

## 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

清水建設株式会社 平野堯将・渡部陽介・米村惣太郎

東京都市大学 横田樹広

京都大学 張林瀛・柴田昌三・森本幸裕

京都先端科学大学 丹羽英之

### 1. はじめに

近年、都市部では、ゲリラ豪雨などによる内水氾濫リスクが増大しており、雨天時に合流式下水道から未処理汚水を含む越流水が放流され、河川・海域の水質汚染や生態系劣化の懸念が広がっている。いずれも、下水道の処理能力を越える雨水が流入することで発生する深刻な都市問題である。対策として、下水道の処理能力向上も進められているが、逼迫する行政財政や用地取得の難しさ等を背景に、下水道設備の新設・更新だけでは対応が難しいと考える。気候変動への適応に向け、従来の雨水は速やかに下水道に流すとの発想を転換し、雨水を敷地で受容し、敷地外への流出を減らすことが環境配慮として重要になってきている。

そうした中、都市のグリーンインフラとして、雨庭(レインガーデン)に対する期待が高まってきている。雨庭とは敷地の建物・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。雨水流出抑制効果をはじめ、地下水涵養や水質浄化、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、生物多様性の保全といった多様な効果があり、深刻化する社会課題の解決に貢献できる、自然を活かした賢いソリューションである<sup>1)</sup>。1990年代以降、欧米都市で普及し、LEEDやSITESなどの建物・街区を対象とした国際的な環境認証でも重要視され、近年、国内での整備も始まりつつある。

雨庭に関する国内の既往研究は、都市スケールで整備の適地や効果を推定した研究<sup>2,3)</sup>や雨庭の雨水流出抑制効果の定量化を試みた研究<sup>4)</sup>がある。しかし、湿潤気候で降雨量が多い日本では未だ整備実績が乏しく、定量データに基づく効果検証や設計・施工がなされていないのが現状である。

そこで本論文では、国内で先駆けて整備された雨庭を対象に、雨水流出抑制効果の実測および敷地レベルの効果推定に基づき、雨庭の可能性を検討した結果を報告する。

### 2. 研究対象

元京都学園大学(現京都先端科学大学)の京都太秦キャンパス(京都市右京区)の中庭を研究対象とした。当該地は、キャンパス新設時に整備され、枯山水庭園をモチーフとしたランドスケープデザインがなされた(監修:森本幸裕, 設計・施工:清水建設)。この中に、雨水流出や水循環の健全化に配慮し、国内で先駆けて3つの雨庭と帯状のバイオスウェル(緑溝)が整備されている。加えて、雨庭とともに築山が島状に配置されており、その裾にも礫で覆われた小さな窪みがつくられ、舗装も透水性舗装となっている。また地域の在来種による植栽や、京都の伝統文化に根差した絶滅危惧種であるフジバカマやキクタンギクなどの保全を試みる「和の花プロジェクト」等、地域の生物多様性保全も取り組まれている。

中庭全体を記した図面を示す(図1)。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:約5.5 m<sup>3</sup>)、湛水域はぐり石で被覆され、集水面積は約500 m<sup>2</sup>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:約22 m<sup>3</sup>)、湛水域はぐり石と芝地で被覆され、集水面積は、約860 m<sup>2</sup>となっている。中庭の南端に位置する雨庭3も、掘り込みが深く(貯留容量:63 m<sup>3</sup>)、湛水域はぐり石と芝で被覆されて、集水面積は約5170 m<sup>2</sup>と最も広い。ただし、集水域と窪地の間に排水溝があるため、現状では路面の表流水は窪地には流入しない状況になっている。中庭の中央に位置するバイオスウェルの湛水域は300 m<sup>2</sup>でぐり石で被覆され、集水面積は約2650 m<sup>2</sup>である。

### 3. 雨庭の雨水流出抑制の枠組み

本論文では、雨庭による雨水流出抑制効果を、1)集水経路での浸透、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(図2)。降雨イベント時の雨水のフローとしては、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、オーバーフロー枡を通じて最終的には敷地外の公共下水道に流出することとなる。

従来のコンクリート等で作られた雨水流出抑制施設(雨水貯留槽や浸透型の雨水枡・トレンチ等)と比較して、雨庭は、窪地が植物や礫、土壌により被覆されており、浸透・貯留、2つの機能を兼ね備えた点に大きな特徴がある。しかし、雨水流出抑制という観点から、こうした特徴の定量的な知見が乏しいのが現状である。そこで、本論文では、まず、窪地での雨水流出抑制効果を実測することとした。その上で、敷地全体の雨水流出抑制効果を推定することとした。

## 4. 研究方法

### 4.1 雨庭の雨水流出抑制効果の実測

雨庭単体の雨水流出抑制効果を定量的に把握するため、1)雨水流量観測と2)雨庭の形状・基盤調査を行った。

#### 1)雨庭の雨水流量観測

雨量と窪地・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。対象は雨庭1・2とし、窪地部と集水域が接続していない雨庭3は除外した。観測期間は2017/7/14～11/25であ

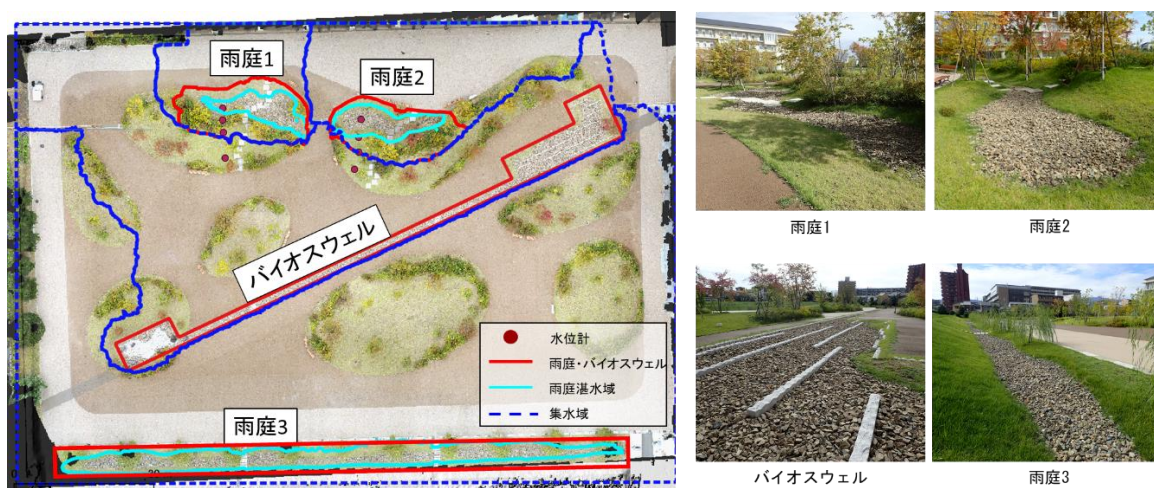


図1 研究対象敷地の全景・現地写真

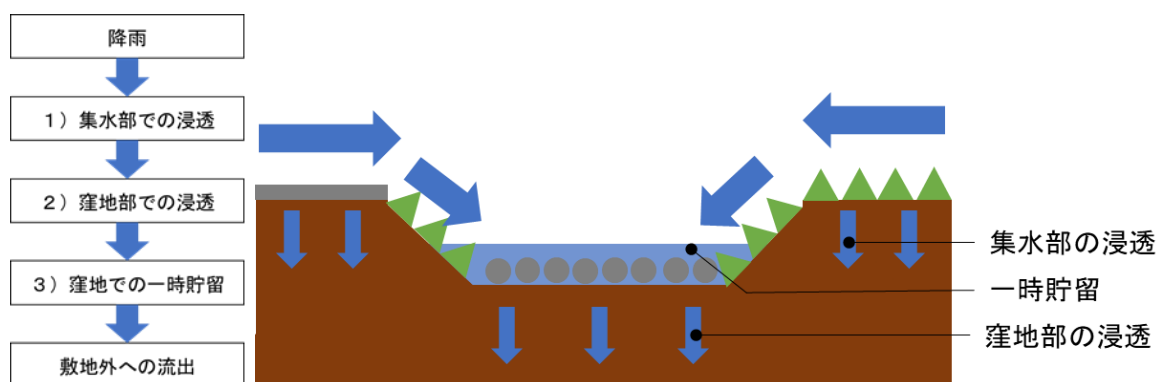


図2 雨庭による雨水流出抑制効果の捉え方

る。雨量は転倒ます式雨量計を用いて記録した(0.2 mm 毎)。水位は圧力式水位計を用いて 5 分間隔で計測した。流入量は土地被覆毎の流出係数を考慮した上で、集水面積と降雨量を乗じて推定した。流出量は、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 1 分間隔で撮影した。期間中の降雨が認められた 58 日分のデータが得られ、台風を含むいくつかの降雨パターンが認められた 10 月 21~23 日のデータ(総降雨量 153 mm:内訳 10/21:26.8 mm, 10/22:122.8 mm, 10/23:4.2 mm)を本論文では分析に用いた。

## 2) 雨庭の形状・基盤調査

形状について、中庭全体の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、地形解析により雨庭全体の集水域と窪地の湛水域、貯留容量を算出した。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・踏み石に分類した。

## 4.2 敷地レベルの雨水流出抑制効果の推定

敷地スケールの雨水流出抑制効果の推定を行うため、まず、1) 集水経路での浸透、2) 窪地での浸透、3) 窪地での貯留という 3 つのプロセスにおいて個別の抑制量を算出した。その上で、個別の抑制量を合算することで、全体の流出抑制量を求めた。なお、雨庭 3 は、現状では、集水域との雨庭 3 の間に排水溝が配置されているため、窪地での浸透と貯留のポテンシャルが十分に発揮されていないことが把握された。そのため、敷地レベルの効果推定は、現状と改善シナリオの 2 つを行った。改善シナリオでは、集水域と窪地部の接続を改善する対策として、舗装面と雨庭 3 の間の排水溝を取り除いたものと想定した。算出方法を以下に示す。

1) 集水経路での浸透は、舗装面や芝地から窪地へと表流雨水が流入する経路で地表面に浸み込むことを指す。まず、10 cm メッシュの微地形データを用いた 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微地形と土地被覆に基づき



図3 雨水流量観測の位置

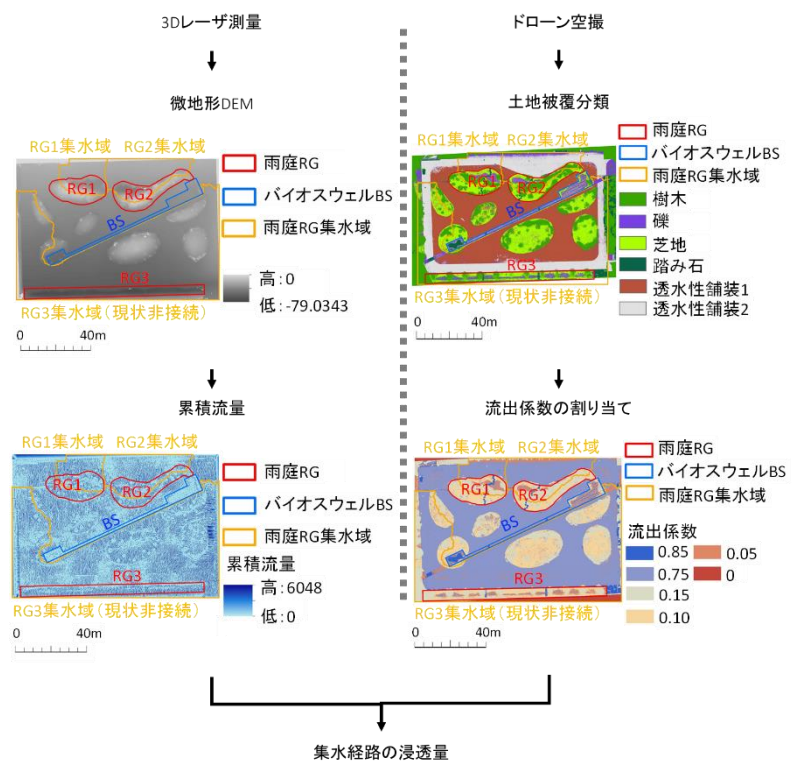


図4 集水経路における浸透のGIS解析フロー



推定した指標であり、集水経路で累積されたメッシュ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、地表面被覆に応じた流出係数とメッシュの単位面積と降雨量を乗じることで流入量と浸透量を推定した。地表面被覆毎の流出係数は、道路土工要綱<sup>5)</sup>を参考に設定した(表1)。

表 1 地表面被覆の流出係数

| 地表面被覆 | 流出係数 |
|-------|------|
| 透水性舗装 | 0.75 |
| 踏石    | 0.85 |
| 樹木    | 0.10 |
| 芝     | 0.15 |
| 礫被覆地  | 0.05 |

2) 窪地での浸透は、本論文では、窪地の貯留容量以上に、流出を抑制できた分を浸透による効果と考えた。雨庭 1・2 については、実測値を用いた。一方、雨庭 3 とバイオスウェルの浸透量は、実測値が存在しないため、雨庭1・2 の実測値から単位面積当たりの浸透量の平均値を算出し、雨庭 3 とバイオスウェルの面積に乘じることで推定した。

3) 窪地での貯留は、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、から構成されたと考えた。前者は、3D レーザ測量データを用い、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。後者は、礫被覆地の面積に、礫層の厚さ(外構計画図の計画値を参照し、雨庭→10 cm、バイオスウェル→25 cm と仮定)と礫間空隙率(0.35)を乗じることで算出した。なお、バイオスウェルは周囲地盤と同じ高さまで礫が敷き詰められていたため、礫間貯留のみを算出した。

## 5. 結果

### 5.1 雨庭の雨水流出抑制効果の実測

#### 1) 雨庭の浸透・貯留状況の全体傾向

降雨に応じた雨庭 1・2 の窪地での浸透・貯留の傾向を観察した。10 月の雨量・水位変化を示す(図 5, 図 6)。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 7 cm 高い位置で水面が滞留している一方、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。また、オーバーフローは、雨庭 1 では 4 回、雨庭 2 では 1 回、観測された。以上から、雨庭 2 の方が雨庭 1 より高い浸透・貯留機能を有するものと考えられた。

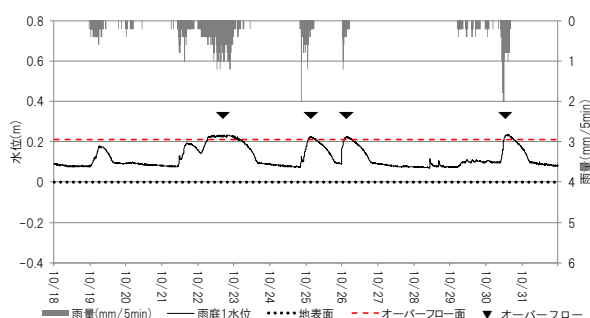


図 5 雨量と水位変化 (雨庭 1)

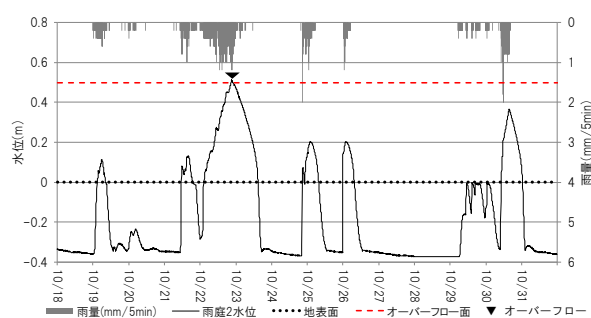


図 6 雨量と水位変化 (雨庭 2)

#### 2) 雨庭の窪地の浸透量および雨水流出抑制率

雨庭 1・2 の 1 時間毎の流入量・流出量の推移を観察したところ、貯留容量を超える雨水が流入しても、オーバーフローせず、雨水の流出が抑制されている様子が把握された。これは、窪地において地中浸透したことが影響していると考えられた。そこで、集水された雨水流入量から貯留容量と雨庭実測による流出量の計測値を引いた値を窪地における浸透量として算出した。その結果、雨庭 1 が 6.2 m<sup>3</sup>、雨庭 2 が 16.8 m<sup>3</sup> と推定された。また、窪地からの総流出量を総流入量で除することで、雨水流出抑制率を算出した。雨水流出抑制率は、雨庭 1 が流入量の約 30 %、雨庭 2 は約 99 %であった。

## 5.2 敷地レベルの雨水流出抑制効果推定

各雨庭およびバイオスウェルの、集水経路での浸透、窪地での浸透、貯留量を足し合わせ、敷地全体の雨水流出抑制量を推定した。また、敷地全体の降雨量に対する雨水流出抑制量の割合を、雨水流出抑制率として算出した。雨水流出抑制効果の水準は、国際環境認証 LEED や SITES の雨水流出抑制の評価基準を参考に考察した。両認証とも、敷地・街区の先進的な環境配慮を評価する仕組みであり、過去 10 年の降雨データのパーセンタイル値をもとに評価する(表 2)。

その結果、過去の1日降雨量の上位 99 パーセンタイル以上にあたる 22 日(122 mm/日)の降雨量では、現状では、雨水流出抑制量が約 220m<sup>3</sup>、雨水流出抑制率が約 15 %と推定された。また、改善シナリオでは、雨水流出抑制量が約 310 m<sup>3</sup>、雨水流出抑制率が約 21 %と推定された(図 7)。

一方、79 パーセンタイルにあたる 21 日(26.8 mm/日)の降雨量の場合、現状では、雨水流出抑制量が約 97 m<sup>3</sup>、雨水流出抑制率が約 70 %と推定された。また、改善シナリオでは、雨水流出抑制量が約 217 m<sup>3</sup>となり、雨水流出抑制率が約 106 %と推定された(図 8)。

以上より、最も高い 95 パーセンタイルを満たすことは難しいが、80 パーセンタイル相当の降雨では、敷地外への流出ゼロを達成できる可能性があり、高い雨水流出抑制効果があることが示唆された。

表 2 国際環境認証における雨水流出抑制効果の水準

|            | LEED-NE v4 | SITES v2 |
|------------|------------|----------|
| 95 パーセンタイル | 4 ポイント     | 6 ポイント   |
| 90 パーセンタイル | 3 ポイント     | 5 ポイント   |
| 85 パーセンタイル | 2 ポイント     | —        |
| 80 パーセンタイル | 1 ポイント     | 4 ポイント   |
| 60 パーセンタイル | —          | 必須       |

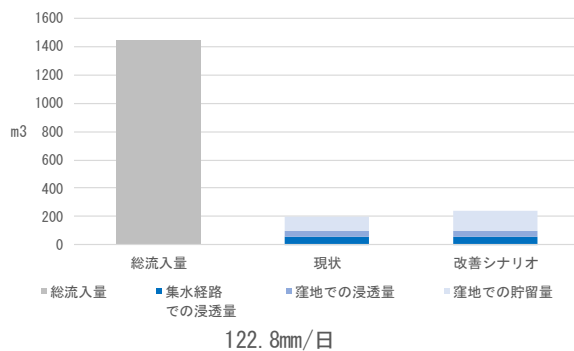


図 7 雨水流出抑制効果 (10/22)

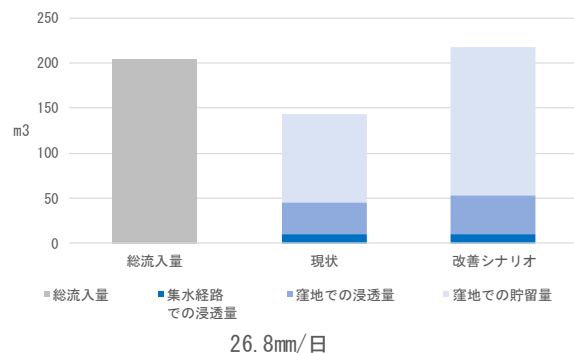


図 8 雨水流出抑制効果 (10/21)

## 6. まとめ

本論文では、雨水流出抑制の観点から、雨庭にはどのような可能性があるのか、実測と敷地レベルの効果推定に基づき検討した。その結果、雨庭単体としては、雨庭 2 のように、台風時で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唆された。一方、敷地レベルでの効果推定でも、過去の降雨イベントの 80 パーセンタイル相当の降雨に対応でき、雨庭とバイオスウェルが高い雨水流出抑制効果を発現できる可能性が示唆された。

また、雨庭やバイオスウェルのポテンシャルを最大限活かしていくには、集水域の大部分を占める舗装面の透水性や集水域と窪地の接続性に留意していくことが重要と考えられた。例えば、雨庭 3 のように、雨庭の浸透・貯留のポテンシャルが高くても、排水溝によって集水域との接続性が断絶されていると、流出抑制効果が発揮できない恐れがある。今後、グリーンインフラとして雨庭を普及展開させていく上では、雨庭自体の浸透・貯留機能の向上はもちろんであるが、舗装面や排水設備等など、雨水の集水・排水に関わるグレイインフラとの一体的な整備が重要と考えられた。

#### 【参考文献】

- 1) 森本幸裕:雨庭というソリューション, LANDSCAPE DESIGN, 128, 2019
- 2) 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ー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
- 3) 巖島怜・岩永祐樹・出田一史・佐藤辰郎・島谷幸宏:各戸貯留及び土壌改良によるマンホール集水域を対象とした流出抑制効果に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.2, 49-58, 2016
- 4) 山田駿介・柴田昌三:雨庭の降雨流出特性の定量的評価, 日本緑化工学会誌, 43(1), 251-254, 2017
- 5) 公益社団法人日本道路協会:道路土工要綱, 丸善出版, 2009