

## 踏圧の影響を受けた登山歩道路面の土壌物理性

瀧澤英紀・山室佑太・三島沙椰実・小坂泉（日大生物資源）

**要旨：**踏圧により登山歩道路面の浸透能が劣化し、小さな降雨強度においても地表流が発生し、歩道沿いを流下して登山道が侵食される場合がある。さらに進行すると、侵食深が増加して歩行困難となり歩道を迂回され、付近の森林土壌面が圧密され、登山道の幅員が拡大する。これらは、登山者数増大の影響と考えられ、歩道の補強、地表流排水など対策工以外にもオーバーユース規制などの対策が取られる。本研究では湘南二宮町と大磯町、小田原市周辺の3ヶ所の公園における登山道の透水性について、土壌硬度および間隙率などとともに合計27地点調べた。また、室内実験として森林土壌から透水性が劣化する状態について、直接踏圧を加えられる大きな断面をもつサンプル(31.5×41.5cm)により飽和透水係数の変化を調べた。また、踏圧により変化する孔隙特性も調べた。結果では、登山道路面の飽和透水係数は $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ cm/secと小さく、硬度23~30mmと硬質だった。また、実験では踏圧により飽和透水係数が $10^{-3}$ cm/secから $10^{-4}$ cm/secに劣化することが確認された。その際、圧密により大きな孔隙が潰れ、相対的に小さい孔隙が増えた。

**キーワード：**踏圧、登山道、飽和透水係数

**Abstract:** The soil physical property of the mountain trail of the three parks in Kanagawa prefecture was investigated. The measurement items of 27 points were saturated hydraulic conductivity, soil hardness, and a degree of porosity. In the laboratory experiment, the saturated hydraulic conductivity of the sample to which step pressures were applied was measured. Moreover, the pore characteristics of changing with step pressures were also investigated. In a result, the saturated hydraulic conductivity of the mountain trail road surface was small in  $10^{-3}$  ~  $10^{-4}$ cm/sec. Soil hardness was as hard as 23~30 mm. In the experiment, it was checked that saturated hydraulic conductivity decreases with step pressures in  $10^{-3}$ cm/sec to  $10^{-4}$  cm/sec. In the experiment, it turned out that the macro pore of the sample soil is crushed with step pressures and the small pore increases.

**Keywords:** step pressures, mountain trail, saturated hydraulic conductivity

## I はじめに

登山者の増加に伴い、多くの国立公園などで登山歩道の荒廃が問題となっている。特に山岳域の自然環境に対して人為の影響は大きく、大きな地表面傾斜や、風化作用など活発な地形形成作用、薄い土壌層、遅い植生回復などに特徴づけられる(5)。この登山歩道の荒廃の環境要因としては、傾斜角度や周辺植生などが挙げられ(1, 2)、人為要因では登山者数の総量が挙げられる(1, 4)。発生メカニズムについては、踏み固めによる透水性の低下や歩道表面流の増大により表面侵食が発達した結果と報告されている(3)。また荒廃の程度も様々であるが、歩道侵食深と幅員の拡大とに分けて考えられている(4)。対策としては表面流の洗掘力に対する歩道の補強と表面流の集中を防ぐ排水工法などや、登山者数増大の影響は大きく、オーバーユース規制などの対策が取られる。

本研究では、現地調査により歩道路面が踏み固められた箇所から森林土壌まで、透水性や硬度および間隙率の関係や、表面の状態や表面流の形跡などを調べた。また、実際に踏圧を加えて透水性が減少する過程を実験的に調べた。

## II 方法

**1. 現地調査** 神奈川県二宮町の吾妻山、小田原市の沼代の馬場と羽根尾公園、大磯町湘南平の3地点を選定した。日常的に登山道として利用され踏み固められた歩道周辺土壌の内、水溜りが残っていた箇所や表面流が流れた形跡がある箇所を中心に付近の森林地も含め対象とした。3地点それぞれにおいて、9か所1m×1mプロットを作成し、山中式土壌硬度計を用い、各箇所3回測定して値を平均して土壌硬度を求めた。また、100cc土壌サンプラーを用いて各プロット4サンプル採土し、間隙率と飽和透水係数を測定して平均値を求めた。3地点9プロットについて4サンプルを採土したので、合計108サンプルを測定した。

**2. 室内実験** 実際に踏圧を掛けられるサイズ(縦31.5cm横41.5cm深さ11.4cm)のサンプラーを用いて飽和透水係数を測定した。当初はサンプル上部に灌水させ動水勾配を掛ける装置を作ったが、踏圧をかけた後にサンプラーと土壌の密着性が保てず、正確に透水係数が測定できなかった。そこで、散水強度を徐々に上げ飽和透水係数を測定する方法を用いた。実験装置では直径0.6cmのチューブに1cm間

Hideki TAKIZAWA, Yuta YAMAMURO, Saemi MISHIMA, Izumi KOSAKA (Coll. Bioresource Sci., Nihon Univ., Fujisawa 252-0880) The soil physical property of the mountain trail surface damaged by step pressures

隔で穴をあけ、マスターフレックス送液ポンプを使用して散水装置を作成した。サンプラーに充てんする土壌は日大藤沢キャンパス付属演習林の表層土壌を採土し攪乱状態で用いた。踏圧は体重約50kgで23.5cmのスニーカーを履き、一つの足型に20回圧密を掛けてずらして満遍なく土壌に圧力を掛けた。また、40回の圧密を掛けた実験も行った。下部の滞水槽の上にサンプル土壌を設置し、表面から40cmの高さから散水した。流出量は装置下部のパイプから採取し、一定時間経過ごとに30秒間の流出量を測定し、同じ流量が3回以上続くことを確認した後、散水強度を上げて実験を繰り返した。その際、流出水が停止した後、チューブを装置から外し散水強度を正確に計測した。

踏圧により潰れた孔隙特性に関しては100ccサンプラーを用いて実際に圧力を掛けてpF試験を行った。藤沢キャンパス付属の演習林にて苗畑土壌を4サンプル採取し、直径4cmの丸太を使って、50kgの体重を使い瞬間的な圧力を0, 1, 10, 40回それぞれ満遍なく掛けた。pF試験は砂柱法および加圧板法を用いて行い、土壌水分特性曲線を求めた。

### III 結果と考察

1. 現地調査 図-1に土壌硬度と飽和透水係数の関係を示す。基本的に土壌硬度が高くなるにつれ飽和透水係数が減少する関係が見て取れる。土壌硬度23~30mmを示す土中への根系の伸長が制限される硬質な土壌では、飽和透水係数が $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ (cm/sec)という低い値を示し、浸透しにくい。土壌硬度が低い23mm未満では、飽和透水係数は $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$ (cm/sec)のような高い値を示し、浸透しやすいことが読み取れる。大まかには両者には右下がりの比例関係が存在していた。

次に、間隙率と飽和透水係数との関係を示す(図-2)。両者には3地点とも規則性は見いだせないが、表層土壌としては間隙率の小さい40~60%を示す値も多かった。

次に、間隙率と山中式土壌硬度の関係を示す(図-3)。こ

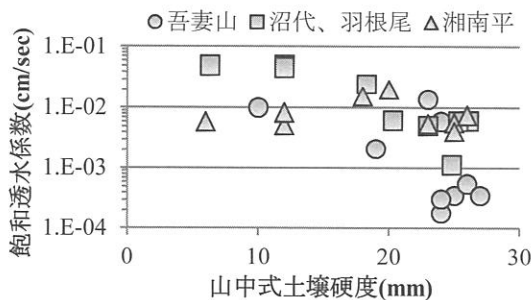


図-1 飽和透水係数と硬度の関係  
Fig.1 Relation between saturated hydraulic conductivity and soil hardness

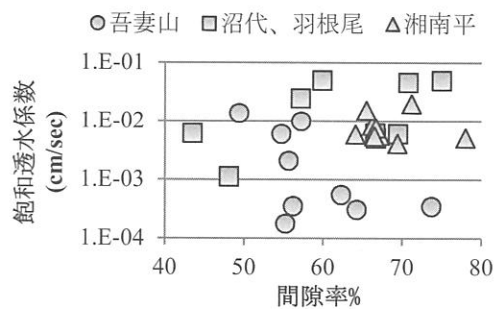


図-2. 飽和透水係数と間隙率の関係  
Fig.2 Relation between saturated hydraulic conductivity and porosity

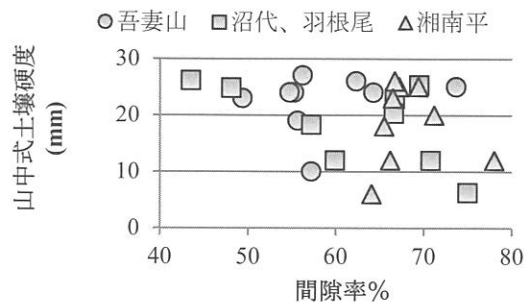


図-3. 土壌硬度と間隙率の関係  
Fig.3 Relation between soil hardness and porosity

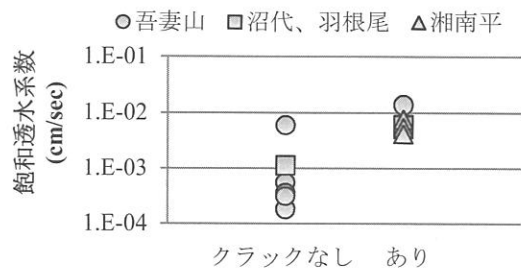


図-4. 土壌硬度23mm以上で地表にクラックがある場所の飽和透水係数  
Fig.4 Saturated hydraulic conductivity of the plot where the soil hardness of not less than 23 mm and a crack exist

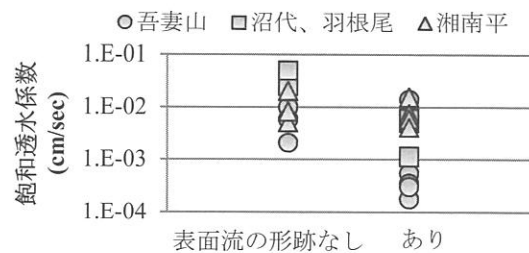


図-5. 表面流の形跡毎の飽和透水係数  
Fig.5 Saturated hydraulic conductivity of the plot which the surface flow generated

の図から同じ調査地点それぞれに、緩やかな連続性を見ることができ、間隙率が小さいと土壌硬度が高く、間隙率が大きいと土壌硬度は低いことが解る。

図4に土壌硬度 23mm 以上のプロットにおける、表面にクラックが確認されるものと透水係数の関係を示した。クラックのあるプロットは無いものに比べ、飽和透水係数が高い値を示した。これは硬質な土壌でも登山道のように表層の強い蒸発強度にさらされていると、クラックができ、極表層の透水性を上げる要因となり得ることを示す。さらに図5で、表面流が起こった形跡の有無について透水係数と比べると、表面流が起こった形跡があると、透水係数が低く浸透しにくくなっている。

**2. 室内実験** 実験 1 として、実際に踏圧を掛けて透水係数の測定を行った。まず、図6に踏圧を掛ける前の状態実験結果を示す。散水量と流出量を比較したところ、踏圧 0 回の土壌では、散水強度の最大値においても流出量と散水量が等しくなり、最大強度の 217mm/hr でも表面に水溜りを作らずに浸透させることができた。

20回の踏圧を加える実験(図7)では、散水量 26.8mm/hr までは散水量と流出量が等しいが、散水量 40.2mm/hr では流出量が下回った。しかし、流出量は徐々に増加せずにはほぼ一定の値に収束したように見える。サンプル表面の水溜りは、26.8mm/hr では小さかったが、40.2mm/hr では拡大し、76.8mm/hr では全面に渡り確認した。

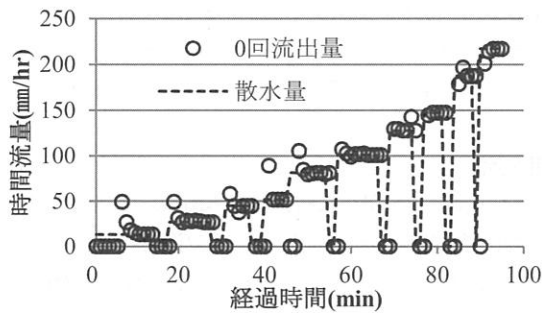


図-6. 0回の散水、流出量の経時変化  
Fig.6 Time series of rain and discharge under the initial condition

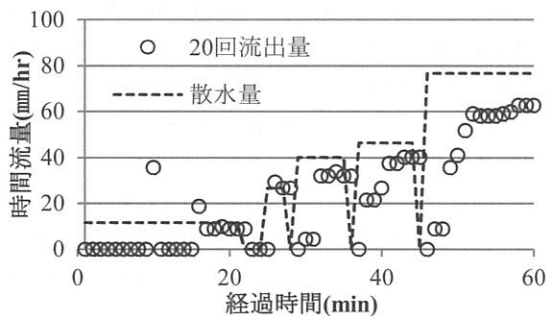


図-7. 20回の散水、流出量の経時変化  
Fig.7 Time series of rain and discharge after 20 times compaction

実験に用いたサンプルを数日排水させたのち、再び 20 回の踏圧を加え、合計 40 回踏圧実験を行った。これにより、土壌サンプルの厚さは実験開始前に比べて 1.2cm 程度低くなった。散水量 11.6mm/hr では、流出量はその半分の 4.5mm/hr であった。散水量 20.5mm/hr では、最大 11.6mm/hr の流出量となった。サンプル表面の水溜りは、降水量 11.6mm/hr の時点ですでに大きな水溜りを確認し、20.5mm/hr ではさらに拡大した。

ここで、本実験の様に湛水させず表面の水溜りを確認しながら飽和透水係数を決定する場合を考える。0 回の土壌では、散水量 217mm/hr と最大値まで流出させることができたが、20 回ではその半分以下の 40.2mm/hr において水溜りを確認し、流出量が散水量を下回った。よって、20 回の土壌は一つ前の散水量 26.8mm/hr と 40.2mm/hr の間に透水の限界点があると考えられる。40 回の土壌では、散水開始の 11.6mm/hr から水溜りが現れたことから、それ以前の 0mm/hr と 11.6mm/hr の間に透水の限界点があると考えられた。実験では水溜りができた後でも散水強度を増加させると流出量の増加が確認された。図9に踏圧を加えた実験における散水量と流出量の関係を示す。散水量を上げるにつれて 1 対 1 の点線から徐々に外れてくる特徴を示す。この差は、地表の水溜りの拡大に利用された分と考えられるが、水溜りの一部がサンプルと壁面の隙間に連続して、その亀裂を伝う流れが生じた可能性もある。本研究では、飽和透

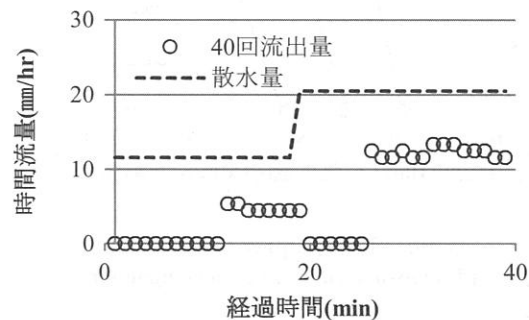


図-8. 40回踏圧の散水量と流出量  
Fig.8 Time series of rain and discharge after 40 times compaction

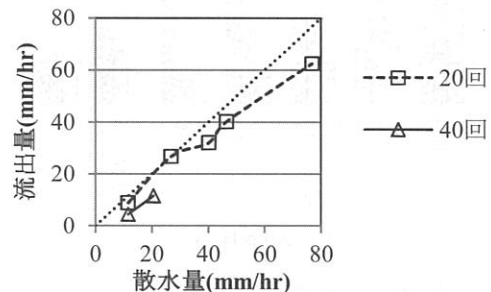


図-9. 踏圧毎の散水量と流出量の関係  
Fig.9 Relation between rainfall and discharge in each step pressure

水係数の算定に関して、流出量が散水量を下回って安定した時点の散水量とひとつ前の値の平均値を飽和透水係数とした。表-1 にそれぞれの踏圧回数と流出量、飽和透水係数を示す。

実験 2 として小サンプルを突き固めて pF 試験を行った。図-10 に圧密 0 回, 1 回, 40 回の土壌水分特性曲線の変化を示し, 図-11 に圧密毎の孔隙率の変化を圧力水頭別に示す。

表-1. 実物サイズの踏圧による飽和透水係数

踏圧回数	流出量	飽和透水係数 cm/sec
Count of step pressures	mm/hr	Saturated hydraulic conductivity
0 回	217.0 以上	$6.0 \times 10^{-3}$ 以上
20 回	33.5	$9.3 \times 10^{-4}$
40 回	5.8	$1.6 \times 10^{-4}$

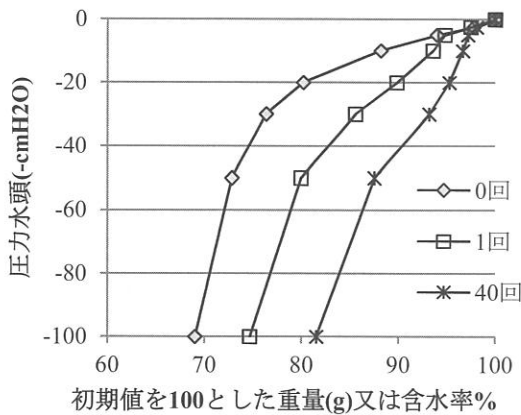


図-10. 圧密毎のpF水分曲線

Fig. 10 pF-moisture curve in each compactions

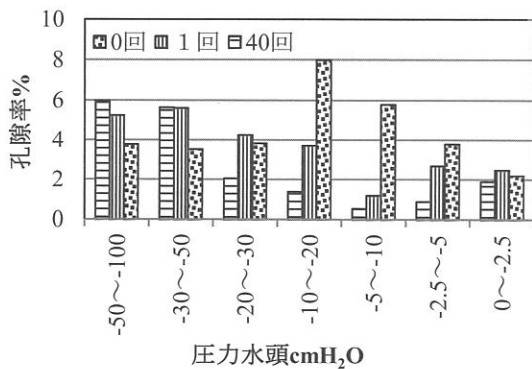


図-11 圧密毎の孔隙率の変化

Fig. 11 Change of pore distribution in each compaction.

土壌水分特性曲線の変化は 1 回目の圧密で最も大きく、圧力水頭 0~-100cmH<sub>2</sub>O に相当する孔隙は 5.7%減少し、40 回の圧密によって 12.5%減少した。そのうち、0~-2.5cmH<sub>2</sub>O に相当する大孔隙は踏圧でも変化が少ない。これは 1mm 程度の大きな土粒子の隙間の様な、踏圧でも潰れない大孔隙の影響と考えられる。また、-2.5~-20cmH<sub>2</sub>O に相当する大きな孔隙は 0 回では 17.6%存在したのに対して 1 回が 7.6%、40 回が 2.8%と減少していった。一方、-30~-100cmH<sub>2</sub>O では、0 回が 7.3%に対して 1 回が 10.9%、40 回が 11.7%と増加した。一般に、飽和透水係数はサンプル中の大孔隙の占める割合に強く影響される。すなわち、予備実験で生じたサンプラーと土壌の隙間や、現地調査でみられた地表のクラックが強く影響する。ここでは、圧力水頭 -2.5~-20cmH<sub>2</sub>O に相当する大および中孔隙では、踏圧で潰れて大きく減少して飽和透水係数を減少させ、-30~-100cmH<sub>2</sub>O に相当する孔隙は増加したがその孔隙径は小さく、飽和透水係数の増加には至らなかったと考えられる。

#### IV まとめ

本研究では公園登山道の飽和透水係数、土壌硬度、間隙率などを比較した。結果では、土壌硬度が 23mm と高いと飽和透水係数が低い  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ (cm/sec) のような低い値を示した。また、クラックにより飽和透水係数が変化することが分かった。室内実験では、踏圧により飽和透水係数が  $10^{-3}$ cm/sec から  $10^{-4}$ cm/sec に劣化することなどが確認された。また、踏圧で大きな孔隙が潰れて相対的に小さな孔隙が増えたが、飽和透水係数は減少する結果となった。

#### 引用文献

- (1) 朴 相獻・浅川昭一郎(1993)大雪山国立公園における登山道に関する研究. 環境情報科学 22:52-61
- (2) 彦坂洋信・小林達明・浅野義人・高橋輝昌(2000)丹沢山地における周辺植生に着目した登山道の荒廃要因の分析. 日緑工誌 25 : 221-229
- (3) PRICE, M. F. (1985) Impacts of recreational activities on alpine vegetation in western North America. Mount. Res. Develop., 5, 263-277
- (4) 塩野貴之(2007)II 登山道施設荒廃への影響分析. 丹沢大山総合調査報告書 794pp. 財団法人平岡環境科学研究所. 相模原
- (5) 渡辺悌二・深沢京子(1998)大雪山国立公園, 黒岳七合目から山頂区間における過去7年間の登山道の荒廃とその軽減のための対策. 地理学評論 71A-10 : 753-764