

三次元写真測量による数値地形モデルの作成法 ～ADAM MPS-2を利用した斜め露頭写真の例～

藤井幸泰
深田地質研究所

How to make DTM of geological outcrop by stereo-photogrammetry,
a example of using ADAM MPS-2.

FUJII Yukiyasu
Fukada Geological Institute

要旨：近年、写真測量を用いた地質学および応用地質学的研究が増えている。とはいえ写真測量は高価な機器や専門的知識・能力を必要とするため、まだまだ敷居の高い解析手法である。この報文では小型解析図化機を用いた地質露頭スケールの数値地形モデル作成法について、写真測量の原理を交えながら具体的に解説する。

1. はじめに

地質図をつくる際、露頭観察から得られたデータは地形図上に書き込んでいく。このように地形図を利用することは、フィールドワークにとって最も基礎的で重要なことである（狩野，1992）。地形図は空中写真をもちいた三次元写真測量によって作成されている。三次元写真測量は、地すべり体の移動量計測（吉澤ほか，1991，宮澤ほか，2000など）や不連続岩盤モデルの作成（島ほか，1995）などにも利用されており、応用地質学や岩盤力学の分野でも必須のツールとなりつつある（中井・島内，2000）。

写真測量は三次元情報を取得するのに大変有効な手段である。しかし機材が高価であるうえ、専門的知識・能力も必要とされるため、素人はなかなか手が出し難い。小型解析図化機はまだまだ値段が高いものの、従来の機器に比べればコストパフォーマンスに大変優れている。この報告では川惣電機株式会社から市販されている小型解析図化機ADAM MPS-2を用いて、斜め写真による地質露頭（数m～十数mスケール）

の数値地形モデルの作成法を解説する。三次元写真測量に縁の薄い地質学者が、地質露頭の数値地形モデル化を行うための、最低限の原理と実践方法を解説した。したがって詳細については別紙文献などを参考にしてほしい。

2. 写真測量の原理

1枚の写真からは平面的な形しかわからない。しかし2枚の写真からなる立体写真からは、奥行き方向の形がわかる（日本写真測量学会，1980）。2枚の写真はそれぞれ異なった2点から撮影されているから、写真像の位置に差異が出る（図1；藤井・堀，2002）。このため実体視の際に視差を生ずる。この視差差から対象物の高さを測定するのが三次元写真測量の基礎である（水尾，1996）。

立体写真測量による数値地形モデル作成の作業工程を図2に示す。以降に図2のチャートの順番で、実際の作業を原理と合わせながら解説する。

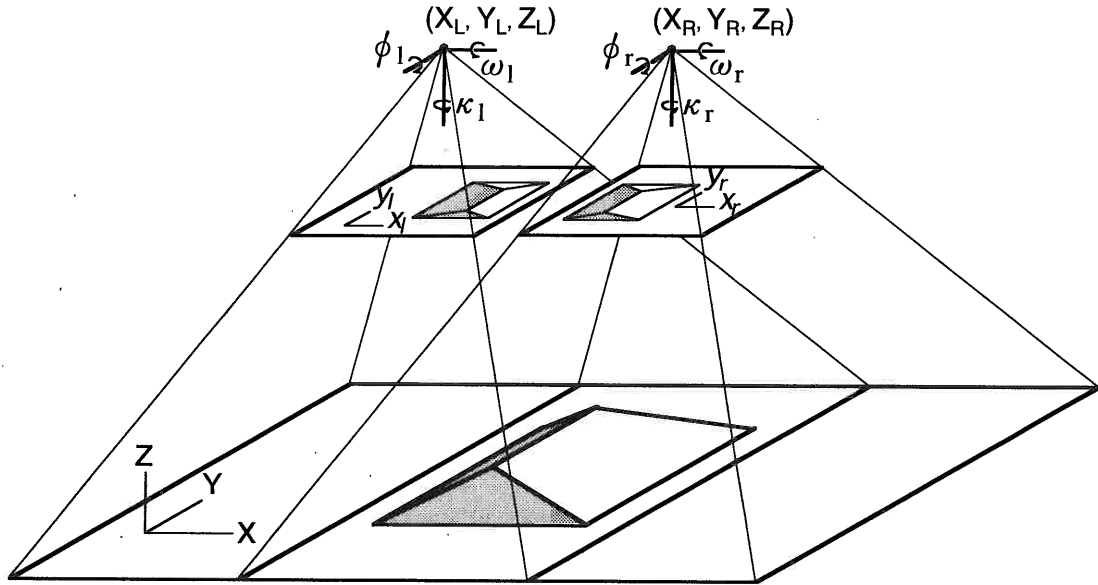


図1 立体写真測量の原理 (藤井・堀, 2002). 地上の対象物 (家屋の屋根のような立体構造物) が左右2枚の写真に写し込まれている. (x_r, y_r) と (x_l, y_l) は左右写真上の座標系, (X, Y, Z) は地上の座標系を示す. 上部の黒丸2点 (X_R, Y_R, Z_R) と (X_L, Y_L, Z_L) が左右写真の撮影位置を, $(\omega_r, \phi_r, \kappa_r)$ と $(\omega_l, \phi_l, \kappa_l)$ が撮影方向を示す.

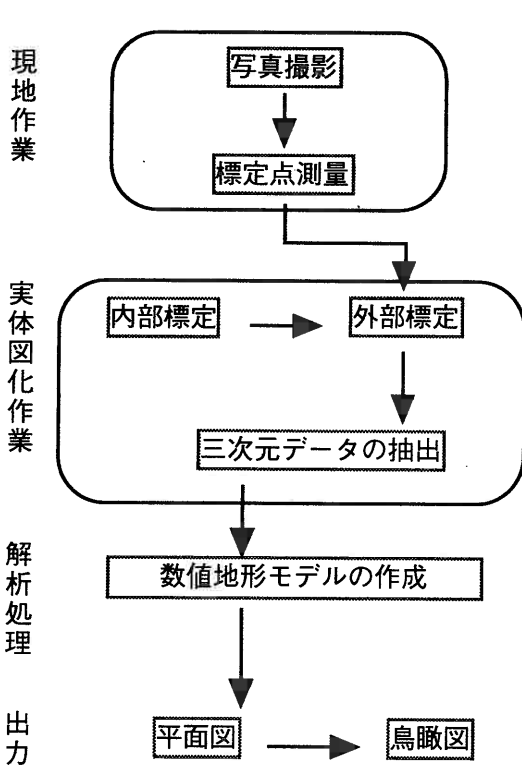


図2 立体写真測量による数値地形モデル作成の作業チャート図

3. 現地作業

3.1 写真撮影

写真撮影を行う前に標定点を設置する. この報告では油性ラッカースプレーで10mm径の赤点 (点A~F) を岩石露頭上に記した (図3,4).

次に写真撮影を行う. 写真測量用カメラもしくは写真測量用に改造およびレンズキャリブレーションを行ったカメラを使うことが望ましい. この報告では, HASSELBLAD にレゾプレートなどを取り付けたカメラに, ZEIS PLANAR 100mm のレンズを使用して行った. このレンズはあらかじめレンズキャリブレーション (歪み測定) を行っている. このカメラは防災技術株式会社からお借りした.

写真撮影に際して注意すべき点は, 撮影距離 (H) と2枚の写真の撮影間隔 (W) である (図3). $1/20 < W/H < 1/3$ くらいの値が望ましい (日本写真測量学会, 1980). $1/100 < W/H$ であれば立体視は可能であるが, 奥行き方向の精度が得ら

三次元写真測量による数値地形モデルの作成法

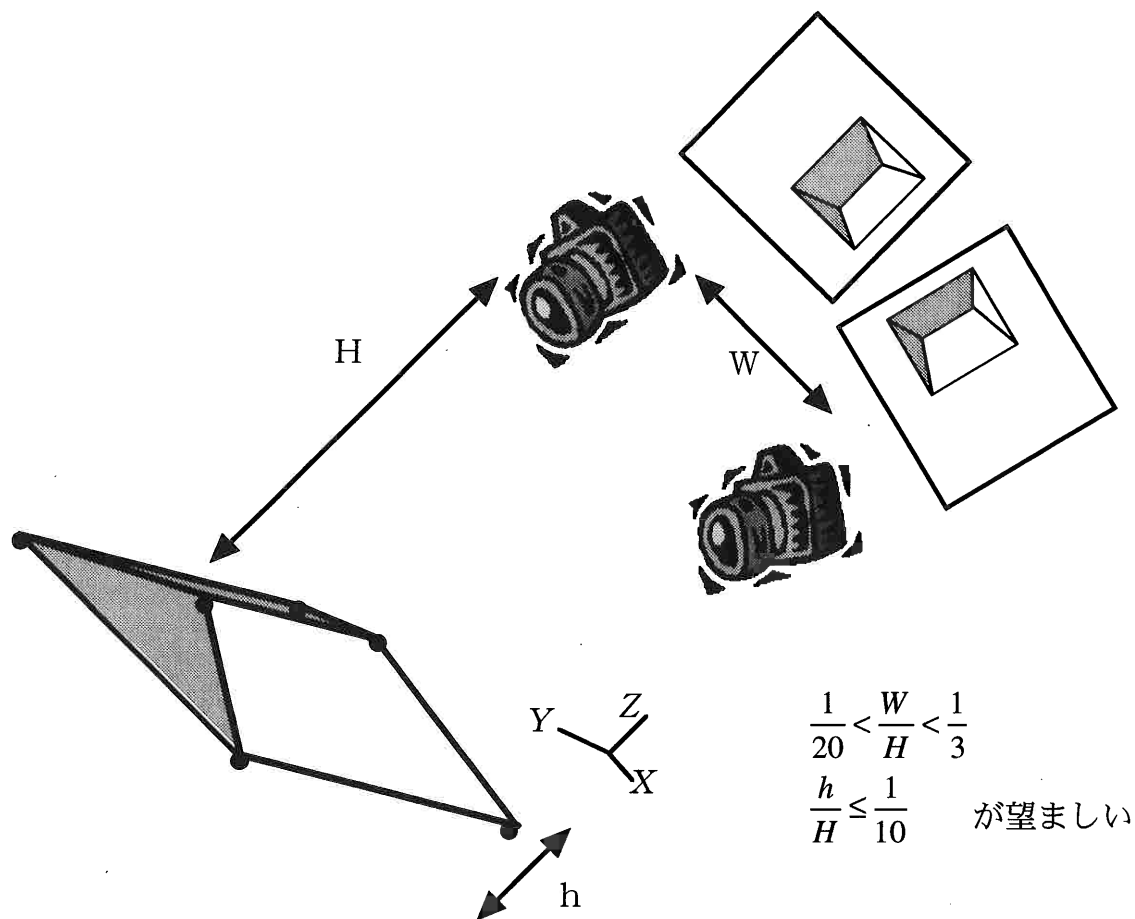


図3 立体写真の撮影。●は標定点。Hは撮影距離，hは対象物の高さ。Wは写真撮影間隔の距離で，この方向が写真撮影基準線となる。

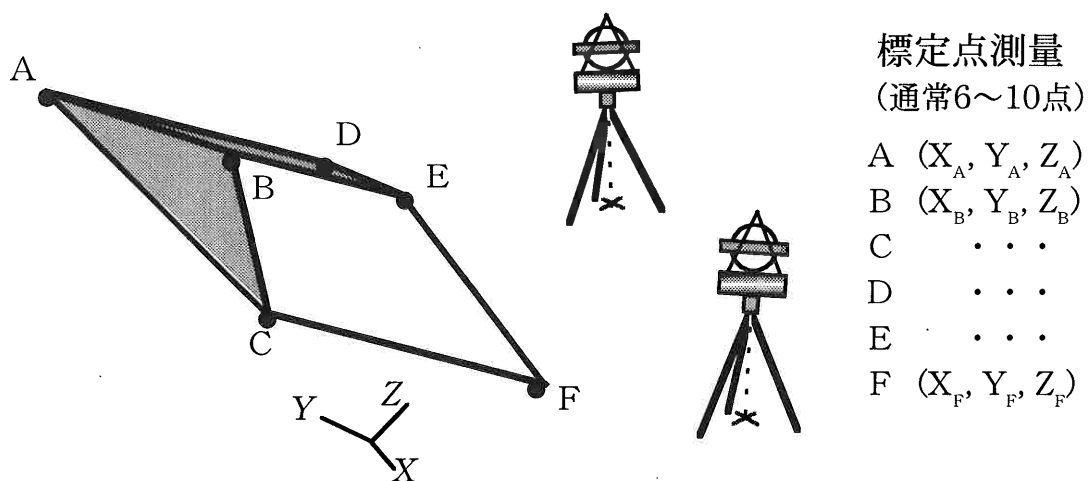


図4 三角測量でA~Fの標定点●の座標(X, Y, Z)をもとめる。

れない。また $1/3 < W/H$ であると、視差が大きすぎて立体視がやりづらくなる。また、撮影距離と被写体の高さ (h) も考慮に入れなくてはならない。 $h/H \leq 1/10$ が望ましい。これは写真撮影を行った際、高さのちがいによる画像のズレが生じるためである。撮影距離 (H) に比べて被写体の高さ (h) が大きいと画像のズレも大きくなり、その結果測量誤差も大きくなってしまう。ただし h/H が小さすぎると、奥行き方向の精度が得られないため、注意が必要である (図5は那珂湊砂岩露頭の立体写真の例、 $H=26m$, $W=2.5m$, $h=2.5m$ で撮影)。

なお撮影後に、写真撮影基準線 (図3のWの方向) の走向傾斜を測定した。

3.2 標定点測量

次に写真に写し込んだ標定点 (点A~F) の測量を行う。これはトランシットコンパスを用いて三角測量を行った (図4)。測量の際、基準となる2点間 (×印) の走向を測定しておき、室内に持ち帰った測量値を計算する際、写真撮影基準線 (図3のWの方向) をX軸に、それと直交して露頭の中心に延ばした線をZ軸にし、残りをY軸となるように座標を決定した (図3,4)。

トランシットコンパスの平面測角精度は5'、鉛直測角精度は30'であるが、鉛直方向はレベルメーターを併用することで鉛直測角精度6'まで高めた。その結果、露頭までの距離約5m、基準点間距離 (図4の×印間) も約5mで三角測量を行ったところ、誤差は2~3cmに抑えることができた。



図5 一对の立体写真 ($H=26m$, $W=2.5m$, $h=2.5m$ で撮影)

左

右

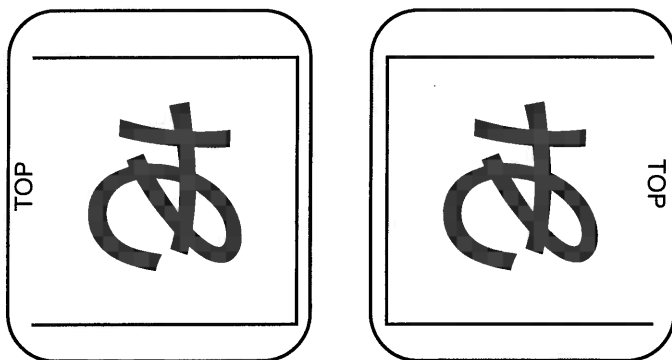


図6 解析図化機へ写真のセットの仕方

4. 室内作業

野外で撮影した写真 (ポジフィルム) と標定点測量結果を用いて、実体図化作業に取りかかる。

4.1 実体図化作業

4.1.1 写真のセットと内部標定

図6のように写真を機械にセットし、ソフトウェア ADAM を起動して作業を始める。始めにJob Name とModel Name の入力を行

う。続けて被写体までのおおよその撮影距離 (H), 撮影間隔 (W), フィルムサイズ, レンズ焦点距離, 内部標定用レゾプレートの指標座標の位置 (図7), 外部標定点座標 (点A~F), レンズキャリブレーション値を入力する。

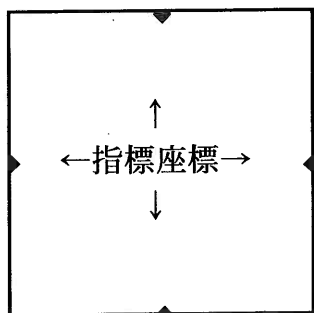


図7 指標座標

次に内部標定に取りかかる。まずは概略標定によってカメラの κ 回転の機械的補正を行う (左右写真が立体視できるように回転させる)。

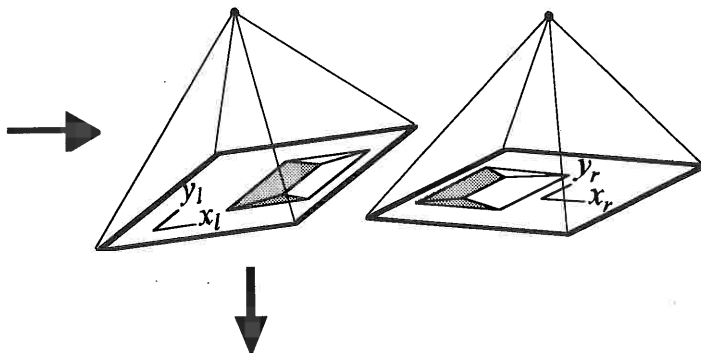
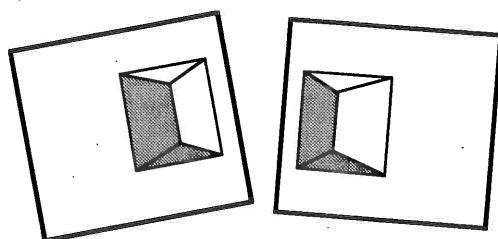
次にMPS-2の左右のコントローラを用いて, 左右写真上の指標座標位置 (図7) にメスマークを移動し, 左右写真それぞれの写真座標位置 (x_l, y_l), (x_r, y_r) を入力する。入力した写真座標値と, あらかじめ入力しておいた指標座標位置との誤差が少なければ内部標定は完了。ここまでで2枚の写真それぞれにおいて, 撮影時のカメラ内部の状態を再現したことになる (図8)。

4.1.2 外部標定

左右写真上の同一の外部標定点 (図4のA~F) にメスマークを移動し, 左右写真それぞれの写真座標位置 (x_l, y_l), (x_r, y_r) を入力する。点

内部標定

一对の写真の (x_l, y_l), (x_r, y_r) 座標と, カメラの焦点距離などを正確に決める。



外部標定

A~Fの (X, Y, Z) 座標を左右写真上の (x_l, y_l), (x_r, y_r) 座標と関連させて, 左右写真の撮影位置 (X_L, Y_L, Z_L), (X_R, Y_R, Z_R) 座標と撮影方向 ($\omega_l, \phi_l, \kappa_l$), ($\omega_r, \phi_r, \kappa_r$) を決める。

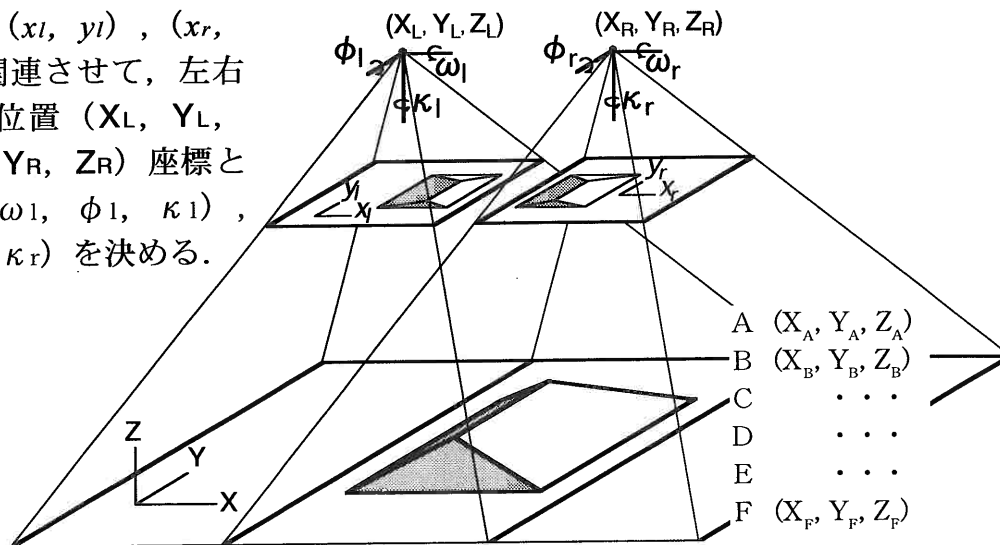


図8 内部標定と外部標定

A~F 各々について左右写真の写真座標位置 (x_l, y_l), (x_r, y_r) を入力し終わったら、測量値の $A(X_A, Y_A, Z_A) \sim F(X_F, Y_F, Z_F)$ を用いて、コンピューターが左右カメラの撮影位置 (X_L, Y_L, Z_L), (X_R, Y_R, Z_R) と撮影方向 ($\omega_l, \phi_l, \kappa_l$), ($\omega_r, \phi_r, \kappa_r$) を最小二乗法で計算してくれる (原理的には5つの標定点があればできるが、通常6~10点を用いて計算を行う; 詳しい原理の解説は日本写真測量学会, 1983などを参照)。このとき誤差の大きい標定点は測量もしくは写真座標位置の入力ミスと考えると入力値から省く。最小二乗法の誤差 (RMS error; Root

Mean Square error) はできるだけ小さくするのがよい。

図5の例の場合、表1のようなカメラ位置が得られた時に、最小二乗法の誤差は平均0.011 (m) となった (表2)。これは測量誤差 (2~3cm) よりやや小さいものの、ほぼ同じ値であるため、良い計算結果が得られたといえる。外部評定による誤差が大きいと、写真撮影位置を再現できない時もある。以上のように、外部標定によって写真撮影位置と撮影方向を再現でき (図8)、写真座標から地上座標の三次元データを取得することができるようになる。

表1 外部標定から計算された、図5の左右写真撮影位置と撮影方向。

Left	Camera	Right	Camera
X:	2.66	X:	5.11
Y:	-0.08	Y:	-0.07
Z:	26.17	Z:	26.23
OMEGA:	0° 42' 09"	OMEGA:	359° 54' 53"
PHI:	356° 59' 30"	PHI:	2° 17' 31"
KAPPA:	359° 34' 30"	KAPPA:	359° 34' 14"

表2 測量による各標定点の座標 (X, Y, Z) と、外部標定による残差 (V)

Pt	X(metres)	V	Y(metres)	V	Z(metres)	V	
1	0	0.005	0.426	-0.005	2.174	0.012	
13	9.111	-0.009	0.867	0.012	1.032	-0.007	
3	1.247	-0.005	0.776	-0.003	1.179	0.007	
4	2.4	-0.004	0.348	0.02	1.842	-0.025	
6	3.559	-0.005	0.43	0.019	1.641	0.01	
7	3.486	0.002	1.612	-0.004	0.299	-0.025	
8	4.729	0.005	0.169	-0.004	1.843	0.004	
9	5.197	0.009	1.018	-0.008	0.776	-0.019	
10	6.725	0.001	1.139	-0.013	0.838	-0.003	
11	7.119	0.003	0.51	-0.018	1.655	0.004	
12	7.939	-0.002	1.43	0.012	0.419	0.029	
2	0.99	-0.002	0	-0.005	2.488	0.011	
						AVE.	
RMS errors		0.005		0.012		0.016	0.011

4.1.3 三次元データ抽出

MPS-2の左右のコントローラを用いて（右十字コントローラ：XY座標上の移動，左コントローラ：Z軸に沿った移動），メスマークを露頭面に貼り付けて入力することによって，コンピューターに左右写真のメスマークの写真座標位置 (x_l, y_l) , (x_r, y_r) が入力され，その値から地上の三次元座標値 (X, Y, Z) を計算で取得できる。

数値地形面をつくるために必要とされるデータは，a:範囲の指定（閉鎖した線）（図9-a），b:谷と尾根のデータ（境界線）（図9-b），c:多数のポイントデータ（図9-c）である。

5. 解析処理

5.1 数値地形のモデル作成

図9のa:範囲の指定の線，b:谷と尾根の境界線，c:多数のポイントデータがそろえば，GEOCOMソフトによってTIN（Triangulated Irregular Net-work）法による数値地形モデルが作

成可能である。TINとは，①指定範囲の中で，②境界線が面の勾配変化の境界になり，③複数のポイントデータを線で結んで，連続的な小三角形網で地形面をつくる方法である（野上，2002など）。GEOCOMPではこのほかに，等高線の作成，横断線の指定と横断面の作成などをカバーしている。

5.2 出力

5.2.1 平面図

等高線図を描くことによって，地形を等高線で表現できる（図10）。

5.2.2 鳥瞰図

GEOCOMPでは鳥瞰図の作成もカバーしている。地形面による陰線処理もカバーしている。直交する等間隔の横断線を地形面上に描けば，ワイヤーフレームによる地形面の表現もできる（図11）。鳥瞰図であるから，写真上でデータを取得した範囲であれば，斜め方向からの鳥瞰図を作成することもできる（図12）。

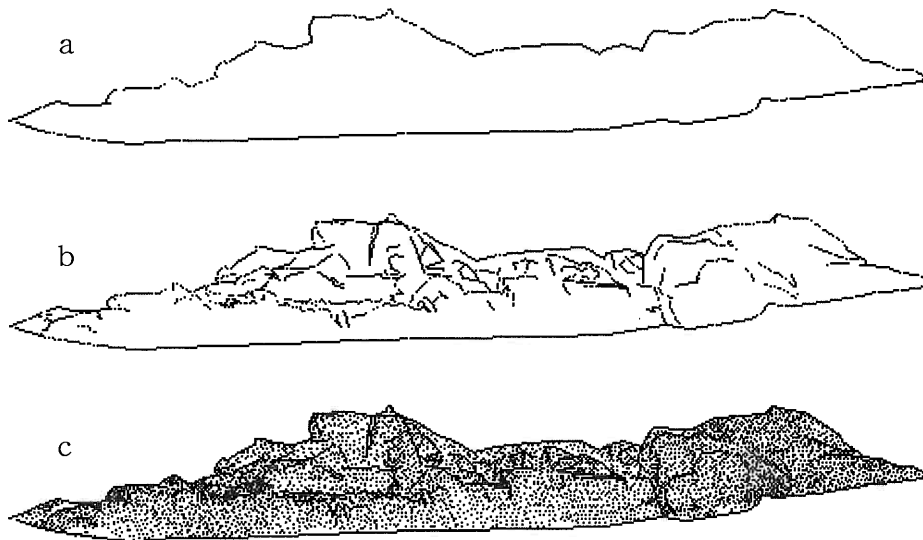


図9 三次元データの抽出. a: 範囲の指定（閉鎖した線），
b: 谷と尾根のデータ（境界線），c: 多数のポイントデータ.

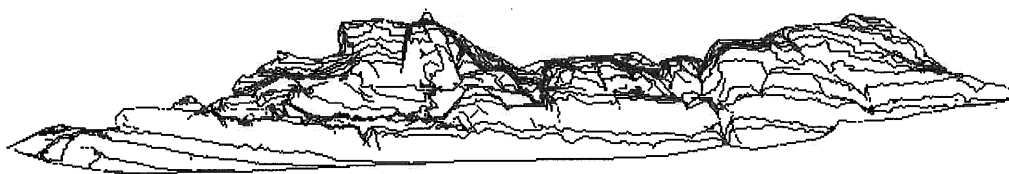


図10 等高線作成 (10cm間隔)

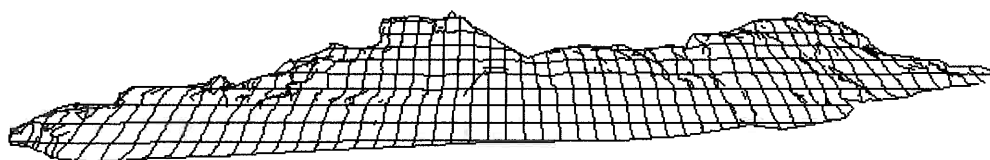


図11 写真撮影方向からの鳥瞰図 (20cm間隔の横断線で表現)

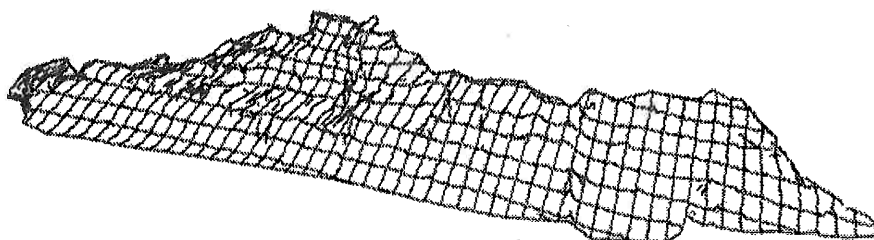


図12 斜め右上からの鳥瞰図 (20cm間隔の横断線で表現)

6. おわりに

近年レーザー測量による数値地形モデル作成が増えてきている(野上, 2002や藤岡, 2003)。数値地形モデルをつくる目的であれば, 機材等が高いものの, 作業時間は数倍早く済む。しかしその他の地質・地形情報を取得するのが目的であれば, 写真観察は必須の事項となる。したがって写真測量は, 判読を伴う作業に今後も利用されると考えられる。

7. 謝辞

防災技術株式会社の堀伸三郎氏には研究を進めるにあたり様々な助言を頂き, 測量用カメラなども貸していただいた。(財)深田地質研究所理事長の佐藤正博士には原稿を校閲いただいた。本研究を進めるにあたり, 文部科学省学術振興会科学研究費(13740296)の一部を使用した。以上の方々と関係各機関に心より御礼申し

上げます。

引用文献

- 藤井幸泰, 堀伸三郎, 2002, 花崗岩体中の割れ目(節理)の時系列解析. 深田地質研究所年報, 3, 59-77.
- 藤岡展价, 2003, 空中レーザー・マッピングとデジタル写真技術の現状とその応用, 深田研ライブラリー, 59, 32p.
- 狩野謙一, 1992, 野外地質調査の基礎. 古今書院, 東京, 148p.
- 宮澤圭, 吉澤孝和, 小野塚良三, 久松文男, 2000, 時間差空中写真測量による地すべり解析システム—八幡平澄川地すべり地の変位計測データを利用した地下すべり面の推定—. 写真測量とリモートセンシング, 39, 39-47.
- 水尾藤久, 1996, 増補教程写真測量. 山海堂, 東京, 272p.
- 中井卓巳, 島内哲哉, 2000, 不連続性岩盤の調査・解析と評価 3. 不連続面の調査と評価(その1). 土と基礎, 48-3, 57-62.
- 野上道男, 2002, 数値地図で何が出来るか, 深田研ライブラリー, 32, 33p.
- 日本写真測量学会, 1980, 立体写真のみかた・と

- りかた・つくりかた。技法堂出版，東京，
79p.
- 日本写真測量学会，1983，解析写真測量。
（社）日本測量学会，東京，190pp.
- 島肇，堀伸三郎，山田祐司，1995，立体写真を用いた岩盤斜面調査。日本応用地質学会研究発表会講演論文集，29-32.
- 吉澤孝和，丸山昌義，長雄勲，村瀬孝三，西澤茂高，三澤敏雄，根岸六郎，1991，空中写真測量による地すべり情報の提供とすべり面の解析ー長野市広瀬地区に発生した地すべり地への応用ー。地すべり，27，9-17.