

山地河川における土砂流出ポテンシャル パワーを用いた流出土砂量予測

ESTIMATION OF SEDIMENT DISCHARGE BY USING OF POTENTIAL POWER OF RIVER BASIN IN MOUNTANIOUS REGION

大橋慶介¹・都築恭子²・藤田裕一郎³
Keisuke OHASHI, Kyoko TSUZUKI and Yuichiro FUJITA

¹正会員 博(工) 岐阜大学工学部 社会基盤工学科 助教 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²非会員 藤コンサル株式会社 (〒451-0025 名古屋市西区上名古屋三丁目12番5)

³フェロー 工博 岐阜大学 流域圏科学研究センター 教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Power of sediment discharge potential in river basins P [Nm/year] defined by the work of annual precipitation in river basins has proved to be effective to estimate sediment discharge in 10^2 to 10^4 km² scale basin. So, its effectiveness is examined when it is applied for the estimation of those less than 10^2 km² scale subject to debris control projects, reflecting confluence network of river system and geological feature. Consequently, its usefulness is confirmed and sediment yield is largest in accretionary complex for same values of the power of sediment discharge potential.

Key Words : sediment transport, check dam sedimentation, GIS, geology, sediment transport potential power

1. はじめに

国土保全や国民経済的な視点から、重要な水系においては、総合河川計画として、河川に関連する計画の基本となる事項についてさまざまな方針が設定されている。そのいくつかの事項のひとつに土砂計画があり、流域の流送土砂量の把握の必要性が指摘されている¹⁾。こうした水系全体の大規模な計画だけにとどまらず、河道や河川構造物の計画において、流域の土砂流出量を把握することが要求されるものは、発電用ダムにはじまり、取水堰、砂防ダム、魚道等、その規模や目的もさまざまである。水系規模での巨視的な土砂流出量予測の研究として、比流砂量 qs と流域面積 A との関係を地域・水系係数 K で整理して、 $Qs/A = KA^{-0.7}$ の関係を明らかにした芦田・奥村²⁾のものが挙げられる。さらに、奥村³⁾はBagnoldによるstream powerの考え方を発展させ、河道や水理パラメータから流水のエネルギーを算定して土砂流出量の予測を試みている。この研究のように、大橋・藤田^{4), 5)}は、土砂流出現象を降水の位置エネルギーが単位時間あたりになす仕事と捉え、仕事率 P (パワー) と土砂流出量 Qs との関係が $10^2 \sim 10^4$ km² の水系規模における主要なダムの堆砂量から $Qs/P = P^{-0.6}$ であることが

明らかにしてきた。しかし、この関係が $10^0 \sim 10^2$ km² 程度の小規模な山地河川流域でも成り立つかどうかは不明であった。これは砂防事業や治山といった土砂生産が激しい地域での対策工が盛んに行われている流域規模に当てはまり、この規模での土砂流出特性を明らかにすることは河川・砂防事業の計画に有用な情報となると考えら

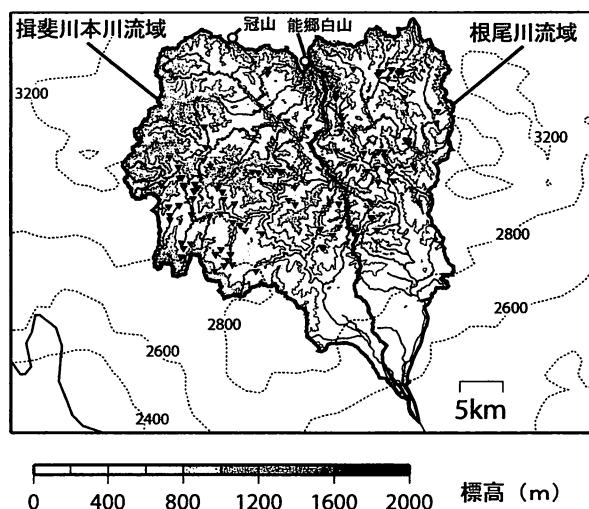


図-1 流域形状と高度分布 (破線は降水量分布, ▼印は砂防ダムの位置を表す)

れる。よって、本研究の目的は、山地河川において流域形状、高度、および、降水量分布データからGISを用いて流域が有する降水のパワーを算出し、それらと砂防ダム堆砂量から推定された土砂流出量との関係を基に、流域全体での土砂動態および流出量の推定方法の検討を行うものである。

2. 研究対象流域の概要

(1) 流域の地形、気候、地質について

研究対象流域は、揖斐川水系揖斐川本川と根尾川であり、それらの合流点より上流域を取り扱う。その概要として、高度分布、水系網、降水量分布、および、砂防ダムの位置を図-1に示す。揖斐川本川は冠山(1256.6 m)を源流とし、その総流域面積1840 km²のうち、1170 km²が対象流域であり、そのうち揖斐川本川が740 km²、根尾川が430 km²となっている。降水量は両流域ともに、下流域では2600 mm、上流域では3400 mm程度となっていて、冬季の積雪も多い地域である。

揖斐川本川上流域・根尾川流域は、地形区分において中部地方主部の「山地・火山」の両白山地、および、「山地・低地」の美濃高原にあたる。この地域の特徴として、美濃帯と呼ばれる付加コンプレックスの影響を強く受けた地形であることと、活断層の影響を受けた直線的な谷や河道が発達していることが挙げられる⁶⁾。付加コンプレックスは、対象流域内で最も広く分布し、次いで、深成岩類、堆積岩類の順に占められている。能郷白山は深成岩類(花崗閃緑岩)から成り、周辺には面積は小さいが火山岩類も分布している。能郷白山(1617 m)に源をもつ根尾川西谷川は、1891年の濃尾地震で断層崖が出現した根尾谷断層に沿って、直線的に流下している。

(3) 砂防ダムについて

この地域は昭和40年9月に台風23号・24号と前線の影響から豪雨に見舞われ、特に旧徳山村(現揖斐川町)や能郷白山付近では700 mmを越える日雨量が観測されている。この影響で、徳山白谷、根尾西谷川の根尾白谷で、崩壊土砂量がそれぞれ183万 m³、107万 m³の大規模な斜面崩壊が発生し、そのとき生産された不安定土砂の流出は現在も続いている。そして、この災害復旧を目的として、当該流域は昭和43年に越美山系砂防事務所の管理区間となった経緯がある。国による直轄区域となる以前に作られた県管理の砂防ダムもこの流域には多数存在しているが、本検討では堆砂に関わる網羅的な調査が行われている理由から、直轄砂防ダム(図-2)を対象とし、そのうち昭和43年9月から平成18年3月までに供用開始されていて、資料から堆砂量が推定できる、揖斐川流域の58基、根尾川流域の46基、合計104基を解析対象として

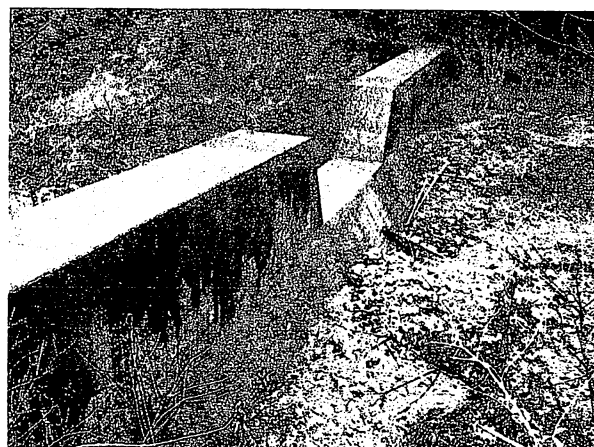


図-2 砂防ダムの堆砂状況

選定した。

3. 地形解析の方法と流域の特徴

(1) GISによる解析に用いる数値データについて

流域地形データは、国土地理院の50 mメッシュ標高データと国土交通省国土数値情報「流域界・非集水域(面)」W15-52Aを基に作成している。流路、降水量は国土数値情報「流路」ks-272、「気候値メッシュ」G02-62Mを使用した。これらの情報をGISソフトウェアのSISにて、解析に必要な単位流域中の面積や高度・降水量分布といったパラメータを抽出し、流路データの支川合流情報を基に単位流域の各諸量を合流順に組み合わせて、流域全体の情報を作成している。

(2) 土砂流出ポテンシャルパワーについて

土砂を運搬する運動エネルギーの基となる降水の位置エネルギー E は、

$$\begin{aligned} E &= m_R g \Delta h \\ &= \rho g \int_0^{A_{max}} R \{h(A) - h_0\} dA \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここで、 m_R は降水量の質量、 g は重力加速度、 Δh は比高、 h_0 は基準となる標高(通常はダムサイトの標高)、 R は降水量、 A_{max} 集水域面積である。この E から時間あたりの仕事、すなわち、仕事率の次元をもつ土砂流出ポテンシャルパワー P は砂防ダムの供用期間 Δt を用いて、

$$P = \rho g \Delta t^{-1} \int_0^{A_{max}} R \{h(A) - h_0\} dA \quad (2)$$

として定義する。

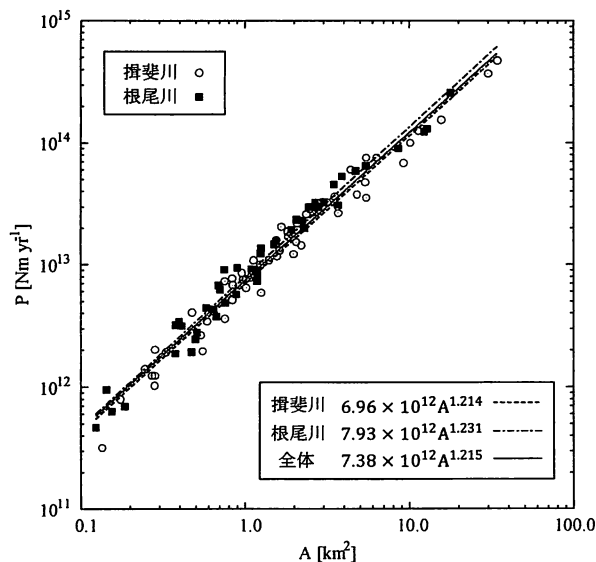


図-3 揖斐川上流・根尾川流域における流域面積とパワーとの関係

(3) ポテンシャルパワーと流域面積との関係

パワー P は式(2)より、面積 A と比高 Δh の関数である。また、河川は流下するに従い、その流域面積と比高を必然的に増加させることから、降水量 R がほぼ一定の条件においては、 P は A の1.0より大きい冪乗となる。ここで、揖斐川上流域の砂防ダム集水域における P と A の関係を図-3に示す。これによると、揖斐川本川、根尾川ともに P は A の約1.2乗に比例しており、根尾川の方がやや係数が大きくなっていることが分かる。流域全体で考えると、標高の高い上流域の年平均降水量は3000 mmを超え、反対に下流部では約2600 mmと400 mmの差があるため、面積増加に伴うパワーの増加率は下流部へ行くほど鈍くなる。このことは10 km²以上のプロットの多くが回帰直線を下回っていることから伺える。

4. パワーによる流域土砂流出量の比較

(1) 砂防ダム堆砂量に基づく年平均土砂流出量の推算

揖斐川本川上流域、および、根尾川流域に点在する砂防ダムの堆砂資料から、年平均土砂流出量 Q_s を見積もり、流域全体の流出傾向の把握を試みた。解析データの基となる資料は、本来、堆砂量の計測を目的とするものではなく、堤体の維持管理のための調査によるものであることから、具体的な数値としての堆砂量は記録されていない。しかし、堆砂率、もしくは、未満砂高といった項目が記録されているので、これらの値と計画貯砂量、および、供用期間から Q_s を算出した。砂防ダムの計画堆積量 C m³は岐阜砂防事業設計要領より、

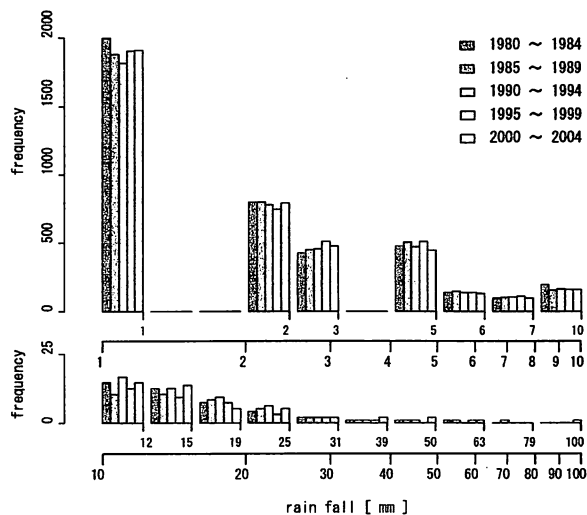


図-4 1980～2004年までの5年ごとの時間雨量のヒストグラム

$$C = \frac{1}{2} \frac{mn}{m-n} b' h^2$$

$$= \frac{1}{2} \frac{mn}{m-n} \left\{ b + \frac{1}{3} (m' + n') h \right\} h^2 \quad (3)$$

として計算される。ここで、 $1/m$ 、 $1/n$ 、 b' 、 b 、 h 、 $1/m'$ 、 $1/n'$ はそれぞれ、堆砂勾配、現溪勾配、堆砂平均幅、元河床幅、ダム有効高、左岸勾配、右岸勾配である。また、 $1/m$ を計画河床勾配、 $1/n$ を元河床勾配、 b を水通し底幅、 h を堤体高において計算した。さらに、未知量の $1/m'$ 、 $1/n'$ については、堤頂幅 B mを用いて、 $1/m' = 1/n' = 2h/(B - h)$ として求めた。よって、未満砂高を H mとすると、調査時における堆砂量 C' m³は、

$$C = \frac{1}{2} \frac{mn}{m-n} \left\{ b + \frac{1}{3} (m' + n') (h - H) \right\} (h - H)^2 \quad (4)$$

となり、堆砂率は C'/C であることから、 Q_s は計画堆砂容量と供用期間 Δt を用いて、

$$Q_s = \{C'/C (1 - \lambda) V_{sp}\} / \Delta t \quad (5)$$

と計算できる。ここで、間隙率 λ は0.4としている。

解析対象の砂防ダムは1969年完成のものから、2003年完成のものまで存在し、それぞれの供用期間が異なるため、ある期間の降水量が平均的な傾向から著しく外れている場合は、その期間の砂防ダムのデータは除外する必要がある。その確認のため流域近隣のアメダスデータ（揖斐川）が存在する1980～2004年までの5年ごとの時間雨量のヒストグラムを図-4に示す。時間雨量100 mm程度の降雨が2000～2004年の期間で観測されているが、その他は概ねどの期間でも同様の頻度分布であることが

わかる。このことから、砂防ダムの建設時期にかかわらず同じ扱いをしてよいものと判断する。

(2) 流域面積による年平均土砂流出量の評価

砂防ダム堆砂量から推算された年平均堆砂量 Qs とその集水域面積 A から Qs/A ，すなわち，比流砂量 qs と A との関係，および，そこから推定される回帰式，回帰式周りの度数分布を図-5 に示す。前述の芦田らによる全国主要貯水池の堆砂量から得た比流砂量と面積の関係は， $A^{-0.7}$ に比例する結果であったが，ここでは更に右下がりの傾向が強く現れており，プロットの包絡線から Qs/A はおよそ $A^{-0.9}$ に比例していることが分かる。この違いは，前者が大きな貯水池を有するダム集水域からの流出土砂を対象としているのに対して，後者は集水域がより上流域に存在していることから，河床や斜面の勾配や，流砂の粒径の違いに起因するものであると考えられる。従って，砂防ダム周辺で生産，運搬される土砂はすべてが下流へ流送されるわけではなく，粒径の大きなものから選択的に掃流力の減少に応じて堆積が生じ，結果として土砂流出量の減少が山地の小さな流域面積内で起こっていることによるものと考えられる。また，満砂，未満砂による違いも明らかな傾向として見るができる。未満砂ダムは点集の上限，もしくは，下限に多く分布しており，満砂ダムは比較的中央付近に集中している。満砂ダムは貯砂容量を使い切った状態であることから，満砂した時点から時間が経過するに従って，みかけの比流砂量は小さくなる。このことから，上限・下限を示す回帰式は，満砂した砂防ダムではなく，点集の最も外側の未満砂ダムのプロットを通過するものから決定している。ただし，満砂ダムでの比流砂量が見かけのうえで小さくなること以上に，点集の下限に位置する未満砂ダムは，古いダムが多く，完成してから大きな土砂生産イベントが発生していない場合は，比流砂量が小さくなっていると考えられる。反対に，上限に分布する未満砂ダムは新しいダムが多い。これは，供用開始直後に大きな土砂生産イベントが発生したため，時間あたりの堆砂量が大きく見積もられていることによるものであると推測できる。また，これらの点集の平均として求まる点線で示された回帰式まわりのデータのばらつきを示す標準偏差は $10^{0.631}$ となっている。

(3) パワーによる年平均土砂流出量の評価

Qs/A と A と同じく， Qs/P と P の関係を図-6 に示す。 A による解析と同様に，回帰式の上限・下限は最も外側の未満砂ダムのプロットから決定している。回帰式の傾きも点集全体の傾向からおおよそその値を決定した。これによると，単位パワーあたりの年平均流砂量 Qs/P はおおよそ $P^{-0.8}$ に比例していることが分かる。これは，全国の主要貯水池の堆砂量を基にした $Qs/P \propto P^{-0.6}$ という結果⁵⁾ と異なる結果となった。このことについても，

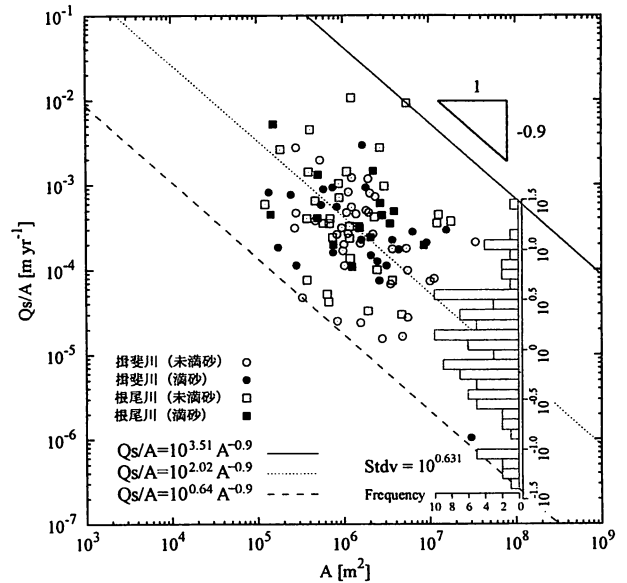


図-5 流域面積 A と比流砂量 Qs/A との関係

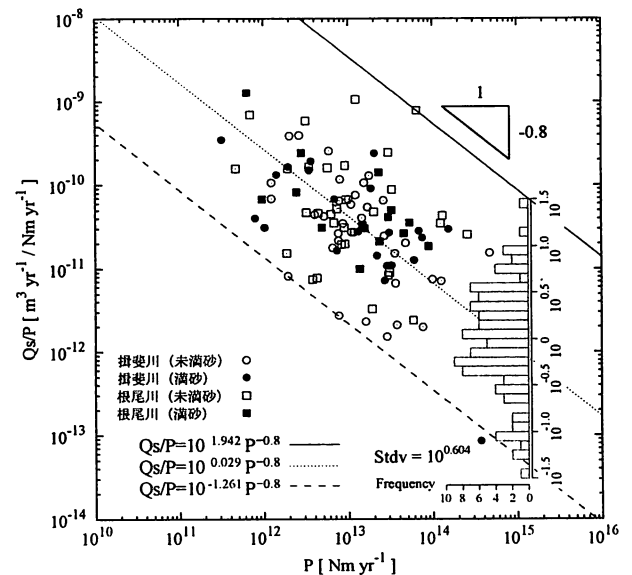


図-6 パワー P とパワーあたりの土砂流出量 Qs/P との関係

A での評価と同じく生産された土砂の大部分が堆積しやすいという山地河川特有の状況を反映した結果，より下流に位置する大規模ダムより Qs/P の減少割合が大きくなっていると思われる。 A もしくは P による大規模ダムでの係数 α と砂防ダムでの係数 α の違いは，いずれも 25 %であることから，両評価において同じ原因で α が変化していることが示唆される。 $Qs/A - A$ の関係のときのように，満砂ダムのプロットが点集の中央付近に分布していることと，新しいダムが上限に，古いダムが下限に位置している。また，回帰式まわりの Qs/P の標準偏差は $10^{0.604}$ となって， A による評価より，ばらつきが小さくなっていることが分かる。しかし，それでもなお，平均的回帰式の両側 1σ であっても依然10倍以上の開きがある。更に解析の精度を高めるには，流砂の粒度分布，

出水や土砂生産イベントの発生頻度など、水理・水水量を取り入れ、現実の土砂の運搬形態を考慮に入れた評価方法とする必要があると考えられる。

(3) 流域土砂流出量の推定

図-5, 6 の回帰式を用いて揖斐川上流域全体の土砂流出量の推算を行う。AおよびPによる推定土砂流出量を図-7 に示す。支川合流を繰り返すことで流域面積、もしくは、パワーが増加し、それぞれの流出係数に比例して土砂が輸送されている様子がわかる。しかし、最下流域である揖斐川、根尾川合流点直上流の単位流域における推定土砂流出量を比較すると、Pによる推定量が約1800 m^3yr^{-1} Aによる推定量が820 m^3yr^{-1} と1000 m^3yr^{-1} もの違いが生じている。このことは、Aによる回帰式の係数 α が-0.9であることに対して、一方のPの係数 α は-0.8であり、その差が流域面積の大きい下流域において顕著となっている。ただし、揖斐川本川沿いの横山ダムの建設後20年間の年平均堆砂量がおおよそ60万 m^3 であることを考えると、どちらの評価も流域全体の実際の流砂量にはほど遠い値である。これは、砂防ダムが捕捉している土砂と、実際の流域において流送されている土砂の粒度組成が大きく異なるためであると考えられ、反対に、砂防ダムに堆積しているものと同等の粒度組成である流域においては、この手法が限定的に用いることができると考えられる。

5. 地質の影響について

(1) 流域の地質分布と地質別土砂流出特性の解析方法

図-8 に揖斐川上流域の地質分布を産業技術総合研究所のシームレス地質図⁷⁾を基に作成したものを示す。美濃帯と呼ばれる付加コンプレックスが流域の大半を占め、ここで挙げた16種類の岩石区分・地質時代の組み合わせの中で、8種類が付加帯堆積物に関連するものである。この地質分布情報を基にして、単位流域内に占めているそれぞれの地質の面積およびパワーを求めた。図-6 の Q_s/P と P の関係のグラフに、ダム集水域内に占める各地質のPを円グラフで表したものを図-9 に示す。大きな面積を占める地質番号52の堆積岩類を主とする付加コンプレックス・ジュラ紀中期～後期が点集のPが小さい側に多く分布し、地質番号60の堆積岩類を主とする付加コンプレックス・ジュラ紀前期～中期は、Pが大きく Q_s/P も大きい、グラフ右上方に分布していることが分かる。これらの地質は南東の方角から日本列島に押しつけられて形成されているため、古い年代の地質番号60が高い標高の地域に位置しているものと考えられる。

地質ごとの土砂流出特性を考えたとき、一般的には硬くて丈夫な物性をもつ地質では土砂流出が少ないだろうという予想が成り立つ。こうした地質による土砂流出の

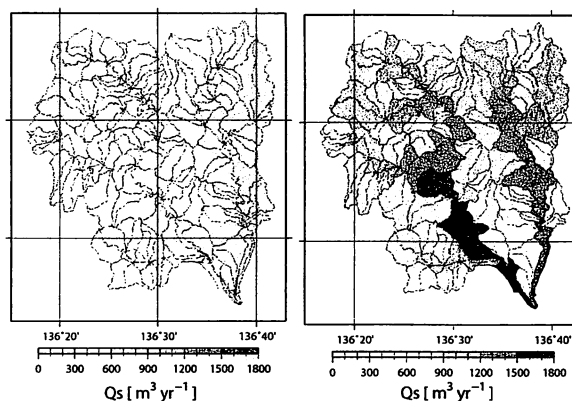


図-7 推定土砂流出量（左が流域面積Aによる評価、右が土砂流出ポテンシャルパワーPによる評価）

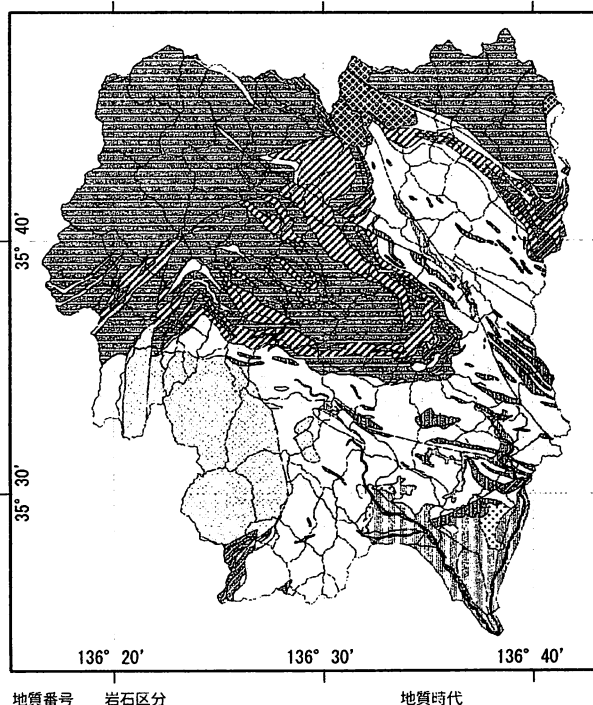


図-8 流域の地質分布

傾向を捉えるために、 Q_s を地質が占めるPの大きさに応じて分配した初期近似の Q_s/P から地質ごとの回帰分析を行い、その結果の α とKから再度 Q_s を計算し、再分配した地質ごとの Q_s/P と P の関係を図-10 に示す。

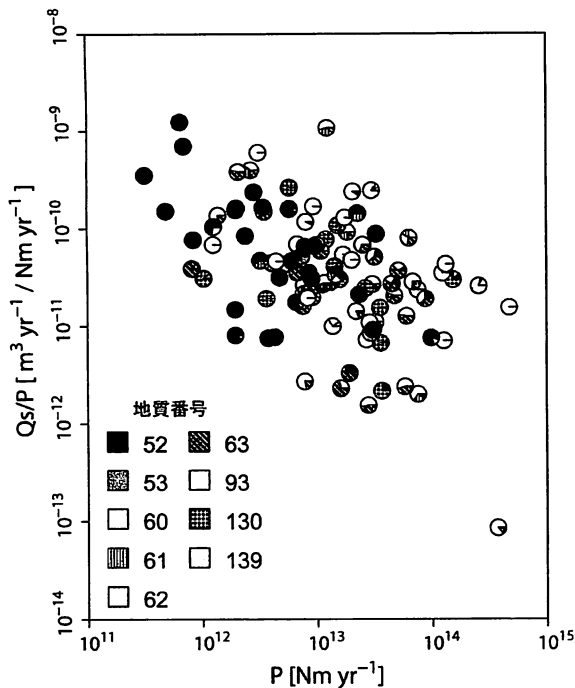


図-9 地質が有するPの大きさとQs/PとPの関係

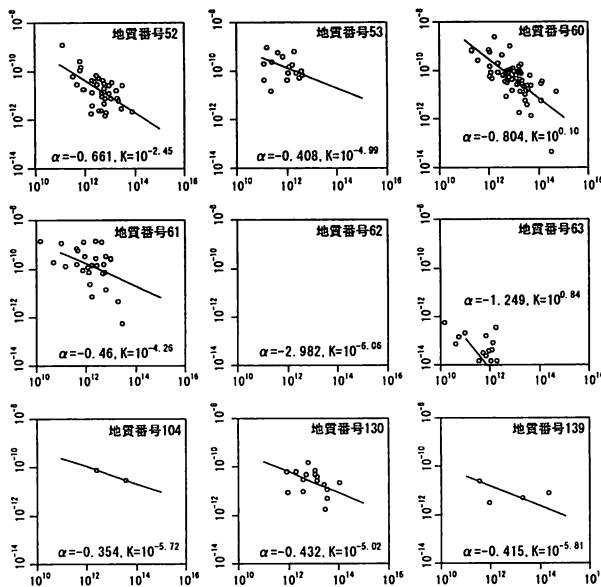


図-10 地質毎の土砂流出特性

(2) 地質別土砂流出特性の解析結果

Qs/P と P は非線形の関係にあるので、重ね合わせの原理は成り立たないが、ここでは近似値から傾向を読み取る目的で解析を行った。その結果、岩石区分が同じである地質番号53と61の α が近い値となっているが、地質番号52と同じ岩種の60はいずれも平均より大きな値を示しているものの、 α の値は-0.661と-0.804と異なっている。地質番号62など、その他の地質はサンプルが少ないため、明確な傾向を把握するのは困難であるが、 α はおおよそ-0.35から-0.45程度に収まっている。全体としては、前述のチャートを主とした付加帯コンプレックスの

地質番号53と61が α の傾きが緩く、 P の増加に伴う Qs/P の減少が小さいことが分かる。

6. まとめ

$10^2 \sim 10^4$ km²の流域規模で検討されてきた降水の位置エネルギーに基づく土砂流出ポテンシャルパワーによる土砂流出量予測が $10^0 \sim 10^2$ km²程度の小規模な山地河川流域でも成り立ち、大規模な流域と同様に P による土砂流出量評価が流域面積 A による評価よりも Qs 値のばらつきを小さくすることが確かめられた。しかし、その Qs/P と P との関係を 10^2 km²以上の流域の土砂流出量の推算に適用すると、砂防ダムの堆積土砂と流域流送土砂の粒度組成の違いから、実用的な精度の実現には至らなかった。また、地質による土砂流出特性の違いについても、大まかな傾向を把握することが可能であるが、そこから土砂量を求めるには、今後、土砂流出現象の物理的な意味を考慮した解析が必要であると考えられる。

謝辞：本研究は科学研究費（若手スタートアップ）「流域の高度分布と降水量分布および地質構造に着目した土砂流出量の推定」（課題番号19860037）の成果の一部である。また、砂防ダムの資料を提供して頂いた国土交通省越美山系砂防事務所、電力ダム資料の提供と貴重な情報をいただいた株式会社シーテックならびに中部電力株式会社に、ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 建設省河川砂防技術基準（案）計画編，建設省砂防局，pp.4-6，1986.
- 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.
- 奥村武信：土砂流送過程とその河道の土砂輸送能に関する研究，京都大学学位論文，pp.37-41，1990.
- 大橋慶介・藤田裕一郎：面積高度曲線に基づいた流域特性と土砂流出特性に関する考察，水工学論文集，第51巻，pp.913-918，2007.
- 大橋慶介・藤田裕一郎：土砂流出ポテンシャルパワーに基づく流域地質構造と土砂流出量の考察，水工学論文集，第53巻，pp.667-672，2009.
- 町田洋・松田時彦・海津正倫・小泉武栄 編：日本の地形5 中部，東京大学出版，pp.289-291，2006.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター（編）（2005）20万分の1日本シーム レス地質図データベース．産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB084，産業技術総合研究所地質調査総合センター．産総研著作物管理番号：H17PRO-316.

(2009. 4. 9受付)