

## 砂防計画における流出土砂量推算に関する考察

奥村 武信\*

### A Review on Estimation of Sediment Transport and Delivery in Debris and Sediment Control Plans

Takenobu OKUMURA\*

#### Summary

Plans for debris and sediment control are characterized by the quality of estimating the sediment discharge or the rate of sediment yield and transport. Therefore, plans have been established in various methods estimating the values.

In this paper, these methods are reviewed and evaluated after the following conception: The process of sediment transport or delivery is subject to 1) the amount of available sediments, 2) the competence of streams in transporting sediments, and 3) the resistance of sediments against transportation. And the valid estimation should take up these aspects coordinately with comparable accuracy, even if insufficient respectively.

#### I まえがき

砂防計画を流出土砂量において定量的に取り扱かうことは、1951年に発表された木村弘太郎の「砂防計画樹立に対する構想」以降通例のこととなった。砂防計画全体の好し悪しを左右するのは、この計画の対象となる基本的な土砂量の把握の的確さであるといえる。したがって、この量のより正確な把握にむかって多くの努力が払われてきた。

しかし、土砂の生産、流出の現象には多くの要因が関与し、しかも要因相互がまた関連し合っており、さらに現象が非定常で再現性に乏しいために、流出土砂量を論理的に系統だって組み立てた手法により決定することは非常に困難である。それで、現在までに種々の流出土砂量推定の手法が提案され、計画立案に利用されてきた。

本文では、最大洪水流砂量あるいは年平均流出土砂量決定の手法のうち、土砂流出現象の理解、土砂流出の取り扱いを概観する。

---

\* 鳥取大学農学部砂防工学研究室; Laboratory of Erosion Control, Fac. of Agr., Tottori Univ., Tottori 680

その手法はまさに多岐にわたるので簡単には類別できないが、以下のように分類して、2、3の考察を加える。

- (1) 流出土砂量の既往実績資料の修正による方法
- (2) (生産土砂量) × (流出率) による方法
- (3) 流出土砂量推算式による方法
- (4) 流量～流砂量による方法——水理学的手法
- (5) 地形変化にもとづく方法
- (6) その他

つぎに、山腹で生産された土砂量がある計算点に到達するまでに経てくる山腹・河道等での貯留過程を詳細に考慮した計画論あるいは計画例について考察する。

そして最後に総括的に筆者の考えを述べることにする。

## II 計画対象土砂量決定の手法

計画対象土砂量は、洪水時流出土砂量あるいは年平均流出土砂量から許容流砂量を控除したものとだろうが、ここでは主として前2者の決定方法について考察する。

また、計画の基本を洪水時流出土砂量におくか、年平均のそれにおくかの長い議論に示されるように、時系列の概念が土砂流出現象の理解に入らなければならないが、ここでは時間の扱いは一応措くことにする。

### 1. 流出土砂量の既往実績資料の修正による方法

木村は、流域の現状における最悪の状態を仮定したときの洪水時流砂量すなわち「最大洪水流砂量」の決定手法の1つとして、「実測法」を挙げ、「災害時に、ある地点以下に流出した土砂量を測定し、これを最大計画雨量に結びつけて訂正する。」と説明している<sup>1)</sup>

砂防事業とくに直轄砂防事業の対象河川はほとんど過去に大規模な土砂災害をこうむっているから、この手法はまったく初歩的であるけれども確かな説得力を有する。

この「実測法」を基本におく好例として、建設省六甲砂防工事事務所の計画土砂量が挙げられる<sup>2)</sup>。住吉川を含む表六甲諸河川は、1938年の阪神間災害時に多量の土砂を流送し、都市域に甚大な被害をもたらした。住吉川流域で、市内堆積量、山地堆積量、海河口堆積量および総堆積量は、それぞれ1,543, 26, 160,  $1,729 \times 10^3 m^3$ と実測計算された<sup>3)</sup>。この数字を基礎にして、当時の最大時間雨量60.8mmと計画時間雨量80mmとの比、および実測時に山地とされた面積と計画基準点流域面積の比で修正した値に近い数字を最大洪水流砂量としている。

木村はもう1つの手法として、

$$(1 \text{ 平方米あたり流出土砂量}) \times (\text{集水面積}) \quad (1)$$

表-1 既往大災害における流送土砂量調査結果(矢野義男による)

災 害 名	山地 1km <sup>2</sup> あたり 流送土砂量10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	災害 年次	県 名	災 害 名	山地 1km <sup>2</sup> あたり 流送土砂量10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	災害 年次	県 名
阪神間災害(六甲)	50 ~ 70	昭13	兵 庫	諫 早 災 害	50 ~ 90	昭32	長 崎
呉 災 害	10 ~ 15	20	広 島	瀬 戸 災 害	20 ~ 30	"	愛 知
赤城山周辺災害	50 ~ 70	22	群 馬	阿 知 川 災 害	10 ~ 15	"	長 野
錦 川 災 害	10 ~ 20	26	山 口	中 津 川 災 害	10 ~ 15	"	岐 阜
亀 岡 災 害	10 ~ 15	"	京 都	金 峰 山 災 害	20 ~ 30	"	熊 本
南 山 城 災 害	50 ~ 70	28	"	狩 野 川 災 害	20 ~ 30	33	静 岡
阿 蘇 災 害	90 ~ 100	"	熊 本	富 士 川 災 害	20 ~ 77	34	山 梨
有 田 川 災 害	70 ~ 80	"	和 歌 山	福 岡 県 北 部 災 害	10 ~ 30	"	福 岡
門 司 災 害	30 ~ 50	"	福 岡	伊 那 谷 災 害	100 ~ 150	36	長 野
安 曇 川 災 害	30 ~ 50	"	滋 賀	長 岡 災 害	30 ~ 50	"	新 潟
大 戸 川 災 害	30 ~ 50	"	"	多 良 災 害	10 ~ 70	37	佐 賀
猪 名 川 災 害	10 ~ 15	"	兵 庫	西 谷 災 害	100 ~ 150	40	福 井
小 丸 川 災 害	50 ~ 60	29	宮 崎	根 尾 災 害	30 ~ 90	"	岐 阜
会 津 若 松 災 害	20 ~ 30	31	福 島				

なる「推定法」をあげている<sup>1)</sup> 矢野義男がその著書で、過去の災害時に行なった調査の結果として表-1を掲げ、「地質的に類似する流域では、やはりこれぐらいの流出土砂量があると考え」、それを異常洪水時の流出土砂量とすることを説き<sup>4)</sup>、1976年に改正された河川砂防技術基準が、土石流区域および掃流区域における計画洪水時流出土砂量を決定するに際して資料がないばあいは、表-2に

表-2 河川砂防技術基準に示された計画流出土砂量

地域地質条件		計画流出土砂量 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /1洪水	備 考
土石流区域	花崗岩地帯	50 ~ 150	標準流域面積 1 km <sup>2</sup>
	火山噴出物地帯	80 ~ 200	流域面積が10倍の場合0.5倍
	第三紀層地帯	40 ~ 100	" 1/10 " 3倍
	破砕帯地帯	100 ~ 200	程度とする。
	その他の地帯	30 ~ 80	
掃流区域	花崗岩地帯	45 ~ 60	標準流域面積 10 km <sup>2</sup>
	火山噴出物地帯	60 ~ 80	年超過確率 1/50
	第三紀層地帯	40 ~ 50	年超過確率 1/100の場合
	破砕帯地帯	100 ~ 125	1.1倍, 流域面積による修
	その他の地帯	20 ~ 30	正は上記と同様

示す値を適宜伸縮して用いることを説いている<sup>5)</sup>のは、この推定法のための目安の値を与えるものである。

このように過去の災害時資料を目安として計画土砂量を決定することが、とくに府県砂防の場合多いようであるが、その数字の適用に際して留意すべき点がいくつかある。

第1に、拘杞芳彦も述べているように<sup>2)</sup>、それが特異な事象でなかったか否かを検討しなければならない。

第2に、これらの数字がいかなる面積を対象とした調査結果であるのか、とくに生産土砂量がいかに

なる貯留効果を受けた後の流出土砂量であるかを検討しなければならない。表-2では一応の対象流域面積が示されているので、小流域ごとに補助基準点を設定して対処するにしても、計画基準点に到るまでに受ける貯留効果が的確に評価できなければ、結局は「単位面積あたりいくらといった大雑把なものでは不満足といわねばならない。」<sup>2)</sup>という、計画立案に実際に携わる者の述懐に落ち着くことになる。

実績資料から単位面積あたりの流出土砂量を求めてこれを利用する手法は、年平均流出土砂量の決定にも使用される。

たとえば、建設省吉野川砂防工事事務所では、対象流域内あるいは近傍流域に散在する高ダムで毎年測定されている堆砂量測定値から流域平均

の比流砂量を求め、基準地点の年平均流送土砂量決定の基礎として

いる<sup>6)</sup>。このような貯水池堆砂量から求めた年平均比堆砂量は、後に述べる多くの流出土砂量堆

算式を誘導するための基礎になっている。まして、対象流域内あるいは近傍流域に多くの高ダムがある場合、その堆砂量に基づいて対象流域からの流出土砂量を決定する方法は、たしかに有効で、説得力のある手法であるけれども、その際留意しなければならない点はいくつかある。

第1に、上流貯水池の存在や、堆砂の進行

表-3 吉野川水系砂防における年平均流送土砂量

河川名	流域面積	単位面積あたり年平均堆砂量	年平均流送土砂量	備考
吉野川本川	734.6 km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /year 1,000	m <sup>3</sup> /year 734,500	銅山川資料
穴内川	86.5	4,676	404,474	穴内川ダム資料
銅山川	106.9	1,118	119,514	柳瀬ダム資料
祖谷川本川	269.3	1,375	370,287	名頃ダム資料
松尾川	96.7	3,737	361,368	松尾川ダム資料
計	1,294.0		2,000,000	

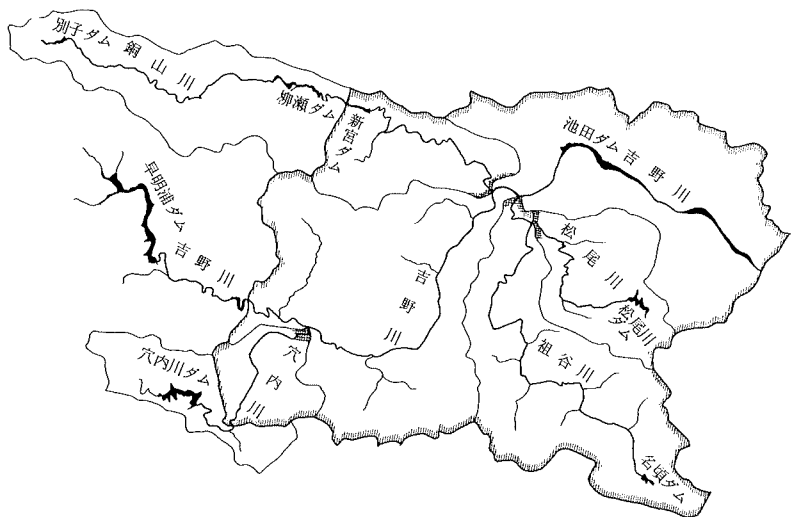


図-1 吉野川上流水系図(ハッチ部分が計画対象流域)

に伴う流砂捕捉率の減少を考慮せずに、ある貯水池の堆砂資料から機械的に比流砂量を算定することは、不的確な推定値に結果する可能性がある<sup>7)</sup>。たとえば、銅山川の柳瀬ダム（集水面積  $170 \text{ km}^2$ ）の上流には、かなり離れているけれども、総貯水量  $560 \text{ 万 m}^3$  の別子ダム（ $28 \text{ km}^2$ ）がある。このようなばあいには、柳瀬ダムを含めた上流域にある貯水池群の堆積土砂量の総計をもって、柳瀬ダム地点における年平均流出土砂量とする必要があろうし、柳瀬ダムの流砂捕捉率が  $1.0$  に近いことが前提となる。

第2に、たとえば流域面積  $28.0 \text{ km}^2$  の名頃ダム、 $26.4 \text{ km}^2$  の松尾川ダムにおける調査結果を、それぞれ  $269 \text{ km}^2$  の祖谷川本川、 $97 \text{ km}^2$  の松尾川に引きのばすばあい、比流砂量に強く関与する流域の崩壊面積率など、比較的定量化しやすい因子で、調査区域と適用区域が同一条件であることを確かめておく必要があろう。とくに、柳瀬ダム、穴内川ダムなどダム流域が適用流域から離れているばあい、この確認はなおさら欠かせない。

たとえ、同一条件であったとしても、比流砂量が流域面積の増大に伴って減少することはよく知られている事実であるから、この点での配慮を行なう必要がある。

第3に、高ダムの堆砂量調査は、有効貯水量の減少を知るために、満水面以下の貯水域での堆砂量に主眼がおかれているので、貯水池末端部満水面上の堆砂が十分に算入されているかを検討しておくことは、砂防で問題にしなければならない粒径の土砂がこの部分に多く堆積することからして、ゆるがせにできない。

第4に、比較的短期間の調査によるものであるから、当該期間中の出水状況が計画期間中のそれを十分に代表できるものであるかをも検討し、ある種の修正を加えることも必要であらう。

以上、流出土砂量の既往実績資料を修正して対象土砂量を決定する手法について述べたが、この手法は土砂流出の過程に対する検討はほとんど行なわず、流域の大小、降雨量の多寡によってのみ乗除するきわめて初歩的な手法である。

## 2. (生産土砂量) × (流出率) による方法

木村は最大洪水流砂量推定の一法として、(1) 式の (1 平方メートルあたり流出土砂量) を崩壊土砂量とその流出率に分解した

$$(1 \text{ 平方メートルあたり崩壊土砂量}) \times (\text{流出係数}) \times (\text{集水面積}) \quad (2)$$

なる「推定法」をあげている。木村が砂防計画に必要な土砂量として崩壊土砂量を取りあげた<sup>1)</sup> のは、この式が念頭にあったからであらう。

流出係数について木村は「集水面積が小さくて河床勾配が急なばあいには、崩壊土砂量をはるかに上まわる流出土砂量となり、流域面積が大きく流路延長の長い流域では流下の途中で調節され流出土砂量は崩壊土砂量よりも減少するものであって、流出係数は  $0.2 \sim 5$  ぐらいであらう。」と推定している。この考え方は正しいが、係数の決定あるいは選定にあたっては非常に直感的な点を残している。

ところで木村のこの式は、洪水流砂量をすべて崩壊土砂量にむすびつけているのであるが、新沢直治は崩壊土砂量と溪間堆積量の2つから洪水時流砂量を推定しなければならないと論じ、

$$V = C_1 K + C_2 P \quad (3)$$

ここに、 $V$ ；洪水流砂量、 $K$ ；崩壊量、 $P$ ；溪間堆積量

$C_1$ ；崩壊係数、 $C_2$ ；堆積係数

なる推定式を使用している<sup>8)</sup>。ここで崩壊係数、堆積係数と名付けられたものは、それぞれ崩壊土砂、堆積土砂の流出係数の意味であろう。

この式は、砂防計画をたてるばあい、洪水流砂量を知るだけでは不十分であり、崩壊により生産された土石を主とするものか、溪間堆積物の移動を主とするものかを知ってはじめて山腹工、床固工、堰堤工などの組み合わせ方が決まるとする論から発している。それは同時に、木村が計画に必要な土砂量としながら、<sup>1)</sup>「移動土砂量」を洪水流砂量推定式に組み入れずに、崩壊土砂量に乗ずる流出係数を大きくとることで処理していたのに比較すると、現象をより詳しく追尾するものである。河床堆積物を流出土砂源として算入すべしとするこの論は、1969年から進められた砂防計画の再検討期において見直され<sup>9)</sup> それ以降、不安定土砂量なる語がしばしば使用されるようになった。

ところで、新沢はこの係数について、1) 崩壊量も堆積量も多く、その両者に大差のないばあい、 $C_1 = 0.2 \sim 0.5$ 、 $C_2 = 0.1 \sim 0.3$ 、2) 溪床岩盤が露出している様な急勾配の溪流 ( $K \gg P$ ) では、 $C_1 = 0.4 \sim 0.8$ 、 $C_2 \approx 0$ 、3) 洪水時に新規崩壊がなく、長年月間に堆積した土砂のみが流出する溪流では、 $K = 0$ 、 $C_2 \geq 1.0$  と見積もっている<sup>10)</sup>。しかし、第3のばあいの係数は不合理である。「小支溪の溪床に堆積する土砂は山津波を発生しやすく、猛烈な縦横浸食を伴う」ことを、 $C_2 \geq 1.0$ とする理由にあげているが、 $K \ll P$ であれば、洪水時に溪床堆積物のすべてが流出するのが一般的現象であるとする論には疑問がある。流出土砂量の源泉として、河道浸食量(現今の不安定土砂量を越える部分)を算入すべきだと筆者も考えるし、またその量の推定も堆積量の何倍といったとり方しかないかも知れない。けれども、一般的に、 $K = 0$ 、 $C_2 \geq 1.0$ とするのでなく、あくまでも  $C_2 \leq 1.0$  であって、第3項として、河道浸食量  $C_3 P$  を列挙すべきであると考えている。

この新沢の提案した手法は、新沢自身が那須山地の砂防計画に<sup>10)</sup> また梶本吉郎が1953年災害後の筑後川上流玖珠川流域の砂防計画<sup>11)</sup>において適用している。

木村の流出係数や新沢の崩壊係数、堆積係数は、河床状況、流域状態の観察からかなり直感的に決められるものであるのに対し、柿徳市は「土石流下率」と名付けて、できるだけ客観的な係数にしようとして努力した。ここでは、防災ハンドブックに引用されている<sup>12)</sup> 利根川水系直轄砂防計画を例にして、この手法について、2・3考察してみる。

柿は、各年の流出土砂量の経年変化を示す「流砂量曲線」の変動の様相に拠って、流出土砂の処理計画を変えねばならないとの論を展開した。そして、河川砂防技術基準にいう年平均流送土砂量<sup>13)</sup>

(柿はこれを周年平均流砂量と呼んだ)のほとんどが数10年に1度といった異常な土砂生産,流出が生起する年の流出土砂量によるものであって, 平年流砂量は至って少ない河川(休眠性河川と名付けた)に対しては, 最大洪水時の流出土砂量の処理に主眼をおいて, ダムの貯砂能力および調節能力に期待する「間接-調節方式」の計画をたてるべきであるとした。

したがって, 利根川水系を休眠性河川と類別したこの計画における計画対象土砂量は洪水時流砂量である。

柿は, 「間接-調節方式」により処理すべき土砂量「ダム計画堆積土石総量」を次式で与え, これを「砂防基本式」と呼んでいる。

$$V_{D.P.} = \left[ p \cdot \beta - \frac{1}{10^6} \int_0^T \epsilon_a q dt \right] \times A \times 10^6 \quad (4)$$

$p$ は「最大土石生産率」すなわち計画降雨時の単位面積あたりの土石生産量あるいは崩壊土砂量 ( $10^6 m^3/km^2$ ) であり,  $\beta$ が「土石流下率」すなわち生産土砂量に対する流出土砂量の比であるから, この積に流域面積  $A$  ( $km^2$ ) を乗じた  $p \cdot \beta \cdot A$  は木村の推算式 (2) にほかならない。 $\epsilon_a$  は「許容含砂率」で  $q$  が比流量であるから,  $A \cdot \int_0^T \epsilon_a \cdot q dt$  は洪水期間中の許容流砂量総計である。柿は,  $p, \beta, \epsilon_a$  が未知量であり十分吟味されなければならないと指摘している。

利根川水系砂防計画をたてるに際して, 土石生産率  $p$  は, 1952~56年に行なわれた全国主要河川水源山地にお

表-4 利根川水系砂防工事区域の地質分類と最大土石生産率  $p$

る崩壊と土砂生産, 流出の実態調査の成果をもとに, 地質区分ごとに, 利根川水系での50年確率雨量150~300mm/dayを過去の記録にもつ, 地形条件が利根川水系に比較的類似した流域での実績から導き出した表

地 層 名		所 属 岩 石 名	最大土石生産率	
水 成 岩 類	古 生 層	秩 父 古 生 層	秩父古生層(石灰紀~二疊紀)	0.03~0.075
		長 瀨 変 成 岩 類	ホルンフェルス, 秩父古成層変成部	0.025
	中 生 層	三疊紀, ジュラ紀, 白亜紀層	南蛇井層, 岩室層, 古白亜紀層	0.020
	第 三 紀 層	古 第 三 紀 層	御坂層	0.015
新 第 三 紀 層		富岡層および他の新第三紀層		
第 四 紀 層	洪 積 層	火 山 性 堆 積 岩	各種熔岩類および火山砕屑物	0.120
		水 成 性 堆 積 岩	火山灰層および洪積層	
	沖 積 層	沖積層	0.010~0.005	
火 成 岩 類	深成岩類および半深成岩類		花崗岩, 閃緑岩, 班岩, ひん岩	0.030
	噴 出 岩 類		流紋岩, 安山岩, 玄武岩	0.030~0.070

-4に示す値を使用している。この値の決め方<sup>14)</sup>をこまかく見ると多少の問題も含んでいるが, 各支流流域の土砂生産量は各地質の分布面積にこの表の値を乗ずれば求まるわけである。

ところで, この生産土砂量(土石生産率)については, その後多くの势力的な調査, 解析, 研究が進められてきている。たとえば, 村野義郎は1961年天竜川災害時における崩壊調査の結果について,

地質、各種の地形要因その他の流域特性、雨量と、崩壊面積、個数に関して詳細な検討を行ない、興味ある結果を得たし<sup>17)</sup>、打狹珠男は集中豪雨時の土砂生産量をとくに雨量と結びつけて推算する式を提案した<sup>18)</sup>。また、西畑勇夫らは天竜川上流域の1961年災害時およびその後の崩壊調査結果から、地質類型、流域の平均傾斜度、雨量階によって崩壊生産量を推定する図表を作成し、佐久間、秋葉両ダム流域においてその適合度を検証した<sup>19)</sup>。けれども、未だ普遍的な数値を与えるには至っていない。

柿は、土石流下率 $\beta$ を洪水流量推定の合理式に使用される流出係数の概念で推定することを試みた。すなわち「降雨量のうちピーク流量に寄与する量の比率」を示す流出係数に対して、「生産土砂量のうち流域末端に流出する土砂量の比率」を示す土石流下率という類似である。そして柿は、河川工学便覧に書かれている「物部公式によれば $Q$ は $(H/\ell)^{0.4}/\ell^{2/3}$ に比例するから……比流量 $q$ は $\ell^{2/3}$ に逆比例する。…… $\ell$ はほぼ $A^{1/2}$ に比例する。……結局 $q$ は $A^{1/3}$ に比例することになる。」<sup>20)</sup>を引用して、 $\beta$ をつぎのように計算している。

「一般に流域面積が $5 \text{ km}^2$ 以下で、溪床勾配が $1/10$ より小さい急な小溪流では、生産土石の殆んど $100\%$ が土石流となって流下する。」ことを根拠に、この流域面積、溪床勾配を基準とした流域面積係数 $a$ ならびに溪床勾配係数 $i$ を、それぞれ次式により算出し、土石流下率 $\beta$ はこの両者の積で表現できるとした。そして、(6)、(7)式を「流域面積係数曲線」、「溪床勾配係数曲線」として表示した。

$$\beta = a \times i \quad (5)$$

$$\begin{cases} a = 1.0 & A \leq 5 \text{ km}^2 \\ a = 1/(A/5)^{1/3} & A > 5 \text{ km}^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$i = (H/L/0.10)^{0.4} \quad (7)$$

ここに、 $A$ ；流域面積、 $H$ ；流域最大起伏量、 $L$ ；最長流路延長

さて、

$$Q \propto (H/\ell)^{0.4}/\ell^{2/3} \quad (8)$$

にもどって考察してみよう。

物部公式とは

$$Q = 0.2778 f \cdot r \cdot A \quad f ; \text{流出係数} \quad (9)$$

であり、洪水到達時間中の平均雨量強度 $r$ は詳細な資料が得られないばあい、日雨量 $R_{24}$ から

$$r = \frac{R_{24}}{24} \left( \frac{24}{T} \right)^{2/3} \quad (10)$$

で推定する。洪水到達時間 $T$ は、Rzihaの洪水到達速度の式

$$w (\text{km/hr}) = 7.2 (H/\ell)^{0.6} \quad (11)$$

ここに、 $\ell$ ；最上流端から計算点までの河道水平距離、 $H$ ；その落差

を用いて

$$T (\text{hr}) = \ell/w \quad (12)$$



から求めるとされている。

(9)～(12)式から、比流量について

$$q \propto f r_{24} (H/l)^{0.4} / l^{2/3} \quad (13)$$

となるのであって、(8)式はまず成立しないことが知られる。そして何よりも、(10)、(11)式を認めなければならない。土砂流出の現象において、この2つの式がいかなる過程を意味するのかを明確にできないかぎり、(13)式が土石流下率推定に援用できる根拠をもたないはずである。さらに、現象的に考えれば、 $\beta$ に対応するのはむしろ $f$ である。この $f$ 値は、雨量そのものによっても変化するといわれる。総雨量が大きくなるほど増大する性質のものである。それに対し、流域での生産土砂量が大きいほど流域内貯留量が増加するのが土砂流出現象であるから、 $\beta$ は一般に減少する傾向をもっている。

このように、 $\beta$ は土砂流出現象を的確に考慮したものとはなっていない。そもそも、土砂の流下率が流域の広がり、勾配によってアプリオリに決まっているとの考えには同意できない。流下率は、生産量と河道の土砂輸送能力との関係において決まってくるはずである。

また柿は、吾妻川869.2 km<sup>2</sup>については8.5～88.8 km<sup>2</sup>の18の支流域に、片品川609.2 km<sup>2</sup>については8.6～84.4 km<sup>2</sup>の支流域に区分して、各支流域あるいは残流域について上記の方法で算出した流下土石量累積を吾妻川、片品川の流下土石量としているけれども、流域の区分方法によっては累計としての流出土砂量には多様な値が算出されてくる可能性がある。土砂の流下経路を追った流下率の計算手法が織り込まれなければならない。

ところで、柿は芦屋川、都賀川における砂防計画において、計画対象土砂量を算定するにあたって、崩壊地源の土砂に対してはこの流下率を使用しながら、河床堆積物に源をもつものについては一律に0.8の流下率を採用している<sup>21)</sup>。それでは、この流下率とはいったい何なのかを問わざるを得ない。洪水流量推定の合理式との類似から形づくられたものである以上、論理的には、流出可能土砂量が山腹からの供給量であっても、溪床堆積量であっても同一に取り扱われなければ意味をもたないとする。

木村や新沢の直感的な流出係数や、この柿の流下率に対して、土砂流出の実態調査にもとづく流出係数、あるいはその反面の貯留係数を用いた対象土砂量決定手法については、節を改めて述べることにする。

### 3. 流出土砂量推算式による手法

土砂の生産、流送に関与する要因は多岐にわたり、また相互に影響しあうので、その関数形を物理的に決め難い。そこで、関与すると考えられる要因を定量化し、これとダム堆砂実績などから流砂量または比流砂量を推算する式を編み出そうとする試みが多く現れてくる。

ここでは、それらの推算式のいくつかについて考察してみることにする。

(1) 多重回帰分析による推算式

多重回帰式による手法は、とくにU. S. A.において発展してきたものである。

たとえば、ANDERSONなどは、野火にあったとか、伐倒木が地曳きで搬出されているとかいった土地利用条件まで含めた40のパラメーターまで考えている<sup>22)</sup>しかし、これらのパラメーターの多くは、WISCHMEIERの提案したUniversal Soil Loss Equation<sup>23)</sup>

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{14}$$

における、ある斜面長L、斜面勾配Sのもとでの年平均雨量の潜在浸食力Rと erosion rate Eの関係から決めねばならぬKとか、すっかり耕された休閑地の浸食量と他の耕作状況での浸食量の比であるCとか、勾配と土壤保全のために行なわれる耕作方法とによる浸食量の差を表示するPなどのように、ある試験区域で得られた詳細な資料にもとづいて定量化する必要のあるパラメーターである。

さて、建設省砂防課および土木研究所砂防研究室は、全国の砂防ダムにおける堆砂資料にもとづいて比堆砂量推算式を多重回帰分析により得ている<sup>24)</sup>

流域面積A km<sup>2</sup>、起伏量比R<sub>r</sub>(〔流域最高点標高-ダム天端標高〕/〔流路延長〕)、流域平均高度M<sub>E</sub>(〔ダム天端標高+流域最高高度標高〕×1/2)、長期間の年間平均雨量R mm/yrならびに期間内総雨量、期間内継続50 mm以上の雨量の年平均値、期間内継続100 mm以上の雨量の年間平均値および計画貯砂量を要因として分析したのち、比堆砂量Q<sub>s</sub> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/yrの推定式をつぎのように与えた。

$$\log Q_s = -3.198 - 0.2059 \log A + 0.9687 \log R_r + 1.213 \log M_E + 0.6757 \log \bar{R} \tag{15}$$

しかし、つぎに述べる田中・石外の式が100 km<sup>2</sup>以下の流域面積しかもたない砂防ダムに適用しにくいとの理由で新たに検討されたにもかかわらず、その適合度はあまり改善されていない。

表-5 未満砂ダムの堆砂量式における指数

$$Q_s = aA^b R_r^c M_E^d R_d^e$$

(15)式は、捕捉率が低下した状態の資料も含めていられるようであるから、計画対象土砂を算

地質区分	a	b	c	d	e
考慮せず	4.924	-0.1665	0.2400	0.6763	0.4914
古生層・中生層	0.001742	-0.7953	-0.8927	2.408	-0.3388
変成岩	154.2	0.2502	2.292	-0.3436	0.02425
第3紀・第4紀火山砕屑物	0.000006573	-0.7324	-1.460	1.854	1.449
噴出岩	29430	-0.09524	0.4658	-0.6778	0.7472

定するには、表-5に示される未満砂防ダム堆砂資料にもとづく推算式<sup>25)</sup>の方が適当であろう。このばあい、時間~堆砂量曲線が最大の勾配をなす部分の期間(1期間の資料しかないばあいには、その期間に150 mm/day以上の雨量が記録されたもの)をとり、この期間内の最大洪水が期間堆砂総量をもたらしたと仮定している。したがって、ここでとられる雨量のパラメーターは期間内最大日雨量

Ra mm/day である。地質区分ごとの推算式は区分Ⅲを除いて、(15)式よりも高い相関係数を与えている。

(2) 地形量による流出土砂推算式

流域の特性を議論するばあい、地形量は比較的定量化しやすい。それで、土砂生産・流出に関与すると思われる地形量を選んで指標とした推算式が多く提案されている。推算式のすべてに何らかの地形量が含まれることによっても、そのことがわかる。

田中治雄、石外宏は、地形・地質を貯水池堆砂量と結びつけることを検討した<sup>26)</sup>彼らのとりあげた地形量は、流域平均標高 $\bar{x}_1$ と平均起伏量 $\bar{x}_2$ (それぞれ地形図に4km方眼をかけた時の各方眼における値の平均)で、その積xを「地貌係数」と呼んだ。このパラメーターをとりあげた根拠は明確でないが、これを独立変数として、地質および気象条件を定性的に表現する地方区分ごとに、表-6<sup>27)</sup>の推算式を提案している。しかし、少ない資料からかなり無理な決められ方をしているので、式の適応性は一応検討されている

が、axと(b±c)が近い値になってしまう、あるいは負の答を与える流域もかなり出てくるようで、実用には供しにくい。(なお、 $\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$ の単位について、文献26の説明文はmであるが、回帰式を得ている図をみると100mである。)

表-6 田中・石外の年比堆砂量式における係数表

$$Q_s = ax - b \pm c$$

類型	地質条件	地理条件	a	b	c
A	深成岩・半深成岩およびその変成岩類が1/2以上	北陸	6.6	934	166
B		中部山岳・奥羽	11.8	543	49
C		中国・近畿・東海	4.5	150	69
D	古生層・中生層・第3紀層が1/2以上		10.1	254	107
E			9.9	77	51
F	結晶変岩・蛇紋岩が1/2以上		9.9	523	-
G	噴出岩が1/2以上		-	-	-
H	第4紀層		-	-	-
I	複雑		13.0	6	189

田中らが「地貌係数」を説明なくとりあげているのに対し、渡辺和衛が採用した「侵食係数」は、明確な意味を有する。すなわち、「侵食係数」とは、5万分の1地形図の集曲線が描き出す谷口300m未満の谷を埋めるに必要な体積「崖端侵食量」を流域面積で除した値で、渡辺は約4万年前から現在までの流域平均侵食深を示すと説明している<sup>28)</sup>渡辺は、この侵食係数を使って、江川および大井川流域の資料にもとづいて、次式の「有効流砂量公式」を提案している。(図-2)

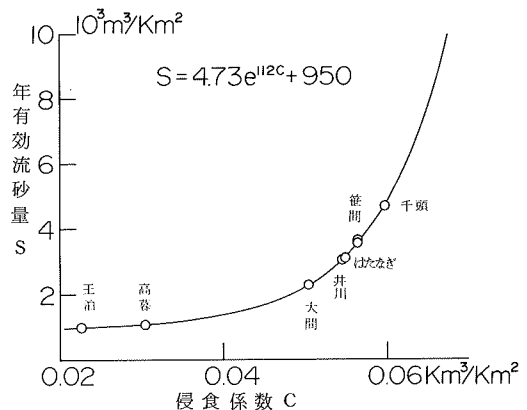


図-2 侵食係数と有効流砂量の関係および渡辺の有効流砂量公式

$$S = 4.73 e^{112C} + 950 \tag{16}$$

ここに、S；比堆砂量  $m^3/km^2/yr$

C；侵食係数  $km^3/km^2$

「有効」を冠しているのは、流域内での貯留堆積を考慮して、ダム地点に到達する、ダム堆砂に有効なという意味である。この式の適用性については、他の多くの流域でも検討されている。たとえば、先に例をあげた吉野川水系祖谷川の名頃ダム地点では、 $1,500 m^3/km^2/yr$  となるが、<sup>30)</sup> 実測量  $1,375 m^3/km^2/yr$  (表-3) に非常に近い値が推算されている。

渡辺はまた、有効流砂量と侵食係数はこのようにならかなり強い相関があるけれども(有効流砂量と実測流砂量の間には捕捉率なる修正係数が入ってくる)、この要素以外に、土砂流送に直接関与する重要な因子として流量をとらねばならないと考え、60日流量、それを流域面積で除した60日高水比流量をとって、侵食係数をパラメーターとして、図-3のようなグラフを提案している。<sup>31)</sup> 各直線の傾きはCの2次式で示されそうであり、この図式計算では捕捉係数を考慮しなくてもよいとしている。ところで、縦軸の値は流域内に散在する砂防ダム群の堆砂量から得たものであって、厳密に言えば、ある地点への流出土砂量ではないから、(16)式とは異なる答が出てくる。渡辺は、一般に図-4による推定値が(16)式による計算値よりも小さいことから、

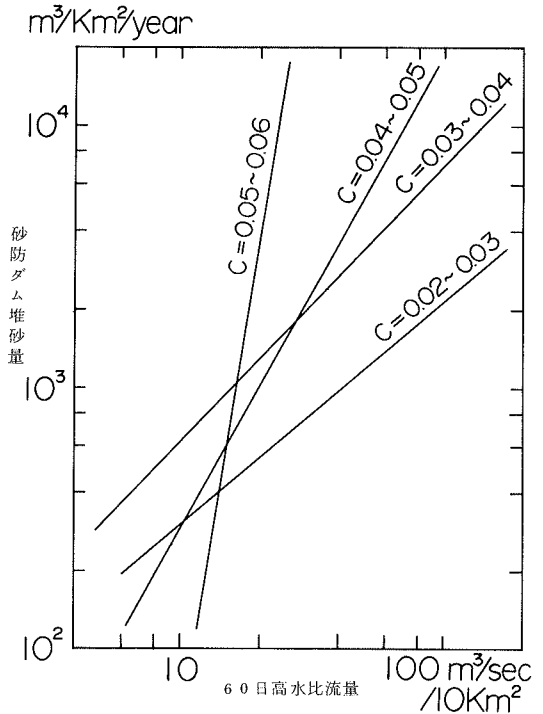


図-3 侵食係数Cによる60日高水比流量と堆砂量関係の変化(渡辺による)

後者は流域が自然状態の時の比流砂量であり、前者は流域内に砂防ダムが多数築設され、その効果が表われた状態のそれであると説明し、捕捉係数を考慮しなくてもよい根拠ともしている。しかし、この差を砂防施設の効果や捕捉率に先験的に結びつけることは無理があり、説明しすぎの感がある。

このように地形量および流量あるいは降雨量を取りあげた推算式としては、石外宏のつぎの式がある。<sup>32)</sup>

$$\log y = a \log x + b \tag{17}$$

ここに、y は比堆砂量  $m^3/km^2/yr$  で、x は〔起伏量〕×〔大雨時降水量〕であり、常数 a, b を田中・石外の式と同様に、地質区分ごとに表-7として与えている。起伏量は田中・石外式の  $\bar{x}$  であり、大雨時降水量とは連続100mm以上の降雨の年平均総量である。

(3) 植生因子をとりあげた推算式

流域の植生被覆状況は、降雨のもつ浸食力、斜面のもつ耐浸食力、雨水の流出過程に対する影響を通じて、土砂生産・流出現象に複雑に関与する。しかし、その定量化は困難で、植生状況をいかに定量表示するかが、まずもって問題となる。

表-7 石外の比堆砂量式における係数

$$\log y = a \log x - b$$

地 質 区 分	a	b
先 新 生 代 堆 積 岩	1.6 0	6.7 6
深成岩・半深成岩・その変成岩	2.1 8	9.5 2
そ の 他	1.5 0	5.5 8

難波宣士、川口武雄は、立木地面積率F(%)でもって植生状況を単純に定量化した。これと、「実用の面から簡便に評価できる」因子として、20万分の1地形図に4km方眼をかけて得られる起伏量R(100m)および年平均降雨量P(100mm)を独立変数に選び、草生地が主としたり露岩地の多い流域を除いたばあいの土砂流出推算のための回帰式

表-8 植生指標

林相による指標			被覆度による指標	
林 相	指 標	地 被 %	指 標	
裸 地	0	裸 地	0	
草 地	1	20	3	
雑木矮林 a	3	40	9	
〃 b	5	60	15	
森 林	8	80	18	
		100	20	

$$E = 0.474R + 0.292P - 0.118F + 2.452 \quad (m^2/ha) \quad (18)$$

または

$$E = 2.743 \times \frac{R \cdot P}{F} - 2.409 \quad (19)$$

を得ている<sup>33)</sup>なお、その適用範囲は10km<sup>2</sup>以上の面積を有する流域としている。

難波らは(19)式が、1) Fの10%の増大が100m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>の減少をもたらす、2) 有限の森林配置で流出土砂防止機能を働かせたいばあい、RあるいはPの大きい部分に配するのが得策である、3) P、Rの小さい部分では森林面積の増大とか保全的施業制限はそれほど考えなくてよい、といった実用的な示唆を与えるとしている。

FERRELは植生とその被覆強度に対しそれぞれ指標となる得点を与え、小面積ごとの得点から流域平均得点を算出し、これを浸食量予測式に導入した<sup>34)</sup>表-8はFERRELの表を山口伊佐夫が一部修正して表示した<sup>35)</sup>植生指標 Vegetation Index で、たとえば、うっ閉した喬木林は8+20=28なる得点が付けられる。

FERRELの浸食量予測式は、つぎのとおりである。

$$D = \alpha Q^{1.67} R_r^{0.72} (5 + VI)^{-2.67} \quad (20)$$

ここに、Qは期間内最大24時間雨量を使って算出される最大比流量であり、表-5の未満砂ダムの資料解析と同じ観点にたっている。R<sub>r</sub>は流域平均起伏量比で、VIが植生指標である。係数αはヤードポンド法によるFERRELのばあい35,600で、山口は各因子をメートル法に読み替えて、αだけを19,740,000と換算している(D; m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)<sup>35)</sup>。

山口らは、胆沢川砂防でこの手法を使用した<sup>36)</sup>。そこでは、係数αを20年間の総堆砂量の実測値と計算値が合致するように、25,463,000と修正している。この係数は普遍的なものでないから、その修正は当然であるが、Qを算定する式<sup>35)</sup>

$$Q = 0.018 (P - 35.5) A^{-0.1} \quad (21)$$

ここに、P:最大24時間雨量、A:流域面積

における無効雨量なども流域によって変化するものであるから、検討しておく必要があったろう。

この手法によれば、森林伐採計画などをもとに将来の流出土砂量の変動予測も可能であるが、計算期間、雨量をどのようにとるかが問題となる。胆沢川では、過去の最大日雨量、50年確率雨量、既往最大日雨量をとって3通りの値を推算している。しかし、Qの定義からすれば、後に述べる生起確率の概念を導入できる性質のものであろう。

植生指標の差が流砂量(FERRELの定義では浸食量)にどれほど効くものかを検討してみると、胆沢川流域58.0km<sup>2</sup>でVIが0.5%小さくなれば、土砂量は1%ふえ、前川流域66.3km<sup>2</sup>では、5.2%のVIの低下が6~10%の流出土砂量の増加をもたらすことになる。

#### (4) 崩壊地面積を考慮した推算式

江崎一博は、貯水池流入土砂をbed material loadとwash loadに分け、後者には流域内崩壊地面積が関与することを考慮し、つぎの仮定のもとに式を立て、実測値との比較から係数を決定している<sup>37)</sup>。

①流入土砂量V<sub>s</sub>は、河道堆積土砂の移動量と崩壊地からの流出量(wash load)から成り立っている。

②前者は、貯水池末端付近平均河床勾配Sと洪水量Iに規定され、後者は、流域内崩壊面積A<sub>d</sub>、崩壊地平均勾配Dおよび洪水量Iのうち崩壊からの流出分I × A<sub>d</sub>/A (A:流域面積)で決まる。

③関数形は、それぞれ〔洪水量〕×〔勾配〕<sup>2</sup>で与えられる。

$$V_s = K_1 I S^2 + K_2 I (A_d/A) \cdot D^2 \quad (22)$$

と表示できる。

④Iは、Q・S = 1.0 (Q; 流量m<sup>3</sup>/sec)を満足する値以上のQの時間累積量とする。

⑤実測値との比較から、K<sub>1</sub> = 8.85, K<sub>2</sub> = 7.83が得られる。

⑥Dの値は他の量に比して精度がわるいので、(22)式右辺第2項をK<sub>2</sub> I (A<sub>d</sub>/A)・Dとすると、K<sub>1</sub> = 8.30, K<sub>2</sub> = 5.47となる。

このように、流出土砂量を2つの部分に分けたこと、wash loadの供給源としての崩壊地面積を

導入したことは、流量と勾配の積という関数形を与えたことは、従来の推算式に比較すると土砂流出現象の物理的な面を考慮した点で一步前進している。

また、砂防のばあいwash load は考慮外に置く場合が多いけれども、都市河川の環境問題等の見地から無視することができなくなつてこよう。

#### 4. 流量～流砂量の生起確率による方法

土砂流送は流水によって行なわれる。だから水理量なかでも流量を根拠にした流出土砂量を推算する手法が当然に出てくる。そして、流量の生起確率に関する水文統計学の知識を導入すれば、最大から最小に至る各種の規模の洪水が将来起こりうるとして、その時々流砂量を包含して年平均した流砂量であるところの年平均流送土砂量を推算する最善の手法とも考えられた。ここでは、2, 3の計算例について考察する。

宮田辰男は、流量を根拠として年平均流出土砂量を推定する方法を、鬼怒川支川大谷川を対象に試みた。<sup>39)</sup> 宮田は、ある規模の洪水による流出土砂量  $Q_s$  と、その洪水の年間平均生起度数  $n$  の積を、平年洪水から計画最大洪水まで累計した「年間確率流砂量期待値」に、平年洪水による平年流砂量を加算することにより、年平均流送土砂量を求めようとした。ここに、平年洪水のとり方は明確ではないが、宮田は2年確率流量よりいくぶん大きい値をとっている。

さて、 $n$  は日雨量あるいは流量に関する長期の資料さえあれば計算できるが、 $Q_s$  をいかに算定するか問題となる。宮田は、

①最大洪水時流砂量  $Q_{smax}$  を、各支川の河床堆積量、新規崩壊見込量、崩壊拡大見込量および既往崩壊地残土量に、それぞれ比較的直感的に見積った流出率を乗じて求める。

②イ) ハイドログラフはピーク流量を頂点とする2次曲線である、ロ) 含砂率は流量に比例する、ハ) この関係が最大洪水、任意の規模の洪水のピーク時含砂率にも成立する、とすれば、任意規模の洪水期間中の流出土砂量は、

$$Q_s = \frac{Q_p^2}{Q_{pmax}^2} \cdot Q_{smax} \quad (23)$$

によって計算できる。

③平年流砂量は、平年洪水のうちでの最大流量で計算した流砂量が、平年流砂量の5～7割を占めるとして計算する。

としている。つまり、直感的な流出率を乗じて得られる最大洪水時流砂量と計画洪水流量という1つの点 ( $Q=Q_{max}$ ,  $Q_s=Q_{smax}$ ) と原点 ( $Q=0$ ,  $Q_s=0$ ) を通る2次の  $Q \sim Q_s$  曲線によって、それぞれの洪水における流砂量が決まるとするものである。

流砂量式を持ち出すことはやめておくとしても、各種土砂源に対して任意に設定された流出率から決まる含砂率に計算の根拠をおくことは、流量～流砂量関係に非常に恣意的な面が入ることになる。

大谷川では最大洪水ピーク時の含砂率が0.54と計算されたけれども、最大洪水流量と流出土砂量を別個の根拠から算出するかぎり、1.0以上の含砂率となる可能性もある。

このように計算過程に問題を含んでいるけれども、年平均流出土砂量の算定方法に生起確率の概念を導入したことは大いに評価されていい。

藤村敏夫は、常願寺川砂防計画において、生起確率による手法を平年流砂量の算定に使用した<sup>39)</sup>彼のばあい、各規模の洪水のピーク時流砂量 $Q_{sp}$ を、河川の掃流力とKrey式による限界掃流力を用いてSchoklitschの流砂式で算定しているから、宮田の方法で恣意的であった部分は取り除かれている。しかし、①1洪水の流砂量を、ピーク時流砂量 $Q_{sp}$ のみを根拠に、時間～流砂量曲線が2次曲線であると仮定して、

$$Q_s = \frac{2}{3} Q_{sp} \cdot T' \quad (24)$$

と計算しているが、ピーク時掃流力さえ限界掃流力を越えておれば、その洪水期間中流砂が続くのか、②(24)式の $T'$ を、基底流量を控除した流出総量 $2 \int_0^{T'} (Q - Q_b) dt$ が有効降雨総量に等しくなる時間としているが、限界掃流力の概念を導入しているのであるから、限界流量以上の時間とするべきでないか、など詳細に検討すれば、2, 3の疑問もはさみうる。

さて、以上のようにして得た $Q_s$ に年生起頻度を乗じ、累加して平年流砂量を計算しているのであるが、年平均流出土砂量は、平年流砂量算定の過程で得られた流量～流砂量関係

$$Q_s = 1.5 \times 10^{-5} Q^{1.5} \quad (25)$$

を用いて5～150年確率雨量による洪水時流砂量を算定しながら、砂防計画期間が20年であるからとの理由で、20年確率流砂量の1/20のみをさきの平年流砂量に加算したのとしている<sup>40)</sup>もしこの方法を踏襲するなら、100年確率流砂量したがって、100年確率雨量は、100年計画ではじめて問題にされることになる。それゆえに「計画年数20年としたばあい……③確率20年の洪水1回だけのばあい、④最大洪水<sup>(註1)</sup>が工期間に起こると考えたばあいetcなどがある……、超過土砂量を考えると④のばあいは③のばあいの2倍以上<sup>(註2)</sup>になるので(計画土砂量は)簡単には決定できかねる」<sup>39)</sup>ということになる。これでは確率水文学の概念を理解していないことになり、この部分にこそ宮田が行ったように、生起確率の概念が入ってこなければならない。この概念の導入を平年流砂量の算定に限る理由は少しもないはずである。

以上考察した2つの計画における流砂量の算定は必ずしも十分ではない。しかし、生起確率の概念は、「期間のとり方によって、そのなかに含まれる異常現象の回数と規模がことなるので、……過去の

脚注1 鷺尾塾龍が手取川の数値を基礎に推定した<sup>41)</sup> $12 \times 10^6 \text{ m}^3$

2 この比較計算は、さきに書いたようにある確率流砂量をその確率年で除した値のみを平年流砂量に加算しているから、確率年を大きくとるほど平均年流出土砂量は小さくなる。④については、うえの $12 \times 10^6 \text{ m}^3$ を20年で除して、平年流砂量に加算している。



災害の時系列的検討を行ないその意味を明確にしておく」<sup>41)</sup> ためにも必要な1つの手法を与えるものである。ところが、この手法は現在あまり使用されていないようである。確かに、宮田も断わっているように、移動供給しうる土砂源が常にあり、流出条件が時間的に大きく変化しない場合にのみ適用しうるという限界があり、また砂防が対象とするような急勾配でかつ砂礫が巨大な条件のもとでの従来の流砂量式の適用性が明確にされていない現状であるけれども、流量～流砂量関係とその生起確率にもとづく流出土砂量算定手法の有用性を高める努力は必要であると考えられる。

## 5. 地形変化量計測にもとづく手法

砂防の対象は浸食現象であるとの論がある。それは個々の斜面の浸食であっても、大地形のそれでもいい。ある範囲の地形の変化量は、その範囲の地形が浸食されて、範囲外に流出した土砂量の積分である。たとえば、裸地斜面からの流出土砂量は斜面上の各点の低下量の総計として、あるいは斜面末端に設けた砂溜めへの流入土砂量として得られる。流域の浸食量ないしは流出土砂量は、流域末端に砂溜めとしての貯水池や湖沼があれば、そこへの推砂量でつかまえられ、そうでないばあい地形の変化量総量としておさえられる。その経過年数を知れば、年平均流出土砂量が算定できる。

現在のように空中写真が比較的手軽に撮られれば、時間をおいて撮影した空中写真の比較によって変化量をこまかく知りえる。しかし、この手段で変化量が得られる例は少なく、可能であってもその時間は短かく測定精度が問題になることが多い。そこで、長時間の変化量は、現在得られる地形図から、ある規準のもとに過去の地形を推定し、経過時間を推理することにより年平均流出土砂量を得ようとする手法が考えられる。

たとえば、大山砂防で流出土砂量を算出した手順は以下のようである<sup>42)</sup>

① 1 km方眼を使って切峯面図を描く。すなわち、何年か以前には1 km方眼中の最高点を包絡する面が地表面であったと仮定する。しかし、堆積地形区域の過去の形状は復元できない。

② この切峯面および現地形のパーセント・ヒプソメトリック・カーブを描く。パーセント表示する必然性はない。

③ 2つの地形のヒプソメトリック・インテグラルの差  $\Delta I_H$ 、流域面積  $A$  ( $km^2$ )、最大起伏量  $H$  ( $km$ ) から、山体減少量  $V$  ( $km^3$ ) が計算できる。

$$V = \Delta I_H \cdot A \cdot H \quad (26)$$

④ この山体減少をもたらしした期間を推定する。この手法の問題点はここに凝縮できる。さきの渡辺の浸食係数が4,000年間の浸食深を表現しそうだとの推定は、比較の規準としての実測値があったり、世界的に言われている  $0.4 mm/yr$  の値と比較してのことである。大山では、この期間を100万年前後としている。しかし、この数字が層序学的に、また広く地質学的に根拠があるとしても(大山火山は更新世200万年前から1万年前に形成された<sup>43)</sup>)、1 km方眼による切峯面図が描き出す地形がその時代のものであると判断する根拠は薄弱である。もし、答えを適当な値にするために経過時間を

与えたとすれば、初めから適当年平均流出土砂量を恣意的に与えても変わりがなくなる。

⑤Vをこの期間で除して、年平均流出土砂量とする。

さて、前述した渡辺の侵食係数も、このばあいと比較して切峯面とするか埋谷面とするかの違いはあるが、ある規準のもとに過去の地形を推定して計測されるものであった。しかし、渡辺の侵食係数は指標として推算式に使ったので、検証されたように有効であったのに対し、このばあい⑤の計算値そのものを年平均流出土砂量とするので、④の期間推定の適否が結果の妥当性を大きく左右することになる。

### Ⅲ 土砂の流送過程を考慮した計画対象土砂量決定の手法

Ⅱで述べた手法は、たとえ流域を細分して種々の指標を算出することはあっても土砂流出の現象そのものについては対象流域を1つの単位とした扱いかいであるか、せいぜい小流域における流出土砂量を単純に積算する手法であった。

土砂流出の現象を的確に解析することの困難さの1つは、前述したように、山腹で生産されたあるいは溪床から移動をはじめた土砂が計算点に達するまでにはさまれる複雑な貯留現象である。これはⅡ-2で述べた直感的な流出率、土砂流出現象を的確に表現しない土石流下率では十分に処理しきれない。

ここでは、流域内に展開する河道網での土砂の貯留に関してかなり詳細に検討した流出土砂量算定手法について考慮することにする。

#### 1. 貯留係数にもとづく逐次計算

天竜川上流砂防計画では、各小流域および河道がおかれた河道網内の位置により異なった貯留係数を与えて、流出土砂量の逐次計算を以下のようにすすめている<sup>4)</sup>。その係数が災害時の実態調査に基礎をおいている点、および小流域における生産土砂量を基礎にして流下経路に従って貯留効果が算入できる点で、従来の流出率の概念を導入した多くの手法と比較して高く評価できる。

①1961年6月伊那谷豪雨災害後の調査結果をHORTON-STRAHLER流の河道次数で整理すると、ある次数以下の溪床・河道に堆積した土砂の総量の流域内崩壊土砂量に対する比 $y_v$ と河道次数 $x$ の

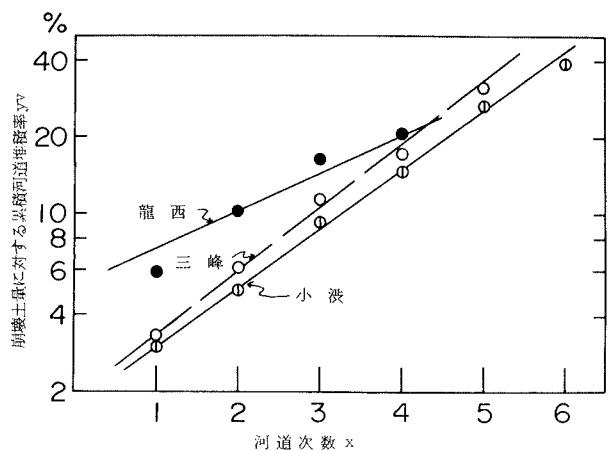


図-4 天竜川上流域における河道次数と累積河道堆積率の関係

間にはつぎの関係が見出された。(図-4)<sup>45)</sup>

$$\log y_v = ax + b \tag{27}$$

ここにいう流域内崩壊土砂量は、調査対象全流域でのそれかある次数の流域内でのそれか不明確であるが、「全流域河道堆積量に対するある次数以下の河道におけるその比と河道次数との間にも同様な関係がある。」<sup>45)</sup>とされていること、中村隄氏がその私信で使われた「河道堆積量の流域内分布」という語から推察すると、前者のようである。すなわち、1.0から最高次数河道の $y_v$ を差し引いた値が従来の流出率に相当する。

②上の事実から、最大洪水流砂量が豪雨型山崩れによって形成され、河道堆積物を起源とする流出土砂が比較的少ないばあい、山地崩壊量と河道貯留量の間に関係が成立すると考えて、河道次道ごとに表-9<sup>44)</sup>のように貯留係数を与えて、(28)式の手順で計画をすすめる。

「流域貯留常数」と「河道貯留常数」の2つの係数を与えているのは、計算点を「支川流域内における経流量および崩壊地

調査を勘案して」<sup>44)</sup>設定しているために、計算単位流域(「単流域」)が図-5のように次数で齊一化されていないためであり、考え方としては(27)式の $y_v$ が前者に、その微係数が後者となる。

$$\left. \begin{aligned} \text{流出対象土砂量} &= \text{既往崩壊残土量} + \text{不安定土砂量} + \text{崩壊拡大見込量} + \text{新規崩壊見込量} \\ \text{流域貯留量} &= \text{流出対象土砂量} \times \text{流域貯留常数} \\ \text{最大洪水流砂量} &= \text{流出対象土砂量} - \text{流域貯留量} \\ \text{または} &= \text{上流計算点最大洪水流砂量合計} - \text{河道貯留量} \\ \text{河道貯留量} &= \text{上流計算点最大洪水流砂量合計} \times \text{河道貯留常数} \end{aligned} \right\} \tag{28}$$

表-9 天竜川流域砂防計画における貯留常数表

流域河道の次数	竜西流域		三峯川流域		新宮川・小渋川流域	
	流域貯留	河道貯留	流域貯留	河道貯留	流域貯留	河道貯留
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
1	0.17	-	0.13	-	0.13	-
2	0.20	0.03	0.16	0.03	0.15	0.02
3	0.24	0.04	0.20	0.04	0.19	0.04
4	0.30	0.06	0.28	0.08	0.24	0.05
5	-	-	0.43	0.15	0.35	0.11
6	-	-	-	-	0.53	0.18

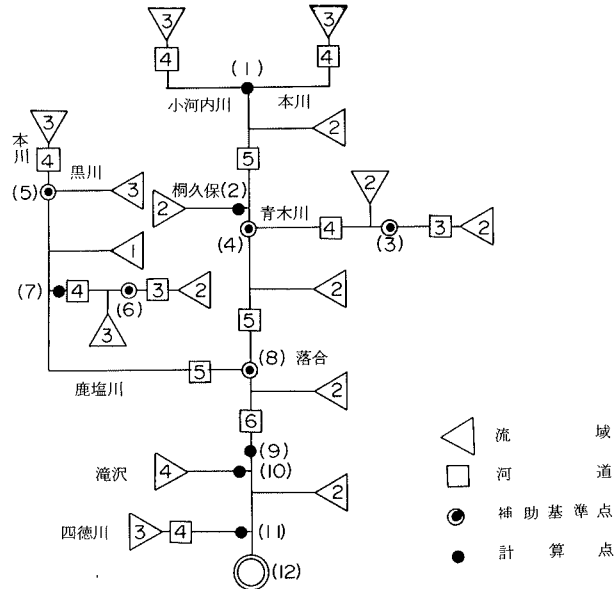


図-5 小渋川流域洪水流砂量算定における流域区分と計算点 (流域河道内の数字は次数, ( )内数字は計算点番号)

さて、貯留係数の算出根拠を全流域の崩壊土石総量におくならば、係数の使用にあたって多少の難点が含まれる。

第1に、計算点の設定方法によって種々の流砂量が計算される可能性がある。いま、流出対象土砂量が1次流域にのみあって、高次河道は1次低い河道のみを承ける極端な河系が竜西地域にあったと仮定すると、①4次河道末端のみに計算点を設定し、全流域を1まとめにしてしまうと、流域貯留が0.30であるから、流域末端での流出土砂量は0.70である。②4次河道上流端に補助基準点を設定すると、3次流域および4次河道の貯留量がそれぞれ0.24, 0.0456で、末端流砂量は0.714となる。③3次河道上流まで計算点をふやすと、2次流域、3次河道および4次河道の貯留量が、それぞれ0.20, 0.032, 0.046で、末端流砂量は0.722である。④すべての合流点で計算をすすめると、末端流砂量は0.736となる。もっとも、一般の河系は複雑で、土砂源も広く分布するから、この程度の差は議論の対象とならないかも知れない。

第2に、同じ貯留常数が算出されるとしても、流出土砂源のあり方が考慮されないために、計算点の設定方法によっては、実態と大きく相違する流砂量を計算することがある。たとえば、先の河系において、土砂源の0.5が1次流域に、残りが2次流域の残留域にあったと考えると、1次流域から2次河道への、2次流域から3次河道への、3次流域から4次河道への流出量がそれぞれ0.33, 0.80, 0.76で、末端流砂量0.70との実効貯留係数が算出される。ところが、すべての合流点に計算点を設定すると、各流砂量はそれぞれ0.415, 0.888, 0.852, 0.801と計算される。末端流砂量が実際の値どおりに計算されるのは、従来からの流出率と同じく、対象全流域を1まとめにした場合だけである。

このような不十分さは、単位流域を次数で斉一にすること、各貯留係数を各次数流域内における移動可能土砂量を基礎に算出することにより克服できよう。

流域貯留常数、河道貯留常数は普遍的なものでないから、この手法が使用できるのは、過去の洪水時の土砂生産・流送に関する詳細な検討によってこれらを求めうるばあい限定されることは言をまたないが、さきに述べた優位性をもっている。

しかし、考え方に対する根本的な疑問もある。

流出対象土砂量の多寡にかかわらず、同一流域では常に同一の流出率をもつのか？

## 2. 貯留量による逐次計算

打荻珠男は、彼の砂防計画論の中でつぎのような流出土砂量算定手法を提案している<sup>46)</sup> すなわち、①流域を主川筋・支川筋を横断する小流域「土砂生産単位域」に分割する。②この単位域内に存在する土砂源から単位域内の川筋上に設定する「代表流出点」への流出土砂量「流出生産量」を推定する。(ここに、降雨の流出係数に相当する流出率の概念が入っている。)この量の最上流代表点からの累加値を「仮定流出量」と呼ぶ。③各流出代表点間の河道に安全に貯留できる土砂量を別個に推定し、

上流端から累加する。これを「安全河道調節量」と呼ぶ。④假定流出量と安全河道調節量の差が、各代表流出点を1洪水期間中に通過する土砂量であり、これを「仮想流出量」と呼ぶ。⑤河道を土石流区域と掃流区域に分画する。各区画の始点においてはその点の水利条件で決まる「水理的運搬量」を、その他の点では始点の水理的運搬量に各始点で0とした「仮想流出量」を合算した量を「想定流出量」と呼ぶ。⑥各代表流出点の想定流出量と水理的運搬量の差が「仮想超過流出量」であり、この処理の施設計画を立案する。

⑤で、土石流区域、掃流区域に分画したあと、各区画の始点での流出量が水理的運搬量にまで下がることは理解できない点である。この操作のために、想定流出量是不連続となってしまう。④の「仮想流出量」が従来の意味での洪水時流出土砂量であろう。

天竜川のばあい、貯留量が崩壊土砂量あるいは流出可能土砂量に対する比率で決まるとしていたのに対して、この論では、河道条件として個有の貯砂能力が生産、流出土砂量の多寡にかかわらず与えられるとする。

この区間貯留量（「安全」か否かは別にして）を流出土砂量から控除しつつ逐次計算する手法は、真名川流域砂防計画で実行されている。<sup>47)48)</sup>

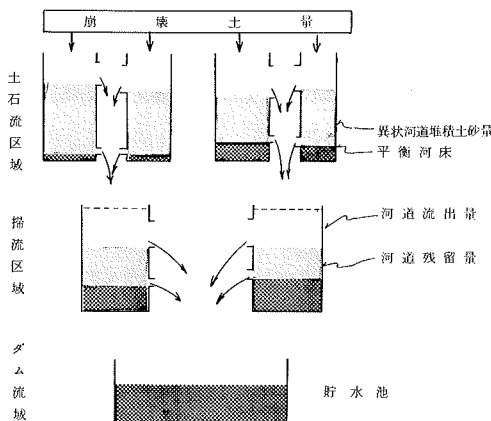


図-6 真名川ダム貯水池流入土砂量算定における土砂流出過程のモデル

対象流域を柿のいう非活動性河川＝休眠性河川と定義づけたうえで、流域末端に存在するダム貯水池流入土砂量推定の考え方として、図-6のモデルを設定している。つまり、土石流区域、掃流区域にかかわらず、異常洪水のとき、各河道区間の有する土砂貯留容量あるいは限界までの流出土砂量は各区間に残留し、超過量のみが下流区間に流下する。そして、この堆積土砂量、河道残留土砂量は休眠期中の中小洪水で流下し、つぎの異常洪水時までには貯留容量は回復するものとする。上流区間から逐次流出対象土砂量と貯留容量の差を累計すれば、各合流点および流域末端部での流出土砂量が計算できるとする

ものとする。

貯留容量については1965年9月出水後の河道堆積調査<sup>49)</sup>を基礎に推定した河道堆積量（表-10の④）が、貯留限界土砂量でもあるとしている。

ところで

$$⑤ = ① + ② + ③ + ④$$

$$\text{最大洪水流砂量} = ⑤ + ⑥ - \text{貯留限界土砂量}$$

（⑥は上流区間よりの洪水流砂量）

(29)

表-10 真名川流域砂防計画における諸土砂量総括表

	①	②	③	④	⑤	流域末端最大洪水流砂量	
	1965年 崩壊残土量	拡大崩壊 見込量	新規崩壊 見込量	河道 堆積量	流出対象 土砂量	A	B
笹生川ダム流域	788	3,151	5,865	5,088	14,892	9,955	3,125
ダム～雲川流域	527	2,108	4,083	4,517	11,235	7,914	2,889
温見川	331	1,426	2,614	3,865	8,237	4,859	1,731
熊河谷	102	404	741	477	1,724	1,263	869
雲川	77	323	593	931	1,925	1,186	249
真名川	458	1,832	3,361	2,705	8,356	5,774	2,774
真名川ダム全流域		24,684		12,495		20,996	8,510

(単位は $10^3\text{m}^3$ )

であるが、貯留限界土砂量=④としているため、さらに当然のことながら⑤>貯留限界土砂量となるので、流域末端流砂量=山腹からの各種崩壊量総計となってしまう。モデルからいえば、最大洪水時には安定河道以上の堆積量はないから、

$$\text{最大洪水流砂量} = \text{①} + \text{②} + \text{③} + \text{⑥} - \text{④} \quad (30)$$

とならなければならない(表-10のB)。真名川ダム流域のばあい、算定表での流出率が85%であったのに対し、35%となる。また、算定表では、④×2>⑤+⑥のばあい最大洪水流砂量=④としているが、これは供給土砂量が現堆積土砂量に満たないばあい現堆積土砂量が最大洪水流砂量を形成することであり、モデルとは全く合わない。

1965年9月奥越豪雨時に、真名川流域では山地崩壊土砂量 $8 \times 10^6\text{m}^3$ をはるかに凌ぐ $1.2 \times 10^6\text{m}^3$ の河床堆積土砂量が推定されており<sup>49)</sup>、溪床堆積物起源の流出土砂量を想定しなければならなかったこと、本流域の砂防計画が笹生川ダム、真名川ダムの治水機能維持を第1の眼目とし、貯砂・扞止によるダム設計利用期間内の流入土砂量軽減を基本構想としている<sup>47)</sup>ことなどから、興味あるモデルを生かしきれなかったのだと考える。

貯留限界土砂量とか安全河道調節量といったものをいかに想定するかはさておき、そもそも、流送土砂量は供給土砂量と堆積可能容量が先在して決まるものでなく、河道の流送能力を超える土砂供給があったばあいに土砂は堆積貯留の過程に入るのである。打荻はそれを水理的運搬量と呼んだが、土砂水理学はあらゆる条件での土砂運搬量を算定できるまでには至っていないし、たとえそれを可能とする流砂量式が現れても、流域全体、河道網全体といったマクロな対象を取り扱うにはあまりにミクロで煩雑な計算を繰り返さねばならぬことになる。

### 3. 河道の「堆積強度比」による推算

順序としてここで触れるべきものか否かは疑問であるが、河道堆積状況を基礎に洪水時流出土砂量

の推算を試みた例があるので考察を加える。

常願寺川で、従来採用してきた最大洪水時流出土砂量を、1969年8月洪水時の河床変動調査の結果を基礎に、概略つぎの手法で検討している<sup>50)51)</sup> (図-7参照)

①河道A～Fの洪水時堆積増加量を $\mathcal{D}_A \sim \mathcal{D}_F$ とする。

②最上流域たとえば流域Aでの生産土砂量(打荻のいう流出生産量)は、 $\mathcal{D}_A + \alpha_1 \mathcal{D}_D + \alpha_2 \mathcal{D}_E + \alpha_3 \mathcal{D}_F$ である。

③D～Fの高次河道には、自己流域起源の土砂は堆積しないとする。

④たとえば、 $\mathcal{D}_D$ のうちA, B流域起源の土砂量の比は、河道状況、河床材料の類似する河道Dへの接合点に近い河道区間A', B'における単位河道面積あたり堆積量の比(堆積強度比)に等しいとする。

⑤②～③を表現する連立多元方程式を解けば各流域での生産土砂量を得る。

⑥これらの和と河道A～Eにおける自然河道調節量の和の差が、計画基準点を通過した洪水時流出土砂量である。

⑦自然河道調節量は、堰堤の存在しない河道では堆積量そのものであり、堰堤の存在する河道では、その影響の及ばない区間での単位河道面積あたり堆積量に全河道面積を乗じた値とする。

⑧2度の洪水における流出土砂量が、雨量とlog-logの関係があるとして、計画雨量を外挿すれば、最大洪水時流出土砂量を得る。

ところで、このモデルでは、第1に河道Fを越えて流下した土砂量が考慮されない欠点がある。第2に、④の仮説がこのモデルの特質であるが、ある河道区間の堆積量は流入土砂量と河道の有する土砂流送能力から決まると考える筆者には理解できない。このモデルに従えば、合流点近くの土砂流送能力をしのぐ流入土砂のない支流が合流するばあい、この支流からの流出土砂量は下流河道区間の堆積量に寄与しないことになる。第3に、⑥で各流域に配分された生産土砂量を再び合算するのであれば、②～⑤の手順はまったく意味を持たない。冒頭に述べた疑問はここに発する。すなわち、⑥は対象流域全体を1単位とした扱いかいであり、堰堤が現在ほど多くない時点で鷺尾が推定した最大洪水流砂量を検証するために、複雑な⑦の手順を採用しているが、現地点の流域条件での河道調節量は結局河道堆積量総量に外ならず、現時点での洪水時流出土砂量は、 $\mathcal{D}_F$ となる。これは木村の「実測法」であり、⑧の手続きも「最大計画雨量に結びつけて訂正する」<sup>1)</sup>ための1手法と位置づけられるに止まる。

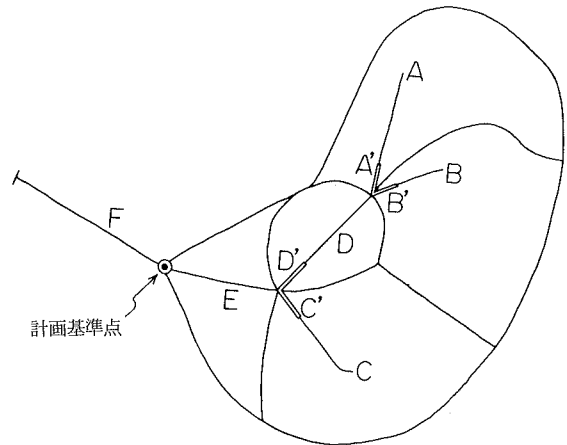


図-7

#### IV 結 語

従来の砂防計画における基本土砂量決定手法のうちに、土砂流出現象がいかに理解されてきたかを概観した。ここに考察した手法の採用されたことが、その時点での現象理解の状況をそのままに反映したものではないだろう。多様な交錯する因子に支配される不安定な現象を対象として、定量化可能な範囲にある知識を集約することによって、計画の科学性を獲得する努力が積み重ねられてきたものだと考える。

さて、ある地点での流出土砂量を推定しようとするばあい、最も理想的には、山腹での土産土砂量の多寡、その発生個所と頻度、生産土砂量の流送土砂量への変換、河道へ供給された土砂量の貯留土砂量への変換、堆積土砂量の流送土砂量への変換のそれぞれの割合、その発生個所など、山体を離れ懸案地点に至るまでの土砂の挙動のすべてが、流域全体にわたって追尾できることである。しかし、それは到底無理なことである。さらに、土砂の挙動の各部分において、現象を支配する因子があまりにも多岐にわたり、しかも相互に輻輳した関連を有する。そのために現象は再現性に非常に乏しい。

このような土砂流出現象を対象とするばあいに重要なことは、第1に、現象に支配的な要因である①流送される条件にある土砂量、②流送力および③流送を阻止する種々の抵抗を、たとえ初歩的であっても同じ程度の正確さで評価することである。3つの要因の関連で決まるはずの流出係数なども、考察した限り、そのような扱かいがほとんどされていない。Ⅲで考察した、土砂の貯留過程を考慮に入れた取り扱かいにおいても、貯留係数や貯留量を3つの要因の関係でとらえることができずに、1回の事象で現われた貯留量、その①に対する割合のみが再現すると期待した取り扱かいに終わっている。

3つの要因は、時間的にも空間的にも変動するものであるから、確率論的または統計的取り扱かいを導入することが、土砂流出量の的確な評価に必要な第2の点である。空間的変動の統計的扱かいには、Ⅲ-1で考察した天竜川のばあいのように、谷次数で河道を類型化するのが適当であろう。そうすることによって、武居有恒が論じた<sup>52)</sup>「下流の許容する流砂量に対して上流端から下流端まで等流砂能力」となるような「勾配計画」としての砂防計画にむかって一步を進めることができよう。ただ、極端に統計的、確率論的に扱かうことは対象流域の特徴を看過することになる。平尾公一が論じた<sup>53)</sup>「これらの関係要素が水系として、どのような組み合わせになっているか？その組み合わせの特徴が河川の特徴であり、これを検討することが砂防計画を検討する出発点となる。」との観点を逸してはならないだろう。また、時間的変動の確率論的取り扱かいにより、Ⅱ-4で考察したように、年平均流出土砂量と洪水時流出土砂量を、別個のものとして算出基礎を異にして評価する必要はなくなり、1つの連続のうちに評価できるはずである。

さて、確率水文学として流砂量を算定する方法は、3要因のうち②に重点がおかれ、①のいかにかわらず(③は限界掃流力の形で入ると考えても)、同一の流砂量が現れるとの期待に立ったものである。したがって、土砂流出量の的確な評価という点で一短を残す。けれども、河道での現象が



流水の作用で進行するものである限り、②の評価において水理学的知識を織り込まなければならない。

現在の到達点に至るまでに積み重ねられた多くの努力を十分評価しながら、その成果を踏まえて、土砂流出の現象が進行する過程を、うへの3つの要因をそれぞれの確に、しかも統一的に表現することによって把握する手法を展開することが、よりよき砂防計画のために必要である。

小論を展べるにあたり、多くの方々のお世話になった。ここに記して深甚の謝意を表したい。

京都大学防災研究所芦田和男教授には、種々懇切なご指導を頂いた。京都大学農学部武居有恒教授には、絶えず暖かい励ましを受けた。在インドネシア政府渡辺正幸氏のご好意により、本文には盛り込めなかったものを含めて、多くの資料、文献に目を通すことができたこと、種々ご助言を頂いたことは、本文を構成するうえで不可欠であった。東京大学農学部山口伊佐夫助教授、四国地方建設局天田高白氏、建設省土木研究所池谷浩氏からは、有益な資料のご送付を受けた。山口先生ならびに中部地方建設局中村稔氏には、小生の愚問に適切なご解答を頂いた。

## 参 考 文 献

- 1) 木村弘太郎：砂防計画樹立に対する構想，河川，1951.
- 2) 枸杞芳彦：砂防計画の考え方，新砂防№83，1972.
- 3) 神戸市：神戸水害誌，1939.
- 4) 矢野義男：砂防調査および計画，山海堂，1962.
- 5) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準（案）計画編第4章，山海堂，1976.
- 6) 吉野川砂防工事事務所：吉野川水系砂防調査報告書（第1回），1974.
- 7) 芦田和男・奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京都大学防災研究所年報第17号B，1974.
- 8) 新沢直治：崩壊と堆積，新砂防№9，1952.
- 9) 平尾公一：砂防計画（その1）土砂の生産および移動，土木技術資料12-4，1970.
- 10) 新沢直治：砂防計画試案，新砂防№10，1953.
- 11) 梶本吉郎：28年6月の大災害とその対策（特に珍珠川流域について），新砂防№16，1955.
- 12) 防災ハンドブック編集委員会：防災ハンドブック第5編山地防災，技報堂，1964.
- 13) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準，1958.
- 14) 柿 徳市：砂防計画論—砂防河川の2つのタイプと砂防計画方式について—（学位論文），1961.
- 15) 柿 徳市：砂防計画に関する2・3の問題点について，河川，1958.
- 16) 柿 徳市：流砂量と砂防計画について，新砂防№31，1958.
- 17) 村野義郎：豪雨型山くずれの研究（第2報）—天竜川上流域について—，新砂防№64，1967.
- 18) 打荻珠男：ひと雨による山腹崩壊について，新砂防№76，1971.

- 19) 西畑勇夫・北村 恵・花谷郁生：山地の崩壊から流出する土砂量の推定（英文），土木学会論文報告集 № 257，1977 ほか
- 20) 河川工学便覧（上巻），コロナ社，1954.
- 21) 六甲砂防工事事務所，柿砂防技術事務所：芦屋川，都賀川における砂防計画報告書，1973.
- 22) WALLIS, J. R., ANDERSON H. W.: Limitation in Sediment Network Design for Regional Analysis of Sediment Problems, U. S. Forest Service Review Draft, 1964.
- 23) WILLIAMS, J. R., BERNDT H. D.: Sediment Yield Computed with Universal Equation, Proc. A.S.C.E. Vol. 98, № HY12, 1972 より引用
- 24) 建設省河川局砂防課：砂防ダムの堆砂，第20回建設省技術研究会報告，1967.
- 25) 河川局砂防課，土木研究所砂防研究室：砂防ダムの堆砂・流送土砂量に関する研究，第21回建設省技術研究会報告，1968.
- 26) 田中治雄，石外 宏：貯水池の堆砂量と集水区域の地形および地質との関係について，土木学会誌 36-4，1951.
- 27) 田中治雄：我国における貯水池の埋没に関する応用地質学的研究，電力技術研究所報告，土木 57011号，1957.
- 28) 渡辺和衛：島根県・広島県江川流域の治山治水に関する調査報告，地質調査所月報 10-9，1959.
- 29) 渡辺和衛：静岡県大井川上流治山治水調査報告，同上 10-10，1959.
- 30) 渡辺和衛：結晶片岩地域における山地の堆砂現象について，同上 13-6，1962.
- 31) 渡辺和衛：石川県手取川上流治山治水のための堆砂量調査報告，同上 12-4，1961.
- 32) 石外 宏：貯水池に於ける碎屑物の堆積作用に関する研究，電力中央研究所技術研究所報告 № 66011，1966.
- 33) 難波宣士，川口武雄：山地流域からの土砂流出に及ぼす諸因子とくに森林の影響，林業試験場報告第173号，1965.
- 34) FERREL, W. R.: Development of a Methode to Predict Erosion Rate, 1959.
- 35) 山口伊佐夫：森林保全工学，農林出版，1970.
- 36) 東北地方建設局岩手工事事務所：胆沢川砂防調査報告書，1975.
- 37) 江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究，土木研究所報告129号，1966.
- 38) 宮田辰男：砂防基本計画の一考察—鬼怒川流域を中心として—，河川，1959.
- 39) 藤村敏夫：常願寺川砂防基本計画に関する2・3の考察，北陸地方建設局管内技術研究会資料，1959.
- 40) 北陸地方建設局河川計画課：常願寺川砂防基本計画における基本土砂量の算出根拠の説明資料，「砂防基本計画に関する参考資料」所収，1966.

- 41) 鷺尾塾龍：荒廃河川処理の一例としての常願寺川改修計画，新砂防№6，1951.
- 42) 建設省倉吉工事事務所：大山砂防調査第一次報告書
- 43) 地学辞典，平凡社
- 44) 建設省天竜川上流工事事務所：砂防基本計画説明資料，1971.
- 45) 大枝市朗，鈴木徳行，中村 稔，宮本 登：天竜川における土砂流出について（特に大洪水時における土砂流出について），第24回建設省技術研究会報告，1972.
- 46) 打萩珠男：砂防計画について，新砂防№77，1970.
- 47) 越美山系砂防工事事務所：真名川砂防基本計画（案）説明資料，1974.
- 48) 越美山系砂防工事事務所：真名川ダム流入土砂量計画書，1974.
- 49) 中部地方建設局越美山系砂防工事事務所：砂防調査報告書 vol. 6，1969.
- 50) 広瀬清臣，高梨和行：常願寺川の最大洪水流砂量に関する一考察，北陸地方建設局管内技術研究会資料，1970.
- 51) 五十嵐武，広瀬清臣，高梨和行，丸山明男：昭和44年8月集中豪雨における常願寺川の土砂流出について，第24回建設省技術研究会報告，1972.
- 52) 武居有恒：砂防計画に想う，新砂防№50，1963.
- 53) 平尾公一：砂防調査のまとめ方，土木技術資料11-5，1969.

