

西丹沢ヌタノ沢の流出特性

内山佳美*・横山尚秀*・三橋正敏*

Runoff characteristics in Nutanosawa Watershed in Tanzawa Mountains

Yoshimi UCHIYAMA*, Takahide YOKOYAMA*, Masatoshi MITSUHASHI*

要 旨

シカの影響により下層植生が衰退した西丹沢ヌタノ沢流域において、植生保護柵を設置してシカを排除したことによる下層植生回復が流出等へ与える効果を検証するため、対照流域法によるモニタリング調査を開始し、あわせて下層植生回復前の流出特性の実態を把握した。その結果、植生や土壌条件に大きな違いのない隣り合ったA沢とB沢の基底流出は、主にそれぞれの源頭の基岩湧水によって供給され、流域末端の流出高で2～10倍程度の違いがあった。丹沢山地の特徴でもある不均一な地質構造が反映し、両流域で湧水の流出経路が異なっていると考えられた。一方、両流域の降雨に伴う直接流出の特性は現状で類似し、直接流出特性には流域の地表条件が反映していた。今後、A沢を囲んで設置した植生保護柵によって両流域の下層植生状態に差が生じると、両流域の直接流出特性にも違いが現れると予想される。また、これらの流出特性から両流域の年間の水収支は異なり、A沢で損失水量が大きく深部浸透等の影響が考えられた。

I はじめに

三保ダムや宮ヶ瀬ダムといった貯水ダムが整備され、水道水源として重要な丹沢山地は、山地形成過程において山塊の衝突・付加や隆起に伴う変形作用を受けたため（有馬ほか，1999）、地質は変化に富み（青池ほか，1997）、多くの断層が発達する（中川，1997）。このような流域の基岩の性質は、一般的に水源地域から下流河川への流出特性と関係し（志水，1980、虫明ほか，1981）、とくに流域の基岩からの流出は無降雨時の基底流出と関係が深い（小杉，2007）。

一方、近年丹沢山地ではニホンジカ（以下シカという。）の生息密度が高く（神奈川県，2012）、シカの採食による下層植生衰退や土壌流出による水源環境の劣化が危惧されたため（丹沢大山総合調査実行委員会調査企画部会編，2006）、現在、神奈川県

はシカの捕獲や植生保護柵設置等の対策により下層植生回復を図っている（神奈川県，2011）。西丹沢のヌタノ沢は、それら対策による水源かん養機能への効果を対照流域法により検証するため、西丹沢を代表する地質である石英閃緑岩地帯に設定された試験流域である（内山ほか，2013）。

下層植生が繁茂し落葉の堆積した通常の森林では地表の浸透能が高く、従来から降雨に伴う面的な地表流の発生はほとんど起こらないとされてきた（平田，1956）。しかし、近年、下層植生が衰退し裸地化した森林では、降雨時に土壌表面の浸透能が低下して地表流が発生することが明らかになっている（辻村ほか，2006、海虎ほか，2012）。これは、森林の水源かん養機能のうちの降った雨を下流にゆっくり流出させる働きの低下をもたらしていると考えられる。現状で裸地化が進んだヌタノ沢において、今後、下層植生が回復することにより降雨

* 神奈川県自然環境保全センター 研究企画部研究連携課（〒243-0121 厚木市七沢657）

時の地表流の発生が抑制され、流域スケールの流量観測結果でみると降雨に反応して比較的短期間にみられる直接流出量が低減するなどの変化が現れる可能性がある。

ヌタノ沢では、平成26年4月に一方の流域を植生保護柵で囲みシカを排除する対策が完了し、現在は対策後の変化の検証段階にある。そこで、本稿では、対策実施前の平成25年までの観測結果を基に、これまで把握されてこなかったヌタノ沢の流出特性について取りまとめ、両流域の下層植生回復前の流出特性を比較検討する観点から基底流出および直接流出の特性について考察した。

II 試験流域の特性

ヌタノ沢流域は、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）全体で約7haの試験流域である（図1）。地質を主に構成する石英閃緑岩は

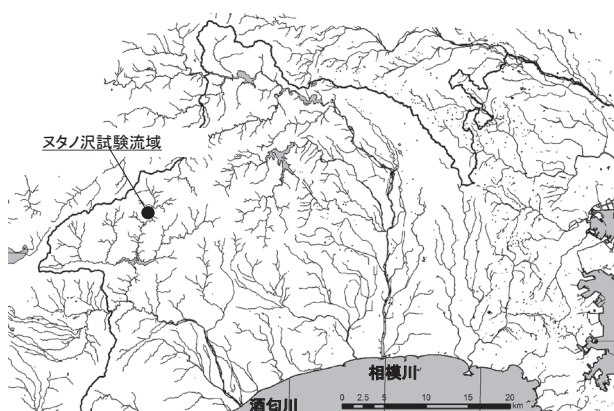


図1 位置図

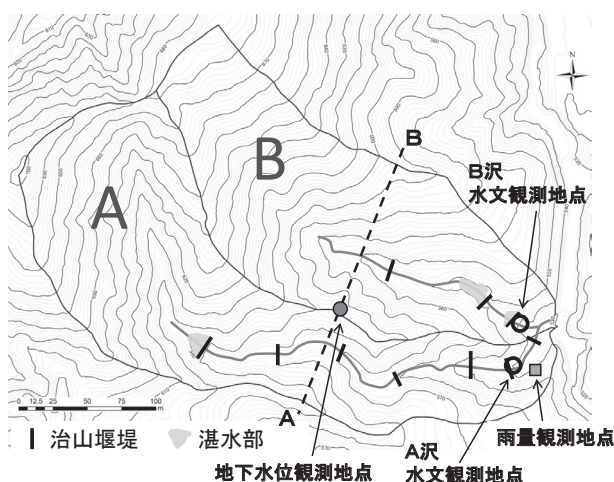
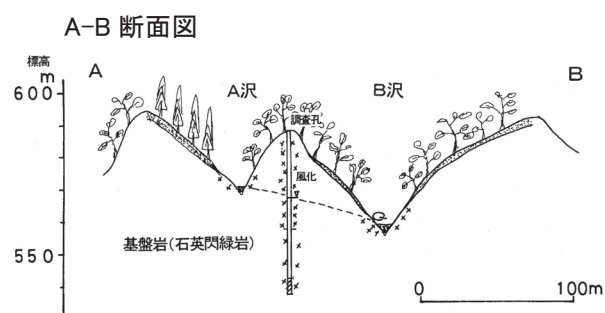


図2 ヌタノ沢試験流域
断面図は、横山ほか（2013）より

風化が進み、この辺りで卓越する北東-南西方向の節理を反映したリニアメント構造が尾根部の地形にみられる（横山ほか，2013）。東方に開ける2つの谷は、全般的に急峻であり、とくに南側のA沢の上流部は深いV字谷を呈している。一方、北側のB沢の上流部は源頭部に露出した壁状の閃緑岩を境にそれより上流は急峻な扇状の地形となっている。昭和47年の豪雨災害の復旧のため両流域ともに昭和47、48年度に治山堰堤が複数施工され、平成16、17年度施工と合わせて現在はA沢で7基、B沢で5基の治山堰堤がある。これら治山堰堤は、A沢では平成17年度施工の最上流の堰堤を除きすべて満砂しており、堰堤の堆砂域において表流水が浸透しているために源頭部から流域末端まで水流が連続しない期間がある。一方、B沢では昭和48年度施工の最上流の堰堤を除き、各堰堤は完全には満砂せず湛水しているため、年間を通して源頭部から流域末端まで水流はほぼ連続している。

林相・植生や土壌条件は両流域で大きな違いはなく、流域の大部分を占める急傾斜地では、土壌厚は数十センチ以下と薄く、アカシデ、ケヤキ等をはじめとした広葉樹林が分布する。流域を囲む尾根は下流側が比較的平坦な台地状であり、土壌厚も3mと厚くスギやヒノキが成立している（横山ほか，2013）。シカの生息密度は、平成21年度以降も5～14頭/km²で推移し（神奈川県，2014）、累積的な採食圧のために林床の植生は乏しく、治山堰堤の堆砂域の一部など光環境の良好な箇所を中心にミツマタやマツカゼソウ等のシカの嗜好性植物がみられる。年平均気温は、平成24～25年の観測でおよそ12℃であり、冬季の1～2月には積雪もみられる。



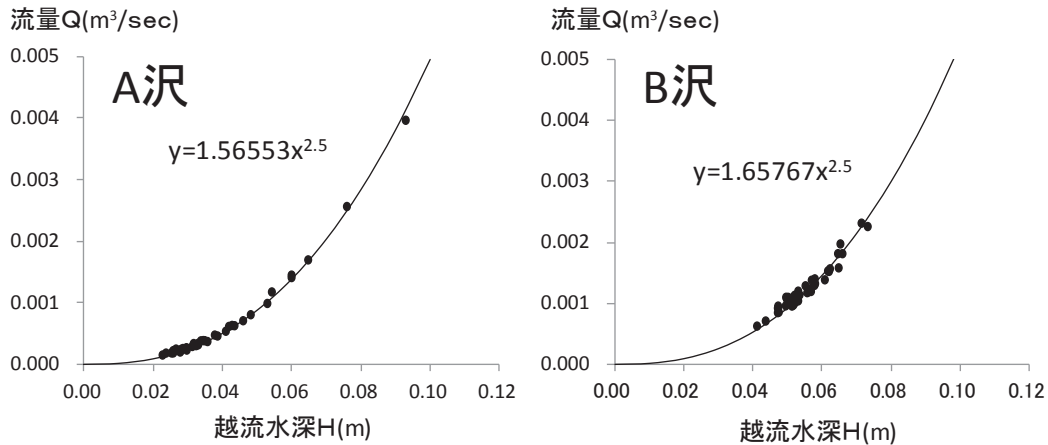


図3 A沢とB沢のH Q曲線

Ⅲ 観測方法

降水量は、A沢の水文観測地点の近傍（図2）に設置したヒーター付きの転倒ます式雨量計（大田計器製作所製OW-34-BP）により10分間隔で測定した。

流量は、各量水堰において圧力式水位計（ウイジン製UIZ-GY1000A）で測定した10分間隔の水位データより求めた。水位から流量への換算は、90°Vノッチの水力公式である次式を用いた。

$$Q = C \cdot H^{2.5} \cdots \cdots (1)$$

但し、Q：流量（m³/sec）、C：流量係数、H：越流水位（m）

流量係数Cは、各量水堰で水位と流量を実測し、その水位と流量の関係（図3）から求めた。流量の解析には、観測精度の安定した平成24年1月以降のデータを用いた。

地下水位は、A沢とB沢の境界の尾根の鞍部（標高585m）において深度50mのボーリング調査孔を用い、確認された深度41m以深の亀裂帯を対象に平成25年1月より圧力式水位計（ウイジン製UIZ-WL1000-N19）により1時間間隔で測定した（図2）。

Ⅳ 観測結果

1 降水量

図4に観測を開始した平成23年3月から平成25年12月までの月別降水量を示した。平成23年は年間のうち梅雨時期の6～7月、秋雨・台風時期の9～10月に降水量が多く、とくに9月の降水量は、2

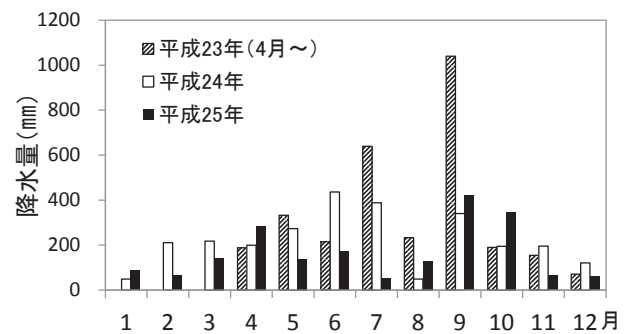


図4 月別降水量

度の台風の影響により1040mmと多かった。2年間ともに、年間のうち降水量が少なかったのは8月や12～1月であった。平成25年は、5～7月の降水量が少なく、年間降水量も1964mmと、平成24年の年間降水量2675mmと比べてもかなり少なかった。

ヌタノ沢の日降水量と近傍の丹沢湖アメダス（標高370m）の日降水量の関係をみたところ相関が認められ、ヌタノ沢の降水量は、丹沢湖アメダスの降水量の概ね103%程度であった（図5）。丹沢湖アメダスの降水量は、過去37年間の平均値で年間2184mmであることから、ヌタノ沢の平均的な年間降水量は、2250mm程度と推測された。また、丹沢湖アメダスの平成23～25年の各年間降水量は、過去37年間の年間降水量の多い順から2位（平成23年）、10位（平成24年）、31位（平成25年）であることから、ヌタノ沢の年間降水量も例年と比較して、平成23、24年はとくに多く、平成25年はとくに少なかったと考えられた。

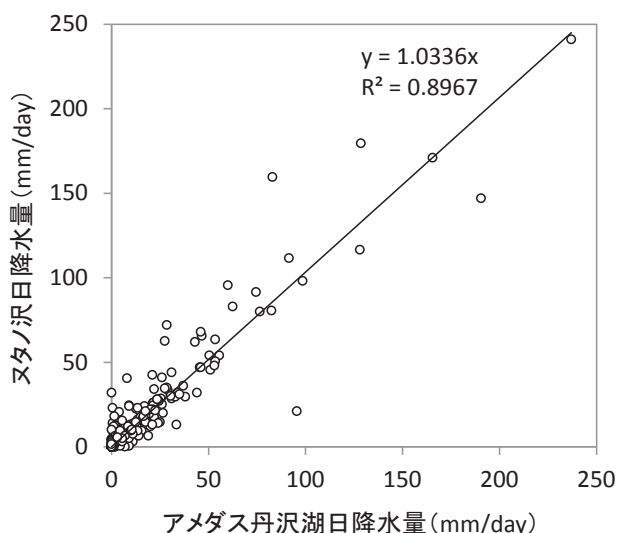


図5 ヌタノ沢とアメダス丹沢湖の日降水量の関係
アメダス丹沢湖日降水量：気象庁HPよりダウンロード

2 流況

図6に平成24～25年のハイドログラフを示した。A沢に比べてB沢のほうが平水時の流量が多く、B沢は2年間を通して豊富な流量が維持された。まとまった降雨の際には、両流域の日流量のピークが流出高で概ね同程度となり、降雨に伴う流量の増加は、B沢よりもA沢のほうが大きかった。降雨後はA沢のほうが流量低減の傾きが大きく、B沢のほうが緩やかであった。これらの傾向は、横山ら(2013)による定期的な流量実測結果とも一致する。

日流量の最大値は、A沢では44.5mm(平成24年6月19日：日降水量241mm) B沢では42.6mm(平成24年7月14日：日降水量147mm)であり、いずれも台風の影響によるものである。この時を含め、A沢では2年間のうちに3回、大雨の際に量水堰の湛水部に土砂が堆積したが、B沢では量水堰への土

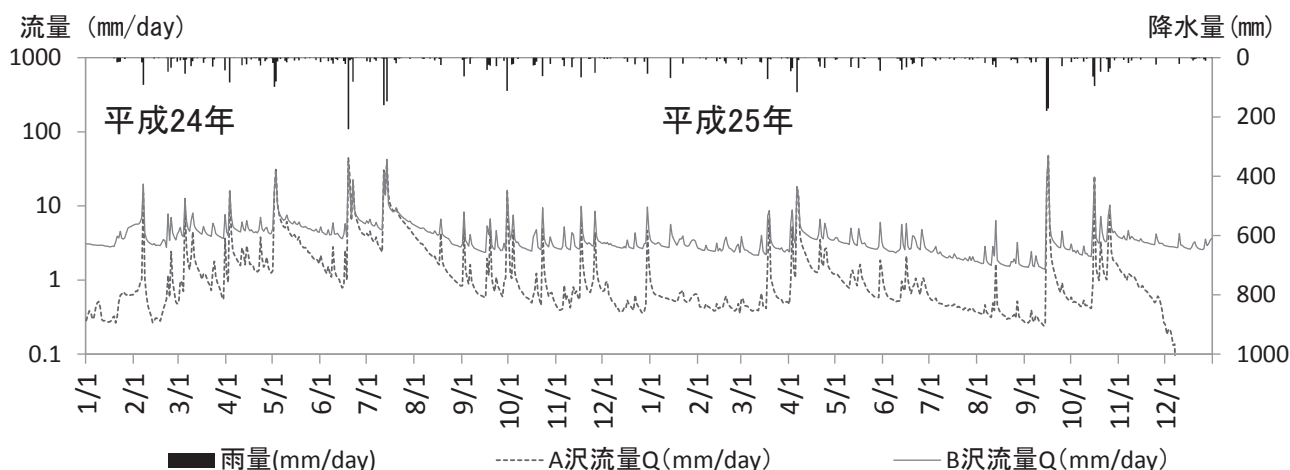


図6 A沢とB沢のハイドログラフ(平成24～25年)

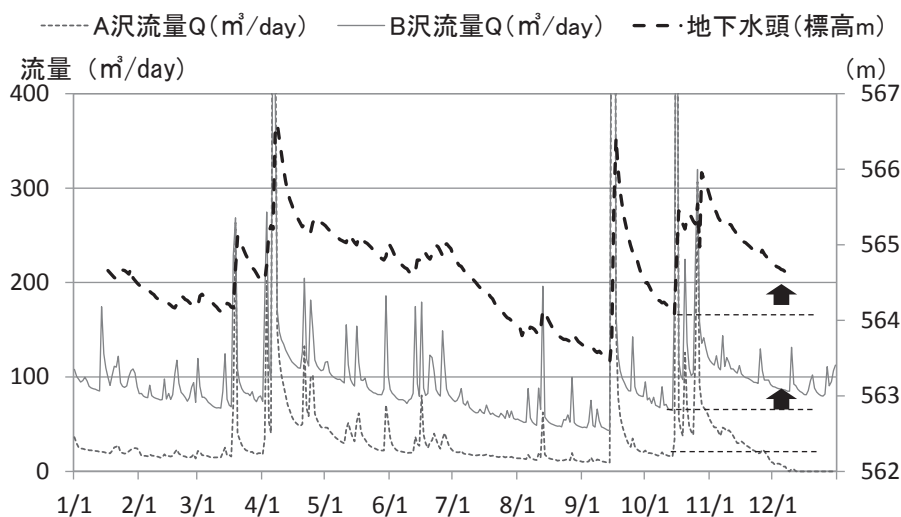


図7 地下水位の日平均値の推移(2013)

砂の堆積はなかった。

降水量の少なかった平成 25 年の日流量の推移をみると、A 沢と B 沢ともに 4 月下旬から 9 月上旬にかけて降雨による一時的な流量増加はみられるものの基底流出は漸次減少し、9 月中旬と 10 月中旬の大雨により大きく流量が増加した（図 6）。その後、A 沢については流量低減により 12 月上旬には量水堰の越流がなくなり、同月末まで量水堰では降雨の度に一時的に越流がみられる程度となった。一方、B 沢については、流量の低減が少なく 12 月も 10 月中旬の降雨前を上回る流量が維持された。図 7 より地下水位の日変動をみると、12 月上旬でも 10 月中旬の降雨前を上回る水位が維持されるなど

B 沢の流量の推移と似た変動が観測された。

図 8 に流況曲線を示した。B 沢の流況曲線は、豊水流量以下の傾きが小さく、平成 24 年と 25 年で大きな違いはなかった。一方、A 沢の最大日流量は B 沢と大きく差がないものの、A 沢の流況曲線は低流量になるにつれ B 沢より傾きが大きくなり、低水ほど両流域の開きは大きくなった。さらに、A 沢は、降水量の少なかった平成 25 年のほうが平成 24 年よりも全体に流量が少なくなっていた。つまり、A 沢の流況は、B 沢と比べて年間の日流量の変動や年ごとの変動が大きく、B 沢の流況は、豊富な流量が年間を通して維持されて変動が少なく、年ごとの降水量の変動も流況にはほとんど反映していなかった。

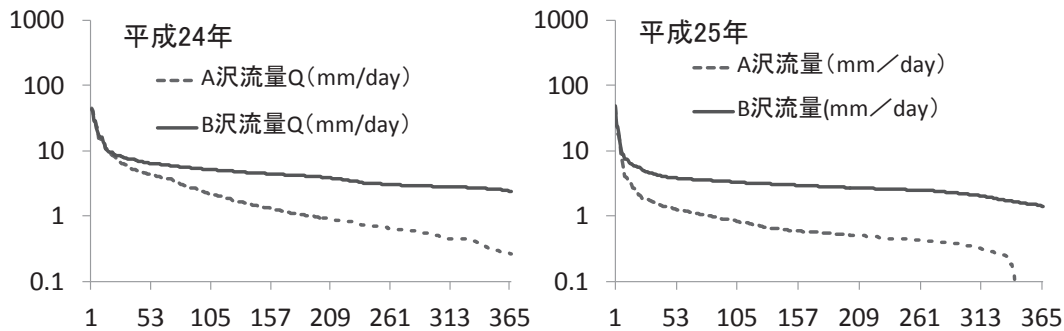


図 8 流況曲線（平成 24 年、平成 25 年）

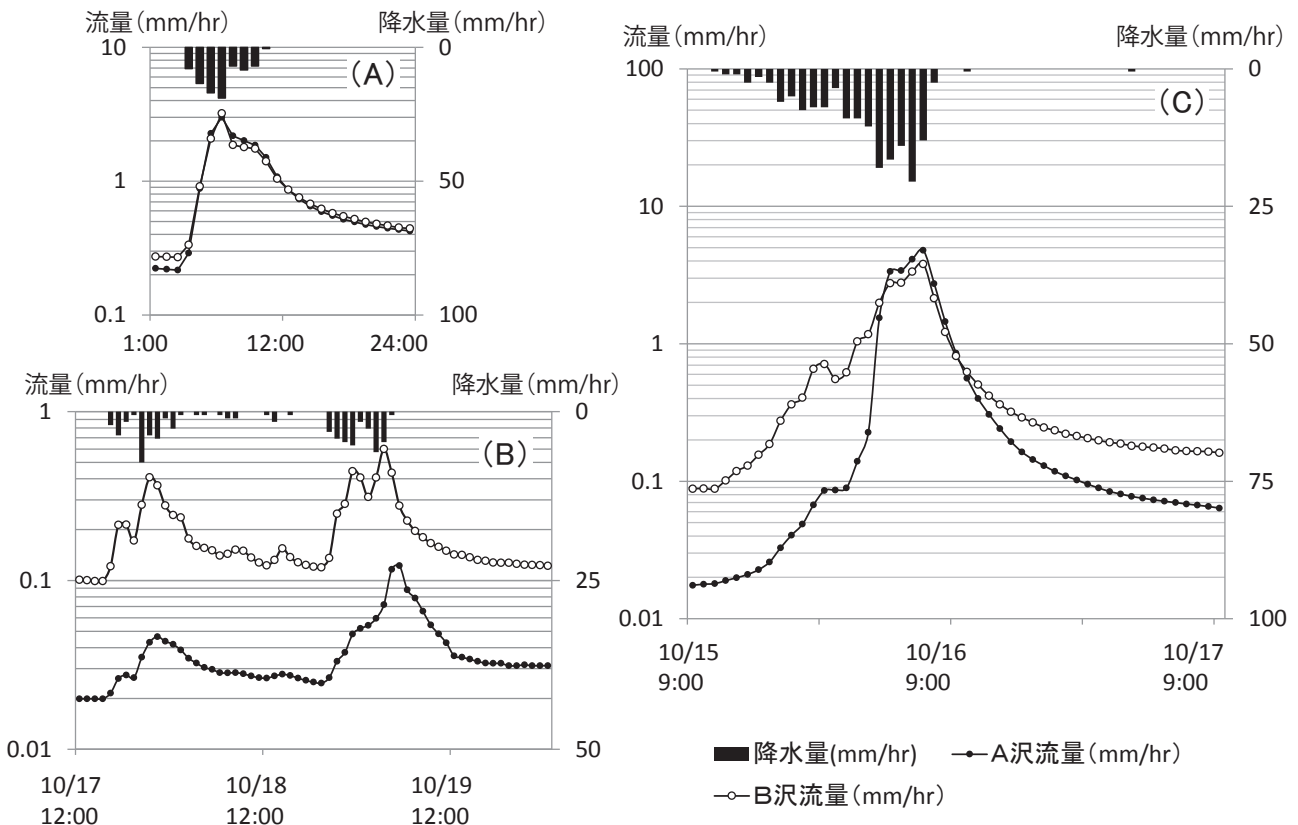


図 9 短期流出のハイドログラフの例

(A) H24.6.22 総降水量 80mm (B) H24.10.17 総降水量 64mm (C) H25.10.15 総降水量 159mm

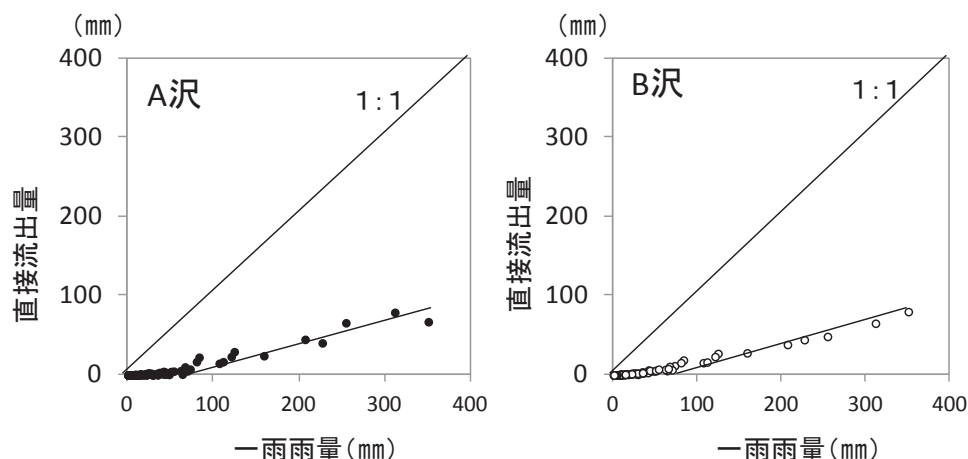


図10 A沢およびB沢の直接流出量と降水量の関係

3 短期流出

降雨に伴う短期流出については、両流域のピーク流量の出現に時間のずれはなかった。降雨開始前の流量が両流域で同程度の場合、両流域の短期流出のハイドログラフはほぼ一致した（図9（A））。しかし、前述のように平水時は両流域の流量に差があり、総降雨量が比較的小さい場合は流量の差は縮まらないものの類似のハイドログラフ波形となり（図9（B））、総降雨量が比較的大きい場合はピーク流量が同程度となった（図9（C））。さらに総降雨量200mmを超えるような場合は、横山ら（2013）にも報告されているように、同程度のピーク流量から流量低減に転じた後は、両流域の流量が同等以上、つまり降雨前と逆転しA沢のほうがB沢を上回る流量で推移する事例もみられた。

直接流出量について、時間データ（mm/hour）によるハイドログラフを用い、変曲点法または小規模な流出の場合は水平分離法により分離した。白木ほか（2013）と同様に、変曲点是对数軸上にとったハイドログラフの逓減期において、以降の6時間以上が直線とみなせる時刻とした。図10に示した降水量と直接流出量の関係から、一雨雨量が10mm以下では直接流出はほとんど観測されないが、10mmを超えると一雨雨量が大きくなるほど直接流出量も大きくなっていった。一雨雨量に対する直接流出量の割合は、A沢は0.03～27%、B沢は1.4～23%の範囲であった。両流域の直接流出の割合は大きくは類似しているが、A沢のほうがばらつきが大きかった。真板ら（2009）によると、同程度の一雨雨量でも流域の水分状態、すなわち降雨直前の流量が大き

いほど直接流出量は大きい。ヌタノ沢の場合も、降雨前の流量の違いが反映し、平水時の流量の安定しているB沢より、流量の安定していないA沢のほうが直接流出量のばらつきが大きくなったと考えられた。

図11で一雨雨量50mm以下の直接流出量をみると、A沢と比べてB沢のほうが十数ミリ程度の少降雨でも常に直接流出が発生していた。これは、畑ら（1973）、高橋ら（1982）の事例にもあるように、河道降雨により速やかに反応する流量増加分と考えられた。ヌタノ沢の場合は、A沢では最上流の治山堰堤を除く5箇所の治山堰堤上流側が満砂し、河道の大部分が浸透域となっているが、B沢では最上流を除く3箇所の治山堰堤上流側が湛水し水流が連続する。このような違いが、少降雨の場合の両流域の直接流出量の相違に影響していると考えられた。

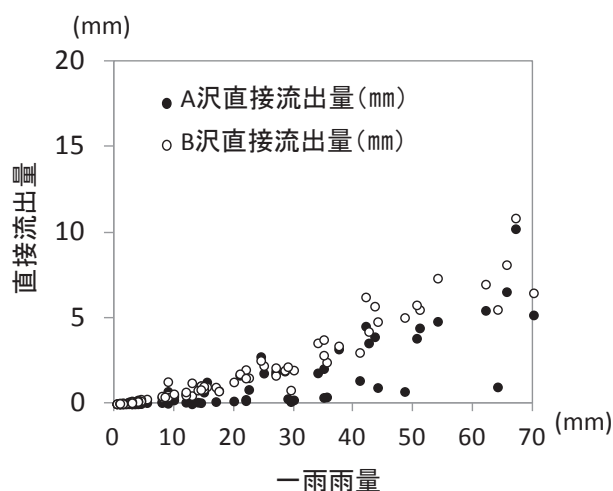


図11 A沢およびB沢の直接流出量と降水量の関係

表1 ヌタノ沢の水収支（平成24年、平成25年）

H24					
	年間降水量	年間流出水量	（直接流出）	（基底流出）	損失水量
A 沢	2675	942	348	594	1733
(3.8ha)	100%	35%	13%	22%	65%
B 沢	2675	1829	355	1474	846
(3.1ha)	100%	68%	13%	55%	32%

※割合は、すべて年間降水量に対する率。

H25			
	年間降水量	年間流出水量	損失水量
A 沢	1964	398	1566
(3.8ha)	100%	20%	80%
B 沢	1964	1209	755
(3.1ha)	100%	62%	38%

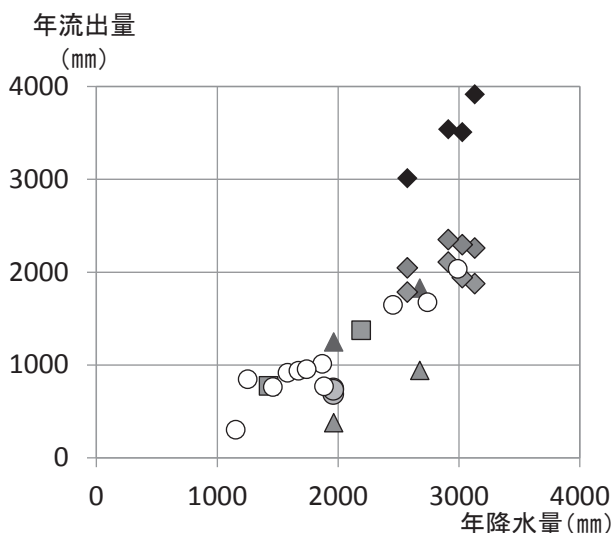
※割合は、すべて年間降水量に対する率。

4 水収支

平成24、25年の水収支を表1に示した。年間の降水量を100%とすると、A沢では、そのうち20～35%が河川水として流出が観測され、残りの蒸

発散などの損失水量は65～80%であった。同様にB沢では、62～68%が河川水として流出し、損失水量は32～38%であり、年間降水量に対する流出水量の割合は、他の観測流域と同程度であった（図12）。関東地方の森林の標準的な蒸発散量は年間700～900mm程度であるため（近藤ほか、1992）、A沢では、深部浸透などによって流域末端の量水堰を通過せずに流域外に流出する成分があると考えられた。

平成24年の流出水量の内訳をみると、直接流出はA沢とB沢で350mm前後と大きく差がなかったが、基底流出では、A沢がおよそ600mmであったのに対し、B沢は1500mmとその2.5倍に相当する値であった（表1）。



- ▲ヌタノ沢(A) (H24～25)
- ▲ヌタノ沢(B) (H24～25)
- ◆大洞沢No1(H22～25)
- ◆大洞沢No3(H22～25)
- ◆大洞沢No4(H22～25)
- 貝沢NO4(H24～25)
- 袋山沢(東京大学千葉演習林)
- 国内の主な試験流域

図12 他の観測流域との水収支の比較

※ヌタノ沢以外は、東京大学（2014）、東京農工大学（2014）、服部ほか（2001）より

V 考 察

1 基底流出特性

流域面積はA沢のほうが2割程度大きいですが、平水時の基底流量はB沢のほうが多く、流出高でみるとA沢の2～10倍程度である。A沢の基底流出は降水量が少ない年には枯れることもあり不安定であるが、B沢は年ごとの降水量の多寡に応じた変動は小さく、常に一定程度の流量を保つ傾向がある。

両流域ともに基底流出の供給源は、主にそれぞれの源頭部の基岩湧水である。横山ら（2013）による

と、A沢の源頭部の湧水はもともと流量が少なく季節単位や年単位の降水条件によっては枯れることもあるが、B沢の源頭部の湧水はA沢の湧水量のおよそ2倍あり少雨期でも一定量が維持される傾向がある。さらに、両流域の間の尾根の地下水位はB沢の流量と対応するが、A沢の流量とは特に渇水期において対応しない。A沢に比べてB沢の河床がおおよそ10 m低い(図2参照)ことと合わせ、これらの源頭湧水の供給源となる地下水帯水層構造の把握にはさらなる調査も必要である。

以上のような傾向は、両流域の基底流出が、いったん地下の透水性基岩まで浸透し涵養された後に再び湧水として地表に流出するまでの地下水流動系に支配されており、両流域で降雨・林相・植生・土壌といった要因が大きく相違ない一方で、地下水の流出経路が両流域で異なることを示唆している。また、横山ら(2013)によると、ヌタノ沢では風化が進み節理の発達した石英閃緑岩の中にも一部に丹沢層群や岩脈が認められ、ボーリングコアからも亀裂が多く数箇所の強風化部が確認されている。このような丹沢山地の特徴でもある不均一で変化に富んだ地質や地下構造のヌタノ沢では、表面的集水地形形状に基づく小流域単位の解析に加え、より広域的な視点で周辺も含めた基底流出特性を明らかにしていく必要がある。

2 直接流出特性

平成24年の水収支で両流域の直接流出量に大きく差がないこと、出水ピークに時間差はなく、降雨開始前の流量が同程度の場合に両流域の短期流出のハイドログラフが概ね一致することなどから、基本的に両流域の直接流出は類似し、流出機構も大きくは相違ないと考えられる。つまり、直接流出は降雨に伴い地表や比較的浅い層の水の移動によって生じ、地下水の流出経路よりも流域の地表条件に大きく依存している。このため、今後、植生保護柵を設置したA沢の流域内で下草植生が回復し、両流域の林床被覆状態に大きな差が生じると、両流域の直接流出に違いが現れることが予想される。

ただし、現状で個々の直接流出事例をみると、A沢においては降雨直前の流量の影響、B沢においては流域内における治山堰堤上流側の湛水部の影響

をうけていることから、今後のモニタリング調査における時系列変化の把握においても、それらを考慮して比較する必要がある。

また、総降雨量が大きくかつA沢の流量がB沢を上回るような観測事例はまだ少ないが、基岩からの流出の影響についても検討する必要があると考えられる。宮田ら(2003)によると、花崗岩山地の源流小流域において降雨量250mmを超えるような豪雨の場合には、降雨量100mm程度と比べて基岩からの流出が大きく寄与すると報告されていることから、短期流出における基底流出の解析も必要である。

VI おわりに

ヌタノ沢試験流域において植生保護柵設置前の流出特性を把握することができた。下層植生衰退地では、地表流の発生により土壌侵食も引き起こされることから(石川ほか, 2007)、流域内の土壌侵食や、浮遊土砂濃度や栄養塩濃度といった水質についても併せて把握する必要がある。

今後は、植生保護柵を設置したA沢の流域内の植生回復とそれに伴う水や土砂の流出特性変化をモニタリング調査によって把握していく計画であり、水源環境の保全・再生対策を順応的管理により進めるために、得られた成果を県民や学識者等の様々な立場の関係者で共有し、議論を深めていきたい。

VII 謝 辞

ヌタノ沢の観測システムの点検保守や修繕については、(株)ウイジンへの委託により、量水堰の浚渫や落石の撤去等は、(有)加藤工務店の請負により実施し、それぞれの担当者には大変お世話になった。観測システムにより取得したデータの基本的な整備は、斎藤正彦特別研究員が行った。また、観測結果の取りまとめにあたっては、東京大学鈴木雅一教授、東京農工大学石川芳治教授、白木克繁准教授はじめ各研究室の先生方に検討会を通して指導・助言をいただいた。厚くお礼申し上げます。

VIII 引用文献

- 青池寛・門田真人・末包鉄郎・相川弘二・松島義章・川手新一・山下浩之・梅沢俊一・今永勇（1997）Ⅱ．丹沢山地ならびに周辺域の地質 1．丹沢山地の地質 丹沢大山総合調査報告書 24-31
- 有馬眞・青池寛・川手新一（1999）丹沢山地の構造発達史、神奈川博調査研報（自然）3，57 - 77
- 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、日林誌 94：167 - 174
- 服部重昭・志水俊夫・荒木誠・小杉賢一朗・竹内郁雄（2001）森林の水源かん養機能に関する研究の現状と機能の維持・向上のための森林整備のあり方（Ⅰ）、水利科学，260：1-40
- 畑武志・今吉洋二（1973）直接流出量にかかわる山地地表層部の機能－山地の水調節機構に関する実験的研究（1）－神大農研報 11：135 - 139
- 平田徳太郎（1956）山地浸透計について、日林誌 38：34-40
- 石川芳治・白木克繁・戸田浩人・若原妙子・宮貴大・片岡史子・中田亘・鈴木雅一・内山佳美（2007）Ⅳ 堂平地区の林床植生衰退地での土壌侵食および浸透の実態。445-458. 丹沢大山自然環境総合調査報告書. 丹沢大山総合調査団編，794pp，財団法人平岡環境科学研究所，相模原市.
- 神奈川県（2011）第2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
- 神奈川県（2012）第3次神奈川県ニホンジカ保護管理計画，43pp
- 神奈川県（2014）平成26年度神奈川県ニホンジカ保護管理事業実施計画ダウンロードページ，<http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/470084.pdf>
- 気象庁（2015）過去の気象データダウンロード，気象庁ホームページ <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- 近藤純正・中園信・渡辺力・桑形恒男（1992）日本の水文気象（3）－森林における蒸発散量－，水文・水資源学会誌，5，4，8-18
- 小杉賢一朗（2007）森林の水源涵養機能に土層と透水性基岩が果たす役割の評価，水文・水資源学会誌 Vol20，No3，201 - 213
- 真板英一・鈴木雅一（2009）山地森林小流域における直接流出量の定量的解析、水文・水資源学会誌，22，5，342-355
- 宮田秀介・内田太郎・浅野友子・安藤宏幸・水山高久（2003）花崗岩山地一次谷流域の流出現象に及ぼす岩盤地下水の影響、砂防学会誌、Vol. 56，No. 1，13 - 19
- 虫明功臣・高橋裕・安藤義久（1981）日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果. 土木学会論文報告集、No. 309、51-62
- 中川節夫（1997）Ⅱ．丹沢の地形（地形に現れた断裂の方向）丹沢大山自然環境総合調査報告書 18 - 23
- 志水俊夫（1980）山地流域における渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係，林試研報 109 - 128
- 白木克繁・片岡宏介・工藤司（2013）貝沢水文試験流域における隣接する三流域の降雨流出特性と浮遊土砂動態，神奈川県自然環境保全センター報告，10：81-89
- 丹沢大山総合調査実行委員会調査企画部会編（2006）丹沢大山自然再生基本構想. 136pp，丹沢大山総合調査実行委員会，横浜.
- 高橋裕・安藤義久・有賀茂（1982）山地河川流域の直接流出特性とそれに対する土地条件の効果，第26回水理講演会論文集，198 - 203
- 東京大学（2014）平成25年度大洞沢における流域水収支に関する調査・研究報告書
- 東京農工大学（2014）平成25年度対照流域調査地流域特性評価研究報告書
- 辻村真貴・恩田裕一・原田大路（2006）荒廃したヒノキ林における雨水流出に及ぼすホートン地表流の影響，水文水資源学会誌 18:17-24
- 内山佳美・山根正伸・横山尚秀・山中慶久（2013）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
- 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