

都市中小河川流域におけるXRAIN及び地上雨量を用いた分布型流出モデルによる豪雨流出特性

米勢嘉智¹・河村明²・天口英雄³

¹ 正会員 工修 (株) 建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町 3-21-1)

E-mail:yonese@ctie.co.jp

² 正会員 工博 首都大学東京教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail:kawamura@tmu.ac.jp

³ 正会員 工博 首都大学東京助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail:amaguchi@tmu.ac.jp

本研究では、神田川上流域における豪雨イベントを対象とし、XRAINや地上観測雨量データを用いて、分布型流出モデルによる流出解析を実施し、計算流出ハイドログラフにおける再現性を検証した。計算流出ハイドログラフの再現性は、高密度の地上観測雨量データを使用した場合に最も高く、詳細な空間分解能を有するXRAINを用いた場合よりも高いことを確認した。また、XRAINの空間分解能をメッシュ雨量として分布型流出モデルに直接用いることで、流域平均雨量を用いた場合と比べて、全体的な計算流出ハイドログラフの再現性が向上することを示した。

Key Words : *urban runoff, XRAIN, X-band MP radar, small urban watershed, analysis of reproducibility, Distribution hydrological model*

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な集中豪雨により洪水被害が頻発している。特に首都圏においては、人口や生産基盤等の集中、都市化や気候変動等に起因した洪水流量の増大などの社会・環境条件により水害リスクが一層増大している。都市域の中小河川では、短時間における集中豪雨により、河川の氾濫や内水による浸水被害の危険性が高いため、都市流出解析では詳細な1分値雨量や水位観測データを用いた流出解析が行われている。このような流出解析による河川水位の推定のためには、第一に詳細な降雨の空間・時間分布を的確に把握することが重要となる。

国土交通省が整備するXバンドMPレーダネットワークは、2010年からの試験運用期間を経て2014年3月に本格運用を開始し、詳細な降雨の時空間分布の情報が入手できる環境が整備されている。著者らは、東京都の代表的な都市中小河川である神田川上流域を対象として、流出解析に必要な地上面への到達雨量を把握するため、東京都に高密度に配置された1分値地上雨量観測データ(東京都水防災総合情報システム)(以下、「水防災システム」

という)によるXバンドMPレーダ雨量(以下、「XRAIN」という)の精度評価を実施するとともに²⁾、1地点の地上雨量データと観測地点周辺メッシュにおけるXRAINを用いた時空間解析により、XRAINと地上雨量の相関性は、必ずしも観測地点直上メッシュでなく周辺メッシュ範囲において高いことを指摘した³⁾。

流出解析を実施する際には、XRAINの詳細な降雨データが流出ハイドログラフの再現性に与える影響を把握しておくことが重要である。XRAINを用いた流出解析に関する研究としては、1分値XRAIN雨量データを用いた都市域における流出解析や浸水・氾濫解析を実施した事例⁴⁾があげられる。

筆者らは、XRAINの詳細な雨量データによる流出解析の精度への影響について、都市の流出機構を考慮した集中型流出モデルであるUSFモデル(Urban Storage Function model)を用いて、XRAIN雨量データと水防災システムの地上雨量データによる流出解析を実施し、河川流量ハイドログラフの再現性を検証した⁷⁾。しかしながら、この研究では、集中型流出モデルを使用しており、XRAINの降雨データを流域平均雨量として取り扱っているため、XRAINの持つ詳細な空間分解能が流出ハイドログラフの再現性にどのよ

うな影響を及ぼすかについては明らかにされていない。

そこで、本研究では、東京都の代表的な都市中小河川流域である神田川上流域を対象として、XRAINの有する空間分解能を直接入力可能な分布型流出モデルを用いて、XRAIN、水防災システムによる地上観測雨量、アメダス雨量データ、それぞれによる流出解析を実施し、降雨データの差異が流出計算ハイドログラフの再現性に与える影響について検証する。

2. 対象流域及び対象豪雨

検証対象流域とする神田川は、東京都三鷹市の井の頭池にその源を発し、中野区の区境付近で善福寺川と合流し新宿区に流入する流域面積105.0km²、流路延長25.48kmの東京都内の中小河川としては最大規模の一級河川である。本研究では、図-1に示す向陽橋地点をハイドログラフ再現性の検証地点とし、向陽橋地点上流域の約7.7km²を対象流域とした。

対象豪雨は、2013年に対象流域において発生した5豪雨を選定する。中小河川では短時間の強降雨が河川水位を上昇させるため、対象降雨の累加時間は30分とし、対象流域内に位置する池袋橋雨量観測所において、30分累加雨量値が25mm以上の降雨を対象豪雨イベントとして設定した⁹⁾。

降雨期間は、1時間より長い無降雨状態を伴わない一連の降雨期間を抽出し、降雨開始30分前から降雨終了210分後までを流出解析に使用する降雨データ期間として設定した。表-1には、対象豪雨イベント、池袋橋雨量観測所における最大30分累加雨量、流出解析に使用する降雨データ期間及び降雨要因を一覧で示した。

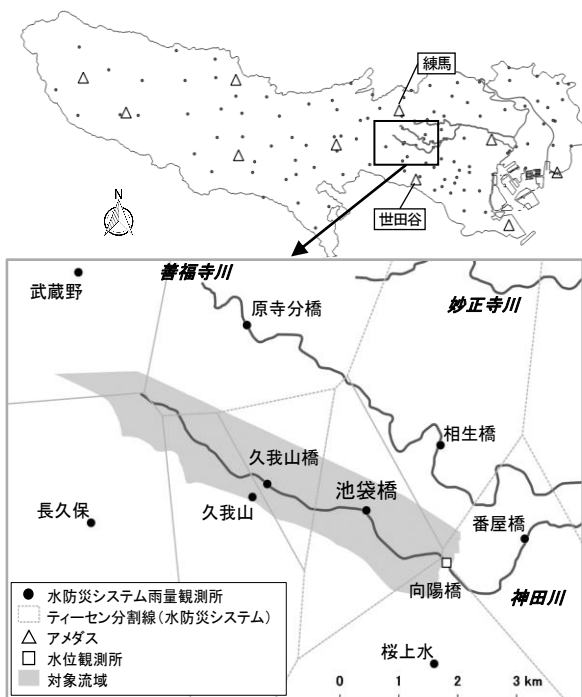


図-1 対象流域及び地上雨量観測所

3. 対象豪雨イベントの豪雨特性

(1) 使用する降雨データ種類

使用する降雨データは、水防災システム、XRAIN及びアメダスの3種類とし、水防災システム及びアメダス雨量については、流出計算に用いるメッシュ雨量に変換する。水防災システムは、図-1に示す対象流域周辺において高密度に配置された水防災システム地上雨量データ（観測最小単位1mm、1分値間隔データ）からティーセン法によりメッシュ雨量データを作成した。XRAINは、図-2に示す対象流域メッシュエリアにおける雨量データを使用した。アメダスは、対象流域内に雨量観測所が存在しないため、対象流域周辺に位置する2箇所の観測所（練馬、世田谷）の雨量データからティーセン法によりメッシュ雨量データを作成した。これらの降雨データの諸元を表-2に示す。

(2) 使用する雨量データの精度評価

使用するデータの特性を把握するため、水防災システム、XRAIN及びアメダスの雨量データについて、高密度な地上観測雨量である水防災システムを基準として雨量精度の比較を行った。

図-3には、降雨要因が異なる豪雨イベントNo.1、No.3、No.5における流域平均雨量のハイトグラフ及び累加雨量を示す。図-3 a)、c)より、いずれの降雨データの種類を見ても概ね同様の降雨波形を示している。一方で、図-3 b)をみると、水防災システムとXRAINは概ね同様の降雨波形を表現できているが、アメダスでは総雨量に

表-1 対象豪雨イベント一覧表

豪雨イベント	30分累加雨量(池袋橋)(mm)	流出解析に使用する降雨データ期間	降雨要因
No.1	36	9/15 03:20-9/15 17:20(841分)	台風18号
No.2	35	8/12 17:14-8/12 23:39(386分)	大気状態不安定
No.3	31	6/25 11:38-6/25 18:10(393分)	大気状態不安定
No.4	26	9/04 22:51-9/05 14:27(937分)	低気圧
No.5	25	4/06 14:48-4/07 04:53(846分)	低気圧

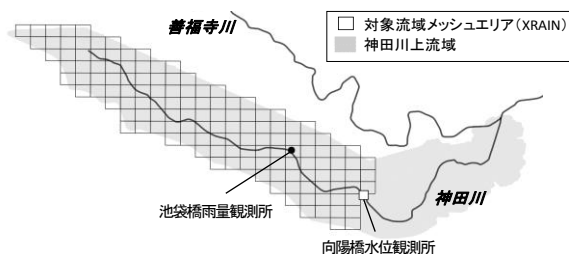


図-2 対象流域メッシュエリア

表-2 使用する降雨データの諸元一覧

	水防災システム	XRAIN	アメダス
観測機	地上雨量計	XバンドMPレーダ	地上雨量計
時間分解能	1分間隔	1分間隔	10分間隔
空間分解能	観測所9地点(流域内3地点)	約250mメッシュ(流域内138メッシュ)	観測所2地点(流域内0地点)

大きな差異がある。これは、対象流域を含む広範囲に雨域が存在している豪雨イベントNo.1, No.5に対して、No.3は大気状態不安定に起因した局所的な豪雨であり、流域内に観測所が存在しないアメダスではその豪雨を捉えることができなかったためである。

次に、図-4に水防災システムに対するXRAIN, アメダスの総雨量比と相関係数をそれぞれ示す。図-4 a)より、総雨量比に関しては、XRAINの平均値が1.09, アメダスの平均値が0.82となっている。アメダスにおける豪雨イベントNo.3の総雨量比は約0.3であり、1.0から大きく乖離していることがわかる。また、図-4 b)より、相関係数に関しては、XRAINの平均値が0.80, アメダスの平均値が0.74となっており、全体的にXRAINの方がアメダスに比べて高い相関を示す。ただし、No.5に関しては、XRAINよりもアメダスの相関が高くなっている。これは、No.5は対象流域の東側に強雨域を伴う豪雨であり、アメダス世田谷雨量観測所で強雨域をたまたまとらえることができたが、XRAINでは図-3 c)に示すとおり豪雨ピークとなる後半の22:30くらいから30分程度において、流域内の強雨域を十分捉えることができていないためである。

4. 流出解析モデル及びパラメータ設定手法

(1) 分布型流出モデルの概要及び検討ケース

本研究で使用する分布型流出モデルは、土研分布モデル⁸⁾における鉛直2層モデルを用いた(以下、「分布型流出モデル」という)。分布型流出モデルは、図-5に示

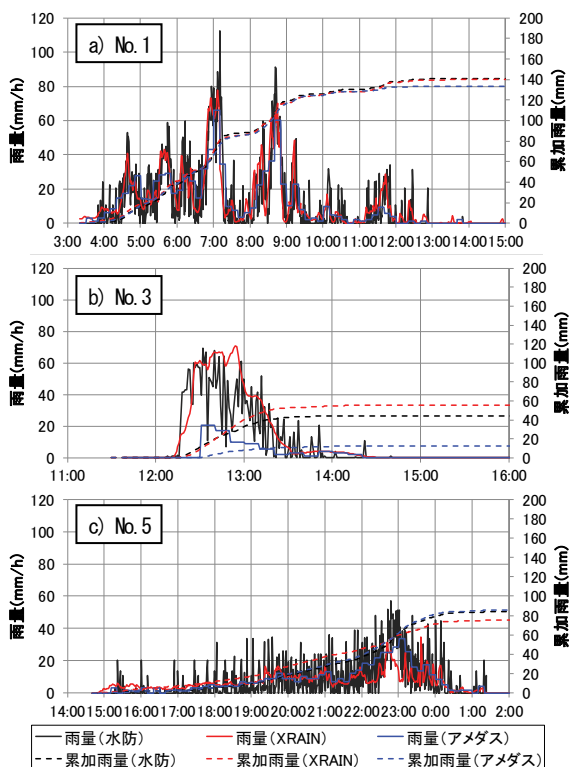


図-3 ハイエトグラフ及び累加雨量比較図

す流域内全メッシュに鉛直2層(表層, 地下水層)モデルと河道モデルから構成され、河道流量は Kinematic Wave 法によって計算される。分布型流出モデル上の土地利用区分は、対象とする向陽橋地点上流域がほぼ全城市街地であることから流域内は同一パラメータを設定することとした。なお、分布型流出モデルのメッシュサイズは、XRAINの詳細な空間分解能を直接入力するため、XRAINのメッシュサイズ同等の約250mメッシュサイズとし、メッシュ位置は分布型流出モデルとXRAINで同一の位置としている。

(2) 検討対象豪雨ケース

検討対象とする豪雨は、前述した対象豪雨5イベントに対して、降雨データの種類が3種類(水防災システム, XRAIN, アメダス)とし、さらに降雨の空間分布の与え方の異なる2ケースを設定する。空間分布は、表-3に示すとおり、メッシュ雨量から算定した流域平均雨量を全メッシュ様に与えたケース(Case1 流域平均雨量)と、メッシュ雨量によるケース(Case2 メッシュ雨量)を設定した。

(3) 分布型流出モデルのパラメータ設定方法

分布型流出モデルにおいて同定すべき対象パラメータは、図-5に示す貯留高や流出係数等の10個とした。設定するパラメータは、それぞれの対象豪雨を入力したときに分布型流出モデルにおける流出ハイドログラフの再

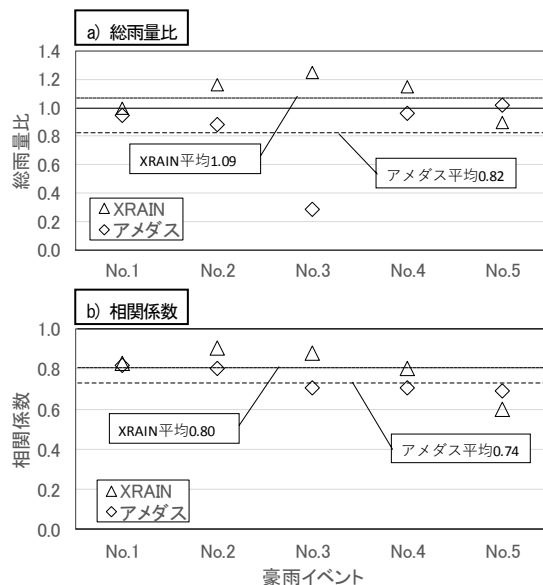


図-4 水防災システムとの総雨量比及び相関係数

表-3 降雨データの種類及び降雨の空間分布

降雨の空間分布	降雨データの種類		
	水防災システム	XRAIN	アメダス
Case1 流域平均雨量	流域平均雨量(空間一様分布)		
Case2 メッシュ雨量	ティーセン法によるメッシュ雨量	メッシュ雨量	ティーセン法によるメッシュ雨量

現性が最も高くなるように SCE-UA 法を用いて最適なパラメータを同定する。

SCE-UA 法はシンプレックス法, ランダム探索, 競争進化, 集団混合の概念を組み合わせたアルゴリズムを持つ大域的探索法であり, モデルパラメータの同定手法として強力かつ効率的な自動最適化手法である⁹⁾¹⁰⁾。

検討対象豪雨ケースは, 前述したとおり降雨データ 3 種類×空間分布 2 ケースとする。さらに, 対象豪雨イベント毎に分布型流出モデルの再現性を最大限確保した場合を比較するため, 表-1 の対象 5 豪雨イベント毎に分布型流出モデルの最適パラメータを同定した。なお, 計算流出ハイドログラフの再現性の評価は, 向陽橋地点の観測流量と計算流出量から算定される誤差評価関数 RMSE (平均二乗誤差の平方根) を用いた。

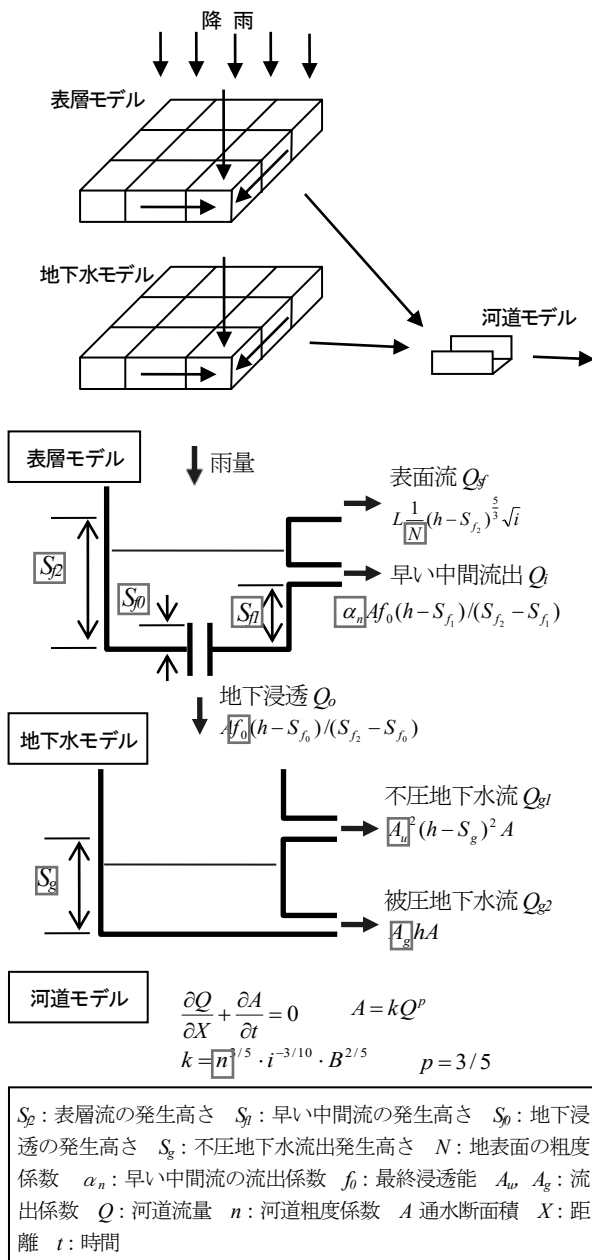


図-5 土研分布型流出モデルの概念図

5. 各豪雨における流出ハイドログラフの再現性

(1) 豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性

図-6は, 豪雨イベント No.1, No.3 について, Case1 の最適パラメータによる流出計算結果を示したものであり, 観測流量とともに降雨データの種類の流出ハイドログラフを重ねて表示した。また, 図-7は, 同様に Case2 の最適パラメータによる流出計算結果を示したものである。図-6, 図-7には流域平均雨量ハイドログラフも示すが, 流域平均雨量のため, Case1, Case2 は同じ波形となる。

全体的な傾向として, いずれの降雨データの種類においても, 計算流量は観測流量を精度良く再現しており, 分布型流出モデルによる流出計算結果は高い再現性を有していることがわかる。次に計算流出ハイドログラフの再現性の評価に用いた誤差評価関数 RMSE について, 降雨データの種類別に図-8に示した。図-8 a) より, 水

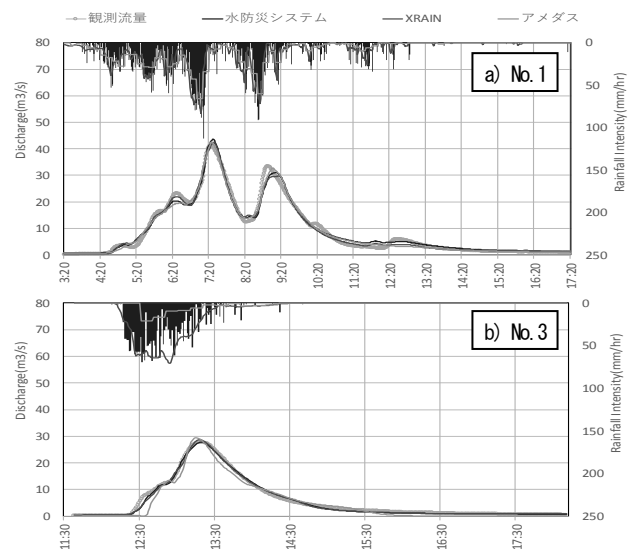


図-6 豪雨イベント毎のハイドログラフの再現性 (Case1流域平均雨量)

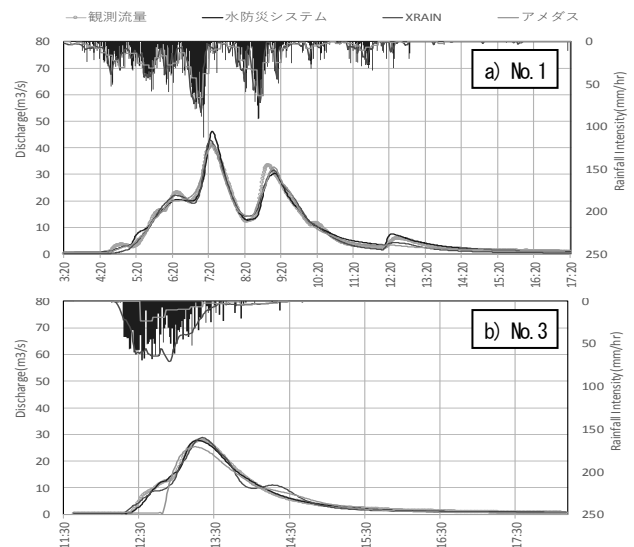


図-7 豪雨イベント毎のハイドログラフの再現性 (Case2メッシュ雨量)

防災システムの RMSE 平均値をみると、Case1 流域平均雨量では 0.89, Case2 メッシュ雨量では 0.78 である。同様に図-8 b), c)より XRAIN の Case1, Case2 における RMSE 平均値は、それぞれ 1.41, 1.36, アメダスでは、それぞれ 1.17, 1.36 となっている。

これより、RMSE 平均値では水防災システムが最も値が小さく、続いてアメダス、XRAIN の順で大きくなっている。XRAIN の RMSE 平均値がアメダスよりも大きくなった理由としては、特に豪雨イベント No.5 の再現精度が悪いためである。前述したとおり XRAIN では No.5 の降雨ピーク付近の降雨を十分に捉えられておらず、計算流出ハイドログラフの再現性が極端に低下したと推測される。また、アメダスの豪雨イベント No.3 は、前述のとおり総雨量比が約 0.3 と小さいため、過度なパラメータの最適化によりピーク流出量を再現している可能性がある。

次に、Case1 流域平均雨量と Case2 メッシュ雨量の違いについて比較を行った。水防災システム及び XRAIN における RMSE 平均値をみると、両者ともに Case1 に比べて Case2 の方が若干小さい値となっている。これより、メッシュ雨量を用いた場合の方が、流域平均雨量を用いた場合よりもハイドログラフの再現性が全体的に向上することを示している。

なお、図-8 b)より XRAIN の豪雨イベント No.3 では Case1 の RMSE が Case2 の RMSE と比べて大幅に小さい

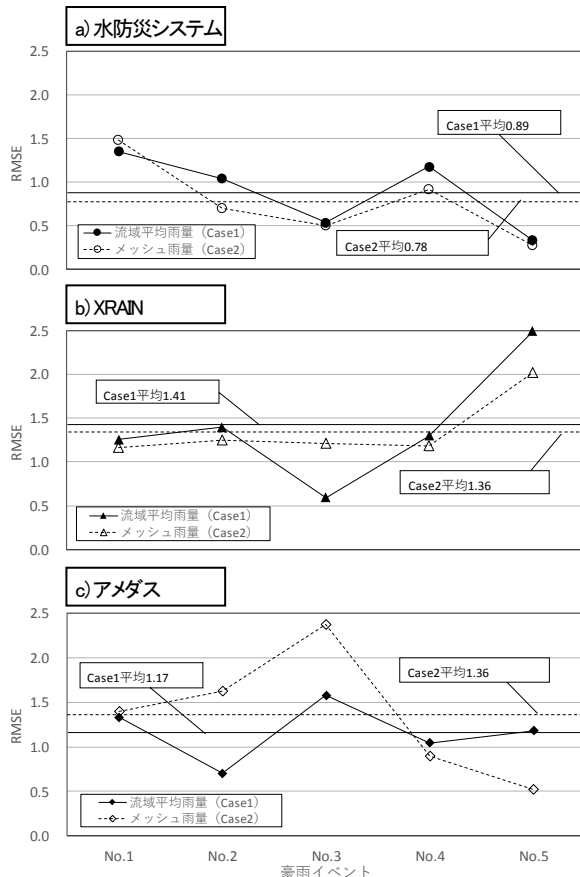


図-8 降雨データの種類のRMSE図

値となっている。これは豪雨イベント No.3 の XRAIN のピーク雨量が過大であることに加え、雨量分布をみると対象流域南側に非常に強い雨域が存在し(図-9), 流域内に大きな偏りの降雨となっていることに起因していると推測される。

また、アメダスにおける RMSE 平均値は Case2 の方が Case1 よりも大きくなったが、降雨イベント毎の Case1 と Case2 の RMSE の大小関係には大きなばらつきが見られ、明確な傾向は見受けられない。

(2) 豪雨イベント毎の最適パラメータの特性

図-10には豪雨イベント毎に同定した最適パラメータのうち、早い流出に寄与する表層モデルの流出係数 (f_0 , a) について示したものである。これより、図-10 a)よりパラメータ f_0 についてみると、豪雨イベント No.3 ではアメダスの流域平均雨量が、他と比べて特に大きな値となっている。また、図-10 b) のパラメータ a についても豪雨イベント No.3 ではアメダスのメッシュ雨量が、他と比べて非常に大きい。アメダスの豪雨イベント No.3 は、前述のとおり総雨量比が約 0.3 と小さいため、最適パラメータは無理に調整されて、結果として他の豪雨イベントのパラメータと大きく値が乖離したものと推察される。また、XRAIN の No.5 についても対象流域内の降雨が過小であり、パラメータ a はアメダスほどではないが、多少大きめに設定されている。

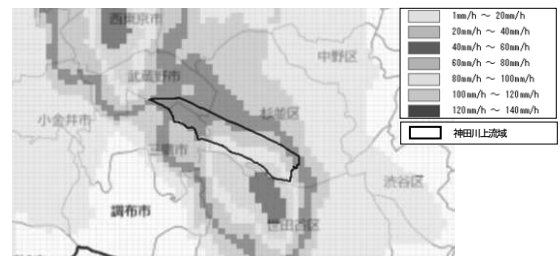


図-9 XRAINメッシュ雨量分布図 (豪雨イベントNo.3 ピーク雨量付近 (6/25 12:54))

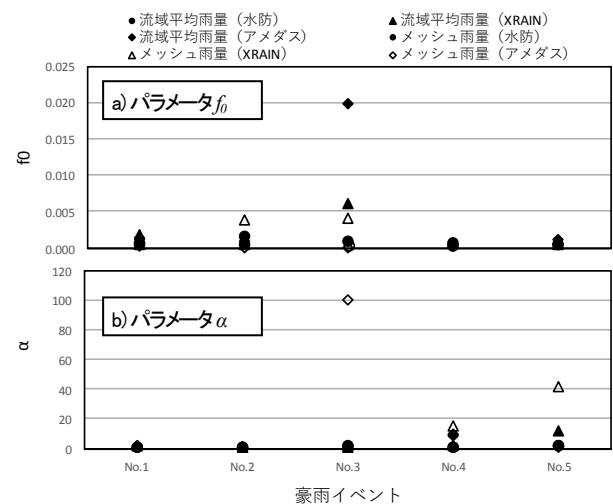


図-10 豪雨イベント毎の最適パラメータ

6. 全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性

前章では豪雨イベント毎に最適パラメータを設定したが、豪雨イベント毎にパラメータが非常に大きく変動する可能性があるため、ここでは、対象5豪雨イベント全体における最適パラメータを設定することとして、流出ハイドログラフの再現性を確認した。なお、検討対象豪雨ケースは前章と同様に、降雨データ3種類×空間分布2ケースとし、それぞれのケースに対して全豪雨イベント共通の最適パラメータを設定する。同定対象パラメータは、前章と同様10個とし、誤差評価関数は豪雨イベント毎に算出したRMSEの合計値を用いた。

全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性について、豪雨イベント No.1, No.3 を対象として Case1 流域平均雨量による結果を図-11, Case2

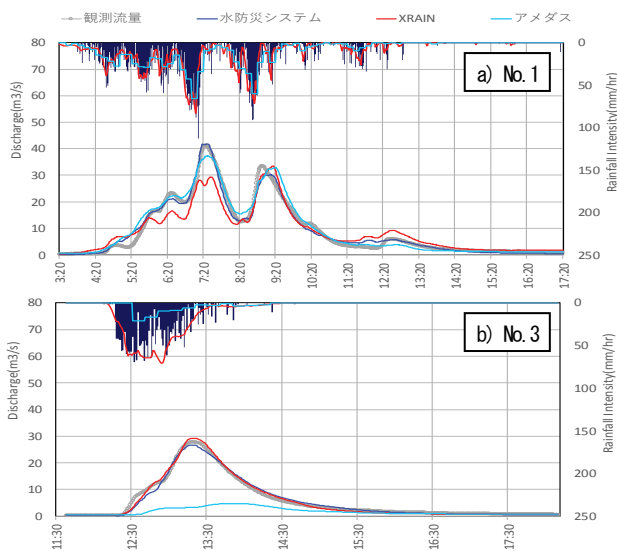


図-11 全豪雨イベント共通パラメータによるハイドログラフの再現性 (Case1流域平均雨量)

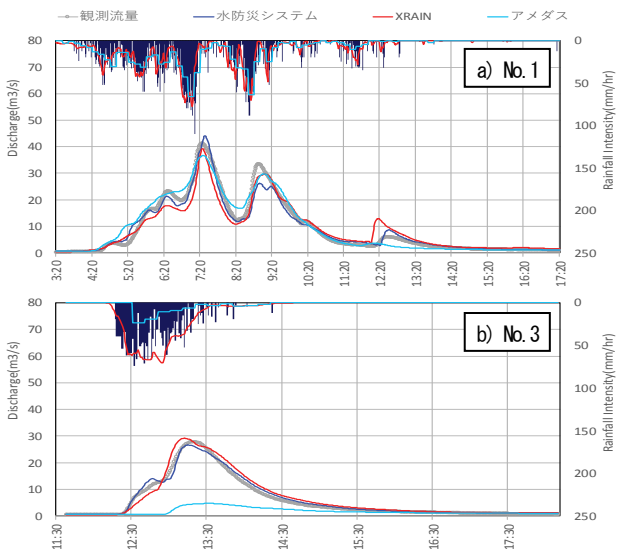


図-12 全豪雨イベント共通パラメータによるハイドログラフの再現性 (Case2メッシュ雨量)

メッシュ雨量による結果を図-12に示した。

全豪雨イベント共通で最適パラメータを設定しているため、前章の豪雨イベント毎に最適パラメータを設定した場合と比べて、ハイドログラフの再現性は低下するものの、水防災システム及びXRAINにおける計算流量は観測流量を精度良く再現していると考えられる。また、図-11 a)及び図-12 a)のXRAINのハイドログラフを比較すると、Case2の方が再現性が高いことが確認できる。その一方で、図-11 b)及び図-12 b)のアメダスのハイドログラフをみるとCase1, Case2ともに再現性が著しく低いことがわかる。

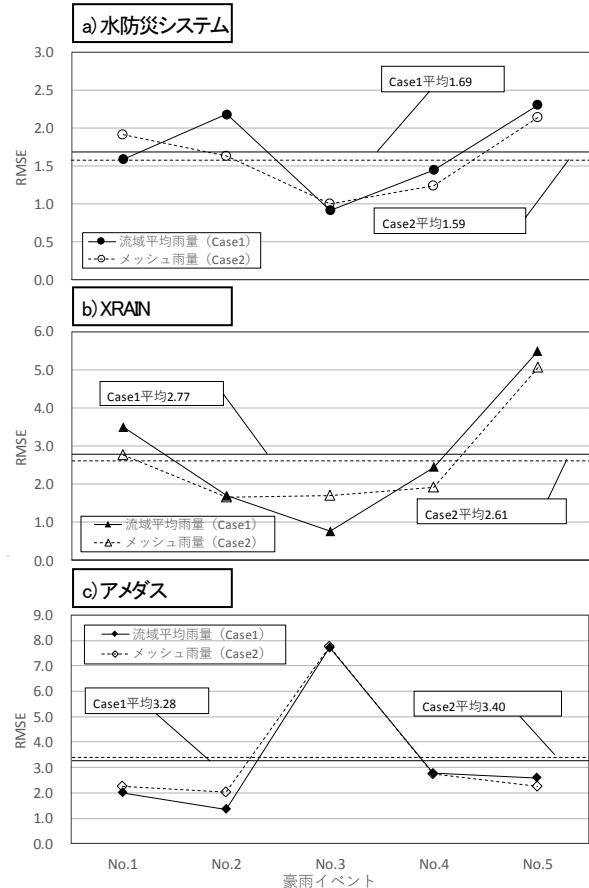


図-13 共通パラメータによる降雨データの種類のRMSE図

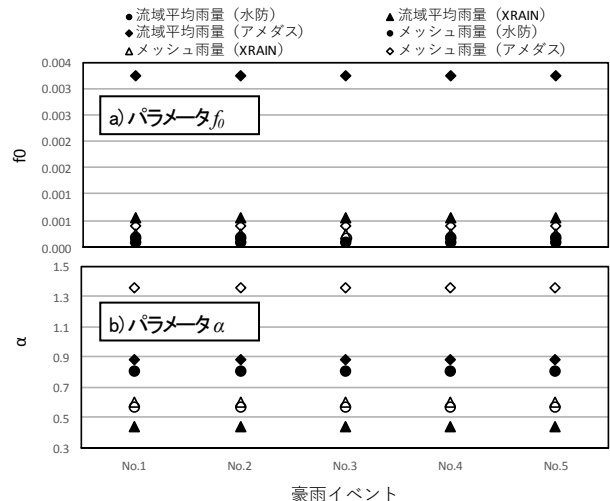


図-14 全豪雨イベント共通パラメータ

図-13は、RMSE について降雨データの種類別に示したものである。これより RMSE 平均値をみると、水防災システムの Case1, Case2 における RMSE 平均値は、それぞれ 1.69, 1.59, XRAIN では、それぞれ 2.77, 2.61, アメダスでは、それぞれ 3.28, 3.40 となっている。RMSE 平均値でみると、水防災システムが最も値が小さく、続いて XRAIN, アメダスの順で大きくなった。

また、水防災システム及び XRAIN における RMSE 平均値をみると、豪雨イベント別に最適パラメータを設定した場合と同様に、両者ともに Case1 に比べて Case2 の方が小さい値となり、流域平均雨量を用いた場合に比べて、メッシュ雨量を用いた場合の方がハイドログラフの再現精度は全体的に向上している。

図-14は、検討対象豪雨ケース別に全豪雨イベント共通パラメータとして設定した最適パラメータのうち、 (f_0, a) について示したものである。これより、アメダスの場合におけるパラメータ f_0, a は、他と比べて多少大きい値となっているものの、図-10で見られたような極端な乖離はみられず、ある程度の範囲内に設定された。

7. むすび

本研究では、神田川上流域における豪雨イベントを対象とし、XRAIN の有する詳細な時空間分解能を直接入力可能な分布型流出モデルを用いて、XRAIN, 水防災システム, アメダスの雨量データによる流出ハイドログラフの再現性を検証した。その結果、水防災システムにおける高密度（流域内 1 観測所あたりの支配面積—約 2km^2 /箇所）の地上雨量観測データを使用した場合、流出ハイドログラフの再現性が最も高いことがわかった。また、XRAIN は非常に詳細な空間分解能（約 $0.06\text{km}^2/1$ メッシュ）を有するものの、都市中小河川でそのまま流出計算の降雨データとして使用すると、観測流量ハイドログラフの再現性が低下する場合があることを確認した。これは筆者らが集中型流出モデルをもとに実施した検討結果⁷⁾と同様の結果であり想定された内容である。

一方で、降雨データの空間分解能の差異については、流域平均雨量を全メッシュ一様に与えた場合とメッシュ雨量を与えた場合の比較より、XRAIN 及び水防災システムともに、メッシュ雨量による詳細な空間分布を与えることで、都市中小河川のような小さい流域においても流出ハイドログラフの全体的な再現性を向上することが可能であることを確認した。

なお、豪雨イベント別に最適パラメータを設定した場合、降雨精度が確保されない場合に流出モデルのパラメータが、他豪雨の最適パラメータと比較して大きく乖離することが確認された。一方、全豪雨イベント共通パラメータを設定した場合は、流出ハイドログラフの再現性

は若干低下するが、このようなパラメータの大きな乖離は抑えられた。

今後、流域規模の異なる他流域等において XRAIN 及び分布型流出モデルを用いた流出解析を実施し、降雨の空間分解能が流出ハイドログラフへ与える影響について、流域スケールや流域特性とどのような関係性があるかを見いだしていくことが必要である。また、分布型流出モデルの有する各パラメータについて、洪水全体で最適化するパラメータや豪雨毎に最適化するパラメータの考え方を明確化することにより、流出解析の一層の精度向上が求められる。そして、近年頻発する都市中小河川における局所豪雨や内水等に対して、XRAIN 及び分布型流出モデルを用いた流出予測等に活用していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博: 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, Vol.65, No.3, pp.217-230, 2009.
- 2) 米勢嘉智, 河村明, 天口英雄, 戸野塚章宏: 1 分値地上観測雨量データを用いた都市中小河川流域における X バンド MP レーダ雨量の精度評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I_217-I_222, 2016.
- 3) 米勢嘉智, 河村明, 天口英雄, 戸野塚章宏: 都市中小河川流域における X バンド MP レーダ雨量の時空間特性解析, 土木学会論文集 G(環境), Vol.72, No.5, pp.I_277-I_282, 2016.
- 4) 米勢嘉智, 河村明, 天口英雄, 戸野塚章宏: 雨域移動に着目した都市中小河川流域における X バンド MP レーダ雨量の時空間相関特性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I_217-I_222, 2017.
- 5) 藤田一郎, 小林健一郎, 奥山貴也, 熊野元気: ゲリラ豪雨に対する都賀川の流出モデル開発と河川監視カメラを活用した水位流量ハイドロの検証, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, I_151-I_156, 2016.
- 6) 関根正人, 浅井晃一: 神田川流域を対象とした豪雨による浸水・氾濫に関する数値予測, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71, No.4, I_1429-I_1434, 2015.
- 7) 米勢嘉智, 河村明, 戸野塚章宏, 天口英雄: 都市中小河川流域における XRAIN を用いた豪雨流出特性, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, pp.I_97-I_102, 2018.
- 8) 安陪和雄, 大八木豊, 辻倉裕喜, 安田佳哉: 分布型流出モデルの広域的適用, 水工学論文集, Vol.46, pp.247-252, 2002.
- 9) Kawamura, A., Morinaga, Y., Jinno, K. and Dandy, G.C.: The comparison of runoff prediction accuracy among the various storage function models with loss mechanisms, *Proc. of the 2nd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference*, Vol.II, pp.43-50., 2004
- 10) 田中丸治哉: タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集, No.178 pp.103-112 1995.

(2018. 4. 9 受付)

RUNOFF CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTION HYDROLOGICAL MODEL USING XRAIN AND GROUND OBSERVATION RAINFALL DATA IN A SMALL URBAN WATERSHED

Yoshitomo YONESE, Akira KAWAMURA and Hideo AMAGUCHI

This paper presents the reproducibility analysis of the distribution hydrological model using several rainfall data, such as XRAIN and ground observation rainfall data, applied to the upper basin of Kanda river in Tokyo. The highest reproducibility is observed by using high density deployed ground observation rainfall, among the simulation using other rainfall data including XRAIN with its spacial high resolution. From the simulation using XRAIN, direct use of XRAIN's spatial distribution data to the hydrological meshed model revealed higher reproducibility than the simulation using averaged XRAIN in the basin.