

# フチジリ沢・クラミ沢流域（箱根外輪山北東麓）の水文地質について

横山尚秀\*・内山佳美\*・三橋正敏\*

## Hydrogeological characteristics of the Kurami-sawa basin and the Fuchijiri-sawa basin, on the north-eastern slope of Hakone caldera rim

Takahide YOKOYAMA\*, Yoshimi UCHIYAMA\* and Masatoshi MITSUHASHI\*

### 概 要

箱根火山外輪山の明神岳北東麓の中腹にあるクラミ沢とフチジリ沢を試験流域に設定し、2012年度から降水量などの気象と河川流量、濁度、水温などの水文観測を主とするモニタリング調査を開始した。これらの2流域では、古くから間伐などの森林管理が行われており、適切な管理の下に樹木および林床植生の生育とそれに伴う流域の長期的な流況の変化を森林環境モニタリング調査の中で検証し、また懸念されているシカ採食害の発生とその推移についても予測、確認していく計画である。そのため、試験流域の特徴、とくに水文地質を把握しておく必要があり、地形・地質の現地踏査、気象・河川流量等の水文観測を行った。その結果、次の流域特性が明らかになった。①クラミ沢とフチジリ沢の両流域には苧野溶岩グループ・金時山体溶岩グループが分布し、フチジリ沢の方が苧野溶岩グループの占める割合が多い。②両沢とも河床勾配の変換点に崖錐堆積が認められ、そこに湧水帯が形成され、沢の水源となっている。③湧水帯より下流側では、年間を通じて流水が観測された。しかし、フチジリ沢の方がクラミ沢より実流量・比流量共に多く、流域特性とくに地下水の関与する基底流出に差があると考えられた。④両沢で2回の大雨時の流出を調査し、洪水時の流量と水質の変化を比較検討した。その結果、両沢の流量の増大に差が認められ、ピーク流量の出現にばらつきがあることから、更なる原因の究明が欠かせないことが分かった。さらに、⑤降雨時とくに流出ピーク時の電気伝導度、水質構成から表面流出による水質希釈を観測し、流域水収支の把握に向けた直接流出・基底流出の分離に関わる条件設定に向けた情報を得ることが出来た。

### I はじめに

かながわ水源エリア内に設定された4試験流域では、想定されている水源管理のために行われる間伐や植生保護柵設置などの効果・影響を予測評価するため、森林水文学的な視点から対照流域法によるモニタリング調査を行っている。調査では、施業前後の森林植生等と流況の変化を調べ、その効果を評価して流域の順応的な管理を進めていく。

これまでの森林の水源かん養機能と森林管理の効果・影響に関する様々な調査・研究（たとえば、

宝ほか、2004、真板ほか、2005、蔵本ほか、2010、蔵治ほか、2014など）では、伐採等による流域の森林植生の変化に加え、地質等の流域特性による影響も小さくないことが明らかになっている（真板・鈴木、2008）。このため、モニタリング調査においては、短期的にはまだ把握されていない流出や流域の水文地質などの流域特性を解明し、中期的には森林の生育にともなう流況変化やニホンシカの生息とその影響の変化（林床植生への影響）など、今後の推移を見極めながら調査を進めて行く必要がある。

\* 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）

試験流域の一つであるフチジリ沢・クラミ沢の流域は、透水性が良い火山斜面に位置し、急峻な上、4試験流域の中では面積が広く、流域内での浸透・湧出を反映して流況が異なるなど、他の3流域とは水文特性が異なる流域として位置づけられている(横山ほか・2013)。しかし、調査地域を含む山麓の水文特性については、荻野ほか(1987)や足柄上地区地下水調査研究会(2004)による取り組みがあるものの、本格的な調査研究は行われていなかった。そこで、本モニタリング調査では、先ず正確なデータの収集から始め、試験流域での2000mmを超える多い年降水量、火山斜面流域としての流出状況、とくに年間を通じて涸れない溪流の水源と流程に沿った流量変化、出水時の流量変化など流域特性の把握に努め、中期的な変化の見出のための基礎資料の修得を進めている。

本報告は、平成25・26(2013・2014)年度に行った地形図、地質図および空中写真に基づく地形と地表地質の現地踏査、流量調査、土壌深度調査の成果を記載した。すなわち、現地踏査では沢沿いに河床の岩相などの地質、礫の状況などを調べ、渇水時に流程の流量を測定して少雨期の表流水の増減(涵養と浸透)をとりまとめ比較検討した。また、大雨時の降雨と流量を連続観測し、流量時系列変化につい

て両流域を比べ異同の把握を試みた。これらの検討により、両流域が本来備えている地形・地質とそれ由来する流況を流域特性として捉え、整理した。

## Ⅱ 調査地域

### 1 調査地域の地形・地質、土壌および植生

フチジリ沢およびクラミ沢は、箱根火山外輪山の明神ヶ嶽の東斜面にあって、フチジリ沢は安沢川、クラミ沢は柄沢となって流下し、下流で合流して柄沢として狩川に注ぐ(図1、写真1)。両流域共に標高が大よそ500m以上の高い地域に位置し、玄武岩質溶岩や火砕流堆積物など不透水性堆積物を反映しているためか、試験流域では多くの火山同様の地下浸透があるものの、中流部で地下水の渓谷への湧き出しがあって、流域末端では年間を通じて流水が観測されている(横山ほか、2013)。

しかし、外輪山東麓では、全般的に透水性の良い火山堆積物を反映して裾野では表流水が地下浸透しやすく、涸れ沢となまっているところが多い。そして、外輪山東麓の斜面で地下浸透した表流水は地下水となって流下し、下流域の柄川、狩川で地表に湧出するほか、足柄平野の地下水をかん養している。そして、足柄平野にとって箱根外輪山は酒匂川と共

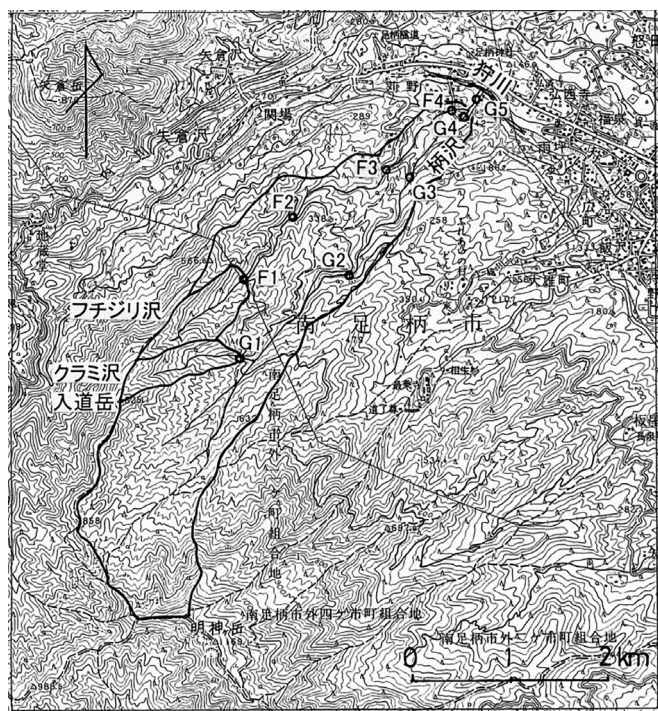


図1 調査地域位置図(F1～G5は流量調査地点)  
国土地理院発行1/5万地形図小田原を使用



写真1 箱根外輪山と調査地域

に有望な水源として位置づけられている（横山ほか，1999）。箱根外輪山における試験流域の位置を斜面の模式図（図2）上に示した。

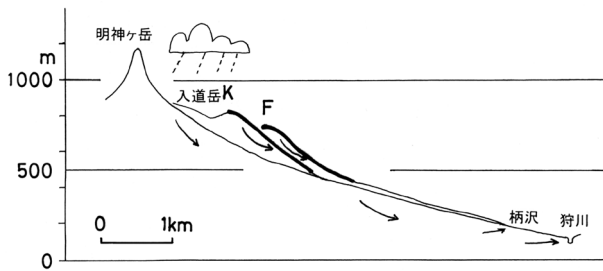


図2 箱根外輪山斜面における調査地域の位置  
太線は試験流域（F：フチジリ沢、K：クラミ沢）、矢印は水の動きを示す

箱根火山の地形・地質については、鈴木（1971）、日本地質学会国立公園地質リーフレット1「箱根火山」編集委員会（2007）および長井雅史・高橋正樹（2008）らの研究がある。さらに、土壌については土地分類基本調査（1985）が、水文については鈴木ほか（2011）の研究がある。これらをもとに現地調査を行って調査地域の地形・地質等の概要を次に取りまとめた。

### (1) 地形

試験流域のフチジリ沢およびクラミ沢は、箱根火山の外輪山の一つである明神ヶ岳の北東斜面に並んで位置している（図3）。明神ヶ岳は、北側の狩川の溪谷を挟んで金時山と接し、南側は明星ヶ岳に連なるカルデラ縁の一部を形成している。両試験流域は、標高1,169mの明神ヶ岳から標高150mの

足柄平野（狩川）までの3kmの間に標高差が1,000mにおよぶ外輪山斜面のほぼ上半にあつて、最高部が825m、最低部は430mの北東方向に開いた流域で、侵食が進んだ横長の山地流域である。両流域の形状等を表1に示した。

両流域の河床縦断面（図4左：フチジリ沢、図3の断面線A-A'投影、図4右：クラミ沢、図3の断面線B-B'投影）によれば、フチジリ沢では標高500mと標高570mに段状地形が認められ、地形変換点となっている。これらの場所は滝となっている。夫々上滝、下滝と呼ぶことにすると、河床勾配は上滝より上流（荏野溶岩グループ）が18.5°、上滝～下滝の間（崖錐帯／湧水帯）が10.1°、下滝より下流（金時山溶岩グループ）が8.1°になっており、上流側の荏野溶岩グループ地域の勾配がきつい。一方、クラミ沢では、フチジリ沢ほど明瞭でないが、標高640mあたりに地形変換点が認められ、地形変換点より上流側の荏野溶岩グループ域の傾斜が19.9°、崖錐帯（湧水帯）では12.1°、下流側の金時山溶岩グループ域が10.4°である。

なお、両沢の人工施設の設置状況は、両沢の調査地域の末端に夫々林道に架かる橋が設置されているほか、クラミ沢に治山堰が橋を挟んで約50m離れて2基設置されているのみと少なく、流域の河川形態は自然がよく残されている。クラミ沢の2ヶ所の治山堰（上側の堰を写真2に示す）は下流からの魚類の遡上を妨げているが、フチジリ沢では下滝

表1 クラミ沢及びフチジリ沢の形状

| 項目       | クラミ沢   | フチジリ沢  | 備考        |
|----------|--------|--------|-----------|
| 頂部標高     | 825 m  | 785 m  | 地形図判読     |
| 最下部標高    | 490 m  | 435 m  | 同上        |
| 高度差      | 335 m  | 350 m  |           |
| 流域長      | 1290 m | 1380 m |           |
| 傾斜       | 14.6°  | 14.2°  | 高度差 / 流域長 |
| 流域幅      | 320 m  | 530 m  |           |
| 流域面積     | 34 ha  | 43 ha  |           |
| 荏野溶岩 G 域 | 14 ha  | 29 ha  | 41%、67%   |
| 金時山溶岩 G  | 20 ha  | 14 ha  | 59%、33%   |

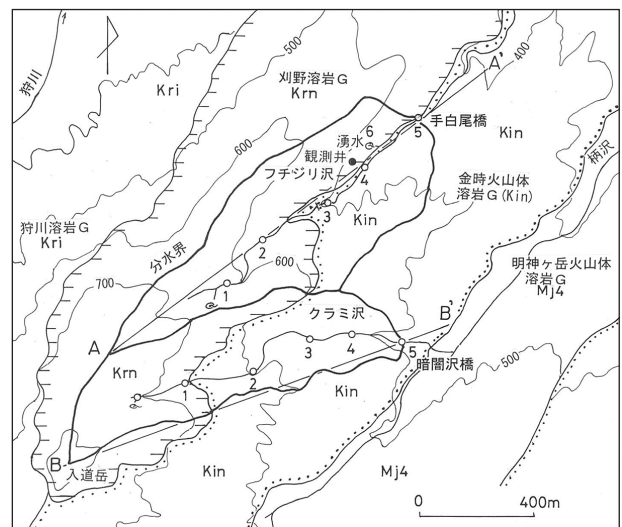


図3 調査地域と地質

Kx、Mx は溶岩グループ、A-A'、B-B' は縦断面位置、番号は流量調査地点



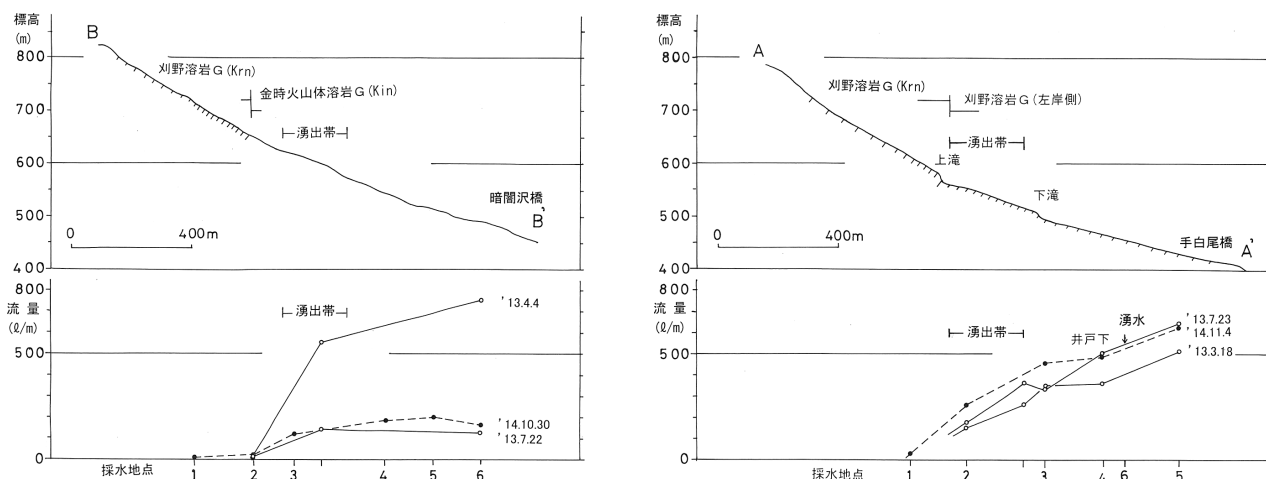


図4 フチジリ沢（左）およびクラミ沢（右）の河床縦断面と流量観測結果  
（調査日 フチジリ沢：2014.3.18,7.23,11.4 クラミ沢：2014.3.18,7.22,10.30）

表2 溶岩グループの特徴

| 外輪山噴出物（溶岩グループ）  | 特 徴                                |
|-----------------|------------------------------------|
| 明神ヶ岳山頂溶岩グループ    | 27 万年～24 万年前頃に噴出し、玄武岩質成層火山体を構成、    |
| 金時火山体・金時山溶岩グループ | 60 万年～30 万年前頃噴出し、玄武岩質成層火山体を構成      |
| 荻野溶岩グループ        | 60 万年～30 万年前頃噴出した無斑晶質安山岩～デイサイト質溶岩流 |
| 狩川溶岩グループ        | 60 万年～30 万年前頃噴出し、玄武岩質成層火山体を構成      |

日本地質学会（2007）国立公園リーフレット1「箱根火山」を基に作成

（写真3）まで下流からの魚類等の侵入が可能である。

## (2) 地質

箱根火山の地質図（日本地質学会・2007）によれば、試験流域および付近の地質は、地質年代が異なる4グループの火山噴出物（狩川溶岩グループ、荻野溶岩グループ、金時山溶岩グループ、および明神ヶ岳山頂溶岩グループ）で構成されている（図3）。夫々の形成時期と溶岩質は表2のとおりである。

両流域の源流部には水量は少ないが、渇水時でも湧水があって、下流に水量は少ないが表流水が認められた。クラミ沢では火山灰の上に溶岩が被さり、境目から湧水が滴下している（写真4）。一方、フチジリ沢では尾根部の火山灰で覆われた溶岩塊から湧き出している（写真5）。

試験流域に限ると、両流域共に表層地質は荻野溶岩グループと金時山溶岩グループで構成されているが、北側のフチジリ沢流域では荻野溶岩グループが占める割合が大きく、かつ上流域の大部分を占めている。一方、南側のクラミ沢流域では上流域を

荻野溶岩グループが、下流域に金時山溶岩グループが夫々分布している。両流域の構成溶岩グループの面積比率を表1に示した。

溪流に沿って地質図を参照しながら現地踏査を行って、両流域共に源頭部では金時溶岩グループとその上に流れた荻野溶岩グループを確認し、溪流では溶岩が露出し、流水は殆ど無いが滝状地形となっていた（写真6、7）。

荻野溶岩グループの範囲は地形が急峻であるが、金時山溶岩グループ域では傾斜が比較的緩やかになる。この傾斜変換点から崖錐状の堆積物が認められ、中流部となる。ここでは、渇水時には本流の河床から地下水が滲み出して流水が復活し、また湧水を水源とする小流が合流する。さらに下って、中～下流部では河床に溶岩（写真8）や固結したローム、火砕流堆積物（写真9）が認められ、河川水の覆没浸透は少なく、流水は年間を通して涸れず流れている（写真10、11）。フチジリ沢では水位観測井の掘削資料（横山ほか・2013）に明らかなように、地表部の土壌、ローム層の下に不透水性の火砕流堆積物



写真2 クラミ沢治山堰（林道橋上）



写真3 フチジリ沢下滝



写真4 クラミ沢源頭部湧水



写真5 フチジリ沢源頭部湧水

がある。このことを反映し、すぐ下流側に湧水が見られ、斜面を流れてきた地下水も河床近くで湧き出している。

### (3) 土壌

試験流域の土壌は黒ボク土に分類され、富士火

山の火山灰であるスコリヤを多く含んでいる。降雨時の流域の地下浸透・保水量を左右する土壌A層の分布を土壌断面調査・土壌貫入試験結果から求め、図5に示した。個々の地点の土壌A層の厚さを見ると、ほとんどの地点で大よそ40～75cmの厚さであつ





写真6 クラミ沢湧水帯上の露出した溶岩  
水量は少ない

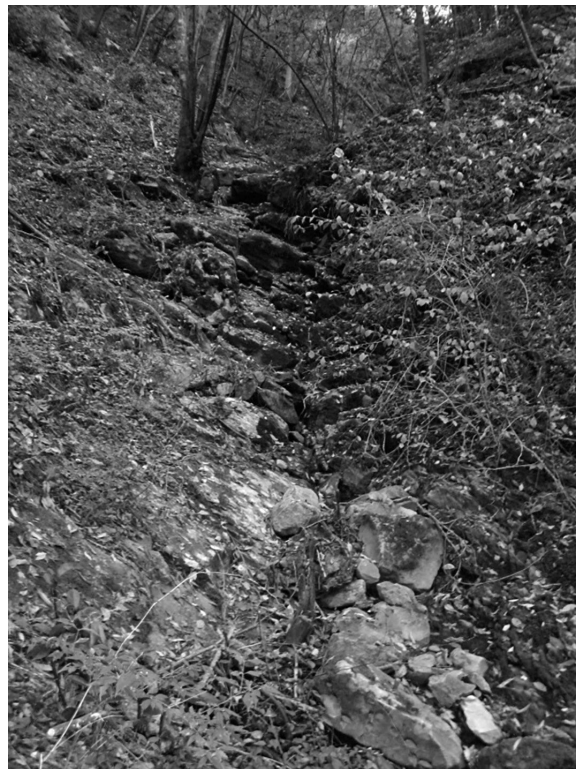


写真7 フチジリ沢上滝の河床の溶岩  
水量は少ない



写真8 溶岩が露出した河床



写真9 火砕流堆積物が露出した河床

て、2ヶ所で100cmを超えるところがあった(図6)。そして、その飽和透水係数は大部分が $10^{-4}$ m/sec.のオーダーであった。

#### (4) 植生

調査地域がある箱根外輪山は古くから入会地として管理されてきたこともあって、クラミ沢およびフチジリ沢の人工林率はそれぞれ95%、70%と高い。このことを踏まえ、本調査地域では現況の延長で森林管理を継続した場合、森林生育に伴う流況等の水源環境にどのような影響が出現するかモニタ

リングで検証していく位置づけになっている。

平成22年度に行われた森林環境調査報告(神奈川県自然環境保全センターほか、2011)の植生概況図に基づき、流域別に林相別面積率を求めたところ表3のとおりであった。スギ・ヒノキの人工林は、クラミ沢が46%とほぼ半分を占めているが、フチジリ沢では76%と流域の3/4の面積を占めている。人工林では、間伐が適宜行われている。また、アカマツ林はクラミ沢とフチジリ沢で夫々25%、15%となっている。そして、写真12に示したように、



写真 10 湧水帯始まり

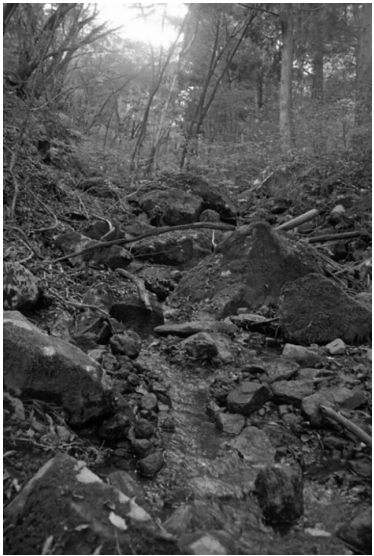


写真 11 湧水帯の水流

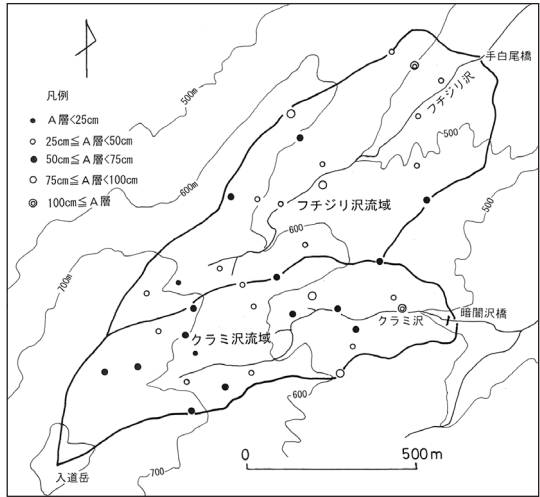


図 5 試験流域の土壌(A層)の層厚分布(5ランク)

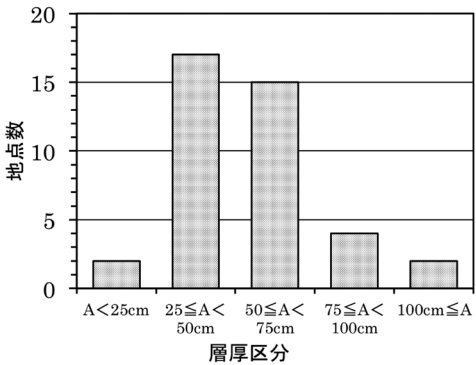


図 6 試験流域のA層土層厚ランク別地点数

人工林では間伐が適宜行われている。林床の状況は、ヒノキ林で植生がやや乏しいものの、通常の状態である。なお、林内でシカに遭遇することがあるが、まだシカ食害は認められていない。

表 3 クラミ沢・フチジリ沢の林相比率 (%)

| 種 類     | クラミ沢 | フチジリ沢 |
|---------|------|-------|
| スギ・ヒノキ林 | 46   | 76    |
| アカマツ林   | 25   | 15    |
| コナラ林    | 25   | 5     |
| その他     | 5    | 5     |

(5) まとめ

以上の内容を取りまとめ、次に示す。

①河床縦断面図で、クラミ沢の標高 640m、フチ

ジリ沢の標高 570m に傾斜変換点があって、傾斜は上流側できつく、下流側が緩い。ここを頂点に崖錐堆積物が堆積し、湧水帯が形成されている。

②クラミ沢の標高 640m 以上、フチジリ沢の標高 500m 以上の河床に溶岩堆積物が露出し、荻野溶岩グループ、金時山溶岩グループが確認できる。さらに下流側では、不透水性の火砕流堆積物やかなり固結したローム層が露出し、表流水の地下浸透は著しくない。

③土壌貫入試験等により A 層の層圧分布を調査したところ、流域全般に大よそ 40 ～ 75 cm であった。

④森林は、スギ・ヒノキ人工林の割合が多く、クラミ沢が 46%、フチジリ沢が 76% となってい



る。

## 2 水文

### (1) 気象観測

平成23(2011)年度に、調査地域の最高部の入道岳に気象観測施設を設置し、降水量、風向、風速、気温および湿度の観測を開始した。箱根火山周辺の年間降水量は2500～3000mmで、丹沢山地(1800～2000mm)より多く、多雨地域である。調査地域では2012年に2345mm、2013年に2512mmが観測された(内山ほか・2016)。

### (2) 流量調査結果と地下水位観測結果

#### ア 流量

試験流域の最下流部で、河川の水位(H)－流量(Q)曲線式の検証と年間の流出の概況を把握するため、大よそ月1度の頻度で流量を実測(断面流速法：電磁流速計を使用)している。2013年～2014年の2

年間の測定結果を月降水量(企業庁足柄)と一緒に図7に示した。

2013年の最大流量は、クラミ沢が4月の大雨に対応して観測された12.5ℓ/秒(4/4)、フチジリ沢は、4月が欠測であったため、秋の多雨時の観測値15.6ℓ/秒(11/12)である。一方、流量の最小値は、フチジリ沢で3.4ℓ/秒(10/9)、クラミ沢で0.6ℓ/秒(8/6)であった。2014年は2月中旬の大雪、6月初旬の前線・低気圧、10月6日の台風による大雨が特記されるものの、梅雨明け後(夏期)の降水量が少なかったことが大きく流況に影響した。流量の最大値は、クラミ沢42.8ℓ/秒(10/7)、フチジリ沢698.9ℓ/秒(10/7)であった。これらは台風18号による大雨直後の記録である。最小値はクラミ沢0.2ℓ/秒(8/18)、フチジリ沢7.3ℓ/秒(1/15)であった。

比流量で2014年10月7日のクラミ沢(42.8ℓ/

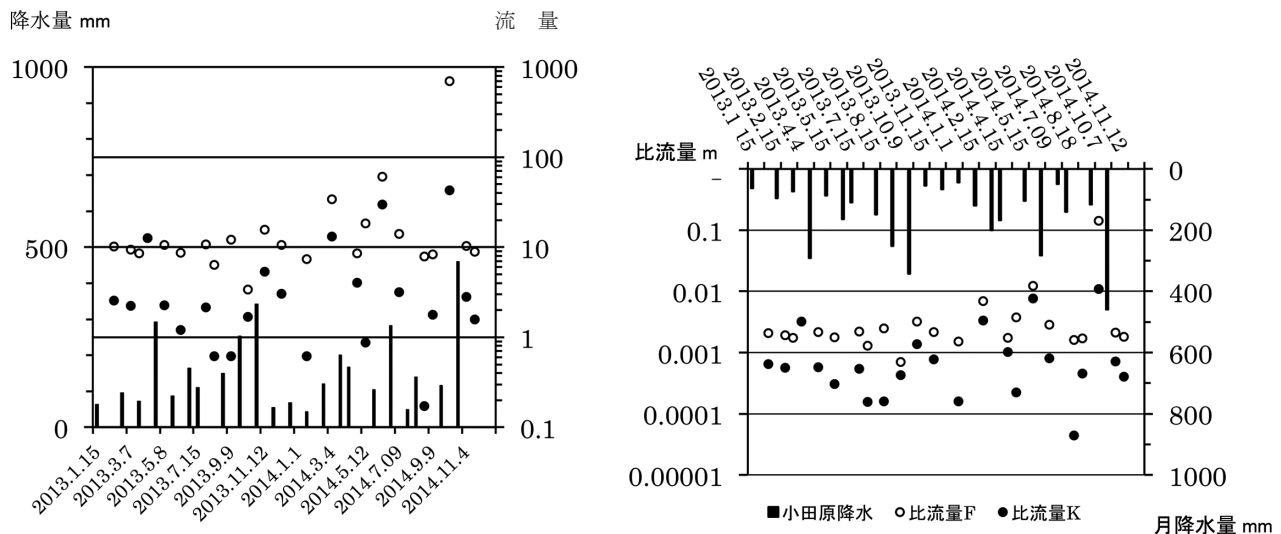


図7 フチジリ沢(○)・クラミ沢(●)の流量調査結果(左:実測値ℓ/秒、右:同比流量m)

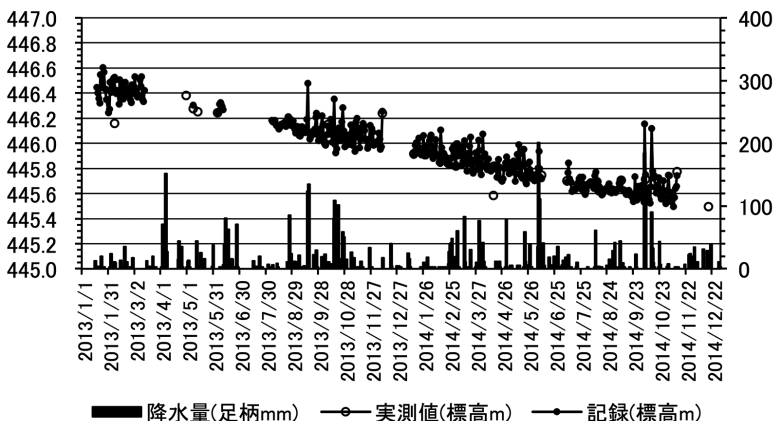


図8 地下水頭観測結果(左軸:水頭、右軸:降水量mm)  
降水量は県企業庁:足柄を使用

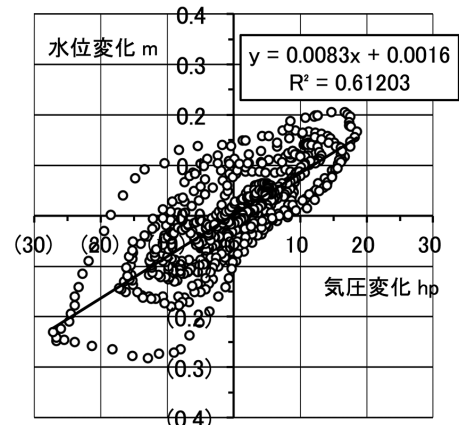


図9 地下水位(縦軸)と気圧(横軸)との相関  
気圧は温泉地学研究所:南足柄を使用



秒) およびフチジリ沢 (698.9 ℓ / 秒) を比較すると、それぞれ  $0.011\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $0.143\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$  となって、フチジリ沢の方が約 10 倍大きい。さらに、図 7 左のグラフに示したように、通年の状況をみても、全般にフチジリ沢の比流量が多い。

以上のように、両沢の年間の流況が異なることが分かる。今後は、降雨と流出の総量を水収支上から調査検討し、流域特性の違いを明らかにする必要がある。

## イ 地下水頭

フチジリ沢の左岸に深度 50m の観測井を設置し、地下水位の連続観測を行っている。2014 年の観測結果を標高換算した地下水頭変化として図 8 に示した。

2013・2014 年ともに地下水位は地表から大よそ 36m ～ 26.5m にあって、グラフは右下がりに低下傾向を示している。地下水位深度が深い上、年間変化量が 40 cm と少ない。その中で、2014 年 10 月に 2 度ほど観測された急激かつ短期間の約 50cm の水位上昇が際立つ。この水位上昇は台風接近による気圧低下に対応した変化と考えられた。これまでの観測結果と合わせ、本観測井は間近な降水より気圧変化に敏感対応して変化すると想定された。そこで、2014 年 2 月の低気圧通過時の地下水位と気圧について 1 日 (24 時間) の変化量の相関を見たところ、図 9 のとおりであった。気圧係数 (地下水位変化 / 気圧変化) は  $8.3\text{mm}/\text{hp}$  で、気圧が低下すると地下水位は上昇する (浅くなる)。

## (3) 柄沢流域の流水量変化

クラミ沢とフチジリ沢は合流し、下流で柄沢となって狩川に流入している。両試験流域から狩川流入までの柄沢の流水の状況を調べた。調査は、2014 年 10 月 30 日にクラミ沢、11 月 4 日にフチジリ沢で源流部から試験流域最下流点まで実施し、両沢より下流側は 2010 年 10 月 26 日に行った調査結果 (図 10) を参考に、両調査結果を合わせて検討した。なお、調査地点は図 1、3 に示した。

試験流域内の流量 (図 4) を見ると、クラミ沢は標高 640m 以下、フチジリ沢は標高 570m 以下の傾斜変換点以下の中流部で共に湧水による流量増加が認められ、湧水帯と図中に示した。湧水帯の水量は最下流部まで増加あるいは横ばいとなっていて、著

しい地下浸透は認められない。ここでは、表流水の地下浸透が起こり難い河床条件が想定される。例えば、フチジリ沢河床の溶岩、クラミ沢では河床で火山礫を挟む固結したロームが露出していた。

試験流域より下流側の状況は図 10 により推定できる。クラミ沢は G1 の下で本流と合流した後、G2 で流量が多くなるものの、下流の G3 では 1/4 に減

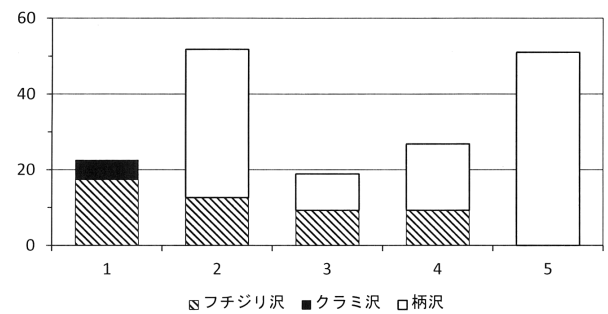


図10 柄沢支流のクラミ沢、フチジリ沢と柄沢 (合流後) の流量観測結果 (2010.10.26) 左軸：流量 ℓ / 秒

少した。フチジリ沢でも F3 で 2/3 に減少し、地下浸透が生じていると考えられる。なお、G5 の流量は増加し、山麓の湧水帯に入ったことを裏付けている。

## (4) 大雨時の流量変化

両沢で量水堰の水位—流量換算式の作成を兼ね、大雨時の流出状況を把握するため 2012 年と 2013 年に行われた台風時の流量・水質観測結果を比較検討した。

### ① 2012 年 9 月 30 日の台風 17 号接近時の流出

2012 年は 9 月 30 日の台風 17 号接近時に 30 分～1 時間ごとになる流量観測を行った (神奈川県自然環境保全センターほか、2012)。ハイレートグラフ (図 11) 上で両沢の流量を比較すると、降雨前は通年の観測結果と同様にフチジリ沢の方の流量が多かった。図中に示すように、降雨開始後の約 3 時間はク

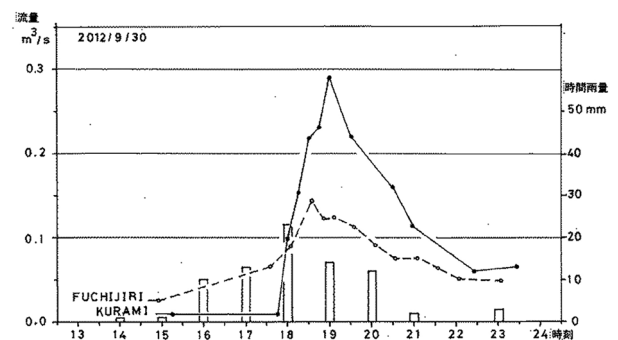


図 11 クラミ沢・フチジリ沢の 2012 年 9 月 30 日の流出状況 (降水量は県企業庁：足柄を使用)

ラミ沢の流量増加は観測されず、フチジリ沢で流量が多い。その後、両沢の水量は約5時間に及ぶ降雨、とくに18時の最大時間降雨22mm/時に対応して急増した。流量増加はクラミ沢の方が急激で、流量は逆転しクラミ沢の方が多くなった。フチジリ沢のピーク流量は $0.144\text{m}^3/\text{秒}$ （比流量 $0.029\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ ）、クラミ沢のピーク流量は $0.289\text{m}^3/\text{秒}$ （比流量 $0.073\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ ）であった。クラミ沢の流量はフチジリ沢の約2倍で、フチジリ沢より約30分遅れてピーク流量を観測している。

② 2013年9月15日～16日の台風18号接近時の流出

2013年は9月15日～16日の2日間に、降雨に合わせて30分ごとの流量、電気伝導度およびpHを観測した。さらに、9月16日は洪水発生に合わせて濁度観測、採水・一般項目の水質分析を行った（神奈川県自然環境保全センターほか、2014）。流量変化をハイトグラフ（図12）で、電気伝導度変化を図13に、濁度とイオン構成（ヘキサダイアグラム）の変化を図14に、pH変化を図15に示した。

雨の降り方をみると、9月15日と16日のいずれも午前中に集中する2つの山（第1の山は15日午前3時から12時までの9時間に125.5mm、第2の山の16日は、午前中の12時までの10時間30分に134mm）を観測した。なお、15日以前の3日間は殆んど降水はなかった。ハイトグラフ（図12）で15日の降雨と流量の状況を見ると、午前9時の強雨に対し、ピーク流量はクラミ沢が $0.272\text{m}^3/\text{秒}$ （比流量 $69.5\text{mm}/\text{日}$ ）、フチジリ沢が $0.255\text{m}^3/\text{秒}$ （比流

量 $52.1\text{mm}/\text{日}$ ）でクラミ沢の方が30分早く観測されたことが分かる。

2013年9月15日の流量は、2012年9月の出水（図11）と同様に、クラミ沢よりフチジリ沢の方が流量が少なかった（図12）。しかし、2013年9月16日は、15日に比べ降水量がやや多かったこともあって、流量は大きく増加した。午前7時30分の雨のピーク18mm/30分に対し、クラミ沢は同時に $0.759\text{m}^3/\text{秒}$ （比流量 $194.0\text{mm}/\text{日}$ ）を、フチジリ沢では30分遅れて $2.958\text{m}^3/\text{秒}$ （比流量 $604.2\text{mm}/\text{日}$ ）を観測した。両日のピーク流量を比較すると、クラミ沢は2.8倍の増加であったが、フチジリ沢は11.6倍と大幅な増加であった。両者で観測された異なったピーク流量の出現については、引き続き観測事例を集め、解明に努めたい。

#### (5) 大雨時の水質変化

2013年9月15日～16日の大雨時の水質の変化を溶存物質量を反映する電気伝導度変化で示した（図13）。両沢共に無降雨時（平常時の値はクラミ沢が $6\text{ms}/\text{m}$ 程度、フチジリ沢が $8\text{ms}/\text{m}$ 程度）と考えられ、降雨後の流量増加に伴う濃度低下（希釈効果）が観測された。15日の第1の山では午前9時に両流域共に $4\text{ms}/\text{m}$ を観測し、16日の第2の山では流量が多いフチジリ沢の7:30の値 $4.0\text{ms}/\text{m}$ に対し流量の少ないクラミ沢が $3.1\text{ms}/\text{m}$ と小さな値が観測された。

濁度について図14で両沢を比較すると、共に第2の山の7:30分に最大値が観測された。クラミ沢の値が333度でフチジリ沢の値192度に比べ1.7倍

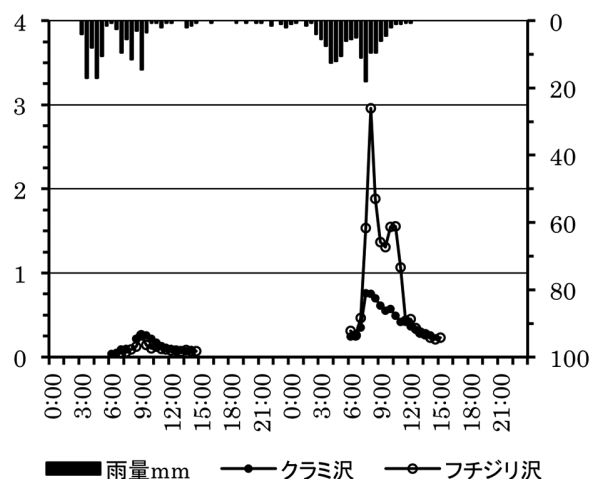


図12 クラミ沢・フチジリ沢の大雨時（9/15・16）の流量変化（左軸：流量  $\text{m}^3/\text{秒}$ 、右軸：降水量  $\text{mm}$ ）

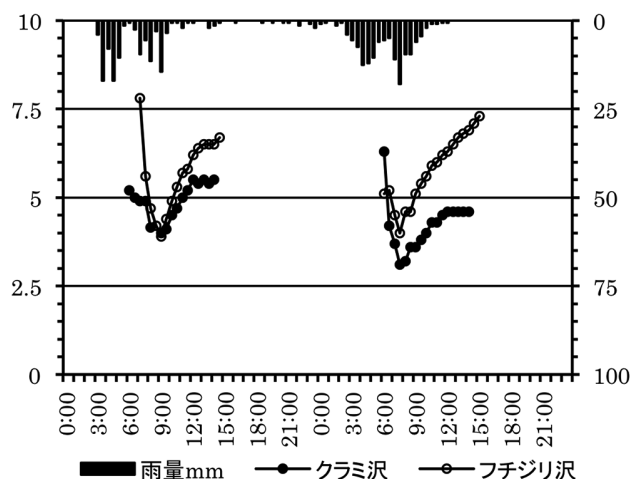


図13 クラミ沢・フチジリ沢の電気伝導度の経時変化（左軸：電気伝導度  $\text{ms}/\text{m}$ 、右軸：降水量  $\text{mm}$ ）



であった。さらに、大雨中の渓流水のイオン構成（ヘキサダイアグラム）を大雨前の8月28日の分析結果と比較した（図右）。流量ピーク後に主成分の炭酸イオン（ $\text{HCO}_3^-$ ）とカルシウムイオン（ $\text{Ca}^{2+}$ ）が大きく減少し、溶存物質が少なくなって、希釈されている。

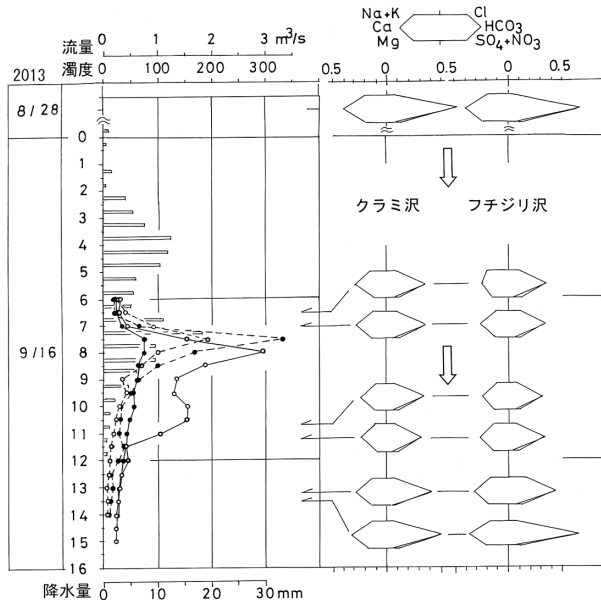


図 14 クラミ沢・フチジリ沢の大雨時の水質変化  
実線：流量、破線：濁度、●：クラミ沢、○：フチジリ沢、右側：ヘキサダイアグラム

さらに、降雨停止後（12 時以降）では、流量の減衰傾向と共に、水質（濁度、電気伝導度および pH）は台風前の状態に向けゆっくりと変化し、水質構成（ヘキサダイアグラム）も復元傾向となった。降雨前後の流量とこれらの水質変化から、降雨前後の基底・直接流出を水質で追跡するため、引きつづきデータ収集に努める必要がある。

#### (6) まとめ

水文に関する以上の調査解析結果を次にまとめた。

①実測値によると、大雨時を除き、年間を通してフチジリ沢の流量がクラミ沢より多い。大雨時にはこの傾向が逆転することがあり、引き続き発生過程の解明が必要である。

②大雨時の両試験流域の観測結果について流量ピーク前後の流量と水質を比較し、降雨強度と流量変化、降雨後の直接流出時の希釈効果や濁度変化、そして降雨停止後の水量減衰と水質回復の状況の把握が欠かせない。

③表流水を供給する地下水の役割（関与率）が大

きいなど、両流域の流況の差を生じさせる原因の解明が欠かせない。水文地質、水収支の検討をさらに進める必要がある。

### III 流域特性

#### 1 水文地質

クラミ沢およびフチジリ沢では、既に言及したように、河床勾配の変換点に崖錐堆積物がある、そこに湧水帯が形成されている。湧水時期では湧水帯より上流側では表流水に乏しい。そして、湧水帯の湧水で増加した表流水は、クラミ沢ではそのまま下流観測点まで流量が持続され、フチジリ沢ではやや増加する。両流域共に溶岩で覆われ、火山斜面の高部にありながら年間を通じ表流水があることは、流域に分布する溶岩グループの浸透性が低いか、あるいは溶岩の下に不透水性の地層がある、上流で地下浸透した地下水が傾斜がゆるくなる地形の変換点で沢に湧水し、湧水帯が形成されていると考えられる。そして、溶岩地で表流水が少ないことと、ボーリング調査で地下に不透水性の地盤が確認されていることなどから、表流水の地下浸透が抑制されている可能性がある。

また、両流域の溶岩グループが占める割合を見ると、フチジリ沢では荻野溶岩グループが 67%、金時山グループが 33%であるが、クラミ沢では 59%と 41%となっている。そして、地形や土壤などの流域の物理特性に大きな差は無いので、降雨時の流出に及ぼす要素として、この 2つの溶岩グループが占める面積の差、性質が溪流の流出に影響している可能性があると考えられる。

#### 2 かん養・湧出機構

試験流域のクラミ沢およびフチジリ沢の渓流水は、無降雨時には地形変換点から下流側の湧水帯での湧水で賄われている。湧水帯で地下水が河床や崖錐堆積物から湧出し、クラミ沢では横ばいで、フチジリ沢では漸増し、溪流を下る。しかし、試験流域よりさらに下ると、流水は次第に地下浸透し、流量を減少する。そして、麓で再び地表に湧出し、河川や平野地下水を涵養している（図 2）。

溶岩グループの構成と分布に違いがある 2 試験

流域で無降雨時および洪水時の流出に差が認められた。とくに、フチジリ沢での地下水流出の役割がクラミ沢に比べ大きく、このため豊かな流水が保たれていると考えられた。

流量（比流量共に）は、年間を通してフチジリ沢の方がクラミ沢より多く、水収支の上からその詳細を明らかにする必要がある。そして、大雨時の出水と水質変化に状況も差があり、これらを裏付ける水文地質を主とする流域特性上の異同を解明する必要がある。

さらに、流域のスギ・ヒノキ人工林の流域に占める割合を較すると、クラミ沢の46%に比べ、フチジリ沢では76%と大きく、両流域で差があるので、森林管理の影響をモニタリング調査で検証する上で今後留意する必要があると考えられる。

#### IV おわりに

流域が持つ自然特性と森林管理に関わる特徴について調査・検討した。調査は流域全体で透水性が良いといわれる火山斜面において、流量観測結果を説明できる地下浸透を抑制する不透水性の地盤の確認から始めた。引き続き、溶岩そのものの透水性、あるいはボーリング調査や踏査で確認されている不透水性地盤と流出との関係について調査解析を行う必要があると考えている。さらに、流域特性の基に森林が生育し、森林管理が継続される中で流域の流況と生態がどのような関係を持って変遷して行くかを検証するために、流域特性の把握への中・長期的な取り組みが欠かせない。

本調査を行うにあたり、試験流域の設定に関し南足柄市総務課管財班にお世話になりました。温泉地学研究所からは、気圧観測データを提供していただいた。また、本調査にあたり、山根研究企画部長、山中研究連携課長には助言を頂いた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

足柄上地区地下水調査研究会・アジア航測株式会社  
(2004) 足柄上地区地下水適正揚水量シミュレーション解析業務委託報告書、pp160.

五名美江・蔵治光一郎(2013) ハゲ山に森林を再生した小流域におけるピーク流出係数の長期変化、日本林学会誌、95(6) : 315-320.

神奈川県自然環境保全センター・株式会社総合環境企画(2011) 平成22年度対照流域法調査森林環境調査業務報告書、pp41.

神奈川県自然環境保全センター・いであ株式会社(2013) 対照流域モニタリング溪流環境調査(フチジリ沢) 報告書、pp92.

神奈川県自然環境保全センター・株式会社東京建設コンサルタント(2014) 平成25年度対照流域法調査地水・土砂流出調査(フチジリ沢) 報告書、pp127.

神奈川県企画部企画調整室(1987) 土地分類基本調査「小田原・熱海・御殿場」pp73.

児島利治・Edwina ZAINAL・大池永子・大橋慶介・篠田成郎(2013) タンクモデルと長期水文観測データを用いた森林小流域における緑のダム機能の評価、土木学会論文集G、69(5) : I\_137-I\_144.

蔵治光一郎・保屋野初子編(2014) 緑のダムの科学、pp253、築地書館、東京.

蔵本康平・篠原慶規・小松光・大槻恭一(2010) 森林回復が流出に及ぼす影響―地質の異なる2流域における検討―、水文・水資源学会誌、23(1) : 32-42.

真板英一・鈴木雅一・太田猛彦(2005) 新第三紀層流域における70年生スギ・ヒノキ林伐採による年流出量の変化、日本林学会誌、87(2) : 124-132.

真板英一・鈴木雅一(2007) 千葉袋山沢流域における伐採による月流出量変化、日本林学会誌、89(4) : 278-287.

真板英一・鈴木雅一(2008) 森林植性の伐採が山地小流域の流況曲線に与える影響―流況の流域間変動に対する植生要因の大きさの検討―、日本林学会誌、90(1) : 36-45.

長井雅史・高橋正樹(2008) 箱根火山の地質と形成史、「箱根火山―箱根火山および箱根地域の新しい形成発達史―」、神奈川県立博物館調査研究報告 自然科学 13 : 25-42.

日本地質学会国立公園地質リーフレット1「箱根火



- 山」編集委員会（2007）国立公園地質リーフレット1「箱根火山」、日本地質学会、東京．
- 荻野喜作・横山尚秀・結田康一・小前隆美（1987）3）水涵養機能の評価の整理、「流域としての機能」農林水産業のもつ国土資源及び環境保全機能の定量的評価 I 桜川・酒匂川等流域における個別環境機能の評価、国土資源資料No. 21、34-37.
- 恩田裕一編（2008）人工林荒廃と水・土砂流出の実態、pp245、岩波書店、東京．
- 鈴木隆介（1971）第1章 箱根火山の地形—地形の成因—「箱根火山」箱根町、7-42.
- 鈴木秀和・宮下雄次・高橋浩・安原正也（2011）箱根外輪山斜面に分布する湧水の水質および同位体組成、神奈川県温泉地学研究所報告、43：29-38.
- 宝馨・立川康人・児島利治・可児良昭・池淵周一（2004）降雨流出に及ぼす山腹斜面の影響—いわゆる「緑のダム」の洪水調節効果の流域水文学的検討—、京都大学防災研究所年報、No. 47B、171-182.
- 内山佳美・山根正伸（2003）森林における水循環モニタリングの調査設計—大洞沢における検討事例—、自然環境保全センター報告、5：15-24.
- 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.
- Yamamoto, Soki (1995) Volcano body springs in Japan, pp264, Kokon-Shoin, Tokyo.
- 横山尚秀・板寺一洋・比日野英俊（1999）足柄平野の地下水賦存特性と自噴帯、日本水文科学会誌、29(2)：81-92.
- 横山尚秀・内山佳美・佐藤壮・山根正伸（2013）試験流域の水文地質等の流域特性、神奈川県自然環境保全センター報告、10：203-214.
- Yokoyama, Takahide (2000) Identification of groundwater sources in the Ashigara Plain using temperature and environment isotopes, Tracers and Modeling in Hydrogeology, IAHS Publ. no. 262：453-458.



## 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



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

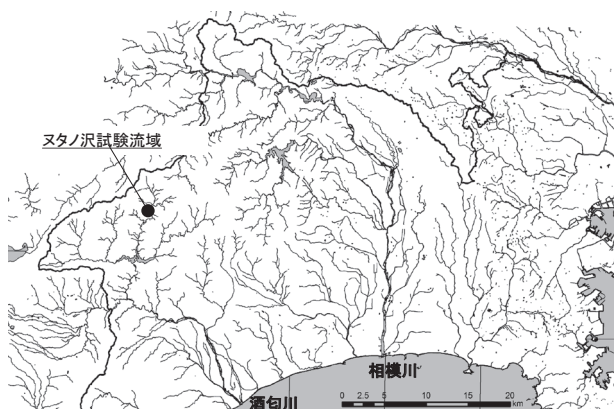


図1 位置図

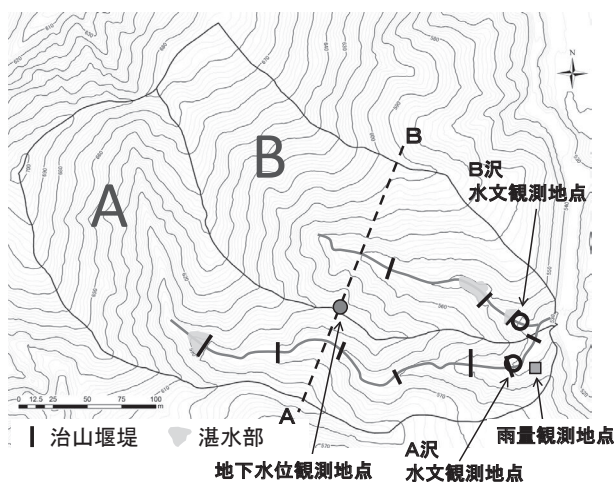
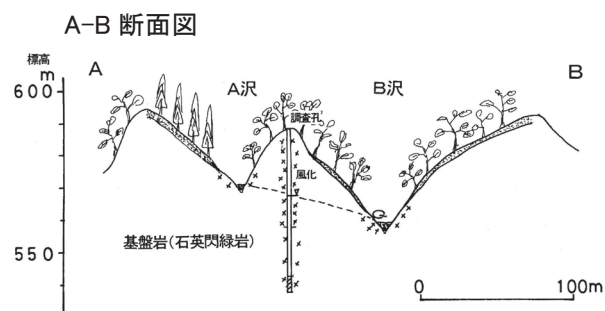


図2 ヌタノ沢試験流域  
断面図は、横山ほか（2013）より

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/km<sup>2</sup>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。



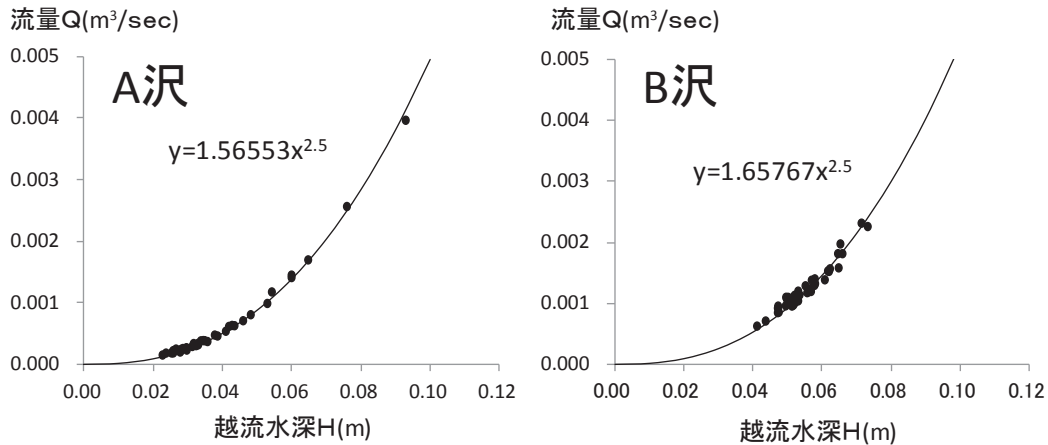


図3 A沢とB沢のH Q曲線

### 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

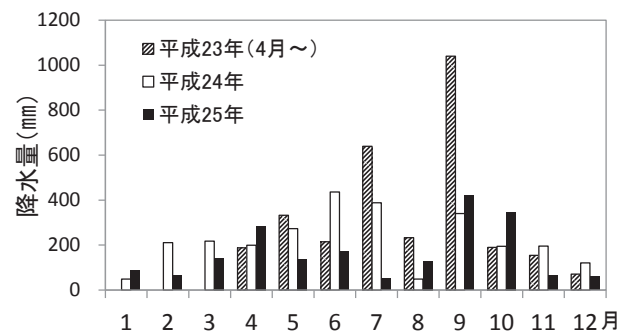


図4 月別降水量

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。

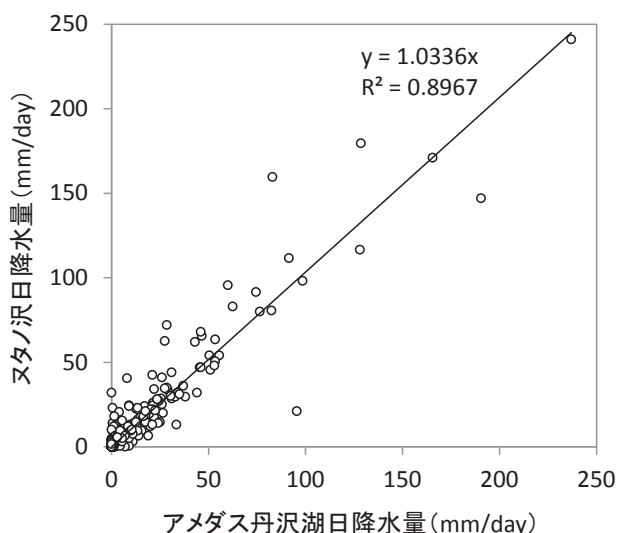


図5 ヌタノ沢とアメダス丹沢湖の日降水量の関係  
アメダス丹沢湖日降水量：気象庁HPよりダウンロード

## 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

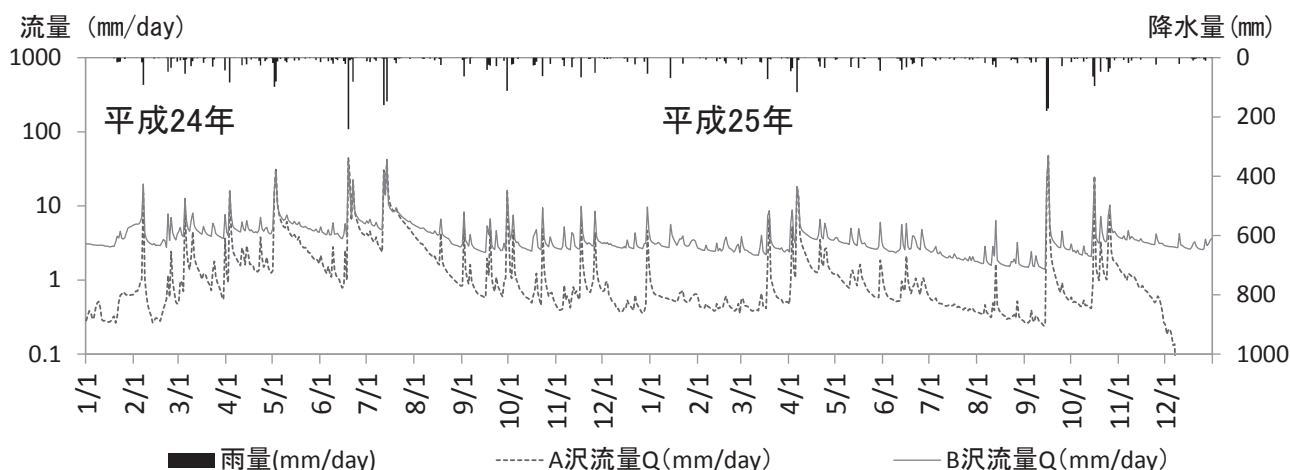


図6 A沢とB沢のハイドログラフ(平成24～25年)

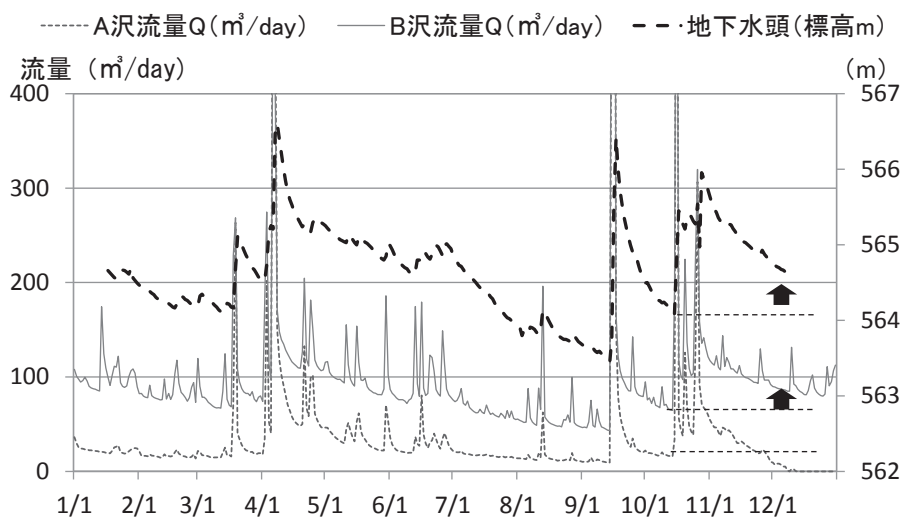


図7 地下水位の日平均値の推移(2013)



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。

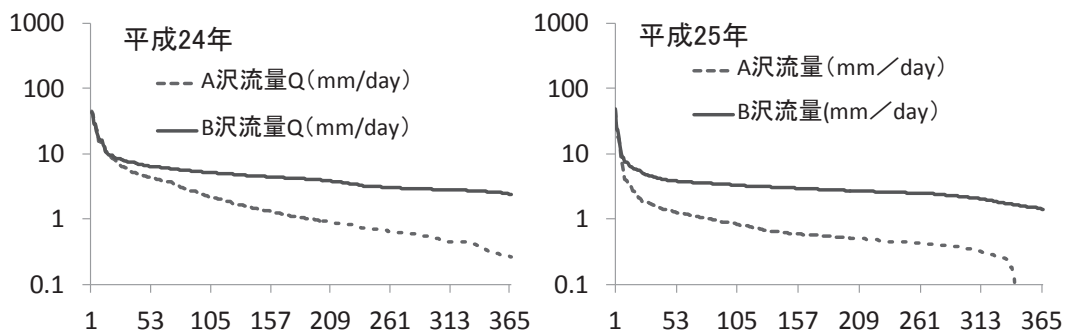


図 8 流況曲線（平成 24 年、平成 25 年）

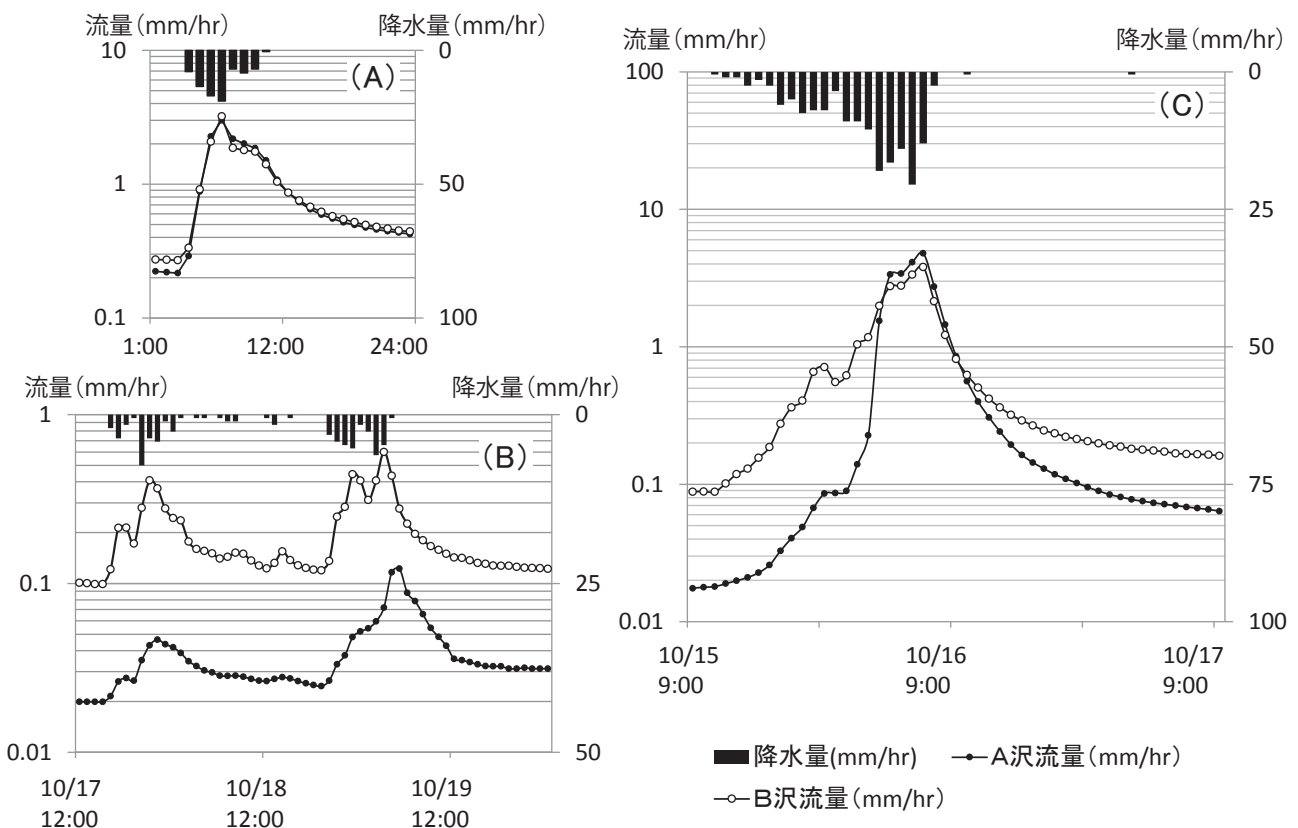


図 9 短期流出のハイドログラフの例

(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

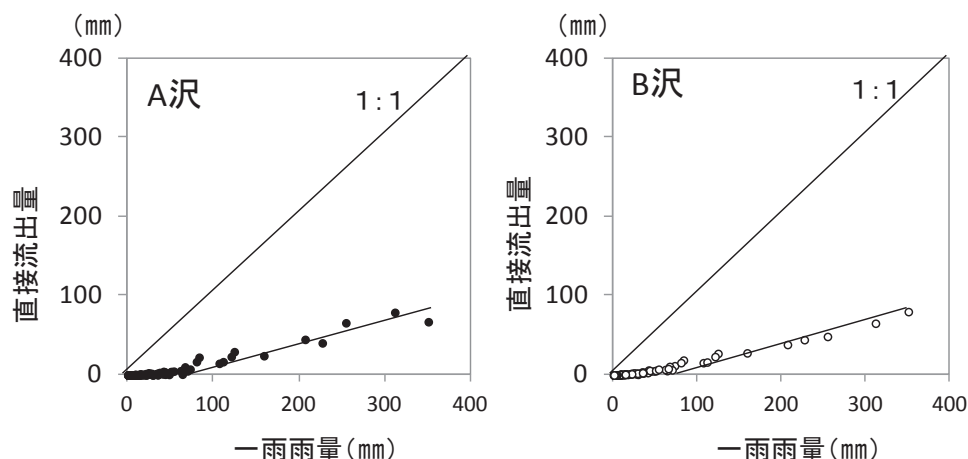


図10 A沢およびB沢の直接流出量と降水量の関係

### 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。

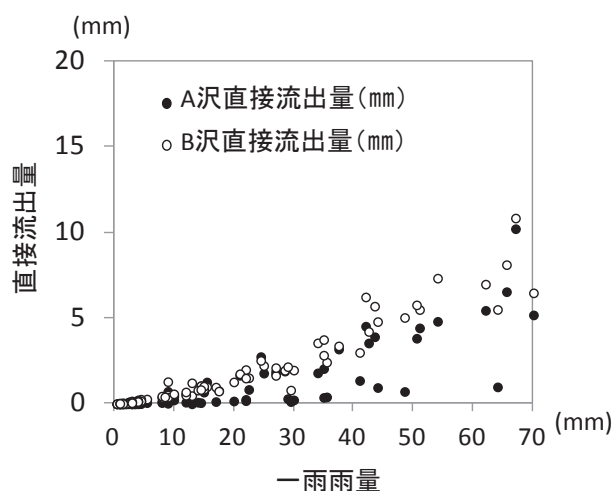


図11 A沢およびB沢の直接流出量と降水量の関係

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%  |

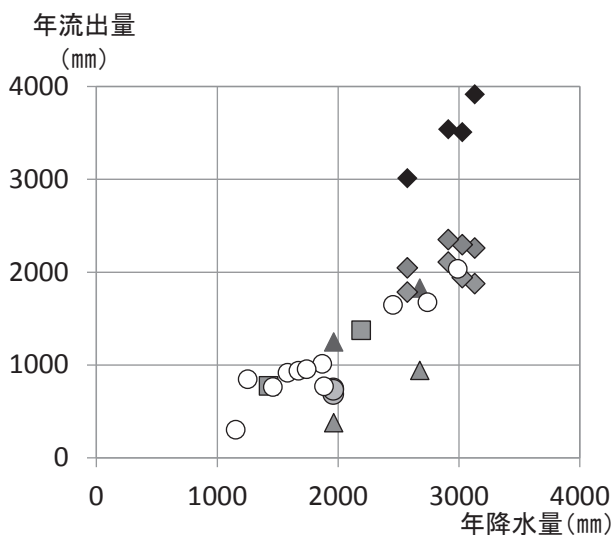
※割合は、すべて年間降水量に対する率。

#### 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壤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

