

⑤ 自然教育園内の土壌呼吸の観測 — 都内緑地公園との比較 —

宮島聖也*・村田智吉**・川東正幸*・渡邊眞紀子*

Observation of soil respiration in the Institute for Nature Study

Seiya Miyajima*, Tomoyoshi Murata**, Masayuki Kawahigashi*, Makiko Watanabe*

はじめに

日本における都市緑地及び都市公園の面積は平成26年3月現在で約12万ha(環境省, 2015)を占めており, 都市域の再開発や造成に伴って今後ますます拡大することが予測される。都市緑地には都市域の環境保全やレクリエーションの場の提供, 防災や景観構成といった様々な役割が求められている(田畑, 2011)。中でも, 都市緑地の持つ重要な役割として循環型社会の形成及び都市域への炭素循環への貢献があげられる。都市域の炭素循環において, 都市緑地は二酸化炭素(CO₂)及び炭素(C)を固定し蓄えるカーボンプールの役割と土壌もしくは植物より炭素を放出するカーボンソースの役割の両面を持っている(Weissert *et al.*, 2014)。

土壌は, 炭素循環において陸域で最も多くの炭素を貯留する一方で土壌呼吸(Soil respiration)と呼ばれる土壌から放出される二酸化炭素は陸域で2番目に大きな炭素放出源となっている(Wang *et al.*, 2013)。都市緑地や都市公園の土壌を対象にした研究は炭素貯留量に着目した研究事例に比べて, 土壌からの炭素の放出に当たる土壌呼吸について都市緑地の土壌を対象に行った研究はまだ少ない。

自然教育園における土壌呼吸量の観測事例には坂巻ほか(1979)が園内の代表的なスダジイ, コナラ, クロマツ, ミズキの四林分で観測を行った事例がある。その結果, 年間の土壌呼吸量はコナラ林, ミズキ林, スダジイ林, クロマツ林の順に高く, 各林分内のA層の厚みとの間に相関関係があることを報告している。

都市緑地の土壌環境は周囲の市街地の影響や, 造成に伴う人為影響を受けていることから独自の土壌性状を有している。そのために都市域における炭素循環を評価するためには, 様々な土壌性状を持つ地点の土壌呼吸量のデータが有効となる。この観点に基づき造成芝地の土壌呼吸量を測定した中野・亀井(2001)の事例では, 造成地であっても畑地と同程度の土壌呼吸量を有することが示唆されているなど, 人為影響が加わることは一概に土壌中の生態系において活動を弱めることには繋がらないと

*首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

**国立研究開発法人国立環境研究所, National Institute for Environmental Studies

考えられる。

今回、自然教育園において土壌性状の異なる複数地点において土壌呼吸量の観測を行った。同様の観測を行った新宿御苑における観測事例と合わせ、土壌性状の指標として土壌硬度及び土壌 pH に着目し、都市緑地において土壌の物理化学的性状を変化させる人為的な影響が土壌呼吸量に及ぼす影響について検討した。

研究方法

観測サイト1 (自然教育園内)

自然教育園内の土壌呼吸量を観測した地点を図1に示した。自然教育園内の土壌は土地分類基本調査図(5万分の1土壌図)では「AT-h (F) 厚層黒ボク土腐植質(林地)」に分類されている(東京都, 1999)。NS1は樹林がないオープンスペースであり、現在は草地となっている。NS2は園の縁辺部に残された土塁上のスタジイを中心とした林地である。NS3は園内中央付近の台地上の林地であり、構成樹種はミズキ、シロダモなどの雑木林であった。

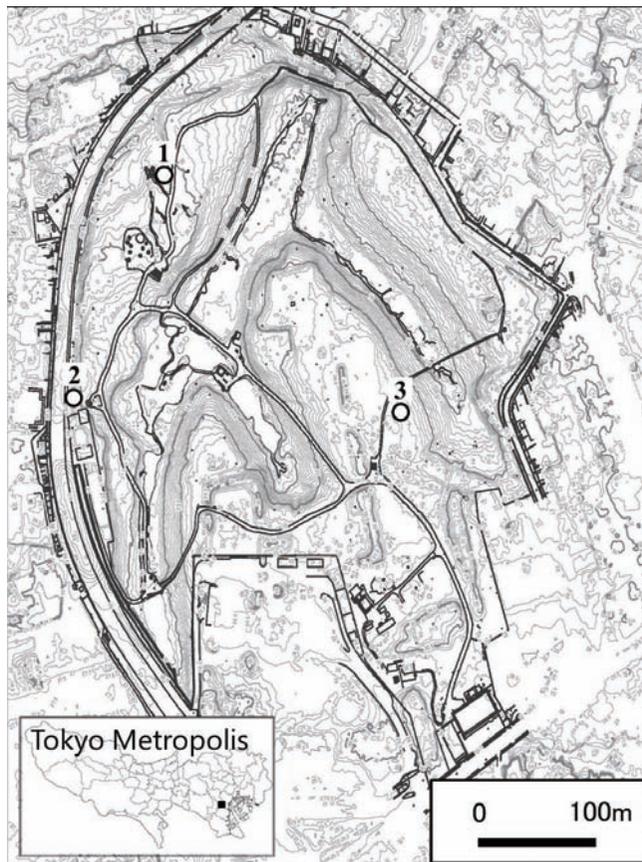


図1 自然教育園内の土壌呼吸量観測地点.

観測サイト2（新宿御苑）

都心の緑地としての自然教育園の比較対象として東京都新宿区に位置する国民公園新宿御苑で土壌呼吸の観測を行った。新宿御苑の土壌は土地分類基本調査図（5万分の1土壌図）では「AT-h（F）厚層黒ボク土腐植質（林地）」と分類されている（東京都，1999）。園内の林地から観測地点として、これまでの土地利用履歴及び簡易的な土壌調査から自然土壌に近い土壌及び造成による影響を強く受けた土壌の特徴を持つ2地点を選出した。SG1は管理門脇に位置し、樹林地から庭園、職員宿舎等の建物用地としての利用を経て現在はスダジイやマテバシイなどの常緑樹、カエデなどの落葉樹が生育する雑木林となっている人為影響を強く受けた林地である。SG2は苑内のモミジ山区に位置し、樹林地としての利用が明治時代より続いている場所であり、大きな土地利用の改変の影響を受けていない地点である。現在はカエデ類を中心にヤブツバキやアオキが生育する雑木林となっている。

観測時期

土壌呼吸量は気温及び地温に大きな影響を受け、気温や地温の上昇に伴い土壌呼吸量も増加する傾向にある（Fang & Moncrieff, 2001）。そのため、一般的に土壌呼吸量は年間を通じて夏季に最大、冬季に最少になる。坂巻ほか（1979）の報告では自然教育園における土壌呼吸量は7月に最大、2月または3月に最少の値を示した。

自然教育園における地温変化は2010年から2011年にかけて台地上（NS3近傍）と低地で地温を測定した村田ほか（2012）では、10月から11月にかけての5cm深の地温は年間の5cm深の平均地温（14.5℃）前後の値を示し、5月から6月にかけての時期とほぼ同じ地温を示していた（図2）。そのため、本研究では5cm深の地温が年間の平均値と近い時期に当たる10月から11月に自然教育園および新宿御苑における土壌呼吸量の観測を行った。

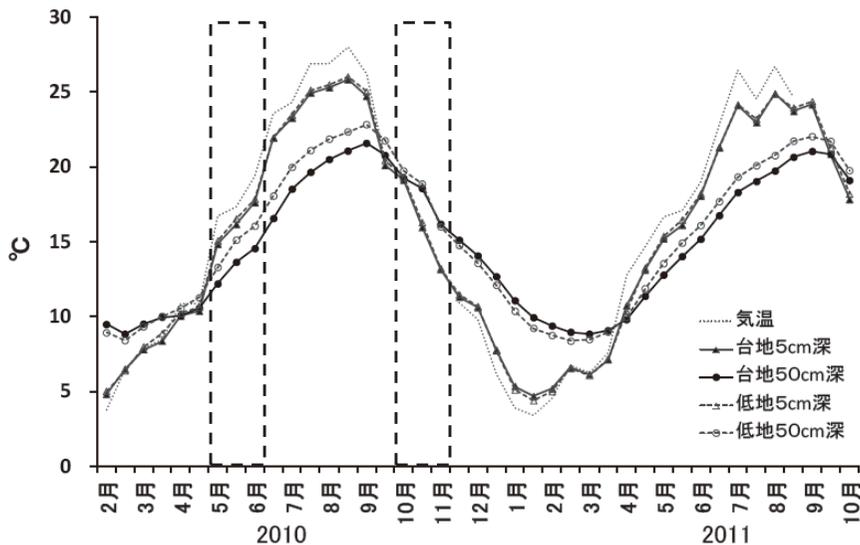


図2 自然教育園の地温変化（村田ほか（2012）を一部改編）。

土壌呼吸の測定

土壌からのガスフラックスの測定はクローズドチャンバー法（木部・鞠子, 2004）を用いて採気したサンプルを実験室へと持ち帰り、ガスクロマトグラフを用いて測定した。

本研究で用いたチャンバーは厚さ約5mm, 直径20cm, 高さ約13cmの塩ビ管とかぶせた後の高さが4cmとなる塩ビ製のフタで構成されている。チャンバー設置地点は、全地点ともリターや草本を除去し、チャンバーを5cm程度土壌中に挿入して接地させ、ふたを被せた後、内部の空気が漏れないようにビニールテープを巻いて密閉した。採気を行う際には、観測開始前後のチャンバー内の土壌表面の温度を温度計で測定した。観測時には同時に3個のチャンバーを使用し、各地点3連の観測を行った。

土壌から放出されるガスの採気は、チャンバーを密閉してから1分後、11分後、21分後の10分間隔でシリンジを用いて内部の空気を50ml採取することで行った。採取した試料は事前に密閉減圧したバイアル瓶に注入し、実験室へ持ち帰った。その後、採取したサンプルを熱伝導度型検出器を接続したガスクロマトグラフ（GC-8A, SHIMADZU）で分析し、二酸化炭素濃度を測定した。測定した二酸化炭素濃度のフラックスの大きさを土壌呼吸量として評価した。

土壌理化学分析と土壌硬度計測

土壌呼吸量の測定を行った地点において、表層土壌の理化学性を把握するために100mlのコアサンプル3個と各種分析用の表層土壌（0～10cm）を採取した。土壌採取の際には、表面のリターを取り除き、土壌を採取した。採取したサンプルは実験室に持ち帰り、風乾後にpH（H₂O）、電気伝導度（以下EC）、全炭素量（TC）、全窒素量（TN）の測定に供した。pH（H₂O）、ECは土壌：脱塩水＝1：5の割合で1時間振とうし、pHメーター（TPX-999, 東興化学研究所）、ECメーター（ES-51, 堀場製作所）を用いてそれぞれ測定した。いずれの測定も各地点3連で行い、その平均値を分析結果とした。

TC・TNはサンプルを微粉碎したのち、NCアナライザー（SUMIGRAPH NC-22F, 住化分析センター）を用いて分析した。

土壌の鉛直硬度の計測には長谷川式土壌貫入計（H-100L, ダイトウテクノグリーン）を用いて各地点で3箇所測定を行った。長谷川式土壌貫入計は2kgの重りを落下させてそのエネルギーによって貫入ポールを土壌中に貫入し、その時の貫入抵抗から相対的な硬さを把握する測定機器である。貫入抵抗値を示すS値は1打あたりの土壌中へのポールの貫入量を示し、この値が大きいほど柔らかい土壌であることを示している。

結 果

観測地点の土壌

自然教育園（NS）と新宿御苑（SG）の各観測地点の表層土壌の理化学性の調査結果を表1に示す。まず自然教育園の3地点を比較すると、表層土壌のTCはNS1で147.2 gkg⁻¹, NS2で162.1 gkg⁻¹, NS3で160.9 gkg⁻¹, TNはNS1で11.8 gkg⁻¹, NS2で11.7 gkg⁻¹, NS3で12.7 gkg⁻¹であった。また、土壌pH（H₂O）はNS1で6.0, NS2で6.5, NS3で5.0であり、NS1及びNS2で高くなっていた。また、NS1では、表層土壌を少し掘るとコンクリート片などの人工的な礫の混入が見られた。固相率（%）

表1 自然教育園 (NS) と新宿御苑 (SG) の土壌呼吸観測地点の表層土壌理化学性。

Area	Site	Three phase distribution			Bulk density (gcm^{-3})	Total		C/N	pH (H_2O)	EC (mSm^{-1})
		Solid	Liquid (%)	Gaseous		C	N			
NS	NS1	16.8	39.2	44.0	0.45	147.2	11.8	12.5	6.0	12.8
	NS2	12.7	27.6	59.8	0.33	162.1	11.7	13.9	6.5	21.5
	NS3	9.5	38.1	52.3	0.22	160.9	12.7	12.7	5.0	13.2
SG	SG1	32.4	45.9	21.7	0.88	29.7	2.2	13.3	7.2	11.0
	SG2	14.6	43.4	42.0	0.37	158.8	10.1	15.8	4.8	23.1

は NS1 (16.8) > NS2 (12.7) > NS3 (9.5) の順に大きかった。仮比重 (gcm^{-3}) も同様に NS1 (0.45) > NS2 (0.33) > NS3 (0.22) の順に大きかった。

一方、新宿御苑における観測地点の表層土壌の TC は SG1 が 29.7 gkg^{-1} , SG2 で 158.8 gkg^{-1} であった。TN は SG1 が 2.2 gkg^{-1} , SG2 が 10.1 gkg^{-1} であり、SG2 で TC, TN とともに大きな値を示した。表層土壌の pH (H_2O) は SG1 が 7.2, SG2 が 4.8 と SG1 で高く、EC は SG1 が 11 mSm^{-1} , SG2 で 23.1 mSm^{-1} であり SG2 で高くなっていた。また、SG1 では土壌中にコンクリート片などの人工物の混入が見られた。

図3に自然教育園と新宿御苑の土壌硬度の調査結果を示す。自然教育園では、NS1における土壌硬度は30cm深程度までS値のばらつきがあるが、30cm深前後までは膨軟な層と相対的に堅密な層が交互に出現した。30cm以深では1cm drop⁻¹程度のS値が連続していたが、数か所の相対的に膨軟な層の出現があった。NS2では測定ごとのばらつきは小さく、最表層を除いた表層から25cm深前後まで2cm drop⁻¹程度のS値が連続し、25cm深前後から50cm深前後まで3~5cm drop⁻¹程度のS値が続く相対的に膨軟な層が出現し、50cm以深から100cm深までは2cm drop⁻¹程度のS値が連続していた。NS3では表層から30cm深前後までは測定ごとのばらつきが多く、8cm drop⁻¹を超えるS値もあったが、30cm以深では深部に向かうほどS値が徐々に減少する自然圧密の影響がみられた。3箇所の観測点について土壌硬度を比較すると、NS1 > NS2 > NS3の順に硬い緻密な土壌であった。

一方、新宿御苑の2地点の鉛直方向の土壌硬度はSG1では20cm深から30cm深付近においてS値0.1 cm drop⁻¹が10打続く硬盤層が存在した。その下から50cm深までは、1打あたりの貫入量が0.1~0.2 cm前後となる固結した堅密層が確認された。さらに50cm深付近にも硬く締まった層が存在し、この層以深では1打あたりの貫入量は1cm程度と50cm深付近と比較すると柔らかな層が連続しており、固結した層と相対的に柔らかい層が交互に出現する傾向にあった。一方、SG2の土壌は全体的に堅密で地点間の差はあるが、20cm深前後にS値が1cm drop⁻¹以上となる相対的に膨軟な層が出現し、20cm以深でも相対的に膨軟な層と堅密な層が交互に出現する傾向にあった。地表面からの土壌呼吸量に影響が大きいと考えられる表層から30cm深前後を比較すると、SG1の方がSG2よりも硬い緻密な土壌 (SG1 > SG2) であった。

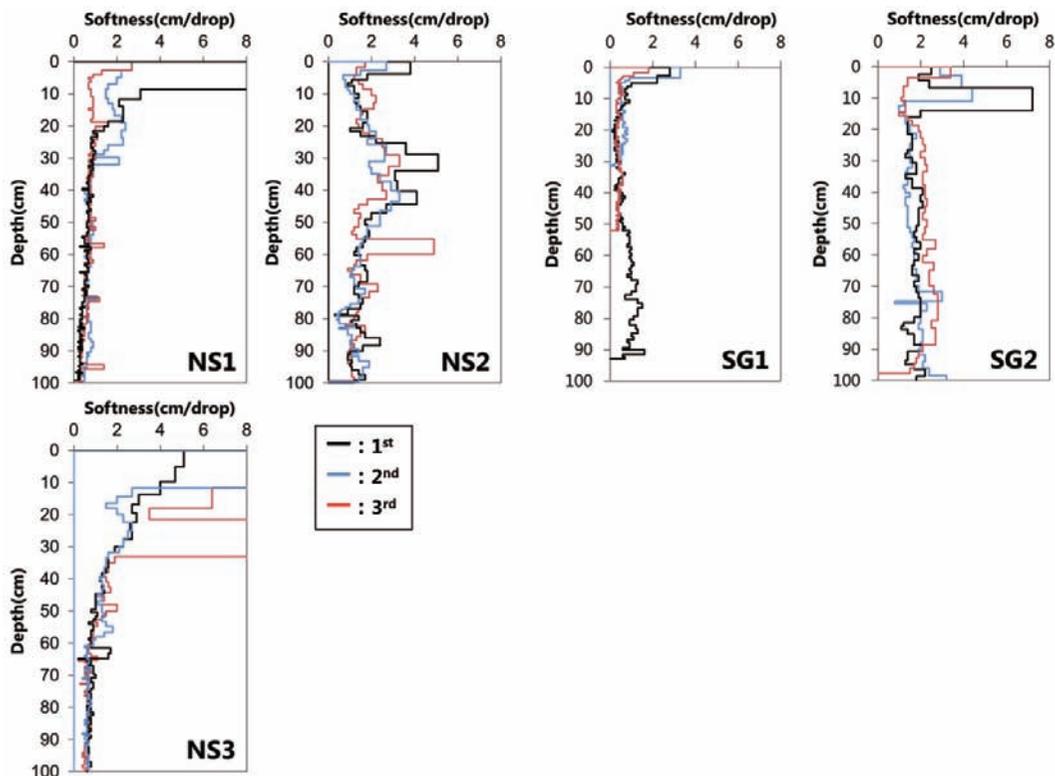


図3 自然教育園 (NS) と新宿御苑 (SG) の土壤呼吸観測地点の土壤硬度鉛直分布.
各地点3回の測定を行い, 凡例は試行回数を示す.

土壤呼吸量

自然教育園の各観測地点で10月8日と10月30日に行った土壤呼吸量の測定結果を図4aに示す。図4aには観測日と各地点の土壤呼吸量, 観測時のチャンバー内表面温度の最大値及び最小値を示した。なお, 観測時には各地点3連の観測を行ったが, 土壤呼吸量の測定結果に測定時のチャンバーと土壤の接地の不具合などの影響がみられたデータは結果から除外した。

自然教育園観測点の土壤呼吸量の平均値は10月8日における観測ではNS1(草地)で $441.2 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$, NS2(土塁上)で $431.3 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ であり, NS3(台地上)は $312.9 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ であった。10月30日の観測ではNS1で $262.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$, NS2で $350.6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$, NS3で $268.0 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ であった。チャンバー内表面温度は10月8日にはNS1で $22.0 \sim 23.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 10月30日は $20.5 \sim 21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ の範囲にあり, 観測を通してみると, チャンバー内表面温度が高いほど土壤呼吸量が大きくなる傾向が示された。

新宿御苑における2015年10月19日と11月16日の土壤呼吸量の測定結果を図4bに示す。土壤呼吸量の平均値は10月19日の観測時にはSG1で $331.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$, SG2で $167.7 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$, 11月16日の観測時にはSG1で $307.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$, SG2で $153.0 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$, といずれの観測日でもSG1で土壤呼吸量は大きくなっていた。チャンバー内表面温度は10月19日にはSG1で

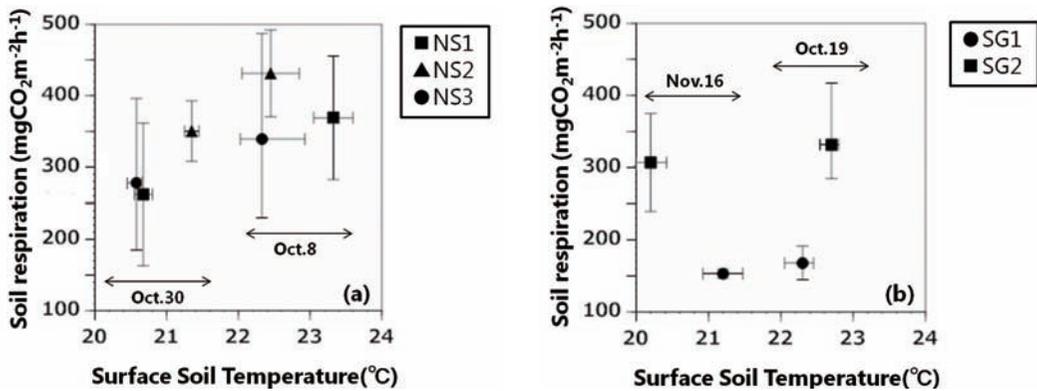


図4 自然教育園 (NS) と新宿御苑 (SG) の土壌呼吸量と観測時チャンバー内表面温度の関係。
(a) 自然教育園 (NS) (b) 新宿御苑 (SG)

各観測における平均値を示した。誤差線は同一観測時の最大値及び最小値を示す。

22.5 ~ 22.8°C, SG2 で 22.3 ~ 22.6°C, 11 月 16 日では SG1 で 20.1 ~ 20.4°C, SG2 で 20.7 ~ 21.0°C であった。同一地点でみると、チャンバー内表面温度が高いほど土壌呼吸量も大きくなる傾向にあった。

考 察

土壌呼吸量は土壌の温度、水分、有機物含有量、植生など多くの環境要因の影響を受けて変化する (Luo & Zhou, 2006)。その中でも温度との関係性は特に強く、地温や気温の上昇に伴い土壌呼吸量も増加する傾向にある (Fang & Moncrieff, 2001)。

本研究においても同一観測地点間で比較した際にはチャンバー内表面温度の高い時期ほど土壌呼吸量は大きくなっており、温度の影響を受けていたことが考えられる。

自然教育園内の地温の分布を調べた山田 (2001) の報告によると、自然教育園内では全ての季節を通じて園内の中心部と比較して縁辺部に近づくほど相対的に地温が高温になっていることを述べており、本研究で観測を行った 2 か所の林地でも、園内の端に位置している NS2 では園内の中心部に位置する NS3 と比較して地温が高温であったことが考えられる。同じ林地としての土地利用形態であった NS2 と NS3 の土壌呼吸量を比較したときには、いずれの観測時にも、土塁上に位置する NS2 で土壌呼吸量は大きくなっていったことから、園内の地温差が土壌呼吸量の違いにも反映されていることが考えられる。

土壌硬度と土壌呼吸量の関係性についてみると、土壌硬度が高く緻密な土壌で土壌呼吸量が大きくなる傾向が自然教育園と新宿御苑共に認められた。この関係は Miyajima *et al.* (2015) の述べる土壌硬度の増加による土壌中の熱環境に及ぼす影響が、以下に述べるように土壌呼吸量にも影響を及ぼしていることが示唆された。

土壌硬度を比較すると自然教育園内では NS1 > NS2 > NS3 の順に硬く緻密な土壌であった。一方、新宿御苑においては SG1 > SG2 となっていた。魚井ほか (2012) の報告に基づく、NS3 は森林土壌に多く見られる表層が柔らかく、徐々に緻密化した硬い土壌を持つグループに分類され、NS1 と

NS2, SG1 と SG2 は硬い層と柔らかい層が交互に出現する人為的影響を受けたグループに分類される。

鉛直方向の土壌硬度の違いは土壌中の生態系に影響を及ぼす。一例として、塚原ほか (2002) では S 値の大きな柔らかい土壌であるほど土壌呼吸量が大きくなることを述べている。しかしながら、自然教育園において土壌硬度と土壌呼吸量の関係性についてみると、土壌呼吸量がいずれの観測日でも大きかった NS2 では土壌硬度も高く緻密な土壌であった。土壌硬度が高く硬い土壌で土壌呼吸量が大きかったことから、塚原ほか (2002) の述べる土壌硬度と土壌呼吸量の関係性とは逆の結果が得られた。この理由として土壌硬度が土壌中の熱環境に与える影響が考えられる。Miyajima *et al.* (2015) では造成等の圧密作用で土壌硬度が大きい緻密な土壌が形成されると、粒子同士の接触面積が増加することで土壌中の熱伝導が高まり、日中の地温の上昇が土壌深部まで及ぶことを示している。そのため、自然教育園においても土壌硬度の高い NS1 ではオープンスペースという日照条件に加え、土壌硬度の面でも日中に土壌が高温になることが推測される。また、Chen *et al.* (2013) によると年間を通じた土壌呼吸量の変動において 5cm 深の地温が同じ春季と秋季の土壌呼吸量を比較した際には、夏季の地温上昇に伴うヒステリシス効果により土壌深部の地温が高く、微生物活動が活発になることで秋季に土壌呼吸量が大きくなることを述べており、表層の地温が等しくても深部の地温が高温化することで、土壌呼吸量は増加することを示している。

これらを踏まえると土壌硬度分布に起因して土壌が深部まで高温化する場合、土壌深部の微生物活動の活発化に伴い土壌呼吸量が増加することを示唆する結果となった。

土壌硬度以外の要因について検討すると、高橋ほか (2000) によると松戸市の都市公園において表層土壌の全炭素量と土壌呼吸量の間には正の相関関係があることが示されている。高橋ほか (2000) の事例における土壌の pH は自然林で 4.5 ~ 5.0、造成林で 6.3 ~ 7.5 と新宿御苑における SG2 と SG1 の関係性と類似していた。今回の事例では新宿御苑において全炭素量が SG1 で 29.7 gkg^{-1} 、SG2 で 158.8 gkg^{-1} と SG2 の方が高かったが、土壌呼吸量との間に正の相関関係はみられなかった。

土壌 pH について見ると、自然教育園内において田中ほか (1990) では土壌 pH と土壌呼吸量の間には正の相関が存在することを述べている。

本研究において自然教育園では NS3 (5.0) に比べて NS1, 2 (6.0, 6.5) では土壌 pH が高くなっていた。坂上ほか (1978) によれば、自然教育園の表層土壌 (A1 層) の pH (H_2O) は 4.7 ~ 4.9 と低いことが報告されている。人為的な影響が小さい NS3 では土壌 pH は上記の値に近い値を取っていた。

土壌上の NS2 は園内の縁辺部に位置しており、コンクリートの擁壁を隔てて首都高速道路が通っている。岡崎ほか (1981) では、コンクリートから炭酸カルシウムをはじめとする塩基類物質の溶出や破碎粒子の混入によって土壌中の pH が上昇することを述べている。また、Smolders & Degryse (2002) では、都市域は自動車の巻き上げる粉塵やタイヤからの放出物の影響で道路脇の土壌 pH が高くなることを述べており、この地点でも隣を通る高速道路と自動車の影響により pH が高くなったと考えられる。

pH の高い 2 地点 (NS1, NS2) は土壌呼吸量も NS3 の雑木林内と比較して高い地点であり、今回の観測においても土壌呼吸量と pH の間には正の相関が見られたことから、pH の差異も土壌呼吸量の地点間差をもたらしたと考えられる。

新宿御苑の土壌 pH は、コンクリート片の混入が見られた SG1 で 7.2 の中性付近、SG2 で 4.8 の強酸性だった。新宿御苑においても土壌呼吸量は高い pH を示した SG1 で大きな値を示したことから、土壌 pH の差異が土壌呼吸量の地点間の差をもたらしたと考えられる。

以上より自然教育園、新宿御苑ともに pH の高い地点で土壌呼吸量が高くなる傾向があった。高橋(2000)では、松戸市の都市公園において自然林 (pH4.5 ~ 5.0) よりも高い土壌 pH (pH6.3 ~ 7.5) を示した造成緑地では、高い土壌 pH によって微生物活動が活発化され、比較的高い有機物の分解・無機化活性を示した。こうした微生物活動の活発化は土壌呼吸量の増加に繋がると考えられる。そのため、土壌図上では「AT-h (F) 厚層黒ボク土腐植質 (林地)」と分類され(東京都, 1998), 潜在的には pH の低い弱酸性の土壌を持つ東京都内の都市緑地では、人為影響に伴う pH の上昇により中性に近い土壌となることは土壌中の微生物活動を活発化し、土壌呼吸量が増加することが考えられる。

ま と め

都市緑地において土壌の物理化学的性状を変化させる人為的な影響が土壌呼吸量に及ぼす影響について検討することを目的として、自然教育園内の3地点、新宿御苑内の2地点において2015年10月、11月に土壌呼吸量を測定した。その結果、高い土壌 pH を持つ地点、土壌硬度が高く緻密な土壌を持つ地点で土壌呼吸量は高くなる傾向を示した。

自然教育園と新宿御苑の2つの都市緑地には、黒ボク土が分布し、潜在的には低 pH (酸性が強い) と低固相率(間隙率が大きく軟らかい)という特徴をもつ。したがって、コンクリート片やその粉砕物、道路脇の粉塵の混入などの人為的な影響により、土壌 pH が上昇し、中性に近くなることで微生物活動が活発化し、土壌呼吸量の増加へと繋がる可能性が示された。また、土壌硬度が高い地点では日中の地温の上昇が土壌深部まで及ぶことで土壌深部の地温が高温化し、土壌深部の微生物活動が活発化することで、土壌呼吸量が増加することが示された。

都市の土壌は、踏圧や造成による土壌硬度の増大と周辺道路、建造物や人工混入物からのカルシウムイオンをはじめとする塩基類物質の溶出に伴う土壌 pH の上昇が少なからず進んでいるといえる。土壌性状のこうした変化により、土壌呼吸量、すなわち土壌中の微生物活動を介する炭素循環に顕著な変化が現われる可能性がある。

土壌呼吸量は時空間的な変動も大きいことから、都市緑地における土壌呼吸量の長期観測を踏まえて人為活動及び造成が土壌生態系に及ぼす影響についてさらに検討していく必要がある。その際には、自然教育園の土壌生態系は、都市域の潜在的な特徴を把握するために欠かせないものとなる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、国立科学博物館附属自然教育園の矢野亮先生には研究の構想段階から観測地点の選定、観測まで多くのご協力を頂きました。また、国民公園新宿御苑管理事務所の皆様には、園内における土壌調査の機会をご提供頂きました。ここに感謝の意を表します。

引 用 文 献

Chen, W., Jia, X., Zha, T., Wu, B., Zhang, Y., Li, C., Wang, X., He, G., Yu, H., Chen, G. 2013. Soil respiration in a mixed urban forest in China in relation to Soil temperature and water content. *European Journal of Soil Biology*, 54 : 63-68.

- Fang, C. & Moncrieff, J. B. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33 (2) : 155-165.
- 環境省. 2015. 都市公園の現状 (都道府県別). 『平成 27 年版 環境統計集』 151pp-153pp. http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/pdfdata/H27_3.pdf
- 木部 剛・鞠子 茂. 2004. 土壌呼吸の測定と炭素循環. *地球環境*, 9 (2) : 203-212.
- Luo, Y. & Zhou, X. 2006. *Soil Respiration and the Environment*. 79 pp-104 pp. ELSEVIER, Amsterdam.
- Miyajima, S., Uoi, N., Murata, T., Takeda, M., Morishima, M. & Watanabe, M. 2015. Effect of structural modification on heat transfer through man-made soils in urban green areas. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61 : 70-87.
- 村田智吉・田中治夫・川井伸郎・矢野 亮・渡邊眞紀子. 2012. 自然教育園内における深度別地温の変動. *自然教育園報告*, 43 : 1-10.
- 中野智子・亀井千絵. 2001. 人工造成地における土壌からの CO₂ フラックスの日変化. *農業気象*, 57 (3) : 155-159.
- 岡崎正規・山根一郎・石田裕二・宮田千. 1981. 街路土壌アルカリ化と重金属汚染. *農業土木学会誌*, 49 (9) : 13-17.
- 坂上寛一・山崎美津子・平山良治・浜田竜之介. 1978. 自然教育園の代表的植生の土壌と水分環境. *自然教育園報告*, 8 : 20-38.
- 坂巻義章・伊野良夫・大島康行. 1979. 自然教育園四林分の土壌呼吸について. *自然教育園報告*, 9 : 91-98.
- Smolders, E. & Degryse, F. 2002. Fate and Effect of Zinc from Tire Debris in Soil. *Environ. Sci. Technol.*, 36 (17) : 3706-3710.
- 田畑貞寿. 2011. 緑被地と都市環境. 『緑と地域計画Ⅱ 緑被地と空間機能』 1pp-82pp. 古今書院.
- 高橋輝昌・小出恭子・浅野義人・小林達明. 2000. 松戸市「21世紀の森と広場」における植生形態の異なる緑地の土壌養分特性の比較. *日本緑化工学会誌*, 25 (3) : 196-207.
- 田中治夫・伊藤一之・本馬昌直・坂上寛一・浜田龍之介. 1990b. 自然教育園のハイドロカタナの土壌(3) : 微生物量および微生物活性と水溶性有機物. *自然教育園報告*, 21 : 109-115.
- 東京都. 1999. 土地分類基本調査「東京東北部」「東京東南部」5万分の1土壌図. 東京都.
- 塚原高志・山寺喜成・宮崎敏孝. 2002. 土壌呼吸量測定による土壌環境評価に関する研究. *日本緑化工学会誌*, 28 (1) : 220-223.
- 魚井夏子・渡邊眞紀子・村田智吉. 2012. 自然教育園における鉛直方向の土壌高度と土地利用履歴との関係. *自然教育園報告*, 43 : 37-45.
- Wang, W., Zeng, W., Chen, W., Zeng, H., Fang, J. 2013. Soil Respiration and Organic Carbon Dynamics with Grassland Conversions to Woodlands in Temperate China. *PLoS ONE*, 8 (8) : Article number e71986.
- Weissert, L. F., Salmond, J.A., Schwendenmann, L. 2011. A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO₂ emissions. *Urban Climate*, 8 : 100-125.
- 山田 勤. 2001. 自然教育園内における地温分布. *自然教育園報告*, 33 : 401-410.