# 都市型グリーン雨水貯留システムの提案 －水温計測と熱収支シミュレーションによる有効性の検討－

柴田　学[1]・大屋　敬之[2]・大八木　豊[3]
野呂　好幸[4]・間宮　尚[5]

[1]正会員　株式会社建設技術研究所 （〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町一丁目6-7）
E-mail: m-shibata@ctie.co.jp
[2]正会員　株式会社建設技術研究所（〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町一丁目6-7）
[3]正会員　株式会社建設技術研究所（〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町一丁目6-7）
[4]正会員　鹿島建設株式会社（〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30）
[5]正会員　鹿島建設株式会社（〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30）

著者らは，都市域の浸水対策として地下に設置される雨水貯留施設に流入する雨水を主に民生系建物のヒートポンプ用熱源水として活用することで，雨水貯留施設を治水だけでなく省エネなど多目的な施設へと高付加価値化することができるのではないかと考えている．本研究では提案の有効性を検証するため，雨水貯留施設において水温の連続測定を行い，河川水よりも地下水に近い安定した水温特性があることが確認された．また，雨水の熱源水利用に関する熱収支シミュレーションを行った結果，従来の空気熱源方式に比べ，11.8%の省エネ効果が期待できることが分かった．

***Key Words:*** *rainwater storage facilities, heat source, water temperature, box model simulation*

## 1. 研究の背景・目的

雨水貯留施設は，大量に降った雨水を一時的に溜める施設のことで，河川や下水道に雨水が直接流出するのを抑制・調整する働きがある．浸水被害の軽減や防止のための重要な治水対策施設である．近年は都市域において集中豪雨による浸水被害が毎年のように発生しており，「流域治水」における流出抑制対策を推進する観点から雨水貯留施設の普及に対する重要性が増している．

雨水貯留施設は都市部の治水目的のみならず雨水利用のための施設としても活用可能であり，健全な水循環の形成への貢献[注1)]のほか，未利用資源としての雨水に着目した省エネ対策における活用が考えられる．気候変動の緩和やエネルギーコストの削減に対する社会的要請はかつてないほどに高まっている．そのため，雨水貯留施設を活用した省エネ技術が確立されれば，都市内の事業者を中心に雨水貯留施設への投資を拡大しようとする動きにつながるものと期待される．

雨水貯留施設を治水以外の他の用途にも活用しようとする提案としては，水野ら[1)]による特定の研究施設に設置された雨水貯留槽の省エネ効果の検証，和田[2)]らによるノンポイント汚染源負荷流出制御への活用検討などがあるが，実際の雨水貯留施設を対象に省エネ技術の確立を目指した実態把握や有効性検証を行った先行研究はあまりみられない．

本研究では，雨水貯留施設を建物空調用の熱源水などとして活用する「都市型グリーン雨水貯留システム」を提案するとともに，提案の有効性に関する初期的検討として，実際の雨水貯留施設を対象に雨水の水温特性を詳細に把握し，その結果を用いて熱源水としての有効性や技術的な成立条件を定量的に検証した．

## 2. 都市型グリーン雨水貯留システム構想

### (1) 構想の概要

雨水貯留施設は都市の排水機能を脅かす豪雨の流出抑制のための備えの施設であるがゆえ，実際に雨水が施設に流入する頻度は年に数回程度に限られる．例えば，東京の冷房期間（6 月～9 月）において 1 時間降水量が

20mm を超えた日数を調べると，2022 年度は 5 日であり，過去 5 年間（2018 年度～2022 年度）の平均では 3.4 日にとどまることがわかる．




**図-1**　1 時間降水量 20mm 超の出現日数

年に数回しか稼働することのない現在の雨水貯留施設において，貯留施設内の雨水を主に民生系建物のヒートポンプ用水熱源として活用し省エネ化を図るなど，雨水貯留施設を治水以外の用途を含めた多目的な施設へと高付加価値化することができるのではないかと考えており，これを「都市型グリーン雨水貯留システム」として提案する．

需要家の脱炭素化やエネルギーコスト削減に貢献することから，需要家自らによる雨水貯留施設への投資意欲が増し，施設の普及拡大の好循環につながることが期待される点で本取組の意義は大きい．

### (2) 運用イメージ

都市型グリーン雨水貯留システムの基本的な運用イメージ（冷房時の場合）を**図-2** に示す．

雨水貯留施設には，建物空調の熱源水として常時，雨水を一定割合程度貯留しておき，外気温よりも低い雨水を利用し，建物空調の放熱先として利用する．大雨時には，雨水を一時貯留し，河川や下水道の雨水処理の負担を軽減する流出抑制対策のための施設運用を図る．

空調廃熱により上昇する熱源水温は，雨水の流入や地下土への放熱により低温を回復・維持する．

### (3) 検討課題

都市型グリーン雨水貯留システムの初期の提案段階においては，システムの有効性や適用性を定量的に検証する必要があり，具体的な検討課題として次の 2 点が挙げられる．

1 点目は，雨水貯留施設内の雨水の温度特性が十分に把握されておらず，熱源水としての有効性が明確でないことである．本研究では，実際の雨水貯留施設において水温等の連続測定を行うことでこの課題に対応する．

2 点目は，治水施設である雨水貯留施設にどのような要素を加えることでどの程度の省エネルギー効果が期待されるかを明確にすることである．この点については雨水貯留施設の運用シミュレーションにより明らかにする．

## 3.　雨水貯留施設における水温・水位の連続計測

### (1) 対象施設

本研究では，大久保調節池及び守山栗東雨水幹線吹上人孔を対象に現地計測を実施した．観測対象施設の諸元は，**表-1** に示すとおりである．

大久保調節池は，洪水の一部を一時的に貯めて調節し，市街地の浸水被害を軽減させる施設であり，貯留水は洪水後 24 時間以内にポンプにより排水される．

守山栗東雨水幹線は，雨水を速やかに流下させ，市街地の浸水被害を軽減させる伏越し管渠である．

**表-1**　計測対象施設の諸元

| 名称 | 所在地 | 管理 | 形状 | 貯留量 |
|---|---|---|---|---|
| 大久保<br>調節池 | 大阪府<br>守口市大久保町 | 大阪府 | 幅　46.8m<br>長さ 50.0m<br>高さ 16.9m | 16 千 $m^3$ |
| 守山栗東<br>雨水幹線<br>吹上人孔 | 滋賀県<br>守山市三宅町 | 滋賀県 | 外径 12.0m<br>高さ 19.3m | 2 千 $m^3$ |

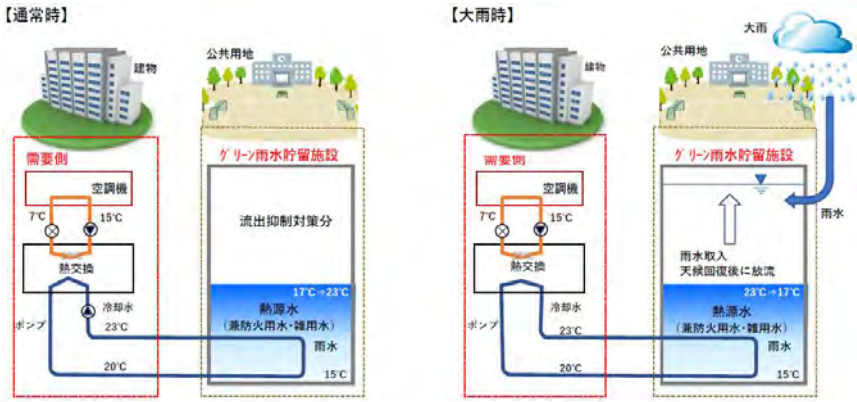



**図-2**　都市型グリーン雨水貯留システムの運用イメージ（冷房時の場合）

### (2) 計測方法

本研究の計測項目は，気温，水温，水位である．測定に使用する機器は，応用地質株式会社製 S&DLmin で，計測間隔は 10 分間である．

大久保調節池の水温・水位の測定点の位置を図-3 に示す．鉛直方向の水温差を把握するため，鉛直方向 5 箇所に水位・温度計を設置した．調節池内は，釜場のみ常時貯水されており，出水時を除くと釜場 No.4 以外は，常時気温を計測している．計測期間は，2021 年 9 月～2022 年 12 月である．

守山栗東雨水幹線吹上人孔の水温・水位の測定点の位置を図-4 に示す．鉛直方向 6 箇所に水位・温度計を設置した．吹上人孔は，常時満水状態にあり，年に数回ポンプにより排水している．計測期間は，2022 年 7 月～2023 年 6 月である．

### (3) 計測結果と考察

大久保調節池の年間の日平均温度の変化を図-5 に示す．同図に調節池近傍の大阪観測所（気象庁）の気温を重ね合わせている．図-5 より No.2～No.4 の水温（温度）は，13.2℃～22.6℃（変動幅 9.4℃，平均 17.6℃）であり，大阪観測所（気象庁）の気温より 1 月が最大 12℃高く，8 月が最大 10℃低いことが分かる．

計測期間中，調節池内に雨水が 3 回（2022 年 7 月 12 日，7 月 22 日，7 月 27 日）流入している．出水時に着目して，7 月の毎正時の温度，水深変化を図-6 に示す．図-6 より釜場 No.4 の水温は，出水に伴う流入により水温が 2℃～3℃上昇するが，10 日程度で気温と同温まで低減していることが分かる．

守山栗東雨水幹線吹上人孔の毎正時の水温，水位変化を図-7 に示す．同図に吹上人孔近傍の大津観測所（気象庁）の気温を重ね合わせている．図-7 より表層 No.2 の水温は，No.3～No.6 の水温と異なり，日周期の変動がみられる．No.3～No.6 の水温は，大津観測所（気象庁）の気温より 8 月が最大 10℃低く，1 月が最大 15℃高くなることが分かる．

雨水貯留水は，夏季は河川水や大気より低く，冬季は河川水や大気より高いといった地下水に似た特性を有する．しかし，雨水貯留水は，治水面から常に利用可能でなく，熱利用する場合は吸放熱の影響を受けて効率低下の可能性があるなど，不安定性を有する．

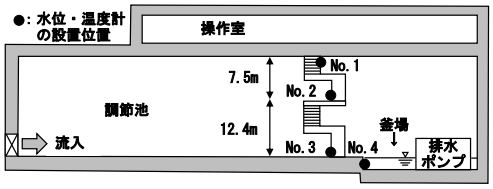



図-3　大久保調節池の測定点位置

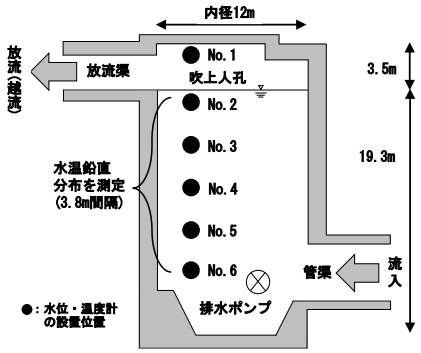



図-4　守山栗東雨水幹線吹上人孔の測定点位置

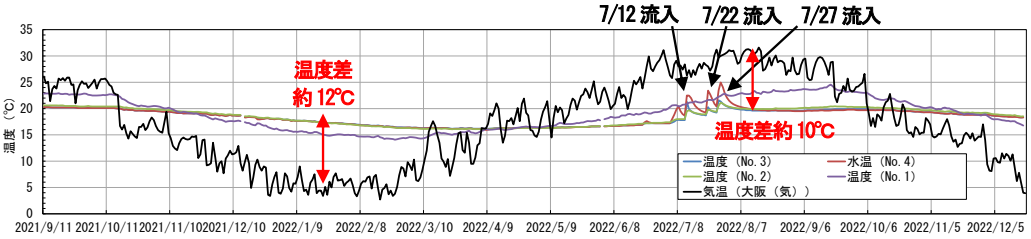



図-5　大久保調節池の年間の日平均温度の変化

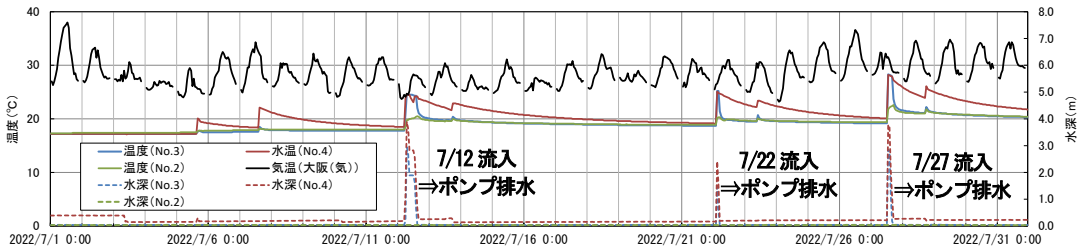



図-6　大久保調節池の 7 月の毎正時の温度，水深変化

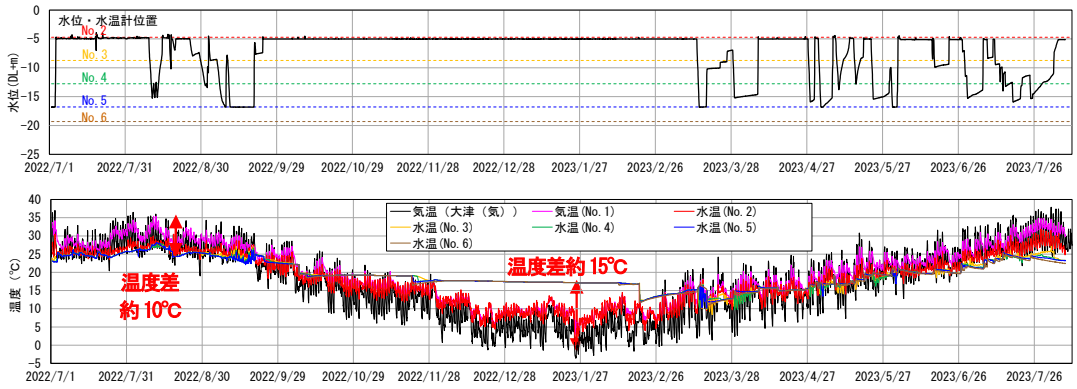



図-7　守山栗東雨水幹線吹上人孔の年間の毎正時の水温，水位変化

## 4.　熱収支シミュレーション

### (1) 分析の枠組み

地下に設置した雨水貯留施設内の雨水をオープンループ方式で揚水した後，建物空調用のヒートポンプ熱源として活用するケースを想定し，施設運用時の熱収支及びエネルギー消費量を算定するモデルを構築した（図-8）．これは雨水貯留施設内の水温と水熱源ヒートポンプ（WHP）ユニットの採放熱量及び COP との間の相互作用を考慮することのできる連成モデルである（図-9）．雨水の水温及び熱源機器のエネルギー消費量の算定方法に関する詳細については，(2)及び(3)で後述する．

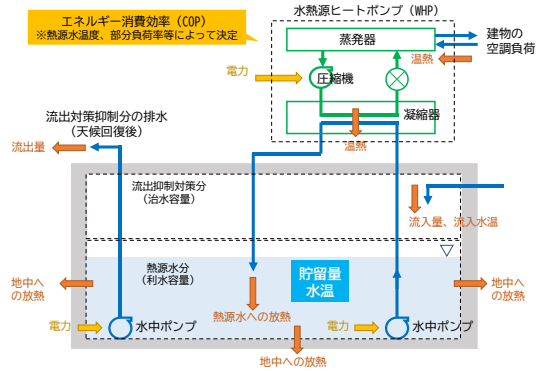



図-8　熱収支等算定モデルの概要

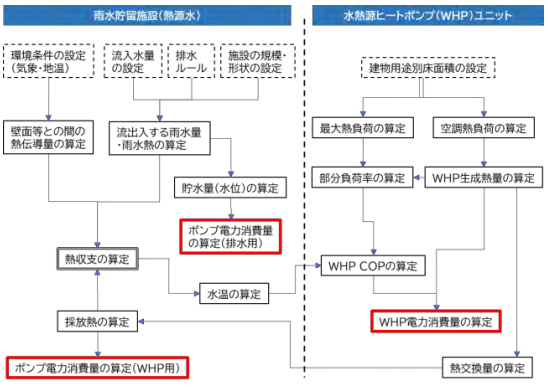



図-9　熱収支及びエネルギー消費量の算定フロー

### (2) 雨水貯留施設内の水温の推計方法

#### a) 雨水貯留施設水温モデルの概要

雨水貯留施設における水温予測は，貯留槽を 1 ボックスとみなし，図-9 に示すように水収支・熱収支を算定し，貯留槽内の水温を算定する．

水収支は，流入量，放流量，貯流量より水量の保存式とし，熱収支は流入熱量，放流熱量，地中との熱交換を考慮した熱量の保存式とする．なお，雨水貯留施設は地下に埋設していることを想定し，水面を通じた空気と貯留水との熱交換は考慮しないこととした．地中との熱交換は，貯留槽，コンクリート壁，周辺土壌をモデル化し，フーリエ則により熱流束を算定する．

#### b) 計算条件

栗東守山雨水幹線吹上人孔を対象とした施設諸元等の計算条件を表-2 に示す．

表-2　計算条件

| 項目 | 設定 | 項目 | 設定 |
|---|---|---|---|
| 流入量 | 水位・越流公式より算定 | 流出量 | 流入量・水位より逆算 |
| 貯留槽面積 | 113.1 m$^2$ | 貯留槽高 | 15.654 m |
| ｺﾝｸﾘｰﾄの熱伝導率 k | 1.60 W/(m·K) | 水比熱 Cp | 1.16 W/(m·K) |
| 壁面厚 | 150cm | ｺﾝｸﾘｰﾄの比熱 | 0.51 W/(m·K) |

#### c) 検証計算

栗東守山雨水幹線吹上人孔における水温観測期間を対象とした検証計算結果を図-10 に示す．

2022 年 8 月 17 日や 2022 年 10 月 10 日等の出水に応じた雨水貯留施設内の水温の変化が再現できている．また，

流入が発生していない 2022 年 10 月 10 日～2022 年 11 月 20 日において地中（地温 19℃）の影響で徐々に水温が上昇している状況が表現できている．ただし，2022年11月 21 日以降において観測値が 2022 年 12 月 15 日以降低下傾向を示しており，計算では再現できていない．観測水温の低下は 2022 年 12 月 15 日以降の気温の低下がみられ，水面を通じた放熱が影響しているものと考えられる．

日周期で大きく変動する気温に対して，雨水貯留施設内の水温は比較的安定的であること，出水による流入により雨水貯留施設内の水温は変動することが概ね再現されている．

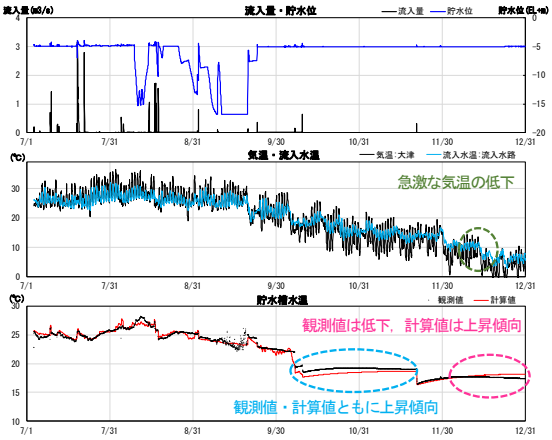



**図-10**　貯留槽水温の再現計算結果（7 月～12 月）

### (3) エネルギー消費量の推計方法

システムのエネルギー消費量は，ヒートポンプユニットの電力消費量（①）と，熱源水用ポンプ及び排水用ポンプの各電力消費量（②）を対象とし，これらを 1 時間毎に求めた．

①は，ヒートポンプの生成熱量を各時間の COP で除して算定した．COPについては，国土交通省が公開する「LCEM ツール」[注 2)]を活用し，熱源温度（WHP では水温，空気熱源ヒートポンプ（AHP）では気温）と部分負荷率をもとに算定した（**表-3**）．WHP が運転可能となる熱源水温は冷房時13℃~35℃，暖房時10℃~25℃の範囲とし，これら以外の水温を示す時は AHP の運転に切り替わるものとした．また，ヒートポンプ生成熱量は簡便のため建物の空調負荷と同時同値とし，空調負荷は，日本エネルギー学会編「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル」[注 3)]に示される建物用途別・月別・時間別の値を用いた．

②については，雨水貯留施設内の雨水排水時（降雨終了後 12 時間以内に全量を排水）及び熱源水としての利用時のそれぞれについて，水中ポンプの揚水量，実揚程及びポンプ効率をもとに算定した．

**表-3**　WHP/AHP の COP 例[※1]

| | | | WHP | | AHP | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 冷房時 | 熱源温度[※2] | | 20℃ | 30℃ | 20℃ | 30℃ |
| | COP [-] | 部分負荷率50% | **8.60** | **5.55** | **4.67** | **3.93** |
| | | 定格時 | **7.70** | **5.37** | **4.81** | **4.05** |
| 暖房時 | 熱源温度[※2] | | 13℃ | 17℃ | 13℃ | 17℃ |
| | COP [-] | 部分負荷率50% | **4.08** | **4.62** | **3.64** | **3.90** |
| | | 定格時 | **4.87** | **5.45** | **3.75** | **4.02** |

※1　冷温水出口温度は冷房時 5℃，暖房時 45℃で固定
※2　熱源温度とは WHP では熱源水温，AHP では気温を指す

### (4) 分析対象ケース

国内の中規模オフィスビル建設において実施される流出抑制対策での適用を念頭に，**表-4** に示す分析対象ケースを設定した．雨水貯留施設の容量は，雨水集水面積 1ha 当たりの流出抑制対策量として一般的な 500m³/ha [注 4)]を満たす治水対策用の容量を設け，ここに十分な熱源水量の利水容量をさらに追加する場合を想定した．

**表-4**　分析対象ケース

| 項目 | 設定内容 |
|---|---|
| 建物用途 | オフィスビル（新設）<br>延床面積 2,500 m²（中規模） |
| 雨水貯留施設 | 最大 1,000 m³（底面 66.7 m²×深さ 15.0m）<br>※流出抑制対策用 50 m³，熱源水用 950 m³<br>※地温は近畿地方での一般的な 17℃を設定<br>※高熱伝導ｺﾝｸﾘｰﾄ（5.8W/(m･K)）の採用を想定 |
| 雨水集水面積 | 1,000 m²（ビルの敷地規模として想定） |
| 雨水流入量 | 近畿地方 A 都市における 1 時間降水量（2022 年）に流出係数 0.9 を乗じて算定 |
| 比較ケース | AHP のみ |

### (5) 算定結果と考察

前項で構築したモデルを用いて 1 年間の施設運用シミュレーションを行った結果，ヒートポンプ空調熱源に雨水を活用することで，従来の AHP ケースと比較して 11.8%の省エネ効果が見込まれた（**表-5**）．このとき，システム全体の電力消費量においてヒートポンプ熱源機器が支配的であり，雨水を活用した高効率化が可能な WHP の運転時間を多く確保することで，全体の省エネ効果をその分だけ向上させることができる．

ただし，雨水熱源の安定的な利用のためには，建物の熱負荷規模に応じた十分な量の雨水の確保が不可欠であり，貯留施設の大容量化を伴うことになる．例えば，本分析対象ケースの条件下で雨水貯留施設の容量のみを半分の 500m³（熱源水用は 450m³）とした場合，**図-11** のとおり，採放熱による大きな影響によって熱源水温は地温近傍での維持が困難となり，省エネ効果はその結果 2.5%にまで低下する（**表-5**）など優位性が乏しくなる．冷房負荷が増大する夏季において，WHP の冷房運転限界として設定した 35℃付近での熱源水温の高止まりによって，WHP の運転時間を確保できない状態が続き，熱源水の容量不足が問題化していることが分かる．

この点への対応策としては，雨水の集水面積を建物敷地から街区や流域等へと拡大し，貯留施設内の事前放流とあわせ雨水の回転率を高めることで，容量をできるだけ抑えながらも省エネ効果を確保・向上することができるようになると思われる．参考として，上記の容量500m³において集水面積を5,000m²に拡大するケースで試算したところ，省エネ効果は4.4%に改善した．

**表-5** 省エネルギー効果の試算結果

| | | 比較ケース | 分析対象ケース | |
|---|---|---|---|---|
| 雨水貯留施設の容量※ | | ― | 1,000 m³ | 500 m³ |
| 年間電力消費量（内訳） | WHP | ― | 60.9 MWh | 6.0 MWh |
| | AHP | 70.5 MWh | 1.1 MWh | 8.4 MWh |
| | 熱源水ポンプ | ― | 0.1 MWh | 0.2 MWh |
| 年間電力消費量（合計） | | 70.5 MWh | 62.1 MWh | 68.8 MWh |
| 省エネ効果 | | ― | ▲11.8% | ▲2.5% |

※うち50m³はいずれの分析対象ケースも流出抑制対策用に確保

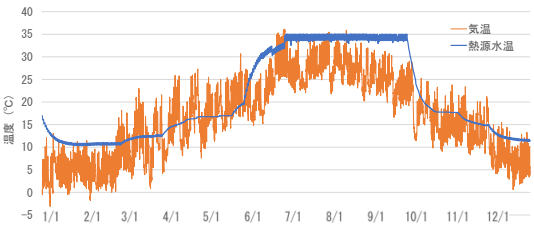



**図-11** 熱源水温の年間推移（雨水貯留施設500m³の場合）

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に述べる．

1）大阪府内の調節池及び滋賀県内の雨水幹線吹上人孔にて水温等の連続計測を行った．その結果，雨水貯留水の温度は，河川水や大気よりも夏季は低く冬季は高いといった地下水に似た特性を有し，気温との温度差は夏季・冬季ともに最大 10℃前後を確保できることが確認された．

2）雨水熱源利用に関するシミュレーションの結果，中規模オフィスビルを新設する想定において冷暖房用の年間電力消費量を従来の AHP 方式から11.8%削減する可能性を示し，「都市型グリーン雨水貯留システム」の有効性を確認した．あわせて，貯留施設の大容量化を抑えつつ，雨水の大量確保を両立する改善策を検討する必要性を示した．

今後は，都市型グリーン雨水貯留システムの実現に向け，小規模なオンサイト型貯留施設内の水温特性の把握や，雨水大量確保のための方策や効果検証に関するシミュレーションなど，実態把握や分析の精度向上を図るとともに，事業採算性の評価や適用性の検討，民間普及に向けたガイドラインの検討などにつなげていきたい．

**謝辞**：建設技術研究所の増田辰徳氏には，データ整理に多大なご協力を頂きました．ここに感謝の意を表します．

**NOTES**

注 1) 国土交通省：雨水の利用の推進に関するガイドライン, 2022.
注 2) 国土交通省：LCEM ツール ver310
注 3) (社)日本エネルギー学会：天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル, 日本工業出版, 2008.
注 4) 東京都総合治水対策協議会：公共施設における一時貯留施設等の設置に係る技術指針, 2016.

**REFERENCES**

1) 水野稔, 鄭用賢：雨水貯留水の熱的活用システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.66, pp.35-44, 1997. [Mizuno, M. and Chung, Y. H.: Study on using rainwater storage facility as cooling system, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.66, pp.35-44, 1997.]
2) 和田安彦, 三浦浩之：雨水貯留施設によるノンポイント汚染源負荷制御方法の検討, 土木学会論文集, 1997 巻 566 号, pp.25-34, 1997. [Wada, Y. and Miura, H.: Study of the way of non-point pollution control with storm-water reservoir for flood control, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.1997, No.566, pp.25-34, 1997.]

**(Received June 19, 2023)**
**(Accepted August 21, 2023)**

# PROPOSAL FOR A MULTI-PURPOSE RAINWATER STORAGE SYSTEM - STUDY OF SYSTEM EFFECTIVENESS THROUGH WATER TEMPERATURE MEASUREMENT AND HEAT BALANCE SIMULATION

Manabu SHIBATA, Yoshiyuki OOYA, Yutaka OOYAGI, Yoshiyuki NORO and Takashi MAMIYA

To verify the effectiveness of the "urban green rainwater storage system" proposed by the authors, the water temperature in the rainwater harvesting facility was continuously measured, and stable water temperature characteristics that are closer to groundwater than river water were confirmed. In addition, a heat balance simulation of the use of rainwater as the heat source water showed that the proposed system is expected to save energy by slightly less than 12% compared to a conventional air heat source system.