

# 研究展望

## 土砂の生産・流出現象と災害

### STATE OF THE ART OF RESEARCH OF SEDIMENT YIELD, TRANSPORT AND RELATED HAZARD

芦田和男\*

By Kazuo ASHIDA

#### 1. はしがき

わが国では、地形、地質、気象条件から崩壊や土石流を始め斜面の侵食現象はきわめて活発で、河川への流出土砂量は多く、洪水時における河床の変動は大きい。

一方、人間の生活空間は山地流域や河川周辺に広がっており、土砂の生産・流送過程の影響を直接受けやすいために、土砂による災害は多い。その形態は、侵食による農耕地土壌の流亡から崩壊・土石流災害、河道・河岸の侵食、土砂流出による河床上昇のための洪水・土砂氾濫、さらには流砂の不均衡による河床変動や貯水池による濁水長期化現象に至るまでさまざまである<sup>1)</sup>。

このように、わが国は、自然的・社会的条件からみて土砂災害にはきわめて弱い体質を有しているが、1960年代以降のいわゆる都市化現象は、土砂災害危険地域における人口・資産の増大と、土砂の生産・流送条件の変化を通じて、それにさらに拍車をかけている。

1982年から1986年までの5か年における土砂災害についてみると、土石流によるものが981件、地すべりによるものが565件、がけ崩れによるものが3283件であり、それらによる死者数はすべての自然災害による死者数のおよそ6割を占めている。また、ダム堆砂や下流域の河床低下、さらには海岸侵食など流砂の不均衡による現象とそれによる障害は広範囲に生じている。

こうしたことから、土砂災害の予知と対策は現在重要な課題となっている。その基礎をなす土砂の生産・流送現象に関する研究は近年著しい進展を遂げてきた。まず、

その中で著者が特に重要であるとする事項を中心として研究の概況を述べ、さらに、課題ごとにそれを具体的に考察するとともに今後の研究動向を模索することにする。

#### 2. 土砂の生産・流出のシステムと砂礫の移動形態

土砂の生産にはいろいろの形態があるが、それらは図-1に示すような過程を経て流出する。すなわち、生産された土砂礫は一部ウォッシュ・ロードとして流出するものを除いて貯留と運搬を繰り返しながら流出する。崩壊や土石流が発生するような豪雨時には、生産土砂量は河道の輸送能力を大幅に上回っており、河道内に大量に堆積貯留される。これはその後における河道侵食による土砂の生産源である。このように、土砂の流出過程は、生産、輸送および堆積（貯留）からなる1つのシステムを構成している。

また、土砂礫の移動形態についてみると、山地流域では地形勾配、粒径および流量によって各種の移動形態が現われる。勾配がある限界値より大きくなると砂礫の移動形態は各個運搬から集合運搬へ移行する。前者では、粒子に作用する抗力や揚力等の流体力が粒子運動の原因であるのに対して、後者では、砂礫と水とが混合して一体となり、それに作用する重力成分が流れの原因であって、両者の運動機構は異なる。また、両者の中間には、図-2に示すように、下層部の集合流動層と上層部の水流層とからなる遷移的な領域が存在する。これは、集合流動層があたかも掃流砂層の厚さが増大したような形を示すため、掃流状集合流動ともよばれる。また、土石流堆積の下流側に発生する土石流はこの形式の場合が多

\* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所  
(〒611 宇治市五ヶ庄)

Keywords: erosion, sediment yield, debris flow, sediment transport, sedimentation

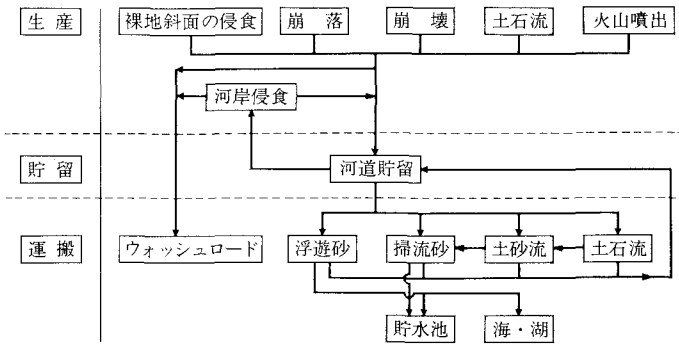


図-1 土砂の生産・流出のシステム

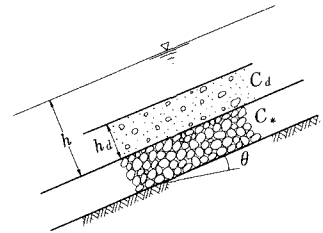


図-2 掃流状集合流動

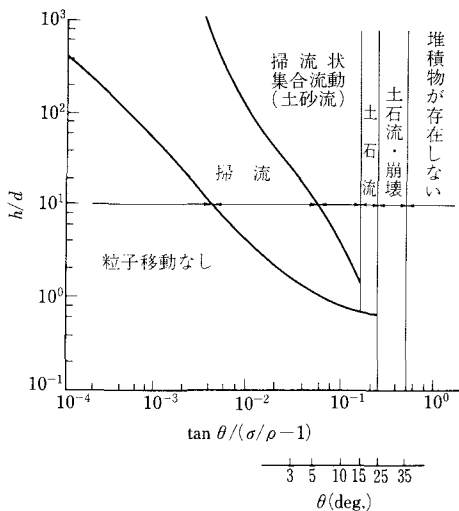


図-3 土砂礫の各種移動形態の発生領域

く、土石流ともいわれている。

それぞれの移動形態の発生領域は、流体の密度や砂礫の内部摩擦角によって若干変化するが、非粘性材料の場合については、勾配と相対水深の平面上で図-3のように区分される<sup>2)</sup>。

土砂による災害現象の予測や対策のためには、図-1のシステム内に含まれる諸現象を解明し、定量的な関係を明らかにすることが重要であって、今までに、その線に従って多くの研究がなされてきた。まだ未解明の点も少なくはないが、ともかく、図-1の流れに従って、流域内における土砂の移動を追跡しようとする試みがなされるまでに至っている。以下、そのような立場からの研究を中心に述べることにする。

### 3. 土砂生産・流送に関する研究の概況

土砂生産・流送には多くの要因が複雑に絡み合っており、一般的な理論の構築は難しい問題である。

したがって、実際的な目的のためには、従来どうしても現地の資料や経験の集積のみが重視されがちであった。しかし、近年、この分野に水理学、砂防学、林学、地形学、地質学等広範囲の分野の研究者が大きな関心をもつようになった結果、メカニズムについての理解もかなり進んできたように思われる。以下、その概況について述べよう。

#### (1) 現地観測による実態の究明

山地における土砂の生産と流送過程に関する現地観測が進み、その実態はかなり明らかになってきた。土石流についてみると、山間部でしかも豪雨時に発生する現象であるので、以前には目撃記録が断片的にあるに過ぎず、幻の災害ともいわれていた。これに対して、奥田らは、

- i) 土石流の発生、発達、減衰、停止の動的経過を一貫して追跡すること、
- ii) 土石流の模型実験やシミュレーションなどの研究に必要な要素を定量的に測定すること、
- iii) 観測者の安全、作業の軽減のため自動化、遠隔測定化を主体とすること、
- iv) 定期的点検が簡単で、悪天候下でも確実に動作すること、

を目標として、新しい土石流の計測システムを開発し、1971年、焼岳において初めて土石流の流動の実態をVTRに収めることに成功した<sup>3)</sup>。これはその後の土石流研究進展の大きな契機となっている。その後、土石流の総合的観測が継続的に実施され多くの成果が得られている<sup>4)~6)</sup>。

同様なシステムは常願寺川、神通川足洗谷、浦川金山沢、木曾川滑川、桜島野尻川ほかで実施され、数多く土石流の観測に成功している。

一方、神通川水系足洗谷流域においては京都大学穂高砂防観測所によって、山地流域における土砂の生産・流出現象の総合的、系統的な観測研究<sup>7)</sup>が1965年以来現在も継続して実施されており、多くの有用な知見が得られている。たとえば、山地河道にはステップとプールよ

りなる階段状河床形態が広く存在しており、これが、出水と土砂の流出過程に大きな影響をもっていることを詳細な観測資料によって具体的に示したのは本観測研究が初めてであると思われる。これはその後の山地河道における流砂の研究に大きな刺激を与えた。

## (2) 土砂の生産・流送に関するメカニズムの究明

土砂の生産・流送の問題に関して以前には経験的な取扱いが主流をなしていたが、最近においては、その過程における諸現象のメカニズムの解明を通じて普遍的な理論を追究しようとする態度が重視されるようになってきている。

土石流についてみると、高橋<sup>9)</sup>が砂礫分の多い渓床堆積物上に表面流が生じて発生する土石流の発生条件を理論的に明らかにし、また、Bagnoldの考え方を土石流の運動解析に適用して以来、土石流の発生・流動機構に関する研究はきわめて活発に行われるようになってきた。また、土砂礫の移動形態に、土石流のような集合運搬と掃流砂のような各個運搬のほかに両者の中間的な遷移状態である掃流状集合流動（土砂流）といわれる形態が存在することが、実験的に見出され、その機構や流砂量式も明らかにされている<sup>9)~11)</sup>。

地面侵食量式に関しては、従来実測のデータを用いた経験的な手法が主体をなしているが、土砂水理学的手法を適用しようとする努力も続けられている。

山地河道における流砂に関する研究は最近多くの研究者の注目を集めるようになってきた。山地河道は、生産源から供給された土砂を一時的に貯留して、河川下流部へ流送する遷移的な場であり、かつ、河道の縦横断形状は不規則性に富み、河床、流路変動や流砂の特性も複雑である。生産された土砂礫の粒度組成は大粒径の石礫からシルトや粘土のような微細粒子まで広範囲に分布している。山地河道はこのような土砂礫が水流によって分級を受けながら流送される場所である。この過程において、河床には大粒径からなる顕著なアーマ・コートが形成されるが、急勾配の河床においては、アーマ・コートの発達と同時にステップ・プールの段階状の河床形が形成されることが多い。以上のように、急な勾配、広い粒度分布、特徴的な河床形態をもった山地河道を対象として、河床および河道の変動と流砂の機構に関する研究が活発に行われ、興味ある知見が得られつつある。

## (3) 土砂輸送の不均衡による地形変化の予測と流域内における Sediment Routing への挑戦

土砂の生産および輸送は時間的、空間的に変動する現象であるので、その不均衡による地形（河床）変動は本質的に避けがたい。最近では、都市化現象やダム築造などの人為的影響がこれに加わり、地形変動はきわめて複雑となっている。

わが国の河川では、ダム堆砂とそれによる河川の中下流部への流出土砂量の大幅な減少、1950年代後半から1960年代にかけてのいわゆる高度経済成長期において特に活発に行われた河川砂利の採取や山地、山麓周辺の開発の影響などのため流域の土砂環境は大きく変化し、水系の各所でさまざまな問題が提起されるようになった。山地や山間部での土砂害の増大、ダム貯水池の堆砂、河川砂利の枯渇や河床低下さらには海岸侵食などである。このため、水系における流水の管理とともに流砂の管理の必要性がましてきた。それを行うためには、土砂収支を山地から海岸まで一貫した立場から検討することが必要である。このような背景のもとに、砂防、河川、海岸分野の研究者が集まって、土砂の流送・運搬に伴う自然環境の変化に関する総合的な研究が行われた<sup>12)</sup>。この研究は、わが国における河川・海岸部における変動の実態を分析し、それを土砂収支の立場から総合的に検討するとともに、解析的な予測法やその問題点などについて考察しているが、この種の研究の出発点ともなる重要なものとして位置づけられる。

土砂収支に基づく地形変化の予測は、原理的には与えられた降雨条件に対して流域内において生産される土砂量とその粒径分布を時間的、場所的に予測し、これを流砂量式と流砂の連続式を用いて河川中流部から下流部さらには海岸部へと追跡することに帰着する。このような手法は砂防施設の効果や貯水ダムの土砂流送に及ぼす影響の定量的評価を可能にするもので、すでにいくつか行われその有用性が実証されている。たとえば、高秀ら<sup>13)</sup>は、土砂移動を水系一貫して追跡する「土砂動態解析システム」を開発し、天竜川水系に適用して、大災害をもたらした昭和36年災害時における土砂の移動の状況やその後長期間にわたる河床変動を解析して実測値と適合する結果を得ている。また、解析を通じて、砂防ダムや治水構造物の効果を定量的に評価している。

もちろん、この手法には改良すべき所が少なくなく、現状では、Sediment Routing への1つの挑戦ともみなされるものではあるが、天竜川での適用結果等からみて、今後の大きな未来が約束されており、その完成に向かったのさらなる努力が期待される。

## (4) 海外における研究状況

流砂に関する問題は国際水理学会においても常に中心課題の1つであって、多くの研究が行われてきており、いちいちここでは取り上げないが、礫床河川を対象とした研究についての国際ワークショップの開催などは新しい傾向であり、その成果が取りまとめられている<sup>14), 15)</sup>。

日本を含む環太平洋地域はいずれも造山運動が活発で急傾斜地も多く、崩壊や土石流災害をはじめ、侵食、堆積による災害が多発するという条件をもっている。これ

らの地域を中心として、砂防学、水理学、林学、地形学、地質学等の研究者が定期的集まって、侵食と土砂輸送に関する国際シンポジウムを開催しており、今までに数多くの研究成果が発表されている<sup>16)~18)</sup>。

一方、中国には国際泥砂研究センター (International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation (IRTCES)) が設立されており、いろいろな活動を行っているが、特に3年に1回開催する River Sedimentation の国際シンポジウム<sup>19)~21)</sup>には世界各国から数多くの研究成果が提出され注目されている。

以下、各課題ごとに考察していこう。

#### 4. 地面侵食

表流水による地面侵食量は基本的には流水の掃流力と土壌の侵食抵抗力との関係で定まる。

降雨量のうちで侵食に関係する表流水成分の割合は、降雨強度や地表の状態 (植生状態や土壌の特性など) に支配される。また流水の分布特性も斜面の形状や Rill の有無およびその分布状況に関係する。したがって、掃流力の算定は非常に難しい。

一方、土壌の侵食抵抗は、土壌の種類特に粘着成分の含有率に支配される。また、凍上融解の作用や雨滴の衝撃力は表層の粒子を剝離して侵食抵抗を減少させる。このように、侵食抵抗の予測も難しい問題である。以上のことから、地面侵食量を一般的に予測する方法はまだ明らかになっていない。

侵食量の予測には、実用的な立場から試験地の実測資料に基づく経験的な方法が広く用いられてきた。その代表的なものはアメリカ合衆国で畑地を対象として開発された Universal Soil Loss Equation (USLE)<sup>22)</sup> であり、次式で示される。

$$A = 0.244 RKLSCP \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $A$  : 土壌損失 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )、 $R$  : 降雨侵食要因、 $K$  : 土壌の受食性要因、 $LS$  : 地形要因、 $C$  : 作付方法に基づく要因、 $P$  : 侵食防止の実施による要因であり、それぞれの要因の計算法や基準値がアメリカ合衆国全土にわたって細かく定められている。日本においても試験地の資料を用いて同式の適用を図る研究が種田<sup>23)</sup>によってなされている。

一方、雨滴の剝離作用に関する研究や表流水の掃流力から侵食量を求める水理学的手法に関する研究は以前から行われているが<sup>24)、25)</sup>、最近貯水池の堆砂量や濁質量の予測の問題に関連して、この方法は注目を集めており、水理学と水文学の接点の問題として土木学会水理委員会でも取り上げられ土砂生産に関する研究小委員会 (河村三郎小委員長) が設けられて研究が続けられている。

芦田・江頭・金屋敷<sup>26)</sup>らは、降雨量から斜面上の表

流水の流量を求め、さらに Rill の分布を与えて掃流力を算定し、これと侵食速度との関係から侵食量を推定する方法を提案しており、河村<sup>27)</sup>は斜面上の Rill の流量から掃流力を算定し、Brown 型の流砂量式を適用し、さらに実測資料に基づいて侵食量式を提案している。この式には、粘土の含有率や分散比などから土壌の受食性を評価する手法が導入されており、一般化が図られている。

澤井<sup>28)</sup>は Rill の発達過程に関するシミュレーションを行い興味ある結果を得ている。

これらの研究では粘性土の侵食限界や侵食速度を的確に評価することが最も重要であるが、それについての研究も行われている<sup>29)、30)</sup>。

以上の取扱いにおいては、降雨時における斜面上の流水の挙動や土壌の侵食抵抗についてはかなり思い切ったモデル化が行われているが、その実態については必ずしも明確ではない。したがって、今後表流水の挙動について実測等を含めて十分な検討を進めていく必要がある。また、土壌の侵食抵抗の評価についても難しい点がいろいろある。裸地斜面の侵食抵抗はいろいろな要因に支配され、場所により大きく変化するが、これをどのような指標で評価すれば合理的でありかつ実用性をもつものにするができるか、また、裸地の形成直後には、侵食抵抗が比較的小さくて侵食が起こりやすく、時間の経過とともに斜面の粗粒化や植生の回復などのため侵食抵抗が大きくなることが予想されるが、こうした現象をどのように評価するか、など今後の研究の進展に待つところが多い。

#### 5. 土石流

##### (1) 土石流の実態

現地観測や調査によって土石流の実態が明らかになってきた。その主な点は次のようである。

1) 土石流の先端部は段波状になっており、そこには図-4に示すように巨石や大きな礫が集中している。しかし、時には石礫を伴わない場合もあって、前者を石礫型あるいは砂礫型土石流、後者を泥流型土石流と区別している。

2) 砂礫型土石流では、先端部が通過してしばらくは石礫を多く含む部分が続くが、やがて、細粒分が多く流動性の高い後続流に移行していく。

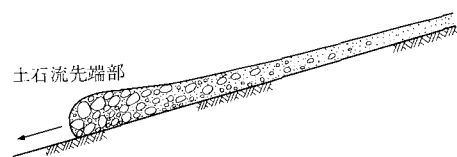


図-4 土石流の縦断形状

3) 土石流の継続時間は、谷の大きさや雨の継続時間によっても異なるが、先端部から後続流まで含めて30分から1時間程度のもが多い。

4) 土石流の流下速度は条件によって種々あり、20 m/sにも達する高速のものもあって、先端部の巨礫の存在と相まって大きな破壊力を示す。泥流型土石流は砂礫型のものに比べて流動性が高く、流速係数は前者で10~20、後者で1~5程度である。

5) 土石流の容積濃度は20~50%程度であって、水と砂礫とが一体となった集合流動体である。

6) 土石流の到達距離は地形条件や流量規模によって異なるが、数km以上に及ぶことも多く、山腹崩壊の場合と著しく異なる。

7) 土石流の発生地点の最上流部には崩壊の存在しているものも多く、崩壊から土石流へ移行する形態が存在することが知られる。しかし、崩壊がなく、ガリ底に堆積していた土砂が動き出したとみられる土石流も多い。この場合の土石流の発生地点の勾配は15~30°であり山腹崩壊の発生する勾配に比して緩い。

8) 土石流は勾配が急に緩くなりかつ幅が広がった部分に流出すると堆積して土石流扇状地を形成するが、その堆積勾配は4°以上であることが多い。

(2) 土石流の発生機構

土石流は、土、砂、礫、転石といった固体分と水とが一体となった混合物の重力に基づく流動現象であるが、その発生原因を大別すると、

- 1) 溪床の堆積土砂が流水の増加によって流動する場合、
- 2) 山腹崩壊土塊に水が供給されて土石流に移行する場合、
- 3) 地すべり土塊が流動化する場合、
- 4) 天然ダムの欠壊
- 5) 火山活動による場合

このうち、高橋<sup>8)</sup>は図-5に示すような様な溪床堆積物の層に飽和浸透流と表流水が存在するときの土層の安定条件から土石流発生限界条件式を求めている。すなわち、土石流が発生するためには移動する層の厚さ  $a_L$  が堆積層の代表粒径  $d$  よりも大きくなければならない。

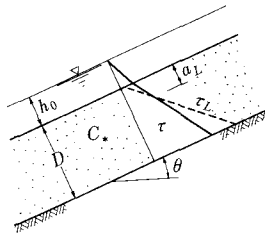


図-5 堆積層内の作用せん断力 ( $\tau$ ) と抵抗力 ( $\tau_L$ )

また、 $a_L$  が表流水の水深  $h_0$  に比べてかなり小さいときには砂礫は全断面に分散し得ず、集合流動の上に水のみ層が生じることになる。したがって、土石流が形成されるためには、 $a_L > kh_0$  ( $k=0.7\sim 1$ ) でなければならない。これより土石流の発生条件式が求められるが、そのうち特に粘着力が無視できる場合には、

$$\tan \theta \geq \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho (1 + h_0 d^{-1})} \tan \phi \dots \dots \dots (2)$$

かつ、

$$\tan \theta \geq \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho (1 + k^{-1})} \tan \phi \dots \dots \dots (3)$$

が土石流の発生領域である。ここに、 $C_*$ ：堆積層の砂礫の容積濃度、 $\sigma, \rho$ ：砂礫および流体の密度、 $\phi$ ：堆積層の内部摩擦角。

芦田、江頭<sup>31)</sup>らは崩壊土塊の内部構造が破壊されて流動化が生ずる過程を解析して土石流の発生機構を明らかにしている。

(3) 土石流の流動機構

土石流の流動則については、これまでいくつかのモデルが提案されている。それらをせん断力  $\tau$  と変形速度  $du/dz$  の関係で示すと図-6のようにダイラタント流体モデルと降伏応力  $\tau_y$  を含む擬ダイラタント流体モデルやビンガム流体モデルに分類される。

外力としてのせん断力  $\tau_B$  が  $\tau_y$  よりも小さくなったときに土石流の停止過程が始まると考えられるので、 $\tau_y$  を含むモデルは流動と堆積を一貫的に取り扱える利点がある。

Bagnold<sup>32)</sup>は高濃度流れにおいては、粒子同士の衝突の結果、粒子の慣性力が卓越する領域では、

$$P_y = a_i \sigma \lambda f(\lambda) d^2 \left( \frac{du}{dz} \right)^2 \cos \alpha \dots \dots \dots (4)$$

のように流れに直角方向の分散力が生じ、また、

$$\tau = P_y \tan \alpha \dots \dots \dots (5)$$

のようなせん断力が発生するとした。ここに、 $a_i$ ：定数、 $\lambda$ ＝線形濃度  $\equiv [(C_*/C_d)^{1/3} - 1]^{-1}$ 、 $C_d$ ：土石流中の砂礫の容積濃度、 $\alpha$ ：衝突条件によって決まる角度である。

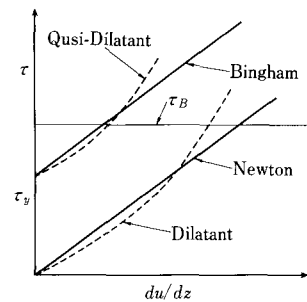


図-6 土石流の流動モデル

高橋<sup>38)</sup>はこの考え方をういて土石流の流速分布および平均流速式を求めている。椿、橋本ら<sup>33)</sup>は反発による分散圧力だけでは粒子は支えきれず比較的長時間粒子同士が接触しながら相対運動をすることによって生ずる接触応力が必要であるとして解析し、高橋の流速分布式と若干異なる分布式を求めている。しかし、これらのモデルはいずれもダイラタント流体モデルに分類される。また、連続体力学のグループで活発に研究されている粒子流の流動則も基本的にはダイラタント流体モデルの範疇に入るものである。

一方、ビンガム流体モデルには Johnson<sup>34)</sup>の研究をはじめとして数多くの研究がある。

また、擬ダイラタント流体モデルには大同、宮本<sup>35), 36)</sup>および芦田・江頭ら<sup>37), 42)</sup>のものがある。この場合、せん断力  $\tau$  は次式で表わされる。

$$\tau = \tau_y + \tau_f + \tau_g \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $\tau_y$  は降伏応力であり、粒子接触に伴う摩擦力や粘土粒子を多量に含む場合などの電気化学的な粘着力に相当する。 $\tau_f$  は流体相の散逸応力で変形速度に依存する。 $\tau_g$  は粒子間の非弾性衝突に伴う散逸応力であって、これも変形速度に依存する。非弾性衝突による応力の Z 方向成分  $P_y$  は、

$$P_y = \tau_g / \tan \alpha_g \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\alpha_g$  は粒子の非弾性衝突による摩擦角。

$\tau_y$  は砂礫の有効応力に比例するものとして、

$$\tau_y = |g(\sigma - \rho)C(h - Z) \cos \theta - P_y| \mu_k \dots \dots \dots (8)$$

とおける。ここに、 $C$ ：砂礫の容積濃度、 $\mu_k$ ：動摩擦係数

Bagnold の取扱いは、非弾性衝突を考えたものではないが、形式的には式(6)の右辺第1項および第2項を無視し、第3項のみを考えたもので、式(8)の第1項と第2項を等しいとしたことに相当している。

芦田・江頭らは式(8)において粒子の非弾性衝突に基づく  $P_y$  は第1項に比してかなり小さいとしてこれを無視した取扱いを行っている。また、 $\tau_f$  については粒子の間隙の大きさ程度の混合距離をもった乱れに対応するレイノルズ応力と粘性応力とを用いて算定し、これらの  $\tau_y$  と  $\tau_f$  から土石流の流動則を導き、実測値と比較的よく適合する結果を得ている。この流動則は土石流の流下過程のみならず堆積過程にも一貫的に適用できるもので合理的であると思われるが、実際にはなにがしかの  $P_y$  の値が存在することは事実であるので、その値を的確に評価して理論に組み込んでいくことが必要である。

また、従来の取扱いでは、鉛直方向の濃度分布を求め理論が与えられていない。かつ平均濃度も発生地点における条件から算定されており、流動過程における力学的解析から求められたものではない。今後これらについ

ての機構を考察し、土石流、土砂流を統一的に説明する理論を構築していく必要がある。

#### (4) 土石流の堆積機構と危険範囲の予測

谷出口のように勾配が緩くなると同時に谷幅が大きくなっているところに土石流が流出すると堆積して土石流扇状地が形成される。これが土石流災害を直接受ける区域である。その範囲の予測は災害対策上きわめて重要である。

焼岳上々堀沢扇状地の観測<sup>38)</sup>によれば、土石流が扇状地に出て来た場合、扇面一杯に広がって流れるのではなく、溪流部の流路幅の2~3倍程度に広がり、流下時の形をある程度保持してロープ状に堆積する。これを土石流堆とよんでおり、1回1回の堆積範囲はそれほど広くないが、何回も流出すると扇面全体に広がっていく。扇頂から扇央にかけて分布する土石流堆は土石の集中度が高く、堆積の厚みが大い盛り上がり型であり、先端部および周辺部には大石が集中する傾向がある。これに対して扇端近くの土石流堆は厚みが小さく形が平坦であり、細粒分が主体をなしている。

土石流が停止する地形勾配は既往の実績によると大体3~4°以上であるが、土石流の性質によって異なり、もっと緩いところまで流出するものもあって、その算定が重要である。高橋<sup>39)</sup>は土石流の底面に作用する摩擦力を考慮して運動量式により検討し、土石流の流速、水深、濃度および地形勾配などの値を用いて、土石流が停止するまでの距離を算定する理論式を求め、実際によく適合することを確かめている。高橋ら<sup>40)</sup>はさらに上述の理論を二次元の場へ拡張して堆積範囲を算定するシミュレーション手法を提案している。芦田・江頭ら<sup>41)</sup>も、自ら導いた土石流の流動則と質量保存則および運動量式を用いて土石流の堆積範囲および堆積形状を解析する手法を提案し実際に適合することを確かめている。

以上の解析においても知られるように、土石流の堆積範囲は流出してくる土石流の物理的性質に大きく依存する。たとえば土石流の流体成分の密度  $\rho$  は含まれている土砂のために1.0よりも大きくなっているが、 $\rho$  が大きくなるほど流動性を増し、堆積範囲が勾配の緩いところまで広がっていくことになり、かつその影響はかなり大きいので、堆積範囲の算定には  $\rho$  の値をいかに的確に推定するかが重要である。

土石流扇状地では、土石流堆積域の下流側に堆積物の二次侵食による掃流状集合流動が発生し、それによる堆積域が広がる。この範囲の予測も災害対策上重要であり、掃流状集合流動に対する流砂量式および抵抗則が提案されており、それらを用いて堆積範囲を予測する手法も提案されている<sup>10)</sup>。

### 6. 大規模崩壊の流動

火山噴火や地震等によって発生する大規模な崩壊は一般に土石流あるいは土石雪崩となって広い範囲に流出し大きな災害を起こすきわめて注目すべき現象である。

1984年9月14日御岳山南麓を震央とするM6.8の地震によって3600万m<sup>3</sup>の大規模崩壊が発生し、土石流となって流下し大きな被害を与えたことは記憶に新しいところである。このときの土石流は平均勾配7~8°の伝上川の河道を侵食しながらほぼ100mの流動深をもって高速で流下し、さらに勾配3.6°の濁川を流れ山の部分を一部堆積させながら流下し、勾配1°の王滝川に流入し最大40m厚に堆積し、先端部はさらに約4km流下して停止した。このような規模の大きい土石流は流動性が高く、高速で遠くまで流下する特徴がある。一般に、規模が大きくなるほど流動性を増し、崩壊源より停止点までの見掛けの等価摩擦係数 $\mu_e$ は図-7<sup>43)</sup>に示すように減少することが知られている。

大規模崩壊から流動性の高い土石流が形成されるメカニズムについての考察が行われた。まず、御岳崩れの場合における流動物が、水と土砂礫の混合した土石流であったのか、空気と土砂礫の混合した粉体流であったのかについての論議がなされた結果、土石流であったと推論されている<sup>44),45)</sup>。崩壊斜面はカルデラの中に熔岩やスコリアが堆積したもので埋没谷の地形構造をもっており、山体中に飽和状態の水を貯留していたものと考えられる。ただし、崩壊土塊の上層部は飽和しておらず比較的乾いた状態であり、この部分は流れ山となって土石流中に保持されながら移動している。

芦田・江頭<sup>44)</sup>は、土塊の空隙を満たしている水とシルトや砂礫などの細粒成分とが大きなせん断力のもとで混合して高濃度の流体が形成され、その浮力増大効果と空隙の増大効果により固体摩擦が減少して流動性を増し

たものであると説明し、さらに彼らの導いた崩壊土塊の運動方程式を用いて、崩壊から土石流への移行過程と流下中における土石流の移動速度の変化を解析して実際現象とほぼ適合する結果を得ている。

御岳崩れの場合においては粉体流によってその流動を説明することはできないが、さらに大規模で高速で移動する場合には、粉体流の形成は可能である。高橋<sup>46)</sup>はこの機構によってセントヘレンズ火山の噴火に伴って生じた大規模な流動を説明している。

大規模崩壊の事例は表-1に示すようにその発生頻度は必ずしも高くないが、一度発生すると大災害を起こすことから、火山や大規模地すべり地の多いわが国では大規模崩壊による土石流の危険地帯の予測は重要な問題であり、上述の研究成果は有用である。しかし、高速度土石流中における乱れ強度や抵抗則など混相流の力学機構について未解明の点も少なくないので研究の進展が望まれる。

表-1 世界および日本における大規模崩壊の事例

場 所	発生年月日	原因	崩壊土量 (億m <sup>3</sup> )
大谷 崩れ(静岡県)	1702	不明	1.2
島原 眉山(長崎県)	1792.5.21	地震, 火山活動	1~5
立山 崩れ(富山県)	1858.2.26	地震	3~4
磐 梯 山(福島県)	1888.7.15	水蒸気爆発	15
稗 田 山(長野県)	1911.8.9	不明	1.5
御 岳 崩れ(長野県)	1984.9.14	地震	0.36
-----			
バイオント (イタリア)	1963.10.2	貯水池による地下水水位の変化	2.6
ハスカラン(ペルー)	1970.5.31	地震	0.5~1
マユン・マルカ (ペルー)	1974.4.25	不明	10
セント・ヘレンズ (アメリカ)	1980.5.18	火山性地震	28

### 7. 河道侵食と流砂

山地河道の侵食と流砂機構に関する研究は現在進みつつあるが、第1の課題は河床および河道の形態に関するものである。山地河道では一般に河床砂礫の粒度分布は広く、河床表面のアーミング現象が砂礫の流送過程において重要な意味をもっている。河床砂礫のうち大きい粒径成分が一部移動しないような掃流力のもとでは、河床砂礫の粗粒化が起り、アーマ・コートが形成されるが、その形成過程は粒子の移動限界の相違で説明されてきた<sup>47)-49)</sup>。Parker<sup>50)</sup>は河床砂礫の全粒子が移動し、かつ河床変動の生じない平衡状態においても河床表層の粗粒化が生じていることを見出した。このとき表層の下側には河床砂礫の粒度分布よりも細粒成分の多い粒度分布

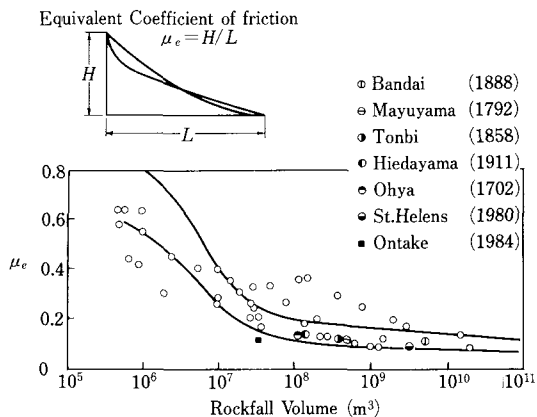


図-7 等価摩擦係数の崩壊土量による変化

を示す層が存在する。このような、層による粒径の分離現象は混合砂礫の流砂現象を取り扱ううえで重要なものであると考えられ、その機構について考察が進められている。

山地河川で形成されるアーマ・コートは大きな礫を含み、比較的安定しており、その形成と破壊を抜きにしては流砂の問題を議論することはできない。特に、勾配の急な河床においては巨礫がかみ合せてステップを作り、いわゆる階段状の縦断形状が形成されるが、これはかなり大きな出水でなければ破壊されることもなく、流砂や水流の抵抗に大きな影響を与える。この河床形態の存在と流水、流砂に与える影響については穂高砂防観測所の観測によって初めて明らかにされたものであるが、ほぼ同じ頃、ニュージーランドにおいても注目され、その発生機構についての研究も進められた。芦田・江頭ら<sup>51), 52)</sup>は階段状河床形状の発生機構について考察し、その形成には反砂堆の発生と最大径の停止条件が必要であるとして発生領域を明らかにしている。さらに、彼らは形状特性、破壊条件、破壊過程における流砂機構および流れに対する抵抗などに関して研究を続けており多くの知見を得ている。

岸ら<sup>53)</sup>は現地観測により山地河道の河床縦断波形には成因の異なる3つの規模のものが含まれており、それぞれ土石流などの土砂移動、反砂堆と砂州および反砂堆と定常波が関係していることを見出した。また、蛇行流路の変形には2つの型があり、1つは蛇行が一方向的に進行する発達型で、他の1つは流量に応じて発達または直線化する型であるとしている。このように、山地河道における河床や河道形態の特性と流砂機構に関しては興味ある問題が数多くあり今後の研究の進展が期待される。

山地河川では勾配が急で粗度要素は大きく相対水深は一般に小さい。このような領域での流れの抵抗は相対水深に大きく依存し、その低下とともに抵抗は急増し、砂礫の移動限界に対する無次元掃流力は増加することが明らかにされている。

側岸侵食に関しては平野<sup>54)</sup>、藤田<sup>55)</sup>、長谷川<sup>56)</sup>らをはじめ数多くの研究が行われており、河道侵食を議論するうえで有用な成果が得られている。山地河道においては側岸侵食によって生産される土砂量は多く、その予測の立場からも側岸侵食は重要な課題である。河岸等の堆積物中に粘土やシルトなどの粘着成分が含まれている場合にはその侵食抵抗は増加する。したがって、粘着性材料を含む場合へ従来の側岸侵食量式を拡張していく研究<sup>57)</sup>も進められている。

## 8. 貯水池の土砂問題

貯水池は土砂の自然流下を阻害して、堆砂による貯水

池容量の減少、上流域の河床上昇とそれに基づく洪水位の上昇、下流域の河床低下や海岸侵食、さらには、濁水の長期化現象などさまざまな影響を与え、その予測と対策はいずれも重要な問題となっている。

### (1) 堆砂機構と堆砂予測

堆砂量と堆砂形状の予測は貯水池計画における基本的な問題である。貯水池堆砂は掃流力の急激な変化によるデルタの形成と粒径の顕著なふるい分け現象に特徴づけられ、その実態は堆砂形状や粒度分布の調査結果を通じてかなり明らかにされている<sup>58), 59)</sup>。このように実際の堆砂現象はきわめて複雑であるが、その基本的なメカニズムの把握には、単純な条件のもとでの実験的研究が有効で、古くから、掃流砂のみの場合や掃流砂と浮遊砂を含む場合について多くの研究<sup>60)</sup>が行われ基本的な特性が明らかにされている。また、それをを用いて簡便な堆砂形状の算定法も提案されている。

しかし、堆砂形状は洪水流量、流入土砂量とその粒度分布、および貯水池水位などによって支配されるので、実際の堆砂形状の時間的変化を予測するためにはコンピューターによる数値計算が有効な手法である。現在、掃流砂と浮遊砂を含む一般的な場合について河床変動の一次元的解析法を適用した堆砂形状の予測法<sup>61)~63)</sup>が提案されており、流入土砂量と粒度分布を適切に与えさえすれば、実際現象をかなりの程度まで再現できるようになっている。多くの場合、一次元的な予測手法で十分目的を果たすものと考えられるが、堆砂の排除等土砂処理の問題との関連において、断面内における堆砂分布を予測することが必要になってくるものと思われる。このような目的に対しては二次元的な解析手法が必要であり、また、予測の精度を向上させることが望まれる。

### (2) 堆砂対策

世界各国とも貯水池の堆砂対策には頭を悩ましており、いろいろな方法が実施されているが<sup>64)</sup>、決定的な方法がないのが現状である。わが国においてもそれぞれのダムの特성에応じた対策が実施されているが十分ではなく、その対策のあり方について現在研究が進められている。堆砂対策を大別すると、

#### 1) 貯水池への流入土砂量の軽減

a) 流域の保全, b) 砂防ダム, c) 排砂トンネルによるバイパス, d) Vegetation Screen など

#### 2) ダムからの流出土砂量の増大

a) 貯水池の運用, b) 排砂門, 排砂管, c) 密度流の利用など

#### 3) 堆砂の浚渫, 掘削

実際には上述の方法を組み合わせた総合的な対策が必要である。たとえば、砂防ダムと掘削の併用が考えられる。これは、貯水池末端付近の適当な場所に砂防ダムを



設置して、洪水時に貯水池へ流入する土砂量を軽減し、洪水後砂防ダムによる堆砂を掘削して砂防ダムの貯砂容量を回転使用するものであるが、大きな砂防ダムを必要とせず有効な方法であって、すでに用いられている。この方法では、堆砂シミュレーションによる砂防ダムの効果や上流への影響の定量的検討や掘削計画および土砂の処理計画の立案が重要な課題である。

上記の諸対策のうち、河川の流下土砂のバランスを回復する立場から、排砂トンネルやダムからの流出土砂量を増大させる方法が特に注目される。

排砂トンネルによる方法は、貯水池末端付近からトンネルによって洪水時の流砂をダム下流へバイパスさせるものであり、諸外国では実例がある<sup>64)</sup>。わが国においても、トンネルの排砂機能や貯水池運用計画と排砂効率との関連について検討を行いその適用を図っていくことが望ましい。

排砂門や排砂管は大抵のダムに設けられているが有効に働いていない場合が多い。これは、高い貯水位を保ったまま排砂門を開いてもその周辺が局部的に洗掘されるだけで十分な排砂機能を発揮しないことによる。排砂能力を高めるためには、排砂期間には貯水位をできるだけ下げようとする貯水池運用が必要である。

中国では、黄河をはじめ河川の流出土砂量は多く、貯水池堆砂はきわめて大きな問題であるが、三門峡ダムをはじめ多くのダムで排砂能力を増大させるような貯水池運用（排砂期間は貯水位を低下させる）を行い大きな効果をあげている<sup>64)</sup>。

わが国においては、関西電力の黒部川出し平ダムで大粒径土砂の排砂が可能な大型の排砂門と排砂路の施設が設置されており、排砂期間に貯水池水位を低下させる貯水池運用によって、貯水池へ流入する土砂の大部分を下流へ流出させるように計画されている。ここでは、流出土砂量も多く、粒径もかなり大きいものまで含まれており、排砂門や排砂路の摩擦も大きな問題であるので、ゲートの構造や排砂路の摩擦対策には特に十分な配慮が払われている。なお、出し平ダムの下流に建設省が設置を予定している宇奈月ダムにおいても同様な排砂施設が計画されている。

今後、貯水池機能と排砂効率を総合的に考えた貯水池運用のあり方についての検討を貯水池計画の中に位置づけていくことが必要である。

### (3) 濁水問題

土砂生産が活発でかつ粘土成分の多い地質構造の流域においては、洪水時に貯水池内に貯留された濁質が沈殿することなく長期間滞留して下流へ放流されるいわゆる濁水長期化現象が発生することがあって、社会的な問題となっているところもある。

貯水池における濁質の挙動と水質保全対策に関して活発な研究が行われてきたが、その第1の課題は、貯水池へ流入する濁質の予測である。これには地域的な特性が大きくかわるのでそれぞれの貯水池ごとに現地調査に基づいた検討が行われている。黒部湖においても流域内における土砂生産源の分布と濁質の存在状況の調査、崩壊量、表面侵食量および河道侵食量の予測に基づいた貯水池流入濁度の予測がなされており<sup>65)</sup>、その手法は大いに参考にすることができる。また、濁質量を予測する一般的な手法も提案<sup>66)</sup>されているが、その精度は、崩壊量、河道侵食量および裸地斜面の侵食量の予測の精度に依存しているので、今後予測精度の向上に努めていく必要がある。

研究課題の第2は、成層型貯水池あるいは非成層型貯水池に流入する濁質の流下機構に関するもので、福岡・福島ら<sup>66)</sup>は詳細な実験と理論解析によって、貯水池へ流入する濁水が潜入する条件や形成される密度流（中層密度流と下層密度流）の特性あるいはその分岐現象などについて多くの知見を得るとともに密度流を追跡する手法について研究を行っている。このほか下層密度流の実験的、理論的研究は多い。

第3の課題は、貯水池濁度の予測に関するものであり、いろいろなモデルが提案されており、流入する濁度物質の量および粒径分布（沈降速度分布）を的確に与ええすれば実際現象をかなりの程度まで再現することが可能になっている。

安芸ら<sup>67)</sup>はMITの水温予測の一次元モデルを基礎としてこれに濁度収支式を与えた一次元解析モデルにより濁度長期化現象を解析している。さらに、中村<sup>68)</sup>や宮永・安芸ら<sup>69)</sup>は上のモデルに濁質の粒度分布についての取扱いに改良を加えている。芦田・江頭ら<sup>20)</sup>は濁質の流下機構に関する基礎的研究の成果を用いて拡散係数や流速分布を評価して濁度を追跡する手法を提案している。岩佐ら<sup>71), 72)</sup>は運動方程式、濁度収支式および水温収支式を用いた二次元解析手法を提案しており実際現象をかなりの程度まで再現することを可能にしている。

以上の解析手法はそれぞれ特徴があり、目的に応じて適用すればよいが、水質変化の予測および水質保全対策の効果を評価するうえで有力な武器となっている。

## 9. 流出土砂量の予測

流出土砂量は、ダムの堆砂量、土砂災害さらには河道計画に関係する基本量であって、その予測には既往の実績に基づく統計的な方法から土砂水理学的なものまで種々の方法が提案されている。

ダム堆砂量の予測についてみると、関係する要因は多く、その抽出の仕方或使用する実績資料の違いにより、

多くの経験式が提案されているが、流域の地形特性や日雨量の資料から年間の流出土砂量を推定する高橋ら<sup>73)</sup>の方法は注目される。

一方、土砂災害に関係する一洪水による流出土砂量の推定法に関する研究は比較的少ない。武居ら<sup>74)</sup>は土石流災害の調査結果に基づいて、一洪水の流出土砂量と流域面積の関係が対数正規分布に従うことを見出し、その分布形を明らかにしている。また、芦田・奥村<sup>75)</sup>はわが国において大きな土砂災害を起こした豪雨時の流出土砂量の資料をもとにストリーム・パワの概念を導入して流出土砂量の予測式を求めている。

流出土砂量を土砂水文学的考察に基づいて推定しようとする試みは最初江崎<sup>76)</sup>によってなされた。その後、土砂水文学の進展に伴って、その成果を用いて流出土砂量を推定しようとする方法は発展しつつある。この方法は崩壊、土石流、土砂流、裸地斜面の侵食、溪岸侵食などに関する既往の研究成果を用いて、与えられた降雨量や流量に対する土砂生産量を推定し、流砂量式と流砂の連続式を用いて、対象地点まで流砂を追跡して流出土砂量を推定するもので、実際にいくつかの流域において適用が試みられている<sup>13), 26)</sup>。この方法の適用にあたっては、流域内における崩壊地や溪岸堆積物の分布状況、粒度分布、流路の形状などに関する調査、崩壊量と降雨特性の解析および出水解析などが必要である。流域場の条件には不規則性が強いが、広い流域を対象とする解析ではモデル化、平均化が必要であり、予測精度も現状では必ずしも十分とはいえない。したがって、貯水池堆砂量の実測資料を用いて、予測式の中に含まれる定数の同定や予測精度の検証を行うことが望ましい。

しかし、土砂の生産から追跡計算によって流出土砂量を推定する手法は物理的な根拠をもっており今後の発展性が期待される。

土砂流出現象は本質的にストカスティックなものであるので、流出土砂量の推定にも上述のデターミニスティックな手法とストカスティックな手法との結合を図っていくことが強く望まれる。

## 10. 土砂災害の防止・軽減

土砂災害にはいろいろな形態があるが、大別すると、河道に流出した土砂の堆積あるいは洗掘による場合のように、その発生が広い範囲に及ぶものと、土石流災害のように、発生域が限られているものがある。前者には流域全体における流砂の挙動が関係し、従来の砂防・治水事業もそのような立場から行われてきた。しかし、最近においては都市化現象との関連のもとに土石流災害も重要になってきており、従来の流域砂防に加えて土石流対策にも力が入れている。

流域砂防に関しては砂防ダムをはじめ各種の施設が設置されている。それらの設計や施行のために従来から土砂の侵食、輸送および堆積現象や構造物の機能に関する研究が行われてきたが、特に、最近ではこれらの構造物の効果の定量的な評価や合理的な配置計画を樹立するために、流域内における Sediment Routing に基づいて、砂防施設が土砂の挙動をどのように変化させるかの検討<sup>77)</sup>が行われるようになってきており、これは好ましい傾向であって、今後さらに予測の精度を向上させていくことが必要である。

土石流対策としては、砂防ダム等の構造物によるいわゆるハードなものや危険範囲や危険度の予測に基づく適切な土地利用、避難・予警報といったソフトなものがあり、現在これらを総合した対策が進められている。

ハードな方法の基本的な考え方は、土石の流出の防止または流出土砂量の軽減であり、これには従来から用いられている砂防ダムに加えて新しい工法がいろいろ開発されつつある。たとえば、鋼管等を組み合わせた透過性の砂防ダムも作られている。これは通常の出水で移動するような石礫はすき間から流出させて砂防ダムが満砂して機能を失うことを防ぎ、土石流のときにはその先端部に集中する巨石によってすき間が閉塞して土石流を堆積させようとするものである。土石流の調節機能はすき間の大きさと土石流の粒度分布に支配されるが、その定量的な関係が実験的・理論的に明らかにされている<sup>78)</sup>。

また、土石流を流路工や導流堤によって無害地域へ導流する工法や防護堤、砂防林による氾濫の制御法についても研究が進められている。

全国に数多い土石流の危険渓流を安全にしていくにはきわめて長期間を必要とし、また、不確定要素の多い自然を対象としてハードな方法だけで安全性を確保することには本質的な困難さがある。そこで、土石流危険渓流の周知、警戒避難体制の確立さらには危険地域からの住宅の移転等を含めた総合的な土石流対策が必要である。これには5.において述べた土石流の発生の予知、堆積危険範囲の予測などに関する研究成果が非常に有効である。今後さらに予測精度を向上させていくことが肝要である。

## 11. むすび

土砂の生産と流出現象はわれわれ人間といういろいろな面でもかかわりをもっており、その1つが「災害」である。本論はその観点から土砂の流出現象の予知と制御の問題を取り上げた。この分野の研究は近年急速な進展を遂げつつある。ここでは、その重要な成果を振り返り、今後の研究の方向を展望することをねらいとした。しかし、著者の勉強不足からその意図を十分に果たしていないよ

うに思われる。また、本論ではあまり触れなかった重要な問題がいくつかある。たとえば、現象の予測に対するアプローチの方法は時間的、空間的スケールの選択で非常に異なってくるが、これについては議論していない。これらについていろいろご教示をお願いしたい。

最後に、流域における Sediment Routing の挑戦が着実な成果を収め、土砂流出の予測と制御に大きな進展をもたらすことを願うものである。

#### 参考文献

- 1) 芦田和男・高橋 保・道上正規：河川の土砂災害と対策，森北出版，pp.1~18, 1983.
- 2) Takahashi, T. : Mechanical characteristics of debris flow, Proc. ASCE, HY 8, 1978.
- 3) 土石流研究グループ：土石流の総合的観測その1，京都大学防災研究所年報，No. 14 B, pp. 691~706, 1971.
- 4) Suwa, H., Okuda, S. and Yokoyama, K. : Observation system on Rocky Mudflow, Bulletin of D.P.R.I., Kyoto Univ., Vol. 23, 1973.
- 5) 奥田節夫・諏訪 浩・仲野公章・横山康二：土石流の総合的観測その2，京都大学防災研究所年報，No. 19 B-1, pp. 385~402, 1976.
- 6) 奥田節夫・諏訪 浩・奥西一夫・仲野公章・横山康二：土石流の総合的観測その3，京都大学防災研究所年報，No. 20 B-1, pp. 237~264, 1977.
- 7) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出，京都大学防災研究所年報，15 B~18 B (1972~1975)，19 B-2~30 B-2 (1976~1987).
- 8) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，No. 20 B-2, pp. 405~435, 1977.
- 9) 水山高久：土石流から掃流に変化する勾配での流砂量，新砂防，No. 116, pp. 1~6, 1980.
- 10) 高橋 保：土石流の停止・堆積機構に関する研究（3）—土石流扇状地の二次侵食—，京都大学防災研究所年報，No. 25 B-2, pp. 327~348, 1982.
- 11) 椿東一郎・橋本晴行：土石流の勾配急変による堆積機構，第28回水理講演会論文集，pp. 711~716, 1984.
- 12) 自然災害科学総合研究班：土砂の流送・運搬に伴う自然環境の変化に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果（研究代表者：石原藤次郎），No. A-50-9, pp. 1~110, 1975.
- 13) 高秀秀信：水系における土砂動態と流出土砂の管理に関する研究，京都大学学位論文，1983. あるいは，建設省中部地建河川計画課：水系における土砂動態と流出土砂の管理に関する研究，pp. 1~236, 昭和58.11.
- 14) Hey, R. D., Bathurst, J. C. and Thorne, C. R. : Gravel-Bed Rivers, John Wiley & Sons Ltd, 1982.
- 15) Thorne, C. R., Bathurst, J. C. and Hey, R. D. : Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, John Wiley & Sons Ltd, 1987.
- 16) Proceeding of the International Symposium on Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands, IAHS Publication, No. 132, Christchurch, New Zealand, 1981.
- 17) Proceeding of the International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, Japan, 1985.
- 18) Proceeding of the International Symposium on Erosion and Sedimentation in Pacific Rim, Corvallis, USA, IAHS Publication No. 165, 1987.
- 19) Proceeding of the First International Symposium on River Sedimentation, Beijing, 1980.
- 20) Proceeding of the Second International Symposium on River Sedimentation, Nanjing 1983.
- 21) Proceeding of the third International Symposium on River Sedimentation, Edited by S. Y. Wang, H. W. Shen and L. Z. Ding, 1986.
- 22) Mitchell, J. K. and Bubenzer, G. D. : Soil loss estimation, Soil Erosion, Chap. 2, Wiley, pp. 17~62, 1980.
- 23) Taneda, Y. : Soil loss prediction of a farm land in Japan, Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steepland, IAHS Publ. No. 132 (Christchurch), pp. 386~399, 1981.
- 24) 岩垣雄一・土屋義人：雨水流による土砂のはく離と輸送について，土木学会論文集，第51号，pp. 34~40, 1957.
- 25) 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，第59号，pp. 32~38, 1958.
- 26) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀：斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究，第24回水理講演会論文集，pp. 134~141, 1980.
- 27) 河村三郎：山地流域の土砂生産量の推算，土木学会水工学夏期研修会講義集，pp. A-4-1~21, 1984.
- 28) 澤井健二：降雨による流路網の発達過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第25 B-2, pp. 317~326, 1982.
- 29) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17 B, pp. 571~584, 1974.
- 30) 芦田和男・江頭進治・加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究（1）—粘着性材料を含む砂礫の移動限界と流砂量—，京都大学防災研究所年報，No. 25 B-2, pp. 349~360, 1982.
- 31) 芦田和男・江頭進治・大槻英樹：山腹崩壊土の流動機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，No. 26 B-2, pp. 315~328, 1983.
- 32) Bagnold, R. A. : Experiment on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian Fluid under shear, Proc. Royal Soc. London, Ser. A 225, pp. 49~63, 1954.
- 33) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文集，第317号，pp. 79~91, 1982.
- 34) Johnson, A. M. : Physical Process in Geology, Freeman, pp. 433~534, 1970.
- 35) 大同淳之・宮本邦明・三輪 浩・西本直史：Newton流体を含む粒子流の構成方程式のエネルギー的考察，39回土木学会全国大会Ⅱ，pp. 367~368, 1984.
- 36) 宮本邦明：Newton流体を含む粒子流の流動機構に関する研究，立命館大学学位論文，pp. 39~72, 1985.
- 37) 芦田和男・江頭進治・神矢 浩・佐々木浩：斜面における土塊の抵抗側と移動速度，京都大学防災研究所年報，

- No. 28 B-2, pp. 297~308, 1985.
- 38) 諏訪 浩・奥田節夫：焼岳上々壱沢扇状地における土石流の堆積構造，京都大学防災研究所年報，No. 25 B-1, pp. 307~321, 1982.
- 39) 高橋 保・吉田 等：土石流の停止・堆積機構に関する研究（1），京都大学防災研究所年報，No. 22 B-2, pp. 315~328, 1979.
- 40) 高橋 保・中川 一・山路昭彦：土石流氾濫危険範囲の指定法に関する研究，京都大学防災研究所年報，No. 30 B-2, pp. 611~626, 1987.
- 41) 芦田和男・江頭進治・矢島 啓：土石流の流動・堆積機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，No. 31 B-2, 1988.
- 42) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，pp. 485~490, 1988.
- 43) 町田 洋：巨大崩壊，岩層流と河床変動，地形，5巻3号，pp. 155~178, 1984.
- 44) 芦田和男・江頭進治：長野県西部地震による御岳くずれの挙動，京都大学防災研究所年報，No. 28 B-2, pp. 263~282, 1985.
- 45) 奥田節夫・奥西一夫・諏訪 浩・横山康二・吉岡龍男：1984年御岳山岩層なだれの流動状況の復元と流動形態に関する考察，京都大学防災研究所年報，No. 28 B-1, pp. 49~504, 1985.
- 46) 高橋 保：セントヘレンズ火山の噴火に伴う災害現象と対応，京都大学防災研究所年報，24号A, pp. 15~34, 1981.
- 47) 芦田和男・道上正規：混合砂れきの河床変動，armoringについて，第15回水理講演会講演集，pp. 31~36, 1971.
- 48) 平野宗夫：Armoringをともなう河床低下について，土木学会論文報告集，第195号，pp. 55~65, 1971.
- 49) 中川博次・辻本哲郎・原 稔明：混合砂礫床面の粗粒化過程について，京都大学防災研究所年報，No. 20 B-2, pp. 355~370, 1977.
- 50) Parker, G.：粗粒化について，土木学会論文集，No. 375, pp. 17~27, 1986.
- 51) 芦田和男・江頭進治・安東尚美：階段状河床波の発生機構と形状特性，京都大学防災研究所年報，第27号B-2, pp. 341~353, 1984.
- 52) 芦田和男・江頭進治・西本直史：階段状河床上における流砂機構，京都大学防災研究所年報，第29号B-2, pp. 377~390, 1986.
- 53) 岸 力・森 明巨・長谷川和義・黒木幹男：山地河川における土砂輸送と河床形状に関する調査研究，文部省科学研究費特定研究比較河川学（研究代表者：岸 力）報告書，pp. 343~364, 1987.
- 54) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について，土木学会論文報告集，第210号，pp. 13~20, 1973.
- 55) 藤田裕一郎：直線流路の側岸侵食機構，京都大学防災研究所年報，No. 22 B-2, pp. 537~552, 1979.
- 56) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究，土木学会論文報告集，No. 316, pp. 37~50, 1981.
- 57) 芦田和男・江頭進治・加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究（2）—流路の側岸侵食機構—，京都大学防災研究所年報，No. 26 B-2, pp. 353~362, 1983.
- 58) 江崎一博：貯水池の堆砂に関する研究，京都大学学位論文，1976.
- 59) 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，No. 17 B, pp. 555~570, 1974.
- 60) 吉川秀夫編著：流砂の水理学，丸善，pp. 433~446, 1985.
- 61) 岡部健士：貯水池における堆砂過程とその予測に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1982.
- 62) 芦田和男・藤田正治：貯水池堆砂の数値シミュレーション，京都大学防災研究所年報，第30号B-2, pp. 457~474, 1987.
- 63) 黒木幹男・岸 力：ダム堆砂の数値シミュレーションに関する考察，文部省科学研究費特定研究比較河川学（研究代表者：岸 力）報告書，pp. 393~400, 1987.
- 64) I. H. P.：Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs, Unesco, Paris, pp. 4-1~4-91, 1983.
- 65) 富山県自然保護協会：黒部川流域の自然と土砂流出—黒部川の濁水現象に関する報告—，関西電力，pp. 136~187, 1987.
- 66) 吉川秀夫編著：流砂の水理学，丸善，pp. 447~460, 1985,あるいは，福岡捷二・福島祐介ら：土木学会論文報告集，第274号，pp. 41~55, 1978, 第293号，pp. 65~77, 1980, 第294号，pp. 73~84, 1980, 第302号，pp. 55~65, 1980.
- 67) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池流動形態のシミュレーション解析その1，発電水力，No. 134, pp. 37~50, 1975.
- 68) 中村俊六・足立昭平：貯水池における濁質粒度の変動，土木学会論文報告集，第279号，pp. 61~68, 1978.
- 69) 宮永洋一・安芸周一：濁質粒度が貯水池濁水現象に及ぼす影響について，土木学会論文報告集，第296号，pp. 49~59, 1980.
- 70) 芦田和男・江頭進治・古屋 健：密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究（4）—貯水池濁度の解析法を中心として—，京都大学防災研究所年報，No. 22 B-2, pp. 383~398, 1979.
- 71) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭：洪水時における貯水池の成層破壊について，京都大学防災研究所年報，No. 20 B-2, pp. 259~270, 1977.
- 72) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行：貯水池における濁度解析について，京都大学防災研究所年報，No. 21 B-2, pp. 319~329, 1978.
- 73) 高橋 保・江頭進治・中川 一：貯水池の堆砂量からみた土砂流出特性，文部省科学研究費特定研究比較河川学（研究代表者：岸 力）報告書，pp. 365~392, 1987.
- 74) 武居有恒監修：地すべり，崩壊，土石流—予測と対策—，鹿島出版会，1980.
- 75) 芦田和男・奥村武信：豪雨時の流出土砂量に関する資料の解析研究，自然災害科学資料解析研究，Vol. 4, pp. 85~91, 1977.
- 76) 江崎一博：貯水池の堆砂量の予測に関する研究，土木学会論文報告集，第262号，pp. 67~78, 1977.
- 77) 文部省科学研究費試験研究（研究代表者：芦田和男）：砂防ダムの機能と配置法に関する研究，研究成果報告書，pp. 1~143, 1987.
- 78) 芦田和男・江頭進治・栗田三津雄・荒牧 浩：透過性砂防ダムの土石流調節機構，第32回水理講演会講演論文集，pp. 491~496, 1988. (1988. 2. 29・受付)