

県西部の4試験流域における水循環機構解明のための溪流調査

横山尚秀*・内山佳美*・三橋正敏*・丸山範明*、板寺一洋**

River flow exploration for investigating the water flow system of four experimental watersheds in western Kanagawa Prefecture.

Takahide YOKOYAMA*, Yoshimi UCHIYAMA*, Masatoshi MITSUHASHI*,
Noriaki MARUYAMA* and Kazuhiro ITADERA**

要 旨

県西部の山岳地域に設定された試験流域で得られた森林水文学的調査の成果を、試験流域全体で、さらにダム流域（広域レベル）で行う水循環モデル解析に拡大適応させるため、4試験流域の地形・地質の特徴を踏まえ、直接流出率、上流から下流までの流程での湧水と流量変化および一般水質、安定同位体比等を調査した。その結果をもとに直接流出率の現況を把握すると共に、流出過程とくに流域でのかん養・流出および流程での流量増減の状況を水循環特性として取りまとめた。流域別に見ると、大洞沢では、上、中流にある地汙り崩壊地の湧水が主水源となり、その集水範囲は地形境界より広いと考えられた。貝沢は比較的均質な地質構成であるため、流域間の水文地質の差はなく、施業の効果を検出しやすいと評価される。ヌタノ沢は、岩盤の風化が進んだ地質で降水の浸透性は良いが、年間を通じて水涸れしないB沢の方がA沢より河床標高が低く、地下水を集めやすい構造が1要因と考えた。さらに、クラミ沢・フチジリ沢の流出の差は、流域を占める荻野溶岩に起因すると考えた。

I はじめに

神奈川県の水源地では、スギやヒノキの人工林の手入れ不足やニホンジカの高密度化が原因となって林床植生が衰退するなど水環境の劣化が顕著となっている。こうした状況と、従来から行われてきた水源開発による水供給確保から、水を育む水源の環境保全へと取り組みの方向を転換し、水源環境保全税を導入した。シカによる採食影響や人工林の管理放棄への対策として、平成19(2007)年度から20年間、4期に亘る実行5ヵ年計画のもと9事業を実施し、劣化した森林の公益的機能の保全・再生を図っている。当所では、これらの事業を検証する「10.水環境モニタリング調査」を進め、試験流域をベ-

スとした各種森林整備事業による水源かん養機能の改善効果の検証を行っている(内山ほか、2013b)。

この調査では、水源地である県西部「かながわ水源の森林エリア」の山岳地に試験流域を設定し(図1)、流域内の数haの小流域にシカを排除する植生保護柵を設置し、あるいは間伐を行い、これらの施業効果を検証するため対照流域法に基づくモニタリング調査を進めている。試験流域は、大洞沢、貝沢、ヌタノ沢およびクラミ沢・フチジリ沢の4流域で、流域ごとに気象、流出、水質など水文観測調査のための施設を設置し、森林環境水環境モニタリング調査が開始された(内山、2013a)。

しかし、長期間の観測結果に基づく検証結果が報告されている(五名・蔵治、2012・同、2013a・同、

* 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)

** 神奈川県温泉地学研究所 研究課 (〒250-0031 小田原市入生田 586)

2013b) ことから、森林の保全・再生に起因する洪水緩和、水質改善、水質浄化などの機能の回復の検証には長期間掛かると考えられる。そこで、調査計画では、水循環モデル解析による効果予測を併せて行い(森ほか、2013)、予測解析結果を参照しながら調査観測を進め、施業効果の裏付けを並行して進める方法をとっている。試験流域ごとに、施業シナリオに基づく解析を行い、さらにダム流域(広域レベル)での予測に拡大させ、モニタリング事業に活用させる手順を取っている。

これらの調査解析には、基本となる流域特性と水循環フレームの把握が欠かせない。本調査では、4試験流域で、気象観測に併せ量水堰(写真1)を用いた流量、水質の常時観測調査を進めながら、現地踏査を随時行い、水文地質の把握に努めている。本

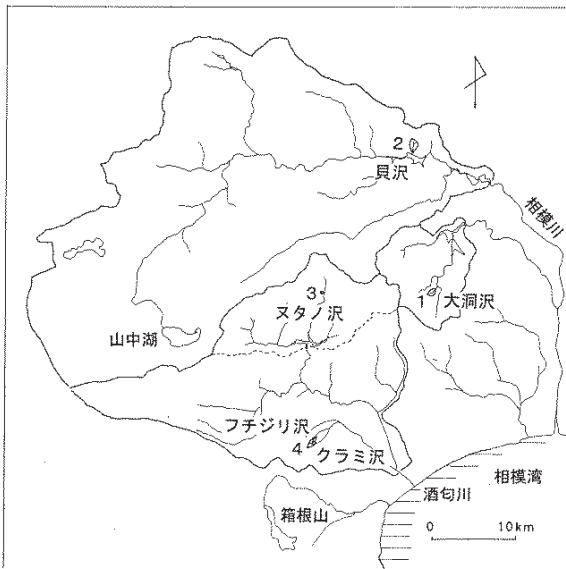


図1 かながわ水源エリアと試験流域の位置

1: 大洞沢、2: 貝沢、3: ヌタノ沢、4: クラミ沢・フチジリ沢



写真1 ヌタノ沢B沢の量水堰

稿では主に現地踏査と流量・水質観測によってこれまでに得られた試験流域内の流程に係る情報を整理し、各試験流域の水循環特性について考察した。

II 試験流域の流域特性と観測調査の内容

1 試験流域の概況

水源の森林エリア内に設置された試験流域(図1)は、丹沢山地東部の宮ヶ瀬ダム上流に位置する大洞沢、相模ダム上流(際)の貝沢、三保ダム上流のヌタノ沢および酒匂取水堰に注ぐ狩川上流のクラミ沢・フチジリ沢の4ヶ所である。4試験流域で実施している施業内容と施業が水源環境に及ぼす効果の検証項目と評価法を表1に、それぞれの流域の概要を表2に示した。

施業内容は、適正な森林管理を進める間伐とシカの採食被害を防止する植生保護柵設置である(表1)。なお、大洞沢では両事業を行っている。しかし、それぞれの流域特性(表2)が示すように、神奈川県西部の自然特性は変化に富んだ複雑な地形・地質が特徴である。したがって、それぞれの流域ごとの流域特性を踏まえ、モニタリング調査地点の位置づけを行い、観測調査を進める必要がある。流域ごとに行われる施業効果の検証は、流域の水源地環境(流域特性)が多様であることを踏まえ、隣接流域を比較しながら行う対照流域法を用いて行われている(内山ほか、2013a)。

2 調査方法

平成19(2007)年度から、試験流域ごとに気象観測及び水文観測の施設とシステムを整備し、モニタリング調査が開始された(内山ほか、2013a・内山ほか、2013b)。観測調査は、流域特性の把握を続けながら、常時観測調査および随時観測調査を行っている。常時観測調査では、通年の観測データをテレメータあるいはロガー観測により収集し、随時観測調査では必要に応じて追加項目、地点で観測情報を得て、これらを総合して水循環情報として取りまとめるほか、水循環解析モデルに反映させている。それぞれの観測状況を表3に示した。なお、試験流域と観測地点は図6～9で流域別に示した。

(1) 流域の水文地質調査

森林植生の劣化から回復までの地表条件の変化が

表1 試験流域の施業と評価項目・評価法

項目	大洞沢	貝沢	ヌタノ沢	クラミ沢・フチジリ沢
施業	間伐・植生保護柵	間伐	植生保護柵	間伐
評価項目	流況変化(直接流出率等)、水収支(蒸発散等)、濁度等水質	同左	同左	同左
評価法	対照流域法と林内調査、流程調査、モデル解析	同左	同左	同左

表2 試験流域の概要

項目	大洞沢	貝沢	ヌタノ沢	クラミ沢・フチジリ沢	
地形	面積 ha	65(県道下:58)	86 (No.5:72)	7(4、3)	76(34、42)
	高低差 m	448.	373.	170.	335、 357
	傾斜度 (°)	24.1	18.3	23.3	14.7、 13.7
	地形	北東向き谷.上流と中流に崩壊地形	南に開く谷.尾根部はなだらか	東向き谷.西側は急峻な谷(断層).尾根に段差(節理)	箱根外輪山東麓.溶岩G(狩川・苅野・金時)
地質	地質年代	新第三紀	中生代・古第三紀	丹沢層群堆積以降	更新世
	基盤岩	丹沢層群(溶岩等の火山岩).断層、風化による粘土化	小仏層・相模層群の砂岩・頁岩	石英閃緑岩.緻密な石英閃緑岩と捕獲岩の丹沢層群岩体が不透水層の役割	火山噴出物(スコリア・軽石・火砕流堆積物).固結ローム・狩川溶岩が不透水性
	断層・節理等	流域No.3、No.4を通る断層.地滑り崩壊地	東西方向の断層	北東-南西方向の節理	上流部に溶岩露出
	風化帯	崩壊岩・基盤岩の風化・粘土化	表層は風化、薄い	風化が顕著、マサ状堆積物	風化帯はない
	土壌(層厚分布図・平均厚 m)	尾根、崩壊地及び南斜面で土壌が発達1.74	尾根、斜面共に土壌が発達.ローム層あり1.67	土壌浸食が進んでいるが、緩斜面で土壌厚いA:1.43 B:2.29	全般に土壌が発達ローム層が厚い2.74
水文	水源	上下流の崩壊地湧水	斜面地下水湧出	両沢の源頭部湧水	上流の溶岩帯から湧水
	渇水期比流量.2011.11	県道下:4.11 mm/day No.3:1.32 mm/day No.4:5.72 mm/day	No.4:0.57 mm/day No.5:0.79 mm/day	A沢:1.15 mm/day B沢:3.50 mm/day	クラミ沢:0.41 mm/day フチジリ沢:0.46 mm/day
森林	林相・林床植生	スギ・ヒノキの人工林.林床は不嗜好性植物が占める	スギ・ヒノキの人工林+自然林.林床植生発達	上流に広葉樹、下流にスギ・ヒノキ人工林、林床植生貧弱	スギ・ヒノキの人工林、間伐が進む.林床植生良好
	施業	シカ柵(No.3)・対照流域(No.4)、間伐	No.1、2を間伐、No.3は巨木林	A沢に植生保護柵、B沢が対照流域	間伐と経過観察
備考	No.2/県道橋より上流	No.5/堰より上流側	県道橋より上流側	林道橋より上流側	

降雨時の表面流出(雨水浸透と流出)へ影響を及ぼし、同時に地下水かん養(基底流出)に影響する。植生保護柵の設置や間伐などの施業による森林環境変化が、水源かん養機能に如何に影響を及ぼしているか効果検証するため、渓流水の流出記録(流況)から、雨水流出時や年間の流況について、水循環の視点で解析する必要がある(中野・1976、塚本・1992)。そこで、試験流域で土層厚分布調査現

地踏査やボーリング調査などを行い、流域の水文地質を把握し、試験流域間や施業実施流域と対照流域(表3)の特徴と流域間の異同の把握を進めている(横山ほか・2013a、横山ほか・2013b、横山ほか・2014、横山ほか・2015)。

(2) 常時観測調査

気象観測施設では、気温、降水量、湿度、風速等

表3 試験流域の実施流域と対照流域

項目	大洞沢	貝沢	ヌタノ沢	クラミ沢・フチジリ沢
流域の組合せ	対照流域：No. 3/No. 4	対照流域：No. 1/No. 2/No. 3	対照流域：A/B	クラミ沢/フチジリ沢
施業の内容	植生保護柵(No.3)	間伐・巨木林化	植生保護柵(A)	従来の管理継続(間伐)
気象観測	1ヶ所(降水、風、湿度、日射)	2ヶ所(同)	1ヶ所(同)	1ヶ所(同)
量水堰	3ヶ所：本流No. 1、支流No. 3、No. 4	5ヶ所：No. 1、No. 2、No. 3、No. 4、No. 5	2ヶ所：A、B沢の最下流	2ヶ所：クラミ沢、フチジリ沢の最下流
地下水観測井	2ヶ所：B1、B2(深度50m)	—	1ヶ所(深度50m)	1ヶ所(深度50m)
備考	No. 3：植生保護柵設置 No. 4：対照流域	源流域に試験流域No. 1～3を設定、間伐・放置	A流域：植生保護柵設置 B流域：対照流域	現状の維持管理(間伐)両流域を長期的観測

をテレメータ観測している。流量観測施設では、量水堰の越流水位を常時観測(流量換算)すると共に、水温、濁度、電気伝導度を併せて常時観測している。また、流域内に地下水位観測井(深度50m)を設置し、ロガーの地下水位の連続観測結果を回収している。そして、流量、地下水位および水質については、データの精度管理を兼ね、月1回の頻度で現地調査を行って実測している。これらの観測データは関係機関により解析評価され、年度ごとの業務報告に速報されている。

(3) 随時観測調査

施業に伴い林相、林床植生などの変化が想定され、出水状況の解析や流出変化を流域内の何処で効果的に検出できるか検討できるよう、出水時観測調査と流程調査を行っている。出水時間側調査では、出水時の常時観測データを補い、直接流出と基底流出の分離解析ができるよう、量水堰で降雨前後の流水の自動採水調査を行った。また、流程調査では、溪流の現地状況に合わせ、上流から下流までの流程に沿った流量と水質の調査を秋期の湧水期に行った。なお、試験流域で簡易貫入試験による土層厚調査、流域範囲の確認のための周辺地域の地質踏査を行った。

ア 出水時観測調査

量水堰に設置した自動採水器で出水時の流水を採水し、陽イオン、陰イオンおよび安定同位体等の水質を分析した。その結果をハイドログラフ上に表示し、流量増加と減衰および水質の時系列変化から直接流出と基底流出の分離を行った。ハイドログラフ

上での分離方法は、これまでは水平分離法によってきたが、今回は変曲点法を試みた。しかし、まだ事例が少なく、引き続き事例を積んで検討が必要と考えている。また、水質の時系列変化について、常時観測結果から得た降雨と基底流出量増加および地下水頭の上昇、減衰をハイドログラフ上で比較した。さらに、これまで得られた他の試験流域の直接流出の解析結果(白木ほか、2013; 小田ほか、2013; 内山ほか、2015)と比較検討した。

イ 流程調査

無降雨時の流域全体の流況を把握するため、年1回の頻度(秋期)で上流から下流に至る流程で踏査を行い、湧水位置、流量・水質の変化を追跡している。本調査は、流域の地形・地質と関連させて流域の保水性、溪流と地下水との関係を把握することを目的としており、出来るだけ湧水時に行うよう努めた。すなわち、平常時の流域ごとに流程での湧水、流量、水質状況から湧出地点を定性的に確認し、渓流水の地下水の湧出かん養や伏没浸透の状況(渓流水と地下水との交流)を調べることができる。

流程での流量の増減が示す湧出涵養、減少が示す伏没浸透の状況、およびそれに伴う水質変化については、当初から調査を進めている(横山ほか、2013)。そこで、これまでの調査結果に新たに得られた安定同位体分析結果などを加え、流域の水循環・水収支の視点から整理した。なお、流程での流量の調査から堰堤前後の水量・水質変化が大洞沢、ヌタノ沢で認められたことから、治山堰堤の影響についても調査を開始した。

Ⅲ 調査結果

常時観測調査と随時観測調査の結果について、降雨時の流出と無降雨時の流出として調査結果を取りまとめた。降雨時の流出については、施業実施前の出水事例として2013年10月の台風時にヌタノ沢で観測された出水時の直接流出を解析した結果を示し(図2)、他流域の直接流出の状況と比較した(表6)。さらに、降雨、流量、地下水等の時系列変化(図3、4)から地下水涵養および基底流出の状況を検討した。また、4試験流域の流程の流出状況が比較できるよう、毎年行っている試験流域の一斉流量調査結果から試験流域内の渇水期の比流量の分布を図示し(図5-1~4)、流域の上流から下流までの流程流量・水質調査結果(図6~9)や1年間(ヌタノ沢)の流量・水質変化についてとりまとめ、流域ごとの流出かん

養・伏没浸透の状況を確認した。

1 降雨時の流出

試験流域の降雨時の直接流出と基底流出の分離を小田ほか(2013)が大洞沢で、白木ほか(2013)が貝沢で、内山ほか(2015)がヌタノ沢で行っている。いずれも、ハイドログラフ上で水量増加が開始した時点から再び開始時の水量まで低減するまでを直接流出として分離し、増加分の水量として算定している。これらの成果を取りまとめて表4に示した。試験流域の降水量と流量の観測結果をみると、降水量の内、降雨があっても流量増を生じない(流域の遮断効果により流出に直接寄与しない)無効降水量が0~20mm程度あって、それより大きな降雨時に直接流出が生じる。なお、直接流出率は、大洞沢や貝沢では降水量が100mmを超える大雨時にほ

表4 試験流域の流出率

流域	直接流出率	年間流出率	備考	流域	直接流出率	年間流出率	備考
大洞沢No.1	28%	74%	2010、2011年観測結果(小田ほか、2013)値は2年の平均値	ヌタノ沢 A	2012:13%	2012:50% 2013:39%	2012、2013年観測結果(内山ほか、2015)
大洞沢No.3	35	62		ヌタノ沢 B	2012:13		
大洞沢No.4	33	120		クラミ沢	9.8%	—	
貝沢No.1	11.6%	2011:51.2%	2010、2011年観測結果(白木ほか、2013)	フチジリ沢	14.4	—	
貝沢No.2	9.8	2011:40.2		備考 クラミ沢・フチジリ沢の事例が少ない。			
貝沢No.3	8.7	2011:34.2		4流域とも、引き続き観測調査が必要。4流域一斉調査も欠かせない			
貝沢No.4	9.6	2011:41.1					

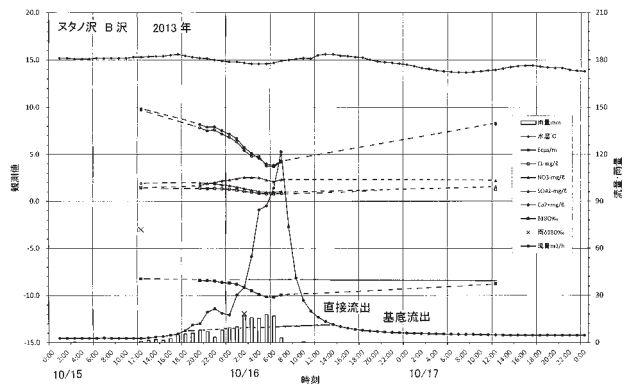
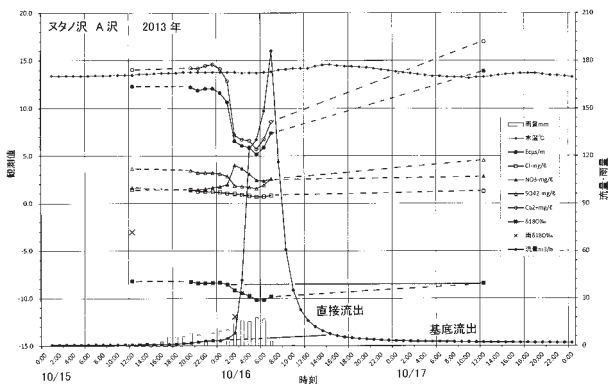


図2 ヌタノ沢の出水時の流量、水質の変化(2013年10月15・16日)
 ヌタノ沢 A 沢 直接流出量: 840m³/d 21.53mm 流出率: 13.6% 継続時間: 15時間
 ヌタノ沢 B 沢 直接流出量: 642m³/d 21.39mm 流出率: 13.5% 継続時間: 21時間

表5 直接流出の概要

流域	流出開始時	流出終了時	継続時間	ピーク流出時	ピーク流量	基底流出量増加
A 沢	16日2時	16日15時	14時間	16日7時	186.1m³/時(4.65mm/時)	2.9m³/時
B 沢	15日19時	16日14時	20時間	16日7時	121.8m³/時(4.06mm/時)	3.8m³/時

ば100%あるいは100%を越えるが、それ以下では10～40%台であった。大洞沢の年降水量に対する直接流出率は28%～35%（年流出率：74～20%、2010～2011年：小田ほか、2013）、それ以前では降水に対しては14.4%（神奈川県、1986）と報告されている。貝沢では、年降水量に対する直接流出率は28～48%（年流出率：40～51%）で、150mm以下の降水量に対し8.7～9.8%であった（白木ほか、2013）。また、ヌタノ沢では、年間降水量に対し13%（年流出率：39～50%）の流出率であった（内山ほか、2015）。クラミ沢・フチジリ沢については、まだ解析が十分行われていないが、2013年の台風接近による出水時の解析データからクラミ沢が9.8%、フチジリ沢が14.4%と直接流出率が得られている（表4）。

森林環境の変化による表面流出、地下浸透現象の変化が想定され、これらをハイドログラフの直接流出の中で追跡していく上で、施業の事前～事後の直接流出の内容を捉えておく必要がある。流域別の直接流出率（表4）は、大洞沢が28～35%、貝沢が8.7～11.6%、ヌタノ沢が13%、クラミ沢が9.8%、フチジリ沢が14.4%となっているが、流域の水文地質（透水性）との関連性を踏まえた検討を行う上で、大雨時を避け、地表の透水性を反映した流出解析が必要である。そこで、2013年10月の台風18号の接近によるヌタノ沢の出水の状況について一般水質および安定同位体の変化とあわせて直接流出の解析を行った（図2）。

図2上で両沢の直接流出の状況を比較すると、流量が増加を始める時刻はA沢が16日の2時、B沢が15日の19時、ピーク流量はA沢が16日の7時の186.1m³/時（4.65mm/時）、B沢は7時の121.8m³/

時（4.06mm/時）、直接流出の終了はA沢が16日の15時、B沢は16日の14時であった（表5）。A沢とB沢の出水状況を比較すると、A沢は直接流出が14時間続き、B沢より6時間短い。さらに、ピーク流量はA沢の方が64.3m³/時（0.59mm/時）ほど大きい。B沢の流出はA沢に比べやや穏やかな流出であった。

出水前後の水質変化を図2上で追跡すると、表面流の発生による流量増加と水質の濃度低下は、出水前の流水に、地下浸透せず地表面を流下した雨水が混入し、水質が希釈された状況が読み取れる。出水期間の後半が採水されていないが、ピーク流量前の一般水質の変化を見ると、NO₃⁻を除く項目が流量増加と共に濃度が低減し始め、しかも初めの2時間の変動が大きい。A沢ではピーク流量発生時の2時間前の5時に、B沢では2時間前の5時に最も濃度が下がっている。しかし、NO₃⁻濃度は初め増加し、低減へと他と逆の変化が観測された。さらに、δ¹⁸Oの変化を見ると、降雨による希釈効果を端的に示しており、-3.00‰の降雨の流入影響を受け、A沢では15日12時の-8.19‰が16日5時に-10.15‰に、B沢では15日12時の-3.00‰が16日5時に-10.17‰へと変化した（軽くなった）。そして、これらの変化は5時以降に元の水質へ緩やかに戻る傾向となった。

この大雨は総雨量159mmで、雨の地下水かん養の状況を観測井の地下水頭記録（図3、4）で見ると、地下水頭上昇の開始はA沢、B沢の流出より早く、15日17時であったが、上昇開始はゆっくりで、16日に入ってから上昇勾配が大きくなり、ピーク日は1日遅れの17日14時であった。この間の水頭上昇量は1.37m、基底流出量増加は、A沢が2.9m³/時（比流量0.07mm/時）、B沢が3.8m³/時（比流量0.13mm/

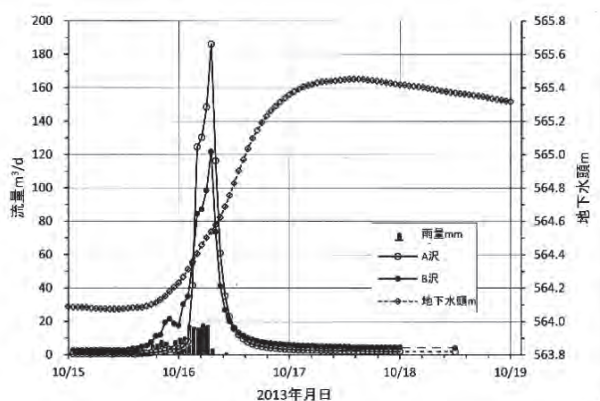


図3 ヌタノ沢の大雨時の流量、水頭変化

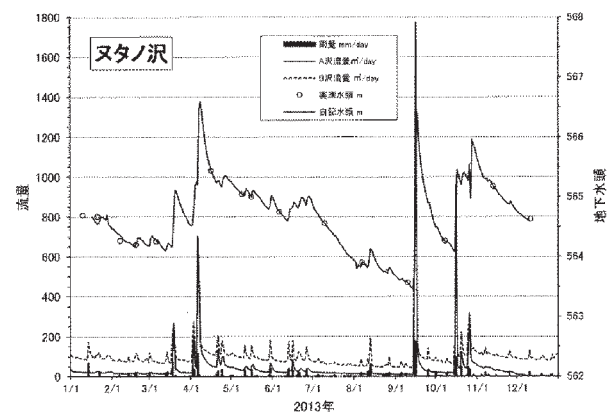


図4 ヌタノ沢の流量、地下水頭の年間変化



写真2 ヌタノ沢 A 沢の出水後の堆砂



写真3 大洞沢の出水後の量水堰 No.1

時)であった。基底流出は、17日から次の降雨があった20日の1日前の19日までの3日間に、A沢で $4.78\text{m}^3/\text{時}$ ($0.12\text{mm}/\text{時}$)、B沢で $8.11\text{m}^3/\text{時}$ ($0.17\text{mm}/\text{時}$)減少し、地下水頭は 0.24m 低下した。

このヌタノ沢の事例(図3)で示されるように、まとまった降雨後の直接流出とその直後の基底流出の増加が繰り返し生じ、年間の流出が維持されている。すなわち、図4の年間ハイドログラフに見られるように、降雨後の基底流出の増加と地下水頭の上昇と減衰を繰り返しながら地下水が溪流に流出し、流水が維持されている。

なお、出水後の量水堰と量水堰に土砂が堆積した様子(2017年10月)を写真2、3に示した。

2 無降雨時の流出

(1) 渇水期の流域の比流量

流域の保水性を比較するため渇水期の一斉流量調査結果を比流量で比較した。2015年10月～11月の一斉調査の結果は図5-1～4のとおりであった。比流量が $2\text{mm}/\text{日}$ 以上の流域を斜線で囲んで図中に示した。比流量が比較的大きい流域は、大洞沢のB流域とD流域、ヌタノ沢のB沢流域(No.4流域)およびフチジリ沢流域が該当した。

渇水期には、これらの流域の湧水が涸れずに主水源となっているし(横山ほか、2013)、貝沢を除く流域ではこの水を求めてシカなどの動物が生息している。大洞沢のD流域は上流にあり、B流域は中流にあって、両流域共に地這り崩壊地で(棚瀬、

1997)、地滑り崩壊地で破碎された基盤岩の堆積物が保水性を持ち、ここから年間を通して湧水を溪流に供給している。ヌタノ沢は、全体が風化しやすい石英閃緑岩の流域で、A沢右岸の湧水(渇水期に涸れる)、B沢の源頭湧水帯からの湧水が供給源となっている。また、フチジリ沢は、箱根外輪山(火山)の中腹にありながら年間を通して流水がある。これは、比較的の不透水性の狩川溶岩グループが基盤となって中流に湧水帯が形成されていると考えられる。そこで、これらの湧水と溪流との相互関連を継続的に観察するため、毎年一度の頻度で調査している。

試験流域の豊かな湧水に由来する比流量を比較すると、流域比流量が良い大洞沢B、D流域、ヌタノ沢B流域およびフチジリ沢ともに破碎した岩盤、風化した閃緑岩、割れ目の多い溶岩が帯水層となっており、地質は異なるものの、水文地質的には同様な保水性を持っていると云える。一方、大洞沢のB流域とB'流域(図5-1)の境界を現地を確認すると、同じ崩壊地にあって、実際の集水(流域)範囲は同一の可能性が高いと考えられた。したがって、地形境界を越えて集水している可能性が高いことも比流量が大きい要因と考えられる。モデル解析では、帯水層の範囲の確認と水収支上のチェックが必要である。なお、貝沢は、支流の比流量がやや大きくなったが、全般には同様な比流量を示し、均質な水文地質を裏付けている。

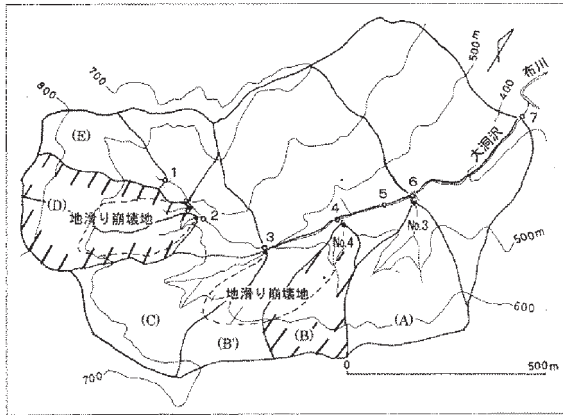


図 5-1 大洞沢の比流量分布

A : 1.16 B : 4.28 C : 1.11 D : 4.02 E : 0.18

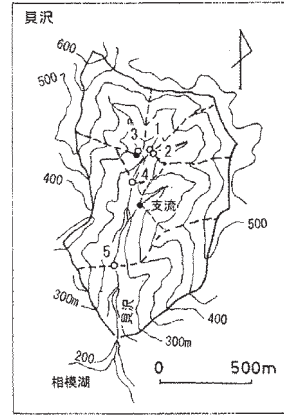


図 5-2 貝沢の比流量分布

1:1.75 2:1.09 3:0.97 4:1.05 支流:1.97 5:1.46

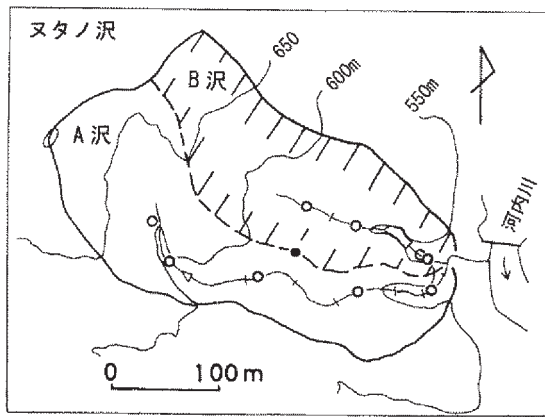


図 5-3 ヌタノ沢の比流量分布

A 沢 : 1.0 B 沢 : 3.2

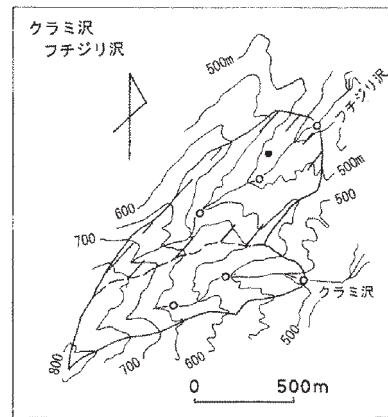


図 5-4 クラミ沢・フチジリ沢の比流量分布

クラミ沢 1.3 フチジリ沢 4.0

表 6 試験流域の流程の調査

項目	年月	調査項目	備考
大洞沢	2011.11、2012.1、2013.9、2015.10、2016.11、2017.12	流量・水質	
貝沢	2011.11、2015.10、2016.11、2017.12	同上	
ヌタノ沢	2011.6~毎月	同上	主担当流域
クラミ沢・フチジリ沢	2013.7、2014.3、2015.10、2016.11、2017.12	同上	

(2) 流程の流況調査

ア 流程での水文調査結果

試験流域の水循環モデル解析、水循環解明にあたり、無降雨時の流路に沿った地質と流出状況から流出に係る水文地質情報を得るため、流程の流量、水質調査に基づく実態の把握が重要である。とくに、上流から下流に至る流量の増減と地質・地下水との関係を調査しておく必要がある。そこで、平成 23 (2011) 年から 4 流域の一斉調査を行い、上流から下流に至る流程での水量、水質の調査を開始した (表 6)。

流域ごとの調査地点と代表的な年次の調査結果を図 6 ~ 9 に示した。流程での調査結果は、横軸に最下流の量水堰から上流の観測地点までの距離を、あるいは地点番号順に図化しており、上段に河床標高と流量を、下段に水温、電気伝導度および $\delta^{18}O$ などの水質を図示した。図中には流入する支流の値も ↓ を付して盛り込んだ。なお、調査実施状況 (表 6) に示たように、4 流域を同時期に行った例はまだまだ少なく、しかも調査地点数が少なかったことなどから、流域別の調査結果の表示は同一年次とせず、特定年次とした。

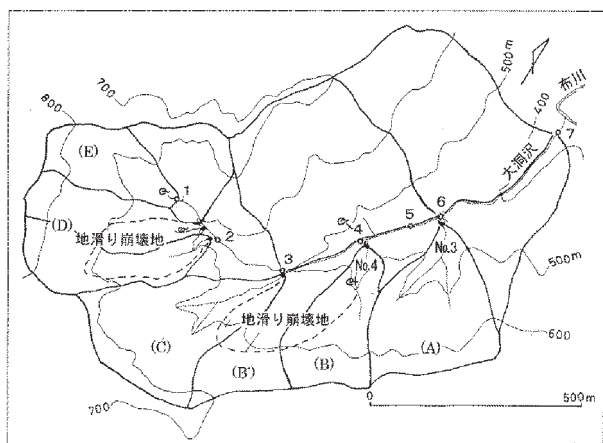


図 6-1 大洞沢流域と調査地点 (図中 1~7)

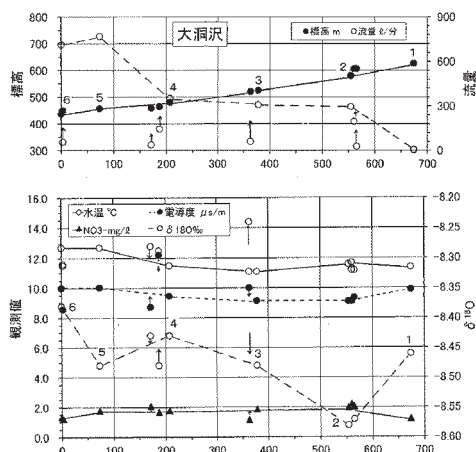


図 6-2 大洞沢の流程調査結果 (2015/10/26・27)

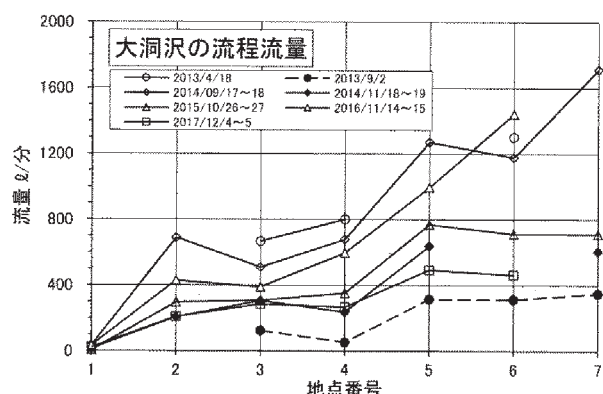


図 6-3 大洞沢の5年間の流程流量比較

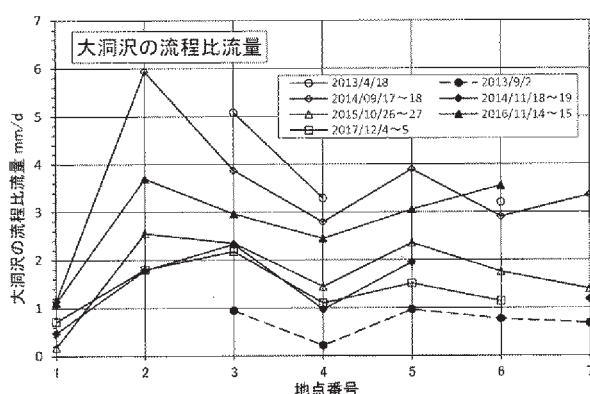


図 6-4 大洞沢の5年間の流程比流量比較

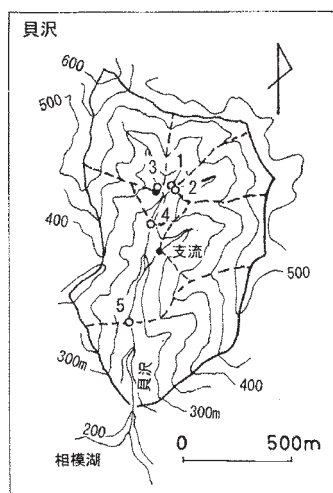


図 7-1 貝沢流域の調査地点

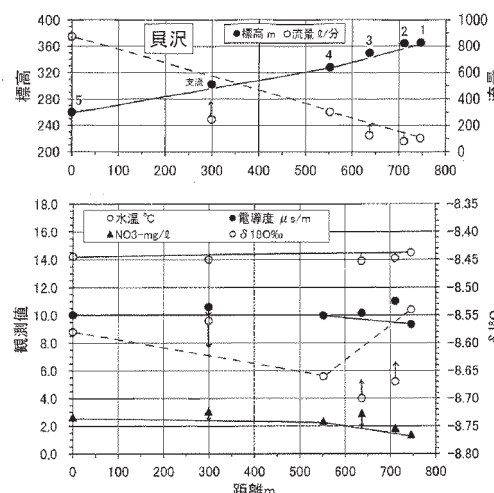


図 7-2 貝沢の流程調査結果 (2015/10/7)

(ア) 大洞沢

大洞沢 (図 6-1) は源頭部の滲み出しが水源となっているが、上、中流部の地回り崩壊地の湧水が豊富で、年間を通して主水源となっている (小田ほか、2013)。2015年10月末に行った調査結果 (図 6-2) によると、流量 (図 6-2 上、破線) は地点6より上流の地点2と5で大きく増加している。これらは図

中に破線で囲まれた崩壊地から流入する湧水が要因である。大洞沢の流量は、これらの流入があった後は、低減あるいは横這いとなる。この傾向は5年間の記録 (図 6-3 ~ 4) に認められるが、実流量より比流量の方が顕著に出ている。

大洞沢は、地点3より下流では河床の勾配が緩くなり、地点4前後の河床は大きな礫を伴う砂礫が堆

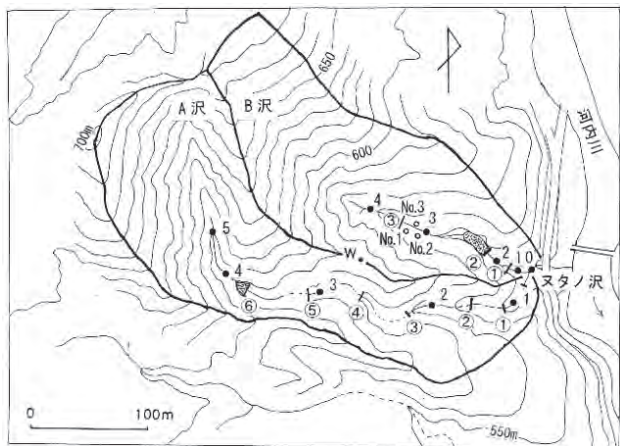


図 8-1 ヌタノ沢流域の調査地点と治山堰の位置

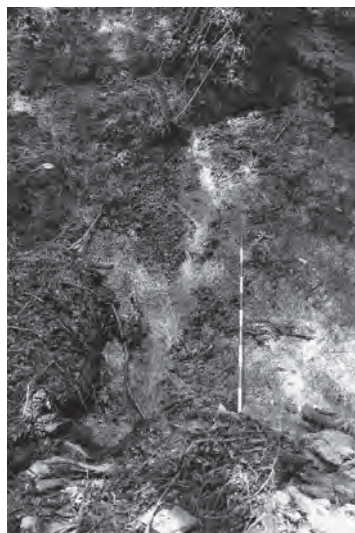


写真 4 ヌタノ沢 A 沢の源頭湧水

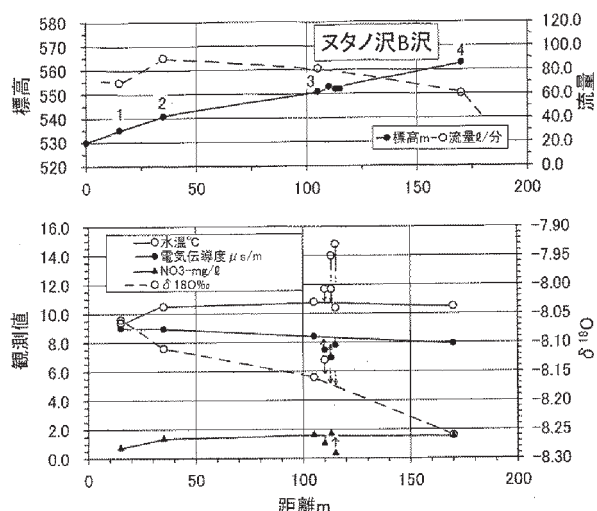
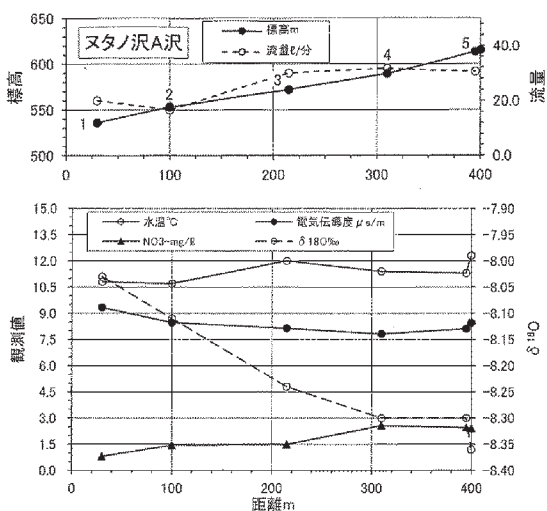


図 8-2 ヌタノ沢 A 沢 (左図) および B 沢 (右図) の流程調査結果 (2016/11/7)

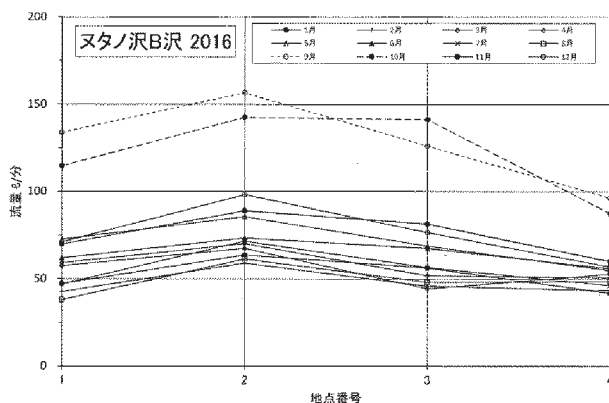
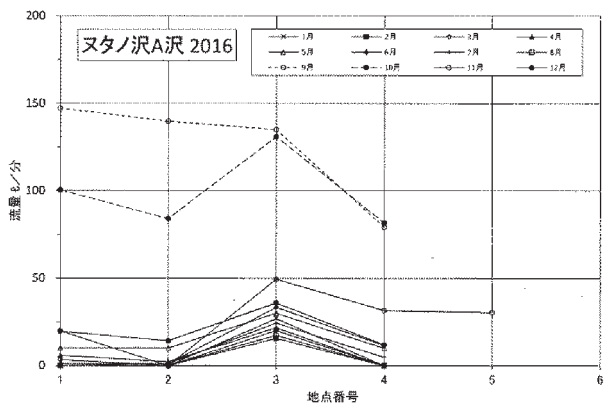


図 8-3 ヌタノ沢の 2016 年の年間流程流量の比較 (A 沢：左図、B 沢：右図)

積している。すなわち、地点 4 は満砂した治山堰堤の上に位置している。そして、これより下流側で支流 No. 4 (対照流域) の流入、さらに左岸湧水の流入および治山堰堤の排水が加わり、水量は再び増加す

る。水質 (図 6-2) を見ると、地点 2 と 5 で支流からの流入水が加わったことによる水温、電気伝導度、 NO_3^- などの水質にも変化が認められる。

なお、 $\delta^{18}\text{O}$ の値は上流方向に軽くなる傾向が認

められ、その傾向は $-0.04\text{‰}/100\text{m}$ であった。

(イ) 貝沢

貝沢(図7-1)では、源流域のNo.1流域の稜線(尾根)の下で、火山灰変り土壌の下にパイプ流の痕跡が認められ、小規模の湧水が確認されている。貝沢では、尾根にローム層が堆積し、土層厚も厚く、他のNo.2、No.3流域でも同様に、源頭部から小規模の湧出が始まり、流下につれて次第に流量は増加する。2015年10月の調査結果(図7-2)によると、水流は、流域No.1からNo.2、No.3と合流し、流量は上流から下流に直線的に増加している。比流量分布(図5~2)でも明らかなように、流程流量は流域全体の均質な水文地質状況を裏付けた流出を示している。なお、流域内の水質の差は小さく、上流から下流への変化は小さい。 $\delta^{18}\text{O}$ の変化は、 $-0.06\text{‰}/100\text{m}$ と上流方向に軽くなる傾向が認められた。

(ウ) ヌタノ沢

ヌタノ沢(図8-1)で2016年11月7日に行った調査結果(図8-2)によると、A沢の流程では源頭湧水(写真4)直下(地点5)の水量 $30.6\text{ℓ}/\text{分}$ が

途中の治山堰堤の堆砂中に伏没浸透し、下流部の地点2に至ると $16.9\text{ℓ}/\text{分}$ と半減する。2016年(1年間)の流程の流量変化(図8-3)を見ると、A沢では地点2と4で水量が減少し、地点3で水量増加する傾向が認められる。一方、B沢では地点3での僅かな減少傾向が観測されている。流程の水質は、図8-2のように、A沢、B沢共に電気伝導度が流下と共に漸増し、 NO_3^- は漸減する。また、 $\delta^{18}\text{O}$ は高度と共に軽くなる傾向が認められ、その割合はA沢が $-0.38\text{‰}/100\text{m}$ 、B沢が $-0.42\text{‰}/100\text{m}$ であった。

(エ) クラミ沢・フチジリ沢

クラミ沢・フチジリ沢流域(図9-1)は箱根外輪山の東斜面に位置する。2014年10月にクラミ沢で、11月にフチジリ沢で行った調査結果をそれぞれ図9-2~3に示した。クラミ沢では地点3~4で、フチジリ沢は地点2~3で湧水による流量増加が観測された。両流域共に、荻野溶岩グループが上流側にあつて、下流に接する金時溶岩グループ(写真5)との境界に滝が形成され、崖錐がその下に続いている。両沢共に、ここに湧水が確認されている。しかし、



図9-1 クラミ沢・フチジリ沢の調査地点



写真5 フチジリ沢の溶岩と滝

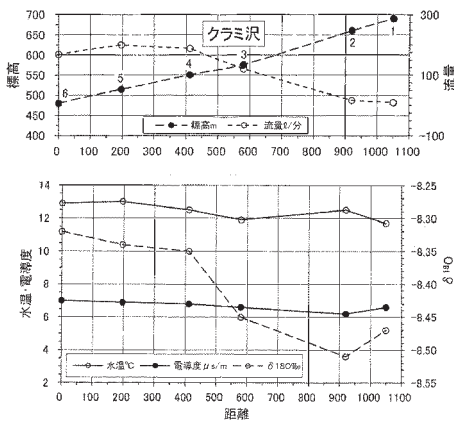


図9-2 クラミ沢の流程調査結果(2014/10/30)

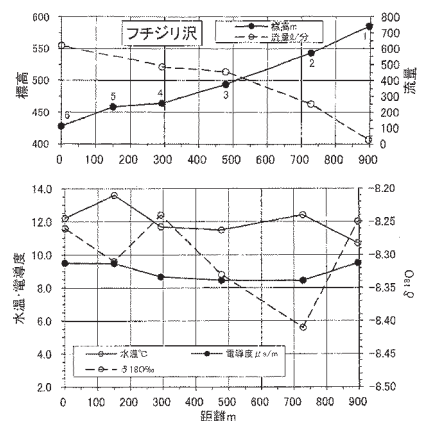


図9-3 フチジリ沢の流程調査結果(2014/11/4)

クラミ沢では増加した渓流水は量水堰まで漸減し、フチジリ沢では微増に留まっている。水質を見ると、クラミ沢の水温上昇、電気伝導度の漸増が認められ、 $\delta^{18}\text{O}$ は重くなる傾向にある。一方、フチジリ沢は下流に向け水温が上昇し、電気伝導度は地点2～4の間で低下する。また、 $\delta^{18}\text{O}$ は変動が大きいものの、高度と共に軽くなる傾向が読み取れる。 $\delta^{18}\text{O}$ の高度との関係は、クラミ沢が $-0.09\text{‰}/100\text{m}$ 、フチジリ沢が $-0.03\text{‰}/100\text{m}$ であった。

(3) 治山堰堤の影響

これまで記載したように、大洞沢とヌタノ沢の流量調査により、大洞沢の地点4と地点5の間の満砂した治山堰堤と、ヌタノ沢A沢の①～⑥までの満砂した治山堰堤の前後での流量の減少、回復が観測された。とくに、無降雨時のヌタノ沢A沢では、伏没浸透による水量の減少・消失が顕著である。堰堤前の地下浸透と堰堤下での排水孔からの流出水による表流水の復活が繰り返され、流量増加は生じない。ヌタノ沢B沢でもこの現象が認められるが、B沢②堰は満砂ではなく、貯水池が形成されており、ここより下流で流量減少が観測されている。このように、ヌタノ沢では伏没浸透による流水量低減した水量が下流で完全には復活せず、水収支として年降水量に対し30%台の損失(深部浸透)が報告されている(内山ほか、2015)。

大洞沢では、地点4下の治山堰堤から地点3までの上流側の河床は巨礫混じりの砂礫で満たされ、この流程で伏没浸透による流量減少が観測されている。地点4より下流に多くの治山堰堤が設置されており、堰堤下では越流水に土管からの排水が加わり、

流量は復活する。流程調査結果では、堰堤下の地点5で流量の増加が観測されている。

IV 考察

4試験流域で、常時および随時の流量観測調査結果について解析し、出水時の直接流出、湧水時の比流量、流程での流量変化および酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)について、その結果を水循環の側面から検討した。

1 無降雨時の流出

(1) 流程流量と水質

無降雨時の流程流量調査により、主水源となっている湧水および地下水湧水かん養の状況が把握できた。その位置は年間を通して変わらない。例えば、大洞沢の6年間の記録(図6-3～4)では、平成25(2013)年を除く5年は湧水の豊富な支流から流入がある地点2、地点5で同様に水量増加している。一方、平成25(2013)年は夏期に降水量が少なかったため、大洞沢の主水源である崩壊地からの流入水は堰越流が無くなるほど減少した。このため、湧水流入の効果は殆どなくなった。このことを裏付けるように、渓流水が気温に大きく影響され、図中には破線で示したように、水温は20度近くまで上昇した(図10)。このように短期的な湧水で湧水源が涸れてしまうことから、崩壊地といっても貯留量(保水能力)に限界があつて、極度の湧水には効果は期待できない。

試験流域ごとに流域を構成する小流域で湧水時の比流量(図5-1～4)を比較すると、大洞沢の地辻

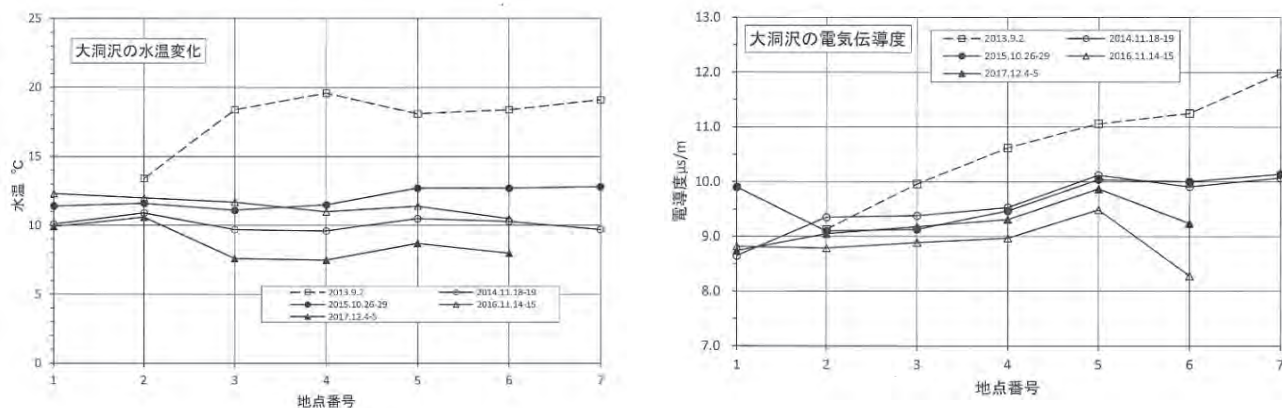


図10 大洞沢流程の水溫・電気伝導度調査結果

り崩壊地の流域 B、D が隣の流域より数倍大きい。大洞沢は、急傾斜の地形で、基盤の凝灰岩の風化が進んでいるものの、地滑り崩壊地以外では透水性は低いと考えられる。湧水の位置と比流量の分布がこのことを裏付けている。そして、比流量が大きい崩壊地堆積物の範囲と地形上の集水域との間にギャップがある可能性が高い。

ヌタノ沢の2016年の1年間の記録(図8-3)では、図中に破線で示したように、A沢では多雨期の9、10月は台風による多雨があったため、水量は他月より一段と多くなった。A沢の伏没浸透は、9月が明瞭でないが、他月では地点2で水量減少が毎月確認されている。一方、B沢の流量は、多雨時はA沢と大きな差は無いが、その他の期間はA沢より2~3倍多い。流程を通してB沢の流量は下流でも大きな変化は認められないが、A沢では流量が数分の1となって、治山堰堤の手前で堆砂中に浸透し、涸れてしまうことが多い。この両流域の差は、両沢が挟む尾根は風化が進んだ地質で、B沢の河床標高がA沢より低く、尾根上の観測井の水頭が両沢の河床標高の間にあることから、A沢は伏没浸透しやすく、B沢に地下水が湧出しやすいことを反映していると考えられる。

クラミ沢・フチジリ沢(図9-1)では、中流部の荻野溶岩G(グループ)と金時火山溶岩Gとの境界部の崖錐堆積地に湧出が多く認められた。ここは地形変換点になっていて、地下水が湧出しやすい。一般

に、火山斜面の浸透性が良く、上流部では雨水は地下浸透しやすく、溪流は表流水に乏しい。地下浸透した地下水は、火山山麓で湧出する(Yamamoto、1995)。しかし、クラミ沢とフチジリ沢は、箱根外輪山斜面の高部にありながら通年で表流水が観測され、下流で水涸れてしまう(横山ほか、2015)。このことから、入道岳から北東に延びる尾根の下に荻野溶岩G、その下に金時溶岩・狩川溶岩Gがある地質構成の中で、金時溶岩G中の固結ロームと狩川溶岩Gの不透水性が湧水の発生と深部浸透に制限を与えていると考えている。クラミ沢とフチジリ沢間の比流量の差は、フチジリ沢で上流部の荻野溶岩Gが占める面積が広いとされている。

(2) 安定同位体比 ($\delta^{18}O$)

流程調査で行った $\delta^{18}O$ の分析結果から、それぞれの流域で高度を増すに伴い値が小さくなる傾向が認められた(表8)。早稲田(2016)は、降水の同位体組成が、高度が高いほど軽くなる高度効果は、中部日本の $\delta^{18}O$ の場合 $-0.25\text{‰}/100\text{m}$ 、中村ほか(2012)は、御嶽山で地下水の高度効果を $-0.13\text{‰}/100\text{m}$ と報告している。また、鈴木ほか(2011)は、箱根山外輪山の湧水の $\delta^{18}O$ を調査し、東斜面で高度効果は $-0.12\text{‰}/100\text{m}$ と報告している。さらに、宮下(2001)は酒匂川支流の河内川の流水を調査し、 $\delta^{18}O$ と高度との間に相関は低く、100mあたり -0.007‰ と報告している。これらの高度効果と試験

表8 試験流域における沢水の $\delta^{18}O$ の高度 100m 当りの変動値

流域名	大洞沢	貝沢	ヌタノ沢 A	ヌタノ沢 B	クラミ沢	フチジリ沢
$\delta^{18}O\text{‰}/100\text{m}$	-0.04	-0.06	-0.38	-0.42	-0.09	-0.03

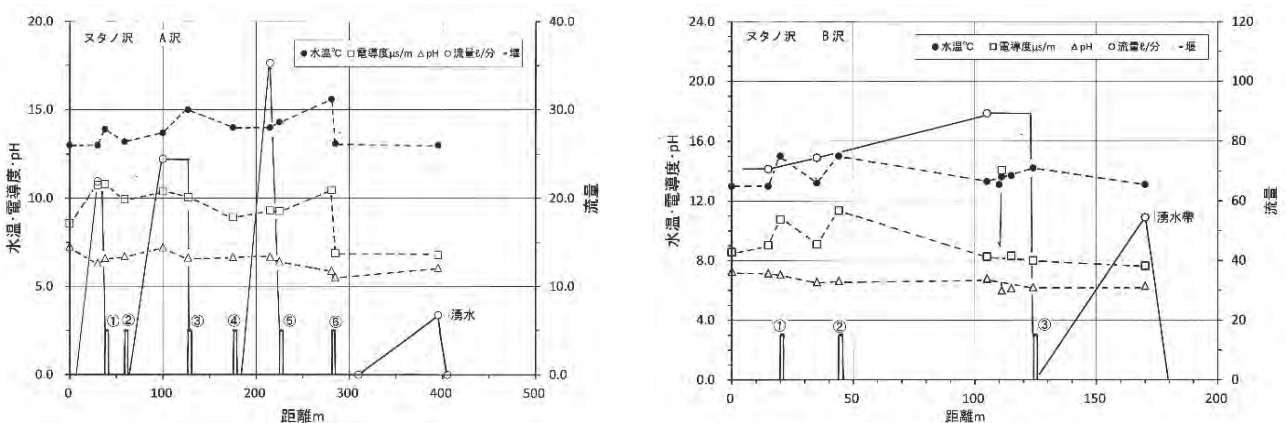


図12 ヌタノ沢の治山堰と流量、水質調査結果(2017年10月18日 A沢:左、B沢:右)



写真6 ヌタノ沢の治山堰堤 (左：A沢⑥、右：B沢②)

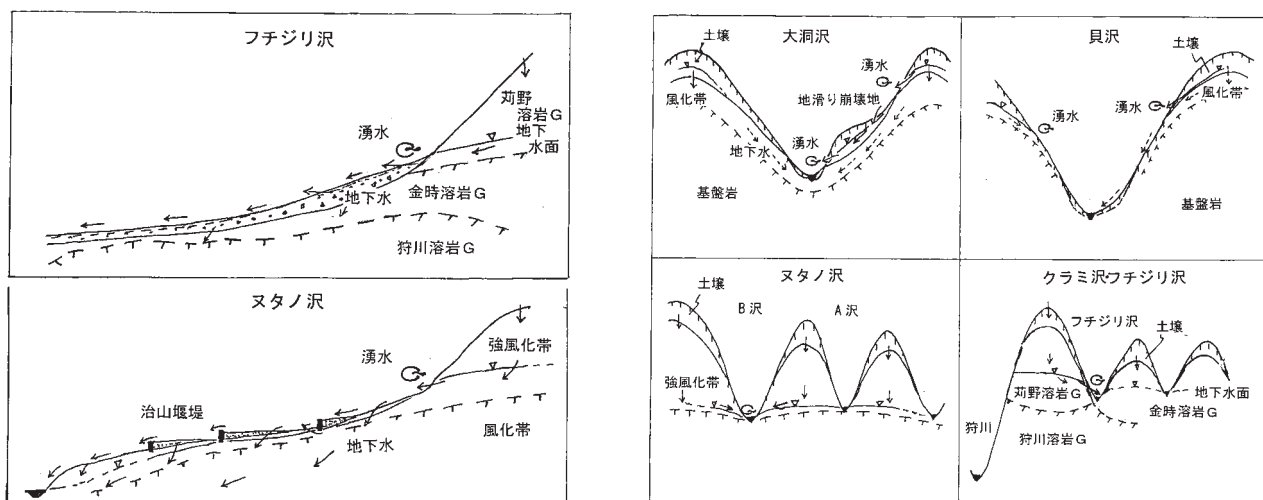


図13 試験流域の水循環 (左図：クラミ沢・フチジリ沢およびヌタノ沢の縦断面、右図：横断面)

流域で得られた高度 100m 当りの変動値は、ヌタノ沢を除き試験流域の絶対値はかなり小さい。流域内の高所、低所で渓流水と起源となる降水との関係を明らかにするためには、流程流量調査と併せて δ¹⁸O の解析を引きつづき行う必要があると考えている。

(3) 治山堰堤の影響

大洞沢とヌタノ沢では治山堰堤に堆積した土砂や治山堰堤が形成した貯水池の流出への影響が考えられる。とくに、無降雨時のヌタノ沢 A 沢では治山堰堤の手前で地表流が伏没浸透により消滅することが多く、水量の元水量までの回復は見られない。そこで、ヌタノ沢の平成 29 (2017) 年 10 月の調査結果を用い、堰堤前後の水量、水質の変化を見てみた (図 12)。A 沢の流水の増減の状況を現地観察結果に基づき図化した。堰堤に堆積した堆砂中へ渓流水が浸

透し、越流水と堰堤下の排水管から出てくる排水 (写真 6) により堰堤下流で流水が復活する。このような現象が堰堤ごとに繰り返されている。一方、水質は、堰⑥下流で水温上昇、電気伝導度増大、pH 上昇が、堰③より下流で水温低下が確認された。B 沢では、堰②を境に貯水池より流量が減少し、電気伝導度が増大する。

このように、治山堰堤が設置されている流域では、源流部の水量、水質が流程 (治山堰堤) で変化する。そして、流域ごとに設置状況が異なるため、施業の影響評価や流域間の生態比較を行う場合は、治山堰堤の設置状況を確認し、観測結果の評価にあたり十分配慮する必要がある。

(4) 水循環スキーム

これまでの結果を基に、試験流域の水循環を模式

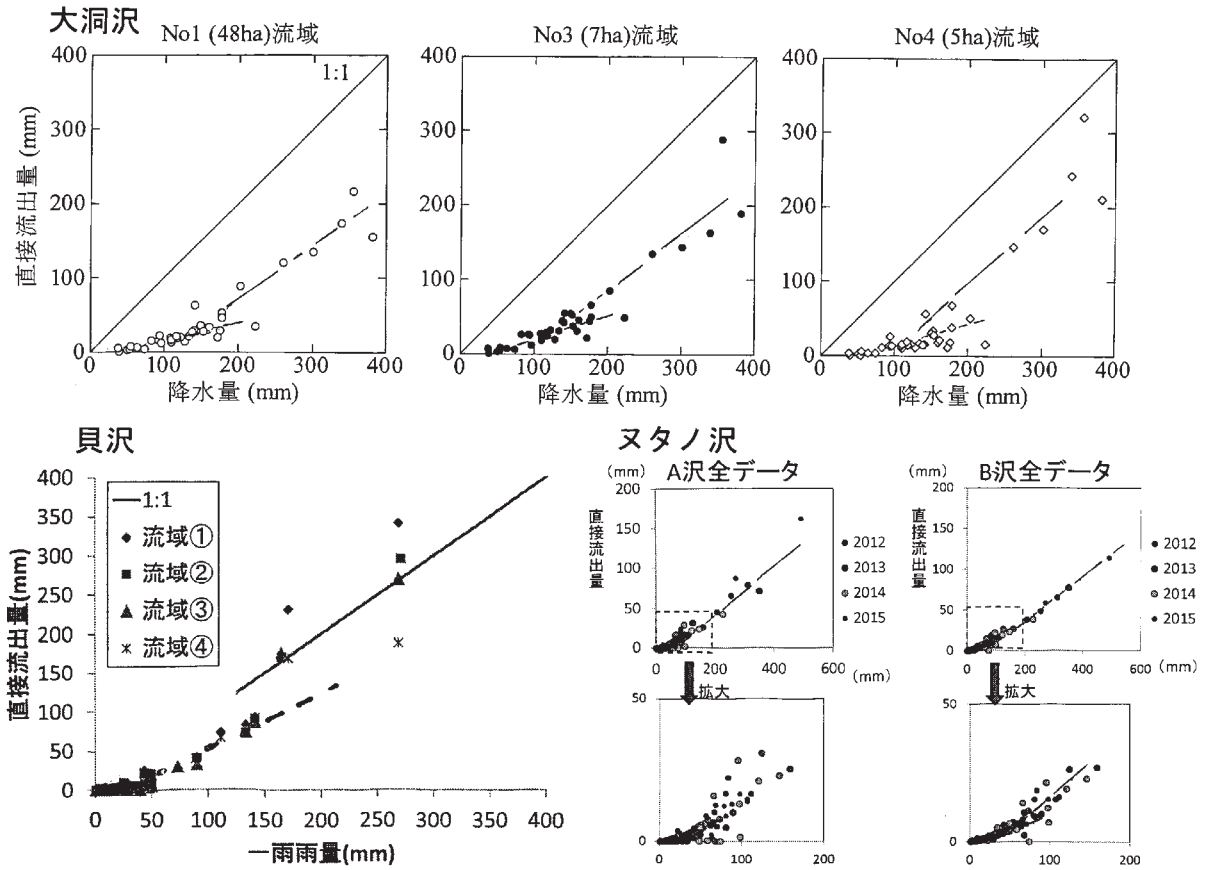


図 14 大洞沢、貝沢および又タノ沢の直接流出量と降水量の関係 (小田他・2013、白木他・2013、内山他・2015 に加筆)

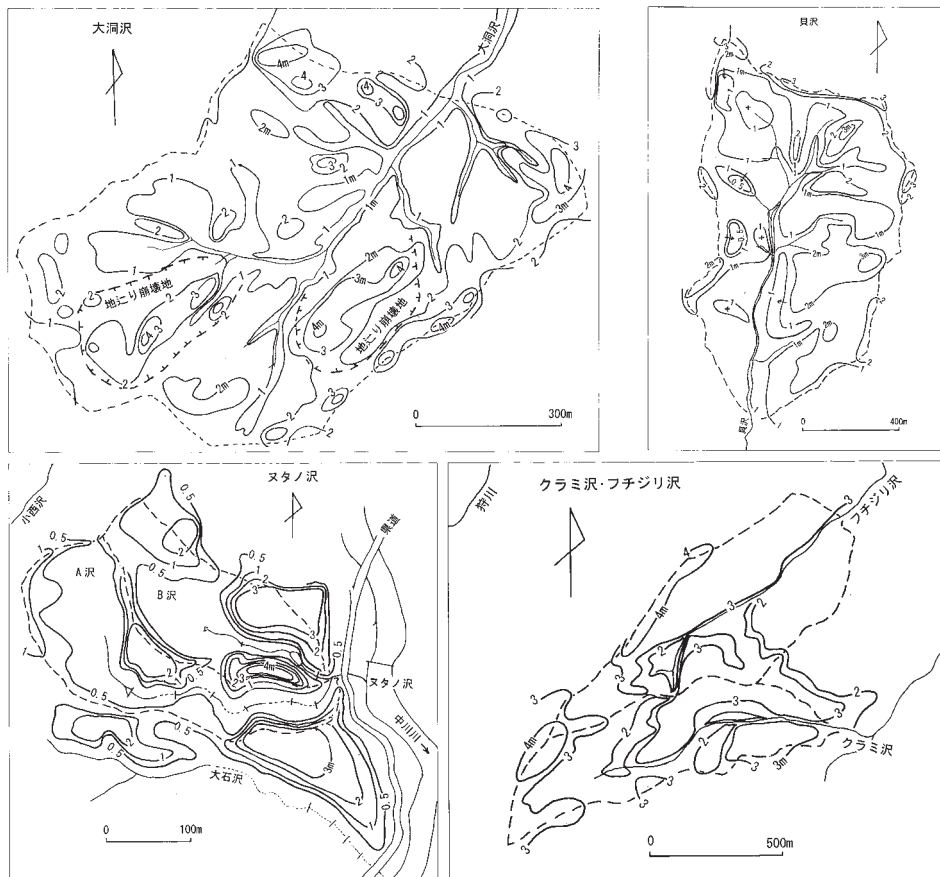


図 15 大洞沢、貝沢、又タノ沢およびクラミ沢・フジチリ沢の土層厚分布 (m)

化し、図13に示した。無降雨時の地下水主体の水循環の概要を次のとおり考えた。①大洞沢では、尾根の土壌体と風化が進んだ凝灰岩基盤が帯水層であるが、保水性は良くない。しかし、流域の上、中流部の地滑り崩壊地の保水性が高く、有力なかん養源となっている。②貝沢では、尾根部～斜面の土壌層に雨水由来の浸透水が保たれるが、基盤岩は風化帯が薄く、保水性に乏しい。③ヌタノ沢は、石英閃緑岩で構成されるが、風化が進んでいる。とくに、河床より上側は強風化帯で、浸透性がよい。薄い地下水浸透し、この強風化帯に保持され、源頭湧水となって溪流を涵養している。しかし、A沢では流下に従い、伏没浸透が著しい。④クラミ沢・フチジリ沢では、崖錐帯で荊野溶岩G下から湧出する地下水が主水源となっている。火山高部にありながら、不透水性の溶岩や固結ロームによって渓流水は伏没浸透せず、恒常的に流水が保たれている。

2 降雨時の流出

植生回復に伴う直接流出への影響は、直接流出率、降水量に対するピーク流量の低減、継続時間の延長などが想定されているので、直接流出の発生状況の変化を追跡するため、経過時間と水量、水質の変化および直接流出率を把握しておく必要がある。本報告では、4試験流域の直接流出率を網羅し、平成25(2013)年9月のヌタノ沢での台風による出水を事例に取り上げ、施業前の直接流水の状況を把握した。

試験流域の内、解析が進んでいる大洞沢、貝沢およびヌタノ沢の直接流出量と降水量の関係を図14に示した。直接流出量は、降雨強度が表土の飽和透水係数より大きい場合(森林土壌が雨で飽和)に、降水の殆どが表面流出となって流下し、直接流出率は100%(グラフ上45°)に近い値となる。したがって、高い流出率が確認されている流域では、地表の透水性が低いか、不透水性地盤により、地下水が深部浸透し難いなどが考えられる。

これまでに試験流域で確認された直接流出率の値を見ると、各流域共に少雨の場合は森林の降雨遮断や不足水分補充などに消費され、直接流出がほとんどない降水量が認められる。無流出の降水量は、大洞沢が40mm、貝沢が20mm、ヌタノ沢が30mmと読み取れる。さらに、大洞沢、貝沢では100～150mm以上の降水量に対してはほぼ1対1(45°)の関係で、降った雨が流出する。しかし、ヌタノ沢ではB沢

で100mmを越える降水量に対してやや勾配が大きくなるが、大きな変化は認められない。飽和透水係数に達したときの降水量は地表の透水性の善し悪しを示すと考えられる。直接流出率は、それ以下の降水量に対しては、大洞沢で28～35%、貝沢が8.7～11.6%、ヌタノ沢が13%、1事例であるがクラミ沢が9.8%、フチジリ沢が14.4%であった。

4流域の土層厚分布を図15に示した。土層厚は、大洞沢の地滑り崩壊地、尾根および南斜面で、貝沢では尾根で、ヌタノ沢では標高が低い尾根(人工林地)で、クラミ沢・フチジリ沢では尾根で土層厚保が大きい。各流域の土層厚の算術平均値は大洞沢が1.74m、貝沢が1.67m、ヌタノ沢A沢が1.43m、B沢が2.29m、そしてクラミ沢・フチジリ沢が2.74mであった。直接流出率の値は流域の地表条件を反映していると考えられ、引き続き解析する必要がある。

さらに、雨後の隣接する施業の実施流域と対照流域のピーク流量を比較すると、ヌタノ沢A沢・B沢やクラミ沢・フチジリ沢のように、雨の直後は流域面積に比例した水量が観測され、流量は肩を並べるほどとなるが、A沢の継続時間がB沢より6時間長く、比流量が0.59mm/時大きい。さらに、渇水時の比流量が小さいA沢やクラミ沢で流量の増減率が大きく、ピーク流量がB沢やフチジリ沢より多くなるが、出水後しばらく経って逆転する。このような違いは、流域の地表の植生や水文地質を反映していることから、施業効果検証のため追跡調査する必要がある。

V おわりに

本調査結果で取りまとめた試験流域の洪水時の流出、流程流量・水質調査結果から、4試験流域間にそれぞれ特徴が把握され、解析調査対象となっている小流域間で差が認められた。とくに、流出に見られた違いの主要因は、大洞沢の地這り崩壊地、ヌタノ沢の風化基盤岩など、流域を構成する地形・地質にあると考えられた。したがって、流出率の差や水収支の違いについて、流域特性との相互関係を明確にした上で、各流域で得られた特徴を踏まえて、施業後の変化を捉えていく必要がある。

流程流量調査によって、地下水の流出涵養が卓越する場所、渓流水が伏没浸透する範囲を定性的に把握することが出来た。施業に対する影響の定量的評

価に向け、引き続き地下水の涵養・流出の状況を各流域モデルに反映させ、モニタリングポイントの想定と影響予測を行い、予測結果に基づくモニタリングと効果検定に結びつけたい。

VI 謝辞

本調査を実施するにあたり、当所の企画部長の山根正伸博士、研究連携課の西口孝雄課長には、業務の進行、調査結果の取り纏めへの有意義な示唆を頂き、大平充特別研究員には現地調査で補助を頂いた。また、東京大学名誉教授鈴木雅一先生、東京農工大学名誉教授石川芳治先生、東京農工大学準教授白木克繁先生ほか多くの先生方から検討会を通して貴重なご意見をいただいた。厚くお礼申し上げます。

VII 参考文献

- 五名美江・蔵治光一郎 (2012) ハゲ山に森林を再生した小流域における降雨量-直接流出量関係の長期変化. 日林誌、94 : 214-222.
- 五名美江・蔵治光一郎 (2013a) ハゲ山に森林を再生した小流域における年損出量と年蒸発量の長期変化. 日林誌、95 : 109-116.
- 五名美江・蔵治光一郎 (2013b) 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. 日林誌、95 : 315-320.
- 神奈川県 (1986) 重要水源山地整備治山事業調査報告書、336pp.
- 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 : 342-355.
- 宮下雄次 (2001) 酒匂川流域における流域平均標高と河川水の酸素同位体比との関係. 神奈川県温泉地学研究所報告、32 : 7-16.
- 森康二・多田和宏・左藤壮・柿澤展子・内山佳美・横山尚秀・山根正伸 (2013) 神奈川県水源エリアの3次限水循環モデル、神奈川県自然環境保全センター報告、10 : 215-223.
- 中嶋伸行・板寺一洋・藤森博英 (2001) $\delta^{18}\text{O}$ をトレーサーとした規模の異なる降雨における河川流出成分の分離結果の比較-東丹沢・大洞沢森林流域の事例-. 神奈川県自然環境保全センター研究報告、28 : 1-6.
- 中野秀章 (1976) 森林水文学、215pp、共立出版、東京.
- 中村太郎・佐藤務・安原正也 (2002) 御嶽山東斜面における天水の高度効果、日本水文学会誌、32 : 135-147.
- 小田智基・鈴木雅一・内山佳美 (2013) 東丹沢大洞沢試験流域における水収支・流出特性-地下部における水井道の影響-. 神奈川県自然環境保全センター報告、10 : 47-52.
- 白木克繁・片岡宏介・工藤司 (2013) 貝沢試験流域におけ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.
- 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.
- 塚本良則 (編) (1992) 森林水文学、291pp、文永堂出版、東京.
- 内山佳美・山根正伸 (2013) 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・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.
- 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.
- 内山佳美・相原敬次・飯田勝彦・板寺一洋 (2009) $\delta^{18}\text{O}$ をトレーサーとした短期流出特性把握におけるサンプリング方法の検討. 神奈川県自然環境保全センター報告、6 : 63-68.
- 山本荘毅 (1983) 地下水調査法、490pp、古今書院、東京.
- Yamamoto, Soki (1995) Volcano body springs in Japan. 264pp, Kokon-Shoin, Tokyo.
- 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.
- 横山尚秀・内山佳美・左藤壮・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.
- 横山尚秀・内山佳美・三橋正敏 (2014) 東丹沢大洞

- 沢の水文地質と流出機構． 神奈川県自然環境保全センター報告、12：1-16.
- 横山尚秀・内山佳美・三橋正敏（2015）フチジリ沢・クラミ沢流域（箱根外輪山東麓）の水文地質について． 神奈川県自然環境保全センター報告、13：25-37. 98
- 横山尚秀・内山佳美・左藤壮・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、10：201-214.
- 早稲田周（2016）1980～1983年に実施した天然水安定同位体組成の研究． 日本水文科学会誌、46：117-122.