空中写真を利用した裸地地域の土砂生産調査の方法について*

中山 政一**・今村 遼平**

On Photogrammetric Investigation Method of the Debris Produced in Bare Mountainside

by Masaichi Nakayama and Ryohei Imamura

Abstract: The definite investigation method of the debris volume derived from the bare mountainside has not been established. Around the Ashio desolate mountainous area, photogrammetric comparative measurement of surface height of some model zones settled on mountainside is carried out through the large airphotographs taken at intervals of about one year by helicopter. Mean deviation value of height of each model zones is applied to all mountainside classified to each type beforehand by photointerpretation to totalize the produced volume of debris. Though the measurement error is estimated as about $\pm 3.6\text{cm}$, this method is considered to be effective for this purpose at nowadays.

はじめに 崩壊地のうち、いわゆる豪雨型崩壊からの生産土砂量算出は、従来から空中写真判読と現地でのサンプル崩壊地調査を併用した方法により、各地で行なわれており、方法的にもほぼ確立されているといえよう。

一方、広域にわたる裸地地域あるいは大規模崩壊地での生産土砂量の算出方法として、これまでも(1)モデル区域における杭による測定方法、(2)モデル地からの流出土砂を、直接特製の土砂だめにうけて測定する方法などが試みられているが、経費と精度の点で問題があった。

以前筆者らは、高瀬川支流の濁沢・不動沢流域において、かかる裸地地域での侵食量を求めるために、空中写真を使用した(東京電力：1967)。しかし、その際には、モデル区域内に基準点の数が少なく、また使用写真が1/2,400(初回1/1,250、2回目1/2,400)の固定翼機によるものであったため、精度上必ずしも期待どうりの成果が得られたとは言えず、結局、裸地地域の生産土砂量の算出方法は、未確立のままであった。

その後、筆者らは1967年から4年間にわたり、広大な荒廃裸地を有する足尾三川地区(図-1)において、この種の調査を実施する機会を得た。調査は、写真撮

図-1 足尾三川地区位置図

* 昭和47年度 写真測量学会総会にて発表

**国際航業(株)地質一部

影にはじまり、傾斜分類図、地表地質図、砂防・治山立地区分図、土砂生産機構区分図の作成など、山腹性状の定性的把握の段階をへて、最終的には選定した20個所のモデル区域で算出した2時期間の平均侵食深をもとに、対象地域全域の生産土砂量を算出するという定量的調査をもって終えた。この空中写真を使った表面侵食量調査の方法が、最良の方法であるとはいえないが、ここに報告し、大方の御批判をおおぐものである。

小論をまとめるにあたり、種々の便宜をはかっていたいただいた建設省渡良瀬川工事事務所や林野庁前橋営林局および国際航業(株)測量・地質両部の関係各位および原稿の監修をお願いした垣下精三氏には、深甚なる感謝の意を表するものである。

1. 地質図の作成

対象地域は、いわゆる秩父古生層の粘板岩を基盤とし、これを貫く石英閃緑岩やいわゆる奥日光流紋岩などの分布する荒廃山地である。全域的56km²について写真判読と現地踏査により、1/5,000地質図を作成した。判読には、裸地地域約30km²については、主として1/5,000カラー写真を、また植生被覆地域については1/10,000パנקロ写真を使用した。地質図作成に際しては、とくに未固結堆積物、裂か系の判読に重点をおき、土砂生産の素因としての地質状況の把握につとめた。

2. 砂防・治山立地区分

荒廃した足尾山地の砂防・治山構造物のうち、足尾えん堤をはじめとする数多くのえん堤が、流出土砂のかん止に有効に作用していることは、河床変動量調査によっても明かであるが(中山ら：1967)、さらに、今後河川への土砂流出を防止する山腹基礎工、緑化工の重要性も見のがせない。ただ当地域の場合、地形・地質・気象・侵食力の大きさ等、砂防・治山作業以前の悪条件が重なっており、これを克服して山地の荒廃復旧・予防を行うためには、まず山腹の現況を詳細に知る必要がある。

このため、全域について「砂防・治山立地区分図」を作成した。これは流域後背山地の山腹と河床の状況を自然のまま、上位から優先的に図示するのを原則とした。すなわち上位より、1) 植生被覆区分、2) 未固結堆積物区分、3) 岩石の風化状態区分、4) 地質区分、などをな行ない、そのほか、5) 山腹斜面の侵食地形区分として、崩壊地と侵食路を図示した(表-1)。

判読には、とくに荒廃の著しい足尾三川地区約30km²については1/5,000カラー写真を使用し、結果は

図-2 調査作業の流れ

1/2,000地形図に図示した。さらに、全域を1/5,000で図示したが、その際植生の多い非荒廃地域では、1/25,000パנקロ写真を使用した。

3. 土砂生産機構区分

全域を、土砂生産機構もしくは崩壊原因に重点をお

表-1 砂防治山立地区分一覧表

大区分	小 区 分	細 区 分	
植区 生分 被覆	森 林		樹木および灌木の生育する地域で、下に笹が繁茂していても森林とする。
	草 生 地		笹の他にわゆる雑草の繁茂するところ
地(未 層の結 堆積物 態区分 区分)	河床堆積物	巨 礫	主として径約 80cm 以上の岩塊よりなる河床
		中 礫	" 80~20cm の礫よりなる河床
		砂・砂利	" 径約20cm 以下の土砂よりなる河床
	崖錐堆積物または扇状地堆積物		崖または崩壊地より供給された砂礫堆。および沢より押し出されて扇状地状の砂礫堆。
	段 丘 堆 積 物	高 位	河床の変動により河床に形成された砂礫堆で平坦面をなすもの。高位 (HTr), 中位 (Tr)
		中 位	低位 (LTr) に3区分した。
		低 位	
岩態 石区 の分 風化 状	鉱 滓		銅製錬の際の産物で、人工的に運搬・廃棄されたもので松木沢下流左岩にのみ分布する。
	ロームまたは礫まじりローム		
	露 岩 地 (r ₁)		新鮮な岩石の露出地
	深 層 風 化 地 (r ₂)		マサ状風化または風化層の厚さが 1m 以上のところ
地 質 区 分	風 化 岩 石 地 (r ₃)		風化岩石地、風化土混り風化岩石地、亀裂が多く脆弱な岩石地
	古 生 層	粘 板 岩	砂岩も含める
		ホルンフェルス	砂岩または粘板岩が熱変成を受けたもの
		チャート	
	石英斑岩類 { 細~中粒石英斑岩 巨晶(粗粒)石英斑岩		現地で確認した地域のみ図示
そ の 他	石 英 閃 緑 岩		
	安 山 岩 (皇海山 安山岩)		皇海山を中心として分布するもので、数枚の熔岩流、火山砕屑岩よりなる。皇海山北腹の変質帯も図示
	崩 壊 地		特に崩壊の進行顕著な箇所を、崩壊地として図示した
	侵 食 路		特に侵食のはげしい沢で、しかも、河床堆積物の図示を行っていないところ。
そ の 他	断 層		現地調査または空中写真判読により確認されるもの
	台風26号時の侵食河岸		とくに侵蝕のはげしい部分のみを図示

いて、適当な小区域ごとにタイプ分けし、さらにそれらを土砂生産の程度によって5階級に区分した。最終的には小区分された各タイプ・階級の中から適当数のモデル地を選び、ある期間をおいて撮影した空中写真の比較計測から、変動深を求め、生産土砂量を算出し、これを全域に普遍化して全生産量を算出するのがねらいである。

区分基準は、当地域で過去に蓄積された経験や調査結果に基づき、あらかじめ土砂生産機構あるいは崩壊原因と目される要素を選定しておき、新たな現地踏査により実情に合うよう適宜修正を加え、下記のごとく定めた。

- 1) 火山灰地（ローム）で、主に谷頭侵食により土砂生産が行なわれる地域(L)。
- 2) 崖錐・段丘堆積物等の未固結堆積物の侵食、移動により土砂生産が行なわれる地域(T)。

- 3) クリーピングが現に起っているかまたは起り易い古生層地域(C)。
- 4) 凍結融解により地表面がゆるんだ南向斜面地域(S)。
- 5) 風化（礫化・マサ化）により滑落のある地域(W)。
- 6) 断層・破砕帯等の影響で土砂生産が行なわれる地域(F)。
- 7) 節理面からの崩壊により土砂生産が行なわれる地域(J)。
- 8) 鉱化帯から土砂生産が行なわれる地域(M)。
- 9) 火山変質帯から土砂生産が行なわれる地域(A)。

区分はあくまで定性的で、従って作業の指標となるのは、現地で観察した土砂生産のタイプ地が、写真上でどう見えるかという対応性の判断と記憶にほかならない。このため、一人で行なわない限り判読者の経験・能力等により、区分に多少主観的差異が生ずるのは否めない。

また、土砂生産の機構や崩壊原因は、われわれが頭の中で考えるよりも実際にははるかに複雑で、これを単一要素にしばること自体相当の無理があるが、便宜上対象小区域ごとに最も卓越する要素をもって代表させ、さらに将来の土砂生産の危険度あるいは量的影響度を判断して階級区分を行なった(図-3次頁)。

4. モデル区域の選定

全域について作成した土砂生産機構区分図の中から、階級3以上のものについて実際に航測を行なう、2時期間の侵食量の算出基準となるモデル区域を選定した。ここでは主として、(1)土砂生産の大勢を支配する機構・原因は何か、(2)他の方法（たとえば河床横断測量など）で測定した方が都合がよいものはどれか、(3)地形的制約（対空標識設置と基準点測量の可能箇所）、(4)経済的制約（測定できるモデル区域の数に限度がある）などの要素を考慮して、足尾えん堤上流付近を中心に20箇所を選定した(図-4次頁)。1箇所の大きさは100×100mを原則としたが、地形的条件で多少変えたところがある。

5. 方眼間隔の検討

モデル区域の平均侵食深算出のため、ある一定間隔をもった方眼点の標高の経年変化を、航測により読み

図-3 土砂生産機構区分図の一部

凡 例

地質区分

	小 (径約20m以下)
	中 (径約20-50m)
	大 (径約50-100m)
	崖崩堆積物
	段丘堆積物
	ローム層
	チャート
	粘板岩・砂岩互層 (ホムンアルス北群)
	ひん岩岩脈
	星海・廣中山火山噴出物 (権神山山群 かんらん山 権神山山群)
	流紋岩の熔結・鉄皮岩
	流紋岩の凝灰角礫岩
	流紋岩の凝灰角礫岩 (箱根山山群 増田山山群)
	星海黒雲母花崗岩
	三沢流紋岩類 (権神山山群 増田山山群)
	仁田元流紋岩類 (権神山山群 増田山山群)
	深床石英斑岩 (一部は流紋岩)
	巨晶花崗斑岩
	熊木石英閃緑岩
	鉱 澤
	温泉変成帯
	鉱水帯

土砂生産機構区分

	断 理
	断 層
	ロームの分譲使用の顯著な部分
	ロームの分譲使用地
	崖崩・段丘堆積物
	古生層のクレービングにより土砂生産の行なわれる地域
	南向斜面に東麓断層の増進により地表面がゆるい地域
	広範囲にわたる(断層・すべり)地域
	断層破砕帯の影響を受けている地域
	断層面から土砂生産が行なわれている地域
	鉱化帯から土砂生産が行なわれている地域
	火山変成帯の粘土水帯から土砂生産が行なわれている地域

土砂生産階級区分

階級区分	
1	非常に少ない
2	少ない
3	中程度
4	多い
5	非常に多い

図一四 モデル地位置図

とった。それに先だち、労力的・経済的かつ精度上、最も適切な方眼間隔を知るために、20箇所のモデル区域以外に、26m×26mの方眼間隔検討専用のモデル地（測定モデル区域W4—1、W4—2の地区に含まれる区域）を設定し、本作業と同一条件で検討した。方眼間隔決定の際の条件は、下記のとおりである。

- (1) 空中写真の撮影縮尺は1/1,000～1/1,200とする
- (2) 標高読定はステレオプラニグラフC 8による。
- (3) 方眼間隔は細かくとるほど望ましいが、一応0.5m×0.5m方眼の値を真の値と仮定する。
- (4) 測定誤差は正規分布するものとする。

0.5m 方眼で測定した場合の2時期間の平均侵食深を、便宜上侵食深の真の値と仮定し、この値に対し1.0m×1.0m、1.5m×1.5m……等各種の方眼の4隅で測定した平均侵食深が、方眼間隔の差異によりどう変わるかを検討した(表—2、図—5次頁)。

その結果、方眼間隔により相当のバラツキがあるが、概して間隔が小さくなるほどバラツキが少なく、当然0.5m方眼の平均侵食深との差自体も小さくなる。2m×4m 以上ではバラツキが大きくて不明確だが、0.5m 方眼の場合の平均侵食深との差異は、3m×4m 以上ではほぼ横ばい状態となるのに対し、これ以下ではほぼ方眼の面積に比例して増大している。

ステレオプラニグラフC 8 の精度は、撮影縮尺1/1,000～1/1,200の写真を使用した場合、1.8cm±とされる。また、各方眼ごとの測定総点数が、作業量を示すと考えてもよく(厳密には測定のみならず標定な

表-2 同一モデル地内における方眼間隔のちがいによる平均侵食深のちがい

方 眼 間 隔 (m)	平 均 侵 食 深 (cm)	真の値(-27.5cm) との差 (註1) (cm)
1	1.0×1.0	-27.5
2	1.0×1.5	-27.7
3	1.5×1.5	-27.5
4	1.5×2.0	-26.5
5	2.0×2.0	-29.4
6	2.0×3.0	-27.4
7	2.5×2.5	-26.7
8	2.0×4.0	-26.4
9	3.0×3.0	-25.0
10	3.0×4.0	-30.1
11	3.5×3.5	-28.2
12	4.0×4.0	-24.9
13	4.0×5.0	-23.3
14	4.5×4.5	-23.5
15	4.0×6.0	-25.8
16	5.0×5.0	-24.8
17	5.5×5.5	-24.4
18	6.0×6.0	-26.0
19	5.0×8.0	-29.6
20	6.5×6.5	-31.4

註 1) 0.5m×0.5m方眼での平均値を真の値と仮定した。

図一五 0.5m方眼で切った場合の2時期間の平均侵食深と各種方眼間隔で切った場合の平均侵食深の差

ど固定的な部分もかなりあるが)、これは方眼間隔のほぼ2乗に逆比例する。

検討の方法にも問題があるが*、一応以上の要素を考えると、2m×4m程度が妥当であろうという結論を得た。しかし、山腹傾斜の急な部分では、水平方向の読定誤差が高さの誤差に著しく影響するため、20個所のうち6個所については、安全をみて2m×2mの間隔で測定した。

6. 基準点設置と撮影

モデル区域20個所について現地踏査の後、対空標識アルミ板を鉄柱で固定)を設置し基準点とした。基準点は、距離をジョジメーター、方向と各点間の比高をトランシット(20秒読み)により測定した。

基準点はモデル区域に3点でよいが、2回目以降の標定はこれら基準点をもとに行なうから、一点でも変位すると正確な標定ができない。このうちの一点が変位しても標定が可能で、さらに正しい3点により変位した1点を測定しなおせるようにした。2年目には再踏査を行ない、対空標識の点検とペンキの塗りかえを行なったが、実測による標高のチェックはしていない。

基準点は、ほとんどモデル区域の内側に設置したが、2回目測定時の標定結果からすると、モデル区域から一定距離おいた外側に配する方が標定しやすく、精度もよいことがわかった。

* 0.5m方眼の平均標高差を真の値と仮定したこと。また、厳密な意味ではこのモデル地でのみこのような結論が得られるのであって、従ってモデル地が足尾地区の全裸地地域を代表しているという大前提がなければ、これをそのまま全城にあてはめることはできない。

モデル区域の撮影には、防震装置を有するベル式KH-4改I型ヘリコプターを使い、初回は1969年11月に、2回目は1971年1月に行なった。80%のオーバーラップで撮ったため、一モデル区域あたり1～2モデルの写真枚数となった。

7. 測定

モデル区域での方眼点の標高測定には高精度が要求され、またモデル区域内での高度差も大きいため、ステレオプラニグラフC8を使った。読定はcmの単位まで読みとり、後の計算に電算機を使う関係上、測定値はさん孔テープにとった。測定に先だち各モデル区域内の基準点の標定を行なったが、2時期の基準点の標高は、必ずしも一致しなかった(表-3)。

標高読定に際し、測定点が樹木と一致する部分、残雪のある部分、オーバーハングした部分などの測定は不可能なため、計算から除外した。

8. 測定結果

各モデル区域ごとに測定した結果は、(表-4次頁)に示した。このうち、W3-1、W3-2、W5-1は、2回目の写真撮影時に多少残雪があり、測定点総数が少ないので平均値の算出の際には除いた。

測定結果をみると、当初の予想に反してW5とW4の値が逆転した。W3は、多少植生被覆があって侵食もごく少なく、当初から平均侵食深は0に近いと考えており、結果も予想どおりであった。ところが、雪のあったW5-1を除外しても全体とするとW4とW5とでは、予想(土砂生産機構区分図)と逆に出ている。このことは、同図上でW(礫化・マサ化を主機構とす

表-3 基準点の標定誤差

基準点No.	図化機における基準点の標定誤差	基準点No.	図化機における基準点の標定誤差
	(cm)		(cm)
W5-1	a 1	J5-1	a 0
	b -3		b 0
	c 2		c 1
	d 0		d -1
W5-2	a 0	J5-2	a 2
	b 0		b -1
	c 0		c 1
	d —		d -1
	e —		
W5-3	a 0	J5-3	a 0
	b 0		b 0
	c 0		c 0
	d 0		d —
W4-1	a 0	J5-4	a 2
	b 0		b -2
	c 0		c 2
	d 0		d -2
W4-2	a 0	J4-1	a 0
	b 0		b 0
	c -1		c 0
	d 2		d 0
W4-3	a 0	J4-2	a 25*
	b 0		b -14
	c 0		c 10
	d —		d -21
W4-4	a 0	J4-3	a 3
	b 0		b -3
	c 0		c 2
	d —		d -2
W3-1	a 3	S4-1	a 3
	b -2		b 0
	c 2		c 0
	d -2		d -3
W3-2	a 0	S4-2	a 0
	b 0		b 0
	c 0		c 0
	d —		d 0
W3-3	a 0	S4-3	a 0
	b -2		b 0
	c 2		c 0
	d -2		d 0

* 他のものよりほぼ1ケタ大きい数値となっているが、何に原因するのか不明である。

る生産地域)での階級区分が不適当であったことになる。

そのほか、J5-3が-26cmと当初の予測よりも少し大きめに出ているようであるが、その値の妥当性については何ともいえない。また、J5-2、J4-3などで侵食深が0となっているが、後述のごとく崩壊物のカサ増しによる堆積量の増加で、侵食深が打消された可能性があり、本当に0に近いのかどうか問題がある。

測定した侵食深を土砂生産機構と階級別に機械的に平均すると、(図-6次頁)のごとくなる。また(図-7次頁)は、モデル区域W4-1における平均的侵食深を図

示したものだが、当地域のごとく全面的裸地域域での侵食も、厳密には決して面状侵食(Sheet Erosion)によるものではないことがわかる。このことは、判読結果(ガリー部分以外での侵食や堆積は、判読ではほとんど変化がわからないが)ともよく一致する。

9. 総生産土砂量算出結果

表-4に示した各タイプごとの侵食深の階級別平均値に、各分布面積を乗じて、足尾三川地区の1969年11月～1971年1月間の生産土砂量を求めた(表-5次頁)。その結果、当地区で約65万 m^3 の土砂が生産されたことになる。この値は、測定誤差の問題を別にして考えると、全くの侵食量ということになる。ただ、崩壊物のカサ増しについての考慮はしていないから、土砂にほぐれた場合の実際の侵食量は、この値より大きくなる可能性がある。

得られた値が妥当なものかどうかが問題であるが、今後つぎのような方面から検証する必要がある。

- 1) 溪床堆積物の調査(河床変動量調査にも山腹侵食量調査にもかからない部分)
- 2) 河床変動量調査
- 3) 流砂量調査(足尾えん堤より下流へ流出した土砂量の調査)

10. 測定精度の検討

ここに示した方法における測定精度は、(1)基準点の誤差、(2)撮影時の誤差、(3)標定誤差、(4)標高測定時の誤差、(5)方眼間隔による誤差、などにより規制される。

基準点測量は、距離をジョジメーター、標高差をトランシット(20秒読み)により測定した。従って、基準点の距離の誤差は5mm程度(±5mm S/1,000,000cm)と考えてよい。一

方高さの誤差は、基準点間の仰角は最大30°程度であるから、トランシットの測角誤差を20"としても、最大1cm($dh=dssin\theta+d\theta\cdot s\cos\theta$)となる。

撮影時の誤差の中には、カメラのもつ誤差と撮影条件による誤差が含まれ、前者には、レンズの収差(半径方向、切線方向および非対称性によるわい曲収差と色収差)、カメラ誤差(光軸、主点位置、画面距離などの誤差)、フィルムの誤差(感光剤の粒状性、局部伸縮、温度および温度、平行性などの誤差)があり、後者には大気の屈折、飛行機の移動、カメラの振動などの誤差が含まれる。それらを写真上の誤差として表現

図一六 土砂生産機構別階級別の平均侵蝕深

すると、レンズの収差は6～11 μ 、カメラ誤差が2.5～5.5 μ 、フィルム誤差が5～11 μ 程度である(尾崎：1968)。ふつう飛行機の移動誤差が最も大きく、その他はほとんど無視できる程度である。しかるに、撮影は防震装置つきのヘリコプターで行なったため、その移動誤差は写真上で10 μ 以下と推測される。

本来、2時期間における基準点の標高読定値の差は0となるはずであるが、標定に際しては主として図化機の機械誤差または標識認定の個人差、撮影条件の差などからくる誤差をとめない、最大限の努力をしても

表一3程度の標定誤差を生じ、その平均値は ± 1.8 cm程度となる。

標高測定は、(a)測定そのものの誤差と(b)水平位置のズレからくる高さの誤差、の2つを有する。一級図化機を使い任意の点の標高を測定した場合の測定誤差は、一般に撮影高度の1/7,000～1/10,000と考えられている。本作業で使用した写真縮尺は最大1/1,200で、撮影高度は180mであるから、観測誤差は ± 1.8 cm程度となる。一方、(b)の方は水平面上で

は0であるが、傾斜地では傾斜角の大きさにより変化する。測定すべき点の2時期間の水平方向のズレは、測定時に使う方眼図上で約0.1mm程度で、これは展開図面の縮尺(1/400)を考慮すると、実長で平均4cmとなる。モデル地内の傾斜を少し大き目にみて仮に30°とすると、これにより平均2.4cmの誤差を生じることになる。さらに、方眼間隔による誤差は、2m $\times$ 4m方眼の場合で1cm程度であるから(図一5)、以上の誤差を誤差伝播法則により合計すると、平均 ± 3.6 cmとなる。

図一七 侵食と堆積の変化(W4-1の一部)
(実線は堆積、破線は侵食を示す。単位cm)

表-4 モデル地一覧表
(1969年11月～1971年1月間の変化)

								註1)		註2)		
モデル 番 号	通し 番号	主要崩 壊機構	階級	地 質	方 間 眼 隔	2時期間の 全ブロッ ク 高 差 (cm)	測 定 数	平均侵食深 (cm)	モデル地の 面積 (m ²)	変動土量 (m ³)	タイプごとの 階級別平 均侵食深	
W5-1*	10	風	5	粘 板 岩	2m×2m	1,793	2295	0	10,000	0	- 1 cm	
W5-2	18			粘板岩と石英斑岩		-1,126	21,83	0	10,000	0		
W5-3	13			粘 板 岩		-3,473	1922	-1	8,788	-87.88		
W4-1	12		化	4	粘 板 岩	2m×4m	-11,512	1293	-8	10,000	-800.00	- 9 cm
W4-2	11	粘 板 岩			-22,119		1267	-17	10,528	-1789.76		
W4-3	17	粘板岩と石英斑岩			530		635	0	6,472	0		
W4-4	14	粘 板 岩		-10,790	1069		-10	10,148	-101.48			
W3-1*	9	節	3	粘 板 岩	2m×4m	1,002	1167	0	10,000	0	0 cm	
W3-2*	15			粘 板 岩		11,894	1168	-7	19,456	-1361.92		
W3-3	16			粘板岩(一部石英斑岩)		-1,160	1248	0	10,000	0		
J5-1	2	理	5	石英閃緑岩	2m×2m	7,191	2453	2	9,776	195.52	- 8 cm	
J5-2	4			石英閃緑岩		-1,220	2370	0	9,468	0		
J5-3	8			石英閃緑岩		-60,712	2264	-26	10,148	-2638.48		
J5-4	19			花崗斑岩		-7,856	815	-9	6,472	-582.48		
J4-1	1	理	4	流紋岩	2m×4m	-2,895	1200	-2	10,000	-200.00	- 3 cm	
J4-2	5			石英閃緑岩		-6,732	906	-7	8,600	-602.00		
J4-3	20			花崗斑岩		-1,160	1248	0	10,000	0		
S4-1	3	凍融 結解	4	石英閃緑岩	2m×4m	-2,107	1250	-1	10,000	-100.00	- 2 cm	
S4-2	6			石英閃緑岩		-3,056	1241	-2	10,000	-200.00		
S4-3	7			石英閃緑岩		-3,060	1194	-2	8,922	-199.84		

註1) 小数点以下切捨

註2) 平均侵食深×モデル地面積

* 雪の部分の多かったサンプル・モデル地については、平均値算出の際には除いた。

11. 問 題 点

本方法により斜面の表面侵食量を測定する場合、次のような点で多少問題がある。

1) 土砂生産機構区分図の妥当性

同図は主として、1966年撮影のカラー写真を用いて判読・作成したもので、この時点での荒廃状況を定性的に表現区分したものであり、定量的裏づけのもとに区分されたものではない。従って、同図を使用するに際し、崩壊現象を固定的なものとして扱ってよいものかどうか疑問が残る。例えば、同図で土砂生産階級が5にランクされた個所を、果していつも5であると考えてよいものかどうかということである。

今回の測定結果からみると、大まかにみてある線までは固定的に考えてさしつかえなく、それを越えると非常に流動的になると考える必要があるように思われる。例えば、2や3の階級のものが2～3年の短期間で、4や5の階級に変るとは考えられないが、4または5のものが、5や4へ変るということは充分に考えられる。

2) 新規崩壊のとり扱い

根本的には前項と同じ問題で、土砂生産機構図を固定的なものとしているため、新規崩壊(植生被覆地域に生じた新たな崩壊)からの生産土砂は、本方法では考慮されていない。植生地区では、特に顕著な気象異

常がない限り、新規の崩壊が起こることは少ないが、当地区は経験的に4、5年に一度ほどの確率で起るようであるから、新規崩壊からの生産土砂を無視することはできない。

ただ、新規崩壊地からの土砂生産量の把握は、豪雨型崩壊における調査方法がそのまま適用可能である。

3) Sheet Erosion の仮定

一度形成された崩壊地(裸地)での土砂生産は、面状侵食(Sheet Erosion)の形で行なわれるという仮定でこの調査をすすめてきた。しかしながら、今回の測定結果からみると、同一モデル区域内でも侵食に著しい差異があるだけでなく、侵食部分と堆積部分とが共存しており(図-7)、厳密な意味での Sheet Erosion ではない。ただ、侵食深の平均値を得るための一手段として、便宜上モデル区域内では Sheet Erosion が行なわれると仮定するのは構わないであろう。

4) 斜面中腹の崖錐と崩壊物のカサ増し

生産土砂が崖錐として麓部に堆積した場合には、ふつう分布状況も明瞭で実作業上は河床横断測定の測線を、崖錐部分まで延すことにより、量的変化を把握できる。また、崖錐下の地山の侵食は行なわれないと考えてよい。ところが、山麓まで達せず中腹に滞留している場合には、測定された侵食深は次のような理由から信頼性がおちる。

(1) 中腹の崖錐は、上から流入した土砂量と、その部

表-5 足尾地区土砂生産量

階 区	級 分	機 構 区 分	面 積 (a)	平均侵食深 (b) cm	生産土砂量 a × b m ³	備 考
1	生におだや常か	植生被覆地	31,806,480.25	0	0	侵食深(b)を0と仮定。 すなわち、新規崩壊もないものと仮定しての計算。
2	生産がおだやか	S J W T 小 計	26,307.25 2,068,265.75 754,393.25 287,896.00 3,136,862.50	≐0	≐0	1年間隔程度では、ほとんど0に等しいという仮定のもとに侵食深を0としている。
3	生産が中程度	S J W T A 小 計	166,327.50 3,873,224.50 1,882,275.75 531,293.75 247,661.25 6,700,782.75	(0) (0) 0 — —	≐0	このうち、実際は測定されたものは、(W)のみである。 他のものは(W)の値を転用した。
4	生産がはげしい	S J F W T C M 小 計	573,896.00 6,644,273.75 80,713.75 3,235,511.00 782,908.00 377,325.00 32,535.50 11,727,163.00	-2 -3 (-3) -9 — (-3) (-2)	-11,477.92 -199,328.21 -2,421.41 -291,195.99 — -11,319.75 650.71	断層によるもの(F)およびクリーピングによるものは(C)、節理による値(J)を転用した 鉱化帯(M)には、(S)の値を転用した。
5	生産が非常にはげしい	S J F W T C M 小 計	67,047.75 1,342,317.75 8,499.75 786,078.00 458,885.25 129,128.50 16,754.50 2,808,711.50	(-8) -8 (-8) -1 — (-8) (-8)	-5,363.82 -107,385.42 -679.98 -7,860.78 — -10,330.28 -1,340.36	同 上
合 計			56,180,000.00	約1.2cm	-649,354.63	

註1) 平均侵食深のうち () を付したものは、他の値を転用したものの。

分からさらに下へと流出した量との差引量があらわれているにすぎない。すなわち、崖錐下の地山の侵食を反映しただけでなく、実際には地山の侵食があっても、その後上から新たな土砂供給があって、逆の現象(標高の増加)として表現されることもあり、モデル区域全体として、このような原因による標高の増加部分と侵食による減少部分とが、打消し合うことがある。

- (2) その上、崩壊物のカサ増量(硬岩の場合約1.7倍)が加わるのも見逃せず、中腹の崖錐の体積が大きくなり、地山の侵食による減少とが打消し合う現象が起りえる。

従って、この種の崖錐部分は、錐雪や木などと同様測定の際に除外するのが望ましいが、実際には分布が狭かったり堆積が薄かったりすると、判別が難しい。

まとめ

- 1) 小論は、写真判読と大縮尺写真を使った写真測量とを応用して、足尾三川地区の裸地地域からの生産土砂量を算出した結果について述べたものである。
- 2) 測定に先だち、写真判読と踏査により山腹の性状を定性的に示した「砂防・治山立地区分図」と「土砂生産機構区分図」を作成した。前者は、自然の山腹形態を上位より優先させて表現したもので山腹基礎工や植生工の基礎資料となる。後者は、土砂生産量算出のための基礎的図面で、全域を土砂生産機構とその程度によって区分した。
- 3) 土砂生産機構図をもとに、機構と程度別に20個所のサンプルモデル区域(100m×100mを基準とした)を選定し、各モデル地内での2時期(1969年11月と1971年1月)の写真の比較計測により侵食深を求め、各モデル地の面積を乗じて生産土砂量を算出し、これを全域に普遍化した。
- 4) 各モデル地についての工程は、(1)4点ずつの対空標識の設置とその基準点測量、(2)一級図化機による方眼上の標高測定、(3)モデル地ごとの平均侵食深の算出、(4)対象地域全域における生産土砂量の算

出などにわかれる。

- 5) 機械計測に先だち、標高を測定する方眼間隔の検討を行なった結果、当地区では2m×4m方眼で行なうのが、精度的・経済的に適当であることがわかり、結局山腹傾斜の急な6区域を2m×2mで、他の14区域を2m×4mで測定した。
- 6) その結果、この2時期間に対象とした足尾三川地区56km²全域から、約65万m³の土砂が生産されたことがわかった。
- 7) 本方法による標高の測定精度を検討してみると、±3.6cmとなる。
- 8) 本方法で生産土砂量を算出する場合、(1)土砂生産機構区分図の妥当性の問題(主として土砂生産を固定的なものとして扱うことへの疑問)、(2)新規崩壊の取扱い、(3)斜面中腹に分布する崖錐の取扱いと、

岩盤が侵食されて土砂となった場合の岩石のカサ増しの問題など、まだ解決さるべき問題も多い。

- 9) 山腹の侵食量と測定精度とを考えると、災害前後で行なう以外すなわち平常時では、3～5年間隔で行なうのが妥当であろうと思われる。
- 10) 本方法により算出される生産土砂量を、今後別の方法によりチェックして、算出値全体についての精度を検討してみる必要があるが、現在いかなる方法でチェックするのが最も妥当か検討中である。

参 考 文 献

- 1) 中山政一・今村遼平・川合恒孝・吉岡良朗(1967), 河床変動調査における航空写真の利用, 写真測量, Vol. 6, No. 4
- 2) 前橋営林局(1967), 足尾三川地区治山立地調査報告書 国際航業㈱調査
- 3) 尾崎幸男(1968), 写真測量の物理的限界, 写真測量, Vol. 7, No. 3
- 4) 関東地方建設局渡良瀬川工事事務所(1969), 足尾地区土砂生産調査報告書, 国際航業㈱調査
- 5) 関東地方建設局渡良瀬川工事事務所(1968), 足尾地区土砂生産調査報告書, 国際航業㈱調査
- 6) 東京電力㈱(1969), 高瀬川地点・航空写真測定資料による, 不動沢・濁沢両流域の崩壊・侵食・貯留ならびに流出土砂量の計算報告書, 国際航業㈱調査
- 7) 関東地方建設局渡良瀬川工事事務所(1971), 足尾地区土砂生産調査報告書, 国際航業㈱調査