

都市郊外部における 排水路基底流量を考慮した内水氾濫解析

AN INUNDATION INSIDE THE LEVEE ANALYTICAL METHOD THAT CONSIDERED THE BASE FLOW OF THE DRAINAGE CANAL

三好 学¹・田村 隆雄²・武藤 裕則³・安藝 浩資⁴
Manabu MIYOSHI, Takao TAMURA, Yasunori MUTOU, and Hiroshi AKI

¹正会員 修士(工学) ニタコンサルタント株式会社 (〒771-0122 徳島県徳島市川内町鈴江西38-2)

²正会員 博士(工学) 徳島大学大学院シオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³正会員 Ph.D 徳島大学大学院シオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

⁴正会員 博士(工学) ニタコンサルタント株式会社 (〒771-0122 徳島県徳島市川内町鈴江西38-2)

An inundation inside the levee analytical method that considered the base-flow of the drainage canal was considered for the suburban area where the mountainous district and the field were contained, and the drainage-canal flowed. The base-flow is presumed from the unsteady flow calculation using the water-levels data of the drainage-canal observed at low-water, and applied to an inundation inside the levee model. The analytical method of the present study was applied to inundation inside the levee in Nishisuga region in Tokushima city that had been generated by Typhoon No.11 in 2014. The following results were achieved. (1)The water-levels in drainage-canal could be reproduced when it was flooded. (2)The runoff-coefficient presumed by the analytical modeling and the runoff-coefficient calculated from material concerning the land-uses were roughly corresponding. (3)The ratio of the base-flow at the flood peak was estimated to be about 50%. The importance of the evaluation of the base-flow was suggested.

Key Words : *inundation inside the levee analysis, base-flow, runoff-coefficient, runoff from mountainous*

1. はじめに

近年, 地球温暖化の影響により降雨量が増加傾向にあり, 地方都市においても内水氾濫の被害リスクが増大している。地方都市の1つである徳島市でも, 内水被害が多発しており, 徳島市南部に位置する西須賀地区を貫流している幹線水路(大谷前排水路)に水位計を設置し, 当該地区における内水氾濫の浸水状況の調査が行われている。

土地利用において田畑や山地が過半数を占める地方都市郊外を対象とし, 内水氾濫解析を適用した事例¹⁾は少ない。そのような流域では解析領域に幹線水路や内水河川が含まれており, 基底流量を考慮した内水氾濫解析を行う必要がある。西須賀地区の開水路上流端は山地と接しており, 大谷前排水路は晴天時においても水深が観測されていた。そのため, 当該地区では基底流量を考慮せずに平成26年台風11号(以下, H26T11という。)時の内水氾濫解析を実施すると, 大谷前排水路に設置した水位計の観測水位より計算水位の方が低い計算結果となることが予想され, 内水氾濫解析を行う際には, 基底流量を考慮する必要があると考えられた。

基底流量を推定するモデルについての先行研究は多い。

例えば, 佐山ら²⁾は山体地下水の流動を表現する分布型モデルを開発し, 山体地下水の流動によって土壌が飽和した場合には土層を介し河道に流入する山体地下水モデルにより基底流量を再現している。また, 杉浦ら³⁾は基底流量に相当する雨量を観測雨量に加え, 観測値から自己回帰モデルを用いて基底流量に相当する雨量を同定している。これらの研究では, 複数のパラメータを同定することにより, 基底流量を推定している。

本研究では, 観測値と計算値の最大浸水位が一致していれば, 実務的に支障はないと考え, できるだけ簡便な流量同定法を採用する。具体的には山地と接する開水路上流端に, 集水面積に応じて基底流量を流入させた内水氾濫解析を行う。そして, 解析により推定された流出係数を指標とし, その妥当性を検証する。また, H26T11の前週に来襲した台風12号(以下, H26T12という。)を対象とした同様の検証を行うことにより, 本手法の汎用性を確認する。また, 大谷前排水路に隣接する多々羅川の基底流量は「徳島県の河川と海岸⁴⁾」に記載されているものの, 大谷前排水路の基底流量に関する文献は見受けられなかった。類似した地質の影響下では基底流量の原単位はほぼ同量であるため, 記載のある多々羅川の基底流量と, 同定された大谷前排水路の基底流量との整合性を確認する。その計算結果から直接流量と基

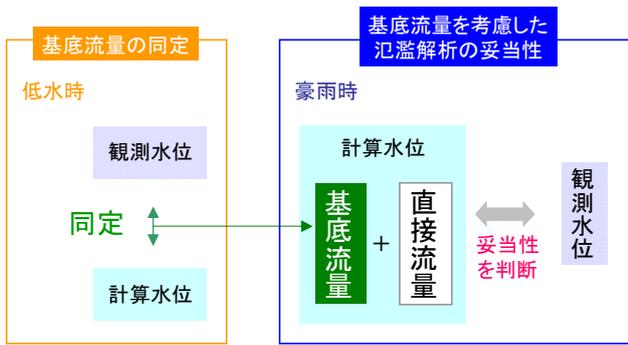


図-1 解析手法

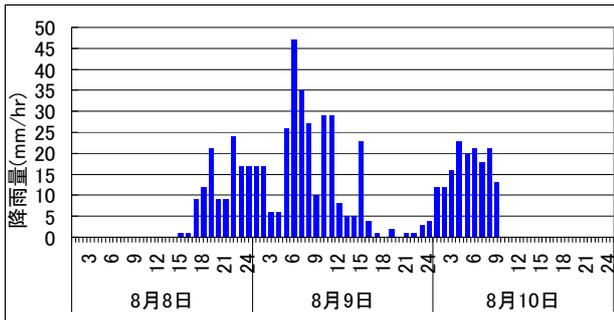


図-2 H26T11の降雨波形(丈六観測所)

底流量の流量比を算定し、田畑や山地を含む地方都市郊外部における基底流量の評価の重要性を把握する。

2. 基底流量を考慮した内水氾濫解析手法

(1) 解析手法

本研究の解析手法を図-1に示す。まず、基底流量を推定するため、低水時における大谷前排水路の不定流計算を行う。不定流計算では、支川の合流や排水路上流端への山地からの流入を考慮した。この計算水位と幹線水路内に設置した水位計による観測水位との比較により、基底流量を同定する。そして、同定した基底流量を考慮した内水氾濫解析を行い、その計算結果と浸水実績との比較により、その妥当性について検証する。

(2) 内水氾濫解析モデル

本解析では、高橋らが開発した内水流動数値解析モデルを使用した^{5),6)}。本解析モデルは、二次元不定流モデル(地表面)、一次元開水路不定流モデル(排水路)、一次元管水路不定流モデル(下水路)の3個のサブモデルを結合することにより構築されている。下水排水路モデルでは、数値解析の不安定化を避けるためスロットモデルを採用している。また、排水路網、雨水排水用下水路網、水門・樋門、排水機場など、実在する内水排水関連施設の効果を考慮することが可能である。流れの数値計算は、空間的には水位と流量フラックスとをスタガード配置した正方形グリッドモデルを差分化した。時間的にはleap-frog法により陽的に離散化している。また、当該地区の排水路は底面砂利のコンクリート水路であ

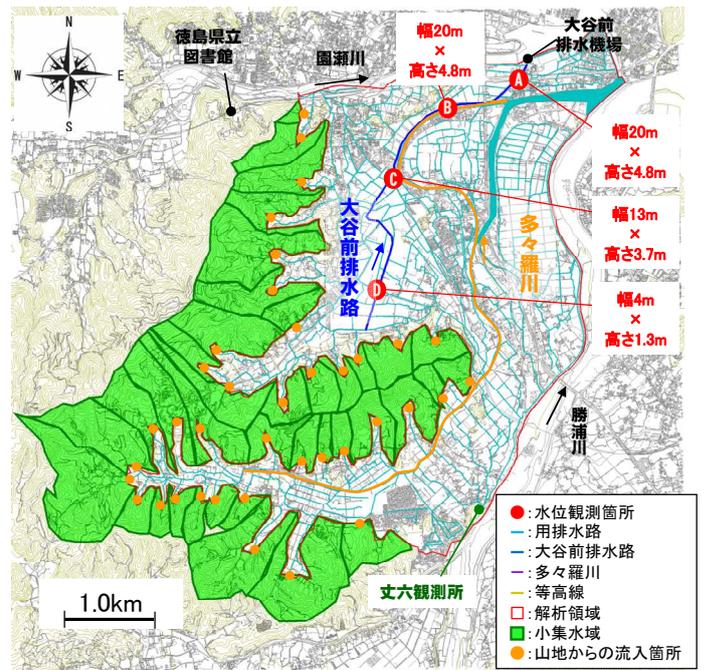


図-3 西須賀地区の位置

ることから、マンニングの粗度係数を0.017とした⁷⁾。

(3) 基底流量の推定

一般的に山地に面した地区の排水路上流端は、山地からの流入が想定される。「土地改良事業計画設計基準⁸⁾」では、内水流域の常時排水量の検討において、観測による方法と流出解析による方法があると記載されている。そこで本研究では、流出解析による方法を用い、比流量算定の考え方を採用することとした。まず、6.0,9.0,12.0,15.0 $\text{m}^3/(\text{sec} \cdot \text{km}^2)$ の4ケースの比流量に集水面積を乗し、その流量を基底流量として図-3中の山地からの流入箇所(山地と接する排水路上流端から常時流入させた氾濫解析を行った。そして、低水時(平成26年7月12日～13日)の48時間を対象に観測水位と定常状態となった計算水位の平均値を比較し、回帰式を算定した。その回帰式を用いて観測値に最も近い流量を算定し、その流量を当該地区の基底流量とした。

(4) 山地から氾濫域への流入

豪雨時の山地から氾濫域への流入については、基底流量と同様に山地に面した地区の排水路上流端へ流入が想定される。そのため、図-3中の山地からの流入箇所に合理式により山地から雨水を流入させた。これに加え、前項で同定した基底流量を常時流入させた。

3. 適用結果

(1) 対象降雨と対象領域および水位観測箇所

対象降雨を図-2に、対象地区を図-3示す。対象とした降雨はH26T11降雨(平成26年8月8日～10日)である。この降雨

は、対象地区内にある丈六観測所において観測されており、3日雨量は413mm、最大時間雨量は47mm/hrである。本研究では、大谷前排水路に設置した水位計による観測値を基に、H26T11時の浸水状況を再現し、基底流量を考慮した内水氾濫解析の妥当性を検証する。

西須賀地区は、山地を含む26.4km²の地区である。当該地区には、本研究で対象とした大谷前排水路に隣接する谷を源流とする多々羅川が流れている。水位観測箇所のC～A点付近では、接続はしていないものの、大谷前排水路と多々羅川が並行して流下している。そのため、両者の集水域の分離が困難であることから、大谷前排水路だけでなく多々羅川の集水域も本研究の解析領域の対象とした。大谷前排水路は全長3.6km、勾配1/1,200の矩形断面の排水路であり、園瀬川と合流する下流端には、大谷前排水機場が建設されており、排水路の水位がT.P.-0.20m以上になると排水機により5.25m³/sの強制排水を行っている。本研究は、これを大谷前排水路下流端の境界条件とした。本研究では、大谷前排水路内の4箇所(A～D地点)における排水路の水位観測値を使用した。

また当該地区は、山地に面しており、「小集水域」から「山地からの流入箇所(開水路上流端)」へ集水面積に応じた常時流入量がある。それが、大谷前排水路や多々羅川に流入

することにより、基底流量となっている。

(2) 基底流量の同定

水位観測箇所(A～D地点)における前述した低水時48時間の観測水位と定常状態となった計算水位の平均値の差を表-1と図-4に示す。これらを見ると、比流量が12.3m³/(sec・km²)の際に、観測水位と計算水位が最も近いことがわかる。そのため、大谷前排水路の基底流量を12.3m³/(sec・km²)と推定した。

ここで「徳島県の河川と海岸⁴⁾」をみると、大谷前排水路の近傍に流れている多々羅川の平常時比流量は、11.1m³/se

表-1 基底流量の同定

観測地点	計算平均水位と観測平均水位の差			
	基底流量 6.0 (m ³ /(sec・km ²))	基底流量 9.0 (m ³ /(sec・km ²))	基底流量 12.0 (m ³ /(sec・km ²))	基底流量 15.0 (m ³ /(sec・km ²))
A	-0.717	-0.432	0.148	0.499
B	-1.673	-0.667	0.074	0.273
C	-1.780	-0.920	0.385	0.734
D	-2.043	-1.183	0.122	0.472
差の合計	-6.213	-3.202	0.729	1.979

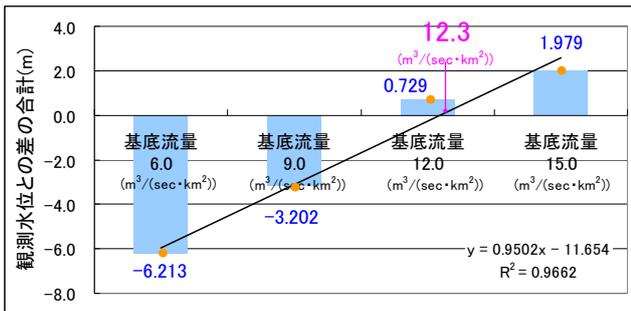


図-4 基底流量の同定

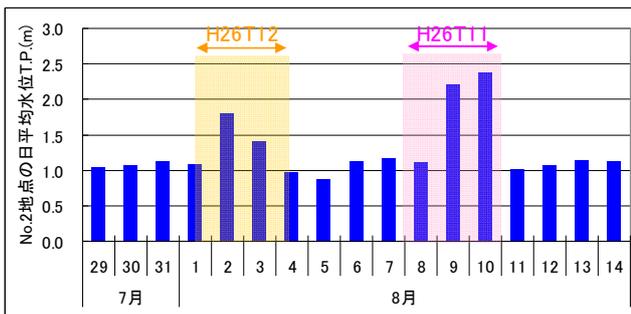


図-5 日平均水位(B地点)

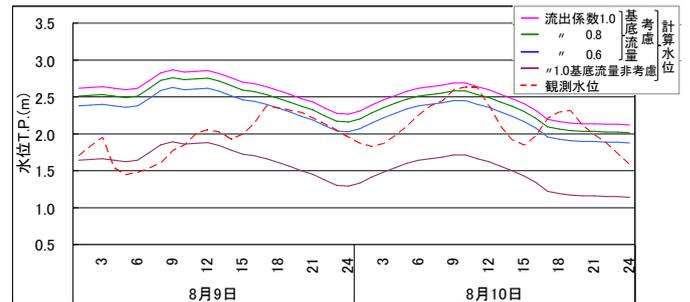


図-6 計算水位と観測水位の比較(A地点)

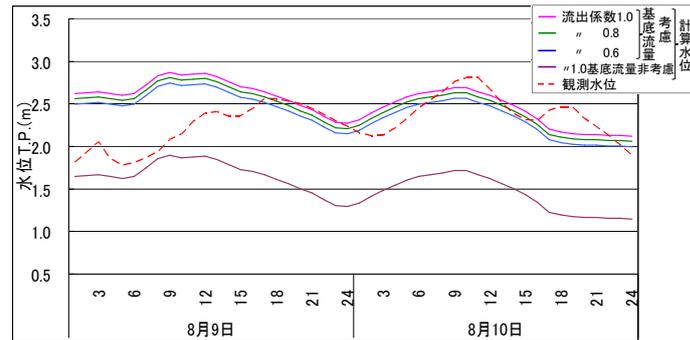


図-7 計算水位と観測水位の比較(B地点)

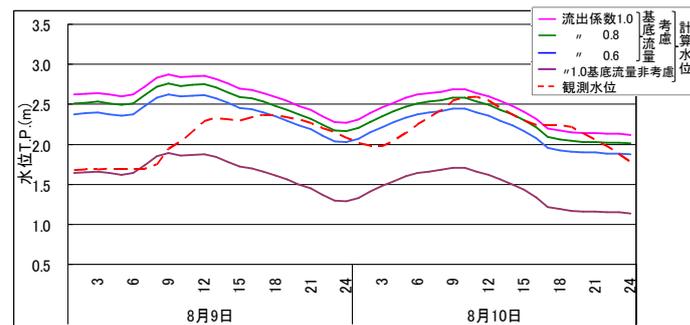


図-8 計算水位と観測水位の比較(C地点)

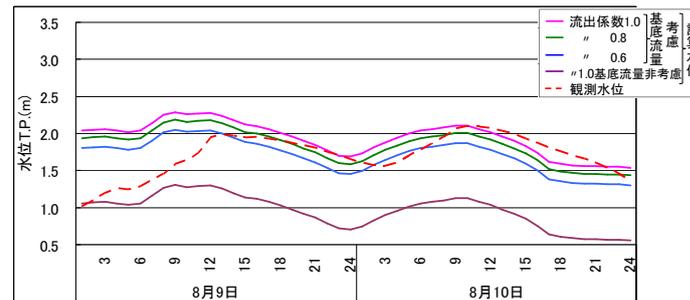


図-9 計算水位と観測水位の比較(D地点)

表-2 流出係数の同定(H26T11)

観測地点	計算最大水位と観測最大水位の差(m)					
	流出係数 1.0	流出係数 0.9	流出係数 0.8	流出係数 0.7	流出係数 0.6	流出係数 0.90
A	0.054	0.001	-0.052	-0.109	-0.126	0.001
B	-0.120	-0.148	-0.182	-0.198	-0.244	-0.148
C	0.094	0.040	-0.014	-0.072	-0.085	0.040
D	0.011	-0.040	-0.090	-0.148	-0.225	-0.040
差の絶対値の合計	0.279	0.228	0.337	0.528	0.680	0.228

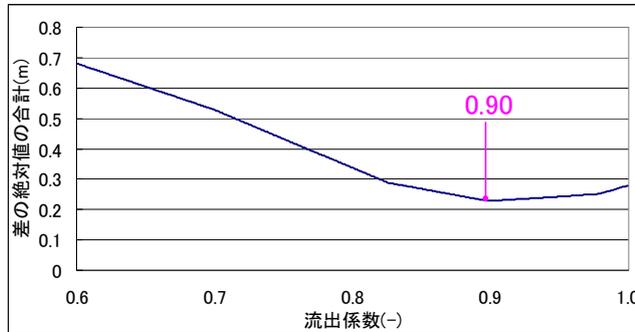


図-10 流出係数の同定(H26T11)

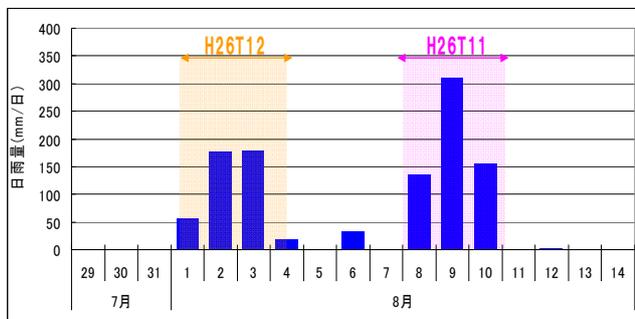


図-12 両台風前後の日雨量

$c \cdot \text{km}^2$)と記載されている。本研究では基底流量を比較的大きな夏季に同定しており、大谷前排水路の基底流量を $12.3\text{m}^3/(\text{sec} \cdot \text{km}^2)$ とすることを妥当と判断した。また、B地点の日平均観測水位を図-5に示す。これを見ると、平成26年8月の月上旬には、2つの台風が来襲したことにより、来襲時には水位が上昇しているものの、その翌日(8月4日)には平常時の水位に戻っていることがわかる。この傾向は、他3地点にもみられた。当該地区では、前日の降雨の影響により、その翌日の基底流量が増加する傾向は少ないと考えられる。そのため、低水時に同定された基底流量を、H26T11(2つ目の台風)時の内水氾濫解析に適用することは妥当と考えた。

(3) 基底流量を考慮した内水氾濫解析

平成26年8月8日～10日を対象に、排水路上流端から集水面積に応じて $12.3\text{m}^3/(\text{sec} \cdot \text{km}^2)$ の比流量を常時流入させ、基底流量と見立てることによりH26T11降雨を対象とした内水氾濫解析を行った。直接流量が比較的大きな平成26年8月9日～10日における大谷前排水路の4箇所(A～D地点)の計算水位の時間変化を図-6, 7, 8, 9に示す。また、図-6, 7, 8, 9には、基底流量を考慮せず流出係数が1.0の場合の計算水位を併せて示した。これらを見ると、基底流量を考慮しない

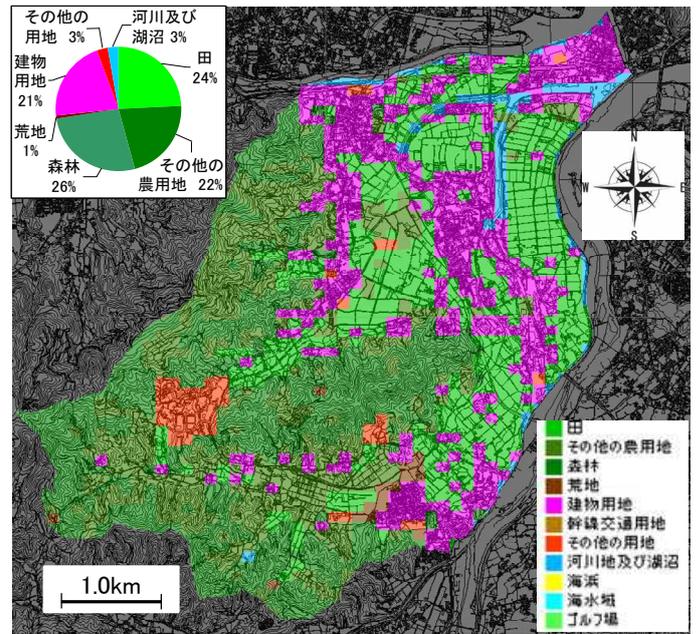


図-11 西須賀地区の土地利用状況⁹⁾

表-3 流出係数の参考値¹⁰⁾

路面及び法面	0.70～1.00	市街	0.60～0.90
急峻な山地	0.75～0.90	森林地帯	0.20～0.40
緩い山地	0.70～0.80	山地河川流域	0.75～0.85
起伏のある土地及び樹林	0.50～0.75	平地小河川流域	0.45～0.75
平坦な耕地	0.45～0.60	半分以上平地の大河流域	0.50～0.75
たん水した水田	0.70～0.80		

場合は、流出係数が1.0の場合であっても、最大観測水位が最大計算水位より高いことがわかる。一方、基底流量を考慮した場合は、最大計算水位の方が高く、流出係数が1.0よりも小さいことがわかる。

4. 基底流量を考慮した解析モデルの妥当性

(1) 流出係数の推定

本項では、観測水位と計算水位から流出係数を同定し、指針に記載されている参考値を参照することにより、解析手法の妥当性を検証する。H26T11豪雨全体をみるため、2つ目のピークを用いて流出係数を同定した。計算最大水位と観測最大水位の差を表-2と図-10に示す。これらを見ると、流出係数が0.90の際に、計算水位と観測水位の差の絶対値の合計が最小になることがわかる。そのため、当該地区の流出係数は0.90と推定される。

一方、図-11に示した西須賀地区の土地利用⁹⁾をみると、面積割合が大きい順に「森林」が26%、「田」が24%、「その他の農用地」が22%、「建物用地」が21%であった。「道路土工要領¹⁰⁾」に記載されている流出係数の参考値を表-3に示す。ここで、「森林」が「森林地帯」と、「田」が「たん水した水田」と、「その他の農用地」が「平坦な耕地」と、「建物用地」が「市街」と対応したとすると、流出係数は概ね0.57と推定(式(1))される。

$$f = \frac{\sum_i f_i A_i}{A}$$

$$= \frac{0.30 \cdot 26\% + 0.75 \cdot 24\% + 0.525 \cdot 22\% + 0.75 \cdot 21\%}{26\% + 24\% + 22\% + 21\%} \quad (1)$$

$$= 0.57$$

ここに、 f : 合成流出係数(-), f_i : 土地利用形態別流出係数の上下限の平均値(-), A : 地区面積(km²), A_i : 土地利用形態ごとの面積(km²)である。

土地利用形態の面積割合から当該地区の流出係数(0.57)を推定すると、計算水位と観測水位から同定された流出係数(0.90)より小さいことがわかる。ここで、図-12をみると、H26T11が来襲する1週間前にH26T12が来襲したことがわかる。これにより、土壌が飽和状態にあったことが参考値より同定された流出係数が大きい要因と考えられる。そのため、当該地区の流出係数を0.90とすることは妥当と判断した。また、流出係数が0.90の際の計算水位と観測水位の差の最大値はB地点で15cmであった。

(2) 基底流量と直接流量の流量比

本項では、降雨時の基底流量と直接流量の割合を把握することにより、当該地区における基底流量の評価の重要性を把握する。流量については本研究に用いた次元開水路不定流モデルの計算流量を用いた。本研究の流量比における直接流量は、降雨期間中の最大値とした。また、基底流量を考慮した豪雨時の氾濫解析では、基底流量と直接流量の分離が困難であるため、式(2)から最大直接流量を求めた。

$$Q_{direct} = Q_{rain} - Q_{base} \quad (2)$$

ここに、 Q_{rain} : 降雨時の最大流量(m³/s), Q_{base} : 基底流量(低水時を想定し12.3m³(sec・km²)の比流量を常時流入させた際の流量)(m³/s), Q_{direct} : 降雨時の最大直接流量(m³/s)である。

低水時を想定し12.3m³(sec・km²)の比流量を常時流入させた際の流量は、A地点で2.32m³/s, B地点で1.75m³/s, C地点で0.95m³/s, D地点で0.21m³/sであった。これが、各地点で

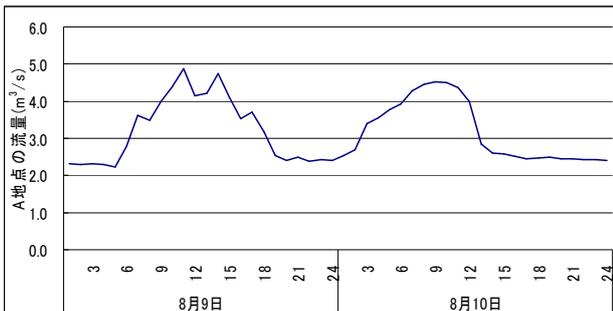


図-13 ハイδροグラフ(A地点)

の基底流量と考えられる。また、H26T11時の最大流量は、A地点で4.87m³/s, B地点で3.61m³/s, C地点で2.50m³/s, D地点で0.34m³/sであった。例として、A地点のハイδροグラフを図-13に示す。

式(2)より、豪雨時の直接流量は、A地点で2.55m³/s, B地点で1.86m³/s, C地点で1.55m³/s, D地点で0.13m³/sであると考えられる。そのため、基底流量1.0に対して、直接流量はA地点で1.10, B地点で1.06, C地点で1.63, D地点で0.62となり、流量比は平均で1.10であった。基底流量は直接流量と同等の大きさがあり、当該地区では基底流量の影響は無視できないと考えられた。

(3) 他降雨を用いた水位の再現性の検証

基底流量を考慮した内水氾濫解析が、他降雨でも再現性があることを検証する。本項では、H26T11の一週間前に来襲したH26T12を対象にし、H26T11と同様の検証を行った。

a) 流出係数の同定

H26T11と同様の手法を用いて、H26T12における流出係数を同定した。計算最大水位と観測最大水位の差を表-4と図-14に示す。これらを見ると、流出係数が0.64の際に、計算水位と観測水位の差が最小になることがわかる。その

表-4 流出係数の同定(H26T12)

観測地点	計算最大水位と観測最大水位の差(m)					
	流出係数 1.0	流出係数 0.9	流出係数 0.8	流出係数 0.7	流出係数 0.6	流出係数 0.64
A	0.153	0.099	0.053	0.003	-0.062	-0.033
B	0.186	0.132	0.085	0.035	-0.028	0.000
C	0.254	0.199	0.152	0.101	0.037	0.065
D	0.255	0.202	0.156	0.104	0.041	0.069
差の絶対値の合計	0.848	0.633	0.446	0.243	0.169	0.168

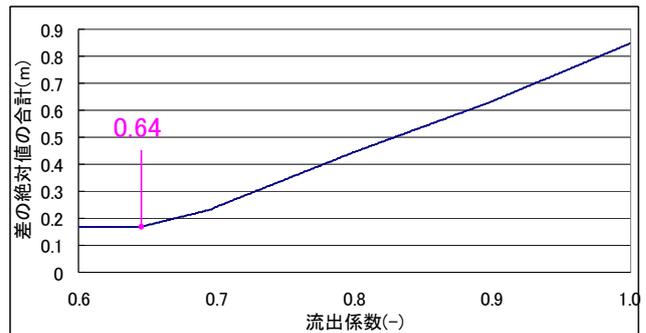


図-14 流出係数の同定(H26T12)

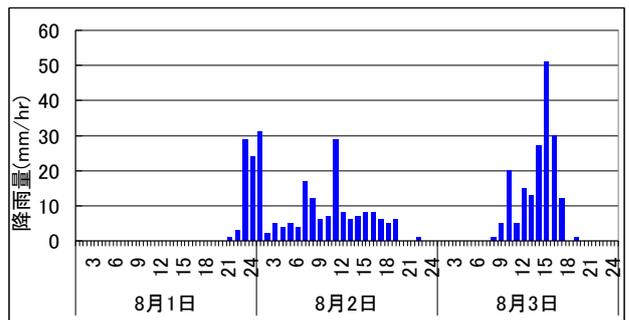


図-15 H26T12の降雨波形(丈六観測所)

ため、当該地区の流出係数は0.64と推定される。H26T12の降雨波形を図-15に示す。これを見ると、H26T12は2つのピークを有する降雨波形であることがわかる。そのため1つ目のピークにより土壌水分量が多くなり、その状態で2つ目のピークを向かえたことが想定できる。そのため、H26T12の流出係数(0.64)は土地利用形態の面積割合から推定された流出係数の参考値(0.57)より大きくなったと考えられる。また、流出係数が0.64の際の計算水位と観測水位の差の最大値はD地点で7cmであった。

b) 基底流量と直接流量の流量比

H26T12時の最大流量は、A地点で4.42m³/s、B地点で3.31m³/s、C地点で1.96m³/s、D地点で0.37m³/sであった。豪雨時の直接流量は、A地点で2.10m³/s、B地点で1.56m³/s、C地点で1.01m³/s、D地点で0.16m³/sであると考えられる。そのため、基底流量1.0に対して、直接流量はA地点で0.91、B地点で0.88、C地点で1.06、D地点で0.76であった。これらの平均は0.90であり、H26T11の直接流量より小さいことがわかった。これは、3日雨量がH26T11は413mm、H26T12は414mmと概ね同雨量であるものの、流出係数がH26T11は0.90、H26T12は0.64であり、H26T12の方の有効雨量が少ないことが要因と考えられる。また流量比をみると、H26T11時と同様に、H26T12時においても基底流量は直接流量と同等の大きさがあり、当該地区では基底流量の影響は無視できないと考えられた。

5. 本研究のまとめ

本研究では、徳島市西須賀地区を貫流する大谷前排水路を対象とし、山地から12.3m³/(sec・km²)の比流量を集水面積に応じて氾濫域に常時流入させ、それを基底流量に見立てることにより、できるだけ簡便な手法で基底流量を考慮した内水氾濫解析を行った。この手法を用い、大谷前排水路に設置した水位計の観測水位を比較すると、当該地区の流出係数はH26T11で0.90、H26T12で0.64と推定された。観測値と計算値の浸水位の差は最大で15cmであるものの、その他は7cm以内に収まっているため、この手法は実務的に支障がないと判断した。この基底流量を考慮した内水氾濫解析は、以下の(1)(3)の検証により妥当と考えられた。また(2)より、当該地区では基底流量の影響が大きいことがわかった。これにより、基底流量の影響が大きい地区において、基底流量を考慮した内水氾濫解析により、豪雨時の浸水深の過小評価を抑止することの重要性が示唆された。

(1) 同定された流出係数と現行の指針との整合性

H26T11において、計算水位と観測水位の比較により、流出係数は0.90と同定された。H26T11が来襲する1週間前に来襲したH26T12の影響により、土壌が飽和状態にあったことが「道路土工要領¹⁰⁾」に記載されている参考値より同定された流出係数が大きい要因と考えられた。

(2) 基底流量と直接流量の流量比

一次元開水路不定流モデルを用いて、基底流量と直接流量の流量比を求めたところ、流量比は基底流量1.0に対して直接流量1.10と推定された。台風時における最大直接流量と基底流量が同等の流量であることから、当該地区では低水時だけでなく豪雨時を対象とした内水氾濫解析においても、基底流量を適切に評価する必要があることがわかった。

(3) 他降雨を用いた水位の再現性の検証

H26T11の一週間前に来襲したH26T12を対象に、流出係数を同定すると、流出係数は0.64推定された。基底流量と直接流量の流量比は、有効雨量との整合があった。また、H26T12時の基底流量も直接流量と同等の大きさがあり、当該地区では基底流量の影響は無視できないと考えられた。

最後に、幹線水路と内水河川の差異は、人工物と自然物による形成過程の違いであり、同じ構造物で護岸・護床されているならば、両者を区別した氾濫解析のモデル化を行うことはほとんどない。そのため、本研究における基底流量を考慮した内水氾濫解析の手法は、内水河川である多々羅川にも適用できると考えられる。今後は、本研究で得られた計算水位と多々羅川の観測水位とを比較することにより、基底流量を考慮した内水氾濫解析手法が内水河川にも再現性があることを確認する予定である。

謝辞：本研究での水位観測データを提供いただきました徳島市下水道事務所保全課の皆様にご心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 宮津進,吉川夏樹,阿部聡,三沢眞一,安田浩保: 田んぼダムによる内水氾濫被害軽減効果の評価モデルの開発と適用, 農業農村工学会論文集, Vol.80, No.6, pp.479-488, 2012.
- 2) 佐山敬洋,小杉賢一朗,岩見洋一: 山体地下水の流動を表現する分布型降雨流出モデルの開発, 水工学論文集, Vol.71, No.4, pp.I_331-336, 2015.
- 3) 杉浦正之,辻倉裕喜,田中耕司: 貯留関数法に基づく簡易洪水予測モデルにおけるパラメータ変動の解釈, 水工学論文集, Vol.71, No.4, pp.I_307-312, 2015.
- 4) 徳島県県土整備部河川局: 徳島県の河川と海岸, p.60, 2009.10.
- 5) 高橋賢司,岡部健士: 平成16年台風23号による徳島市佐古地区の内水被害の数値解析, 土木学会四国支部平成18年自然災害フォーラム論文集, pp.9-20, 2006.
- 6) 三好学,田村隆雄,安芸浩資: 面積割合の加重平均の逆算による土地利用形態別流出係数の推定方法, 水工学論文集, Vol.59, pp.I_1315-1320, 2015.
- 7) (社)日本道路協会: 道路土工要領, p.137, 2009.3.
- 8) (社)農業土木学会: 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説, pp.259-260, 2006.3.
- 9) 国土交通省国土地理院: 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ, 2012.
- 10) (社)日本道路協会: 道路土工要領, p.134, 2009.3.

(2015.9.30受付)