

# 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

## DISCUSSION OF GEOLOGICAL FEATURE AND SEDIMENT TRANSPORT OF BASIN BASED ON POWER OF SEDIMENT DISCHARGE POTENTIAL

大橋慶介<sup>1</sup>・藤田裕一郎<sup>2</sup>

Keisuke OHASHI and Yuichiro FUJITA

<sup>1</sup>正会員 工博 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>2</sup>フェロー 工博 岐阜大学教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Power of sediment discharge potential in river basins  $P$  [Nm/year] defined in the present paper is that of precipitation onto basins sediment evaluated by the use of hypsometric curves. Standard hypsometric curves of whole basins oversimplify distributions of actual locations of individual elevations and linkage of sub-basins. Therefore, a combined hypsometric curve is proposed and used to calculate the power of sediment discharge potential. The combined hypsometric curves are derived at each confluence of tributary, indicating the hierarchy of river system.  $P$  is compared with specific rates of sedimentation volume  $q_s$  [m<sup>3</sup>/year/m<sup>2</sup>] of several major river systems in Japan. Moreover, a relation between  $P$  and geological feature is discussed on the river basins.

**Key Words** : sediment transport, GIS, geology, sediment transport potential power

### 1. はじめに

流域規模における土砂流出現象は、自然的要因から人為的要因までその支配要因が非常に多く、それら相互の関係も極めて複雑である。それゆえ、土砂粒子の移動の素過程に着目した物理モデルほどの高い精度を要求されない、巨視的・長期的な土砂流出予測の場合であっても、その精度は実用的に十分であるとは言えない。このような流域規模での土砂流出量予測の代表的な研究として、全国のダム貯水池の比堆砂量  $q_s$  と流域面積  $A$  との関係を地域または水系係数  $K$  で整理し、 $q_s = KA^{-0.7}$  の関係を導いた芦田・奥村<sup>1)</sup> のものが挙げられる。彼らは、貯水容量 200万 m<sup>3</sup>、堆砂率 25% 未満で捕捉率がほぼ 1.0 である、貯水池完成から10年以上経過したダムを選定し、上下流の貯水池の連続状態からそれぞれの比堆砂量を決定している。最も土砂流出量が多いグループとされている大井川、黒部川、天竜川については、全体的に  $q_s \propto A^{-0.7}$  の関係が認められるが、個々の水系について詳細に見ればダムの数が少ないこともあり、その傾向ははっきりしない。一方、ダムの数が多い吉野川、只見川・阿賀野川ではその傾向を確認することができる。しかし、この評価は簡便な反面、その土砂流出強度を表す係数  $K$  については、石狩川水系のように、280 ~

160000 と3オーダーの幅を持つ流域も報告されており<sup>2)</sup>、単純に同一水系であれば流域面積と一定の  $K$  の値によって評価できるものでもない。さらに、奥村<sup>3)</sup> は Bagnoldによる stream power の概念を発展させ、河道群の総輸送能を集水面積  $A_d$  と河道勾配  $S$  の積  $A_d S$  で表している。彼は、吉野川流域、小渋川流域について、消費された流水のエネルギーが土砂輸送にどれだけ消費されたかを各種地形量を用いて解析し、水害調査などの結果を踏まえて洪水時の降雨量  $R_d$  を  $A_d S$  に乗じた  $A_d S R_d$  と  $q_s$  との相関が良好であるとの結論を導いている。

本研究では、前述の研究と同様に、土砂流出量を降水の流出に伴う仕事（エネルギー）との関係によって評価しようとするものである。但し、一度の水害といった短期間の土砂流出イベントではなく、長期間の土砂流出現象に焦点を絞っている。広域に亘って土砂流出量を連続的に観測することが困難である以上、流域から生産され、河川において輸送される土砂量を確実に計測しているといえるものはダムにおける堆砂測量に尽きるが、しかし、その頻度は測量が行われているダムであっても通常は年に一度であり、その間の出水毎の土砂移動量については把握することが出来ない。また、大出水時には、流送される量が飛躍的に増加することと、それを引き起こす洪水が間欠的に発生することから、土砂流出量には統計的な取り扱いが必要とされ、そのサンプリング期間は長い

方が好ましい。このように、ダム貯水池での測量資料は長期間の平均的な取り扱いになるため、エネルギーの評価に関しても長期的な水文学である年平均降水量を用いている。さらに、地形情報としては前述のstream powerの評価が河道の断面積や勾配といった水理量を必要とするのに対して、ここでは流域地形の高度分布のみでエネルギーを推算し、その流域に存在するダムの堆砂量を土砂流出量と見なして検討を進めた。その際、流域地形の高度分布を表現する手段として、地形学において流域の特徴を表現するのにしばしば用いられる面積高度曲線(hypsometric curve)を利用した<sup>4)</sup>。但し、一般に用いられる面積高度曲線は河道の合流順序や位置の情報が失われることから、それらを補うために単位流域の面積高度曲線を連結した合成面積高度曲線として改良し、それを用いて得られる単位時間(ここでは1年)当たりのエネルギーを土砂流出ポテンシャルの仕事率(パワー)と定義して、その大きさと土砂流出量との関係を調べ、さらに地質による影響についても考察を進めた。

## 2. 面積高度曲線を用いたポテンシャルパワーと土砂流出量との比較

### (1) 解析方法とデータセット

標高データは国土地理院の50 m メッシュ標高データを、流域界、流路、降水量データは、それぞれ国土交通省国土数値情報「流域界・非集水域(面)」W15-52A、「流路」ks-272、「気候値メッシュ」G02-62Mを使用している。それらをGISソフトウェアSISにて解析する。

### (2) 面積高度曲線によると土砂流出ポテンシャルパワーの算出と合成面積高度曲線への拡張

面積高度曲線は、縦軸に標高、横軸にその標高以上の面積をとることで、3次元の流域高度分布を2次元上に表現する曲線であり、その木曾川流域の例を図-1に示す。Strahlerら<sup>5)</sup>は、この曲線形と地形輪廻の各ステージとが対応していると述べ、縦横軸と曲線とで囲まれる面積を面積高度曲線積分値  $HI$  とし、さらに流域面積  $A$  と最大高度  $H_{max}$  で正規化したものを  $HI/(AH_{max})$  とすると、0.6 以上が幼年期、0.6 ~ 0.35 が壮・老年期、0.35 以下が準平原期の地形を表すとしている。一方、この面積高度曲線積分値  $HI$  は流域面積が  $A$  である地点の標高を基準とした流域の体積に相当するので、このときの流域の平均高度は  $HI/A$  となる。これを用いると降雨を一樣とするとその位置エネルギー  $E$  は、

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

と表され、 $HI$  から計算することができる。ここで、 $m_R$  は降水の質量、 $g$  は重力加速度、 $\Delta h$  は平均比高、 $R$  は降水量、 $A_{max}$  は流域面積である。今回の検討では、 $R$  の代わりに年平均降水量  $R_m$  を用いるので、時間あたりのエネルギーすなわちパワーの次元を持つ。これを土砂流出ポテンシャルパワー  $P$  として以下のように定義する。

$$P = \rho g R_m \int_0^{A_{max}} h(A) dA \quad (2)$$

ここでは降水量に年間平均降水量を用いる理由からパワー  $P$  の時間の単位は年としている。この方法によって全国の主要な水系における海水準からの  $P$  を求め、流域面積で整理すると、従来の研究で明らかにされている比流砂量と面積の関係と良く一致することが確認された<sup>6)</sup>。しかし、通常のアreas高度曲線では、水系全体の傾向しか表現することができず、多くが上流域に位置する

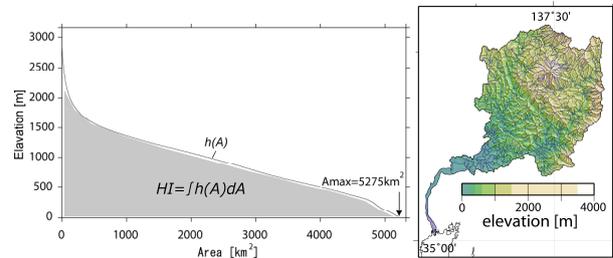


図-1 木曾川流域の面積高度曲線の例

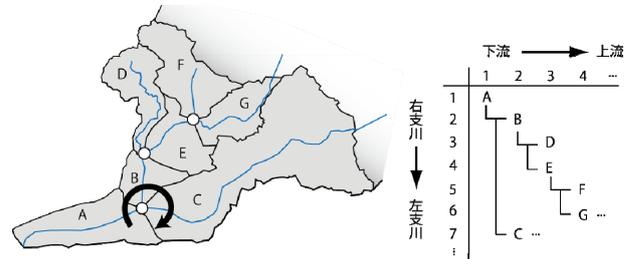


図-2 合成面積高度曲線作成時の支川合流の順序

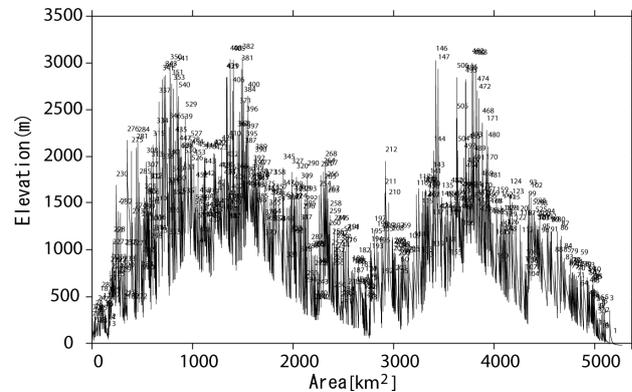


図-3 木曾川流域の合成面積高度曲線  
(曲線上の数字は単位流域番号に対応)

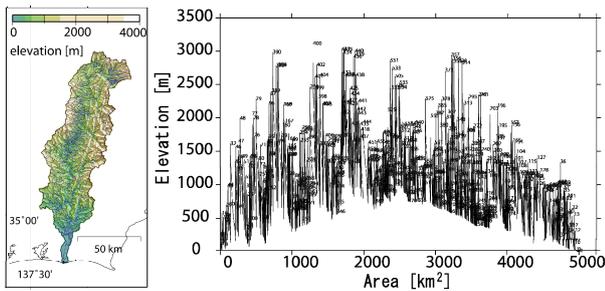
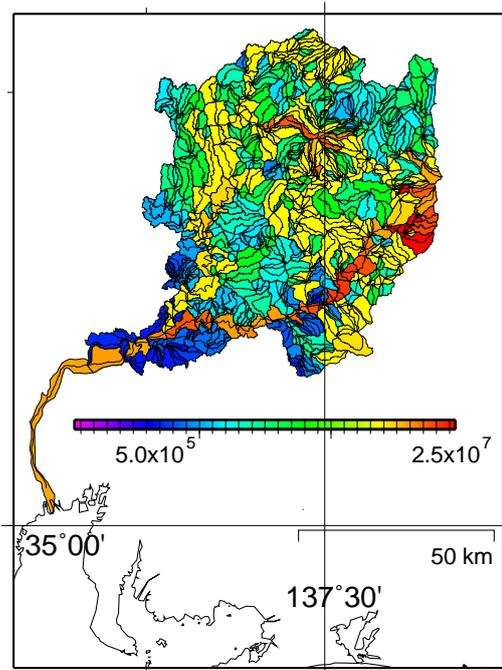


図-4 羽状流域の合成面積高度曲線（天竜川）

ダム堆砂量との比較を行うには、各ダム地点について面積高度曲線を用意する必要があり煩雑である。そこで、以下の手順に基づいて合流支川をリスト化して、それに基づき各単位流域の面積高度曲線を拡張する<sup>7)</sup>。例えば、図-2のような支川合流を持つ流域があった場合、1) 最下流の単位流域を始点とし、上流へ向かって流域番号を取得していく、2) 合流点では時計回りに出現する流路の順にリストを作成し、3) そのリスト下位から順に当該単位流域の面積高度曲線を連結する。以上のように、作成された面積高度曲線をここでは合成面積高度曲線と呼ぶ。合成面積高度曲線は、グラフの右端が最下流の単位流域の高度分布を示し、ほぼ中央に位置する本川最上流点を対象として、左半分と右半分がそれぞれ本川の右支川および左支川の単位流域の面積高度曲線群に対応している。これによって、2次元平面上に3次元地形を表現する際に失われた合流順序を復元することができる。例えば、図-3の木曾川流域の合成面積高度曲線では、その曲線形状は双峰形となっており、右側のピークが最も有力な右支川である飛騨川を、左側のピークが木曾川本川を表している。両者は御嶽山を最も標高の高い流域境界として共有しているため、そのピーク値は同じ値となっている。一方、グラフ左側の木曾川本川はその流域に木曾山脈を有していることから、標高の高い流域を占める割合が飛騨川に比べて大きいことが分かる。このような特徴から、合成面積高度曲線は流域形状を表現する手段としても有用であると考えられる。図-4に典型的な羽状流域である天竜川の流域形状と合成面積高度曲線を示す。東西両側に赤石山脈と木曾山脈を有する天竜川流域では、有力な支川が3000mに達する曲線形を示すが、全体としてはグラフ中央に位置する源流の諏訪湖流域に向かう一峰性を示す。

この合成面積高度曲線を用いると、ダム地点上流の土砂流出ポテンシャルパワー  $P$  は、そこを基準標高  $h_0$  とし、 $h = h_0$  とダム集水域に含まれる全部で  $n$  個の単位流域の面積高度曲線で囲まれた面積と単位流域毎の降水量から、 $P$  は、

$$P = \sum_{i=1}^n \left( \rho g \int_0^{A_{\max i}} R_i (h(A) - h_0) dA \right) \quad (3)$$



Power of sediment discharge potential [Nm/year / m<sup>2</sup>]

図-5 単位流域における累積面積あたりの土砂流出ポテンシャルパワー

として通常的面積高度曲線と同様に求められる。

初めに、木曾川流域の各単位流域地点における単位面積あたりの土砂流出ポテンシャルパワー  $P/A$  を図-5に示す。木曾山脈と御岳の周辺で高い値を取り、また、木曾川本川沿いにパワーが集中している様子が確認される。さらに、河口へ向かうに従い、パワーの小さな支川と合流していくので単位面積あたりのパワーを減じる状況が読み取れ、これは面積が増加するに伴って比堆砂量が減少する  $-0.7$  乗則にも合致する。

### (3) 土砂流出ポテンシャルパワーと全国の水系における土砂流出量

まず、ここで用いる全国のダム堆砂資料には、上下流のダムの土砂流入状況や捕捉率に関する情報が含まれていないため、単に平均年堆砂量との比較であることをはじめに断っておきたい。図-6は全国180のダムの比堆砂量と流域面積との関係を示したものである。それらのプロットの包絡線は、単に比堆砂量の比較にもかかわらず、従来の研究での、いわゆる、 $q_s = KA^{-0.7}$  の関係になっている。しかしながら、地域ごとに観察すると特に関東地方のデータは非常に大きくばらついているのが分かり、個々の水系に着目してもある一定の範囲に  $K$  が収まっているとはいえない状況である。さらに、ダム毎に見てみると、建設年度が新しく大出水に見舞われた流域のダムの値が突出している傾向があり、これは使用している資料の限界であるともいえ、このような場合には出水の生起確率による補正が考えられる。

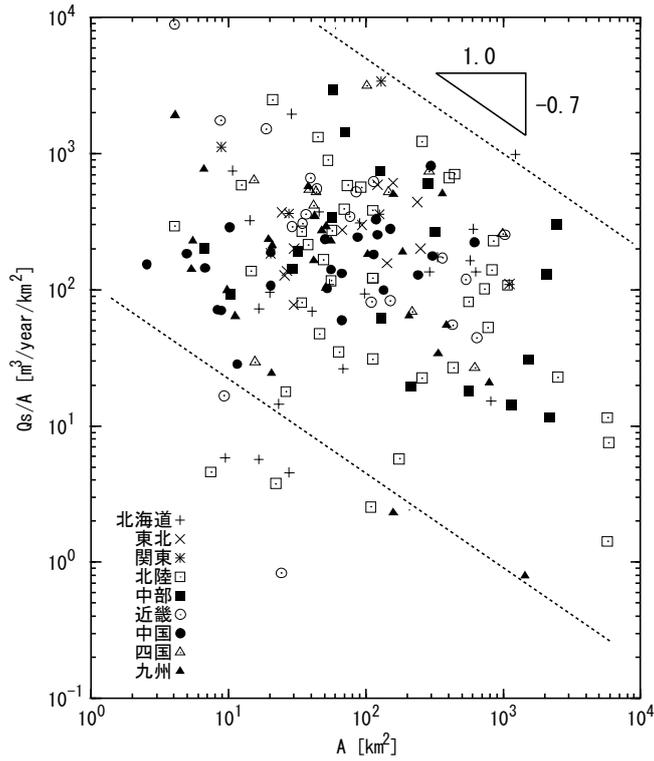


図-6 全国ダム貯水池における比堆砂量 $Q_s/A$ と流域面積 $A$ との関係

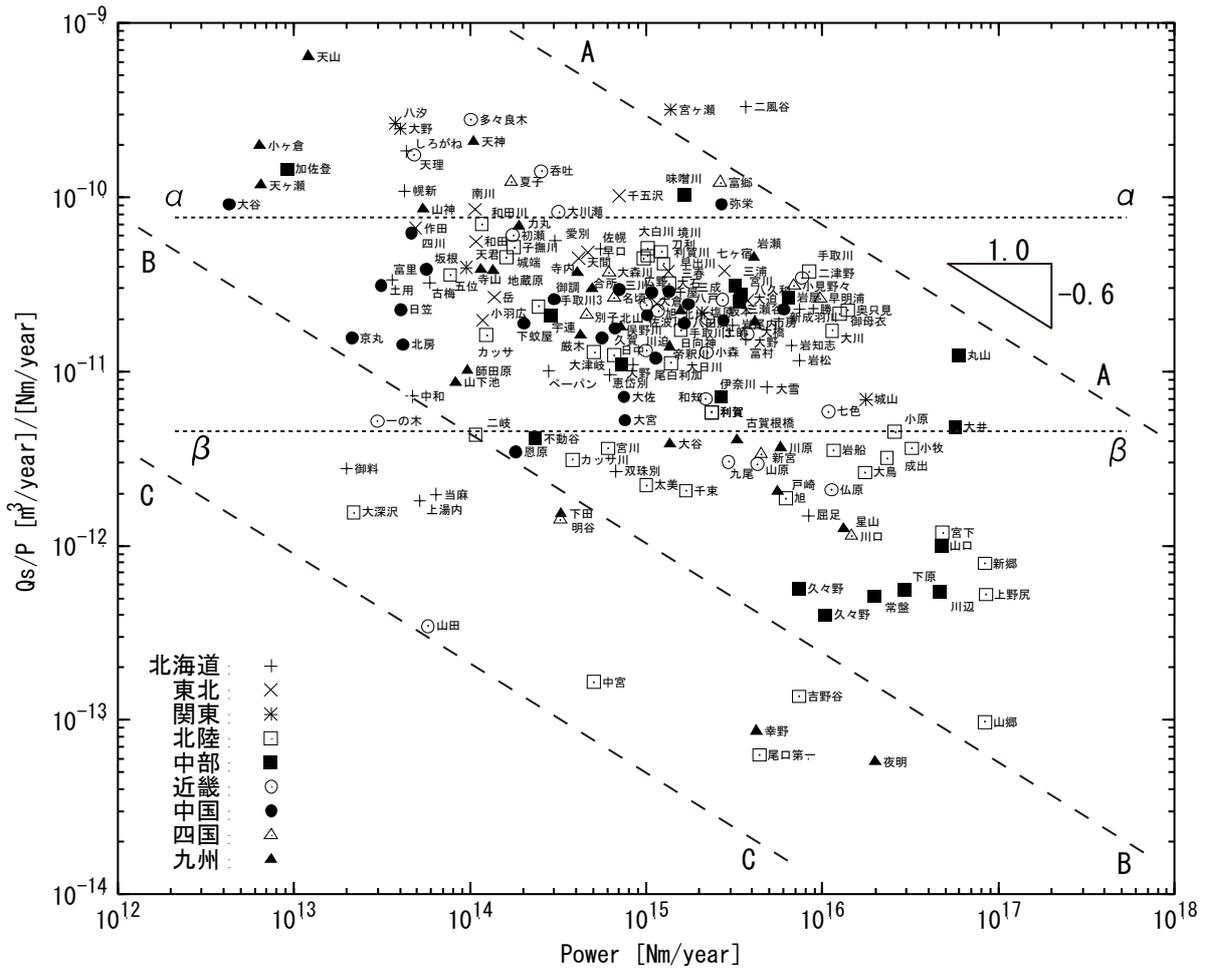


図-7 パワーあたりの年平均堆砂量と土砂流出ポテンシャルパワーの関係

図-7には単位パワーあたりの平均堆砂量  $Q_s/P$  と  $P$  の関係を示す。また、全国貯水池の年平均堆砂量を図-8に示す。 $Q_s - A$  の関係と同様に、その包絡線は破線のA, B, Cで区分されるような  $-0.6$  乗の関係があるようにもみえる。しかし、その一方で、破線  $\alpha, \beta$  のように北陸、関東、中国の各地方のプロットが  $Q_s/P = const.$  として集中しているようにも見受けられる。仕事率を基準として土砂輸送を考えたとき、 $Q_s$  が  $P$  に対して一定である、すなわち、同図で-1乗の関係になることはありえないが、ダムに適地である地域であっても流水のパワーと  $Q_s$  とは比例関係程度のものである。ただ、前述の資料の限界もあることから、この点についてはさらに慎重に検討を進める必要がある。

### 3. 地質と土砂流出量について

$Q_s$  のばらつきの物理的な要因の一つとして、地質の違いが考えられるので、ここでは産業技術総合研究所のシームレス地質図<sup>9)</sup>を用いて検討を加える。この地質分類は岩石の成因、年代、岩質組成によって細かく区分されているが、図-9に示すように、堆積岩類、付加コンプレックス、火山岩類、深成岩類、変成岩類の5つに大別している。

北海道では低平地部は堆積岩類、日高山脈では付加コンプレックス、変成岩類が見られ、その他は火山岩類が多く占めている。東北日本での脊梁山地はほぼ火山岩類で、中部日本から西南日本にかけては中央構造線から外帯へ向かって変成岩類、付加コンプレックスが分布している。日本の国土の標高を上記の5地質区分に従って1 m 間隔のヒストグラムで表したものが図-10である。堆積岩類は平野部の大部分を占めているため、低い標高ほど広く分布している。それに対して、火山岩類の面積は堆積岩類に次いで広いものの、その高度分布は大きく異なり、標高 300 m 以下では各標高でほぼ一定の面積を示している。付加コンプレックスは標高 200 m 付近をピークにして高度を下げるにつれて、その面積は減ずる。これは、大陸側のプレートに押しつけられて、ある程度の高度まで達するものの、破碎も進んでいて岩屑や土砂となって平野部に堆積するため表層から姿を消すためと考えられる。付加コンプレックスと隣接する変成岩類は面積の割合が小さいが深成岩類と相似な高度分布を示している。なお、深成岩類は阿武隈高地や木曾山脈を主に形成する地質であるため標高が高い土地の割合が大きくなっている。

これら地質情報を用いて、土砂流出ポテンシャルパワー  $P$  の大きさと、その流域内に占める各地質の面積割合を図-11に示す。ヒストグラムに現れていたとおり、 $P$  が大きな中部山岳地帯では、火山岩類の割合が大きい。また、中央構造線沿いには、付加コンプレックスと

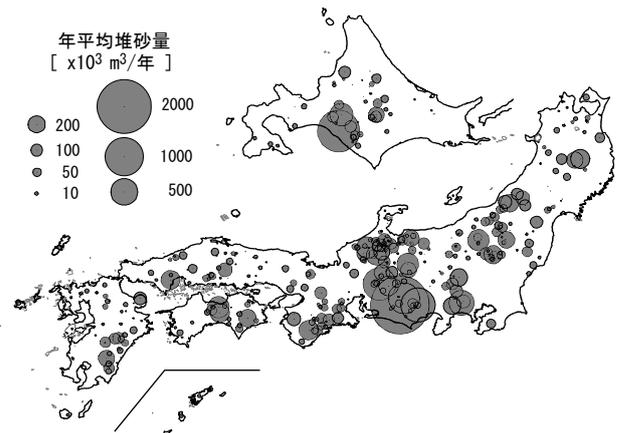


図-8 全国貯水池の年平均堆砂量

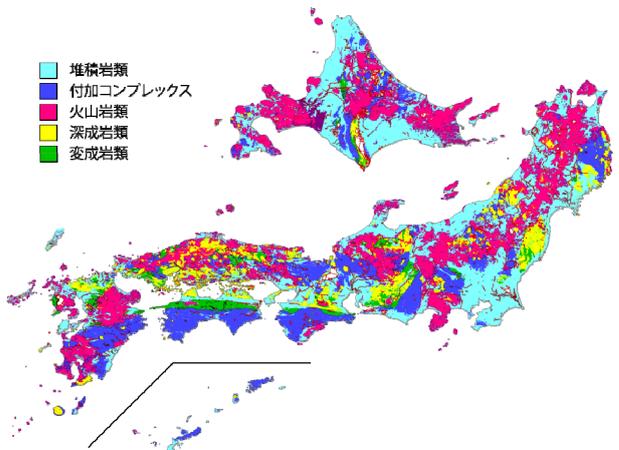


図-9 岩石の成因によって分類された全国地質分布

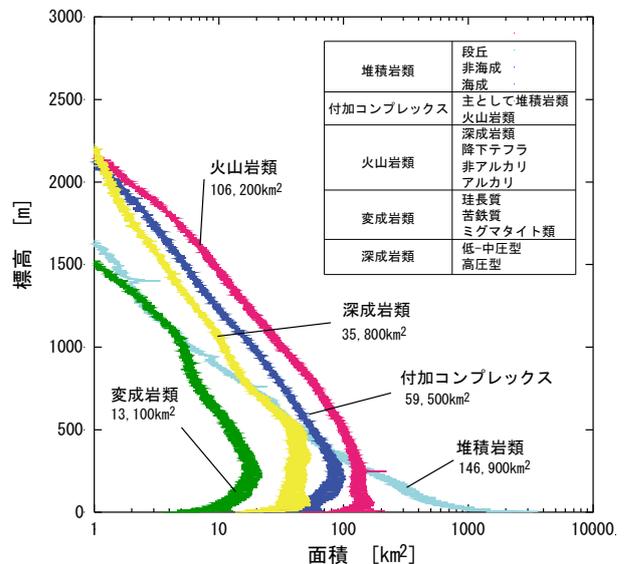


図-10 表層地質別の全国高度分布ヒストグラム

変成岩類が多く分布していて、それが宮崎県まで続いていることがわかる。構造破碎帯の存在だけでは、十分に説明できない<sup>9)</sup>とされていた宮崎県における土砂流出の傾向はこのパワーを用いた評価ではよく一致している。

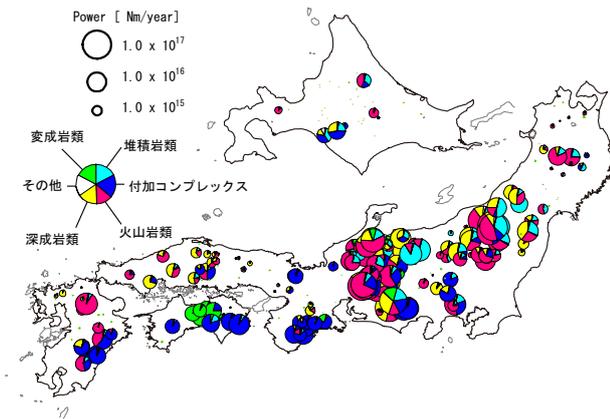


図-11 ダム貯水池における土砂流出ポテンシャルパワーと流域面積に占める各地質の割合

#### 4. おわりに

本研究では、地形の高度分布と降水量で求まる流域における降水の単位時間あたりの位置エネルギーを土砂流出ポテンシャルパワー  $P$  と定義し、土砂流出量との関係について調べた。その場合に問題となる支川の合流過程を取り扱うために合成面積高度曲線を作成して任意地点での  $P$  の算出を可能にした。これらを用いて、全国のダム地点の  $P$  と比堆砂量  $q_s$  とを比較することによって、従来の結果よりも高い精度で長期的な流域土砂流出量を予測する可能性を示した。しかしながら、堆砂資料の精査や土砂流出強度の相違の背景にある物理的な説明については未だ多くの検討の余地は残されている。

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、学部4年生の都築恭子氏には、支川合流順序のデータ作成に協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) T. Kashiwai, J.: Reservoir sedimentation and sediment management in Japan, Proceedings of The First EADC Symposium, Vol. 1, pp.13-23, 2004.
- 3) 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.
- 4) 村野義郎：山地における砂石の生産に関する研究，土木研究所報告第114号，pp. 8-16, 1963.
- 5) 高山茂美：河川地形，共立出版株式会社，pp.9-11, 1974.
- 6) 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.
- 7) Ohashi, K. and Fujita, Y.: Sediment transportation estimated with potential power through tributaries confluence, The International Conference on Hydro-Science and Engineering, pp.1331-1339, 2008.
- 8) 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
- 9) 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(1)昭和59～61年度研究成果報告書 比較河川学の研究（代表研究者 岸力），p.373, 1987.

(2008. 9. 30受付)