山地流域における面的な土砂生産モデルの開発

CALCULATION OF SEDIMENT PRODUCTION IN TRIBUTARY BASINS OF MOUNTAIN AREAS

笠井 賢治[1]・堀江 雄太[2]・山口 貴之[3]・越智 尊晴[4]
Kenji KASAI, Yuuta HORIE, Takayuki YAMAGUCHI, Takaharu OCHI

[1]いであ株式会社 大阪支社（〒559-8519 大阪府大阪市住之江区南港北 1 丁目 24 番 22 号）
E-mail: kasaik@ideacon.co.jp
[2]国土交通省 四国地方整備局 那賀川河川事務所（〒774-0011 徳島県阿南市領家町室ノ内 390 番地）
[3]いであ株式会社 大阪支社（〒559-8519 大阪府大阪市住之江区南港北 1 丁目 24 番 22 号）
[4]いであ株式会社 東北支店（〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉 3 丁目 4 番 43 号）

Key Words: *sediment production, dam sedimentation, surface collapse, slope erosion, erosion control*

1. はじめに

過度な土砂堆積が問題となっている貯水ダムでは，ダム機能の確保に向けた対応が必要となり，上流域の土砂生産量の将来予測と土砂流入抑制などの対策検討が求められる．筆者らは既報[1]において，那賀川の長安口ダム直接流入域（**図-1**）を対象に，表層崩壊および表土侵食に基づく面的な土砂生産モデルを構築し，ダム堆砂量等との比較から一定の再現性を示した．一方，山地流域における土砂生産量を面的に算出し，将来予測や対策検討へ直接活用できる一般的かつ実務的な手法は，現時点では確立されているとは言い難い．そこで筆者らは，本土砂生産モデルを意思決定に供することを念頭に，与条件設定の妥当性を再整理してモデルの再現性を検証すること，別流域の検討を通じてモデルの適用性を確認することを目的として，表層崩壊モデルおよび表土侵食モデルの改良と検証を行った．本研究では，改良モデルの算定手順を小流域単位の枠組みとして整理し，長安口ダム直接流入域における改良効果，ならびに小見野々ダム上流域への適用結果を示す．

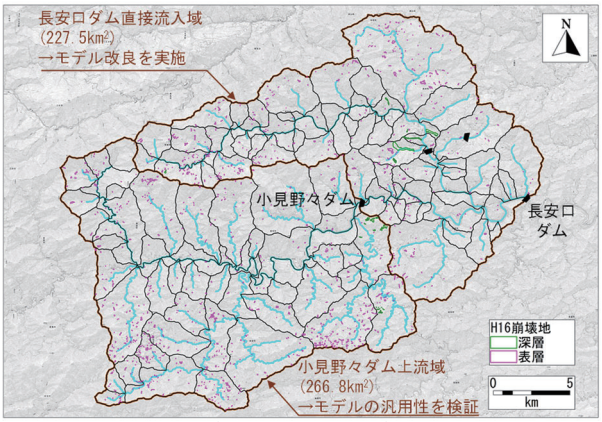


図-1 長安口ダム・小見野々ダム上流の流域図

2. 土砂生産モデルの課題

(1) 既報モデル（2024）の概要

既報[1]では，長安口ダム直接流入域を対象に，表層崩壊モデルと表土侵食モデルを統合した土砂生産モデルを構築した．表層崩壊による土砂量は，平成 16 年洪水で多発した斜面崩壊を対象として，式(1)～(3)のとおり斜面安全率 Fs が 0.1 間隔の Fs ランクに応じた崩壊発生確率を基本として小流域単位で算出し，航空レーザ測量結果から推定した実績相当の崩壊土砂量と同等程度となることを確認した．

$$Fs = \frac{c + (\sigma_A' + \sigma_B')\tan\phi}{\tau_A + \tau_B} \quad (1)$$

ここに，Fs：無限長斜面の斜面安全率，c ：粘着力，σ'：垂直応力，ϕ内部摩擦角，τ：せん断応力である（添字 A・B は A 層と B 層の値）．

$$V1 = \Sigma(P(Fs) \times a \times h) \quad (2)$$

$$P(Fs) = \Sigma Ac\ (Fs)/\Sigma a(Fs) \qquad (3)$$

ここに，$V1$：表層崩壊による土砂量，$P(Fs)$：斜面安全率に応じた崩壊発生確率，a:計算メッシュ面積，h：平均崩壊深，$\Sigma Ac(Fs)$：各斜面安全率ランクに含まれる実績の表層崩壊地面積の合計，$\Sigma a(Fs)$：各斜面安全率ランクの計算メッシュ面積合計である．

表土侵食による土砂量は，表土が露出した裸地領域から生産されることを前提とし，年総雨量と年平均侵食深から作成した式(4)～(5)の近似式による結果とダム堆砂量が同等程度になることを確認した．

$$V2 = dh \times Ab \qquad (4)$$

$$dh = 0.0000209 \times R \qquad (5)$$

ここに，$V2$：表土侵食による土砂量，dh：年平均侵食深，Ab：裸地面積，R：年総雨量である．

これらの土砂量を統合し，ダムまでの土砂移動を一次元河床変動解析で検討を行い，ダム堆砂量等との比較により一定の再現性を確認した(詳細は既報)．

(2) 表層崩壊モデルの課題

第一に，秩父帯北岸エリア（図-2）の斜面安全率 Fs と崩壊発生確率の関係（H16.8 洪水）を図-3 に示すが，実績データによるプロットと近似線の乖離が大きくなる点が課題である．第二に，Fs 算定に用いる粘着力 c，内部摩擦角ϕの与え方であるが，ϕは標準値として固定して c のみの設定としていたことから，設定手順と根拠の整理が必要であった．第三に，崩壊地が特定の小流域に偏在する場合，全域一様の Fs と崩壊発生確率の関係を適用すると，崩壊偏在域で過小評価，それ以外で過大評価となり，土砂生産量の誤差が拡大する恐れがある．

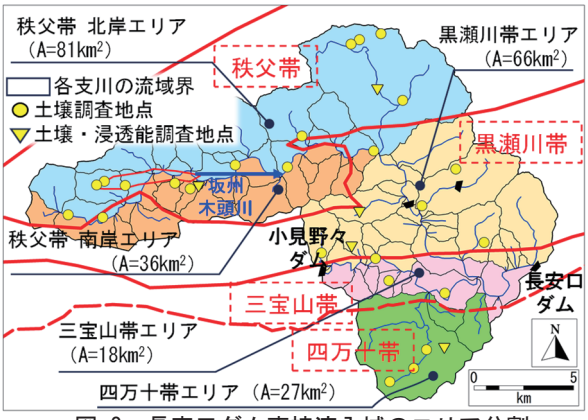


図-2　長安口ダム直接流入域のエリア分割

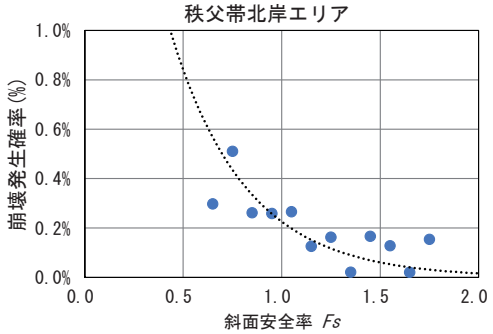


図-3　既報モデルの斜面安全率 Fs と崩壊発生確率

(3) 表土侵食モデルの課題

第一に，非樹林帯のうち顕著な表土侵食が発生している領域は実態としては図-4 のように限定的である．遠景判読では裸地として抽出される領域であっても，現地では植生被覆が発達している場合があり，その場合，当該領域の全体は表土侵食の発生源とはならない．このため，侵食寄与域の再定義が必要であり，面的な対策を設定する際にも過大な範囲となり得る点が課題である．第二に，大規模斜面崩壊等が多発した後の数年程度は崩壊残土等の影響で土砂生産量が多くなる傾向で，それ以降は比較的安定化することが一般的であるが，既報 [1]では表土侵食量の近似式が全期間で共通であり，時期による再現性の差が生じ得る点が課題である．

(4) 別流域の適用性確認の必要性

土砂生産量の将来予測，対策検討においては，那賀川流域内の他ダム流域への展開が求められる．また，土砂生産モデルの別流域の適用性を確認するためには，別流域へ適用した際に，表層崩壊，表土侵食の空間分布と量が同様に説明可能であることを確認する必要がある．以上より，本研究では長安口ダム直接流入域の上流に位置する小見野々ダム上流域（図-1）を対象として，表層崩壊モデル，表土侵食モデルの適用性を確認する．

3. 土砂生産モデルの改良・別流域の適用確認

(1) 表層崩壊モデルの改良・別流域の適用確認

ここでは，モデルの改良として，計算メッシュサ

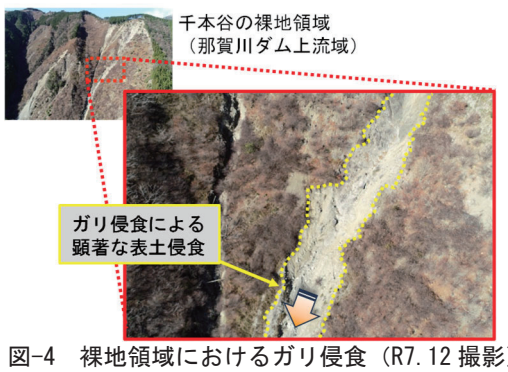


図-4　裸地領域におけるガリ侵食（R7.12 撮影）

イズの細分化，平成 16 年 8 月洪水による実績崩壊地数が再現可能な粘着力 c，内部摩擦角ϕの設定，崩壊発生確率のグルーピングを行うとともに，小見野々ダム上流域において適用性の確認を行った．

a) 計算メッシュの細分化

表層崩壊の空間再現性を改善するため，計算メッシュサイズを既報[1)]の 100 m から 20 m に細分化した．これは当該流域の崩壊面積規模を踏まえ，崩壊地形の起伏と集水条件を過度に平滑化しない解像度として設定したものである．さらに，細分化した計算メッシュの土層厚は，連続性のある地形条件を設定するため既往の調査結果（令和 3 年度：30 地点）の土層厚と斜面勾配から作成した**図-5** に示す関係図をもとに計算メッシュ毎に設定した．

b) 実績の崩壊地数が再現可能な粘着力 c，内部摩擦角ϕの設定

与条件設定の説明の容易性を確保するため，**表-1** に示すように粘着力 c，内部摩擦角ϕをパラメトリックに設定し，Fs<1 の条件が崩壊発生とみなす前提で，当該流域で表層崩壊が多発した平成 16 年 8 月洪水における崩壊地個数の再現性が高く，かつ文献等などの一般的な値や土壌の調査事例[2)]を踏まえても適正な範囲と考えられる組合せを最適値として採用した．このときの粘着力 c は，当該流域の特性を可能な限りモデルに反映するため，針葉樹，広葉樹それぞれで樹木根系による粘着力増分Δc[3),4),5)]を式 (6) ～ (7) によって算出し，土壌のみの粘着力との合算値とした．これらの手法により，粘着力 c は 2.4 kN/m^2（土壌の粘着力 1.0 kN/m^2 とΔc の平均値 1.4 kN/m^2 の合算値），内部摩擦角ϕは 37.4°を最適値として採用した．

$$\text{針葉樹：}\Delta c = (0.0033D^{2.77})X^{-2.8} \quad (6)$$

$$\text{広葉樹：}\Delta c = 0.00198(D/X)^{2.8} \quad (7)$$

ここに，Δc：樹木根系による粘着力増分，D：樹木の胸高直径（cm），X：樹木間の距離（m）である．なお，D，Xは令和 3 年度に長安口ダム直接流入域の 30 地点で実施した調査結果を採用した．

c) 崩壊発生確率のグルーピング

図-3 に示す Fs と崩壊発生確率の関係図は，その関係を構築するエリア分割（**図-2**）内で崩壊発生箇所が概ね均等に含まれることが前提となる．崩壊が特定小流域に偏在する場合，全域一括の関係を用いると再現精度が低下する恐れがある．そこで，エリア分割したそれぞれの領域において，崩壊地面積が当該流域に占める割合（**図-6**）が同等程度となるように崩壊地が多い小流域とそうでない小流域に**図-7** のとおりグルーピングし，分割後の各エリアで斜面安全率 Fs と崩壊発生確率の関係を作成した．これより，斜面崩壊の発生状況が偏在条件下でも**図-8** のように崩壊発生確率関係の単調性と安定性を確保した．

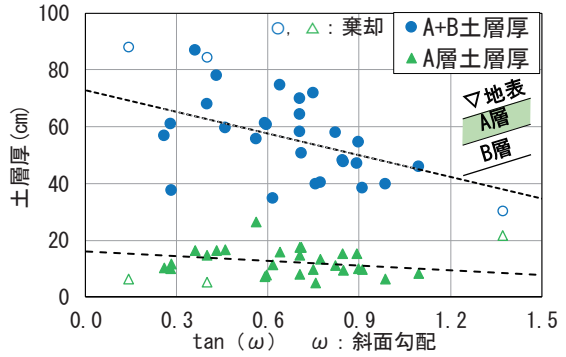


図-5　土層厚（R3 現地調査）と斜面勾配の関係図

表-1　粘着力 c，内部摩擦角ϕの設定結果

粘着力c(kN/m^2)			崩壊地の再現割合（内部摩擦角ϕ別の感度分析）					再現割合別の内部摩擦角ϕ		
土壌の粘着力 ①	樹木根系粘着力増分 Δc ②	ダム上流域の平均値 ①＋②	ϕ=10°	ϕ=20°	ϕ=30°	ϕ=35°	ϕ=40°	100%	75%	50%
1.0	1.4	2.4	100%	100%	92%	82%	68%	20.0	37.4	—
2.0	1.4	3.4	100%	91%	68%	51%	36%	10.0	27.6	35.4
3.0	1.4	4.4	86%	60%	34%	20%	6%	—	14.7	23.8
4.0	1.4	5.4	50%	22%	2%	1%	1%	—	—	10.0

：再現割合（斜面安全率Fs<1.0以下の崩壊地の個数/崩壊地個数）が75%以上

：斜面安全率Fsの算定時に採用した粘着力c，内部摩擦角ϕ

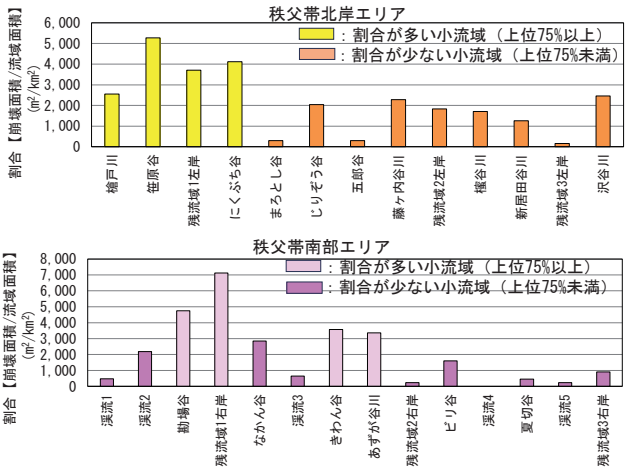


図-6　崩壊地面積が当該流域に占める割合

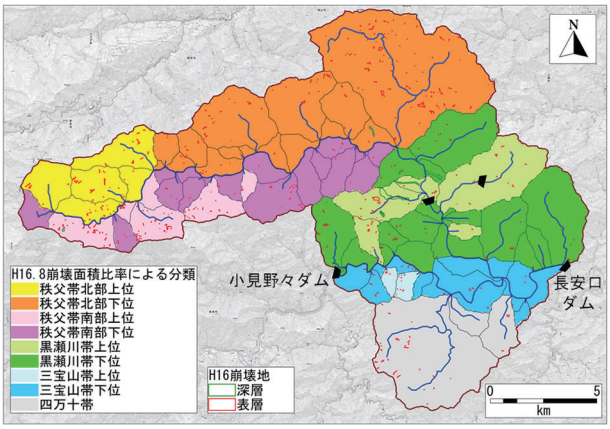


図-7　崩壊地面積の割合による小流域のグルーピング

d) 改良モデルによる崩壊土砂量の算出

長安口ダム直接流入域を対象に，前項 a)，b)，c) の改良後の表層崩壊による土砂生産量を算出し，既報[1]の結果と比較した．結果は**図-9** に示すが，平成 21 年度の航空レーザ測量結果から推定した実績相当の崩壊土砂量に対して，秩父帯北部エリアの槍戸川，笹原谷，にくぶち谷のように一部の支川流域では再現性の向上も確認できた．

e) 小見野々ダム上流におけるモデルの適用性確認

別流域である小見野々ダム上流域を対象に前項 a)，b)，c) と同様の考え方で表層崩壊モデルを構築し，崩壊土砂量の空間分布と土砂生産量の再現性を確認した．結果は**図-10**（流域図：**図-11**）のとおりであり，長安口ダム直接流入域と同等程度の再現精度であることが確認できた．また，式（3）の *Fs* について，洪水期間中の最小値を用いることの妥当性を補足する目的で，崩壊地が流水の集中しやすい地形条件にあることや，*Fs* 最小値の採用が過度に瞬間的低下へ依存しないことを確認した．具体的には，崩壊地と非崩壊地（崩壊地周辺の同等勾配斜面）で *Fs*＜1.0 の継続時間を比較した結果（**図-12**），崩壊地で継続時間が相対的に長い傾向が認められ，*Fs* 最小値の採用が崩壊発生条件を過度に逸脱しないと判断した．

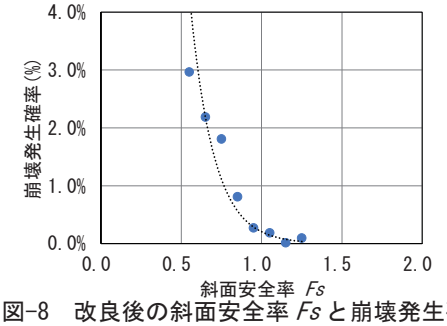


図-8　改良後の斜面安全率 *Fs* と崩壊発生確率

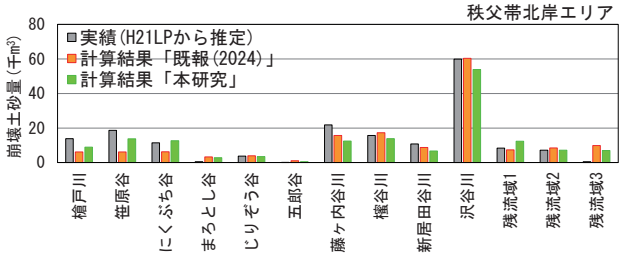


図-9　表層崩壊の土砂量再現「長安口ダム」

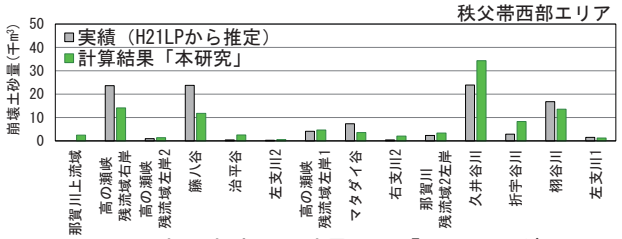


図-10　表層崩壊の土砂量再現「小見野々ダム」

(2) 表土侵食モデルの改良・別流域の適用確認

ここでは，モデルの改良として，表土侵食領域の再設定，表土侵食における近似式の時期別の細分化を行うとともに，小見野々ダム上流域において適用性の確認を行った．

a) 現地調査による地被状況別の土砂流出の容易性

既報[1]では非樹林帯の表土が一様に侵食される前提を置いていたが，令和 7 年 12 月の現地調査により，**図-4** のようにガリ侵食や集中的な地表流が生じる領域が限定的であることを確認した．そこで，ガリ侵食などに起因すると考えられる表土露出が明瞭な領域を光学衛星画像から主要生産源として設定し，裸地全域一様の仮定を改めた．

b) 表土侵食の近似式を細分化

小規模降雨時を含む再現性を改善するため，年ダム堆砂量を年総雨量で除した指標の経年変化から表土侵食の状態を**図-13** のように流出土砂量の変動が大きい時期，安定期に区分し，区分ごとに近似式を設定した．崩壊多発後の平成 23 年までを流出土砂量の変動が大きい時期，それ以降を安定期とし，各期間について年総雨量を変数とする近似式を作成した（**図-14**）．これを式（5）に反映することにより，単一式では表現が難しかった時期依存性を改善した．

c) 改良モデルによる表土侵食土砂量の算出

長安口ダム直接流入域で改良前後の結果比較を行い，表土侵食量の算出結果を評価した（**図-15**）．

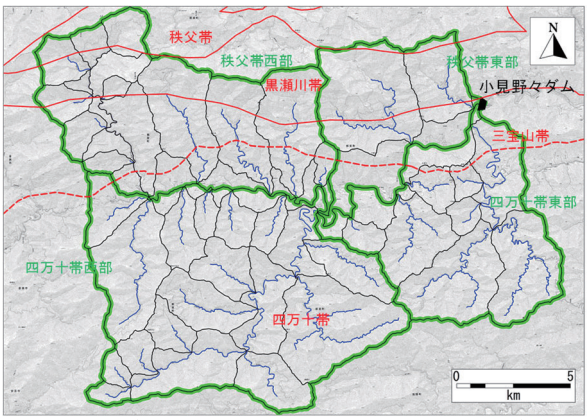


図-11　ダム上流域のエリア分割「小見野々ダム」

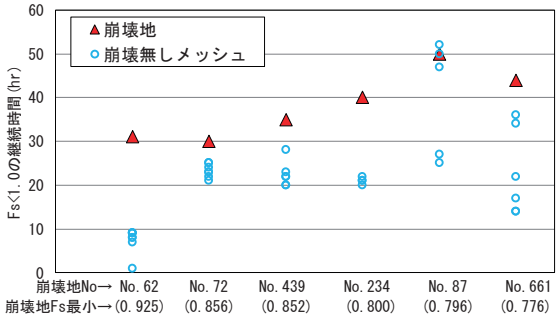


図-12　斜面安全率の継続時間分析「小見野々ダム」

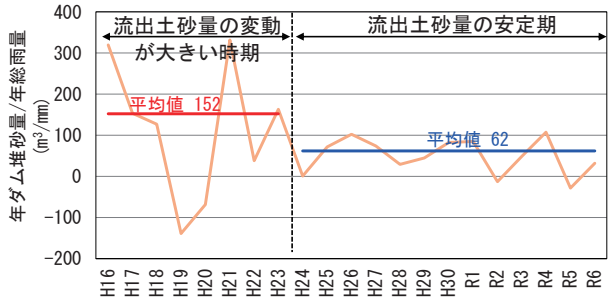


図-13　流出土砂量の時期区分「長安口ダム」

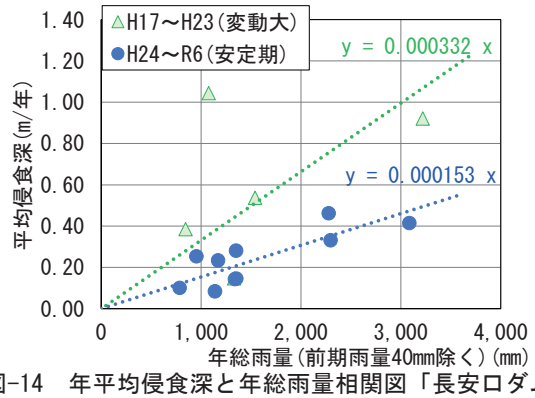


図-14　年平均侵食深と年総雨量相関図「長安口ダム」

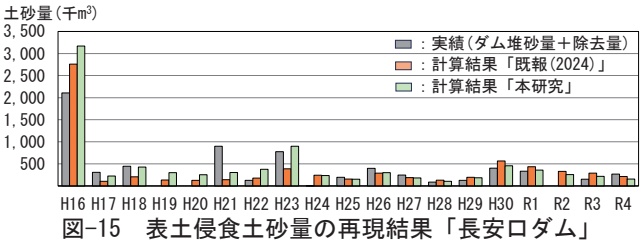


図-15　表土侵食土砂量の再現結果「長安口ダム」

なお，平成 16 年の計算結果には大規模斜面崩壊の土砂量を加算している．改良後は，流出土砂量の変動が大きい時期，安定期の区分により，平成 16 年 8 月の大規模崩壊後の平成 17 年や平成 18 年の再現性の向上も確認できた．

d) 小見野々ダム上流におけるモデルの適用性確認

小見野々ダム上流域へ同様の考え方を適用し，表土侵食量の推定を行い，概ねダム堆砂量と同等程度の土砂生産量が再現できたことを確認した（**図-16**）．なお，平成 16 年の計算結果には大規模斜面崩壊の土砂量を加算している．加えて，この式（4）～（5）の妥当性を補強するため，本研究の近似式で得た表土侵食量が水理公式集 [6]に記載の式（8）による推定量と同等オーダーであるかを確認した．

$$Es = \alpha \cdot u_*^3 \qquad (8)$$

ここに，Es：侵食速度（m/s），α：水含有率などによって定まる係数，u_*：摩擦速度（m/s）である．

結果は**図-17** のとおり，大規模斜面崩壊が多発した平成 16 年以外は，**図-16** の結果と比較しても概ね同等程度の再現性が確認できた．そもそも表土侵食量は，微地形や植生被覆等の複合要因に支配され，

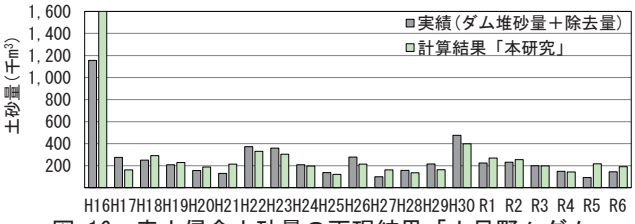


図-16　表土侵食土砂量の再現結果「小見野々ダム」

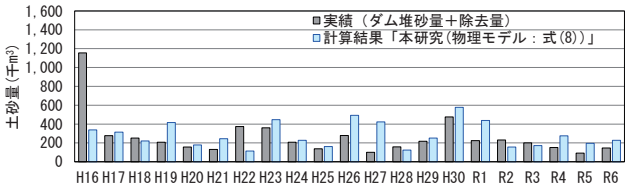


図-17　物理モデルの表土侵食土砂量「小見野々ダム」

表-2　河床変動モデルの解析条件「小見野々ダム」

項目	設定条件
計算手法	一次元河床変動解析
流砂量式	土石流：高橋の式（河床勾配が0.03より急な場合）
	掃流砂：芦田・道上式，浮遊砂・wash load：板倉・岸式
初期河床形状	河道域：H21年LP結果から断面形状を設定（⊿X=50～100m） ※横断方向に均等に5区分（貯水池：3区分）
	小見野々ダム貯水池：平成15年深浅測量（⊿X=約80～400m）
初期河床材料	既往の河道内河床材料調査結果（S52）
粗度係数	水理公式集（H11）の標準値を初期値とし，実績の河床高，ダム堆砂量の再現状況を踏まえて設定
出発水位	小見野々ダム：貯水位ハイドログラフ（実績）
生産土砂粒度	H30年の山地斜面の粒度調査結果，ダム貯水池内の粒度調査結果，S52年河床材料調査結果をもとに設定
流量ハイドロ	河道測線に地点上流域の流量ハイドロ（解析結果）を設定

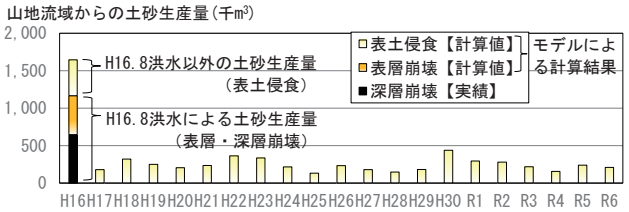


図-18 山地流域からの土砂生産量「小見野々ダム」

物理式のみで流域スケールの再現性を安定的に確保することは難しい．本研究による近似式は侵食の素過程を詳細に表現することを目的としないが，堆砂量と降雨量の関係に基づき土砂量規模を推定し，裸地へ配分することで面的評価を可能とする実務的手法の一つとして有効であると考えられる．

4. 土砂生産モデルの検証（ダム堆砂量の再現）

長安口ダム直接流入域におけるダム堆砂量再現は既報 [1]で報告済であるため，本章では，適用性確認の対象である小見野々ダム上流域について検証を行った．具体的には，本研究で算出した小流域別土砂生産量（**図-18**）を倍率（ダム堆砂量の再現性から試算）を考慮して河道領域へ与え，土砂移動予測モデルによりダム堆砂量を**表-2** の条件で計算し，実績のダム堆砂量と比較した（**図-19**）．その結果，年ダム

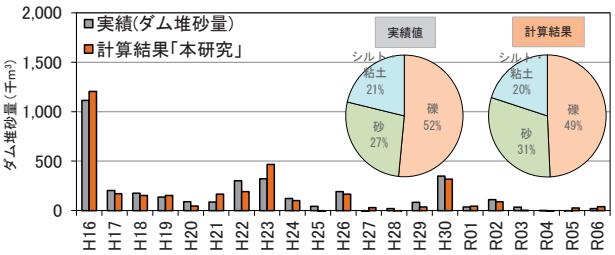


図-19 土砂移動を考慮した検証結果「小見野々ダム」

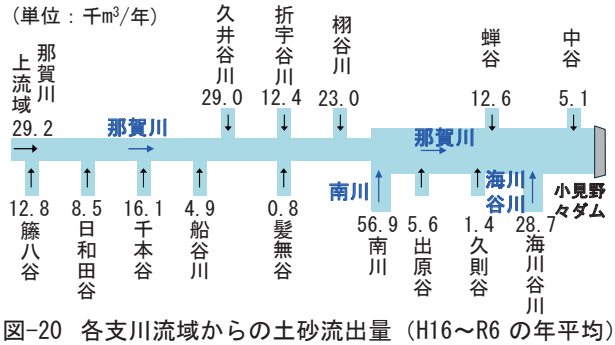


図-20 各支川流域からの土砂流出量（H16～R6 の年平均）

堆砂量は実績値を概ね再現できたことが確認できた．各支川流域からの土砂量は図-20 のとおりであり，支川別の土砂寄与を定量的に評価する枠組みを提供でき，対策検討における優先度付けの基礎情報として有用であると考えられる．

5. 結論

本研究は，既報 [1]の土砂生産モデルを基礎として，将来予測および対策検討に資する実務精度を有する小流域単位の土砂生産量を推定可能なモデルとするため，表層崩壊，表土侵食の改良と別流域で同様のモデル構築方法で検討を行った場合の適用性の確認を行った．得られた結論を以下に示す．

1）表層崩壊モデルは，崩壊面積規模を踏まえた計算メッシュの細分化（100 m→20 m），土壌定数 c，ϕ の傾向分析に基づく設定，崩壊発生確率のグルーピングにより，崩壊偏在時の確率配分の不安定性を抑制し，崩壊土砂量の再現性も改良前より向上させた．

2）別流域（小見野々ダム上流域）へのモデル構築方法の適用により，崩壊土砂量の空間分布，規模の再現性を確認した．さらに，斜面安全率 Fs の低下継続時間は崩壊地で相対的に長い傾向を示し，洪水期間中の最小 Fs に基づく評価の適用性を補強した．

3）表土侵食モデルでは，現地調査に基づき侵食による土砂生産源を限定し，ダム堆砂量，総雨量の経年変化から活発期，安定期に区分した近似式へ細分化することで，年別の土砂生産量の再現精度の向上を図った．別流域の小見野々ダム上流域では，近似式推定量が物理モデル推定量と同等オーダーであることを確認し，近似式適用の妥当性を担保した．

4）小見野々ダム上流域では，山地流域で算出した土砂生産量を河道領域に与えた土砂移動予測によりダム堆砂量を検証し，実務検討に必要な再現性を得た．

本モデルは，山地流域の土砂生産過程を物理的に網羅して精緻に再現することを主目的とするものではなく，将来予測および対策検討に用いることを前提に，実績相当の斜面崩壊土砂量やダム堆砂量の再現性を一定程度確保しつつ，小流域単位で面的に土砂生産量を算定できる実務的枠組みとして整備したものである．一方で，表層崩壊モデルは平成 16 年 8 月洪水の崩壊実態に基づくこと，表土侵食モデルは実績の年ダム堆砂量と年総雨量の相関関係を基本とすることから，適用範囲や不確実性を含む．このため，規模の大きい洪水による斜面崩壊等，新たな情報が得られた場合には，モデルの妥当性等について，継続的に検証・更新していく必要があると考える．

謝辞：本研究は，国土交通省 那賀川河川事務所からの委託業務成果を使用しており，那賀川河川事務所には多大な協力をいただいた．また，土砂生産量算出の考え方や条件設定について徳島大学大学院 社会産業理工学研究部の武藤裕則教授，田村隆雄准教授にご助言いただいた．記して謝意を表します．

参考文献

1) 笠井賢治，入星亮介，森友佑，永谷直昌：山地域における面的な土砂生産特性の分析，第 12 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，2024 年 9 月，pp. 131-136，2024.
2) 水山高久，小菅一弘：表層崩壊予測のための土層調査例，砂防学会誌，46 巻，1 号，pp. 38-40，1993.
3) 林野庁森林整備部治水課：森林が持つ表層崩壊防止機能を高めるための森林施業の計画に関するガイドライン（案）令和 5 年 3 月，2 章 pp. Ⅰ-21-Ⅰ-32，2023.
4) 阿辻雅言，北原曜，小野裕：広葉樹天然林における根系による崩壊防止力分布，中部森林研究，No. 62，pp. 99-102，2014.
5) 阿辻雅言，北原曜，小野裕：林分における崩壊防止力二次元分布図の構築，中部森林研究，No. 61，pp. 13-16，2013.
6) 土木学会：水理公式集［2018 年版］，土木学会，pp. 299，2018.

（2026. 5. 31 受付）