

雨庭の浸透機能による 内水氾濫抑制効果に関する研究

浜田 晃規¹・渡辺 亮一¹

¹正会員 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目19-1)
E-mail:hamadateruki@fukuoka-u.ac.jp (Corresponding Author)

¹正会員 福岡大学教授 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目19-1)
E-mail:wata@fukuoka-u.ac.jp

都市化の進行に伴い、下水道の計画規模を超える降雨により内水氾濫の発生リスクは高まっている。一方で既存インフラの維持管理費や更新費の増加が予想されており、持続可能な地域社会の形成に向けてグリーンインフラ(以下GI)の取り組みが期待されている。本研究ではGI要素の一つである雨庭を各家庭に導入した場合の流出抑制効果について検証を行った。雨庭による流出抑制効果の検証は下水道網をモデル化した流出解析により流末出口の流出量を求め、外水位がゲート天端高より高くなる時間をゲート閉塞時間とし、その時間の流出量を内水量として算出した。雨庭は不透透域である屋根面積の50%の雨水を既存の庭の面積に導水するモデルとした。解析の結果、雨庭を導入することにより現況の土地利用に比べてピーク流量では約60%の流出抑制効果が算出され、内水氾濫被害の低減に効果的であることが示された。また、浸透性のGIは降雨規模に関わらず効果を発揮することから災害外力に対するレジリエンス性の底上げと既設ポンプの有効利用が期待され、GIとグレーインフラの長所を組み合わせることが可能になると考えられる。

Key Words : green infrastructure, rain garden, inland flood, urban residential area

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響を受け、台風の大型化や線状降水帯の発生による豪雨の被害が深刻化している¹⁾。また、都市化の進行に伴い、損失降雨が少なく短時間で雨水管へと流入するため、計画規模を超える降雨により内水氾濫が発生する危険性が高まっている。樋井川流域では、平成11年6月の集中豪雨により199戸、平成21年7月の中国・九州北部豪雨により410戸が浸水被害を受けた²⁾。このため、平成12年に策定された「雨水整備Doプラン³⁾」ではポンプ場の建設等の下水道施設整備、2010年には床上浸水対策特別緊急事業による河川改修といった対策が取られてきた。2014年に策定された樋井川水系河川整備計画では、分散型の雨水流出抑制施設を導入していくとこによって、浸水被害の軽減に取り組むとされている。また、既存インフラの維持管理費や更新費の増加が予想されており、持続可能な地域社会の形成に向けて自然の営力を利用するグリーンインフラの取り組みが期待されている。本研究ではグリーンインフラ要素の一つである雨庭を各家庭に導入した場合の流出抑制効果について検証することを目的としている。

2. 研究対象領域

(1) 対象領域

対象領域は、福岡市中心部を流れる二級河川の樋井川流域において浸水被害が発生した田島地区49.7haを解析対象とした(図-1)。



図-1 解析対象領域

下水道の排水先である樋井川は、油山を水源とし博多湾に注ぐ流域面積29.2k m²、路延長12.9kmの都市河川である。田島地区は人口10,527人、世帯数5,079世帯の住宅密集地域であり、その大部分は第一種低層住居専用地域に指定されており建蔽率は50%である。また、河道改修以前は外水位が高く頻繁に内水氾濫が発生している地域である(図-2)。

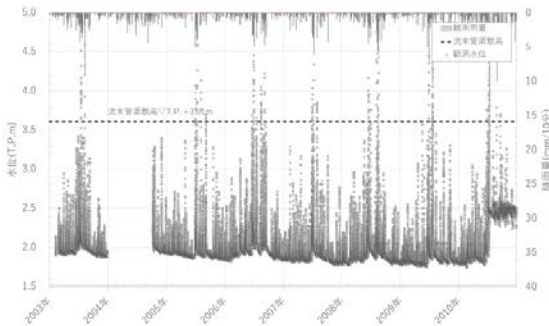


図-2 樋井川本川水位と接続雨水管数高

(2) 対象領域の土地利用

対象地域の土地利用状況はArcGIS Desktop10.7を用いて整理した。土地利用区分は、Google航空写真で目視判別を行い、図-3に示す項目に分類した。土地利用ごとの面積割合を表-1に示す。排水区の設定には国土基盤図の道路線を用い、最も小さい排水区割は戸建て住宅1軒となる。

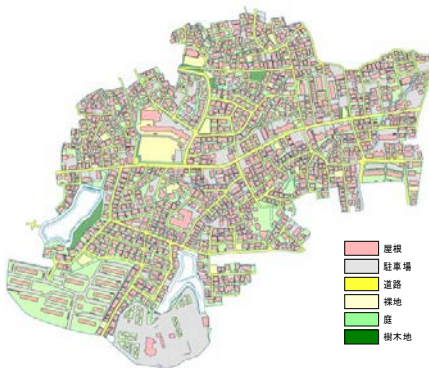


図-3 研究対象地域の土地利用

表-1 研究対象地域の土地利用面積割合

	屋根 (Roof)	駐車場 (Parking)	道路 (Road)	裸地 (Bare)	庭 (Garden)	樹木地 (Forest)	池 (Pond)
面積(ha)	13.7	11.7	6.5	1.6	10.8	0.2	5.3
面積割合(%)	27.5	23.6	13.0	3.2	21.6	0.4	10.7
浸透種別	不浸透域			浸透域			
種別内面積割合(%)	43.0	36.8	20.2	12.8	85.8	1.4	

対象地域の土地利用の内訳は、不浸透域が全体の64.1%、浸透域が25.2%、池が10.7%である。また、不浸透域の79.8%は屋根および駐車場(家屋敷地内含)が占め、浸透域の85.8%は庭が占めることからこのような土地利用状況下において流出抑制を図るには敷地内の不浸透域の雨を庭で処理することが有効と考えられる。

3. 水位観測による現況浸透能評価

(1) 観測流量の成分分離

対象領域は、現況の浸透能を評価することは、流出抑制対策を考えるうえで非常に重要である。ここでは観測流量から浸透域の直接流出成分を抽出することで浸透能の評価を試みる。表-1に示すように対象地域全体に対する浸透域面積比率は25%で、浸透域内での内訳は庭が86%と大部分を占めている。このことから対象地域の土地利用は不浸透域と庭からなる単純な構成といえる。それゆえ、対象地域下流で観測された流出流量について不浸透域成分、浸透域成分を分離することが可能である⁴⁾。観測された流量は、次の4つの流出量の和を計測し、各流出量が生じる優先順位は $Q_{imp_s1} > Q_{imp_s2} > Q_{p_s1} > Q_{p_i}$ と仮定し、不浸透域の単位時間表面流出量 Q_{imp_s1} を不浸透域面積と降雨量の積で表した。すなわち、 Q_{imp_s1} が観測流出量 Q_{obs} に満たない場合は、優先順位に従い Q_{obs} を満足するまで足していく。一方で、 Q_{imp_s1} が Q_{obs} を上回る場合は、表面貯留として次のタイムステップに持ち越すことで収支を満足させる。対象地域は領域の外縁部の標高が高くすり鉢状になっているため、中間流出が生じているものと推察される。観測期間内に降雨強度15mm/h以上を記録した比較的大きな10降雨を抽出し解析を行った。

$$Q_{obs} = Q_{imp_s1} + Q_{imp_s2} + Q_{p_s1} + Q_{p_i} \quad (1)$$

ここで、

Q_{obs} : 観測流出量 (m³/s)

Q_{imp_s1} : 不浸透域の表面流出量 (m³/s)

Q_{imp_s2} : 不浸透域の表面貯留流出量 (m³/s)

Q_{p_s1} : 浸透域の表面流出量 (m³/s)

Q_{p_i} : 浸透域の中間流出量 (m³/s)

図-4に観測流出量の成分分離をした結果の一例を示す。対象降雨は3波形からなり、1つめの降雨では不透透域の直接流出のみが現れ、2つめの降雨以降では浸透域の直接流出に次いで中間流出が現れる結果となる。なお、対象地区の雨水管は晴天時には流出量が0となり、地下水位は管渠より低いため、ここでの地下水流出とは地下を流れて再度地表に現れる中間流出として扱う。

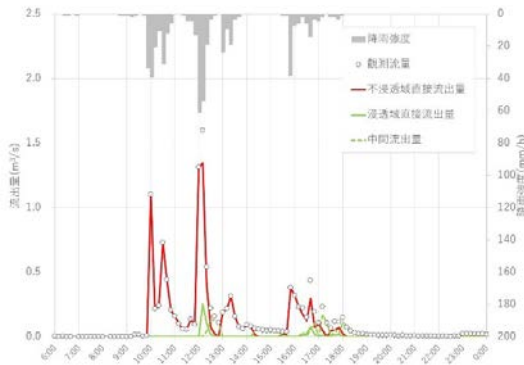


図-4 水位と降雨量観測による成分分離象

(2) 現況の庭の浸透能評価

庭の浸透の評価は、成分分離を行った後に浸透域に降った雨の総量から浸透域の直接流出量を差し引くことで損失雨量を求め、降雨波形ごとに降雨継続時間で除して浸透能を算出した⁵⁾。図-5は観測期間中に算出した浸透能をプロットしたものである。このなかで観測期間中比較的大きな値を用いてホートン式(2)に近似する曲線を求めた。

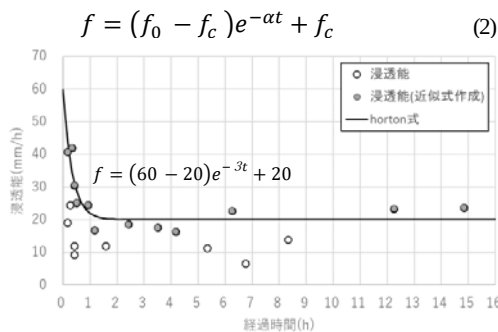


図-5 浸透能曲線の作成(ホートン式)

ここに、 f は任意時刻 t における浸透能(mm/h)、 f_0 は初期浸透能(mm/h)、 f_c は最終浸透能(mm/h)、 α は時間係数(h^{-1})を表す。近似曲線より、検討対象地域の浸透域の浸透能は空間的な平均値として、初期浸透 f_0 は60(mm/h)、最終浸透能 f_c は20(mm/h)、時間係数 α は3(h^{-1})となった。この浸透能は対象地域の浸透域の86%を占める既存の庭の浸透能として考える。

4. 雨庭導入による流出抑制効果の評価法

雨庭による流出抑制効果の検証はMIKE URBAN(MIKE1D)のLID機能を用いた流出解析により各吐出口の流出量を求め、外水位がゲート天端高より高くなる時間をゲート閉塞時間とし、その時間の流出量を内水量として算出した。また、検討ケースを土地利用およびポンプの有無により、1)ポンプなし+現況土地利用、2)ポンプなし+雨庭導入、3)ポンプあり+現況土地利用の3つに分け、それぞれのケースについて内水量の比較を行った。ここで内水量は、ゲート閉塞時間内の流出量と定義する。ゲート閉塞時間とは、河川水位が接続管渠上端を超えて、ゲートが閉鎖する時間とする。以下に計算式を示す。

$$\int_{t_2}^{t_1} q(t) \cdot t dt \quad (3)$$

ここで、

t_1 : ゲート閉塞開始時間

t_2 : ゲート閉塞終了時間

$q(t)$: 河川への流出量

(1) 流出予測モデルの構築

流出予測モデルの作成は、福岡市道路下水道台帳を基にArcGIS Desktop10.7を用いてマンホール位置、管渠寸法、上下流管底高を整理した。これらの必要な項目をDHI社製MIKE URBANにインポートすることにより構築した図-6に作成した下水道管網を示す(管路延長26,772.9m、総ノード数1,370個、総集水区域数529個)。図中の太線は台帳管理されている幹線を示し、細線は机上調査、現地確認により追加したものである。本川の樋井川に接続する吐出口は図中▼で示すように3か所あり、ポンプは①と②の吐出口の間に位置し、①と②の下水管から導水している。排水能力は3.3m³/sである。



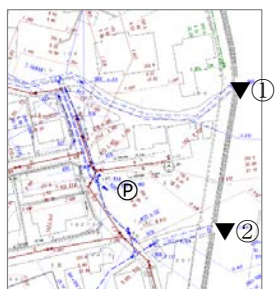


図-6 研究対象地域の雨水管渠網

作成した流出予測モデルの妥当性を検証するため、水位観測期間中で連続する降雨波形が現れる2014年7月7日降雨を用いて再現計算を行い、観測値との比較を行った。評価は排水区域の最下流端の水位観測地点にて行うことで、排水区域の平均値として算出される。計算結果を図-7に示す。観測値と計算値を比較するとピーク流量が小さい結果となったが、波形は概ね一致しており、妥当と考えられる。流出解析はキネマティックウェーブ法を採用し、現状の浸透域の浸透能は水位観測から得られた上述のホートン式による浸透能を与えた。

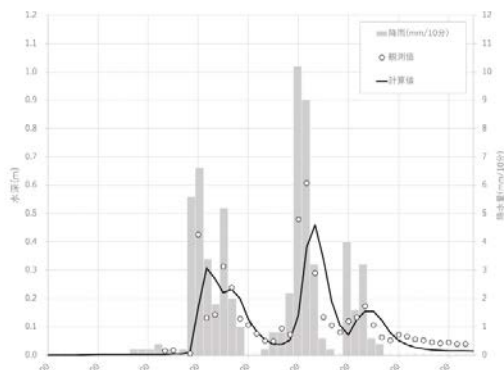


図-7 流出予測モデルの再現計算結果

(2) 雨庭のモデル化

雨庭の導入シナリオを図-8に示す。不浸透域である屋根の50%を既設の庭で受けるものとする。

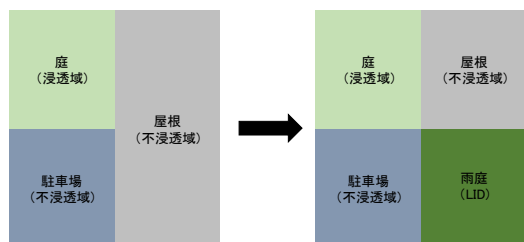


図-8 雨庭導入イメージ(屋根の50%を雨庭へ導水)

浸透および流出現象は、ホートン型を想定し、既設の庭の浸透能は上述の通り下流端での水位観測から算出したホートン式を用いた。雨庭の浸透能は既設の庭を土壤改良するものとし、樋井川流域内での現地ダブルリング浸透能計測実験の値を用いた(図-9)。一覧表を表-2に示す。

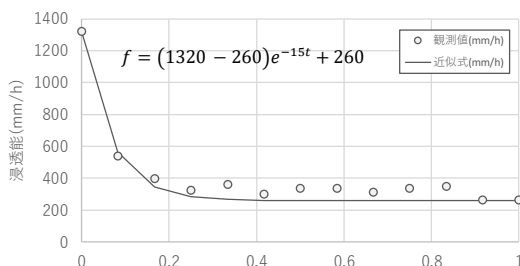


図-9 雨庭の浸透能調査結果

実験の結果、雨庭の初期浸透 f_0 は1320(mm/h)、最終浸透能 f_c は260 (mm/h)、時間係数 α は15(h⁻¹)となった。この実験に使用した施設では家主によって樹木や花が多く植えられており、継続的な手入れにより建設当初の基盤上に落ち葉が長年堆積し、間隙の大きい土層を形成している。そのためこのような大きな浸透能を有するに至ったと考えられる。検土杖調査では間隙の大きい土壌厚は70cmに達しており、100mm/h程度の降雨では浸透した降雨は基盤層まで到達していないと考えられる。基盤層に達した場合は現状の最終浸透能 f_c 20(mm/h)に近づくことが予想される。

表-2 浸透能の設定

	初期浸透能 (mm/h)	最終浸透能 (mm/h)	時間係数 (h ⁻¹)
現況の庭	60	20	3
雨庭	1320	260	15

(3) 対象降雨

対象降雨は、田島地区において洪水被害が発生した平成21年7月24日の中国・九州北部豪雨とし、樋井川流域内の柏原松原運動公園雨量観測所で観測された10分間降雨雨量データを用いる。雨水管の下流端水位は、同日の田島橋に設置してある水位計の実測値を用いた(図-10)。

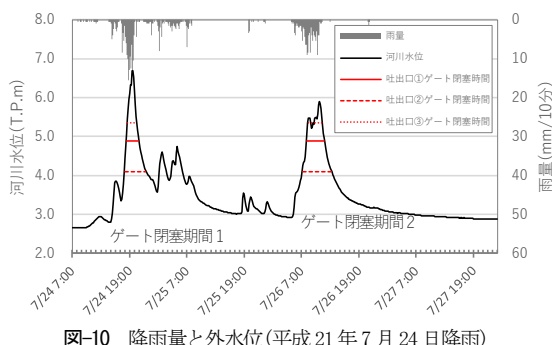


図-10 降雨量と外水位(平成 21 年 7 月 24 日降雨)

5. 解析結果

図-11は2山からなる波形の1つ目の水位上昇によるゲート閉塞時間1の間に吐出口①～③の流出量を重ね合わせた結果を示している。図-12は山からなる波形の2つ目の水位上昇によるゲート閉塞時間2の間に吐出口①～③の流出量を重ね合わせた結果を示している。図-11より、ゲート閉塞時間1における流出流量のピーク値は

- 1)ポンプなし+現況土地利用の場合20:10に2.06m³/s
- 2)ポンプなし+雨庭導入の場合20:33に0.83m³/s
- 3)ポンプあり+現況土地利用の場合20:07に1.27m³/s

となった。また、図-12より、ゲート閉塞時間2における流出流量のピーク値は、

- 1)ポンプなし+現況土地利用の場合11:05に1.21m³/s
- 2)ポンプなし+雨庭導入の場合11:25に0.91m³/s
- 3)ポンプあり+現況土地利用の場合9:09,11:05に0.66m³/s

となった。また、表-3にゲート閉塞時間の流出量を積算した結果である内水量を示す。ゲート閉塞時間における内水量は、

- 1)ポンプなし+現況土地利用と比較して、
 - 2)ポンプなし+雨庭導入の場合 66.3%減少、
 - 3)ポンプあり+現況土地利用の場合 36.6%の減少
- となった。3ケースの中では雨庭を導入した場合に最も河川への流出流量と内水量が小さくなる結果となった。また、雨庭を導入した場合において流出の時間を遅らせることも確認できた。

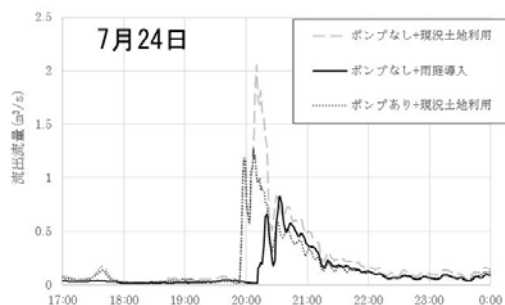


図-11 ゲート閉塞時間 1 における河川への流出流量

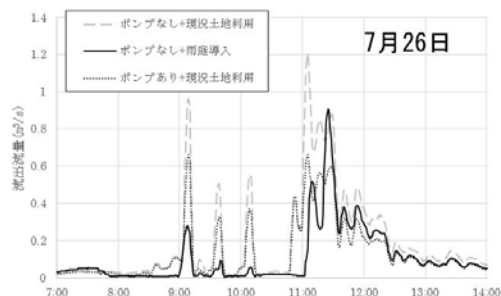


図-12 ゲート閉塞時間 2 における河川への流出流量

表-3 総内水量の計算結果

	ポンプなし +現況土地利用 (m ³)	ポンプなし +雨庭導入 (m ³)	ポンプあり +現況土地利用 (m ³)
吐出口①	2053	1030	10
吐出口②	1466	797	1462
吐出口③	2067	56	2069
合計(m ³)	5585	1884	3541

6. 結論

以上の結果から雨庭のように高い浸透能を有する浸透域を増やすことは、内水氾濫被害の低減に効果的であることが示された。この流出量の低減高は、浸透による損失量にあたり、流出量のベースカットを行うことでポンプ場をより大きいリスクに対して使用することができ、つまり雨庭などのグリーンインフラは浸透により小降雨から災害規模の降雨に対しても効果が期待できることから災害外力に対するレジリエンス性の底上げが期待できる。また、底上げされたことにより既存のポンプを有効利用することができグリーンインフラとグレーインフラの長所を組み合わせることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 津口裕茂：集中豪雨をもたらす線状降水帯について、環境技術,Vol.48,No.4,pp180-184,2019.
- 2) 福岡県：樋井川水系河川整備計画, 2014
- 3) 福岡市：雨水整備 Do プラン 2026,2019
- 4) 岡太郎，角屋睦，野口美具：宅地域の雨水浸透と流出特性，京大防災研究所年報第 23 号 B-2(昭 55.4)，pp.227-238.1980.
- 5) C.O.Wisler，E.F.Brater，五十嵐正次訳：HYDROLOGY(水文学入門)，彰国社刊，pp.90-93，1973.

(2021.8.23受付)

STUDY ON THE EFFECT OF SUPPRESSING INLAND WATERS FLOODING BY INFILTRATION OF RAIN GARDEN

Teruki HAMADA, Ryoichi WATANABE

With the progress of urbanization, the risk of inland water inundation is increasing due to rainfall exceeding the planned scale of sewerage. On the other hand, maintenance costs and renewal costs for existing infrastructure are expected to increase, and green infrastructure (GI) efforts are expected toward the formation of sustainable local communities. In this study, we verified the outflow control effect when rain garden, which is one of the GI elements, was introduced into each household. To verify the outflow control effect of the rain garden, the outflow amount at the end of the outflow was calculated by outflow analysis modeling the sewer network, and the time when the outside water level became higher than the gate top height was defined as the gate blockage time, and the outflow amount at that time was defined as the outflow amount. It was calculated as the amount of inland water. The rain garden is a model that guides rainwater, which is 50% of the roof area, which is an impermeable area, to the existing garden area. As a result of the analysis, it was shown that the introduction of the rain garden was effective in reducing the damage caused by inland waters, with a runoff control effect of about 60% calculated at the peak flow rate compared to the current land use. In addition, since permeable GI is effective regardless of the scale of rainfall, it is expected to raise the resilience to external disaster forces and effectively use existing pumps, and it will be possible to combine the advantages of GI and gray infrastructure.