

◆ 報 文 ◆

分布物理型水循環モデル WEP MODEL を用いた 茨城県谷田川流域の水収支の定量化

賈 仰文* 木内 豪** 戸嶋光映*** 吉谷純一****

1. はじめに

著者らは、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^{1)~5)}。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する。また、谷田川流域の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、水収支の定量化を行うとともに、常磐新線沿線の開発に伴う流域水循環への影響を推定した結果について報告する。

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する利根川水系の支川流域 (流域面積約 166km²) で、つくば市、荃崎町、谷和原村、伊奈町、牛久市、龍ヶ崎市が関係している。つくば市は流域の約 70% を占め、次いで荃崎町が 12% を占める。主要な河川として谷田川、西谷田川、稲荷川があり、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 T.P.+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谷田川、西谷田川、稲荷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。

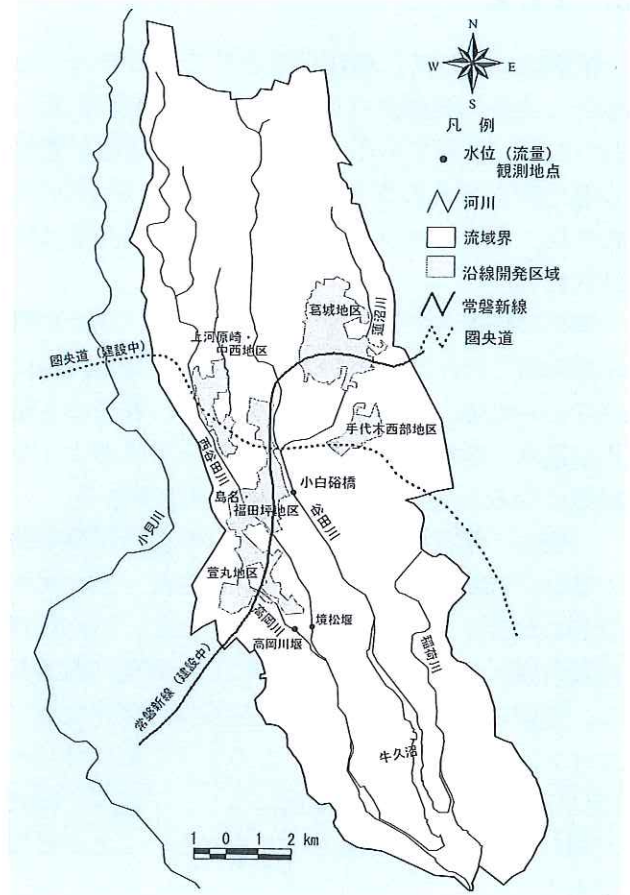


図-1 谷田川流域の概要

谷田川流域とその周辺の地質層については既報⁵⁾で示したとおりである。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⁶⁾。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。

(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、表-1 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

Quantification of water balance in the Yata River Watershed using physically distributed model WEP MODEL

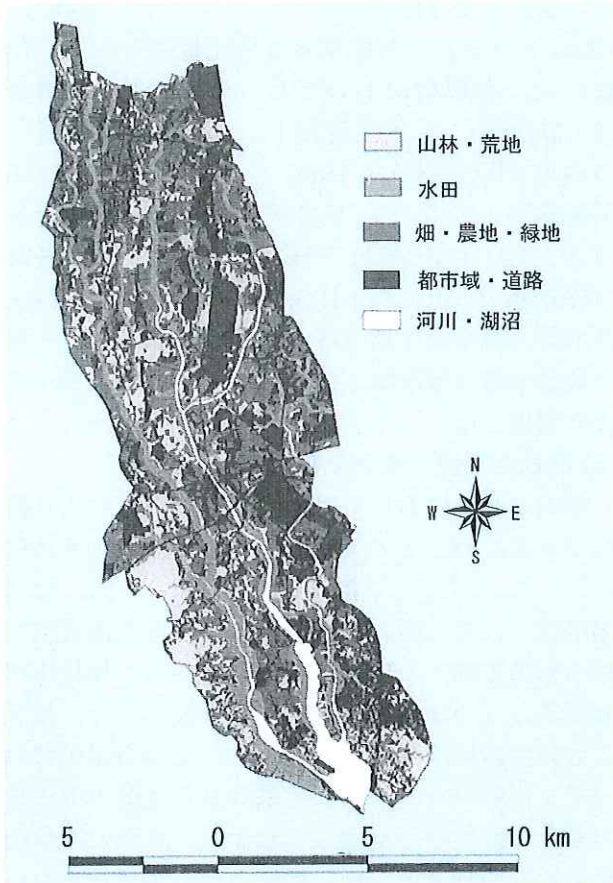


図-2 谷田川流域とその周辺の土地利用状況

表-1 過去、現状、将来の土地利用 (単位: %)

西暦	流域全体			開発地区		
	1976	1994	2020	1976	1994	2020
森林荒地	22	16	14	31	27	0
水田	15	14	13	12	11	0
畑・農地	39	33	28	39	35	0
建物用地	7	18	23	2	6	63
道路用地	0	4	5	0	3	21
河川湖沼	5	4	4	1	1	1
その他	12	11	13	16	17	16

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茨城県等により計画されており、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 12.6 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 7.5 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。

(4) 上水、工業用水、農業用水及び排水

流域内の上水は、霞ヶ浦からの表流水、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域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施設計画 4,400m³/日を汲み上げている。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。

灌漑用水の多くは流域外の小貝川と桜川から導水されている。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で揚水される。桜川から取水された農業用水は、谷田川、西谷田川の数カ所で放流されるほか、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約 2.9m³/s、普通期で約 2.4m³/s である。

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常南流域下水道を經由して利根川に放流される。

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。WEP MODEL の内容や他モデルとの違いについては、文献 1 に詳しい。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、農地も含む多様な土地利用の流域におけるモデルによる再現精度向上を図るために、モデルの改良と谷田川流域への適用性検討を行ったので、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を計算できるようにした。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ができるが、本研究では全ての土地利用で0.05を用いた。河道の追跡計算には不定流式とkinematic wave式が適用できるが、今回は河道特性を考慮の上、kinematic wave式を用いた。

(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-3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、浅層地下水水位が低い場合や土壌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。

(4) 土壌の分類とパラメータ

対象流域の土壌の飽和・不飽和特性を反映させるため、流域の上流、中流、下流の3箇所地表面から1mの深さで採取した関東ローム層土壌の $\Psi-\theta$ 関係、飽和含水率 θ_{sat} 、鉛直、水平双方の飽和透水係数を実験により算出した。また、その結果に基づき、圃場容量 θ_f 、残留含水率 θ_r やHaverkamp式のパラメータを設定した。また、河川沿いの沖積土や常総粘土層の物性値には既往文献の報告値を用いた。

地質構造については、収集した流域内及び周辺部の地質データのうち、面的なバランスを考

えて選定した119地点のボーリングデータから、100mメッシュに対応する3次元地質データを作成した。本解析においては、沖積低地(沖積砂層・砂礫層)、台地表層部(ローム層)、常総層中の砂層(T.P.+20~+10m)の3つの帯水層は不圧帯水層とみなし、下総層群下部の砂・砂礫層(T.P.-20~-40m)と下総層群最下部~上総層群の砂礫層(T.P.-70m以深)はそれぞれ第1被圧帯水層と第2被圧帯水層とした。計算メッシュ毎の各帯水層の層厚は、作成した3次元地質データより算出した。

(5) 農地と灌漑のモデル化

谷田川流域においては灌漑用水が複雑に入り組んでいるため、その実態を把握した上でモデル化を行った。水田への灌漑用水量については、水利権申請ベースにおける地区別の用水量を地区別の給水面積で割った値の流域平均値から、単位水田面積あたりの灌漑用水量原単位を設定した。地区ごとの実績給水量は不明なため、この原単位に対して、申請ベースの取水量に対する実績の取水量の割合を掛け合わせるにより、水田の単位面積あたり灌漑量とした。畑地への灌漑は行わないものと仮定した。

水田では灌漑量 - (浸透量+蒸発散量)により湛水深を求める。湛水深が所定の高さを超えた場合、余剰水は河川に還元されるとした。本モデルでは湛水深の上限を10cmに設定した。水田土壌の不飽和透水層も他の土地利用と同様に3層に分割する。そのうち、第1層と第2層は粘土層、第3層は沖積層と仮定した。一方、畑地では3層ともにロームとするが、谷底平野に位置する場合には3層とも沖積土と設定した。畑地の窪地貯留量は5mmとした。

(6) その他の設定条件

不浸透面積率は基本的には既報¹⁾に基づき細密数値情報の土地利用分類毎の値を与えたが、流域内の公共公益施設用地には国立試験研究機関が含まれ、また、商業業務用地には民間研究所が含まれている状況を考慮し、不浸透面積率の値に修正を加え、公共公益施設30%、工業用地、住宅用地、商業用地、造成中地でそれぞれ60%、公園・緑地10%、空地25%とした。

4. WEP MODELの適用

(1) 適用条件

計算対象期間は、1998年1月1日から2001

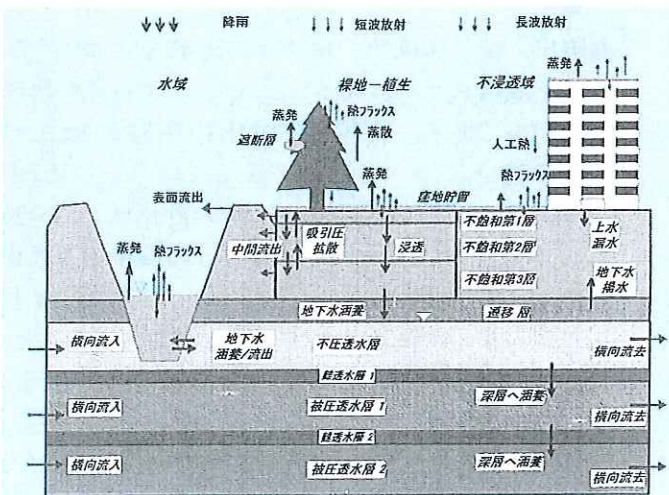


図-3 対象とする水熱輸送過程とモデルの鉛直構造

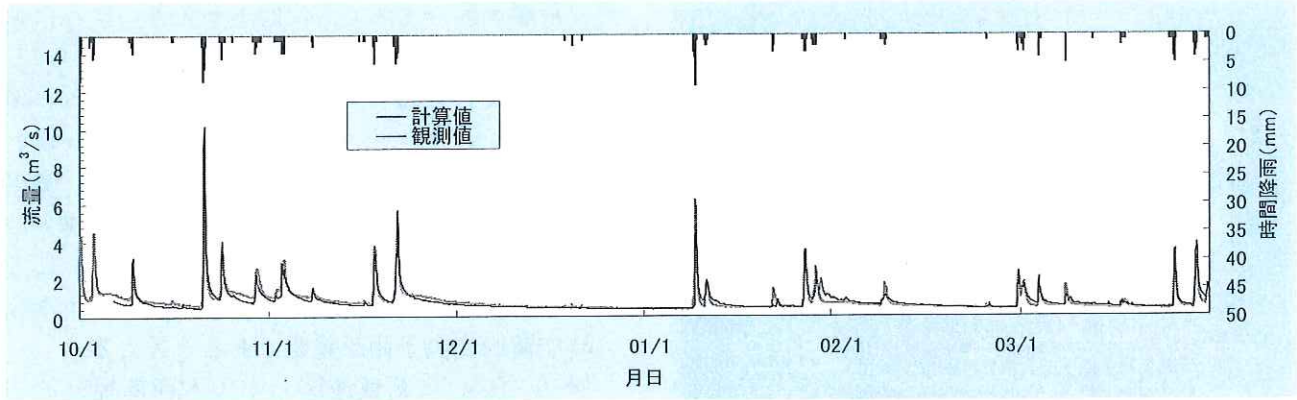


図-4 河川流量の計算結果と観測値 (小白裕橋地点、2000年10月1日～2001年3月31日)

年3月31日までとした。降雨量、気温、湿度、風速、日照時間は AMeDAS の測定地点のうち、長峰と下妻の2箇所の測定値を用い、それぞれの代表範囲をティーセン分割によって決定した。

谷田川流域の被圧帯水層の実態は明確にされていないが、文献7)、8)からは小貝川、鬼怒川方向への流れや南東方向への流れの双方が読みとれる。すなわち、谷田川流域の被圧地下水位は広域の流動系における上流側の揚水量によって大きく変動するため、本論文では、便宜的に、被圧帯水層(第2層)の地下水位に流域内における1998年の実測値を与えた。地下水の取水に関するモデル上の取り扱いのうち、農業用の地下水取水は量的に少ないと考えられるため、今回の計算では考慮していない。簡易水道や上水道が整備されていない地域等における浅井戸使用の実態は不明な部分が多く、モデル上無視した。簡易水道における深井戸からの取水は第1被圧帯水層からの取水と仮定した。計算メッシュの水平スケールは100m、時間スケールは1時間とした。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-4は谷田川流域のほぼ中央部に位置する谷田川小白裕橋地点における水位記録から換算される流量と、モデル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。WEP MODELでは積雪・融雪現象を表すモデルが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日の出水時の実測と計算のずれは、降雪に起因するものであると考えられる。

図-5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

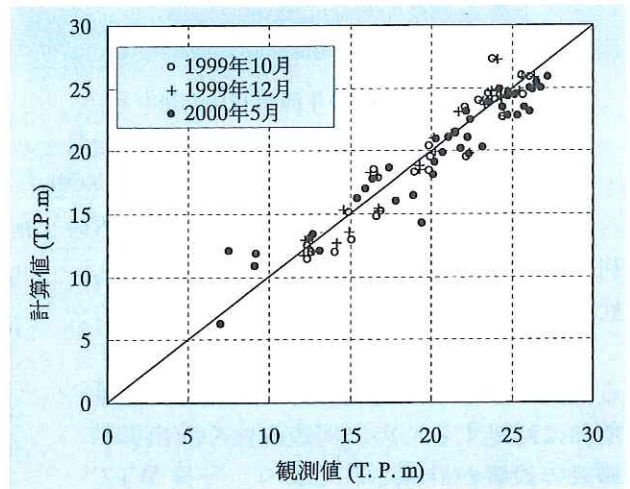


図-5 浅層地下水の実測値と計算値

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いため、1999年と同じ用水量を便宜的に用いていることに起因すると考えられる。

モデルの出力として得られる谷田川流域の年間水収支(図-6)によると、年間降雨量の約62%は蒸発散として大気へ輸送され、河川流量の約半分(降雨量の約28%)は洪水時の表面流出由来のものであることがわかる。河川流量に占める地下水成分の割合は約33%と、都市化の進んだ千葉県海老川流域の計算値約11%¹⁾よりも相当多い。

5. 将来の土地利用変化による水収支への影響

沿線開発に伴い土地利用は2020年頃には表-1に示した状態になることが想定される。計算に際しては、土地利用が変わる区域を抽出し、将来の土地利用分類ごとの面積率情報に基づいて土地利用データを作成した。人口も同様に将来のデータを作成した。工業用水は現状と同じとした。

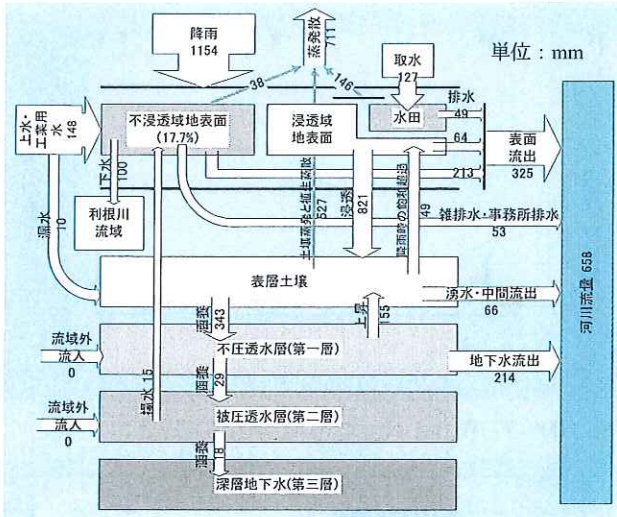


図-6 谷田川流域の年間水収支 (1999年)

図-7には沿線開発に伴う河川流量の変化量を示す。縦軸は開発後(2020年頃の土地利用を想定)の河川流量から開発前(現状、1994年時点の土地利用)の河川流量を差し引いた値である。低水流量は開発に伴い5~6%程度減少する一方、洪水時の流量は20~60%程度増加する結果となった。現実には、これらの流量増加に対処するために河道改修や流出抑制施設の設置が計画されており、今後WEP MODELによる効果の検証を進める予定である。

図-8は、沿線開発による将来の浅層地下水位への影響を推定した結果で、図-7と同様に開発後の計算結果から開発前の結果を差し引いてある。地下水位の低下量は地区により異なり、上河原崎・中西地区では2m以上水位低下の生じる領域が広く分布していることがわかる。他にも、萱丸地区の一部や島名・福田坪地区の一部で1.5m以上の水位低下の生じるエリアが出現している。概して、河川合流部や河川と河川の

間の距離が短い地区で水位低下が大きくなるように見受けられる。また、季節によっても違いが見られ、灌漑期の7月で最も大きな違いとなっている。図には示していないが、2000年3月では50cm以上の低下域は葛城地区のみに限定されていた。洪水時の流出抑制という観点の他、地下水資源保全の面から土地利用のあり方を検討する上でも、ここで示したような分布物理型モデルによる地下水位の時空間的変動予測が重要であると言える。

図-9, 10には葛城地区と手代木西部地区の一部が含まれる支流(蓮沼川流域)における沿線開発前後の年間水収支を模式的に示す。開発により蓮沼川流域の約10%が不透透域に変わることによって当該流域の表面流出は25%増加する一方で、浸透量や不圧透水層の涵養量は約15%減少する。また、蓮沼川流域外からの導水(上水道の給水)の占める割合が非常に大きくなり、水循

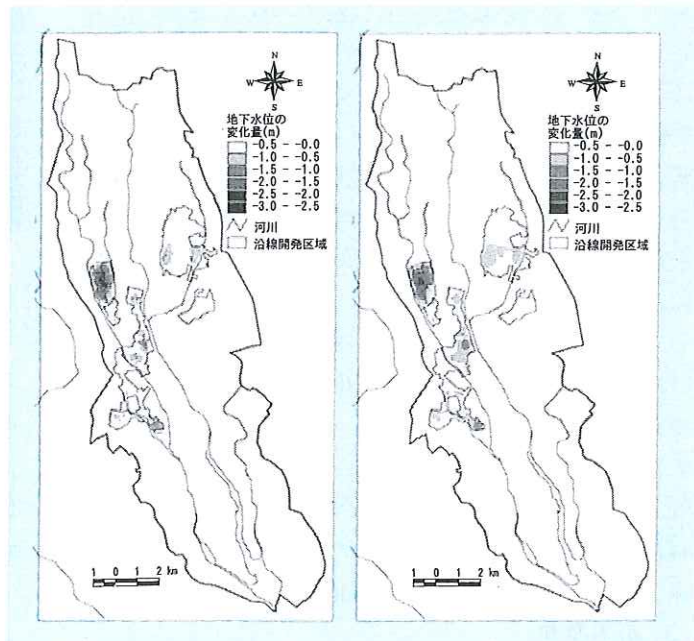


図-8 沿線開発に伴う浅層地下水の変化量
(左: 2000/7/31、右: 2000/11/30)

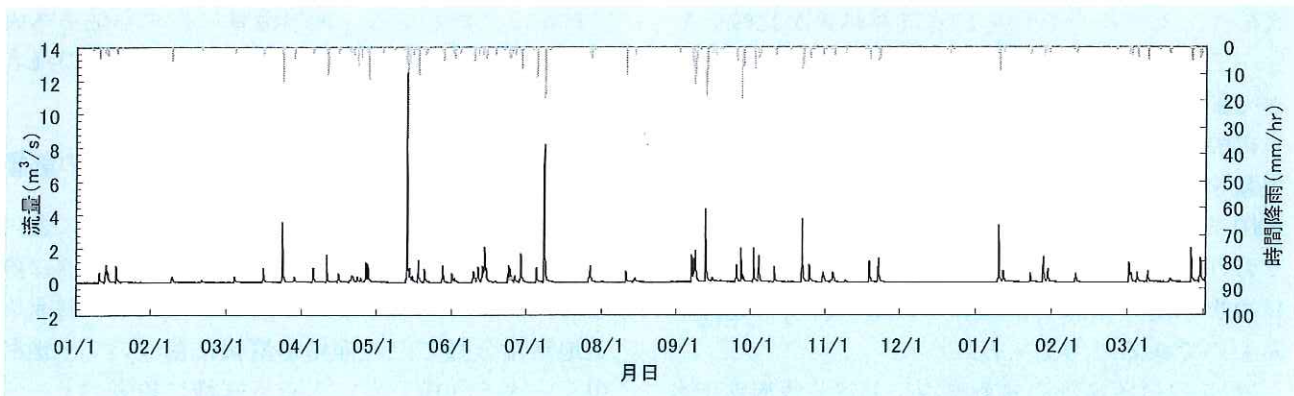


図-7 常磐線沿線開発に伴う河川流量の増加量(小臼裕橋地点、2000年1月1日~2001年3月31日)

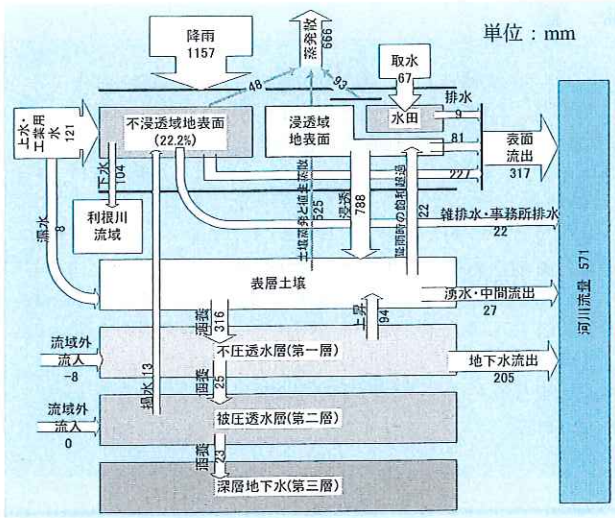


図-9 蓮沼川流域の年間水収支 (1999年)

環系に与える人為的影響が増大することがわかる。

6. 結論

本論文では、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した。また、谷田川流域の水循環解析を実施して流量と地下水位の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すとともに、年間水収支の定量化を行った。さらに、常磐新線沿線の開発に伴う河川流量や浅層地下水位の時空間的变化を定量化した。

なお、谷田川流域の研究ならびに WEP MODELについては土木研究所 (<http://www.pwri.go.jp>) の重点研究プロジェクトサイトからアクセスできる。また、現在、WEP MODELの試用版(実行ファイル形式)と谷田川流域のサンプルデータ、WEP MODELのマニュアルを同サイトからダウンロードできるようになっている。

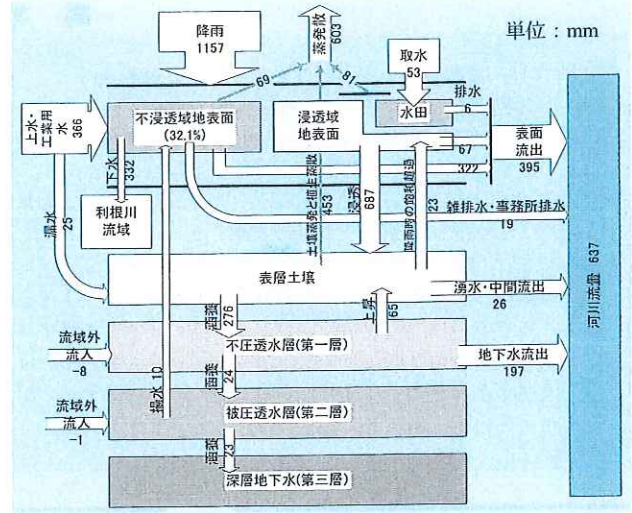


図-10 蓮沼川流域の年間水収支 (開発後)

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, pp.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, pp.151-156, 1998.
- 3) 河原能久、末次忠司、賈仰文、倪广恒：都市河川流域の水循環解析 - モデルの開発と海老川流域への適用 -, 土木技術資料, Vol.41, No.12, pp.38-43, 1999.
- 4) 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.
- 5) 吉谷純一、木内豪、戸嶋光映、賈仰文、倪广恒、河原能久：茨城県谷田川流域における地下水位と地下水水質の実態調査, 土木技術資料, Vol.43, No.10, pp.50-55, 2001.
- 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, 1043p, 1986.
- 8) 国土庁土地局：地下水マップ(茨城、栃木地域), 1995.

賈 仰文*



土木研究所水工研究グループ水理水文チーム特別研究員, 工博
Dr. Yangwen JIA

木内 豪**



同 水理水文チーム主任研究員
Tsuyoshi KINOUCHI

戸嶋光映***



同 水理水文チーム交流研究員
Kouei TOJIMA

吉谷純一****



同 水理水文チーム
首席研究員
Junichi YOSHITANI