays significant role in maintaining groundwater level and river flow not only during irrigation period, but also in non-irrigated seasons.

Key words: Hydrological cycle, watershed modeling, agriculture and urban, groundwater, surfacewater

1. 序論

著者らの研究グループは、茨城県谷田川流域をフィールドとして、流域の開発に伴う水循環や物質循環への影響を明らかにするため、河川や地下水の水量・水質のモニタリングとモデリングを実施しており、これまでに Jia ほか^{3,4)}が開発した分布物理型水循環モデル (WEP MODEL) の適用性検討や将来の流域改変の影響の定量化ならびに、地下水や河川水の水質、水量のモニタリング結果について報告してきた^{3,4)}。本論文では、既報以降に WEP MODEL の適用性を高めるために行ったいくつかの修正点について説明を行った上で、新たに得られた水文情報や流域情報を加えて、より精度の高い水循環解析を実施して流量と地下水位の連続測定結果との比較を行った結果について報告する。また、浅層地下水に着目して、不圧帯水層や河床の透水係数が地下水位の計算結果に及ぼす影響や、水田の存在が浅層地下水位や河川流量に及ぼす影響について試算を行った。

2. 対象流域の特徴

(1) 対象流域

谷田川流域は茨城県の西部に位置し、流域関係市町村としてつくば市、莖崎町、谷和原村、伊奈町、牛久市、龍ヶ崎市がある。関連市町村の中でつくば市は流域の約70%を占め、次いで莖崎町が流域の12%を占める。主要な河川として谷田川、西谷田川、稻荷川があり、下流の牛久沼に流入している。また、支川として、谷田川支川の蓮沼川、西谷田川支川の高岡川があげられる。谷田川流域の概要を図-1に示す。

(2) 地形地質条件

谷田川流域の地形は、筑波・稲敷台地と台地を刻む谷田川の開析谷によって特徴づけられる。筑波・稲敷台地は、水戸から千葉に広がる常総台地の一部であり、標高は TP.+30m~+20mである。台地の北~東側を桜川低地、西~南側を小貝川低地に区切られており、北西から南東

へ次第に標高が低くなっている。この台地面傾斜に沿って稲荷川、谷田川、西谷田川がほぼ平行して開析谷をつくり、牛久沼に流入している。

谷田川流域とその周辺の地質層については、筑波大学構内及び国土地理院地殻活動観測井のボーリング記録によると、それぞれ深度 477m と 487m で基盤岩類に達している。岩盤からの地層は、上総層群、下総層群、常総層、関東ローム層となっており、谷部には沖積層が分布する⁹⁾。常総層及び下総層群の成田層を帯水層とする地下水は主に不圧であるが、常総層中のシルト層あるいは常総粘土層によって被圧されている場合もある。下総層群下部の砂・砂礫層の帯水層は、筑波地域において比較的浅い位置に存在する被圧帯水層として簡易水道、農業用に広く利用されている⁹⁾。浅層地下水の水位は地表面から 1m~8m に位置し、一般家庭の個人井戸は主にこの浅層地下水を利用している。

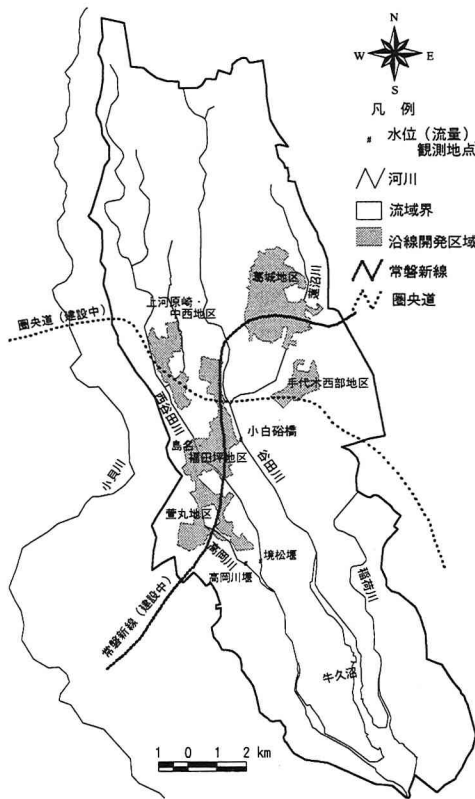


図-1 谷田川流域の概要

(3) 土地利用と人口

第五期(1994年調査)細密数値情報に基づく流域内の土地利用状況を図-2に示す。流域内では、山林・荒地が16%、水田が14%、畑・農地が33%を占め、住宅、工業、商業、道路、公園及びその他の公共公益用地からなる都市域の面積は流域全面積の33%となっている。水田は主として河川沿いの沖積平野上に広がっている。都市域は研究学園都市内やその周辺の住宅地、民間研究所等の集まる工業団地など流域内の各地に散在している。また、図-1中に示す総面積約13km²の5地区において、

2005年開通予定の常磐新線の沿線開発が計画されており、これを加えた将来の都市域の面積率は41%となる。

地域メッシュ統計(1995年国勢調査)から求めた谷田川流域内の人口は126万人である。沿線開発計画が検討されている5地区のうち、4地区の計画人口は、合計で75万人と想定されており、今後、谷田川流域の都市化が急激に進展することが予想される。

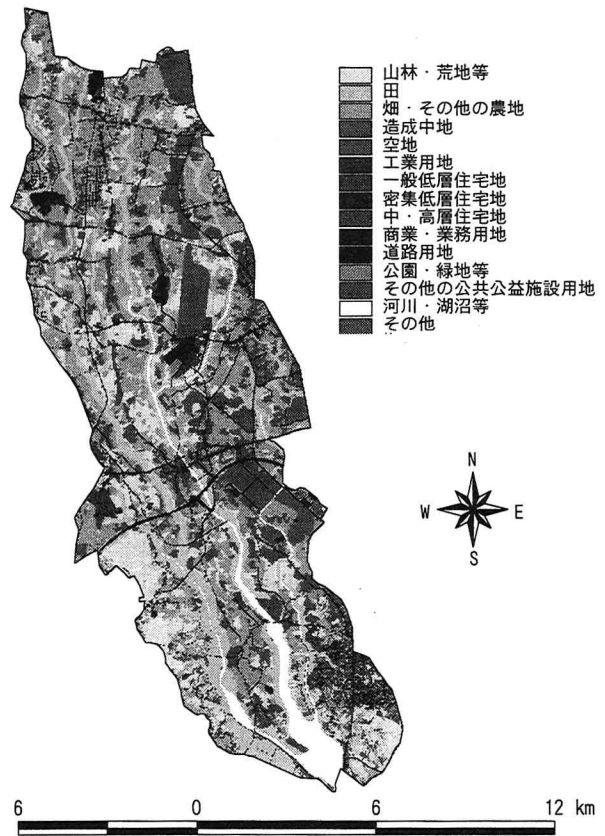


図-2 谷田川流域とその周辺の土地利用状況

(4) 上水、工業用水、農業用水及び排水について

流域内の上水は、霞ヶ浦からの表流水と深層地下水の配水及び流域内に点在する簡易水道等による深層地下水の配水に依存している。流域内の上水道整備度をほぼカバーする筑南水道企業団中央配水区の1日平均配水量は約46,000m³で、そのうちの約2.5%が地下水からの揚水である。簡易水道は流域内に62施設あり、集落毎に所有する地表から40~250mの深さの共同井戸から汲み上げた水を処理後に配水している。計画日最大給水量の合計は約4,400m³/日、計画給水人口の合計は約21,000人である。上水道や簡易水道が整備されていない地域では、個人所有の井戸揚水により生活用水を賄っている。

工業用水については、県西広域工業用水事業による配水区域内に流域があり、日量8,270m³/日が配水されている。また、井戸からの取水を行っているのは流域内14事業所で、取水量の合計は5,910m³/日である。

谷田川流域では、自己水源では灌漑用水を確保できないため、流域外の小貝川と桜川から導水を行っている。

小貝川からの導水は西谷田川上流端で流入し、河川内の数カ所に設けられた取水堰上流部で揚水される。桜川からの取水は導管により流域内各所に配水されて、谷田川、西谷田川の数カ所で流入するほか、直接水田を灌漑するために使用される。両河川から谷田川流域への導水量合計値は代掻き期でおよそ $2.9\text{m}^3/\text{s}$ 、普通期で $2.4\text{m}^3/\text{s}$ である。また、わずかではあるが流域内数箇所で深井戸からの揚水による灌漑も行われている。利水施設としては、揚水機場が谷田川で 10 カ所、西谷田川で 11 カ所、蓮沼川で 4 カ所に設置されている。

流域の下水道普及率は約 65% で、下水道未整備地域からの汚水は浄化槽を経て、雨水は排水路等を経て河川に放流される。下水道整備地域の汚水は霞ヶ浦城南流地下水道を経由して最終的には利根川に放流される。

(5) 浅層地下水の実態

図3には浅井戸を用いて実施した浅層地下水調査⁴⁾から判明した全窒素濃度の面的分布の一例を示す。浅層地下水の全窒素濃度は灌漑期で低く、非灌漑期で相対的に高い値を示す。また、ここでは図示しないが河川水中の全窒素濃度にも同様の年変動が見られている。当該流域ではまだ浅井戸を飲料用等に使用している世帯も多く存在しているが、浅層地下水の水質悪化により深井戸へと転換が進んでいる。灌漑の有無による浅層地下水質への影響や浅層地下水の挙動が河川の流量や水質にどのような影響を及ぼしているかについては、地下水も含めた流域水循環・物質循環モデルによる解明を行う必要がある。

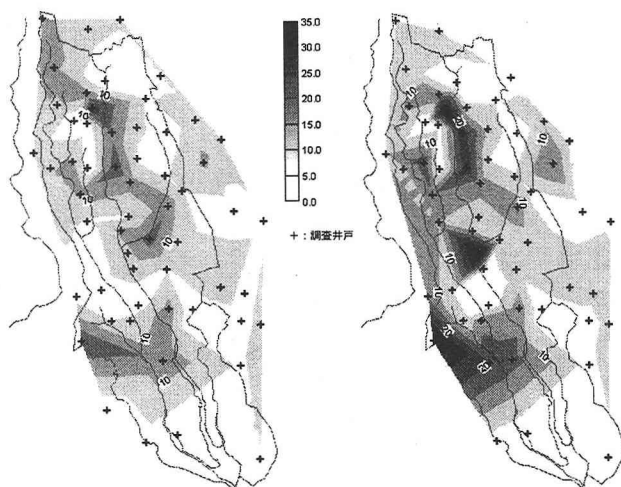


図3 浅層地下水中の全窒素濃度
(左:2000年5月, 右:2000年11月, 単位: mg/l)

3. 分布物理型水循環モデル—WEP MODEL—

(1) WEP MODELの概要

WEP MODELは、流域の地形、地質、気象等の条件を入力として、浸透、蒸発散、河川への表面流出、地下水

流出、地下水の流動などの時空間分布を流域スケールでシミュレートする分布物理型モデルである (Jia and Tamai, 1998; Jia et al., 2001)。WEP MODELでは、地表面を正方形の計算格子に分割し、各格子内の土地利用分類ごとの面積率を考慮した水文素過程の計算を行っており、多様な土地利用が混在する流域へ適用することができる。また、地表面熱収支解析に基づく蒸発散量の推定を行っており、大気モデルとの結合もし易い利点がある。

本モデルは、これまでに多摩川中流域 (CA=579km²)、千葉県海老川流域 (CA= 27km²) で検証されてきたが、大部分が都市化された流域への適用であった。その後、農地が主体で都市が混在する茨城県谷田川流域への適用を試み、地下水位や低水流量の測定結果との比較について報告してきた³⁾。その後、モデルによる再現精度向上を図るために、現地の水文・土質情報等の収集を進めるとともに、モデルの一部改良を行ったので、以下にその内容を記す。

(2) 表面流と河道の追跡計算

標高の数値データに基づいて4方向の落水線を作成し、kinematic wave式による表面流の追跡計算に用いた。表面流計算に用いる等価粗度は土地利用別に割り当てることもできるが、本研究では全ての土地利用で0.05を用いた。河道の追跡計算にも kinematic wave 式を適用し、農業用取水堰により一部で背水状態となる点は考慮しなかった。このことにより、河川と地下水との相互作用の計算結果にも影響があると想定されるが、流量の検証は非灌漑期のデータで行っていることから、大きな影響はないと考えられる。

(3) 遷移層における貯留効果のモデル化

不飽和透水層 (第3層) からの涵養量が不圧帯水層に到達する際、遷移層内 (図4に示す Transition Layer) の飽和度に応じて遷移層内に貯留される効果を新たにモデル化した。これにより、浅層地下水が低かったり、土壤が乾燥化している場合の信頼性が向上すると考えられる。

第3層から遷移層への単位面積あたり涵養量を Q_m 、遷移層から帯水層への涵養量を Q_{out} 、遷移層内の貯留量を S とすると、遷移層内の連続式は次のように表される。

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1), \quad S = \ell\theta \quad (2), \quad Q_{out} = K_{vt}(\theta) \quad (3)$$

ここで、 K_{vt} : 不圧帯水層上部の遷移層における鉛直不飽和透水係数、 θ : 遷移層の含水率、 ℓ : 遷移層の厚さ (不飽和層上端から不圧帯水層上端までの距離から毛管水縁帯の長さ差を差し引いた値) である。遷移層部分の地質は空間的にも不均質なためメッシュ毎に特定する必要があるが、ここでは、不飽和層と同じ土壌と仮定した。

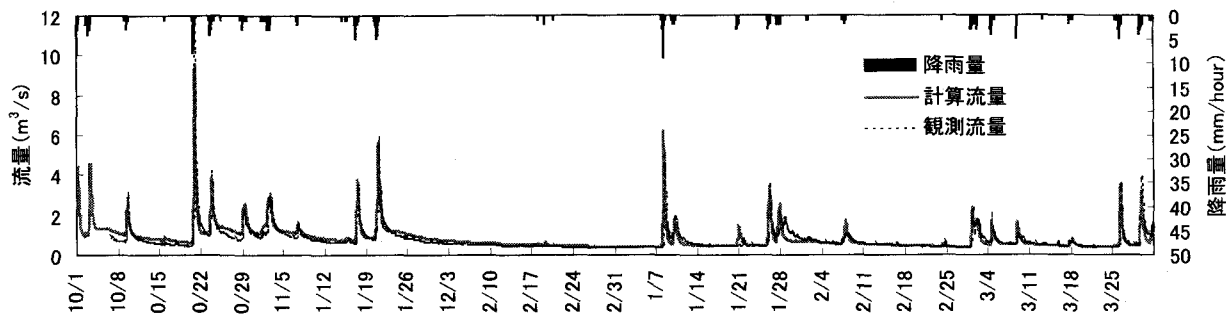


図-5 河川流量の計算値と実測値の比較 (2000年10月～2001年3月)

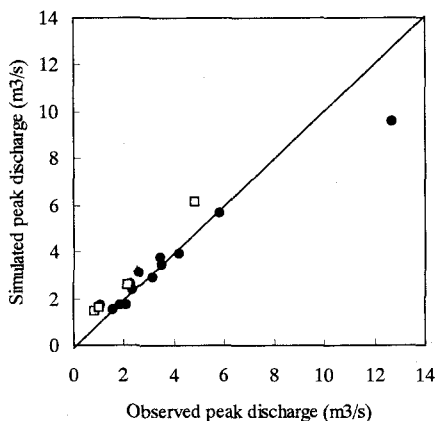


図-6 出水時ピーク流量の実測値と計算値

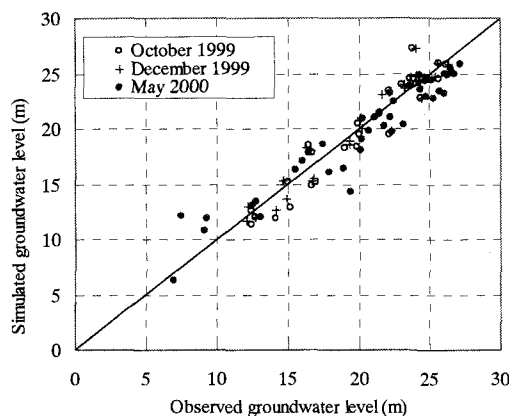


図-7 浅層地下水の実測値と計算値

とした。河道の追跡計算のみ、流下方向には約 1km 間隔で離散化した。

(2) 適用結果

図5には、谷田川小白碓橋地点における水位記録から換算される流量とモデル計算から得られる計算結果を比較したものである。わずかな違いは見られるものの、低水流量、高水流量ともに計算結果は実測値を良好に再現していることがわかる。WEP MODELでは積雪・融雪現象を表すモデルはまだ組み込まれていないが、2001年の冬期は降雪が例年になく多く観測されており、1月8日、1月21日、1月28日、3月8日前後の出水時の実測と計算のずれは、降雪・積雪による影響が大きいと考えられる。図6には各出水時における小白碓橋地点の実測ピーク流量と計算ピーク流量を比較したもので、●は降雨条件、□は降雪・積雪条件を示す。ピーク流量が13m³/sの出水は現在使用している H-Q 曲線を外挿して求められることから、計算との違いが大きくなっているものの、それ以外ではピーク流量も良好に再現されている。

図7には流域内の複数地点における浅層地下水位の一斉計測結果と計算値の比較を示す。全体的な計算精度は悪くないものの、灌漑期の計測結果で実測とのずれが相対的に大きくなっている傾向が読みとれる。これは、1999年までは実績の灌漑用水量データがあるが、2000年5月では実績の灌漑用水量データがなく、前年度と同じ用水量を用いていることに起因すると考えられる。

(3) パラメータの感度分析

浅層地下水位に影響を及ぼすと想定されるパラメータのうち、不圧帯水層の水平方向透水係数と河床の透水係数の感度分析を行い、地下水位や河川流量などへの影響を調べた。

図8にはそれぞれ島名・福田坪地区内と葛城地区内(図1参照)の井戸における浅層地下水位の測定記録と、3通りの不圧帯水層の透水係数を与えて計算された、井戸を含む100m×100mメッシュの地下水位を示している。透水係数が大きくなると地下水位が全体的に低下し、上下の変動量も大きくなる。実測値との整合性で見ると、島名・福田坪地区内の実測値は透水係数が2.5E-3cm/sの場合の結果に類似している。他方、葛城地区内の場合には上下変動のパターンは透水係数がより大きな場合の計算結果と類似している。現状、計算では不圧層の厚さに空間的な分布の違いを反映させ、かつ、難透水層の不連続性も考慮しているが、透水係数は均一な値を用いている。より精度良く地下水状況を再現するには、透水層土壌パラメータの空間分布についても何らかの形でモデルに反映させる必要があると言える。年間の水収支で見た河川への地下水流出量も、透水係数が2.5E-3cm/sからその倍の値になると、20%程度増加することが計算された。

河床の透水係数についても同様に3通りの値を与えて河川流量や地下水位への影響を調べたが、不圧帯水層の場合に見られたような大きな違いは現れなかった。

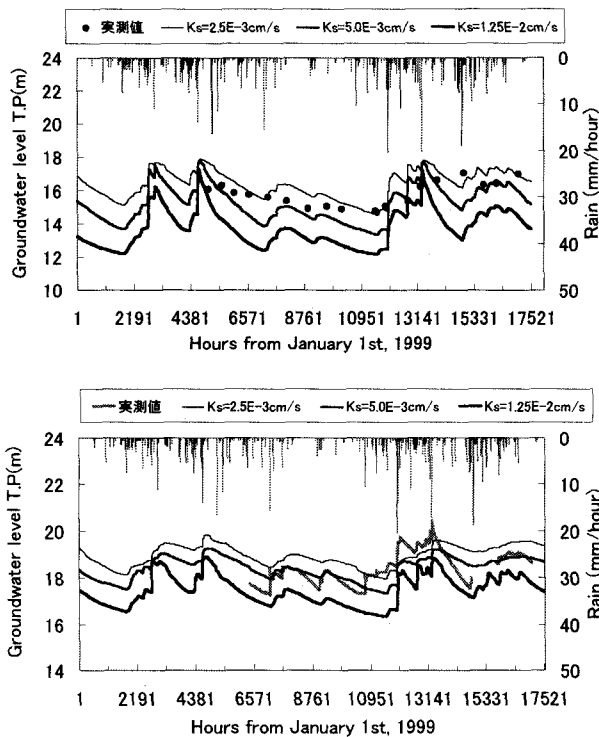


図8 不圧帯水層内地下水位の実測値と計算値
上段：島名・福田坪地区，下段：葛城地区

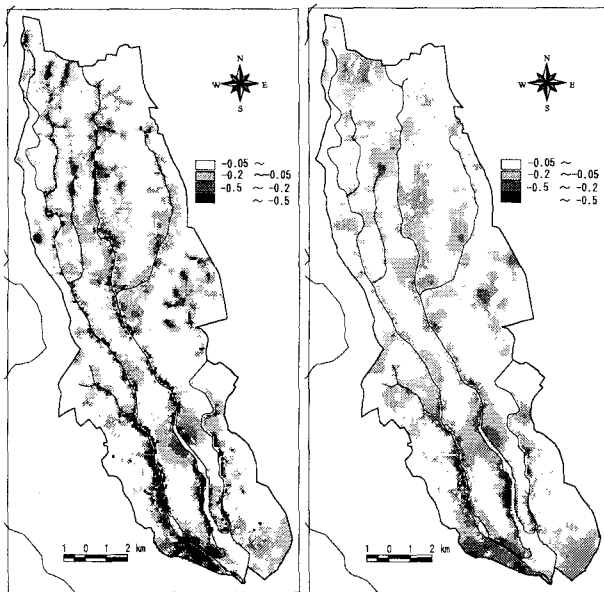


図9 水田が畑地に変わった場合の浅層地下水位の変化
左：2000年7月，右：2001年3月

5. 農地が水循環に及ぼすインパクト

農地が卓越する谷田川流域では、灌漑期における流域外からの導水と灌漑や、高い窒素濃度を持つ地下水の流動により、浅層地下水は河川水の水量や水質に大きな影響を与えられと考えられる。ここでは、水田の有無により河川の流量や浅層地下水位がどのような変化を示すのかをモデルにより試算する。1つのケースとしては現状の

各種条件を与える。もう1ケースとしては、流域内の全ての水田が畑に変化した場合を想定し、流域外からの取水はなく、したがって、灌漑もないものと仮定する。土壌条件は前述のように土地利用に応じて与えた。

図9は水田が畑地に変わった場合の浅層地下水位の変化量の面的分布を示しており、色が濃いほど水位が低下することを意味する。灌漑期は流域全体で河川沿いに地下水位の低下域が広がっている。その影響範囲は河川沿いの極限られた区域の所もあれば、水田域からさらに1km以上も周辺部に影響している地域も見られる。最下流部の牛久沼周辺で低下量が相対的に大きいのは、これは現状浅層地下水と牛久沼との間で水の移動を考慮していないことによるものである。非灌漑期の3月末では、中・上流域でも場所によっては広く低下域が残っているものの、大部分で20cm未満の低下とわずかである。不圧地下水から河川への流出量も畑地に変わるにより20%程度減少する結果となった。

6. 結論

本論文では、WEP MODELの適用性を高めるために既報以降に行ったいくつかの修正点について説明を行った上で、新たに得られた水文情報や流域情報を加えた水循環解析を実施して流量と地下水位の連続測定結果との比較検証を行い、低水流量、高水流量ともに精度の良い算定が行えることを示した。また、浅層地下水に着目して、不圧帯水層や河床の透水係数が地下水位の計算結果に及ぼす影響や、水田灌漑の有無による浅層地下水位や河川流量の変化について試算を行い、土壌条件や水田灌漑が地下水位に及ぼす影響が大きいことを示した。

参考文献

- 1)Jia, Y., G. Ni, Y. Kawahara and T. Suetsugi: Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, 15, 2175-2194, 2001.
- 2)Jia, Y. and N. Tamai: Water and heat balances in the middle-reach catchment of Tama River and sensitivity analysis, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 42, 151-156, 1998.
- 3)倪广恒, 賈仰文, 木内豪, 戸嶋光映, 吉谷純一: 谷田川流域における分布型水循環モデルを用いた地下水解析, 2001年水文・水資源学会研究発表要旨集, 2001.
- 4)戸嶋光映, 木内豪, 賈仰文, 吉谷純一, 倪广恒: 谷田川流域における水循環の実態調査—都市化が地下水位及び水質に与える影響について, 2001年水文・水資源学会研究発表要旨集, 2001.
- 5)財団法人建築保全センター: 筑波研究学園都市地盤図, 1980
- 6)地質調査所: 筑波研究学園都市及び周辺地域の環境地質図, 1988
- 7)農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会: 日本の地下水, 地球社, 1986, 1043p.
- 8)国土庁土地局: 地下水マップ(茨城, 栃木地域), 1995.

(2001. 10. 1受付)