

沖縄における降雨特性と都市河川の流出特性に関する研究

－沖縄県安里川を対象として－

沖縄県庁土木建築部 岩田将弥
琉球大学工学部 小野尋子

1. 研究の背景と目的

近年の気候変動に伴い局地的集中豪雨の増加により、「治水上の問題」として揚げられる。

河川の流出特性解析は、高強度降雨時の治水対策を目的とした流出特性解析と平常時の流出解明では異なる。

工学的に治水対策を目的とした場合、主に明らかにすべき事象は降雨に対して「水位のピークの高さや経過時間が合うこと」の予測が可能となることが重要。

しかし、その一方で、応答モデルでは、流域土地利用の変化による影響を内在化することができないという課題が残る。

発生源的対処方法として求められる基礎的知見を得るために、流域の土地利用が流出にどのように影響を与えるか、流出特性を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法と対象河川概要

研究の方法

- ①沖縄県が管理している雨量観測所の9ヶ月間分の雨量データ（10分間値）を用いて、雨の降り始めから降り終わりまでの降雨現象をまとめ、クラスター分析により降雨のパターンを類型化する。
- ②①で類型化した降雨パターンと雨量観測所とセットにされている水位観測所のデータ（10分間値）を用いて、都市中心部に位置する河川の水位を抽出及び比較し、流出特性の実態把握する。

対象河川と被害状況

安里川は、流路延長 13.60km、流路面積 13.17 km²の二級河川であり、蛇行が激しく、流域は都市化し、両岸とも既設護岸いっぱいまで民家が建ち並び、河積が狭小なため、台風や梅雨時には豪雨による洪水被害に見舞われており、多大な被害を被っている事もあり、流出特性の把握と対応が求められる。安里川の地質は、下流から中流にかけての一带が沖積層となり、真嘉比川流域及び安里川上流域には島尻層群の泥岩を主体とする地層が広がる。また、首里城跡周辺には琉球石灰岩が見られ、数多くの湧水地が分布する。観測の基準点は、水位高を連続計測しているひめゆり観測所を基準とした。降雨が流下し河川に流れ込む範囲を集水域と呼び、Arc GIS を用いて安里川周辺の集水域を抽出することができる。流域面積は5m×5mメッシュで4.24 km²となった。流域内の土地利用は航空写真をベースに用途別に面積を計測すると、建物用地と幹線交通用地の合計で80.1%となる都市河川であることがわかる。



4. 降雨特性の類型化

降雨特性の類型化方法

安里川近隣のひめゆり観測所9ヶ月分の雨量データの10分間値を基に降雨の降り始めから降り終わりまでのデータを一つの降雨イベントのセットとして収集したデータから、

- ①1 降雨イベント内の総雨量、
 - ②総雨量に対するピークとなる10分間雨量の比、
 - ③振り始めから振り終わりまでの降雨継続期間内の10分間値推移、
- の3つの指標を用いて、階層型クラスター分析により類型化を行った。

階層型クラスター分析による降雨特性の類型化

収集した降雨イベントは総計114回となり、デンドログラムの樹形距離より、一番大きな距離を持つものとしては同質性から3群に別れた。3つの群の類似性をデータから見ると、降雨イベントの継続時間が一番上位の階層を分けるものとして識別された。10分間のみの短時間の降雨が1度確認されたのみの降雨イベントがType6、中程度の継続時間の降雨イベントはType1、Type2、Type3、長時間継続する降雨イベントはType4、Type5となった。各タイプの日付を付してあるが、Type間に季節性がないことは亜熱帯海洋性気候の一つの特徴と言えるかもしれない。本研究では、降雨イベントのタイプ別に河川の流出特性との関係性を整理するため、降雨特性はさらに2階層下の6つのTypeで整理した。

1) Type6：極小時間スポット降雨型

Type6に分類されたのは36事例あり、全てが10分間値観測で0ミリ-1ミリ-0ミリもしくは、0-2-0、0-4-0でその後220分間降雨減少が記録されていないものである。極小時間スポット降雨型は、全事例の32%を占め、亜熱帯海洋性気候で最も多い降雨特性となっている。

2) Type1：極小時間弱雨型（1-1）及び極小時間局地的大雨型（1-2）

Type1に分類されたのは33事例あり、全事例の29%を占める。1回の降雨イベントの総雨量に対する10分間ピーク雨量の比が50%以上で構成され、時にスコールの様に1回の降雨イベントの中で極小時間内にまとまって雨が降るタイプが類型化された。降雨強度を表現するために、10分間雨量の値を振りはじめからの1時間毎の値として整理した。気象庁の表現に合わせると総雨量が5mm以下のサンプルは4mm/h以下の「弱い雨」となり、総雨量が5mmを超える26mm/h以下で最大19mm/hの「やや強い雨」となっており、細分類では2つに分類することができる。総雨量が5mm以下を極小時間弱雨型とし、10分間値でも数十ミリを超えるものが含まれるため総雨量が5mmを超える場合を極小時間局地的大雨型とする。以上、Type6とType1で合わせて全事例の62%が10分間という極小時間に雨がまとまって降るといふ亜熱帯特有と思われる特性が確認された。

3) Type2：通常降雨型

Type2に分類されたのは20事例あり、全事例の28%を占める。Type2とType3を分けたのは、総雨量である。1回の降雨イベントにおける総雨量が12mm以下のものはType2に類型化された。総雨量のタイプ平均は6.4mmとなる。継続時間はType1よりもやや長い、10分間値のピーク雨量が占める比率は最大で42.9%(4mm)、タイプ平均で30%となる。降り始めから1時間毎の値に整理した降雨量は1-8mm/hの値となり、「弱い雨～（弱いとも強いとも形容のつかない通常の）雨」の強度が確認された。

4) Type3：スコール含有型

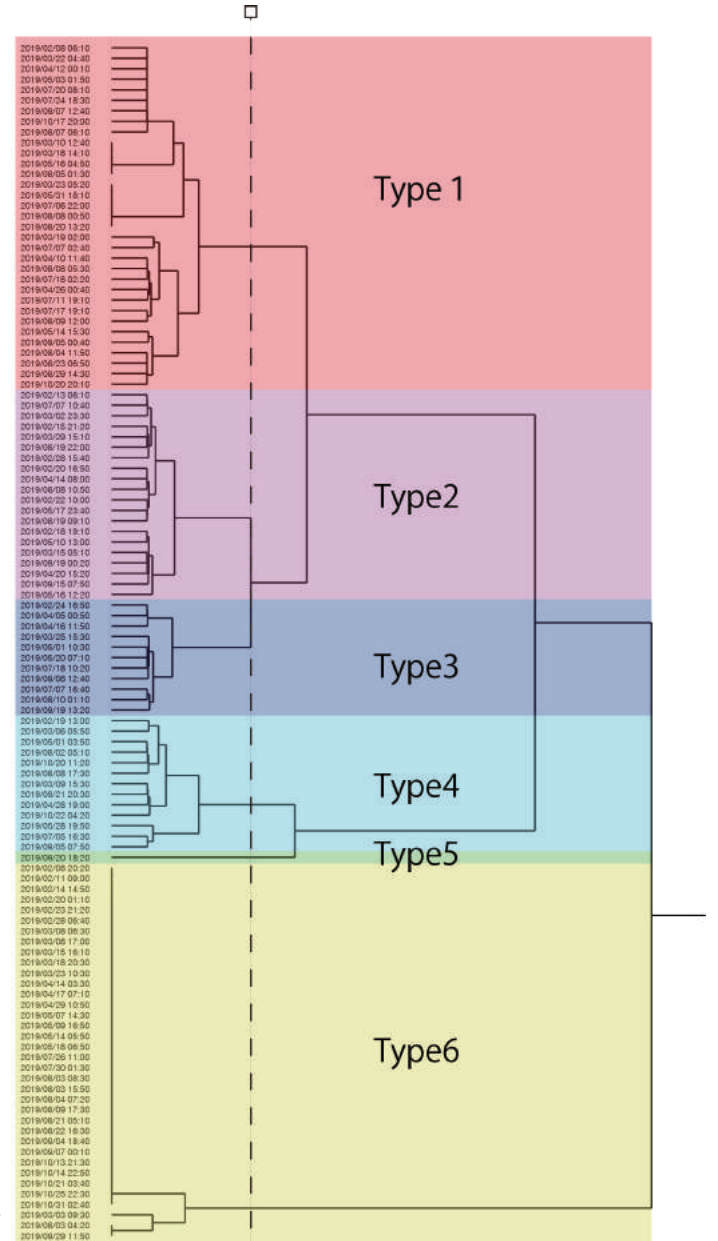
Type3に分類されたのは11事例あり、全事例の10%を占める。総雨量は最大で28mm、タイプ平均で23mmとなった。10分間値のピーク雨量が占める比率は最大で34.6%(9mm)、タイプ平均で21.3%となる。10分間値で1-9mmまでとなる。1時間値として整理すると、1-19mm/hとなり「やや強い雨」を含みながら降雨に大きなピークを含まないことがわかり、ピークを有するType1-2(極小時間スコール型)と異なることが分かった。

5) Type4：局地的大雨型

Type4に分類されたのは13事例あり、全事例の11%を占める。総雨量が35mmから61mmまでの範囲で、タイプ別平均で45mm、かつ降雨の継続時間が3時間以上となった。10分間値ピーク雨量が占める割合は最大で35%(14mm)、最少で5.6%、タイプ平均で17.6%となる。1時間値に整理した値では、数十ミリを含み最大33mm/hとなり、「強い雨～激しい雨」を含むため、局地的大雨型とした。

6) Type5：集中豪雨型

Type5に分類されたのは1事例のみであり、全事例の1%である。他のタイプとは異なる傾向として、降雨の継続時間が長く、総雨量も108mmと100mmを超える。一方で10分間値のピーク雨量は5mmと少なく、1時間値でも1mmから最大でも17mm/hとなる。Type1-2やType4の方が10分間値のピークや1時間値で高く、それらと比較すると長時間にわたって降雨が継続し、結果として総雨量が増えていることから、気象庁の定義に沿って「集中豪雨型」とした。



以上から、亜熱帯海洋性気候の沖縄本島での降雨特性としては10分単位の雨が観測される極小時間型の事象が6割を占め、その降雨強度は小雨程度から局地的大雨といわれるものまでが含まれる事が沖縄本島中南部の降雨特性として整理できた。これらは、上昇気流とともに大小様々な単独の積乱雲が発生しやすい亜熱帯特有の気候特徴を反映していると考えられる。また、一般的には「集中豪雨」として定義されるType5のような「同じような場所で数時間にわたり強く降り、100mmから数百mmの雨量をもたらす雨」は発生頻度が少なく、それよりも数時間という比較的短時間に「激しい雨」を伴うType4のような局地的大雨型が多く確認された。局地的な大雨は河川や水路等が短時間で増水する等、急激な下水道の増水による河川の流量状況の変化や、低地の浸水を引き起こしやすく注意が必要である。亜熱帯海洋性気候の沖縄本島では、防災対策として検討する場合の想定する降雨現象では、総降雨量型ではなく、短時間豪雨型の方へ対応が求められることが明らかとなった。

5. 単時間降雨時の流出特性

実測によるマニング式の流出係数の検討と検証

安里川の9ヶ月分の雨量データの10分間値を基に降雨の降り始めから降り終わりまでのデータを使用し、流出量を算定する。算定方法としては、降雨の降り始め20分前から降雨後8時間分の水位データを取り、マニング式により降雨の降り始め20分前から降雨後8時間までの流量を算定した。表面土地利用別の流出係数から求められる流出量を「想定表面流出量」とする。対象箇所は、3面張りの接続ブロックで護岸整備されているため、マニング式の粗度係数は0.027が基準となる。しかし、現地の河道断面で草等が生えている部分があるため、係数の妥当性について最初に検証を行った。流量計測器を設置して、対象地の単位時間流量及び断面形状を計測し、そこから粗度係数の妥当性を0.027～0.030の間で検証した。結果、粗度係数について0.027で算出される流量と、実測流量をベースにした流量の適合性が最も高いことから、水位による観測値の推計は0.027を使って以降の分析手法と比較を行った。降雨イベントとして観測された113回のうち、水位の観測データの欠損値などを抜くと111回の水位観測データが得られた。また観測地は感潮域から外れているが、潮位と水位の関係も確認した。

土地利用別表面流出係数の妥当性の検証

土地利用別表面流出係数については日本下水道学会などにより幅を持って指定されている。なぜなら、その場所の地質や傾斜などにより大きく貯留傾向が異なるからである。沖縄本島中南部の表面流出係数の妥当性については、地下水涵養を目的としているため栄野川・小野(2017)で設定されている値を初期値の参考とし、想定表面流出量を求めた。次に、111回分の降雨イベント時の水位の時間変化のデータを用いて、マニング式から求めた総流量を求め、総雨量別に想定表面流出量に対する実際の総流量を「流出率」として整理した。総雨量1mmでは流出率が0～0.2が多いものの、0～13.1までと大きくばらついている。総雨量2mmではばらつきがあるものの流出率が0.3～0.5で多くなる。総雨量4mmから17mmでは流出率が0.4～0.7で記録され、総雨量18mmから25mmでは流出率が0.5～0.9に分布し、さらに総雨量が増えると流出率が0.7-0.8に収束している。総雨量が増えることにより流出率が増加し、ばらつきも小さくなることが確認された。この要因としては、総雨量が少ない降雨イベントでは、流域に対する雨雲の形成が弱くそれにより流域内の雨雲の密度にばらつきが生じ、流域内で均一な降雨現象とならないためであると想定される。総雨量が増えるにつれて、継続した雨量を得るための雨雲が流域内で均一的に均質性を持って得られたと考えられる。総雨量の増加に伴い流出率が1.0ではなく、0.7-0.8の値に収束することは、実態に即して考えて流域全域が均一の雨雲で100%覆われる事はないであろうことを想定すると妥当な値への収束となっている。つまり、本研究で設定した流域の土地利用別流出係数が短時間の表面流出を扱うのときに妥当な係数設定であることが確認された。

6. 今後の展望

亜熱帯海洋性気候の沖縄では、極小的に大小様々な積乱雲による降雨の現象がもっとも多く確認され一般に温帯性気候よりも流域単位での流出解析が困難であることが示唆された。また、表面流出係数に対する流出率で整理すると総雨量の増加とともに流出率が0.7～0.8に収束していくことが確認された。つまり、沖縄本当での流出解析を行うには雨雲の均一性に関する不確実性、貯留能力の逐次変化をプログラミングにしていけることが今後の課題である。

単位流量の分析方法

土地利用別の表面流出係数の妥当性が確認されたことから、表面流出係数を用いた想定表面流出量と各降雨特性別の流出特性について傾向を把握する。流域土地利用を考慮しながら降雨に対する河川の流出予測を行う場合、累積雨量の変化により流域内の降雨貯留が変化し同一土地利用でも流出特性が刻々と変化する不確実性があるため、累積降雨量によって変わる流域の貯留能を一つのモデルで示すことは難しい。そこで、基礎的知見を得るために、単位図法を用いて、単位時間にある雨量が降った場合の流出量を、累積降雨毎に段階的に流量を整理した。極小時間スポット降雨型(Type6)のデータと同日同時刻の水位データを用いて流量を解析した。流量がマイナスになる等観測誤差と思われるものを除き、降雨1mm(32事例)、2mm(2事例)、4mm(1事例)のデータを抽出し、総降雨量毎の降雨後10分間毎の流量平均値をマニング式により算出し、それぞれの流出量（以下「単位流量」とする）。次に、算出した1.2,4mmの単位流量のデータを単位図法に展開し、1.2,4mmの10分間降雨量とそれ以外の降雨量を併せ持つ降雨イベントから、その他の3mm及び5mm以上の降雨時に流出したと想定される単位流量のデータを算出した。さらに、安里川の集水域と流出係数から推計される総流出量を算定し、単位流量のデータと比較及び検討を行った。

10分間の極小時間スポット降雨時の流出特性

降雨特性に対する流出特性を調べるに当たり、最も単純な形となる単時間の降雨を対象に流出特性を整理する。これにより、3.2で整理した降雨特性の類型別の流出特性を把握する際の要素を整理するためである。極小時間スポット降雨型と単位図法により算出した結果、1mm、2mm、3mm、4mm、6mm、8mmの単位流量を得た。

- ①総雨量1mmに対する単位流量は8つの極小時間スポット降雨型データの平均値より求めた。総流量は892 m³であった。これはTable2で算出した流域の表面土地利用別表面流出で想定される4,821 m³に対する流出率は0.19の値となる。
- ②総雨量2mmに対する単位流量は2つの極小時間スポット降雨型データの平均値より求めた。総流量は3,525 m³で、想定表面流出量9642 m³に対する流出率は0.37となった。
- ③総雨量3mmでは単位図法を用いて単位流量を算出した。総流量は7,515 m³で、想定表面流出量14,464 m³に対する流出率は0.52となった。
- ④総雨量4mmに対する単位流量は1事例の小時間スポット降雨型データより求めた。総流量は10,253 m³で、想定表面流出量19,286 m³に対する流出率は0.53となった。総雨量4mm以降では降雨後の時間別河川流量の水位では、降雨直後の流量増加の後に、時間を置いてもう一度流量が増加する現象が確認された。
- ⑤総雨量6mmでは、単位図法を用いて単位流量を算出した。算出した総流量は28,213 m³となり、想定表面流出量28,929 m³に対する流出率は0.98となった。
- ⑥総雨量8mmでは、単位図法を用いて単位流量を算出した。総流量が40,639 m³となり、想定表面流出量38,572 m³に対する流出率は1.05となった。

