

実測モニタリングに基づく雨庭の雨水流出抑制効果の評価

渡部 陽介 平野 堯将

(技術研究所)

(技術研究所)

A field evaluation of rain gardens for urban stormwater runoff in Japan

Yosuke Watanabe and Takamasa Hirano

雨庭とは、建物・道路などに降った雨水を集め、一時貯留・地中浸透させる窪地状の緑地である。都市水害緩和や生物多様性など多様な効果が期待され、持続可能な都市への変革に貢献するグリーンインフラの代表技術として重要視されている。しかし、日本では整備実績が少なく、湿潤気候の降雨量が多い条件下において定量データに基づく効果検証の知見が蓄積されていない。本研究では、国内で先駆けて整備された雨庭を対象に実測モニタリングに基づき雨水流出抑制効果を検証した。その結果、台風時であっても雨庭に流入した雨水の大部分の流出を抑制できる可能性が示された。

Rain garden is a shallow vegetated depression to infiltrate and retain stormwater runoff from roof and pavement. With expecting multiple benefits such as flooding mitigation and biodiversity, rain garden has become important as green infrastructure for urban sustainability. However, performance data under pluvial climate in Japan were limited. In this study, effect of rain gardens on reducing storm water runoff was examined. Results of field evaluation shows that rain garden have potentially contributed to reduce stormwater runoff in heavy rain caused by typhoon.

1. はじめに

ゲリラ豪雨や酷暑など都市気象が極端化するなか、気候変動に適応しつつ、次世代が持続的に暮らし続けられる都市への変革が喫緊の課題となっている。そうした課題に対して注目されているのが雨庭（レインガーデン）である。雨庭とは、建物・道路に降った雨水を集め、一時貯留・地中浸透させる窪地状の緑地である。

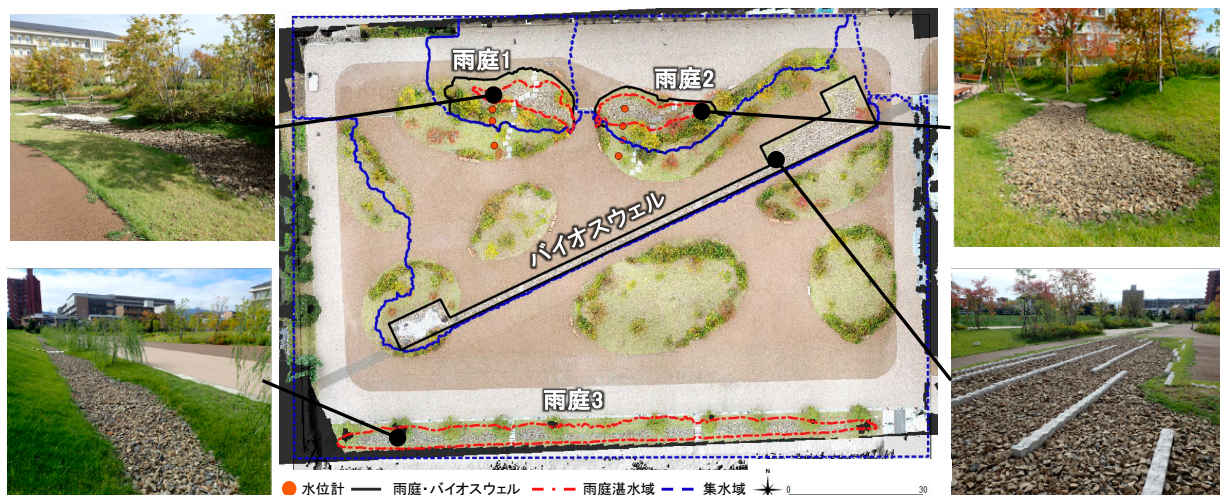
雨庭は、雨水のもたらす災いを緩和する「減災」と人と生き物が様々な自然の恵みを分かち合う「恵みの分配」を兼ね備えている「賢いソリューション」¹⁾とされる。下水道に排水されてきた雨水を敷地で積極的に受容することで、内水氾濫リスクや合流式下水道の越流水汚染に対する小規模分散型の雨水流出抑制策として期待されている。加えて、地下水涵養、水質浄化、ヒートアイランド現象の緩和、自然体験の場の提供、コミュニティの交流促進、景観向上、生物多様性保全など様々な環境改善も期待できる¹⁾。

雨庭は、1990年代以降、都市のグリーンインフラの代表技術として欧米都市で発展・普及してきた。LEED や SITES といった建物・街区を対象とした

国際的な環境認証でも重要視されている。日本ではグリーンインフラが政策課題となってきた 2015 年以降、実装の機運が高まり整備事例が増えている。

国内における既往研究としては都市スケールで雨庭の整備適地や雨水流出抑制効果の推定など、ポテンシャルを検討した研究^{3),4)}が主に行われてきた。しかし、湿潤気候で降雨量が多い日本では、定量データに基づく効果検証や設計・施工に活用できる知見は十分に蓄積されていない。そうした中、国内で先駆けて整備された雨庭を実測し、雨水流出抑制効果の効果検証を試みた先駆的な研究もはじまっている。山田・柴田（2017）や Zhang et al.（2019）、Zhang et al.（2020）は、雨庭単体の実測モニタリングを行い雨水流出抑制効果の検証に取り組んでいる^{5),6),7)}。また、平野ら（2019）や渡部・平野（2020）では、実測に基づき敷地レベルでの雨水流出抑制効果の可能性を報告している^{8),9)}。これらの既往研究では、主に雨庭の窪地部における雨水の浸透や一時貯留に注目して検証が行われている。

しかし、雨庭の雨水流出抑制効果についてさらに検証を積み重ねていく上では、窪地部における浸透・一時貯留に加え、舗装などからの集水も考慮する必



図一 研究対象地

要がある。窪地部が高い浸透・一時貯留機能を有していても、周辺から雨水が集まらなければ雨庭のポテンシャルは十分には活かされない。また、今後の設計・施工に活用していくためには雨庭の雨水流出抑制効果に影響する要因についても明確化していくことが求められる。

そこで本研究では、雨庭実装の基礎的知見として、実測モニタリングに基づき雨庭の雨水流出抑制効果を検証し、影響要因を考察することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 研究対象地：元京都学園大学（現京都先端科学大学）京都太秦キャンパス中庭（図一）

2015年に新設された当該キャンパスのランドスケープは、森本幸裕先生監修のもと地域の歴史や伝統を尊重するとのコンセプトに基づき、名勝・雙ヶ岡や御室仁和寺などを参照したデザインが基調とされている。一方、気候変動に伴い深刻化するヒートアイランド現象や集中豪雨リスク、生物多様性損失など現代の課題への対応も重視されている。枯山水庭園を意識した3つの雨庭が実装され、舗装面に降った雨水が自然流下で窪地に流れ込み、一時貯留・浸透される仕組みとなっている。中庭中央には路面雨水の排水路となるバイオスウェル（緑溝）があり、舗装は透水性の素材が用いられている。また、築山の裾にも小さな窪地があり、細部に至るまでランドスケープ全体で雨水流出抑制に配慮がなされている。

生物多様性保全の観点では、京都の伝統文化に根差した絶滅危惧種を保全する「和の花プロジェクト」と連携し、フジバカマやキクタンギクなどの生息域外保全や普及啓発の場として雨庭が活用されている。なお、中庭は学部新設にともない改修中である。



図二 調査地点

2.2 雨庭による雨水流出抑制効果の捉え方

雨庭は、雨水流出抑制効果とともに景観や暑熱緩和、生物多様性保全などの複合的な効果が発現されるところ大きな意義がある。したがって、人や生き物が雨水の恵みを直接的に享受しやすいよう、雨水の集水・浸透・一時貯留といった一連のプロセスが主に地表で行われることが重要と考えた。

そこで雨庭による雨水流出抑制効果は、1) 集水、2) 窪地での浸透、3) 窪地での貯留の3つの視点で整理した。降雨イベント時は、まず1) 透水性舗装や芝地面に降った雨水が一部浸み込みつつ、表流水となり窪地に流れ込む。次に、2) 窪地において地中浸透し、3) 貯留される。1)～3)で処理しきれなかった雨水が、オーバーフロー口・雨水排水系統を経由し、敷地外の公共下水道に流出すると想定した。

2.3 調査項目

雨庭の雨水流出抑制効果と影響要因を解明するため、雨庭の形状・構造、雨水流量観測、植栽基盤調

査を行った。雨水流量観測・植栽基盤調査の対象は、3つの雨庭のうち中庭北側に位置する雨庭1と雨庭2を対象とした。各調査地点を図-2に示す。

2.3.1 雨庭の形状・構造

形状について、微地形と土地被覆を実測した。微地形は3Dレーザ測量から10cmDEM（数値標高モデル）を作成し、GISの地形解析により雨庭全体の集水域と窪地の湛水域を算出した。また、窪地での貯留容量を地表面での貯留と窪地底面に敷き詰められた礫間での貯留を合算して求めた。地表面での貯留は、窪地底面からオーバーフロー桝の天端の高さまでの貯留容量を算出した。礫間貯留は、礫被覆地の面積に、礫層の厚さ10cm（外構計画図の計画値）と礫間空隙率（0.35）を乗じることで算出した。土地被覆はドローン空撮写真を元に石被覆地・芝地・樹木・透水性舗装・踏石に分類した。

2.3.2 雨水流量観測

雨量と窪地部・築山部の水位（地表・地下）を計測し、雨水の流入量・流出量を推定した。観測期間は2017/7/14～11/25である。雨量は転倒ます式雨量計を用いて記録した（0.2mm毎）。水位は圧力式水位計を用いて5分間隔で計測した。期間中の降雨が認められた58日分のデータのうち、台風を含むいくつかの降雨が認められた10月後半のデータを本論文では分析に用いた。具体的には4つの降雨イベントを対象とした（表-1、図-3）。

表-1 分析対象とした降雨イベント

No	日時	総雨量
1	2017/10/18 23:30～10/19 10:35	23mm
2	2017/10/21 06:00～10/23 10:50	154mm
3	2017/10/24 19:35～10/25 05:00	30mm
4	2017/10/28 05:00～10/29 16:00	59mm

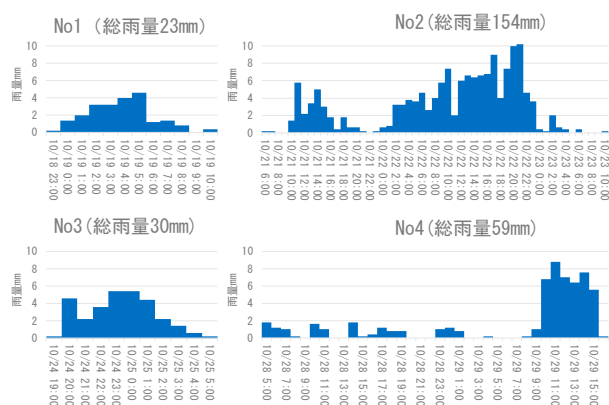


図-3 雨量の変化（降雨イベント別）

流入量は、雨庭に直接降り注ぐ雨水と舗装面や芝地から窪地へと流入する表流雨水を合算して求めた。表流雨水は10cmDEMを用い、GISの水文解析により、窪地に至るまでの集水経路と累積流量を求めた。累積流量（ m^3 ）とは、各メッシュに周囲からどの程度、水が集まってくるかを推定した指標であり、集水経路で累積されたメッシュの面積の総和として算出される。本論文では、1つのメッシュにおいて雨が全く浸透せず、全て流出する場合の累積流量を1として、メッシュの単位面積と地表面被覆に応じた流出係数¹⁰⁾に降雨量を乗じることによって流入量を推定した。流出量（ m^3 ）は、排水側溝に三角堰を設置して実測した。また、インターバルカメラを用い雨庭の湛水状況を撮影した（1分間隔）。

2.3.3 植栽基盤調査

植栽基盤について現場透水試験と土壌試料分析を実施した。現場透水試験は、長谷川式簡易現場透水試験器を用い、深さ30cmの試験孔を掘り、注水後40分間の浸透能を計測した。土壌試料は、植栽基盤の上層10-15cmと下層25-30cmから攪乱土壌試料2Lを採取し、粒径組成、礫含有率、pH、飽和透水係数を分析した。

3. 結果・考察

3.1 雨庭の形状・構造

雨庭1・雨庭2は、「窪地と築山を有する」、「路面・芝地から雨水が流入する」、「オーバーフロー用の排水口を有する」などが共通している一方、形状・構造には異なる特徴がある。中庭の北側に位置する雨庭1はやや浅い窪地になっており、貯留容量は約 $5.5m^3$ である。湛水域はぐり石で被覆されており、集水面積は約 $500m^2$ である。一方、雨庭1に隣接する雨庭2は窪地の掘り込みが深く貯留容量は約 $22m^3$ であり、湛水域はぐり石と芝地で被覆されている。集水面積は約 $860m^2$ であった。

3.2 雨庭の雨水流出抑制効果

雨庭1・雨庭2の雨水流出抑制効果を把握するため、降雨イベントごとに1時間毎の流入量と流出量の推移を分析した（図-4～図-7）。また、窪地への総流入量から総流出量を差し引き、総流入量で除することで雨水流出抑制率を算出した。

No1（10/18～19：総雨量23mm）の降雨イベントでは、雨庭1・2ともにオーバーフローは発生しておらず、流入するすべての雨水を抑制していることが把握された。一方、台風通過時の降雨イベントであ

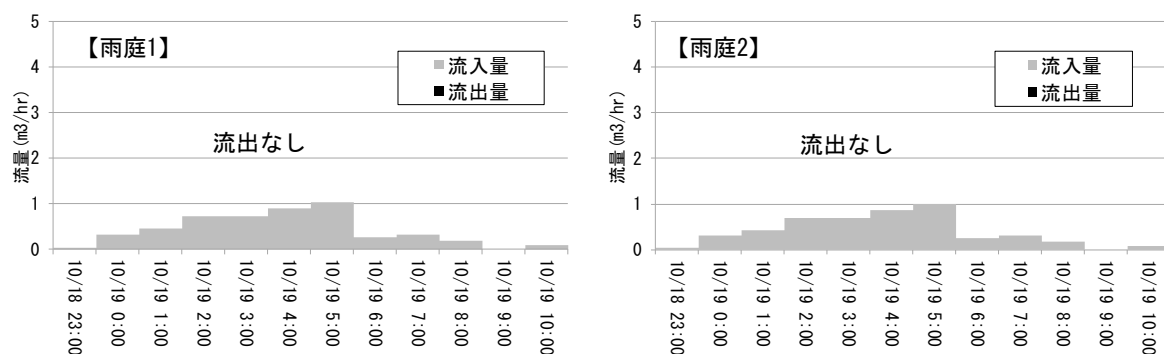


図-4 No1 (総雨量 23mm) の流入・流出

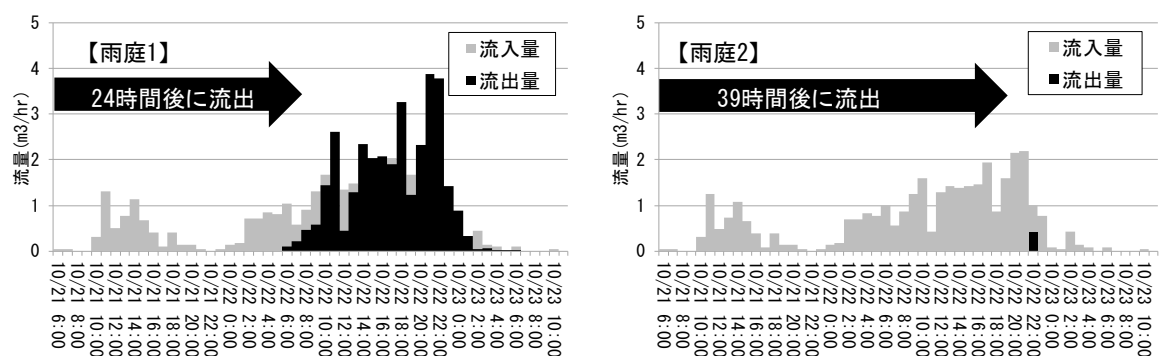


図-5 No2 (総雨量 154mm) の流入・流出

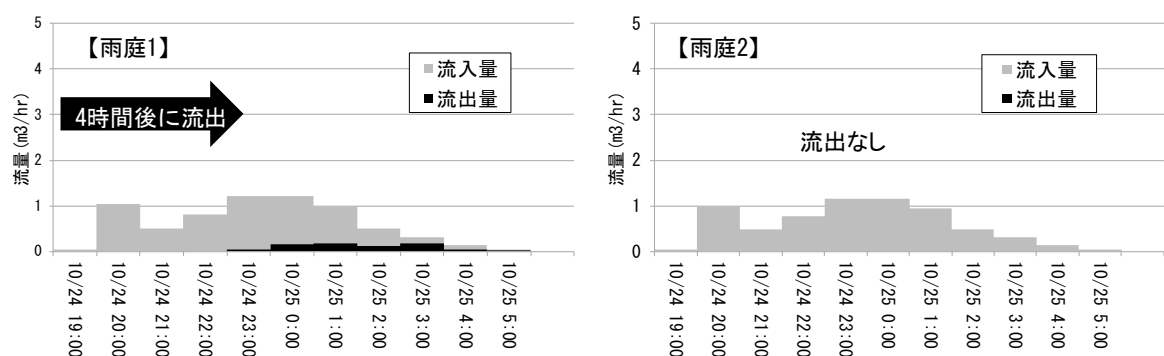


図-6 No3 (総雨量 30mm) の流入・流出

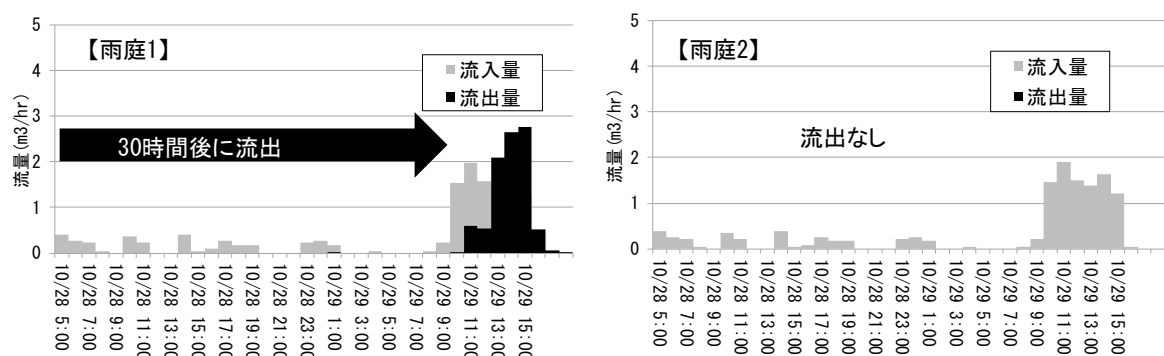


図-7 No4 (総雨量 59mm) の流入・流出

る No2 (10/21～23: 総降雨量 153mm) では、雨庭 1 が降雨開始から 24 時間後に、雨庭 2 が 39 時間後にそれぞれ流出が始まっていることが把握された。雨水流出抑制率は、雨庭 1 が流入量の約 30%

弱、雨庭 2 は約 99%であり、雨庭 2 では大半の雨水の流出を抑制できていた。

No3 (10/24～25: 総雨量 30mm) と No4 (10/28～29: 総雨量 59mm) では雨庭 2 では流出がなかつ

た一方、雨庭1でオーバーフローが確認された。ただし、降雨の状況によって流出の開始時間や抑制率に差がみられた。4mm/hr程度の弱い降雨が半日程度続いたNo3では、降雨開始4時間後に流出が開始していたものの、流出抑制率は90%程度と流入する雨水の大部分が抑制されていた。一方、2mm/hrの小雨が1日程度続いた後に6～8mm/hrのまとまった降雨があったNo4では、30時間後に流出がはじまり流出抑制率は約30%であった。

以上より、雨庭1よりも雨庭2の方が雨水流出抑制効果は大きく、台風時であってもほとんど流出せず、流入する雨水の大部分を抑制できる可能性が示された。また、雨庭1も降雨状況に応じて幅があるものの、雨水流出のピークを遅延させることで下水道の負荷低減に寄与している可能性が示された。

3.4 雨水流出抑制効果に影響する要因

2.2節で整理した枠組みに基づき、雨水流出抑制効果に影響する要因として集水・浸透・一時貯留の観点から考察する。

3.4.1 集水

10cmDEMの水文解析に基づき雨庭1・2の集水経路を推定した(図-8)。また、集水経路を通じて窪地部に流入する累積流量を求めた。

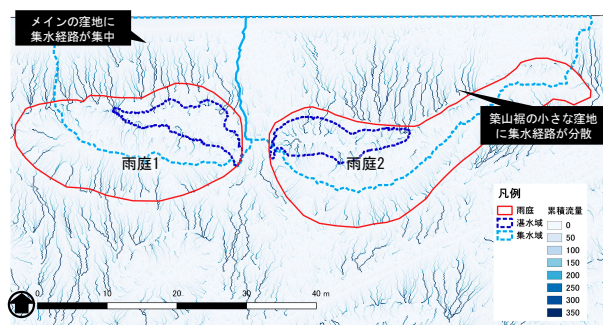
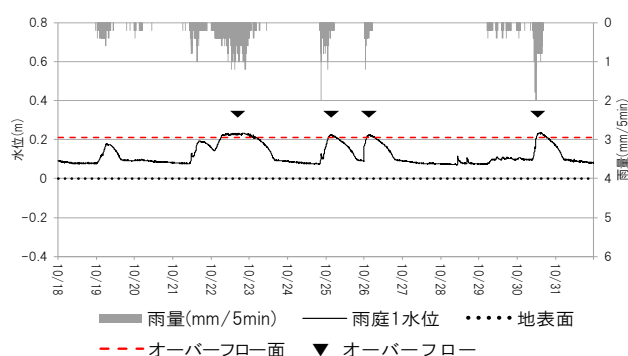


図-8 集水経路



その結果、雨庭1・2ともに集水経路に縁石や側溝など障害物に分断されず、舗装面から窪地まで雨水が流れ込むことが解析結果からも確認された。一方、集水経路を観察すると、雨庭1では主に北側の舗装面全体から窪地に表流雨水が流れ込んでいることが把握された。対して雨庭2では同じく北側の舗装面から窪地に流れ込む集水経路はあるものの、築山裾の小さな窪地にも集水経路が分散していることが把握された。また、雨庭2の集水域西側・東側では、地表面に微細な凹凸があり、集水経路がつながりにくい状況が把握された。窪地部に流入する累積流量は雨庭1が約222m²、雨庭2が約189m²であり、雨庭1が大きい値となった。集水経路の集中・分散により窪地への表流雨水の集まりやすさに差が生じ、雨水流出抑制効果に影響したと考えられる。

また、舗装材料が透水性舗装だった点も雨水流出抑制という点では好影響を与えたものとする。台風通過時のNo4の集水経路における浸透量を推定した結果、雨庭1が約11m³、雨庭2が約10m³であった。集水域の舗装材料を透水性にすることにより、一般的なコンクリートやアスファルトによる舗装と比べて窪地部への流入量を抑制でき、一時貯留・浸透に余剰を生み出すことが可能となることが示唆された。

以上より、効果的な雨庭の設計においては、緑地の形状・構造だけでなく、集水経路や舗装材料などに配慮することが重要と考えられた。

3.4.2 浸透

降雨に応じた雨庭1・2の窪地部での浸透の傾向を観察した。10月の雨量・水位変化を示す(図-9)。

その結果、降雨に伴い両雨庭とも水位が上昇するが、降雨後、雨庭1では地表面より約7cm高い位置で水面が滞留したのに対し、雨庭2では降雨が終わると半日以内で地中に浸透する状況が観察された。台風通過時の降雨後6時間の水位変化から両雨庭の

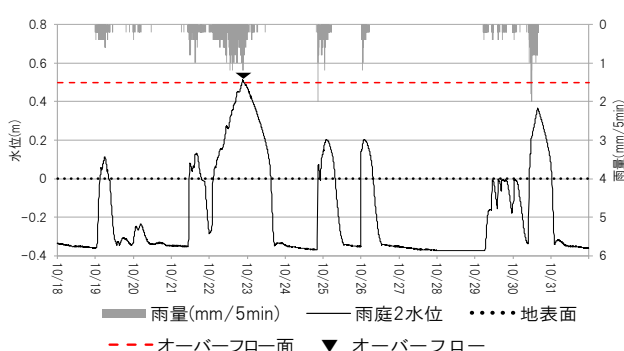


図-9 窪地部での水位変化(10月後半、左:雨庭1、右:雨庭2)

浸透能 (mm/hr) を算出した。その結果、雨庭 1 は約 10mm/hr、雨庭 2 は約 50mm/hr と推定され雨庭 2 の浸透能が大きいと考えられた。

同一敷地で隣り合って整備されたにもかかわらず、浸透能に生じた違いについて、土地被覆と植栽基盤を構成する土壌から考察する。

土地被覆について、湛水域の面積は大差がないものの雨庭 1 と 2 では構成が大きく異なっている。湛水域の全面がぐり石で被覆される雨庭 1 に対し、雨庭 2 はぐり石と芝地が同程度の被覆となっている。土地被覆別の現場透水試験による浸透能を計測した結果、雨庭 1 の石被覆地ではいずれも 0mm/hr (3 地点) であった。一方、雨庭 2 では、石被覆地が 9~114mm/hr (3 地点)、芝地が 63~96mm/hr (4 地点) であった。石被覆地は調査地点によってばらつきが大きい、総じて芝地の方が高い浸透能を示した。こうした土地被覆の構成の違いが、浸透能に影響を与えたものと考えられる。

植栽基盤を構成する土壌は、両雨庭で大きな差は認められなかった。粒径組成は、雨庭 1・2 で同程度の数値を示した (図-10、図-11)。土壌の礫含有率も両雨庭で差がなかった (石被覆地：約 50%、芝地：30~40%程度)。pH はどちらも 9 弱と高い値であった。飽和透水係数はばらつきが大きい、雨庭 2 で若干大きい値を示した (図-12、図-13)。同様の土壌材料であるにもかかわらず浸透能に違いが生じたのは、転圧や地盤改良など施工方法が影響を与えた可能性が示唆された。

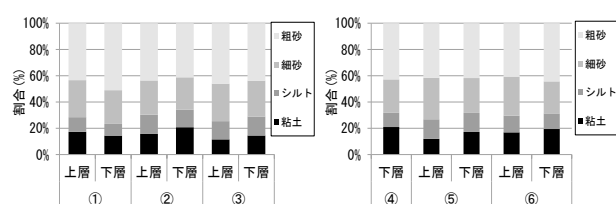


図-10 粒径組成
(雨庭 1)

図-11 粒径組成
(雨庭 2)

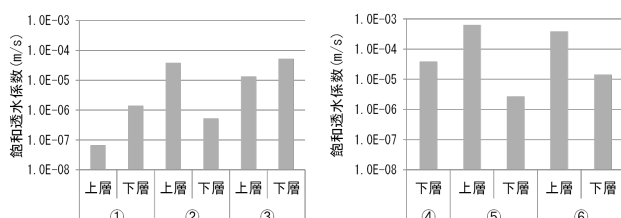


図-12 透水係数
(雨庭 1)

図-13 透水係数
(雨庭 2)

3.4.3 一時貯留

一時貯留について、地形解析からメッシュごとの貯留容量を算出した。メッシュごとの貯留容量は最大湛水深とメッシュの単位面積を乗じた上で、礫間貯留分を加えて算出した。

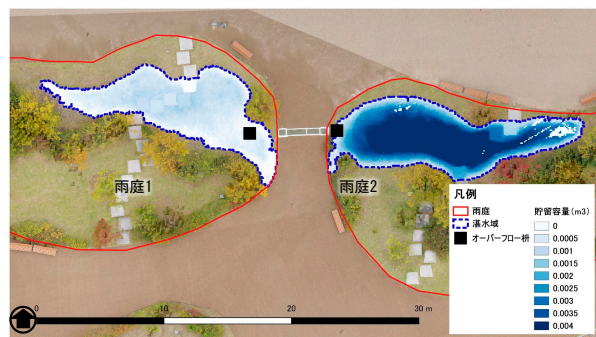


図-14 貯留容量

その結果、掘り込みが浅い雨庭 1 よりも掘り込みが深い雨庭 2 の方が窪地全体の貯留容量が大きいことが把握された。加えて、雨庭 1 はオーバーフロー口が窪地内で湛水深が浅く貯留容量が相対的に小さい地点に配置されていた。一方、雨庭 2 のオーバーフロー口は、貯留容量が比較的大きく、湛水域も広い窪地西側の斜面上部に配置されていた。こうした窪地内の微地形やオーバーフロー口の配置等も雨水流出抑制効果に影響を与えたものと考えられた。

一時貯留は、窪地形状や面積、湛水深 (窪地底面とオーバーフロー口天端の比高)、碎石層の空隙率や厚さなどにに基づき算出でき、設計段階で雨水の流出抑制効果や雨水を活かした景観・生物多様性向上の効果を予測しやすい。また集水や浸透と比較した場合、季節や気象による変動が少ない。雨庭の多様な効果を安定的に発現させていくためには、一時貯留を適切に計画することが重要と考えられる。

5. まとめ

雨庭実装に向けた基礎的知見を得るため、本研究では、実測モニタリングに基づき雨庭の雨水流出抑制効果を検証し、影響要因について考察してきた。

雨庭の雨水流出抑制効果としては、雨庭 2 のように台風時であってもほとんど流出せず、流入する雨水の大部分を抑制できる可能性が示された。また、雨庭 1 のように雨水流出が発生している場合でも流出のピークを遅延させることで下水道の負荷低減に寄与している可能性が示された。

影響要因としては、集水では集水経路・舗装材料、浸透では土地被覆の構成・植栽基盤を構成する土壌、一時貯留では窪地内の微地形・オーバーフロー柵の配置などが把握された。「減災」と「恵みの分配」を兼ね備える効果的な雨庭を設計していく上では、上記のような複合的な影響要因を踏まえ、雨庭内部の形状・構造はもちろんのこと、集水にかかわる舗装材料や排水系統との関係を考慮していくことが重要と考えられた。

今後の課題としては、長期間のモニタリングを通じて降雨条件による効果検証のデータを蓄積し、材料選定や配置・構造など最適な設計技術を明確化していくことが重要と考えられる。

謝辞

本稿は京都大学・京都学園大学（現京都先端科学大学）・東京都市大学・清水建設による共同研究の成果に基づいている。共同研究者である森本幸裕先生、柴田昌三先生、横田樹広先生、丹羽英之先生、張林瀛氏、米村惣太郎氏および研究に協力いただいた各組織の関係者の皆様への謝意をここに記す。

<参考文献>

- 1) 森本幸裕：“雨庭というソリューション”，LANDSCAPE DESIGN128, 8-13, 2019
- 2) 森本幸裕：“雨庭の社会実装”，グリーンインフラ研究会編『実践版グリーンインフラ』，日経 BP, 162-173, 2020
- 3) 小河原洋平，田浦扶充子，島谷幸宏：“善福寺川上流域を対象にしたグリーンインフラ による流出抑制及び CSO 抑制効果”，土木学会水工学論文集 63, 355-360, 2018
- 4) 石松一仁：“地理空間情報を活用した都市部における人と自然の共生モデル構築に関する研究—レインガーデンの最適配置計画を基軸として”，平成 28 年度国土政策関係支援事業研究成果報告書，2016
- 5) 山田駿介，柴田昌三：“雨庭の降雨流出特性の定量的評価”，日本緑化学会誌 43 (1)，251-254, 2017
- 6) Linying Zhang, Yui Oyake, Yukihiko Morimoto, Hideyuki Niwa and Shozo Shibata: “Rainwater storage/infiltration function of rain gardens for management of urban storm runoff in Japan” ,Landscape and Ecological Engineering 15(4),421-435, 2019
- 7) Linying Zhang, Yui Oyake, Yukihiko Morimoto, Hideyuki Niwa and Shozo Shibata: “Flood mitigation function of rain gardens for management of urban storm runoff in Japan” , Landscape and Ecological Engineering 16, 223-232,2020
- 8) 平野堯将，渡部陽介，米村惣太郎，横田樹広，張林瀛，柴田昌三，森本幸裕，丹羽英之：“グリーンインフラとしての雨庭による敷地の雨水流出抑制の可能性”，アーバンインフラ・テクノロジー推進会議第 31 回技術研究発表会，<https://www.uit.gr.jp/members/thesis/pdf/honb/607/607.pdf>，2019
- 9) 渡部陽介，平野堯将：“雨庭による敷地の雨水流出抑制効果の評価”，水循環 貯留と浸透 Vol118, 16-21, 2020
- 10) 公益社団法人日本道路協会：“道路土工要領”，丸善出版，2009