

山地流域における土砂流出過程の実証的研究

OBSERVATION STUDY ON SEDIMENTATION PROCESSES IN A STEEP AND HIGH MOUNTAIN RIVER BASIN

井上素行¹・千賀春夫²・高橋 保³

Motoyuki INOUE, Haruo SENG and Tamotsu TAKAHASHI

¹ 正会員 工修 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ 主席研究員 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

² 正会員 東京電力(株)工務部 副長 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

³ フェロー会員 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

It is very important for the prediction of sediment runoff into reservoirs and downstream of rivers to evaluate the behavior of sediment transport in a river basin located at high mountains. However, the difficulty for this study due to steep topographies and extensive research areas have hindered the accumulation of reliable data. This paper discusses characteristics of production, transportation and deposition processes of sediment in failed slopes and streams, and the overall situation of sediment balance of the basin, based on the on-site data such as aerial photographs and slope erosion data obtained from measuring sticks. The study area, Takase Dam basin, is surrounded by mountains higher than 2800 m in elevation. Characterized by steep topography and weak geology consisting of deteriorated granites, the area is one of the major sediment runoff areas in Japan.

Key Words: Sedimentation Process, Failed Slope, Mountain River Basin, Erosion, Aerial Photogrammetry

1. はじめに

山地流域における土砂の動態を把握することは、ダムや下流河川への土砂流入を予測する上で極めて重要である。しかし、現地の調査範囲が広く、また地形が急峻であること等から十分な調査データが蓄積されているとはいえない状況にある。

本研究では急峻で土砂生産が活発な山地河川における土砂の生産、移動、堆積のプロセスの特徴を現地測定データを用いて検討した。

まず、土砂生産源である岩盤斜面崩壊地の地形・地質および崩壊面積の経年変化ならびに斜面の崩壊・侵食の特性を長期間の空中写真データ、杭による斜面侵食測定データ等を用いて考察した。また、山地河川流域における土砂移動の特性を空中写真測量データを用いた地形解析により検討した。

本研究において調査対象とした高瀬ダム周辺は、糸魚川-静岡構造線の西側に位置し、北アルプスの高山に囲まれた急峻な地形で、かつ脆弱な地質が分布する我が国屈指の土砂流出地域である。

2. 調査地点の概要

本研究において調査の対象とした高瀬ダム流域(図

ー1)は信濃川水系高瀬川の最上流部に位置し、2800m以上の高山に取り囲まれた高山地域に所在する。流域界の稜線は森林限界以上で、崩壊裸地斜面、草地、高山性灌木等によって構成されている。冬期は全流域が積雪に覆われ、一部の沢には夏期においても残雪が見られる。平均的な年間の降水量および最高・最低気温はダムサイト(EL.1280m)でそれぞれ 2100 mm、-16～30℃程度である。

尾根部分および沢の部分を除いた流域斜面はほとんど勾配 30° 以上の急斜面を形成している。流域の地質は 90%以上が白亜紀から古第三期の中～粗粒の花崗岩類から成っており、一部に火山岩類の貫入および沖積期の砂礫堆積物が見られる。花崗岩は全般に新鮮・堅硬であるが、一部に火山岩類の貫入等の影響により強い熱水変質作用あるいは破碎作用を受けて脆くなっている岩盤が分布する。

高瀬ダム貯水池には 1978 年の完成以来 1996 年までの 18 年間で、約 1290 万 m³ が堆砂しており、特に 1982 年、1983 年および 1995 年に大量の土砂が流入している。全堆砂量の内訳は、濁沢・不動沢流域 740 万 m³、本川流域 400 万 m³、その他となっている(図-2)。全堆砂量を流域面積 131km² で割り、さらに経過年数 18 年で割った値、つまり比堆砂量は 5,470m³/km²/year となり、我が国山地の平均値 300m³/km²/year と比較する

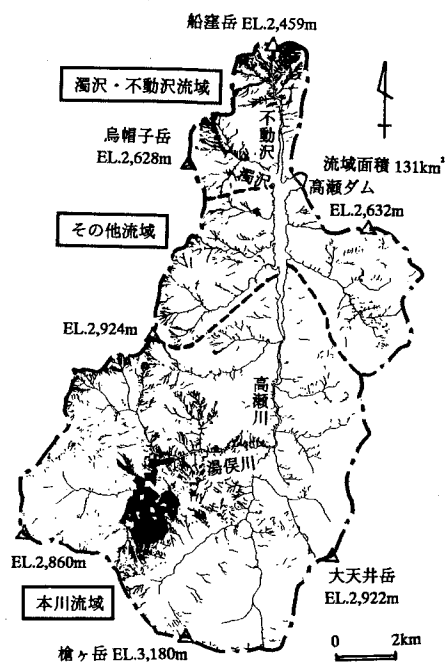


図-1 高瀬ダム流域の崩壊地分布

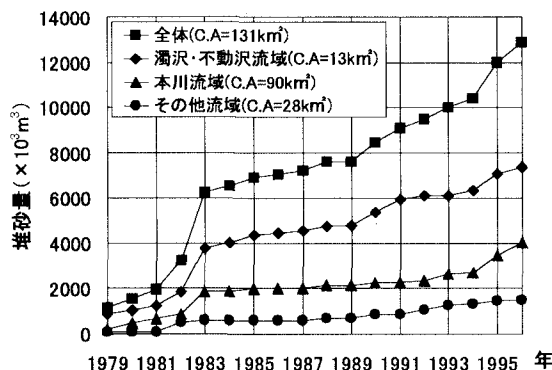


図-2 高瀬ダム堆砂量 (HWL 以上含む)

と如何に激しい土砂流出を持っているかがわかる。さらに濁沢・不動沢流域 12.83km^2 について比堆砂量を計算すると、 $32,000\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ という途方もない大きな値が得られる。

3. 土砂生産源の特徴

(1) 崩壊地の分布及び面積変化

空中写真によって判読した高瀬ダム流域の崩壊地分布を図-1に示す。土砂の主要供給源である崩壊地は、熱水変質・破碎質の脆い花崗岩類が分布する湯俣川(崩壊面積率 15%)および濁沢(同 25%)・不動沢(同 20%)の流域に集中している(図-1)。

これら崩壊地の岩盤は火山岩類の貫入に伴う熱水変質作用および破碎作用を受けており、細かい割れ目が発達しているとともに、割れ目に沿ってイライト、クロライト、モンモリロナイト、沸石等の粘土鉱物が存在し、劣化が深層までおよんでいる。斜面崩壊の状況は大別すると、岩盤が熱水変質作用・風化作用により

土砂化している軟質岩盤部、細かい割れ目が密に発達したクラッキー岩盤部、流れ目の不連続面に沿って崩落が生じている平面スベリ部が代表的なものである。これら崩壊部は雨水の浸透と冬期の凍結・融解の繰り返し作用等により風化が促進され、著しい強度低下をきたしている。

5 年毎の空中写真を用いて判読した濁沢・不動沢および湯俣川における崩壊地面積の長期的な経年変化を図-3に示す。この図によれば、1969年に崩壊面積が1.3~1.5倍程度に急増している。これは、1969年8月の豪雨によって主に既存の斜面崩壊が拡大したものである。当時の崩壊地現地調査によれば、平均崩壊深は約1mと見積もられている。その他の1982年、1983年および1995年等には調整池への大量の土砂流入があったにもかかわらず、崩壊地面積には大きな変化は認められない。1969年を除けば崩壊地面積の拡大および縮小はそれぞれ1~4%程度の範囲となっている。これらの崩壊地は特異な地質条件に強く支配されて発生しているために、既存の崩壊地内で崩壊が繰り返し発生するとともに、崩壊面積の縮小や拡大もほとんど既存の崩壊地の境界付近で生じており、崩壊地の一部植生回復と回復部の再崩壊を繰り返している。

1969年8月降雨に関して、京都大学富山地区災害調査グループによる雨量分布の考察¹⁾を参考として作成した時間降雨強度とそれを含む積算雨量の関係曲線に、高瀬ダムにおける1982年、1983年および1995年のスネーク曲線を書き加えて図-4に示す。これより1969年の降雨が他の年と比べて降雨強度・積算雨量ともに、いかに激しいものであったかがわかる。ど

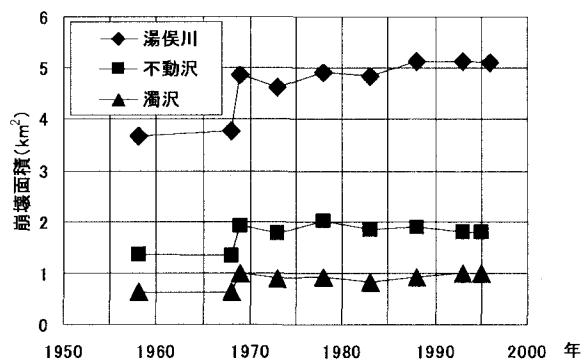


図-3 崩壊地の面積の推移

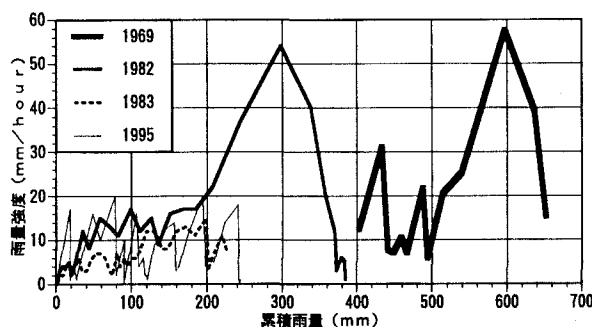


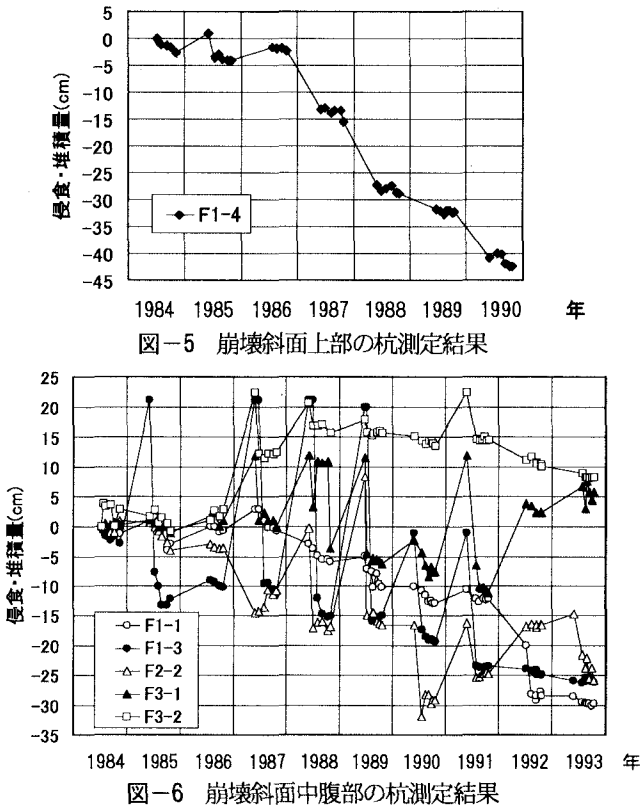
図-4 高瀬ダム流域の降雨曲線(中断が6時間以内の降雨)

のような降雨が発生した時に崩壊が大幅に拡大するかを検討する上で重要な資料を提供しているものと考えられる。

(2) 杭測定結果に基づく崩壊斜面の侵食の特徴

1984 年以来、不動沢において、熱水変質作用により軟質化した勾配 45° 程度の 3 箇所の岩盤斜面の地山部に杭(φ12~16mm、長さ 40~60cm の鉄筋)を設置し、崩壊斜面における侵食・堆積がどのようになっているかを観測した。観測時期は梅雨期の 6 月から降雪前の 10 月末までの期間で、月 1 回を定期観測とし、大雨直後についても随時観測した。測定結果の一例を図-5、図-6 に示す。これらによると、杭を設置した斜面の位置や時期・微地形により侵食や堆積の変化に差異が認められ、概ね以下のように特徴づけられる。

- a) 崩壊斜面上部では侵食が進行しており、降雨期(6 月から 10 月)よりもむしろ降雪期~融雪期(11 月~6 月)の間で侵食量が大きくなっている。1986 年から 1990 年の間の平均値で見ると、降雨期が 1.7cm/年に対して融雪期 8.6cm/年となっている。
- b) 崩壊斜面中腹部では堆積と侵食を繰り返している。すなわち降雪期~融雪期の間には斜面上部からの侵食土砂が堆積し、梅雨期の比較的初期の強い降雨により堆積物は流失し、最大 15cm 程度の地山侵食に転じている。さらにその後の降雨により侵食または堆積を生じている。堆積と侵食の振幅が大きいデータ(F1-3, F3-1)はスプーン型の地形で地表水が集まりやすく土砂がたまりやすい位置のものであり、経年的に侵食傾向にあるもの(F1-1, F2-2)は沢状地形部のものである。



c) 以上より、軟質化した地質の裸地斜面では、積雪前および融雪後の凍結・融解の繰り返しや雨水の浸透等により斜面表層の劣化が進行し、剝削が活発に行われているものと考えられる。融雪期の降雨や自重による剝落、雪の移動等により、上部斜面が侵食を受けて土砂が下方に移動・堆積する。そして、斜面下部の沢付近の積雪がなくなる 6 月以降の比較的大きな降雨により、斜面上の堆積土砂は下部に移動するとともに、地山も侵食を受け、河床に流入するものと考えられる。なお、堆積土砂の一部は斜面上に残留したまま越年するものもある。

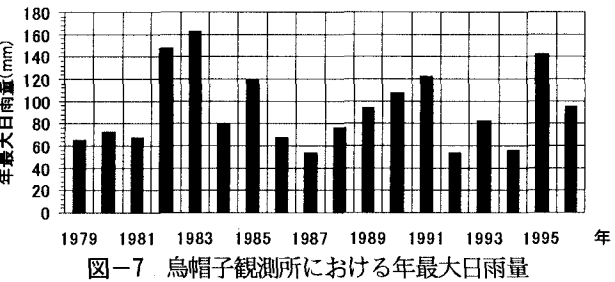
4. 山地河川流域における土砂移動の特徴

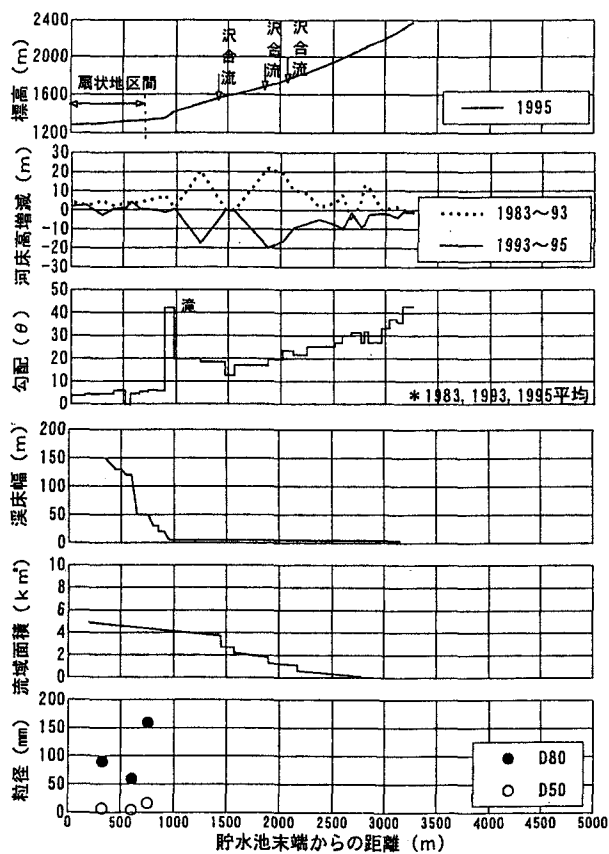
(1) 流域における侵食と堆積

濁沢・不動沢流域および湯俣川を含む本川流域の崩壊地および河床の変化を空中写真を用いて調べた。空中写真は 1983 年 10 月、1993 年 10 月および 1995 年 10 月(湯俣川は 1996 年 10 月)に縮尺 1 万 5 千分の 1 で撮影されたものを用いた。ここに、1983 年の写真は高瀬ダム完成後における最大の降雨(900mm/月)があり、貯水池に最大の土砂流入があった直後のものである。1993 年の写真は、1992 年~1993 年の 2 年間、比較的降雨が少なく、貯水池への土砂の流入が少なかった年が続いた後の写真である。1995 年の写真は、大きな降雨(800mm/月)と貯水池に大量の土砂流入が生じた直後のものである(図-2、図-7)。

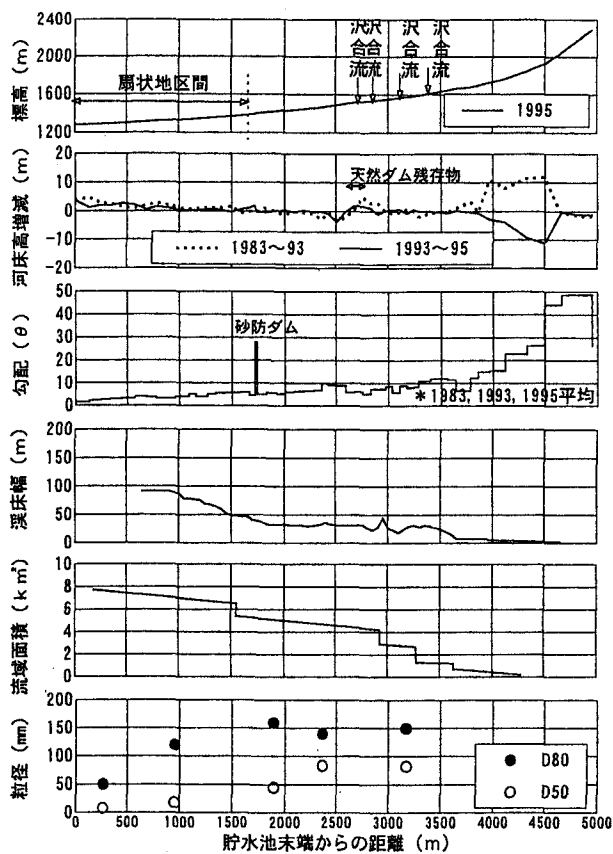
デジタル写真測量によって 20m ピッチで計測した上記 3 時期の崩壊地および河床の標高値データから各期間の地形変化量を求め、さらに 5m ピッチの内挿処理を行うことにより、堆積と侵食量の分布を表わす差分画像を作成した。これらの地形解析に当たっては、A/D 変換時の画像の歪による誤差を極力除去するために、解析図化機によるランダムチェック計測を行い、補正を行った。地形解析結果を既存構造物の標高と比較したところ、誤差は 40cm 程度以下であった。濁沢、不動沢および湯俣川を含む本川の河床標高の変化を 100m ピッチの解析図化機によるデータを用いて河床縦断面図に表わしたものを図-8 に示す。これらより、濁沢・不動沢および湯俣川流域の崩壊斜面および河床の変化は概ね以下のように特徴づけられる。

- a) 崩壊斜面部は全期間を通じて、ほとんどの場所で侵食となっている。その大きさは様々であり、かなり

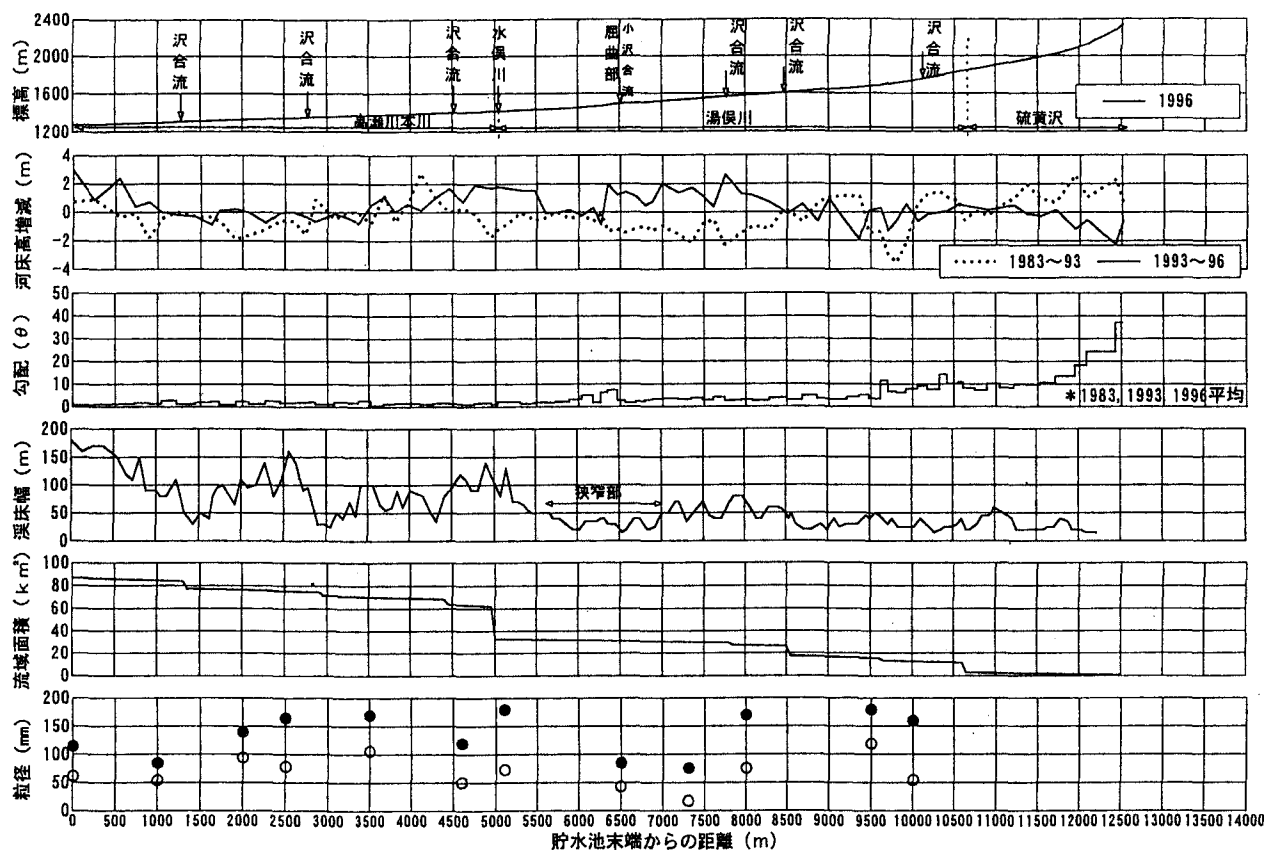




(a) 濁沢



(b) 不動沢



(c) 湯俣川を含む高瀬川本川

図-8 河床の侵食・堆積状況縦断面図

規模の大きい崩壊が生じている箇所も認められる。斜面内で一時的な土砂の堆積が生じている箇所があるが、崩壊・侵食土砂が集まり易い沢地形部や斜面勾配が緩くなった変化点等である。

b) 1983 年から 1993 年の期間では、濁沢の滝より上流部(追加距離 1000m 以上)および不動沢の最上流部の沢(追加距離 3800m 以上)で大規模な河床上昇を生じており、その後の期間では侵食に転じ、堆積物の大部分が流出している。これらの場所は、いずれも大規模な崩壊地に接しているために河床への土砂供給が豊富で、かつ集水面積が小さいために通常期の河川流量が少ない場所である。河床勾配は 15°以上となっている。また、川幅が非常に狭く、険しい斜面下で日照時間も短い。現地での観察によれば、巨大な転石に土砂がせき止められたり、河床が雪水で覆われて凍結しているために、通常時は土砂はあまり流出することなく蓄積しており、大降雨時に冰雪もろとも土石流となって流出するものと考えられる。濁沢および不動沢の 1983 年から 1993 年の間における上記区間の堆積量はそれぞれ約 26 万 m^3 および 10 万 m^3 となっている(表-1)。ただし、河床付近の冰雪の存在を考慮すると、実際の土量はこれよりやや少な目であると考えられる。

c) 不動沢における追加距離 TD3900m から 1700m 区間の河床(勾配 7~15°)では、沢との合流点付近および河床勾配、川幅の変化点付近で堆積と侵食が生じている。これらの場所では洪水時に一時的に河床上昇が生じるが、両期間を通した長期間では変動はそれほど大きくない。なお、TD2600m 付近には 1978 年 7 月に右岸斜面の崩壊により、高さ 35m 程度の天然ダムが出現したが、約 1 ヶ月後には決壊している。

d) 湯俣川を含む本川では崩壊地に接する最上流の区間(TD11200m 以上)において前者の期間に堆積が生じ、その後の期間では侵食に転じている。また、これより下流部は濁沢・不動沢流域と異なり、勾配が緩く川幅が激しく変化する区間が長く続いており、沢との合流点付近および川幅、河床勾配の変化点付近で、前者の期間に河床の侵食が、また後者の期間では堆積傾向が見られ、一種の土砂流出の調節機能を有した区間

であるような特徴が見られる。なおこれらの各期間内には様々な降雨や出水現象が含まれているために、一時的にはさらに大きな河床の変動が生じていると考えられる。この河床変動の詳細な特性については今後さらに短い時間スケールで解析を実施する予定である。

e) 濁沢の TD1000m より下流および不動沢の TD1700m より下流の貯水池までの区間(勾配 2~7°)は扇状地形となっており、両期間を通じて堆積が卓越している。貯水池への流入部付近の堆砂形状の変化を図-9 に示す。これより、貯水池の直上流部の河床は、貯水位の影響も受けながら上昇傾向にあることがわかる。

(2) 流域における土砂の収支

空中写真測量による濁沢・不動沢および本川流域における崩壊地と河床の侵食・堆積量の土砂収支から算出される高瀬ダム貯水池内へ流入土砂量を、深浅測量による現地実測値と比較すると、表-1 のとおりであり、両者は概ね一致している。

土砂の供給源の大部分は崩壊斜面であり、その流出土砂量は降雨の大きさとともに降雨の履歴によって異なる。崩壊地の侵食土砂の一部は、崩壊斜面内および崩壊地直下の沢部等で一時貯留し、その後の著しい降雨時に流出する。1983 年から 1995 年の 12 年間で見ると、斜面から流出した土砂の大部分が貯水池内および貯水池流入部の扇状地に堆積している。湯俣川を含む本川では 1993 年から 1996 年の 3 年間に 13 年分の斜面侵食の半分以上が発生している。これは濁沢・不動沢に比べて崩壊地斜面の勾配が緩いこと等から、毎年継続的に発生する凍結融解に起因する融雪期の自重による崩落侵食よりも、むしろ降雨期の侵食が卓越しているためと考えられる。

1983 年~1995 年の 12 年間の空中写真測量による崩壊斜面部の侵食量より、濁沢・不動沢における崩壊斜面の年平均侵食深を求めると 8.8cm/年となる(表-2)。貯水池の堆砂量からの算定値 7.6cm/年に比べてやや大きい値となっているが、この差分は扇状地形部等の河床部への堆積量(約 67 万 m^3)にほぼ一致する。湯俣川における崩壊斜面部の年平均侵食深は 2.9cm/年

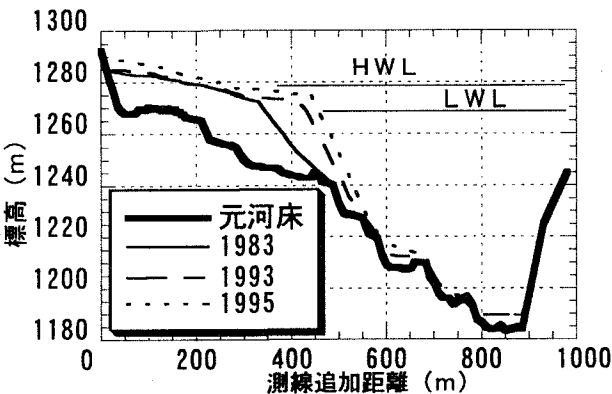


図-9 貯水池流入部付近堆砂形状の変化

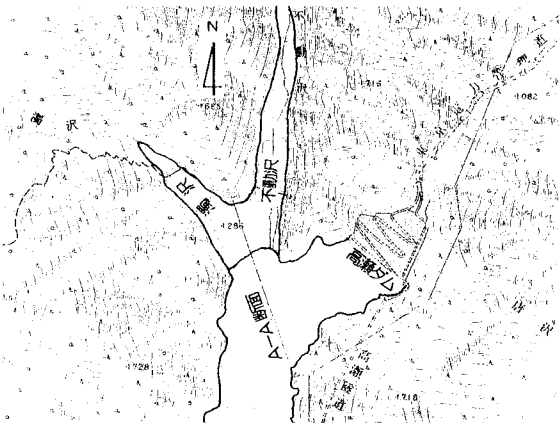


表-1 空中写真測量結果に基づく流域の土砂収支 (×10³m³ +堆積 -侵食)

流域名	位置	1983～1993	1993～1995	1983～1995	備 考
濁 沢 ・ 不動沢 流域	崩壊地斜面	-1,143 (121)	-464 (99)	-1,561 (111)	斜面の土砂量は、ほぐれ率1.3を乗じた値 ()内の数値は、斜面内の堆積土砂量(内数)を示す
	河床(θ ≥ 15°)	222	-258	-36	大部分はθ < 7°の扇状地形部
	河床(θ < 15°)	280	289	568	
	計	-641	-433	-1,029	
	不動沢 崩壊地斜面	-1,563 (126)	-853 (82)	-2,303 (73)	斜面の土砂量は、ほぐれ率1.3を乗じた値 ()内の数値は、斜面内の堆積土砂量(内数)を示す
	河床(θ ≥ 15°)	64	-104	-33	大部分はθ < 7°の扇状地形部
	河床(θ < 15°)	147	439	586	
	計	-1,352	-518	-1,750	
濁沢・不動沢流域合計		-1,993	-951	-2,779	貯水池内流入土砂量(HWL以下)に相当
貯水池内実測堆砂量(HWL以下)		2,176	651	2,827	濁沢・不動沢流域分
流域名	位置	1983～1993	1993～1996	1983～1996	備 考
高瀬川 本川 流域	湯俣川 崩壊地斜面	-1,081 (342)	-1,328 (431)	-2,340 (394)	斜面の土砂量は、ほぐれ率1.2を乗じた値(濁・不動 沢に比べて、崩壊地は土砂化した軟質岩盤部の比 率が高いこと、斜面内での中間貯留土砂の侵食分 が多いことを勘案してほぐれ率を若干小さくした) ()内の数値は斜面内の堆積土砂量(内数)を示す
	河床(θ ≥ 15°)	146	61	202	ほぐれ率1.2を乗じた値(同上) ()内の数値は、斜面内の堆積土砂量(内数)を示す
	河床(θ < 15°)	64	70	135	
	計	-871	-1,197	-2,003	
	その他 崩壊地斜面	-223 (37)	-320 (25)	-530 (17)	ほぐれ率1.2を乗じた値(同上) ()内の数値は、斜面内の堆積土砂量(内数)を示す
	河床(θ ≥ 15°)	38	32	69	
	河床(θ < 15°)	149	216	365	
	計	-36	-72	-96	
高瀬川本川流域合計		-907	-1,269	-2,099	貯水池内流入土砂量(HWL以下)に相当
貯水池内実測堆砂量(HWL以下)		672	1,296	1,968	高瀬川本川流域分

表-2 崩壊地侵食量から算定した崩壊斜面の年平均侵食

[cm/年]			
流域名	1983～1993	1993～1995	1983～1995
濁 沢	8.8	17.8	10.0
不動沢	6.7	18.2	8.2
濁・不動沢全体	7.4 (6.4)	18.1 (13.1)	8.8 (7.6)
流域名	1983～1993	1993～1996	1983～1996
湯俣川	1.8	7.2	2.9
その他	1.0	4.8	1.8
本川全体	1.6 (0.9)	6.6 (5.6)	2.6 (2.0)

()内は貯水池堆砂量からの換算値

となる。崩壊地の平均侵食深は、濁・不動および本川のすべてについて、1993～1995 (1996) の期間で他の期間の値を大幅に上回っている。このことは、崩壊地の侵食機構を考察する上で重要な材料を与えていると判断される。

5. おわりに

急峻で土砂の流出が活発な山地河川流域の土砂の生産・流送過程を、高瀬ダムの濁沢・不動沢流域を対象として検討した。本研究によって得られた結論は以下のとおりである。

(a) 高瀬ダムの流域は花崗岩類が分布する、30°以上の急勾配岩盤斜面から成っている。崩壊はこのうち火山岩類の貫入による熱水変質作用を強く受けた領域に集中している。崩壊地は通常年では面積の拡大・縮小はそれぞれ 1～4%程度であり、全体面積の変化は大きくない。しかし、極めて強い雨が長時間にわたって大量に降った場合は崩壊地の大幅な拡大が発生する。

(b) 既存の崩壊斜面においては、冬期から融雪期と降雨期の両方の期間において侵食が生じている。急勾配斜面の上部では主に前者の期間に凍結融解等によると考えられる侵食が卓越している。斜面中腹部では、前者の期間に土砂が堆積し、その後積雪がなくなる後者

の期間に強い降雨により堆積土砂が流出するとともに地山の侵食が生じている。また、沢地形部や緩勾配部には、越年して斜面上に堆積土砂が残留している。崩壊地斜面の侵食・堆積の大きさは地質とともに微地形の影響を強く受ける。

(c) 崩壊地が集中する上流部の急勾配沢部 (15°程度以上) には、大規模な土砂の堆積が生じる。これらの場所には大量の土砂供給とあわせて、河川流量が少ないこと、川幅が狭いため巨大転石でせき止められやすいこと、日照時間が短く夏期も河床に氷雪が残り凍結していること等が土砂が流出しにくい原因と考えられる。これらの崩壊斜面下部および河床の堆積物は著しい降雨時に大部分が流出する。

(d) 緩勾配で川幅が激しく変化する河床区間が長い本川では、沢との合流付近および川幅、河床勾配変化点付近において洪水時に土砂が一時的に貯留され、その後の期間に侵食される一種の土砂流出調整機能を有した区間であるような特徴が認められる。貯水池流入部の扇状地部は貯水位の影響を受けつつ堆積傾向にある。(e) 崩壊地部および河床の土砂収支は、貯水池内の実測堆砂量と概ね釣り合っている。長期的に見れば、土砂の供給源の大部分は崩壊地斜面であり、その年間侵食深は、濁沢・不動沢では平均 8.8cm/年、湯俣川では 2.9cm/年と算定される。

謝辞：本研究を進めるにあたり、特に空中写真の解析に多大なご協力をいただいた東電設計(株)岡信彦氏、日本工営(株)、アシア航測(株)の関係者に感謝致します。

参考文献

- 1) 京都大学防災研究所富山地区災害調査研究グループ：昭和 4 年 8 月水災害の総合的調査研究報告書,pp.39-93,1970.

(1999.9.30 受付)