

52. 利根川上流域における降雨の空間分布が 河川流量に及ぼす影響に関する研究

清水 雄太¹・吉見 和紘¹・山田 正²

¹中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

²中央大学教授 理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

E-mail: shimi-yu@civil.chuo-u.ac.jp

本研究では、流域における降雨の空間分布が降雨流出に与える影響の解明を目的とし、利根川流域で過去最も被害をもたらしたカスリーン台風を対象に、降雨を流域内で入れ替え、流出計算を行なうことで算出したピーク流量の取り得る幅についての検証、降雨入れ替え前の流量を超過する降雨の空間分布の解明を行なった。

その結果、本研究で対象とする流域の基準点のピーク流量は、降雨の空間分布の違いによって雨を入れ替える前のピーク流量を上回る可能性があることがわかった。また総ボリュームの大きい雨を流域全体に降らすと、基準点でそれぞれの流域から流れてくる流出量のピークが重なり、基準点におけるピーク流量は大きくなることがわかった。

Key Words : peak discharge, deviation of peak discharge, Kathleen typhoon, rainfall distribution

1. はじめに

地球温暖化の影響により台風を始めとした自然現象の極端化が指摘されている^{1),2)}。近年、日本においても2013年に近畿地方に大きな被害をもたらした台風18号のように今までに経験したことのないような雨が発生した。今後も日本各地で同様な規模、もしくはそれを上回る規模の自然現象が発生すること、発生の頻度が増加することが指摘されている。一方で、降雨は計画規模を超えていないにも関わらず、河川水位は計画高水位を超え、氾濫水が周辺地域に浸水被害や家屋の一部損壊をもたらすような出水が三重県雲出川で発生した³⁾。台風の経路は台風毎に違う経路を辿り、降雨量、ピークの生起時間といった降雨特性も台風毎に異なる。同一規模の台風が仮に再来したとしても同一経路を辿るとは限らず、降雨特性、降雨の空間分布も同一とは限らない。つまり、既往の台風と同一規模であるのにも関わらず、降雨パターンの空間的な違いによって水位は計画高水位を超える可能性がある。

本研究は、流域における降雨の空間分布の違いが降雨流出に与える影響の解明を目的とし、利根川流域で過去最も被害をもたらしたカスリーン台風を対象にして降雨を流域内で入れ替え、流出計算を行なうことで算出したピーク流量の取り得る幅についての検証、降雨入れ替え前の流量を超過する降雨の空間分布の解明を行なった。

2. 降雨流出計算手法の概要

(1) 流出計算及び対象流域の概要

対象流域を利根川上流域(流域面積5,110km²)とし、利根川流域に最も被害をもたらしたカスリーン台風を対象に降雨流出再現計算を行なった。織田ら⁴⁾は1次河道が流出計算に与える影響は小さいことを明らかにしている。そのため、本研究では2次以降の河道のみを考慮して計算を行なう。利根川上流域を4流域に分割し、各流域の平均降雨強度を算出し、それらを用いて斜面計算及び、河道計算を行なった。以下に斜面計算の概要を示す。

(2) 鉛直浸透機構を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式の導出

(a) 単一斜面における降雨流出の基礎式

山田ら⁵⁾は従来から流域の最小スケールを単一斜面とし、斜面流下方向流れを Kinematic Wave とし単一斜面における一般化した降雨流出の式を提案している。以下にその概要を示す。一般化した運動則、連続式を q について整理すると(1)式を得られる。

$$\frac{\partial q(t)}{\partial t} + aq(t)^\beta \frac{\partial q(t)}{\partial x} = aq(t)^\beta r(t) \quad (1)$$

ここに、 $q(t)$: 単位幅流量[mm²/h], $r(t)$: 有効降雨強度[mm/h],

α, β : 流出特性を表すパラメータである。

山田らは、直接流出は斜面近傍から発生し、その流出量は斜面長に比例し(2)式のような変数分離形の近似式が仮定することができることを示した。

$$q(x, t) \equiv x q_*(t) \quad (2)$$

ここに、 $q_*(t)$: 流出高[mm/h]。直接流出は斜面末端で発生すると考え、斜面長を L とし、(1)式に代入、整理すると(3)式になる。

$$\frac{dq_*(t)}{dt} = a_0 q_*(t)^\beta (r(t) - q_*(t)) \quad (3)$$

(3)式は単一斜面における斜面流出を表す基礎式となる。

(b) 鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の概要

山地流域における流出現象では、表面流より中間流が卓越することが知られている。そのため大規模出水もしくは斜面深層の流れを考慮した流出計算を行うためには、斜面多層流れを多層構造として扱う必要がある。そこで山田ら⁶⁾は、以下に示す新しい流出計算手法を用いて再現性の向上を試みた。まず、山腹斜面が複数の層で構成されていると考え、 n 層目における鉛直浸透について考える。 $n-1$ 層目から n 層目への浸透量 $V_{n-1}(=b_{n-1}s_{n-1})$ 、 n 層目から $n+1$ 層目への浸透量 $V_n(=b_n s_n)$ と各層における流出に寄与する雨量の連続関係から(4)式を得る。

$$\frac{ds_n(t)}{dt} = V_{n-1}(t) - r_{nm}(t) - V_n(t) \quad (4)$$

各層の流出に寄与する降雨量は(5)式に示すように土層内水位 s_n が各層の保水力を表す土層内の側方成分までの高さ h_{nm} を超えた時点で発生する。

$$\begin{cases} r_{nm}(t) = 0 \\ r_{nm}(t) = a_{nm}(s_n(t) - h_{nm}) \end{cases} \quad (5)$$

さらに、(5)式中の r_{nm} を(6)式中の基礎式に斜面流出に寄与する降雨として与えることで一連の斜面計算が行われる。

$$\frac{dq_{nm}(t)}{dt} = a_{nm} q_{nm}(t)^{\beta_{nm}} (r_{nm}(t) - q_{nm}(t)) \quad (6)$$

ここに、 n : 層数、 m : 各層における側方成分の数である。また、 s_n : 各層の土壌内水位[mm]、 a_{nm} 、 b_n : 各側方成分、浸透成分の比例定数[1/h]、 h_{nm} : 流出成分発生の閾値[mm]、 r_{nm} : 斜面流出に寄与する雨量[mm/h]、 V_n : 鉛直浸透量[mm/h]である。 a_{nm} 、 β_{nm} : 単一斜面における降雨流出の基礎式の a_0 、 β にそれぞれ対応する。また図-1に鉛直浸透を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式概念図を示す。この鉛直浸透機構は、降雨が流出に寄与するまでの遅れ時間や損失雨量を表現することが出来る。鉛直浸透機構における各層側方成分は、流出に寄与する降雨量として(6)式の入力降雨として与えられる。

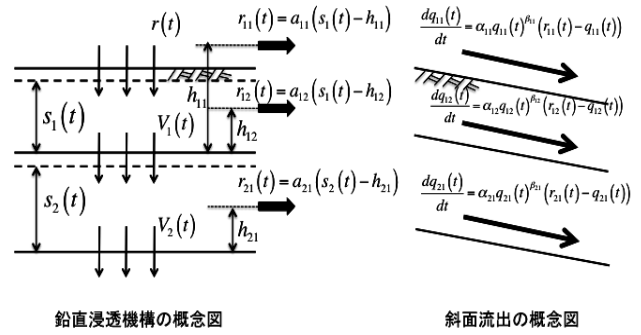


図-1 鉛直浸透機構を考慮した単一斜面における降雨流出の基礎式概念図

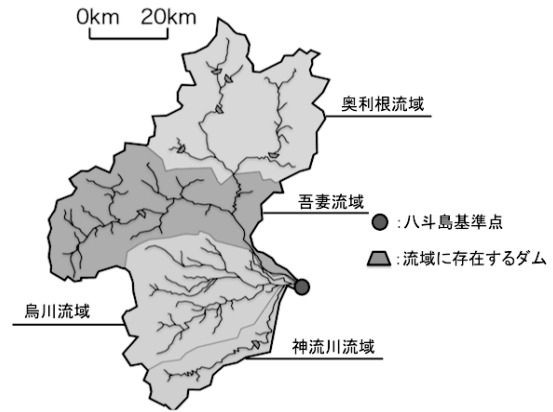


図-2 利根川上流域の河道網

(3) 流域内での降雨の入れ替え手法

降雨の空間分布が流出に与える影響を明らかにするために、利根川上流域を対象として流域内で雨の入れ替え、流出計算を行なったが、以下に雨の入れ替え手法を示す。図-2に利根川上流域河道網を示す。図-2に示すように、利根川上流域を奥利根、吾妻、鳥、神流の4流域に分割し、流域毎の総降雨量は一定にし、雨の降りかたのパターン、つまりハイレートグラフの入れ替えを行なった。また、本研究ではカスリーン台風発生当時の流量を再現するため、ダムの効果は考慮せずに計算を行った。降雨の入れ替えに用いる式を以下に示す。

$$r_j^i(t) = \frac{r_i(t)}{\sum r_i(t)} \times \sum r_j(t) \quad (7)$$

降雨強度の時系列を無次元化

ここに、 $r(t)$: 降雨強度[mm/h]、 i : ハイレートグラフの入れ替えに使う流域の番号、 j : 入れ替え先の流域の番号である。 $i=j$ で実際のハイレートグラフである。例えば、1の流域のハイレートグラフを2の流域に降らせるとすると $i=1$ 、 $j=2$ になる。(7)式の右辺第一項に示すように総降雨量をそれぞれの流域の総雨量で除すことにより降雨を無次元化する。

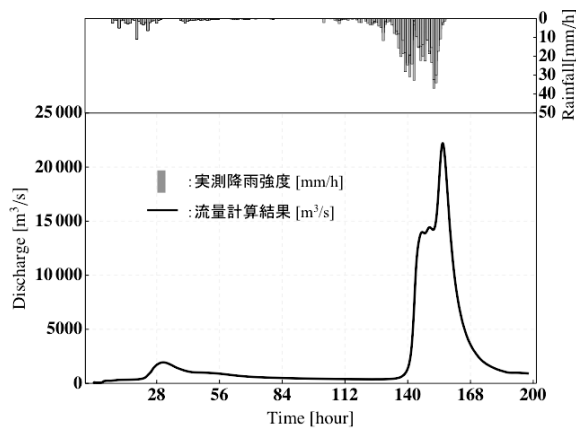


図-3 八斗島流量観測所(河口から181.5km)における流出計算結果

次に入れ替え先の流域の総降雨量を、無次元化した降雨を降らす流域の総降雨量倍することにより入れ替え先の流域の総降雨量を変えずにハイトグラフを入れ替えることができる。降雨を入れ替えることによって得られる降雨パターンは、4流域の降雨を4流域に降らす組み合わせを重複を許して考え256パターン作成し、それぞれの降雨を与え、1パターン毎に斜面計算及び河道計算を行い、八斗島地点における河川流量の検証を行なった。

3. カスリーン台風での雨の入れ替え計算

(1) カスリーン台風の再現計算結果

利根川上流域(流域面積5,110km²)を図-2に示すように奥利根、吾妻、烏川、神流川流域に4分割し各流域毎に流域平均降雨を算出した。その降雨を用いて利根川上流域内の小流域毎に斜面計算及び河道計算を行なった。本流出計算手法によるカスリーン台風の再現計算結果を図-3に示す。国土交通省及び、日本学術会議は貯留関数法を用いてカスリーン台風時の流量再現計算を行っており、それぞれの計算による八斗島地点のピーク流量の再現計算結果は、約22,000m³/sである。図-3に示すように本研究で用いた流出モデルによる八斗島地点のピーク流量の再現計算結果は日本学術会議は約21,200m³/s、国土交通省は約22,100m³/sとなり、どのモデルを用いても八斗島地点でのピーク流量はほぼ一致していることがわかる。つまりカスリーン台風の再現計算には貯留関数法、本流出計算手法のいずれでもよく再現できることを示している。

(2) カスリーン台風における降雨の入れ替え計算結果

図-4に八斗島地点におけるピーク流量を示す。図-4の中央にある黒い太線は入れ替え前のケースのピーク流量を表している。また図-4より各流域内の総降雨量は変わらないが、カスリーン台風のハイトグラフを流域内で

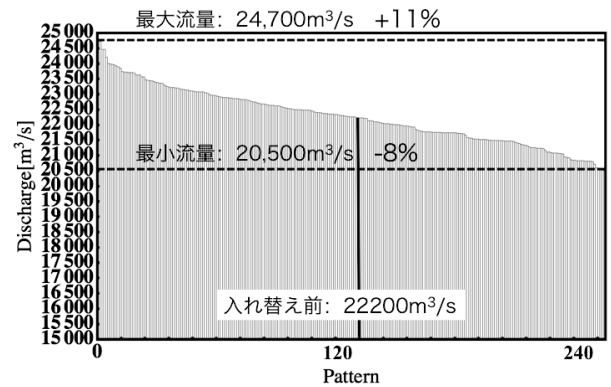


図-4 降雨入れ替え計算結果 Q_{peak} 八斗島地点(入れ替え前の降雨パターンは256ケースの平均に近い値をとる。最大流量は24,700m³/s、最小流量は22,200m³/sとなり、約4,200m³/sの幅が出る。)

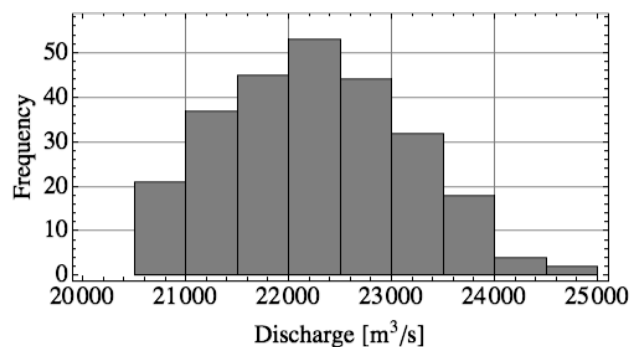


図-5 降雨の入れ替え計算256ケースによるピーク流量のヒストグラム(入れ替え前降雨パターンのピーク流量である22,000m³/sから22,500m³/sが最も頻度が高い。)

入れ替えることにより、八斗島地点のピーク流量は、総降雨量を変えていないだけだが、降雨の空間分布の違い次第で、入れ替え前のピーク流量より約3,000 m³/sも大きくなることがわかった。さらに八斗島地点のピーク流量は入れ替え前に比べて-8%~11%の幅があり、流量にすると、約4,200m³/sの幅があることがわかった。また、図-5に降雨の入れ替え計算256ケースによる八斗島地点でのピーク流量のヒストグラムを示す。図-5に示すように入れ替え前の流量である約22,000m³/s付近に最も多くのパターンが集中しており、降雨パターンを入れ替えただけで多くのパターンが入れ替え前のパターン付近に集中していることはとても興味深い。そのため、他出水でも同様の結果が得られるかどうか検証する必要がある。

(3) 河川流量が最大になる降雨パターンの考察

カスリーン台風時の、流域内で4つのハイトグラフを入換え、斜面計算及び河道計算によって得られた八斗島地点での256ケースのピーク流量の内、ピーク流量上位3位の降雨パターンに着目し、河川流出量が入れ替え

前の降雨パターンより大きくなる降雨パターンの解明を行う。鳥・神流川流域で早いピークの降雨が、奥利根・吾妻流域でピークの遅い降雨が発生した時、八斗島流量観測所付近においてピーク流量は大きく算出されることを明らかにした。これは、近い流域で発生した遅いピークの降雨がゆっくりやって来て、遠い流域で発生した早いピークの降雨が早くやって来る事により、八斗島地点に到達する時間が重なったため、ピーク流量は入替前の降雨パターンと比べ大きくなると考えられる。

4. 降雨規模とピーク流量の取り得る幅の関係

カスリーン台風について降雨入れ替えの影響についての検証を示したが、流域平均降雨強度・降雨量を0.5倍、0.8倍、1.0倍、1.2倍にした場合、ピーク流量の取りうる幅はどのように変わるのか検証を行った。この検証では降雨パターンは各降雨の重複を許さない組み合わせ、つまり4降雨の階乗である24ケースで検証を行った。全降雨24パターンを用いて、斜面計算及び河道計算によって得られた入れ替え計算結果を図-6(降雨強度・総降雨量の引伸率は左から、0.5倍、0.8倍、1.0倍、1.2倍)に示す。図-6に示すように確率密度関数の形状はカスリーン規模の台風と比べ、0.5倍、0.8倍、1.0倍、1.2倍の順に確率密度関数の裾が広がることが分かる。このことから台風の規模が大きくなるほど降雨の空間分布の違いが降雨流出現象、特にピーク流量の取り得る幅に与える影響は大きくなると言える。

5. まとめ

利根川上流域を対象とし、斜面計算及び河道計算を行いカスリーン台風時の八斗島地点での流量再現計算によりモデルの妥当性及び、基本高水ピーク流量の検証、降雨の空間分布が河川流出量に及ぼす影響について検証するために降雨入れ替え計算を行なった。研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)カスリーン台風時のハイエトグラフを流域内で入れ替えることにより、流域での総降雨量を変えずに、八斗島でのピーク流量について、取りうる幅があることを明らかにした。その幅は入れ替え前のピーク流量に対して-8%~11%の幅があることがわかった。
- (2)入れ替え計算結果から入れ替え前の流量である約22,000m³/s 付近に最も多くのパターンが分布しており、降雨パターンを入れ替えただけで最も多くのパターンが入れ替え前のパターン付近に集中していることがわかった。その結果から他出水でも入れ替え計算を多くのパターンで行い検証する必要がある。
- (3)降雨の入れ替え計算結果から、八斗島基準点のピーク

引伸ばし率	×0.5	×0.8	×1.0	×1.2
総降雨量	190mm	310mm	390mm	430mm
Q	6,700m ³ /s	17,100m ³ /s	22,000m ³ /s	26,500m ³ /s

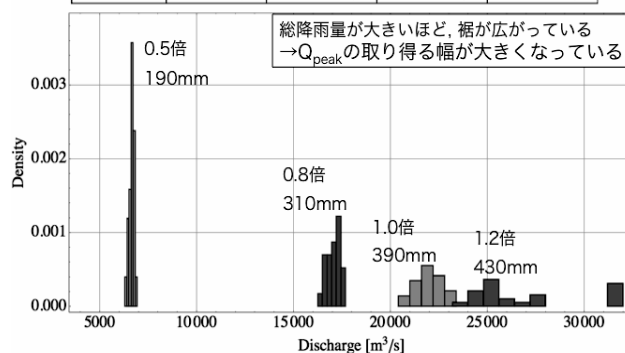


図-6 降雨強度・総降雨量引伸した降雨の入替計算によるピーク流量の度数分布

流量は規模が同じ降雨でも降雨の空間分布の違いによって実測の流量より大きくなる可能性があることを示した。

- (4)降雨強度、総降雨量をカスリーン台風時の0.5~1.2倍のハイエトグラフを流域内で入替えることにより、八斗島地点でのピーク流量について検証した結果、カスリーン台風入替計算同様、取り得る値に幅がある事を明らかにし、0.5倍、0.8倍、1.0倍(Kathleen 台風の降雨入替計算)、1.2倍の順にピーク流量の取り得る幅は大きくなることを明らかにした。

謝辞

本研究は科研費基礎研究(A)「可能最大洪水に対応できる数理科学的な河川計画手法の確立」(代表者、山田正)の支援を受けて行なわれたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) IPCC, 2007:Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis.
- 2) IPCC, 2013:Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- 3) 国土交通省、平成23年台風12号災害の報告
- 4) 田名辺剣児, 織田賢太, 岡部真人, 山田正:降雨流出計算における河道効果の検証, 土木学会第64回年次学術講演会論文集, II-156, 2009.
- 5) 呉修一, 山田正, 吉川秀夫: 表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol. pp167-174, 2005.
- 6) 吉見和紘, 山田正: 鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の長短期流出解析への適用, 土木学会水工学論文集 Vol.70, pp.367-372, 2014.