

雨水浸透施設による地下水涵養および熱環境改善効果についての観測手法の試み

MONITORING OF THE EFFECTS OF RAINWATER INFILTRATION SYSTEM ON GROUNDWATER RECHARGE AND IMPROVEMENT OF THERMAL ENVIRONMENT

ティ ハ *・屋井 裕幸 **・張 杰 ***・吉澤 拓也 ****

Thi Ha, Hiroyuki OKUI, Jie ZHANG and Takuya YOSHIZAWA

In recent years, rainwater storage/ infiltration facilities are being introduced in urban areas for improvement of base water flow, groundwater recharge, restoration of spring water, etc. Although several numerical simulation studies have been made in Japan to determine the effects of the infiltration facilities, providing data of those effects based on observed results are limited and not clear.

In this paper, long-term monitoring of hydrological and thermal behaviors at and near rainwater storage/ infiltration facilities were examined to study the actual effects of groundwater recharge and improvement of thermal environment at site. From the monitoring results, such effects of groundwater recharge and thermal environment were determined. And, some issues were also observed including the monitoring methods to evaluate the thermal environment effect.

Keywords : *rainwater infiltration, groundwater recharge, thermal environment improvement, soil moisture, rain water temperature, ground temperature*

1. はじめに

都市化の進展に伴う建物やアスファルト、コンクリートなど雨水が地下に浸透しにくい不浸透域が拡大し、都市域の水循環の悪化が確認されている¹⁾。そのため、都市型水害の多発、地下水位の低下、湧水の枯渇およびヒートアイランド現象といった都市域特有の課題が顕在化する結果となった²⁾。このように悪化した都市域の水循環を健全化させるため、効果的な方策の一つとして雨水貯留浸透技術が近年多くの注目を集めており、その普及が世界中で推進されている^{3)~5)}。都市域では、雨水の貯留浸透によって、豪雨流出抑制をはじめ、地下水の涵養、湧水の復活、平常時河川流量の維持・湧水流量の増加、ヒートアイランド現象の改善、生態系の保全など、健全な水循環系の構築に係わる複合的な効果が期待されている⁶⁾。

これまで、都市河川流域を対象として、数値シミュレーションモデルにより、雨水浸透施設の治水効果を検証した事例が多数報告されている。例えば、賈ら(2000)⁷⁾、忌部ら(2008)⁸⁾は水文モデルを用いて、雨水浸透施設の効果を検証している。また、藤村ら(1998)⁹⁾は雨水浸透施設を考慮した流出シミュレーション手法を提案し、浸透施設による総流出量の抑制効

果を定量的に示した。また、浸透施設による湧水の保全・回復効果は安藤ら(2003)により報告されている¹⁰⁾。

一方、雨水浸透施設による地下水の涵養効果については、施設設置により多くの雨水を浸透させ、地下水位が上昇傾向に転じたことを定性的に確認した実証実験の事例報告がいくつかある(例えば、井上ら(1991)¹¹⁾、高瀬ら(1999)¹²⁾、山濱ら(2002、2009)^{13)、14)})。また、都市流域での雨水浸透施設による地下水涵養の有効性を GIS データと数値シミュレーションモデルにより検証した事例も報告されている^{15)、16)}。さらに、半乾燥地域での雨水浸透施設による地下水の涵養は、降雨量が一定の条件を満たせば有効であるという報告もある¹⁷⁾。しかし、地下水の涵養効果について長期観測の事例が少なく、浸透施設から浸透した水がどのように地下水へ涵養し、定量的にどの程度の効果を生じ、季節的にその効果がどう変化するかなどについて不明な点が多い。

雨水浸透施設による都市熱環境の改善効果については、透水性舗装を対象とした報告が多くなされている(例えば、木内ら(1999)¹⁸⁾、三坂ら(2005)¹⁹⁾、西山ら(2007)²⁰⁾)。これらの報告では、透水性舗装により地表温度の上昇抑制や顕熱フラックス低減の効果が確認されている。しかし、日本の戸建住宅によく適用される浸透マスおよび浸透トレンチについては、透水性舗装と同様に、ヒートアイランド現象の緩和効果が期待されるものの⁸⁾、これらの施設による熱環境改善効果を検証した事例は極めて少なく、長期観測の事例もほとんどない。このように雨水浸透施設による地下水涵養および熱環境改善

* コンサルタント海外事業本部 交通・都市事業部 港湾・空港部

** 公益社団法人 雨水貯留浸透技術協会

*** コンサルタント海外事業本部 環境・水資源事業部 地圏防災室

**** 技術本部 中央研究所 総合技術開発第 2 部

効果の評価方法が明確でないため、効率的な施設配置を考慮した事業の推進が困難な状態にあり、普及を遅らせている原因の一つであると考えられる。

そこで、著者らは都市化された地域に実物大の浸透施設を設置し、実証実験（注水実験）を行い、地下水涵養効果の定量的評価を試みた（Thi Haら（2009）²¹⁾）。また、実証実験の再現可能な2次元および3次元の飽和・不飽和浸透流モデルを構築し、浸透施設による地下水涵養効果の定量的評価方法について検討した（Thi Haら（2010）²²⁾）。次に、著者らはこれまで検討できていなかった自然降雨時の浸透施設の地下水涵養および熱環境改善効果を検討するため、上記実物大の雨水浸透施設近傍に、水文および熱流等の長期現場観測を実施し、その効果の評価を試みた。本稿では、その手法および結果について報告する。

2. 雨水浸透施設と観測装置の概要

本調査地は市川市真間川流域に位置し、雨水浸透施設および観測装置が市川市立若宮小学校内の2箇所（プール側、グラウンド側）に設置されている（図-1）。浸透施設の基本構造は、浸透量を確保するために浸透トレンチ、浸透マスおよび浸透マス直下に延びる砕石を充填した鉛直ドレーンからなる（図-2）。雨水は屋根に設置された導水パイプを通して浸透施設に導水され、地下に浸透していく。施設の設計浸透能力は、プール側で $50.14\text{m}^3/\text{day}$ 、グラウンド側で $20\text{m}^3/\text{day}$ である。浸透施設による地下水位の上昇と涵養効果は、設置後に実施された人工注水実験と数値解析により確認されている^{21), 22)}。さらに、浸透施設による熱環境改善効果を検討するため、小学校グラウンド側の浸透施設近傍に土壌水分計、熱流量計、地中温度計を新設して、2012年6月より、観測をはじめた。

本検討における観測項目および各観測装置の設置状況を



図-1 雨水浸透施設設置場所および観測機器

表-1に示す。また、グラウンド側において、設置されている観測装置の配置図および浸透施設の断面図を図-2に示す。プール側の浸透施設はグラウンド側の浸透施設と同様の構造である（Thi Haら（2009）²¹⁾）。これらの図表から分かるとおり、2箇所共通の観測項目は浸透施設内の水深と地下水位である。雨量計と雨水温度計はプール側だけに設置している。本観測では「転倒マス型雨量計」を用いているが、雨水の温度は転倒マスに雨水が落下する直前、雨量計内の雨水を受ける箇所に設置している小型温度計を用いて測定している。そのため、無降雨時には雨量計内の温度を、降雨時には雨水の温度を測定することになっている。気温は地下水位等観測デー

表-1 観測装置一覧表

観測地点	観測項目	計器センサー設置場所	計器センサー設置深度 (G.L.-m)	記録間隔
プール側	ドレーン内水深	A'	2.6	1hr
	地下水位 (BW-2)	B'	不明	1hr
	気温	B'	-	1hr
	雨水温度	B'	-	10min
	雨量	B'	-	10min
グラウンド側	ドレーン内水深	I	3.2	1hr
	浸透トレンチ内水深	G	0.15程度	1hr
	地下水位 (BW-3)	H	不明	1hr
	土壌水分-1	A	0.5	10min
	土壌水分-2	B	0.5	10min
	土壌水分-3	C	1.0	10min
	土壌水分-4	D	1.5	10min
	熱流量-1	A	0.5	10min
	熱流量-2	B	0.5	10min
	熱流量-3	C	1.0	10min
	熱流量-4	D	1.5	10min
	地中温度-1	A	0.5	10min
	地中温度-2	B	0.5	10min
	土壌水分既設-1 (SW-1)	E	2.0	1hr
	土壌水分既設-2 (SW-2)	F	4.0	1hr

*計器センサー設置場所のアルファベットはプール側は図-1、グラウンド側は図-2に示す
*()は同観測装置の既往研究に使用された項目名

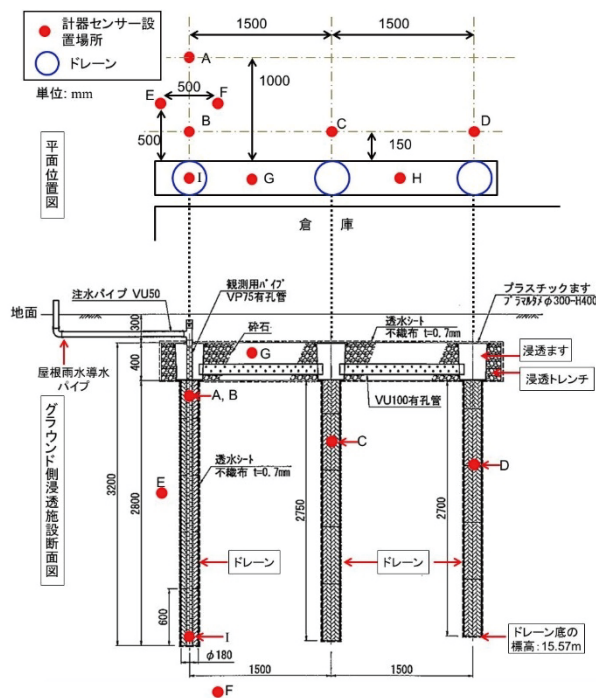


図-2 グラウンド側観測装置の位置分布と浸透施設の断面図

タ記録装置箱内にセンサーを設置して観測している。また、雨水浸透施設による地盤内の土壌水分と熱環境の挙動を把握するため、グラウンド側の雨水浸透施設近傍において土壌水分計を 6 箇所、熱流量計を 4 箇所、地中温度計を 2 箇所設置しており、設置深度は 0.5m ～ 4.0m である。

3. 観測結果

(1) 観測期間の選定

観測結果に基づき、熱流量、地中温度、土壌水分、地下水位等の季節変動特性、および浸透施設による効果を把握するため、観測期間中に欠測が少ない 2012 年 6 月～2013 年 5 月の一年間のデータを検討対象観測期間とした。この期間中の観測結果を図－3 に示す。

(2) 各観測装置の結果

1) 気温と雨水温度

気温と雨水温度の観測結果を図－3 (a) に示す。同図から、雨水温度は気温に支配され、ほぼ気温の変動範囲内に収まっており、雨水温度の変動幅は気温と比べてやや小さい傾向が見られる。観測期間中の雨水の温度は最大値が 32.7℃、最小値が -0.2℃である。一方、気温の最大値は 39.5℃、最小値は -4.5℃である。

2) 浸透施設内水深と降雨

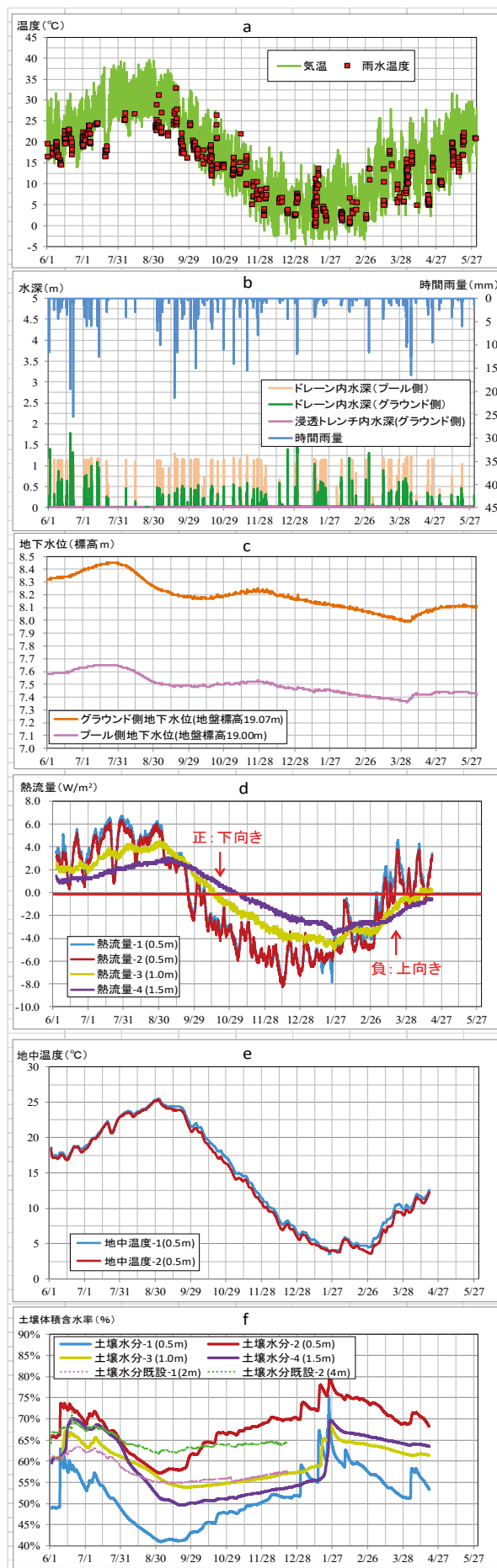
浸透施設内の水深と降雨量を図－3 (b) に示す。観測期間中の累積雨量は 1203.5mm であり、最大時間雨量は 6 月 22 日に 25.5mm/hr を観測している。また、観測期間中のトレンチ内水深はほとんどなく、同図に示すようにゼロ付近で推移している。一方、ドレーン内最高水深は、平均的にプール側で 1m 程度、グラウンド側で 0.5m 程度であった。このことから、浸透施設内に流入した雨水は施設の能力に比べて十分に小さく、そのためにトレンチ内で水深が生じることはなかったものと推察される。

3) 地下水位

小学校内プール側およびグラウンド側における地下水位観測結果を図－3 (c) に示す。グラウンド側の地下水位標高はプール側より約 1m 高いが、双方における水位変動は同様の挙動をしている。地下水位は降雨が少ない時期に低下する傾向が見られ、降雨の影響を比較的強く受ける帯水層のものである。観測期間中に 3 つの地下水位のピークがあるが、これらは直前の降雨により生じた雨水浸透が原因となっており、時間遅れを伴って地下水位が上昇したものと考えられる。

4) 熱流量

浸透施設周辺地下の熱流量の観測結果を図－3 (d) に示す。熱流量の値は正が下向きの、負が上向きの熱流を示す。すなわち、正の場合は、地中浅部の温度が深部より高いため、熱流は浅部より深部へ流れていく。負の場合はその逆となる。本観測では、図－3 (d) に示すように熱流量は 10 月頃から



図－3 2012 年 6 月～2013 年 5 月の観測結果

3月頃にかけて負（上向き）と観測され、4月頃から9月頃にかけて、正（下向き）と観測された。すなわち、10月～3月頃は、地下深部の温度は地表浅部より高く、逆に4月～9月頃は地下深部の温度は地表浅部より低いことを示す結果である。

また、熱流量の変動幅は深度が深いほど小さくなる傾向が見られる。浅い深度（0.5m）に設置されている熱流量-1と熱流量-2は地表面に近いので、気温に影響されやすく、熱流量は変動幅が大きいことも分かった。熱流量-3と熱流量-4の変動は熱流量-1と熱流量-2よりやや遅れるが、熱流量の長期的変動は、4つとも類似の変動パターンを示している。すなわち、8月～9月頃に年最大値に達し、12月～1月頃に年最小値になる。

5) 地中温度

地表面から0.5m深度の地中の温度変化を図-3(e)に示す。観測期間中の最大値は25.5℃、最小値は3.5℃であり、前者は8月末に、後者は2月下旬に観測された。図-2に示すとおり、地中温度-2は浸透施設近傍に、地中温度-1は浸透施設と約1m離れているところに設置されているが、変動パターンと変動幅に大きな違いが見られない。これは、2つの観測機器が同じ深度に設置されたこと、および浸透トレンチからの浸透がほとんどないことによるものと考えられる。ただし、浸透施設に近い地中温度-2の地中温度がやや低い理由にドレーン下部周辺からの浸透水が毛管現象により地表に向かって上昇し、蒸発で気化熱が放出されることによると考えられる。

6) 土壌水分

土壌水分を反映する土壌体積含水率の観測結果を図-3(f)に示す。同図より、浸透施設からの距離、設置深度により観測データの挙動が異なる。

＜設置深度が同じ場合＞

同じ設置深度0.5mに設置された土壌水分-1および-2の結果を比較すると、浸透施設から離れた前者より、浸透施設に近い後者の体積含水率（以下、土壌含水率と呼ぶ）が高いことが分かる。また、体積含水率の変動状況は、設置深度の深い含水率の挙動に比べ降雨による応答が鋭敏であることが分かる。

＜浸透設備からの距離が同じ場合＞

浸透設備からの距離が同一で、土壌水分計の設置深さが異なる新設の土壌水分-2、-3、-4の観測結果（ここではそれぞれ設置高さにより上、中、下と区別する。）は図-3(f)より、体積含水率は6～7月および2～5月は上>下>中の関係であり、8～1月は上>中>下の関係にあった。同様に、新設機器より浸透施設からやや離れた土壌水分既設-1および-2の観測結果は、ドレーン底部より深部にある既設-2の含水率が既設-1より高い関係にあり、降雨の影響を若干受けた挙動を示した。

これらの結果より、浅部とドレーン底部以深の体積含水率は降雨の影響を受けやすく、中間部は浅部とドレーン底部からの

雨水浸透の影響を、時間をかけて受けたものと考えられる。

4. 浸透施設の効果についての検討

(1) 降雨イベントの選定

浸透施設による地下水涵養効果および熱流環境効果を検討するため、この一年間の観測結果から代表的な降雨イベントを選定した。

降雨イベントの選定方法として、下記の条件を考えた。

- 時間降雨量が多いこと
- 選定される降雨イベントの前後3日間にほかの降雨イベントがないこと
- 季節による差異を考察するため、雨季と乾季を対象にすること

上述の条件を踏まえ、表-2に示す3つの降雨イベントを選定し、各降雨イベントの観測結果を図-4～図-5に示す。

表-2 選定した降雨イベントの一覧表

降雨イベント	考察期間	日数	最大時間降雨量 (mm)	累積雨量 (mm)	ドレーン内最大水深 (m)	
					プール側	グラウンド側
1	6月14日～6月26日	13	25.5	124.5	1.31	1.78
2	9月14日～9月22日	9	21.5	45.0	1.28	0.46
3	12月25日～1月4日	11	12.0	44.0	1.20	1.48

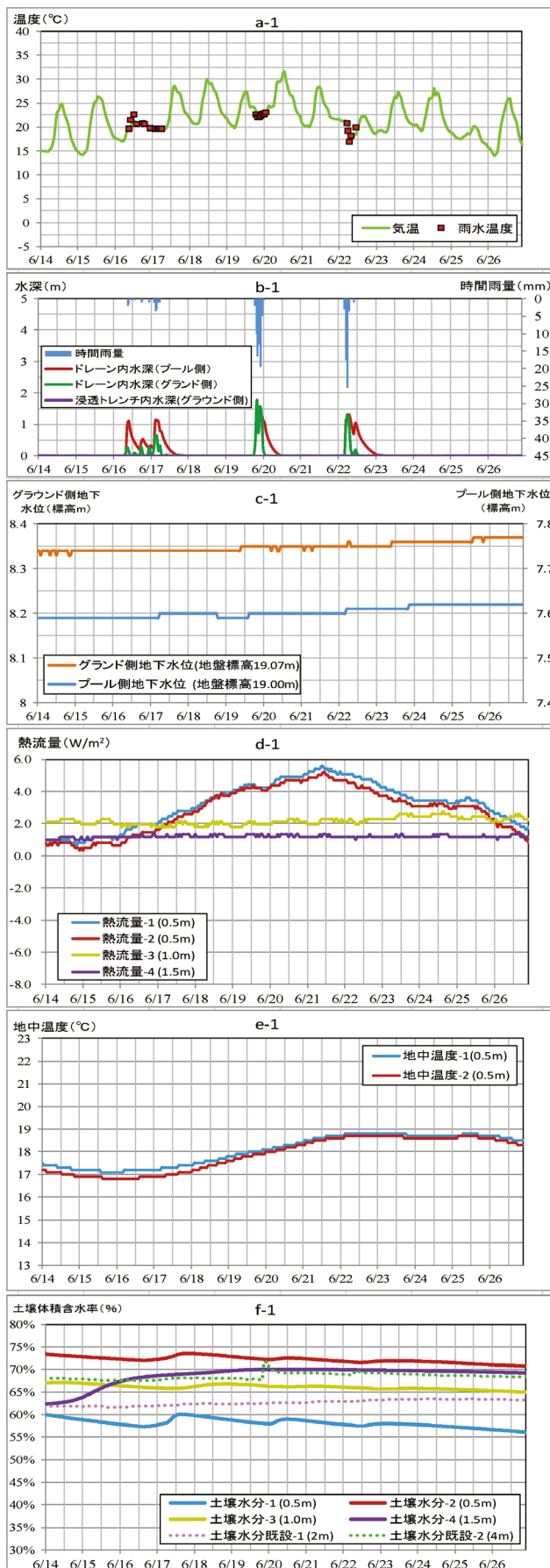
(2) 地下水涵養効果

選定された降雨イベントのなかで、浸透施設による地下水位の上昇現象が見られるのはイベント1とイベント3である。プール側とグラウンド側とも水位の上昇量は約2cm程度であった。

著者らは同浸透施設においては、140～170m³（8日間）の注水量に対して、約7～8cmの地下水位を上昇させる効果があることを既に検証している²¹⁾。一方、イベント3の累積降雨量と屋根の集水面積から推定される浸透施設への導水量は11日間で約35m³であり、この対象降雨イベントでは雨水浸透施設による地下水位の上昇は2cm程度には及ばないと思われる。そのため、今回対象の降雨イベント1とイベント3において観測された地下水位の上昇は降雨の雨水浸透施設を経由した涵養と浸透施設以外からの直接浸透涵養の両者の効果が合算された結果と考える。現に、雨水浸透施設周辺の被覆状況は都市域での通常の被覆状況と違い、図-1に示すように、透水性のよい被覆面が多いため、降雨時に雨が広範囲に地表面から浸透し、直接地下水へ涵養していると考えられる。

一方、降雨イベント2においては、雨が降っても地下水位の上昇が見られなかった。その理由は、降雨イベント2直前の8月の降雨が比較的少なく、図-3(f)に示すように8月末～9月上旬まで観測したすべての体積含水率が最も小さくなっていることが原因であると考えられる。すなわち、多少の降雨があっても、地表部およびドレーン底部周辺の乾燥部分

降雨イベント 1



降雨イベント 2

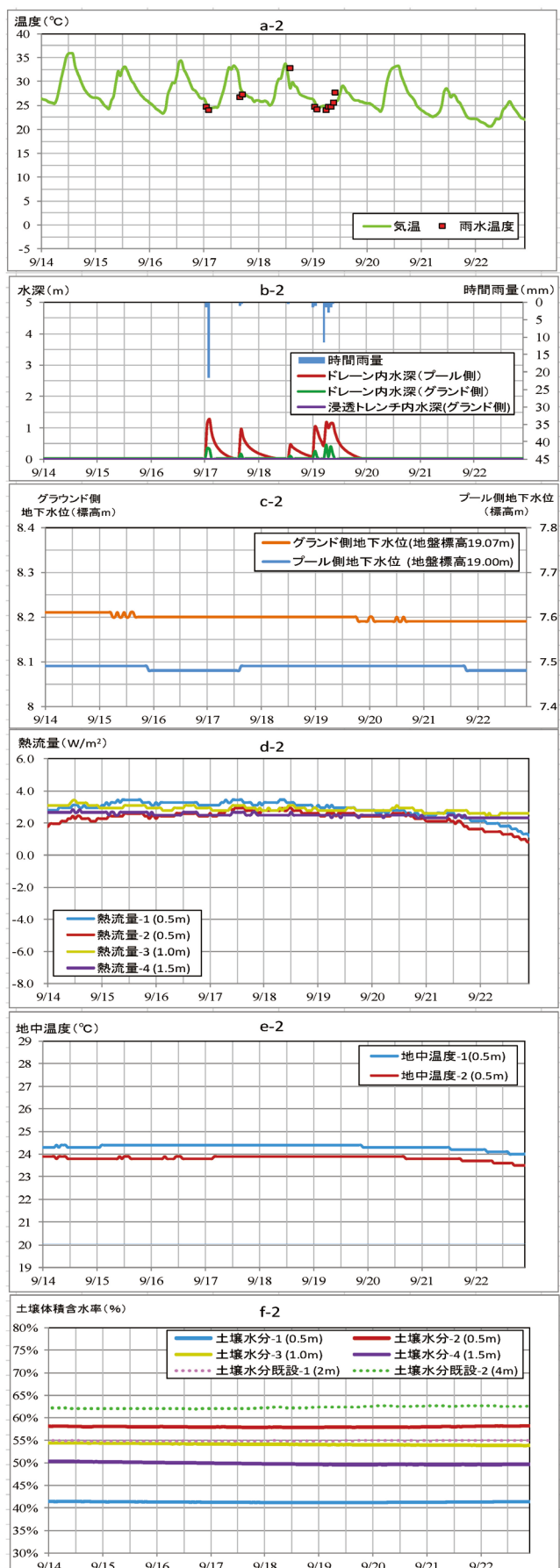
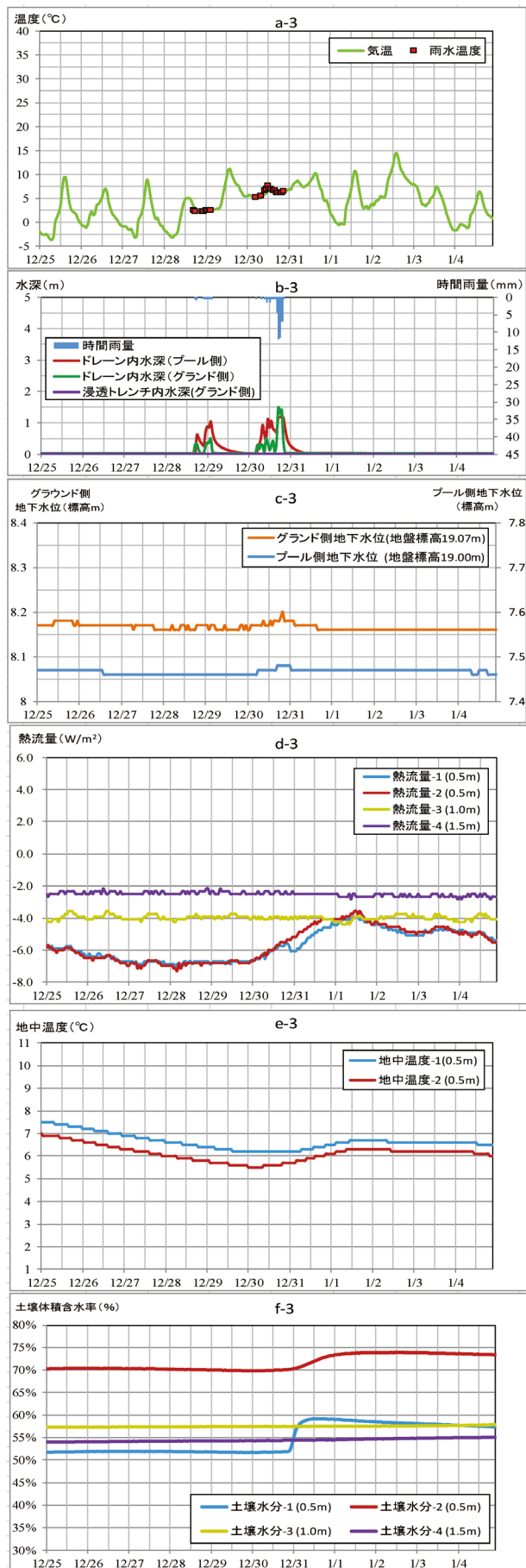


図-4 選定降雨イベント 1 と 2 の観測結果

降雨イベント3



図－5 選定降雨イベント3の観測結果

(不飽和部分)への水分供給に過ぎず、水分計を設置している深さまで雨水が浸透していないと考えられる²¹⁾。また、表－2に示すように、降雨期間中にグラウンド側の浸透施設内の水深が0.46mであり、ほかの2つの降雨イベントと比べて1m程度小さく、地盤内への浸透量が少なかったことが、このデータからも分かる。

(3) 地中の熱環境改善効果

1) 熱環境の影響因子

地中の熱環境を表す熱流量は、Fourierの法則に基づく以下の式で表すことができる²³⁾。

$$G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (1)$$

ここに、 G : 地中熱流量 (Wm^{-2})

(下向きが正)

λ : 土壌の熱伝導率 ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

$\partial T/\partial Z$: 温度勾配 ($^{\circ}\text{C m}^{-1}$ または Km^{-1}) で

(本観測の場合は、地表面と熱流量計設置深度の温度差 ($^{\circ}\text{C}$) をその設置深度 (m) で除したものに相当する)

この式により、熱流量の変動は土壌の熱伝導率および温度勾配により支配されることが分かる。

一般に体積含水率が増加すると有効熱伝導率が上昇するため²⁴⁾、イベント1とイベント3において、降雨時に深度0.5mの土壌含水率が上昇するとともに、同深度での熱流量も上昇している。イベント2においては、4(2)節で述べたように、降雨前の地盤が乾燥していたため、降雨があっても、体積含水率の変化がほとんどなく、熱流量の変動も大きくない。

次は、温度変化の影響因子を考える。深度が深くなると、地中温度が一定となり、また温度勾配も小さくなる傾向があるため、図－4(d-1、d-2)および図－5(d-3)に示すとおり、熱流量－3と熱流量－4において熱流量の変動幅が小さいことが分かる。一方、熱流量－1と熱流量－2は浅い深度(0.5m)に設置されているため熱流量の変動幅が大きく、図－3(a)と図－3(e)に示すとおり、該当深度の地中温度は気温の影響を受けやすいといえる。地表面温度は地下よりも日射や気温変化に直接的に影響されるため、気温が上昇すると、地表面と0.5m深度の温度差は夏に拡大し、冬に縮小していくと想定できる。これは、イベント1とイベント3の熱流量の観測結果と一致している。

2) 熱環境の改善効果

イベント1のような熱流量の正值の季節(夏季)では、雨水浸透による土壌含水率の上昇により、地表面から地下に伝わる熱流量も増加することが確認された(図－4(d-1))。この伝導熱流量の増加により、地表面付近高温化の抑制効果が期待される。しかし、本観測では、敷地利用制限により、地表温度の測定を実施していないため、地表温度上昇の抑制効

果を直接判断できない。また、体積含水率の上昇に対し、浸透施設と降雨の直接浸透によるそれぞれの地表面温度低減効果（低減量、範囲等）についても、更なる検討が必要である。

一方、イベント3のような冬季の場合、熱流量は負値で、熱流は暖かい地下から地表面に伝わるため、夏季の地表温度上昇を抑制する効果から、地表を保温する効果に転じると考えられる（図－5（d-3））。しかし、冬季の降雨時には、温度が低い雨水が地中に浸透するため、地下から地表に伝わる熱流量が減少することになり、冬季において雨水浸透施設の周辺が冷環境となる可能性についての指摘もある（福田ら（1999）²⁵⁾）。この現象について当観測で確認できていないが、これを検証するためには、今後浸透施設付近の温度を測定する必要があると考える。

5. おわりに

本稿では、比較的地表近傍に設置されている雨水浸透施設を用い、雨水浸透による地下水涵養効果および熱環境改善効果を明らかにすることを目的として、観測データから、代表的な観測期間と降雨イベントを選定し、考察を行った。これらの観測結果により、降雨時における浸透施設周辺の熱流量、地中温度、土壌含水率、地下水位などの変動特性、およびこれらと降雨、気温、浸透施設の貯水深に対する応答関係を明らかにした。観測結果によって、雨水浸透による地下水涵養効果および熱環境改善効果が確認されているが、幾つかの課題も発見されており、下記のとおりまとめられる。

- 浸透施設周辺にて土壌水分量の高い状態が比較的継続されることから、浸透施設から不飽和帯への水分供給効果が期待される。
- 浸透施設より浸透した水は一部不飽和帯に貯留されながら浸透し、地下水面へ到達した後地下水位が上昇すると考えられる。
- 本観測で、雨水浸透による地下水位上昇効果が確認されたが、人工注水実験と比べ、自然降雨による浸透施設への導水量が少ないため、地下水位の上昇幅は人工注水実験で得られた上昇量を下回った。浸透施設による地下水涵養効果を高めるためには、屋根集水面積を拡大し、浸透施設への集水能力を高める必要がある。
- 夏季に、土壌水分量の増加とともに地表面から地下に伝わる熱流量も増加し、浸透施設による熱環境の改善効果が期待されると考えられるが、その効果を検証するため、今後地表面付近の温度を測定する方法および計器の設置について検討する必要がある。そのため、学校施設に適する安全性が高い観測装置と設置方法を検討する必要がある。
- 熱環境改善効果に対し、より効果的となる浸透トレンチからの地中浅部への浸透による効果（低減量、範囲等）

を把握する必要がある。そのため、浸透トレンチを対象とした土壌水分計や温度計を追加で設置することが必要であると考えられる。

謝辞：雨水浸透施設の設置および観測データ回収の際に千葉県市川市水と緑の部、市川市立若宮小学校より多大なご協力を頂きました。また、研究にあたって雨水貯留浸透技術協会の益田宗則氏より有益なご助言を頂きました。関係者の皆様にこの場をお借りしまして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) A.Kondoh, J.Nishiyama: Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo metropolitan area, Japan, *Advances in Space Research*, Vol.26(7), pp. 1173-1176, 2000
- 2) (公社) 雨水貯留浸透技術協会：戸建住宅における雨水貯留浸透施設設置マニュアル、2006
- 3) 潘 安君、張 書函、陳 建剛：城市雨水総合利用技術研究と応用、中国水利水電出版社、2009
- 4) (一社) 環境情報科学センター：雨水を浸透させて下水料金割引、欧州の環境への取組み 7 月第 1 号、2011
- 5) (公社) 雨水貯留浸透技術協会：特集 / 全国の水循環再生モデル 6 流域をふりかえる、水循環 貯留と浸透、Vol.92、2014
- 6) (公社) 雨水貯留浸透技術協会：都市の水循環改善研究会：都市の水循環改善への提言、1995
- 7) 賈 仰文、倪 広恒、河原 能久、末次 忠司：都市河川流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価、水工学論文集、Vol.44、pp.151-156、2000
- 8) 忌部 正博、屋井 裕幸、高祖 成一：都市域の健全な水循環系構築のための雨水浸透施設の効果と評価について、日本水文学会誌、Vol.38、pp.43-54、2008
- 9) 藤村 和正、安藤 義久：都市流域における雨水浸透施設による流出抑制効果に関するシミュレーション、水文・水資源学会誌、Vol.11 (4)、pp.360-370、1998
- 10) 安藤 義久、天口 英雄、宮端 伸治：浸透施設による湧水保全の効果、水循環 貯留と浸透、Vol.47、pp.12-17、2003
- 11) 井上 正之、和泉 清：流域貯留浸透施設の地下水涵養効果、土木学会第 46 回年次学術講演会、II-60、pp.160-161、1991
- 12) 高瀬 安利、松尾 哲：黒ぼく地盤での雨水浸透施設による雨水涵養の測定、土木学会第 54 回年次学術講演会、II-348、pp.698-699、1999
- 13) 山濱 裕、楠田 隆、風岡 修、香村 一夫、楢井 久、澤地 義雄、泉水 菊夫：下総台地での雨水浸透枡による地下水涵養実験について、Proc. of the 12th Sym. on Geo-Environments and Geo-Tech、pp.179-184、2002
- 14) 山濱 裕、風 岡修、澤地 義雄：下総台地における雨水浸透枡による地下水涵養実験について、水循環 貯留と浸透、Vol.73、pp.31-35、2009

- 15) 安藤 義久、長畑 範明：台地の試験流域における地下水流動を含む水循環機構のモデル化とその応用、水文・水資源学会誌、Vol.2 (1)、pp.33-40、1989
- 16) 荒木 千博、天口 英雄、河村 明、高崎 忠勝：地物データGISを用いた都市流域地下水涵養モデルの構築および実流域シミュレーション、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.68 (2)、pp.109-124、2012
- 17) V.N.Sharda, R.S.Kurothe, D.R. Sena, V.C. Pande, S.P.Tiwari: Estimation of groundwater recharge from water storage structures in a semi-arid climate of India, *Journal of Hydrology*, Vol.329(1-2), pp.224-243, 2006
- 18) 木内 豪、小林 裕明：快適な都市熱環境創造のための舗装の高温化抑制策に関する検討、土木学会論文集、No.622/VII-11、pp.23-33、1999
- 19) 三坂 育正、成田 健一、綿貫 良太、横山 仁、山口 隆子、石井 康一郎：感温性を有する保水性舗装によるヒートアイランド緩和効果に関する研究、東京都環境科学研究所年報、pp.19-24、2005
- 20) 西山 哲、大西 有三、矢尾 隆夫：透水性舗装による都市の熱環境改善効果の研究、日本ヒートアイランド学会論文集、Vol.2、pp.22-28、2007
- 21) Thi Ha、武田 智恵、萩原 崇、屋井 裕幸：実証実験による雨水浸透施設の地下水涵養・湧水保全効果の検討、土木学会地球環境シンポジウム講演集、Vol.17、pp.121-130、2009
- 22) (社) 雨水貯留浸透技術協会：水循環再生構想・施策の評価手法検討業務、水循環 貯留と浸透、Vol.66、pp.52-55、2008
- 23) 鈴木 伸治、飯塚 圭子、渡邊 文雄、島田 沢彦、高橋 悟：地表面近傍での地中熱流量の測定における温度勾配法と熱流板法の比較および貯熱の影響、土壌の物理性、Vol.124、pp.35-42、2013
- 24) 吉岡 真弓、内田 洋平、高杉 真司、笹田 政克：地中熱利用における雨水浸透枘の役割、水循環 貯留と浸透、Vol.80、pp.53-56、2011
- 25) 福田 萬大、浅枝 隆、藤野 毅：冬季自然状態における保水性舗装の熱環境特性に関する実験的研究、土木学会論文集、No.634、Vol.45、pp.243-254、1999