

自然教育園内の台地縁辺斜面における土壌侵食特性

渡邊眞紀子^{1,*}・赤坂郁美²・田代 崇³・長田強志³・村田智吉⁴・遠藤拓洋⁵

¹東京都立大学, ²専修大学, ³日本大学, ⁴国立環境研究所, ⁵国立科学博物館附属自然教育園

Makiko Watanabe¹, Ikumi Akasaka², Takashi Tashiro³, Tsuyoshi Osada³, Tomoyoshi Murata⁴, Takumi Endo⁵: Characteristics of soil erosion on upland margin slopes in the Institute for Nature Study. Miscellaneous Reports of the Institute for Nature Study (54): 27-36, 2022.

¹Tokyo Metropolitan University, ²Senshu University, ³Nihon University, ⁴National Institute for Environmental Studies, ⁵Institute for Nature Study, National Museum of Nature and Science

はじめに

自然的営力のみが働くことによって生じる表土流出は、土壌の性質、地形傾斜、気象などの無機的条件と、動植物群の生生活動との間にほとんど完全な均衡が保たれているが、降雨や台風などの組み合わせによって土の流亡はわずかながら起こる。この場合、侵食土量よりも自然の風化作用によって生成される土壌量の方が多いので、自然侵食はほとんど問題にならないとされる（砂防学, 1992）。自然教育園では10000本以上の樹木が記録されており、その大部分を自然の遷移のままに管理しているため、有機物の供給と分解による物質循環によって土壌の生成が進む環境下にあると考えられる。しかしながら、台地縁辺部の斜面や土塁斜面では、樹木の生長に伴う根上り、樹幹流の増加、倒木などによる土層の攪乱や、開空率の増大といった植物の生生活動に伴い土壌侵食現象が加速されることも予想される（田代ほか, 2020など）。また、近年の都市部の短時間強雨、台風による大雨などの気象イベント（金井ほか, 2019；赤坂ほか, 2020）や、土壌の膨軟化・乾燥化（魚井ほか, 2012；川井ほか, 2013）といった土壌性状の変化によっても、土壌侵食現象が加速的に進むことが予想される。自然教育園の文化財である土塁においても、土塁比高の低下や形状変化として顕在化していくと考えられる（長田ほか, 2021）。斜面の土砂移動の実証的な研究を行う際には、降水量や斜面の植被率などに関する基礎的な情報が重要

となる（森林立地調査編集委員会, 2010）。そこで、本研究では自然教育園における斜面地形を対象に、自然侵食量に関するモニタリングデータを取得し、園内の降水データを活用して強雨が土壌侵食に及ぼす影響について検討することを目的とした。

モニタリング手法と期間中の降水概況

本調査では、対象斜面に塩化ビニル製のパイプ状の杭（以下、塩ビパイプ）を打ち込んで、地表面からの杭の高さを計測することによって土壌侵食量を求めた。この手法は原始的ではあるが、斜面の侵食量を直接に測定する方法であり、侵食現象を理解する上で適した方法でもある（砂防学会, 1992）。杭の設置地点は、田代ほか（2019）で示されたひょうたん池の集水域に含まれる西側の台地斜面の上部（A）、中腹部（B）、下部（C）の3つのエリアを選定した（図1, 2）。各エリアの傾斜量は、A:1~4°, B:18~20°, C:14~18°で、Aはほぼ平坦面、BはCよりも急傾斜であるが、BとCエリアとも直線斜面であった。エリアAでは3本（A1, A2, A3）、エリアBで4本（B1~B4）、エリアCで4本（C1~C4）の計11本の塩ビパイプ（90~180cm）を打ち込み、堆積腐植層の厚さ（cm）と塩ビパイプ長（cm）を計測した。堆積腐植層は、ほとんど分解されていない有機質層（L層、国際土壌学連合の新分類ではOi層）と分解が進み、

*E-mail: m.wata@tmu.ac.jp

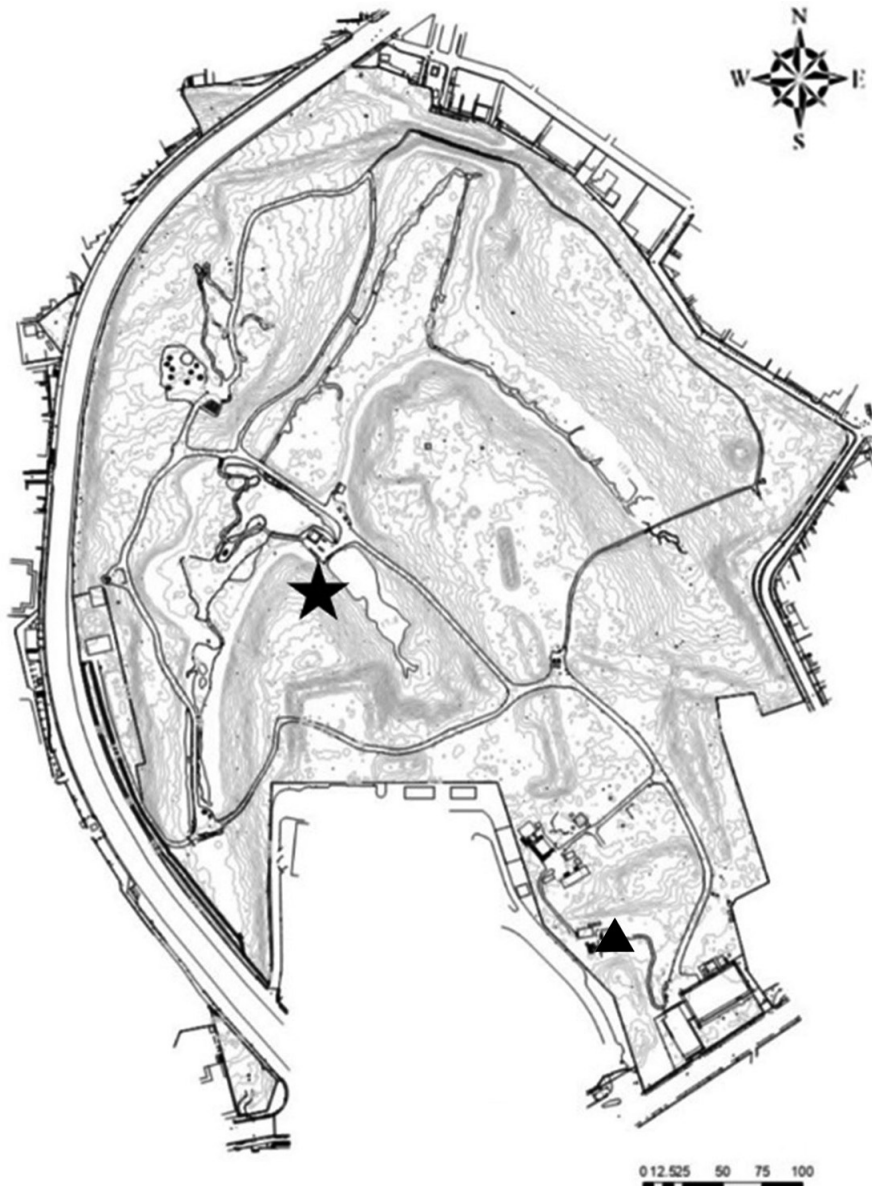


図1. 土壌侵食モニタリング調査の実施場所 (★) と雨量観測点 (▲) の位置図.

元のリターの形がわからない程度に粉状に細くなった有機質層 (H層, 国際土壌学連合の新分類ではOa層) を区別してそれぞれの厚さを計測した。なお, 傾斜地での計測であることから, 堆積腐植層の厚さは, 塩ビパイプが設置されている地点で直径約50cm (リター用) と20cm (H層用) の2種のドーナツ状円盤を用いて, 塩ビパイプを取り囲む4方位で塩ビパイプの地上部先端との長さをコンバックスで計測し, その平均値を記録した。パイプ長はリター層, H層を除去し, A層直上からパイプ先端までの長さを4方位で計測し, 平均を記録した。本手法による計測値の精度は $\pm 0.5\text{cm}$ である。なお, 塩ビパイプの埋設が行われた2018年6月以降, 2019年10月に台風第19号 (以下, 台風19号) により自然教育園

でも一日で223mm (10月平均降水量に相当) の降水があり, 園内で「おろちの松」の倒木など大きな被害が出た。2019年8月にはひょうたん池東側で倒木したマツが池の西側の樹木にかかり, 根返りによって池の西側の岸が崩落した。この影響で池の西側の倒木除去と整地作業が行われ, モニタリング地点C3周辺で土層攪乱の影響があったため, 以降のC3のデータを欠損とし, 新たな地点としてC4を2019年9月に設置した。また, 中腹部Bエリアでは, 近傍でマツの倒木があり, B2の観測点が人為的な影響を受けた可能性があったため, B2のデータを欠損とし, 計測精度を維持するために, 2019年9月に新たな地点B4を増設して計測を開始した。塩ビパイプの設置は2018年6月に行い, 2018年11月~2021

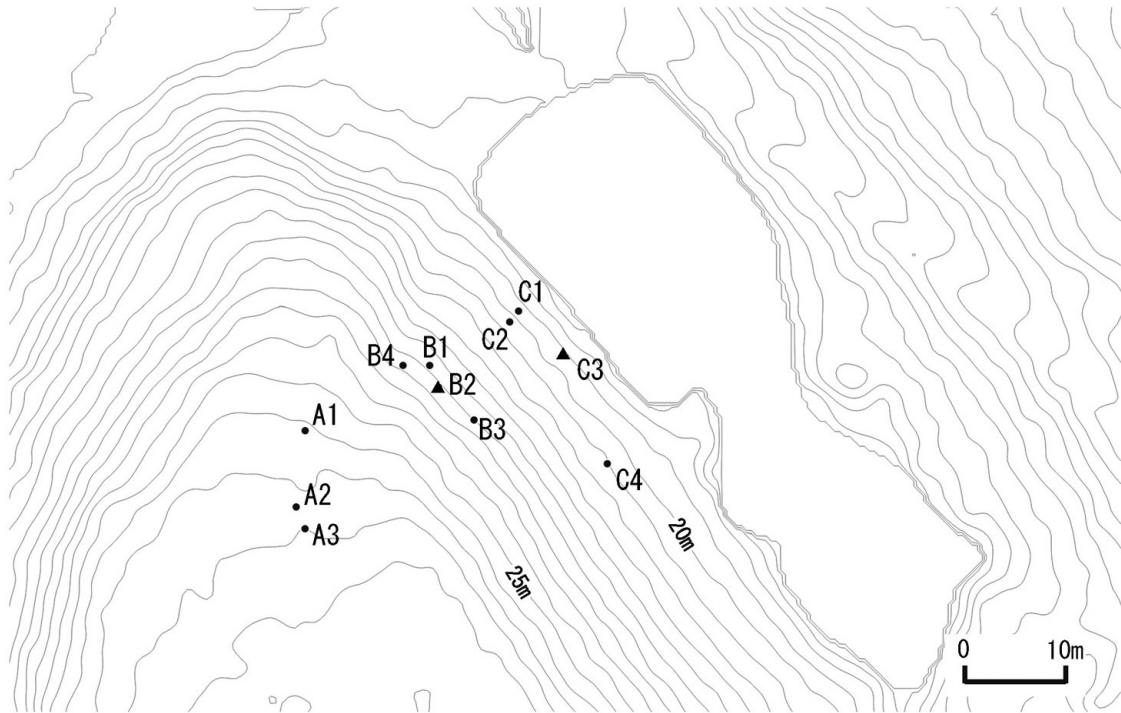


図2. 塩ビパイプ杭によるモニタリング地点 (A1～A3, B1～B4, C1～C4) の位置図.

年11月までの3年間について、おおよそ2ヶ月毎に計測を行った。

塩ビパイプ設置地点には裸地はなく、自然教育園による2010年毎木調査データと現地観察により塩ビパイプ設置場所周辺の樹木の種類を把握した。また、地上植被率の違いや変化を写真撮影により記録した。

自然教育園における1990年7月～2011年6月の降水観測データを用いて、約20年の降水特性とその経年変化について、様々な時間スケールで分析を行った赤坂ほか(2018)によれば、年降水量には1990年代後半以降に増加傾向が、年降水日数には若干の減少傾向がみられた。また、2019年まで解析期間を延ばすと、2000年代以降に、台風の影響により10月の最大日降水量がそれまでより多くなる年が頻繁に見られた(赤坂ほか, 2020)。本研究では、土壌侵食に影響を及ぼす可能性が高い台風の降水や短時間降水に着目し、土壌侵食量との対応関係を調べる目的で、モニタリング期間(2018年11月～2021年11月)の3年間に自然教育園で観測された日降水量データを用いた。なお、2020年10月中旬～12月初旬に連続したデータの欠測があったため、当該期間の降水量を、気象庁のアメダス東京の値で補った。解析対象の3年間の降水概況は、2019年と2021年に、1991～2010年平均(1474mm)よりも年降水量が多く、2019年は1895.5mm、2021年は2012.0mmであっ

た。2019年は10月の台風19号により、2021年は梅雨前線による大雨と8月の停滞前線の影響により、年降水量が多くなった。2020年の年降水量は約1670mmと平均よりやや多かったものの、台風が上陸しなかったこともあって、日単位や時間単位での強雨イベントの発生は相対的に少なかった。

結果と考察

本研究の対象斜面の植生環境は、3つのエリアにおいていずれも各種落葉高木(ミズキ、コナラ、キハダ、コブシ、エゴノキ、イイギリ、イヌシデ、ムクノキ、ミツデカエデ、アカメガシワなど)と常緑高木(シロダモ、オオツクバネガシ、ネズミモチ)が混生する林分であったが、斜面上部の平坦面のエリアAではシュロの低木とシロダモが、東向き斜面のエリアBとCは常緑小高木のヒサカキや常緑針葉樹のアカマツ、常緑低木のアオキや林床植生のアズマネザサによって特徴づけられていた。リターの樹種構成はエリアAでは落葉広葉樹起源であったのに対して、エリアBとCはマツ起源が多く、とくにエリアBでその特徴が強かった。

堆積腐植層の厚さに関するモニタリング結果を図3と図4に示す。森林の堆積腐植量は、一般に落葉期である

11月～2月に増大し、有機物の分解が進む6月～9月の暖候期に減少する。傾斜量が1～4°と平坦なエリアAでは、この季節変化が明瞭に現れていた(図3)。一方、斜面の傾斜量が18°以上のエリアBとCでは、エリアAのような明瞭な季節変化は見られなかった。L層の層厚は全地点でA1が最大(2～9cm)で変動幅も大きかった。

斜面上部平坦面のエリアA2とA3では2～6cm、急斜面のエリアB(B1～B4)では2～7cmで変動幅が小さかった。エリアCではL層の層厚は1～6cmで、C1で全地点での最小値(1～4cm)を示し、変動幅も小さかった。H層の厚さの計測結果が図4である。H層が重力移動をせずにその場で残積しやすい環境ほど、土壌の腐

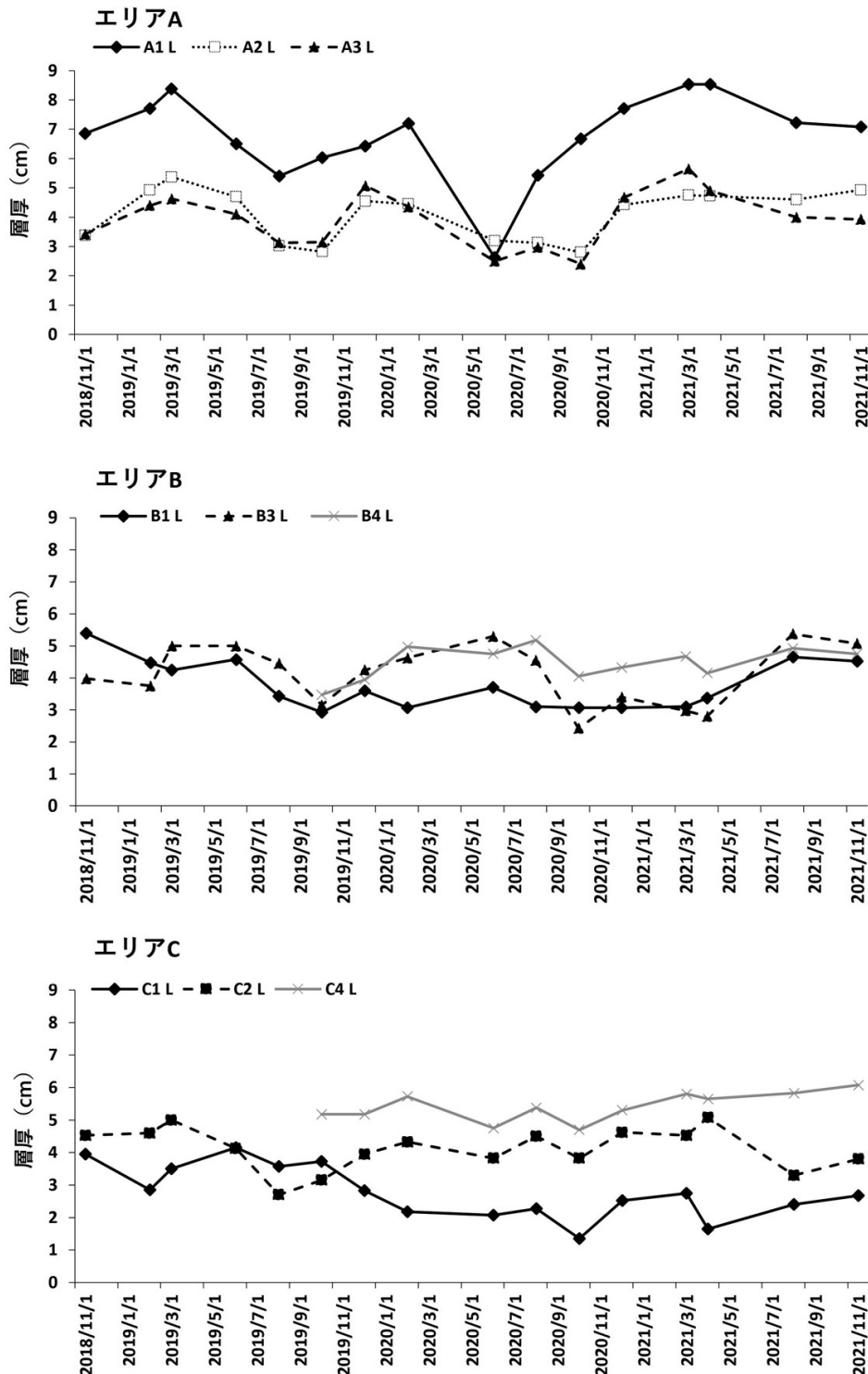


図3. 堆積腐植層(L層)の推移(2018年11月～2021年11月). (上) エリアA, (中) エリアB, (下) エリアC.

植成分となって土壌が発達することから、H層の厚さから、土壌生成の進み方を見た場合、エリアB、Cでは0～2cmを推移し、とくに中腹斜面のエリアBではH層の層厚の変動がもっとも大きくなった。これに対して、エリアAで0～3cmを推移しており、(台風前の)2019年9月までは、L層の層厚が大きいA1においてH層の

層厚も大きくなっていった。エリア間でのリター層とH層の層厚の推移を比較した場合、斜面上部平坦地(エリアA)では斜面中腹と下部の傾斜地(エリアB、C)に比べて土壌生成が比較的安定的に進んでいるといえる。

なお、土壌侵食現象は、水食だけでなく、風食によっても生じるが、観測期間中にL層がなくなることはな

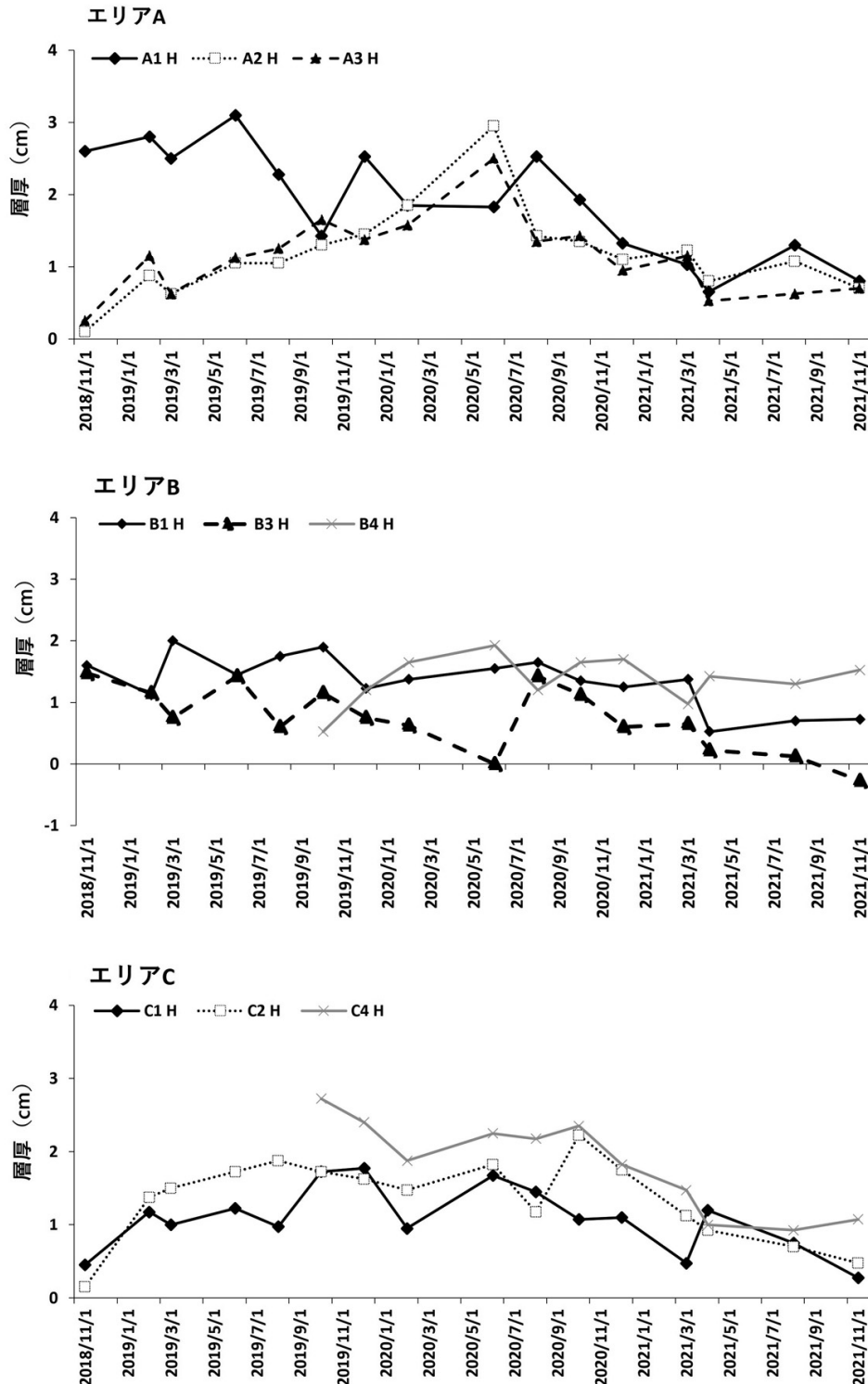


図4. 堆積腐植層(H層)の推移(2018年11月～2021年11月)。(上)エリアA、(中)エリアB、(下)エリアC。

く、風食の影響は小さいと考えられる。前述したように、本研究で対象とした斜面は植林地のような単相林ではなく、斜面上部のエリアAで落葉高木を主体とするリター量が最も大きく、斜面中腹（エリアB）と斜面下部（エリアC）でリター堆積量（L層の層厚）が少なく、さらに斜面下部（エリアC）でリターに占めるマツの割合が多いという特徴が見られた。こうした観測事実を踏まえると、渡邊ほか（2016）などによって指摘されているように、樹種によるリター被覆率やリターの性質の違いが表土移動に与える影響を考慮してモニタリングを行う必要もある。また、自然教育園では倒木や、大きな枝の落下などによる地上部の攪乱と開空率の変化が起きやすく、長期モニタリングを行う際には、こうした環境変化も留意する必要がある。

図5に解析対象期間の降水特性の推移を示す。ここでは、前測定日～測定日前日までの期間降水量、期間降水日数、期間平均降水強度、階級別降水日数を算出した。降水日数は日降水量0.5mm以上の日数、期間平均降水強度は、期間降水量を期間降水日数で除した値である。期間降水量は、梅雨期を含む測定期間に500mmを上回り、年降水量の4～6割に相当する降水がもたらされている。同様に、期間降水日数も、梅雨期を含む期間に最も多い。一方、期間平均降水強度は、2019年台風19号が関東平野を通過した2019年10月12日を含む1か月の値が最も大きく、24.3mm/dayとなった。この期間には、台風通過日には日降水量が50mm以上であったものの、その他の日の日降水量は20mm未満であったため、台風通過日に集中的な強雨があったといえる。次いで平均降水強度の値が大きかったのは、2021年4月29日までの期間の21.8mm/dayであった。この約2ヶ月間には、南岸低気圧の影響により、日降水量20mmを上回る降水が断続的に観測されたため、期間平均降水強度の値が大きくなった。

図6に観測期間（2018年11月～2021年11月）の塩ビパイプ長の平均偏差と降水強度を重ね合わせた図を示す。ここで示される塩ビパイプ長（cm）の平均偏差は、観測期間の平均値から計測値を差し引いた値である。まず、パイプ長の平均偏差の変動幅は、エリアAでは±1cm、エリアBでは±1.5cm、エリアCでは±1cmとなっており、斜面中腹のエリアBで大きくなっていった。また、エリアAでは、A2とA3が同様な傾向を示しているのに対して、A1はこれら2点と相反する推移を示している。A1は、A2とA3より標高が2m低く、谷線の近くに位置していることから、上述の結果を受けて、

移動した土砂を受け取る堆積場となっていると考えられる。エリアBとCに関しては、エリア内の地点の標高がほぼ同じであることから、観測期間中の変動の傾向はエリアの中では類似していた。

次に、降水強度と平均偏差についてみた場合、全体を見ると降水強度が大きくなるとパイプ長の平均偏差が小さくなる、すなわち土砂堆積が生じるといった傾向が示され、水食作用と侵食の明瞭な関係性は見出されなかった。しかしながら、降水強度が小さかった期間（2020年）では、いずれのエリアでもパイプ長の平均偏差が大きくなる、すなわち侵食傾向が強くなることが示された。エリアA・B・Cを個別にみると、降水強度とパイプ長との関係には多少の差異が見受けられる。まずエリアAに関しては、図6において一つ目のピークとなる台風19号に伴う降水強度の増加時（2019年10月18日頃）にA1～3のパイプ長がいずれも0.2～1.0cm減少し、その後1～2ヶ月の間に減少前を上回る0.6～1.2cmほど増加を示している。この傾向は、エリアCも同様であり、降水強度が増加すると同時に、C1～C4のパイプ長が0.8～1.0cm程度の減少を示し、その後約1カ月の期間で0.8～1.4cmの増加を示している。一方エリアBでは、B1～B4のいずれの地点でも降水強度が増加を示す前の2～6月頃より徐々にパイプ長の減少が見られ、降水強度の増加直後よりパイプ長の0.3～0.5cmの増加が確認できる。この違いの要因は、明確ではないが、観測地点の地形を反映した堆積・侵食作用の傾向と示唆される。すなわち、台地の斜面の頂部であり遷急点付近に位置するエリアAでは、降雨開始から上流側より移動してきた堆積物の堆積が始まるが、徐々に降雨強度が増すことで駆動力も増加し、一定の閾値を超えた際に、一転して侵食作用が大きくなる働きが考えられる。エリアCも同様に、台地斜面下部の遷緩点に位置することから、常に堆積環境が形成されており（田代ほか、2019）、降雨強度が閾値を超えるまでは、土砂の堆積が継続的に見られるが、これを超えることで一転侵食作用が大きくなり、パイプ長が長くなっているものと推測される。一方でエリアBは、平均傾斜角度が最も大きい斜面中腹部分に位置することから、時間あたりに働く堆積・侵食作用が大きい傾向にあるため、降雨に関わりなく常に表面物質の移動が起こっているものと考えられる。このため、降雨強度の漸増により、少しずつ堆積作用が強くなるが、閾値が低い場合、大きな堆積場を形成する前に侵食作用による下流への土砂移動が常時発生することで、極端なパイプ長の変化が起こらないことが予想される。

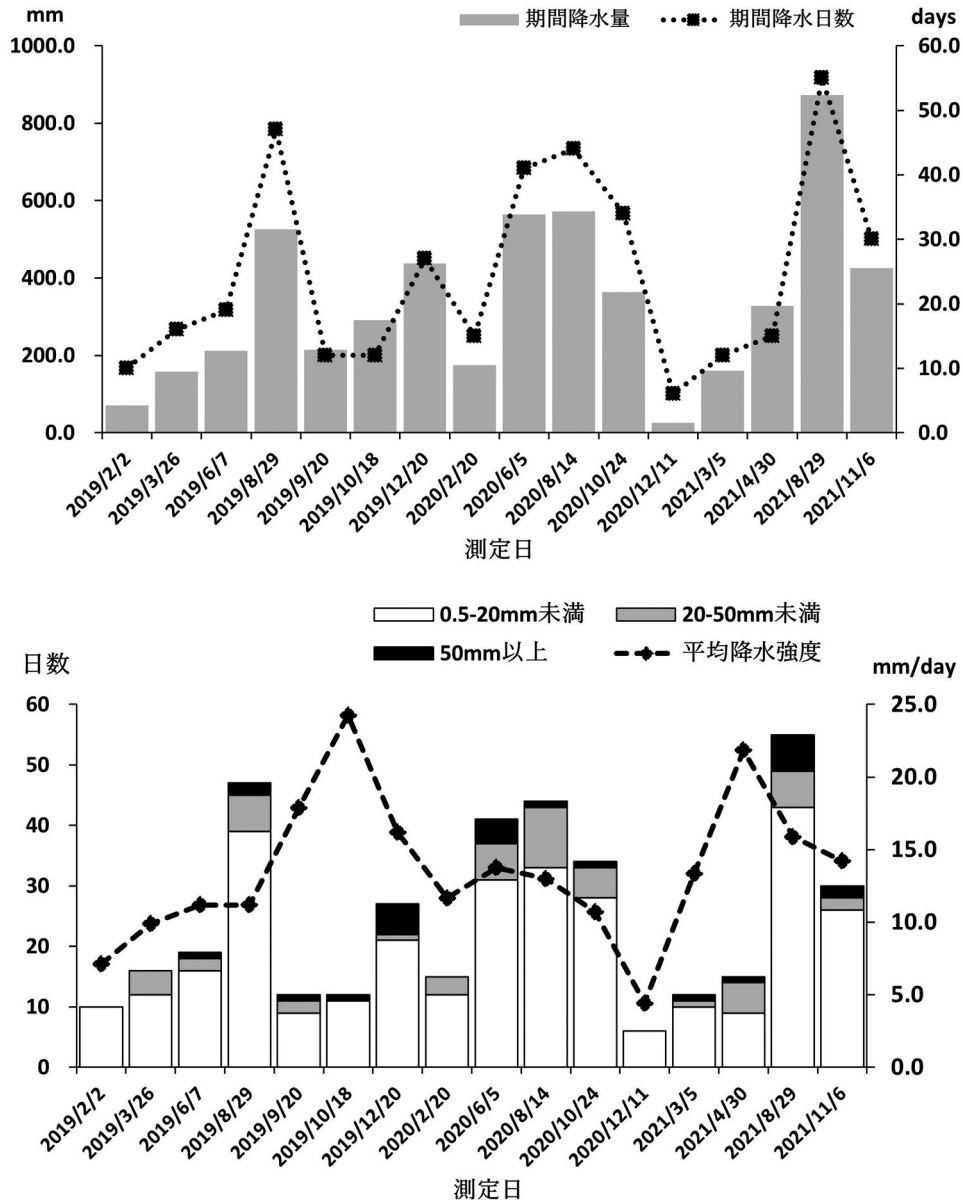


図5. (上) 測定日間の合計降水量, 降水日数, (下) 平均降水強度, 階級別降水日数 (2018年11月~2021年11月). いずれの値も, 集計期間は前測定日から測定日前日まで.

図5において南岸低気圧の影響に伴う2つ目のピーク (2021年3~4月頃) では, 比較的長期にわたる降水強度の漸増が認められる。このため, 前述の台風19号の影響と異なり, エリアA・B・Cいずれの観測地点においても降水強度の漸増が始まる時期 (2019年末頃) から緩やかな堆積傾向を示しているが, 降水強度のピークを過ぎると, 一転緩やかな侵食傾向に移行していることが確認できる。

図7は, 観測期間における塩ビパイプ長の推移を設置時のパイプ長から計測値を差し引いた値によって示しており, マイナスはパイプ長が設置時より短くなっている, すなわち土砂堆積量を表し, プラスはパイプ長が設置時

より長くなっている, すなわち土砂侵食量を表す。図6に示した降水特性との対応をみると, 平均降水強度がとくに大きい2019年10月の測定日頃に, 谷線近くに位置するA1で-0.3cm程の偏差の減少傾向 (堆積) が, 反対に2020年12月の測定日のように平均降水強度がとくに小さい場合には, +0.7cm程の増加傾向 (侵食) が見られるなど, 図7においても全体的に降水強度との間に負の相関関係が認められる。2019年10月中旬までの1か月間には, 台風19号の影響により日降水強度が極端に高い日があったことにより, 谷線近く (A1) ではA2, A3からの土砂の堆積が進んだ可能性がある。対して, モニタリング期間において, 降水日数, 降水量が共

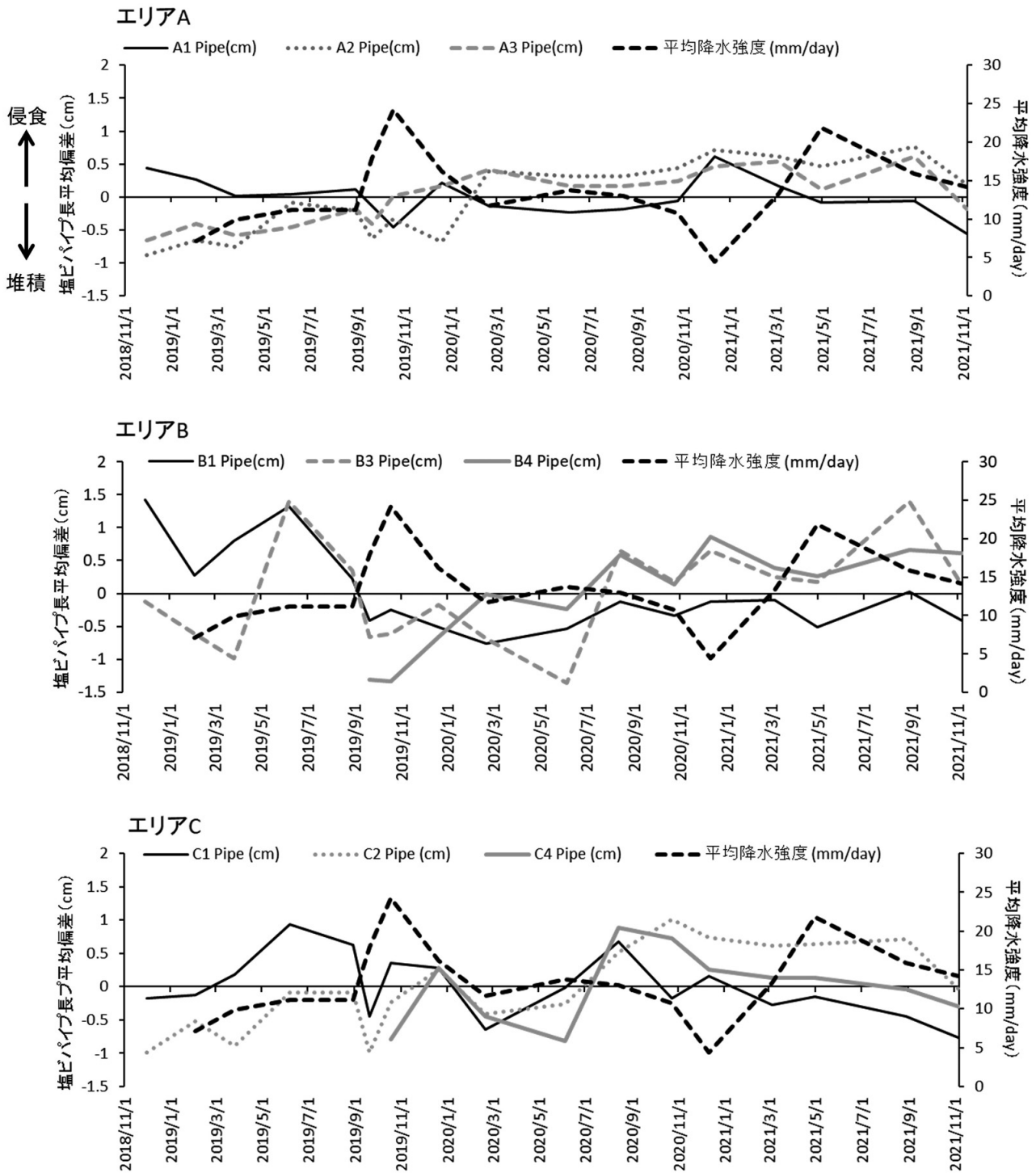


図6. 塩ビパイプ長の平均偏差と降水強度（2018年11月～2021年11月）.（上）エリアA,（中）エリアB,（下）エリアC. 塩ビパイプ長平均偏差は、観測期間の平均値から計測値を差し引いた値（cm）.

に最も少なかった2020年12月までの2ヶ月間には、侵食作用が進んだと考えられる。

また、2021年8月末の測定日までの4ヶ月間には、エリアA（A1を除く）とBで共通して、+0.3～1.2cmの偏差の増加がみられた。2021年8月末までの期間には、梅雨前線や8月の停滞前線の影響により、期間降水量、

期間降水日数、日降水量50mm以上の日数がモニタリング期間中で最も多くなっている（図5）。このように、強雨日数、総降水量共に増加する期間には、多地点で共通して侵食作用が進むことが示唆される。

エリアAからCに至る土壤侵食モニタリングの空間スケールは、直線距離でおよそ30mなので観測の空間

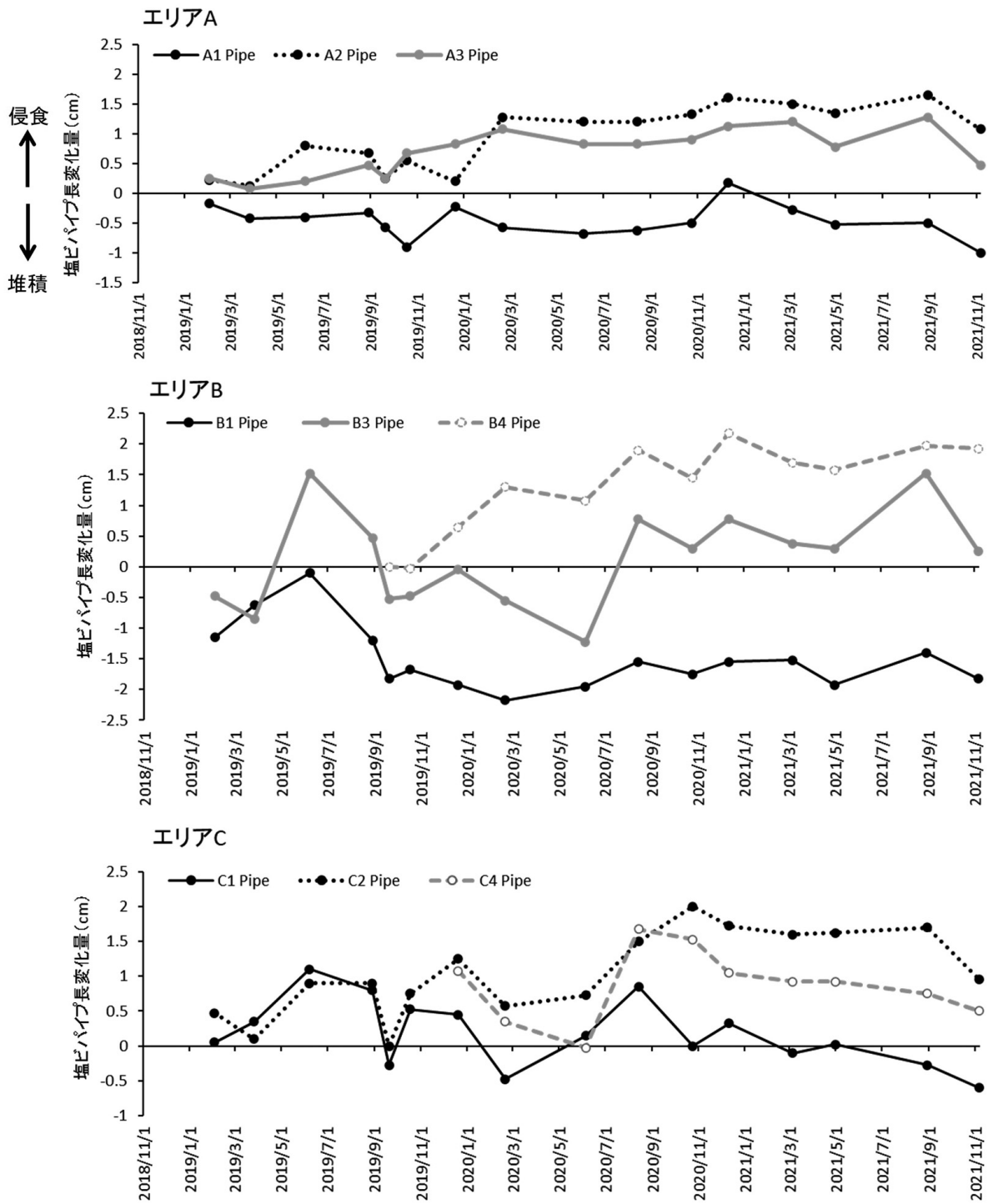


図7. 塩ビパイプ長の変化量 (2018年11月～2021年11月). (上) エリアA, (中) エリアB, (下) エリアC. パイプ変化量は、測定時の塩ビパイプ長から設置時2018年6月の塩ビパイプ長を引いた値 (cm). ただし、地点B4とC4の設置時は2019年11月.

規模としては比較的大きいといえる。一般に、観測区画のサイズが大きくなるほど、微地形要素が増加し、表面流の浸透の機会が増加し、かつ微凹地形は侵食土砂の堆積を促すため、斜面の発生している表面流や侵食現象は必ずしも斜面上部から下部まで連続性をもたない(五味, 2006)。本研究においても、斜面上部(A)→斜面中部

(B)→斜面下部(C)の土砂移動、すなわち斜面上部(A)が侵食場となり、斜面下部(C)が堆積場となる明瞭な関係性は見られなかった。むしろ、斜面上部(A)はリター供給が平坦地に多量に供給されるため、土壌が生成される場となっており、Aの中でも、A2、A3は土砂供給源となり、A1はそれを受ける堆積場となっていた。

斜面中腹 (B) の3点 (B1 ~ B4) は、地形図上では標高差がほぼ無い直線斜面上に位置しているが、侵食と堆積の変動幅が大きいことが示された。この変動は、倒木や落枝が誘発する微地形に起因すると考えられ、傾斜量が大きいものの、短い時間スケールで見た場合、必ずしも侵食場ではないことが明らかとなった。一方、斜面下部 (C) については、観測期間中は堆積場ではなく侵食場となっていることが判明した。このことは、斜面上部から土砂の移動・供給を受けるものの、斜面下部から土壌侵食が進む傾向があり、定常的なひょうたん池への土砂流入源となっている可能性が示唆された。

おわりに

本研究における対象斜面においてモニタリングに先行して2018年に行われた土壌硬度の鉛直分布と土壌断面の調査により、暗褐色～黒色の土層厚すなわち、心土 (ローム層) の出現深度は、斜面上部平坦面付近で40～60cm、斜面中腹で20～30cm、斜面下部で60cmであることが報告されている (田代ほか, 2019)。心土より上位の柔らかい土層の厚さは、長いタイムスケールでの自然侵食と土砂の運搬堆積の結果を指示していると考えられ、斜面上部 (本稿におけるエリアA) において侵食量と土壌生成量が均衡を保ちながら斜面中腹の急斜面 (本稿におけるエリアB) に運搬された土砂はさらに下方に移動し、斜面下部 (本稿におけるエリアC) に堆積している。このように土層厚から捉えると、自然教育園の台地縁辺斜面の土砂移動は、地形に起因する斜面の土砂移動現象の一般的な解釈と合致するものである。

本研究では、自然教育園内の台地縁辺斜面を対象として、雨量と土壌侵食のモニタリングデータを用いて降水強度と土砂移動の関係を調べた。その結果、3年間と限られた観測期間ではあるが、短いタイムスケールで自然侵食と降水現象の対応をよく捉えることができた。さらに、時間スケールが大きい場合は、侵食場になる斜面地形においても、時間スケールが小さい場合には堆積場にもなっていることが示された。また、侵食速度を求めるには至らなかったが、台地上部では侵食が進むことが実証されたとともに、リターの供給と分解による土壌生成現象および斜面における侵食と堆積の土砂移動現象を理解する上で貴重なデータが得られた。今後起こり得る加速侵食や地形変位に関して知見をさらに深めていくことが期待される。

引用文献

- 赤坂郁美・遠藤拓洋・渡邊眞紀子・矢野 亮. 2018, 自然教育園における1990年以降の降水特性とその変化. 自然教育園報告, 49: 41-48.
- 赤坂郁美・遠藤拓洋・矢野 亮. 2020, 自然教育園における10月の降水特性とその変化. 自然教育園報告, 52: 13-18.
- 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硬度と土地利用履歴との関係. 自然教育園報告, 43: 37-45.
- 金井優佳・赤坂郁美・遠藤拓洋・矢野 亮. 2019, 自然教育園における暖候期の短時間強雨特性. 自然教育園報告, 50: 13-20.
- 川井伸郎・村田智吉・田中治夫. 2013, 自然教育園における歴史的な人為からの土壌の自然再生. 自然教育園報告, 44: 25-36.
- 五味高志. 2006, 土壌侵食と森林. 森林科学, 47: 10-14.
- 砂防学会. 1992, 斜面の土砂移動現象. 砂防学講座第3巻. 山海堂.
- 森林立地調査法編集委員会編. 2010, 森林立地調査法 (改訂版) 森の環境を測る. 博友社.
- 田代 崇・渡邊眞紀子・赤坂郁美・坂上伸生・村田智吉. 2019, 自然教育園ひょうたん池集水域の土壌. 自然教育園報告, 50: 21-28.
- 田代 崇・長田強志・村田智吉・遠藤拓洋・矢野 亮・渡邊眞紀子. 2020, 自然教育園内における土塁の地形的特性. 自然教育園報告, 52: 7-12.
- 長田強志・田代 崇・村田智吉・遠藤拓洋・渡邊眞紀子. 2021, 自然教育園内の土塁斜面にみられる地形変化の解析. 自然教育園報告, 53: 49-54.
- 渡邊仁志・井川原弘一・茂木靖和・横井秀一・平井敬三. 2016, 植栽樹種の違いが同一斜面のヒノキ, スギ, アカマツ人工林の表土移動に及ぼす影響. 日林誌, 98: 193-198.