

屋上貯留のもつ雨水流出抑制効果及び熱環境緩和効果に関する研究

礪貝二郎 岡部真人 此島健男子 山田正

**Journal of the Institute of Science
and Engineering**

CHUO UNIVERSITY

Vol.16 2010

.....

中央大学理工学研究所論文集 第16号 2010年

屋上貯留のもつ雨水流出抑制効果及び熱環境緩和効果に関する研究

磯貝二郎*, 岡部真人*, 此島健男子*, 山田正*

A Study on the Effects of Runoff Suppressant and Heat Environment Mitigation by Rainfall Harvesting on the Top of the Building

Jiro ISOGAI*, Masato OKABE*, Takehiko KONOSHIMA*
and Tadashi YAMADA*

Abstract

Recent years, inside water inundation disasters caused by locally heavy rainfall have the highest percentage of water disaster in urban areas. Increasing impermeability area by expanding built-up area and lack of drainage capacity of basin of side ditch, sewage line and rivers bring down water inundation. Therefore improving rainwater drainage system is an urgent need. Our previous studies proposed pipe and drain, pump station and rainfall harvesting facility construction as methods of improving rainwater drainage system. And we simulated and calculated cost benefit when these were constructed. In the result, we showed that rainfall harvesting underground is the most effective way as a rainwater drainage system. On the other hand it is difficult to build a new facility in a city having overcrowded population. In this paper the new way of rainfall harvesting is proposed. Installing those equipments on the top of the building also mitigates the inundation damages. In addition, rainfall harvesting on the top of the building have heat environment mitigation by heat of evaporation when rain water evaporate. This paper shows that rainfall harvesting on the top of the building is effective to runoff suppressant and heat environment mitigation by an observation on the top of the building and runoff analysis.

1 はじめに

近年、都市域における内水氾濫が多く報告されている[1]。これは都市域での市街地の拡大に伴う、不浸透域の増加および道路側溝や下水道の整備等の流域の排水能力の不足が原因であると考えられ、雨水排水対策が急務である。既往の研究[2]では雨水排水対策として管渠布設替え、ポンプ場の新設および地下貯留施設の新設を提案し、これらの効果を検証するために氾濫シミュレーションを行い、費用対効果を算出した。その結果、対象流域においては地下貯留施設の新設が雨水排水対策として最も効果的であることを示した。しかし、住居や工業施設、商業施設、公共施設等が密集している都市域において、地下貯留施設の新設は空間的・費用的に困難であるといえる。そこで本研究では既存の建物の屋上に雨水を一時的に貯留する屋上貯留を提案する。屋上貯留により雨天時は雨水を貯留することによる雨水流出抑制効果、また晴天時は貯めこんだ雨水が蒸発する際の気化熱による熱環境緩和効果が期待できる。これらの対策の1つとして屋上緑化が行われており熱環境緩和効果は実証されている[3]。しかし、植物の生育には土壌やそれに付随する施設の設置・定期的な水やりや芝刈りといったメンテナンスが必要不可欠であり、維持管理に費用を要する。また、外来種の芝生が在来種の芝生を駆逐して生態系を壊す恐れがある。そのため本稿では屋上貯留に保水蒸発機能が優れたメンテナンスフリーの多孔質セラミックスを用いた。既往の研究[4]でセラミックスの熱環境緩和効果に関しては検証されているが、本稿ではそれに加え雨水流出抑制効果についても検証を行う。屋上での実験観測によりセラミックスと芝生を敷設した場合と何も敷設しない場合の雨水流出抑制効果と熱環境緩和効果を比較し、並びに流出氾濫解析を行うことにより屋上貯留が効果的であるかを評価している。また、屋上面は地表面と比べて日陰になりやすく地表面は地中に熱が伝導するのに対し、屋上面は下に居住空間等があるため高温になりやすいといった問題も存在する[5]。そこで、屋上面の蓄熱についても検証を行っている。

*中央大学理工学研究所 東京都文京区春日1-13-27

2 屋上実験・観測

2.1 観測概要

観測場所は東京都港区にある9階建ての建物の屋上で、2010年7月下旬から熱観測と水収支観測を行っている。本稿では7月30日から8月30日を対象期間とする。熱観測では100[mm]程度の厚さの軽石状のセラミックスと芝生を5.0[m]×10[m]に敷設し、セラミックスと芝生と敷設なしで比較を行った。水収支観測は100[mm]程度の厚さの軽石状のセラミックス、40[mm]程度の厚さの平板状のセラミックス、50[mm]程度の厚さの円柱状のセラミックス、60[mm]程度の厚さのブロック状のセラミックス、土壌厚50mm程度の芝生を40[cm]四方に敷設し、深さ60[mm]の40[cm]四方のタンクと比較を行った。水収支観測の容器は断熱材である発砲ポリスチレン板を厚さ10cmで覆った上で、まわりをアルミテープで覆い、周囲の影響を受けないようにした。測定項目及び測定機器はTable.1に示す。表面温度と各種気温、各種気象項目、質量計、熱流量は1分間隔で観測を行った。Fig.1に屋上の平面図と観測器材設置箇所を示す。屋上の北部には階段が、南部には室外機があるが、室外機からの温風は屋上外部に出るようになっており観測への影響はない。表面温度と各種気温についてはT型熱電対を用いて、日射や照り返しの影響が無いようにアルミ製のカバーをかぶせ、表面温度と鉛直上空1[cm]、5[cm]、10[cm]、30[cm]、50[cm]の気温を測定した。また、カバーは実験により長波放射の影響がないことを確認している。水収支は質量計を用いて、重量を測定することにより、貯留量・蒸発量を算出した。各種気象項目は屋上面から1.5[m]の高さに設置した気象観測装置を用いて測定し、熱流量は屋上面上に地中熱流計を設置し測定し、太陽光の反射率は屋上面から50[cm]の高さに設置したアルベドメーターを用いて測定を行った。また芝生は毎日午前6時に5[mm]程度自動灌水を行っている。

Table.1 The measurement items and methods

評価項目	方法	詳細
風向・風速	気象観測装置	Vantage Pro2(Davis社製)
日射量		
気温・湿度		
降雨量		
表面温度・上空気温	熱電対	T型熱電対 $\phi 0.32$ (グラフテック社製)
貯留・蒸発量	質量計	SB60KI1(エー・アンド・アイ社製)
熱流量	地中熱流計	地中熱流計(英弘精機社製)

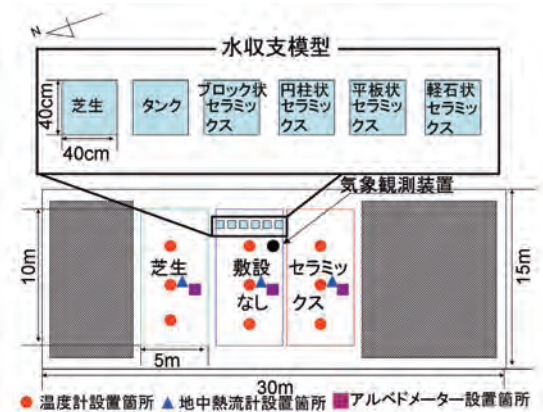


Fig.1 The floor plan of the rooftop

貯留量・蒸発量を算出した。各種気象項目は屋上面から1.5[m]の高さに設置した気象観測装置を用いて測定し、熱流量は屋上面上に地中熱流計を設置し測定し、太陽光の反射率は屋上面から50[cm]の高さに設置したアルベドメーターを用いて測定を行った。また芝生は毎日午前6時に5[mm]程度自動灌水を行っている。

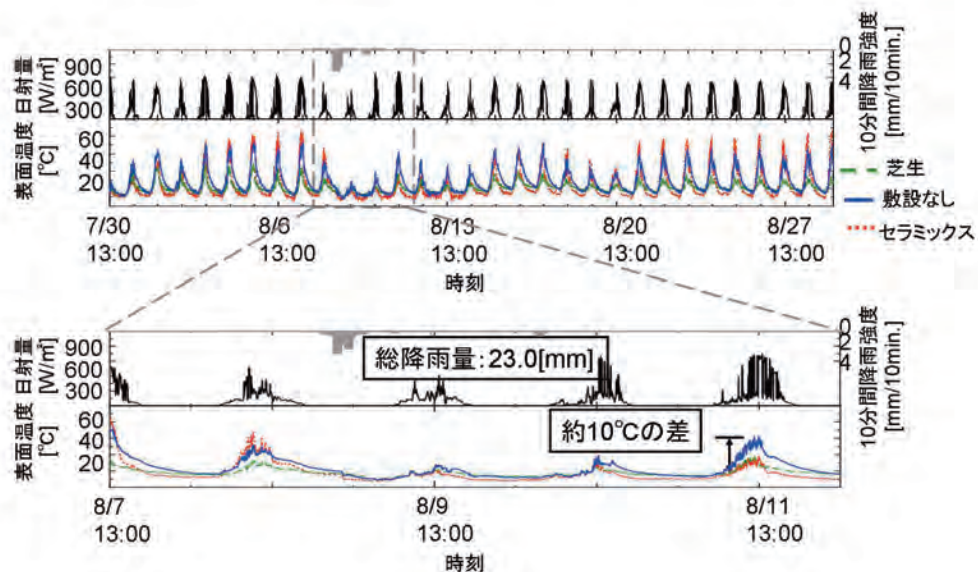


Fig.2 The time series graph of rainfall, amount of solar radiation and surface temperature from 30th July 2010 to 30th August 2010

2. 2 観測結果

2. 2. 1 表面温度

Fig. 2 に対象期間中の降雨量, 日射量, セラミックスと芝生と敷設なしの表面温度を示す. 芝生は敷設なしの場合と比較して常に表面温度が低くなっている. これは芝生には自動灌水が行われているため常に水を含んでいる状態にあるためである. それに対しセラミックスは, 降雨後 1 週間程度は敷設なしの場合と比較して表面温度が低くなっており, 芝生と同程度の温度低減効果を示している. しかし, 降雨後 1 週間以上経過すると敷設なしの場合と比較して同程度の表面温度またはそれ以上に高い表面温度になっている. これは, セラミックスは貯めこんだ雨水を一週間程度で蒸発させているためだと思われる. 降雨直後に着目してみると, セラミックスと芝生共に敷設なしの場合と比較して, 表面温度が約 10°C 低くなっており, 熱環境緩和効果があることがわかる. また, 日射の強い昼間と日射のない夜間の表面温度を比較すると, 昼間は芝生がセラミックスと敷設なしの場合を比較して表面温度が低くなっているのに対し, 夜間はセラミックスが芝生と敷設なしの場合と比較して表面温度が低くなっている.

2. 2. 2 気温鉛直分布

Fig. 3 に降雨直前である 8 月 8 日の日射が強い時間のセラミックスと芝生と敷設なしの気温鉛直分布を, Fig. 4 に降雨直後である 8 月 11 日の日射が強い時間のセラミックスと芝生と敷設なしの気温鉛直分布を示す. 12 時, 14 時, 16 時の各々の正時前後 10 分を平均した. 降雨直前のほぼ水を含んでいないセラミックスと敷設なしの場合と芝生を比較すると, 表面温度は芝生が最も低くなっている. また, 鉛直上空 50 [cm] の気温に着目しても 1°C 程度気温が低くなっている. それに対し降雨直後はセラミックスが芝生と敷設なしの場合と比較して最も表面温度が低くなっている. また鉛直上空 50 [cm] の気温も芝生と比較して 0.5°C 程度の差になっている. さらに降雨前後のセラミックスの気温鉛直分布に着目すると降雨直前は表面に近づくにつれ気温が高くなっている. しかし, 降雨直後の鉛直上空の気温は上空高さによらず同程度の気温となっている. このことから屋上貯留には熱環境緩和効果があることがわかる. 芝生は土壌の表

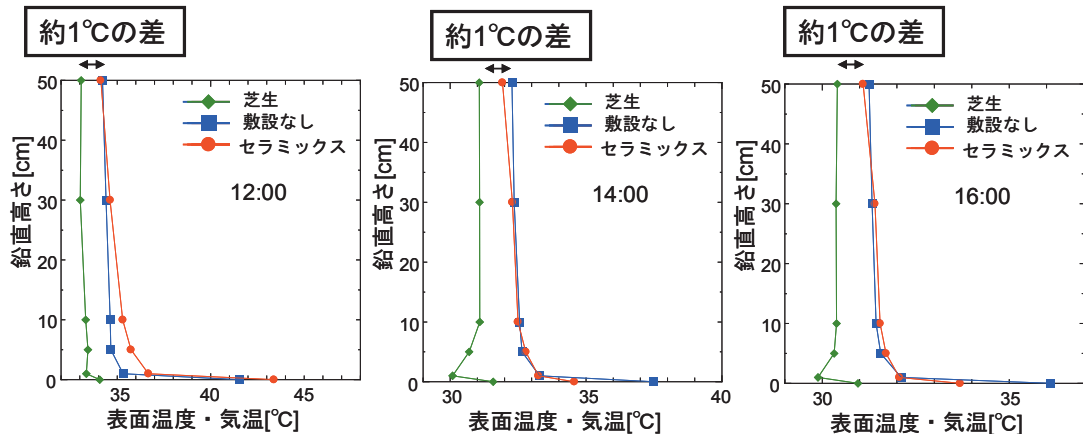


Fig. 3 The vertical profile temperature before rainfall

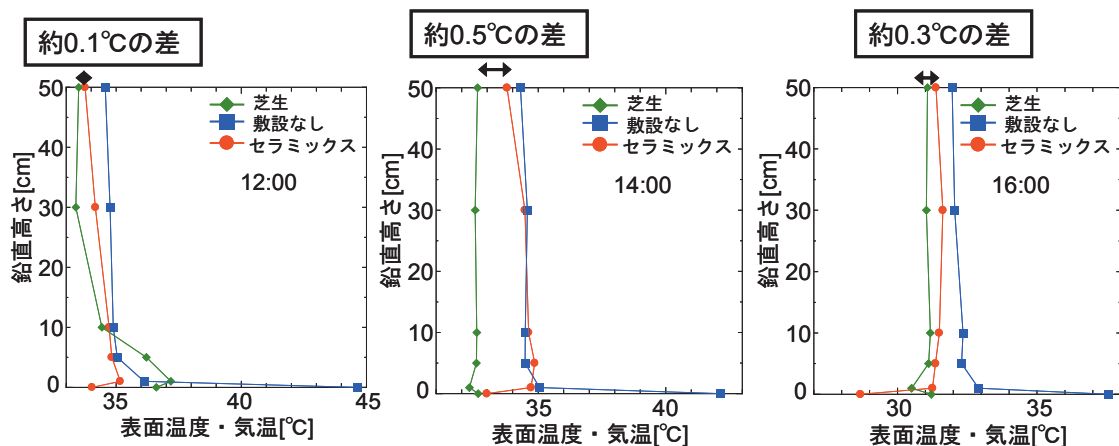


Fig. 4 The vertical profile temperature after rainfall

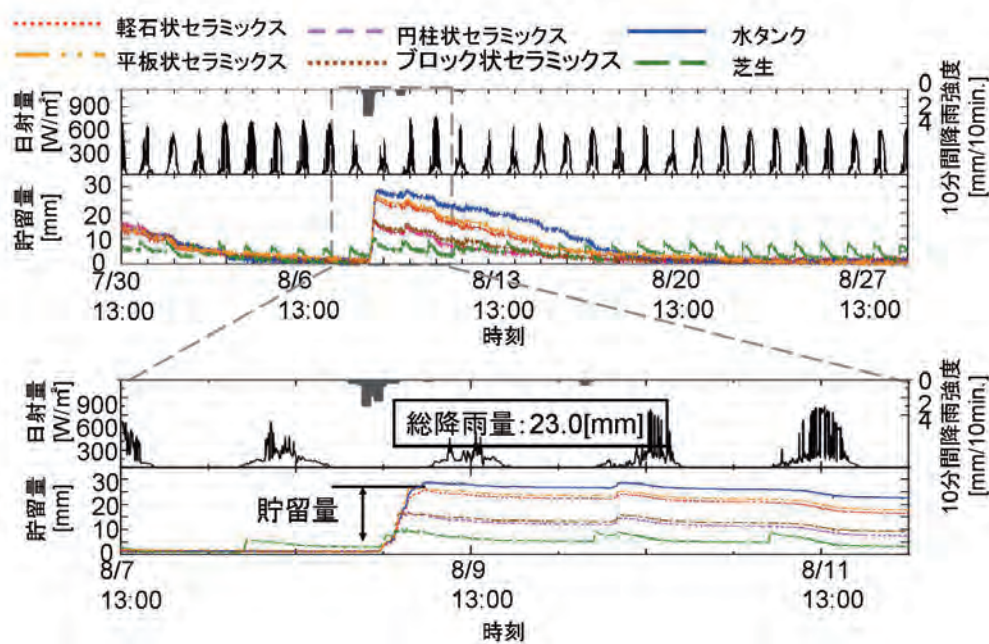


Fig.5 The time series graph of rainfall and amount of solar radiation and rainfall harvesting from 30th July 2010 to 30th August 2010

面を表面温度としており、芝生の長さが 1[cm]以上になっているため、水蒸気を含んだ空気が滞留しやすい状態であり、さらに芝に付着した水の蒸散により気温が最小となっている。

2. 2. 3 降雨に対する貯留量

Fig. 5 に対象期間中の降雨量、日射量、各種セラミックスと芝生とタンクの雨水の貯留量を示す。貯留量から各種セラミックス・芝生・タンク全てが雨水を貯留していることがわかる。さらに各種セラミックスとタンクで貯留した雨水は約 10 日間で蒸発する。総降雨量 23[mm]の降雨に対する各種素材の貯留量を見ても、この降雨に対しては軽石状のセラミックスは約 20[mm]、平板状のセラミックスは約 21[mm]、円柱状のセラミックスは約 12[mm]、ブロック状のセラミックスは約 12[mm]、芝生は約 3[mm]、タンクは約 23[mm]の雨水を貯留していた (Table. 2)。芝生は自動灌水を行っているため、各種セラミックス、タンクと比較して多くの雨水を貯留することはできなかった。

2. 2. 4 積算日射量と蒸発量の関係

Fig. 6 に降雨翌日の時間積算日射量と各種セラミックス、芝生、タンクの 1 時間当たりの蒸発量を示す。日射が強くなる時間帯に蒸発量が大きくなっていることがわかる。

Fig. 7 に降雨後からの日積算日射量と各種セラミックス、芝生、タンクの 1 日当たりの蒸発量を示す。降雨直後は 1 日当たり 4[mm]から 6[mm]程度蒸発しているが、各種セラミックスとタンクは徐々に蒸発量が少なくなっている。これは貯めこまれている雨水が徐々に少なくなっているためと思われる。毎日自動灌水が行われている芝生の蒸発量に着目してみると日積算日射量とほぼ同じ推移変動を示している。このことから日射の強い日により蒸発量が大きくなっていることがわかる。敷設物による蒸発速度の違いを見ると、タンクが最も蒸発速度が速く、円柱状のセラミックスが最も蒸発速度が遅くなっている。

2. 2. 5 屋上面への伝導熱

Fig. 8 に対象期間中の熱流量の結果を示す。熱流量の正の値は屋上面に入っていく熱流量を示している。セラミックスと芝生に比べ、敷設なしの場合は昼間に多くの熱を溜めこみ、夜間に昼間溜めこんだ熱を放出していることがわかる。つまり、セラミックスと芝生を敷設することにより屋上面への伝導熱を大きく減少させていることがわかる。

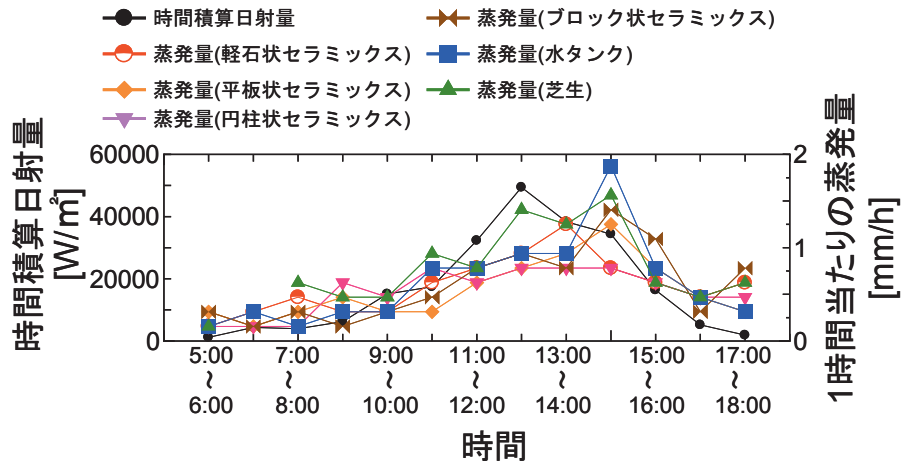


Fig. 6 The hour integrate amount of solar radiation and amount of evaporation per hour on the day after rainfall

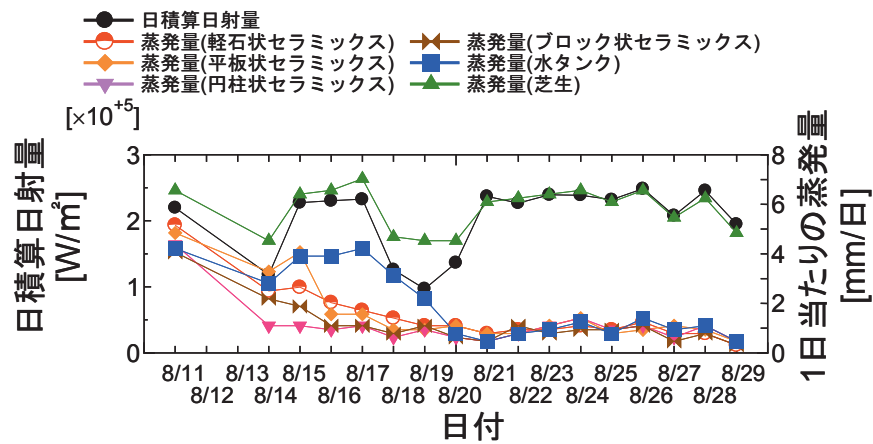


Fig. 7 The day integrate amount of solar radiation and amount of evaporation per day from 11th August 2010 to 29th August 2010

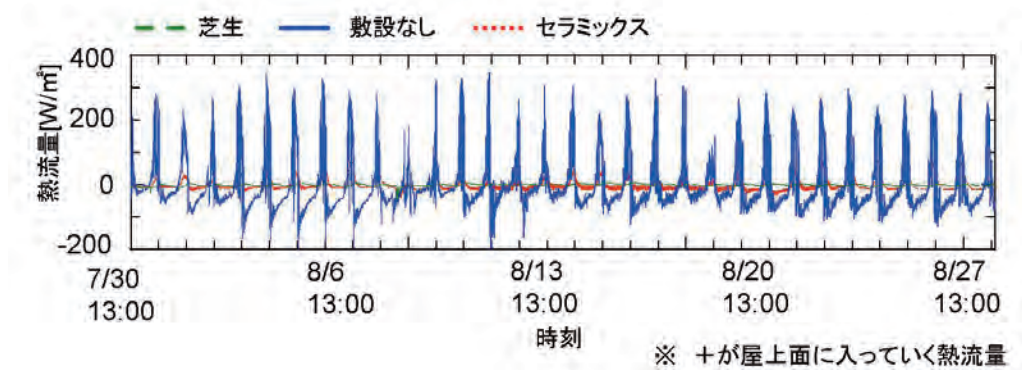


Fig. 8 The time series graph of heat flow from 30th July 2010 to 30th August 2010

2. 2. 6 太陽光の反射率

反射率はアルベドメーター下部にて測定した反射エネルギーをアルベドメーター上部にて測定した入射エネルギーで割って算出した。Fig. 9 に降雨直前である 8 月 8 日の日射がある時間帯の反射率の瞬間値を、Fig. 10 に降雨直後である 8 月 11 日の日射がある時間帯の反射率の瞬間値を示す。降雨前後共に芝生が最も反射率が高く、セラミックスが最も反射率が低くなっている (Table. 2)。セラミックス・芝生・敷設なし全ての場合において、全日射量が急激に上昇する 9 時頃と 10 時頃に反射率が上昇している。

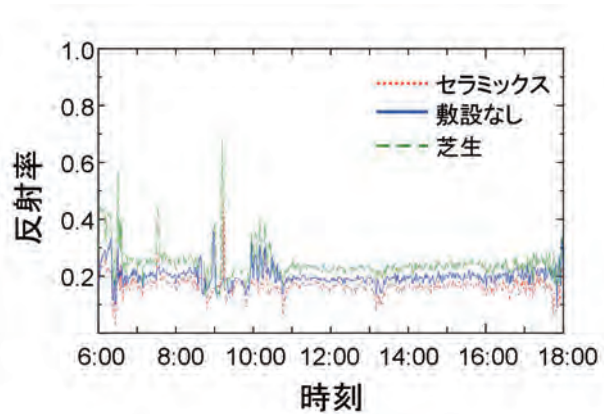


Fig. 9 The time series graph of albedo on the day before rainfall

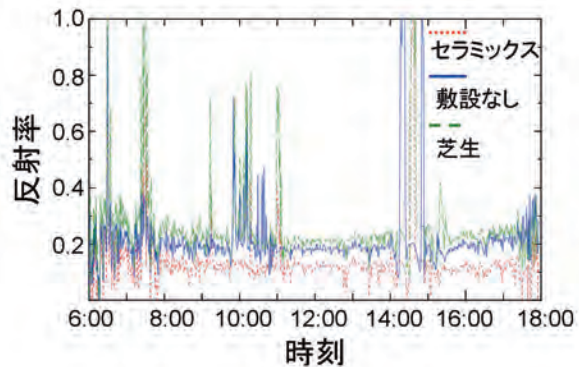


Fig. 10 The time series graph of albedo on the day after rainfall

Table. 2 The average value of albedo

敷設物	反射率	
	降雨前(8月8日)	降雨後(8月11日)
セラミックス	0.17	0.14
敷設なし	0.20	0.21
芝生	0.25	0.26

3. 2 各種整備対策案の比較検討

対象流域において管渠布設替え、ポンプ場の新設および地下貯留施設の新設整備とそれらの組み合わせの整備、屋上貯留(セラミックスの敷設)の氾濫シミュレーションを行い、どの対策が最も雨水排水対策に効果的であるか比較検討を行った。屋上貯留は対象流域である当代島第 2 排水区内にある屋上に対して 100[%]、75[%]、50[%]、25[%]、10[%]に敷設し、屋上の積載荷重を考慮し敷設の厚さは 30[mm]~180[mm]、実質 10[mm]~60[mm]の降雨を貯留できるという条件で、それぞれ各種対策前後の氾濫浸水面積を算出した。敷設率 100[%]は通常家屋を含む流域内全ての屋根に敷設した状態である。管渠布設替えは管径を 20[cm]拡大し、新設するポンプ場の排水能力は 2.8[m³/s]、新設する地下貯留施設の貯留面積は 1,100[m²]である。ポンプ場の排水能力は浦安市に既設されているポンプと同等の排水能力を仮定し、地下貯留施設の貯留面積は新設可能な既存の公園の面積である。

3. 3 費用対効果(B/C から見た屋上貯留の効果)

整備前の被害額から整備後の被害額を差し引いた被害軽減額と降雨の確率年の結果を Fig. 13 に示す。管渠の拡大により雨水が流れやすくなったため被害額の増大し、被害額の差額が小さくなっている場合が見

られた。Fig. 13 より、被害軽減額が生起確率 20 年で最小となっている。これは生起確率 20 年の降雨までは現況の管路網による排水がある程度行なわれており、生起確率 35 年以上の降雨では現況の管路網の排水能力を超過しており、被害額が大きく増大したためだと考えられる。ここで、どの対策が最も有効であるかを評価するため、各種整備対策の費用対効果を算出した。B/C の算出方法は以下の通りである。

各整備対策に対して基準降雨を $i=1$, 1 割増加降雨を $i=2$, 2 割増加降雨を $i=3$, 3 割増加降雨を $i=4$, 4 割増加降雨を $i=5$, 5 割増加降雨を $i=6$ として、

被害軽減額=整備前の被害額-整備後の被害額

$$B = \left\{ \left(\sum_{i=1}^6 \left((\text{降雨 } i \text{ の被害軽減額} + \text{降雨 } i+1 \text{ の被害軽減額}) / 2 \right) \times (\text{降雨 } i \text{ の降雨の超過確率} - \text{降雨 } i+1 \text{ の降雨の超過確率}) \right) \times \text{評価対象期間 (年)} \right\}$$

$C = \text{整備費用} + \text{維持管理費}$

つまり B は、 $\sum_{i=1}^6 \left((\text{降雨 } i \text{ の被害軽減額} + \text{降雨 } i+1 \text{ の被害軽減額}) / 2 \right) \times (\text{降雨 } i \text{ の降雨の超過確率} - \text{降雨 } i+1 \text{ の降雨の超過確率})$ の算出により年平均被害軽減期待額を算出している。これに評価対象期間（整備施設の耐用年数）を乗じることで対象期間の被害軽減期待額が算出される。被害額=単位面積当たりの資産価値×浸水深ランク別被害率×湛水面積により算出した。C は総費用であり、整備費用は Table. 3 に示す通りである。ポンプ場の新設及び地下貯留施設の新設に関する費用は建設費のみで、用地代を含んでいない。尚、通常家屋と平屋根の屋上に対する敷設費用は同様とした。また、毎年の維持管理費は整備費用の 0.5% とした。尚、単位面積当たりの資産価値及び浸水深ランク別被害率は国土交通省河川局出典の「治水経済調査マニュアル」[8] を参考にした。これにより算出された各種整備対策の費用対効果を Fig. 14 に示す。この結果より、効果的に排水対策をするためには雨水の貯留が有効であり、屋上貯留にしていえば敷設方法によっては地下貯留ほどの効果を上げることを明らかにした。雨水貯留は排水対策として非常に効果的である上、地下貯留施設の新設は用地代を含んでおらず、セラミックスは非常に安価であるため、費用対効果が大きくなっている。

4 まとめ

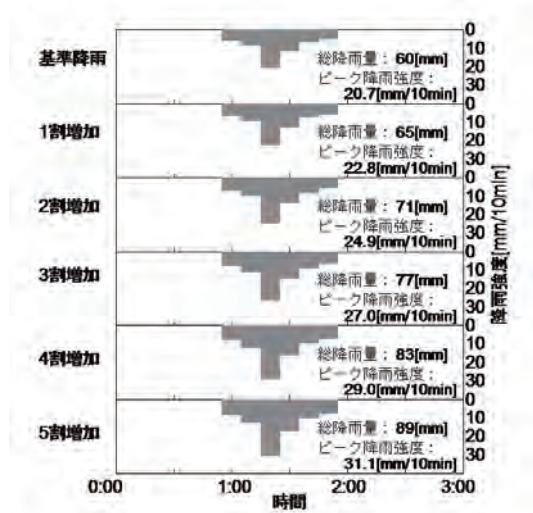


Fig. 11 The waveform chart of rainfall

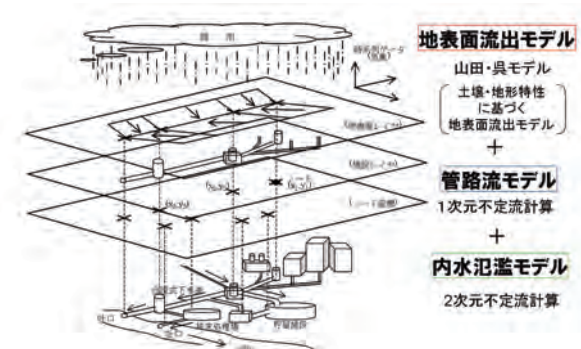


Fig. 12 The general flowchart of calculations

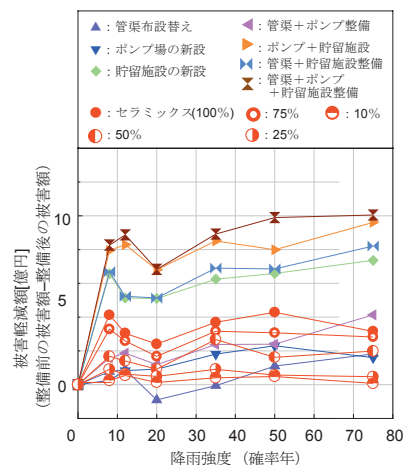


Fig. 13 The relation between mitigation amount of damage and return period

本論文では、内水氾濫被害が多い都市流域での内水氾濫被害軽減のため、一時的な雨水の屋上貯留を提案し、現地実験・観測及び流出氾濫解析により評価をした。また、屋上貯留のもう1つの効果であるヒートアイランド緩和効果についても現地実験・観測により評価を行った。以下に得られた知見を述べる。

1) 現地実験より屋上貯留に用いたセラミックスと芝生共に雨水流出抑制、熱環境緩和両方に効果があることを示した。
2) 芝生には植物の生育のために毎日自動灌水を行っているため、セラミックスと比べ熱環境緩和効果が大きいものに対し、セラミックスは芝生に比べより多くの雨水を貯留することができるため雨水流出抑制効果が大きいことを示した。

3) 雨水流出抑制効果について見ると、水を貯めるだけのタンクが最も雨水を貯留し、蒸発速度も最も早い
ため非常に効果的であることを示した。

4) 日射が強い日ほど、より多くの雨水が蒸発することを示した。

5) 蒸発量の1日の推移変動を見た結果、日射の強い屋間により多くの雨水が蒸発することを示した。

6) 屋上面にセラミックスと芝生を敷設することにより屋上面への伝導熱を大きく減少させていることを示した。

7) 太陽光の反射率は芝生が最も高く、セラミックスが最も低いことを示した。

8) 屋上貯留を行った際の氾濫シミュレーションにより費用対効果を算出し、他の整備項目と比較することによって、屋上貯留が非常に効果的であることを示した。

Table.3 The cost of each rain water drainage measure

整備メニュー	整備費用
管渠布設替え	3.12[千万円]
ポンプ場の新設	12[億円]
地下貯留施設の新設	3.3[億円]
屋上貯留 (雨水30mm貯留)	5[千円/㎡]×敷設面積[㎡]

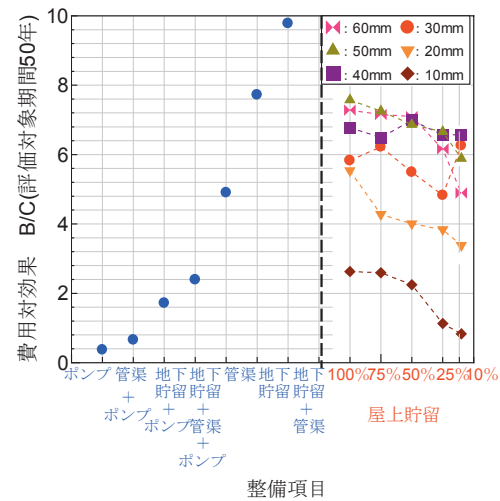


Fig.14 The cost benefit to each rain water drainage measure

謝辞：本研究の遂行にあたり、「雨水流出抑制・ヒートアイランド緩和に係る研究の有識者委員会」の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 国土交通省ホームページ：水害対策を考える
- [2] 荒川貴志，石塚丈晴，此島健男子，呉修一，山田正：都市流域における効果的な雨水排水計画の提案，土木学会第64回年次講演会講演概要集，CS11-017，pp.423-424，2009
- [3] 福岡義隆，松本太，林宏三郎：屋上緑化と特殊舗装面による都市の温暖化緩和効果に関する研究，日本農業気象学会大会講演要旨，Vol.08sp，p.26，2008
- [4] 尾崎哲二，鈴木義則：保水セラミックタイルの熱環境改善に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol.42，pp.61-66，1998
- [5] Goward.S.N: Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island, Physical Geography 2, pp.19-33, 1981
- [6] 土屋修一，土肥学，海野修司，山田正：管路網水理解析による都市洪水流出特性に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol.46，pp.259-264，2002
- [7] 呉修一，山田正，吉川秀夫：表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol.49，pp.169-174，2005
- [8] 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル，2005