

土砂流出のシステムと特性に関する二・三の考察

Sediment yield system and its characteristics

宇都宮大学 正員 須賀 堯 三

1. 研究の目的と方法

この研究の目的は、河道計画・砂防計画・ダム堆砂計画等に資することである。このような実際面の立場にたつと、土砂流出量の平面分布と時間分布、ならびにその粒度組成を明らかにすることが重要である。現在の段階では、研究の成果は十分に得られているとはいえ、工学上に支障をきたしている、この問題は緊急課題のひとつとなっている。

ここでは、ダム堆砂量の経年的な資料を全国的レベルで収集し、集計された実態調査の結果に注目する。それによると、ダム堆砂量の平面分布にかなりの偏りがあるので、その特性と原因について考察を行う。ついで、ある小さな流域を考えたとき、その流域に属する支川毎に、あるいは左右岸の山腹毎に、生産土砂量やその粒径が異なることがあるので、鬼怒川上流部の小支川を踏査等に基づいて調査し、河相との関連について考察を行う。このような大・小のスケールからなる2種類の資料によって、土砂流出現象のシステムについて検討を行う。この段階で重要なことは、土砂流出量の時間分布とその原因、および粒度組成との関係である。そこで、時間分布の特性について検討を行い、河道特性との関連についても考察を行っている。

2. 流出土砂量の地域分布に関する考察

流出土砂量を正確に把握することは容易ではない。大きい時間尺度でみる場合には扇状地とデルタの発達量から推定することができる。小さい時間尺度の場合には、土砂生産（崩壊量調査等）、ダム・砂防ダム堆砂量、河床変動量調査、あるいは河道特性量（川幅・粒径・合流点の変動・天井川の程度等）などに基づいて推定する。最も信頼度の大きい方法は、規模の大きい最上流ダムで捕捉率が大きい状態のときの堆砂量資料に基づくものである。

ダム堆砂資料によると、ダムの堆砂量が極めて大きな値を示すのは、中部地方の赤石山脈・木曾山脈、北陸地方の飛騨山脈・両白山地および四国山地である。¹⁾ 土砂流出量の大きい河川としては、大井川・黒部川 ($q_s > 2000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$) があり、次いで小矢部川・物部川・庄川・小丸川・天竜川・那賀川・富士川・九頭竜川 ($q_s > 1000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$) となっている。概略の比流出土砂量 q_s の値を表-1に示す。

従来、流出土砂量は $q_s = KA^{-0.7}$ と現されている。ここに、Aは流域面積 (km^2)、Kは定数で地形・地質・植生状態・河川流量・気象状態などにより異なり、 5×10^5 から 10^3 程度の値を示す。資料を通覧すると、影響要因のうち、地形・地質要因を重視すべきことがわかる。流出土砂量が少ない場所は、準平原（例えば北上高原、阿武隈高原、三河高原、大和高原、吉備高原など）、氷期の周氷作用が終了した地域（日高山地、造山運動は約2億年前から2千年前）、および第4紀における隆起量が少ない低い山岳地域である。一方、流出土砂量が大きい場所は、中部山岳地域と西南日本外帯山地であり、そこは第4紀の隆起量が大き

地 域	q_s	$\bar{q}_s$ の目安	最下流ダム地点における実測値 q_s の例 ²⁾
北海道	100~500	200	石狩261, 手塩178, 十勝410,
東 北	100~700	400	岩木399, 米代577, 雄物512, 赤528, 北上331, 名取279, 最上166, 阿武隈13
関 東	100~1200	500	利根312, 那珂595, 荒127, 相模303, 富士1191
北 陸	200~3000	800	荒519, 阿賀野231, 信濃193, 黒部2858, 常願寺776, 神通260, 庄1536
中 部	200~4000	1000	大井3777, 天竜1469, 豊145, 矢作589, 木曾881, 宮632
近 畿	100~1200	500	新宮833, 淀 111, 由良154, 九頭竜1138
中 国	100~400	200	斐伊360, 江48, 吉井148, 旭117, 高梁243, 太田210, 小瀬159,
四 国	100~1600	700	吉野809, 那賀1209, 物部1559, 渡320
九 州	100~1600	500	速賀348, 大分100, 五ヶ瀬74, 小丸1517, 大淀343, 川内449, 筑後289

表-1 地域別比流出土砂量 q_s ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{年}$)

い所でもある。このような山岳地帯の山地斜面は急であり、日本で最大の平均傾斜は赤石山地の35度である。ちなみに、最小の平均傾斜は9度前後で岡山北面の吉備高原と北上高原北部、ついで火山地域（特に巨大カルデラ火山）、北海道北部（第4紀の隆起量が小さく、氷期の周氷河作用によってなだらかな地形形成）である。つぎに、地形構造と岩質の影響として、年代・褶曲・構造活動を考慮し、地層の傾き・風化（まさ地帯では q_s は400 ~ 600 m^3/km^2 年）・破碎の程度（地下水の侵入にも関係）、火山堆積物・崖錐の状況、および岩の種類（流出土砂量の大きい場合は細粒分が多いことから頁岩系など、ただし砂岩系は大きなブロックとなって生産され、その量は多くない）に注目すべきである。

植生に関連した事項としては、裸地面積が重要な示標として検討されている。実際には裸地の性質による分類を行うことが大切である。すなわち、裸地の成因、形状（幅・長さ・深さ・傾斜度）、および安定度（侵食率）により土砂生産量は異なる。写真-1は大井川におけるガリの発達と土砂生産の状況である。山腹傾斜度は35度前後であって、前記のように土砂流出量の多い代表的な地域であるが、土砂生産はこのような山地から平均的に行われるのではなく、処々に存在する写真のような裸地において集中的に行われている。こうしてみると、土砂生産にとっては山腹の平均傾斜度よりは裸地傾斜度がより直接的であり、かつ多くのガリは稜線まで伸びているのでガリの長さを規定する山の高さが重要であることがわかる。

河川流量・気象状態では、降水量と降雨パターンに注目するが、資料によると土砂流出と直接的な関係を見出すことができない。ただし、豪雨の頻度の大きいところは流出土砂量も多く、北海道のようにその頻度の小さいところは長い年月にわたる平均の流出土砂量は少なくなっている。豪雨は地形にも関係がある。その他の事項として地震や火山爆発による土砂生産、および人工的な影響等を無視することはできない。

3. 流域内の流出土砂量分布

以上のように、土砂生産の現象は地域によって、平均的にみて3倍以上の量的な相違があり、かつ同一の地域においても、条件が異なれば複雑な分布を示すことが推定された。すなわち、土砂生産量は本来、谷ごとに、また左右岸の山腹ごとに異なるものである。

鬼怒川上流の水源地一帯には日光連山が連なり、一般に、土砂生産量の多い地帯である。図-1は谷の配置関係であり、土砂生産の中心は火山として一万余年の歴史を持つ男体山（標高2484m）や女峰山（2463m）・赤薙山（2010m）である。表-2は各支川における砂防計画上の計画対象土砂量の値を示す。これは一出水に対する計画上の流出土砂量である。その算出根拠は、降雨の超過確率を1/150とし、大谷川については、現在不安定土砂（崩壊残土+崩壊地下刻見込量+拡大見込量）+溪床堆積土量、鬼怒川については、現在不安定土砂量（崩壊残土量+溪間不安定土量）+予測生産土砂量（山腹生産土砂量+溪岸洗掘土砂量）である。

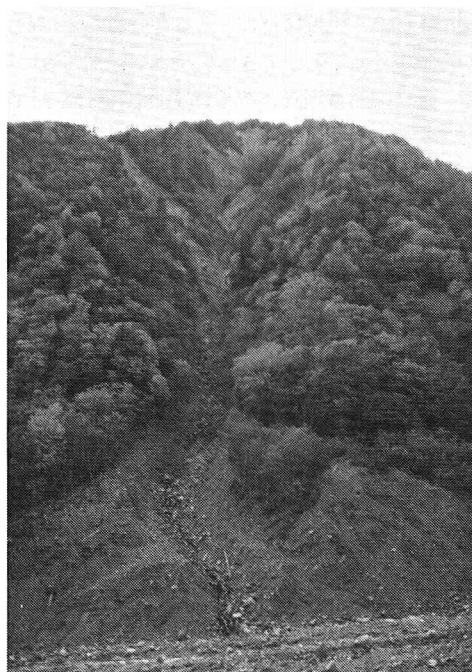


表-2をみると、単位面積当たりの計画対象土砂量が写真-1大井川のガリと土砂生産の状況(S.60,10)谷によって著しく異なっていることがわかる。土砂生産量が多いのは、大谷川の左岸側に合流する荒沢・田母沢・稲荷川、および鬼怒川の右岸に合流する大事沢である。これらの沢は男体山や女峰山より発する谷沢である。しかし、この山岳地を水源とする全ての谷沢において流出土砂量が大いとは限らない。たとえば、戦場ヶ原の方に流下する沢では非常に少ない。また、ほぼ同じような地形・地質条件である大事沢と野門沢

では、後者は前者の半分程度の流出土砂量と考えられる。さらに、鬼怒川上流部の右岸から流入する沢谷や五十里湖上流の湯西川と男鹿川に合流する諸沢谷からの流出土砂量は多くない。

ちなみに、五十里ダムにおける昭和32年～52年までの平均比流砂量 $q_s=267\text{m}^3/\text{km}^2$ 年、川俣ダムにおける昭和41年～52年までの $q_s=436\text{m}^3/\text{km}^2$ 年である。川俣ダムでは上流に土砂量の多い根名草沢があり、五十里ダムより若干多くなっている。しかし、流域面積が大き

五十里ダム
川俣ダム
黒部ダム
川俣ダム

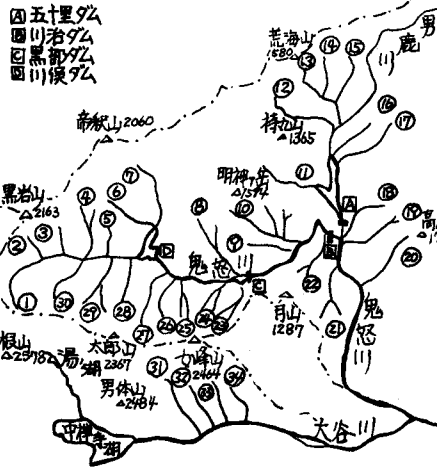


図-1 鬼怒川水源地図と谷の配置

くことを考慮し、表-1の値と比較すると、これからの小河川は流出土砂量の小さい河川と考えてよい。

一方、土砂量の多い沢谷の流出土砂量は、たとえば稲荷川の日向ダム地点($A=5.8\text{km}^2$)では、 $q_s=7700\text{m}^3/\text{km}^2$ 年である。これは昭和55年～60年の6年間の平均値である。稲荷川の上流には、女峰・赤薙の両山があり、その山腹にはそれぞれ大規模な崩壊地があって、過去に土石流発生の記録もある。河床には、転石や砂礫の中に多量の砂が含まれている。

以上のように、同一水系のまとまった水源地域であって、気象条件はほぼ同一と考えられる条件のもとにおいてすら、流出土砂量には大きな差が存在することが明らかである。これは、土砂生産活動の活性度による違いである。すなわち、崩壊地の活性度が特に重要であり、崩壊地の深さ・長さ・傾斜角・面積・数などによる評価が必要である。また、崩壊の条件としての火山とその歴史、地質・地層構造と地盤の隆起活動の歴史などが、大きな差を生じる原因と考えられる。

4. 流出土砂と河道特性

鬼怒川水源地域における土砂流出の現象は谷によって顕著な相違をみせており、その結果として、各谷の河道特性や合流後の河道特性に反映されている。図-2は大事川の縦断形と平面形をしめす。大事沢の流出土砂量は稲荷川の半分程度であるが、なお土砂量の多い沢であり、鬼怒川上流部では影響力のある沢であるといえる。大事沢の中下流部の勾配は1/10程度であり、土砂の堆積・調整区域となっている。この程度の規模の沢では多くの場合、ほぼ類似した縦断形状となっている。川幅は60m内外であり、堆積土砂は表面には礫が多いが、内部には砂分が多く、その粒径は10% 粒径 $d_{10}=0.6\text{mm}$ 、 $d_{60}=17\text{mm}$ 、 $d_{90}=30\text{mm}$ 、鬼怒川との合流では $d_{10}=0.4\text{mm}$ 、 $d_{60}=4\text{mm}$ 、 $d_{90}=15\text{mm}$ である。この間に砂防堰堤が3基存在するため、最下流地点ではかなり細粒化している。川床には玉石はほとんどなく、巨大な転石が散在する程度である。河床面はほぼ平た

No	沢	計画対象 土砂量	単位面積 当り土砂量
①	根名草沢	294	122.5
②	鳥沢	107	32.4
③	コザ地沢	483	67.6
④	黒沢	490	34.6
⑤	錆沢	339	48.1
⑥	無砂沢	433	17.9
⑦	鳥坂沢	455	14.7
⑧	唐沢	353	31.0
⑨	三沢	298	50.7
⑩	深沢	134	24.1
⑪	野門沢	286	36.8
⑫	大事沢	943	76.0
⑬	荒沢	4036	184.1
⑭	田母沢	1374	104.7
⑮	稲荷川	2544	182.4
⑯	鳴沢	900	83.3

表-2 計画対象土砂量

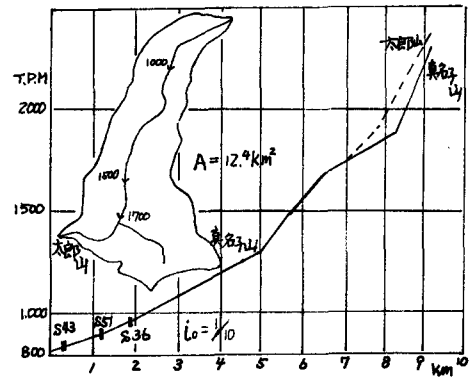


図-2 大事沢の平面図と縦断図

んで、河床波はないとみなすことができる。急な斜面でありながら、細粒であり、流域面積は小さいのに川幅が大きく、その広い河床面全体で砂移動のあるダイナミツクな河床を形成している。こ

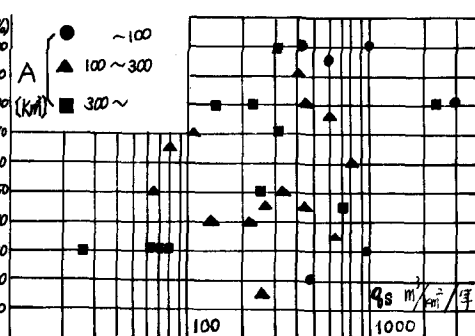


図-3 ダム堆砂のうちの

砂・シルトの占める割合

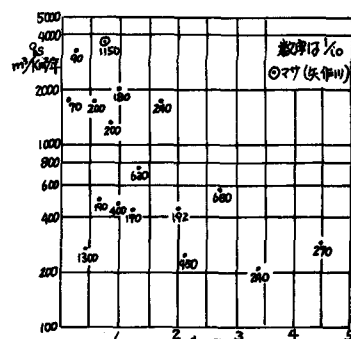


図-4 q_s と 10% 粒径 d_{10} および

河床勾配 i_0 の関係

のような状況は、流出土砂量が多く、かつ土砂が時間的に連続しているが、多い年や少ない年もあって、それが調整されながら、そこから下流に流出していることを示すものと推察される。なお、大事川上流の侵食域では、挟窄部があり、そこでは滝も存在する。また、転石も多く、ところによっては転石が群となってステップ状に配置されている。一方鬼怒川本川の水源地域では、勾配が大事沢部下流より小さいが、川幅は狭く、巨大な転石が多く存在し、それがステップを形成している。そして転石で堰上げられたプール面には細粒砂が堆積している。この地域では、根名草沢のような比流出土砂量の多い沢もあるが、全体を平均すると流出土砂量が極端に多くなく、大事沢より細粒砂が少ない。このような点から判断すると、土砂があまり出ない年もあるが、ステップを破壊させる流量を境として、流出土砂量が多くなったり、少なくなったりするものと考えられる。しかし、転石の移動量はわずかであり、砂防ダムに堆積している移動してきた土砂はほとんど砂である。鬼怒川本川の水源河道と大事沢河道とが異なっている原因は、土砂生産量とその粒径、およびその時間分布であり、その結果異なった土砂調整機能容量となっていることによるものと思われる。

つぎに、河道特性に与える土砂粒径の効果は大きいので、粒径によつて流出土砂量を推定する可能性を探ってみる。図-3はダム堆砂のうち、2mm以下の砂とシルトの占める割合を占めたものである。この率は、流域面積が大きいほど、また比流出土砂量が多いほど増大するものと予想したが、資料では必ずしも明確ではない。その理由は、土砂の資料採集を貯水池上流端の背砂区間で行っていることが多く、採集位置や表面からの深さによる違いにより、必ずしも実態を正確に示めていない資料が混じっていることによるものと思われる。図-4は下流河道における細粒砂を代表する d_{10} と比流出土砂量 q_s との関係と、河床勾配をパラメーターとして求めたものである。³⁾ ただし、外力としての雨量は年平均約2000mm程度以上の場所の資料を採用しているので、北海道のように洪水の頻度の小さい河川の場合には、この値より小さい q_s となるので注意を要する。これによると、細粒分が多く d_{10} が小さくなるほど、またその地点の勾配が大きいほど、 q_s は大きくなっていることがわかる。

鬼怒川上流部では、大事沢および野門沢の合流後に河床の砂分が急激に増大し、黒部ダムの背砂区間にはほとんど砂のみが堆積している。

5. 流出土砂量の時間分布

河床に砂が多くなると、河床変動が活発になる。このとき、流出土砂量と流量との関係、および流出土砂量の時間分布が問題となる。時間分布としては時系列論的な取り扱いと確率論的な取り扱いとがあり、その特性について考察を行う。

図-5および図-6は、年間のダム堆砂量とダム地点の最高流量の年変化の関係を示めたものである。流出土砂量は必ずしも水量と対応しないので、当然のことながら、年間最大流量と対応することはない。定性的にみても、このような傾向はあまりみられない。雨量をとってみても同様である。

Figure 1 is a scatter plot showing the relationship between the logarithm of the number of eggs per female (Q_s , $\log_{10}$) on the y-axis and the logarithm of the number of females per square meter (Q , $\log_{10}$) on the x-axis. The y-axis ranges from 10,000 to 1,000,000, and the x-axis ranges from 30 to 50. Data points are categorized by region: 92.4% (filled circles), 8s (open circles), 2925 (filled triangles), 266 (open triangles), and 565 (filled squares). The plot shows a general positive correlation between the two variables.

いこと、および
流出土砂量が多
いときには、 σ
の値はAが小さ
いときに大きく
Aが大きくなる
に従い減少して
いる事がわかる。

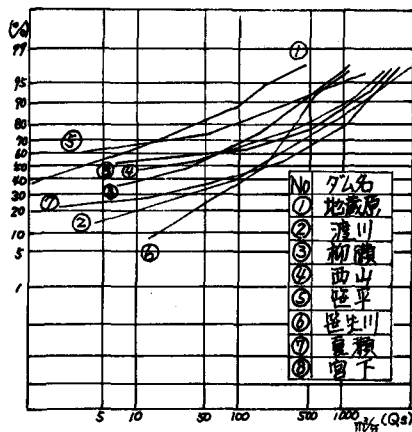


図-7 流出土砂量の

6. まとめ

比流出土砂量
 q_s は地域的に3

倍程度の差があ
るが、同一流域
対数正規分布への適合性
にあっても、支川や左右岸により大きな違いがある。
その主要な原因に、地質年代と隆起量および火山があ
り、崩壊地の活性度に注目すべきである。

流出土砂量と粒度構成とは多くの場合関係があり、
河道特性に反映されている。この場合、細粒砂に注目
すべきことを再度強調しておく。

流砂の時間分布として図-5、6に示す時系列的特
性と、図-8に示す $(\log q_s)^2$ の正規分布およびその特
性としての図-10の標準偏差は重要な意味をもつもの
である。

なお、資料調査の段階で、(財)国土開発技術研究
センターおよび建設省日光砂防工事事務所の協力があ
り、資料整理には矢萩氏の助力があった。記して深甚の
謝意を表す次第である。

(参考文献)

- 1) 須賀・島貢・徳永：流出土砂量の全国分布特性、
年構 S.51
- 2) 高秀秀信：水系における土砂動態と流出土砂の管
理に関する研究、京大学位論文 S.58
- 3) 須賀堯三：最近の河相変化とその特性、
水工シリーズ S.58
- 4) 須賀・島貢：流出土砂量の年変動特性について
の考察、年構 S.51

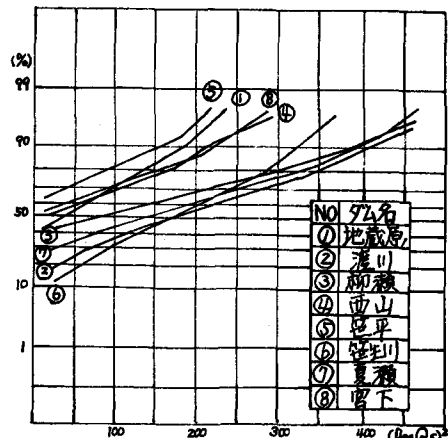


図-8 $(\log q_s)^2$ の正規分布特性

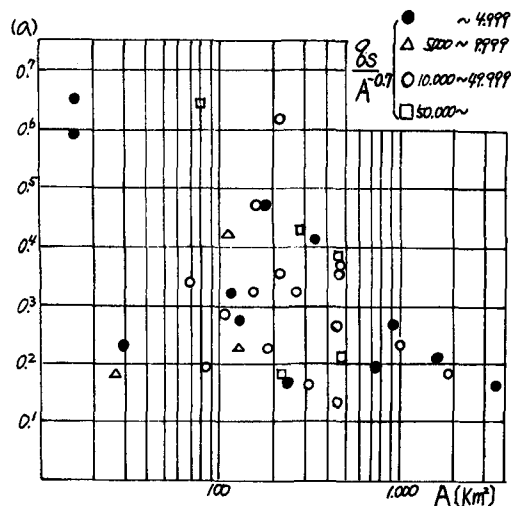


図-9 標準偏差 (図-7で q_s が大きい範囲)

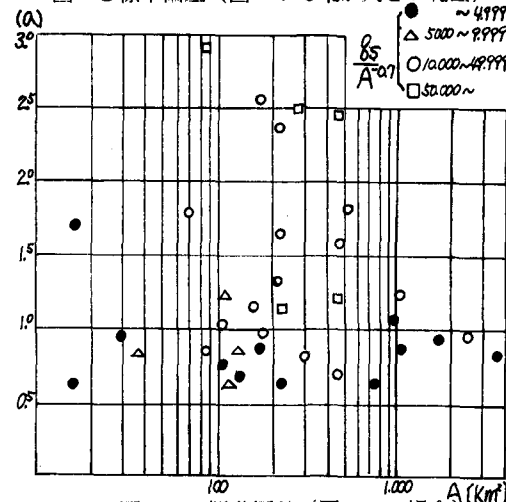


図-10 標準偏差 (図-8の場合)