

降雨特性の違いが洪水ピーク流量に与える影響
—利根川上流域を例として—

吉見和紘, 山田 正, 土屋信行

**Journal of the Institute of Science
and Engineering**

CHUO UNIVERSITY

Vol.18 2012

.....
中央大学理工学研究所論文集 第18号 2012年

降雨特性の違いが洪水ピーク流量に与える影響

-利根川上流域を例として-

吉見和紘*, 山田正*, 土屋信行**

Effects of Rainfall Characteristic on Peak Discharge of Flash Flood - Upper Tone River Basin -

Kazuhiro YOSHIMI*, Tadashi YAMADA* and Nobuyuki TSUCHIYA

Abstract

It is needed to clarify the effects of difference in rainfall pattern on runoff phenomenon for the further development of the flood control measures including dam control. Elucidating those effects are very useful to examine flood control plan.

In this study, we made virtual rainfall patterns based on Typhoon Kathleen in September 1947 in Tone upper river and examined the effects of difference from rainfall pattern we created on runoff phenomenon. As a result, it was indicated that peak discharge at Yattajima point of observation was up 15 percentage point from peak discharge at Typhoon Kathleen depending on rainfall pattern.

1 はじめに

気候変動に伴い降雨形態の変化が予測される中、降雨パターンの違いが流出現象に与える影響を解明する事は、従来から行われてきた多様な治水手法の組み合わせによる総合的な治水対策の更なる発展に寄与し、治水計画を検証する上で非常に有益である。

近年、地球温暖化による降雨形態の変化などの問題が指摘されている。実際、様々な機関から近年の異常気象や長期的な気候変動に関して報告書が発行されている。例えば、IPCC第4次報告書[1]に示されるように、地球温暖化による降雨形態の変化が予測されている。IPCC第4次報告書では、20世紀後半、北半球中・高緯度域においては、大雨の発現頻度が2~4%増加した可能性が高いと述べられるとともに、自然現象の極端化、例えば、将来の温暖化した気候において、夏季はより乾燥し渇水の危険性が高まり、冬季はより湿潤となり強い降水や洪水の危険性が增大すると指摘されている。

以上より、降雨パターンの違いや降雨強度の増大による流出現象への影響を明らかにする事は、我が国における総合的な治水対策の確立のためにも重要であると考えられる。本論文では、利根川上流域を対象として、降雨パターンの違い及び降雨強度の増大がピーク流量に与える影響について検証した。

2 単一斜面における降雨流出の基礎式の概要

降雨の斜面流下方向流れに関する流出計算手法はKinematic Wave法が代表的であり、流出形態が表面流をとるとしManning則を用いて表現する試みが多くなされている。しかしながら、斜面における流れの状態は地表面形態や土壌内水分量に応じて変化し、全てを表面流として扱うのは現実的ではない。

山田[2]は、従来から単一斜面における一般化した降雨流出の基礎式を提案している。以下にその理論

*中央大学理工学研究所 東京都文京区春日1-13-27

**公益財団法人えどがわ環境財団 東京都江戸川区中央1-3-13

の概要を記す。単一斜面に対して幅広矩形断面を想定するとともに、様々な流出形態に対応するため運動則を(1)式に示すように、断面平均流速は水深のべき乗に比例するという形式で表現する。一般的な Kinematic Wave 理論における(1)式の表現は、著者らの記述方法とは異なり、単位幅流量 q が水深のべき乗に比例する形式で記述する事が多いのでべき数 m の値に注意されたい。連続式に関しては(2)式で表現される。(2)式と(1)式より単位幅流量 q についての(3)式を得る。

$$v = \alpha h^m, \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \alpha q^\beta \frac{\partial q}{\partial x} = \alpha q^\beta r(t) \quad (3)$$

$$a = (m+1)\alpha^\beta \quad (4)$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} \quad (5)$$

ここに、 v : 断面平均流速[mm/h], h : 湛水深[mm], q : 単位幅流量[mm²/h], $r(t)$: 降雨強度[mm/h], α , m は流域特性を表すパラメータである。直接流出は流出寄与域(河道及び河道近傍の湿潤領域)のみからの流出と考え、流出寄与斜面長は実地形上の斜面長より十分短いものと考えられ、(6)式に示す変数分離形の近似式が仮定できる。

$$q(x, t) \cong xq_*(t) \quad (6)$$

ここに、 q_* : 流出高[mm/h]である。また、流出寄与斜面長 L の末端で考え $x=L$ として(6)式を用いると、偏微分方程式である(3)式は(7)式に示すように流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (7)$$

$$\text{ただし,} \quad a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\left(\frac{\alpha}{L}\right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (8)$$

(7)式が一般化された単一斜面からの降雨流出の基礎式となる。土壤・地形特性を示す流出パラメータ a と m の値に関して志村ら [3] は、鈴木 [4] [5]、窪田ら [6] の不飽和浸透理論と Kinematic Wave 法の式展開の比較により式(9), (10)で示されるように、土壤・地形特性から決定できる事を示している。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (9)$$

$$m = \gamma - 1 \quad (10)$$

ここに、 i : 斜面勾配, D : 表層土層厚[mm], k_s : 飽和透水係数[mm/h], w : 有効空隙率であり、 $w = \theta_s - \theta_r$ (θ_s : 飽和含水率, θ_r : 残留含水率)で定義される。また、 γ は不飽和浸透を考える際の特有の無次元パラメータで、浸透流の通減特性を表す。これにより、斜面流下方向流れに関して飽和・不飽和側方流を対象とする場合、土壤・地形特性から流出パラメータを決定し降雨流出計算を行う事が可能である。

また、一般的に洪水現象は複数の流出成分により構成されると考えられるため、山地流域における大規模出水の降雨流出計算を行うためには、表面流、飽和・不飽和側方流、地下水流などから構成される斜面内多層流れを考慮した流出計算手法が必要である。そこで、呉ら [7] は、(11)式に示す表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流に関する多層流れを考慮した降雨流出計算手法を(7)式の流出高に関する常微分方程式を基礎式として提案している。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) \quad \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) \quad \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - k_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) k_s} \frac{(q_0 - k_s)^2}{(h_s + h_k)} \quad \dots \text{鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 - q_s \quad \dots \text{湛水深} \\ q_T = q_s + q_* \quad \dots \text{全流出高} \end{array} \right. \quad (11)$$

ここに、 q_* :飽和・不飽和側方流に関する流出高[mm/h], q_s :表面流に関する流出高[mm/h], q_T :全流出高[mm/h], q_0 :鉛直浸透流[mm/h], h_s :湛水深[mm], h_k :湿潤線での毛管負圧[mm]である。表面流は Manning 則をとり、抵抗則 $m_s=2/3$, $a_s=i^{1/2}/n$ で表され、表面流に関する流出パラメータ a_s および β_s が求まる。ここで、 n は斜面表層における Manning の粗度係数である。本解析手法は、既往の研究 [2] [7] によりその信頼性について十分に検証されたものである。呉らは、草木ダム流域を対象として流出計算を行った結果、中規模出水時は中間流のみで、大規模出水時は表面流がピーク付近で発生することで、実測ハイドログラフを概ね再現可能であることを示している。

さらに本解析手法は、ハイドログラフのピーク値の再現性が極めて良好である事が上述の研究により示されている。しかし、表面流と中間流の2層構造で土壌を表現した流出モデルであり、二峰性の降雨イベントや先行降雨が長く降り続く降雨に対しては、ハイドログラフの立ち上りや逡減部の再現性に限界が見られる事も事実である。これは土層構造を鉛直方向に増やし、更に遅れてくる流出成分を考慮することで解決される問題である。著者らは今後これらの問題を解決すべく、本解析手法の改良が必要であると考えているが、ピーク値の再現性に焦点を当てた本稿では、本解析手法の再現精度で十分に以下の検証が可能であると考え検証を行った。

3 対象流域と計算方法

3.1 対象流域

対象流域はFig-1に示すように、利根川上流域（流域面積5110 km²）とし、懸案地点は最下流端に位置する八斗島基準点とした。また、利根川上流域は奥利根流域(1670km²), 吾妻川流域(1680km²), 烏川流域(1320km²), 神流川流域(440km²)の4つの中流域に大別される。八斗島基準点の基本高水流量22000m³/sであり、この値は既往最大洪水であるS22年9月洪水（カスリーン台風）から算出した値である。本稿では、S22年9月洪水及びS22年9月洪水を基に作成した擬似降雨を対象とした流出計算を行った。



Fig-1 Upper Tone river basin with the location of main 6 dams, river network of Strahler number of only two-to-four and Yattajima points. (at 181.45 km mark from the river mouth)

3.2 計算条件

本稿では上述の表面流, 鉛直浸透流, 飽和・不飽和側方流に関する多層流れ

を考慮した降雨流出計算手法(式(11))により斜面流出計算を行い、その出力を境界条件として各河道上流端に与える事で、斜面と河道を結び付け、流域上流端から流域下流端までの降雨流出計算を行っている。

河道部では、連続式(12)式と運動量保存式(13)式を用いて一次元不定流計算を行なっている。水位計算点と流量計算点を異なる格子点で定義し計算を行う 6-point Abbott Scheme によって解いている。

また、河道位数の概念に基づいて全流域面積を河道長の比で重み付けし、142のサブ流域(奥利根流域:28分割、吾妻川流域:54分割、鳥流域:52分割、神流川流域:8分割)に分割している。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{12}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \tag{13}$$

ここに、 A : 通水断面積[m²]、 Q : 流量[m³/s]、 q : 側方流入単位幅流量[m³/s]、 α (=1.0): エネルギー補正係数、 g : 重力加速度[m/s²]、 n : Manningの粗度係数、 R : 径深[m]である。

3. 3 流出パラメータの空間的な分布

Odaらの研究[8]により、利根川上流域程度の流域面積であれば、水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響は小さく、流域平均値としての水文諸量を用いれば、流出計算結果にほとんど差異が表れない事が示されている。以上より本稿においては、斜面長 $L=30$ [m]、表層土層厚 $D=20$ [cm]、有効空隙率 $w=0.42$ 、斜面勾配 $i=15^\circ$ 、抵抗則 $m=4$ を各中流域に一样に与えた。これらの水文諸量は、既往研究により利根川水系渡良瀬川流域を対象とした流出計算時に同定した値及び、中央大学が所有する春日試験地で実際に観測された値を参考に決定されており、現在考え得る最良のパラメータであるとして流域一样に与えている。

4 降雨強度の違いとピーク流量の関係

4. 1 吾妻川上流域の降雨量分布

吾妻川上流域は、利根川上流域の中でも従来から降雨量が少ない[9][10]とされており、実際に昭和22年9月洪水時も吾妻川流域の流域平均降雨量は他の中流域の流域平均降雨量と比較して少ない事が知ら

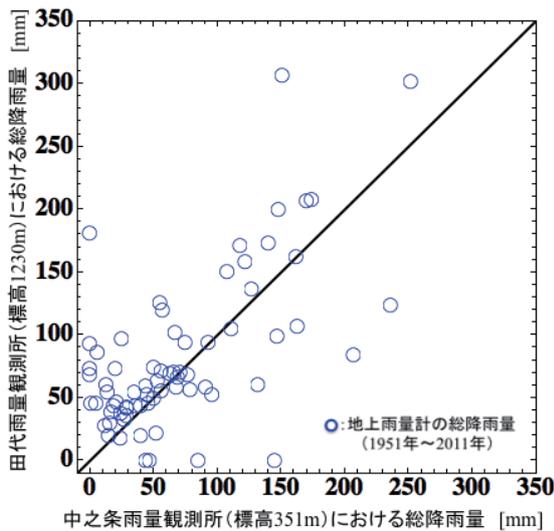


Fig-2 Relation of rain total for each rainfall event at precipitation point of Nakanojyou(351m) and Tashiro(1230m), observation period is 1951-2011.

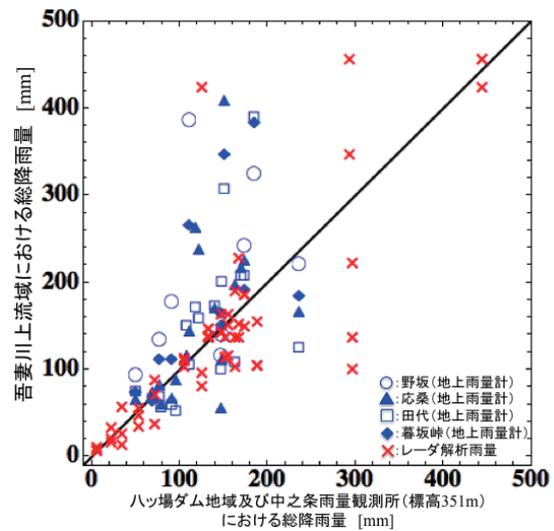


Fig-3 Relation of rain total for each rainfall event on upper and middle Agatsuma river basin using precipitation of radar analysis and precipitation observed on the ground, observation period is 1995-2008.

れている。

4. 1. 1 単体の雨量観測所同士の比較（上流域と中・下流域で1点ずつ選定）

吾妻川中・下流域代表地点として Fig-1 に示す中之条雨量観測所（標高：351m），上流域代表地点として田代雨量観測所（標高：1230m）を選定し，両雨量観測所における60年間の降雨量データから，標高と総降雨量の関係を検証した。本論文における吾妻川上流域，中流域，下流域の区分は Fig-1 に示すとおりである。検証結果を Fig-2 に示す。上流域代表地点と中・下流域代表地点の単一降雨イベントの総降雨量を比較すると上流域では平地部よりも最大で2倍近い降雨が発生する降雨イベントがある事がわかった。

4. 1. 2 複数の雨量観測所との比較及びレーダ解析雨量を用いた比較

4. 1. 1の結果に加えて，Fig-2 から局地的な降雨イベントが存在することがわかる。また，4. 1. 1の検証は点同士の比較であり空間的な降雨分布を知るためには情報量が少ない。よって，地上雨量計を用いた空間的な比較及びレーダ解析雨量を用いて上流域と中流域で空間的な比較を行った。結果を Fig-3 に示す。Fig-3 に示す青い点は，中之条雨量観測所（標高：351m）の総降雨量と暮坂峠雨量観測所（標高：1110m）及び吾妻川上流域に位置する野坂雨量観測所（標高：1490m），応桑雨量観測所（標高：1100m），田代雨量観測所（標高：1230m）のそれぞれの総降雨量を比較したものである（観測期間：1998-2008）。赤い点は，吾妻川中流域と上流域のレーダ解析雨量から得た総降雨量である（観測期間：1995-2008）。

どちらの比較においても，単一降雨イベントにおいて0.5倍～2.0倍近い降雨量が観測されている事がわかった。吾妻川上流域は，上述の通り，中・下流域で小降雨の際に上流域で大雨が発生している降雨イベントもある事がわかった。

4. 2 吾妻川上流域の降雨強度の違いが八斗島基準点の洪水ピーク流量に及ぼす影響

従来から雨が降りにくいとされていた吾妻川上流域で多くの降雨が観測された場合，八斗島基準点の流量がどのようになるか検証した。つまり，吾妻川上流域の降雨量の変化が八斗島基準点の流量に与える影響を検証するため，同流域以外は昭和22年9月洪水時の降雨量と全く同じ降雨量を用いて計算した。4. 1の結果を踏まえ，昭和22年9月洪水時中之条雨量観測所（標高：351m）で得られた降雨量から，類推した降雨量を田代雨量観測所地点（標高：1230m）に与えて流出計算を行った。与えた降雨量は，中之条雨量観測所で得られた時間降雨量を1.5倍及び2倍に引き伸ばした降雨量である。これらと田代雨量観測所には降雨を与えず中之条雨量観測所で観測された降雨量のみを用いた場合の計算結果（以下，昭和22年9月洪水計算と呼ぶ）を比較することにより，八斗島基準点におけるピーク流量の差異を検証した。また，昭和22年洪水時は八斗島基準点の流量時系列データが存在しないため，現行の基本高水流量と計算値の比較を行う。この基本高水流量は昭和22年9月洪水，昭和57年9月洪水，平成10年9月洪水等の既往洪水について検討した値を元に決定されたものである。

流出計算を行った結果を Fig-4 に示す。以下に示す計算結果は，いずれの場合も吾妻川流域に洪水制御施設がない場合のものである。洪水ピーク流量はいずれの場合も八斗島基準点において比較している。昭和22年9月洪水計算時のピーク流量は22085 m³/sであり，八斗島基準点の基本高水流量と比較をするとその差はわずか0.4%であるこ

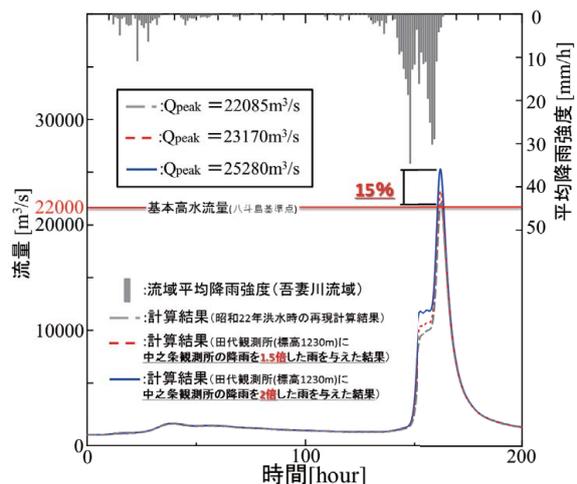


Fig-4 Effect of increase in precipitation at upper Agatsuma river basin on discharge at the target point.

Table-1 Relation among average precipitation of upper Tone river basin and peak discharge of flash flood at Yattajima point.

	利根川上流域の 流域平均降雨量の増加割合	八斗島基準点の ピーク流量の増加割合
昭和22年9月洪水計算	1.00 (352[mm])	1.00 (22085[m ³ /s])
1.5倍降雨計算	1.03	1.12
2.0倍降雨計算	1.06	1.15

とから、本解析手法を用いたピーク流量検証は妥当なものだと考える。

中之条雨量観測所で得られた降雨を1.5倍に引き伸ばし、田代雨量観測所に与えた場合（以下、1.5倍降雨計算と呼ぶ）の八斗島基準点の洪水ピーク流量は、昭和22年9月洪水計算時の洪水ピーク流量より12%増加する事がわかった。また同様に、中之条雨量観測所で得られた降雨量の2倍の雨を田代雨量観測所に与えた場合（以下、2倍降雨計算と呼ぶ）の八斗島基準点の洪水ピーク流量は、昭和22年9月洪水計算時の洪水ピーク流量より15%増加する事がわかった。Fig-4に示す通り、先行降雨の影響により、土壌が飽和に近い状態で主要降雨イベントが発生したからであると考えられる。また、流域平均降雨量の増加率に対してピーク流量の増加率が大きいのは、昭和22年9月洪水時の降雨ハイトグラフが短時間集中型である事が理由の1つであると考えられる。

Table-1に示す通り、利根川流域の流域平均降雨量の増加率が約6%に対して、八斗島基準点の洪水ピーク流量の増加率が約15%である事は非常に興味深い。

5 まとめ

従来から降雨量が少ないとされていた吾妻川上流域では、下・中流域の降雨量に比べて多くの降雨量が観測される降雨イベントがある事を示した。また、吾妻川流域の降雨量の増加が八斗島基準点の洪水ピーク流量に与える影響について利根川上流域を対象として検証した。以下に本稿で得られた結論を列挙する。

- 1) 吾妻川流域の高地と低平地において、単一降雨イベントの降雨量を比較すると、高地では低地の約0.5～2.0倍の降雨量が観測されるケースがある事がわかった。
- 2) 1)を踏まえ、吾妻川上流域の降雨量の変化が八斗島基準点の流量に与える影響を検証するため、本流出計算手法を用いて計算した。その結果、利根川上流域の流域平均降雨量に換算して流域平均降雨量を3～6%増加させた流出計算を行った場合、八斗島基準点において、洪水ピーク流量が12～15%の上昇する事を示した。

参考文献

- [1] IPCC,2007: CLIMATE CHANGE 2007 -The Physical Science Basis-,IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT, Technical Summary, pp.19-92, 2007.
- [2] 山田正:山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol.47,pp.259-264,2003.
- [3] 志村光一, 大原憲明, 松本浩志, 山田正:水理計算に基づく大規模河道網の洪水流出特性に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol.14,No.3,pp.217-228,2001.
- [4] 鈴木雅一:山地流域の基底流出逓減特性(I), 日林誌, Vol.66,pp.174-182,1984.
- [5] 鈴木雅一:山地流域の基底流出逓減特性(II), 日林誌, Vol.66,pp.211-218,1984.
- [6] 窪田順平, 福冨義宏, 鈴木雅一:山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化(II)ー水収支および地下水発生域の検討ー, 日林誌, Vol.70,No.9,pp.381-389,1988.
- [7] 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.49, pp.169-174, 2005.
- [8] K Oda, S Kure, T Yamada, R Ebana, A Watanabe, N Watanabe: Effects of Special Distribution of Hydrological Characteristics to Runoff, World City Water Forum, CD-ROM, 2009.
- [9] 糸川和弘, 荒川貴志, 岡部真人, 山田正:統計学を用いた大雨の発生頻度と周期性に関する研究, 水文水資源学会研究発表会, pp.210-211,2010.
- [10] 公益社団法人土木学会水工学委員会日本のかわと河川技術を知る(利根川)編集委員会:日本のかわと河川技術を知る~利根川~, 丸善出版, 2012.