屋上緑化の雨水流出抑制機能に植物種の違いとバイオチャーの利用が与える影響

麥田隼希¹⁾・土屋一彬¹⁾・松岡達也¹⁾・山田 晋¹⁾²⁾・大黒俊哉^{*1)}

1) 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

2) 東京農業大学農学部 Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture

摘要: イネ科植物は、薄層土壌の屋上緑化においてセダム類に比べ雨水流出抑制機能が高いことが知られているが、乾燥時の生育に課題があり、種ごとの機能の差異も明確ではない。本研究は、バイオチャーを土壌に混合することで無灌水時の生育状況が改善されるか明らかにするため、イネ科のチガヤとネズミムギの植栽への降雨時雨水流出と無灌水時生育状況を、セダム類を含む種間比較から検証した。その結果、100 mm/h 相当の 20 分間の降雨時の流出量は、ネズミムギでチガヤやセダム類に比べ少なく、降雨前土壌水分量とは負の、乾燥重量とは正の関係が認められた。他方で、バイオチャーの混合によるイネ科植物の無灌水時生育状況の改善効果は確認されなかった。

キーワード: 屋上緑化, 雨水流出抑制機能, バイオチャー

MUGITA, Junki, TSUCHIYA, Kazuaki, MATSUOKA, Tatsuya, YAMADA, Susumu, OKURO, Toshiya: **Effects of biochar usage and plant species selections on the storm water runoff mitigations by green roofs**

Abstract: This paper describes an experiment that investigates the influence of plant species choices and the impact of mixing biochar in growing mediums on the amount of water runoff from a simulated green roof. We also measured drought tolerance of different plant species with visual rating method. We found that water runoff mitigation capacities under 100 mm/h rain simulations were higher in *Lolium multiflorum* Lam compared to *Imperata cylindrica* (L.) Beauv. and sedum species probably due to differences in their biomass and transpiration rate. We also found that mixing biochar in growing mediums may not change drought tolerance of grass species.

Key words: green roof, storm water runoff mitigations, biochar

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨などの短時間大量豪雨によって内水氾濫が頻発し、都市機能の集積した地区等において毎年甚大な浸水被害が発生している¹³⁾。こうした被害の原因として、地球温暖化やヒートアイランド現象などに伴う降雨の変化でのみならず、都市が拡大し高密度化することによる不透透面の増加による影響も大きいとされる。降雨量が下水管の処理能力の限界を超えて側溝や下水管に流れ込んだ大量の水を川に排水することができずに起こる内水氾濫の対策としては、これまで下水管の拡張などが行われてきたが、それだけでは十分に被害を抑えることが難しい状況が生じている。

そうした中、近年、グリーンインフラの概念が注目されるなど、都市緑化等の手段で不透透面を浸透面に改変し、雨水を貯留あるいは地下浸透させることで流出量を抑制しようという検討がなされている。制度面でも、都市緑化法にもとづく緑化地域制度や東京都の緑化計画書制度などによって、都市域での大規模建築物に対する緑化の義務づけられるようになりつつある。この際、一般に地価の高い都市部では地上部

に十分な緑化空間を用意することが困難であることも多いことから、建築物の屋上部の薄層緑化が増加しており⁹⁾、こうした屋上緑化の雨水流出抑制機能を活用することは、内水氾濫対策として検討の余地がある。

屋上緑化のもつ雨水流出抑制機能は、貯排水層等の人工構造物の設計⁸⁾に加えて、植栽する植物種の選択によって高められる可能性がある^{3,4,15,18)}。しかし、既存の屋上緑化の多くは、建築物の耐荷重制限や灌水コストといった問題から、薄層土壌上で生育可能な乾燥耐性の強い植物を利用しており⁹⁾、雨水流出抑制機能の発揮に適した植物種が検討され利用されているとは言い難い。世界的に屋上緑化に用いられていることの多いセダム類は、CAM 型光合成を行うために乾燥耐性は高いものの、屋上緑化に利用された際の雨水流出抑制機能は大きくない指摘されている^{3,4,15,18)}。一方で、他の植物種では、セダム類に比べて雨水流出抑制機能が高まり、特にイネ科植物で機能が顕著に発揮されることが指摘されている^{3,15)}。しかし、イネ科などの乾燥に弱い植物は、日本国内での薄層土壌を用いた屋上緑化にはほとんど使われていない⁹⁾。

* 連絡先著者 (Corresponding author) : 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1 E-mail : aokuro@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

このような植物種の違いが雨水流出抑制機能に与える影響に着目した既往研究の多くは、比較的少量の雨量を想定していることが多い^{3,4,18)}。日本のゲリラ豪雨のような 100 mm/h 程度の短時間大量豪雨を想定した雨水流出抑制機能の抑制効果に植物種の違いが与える影響の検証は、石原ら(2008)⁵⁾や Nagase and Dunnett (2012)¹⁵⁾などを除いて世界的にもほとんど行われていない。さらに、雨水流出抑制機能を高めるだけでなく、無灌水時などの乾燥化での生育の担保も屋上緑化では一定程度求められるが、雨水流出抑制機能と乾燥化の生育状況を同時に測定した研究はほとんどない。そのため、短時間大量豪雨時の雨水流出の抑制に貢献し、かつ乾燥条件でも一定程度生育可能な植物種に関するさらなる検討が求められる。

そこで本研究は、こうした条件を両立させる植物種の検討にあたり、土壌の水分保持能力を向上させることで、乾燥に弱い植物にとっての水分条件を改善出来る可能性に着目する。具体的には、近年の研究において、屋上緑化土壌の水分保持能力を高める可能性が指摘されつつある^{1,2)}バイオチャーの利用に着目する。バイオチャーは、バイオマスを炭化させて作成されるものである。バイオチャーの利用によって、雨水流出抑制機能が高いとされているイネ科植物などの乾燥に弱い植物種の生育条件が改善されれば、薄層屋上緑化に導入できる植物種数が増やすことが出来る可能性がある。また、近年、国内の都市部において街路樹剪定枝等の未利用バイオマスが増加しており¹⁷⁾、屋上緑化土壌にバイオチャーを利用することは、未利用バイオマスの有効利用と有機性廃棄物の削減に資する可能性もある。さらに、少量の降雨時を想定して雨水流出量を測定した研究では、土壌の水分保持能力が高まることで、土壌が降雨を一時的にためることになり、直接的に雨水流出抑制機能が高まる可能性も指摘されており^{1,4)}、バイオチャーの利用には土壌の水分条件の改善だけではなく、直接的に雨水流出抑制機能を高める役割も期待出来る。

そこで、本研究では、バイオチャーを混合した土壌をイネ科植物とともに用いて、短時間大量豪雨相当の降雨実験および無灌水時の乾燥耐性に関する実験を行うことで、一般的な屋上緑化土壌とセダム類による屋上緑化と比較して、雨水流出抑制機能が高く、乾燥にも一定程度耐えうる植物種と土壌の組み合わせを探ることを目的とした。

2. 方法

2.1 生育環境

使用する植物は、セダム類からメキシコマンネングサ(*Sedum mexicanum* Britton)、タイトゴメ(*Sedum oryzifolium* Makino)の2種類、イネ科からチガヤ(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)とネズミムギ(*Lolium multiflorum* Lam.)の2種類の計4種類を選定した。セダム2種は、屋上緑化に頻繁に使用されるものの中で、CAM化特性に影響を与えうる葉の形状や多肉度¹²⁾が異なるものを選

択した。イネ科は、他の科の植物と比較して根の乾燥重量が大きく³⁾、雨水流出を少なく抑える可能性が指摘されている¹⁵⁾。メキシコマンネングサ、タイトゴメ、チガヤは苗を購入し、ネズミムギは種子で購入した。なお、イネ科2種のうちチガヤは国内の屋上緑化にいくつか利用例があるものの、ネズミムギは国内ではこれまでほとんど導入されていない。今回チガヤに加えネズミムギを選定した理由は以下の通りである。まず、海外の屋上緑化¹⁾をはじめ多様な場所で緑化資材として広く用いられていること、もうひとつのイネ科であるチガヤと形態が一定程度異なると想定されたことから、ドクムギ属(*Lolium* spp.)を対象とした。そしてそのなかでも、チガヤと同様、日本でよくみられ入手が容易なこと、成長が早く短時間集中豪雨が発生する夏季に植物体が大きくなること、植物体が高くなりすぎず風の強い屋上への利用可能性があることなどから、ネズミムギを選定した。

使用する土壌は、屋上緑化土壌のみのものと、屋上緑化土壌に重量比30%バイオチャーを加えた土壌(以下、混合土壌)の2種類を用意した。屋上緑化土壌にはRS-8(単位容積重量890 g/L, pH 6.4, 気孔率30%, 有効水分量400 L/m³, 湿潤時重量0.89 t/m³, 透水係数 1.2×10^{-4} m/sec)を用い、バイオチャーには、あかぎ園芸粒状木炭(単位容積重量333 g/L)を用いた。バイオチャーとして木炭を選定したのは、都市部での未利用バイオマスの利用を想定したためである。木炭の土壌に混入した際の水分保持機能向上効果は粒径が大きいと発揮されない可能性が指摘されているため⁹⁾、あらかじめ目地が1 mmのザルを通し、それよりも小さなサイズの木炭のみを使用した。バイオチャーの混合割合である30%は、バイオチャーを屋上緑化土壌に混入した際の水分保持量を調べた既往文献²⁾を参考に設定した。

以上より、植物4種類と土壌2種類の組み合わせからなる8パターンに対し、それぞれ4つの育苗トレーを用意し、計32個の育苗トレーを用いた。種子で用意したネズミムギは2017年4月14日に播種し、他の苗3種とともに、同5月15日から17日に全ての植物を育苗トレーに植え付けた。育苗トレーの大きさは外側505 mm × 360 mm × 107 mm、内側480 mm × 330 mm × 95 mmであった。なお、乾燥重量測定および無灌水実験の双方の反復の数を確保するために下記の降雨実験後に育苗トレーを半分に切断したが、その際の水や土壌の移動を防ぐためのシリコンで接着したアクリル板をあらかじめ差し込んだ。土壌流出を防ぐため、トレーの底には1 mmメッシュの布を敷き、その上に分割したトレーの両側に3.0 kgずつ土壌を充填し、植物を植えた。土壌厚は、育苗トレー内側の高さと同じ95 mmに統一し、充填後の締固めは行わず、土壌表面が平らになるように軽くならした。植栽密度は、既往文献¹⁴⁾を参考に1トレーあたり16個体とした。同5月29日にトレーあたり5.0gずつ施肥し、同6月26日まで毎日灌水して生育した。降雨実験および無灌水時の生育状況測定にも同トレーを使用した。実験は全て東京都内の

大学施設の温室にて行った。

2.2 降雨実験と乾燥重量の測定

降雨実験前の灌水条件を統一するために、2017年6月26日と27日に育苗トレーあたり6.0 Lを灌水して土壌中の水分を飽和状態にし、その後に4日間無灌水状態を維持した。同7月1日と2日に植栽トレーに102 mm/h(264 g/min)の降雨を20分間与え、その間のトレーの底から流出した量を1分ごとに計測した。実験開始前に育苗トレーごとに5から10箇所の土壌水分量を土壌水分計で記録し、その平均値をトレーの土壌水分量とした。降雨強度の100 mm/h程度という設定には、短時間大量豪雨を想定している100 mm/h安心プラン¹⁰⁾や既往研究¹⁵⁾での降雨量を参考とした。なお、降雨実験前の無灌水期間の4日間は、短時間大量豪雨が想定される東京都心の夏季の無降雨期間が8日から13日程度であること⁷⁾、イネ科を用いて100 mm/h相当の降雨実験を行った既往研究¹⁵⁾で7日おきに測定されていること、灌水後に圃場水分量に達するまでに1日から2日かかることとされていることに加え、大学施設の温室の利用上の制約をふまえて設定した。

降雨実験に使用した降雨機は、一定強度を保って灌水できるように自作したものを使用した(図-1)。降雨機は主にタンク、塩化ビニル管、重量測定部の3つの部位からなっている。最上部のタンク部分(509 mm×357 mm×300 mm)に水をため、ボールタップによって滴下部分にかかる水圧を一定にする構造になっている。その下の塩化ビニル管部分では、5.6cm間隔に直径1 mmの穴を40か所あけ、土壌表面に育苗トレー上端から85 cmの高さからほぼ垂直に水を滴下できるように調整した。タンクと塩化ビニル管をつなぐボールバルブを調整することで降雨強度を調整した。下の重量測定部では金属管で植栽トレーを固定し、その下に集水用の桶と重

図-1 降雨実験に使用した降雨機

Fig. 1 Water runoff measurement system

量計を配置し、育苗トレーの底から流出する水量を測定した。

降雨実験終了後には、アクリルに沿って2つに育苗トレーを分割したうちの片側32個について、乾燥機にて2週間乾燥させた後に、植物の地上部と地下部の乾燥重量を測定した。重量計は、株式会社シロ産業の防水デジタル電子天秤M2X-8KAを用いた。

2.3 無灌水時の生育状況の測定

降雨実験終了後、分割した育苗トレーのうち乾燥重量の測定に使用しなかった片側32個を用いて、無灌水時の生育状況を測定した。同7月3日に育苗トレーあたり3.0 Lずつ灌水し土壌水分を飽和状態とし、その後は無灌水状態として植物の生育状況と土壌水分量を1日おきに15日間測定した。

植物の生育状況を評価するにあたり、植物が枯れるまでの状況の変化を目視で5段階で評価する成長スコア¹⁵⁾を記録する方法をとった。成長スコアは、評価が順序尺度というおおまかなものになる一方で、非破壊的に継続して全ての植物が枯れるまでの状態を評価可能という利点がある。本実験における成長スコアは乾燥ストレスによる形態変化によって定義し、5:健全な状態、4:形態変化が始まる、3:一部枯死、2:半分

図-2 植物と土壌の違いによる10分と20分後の累積流出量

Fig. 2 Cumulative amount of water runoff from simulated green roofs under different plant species and soil types

図-3 植物と土壌の違いによる降雨後の流出開始までの時間

Fig. 3 Time to the beginning of water runoff from simulated green roofs under different plant species and soil types

図-4 降雨開始後 20 分間累積流出量と降雨開始時土壌水分量，地上部乾燥重量，地下部乾燥重量の関係性

Fig. 4 Relationships among cumulative water runoff amount, soil moisture and aboveground and belowground biomass

以上枯死，1:完全に枯死の 5 段階とした。セダム 2 種類は測定期間では実質的に成長スコアは変化せず，スコアのうち 5:健全な状態を維持したと観察されたため，以下の解析では，イネ科 2 種の成長スコアのみを用いた。

2.4 解析

降雨実験と乾燥重量測定の結果を用いて，植物 4 種と土壌 2 種からなる 8 パターンの間で，降雨開始 10 分後および 20 分後の累積流出量と流出が開始するまでの時間がいかに異なるかを雨水流出の指標とし，Tukey-kramer 法によって多重比較した。流出が開始するまでの時間は，重量計の誤差や局所的な土壌条件の影響を除くため，1 分間に 10 g 以上の流出があった時点とした。また，雨水流出に影響を与える降雨前の土壌水分量，地上部乾燥重量，地下部乾燥重量については，20 分後の累計流出量と最小二乗法による線形回帰により正もしくは負の関係性が認められるかを検証するとともに，植物間では Tukey-kramer 法によって，土壌間では ANOVA により数値を比較した。さらに，無灌水時の生育状況の測定結果から，土壌水分量が土壌 2 種の間で異なるかどうか，イネ科 2 種の成長スコアが種間および土壌 2 種の間で異なるかどうかを ANOVA で比較した。統計解析には R 3.4.1¹⁶⁾を使用した。

3. 結果

3.1 降雨実験

降雨実験と乾燥重量測定の結果を用いて，植物 4 種と土壌 2 種からなる 8 パターンの間で，降雨開始 10 分後および 20 分後の累積流出量を比較した結果（図-2），いずれの時点でもネズミムギが他 3 種に比べて有意に流出量が少なかった（ $p<0.05$ ）。なお以下の図ではエラーバーは標準誤差を示す。土壌 2 種の比較ではバイオチャー混合の影響は認められなかった。植物種ごとの平均流出量をもとに換算すると，20 分間の累積降雨量のうちネズミムギは 74 %，チガヤは 38 %，タ

イトゴメは 44 %，メキシコマンネングサは 41 %程度の雨水を保持した。流出が開始するまでの時間でも，累積流出量と同様の傾向がみられ，ネズミムギでは 10 分程度だったのに対して，他 3 種は 6 分程度と異なっていた（図-3）。なお降雨実験時には，ネズミムギとメキシコマンネングサではほぼ 100 %が植被で覆われており，チガヤとタイトゴメではトレーによっておよそ 50 %から 80 %程度が植被で覆われていた。植被の厚さは，ネズミムギとチガヤで，メキシコマンネングサとタイトゴメよりも大きくなる傾向がみられた。

降雨前の土壌水分量と累積流出量との間には，正の関係性がみられた（図-4， $R^2=0.72$ ， $p<0.001$ ）。土壌水分量は，植物種別ではネズミムギが他 3 種よりも顕著に少なく，土壌別にみると，全種において屋上緑化土壌が混合土壌よりもわずかに高かった。降雨実験後の地上部および地下部乾燥重量は，累積流出量と負の関係性がみられた（図-4， $R^2=0.37$ および 0.52 ， $p<0.001$ ）。地上部乾燥重量は，植物種別ではネズミムギとメキシコマンネングサが他 2 種より大きく，土壌別ではタイトゴメのみ屋上緑化土壌で混合土壌よりも大きくなった。地下部乾燥重量は，植物種別ではネズミムギが最も大きく，次にチガヤ，さらに小さいものがセダムであった。ネズミムギとチガヤのイネ科 2 種では，混合土壌において屋上緑化土壌よりも地下部乾燥重量が小さくなった。

3.2 無灌水時の生育状況

イネ科植物 2 種の成長スコアを比較したところ（図-5），灌水直後と枯死した状態を除いては，常にチガヤがネズミムギよりも成長スコアが高い傾向がみられた（ $p<0.05$ ）。ネズミムギは灌水後 11 日目で全ての個体が 1:完全に枯死になったのに対し，チガヤは 11 日目の段階では 1:完全に枯死の状態の個体はなく，15 日後でも一部は 1:完全に枯死の状態になっていない個体があった。いずれの種でも，成長スコアの土壌 2 種による差異はみられなかった。無灌水時の土壌水分量は植物 4 種類いずれでも混合土壌が屋上緑化土壌より高い傾向

図-5 無灌水状態でのネズミムギとチガヤの成長スコアの変化

Fig. 5 Changes in visual rating scores for two grass species under drought conditions

図-6 無灌水状態での土壌水分量の変化

Fig. 6 Changes in soil moisture under drought conditions

がみられた (図-6)。

4. 考察

4.1 植物種による雨水流出抑制機能と無灌水時生育の違い

植物種別にみると、ネズミムギがセダム類 2 種よりも流出を抑制することができたという結果であった (図-2、図-3)。これは、同程度の降雨条件での流出抑制機能がイネ科植物に

おいてセダム類よりも高いことを示した既往研究¹⁵⁾と同じ傾向であった。一方で、イネ科の中でもネズミムギに比べてチガヤを植栽した場合の流出量が大きかった (図-2、図-3) ことは、既往研究では明確に議論されていない傾向であった。ここで、イネ科 2 種の地下部乾燥重量ではネズミムギがチガヤに比べて大きかった (図-4)。また、根の形態についても、ネズミムギが土壌全体に密に広がるのに対し、チガヤは地下茎が這いそこから細根が少量伸びるという違いがあった。既往研究¹⁵⁾でも地下部乾燥重量が大きな植物で流出量が少なくなることが示されており、本研究の結果と合わせて考察すると、短時間大量降雨の雨水流出抑制には、密集した根を持つイネ科植物を用いることが有用である可能性が示唆された。すなわち、地下部乾燥重量が多いことが蒸散量の増加をもたらして降雨前の土壌水分量を低下させ (図-4)、流出量の低下に寄与しているという関係が示唆された。他方で、別の既往研究¹¹⁾では、本研究とは灌水条件が異なるものの、密集した根を持つ植物種の水分保持量が相対的に少なくなるという、本研究とは相反する傾向が示されていた。既往研究¹⁸⁾は 2 mm/h や 10 mm/h など異なる降雨強度では雨水流出抑制機能の植物種間での差異が異なることを指摘しているが、こうした差異には地上部では雨滴の量と葉の形態による雨滴の弾かれやすさの違いなどが、地下部では土壌の飽和度合いや根の形態による透水係数および間隙の量や分布の違いなどが関係すると考えられ、今後、さまざまな植物と降雨強度の関係の検討がさらに進められていく必要がある。

無灌水時の生育状況の植物種による違いについてみると、チガヤがネズミムギよりも常に成長スコアが高く、土壌水分量も同様にチガヤがネズミムギよりも高く推移していたことから (図-5、図-6)、2 種間の蒸散量の違いが成長スコアに影響していると考えられた。雨水流出量もチガヤがネズミムギよりも多かったことや、セダムでの雨水流出量が相対的に多かったことから (図-2、図-3)、雨水流出抑制機能と乾燥時の生育との間にトレードオフ関係があると考えられた。

4.2 バイオチャーによる土壌改善効果の検証

全植物種において、バイオチャーを混合することによる雨水流出量の変化は観測できなかった。既往研究^{1,2)}で示唆された混合土壌での水分保持量の増加は、本研究の降雨実験前の土壌水分量の測定でもわずかに示されており、また混合土壌で地下部乾燥重量が小さくなっていたことから (図-4)、これら土壌水分量増加や地下部乾燥重量低下の流出量増加に与える影響を打ち消すほどには、バイオチャーの降雨時雨水流出量削減効果は高くないことが示唆された。なお、土壌水分量が飽和状態に近い時にバイオチャーの利用が雨水流出抑制機能を高める可能性を示した研究¹⁾もあり、バイオチャーの混合比率の変更も含めて、さまざまな土壌条件での降雨実験が今後検討される必要がある。

成長スコアの測定では、イネ科 2 種において、バイオチャーの利用による成長スコアの改善効果は確認されなかった

(図-5)。本研究でもコムギ(*Triticum aestivum* L.)を用いた既往研究²⁾と同様に、バイオチャーの利用による土壌水分量が増加する傾向は認められたが、この増加分はイネ科2種の蒸散量に比べると相対的に小さいために成長スコアに顕著に影響を与えるほどの効果をもたらさなかったと考えられた。ただし、イネ科よりもさらに蒸散量が少ない他種において、バイオチャーの利用による水分保持効果が乾燥時の成長スコアを維持する可能性については、さらなる検討が必要である。

5. 結論

本研究によって、短時間大量豪雨時の屋上緑化の雨水流出抑制機能はその効果が高いとされていたイネ科の中でも地下部の形態によって異なりうること、バイオチャーの混合は土壌の水分保持量の改善に貢献はするものの、必ずしも雨水流出抑制機能や無灌水時の生育状況の改善に寄与しないこと、そして、乾燥時の生育と雨水流出抑制機能にはトレードオフの関係の可能性があることが示された。また、20分間の100 mm/hの降雨に対して、4日間無灌水状態では、従来のセダム類を用いた屋上緑化では40%程度の流出を削減するのに対して、ネズミムギなどの蒸散量の多い植物では70%程度まで削減効果を高められる可能性が示唆され、これまで十分でなかった屋上緑化を用いた都市部での短時間大量豪雨対策の検討における基礎的知見を明らかにすることが出来た。

なお、本研究では、植物種の違いによる雨水流出抑制機能と無灌水時の生育状況の違いに重点をおいたために、土壌の物理性に関する検証は、降雨実験前後の土壌水分量の測定に留まった。今後は、屋上緑化土壌の資材や、バイオチャーの原材料、焼却温度、混合率を変えた場合に、有効水分量、粒径分布、土壌水分特性曲線、飽和透水係数、間隙の量や分布、有効水・重力水などの土壌の物理性と雨水流出量がどのように変化するのか、さらに、さまざまな植物種の利用時や、降雨実験前の無灌水期間や降雨強度を変えたり、土壌水分量を統一したりした場合で雨水流出量がどのように変化するのか明らかにされることで、短時間大量豪雨対策としてより汎用性の高い屋上緑化技術の発展につながるであろう。

謝辞：東京大学大学院農学生命科学研究科付属生態調和農学機構の皆様には、実験にあたりさまざまにご助力頂いた。

引用文献

- 1) Beck, D.A., Johnson, G.R. and Spolek, G.A. (2011) Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution*, 159(8-9): 2111-2118.
- 2) Cao, C.T.N., Farrell, C., Kristiansen, P.E. and Rayner, J.P. (2014) Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*, 71: 368-374.
- 3) Dunnett, N., Nagase, A., Booth, R. and Grime, P. (2008) Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems*, 11(4): 385-398.
- 4) Heim, A., Appleby-jones, S. and Lundholm, J. (2017) Green roof thermal and stormwater performance comparisons between native and industry-standard plant species. *Cities and the Environment*, 9(1): 1-15.
- 5) 石原沙織・松尾隆士・宮内博之・田中享二 (2008) 防水押え層として芝生を用いて緑化された屋根の雨水排水遅延効果. 日本建築学会構造系論文集, 73(631): 1475-1481.
- 6) 岩田幸良・宮本輝仁・亀山幸司 (2014) バイオ炭混入による砂質土壌の物理性の変化-保水性・透水性・肥料成分の影響について-. 農村工学研究所技報, 215: 113-121.
- 7) 岩屋隆夫 (2007) 東京都心における連続干天とその特徴. 東京都土木技術センター平成19年度年報, 133-140.
- 8) 菊池佐智子・興水肇 (2011) 局所的集中豪雨を想定した貯排水層の異なる屋上緑化システムの流出特性. ランドスケープ研究, 74(5): 739-742.
- 9) 国土交通省 (2015) 平成26年 全国屋上・壁面緑化施工実績調査の結果報告, 6pp.
- 10) 国土交通省(更新: 2018年1月31日), “100 mm/h 安心プラン”, <http://www.mlit.go.jp/river/kasen/main/100mm/>, (参照: 2018年2月8日)
- 11) Macivor, J.S., Ranalli, M.A. and Lundholm, J.T. (2011) Performance of dryland and wetland plant species on extensive green roofs. *Annals of Botany* 107: 671-679.
- 12) 松岡達也・土屋一彬・大黒俊哉 (2017) 屋上緑化に用いられるセダム類の葉の形質の違いが蒸発散量に及ぼす影響. 日本緑化工学会誌, 43(1): 115-120.
- 13) 文部科学省・気象庁・環境省 (2013) 日本の気候変動とその影響(2012年度版), 38pp.
- 14) Nagase, A. and Dunnett, N. (2010) Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 97(4): 318-327.
- 15) Nagase, A. and Dunnett, N. (2012) Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 104: 356-363.
- 16) R Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- 17) 寺田徹・横張真・田中伸彦 (2009) 大都市郊外部における緑地管理及び木質バイオマス利用によるCO2固定量/排出削減量の推定. ランドスケープ研究, 72(5): 723-726.
- 18) Whittinghill, L.J., Rowe, D.B., Andresen, J.A. and Cregg, B.M. (2015) Comparison of stormwater runoff from sedum, native prairie, and vegetable producing green roofs. *Urban Ecosystems*, 18: 13-29.

(2018年6月5日受理)