

西丹沢ヌタノ沢における濁度計による浮遊土砂観測結果

内山佳美*・横山尚秀*・三橋正敏*・島田武憲*

Suspended sediment observation using a turbidity meter in Nutanosawa Watershed in Tanzawa Mountains

Yoshimi Uchiyama*, Takahide Yokoyama*, Masatoshi Mitsuhashi*
and Takenori Shimada*

I はじめに

丹沢山地では、近年のニホンジカ（以下、シカという。）の高密度化や人工林の手入れ遅れにより森林の下層植生が衰退し、降雨に伴って土壌侵食が発生している。このため、神奈川県では、水源かん養機能等の森林の公益的機能の観点から、人工林の間伐やシカの管理を行い、衰退した下層植生を回復させて土壌を保全する対策を推進している（神奈川県、2016）。

下層植生回復による水源かん養機能改善効果の一つとして、流域内斜面の降雨に伴う土壌侵食量が減少することによって、溪流を流下する土砂のうち粒径が小さく渓流水中を浮遊・懸濁した状態で流下する細粒土砂（浮遊土砂）の量が減少すると予想される（内山ほか、2013a）。しかし、シカによる下層植生衰退地における地表流流出量や土壌侵食量の実態とそれに基づく斜面スケールの土壌流出機構はすでに解明されているものの（若原ほか、2008、初ほか、2010、海虎ほか、2012）、流域スケールにおける斜面の土壌侵食に由来する溪流の浮遊土砂流出は、多くの要因が関係し単純でなく、実態を把握した例も限られる（石川ほか、2013 など）。

溪流における浮遊土砂観測には、直接濁水を採取して土砂濃度を測定する手法、濁度計により間接的に測定する手法等が用いられる。特に連続観測といった面では濁度計による手法が有効であるが、測定環境の変動も大きく測定精度の確保が課題である

ほか、濁度計の粒径依存性にも留意が必要である（田村ほか、2016）。こうしたことから、個々の溪流における実際の浮遊土砂観測において、実務面での手法を確立していく必要がある。

酒匂川水系三保ダム上流域のヌタノ沢では、2000年代以降にシカが増えて下層植生が衰退したことから、現在は、植生保護柵によりシカを排除した流域とシカを排除しない流域との隣り合う2流域の比較試験により、県が実施するシカ対策による下層植生回復と下流への水や土砂の流出への効果について検証を進めている。2014（平成26）年4月に植生保護柵が設置された流域は、現在、下層植生の回復途上にあり、今後は浮遊土砂流出等の変化を検証する段階となる。そこで、今後の検証に先立ち、ヌタノ沢における2011（平成23）年4月～2016（平成28）年12月までの濁度計による浮遊土砂観測の結果を整理し取りまとめた。

II 調査方法

1 試験流域の概況

試験流域は、酒匂川水系三保ダム上流、中川川右岸の標高530～705mに位置する（北緯35°28'N, 東経139°03'E）ヌタノ沢試験流域である（図1）。流域面積は、A沢が3.8ha、B沢が3.1haであり、各流域末端に量水堰が設置されている（図2）。下流側の尾根の緩傾斜地を中心にスギやヒノキの人工林が分布し、それ以外の急傾斜地はイヌシデ等の落

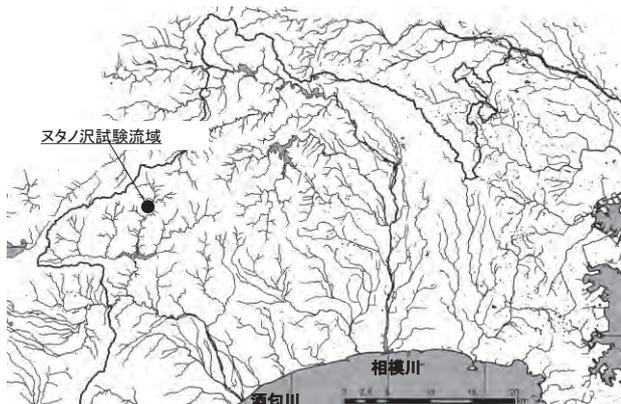


図1 位置図

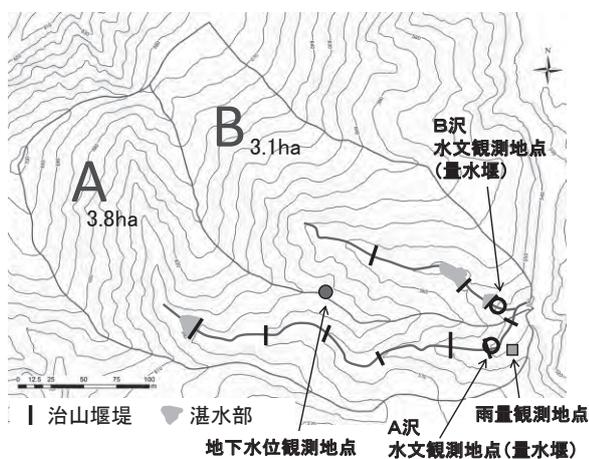


図2 ヌタノ沢試験流域

葉広葉樹、また両流域の間の尾根の上流側にはウラジロガシ等の常緑広葉樹が分布する。シカの影響で下層植生はほとんど無いかミツマタ等のシカの不嗜好性種が部分的に繁茂し、急傾斜地を中心にリター堆積も少なく土壌侵食がみられる。一方、植生保護柵で囲まれたA沢の流域内は、特に2015(平成27)年頃から下流側の沢沿いを中心に柵の無いB沢と比べて下層植生や低木が顕著に増加しつつある。

両流域は東方に平行して開けた隣り合う急峻な谷であるが、A沢よりもB沢の河床のほうがやや低い。地質は主に石英閃緑岩で風化が進み、北東～南西方向の節理が発達している。このような地形や地質の特徴が、各流域の流況、すなわち流程変化および時系列変動においてA沢は不安定でB沢は安定的といった流出特性に影響している(横山, 2013)。また、両流域とも河道には複数の治山堰堤が設置されており(図2)、A沢では最上流の1基以外はすべて満砂・伏流し河道の大部分が浸透域であるが、B沢は最上流の1基を除いてすべて湛水し、源頭の湧水から流

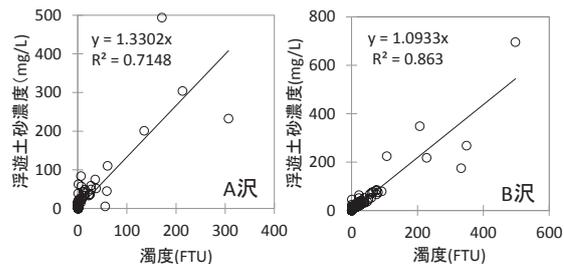


図3 採水試料の浮遊土砂濃度と濁度の関係

域末端までほぼ水流が連続する。このような河道の状態の相違は、流域ごとの短期流出の特性、特に直接流出量にも影響している(内山ほか, 2015)。なお、年平均降水量は2311 mm (2012～2016年)、年平均気温は12℃である。

2 降雨量・流量

2011(平成23)年3月に整備された観測施設(内山ほか, 2013b)によって、降水量は、A沢の量水堰付近にてヒーター付き転倒ます式雨量計(太田計器製作所OW-34-BP)により10分間隔、流量はA沢及びB沢の各量水堰において圧力式水位計(ウジン製UIZ-GY1000A)により10分間隔で水位を測定し流量に換算した(内山ほか, 2015)。

3 濁度

濁度は、各量水堰に設置されたワイパー付きの透過光式濁度計(OPTPREX製TC500)により10分間隔で測定し、センサ出力値をホルマジン度(FTU)に換算した。なお、センサの測定範囲は0～500FTUである。また、降雨や大きな水位変動の無いときに、前後の値とは不連続に1～3データのみ数十や数百の高い濁度値が記録されたものは異常値として扱った。

4 浮遊土砂量

2013(平成25)～2016(平成28)年にかけて各量水堰に設置した自動採水器により出水の前後を通して1または2時間間隔で渓流水を採取し、持ち帰った試料を事前に乾燥重量を測定したフィルター(1.0 μm)を用いて吸引濾過した後、フィルターを乾燥・秤量して浮遊土砂量を求め試料量で除して浮遊土砂濃度を求めた。採取できた全9回の出水の試料(計180試料)の浮遊土砂濃度と同時刻に観測された濁度の関係(図3)から、連続測定で得られ

た濁度の値を浮遊土砂濃度に換算し、それに流量を乗じた値を浮遊土砂量とした。なお、濁度計の粒径依存性を考慮し、流域ごとに浮遊土砂濃度と濁度の関係を求めた。

Ⅲ 調査結果

1 濁度の連続観測の概況

平水時の濁度は、A 沢、B 沢ともに 2FTU 以下であった。降雨に伴う増水時にはピークが数十～数百 FTU に達する濁度の顕著な上昇がみられ、その後の減水に伴い降雨前の濁度の値に戻った。また、台風等による断続的な降雨の間は、降雨強度の変化に流量が

鋭敏に反応して増減するが、同様に濁度も増減した(図 4)。増水時に量水堰の一部に土砂が堆積した場合も、減水後に高い濁度が継続することは無く降雨前の濁度の値に戻った。

このような濁度上昇事例の件数をみると、総降雨量 1 mm 以上の降雨イベント(年間総件数 90 件程度)に対し、明らかな濁度の上昇は年間で十数回程度認められた。その内訳をみると、発生時期では四季を通じて発生し、特に台風等により大雨が多く発生する夏季(7～9月)の件数が最も多かった。さらに年間で 0～2 回は、量水堰への土砂堆積が伴い(ただしすべて A 沢のみ)、濁度計の測定範囲を超える高濃度の濁度も年間で 0～2 回発生した(表 1)。

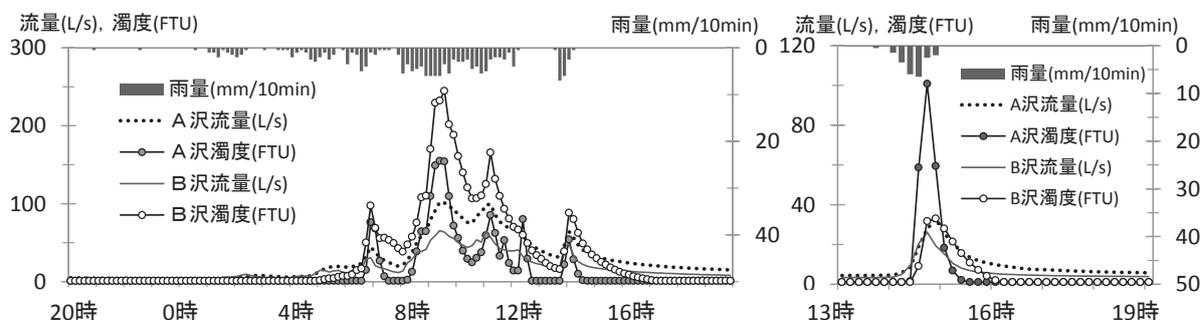


図 4 増水時の降雨量・流量・濁度の観測事例(10分間隔測定値)

左: 2015年9月8日20:00～9月9日19:50(総降雨量165mm、最大時間雨量7.0mm)

右: 2015年7月24日13:00～19:00(総降雨量22.5mm、最大時間雨量22.0mm)

表 1 年間の浮遊土砂の発生件数と季節等の内訳

年	年間発生件数	発生季節内訳				観測属性内訳						ヒステリシス内訳							
		冬季	春季	夏季	秋季	A沢			B沢			A沢			B沢				
						初期流量なし	堰への土砂堆積あり	濁度測定範囲越え	初期流量なし	堰への土砂堆積あり	濁度測定範囲越え	時計まわり	反時計まわり	その他	発生なし・わずか	時計まわり	反時計まわり	その他	発生なし・わずか
2011	15	0	6	6	3	0	2	2	0	0	1	8	0	6	1	0	9	6	0
2012	13	4	4	3	2	0	2	2	0	0	1	6	4	3	0	0	9	1	3
2013	11	2	3	5	1	0	1	2	0	0	0	3	4	0	4	4	6	0	1
2014	12	2	1	6	3	6	0	0	0	0	0	3	1	2	6	3	6	3	0
2015	14	0	3	8	3	1	1	1	0	0	1	2	4	7	1	1	10	3	0
2016	16	0	2	9	5	3	1	1	0	0	1	3	1	4	8	2	11	3	0
計	81	8	19	37	17	10	7	8	0	0	4	25	14	22	20	10	51	16	4

※2011は1～3月を除く。2011.7.19、2011.9.2～4の出水はデータ欠測のため件数に含まず。

※発生季節の区分は、冬季1～3月、春季4～6月、夏季7～9月、秋季10～12月。

※ヒステリシスの区分のうち、その他は、八の字、直線、複雑型など。

また、流量と濁度の時系列推移（ヒステリシス）の出現タイプを見ると、A沢とB沢で傾向が異なり、A沢では比較的時計まわり（図5）が多いが他のタイプもある程度見られ、一方B沢は反時計まわり（図5）が全体の6割以上と突出していた（表1）。たとえば、谷ら（2012）によるとヒステリシスには浮遊土砂供給機構の違いが反映され、河床堆積物や溪岸の土砂が増水に伴って供給された場合には浮遊土砂流出が流量のピークに先行する時計まわりのヒステリシスが出現し、上流部の斜面の侵食により供給された場合には出水の後期に浮遊土砂流出が多くなる反時計まわりのヒステリシスが出現するとされている。しかし、ヌタノ沢の特にB沢には堰堤の湛水部が2か所あり、少なくとも河道降雨により降雨初期に速やかに流量が増加することに加え、河道の湛水部によって浮遊土砂濃度の上昇の時間遅れが予想されるため、このような河道の状況もヒステリシスに反映していると考えられた。

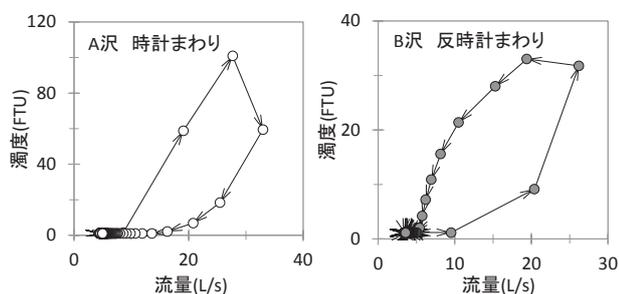


図5 流量と濁度の時系列推移の例（2015年7月24日）

2 降雨量と浮遊土砂量

2012（平成24）～2016（平成28）年の総降水量1mm以上の降雨を対象に、降雨と浮遊土砂量の関係を示した（図6）。1回の降雨イベントあたりの総降水量で見ると、50mm程度までは浮遊土砂量の増加はほとんど見られないが、それ以上になると少量の浮遊土砂流出が見られるようになり、さらに200mmを超えると浮遊土砂量が顕著に多くなる事例が見られた。時間最大雨量（毎正時区切り）で見ると、20mm以上で浮遊土砂量が多くなる事例が見られた。また、A沢とB沢の同程度の降雨イベントにおける浮遊土砂量を比較すると、全般的にB沢よりA沢のほうが多かった。

石川ら（2013）による堂平地区の観測では、同程度の降雨でも春季と秋季に比べて夏季の浮遊土砂量のほうが大きいという季節性が認められている。しかし、図6では季節によって降雨規模が異なり、同程度の降雨に対する浮遊土砂量の季節性までは確認できなかった。

表1の増水時の濁度上昇事例全81件を対象に、降雨と浮遊土砂量の関係をより詳細に調べた。ただし、A沢に関しては、初期流量（降雨開始直前の流量）がゼロ、すなわち渇水で水が枯れた状態（量水堰の越流が無い状態）から増水したもの全10件を除いた。図7から、総降水量と浮遊土砂量、最大時間雨量（毎正時区切りでなく任意の1時間）、と浮遊土砂量に関しては相関が認められ、最大時間雨量

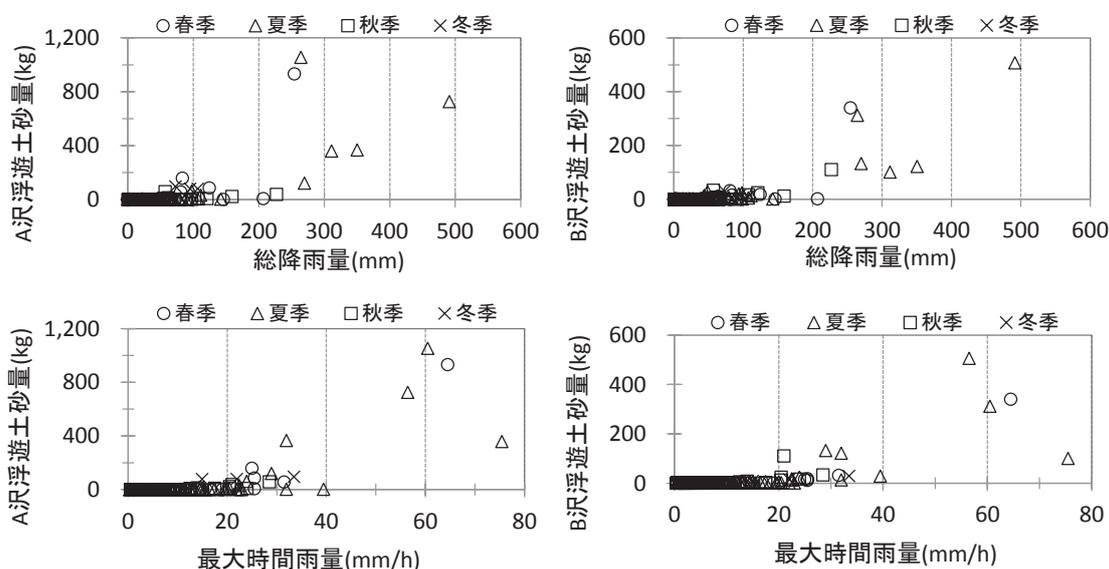


図6 総降雨量、最大時間雨量と浮遊土砂量の関係

5.0 mm/h以下における降雨イベントの浮遊土砂流出事例は無かった。また、最大10分間雨量と浮遊土砂量の相関は比較的弱く、浮遊土砂流出事例の最大10分間雨量の最小値は1.5mmであった(図7)。

3 ピーク流量と浮遊土砂量

ピーク流量、浮遊土砂量ともに指数関数的に増大し、両者の関係には相関が認められた(図8)。こ

れは、石川ら(2013)による堂平地区の浮遊土砂観測と同様であった。また、ピーク濁度とピーク流量の関係については、浮遊土砂量よりも相関は低かった(図8)。ピーク流量はピーク濁度と同様に10分間隔の測定値のピークであるが、ピーク流量には降雨イベントあたりの増水の規模がある程度反映され、浮遊土砂量との相関のほうが高くなったと考えられた。

4 浮遊土砂量の経年変化

比較的相関の高かった最大時間雨量と浮遊土砂量、ピーク流量と浮遊土砂量の関係について、初期流量ゼロと濁度計の測定範囲を超えた事例を除いてそれぞれ経年変化を調べた。最大時間雨量と浮遊土砂量の関係では、両流域ともに年による違いは明瞭でなく、ピーク流量と浮遊土砂量の関係では、B沢は年による違いがないものの、A沢では、特にピーク流量50L/s以下で2014(平成26)年までの浮遊土砂量に比べて2015(平成27)~2016(平成28)年の浮遊土砂量のほうが少なかった(図9)。

この結果に関して、A沢のピーク流量、つまり短期流出の特性のほうに年変動が生じている可能性もあることから、ピーク流量と浮遊土砂量のそれぞれについて、A沢とB沢の値を比較した。A沢とB沢のピーク流量は、多くの降雨イベントで概ね1:1の関係にあり、B沢がA沢を大きく上回ることは無かったが、A沢がB沢を下回る事例は2013、2014、2016年で多かった(図10)。A沢のピーク流量がB

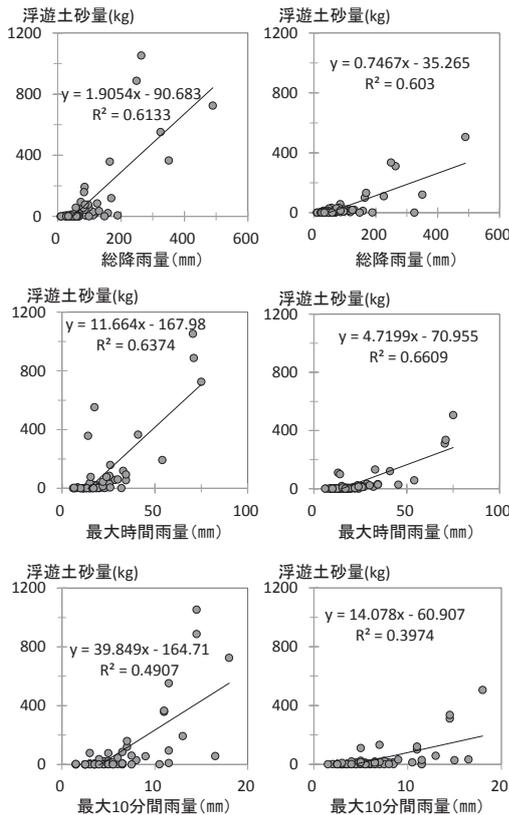


図7 降雨と浮遊土砂量の関係(左:A沢, 右:B沢)

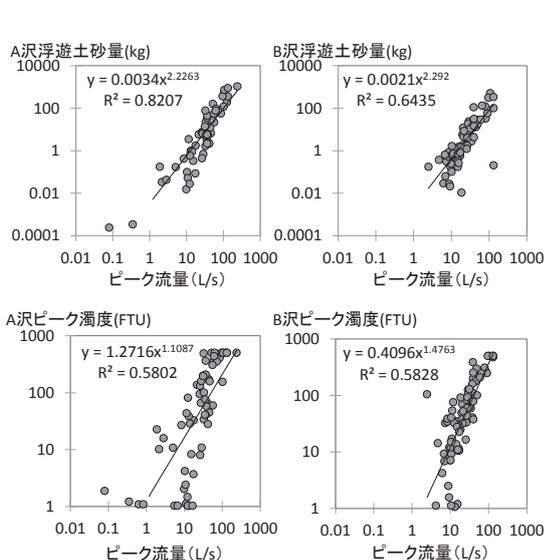


図8 ピーク流量と浮遊土砂量、ピーク濁度の関係

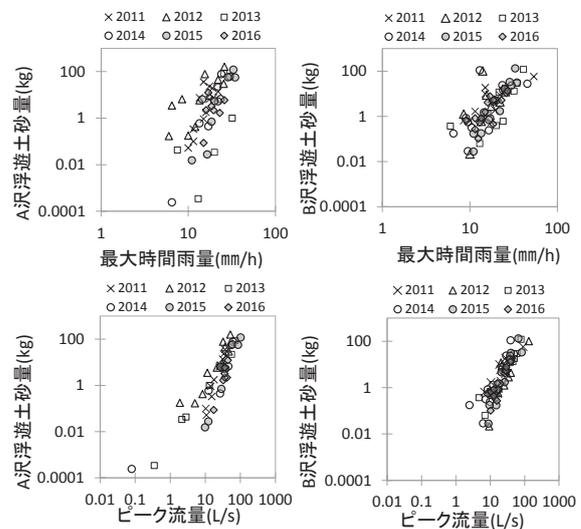


図9 浮遊土砂量の経年変化(上:最大時間雨量と浮遊土砂量, 下:ピーク流量と浮遊土砂量)

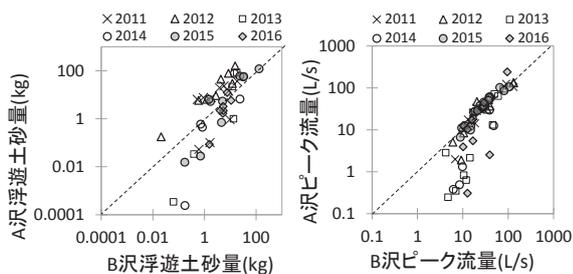


図10 A 沢と B 沢のピーク流量、浮遊土砂量の比較

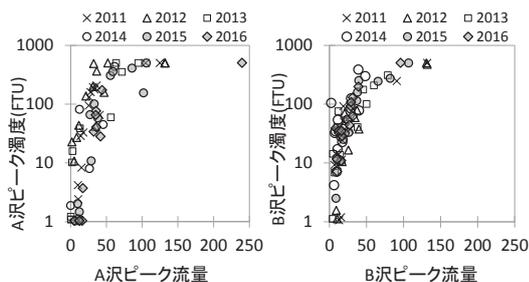


図11 ピーク流量と濁度の時系列変化

沢のそれを下回る現象については、筆者ら (2015) がヌタノ沢の短期流出の特性で指摘したように初期流量の相違が反映したと考えられる。つまり、B 沢では平水時も常に豊富な流量が維持されるが A 沢では湧水時に水が枯れるなど平水時の流量が不安定であることから、それが個々の降雨イベントにおける A 沢の直接流出量さらにはピーク流量のばらつきに反映したと考えられた。

A 沢と B 沢の浮遊土砂量の比較では、B 沢に対して A 沢が上回る事例は、2011、2012 年が多く、B 沢に対して A 沢が下回るまたは同程度の事例は、2015、2016 年が多かった (図 10)。浮遊土砂量は、浮遊土砂濃度に流量を乗じていることから、直接的には流量の加味されていないピーク濁度の値で同様に経年変化を調べた。図 11 から、B 沢のピーク流量とピーク濁度の関係には年による違いは認められない。しかし、A 沢に関しては、特にピーク流量 50L/s 以下の場合に同程度のピーク流量でも 2015、2016 年の濁度の値が低く、ピーク流量と浮遊土砂量の関係の経年変化と同様であった。

以上のことから、B 沢では、2011～2016 年にかけての短期流出と浮遊土砂流出の特性にはほとんど変化が見られないが、A 沢に関しては、年ごとの浮遊土砂量の比較において経年変化に加えて初期流量等の個々の降雨イベントごとの条件の相違も影響している可能性があるため、今後はそれらも考慮して

検証していく必要があると考えられた。

IV まとめ

ヌタノ沢において今後予想される A 沢の流域全体の下層植生回復と、それによる水や土砂の流出の変化の検証に先立ち、観測開始以降の濁度計による浮遊土砂観測結果を整理した。ヌタノ沢における浮遊土砂流出実態として、浮遊土砂は最大時間雨量 5 mm 以上で発生し、最大時間雨量 20 mm 以上、総降雨量 50 mm 以上で浮遊土砂量が増加する事例が見られた。また、両流域の流量と濁度のヒステリシスの相違や A 沢の降雨イベントごとの浮遊土砂量のばらつき等からも、浮遊土砂量と直接流出量等の短期流出は、密接に関係していることが改めて確認された。

今後の浮遊土砂量の変化には、量の経年変化だけでなく、浮遊土砂の発生する降雨や流量等のしきい値の変化、あるいは浮遊土砂の粒径の変化やヒステリシスの出現パターンの変化などの可能性も考えられる。このため、流域内の斜面からの細粒土砂の供給と河道における細粒土砂滞留・浮遊土砂流出といった流域スケールの一連の浮遊土砂流出プロセスを念頭に、直接流出等の短期流出と浮遊土砂流出の変化を一体として検証していく必要がある。

V 引用文献

- 海虎・石川芳治・白木克繁・若原妙子・畢力格図・内山佳美 (2012) ブナ林における林床合計被覆率の変化が地表流出率に与える影響, 日本森林学会誌 94, 167-174
- 石川芳治・内山佳美 (2013) 東丹沢堂平における流域スケールでの土壤保全対策効果の検証, 神奈川県自然環境保全センター報告, 10: 37-45
- 神奈川県 (2016) 第3期かながわ水源環境保全・再生実行5か年計画, 10-11, 48pp, 神奈川県
- 初磊・石川芳治・白木克繁・若原妙子・内山佳美 (2010) 丹沢堂平地区のシカによる林床植生衰退地における林床合計被覆率と土壤浸食量の関係, 日本森林学会誌 92:261-268
- 田村圭司・小菅尉多・内田太郎・永田葉子・小杉賢一朗・水山高久 (2016) 山地河川における浮遊土砂観測の課題と対応, 砂防学会誌, Vol. 69, No. 4: 3-9

- 谷寧人・堤大三・水山高久（2012）流砂観測に基づく土砂移動特性の評価及び土砂供給源の推定, 砂防学会誌, Vol. 65, No. 3 : 21-28
- 内山佳美・山根正伸（2013a）神奈川県における水源環境保全・再生施策の検証方法とその実施状況, 神奈川県自然環境保全センター報告, 10 : 1-12
- 内山佳美・山根正伸（2013b）対照流域法によるモニタリング調査のための観測システムの整備, 神奈川県自然環境保全センター報告, 10 : 13-21
- 内山佳美・横山尚秀・三橋正敏（2015）西丹沢ヌタノ沢の流出特性, 神奈川県自然環境保全センター報告, 13 : 39-47
- 若原妙子・石川芳治・白木克繁・戸田浩人・宮 貴大・片岡史子・鈴木雅一・内山佳美（2008）ブナ林の林床植生衰退地におけるリター堆積量と土壤侵食量の季節変化-丹沢山地堂平地区のシカによる影響-, 日本林学会誌 90:378-385
- 横山尚秀・内山佳美・山根正伸（2013）西丹沢ヌタノ沢の水文地質と流出状況, 神奈川県自然環境保全センター報告, 10 : 101-113