

分布型降雨流出氾濫モデルに適用する 中小河川の河道断面推定法

ESTIMATION METHOD OF CROSS-SECTION OF SMALL RIVERS
FOR DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF-INUNDATION MODELS

山田真史¹・富樫冨佳²・佐山敬洋³

Masafumi YAMADA, Saeka TOGASHI and Takahiro SAYAMA

¹正会員 博(工) 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²学生会員 修(工) 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都府京都市西京区)

³正会員 博(工) 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In order to represent flood and inundation events with a distributed rainfall-runoff-inundation model, it is necessary to appropriately model river cross-sections along all rivers including small rivers. However, in most cases, cross-section data of small rivers are not available. In this study, we propose a new method to estimate cross-sections of small rivers. Through investigation of conventional estimation method by power law regression with downstream data, we revealed that the conventional method may underestimate cross-sections of small rivers. Alternatively, we propose to use a linear regression with a certain intercept, so that we can estimate the lower bound of cross-section of small rivers for preventing underestimation. Finally, by comparing the results of RRI model with different cross-section settings (real section, conventional estimation method, and our new estimation method), we examined the applicability of our new method, and demonstrated that the new method reproduces a similar result with the case based on the real sections.

Key Words : *River Cross-Section Estimation, Small Rivers, Distributed Hydrological Model, RRI model, Regime Theory, Chikusa River Basin*

1. 背景と目的

令和元年台風19号をはじめとして、主要河川の氾濫とともに、中小河川群の氾濫が同時多発的に発生することで、被災が流域全体に及ぶ災害が相次いでいる。複数箇所での様々な規模の河川に起因する氾濫被害を広域的に予測・分析するためには、降雨分布を入力として流出過程と氾濫過程を一体的に解析する分布型モデルの活用が望ましい¹⁾。近年、標高データ・集水域データの高解像度化とオープンデータ化が進み²⁾、地形や落水線を詳細に反映した分布型モデルの構築が可能となっており、分布型流出氾濫解析モデルを用いた上流部中小河川を含む流域全体での氾濫発生予測も試みられている³⁾。

分布型の降雨流出氾濫モデルを構築する際には、河道横断面形を全河川セルにおいて明示的に設定する必要があり、適切な河道横断面形の設定が流出・氾濫予測の蓋

然性のために重要となることが指摘されている⁴⁾。一方で、流域のあらゆる河川について河道横断面形データが整備されていることは稀である。河川管理者による測量が各水系の本川や主要支川で行われているに留まり、河川延長の大部分を占める上流部中小河川では対象河川の多さや予算制約から測量が行われていない場合が多い。

河道横断面形を推定する既往研究として、代表粒径や河床勾配等を考慮した水理学的な検討が行われてきた^{4,5)}。しかしながら、河道横断面形の推測対象となる地点すべてについてこれらの変数を測定することは難しく、流域全体のモデリングという観点からは必ずしも実用的ではない。このため、河道横断面形を矩形と仮定し、断面形状と流量の関係に関する経験式であるレジーム則⁶⁾からの類推により、河道の幅 W [m]と深さ D [m]を流域面積 A [km²]の冪乗関数(式(1)・式(2))で推定する方法が一般的である^{7,9)}。その際、下流域の横断面形データを用いて回帰的にパラメータ a_w , b_w , a_d , b_d を決定し、上流部中小

河川の横断面形を推定する機会が多い⁷⁻⁹⁾ (以下、疑似レジェーム則と表記) . しかし、流域下流部の本川における河道横断面形から上流域の中小河川の河道横断面形を推定した際にどの程度の精度で推定できるのか、また、冪乗関数のパラメタを単純な回帰式で推定する以外により実態の河道断面特性に則した方法は無いのか、といった基礎的な検討は十分にされていない。

$$W = a_w \cdot A^{b_w} \quad (1)$$

$$D = a_d \cdot A^{b_d} \quad (2)$$

以上を踏まえ本研究は、河口部から流域面積 1 km² 付近の上流部まで1532の河道断面が実測されている兵庫県千種川水系を対象に、集水面積と河道断面パラメタの関係を統計的に分析する。また、流域面積 200 km² 以上の区間でのみ河道断面情報が得られると仮定したとき、その上流域の河道断面パラメタを推定する方法を比較検討するとともに、推定断面と実断面を反映した降雨流出氾濫モデルを構築し、断面推定の結果が流域全体の浸水深や流量の推定結果に及ぼす影響を明らかにする。

2. 手法

(1) 対象流域の概要

千種川水系は兵庫県南西部に位置し、南北に細長い 754 km² の流域を持つ二級水系である (図-1) . 本川の千種川は中国山地の江浪峠付近を源流とし、赤穂平野を貫流して瀬戸内海の播磨灘に注ぐ。下流部では平野に市街地が広がる一方、上流部では山林が主要な土地利用であり、市街地は谷底平野沿いに留まる。河川管理者である兵庫県より、流域内57河川について、2009年台風9号の被害を受けて行われた大規模河川改修事業以前の、合計1532箇所の横断面形データの提供を受けた。

(2) 河道横断面形の特徴変数の算出

各河道横断面形データから、左右岸の低いほうの距離杭もしくは堤防最高点に合わせた河岸満杯時について、河川水が占める面積として河積 S [m²]、水面から河道最深点までの深さ D [m]、水面の幅 W [m] のそれぞれを、図-2のように算出した。また、各地点での流域面積 A [km²] を、基盤地図情報の標高データから算出した。

(3) 河道区間の定義と代表断面の選択

河道横断面形データが存在する河川について、河川の合流点から次の合流点までを一つの河道区間として、計 57 河川を 94 の河道区間に切り分け、各河道区間において河積 S が中央値をとる断面を代表断面と定めた。続いて、国土技術研究センター「中小河川計画の手引き」¹⁰⁾ における定義を踏まえ、代表断面について流域面積 1 km² 以上 200 km² 未満の河川を中小河川、流域面積 200 km² 以上の河川を大河川と定義した (図-1 (b)) .

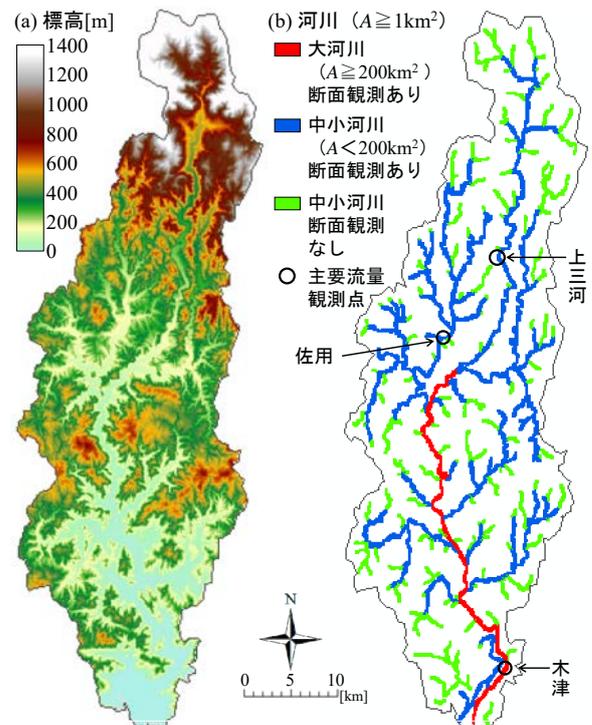


図-1：千種川流域の標高および河川

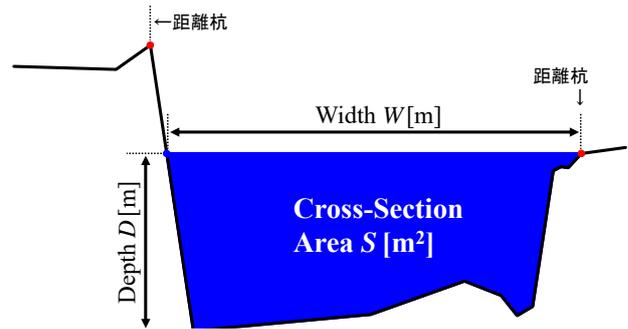


図-2：河道横断面形からの S , D , W の算出方法

(4) 疑似レジェーム則の妥当性検証と新たな推定式の提案

大河川のみ河道横断面形を用いてパラメタを決定した場合の疑似レジェーム則による中小河川の河積 S , 幅 W , 深さ D の推定値と、実際の値の比較により、中小河川の横断面形を、大河川のみに基づく疑似レジェーム則を用いて推測することの妥当性を検討した。続いて、中小河川の河積 S , 幅 W , 深さ D と流域面積 A の関係を考察し、中小河川の河道横断面形が未知である場合に適用するための推定式を検討した。

3. 河道横断面形の推測結果

(1) 疑似レジェーム則を用いた全断面での検討

全1532断面を検討対象に、河積 S , 幅 W , 深さ D それぞれの分布と、各地点での流域面積 A の関係を図-3に示す。また、河積 S , 幅 W , 深さ D それぞれについて最小二乗法により決定した疑似レジェーム則のパラメタと、中小河川に該当する1320横断面を対象にした推定精度の指標を表

表-1：全断面を用いた疑似レジーム則によるS, W, D推定

| 推定対象 | 凡例 | 疑似レジーム則 $a \times A^b$ の パラメタ推定に用いた断面 | パラメタ | | 精度指標 | |
|---------------------------|-------|--|---------|-------|----------------|-------|
| | | | a | b | R ² | RMSE |
| 河積 S [m ²] | | 全1532断面 | 0.0200 | 1.726 | -0.239 | 78.84 |
| | | A ≥ 200km ² の212断面 | 0.00263 | 2.038 | -0.488 | 86.39 |
| | | A < 200km ² の1320断面 | 12.16 | 0.585 | 0.635 | 42.77 |
| | | W (①式) × D (②式) | | | -0.305 | 80.91 |
| | | S=A+I0 | | | 0.330 | 57.96 |
| 幅 W [m] | | 全1532断面 | 1.987 | 0.735 | 0.467 | 13.74 |
| | | A ≥ 200km ² の212断面 (①) | 0.0675 | 1.262 | -0.602 | 23.82 |
| | | A < 200km ² の1320断面 | 6.740 | 0.453 | 0.651 | 11.12 |
| 深さ D [m] | | 全1532断面 | 1.827 | 0.221 | 0.235 | 1.076 |
| | | A ≥ 200km ² の212断面 (②) | 0.0739 | 0.731 | -4.281 | 2.826 |
| | | A < 200km ² の1320断面 | 2.190 | 0.157 | 0.286 | 1.039 |

表-2：代表断面を用いた疑似レジーム則によるS, W, D推定

| 推定対象 | 凡例 | 疑似レジーム則 $a \times A^b$ の パラメタ推定に用いた断面 | パラメタ | | 精度指標 | |
|---------------------------|-------|--|---------|-------|----------------|-------|
| | | | a | b | R ² | RMSE |
| 河積 S [m ²] | | 全94断面 | 0.0183 | 1.742 | -0.171 | 63.22 |
| | | A ≥ 200km ² の11断面 | 0.00165 | 2.115 | -0.497 | 71.48 |
| | | A < 200km ² の83断面 | 11.44 | 0.580 | 0.801 | 26.04 |
| | | W (①式) × D (②式) | | | -0.228 | 64.73 |
| | | S=A+I0 | | | 0.518 | 40.57 |
| 幅 W [m] | | 全94断面 | 1.314 | 0.802 | 0.531 | 11.36 |
| | | A ≥ 200km ² の11断面 (①) | 0.0149 | 1.508 | -0.855 | 22.61 |
| | | A < 200km ² の83断面 | 6.451 | 0.455 | 0.820 | 7.035 |
| 深さ D [m] | | 全94断面 | 1.945 | 0.201 | 0.327 | 0.820 |
| | | A ≥ 200km ² の11断面 (②) | 0.352 | 0.484 | -3.156 | 2.038 |
| | | A < 200km ² の83断面 | 2.248 | 0.143 | 0.400 | 0.774 |

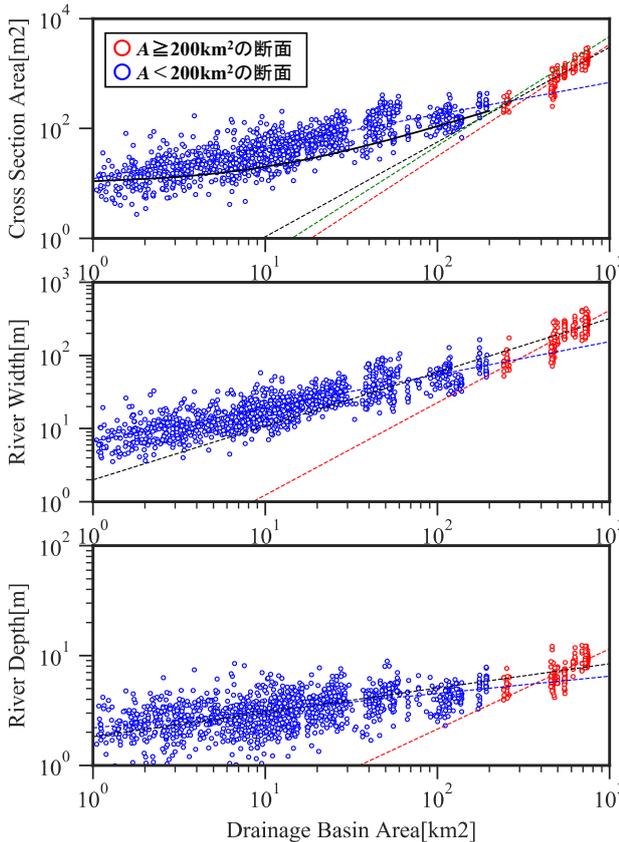


図-3：全断面のS, W, DとAの関係図

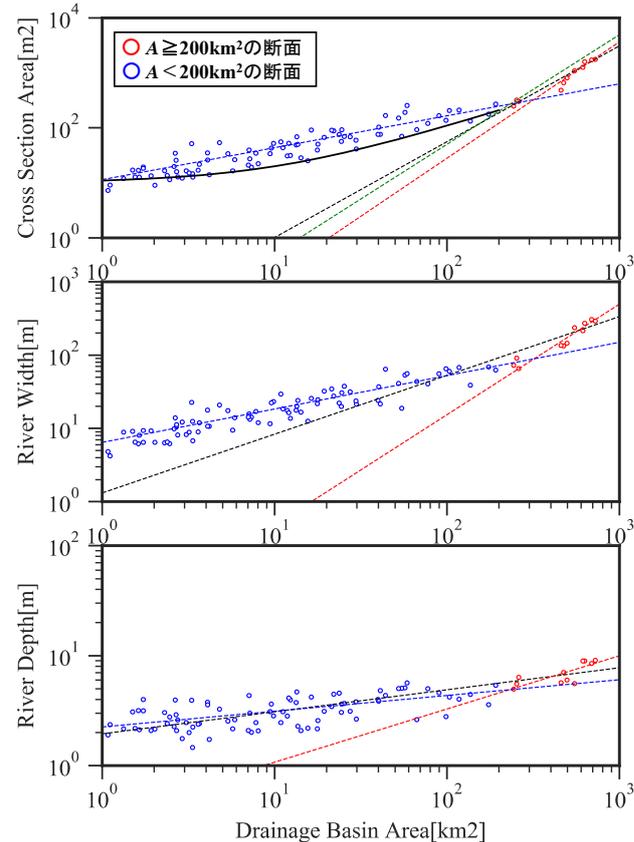


図-4：代表断面のS, W, DとAの関係図

-1に示す。推定精度の指標には、決定係数R²とRMSEを採用した。パラメタを決定する際に用いる断面情報の範囲として、a)全断面、b) A ≥ 200 km²の大河川のみ、c) A < 200 km²の中小河川のみ、の3パターン想定した。

図-3の赤破線は、大河川のみを横断面に基づいてパラメタを決定した疑似レジーム則の回帰式を示している。河積S、幅W、深さDのどの変数についても、中小河川の断面について、各変数を過小評価する傾向にあることが読み取れる。また、河積Sを推定の対象とせず、幅Wと深さDのみについて疑似レジーム則より推定し、河積をS=W×Dとして推定した場合（図-3緑破線）も、同様に中小河川の河積Sを過小評価する傾向にあることが読み取れる。このように、大河川のみを横断面に基づいた疑似レジーム則で中小河川の河道横断面形を推定することは、河積Sの過小評価につながる可能性が示唆された。

(2) 疑似レジーム則を用いた代表断面での検討と河積Sの下限推定式の提案

各河道区間の内部では、流域面積Aは大きく変化しない。一方で、一つの河道区間内で流域面積Aがほぼ同じとみなせる断面群についても、河積S、幅W、深さDには一定の変化があり、それが図-3の縦軸方向のばらつきの原因となっている可能性がある。本研究では、河道区間内部での河道断面形状のばらつきまでを考慮することはせず、各河道区間での代表的な断面形状を推定することを目標とする。

各河道区間で河積が中央値となる断面をその河道区間の代表断面と定義し、94代表断面を検討対象に、河積S、幅W、深さDそれぞれの分布と、その流域面積Aの関係を図-4に示す。また、河積S、幅W、深さDそれぞれについて最小二乗法により決定した疑似レジーム則のパラメタと、代表断面の中小河川に該当する83断面の実際の値

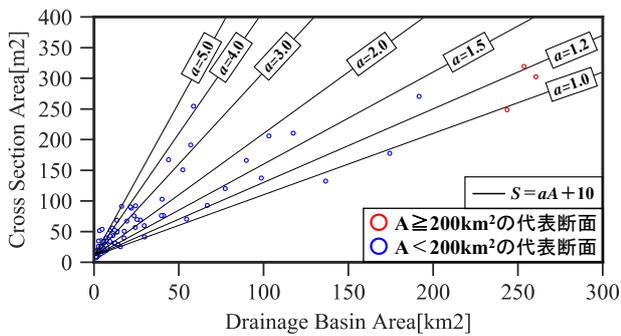


図-5：河積Sの下限値を推定する線形式の傾きaの検討

に関する推定精度の指標を表-2に示す。大河川のみを横断面に基づいてパラメータを決定した疑似レジーム則の回帰式である図-4の赤破線から、代表断面に着目した場合でも、大河川の横断面に基づいた疑似レジーム則では、中小河川の河積S、幅W、深さDのそれぞれを過小評価している。これら3つの変数のうち、特に河積Sの推定精度が氾濫の有無を推定する上では重要である。そこで、河積Sの過小評価を避けるため、中小河川の河積Sの概ねの下限値と流域面積Aの関係を検討する。

流域面積A=1km²付近の中小河川最上流部で河積Sの最小値は約10m²であることから、この値をA=1km²での河積Sの下限値に設定する。このとき、河積Sの下限値と流域面積Aの関係式として線形式 $S=aA+10$ を仮定すると、図-4に黒実線で示すように、 $a=1.0$ [m²/km²]の場合、すなわち $S=A+10$ の式が、中小河川代表断面の河積Sのおおよその下限値となることが分かった。また、中小河川の断面情報がないと仮定した場合、大河川下流側の河口付近は河道改修の影響が大きいと考えられるため、大河川でも流域面積が小さい上流側の断面を、線形式 $S=aA+10$ のパラメータ決定に使用するほうが望ましい。この場合、図-5に示すように、aは1.0~1.2の範囲と推定される。

(3) 代表断面での川幅水深比W/Dの推定式の提案

ある断面の河積S推定値が定まり、断面形状を矩形と仮定したとき、続いて $S=W \times D$ を満たす幅W、深さDを推定することとなる。ここで、WかDの一方を独立して推定し、 $S=W \times D$ の関係式からもう一方を算出する場合、極端に狭く深い、あるいは広く浅いといった、非現実的な断面形状となってしまう可能性がある。これを避けるため、本研究では、矩形断面形状を単独で表すパラメータである川幅水深比W/Dと流域面積Aの関係から、各断面のW/Dを決定する。

94代表断面を検討対象に、川幅水深比W/Dと流域面積Aの関係を図-6に示す。また、最小二乗法により決定した疑似レジーム則のパラメータと、中小河川に該当する河道区間の代表断面83断面を対象にした推定精度の指標を表-3に示す。大河川の代表断面から回帰した疑似レジーム則（赤破線）は中小河川のW/Dを過小推定している。本研究では、大河川の断面データのみを用いた中小河川の川幅水深比W/Dの推測手法については今後の課題とし、

表-3：代表断面と疑似レジーム則を用いたW/Dの推定

| 推定対象 | 凡例 | 疑似レジーム則 $a \times A^b$ の パラメータ推定に用いた断面 | パラメータ | | 精度指標 | |
|-----------------|-------|---|-------|-------|----------------|-------|
| | | | a | b | R ² | RMSE |
| 川幅水深比 W/D[-] | | 全94代表断面 | 2.302 | 0.389 | 0.573 | 2.670 |
| | | A ≥ 200km ² の11代表断面 | 0.125 | 0.855 | -0.995 | 5.751 |
| | | A < 200km ² の83代表断面 | 2.898 | 0.324 | 0.595 | 2.590 |

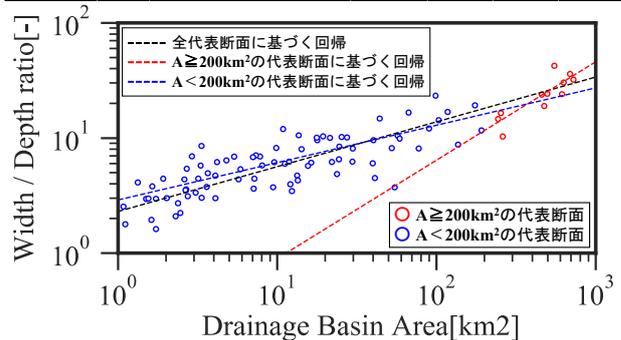


図-6：代表断面のW/DとAの関係図

表-4：計算実施4ケースの河道断面設定

| | 河道断面の設定（流域面積A [km ²] |
|------------------|--|
| ケース1 (山本ら) | 断面観測実施区間には1532断面の実観測データを導入。 無観測区間はW, Dを疑似レジーム則で推測。 W [m] = $5.5 \times A^{0.61}$, D [m] = $0.94 \times A^{0.34}$ |
| ケース2 (従来手法) | 大河川：実観測データ（212断面）を導入。 中小河川：大河川の観測断面を用いた疑似レジーム則でW, D を推測。 W [m] = $0.0675 \times A^{1.262}$, D [m] = $0.0739 \times A^{0.731}$ |
| ケース3 (本研究の方法) | 大河川：実観測データ（212断面）を導入。 中小河川： S [m ²] = $A+10$, $W/D = 2.898 \times A^{0.324}$ |
| ケース4 (本研究の方法) | 大河川：実観測データ（212断面）を導入。 中小河川： S [m ²] = $1.2 \times A+10$, $W/D = 2.898 \times A^{0.324}$ |

中小河川の代表断面から回帰した疑似レジーム則（青破線）である $W/D = 2.898 \times A^{0.324}$ を、川幅水深比W/Dと流域面積Aの関係式として暫定的に用いるものとする。

4. 実際の河道断面を導入したモデルとの比較による本研究の手法の妥当性検証

(1) 対照実験に用いるモデルの概要

前章で提案した中小河川の河道断面推定式を、分布型降雨流出氾濫モデルに導入し、その妥当性を検討する。これまでに複数の分布型降雨流出氾濫モデルが提案されている^{9,11,12}が、本研究ではSayama et al.⁹によるRRIモデルを使用する。千種川水系では山本ら⁹により合計1532箇所の横断面形状データを導入したモデル構築と流出パラメータの較正が行われており、このモデルの提供を受け、参照ケースとした（ケース1）。これに加えて、既往研究と同様に大河川の横断面形のみに基づき疑似レジーム則で中小河川の河道断面を推定したケース2、本研究で提案した河道断面推定式を用いたケース3($a=1.0$ の場合)およびケース4($a=1.2$ の場合)の計4ケースについて結果を比較した。各ケースの河道断面設定の詳細を表-4に示す。なお、RRIモデルの詳細、および河道断面形状以外のモデルパラメータは、山本ら⁹を参照されたい。検討対象は2009年台風9号による降雨イベントとし、入力解析雨量、検討期間は8月9日午前0時から同13日午前0時とした。

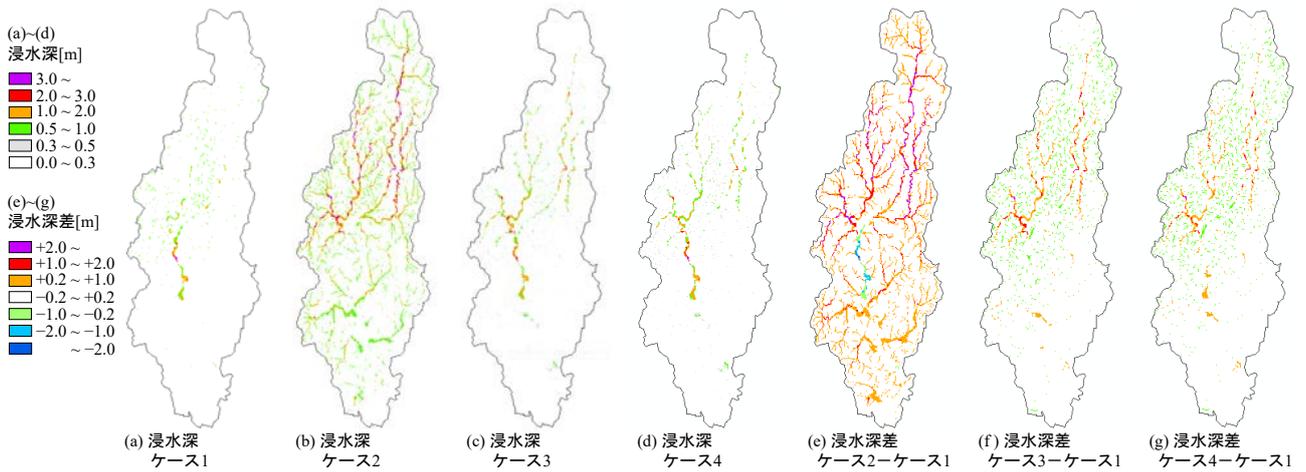


図-7：河道横断面形の設定が異なる4ケースの最大浸水深分布および浸水深差分布

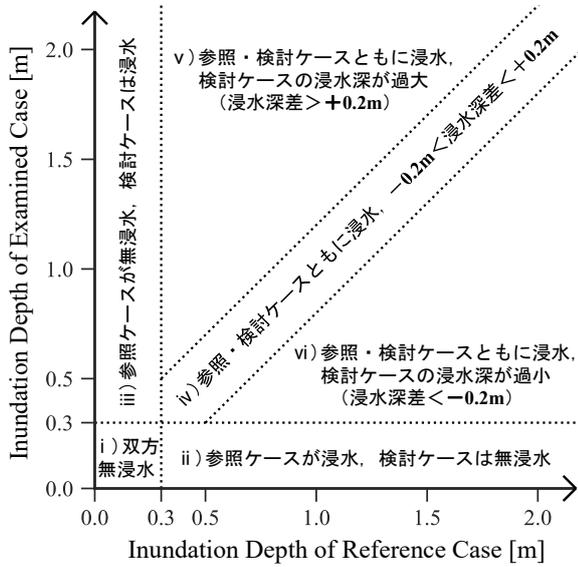


図-8：浸水領域と浸水深の再現度に関する領域分け

表-5：浸水領域と浸水深の再現度の分析結果

| 検討ケース | 各領域に該当する面積[km ²] | | | | | |
|-------|------------------------------|------|------|------|-----|-----|
| | i | ii | iii | iv | v | vi |
| ケース2 | 626.1 | 3.5 | 92.7 | 23.3 | 7.5 | 0.8 |
| ケース3 | 704.8 | 17.4 | 14.0 | 14.0 | 2.9 | 0.9 |
| ケース4 | 707.6 | 17.8 | 11.3 | 13.1 | 3.8 | 0.4 |

(2) 各ケースの解析結果比較

各ケースの検討期間最大浸水深の分布、および参照ケースからの最大浸水深の差の分布を図-7に示す。(a)の参照ケースでは流域中央の大河川で集中的に氾濫が生じている。検討ケースのうち(b)のケース2では、(a)の浸水域では氾濫が生じず、より上流側の中小河川に沿って広範囲に氾濫が生じており、参照ケースと浸水域が異なる。この原因は疑似レジーム則による中小河川河道断面の過小推定と考えられ、上流側の中小河川で氾濫量が過大となり、一方で下流への流量は過小となるため、大河川での氾濫が再現されていないと考えられる。このように、中小河川で河積Sが過小評価された分布型降雨流出氾濫モデルでは、水害リスクを中小河川周辺で過大に、大河川周辺で過小に評価してしまう可能性がある。一方、(c)のケース3と(d)のケース4では、主要な中小河川沿いで氾

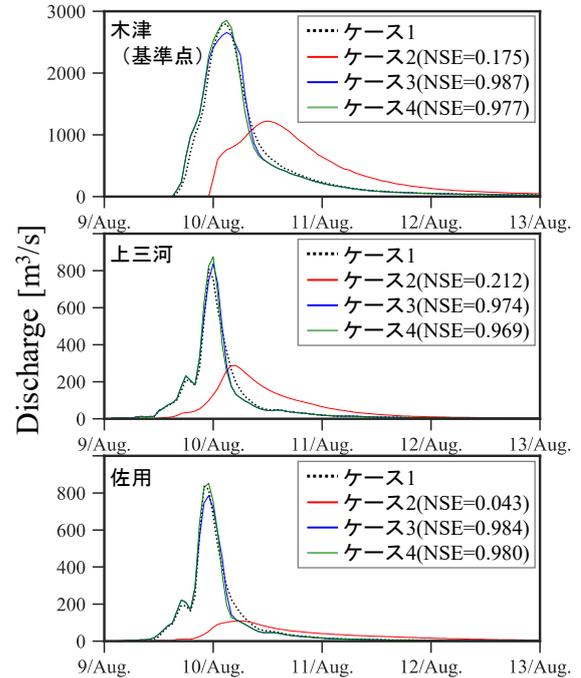


図-9：主要流量観測点における流量ハイドログラフ

濫が生じているものの、参照ケースで主要な浸水域であった流域中央の大河川沿いの氾濫が再現されており、ケース2と比べてより参照ケースに近い浸水域分布となっている。この理由として、本研究の提案する河積下限値の推定式により河道断面の過小推定が防がれ、中小河川沿いの過剰な氾濫が抑えられたと考えられる。同図(e)から(g)の最大浸水深差についても、流域中央の大河川沿いの参照ケース浸水域がケース2では再現されていない一方で、ケース3・ケース4では同領域の浸水深差がほとんどなく、浸水深が再現できていることが分かる。ただし、河積Sについて、 $a=1.2$ を用い下限値からやや大きく推定しているケース4の場合でも、河積を過小評価する支川は存在するため、ケース1に比べて浸水深が過大に評価される場所も見受けられる。

浸水域・浸水深の再現性を定量的に考察するため、参照ケースと検討ケースの浸水深に基づき、図-8に示す6分類に該当する面積をそれぞれ求め、結果を表-5に示した。ケース2では(i)と(ii)が少なく(iii)が多いことから、参

照ケースで無浸水の領域に浸水が生じ、浸水域が過剰となっていることが分かる。一方でケース3・ケース4は、無浸水を再現している(i), および浸水を再現している(iv), (v), (vi)の割合が増え、浸水域の再現性が向上している。また、浸水域を再現している(iv), (v), (vi)の中でも、浸水深を正しく再現している(iv)の割合が増え、浸水深の再現性も向上している。

また、本川河口付近の流量基準点である木津、中小河川区間に位置する上三河および佐用の3流量観測点について、各ケースの流量、および参照ケースを基準としたNash Sutcliffe Efficiency(NSE)を図-9に示した。どの観測点においてもケース2では立ち上がりとピークが遅く、またピーク流量が参照ケースの半分以下となっており、再現性が低い。対照的にケース3・ケース4では、NSEもすべて0.95以上と高い値を示しており、また、参照ケースのハイドログラフ形状をほぼ再現している。

なお、ケース2と同様に疑似レジーム則を用いた既往研究⁷⁹⁾では、幅 W と深さ D を独立に推定していた。指数部のパラメータ b_w , b_d の和が1を超えない程度に制限したうえで、係数部のパラメータ a_w , a_d を調整することにより、経験的に図-4における推定線の傾きが大きくなるように設定し、中小河川における河積 S の極端な過小推定や、氾濫の過大推定を防いでいたことが分かった。

上述の浸水域や浸水深、流量の再現性に関する検討から、本研究の提案する手法は、上流域で氾濫をやや過大に推定するという傾向はあるものの、流域全体の浸水の状況を概ね再現するとともに、氾濫の過大評価の影響が下流の流量推定や氾濫に影響を及ぼさない、現実的な河道断面を推定できる簡易手法である。

5. まとめ

本研究では、横断面の観測データが少ない中小河川について、分布型降雨流出氾濫モデルに適用することを目的とした、断面形状の推測法の提案を試みた。河積 S について見出した下限式である $S = aA + 10$, $a = 1.0 \sim 1.2$ を用いることで、河積の過小評価を防ぎ、実際の河道断面を中小河川に導入した場合の分布型降雨流出氾濫モデルとほぼ同様の解析結果を再現できることを確認し、その妥当性を示した。ここで得られたパラメータは千種川流域の断面特性を反映したものであるため、この a や切片の値が日本全国の河川でどのように分布しているかを明らかにすることが今後の課題である。また、本研究では簡易推定の結果を示すことに主眼をおいたが、限られた断面情報で精度を向上させるためには、例えば支川毎に a のパラメータを変えるなどの方法も検討に値する。また、川幅水深比 W/D と流域面積 A の関係の検討も今後の課題である。以上、本成果は、断面情報が存在しない領域への分布型降雨流出氾濫モデルの適用に資するものである。

謝辞：本研究の実施にあたり、兵庫県より河道断面データを提供いただいた。モデル整備には三井共同建設コンサルタント(株)にご協力いただいた。京都大学防災研究所竹林洋史准教授には研究のご助言をいただいた。本研究は、科研費基盤(B)19H02248(代表：佐山)の支援を受けて実施したものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山本浩大, 佐山敬洋, 近者敦彦, 中村要介, 三宅慎太郎, 寶馨: 千種川流域を対象にしたRRIモデルによる降雨流出・洪水氾濫統合型解析. 自然災害科学, Vol.36, 特別号, pp.139-151, 2017.
- 2) 山崎大, 富樫冨佳, 竹島滉, 佐山敬洋: 日本全域高解像度の表面流向データ整備. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_163 I_168, 2018.
- 3) 近者敦彦, 関本大晟, 阿部紫織, 岩崎貴志, 崔国慶, 小島広宜, 中村要介, 佐山敬洋: 降雨流出氾濫一体解析を用いた全国ベースでの氾濫予測の試み. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.I_1321-I_1326, 2019.
- 4) 福岡捷二, 坂口達哉: 無次元流量に対する無次元河幅・水深のとりまわりと整備途上河川への適用. 土木学会論文集B1(水工学), No.68, Vol.4, pp.I_1423 I_1428, 2012.
- 5) 池田駿介, Parker, G., 千代田将明, 木村善孝: 直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール. 土木学会論文集, Vol. 375, pp.117-126, 1986.
- 6) Leopold, L.B., Maddock, T.: The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. USGS, Professional Paper 252, 1953.
- 7) Try, S., Lee, G., Yu, W., Oeumg, C., Jang, C.: Large-Scale Flood-Inundation Modeling in the Mekong River Basin. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol.23, No.7., 2018.
- 8) 山田真史, 知花武佳, 渡部哲史: 地先のハザードカーブに基づいた流域の地理的構造化とその自然的・社会的要因の分析. 河川技術論文集, Vol.25, pp.37-42, 2019.
- 9) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., Fukami, K.: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. Hydrological Science Journal, Vol.57, No.2, pp.298-312, 2012.
- 10) 中小河川計画検討会: 中小河川計画の手引き(案). 一般財団法人国土技術センター技術資料, 1999.
- 11) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 大久保剛貴, 中木翔也, 松本拓磨: レーダー雨量を外力とした山国川流域の分布型流出・洪水氾濫解析と洪水・氾濫プロセスの検討. 河川技術論文集, Vol.22, pp.13-18, 2016.
- 12) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝, 中川直子: 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), Vol.71, No.4, pp.I_313-I_318, 2015.

(2020. 4. 2受付)