

降雨の空間的なばらつきが 河川の洪水ピーク流量に与える影響に関する研究 The relationship between spatial distribution of rainfall and flood peak discharge in a river

16N3100016J 佐藤 憲弥 (河川・水文研究室)
Kenya SATO/ River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : spatial distribution, rainfall, uncertainty, peak discharge

1. はじめに

私たちは、雨粒を連続的に捉えられていない。私たちが、どのくらい雨が降ったのかを知ろうとするときに認識可能な雨は、転倒柵形地上雨量計によって観測されたもの、或いは、レーダ雨量計によって雨粒を間接的に観測されたものであり、いずれも流域に降った雨を一粒ずつ連続的に認識しているわけではない。つまり、私たちが観測によって認識できる雨には認識不足によって知りえないもの(不確実性)が含まれていることが分かる。このような水文諸量における不確実性を扱う先行研究として吉見・山田¹⁾は、流出解析に確率過程論を導入し、流出高に関する Fokker-Planck 方程式を導出することにより、降雨の不確実性と流出高の確率密度関数の時間発展の関係を明らかにしている。また、私たちが観測によって認識できる雨にも不確実性は含まれている。流域に降った雨の総量は、流域内の複数の観測点の雨量を平均することで算出される。しかし、雨は空間的に一様に降っているわけではなく、空間的なばらつきを持っているため、観測点の場所によって私たちが観測によって認識できる雨が異なる。つまり、観測点の場所や平均する観測点の個数によって、算出される雨の総量に不確実性が存在する。このような雨量データの空間分布の違いによる不確実性は、雨量データが密にある日本でも、まだ整備の進んでいない新興国でも考慮するべき問題であると考えられる。

近年、気候変動により水災害が激甚化しており、東南アジアの新興国では甚大な被害がもたらされている。このような水災害を防ぐためには、ハード・ソフトの両面から流域を整備していくことが重要であると考えられる。しかし、新興国では降雨量などの水文データが観測されていないことや、個数が少ないために、精度の高い流域平均雨量の算出が一般に困難である。そのため、十分な数の雨量計の整備が重要な課題であると言える。また、日本では、2016年8月の1ヶ月間で北海道に台風が4個が直撃し、河川の氾濫により多大な被害がもたらされた。これを受けて国土交通省は、日本

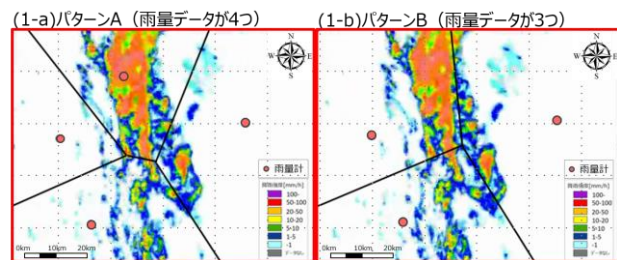


図-1 雨域と雨量データの位置図

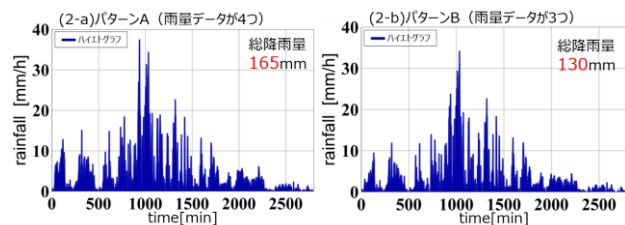


図-2 流域平均雨量のハイトグラフ

雨量データが少ないパターンBでは、同一の雨にも関わらずパターンAに比べて雨域を捉えられていないため、流域平均雨量が小さく推定されている。

で初めて気候変動を考慮した河川整備計画の策定を北海道で開始した²⁾。河川整備計画の中で、観測点の個数や位置が流域平均雨量の算出に与える不確実性に関して議論しているが、まだ定量的に評価されていない。

以上を踏まえ本研究では、日本や新興国の雨量計の少ない地域においてどのように雨量計を整備していくか、雨量計の空間解像度(位置や個数)が流域平均雨量に与える不確実性を定量的に評価することを目的として、雨量計の個数や位置による流域平均雨量の不確実性が河川の流量に与える不確実性を明らかにする。

2. 雨量データの空間分布の違い

雨量データの空間分布の違い(観測点の位置や個数の違い)による不確実性の一例を示す。図-1は、赤枠で囲われた仮想の流域において、実測の雨域を重ねたものである。図中の赤点は観測点、黒線は隣り合う観測点との垂直二等分線を表しており、仮想の流域が複数の小流域に分割されている。図-2は、ティーセン法によって求められたそれぞれの流域の流域平均雨量のハイトグラフである。図-1(1-a)には観測点が4つ、図-1(1-b)には観測点が3つある。図-1(1-b)では観測点が少ないた

め図-1(a)で捉えられている雨域を捉えられていないことがわかる。そのため、同一の降雨であるが、図-2の(a)で算出された流域平均雨量が図-2の(b)ものよりも多くなっている。

3. 対象流域と流出計算手法の概要

まずは、雨量計の個数の違いが流量にどのような影響を与えるのかを検討するために、利根川上流域(流域面積5110km²)を対象流域とし、2015年9月の関東・東北豪雨を対象降雨イベントとして降雨流出計算を行った。

降雨流出計算においては斜面及び河道を対象とした。斜面計算は吉見・山田の提案した鉛直浸透機構と斜面計算を分離した降雨流出モデルを用いた。このモデルは、山腹斜面が複数の層で構成されていると考え、各層における鉛直浸透量と流出に寄与する雨量の連続関係から得られた鉛直浸透機構と、山田によって提案された単一斜面における降雨流出の基礎式を組み合わせた集中型の流出モデルである。河道計算はSaint-Venant方程式と連続式からなる1次元不定流計算を行った。また、呉ら⁴⁾は、流域面積が200km²までは集中型モデルと分布型モデルとでピーク流量やピークの遅れ時間に差がないことを、流出計算のみの算出流量と不定流計算も行い算出された流量との比較により明らかにしており、流域面積200km²を集中型モデルの適応限界としている。上述した既往の研究を踏まえて本研究では、利根川上流域を139のサブ流域に分割し、斜面計算及び河道計算を行った。

4. 雨量データの個数が流量に与える影響

水文データの空間解像度が流量に与える影響を調べるために、利根川上流域において国土交通省が整備している68の地上雨量観測所をこの研究の最大観測所数とし、観測所数を68から35, 17, 10, 5にランダムに間引き、それぞれの個数で求めた流域平均雨量を入力降雨とし、それぞれのケースにおいて降雨流出計算を行った。地上雨量計を間引いた場合の八斗島地点での各ケースの流量ハイドログラフを図-3に示す。雨量観測所数N=17, 35, 68(full)のケースでは、ピーク流量及びハイドログラフの概形にほぼ差がなかった。雨量観測所数N=5, 10のケースでは、全雨量観測所数を用いた場合に比べてピーク流量が小さく、ハイドログラフの概形も大きく異なっていた。これは、降雨を捉える雨量観測所数が少ないため、雨の空間分布が捉えきれず、流域平均雨量が小さくなってしまったためと考えられる。また、雨量観測所数がN=5の方がN=10の時よりも流量が大きくなっており、これはN=5の時の雨量計の観測場所が当該豪雨の強い雨域を観測していたことが要因であると考えられる。

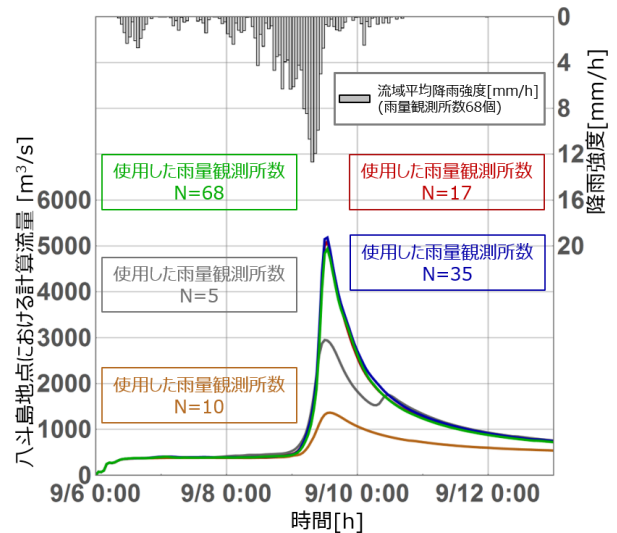


図-3 雨量観測所の数と流量ハイドログラフの関係
 [降雨を捉える雨量観測所の数が少ないと、流量ハイドログラフのピーク流量が最大で80%程度小さくなっている。]

このように、雨量観測所の個数が変化すると、算出される流域平均雨量に差が生じ、下流の流量に影響を与えることが分かった。次に、どの程度密に雨量を観測すれば流量に与える影響が小さくなるのか(不確実性が小さくなるのか)検討を行った。

5. 降雨の空間解像度が流量に与える影響

検討を行うにあたって対象とした流域は、利根川上流域(流域面積5110km²)、安倍川流域(流域面積567km²)、大井川流域(流域面積1280km²)、鶴見川流域(流域面積128km²)、渋谷川流域(流域面積15km²)である。また、対象とした降雨は、2013年以降で各流域において出水の大きかった上位3つの降雨イベントとした。

2で示した呉らの既往研究を参考とし、本研究では、利根川上流域を139のサブ流域、安倍川流域を8のサブ流域、大井川流域を30のサブ流域、鶴見川流域を5のサブ流域、渋谷川流域を5のサブ流域に分割し斜面計算を行った。雨量データの空間解像度が流量に与える影響を検討するために、対象とした5つの流域において雨量データの数を間引き、斜面計算を行った。また、雨量データは、十分に密な流域を再現するためにレーダ雨量計の各格子雨量を雨量観測所1つとし、1時間雨量に算術平均したものを用いた。ただし、降雨のピークが欠測していたり、半分以上が欠測のデータは除外した。また、いずれの場合もティーセン法により求めた流域平均雨量をサブ流域ごとに与えて斜面計算を行った。雨量データの数の間引き方は、各流域において、レーダ雨量計の格子雨量の最大個数から、雨量計1つあたりの支配面積がNkm²となるように任意の個数を決め、その個数に対してランダムに100ケースずつ雨量計を抽出し、それぞれのケースにおいて斜面計算を行った。雨量計1つ

表-1 各対象流域の概要

	抽出個数	流域面積[km ²]	最高値と最低値の標高差[km]	河川長[km]
利根川上流域	m=5,10,17,35,68,100,200,500,1000,5000	5110	2.536	126.7
安倍川流域	m=1,2,5,10,50,100,200,300,500	567	2.013	51.0
大井川流域	m=1,2,5,10,50,100,200,500,1000	1280	3.167	168.0
鶴見川流域	m=1,2,5,10,30,50,100	128	0.170	28.6
渋谷川流域	m=1,2,3,5,10,12	15	0.037	4.6

あたりの支配面積は以下の式より導出する。

$$N = \frac{A}{m} \quad (1)$$

ここに、 N ：雨量計1つあたりの支配面積[km²/個]、 A ：各流域の流域面積[km²]、 m ：抽出した雨量計の個数[個]とする。ただし、 m の値は表-1のとおりである。

6. 流出計算の結果

図-4は、利根川上流域における雨量計1つ当たりの支配面積が150km²の場合の100ケースのハイドログラフをプロットしたものである。横軸は計算開始時刻からの経過時間[h]、縦軸は流量[m³/s]である。図-4より、流量のピークが生じるあたりでハイドログラフに最もばらつきが生じていることが分かる。つまり、雨量データの空間解像度による不確実性がピーク流量に最も影響を与えていると考えられる。次に、ピーク流量が持つばらつきを評価するために、各ケースの流出計算において100本のハイドログラフからピーク流量の変動係数を算出した。変動係数は以下の式で求められる。

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{Q}} \quad (2)$$

ここに、 CV ：変動係数、 σ ：ピーク流量の標準偏差[m³/s]、 \bar{Q} ：ピーク流量の平均値[m³/s]である。

図-5は変動係数と雨量計1つあたりの支配面積の関係を表したものである。図-5より、オレンジ色の点で示す渋谷川流域(都市流域)と他の4つの流域(山地流域)では大きく傾向が異なることがわかる。そこで、都市流域と山地流域に分けて考察した。

都市流域で変動係数のばらつきが小さくなるのは雨量計の支配面積が0.1km²/個程度の時である。これは、都市のように流域の表面がコンクリート等で覆われていて流出が早い流域では、雨量計で認識される雨がほぼ100%流出に寄与するため、1つ1つの雨量計で観測される降雨が流量に大きな不確実性を与えるためと考えられる。

山地流域では、雨量計1つあたりの支配面積が10km²以下では、洪水ピーク量の変動係数(洪水ピーク流量のばらつき)はほぼ横ばいである。それに対して、雨量計1つあたりの支配面積が10km²以上になると、洪水ピーク流量の変動係数(洪水ピーク流量のばらつき)は、

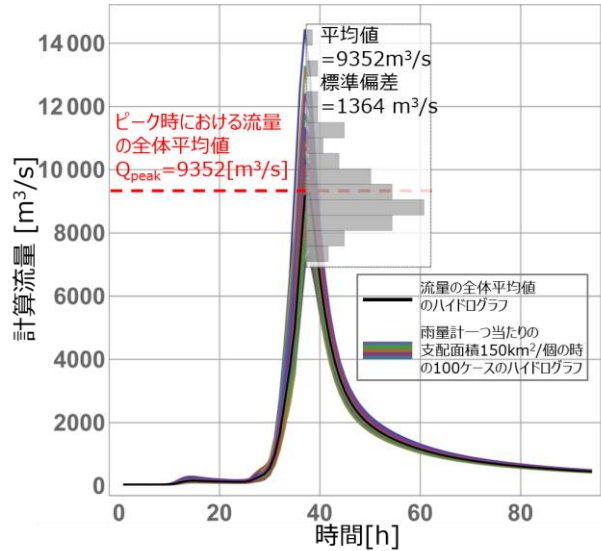


図-4 流出計算結果の一例

100本のハイドログラフのばらつきが、流量のピークが生じるあたりで最大となっており、雨量データの空間解像度の不確実性が洪水ピーク流量に最も影響を与えていると考えられる。

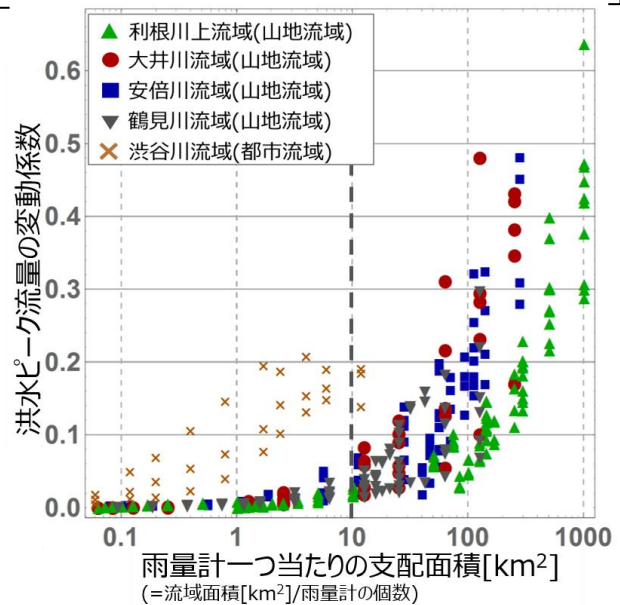


図-5 雨量計1つあたりの支配面積と変動係数の関係

都市流域では、支配面積が大きくなるに従い変動係数が大きくなるが支配面積が5km²より大きくなるとほぼ横ばいになる。山地流域では、支配面積が10km²より大きくなるにつれて変動係数が増加するが、支配面積が10km²以下ではほぼ横ばいになる。

雨量計1つあたりの支配面積が大きくなるにつれて増加している。流域に雨量計が少ない場合、洪水ピーク流量のばらつきは流域によらず大きくなることが分かる。

これは流域平均雨量が1つ1つの雨量観測所の影響を顕著に受けるためであるといえる。

7. 流域特性を考慮した考察

図-6は、降雨イベントごとの変動係数の平均値とそれぞれの流域の回帰直線(直線)及び雨量計1つあたりの支配面積が同一の時の変動係数の値をプロットしたものの(点線)である。図-6より、雨量計1つあたりの支配面積が10km²より大きい範囲では、流域ごとに変動係数の増加の傾向が異なる。これは、流域ごとに流域の特性(面積、標高差、河川長等)が異なるためと考えられる。

そこで、変動係数と雨量計1つあたりの支配面積の関係について流域特性を考慮して検討する。流域特性は、流域形状係数と流域平均勾配を考える。流域形状係数と流域平均勾配は以下の式より導出される。

$$F = \frac{B}{L_m} = \frac{A}{L_m^2} \quad (3)$$

$$M_s = \frac{E_{max} - E_{min}}{L_m} = \frac{\Delta E}{L_m} \quad (4)$$

ここに、 F ：流域形状係数、 L_m ：河川長[km]、 B ：流域平均幅[km]、 A ：流域面積[km²]、 M_s ：流域平均勾配、 ΔE ：流域内の標高値の最大値と最小値の差である。

算出された流域特性を表-2に示す。表-2より、利根川上流域と大井川流域で流域平均勾配が相対的に等しく、安倍川流域と鶴見川流域で流域形状係数が相対的に等しいことがわかる。そこで、それぞれの組み合わせで比較することで流域特性の影響を検討する。

図-6より、利根川上流域と大井川流域の回帰直線を比較すると、同一の支配面積に対して大井川流域のほうが変動係数が大きくなることがわかる。つまり、流域形状係数が小さい(流域の形が縦に長い)ほうが変動係数が大きくなると考えられる。次に、鶴見川流域と安倍川流域の回帰直線を比較する。図-6より同一の支配面積に対して安倍川流域のほうがわずかに変動係数が大きくなることがわかる。つまり、流域平均勾配が大きい(流域内の標高差が大きい)ほうが変動係数が大きくなると考えられる。

以上より、流域の形が縦に長く流域内の標高差が大きいほど、雨量計の個数が少ない場合に流域平均雨量の不確実性が大きくなるといえる。これは、山田ら⁴⁾によって示されているように、山地では平地に比べ3割程度雨が増えるため、雨量計の個数が少ないと山地部と平地の降雨量の違いを捉えられないためと考えられる。

8. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・雨量データの空間解像度が粗いほど、洪水ピーク流

表-2 各対象流域の流域特性値

流域	流域形状係数	流域平均勾配
利根川上流域	0.32	20.01
安倍川流域	0.22	11.12
大井川流域	0.05	18.85
鶴見川流域	0.16	5.94
渋谷川流域	0.70	7.97

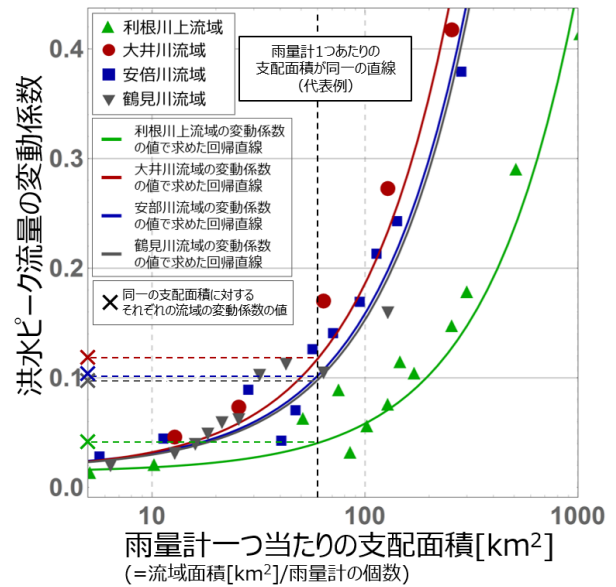


図-6 雨量計1つあたりの支配面積と変動係数の関係

降雨イベントごとに平均) (流域の形が縦長で、流域内の標高差が大きい流域では同一の支配面積に対して洪水ピーク流量の変動係数が大きくなる。

量の不確実性は大きくなる。したがって、観測が密に行われていない場合、1つの雨量計の欠測が洪水ピーク流量に大きな不確実性を与える。

- ・雨量計が約3km×3kmに1つある場合、雨量データの空間解像度による不確実性はほぼなくなるといえる。
- ・雨量計1つあたりの支配面積が10km²より大きい範囲では、流域の形が縦長で流域内の標高差が大きいほど洪水ピーク流量の不確実性は大きくなる。

参考文献

- 1) 吉見和紘：確率過程論に基づいた降雨流出過程における不確実性評価の理論的枠組みの提示，土木学会論文集，Vol72,No4,I-1225-1230,2016
- 2) 第2回平成28年8月北海道激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会 配布資料
- 3) 吳修一，下坂将史，山田正：降雨流出における流域スケールに応じた斜面と河道の効果に関する研究，水工学論文集，第51巻，pp-259-264,2007
- 4) 山田正，日比野忠史，荒木隆，中津川誠：山地流域での降雨特性に関する統計的解析，土木学会論文集，No.527,pp1-13,1995