

相国寺裏方丈庭園枯流の雨水管理機能評価

山下三平¹・森本幸裕²・阿野晃秀³・丹羽英之⁴・佐藤正吾⁵・深町加津枝⁶

¹正会員 工博 九州産業大学建築都市工学部

(〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1, E-mail: samp@ip.kyusan-u.ac.jp)

²非会員 農博 (名誉教授) 京都大学大学院地球環境学

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町, E-mail: ymo3@me.com)

³非会員 MA in Landscape Architecture 京都学園大学バイオ環境学部

(〒621-8555 京都府亀岡市曾我部町南条大谷1-1, E-mail: akihide.ano@gmail.com)

⁴非会員 地環博 京都学園大学バイオ環境学部

(〒621-8555 京都府亀岡市曾我部町南条大谷1-1, E-mail: niwa-h@kyotogakuen.ac.jp)

⁵非会員 農博 (公財) 京都市都市緑化協会

(〒605-0071 京都市東山区円山町4 6 3 番地, E-mail: shg@kyoto-ga.jp)

⁶非会員 農博 京都大学大学院地球環境学

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町, E-mail: katsue@kais.kyoto-u.ac.jp)

地球温暖化にヒートアイランド現象が加わり、都市型水害が頻発している。その対策として、小規模分散型水管理の、グリーンインフラの技術が世界的に注目され、各地で実装されつつある。本研究は日本の風土に適した分散型水管理のあり方を追究するものである。そのために、京都の相国寺裏方丈庭園の枯流の雨水貯留を実測し、3Dモデルを作製して、その機能を評価した。本枯山水庭園の浸透率は、48.7%と見積もられた。また、降雨終了後直ちに貯留が終了することが確認された。この高い浸透機能を無視しても、一つの降雨イベントの総雨量として、貯留だけで430mmを処理できることが明らかになった。現代日本の都市で雨庭を賢くデザインするには、貯留とともに、浸透機能を十分考慮すべきと示唆された。

キーワード: 雨庭, グリーンインフラ, 枯山水, 雨水貯留浸透

1. はじめに

(1) 背景

地球温暖化にヒートアイランド現象が加わり、都市空間における気象の激化が著しい。局地的な豪雨が不透水性材料に覆われた都市域に降れば、下水道と河川で処理しきれない雨水が氾濫して都市型水害が頻発する。

このような状況は世界中の都市でみられる現象である。人類の責任として¹⁾、抜本的な抑止と緩和を世界的に進めなければならない。その一方で、都市型水害への適応策も併せて講じる必要があり、そのために、大規模集中型の雨水貯留排水施設の整備も進められている。

しかしこうした大規模集中型の施設は建設と維持管理に多額の費用が伴い、人口減少が始まった国々では、持続可能と言えない。こうしたなか、都市型水害への賢明な適応策として、自然の形態と機能を効果的に取り入れた、バイオスウェールやレインガーデンなどの、小規模分散型の、グリーン・インフラストラクチャ (グリーンインフラ) の積極的導入が、欧米先進諸国で進められている²⁾⁶⁾。日本においても、2016年8月に国土形成計画に

おけるグリーンインフラの導入が閣議決定され、その活用が模索されている⁷⁾。

しかし世界のグリーンインフラ導入の意図には、それぞれに重点の違いがある⁸⁾⁹⁾。概してヨーロッパにおいては、都市の生物多様性と美的観点に重点が置かれるのに対して、米国では都市内の直接流出処理が重視される。とくに、合流式下水道が支配的な古い都市においては、降雨時の水質汚染の処理が重要視される (Combined Sewer Overflow (CSO))²⁾。

一方、日本では国土形成計画におけるグリーンインフラは、従来型の下水道・河川施設を補うという位置づけである⁷⁾。また、日本の年平均降水量 (1,600mm) は欧米でグリーンインフラを導入した都市の2倍程度である⁸⁾。

そこで、日本においてグリーンインフラを普及させるためには、日本の風土に適した技術を追究する必要がある。そのためには、伝統的空間において、雨水管理の実態を把握し、その機能を評価したうえで、賢明な適応技術としての、分散型水管理要素技術を提案する必要がある¹⁰⁾¹¹⁾。

(2) 目的

本研究では、近代以前から雨水管理を行ってきたと考えられている伝統的な空間・施設として、京都の相国寺の裏方丈庭園を取り上げ、その雨水管理機能を観測・評価する。こうして都市型グリーンインフラの要素技術としての、新しい雨庭のデザインに供する基礎的知見を得ることを、研究の目的とする。

2. 方法

(1) 相国寺裏方丈庭園

対象施設は臨済宗相国寺派大本山相国寺である。足利三代将軍義満が後小松天皇の勅命により1392（明徳3）年に完成した大禅苑であり、夢想国師を勧請開山とする。その法堂（重文）は桃山時代の遺構であり、本尊釈迦如来と脇侍は運慶作である。豊臣氏の外衛、徳川家の寄進を受けたが、1788（天明8）年の大火を含む重なる災禍で多くの建築が失われた。その後、1807（文化4）年に開山塔が建立され、方丈・庫裏も完備されて、壮大な旧観を取り戻した。

方丈の裏庭は1985（昭和60）年に京都市名勝に指定されている。この枯山水庭園には長さ約30mにおよぶ枯流れがあり壮観である（図-1）。



図-1 相国寺裏方丈庭園の枯流。

相国寺に隣接する同志社大学校地学術調査委員会が行った、裏方丈庭園付近の敷地の発掘調査によれば、庫裏と書院の東側の発掘で、「溝II」と呼ばれる堀が検出された¹²⁾。その形状や川底の標高、土塁の幅が裏方丈庭園の堀（枯流）や築山のそれらと合致することから、溝IIと土塁は、裏方丈庭園の堀と築山の延長であるとしている。この調査では、溝IIの下の土層は調べられていないので、枯流の土層の構成もまた不明である。

溝IIと土塁の北側にある溝IVはもう1本の堀であり、築山（土塁）と堀が東西で南に折れ曲がっており、方丈を区画して護るものであったとしている。この堀と土塁のうち、天明の大火後、庫裏の建物を建てる際に、東側

部分が削られ、残った西側部分が方丈側に残された。これが方丈再建時に庭に取り込まれたものであるとしている。かつては溝IVと土塁が現在より東に延びていて、その東端が御用水の水路に近かったことから、溝IVは御用水を西に引く堀だったのではないかと推察されている。

林らは開山塔庭園の枯山水にかつて禁裏御用水の幹線流路を取り込んで池としていたと指摘する¹³⁾。禁裏御用水と相国寺内の庭園との、かつての強い結びつきが理解される。

しかしこの庭園の雨水管理機能の観測を行った研究は、これまでのところみられない。

(2) 雨水貯留・浸透の観測の方法

梅雨期の観測を想定し、2017年5月30日（火）～8月7日（月）を調査期間とした（8月22日（火）に観測機材を回収）。

観測機材・カメラは（株）バイコムのTime Lapse Construction Camera “BCC100(64×106×46mm, 120g)”とした。カメラは枯流の眺めを阻害せず、かつ目立たない箇所を3か所選んで3台設置した（図-2）。また建物や植栽等を傷つけないように、カメラを防水ケースに入れ用意したカメラと同規模の台板に固定し、台板を庭木の根本付近にゴム製ストラップで固定した。

文化財であることに配慮し、撮影は照明を使わず、昼間に限った。撮影間隔は10分とし、自動で撮影する設定とした。

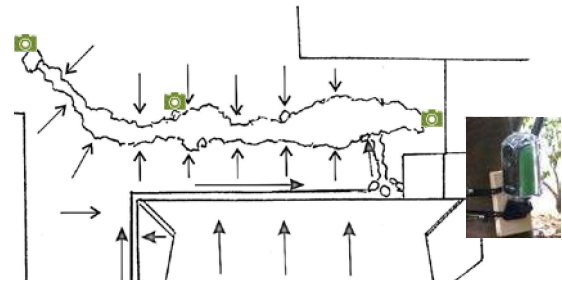


図-2 枯流とタイムラプスカメラの設置位置。下方が方丈屋根。矢印は雨水の流れる方向を表す。



図-3 枯流の水位（標高）目標の確認。

(3) 枯流れの3Dモデル作製と雨水貯留量推定の方法

相国寺の許可を得て、2017年9月19日に裏方丈庭園枯流の測量を、ジンバルカメラ（DJI社製Osmo）を用いて行った。

文献12)に掲載の発掘平面図を1/2500でジオレファレンスした。発掘平面図上の巨石や縁石などにGCP（Ground Control Point）を6地点設定した。得られたデータをSfM（Structure from Motion）用ソフト（Agisoft社製Photoscan）を用いて解析し、3Dモデルを作製した。この3Dモデルと、上記の水位観測画像から、実際の降雨イベントの水位を読み取った。その際に、目標物をあらかじめ決めておいた。本研究では、枯流の中で観測しやすい庭石を目標物とした（図-3）。

こうして求めた3Dモデルと、対応する標高データから、雨水貯留の水位－貯留量の関係を求めると、図-4のようになる。なお、文献12)により、枯流貯留の上限を標高58mと設定した。枯流の貯留容量は303.3m³となった。

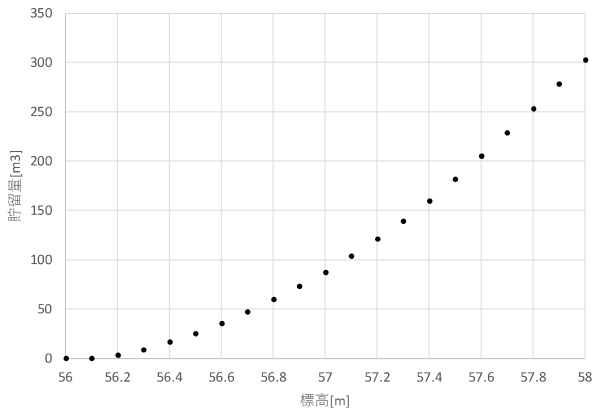


図-4 枯流の水位（標高）と貯留量との関係。

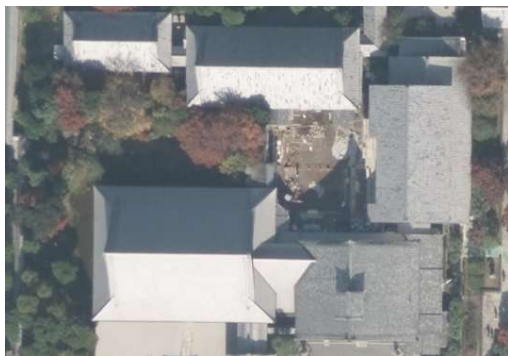


図-5 方丈とその周辺の航空写真（京都市提供）。

表-1 庭園の集水面積の推定。

集水面	集水面積 (m ²)
方丈屋根	260
枯山水庭園枯流	430
計	690

(4) 雨量・集水量の推定と雨水管理機能評価の方法

相国寺裏方丈庭園の最寄りの雨量観測地点は、直線距離で1kmの京都府庁である。そこでこの観測地点における5月30日から8月7日までの期間の、1時間と10分間の雨量記録を参照することとした。

京都市が撮影した航空写真をもとに、集水面積を推定した（図-5）。その結果、方丈の屋根のうち、雨水が樋から枯流に導かれる部分の面積は260m²、裏方丈庭園の部分で、枯流への直接流出に関わる集水面積が430m²となり、合計690m²であった（表-1）。

この面積に雨量強度記録を掛け合わせ、上記の3Dモデルの貯留量推定値と比較することで、本枯流の経時的な雨水管理機能を評価することができる。

3. 結果と考察

枯流の有効な観測の水位とその時刻を示すと、表-2のようになる。6月21日の午前7時18分の貯留がもっとも多いことがわかる。以下、この降雨－貯留イベントとその水収支をくわしく検討しよう。

表-2 対象イベント。時刻はタイムラプスカメラの記録による。

日	貯留開始時刻	貯留終了時刻	最高水位の時刻	最高水位 (m)
2017/6/21	4:38	9:08	7:18	56.45
2017/6/30	4:48	6:28	5:08	56.1
2017/7/1	6:48	9:08	7:08	56.15
2017/7/1	4:28	6:18	5:08	56.05
2017/7/2	13:58	15:48	14:18	56.38

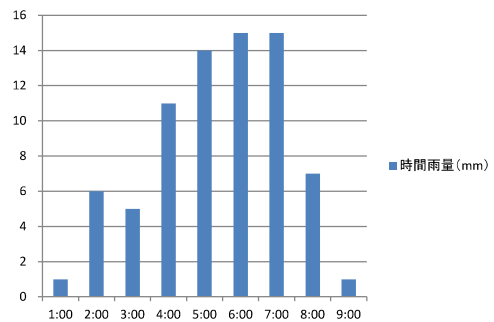


図-6 2017年6月21日 時間雨量の継時変化。

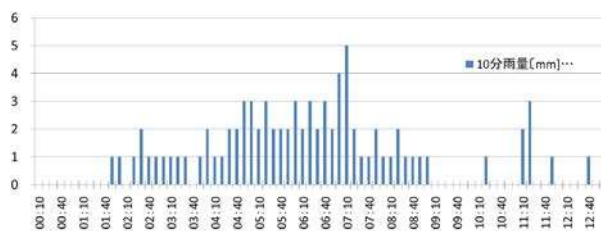


図-7 2017年6月21日 10分間雨量の継時変化。

(1) 2017年6月21日の降雨イベント

2017年6月21日の午前1時50分から午前9時10分の間に、継続時間が7時間20分の降雨が、最寄りの雨量観測地点である京都府庁で観測された。その時間雨量と10分間雨量の継時変化を示せば、それぞれ図-6と図-7のようになる。降雨は9時10分以降も観測されたが、中断が1時間以上あるため、この時刻までを扱うこととする。

時間雨量の変化をみると、午前4時台から8時台までは、10mm以上の雨が降り、その前後と明瞭に区別される（図-6）。また、10分間雨量の変化によれば、午前4時30分台から7時10分台までに、継続的に2mm以上降っていることがわかる（図-7）。最大時間雨量は15mm/h（6時、7時）、最大10分雨量は5mm/10分（7時10分）である。

午前1時50分からの、継続時間7時間20分のこの降雨イベントの総雨量は75mmになる（図-7）。したがってこのイベントによる、枯流への総流出量は51.8m³と推計される（表-3）。また降雨が最大になる午前7時10分台までとすれば、そこまでの雨量は61mmとなり、流出量は42.1m³となる。

表-3 2017年6月21日 枯流への流出量

集水面	集水面積(m ²)	雨量(mm)		流出量(m ³)	
		降雨継続時間内	ピークまで	降雨継続時間内	ピークまで
方丈量根	260			19.5	15.9
枯山水庭園枯流	430	75.0	61.0	32.3	26.2
計	690			51.8	42.1

経て（7mm）、雨がいったん降り終わる午前9時10分に、貯留雨水がすべて浸透してしまう。

- 降雨が最大になる午前7時10分台までの雨量は61mmであり、枯流への流出量は42.1m³である。一方、直接観測された枯流のピーク貯留量は、21.6m³である。したがって、この時点までで、20.5m³、48.7%の雨水が枯流を中心とする本庭園敷地に浸透している。

以上のように、本枯山水庭園は、降雨をきわめて効果的に処理する機能をもっていることがわかる。とりわけ、その浸透機能は、本降雨-貯留イベントに関する限り、雨水処理率で約50%と高い。

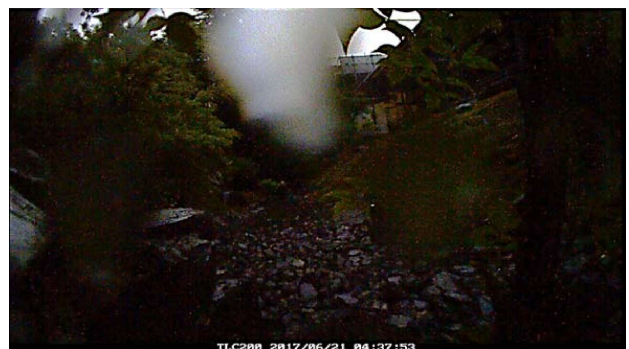


図-8 2017年6月21日 午前4時38分. 貯留開始.

(2) 2017年6月21日の雨水貯留

図-2の中央のカメラによる映像がもっとも明瞭に雨水貯留の状況を捉えていた。映像記録によれば、降雨開始から約3時間後の午前4時40分ごろに貯留が始まったことがわかる（図-8）。その後、7時20分ごろに貯留のピークを迎える（図-9）。これは降雨のピークである午前7時10分とほぼ同時刻である。その後、雨の降り終わりと同時刻の午前9時10分ごろに、貯留がなくなり、雨水が浸透し切ってしまう（図-10）。

図-9と文献12)によれば、最大貯留の時の水位は標高56.45mである。3Dモデルによる水位-貯留量の関係（図-4）によれば、雨水貯留量は21.6m³と見積もられる。

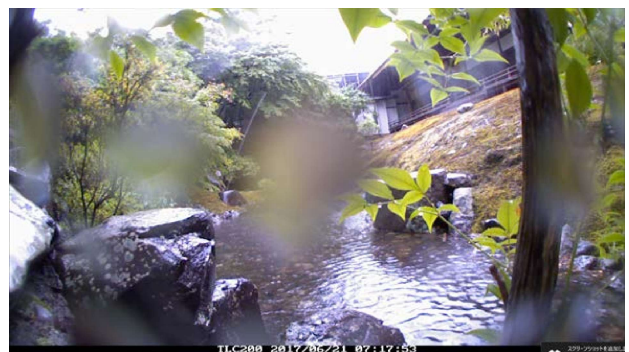


図-9 2017年6月21日 午前7時18分. 最大貯留.

(3) 2017年6月21日の水収支

以上を整理すれば、以下のようになる：

- 時間雨量で10mm以上の雨が降り始めた午前4時台、10分間雨量で2mm以上の雨が継続して降り始めた午前4時40分ごろから、枯流の貯留が始まる。
- 降雨のピークである午前7時10分とほぼ同じ7時20分ごろに、貯留のピークが現れる。
- 時間雨量で雨量が10mmを大きく下回る午前8時台を

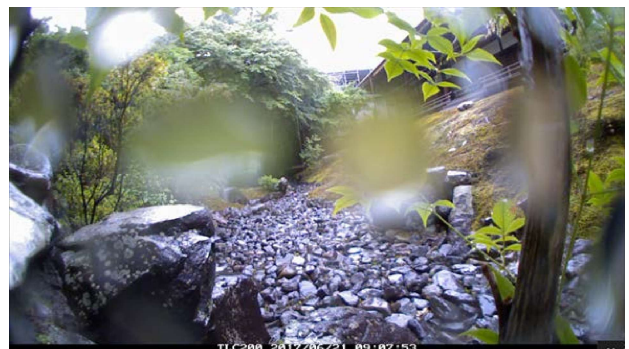


図-10 2017年6月21日 午前9時08分. 貯留終了.

(4) 枯流の雨水管理機能の可能性

2(3)に示したとおり、本枯流の雨水貯留容量は303.3m³である。ここで本庭園とそこに流れ込む雨水を集める方丈屋根の総面積690m²に100mmの降雨があったとすると、枯流への総流出量は69m³となる。

いま6月21日の降雨—貯留イベントにおける、上記の浸透率48.7%すなわち貯留率51.3%を用いれば、100mmの降雨に対して、35.4m³の貯留容量が必要である。本枯流の容量は、これの8.56倍である。

したがって、やや単純ではあるが、ひとつのイベントで総雨量850mmが降ったとしても、本枯流は雨水管理のできる可能性がある。また、浸透を考慮せず、貯留だけだとすれば、430mmの雨水を管理できるであろう。

雨量の比較的多い現代日本の都市で雨庭をデザインする際には、貯留とともに、浸透機能を十分発揮させることを考えるべきことが示唆される。

4. おわりに

本研究では、日本の風土に合った、親しみのある分散型雨水管理施設のデザインを探求するために、伝統的に雨水管理を行ってきたと考えられる、京都の相国寺裏方丈庭園の雨水管理機能を検討した。そのために、雨水貯留量を実測し、庭園の3Dモデルを作製した。

その結果、枯山水庭園の雨水処理機能はとくに浸透機能が顕著であり、約50%の雨水を浸透処理できる可能性があることがわかった。またこの浸透を考慮せずとも、一つの降雨イベントの総雨量として、430mmを貯留して処理できることが明らかになった。さらにこの高い浸透率(48.7%)に基づけば、総雨量850mmまでを、処理できる可能性があることが示唆された。またそこから、欧米と異なる降雨のパターンと量を示す、現代日本の都市で雨庭をデザインする際には、貯留とともに、浸透機能を十分発揮させることを考えるべきと示唆された。

以上のことがらは、限られた、比較的小規模の降雨イベントと貯留量観測の結果に基づくという制約をもつ。そのことを踏まえ、今後さらに異なる降雨パターンを含む、継続的な観測が必要である。また、相国寺庭園のように貯留と浸透の両機能が明瞭な伝統的空間・枯山水庭園のほか、枯流をおもに流路として使い、貯留は別に大きな苑池で行う形式もある(たとえば、眞如寺や法金剛院(図-11)など)。今後はそうしたパターンと機能の違いを踏まえた、実測調査が必要である。

謝辞：本調査の遂行にあたり、貴重な文化財・施設での実測を許可していただいた、相国寺の方々、とくに佐分

昭文氏ならびに豊田功氏に、厚く感謝の意を表する次第である。本研究の一部は、科研費・挑戦的研究(萌芽)「伝統的な枯山水庭園の雨水管理機能の評価に基づく都市型雨庭のデザイン」(課題番号：18K18493、研究代表者：山下三平)によった。併せて謝意を表する。

参考文献

- 1) Paul J. Crutzen: Geology of mankind—The Anthropocene, *Nature*, Vol. 415, p. 23, 2002.
- 2) NYC Environmental Protection: *NYC green infrastructure—2013 annual report*, New York: NYC Environmental Protection, 2013.
- 3) Marsalek, J., & Schreier, H.: Innovation in stormwater management in Canada: the way forward, overview of the theme issue, *Water Quality Research Journal of Canada*, Vol. 44, No. 1, v-x, 2009.
- 4) Palmer, M. A., Liu, J., Matthews, J. H., & Mumba D'Odorico, P.: Manage water in a green way, *Science*, Vol. 349, No. 6248, pp. 584–585, 2015.
- 5) GhaffarianHoseini, A., Tookey, J., GhaffarianHoseini, A., Yusoff, S. M., & Hassan, N. B.: State of the art rainwater harvesting systems towards promoting greenbuilt environments: a review, *Desalination and Water Treatment*, pp. 1–10, 2015.
- 6) Hering, J. G., Sedlak, D. L., Tortajada, C., Biswas, A. K., Niwagaba, C., & Breu, T.: Local perspective on water, *Science*, Vol. 349, No. 6247, pp. 479–480, 2015.
- 7) 国土交通省：国土形成計画(全国計画)，国土交通省，2015
- 8) グリーンインフラ研究会，三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング，日経コンストラクション編：決定版！グリーンインフラ，日経BP社，2017.
- 9) 古米弘明：海外における雨水管理の動向と今後の方向性，特集／流域の雨水管理に係る最近の海外動向，水循環—貯留と浸透，Vol. 97, pp. 5-10, 2015.
- 10) Yamashita, S., Watanabe, R., Shimatani, Y.: Smart adaptation activities and measures against urban flood disasters, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 27, pp. 175–184, 2016.
- 11) Yamashita, S., Shimatani, Y., Watanabe, R., Moriyama, T., Minagawa, T., Kakudo, K., et al.: Comprehensive flood control involving citizens in a Japanese watershed, *Water Science & Technology*, Vol. 68, pp. 791–798, 2013.
- 12) 同志社大学校地学術調査委員会：大本山相国寺境内の発掘調査II，同志社大学校地学術調査委員会調査資料，No. 21, 1988.
- 13) 林倫子，藤原剛，出村嘉史，川崎雅史，樋口忠彦：禁裏御用の構成と周辺園池との関係，土木学会論文集D，Vol. 65, No. 2, pp. 187–197, 2009.



図-11 法金剛院の枯流。雨水排水は蓮池に向かう。