つくば市蓮沼川流域における 都市化に伴う河川流出特性の変化

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

201710764

川瀬 将嗣

2021年1月

目次

要旨iii
Abstract iv
表目次v
図目次vi
第1章 序論1
1.1 研究背景
1.2 研究目的
第2章 研究方法
2.1 研究対象
2.1.1 研究対象地域
2.1.2 対象期間
2.2 流量観測(現在)
2.2.1 流量算出
2.2.2 観測詳細
2.3 使用データ・資料
2.3.1 つくば市研究学園都市付近の水文資料集(過去)4
2.3.2 新井橋河川自記水位計データ(現在)5
2.3.3 土地利用
2.3.4 数値標高モデル(DEM)データ5
2.3.5 降雨イベント
2.3.6 TX 沿線地区(つくば市域)雨水貯留浸透基本計画書6
2.3.7 小貝川圈域河川整備計画6
2.4 使用モデル
2.4.1 タンクモデルのパラメーター
2.4.2 タンクモデルによる計算式7
2.5 過去と現在の河川流出特性の比較
2.5.1 流下方向の比流量変化の比較8
2.5.2 ハイドログラフでの比較
第3章 結果・考察10
3.1 土地利用状況10

3.1.1 過去と現在の比較10
3.1.2 浸透域面積割合の変化
3.1.3 葛城地区における下水道集水区域区分10
3.2 流量観測・水位流量曲線(現在)11
3.3 過去と現在における流下方向の比流量変化の比較12
3.4 降雨イベントの選出12
3.4.1 タンクモデル作成(キャリブレーション)で使用する降雨イベント
3.4.2 タンクモデル作成(推定結果の検証)で使用する降雨イベント
3.4.3 ハイドログラフでの比較で使用する降雨イベント13
3.5 タンクモデル作成13
3.5.1 キャリブレーション13
3.5.2 推定結果の検証
3.6 ハイドログラフの比較14
3.6.1 過去・現在の類似した降雨イベントにおける比較14
3.6.2 同一の降雨イベントにおける比較16
第4章 まとめ18
4.1 結論
4.2 今後の課題
謝辞19
参考文献

川瀬 将嗣

要旨

降雨に伴って発生する河川流出の特徴として,自然流域では,降雨が地表から地下へと浸透し,そ の後徐々に河川へと流出していくのに対し,都市流域では,降雨が浸透せず,直接河川へと流出して いくということが挙げられ,流域の都市化と河川流出との関係を理解することは重要である.日本 では,1960 年代後半の高度経済成長期を経て急速に都市化が進行し,それに伴って降雨時の河川流 量の増加が確認されている.流域の都市化に伴って流出率が増加すること,ピーク流量が増加する ことが分かっているが,実際の観測データに基づいた研究は十分に行われていない.

本研究では、つくば市蓮沼川流域において、2 つの土地利用状況が異なる年代での河川流出特性を ハイドログラフや比流量変化を用いて比較することで、都市化による河川流出への影響を明らかに することを目的とした.

都市化については、1976年と2016年の土地利用図を比較することで調べた.その結果,蓮沼川流 域では過去から現在にかけて農用地・森林の減少,建物用地の増加が認められた.また,土地利用種 を浸透域と非浸透域に分類した結果,非浸透域面積割合が 11.4%から 50.6%まで増加していること が分かったため、この地域では都市化が進行していることが明らかになった.河川流出特性につい ては、過去の流量は代表的な河川流出モデルの1つであるタンクモデルを用いて推定を行い,現在の 流量は流量観測を行なって作成した水位流量曲線から算出することで,ハイドログラフを作成し, 比較を行なった.その結果,タンクモデルを用いて過去の流量を高い精度で推定することができ,比 較的規模の大きい降雨イベント時には、過去から現在にかけて、流出率の増加,降雨ビークから流出 ビークまでの時間差の短縮,降雨終了から流出終了までの時間差の短縮などが認められた.これら の原因として、流域の都市化に伴う非浸透域面積の増加によって,降雨の浸透量が減少し,直接流出 量が増加したことが考えられる.ただし,現在の水位流量曲線に関しては、流量観測の回数が少なく、 まだあまり精度が高くないという課題が残る.今後、流量観測の回数を増やして水位流量曲線の精 度を向上させることができれば、さらに大規模な降雨イベントでの流量を算出できるようになり、 都市化地域の河川流出特性についてさらに深く理解できるようになるだろう.

Key words:都市化,河川流出特性,比流量,タンクモデル,水位流量曲線,ハイドログラフ

iii

Changes in Characteristics of River Runoff

by Urbanization in the Hasunuma River Basin, Tsukuba

Masashi KAWASE

Abstract

One of the characteristics of river runoff caused by rainfall is that, in natural basins, rainfall infiltrates from the ground surface to the deeper soil, and then gradually discharges into the rivers, whereas, in urban basins, rainfall does not infiltrate, but directly discharges into the rivers. It is important to understand the relationship between urbanization of basins and river runoff. In Japan, the rapid urbanization that followed the period of high economic growth in the late 1960s has been accompanied by an increase in river runoff during rainfall. Although it is known that the runoff rate increases and that the peak runoff increases with the urbanization of the basin, studies based on actual observation data have not been sufficiently conducted.

The purpose of this study is to clarify the impact of urbanization on river runoff in the Hasunuma River basin of Tsukuba by comparing the characteristics of river runoff at two different land use periods using hydrographs and specific runoff changes.

The urbanization was investigated by comparing the land use maps of 1976 and 2016. As a result, the Hasunuma River basin showed a decrease in farmland and forest and an increase in city from the past to the present. The land use types were also classified into permeable and impermeable area, and showed that the percentage of non-infiltrated area increased from 11.4% to 50.6%, indicating that urbanization is progressing in this basin. The characteristics of river runoff was investigated by creating hydrographs using the past runoff estimated using the tank model and the current runoff calculated from the H-Q curve. As a result, the tank model can estimate the past runoff with high accuracy. It was found that during relatively large rainfall events, the runoff rate increases and the time differences between the peak of rainfall and the peak of runoff, and those between the end of rainfall and the end of runoff decrease from the past to the present. This is due to the increase in the impermeable area caused by the urbanization of the basin, resulting in a decrease in the rainfall infiltration and an increase in the direct runoff. However, there is still an issue that the H-Q curve is not very accurate due to the small number of runoff observations. If the accuracy of the H-Q curve can be improved by increasing

the number of runoff observations, it will be possible to calculate the runoff under even larger rainfall events.

Key words: Urbanization, Characteristics of river runoff, Specific runoff, Tank model, H-Q curve, Hydrographs 表目次

表	1	流量観測結果(過去)	. 21
表	2	過去・現在の土地利用割合	. 21
表	3	流量観測結果(現在)	. 21
表	4	八千代橋における流量観測結果詳細	. 22
表	5	上橋における流量観測結果詳細	. 23
表	6	新井橋における流量観測結果詳細	. 23
表	7	比流量算出結果(過去)	. 24
表	8	比流量算出結果(現在)	. 24
表	9	キャリブレーションに用いる降雨イベント	. 25
表	10	推定結果の検証に用いる降雨イベント	. 25
表	11	ハイドログラフでの比較に用いる降雨イベント	. 25
表	12	ハイドログラフでの比較に用いる降雨イベントの特徴(表 11 参照)	. 26
表	13	タンクモデルパラメーター	. 26
表	14	キャリブレーション結果(統計値)	. 26
表	15	流出率・各時間差(過去・現在の類似した降雨イベント)(表 11 参照)	. 27
表	16	流出率・各時間差(同一の降雨イベント)(表 11 参照)	. 27

汊	1	蓮沼川流域2	8
义	2	八千代橋における蓮沼川の状況(2021 年 1 月 28 日撮影)2	9
汊	3	上橋における蓮沼川の状況(2021 年 1 月 28 日撮影) 2	9
汊	4	ゴム堰あり時の設置場所における蓮沼川の状況(2020年5月31日撮影)	0
义	5	ゴム堰あり時の新井橋における蓮沼川の状況(2020年5月31日撮影)	1
义	6	ゴム堰なし時の設置場所における蓮沼川の状況(2020年9月3日撮影)	1
义	7	ゴム堰なし時の新井橋における蓮沼川の状況(2020年9月3日撮影)	2
义	8	八千代橋周辺の河川断面図	2
义	9	新井橋・上橋周辺の河川断面図3	3
义	10	講和橋における水位流量曲線と水位流量年表の比較(過去)	4
义	11	タンクモデル模式図3	4
义	12	土地利用図(1976年)3	5
义	13	土地利用図(2016年)3	5
义	14	土地利用変化図	6
义	15	浸透域面積割合変化図	6
义	16	航空写真(1976年)(国土地理院, 2020)	7
义	17	航空写真(2016年)(左:西部,右:南西部)(国土地理院,2020)	8
义	18	下水道集水区域区分図(葛城地区)(雨水貯留浸透基本計画書,2007)	9
义	19	蓮沼川支川調節池概要図(河川整備計画付図,2012)4	0
义	20	蓮沼川第一調節池概要図(河川整備計画付図,2012)4	2
义	21	蓮沼川第二調節池概要図(河川整備計画付図,2012)4	3
义	22	水位流量曲線(2020年)(左:八千代橋,右:上橋)4	4
汊	23	新井橋水位流量曲線(2020年)(左:ゴム堰あり時, 右:ゴム堰なし時)	4
汊	24	流域面積と比流量の関係(過去)4	5
汊	25	流域面積と比流量の関係(現在) 4	5
汊	26	キャリブレーション結果(ハイドログラフ)(表9参照)4	6
汊	27	キャリブレーション結果(1 時間ごとの流量値)(表 9 参照) 4	7
汊	28	キャリブレーションで用いた降雨イベントでの検証結果(日平均値)4	8
义	29	9 事例の降雨イベントでの検証結果(日平均値) 4	8
図	30	ハイドログラフ(過去)(表 11 参照 降雨 2) 4	9
図	31	ハイドログラフ(現在)(表 11 参照 降雨 4) 4	9
汊	32	ハイドログラフ(過去)(表 11 参照 降雨 1)5	0
図	33	ハイドログラフ(現在)(表 11 参照 降雨 5)5	0

図 34	ハイドログラフ	(過去)(表11参照	降雨 3)5
図 35	ハイドログラフ	(現在)(表11参照	降雨 6)5
図 36	ハイドログラフ	(表 11 参照 降雨 4)	
図 37	ハイドログラフ	(表 11 参照 降雨 5)	
図 38	ハイドログラフ	(表 11 参照 降雨 6)	

第1章 序論

1.1 研究背景

降雨に伴って発生する河川流出の特徴は、その流域の土地利用状況によって異なる. 農用地や森 林などの、比較的浸透能が高い土地利用種が流域の大半を占めるような自然流域では、降雨が地表 から地下へと浸透し、その後徐々に河川へと流出が行われていく. それに対し、コンクリートやアス ファルトで舗装された建物用地や道路などの、浸透能が低い土地利用種が流域の大半を占めるよう な都市流域では、降雨が浸透せず、直接河川へと流出が行われていく. そのため、流域の都市化と河 川流出との関係を理解することは非常に重要である.

日本では、1960年代後半の高度経済成長期を経て、急速に都市化が進行し、それに伴って、降雨時 における河川での流量の増加が確認されてきた.都市化が確認されている流域において、都市化以 前と都市化以後の河川流量の変化を調査した結果、都市化によって浸透域面積割合が減少するのに 従って流出率が増加すること(吉岡、2015)、また、宅地面積が増加するのに従って流出時のピーク 流量が増加すること(瀬川ら、2017)が分かっている.さらに、日本以外の地域で行われた都市化と 河川流出に関する研究では、都市域の増加率は直接的にピーク流量と総流出量の増加に影響を与え ていること(Chen et al., 2009)、また、非浸透域面積の増加によって降雨のピークからピーク流量の 出現までの時間差が短縮すること(Rodrigues et al., 2019)が分かっている.しかし、これらの先行研 究は、過去、現在ともに流出モデルを用いて河川流量を算出している研究がほとんどであり、実際の 観測に基づいたデータによって河川流出特性の変化について研究を行うことは非常に重要である.

茨城県つくば市は、茨城県の南西部に位置し、面積 283.72 km²,総人口 245,958 人 (2021 年 1 月 時点,つくば市,2021)の都市であり、東部には桜川,西部には小貝川や西谷田川,中央部には谷田川, 蓮沼川,花室川が主に流れている.また,つくば市全域を対象とする筑波研究学園都市の建設が 1963 年に決定され,1980 年に都市としての概成を迎えた後,現在まで発展が続いている.筑波研究 学園都市とは、科学技術の振興と高等教育の充実、東京の過密対策を目的に国家プロジェクトとし て建設された都市であり、計画人口を 35 万人として、研究機関等の集積を活かした世界的な科学技 術拠点都市を目指している(つくば市,2021).また、都市構造として研究学園地区と周辺開発地区 の 2 つの地区が存在し、研究学園地区では、つくば市中央部において国の試験研究・教育施設や商 業・業務施設、住宅施設等を計画的に配置、また、周辺開発地区では、研究学園地区以外において全 体として均衡のとれた都市形成や、1994 年に着工、2005 年に開業したつくばエクスプレスの沿線地 域での開発などが行われている.以上のように、つくば市では短期間の間に急速な都市化の計画が 行われており、つくば市内の流域においても土地利用状況が大きく変化していることが見込まれる.

つくば市においても、これまでに都市化と河川流出に関する研究が行われてきた.山本ら(1978) では、当時都市化が進行していた地域として蓮沼川流域、自然流域として西谷田川流域を対象に観 測に基づく河川流出特性の比較を行い、都市流域である蓮沼川流域の方が西谷田川流域よりもピー ク流量の出現時刻が早く、ピーク流量が増加することが分かった.また、田口ら(1979)でも同様の 流域において両河川への都市化の影響の評価を行い、都市流域の方が自然流域よりも非浸透域面積

1

の増加による直接流出量の増加が認められることが分かった.しかし,これらの研究は,研究学園都 市が建設されている最中に行われたものであり,さらなる今後の河川流出特性の変化が見込まれる 点や,本来は同一の地域が都市化の進行に伴ってどのように変化していったかを時系列的に考察す ることが理想であるという点において,今後も継続的な研究が必要であるとしている(市川ら,1980). そのため,つくば市の同一の流域において都市化の現状を把握することや,それに伴う河川流出特 性の変化を理解することは非常に重要である.

1.2 研究目的

本研究では、つくば市内の蓮沼川流域において、都市化以前と以後の2つの土地利用状況が異なる 年代での河川流出特性をハイドログラフや比流量の変化を用いて比較することで、都市化による河 川流出への影響を明らかにする.

第2章 研究方法

2.1 研究対象

2.1.1 研究対象地域

本研究では、茨城県つくば市蓮沼川流域を対象として研究を行う.図1 に蓮沼川流域を示す. 蓮沼 川はつくば市の中央部を流れる流路延長 10.0 km, 流域面積 19.3 km²の河川であり, 流域内の地質は ほとんどを後期更新世の中位段丘堆積物が占めている.この河川はつくば市蓮沼地区に源流があり, 島名地区で西側を流れる谷田川に合流する.また, 蓮沼川に架かっている主な橋として, 上流側から 順に, 東平塚橋, 八千代橋, 新井橋, 上橋, 講和橋などが挙げられ, 新井橋と上橋の間では, 毎年 4 月 ~8月の期間に農業用のゴム堰が設置されており, 降雨がない時に揚水場で農業用水として汲み上げ が行われていると思われる.

っくば市の気候は, 1980 年~2010 年において, 年総降水量は 1282.9 mm, 年平均気温は 13.8℃であり, 降水量は 12 月が 43.6 mm で最低, 9 月が 183.2 mm で最高, また, 月平均気温は 1 月が 2.7℃で最低, 8 月が 25.5℃で最高である(つくば市, 2021).

蓮沼川流域内には、筑波研究学園都市の研究学園地区が分布しており、住宅地や教育機関、研究施設などが広がっている.また、流域の中央部にはつくばエクスプレスが横切っており、西側の研究学園駅と東側のつくば駅をそれぞれ中心として様々な商業施設などが広がっている.特に研究学園駅の周辺地域はつくばエクスプレス沿線開発地区である葛城地区として、市役所や大型商業施設、その他各種業務施設などが配置され、つくば市の中心部に隣接する副都心的な役割を担う地域となっている.

2.1.2 対象期間

本研究では,過去として 1975 年~1977 年,現在として 2016 年~2020 年を対象期間として研究を 行う.過去では,土地利用データは 1976 年,河川水位・流量,降水量データは 1975 年~1977 年のも のを用い,現在では,土地利用データは 2016 年,河川水位・流量データは 2020 年,降水量データは 2019 年~2020 年のものを用いる.

2.2 流量観測(現在)

2.2.1 流量算出

一般的に河川流量 Q (m³/s) は水流の断面積 A (m²), 流速 v (m/s) を用いて

$$Q = A \times v \tag{1}$$

と表される. そのため本研究では, まず, 河川の左岸から x (m) ごとに水深 h (m) を測定し, それ ぞれの x (m) ごとのブロックにおいて断面積 A (m²) を算出する. 左岸から順に水深, ブロックを n番目として表すとすると, ブロックの断面積 A は

3

$$A_n = x \times (h_n + h_{n+1}) / 2 \tag{2}$$

と表される. そして, それぞれのブロックの中心において流速計を用いて流速 v(m/s)を測定し, (1) 式を用いてそれぞれのブロックにおける流量 $q(m^3/s)$ を算出した後, それらを合計してその地点で の河川流量 $Q(m^3/s)$ を算出する. この時, 河川流量 Qは式(3)のように表される.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} q_i \tag{3}$$

2.2.2 観測詳細

本研究では、茨城県の河川自記水位計によって水位の定時観測が行われている新井橋において水 位流量曲線を作成するために流量観測を行う予定だったが、2020年4月23日~8月28日の期間に おいて新井橋一上橋間にゴム堰が設置されており、流速が非常に小さく、流速計の性能上測定が困 難だったため、新井橋の上流の八千代橋と下流の上橋において流量観測を行なった.八千代橋にお ける蓮沼川の状況を図2,上橋における状況を図3,ゴム堰の設置場所における状況を図4,ゴム堰あ り時の新井橋における状況を図5に示す.その後8月28日にゴム堰が撤去されてからは、より高性 能の流速計が手に入ったこともあり、新井橋で流量観測を行なった.ゴム堰なし時の設置場所の様 子を図6,ゴム堰なし時の新井橋の様子を図7に示す.また、八千代橋周辺における河川断面図を図 8,新井橋・上橋周辺における河川断面図を図9に示す.観測は降雨によって河川水位が上昇してい るタイミングに合わせて行い、八千代橋と上橋では7回、新井橋では3回の合計10回行なった.こ のデータをもとに、現在の新井橋での水位流量曲線を作成する.

2.3 使用データ・資料

2.3.1 つくば市研究学園都市付近の水文資料集(過去)

2.3.1.1 流量観測結果

過去の流量観測結果を表1に示す. 1975 年 11 月 16 日, 1976 年 1 月 31 日, 2 月 21 日, 7 月 31 日, 1977 年 12 月 21 日の計 5 回,東平塚橋,八千代橋,講和橋の3箇所において流量観測を行なった結 果である(筑波大学地球科学系,1976,1977,1978).このデータは過去の比流量変化についての考察 をするときに用いる.本研究では言及しないが,流量の他にも水温,pH,電気伝導度の測定が行われ ていた.

2.3.1.2 水位流量年表

1976 年 3 月 13 日~1977 年 12 月 31 日の期間において講和橋での水位(m)と流量(m³/s)の日 平均値が記載された年表である(筑波大学地球科学系, 1977, 1978). このデータはタンクモデルの 推定結果の検証を行うときに用いる.日平均値の算出方法については資料に記載されていないが, 同資料に記載されている 1976年,1977年における講和橋での水位流量曲線(筑波大学地球科学系, 1977,1978)と値が概ね一致するため,この水位流量曲線を用いて算出したものであると思われる. 講和橋での水位流量曲線と水位流量年表の日平均値との比較を図 10に示す.全体的にデータの欠損 が多く,主に1976年8月5日~30日,1977年2月3日~9月2日の期間で大きな欠損があった.

2.3.1.3 ハイドログラフ

1977 年9月4日~6日,9月19日~21日,10月3日~5日,11月16日~18日の4つの期間にお ける講和橋でのハイドログラフである(筑波大学地球科学系,1978).4事例とも1時間ごとの図の みが記載されており,そこから目視で時間値を読み取って用いる.このデータはタンクモデルのキ ャリブレーションを行うときに用いる.

2.3.2 新井橋河川自記水位計データ(現在)

2019 年~2020 年において新井橋に設置されている河川自記水位計によって測定された 1 時間ご との水位データを用いる(茨城県土木部, 2020).このデータを流量観測によって作成した新井橋で の水位流量曲線に入れることで,新井橋での流量を算出し,現在のハイドログラフを作成する.

2.3.3 土地利用

土地利用図の作成において,国土交通省国土数値情報の 1976 年と 2016 年の土地利用細分メッシ ュデータ(国土数値情報, 2020)を用いる.このデータをもとに ESRI ジャパンの Arc Map 10.4.1 を 用いて作図を行なった.また,土地利用状況の確認として 1976 年と 2016 年のつくば市で撮影され た航空写真(国土地理院, 2020)を用いた.

2.3.4 数値標高モデル (DEM) データ

流域地形図,土地利用図の作成において,数値地図(国土数値情報)の5mメッシュ標高 DEM デ ータを用いた(国土地理院,2020).地域としては,霞ヶ浦流域内の谷田部地区,土浦地区,上郷地区 におけるデータを用いた.また,流域界については,このデータをもとに ESRI ジャパンの Arc Map 10.4.1を用い,水系網解析として地形の勾配から流向を定義し,水系網に対して最下流点を決定する ことで作成した.

2.3.5 降雨イベント

降水量は, 1975 年~2020 年において, つくば市舘野にある高層気象台で観測された1時間ごとの 降水量データ(気象庁, 2021)を用いる.この高層気象台は蓮沼川流域から約4km 南東側にあり, 他 の気象観測所は 10 km 以上離れているため, 本研究ではつくば市舘野で観測されたデータを新井橋 での降水量として用いる. また、本研究では使用する降雨イベントを以下のような条件に従って選出する.

- 流出が発生する一連の降雨を降雨イベントと定義し、降雨イベントの開始時刻は一連の降雨が 始まる時刻、終了時刻は降雨イベントによる流出が流出発生前とほぼ同じ値まで減少する時刻 とする。
- 2. 降雨イベントの前後24時間以内に他の降雨イベントがないものを選出する.
- 3. 降雨イベント内での総降水量が 40 mm 以上,降雨イベントの長さが 3 日以内のものを選出する. さらに,降雨イベントの評価基準として先行降雨指数(API)を用いる. API は, *i*日前における日 降水量 *P_i*(mm),降雨イベント開始日から遡る日数 *n*(日)を用いて

$$API(n) = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{i}$$
(4)

と表される.本研究では, n = 5, 10, 15 の 3 つの値を用いて API を算出する.

2.3.6 TX 沿線地区(つくば市域)雨水貯留浸透基本計画書

この計画書は 2007 年 3 月に社団法人雨水貯留浸透技術協会によって作成され,公的事業者が整備 する基本施設をベースに,地域が一丸となって施設の整備促進,機能保持に取り組み,浸水防止と水 環境の高い水準の実現を目指すことを目的としている.主な内容としては,TX 開発計画による影響 を緩和するための河川計画と下水道計画があり,つくば市域の牛久沼流域内に位置する葛城, 萱丸, 島名・福田坪,上河原崎・中西の 4 つの開発地区を対象としている.河川計画では,開発による牛久 沼への影響を開発前と同等の水準に保つための貯留浸透量を確保すること,下水道計画では,集水 域を直接流出域,浸透域,貯留域に 3 区分し,浸透域,貯留域に施設を配置することをそれぞれ目標 としている.

2.3.7 小貝川圈域河川整備計画

蓮沼川における河川整備計画が 2001 年に最初に国によって認可されており, その後 2012 年に変 更したものが再度認可されている(茨城県, 2020).これは, 圏域ごとに今後 20 年~30 年間の具体 的な河川整備の内容を明らかにしたものであり, 河川整備の目標や河川整備の実施に関する事項な どが記載されている.本研究の対象である蓮沼川は小貝川圏域に属している.

2.4 使用モデル

2.4.1 タンクモデルのパラメーター

河川での短期流出の推定には図 11 のような直列 2 段タンクモデルを用いる.本研究では,武田ら (1982) で作成された,1980 年における蓮沼川八千代橋でのタンクモデルと同じ構造のものを使用 し,パラメーターを変えることで 1975 年~1977 年における新井橋でのタンクモデルを作成する.

タンクモデルに入力するデータは降水量 P(mm) のみとし、蒸発量 (mm) については、本研究で は降雨流出時を対象としているためないものとする.

タンクモデルで使用する定数は、各タンクからの流出しやすさを表す流出係数 a, 上タンクから下 タンク,下タンクから地中への浸透しやすさを表す浸透係数 b,各タンク内の水位 H (mm),流出 孔の高さ z(mm) がある. タンクモデルの作成はこれら 4 種類のモデル定数を調整することで行わ れる.Q(mm)は各流出孔からの流出量,G(mm)は各タンクから下に落ちる浸透量である.最終的 な河川流出量は各タンクの Q を全て合計した値となる.

2.4.2 タンクモデルによる計算式

各タンクからの流出量 Q (mm) と浸透量 G (mm) は流出・浸透係数, 各タンクの流出孔の高さ, タンク内水位から求められる. Qの計算式を以下に示す.

タンクは上から n 段目として表し, 特定のタイムステップにおいて変化前のタンク内水位を H, 変化後を H'とするとき,あるタイムステップ I におけるタンク内水位 H は

<n=1のとき>

$$H_1(i) = H'_1(i-1) + P(i)$$
(5)

<n=2のとき>

$$H_2(i) = H'_2(i-1) + G_1(i-1)$$
(6)

と表せる.

タンクからの流出量 Q は

<1 つのタンクに流出孔が2 つあるとき>

$$Q_n(i) = Q_{n1}(i) + Q_{n2}(i) \tag{7}$$

$$Q_{n1}(i) = a_{n1} \times \{H_n(i) - z_{n1}(i)\}$$
(8)

$$Q_{n2}(i) = a_{n2} \times \{H_n(i) - z_{n2}(i)\}$$
(9)

<1 つのタンクに流出孔が1 つあるとき>

$$Q_n(i) = a_n \times \{H_n(i) - z_n(i)\}$$
(10)

と表せ、タンクからの浸透量 G は

$$G_n(i) = b_n(i) \times H_n(i) \tag{11}$$

となる.

これらを元にタイムステップ i での河川流出量 Q(i) は

$$Q(i) = Q_1(i) + Q_2(i)$$
(12)

と求められる.2段目タンクからの浸透量 G2 は地下水涵養量となる.

またこのとき, タイムステップ内でタンク内水位 H は式 (10) のように H' に変化する.

$$H'_{n}(i) = H_{n}(i) - Q_{n}(i) - G_{n}(i)$$
(13)

2.5 過去と現在の河川流出特性の比較

2.5.1 流下方向の比流量変化の比較

過去に行われた流量観測結果と 2020 年に行なった流量観測結果を用いて比流量を算出し, その比較を行う. 一般的に, 比流量 q (m³/s/km²) は流量 Q (m³/s) と観測地点の上流流域面積 S (km²)を用いて

$$q = Q/S \tag{14}$$

と表される. 流域面積は ESRI ジャパンの Arc Map 10.4.1 内の計測を用いて算出した.

2.5.2 ハイドログラフでの比較

2.5.2.1 流出率・時間差の算出

ハイドログラフの特徴を表す指標として, 流出率 r (m³/s/mm),降雨が開始してから流出が開始 するまでの時間差 Δt_s (h),降雨のピーク時間から流出のピーク時間までの時間差 Δt_p (h),降 雨が終了してから流出が終了するまでの時間差 Δt_f (h)を用いる.一般的に流出率 r は総流量 Q(m³/s)と総降水量 P (mm)を用いて

$$r = Q/P \tag{15}$$

と表される.時間差は全てハイドログラフの流量,降水量のデータをもとに算出する.

2.5.2.2 類似した降雨イベントにおけるハイドログラフの比較

過去・現在それぞれの異なる特徴をもった降雨イベントを用いて,その特徴ごとに過去と現在で新 井橋でのハイドログラフを作成し,比較を行う.過去の流量は作成したタンクモデルに過去の降雨 イベントを入力することで算出し,現在の流量は作成した水位流量曲線に新井橋での河川自記水位 計データを入力することで算出する.

2.5.2.3 同一の降雨イベントにおけるハイドログラフの比較

現在の異なる特徴を持った降雨イベントを用いて,過去に現在と全く同一の降雨イベントが発生 したと仮定し,同一降雨における新井橋でのハイドログラフを作成し,比較を行う.現在の流量は作 成した水位流量曲線に新井橋での河川自記水位計データを入力することで算出するが,過去の流量 は作成した過去のタンクモデルに現在の降雨イベントを入力することで算出し,過去に現在と全く 同一の降雨イベントが発生した場合の流量を再現した.

第3章 結果・考察

3.1 土地利用状況

3.1.1 過去と現在の比較

1976年の土地利用図を図 12,2016年の土地利用図を図 13,土地利用変化図を図 14,過去・現在 の土地利用変化割合を表 2 に示す.全体的な土地利用の傾向としては,過去から現在にかけて,田は 11.3%→7.2%,農用地は39.9%→25.5%,森林は23.6%→8.5%と大きく減少しているのに対し,建物 用地は4.7%→35.2%と大きく増加していることが分かった.このことから,1976年から2016年の間 に畑や森林などの土地を開拓し住宅地などとして利用していったことが分かる.これはつくば市全 体での人口が1976年のおよそ7.8万人から2016年には22.7万人まで大きく増加していることと一 致しており,蓮沼川流域において都市化が進行していると言える.

また,過去と現在それぞれでの土地利用種の分布を見ると,過去では蓮沼川の西側には主に森林 と農用地,そしてその他の用地が分布しているが,現在では森林と農用地がほとんど建物用地に変 わっていることが分かる.しかし,過去でその他の用地だった地域のほとんどが現在でも継続して その他の用地として残っている.これは,その他の用地の定義として建設予定地や工場,研究施設な どの人口造成地を含むことから,1976年の時点では筑波研究学園都市の建設途中であり,1980年に 都市としての概成を迎える前であるため,その他の用地として建設予定地が多く含まれており,そ れが現在には研究施設などとしてその他の用地となっていると考えられる.これは過去と現在の航 空写真の比較からも明らかであり,このことからも蓮沼川流域において都市化が進行していること が確認できる.

3.1.2 浸透域面積割合の変化

浸透域面積割合変化図を図 15, 1976 年の航空写真を図 16, 2016 年の航空写真を図 17 に示す.土 地利用種による分類から,その土地利用種を浸透域と非浸透域の2つに分け,過去と現在におけるそ れらの流域に占める割合の違いについて比較した.過去では建物用地,道路,その他の用地の 30%, また,現在では建物用地,道路,その他の用地の 60%をそれぞれ非浸透域として分類した.その他の 用地の分類の仕方については,過去と現在それぞれの航空写真から目視で土地被覆の状態を判別し, アスファルトやコンクリートなどの人工物で舗装されている部分の割合で分類を行なった.その結 果,非浸透域面積割合は 1976 年の 11.4%から 50.6%まで大きく増加していることが分かった.この ことから,水文学的観点から見ても蓮沼川流域において都市化が進行していると言える.

3.1.3 葛城地区における下水道集水区域区分

TX 沿線地区(つくば市域)雨水貯留浸透基本計画書に記載されていた,葛城地区における下水道集 水区域の区分図と下水道区域別に区分した土地利用の用途を図 18 に示す.本研究の研究対象地域で ある蓮沼川流域はその西側の一部が葛城地区に含まれている.この図から,下水道計画における集 水域の区分のうち,浸透域として住宅地,小規模である街区公園,貯留域として教育施設,商業施設 などが含まれる誘致施設,近隣・地区公園,直接流出域として幹線道路が分類されていることが分かる.しかし,浸透域においては,蓮沼川流域全体で考えると,田・農用地や森林などの浸透能の高い 土地利用種と比較した時,住宅地がそれらと同等の浸透能を持つと考えるのは難しいため,本研究 において住宅地は非浸透域として扱うこととする.

また,葛城地区における下水道計画として,貯留浸透施設を以下のように取り扱って配置してい ることが分かっている.

1. 直接流出域:雨水を直接下水管渠に放出するため,貯留浸透施設は配置しない.

- 貯留域:雨水を貯留施設から一定の放流量で直接下水管渠に放流するため、宅内浸透枡や浸透トレンチ等の浸透施設は配置しない.
- 浸透域:雨水から下水管渠への放出を減少させて地中への浸透量を増加させるため、宅内浸透枡 や浸透トレンチ等の浸透施設を配置する.

そして,葛城地区の西側には蓮沼川流域に含まれない地域が一部存在するが,図 18 を見ると,葛城 地区の西側に降雨があった場合,浸透・流出した降雨は葛城地区中央部の大規模な貯留域へと放出さ れることが読み取れる.これらのことから,蓮沼川流域外である葛城地区の西側での降雨は,蓮沼川 流域内にある貯留域へと流出し,その後一定の放流量で直接下水管渠に放流されることで,蓮沼川 へと流れ込んでいると考えられる.そのため,現在の蓮沼川流域の集水域は流域界から西側にいっ た地域にも広がっていると考えられる.

また,葛城地区における河川計画として,蓮沼川の流量を調整するために,蓮沼川の西側に蓮沼川 支川調節池,南東側に蓮沼川第一調節池,北東側に蓮沼川第二調節池の設置が計画されている.蓮沼 川支川調節池の概要図を図 19,蓮沼川第一調節池の概要図を図 20,蓮沼川第二調節池の概要図を図 21 に示す(河川整備計画,2012).これらの図から,支川調節池は調節池から蓮沼川へ流入しており, 第一,第二調節池は蓮沼川から調節池へ流出していることが分かる.そのため,規模の大きい降雨イ ベント時には,それぞれ蓮沼川への急激な流入の緩和,ピーク流量の上限での調整という点で働く ことで,蓮沼川の流量に影響を与えていると考えられる.

3.2 流量観測·水位流量曲線(現在)

八千代橋, 上橋, 新井橋の3箇所において行なった流量観測の結果を表3, 観測地点ごとの詳細結 果を表4,5,6に示す.1番~7番の観測は新井橋と上橋の間にゴム堰が設置されている期間において 八千代橋と上橋の2箇所で行い,8番~10番の観測はゴム堰が撤去されている期間において新井橋の 1箇所で行なった.また,それぞれの観測地点において観測結果をもとに水位流量曲線を作成した. 八千代橋・上橋での水位流量曲線を図22,新井橋でのゴム堰あり時・なし時それぞれの水位流量曲 線を図23に示す.八千代橋・上橋と新井橋のゴム堰なし時での水位流量曲線については,流量観測 結果をそのまま用いて作成したが,新井橋での観測が行えなかったゴム堰あり時における新井橋で の水位流量曲線については,新井橋と上橋の間に蓮沼川への地表流の流入点がなかったため,上橋 2つの期間における新井橋での水位流量曲線の違いとしては、ゴム堰が撤去されていた期間のもの は流量の変化に対する水位の変動の幅が大きく、滑らかな曲線状となっているが、ゴム堰が設置さ れていた期間のものはグラフがより直線的な形をしており、水位の変動が小さくほぼ一定となって いる.ここから、ゴム堰が設置されていた期間においては、降雨によるわずかな水位の上昇が大きな 流量の増加につながるということが分かる.

また,ゴム堰あり・なしの期間ともに,十分な回数の流量観測を行うことができず,ゴム堰ありの 期間では水位が 2.50 m 以上,ゴム堰なしの期間では 0.86 m 以上の観測結果を得られなかった. そ のため,ハイドログラフを作成する時に入力する水位がそれぞれの期間での観測値を超えるとデー タの精度が下がってしまうため,これらの水位を超えてしまわないような降雨イベントのみを選出 する必要ができた.

3.3 過去と現在における流下方向の比流量変化の比較

過去・現在の流量観測の結果をもとに,比流量の算出を行なった.過去の比流量算出結果を表7,過 去の流域面積と比流量の関係を図24,現在の比流量算出結果を表8,現在の流域面積と比流量の関係 を図25に示す.過去の流量観測は東平塚橋,八千代橋,講和橋の3地点で計5回行われており,それ ぞれの比流量変化の回帰直線の傾きを算出しその平均をとると,-3.0×10⁻⁵ (m³/s/km²/km²) となっ た.この値はほとんど0と等しく,流域面積の違いによる流量の差がないと言えるため,流量と流域 面積は比例しているということが分かる.つまり,流量の増加率は流域面積の増加率と等しいと言 えるため,八千代橋での流量を基準とすると,新井橋での流量は八千代橋での流量の1.1 倍,講和橋 での流量は八千代橋での流量の1.4 倍となることが分かる.

現在の流量観測は八千代橋,上橋の2地点では計7回行われており,過去の場合と同様に直線の傾 きの平均をとると,2.5×10⁻³(m³/s/km²/km²)となった.この値は過去の値と比べると大きくなって いることから,流量の増加率が流域面積の増加率よりも大きいということが分かる.これは,3.1.3章 で述べたように,葛城地区における下水道計画によって蓮沼川の集水域が流域界を超えた少し西側 にまで広がっていると考えられることから,八千代橋と上橋の間において広がった集水域による流 量の増加があるからだと考えられる.

3.4 降雨イベントの選出

3.4.1 タンクモデル作成(キャリブレーション)で使用する降雨イベント

タンクモデルのキャリブレーションに用いる降雨イベントを表 9 に示す. これらの降雨イベント は, 筑波大学地球科学系 (1978) に記載されているハイドログラフの期間である 4 事例とする. 1977 年 10 月 3 日~5 日の事例は総降水量が条件である 40 mm に満たないが, 1 時間ごとの流量が記載さ れているものがこの 4 事例のみであるためそのまま使用する. また, これらの降雨イベントの API は, n=5, 10 の時は全てかなり小さな値となっているが, n=15 の時は 1977 年 9 月 19 日と 10 月 3 日 ~5 日の事例において大きな値となった.

3.4.2 タンクモデル作成(推定結果の検証)で使用する降雨イベント

タンクモデルによる推定結果の検証に用いる降雨イベントを表 10 に示す. これらの降雨イベント は、つくば市研究学園都市付近の水文資料集内の水位流量年表に日平均値が記載されている 1976 年 3月13日~1977年12月31日の期間の中で,降雨イベントの選出条件を満たすもののうち,キャリ ブレーションやハイドログラフでの比較で使用しておらず,データの欠損がない9事例とする. また、 これらの降雨イベントの API は、全体的に値が大きいものが多くなったが、1976 年 7 月 10 日~12 日や8月2日~3日の事例などはかなり小さな値となったため、様々な先行降雨の条件を持つ降雨イ ベントを用いて推定結果の検証を行うことができたと言える.

3.4.3 ハイドログラフでの比較で使用する降雨イベント

ハイドログラフでの比較に用いる降雨イベントを表 11 に示す. これらの降雨イベントは, まず現 在の降雨イベントとして, 現在の流量観測で得られた水位の上限を超えることがないような選出条 件を満たすものの中で, 降雨の仕方に異なった特徴のある3事例を選出した. その後, 過去の降雨イ ベントとして, 現在の降雨イベント3事例のそれぞれの特徴と概ね合致するような3事例を選出し た. 過去と現在の降雨イベントで特徴が合致するかどうかは, 総降水量, 1時間最大降水量, そしてグ ラフの形状を基準として判断した.

表8の過去と現在の降雨の対応と、それらの特徴についてまとめたものを表12に示す.降雨2と降雨4が比較的強いまとまった降雨,降雨1と降雨5が比較的弱い長時間の降雨,降雨3と降雨6が短期集中型降雨となっている.また、これらの降雨イベントのAPIは、全体的にかなり小さな値となっているが、n=15での1976年9月21日~22日と2019年3月10日~11日の事例では少し大きな値となっている.しかし、降雨イベントの特徴ごとの過去と現在の比較においては、どの特徴の場合でも大きな差はないため、APIによる影響はないものとして考える.

3.5 タンクモデル作成

本研究では、1976年~1977年で有効な新井橋でのタンクモデルを作成するにあたり、武田ら(1982) で作成された 1980年で有効な八千代橋でのタンクモデルの構造を参考にした.しかし、キャリブレ ーション、バリデーションに使用できる過去の流量値は講和橋での値しか存在しないため、3.3 の過 去の比流量の結果から八千代橋でのタンクモデルで算出できる流量値に 1.4 を乗じることで講和橋 での流量値を算出し、キャリブレーション、バリデーションを行なった.そしてパラメーターが決定 した後、1.4 を乗じて講和橋での流量値としていた部分を代わりに 1.1 を乗じることで、新井橋での 流量値を算出可能なタンクモデルとして使用する.

3.5.1 キャリブレーション

3.4.1 章で選出した 4 事例の降雨イベントを用いてキャリブレーションを行なった. キャリブレー

ション結果(ハイドログラフ)を図26,キャリブレーション結果(1時間ごとの流量値)を図27,タ ンクモデルのパラメーターを表13,統計値(R², RMSE)を表14に示す.結果として,4事例とも比 較的高い精度で推定することができ,水位流量年表の日平均値とも比較的高い精度で一致させるこ とができた.特に降雨イベントの規模が比較的小さい1977年10月3日~5日,11月16日~18日の 2事例においてはかなり高い精度で推定することができたが,その他の規模が比較的大きい1977年 9月4日~6日,9月19日~21日の2事例においては降雨終了後の流量が実測値を下回るものと上 回るものがあり,降雨イベントによって多少精度が下がる可能性がある.

3.5.2 推定結果の検証

3.4.2 で選出した9事例の降雨イベントを用いて1時間ごとの流量値を推定し,そこから算出した 日平均値を水位流量年表に記載されている値と比較することで推定結果の検証を行なった.また, キャリブレーションで使用した4事例の降雨イベントについても同様に,日平均値を算出し水位流 量年表の値と比較を行なった.キャリブレーションで使用した降雨イベントにおける検証結果を図 28,9事例の降雨イベントにおける検証結果を図29に示す.結果として,全体的にキャリブレーショ ンで使用した降雨イベントでの結果に比べて,9事例の降雨イベントでの結果の方が精度が下がるこ ととなった.9事例の降雨イベントでの結果では,全体的に推定値の方が実測値よりも小さくなって おり,RMSEが増加している.

この原因としては、キャリブレーションに用いた降雨事例が全て 1977 年のものであるのに対し、 検証のみに用いた降雨事例は9事例中8事例が1976年のものであり、1976年と1977年の水位流量 年表を比較すると、1976年に比べて1977年の方が平均的に流量値が小さくなっていることから、蓮 沼川流域において基底流量が減少したのではないか、ということが考えられる.これは、田口ら (1979)において「蓮沼川は全流路ブロックにて両岸ののり面および河床を改修しており」と述べら れているが、その詳細な時期については記載されていないため、ちょうど水位流量年表のデータが まとまって欠損している1977年前半にこのような河川改修が行われた可能性があり、その影響を受 けて蓮沼川の基底流量が減少したと考えられる.しかし、この期間に河川改修が行われたかどうか は確認できていないため、今後の早急な確認が必要である.

3.6 ハイドログラフの比較

3.6.1 過去・現在の類似した降雨イベントにおける比較

3.6.1.1 比較的強いまとまった降雨

表 11 の降雨 2 による過去のハイドログラフを図 30,降雨 4 による現在のハイドログラフを図 31, 流出率・各時間差を表 15 に示す.ここで用いる降雨イベントは,比較的 1 時間最大降水量が多く, 降雨が開始してから終了するまで短時間であるという特徴を持ったものである.過去と現在の降雨 イベントにおいて,総降水量は過去が 82.0 mm,現在が 45.0 mm と大きく異なるが,降雨のグラフ の形状はかなり類似している. 過去のハイドログラフの特徴として, r = 0.81, $\Delta t_s = 2$, $\Delta t_p = 5$, $\Delta t_f = 24$ と算出され, 特に Δt_p , Δt_f はかなり大きな値となった. グラフの形状は降雨が終了してからの減少の仕方が緩や かになっていることから, 降雨の浸透成分が徐々に河川へと流出していることが分かる.

それに対し現在のハイドログラフの特徴として, r = 0.96, $\Delta t_s = 1$, $\Delta t_p = 1$, $\Delta t_f = 14$ と算出され, 過去と比べて流出率は増加, その他の時間差は全て縮まっていることが分かる. また, グラフの形状もかなり先鋭化していることから, 過去から現在にかけて降雨の直接流出量が増加し浸透量が減少していることが分かる. これは, 過去から現在にかけて都市化が進行し, 非浸透域面積が増加したことによる影響を受けているからであると考えられる.

3.6.1.2 比較的弱い長時間の降雨

表 11 の降雨1による過去のハイドログラフを図 32,降雨5による現在のハイドログラフを図 33, 流出率・各時間差を表 15 に示す.ここで用いる降雨イベントは,比較的1時間最大降水量が少なく, 降雨が開始してから終了するまで長時間であるという特徴を持ったものである.過去と現在の降雨 イベントにおいて,グラフの形状は少し異なるが,総降水量と1時間最大降水量はかなり類似して いる.

過去のハイドログラフの特徴として, r = 0.72, $\Delta t_s = 3$, $\Delta t_p = 3$, $\Delta t_f = 21$ と算出され, グラフ の形状は全体として比較的強いまとまった降雨の時よりは平坦になった.しかし, 降雨終了後に緩 やかに流出している部分は類似しており, こちらの場合も降雨の浸透成分が徐々に河川へと流出し ていると考えられる.

現在のハイドログラフの特徴として, r = 0.52, $\Delta t_s = 1$, $\Delta t_p = 1$, $\Delta t_f = 15$ と算出され, 過去と 比べて流出率が減少しているため, 現在の方が降雨の浸透量が増加していると考えられるが, その 他の時間差が全て縮まっており, グラフの形状も降雨終了後に大きく凹んでいることから, やはり 過去から現在にかけて降雨の直接流出量が増加し, 浸透量が減少していると考えられる. 流出率が 減少している理由については, 過去・現在の降雨の先行降雨指数が n = 5, 10, 15 の全ての場合におい て過去の方が大きくなっているため, 降雨イベント開始前の流域での乾湿状況の違いによる影響が 多少あるのではないか, ということが挙げられる. また, 雨量観測地点と新井橋での降水量が異なっ ていたことによる影響, もしくは現在の流量を算出するために用いた水位流量曲線の精度の低さに よる影響があったのではないか, と考えられる.

3.6.1.3 短期集中型降雨

表 11 の降雨 3 による過去のハイドログラフを図 34,降雨 6 による現在のハイドログラフを図 35, 流出率・各時間差を表 15 に示す.ここで用いる降雨イベントは,1時間最大降水量がかなり多く,降 雨が開始してから終了するまで非常に短時間であるという特徴を持ったものである.過去と現在の 降雨イベントにおいて総降水量と 1 時間最大降水量に多少の違いはあるが,グラフの形状はとても 類似している. 過去のハイドログラフの特徴として, r = 0.85, $\Delta t_s = 1$, $\Delta t_p = 2$, $\Delta t_f = 33$ と算出され, 過去の 他の降雨イベントにおけるハイドログラフよりもかなり先鋭化した形状になっているが, Δt_f が最 も大きな値となっているため, やはり降雨の浸透成分が徐々に流出していることが分かる.

現在のハイドログラフの特徴として, r = 0.90, $\Delta t_s = 1$, $\Delta t_p = 0$, $\Delta t_f = 13$ と算出され, 降雨に 対する流出の応答が非常に早く, グラフの形状も非常に先鋭化していることから, 過去と比べて直 接流出量が増加していると考えられる. これは, 3.6.1.1 章で述べたことと同じく, 過去から現在にか けて都市化が進行し, 非浸透域面積が増加したことによる影響を受けているからであると考えられ る.

3.6.2 同一の降雨イベントにおける比較

3.6.2.1 比較的強いまとまった降雨

表 11 の降雨 4 による過去・現在のハイドログラフを図 36, 流出率・各時間差を表 16 に示す. 現 在の比較的強いまとまった降雨イベントを用いて比較を行なった. 過去のハイドログラフの特徴と して, r = 0.75, $\Delta t_s = 2$, $\Delta t_p = 2$, $\Delta t_f = 24$ と算出され, 3.6.1.1 章で算出した現在のハイドログラ フの特徴と比較すると, 過去から現在にかけて流出率が増加し, 時間差も全て縮まっており, ピーク 流量の値も現在の方が大きく上回った. グラフの形状としては, ピーク後の流出の仕方が現在の方 がかなり急激に減少していることが分かる. このことから, 同一の比較的強いまとまった降雨にお いて, 現在の方が過去よりも降雨の直接流出成分が大きく浸透成分が少なくなっているということ が分かる. これは, 都市化の進行によって非浸透域面積が増加したことによる影響を受けているか らであると考えられる. また, 過去・現在のハイドログラフの形状の違いから, 葛城地区に設置され ている貯留施設や調節池による急激な流量の増加の緩和, ピーク流量の上限での調整といった効果 は確認することができないため, 今回のような規模の降雨イベントでは効果は得られないと考えら れる.

3.6.2.2 比較的弱い長時間の降雨

表 11 の降雨 5 による過去・現在のハイドログラフを図 37, 流出率・各時間差を表 16 に示す.現 在の比較的弱い長時間の降雨イベントを用いて比較を行なった.過去のハイドログラフの特徴とし て, r = 0.73, $\Delta t_s = 1$, $\Delta t_p = 2$, $\Delta t_f = 22$ と算出され, 3.6.1.2 章で算出した現在のハイドログラフ の特徴と比較すると,過去から現在にかけて流出率は減少しているが, Δt_p , Δt_f は縮まっている ことが分かる.また,グラフの形状は,過去の方が特に降雨終了後の流出部分において緩やかになっ ており,流出率の減少以外は全て,現在の方が浸透量が減少していることによる影響であると考え られる.比較的弱い長時間の降雨において現在の方が流出率が小さくなった理由としては, 3.6.1.2 章 で述べたことと同じく,雨量観測地点と新井橋での降水量が異なっていたことによる影響,もしく は現在の水位流量曲線の精度の低さによる影響があったのではないか,と考えられる.

16

3.6.2.3 短期集中型降雨

表 11 の降雨 6 による過去・現在のハイドログラフを図 38, 流出率・各時間差を表 16 に示す. 現 在の短期集中型の降雨イベントを用いて比較を行なった. 過去のハイドログラフの特徴として, r =0.83, Δt_s =1, Δt_p =1, Δt_f =30 と算出され, 3.6.1.3 章で算出した現在のハイドログラフの特徴 と比較すると, 流出率の増加, Δt_f の大きな短縮が見られる. また, グラフの形状はピークの高さは 類似しているが, その後の流出の仕方が過去の方がかなり緩やかになっているため, 短期集中型降 雨においても, 過去から現在にかけて浸透量の減少が起こっていると考えられる. これは, 3.6.2.1 章 で述べたことと同じく, 都市化の進行によって非浸透域面積が増加したことによる影響を受けてい るからであると考えられる. また, 過去・現在のハイドログラフの形状の違いから, 貯留施設や調節 池による効果として, 急激な流量の増加の緩和は確認できなかったが, ピーク流量の上限での調整 はわずかではあるがあったとも考えられる. しかし, 流出率は過去より現在の方が高いため, 今回の ような規模の降雨イベントでは大きな効果は得られないと考えられる.

第4章 まとめ

4.1 結論

つくば市蓮沼川流域において過去と現在の土地利用状況を比較した結果,1976年から2016年にか けて主に農用地や森林などが減少し,建物用地が大きく増加していることが分かった.これは1963 年から始まった筑波研究学園都市の建設に伴って都市化が進行していることを表しており,さらに 土地利用種を浸透域と非浸透域に分類した結果,非浸透域面積割合が大きく増加していることが分 かった.

また, 蓮沼川流域内での過去と現在の比流量の変化を比較した結果, 過去では流域面積の増加率 と流量の増加率が等しかったが, 現在では流域面積の増加率よりも流量の増加率の方が大きくなっ ていることが分かった. これは下水道の整備が進んだことによって蓮沼川流域の外からも蓮沼川へ の流出が発生しているからであると考えられる.

そして, 蓮沼川流域内の新井橋において過去と現在のハイドログラフを比較した結果, ほとんど の降雨イベントにおいて過去から現在にかけて流出率の増加, 流出時間の短縮が見られた. これは 流域内で都市化が進行したことによる非浸透域面積の増加の影響を受け, 降雨が地中へと浸透する 成分が減少し, 河川へと直接流出する成分が増加しているからであると考えられる. また, 蓮沼川流 域の南西部に一部位置している葛城地区では, 下水道集水区域区分として住宅地などを浸透域, 商 業施設などを貯留域となるように浸透施設, 貯留施設の設置を計画していたが, 本研究での比較で はそれらの施設による河川流出量への影響はほとんど見られなかった. ただし, 葛城地区は蓮沼川 流域の一部に過ぎないということや, 雨水貯留浸透基本計画書が作成された 2007 年時点での流量と の比較ではなくそれ以前の 1977 年時点での流量との比較であるということを踏まえると, 葛城地区 における河川計画, 下水道計画の意義の有無については別途考察が必要である.

4.2 今後の課題

本研究では計 10 回の流量観測を行い水位流量曲線を作成したが,精度の高い水位流量曲線を作成 するには観測の回数が少なく,また大規模な降雨時に観測を行うことができなかったため,流量を 算出できる降雨イベントに限りがあった.そのため,今後様々な降雨イベント時に重ねて流量観測 を行うことができれば,本研究で作成したハイドログラフよりも精度が高く,より大規模な降雨イ ベントでのハイドログラフを作成することができ,都市化地域の河川流出特性のさらなる理解や洪 水などの災害対策に大いに貢献できるかもしれない.

また,過去に行われた蓮沼川の河川改修工事の有無について確認をすることができなかったため, 過去の流量変化において説明に疑問が残った.そのため,今後蓮沼川に関する資料について調査し, さらに細かい考察を行いたい.

18

謝辞

本研究を行うにあたり,筑波大学生命環境系の杉田倫明先生には,研究方法における丁寧なご指 導やご提案など,数多くの面において大変お世話になりました.誠に感謝申し上げます.

また,筑波大学水文科学分野の先生方や,杉田研究室の方々には,度々貴重なご意見やご提案をい ただきました.

また,筑波大学生命環境学群地球学類の同期や後輩の方々には,本研究において重要な河川での 流量観測を度々ご協力いただき,大変お世話になりました.

また,茨城県土木部の方々には,本研究において重要な新井橋水位データをご提供いただき,大変 ありがたく利用させていただきました.

以上の方々と,本研究に対して応援をくださった家族,友人をはじめとする全ての方々に,この場 を借りて心から御礼申し上げます.

参考文献

- 市川 正巳,山本 荘毅,高山 茂美,榧根 勇,古藤田 一雄,田中 正,田口 雄作,佐倉 保夫,鈴木 裕一(1980):
 水文循環に及ぼす都市化の影響-筑波研究学園都市およびその周辺地域の場合-.筑波の環境研究 5, 5-18.
- 茨城県 河川整備基本方針・河川整備計画(2021年1月28日アクセス) (https://www.pref.ibaraki.jp/doboku/kasen/keikaku/kasen/plan.html)
- 茨城県土木部 雨量・河川水位情報 蓮沼川新井橋河川水位データ(2021年1月28日アクセス) (<u>http://www.kasen.pref.ibaraki.jp</u>)
- 国土交通省 気象庁 (2021 年 1 月 22 日アクセス) (https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php)
- 国土交通省 国土地理院 地図・空中写真・地理調査(2021年1月28日アクセス) (<u>https://www.gsi.go.jp/tizu-kutyu.html</u>)
- 国土交通省 不動産・建設経済局 国土数値情報(2021年1月22日アクセス)
 (<u>https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html</u>)
- 社団法人 雨水貯留浸透技術協会(2007): TX 沿線地区(つくば市域)雨水貯留浸透基本計画書.
- 瀬川 学,丸山 利輔,高瀬 恵次(2017):都市化に伴う流出量の変化:一手取川扇状地,倉部川流域を事例として
 一. 農業農村工学会論文集 85(2), II_71-II_81.
- 武田 宏, 岸井 徳雄, 中根 和郎, 大倉 博, 佐藤 照子(1982): 筑波研究学園流出試験地の流出特性(第 1 報). 国 立防災科学技術センター 研究報告 第 27 号, 49-87.
- 田口 雄作, 佐倉 保夫, 市川 正巳, 高山 茂美(1979): 筑波研究学園都市およびその周辺地域における河川の流 出特性について 第3報. 筑波の環境研究 4, 162-166.
- つくば市公式ウェブサイト (2021 年 1 月 22 日アクセス) (https://www.city.tsukuba.lg.jp)
- 筑波大学地球科学系,水文分野(1976):つくば市研究学園都市付近の水文資料集 No.1.水文学研究報告第1号.
- 筑波大学地球科学系,水文分野(1977):つくば市研究学園都市付近の水文資料集 No.2.水文学研究報告第2号.
- 筑波大学地球科学系,水文分野(1978): つくば市研究学園都市付近の水文資料集 No.3. 水文学研究報告第3号.
- 山本 荘毅,市川 正巳,高山 茂美,鈴木 裕一,田口 雄作,古藤田 一雄,佐倉 保夫(1978): 筑波研究学園都市 およびその周辺地域における河川の流出特性について 第2報. 筑波の環境研究 3, 157-161.
- 吉岡 耀子(2015): 多摩川水系・湯殿川における流域開発と降雨流出の変化. 法政地理(47), 31-42.
- Chen Y, Xu Y, Yin Y(2009): Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoxi basin, China. Quaternary International 208, 121–128.
- Rodrigues A.L.M, Reis G.B, dos Santos M.T, da Silva D.D, dos Santos V.J, Castro J.D, Calijuri M.L(2019): Influence of land use and land cover's change on the hydrological regime at a Brazilian southeast urbanized watershed. Environmental Earth Sciences 78(20), 595.

来旦	日付	流量(m ³ /s)							
笛勺		東平塚橋	八千代橋	講和橋					
1	1975/11/16	0.67	1.13	1.31					
2	1976/1/31	0.05	0.09	0.14					
3	1976/2/21	0.04	0.08	0.14					
4	1976/7/31	0.14	0.31	0.35					
5	1977/12/21 14:00	0.07	0.15	0.15					

表 1 流量観測結果(過去)

※1~4 は資料に時刻の記載なし

表 2 過去・現在の土地利用割合

	田(%)	農用地(%)	森林(%)	荒地(%)	建物用地(%)	道路(%)	その他の用地(%)	河川(%)	芝地(%)	合計(%)
1976年	11.3	39.9	23.6	0.0	4.7	0.9	19.5	0.1	0.0	100
2016年	7.2	25.5	8.5	0.3	35.2	3.9	19.4	0.0	0.0	100

表 3 流量観測結果(現在)

亚口	口付	八千	代橋	Ŀ	橋	新井橋		
借亏	口15	水位(m)	流量(m ³ /s)	水位(m)	流量(m ³ /s)	水位(m)	流量(m ³ /s)	
1	2020/6/19 11:00	0.43	1.25	0.46	1.60	2.43		
2	2020/7/1 11:00	0.40	0.84	0.38	1.10	2.43		
3	2020/7/4 10:00	0.58	1.58	0.60	1.81	2.50		
4	2020/7/9 11:00	0.59	1.38	0.52	1.72	2.48		
5	2020/7/14 10:00	0.44	1.10	0.45	1.48	2.43		
6	2020/7/18 11:00	0.58	1.53	0.65	2.18	2.48		
7	2020/7/23 11:00	0.42	0.67	0.39	1.22	2.39		
8	2020/10/8 12:00					0.50	0.92	
9	2020/10/10 9:00					0.86	4.32	
10	2020/11/3 9:00					0.44	0.34	

表 4 〔	乁千代橋における	流量観測結果詳細
-------	-----------------	----------

番号	日付	左岸からの距離(m)	4		3	3	4	2	1		()
		水深(m)	0.20	5	0.	56	0.	59	0.56		0.	19
1	0000/6/10 11 00	断面積(m ²)		0.	.41	0.5	58	0.5	58	0.3	38	
1	2020/ 0/ 19 11:00	流速(m/s)		0.	.68	0.8	85 0.68		0.25			
		流量(m ³ /s)		0.	.28	0.4	19	0.3	39	0.0)9	
		水深(m)	0.28	3	0.	50	0.	53	0.	49	0.	20
2	2020/7/1 11.00	断面積(m ²)		0.	.39	0.5	52	0.:	51	0.3	35	
2	2020/7/111:00	流速(m/s)		0.	.40	0.6	67	0.4	45	0.3	32	
		流量(m ³ /s)		0.	.16	0.3	35	0.2	23	0.1	1	
		水深(m)	0.50)	0.	72	0.	70	0.	63	0.	33
2	2020/7/4 10:00	断面積(m ²)		0.	.61	0.7	71	0.	56	0.4	18	
3		流速(m/s)	0.		.84 0.7		.72 0.		55	0.4	40	
		流量(m ³ /s)		0.	.51	0.5	51	0.3	37	0.1	9	
4	2020/7/9 11:00	水深(m)	0.59	9	0.	66	0.	70	0.	70	0.	31
		断面積(m ²)		0.	.62	0.6	68	0.7	70	0.5	50	
4		流速(m/s)		0.37		0.7	75	0.'	70	0.3).30	
		流量(m ³ /s)		0.	.23	0.5	51	0.4	49	0.1	5	
		水深(m)	0.4	1	0.	57	0.	59	0.	47	0.	20
F	2020/7/14 10:00	断面積(m ²)		0.	.49	0.5	58	0.:	53	0.3	33	
5	2020/7/14 10:00	流速(m/s)		0.	.54	0.7	72	0.0	66	0.2	24	
		流量(m ³ /s)		0.	.26	0.4	41	0.3	35	0.0)8	
		水深(m)	0.5	1	0.	69	0.	67	0.	63	0.	39
ć	2020/7/18 11.00	断面積(m ²)		0.	.60	0.6	68	0.0	65	0.5	51	
0	2020/7/18 11:00	流速(m/s)		0.	.59	0.8	33	0.0	0.61 0		12	
		流量(m ³ /s)		0.	.35	0.5	57	0.4	40	0.2	21	
		水深(m)	0.37	7	0.	50	0.	48	0.	51	0.	22
-	2020/7/22 11.00	断面積(m ²)		0.	44	0.4	49	0.	50	0.3	36	
	2020/7/23 11:00	流速(m/s)		0.	.25	0.5	57	0.45		0.15		
		流量(m ³ /s)		0.	.11	0.2	28	0.2	22	0.0)5	

番号	日付	左岸からの距離(m)	5		4	3	2	2	1	0
		水深(m)	0.44	0.	47	0.49	0	42	0.50	0.44
	0000///10.11.00	断面積(m ²)		0.46	0.48		0.45	0.46	0.	47
1	2020/6/19 11:00	流速(m/s)		0.79	0.75		0.71	0.66	0.	53
		流量(m ³ /s)		0.36	0.36		0.32	0.30	0.	25
		水深(m)	0.36	0.	39	0.40	0.3	34	0.46	0.32
2	2020/7/1 11.00	断面積(m ²)		0.37	0.40		0.37	0.40	0.	39
2	2020/7/111:00	流速(m/s)		0.56	0.61		0.65	0.63	0.	41
		流量(m ³ /s)		0.21	0.24		0.24	0.25	0.	16
		水深(m)	0.60	0.	63	0.62	0.	58	0.63	0.54
2	2020/7/4 10:00	断面積(m ²)		0.62	0.63		0.60	0.61	0.	59
3		流速(m/s)		0.68	0.65		0.62	0.55	0.	48
		流量(m ³ /s)		0.42	0.41		0.37	0.33	0.	28
	2020/7/9 11:00	水深(m)	0.48	0.	64	0.60	0.	50	0.58	0.35
4		断面積(m ²)		0.56	0.62		0.55	0.54	0.	46
4		流速(m/s)		0.66	0.60		0.65	0.74	0.	47
		流量 (m^3/s)		0.37	0.37		0.36	0.40	0.	22
		水深(m)	0.45	0.	49	0.45	0	42	0.48	0.42
F	2020/7/14 10:00	断面積(m ²)		0.47	0.47		0.44	0.45	0.	45
Э	2020/7/14 10:00	流速(m/s)		0.66	0.76		0.75	0.67	0.	42
		流量 (m^3/s)		0.31	0.36		0.33	0.30	0.	19
		水深(m)	0.70	0.	72	0.68	0.	59	0.69	0.50
6	2020/7/18 11.00	断面積(m ²)		0.71	0.70		0.64	0.64	0.	60
0	2020/7/18 11:00	流速(m/s)		0.64	0.76		0.72	0.72	0.	46
		流量(m ³ /s)		0.45	0.53		0.46	0.46	0.	27
		水深(m)	0.36	0.	44	0.45	0.3	37	0.53	0.20
7	2020/7/22 11:00	断面積(m ²)		0.40	0.45		0.41	0.45	0.	37
1	2020/7/23 11:00	流速(m/s)		0.65	0.64		0.64	0.49	0.	54
		流量(m ³ /s)		0.26	0.28		0.26	0.22	0.	20

表 5 上橋における流量観測結果詳細

表 6 新井橋における流量観測結果詳細

番号	日付	左岸からの距離(m)	6	5	Ę	5		4	3	3	2	2		1		0
	2020/10/8 12:00	水深(m)			0.1	18	0.	52	0.	61	0.	61	0.	54	0.	.52
1		断面積(m ²)				0.:	35	0.57		0.	61	0.:	58	0.	0.53	
1		流速(m/s)				0.	18	0.3	30	0	40	0.3	37	0	44	
		流量(m ³ /s)				0.0	06	0.	17	0.	24	0.1	21	0.	23	
	2020/10/10 9:00	水深(m)	0.	15	0.5	52	1.	03	1.	06	1.	18	1.	06	1.	.02
2		断面積(m ²)		0.33		0.77		1.0)5	1.	12	1.	12	1.	04	
2		流速(m/s)		0.1		0.90		0.7	78	0.	85	0.	94	0.	74	
		流量(m ³ /s)		0.	.03	0.′	70	0.8	32	0.	95	1.	05	0.	77	
		水深(m)					0.	30	0.	52	0.	53	0.	47	0.	.37
2	2020/11/2 0.00	断面積(m ²)						0.4	41	0.	52	0.	50	0.	42	
5	2020/11/3 9:00	流速(m/s)		\nearrow		\sim		0.	16	0.	22	0.	18	0.	16	
		流量(m ³ /s)						0.0)7	0.	12	0.	09	0.	07	

表 7 比流量算出結果(過去)

	日付	東平塚橋	八千代橋	講和橋
流下距離(km)		0	3.220	6.785
流域面積(km ²)		8.79	13.82	19.30
	1975/11/16	0.0762	0.0818	0.0679
	1976/1/31	0.0057	0.0065	0.0073
比流量(m ³ /s/km ²)	1976/2/21	0.0046	0.0058	0.0073
	1976/7/31	0.0156	0.0226	0.0181
	1977/12/21	0.0083	0.0108	0.0079

表 8 比流量算出結果(現在)

	日付	八千代橋	上橋
流下距離(km)		3.220	5.310
流域面積(km ²)		13.82	16.87
	2020/6/19	0.0907	0.0946
	7/1	0.0609	0.0653
	7/4	0.1147	0.1074
比流量(m ³ /s/km ²)	7/9	0.0995	0.1017
	7/14	0.0798	0.0879
	7/18	0.1108	0.1291
	7/23	0.0483	0.0725

采旦	口仕	降水量		先行降雨指数(API)		
宙与	μŋ	合計(mm)	最大(mm/h)	n=5	n=10	n=15
1	1977/9/4	73.5	70.0	0	0.25	0.46
2	1977/9/19	112.0	24.5	0	2.26	10.66
3	1977/10/3-4	37.0	5.5	2.17	2.45	10.45
4	1977/11/16-17	55.5	11.0	0.50	0.56	1.05

表 9 キャリブレーションに用いる降雨イベント

表 10 推定結果の検証に用いる降雨イベント

采旦	口仕	降水量		先行降雨指数(API)		
借与	L 11	合計(mm)	最大(mm/h)	n=5	n=10	n=15
1	1976/5/21-22	42.5	6.5	16.35	16.35	18.70
2	1976/5/25-27	130.5	27.0	23.58	30.68	30.68
3	1976/7/10-12	74.0	15.0	0.50	3.19	4.52
4	1976/7/17-19	57.5	22.5	4.95	14.56	15.14
5	1976/8/2-3	64.5	24.0	0	0	3.70
6	1976/9/1-2	81.0	25.5	28.25	30.71	30.78
7	1976/10/9	44.5	15.0	2.05	2.70	5.79
8	1976/10/24	46.0	15.0	9.25	12.88	15.85
9	1977/9/8-10	60.5	11.0	18.38	18.38	18.59

表 11 ハイドログラフでの比較に用いる降雨イベント

番号日付	日付	降水量		先行降雨指数(API)		
	μŋ	合計(mm)	最大(mm/h)	n=5	n=10	n=15
1	1976/9/21-22	44.5	6.5	1.50	4.99	9.60
2	1977/5/15	82.0	13.0	0	2.36	2.63
3	1977/9/4	73.5	70.0	0	0.25	0.46
4	2019/3/10-11	45.0	11.0	3.45	7.24	9.81
5	2020/3/28-29	52.0	5.5	0.38	0.54	1.90
6	2020/8/23	61.5	43.0	0	0.08	0.13

番号	日付	特徴	
2	1977/5/15	比較的強いましま。 を降雨	
4	2019/3/10-11	比較的強いまとまうた時的	
1	1976/9/21-22	比較的弱い長時間の降雨	
5	2020/3/28-29	比較的物が及时间の陸的	
3	1977/9/4	斩 期集 山 刑 降 雨	
6	2020/8/23	应期集中空阵的	

表 12 ハイドログラフでの比較に用いる降雨イベントの特徴(表 11 参照)

表 13 タンクモデルパラメーター

文字	数值
a 11	0.02
a 12	0.015
a 2	0.002
b 1	0.1
b 2	0.001
Z 11	40
Z 12	1.5
Z 2	35

表 14 キャリブレーション結果(統計値)

番号	日付	R^2	RMSE
1	1977/9/4	0.822	0.7386
2	1977/9/19	0.9387	0.5473
3	1977/10/3-4	0.9582	0.1430
4	1977/11/16-17	0.9481	0.2677

表 15 流出率・各時間差(過去・現在の類似した降雨イベント)(表 11 参照)

番号	日付	r	$\Delta t s$	$\varDelta t_p$	Δtf
2	1977/5/15	0.81	2	5	24
4	2019/3/10-11	0.96	1	1	14
1	1976/9/21-22	0.72	3	3	21
5	2020/3/28-29	0.52	1	1	15
3	1977/9/4	0.85	1	2	33
6	2020/8/23	0.90	1	0	13

表 16 流出率・各時間差(同一の降雨イベント)(表 11 参照)

番号	日付	過去・現在	r	$\Delta t s$	Δt_p	∆t f
4 2019/3/10-11	2010/2/10 11	過去	0.75	2	2	24
	現在	0.96	1	1	14	
5 0000/0/00 00	2020/2/28 20	過去	0.73	1	2	22
5	2020/ 3/ 20-29	現在	0.52	1	1	15
6 2020/8/2	2020/0/22	過去	0.83	1	1	30
Ö	2020/ 8/ 23	現在	0.90	1	0	13



図 1 蓮沼川流域



図 2 八千代橋における蓮沼川の状況(2021年1月28日撮影)



図 3 上橋における蓮沼川の状況(2021年1月28日撮影)



図 4 ゴム堰あり時の設置場所における蓮沼川の状況(2020 年 5 月 31 日撮影)



図 5 ゴム堰あり時の新井橋における蓮沼川の状況(2020年5月31日撮影)



図 6 ゴム堰なし時の設置場所における蓮沼川の状況(2020年9月3日撮影)



図 7 ゴム堰なし時の新井橋における蓮沼川の状況(2020年9月3日撮影)



図 8 八千代橋周辺の河川断面図



図 9 新井橋・上橋周辺の河川断面図



図 10 講和橋における水位流量曲線と水位流量年表の比較(過去)



図 11 タンクモデル模式図



図 13 土地利用図(2016年)



図 14 土地利用変化図



図 16 航空写真(1976年)(国土地理院, 2020)

図 17 航空写真(2016年)(左:西部,右:南西部)(国土地理院,2020)

図 18 下水道集水区域区分図(葛城地区)(雨水貯留浸透基本計画書, 2007) (蓮沼川流域界の西側を記載, 流域界より東側が蓮沼川流域)

平面図(縮尺 1:5,000)

図 19 蓮沼川支川調節池概要図(河川整備計画付図, 2012)

(写真:2021年1月28日に南東側より撮影)

図 20 蓮沼川第一調節池概要図(河川整備計画付図, 2012)

(写真:2021年1月28日に南西側より撮影)

平 面 図 (縮尺 1:5,000)

図 21 蓮沼川第二調節池概要図(河川整備計画付図, 2012)

(写真: 2021年1月28日に南東側より撮影)

図 22 水位流量曲線(2020年)(左:八千代橋,右:上橋)

図 23 新井橋水位流量曲線(2020年)(左:ゴム堰あり時,右:ゴム堰なし時)

図 25 流域面積と比流量の関係(現在)

(左上:降雨1,右上:降雨2,左下:降雨3,右下:降雨4)

図 27 キャリブレーション結果(1時間ごとの流量値)(表9参照) (左上:降雨 1,右上:降雨 2,左下:降雨 3,右下:降雨 4)

図 28 キャリブレーションで用いた降雨イベントでの検証結果(日平均値)

図 29 9 事例の降雨イベントでの検証結果(日平均値)

図 30 ハイドログラフ (過去) (表 11 参照 降雨 2)

図 31 ハイドログラフ (現在)(表 11 参照 降雨 4)

図 32 ハイドログラフ (過去) (表 11 参照 降雨 1)

図 33 ハイドログラフ(現在)(表 11 参照 降雨 5)

図 34 ハイドログラフ (過去) (表 11 参照 降雨 3)

図 35 ハイドログラフ(現在)(表 11 参照 降雨 6)

図 36 ハイドログラフ (表 11 参照 降雨 4)

図 37 ハイドログラフ (表 11 参照 降雨 5)

図 38 ハイドログラフ (表 11 参照 降雨 6)