屋上緑化における保水効果と植物の生育状況にバイオ炭混合とセダム混植が与える影響

松岡達也^{*1,2)}・土屋一彬¹⁾・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) 清水建設技術研究所(現所属) Institute of Technology, Shimizu Corporation

摘要: 近年注目されている粗放型屋上緑化は、薄層土壌を用いる特性から導入可能な植物種に制限があることや、集中豪雨時の保水量が僅少である点が問題視されてきた。バイオ炭の土壌への混合とセダムの混植は土壌内の水分量を高く保つことが報告されているが、現状では各方法の有効性の検証に留まっている。そこで本研究では、両方法を用いた場合の相乗効果を期待し、その組み合わせが植物体の生育状況および保水量に及ぼす影響の検証を目指した。対象植物としてオジギソウとローズマリーを、セダムとしてシロバナマンネングサを用い、温室内において乾燥条件下における栽培実験を16日間行った。また、バイオ炭の混合率を0%、15%、30%、60%とし、セダム混植の有無で分けて栽培した。その結果、両方法の組み合わせにより保水量および土壌水分量に統計的に有意な相乗効果はみられなかった。一方で、両方法を施した場合でも対象植物の顕著な生育悪化はみられず、バイオ炭の混合率の増加に応じて保水量が向上した。以上より、両方法により顕著な相乗効果は期待されないものの、バイオ炭混合により生育悪化を防ぎつつ降雨時の保水量向上が期待されることが結論づけられた。

キーワード: 粗放型屋上緑化, バイオ炭, セダム, 混植

MATSUOKA, Tatsuya, TSUCHIYA, Kazuaki and OKURO, Toshiya: **The effects of biochar amendment and companion planting with *Sedum* on water holding capacity and the health conditions of the plants for green roofs**

Abstract: Extensive green roofs have benefits of weight and cost reduction for the buildings, though their shallower substrates resulted in fewer options of plant species to introduce and lower water holding capacity. Although previous studies reported that companion planting with *Sedums* and biochar amendment can improve soil water content, their synergistic effects were not fully clarified. Therefore, this study aimed to reveal the effects of the combination of companion planting with *Sedums* and biochar amendment on the health conditions of the plants. We cultivated two plant species for green roofs (*Mimosa pudica* and *Rosmarinus officinalis*) with/without *Sedum album* in a greenhouse under drought condition for 16 days. Additionally, we added biochar at rates of 0, 15, 30 and 60% by volume to the substrates. The results indicated that there were no significant synergistic effects by the combination between soil water content and water holding capacity. However, the health conditions of plants were healthy when biochar was added and/or *Sedums* were planted together. Additionally, water holding capacity was improved with the increase of biochar application rate. In conclusion, we revealed that although synergistic effects between companion planting with *Sedums* and biochar amendment would not be induced on green roofs, the effects of biochar amendment can improve water holding capacity without wilting of the plants.

Key word: Extensive green roof, Biochar, *Sedum*, Companion planting

1. はじめに

近年、都市域における浸水被害を防止するために、屋上緑化の浸透面を用いた集中豪雨時の雨水流出抑制効果が期待されている¹⁰⁾。他方で、管理の簡便さや建築物の荷重制限の面から、屋上緑化では、最低限の灌水頻度の下で薄層土壌を用いて緑化を施す粗放型屋上緑化が用いられることが多い¹⁴⁾が、土壌厚の限られた条件では保水量を確保することが難しい³⁾。さらに、屋上緑化には雨水流出抑制以外にも、都市に

おける蜜源の確保などの様々な役割が期待されているが、少ない灌水頻度で乾燥しやすい条件のもとでは、導入可能な植物種の選択肢が僅少であることが指摘されている⁹⁾。そのため、降雨時に保水しつつ、降雨や灌水がない期間に土壌中に水分を維持することが重要になる。すなわち、薄層土壌を用いた乾燥条件下において、植物体の生育を良好に保ちつつ、保水量を向上させる栽培技術の開発が求められている⁷⁾。

その方法の一つとして、バイオ炭の土壌への混合が挙げられる。バイオ炭は木材や竹、もみ殻などを熱融解させて生成

される軽量な有機炭素系物質で、多孔質な構造を持つことから土壌の保水量を向上させる効果を持つ³⁾。既往研究では、バイオ炭の混合により植物種の生存率を向上させ、雨水流出効果を向上させる可能性があることを報告している¹³⁾。なお、バイオ炭の混合率の増加によって pH が上昇すること⁶⁾、リンや窒素などの土壌栄養成分、土壌物理性、土壌微生物との相互作用の程度などが変化することが報告されているが¹⁹⁾、本研究ではバイオ炭が保水量の変化が植物体の生育に及ぼす影響に焦点を絞るものとする。

保水量を向上させるもう一つの方法として、セダムの混植が挙げられる。既往研究から、セダムの混植により屋上部で植物の生育が良好に保たれる場合があることが報告されている²⁾。また、この効果は混植による土壌水分量の増加に起因するとされ、セダムが CAM (Crassulacean acid metabolism) 型光合成を行うことで蒸散量が抑制されると共に、カーペット状に成長するセダム自体の土壌被覆により蒸発量が抑制されることで誘導されると推察されている⁹⁾。セダムはコロニーを形成する特性を持ち、広大な緑被状態の安定的な確保が困難なため⁴⁾、その間に蜜源植物を導入する余地があると考えられる。

上記の通り、バイオ炭混合とセダム混植は異なるメカニズムによって土壌水分量および保水量を増加させることから、両方法を組み合わせることにより、その効果が向上することが予想される。その相乗効果について検証した研究事例は存在しないが、土壌水分量と保水量の改善度を向上させることで、雨水流出抑制効果と植物体の生育の良好さを効率的に両立できる可能性がある。よって本研究では、自然降雨に依存する薄層土壌を用いた粗放型の屋上緑化を想定し、セダム混植とバイオ炭混合の組み合わせが土壌の保水効果および植物体の生育に及ぼす影響を検証することを目的とした。そのために、温室内で対象植物（オジギソウ、ローズマリー）の栽培実験を行い、保水量、植物体の生育状態、土壌水分量、植物体地上部の乾燥重量を測定した。その際、セダム（シロバナマンネングサ）混植の有無で分けた上で、バイオ炭を 4 種類（0%、15%、30%、60%）の混合率で加えて栽培を行った。Cao ら³⁾の研究事例では、バイオ炭を 40% 以上混合した場合に保水量の改善効果および植物体の生存率に及ぼす正の影響が頭打ちになることが報告されている。そこで、バイオ炭の混合率が 30% 以下の時は、両方法を組み合わせることで土壌水分量が増加し、植物体の生育が良好に保たれると

いう仮説を立てた。

また、湿潤した土壌環境で育苗すると、植物体の成長に伴い蒸発散に必要な水分量が増加し、夏季において乾燥ストレスに対応できず生育が悪化する場合があることが報告されている¹¹⁾。そのため、バイオ炭混合による保水量の改善効果が過剰な場合、植物体の生育に悪影響が及ぼされる可能性がある。そのため、バイオ炭混合による保水効果の向上と植物体の生育の良好さを両立する栽培条件の解明し、粗放型屋上緑化へのバイオ炭の導入に向けた基礎的知見を確立することを、本研究のもう一つの目的とした。

2. 材料と方法

2.1 植物体の栽培条件

植物体の栽培と実験は、全て東京大学生態調和農学機構（東京都西東京市）の温室で行った。実験は 2018 年の 8 月 14 日から 9 月 2 日まで行い、気温、湿度、生育光量は自然条件とした。実験期間中の日平均気温は 21.7℃ から 31.7℃、日平均湿度は 44% から 95%、日照時間は 0 時間から 12.2 時間であった。植物体は、縦横 30 cm×40 cm のプラスチックプランター（緑のやさいプランター、リッチェル株式会社、富山、東京）を用いて栽培し、土壌厚は 10 cm とした。排水層として、プランター下部に網目 2 mm のナイロンシートを敷いた上で、直径 5 mm の軽石を敷き詰めた。バイオ炭を用いて栽培実験を行った Cao ら³⁾の研究事例を参考とし、植物体の栽培には粒子径 5 mm 未満の赤玉土（赤玉土、あかぎ園芸、茨城、日本）と、そのうち体積比 20% を有機物（ココナッツ繊維、Berry's Life、香川、日本）に置き換えた混合土壌を用いた。バイオ炭は麦田ら¹⁰⁾の既往研究を参考とし、常緑樹である桤等を由来とし、500℃ で熱融解された木炭（みのり炭素、奈良炭化株式会社、奈良、日本）を使用した。バイオ炭はふるいで 2 mm 未満の粒子とし、体積比 0%、15%、30%、60% の割合で混合した³⁾。バイオ炭の各混合率による土壌配合の体積比および土壌要素は表-1 に記した通りである。

対象植物として、オジギソウ (*Mimosa pudica*) およびローズマリー (*Rosmarinus officinalis* 'Prostratus') を用いた。これらの種は日本国内の訪花昆虫の有力な蜜源とされ¹⁵⁾、屋上緑化に導入することで、花粉媒介や蜜供給などを介した生態系サービスの向上が期待される¹⁸⁾。また、混植種としてセダム緑化への導入を検討する際、セダムとの空間を巡る種間

表-1 植栽区毎の土壌配合条件と土壌要素

Table 1 Soil mixture conditions and soil factors of the substrates

バイオ炭混合率	配合率（体積比）			pH	EC (mS/cm)
	赤玉土	バイオ炭	ココナッツ繊維		
0%	80%	0%	20%	5.14	0.32
15%	68%	15%	17%	5.67	0.37
30%	56%	30%	14%	6.21	0.41
60%	32%	60%	8%	7.28	0.49

競争を避けつつ裸地を減らす必要がある。そのため、上記の蜜源植物のうち生育初期に直立状に成長し、後に匍匐性となる生育特性を持つ植物種として、日本の栽培環境でも生育可能なオジギソウおよび匍匐性のローズマリーを選定した。オジギソウは200穴タイプの育苗トレーを用いて種子から、ローズマリーは直径10.5 cmの育苗ポットを用いて苗から栽培し、育苗開始から50日後に実験用プランターに移植した。また、対象植物と混植するセダムとして、既往研究で混植の有効性が示されているシロバナマンネングサ (*Sedum album*) を用いた⁹⁾。シロバナマンネングサは挿木苗から栽培し、直径6 cmの育苗ポットを用いて40日間栽培した後に実験用プランターに移植した。植栽区は、プランターの中心部に1個体の対象植物を植える単植区と、その周囲にセダムを植える混植区の2パターンとした。単植区においては、小型のプランターを用いて栽培実験を行う特性上、対象植物同士の種内競争の影響を排除するために植栽数は1個体と設定した。混植区ではシロバナマンネングサを8個体植え、対象植物との間に7 cm以上の間隔を設けた⁷⁾。シロバナマンネングサの草丈3 cm未満で、カーペット状に成長した個体を用いた。また、各植栽区とも繰り返しは6回とした。

育苗期間中は、自動灌水装置を用いて毎日十分な灌水を行った。植物体の急激な乾燥ストレス受容を避けるため、2018年8月1日から8月14日の間は4日毎に灌水を行い、乾燥実験は同年8月14日から同年8月30日の間に行った。実験期間は、本研究と同様に排水性の高い土とバイオ炭を用いた既往研究³⁾を参考とし、バイオ炭の流出や劣化の影響を排除する¹⁰⁾目的も合わせて決定した。なお、乾燥実験前の対象植物では葉の萎れは全くみられず、全個体の生育が良好に保たれていた。実験期間中の灌水間隔は8日毎に行い、これは2017年度の7月から9月の間に平均で7.6日毎に10 mm以上の降雨がみられたことや、Caoら³⁾の研究事例において最終萎れ点となる期間を参考とし、設定した。また、灌水量は10 mm降雨相当となる1200 mlとし、プラスチック製ポットを用いて30秒掛けて土壌表面に水を掛ける手法を採用した⁷⁾。

2.2 測定手法

保水量はLundholmら⁷⁾の手法を参考とし、実験開始日である2018年8月14日に灌水前の重量と灌水30分後の重量差から評価した。

対象植物の生育状態および土壌水分量は、実験終了の前日である2018年8月29日に測定した。植物体の生育状態として、目視による葉の萎れ具合から評価する生育スコアを用いた⁹⁾。生育スコアは以下の5段階により評価した(5:全ての葉が健康な状態, 4:30%未満の葉の色素が欠落した状態, 3:30%から70%の葉の色素が欠落した状態, 2:70%以上の葉の色素が欠落した状態, 1:全ての葉が枯死した状態)。土壌水分量はHH2土壌水分計(DeltaT Devices株式会社, ケンブリッジ, イギリス)を用い、針センサーにより表層部から5 cm部分の水分量を植栽区あたり4点測定し、その平均値をデータとして用いた2018年9月3日に対象植物の地上部を刈取り、70℃で7日間乾燥させた後にその重量を測定した^{9, 12)}。

2.3 統計処理

全ての実験結果はR studio(3.2.3)を用いて統計処理を行った。保水量と土壌水分量については、Two-way ANOVAによりバイオ炭の混合率の違いおよびセダム混植の有無による交互作用の有無を検定した後に、*t* 検定またはTukey-Kramer法により対象値における有意差の解析を行った。

また、生育スコアおよび乾燥重量に関してはノンパラメトリックな解析を行う必要があるため二元配置の分散分析を行わず⁵⁾、バイオ炭の混合率およびセダム混植の有無が異なる全植栽区間においてSteel-Dwass法により対象値における有意差の解析を行った。

3. 結果と考察

保水量についてTwo-way ANOVAを行った結果、対象植物の両種においてバイオ炭混合率の違いとセダム混植の有無による有意な交互作用はみられなかった(オジギソウ $p=0.97$, ローズマリー $p=0.87$)。そのため、バイオ炭混合率とセダム混植の有無のそれぞれに焦点を当て、各々*t* 検定とTukey-Kramer法により解析を行った結果、バイオ炭混合率の違いにより保水量に有意差が確認された(表-2)。両種とも、バイオ炭を15%以上加えることで非混合時よりも顕著な保水量の増加がみられること、バイオ炭を30%以上加えることで更なる保水量の改善効果がみられることが示された。なお、バイオ炭を60%混合した場合、30%混合時と保水量に有意差は見られなかった(表-2)。Caoら³⁾の既往研究の結果も本研究と同様の傾向を示しており、体積比30%ま

表-2 バイオ炭混合とセダム混植が保水量に及ぼす影響

Table 2 Effects of biochar application and companion planting with Sedum on water holding capacity

バイオ炭混合率	オジギソウ		ローズマリー	
	単植区	混植区	単植区	混植区
0%	0.74 (0.04) a*	0.77 (0.06) a	0.78 (0.06) a	0.77 (0.04) a
15%	1.05 (0.03) b	1.06 (0.05) b	1.07 (0.08) b	1.09 (0.07) b
30%	1.17 (0.04) c	1.19 (0.01) c	1.18 (0.04) c	1.16 (0.03) c
60%	1.19 (0.01) c	1.20 (0.01) c	1.19 (0.01) c	1.19 (0.01) c

※括弧 () 内は標準誤差を表す。異なるアルファベットは、条件毎にバイオ炭混合率の違いにより5%水準で有意差がみられたことを表す。

ではバイオ炭混合率に依存して保水量が増加するものの、それ以上の混合率では保水量の改善効果の増加は鈍化するものと推察された。また、セダム混植により保水量に有意差はみられなかった。これは、同様の手法により保水量を評価した Lundholm ら⁷⁾の結果を支持するものであり、30 秒間で灌水を行う特性上、植物体の有無が保水量に及ぼす影響が僅少であったためと推察された。

土壌水分量については、Two-way ANOVA を行った結果、対象植物の両種においてバイオ炭混合率の違いとセダム混植の有無による交互作用がみられた（オジギソウ $p < 0.05$ 、ローズマリー $p < 0.01$ ）。そのため、全植栽条件を対象に当てて Tukey-Kramer 法により解析を行った結果、両種共にバイオ炭を加えない条件でのみセダム混植時の方が単植時よりも土壌水分量が有意に高く、バイオ炭混合時はセダム混植の有無で顕著な差はみられなかった（図-1）。セダム混植による土壌水分量の増加は、セダム特有の CAM 型光合成による蒸発散抑制に起因するとされるが⁹⁾、CAM 型光合成は乾燥条件下で誘導されることが報告されている¹⁾。そのため、バイオ炭混合により保水量が増加した条件においては土壌が乾燥した状態にならず、混植したセダムが C_3 型光合成を行うことが予想される。その場合、セダム混植による蒸散量の抑制がみられず、結果として土壌水分量が増加しなかったと推察された⁸⁾。得られた結果から、セダム混植の効果は土壌水分環境によって異なり、特に土壌が乾燥した条件でのみ顕著に誘導されることが示唆された。加えて、バイオ炭混合時においても、本研究よりも乾燥条件に置かれる期間が長い場合は、セダム混植により土壌水分量が増加する可能性が考えられた。また、バイオ炭の混合率に依存する効果に注目すると、混合率の上昇に応じて土壌水分量の増加がみられた（図-1）。これは、バイオ炭を混合することで保水量が増加したためと推察された³⁾。さらに、保水量に有意差がみられなかった（表-2）にも関わらずバイオ炭 60% 混合時の方が 30% 混合時よりも土壌水分量が有意に高かったのは、育苗期間の生育初期における保水能力の差に起因するものと推測された。

一方で、生育スコアおよび乾燥重量については、Steel-Dwass 法で解析した結果、バイオ炭混合率の違いとセダム混植の有無によって顕著な差はみられなかった（図-2、図-3）。セダム混植により対象植物の生育および成長の程度に顕著な差がみられなかった要因として、実験期間の長さが考えられる。本研究では 16 日間の栽培試験を行ったが、Vasla¹⁶⁾はセダム混植の効果が 1 ヶ月以上の実験期間を経た後にみられる場合があることを報告している。そのため、1 ヶ月を越える長期間セダムを混植することで、植物体の葉が萎れる時期を遅延させ、生育が良好に保たれることが予想される。また、バイオ炭非混合時のみセダム混植による土壌水分量の増加がみられた結果（図-1）からも、セダム混植は長期間かつ強い乾燥条件下において植物体の生育を良好に保ち、土壌水分量を高く保つ補助的な効果を持つことが期待される。

上記の通り、バイオ炭を混合した際、その混合率に依らず対象植物の顕著な生育悪化はみられなかった（図-2、図-3）。これは、バイオ炭混合による保水量の増加が顕著であり、植物体が成長しても土壌水分量が永久しおれ点を下回らなかったためと推察された³⁾。よって本研究から、バイオ炭を高い割合で混合した場合においても、顕著な生育悪化を防ぎつつ、高い雨水流出抑制効果を期待できる可能性が示唆された。一方で、バイオ炭を混合すると pH が上昇すること¹³⁾から、アルカリ性土壌を好まない植物種を緑化に用いる際は、バイオ炭の混合率を上げ過ぎないように注意が必要である。反対に、バイオ炭を 4 ヶ月以上混合するとバイオ炭の酸性化に伴い土壌の pH が低下することが報告されている¹⁹⁾。そのため、バイオ炭を土壌に長期間混合する場合は pH 調整を頻繁に行う必要があると考えられる。

また、バイオ炭混合時は保水量が大幅に増加したこと（表-2）、本研究で採用した混合率においてはバイオ炭混合により顕著な雨水流出防止効果が期待されることが示唆された。その定量的な効果の例として、土壌にバイオ炭を体積比 30% 混合すると、保水量はオジギソウで 1.61 倍、ローズマ

図-1 バイオ炭混合とセダム混植が土壌水分量に及ぼす影響

Fig. 1 Effects of biochar application companion planting with Sedum on soil water content

■ 単植区 ■ 混植区 ※エラーバーは標準誤差を表し、異なるアルファベット間では5%水準で有意差がみられた。

図-2 バイオ炭混合とセダム混植が蜜源植物の生育に及ぼす影響

Fig. 2 Effects of biochar application and companion planting with Sedum on the health conditions of nectar-producing plants

■ 単植区 ■ 混植区 ※エラーバーは標準誤差を表す。

図-3 バイオ炭混合とセダム混植が植物体の地上部重量に及ぼす影響

Fig. 3 Effects of biochar application and companion planting with Sedum on dry shoot weight of nectar-producing plants

リーで 1.51 倍、非混合時と比較して向上することが示された。他の園芸資材を用いて土壌の保水効果に及ぼす効果を検証した事例に注目すると、Young ら¹⁷⁾は市販の水溶性合成樹脂を体積比 1% の割合で土壌に混合すると、通常時より保水量が 1.56 倍に向上することを報告している。よって本研究の結果から、有機素材であるバイオ炭を用いても、人工的な保水材と同等の保水効果の向上が期待できると推察された。

4. 結 論

本研究では、バイオ炭混合とセダム混植を組み合わせ、対象植物の生育状況および保水効果に及ぼす影響を評価した。その結果、バイオ炭混合とセダム混植の両方法の導入による顕著な相乗効果はみられないことが示唆された。一方で、バイオ炭を体積比 15% 以上混合した場合は保水量が大幅に増加し、かつ対象植物の過度な生育悪化も見られなかった。これらの結果から、バイオ炭混合は生育悪化を防ぎつつ雨水流出抑制を可能にする有効な方法であることが示された。今後

は、実験期間に依存するセダム混植の効果を検証すると共に、土壌栄養や土壌物理性など土壌水分環境以外の要因が植物体の生育や保水効果に及ぼす影響を明らかにすることで、バイオ炭混合の有効性を解明する必要があると考える。

謝辞：本研究は公益財団法人都市緑化機構の調査研究助成を頂いて遂行されたものである。また、実験にあたり東大生態調和農学機構の皆様には多大なご助力を頂いた。この場を借りて深い感謝の意を表する。

引用文献

- 1) Black, C.C. and Osmond, C.B. (2003) Crassulacean acid metabolism photosynthesis: 'working the night shift'. *Photosynthesis Research* 76: 329-341.
- 2) Butler, C. and Orians, C.M. (2011) *Sedum* cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof. *Ecological Engineering* 37: 1796-1803.

- 3) 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.
- 4) 飯島健太郎 (2003) 芝生による屋根緑化 (脱セダム屋根) と熱環境の改善. *芝草研究*, 32 (supplement 1): 1-8.
- 5) 池田郁夫 (2013) 統計検定を理解せずに使っている人のためにⅢ. *化学と生物*, 51 (7): 483-495.
- 6) 亀山幸司・岩田幸良・佐々木康一・成岡道男・宮本輝仁 (2016) 樹皮由来バイオ炭の砂丘地圃場への施用による土壌の保水性・保肥性改善効果. *農業農村工学会論文集*, 301 (84-1): 65-74.
- 7) Lundholm, J., MacIvor, J.S., MacDougall, Z. and Ranalli, M. (2010) Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. *PLoS ONE* 5(3): e9677.
- 8) 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. *43 (1)*: 115-120.
- 9) Matsuoka, T., Tsuchiya, K., Yamada, S., Lundholm, J. and Okuro, T. (2019) Value of *Sedum* species as companion plants for nectar-producing plants depends on leaf characteristics of the *Sedum*. *Urban Forestry and Urban Greening* 39: 35-44.
- 10) 麥田隼希・土屋一彬・松岡達也・山田 晋・大黒俊哉 (2018) 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. *日本緑化工学会誌*, 44 (1): 69-74.
- 11) Nagase, A. and Dunnett, N. (2011) The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning* 103(2): 230-236.
- 12) 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.
- 13) 中根周歩・皮玲 (2009) 屋上緑化土壌への竹炭埋設が植栽植生の生育に及ぼす効果. *環境情報科学論文集*, 23: 441-446.
- 14) Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K.K.Y. and Rowe, B. (2007) Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience* 57(10): 823-833.
- 15) 佐々木正己 (2010) 蜂からみた花の世界 四季の蜜源植物とミツバチからの贈り物. *海游舎*, 416 pp.
- 16) Vasl, A., Shalom, H., Kadas, G.J. and Blaustein, L. (2017) *Sedum*-Annual plant interactions on green roofs: Facilitation, competition and exclusion. *Ecological Engineering* 108: 318-329.
- 17) Young, T.M., Cameron, D.D. and Phoenix, G.K. (2017) Increasing green roof plant drought tolerance through substrate modification and the use of water retention gels. *Urban Water Journal* 14(6): 551-560.
- 18) 山田順之・曾根佑太・古谷勝則 (2011) 都市域の自然体験活動としてのミツバチプロジェクトに関する研究. *ランドスケープ研究*, 74 (5): 585-590.
- 19) Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., Tang, H., Wei, X. and Gao, B. (2019) Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management* 232: 8-21.

(2020 年 5 月 14 日 受理)