

デジタル写真測量による登山道の土壤侵食量の計測手法

Manual for Measuring the Volume of Mountain Trail Erosion by Digital Photogrammetry

太田 健一*・渡辺 悅二**

Kenichi OTA* and Teiji WATANABE**

キーワード：デジタル写真測量、登山道、土壤侵食、マニュアル

Key words : digital photogrammetry, mountain trail, soil erosion, manual

I. はじめに

一般に降水量が多く、地表面が侵食されやすい物質からなることが多い日本の高山地域では、登山道の土壤侵食が大きな問題となっており、これまでにも、大雪山や北八甲田山、白山などで土壤侵食量の見積りが行われてきている(山田, 1993; 渡辺・深澤, 1998; Yoda and Watanabe, 2000; 渡辺ほか, 2004など)。登山道の土壤侵食量を見積る従来の方法には、糸と錘を用いた断面測量がある(たとえば, Cole, 1983)。断面測量は作業が簡便であるため、従来のほとんどの研究でも使用されてきたが、侵食量を体積として求められないことや、精度良く計測するためには長時間の野外作業が要求されるなどの短所を持っていた。いっぽう、Warner(1995)およびWarner and Kvaerner(1998)は、野外作業が短時間ですむ写真測量を行い、侵食量を体積として把握しようとした。しかし、彼らの研究は試験的なものにすぎず、実用に耐えうるものではなかった。

写真測量は、空中あるいは地上で撮影した写真から、解析図化機を用いて実体モデルを再現し、空間データを取得する測量法であり、地形図の作成方法として広く知られている。写真測量撮影には測量専用の高価なフィルムカメラを用い、解析

には特殊な技術を要する図化機を用いるが、市販のデジタルカメラを用いたデジタル写真測量を採用すれば、より安価に、多量のデータ解析を行うことができると考えられる。また、「人力による小規模な登山道の維持管理」(環境省, 2002)を行うためには、広域で各登山道の土壤侵食量を経年的に把握する必要があり、測量作業を担う人材の育成が重要となる。そこで、本マニュアルでは、筆者らがこれまで行ってきた研究をもとに、デジタル写真測量による登山道の土壤侵食量の見積りの手順を示す。ここで示す手順は、登山道だけではなく、さまざまな小地形の形態解析にも適用できる。

デジタル写真測量で使用するアプリケーションには、Kuraves-K(クラヴェス-K、倉敷紡績株式会社), 3 D-MODE(株式会社三次元メディア), 3 DiVision(東京電機大学近津研究室; 近津ほか, 2003)などがある。本マニュアルで示した登山道の計測作業は、Kuraves-Kの使用を前提としている¹⁾。

II. デジタル写真測量による登山道の三次元計測の流れ

登山道計測に関わる作業は、(1)画像取得および(2)

*加森觀光株式会社(元・北海道大学大学院地球環境科学研究科・院生)

**北海道大学大学院地球環境科学研究院

*Kamori Kanko Co., Ltd. (Former graduate student, Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University)

**Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

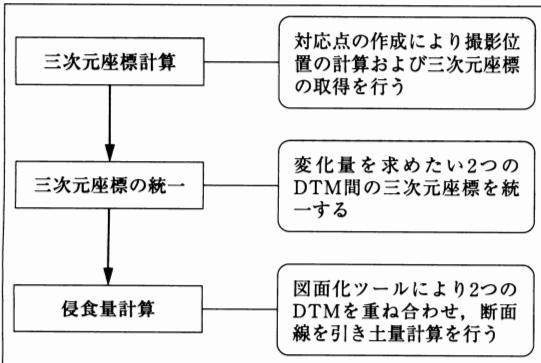


図1 デジタル写真測量における登山道画像の解析の流れ

画像解析の2つにわけられる。画像取得にあたっては、まず、撮影に使用するカメラおよびレンズを決定する(機材の選定)。次に、カメラ校正用紙を用いて、撮影に使用するレンズの焦点距離、歪みなどのパラメータを取得する(カメラ校正)。そして、フィールドで観測地点を設定し、撮影位置および写真枚数、基準尺(DTM; Digital Terrain Modelにスケールを与える)、平面基準(DTMの座標を決定する)を決定し、登山道の変化前および変化後の写真撮影を行う(登山道の写真撮影)。

次に、フィールドで取得した画像を解析する(図1)。画像をパソコンへ入力した後、アプリケーションKuraves-Kを用いてDTMの作成を行う(三次元座標計算)。その手順の概要は、以下の通りである。まず、取得した2枚1組の画像上で同一の点を対応点として作成し、撮影位置を計算する。Kuraves-Kでは、対応点を8点以上設けることで撮影位置の計算が可能になる。撮影位置の計算が終了した後、対応点を増やして三次元座標を取得していく。目的に対してじゅうぶんな数の対応点を取得したら、基準設定によって距離基準および平面基準を与え、座標系を調整する。異なる日(たとえば1年後)に撮影した画像についても同様にDTMを作成する。2つのDTM完成後、変化前のDTMの座標を基準として、変化後のDTMの座標系を変化前のものと統一する(三次元座標の統一)。アプリケーション図面化ツールを用いて、異なる日に撮影を行った2つのDTMを重ね合わせ、断面線を引き、侵食量の計算を行う

(侵食量計算)。

III. 各作業の手順

1. 機材の選定

撮影にあたって、デジタルカメラ、レンズ、三脚、マーカーなど、撮影に必要な機材の選定を行う。デジタルカメラはなるべくCCDサイズの大きいもの(高画素数)を選択する。倉敷紡績株式会社は150万画素以上を推奨しているが、実用レベルでは有効な画素数が低下すると予想されるので、500万画素以上は必要である。レンズは広範囲の撮影が可能な28mm程度の広角のものがよい。ただし、レンズの歪みが大きいと精度が劣化するので、歪みが小さいレンズを選択する。これらの点から、一眼レフデジタルカメラの使用が推奨されるが、筆者らが使用したNikon Coolpix 5000と同等のスペックのカメラでも解析は可能である。ズームレンズを使用する場合は、もっとも広角側(あるいは望遠側)で撮影する必要がある。三脚は一般に使用するものでよいが、なるべく背の高いものが良い。マーカーは、2枚1組の画像上で対応する点を発見しやすくするために画像の解析を行う際に使用する。小さくて目立つ色(赤や黒など)の、角が尖っているものを使用する方が対応点を作成しやすい。

2. 調査地点の設定

対象とする登山道において調査地点の設定を行う(図2)。登山道の両端にそれぞれ2ヵ所、計4ヵ所にL字型アルミアングルを打ち込む²⁾。1枚の画像に収まる登山道の範囲はおよそ2~3mである。登山道脇に設置する2本のアングルの間隔は、解析しやすい1m程度がよい。観測期間(変化後の再撮影までの期間)が1年間を超える場合、冬季の凍上やその他の要因によってアングルが動く可能性がある。アングルは25×25×1,000mm程度(とくに長さは少なくとも1,000mm必要)のものを使用し、できるだけ地中深くまでしっかりと打ち込む。距離および平面基準として、箱尺を登山道の中央に置く。このとき、水準器を用いて、箱尺の目盛の書かれた面が水平になるよう調節する。撮影の際、箱尺が侵食量計算の障害にならないよう注意する。解析の際の目印として、マーカー

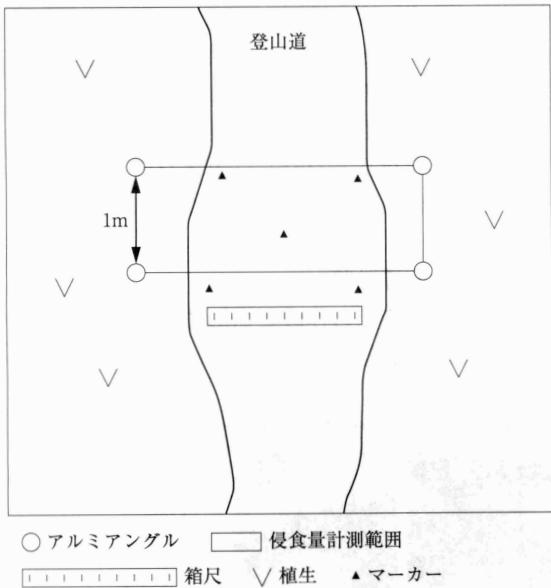


図2 調査地点の設置

を四方に置いておく。

3. 登山道の写真撮影

(1) 撮影の手順

写真撮影の方法は、登山道の規模や、状況で大きく3通りに分類できる(図3)。道幅3m以下の小規模な登山道では、近距離から登山道全体を写しこむことができるので、図3-Aのように登山道の進行方向に向かって写真撮影を行う。いっぽう、道幅3m以上の大規模な登山道は、対象が大きすぎてカメラに写しきれないため、図3-Bのように登山道を分割して撮影する。たとえば、登山道の左側面を写した画像(カメラa₁, a₂, a₃)と、右側面を写した画像(カメラb₁, b₂, b₃)に二分割する。登山道の中央に島状の土塊がある場合は、図3-Cに示したカメラa₁, a₂, b₁, b₂のように登山道ごとに分割して撮影する。被写体を分割して撮影した場合、各画像について別々にDTMを作成し、後で2つのDTMを接続することになる。いずれの撮影方法をとるにしても、ひとつのDTMを作成するたびに、同一方向から2~3枚の画像撮影を行う(実際には、次の注意点のように、失敗を防ぐためにより多くの枚数を撮影しておくとよい)。

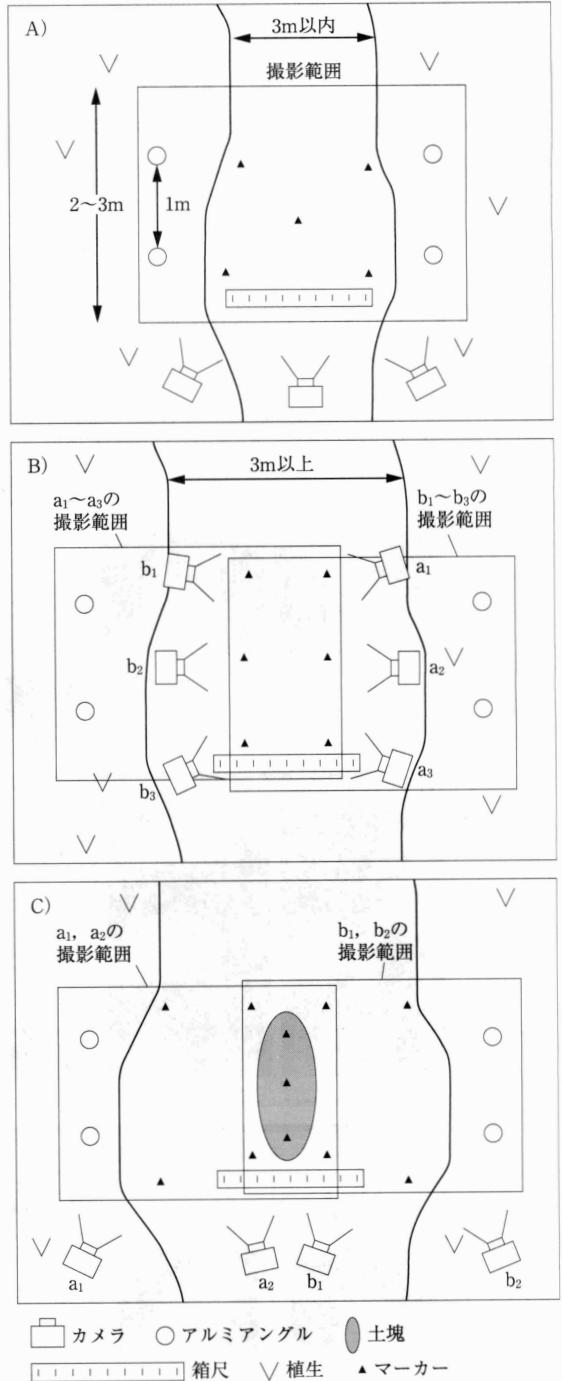


図3 A) 道幅3m以下の登山道の撮影方法, B) 道幅3m以上の登山道の撮影方法, C) 登山道上に島状の土塊がある場合の撮影方法

(2) 撮影時の注意点

撮影では、基線長が大きすぎると、画像解析時

の対応点作成作業が困難になり、基線長が小さすぎると三次元座標計算の誤差が大きくなる。侵食量計測範囲に対して、撮影距離 2 m, 基線長 50~100 cm を目安にすればよい。被写界深度を深くするため、絞りはできるだけ絞り込む。このため、カメラを三脚に据えつけて、ブレを防ぐようとする。画質が粗い（画素数が少なく、対象がぼやけている）、ブレ、画像が暗すぎる、もしくは明るすぎるなど、写真の写り具合が悪くならないよう注意する。撮影の失敗を無くすためにカメラの

位置を少しづつ変えながら、合計 10 枚以上の画像を取得しておくとよい。1 回目の撮影（登山道が変化する前の状態の撮影）が終わったら、後日（たとえば 1 年後）、同じ地点で、同じ撮影位置から 2 回目の撮影を行う。ただし、カメラの高さやアングルまで厳密に再現する必要はない。

4. 三次元座標計算

(1) 初期対応点の作成と撮影位置の計算

三次元座標計算の手順を図 4 に示す。まず、撮

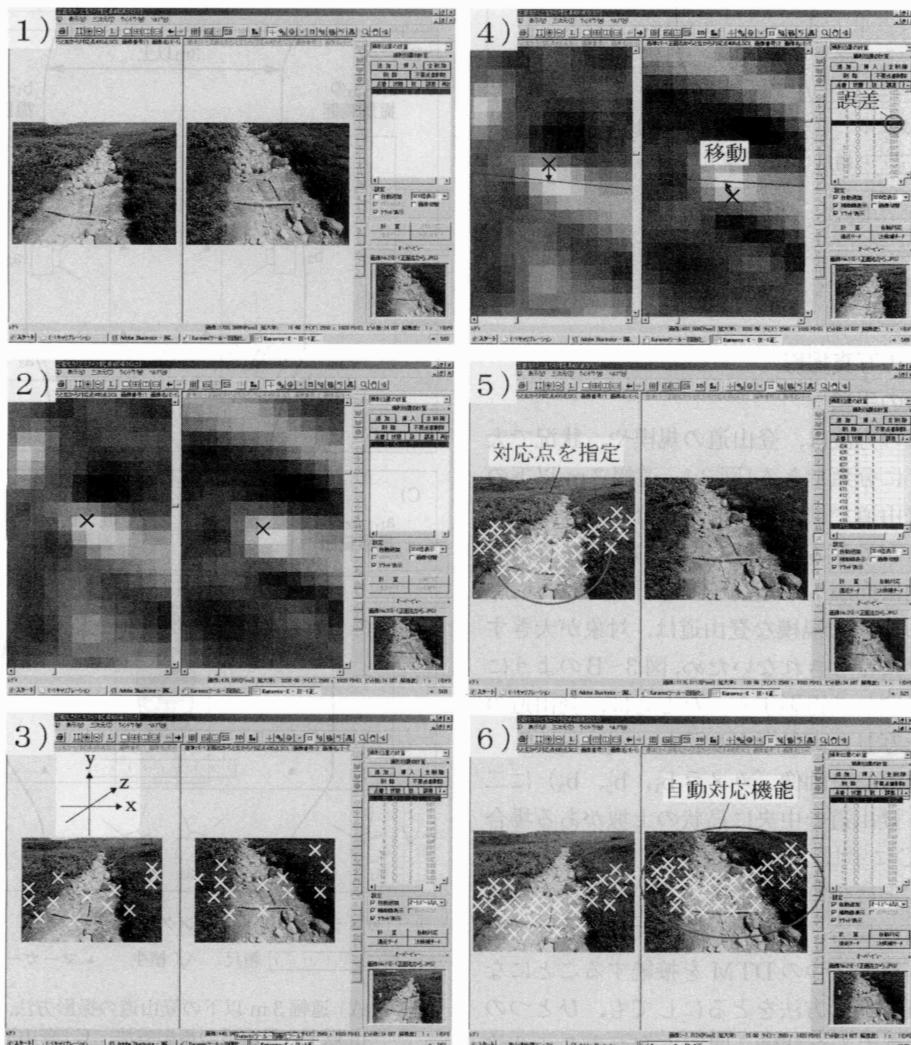


図 4 三次元座標計算の手順

1) パソコン上で、撮影より取得した変化前（1回目）の登山道の画像を 2 枚、Kuraves-K に入力する、2) 2 枚の画像上で対応する点（対応点）を作成する、3) 対応点を 8 点以上取得したら、撮影位置の計算を行う、4) 各対応点の誤差が求まり、対応点の存在範囲を示す補助線が表示される、5) 対応点の数を増やす、6) もう一方の画像に対応点を対応付ける。

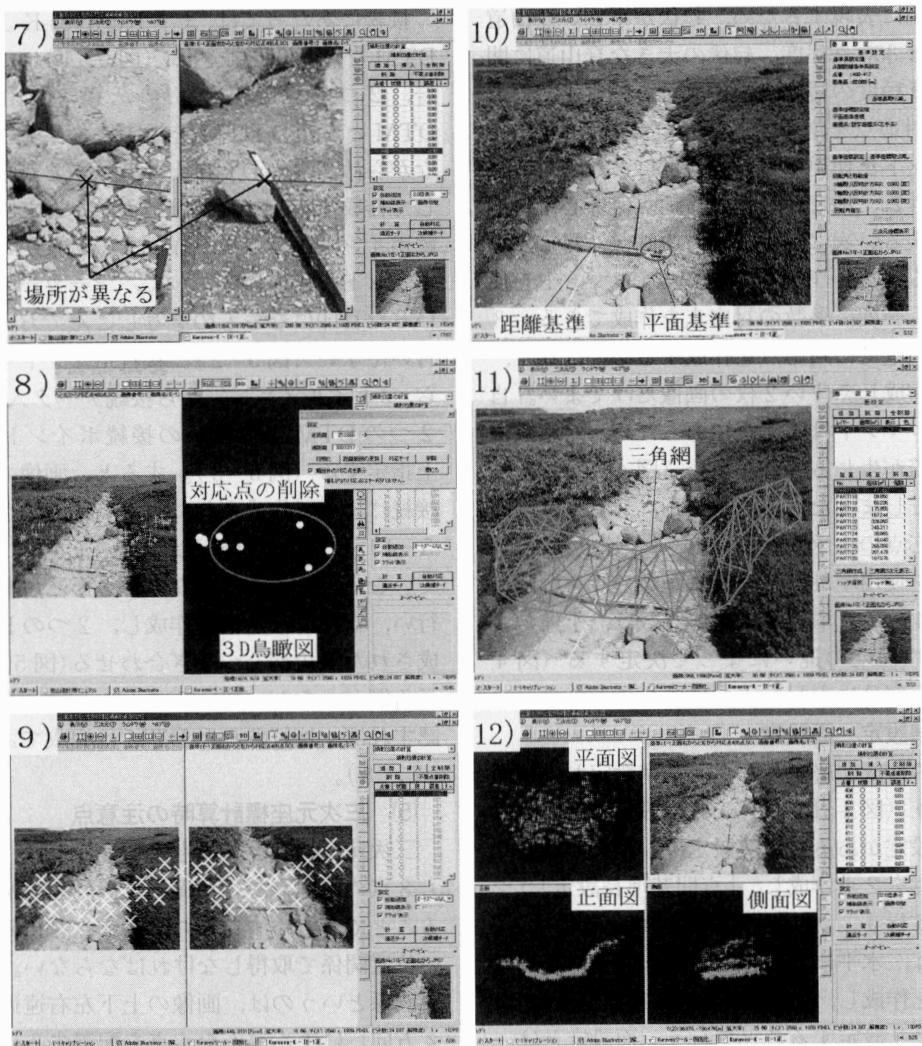


図4 (三次元座標計算の手順：続き)

7) ずれた対応点を修正、もしくは削除する、8) 対応点のエラーが多いときは「遠近サーチ」コマンドを使用すれば、一度に多数の点を削除できる、9) 対応点は、登山道の起伏の大小に応じて300~500点程度取得する、10) 基準設定を行う、11) 平面設定を行う、12) 三角網を削除・追加し、DTMの形状を調整する。

影より取得した変化前（1回目）の登山道の画像2枚を、パソコン上でKuraves-Kに入力する（図4-1）。次に、2枚の画像上で対応する点（初期対応点）を作成する（図4-2）。初期対応点はマークや特徴的な石の角・模様などを手がかりに作成すればよい。初期対応点が不正確である場合や、空間的配置が偏っている場合は、撮影位置計算の精度が低下する。初期対応点の対応付けはピクセル単位で正確に行い、画像のx, y, z軸方向へ分散して配置するよう心がける。初期対応点を最

低8点（実際にはもっと多い方がよく、この例では13点）取得したら、撮影位置の計算を行う（図4-3）。それにより各対応点の誤差が求まり、初期対応点の存在範囲を示す補助線が表示されるようになる（図4-4）。補助線と対応点の間の距離が小さくなると誤差も小さくなるので、補助線を参考に点の位置を調整する。点の誤差は0.1以下が望ましい。

(2) 対応点の作成

次に対応点の数を増やす（図4-5）。登山道の

形状を正確に表現するため、起伏が小さい登山道に関しては 300 点程度、起伏の大きな登山道に関しては 500 程度の対応点を作成する。まず、一方の画像で対応点を増やす。「領域内を格子状に指定」コマンドを使用すると、一度に多数の対応点を設定できる。地形が変化する地点には必ず対応点を設定する。次に、もう一方の画像に対応点を対応付ける(図 4-6)。「自動対応」コマンドを使用すると、一度に多数の対応点を作成できる。3 枚の画像上全てに対応点を作成する必要はなく、対応点が作成しやすい 2 枚の画像だけでよい。「自動対応」コマンドは不完全であるため、対応点に大きな誤差が生じる場合が多い(図 4-7)。そこで、ずれてしまった対応点を修正、もしくは削除する。対応点のエラーが多いときは「遠近サーチ」コマンドを使用すれば、一度に多数の点を削除できる(図 4-8)。取得する対応点数は、上述のように起伏の程度の違いによって決定する(図 4-9)。植生部分にも対応点を作成しておく。

(3) 基準設定・面設定

対応点の作成が終了したら、基準設定および面設定を行う(図 4-10, 11)。基準設定には距離設定と平面設定がある。距離設定は、箱尺の目盛り上に対応点を 2 点作成し、「点間基準長設定」コマンドにより行う。2 点間の距離は 100 cm にする。平面設定は、水平に設置した箱尺の面上に 3 点以上対応点を作成し、「平面鉛直基準座標を設定」コマンドにより設定することで行う。面設定とは、「三角網作成」ボタンを押し、自動で三角網を作成することである。自動作成された三角網が登山道の形状を正しく表していない場合は、三角網を削除・追加することで、求めたい形状が得られる。三角網の調整が終了すれば DTM は完成である(図 4-12)。

(4) DTM の接続

図 3-B, C に示したように 1 つの DTM で登山道を表現しきれない場合には、2 つの DTM を接続する必要が生じる。接続とは、例えば L, R という 2 つの DTM が存在したとすると、L の DTM 上でも、R の DTM 上でも存在する同一の地点を指定することで、L で計算された三次元座標を基準として、R の DTM が L に組み込まれることを意味する。接続の手順を図 5 に示す。

接続にあたっては、まず Kuraves-K 上に 2 つの DTM ファイルを並べる(図 5-1)。この例の場合、2 つの DTM ファイルとは、登山道右側の DTM と左側の DTM を指す。お互いの画像を見ながら、2 つの DTM 上で共通する点を対応点として作成する。これを接続ポイントと呼ぶが、接続ポイントは 3 点以上作成する必要がある。接続ポイントの作成にあたって、マーカーや基準尺といった目印になるものを写しこんでおくと作業を行いやすい(図 5-2)。接続ポイントを作成したら、ファイルメニューから接続データ入力を行い、2 つの DTM 上で互いの接続ポイントを 3 点以上指定する(図 5-3)。すると、画像の外側に、接続によって作成された対応点が表示される(図 5-4)。DTM が接続されても、三角網は接続されていない。そこで、重なり合った三角網の削除を行い、新たに三角網を作成し、2 つの DTM に作成された三角網をつなぎ合わせる(図 5-5, 6)。三角網がつながっていることを三次元鳥瞰図で確認すれば、接続された DTM は完成である(図 5-7, 8)。

(5) 三次元座標計算時の注意点

三次元座標計算で最も大切なことは、少なくとも 8 点の対応点で行う撮影位置計算の精度を高めることである。すなわち、対応点を正確に、正しい位置関係で取得しなければならない。正しい位置関係というのは、画像の上下左右遠近(x, y, z 方向)にまんべんなく点を配置することを意味する。対象が登山道の場合、撮影の角度が少し変わっただけでも、画像の様子は大きく変わる。画像上で同じ場所に見えて、現実の場所はズレていることがあるので、マーカーなどを頼りに自ら推測する。対応点を作成する際の基準として重要な点は、画像の奥行き方向にズれる可能性がある場所には対応点を作成しないということである(図 6)。

5. 三次元座標の統一

三次元座標の統一の手順を図 7 に示す。変化前の登山道の DTM を作成した要領で、変化後の登山道についても DTM を作成する(図 7-1)。変化前(1 回目の撮影)、変化後(たとえば 1 年後の 2 回目の撮影)の登山道のファイルを Kuraves-K

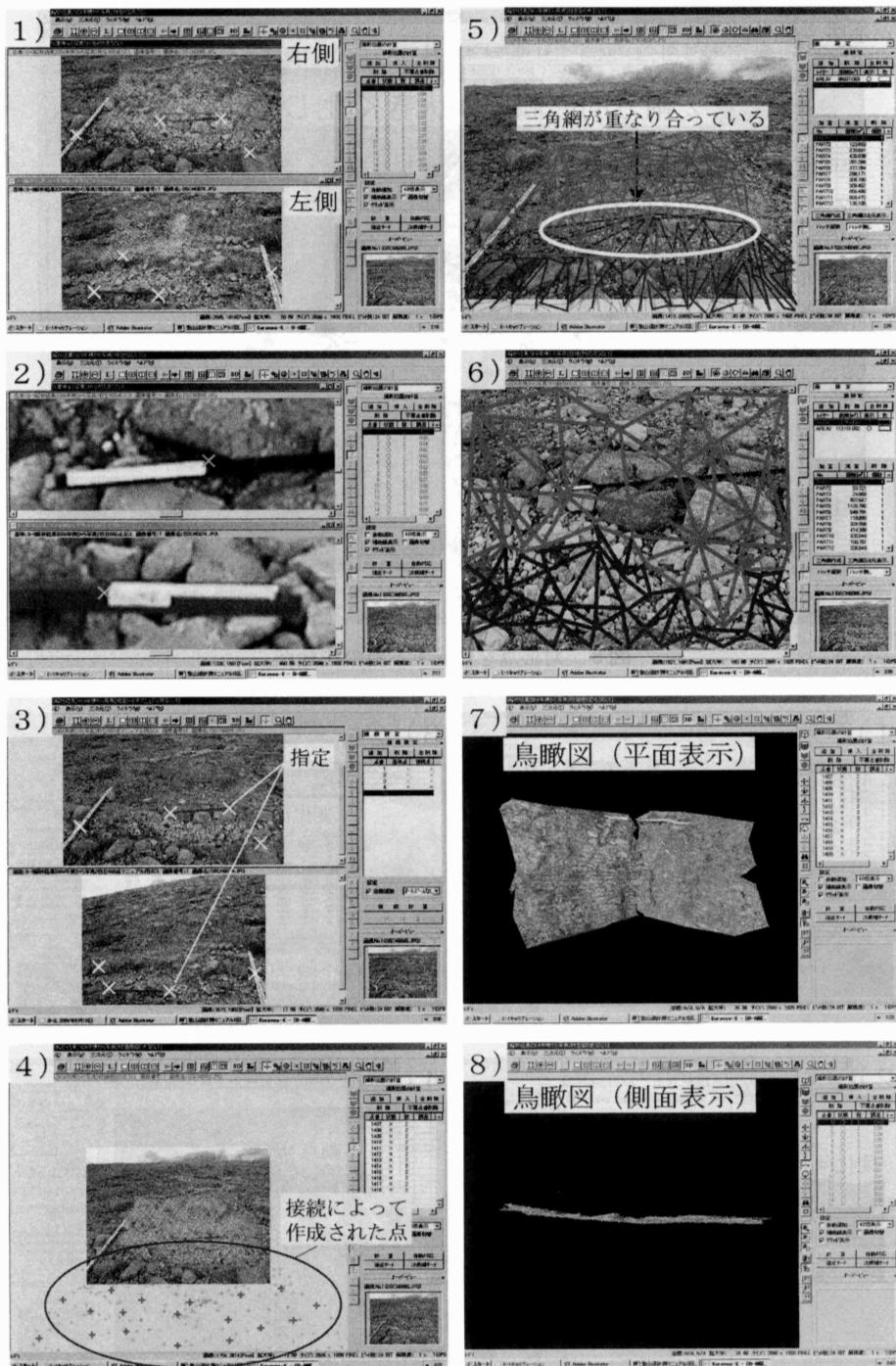


図5 接続の手順

1) Kuraves-K 上に 2 つの DTM ファイルを並べる、2) 接続ポイントの作成にあたって、マーカーや基準尺といった目印になるものを写しこんでおくと作業を行いやすい、3) ファイルメニューから接続データ入力を行い、2 つの DTM 上で互いの接続ポイントを 3 点以上指定する、4) 画像の外側に、接続によって作成された対応点が表示される、5) 重なり合った三角網の削除を行い、新たに三角網を作成し、2 つの DTM に作成された三角網をつなぎ合わせる、6) 三角網がつなぎ合わせた状態、7) DTM の接続終了（三次元鳥瞰図平面表示）、8) DTM の接続終了（三次元鳥瞰図側面表示）。

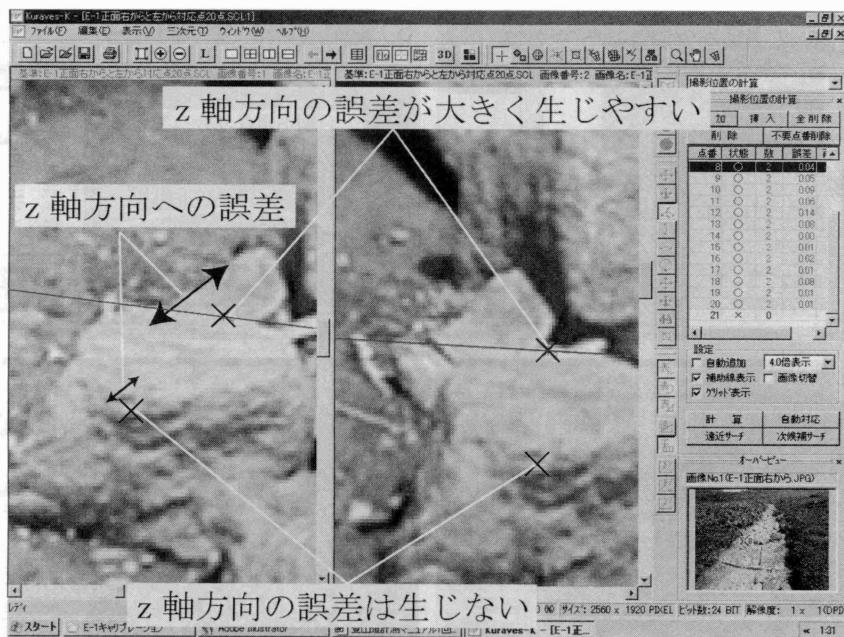


図 6 対応点を作成する際の注意点

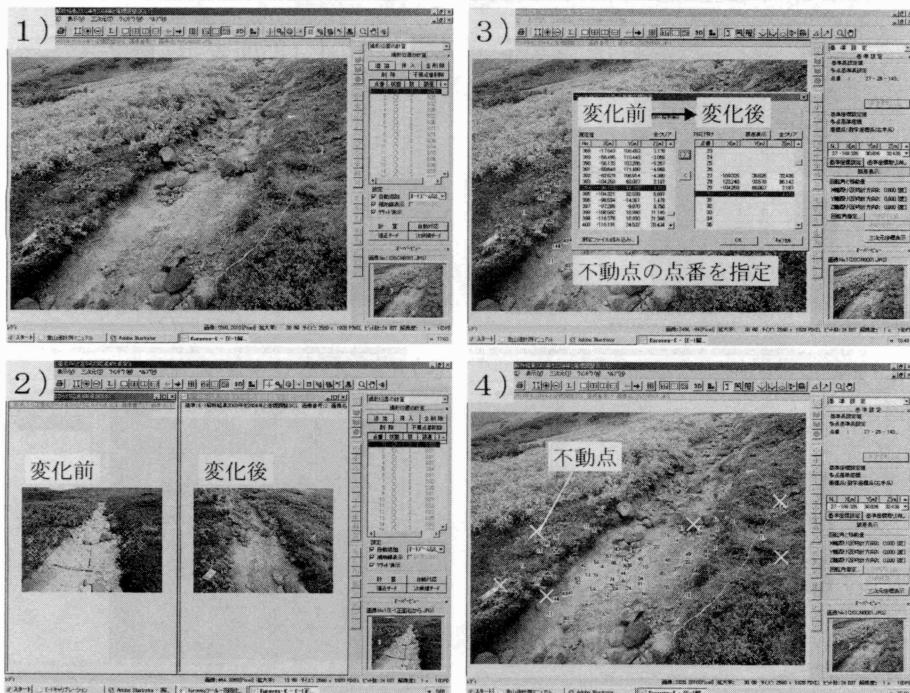


図 7 三次元座標の統一の手順

1) 変化後の登山道についても DTM を作成する, 2) 変化前 (1回目の撮影), 変化後 (2回目の撮影) の登山道のファイルを Kuraves-K 上で並べ, 2つのDTM 上に不動点となる対応点を4点以上作成する, 3) 基準とする DTM (ここでは変化前) の三次元座標情報を CSV ファイルへエクスポートする。変化後の DTM ファイルを開き, 基準設定モードで変化前の三次元情報が入っている CSV ファイルを開き, 不動点の座標を指定する, 4) 不動点の指定により変化前の登山道と変化後の登山道が同一の座標系へ調整される。

上で並べ、2つのDTM上に不動点となる対応点を4点以上作成する(図7-2)。不動点とは、時間が経過しても移動しない点に作成した対応点を指す。筆者らは、登山道脇に設置した4本のアルミアンダルの基部や不動と思われる巨礫上に対応点を作成した。不動点を作成したら、基準とするDTM(ここでは変化前)の三次元座標情報をCSVファイルへエキスポートする。変化後のDTMファイルを開き、基準設定モードで変化前の三次元情報が入っているCSVファイルを開き、不動点の座標を指定する(図7-3)。不動点の指定により変化前の登山道と変化後の登山道が同一の座標系へ調整される(図7-4)。

6. 侵食量計算

侵食量計算の手順を図8に示す。侵食量の計算にはKuraves-Kに付属している別のアプリケーション(図面化ツール)を用いる。あらかじめ、Kuraves-Kにより作成した登山道のファイル(変化前、変化後)をKVLファイルとしてそれぞれ保存しておく。図面化ツール上に変化前の登山道のファイルを開く(図8-1)。そこへKVLとして保存した変化後の登山道ファイルを計画レイヤー³⁾としてインポートする(図8-2)。それにより2つのDTMが画面上で重ねられる(図8-3)。

(1) 登山道の使用開始時から現在(調査時時点)までの侵食量計算

登山道が使用開始(設置)されてから調査時点までの総侵食量を算出するには、まず、調査時点である変化後の登山道(計画レイヤー)を非表示にし、使用開始時である変化前の登山道(現況レイヤー)のみを表示する(図8-4)。登山道の両端に設置したアルミアンダルの点を断面線で結び、断面線の両側に10cm間隔で新たに断面線を引く(図8-5)。変化前の登山道(現況レイヤー)へ、各断面図に想定される登山道完成時、すなわち土壌侵食発生前の地表面を書き込む。ここで、使用開始時の登山道の地表面は、周辺部の地表面と同じレベルにあったと仮定する。実際の作業では、現在の登山道の両脇に残る地表面(植生に覆われている方が望ましい)をつなぐことで、使用開始時の登山道周辺部の地表面を推定する。これらの作業後、土量計算によって侵食量を算出する。

(2) 調査期間内の侵食量計算

変化前から変化後までの侵食量および再堆積量を算出するには、変化後の登山道(計画レイヤー)を表示しておく。2つのDTM上にある植生部分の三角網を削除する(図8-6)。この作業は先にKuraves-Kで行っておいてもよい。アルミアンダルを結んだ断面線を中心に、1cm間隔で新たに断面線を引く(図8-7)。土量計算によって侵食量および再堆積量を算出する(図8-8)。画面上に「切り土」、および「盛り土」が表示される。ここで、「切り土」は侵食量、「盛り土」は再堆積量を表す。

IV. おわりに

本マニュアルでは、登山道の維持管理を目的とした作業のために、デジタル写真測量による土壤侵食量計算の流れについて記載した。冒頭で述べたように、デジタル写真測量は、登山道だけではなく、さまざまな小地形の解析や小面積の詳細地形図作成などにも応用できる。このため、今後、地形学のさまざまな分野でも普及が期待される。なお、紙面の都合で省略せざるを得なかった情報や作業例などは、URL(<http://daisetsu.ees.hokudai.ac.jp/>)にあるので参照していただきたい。

謝辞

本研究は、環境省の平成15・16年度大雪山国立公園における登山道管理水準検討調査の一環として実施したもので、本研究を行うにあたり、環境省西北海道地区自然保護事務所から支援をいただき、三次元計測システムを借用させていただきました。ここに記して厚く感謝申し上げます。

注

- 1) コマンドの操作方法など細かな点については、同社が作成したマニュアルを参照されたい。また、カメラ校正の方法は倉敷紡績株式会社が作成したマニュアルに従って行えばよいのでここでは割愛した。
- 2) アルミアンダルの設置は、調査地によって許可が必要な場合がある(たとえば、国立公園、国定公園、私有地)。
- 3) Kuraves-Kでは、地形改変を伴う土木工事に対応できるよう、工事前の地形と計画された地形から工事に必要な土砂の量を計算する機能がある。この機能を利用して、登山道の使用開始時(=工事前の地形=現況レイヤー)における侵食量を算出する。

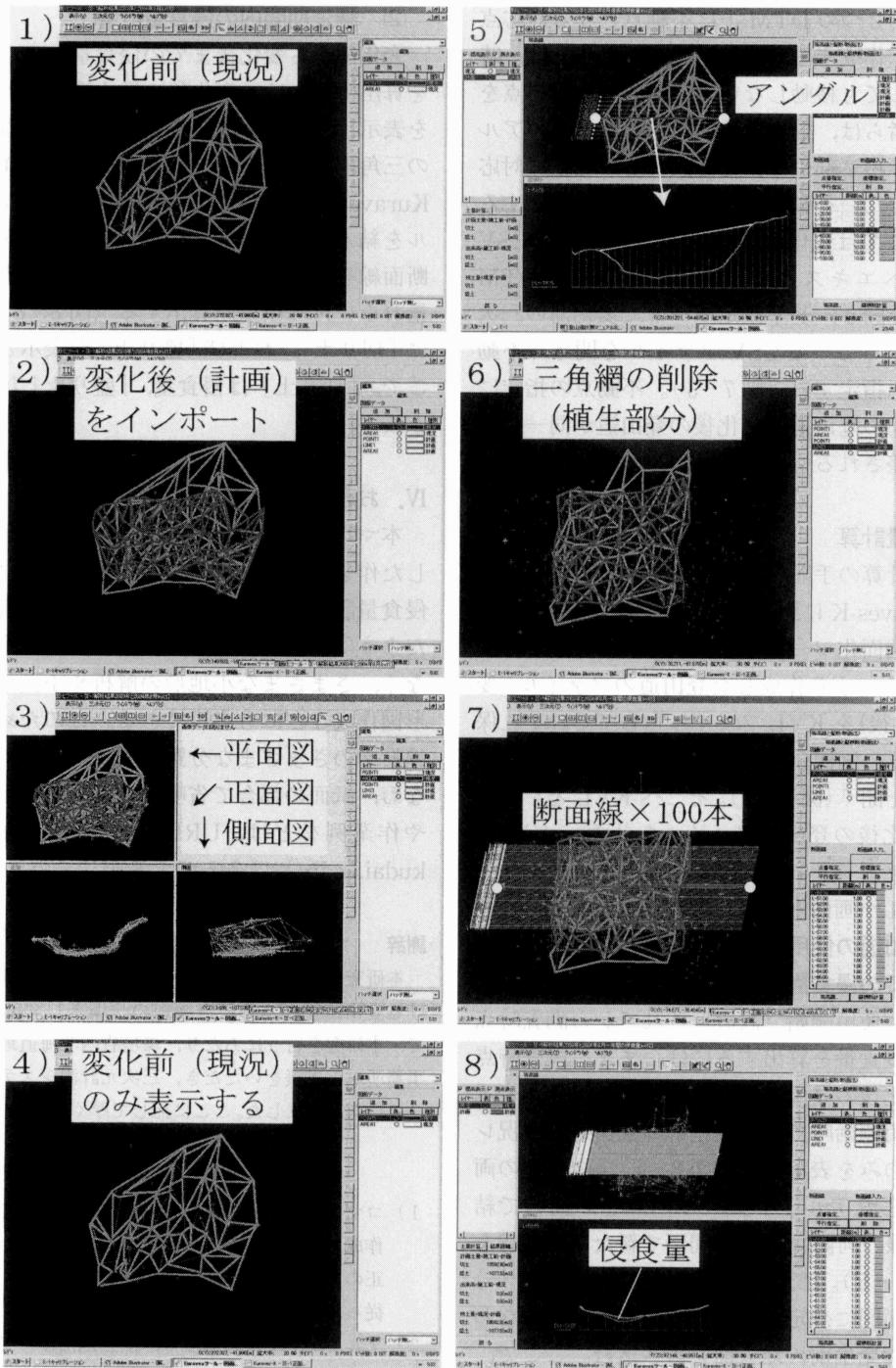


図8 侵食量計の手順

1) 図面化ツール上に変化前の登山道のファイルを開く、2) KVLとして保存した変化後の登山道ファイルを計画レイヤーとしてインポートする、3) それにより2つのDTMが画面上で重ねられる、4) 変化後の登山道（計画レイヤー）を非表示にし、変化前の登山道（現況レイヤー）のみを表示する、5) 登山道の両端に設置したアルミアングルの点を断面線で結び、断面線の両側に10 cm間隔で新たに断面線を引く、6) 2つのDTM上にある植生部分の三角網を削除する、7) アルミアングルを結んだ断面線を中心、1 cm間隔で新たに断面線を引く、8) 土量計算によって侵食量および堆積量を算出する。

イヤー）と調査時点（＝計画される地形＝計画レイヤー）とを比較することができる。

参考文献

- 環境省自然保護局（2002）：『平成13年度国立・国定公園における登山道のあり方検討調査報告書』財団法人自然環境研究センター。
- 近津博文・國井洋一・中田隆司・大嶽達哉（2003）：民生用デジタルスチルカメラによるデジタル写真測量システム“3 DiVision”の構築。写真測量とリモートセンシング，**42**(3), 6-16.
- 山田周二（1993）：白山における登山道のひろがりとその速さ。筑波大学水理実験センター報告, 17号, 65-72.
- 渡辺悌二・深澤京子（1998）：大雪山国立公園、黒岳七合目から山頂間における過去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**, 753-764.
- 渡辺悌二・太田健一・後藤忠志（2004）：大雪山国立公園、裾合平周辺における登山道侵食の長期モニタリング。季刊地理学, **56**, 254-264.
- Cole, D. N. (1983) : Assessing and monitoring back-country trail conditions. Research Paper. INT/United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, **303**, 1-10.
- Warner, W. S. (1995) : Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35mm photography. *Soil and Tillage Research* **34**, 187-197.
- Warner, W. S. and Kvaerner, J. (1998) : Measuring trail erosion with a 35 mm camera. *Mountain Research and Development* **18**, 273-280.
- Yoda, A. and Watanabe, T. (2000) : Erosion of mountain hiking trail over a seven-year period in Daisetsuzan National Park, central Hokkaido, Japan. In Cole, D. N. and McCool, S. F. eds.: *Wilderness Science in a Time of Change*. Vol. 5, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, 172-178.