土砂流解析への16㎜撮影機の利用

著者	中根 和郎
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	16
ページ	83-96
発行年	1976-12
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000739

551.311.2.235:624.131.37:528.5:771

土砂流解析への16mm撮影機の利用

中　根　和　郎*

国立防災科学技術センター大型実験研究部

Study on Short-Range Photogrammetry with 16-mm Movie Cameras for Observation of Sediment Flow

By

Kazurou Nakane

Rainfall Laboratory, Research Division of Large Expriments National Research Center for Disaster Prevention, 4489-1, Kurihara, Sakura-mura, Ibaraki-ken, 300-32

Abstract

No simple methods are available yet for measuring the three-dimentional motion of objects which rapidly move in space. The present paper proposes an easy method called short range photogrammetry by using two 16 mm movie cameras.

Section 2 of this paper describes the frequency distribution of observed values of calibration targets marked on the projected film image. This distribution is mainly caused by the instability of film at the photographing stage and by the local dislocation of film image at the developing stage. The range of this distribution is within about ±0.2 mm. This value limits the maximum accuracy of this photogrammetry.

The systematic distortion of film image caused by using 16 mm movie cameras is discussed in Section 3.

In Section 5, the accuracy of outer orientation which uses the method of least squares and the accuracy of short-range photogrammetry which uses the stereo photographing method in case of convergence are described.

It is found that the coordinates X, Y, Z of markers are measured within the errors of ±20 mm, ±10 mm, ±25 mm, respectively, under the condition that the base length of two 16 mm movie cameras is about 2 m, the distance between these cameras and the measuring markers being about 6 m.

まえがき

近年，土砂災害は，ますます増加の一途をたどっており，早急な対策が望まれている．一方，泥状土砂流がどういう状態で流下し，堆積するか，巨大な転レキをどのように運搬する

* 降雨実験室

か，これら土砂流がどのように構造物を破壊するか等々，未解決の問題が多い．そこで，室内基礎実験における基礎理論を総合し，土砂災害対策の基礎資料とする意味において，泥状土砂流の大規模な実験が必要である．同時に，実験時の高速度（5 m/sec～0.5 m/sec）な土砂流の先端形状，表面速度，表面形状を計測する手法を早急に開発する必要がある．この計測法としては，3次元空間を高速度に動く物体群を非接触な方式で計測できるものでなければならない．この条件を満す計測法として，4次元写真測量法（金沢他，1973）があげられる．そこで，16 mm 撮影機2台を用いたステレオ同期収れん撮影による4次元写真測量を試みた．この方法は，すでに普及している写真測量の手法とは本質的な違いはないが，在来の写真測量のように熟練者と高度な装置とによって，解析される方法と違い，測定点のフィルム画面上の座標値をフィルム投影機などにより読み取れば，ここに示した計算を用いて誤差を最小とした測定点位置を数値的に求める事ができる．

1. 計測の概略

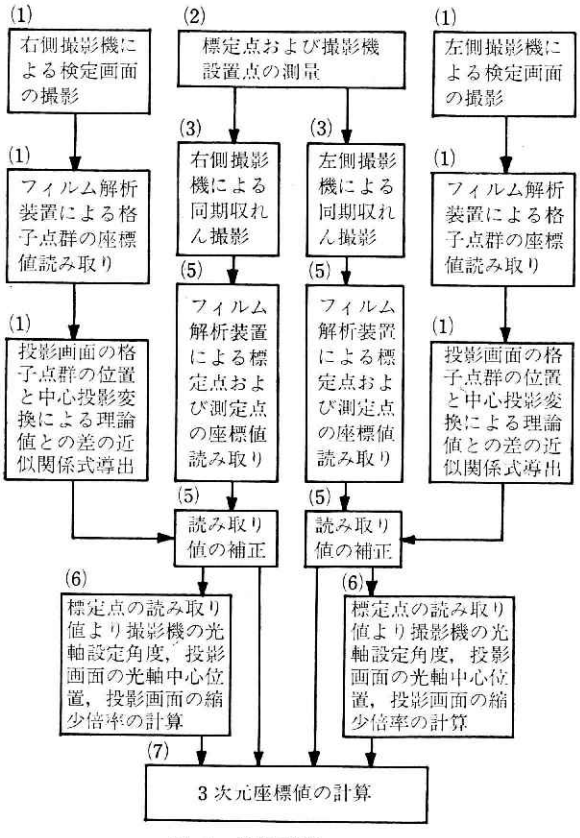


図 1　解析手順
Fig. 1　The flow analyzed

図1に示すように(1)から(7)の手順で計測を行う．

（1）　使用する 16 mm 撮影機は，計測用として開発されたものでなく，これを測量機器として機能させる必要がある．ここでは，撮影機・投影機などを個別に検討するのは繁雑なため，測定系全体として検討した．まず，検定用図面を屋外撮影した後に，フィルム解析装置で検定図面の格子点像位置を読み取る．その値と理想中心投影変換したときの理論値との系統的な誤差量を計算し，変位量とフィルム上の位置との近似関係式を導く，この近似関係式を用いて，フィルム上の像位置の読み取り値を補正し，撮影機を測量機として機能させる方法をとる．

（2）　測定区域内の不動地点に，基準点を一点，水平方向およ

び鉛直方向に標定点を各々等間隔に 4 点以上設置し，基準点から各々の標定点位置を測量する．撮影機は基線比が 1/5～1/2 になるように適当な安定位置に設置し，基準点から 2 台の撮影機位置を測量する．なお，測定点としては，フィルム上で容易に判読できる白い指標を用いる．

（3） (1) により検定された撮影機 2 台を用いて，ステレオ同期収れん撮影法により，標定点および測定点を撮影する．

（4） フィルムを現像し，後に，比較的伸縮の少ないポジフィルムに反転焼付けする．

（5） フィルム解析装置により，ポジフィルム上の基準点像位置をフィルム上の原点として，標定点像および測定点像の位置を読み取る．次に，(1) で導出した系統的誤差量とポジフィルム上の位置との近似関係式を用いて，読み取り値を補正する．

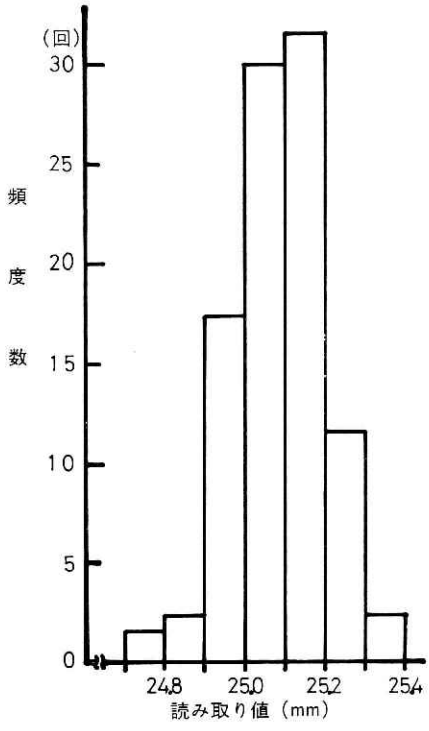


図 2 読み取り値のヒストグラム
Fig. 2 Frequency distribution at the observation positions

（6） 補正された標定点像位置の読み取り値，標定点および撮影機設置位置の測量値を用いて，撮影機の光軸設定角度，ポジフィルム上の光軸中心位置，レンズの光軸中心からフィルム投影画面までの距離を計算によって求める．

（7） (6) で求めた外部標定値と投影画面上の測定点像位置の読み取り値を用いて，計算により測定点の 3 次元座標値を求める．

2. フィルム読み取り値の分布

測定系の偶然的な誤差を求めるため，撮影したポジフィルム上の任意な数地点の固定点像位置をフィルム解析装置（分解能 0.05 mm，倍率 x 方向 23.3 倍，y 方向 23.4 倍，直線性 0.1 %）で 100 コマ読み取り，読み取り値のヒストグラムを求めた．このヒストグラムは図 2 に示すように，平均値を中心に ± 0.2 mm 以内に標本数の 90 %以上が含まれる．この事から，撮影時に起る偶然的なフィルムの歪み，現像焼付け時に起るフィルム乳剤膜の局部的な変位，フィルム解析時に起る偶然的なフィルムの歪み，読み取り誤差などの測定系における積算された誤差は，フィルム解析装置画面上で ± 0.2 mm であると言える．次に，読み取り値を何コマ読み取り，平均化すれば目標とする最確値を得る事ができるかを検討す

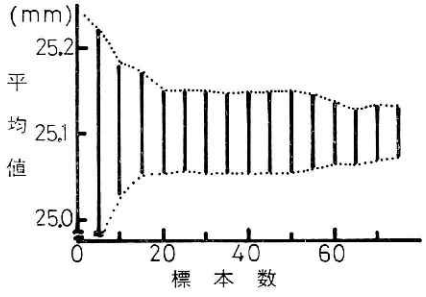


図 3　標本数と平均値の関係
Fig. 3　Relation between the sample size and the mean

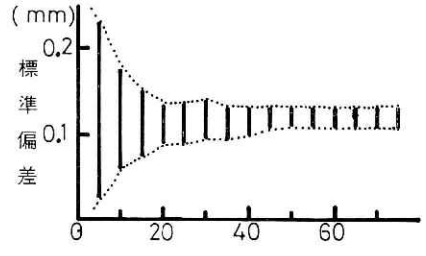
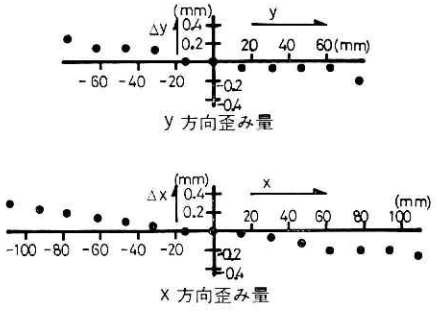


図 4　標本数と標準偏差の関係
Fig. 4　Relation between the sample size and the standard deviation



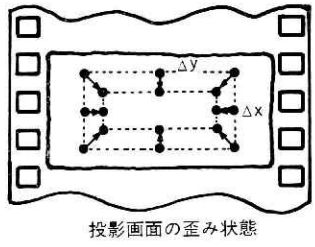


図 5　読み取り値の系統的な誤差量
Fig. 5　Systematic errors of the optical instrument used

る．標本数と読み取り値の平均および標準偏差との関係を図 3, 4 に示す．これによると標本数 75 から 40 にかけては，平均値，標準偏差共にほぼ同様な分布を示す．また，標本数 20 の平均値の幅は ± 0.05 mm 以内に納っている事から，フィルム上の標定点位置の読み取り値は 20 コマの読み取り値の平均値とする．

3.　読み取り値の系統的歪み量

読み取り値の系統的歪み量を定量的に測定するために，次のような測定を行なった．格子点群（格子点間隔 5 cm×5 cm）を書き込んだ検定用図面（50 cm×70 cm）を 1.9 m 前方から直角撮影し，後に，フィルム解析装置を用いて，格子点像群の位置 (x, y) を 20 コマ読み込み，その平均値 $(\bar{x}, \bar{y})$ を求める．次に，各格子点群を中心投影変換した場合の各像位置の理論値 (x_o, y_o) と上述の平均値 $(\bar{x}, \bar{y})$ との差 $(\Delta x, \Delta y)$ を求め，これを系統的な誤差量とする．図 5 は，16 mm 撮影機*を用いた場合の系統的な誤差量分布である．これによると，系統的な誤差量は x 方向，y 方向に，ほぼ平行に収縮する傾向を示す．

* F=1.4, f=25 mm のアンジェニューレンズ付きボレックス H 16 撮影機

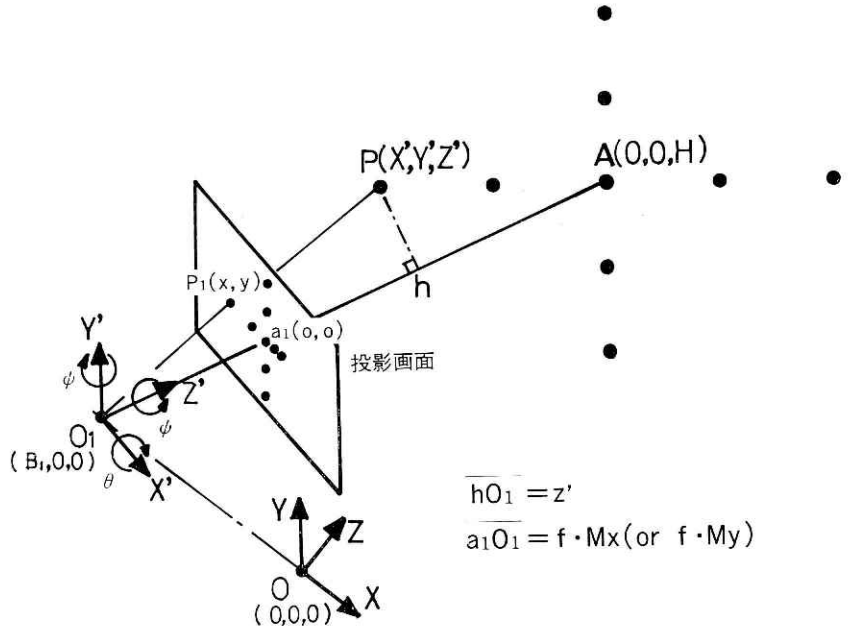


図 6 収　れ　ん　撮　影
Fig. 6 Photographing in case of convergence for outer orientation

4. 解析手法

16 mm 撮影機を所定の角度に対し ± 0.2 度以内の精度で設定するのは困難である．したがって，必要な精度を得るため計算によって設定角度を求める必要がある．そこで，フィルム解析装置により標定点のフィルム像位置を読み取り，後に，解析的にフィルム上の光軸中心 (O_x, O_y)，水平偏向角 φ，鉛直偏向角 θ，撮影機の焦点距離 f とフィルム解析装置の投影倍率 M_x (x 方向の倍率)，M_y (y 方向の倍率) との積 $f \cdot M_x$，$f \cdot M_y$ を求める．

図 6 に示すように点 O を原点とする座標系を O—X, Y, Z とし，撮影機のレンズ中心 O_1 を原点とする座標系を (O_1-X′, Y′, Z′) とすると，(O_1-X′, Y′, Z′) 座標系の点 P (X′, Y′, Z′) と (O-X, Y, Z) 座標系における同点 P (X, Y, Z) との関係式*は次のように表わされる．

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X-B \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \qquad (1)$$

ここで，Ψ は Z′ 軸 (撮影光軸) を回転軸にした回転角度であり，フィルム解析装置の投影画面を回転させる事によって $\Psi = 0$ に設定できる．

また，測定点 P (X′, Y′, Z′) とフィルム解析装置に投影されたフィルム画面上の測定点

* 3 次元座標軸回転変換

P の像 P_1 (x, y) との関係式*は次式のように表わされる.

$$\frac{x}{f\cdot M_x}=\frac{X'}{Z'} \tag{2}$$

$$\frac{y}{f\cdot M_y}=\frac{Y'}{Z'} \tag{3}$$

(1), (2), (3) 式より, 標定点 (X_i, Y_i, Z_i) と, 基準点 (o, o, H) の像の位置をフィルム画面上の原点と定めた時の各標定点像位置 (x_i, y_i) との関係式は次のように表わされる.

$$\left(\frac{x_i+O_x}{f\cdot M_x}\times\cos\varphi+\sin\varphi\right)\times Z_i'=X_i-B \tag{4}$$

$$\frac{y_i+O_y}{f\cdot M_y}\times Z'=Y_i\times\cos\theta+Z_i\times\sin\theta \tag{5}$$

$$Z_i'=(X_i-B)\times\sin\varphi-Y_i\times\sin\theta\times\cos\varphi+Z_i\times\cos\theta\times\cos\varphi \tag{6}$$

ここで, 点 ($-O_x$, $-O_y$) はフィルム面上の光軸中心

i　次に, $Y_i\simeq o$ なる水平方向の標定点を4点 ((X_i, Y_i, Z_i), i=1,2,3,4) 定め, 各標定点の投影画面上の像位置を ((x_i, y_i), i=1,2,3,4) とし, (4), (5) 式を用いて, 次の手順で $f\cdot M_x$, φ, θ の最確値を求める.

i-1　(4) 式より $f\cdot M_x$ を消去し

$$\varepsilon_1(\varphi)=\left\{\frac{\bar{X}_1+\bar{O}_x}{\bar{X}_4+\bar{O}_x}-\frac{(X_1-B)/Z'_1-\sin\varphi}{(X_4-B)/Z'_4-\sin\varphi}\right\}^2+\left\{\frac{\bar{X}_2+\bar{O}_x}{\bar{X}_3+\bar{O}_x}-\frac{(X_2-B)/Z'_2-\sin\varphi}{(X_3-B)/Z'_3-\sin\varphi}\right\}^2 \tag{7}$$

なる評価関数を定め, $\varepsilon_1(\varphi)$ を最小にする設定値付近の値 φ を仮りの設定値とする. ここで, ($\bar{x}_i$, $\bar{y}_i$, i=1,2,3,4), $\bar{O}_x$ はフィルム解析装置による読み取り値の平均値である.

i-2　(4) 式より O_x を消去し

$$\varepsilon_2(f\cdot M_x)=\sum_{i=1}^{4}\left\{\bar{X}_i-\left(\frac{X_i-B}{Z'_i}+\frac{B}{H'}\right)\times\frac{f\cdot M_x}{\cos\varphi}\right\}^2 \tag{8}$$

$$O_x=-\left(\frac{B}{H'}+\sin\varphi\right)\times\frac{f\cdot M_x}{\cos\varphi} \tag{9}$$

$$H'=-B\times\sin\varphi+H\times\cos\varphi\times\cos\theta$$

なる評価関数 (8) 式を定め, ε_2 (f·M_x) を最小とする f·M_x を最確値とする.

i-3　(8) 式を

$$\varepsilon_3(\varphi)=\sum_{i=0}^{4}\left\{\bar{X}_i-\left(\frac{X_i-B}{Z_i}+\frac{B}{H'}\right)\times\frac{\cos\varphi}{f\cdot M_x}\right\}^2 \tag{8}'$$

なる評価関数と定め, $\varepsilon_3(\varphi)$ を最小にする φ を最確値とする.

ii　さらに, $X_i\simeq O$ 附近の鉛直方向の標定点を4点 ((X_i, Y_i, Z_i), i=1, 2, 3, 4) 定め, 各標定点のフィルム画面上の像位置を ((x_i, y_i), i=1, 2, 3, 4) とし (5), (6) 式を用いて

---

* 中心投影変換

$f\cdot M_y$, O_y, θ の最確値を求める.

ii-1 (5) 式より $\mathrm{f}\cdot\mathrm{M}_y$ を消去し

$$\varepsilon_4(\theta)=\left\{\frac{\bar{y}_1+\bar{O}_y}{\bar{y}_4+\bar{O}_y}-\frac{(Y_1\times\cos\theta+Z_1\times\sin\theta)/Z'_1}{(Y_4\times\cos\theta+Z_4\times\sin\theta)/Z'_4}\right\}^2+\left\{\frac{\bar{y}_2+\bar{O}_y}{\bar{y}_3+\bar{O}_y}-\frac{(Y_2\times(\cos\theta+Z_2\times\sin\theta)/Z'_2}{(Y_3\times(\cos\theta+Z_3\times\sin\theta)/Z'_3}\right\}^2 \tag{10}$$

なる評価関数を定め, $\varepsilon_4(\theta)$ を最小にする設定値付近の値 θ を仮りの設定値とする.

ii-2 (5) 式より O_y を消去し

$$\varepsilon_5(f\cdot M_y)=\sum_{i=1}^{4}\left\{\bar{y}_i-\frac{(Y_i\times\cos\theta+Z_i\times\sin\theta)\times f\cdot M_y}{Z_i'}+\frac{H\times\sin\theta\times f\cdot M_y}{H'}\right\}^2 \tag{11}$$

なる評価関数を定め, $\varepsilon_5(\mathrm{f}\cdot\mathrm{M}_y)$ を最小にする $\mathrm{f}\cdot\mathrm{M}_y$ を最確値とする.

ii-3 (11) 式を

$$\varepsilon_6(\theta)=\sum_{i=1}^{4}\left\{\bar{y}_i-\frac{(Y_i\times\cos\theta+Z_i\times\sin\theta)\times f\cdot M_y}{Z_i'}+\frac{H\times\sin\theta\times f\cdot M_y}{H'}\right\}^2 \tag{11'}$$

なる評価関数と定め, $\varepsilon_6(\theta)$ を最小にする θ を最確値とする.

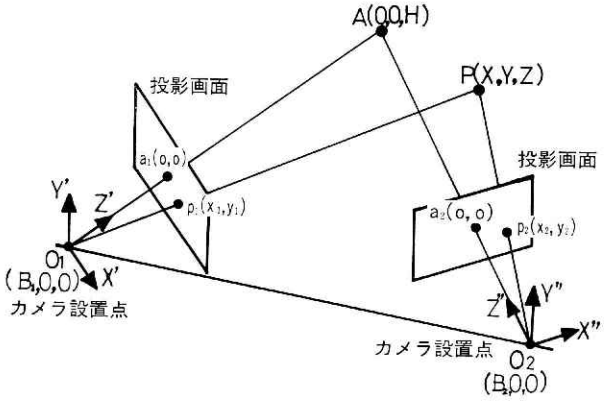


図 7 ステレオ収れん撮影
Fig. 7 Stereo-photographing in case of convergence

iii 以上の結果を用いて測定点の3次元座標値を計算する. 図7のように設定された2台の撮影機を上述 i, ii により外部標定し, 各々の値を $\{\varphi_1,\ \theta_1,\ (O_{x1},\ O_{y1}),\ \mathrm{f}_1\cdot\mathrm{M}_x,\ \mathrm{f}_1\cdot\mathrm{M}_y\}$, $\{\varphi_2,\ \theta_2,\ (O_{x2},\ O_{y2}),\ \mathrm{f}_2\cdot\mathrm{M}_x,\ \mathrm{f}_2\mathrm{M}_y\}$ とする. 測定点 $P(X,\ Y,\ Z)$ とステレオ同期収れん撮影した2対のフィルム面上の像の位置 $P_1(x_1,\ y_1)$, $P_2(x_2,\ y_2)$ との関係式は次式で表わされる.

$$\begin{pmatrix} X-B_1 \\ Y \\ Z \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos\varphi_1 & 0 & \sin\varphi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi_1 & 0 & \cos\varphi_1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dfrac{x_1+O_{x_1}}{f_1\cdot M_x}\cdot Z_1' \\ \dfrac{y_1+O_{y_1}}{f_1\cdot M_y}\cdot Z_1' \\ Z_1' \end{pmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{pmatrix} X-B_2 \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi_2 & 0 & \sin\varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi_2 & 0 & \cos\varphi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{x_2+O_{x_2}}{f_2\cdot M_x}\cdot Z_2' \\ \frac{y_2+O_{y_2}}{f_2\cdot M_y}\cdot Z_2' \\ Z_2' \end{pmatrix} \tag{13}$$

従って，X，Y，Z の座標値は次式で表わされる．

$$Z_1' = \frac{(B_2-B_1)\times H_2}{H_2\times F_1 - H_1\times F_2}$$

$$Z_2' = \frac{(B_2-B_1)\times H_1}{H_2\times F_1 - H_1\times F_2}$$

$$X = \frac{F_1\times Z_1' + F_2\times Z_2' + B_1 + B_2}{2} \tag{14}$$

$$Y = \frac{G_1\times Z_1' + G_2\times Z_2'}{2} \tag{15}$$

$$Z = \frac{H_1\times Z_1' + H_2\times Z_2'}{2}$$

ただし，i=1，2 (16)

$$F_i = \frac{(x_i+O_{xi})\times\cos\varphi_i}{f_i\times M_x} + \sin\varphi_i$$

$$G_i = \frac{(x_i+O_{xi})\times\sin\theta_i\times\sin\varphi_i}{f_i\times M_x} + \frac{(y_i+O_{yi})\times\cos\theta_i}{f_i\times M_y} - \sin\theta_i\times\cos\varphi_i$$

$$H_i = \frac{-(x_i+O_{xi})\times\cos\theta_i\times\sin\varphi_i}{f_i\times M_x} + \frac{(y_i+O_{yi})\times\sin\theta_i}{f_i\times M_y} + \cos\theta_i\times\cos\varphi_i$$

5. 解析誤差

i 標定誤差

一定の撮影条件*のもとで，標定要素 (φ, $f\cdot M_x$, O_x, θ, $f\cdot M_y$, O_y) の最確値を求める評価関数 ((7)，(8)，(9)，(10)，(11)，(11)′式) の数値実験結果を図8 (A～R) に示す．ここで図8 (A～F) は，理想中心投影変換した時の投影画面上の標定点像位置 (x, y) の誤差を各成分について±0.005 mm とした場合の数値実験結果である．同様に，(G～L)，(M～R) は各々の誤差を ±0.05 mm，±0.5 mm とした場合の数値実験結果である．また，表1は各場合の評価関数 ((8)，(8)′，(11)，(11)′式) の最小値における各標定要素の値と，それらの真値との残差を示したものである．図8，表1より，投影画面上の標定点像位置の読み取り誤差を±0.05 mm (16 mm フィルム面上で±2 μm) 以下で測定可能な場合，容易

* 撮影位置 $X=-1000$ mm, $Y=Z=O$, 撮影角度 $\varphi=10.5$ 度, $\theta=1.0$ 度,
標定点座標値 (mm)　(−600, 0, 6000), (−300, 0, 6000), (300, 0, 6000), (600, 0, 6000), (0, 600, 6600), (0, 300, 6300), (0, −300, 5700), (0, −600, 5400)

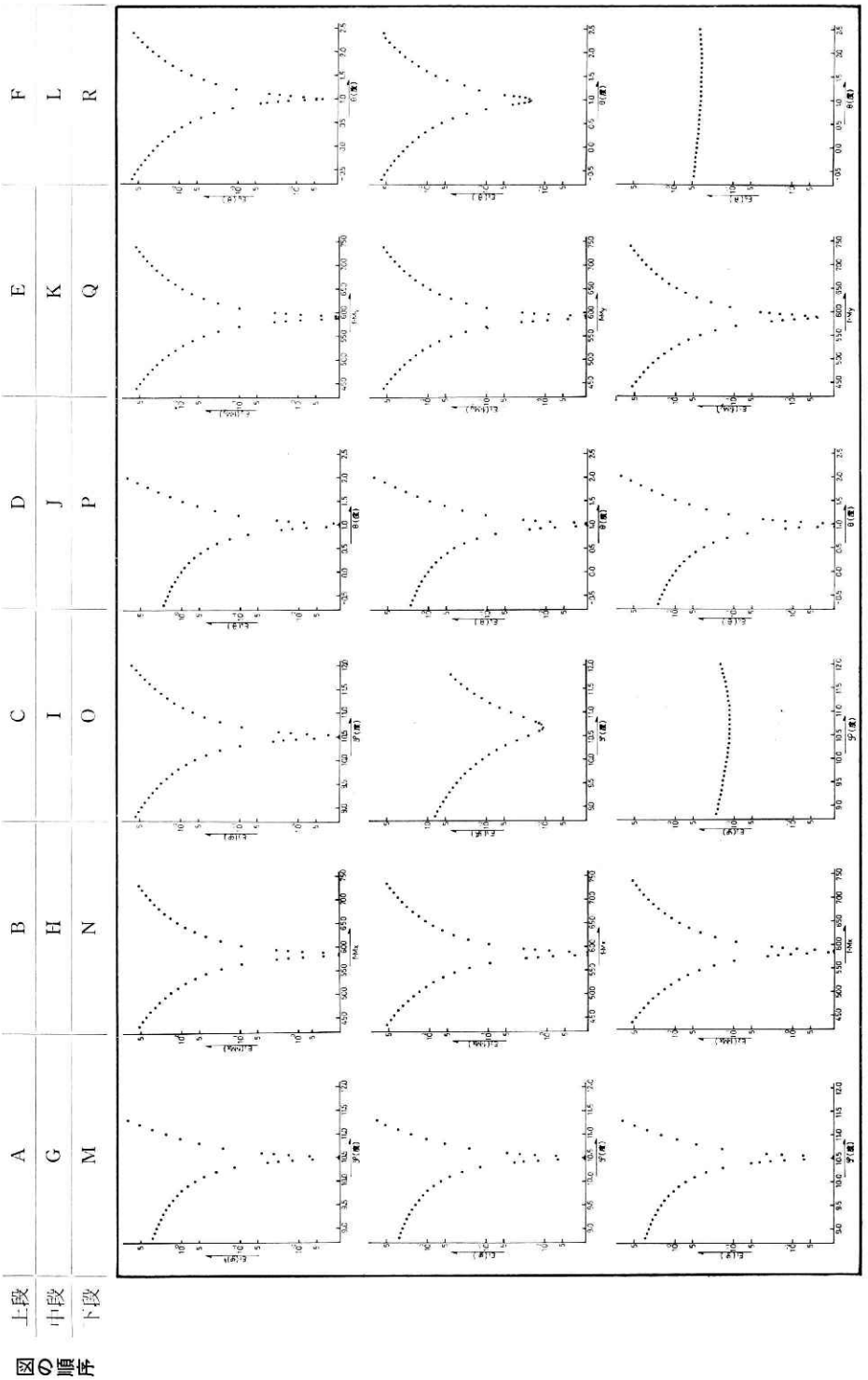


図 8 評価関数の数値実験結果
Fig. 8 Variation of the estimator

表 1　標 定 要 素 の 誤 差 解 析
Table 1　Computed elements of outer orientation

（　）内は残差

標定点読み取り精度	φ（度）	$f \cdot M_x$	O_x(mm)	θ（度）	$f \cdot M_y$	O_y(mm)
±0.005mm	10.506 (0.006)	585.0 (0.1 以下)	−10.64 (−0.06)	1.023 (0.023)	590.0 (0.1 以下)	10.39 (0.23)
±0.05 mm	10.685 (0.185)	584.8 (−0.2)	−12.47 (−1.89)	0.986 (−0.014)	590.1 (0.1)	10.02 (−0.14)
±0.5 mm	10.77 (0.25)	585.4 (0.4)	−13.35 (−2.77)	1.592 (0.592)	588.8 (1.2)	16.15 (5.99)

表 2　評価関数の 1 次の誤差解析
Table 2　First-order errors of estimator

標定点位置 (mm)	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial x}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial X}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial Y}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial Z}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial (f \cdot M_x)}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial H}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial B}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial \varphi}$	$\frac{\partial \varepsilon_2'}{\partial \theta}$
X＝600		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
Y＝50	1	−9.16	−4.16	2.44	−9.57	−1.58	−3.31	6.37	−3.84
X＝300		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
Y＝50	1	−9.32	−3.53	2.02	−4.83	−1.58	−1.67	−6.89	−2.64
X＝−300		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
Y＝50	1	−9.62	−1.95	1.12	4.96	−1.58	1.34	−6.51	−0.14
X＝−600		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$
Y＝50	1	−9.92	−1.16	0.67	9.85	−1.58	4.34	−5.59	0.93

標定点位置 (mm)	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial y}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial X}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial Y}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial Z}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial (f \cdot M_y)}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial H}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial B}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial \varphi}$	$\frac{\partial \varepsilon_5'}{\partial \theta}$
X＝50		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10$
Y＝600	1	1.73	−0.89	7.78	−12.40	−5.07	−2.03	−3.11	−2.05
X＝50		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10$
Y＝300	1	1.08	−0.93	4.23	−8.15	−5.07	−1.39	−1.51	−2.04
X＝50		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10$
Y＝300	1	−0.64	−1.02	−5.23	1.73	−5.08	0.34	−0.27	−2.03
X＝50		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10$
Y＝600	1	−1.79	−1.07	−11.50	7.45	−5.07	1.48	−1.12	−2.04

撮影条件　B＝−1000 mm, H＝6000 mm, Z＝6000 mm
$f \cdot M_x$＝585, $f \cdot M_y$＝590, φ＝10.5 度, θ＝1.0 度

に各標定要素，特に φ を ±0.2 度以下の精度で求める方法として，上述の数値計算法が有効である事がわかる．なお，投影画面上の標定点の読み取り誤差が ±0.2 mm 以上の場合は，$\bar{O}_x$, $\bar{O}_y$ を ±0.5 mm の誤差（フィルム上の光軸の中心位置を ±21 μm の誤差で求める事に相当）で求める事が可能ならば図8（G, M, J, P）からも，わかるように φ, θ を±0.1 度以内の精度で求められる．

次に，標定点および撮影機設置位置の測量精度が標定要素 φ, θ の解析誤差に与える影響を考察する．評価関数の基礎式は

$$\varepsilon_2' = \bar{x}_i - \left(\frac{X_i - B}{Z_i'} + \frac{B}{H'}\right) \times \frac{f \cdot M_x}{\cos\varphi} \tag{19}$$

$$\varepsilon_5' = \bar{y}_i - \frac{(Y_i \times \cos\theta + Z_i \times \sin\theta) \times f \cdot M_y}{Z_i'} + \frac{H \times \sin\theta \times f \cdot M_y}{H'} \tag{20}$$

であり，この2式の1次の誤差量を数値解析*した結果を表2に示す．これによると，φ を ±0.2 度以内の精度で求めるためには x を±0.005 mm，x を ±0.5 mm，Y を ±10 mm，Z を ±1 mm，H を ±1 mm，B を ±2 mm，$f \cdot M_x$ を ±0.1，θ を ±1 度以内の誤差で求める必要がある．同様に，θ を ±0.02 度以内の精度で求めるためには y を ±0.1 mm，X を ±100 mm，Y を ±1 mm，Z を ±20 mm，H を ±20 mm，B を ±100 mm，$f \cdot M_y$ を ±1，φ を ±5 度以内の誤差で求める必要がある．

ii　計算された次元座標値の誤差

標定点および測定点を仮想的に中心投影変換*したときの各点のフィルム像読み取り値を変化させた場合について，解析区域（幅 1.2 m，高さ 1.2 m，奥行き 1.2 m）内の 54 ヶ所の測定点の3次元座標値を計算した．そのときの計算値の絶対誤差および相対誤差を表3に示す．これによると，標定点像および測定点像位置の読み取り誤差を各々 ±0.05 mm，±0.5 mm，とした時，X, Y, Z の各座標値の相対誤差は ±15 mm，±18 mm，±40 mm である．したがって，16 mm 撮影機2台を基線比 1/3 の状態に設置し，収れん撮影する方法を用いて，6 m 前方の物体の3次元的な動きを写真解析する場合，相対的な解析精度を X, Y 方

---

* (19), (20) 式を各パラメータについてティラー展開し，高次の項を省略した計算式は次式のように現わされる．

$$\delta\varepsilon_2' = \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial x}\cdot\delta x + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial X}\cdot\delta X + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial Y}\cdot\delta Y + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial Z}\cdot\delta Z + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial(f\cdot M_x)}\cdot\delta(f\cdot M_x) + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial H}\cdot\delta H + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial B}\cdot\delta B + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial\varphi}\cdot\delta\varphi + \frac{\partial\varepsilon_2'}{\partial\theta}\cdot\delta\theta$$

$$\delta\varepsilon_5' = \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial y}\cdot\delta y + \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial X}\cdot\delta X + \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial Y}\cdot\delta Y + \frac{\partial\varepsilon_3'}{\partial Z}\cdot\delta Z + \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial(f\cdot M_y)}\cdot\delta(f\cdot M_y) + \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial H}\cdot\delta H + \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial B}\cdot\delta B + \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial\varphi}\cdot\delta\varphi + \frac{\partial\varepsilon_5'}{\partial\theta}\cdot\delta\theta$$

上2式を用いて，1次の誤差解析を行う．

* 仮想的に，16 mm 撮影機（f=25 mm レンズ付き）2台を撮影距離 6 m，基線長 2 m の位に設置し，収れん撮影（φ_1=10.5 度，θ_1=1.0 度，φ_2=−10.5 度，θ_2=−1.0 度）した後に，16 mm フィルムを拡大（x 方向に 23.4 倍，y 方向に 23.9 倍）する事に相当

表 3 座 標 値 の 解 析 誤 差
Table 3 Analyzed errors of the analytical photogrammetry

(単位 mm)

標定点像読み取り誤差	± 0.005			± 0.005			± 0.005		
測定点像読み取り誤差	± 0.005			± 0.05			± 0.5		
座標	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
解析した基準点の座標値	0.1	−3.7	−7	0.0	−3.7	−5	0.0	−3.7	20
絶対誤差	+0.7 ～ −0.7	−2.6 ～ −4.8	−5 ～ −9	+0.9 ～ −1.1	−1.8 ～ −6.0	−2 ～ −11	+3.2 ～ −3.2	+1.5 ～ −7.9	+20 ～ −26
相対誤差	±0.7	±1.1	±2	±1.0	±2.1	±4.5	±3.2	±4.7	±23

標定点像読み取り誤差	± 0.05			± 0.05			± 0.5		
測定点像読み取り誤差	± 0.05			± 0.5			± 0.5		
座標	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
解析した基準点の座標値	0.0	3.1	−119	0.0	3.1	−95	0.0	30.5	−146
絶対誤差	+13 ～ −13	+17 ～ −10	−94 ～ −150	+15 ～ −15	+21 ～ −14	−86 ～ −161	+22 ～ −22	+57 ～ +7	−131 ～ −227
相対誤差	±13	±14	±28	±15	±18	±40	±22	±25	±48

向について，20 mm，Z 方向について ±40 mm にするためには，16 mm フィルム上の標定点像および測定点像の位置を23.4倍に拡大投影した画面上で，標定点像位置を ± 0.05 mm，測定点像位置を± 0.5 mm の相対誤差内で求める必要がある．

6. 応 用 例

土砂流の表面形状，流速は従来，水位計，流速計，流量計等によって，点あるいは全体の平均量として計測されていた．しかし，土砂流のようにランダム性を持つ流れに対して，全体的な流れの現象からその特性を求めるには上述の観測手法では不十分と考えられ

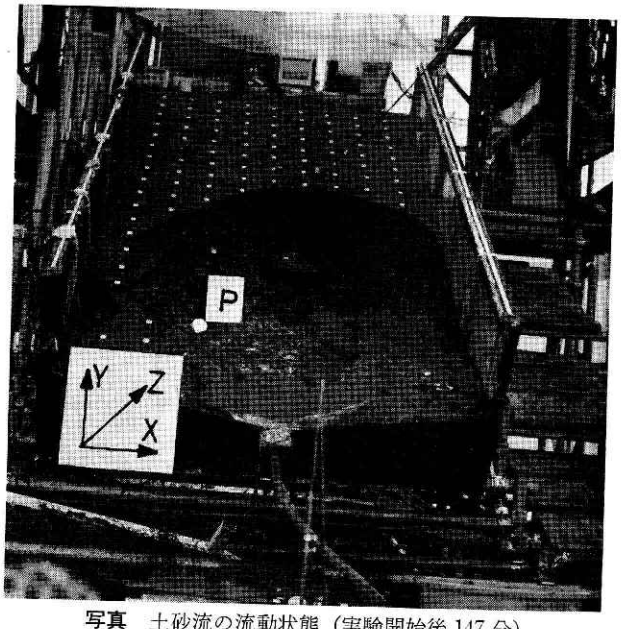


写真 土砂流の流動状態（実験開始後 147 分）
Photo. View of the sediment flow

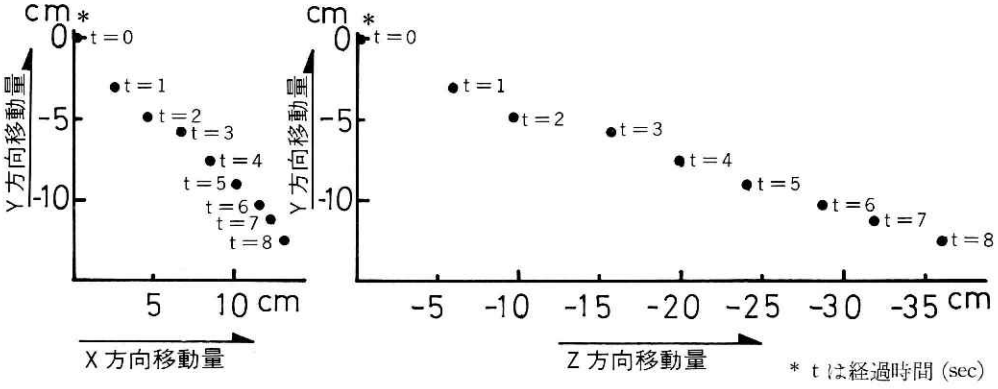


図 9 土砂流表面の移動量解析
Fig. 9 Analyzed motion of the markers on the sedimentflow

る．そこで，流れの全体的な動きを計測する手法として，16 mm 撮影機 2 台を用いた近接写真測量を用い，斜面崩壊実験における土砂流の移動量を解析した．実験は幅 1.5 m，斜面長 3 m，深さ 50 cm の鉄枠に粒径 0.3～0.5 mm，比重 2.91 の山砂を締め固めて（乾燥密度 1.4 g/cm^3），深さ 30 cm に詰め，時間雨量 50 mm の散水条件で 150 分間行った．撮影は 16 mm 撮影機 2 台を基線長 185 cm，撮影距離 571 cm の位置に設置し，ステレオ同期収れん撮影法を用いた．

写真 1 は散水後 147 分における実験斜面の状態である．この時点における土砂流上の点 P の移動量を 1 秒間隔に写真解析した．点 P の動きは，図 9 に示すように，送流土砂がほぼ 18 度に堆砂した斜面上を流下している．土砂流の速度，方向は一様ではないが，速度の概略は，解析の初期において 7.2 cm/sec. となっており，その後次第に速度を落し 7 秒後には 3.3 cm/sec となり，後に停止している．本計測の解析誤差を求めるために，実験前の砂斜面上の 50 地点の位置を写真解析した．これによると，X, Y, Z の各成分の解析値は，各々 ±20 mm, ±10 mm, ±25 mm の相対誤差を含んでいる．表 4 は，解析結果の 1 部である．

表 4 3 次元座標値の解析誤差
Table 4 Accuracy of computed positions

( ) 内に相対誤差

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X	−594 (+3)	609 (−3)	−297 (+3)	304 (−1)	−606 (−6)	−1 (−1)	300 (−5)	−313 (−13)	294 (−11)	−622 (−16)	610 (−2)
Y	−297 (+3)	−302 (−2)	4 (+4)	−4 (−4)	307 (−3)	304 (−6)	310 (0)	608 (−2)	615 (+5)	915 (+5)	914 (+4)
Z	5191 (+1)	7303 (+13)	5712 (+2)	5706 (−4)	6237 (−12)	6246 (−3)	6250 (+1)	6770 (+1)	6782 (+13)	7313 (+23)	7303 (+13)

(単位 mm)

今回は，土砂流上の1点の動きを解析するにとどまったが，本計測法を用いて，近距離に位置する土砂流上の各測定点の動きを解析できるという結論を得た．

7. 結　　論

16 mm 撮影機を測量機器として使用する場合，16 mm フィルム上の固定点像の読み取り値は，フィルムの機械的歪み，フィルムの局部的な転位等により図2に示すように一定の分布を示す．このため外部標定に一定の誤差を含み．この外部標定要素の含む誤差が3次元解析測量値の誤差の支配的な因子となる．そこで，6 m 前方の測定点位置 (X, Y, Z) の解析精度を ± 40 mm 以下にする事を目標に，最小2乗法を用いた外部標定法を展開し，フィルム投影画面上の標定点像位置を ± 0.05 mm 以下の誤差範囲内で測定できる場合，上述の目的に達するという結論を得た．また，投影画面上の標定点像位置の読み取り値が ± 0.05 mm～± 0.5 mm の誤差を含む場合，投影画面上の光軸の中心位置を ± 0.5 mm の誤差範囲内で機械的に求める方法をとる事によって，上述の目的を達するという結論を得た．また，16 mm 撮影機を用いた3次元座標値の解析精度は，6 m 前方の測定点に対して，± 20 mm～±40 mm が限界と考えられる．従って，16 mm 撮影機を用いた計測手法は，適用範囲（撮影距離 6 m～30 m）を限る事によって有効な手段となる．これを斜面崩壊実験に適用したところ，6 m 前方の流動土砂の移動量を X, Y, Z 方向について，各々 ± 20 mm, ± 10 mm, ± 40 mm 以下の精度で検出することが出来た．この方法において，肉眼による投影画面上の測定点像位置の読み取り量が非常に多い欠点はあるが，実験斜面の流動土砂の移動量を測定する方法として有効である事がわかった．

8. 謝　　辞

本研究を遂行するに当たり，国立防災科学技術センター大型実験研究部木下部長，同降雨実験室寺島室長，同研究室佐藤照子氏，高田孝三氏，青木秀夫氏に御指導御協力をいただいた．また，解析にあたって，第3研究部渡辺部長，同計測研究室勝山室長，同研究室の方々に御指導いただいた．ここに感謝の意を表します．

参 考 文 献

1) 金沢正治，他（1973）「4次元写真測量の概念と 35 mm 映画」写真測量 Vol. **12** No. 4
2) 池崎良三，他（1975）「移動式 16 mm カメラによる歩行分析」リハビリテーション医学 Vol. **12** No. 2
3) 森忠次，他（1969）「単写真による運動体測定法」写真測量 Vol. **8** No. 3
4) 柳福模（1969）「直交公式を用いた空間標定の解析に関する研究」写真測量 Vol. **14** No. 2
5) 栗原昭八，他（1975）「写真測量による三次元微偏位量測定」写真測量 Vol. **14** No. 2
6) 田中総太郎（1973）「測量用カメラの内部定位の解析的決定方法」写真測量 Vol. **12** No. 1
7) 大嶋太市（1971）「近接地上写真測量による土木構造物の測定への利用法(1)」農業土木 Vol. **39** No. 6
8) 尾崎幸男（1968）「写真測量の物理的限界」写真測量 Vol. **7** No. 3

(1976年7月6日　原稿受理)