

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：54502

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510261

研究課題名(和文) 風化花崗岩地域の表層崩壊発生位置予測精度向上のための表土層深分布推定手法の構築

研究課題名(英文) Estimation method for the distribution of the thickness of decomposed granite soil

研究代表者

鳥居 宣之 (Torii, Nobuyuki)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：70294246

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、表層崩壊の発生危険評価の精度向上のために必要不可欠な情報である表土層深分布を従来手法に比して容易に把握でき、かつ精度の高い手法を確立させることを目的として実施した。本研究では、表土層の形成には、地形が大きく影響していることを考慮して、重回帰分析結果に基づく地形量と表土層深の関係式から表土層深分布を推定する手法を提案することとした。

本手法を試験地に適用し、その精度を検証した結果、表土層深を形成過程別に考え、それぞれ重回帰分析を行うと全ての地形区分において良好な推定を行うことができること、その際、説明変数の選定は地形区分別、形成過程別に差異を設けると推定精度が向上することが分かった。

研究成果の概要(英文)：In order to mitigate landslide disasters, it is important to evaluate the potential of slope failure events in space and time quantitatively. Rainfall-triggered slope failures are controlled by rainfall characteristics, slope topographic attributes and soil parameters. In these factors, the thickness of surface soil layer is a key parameter to control the result of evaluation. Therefore, it is important to consider the spatial variation of it in target area. In order to obtain the spatial variation of it, it is necessary to carry out field investigation such as portable penetration test (PPT). However, it is not realistic procedure to do it for the large area because it required tremendous amounts of money and time. In this paper, estimation method for the distribution of the thickness of decomposed granite soil is proposed as a method that takes the place of only measurement.

研究分野：斜面防災工学

キーワード：斜面防災 表層崩壊 風化花崗岩(まさ土) 表土層深分布

## 1. 研究開始当初の背景

花崗岩質地盤は、わが国の国土面積の13%強にわたって広く分布し、1種類の岩種としては最大の占有率を示しており、風化の進展が早い上に風化による強度低下が著しいため、豪雨時には表層崩壊型の斜面崩壊の発生の頻度が高く、防災上大きな問題を有する地盤といえる。平成13年には、「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」(土砂災害防止法)が施行され、従来のハード対策に加えて、斜面災害に関する情報提供、警戒避難体制の整備などのソフト対策の推進が各自治体で行われている。よって、災害時において発生しえる被害を最小化するためには、豪雨時に斜面崩壊がどこで起こりえるのかということを事前に把握しておくことが必要不可欠となっている。そのためには、斜面崩壊の発生危険度を経験的な手法に頼ることなく、対象地域に応じた様々な条件を科学的な手法で定量的に評価する手法の構築が重要である。

表層崩壊の発生危険度を精度良く評価する場合、表土層深(潜在崩土層深)は斜面勾配とともに崩壊の発生しやすさ(起こりやすさ)に与える影響が大きいことが知られており、対象領域内の表土層深分布を知ることが非常に重要である。しかし、この表土層深分布を求めるためには、現状では簡易貫入試験に代表されるような現地調査により求める必要がある。よって、ある(広域な)流域を対象とした表層崩壊発生位置の予測を行う場合、この表土層深分布を求めるために多大な労力と時間が必要となることから、通常はいくつかの地点で簡易貫入試験を行い、その結果を基にある一定の表土層深(例えば、平均表土層深)を仮定する場合や、補間により対象領域の表土層深分布を推定している。しかし、斜面上の表土層深は場所により大きく異なっており、限られた代表地点(実測値)のみからの(単純な)補間による推定では、精度の高い面的な表土層深分布を推定することは難しい。したがって、表層崩壊の発生危険評価の精度向上のために必要不可欠な情報である表土層深分布を従来手法に比して容易に推定でき、かつ精度の高い表土層深分布推定手法が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、表層崩壊の発生危険評価の精度向上のために必要不可欠な情報である表土層深分布を従来手法に比して容易に推定でき、かつ精度の高い手法を確立させることを目的としている。

一般に表土層の形成には、地形が大きく影響していることが知られている。そこで、本研究では地形量と表土層深との関係性に着目し、重回帰分析結果に基づく地形量と表土層深の関係式から表土層深分布を推定する手法を提案することとし、提案手法を六甲山系の試験地で適用し、その有用性を検証する

こととした。

## 3. 研究の方法

### (1)試験地の概要

地形量と表土層深の関係性を明らかにするため、花崗岩地域の試験地において、表土層深を実測するとともに、実測点の地形量を算定することとした。試験地としては、神戸市街地の背山を形成する六甲山系南側斜面の山麓部に位置する青谷試験地を選んだ。試験地内の人工構造物は石積擁壁のみであり、ほぼ自然な状態の表土層が存在していると考えられる地域である。

青試験地では空中写真と地形図を用いて地形区分が行われており、さらに、これを基図とし田村 によって定義される微地形単位をもとにして区分された地形に名称がつけられている。

### (2)表土層深の定義と測定結果

#### 表土層深の定義

本研究では、沖村・田中 の結果を参考に表土層の測定結果を整理することとした。また、花崗岩地域の表土層は、堆積、浸食等により形成される土層である運積土層と基岩である花崗岩が風化することにより形成される土層である残積土層から構成されており、それぞれ土層の形成過程が異なる。したがって、地形量と表土層深の関係性を明らかにするには、表土層を1つの層としてとらえるのではなく、それぞれを別々の層として扱うほうが表土層の形成過程を考慮できるものと思われる。以上のことから、本研究では、運積土層を表土移動層(D1層)、残積土層を基岩風化層(D2層)と称する。また、両層の境界となる簡易貫入試験の測定値  $N_c$  値の基準値は、表土移動層が  $N_c = 5$ 、基岩風化層が  $5 < N_c = 12$  とすることとした。

#### 表土層深の測定方法

本研究では、サウンディング手法の1つである簡易動的コーン貫入試験(簡易貫入試験)により表土層深を実測することとした。

図1に簡易貫入試験の実測位置図を示す。実測点は合計63測点であり、地形区別別では、頂部斜面で10測点、谷頭凹地で16測点、上部谷壁斜面で18測点、下部谷壁斜面で11測点、崩壊跡地で8測点である。

本研究では表土層深データを正確に得るため、各測点で簡易貫入試験を複数回行った。基本的に各測点において2回簡易貫入試験を行い、両者の  $N_c$  プロファイル(簡易貫入試験の測定結果を深度方向の連続データとして表したもの)に著しい相違があると判断された場合は、さらに追加で試験を実施し、プロファイルの傾向が異なる実測データは除外した。どの測点においても類似した実測データが確認できるまで簡易貫入試験を行い、それらの平均値を採用値として用いることにした。なお、次節において詳細に採用表土層深データの決定方法を示す。

#### 採用表土層深データの決定方法

採用表土層深データの決定方法について以下に示す。本研究では、上述したように  $Nc_{12}$  で表土層を評価するのではなく、 $Nc_5$  の表土移動層 (D1 層)、 $5 < Nc_{12}$  の基岩風化層 (D2 層) として評価するため、 $Nc_5$ 、 $12$  を表土層の判断指標として活用している。なお、 $Nc_5$ 、 $12$  に該当する深さを判断するにあたり、本研究では基本的に実測データが最終的に  $Nc$  基準値を上回る深さを選定している。以下に、本研究での採用表土層深データの決定方法の基準を示す。i)  $Nc_5$ 、 $12$  を複数回上回るケースは基本的には最終的に  $Nc$  基準値を上回る深さを選定、ii) 実測データの平均値を採用値として採用、iii) 著しく傾向の異なる実測データは不採用とすることとした。以上の基準を全 63 測点に適用し、各層の表土層深をそれぞれ決定した。

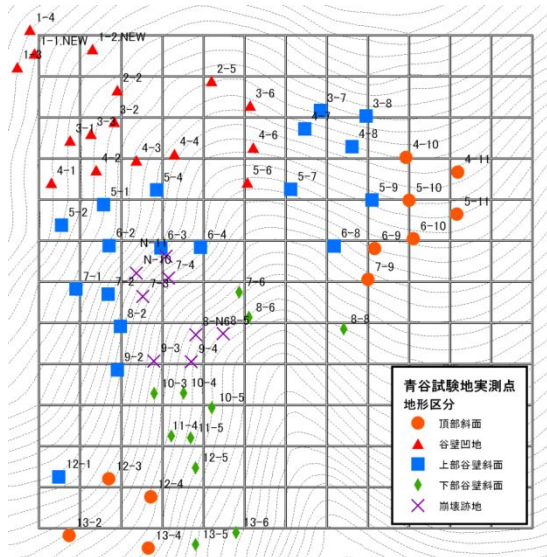


図 1 実測点位置図

### (3) 形成過程を考慮した表土層深分布推定手法の提案

#### 重回帰分析

表土層の形成には地形が大きく影響していることから、本研究では、重回帰分析結果に基づく地形量と表土層深の関係式から表土層深分布を推定する手法を提案することとする。また、表土層に関しては、表土移動層 (D1 層) と基岩風化層 (D2 層) に大別して考えていくこととする。つまり、それぞれの層毎に重回帰分析を行い、地形量と各土層深の関係式から各土層深分布を推定していくこととする。重回帰分析の説明変数には、渡邊の方法を参考に局所地形量と広域地形量を選定することとした。具体的には、表土移動層 (D1 層) を目的変数とした場合には地形的特徴として、地表面の傾斜、凹凸、曲率、浸食性、未浸食性、集水性を示す地形量を選定した。これは表土移動層 (D1 層) が地表面に露呈している土層で、地表面の傾斜・凹凸・曲率等の斜面の状態や表土移動層 (D1 層) の形成過程である堆積、風化に大きな要因となる浸食性、未浸食性、集水性を

勘案することで表土移動層 (D1 層) と地形特性値群 (説明変数) の相関関係を明確にできるのではないかという考えからである。一方、基岩風化層 (D2 層) を目的変数とした場合には地形的特徴として、地表面の傾斜、標高、運積量 (表土移動層 (D1 層) の推定値) を優先的に選定することとした。これは基岩風化層 (D2 層) が基岩からの風化により成り立つ土層で運積量によって風化速度が異なってくるという特徴を考慮するためである。地表面の傾斜については、表土層と最も相関関係が強い地形量であり、表土移動層 (D1 層) のみならず基岩風化層 (D2 層) 形成にも影響を与えることが予測されるため、これを説明変数として採用した。さらに、精度を補完する観点で地形的特徴として地表面の凹凸、曲率、浸食性、未浸食性、集水性を示す地形特性値を説明変数群に追加している。理由としては、基岩風化層 (D2 層) を目的変数とした場合には、運積量を考慮する観点で表土移動層 (D1 層) を説明変数に選定しているが、その表土移動層 (D1 層) は上述した説明変数から重回帰分析によって算定しているので一定の相関関係は評価でき、説明変数として選定するに値するとの判断からである。また、説明変数として定義した地形特性値は偏重回帰係数評価のため、任意試験地では (1) 式により 0 ~ 100 に規準化している。理由としては、重回帰分析の説明変数として使用する地形特性値は様々な桁の異なる変数を使用するため、これを規準化した後に重回帰分析を行う方が任意試験地においては説明変数間の関係ならびに他の地形区分との比較に際して有用になると考えたためである。

$$X = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $X$ : 規準化した地形特性値 (説明変数)

$X_i$ : 任意の地形特性値

$X_{\max}$ : 地形特性値の最大値

$X_{\min}$ : 地形特性値の最小値

また、目的変数 (実測点群) については推定精度向上のためにグループ化および取捨選択を行っている。グループ化については地形区分に基づき、頂部斜面、谷頭凹地、上部谷壁斜面、下部谷壁斜面、崩壊跡地の 5 つの地形区分に大別し、実測点の取捨選択については任意の実測点により重回帰分析の分析精度が大きく低下するものを目的変数から除外することとした。したがって、青谷試験地における総実測点 63 測点のうち、重回帰分析の目的変数に 51 測点 (各地形区分に 10 測点前後)、実測点として扱わない測点 (除外対象) に 6 測点、検証測点の対象に 6 測点をそれぞれ選定した。

#### a) 説明変数

説明変数は、数値標高モデル (DEM) から

算定した地形特性値を用いる。数値標高モデルは、青谷試験値の集水域をカバーできるように、62×49 格子 (5m 間隔, 3,038 点) とした。数値標高モデルを利用して計算される地形特性値は、比高、傾斜、曲率、凹凸、地表形状のように対象格子点付近の地形量で定義できる局所地形量と集水面積、浸食高、未浸食高、接峰面高度、接谷面高度、起伏量などの広がりを持った広域の地形量で定義される広域地形量である。それぞれの定義式についての詳細は、参考文献を参照されたい。

b) 目的変数のグループ化および選定

目的変数 (実測点群) のグループ化として 5 つの地形区分 (頂部斜面, 谷頭凹地, 上部谷壁斜面, 下部谷壁斜面, 崩壊跡地) に基づくグループ化を行った。また、前述したように重回帰分析の分析精度が大きく低下するもの (6 点) を目的変数から除外することとした。具体的には、重相関係数で 0.05 以上相関係数が低下するものを除外した。

c) 地形区分毎の重回帰分析結果

表土移動層 (D1 層) と基岩風化層 (D2 層) の重回帰分析結果を表 1 に示す。なお、表中の偏回帰係数一覧はそれぞれの変数を 0~100 に規準化した場合の重回帰分析結果である。したがって、変数間のバラつきを制限しており、実質的な表土層深への寄与率であると考えられる。

表土層深分布推定手法の提案  
重回帰分析結果より得られた各地形量の偏回帰係数を用いて各土層の表土層深推定式を次式により定義する。

$$D = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \dots + Y \quad (2)$$

表 1 重回帰分析結果一覧表

a) 頂部斜面と谷頭凹地

地形区分	頂部斜面		谷頭凹地	
	D1層	D2層	D1層	D2層
傾向面の傾斜	-1.3	4.1	0.7	-2.6
平均傾斜	-	-	-	-
集水面積	-	-4.0	0.4	-1.3
傾向面の偏差	-	-2.5	-0.4	1.7
入出傾斜和	-	1.4	-0.5	-2.6
PrC	-24.6	-	24.6	-21.8
PIC	56.6	-78.1	-24.0	21.3
標高	-4.0	6.3	-	1.1
浸食高	-	-	-0.2	-0.8
未浸食高	-	-	-0.7	-
表土移動層	-	-0.4	-	0.6
切片	-2790	4849	86	203

b) 上部谷壁斜面と下部谷壁斜面

地形区分	上部谷壁斜面		下部谷壁斜面	
	D1層	D2層	D1層	D2層
傾向面の傾斜	-	0.3	2.5	-
平均傾斜	-	-1.0	-	-0.3
集水面積	-	0.8	-0.5	-
傾向面の偏差	-	-	-	-
入出傾斜和	-0.7	-	-1.4	-0.3
PrC	4.7	153.9	155.2	-
PIC	22.7	-	24.1	153.9
標高	-	3.2	-	0.7
浸食高	-0.3	-1.7	-0.3	0.7
未浸食高	-	-0.8	1.1	1.3
表土移動層	-	-0.6	-	-0.7
切片	-2578	-5142	-16920	-14760

c) 崩壊跡地

地形区分	崩壊跡地	
	D1層	D2層
傾向面の傾斜	-2.5	8.1
平均傾斜	-	-
集水面積	-2.0	1.8
傾向面の偏差	-1.0	3.5
入出傾斜和	1.3	-3.4
PrC	-	-
PIC	-	-
標高	-	-2.0
浸食高	-2.7	-
未浸食高	-3.0	-
表土移動層	-	3.9
切片	437	-661

ここで、D: 推定表土層深 (cm)

$X_i$ : 任意の地形特性値

$\beta_i$ : 任意の地形特性値に対する偏回帰係数

Y: 切片

この式より推定した各層の地形区分毎の推定値と実測値との関係の一例を図 2 に示す。図 2 より、表土移動層 (D1 層) の実測値と推定値は良い相関関係を示していることが分かる。一方、基岩風化層 (D2 層) の実測値と推定値の関係は、谷頭凹地や上部谷壁斜面において表土移動層 (D1 層) に比してややバラツキがあるものの、概ね良い相関関係を示していることが分かる。したがって、説明変数に選定した地形区分毎の地形特性値がそれぞれにおいて目的変数を説明しうる説明変数であるといえる。つぎに、形成過程を考慮したことの有用性を検証するため、渡邊の手法で用いられている説明変数 (地表面の傾斜・形状・凹凸、集水性、浸食性を考慮し、地形区分別の説明変数の差異はなし) を用いて推定した結果と本手法の結果を比較する。なお、比較を行うにあたり、渡邊は表土移動層 (D1 層) と基岩風化層 (D2 層) を 1 つの表土層として扱っているため、本手法の推定結果も、表土移動層 (D1 層) と基岩風化層 (D2 層) を合わせたものを表土層として扱うことにする。その結果を図 3 に示す。図 3 より、形成過程を考慮した本手法の方が重回帰分析結果を用いた表土層の推定精度が向上していることが分かる。したがって、本手法で提案している形成過程を考慮し地形区分別に説明変数の選定に差異を設けることで推定精度は向上するといえる。

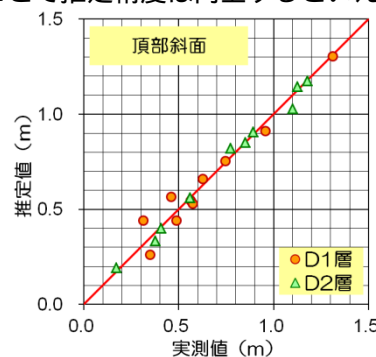
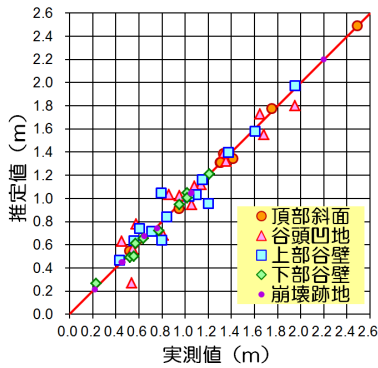
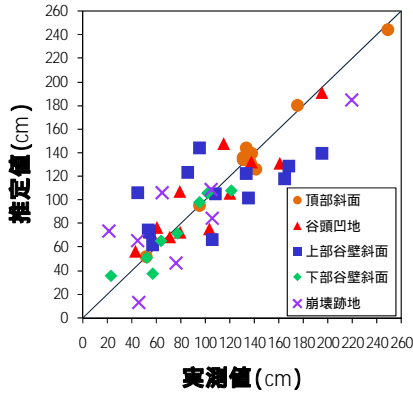


図 2 各層の地形区分毎の推定値と実測値との関係の一例 (頂部斜面)





a) 本手法



b) 渡邊 の手法

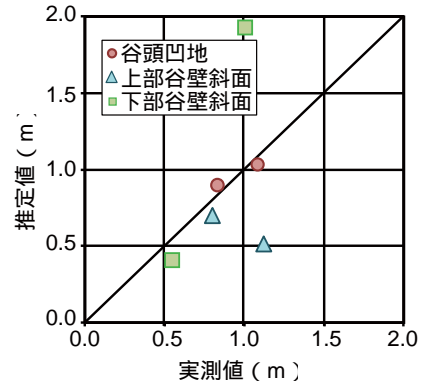
図3 本手法と渡邊 の手法との比較

#### 推定精度の検証

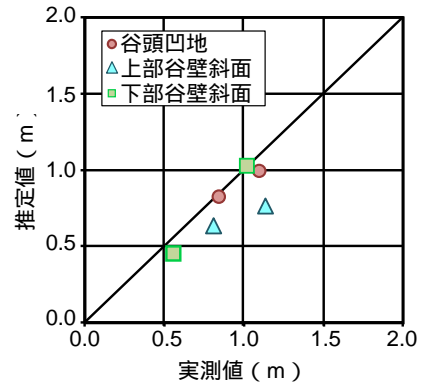
重回帰分析という手法は、目的変数に対して適切に一定の相関関係があると判断される変数を説明変数とすれば推定値を限りなく実測値に近づけることが可能である。しかし、それは目的変数に選定している変数に限られ、選定していない変数はこの条件には当然該当しない。つまり、重回帰分析結果に基づく表土層深分布推定を行っている本研究において、重回帰分析によって定義した推定式を新たな検証用の測点に適用し、推定式による推定値と実測値の関係がどの程度であるかを検証する必要がある。そこで、前述したように、青谷試験地において検証用に設定した6測点(谷頭凹地, 上部谷壁斜面, 下部谷壁斜面それぞれ2測点ずつ)を用いて、提案手法の推定精度の検証を行う。なお、ここでの検討では、目的変数を表土移動層(D1層)と基岩風化層(D2層)を合わせた表土層を用いて比較、検討することとし、図4に検証測点における推定値と実測値との関係を示す。なお、図中には形成過程の有用性についても検討している。

図4より、本手法を用いた表土層深の推定は、谷頭凹地や下部谷壁斜面では良好に推定されていることが分かる。特に下部谷壁斜面では、形成過程を考慮していない場合と比較するとその差は歴然である。一方、上部谷壁斜面での推定精度は、両者に比較するとやや精度が落ちる結果となっているが、やはり形成過程を考慮していない場合と比較すると

本手法の方が推定精度は高いことが分かる。



a) 形成過程を考慮(本手法)



b) 形成過程の考慮無し

図4 検証測点における推定値と実測値との関係

以上の結果から総合的に考察すると、形成過程を考慮した表土層深推定手法の利点は2点あると考えられる。1点は何の地形区分においても一定の精度を確保することができる点、もう1点は実用性のある推定を行うことができる点(表2参照)である。

表2 平均誤差(検証測点)

	平均誤差 (m)
表土層深(D1層+D2層)	0.13
表土層深	0.32

表2で示している平均誤差は、検証測点を用いて精度検証を行った谷頭凹地, 上部谷壁斜面, 下部谷壁斜面の誤差である。形成過程を考慮して、表土移動層(D1層)と基岩風化層(D2層)をそれぞれ推定した後にそれらを足し合わせて表土層深とした方が形成過程を考慮せずに1つの表土層として推定するよりも平均誤差を小さくすることができる。したがって、形成過程を考慮した重回帰分析に基づく表土層深の推定式を作成すれば実用性のある表土層深の推定を行うことが可能であると考えられ、数値標高モデル(DEM)から各格子点における地形量を算

出し、そこから推定式により格子点毎の表土層深を推定することで、広域の表土層深分布を実測に比して容易に得ることが可能となる

#### 4. 研究成果

本研究では地形量と表土層深との関係性に着目し、重回帰分析結果に基づく地形量と表土層深の関係式から表土層深分布を推定する手法を提案した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 重回帰分析結果を用いた表土層深分布推定手法では、実測点は必ず必要となる。対象試験地の面積にもよるが、ひとつの地形区分に実測点の数が10測点前後あれば地形特性値(説明変数)と表土層深(目的変数)の相関関係を明確化させることができ、その関係性から推定値と実測値を近似させることができることを明らかにした。また、目的変数についてもグループ化等を考慮することで推定精度は向上することがわかった。

(2) 表土層深を形成過程別(表土移動層と基岩風化層)に考え、それぞれ重回帰分析を行うと全ての地形区分において良好な推定を行うことができることを示した。その際、説明変数の選定は地形区分別、形成過程別に差異を設け設定すると推定精度が向上する。具体的には、表土移動層を目的変数とした場合には、地形的特徴として、地表面の傾斜、凹凸、曲率また、集水性、浸食性を示す地形特性値を選定し、基岩風化層を目的変数とした場合にはまず、地形的特徴として高さ、運積量、地表面の傾斜を示す地形特性値を選定し、推定精度を補完する観点で地表面の凹凸、曲率また集水性、浸食性を示す地形特性値を加えると良い。

(3) 形成過程考慮の有用性に関して、既往の研究成果である形成過程を考慮せずに推定を行ったものと比較した結果、本手法で提案している形成過程を考慮した方が全地形区分において良好な推定を行うことがわかった。

(4) 形成過程を考慮した重回帰分析に基づく表土層深の推定式を作成すれば実用性のある表土層深の推定を行うことが可能であると考えられ、数値標高モデル(DEM)から各格子点における地形量を算出し、そこから推定式により格子点毎の表土層深を推定することで、広域の表土層深分布を実測に比して容易に得ることが可能となる。

(5) 本手法によって推定された表土層深を活用した精度の高い表層崩壊の安定性評価手法として、二層型多平面安定解析手法の開発を行った。

#### <引用文献>

鳥居宣之、沖村孝、中村 幸一：簡易貫入試験による山腹斜面における潜在崩土層深の経年変化量の測定,49,pp.33-44,2007.  
田村俊和：微地形分類と地形発達 - 谷頭部

斜面を中心に - , 水文地形学 - 山地の水循環と地形変化の相互作用 - , 古今書院, pp.177-189, 1996 .

沖村孝, 田中茂：一試験地における風化花崗岩斜面の土層構造と崩壊発生深さに関する研究, 新砂防, 33-1, pp.7-16, 1980 .

渡邊住秀：数値地形モデルより推定した表土層を用いた崩壊発生位置の予測, 神戸大学大学院工学研究科修士論文, 58p, 1995 .

Burrough, P. A. and McDonnell, R. A.: Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, 333p., 1998 .

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

鳥居宣之：風化花崗岩地域における表土層深分布推定手法に関する基礎的研究, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要, 査読有, 53, pp.41-50, 2015 .

鳥居宣之：二層型多平面安定解析手法の提案, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要, 査読有, 52, pp.55-62, 2014 .

[学会発表](計4件)

川畑将大, 鳥居宣之：二層型多平面安定解析手法による表層崩壊危険度評価の試み, 平成26年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2014.5.31, 大阪産業大学中央キャンパス(大阪府・大東市).

鳥居宣之, 川畑将大, 鏡原聖史：風倒木地における表層崩壊発生に及ぼす根系の影響, 平成26年度砂防学会研究発表会, 2014.05.28, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県・新潟市).

鳥居宣之, 川畑将大, 上平慎弥：表層崩壊危険度評価手法としての二層型多平面安定解析手法の提案, 神戸高専産学官金技術フォーラム'13, 2013.11.20, 神戸市産業振興センター(兵庫県・神戸市).

鳥居宣之, 上平慎弥, 鏡原聖史：表層崩壊発生に及ぼす植生の影響に関する解析的検討-二層型多平面安定解析手法を用いて-, 平成25年度砂防学会研究発表会, 静岡市民文化会館(静岡県・静岡市).

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

鳥居 宣之 (Nobuyuki Torii)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局・准教授

研究者番号：70294246