

グリーンインフラによる雨水流出抑制の評価と予測ツールの開発

株式会社竹中工務店 向井一洋, 鈴木康平
花岡郁哉, 古川靖英

1. はじめに

高度で豊かな都市環境の実現において、緑地空間の持つ役割が重要となっている。都市における緑地空間は、単なる景観や憩いの場としてだけでなく、生態系サービスの提供、地域コミュニティの活性化など、多様な機能が求められている。特に昨今、気温上昇や豪雨といった極端気象への対策として、都市緑地の整備が注目されている。ゲリラ豪雨や台風による水害（内水氾濫）が頻発し、合流式下水道の雨天時越流による水質汚濁が問題になっていることから、国や自治体では、雨水の地下浸透を推奨し、下水道などへの流出抑制などの対策を推進している。国際的には自然の力を活用して生態系と人々に恩恵をもたらしながら社会的な課題を解決する Nature-based Solutions (NbS) の概念が広く浸透しつつある。国際自然保護連合 (IUCN) は、2020 年に NbS の初のグローバル標準「IUCN Global Standard for Nature-based Solutions」¹⁾ を発表し、政府や民間企業等による NbS の取組みを推進している。NbS アプローチの一つに位置付けられるのが、グリーンインフラであり、その中でも都市型水害（内水氾濫）、合流式下水道の雨天時越流による水質汚濁等の都市課題を同時に解決可能な雨庭（レインガーデン）の活用が期待されている。

2. 実装に向けた課題と本研究の目的

都市緑地の質と量を両立させ、グリーンインフラとしての機能発揮を図るためには、科学的な根拠に基づいた設計や、その効果を定量的に検証するしくみの整備が不可欠となる。近年、国や一部の自治体がグリーンインフラガイドライン²⁾を定めるなど、国内においても雨水流出抑制を主要な導入目的とした雨庭（レインガーデン）の適用事例が増えつつあるが、実規模の施設における効果検証事例は少ない。雨水流出抑制効果の変化を長期モニタリングにより把握し、設計や維持管理においてどのように活用するかを検討や、雨庭の設計に必要な流出予測モデルの検討の必要性が高まっている。竹中工務店では、グリーンインフラコンセプトブック³⁾を策定し、プロジェクトでのグリーンインフラ技術の実装の取組みを継続している。グリーンインフラ技術の一つである雨庭については、2015 年より実装と共に、実規模施設での雨水流出抑制機能の検証を行ってきた。本報告では、そのうち 2 件の実証例を対象とした。表 1 に本報告にて対象とした実規模施設での実証の目的を整理した。調の森 SHI-RA-BE では、雨庭の豪雨時及び長期における雨水貯留浸透挙動の把握を報告する。東陽町ぐりんとすコミュニティガーデンでは、複数の雨庭の連結による雨水流出抑制効果の把握に加え、計画段階において流出抑制効果を予測するためのモデルを作成し、実測値との比較検証を行った結果について報告する。

表1 評価対象プロジェクトの概要

プロジェクト名称	実証の目的	規模	実証期間
調の森 SHI-RA-BE (千葉県印西市)	<ul style="list-style-type: none">雨庭の豪雨時における雨水貯留浸透挙動の把握(3.1 節)雨庭の長期的な流出抑制効果(3.1 節)	2,500m ²	2019 年 10 月 ～現在
東陽町ぐりんとす コミュニティガーデン (東京都江東区)	<ul style="list-style-type: none">複数の雨庭の連結による流出抑制効果の把握(3.2 節)モデルとの比較検証(4 章)	813m ²	2024 年 7 月 ～現在

3. プロジェクトにおける実証

3.1. 事例1: 竹中技術研究所 調の森 SHI-RA-BE®

3.1.1. 施設の概要

2019年に整備が完了した調の森 SHI-RA-BE では、集水面積が 2,500 m² 規模の雨庭を導入し、長期的な効果検証を行っている(図 1)。図 2 に、調の森 SHI-RA-BE における雨庭の配置図を示す。調の森 SHI-RA-BE の雨庭は、地中の堰により越流高さの異なる4つの区画に分割されており、降雨初期にはそれぞれの区画で個別に水位が上昇するが、降雨量が増えると、隣接の池も含めた一体の水面が現れる。池と隣接する位置に配置され、豪雨時には池と一体となり雨水を一時貯留・浸透させることが可能である。

3.1.2. 流出抑制効果の検証方法

降雨状況を把握するため、敷地内には、転倒ます型雨量計を設置し、15 分間隔で降水量を記録した。また、雨庭内では、豪雨時の雨水貯留浸透量を把握することと、長期運用での浸透量の変化を把握することを目的とし、区画①～④の底面に圧力式の水圧センサーを設置し、1 分間隔で水位変動を記録した。豪雨時に貯留した雨水が速やかに地中浸透されることで、平時の状態へと戻るが、長時間、地表付近に水たまりが残留すると蚊の発生場所となり衛生面でのリスクが生じる。そのため、複数回大雨が降っても速やかな排水機能が維持されることが重要となる。

3.1.3. 結果と考察

調の森 SHI-RA-BE に設置された雨庭では、2019 年の千葉県豪雨時には、平年 10 月の 1 ケ月分に相当する雨(積算降水量 219 mm)がわずか半日で降った。図 3 に貯水状況の写真と降水量の推移のグラフを示す。降雨が継続した 10 時間で、集水域の総降水量の約 43% に相当する 236 m³ を雨庭部分で貯留浸透した。これに、雨庭と池を除く植栽地の貯留浸透量 67.5 m³ と、池の調整容量 60 m³ も加算すると、合計で 363. 7 m³ の貯留浸透能を有することを確認した。本集水域に関しては日本建築学会発行の「雨水活用技術規準」⁴⁾が推奨する蓄雨高 100 mm/ m² を達成していることが明らかとなった。

2019 年 9 月の竣工時より継続している水位モニタリング結果より、雨庭の運用開始後、約 5 年間のうちに発生した豪雨のうちオーバーフロー桝の流入口に当たる GL+150 mm まで水位が達したのは、前述の 2019 年 10 月の千葉県豪雨時と 2023 年 6 月の台風 2 号に伴う豪雨時である。図 4 には 2023 年 6 月の台風 2 号に伴う豪雨時(降雨継続時間 34 時間、累積雨量 264 mm)の降水量と水位の変化を示



図 1 調の森 SHI-RA-BE の雨庭

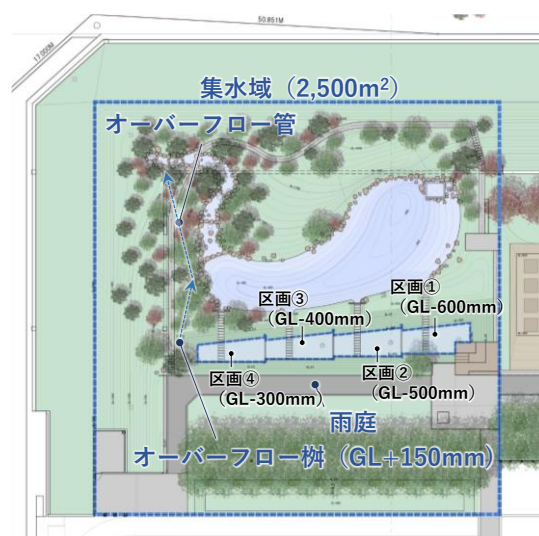


図 2 調の森 SHI-RA-BE の雨庭の平面図

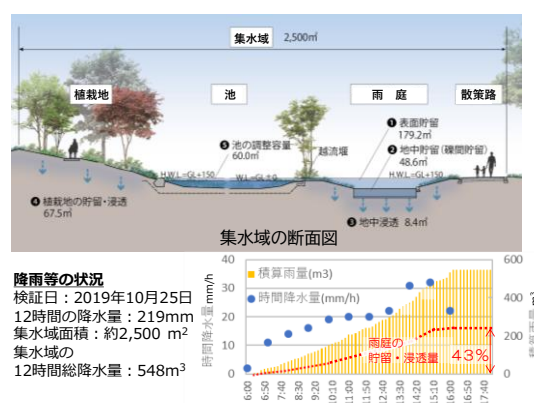


図 3 2019 年 10 月千葉県豪雨時の貯留浸透量

す。6/2 午前 1 時 30 分頃から断続的に降雨が発生し、雨庭内の水位にも変動が確認された。特に、6/3 午前 0 時～午前 3 時の 3 時間累積 65.5 mm の豪雨により雨庭内の水位が急上昇し、6/3 午前 5 時 30 分頃に満水状態となっていることが確認された。降雨終了後の水位変動からは、満水状態 (GL+150 mm) から貯留水が完全に浸透し平時の状態に戻る (GL-600 mm) までに 2.5 日程度の時間を要することが確認された。

表 2 に、雨庭の 4 つの区画の中で最も雨水の流入頻度が高い区画①において、運用開始後 1 年後の 2020 年 10 月から、運用約 5 年となる 2024 年 8 月までの間で、水位計測の実測値に基づき浸透能を評価した結果を示す。雨庭は目詰まりによる性能低下が懸念されるが、対象施設においては浸透能の低下は確認されず、運用開始時の浸透能を維持していることが示された。

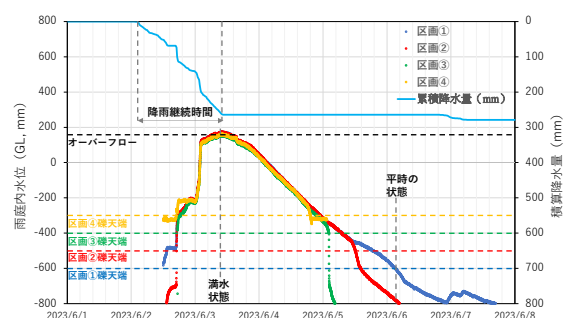


図 4 2023 年 6 月豪雨時の累積雨量と雨庭内水位の変化

表 2 運用開始から 5 年間の浸透能の評価結果

計測時期	2020年10月	2022年6月	2023年6月	2024年8月
浸透能 (mm/hr)	10.0	10.9	11.9	10.6

3.2. 事例 2: 東陽町ぐりんとすコミュニティガーデン

3.2.1. 施設の概要

東京都江東区において従来駐車場であった場所を市民に開放するコミュニティガーデンとして整備するにあたり 3 つの貯留エリアを連結した雨庭を設置し、2024 年より流出抑制効果の検証を開始している (図 5)。図 6 に平面における雨庭の配置と雨水の流出経路、図 7 に雨庭の断面図、面積、計画貯留量を示す。隣接の駐車場や建物屋上を含める 813m² を集水面積とし、集まった雨水は軽量土や礫の間隙貯留及び窪地地形による表面貯留により敷地内に一時貯留される。雨庭①は、表層碎石層 5cm、軽量土層 30cm、砂層 20cm で構成される。雨庭②、③は、碎石層 25cm で構成され、礫層天端からオーバーフロー高さまでの表面貯留深は 5cm である。各雨庭の計画貯留量は、雨庭①が 3.6 m³、雨庭②が 6.2 m³、雨庭③が 7.0 m³ となる。

3.2.2. 流出抑制効果の検証方法

雨庭の水収支を把握するため、流路の 3 カ所 (図 7 中、橙色①～③) において流量計測を行った。集水面である隣接する建物屋上と駐車場から雨庭①への流入流量を計測する流量計①、雨庭①からオーバーフロー後、雨庭②への流入流量を計測する流量計②、雨庭②、③が満水状態となり最終枳を介

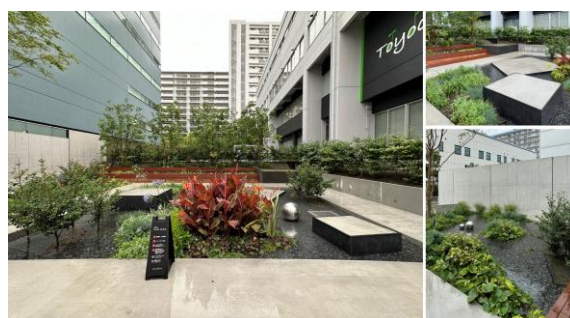


図 5 東陽町ぐりんとすの雨庭

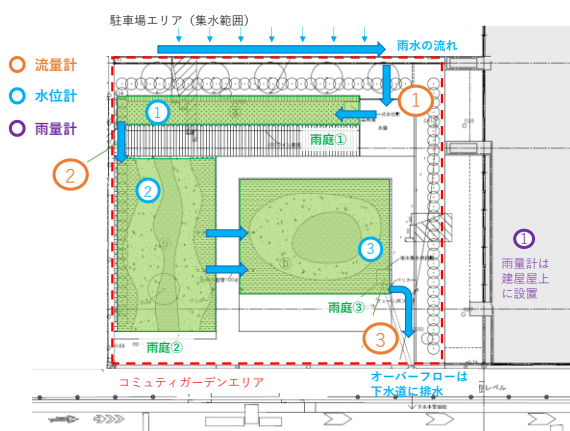


図 6 東陽町ぐりんとすの雨庭の平面図と計測機器配置

して下水道への流出される流量を計測する流量計③を設置した。流量計測方法はいずれも三角堰の越流高をレーダー式水位計にて計測し、流量に変換した。併せて現地の降水量を把握する目的で、転倒ます型の雨量計を隣接する建物屋上に設置し、0.5mmの分解能にて10分間隔で雨量を計測した。

貯留された雨水の浸透の様子を把握する目的で、雨庭の貯留浸透部の底面に圧力式の水圧センサーを設置し、1分間隔で計測を行った。また、施工前の浸透底面における浸透能評価と実施設での浸透能を比較する目的で、簡易法による浸透能評価を行った。施工前の浸透面の鉛直現場飽和透水係数の評価にはダブルリング法⁵⁾を採用した。

3.2.3. 結果と考察

図8に計測期間における降水量と水位の変動を示す。降雨に対して、水位が上昇している様子が確認できた。水位計測結果から、各雨庭が満水状態となり、オーバーフローが生じた回数は、雨庭①が1回、雨庭②及び③の連結部が4回であった。雨庭①は軽量土層の厚みが大きく、雨庭②、③よりも貯留量可能な水量が大きいため満水となる頻度が低い結果となったと考えられる。建物屋上と駐車場から集水され、雨庭①へと流入した雨水の大部分は雨庭①によって一時貯留され、地中へと浸透したことが確認された。

図9に水位変化の傾きより算出した雨庭の浸透能を示す。雨庭①については、貯留水深が底面より20cm付近で浸透速度が緩やかになる傾向が確認された。地表面への雨水の滲み出しは確認されておらず、貯留水は全て地中に浸透したものと考えられた。施工前に浸透底面の浸透能を調査したところ、鉛直方向に70.7～140 mm/hrの現場飽和透水係数が確認されており、底面では施工時の踏み固め等の影響により浸透能低下したことが示唆された。従来、貯留浸透施設計画時には浸透底面における鉛直現場飽和透水係数を用いることが一般的であるが、貯留部の深度が深い雨庭の計画段階においてはボアホール法等の現地浸透試験により浸透施設性能を正確に把握することが適切な規模の雨庭の計画・設計において肝要と考える。

図10に計測開始以降の雨量及び流量のモニタリング結果より算出した、流入・流出の積算水量を示す。今回の計測期間を通じた積算降雨量は597.5 mmであり、278.2 m²のコミュニティーガーデンエリアに対して直接降った雨量は166.2 m³となった。また、流量計①を用いて実測した駐車場と建物屋上から

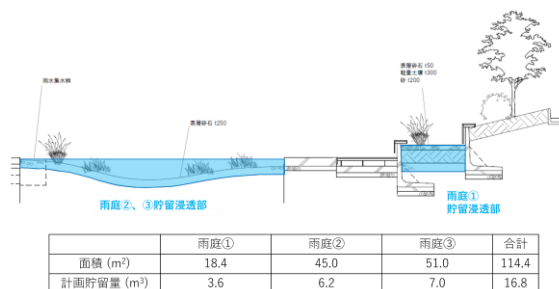


図7 東陽町ぐりんたすの雨庭の断面図

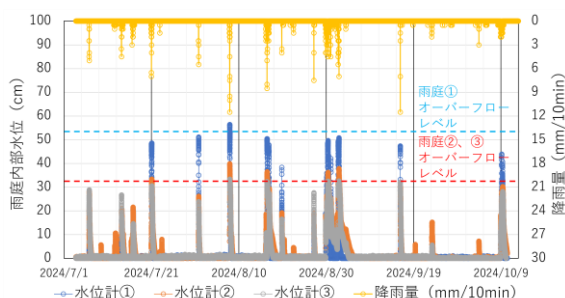


図8 雨庭内水位計測結果(2024年7月～10月)

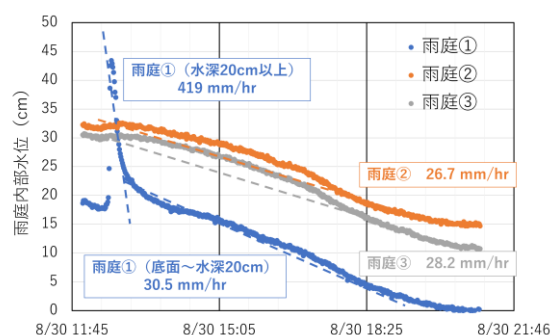


図9 浸透能評価結果

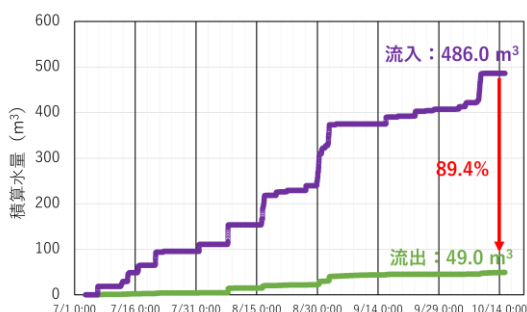


図10 積算流量計測結果(2024年7月～10月)

の積算流入量は 319.8 m³ であり、雨量と合算した数値を雨庭への流入量として用いて試算を行った。対象期間全体の実績として、積算流入量が 486.0 m³ に対して、下水道への積算流出量が 49.0 m³ となり、計測期間中において敷地に降った雨量の約 89.4 %に当たる雨水を敷地内に留めたことが確認できた。建築学会の「雨水活用技術基準」⁴⁾では、環境蓄雨として年間を通して降雨量の 1/3 を環境に還すことにより、自然の雨水循環系を損なわない性能を有するとされており、当該施設が高い蓄雨性能を有することが確認された。

4. 流出抑制効果予測と実測との比較検証

4.1. 雨水貯留浸透挙動予測モデルの検討

3.2 に示した東陽町ぐりんとすコミュニティガーデンの事例を対象に、建築設計において適用が拡大してる 3D モデリングソフトウェアを用いて雨庭における貯留浸透挙動予測モデルを構築した。図 11 に作成したモデルの概要を示す。モデル作成においては、雨水流出予測に一般的に用いられる貯留関数法を参照した。雨庭に流入する雨水を集水する集水面と集水された雨水が一時貯留され、地中へと浸透する貯留浸透部により構成される。10 分間隔のタイムステップを

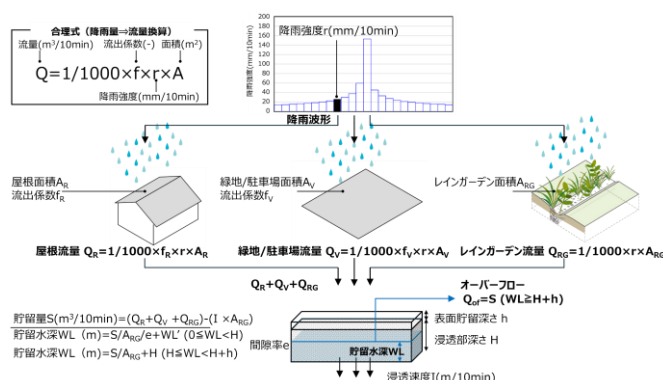


図 11 雨水貯留浸透挙動予測モデルの概念図

設定し、集水面からの流入と貯留浸透部に対する直接降雨を流入量として求め、ここから浸透量を差し引くことで、貯留浸透部の水位に換算した。各貯留浸透部では、設定したオーバーフロー水位を超えると下段の貯留浸透部へとオーバーフローが生じる。集水面積や勾配が然程大きくない建築の外構での雨庭の計画での初期検討に用いるツールを想定し、モデルが複雑となる集水面の勾配や表面粗度等による流出遅延などは考慮しない簡易モデルとした。

各雨庭の浸透量の算出においては、東京都雨水貯留浸透技術指針⁶⁾におけるトレンチ型の浸透施設を想定し、設計浸透量を設定した。3.2.3 において述べた通り、雨庭①では、貯留水深に応じて浸透能が変化しており、実測値を基に貯留水位が貯留浸透部底面から 20 cm までが浸透能 419 mm/hr、20cm～50cm(満水時水位)を浸透能 30.5 mm/hr と設定し、計算を実行した。雨庭②、③については貯留水深に寄らず一定の浸透能が得られており、モデルにおいては雨庭②に 26.7 mm/hr、雨庭③に 28.7 mm/hr の浸透能を与えて計算を行った。

4.2. 豪雨時における雨水貯留浸透の実測結果

東陽町ぐりんとすコミュニティガーデンの事例において、観測期間中で最も積算降雨量の大きい連続した降雨イベント対象に、モデルの検証を行った。対象とした降雨イベント時の降雨強度と水位の実測結果を図 12 に示す。計測期間中で最大規模の降雨は、2024 年 8 月 29 日午前 5 時から 9 月 1 日午後 23 時までの 90 時間の間に断続的に発生した降雨であった。対象とした 90 時間の積算降雨は 595mm であり、これは東京都の降雨量 9 月の平年値の 2.7 倍に相当する規模であった。降雨に対して雨庭内の水位が上昇、その後小康状態の時間では浸透により水位が低下していく様子が確認された。

4.3. モデルによる計算結果と実測値との比較

図 13 に豪雨時における雨庭①と雨庭③内の水位変化について、計算と実測の結果比較を示す。集

水面での流出遅延を考慮しない簡易モデルであるが、雨庭内水位のピークが現れるタイミングや浸透による水位低下の傾向が合致しており、雨庭の貯留浸透挙動を一定の精度で再現可能であることを確認した。今回、集水面がアスファルトやコンクリートで覆われた条件であり、流出遅延の影響は小さいと考えられるが、集水面の土地被覆条件が異なる場合や勾配が大きい条件では誤差が大きくなる可能性があり、今後更なる検証が必要である。

図 14 に計算結果の可視化の例を示す。建築設計において適用が拡大しつつある 3D モデリングソフトウェアをベースとしたツール開発により、設計において作成された BIM データ等を活用し、雨庭の流出抑制効果の検証が可能となった。また、降雨後の景観の変化も容易に可視化が可能となることで、ランドスケープデザインによる景観形成とグリーンインフラ機能を同時に検討し、合意形成を図るツールとしての活用が期待される。

5. おわりに

本報告では、グリーンインフラの機能の一つである雨水流出抑制に着目し、2 件の実規模の雨庭における実証を行った。調の森 SHI-RA-BE では、降雨量と水位、東陽町ぐりんとすコミュニティガーデンでは、降雨量、水位、流入・流出流量のモニタリングにより雨水流出抑制効果の把握を試みた。長期モニタリングの結果から、運用開始 5 年経過時点においても浸透能が維持されていることが確認された。また、雨庭内水位計測により浸透能を評価することで、維持管理の指標として有効であることが確認された。併せて、流入・流出流量計測により水収支を評価することで、環境蓄雨性能の指標としての活用の可能性が示唆された。今回対象とした雨庭では、今後もモニタリングを継続し、雨庭の計画や維持管理に有益なデータの蓄積を継続していく計画である。また、東陽町ぐりんとすコミュニティガーデンの事例を対象に、雨庭による貯留浸透挙動を予測する簡易モデルを構築し、実測との比較により一定の精度を有することを確認した。雨庭のプロジェクト実装件数は着実に増加しつつあり、現在、貯留浸透施設規模の最適化や気候変動による降雨パターンの変化への対応等に取り組んでいる。

【参考文献】

- 1) IUCN: IUCN Global Standard for Nature-based Solutions : first edition, 2020
- 2) 国土交通省総合政策局: グリーンインフラ実践ガイド, 2023.10
- 3) 竹中工務店: グリーンインフラコンセプトブック, <https://www.takenaka.co.jp/enviro/gicb/pdf/gicb.pdf>, 2021
- 4) 日本建築学会: 雨水活用建築ガイドライン, AIJES-W0002-2019, 2016.3
- 5) ASTM: Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer, D3385-18
- 6) 東京都総合治水対策協議会: 東京都雨水貯留・浸透施設技術指針(資料編), p28, 2009.2

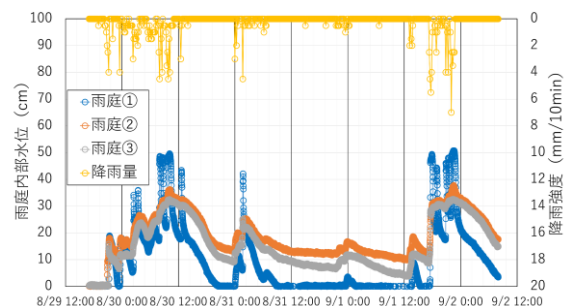


図 12 豪雨時の降雨量と庭内水位の実測結果

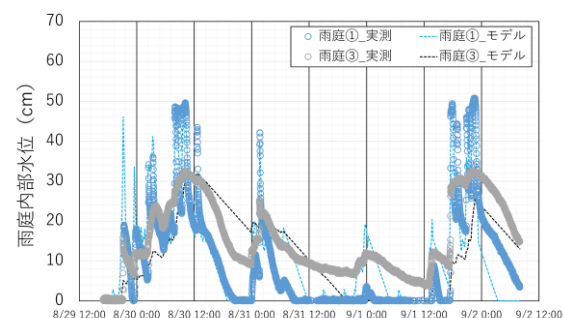


図 13 モデルによる計算結果と実測値との比較

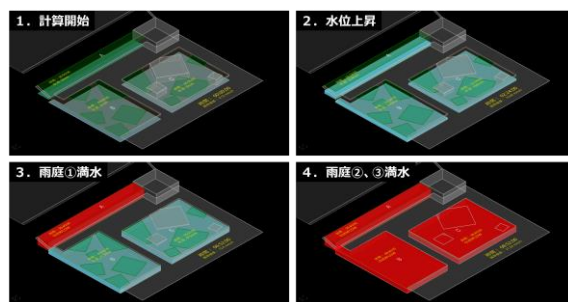


図 14 モデルによる計算結果の可視化の例