

◆ 報 文 ◆

WEPモデルを用いた印旛沼・高崎川における 雨水浸透対策効果のシミュレーション

飯泉佳子* 深見和彦** 木内 豪***

1. はじめに

時間的にも空間的にも変化する流域の水循環を1つのシステムとして理解するためには、どの経路でどのような質の水がどれだけ移動しているのかを定量化することが不可欠である。実測データのみで複雑な水循環全体の構造、因果関係を知ることが難しい。そこで、流域水循環解析モデルを用いて、水循環系を構成する因子間の関係を定量的に明示することによって、流域水循環の特徴を理解するとともに、水循環系の一部の改変がほかの部分に及ぼす影響を評価することが必要になる。これにより、流域全体を視野に入れて水循環系を健全化する対策を検討できるようになる。

このように、流域水循環解析モデルは、モニタリングとともに、計画策定、問題解決の過程において必要不可欠な存在である。複雑な流域水循環を表現するために様々なモデル化の方法が考えられてきた¹⁾。いわゆる概念型のものから分布物理型まで様々あり、目的に応じて使い分けられている。どのようなモデルを使うにしても、注目する現象をどの程度再現できるか、そして、(対策実施の効果も含めた) 将来予測の信頼性がどれほど確保されるか、という点はそのモデルの価値を左右する基本的なポイントである。もちろん、モデルを駆動するデータの入手に要する費用や時間、モデルの使いやすさなどの面も考慮事項である。

WEPモデル(WEP MODEL: Water and Energy transfer Process Model)は、複雑な土地利用がなされている都市河川流域での水・物質循環の定量化と流域変化の影響予測を目的として土木研究所において開発が進められている分布物理型モデルである。本モデルのプロトタイプは買によって作成され²⁾、その後、メッシュごとの地

下水解析、表面流の追跡計算、浸透施設・調節池の効果の計算などの機能を加えつつ、都市域ばかりでなく、水田や畑地などが混在する流域への適用性を確認してきた。さらに、窒素循環モジュールを開発して農地流域への適用性の検討を実施し、現在は窒素循環モジュールの改良とリン循環解析機能の追加を実施している³⁾。

近年、千葉県高崎川流域では市街化に伴い流域の保水・遊水機能が低下し、3~5年に1度の頻度で浸水被害が発生しており、年々被害が拡大、深刻化する傾向がある。同流域は、千葉県の水がめとして重要な印旛沼の流域総面積の16%を占めていることから、印旛沼の水質・水資源管理の観点からも、水循環の健全化に対する期待は大きい。

本研究の目的は、WEPモデルを高崎川流域へ適用し、将来の都市化や雨水の貯留浸透対策実施による流域水循環への影響について評価すること、及び、現在進められている高崎川および印旛沼流域における水循環の健全化計画策定に資する情報・知見を提供することである。

2. 高崎川流域へのWEPモデルの適用

土木研究所で開発したWEPモデルを高崎川流域(図-1)へ適用した。解析対象は、2001年1月1日~2003年12月31日の3年間として、現況再現計算を行った。また、土地利用の変化による蒸発



図-1 高崎川流域の概要

Simulation of The Water Cycle of The Takasaki River Watershed in The Inbanuma Lake Basin Using WEP Model to Evaluate The Effect of Rainfall Infiltration Facilities

散量、地下浸透量、表面流出量の変化と、河川流量の変化を予測し、評価を行った。

2.1 流域の概要

高崎川は流域面積約85.6km²、利根川水系の1級河川である。流域の市街化率はおよそ17%であり、土地利用は畑地39%が優先し、山林23%、宅地10%、水田9%と続く。畑地の灌漑は地下水の汲み上げでまかなわれており、水田の灌漑は印旛沼からの取水に依存している。

2.2 流域データの作成

表-1に示すように、WEPモデルの駆動に必要な地形、地質、土壌、土地利用、人口、水利用（農業、事業所）、河道、下水道、気象（雨量、気温、湿度、風速、日照時間）などの100mメッシュ空間分布情報を作成した。土壌と地質を除くこれらの空間分布情報は、基本的には印旛沼流域水循環健全化会議において収集されてGIS上で整理されたデータ及び新たに収集したデータに基づき作成した。

地質構造は、ボーリングデータをもとに設定した。表土・ローム層および表土、ローム層の直下にある難透水層をモデルで考慮する表層土壌層とみなした。以下、順に不圧帯水層、難透水層、被圧帯水層、難透水層、被圧帯水層の5層で設定した。ただし、表層土壌層の第1層と第2層の透水係数は $5.6 \times 10^{-4} \text{cm s}^{-1}$ とし、難透水層である最下層の第3層の透水係数を $2 \times 10^{-5} \text{cm s}^{-1}$ とした。この値は、表層土壌層より下位にある難透水層の透水係数を参考に、計算流量が実測流量に近くなるようキャリブレーションを行った。

2.3 各種パラメータ

土地利用分類ごとに設定する地被状態（浸透域、不浸透域など）のパラメータは、土木研究所の検討において千葉県海老川流域で設定された値⁴⁾を参考に決定した。また、植被状況のパラメータは、同様に過去の検討において茨城県谷田川流域で設定された数値⁵⁾を参考に、同定した。土壌パラメータも同様であるが、表層土壌層については上記2.2のように決定した。各パラメータは、計算と実測の流量が近似するようキャリブレーションを行ったが、これまでの海老川や谷田川における設定を大きく変更せず、チューニングを最小限にとどめた。

2.4 計算条件検証データ

便宜的に、解析対象期間と同じ2001年1月1日～2003年12月31日の3年間の助走計算を行い、地下水位、初期含水率について初期値を設定した。計算結果の検証に使用したデータは表-2のとおりである。

3. 適用結果及び考察

3.1 河川流量

河川流量の実測値と現況再現計算の計算値を比較すると、低水時の流量が実測値に比べ計算値でやや小さくなっているものの、降雨の大きい時のピーク流量や、降雨後の流量の低減傾向については、おおむね良好に再現できた（図-2）。また、定常的な地下水の高さや降雨時の変化の傾向（降雨時に上昇し、その後低下する）はおおむね再現できた。

表-1 入力データの種類とその出処

種類	データソースと出処	
気象	気温、風速、日照時間	アメダスデータ（気象庁）
	降雨量	テレメータデータ（千葉県）
	相対湿度	大気環境測定データ（千葉県）
	地質分布（ボーリングデータ）	地質環境インフォメーションバンク（千葉県）
地質	表層地質	土地分類図（経企庁総合開発局）
	標高	10mメッシュ標高データ（国土地理院）
地形	土地利用	細密数値情報（国土地理院） 国土数値情報（国土地理院）
	人口	字別人口（千葉県）
社会	事業所排水量	特定事業所排水排水量データ（千葉県）
	下水道整備状況	下水道情報システムデータベース（千葉県）
河川	南部川、鹿島川諸元	各河川の業務報告書（佐倉市、千葉県）
	高崎川流量	調査報告書（印旛沼流域水循環健全化会議）
農業	取水水量	印旛沼取水水量年表（水資源機構） 農業用水施設別取水データ（印旛沼土地改良区）

表-2 計算条件検証データ

項目	地点名	観測期間
河川流量	高岡橋	2002年7月1日～2003年12月31日
地下水位	大田谷津	2002年9月1日～2003年12月31日
地下水湧出量	大田谷津	2002年9月1日～2003年12月31日

3.2 土地利用の変化による水循環への影響

(1) 市街化のシナリオ設定

将来の土地利用は、千葉県資料⁶⁾を参考に、下水道計画区域内が全て市街地化されるシナリオ(将来土地利用1)、および現況と将来土地利用1の中間のシナリオ(将来土地利用2)の2シナリオを想定した。将来土地利用1の場合、市街地・宅地、畑地、山林、水田が流域面積に占める割合はそれぞれ48%、23%、14%、8%となる。

(2) 予測計算結果

表-3に、現況と将来土地利用の河川流況の比較を示す。現況に比べ将来土地利用では、浸透域の減少により地下水涵養量が減少するため、降雨時のピーク流量は大きくなり、地下水流出に影響を受ける平水、低水、濁水流量は小さくなる傾向

が示された。また、市街化が進むほどその傾向が顕著になることが示された。地下水位観測地点において、平常時では現況に比べ将来土地利用の地下水位の高さが、将来土地利用1で約5m、将来土地利用2で約2.5m低くなった。また、降雨時には、現況では明確な地下水位の上昇が見られるが、将来土地利用1および2ともに、地下浸透量が少なくなるため、地下水位の上昇が現況に比べ小さくなることが予想された。

また、表-4に水収支(主な項目のみ抽出)の比較を示す。2001~2003年の3ヵ年全てにおいて、将来土地利用では浸透域が減少し不浸透域が増加するため、蒸発散量は0.7~0.8倍に減少、表面流出量は1.3~1.8倍に増加、基底流出量は0.8~0.95倍に減少すると予測された。

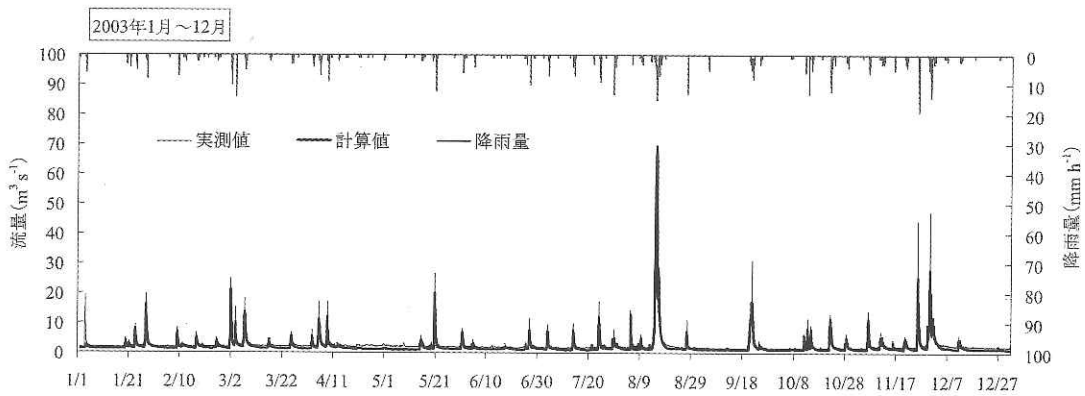


図-2 河川流量観測値と計算値の比較(2003年)

表-3 流況の比較

	現況				将来土地利用1				将来土地利用2			
	豊水	平水	低水	濁水	豊水	平水	低水	濁水	豊水	平水	低水	濁水
2001年	1.98	1.45	1.28	0.95	2.10	1.41	1.20	0.97	2.09	1.42	1.23	0.96
2002年	1.86	1.35	1.20	0.89	1.82	1.19	1.03	0.81	1.86	1.25	1.10	0.83
2003年	1.92	1.41	1.21	1.01	1.86	1.17	0.99	0.87	1.96	1.27	1.09	0.93

表-4 水収支の比較

単位 (mm)	2001			2002			2003		
	現況	将来	将来	現況	将来	将来	現況	将来	将来
		土地利用1	土地利用2		土地利用1	土地利用2		土地利用1	土地利用2
降雨量	1,272	1,272	1,272	1,281	1,281	1,281	1,372	1,372	1,372
蒸発散	529	385	442	572	408	473	570	427	483
表面流出	409	669	565	361	644	531	384	673	557
基底流出	537	495	511	511	431	462	522	413	456
地下涵養	363	236	288	382	249	303	432	282	343

3.3 浸透系対策による水循環への影響

(1) 対策量の設定

現在のWEPモデルでは、浸透トレンチ（雨水を浸透管（有孔管、ポーラス管など）へ導き、その周囲の充填材（碎石など）を通じて土壌へ浸透させる施設）の長さで対策量を設定する必要がある。このため、浸透マス1個あたりの浸透量を浸透トレンチの長さ（m）に換算した。換算の方法は以下の通りである。浸透マス、浸透トレンチの浸透量は、千葉県土木部（2003）⁷⁾より下記のように設定した。

雨水浸透マスの浸透量： $Q_M = 0.432\text{m}^3/\text{h}/\text{個}$

浸透トレンチの浸透量： $Q_T = 0.271\text{m}^3/\text{h}/\text{個}$

これらの浸透量から、浸透マス1個あたりの浸透トレンチの長さを求めると、以下の通りとなった。

$$Q_M / Q_T = 0.432 / 0.271 = 1.60\text{m}/\text{個}$$

よって、市街地・住宅地面積100m²あたり浸透マス1個、浸透トレンチ2mと設定した対策量を、浸透トレンチの長さのみに換算すると、

$$\text{浸透トレンチの長さ} : 3.6\text{m}/100\text{m}^2$$

となった。この対策量をケースAとし、半分の対策量（1.8m/100m²）をケースBと設定した。

(2) 予測計算結果

流量観測地点における現況の土地利用と将来土地利用1、将来土地利用2の各場合について、浸透対策なしと浸透対策実施時の河川流況を比較し

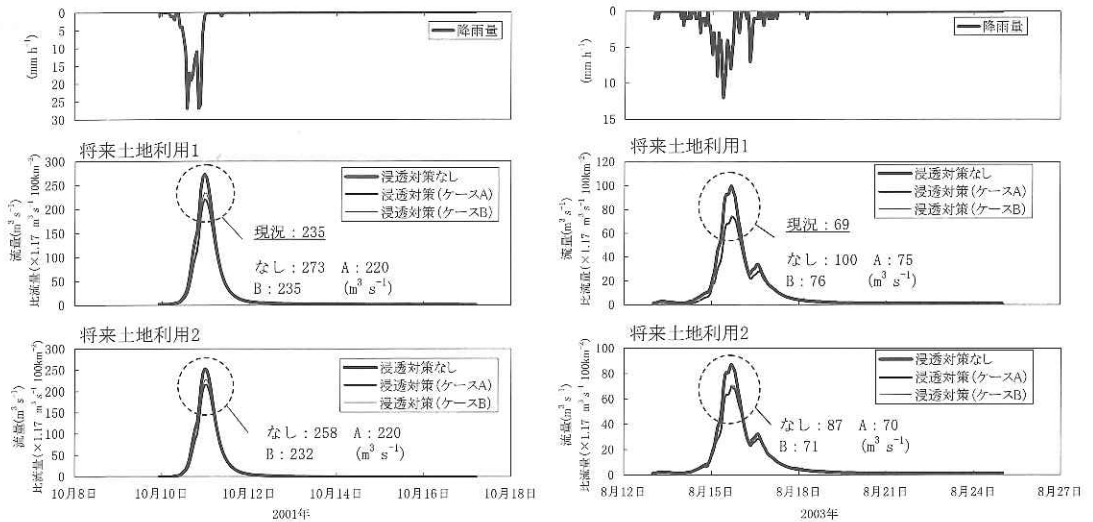


図-3 土地利用と浸透対策による大洪水時ピーク流量低減効果量の関係（流量観測地点）

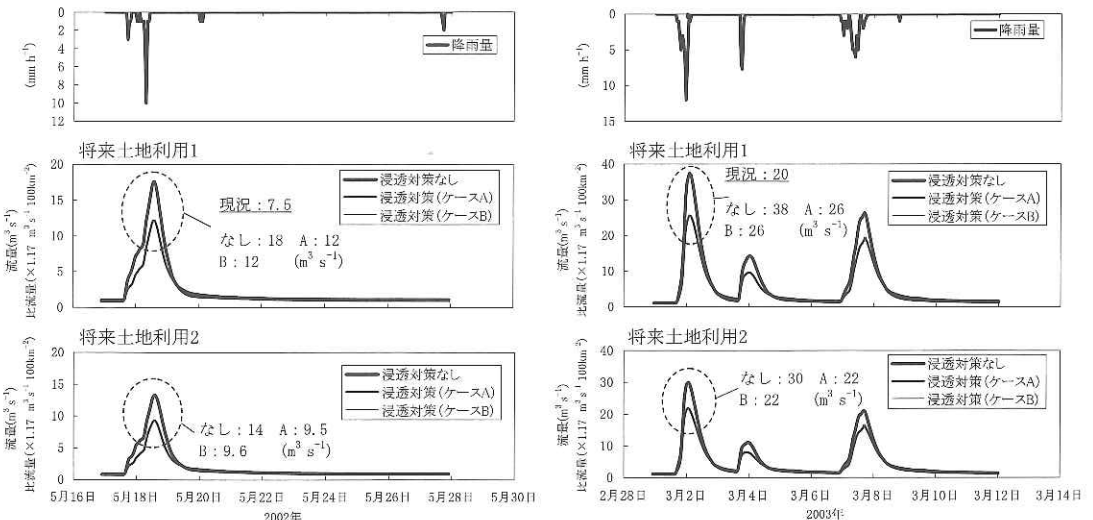


図-4 土地利用と浸透対策による中小洪水時ピーク流量低減効果量の関係（流量観測地点）

た。浸透対策により、地下水涵養量が多くなることから、対策なしに比べ高水時の流量は減少し、平水～渇水の流量は増加した。その増加割合は最大で5%程度であった。また、ケースAとBを比較するとケースAの方が流量の増加は大きいものの、ケースによる違いは小さかった。

2001年から2003年までの3年間のうち、単位時間当たりの流出量が $60\text{m}^3\text{s}^{-1}$ 以上の3洪水を「大洪水」、それ以下の洪水を「中小洪水」として、ピーク流量と土地利用、浸透対策効果量の関係について比較、検討を行った(図-3、図-4)。対象とした洪水のうち2001年10月の大洪水の事例を除き、将来土地利用1、2において浸透対策A、Bを実施しても、洪水ピーク流量が現況より増加することが明らかとなった。2001年10月の事例では、10日午前6時から11日午前9時の間の総雨量が

195mmであった。現況のピーク流量が $235\text{m}^3\text{s}^{-1}$ と比較的大きいことから、降雨が現況土地利用の浸透能を上回っていた可能性も考えられる。2003年8月の降雨では、将来土地利用1の場合に浸透対策を実施しないと、現況に比べピーク流量が1.5倍程度増加すると予想された(図-3)。将来土地利用1と将来土地利用2において、浸透対策(ケースA)あるいは浸透対策(ケースB)を実施すると、浸透対策を実施しなかった場合に比べて大洪水では10～30%、中小洪水では26～34%、ピーク流量を低減できることが示された。一方、浸透対策量の違いについては、大洪水ではピーク流量低減効果量の違いとなって影響が表れたが、中小洪水では両ケースの間に差はほとんど見られなかった。

地下水位観測地点では、現況と浸透対策実施時の地下水位の差は小さかった。これは、地下水位

表-5 水収支の比較 (単位: mm)

	現況土地利用								
	2001年			2002年			2003年		
	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)
降雨量	1,272	1,272	1,272	1,281	1,281	1,281	1,372	1,372	1,372
蒸発散	529	545	545	572	589	589	570	588	589
表面流出	409	336	346	361	289	298	384	309	317
基底流出	537	558	546	511	546	537	522	565	556
地下涵養	363	419	410	382	435	426	432	487	479

	現況土地利用1								
	2001年			2002年			2003年		
	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)
降雨量	1,272	1,272	1,272	1,281	1,281	1,281	1,372	1,372	1,372
蒸発散	385	417	417	408	443	443	427	464	464
表面流出	669	467	479	644	441	449	673	461	467
基底流出	495	559	548	431	536	527	413	541	533
地下涵養	236	405	393	249	415	407	282	455	449

	現況土地利用2								
	2001年			2002年			2003年		
	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)	浸透対策なし	浸透対策(ケースA)	浸透対策(ケースB)
降雨量	1,272	1,272	1,272	1,281	1,281	1,281	1,372	1,372	1,372
蒸発散	442	467	468	473	501	501	483	513	513
表面流出	565	415	426	531	381	389	557	401	407
基底流出	511	559	547	462	540	531	456	551	542
地下涵養	288	411	400	303	423	415	343	468	461

観測地点周辺の土地利用がもともと畑や山林などの浸透域が多いため、変化が小さかったと考えられる。そこで、市街地・宅地等の不浸透域の多い八街市街地内の地下水位を比較すると、浸透対策実施後、約1mの地下水位上昇が見られた。なお、ケースによる違いは小さかった。

表-5に水収支の比較(主な項目のみ抽出)を示す。将来土地利用1では、2001~2003年の3年間全てにおいて対策なしに比べ浸透対策を実施した場合に、地下水涵養量が増加し、基底流出量が増加した。これにともない、表面流出量が減少した。地下水涵養の増加割合は60~70%程度、基底流出の増加割合は10~30%程度、また表面流出の減少割合は30%程度であった。

ケースAとBを比較すると、ケースAの方が地下水涵養量と基底流出量の増加と表面流出量の減少が大きかったものの、その差は小さかった。

また、将来土地利用2について、将来土地利用1と比較して市街地が少ないため、対策なしの場合の基底流出量や地下水涵養量は多かった。このため、浸透対策による増加割合は、将来土地利用1より小さいものの、浸透対策後の各項目の値は、将来土地利用1と2ともにおおむね同様の値となった。

4. まとめ

千葉県印旛沼に流入する高崎川流域にWEPモデルを適用し、以下の研究成果を得た。

- (1) WEPモデルにより、高崎川の洪水ハイドログラフのみならず、流域水収支、流況指標、及び、定常的な地下水の高さや降雨時の変化の傾向をおおむね再現できた。

- (2) 下水道計画区域内全てが市街化された場合、現況に比べ1.5倍程度ピーク流量の増加する計算結果となった。
- (3) 将来下水道区域の全てあるいは50%の面積が市街化された場合、浸透対策を全域あるいは半数の面積で実施しても、解析を行った6洪水のうち5洪水において、現況よりピーク流量が増加した。しかし、対策を実施しない場合に比べて大洪水では10~30%、中小洪水では26~34%、ピーク流量を低減できる試算結果となり、相当の効果が期待できることを示した。

参考文献

- 1) 「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- 2000.
- 2) Jia, Y. and Tamai, N.: Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model. 水文・水資源学会誌, 11, pp.150-163, 1998.
- 3) 飯泉佳子、木内 豪、深見和彦：分布型モデルを用いた河川・地下水の水質解析. 河川技術論文集, 12, pp.335-339, 2006.
- 4) 建設省土木研究所：都市河川流域における水・熱循環の統合解析モデルの開発. 土木研究所資料, 3713, pp.72, 2000.
- 5) 木内 豪、賈 仰文：流域水循環モデルの開発と応用. 地下水技術, 45, pp.13-28, 2003.
- 6) 千葉県印旛地域整備センター：県単河川調査委託(印旛沼治水計画検討) 報告書, 2002.
- 7) 千葉県土木部：千葉県における宅地開発等に伴う雨水排水・貯留浸透計画策定の手引, 2003.

飯泉佳子*



独立行政法人国際農林水産業研究センター研究員(前 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム専門研究員), 農博 Dr. Yoshiko IIZUMI

深見和彦**



独立行政法人士木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム首席研究員, 工修 Kazuhiko FUKAMI

木内 豪***



福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻(前 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), 工博 Dr. Tsuyoshi KINOUCHI