

## 降雨流出過程に影響する流域地形特性に関する研究\*

福島大学共生システム理工学類 三浦 優樹  
 福島大学共生システム理工学類 菅野 理恵  
 福島大学共生システム理工学類 横尾 善之

### 1. はじめに

洪水や渇水の水循環モデルや河道モデルを作成する際に、河川や流域をどこまで細かく再現すればよいか、という点は未だ解決を見ない。粗い河道網を作成すると現実から遠ざかってしまい、細かい河道網を追及しても際限がない上に計算機への負荷が大きくなってしまう。このため、モデル構築者が利用する地形データの解像度に依存した流域地形や河道開始点を設定していた（例えば Yokoo ら, 2012）。このため、地形データの空間解像度が降雨流出計算の結果に与える影響が検討されてきた（例えば Pradhan ら, 2005, Ku ら, 2005）が、統一的な見解を得るには至っていない。

Moussa ら (2011)は、この問題の解決の糸口となる研究成果を報告している。彼らのフランス国内の 18 流域を対象とした研究によると、河道が存在しないと定義する面積（カットオフエリア）を  $0.5\sim5\text{km}^2$  とする場合、流域内の河道が存在しない最上流部の面積の合計は流域面積や流域地形によらず流域全体の  $0.29\pm0.03$  程度となることを発見した。具体的には、Moussa ら (2011)は、「カットオフエリア」の大きさを変えていくことで、流域面積に占める最上流部の総面積の割合の変化を調べた。この知見は流域地形や河道網をモデルで再現する際の新しい指標になる可能性がある。しかしながら、Moussa ら (2011)の知見の有効性を他の流域で確認した例はなく、適用範囲についてはまだ不明確である。

そこで、本研究では Moussa ら(2011)の方法を日本の河川で適用し、フランスおよび日本の両国における適用結果の類似性および相違点を検討した。

### 2. 方法

対象流域は荒川と阿武隈川の 2 つ（図-1）とする。荒川は、福島県福島市を流れる阿武隈川水系の一級河川である。流域面積  $185.4\text{km}^2$ 、流路延長  $29.7\text{km}$  である。阿武隈川は福島県及び宮城県を流れる阿武隈川水系の本流で、一級河川であり、流域面積  $5390\text{km}^2$ 、流路延長  $239\text{km}$  である。

まず、国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービスから福島県と宮城県の河川データ（線、点）と行政区域（面）データを取得し、地理情報システム（Geographic Information System : GIS）上に取り入れる。



図-1 対象流域の位置

\* Exploring scaling characteristics of watershed topography for rainfall-runoff modeling by Yuki Miura , Rie Kanno and Yoshiyuki Yokoo

その後、 $50m \times 50m$  のメッシュで表示し、1つ1つのセルに標高データを与える。河川は標高の高いほうから低いほうへ流れることから、囲まれたセルの中で標高が一番低いセルに向かって矢印を書く。その矢印はセルごとの流向を示している。流域全体の流向を求めるために、セルに向けられている矢印の数とそのセル自身の矢印の数の合計をセルごとに足していく。セルの中の値が大きいほどより多くの水が集まることになる。つまり、その流域では最大値のセルに向かって流れることがわかる。そこでカットオフエリアを設定する。カットオフエリアより大きいセルは河道網を表す。また河道が発生するセルに流れ込んだセルは最上流部を表す。カットオフエリアを変えていくことで、河道が発生するセルの位置が変わり、最上流部の面積が変化する。このような方法で、流域全体に占める最上流部の面積の割合を算出する。

### 3. 結果

#### 3.1 カットオフエリアと河道網の関係

図-2と図-3は、荒川と阿武隈川を対象とした場合のカットオフエリアと河道網の関係を示したものである。①、②、③、④はそれぞれカットオフエリア ( $A$ ) を流域面積 ( $A_0$ ) の 100%、10%、1%、0.1%に設定したときの河道網である。①のようにカットオフエリアと流域面積が等しいとき、流域すべてが最上流部となる。そこから、②、③、④のようにカットオフエリアを小さくしていくことによって、カットオフエリアより小さくなる最上流部の集水域の面積が小さくなりつつその数が増えることがわかる。

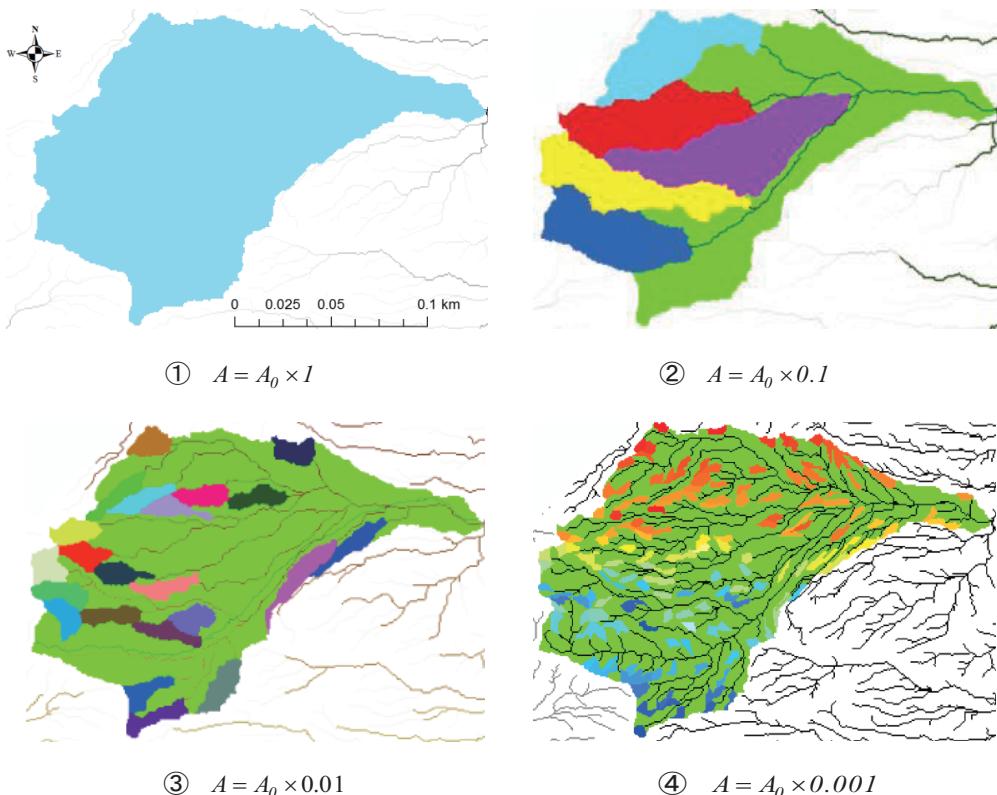


図-2 カットオフエリアと荒川の河道網の関係

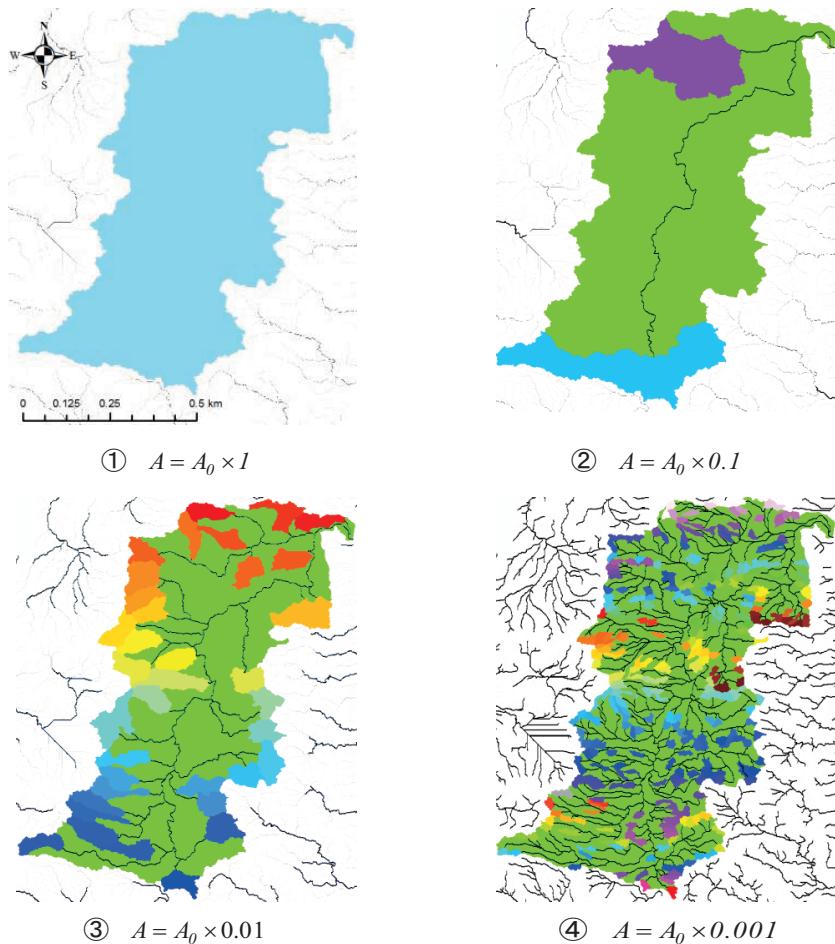


図-3 カットオフエリアと阿武隈川の河道網の関係

### 3.2 カットオフエリアと最上流部の面積の関係

図-4 と図-5 はそれぞれ荒川流域と阿武隈川流域において計算したカットオフエリアの割合と最上流部の総面積の割合の関係を示す。図-4 と図-5 中の横軸  $a$  は、式(1)で示される通り、流域面積  $A_0$  に占めるカットオフエリア  $A$  の割合である。図-4 と図-5 中の縦軸の  $u(a)$  は、式(2)で示される流域面積  $A_0$  に占める最上流部の総面積  $U(A)$  の割合である。 $U(A)$  は、カットオフエリアの設定値ごとの集水域の面積の合計値となる。また、縦軸の  $n(a)a$  は最上流部とみなされた各流域の総数  $n(a)$  と上述のカットオフエリアの割合  $a$  の積であり、 $u(a)$  の近似値となるものである。

$$a = \frac{A}{A_0} \quad \cdots(1)$$

$$u(a) = \frac{U(A)}{A_0} \quad \cdots(2)$$

図4より、荒川の場合、カットオフエリアを小さくしていくと、 $0.1 \leq a \leq 1$  のときの  $u(a)$  やその近似値である  $n(a)a$  の変動が激しくなった。また、 $u(a)$  と  $n(a)a$  の変化の仕方に違いが見られた。 $a \leq 0.1$  では徐々に変動が小さくなり、 $a \leq 0.01$  では  $u(a)$  は、 $0.26 \leq u(a) \leq 0.32$  となった。 $a \leq 0.0008$  のときは、データ数が多く GIS 上での処理が困難だったため、結果を算出することができなかった。

図5より、阿武隈川の場合、カットオフエリアを小さくしていくと、 $0.2 \leq a \leq 1$  のときの  $u(a)$  やその近似値である  $n(a)a$  は滑らかに減少していった。 $a \leq 0.05$  になると徐々に安定し始め、 $a=0.001$  になると  $u(a)$  は  $0.26 \leq u(a) \leq 0.32$  となった。荒川と同様に、 $a \leq 0.0008$  のときは、データ数が多く GIS 上での処理が困難だったため、結果を算出することができなかった。

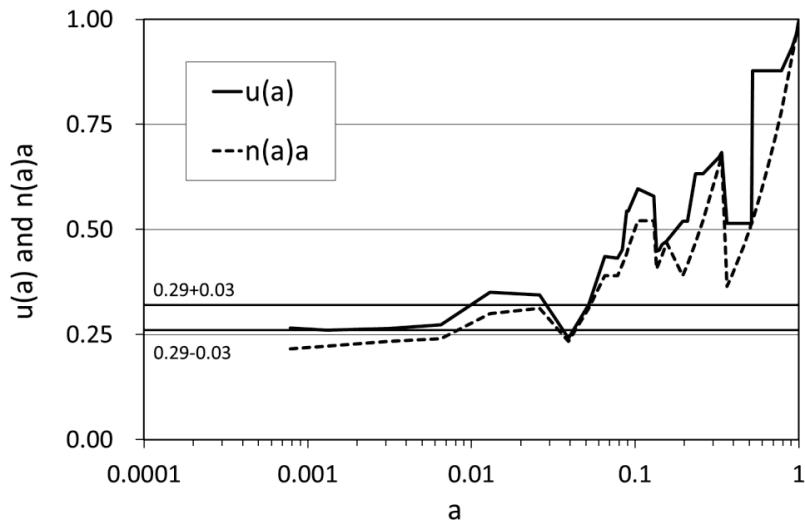


図4 カットオフエリアと最上流部の面積の関係（荒川）

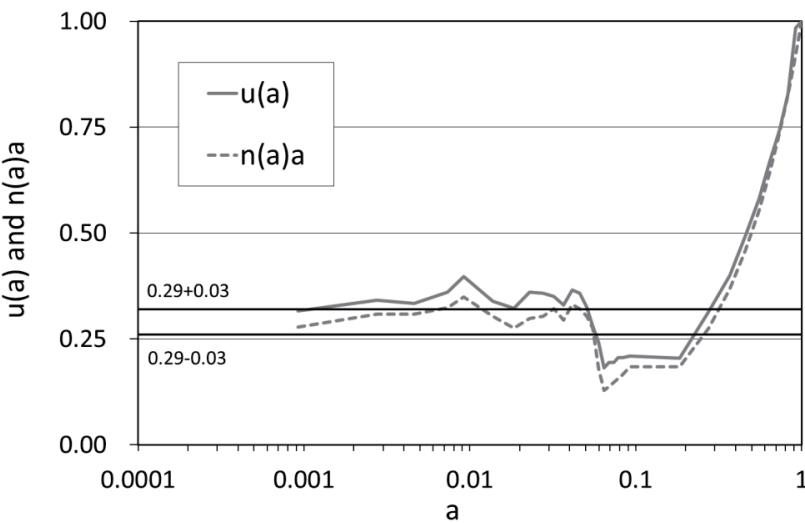


図5 カットオフエリアと最上流部の面積の関係（阿武隈川）

図6は図4と図5を1つにまとめたものである。この図より、 $0.05 \leq a \leq 1$  の範囲において、荒川と阿武隈川で  $u(a)$  と  $n(a)a$  に大きな違いがみられた。 $a \leq 0.05$  では荒川も阿武隈川も同じように  $u(a)$  や  $n(a)a$  の変動が安定している。

Moussa ら(2011)の研究では、カットオフエリアを  $0.5 \sim 5 \text{ km}^2$  とする場合、流域内の河道が存在しない最上流部の面積の合計は流域面積や流域地形によらず流域全体の  $0.29 \pm 0.03$  程度となることを報告している。荒川流域で上流部の割合が一定となったカットオフエリアの面積は  $0.14 \sim 7.24 \text{ km}^2$  であり、これは Moussa ら(2011)の研究と同様の結果である。一方、阿武隈川流域全体で上流部の割合が一定となったカットオフエリアの面積は  $4.96 \sim 24.76 \text{ km}^2$  であった。計算機能の制限のため、データの突合せはできていないが、 $a$  が 0.001 未満の場合も上流部の割合が一定となる可能性が高いことが図6から推測される。このため、Moussa ら(2011)の知見は日本の荒川および阿武隈川においても適用できる可能性が高いと考えられる。

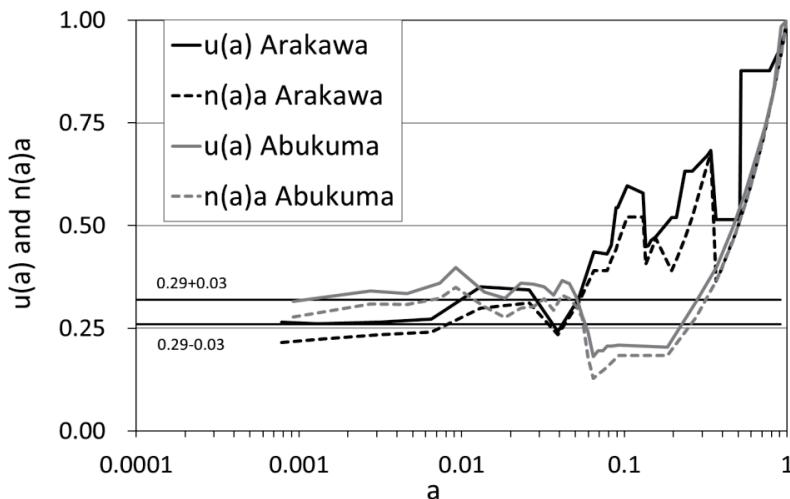


図6 カットオフエリアと最上流部の面積の関係（荒川と阿武隈川）

#### 4. 考察

本研究は Moussa ら(2011)の方法を日本の河川で適用し、フランスおよび日本の両国における適用結果の類似性および相違点を検討した。その結果、流域面積の違う日本の 2 つの流域の場合では、カットオフエリア  $a \leq 0.001$  のとき、 $u(a)$  やその近似値である  $n(a)a$  はフランスと同じように  $0.26 \leq u(a) \leq 0.32$  になることがわかつた。この結果は Moussa ら(2011)と同様の傾向を示しており、日本でも適用できると言えるのではないかと考えている。本研究では、 $0.0001 \leq a \leq 0.0008$  の範囲での  $u(a)$  や  $n(a)a$  を算出できなかったが、 $0.001 \leq a \leq 1$  のときの  $u(a)$  や  $n(a)a$  の変動が Moussa ら(2011)の結果と類似していることを踏まえると、Moussa ら(2011)と同様にカットオフエリアが  $0.5 \sim 5 \text{ km}^2$  の範囲において  $0.26 \leq u(a) \leq 0.32$  となるのではないかと考えている。このため、降雨流出モデルを構築する際には、河道が初めて発生する点の上流部の面積が  $0.5 \sim 5 \text{ km}^2$  の範囲になるように設定すれば、流域の地形特性を一定程度に安定して反映したモデル構築が可能になることを示していると考えられる。

また、本研究ではカットオフエリアの割合が  $0.05 \leq a \leq 1$  の範囲において、対象流域が異なると最上流部の割

合の変化の仕方に大きな違いが生じた。これは、既往研究の18流域を対象とした場合でも同様であった。この要因として、流域形状の違いが関係しているのではないかと考えている。羽状形状は中央の本川に沿って左右から小規模な支川が合流するという特徴より、Moussaら(2011)の方法を適用すると、支川が本川に合流するところでセルの値が急に上昇してしまう。放射状流域では比較的同じ規模のいくつかの支川が河口付近で本川に合流するという特徴から、流域全体で考えるとセルの値は河口付近に向かって徐々に大きくなっていく。そのことによってGIS上での河道網の作成に影響し、放射状流域である荒川と羽状流域である阿武隈川で $u(a)$ や $n(a)a$ に違いが生じてしまうのだと考えている。

## 5. 結論

本研究はMoussaら(2011)の方法を流域面積の違う日本の河川を対象とした場合、適用できるのかを検証した。その結果、荒川と阿武隈川の双方とも、カットオフエリア $a=0.001$ のとき $u(a)$ はMoussaら(2011)の研究で示された通りに $0.26 \leq u(a) \leq 0.32$ となった。また、 $a \leq 0.001$ のときも $u(a)$ は $0.26 \leq u(a) \leq 0.32$ になると考えられる。 $a=0.001$ とは荒川流域では $0.24\text{km}^2$ 、阿武隈川流域では $4.96\text{km}^2$ である。これにより、Moussaら(2011)の知見は日本の流域においても適用できる可能性が高いと言える。

今後は、流域形状の違いが関係しているという考えが、Moussaら(2011)が対象とした18流域でも当てはまるのかを調べること、また $0.0001 \leq a \leq 0.0008$ のときの $u(a)$ や $n(a)a$ の結果の別の算出方法を検討することが課題である。

## 謝辞

本研究は、東京大学総括プロジェクト機構「水の知」(サントリー)総括寄附講座、科学研究費補助金(若手研究B, 24760388)、東北大学災害科学国際研究所「特定プロジェクト研究(B-18)」、科学研究費補助金(基盤B, 22360192)の成果の一部である。また、本研究は国土交通省の水文水質データベース、数値地図情報を活用した。ここに謝意を記す。

## 参考文献

- Ku, H. J., Kazama, S. and Sawamoto, M. (2005), Effect of geomorphologic resolution on hydrograph at different scales, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 49, 223-228.
- Moussa, R., Colin, F. and Rabotin, M. (2011), Invariant morphometric properties of headwater subcatchments, *Water Resour. Res.*, 47, W08518, doi:10.1029/2010WR010132.
- Pradhan, N. R., Tachikawa, Y. and Takara, K. (2005), Development of a transferable hydrologic modeling in TOPMODEL framework across scale and region, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 49, 217-222.
- Yoshiyuki Yokoo, So Kazama (2012), Numerical investigations on the relationships between watershed characteristics and water balance model parameters: searching for universal relationships among regional relationships, *Hydrol. Process.*, 26, 843-854, doi: 10.1002/hyp.8299.