

## ◆ 流域管理特集 ◆

# 全国のモデル流域における水循環のモニタリング及びモデリング

吉谷純一\* 忌部正博\*\* 木内 豪\*\*\* 倪 广恒\*\*\*\* 戸嶋光映\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

都市河川流域において顕在化してきた都市型水害、河川水質・生態系の悪化、平常時の河川流量の減少などの様々な問題は、流域の急激な変化が水循環系にもたらした影響の現れである。個々の問題は水循環系をとおして密接に関連しあっているので、このような問題の解決策を見いだすためには、問題を個別に取り扱って対策を考えるのではなく、流域の水循環系全体で定量的に考える必要がある。そして、そのためには水循環健全化のための各種対策の効果を的確に評価するための技術開発が求められる。

水循環のモニタリングとモデリングは、科学に基づく信頼性の高い水循環の評価を行うために必要な実務上の重要な判断材料である。水循環のモニタリングとモデリングは、流域の特性に応じた水循環の現象を理解するのに役立つばかりでなく、将来の流域の変化が水循環にもたらす影響を予測し、水資源の有効利用、水質・生態系の保全や改善、洪水被害の軽減といった流域全体に関わる課題に取り組むための様々な情報を提供してくれる。建設省と地方自治体では1996年より、全国の6河川流域において水循環のモニタリングとモデリングを行っており、各流域における水循環再生構想の策定<sup>1),2)</sup>においても重要な役割を果たしてきている。そこで、本報では上記の6河川流域と土木研究所の主導のもとに調査を行っている1河川流域でのモニタリングとモデリングの現状について紹介する。

## 2. 水循環モニタリングの現状

### 2.1 水循環系の評価に必要となるデータ

水循環は対象とする流域の土地利用(森林、農地、都市)によって特徴が大きく異なる。農地を主とする流域では、河川における農業用水の取排水や、農業・生活用水としての地下水利用によって自然の水循環系が量的・質的に大きく影響される。また、人口が集中し、都市化された流域では、

不浸透域の増大や下水道の整備により、自然系と人工系の水循環が空間的に分離されるとともに、時間的にも洪水ピークの増大と低水流量の減少という二分化を引き起こす。量的な水の循環のほかに、物質の流れとして水循環を捉えた場合も同様である。したがって、流域の特性によってモニタリングするデータの種類は増減するが、非常に多くの種類のデータを空間分布と合わせて取得整理する必要がある。

水循環系を把握するために必要となるデータは水文・気象データと流域情報に大きく分けられることが多い。前者には、降水量、気温、河川流量、河川水質、地下水位分布などがあり、後者には、流域界、土地利用、標高・地表面勾配、人口(分布)、使用水量原単位、河川取水量、地下水揚水量、上水道漏水量、下水処理量、下水道整備(地域、普及人口)、河道縦横断、表層地質、帶水層構造などがある。

流域水循環の把握にあたっては、多岐にわたる情報を整理して解析する必要がある。ところが、必要なデータの中には、これまで充分に計測されていないものが少なくない。したがって、新規に計測を実施しなければならない項目が生じてくる。また、観測データは、管理組織毎に分散しているために、収集の手続きが煩雑であることが多い。このような状況から、実務においてデータの入手(観測及び資料収集)は相当なウエイトを占めることになっている。

また、計画段階の現状把握ばかりでなく、水循環系の再生方策を実施した後も継続的に観測及び資料収集を行うことにより、実施効果を的確に把握することが重要である。ともすると、計画が終わると実施に力点が置かれ、モニタリングをおろそかにする傾向がある。

自然系の水循環を把握する上で、地下水位の分布や地下水の流動方向、洪水時・平常時の河川流量などが、重要な観測項目となる。地下水については、観測井を平面的に適切な密度で設置するためには相当の労力とコストがかかるため、充分な精度で把握することが困難な場合が多い。河川流量については、水位と流量の関係(HQ曲線)にもと

づいて水位データから流量に換算する場合が多いが、低水位から高水位まで広範囲にわたる HQ 曲線を精度良く作成するためには、出来るだけ単純な断面をもつ観測位置の選定と精度の高い流量観測技術が必要とされる。特に、微小な水深を観測することになる場合の多い平常時の流量観測については、観測用の堰を設置するなどの工夫を要する。

## 2.2 モニタリング項目の事例

実務において水循環系の解析を実施した先進的な事例として、水循環再生構想のモデル流域（前記の 6 河川流域）が挙げられる。これらの流域において検討の際に用いられた気象水文データについてまとめると表-1 のようである。表中の数字はデータが得られている地点数を示す。これらの内で、地下水位関連と河川の 24 時間流量変動及び低水流量に関するものは、既往のモニタリングが無い場合がほとんどで、新規に観測を実施したものである。

## 2.3 近年の技術動向

近年、衛星リモートセンシング、レーダ雨雪量計などに代表される広域同時観測が可能となつたこと、また、流速計や土壤水分計などのセンサー技術の進歩により、観測精度が向上したり観測が容易になつたりしたことによって、水循環系のモニタリング技術は発展を続けている。

また、収集した情報の整理には情報の分布を数値に置き換える必要があるが、GIS 技術の進歩により、その面の作業は大幅に効率化されている。特に、我が国では国土数値情報をはじめとして、多くの地理情報が既に電子化されており、コンピュータ上で流域情報を整理するのが容易な状況となっている。

表-1 水循環再生計画に用いたデータ（6 地域の例）

	善福寺川	東川	和泉川	平戸永谷川	海老川	菩提川
所在地	東京都	埼玉県	神奈川県	神奈川県	千葉県	奈良県
流域面積 (km <sup>2</sup> )	18.3	18.1	11.5	15.2	27.1	3.1
雨量	2	5	2	1	11	1
気温	1	3	1	1	2	—
河川水位(自動連続)	9	3	3	2	3	3
河川流域	洪水時	2				3
	平常時定期	2				3
	24時間連続	5	3		2	4
	複数地点同時					14
河川水質	平常時定期	5	3			10
	洪水時連続	2		4		9
	24時間連続			5	2	3
	連続自動					1
地下水位	複数地点同時		2			11
	自動連続	12	3	6		13
	一斉測水					100
	湧水量			3		一式
他	湧水量連続			1		
	総合気象					1
	池の透明度					3

表-2 水文解析モデルの分類

モデルの分類		代表的なモデルの名称
集中モデル	流域を一様な一つの計算単位として扱う	EPIC、CREAMS、TANK、安藤・虫明・高橋モデル <sup>4)、5)</sup>
分布モデル	斜面要素型	HEC-1、KINEROS、RORB、SRM、SPUR-91、SWRRB、SLURP、HSPF、NWSRFS、PRMS、SSARR、SWMM、UBC、XINANJIANG、MIKE 11、MOUSE NAM、HBV、TOPMODEL、土研改良 PRMS モデル <sup>6)</sup> 、SHER <sup>7)</sup>
	グリッド型	AGNPS、WEPM <sup>8)</sup> 、土研分布モデル <sup>9)</sup> 、THALES、立川モデル <sup>10)</sup> 、陸モデル <sup>11)</sup> 、SHE (MIKE SHE、SHESED)、IHDM、Hydro-BEAM <sup>12)</sup> 、PDE <sup>13)</sup>

注) 文献番号のないものについては文献14)から情報を得た。一部のモデルの名称は他と区別するために一時的に付けたものである。

## 3. 水循環モデリングの現状

### 3.1 解析モデルの変遷

コンピュータを活用した水文解析モデルの発展は、米国を例にとれば、50 年代から現在にかけて、施設計画、施設運用、水資源管理そして水環境管理へと視点が移行するにつれてその対象が拡大してきた<sup>3)</sup>。これに伴い、解析対象は単に河川流量のみとしたものから、地下水位なども含むものとなった。

これらのモデルの分類は、空間表現手法 (例えば、集中か分布か) あるいは支配方程式とその解き方 (例えば、集中定数系か分布定数系か) の観点

から行われることが多い。ところが、後者の場合には、サブモデル毎に分布定数系、集中定数系を使い分けるときがあり、一つのモデルの中に複数の分類が混在していることが多く、明確な分類は難しい。ここでは空間表現手法に着目した分類手法に従って既往の流出解析モデルを表-2に整理した。これによると斜面要素型に分類されるものが最も多いが、近年はコンピュータの能力向上やりモートセンシング及びGISなどの周辺技術の発展に伴ってグリッド型モデルの適用事例が増えている。

水循環のモデリングでは、土地利用に応じた流出、浸透現象や不飽和帯の取り扱い、人工系と自然系の水の流れの取り扱いが重要である。人工系の流れに関してはモデルの中で考慮されていない場合が多く、適用に際しては何らかの改造が必要である。自然系・人工系の流れを全て扱えるモデル

としては表-2のSHER、WEPM、PDEが挙げられる。

### 3.2 実務における検討事例

前述の水循環再生構想では、6河川流域において将来想定に基づく土地利用と水利用による水循環系の変化を予測し、対策の効果を定量化している。これらの事例について、効果評価指標、検証データ、変化項目(現在と将来で変化する流域の状態)及び効果評価モデルを整理した(表-3)。対策の効果評価を行う指標としては、①平・低・渴水流量の中のどれかが採用されている、②単なる河川流量ではなく地下水流出成分などの河川の清流成分を評価指標としている、などの特徴がある。したがって、①日流量を計算して流況曲線を描けること、②地下水流出などの流出成分を個別に出力出来ることが、水循環系解析モデルに要求される。これに対して、採用されたモデルはタイプA

表-3 対策(工)と水循環系解析(6地域)

	神田川	東川	和泉川	平戸永谷川	海老川	菩提川
所在地	東京都	埼玉県	神奈川県	神奈川県	千葉県	奈良県
流域面積 [km <sup>2</sup> ]	105.0	18.1	11.5	15.2	27.1	3.1
河川延長 [km]	25.5	12.6	11.5	4.9	4.8	1.6
市街化率 [%]	94.0	57.2	54.9	82.0	62.0	70.0
変化項目 (モデル上で将来に向けた変化する流域の状態)	不浸透面積 合流改善策 浸透施設 人工系成分	不浸透面積 下水道整備 浸透施設 人工系成分	不浸透面積 下水道整備 浸透施設 人工系成分	不浸透面積 下水道整備 浸透施設 貯留施設 人工系成分	不浸透面積 土壤締固め 下水道整備 浸透施設 貯留施設 人工系成分	不浸透面積 下水道整備 浸透施設 貯留施設 人工系成分
効果評価指標	平水流量(自然) 低水流量 年間浸透量	平水流量(自然) 低水流量 地下水位	ピーク流量 平水流量 年間浸透量 年間地下水流出	ピーク流量 低水流量 年間浸透量	ピーク流量 平水流量 年間浸透量 地下水位	ピーク流量 渴水流量 年間流出高
検証データ	日流量	日流量 地下水位	時間流量	時間流量	時間流量 地下水位	時間流量
効果評価モデル (解析モデル)	タイプA	タイプA	タイプB	タイプA + 合理式	タイプC	タイプD

タイプA: 表層土壤の容水量を考慮したタンクモデル、安藤・虫明・高橋モデルを基本とする。

タイプB: 合理式、飽和浸透流(ダルシー流)、河道不定流を組み合わせた流出モデル

タイプC: 50mメッシュのグリッド型モデル

タイプD: タンクモデル、修正RRL法、土研下水道負荷流出モデルを組み合わせたモデル

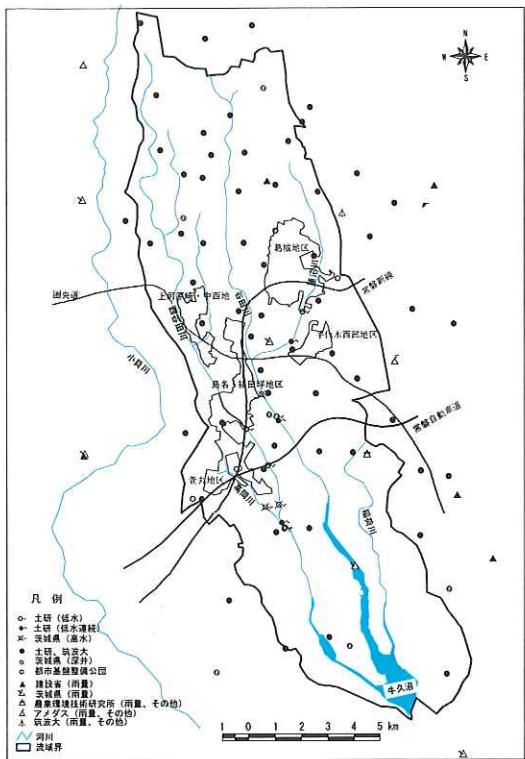
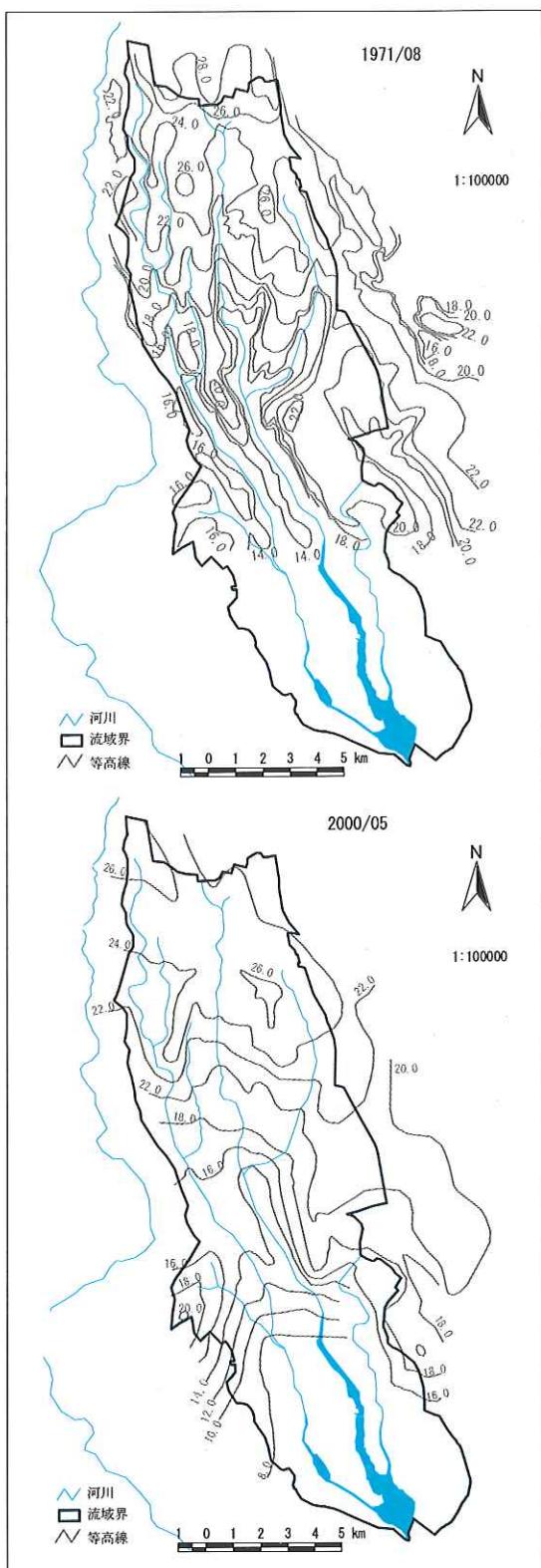


図-1 谷田川流域における水循環のモニタリング状況

の事例が最も多く、他にグリッド型を用いた例が一つ、その他は流域の特性に合わせて水循環系の各部分をモデル化して組み合わせたモデルとなっている。いずれのモデルも新規開発あるいは従前のモデルを改造して実務へ適用している状況である。

#### 4. 水循環モニタリングの事例－谷田川流域－

谷田川流域は第7番目のモデル流域として、平成11年度より土木研究所がモニタリングに着手し、観測体制を順次拡張しながら進めている。流域面積は166.6km<sup>2</sup>で、このうち、平成17年開通予定の常磐新線沿線の開発予定面積は約13km<sup>2</sup>である。第5時期(1994年)の細密数値情報によると、谷田川流域の土地利用としては山林、水田、畠地が全体の63%をしめ、宅地は15%にとどまる。水田は主として河川沿いの低地に広がる。畠地の内訳では芝地が最も多い。このような農地や森林を中心とした流域が急激に都市化されることによる流出増、地下水低下、汚濁物質の流出による水質悪化や下流の牛久沼への影響が問題視されるため、多面的かつ長期間のデータ蓄積が重要である。現在、当流域では図-1に示すように、茨城県

図-2 浅井戸の調査結果に基づく地下水位等高線  
(上段:1971年8月、下段:2000年5月)

と土木研究所による低水観測、高水観測が実施されている<sup>15)</sup>。地下水の一斉観測は土木研究所と筑波大学が共同で実施している。都市基盤整備公団により開発予定地内の多数地点で地下水調査も行われているが、図-1には一部の地点のみ示した。また、雨量、気温などの気象データは気象庁、農省、建設省、茨城県、筑波大学等がそれぞれの目的で測定しており、これらのデータを利用することができる。

当流域では相当量の農業用水、上水を地下水に依存していることから、地下水の賦存量や水質をモニタリングすることは非常に重要である。図-2には1971年8月と2000年5月の竜ヶ崎層を主体とする浅層地下水位の等高線を示す。1971年の実績は筑波大学田中研究室において実測された結果である。一般的には5月のほうが多くの農業用水を必要とすることや1971年当時の流域外からの補給水量が不明なことから、単純な比較には注意が必要であるが、図-2より、1971年に比べて2000年には下流域で地下水位が大きく低下していることがわかる。この現象は牛久沼への湧出量にも影響するおそれがある。

図-3は1999年1月から2000年3月までに測定された深井戸と浅井戸における地下水位及び降雨量を示す。深井戸データは県管理の牛久地点(深度146m)の井戸水位、浅井戸は都市基盤整備公団

による一般住宅の井戸水位をあらわす。また、降雨データは長峰観測所の日雨量である。深井戸の地下水位は、5月から8月の期間は低下し、9月から回復している。一方、浅井戸の地下水位は8月から低下傾向にある。深井戸の地下水位低下は農業用水等の汲み上げによるもので、浅井戸の地下水位は灌漑水等による涵養効果がなくなる8月以降に低下をはじめるものと考えられる。同じ浅井戸でも降雨に対する応答性が異なるのは、地下の地質分布と関係がある。

## 5. 水循環モデルの適用例

### - 斜面要素型モデルの善福寺川流域への適用 -

神田川の支川、善福寺川は流域面積18.3km<sup>2</sup>、河川延長10.5kmの市街地を流れる河川である。流域は武蔵野台地の平坦な地域に善福寺川が細く開析した地形であり、表層土壤の地質は関東ロームである。解析モデルには斜面要素型分布モデルであるSHERモデル<sup>7)</sup>を用いた。同モデルは地形、土地被覆などが比較的均一と思われる地域で流域を分割し、それぞれに図-4のモデルを充てるものである。地盤図をみると河川近傍に盛土地、平坦化地などが分布しているが、この部分を開析作用により形成された河道周辺の低地とみなしその外周の台地と区分して2つのブロックを設定した(図-5)。

流域は全域市街化されており、また、全域が合流下水道整備地区である。モデル化においては、河川への合流下水越流量算定部分を組み込んだ。

なお、上水道漏水、下水浸入水、地下水揚水、雨水貯留浸透施設、清流復活事業による導水、善福寺池への地下水揚水は年間平均値として与えた。また、時間雨量と日可能蒸発量を用いた。モデル

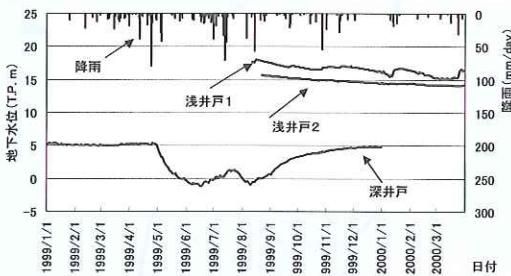


図-3 地下水位変動のモニタリング結果

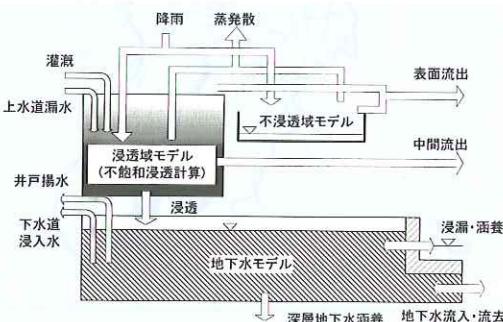


図-4 SHER モデルの概念図

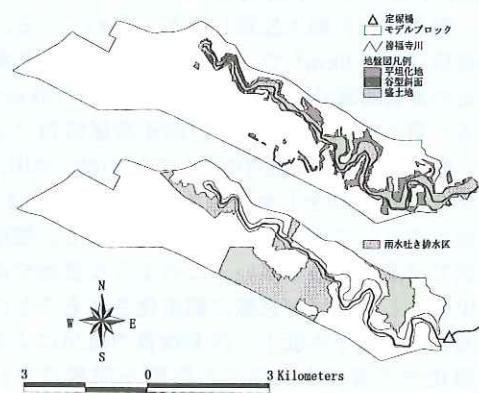


図-5 善福寺川の概要とモデルブロック

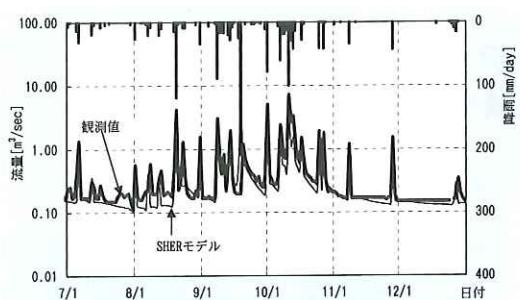


図-6 定塚橋地点流量の再現性(平成3年後半)  
のパラメータは河川流量と地下水位の実測値を用いて同定した。

## 2) 再現計算結果

定塚橋地点の再現計算結果を実測値と比較した(図-6)。9~10月の期間に大きな降雨が集中しているが、降雨による河川への流出量のピークおよびその発生時刻は良く対応している。また、ピーク流量から平常時の流量に至る低減曲線も良く対応しており、地下水流出成分の妥当性を示している。このことから、適用したモデルは、水循環モデルの基本的要件である表面流出、中間流出、地下水流出の全ての機構を精度よく再現していると考えられる。

## 6. おわりに

本論文で紹介したモニタリング、モデリングは、建設省、千葉県、東京都、横浜市、埼玉県、奈良県、茨城県の行政担当者のほか、多くの調査試験機関の多大な努力のもとに成り立っている。本報文ではその成果のほんの一部分しか掲載できなかつたが、このような取り組みの必要性が少しでも多くの読者に理解して頂ければ幸いである。

末尾ながら、貴重なデータを提供してくださった東京大学生産技術研究所虫明功臣教授、千葉工業大学高橋彌教授に深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 建設省：都市の水循環再生構想策定マニュアル(案),1998.
- 2) (社)雨水貯留浸透技術協会：都市の水循環再生に向けて,1998.11
- 3) R. A. Wurbs: Computer Models for Water Resources Planning and Management, IWR Report 94-NDS-7, 1994.7 ([www.wrc-ndc.usace.army.mil](http://www.wrc-ndc.usace.army.mil))
- 4) 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, 25回水理講演会論文集,1981.
- 5) 虫明功臣、石崎勝義、吉野文雄、山口高志：水環境の保全と再生, 山海堂, 1987.
- 6) 寺川陽・深見和彦：モジュラー型水文循環モデルにおけるリモートセンシング情報活用手法, 土木技術資料 vol.37, no.11 pp.38-43, 1995.
- 7) 福田正晴、忌部正博、中村茂、Srikantha Herath: 流域水循環解析モデルの比較研究, 水文水資源学会2000年研究発表会要旨集,2000.8
- 8) 末次忠司、河原能久、賈仰文、倪廣恒：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, 土木研究所資料第3713号, 2000.3
- 9) 吉野文雄、吉谷純一、堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用, 土木技術資料 vol.32-10, pp.54-59, 1990.
- 10) 立川康人、原口明、椎原充晴、高橋琢馬：流域地形の三角形要素網表現に基づく分布型降雨流出モデルの開発；土木学会論文集 565/II-39, pp. 1-10, 1997.
- 11) 陸曼皎、小池俊雄、早川典生：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木学会論文集,411/II-12, pp.135-142, 1989.
- 12) 小尻利治・木内陽一：Hydrological River Basin Environment Assessment with Multi-layer and Multi-mesh(Hydro-BEAM), 流出モデルの比較・評価に関する研究会報告,2000.5
- 13) S.Nakamura, M.Saito,S.Herath : Development and Applications of a Physically Based Distributed Catchment Model in Urban Area, 21世紀におけるアジアの都市工学国際学会,'98.11
- 14) V. P. Singh : Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications,1995.1
- 15) 倪廣恒ほか：谷田川流域における低水時の河川流量、水質特性, 水文・水資源学会2000年研究発表会要旨集, 214-215, 2000.8

吉谷純一\*



建設省土木研究所  
河川部  
都市河川研究室長  
Junichi YOSHITANI

忌部正博\*\*



(社)雨水貯留浸透技術協会技術第一部長  
Masahiro IMBE

木内 豪\*\*\*



建設省土木研究所  
河川部都市河川研究室主任研究員  
Tsuyoshi KINOUCHI

倪 广恒\*\*\*\*



同 都市河川研究室  
交流研究员、工博  
Dr.Guangheng NI

戸鳴光映\*\*\*\*\*



同 都市河川研究室  
交流研究员  
Kouei TOJIMA