第3節土

I 中川川流域における堰堤満砂期間を用いて推定した土砂生産分布と崩壊履歴の関係

厚井高志¹⁾•堀田紀文¹⁾•鈴木雅一¹⁾

Sediment Yield Distribution Estimated by Duration to Fill of Check-Dam and

Landslide History in the Nakagawa River Basin

Takashi Koi, Norifumi Hotta & Masakazu Suzuki

要 約

長期にわたる土砂流出の実態を把握し、その要因を明らかにすることは、流域管理のみならず、砂防計画上も重要な検討 課題である.しかしながら、その検討手法は十分に確立されていない.本研究では、神奈川県中川川流域における土砂流 出特性をダム堆砂データを用いて明らかにした上で、流域内に存在する堰堤の満砂期間から土砂生産分布を推定し、土砂 流出と崩壊履歴との関係を明らかにした.その結果、年平均流出土砂量は 2033m³km⁻²yr⁻¹と見積もられ、全国的に見ても 土砂流出の激しい流域であった.推定された土砂生産分布より、流域東部が土砂生産源となっていることが分かった.また、 この流域では過去2度の大きな崩壊が発生しているが、それぞれの崩壊分布は流域内で異なっており、推定された土砂生 産分布は、関東大震災の影響により発生した崩壊分布と良好に対応していた.ダム堆砂から求めた流域全体からの比流出 土砂量と土砂生産分布の推定値から求めた比流出土砂量は近い値と取ったことなどから、本研究で用いた手法により、土砂 生産量を推定することは可能であると言えた.中川川流域における近年の土砂流出は、関東大震災の影響により発生した崩 壊地が生産源となって引き起こされている可能性が高い.

1. 背景

流域の山地・渓流環境を考える上で,土砂流出の実態 を把握することは重要な課題である.神奈川県西部の丹 沢山地においては,近年,シカによる食害や,人工林の 手入れ不足のために林床植生が失われることによって土壌 侵食が加速し,山地が荒廃してしまうことを危惧する声があ がっている.本研究はそれらの問題を直接対象とはしてい ないが,比較的長期間・広域からの土砂流出の実態とそ の要因を明らかにすることは、今後,個別の課題を検討し ていく上で基礎的な知見となる.

流域からの土砂流出を推定する手法としては、土砂流出 モデルを用いた検討手法(小川ほか, 1989, Tattari, 2001; White, 2005)の他に、ダム堆砂データを用いた検討手法 (佐藤ほか, 2001; Verstraeten et al., 2003; Radoane, 2005) がある.本研究で調査対象地とした中川川流域においても 下流に三保ダムが存在し,ダム完成以来,年々の堆砂デー タが測定されていることから、ダム堆砂データを用いて流域 全体の土砂流出特性を長期にわたり把握することが可能で ある. また, これまでに流域内の土砂生産分布の把握を目 的として、流域内に存在する堰堤の堆砂期間を用いた検 討が行なわれている (Neil at el., 1993) が、 ダム堆砂データ が存在する流域において、そうした検討は行なわれておら ず,分布の確かさについては検討できていない.本研究 では、丹沢山地からの土砂流出の実態とその長期変動を ダム堆砂データを用いて明らかにするとともに、流域内に 存在する堰堤の満砂までの期間を用いて流域内の土砂生 産分布を推定することで、推定された土砂生産分布の妥当 性について検証した. その上で, 土砂流出を引き起こす要 因を,崩壊履歴との対応を検討することによって明らかにした.

2. 調査地概要

中川川流域は、相模湾に注ぎ込む酒匂川の上流にあたり、神奈川県山北町に位置する.中川川流域下端部には 三保ダム(総貯水量;64,900 × 10³ m³)が存在し、三保 ダムには、中川川のほかに玄倉川、世附川の計3河川が 流入している(図1).中川川流域の流域面積は39.2km² で、標高は350mから1500mの間に分布している.付近 の年平均降水量は2167mm(AMeDAS観測点「丹沢湖」; 1979 ~ 2000)で、6月から9月までの夏季に雨が多い太 平洋側の気候である.中川川流域の地質は主に石英閃緑 岩などの深成岩で構成されており、下流の一部に結晶片 岩などの変成岩が存在する.

中川川流域では、1923年の関東大震災とその余震,およびその後の台風に伴う降雨により大面積崩壊が発生した. さらに、1972年7月にも豪雨により流域内に多数の崩壊が 発生(昭和47年災害)している(棚瀬,1997).

3. 方法

(1) 中川川流域における土砂流出特性の把握

三保ダム堆砂データを用いて,流出土砂量と降雨との 比較を行なって土砂流出特性を検討した上で,中川川流 域全体からの年平均流出土砂量を算出した.三保ダムは 1978年に完成後,1979年から毎年流入土砂量が測定さ れており,三保ダムに流入する3河川からの流入土砂量が 個別に記録されている.藤原ほか(1999)は,全国82の ダムデータを集計した上で求めた地表面の凹凸を表現する 地形指標である基準高度分散量(領域内の標高値の標準 偏差)と侵食速度の対応関係を比較している.そこで,そ れらのダムデータのうち,浚渫や排砂の影響がない38の ダムデータを用いて,三保ダム流域での土砂流出が全国 の貯水ダム流域と比較することにより,その位置づけを明ら かにした.

次に、中川川流域から流入するダム堆砂量と年降水量

¹⁾ 東京大学大学院 農学生命科学研究科



表1.使用した航空写真一覧

撮影年	縮尺	撮影機関
1961 (S36)	1/40,000	建設省地理調査所
1963 (S38)	1/21,000	林野庁
1967 (S42)	1/20,000	国土地理院
1970 (S45)	1/40,000	国土地理院
1973 (S48)	1/10,000	神奈川県
1975 (S50)	1/15,000	国土地理院
1977 (S52)	1/15,000	国土地理院
1978 (S53)	1/20,000	林野庁
1983 (S58)	1/20,000	国土地理院
	1/16,000	林野庁
1988 (S63)	1/20,000	国土地理院
1993 (H4)	1/25,000	国土地理院

(AMeDAS 観測点「丹沢湖」)との比較を行なって、降雨 の年々変動と土砂流出の年々変動の対応を検討した上で、 年平均流出土砂量を算出した.中川川から三保ダムへの 流入土砂量は、1979年から2003年までの25年間分であ る.なお、ダム堆砂は、侵食前の岩石と比較して空隙が多 く、密度が小さい.そのため、この密度差を補正する必要 がある.本調査では密度差の補正に用いる空隙率 P の値 には、既往研究(Ohmori, 1978; 芦田ほか, 1983; 藤原ほか, 1999年)と同様に 0.3を採用した.

(2) 中川川流域における生産土砂量分布の推定

中川川流域内に存在する砂防・治山堰堤の満砂までの 年数を航空写真から明らかにして、堰堤流域毎の生産土 砂量を推定することにより、流域内の生産土砂量分布を明 らかにした.使用した航空写真は1961年から1993年まで に撮影された11時期である(表1).

調査対象とした堰堤は、施工から満砂までの期間に上流

表 2. 調查対象堰堤諸元

堰堤No.	流域	施工年次	流域面積	貯砂量
			(km²)	(m ³)
1	白石沢	1970	2.20	1,515
2	室窪沢	1977	2.51	2,369
3	桝小屋沢	1977	0.13	4,125
4	東沢	1964-66	1.89	88,541
5	東沢	1967	4.90	200,000
6	西沢	1963	2.86	43,000
7	石堂沢	1977	0.24	5,500
8	板小屋沢	1979	0.99	15,680
9	オイダン沢	1975-77	0.44	3,791
10	大滝沢	1974	0.32	6,440
11	大滝沢	1960	0.59	4,533
12	大滝沢	1960	2.37	11,400
13	湯ノ沢	1962	1.51	65,000
14	小塚沢	1970-72	0.38	25,850
15	笹子沢	1956	1.39	18,480

に未満砂の堰堤が存在せず、上流に存在する堰堤による 土砂捕捉の影響を受けていない15基の不透過型堰堤であ る.調査対象とした堰堤の諸元を表2に示す.表2には 各堰堤の施工年次と貯砂量および堰堤流域の集水面積を 示した.施工年次および貯砂量は台帳記録を参照したが、 台帳に記録がない堰堤も存在した.施工年次が不明の堰 堤については航空写真から堰堤の有無を確認し、施工年 次は期間で示した.1972年に発生した昭和47年災害以 前に施工された堰堤は8基,災害後に施工された堰堤は 7基ある.また、貯砂量が不明の堰堤については、現地 調査を行った.堰堤堤体の名盤に記録があるものについて はその記録を用い、名盤が無いものについては堤高およ び堤長、堆砂地長の測量を行って、算出した貯砂量を用 いた. 堰堤の満砂までの年数は,航空写真から判読した. 施工後,堆砂面が水通しに達した写真撮影年次を最終満 砂確認年次とし,1時期前の撮影年次の翌年から,最終 満砂確認年次までを満砂期間として,施工年次からの年数 を数えた.このため満砂までの年数は,航空写真の撮影 間隔に応じて5年までの幅を有する値となった.

以上より, 堰堤流域ごとの年平均生産土砂量 SY (m³yr¹) および単位面積あたりの年平均生産土砂量 SYa (m³km⁻²yr¹) (以下, 比生産土砂量とする)を次式より算出した.

$$SY = \frac{V(1-P)}{Y} \tag{1}$$

$$SY_a = \frac{SY}{A} \tag{2}$$

ここで、V は堰堤貯砂量(m³), Y は満砂までの年数(yr), A は堰堤流域の集水面積(km²), P は空隙率とする. なお, 空隙率は 0.3 を用いた. (2) 式より算出した堰堤ごとの生 産土砂量から,中川川流域内の土砂生産分布を示した.

(3) 中川川流域内の崩壊履歴と土砂生産分布との関係

流域内の崩壊地分布を時系列的に抽出し,推定された 土砂生産分布との対応を比較した.石垣ほか(2007)は, 1923年の関東大震災後に作成された災害復旧地図から抽 出した崩壊地を関東大震災の影響により発生した崩壊地と し,その後,1967年,1978年,1988年,1999年の航空 写真から崩壊地を抽出した.本研究では、これらのデータ のうち、中川川流域において抽出された崩壊地について、





堰堤流域ごとに崩壊地面積と崩壊箇所数を整理して,崩壊 地の分布の経年変化を明らかにした.さらに,堰堤流域ご との崩壊面積とその生産土砂量との関係について検討した.

4. 結果

(1) 土砂流出特性

三保ダム流域における土砂流出の日本全国における位 置付けを示す(図2).図2において、三保ダム流域にお ける流出土砂量は, 1979年~1990年期間と1991年~ 2003 年期間の 2 期間で求めたものをプロットした. 図 2 よ り、三保ダムについては、2期間で土砂流出の違いは見ら れない. 全国においては基準高度分散量が大きい(地形 の急峻な)一部の流域においては、非常に激しい土砂流 出があるが、それ以外のダム流域の値と比較すると、三保 ダム流域からの流出土砂量は比較的大きいと言える. 基準 高度分散量が140m以下の流域では、1990年度までに記 録されている一点を除いて最大の値となっている. 三保ダ ム堆砂データから算出した中川川流域からの年平均流出土 砂量は 2033m³km⁻²yr¹ であった. 一般に日本の森林流域 からの土砂流出は 20 ~ 200m³km⁻²yr¹ 程度の範囲(川口, 1951)に収まっていると言われていることから、中川川流域 は比較的土砂流出の激しい流域と言える.

次に、三保ダム堆砂量の時系列変化と年雨量との対応を 図3に示す.図3より、年雨量に応じて多少の年々変動 が見られるが、中川川流域では1979年から2003年まで 直線的な増加が見られ、ほぼ一定の土砂流出が継続して いた.また、図4に年降水量と年ダム堆砂量との関係を示 す.図4から、年降水量と年ダム堆砂量との間にある程度 の相関が見られることから、降雨にともなう出水の規模に応 じて、流出土砂量が変動していると考えられる.

(2) 生産土砂量の分布

航空写真から判読した各堰堤の堆砂状況と満砂までの年 数を図 5 に示した. 図 5 より,昭和 47 年災以前に施工さ れた 8 基の堰堤のうち,3 基は災害発生以前に,5 基は災 害発生以後に満砂が確認できた.満砂までの年数は,1 ~3 年程度と比較的短期間で満砂した堰堤は4 基存在し た一方で,満砂までの年数が10 年以上経過している堰堤 は2 基 (No.13,14)存在した.比較的短期間で満砂した No.9 堰堤や No.10 堰堤と,満砂までに長期期間を要した No.14 堰堤は,同時期に施工されているにもかかわらず,



図 4. 年降水量と年ダム堆砂量の関係



図 5. 堆砂状況の時系列変化と満砂までの年数



図 6. 堰堤流域における比生産土砂量とその分布

満砂までの年数が大きく異なっていることから,流域内での 生産土砂量が施工時期よりも施工場所により決定されてい ることが示唆された.

(2) 式より堰堤ごとに算出した比生産土砂量とその分布を 図6に示した.なお、満砂までの年数が幅を持った値で示 されているため、各堰堤流域の各生産土砂量は、その最 大・最小値から平均値を求め、その増減分とを合わせて 示した値として表示した.図6より、比生産土砂量は堰堤 流域により大きく異なることが分かる.すなわち中川川流域 東部に比生産土砂量が5000m³km²yr¹以上の激しい土砂 生産を示す堰堤流域(No.3,5,7,8)が存在していた.一 方で、流域西部は No.10 堰堤や No.15 堰堤のように比生 産土砂量の激しい堰堤流域もあるものの、比生産土砂量が 1000 m³km²yr¹ 程度と、土砂生産が比較的穏やかな堰堤 流域(No.1, 2, 6, 11)が存在していた.以上より中川川流 域では、流域東部が主な土砂生産源となっていることが明 らかになった.

(3) 土砂生産分布と崩壊地分布との関係

図7に、航空写真から読み取った中川川流域内の崩壊 地分布の時系列変化を示す(第3章第3節Ⅱ). 図7より、 関東大震災後に作成された崩壊復旧地図より抽出した崩壊 地がもっとも顕著であった. 1978年は、関東大震災の影 響により発生した崩壊地分布以外では、最も多くの崩壊地 が確認できる. 1978年は1967年に比べ崩壊地が増加して いることが見て取れることから、この期間で、新規崩壊が発 生したと考えられる. 1978 年は, 昭和 47 年災害の発生か ら6年後であるが、災害後から1978年の期間では、崩壊 の発生や大規模な降雨が記録されていないことから、ある 程度植生回復が進んでいる可能性はあるものの,昭和47 年災害時の崩壊発生を表しているものと言える. 崩壊発生 の頻発地域について見てみると、関東大震災の影響により 発生した崩壊は主に流域内の東部に集中しているものの, 1978年の写真では流域西部での崩壊が顕著であり、関東 大震災の影響による崩壊と昭和47年災害による崩壊では、



崩壊の頻発地域が異なっていることが分かる.

図 8. a, bに(1)式より算出した年平均生産土砂量と関 東大震災後に発生した崩壊地面積,昭和47年災害時に 発生した崩壊地面積との関係を示す.図より,ほとんどの 堰堤は施工年次が1960年以降にもかかわらず,土砂生産 量の分布は,直近の崩壊イベントである昭和47年災害と はほとんど対応関係が見られず,関東大震災時に発生した 崩壊地分布と良好に対応していた.さらに,昭和47年災 害により発生した崩壊の影響を検討するために,堰堤の施 工年次を1972年より前とそれ以降に分けて,関東大震災 後に発生した崩壊地面積,昭和47年災害時に発生した崩 壊地面積と比較した(図 9. a, b, c, d).図より,1972年より 前に施工された堰堤と,関東大震災の影響により発生した 崩壊地と良好に対応していた(図9.a).1972以降に施工 された堰堤については良好な対応は見られないものの,両 者を比較すると,相対的には関東大震災の影響により発生 した崩壊地との対応が見られた(図9.c,d).したがって, 推定された土砂生産量の分布は,直近の崩壊イベントであ る昭和47年災害よりも,関東大震災時に発生した崩壊地 分布と良好に対応していると言える.

5. 考察

(1) 堰堤流域ごとに推定した生産土砂量の妥当性の検討

航空写真から満砂時期を読み取って明らかにした堰



図 9. 年平均生産土砂量と崩壊面積の関係(施工年次別)(a. 1972 年以前に施工した堰堤と1923 年崩壊面積, b. 1972 年以前に施工した堰堤と1978 年崩壊面積, c. 1972 年以降に施工した堰堤と1923 年崩壊面積, d. 1972 年以降に施工した堰堤と1978 年崩壊面積)

堤満砂期間を用いて推定した堰堤流域ごとの生産土砂 量について、その妥当性を検討した. 堰堤満砂期間を 用いて推定した生産土砂量を,流域面積の違いを考慮 した上で,流域全体からの比生産土砂量を算出すると 1851 ± 582m³km²yr¹となった. この値は4(1)で求め た三保ダム堆砂データを用いた中川川流域全体の流出土 砂量(2033m³km²yr¹)とほぼ同程度に範囲内に収まって いる. また,調査対象とした堰堤流域の合計面積は流域 全体の約53%(20.9km²)を占め,堰堤流域は全体の半 分以上を占めることから,推定された値の信頼性は高いと 考えられる.

ここで、本研究で用いたデータごとにその集計期間をまと めた概念図を図 10 に示す. 図 10 より、生産土砂量の推 定に用いた堰堤流域ごとの満砂期間は、三保ダム完成の 前後にまたがっている上、それぞれの期間が 1956 年から 1993 年までばらついており、満砂期間が重なっていない堰 堤流域が存在する. しかしながら、流域下端部に位置する 三保ダムの堆砂の経年変化が長期にわたりほぼ一定である (図 3) ことに加え、4 (3) から明らかなように、三保ダム 完成 7 年前の昭和 47 年災害時の崩壊はその後の土砂流 出にあまり影響を与えていないことから、三保ダム完成前後 で、流出土砂量が著しく変わったとは考えにくい. したがっ て、ダム完成前に満砂した堰堤も含めて推定された流域全 体からの比生産土砂量も、実態とはそれほどかけ離れたも のではないと考えられる.このことから、本研究で用いた手 法よって推定された堰堤流域ごとの生産土砂量は妥当な値 であったと考えられる.

(2) 中川川流域における過去の崩壊が土砂流出に与える影響

中川川流域内で推定された生産土砂量の分布と崩壊履 歴との関係から、崩壊が流域の土砂流出に与える影響に ついて考察した.中川川流域では、一定の土砂流出が長 期継続している.また、図2から明らかなように、その流出 土砂量は、全国の他のダム流域と比較して大きい.近年、 顕著な崩壊の発生がないにもかかわらず、このような大量 の土砂が継続的に流出していることから、流域内に大量の 不安定土砂や、河床堆積物が存在していると言える.土砂 流出の年々変動は、これらの土砂が生産源となり、出水に 応じて河川の掃流力により流出するためであると考えられる. 一般に、崩壊地面積とその崩壊地から生産される土砂量 には正の相関があることが明らかにされている(Guthrie., 2004).中川川流域においては、土砂生産域に偏りがあ り、土砂生産分布と関東大震災の影響により発生した崩壊 地分布が良好に対応するという結果から、上述の土砂生産



図 10. 用いたデータ期間の概念図

源は、関東大震災の影響により発生した崩壊によって供給 されたと考えることができる.昭和47年災害後には、ほと んどの不安定土砂が崩壊地よりも河床に残存しているという 過去の調査結果(中山・中筋、1974)も、このことを支持 すると言える.以上より、中川川流域における土砂流出は、 現在に至る約80年もの間、関東大震災時の大面積崩壊 によって大量に生産された土砂によって引き起こされている 可能性が高い.流域の土砂流出特性を把握するためには、 その流域での崩壊履歴を長期にわたって検討する必要が あると考えられる.

6. 結論

本研究により,以下のことが明らかになった. ① 中川川流域における流出土砂量は 2033m³km⁻²yr¹と見 積もられ,全国的にみても比較的土砂流出の激しい流域で あった.さらに,本研究で用いた堰堤満砂期間から推定し た生産土砂量の妥当性が確かめられ,流域内の土砂生産 分布を把握することができた.これにより,中川川流域では 流域東部からの土砂生産が激しいことが確かめられた.

② 中川川流域では、関東大震災の影響による崩壊と、昭 和47年災害時に発生した崩壊の、2度にわたって大きな崩 壊が発生していた.流域内の生産土砂量の分布は、関東 大震災の影響により発生した崩壊地の分布と対応しており、 中川川流域における土砂流出は、現在に至るまで、関東大 震災の影響により発生した崩壊地から生産された土砂によっ て引き起こされている可能性が高いことが示唆された.

謝 辞

本研究にあたり、日本大学生物資源学部の石垣逸朗教 授には崩壊地データをご提供いただいた.また、神奈川 県自然環境保全センターの内山佳美さんには貴重な資料 を提供していただいた.ここに記して謝意を表します.

文 献

- 芦田和男・高橋保・道上正規,1983.河川の土砂災害と 対策.260pp.森北出版.東京.
- 藤原治・三箇智二・大森博雄, 1999. 日本列島における

侵食速度の分布. サイクル機構技報, (5): 85-93

- Guthrie, R. H. & S. G. Evans., 2004. Analysis of Landslide Frequencies and Characteristics in a Natural System, Coastal British Columbia. *Earth Sur f. Process. Land forms*, 29: 1321-1339
- 川口武雄,1951.山地土壌浸食の研究(第一報).林業試 験場集報,(61):1-119.
- 中山政一・中筋章人,1974. 昭和47年7月豪雨時の西 丹沢山地における流出土砂について.砂防学会誌, 90(2):28-36
- Neil, D. T. & R. K. Mazari., 1993. Sediment Yield Mapping Using Small Dam Sedimentation Surveys, Southern Tablelands, New South Wales. *Catena*, 20: 13-25
- 小川紀一朗・松村和樹・菊井稔宏・井良沢道也, 1989. 山地流域における土砂生産・流出の実態と解析.砂 防学会誌, 41(6): 4-13
- Ohmori, H., 1978. Relief Structure of the Japanese Mountains and their Stages in Geomorphic Development. *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo*, 10: 31-85.
- Radoane, M. & N. Radoane., 2005. Dams, sediment sources and reservoir silting in Romania. *Geomorphology*, 71: 112-125
- 佐藤直良・小山内信智・川西浩二・木村田和也,2001. 四国山地の土砂生産・流出に関する一考察,砂防学 会誌,54(3):32-38
- 棚瀬充史,1997. 丹沢山地のマスムーブメント. 神奈川県 公園協会・丹沢大山自然環境総合調査団企画委員 会編,丹沢大山自然環境総合調査報告,pp.64-73. 神奈川県環境部. 横浜.
- Tattari, S., & I. Barlund., 2001. The Concept of Sensitivity in Sediment Yield Modelling. *Phy. Chem. Earth*, 26(1): 27-31.
- Verstraeten, G., J. Poesen., J. D. Vente & Koninckx, X., 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiqualitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*, **50**: 327-348.
- White, S., 2005, Sediment yield prediction and modeling. *Hydrol. Process.*, 19: 3053-3057.