

# 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

## CHARACTERISTICS OF SEDIMENT TRANSPORT AND RIVER BASINS DISCUSSED ON HYPSONETRIC CURVES

大橋慶介<sup>1</sup>・藤田裕一郎<sup>2</sup>  
Keisuke OHASHI, Yuichiro FUJITA

<sup>1</sup>学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1 番 1)

<sup>2</sup>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 番 1)

Characteristics of sediment transport in a drainage basin are discussed from a concept of sediment transport potential estimated by a hypsometric integral of landform weighted with annual precipitation, as a measure of potential energy. A hypsometric curve indicates altitude distribution of the drainage basin topography, and characterizes landform, which resulted from geological and meteorological actions. The sediment transport potentials show high correlation with sedimentation volumes in dam reservoirs in the Kiso river basin, and those of 33 major river basins in Japan prove to be able to explain a generally accepted tendency of sediment yields theory well, and clarify that sediment transport is related with a development of alluvial plain.

**Key Words :** Sediment transport potential, Dam sedimentation, Hypsometric curve, GIS

### 1. はじめに

流域における土砂流出の影響は治水, 利水, 生物環境など非常に広範囲に及ぶことから, 古くから流出土砂量を見積もるために多くの研究がなされてきて, 地形量や水理・水文量との関係が明らかにされてきている<sup>1)</sup>. しかしながら, 流域の土砂流出量は, 生起確率の低い大規模な斜面崩壊などによって, その総量が大きく変動することから, 精度の高い予測をすることは非常に困難であり, この理由から統計的手法で評価されることが多い. また, 一般的にダム建設において計画堆砂容量は 100 年の供用期間を想定して設計されており, 比較的構造が単純な重力式ダムやフィルダムが適切に維持管理がなされた場合, その構造物としての寿命はさらに長い<sup>2)</sup>, 3 百年に及び, その水系や流域に及ぼす影響は千年といった期間で考える必要もあろう<sup>2)</sup>. こうしたタイムスケールで土砂流出現象を捉えようとするときには, 水文統計量だけではなく, 海面変動や地殻変動の影響をも考慮に入れて検討していかなければならない. 実用的なレベルで土砂流出量を予測する場合であっても, 現象の生起場は地殻変動などの地質条件や降水などの気象条件の長期的な影響を受けて形成された地形を持つ流域であることを考慮しておくことが要求される. このため, 地形学における様々な概念を取り入れていくことも必要となってく

る. 本研究では, 主に流域地形学の分野において流域の発達過程を論じる際に用いられてきた面積高度曲線(ヒプソメトリックカーブ)(図-1)に着目し, 裸地や崩壊地の分布などではなく, 流域全体という, よりマクロなスケールで地形を捉え, その観点から新たに定義した土砂流出ポテンシャルと流域土砂生産量との関係を木曾川流域について明らかにした. また, 全国の主要河川流域における高度分布から土砂流出ポテンシャルを算定し, 土砂生産特性に関する既往の研究成果との関係を検討して, 流出土砂量推算の足がかりを与えたものである.

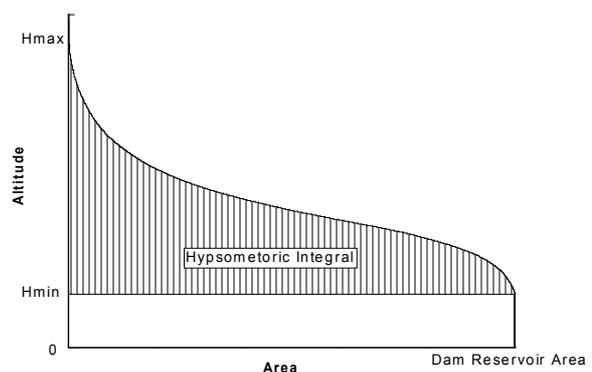


図-1 面積高度曲線

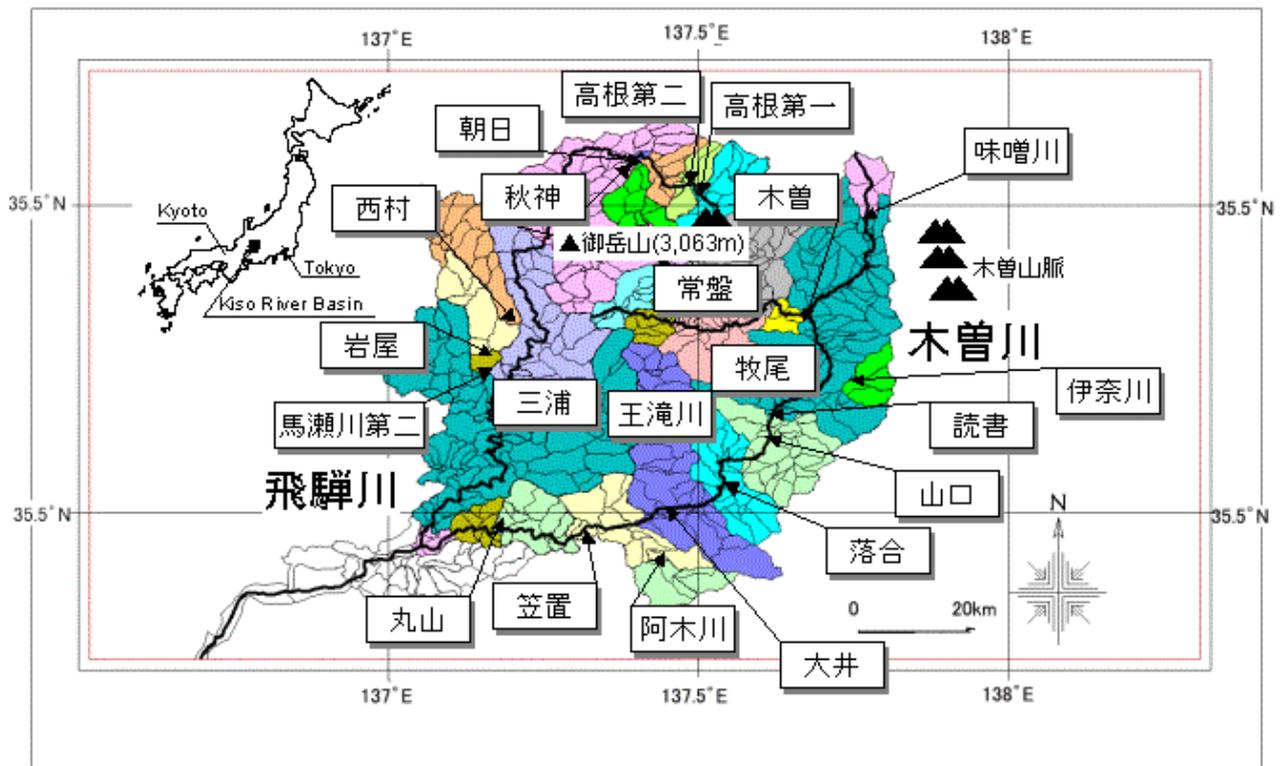


図-2 木曾川流域のダムサイトとその集水域

## 2. 流域地形の発達と土砂流出因子

### (1) 流域の成り立ち

地形を形成する営力の作用形態は、地殻変動（テクトニクス）に代表される地球内部の熱エネルギーと重力に起因する内作用と、太陽エネルギーと重力とを源とする風化、侵食、氷食、風食、溶食などの外作用に分類される<sup>3)</sup>。一般に内作用による変動の時空間規模は大きく、とくに、その時間規模は $10^2 \sim 10^8$ 年と非常に長期間にわたる。それに比して、外作用による変動は、規模や時間が小さく、かつ、短いために捉えやすい。このことから、これまでの土砂流出の見積もりは、内作用の結果を所与のものとして、外作用に着目して検討がなされてきた。ここでは、内作用も考慮に入れた検討を行うために、現在の地形を、表層物質である地殻に対する内作用と外作用の総和の結果が現れた形態であり、現時点までの両作用の最終生産物である<sup>3)</sup>と捉え、かつてそこに作用してきた営力と地質条件を反映しているもの<sup>4)</sup>として検討を進めていくこととした。そして、流域形状の高度分布として求められる面積高度曲線（ヒプソメトリックカーブ）が地形全体の特性を表現する最も有効な方法の一つであり、地形形成因子を包含した流域特性として扱うことができるのではないかと考え、それを具体的に算定し検討を加えた。

### (2) 面積高度曲線の特性

面積高度曲線は、縦軸に示されている標高以上の位置にある流域内の面積を横軸にプロットして描かれる曲線で、流域の高度分布を表現する手段として、古くから流域特性との関係について研究がなされてきた。なかでも、曲線の形状特性や最高高度と総流域面積で無次元化された面積高度曲線の積分値であるヒプソメトリック積分値と地形輪廻に基づく地形分類との関連についての古典的な研究は有名である<sup>5)</sup>。この面積高度曲線は、流域幅が一定であるような矩形斜面流域を仮定すると、斜面縦断形状と一致する曲線を描き、一様勾配の流域を仮定すると、流域最低点から流域の重心点の位置と流域全体の高低差との比が、無次元ヒプソメトリック積分値と一致する特性を持っている。また、面積高度曲線を面積で積分した値は、流域最低高度と流域界によって切り取られた流域のボリュームを表している。

### (3) 土砂流出因子としてのポテンシャル

$10^4$ 年オーダーの時間スケールで土砂流出現象を考えたとき、その要因として最も大きいものは、侵食、堆積現象の駆動力である流水の運動エネルギーであると考えられる。それは、ある高度分布を有する流域への降水の位置エネルギーに由来するため、その総量は土砂の侵食・運搬強度をあらわすパラメータになりうると考えた。流域への降水の位置エネルギー  $E$  は式(1)のように表され、年単位として近似的に求めると、面積高度曲線の積分値と流域平均年降雨量  $\bar{R}$ 、水の密度  $\rho$ 、重力加速度  $g$

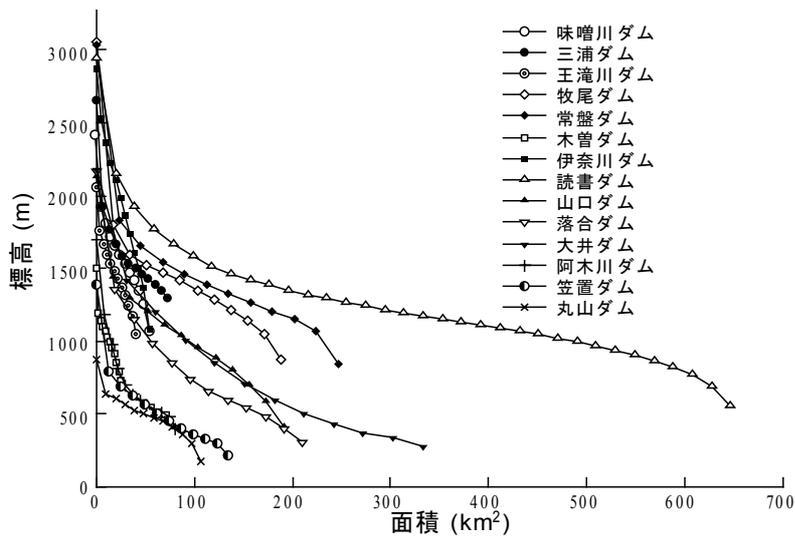


図-3(a) 木曾川本川ダム個別集水域の面積高度曲線

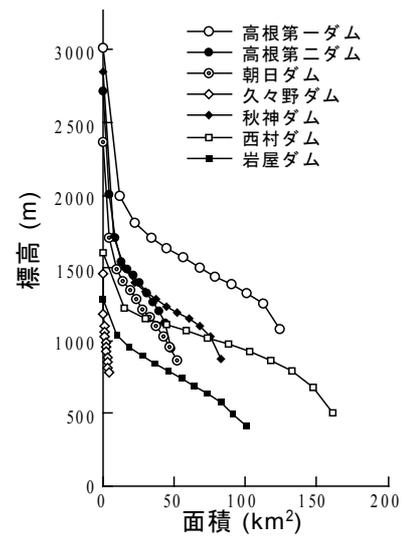


図-3(b) 飛騨川ダム個別集水域の面積高度曲線

との積となる。

$$E = \rho g \int_0^{Area} \bar{R} h dA \quad (1)$$

なお、この流域平均標高と流域平均降水量との積である近似値は、一般に標高の高い地域ほど降水量も大きい傾向にあるので、積分値よりもやや小さい値になる。この土砂運搬に関わるエネルギーを土砂流出ポテンシャルと定義し、電力史のなかでも早い段階から多くのダムが建設され、膨大な堆砂資料が蓄積されている図-2の木曾川流域における土砂流出量と土砂流出ポテンシャルとの対応関係<sup>6)</sup>を、木曾川本川と最も大きな支流である飛騨川について検討した。

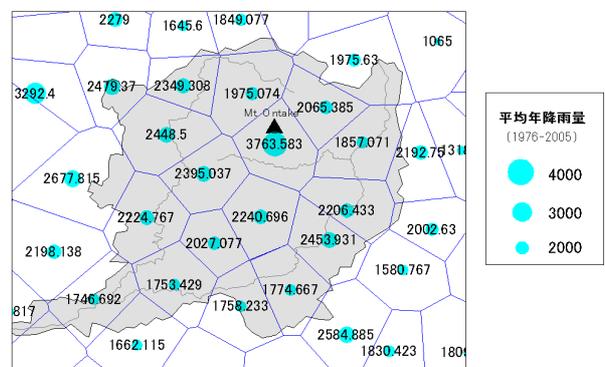


図-4 木曾川上流域におけるアメダス雨量データをティーン分割して取得した平均降水量 (1976-2005)

### 3. 木曾川流域における土砂流出

#### (1) 流域の概要

ここで対象とした流域は、いわゆる木曾三川のうちの木曾川流域であり、ほぼ同程度の流域面積を持つ木曾川本川と飛騨川とが合流するまでの約 4600km<sup>2</sup>である。そこに存在する大小 40 を超えるダムのうち、短期間に満砂しない程度の貯水容量を有し、建設から年月が経過して堆砂データが十分揃っているダムを解析対象として取り上げた。木曾川本川とその支流である王滝川の 14 ダムについて検討を行ったうえで、比較のために飛騨川の 6 ダムについても同様の検討を行った。

木曾川本川の主な土砂供給源は、御嶽山と、木曾駒ヶ岳を主峰とする木曾山脈である。御嶽山では昭和 59 年の長野県西部地震により御嶽崩れと呼ばれる大規模土砂災害が発生し、木曾川本川の最大の支川で、多数のダムが立地している王滝川を堰き止めるほどの大量の土砂供給イベントが発生している。一方の木曾山脈でも多くの土石流が発生しており、その対策として砂防事業が数多く行われてきている。平均年降水量は、御嶽山周辺が約

表-1 各ダムサイトでの面積高度曲線積分値、土砂流出ポテンシャルと初期堆砂量(上段が木曾川本川、下段が飛騨川)

ダム	面積高度曲線積分値 (km <sup>3</sup> )	平均年降水量 (mm)	ダム個別土砂流出ポテンシャル (× 10 <sup>14</sup> Nm)	土砂流出ポテンシャル (× 10 <sup>14</sup> Nm)	初期堆砂量 (× 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /年)
味噌川	32.729	1976	6.337	6.337	30.00
三浦	22.937	3217	7.231	7.231	208.25
王滝川	16.713	3315	5.429	12.660	9.57
牧尾	103.026	3410	34.427	47.087	170.41
常盤	172.018	2954	49.796	96.883	94.42
木曾	7.187	2906	2.047	98.930	161.13
伊奈川	54.019	2186	11.573	11.573	118.00
読書	624.854	2422	148.326	265.165	321.06
山口	131.035	2423	31.121	296.286	761.00
落合	141.894	2382	33.124	329.411	265.33
大井	156.507	2326	35.669	365.080	781.91
阿木川	31.158	1763	5.383	5.383	94.70
笠置	63.341	2275	14.122	384.585	620.00
丸山	38.595	2252	8.516	393.101	942.91
高根第一	70.135	2290	15.743	15.743	146.90
高根第二	25.870	2203	5.585	21.328	284.50
朝日	24.143	2150	5.087	26.416	213.20
秋神	41.064	2168	8.725	8.725	63.90
西村	87.395	2461	21.077	21.077	データ不足
岩屋	37.866	2446	9.078	30.155	559.30

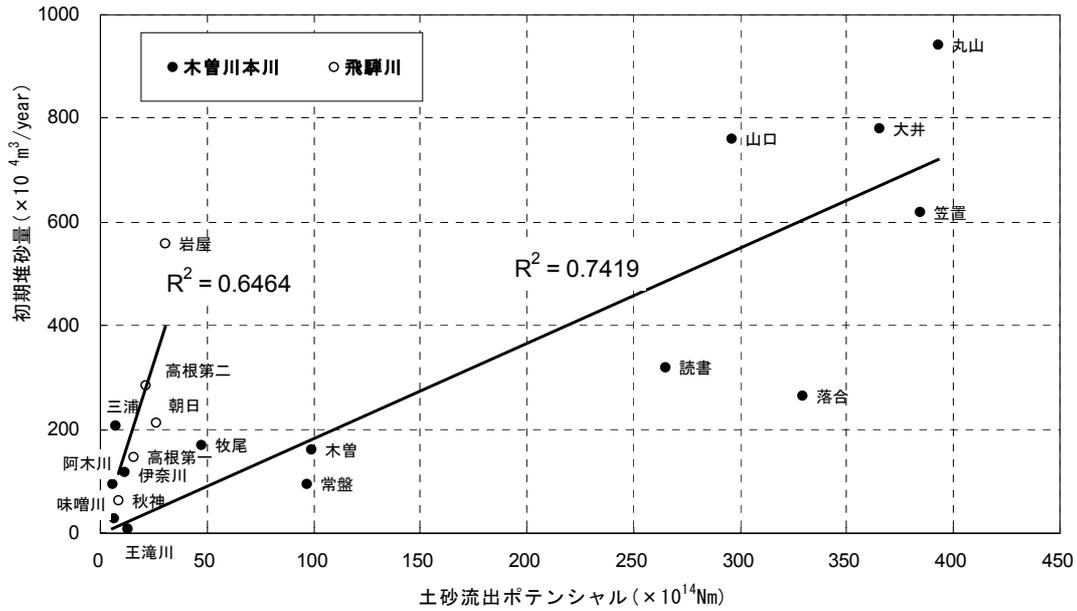


図-5 木曾川上流域における土砂流出ポテンシャル

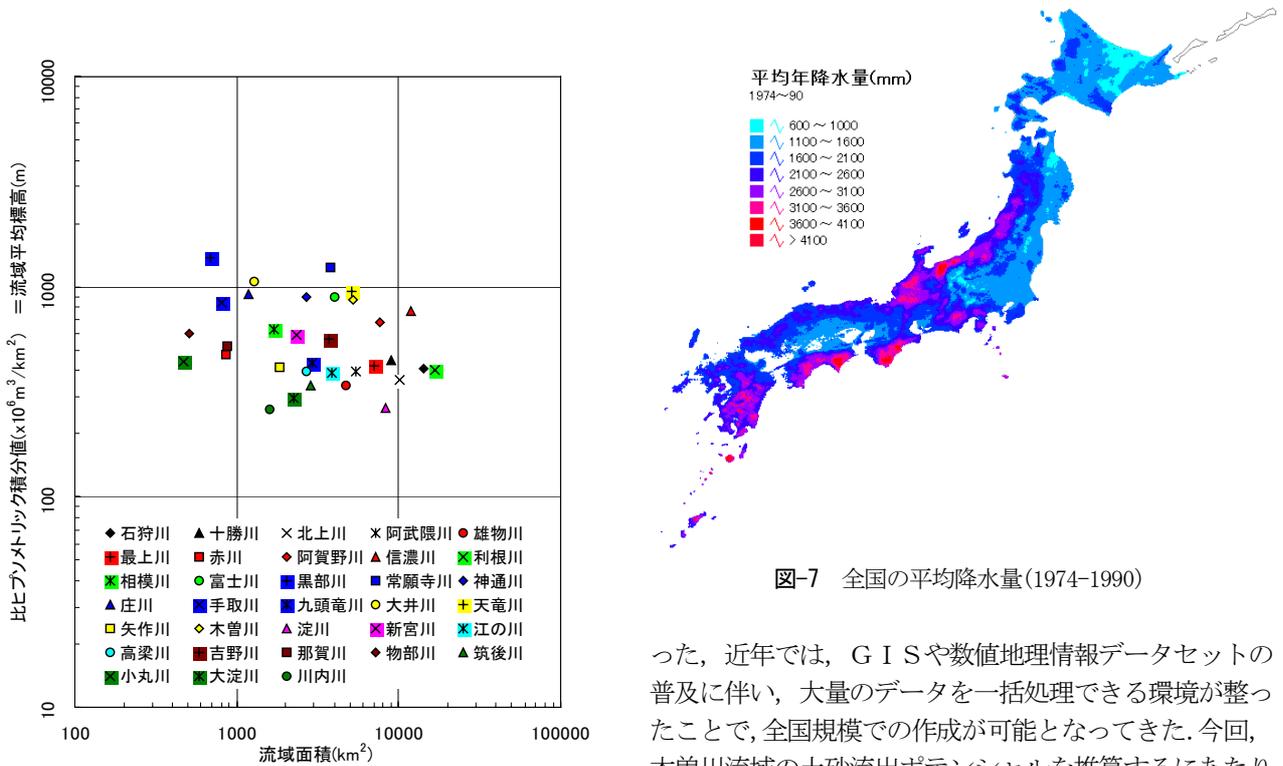


図-7 全国の平均降水量(1974-1990)

図-6 面積高度曲線積分値(平均流域高度)と流域面積との関係

3800 mm, 木曾山脈周辺では2000 mm 前後と山地自体はほぼ同じ標高であっても、気象条件が大きく異なっている。一方、飛騨川流域の主な土砂供給源は飛騨山地の乗鞍岳の西南麓と御嶽山の西北麓である。

## (2) 土砂流出ポテンシャルの算定

面積高度曲線の作成は、かつては地図上の等高線から流域界を判別し、プランメータなどを用いて標高値と等高線間隔求めるといった大変な作業量が要求されるものであ

った、近年では、GISや数値地理情報データセットの普及に伴い、大量のデータを一括処理できる環境が整ったことで、全国規模での作成が可能となってきた。今回、木曾川流域の土砂流出ポテンシャルを推算するにあたり、国土交通省の国土数値情報「流域界・非集水域(面)」、気象庁の気象統計情報アメダス平均降水量(1976~2005)、国土地理院の50mメッシュ標高データをGIS上に展開した。ついで、各ダム流域界から、流域内の標高分布を取得し、図-3のように、面積高度曲線を得た。さらに、流域に点在するアメダス降水量データを図-4に示したティーセン分割により各ダム流域に分配することで、流域平均年降水量を求め、面積高度曲線の積分値に平均年降水量を乗じて、各ダム集水域の土砂流出ポテンシャルを得た。

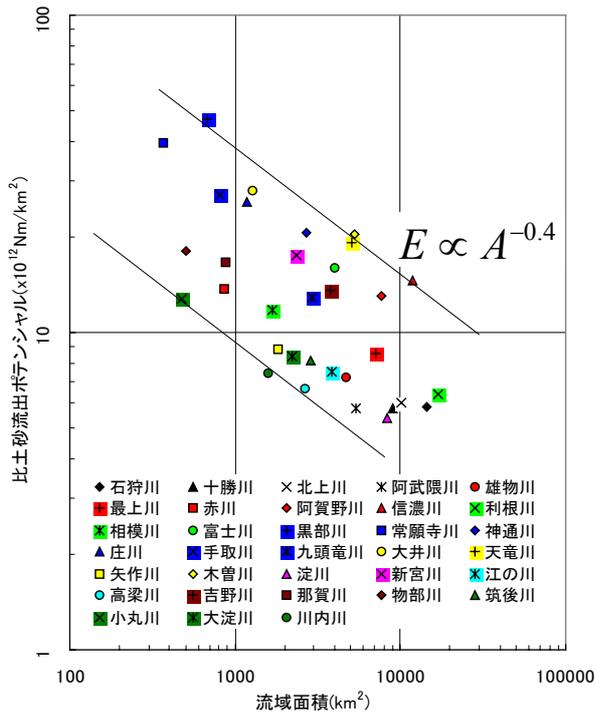


図-8 土砂流出ポテンシャルと流域面積の関係

### (3) ダム堆砂量との関係

ダム堆砂データは対象とするダムの上流に位置するダムの影響がほとんど認められない期間について、ダムの土砂捕捉率が高いダム建設直後の初期堆砂量<sup>6)</sup>を採用し、それが流域の流出土砂量であるとみなして、土砂流出ポテンシャルとの相関関係を調べた。その結果は図-5に示したようである。木曾川本川流域では、ダム本体や貯水池規模に支配される捕捉率の相違によって多少のばらつきがあるものの、相関係数が約0.75と、両者はかなり高い相関関係を有している。一方、飛騨川流域では、大きな集水面積を持つ流域下流部のダムは総貯水容量が小さく、そこでは妥当と見られる堆砂データが得られなかったために、土砂流出量として扱うことのできるデータのあるダムが流域上流部に集中することとなった。このため、図-3(b)のように、ほとんどの面積高度曲線は流域面積が150km<sup>2</sup>の範囲に収まることとなり、その結果として、土砂流出ポテンシャルの大きなダムサイトでのデータを得ることができなかった。結局、横軸の狭い範囲にデータが限られて、土砂流出ポテンシャルと初期堆砂量との相関は、相関係数が約0.60と低めであった。図-5におけるダムの分布を詳しく見ていくと、流域の上流に位置していて、流域高度が高く、流域面積が小さいダム貯水池では、下流域のダムよりも土砂流出ポテンシャルの同一の値に対する初期堆砂量が多い傾向にあることがわかる。この傾向は、王滝川や飛騨川の個別の河川ごとに見ても当てはまり、流水の総ポテンシャルエネルギーは、高度が低く、平らな流域であっても、面積が広ければ大きな値を取りうることに起因していることが第一に

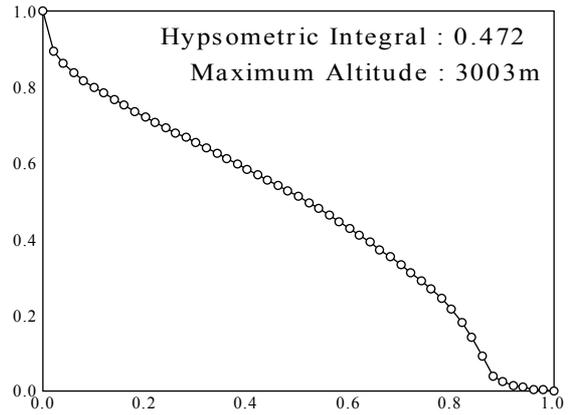


図-9 黒部川流域の正規化面積高度曲線

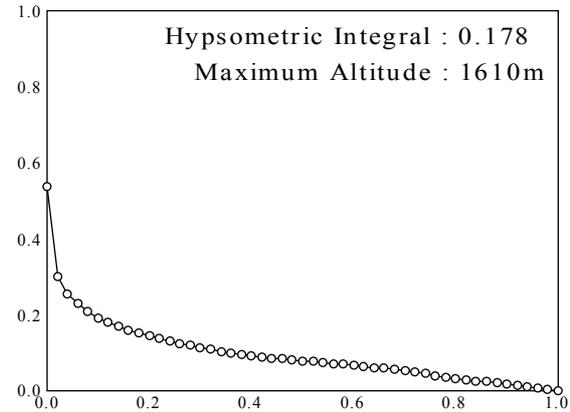


図-10 川内川流域の正規化面積高度曲線

考えられる。それ以外にも、例えば、重力の土砂に対する直接的な作用によるマスムーブメントの影響などが出ている可能性も考えられるが、貯水池まで土砂を運搬するためには、やはり、水流の作用は無視できないであろう。

さて、単一の河川水系の解析では、地質条件や気象・気候条件の差が小さいため、他の因子が明確に現れてこないと考えられるので、次章では全国の主要河川水系について土砂流出ポテンシャルを算出し、その特性を検討して、地域的な相違を明らかにする。

## 4. 全国主要河川流域の地形特性と土砂流出因子

### (1) 全国主要河川流域の地形特性

国主要河川の土砂流出ポテンシャルを見積もる前に、降雨量の影響を除いたヒプソメトリック積分値のみによる地域ごとの特徴を調べる。横軸に流域面積をとり、縦軸に流域面積あたりのヒプソメトリック積分値である、比ヒプソメトリック積分値、すなわち、流域の平均高度を算定してプロットすると図-6のようである。したがって、中部・北陸地方のように、流域に3000m級の飛騨、木曾、赤石山脈を有する地域では、全般的に平均高度の値は大きくなるはずであるが、分母となる流域面積が大

きくなると、山地部の流域面積に占める割合が下がっていくために、平均高度が小さくなると考えられる。このため、同図では、黒部川、成願寺川、大井川、天竜川など、確かに、中部・北陸地方の河川は図の上方にプロットされているが、芦田・奥村<sup>1)</sup>が示した流域面積と比堆砂量との関係図に見られるような極端な地域差は現れていない。

## (2) 全国主要河川流域の土砂流出ポテンシャル

上記の結果から、降水量の影響の大きいことも推察されるので、この点を国土地理院の国土数値情報「気象メッシュ」の降水量データを使用して検討した。このデータセットは、各観測点における1974～1990までの平均降水量を約1 km間隔にとられた標準地域区画における第3次地域区画に空間内挿して作成されたものである。図-7にそれを示しているが、これによると、太平洋側では九州から四国南部、紀伊半島南部、日本海側では新潟から福井にかけての地域で降水量が大きいことがわかる。この降水量データと木曽川流域での検討と同様の方法で作成した面積高度曲線から、土砂生産が多く、流域面積の大きい33の1級河川水系の流域について土砂流出ポテンシャルを試算した。ここでは、これを流域面積で除して単位面積当たりの値とし、比土砂流出ポテンシャルと定義している。比土砂流出ポテンシャルと流域面積との関係を示すと図-8のようである。流出土砂量の多い地域に限定はされてはいるが、先ほどのヒプソメトリック積分値上述の平均高度のみの場合とは違い、右下がりの傾向が強く現れているのがわかる。また、地域ごとの傾向も強く、黒部川、天竜川、木曽川といった日本有数の土砂生産量を誇る河川がこの図では明確に最もポテンシャルの大きなグループに位置している。逆にポテンシャルの小さな流域は、筑後川、小丸川、大淀川、川内川といった九州地域と、石狩川、十勝川、北上川、阿武隈川の流域などの北海道から東北にかけての地域に多い。流域平均高度と比土砂流出ポテンシャルとの値がともに大きい黒部川流域の面積高度曲線は、図-9に示したように、背後に高い山地が存在し、流域勾配が急であることに加え、流域形状が上流側に広がっていることから、面積高度曲線は上に凸の形状となっている。反対に、両者がともに小さな値である川内川流域は、流域形状が細長く、背後の山地も低く、流域勾配も緩いことから、図-10に示したように、面積高度曲線も全体的になだらかで緩やかに勾配が減少するカーブを描いている。

プロットの上限に位置する黒部川と天竜川、木曽川の傾きを調べると流域面積の $-0.4$ 乗に比例しており、同様に、下限に位置するグループも $-0.4$ 乗に比例している。これは芦田・奥村<sup>1)</sup>による $-0.7$ 乗則によく似た傾向ではあるが、絶対値が小さくなっている。これは、ここでの検討が流域全体を対象として、河口を基準点として土砂流出ポテンシャルを求めているのに対して、芦田・奥

村<sup>1)</sup>による検討はダム貯水池の比堆砂量についてであって、流域の上流部に位置している地点におけるデータは山地の特性を反映して値が大きくなり、一方、中下流部に位置している貯水池では限定された土砂生産域に対して流域面積のみ大きくなる傾向にあること、また、一般に、流域高度の高い位置ほど降水量も多くなるという傾向によっているものと推察される。

現段階では土砂流出量の多い河川についての土砂流出ポテンシャルでの評価にとどまっているが、今後、全国の主要河川での実測土砂流出量との関連を詳しく調べていきたい。

## 5. おわりに

本研究では、GISと数値地理データを用いて、流域に作用してきた営力を表現していると考えられる面積高度曲線を求め、その積分値と流域平均降水量との積を土砂流出のパラメータとして、流域における土砂流出量との関係を調べた。さらに、全国の土砂流出ポテンシャルを求め、その地域特性や過去の研究結果との比較を行った。それらの結果、以下の諸点を確認できた。

- ・ 木曽川流域では、土砂流出量と土砂流出ポテンシャルとの間に有意な相関が認められた。
- ・ 既往の研究で明らかになっている流域面積と土砂生産量との関係を、全国主要河川流域における土砂流出ポテンシャルの特性から、ある程度説明することができた。

今後は、曲線形状自体の特徴、すなわち、高度分布の統計的特性量などと流域特性や水系特性との関係について検討を深め、地殻変動を含む地質条件と気象条件によって決定されている流域の高度分布特性と土砂流出量とのより明確な定量的関係を明らかにしていきたい。

## 参考文献

- 1) 例えば、芦田和男、奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京大防災研究所年報第17号B，p. 558，1994。
- 2) Y. Fujita: *Synthetic Sediment Management in River Basins and Dam Reservoir Sedimentation*, International Seminar on the Water Management in Basins and the Role of Reservoirs, Proceedings of the Seminar, pp. 83-85, 2002.
- 3) 貝塚爽平：序説「変動地形研究」，大学テキスト『変動地形学』（米倉伸之・岡田篤正・森山昭雄編著），古今書院，p4，2001。
- 4) 貝塚爽平：発達史地形学，東京大学出版，p. 22，1998。
- 5) 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。
- 6) K. Ohashi & Y. Fujita: *Sedimentation in a series of dam reservoirs and their trap efficiency*, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Vol. 1, pp. 515-524, 2005.