

火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地での 森林生態学と地盤工学的観点からの調査

INVESTIGATION ON SHALLOW LANDSLIDE SCARS OF SLOPES COVERED BY VOLCANIC ASH AND PUMICE FALL FROM THE VIEWPOINT OF FOREST ECOLOGY AND GEOTECHNICAL ENGINEERING

山本 健太郎¹・寺本 行芳²・永川 勝久³・平 瑞樹⁴

Kentaro YAMAMOTO, Yuki Yoshi TERAMOTO, Katsuhisa NAGAKAWA and Mizuki HIRA

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: yamaken@oce.kagoshima-u.ac.jp

² 鹿児島大学農学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-24)

E-mail: sabot@agri.kagoshima-u.ac.jp

³ 基礎地盤コンサルタンツ(株)大分事務所 (〒870-0033 大分市千代町 1-2-35 鈴木IIビル)

E-mail: nagakawa.katsuhisa@kiso.co.jp

⁴ 鹿児島大学農学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-24)

E-mail: hira@agri.kagoshima-u.ac.jp

Key Words: Shirasu natural slope, site investigation, in situ test, revegetation, soil development

1. はじめに

日本は森林が国土の約70%を占め、斜面崩壊の大半は表層崩壊(全体の約90%が表層崩壊)で、誘因である降雨の影響がかなり大きい。そのため、表層崩壊の危険性があるしらす自然斜面の安定性評価や抽出方法(用いるべき指標)などの提案は、災害発生前の予測手法として意義があると考えられる。そこで、我が国において、真っ先に亜熱帯化が懸念される九州地方の最南端に位置する鹿児島県において、森林生態学的と地盤工学的観点から、表層崩壊跡地での現地調査並びに原位置試験によるしらす自然斜面の安定性評価を行う。具体的には素因となる斜面特性の把握のために、植生(森林)生育状況などの現地詳細調査(検土杖、乾燥密度測定も含め)と、簡易的な原位置試験(簡易動的コーン貫入試験、土層強度検査棒)を実施する。特に、土検棒では斜面表層内部の粘着力と内部摩擦角の推定をはじめ、斜面の安定性評価も概略的に可能である。

2. 調査地概要

テストフィールドを鹿児島県垂水市に位置する鹿児島大学農学部附属高隅演習林に設定し(図-1参照)、定期的に植生が斜面安定に与える効果についての現地詳細調査と簡易的な原位置試験を実施してきた。テストフィールドは業務資料¹⁾、空中写真や現地調査(生長錐による樹齢調査や検土杖による表層土厚さなど)を基に表層崩壊の発生年が同定されたものを調査対象とした。2013年度時点で表層崩壊発生後の経過年数は8~58年の範囲となった。現在、同じ領域内であつ、北向き、ほぼ同じ標高(約520m)の6地点のしらす自然斜面を表-1に示すように設定した。表層崩壊跡地は35~40度程度の急傾斜を成し、表層崩壊面積は29~114m²の範囲である。

写真-1にはテストフィールドでの現地写真を示す。No.6では表層崩壊後の経過年数が最も大きく、No.1では経過年数が最も小さい。これを見ると、No.6では大きな樹木である常緑広葉樹が多く見られる。樹

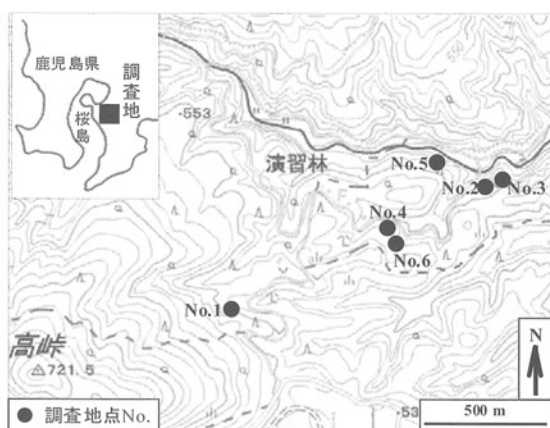


図-1 テストフィールド（国土地理院地形図）

表-1 テストフィールドでの表層崩壊特性

テストフィールド	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
表層崩壊発生後の経過年数（年）	8	12	22	28	40	58
斜面平均傾斜（°）	42	38	41	37	40	39
崩壊地の面積（m ² ）	42	36	29	34	61	114

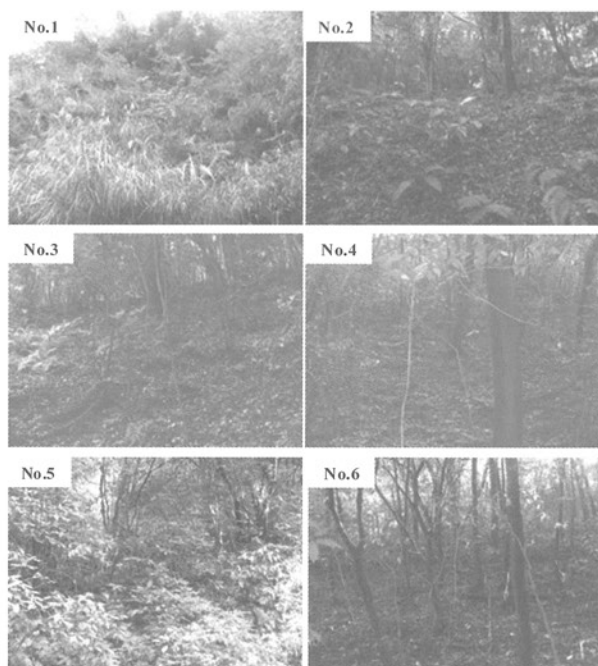


写真-1 テストフィールドでの現地状況

高 1m 以上では、アラカシ、スダジイ、タブノキなどの常緑性高木や、常緑性小高木のヒサカキ、ネズミモチが優占していた。樹高 5m 以上を構成する樹種は常緑性高木のアラカシ、スダジイ、ヤブニッケイ、タブノキ、ヤブツバキ、クロキであり、樹高 10m 以上を構成する樹種はアラカシ、スダジイ、タブノキ、クロキであった。樹高 1m 未満では、イブセンリョウ、イ

ヌビワなどが多く出現していた。最大樹高を示した樹種はアラカシで、その樹高は 13.6m であった。一方、No.1 では小さな雑木や雑草が多いことがわかる。樹高 1m 以上ではアカメガシワが優占し、これ以外にもヌルデ、センダン、ヒサカキ、クロマツなども多くみられた。樹高 4m 以上を構成する樹種は常緑針葉樹のクロマツであった。樹高 1m 未満ではイヌビワ、イブセンリョウなどが優占し、これ以外にもマルバウツギ、ヤブムラサキも多く出現していた。最大樹高を示した樹種はクロマツで、その樹高は 4.5m であった。

次に、粒径に関しては崩壊跡地の中腹で深さ 10cm の地点から採取した。どの地点においても粒径が 2.0 mm 以内のものがほとんどで、粗砂を圧倒的に多く含んでいた。例えば、No.6 では粒径 0.075, 0.25, 0.85 mm 以内のものがそれぞれ約 11%, 24%, 35% であった。一方、No.1 では粒径 0.075, 0.25, 0.85 mm 以内のものがそれぞれ約 6%, 16%, 25% であった。これらより、表層崩壊後の経過年数が大きい地点ほど、細粒分、細砂、中砂を多く含む傾向にあることもわかった。

3. 現地調査

現地詳細調査では、各地点において、樹種の同定、樹高と胸高直径（地上から 1.2m の高さの直径）、密度や樹齡、腐植土のチェック、表層土の厚さの計測などを実施した。まず、図-2(a)～(c)にはそれぞれ木本植生の個体数、種数および胸高断面積を表層崩壊発生後の経過年数に対してプロットしたものである。図中の実線はそれぞれの経年変化曲線を表す。図-2(a),(b)で示されている木本植生の個体数、種数は崩壊発生後 10 数年で最大となった後減少し、40 年以上が経過すると一定値を迎える。一方、木本植生の胸高断面積（図-2(c)）は経年的に増加し、個体数と種数が一定値を迎えた 40 年以降も増加していることがわかる。

図-3(a),(b)はそれぞれ Fisher-Williams の多様度指数 α^2 と全侵入木本植生の個体数に占める常緑広葉樹の個体数の割合を、表層崩壊発生後の経過年数に対してプロットしたものである。図中の実線はそれぞれの経年変化曲線である。なお、Fisher-Williams の方法では以下の関係式を解くことによって、 α を求めるものである。

$$S = \alpha \log(1 + N / \alpha) \quad (1)$$

ここに、 N : 全個体数、 S : 全種数で、これらは既知数である。図-3(a)での多様度指数 α は図-2(a), (b)と

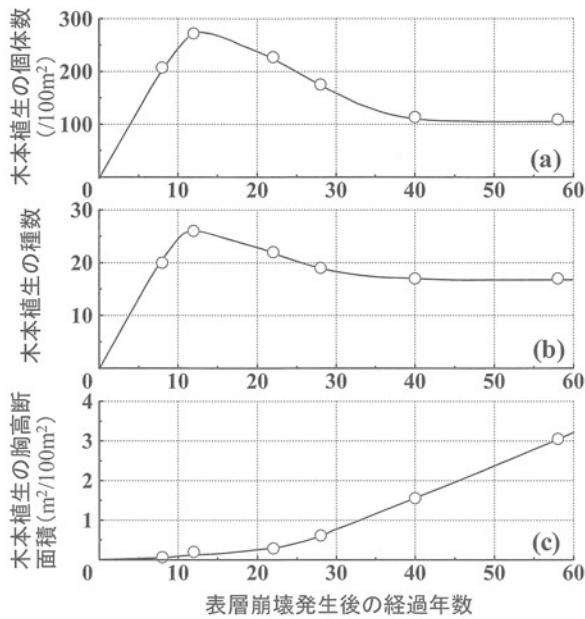


図-2 表層崩壊発生後の経過年数に対する木本植生の個体数、種数及び胸高断面面積

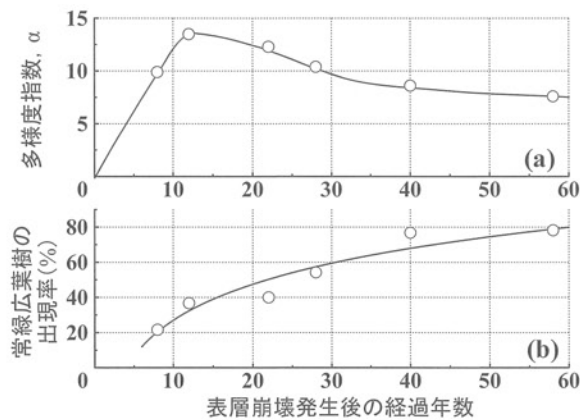


図-3 表層崩壊発生後の経過年数に対する多様度指数及び常緑広葉樹の出現率

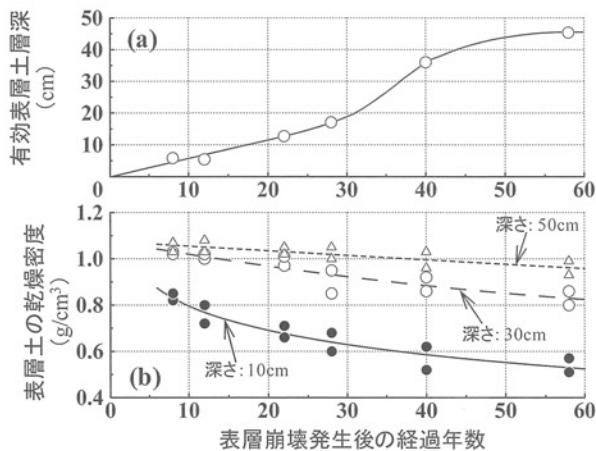


図-4 表層崩壊発生後の経過年数に対する有効表層土層深及び表層土の乾燥密度

良い相関を有し、崩壊発生後 10 数年までは大きな増加をするが、その後経年的に低下して 40 年以上が経過すると 8 程度となっている。よって、本研究の表層崩壊跡地における森林は、崩壊発生後 40 年以上を経過すると極相に達すると言える。また、図-3(b)より崩壊発生後の経過年数の増加に伴って常緑広葉樹の出現率は増加し、40 年以上を経過して極相に達した時点での森林では約 80% が常緑広葉樹で占められていることもわかった。

次に、図-4(a), (b)には有効表層土層深と表層土の深さ方向による乾燥密度を、表層崩壊発生後の経過年数に対してプロットしたものである。有効表層土層深は検土杖を用い、各地点全域での縦横断方向に 1m 間隔で行った測定結果の平均値である。また、乾燥密度を測定するために 1 つの表層崩壊跡地につき、斜面の上部と下部の 2 箇所土壤断面を設けた。そして、乾燥密度は、各土壤断面において地表から 10cm, 30cm および 50cm の深さの地点でそれぞれ、100ml のステンレス試料円筒を用いて不攪乱試料を採取することにより求めた。図-4(a)を見ると、有効表層土層深の発達は崩壊発生後 30 年頃までは穏やかであるが、その後次第に速度を増し、40 年程度を過ぎると少し鈍化している。58 年を経過した No.6 における有効表層土層深 (平均値) は 45.3cm であり、この値から有効表層土層深の発達速度を計算すると 0.78cm/year となった。この値は、鹿児島市のしらす地域における表層崩壊跡地で 0.45cm/year (80 年間の平均値)³⁾ と比べると大きいことがわかる。この理由としては、本研究における表層崩壊跡地の傾斜は 37~42° 程度であるのに対して、しらす地域におけるそれは 50° 程度であることに関係している。さらに、図-4(b)は No.1 ~ No.6 の各地点における深さごとの乾燥密度を、表層崩壊発生後の経過年数に対してプロットしたものである。図中の実線および破線は、それぞれの経年変化曲線である。なお、斜面の上部と下部で乾燥密度を測定したため、それぞれプロットが 2 つとなっている。これを見ると、表層土 (森林土壌) の発達は深さ 10cm の乾燥密度の値が示すように、比較的地表に近い部分からはじまり次第に深さ方向に進行している。崩壊跡地への森林の侵入は、森林の回復に伴う根系の発達や森林による有機物の供給を通じて土壌化を促し、これらの作用は比較的土壌の表層から進行していくことがわかる。これらの結果は、2. で述べた粒径加積曲線に関する結果とも調和的であった。

4. 原位置試験

簡易的な原位置試験として、簡易動的コーン貫入試験（通称：簡易貫入）⁴⁾と土層強度検査棒（通称：土検棒）⁵⁾を実施した。図-5, 6 には一例として、表層崩壊後の経過年数が最も小さい No.1 と最も大きい No.6 でのコーン貫入試験とベーンコーンによるせん断試験結果を示す。図-5(a)を見ると、打撃回数が 0 回でも貫入量が 9 cm となり、打撃回数が 1 回でも 25 cm まで貫入した。その後、貫入量が減少し、 N_d 値が増加していった。これより、貫入深さが 9 cm 程度辺りに表層土層深があることが推測される。なお、貫入深さが 1.5 m 程度において 10 回の打撃による貫入量が 20 mm 未満となったため、貫入を中止した。一方、図-5(b)を見ると、打撃回数が 0 回でも貫入量が 6 cm あり、貫入深さが 10 cm 程度までは N_d 値は増加しているが、その後、貫入深さが 60 cm 程度まで減少を続け、この辺りが表層土層深であることがわかる。また、貫入深さが 3.3 m 程度辺りから N_d 値が急に増加していることも観察される。

次に、図-6 にはベーンコーンにかかる鉛直荷重 W_{vc} (N) を 4-5 回変え、せん断試験を実施した時のベーンコーンにかかるトルク T_{vc} (N・m) との相関関係を示す。これらのケースに関してはかなり良い相関が得られ、以下の換算式⁵⁾により c 、 ϕ を算出する。No.1 に対しては、 $c_{dk}=10.46$ (kN/m²)、 $\phi_{dk}=19.86$ (deg.)、No.6 に対しては、 $c_{dk}=4.88$ (kN/m²)、 $\phi_{dk}=6.87$ (deg.) となった。下添字 dk は土検棒を表す。

$$c=10.16 \cdot Y_0 \quad (2)$$

$$\tan \phi = 12.04 \cdot X \quad (3)$$

ここに、 c ：粘着力、 ϕ ：内部摩擦角、 Y_0 ：近似式の Y 切片、 X ：近似式の傾きである。なお、この換算式は参考文献での参考式であるため、現在、室内一面せん断試験を実施しており、そこから得られた地盤強度パラメータとの比較検討も実施する予定である。また、図-7 には、テストフィールドの全地点での試験結果をまとめた表層崩壊後の経過年数に伴う c_{dk} と ϕ_{dk} の変化を示す。これを見ると、表層崩壊後の経過年数が大きいほど風化や森林の回復に伴う根系の発達や有機物の供給による土壌化が進行し、 c_{dk} と ϕ_{dk} が徐々に減少する傾向を有することがわかる。よって、一般的に表層崩壊後の経過年数が大きいほど風化や土壌化が表層から進行し、地盤強度パラメータである c 、 ϕ や乾燥密度が小さくなる傾向を有すると考えられる。ただ、原位置にて実際に試験を実施すると、軽石や根の影響が特に、せん断試験結果

に与える影響は大きいと感じた。

5. 土壌分析

テストフィールドの各地点での表層土壌を採取し、土壌の溶出液に対して pH、電気伝導率 (EC) 並びに誘導結合プラズマ発光分光分析を用いて、含有元素濃度の測定を実施した。土壌の溶出液は自然乾燥させた土壌 20g に蒸留水 50 g を加え、マグネチックスターラーで約 3 分間かくはんした後、上澄み液が透明になった約 10 分間程度放置したものを使用した。図-8, 9 には、測定結果をまとめた表層崩壊後の経過年数に伴う pH と電気伝導率の変化を示す。これを見ると、表層崩壊後の経過年数の増加とともに単調に pH は減少し、一方、電気伝導率は増加していることがわかる (No.6 において、pH=5.50, EC=10.96 mS/m)。これは土壌の酸性化が進むにつれて、腐植酸の効果により電解質が増えて、電気を通しやすくなったためだと考えられる。よって、順当に腐植が進行し、観察からも色自体が黒っぽくなることが確認された。

次に、含有元素濃度の測定結果からは、どの採取箇所においてもケイ素、カルシウム、硫黄、鉄などが検出された。このことから炭酸塩やケイ酸塩を含む鉱物を有することが推測される。

6. 終わりに

南九州（特に垂水市高隅地域）でのしらす斜面の表層崩壊の発生頻度は高く（表層崩壊の周期が短く）、樹木（常緑広葉樹）の寿命も長いため、木本植生の追跡調査が可能である。斜面崩壊は森林を伴っている場合がほとんどなため、従来からの地盤工学的な検討に加えて森林生態学的観点から森林を見ることにより、斜面の安定性を判断できる多様性指数や常緑広葉樹の出現率、有効表層土層深のような指標を定量的に提案していきたいと考えているところである。また、表層崩壊後の経過年数の増加につれて、森林の回復に伴う根系の発達や土壌化により斜面表層での地盤強度パラメータは一般的には小さくなると考えられる。しかし、樹木根系には補強効果があり、本研究からも崩壊跡地に森林が侵入し、おおまかに 20 年程度経過すると、根系の発達が確認され、森林が発達した地域では表層崩壊が生じにくくなると推測される。よって、簡易的な現地（植生）調査と原位置試験（検土杖や土検棒など）を実施することにより、表層崩壊の素因を調べることは崩壊予測の観点からも意義があると考えている。今後は、植生が斜面安定に与える効果（根系効果）についての

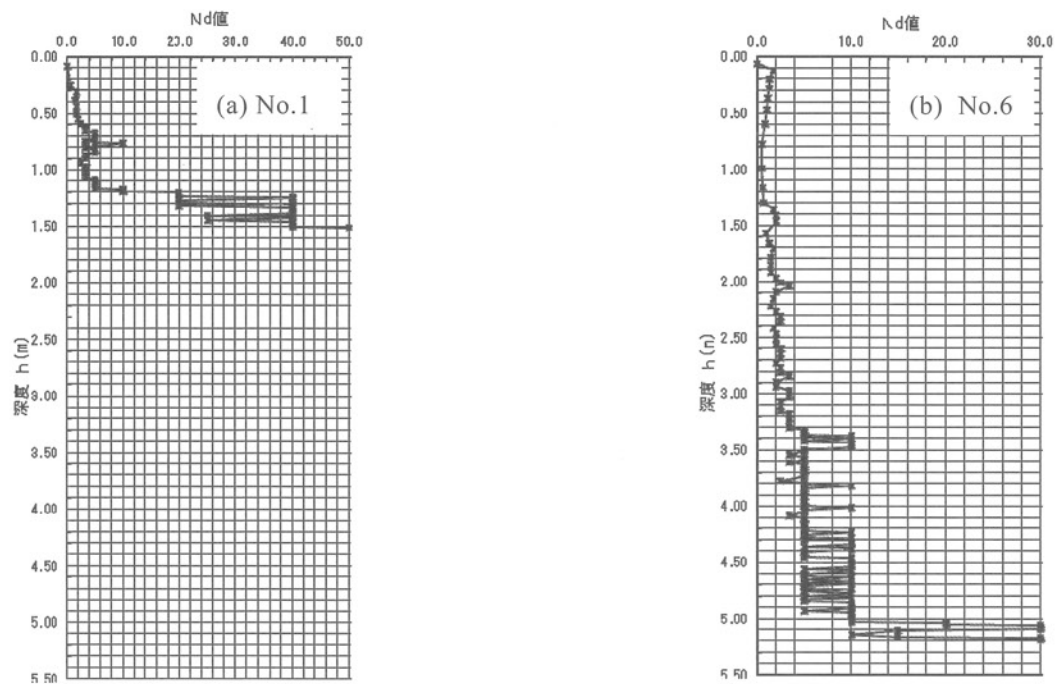


図-5 簡易動的コーン貫入試験結果

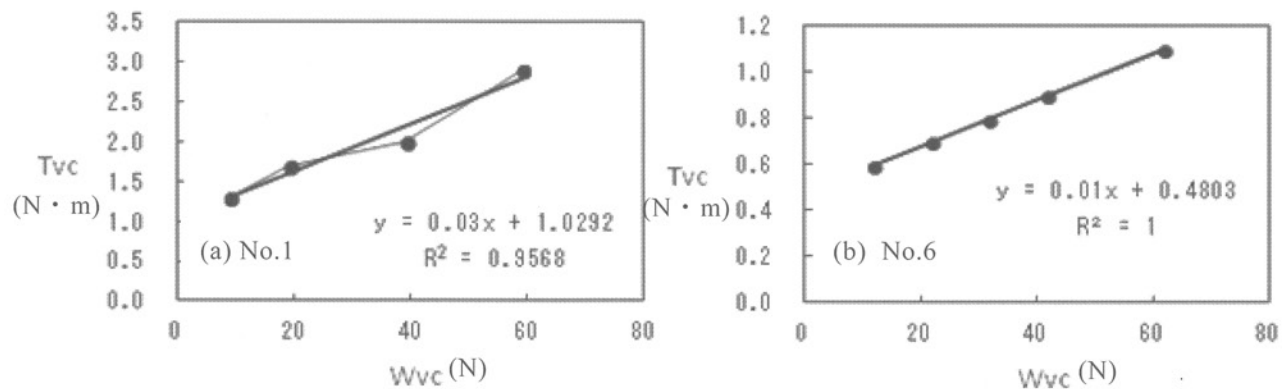


図-6 ベーンコーンせん断試験結果

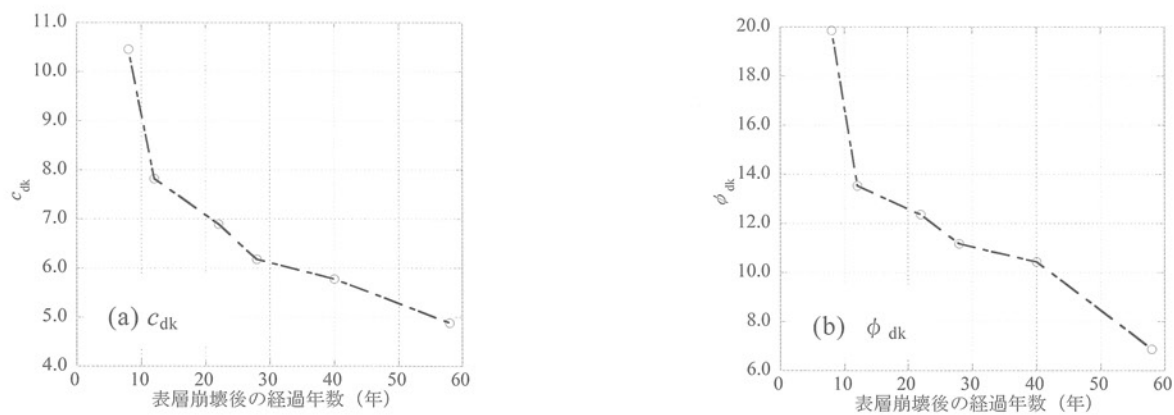


図-7 表層崩壊後の経過年数に伴う c_{dk} と ϕ_{dk} の変化

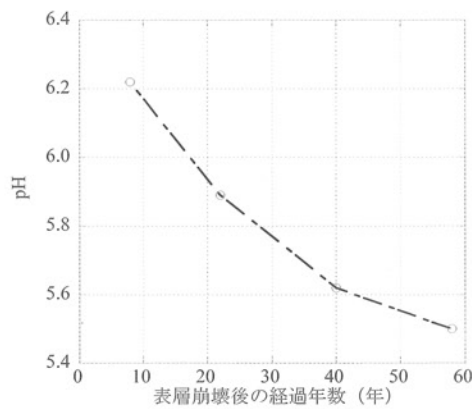


図-8 表層崩壊後の経過年数に伴う pH の変化

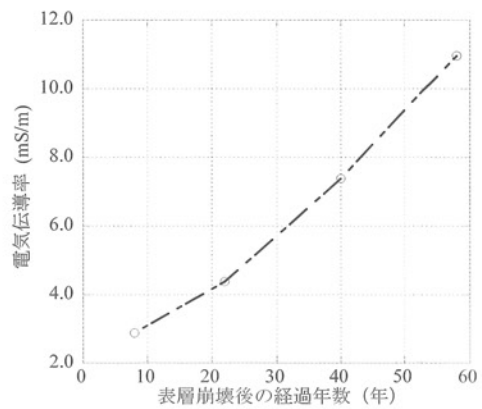


図-9 表層崩壊後の経過年数に伴う電気伝導率の変化

現地調査も詳細に実施していく予定である。

謝辞：本研究は鹿児島大学地域防災教育センターと（公財）鹿児島県建設技術センターからの研究助成得て，実施された．ここに謝意を表します．

参考文献

- 1) 鹿児島大学農学部附属高隅演習林：業務資料，2010.
- 2) 田川日出夫，沖野外輝夫：生態遷移研究法，共立出版株

式会社，1979.1.

- 3) 下川悦郎，地頭菌隆，高野 茂：しらす台地周辺斜面における崩壊の周期性と発生場の予測，地形，10(4)，pp.267-284，1989.
- 4) 地盤工学会：地盤調査—基本と手引き—，pp.113-118，2005.
- 5) 独立行政法人土木研究所：土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル（案），2010.7.

（2014.5.9 受付）