

流 砂 の 道

芦 田 和 男

1. プ ロ ロ ー グ

山崩れや地表面の侵食で生産された土石は、水の作用で山から河へ、さらに海へと輸送されて行く。このような水を媒介とした土石の移動を広い意味でここでは流砂と呼ぶことにする。

私が流砂の道に始めて足を踏み入れたのは、1952年大学を卒業して建設省土木研究所に入所した時であった。土木研究所には流砂研究の伝統というものがあった。1930年から1940年代にかけて、安芸皎一博士は富士川や鬼怒川などの現地調査に基づいて、河相論を提唱し、それを実証するために、実験を行い流砂現象を詳細に調べた。また、筆者が入所した当時は、佐藤清一博士が河川研究室の室長として、流砂現象の基礎となる乱流理論についてのレビューを行い、また、吉川秀夫博士を中心に、流砂の現地観測、流砂理論およびそれを適用した河道計画に関する研究が進められていた。一方、米国では、H. A. Einstein¹⁾が流砂理論を発表して話題になっていた。その論文を手渡されたのが流砂の問題を研究するきっかけとなった。それから約10年間、土木研究所で流砂の問題について研究を行っていたが、1961年京都大学に移り、防災研究所の矢野勝正教授の研究部門に配属された。当時矢野研究室では、洪水、ダム堆砂、河床変動などの問題が研究されており、私は防災研究所へ移ってからも流砂の問題を引き続き研究することになった。すなわち、土木研究所で10年間、京都大学で30年間、流砂の道を歩いてきたことになる。それは外から見ると蟻地獄に落ちてそこから抜け出せずにもがいているようにも見たかも知れないが、私にとっては、多くの優れた仲間や学生諸君に恵まれた楽しい旅であった。

ここでは、旅の途中での印象的な事や感じたことを、若干の成果をおりませながら書いてみたい。

2. 流砂現象に関する観測研究

防災研究所の主要な研究対象である自然現象の分野では、観測によって実際にどのような事が起こっているかを自分の目で確かめることの重要性は今さら言うまでもない。観測によって、新しい現象が見い出されたり、現象に対するイメージが形成されたりして、そこから新しい研究が始まることが多い。

1954年と55年に利根川の布川で洪水時の流砂観測を行った²⁾。橋の上からワイヤーロープで流速計、採水器および掃流砂採取器を吊り下げ、流速分布、濃度分布、掃流砂量および水深を計測した。2日続けたの徹夜の観測であった。洪水の規模はピーク流量で2,500～3,000 m³/sで利根川の洪水としてはそう大きいものではなかったが、私にとっては詳しく観察した初めての洪水であって、いろんな事を教えられた。洪水の流れは渦のかたまりのようなもので、河床からボイルと言われる渦が湧き上がってくると浮遊砂の濃度は高くなる。そのために浮遊砂濃度は時間的に大きく変動し十分に時間をかけて採水しないと平均的な濃度を知ることができない。使用した採水器は土研式簡易採水器B型と言われるもので、平均的な濃度を取るように入水孔から平均流速で採水するよう配慮されていたが、濃度の測定値は相当のばらつきを示した。そこで、採水時間について検討した所、十分でないように思われたので、流入孔の直径を1 cmから5 mmに縮小して採水時間を長くするように改善した結果、濃度測定値のばらつきはかなり少なくなった。また、測定中水深は大幅に変動し、河床にはかなり波高の大きいDunesが形成されていること

が推察された。また、流水中のゴミは、ワイヤーロープにかかり観測の障害となるものであるが、洪水の上昇期に多く、ピークを過ぎる頃から急に減少し出すことも実感した。

1983年、重慶から武漢まで、2泊3日の舟旅で長江を下ったことがあった。舟辺に座って移り行く雄大な三国史の舞台を眺めていることはまことにいいものである。長江も三峡付近では河幅が狭く、最も狭い所では100m位しかない。水深も100m位で、常時流量は多く濁流渦まく流れであるが、その時はとくに出水しており流速もかなり速かったように思う。河床から湧き上がる規模の大きな渦が、あちこちで水面を持ち上げて、小さい舟だと危ないと感じられた。これが、利根川の洪水で見たあのボイルであるということがすぐ分かった。

このように渦の構造は、流砂現象に大きなかわりを持っており、最近では空中写真等から見られる渦構造と流砂現象との関連についての研究が進んで来ている。また、現地観測も重視される機運にある。大変好ましい事であり、新たな発展を期待している。

なお、三峡には大ダムが建設されることになっている。完成後は、この付近の景色も大きく変わるであろう。

防災研究所では、その創設以来観測研究が重視され、各分野で観測所を持っている。その一つの穂高砂防観測所は、矢野勝正先生が1965年につくられたものだ。先生は「石が流れる音を聞きたい」、「土石流を見たい」とよく言っておられ、観測研究には情熱を燃やしておられた。

観測領域は、焼岳周辺の神通川水系足洗谷で、土砂生産は極めて活発で、かつその流出形態も、浮遊砂、掃流砂、土砂流、土石流と変化に富んでおり、土石の生産流出現象を調べるには格好の場所である。また、降雨分布や流出過程の面から見ても、7.5 Km²というそれほど大きくない流域内の標高差が1000mもあって、降雨量の標高差による地域分布もあり、また、火山堆積物が厚く堆積している地域であるので、降雨の流出過程も複雑であり、観測研究の対象地域としては興味ある所である。さらに、流域内には、コンクリートの砂防ダムや鋼製の立体格子堰堤が設置されており、それらが土石の流出過程にどのような影響を持っているかを調べる上でも格好の所である。

この観測流域において、降雨分布と流出過程、土石の生産過程、掃流砂や土石流による土石の流出過程、ならびに河床および流路変動などに関する実態とそのメカニズムについての観測研究が長年続けられ、貴重なデータが集積されてきている。観測は、主として穂高砂防観測所の沢田助教授が中心となって行っているが、筆者も1971年以来、矢野教授の後をついで穂高砂防観測所長として観測研究にかかわってきた。

Fig. 1に足洗谷流域における流砂観測システムを示す。調査項目を大別して示すと次のようである。

i) ヒル谷流域における出水と土砂流出の観測。ヒル谷流域は、主要な土砂生産源となっている崩壊地を持つ支流と土砂生産源のない本流とからなっており、その合流点下流の河道には、よほど大きな出水でないと破壊されないような安定したステップとプールが形成されている。上流の崩壊地の表面侵食により生産された花崗岩質の砂は、安定したステップ・プール河道上を輸送されて谷の出口から下流へ流出している。このような流域の下流端に、堰および流砂量計測装置を設置して、流量および流砂量の連続計測を行っている。また、土砂生産のある支流と生産のない本流にそれぞれ水位計と流砂量計を設置して流域特性の差異を調べている。さらに、ステップ・プール河道の特性とそこでの土砂の流送過程についての調査も行ってきた。

ii) 足洗谷上流域における土石流の発生と流動特性ならびに立体格子堰堤の土石流調節機能に関する観測。足洗谷は焼岳火砕流堆積物のガリ侵食によって形成されたもので、ガリの両岸は裸地の急な崖になっており、崖は年々侵食により後退し、河道へ土石を供給しており、その生産量は極めて多い。土石流の発生源は、勾配15°以上の急傾斜の部分であるが、そのような場所では、流水は河道堆積物の中を地下水として流出しており表面流はない。このような場所において、土石流はいつどのようにして発生するか、その時の地下水流および表面流はどうなっているか、発生した土石流はどのような挙動をして流出するか、砂防ダムはそれにどのような影響を与えるのかなどについて主としてTVカメラを用いて観測して

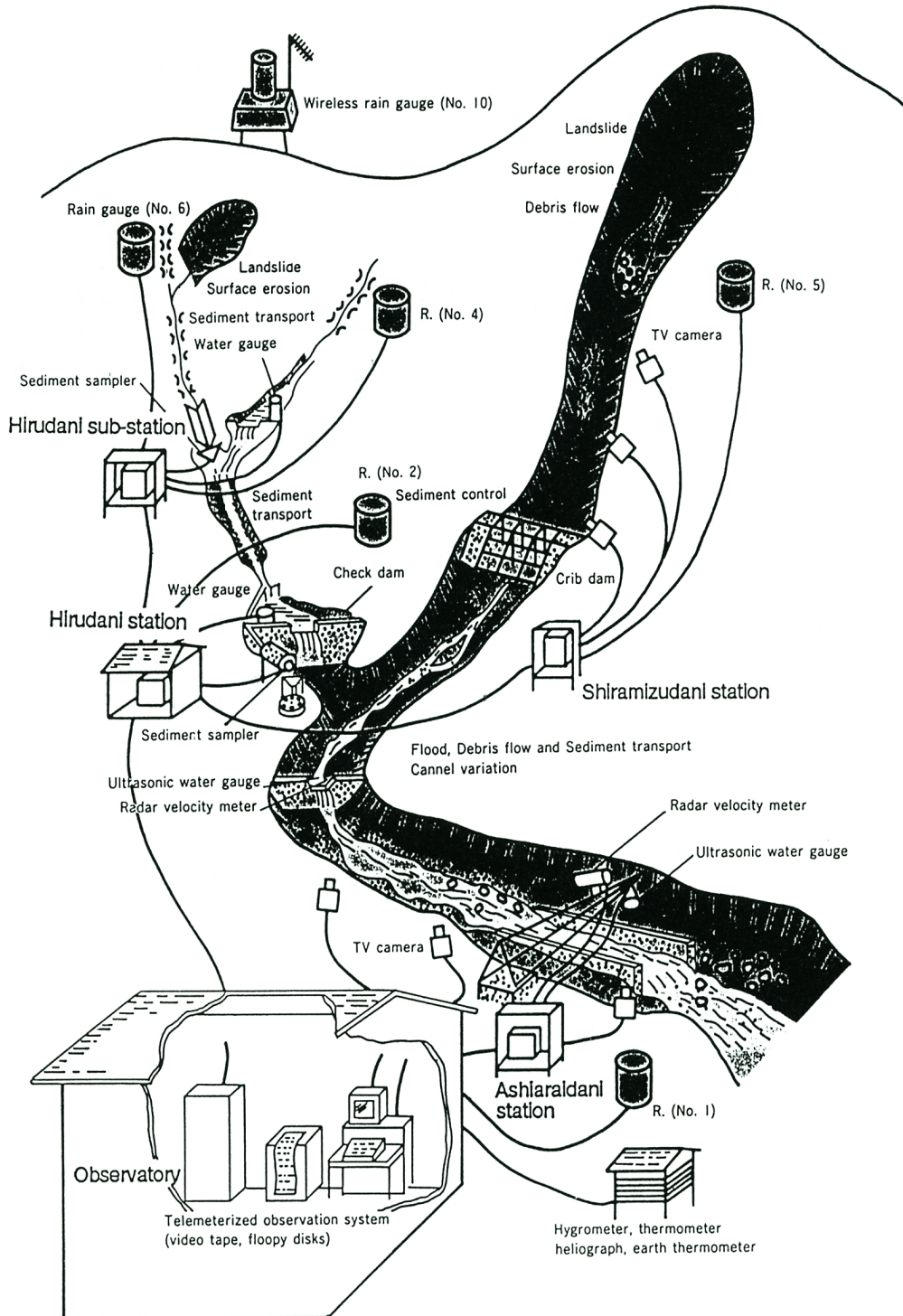


Fig. 1. Observational system in Ashiaraidani experimental basin of Hodaka Sediment Observatory.

いる。

iii) 足洗谷下流域における流水と土石の流送過程および流路・河床変動の観測。足洗谷下流域への土砂の供給源としては、上流域から土石流として供給されるものに加えて、両岸の崖の侵食後退によるもの

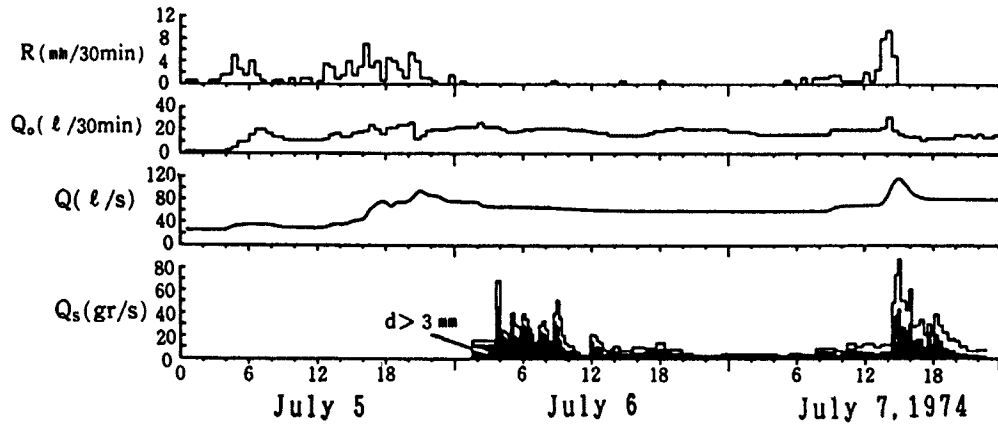


Fig. 2. Variations of discharge Q , sediment discharge Q_s and rainfall R during floods in the Hirudani experimental watershed.

がある。河道には常時流水が存在し、出水時には増加する。土石の移動形態は土石流や土砂流の他に出水時における掃流運動も加わり多様である。このような場所で、出水時の流量、土石流、土砂流および掃流による土石の移動過程とそれに伴う河床および流路の変動をTVカメラ、レーダー流速計、超音波水位計などによる連続計測と洪水前後における河床測量によって調べている。

iv) 裸地斜面や崖の侵食による生産土砂量の観測。種々の地質条件を有する裸地斜面を対象として、勾配の比較的緩い斜面については侵食深の直接計測により、また勾配の急な崖については光波測距儀による計測によって侵食量の計測を行っている。また、計測の可能な裸地斜面については、斜面下にサンプラーを設置しておき、侵食量を定期的に計測する継続観測を行っている。

以上の観測成果については、今まで防災研究所年報に発表しているので、ここでは、観測の成果がその後の研究進展にどのようにつながったかの1例をあげて、観測研究の重要性を示すに止める。Fig. 2^{3),4)}はヒル谷における雨量と谷の出口で測った流量および流砂量の観測値の一例である。雨量と流量とはよく対応しているが、流砂量の対応は悪い。すなわち、流砂は、最初の出水(7月5日)では、流量のピーク付近では存在せず、10時間ぐらい遅れて生じている。これに対して二番目の出水(7月7日)では流砂量は流量と比較的よく対応しており、遅れの時間はほとんどない。なぜこのような事が起こるのであろうか? 高橋や沢田らとその原因について種々検討した結果、次のような結論に到達した³⁾。ヒル谷の河道にはFig. 3に示すようにステップとプールが連続して形成されているが、もしプールが空であれば、上流の崩壊地から供給された土砂はプールを埋めながら流出してくるので、それが下流端に到達するまでにはかなりの時間がかかるはずである。ここでは、雪解け時に出水があるが、その出水では上流からの土砂の供給がないので、プールに堆積している土砂を流出させ、プールは空の状態になる。7月5日の出水時にはそういう状態になっていて、土砂流出の発生が10時間位遅れたのではないだろうか。ところが、7月7日の出水時には7月5日の出水で土砂が下流端付近のプールにまで流出して来ていたので、流砂量と流量との対応が良くなったのであろう。この推論を確かめるために、上流端付近に染色砂を置き、これをトレーサーとして下流端まで流出してくる時間を計測したり、出水の前後におけるプール内の堆積土砂量の消長と流出土砂量との関係の調査を行い、その考え方が妥当であることを確かめた。このように河道に形成されたステップ・プールは土砂の流送過程に大きな影響を持つことが知られた。これを契機に山地河道の縦断形状を注意してみるようになったが、ステップ・プールは山地河道において一般的なものであることが分かった。そこで、山地河道における土砂の流出過程の研究においては、ステップ・プールに関する基礎的研究が必要であるとして、江頭と一連の研究を行った。その結果、ステップ・プールの形成機構、ステップ・プールの破壊条件と流砂量などが明らかにされ^{5)~8)}、研究は大きく進展した。

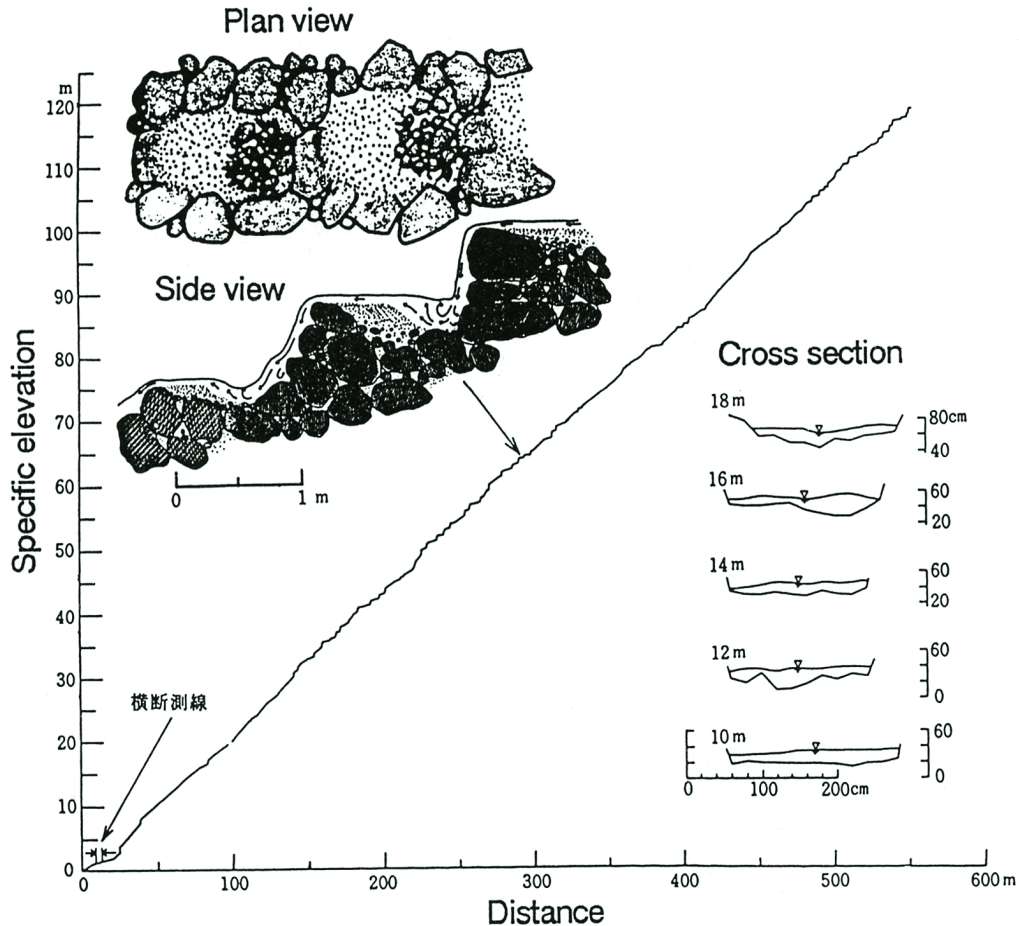


Fig. 3. Step-pool morphology in the Hirusani creek.

以上は、現地観測によって新しい現象に気づき、それがきっかけとなって基礎的な研究が進展した一例であるが、こうした事は数多くある。現在は、コンピューター解析が進み、安易なモデル化に走り、実験やとくに手間のかかる観測は敬遠されがちであるように思われる。現地の観測所や実験所を多く持っている防災研究所では、今後もこの分野に力を入れてもらいたいものである。

3. 流砂現象のメカニズム

流砂現象の研究において、著者が最も力を入れてきたのは、言うまでもなく流砂現象を支配する法則いわゆるメカニズムの解明であった。流砂現象と一口に言っても河川の中下流部におけるものと山地部におけるものとはかなり異なっている所もあり、研究を行った項目は多岐にわたる。それらを **Table 1** および **Table 2** に示す。

河川中・下流部の問題は著者の全研究期間を通しての研究課題であり、山地部の問題は主として1971年砂防部門教授となって以降の課題である。これらのうち、ここでは、二つの問題だけに限って研究発展の過程を振り返ってみたい。

Table 1. My research subjects related to sediment problems in mountain area.

Phenomenon	Theme
Slope erosion	<ul style="list-style-type: none"> • Erosion mechanism of slope bed composed of cohesive and non-cohesive material • Gully formation and development of stream net-work
Slope failure	<ul style="list-style-type: none"> • Prediction of the occurrence • Mechanism of soil block movement • Transformation from landslide to debris flow
Debris flows	<ul style="list-style-type: none"> • Prediction of the occurrence • Mechanisms of the flow and sediment deposition from it • Prediction of hazardous area • Debris flow control with sabo-dams
Sediment gravity flows or immature debris flows	<ul style="list-style-type: none"> • Prediction of the occurrence • Structure of the flow • Sediment transport equation
Step-pool bed form	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanism of the formation • Characteristics of geometric shape • Flow resistance • Mechanism of sediment transportation • Mechanism of destruction of the bed form
Bed and channel	<ul style="list-style-type: none"> • Critical condition of sediment movement and erosion rate of stream bed and banks composed of cohesive and non-cohesive material • Mechanism of stream formation on very wide channel beds • Sediment transportation and channel variation of braided streams • Armoring phenomenon
Wash-load	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanism of wash-loads • Prediction of the rating curve of wash-loads
Mechanism of debris control and sabo-structures	<ul style="list-style-type: none"> • Control of sediment transportation with sabo-dams • Control of river bed erosion with ground sills • Regulation of river course with channel works

Table 2. My research subjects related to sediment problems in river.

Phenomenon	Theme
Bedload	<ul style="list-style-type: none"> • Critical condition of particle movement • Bedload equation
Sand waves	<ul style="list-style-type: none"> • Criterion of sand-wave formation • Mechanism of occurrence of sand-waves
Suspended load	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanism of sediment suspension • Distribution of suspended sediment • Formula of transport rate • Mechanism of mud flow
Bed variation and channel variation	<ul style="list-style-type: none"> • Bed variations of compound channels and meandering channels as well as of channels with abrupt change of flow width • Channel variations • Sediment sorting and armoring phenomenon
Sediment hydraulics in reservoirs	<ul style="list-style-type: none"> • Reservoir sedimentation • Prediction of inflow rate of sediment and bed profile • Stratified flows • Turbidity currents • Elimination of reservoir sedimentation • Sediment transportation with pipe
Estuary sand bars	<ul style="list-style-type: none"> • Estuary closing • Method for preventing estuary closing • Mechanism of the development and variation of bars

3.1 流砂と河床・流路変動

わが国では、第二次世界大戦終了（1945）後 1950 年代にかけて、荒廃した国土に大型台風が相次いで襲来し、各地で水害が頻発した。そのため、計画高水流量の見直しや河川改修計画の立案に力が注がれた。建設省土木研究所では、計画高水流量を安全に流下させ、かつ安定な河道の設計を目指して、その基礎となる流砂に関する研究やそれを用いた河道設計の手法に関する研究が進められていた。一方、アメリカでは、土壌保全や河川の流砂問題などから、H. A. Einstein が流砂に関する研究を行い、1950 年有名な Bed Load に関する流砂量式を発表していた。また、ヨーロッパにおいては、Meyer・Peter と Müller⁹⁾ が 1948 年第 2 回 IAHR で掃流砂量式を発表していた。筆者が建設省土木研究所における流砂研究に加わった 1952 年には以上のような状況にあった。筆者らは、幅 78 cm、長さ 100 m の大型水路を用いて、掃流砂の実験を続けた。実験は 250 種類ぐらい行ったと思う。また、砂移動の機構を調べるために着色砂を何種類も敷き、数時間通水後の着色砂の分布状況も調べた。一方、流砂理論をつくるためには現象のモデル化が必要であるが、そのためのイメージを得るために、砂粒子の運動を観察した。砂粒子は静止の状態から急に少し浮き上がり、その点の流速で輸送され、ある距離移動して停止する。この最初に少し浮き上がる点が重要であり、これが Einstein が言う揚圧力によるものだと考えた。そして、流砂が平衡している状態では、揚圧力によってピックアップされるものと重力によって落下するものとが釣り合っていると運動量式を用いて掃流砂量式を導き、土研式（佐藤・吉川・芦田式）として発表した¹⁰⁾。流砂量は同じ掃流力でも河床形態によって大きく変化する。筆者らの実験は Lower Regime で行われたものである。その結果と Upper Regime で行われた Gilbert の結果では、同じ掃流力に対する流砂量が顕著に相違する。彼らは、その違いを Manning の粗度係数の関数として評価したが、この点の物理的な意味が明確でないとしてさらに検討を加える必要があることを述べている。佐藤・吉川・芦田による掃流砂量式はわが国においては最初のものであり、また、式形が簡単で、かつある程度の検証がなされていることから、その後河床変動の解析や流砂量の推定にかなりよく用いられている。

その後、流砂量式をはじめ移動床現象の問題については、わが国を始め世界各国で活発な研究が行われ、大きな進展をみせてきた。H. A. Einstein が初めて提唱した砂粒子の確率的な運動特性は多くの研究者によって詳細に調べられ、砂粒運動の確率過程としての解析が進み、それを用いた流砂量式も提案されている。また、河床形態に関する研究もかなり進展して、流砂量に及ぼす河床形態の効果を合理的に流砂量式に導入しうようになった。

芦田・道上¹¹⁾は Bagnold の考え方に基づいて、一様砂および混合砂の掃流砂量式を提案し、これを用いてアーミング現象なども説明できることを示した。その後芦田・高橋・水山¹²⁾は、平衡状態においては混合粒径の各粒径階の限界掃流力は粒径によらずほとんど一定していることや、勾配によって限界掃流力の無次元表示量や抵抗係数が変化するなどを見い出して、上の掃流砂量式に若干修正を加えた掃流砂量式を提案した。著者らの他にも多くの研究者により掃流砂量式は提案されている。しかし、どの式が最も適合性が良いかを判定することは難しい。それは条件により適合性の良否が変化することや、ほぼ同一と考えられる条件のもとでも、流砂量の実測値はかなりのばらつきを示し、比較すべき実測値としていづれが正しいかを判定することが困難であることなどによる。このように、流砂現象はもともとかなり大きな変動性をもっているものであるので、そう言ったことから考えると、従来提案されている流砂量式は河床変動の解析などの実用上の目的に対して適用できると考えても差し支えないであろう。

一方、浮遊砂量式については、Rouse をはじめ、濃度分布形についての研究が数多く行われ、また、基準面における濃度を与える式については、Lane-Kalinske, Einstein の研究をはじめ、わが国では、板倉・岸¹³⁾や芦田・道上¹⁴⁾などの研究があって、実用上流砂量の算定が可能になっている。しかし、非平衡な浮遊砂現象の解析などに対しては、粒子の運動を追跡するような詳細な取り扱いが必要であり、上の諸式では十分ではない。このため、最近進展してきた流れの可視化手法や高速度 TV カメラを用いて底面粒子の浮上条件、浮上した粒子の運動の追跡、パースティングなどの流れのマクロな渦構造と浮遊砂の運

動との関係などが研究され^{15), 16)}, Stochasticな立場からの解析がなされている。このような手法を用いて、非定常な場での浮遊砂現象についての研究が今後さらに進展することが期待される。

河床変動の問題では、1950年代のはじめ頃、天竜川泰阜ダムによる堆砂により、上流の川路・竜江地区がしばしば水害を受けるようになったとして、また、堆砂の影響はさらに上流に及んでいるとして論争がおこり、それが国会などでも取り上げられ、社会的な注目を集めていた。

著者は、泰阜ダム築造後の堆砂形状の経年変化の資料により、高さ30数mのダムが数年にしてほぼ埋没し、堆砂の影響は次第に上流に及んでいる実態を知り、堆砂のメカニズムや堆砂形状の予測の問題を研究する必要性を痛感した。それ以来この問題とかかわりを持ち続けてきた。現在では、堆砂のメカニズムもわかり、またかなりの精度で堆砂形状を予測することも可能になっている。

河床変動に関しては、断面変化部や弯曲部あるいは複断面河道など種々の河道条件のもとでの変動の特性が実験的に調べられ、一方、これを解析する手法についての研究も幅広く進展してきた。これらの結果明らかになってきた移動床の水理特性の主要なものを示すと次の通りである。固定床の水理特性と比較して移動床での特徴的な特性は断面変化部において最も顕著に現われる。すなわち、固定床においては断面変化に対応して局所的なエネルギー損失が生じるが、移動床においては、局所的なエネルギー損失が少なくなるように堆積、洗掘が生じ、平衡した状態においては、局所的なエネルギー損失はほとんど無視できる程度である。これは、著者¹⁷⁾の行った実験によって見いだされたものであるが、この事を用いると、断面変化部における平衡な平均河床形状を容易に予測することができる。

次に、河床形状の二次元的な特性は、底面付近の主流および二次流の分布特性に支配され、かつ、河床と流れとは相互作用を持って変化する。

混合粒径の河床においては、掃流力の場所的な分布特性によって粒径の場所的な粗粒化や細粒化が生じ、これが河床の変動特性を支配する。

河床変動の解析法としては、一次元解析法および二次元解析法があるが、平均河床高の変動予測には一次元解析法で十分な場合が多く、従来から数多く試みられ、その解析法は確立されていると言える。しかし、これを実際に適用する上では、いくつかの難しい問題が存在する。それは、解析区間の上流端からの流砂量の与え方と下流端の境界条件の設定の問題である。上流端からの流砂量は、河道条件と粒度分布を用いて流砂量式で算定される場合が多いが、実際には、その上流域における土砂供給条件によって変化するはずである。上流域で新たな崩壊や侵食によって生産された土砂は貯留作用を受けながら流下して、対象とする河道区間に到達する。この際、細粒成分ほど流出速度が早い。こうした事を考えると、上流端からの流砂量を予測するためには、その上流域全体を取り上げ、生産地点から粒径別に流砂量式と連続式を用いて対象地点まで土砂を追跡してくることが必要となる。これを精度よく行うことは困難ではあるが、ある程度の精度で行うことは可能であり、建設省中部地建においては天竜川を対象としてそうした検討を行い、かなりの成果を上げている。

1960年代においては、高度経済成長のための活発な建設投資が行われたが、そのため河川から骨材資源として多量の砂利が掘削された。また、ダムの築造による河川への流出土砂量の減少の影響もあって、わが国の河川は全般的に大幅な河床低下をきたした。このため河床低下による災害が目だつようになり、流域における土砂収支や河床変動の検討が重要視されてきた。また、Sediment Routingに基づいて河床変動を長期的に予測し、土砂環境を管理することの重要性も強調されるようになった。

河床変動の解析には、一般に数値解析が用いられるが、単純な河道条件のもとで、ある地点における河床変化が上下流にどのように伝播するかについては、拡散方程式を用いた解析解¹⁸⁾が適用でき、長期にわたる変化の身通しを得るには便利である。

二次元的な河床変動の解析手法も最近進展している。著者ら¹⁹⁾も、直交曲線座標系を用いた平面流れの解析と流砂量に及ぼす傾斜の影響と粒径の篩分け現象を考慮した二次元の流砂量解析により、かなり一般的な河道条件での河床変動の解析法を提案している。側岸近傍においては、流れの三次元的な特性のため、

上の解析では必ずしも十分な結果が得られない場合があるので、さらに研究を進展させる必要がある。

側岸侵食や水みち侵食を伴うような場合の河床変動や流砂量などの問題は、著者ら^{20), 21)}がここ数年研究を進めている所であり、数多くの興味ある特性が明らかにされている。しかし、その解析法については今後さらに研究を進めなければならない。

3.2 土砂災害にかかわる混相流

Table 3 に示す混相流は、いずれも短時間のうちに大量の土石を移動させて大きな地形変化を与え、人命の犠牲を伴う大災害を引き起こすことが多い。

これらの現象は、古くから存在しているものではあるが、最近における都市化による土砂災害危険地帯における人口・資産の増大や山岳地帯における観光開発による土砂災害危険地帯への接近する機会の増加によって、顕在化してきた。それを示す象徴的な事件が1968年に発生した。すなわち、飛騨川沿いの国道41号線に流出してきた土石流が、バス2台を飲み込んで一瞬のうちに104名の人命を奪うという事故が発生した。これは乗鞍岳に御来光を拝むために、バスを連ねて夜中に出た所、途中で豪雨に遭って事故に巻き込まれたものである。この事を契機に土石流の恐ろしさが社会的な注目を集め、観測や実験的、理論的研究が活発に行われるようになり、研究は大きく進展した。

また、火砕流については、火山学者の間では諸外国の事例がいくつか知られていたが、社会的にはほとんど知られていなかった。しかし、火砕流は1991年以降雲仙普賢岳において頻発するようになり、とくに1991年6月4日には43名に及ぶ人命を奪うに及んで大きな注目を集めるようになり、現在そのメカニズムについていろいろと議論されている所である。

これらの土砂災害の防止軽減のためには、まず、発生の条件、規模、流出範囲などを知ることが重要である。そのため、著者らは、これらの現象の発生機構や流動機構についての研究を進めてきた。ここでは、江頭らと共同で行ってきた土石流の流動機構の研究^{22)~24)}について述べる。

最も簡単な場合として、Fig. 4 に示すように、重力によって与えられる土石流の運動エネルギーと流動の内部で散逸するエネルギーとが釣合った平衡状態を考えると次式が成立する。

$$g\sin\theta + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$g\cos\theta + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

Table 3. Catastrophic Sediment Disasters.

Phenomenon	Theme
Volcanic eruption	<ul style="list-style-type: none"> • Pyroclastic flows • Large scale landslides • Dry debris avalanches • Debris flows • Mud flows
Earthquake Severe rainfall	<ul style="list-style-type: none"> • Large scale landslides and debris flows • Formation of natural dams • Floods due to breakdown of natural dams

$$\rho_m = \rho \{ (\sigma / \rho - 1) c + 1 \} \dots\dots\dots (3)$$

せん断力 τ と圧力 p の構造についての考察が流動機構の考察に他ならない。著者らは、土石流の運動を次のように考えている。土石流の石礫は石同士衝突によって分散する。この際衝突により運動エネルギーの一部が失われるが、一部は保存される。このエネルギー損失に対応してせん断力 τ_g が生じる。分散力と石礫の重量との関係を見ると、前者の方が小さい。すなわち分散力だけでは土石の全重量を支えることができず、その差は、上方の粒子から下方の粒子へ接触圧力 p_s として伝達され、河床によって支持されている。この事は、土石流中の石礫は衝突して反発する他に、かなりの部分互いに接触し、その間に垂直応力 p_s を作用させながら、相対位置を変化させるような運動をしていることを示している。このような場合、摩擦力に抗して相対位置を変化させるためにせん断力 τ_y が生じる。この他、せん断力を生じさせる原因としては、粘土粒子群に作用する電気化学的な性質に基づくもの、水の粘性や乱れの場合で流体を変形させるためによるものがある。すなわち、せん断力 τ としては、

- i) 石同士の衝突によるエネルギー損失に基づくもの
- ii) 石同士の垂直応力 p_s の作用場での摩擦によるもの
- iii) 粘土粒子群に作用する電気化学的性質に基づくもの
- iv) 流体を変形させるためによるもの

などが考えられる。Bagnold の理論では、ii) のせん断力は考えられていないが、実際には、ii) のせん断力が作用しており、むしろ i) よりも ii) の方が大きいと考えられる。ii) は土石の運動において Yield Stress として作用し、これを考慮すれば、Bagnold の取り扱いとかなり異なったものとなる。

いま、iii) の効果が無視できるような場合には、

$$\tau = \tau_y + \tau_f + \tau_g \dots\dots\dots (4)$$

と表わされる。ここに、 τ_y : 粒子間の摩擦によるせん断力、 τ_f : 間隙流体によるせん断応力、 τ_g : 粒子の衝突に基づくせん断応力。

また、圧力 p は次のように表わされる。

$$p = p_w + p_s + p_d \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 p_w : 水圧、 p_s : 粒子同士の静的な垂直応力、 p_d : 衝突に伴う動的な圧力 (分散力)。

p_d は粒子間の非弾性衝突において保存されるエネルギー成分を考えると、次式で与えられる。

$$p_d = K_g e^2 \alpha d^2 c^{3/3} (du/dz)^2 \dots\dots\dots (6)$$

p_s については、これを直接算定することが難しいので

$$p_s / p_d = \alpha$$

とおき、土石流の運動を説明できるように実験的に定めると、 $\alpha = 0.25$ 程度の値が得られる。

τ_y 、 τ_f および τ_g についてエネルギー散逸に関する考察を展開して、次のように表わすことができる。

$$\tau_y = p_s \tan \phi = \int_z^h \frac{\rho}{1 + \alpha} (\sigma / \rho - 1) c g \cos \theta \tan \phi dz \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_f = \rho k_f \frac{(1 - c)^{5/3}}{c^{2/3}} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_g = \rho k_g \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) c^{1/3} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \dots\dots\dots (9)$$

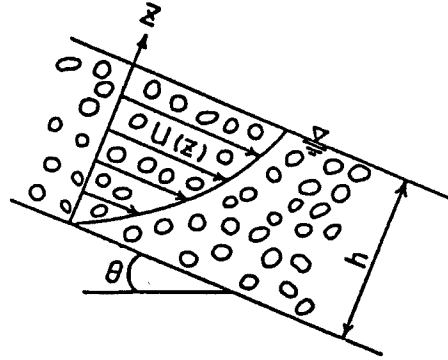


Fig. 4. Uniform debris flow and coordinate system.

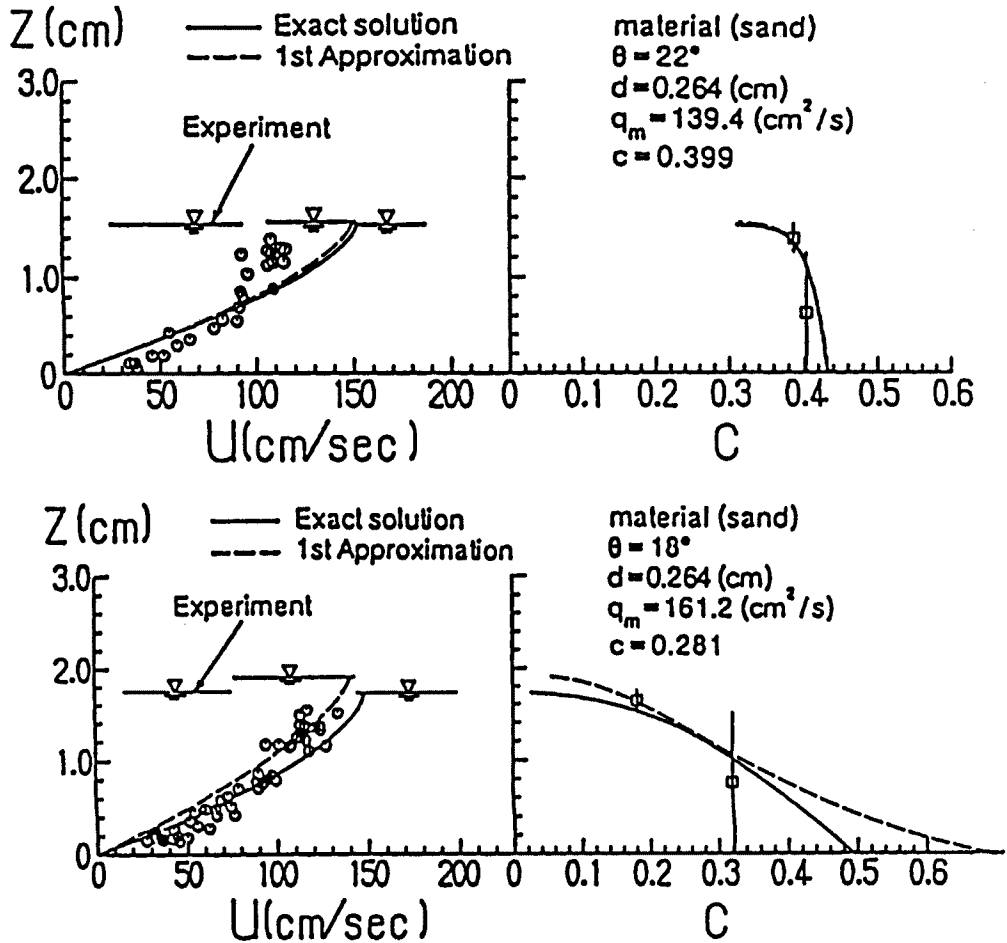


Fig. 5. Comparison between authors' theory and experimental data for the distributions of velocity and particle concentration of debris flows.

上に求めた p および τ を式 (1) および (2) に代入すれば、二つの未知数 c および u を含む二式が得られる。これから、土石流の流速 u および濃度 c の分布が算定される。Fig. 5 は実験値と理論値の比較の一例である。

以上のように、土石流では石礫は石同士の間をすり抜けて分散しており、これが流動性を保つ原因である。この分散力は粒子に作用する重力成分に基づくものである。したがって、勾配がある限界より緩くなると石礫は水面付近まで分散できず、下層だけに石礫の集中した流れが現われる。このような流砂の形態は著者らが初めて見つけ出したもので、これを掃流状集合流動と名付けた。掃流状集合流動についても上の土石流の理論を拡張して、流速分布、濃度分布、集合流動の厚さ、流砂量などを解析することができる。Fig. 6 は掃流状集合流動の厚さと勾配との関係について実験値と理論曲線を比較したものである。また、Fig. 7 は流砂量の実験値と計算値を比較したものである。両者は比較的良好に一致している。

火砕流の流動機構は、現在必ずしも十分にわかっていないが、Fig. 8 (a) に示すように、高温な岩塊の集積的な流動層とその上層部の高温な火山ガスや火山灰からなる気体の流れの層から成っていると考えられている。このように、火砕流における下層部の集合流動層とその上部の気体の流れの存在は、Fig. 8 (b) に示す掃流状集合流動の流れとの類似性をうかがわせる。しかし、両者で大きく異なることがある。すなわち、火砕流では高温な岩塊が流下に伴って割れ、内部から多量のガスが放出されるが、その上昇に伴う揚圧力が岩塊の重量を支えて流動性を高める要因と考えられている。また、高温な岩塊と流下途

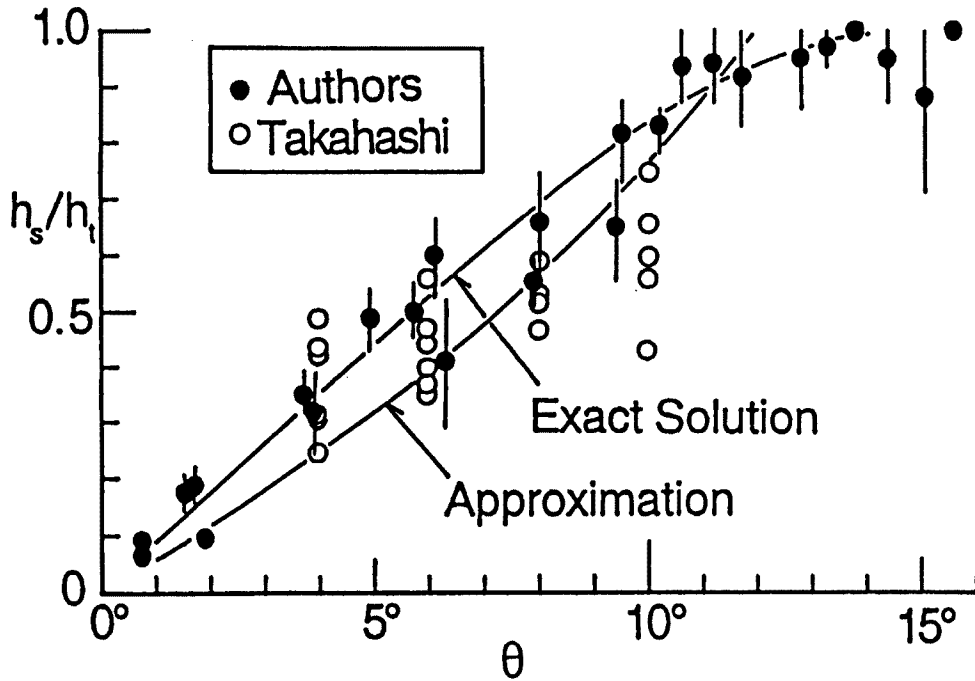


Fig. 6. Comparison of authors' theory and experimental data for the ratio of depth of layer of massive sediment transport to the whole depth.

中の地表面や地中に存在する水との接触によって急激な蒸発に伴う体積膨張をおこし大きな圧力を発生させることも考えられる。その典型的なものが水蒸気爆発として知られている所であるが、このような圧力も流動性を高める要因となることが考えられる。しかし、現在、これらについての定量的な評価はほとんど行われていない。

これに対して、土石流では、気体に比して大きな浮力を持つ水の存在が流動性に大きな影響を持っている。このように、火砕流と土石流とは流動機構はかなり異なるが、その力学的な手法は共通である。すなわち、流動の内部における圧力やせん断応力の構造を定量的に評価し、エネルギー方程式に基づいて流動機構を考察するという力学的な手法により、火砕流に関する研究が進展することを期待したい。

4. 土砂災害の予測と対策

土砂災害は、土砂流送の不均衡によっておこるもので、土石流のように現象が急激なものから、ダムによる堆砂やダム下流域の河床低下のように、長期間にその影響が累積していくものまでいろいろある。しかし、その災害予測は、いずれも流砂の不均衡による地形の変化を予測する問題に帰着する。その解析には、土石の生産から流送・堆積過程までの緒現象のメカニズムの解明とそれ

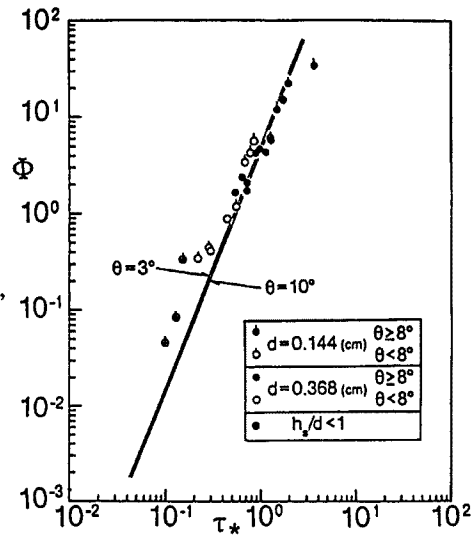


Fig. 7. Comparison of experimental data and authors' theory for sediment transport rate in both regimes of debris flow and partial massive sediment transport.

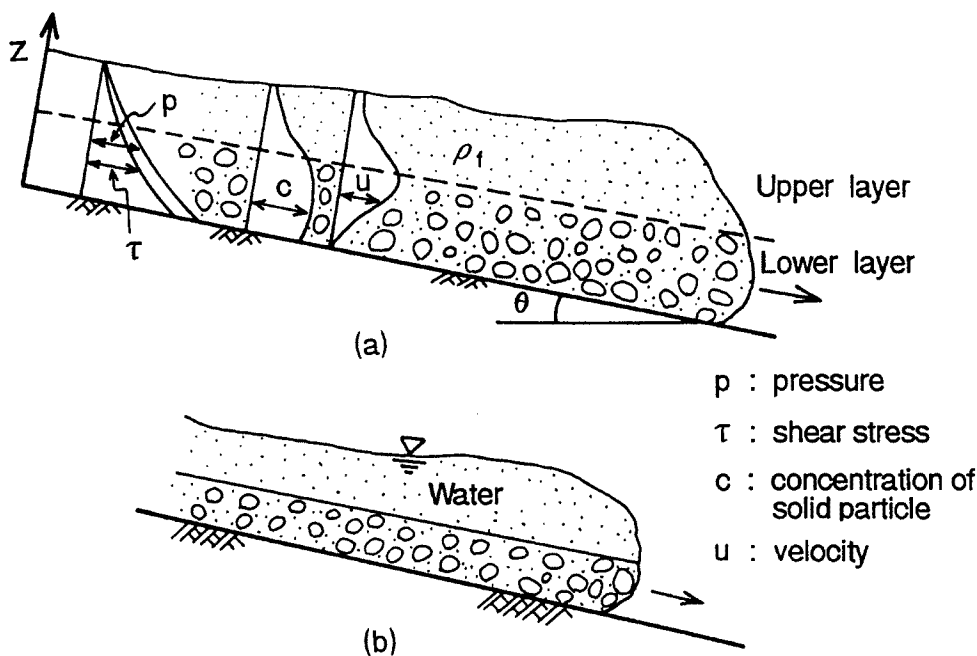


Fig. 8. Schematic diagrams of pyroclastic flow and partial massive sediment transport (immature debris flow).

に基づいた地形変化の定量的な解析法の確立が必要であると考えられる。著者らは、いままで **Table 1** および **2** に示したように、そのための基礎的な研究を行ってきた。その成果については防災研究所の年報その他に発表して来たのでここでは省略する。

一方、土砂災害対策としては、土砂流送の不均衡を砂防ダム等の構造物によってできるだけ調節して被害を防止軽減するハードな方法と危険範囲の予測や土地利用の合理化、避難予警報システムの適用などで災害を未然に防止軽減するソフトな対策がある。著者らの行って来た研究成果はこれらのハードおよびソフト対策を行うための基礎として用いられている。

5. 天変地異への備え

災害の規模は外力の3乗に比例するとも言われているように、災害は外力が大きくなるにつれて飛躍的に増大していく。したがって、災害科学や防災科学の分野ではとくに規模の大きい現象が重要である。

雲仙普賢岳の火砕流の生々しい映像は、改めて自然の恐ろしさを思い起こさせた。フィリピンのピナトッポ火山においては今世紀最大と言われる噴火によって大災害が発生している。自然とはもともとそう言うものであり、人類はこのような天変地異を幾度となく経験して来た。旧約聖書にノアの洪水物語がある。ある時大洪水が発生し、地上の生けとし生けるものはすべて滅んだが、正しい人と神から認められていたノアがこの洪水を予告され、その命によって作った箱船で難を逃れるというのである。古代シュメール文化が華咲いた現在のイラク地方にある古い都市の発掘調査によって、ノアの洪水は単なる物語でなく、人類が実際に経験した洪水の伝承であることが知られている。この物語は、大変示唆に富んだもので、大規模な天変地異がいつかは起こること、それに対しては、現象を予知して難を逃れることが大切であることを人類に語り伝えているのであろう。

このような天変地異についてどう対処したらよいかについて若干述べてみたい。

まず、大規模な土砂災害の種類としては Table 3 のようなものが考えられる。これらの現象がいつ、どこでどの程度の規模で発生し、どの範囲が危険であるかを知り、それに基づいて危機管理的な立場からハード・ソフトを総合した防災対策をたてることが重要である。これらについては今後の研究に待つところが多いが、現在わかっていることや研究すべきことについて2, 3述べてみよう。

大規模な現象が発生する地域としては、まず火山地帯があげられる。ここでは、火砕流、大規模山くずれ、岩屑流、土石流、泥石流など多種多様な土砂災害が発生し、時には大規模なものがおこる。次に、中央構造線の破砕地帯と日本海沿いの第三紀層地帯において、しばしば大規模な土砂災害の発生をみているが、前者は主として豪雨により、後者は主として地震によって発生しており、地質条件の相違があらわれている。

どの範囲が危険であるかは、発生する現象の規模に依存するが、どのような規模の現象がどのような頻度でおこるかの評価は最も難しい問題である。しかし、自然は過去に忠実であるといわれるように、大規模な現象が発生する地域においては、過去においても同様な現象が何回となくおこっているはずである。その痕跡を詳細に調べ、近代科学の光を当てて解析することが有力な方法であろうと思われる。

これらの大規模な災害の共通的な特徴は、土石が空気や水と混合して大規模な混相流を形成して、勾配の緩いところまで流出し、被害範囲を拡大することである。

火山噴火による大規模な混相流の実例は、浅間山(1783)、十勝岳(1926)、セント・ヘレンズ(1980)、ネバド・デル・ルイス(1985)、ピナトゥポ(1991)ほか数多くある。ここでは、浅間山の例によってどのようなことがおこったかを説明しよう。

1783年8月5日の噴火によって、鎌原火砕流とそれに続いて大規模な泥石流が発生し、広い範囲にわたって大災害が発生した。鎌原火砕流の噴出物の量は荒牧らによって1000万 m^3 のオーダーと推定されている。これに対して、泥石流の方は、総量1億 m^3 以上の大規模なもので、山麓で侵食された土砂礫と多量の水と混合して形成されたものである。その流量は上流部で20万 m^3/s 、70Km流下した地点でも5万 m^3/s 程度の値で吾妻川を流下し利根川に流入して大きな被害を与えた。また、この泥石流で多数の巨礫が下流に運搬された。なかには直径10m程度の巨石が100Km下流まで運搬されたと記録されている。いかに大規模な泥石流であったかを想像することができよう。

このような大規模な泥石流がどうして発生したかについて、天然ダムが決壊して形成されたものであるとか、吾妻川の河川水と混合して形成されたものであるとか、さまざまな意見があるが、当時の古文書の記録からそのような事ではなかったように思われる。古文書による泥石流の到達時間の記録から、火砕流から泥石流の発生・伝播は一連の現象として起っていることが知られている。また、泥石流中には1億 m^3 程度の水が含まれていたとみられるが、河川水の量は比較にならないほど小さい。また発生時には雪もなかった。

大規模な泥石流を発生させた大量の侵食がどのような機構でおこったか、さらに多量の水の供給がどのようにしてなされたかについては現在まだ解明されてはいない。しかし、侵食が発生した周辺には、古地図によると柳井沼があったとされており、その周辺に多量の水が存在していたことは容易に想像される。また、侵食の発生に関しては、その周辺で噴火がおこったか、あるいは火砕流が流下して高温岩塊と水とが接触して水蒸気爆発がおこったかなどいろいろ想像されるが、これは、専門家による今後の解明に待つことにしたい。

いずれにしても、大規模な泥石流は、山体あるいは山麓に含まれていた大量の水が、崩壊・侵食された土砂と混合して形成されたものと考えられる。

地震による大規模崩壊とその流動化による土石流の実例も多い。常願寺川・鷲山崩れ(1858)はM6.9の安政飛騨地震によって起こったもので、崩壊土量は $4.1 \times 10^8 \text{m}^3$ と推定されている。天然ダムや大規模な土石流によって常願寺川は一変し、その影響は現在に及んでいる。最近では、M6.8の長野県西部地震による御岳崩れ(1984)とその流動化による大規模な土石流の例がある。この場合にも、山体に含まれていた大量の水が土石流の発生に大きく寄与したと見られている²⁵⁾。

豪雨による大規模な山崩れと天然ダムの形成は構造線沿いの地域でしばしば発生している。大規模な天然ダムが53個出現した十津川災害(1889)^{26), 27)}はその代表的なものである。このように、大規模な土砂災害の発生には、大規模な混相流が常にかかわりを持っており、大量の水の存在が不可欠である。この水は、河口湖から供給されるような特別の場合を除いて、山体を覆っている雪水の熱による融解と山体に含まれている地下から供給される。前者については、融解の機構と発生水量の予測に関する研究、後者については山体のどこにどのように地下水が存在しているかの研究が重要であり、ボーリング調査などによる実態の究明が望まれる。

危険範囲の予測には、混相流の流動機構に基づくシミュレーション手法が有力である。いずれの混相流においても、間隙流体の密度が高くなるほど流動性を増し、到達範囲が広がるので、流体の密度の予測が重要な課題であるが十分にはわかっていない。そのためには、せん断流れにおける間隙流体の乱流構造と微細粒子の浮遊機構を究明しなければならない。こうした成果に基づいてシミュレーション手法の精度を向上させるとともに、現地調査の結果を総合的に判断してハザードマップを作成する手法を発展させて行かなければならない。

6. むすび——今後の発展に向けて——

河川の機能としては、治水、利水および環境が考えられるが、最近とくに、緑や生態系の保全に対する社会的期待が高まっている。治水・利水は河川の環境と深いかかわりを持っており、これらは総合的に考えて行かなければならない問題である。例えば、瀬や淵の河床形態や洪水によるその変動は、洪水の流下や堤防の安全性とかかわりを持っているが、そこでの水質や水量の変動特性と相まって、魚や小動物、植生などの生態系に大きな影響を与える。広大なオープンスペースである高水敷は、植生、小動物、鳥類などの宝庫となっているが、人間にもさまざまな形で利用されている一方、洪水時における堆積や洗掘現象を支配し、また、洪水の疎通能力に直接的なつながりを持っている。また、河岸の形状や護岸の形態は、洗掘や堆積の問題を通じて河川の安全度を支配する一方、景観や生態系とも深いかかわりを持っている。また、ダムや堰などは、治水・利水の上で非常に大きな効用を持っているが、反面、土砂の自然流下や水質に変化を与えてそれによる影響が問題視される場合もある。さらに、生態系についてもいろいろな影響を与える。

こうしたことを考えると、治水・利水・環境の調和をはかって行くことは極めて重要な問題である。これを具体的に進めて行くためには、河川工学、砂防学、地形学、生態学、景観等の研究者の共同研究が必要であるが、土砂の面からみると、土砂環境を的確に予測することが最も大切である。これには、流域内における侵食と崩壊・土石流などによる土砂生産、生産された土砂の河道への流出、河道内における土砂輸送、ダム等の構造物の土砂輸送過程に及ぼす影響、河道内における侵食、堆積現象などの予測が含まれる。これらの問題は従来から流域内におけるSediment Routingとして、また、一次元的あるいは二次元的河床変動の予測の問題として取り扱われているところであるが、境界条件が単純化されており、実際河川との間にまだかなりのギャップが存在する。そこで、実際の河川や河道はどのような特性を持っているかを改めて検討し、それに基づいて予測精度の向上をはかることが必要ではないかと考えられる。

自然の外力は大きく変動する。時には異常な規模の外力が出現することがある。このような外力にもできるだけ安全なようにしておくことが望ましいが、河川環境との調和をどうするかが重要な問題である。このような問題を議論するためにも、まずこのような現象を的確に評価することが必要であり、そのためにも予測手法の発展が期待される所である。

参考文献

- 1) Einstein, H. A.; The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, USDA, Soil Conservation Service, Technical Bulletin, No.1026, 1950, pp. 1-71.
- 2) 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男: 河川の土砂流送に関する研究, 建設省土木研究所報告, 1958, pp. 49-64.
- 3) 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(4), 京大防災研究所年報, 第18号B, 1975, pp.529-540.
- 4) Ashida, K., Takahashi T., and T. Sawada: Sediment Yield and Transport on a Mountainous Small Watershed, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.26, September, 1976, pp.119-144.
- 5) 芦田和男・江頭進治・安東尚美: 階段状河床形の発生機構と形状特性, 京大防災研究所年報, 第27号B-2, 1984, pp.341-353.
- 6) 芦田和男・江頭進治・西本直史: 階段状河床波上における流砂機構, 京大防災研究所年報, 第29号B-2, 1986, pp.377-390.
- 7) 芦田和男・江頭進治・西野隆之: 階段状河床波上の流れと抵抗則, 京大防災研究所年報, 第29号B-2, 1986, pp.391-403.
- 8) 芦田和男・江頭進治・西野隆之・亀崎直隆: 階段状河床波の形成・破壊過程における流砂機構, 京大防災研究所年報, 第30号B-2, 1987, pp.493-506.
- 9) Meyer Peter E. and R. Muller: Formulas for Bed-Load Transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, 1948, pp.39-64.
- 10) 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男: 河床砂礫の掃流運搬に関する研究, 建設省土木研究所報告98号, 1957, pp.1-13.
- 11) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972, pp.59-69.
- 12) 芦田和男・高橋 保・水山高久: 山地河川の掃流砂量に関する研究, 新砂防, 107号, 1978, pp.9-17.
- 13) Itakura, T. and T. Kishi: Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc. ASCE, HY 8, August, 1980, pp.1325-1343.
- 14) 芦田和男・道上正規: 浮遊砂に関する研究(1) —河床付近の濃度—, 京大防災研究所年報, 13号B, 1970, pp.233-242.
- 15) 芦田和男・藤田正治: 粒子の浮遊運動と河床付近の流れ, 京大防災研究所年報, 第27号B-2, 1984, pp.355-367.
- 16) 芦田和男・藤田正治・向井 健: 河床砂礫の浮上率と浮遊砂量, 京大防災研究所年報, 第28号B-2, 1985, pp.353-366.
- 17) 芦田和男: 断面変化部における河床変動に関する研究, 京大防災研究所年報, 第6号, 1963, pp.312-327.
- 18) 芦田和男: 下流端水位低下による河床変動, 京大防災研究所年報, 第12号B, 1969, pp.437-447.
- 19) 芦田和男・江頭進治・劉 炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析; 水工学論文集, 第35巻, 1991, pp.383-390.
- 20) 芦田和男・江頭進治・里深好文・後藤隆之: 網状流路の流路変動と流砂量, 京大防災研究所年報, 第33号B-2, 1990, pp.241-260.

- 21) 芦田和男・江頭進治・里深好文・後藤隆之・寺西直之：網状流路における混合砂礫の分級と流路変動，京大防災研究所年報，第34号B-2，1991，pp.247-260.
- 22) 芦田和男・江頭進治・矢島 啓：土石流の流動・堆積機構，京大防災研究所年報，第31号B-2，1988，pp.411-422.
- 23) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎・田野中新：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル，京大防災研究所年報，第33号B-2，1990，pp.293-306.
- 25) 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，京大防災研究所年報，第28号B-2，1985，pp.263-281.
- 26) 十津川村：明治22年吉野郡水災誌十一巻復刻版，1981.
- 27) 芦田和男：河道埋塞に関する事例研究，全国防災協会 二次災害の予知と対策，No. 2，1987.

HISTORY OF MY RESEARCH ON EROSION, SEDIMENT TRANSPORT AND SEDIMENTATION

By *Kazuo* ASHIDA

Synopsis

The author has engaged in the research on erosion, sediment transport and sedimentation for forty years since his graduation from Kyoto University in 1952 to the time of his retirement from Kyoto University in 1992.

Firstly, he stressed the importance of field observation by taking an example from the results by Hodaka Sedimentary Observatory of disaster prevention research institute, Kyoto University which has continued the field study on sediment erosion and sediment transport since 1965. The authors found the existence of step-pool morphology which has an important influence on sediment transport process in mountain creek. This finding stimulated the fundamental investigation on step-pool problems and led to successful results.

Secondly, he reviewed his study on the mechanism of sediment problems. His most interest in sediment research has been toward to the mechanism of the phenomena. He conducted the investigation of several sediment problem in mountain region and alluvial rivers. Among those some of the studies relating sediment transport, river bed variation and debris flow are reviewed in this paper.

Lastly, he mentioned the phenomena relating to the catastrophic sediment disasters by taking some examples.