

土砂災害防止法に基づく基礎調査の結果を用いた流出土砂量の評価

PREDICTION OF SEDIMENT RUNOFF FROM RESULTS OF BASIC SURVEYS UNDER SEDIMENT DISASTER PREVENTION ACT

高岡広樹¹・原田守啓¹・大石哲也¹・萱場祐一²

Hiroki TAKAOKA, Morihiro HARADA, Tetsuya OISHI and Yuichi KAYABA

¹正会員 博(工) 独立行政法人 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²正会員 博(工) 独立行政法人 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム
(〒300-2621 茨城県つくば市南原1-6)

There are some studies of sediment runoff using volume of deposited sediment in large dams. However, quantitative evaluation of sediment runoff is not sufficient because the basin area is large and has various surface geologies. We paid attention to sabo dams. The basin area of sabo dam is small and has almost uniform surface geology. The analysis of its deposition sediment is suited to develop the characteristics of sediment runoff.

In this study, we develop the prediction method of the volume of sediment runoff by deposited sediment volume of sabo dams and apply this method to Nagara River basin in Gifu Prefecture. As a result, we could evaluate the sediment runoff by using results of basic surveys under Sediment Disaster Prevention Act.

Key Words : *sediment runoff, sabo dam, Sediment Disaster Prevention Act, Nagara River*

1. はじめに

近年、直轄河川区間において、河床低下に伴う滞筋の固定や砂州の樹林化が散見され、問題となっている¹⁾。また、さらに河床低下が進行し、局所的な深掘れが生じている木曾川の事例²⁾等も報告されている。河床低下の原因の1つとして、支川からの流入土砂の減少が考えられる。事実、大石ら³⁾が岐阜県の中小河川を対象に行った調査では、岩盤が露出している河川が多く見られた。

これらの問題解決に向けては、流出土砂の量と質を評価する必要がある。流出土砂量の評価については、これまで、観測データに基づく方法や水理・水文学に基づく方法が行われている。観測データに基づく方法は、貯水ダムの比堆砂量と流域面積との関係式に代表され、地域特性があることが分かっている⁴⁾。また、表層地質により土砂生産特性が異なることが示唆されている⁵⁾が、対象としているダムの流域が大きく、さまざまな地質から成っている場合がほとんどであり、定量的な評価には至っていない。しかしながら、堆砂量を用いた解析は、土砂流出をマクロに把握するには、非常に有用である。

水理・水文学に基づく方法は、流水と流砂の支配方程

式に基づき解析するものであり、さまざまな土砂流出モデル⁶⁾が構築されている。いくつかのモデルでは、河床の粒度分布を考慮することにより、流出土砂の量と質を評価することができる。しかしながら、雨量や標高など多くのデータが必要であり、解析を行うには多大な労力を要する。

土砂生産源である山地では、不安定土砂の固定化や渓岸侵食を防ぐため、治山ダムが設置され、また、土石流災害を防止するため、砂防えん堤が建設されている。不透過型の砂防えん堤は、貯水ダムと同様、流出土砂を捕捉するため、砂防えん堤の堆砂量を対象とした研究も行われており、実測の堆砂量より、堆砂量推定式⁷⁾が求められている。しかしながら、統計解析で求められた式であり、物理的な意味が不明瞭で、適用範囲も限られている。砂防えん堤は全国的に数多く建設されており、流域面積が小さく、表層地質も均一である場合が多く、砂防えん堤の堆砂量の解析は、流出土砂の特性の把握に適していると考えられる。

さて、2001年、「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」(通称：土砂災害防止法)が施行され、土砂災害から国民の生命を守るため、土砂災害のおそれのある区域について、危険の周知、警

戒避難態勢の整備，住宅等の新規立地の抑制，既存住宅の移転促進等のソフト対策の推進が図られている．土石災害としては，急傾斜地の崩壊（傾斜度が 30° 以上である土地が崩壊する自然現象），土石流（山腹が崩壊して生じた土石等又は溪流の土石等が一体となって流下する自然現象），地滑り（土地の一部が地下水等に起因して滑る自然現象又はこれに伴って移動する自然現象）を対象としている．

これを受け都道府県では，溪流や斜面など土砂災害により被害を受けるおそれのある区域の地形，地質，土地利用状況について調査（基礎調査）を行い，それに基づき，土砂災害警戒区域（通称：イエローゾーン）や土砂災害特別警戒区域（通称：レッドゾーン）を指定している．特に，レッドゾーンは，建築物に損壊が生じ，住民等の生命又は身体に著しい危害が生じるおそれがあると認められる区域で，特定の開発行為に対する許可制，建築物の構造規制等が行われる．

土石流の発生する恐れのある溪流（土石流危険溪流）の基礎調査では，流出する土石等の量に影響するため，砂防えん堤や治山ダムなどの対策施設の諸元や現況について，調査・整理されている．基礎調査は全国各地の土石流危険溪流で実施されており，その結果を用いて砂防えん堤の堆砂量が評価できれば，流出土砂の特性について，日本全国で把握することが可能となり，総合土砂管理などに非常に役立つものとなる．

そこで，本研究では，土石流危険溪流の基礎調査で行われている砂防えん堤の調査結果を用いて，流出土砂量の評価を試みた．さらに，岐阜県長良川上流域へ適用し，流出土砂量の特性について検討するとともに，評価手法の課題について整理した．

2. 基礎調査結果を用いた流出土砂量の算定

本研究では，土石流危険溪流の基礎調査で実施される砂防えん堤の調査結果を用いて流出土砂量を推定する．

(1) 土石流危険溪流の基礎調査の概要

土石流危険溪流の基礎調査では，最初に，机上調査を実施し，地形図や数値地図などを用いて，警戒区域（イエローゾーン）の仮設定を行う．まず，土石流が氾濫を開始する地点（基準地点）を設定する．基準地点は，谷出口や扇頂部，勾配変化点などに着目して設定される．次いで，土石流の流下方向を設定する．流下方向は，周辺の地形，道路等の構造物，流路状況に影響されるが，土石流の直進性を考慮して決められる．さらに，周辺の地形条件などによりイエローゾーンが仮設定される．

机上調査の結果を踏まえ，現地調査を実施し，妥当性を判断するとともに，イエローゾーンに影響を与える微地形や構造物等を確認する．例えば，比高が5m以上あれ

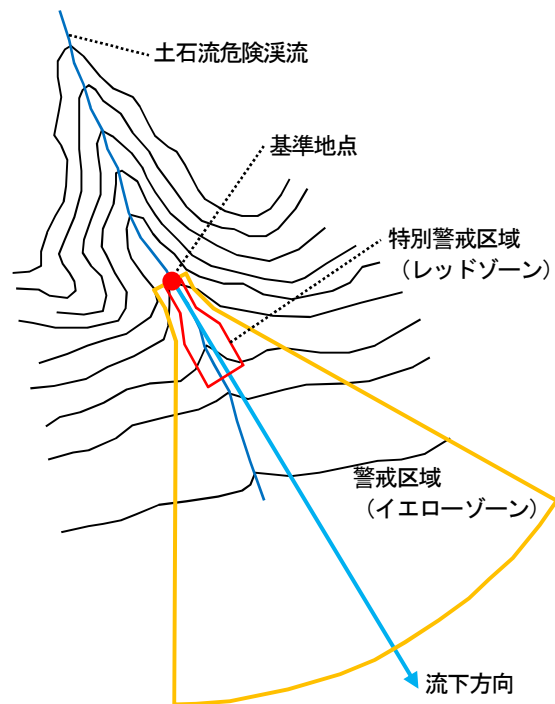


図-1 土石流の警戒区域の模式図

表-1 調査項目一覧

| 項目 | 記号 | 単位 |
|------------|------------|-----------------|
| 所管 | - | - |
| 竣工年度 | - | - |
| 対策施設構造 | - | - |
| 元河床勾配 | i_0 | (tan θ) |
| 平常時堆砂勾配 | i_1 | |
| 洪水時堆砂勾配 | i_2 | |
| 有効高 | H | (m) |
| 未満砂高 | ΔH | |
| 堆砂基礎長 | B_0 | |
| 現況堆砂幅 | B_1 | |
| 計画堆砂幅 | B_2 | |
| 現況堆砂長 | L_0 | |
| 計画堆砂長(平常時) | L | |
| 計画堆砂長(洪水時) | L_2 | |

ば，土石流は到達せず，イエローゾーンから除外される．また，基準地点上流について，溪床の堆積土砂量について調査する．溪床の堆積土砂が土石流として流出する土石等の量として，土石流により建築物に作用すると想定される力を算出する．それが建築物の耐力を上回る範囲を特別警戒区域（レッドゾーン）として設定する．区域設定の模式図を図-1に示す．

基準地点より上流に土石流対策施設がある場合，その効果により，流出する土石等の量が減少し，レッドゾーンの範囲に影響を与える．そのため，基礎調査の中で，施設の設置状況に関する調査を行い，施設の効果について適正な評価を行うこととなっている．土石流対策施設の代表例としては，砂防えん堤などの土石流捕捉工，床

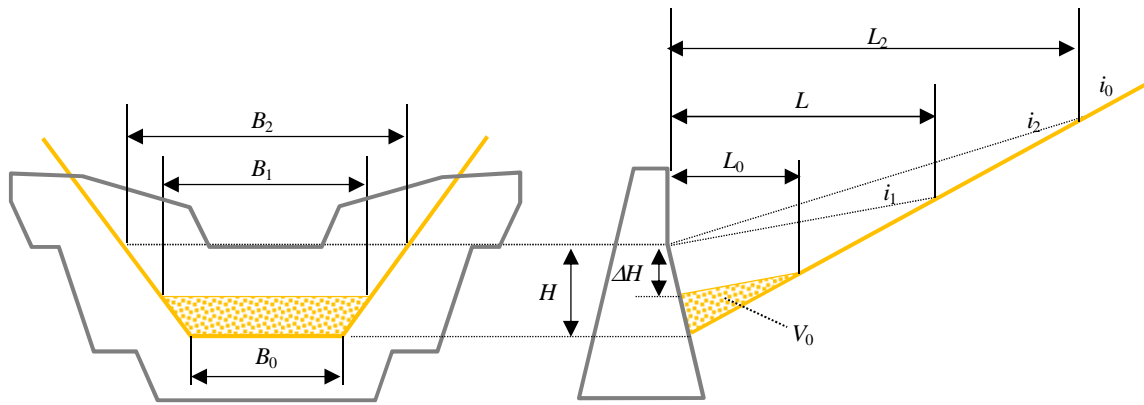


図-2 砂防えん堤の諸元（不透過型）

固工や山腹工などの土石流発生抑制工などがある。施設効果の評価結果は、土石流により流下する土石等の量に反映され、レッドゾーンの範囲が修正される。

(2) 砂防えん堤の調査

基礎調査による砂防えん堤の調査項目の一覧を表-1に示す。ここで、対策施設構造は、不透過型、部分透過型、透過型で区分されている。基礎調査では、砂防施設台帳などを用いて机上調査によりあらかじめ諸元を整理しておき、現地においてその妥当性を目視確認するとともに、現況堆砂幅や未満砂高についても計測する。本研究では、砂防えん堤の堆砂量を対象とするため、通常時に土砂を捕捉しない透過型の砂防えん堤は、対象外とした。不透過型砂防えん堤の諸元を図-2に示す。

ここで、計画堆砂長 L 、 L_2 については、有効高 H と堆砂勾配 i_1 、 i_2 より次式で算定可能である。

$$L = \frac{H}{i_0 - i_1}, \quad L_2 = \frac{H}{i_0 - i_2} \quad (1)$$

ここで、堆砂勾配をどのように設定するかが問題となる。堆砂勾配については、さまざまな研究が行われており、元河床勾配との関係について調べた研究⁸⁾や河床の粒径との関係について調べた研究⁹⁾、流砂理論から堆砂勾配を論じた研究¹⁰⁾などがある。国土交通省の基準¹¹⁾では、砂防えん堤を計画する際、堆砂勾配は元河床勾配の1/2までとしている。一方、海堀¹²⁾は、広島県の砂防えん堤を対象に堆砂勾配を調べており、満砂状態の17基の堆砂地の勾配は、元河床勾配の1/3程度であり、河川砂防技術基準よりも緩い勾配であることを明らかにした。この理由について、対象とした砂防えん堤の流域面積が小さかったことや土砂の粒径や土砂移動の頻度が小さいことが挙げられている。また、水山¹³⁾は、全国の直轄砂防工事事務所管内の288基の砂防ダムの堆砂測量資料を整理しており、堆砂勾配は、元河床勾配が1/10よりも急な場合、元河床勾配の1/2近くに分布するが、1/10よりも緩い勾配では広くばらつくことが分かっている。

基礎調査では、河川砂防技術基準と同様、堆砂勾配は元河床勾配の1/2となっている。



写真-1 砂防えん堤の堆砂状況例

(3) 流出土砂量の算定

図-2のように河道断面を台形で近似し、川幅の変化はなく、堆砂勾配を元河床勾配の1/2とすると、現況堆砂量 V_0 は、台形断面を底面とした四角柱の半分となり、次式により算定可能である。

$$V_0 = \frac{L_0}{2} \frac{(B_1 + B_0)}{2} (H - \Delta H) \quad (2)$$

ここで、堆積土砂の空隙率は考慮せず、見かけの体積で評価する。また、 L_0 ：現況堆砂長であり、有効高 H 、堆砂勾配 i_1 および未満砂高 ΔH を用いて、

$$L_0 = \frac{H - \Delta H}{i_0 - i_1} \quad (3)$$

と表される。また、現況堆砂幅 B_1 と未満砂高 ΔH は、

$$B_1 = \frac{(B_2 - B_0)}{H} (H - \Delta H) + B_0 \quad (4)$$

の関係があり、どちらかを測定すれば、現況堆砂量 V_0 を算定できる。現況堆砂幅や未満砂高の調査は必須ではないが、ほとんどの場合、堆砂状況が確認できる写真が撮影されており（写真-1）、ポール等のスケールが入っていれば、写真より未満砂高を推定することが可能である。

また、満砂状態の砂防えん堤については、満砂の時期

が不明であり、満砂後の流出土砂は捕捉されないため、堆砂量を流出土砂量とすると、過少評価することになる。そのため、満砂しているえん堤は、対象外とする。

写真-1にも見られるように、不透過型の砂防えん堤には、水抜き用の暗渠が造られており、洪水時などに微細土砂が流出していると考えられる¹⁴⁾。そのため、堆砂量を流出土砂量とすると、過少評価している可能性がある。貯水ダムを対象とした事例では、ダムの回転率（総貯水容量／平均年総流入量）より捕捉率を推定し、堆砂量から流出土砂量へ変換する方法¹⁵⁾が提案されているが、砂防えん堤への適用は難しい。微細土砂が多く生産される地質条件を持つ流域では、土砂の捕捉率が非常に重要になってくると考えられる。しかしながら、現状、評価手法がないため、本研究では、水抜き暗渠からの流出を無視し、現況堆砂量を流出土砂量と見なすこととするが、何らかの評価が必要である。

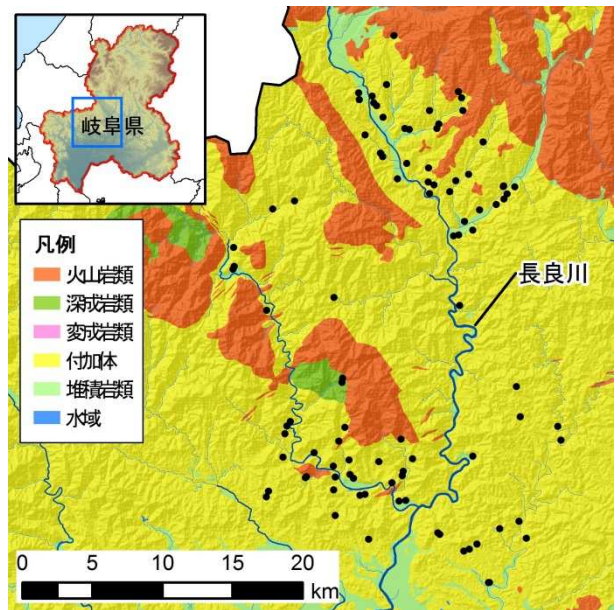


図-3 砂防えん堤位置図

3. 長良川流域の流出土砂量の評価

前章で述べた手法を用いて、岐阜県長良川流域の砂防えん堤を対象に、流出土砂量の評価を行った。

(1) 対象とした砂防えん堤

本研究では、岐阜県を流れる長良川の中上流域の砂防えん堤を対象とした。基礎調査は、平成17年から平成24年度に実施されている。対象流域内には、土石流危険渓流が330ヶ所程度あり、170基の砂防えん堤が建設されている。その内、未満砂高の評価が難しく堆砂量の推定ができなかったもの（45基）、満砂しているもの（19基）、上流に他の砂防えん堤があるもの（1基）、透過型の砂防えん堤（11基）を除いた計94基を対象とした。図-3に対象とした砂防えん堤の位置（図中の黒丸）を示す。同図には、20万分の1の表層地質図も示している。

砂防えん堤の流域面積について、GISを用いて算出するとともに、流域の表層地質の割合を整理した。図-3を見ると、対象とした砂防えん堤の多くは、付加体の領域にあることが分かる。

図-4に、対象とした不透過型砂防えん堤の建設数の推移を事業種別に示している。事業種別は、銘板を撮影した写真より判別し、激特事業や災害関連緊急事業などを災害復旧とし、それ以外を通常砂防工事とした。また、銘板の写真がないものや判読できないものについては、不明とした。建設数は、1970年代から1980年代にかけて急増していることが分かる。岐阜県では、1976年9月に台風第17号による豪雨に見舞われ、長良川下流では堤防が決壊し、洪水氾濫が発生している。山地流域では、斜面崩壊や土石流が発生していたと考えられ、この災害後、通常砂防工事だけでなく、災害復旧事業により多くの砂防えん堤が建設されていることが分かる。しかしながら、

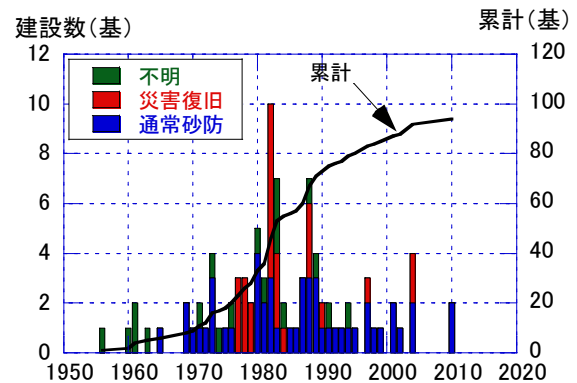


図-4 砂防えん堤の建設数

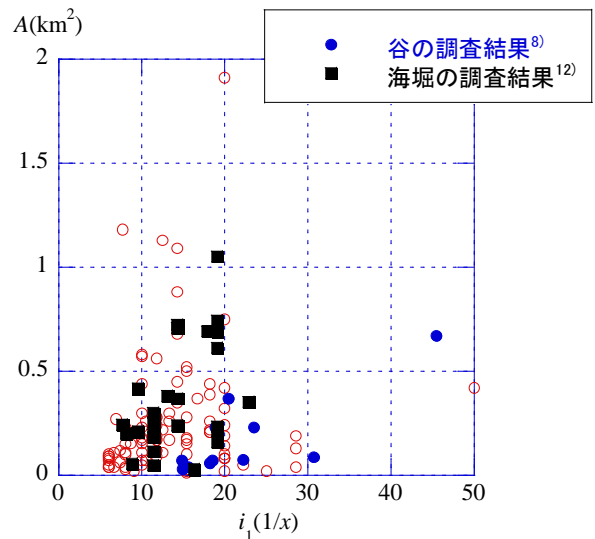


図-5 堆砂勾配と流域面積との関係

2000年以降は、不透過型砂防えん堤の建設数は非常に少なくなっている。最近では、通常時には土砂を貯めず、土石流のみを捕捉する透過型や部分透過型の砂防えん堤の建設が進められている。

図-5に、堆砂勾配と流域面積との関係を示す。同図には、谷⁸⁾や海堀¹²⁾の実測結果についても示している。傾

向として、流域面積が大きいほど堆砂勾配も緩くなっていることが分かる。本研究では、堆砂勾配を元河床勾配の1/2としたが、谷、海堀の実測結果と大きくずれておらず、妥当であると考えられる。

(2) 流出土砂量の算定結果

94基の砂防えん堤の基礎調査結果を用いて、式(2)より現況堆砂量を計算した。現況堆砂量を、完成年から基礎調査年までの流出土砂量とし、流域面積および経過年数で除し、比流出土砂量 q_s を算出した。図-6に流域面積 A との関係を示す。図中の①～⑤の直線は、我が国の主要河川のダム堆砂量に基づいて得られた研究成果⁴⁾であり、

$$q_s = KA^{-0.7} \quad (5)$$

で表される。ここで、①：最大の流出土砂量を示す黒部川、天竜川、大井川など、②～③：阿賀野川、庄川、吉野川、木曾川、耳川、熊野川など、流出土砂量が多いとされる河川、④～⑤：流出土砂量が少ない中国地方の河川のもので、④はその上限、⑤はその下限を示し、そのほかの地域も④～⑤群に入るものが多いとされている。

既存の研究は、流域面積 10km^2 以上の領域であるのに対し、本研究は、ほとんどが 1km^2 以下である。本研究の結果を見ると、既存の研究成果よりもばらつきが小さく、2オーダー程度の範囲に収まっていることが分かる。比流出土砂量は、流域面積が大きいほど、生産土砂が貯留される機会が多くなり、土砂生産の少ない平地部が相対的に増加するため、小さくなると言われている⁴⁾。本研究の結果は、既存の研究成果と流域面積が大きく異なる領域であるが、流域面積が大きくなると比流出土砂量は小さくなる、同様な傾向が見られることが分かる。さらに、式(5)よりも傾きが急であり、流域面積の減少に対する比流出土砂量の増加が著しいようにも見える。

本研究で算出した比流出土砂量は、水抜き暗渠からの土砂流出を考慮していないため、若干、過少評価している可能性があるが、⑤の実線を延長したものよりも下方に位置しており、流域面積に比して比流出土砂量が小さいことが示唆される。この理由としては、付加体の中でもチャートと呼ばれる非常に硬く、風化しにくい地質であるため、流出土砂量が少ないと考えられる。

一方、全国103基の砂防えん堤の資料を用いて、統計解析により以下の比堆砂量推定式が得られている⁷⁾。

$$\log q_s = a + b \log A + c \log R + d \log M_E + e \log R_r \quad (6)$$

ここに、 R ：平均年間雨量(mm)、 M_E ：流域平均高度(m)、 R_r ：起伏量比、 a, b, c, d, e ：係数であり、表層地質を考慮しない場合、 $a = -3.1980$ 、 $b = -0.2059$ 、 $c = 0.9687$ 、 $d = 1.213$ 、 $e = 0.6757$ である。起伏量比は、最大起伏（最高点と谷出口との高度差）を流路延長で除したものである。

GISを用いて M_E 、 R_r を整理し、 R として最寄りのアメダス観測所の平均雨量とし、式(6)により比堆砂量を推定

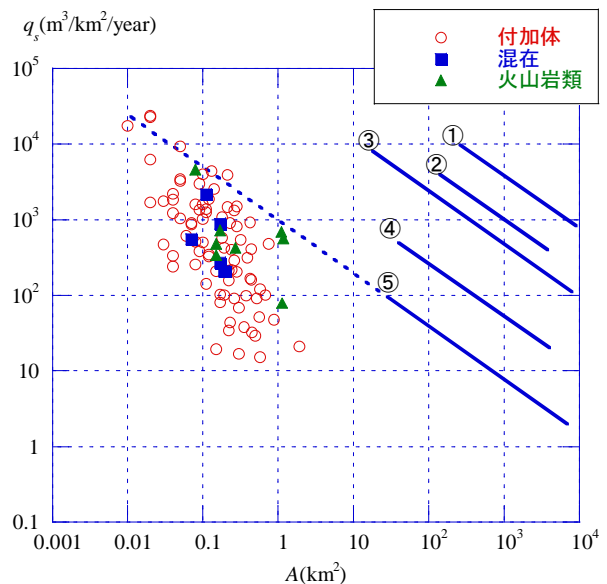


図-6 比流出土砂量と流域面積との関係

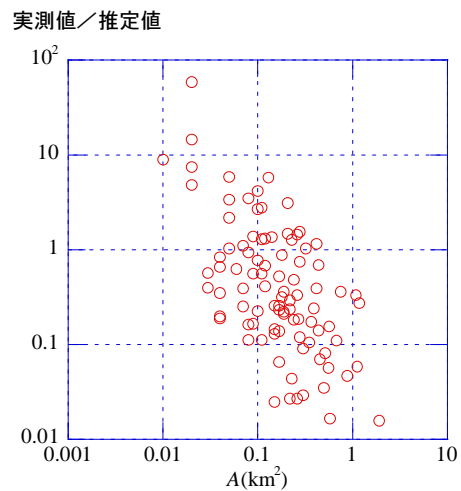


図-7 比堆砂量推定式との比較

し、図-6の比流出土砂量との関係について、両者の比を図-7に示す。流域面積 0.1km^2 前後では、両者はよく一致していることが分かる。一方、流域面積が大きくなるほど、比は小さくなっており、大略的に、本研究の結果は、式(6)で推定される堆砂量に比べ、流域面積 0.1km^2 以上では過小に、 0.1km^2 以下では過大に評価していることが分かる。これは、図-6における傾きが急であることと一致する結果である。

本研究で対象とした砂防えん堤の流域は、ほとんどが付加体か火山岩類から成っている。図-6中の凡例は、流域の8割以上を占めているものとし、それ以外は、両者が混在しているものである。付加体のデータがほとんどであり、明確な傾向は把握できないが、火山岩類のデータが若干、比流出土砂量が大いように見える。

貯水ダムを対象とした研究では、表層地質の構成により、土砂生産特性が異なることが示唆されている⁵⁾。しかしながら、明確な関係性を見つけるまでには至っていない。この原因の1つとして、貯水ダムの流域が比較的

広い範囲、流域に様々な地質が混在しており、特徴が把握し辛いことが挙げられる。一方、砂防えん堤の流域は、比較的小さく、表層地質も均一な場合が多いため、表層地質の違いによる土砂流出の特性を把握することができる可能性がある。本研究で対象とした長良川流域では、付加体に属するものがほとんどであったため、今後は、表層地質の異なる他流域のデータを追加し、地質ごとの特性について検討を行う予定である。

また、本研究では、単純に経過年数で除して比流出土砂量を算定している。しかしながら、毎年降雨の状況は異なっており、豪雨が発生した年は、流出土砂量が多いと考えられる。今後は、降雨の変動を考慮した解析を行う必要がある。また、表層地質により河床材料の摩耗破碎特性が異なり¹⁶⁾、粒径に大きく寄与することが分かっている。基礎調査では、河床材料については調査されていないため、流出土砂の粒度分布の評価には、他の調査を行う必要がある。

4. おわりに

本研究では、土石流危険渓流の基礎調査による砂防えん堤の調査結果を用いて、流出土砂量の推定を試みた。その結果、未満砂の不透過型砂防えん堤において、現況堆砂幅または未満砂高が測定されていれば、堆砂量を算出できる。未満砂高は、堆砂の現況写真などから推定することも可能である。

ここで、堆砂勾配の評価が問題であり、本研究では、基礎調査の結果に倣い、堆砂勾配を元河床勾配の1/2とした。しかしながら、堆砂勾配は、河床材料などにも影響すると考えられ、より詳細な検討を行う必要がある。

また、本研究では、水抜き暗渠からの土砂の流出を無視し、堆砂量＝流出土砂量としており、過少評価している可能性がある。今後は、砂防えん堤の土砂の捕捉率について、雨量や流量などとの関係を明らかにし、より正確に堆砂量を評価する必要がある。

岐阜県長良川上流域の94基の砂防えん堤を対象に、流出土砂量の推定を行った。その結果、流域面積が大きいほど比流出土砂量は小さくなる傾向が見られたが、既存の研究成果と比べ、傾きが急であった。この原因については、本研究の結果だけでは解明が難しく、他流域のデータを追加し、さらに検討を行う必要がある。

貯水ダムを対象とした多くの研究では、比較的流域が大きく、多様な地質構成から成っており、堆砂量と表層地質との関係が把握しづらい。一方、本研究では、砂防えん堤を対象としており、流域が比較的小さく、表層地質は均一である場合が多い。また、基礎調査は全国で実施されているため、それらの結果を用いて、全国各地の流出土砂量の特性を把握することができ、表層地質と流出土砂量の関係性などが明らかになると考えられる。

今後は、他流域の資料を追加するとともに、表層地質や地形量等との関係について、さらなる解析を行う予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、岐阜県県土整備部、郡上土木事務所、美濃土木事務所には、基礎調査結果および施設台帳を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 長田健吾, 安部友則: 石礫河川の河床安定に果たす石の役割, 水工学論文集, 第52巻, pp. 643-648, 2008.
- 2) 栗原太郎, 浅野和広, 菊池秀之, 高橋伸次, 黒田直樹: 木曾川の局所洗掘箇所における発生要因の分析, 河川技術論文集, 第19巻, pp. 165-170, 2013.
- 3) 大石哲也, 高岡広樹, 原田守啓, 萱場祐一: 中小河川改修時の川幅設定が河道の景観に与える影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 70, No. 4, pp. I_997-I_1002, 2014.
- 4) 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, pp. 555-570, 1974.
- 5) 田代喬, 栃木宏之, 高岡広樹, 辻本哲郎: 集水域特性からみたダム上流域における土砂生産の評価, 河川技術論文集, 第16巻, pp. 71-76, 2010.
- 6) 芦田和男, 江頭進治, 中川一: 21世紀の河川学 安全で自然豊かな河川を目指して, 京都大学学術出版, 2008.
- 7) 土木研究所砂防研究室: 砂防ダムの堆砂流出土砂量の研究, 第23回建設省技術研究会報告, pp. 489-517, 1970.
- 8) 谷勲: 特殊な場合の堰堤貯砂勾配について, 新砂防, 18, pp. 17-20, 1955.
- 9) 熊谷才蔵, 並松達他: 福岡県糸島半島の砂防ダム堆砂勾配調査, 九州大学演習林集報, No. 14, pp. 1-10, 1960.
- 10) 矢野勝正, 大同淳之: 砂防ダムの堆砂勾配について, 新砂防, 31, pp. 1-6, 1958.
- 11) 日本河川協会: 国土交通省河川砂防技術基準 同解説, 計画編, 技報堂出版, 2005.
- 12) 海堀正博: 小流域での流出土砂量とそれに対する砂防施設の役割—特にダム堆砂勾配について—, 広島大学総合科学部紀要IV理系編, 第18巻, pp. 19-34, 1992.
- 13) 水山高久, 井良沢道也, 天田高白, 小林幹男: 砂防ダム堆砂測量資料の解析, 新砂防, Vol. 43, No. 4, pp. 33-35, 1990.
- 14) 栗原淳一, 山越隆雄, 田方智, 若林栄一: 砂防えん堤水抜き暗渠からの土砂流出への対応, 土木技術資料, 47-11, pp. 62-67, 2005.
- 15) 土木学会: 水理公式集【平成11年版】, 1999.
- 16) 五島暢太, 田代喬, 辻本哲郎: 流域地質の異なる河川における石礫の摩耗・破碎現象のモデル化に基づく河床材料の縦断変化に関する研究, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol. 68, No. 4, pp. I_907-I_912, 2012.

(2014. 9. 30受付)