

山地流域の土砂生産量の推算

河 村 三 郎

1. はじめに

地表面上の侵食は、侵食を生起させる媒体によって分類すると水食と風食とに分類される。この講義で取り扱う問題は水食であり、水食の中でも雨水侵食を対象としている。雨水侵食は、降雨の雨滴と降雨に伴って生ずる地表面上の雨水の流れ（雨水流）の分散作用と流水の運搬力とによって生ずる。雨水侵食は、地表面上の様相によって(1)層状侵食（sheet erosion）（面状侵食ともいう）、(2)リル侵食（rill erosion）（細流侵食、糸状侵食ともいう）、及び(3)ガリ侵食（gully erosion）（雨裂侵食、溝状侵食ともいう）とに分類される。これらの分類は、土砂水理学的観点から定量的になされたものでないので厳密な基準によって区分することはできない。雨水侵食の被害は、丘陵地山腹の裸地、切り取り面と盛土面などの斜面の崩壊をもたらし、その斜面上の上部あるいは下部の土木構造物に大きな被害を与える。さらに山地部斜面の侵食によって生じた微細粒子は、河川のウォッシュ・ロード（wash load）となって河川下流部に流下し、河川水の濁水長期化の原因の一つともなっている。また、営農的な面から見ると、農地表土の流出により肥沃な土壌を失い農業の生産性を低下させ、最悪の場合には、現在アメリカなどで問題となっている農地の砂漠化をもたらすことになる。この現象は、東南アジアの焼畑農業によっても発生しており、広大な面積が裸地となり、土壌流亡により砂漠化現象を起こしている。

本講では、斜面侵食の計算式に、粘土比、分散比、リル密度などの指標を取り入れた新しい斜面侵食量の計算法を実際斜面の計算例によって説明し、さらにこの計算法を適用した実際流域における土砂生産量の推算法を詳述する。

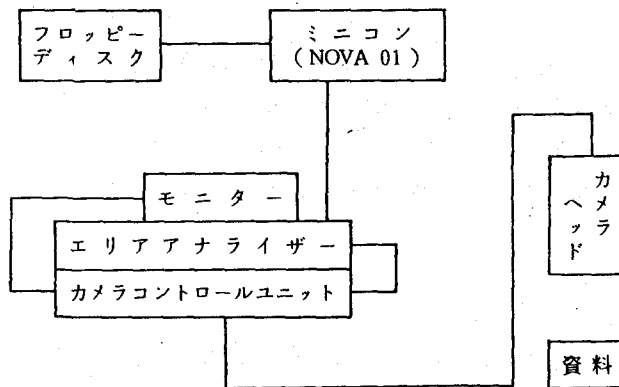


図-1 画像解析システムの構成

2. 画像解析システムと解析手法

(1) 画像解析システム^{1), 2)}

画像解析装置 (HTV-C 862-03) は図-1 のような構成になっている。カメラヘッド、カメラコントロールユニット、エリアアナライザー、モニターの部分を示すと写真-1 のようである。計測は、最初

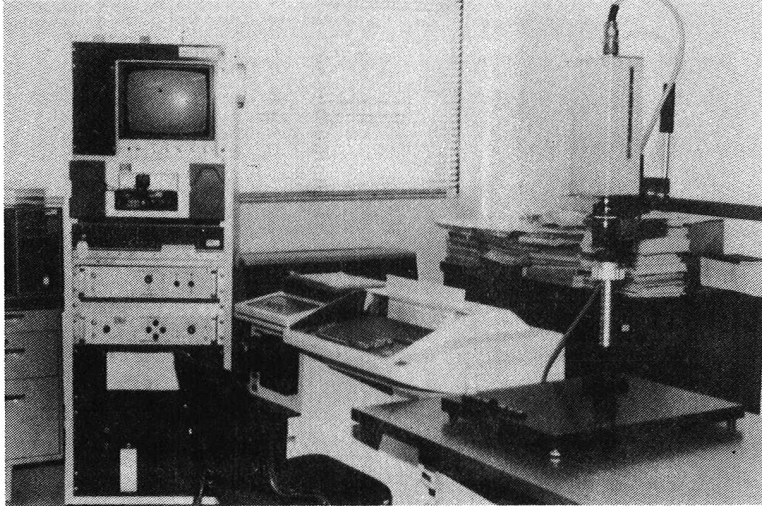


写真-1 画像解析装置

に、カメラスタンド上に静置した資料 (航空写真など) をカメラヘッドを通してモニターに写し出す。カメラヘッドから光電子倍增管に入る航空写真の濃淡光量はレンズ部の絞りなどで調整できる。このようにしてモニターに写し出された映像はノルマル・スライス スイッチによって通常の映像から2値化された映像へと切り換えられる。そして2値化映像信号のスレッシュールド レベルで計測したい部分のみ白くなるように設定する。スレッシュールド レベルは資料 (航空写真) の濃淡に応じて2値化された映像の輝度を調整することができる。すなわち、同じ裸地でも小さな草木などの影響によって航空写真の濃淡が異なっているので、それらの効果を見るときは、その目的に応じた輝度を選択することができる。

スレッシュールド レベルを適切に設定した後に、計測範囲をモニターの全視野か、窓枠 (任意に設定できる) 内かを指定する。計測範囲が窓枠内の時は、ツマミによって窓枠の位置、大きさを適当に設定する。次に、画像解析のモードを指定すると、その解析結果がモニター上部及びダッシャープリンタに出力される。

画像解析のモードとしては

(i) 面積, [A] (%)

モニター全視野あるいは設定窓枠内の視野に対する計測対象部分の白い部分 (裸地・山崩れ部分) の面積比 (%) で表示される。

(ii) 幅, [W] (%)

モニターの全視野の幅あるいは設定窓枠内の幅に対する計測対象内の白い部分の幅の比で表示される。したがって、サンプリング間隔を指定することによって計測対象部分の幅の分布図を得ることができる。

(iii) スライス像, [S]

この解析モードは計測対象内の白い部分 (裸地や山崩れ部分) のパターンの出力表示である。

画像のデータ処理はフロッピーディスクを有するミニコン (NOVA-01型) 及びエリアアナライザー A-4-2

一中のインテル 8080 マイクロプロセサーで行っている。画像データの処理に際しては、モニター画面を 256×256 のエリアに分割し、像の有無により 1 ビットの情報を持つようにして、各エリアは X 軸と Y 軸のアドレスによりその位置づけを行っている。なお、スライス像は、アナログ (0~5 V) あるいはデジタル (BCD 5 桁) でも出力できる。また、影像の白黒はネガ・ポジ スイッチにより反転することができる。

(2) 画像解析システムによる裸地と崩壊地の解析手法

一般に、画像解析において白黒の航空写真を使用するときは、色調と濃淡の関係から崩壊地と裸地とは区別されずに検出される。したがって、崩壊地と裸地とを厳密に区別して解析する必要があるときは、崩壊地のみを航空写真からトレーシングペーパーに写し取り画像解析を行い、例えば

(崩壊地・裸地の面積) - (トレーシングペーパー上の崩壊地面積) = 裸地面積、
とすればよい。

3. 斜面侵食の推定法

(1) 斜面侵食の計算式

斜面侵食の計算式としては、これまでに多くの式が提案されているが、土砂水理学的観点から研究された式は非常に少なく、ほとんどの式が実験データや観測データの回帰分析によるものである。ここでは、流砂に関する運動方程式と連続式、降雨を伴う雨水流の運動方程式と連続式、及び降雨を伴う雨水流の境界剪断応力の式から解析的に求められた河村³⁾の式を説明し、その計算法を示す。得られた式は、

$$E_V = \frac{476 C_A C_E}{d} q_*^{15/8} L^{3/8} S_0^{3/2} \quad (1)$$

である。ここに、 E_V : 単位時間単位面積当りの容積侵食量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)、 C_A : 裸地面積率 (= 裸地部分の面積/全面積)、 C_E : 侵食性係数、 q_* : 斜面上への降雨流入量、 L : 斜面長 (m)、 d : 平均粒径 (mm)、 S_0 : 斜面勾配、である。

q_* は降雨強度を i (mm/hr)、裸地斜面の流出係数を f とすると、

$$q_* = 2.778 f i \times 10^{-7} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2) \quad (2)$$

で与えることができる。侵食された土の単位重量を W_s (kgf/m^3) とし、式 (2) を代入すると、侵食量 E_1 ($\text{kgf}/\text{hr}/\text{m}^2$) は、

$$E_1 = \frac{8.73 \times 10^{-7} C_A C_E W_s}{d} (f i)^{15/8} L^{3/8} S_0^{3/2} \quad (3)$$

となる。 W_s を (N/m^3) 単位とするときは、 E_1 は ($\text{N}/\text{hr}/\text{m}^2$) 単位となる。この式を実際斜面に適用するとき、特に問題となるのは、侵食性係数 C_E の与え方である。ここでは、 C_E が次の要素から成り立つ関数として、 C_E の推定式を求める。

$$C_E = F_{unc} (C_M, C_{CR}, C_{RD}) \quad (4)$$

ここに、 C_M ：土の締固め係数（盛土斜面で締固めしないとき、及び休耕中の畑などでは、 $C_M = 1.5$ ，締固めしたときは $C_M = 1.0$ ，切土斜面のときは $C_M = 0.5$ とする）， C_{CR} ：粘土比（ CR ）と分散比（ DR ）によって決定される係数， C_{RD} ：リル密度によって決定される係数，である。式（4）は比例係数を C_1 とすると，

$$C_E = C_1 C_M C_{CR} C_{RD} \quad (5)$$

で表わすことができる。

リル密度（ R_d ）は，次式で定義する。

$$R_d = \frac{n B_r}{B} \quad (6)$$

ここに、 B ：斜面幅， B_r ：リル流路一本の平均幅， n ：斜面幅 B 中のリル流路の本数である。傾斜裸地斜面の侵食性は，例えば粘土比（ CR ）や分散比（ DR ）のようなその斜面の土壌固有の特性に依存している。Middleton⁴⁾は，1930年に分散比と侵食比を提案した。

$$DR = \frac{\text{Suspension (\%)}}{\text{Silt (\%)} + \text{Clay (\%)}} \quad (7)$$

$$ER = \frac{DR}{(\text{Colloid} / \text{Moisture Equivalent})} \quad (8)$$

なお、 DR と ER を100倍して％表示したものをそれぞれ分散率と侵食率という。従来から土の侵食性を示す指標としては，分散率と侵食率が最もよいことが指摘されてきた。1935年には，Bouyoucos⁵⁾が侵食性を示す一つの指標として，次式のように定義された粘土比（ CR ）を提案した。

$$CR = \frac{\text{Clay (\%)}}{\text{Sand (\%)} + \text{Silt (\%)}} \quad (9)$$

式（5）の式形を決定するために，Kilinc⁶⁾，Young⁷⁾，Holy-Vitkova⁸⁾，Holy-Vaska⁹⁾，今尾¹⁰⁾，吉田・藤川・加来¹¹⁾，Doty-Carter¹²⁾，技術調査報告書¹³⁾のデータを使用した。最初に， E_1 ， C_A ， W_s ， d ， f ， i ， L ， S_0 の実測データを式（3）に与えて C_E を求める。次に，各実験・実測データに対応する斜面の表層土の締固め状況から C_M の値を与え，さらに $C_1 = 2.0$ として式（5）から C_{CR} を決定する。 C_{CR} を求める際には，リル密度（ R_d ）がゼロに近いデータを使用することとした。河村¹⁶⁾は，侵食性を表わす最良の指標として（粘土比／分散比）の使用を提案した。上記データの C_{CR} と CR/DR との関係をプロットすると図-2のようである。

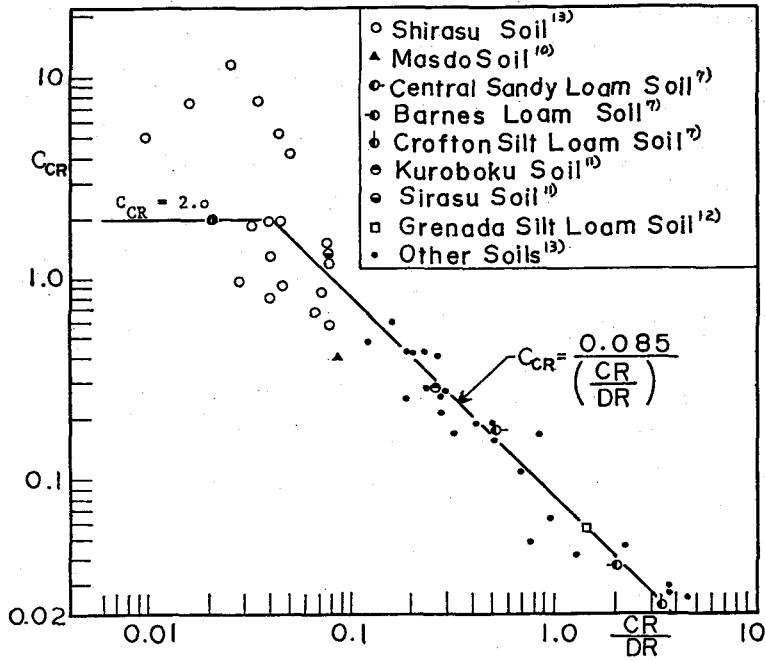


図-2 C_{CR} と CR/DR との関係

近似的に求めた式は、

$$\left. \begin{aligned} C_{CR} &= \frac{0.085}{(CR/DR)} & : \quad \frac{CR}{DR} > 0.0425 \\ C_{CR} &= 2.0 & : \quad \frac{CR}{DR} \leq 0.0425 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

リル密度に関する関数 C_{RD} については、 C_{RD} の式形を決定するために、リル侵食のデータ (Kilinc⁶⁾ と Young⁷⁾) を使用した。 C_{RD} と R_d との関係を示すと図-3 のようであり、図中に示した式は、データの散らばりが大きいので一次式として暫定的に求めたものである。

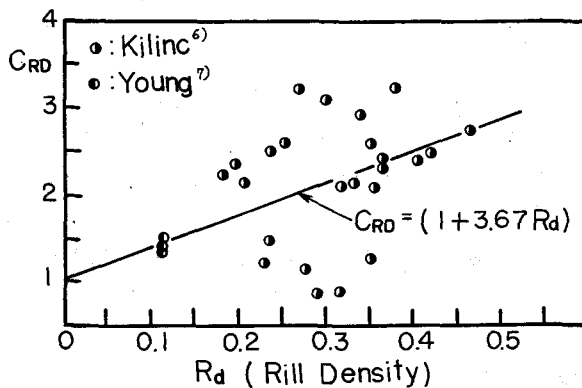


図-3 C_{RD} と R_d との関係

$$C_{RD} = 1 + 3.67 R_d \quad (11)$$

式(10)と式(11)を式(5)に代入して、 $C_1 = 2.0$ を使用すると、侵食性係数 C_E は、

$$\left. \begin{aligned} C_E &= 0.17 C_M \frac{(1+3.67 R_d)}{(CR/DR)} : \frac{CR}{DR} > 0.0425 \\ C_E &= 4 C_M (1+3.67 R_d) : \frac{CR}{DR} \leq 0.0425 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Kilinc⁶⁾, Young⁷⁾, Holy - Vitkova⁸⁾, Holy-Vaska⁹⁾, 今尾¹⁰⁾, 吉田・藤川・加来¹¹⁾, Doty-Carter¹²⁾のデータについて、式(3)と式(12)を使用して計算した侵食土砂量 E_1 (kgf/hr/m²) と対応する実測値 E_1 を示すと図-4のようである。

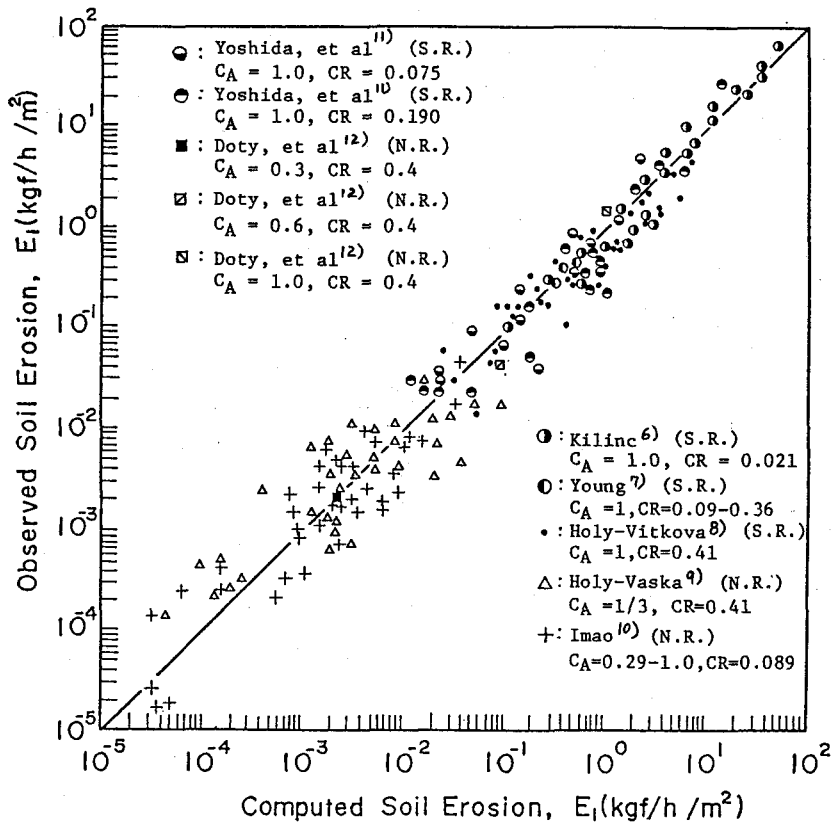


図-4 計算侵食量と実測侵食量との関係

(S.R.= Simulated Rainfall, N.R.= Natural Rainfall)

(2) 自然降雨の降雨強度

降雨継続時間 t (hr) の間に R (mm) の総降雨量がある場合、図-5のように降雨を中央集中型降雨

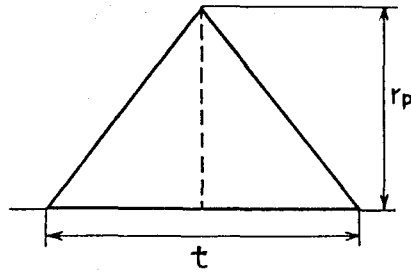


図-5 定義図

と考え、 r_p をピーク時の降雨強度と考えると、

$$R = \frac{1}{2} r_p t \quad (13)$$

式(13)より、 R と t とが実測されたときのピーク時降雨強度 r_p は、

$$r_p = 2R/t \quad (14)$$

となる。この r_p の降雨が T 時間継続すると考えると、

$$\frac{R}{r_p} = \frac{t}{2} = T \quad (15)$$

である。したがって、斜面侵食に使用する降雨強度 i (mm/hr) は、

$$i = \frac{R}{T} = \frac{R}{(t/2)} \quad (16)$$

とすべきである。式(1)は、 i = 一定の降雨強度の雨が単位時間(一時間)続くものとして計算式を誘導している。したがって $r_p = i$ = 一定の降雨強度の雨が $T = t/2$ 時間継続すると考えればよい。この意味で T を相当降雨継続時間と呼ぶことにする。

(3) 降雨強度と流出係数との関係

流出係数 f を降雨強度 i (mm/hr) の値から概略的に推定できるように、 f と i との関係を多治見市¹⁴⁾ とチェコスロバキア⁹⁾ のデータによって求めてみると図-6 のようである。近似式で表現すると、

$$\left. \begin{aligned} f &= 0.05 i & : i < 10 \text{ mm/hr} \\ f &= 1 - 0.89 i^{-0.25} & : i \geq 10 \text{ mm/hr} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

としてよい。

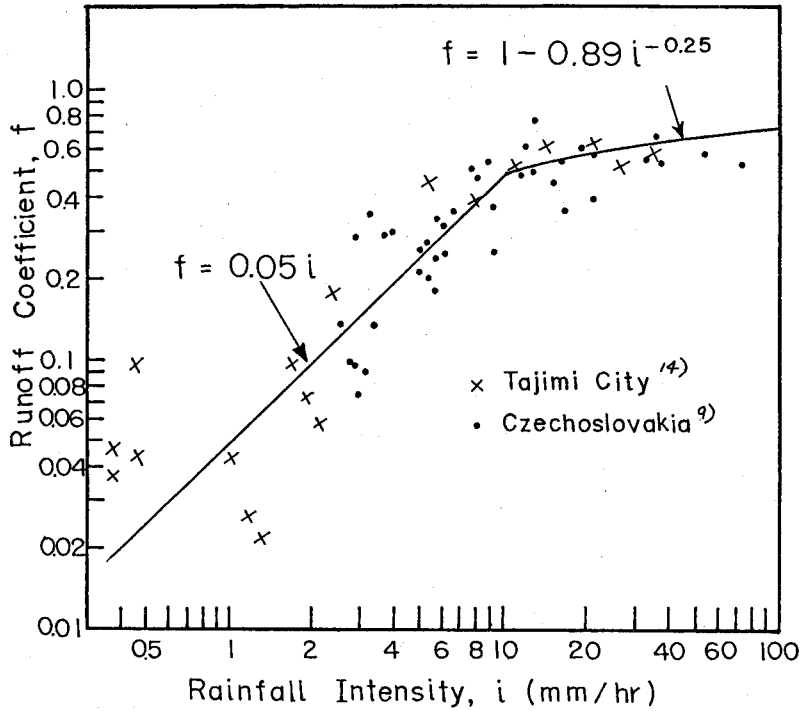


図-6 傾斜裸地における流出率と降雨強度との関係

(4) 斜面侵食量の推定法

(a) 連続降雨毎の降雨量とそれらの継続時間が与えられている場合

- ① 式 (16) によって、降雨毎の降雨強度 i を計算する；
- ② 式 (17) によって、 f を計算、あるいは斜面の土の性質、地表面の状況、及び降雨状況から f を推定する；
- ③ 斜面からサンプリングした土の CR 、 DR 、 d 、及び W_s を測定あるいは推定する；
- ④ 斜面の状況から、 R_d 、 C_A 、 C_M を推定する；
- ⑤ 斜面長 L と平均斜面勾配 S_0 を実測値から決定する；
- ⑥ 式 (12) によって、 C_E を計算する；
- ⑦ 式 (3) によって、各降雨に対する降雨継続時間 t_j (hr) について E_{1j} (kgf/hr/m²) を計算する；
- ⑧ 単位面積当り (1 m²) の侵食量 E_{1t} (kgf/m²) は、次式によって計算する；

$$E_{1t} = \sum_{j=1}^n E_{1j} \left(\frac{t_j}{2} \right) \quad (18)$$

($j = 1, 2, 3, \dots, n$)

- ⑨ 全侵食量 $E_{1(total)}$ (kgf) は、次式によって与える；

$$E_{1(total)} = A \cdot E_{1t} = A \sum_{j=1}^n E_{1j} \left(\frac{t_j}{2} \right) \quad (19)$$

ここに、 A ：斜面の全面積 (m^2)

一年間に n 回の降雨事象があったとすると、年侵食量は式 (19) によって計算できる。

(b) 年総降雨量と総降雨継続時間が与えられている場合

計算手順としては、前述の (a) の場合と同様であるが、その概略を示すと次のようである。

- ① 年総降雨量 R (mm) と総降雨継続時間 t を与え、 $i = R / (t/2)$ によって年平均降雨強度を計算する；
- ②～⑥は、(a) の場合と同様である；
- ⑦ 式 (3) によって E_1 (kgf/hr/m^2) を計算する；
- ⑧ 単位面積当りの年侵食量 E_{1y} (kgf/year/m^2) は、次式によって与える；

$$E_{1y} = E_1 (t/2) \quad (20)$$

- ⑨ 年侵食量 $E_{1(year)}$ (kgf/year) は、次式によって計算する；

$$E_{1(year)} = A \cdot E_{1y} = A E_1 (t/2) \quad (21)$$

4. 斜面侵食量の計算例

細山田¹⁵⁾の屋外自然斜面の実測データを使用して計算手法を簡単に説明する。実測の自然斜面は、 $20\text{m} \times 2\text{m}$ に仕切られた勾配 0.10 の斜面 (No. 1) と $10\text{m} \times 2\text{m}$ に仕切られた勾配 0.176 の斜面 (No. 2) である。表-1 は No. 1 と No. 2 の斜面の土壌特性である。

1978, 1979, 1980 の降雨と実測侵食量を示すと表-2 のようである。

計算例は、1978年に実測された斜面 No. 1 のデータによって示す。

- 1) 式 (16) を使用して、 $i = R / (t/2) = 11.556 \text{ mm/hr}$ ；
- 2) 式 (17) を使用して、 $f = 1 - 0.89 i^{-0.25} = 0.517$ ；
- 3) 実測データから、 $CR = 0.111$, $DR = 0.70$, $d = 0.13 \text{ mm}$, $W_s = 560 \text{ kgf/m}^3$ (5.492 KN/m^3)、
(DR の値は、他の実測データからの推定値)；
- 4) 斜面の状況から、 $R_d = 0$, $C_A = 1.0$, $C_M = 1.5$ ；
- 5) 斜面形状から $L = 20 \text{ m}$, $S_0 = 0.10$ ；
- 6) 式 (12) を使用して、 $C_E = 1.61$ ；
- 7) 式 (3) を使用して、 $E_1 = 0.01674 \text{ kgf/hr/m}^2$ ；
- 8) 式 (21) を使用して、 $E_{1(year)} = 68.634 \text{ kgf/year}$ ；
1 m^2 当りの年侵食量 E_{1y} は、 $E_{1y} = 1.716 \text{ kgf/m}^2$ ；

表-1 実測斜面の土壌特性¹⁵⁾

Classification	Lot No.1 (L=20m) (S ₀ =0.10)	Lot No.2 (L=10m) (S ₀ =0.176)	Remarks
Sand (%)	54	54	Less than 0.005mm
Silt (%)	36	40	
Clay (%)	10	6	
Colloid (%)	2	3	
D _{max} (mm)	2	2	
D ₈₄ (mm)	0.30	0.34	
D ₅₀ (mm)	0.08	0.08	
D ₁₆ (mm)	0.012	0.016	
D ₁₀ (mm)	0.005	0.010	
D (mm)	0.13	0.15	
W _s (kgf/m ³)	560	560	W _s = 5.492 KN/m ³
C R	0.111	0.064	* 実測値が無いので推定値
D R	* 0.70	* 0.65	
$\frac{C R}{D R}$	0.159	0.0985	
Specific Gravity (比重)	2.55	2.55	
Porosity (%) (空げき率)	78	78	

表-2 降雨量と侵食量の実測値¹⁵⁾

Year	t (hour)	R (mm)	i=R/(t/2) (mm/h)	E _{1y} (kgf/m ²)	
				Lot No.1	Lot No.2
1978	205	1184.5	11.556	1.168 * (11.45)	2.164 (21.22)
1979	248	1589.5	12.819	2.591 (25.41)	5.969 (58.54)
**1980	294	1833.0	12.469	3.717 (36.45)	8.546 (83.81)

(注): * ()内の数値は, SI 単位 (N/m²) である。

** 1980 年のデータは, 細山田による追加データ

計算侵食量と実測侵食量を示すと表-3のようである。この表から、計算侵食量は実測侵食量にかなり一致することが知られる。

表-3 計算侵食量と実測侵食量の比較

Year	Lot No 1 (A=40 m ²)		Lot No 2 (A=20 m ²)	
	Observed E _{2y} (N/m ²)	Computed E _{2y} (N/m ²)	Observed E _{2y} (N/m ²)	Computed E _{2y} (N/m ²)
1978	11.45	16.83	21.22	42.39
1979	25.41	25.91	58.54	65.27
1980	36.45	28.75	83.81	72.42

5. 河川流域への適用例

5-1 天竜川右岸上流域の崩壊地面積と裸地面積

(1) 対象流域の区分

画像解析のために、天竜川右岸上流域を図-7のように区分した。すなわち、

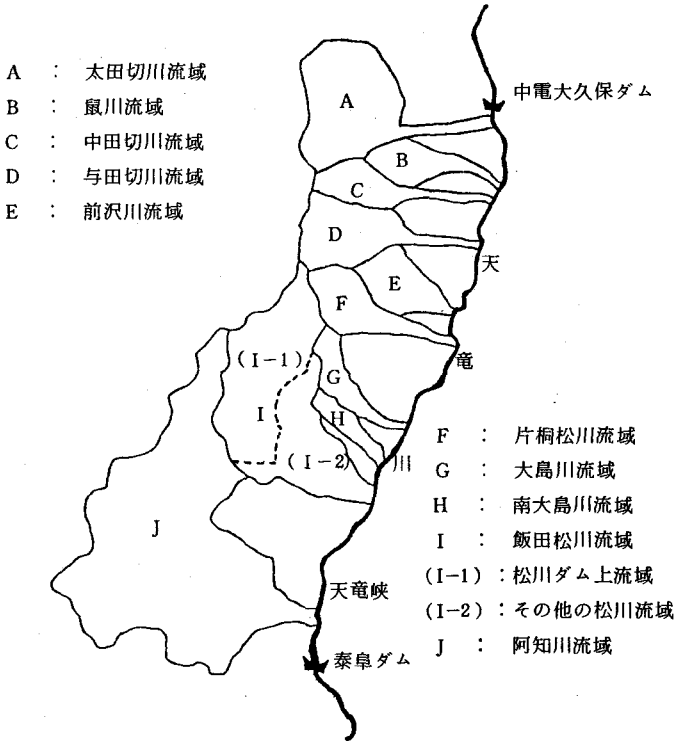


図-7 天竜川右岸上流域の流域区分図

A : 太田切川流域 (61.5 km ²)	G : 大島川流域 (13.2 km ²)
B : 鼠川流域 (19.2 km ²)	H : 南大島川流域 (9.7 km ²)
C : 中田切川流域 (22.5 km ²)	I : 飯田松川流域 (104.6 km ²)
D : 与田切川流域 (42.7 km ²)	I-1 : 松川ダム上流域 (60.0 km ²)
E : 前沢川流域 (18.6 km ²)	I-2 : その他の松川流域 (44.6 km ²)
F : 片切松川流域 (28.4 km ²)	J : 阿知川流域 (216.5 km ²)

参考のために天竜川右岸上流域の地質図を示すと図-8 のようである。

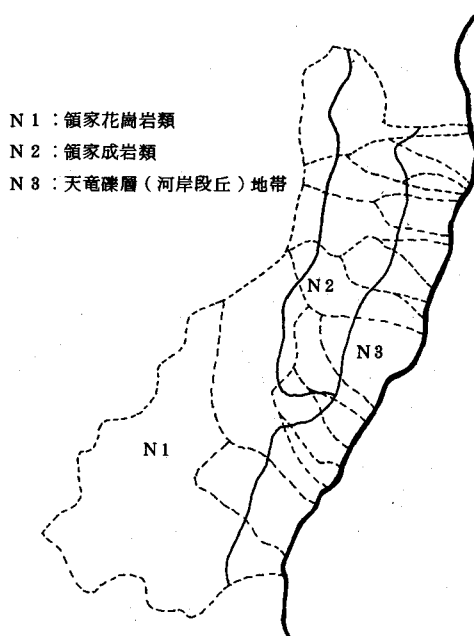


図-8 天竜川右岸上流域地質図

(2) 画像解析システムによる崩壊地面積と裸地面積の計算

2.の(2)で述べた解析手法により、下記の航空写真を使用して、各区分流域の崩壊地面積及び裸地面積を求めた。

昭和51年、縮尺1/15,000 (178枚) ; 阿知川の一部は縮尺1/10,000 (23枚)。

解析結果を表-4に示した。

5-2 天竜川右岸上流域の生産土砂量の推算

(1) 流域の平均傾斜角と崩壊地の平均傾斜角

流域の平均傾斜角を求める方法としては、寺田法、松井法などが使用されている。天竜川右岸上流域については、寺田法を使用した。この方法を簡単に説明する：

最初に、地形図上に適当な大きさの方眼を描き、この方眼に内接する半径 r の円に含まれる等高線の本数 n を方眼ごとに計測する。等高線は複雑なものでも1本に数え、山頂付近で同一の等高線が2度現われ

表－４ 昭和51年度の解析結果

項 目	流 域										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	全 域
流 域 面 積 (km ²)	61.5	19.2	22.5	42.7	18.6	28.4	13.2	9.7	104.6	216.5	536.9
崩 壊 地 面 積 (km ²)	2.868	0.028	0.491	0.763	0.090	0.313	0.135	0.006	1.286	1.374	7.354
裸地・崩壊地面積 (km ²)	4.767	0.099	0.925	1.636	0.167	0.747	0.328	0.088	4.031	5.869	18.657
裸 地 面 積 (km ²)	1.899	0.071	0.434	0.873	0.077	0.434	0.193	0.082	2.745	4.495	11.303
崩 壊 面 積 率 (％)	4.664	0.148	2.182	1.787	0.483	1.101	1.025	0.067	1.230	0.635	1.370
裸地・崩壊地面積率 (％)	7.751	0.519	4.112	3.832	0.897	2.630	2.485	0.910	3.854	2.711	3.475
裸 地 面 積 率 (％)	3.087	0.371	1.930	2.045	0.414	1.529	1.460	0.843	2.624	2.076	2.105

(注) A：太田切川流域 B：鼠川流域 C：中田切川流域 D：与田切川流域
 E：前沢川流域 F：片桐松川流域 G：大島川流域 H：南大島川流域
 I：飯田松川流域 J：阿知川流域

る場合には2本に、閉曲線は1本に数えることにする。以上の作業から、必要なデータが得られれば、次式を使用して方眼内の傾斜角が求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{n \Delta h}{2r} \right) \quad (22)$$

ここに、 Δh ＝地形図上のとなりあう等高線間の高度差。

この式で求めた傾斜角の流域平均値がその流域内の平均傾斜角である。

大村¹⁷⁾らの研究によると寺田法には次のような特徴がある。地形図上の方眼の取り方に関しては、方眼を広くとれば、いろいろな斜面の複合した地形の平均傾斜角を測定することになり、反対に方眼を狭くとれば単一な斜面についての局所変化を測定することになる。後者の場合、データ数も同時に多くなり、情報は統計的に安定するが、方眼をあまり狭くすると等高線1本当りによる傾斜の括約幅が広がる。その結果として、等高線の本数による度数分布の階級数が少なくなり分布の変化が極端になる。また、測定作業量が増大して、データ数が増加する割には、地形図の縮尺以上の情報が入る恐れもある。

以上のことから、方眼の大きさを決定する際は、地形の複雑さと縮尺を考慮して、無理のない詳しい情報を能率的に多くとれるように方眼の大きさを決定することが肝要である。

天竜川右岸上流域の解析では、1/50,000の地形図を使用し、方眼の大きさは1cm×1cmとした。したがって、 $r = 250$ m, $\Delta h = 20$ m なので式(22)は、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{n}{25} \right) \quad (23)$$

となる。この式を使用して流域の平均傾斜角を求めた。各流域の平均傾斜角($\bar{\theta}^{\circ}$)、及び傾斜角分布の標準偏差(S°)を示すと表－5のようである。

裸地と崩壊地は、いずれも斜面長を $L = 50$ mとし、崩壊地の平均傾斜角は、流域の平均傾斜角＋傾斜

表－5 流域内の平均傾斜角・標準偏差・崩壊地の平均傾斜角

流域	流域内の平均傾斜角 $\bar{\theta}^{\circ}$	標準偏差 S°	崩壊地の平均傾斜角 $\bar{\theta}^{\circ} + S^{\circ}$
A	32.8	5.2	38.0
B	28.2	4.9	33.1
C	33.0	5.5	38.5
D	30.4	6.2	36.6
E	29.7	5.8	35.5
F	31.9	5.5	37.4
G	28.2	5.8	34.0
H	23.9	3.7	27.6
I	30.0	4.5	34.5
J	27.5	4.8	32.3

角分布の標準偏差に近似的に等しいので、

$$\text{崩壊地の平均傾斜角} \doteq \bar{\theta} + S \quad (24)$$

とする。表－5に崩壊地の平均傾斜角を示した。

生産土砂量の推算には、降雨強度が必要なので、昭和40年4月～昭和58年3月までの降雨強度とその頻度を示すと表－6～8のようである。

表－6 降雨強度とその頻度（対象流域A，B，C，D）

年	S 4 0.4 ～S 4 1.3		S 5 1.4 ～S 5 2.3		S 5 3.4 ～S 5 4.3		S 5 4.4 ～S 5 5.3		S 5 5.4 ～S 5 6.3		S 5 6.4 ～S 5 7.3		S 5 7.4 ～S 5 8.3	
項目	降雨強度 (mm/hr)	回数	降雨強度 (mm/hr)	回数	降雨強度 (mm/hr)	回数	降雨強度 (mm/hr)	回数	降雨強度 (mm/hr)	回数	降雨強度 (mm/hr)	回数	降雨強度 (mm/hr)	回数
太田切川 (中御所ダム)	0.5	24(回)	1.0	41(回)	0.5	18(回)	0.5	20(回)	1.0	89(回)	1.0	41(回)	1.0	40(回)
	1.0	11	2.0	22	1.0	10	1.0	16	2.0	23	2.0	24	2.0	24
	1.5	12	3.0	9	1.5	11	1.5	14	3.0	18	3.0	12	3.0	14
	2.0	9	4.0	13	2.0	10	2.0	13	4.0	8	4.0	18	4.0	16
	2.5	5	5.0	13	2.5	11	2.5	7	5.0	13	5.0	10	5.0	8
	3.0	8	6.0	8	3.0	11	3.0	10	6.0	11	6.0	9	6.0	14
	3.5	4	7.0	7	3.5	3	3.5	4	7.0	7	7.0	9	7.0	7
	4.0	7	8.0	8	4.0	6	4.0	8	8.0	8	8.0	8	8.0	7
	4.5	5	9.0	6	4.5	5	4.5	6	9.0	6	9.0	3	9.0	5
	5.0	5	10.0	1	5.0	3	5.0	5	10.0	7	10.0	3	10.0	1
	5.5	1	11.0	1	5.5	4	5.5	3	12.0	3	11.0	6	11.0	4
	6.0	6	12.0	2	6.0	5	6.0	3	15.0	2	12.0	2	12.0	1
	6.5	4	13.0	1	6.5	5	6.5	3	16.0	1	13.0	2	13.0	1
	7.0	5	14.0	1	7.0	2	7.0	6	17.0	1	15.0	2	14.0	8
	7.5	2	15.0	3	7.5	4	7.5	5	21.0	1	22.0	1	16.0	1
	8.0	6	18.0	1	8.0	3	8.0	6	24.0	1			18.0	1
	8.5	2	24.0	1	8.5	3	8.5	2	26.0	1			21.0	1
	9.0	4	26.0	1	9.0	3	9.0	3	32.0	1				
	9.5	2			9.5	3	9.5	2	37.0	1				
	10.0	2			10.5	1	10.0	1						
	10.5	1			11.5	1	11.0	4						
	11.0	1			12.0	1	11.5	1						
	12.0	6			12.5	2	12.5	1						
	12.5	1			13.0	2	13.0	1						
	13.0	2			14.0	2	15.0	2						
	13.5	1			14.5	1	15.5	1						
	15.0	1			15.0	2	16.0	2						
	15.5	1			15.5	1	16.5	1						
	17.0	2			18.0	1	17.0	3						
	17.5	1					20.0	1						
	18.0	1					27.5	1						
	20.0	1					28.0	1						
	20.5	1												

表-7 降雨強度とその頻度(対象流域E, F, G, H, I)

年	S 4 0.4 ~S 4 1.3		S 5 1.4 ~S 5 2.3		S 5 3.4 ~S 5 4.3		S 5 4.4 ~S 5 5.3		S 5 5.4 ~S 5 6.3		S 5 6.4 ~S 5 7.3		S 5 7.4 ~S 5 8.3	
項目	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数
飯田 松川 (松川第三ダム)	0.5	7(回)	0.5	22(回)	0.5	21(回)	0.5	25(回)	0.5	19(回)	0.5	9(回)	0.5	22(回)
	0.7	6	1.0	9	1.0	18	1.0	18	1.0	10	1.0	17	1.0	18
	1.0	15	1.5	12	1.5	9	1.5	12	1.5	18	1.5	8	1.5	18
	1.5	6	2.0	10	2.0	7	2.0	16	2.0	11	2.0	14	2.0	17
	2.0	8	2.5	7	2.5	6	2.5	8	2.5	9	2.5	7	2.5	5
	2.5	8	3.0	10	3.0	8	3.0	9	3.0	13	3.0	9	3.0	8
	3.0	18	3.5	6	3.5	7	3.5	8	3.5	5	3.5	5	3.5	6
	3.5	9	4.0	9	4.0	12	4.0	18	4.0	8	4.0	16	4.0	9
	4.0	9	4.5	8	4.5	4	4.5	8	4.5	6	4.5	1	4.5	4
	4.5	1	5.0	4	5.0	8	5.0	8	5.0	11	5.0	9	5.0	10
	5.0	12	5.5	2	5.5	5	5.5	6	5.5	1	6.0	4	5.5	8
	5.5	1	6.0	2	6.0	8	6.0	1	6.0	3	6.5	2	6.0	8
	6.0	8	6.5	2	7.0	4	7.0	6	6.5	2	7.0	5	6.5	2
	6.5	8	7.0	8	7.5	4	7.5	1	7.0	5	7.5	1	7.0	1
	7.0	4	7.5	4	8.0	8	8.0	6	7.5	1	8.0	2	7.5	1
	7.5	8	8.0	4	8.5	2	8.5	2	8.0	2	9.0	3	8.0	3
	8.0	4	8.5	4	9.5	1	9.0	5	9.0	6	10.0	1	9.0	5
	8.5	1	9.0	8	10.0	2	9.5	1	9.5	3	11.0	1	10.0	8
	9.5	1	9.5	8	11.0	2	10.0	1	10.0	1	12.0	2	11.0	1
	10.0	2	10.0	2	12.0	2	11.0	1	10.5	1	18.0	1	12.0	1
	11.0	1	10.5	1	13.0	8	12.0	2	11.0	2	13.5	1	13.0	3
	12.0	4	11.0	1	16.0	1	16.0	1	12.0	3	14.0	2	14.0	1
	14.0	2	12.0	2	17.0	1	17.0	1	13.0	1	14.5	2	17.0	1
	14.5	1	12.5	2	20.0	1	18.0	1	14.0	3	15.5	2		
	15.0	1	14.5	1	22.0	1	20.0	1	17.0	2	25.0	1		
	17.0	1	15.0	1			21.0	1	18.5	1				
	18.0	1	18.0	1			22.0	1	22.5	1				
	19.0	1	18.5	2			30.0	1	32.5	1				
	23.0	1	19.0	1			42.0	1						
	45.0	1	20.5	1										
			23.5	2										

表-8 降雨強度とその頻度(対象流域J)

年	S 4 0.4 ~S 4 1.3		S 5 1.4 ~S 5 2.3		S 5 3.4 ~S 5 4.3		S 5 4.4 ~S 5 5.3		S 5 5.4 ~S 5 6.3		S 5 6.4 ~S 5 7.3		S 5 7.4 ~S 5 8.3	
項目	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数	降雨強度 (mm/hr)	回 数
阿知 川 (黒川ダム)	0.5	10(回)	1.0	39(回)	1.0	35(回)	1.0	49(回)	1.0	43(回)	1.0	42(回)	1.0	50(回)
	1.0	17	2.0	24	2.0	21	2.0	16	2.0	29	2.0	26	2.0	22
	1.5	9	3.0	15	3.0	20	3.0	25	3.0	11	3.0	16	3.0	15
	2.0	11	4.0	16	4.0	12	4.0	18	4.0	17	4.0	12	4.0	18
	2.5	8	5.0	10	5.0	8	5.0	6	5.0	10	5.0	6	5.0	12
	3.0	9	6.0	6	6.0	12	6.0	6	6.0	7	6.0	9	6.0	10
	3.5	9	7.0	6	7.0	7	7.0	3	7.0	4	7.0	4	7.0	2
	4.0	11	8.0	5	8.0	5	8.0	1	8.0	3	8.0	7	8.0	3
	4.5	4	9.0	3	9.0	1	9.0	6	9.0	2	9.0	1	9.0	3
	5.0	7	10.0	4	11.0	4	10.0	3	10.0	1	10.0	2	11.0	1
	5.5	3	11.0	2	13.0	2	11.0	3	11.0	3	11.0	2	12.0	2
	6.0	7	12.0	4	17.0	1	12.0	2	12.0	1	14.0	1	13.0	1
	7.0	4	13.0	1	18.0	1	13.0	1	13.0	2	16.0	1	14.0	2
	7.5	1	14.0	1	20.0	2	15.0	1	14.0	2	18.0	1	16.0	1
	8.0	3	17.0	2			17.0	1	17.0	1	20.0	2	17.0	1
	8.5	3	20.0	1			19.0	2	28.0	1	21.0	1		
	9.0	1	29.0	1			20.0	2			27.0	1		
	9.5	4					23.0	1						
	10.5	2					25.0	1						
	11.0	2					26.0	1						
	11.5	1												
	12.5	3												
	13.0	1												
	13.5	1												
	14.5	1												
	15.0	2												
	16.5	1												
	18.0	1												
	20.0	2												
	24.0	1												
	39.0	1												

各流域の生産土砂量を計算するための基礎的データを示すと、表－9 のようである。裸地の侵食土砂量の計算結果、及び崩壊地の侵食土砂量の計算結果を、それぞれ表－10 及び表－11 に示した。裸地部分と崩壊地部分の合計を表－12 に示した。

表－9 各流域の使用データ

項目 \ 流域	A	B	C	D	E
S_o { 裸 地	0.6445	0.5362	0.6494	0.5867	0.5704
崩 壊 地	0.7813	0.6519	0.7954	0.7427	0.7133
d (mm)	0.552	0.343	0.343	0.258	0.477
W_s (kg/m ³)	2652	2676	2676	2525	2653
CR	0	0	0	0	0
DR	1	1	1	1	1
C_M	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
L (m)	50	50	50	50	50
R_d	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

項目 \ 流域	F	G	H	I	J
S_o { 裸 地	0.6224	0.5362	0.4431	0.5774	0.5206
崩 壊 地	0.7646	0.6745	0.5228	0.6873	0.6322
d (mm)	0.477	0.412	0.412	0.412	0.369
W_s (kg/m ³)	2653	2713	2713	2713	2662
CR	0	0	0	0	0
DR	1	1	1	1	1
C_M	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
L (m)	50	50	50	50	50
R_d	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

表－10 各流域の年平均侵食土砂量（降雨強度と頻度（回数）から求めた場合）

	年	S 40.4	S 51.4	S 53.4	S 54.4	S 55.4	S 56.4	S 57.4	Mean
	流 域	～S 41.3	～S 52.3	～S 54.3	～S 55.3	～S 56.3	～S 57.3	～S 58.3	Value
裸 地	A	1468.4	1132.7	973.1	1766.0	2254.9	906.8	923.1	1346.4
	B	215.5	166.2	135.0	259.2	302.4	133.1	135.5	192.4
	C	1494.2	1152.7	990.4	1797.2	2096.8	922.8	939.4	1341.9
	D	1807.5	1394.4	1198.0	2174.0	2536.5	1116.3	1136.4	1623.3
	E	220.5	191.3	115.0	238.3	181.3	116.1	76.7	162.7
	F	928.2	761.5	484.0	1003.2	763.1	488.7	323.0	678.8
	G	820.3	711.8	427.8	886.7	674.5	432.0	285.4	605.5
	H	355.9	308.8	185.6	384.6	292.6	187.4	123.8	262.7
	I	1647.6	1429.6	859.3	1780.8	1354.6	867.6	573.3	1216.1
	J	1326.1	802.8	565.0	1126.6	577.7	765.0	404.7	795.4

（単位：m³/yr/km²）

表-11 各流域の年平均侵食土砂量(降雨強度と頻度(回数)から求めた場合)

	年 流域	S 40.4 ~S 41.3	S 51.4 ~S 52.3	S 53.4 ~S 54.3	S 54.4 ~S 55.3	S 55.4 ~S 56.3	S 56.4 ~S 57.3	S 57.4 ~S 58.3	Mean Value
崩 壊 地	A	2961.0	2284.3	1962.5	3561.2	4155.1	1828.7	1861.4	2659.2
	B	115.2	88.9	72.2	138.6	161.7	71.2	72.5	102.9
	C	2290.0	1766.6	1517.8	2754.2	3213.4	1414.3	1439.6	2056.6
	D	2249.6	1735.5	1491.1	2705.7	3156.9	1389.4	1414.3	2020.4
	E	359.7	312.1	187.6	388.8	295.8	189.4	125.2	265.5
	F	910.0	746.6	474.6	983.6	748.2	479.2	316.6	665.5
	G	812.6	705.0	423.7	878.3	668.1	427.9	282.7	599.8
	H	36.2	31.4	18.9	39.2	29.8	19.0	12.5	26.7
	I	1003.1	870.3	523.1	1084.1	824.7	528.2	349.0	740.4
	J	542.8	328.6	231.3	461.1	236.5	313.1	165.7	325.6

(単位: $\text{m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$)

表-12 各流域の年平均侵食土砂量(降雨強度と頻度(回数)から求めた場合)

	年 流域	S 40.4 ~S 41.3	S 51.4 ~S 52.3	S 53.4 ~S 54.3	S 54.4 ~S 55.3	S 55.4 ~S 56.3	S 56.4 ~S 57.3	S 57.4 ~S 58.3	Mean Value
裸 地 + 崩 壊 地	A	4429.4	3417.0	2935.6	5327.2	6410.0	2735.5	2784.5	4005.6
	B	330.7	255.1	207.2	397.8	464.1	204.3	208.0	295.3
	C	3784.2	2919.3	2508.2	4551.4	5310.2	2337.1	2379.0	3398.5
	D	4057.1	3129.9	2689.1	4879.7	5693.4	2505.7	2550.7	3643.7
	E	580.2	503.4	302.6	627.1	477.1	305.5	201.9	428.3
	F	1838.2	1508.1	958.6	1986.8	1511.3	967.9	639.6	1344.4
	G	1632.9	1416.8	851.5	1765.0	1342.6	859.9	568.1	1205.3
	H	392.1	340.2	204.5	423.8	322.4	206.4	136.3	289.4
	I	2650.7	2299.9	1382.4	2864.9	2179.3	1395.8	922.3	1956.5
	J	1868.9	1131.4	796.3	1587.7	814.2	1078.1	570.4	1121.0

(単位: $\text{m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$)

表-13 天竜川右岸上流域の侵食土砂量

流 域	流域面積 (km^2)	降雨強度と頻度(回数)の場合		年総降雨量と総降雨継続時間の場合	
		単位面積(km^2) 当りの侵食土砂量 ($\text{m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$)	年侵食土砂量 (m^3/yr)	単位面積(km^2) 当りの侵食土砂量 ($\text{m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$)	年侵食土砂量 (m^3/yr)
A	61.5	4005.6	246344.4	4470.5	274935.8
B	19.2	295.3	5669.8	333.8	6409.0
C	22.5	3398.5	76466.3	3819.4	85936.5
D	42.7	3643.7	155586.0	4094.9	174852.2
E	18.6	428.3	7966.4	173.6	3229.0
F	28.4	1344.4	38181.0	549.9	15617.2
G	13.2	1205.3	15910.0	531.2	7011.8
H	9.7	289.4	2807.2	117.3	1137.8
I	104.6	1956.5	204649.9	793.0	82947.8
J	216.5	1121.0	242696.5	622.3	134728.0
Total	536.9		996277.5		786805.1

最後に、天竜川右岸上流域の生産土砂量を表-13に示した。参考のために、年総降雨量から計算した場合も同表に示した。

表-14 松川ダム流域（I-1）の侵食土砂量

年	項目	裸 地	崩 壊 地	裸地+崩壊地
S 4 0.4～S 4 1.3		1 9 2 9.9	1 1 4 2.1	3 0 7 2.0
S 5 1.4～S 5 2.3		1 6 7 4.5	9 9 0.9	2 6 6 5.4
S 5 3.4～S 5 4.3		1 0 0 6.3	5 9 5.7	1 6 0 2.0
S 5 4.4～S 5 5.3		2 0 8 5.8	1 2 3 4.5	3 3 2 0.3
S 5 5.4～S 5 6.3		1 5 8 6.8	9 3 9.0	2 5 2 5.8
S 5 6.4～S 5 7.3		1 0 1 6.2	6 0 1.4	1 6 1 7.6
S 5 7.4～S 5 8.3		6 7 1.5	3 9 7.4	1 0 6 8.9
Mean Value		1 4 2 4.4	8 4 3.0	2 2 6 7.4

(単位：m³/yr/km²)

5-3 計算結果の検証

松川流域には、松川ダムがあり、計算結果の検証をダム堆砂量の比較から行えるので松川ダム流域（I-1）の年平均侵食土砂量を示すと表-14のようである。松川ダムの堆砂の状況は、図-9のようであり、比堆砂量は、1664.3 m³/yr/km²（昭和50年～56年の平均値）である。

ダム堆砂量による検証では、

ダム堆砂量＝山地流域の土砂生産量×ダム地点までの流達率（％）／100

を使用する。流域面積（km²）と流達率（％）との関係を図示すると、図-10のようであって、飛騨川の例¹⁸⁾では、Manerの曲線¹⁹⁾による流達率を使用した計算値が飛騨川のダム堆砂量とよく一致しているが、天竜川の計算結果から、流達率を松川ダムのデータとアメリカのデータから推定すると図中の実線のようなのである（曲線の推定では、アメリカの流域データの上限になるように設定した。上限に設定した理由は、式(1)

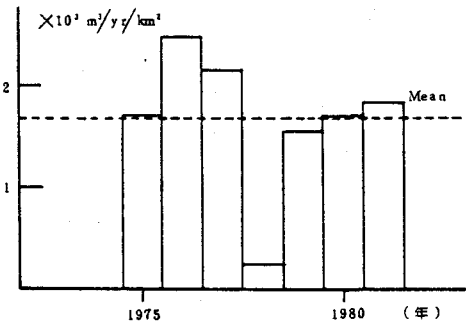


図-9 松川ダムの比堆砂量

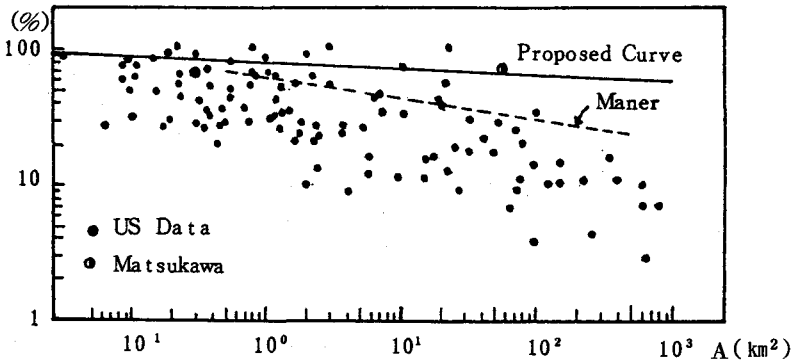


図-10 流域面積と流達率との関係

の誘導において斜面末端までの流達率の概念がすでに一部使用されていること、及びほとんどのデータが広大な丘陵農地の観測値であるためである)。この実線の式は、流達率を $SDR(\%)$ とすると、

$$SDR(\%) = 81A^{-0.042} \quad (25)$$

Maner の曲線は、

$$SDR(\%) = 62A^{-0.14} \quad (26)$$

である。式 (25) から松川ダムにおける流達率を求めると、 $SDR = 68.20\%$ である。この値を使用すると、本計算手法による松川ダム流域の侵食土砂量の平均値が $2267.4 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$ であることから、 $2267.4 \times 0.682 = 1546.4 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$ となって、実測値の $1664.3 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$ に近い値を与える。したがって、他の流域へは、式 (25) によって流達率を与えることにする。

今後の土砂生産量の推算では、花崗岩の風化地帯では、式 (25) を、その他の地域では、Maner の曲線式 (26) を使用すればよいであろう。

5-4 天竜川本川への供給土砂量

本計算手法によって得られた侵食土砂量（生産土砂量）に本川合流点までの流達率を乗じて、天竜川本川への流出土砂量を求めると、表-15 のようである。なお、松川流域では、松川ダムから上流の流域（I-1）の生産土砂量は、ダムへ到達し、全量堆砂するとしている。したがって、松川流域から天竜川へ流入する土砂量は流域（I-2）からのみとした。

表-15 天竜川本川に流入する土砂量

流域	流域面積 (km^2)	流達率 (%)	侵食土砂量 ($\text{m}^3/\text{yr}/\text{km}^2$)	天竜川本川に 流入する土砂量 (m^3/yr)	備考
A	61.5	68.13	4005.6	167,840	太田切川
B	19.2	71.55	295.8	4,057	鼠川
C	22.5	71.07	339.85	54,346	中田切川
D	42.7	69.18	364.87	107,641	与田切川
E	18.6	71.64	428.3	5,707	前沢川
F	28.4	70.38	134.44	26,872	片桐松川
G	13.2	72.68	120.53	11,564	大島川
H	9.7	73.63	289.4	2,067	南大島川
I-1	60.0	68.20	2267.4	0	松川ダム
I-2	44.6	69.06	1538.2	47,376	飯田松川
J	216.5	64.62	1121.0	156,841	阿知川
合計	536.9			584,311	

6. あとがき

土砂水理学的研究から得られた斜面侵食量の計算式を広大な流域における土砂生産量の推算に適用した結果は、新規の大規模崩壊がない場合、ダム堆砂の実測値にかなり一致した推算値が得られることが明らかとなった。今後改善すべき点としては、流達率の計算式、及び土壌分散率の測定法の確立である。

最後に、本計算法を天竜川右岸上流域へ適用²⁰⁾した際に御協力頂いた中部電力株式会社及び中電工事株式会社の関係者に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 河村三郎・内藤 充：画像解析装置による山崩れの解析，第14回自然災害科学総合シンポジウム，1977，pp. 253 - 254
- 2) 河村三郎・川口 均：画像解析装置による山崩れの解析，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，1979，pp. 114 - 115
- 3) 河村三郎：Hydraulics of Slope Erosion by Overland Flow，Proc. ASCE, Vol. 102, No. HY 10, 1976，pp. 1573 - 1586
- 4) Middleton, H. E. : Properties of Soils which Influence Erosion, USDA Technical Bulletin, No. 178, 1930, pp. 1 - 16
- 5) Bouyoucos, G. J. : The Clay Ratio as a Criterion of Susceptibility of Soils to Erosion, Jour. of Amer. Soci. of Agronomy, Vol. 27, No. 9, 1935, pp. 738 - 741
- 6) Kilinc, M. Y. : Mechanics of Soil Erosion from Overland Flow Generated by Simulated Rainfall, Dissertation (Ph. D.), Colorado State Univ., 1973, 183 pp.
- 7) Young, R. A. : The Role of Rainfall Impact and Surface Flow in Soil Detachment and Transport, Dissertation (Ph. D.), South Dakota State Univ., 1972, 143 pp.
- 8) Holy, M. and Vitkova : Determining the Influence of the Slope Gradient on the Intensity of Erosion Processes, Proc. International Water Erosion Symposium, Praha, Vol. II, 1970, pp. 71 - 82
- 9) Holy, M. and Vaska, J. : Relation Between Surface Runoff and Soil-Loss Caused by Water Erosion, Proc. International Water Erosion Symposium, Praha, Vol. I, 1970, pp. 229 - 246
- 10) 今尾昭夫：農地の土壌流亡，自然災害特別研究研究成果，代表者河村三郎，No. A-57-3, 1982, pp. 63 - 69
- 11) 吉田 勲・藤川武信・加来 研：シラスの侵食，自然災害特別研究研究成果，シラス地帯の開発に伴う自然災害の防止研究，代表者山内豊聡，No. A-49-1, 1974, pp. 26 - 33
- 12) Doty, C. W. and Carter, C. E. : Rates and Particle-Size Distributions of Soil Erosion from Unit Source Areas, Trans. ASAE, Vol. 8, No. 3, 1965, pp. 309 - 311
- 13) 大隅区域防災技術調査報告書，農用地開発公団九州事務所（太陽コンサルタント株式会社調査），1978，96 p.
- 14) 土屋義人：地面侵食に関する二，三の水理学的考察，土木学会論文集，59号，1958，pp. 32 - 38

- 15) Hosoyamada, K. : On Soil Erosion by Rainfall at Bare Sloping Field Composed of Kuroboku Soil, Trans. JSIDRE, No. 91, 1981, pp. 8-14
- 16) Komura, S : A Method of Predicting Slope Erosion, Proc. 3rd Congress of IAHR, Bandung, Indonesia, Vol. C, 1982, pp. 159-169
- 17) 木村 寛・高橋敏男：新砂防, 99, 1976, pp. 5-8
- 18) 飛騨川濁水問題技術対策審議会, 中部電力：“飛騨川濁水現象調査報告書”, 1981, 35 p.
- 19) “Sedimentation Engineering”, editor V. A. Vanoni, ASCE, M & R No. 54, 1975, pp. 460-463
- 20) 河村三郎：画像解析による天竜川右岸流域における土砂生産量の推算, 中部電力株式会社, 中電工事株式会社への研究報告書, 1983, 44 p.