

都市流域における洪水流出解析の現状と 将来展望

河村 明^{1)†}

1) 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

†連絡先著者 (Corresponding Author) E-mail: kawamura@tmu.ac.jp

本総説では、都市流域を対象とした洪水流出解析の現状を概説するとともに将来展望を述べている。まず、都市型水害について述べ、次いで流出解析におけるモデルの歴史を簡単に振り返りそれらを概説するとともに、都市流域への洪水流出モデルの適用の現状を紹介する。次に、集中型概念モデルの貯留関数モデルを概説するとともに、都市貯留関数 (USF) モデルについて解説を行う。そして、都市流域における精緻な分布型物理モデルの必要性を述べ、高度な地物データ GIS についてメッシュデータとの違いを示し、高度な地物データを活用した精緻な分布型物理モデルである TSR モデルについて概説する。最後に、集中型概念モデルや分布型物理モデルなどの課題や将来展望を俯瞰し、都市型水害の減災への提言も行っている。

キーワード：洪水流出モデル、都市流域、USFモデル、TSRモデル、高度な地物データGIS

I. はじめに

20世紀後半、世界では先進国、途上国を問わず、都市化が急速に進み、特に日本においては、欧米の都市化とは比べものにならないほど激しく都市化が進行し、森林や畑だった流域の山地や丘陵地が次々と開発され、また水田をはじめ農地が一斉に宅地化された (高橋, 1988)。その結果、河川周辺の遊水機能が失われそれが浸水リスクの高い市街地へと変貌し、さらに、降水が地下へ浸透せず、そのまま都市河川もしくは整備された下水道へ一気に流れ込む典型的な「都市型の流出形態」となり都市水害が頻発した。日本で初めて都市水害として注目された1958年の狩野川台風水害では、伊豆温泉街の被害もさることながら、横浜の台地における崖崩れなどによる被害を発生させ (玉井編, 1999)、また東京都内において、東側の低地において広範囲に浸水被害が発生したのみならず、それまで水害とは無縁と考えられていた東京台地部すなわち神田川流域などの山の手地区においても甚大な浸水被害が発生し過去最大の氾濫・浸水被害となった (石原ら, 2014)

守田 (2014) は「都市水害」を、①不浸透域の拡

大、②下水道の普及、③河道の改修整備を背景に洪水流量が増大し、流域の人口・資産の集中により被害ポテンシャルも高くなる結果もたらされる都市流域の水害とし、1990年代以降に聞かれるようになる「都市型水害」とは区別している。近年の都市域の水害すなわち「都市型水害」は、従来の「都市水害」よりさらに複雑化してきており、特に都市化の影響とも考えられる俗に「ゲリラ豪雨」 (例えば、鼎, 2009; 中北ら, 2009; 牛山, 2011) と呼ばれる予測の難しい局地的集中豪雨の発現頻度の増加、それまでの河道からの溢水・越水による「外水氾濫」よりも下水道施設からの溢水による「内水氾濫」の増加、地下空間の浸水被害ポテンシャルの増大 (守田, 2014) などの特徴を有している (河村, 2016)。本稿では以下、「都市型水害」は「都市水害」を包含する一般的な用語として用いる。

近年、都市型水害が喫緊の社会問題の一つとなっており、都市型水害を防災・減災するにはまず都市流域における洪水流出解析が必要不可欠である。都市流域の概念として、守田 (2014) は流域の大部分が沖積平野・洪積台地・扇状地・丘陵地などの平地

であり、上・中・下流の全域が都市部に含まれ、流域面積も概ね100 km²より小さいいわゆる都市中小河川流域としており、本稿でも都市流域の概念はこれに従うものとする。都市流域では一般的に平坦でかつ資産が高度に蓄積しており、氾濫・浸水により甚大な被害を受ける特徴を有する。都市型の洪水流出機構に初めて総括的定量的に論及したのは木下(1967)とされ、その後都市型の洪水流出機構に関して数多くの論文(例えば、高橋ら, 1982; 鮭川・北川, 1982; 志子田ら, 1985; 守田・和泉, 1985; 山田ら, 1985)が発表されたが、それらの研究成果は角屋(1985)によって総括されている。都市型の洪水流出機構の特徴は以下の様に要約される。①洪水時の流出率が增大し、②雨水が河川に流れ込むまでの洪水到達時間が短くなり、また短い時間になればなるほど降雨の特性として降雨強度は強くなるので、その結果③洪水のピーク流量が非常に大きくなる。

その後、都市流域における洪水流出解析として、コンピュータ技術の飛躍的発展とともに、衛星やレーダなどによるデータ収集技術の発達、情報通信技術の進展による様々なデータ蓄積・データベース化、特にGIS(地理情報システム)技術の進歩とGISデータの整備、さらに近年の最適化手法、人工知能手法、カオス・フラクタル理論、ネットワーク理論などの種々の新しい手法の開発も進み、新たな流出モデルが提案されている。本稿では、都市流域における洪水流出解析を概説するとともに、特に都市流域に特化した集中型概念モデルである貯留関数モデルおよび高度な地物データGISを用いた分布型物理流出モデルの現状を紹介し、都市流域における流出モデルの将来展望について私見を述べる。

II. 流出モデル

1. 概説

一般的な狭義の流出解析の目的は、降水(降雨や降雪など)の特に量に着目しその流出過程の物理機構を明らかにして、対象流域の洪水や渇水などの水循環過程を予測することと考えられる。その予測量は河川や流域の計画や管理などに用いられる。降水を入力とした流出解析には流出モデルが用いられるが、これまでに相当数の様々な流出モデルが開発されてきている。

定量的な降雨流出モデルは、19世紀中頃都市小流域の降雨イベントに対するピーク流量の算定に用い

られた合理式(Mulvany, 1850; 土木学会水理委員会, 1999)に遡る(Singh and Jain, 2017)。また、与えられた降雨イベントのピーク流量のみならず流出ハイドログラフを求めるのにShermanは1932年に単位図法(Sherman, 1932; 土木学会水理委員会, 1999)の概念を導入した。単位図法の概念はその後の水文システムにおける線形応答理論の基礎となった。そして、1954年には岩垣・末石がkinematic wave理論を山腹斜面の流出解析に適用し(岩垣・末石, 1954; 末石, 1955)、また1955年にはLighthill and Whithamは河川の流量追跡のためにkinematic wave理論を構築した(Lighthill and Whitham, 1955)。その後現在に至るまで本理論は地表面流や他の様々な水文素過程をモデル化する標準的なツールとして受け入れられている(Singh and Jian, 2017; 木村ら, 2017)。1960年代になるとデジタル革命によりコンピュータ性能が大幅に向上し、流域全体の水文過程を数値的にシミュレーションすることが可能となってきた。そして1966年Crawford and Linsleyによって開発されたStanford Watershed Model(SWM)(Crawford and Linsley, 1966)以降、特に物理性を強調する流域水文モデルが急増し現在に至っている(Singh, 1995; Singh and Frevert, 2006; Singh and Jian, 2017)。

流出モデルは、そのモデルの取り扱う時間スケールにより(降雨を入力とした洪水イベントベースの)短時間スケールの「洪水流出モデル」と、(降水を入力とした通常月・季節・年ベースの長時間流出量を対象とした)長期的時間スケールの「長期流出モデル」に大別される(土木学会水理公式集改訂委員会, 1971; 土木学会水理委員会, 1985)。また、モデルの空間的構成の取り扱いにより、対象流域を均一な一つの塊と捉え流域特性の空間的な変動を考慮しない(一般的に時間の常微分方程式として表現される)「集中型モデル」と、流域特性の空間的な変動分布を陽に考慮する(通常、時間と場所の偏微分方程式として表現される)「分布型モデル」に分類される(Singh, 1995; 土木学会水理委員会, 1999)。なお、モデル自体は時間の常微分方程式として表現されるが、対象流域を小流域に分割しそれぞれの小流域を集中型モデルとする複合的なモデルもある。さらに、降雨(降水)を入力とし流出を出力として、この入出力の応答関係のモデル化の方法により、単に応答関係としてモデルを構成する「応答モデル」、応答関係の現象を概念的に捉えモデルを構成する「概念モデル」、その現象を物理的な法則性に基づいた基

礎式からモデル化する「物理モデル」に分類される(椎葉ら, 2013b; 木村ら, 2017). なお, 沖(2006)は, 基本的な物理法則を破っていない限りすべて物理モデルと呼ぶのが適切ではないかとし, 現実的には, 流出モデルパラメータに一般性がある場合に物理的と呼ばれることが多いとしている.

集中型概念モデルとして現在我が国でよく用いられているのはタンクモデル(例えば, Sugawara, 1995; 土木学会水理委員会, 1999; 河村, 2002b)と貯留関数モデル(次節Ⅲで述べる)である(河村, 2000). タンクモデルは菅原によって考案され, 1956年にはその典型的な直列貯留型タンクモデルが開発されており(菅原, 1972), また貯留関数法は1961年には木村により提案され(木村, 1961; 木村, 1975; 日野, 1996), 現在特に国土交通省の管轄する現場で一般的に用いられている. 分布型物理モデルとしては, 流域を長方形斜面と河道の集合体として, 雨水の流れを水理的な連続式と運動式で表現する kinematic wave モデル(等価粗度法, 雨水流法ともよばれる)が我が国では多用されている(例えば, 椎葉ら, 2013a; 木村ら, 2017参照). さらに近年, 分布型物理モデルとして, Sayama *et al.* (2012)により提案され, 土木研究所 ICHARM(水災害・リスクマネジメント国際センター)(2018)により実装されそのプログラムが公開されている RRI モデルは, 降雨流出と洪水氾濫を二次元で一体的に解析するモデルとしてその適用例が増えている.

一方, 前述のように世界中では多くの様々な流域水文モデルが開発されている(Singh and Frevert, 2006)が, 流域の水文量の空間分布を分布関数として考慮する集中型モデルとして, Beven and Kirkby (1979)によって提案され特にヨーロッパの国々で標準的モデルとして用いられている TOPMODEL (Beven *et al.*, 1995) や 1973年に構築され中国で一般的に用いられている Xinanjiang Model (Zhao, 1992; Zhao and Liu, 1995; Ren and Yuan, 2006) などがある. また, 地形標高を DEM (Digital Elevation Model または Digital Elevation Map) を用いて記述する分布型物理モデルとして, デンマーク水理研究所がイギリス・フランスの研究所と共同開発した SHE モデル(例えば, Bathurst *et al.*, 1995; 土木学会水理委員会, 1999), イギリス水文研究所による IHDM (例えば, Calver and Wood, 1995; 土木学会水理委員会, 1999) などがある. スウェーデン気象水文研究所により 1972年から開発された HYPE モデル(旧 HBV モデ

ル)(例えば, Bergström, 1995; Lindström *et al.*, 2010; SMHI, 2018)のように複数の土地被覆と土壌タイプを設定可能な地下水流動を考慮したポリゴン型副流域を単位とする集中型と分布型の複合的な水文・水質モデルもある. なお, 上記のオリジナルモデルは次々と改良・拡張され現在その多くの発展系モデルが存在する.

2. 洪水流出モデルの都市流域への適用

Ⅱ.1で述べた種々の洪水流出モデルは, その多くは山地・自然流域を主な対象流域として提案されたモデルであり, 特に都市流域を意識して構築されたモデルではない. 都市流域では, まず, 雨水が浸透しない家屋やビル, 舗装道路, 駐車場など人工的に整備された不浸透域が錯雑に分布し, 次いで, 下水道や人工的排水路などの雨水排水施設による流出経路が存在し, さらには貯留・浸透施設等の流出抑制施設や治水施設も整備され, 非常に複雑な都市流出システムが人工的に形成されると共に, 絶えずその形態が変化している(天口ら, 2007). しかしながら, 都市流域での流出現象素過程の物理過程そのものは, 自然流域と基本的に大きな差があるわけではないので, 結果として各モデルのパラメータの値を対象都市流域に適用するように変化させることとなる(松林, 1997a).

合理式(例えば, 石川ら, 1982)は多くの中小河川および下水道の計画に用いられているが, 元々都市流域での雨水排除計画の基本となるピーク流量の推定式として提案されたモデルである. 流出係数や洪水到達時間などのパラメータは対象とする都市流域に対して適切に推定される必要がある. 例えば, 角屋・福島(1976)は, 等価粗度法の理論に基づいて, 洪水規模による洪水到達時間の変化を表現した式を提案している(松林, 1997a, 土木学会水理委員会, 1985). また, 対象都市流域を小流域に分割し, 小流域ごとに流域面積, 流出係数, 洪水到達時間を設定して, 合理式によるピーク流量を重ねて結合することによりハイドログラフを作成する合成合理式(谷岡ら, 1998; 渡邊ら, 2012)も都市流域のモデルとして用いられている. その他, 準線形貯留モデル(橋本・長谷川, 1977)や修正 RRL 法(山口ら, 1972)も洪水到達時間や流出係数を対象の都市流域に対して設定することにより都市域の洪水流出モデルとして用いられている(松林, 1997b; 鮎川・北川, 1982).

分布型物理モデルである kinematic wave モデルの

都市流域への適用例として、安藤ら（1991）は、降雨分布を考慮して都市流域を長方形斜面の小流域に分割し、分割小流域ごとにkinematic waveモデルを適用し、有効雨量（窪地損失、浸透損失などの損失雨量を総雨量より差し引いた雨量）を入力として、市街地流域の等価粗度の値を設定することによりハイドログラフの再現性が高くなることを示している。また、藤村ら（1995）は、低地都都市流域の洪水流出モデルとしては、斜面流計算はkinematic waveモデルを用いるものの、河道流計算に対してはkinematic waveモデルよりもdiffusion waveもしくはdynamic waveモデルの方がハイドログラフの再現性が高いことを示した。そして、1997年には既に近森ら（1997）は都市流域におけるkinematic waveモデルの構築に際し、等価粗度などのモデルパラメータをGIS（地理情報システム）情報を活用して求めることを試みている。戸田ら（2000）は都市域近郊の山地領域からの流出にkinematic waveモデルを用い、それを下水道による排水も考慮した市街地の氾濫解析モデルと組み合わせ総合的な洪水氾濫モデルを構築した。

さらに、本来広域の自然流域を対象として開発されてきた、例えば前述のHYPERモデルはスウェーデン全域を対象とした日単位のポリゴン型副流域を単位とするモデルであるが、これを都市流域の影響を考慮して洪水流出にも適用できるように拡張するような研究もなされている（田内ら、2016）。

現在、特に都市流域での分布型物理モデルとして、雨水流出現象および複雑にネットワーク化された下水道管路内の流況について、水量のみならず水質情報も時系列的に取り扱い、外水・内水による氾濫浸水現象や放流先の水位の影響まで統合的に解析できるソフトウェアが一般に市販されその使用実績も多くなっている（江藤編、2017）。例えば、InfoWorks ICM, MIKE URBAN, xpswmmの各ソフトウェアに関しては、江藤編（2017）によりその利活用マニュアルが発行されている。特に、xpswmmソフトウェアの中核をなすEPA（Environmental Protection Agency）のSWMM（Storm Water Management Model）は、当初より都市流域を対象とした都市排水問題に関わる水量・水質解析モデルとして開発されてきており、1971年以降SWMMはアメリカやカナダを中心に世界中で用いられている（Huber, 1995; Huber *et al.*, 2006）

III. 都市流域における貯留関数モデル

1. 貯留関数モデル概説

集中型概念モデルの貯留関数モデルは、前述のように1961年には木村によって提案されており、流出過程における非線形性を非常に簡単なモデル構造で表現しているにも関わらず、洪水の再現性が高く、また、計算を簡便かつ迅速に行うことができる特長を有しており、現在でも多くの一級水系の計画等に用いられ、我が国の治水計画を立案する上での基本的な流出モデルとなっている（馬場ら、1999; 高崎ら、2009; 椎葉ら、2013b）。

元々の木村の貯留関数モデルは、流域を流出域と浸透域に区分することによって有効降雨の算定を貯留・流出プロセスの中で扱う方法であり（椎葉ら、2013b）、水理公式集昭和60年版（土木学会水理委員会、1985）では「総合貯留関数法」として解説されている。現在では有効降雨の算定と貯留・流出機構を分離した貯留関数モデル（角屋・永井、1980; 椎葉ら、2013b）が一般的に用いられている（土木学会水理委員会、1999）。この貯留関数モデルは連続式（1）と運動方程式（2）で表される。

$$\frac{ds}{dt} = r_e - q \quad (1)$$

$$s = f(q) \quad (2)$$

ここに、 t : 時間 (min), s : 流域の概念的貯留高 (mm), r_e : 有効雨量 (mm/min), q : 直接流出高 (mm/min), $f(\cdot)$: 関数。

一般に洪水時の流域の貯留量と流量の関係は、流出量の上昇期と下降期でループを描き二価関数となる（角屋・永井、1980; Holmes, 2017）。木村の貯留関数モデルは遅滞時間 T_L を導入することによりこのループを解消しようとするものであり、この考えを式（1）、（2）に適用すると、式（3）、（4）となる（永井ら、1982; 土木学会水理委員会、1999）。

$$\frac{ds}{dt} = r_e(t - T_L) - q \quad (3)$$

$$s = k_1 q^{p_1} \quad (4)$$

ここに、 k_1 , p_1 : モデルパラメータ。

本稿では、最初にオリジナルのアイデアを提案した木村にちなんで式（3）、（4）のモデルも木村の貯留関数モデルと呼ぶことにする。一方、Prasad（1967）は貯留量と流出量の二価性を非線形貯留方程式で直接表現し、木村の貯留関数モデルで導入されている遅滞時間を用いない貯留関数モデルすなわち式（1）はそのままで式（5）の関係式を示した。

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{dq}{dt} \quad (5)$$

ここに、 k_2 :モデルパラメータ。

さらに、星・山岡(1982)は、上昇期と下降期でループの膨らみの度合いが異なり、Prasadの貯留関数モデル式(5)におけるパラメータ k_2 が流量に依存するとしてモデルパラメータ p_2 を追加した式(6)を提案した。

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{dq^{p_2}}{dt} \quad (6)$$

そしてこれがKinematic wave法の解と等価なモデルであることを示し、北海道の山地河川においてその有用性を検証している(星・村上, 1987; 北海道開発土木研究所, 2004)。高樺ら(1985)は式(4)、(5)、(6)の3つの貯留関数モデルの比較評価を確率過程の観点より試みている。なお、星らの貯留関数モデルに実時間予測手法であるカルマンフィルターを組み合わせた山地流域における洪水予測計算も実用化されている(国土交通省北海道開発局, 2004; 河村, 2002a)。

以上の貯留関数モデルに限らず、洪水流出モデルでは、タンクモデルのように流域での雨水の損失・貯留機能を内蔵するものは別として、一般に河川に流出する全流出量(観測流量)のうち直接流出量を対象としており(土木学会水理委員会, 1999)、実際の流出解析に適用する場合、有効雨量(対象とする流出成分になる降雨分)の算定が必要となる。このため、流出計算の前処理として全体ハイドログラフから直接流出量を分離する操作(流出成分の分離)を行う必要があり、様々な流出成分の分離法が提案されている(土木学会水理委員会, 1985)。そして、例えば全降雨量に対する直接流出量の比率(流出率)を算定し有効雨量を求めている。この場合、直接流出量の分離法として確定的なものではなく、分離作業において主観的な要素が入りやすいので算定される直接流出量も異なったものとなる。その結果、モデルパラメータの同定結果が大きく変化することもあり、流出計算の安定性・信頼性を損なう原因ともなっている(馬場ら, 1999)。

このような直接流出を対象とする洪水流出モデルの問題点を解消するため、馬場ら(1999)および星ら(2000)は観測雨量と観測流量を直接用いる貯留関数モデルを開発した。この新しいモデル(以下馬場らの貯留関数モデルと呼ぶ)では以前の星・山岡(1982)の貯留関数モデル式(6)に浸透等の損失メ

カニズムを組み込み、直接流出成分だけではなく全流出成分を対象とすることで、有効雨量の算出や流出成分の分離作業を不要としている。そして、このモデルを北海道の山地河川を対象に適用して、観測流量の再現性を評価し、その特性について考察を加えている(馬場ら, 1999)。この流出成分の分離作業を不要とするモデル概念の提案は画期的であった。

2. 都市貯留関数 (USF) モデル

I.で述べたように、都市流域では開発の進行に伴い流域に占める不浸透域の比率が高く、また、下水道の普及がすすんでおり、都市流域の流出特性は山地流域のそれとは大きく異なっている。このためこれまでの貯留関数モデルをそのまま適用しても洪水到達時間の短い都市中小河川のハイドログラフを良好に再現することは困難であると考えられた。そこで高崎ら(2008)は当初これまでのように有効雨量を対象として、合流式下水道の流出特性を考慮した二価の貯留関数モデルを提案した。その後、都市流域特有の流出機構を考慮しつつ、馬場らの貯留関数モデルのように、観測雨量と観測流量を直接用いることで有効雨量の算定や流出成分の分離作業が不要となる貯留関数モデルを「都市貯留関数モデル」(Urban Storage Function, USFモデル)として提案・構築した(高崎ら, 2009)。以下に、全降雨成分を対象として都市流域用に拡張された概念型集中モデルであるUSFモデルについて概説する。

都市流域において総貯留高に関係する流入出成分を考えると、流入成分としては降水の他に、都市特有の流入成分として下水処理場からの放流水、水道管からの漏水、環境用水等の導水、灌水等が挙げられ、また他流域からの地下水流入も考えられる。一方、流出成分としては河川表流水、下水道による流域外への排出、地下水に関連した損失とみなされる流出(伏流水、流域外への地下水流出、深層への浸透等)、河川や地下水からの取水、蒸発散等が考えられる。分流式下水道が普及している地域では下水道に流入した雨水は全て河川に放流されるが、合流式下水道が普及している地域では雨水の一部が合流式下水道により流域外へ運ばれることとなり、この量も流域からの流出として考える必要がある。以上の都市流域の総貯留高 s (mm)の流入出概念図を図一1に示す。そして、総貯留高 s と流域からの流出量(河川流出量 Q と合流式下水道による流域外への雨水排水量 q_R の合計)との関係を式(7)に、その

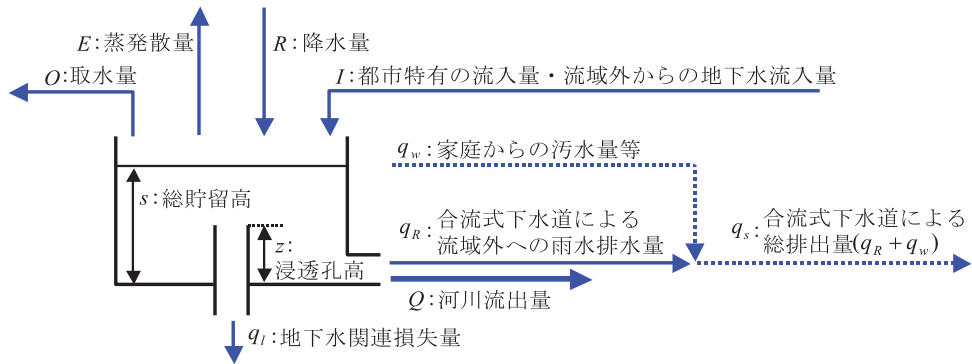


図-1 総貯留高sの流入出概念図

Fig. 1 Schematic diagram of all inflow and outflow components for total storage s.

連続式を式 (8) に示す (高崎ら, 2009).

$$s = k_1(Q + q_R)^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt}(Q + q_R)^{p_2} \quad (7)$$

$$\frac{ds}{dt} = R + I - E - O - Q - q_R - q_l \quad (8)$$

ここに、 t : 時間 (min), R : 降水量 (mm/min), I : 都市特有の流入量・流域外からの地下水流入量 (mm/min), E : 蒸発散量 (mm/min), O : 取水量 (mm/min), Q : 河川流出量 (mm/min), q_R : 合流式下水道による流域外への雨水排水量 (mm/min), q_l : 地下水関連損失量 (伏流水, 流域外への地下水流出, 深層への浸透等) (mm/min), k_1, k_2, p_1, p_2 : モデルパラメータ.

また図-1に示すように、降雨終了後の河川流出量の逡減部を良好に再現するため、地下水関連損失量の浸透孔高 z (mm) を導入している (天口・安藤, 2001). そして、 q_l は次式に示すように s と z の差に比例すると考える。ただし、 s が z より小さい場合は、 q_l は 0 となる。

$$q_l = \begin{cases} k_3(s - z) & (s \geq z) \\ 0 & (s < z) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 k_3 : モデルパラメータ.

なお、図-1に示すように、 s には直接関係しないが、 q_R と家庭からの汚水量等 q_w を合わせた q_s が合流式下水道により流域外に排出される水量となる。

次に、流域からの流出量 ($Q + q_R$) と合流式下水道による流域外への雨水排水量 q_R の関係としては、簡単のため次式のように線形を仮定している (高崎ら, 2009).

$$q_R = \begin{cases} \alpha(Q + q_R - Q_0) & \alpha(Q + q_R - Q_0) < q_{Rmax} \\ q_{Rmax} & \alpha(Q + q_R - Q_0) \geq q_{Rmax} \end{cases} \quad (10)$$

ここに、 Q_0 : 計算開始時の河川流出量 (mm/min), α : 下水道排出係数 (線形関係の傾き), q_{Rmax} : 合流式下

水道による流域外への最大雨水排水量 (mm/min). q_{Rmax} は、流域外に接続する下水道の流下能力 (水理学的に算定される) から、家庭からの汚水量等 q_w (計画汚水量をもとに推定) を差し引いた値として求められる (高崎ら, 2009).

以上、USFモデルにおける同定すべき未知パラメータは $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, z, \alpha$ の7個となり、これらのパラメータの値が決定すれば、式 (7) ~ 式 (9) を連立常微分方程式に変換して数値解法で解くことにより、流域からの流出量 ($Q + q_R$) の値が算定され、また式 (10) より q_R が求まるので、結果として河川流出量 Q を求めることができる (高崎ら, 2009).

近年、特に集中型概念モデルのパラメータ同定のための最適化手法として、遺伝的アルゴリズムなどの進化的計算法を用いた大域的探索法が多用されるようになってきた (詳細は、Kawamura and Merabtene, 2017; 河村, 2000 参照). その中でも特に Duan *et al.* (1992) によって開発された SCE-UA 法の有用性が指摘されている (田中丸, 1995; 森永, 2002; 金塚, 2017).

高崎ら (2009) は USFモデルを、東京都の代表的中小河川であり流域全体が市街化し都市型洪水が頻発している神田川上流域に適用し、パラメータ同定には SCE-UA 法を用い、ハイドログラフの再現性が格段に向上することなど USFモデルの有用性を検証した。また、Padiyedathら (2018) は同じ都市流域を対象に、式 (8)~(10) は同じものを用い、貯留高のモデル形式として式 (4) の木村モデル、式 (5) の Prasadモデル、式 (6) の星モデル、式 (7) の USFモデルを比較検証した結果、USFモデルがハイドログラフの再現性が最も高くなることを示し、さらに AIC などの情報量基準 (例えば、鈴木, 1995 参照)

の観点からも最も効率の良いモデルであることを示している。なお、モデルパラメータが適切に同定されていれば、パラメータ数が多くなるほどハイドログラフの再現性が高くなるのは当然の結果である。

IV. 都市流域における精緻な分布型物理モデル

1. 背景

都市流域の集中豪雨による浸水被害は、局所的に生じる雨水管路システムの排水不良から広範囲に生じる河川の溢水など、降雨規模が同じであっても場所により被害規模が異なる。このような背景の下、現有する河川や調節池などの治水施設や流出抑制施設が洪水流出現象に与える影響や浸水被害を軽減させるために設置する新たなハード対策のきめ細かな影響を評価でき、さらに都市の再開発に伴う土地利用形態の影響を考慮できる都市流域特有の洪水流出シミュレーションモデルの構築が切望されている。

分布型物理モデルの流出モデルとして、山地流域など人工物の少ない自然流域に適用されるモデルとしては、DEMを利用して雨水の流出経路を決定するグリッド型モデルが数多く提案されている（例えば、Takeuchi *et al.*, 1999; 市川ら, 2001; 朴ら, 2003）。また、都市流域に対しても、主に水循環機構の解明を目的としてグリッド型モデルが用いられている（中村, 2001; 賈ら, 2001; 天口・安藤, 2002）。本来、都市流域はⅡ.2で述べたように山地流域とは異なり自然要素だけでなく多くの人工的要素を含んでおり、このような複雑な空間情報の記述にグリッド型を用いることは適当ではないが、入力可能なデータ制約上の理由やモデル構築の簡便さから、流域をグリッド型（格子状）に分割し、その領域内の不浸透・浸透特性により流出率を設定するグリッド型モデルが多用されているのが現状である（Koga *et al.*, 2016）。

都市流域の洪水流出シミュレーションを行うためには、都市特有の特徴を反映可能な分布型物理モデルが必要であり、これにはⅡ.2で述べたように主に海外で開発されたモデルを組み込んだソフトウェアが用いられている。しかしながら、グリッド型はもちろんの事、上記ソフトウェアにおいても入力データとして用いられる土地利用情報は、一般的に、単に流域特性としての不浸透面積率や流出係数のみである。このため流出モデル内において個別の建物、道路、駐車場等の地物を考慮することができないの

で、個別建物の雨水流出抑制施設や特定の透水性舗装道路を整備した効果を検証するなど現実的な政策評価を行うことは困難である。さらに、道路などの地物と地下に埋設されている管路との相互関係など具体的な空間情報が考慮されていないので、例えば、下水道管路の排水不良に伴うマンホールから道路への溢水による氾濫状況を正確に表現することはできない（天口ら, 2007）。

近年、GISの技術的進歩やGISデータ整備が進み、都市流域では道路ネットワーク、街区データなどのデジタル情報が容易に入手できるようになった。また、グリッド形状のラスタ型土地利用情報だけでなく、建物や道路などの地物を的確に表現出来る多角形（ポリゴン形状）のベクター型を用いた地物データの作成も進んでいる（Koga *et al.*, 2016）。しかしながら、現在利用可能な地表面GISデータには、直接流出量の算定に必要な浸透特性に基づいた林地、緑地、グラウンドおよび畑地などの土地利用種別の情報が含まれていない。また、道路は連続した形状となっているため、分布型物理モデルへの適用には解析用の微小要素へ分割する作業も行わなければならない。さらにマンホール・下水道管路のデータも取り込み、地表面地物との接続情報をデータベース化する必要がある。このように、現存するGISデータに様々な手を加えることで、洪水流出解析モデルに適用可能な「高度な地物データGIS」を構築する必要がある。

2. 高度な地物データGIS

図一2に高度な地物データGISを構築する手順の概要を示す（河村・天口, 2015）。その手順は、a) 地形図データの変換、b) 基礎的地物データGISの準備、c) 街区内土地利用要素の構築、d) 道路・河道要素の分割となっている。このように、対象都市流域の基礎的地物データGIS（1/2500地形図データ）の収集・加工を行い、このデータに航空写真や現地調査データを基に土地利用種別に関する情報を加え、対象都市流域全体を土地利用種別毎にさらに小さく分割する事で、高度な地物データGISを構築している（詳細は、天口ら, 2007; 天口ら, 2011; Amaguchi *et al.*, 2012を参照）。高度な地物データGISにより、各地物の浸透・不浸透を正確に表現できるので、対象流域の不浸透面積を極めて高い精度で算定することが可能となる。また浸透地物に対しては、浸透能などの特性を土地利用種別に応じて個別に詳細に設定

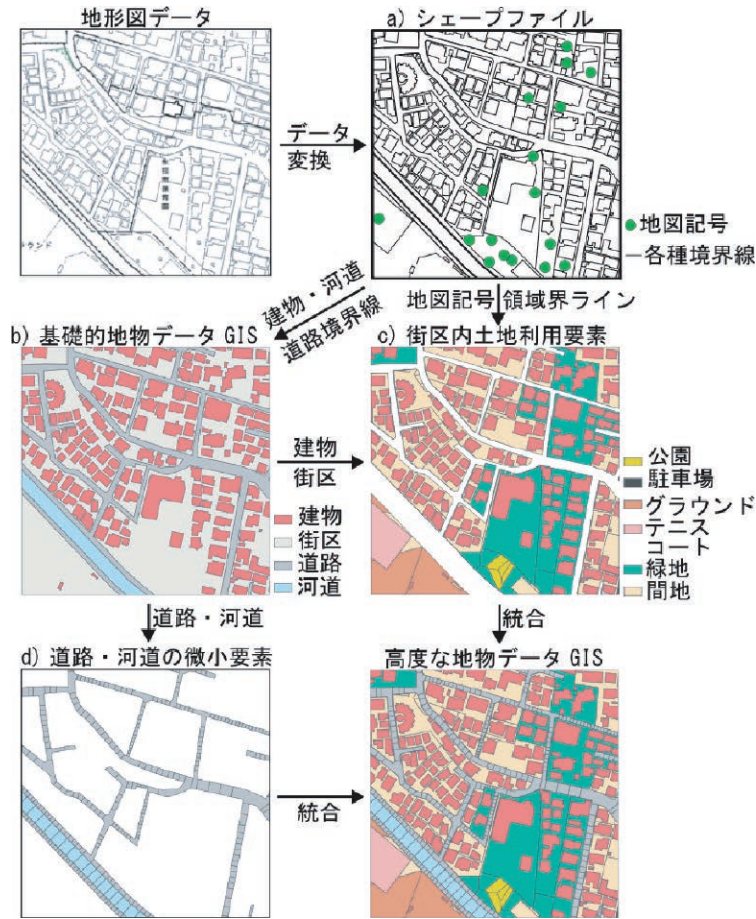


図-2 高度な地物データ GIS の構築手順
 Fig. 2 Construction procedure of urban landscape GIS delineation.

が可能となる (Koga *et al.*, 2016).

都市流域の洪水流出モデルとしてグリッド型分布モデルを用いる場合、各グリッドからの直接流出量を算定するのに通常不浸透面積率を指標として用いるが、その推定精度がダイレクトに流出予測精度に影響を及ぼすので、不浸透面積率の精度良い推定は極めて重要となる (古賀ら, 2012). 三大都市圏の主要部においては国土地理院作成の 10 m メッシュの土地利用データである細密数値情報 (10 m メッシュ土地利用) (国土地理院, 2018a) が準備されており、本データが土地利用データとして容易に入手できるものであるため、ほとんどのグリッド型分布モデルで利用されている。なお、現在、三大都市圏の主要部において土地利用状況に分類したポリゴンデータである「数値地図 5000 (土地利用)」(国土地理院, 2018b) も入手可能となっている。図-3 (a) に東京都神田

川上流域における 10 m メッシュ土地利用区分を、そして図-3 (b) には高度な地物データ GIS による各地物の 20 の土地利用種別を示している (Koga *et al.*, 2016). 同図には流域の一部 (100 m × 100 m) を拡大して示しているが、これより高度な地物データ GIS に比べ 10 m メッシュ土地利用区分の粗さを認識できる。さらに、10 m メッシュ土地利用区分では工業用地、商業・業務用地、一般低層住宅など 17 の土地利用区分があるものの、データ整備の本来の目的が都市圏の宅地関連政策に必要な基礎資料を得るためのものであり、これらの土地利用区分は浸透率の違いを念頭に整備されたデータではない。そのためグリッド毎 (一般的には土地利用区分毎) の不浸透面積率を設定 (推定) する場合に大きな誤差を生ずる (古賀ら, 2012).

荒木ら (2012) は、高度な地物データ GIS を活用

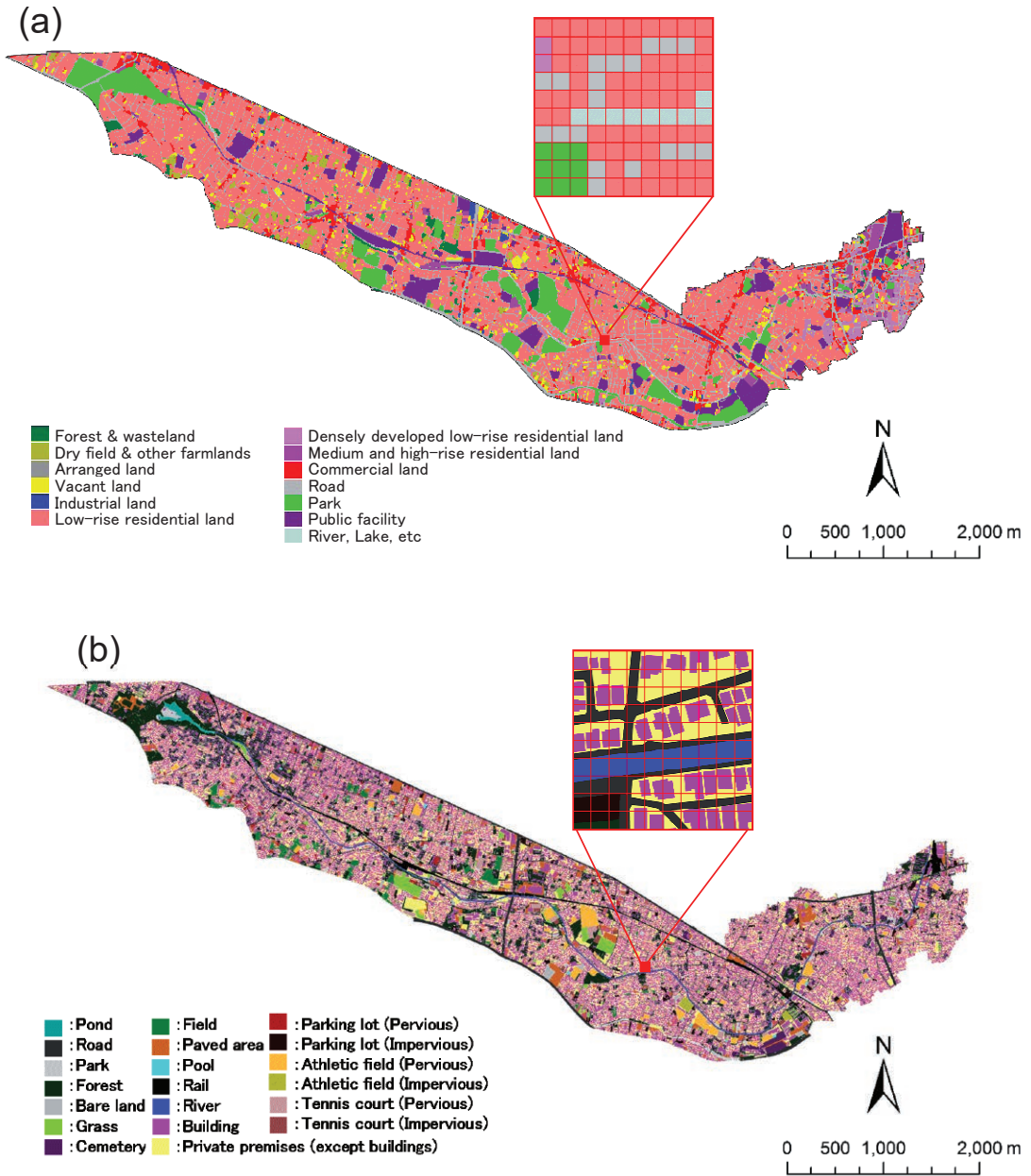


図-3 神田川上流域における (a) 10 mメッシュによる13の土地利用区分, (b) 高度な地物データGISによる各地物の20の土地利用種別

Fig. 3 Spatial distribution of (a) 13 grid-based land use classifications by 10 m mesh data, and (b) individual land surface features of 20 land use types by urban landscape GIS delineation for the upper Kanda watershed.

して、都市流域に設置されている雨水浸透施設を地物として正確に表現する地下水涵養モデルを構築し、これにより洪水時の雨水流出抑制効果をシミュレーションしている。さらに、洪水流出には直接関係しないが、高度な地物データGISを活用して、地

表面地物要素毎の浸透特性と土壌水分量の違いによる都市流域の蒸発散量を予測するモデルを構築して検証を行い(古賀ら, 2014), 本モデルを各種ヒートアイランド緩和策に対する実流域シミュレーションに適用した例もある(古賀ら, 2015)。

3. TSRモデル

高度な地物データ GISを活用する精緻な地物分布型物理モデルである TSR (Tokyo Storm Runoff) モデルについて以下に概説する (詳細は、天口ら, 2007; 天口ら, 2011; Amaguchi *et al.*, 2012 を参照)。まず、構築した対象流域の高度な地物データ GIS から街区内土地利用地物要素、道路要素および河道要素を抽出し、マンホール・下水道管路要素を加えて都市流域のモデル化を行う。これにより、街区内土地利用地物要素と道路間や道路要素とマンホール・下水道管路との接続関係を忠実に表現できる。次いで、各地物要素間の雨水流出過程を表現する様々な水理・水文モデルを組み込み、それらを積み上げ全体として降雨の流出経路を物理的に忠実に再現する TSR モデルの構築を行う。そして、モデルパラメータと初期値を設定し、対象降雨を入力して洪水流出解析を実行することとなる。

図-4に、TSRモデルが対象とする洪水流出過程を示す (河村・天口, 2015)。すなわち、流域内への降雨を土地利用地物要素に与え、個々に設定した浸透・不浸透特性に関する情報を基に、浸透しきれない雨水は近傍の道路へ流出させ、道路からはマンホール・下水道管路に流下させる。マンホール・下水道管路要素では、まずマンホール部において道路との流入量及び接続管路からの流入量により水位を算出し、次いでマンホール部の水位と管路断面

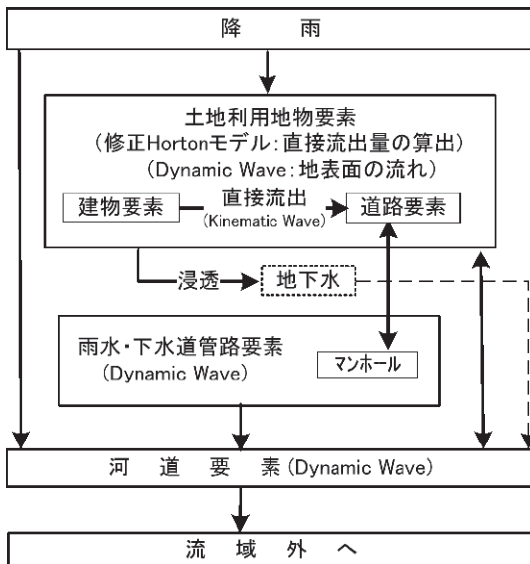


図-4 TSRモデルの洪水流出過程
Fig. 4 Rainfall runoff process in TSR model.

特性から流量を計算する。この計算過程において、マンホール内の水位が上昇して道路の地盤高にまで達すると、マンホール内の水は道路上に溢水することになる。溢水した水は、道路を流下し流下能力に余裕のあるマンホールの存在する道路において再びマンホール・下水道管路に流れ込む。このようにして、下水道管路内の水は数々の管路網内の水を合流して最終的には河道に流出し、流域外へと流去することになる。浸水解析においては、土地利用地物要素からの流出量と下水道管路のマンホールを介した溢水量により、道路水位が周囲の地盤高以上となると水は宅地内等流れ込み、道路上の水位が低下すると宅地内の水は道路に流出するという計算を行っている。

さて、都市流域における家屋浸水被害対策の現状は様々であるが、浸水発生時には、建物の耐水化や浸水防護壁により雨水の浸入を防止しなければ、雨水は床下、ドア、窓などから建物内に徐々に浸水する。天口ら (2013) は、高度な地物データ GIS の建物要素を活用して、図-5に示すように建物の敷地標高、床面標高などの値を個々に設定し、TSRモデルでの浸水解析に若干の修正を加えている。これにより、図-6に示すように建物内外の浸水状況をシミュレートすることも可能となっている。さらに、天口ら (2015) は、スウェーデンの都市小流域を対象に、家屋の雨水排水経路を組み込むようにTSRを修正した適用例も示している。このようにTSRモデルを活用し、豪雨浸水被害に対するきめ細かな減災対

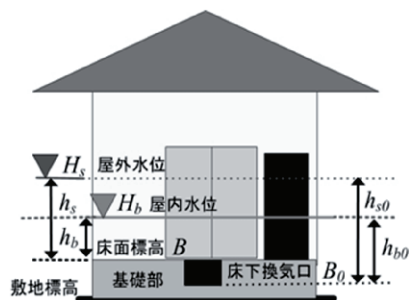


図-5 建物の設定条件
Fig. 5 Setting condition for house.

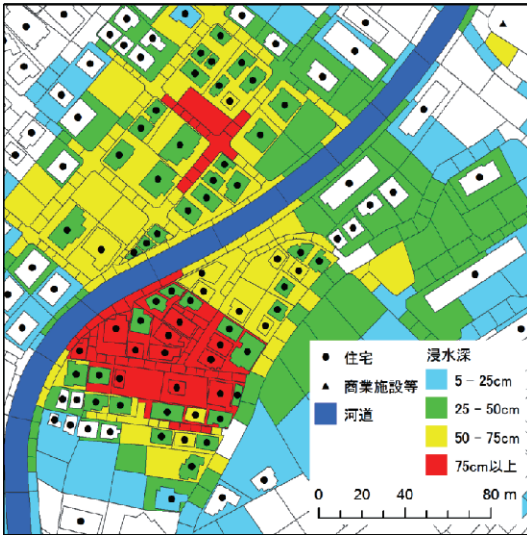


図-6 浸水解析結果の例
Fig. 6 Example of inundation analysis result.

策として、個々の建物の浸水特性や雨水経路特性を考慮した様々なシナリオ分析が可能となっている。

V. おわりに — 将来展望

そもそも都市流域における洪水流出解析は、都市河川流域の計画や管理、特に都市型水害の防災・減災に役立たなければ意味がない。I. で述べたように都市流域においてはゲリラ豪雨のような局地的大雨の頻度・規模の増大により洪水氾濫・浸水リスクが高まってきていることから、今後限られた財源の中で粘り強い効果を発揮するハード・ソフトを組み合わせ、河川や下水道その他の分野の連携による総合的な洪水氾濫・浸水対策およびリスクマネジメントの推進が必須となる(古米・洪尾, 2017)。特に計画を上回る流出に対して、リアルタイム情報を活用して洪水流出モデルにより外水・内水氾濫の実態把握および予測を迅速に行い被害を軽減する効果的な対策を行うことが求められる。

III. で紹介した貯留関数モデルなどの集中型概念モデルは、対象都市流域の降雨データを入力として河川のある対象地点での流出量を予測するものであるが、流出量がパソコンで瞬時に計算されることやモデルパラメータが通常少ないことが大きなメリットである。このためパラメータ同定も大域的探索法などによりほぼ自動化され(III.2参照)、対象地点でのハイドログラフの再現性は分布型物理モデルに

比べ一般に高いものとなり、また、モデルパラメータを逐次修正しながらの実時間洪水予測にも適している。例えば、高崎ら(2012)、高崎ら(2013)は粒子フィルターおよびカルマンフィルターを用いたUSFモデルによる実時間洪水流出予測特性について検討を行っている。集中型概念モデルはよく言えばほぼ完成しており、河川のある対象地点だけの流出量予測には適しているが、モデルの発展性という意味では将来性は低いと言えよう。

一方、分布型物理モデルによる洪水流出解析では、これからまだまだ改善・改良されなければならない課題があり、そう言う意味では発展性は高いと考えられる。例えば、地表面土地利用や地質の空間的分布に応じて、物理モデルパラメータである粗度や透水係数などの空間変動をどのように推定し適切に設定していくのかという大きな課題がある(Singh and Jain, 2017)。現在は対象流域で一定パラメータとするか、せいぜい流域を何分割かしてそれぞれの分割流域毎に物理パラメータを大まかに設定している。また設定したパラメータの実測値(例えばハイドログラフなど)を用いたキャリブレーションや実時間でのパラメータ補正に対し、都市中小河川流域では特に高い解像度が求められるので、分布型物理モデルでは出力までの計算時間が長くなり、その時間的制約により大域的探索法などによるパラメータ同定は難しく、また実時間予測での適用でも現時点ではかなり困難を伴う。例えば、IV. で紹介した神田川上流域を対象としたTSRモデルによる計算時間間隔0.1秒、雨量観測間隔1分で1時間の流出計算を行うのに通常のパソコンで大体1時間もの計算負荷を要する。

上記の高度な地物データGISを用いた精緻な分布型物理モデルであるTSRモデルでは、全ての地表面地物が元々浸透特性に基づいたホモジニアス(均一)なポリゴン要素として表現されているので、グリッドモデルのようにグリッドサイズをどこまで細かくすれば、グリッド内の不均一性を無視でき都市流域を正確に表現できるかという問題はほぼ解消されている。しかし、高度な地物データGISの構築には現在GISソフトを用いて手作業で行う必要があり、膨大な時間と労力を要している(田内ら, 2013)。そのため、高度な地物データGISの自動構築に関する研究も行われている(田内ら, 2013; 田内ら, 2014; 田内ら, 2015)。また、現在の高度な地物データGISは、地表面地物の平面構造を表現しているだけであるの

で、地下鉄や地下の道路トンネル、そして道路や橋梁などの立体交差や建築物特に高層ビルの立体構造を表現できていない。降雨の流出経路をさらに物理的に忠実に再現するには、高さ方向も考慮した立体的な地物データGISの構築が必要になってくると考えられる。GISの将来展望としては、都市開発などによるGISデータの更新も大きな課題であり、今後は空間3次元のみならず時間も含めた4次元的なGISの構築がチャレンジングな課題として指摘されている(Griffin *et al.*, 2017)。なお、個人的には下水道管路網など都市インフラに関する基礎的なGISデータが自治体などから容易に入手可能となることを切望している。

さらに、分布型物理モデルによる洪水流出解析においては、モデルのキャリブレーションや実時間での洪水氾濫・浸水予測に対して、空間的なリアルタイムの降雨レーダ情報(中北, 2017; 崎田, 2017)や豪雨時の下水道管渠水位、浸水深、浸水範囲などのモニタリング情報(古米・洪尾, 2017)などの観測体制の充実が非常に重要となる。これには安価な河川水位計や浸水計などを空間的に密に設置してそのFACT情報(布村, 2017)を速やかに収集し活用する技術が必要不可欠である。また、そのFACT情報や洪水氾濫・浸水予測情報を、さらに近年ではドローンによる早期の被災状況などの情報を、地域住民の避難判断等に役立て効率的に自助を促すため、受け手にとって分かり易く使いやすい情報表示や伝達方法を構築する必要がある(布村, 2017)。最終的に、どのようなタイプの洪水流出モデルでも、リードタイムの長い高精度の実時間洪水氾濫・浸水予測を可能とするためには、FACT情報のみならず当然のことながら入力データとしての雨量強度分布の、都市流域では1時間くらい先までの精度よい信頼できる予測値が得られることが最も切望される。

次に、特に都市下流域では、流出モデル・河道モデルおよび下水道モデルのみならず洪水氾濫・浸水現象の境界条件となる潮汐現象、高潮や高波そして津波に対する沿岸水理モデルも組み込んだシームレス結合モデル(古米・洪尾, 2017)が発展してくることとなる。さらにはレーダ雨量情報などの気象モデルや大気・陸面モデル(沖, 2006)なども組み込んだ総合的なシームレスモデルも構築されてくるであろう。そして、それらのシームレスモデルは一つの都市流域の範囲を超え山地流域も含む広範囲な複数流域を包含する(究極的には地球全体)方向に

進むのではなかろうか。一方で、結合される各モデルおよび同一モデル内での不確実性の把握が重要なテーマとなる(詳しくは、木村ら, 2017参照)。

近年、情報通信技術(ICT)のAI(人工知能)と総称される技術の中で特に深層学習(ディープラーニング)と呼ばれる多層のANN(Artificial Neural Network)を用いた機械学習手法が脚光を浴びており、2018年2月号の土木学会誌の特集テーマとして取り上げられている(土木学会 2018)。ANNによる流出モデル(例えば、Govindaraju and Rao, 2000; Tayfur and Singh, 2017参照)は、II.1で述べた入力と出力の応答関数としてモデルを構成する「応答モデル」に分類され、未知モデルパラメータ(各ニューロンの重み)数は非常に大きくなる。対象の都市流域での洪水流出データ数が深層学習に対しては相対的にかなり少なくなる洪水流出解析に対し、深層学習がどの程度有効に適用できるのか今後の検証を待ちたい。

さて、根本問題として、財政的に厳しい現在、国も地方自治体も、即効的な効果が目に見え難い防災に予算を回す余裕は少なくなっている。高度成長期以来、土地が足りずに水害危険地域に広がった住宅地を守るため、特に都市では致し方なしに後追いで治水施策が行われてきた。しかし、今後日本の人口が減少していくことも考えあわせ(東京都でも近い将来人口がピークを迎えることが予想されており)、災害を減らすために、危険な土地には住まず、また高度利用をせず、相対的に安全な土地に住むように誘導し、移転をも含む防災政策を立案することが重要になってくるであろう(沖, 2012)。都市河川においても、例えば、今後長い目で、河川沿い等の氾濫危険地域を、土地買収というよりもマーケット価格で徐々に購入していき、公園化して遊水地として利用していけば、洪水氾濫・浸水リスクの低減のみならず健全な水循環やヒートアイランド等の都市環境の改善にも資することになると考える(河村, 2016)。

引用文献

- 天口英雄・安藤義久 2001. SMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの開発と東川試験流域への適用. 水工学論文集 45; 97-102. DOI: 10.2208/prohe.45.97.
- 天口英雄・安藤義久 2002. SMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの改良について. 水工学論文集 46; 265-270. DOI: 10.2208/prohe.46.265.
- 天口英雄・河村 明・高崎忠勝 2007. 地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案. 土木学会論文集B 63 (3); 206-223. DOI: 10.2208/jscejb.63.206.
- 天口英雄・河村 明・高崎忠勝・中川直子 2011. 個別の地物情報を

- 考慮した密集市街地におけるTokyo Storm Runoff Modelの提案. 土木学会論文集B1 (水工学) 67 (4) : I_517-I_522. DOI: 10.2208/JSCEJHE.67.I_517.
- Amaguchi H, Kawamura A, Olsson J, Takasaki T. 2012. Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation. *Journal of Hydrology* 420-421: 205-215. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.12.003.
- 天口英雄・長坂丈巨・河村 明・高崎忠勝・中川直子 2013. 都市流域を対象とした建物浸水モデルの提案. 河川技術論文集 19: 211-216.
- 天口英雄・河村 明・Jonas OLSSON・高崎忠勝・中川直子 2015. 家屋の雨水排水経路を考慮した洪水流出解析モデルの提案と都市小流域への適用. 土木学会論文集B1 (水工学) 71 (4) : I_313-I_318. DOI: 10.2208/JSCEJHE.71.I_313.
- 安藤義久・鍋山 隆・西島滋史 1991. 都市流域の洪水流出解析. 総合都市研究 41: 69-89.
- 荒木千博・天口英雄・河村 明・高崎忠勝 2012. 地物データGISを用いた都市流域地下水涵養モデルの構築および実流域シミュレーション. 土木学会論文集B1 (水工学) 68 (2) : 109-124. DOI: 10.2208/jscejhe.68.109.
- 馬場仁志, 星 清, 橋本認秀 1999. 損失機構を組み合わせた貯留関数モデルの総合化. 水工学論文集 43: 1085-1090. DOI: 10.2208/prohe.43.1085.
- Bathurst JC, Wicks JM, O'Connell PE. 1995. The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 16, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 563-594.
- Bergström S. 1995. The HBV Model. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 13, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 443-476.
- Beven KJ, Kirkby MJ. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1): 43-69. DOI: 10.1080/02626667909491834.
- Beven K, Lamb R, Quinn P, Romanowicz R, Freer J. 1995. TOPMODEL. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 18, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 627-668.
- Calver A, Wood WL. 1995. The Institute of Hydrology Distributed Model. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 17, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 595-626.
- 近森秀高・岡 太郎・宝 馨・大久保豪 1997. 都市流域における流出モデル構築へのGISの応用. 京都大学防災研究所年報 40B2: 137-144.
- Crawford NH, Linsley RK. 1966. Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV. *Technical Report* 39, Stanford University, CA.
- 土木学会 2018. 深層学習は土木を変える? - AI活用の可能性を探る -. 土木学会誌 103 (2) : 6-37.
- 土木学会水理委員会 1985. 水理公式集 昭和60年版. 土木学会; 151-172.
- 土木学会水理委員会 1999. 水理公式集 平成11年版. 土木学会; 35-47.
- 土木学会水理公式集改訂委員会 1971. 水理公式集 昭和46年改訂版. 土木学会; 117-131.
- 土木研究所ICHARM 2018. RRI model. http://www.icharm.pwri.go.jp/research/rri/rri_top.html. (参照: 2018/01/25).
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. 1992. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Water Resources Research* 28(4); 1015-1031. DOI: 10.1029/91WR02985.
- 江藤 編2017. 流出解析モデル活用マニュアル (雨水対策における流出解析モデルの運用手引き). 日本下水道新技術機構; 317.
- 藤村和正・安藤義久・前田正博 1995. 低地部都市流域の洪水流出モデルに関する一考察. 水工学論文集 39: 61-66. DOI: 10.2208/prohe.39.61.
- 古米弘明・渋尾欣弘 2017. 都市雨水管理・制御システムのスマート化, 豪雨のメカニズムと水害対策-降水の観測・予測から浸水対策, 自然災害に強いまちづくりまで. エヌ・ティー・エス; 189-198.
- Govindaraju RS, Rao AR (eds) 2000. *Artificial Neural Networks in Hydrology*. Klumer Academic Publishers, Boston; 329.
- Griffin RE, Cruise JF, Ellenburg WL, Al-Hamdan, MZ, Handyside C 2017. Geographic Information Systems. In *Handbook of Applied Hydrology, Second Edition*, Singh VP (ed). Chap. 9, McGraw-Hill Education: New York; 9-1-9-8.
- 橋本 建・長谷川正 1977. 土地利用変化を評価する流出モデル. 土木技術資料 19 (5) : 221-226.
- 日野幹雄 1996. 水文研究者は何をやって来たか. そして, これからなにをなすべきか?. 水文・水資源学会誌 9 (1) : 3-16.
- 北海道開発土木研究所 2004. 対話式洪水流出計算マニュアル. 北海道河川防災研究センター・研究所; 9-20.
- Holmes RRJr. 2017. Streamflow Ratings. In *Handbook of Applied Hydrology, Second Edition*, Singh VP (ed). Chap. 6, McGraw-Hill Education: New York; 6-1-6-14.
- 星 清・山岡 勲 1982. 雨水流法と貯留関数法との相互関係. 水理講演会論文集 26: 273-278. DOI: 10.2208/prohe1975.26.273.
- 星 清・村上泰啓 1987. 小流域における総合貯留関数法の開発. 水理講演会論文集 31: 107-112. DOI: 10.2208/prohe1975.31.107.
- 星 清・馬場仁志・橋本認秀 2000. 流域・河道系洪水追跡のための貯留関数法の開発. 河川技術に関する論文集 6: 297-302.
- Huber WC. 1995. EPA Storm Water Management Model - SWMM. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 22, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 783-808.
- Huber WC, Rossman LA, Dickinson RE. 2006. EPA Storm Water Management Model, SWMM5. In *Watershed Models*, Singh VP and Frevert DK (ed). Chap. 14, CRC Press, Boca Raton; 339-359.
- 市川 温・村上將道・立川康人・椎葉充晴 2001. 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発. 土木学会論文集 691/II-57: 43-52. DOI: 10.2208/JSCEJ.2001.691_43.
- 石原成幸・高崎忠勝・河村 明・天口英雄 2014. 東京の中小河川における新たな整備方針とその特徴的な施策の背景. 河川技術論文集 20: 437-442.
- 石川金治・佐藤一夫・和泉 清 1982. 都内中小河川にみる合理性の適用性について. 水理講演会論文集 26: 267-272. DOI: 10.2208/prohe1975.26.267.
- 岩垣雄一・末石富太郎 1954. 横から一様な流入のある開水路の不定流について - 雨水の流出現象に関する水理学的研究 (第1報) -. 土木学会誌 39 (11) : 575-583.
- 賈 仰文 2001. 分布型モデルを用いた都市河川流域における流出抑制施設の効果の比較. 水工学論文集 45: 109-114. DOI: doi.org/10.2208/prohe.45.109.
- 角屋 睦・福島 晟 1976. 中小河川の洪水到達時間. 京都大学防災研究所年報 19B: 143-152.
- 角屋 睦・永井明博 1980. 流出解析手法 (その10) 貯留法-貯留

- 関数法による洪水流出解析-, 農業土木学会誌 48 (10) : 43-50. DOI: 10.11408/jjsdre1965.48.10_747.
- 角屋 睦1985. 都市化に伴う流出の変化. 土木学会論文集 363/II-4: 23-34. DOI: 10.2208/jscej.1985.363_23.
- 鼎信次郎 2009. 局地的集中豪雨(いわゆるゲリラ豪雨)の降雨特性. 水循環 貯留と浸透 73: 11-16.
- 金塚 匠 2017. 進化的計算手法を用いた都市貯留関数モデルのパラメータ同定. 首都大学東京大学院都市環境科学研究科修士論文: 53.
- 河村 明 2000. 水文学における逆問題. 土木工学における逆問題入門, 土木学会, 丸善; 24-30.
- 河村 明 2002a. 貯留関数法を用いたカルマンフィルタによる洪水流出の実時間予測. 水理公式集例題プログラム集 [平成13年度版]. 土木学会水理委員会; 例題1-11.
- 河村 明 2002b. タンクモデルを用いたカルマンフィルタによる日流出高の逐次予測. 水理公式集例題プログラム集 [平成13年度版]. 土木学会水理委員会; 例題1-12.
- 河村 明, 天口英雄 2015. 地物データGIS を利用した都市部における精緻な降雨流出経路のモデル化. 月刊J-LIS 2 (7) : 34-38.
- 河村 明2016. 都市型水害とその対策. 都市の技術 (改訂版). 首都大学東京大学院都市基盤環境学域編, 技報堂出版; 235-249.
- Kawamura A, Merabtene T. 2017. Evolutionary Computing: Genetic Algorithms. In *Handbook of Applied Hydrology, Second Edition*, Singh VP (ed). Chap. 13, McGraw-Hill Education: New York; 13-1-13-4.
- 木村俊晃 1961. 貯留関数法 (1). 土木技術資料 3 (12) : 36-43.
- 木村俊晃 1975. 貯留関数法. 水文研究資料. 河鍋書店; 57.
- 木村匡臣・田中智大・安瀬地一作・中谷加奈・山崎 大・吉岡秀和 2017. 地表水流れの数値解析技術に関する分野横断的視点から見た特徴と最前線. 水文・水資源学会誌 30 (5) : 307-334. DOI: 10.3178/jjshwr.30.307.
- 木下武雄 1967. 都市化による流出の変化. 土木技術資料 9 (9) : 11-15. DOI: 10.11532/prohe1962.17.97.
- 古賀達也・河村 明・天口英雄 2012. 神田川上流域における高度な地物データGISを用いた10 mメッシュ土地利用区分の浸透面積率に関する研究. 土木学会論文集B1 (水工学) 68 (4) : I_505-I_510. DOI: 10.2208/jscejhe.68.I_505.
- 古賀達也・河村 明・天口英雄 2014. 熱収支及び土壌水分を考慮した地表面地物要素毎の蒸発散モデルの構築と実流域への適用. 土木学会論文集B1 (水工学) 70 (4) : I_319-I_324. DOI: 10.2208/jscejhe.70.I_319.
- 古賀達也・河村 明・天口英雄 2015. 都市流域の地表面地物要素へのヒートアイランド緩和策に対する実流域シミュレーション評価. 土木学会論文集B1 (水工学) 71 (4) : I_253-I_258. DOI: 10.2208/JSCJEJHE.71.I_253.
- Koga T, Kawamura A, Amaguchi H, Tanouchi H. 2016. Assessing impervious area ratios of grid-based land-use classifications on the example of an urban watershed. *Hydrological Sciences Journal* 61(9): 1728-1739. DOI: 10.1080/02626667.2015.1133909.
- 国土地理院 2018a. 細密数値情報 (10 mメッシュ土地利用). <http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/lum-saimitsu.html>. (参照: 2018/04/20).
- 国土地理院 2018b. 数値地図5000 (土地利用). <http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/lum-5k.html>. (参照: 2018/04/20).
- 国土交通省北海道開発局 2004. 実時間洪水予測システム理論解説書. 北海道河川防災研究センター・研究所; 7-19.
- Lighthill MJ, Whitham GB. 1955. On kinematic waves: 1. Flood movement in long rivers. *Proceedings of the Royal Society, Series A* 229: 281-316. DOI: 10.1098/rspa.1955.0088.
- Lindström G, Pers CP, Rosberg R, Strömqvist J, Arheimer B. 2010. Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model – A water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research* 41 (3-4) : 295-319. DOI: 10.2166/nh.2010.007.
- 松林宇一郎 1997a. 都市域の流出現象とその特徴. 水文・水資源ハンドブック. 水文・水資源学会; 146-148.
- 松林宇一郎 1997b. 都市流域の流出モデル. 水文・水資源ハンドブック. 水文・水資源学会; 148-151.
- 森永陽子・河村 明・神野健二 2002. SCE-UA法による貯留関数モデルの大域的パラメータ同定について. 土木学会西部支部研究発表会講演集; B198-B199.
- 守田 優・和泉 清 1985. 都市化と洪水流出変化の定量的分析. 水理講演会論文集 29: 19-24. DOI: 10.2208/prohe1975.29.19.
- 守田 優 2014. 都市の洪水リスク解析. フォーラムエイト; 3-75.
- Mulvany TJ. 1850. On the use of self-registering rain and flood gauges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineering* 4(2): 1-8.
- 永井明博・角屋 睦・杉山博信・鈴木克英 1982. 貯留関数法の総合化 京都大学防災研究所年報 25B-2: 207-220.
- 中北英一 2017. 3次元観測気象レーダーを活用しつくす. 水循環 貯留と浸透 104: 4-9.
- 中北英一・山口弘誠・山邊洋之 2009. レーダー情報を用いたゲリラ豪雨の卵の解析. 京都大学防災研究所年報 52B: 547-562.
- 中村 茂 2001. 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 45: 103-108. DOI: 10.2208/prohe.45.103.
- 布村明彦 2017. 水害発生時等の情報の収集・伝達・活用. 水循環 貯留と浸透 106: 4-8.
- 沖 大幹2006. 水文モデル. 地球規模水循環変動研究の最前線と社会への貢献 (総合科学技術会議地球規模水循環変動研究イニシヤティブ), 内閣府; 84-95, http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/pub/h17water_report/water_top.html. (参照: 2018/01/12).
- 沖 大幹2012. 水危機ほんとうの話. 新潮社; 191-229.
- Padiyedath SG, Kawamura A, Takasaki T, Amaguchi H, Azhikodan G. 2018. Performance evaluation of Urban Storage Function (USF) model compared with various conventional storage function models for an urban watershed. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)* 70(4): I_973-I_978. DOI: 10.2208/jscejhe.74.I_973.
- 朴 珍赫・小尻利治・友杉邦雄 2003. 流域環境評価のためのGISベース分布型流出モデルの展開. 水文・水資源学会誌 16 (5) : 541-555. DOI: 10.3178/jjshwr.16.541.
- Prasad R. 1967. A nonlinear hydrologic system response model, *Journal of the Hydraulics Division* 93(4): 201-222.
- Ren L, Yuan F. 2006. The Xin' anjiang model on digital basin platform. In *Watershed Models*, Singh VP and Frevert DK (ed). Chap. 8, CRC Press, Boca Raton; 179-208.
- 崎田泰三 2017. 都市域レーダを活用した浸水対策の取り組み. 水循環 貯留と浸透 104: 10-15.
- Sayama T, Ozawa G, Kawakami T, Nabesaka S, Fukami K. 2012. Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal* 57: 298-312. DOI: 10.1080/02626667.2011.644245.
- Sherman LK. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News Record* 108: 501-505.
- 椎葉充晴・立川康人・市川 温 2013a. 水文学・水工計画法. 京都大学学術出版会; 3-51.
- 椎葉充晴・立川康人・市川 温 2013b. 水文学・水工計画法. 京都大学学術出版会; 351-374.

- 志子田典生・友納寛幸・虫明功臣・柳原和憲・八尋康雄 1985. 多摩ニュータウン流出試験地における流出特性と都市化によるその変化. 水理講演会論文集 29: 1-6. DOI: 10.2208/prohe1975.29.1.
- Singh VP. 1995. Watershed Modeling. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 1, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 1-22.
- Singh VP, Frevert DK (ed). 2006. *Watershed Models*. CRC Press: Boca Raton; 678.
- Singh VP, Jain SK. 2017. Rainfall-Runoff Modeling. In *Handbook of Applied Hydrology, Second Edition*, Singh VP (ed). Chap. 59, McGraw-Hill Education: New York; 59-1-59-8.
- SMHI. 2018. HYPE. <https://www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/hype-1.7994>. (参照: 2018/01/30).
- 末石富太郎 1955. 特性曲線法による出水解析について -雨水の流出現象に関する水理学的研究 (第2報)-, 土木学会論文集 29: 74-87. DOI: 10.2208/jscej1949.1955.29_74.
- 菅原正巳 1972. 流出解析法. 共立出版; 257.
- Sugawara M. 1995. Tank Model. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 6, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 165-214.
- 鮎川 登・北川善廣 1982. 都市化流域の洪水流出モデル. 土木学会論文報告集 325: 51-59. DOI: 10.2208/jscej1969.1982.325_51.
- 鈴木義一郎 1995. 情報量規準による統計解析入門. 講談社; 170.
- 高橋 裕・和泉 清・安藤義久・金尾健司 1982. 丘陵地の中小河川流域の都市化に伴う洪水流出の変化. 水理講演会論文集 26: 261-266. DOI: 10.2208/prohe1975.26.261.
- 高橋 裕 1988. 都市と水. 岩波新書; 1-34.
- 高崎忠勝・河村 明・天口英雄 2008. 合流式下水道の流出特性を考慮した都市洪水貯留関数モデルの構築. 水文・水資源学会誌 21 (3): 228-241. DOI: 10.3178/jjshwr.21.228.
- 高崎忠勝・河村 明・天口英雄・荒木千博 2009. 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案. 土木学会論文集B 65 (3): 217-230. DOI: 10.2208/jscejb.65.217.
- 高崎忠勝・河村 明・天口英雄・石原成幸 2012. 粒子フィルタを用いた都市貯留関数モデルによる実時間洪水流出予測特性. 土木学会論文集B1 (水工学) 68 (4): I_511-I_516. DOI: 10.2208/jscejhe.68.I_511.
- 高崎忠勝・河村 明・天口英雄・石原成幸 2013. カルマンフィルタによる都市貯留関数モデルの実時間洪水流出予測特性. 土木学会論文集B1 (水工学) 69 (4): I_457-I_480. DOI: 10.2208/jscejhe.69.I_475.
- 高埜琢馬・宝 馨・楠橋康広 1985. 貯留関数型洪水流出モデルの比較評価. 水理講演会論文集 29: 245-250. DOI: 10.2208/prohe1975.29.245.
- Takeuchi K, Ao TQ, Ishidaira H. 1999. Introduction of block-wise use of TOPMODEL and Muskingum-Cunge method for the hydro-environmental simulation of a large ungauged basin. *Journal of Hydrological Sciences* 44(4): 633-646. DOI: 10.1080/02626669909492258.
- 玉井信行編 1999. 河川工学. オーム社; 55-95.
- 田中丸治哉 1995. タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集 178: 103-112. DOI: 10.11408/jsidre1965.1995.503.
- 谷岡 康・福岡捷二・谷口将俊・小山幸也 1998. 都市中小河川の洪水流出特性. 土木学会論文集 586/II-42: 1-12. DOI: 10.2208/jscej.1998.586_1.
- 田内裕人・天口英雄・河村 明・中川直子 2013. 1/2500地形図標準データファイルを用いた高度な地物データGISの自動構築に関する研究. 土木学会論文集B1 (水工学) 69 (4): I_523-I_528. DOI: 10.2208/jscejhe.69.I_523.
- 田内裕人・天口英雄・河村 明・中川直子・古賀達也 2014. 都市域における洪水流出解析を目的とした微小道路要素の自動構築手法に関する研究. GIS-理論と応用 22 (2): 25-34.
- 田内裕人・天口英雄・河村 明・古賀達也・萩原陽一 2015. 都市流域における街区ポリゴンの自動構築手法に関する研究. 水文・水資源学会誌 28 (6): 298-303. DOI: 10.3178/jjshwr.28.298.
- 田内裕人・河村 明・天口英雄・Jonas OLSSON 2016. 都市部におけるポリゴン型不浸透面積率データを用いたHYPEモデルの流出予測精度向上に関する研究. 土木学会論文集B1 (水工学) 72 (4): I_427-I_432. DOI: 10.2208/jscejhe.72.I_427.
- Tayfur G, Singh P. 2017. Artificial Neural Networks. In *Handbook of Applied Hydrology, Second Edition*, Singh VP (ed). Chap. 11, McGraw-Hill Education: New York; 11-1-11-6.
- 戸田圭一・井上和也・村瀬 賢・市川 温・横尾英男 2000. 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集 663/II-53: 1-10. DOI: 10.2208/jscej.2000.663_1.
- 牛山素行 2011. 「ゲリラ豪雨」と災害の関係について. 水工学論文集 55: 505-510. DOI: 10.2208/jscejhe.67.I_505.
- 渡邊暁人・笹田拓也・渡辺直樹・山田 正 2012. 合成合理式の理論的導出. 土木学会論文集B1 (水工学) 68 (4): I_499-I_504. DOI: 10.2208/jscejhe.68.I_499.
- 山田 正・石井文雄・山崎幸二・岩谷 要 1985. 小流域における保水能の分布と流出特性の関係について. 水理講演会論文集 29: 25-30. DOI: 10.2208/prohe1975.29.25.
- 山口高志・松原重昭・山守 隆 1972. 都市における降雨流出調査第2報 -修正R.R.L.法による流出推定-. 土木技術資料 14 (11): 34-39.
- Zhoa RJ. 1992. The Xinanjiang model applied in China, *Journal of Hydrology* 135: 371-381. DOI: 10.1016/0022-1694(92)90096-E.
- Zhao RJ, Liu XR. 1995. The Xinanjiang Model. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed). Chap. 7, Water Resources Publications, Highlands Ranch; 215-232.

(受付: 2018年2月8日, 受理: 2018年5月25日)

この論文への討議・コメントを, 2019年5月末日まで受け付けます。

Status Quo and Perspectives of Flood Runoff Analysis for Urban Watersheds

Akira KAWAMURA ^{1)†}

¹⁾ Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University
(1-1 Minami-Ohsawa, Hachioji, Tokyo, 192-0397 Japan)

[†]Corresponding Author E-mail : kawamura@tmu.ac.jp

This paper outlines the current status of flood runoff analysis for urban watersheds and presents its future prospects. First, I will describe the urban flood disaster, then briefly review the history of the runoff models before explaining the current state of application of flood runoff models for urban watersheds. Next, storage function models as the lumped conceptual model are outlined, and the urban storage function (USF) model is explained. Then, the necessity of a detailed distributed physical model in urban watershed is described by explaining the difference between mesh data and the urban landscape GIS delineation. I introduce TSR model which is a precise distributed physical model utilizing the urban landscape GIS delineation. Finally, I overlook the future issues to be solved for lumped conceptual and distributed physical models as well as making some recommendations for reduction of urban flood disaster.

Key words : flood runoff model, urban watershed, USF model, TSR model, urban landscape GIS delineation