

論文

ダム堆砂データに基づく日本全国の潜在的侵食速度分布

長谷川 浩一*・若松 加寿江**・松岡 昌志*

Mapping of Potential Erosion-Rate Evaluated from Reservoir Sedimentation in Japan

Kouichi HASEGAWA*, Kazue WAKAMATSU** and Masashi MATSUOKA*

Abstract

In order to improve the way to evaluate landslide potential, we proposed a new method to obtain a distribution of specific sedimentation rate, which gives information on regional erosion rate. First, several topographic indices were compared with specific sedimentation rates. We found that an average grid slope was the best index to estimate specific sedimentation rate. Based on a regression analysis, we obtained equations to estimate specific sedimentation rate using simple parameters: grid slope and surface geology contained in a GIS database "Japan Engineering Geomorphologic Classification Map (JEGM)". The estimation error of specific sedimentations using our proposed model is smaller than those using previous models. Using the equations and the JEGM, we mapped the potentials of specific sedimentation rate in every drainage basin all over Japan.

キーワード：侵食速度，堆砂量，比堆砂量，メッシュ傾斜，日本全国地形・地盤分類メッシュマップ，GIS

Key Words: erosion rate, reservoir sedimentation, specific sedimentation rate, grid slope, Japan Engineering Geomorphologic Classification Map (JEGM), GIS

1. はじめに

土砂災害の予測では，誘因となる降雨や地震などの情報とともに，素因となる地形や地質，

災害履歴などの情報が必要になる。誘因の降雨情報は，気象庁のレーダー・アメダス解析雨量が約5kmメッシュの精度で日本全国にわたり

* 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター
Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED

** 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア
研究センター川崎ラボラトリー
Kawasaki Laboratory, Earthquake Disaster Mitigation
Research Center, NIED

本論文に対する討論は平成18年5月末日まで受け付ける。

利用できるため、これを利用して土砂災害の発生危険度を推定する手法が提案されている^{1),2)}。一方、素因の情報は土層厚、地質、地形、植生など多岐にわたり、数値標高モデル (DEM) に基づく地形モデルを利用した斜面崩壊危険度予測³⁾も行われている。三隅・他²⁾は、DEM に基づく流出モデルと斜面安定解析を組み合わせ、レーダー・アメダス解析雨量を用いた斜面崩壊予測に関する研究を行っている。この手法では DEM のメッシュ精度で危険度の予測ができるが、現地での土質調査によるパラメータや表土層厚などの詳細な情報が必要になる。土壌雨量指数¹⁾は、メッシュ毎に土壌水分の収支をタンクモデルによって計算し、市町村程度のおける土砂災害の発生する危険度を推定する指標である。モデルでは特定の地質の平均的な斜面における貯水量を用いているため、今後、地形地質の違いや人工的ながけ、荒廃などによる地域全体の崩れやすさを考慮することが課題として挙げられている¹⁾。よって、ある程度広域の地域での土砂災害予測においては、「地域の崩れやすさ」という指標を簡便に把握することが重要な課題である。

わが国では、山地の侵食の主な原因は崩壊などのマスマーブメントであると考えられている⁴⁾。山地での侵食量は河川流域から搬出されてダムに堆積する土砂量に等しいとみなされており^{5),6)}、ある程度の規模を有するダムで上流域に別のダムがない場合、ダムの比堆砂量 (単位年、単位面積当りのダム堆砂量) が流域全体の平均的な侵食速度を近似的に表していると考えられている^{5),7)}。従って、このような条件のダムの堆砂量には大小の崩壊による土砂量が含まれると考えられる。

これらのことから、流域全体の侵食速度は個々の谷や斜面の崩壊につながる地域の崩れやすさを知るための一つの指標になると考えられる。しかし、日本全国の流域での侵食速度をダムに堆積する土砂量から計測することは現実的ではない。そこで、地形指標や地質などの面的な情報を用いて、任意の流域での侵食速度を推定す

ることは、地域の崩れやすさを把握する解決策の一つと考えられる。

流域の侵食速度は、地形の起伏状態と相関をもつことが知られており、高度分散量 (標高の標準偏差) を用いた侵食速度の推定式が提案されている⁶⁾。藤原・他⁸⁾は、高度分散量を基準地域メッシュ単位で計測し、この地形量を用いた侵食速度の推定式を提案している。推定式を求める際の回帰分析は、地形量の区間毎に算出された侵食速度の平均値のデータセットに対してなされているが、本来すべてのデータに対して分析することが望ましい。また、高さの次元をもつ起伏量や高度分散量は、斜面の傾斜を間接的に表現するために用いられてきたものであり⁹⁾、本来の地形変化を表現する物理量としては、傾斜がふさわしいと考えられる。

そこで、本研究ではメッシュ単位で算出された傾斜を侵食速度推定のための地形量として用い、従来提案されてきた地形量とともに、侵食速度とみなされるダムの比堆砂量との関係について比較を行う。なお、侵食速度に対する降雨の影響に関しては、藤原・他⁸⁾が流域の侵食速度と降水量や降水強度との間に、相関がほとんどみられないことを確認している。その考察で、「世界的な観点でみると、侵食速度は降水量と植生密度とによって変化する」が、「日本列島の山地のように植生密度が高い地域では、降水量による侵食速度の差は現れにくい」と述べている。そこで、地域の崩れやすさの指標の提案の第1ステップとして、本研究では地域による降雨の違いを考慮しないものとする。

2. 流域の侵食速度推定のための既往の地形量

まず、ダム堆砂量の推定を目的として日本において提案された主な地形量を表1に示す。以下に、各地形量の概要と特徴・問題点などを整理する。

2.1 流域単位の地形量

流域単位で地形を計測する代表的な地形量と

表 1 堆砂量推定のための主な地形量

単位	地形量	説明	主な文献
流域	起伏量比	流域内の起伏量を本河川の流路距離で除した値	吉松 ¹⁰⁾ 建設省河川局 ¹²⁾ , 日本河川協会 ¹¹⁾
流域	流域面積	ダムの集水域に相当する上流地域の面積	芦田・奥村 ¹³⁾ 建設省河川局 ¹²⁾ , 日本河川協会 ¹¹⁾
メッシュ	地貌係数	流域内でのメッシュ単位の標高と起伏量の平均値を互いに乗じた値	田中・石外 ¹⁵⁾
メッシュ	(基準)高度分散量	メッシュ内に含まれる複数の標高データの標準偏差の流域内での平均値	Ohmori ⁶⁾ , 藤原・他 ⁸⁾
メッシュ	起伏度×平均標高	流域内でのメッシュ単位の起伏量のうち最頻値より大きい階級の値を合計し流域面積で除した値と平均標高の積	岡野・他 ¹⁶⁾

して、起伏量比が挙げられる。起伏量比とは、流域内の最高点と最低点の標高差を該当する河川の流路距離で除した値である。吉松¹⁰⁾は、山地の崩壊面積率の推定モデルにおける変数として起伏量比を用いたほか、建設省河川砂防技術基準(案)¹¹⁾で採用されている砂防ダムの比堆砂量を推定する重回帰式の変数として、流域面積や流域平均高度などと共に用いられている。

また、建設省河川局¹²⁾は、砂防ダムの比堆砂量と起伏量比や流域面積との関係を検討しており、芦田・奥村¹³⁾は比堆砂量と流域面積との関係図に水系情報を加えて分析を行っている。最近では、これらの地形量の計測にDEMやGISを用いて作業の効率化も図ることができるが、データの作成にはある程度の手間を要する。

2.2 メッシュ単位の地形量

(1) 地貌係数

メッシュ単位の地形計測は、古くから研究されており¹⁴⁾、貯水池の堆砂量とメッシュ単位の地形量との比較を行った研究としては、田中・石外¹⁵⁾の論文が挙げられる。その中で、16 km²メッシュ内の起伏量と平均標高を計測し、流域内での加重平均を求め、比堆砂量との関係を検討している。さらに、流域内の平均起伏量と平均標高を乗じて得られる値を地貌係数と名付け、比堆砂量との関係を検討しており、地質別の関係式を示している。また、流域内に分布する岩石の種類によって地貌係数と比堆砂量との関係を整理しているが、研究で用いられたダム数は32

と多くはないこともあり、明確な傾向を把握するには至っていない。

(2) 基準高度分散量

藤原・他⁸⁾は、全国の山地の侵食速度を推定するために、ダムへの土砂流入量と流域の基準高度分散量の平均値との関係から、回帰式を求めている。ここで基準高度分散量とは、地域の起伏の大小を示す地形指標である高度分散量⁶⁾を基準地域メッシュ(約1kmメッシュ)に適用したもので、メッシュに含まれる数値標高データ(250mメッシュ)の標準偏差に相当する。この研究で用いられたダム数は82と比較的多い。

(3) 起伏度×平均標高

岡野・他¹⁶⁾は、起伏度という地形量を定義している。起伏度とは、流域内に含まれるメッシュ単位の起伏量のうち最頻値より大きい階級の値を合計し、流域面積で除した値である。この研究では、地貌係数を参考にして、起伏度と流域の平均標高を乗じた値(起伏度×平均標高)を提案しており、比堆砂量との相関係数は0.74と高い。また、国土数値情報の表層地質を用いて、岩石の硬さなどに着目した表層地質4区分における回帰式を示している。相関係数はいずれも0.9前後と極めて高いが、研究で用いられたダム数は各区分で5~11であり、より多くのデータに基づく分析が望まれる。

2.3 日本全国地形・地盤分類メッシュマップでの地形量

筆者らの研究グループは、行政区域を越えた広域を対象としたハザード評価のための基礎情報となる、全国的な地盤特性データベース『日本全国地形・地盤分類メッシュマップ』を最近構築しており¹⁷⁾、デジタルデータを公開予定である¹⁸⁾。このマップは、地理情報システム (GIS) にて取り扱うことのできる数値情報で、地形分類・表層地質などに関する基準地域メッシュ (約 1km メッシュ) 単位のデータによって全国が網羅されている。地形分類や表層地質の情報に加えて、国土院発行の 250 m メッシュ標高データを用いて計算された傾斜や起伏量などの地形量に関する情報も収録されている。

メッシュ単位の傾斜の計算は、図 1 に示す三

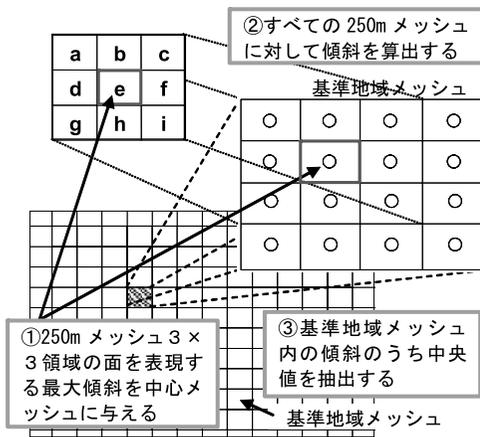


図 1 メッシュ傾斜の計算手順

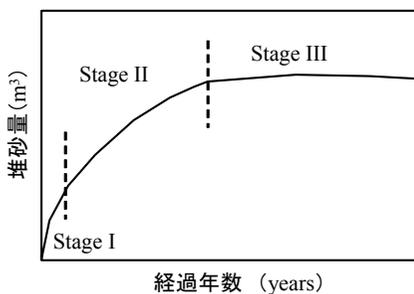


図 2 一般的なダム堆砂の経年グラフの形状²¹⁾

段階の処理によって実施されている。即ち、① 沖村・他¹⁹⁾手法に従い、数値地図 250 m メッシュ標高のデータを 3 × 3 メッシュで取り出し、その中心メッシュを対象として、その分布を最もよく表現する平面を最小二乗法により求め、その面の傾斜を算出する。②すべての 250 m メッシュに対して傾斜を算出する。③基準地域メッシュ内に含まれる 250 m メッシュの傾斜の中央値を算出し、その値を基準地域メッシュでの傾斜 (正接) とする。以下、この値をメッシュ傾斜と呼ぶ。

本研究では、メッシュ傾斜のダム堆砂量推定のための地形量としての適否を検討するために、他の地形量と比較を行った。

3. 利用したダム堆砂量と流域データ

ダムの比堆砂量 ($10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$) は、年平均堆砂量を流域面積で除して得られる。本研究では年平均堆砂量を求めるために、全国のダム堆砂量データを作成し、それらのダムの流域面積を算出するために、流域ポリゴンを GIS にて作成した。

3.1 全国のダム堆砂量のデータベース化

本研究にて使用したダム堆砂データは、『電力土木』²⁰⁾誌上に公表された昭和 37 年 (1962) から平成 13 年 (2001) までの堆砂データである。これに基づきダム単位の堆砂量の経年グラフ (以下、堆砂グラフと呼ぶ) を作成した。

堆砂グラフから経年変化の勾配を計測したものが年平均堆砂量である。芦田・他²¹⁾によると、一般的な堆砂の経年変化には図 2 に示すような 3 段階があり、比較的安定した堆砂の傾向を示すステージ II が自然環境による堆砂傾向を最もよく表しているときとされる。このステージを判読するためには、ある程度長期間にわたって堆砂グラフを作成する必要がある。そこで、本研究では昭和 20 年代から 40 年代に竣工したダムを採用することとした。これによって、竣工直後から現在まで少なくとも 25 年以上の堆砂の傾向を把握できる。

これらの堆砂データのうち、他のダムの影響を受けず、土砂の捕捉率が100%に近いダムのデータが、自然な状態での堆砂傾向を示していると考えられる。このようなダムを選ぶにあたり、芦田・他²¹⁾の研究を参考にして、次のような条件を満たすダムを選ぶことにした。

- 1) 上流に大規模ダムが存在しない
- 2) 貯水容量が200万m³以上である
- 3) 堆砂率が25%以下である

上記の1)は他のダムの影響を受けない条件であり、国土数値情報のダム位置および地形図により判断した。最上流に位置してなくても上流のダムの竣工年と堆砂グラフから判断して、上流のダムの影響が殆ど無いと判断される場合、そのダムも採用した。2), 3)は土砂の捕捉率がほぼ100%とされる経験的な条件であり、電力土木誌上に公開されている情報によって判断した。

以上、三つの条件を満たしたダムの殆どの堆砂グラフは、図2のような一般的な形状を示さず、ステージIIを確認できなかった。そこで、まず本研究では、次節にて示すように、近年の研究を参考にして、堆砂量の経年変化をタイプ

別に分類し、代表的な勾配を読み取った。

3.2 堆砂量の計測方法

宮崎・大西⁷⁾は、堆砂量の経年変化を、A：堆砂量が一様に増加する、B：堆砂量の増加が途中から遅くなる、C：堆砂量の増加が途中から速くなる、という三種類のパターンに大別している。また、比堆砂量の算定には侵食速度に相当する量で表すのが適当であるとしており、Aの場合は勾配がひとつで問題ないが、B、Cの場合は侵食速度に相当する量を選ぶ必要があるとしている。そして、「堆砂量の増加が途中から遅くなるタイプBの場合には、堆砂速度減少の原因が背砂や排砂であるとすれば、減少後の比堆砂量は侵食速度を表さないことになる」とあり、タイプCの場合には、「流域の侵食状況変化が原因と考えるのが自然であるから、勾配変化の前後とも侵食速度の対象となる」とある。さらに、タイプAとBの区別が難しい場合の処置として、堆砂グラフの二つの勾配の比率（変化前/変化後）が、おおよそ2を超える場合はBと判断するのが妥当であるとしている⁷⁾。

そこで、これらの判断事例を参考にして、B

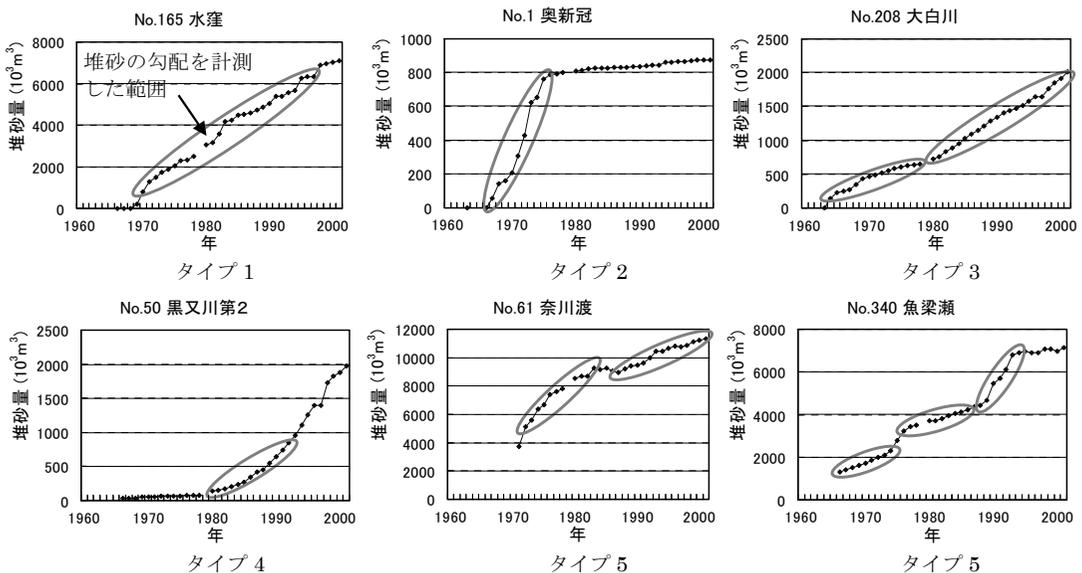


図3 本研究での堆砂グラフのタイプ分類例

とCの場合の簡略化した判断基準を次のように考えた。すなわち、上記の勾配の比率によりBと判断される場合は、減少前の期間の勾配のみを対象として堆砂の勾配を計測し、Cの場合は複数の勾配の平均をもって代表値とする。また、BとCが混在するような場合は、Cの場合と同様に、それらの平均をとることとする。

以上の判断基準に加え、勾配が曲線的な場合の扱いも含めて、堆砂の勾配の計測方法を次のように設定した。また、()内に対応する宮崎・大西⁷⁾のパターンを示した。

タイプ1：終始一貫して一様に増加している場合、堆砂期間の平均的な勾配を計測する(A)。

タイプ2：増加勾配が一様ではなく、堆砂量の増加が途中から遅くなる場合、勾配が変化する前の期間を対象として勾配を計測する(B)。

タイプ3：増加勾配が一様ではなく、堆砂量の増加が途中から速くなる場合、勾配が変化する前後の勾配をそれぞれ計測し、それらの平均をとって全体の値とする(C)。

タイプ4：増加勾配が曲線的で、勾配計測のための区切りを判断するのが難しい場合、その期間の中程での勾配を計測する(B、Cの特殊なパターン)。

タイプ5：タイプ2～4の傾向が混在している場合、それぞれの勾配の平均をとって全体の値とする(B、Cが混在したパターン)。

また、各増加期間が10年程度以上続く場合に限りそれぞれの勾配を計測するものとし、5年に満たない急激な増加期間は計測しない。全体的に減少傾向にある場合や、ほとんど増加傾向がみられない場合あるいは増加と減少傾向が交互に現れるなど安定していない場合、そのダムは除外する。

図3に、上記タイプ1から5までの堆砂グラフの例を示す。曲線で囲んだ部分が年平均堆砂量の計測に用いたデータである。

以上、ダムの選択条件を満たし、かつ、堆砂グラフの勾配が読み取れるダムの数は、本研究で作成したデータベースのダム総数391のうち、72であり、これを本研究における以降の検討に用いることにした。72のダムの位置を末尾の図4(a)に、ダム諸元、堆砂グラフの一覧を表2に示す。

なお、表2中のNo.に欠番があるのは、本研究で作成したデータベースのダム総数391に対する通し番号をそのまま用いているためである。

3.3 ダム流域 GIS データの構築

現実の流域界をできるだけ忠実に取得するため、国土地理院発行の5万分の1地形図画像に地理的位置合わせを施したものを背景図として、等高線に基づいて集水域を切り出した。その際、他のダムの水がパイプラインなどによって流入する可能性があるが、ここでは他のダムの流域は除いた。なお、標高データによって流域界を抽出することも考えられるが、現実の流域界を再現できない場合があること²²⁾や、上記のような人工施設の確認が別途必要であることから、本研究では地形図から手作業にて流域界を求めた。GISによるポリゴン計測によって得られた面積を表2に示す。流域ポリゴンの面積はダム年鑑2004²³⁾に掲載されている流域面積とほぼ同じ値になること、国土数値情報の流域界²⁴⁾と取得した流域界がほぼ一致することを確認した。

4. 比堆砂量と地形量との比較

本研究では、ダム流域内に含まれるメッシュ傾斜の合計値を流域面積で除した値を平均メッシュ傾斜と定義する。地域別にメッシュ傾斜を合計し流域面積で除し、地域の平均メッシュ傾斜を算出した。2章で示した砂防分野で従来用いられてきた地形量と、メッシュ傾斜のいずれが比堆砂量の推定に適しているのか確認するために、各地形量と比堆砂量を比較したグラフを作成した(図5(a)-(f))。プロットは表層地質別に種類を変えて表示している。

表層地質の違いは、堆砂量の地域性に関わる

表2 ダムの諸元および計測値

No.	地域 ^(注)	ダム名	水系	総貯水量 (10 ⁶ m ³)	堆砂率	竣工年	流域面積 (km ²)	堆砂グラフタイプ	堆砂量 (10 ³ m ³ /年)	比堆砂量 (10 ³ m ³ /km ² /年)	平均メッシュ傾斜	表層地質
2	北海道	奥新冠	新冠川	6,665	13.1	1963	51.9	2	84.78	1.63	0.43	混在
19	北海道	大夕張	石狩川	87,300	16.7	1959	432.8	5	696.05	1.61	0.19	先第三系
26	北海道	幌満川第3	幌満川	15,379	7.9	1954	140.7	1	21.60	0.15	0.29	第三系
29	北海道	糠平	十勝川	193,900	4.9	1956	392.6	2	297.70	0.76	0.22	第三系
30	北海道	活込	十勝川	17,410	19.1	1955	524.3	2	203.11	0.39	0.19	第三系
34	東北	日屋	岩木川	39,000	7.8	1959	170.8	5	105.67	0.62	0.24	第三系
46	東北	菅平	信濃川	3,451	8.0	1968	32.0	5	10.77	0.34	0.15	第四系火山岩類
50	東北	黒又川第2	信濃川	60,000	3.3	1964	84.5	4	50.80	0.60	0.29	先第三系
57	東北	野反	信濃川	28,700	0.8	1956	8.8	1	1.80	0.20	0.17	第三系
61	東北	奈川渡	信濃川	123,000	9.2	1969	374.4	5	316.43	0.85	0.35	先第三系
68	東北	笠堀	信濃川	15,400	12.1	1964	68.5	2	93.57	1.37	0.33	第三系
92	東北	鑑畑	雄物川	51,000	8.8	1957	316.4	2	80.60	0.25	0.19	混在
98	東北	猿田	三面川	11,740	17.9	1955	86.1	2	164.20	1.91	0.27	先第三系
102	東北	荒沢	最上川	41,420	8.5	1955	163.5	3	117.71	0.72	0.27	混在
103	東北	八久和	最上川	49,028	9.2	1957	142.6	5	112.14	0.79	0.30	先第三系
107	東北	木地山	最上川	8,200	10.2	1960	61.2	5	26.28	0.43	0.27	先第三系
110	東北	高坂	最上川	19,050	10.4	1967	68.6	5	50.25	0.73	0.23	第三系
112	東北	萩形	信濃川	14,950	8.8	1966	85.2	2	29.25	0.34	0.27	混在
113	東北	素波里	信濃川	42,500	2.8	1970	98.4	2	69.56	0.71	0.28	第三系
116	東北	森吉	米代川	37,200	7.8	1953	126.7	2	50.57	0.40	0.14	第四系火山岩類
119	関東	矢木沢	利根川	204,300	1.3	1967	166.8	2	87.00	0.52	0.31	先第三系
130	関東	下久保	利根川	130,000	6.1	1968	323.8	5	385.35	1.19	0.27	先第三系
134	関東	深山	那珂川	25,800	3.7	1973	52.5	2	44.25	0.84	0.31	第三系
138	関東	小河内	多摩川	189,100	2.7	1957	259.4	5	150.38	0.58	0.30	先第三系
147	東海	広瀬	富士川	14,300	9.3	1974	74.4	1	18.83	0.25	0.30	第三系
150	東海	柿本	富士川	7,592	18.4	1952	33.2	1	30.41	0.92	0.33	第三系
165	東海	水窪	天竜川	30,000	23.6	1971	56.7	1	193.13	3.41	0.40	先第三系
195	東海	高根第一	木曾川	43,568	5.6	1969	126.1	2	107.00	0.85	0.21	第四系火山岩類
201	北陸	笹生川	九頭竜川	58,806	5.6	1957	70.6	1	39.63	0.56	0.25	先第三系
208	北陸	大白川	庄川	14,200	14.1	1963	20.6	3	47.73	2.32	0.39	先第三系
219	北陸	和田川	庄川	3,070	9.5	1967	32.6	2	9.11	0.28	0.07	第三系
226	北陸	大日川	手取川	27,200	2.1	1967	85.3	3	16.94	0.20	0.21	先第三系
227	北陸	刀利	小矢部川	31,400	5.2	1966	43.1	2	32.55	0.75	0.28	第三系
239	北陸	室牧	神通川	17,000	14.2	1961	82.6	1	38.40	0.46	0.27	混在
241	北陸	有峰	常願寺川	222,000	0.4	1959	51.5	2	37.10	0.72	0.22	先第三系
247	北陸	犀川	犀川	14,300	9.4	1965	56.4	2	64.64	1.15	0.35	第三系
248	北陸	内川	犀川	9,500	6.0	1974	35.3	3	9.68	0.27	0.28	第三系
249	北陸	我谷	大聖寺川	10,100	10.7	1964	85.8	2	57.38	0.67	0.25	第三系
252	近畿	坂本	熊野川	87,000	2.0	1962	76.0	1	34.26	0.45	0.33	先第三系
261	近畿	殿山	日置川	25,446	16.8	1957	293.4	5	44.56	0.15	0.22	第三系
263	近畿	七川	古座川	30,800	3.5	1956	101.9	2	45.33	0.44	0.20	第三系
264	近畿	三瀬谷	宮川	13,100	20.7	1966	314.7	3	102.00	0.32	0.28	先第三系
276	近畿	二川	有田川	30,100	15.4	1966	228.7	5	124.58	0.54	0.22	先第三系
277	近畿	引原	摺保川	21,950	2.1	1957	51.5	2	16.00	0.31	0.21	先第三系
281	中国	河本	高梁川	17,350	17.7	1964	326.1	2	34.75	0.11	0.14	先第三系
282	中国	黒木	吉井川	6,000	10.0	1966	49.0	4	14.80	0.30	0.18	先第三系
284	中国	久賀	吉井川	4,400	5.6	1973	61.1	2	13.43	0.22	0.17	先第三系
287	中国	湯原	旭川	99,600	1.2	1954	256.1	3	38.59	0.15	0.12	混在
297	中国	樽床	太田川	20,600	2.2	1957	41.0	5	16.53	0.40	0.10	先第三系
302	中国	渡之瀬	小瀬川	10,424	6.1	1956	73.8	5	23.78	0.32	0.13	先第三系
304	中国	佐々並	阿武川	20,100	5.5	1959	90.8	5	29.38	0.32	0.13	先第三系
309	中国	周布川	周布川	10,173	11.5	1961	86.4	5	36.00	0.42	0.17	先第三系
310	中国	浜田	浜田川	5,240	6.3	1962	31.8	3	10.42	0.33	0.10	第三系
312	中国	高暮	江ノ川	39,658	2.3	1949	157.1	1	13.03	0.08	0.15	混在
314	中国	来島	神戸川	23,470	5.9	1956	142.0	5	40.67	0.29	0.13	混在
317	中国	布部	斐伊川	7,100	11.4	1967	69.4	2	25.00	0.36	0.14	第三系
320	中国	佐波川	佐波川	24,600	3.9	1955	86.2	2	12.00	0.14	0.20	先第三系
322	四国	鏡	鏡川	9,380	10.7	1966	80.8	1	25.17	0.31	0.24	先第三系
333	四国	別子	吉野川	5,628	5.8	1965	15.2	5	13.13	0.87	0.29	先第三系
337	四国	面河	淀川	28,300	0.7	1965	16.1	5	5.14	0.32	0.18	第三系
340	四国	魚梁瀬	奈半利川	104,625	6.6	1970	100.6	5	105.11	1.05	0.27	先第三系
352	九州	芹川	大分川	27,500	4.0	1956	124.2	5	18.21	0.15	0.10	第四系火山岩類
353	九州	北川	五ヶ瀬川	41,000	3.0	1962	181.3	1	32.70	0.18	0.15	先第三系
355	九州	上椎葉	耳川	91,550	17.6	1955	211.1	1	118.27	0.56	0.28	先第三系
362	九州	渡川	小丸川	33,900	21.6	1955	80.0	5	17.39	0.22	0.22	第三系
368	九州	立花	一ツ瀬川	10,000	14.0	1963	39.9	5	56.94	1.43	0.28	第三系
372	九州	綾南	大淀川	38,000	4.2	1958	86.6	5	27.69	0.32	0.16	第三系
373	九州	綾北	大淀川	21,300	21.5	1960	148.3	5	102.06	0.69	0.23	第三系
375	九州	岩瀬	岩瀬川	57,000	18.8	1967	356.7	5	180.54	0.51	0.10	第四系火山岩類
376	九州	祝子	祝子川	5,774	8.4	1972	45.7	1	16.54	0.36	0.27	混在
383	九州	日向神	矢部川	27,900	2.7	1959	82.9	1	13.63	0.16	0.18	第三系
389	九州	尾立	安房川	2,265	12.5	1963	20.8	5	11.48	0.55	0.18	第三系

(注) 地域分けは、ダム堆砂量の出典である「電力土木」誌の分類に従った。

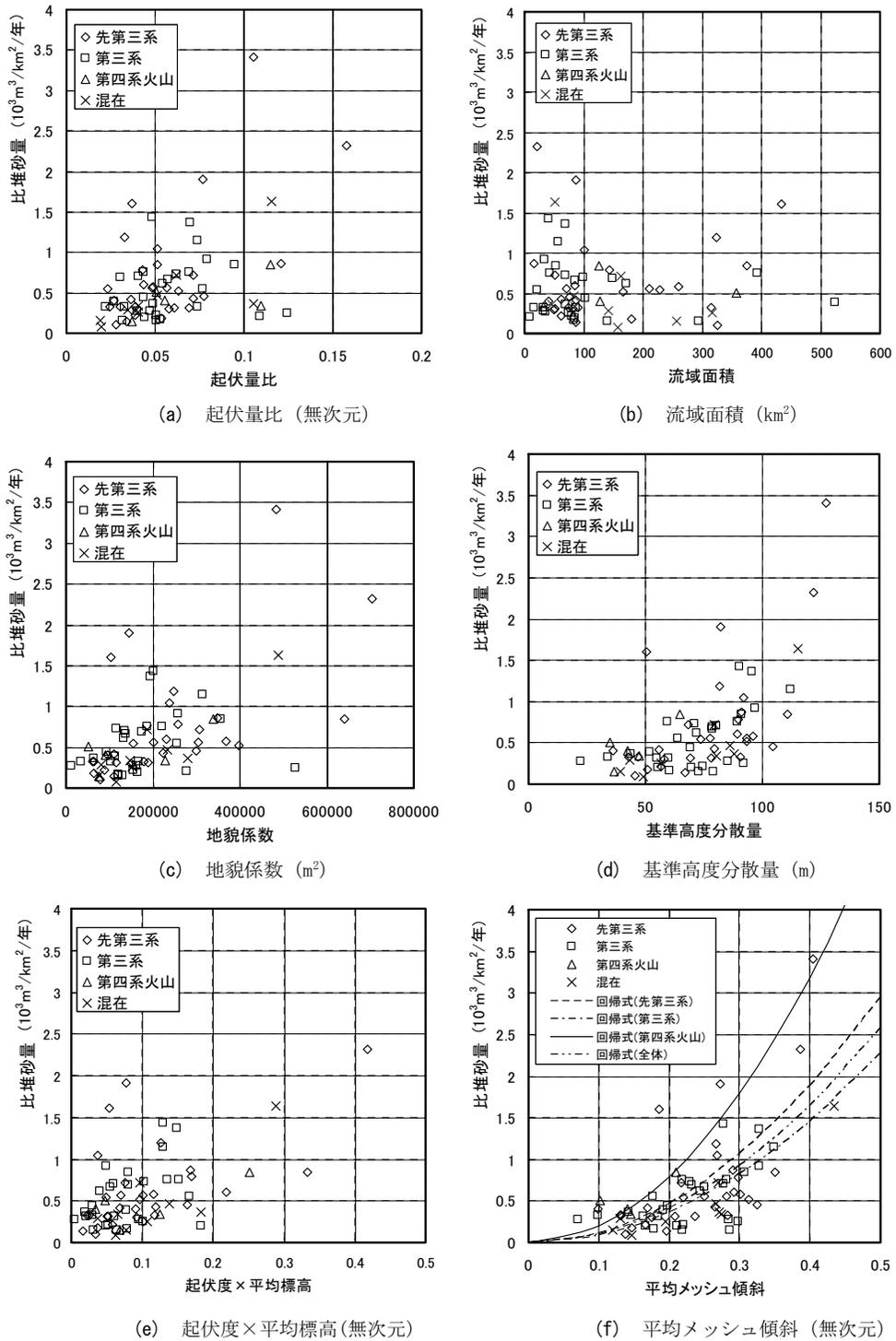


図5 地質区分ごとの比堆砂量と各種地形量との比較

表3 地質区分別の各地形量と比堆砂量の相関係数

表層地質	ダム数	起伏量比	流域面積	地貌係数	基準高度分散量	起伏度×平均標高	平均メッシュ傾斜	基準高度分散量二乗	平均メッシュ傾斜二乗
先第三系	30	0.60	-0.03	0.56	0.58	0.41	0.61	0.65	0.68
第三系	28	0.14	-0.10	0.26	0.58	0.44	0.59	0.63	0.63
第四系火山	5	0.49	0.14	0.68	0.83	0.73	0.80	0.84	0.83
混在	9	0.77	-0.46	0.90	0.81	0.84	0.89	0.88	0.95
全体	72	0.46	-0.06	0.55	0.60	0.46	0.61	0.66	0.67

要因の一つと考えられる。そこで本研究では、前述の日本全国地形・地盤分類メッシュマップに含まれている表層地質データを用いて、ダム堆砂量との関係を調べた。この表層地質データは地質時代によって次の5つに大きく分類されている¹⁷⁾。

- 先第三系
- 第三系
- 第四系火山岩類
- 第四系更新統
- 第四系完新統

なお、全国の表層地質の分布は図4(a)に、各ダムの主な表層地質は表2に示している。

図5の各グラフの比堆砂量を比較すると、流域面積、起伏量比、起伏度×平均標高、地貌係数でばらつきが大きい、基準高度分散量と平均メッシュ傾斜のばらつきは小さい。

表3に各地形量と比堆砂量の直線近似による相関係数を表層地質別と全体について示す。基準高度分散量と平均メッシュ傾斜については、それぞれの分布傾向と藤原・他⁸⁾の研究成果を参考にして、地形量を2乗した値との相関係数も示す。各地形量の中では、流域面積、起伏量比、起伏度×平均標高、地貌係数、基準高度分散量

に比べて平均メッシュ傾斜の相関係数が最も高い。また、2乗の値との相関は元の値との相関よりも高い。従って、平均メッシュ傾斜の2乗の指数関数を比堆砂量推定モデルとして採用した。第四系火山岩類のデータが少ないが、表層地質ごとに平均メッシュ傾斜の2乗値を変数として原点を通る場合の回帰分析を行った。回帰式を式(1)に、式(1)の地質区分ごとの係数 a と標準偏差 σ の値を表4に示す。図5(f)中には式(1)の回帰式も示している。重相関係数は、表4の地質区分の順で、0.67、0.61、0.79であった。なお、地質区分をせずに全体データについて同様の回帰分析を行った結果も表4に示す。

$$y = ax^2 \pm \sigma \tag{1}$$

表4 式(1)の係数と標準偏差

地質区分	a (係数)	σ (標準偏差)
先第三系	11.8	0.53
第三系	9.1	0.29
第四系火山	19.8	0.16
全体	10.3	0.41

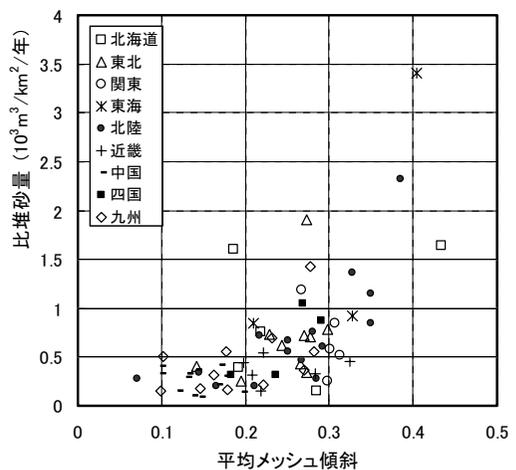


図6 比堆砂量と平均メッシュ傾斜の関係 (地域別の比較)

表5 地域別の合計値の一覧

地域	ダム数	堆砂量 (10 ³ m ³ /年)	流域面積 (km ²)	比堆砂量 (10 ³ m ³ /km ² /年)	平均 メッシュ 傾斜
北海道	5	1,303.2	1,542.2	0.85	0.21
東北	10	806.2	1,319.4	0.61	0.24
関東	5	685.8	876.8	0.78	0.29
東海	3	330.5	215.9	1.53	0.28
北陸	15	826.5	1,131.9	0.73	0.29
近畿	6	366.7	1,066.1	0.34	0.24
中国	13	308.4	1,470.8	0.21	0.14
四国	4	148.6	212.6	0.70	0.25
九州	11	595.4	1,377.3	0.43	0.18
全国	72	5,371.4	9,213.1	0.58	0.22

ここで、 x ：流域での平均メッシュ傾斜、

y ：比堆砂量

回帰式の係数は、第四系火山岩類の値が最も大きく、土砂の流出し易さが最も高い地質であることを示している。次いで、先第三系、第三系の順で小さくなる傾向がみられた。この傾向は、斜面の大規模崩壊の事例が多い地質が第四紀の火山地域および中生代～古第三紀の地層であること²⁵⁾と調和的である。しかし、式(1)のうち第四系火山岩類では、データが少ないため、回帰式の信頼性は高いとはいえない。より多くのデータに基づいた傾向の把握が今後の課題といえる。

5. 平均メッシュ傾斜による侵食速度の推定

5.1 地域による分類

図6に、比堆砂量と平均メッシュ傾斜の関係を地域ごとにシンボルをかえて示す。全体的には、平均メッシュ傾斜と比堆砂量の間には2次曲線的な傾向がみられるが、地域別にみると近畿、中国、北海道で相関が低く、四国、東海、北陸で相関が高かった。

比堆砂量の平均を地域別に算出し、比較した結果を表5に示す。比堆砂量の平均が大きい地域と値は、①東海(1.53)、②北海道(0.85)、③関東(0.78)、④北陸(0.73)、小さい地域は①中国(0.21)、②近畿(0.34)、③九州(0.43)、④東北(0.61)であった。なお、ここでの地域分

類では、吉良・他²⁶⁾に従って表2のうち、信濃川水系のダムを北陸に、富士川水系のダムを関東に移している。

吉良・他²⁶⁾は、1971年当時の全国のダムの堆砂実績値を地域別に集計している。これによると、地域の比堆砂量の順位と値は、大きい方で①四国(0.819)、②東海(0.807)、③北陸(0.550)、④近畿(0.517)、小さい方で①中国(0.149)、②九州(0.299)、③北海道(0.323)、④東北(0.328)という結果であった。上位では東海と北陸が、下位では中国、九州、東北が本研究と同じであるが、一方で北海道や近畿は上位と下位が入れ替わっている。また、比堆砂量の値は本研究で堆砂グラフから読み取られた勾配の値よりも小さくなる傾向を示している。これは、吉良らは全期間の堆砂量を用いているのに対して、本研究では、堆砂グラフの増加傾向が途中から遅くなる場合、遅くなる前のみを対象として勾配を読み取っているためと推測される。

浅田²⁷⁾は、比堆砂量の算出方法によって3通りに分けて、地域別の平均を示している。このうち、比堆砂量が100 m³/年・km²より大きい貯水池に対して最大比堆砂量の地域平均を算出している。地域の順位と値は、大きい方で①四国(2.38)、②東海(1.84)、③北陸(1.29)、④北海道(1.07)、小さい方で①中国(0.52)、②東北(0.602)、③近畿(0.801)、④関東(0.90)という結果であった。吉良らの結果と異なる特徴は、北海道が上位に入っていること、下位に近畿が入っていることであり、これは本研究の傾向と一致する。また、比堆砂量の値は、吉良らの結果に比べて大きく、本研究の結果よりもやや大きい。

以上、既往の二つの研究事例と比較すると、本研究の地域別平均比堆砂量の順位は、おおむね同じ傾向であると思われるが、比堆砂量の値は両者の中間的な値となっている。この相違の最大の要因は、堆砂量(堆砂グラフでの勾配)の計測方法の違いと考えられるが、その他に対象としたダムや堆砂の計測期間の違いも挙げられる。また、浅田²⁷⁾の研究と本研究において、

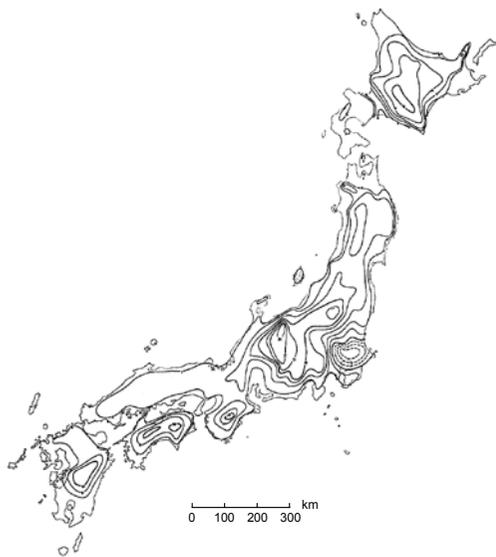


図7 日本列島の第四紀における垂直変位量²⁸⁾
(等値線は200 m ごとで実線は隆起, 破線は沈降を表す)

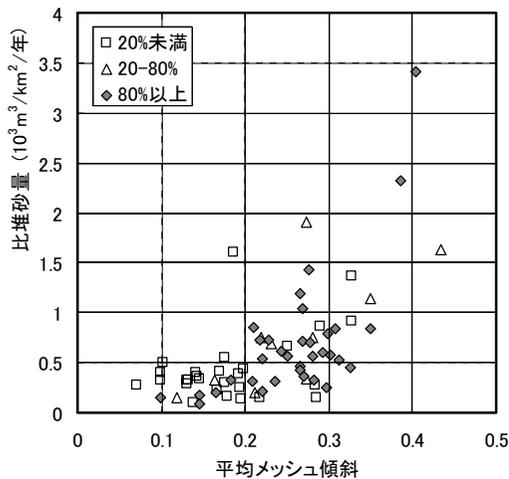


図8 荒廃地域の占有率別の比堆砂量と平均メッシュ傾斜の関係

地域別の比堆砂量が上位にある、東海、北海道、北陸、四国では、図7に示す第四紀における垂直変位量²⁸⁾の隆起が大きいことと対応する傾向がみられた。なお、前述の2つの研究事例で順位が低かった関東地方は、本研究では上位3位となっている。これは、本研究で用いた下久保

表6 荒廃地域占有率別の比堆砂量とメッシュ傾斜の平均値

荒廃地域占有率	比堆砂量	平均メッシュ傾斜
20%未満	0.45	0.18
20-80%	0.79	0.26
80%以上	0.70	0.26

ダムの堆砂量、比堆砂量ともに特に大きいことが影響している。下久保ダムは利根川支流の神流川に作られたダムで、ダムの堆砂速度は計画の倍以上にもなったことが報告されている²⁹⁾。堆砂量が多いのは、神流川の水源地が関東地方の中でも隆起量が多い関東山地にあることが影響していると推定される。

5.2 荒廃地域での平均メッシュ傾斜と比堆砂量との関係

土砂の流出が流域の植生の影響を受けることが従来から指摘されている。例えば、土壤浸食による土砂生産量は、草地・林地・畑作地では $10^1 \sim 10^3$ ($m^3/km^2/年$)であるのに対して、崩壊地・裸地ではそれよりはるかに大きく、 $10^3 \sim 10^4$ であるという一般的な傾向が示されている³⁰⁾ことから、ダム堆砂に及ぼす荒廃地域の影響を検討する必要がある。植生が殆ど無い地域は荒廃地域として示されており、砂防便覧³¹⁾には全国の荒廃地域の分布図が掲載されている。

そこで、荒廃地域が流域内でどの程度の割合を占めるかを分析し、比堆砂量と平均メッシュ傾斜との関係を検討した。本研究では、荒廃地域の分布図をGISにてポリゴンとして読み取り、ダム流域と重ね合わせて、比堆砂量との関係の検討に用いた。荒廃地域は末尾の図4(b)に示されるように、重荒廃地域と一般荒廃地域に分かれているが、両者の差異が明確に見分けられなかったため、本研究ではまとめて一つの分類として扱った。その結果を図8に示す。荒廃地域の占有率による分類は、20%と80%を閾値に設定し、ほとんど含まない場合(20%未満)、ほとんどすべてが荒廃地域である場合(80%以上)、両者の中間の場合(20%以上80%未満)の3分

類とした。

図8で、荒廃地域の占有率と平均メッシュ傾斜の関係を見ると、平均メッシュ傾斜の値が0.2付近より小さい流域は、荒廃地域の占有率20%未満が多く、逆に0.2付近より大きい流域は、荒廃地域の占有率20%以上が多い。さらに、荒廃地域の占有率が20%未満の流域では、平均メッシュ傾斜の値が小さく、比堆砂量も小さい傾向がある。これに対して、荒廃地域の占有率が80%以上の流域では、平均メッシュ傾斜の値も比堆砂量も比較的大きくなっている。そこで、荒廃地域の占有率による各分類について平均メッシュ傾斜と比堆砂量の平均値を算出した(表6)。占有率が20%以上の流域での比堆砂量は、20%未満の流域に比べて約1.6倍大きく、平均メッシュ傾斜の値も約1.4倍大きい。つまり、荒廃地域を20%以上含む流域では、それ以外の流域に比べて、平均メッシュ傾斜と比堆砂量がともに大きな値となる傾向がみられる。傾斜が大きくなる理由として、我が国の荒廃地域は中部山岳地域や四国山地などの急峻で隆起運動の盛んな山地に多く分布していることが挙げられる。また、比堆砂量が大きくなることは、侵食速度の分布の地域性は隆起量を反映する⁸⁾ことと調和的である。

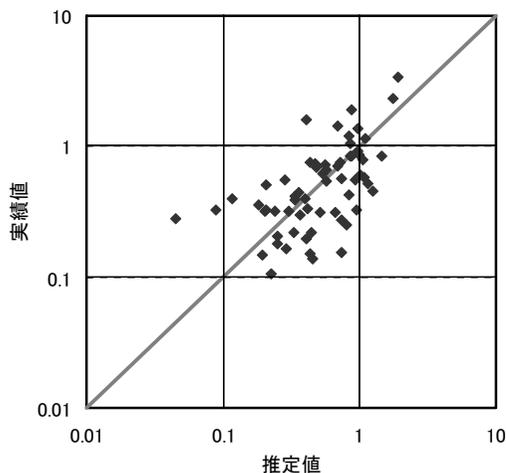


図9 比堆砂量の推定と実績値の比較
(単位： $10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$)

以上より、簡易的には、荒廃地域の有無に関わらず、平均メッシュ傾斜のみで比堆砂量を説明できる可能性があることが示された。

5.3 侵食速度の推定

式(1)のように、比堆砂量の推定式には、表層地質の影響が少なからずみられたので、利用した72ダムのうち地質が明瞭に区分できる63ダムについて、流域に含まれる表層地質ごとに流域の平均メッシュ傾斜を求め、これに式(1)を適用して比堆砂量を算出した。次に、推定された比堆砂量に流域面積を乗じて各ダムの堆砂量を推定した。

本来ならば、別に推定用のデータを用意すべきであるが、入手できるデータが限られているため、分析に用いたデータと同じものを用いた。

図9に比堆砂量の推定値と実績値を比較した結果を示す。ここでの平均的な誤差量は $\pm 52 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ であり、岡野・他¹⁶⁾での $1000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ 未満の貯水池を対象とした誤差量 $\pm 150 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ 程度よりも誤差が小さい。藤原・他⁸⁾では、推定値の誤差が明示されていないため比較ができない。この他、砂防ダムに関する既往の研究¹²⁾では、比堆砂量の計算値と実測値の誤

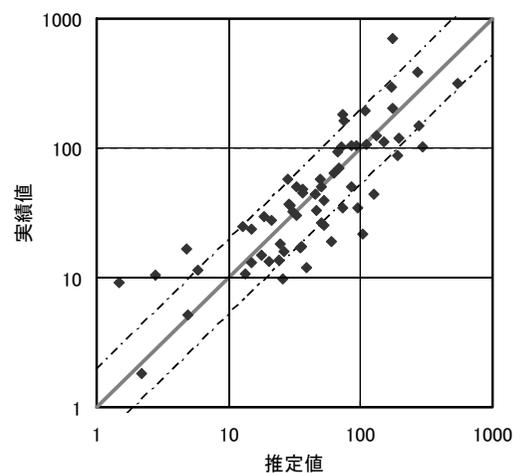


図10 堆砂量の推定値と実績値の比較
(単位： $10^3 \text{ m}^3/\text{年}$ 、鎖線は標準偏差)

差は、最大で8～10倍のばらつきがあると述べられている。砂防ダムを対象とした誤差との厳密な比較はできないが、本研究の推定法によるばらつきはこの範囲におさまっている。

図10には、堆砂量の推定値と実績値を比較した結果を示す。実績値と推定値の対数値に対する標準偏差は0.29であった。図10全体をみると、両者はおおむね一致している。

最後に、全国の流域に対して、日本全国地形・地盤分類メッシュマップの表層地質、メッシュ傾斜と式(1)を適用して、全国の潜在的な侵食速度の分布を推定した。全国の流域情報は、国土数値情報の流域境界ポリゴンデータ²⁴⁾を用いた。流域内の表層地質のうち、先第三系、第三系あるいは第四系火山岩類が単独で流域面積の半分以上を占める場合に式(1)の表層地質別の式を適用し、それらの地質がいずれも半分未満で混在している場合は式(1)の全体を適用した。また、第四系更新統や完新統が大半を占める流域では式(1)を適用できないため、空白域とした。その結果得られた全国の侵食速度ポテンシャルマップを図11に示す。この図で比堆砂量(侵食速度)が大きい地域は、図7における第四紀における隆起量が大きな地域(静岡-糸魚川構造線の西側、日高地方、西南日本の外帯)と一致しており、山地の侵食速度は第四紀における隆起量と相関があるという既往の研究結果⁵⁾とも符合している。比堆砂量の実績値と推定値を地域別に比較すると、北海道では過小評価(実績値:0.85, 推定値:0.47, 単位:10³m³/km²/年, 以下同様)、近畿(0.34, 0.67)と北陸(0.73, 0.96)では過大評価であり、その他の地域ではおおむね同じ値であった。推定結果が地域により異なる理由は、特定のダムでの過大、過小評価の影響による。例えば、北海道では大夕張と糠平での過小評価、北陸では奈川渡での、近畿では三瀬谷、殿山、坂本での過大評価の影響が挙げられる。これらの誤差の低減が推定精度の向上には必要である。

6. 結論

本研究では、土砂災害の素因となる「地域の崩れやすさ」を広域に把握するための指標を見出すことを目的として、ダム堆砂量のデータベース化を行い、地域の侵食速度とみなせる比堆砂量を算出した。この比堆砂量を標高データから計測された複数の地形量のうちいずれが精度よく推定できるかを比較検討した結果、平均メッシュ傾斜との相関が比較的高いことが確認され、表層地質と平均メッシュ傾斜を用いた比堆砂量の推定式を提案した。

また、荒廃地域を多く含む流域では、平均メッシュ傾斜や比堆砂量がそれ以外の流域に比べて大きくなることを示した。日本全国地形・地盤分類メッシュマップに含まれるメッシュ傾斜と表層地質を用いて、ダムの侵食速度(比堆砂量)を簡便に推定する手法を提案した。提案する手法を国土数値情報の流域ポリゴンと日本全国地形・地盤分類メッシュマップに適用して、全国の侵食速度ポテンシャルマップを作成した。

今後、地域別の降雨量と侵食速度やマスマーブメントによる崩壊土砂量との関係を分析する研究へと発展させる予定である。

謝辞

本研究は、平成14年度兵庫県ヒューマンケア研究助成、平成14年度(財)福武学術文化振興財団研究助成および平成15年度日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号:15510155)によった。また、アジア航測(株)杉浦正美氏および早稲田大学久保純子助教授には、研究当初から参考文献の提供や分析結果の議論に参加していただいた。査読者の方々からは、本稿の本質に関わる重要なご指摘をいただいた。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡田憲治: 土壌雨量指数, 測候時報, Vol.69, pp.67-100, 2002.
- 2) 三隅良平・小口高・真木雅之・岩波越: 分布型流出モデルを用いた表層崩壊危険度のリアルタイム

- 予測, 自然災害科学, Vol.23, pp.415-432, 2004.
- 3) 水田敏彦・瀬尾和大: 数値標高モデルに基づく豪雨による斜面崩壊危険度予測—長崎市を事例対象として—, 自然災害科学, Vol.19, pp.477-491, 2001.
 - 4) 吉川虎雄・杉村新・貝塚爽平・太田陽子・阪口豊: 日本地形論, 東京大学出版会, 1973.
 - 5) Yoshikawa, T.: "Denudation and tectonic movement in contemporary Japan", Bull. Dept. Geography Univ. Tokyo, No.6, pp.1-14, 1974.
 - 6) Ohmori, H.: "Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development", Bull. Dept. Geography Univ. Tokyo, No.10 pp.31-85, 1978.
 - 7) 宮崎洋三・大西外明: 貯水池堆砂量の経年変化と比堆砂量に関する考察, 土木学会論文集, No.497 / II - 28, pp.81-90, 1994.
 - 8) 藤原治・三箇智二・大森博雄: 日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, No.5, pp.85-93, 1999.
 - 9) 米倉伸之・貝塚爽平・野上道男・鎮西清高編: 日本の地形 1—総説—, 東京大学出版会, 2001.
 - 10) 吉松弘行: 山腹崩壊の予測式について, 新砂防, 102, pp.1-9, 1977.
 - 11) (社) 日本河川協会編: 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案)・同解説, 山海堂, 1997.
 - 12) 建設省河川局砂防課: 砂防ダムの堆砂, 第20回建設省技術研究会報告, pp.369-387, 1966.
 - 13) 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, 17-B, pp.1-16, 1974.
 - 14) 例えば, 多田文男: 山頂の高度と起伏量との関係並に之より見たる山地の開析度就て, 地理学評論, Vol.10, No.11, pp.937-967, 1934.
 - 15) 田中治雄・石外宏: 貯水池の堆砂量と集水区域の地形・地質との関係に就いて, 土木学会誌, Vol.36, No.4, pp.173-177, 1951.
 - 16) 岡野眞久・高柳淳二・藤井隆弘: 計画堆砂容量の設定とダム貯水池流入土砂量に基づく貯水池堆砂量推定方法についての考察, 平成14年度ダム水源環境技術研究所 所報, pp.31-37, 2002.
 - 17) 若松加寿江・松岡昌志・久保純子・長谷川浩一・杉浦正美: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759 / I - 67, pp.213-232, 2004.
 - 18) 若松加寿江・久保純子・松岡昌志・長谷川浩一・杉浦正美: 日本の地形・地盤デジタルマップ, 東京大学出版会, 2005.11 (刊行予定).
 - 19) 沖村孝・吉永秀一郎・鳥井良一: 地形特性値と地形区分, 表土層厚の関係 —仙台入菅谷地区を例として—, 土地造成工学研究施設報告, Vol.9, pp.19-39, 1991.
 - 20) (社) 電力土木技術協会: 昭和37年~平成13年度発行発電用貯水池・調整池土砂堆積状況, 電力土木昭和38年度~平成14年度, 1963-2002.
 - 21) 芦田和男・高橋保・道上正規: 河川の土砂災害と対策, 森北出版, 1983.
 - 22) 久保幸夫: 新しい地理情報技術, 古今書院, 1996.
 - 23) (財) 日本ダム協会: ダム年鑑2004, 2004.
 - 24) 国土地理院: 国土数値情報流域界・非集水域(面), 1977.
 - 25) 中村三郎・望月巧一: 斜面災害, 大明堂, 1984.
 - 26) 吉良八郎・石田陽博・畑武志: 日本における貯水池堆砂の実態, 神戸大学農学部研究報告, Vol.11, No.2, pp.1-18, 1975.
 - 27) 浅田宏: 山地河川の流砂量と貯水池の堆砂過程に関する研究, 電力中央研究所報告総合報告, No.2, pp.1-33, 1976.
 - 28) 吉川虎雄: 山崎直方先生と変動地形の研究, 地理学評論, 44-8, pp.552-564, 1971.
 - 29) 日本ダム協会: ダム便覧2005, <http://www.soc.nii.ac.jp/jdf/index.html>, 2005.
 - 30) 松村和樹・石橋晃陸: 流砂系における流域土砂管理, 山海堂, 2001.
 - 31) (社) 全国治水砂防協会: 砂防便覧(平成9年度版), 1997.

(投稿受理: 平成17年4月6日
訂正稿受理: 平成17年9月20日)

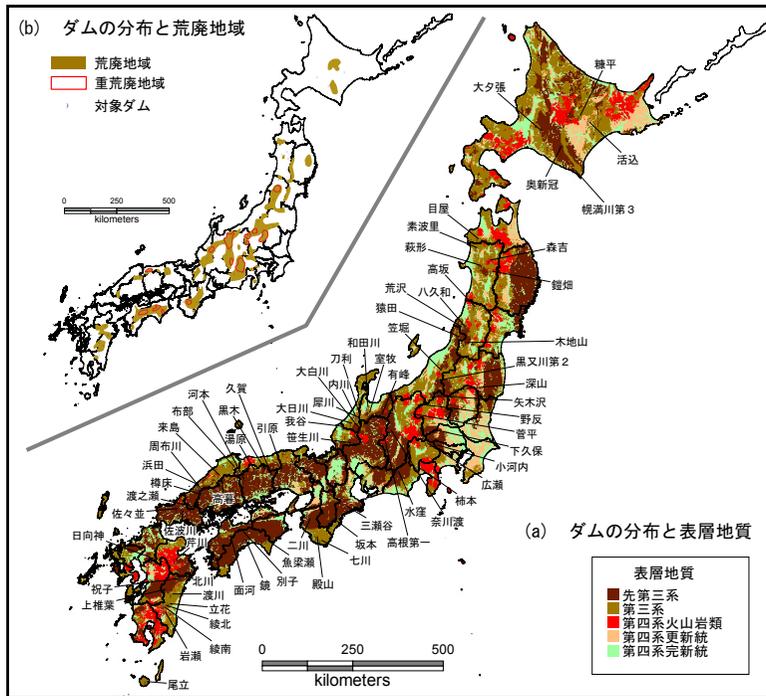


図4 分析に用いたダム位置, 表層地質および荒廃地域の分布

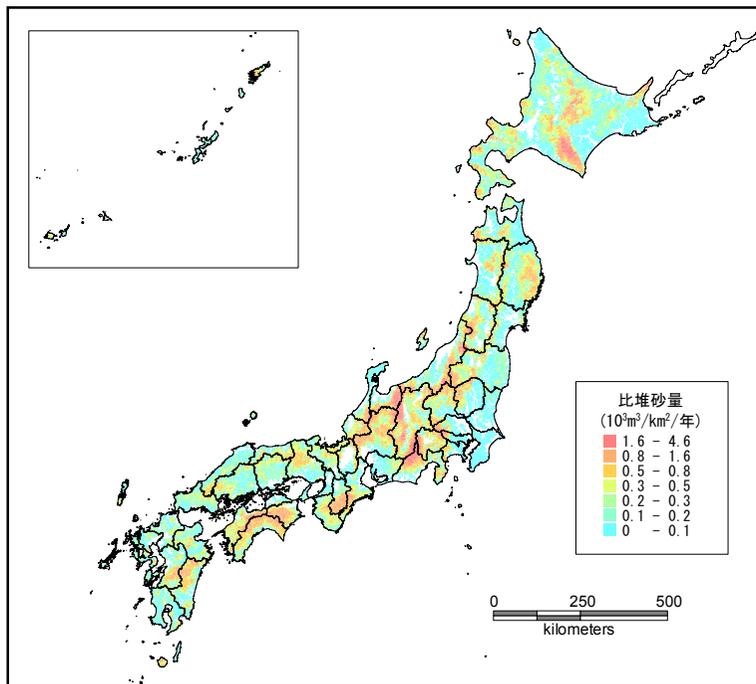


図11 全国の流域単位の侵食速度ポテンシャルマップ