

レーザー距離計を用いた山岳地での凍結融解による土砂生産量の簡易計測手法

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 ○松田 悟・宮本 邦明・今泉 文寿

1. はじめに

裸地斜面からの恒常的な土砂生産の原因のひとつとして凍結融解がある。その実態を明らかにするためには、凍結融解作用に関する諸因子と土砂生産量の関係を把握することが重要であり、なにより、様々な条件下にある裸地斜面での土砂生産量を現地で計測することが不可欠である。わが国において凍結融解に伴う土砂生産が活発な地域は主に山岳地域に位置しており、現地計測の際にはアクセスの困難さや危険性が伴う。また、航空レーザーによる定期的な測量や3Dレーザースキャナーによる計測は大きなコストを要する。このため、計測に必要な機器が持ち運びの際に簡便であることや、計測対象から離れた位置で間接的に計測可能な手法が求められる。本研究では、デジタルコンパス付きレーザー距離計を用いた裸地斜面下部の崖錐地形計測を試みた。計測対象は、筑波大学農林技術センター井川演習林内の急勾配裸地斜面直下の崖錐である。崖錐として堆積する土砂が凍結融解作用の生じる時期において降雨などにより侵食されることのない場合、崖錐の体積増加量が斜面からの土砂生産量に等しいと考えることができる。凍結融解の生じる時期をはさむ2時期に計測した崖錐地形を比較することにより、2時期間の地形変化量を推定し、その変化量から凍結融解による土砂生産量を算出した。さらに本手法で生じうる誤差の検討も行った。

2. レーザー距離計を用いた崖錐地形の計測

本研究では、レーザー距離計 Impulse 200 LR およびデジタルコンパスモジュール MapStar (いずれも Leaser Technology 社製)、データを記録用に PC を用いた。この Impulse 200 LR と MapStar はあわせて 1.5kg 程度とトータルステーションなどに比べ軽量で、持ち運びの際にも脚以外の計測に必要な機材はひとつのザックにまとめて運ぶことができる。計測される斜距離と仰角、方位角は PC に随時転送する(インターフェースには USB を使用)。それらの値から表計算ソフト(Microsoft Excel)を用いてレーザー照射点の位置座標をデカルト座標系(x, y, z)に変換した。ともに PC に記録した。凍結融解が生じる冬季をはさむ2時期(2009年冬および2010年春)に計測を演習林内10箇所の崖錐に実施し、ひとつの崖錐あたり数百点~1000点程度の点群データを得た。

3. 2 時期の DEM の作成および DEM の比較による土砂生産量の推定

計測データから図1に示した手順でDEMを作成し、得られた2時期のDEMの差分をとって生産土砂量を求めた。計測により得られる座標は、計測器の位置を原点とした相対位置座標であるため、2時期のデータを比較するためには計測器の位置と姿勢が保持されてなくてはならない。しかし、多くの斜面を計測対象とする場合に、次の計測まで機器を現地に設置しておくことは困難である。そのため、2回目の計測時には改めて機器を設置しなおすことになるが、そのときの計測器の位置と姿勢にずれが生じる。そこで、周囲に設けた10点程度の不動点を計測し、2時期の不動点座標が重なるように2010年の座標系を2009年の座標系に投影させた。計測器の位置のずれとして(dx, dy, dz)を、姿勢のずれとして x - y - z の各軸の微小な回転(ω, ϕ, κ)を考えると2時期の計測による不動点座標の関係は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} x'_k \\ y'_k \\ z'_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dx + x_k + \kappa y_k - \phi z_k \\ dy - \kappa x_k + y_k + \omega z_k \\ dz + \phi x_k - \omega y_k + z_k \end{pmatrix} \quad \dots (1)$$

ここで、(x'_k, y'_k, z'_k)と(x_k, y_k, z_k)は2009年と2010年の各計測による n 個の不動点の k ($k=1, 2, \dots, n$)番目の不動点座標を示す。実際に計測した座標には誤差が含まれ、すべての不動点において式(1)を満たすような(dx, dy, dz)および(ω, ϕ, κ)は得られない。そこで、最小二乗法により最適な(dx, dy, dz)および(ω, ϕ, κ)を求める。その際、MapStarは内臓の電子水準器により水平面を維持することから(ω, ϕ, κ)は、デジタルコンパスによる方位計測の誤差(dx, dy, dz)に比べはるかに小さいことが推定されること、不動点の数が10程度と6つの変数に対してさほど多くないことから、式(1)の ω, ϕ, κ をそれぞれ0とし、計測器の位置のずれ(dx, dy, dz)を最小二乗法で求めた。得られた点群データをクリギング補間することによってラスタ型

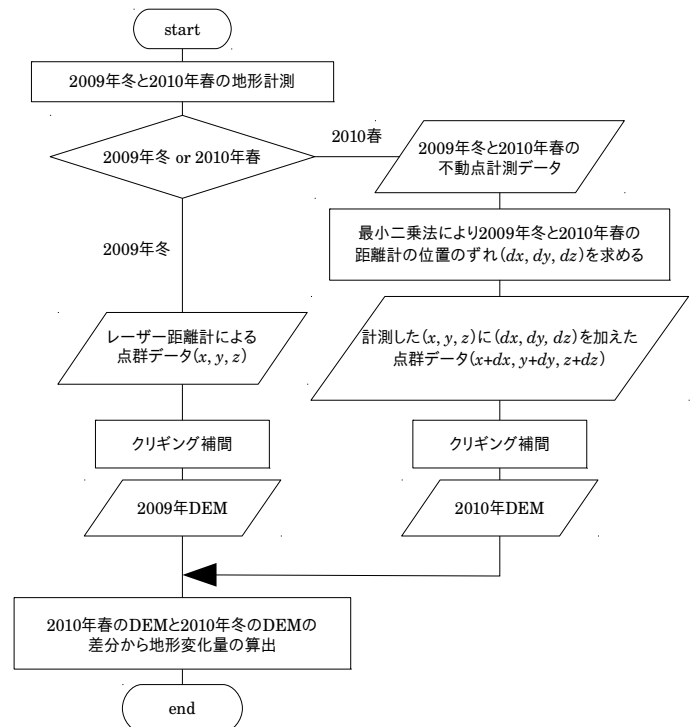


図1: 本研究における地形変化量算出のフローチャート

ここで、(x'_k, y'_k, z'_k)と(x_k, y_k, z_k)は2009年と2010年の各計測による n 個の不動点の k ($k=1, 2, \dots, n$)番目の不動点座標を示す。実際に計測した座標には誤差が含まれ、すべての不動点において式(1)を満たすような(dx, dy, dz)および(ω, ϕ, κ)は得られない。そこで、最小二乗法により最適な(dx, dy, dz)および(ω, ϕ, κ)を求める。その際、MapStarは内臓の電子水準器により水平面を維持することから(ω, ϕ, κ)は、デジタルコンパスによる方位計測の誤差(dx, dy, dz)に比べはるかに小さいことが推定されること、不動点の数が10程度と6つの変数に対してさほど多くないことから、式(1)の ω, ϕ, κ をそれぞれ0とし、計測器の位置のずれ(dx, dy, dz)を最小二乗法で求めた。得られた点群データをクリギング補間することによってラスタ型のデータ

の DEM を作成した。2 時期の DEM のグリッドセルごとの高さの差分をとることにより地形変化量の算出を行った。

4. 土砂生産量の推定結果

計測した 10 箇所での 2009 年冬季と 2010 年春季の地形の差分結果を表 1 に示した。崖錐の体積変化量は、2 時期の DEM の全グリッドセルの差分値にグリッドセル 1 つあたりの面積を乗じたものを合計したものである。崖錐の平均高さ変化は、体積変化量をグリッドセル数とグリッドセル 1 つあたりの面積で除した値である。間隙率を考慮した体積は間隙率は 0.4 として体積変化量から計算した。斜面面積は演習林の等高線図を参考に裸地斜面の水平面への投影面積にその平均勾配をかけ算出した。斜面侵食深さは間隙を考慮した体積を斜面面積で除した値である。崖錐の体積の増加を示した箇所に関しては崖錐の高さの増加は概ね 30 cm 程度であり、大きいもので 70 cm を超えた。また、各斜面の土砂生産量は $10^1 \sim 10^2 \text{ m}^3$ オーダーという値が算出された。この土砂生産量から求めた斜面の侵食量は、No.2 を除き、既往研究でいわれている年間 5 ～ 50mm 程度（鈴木・福島, 1989・永井ら, 2001・堤ら, 2007）という値と同程度である。

図 2 に示すように後の調査で No.7 における崖錐の断面の深さをスケールによる計測した。崖錐表面は 2010 年春の計測時の写真と比較して侵食を受けた様子がみられず、2009 年冬季の計測時に露出していた基岩も確認できた。崖錐表面から基岩の間で鉛直方向に約 1m の深さが確認され、2 時期の差分結果においてもスケールによる計測をした位置で同等の変化が見られた。このことから、No.7 における算出結果が妥当な値であることが示唆される。

5. 誤差の検討

各崖錐の計測における計測器の精度に基づく誤差は斜距離に比例して大きくなる。各崖錐の計測における斜距離の最大値 17.9 ～ 102.8 m をもちいて、誤差伝播の法則をから考えると、水平方向で約 10 ～ 60 cm、高さ方向で約 4 ～ 17 cm の誤差であった。また、点群データからクリギング補間によりラスター型データを作成した際の誤差について、計測した各点の高さと作成した DEM においてその点を含むグリッドセルの高さとを比較を行ったところ、崖錐の DEM はほとんどの点で約 30 cm 程度の誤差が考えられた。ただし、計測点の密度がグリッドセルあたり 1 点を下回る場合にはより大きな誤差が生じる可能性が考えられる。表 1 で体積の変化量が負の値を示した No.3 と No.10 については、崖錐計測時の最大斜距離が 100 m 程度あり、計測点密度も他の計測箇所比べ小さいため、各時期の DEM に大きな誤差を持っていることが考えられる。

6. おわりに

本研究では、既往研究と同程度の斜面侵食深さが算出された計測箇所、中には直接の計測においても同等の結果を確認できた箇所もある。これは凍結融解による土砂生産のみとどまらず、地形変化を伴う土砂移動を計測する簡易手法としても有効であると考えられる。一方で、斜距離が大きいこと、計測点密度が小さいことにより生じる誤差が各時期の DEM に影響していることが考えられる箇所もあり、本手法を用いる際に注意すべき点が示唆された。本研究で用いた計測器の精度に基づく誤差は、最大斜距離 50 m 程度の対象物で水平方向 30 cm 以内、高さ方向で 10 cm 以内となる。また、計測点密度がグリッドセルあたり 1 点を下回る場合に大きな誤差を生じることが考えられたが、用いた計測器ではレーザー照射点を計測者が任意で決めている。このため、設定するグリッドセルに応じたデータの取得を行う必要がある。

〈引用〉

- ・永井修・瀬戸俊彦・城ヶ崎正人（2001）：衛星伝送画像と温度測定による崩壊斜面の侵食に関する解析
－春木川の破碎粘板岩地帯を例に－。地すべり, 37(4), pp. 66-73.
- ・鈴木雅一・福島義宏（1989）：風化花崗岩山地における裸地と森林の土砂生産量
－滋賀県南部、田上山地の調査資料から－。水利科学, 190, pp. 89-100.
- ・堤大三・藤田正治・伊藤元洋・手島宏之・澤田豊明・小杉賢一朗・水山高久（2007）：凍結融解による土砂生産に関する基礎的研究
－田上山裸地斜面における現地観測と数値シミュレーション－。砂防学会誌, 59(6), pp. 3-13.

表 1: 地形変化量の算出結果

計測箇所	崖錐の体積変化量 (m^3)	崖錐の平均高さ変化 (m)	間隙を考慮した体積 (m^3)	斜面面積 (m^2)	斜面侵食深さ (cm)
No.1	90.14	0.29	54.08	1849.11	2.92
No.2	155.20	0.27	93.12	645.87	14.42
No.3	-141.44	-0.15	-84.86	80.84	²⁾
No.4	10.46	0.22	6.28	552.57	1.14
No.5	58.46	0.32	35.08	1507.55	2.33
No.6	77.19	0.26	46.31	647.82	7.15
No.7	80.51	0.74	48.31	938.87	5.15
No.8	417.17	0.48	250.30	- ¹⁾	-
No.9	-18.09	-0.04	-10.85	749.09	²⁾
No.10	-417.17	-0.41	-250.3	278.47	²⁾

- 1) No.8 の斜面面積は等高線図より確認できなかったため値を示していない。
2) 体積の変化量が負の値を示している箇所については崖錐の体積減少に伴う斜面の隆起の意味になるため計算をしていない。

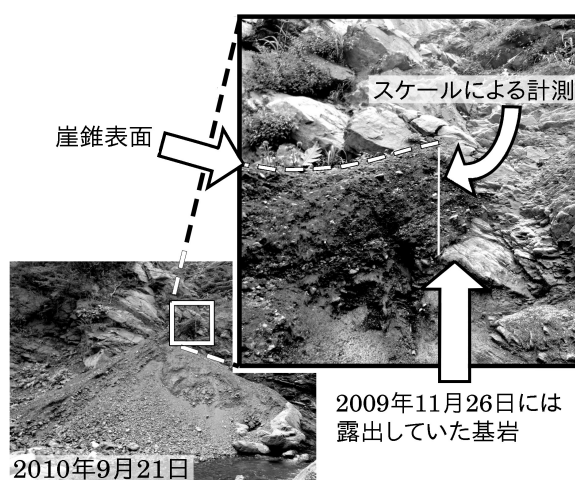


図 2: 崖錐の断面からみた堆積の厚さ
(2010 年 9 月の調査時にスケールにより確認)