

豪雨時の土砂生産量の推定手法に関する研究 -額平川流域の事例-

Research on Estimation Method of Sediment Yield Due to Heavy Rain
-Case Study of Nukabira River Basin-

室蘭工業大学 ○学生員 芳賀 一斗 (Kazuto Haga)
室蘭工業大学 正 員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
(独) 寒地土木研究所 正 員 村上 泰啓 (Yasuhiro Murakami)

1. はじめに

河川における土砂問題としてダムの堆砂, ダム下流の河床低下, 河口における干潟減少などが考えられる. それぞれの問題については, これまで個々に研究がなされていた. しかし近年は, 河川流域全体として土砂動態を考えることが河川の土砂問題を考える上で重要となってきた.

そこで本研究では, 流域全体の土砂動態のうち, 土砂生産の部分に着目し, 日高地方で発生した 2003 年 8 月の豪雨の事例における土砂生産量を検討した. ここでは, 村上¹⁾ による生産土砂量の推定結果に基づき既存手法による推定値を評価するとともに, 今回新たに降雨条件と地形条件を考慮した重回帰分析式による生産土砂量の推定手法を提案した.

2. 対象流域の概要

今回の解析では, 北海道日高地方の沙流川流域に属する額平川流域を対象の流域とした. 図-1 に額平川と額平川流域を示す. 額平川は一級河川である沙流川水系の一次河川で, 流域面積は 384 km² である.

3. 対象大雨事例

2003 年の大雨は観測史上記録的な大雨であった. とくに沙流川流域では, 流域平均日雨量が 250mm を超えていたことがわかっている. この 2003 年 8 月の豪雨を対象に解析を進める.



図-1 沙流川流域図



図-2 額平川流域の H15 豪雨前後の崩壊地判読結果¹⁾ (黒色が崩壊地)

3.1 2003 年 8 月の豪雨について

2003 年 8 月 7 日～10 日にかけて, 停滞前線と台風 10 号の影響により北海道全域に大雨がもたらされた. とくに, 沙流川流域では 8 日～10 日にかけての 3 日間の総雨量が 300mm を超えるところも多く, 最大時間雨量は, 最も多かった地点では 76mm に達し, 既往最大の規模であった. この大雨による崩壊地の様子を写真-1 に, リモセンデータ¹⁾ (IKONOS, 空中写真) から判読した大雨前後の崩壊地の変化を図-2 に示す. これより, 大雨後に斜面崩壊が判読された箇所数は 4,776 箇所であり, 崩壊面積にして 5.884km² であったことが推測される. これは前年に調査した崩壊面積 (1.64km²) の約 3 倍であり, この大雨で急増したことがわかる¹⁾. つぎに図-3 に, 2003 年 8 月 8 日～10 日で雨量がとくに多かった額平川流域・宿主別地点の降雨量の推移を示す. 観測所の位置は図-1 に示してある. この時の大雨が, 多くの崩壊地を発生させたと考えられる.

また, 沙流川流域におけるレーダーアメダス雨量から得られた 2003 年 8 月 8 日 0 時 00 分～8 月 10 日 24 時 00 分間の最大時間雨量と総雨量の分布図を図-4 および図-5 に示す. これより, 最大時間雨量では額平川流域周辺に集中して最大で 80mm/h 以上の降雨強度があったことがわかる. また, 総雨量も額平川流域周辺で大きく, 最大で 516mm に達していた.



写真-1 2003 年の豪雨による崩壊地¹⁾

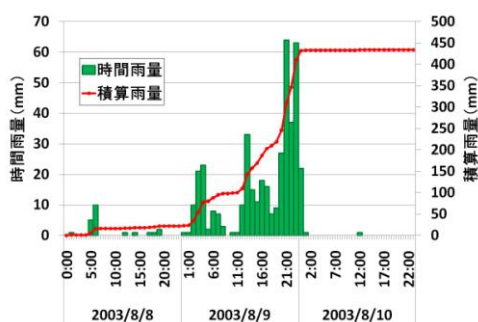


図-3 額平川流域・宿主別地点の降雨量 (2003 年 8 月 8 日～8 月 10 日)

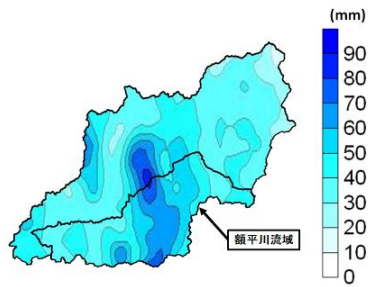


図-4 レーダーアメダス最大時間雨量コンター図
期間 (2003/08/08/0:00~08/10/24:00)

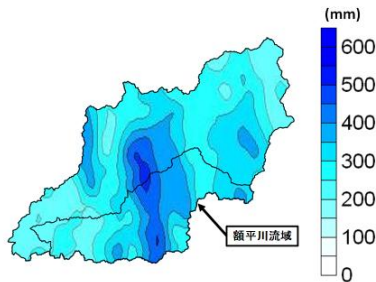


図-5 レーダーアメダス総雨量コンター図
期間 (2003/08/08/0:00~08/10/24:00)



図-6 額平川流域の時間雨量・実効雨量の推移
(2003年8月8日~8月10日)

3.2 2003年豪雨の実効雨量

一般的に、最大時間雨量などで表わされる短期降雨指標は地表面の流量を表し、実効雨量などで表わされる長期降雨指標が土中の水分量を表しているとされる。土中の水分量が増加し飽和状態に近づくと、土砂の崩壊が発生しやすくなると考えられる⁸⁾。

本研究では、長期降雨指標である実効雨量に半減期 72 時間実効雨量を用いた。図-6 に時間雨量と実効雨量の推移を示す。ここで半減期 72 時間実効雨量は次式で表わされる。

$$R_w = \sum \alpha_{1i} \times R_{1i}$$

ここで、 R_w ：実効雨量(mm)、 R_{1i} ： i 時間前の 1 時間雨量(mm)、 α_{1i} ： i 時間前の減少係数で $\alpha_{1i} = 0.5^{i/T}$ 、 i ：時間(hr)、 T ：半減期(hr)である。減少係数は長期間の降雨履歴を考慮できるように本研究では半減期 T を 720 時間 (30 日) とした。

4. 既往手法による生産土砂量の推定結果

村上ら¹⁾は、2003 年の豪雨による崩壊土砂量をリモセンで判読した崩壊面積に地質分類別の崩壊深を乗じて約 $7.92 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定している。ここでは、対象流域を図-7 のように各 1km メッシュに区切り、村上らの推定結果を基準に各種生産土砂量を検証してみた。

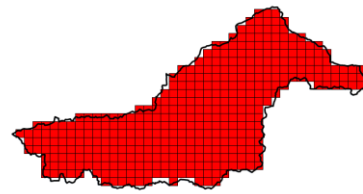


図-7 額平川流域メッシュ図 (1km メッシュ)

4.1 USLE 式による推定

USLE 式^{4) 5)}は、米国農務省を中心として開発された流出土砂量予測式である。USLE 式は、次に示すような年間での流出土砂量予測を目的としてつくられた式である。

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

ここで、 E ：流出土砂量(ton/ha)、 R ：降雨係数(ton・m²/ha/h)で $R = (E \cdot I_{60})/100$ 、 E ：降雨エネルギー(m・ton/ha)、 K ：土壌係数(h/m²)、 LS ：地形係数(無次元)で $LS = (I/20.0) \cdot (68.19 \sin^2 \theta + 4.75 \sin \theta + 0.068)$ 、 I ：斜面長(m)、 θ ：斜面勾配(rad)、 C ：作物係数(無次元)で森林の場合 $C = 0.005$ 、 P ：保全係数(無次元)で地表面の整備の状態による土壌の流れやすさを表すものであり、今回は $P = 1$ とする。

上式から額平川流域全体の生産土砂量を計算すると、 $E = 15,003$ (ton)となる。この生産土砂の質量を体積に変換するため、土砂の比重を考慮して 2.65 (ton/m³)で除すと、 $V = 15,003/2.65 = 5,662$ (m³)を得る。

4.2 芦田・奥村の土砂流出量算定式

芦田・奥村の土砂流出量算定式⁶⁾は、洪水時の土砂の流出について過去の土砂流出の資料より算出した経験式で、次のように表わされる。

$$V = K \cdot (A \cdot R \cdot I)^2$$

ここで、 V ：豪雨時流出土砂量(m³)、 A ：流域面積(m²)、 R ：最大日雨量(mm)、 I ：河床勾配、 K ：定数($K = 10$)とする。また、今回計算する流域がほぼ山地流域であるため、河床勾配をそのまま用いることが難しかった。そこで、 I としてメッシュ毎の最大傾斜角と最小傾斜角の平均を用いて流出土砂量の推定を行った。

これを、2003 年の事例にあてはめると、 $V = 25,628,790 \text{ m}^3$ と推算される。

4.3 砂田らの土砂生産量の推定式

砂田らの土砂生産量の推定式⁷⁾は、過去の資料を基に土砂量を推定する経験式で、次のように表わされる。

$$V = \alpha \cdot \theta^{0.5} \cdot r^2$$

ここで、 V ：生産土砂量(m³/km²/h)、 α ：係数、 θ ：斜面勾配(rad)、 r ：降雨強度(mm/h)、である。なお、 α は対象流域の調査結果より V の値が妥当となるよう逆推定する。

上式から額平川流域全体の生産土砂量を推算すると、 $V = 17,733,913 \cdot \alpha$ (m³)となる。先に示した額平川流域の生産土砂量の推定値 $7.92 \times 10^6 \text{ m}^3$ より α を逆算すると $\alpha = 0.45$ となる。これより、この値が妥当であるのか判断するには対象流域について複数の事例で確認しなければならないという課題がある。

4.4 リモセン判読による生産土砂量の推定

村上ら¹⁾による生産土砂量の推定手法は、次のとおりリモセンによって崩壊していると判読された崩壊地の面

積に地質別の崩壊深を乗じることで生産土砂量を算出する。

$$V=A \cdot d$$

ここで、 V : 生産土砂量(m^3)、 A : リモセン判読により読みとられた崩壊面積(m^2)、 d : 地質毎の崩壊深(m)、である。

各メッシュの生産土砂量を推定するため、まずは各メッシュ毎の地質を判別した。図-8 に地質のメッシュ図を示す。これは、メッシュの中で一番割合の多い地質をそのメッシュの代表地質とすることで判別した。また、既往の現地調査結果²⁾により得られた地質毎の崩壊深を表-1 に示す。なお、村上ら¹⁾は浅い崩壊深と深い崩壊深に分けて算出し $V=7.92 \times 10^6 m^3$ という結果を得ているが、本研究では崩壊深は地質別に一律で与えて算出した結果である $V=8.24 \times 10^6$ を用いる。

これらのデータを用いて各メッシュの生産土砂量を求めた。図-9 にリモセン判読による生産土砂量の推定値の分布図を示す。

これより、生産土砂量の多いメッシュが額平川流域の中流部に集中していることが特徴としてあげられる。また、図-4 と比較すると最大時間雨量と生産土砂量の大きいところがほぼ重なっているということがわかる。ここで、図-10 に最大傾斜角の分布図を示す。一般的に降雨量が一定の場合、傾斜角が急になるほど生産土砂量は増加すると考えられる。しかし、図-4、図-9、図-10 を比較すると傾斜が急な額平川流域上流部で下流部と同程度の降雨が降っているにも関わらず、生産土砂量に大きな変化がみられなかった。これらのことから、生産土砂量を推定する場合、支配的要因としては降雨条件と地形条件の二つについて考慮する必要があると考える。

5. 降雨条件・地形条件を考慮した生産土砂量推定手法の提案

本研究では、前章で推定された各メッシュの生産土砂量を降雨条件、地形条件から生産土砂量を推定するための方法を検討した。

5.1 分析手法

本研究では重回帰分析を用いて分析を行う。ここでは、メッシュ毎の生産土砂量の推定結果を目的変数とした。説明変数には、降雨条件として最大時間雨量(mm/hr)、最大実効雨量(mm)を用い、地形条件として最大傾斜角(度)、メッシュ内で傾斜角が10度以上の面積(m^2)、起伏量(m)を用いた。起伏量とは、500mメッシュ内の最高標高値と最低標高値の差を算出し、1kmメッシュ内の最大値をとったものである。また、地質による影響をみるため、額平川流域の地質で割合の多い、中生代～古第三紀堆積岩類、蝦夷層群、新第三紀堆積岩類の3つについて注目し、地質別の推定を行った。

$$Y=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_ix_i$$

ここで Y : 目的変数、 a_i : 係数、 x_i : 説明変数である。

5.2 分析結果

分析結果を表-2 に、全メッシュで最も相関の良かったケースの分析結果と実際の推定結果の再現性を図-11 に示す。これより、バラつきはあるが概ねの傾向は再現できていることがわかる。

表-2 をみると、全メッシュを対象とした重回帰分析で

は、最も相関の良好だったのは全ての説明変数を用いたケース 1-5 であった。地質別にみても全ての説明変数を用いた場合で相関が高い。ケース 1-5 の重回帰式を用いて算出した各メッシュの生産土砂量の分布を図-12 に示す。図-9 に示すリモセン判読による生産土砂量の図と比較すると、生産土砂量の多い額平川中流部についての再現性がよくなされていることがわかる。

表-3 に今回の比較した各手法の結果をまとめる。これより、既存の手法で生産土砂量を推定したが、再現性の良い結果が得られなかった。また、今回提案した手法では生産土砂量が $V=8.32 \times 10^6 m^3$ とほぼリモセン判読による生産土砂量と同様な値が再現できたことが示された。

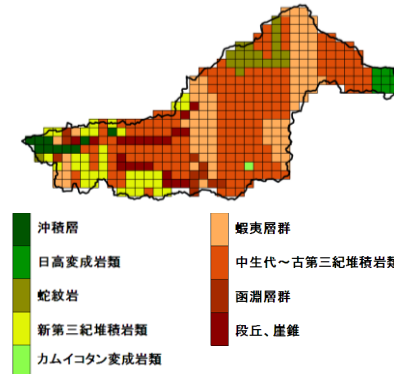


図-8 額平川流域の地質分類図

表-1 地質別の崩壊深

地質	崩壊深(m)
沖積層	1.00
日高変成岩類	0.75
蛇紋岩	1.36
新第三紀堆積岩類	1.93
カムイコタン変成岩類	0.75
蝦夷層群	2.41
中生代～古第三紀堆積岩類	1.36
函淵層群	2.41
段丘、崖錐	2.00

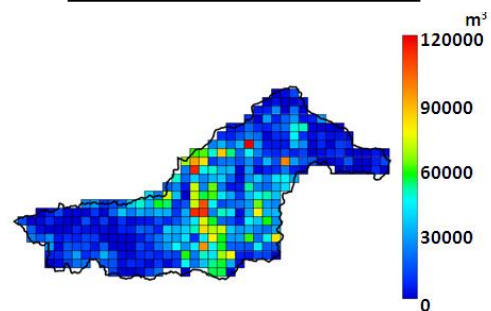


図-9 リモセン判読による生産土砂量の分布
(村上ら¹⁾の崩壊面積判読に基づく)

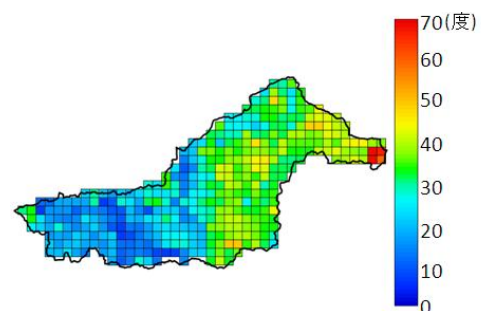


図-10 最大傾斜角の分布

表-2 係数の一覧と分析結果(額平川流域)

		全メッシュ対象					中生代～古第三紀堆積岩類対象				
ケース		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
X_1	最大時間雨量(mm/h)	350.34	677.81	584.77	576.70	558.73	461.48	635.89	481.53	448.69	473.72
X_2	最大実効雨量(mm)	26.17	-24.29	5.49	72.86	15.55	45.17	-34.24	12.05	48.79	14.30
X_3	最大傾斜角(度)	46.14		-424.76	32.16	-205.80	-325.27		-527.09	-247.56	-479.52
X_4	傾斜角10度以上の面積(m ²)		0.03	0.04		0.04		0.04	0.05		0.05
X_5	起伏量(m)				-15.72	-31.66				-9.84	-5.99
R	相関係数	0.45	0.48	0.50	0.38	0.51	0.44	0.51	0.55	0.44	0.55

		蝦夷層群対象					新第三紀堆積岩類対象				
ケース		3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
X_1	最大時間雨量(mm/h)	1241.79	1160.90	1223.87	1241.86	1223.79	-170.03	116.65	-51.19	-51.38	-163.67
X_2	最大実効雨量(mm)	91.86	86.41	69.07	93.38	72.66	110.41	471.15	121.23	120.46	114.29
X_3	最大傾斜角(度)	-100.12		-583.43	-27.49	-403.08	727.35		482.07	490.02	681.46
X_4	傾斜角10度以上の面積(m ²)		0.04	0.05		0.05		0.01	0.01	0.01	
X_5	起伏量(m)				-10.10	-26.05				-4.32	18.74
R	相関係数	0.51	0.55	0.57	0.51	0.57	0.55	0.58	0.58	0.58	0.55

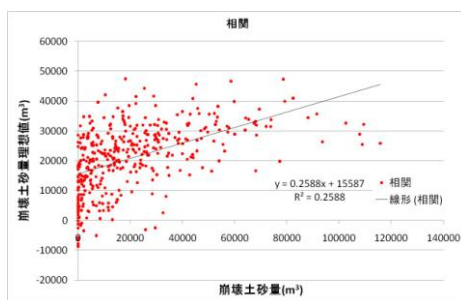


図-11 生産土砂量と重回帰式による計算値の相関

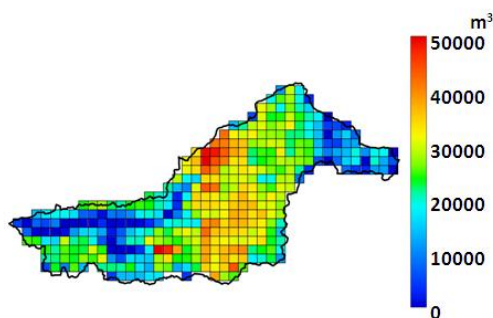


図-12 重回帰式によって得られた生産土砂量の分布図

6. まとめ

本研究で得られた研究結果を示すと以下のとおりである。

- (1)2003 年豪雨による生産土砂量の推定について、既存の手法を用いて解析を行ったが、再現性の良い結果が得られなかった。
- (2)本研究で提案した降雨・地形要因を考慮した手法で推定した結果、流域全体としての生産土砂量は、再現性が良好であった。また、各メッシュの生産土砂量の分布についてもおおむねの傾向が再現された。
- (3)重回帰分析の結果をみると土砂生産には最大時間雨量と最大実効雨量の降雨条件と斜面角 10 度以上の面積といった地形条件が大きく関係していることがわかった。

表-3 各手法の生産土砂量推定結果(額平川流域)

生産土砂推定手法	生産土砂量推定値(m ³)
USLE式	5,662
芦田・奥村の推定式	25,628,790
砂田らの推定式*	17,733,913・ α
本研究(重回帰式)による推定	8,323,263
リモセン判読による推定	8,243,837

*: α の設定に依存する

以上より、降雨条件と地形条件が土砂の生産に密接に関係していることが推察され、土壌の水分量についてより正確な把握が土砂の動態を解析していくうえで重要であると考えられる。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、データを提供していただいた、気象庁、(財)気象協会の関係各位にここに記し深く感謝する。

参考文献

- 1) 土木学会水工学委員会：平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査団報告書，pp.1-95，2004.
- 2) 室蘭建設部：沙流川総合開発事業の内 沙流川生産土砂調査検討業務報告書，2004.3
- 3) 国土交通省水文水質データベース：
<http://www1.river.go.jp/>.
- 4) 鶴木啓二，多田大嗣，細川博明：USLE による畑地流域からの土砂流出解析，技 21(農)，北海道開発技術研究発表会，2009.2
- 5) 今井啓，石渡輝夫：統計資料等を用いて整理した北海道における土壌侵食因子の地域性について，寒地土木研究所月報，No.640，pp.40-45，2006.9
- 6) 土木学会：水理公式集，pp.140-141，1999
- 7) 砂田憲吾，小松勝彦，小林弘：流域全体の土砂動態モデルに関する基礎的検討，水工学論文集，第 44 巻，pp.729-734，200.2
- 8) 芳賀一斗，中津川誠，山下彰司：降雨特性による土砂災害発生要因の解析 -沙流川流域の事例-，第 66 号，土木学会北海道支部論文報告集，2010.2