屋上緑化芝地における炭素含有量, 土壤微生物活動 および窒素含有量の経年変化

黒沼尊紀¹⁾・任 倩玉²⁾・石原竜彰³⁾・孔 大徳³⁾・東島一成³⁾・
安藤匡哉¹⁾・渡辺 均^{*1)}

- 1) 千葉大学環境健康フィールド科学センター Center for Environment, Health and Field Sciences, Chiba University
- 2) 千葉大学大学院園芸学研究科 Graduate School of Horticulture, Chiba University
- 3) 共同カイテック株式会社 Kyodo KY-TEC Corp.

摘要: 本研究では, 施工後経過年数の異なる屋上緑化芝地について, 炭素含有量, 土壤の微生物活動, 窒素含有量の経年変化を調査した。その結果, 屋上緑化芝地は, 土壤呼吸速度が施工後有意に増加するものの, 芝の乾燥重量の増加および有機物層へのサッチの蓄積により, 炭素固定能を有することが明らかになった。窒素溶脱負荷については, 施工後, 硝化速度が減少することから, 溶脱負荷は低いと考えられた。また, 微生物バイオマス炭素量が施工後有意に増加していることから, 土壤微生物量が増加していると考えられた。以上のことから, 本研究で明らかになった知見が, 屋上緑化芝地の炭素固定能の向上および窒素溶脱負荷の低減に役立てば幸いである。

キーワード: 屋上緑化, 芝地, 土壤微生物, 炭素, 窒素, 人工軽量土壤

KURONUMA, Takanori, REN, Qianyu, ISHIHARA, Tatsuaki, KOU, Daitoku, TOUSHIMA, Kazunari, ANDO Masaya, WATANABE Hitoshi: **Changes of carbon amount, soil microbial activities and nitrogen amount in rooftop lawns over the years.**

Abstract: We examined changes of carbon amount, soil microbial activities and nitrogen amount in several rooftop lawns of different age. Consequently, we suggested that rooftop lawns serve as carbon sinks because plant dry weight in rooftop lawns increased with age and thatch seemed to be accumulated in organic layer although respiration rate significantly increased after completion. Regarding nitrogen leaching, it was suggested that reduction in nitrification rates after completion results in low leaching losses. In addition, amount of microbial biomass carbon in rooftop lawns significantly increased after completion. Thus, it is suggested that microbial biomass in a roof top lawn increases after construction. Therefore, we hope that the findings of this study will serve for increase of CO₂ sequestration and reduction in nitrogen leaching loads in rooftop lawns.

Key words: green roof, turf grass, soil microbes, carbon, nitrogen, lightweight artificial soil

1. はじめに

屋上緑化は, 雨水の流出遅延^{3, 22)}, 建築物の空調負荷の低減^{16, 24)}, ヒートアイランド現象の緩和^{8, 20)}, 大気浄化²⁵⁾, 生物のすみかとしての役割⁹⁾など, 様々な環境改善効果が認められ, 施工が推奨されてきた。また, 屋上緑化のCO₂固定能については, 黒沼ら¹²⁾が, 施工後経過年数の異なる屋上緑化芝地について, 土壤の全炭素量が経年的に増加し, 0.107 kg-C / m²・yearの炭素固定能を有することを明らかにした。一方, 屋上緑化用土においては, 硝酸態窒素をはじめとした土壤中の栄養塩類が流出するなど^{1, 23)}, 屋上緑化を施工することによる環境負荷も明らかにされてきている。

炭素や窒素の物質循環については, 森林や草地などの緑地において, 定量的な調査に加え, 物質循環に関わる土壤微生物の活動・活性について, 多くの報告がなされてきた^{5, 14, 18,}

21)。特に, 緑地の炭素固定に関しては土壤呼吸速度が, 窒素溶脱に関しては硝化速度が調査され, 物質循環との関連性が評価されている。

しかしながら, 屋上緑化について, それら土壤微生物性に関する知見は得られておらず, 炭素および窒素の物質循環との関連性は明らかになっていない。加えて, 屋上緑化などの都市緑化技術の多くは, 森林や草地などと異なり, 人工土壤を用いるのが一般的である。そのため, 人工土壤を用いた緑化工法において, 土壤の物質循環や微生物性に関する知見は, 今後の都市緑化技術を検討する上で, 重要な知見となる。

そこで, 本研究は, 屋上緑化芝地の炭素含有量, 土壤微生物活動および窒素含有量の経年変化を明らかにすることで, 屋上緑化芝地の炭素・窒素循環について, 先行研究^{11, 12)}で報告されている知見を更に先に進めることを目的とし, 各種項目の測定を行った。

* 連絡先著者 (Corresponding author) : 〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 6-2-1 E-mail : hwatanabe@faculty.chiba-u.jp

2. 材料ならびに方法

2.1 屋上緑化システムの概要

コウライシバ (*Zoysia matrella* Merr.) が植栽され、同一種類のパーライト系人工軽量土壌 ((株)三宝緑化製, グリニッチソイル; $\text{NO}_3\text{-N}$: 114 ppm, $\text{NH}_4\text{-N}$: 323 ppm, P: 159 ppm, K: 332 ppm¹¹⁾) と 1 つの大きさが 0.315 m 角のトレイ型の雨水貯留型薄層基盤 (共同カイテック(株)製, スクエアターフ Rain77) が用いられた施工場所を調査対象とした。同社製薄層基盤は、雨水貯留型薄層基盤であり、土壌コンテナ、貯水トレイ、灌水パイプからなる¹¹⁾。また、基盤土壌厚は 7.5 cm であり、灌水は自動灌水システムにより行われる。

2.2 サンプルング

千葉県柏市の同一建築物の屋上において管理した施工後経過年数 0, 3, 10, 14 年の屋上緑化芝地を、調査の対象とした。これらの屋上緑化芝地は、踏圧を受ける機会がほとんどなく、周囲に太陽光を遮る高い建築物がない環境で管理を行った。また、施肥などの管理状況の違いによる影響を最小限にするため、いずれの芝地についても、粗放管理下における屋上緑化を想定し、半年以上の間、施肥・芝刈りを実施せず、実験期間中も同様に施肥・芝刈りを行わなかった。

サンプルングは、2016 年 3 月 14 日、6 月 6 日、9 月 12 日、12 月 12 日に、それぞれできるだけ相互に離れた 3 地点から芝および土壌を採取し、乾燥重量、クロロフィル含有量以外の全ての項目について測定を行った ($n = 12$)。1 地点は、 0.05 m^2 ($0.315 \text{ m} \times 0.1575 \text{ m}$) とした。乾燥重量の測定は、2016 年 12 月 19 日に、できるだけ相互に離れた 4 基盤について、1 基盤中 ($0.1 \text{ m}^2 : 0.315 \text{ m} \times 0.315 \text{ m}$) に含まれる芝および土壌を採取した ($n = 4$)。乾燥重量の測定が 4 基盤についてのみの実施であったのは、実験終了時の基盤の残数を考慮したためである。

2.3 サンプルの調整

薄層基盤型屋上緑化は、用土の上に切り芝を敷き、養生する施工法が一般的である。そのため、採取したサンプルは、目視により、かつ、手でほぐしながら 2.0 mm の網ふるいを通し、植物体としての芝 (葉・茎・根)、有機物層 (上層) および人工土壌層 (下層) に分けた。なお、各土壌層は、根や地下茎が可能な限り取り除かれている。また、人工土壌層は、施工時に基盤に充填されたパーライト系人工土壌で形成されている層と定義した。土壌微生物活動の調査には、生土 (風乾などの乾燥処理を行っていない土壌) を用い、それ以外の測定項目については、風乾させた土壌を実験に供試した。

2.4 芝および土壌の分析

全ての計測は、2016 年 3 月 21 日から 2017 年 1 月 17 日までの間に千葉大学環境健康フィールド科学センター内実験室で、著者らによって実施された。

2.4.1 全炭素・全窒素・形態別窒素 (表-1, 図-1, 表-3, 図-2~4)

芝および各土壌を粉砕機で粉砕し (粉砕した風乾土壌を風乾細土とする)、元素分析装置 (パーキンエルマー: 2400 II CHNS/O) を用いて炭素含有率と窒素含有率を計測した。また、風乾細土について、分光光度計 (HITACHI 製 UV-1200) を用いて、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (紫外外部吸光度法)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (ニトロプロシッド法) を測定した。

2.4.2 乾燥重量 (表-1)

2016 年 12 月 19 日に採取した任意の 4 基盤に含まれる芝および土壌 (有機物層、人工土壌層) について、 100°C 48 時間以上乾燥させ、 0.1 m^2 当りの乾燥重量を測定した。また、これらの結果より、炭素・窒素については、屋上緑化芝地 1 m^2 当りの含有量を推定した。推定は、炭素・窒素含有率の平均値 ($n = 12$; 2016 年 3, 6, 9, 12 月採取) $\times$ 乾燥重量の平均値 ($n = 4$; 2016 年 12 月採取) とした。

2.4.3 芝のクロロフィル含有量 (表-1)

2016 年 9 月 19 日に、任意の 4 地点から芝の葉身を採取し、80%アセトンで色素を抽出後、分光光度計 (HITACHI 製 UV-1200) によって、クロロフィル含有量を調査した。

2.4.4 土壌微生物活動 (表-2, 図-5)

2016 年 3~12 月に採取したサンプルの土壌微生物活動を評価するため、分光光度計 (HITACHI 製 UV-1200) によって、土壌微生物活性 (FDA 加水分解活性法)⁶⁾、硝化速度 (フラスコ培養法)¹⁰⁾ を調査した。また、全有機体炭素計 (SHIMADU 製 TOC-L) を用いて、微生物バイオマス炭素 (クロロホルム燻蒸法)¹³⁾ を調査した。土壌呼吸速度は、一定量の土壌を捕集ビン内で、 25°C 下で 5 日間培養し、 1 mol 水酸化ナトリウム液に吸収させた二酸化炭素量を、 0.2 mol 塩酸を用いた滴定法によって、算出した¹⁹⁾。

2.5 窒素溶脱量の測定 (図-6)

施工後経過年数の異なる屋上緑化芝地の各 4 基盤について、1 年間の排出水を収集し、分光光度計 (HITACHI 製 UV-1200) によって、全窒素 (ペルオキシ二硫酸カリウムによる分解法)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (紫外外部吸光度法)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (ニトロプロシッド法) を測定した。測定は、3 ヶ月毎に、それまで回収された排出水を全て混ぜ合わせ、実施した。

3. 結果および考察

3.1 屋上緑化芝地の炭素と土壌微生物活動の経年変化

芝および土壌の乾物重量、炭素含有率、芝のクロロフィル含有量を表-1 に示した。芝の乾燥重量は、施工後、有意に増加したが、炭素含有率に経年的な傾向は確認されなかった。また、クロロフィル含有量にも経年的な変化はみられなかったことから、施工後十数年が経過しても、芝の観賞性が維持されていることが示された。有機物層では、乾燥重量および炭素含有率が、経年的に増加した。一方、人工土壌層の乾燥重量、炭素含有率に経年的な傾向は確認されなかった。

これらの結果より、芝、有機物層、人工土壌層の屋上緑化芝地 1 m^2 当りの全炭素量を算出した (図-1)。この結果、屋

表-1 経過年数毎の芝と土壤の乾燥重量 (n=4), 炭素含有率 (n=12), 芝のクロロフィル含有量 (n=4)

Table 1 Dry weight (n=4), carbon amounts (n=12), chlorophyll contents (n = 4) of grasses and media in each rooftop lawn with different ages

経過年数毎の芝および土壤	乾燥重量 (kg / m ²)	炭素含有率 (%)	クロロフィル含有量 (mg / g-FW)
芝	0年 1.1 ± 0.1 ^a y	42.8 ± 0.2	0.9 ± 0.1
	3年 1.5 ± 0.1 b	42.3 ± 0.1 n.s.	0.8 ± 0.0 n.s.
	11年 1.9 ± 0.1 c	42.5 ± 0.2	0.9 ± 0.1
	14年 2.1 ± 0.0 c	42.7 ± 0.0	1.0 ± 0.0
有機物層	0年 4.0 ± 0.5 A	4.4 ± 0.4 A	—
	3年 5.1 ± 0.3 AB	9.5 ± 0.3 B	
	11年 6.7 ± 0.5 BC	13.7 ± 0.7 C	
	14年 8.1 ± 0.7 C	17.6 ± 0.9 D	
人工土壌層	0年 10.7 ± 0.4	4.3 ± 0.4 b'	—
	3年 10.9 ± 0.5 n.s.	4.2 ± 0.3 b'	
	11年 11.3 ± 0.5	3.0 ± 0.1 a'	
	14年 11.8 ± 0.0	4.6 ± 0.1 b'	

※: 平均値±SE ※: 同じアルファベット間には5%水準で有意差なし(Tukey-b)

図-1 経過年数毎の屋上緑化 1 m² 当りに含まれる全炭素量

Fig. 1 Carbon storage of grasses and media in each rooftop lawn with different ages

上緑化芝地は、植物体の乾燥重量の増加と有機物層への植物体残渣(サッチ)の蓄積により、施工後十数年間は炭素を固定していることが明らかとなった(図-1, 表-1)。さらに、これらの結果について、経過年数と屋上緑化芝地 1 m² 当りの全炭素量の単回帰分析を行ったところ、年間 0.111 kg-C・m⁻² の炭素固定が確認された {屋上緑化芝地 1 m² 当りの全炭素量 (kg-C・m⁻²) = 0.111 × 経過年数 (year) + 1.113; R = 0.967; P<0.05}。黒沼ら¹²⁾は、屋上緑化芝地の炭素固定能について、土壤の炭素保持量の経年的な増加が主要因と報告したが、本研究により、芝の乾燥重量の増加と、有機物層への炭素の蓄積が、炭素固定能の主要因であることが新たに明らかとなった。また、本結果は、都市林や街路樹、都市公園に用いられている木本植物の樹幹被覆面積当りの炭素固定能 (0.12~0.26 kg-C / m²・year²⁾, 0.216~0.276 kg-C / m²・year⁷⁾) よりも低い値を示したが、黒沼ら¹²⁾が報告した屋上緑化芝地の炭素固定能 (年間 0.107 kg-C・m⁻²) に近い値であったことから、妥当な値であると考えられる。一方、経過年数の増加に伴い、土壤からの CO₂ 放出量の増加や積載荷重の

表-2 経過年数毎の土壤微生物活性、微生物バイオマス炭素量、土壤呼吸速度 (n=12)

Table 2 Microbial activities (A₄₉₀), amount of microbial biomass carbon, and respiration rates of each medium with different ages (n=12)

経過年数毎の土壤	土壤微生物活性 (490 nmにおける吸光度)	微生物バイオマス炭素 (g-C / kgDW)	土壤呼吸速度 (g-C / kgDW・d)
有機物層	0年 0.40 ± 0.03 ^a y	1.09 ± 0.03 A	0.05 ± 0.00 A
	3年 0.63 ± 0.06 B	1.87 ± 0.03 B	0.10 ± 0.01 C
	11年 0.58 ± 0.04 B	2.03 ± 0.03 C	0.08 ± 0.00 B
	14年 0.68 ± 0.04 B	2.17 ± 0.03 D	0.09 ± 0.00 C
人工土壌層	0年 0.13 ± 0.00 a'	0.34 ± 0.03 a'	0.08 ± 0.00 b'
	3年 0.33 ± 0.05 b'	1.06 ± 0.03 d'	0.11 ± 0.00 c'
	11年 0.24 ± 0.01 b'	0.77 ± 0.01 b'	0.06 ± 0.00 a'
	14年 0.26 ± 0.01 b'	0.97 ± 0.03 c'	0.07 ± 0.00 a'

※: 平均値±SE ※: 同じアルファベット間には5%水準で有意差なし(Tukey-b)

増加が懸念され、今後、これらの課題の解決に資する更なる調査研究が必要であると考えられた。

土壤単位質量当りの微生物活性 (FDA 加水分解活性法)、微生物量の指標である微生物バイオマス炭素、土壤呼吸速度を表-2 に示した。有機物層では、微生物バイオマス炭素が経年的に有意に増加した。土壤微生物活性および土壤呼吸速度については、経年的な増加は確認されなかったが、0 年よりも他の施工年の値が有意に高く、施工後 (0 年以降)、値が有意に増加したと考えられた。一方、人工土壌層においては、土壤微生物活性、微生物バイオマス炭素量が、施工後 (0 年以降)、有意に増加したが、土壤呼吸速度は、0 年よりも 11, 14 年の基盤において、有意に低い値を示した。また、屋上緑化芝地の有機物層における土壤微生物活性 (FDA)、微生物バイオマス炭素、土壤呼吸速度は、地上の芝地や草地に関する先行研究結果^{4, 15, 17)} と同等もしくは高い傾向を示した。

以上のことから、本研究で調査を実施した屋上緑化芝地は、クロロフィル含有量が経年的に低下せず、芝の鑑賞性を維持しながら、微生物量の指標である微生物バイオマス炭素および微生物活性が上昇することが明らかとなった。これより、人工土壌層と切り芝のみから構成される緑化技術であっても、施工後、土壤微生物活動や量は変化し、緑地が維持されていると考えられた。また、有機物層では、土壤呼吸速度が経年的に増加するものの、サッチの蓄積量が多いため、経年的に全炭素量が増加していると考えられた(図-1, 表-2)。

3.2 屋上緑化芝地の窒素と硝化速度の経年変化

芝および土壤の全窒素, NO₃ - N, NH₄ - N の含有率を表-3 に示した。また、屋上緑化芝地 1m² 当りの全窒素量を図-2 に示した。この結果、屋上緑化芝地の全窒素量は、炭素と同様に、芝の乾燥重量の増加と、土壤への有機物の蓄積によって、施工後、増加することが示された(表-1~2, 図-2)。

土壤中の NO₃ - N は、有機物層、人工土壌層ともに、施工後、含有率が有意に低下した(表-3)。一方、NH₄ - N 含有率については、経年的な傾向は確認されなかった。これらの結果より、屋上緑化芝地 1m² 当りの NO₃ - N 量, NH₄ - N 量

表-3 経過年数毎の全窒素, NO_3^- -N, NH_4^+ -N 含有率 (n=12)

Table 3 Amounts of total nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen in each rooftop lawn with different ages (n=12)

経過年数毎の 芝および土壌	全窒素含有率 (%)		NO_3^- -N (g-N/kg-DW)	NH_4^+ -N (g-N/kg-DW)
芝	0年 0.7 ± 0.0^2	n.s.	—	—
	3年 0.7 ± 0.0			
	11年 0.7 ± 0.0			
	14年 0.7 ± 0.0			
有機物層	0年 0.5 ± 0.0 A ^y	n.s.	0.024 $\pm$ 0.007 B	0.17 $\pm$ 0.04
	3年 0.7 ± 0.0 B			
	11年 0.6 ± 0.1 AB			
	14年 0.8 ± 0.0 B			
人工土壌層	0年 0.3 ± 0.0 a ^y	n.s.	0.084 $\pm$ 0.021 b ^y	0.36 $\pm$ 0.09
	3年 0.4 ± 0.0 b ^y			
	11年 0.3 ± 0.0 a ^y			
	14年 0.4 ± 0.0 a ^y b ^y			

*: 平均値 $\pm$ SE *: 同じアルファベット間には5%水準で有意差なし(Tukey-b) 図-2 経過年数毎の屋上緑化芝地 1 m² 当りに含まれる全窒素量

Fig. 2 Total nitrogen storage of grasses and media in each rooftop lawn with different ages

を算出した (図-3~4)。この結果, 有機物層および人工土壌層の NO_3^- -N 量は, 施工後, 大幅に減少することが示された。一方, NH_4^+ -N 量については, 人工土壌の含有量が, 施工後減少するものの, その後の経年的な傾向は確認されなかった。

$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$ の反応速度を示す硝化速度を図-5 に示した。その結果, 有機物層および人工土壌層の硝化速度は, 施工後, 有意に値が減少した。これらの結果より, 屋上緑化シバ地の有機物層および人工土壌層は, 硝化速度が, 施工後, 有意に減少することで, NH_4^+ -N 量が一定に保たれ, NO_3^- -N 量が低い値で推移していると考えられた。

また, 屋上緑化基盤からの年間の窒素溶脱量を図-6 に示した。その結果, 0 年が有意に高い値を示し, 3, 11, 14 年の基盤からの窒素溶脱量は, 低い値で推移した。これは, 施工後, 人工土壌層中の NO_3^- -N, NH_4^+ -N 量が減少したことに加え, 硝化速度が大幅に低下し, NO_3^- -N, NH_4^+ -N 量が一定の値で推移したためと考えられた。また, 本研究において, 0 年の年間窒素溶脱量は, その 75%が, 施工から 3 ヶ月

図-3 経過年数毎の屋上緑化芝地 1 m² 当りに含まれる NO_3^- -N 量

Fig. 3 Nitrate nitrogen storage in each rooftop medium with different ages

図-4 経過年数毎の屋上緑化芝地 1 m² 当りに含まれる NH_4^+ -N 量

Fig. 4 Ammonium nitrogen storage in each rooftop medium with different ages

図-5 経過年数毎の屋上緑化芝地における土壌の硝化速度 (n=12)

Fig. 5 Nitrification rate in each rooftop medium with different ages (n=12)

*: 同じアルファベット間には5%水準で有意差なし(Tukey-b)

図-6 経過年数毎の屋上緑化芝地 1m² 当りの年間の窒素溶脱量 (n=4)

Fig. 6 Nitrogen leaching losses from rooftop lawn with different ages (n=4)

*: 同じアルファベット間には 5%水準で有意差なし(Tukey-b)

以内に溶脱したものであった（データ省略）。

以上のことから、屋上緑化芝地の窒素溶脱の主要因は、元肥過多などの施工初期によるもので、施工後は、硝化速度および NO₃-N 量の減少により、窒素溶脱負荷は、低いと考えられた。一方、硝化速度の 0 年以降の減少について、その要因は明らかになっておらず、更なる知見の蓄積が必要であると考えられた。

4. まとめ

本研究は、経過年数の異なる屋上緑化芝地について、炭素および窒素の経年変化と微生物性の関係性を評価した。その結果、屋上緑化芝地は、有機物層において、土壤呼吸速度が施工後（0 年以降）、有意に増加するものの、植物体の増加および有機物層へのサッチの蓄積により、炭素固定能を有することが明らかになった。また、窒素溶脱負荷については、施工初期の元肥過多による溶脱を考慮する必要があると考えられたが、施工後は、硝化速度が大幅に減少するため、溶脱負荷は低いものと考えられた。さらに、人工土壌を用いた緑化技術であっても、屋上緑化芝地は土壤微生物活動に経年的な変化を有していることが明らかになった。以上の知見が、経年変化を考慮した施工や維持管理方法の検討に役立つ基礎的な知見となれば幸いである。

引用文献

- Berndtsson, J. C., Emilsson, T. and Bengtsson, L. (2006) The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Sci. Total Environ.*, 355(1): 48-63.
- David, J. N. and Daniel, E.C. (2002) Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA, *Environmental Pollution*, 116: 381-389.
- Getter, K. L., Rowe, D. B. and Andresen, J. A. (2007)

- Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecol. Eng.*, 31(4): 225-231.
- Haynes, R. J. (1999) Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management. *Biology and Fertility of Soils*, 30 (3): 210-216.
- 平井敬三・阪田匡司・森下智陽・高橋正通 (2006) スギ林土壌の窒素無機化特性とそれに及ぼす環境変動や施業の影響, *日本森林学会誌*, 88(4): 302-311.
- 市川貴大・高橋輝昌・浅野義人・小林達明 (2001) FDA (Fluorescein Diacetate) 加水分解法による森林土壌の微生物活性の測定, *日本緑化工学会誌*, 26(4): 337-342.
- 市村恒士 (2006) 樹幹被覆面積にもとづいた都市緑地の二酸化炭素固定量の推定に関する研究, *ランドスケープ研究*, 69 (5): 613-616.
- 一ノ瀬雅之・石野久彌・群公子・永田明寛 (2006) ヒートアイランド低減手法としての屋上緑化の実測評価, *日本建築学会環境系論文集*, 605: 47-54.
- Kadas, G. (2006) Rare invertebrates colonizing green roofs in London. *Urban Habitats*, 4(1): 66-86.
- 木村龍介 (1997) 土壤環境分析法. 土壤環境分析編集委員会編, 11. 硝酸化成作用. 博友社, pp.157-160.
- 黒沼尊紀・橋本早織・千村隆太・横川晴昭・坂本一憲・渡辺均 (2012) 屋上緑化薄層基盤軽量土壌の経年変化および栄養塩類の推移, *日本緑化工学会誌*, 38(1): 51-55.
- 黒沼尊紀・橋本早織・石原竜彰・吉岡孝治・渡辺均 (2014) 屋上緑化の芝地における土壌の経年変化と CO₂ 固定能の定量化, *日本緑化工学会誌*, 40(1): 20-24.
- 小川吉雄 (1997) 土壤環境分析法. 土壤環境分析法編集委員会編, 10. 土壌バイオマス. 博友社, pp.146-152.
- 小柳信宏・戸田浩人・久保井喬・生原喜久雄 (2004) 北関東地方の高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域における炭素と窒素の動態特性. *日本林学会誌*, 86(2): 134-143.
- Groffman, P. M., Eagan, P., Sullivan, W. M., and Lemunyon, J. L. (1996) Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity. *Plant and soil*, 183(1): 61-67.
- Sailor, D. J. (2008) A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8): 1466-1478.
- Shi, W., Yao, H., and Bowman, D. (2006). Soil microbial biomass, activity and nitrogen transformations in a turfgrass chronosequence. *Soil Biol. and Biochem.*, 38(2): 311-319.
- 柴田英昭・小澤恵・佐藤冬樹・笹賀一郎 (2007) 森林施業に伴う地表処理が土壌窒素動態に及ぼす影響とそのメカニズム. *日本森林学会誌*, 89(5): 314-320.
- 菅原和夫 (1997) 土壤環境分析法. 土壤環境分析法編集委員会編, 7. 土壌呼吸. 博友社, pp.123-126.
- Susca, T., Gaffin, S. R. and Dell'Oso, G. R. (2011) Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmen. Pollution*, 159(8-9): 2119-2126.
- 豊田広三 (1967) 草地における窒素の 2, 3 の問題. *土と微生物*, 9: 12-15.

- 22) Villarreal, E. L. and Bengtsson, L. (2005) Response of *Sedum* green-roof to individual rain events. *Ecol. Eng.*, 25(1): 1-7.
- 23) 渡辺均・山中典幸・横川晴昭・千村隆太 (2011) 数種の屋上緑化薄層基盤土壌からの栄養塩類の流出について. *日本緑化工学会誌*, 37(1): 78-83.
- 24) Wong, N. H., Cheong, D. K. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L. and Sia, A. (2003) The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35(4): 353-364.
- 25) Yang, J., Yu, Q. and Gong, P. (2008) Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environ.*, 42(31): 7266-7273.

(2018 年 7 月 3 日 受理)