

神奈川県

自然環境保全センター報告

第 10 号 特集 森林における水環境モニタリングの始動

Bulletin of the
Kanagawa Prefecture Natural Environment Conservation Center

No. 10



2013年(平成25年)3月

表紙の写真

(表表紙)

- | | |
|------|---|
| 上段左 | 東丹沢堂平地区の土壌保全対策事業地 (H23 自然環境保全センター) |
| 上段中央 | 貝沢の流域3の植生状況 (H21 東京農工大学) |
| 上段右 | 貝沢のNo.1 水文観測地点の量水堰 (H22 自然環境保全センター) |
| 下段左 | 大洞沢のNo.1 水文観測地点の量水堰 (H22 自然環境保全センター) |
| 下段右 | フタスジモンカゲロウ <i>Ephemera japonica</i> : 雄亜成虫 (南足柄市 1985.6.6 石綿進一) |

(裏表紙)

空から見た水源の森林

衛星画像による県外上流域も含めた神奈川県の水源地域の概観。対照流域法によるモニタリング調査の各試験流域(貝沢、大洞沢、ヌタノ沢、フチザリ沢)と水源環境保全再生施策の森林における主要な事業の一つである水源の森林づくり事業の水源地確保地とモニタリング地点(50 地点)を図示した。

ニホンジカによる植生衰退が水源地域の水や土砂の流出に与える影響（本文 P.23 ～ 45）



東丹沢堂平地区のブナ林の景観（左：春季、中央：夏季、右：秋季）東京農工大学撮影（H 22）



左：リターネット補足工 右：リターネットロール工 東京農工大学撮影（H 22）



左：既設堰堤の上流の水位計・濁度計設置状況（ワサビ沢）東京農工大学撮影（H 21）

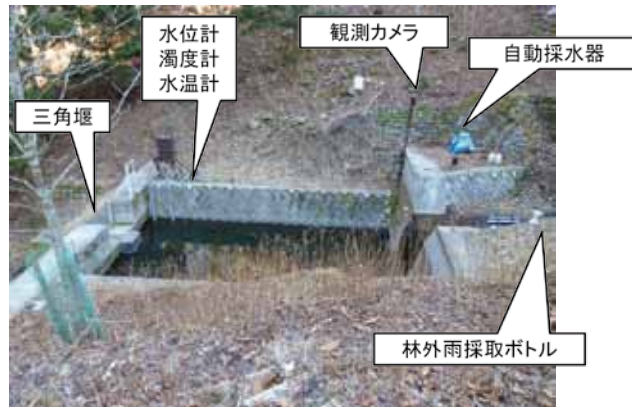
水源地域の森林における水や土砂の流出特性（本文 P.47 ～ 122）



大洞沢の林床植生の状況（植生被覆 80%以上）
東京農工大学（H 21）



大洞沢の林床植生の状況（裸地）
東京農工大学撮影（H21）



大洞沢No.4 量水堰の周辺の観測機材 自然環境保全センター撮影（H 23）



大洞沢樹冠遮断観測プロット 東京大学撮影（H 21）



大洞沢流域No.3 の植生保護柵
自然環境保全センター撮影（H 23）



貝沢植生状況（左：流域1 沢沿いのスギ林、右：流域2 沢沿いのスギ林）東京農工大学撮影（H 21）



左：貝沢植生状況（流域3） 右：量水堰の水位流量実測の様子 東京農工大学撮影（左：H 21、右：H 22）



左：貝沢のイオン交換樹脂バツクの設置状況（土壌深 0cm） 東京農工大学撮影（H 21）

中央：貝沢のNo.1 量水堰の落葉除けネット設置状況、 東京農工大学撮影（H 23）

右：貝沢の尾根に設置したNo.2 気象観測装置 自然環境保全センター撮影（H 24）



ヌタノ沢 A 沢上流 自然環境保全センター撮影（H 24）



ヌタノ沢林内の状況 東京農工大学撮影（H 23）



左：ヌタノ沢 A 沢源頭部の湧水



右：ヌタノ沢 B 沢源頭部の湧水帯

自然環境保全センター撮影（H 24）

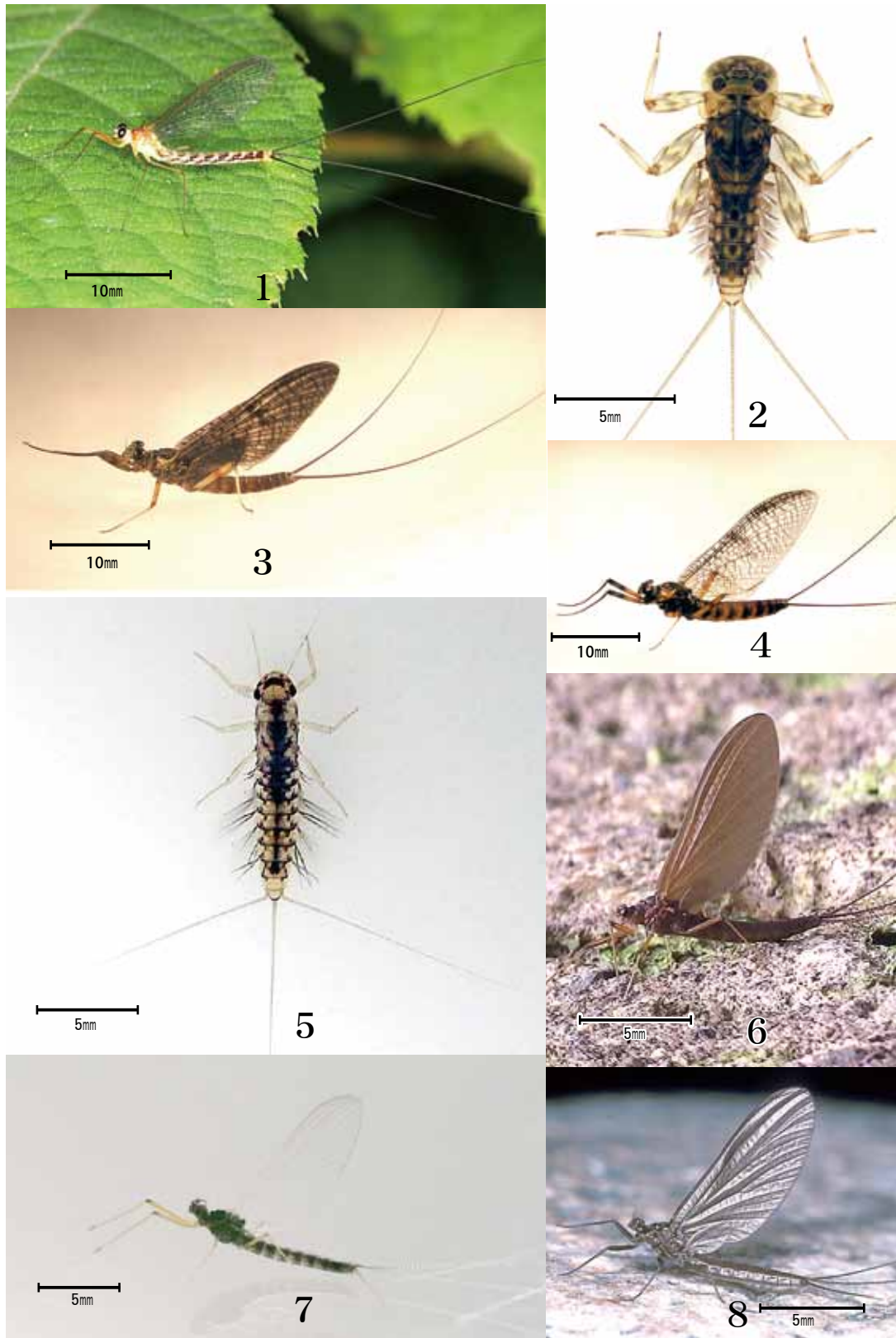


フチヂリ沢の溪流の状況 自然環境保全センター撮影（H 22）

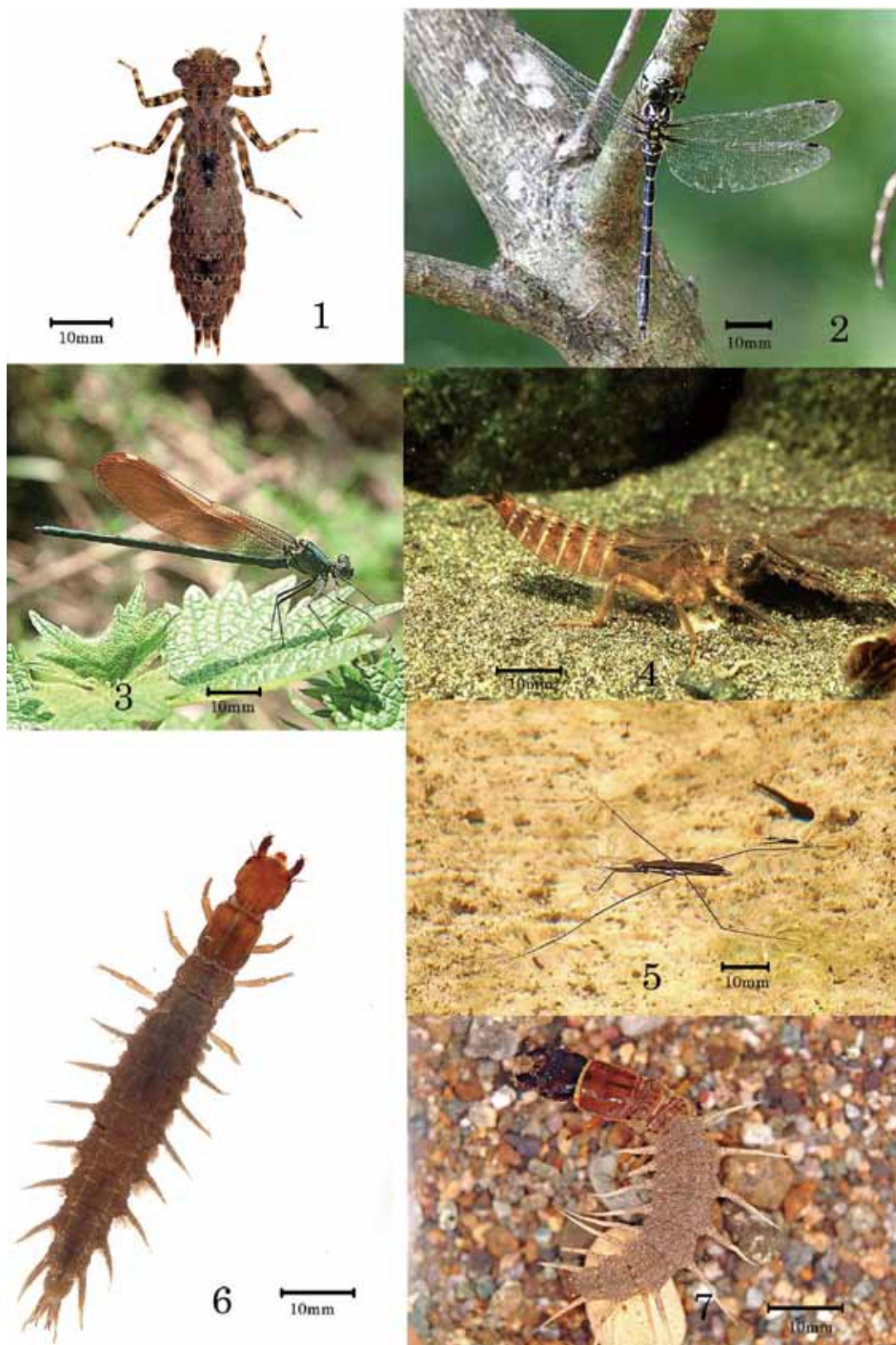


クラミ沢のスギ林 東京農工大学撮影（H 23）

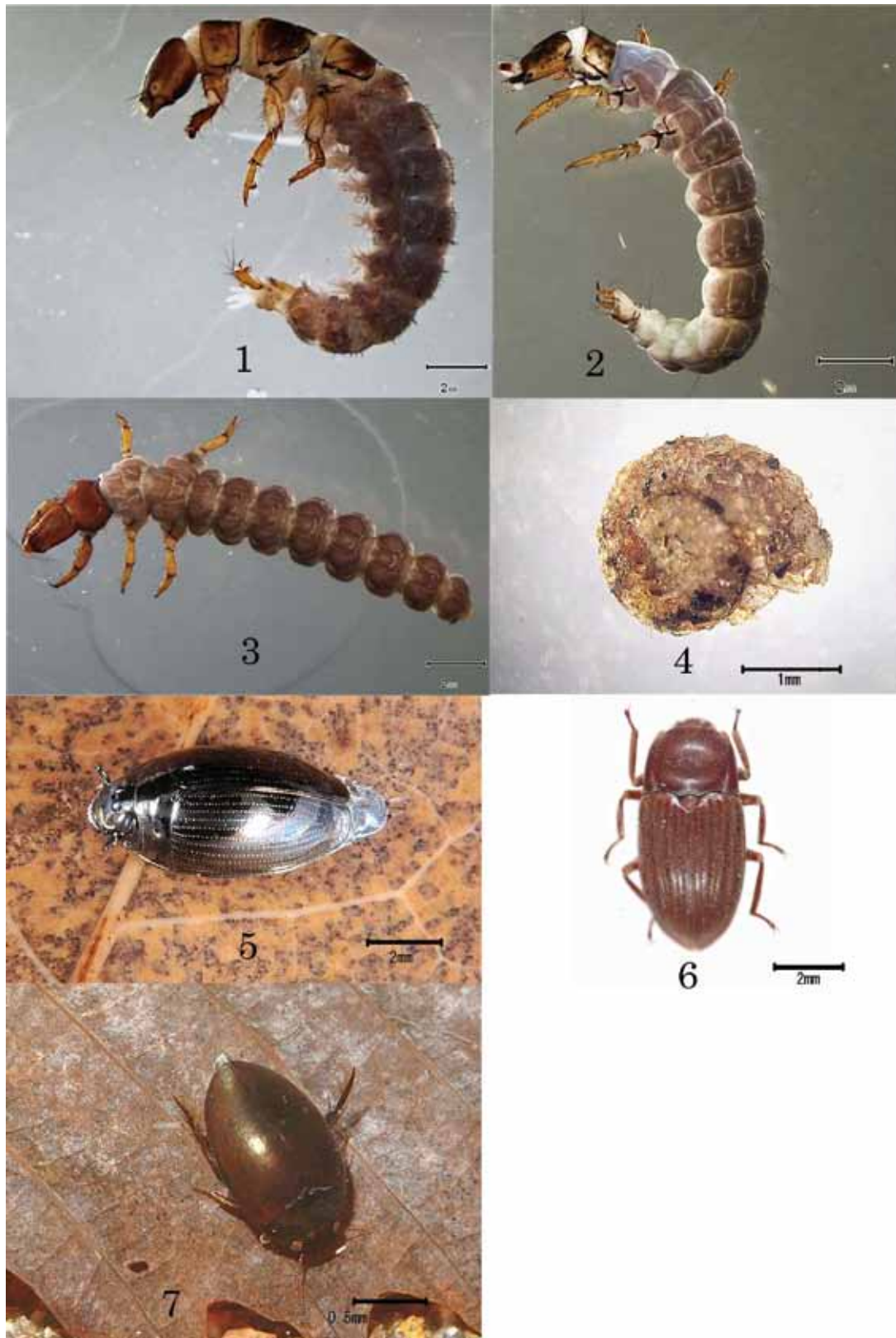
水源地域における源流河川の水生生物（本文 P.123 ～ 202）



1. ガガンボカゲロウ *Dipteromimus tipuliformis* McLachlan：雄成虫； 2. マダラタニガワカゲロウ属（新称）の一種 *Electrogena* sp.1：幼虫（中齢）； 3. 同：雄亜成虫； 4. 同：雌成虫； 5. ウェストントビイロカゲロウ *Paraleptophlebia westoni* Imanishi：幼虫（中齢）； 6. 同：雌亜成虫； 7. 同：雄成虫； 8. ナミトビイロカゲロウ *Paraleptophlebia japonica* (Matsumura)：雌亜成虫



1. ミルンヤンマ *Planaeschna milnei* (Selys) : 幼虫 (写真提供、嶋崎えつ子氏) ; 2. 同 : 成虫 (写真提供、嶋崎えつ子氏) ; 3. ニホンカワトンボ *Mnais costalis* Selys : 雄成虫 ; 4. オニヤンマ *Anotogaster sieboldii* (Selys) : 幼虫 (終齢) ; 5. オオアメンボ *Aquarius elongatus* (Uhler) : 成虫 ; 6. ヘビトンボ *Protohermes grandis* (Thunberg) : 幼虫 ; 7. タイリククロスジヘビトンボ *Parachauliodes continentalis* Weele : 幼虫



1. シロフツヤトビケラ属の一種 *Parapsyche* sp. : 幼虫 ; 2. ナガレトビケラ属の一種 *Rhyacophila* sp.3 : 幼虫 ;
 3. ナガレトビケラ属の一種 *Rhyacophila* sp.1 : 幼虫 ; 4. カタツムリトビケラ属の一種 *Helicopsyche* sp. :
 幼虫の筒巢 ; 5. ミズスマシ *Gyrinus japonicus* Sharp : 成虫 ; 6. ハバビロドロムシ *Dryopomorphus*
extraneus Hinton : 成虫 ; 7. クロズマメゲンゴロウ *Agabus conspicuus* Sharp : 雄

発刊にあたって

神奈川県自然環境保全センターは、森林を中心とした自然環境の保全や再生を推進するため、研究、普及、事業の各部門を備えた中核機関として、平成 12 年度に創設されました。それ以来、丹沢大山地域の自然再生をはじめとした森林環境に関わる近年の様々な課題に対応するために、森林管理・自然公園・野生動物等の各分野の事業とそれに関する普及啓発・県民協働や試験研究が一丸となって業務を推進しております。

「自然環境保全センター報告」は、このような日々の業務から得られた様々な成果や自然情報及び知見を県民や他の行政機関等に提供するとともに、記録・保存することを目的に作成しております。

第 10 号では、神奈川県が平成 19 年度から開始したかながわ水源環境保全・再生施策に位置づけられている、森林における各事業の効果検証と得られた科学的知見の情報提供を目的とする「水環境モニタリング」の当初 5 年間の中間成果について特集を組みました。

本施策は、近年の水源地域の環境劣化に対して、将来にわたる良質な水の安定的確保を目的に、ダム上流域を中心とした水源環境全体の保全・再生を推進しておりますが、その中でも水環境モニタリングは、自然環境という不確実なものを相手にした各対策事業の推進を、専門的な見地から支える取り組みです。水源地域における近年の様々な課題に対応していくためには、対策の効果や影響を検証して得られた結果を、次の対策に随時反映させるような順応的な対応も必要です。

本号では、当センターの研究部門に加え、共同研究機関である各大学や調査会社、NPOからの投稿も含めて、これまでの 5 年間の中間報告として主な成果を掲載しました。内容は、極めて専門的ですが、モニタリングという長期にわたる定点観察において、初期状態の記録を残すことはとても重要です。さらに、多くの機関の参画によるプロジェクト体制で推進しているため、まとまった研究成果だけでなく過程の記録を残すことも意義のある成果であることから、業務上の資料なども掲載しました。

当センターでは、今後も自然環境の保全と再生に係る業務の充実に努めるとともに、得られた成果や情報についてもホームページ等で紹介してまいります。本号の専門的な内容も一般向けにわかりやすくまとめたものも、別途ご紹介していきたいと思っております。

平成 25 年 3 月

神奈川県自然環境保全センター所長 益 子 篤

目 次

口 絵

発行にあたって

特集 森林における水環境モニタリングの始動

対照流域法によるモニタリング調査の始動

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（総説）----- 1

内山佳美・山根正伸・横山尚秀・山中慶久

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（資料）-----13

内山佳美・山根正伸

ニホンジカによる植生衰退が水源地域の水や土砂の流出に与える影響

～先行研究による評価手法開発～

東丹沢堂平における土壌保全工の土壌侵食軽減効果の評価（調査・研究報告）-----23

石川芳治・内山佳美

東丹沢堂平における流域スケールでの土壌保全対策効果の検証（調査・研究報告）-----37

石川芳治・内山佳美

水源地域の森林における水や土砂の流出特性

東丹沢大洞沢試験流域における水収支・流出特性 ―地下部における水移動の影響―（原著論文） 47

小田智基・鈴木雅一・内山佳美

東丹沢大洞沢試験流域における窒素流出機構（調査・研究報告）----- 53

小田智基・鈴木雅一・内山佳美

大洞沢試験流域における林床植生の空間分布特性（原著論文）----- 59

五味高志・平岡真合乃・坂上賢・アン ファム ティ クイン・内山佳美

大洞沢試験流域における流出土砂量と土砂生産源の季節変動（原著論文）----- 71

平岡真合乃・五味高志・小田智基・熊倉歩・宮田秀介・内山佳美

貝沢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（調査・研究報告）----- 81

白木克繁・片岡宏介・工藤 司

神奈川県の貝沢試験流域における窒素動態特性（原著論文）----- 91

辻千智・戸田浩人・崔東寿

西丹沢ヌタノ沢の水文地質と流出状況（調査・研究報告）----- 101

横山尚秀・内山佳美・山根正伸

西丹沢ヌタノ沢試験流域における平成 23 年度の台風による土砂流出の概況（資料）----- 115

内山佳美・横山尚秀・山根正伸

水源地域における源流河川の水生生物

大洞沢、貝沢の付着藻類植生（原著論文）-----	123
吉武佐紀子・坂本照正	
山地溪流の付着生物群集への生態学的アプローチ（資料）-----	145
坂本照正・吉武佐紀子	
源流河川の底生動物（資料）-----	163
石綿進一・守屋博文・倉西良一・清水高男・小林貞・司村宜祥	
ヌタノ沢のカゲロウ類（原著論文）-----	177
石綿進一・藤谷俊仁・司村宜祥	
源流河川のトビケラ目昆虫－ヌタノ沢で採集されたアミメシマトビケラ科とナガレトビケラ科の形態と遺伝子情報－（原著論文）-----	187
倉西良一	
西丹沢ヌタノ沢のユスリカ科（Chironomidae）（原著論文）-----	195
小林 貞	

水源地域の水循環モデルの構築

試験流域の水文地質等の流域特性（調査・研究報告）-----	203
横山尚秀・内山佳美・佐藤壮・山根正伸	
神奈川県水源エリアの3次元水循環モデル（調査・研究報告）-----	215
森康二・多田和広・佐藤壮・柿澤展子・内山佳美・横山尚秀・山根正伸	

付 表

付表1 大洞沢、貝沢、ヌタノ沢の底生動物の水域別地点別リスト-----	224
付表2 大洞沢、貝沢、ヌタノ沢における底生動物の出現生物リスト-----	276
付表3 ヌタノ沢で採集されたカゲロウ目、カワゲラ目、トビケラ目の成虫等-----	280

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

内山佳美*・山根正伸**・横山尚秀*・山中慶久*

Verification of the measures for environmental protection and forest regeneration of water resource and its progress in Kanagawa Prefecture

Yoshimi UCHIYAMA*, Masanobu YAMANE**, Takahide YOKOYAMA*,
Yoshihisa YAMANAKA*

要 旨

神奈川県の水源地域では、人工林の手入れ不足やシカの高密度化による林床植生の衰退、さらには地表面の裸地化によって、降った雨をゆっくり流出させるという森林の機能が低下している。このため、かながわ水源環境保全・再生施策により植生回復や土壌保全のための各種対策を行って森林の機能を回復させるとともに、対策の効果を科学的に検証して施策の見直しに反映させる計画である。自然環境保全センターでは、平成 19 年度からシカや森林の適正な管理による効果や水源林の施業等の効果を小流域スケールで検証する「対照流域法によるモニタリング調査」を開始した。当初 5 か年で、調査設計と 4 か所の試験流域の設定、観測施設整備、試験流域の現状を把握するための調査を行い、各試験流域における水や土砂の流出特性や水生生物の生息状況等の実態を概ね把握した。第 2 期 5 か年においては、各試験流域の水源環境の課題に応じて、事業の効果検証のための植生保護柵の設置や水源林の施業などの整備実験を順次行い、これらの対策の効果や影響を小流域スケールでモニタリングすることによって、短期的な効果を明らかにしていく。加えて、水循環モデルによるダム上流等の広域での事業の効果予測についても取り組む計画である。

I はじめに

神奈川県は、24 万 ha という狭い県土に 900 万余の県民が暮らす全国でも有数の人口過密な県であるが、県西部には、丹沢山地を初めとする森林地帯が広がり、ツキノワグマなどの大型野生動物も生息する自然豊かな環境が残されている。この県西部の森林地帯は、下流に相模ダムをはじめとしたダム湖や取水堰が整備され、県民が利用する水の主な水源となっている。

これまで神奈川県は、この水源地域を中心にダム

の建設をはじめとした水資源開発によって、県民が必要とする水資源の確保に取り組み、成果を上げてきた（神奈川県，2005）。しかし、一方で、近年の水源地域では、人工林の手入れ不足やニホンジカ（以下、「シカ」という。）の高密度化が原因となり林床植生が衰退するなど水源環境の劣化が顕在化している。

これに対し、神奈川県は、平成 19 年度より新たな超過課税を財源とする「かながわ水源環境保全・再生施策」を開始し、将来にわたり良質な水を安定的に確保するために、ダム上流域を中心とした森林・

* 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）

** 神奈川県環境農政局 水・緑部 自然環境保全課（〒231-8588 横浜市中区日本大通 1）

河川・地下水などの水源環境全体の保全・再生のための事業を推進している。自然環境保全センターが平成19年度から開始した対照流域法によるモニタリング調査は、「かながわ水源環境保全・再生施策大綱」の理念に基づいて、森林における事業の実施効果を測定し検証した結果を事業の見直しに反映させるとともに、得られた科学的知見を県民に情報提供していく取組みである。水源環境の保全の観点から、事業の実施による森林の変化と水源かん養機能の改善とを結び付けるためには、特に、流域スケールのモニタリングにより事業の効果を検証する必要がある。すでに、モニタリングの調査設計の検討、現地の観測施設の整備等が完了し、現在は、本格的なモニタリングを開始したところである。

本稿では、対照流域法によるモニタリング調査の当初5か年の実施状況報告として、まず、基本認識として森林を中心とした水源環境の課題とその対策、既存のモニタリングによる知見について示した。次に、その対策の評価体系とともに、効果検証の方法やねらいについて、既報（内山・山根，2008）の内容も踏まえて概略を示し、最後に、現在までの進捗状況と現段階で明らかになった知見を示した。

II 水源環境の課題とその対策

1 新たな水源環境の課題とその対策

県内の水源地域では、これまでも様々な課題に対する事業が行われてきた。例えば、大正12年の関東大震災では、丹沢山地をはじめ山地の至る所に山崩れが発生した。表土が崩れ落ちた山肌は、基岩がむき出しとなり、崩れ落ちた土砂は土石流となって下流に流出した。これに対して、県は、植生の無くなった山肌の緑化を図り、堆積土砂の流下を防ぐための堰堤を設置した。また、太平洋戦争中には、全国的に燃料や資材のために森林が大量に伐採されたため、戦後は、国土緑化の推進としてスギやヒノキによる復興造林や拡大造林が進められた。

これらの過去に行われた対策の効果もあり、現在、県内の水源地域は、豊かな森林に覆われている。しかし、近年、シカの高密度化によって林床植生が衰退した箇所では、降雨が地中に浸透しにくくなり、地表流が発生することによって、年間約2～9mmの

厚さの土壌が侵食されていることが明らかになった（石川ほか，2007）。また、神奈川県に限らず全国で、戦後に植林されたスギやヒノキの人工林が、間伐も行き届かず荒れていることが問題になっている。間伐遅れの人工林では、林の中の光環境が悪化し下草が乏しく裸地化することによって、前述のシカの高密度化した場所と同じように、地表流の発生、土壌の侵食が起こることが明らかになっている。（恩田編，2008）。

このように、現状では林床の裸地化により降った雨をゆっくり流出させる森林の機能の低下や土壌の侵食が起こっていることから、水源環境を保全・再生するためには、林床植生を回復させ土壌を保全する必要がある（図1）。これらの課題に対して、数

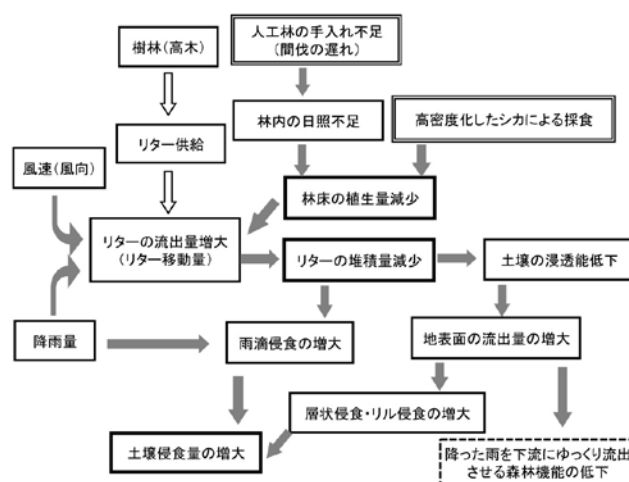


図1 現在の水源環境の主な課題
※石川（2007）一部改変

年から5年程度の短期的な対策として、植生保護柵の設置によるシカの排除、高木層から供給される落葉を捕捉して地面に留めることや森林の間伐により林内に光を入れることによって、林床植生を回復させ土壌の保全を図る方法が有効である。根本的な対策は、植生量とシカの生息密度との均衡を考慮した水源環境管理、あるいは人工林の適正な管理であり、これらを短期的対策と平行して計画的に進める必要がある。このような近年の新たな課題への対策手法は、対策を開始してから年数が浅く手法の検証段階にあるものや、各手法の相互影響が明らかになっていないものもある。このため、対策を実行すると

同時に効果や影響を検証し、その結果を次の対策の実施に随時反映させるといった順応的な対応が欠かせない。

2 これまでのモニタリングや他の研究による知見

これまでも丹沢大山保全・再生対策やシカ保護管理、水源林整備事業では、各種の調査や研究が継続して行われてきた。新たに行うモニタリング調査では、これらの既存の知見も踏まえる必要がある。

シカの影響が顕著な丹沢山地においては、これまでも植生保護柵の設置やシカの管理捕獲に加えて、一部で簡易な土壌保全工の設置が行われてきた。これらの対策の検証結果から、植生保護柵で囲うだけで4～5年で林床植生は回復すること（田村ほか、2007）、人工林では間伐により下層植生が回復するが植生保護柵を設置するとより回復が早まること（田村・山根、2005）、自然林内で落葉を捕捉して地面に留める簡易な施設によって短期的に土壌侵食を軽減できること（石川・内山、2012a）、さらに、シカの捕獲を行った場所では、シカの生息密度は概ね減少または横ばいになる傾向が確認された（神奈川県、2012）。このように対策を実施した箇所の短期的な効果は、ある程度確認されてきたが、対策を実施していない箇所では土壌侵食が進行するなど水源地域全体の改善には至っていない。

さらに、水源環境の保全の観点から、これらの対策によって下流への水や土砂の流出がどう変化したかという流域スケールでの効果検証はこれまで行われてこなかった。このため、対照流域法によるモニタリング調査に先行して、石川ら（2013b）によって流域スケールの事業効果の検証が試行的に開始された。調査地は、前述の植生保護柵や土壌保全工の設置、シカ管理捕獲等の対策と効果検証が行われている東丹沢堂平地区を含む堂平沢（流域面積約141ha）と隣接するワサビ沢（流域面積約91ha）の2流域である。この先行研究の現在までの成果については、後述する。

また、水源環境の実態把握にとどまるが、丹沢山地の一部で渓流水質の窒素濃度が高く、その濃度は首都圏からの大気汚染物質の影響をうける関東山地と同程度であったことから、丹沢山地においても窒素飽和現象が懸念されている（戸田ほか、2007）。

丹沢山地の溪流では、下流の河川と比べて付着藻類の現存量が低く、山地溪流のため栄養塩に乏しく流速が大きいことや斜面から流入した微細土砂による剥離作用などの影響が指摘されている（吉武ほか、2007）。底生動物については、石綿ら（2007）によると、前述のワサビ沢では、3年で1化性の長い生活環をもつ大型のカワゲラ類の生息が確認されたのに対し、堂平沢では、年1化性もしくはそれより短い生活環をもつものが大部分であり、底生動物相がより貧弱であった。これについて、両沢河床のクロロフィルa量の比較からも、堂平沢における斜面からの微細土砂の流入が影響している可能性も指摘されている（石綿ほか、2007）。

一方、シカの高密度化と植生への影響は、近年急激に全国各地で問題が深刻化しており、生態系への影響が流域スケールで検証されるようになってきた。たとえば、京都大学の芦生演習林では、平成12年頃から数年の間にシカの影響によって林床植生の衰退が進んだことに対して、福島ら（2011）は、平成18年に13haの流域の周囲を柵で囲み、その後の植物、水質、土壌や水生昆虫の変化を隣接する19haの流域と比較して調査した。その結果、柵設置後4年程度で林床植生が回復し、植生が回復した流域では渓流水の硝酸態窒素の濃度が低下した。これは、林床植生による土壌からの養分吸収の有無が、渓流水質にも影響することを示している。また、柵を設置した流域と設置しない流域では、溪流の底生動物相にも違いが現れており、柵外では河床が細粒堆積物で覆われ、細粒堆積物に潜って生活する掘潜型の底生動物の割合が柵内より柵外で高かった（福島ほか、2011）。芦生演習林と比較すると、丹沢山地は、ほぼ30年以上にわたってシカの累積的な影響を受けてきたことや、地形が急峻であること、近年の冬季の平均的な積雪深が1m未満である点で相違があるものの、参考にすべき事例である。

Ⅲ 森林における水源環境保全・再生対策の検証方法

1 森林における水源かん養機能改善の検証方法

本施策の評価体系では、森林整備面積などの事業量（アウトプット）に加えて、得られた効果（アウ

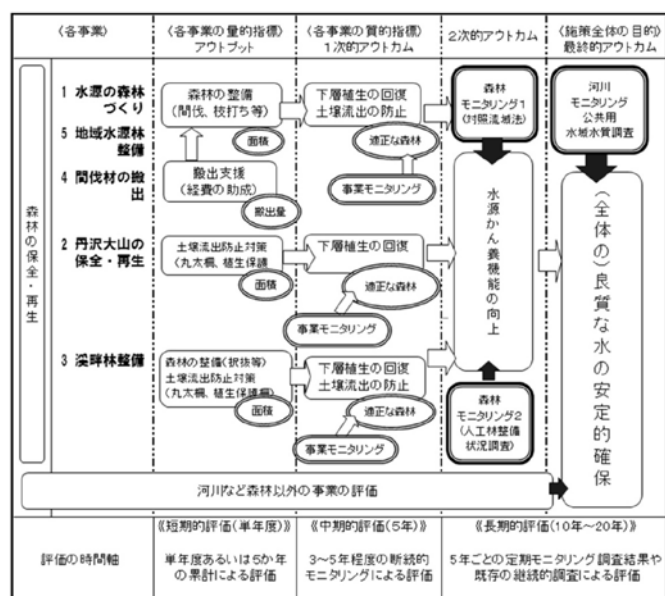


図2 水源環境保全・再生施策の評価体系
※水源環境保全・再生かながわ県民会議 (2012) 一部改変

トカム) が短期～中長期に段階的に評価される仕組みとなっている(図2)。各事業の実施箇所の効果(1次的アウトカム)は、各事業の一環でモニタリングされている植生や土壌侵食等の改善状況によって中期的に評価される。例えば、水源の森林づくり事業における森林の整備では、全事業実施箇所のうち代表する50箇所にモニタリング地点を設定し、間伐後の光環境の改善状況や、林床植生の回復状況、土壌侵食状況等について整備後5年ごとに調査している。このような事業の実施による森林内の変化に加えて、2次的アウトカムである森林の水源かん養機能の改善については、対照流域法によるモニタリング調査により中長期的に検証し、最終的には、河川等における施策効果の検証も踏まえて、施策の目標である「良質な水の安定的確保」が長期的・総合的に評価される。

対照流域法によるモニタリング調査では、流域内の植生や土壌の状態変化として把握される1次的アウトカムを下流への水や土砂の流出などの流域スケールの水源かん養機能の変化として把握される2次的アウトカムに結びつける必要がある。このため、小流域における現地実証型のモニタリング調査と水循環のシミュレーションモデル(以下、水循環モデルと呼ぶ。)による効果予測の2つの検証方法を採用した。

前者の現地実証型のモニタリング調査は、従来の森林水文学において行われてきた流域試験である。これは、雨量や河川流量をはじめとした水文観測を継続しながら上流域の森林の整備を行うことにより、小流域スケールの水や土砂の流出の変化を定量的に検証するものである。しかし、下流への水流出には、森林や植生の状態だけではなく、降雨や地形、地質、土壌などいくつもの要因が関係する。このため、森林整備の影響だけを抽出して調べるために対照流域法と呼ばれる方法を採用した。これは、似たような自然条件を持つ隣り合う2つの流域で流域試験を行い、片方の流域だけ整備をすることによって、整備前後の比較だけでなく整備の有無による差異を把握するものである。この対照流域法は、BARCI法(詳細は、内山・山根(2008)を参照。)と呼ばれる自然環境のモニタリング手法にも合致することから、森林等の自然環境を施策の対象とする本施策の検証に適した方法であると考えられた。既存の知見を踏まえ、検証の対象は、森林の整備を実施したことによる下流への水や土砂の流出の変化に加えて、その変化が溪流の水生生物に与える影響についても視野にいった。底生動物や藻類は、源流河川における調査事例は少ないものの、通常は、河川のモニタリングの対象生物として利用されており、源流の水源環境のモニタリングにも有用視されつつある。

後者の水循環モデルとは、コンピュータを用いて地表や地下の水の動きを3次元で流体シミュレーションするものである。対照流域法による現地モニタリング調査が、小流域における施策効果の詳細な検証に適していることから、水循環モデルは、ダム上流等の広域を対象に想定される施策に対するシナリオ解析等の予測解析を行うことをねらいとして補完的に導入した。このような現地の流域試験と併せて森林の水流出を再現するモデルには、福罵ら(1986)によって提唱されているモデルがあり、このモデルを東丹沢大洞沢の既設量水堰(現在のNo.1量水堰)の観測データに適用した例がある(白木ほか, 2007)。しかし、本施策は、ダム上流等の水源地域全体を対象とし、水の流出だけでなく流域の土壌の侵食といった要素も含まれる。そこで、事業実施箇所の面的配置を水流出解析における係数設定に

より加味して、地表流水・地下水流動に加えて流砂の解析も行うことができる水循環モデルを用いた（森ほか，2013）。

2 現地の試験流域の配置と検証のねらい

現地実証型のモニタリングを行う試験流域は、県内の水源地域における4つの地域にそれぞれ配置した（図3、表1）。これは、県内の水源地域の自然特性が一樣ではなく、特にこれらの4地域で水流出に影響する地質をはじめとした要因が異なるためである。すなわち、相模川水系宮ヶ瀬湖上流に位置する東丹沢地域の地質は、新第三系丹沢層群であり、相模川水系の津久井湖上流に位置する小仏山地の地質は、小仏層群で頁岩、砂岩が主体である。また、酒匂川水系丹沢湖上流に位置する西丹沢地域の地質は、主に石英閃緑岩であり、酒匂川水系狩川上流に

位置する箱根外輪山地の地質は、明神ヶ岳など外輪山の火山噴出物である。

これらの4地域のうち、現状でシカの影響が顕著な丹沢山地とそれ以外の地域では、水源環境の課題の性質と対策が異なる。このため、東丹沢と西丹沢では、シカと森林の適切な管理による効果の検証をねらいとし、それ以外の箇所では、水源林の施業の効果や影響を検証することをねらいとした。

さらに、流域の地質条件によって水の流出特性も異なるが（虫明ほか，1981）、県内の各地質条件における森林流域からの水の流出特性を実際に把握した例はこれまでにない。そこで、前述のような対策の効果を検証する過程で得られる各地域の水流出などの水源環境の特性についても、成果の一つとして取りまとめていくこととした。この成果は、それぞれの地域の特性に応じた水源林の管理計画に反映させることができると考えている。

このような4つの地域で、流域試験の可能な箇所に試験流域を設定した（内山・山根，2013a）。以下には、各試験流域の事業の効果検証のねらいと効果発現の筋書きの概略を示す。

シカと森林の適切な管理による効果を検証する試験流域が、東丹沢の大洞沢試験流域（以下、「大洞沢」という。）と西丹沢のヌタノ沢試験流域（以下、「ヌタノ沢」という。）である。どちらもシカの影響により林床の植生は乏しい、もしくは、シカの不適好性植物に覆われている。両試験流域における林相の相違から、特に、大洞沢をシカと人工林の適切な管理による効果を検証する試験流域、ヌタノ沢を広葉樹林における適切なシカ管理による効果を検証する試験流域と位置付けた。既存の知見を踏まえた整備による効果発現の筋書きは、流域内の林床植生が回復して土壌が保全されることによって、下流への水流出においては直接流出率が減少し、水質では細粒土砂による濁りの減少に加えて、林床植生による土壌からの養分吸収量の増加で硝酸態窒素濃度が減少する、さらには溪流環境の安定化により溪流生物の多様性が向上することと設定した（図4）。この筋書きに基づき、今後は各項目を定量的・定性的に検証する計画である。なお、大洞沢における間伐等の人工林施業は、植生保護柵の設置後数年の間隔をあけて行う予定である。



図3 試験流域位置図

表1 試験流域一覧

試験流域	観測開始年度	自然特性等	モニタリングのねらい
東丹沢「大洞沢」	H21	宮ヶ瀬湖上流、新第三系丹沢層群人工林、シカ影響	シカ管理と人工林管理の効果検証
相模湖「貝沢」	H22	相模湖支流、小仏層群（頁岩）人工林	水源林整備の効果検証
西丹沢「ヌタノ沢」	H23	丹沢湖上流、深成岩（石英閃緑岩）広葉樹、シカ影響	シカ管理と広葉樹整備の効果検証
南足柄「フチチリ沢」	H24	狩川上流、外輪山噴出物、人工林	当該地域の水源環境の特性把握

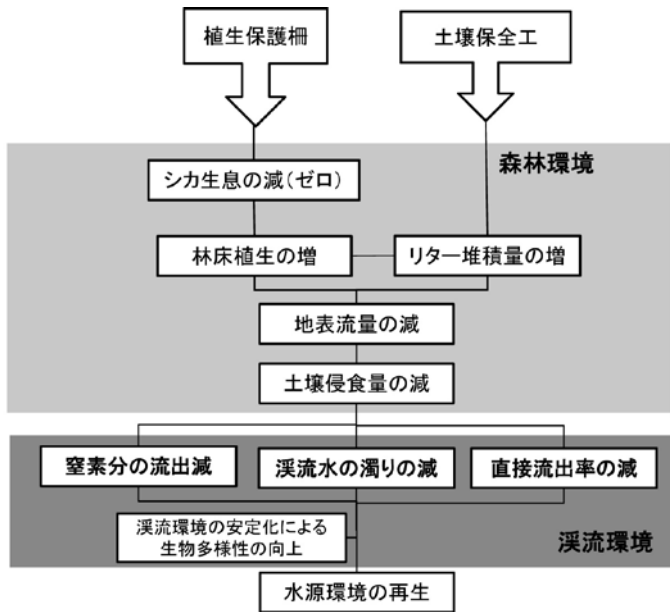


図4 シカと森林の適切な管理の効果検証における効果発現の筋書き

また、水源林の施業の効果や影響を検証する試験流域が、相模湖に流入する貝沢試験流域（以下、「貝沢」という。）、南足柄市のフチゼリ沢試験流域（以下、「フチゼリ沢」という。）である。丹沢山地が累積的にシカの影響を受けてきたのに対し、貝沢、フチゼリ沢では、シカの生息は確認されているものの密度は低く、現状では植生への影響はほとんどみられない。また、流域の大部分を占める人工林は、概ね適切に管理されている。一方で、今後は、流域内の人工林の間伐に伴う木材の搬出が計画されている。そこで、平成24年度に試験流域内の一つの支流で間伐と木材の搬出が行われる貝沢では、間伐による水の流出特性の変化や窒素をはじめとした森林の物質循環の変化に加えて、地表面のかく乱に配慮した木材搬出作業により、土壌の侵食や下流への水の濁りの発生が抑制される、あるいは一時的に濁りが発生しても短期に回復することを小流域スケールで定量的に検証することとした。また、対照流域法に適した面積規模の試験流域を確保できなかった南足柄地区では、当面は、箱根外輪山地域の水や土砂の流出特性や水生生物の生息状況を把握することをねらいとしてフチゼリ沢におけるモニタリングを実施し、将来、必要に応じて森林整備の検証を行うこととした。

3 対照流域法によるモニタリング調査の実施手順

これまで述べてきたように、対照流域モニタリング調査は、本施策の森林における2次的アウトカムである流域スケールの水源かん養機能評価を目的として、試験流域における現地モニタリングと水循環モデルによる効果予測の2つの手法により事業効果の検証を行う。さらに、現地モニタリングでは、水の流出特性の異なる4地域の各試験流域において各地域の課題と対策に応じた検証を行う。このようなモニタリング調査の実施手順の概略を以下に示した。

前述の4箇所の試験流域は、平成20～23年度にかけて、毎年1箇所ずつ設定した。各試験流域で行うモニタリングの手順を表2、第1期5か年計画のスケジュールを表3、基本的なモニタリング項目を表4に示した。最も先行する大洞沢の例では、平成19年度に森林・植生状態、地形・土壌等の試験流域の基礎調査を行い、モニタリングの詳細な計画を検討した。平成20年度には、モニタリングの基盤データとなる気象・水文観測施設を整備し、平成21年度から気象・水文観測を開始した（内山・山根, 2013a）。そして、平成21～23年度まで現状の流域特性を把握する事前モニタリングを行った。これは、モニタリング結果の流域間の差異が、整備の有無によるものか、固有の流域特性によるものか判別不能になることを避けるためである。流域特性の把握という観点から、事前モニタリングでは、流域末端で水の流出量や水質、土砂流出量を把握するだけでなく、流域全体としての水や土砂の流出過程や物質循環の把握に努めた。また、源流での調査事例の少ない付着藻類や底生動物については、あらかじめ指標種等を絞り込むことが困難であったため、各地点の実態を把握する基礎的調査が中心となった。さらに、平成24年3月に実施流域のみを植生保護柵で全域囲う整備を行った。その後は、柵で囲った実施流域と囲っていない対照流域における水や土砂の流出の差異や、柵の設置前後の変化を比較する事後モニタリングを実施している。その他の試験流域も1年ずつずらして同様の手順により順次実施した。なお、大洞沢以外の森林整備については、第2期の5か年で実施する計画である。

また、水循環モデルによる効果予測も平行して進

表4 現地モニタリングの主な調査項目

区分	モニタリング項目
森林環境	林床植生(被度、現存量)
	森林構造(林相、立木密度等)
	光環境、リター堆積量
	地表流量、土壌侵食量
	土壌水分量、土壌深度
	土壌理化学性
整備効果 検証指標	中大型哺乳類生息状況
	水量、水質、水温
	浮遊砂量、濁度、掃流砂量
	溪畔環境(照度、水温など)
溪流・水環境	藻類、溪流動物
	降水量(降雪量)、降雨水質
基盤情報	気温、湿度、全日射量

表2 試験流域におけるモニタリングの手順

モニタリング実施手順	期間	大洞沢における 実施スケジュール
Step1 計画検討・事前調査	1年間	H19
Step2 施設設置・観測システム整備	1年間	H20
Step3 事前モニタリング	3年間	H21～23
Step4 整備実施		H23下半期
Step5 事後モニタリング	継続	H24以降

表3 対照流域法によるモニタリング調査第1期スケジュール

	H19 (2007)	H20 (2008)	H21 (2009)	H22 (2010)	H23 (2011)	H24～28 (2012～2016)
施策スケジュール	実行5か年計画					第二次 5か年計画
対照流域法等による モニタリング調査	試験流域の設定					モニタリング継続
東丹沢 (大洞沢)	・既存観測の継続 ・事前調査・検討	・既存観測の継続 ・施設設置	・事前モニタリング (既存+新規項目)	・事前モニタリング	・事前モニタリング ・整備実施	・事後モニタリング
相模湖 (貝沢)	—	・事前調査・検討	・施設設置	・事前モニタリング	・事前モニタリング	・事前モニタリング ・整備実施(H24) ・事後モニタリング
西丹沢 (ヌタノ沢)	—	—	・事前調査・検討	・施設設置	・事前モニタリング	・事前モニタリング ・整備実施(H25) ・事後モニタリング
南足柄 (フチヂリ沢)	—	—	—	・事前調査・検討	・施設設置	・事前モニタリング ・整備実施(H26) ・事後モニタリング
水循環モデル	宮ヶ瀬ダム上流モ デル構築	津久井ダム上流モ デル構築	酒匂川流域モデル 構築	モデル解析	モデル解析	モデル解析

めている。実施手順は、まず地形や地質といった既存データを用いて基本的なモデルを構築し、自然の流況が再現できるかを検証する。次に、降雨量や河川流量などの実測データを用いて、基本的なモデルでそれらの流量等の時系列変化が再現できるかを検証する。さらに、これらの再現性がある程度検証されたモデルを用いて、森林・植生・土壌等の任意の条件を与えることによって想定される整備の効果予測を行う(森ほか, 2013)。これによって、各試験流域における効果予測とダム上流等の広域における効果予測を行い、施策の効果を分かりやすく表現し

ていく計画である。また、モデルの再現性の検証にあたっては、現地モニタリングで得られた定点の水や土砂の流出の時系列データのほか、地域ごとの水源環境の違いを把握するための水流出等の広域一斉調査データも活用した(横山ほか, 2013b)。

IV 各モニタリング調査の実施状況と得られた知見

1 東丹沢堂平地区における先行研究で得られた知見

東丹沢堂平地区では、これまでの植生保護柵や土

壤保全工の設置、シカの管理捕獲等の各種対策により、植生保護柵設置箇所の植生の回復や土壤保全工設置箇所の土壤侵食の軽減などの効果に加えて、シカの生息密度も38頭/㎢（平成14年度）から5頭/㎢前後（平成23年度）にまで減少してきた（神奈川県, 2012）。石川ら（2013b）は、その下流にあたる堂平沢と隣接するワサビ沢において、平成19年度から流域スケールの効果検証を試行的に開始した。石川ら（2013b）によると、斜面の土壤侵食と下流の水の濁りである浮遊土砂濃度の発生の関係を調べたところ、斜面における土壤侵食量と下流の溪流の浮遊土砂量には、強い相関が認められ、流域スケールの土壤保全効果の検証に本手法を用いることができると考えられた。しかし、同一の一雨雨量に対する浮遊土砂量の過去3年間の減少傾向は明瞭でなかった（石川・内山, 2013b）ことから、今後も継続して経年変化を検証するとともに、斜面で侵食された土砂が溪流に流出する機構を明らかにしていくことによって、本検証手法のさらなる確立と流域スケールの土壤保全対策の効果的な推進方法の検討に必要な知見を提供していくことができると見込まれる。

2 大洞沢における現状の流域特性

大洞沢では、平成21年度から森林整備前の植生状態や河川流出等を把握する調査を行った。調査項目は、各水文観測流域の水収支や水の流出特性、水質のほか、流域内の植生被覆や土壤の状態と土砂流出の関係、また、溪流の付着藻類と底生動物の生息状況である。主な調査箇所は、植生保護柵を設置する実施流域（流域No.3：7ha）、柵を設置しない対照流域（流域No.4：5ha）の2つの支流である。流域内の林床植生の状態は、全体として尾根の平坦部に不嗜好性植物に覆われる箇所が多く、溪流沿いに裸地が多かった（五味ほか, 2013）。さらに、降雨や風によるリターの移動と落葉によるリター供給、気温の変化に伴う草本性植物等の枯死によって、植生とリターによる林床の被覆率は、秋季から冬季にかけて変動していることが確認されたため、流域内の主な土砂生産源と予想される裸地の分布も季節変動している可能性がある（平岡ほか, 2013）。また、事前モニタリングで明らかになった実施流域と対照

流域の基底流量等の水流出特性の相違については、基岩形状や深部浸透が影響していると考えられ（小田ほか, 2013）、事後モニタリングでは、このような流域特性を考慮して検証する必要がある。さらに、吉武ら（2013）によると、溪流の付着藻類は、国内の一般的な河川と比べて細胞密度が極めて少なく、対照流域より実施流域のほうで細胞密度がより少なかった。最も出現率の高かった種は、流れの急な環境に生育可能な種であった。これらには、流速や溪岸からの流出土砂による剥離作用等が影響していると考えられた（吉武・坂本, 2013）。底生動物については、山地の小溪流に通常生息する種がみられたが、生育に2年以上を要する水生昆虫類の種類数が貝沢より少なく、特に対照流域よりも実施流域のほうでより少なかった。これは、冬季など少雨期に表流水の水域が縮小または伏流し、十分な流水環境が確保されないことが影響していると考えられた（石綿ほか, 2013）。

平成24年3月に、森林整備として実施流域の周囲を植生保護柵で囲った後は、事後モニタリングを実施している。既存の知見からも4年程度で柵内外の差が現れると思われ、五味ら（2013）、平岡ら（2013）によって把握された流域内の詳細な植生被覆状態や土砂の生産状況が、どのように改善されていくかが明らかになると見込まれる。また同時に、中長期的には、下流への水や土砂の流出や水生生物の生息に現れる変化を検証していく計画である。

3 貝沢におけるモニタリングの実施状況

貝沢では、平成22年度から森林整備前の立木・植生状態や河川流出等を把握する調査を行った。貝沢の本流は上流で3つの支流に分岐しており、この3つの支流を中心に、各観測流域の水の流出特性や水質、水の濁りのほか、立木・植生・土壤状態と林内の窒素の動態、溪流の付着藻類と底生動物の生息状況を調査している。水の流出特性は、3つの支流のうち中央に位置する流域1（6.6ha）において基底流量、直接流出量とともに他の支流（流域2：8.3ha、流域3：14.9ha）よりも多い傾向がみられた（白木ほか, 2013）。また、浮遊土砂濃度の観測結果から、流域1で最も水の濁りの発生回数が多く、3つの支流の浮遊土砂流出量の合計値よりも3支流の合

流点より下流に設けたNo.4 水文観測地点における浮遊土砂流出量の値のほうが少ないことから、途中で浮遊土砂の堆積が起こっていることが示唆された（白木ほか, 2013）。また、辻ら（2013）によると、流域1～3で物質循環特性に大きな相違はないものの、流域1で比較的窒素循環が激しく、全体的に安定しているのが流域3であることが明らかになった。吉武ら（2013）によると、貝沢の付着藻類は、大洞沢よりも全般的に細胞密度が高い傾向にあったが、国内の一般的な河川と比較すると少なかった。付着藻類の多様性は低く、大洞沢と同様に珪藻の中でも付着力が強く剥離作用に対して抵抗性を有する種によって主に構成されており、流速、流出土砂による剥離、光量の不足などが影響していると考えられた（吉武・坂本, 2013）。底生動物については、山地の小溪流に通常生息する種がみられたが、貝沢では、大洞沢やヌタノ沢とは異なり、丘陵地の細流や低山地の小溪流に生息する種もみられた（石綿ほか, 2013）。さらに、生育に2年以上を要する水生昆虫類の種類数が、大洞沢やヌタノ沢よりも多く（石綿ほか, 2013）、比較的安定した流水環境が反映されていると考えられた。

貝沢では、平成24年秋季に流域1で群状の間伐と木材の搬出を行うが、施業の前後での林内の光環境、植生や窒素の動態の変化を把握するとともに、下流への水の流出や水質、水の濁り、水生生物の生息状況についてのモニタリングを継続し、水源環境への効果・影響を検証する計画である。

4 ヌタノ沢、フチヂリ沢におけるモニタリングの実施状況

ヌタノ沢においても、平成23年度から森林整備前の植生状態や水流出を把握する調査を行った。調査項目は、各観測流域の水の流出特性、水質、土砂流出、流域内の植生被覆、土壌のほか、溪流の付着藻類と底生動物の生息状況である。特に現状では、土砂流出が多く、台風等による豪雨のたびに多量の土砂が流出する（内山ほか, 2013b）。また、大洞沢と同様に実施流域（A沢：4ha）と対照流域（B沢：3ha）で基底流量等の水流出特性に違いが認められ、両流域の流量に寄与している各源頭部の湧水の流出機構等について今後も調査する必要があると

考えられた（横山ほか, 2013a）。さらに、底生動物については、山地の小溪流に通常生息する種に加えて止水や飛沫帯などに生息する種がみられたほか、生育に2年以上を要する水生昆虫類の種類数は実施流域で極めて少なかった（石綿ほか, 2013）。実施流域は、沢の源頭部から量水堰のある下流の間に数か所の伏流箇所があり年間を通して流水域が断続的であるうえ、冬季には表流水も枯渇する傾向があることから、このような環境が底生動物相にも反映していると考えられた。

ヌタノ沢では、平成25年度下半期に、A沢の流域全体を植生保護柵で囲う森林整備を計画している。その後は、大洞沢と同様に柵内の植生被覆状態の変化を4年程度で検証するとともに、それによる下流への水や土砂流出への影響、水生生物の生息状況の変化を中長期的に検証する計画である。

また、フチヂリ沢については、平成23年度に気象・水文観測施設を整備し、平成24年度から観測を開始した。すでに調査された流域内の森林や植生、土壌の状態に加えて、今後は、気象・水文観測を軸とした水や土砂の流出特性を把握する調査や水生生物の生息状況調査を実施し、当該地域の流域特性を他の試験流域とも比較して取りまとめていく計画である。

5 水循環モデルによる効果予測の取組み状況

水循環モデルによる効果予測に関しては、平成19～23年度までに、4箇所の試験流域と前述の東丹沢堂平地区の先行試験流域を合わせた5つの試験流域モデルと宮ヶ瀬湖上流域モデル、相模川上流域モデル、酒匂川流域モデルの3つの広域モデルについて、地形や地質を初めとした既存データを元に基本モデルを構築した（森ほか, 2013）。さらに、試験流域で得られた観測データや、ダム周辺の既存の流量データを活用して、モデルの再現性の検証を行うとともに、大洞沢モデルを用いてモデルの感度分析を行った。第2期5か年においては、構築したこれらのモデルを活用し、段階的に効果予測に取り組む計画である。

6 第2期5か年計画以降における取組み

第2期の5年間では、4つの試験流域における森

林整備が一通り終了し、事後モニタリングによる効果検証を開始する計画である。このため、数年～5年程度の短期的な効果については、第2期の5年間で検証できると思われる。特に、最初に森林整備を行った大洞沢では、第2期の後半で植生保護柵の内と外で植生回復の差が現れ、それに対応する小プロットにおける水流出や水質、土砂生産等の変化が見え始めると予想される。また、貝沢においては、平成24年度の間伐と木材の搬出による水・土砂流出や水質への短期的な影響が明らかになる見込みである。さらに、ヌタノ沢、フチヂリ沢についても、流域の水や土砂の流出特性がある程度把握でき、県内の4地域の水源地域の特性に関する知見が得られると見込まれる。

一方、水生生物については、下流の河川と比較しても試験流域の生物相はいずれも特徴的であり、さらに同じ源流であっても異なる生物相であることが明らかになってきた(石綿ほか, 2013)。このような環境下で新種や日本初記録種の存在を確認できたこと(石綿ほか, 2013; 小林, 2013)は、源流域のモニタリング調査を継続する上でも意義のある成果である。すでに坂本ら(2013)によって一部検討されているように、第2期では、これまでの成果を踏まえて、森林施業による水生生物相の変化、あるいは、源流河川から下流の河川への結び付けについて、水や土砂の分野と両輪で検討していく必要がある。

さらに、第2期に行う森林整備による各試験流域の検証結果を踏まえ、第3期5か年計画以降に2回目の森林整備を行うことも想定しており、この計画も第2期の5年間で検討を進めていきたい。

V おわりに

かながわ水源環境保全・再生施策の森林における事業の検証を行うために、対照流域法による試験流域を県内の4箇所に設定し水源環境のモニタリングを開始するとともに、水循環モデルによる効果予測のための基本モデルを構築した。第1期の5年間では、大洞沢、貝沢を中心に水や土砂の流出特性や水生生物の生息実態が概ね明らかになった。第2期においては、大洞沢、ヌタノ沢で植生保護柵の設置効果、貝沢では群状間伐と木材の搬出が水源環境に与

える効果や影響について、それぞれ流域スケールでモニタリングし、短期的な効果が検証できる見込みである。加えて、各試験流域におけるモニタリング調査を継続することで、県内の4地域それぞれの流域特性など水源環境の基礎的な情報が得られる見込みである。これらの現地モニタリング調査と併せて水循環モデルによる広域の事業効果の予測についても試みる計画である。

長期的にみると、水源地域の課題には、関東大震災のような過去の大規模な自然のかく乱だけでなく、森林の過度な利用や絶滅の危機にあったシカの保護、新たな植林地の拡大など、人々が過去に森林で行ってきた行為も現在の森林の状態に少なからず影響してきた(内山・鈴木, 2007)。このため、現在、森林で実施している事業も、直接的な事業効果に加えて、経年的な森林の成長や生態系の相互作用等を通して将来の森林の姿に多かれ少なかれ影響を及ぼすであろう。当面の施策の効果検証に加えて、さらに長期にわたって一部の必要なモニタリングを継続することができれば、本施策の水源環境への長期的な効果・影響が検証できるうえ、将来、新たな水源環境の課題が発生しても問題の小さなうちに早期に対策をとることが可能になると考えられる。

VI 謝 辞

この対照流域法によるモニタリング調査を進めるにあたって、東京農工大学の石川芳治教授、東京大学の鈴木雅一教授をはじめとして、多くの先生方に指導、助言をいただいた。加えて、共同研究として実施している現地モニタリング調査では、各研究室の歴代の学生の方々も含めてご尽力をいただいた。また、試験流域の設定や現地の観測施設の整備、森林の整備に関しては、庁内関係所属のほか、森林管理署、地元市町村、各森林所有者の方々にご理解とご協力をいただいた。ここに記して、感謝の意を表します。

VII 引用文献

- 福島慶太郎・井上みずき・坂口翔太・藤木大介・山崎理正・境優・齊藤星耕・中島皇・高柳敦（2011）ニホンジカによる過採食が芦生の冷温帯天然林の生物多様性と生態系機能に及ぼす影響の解明、プロ・ナトウラ・ファンド第20期助成成果報告書、181-199
- 福嶋義宏・鈴木雅一（1986）山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10年間連続日・時間記録への適用。京都大学演習林報告57：162-185
- 五味高志・平岡真合乃・坂上賢・ファム ティ クイン アン・内山佳美（2013）大洞沢試験流域における林床植生の空間分布特性，神奈川県自然環境保全センター報告，10：59-69
- 平岡真合乃・五味高志・小田智基・熊倉歩・宮田秀介・内山佳美（2013）大洞沢試験流域における流出土砂量と土砂生産源の季節変動，神奈川県自然環境保全センター報告，10：71-79
- 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。
- 石川芳治（2007）3. 土壌と土砂。97 - 117. 森林科学。294pp，佐々木恵彦・木平勇吉・鈴木和夫編，文永堂出版
- 石川芳治・内山佳美（2013a）東丹沢堂平における土壌保全工の土壌侵食軽減効果の評価，神奈川県自然環境保全センター報告，10：23-35
- 石川芳治・内山佳美（2013b）東丹沢堂平における流域スケールでの土壌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
- 石綿進一・齋藤和久（2007）1. 堂平沢およびワサビ沢の底生動物。328-331。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。
- 石綿進一・守屋博文・倉西良一・清水高男・小林貞・司村宜祥（2013）源流河川の底生動物，神奈川県自然環境保全センター報告，10：163-175
- 神奈川県（2005）かながわ水源環境保全・再生施策大綱。59pp，神奈川県企画部土地水資源対策課，横浜。
- 神奈川県（2012）平成24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>
- 小林貞（2013）西丹沢のユスリカ科（Chironomidae），神奈川県自然環境保全センター報告，10：195 - 201
- 森康二・多田和広・佐藤壮・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次元水循環モデル，神奈川県自然環境保全センター報告，10：215-223
- 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
- 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・流出特性ー地下部における水移動の影響ー，神奈川県自然環境保全センター報告，10：47-52
- 恩田裕一編（2008）人工林荒廃と水・土砂流出の実態。245pp，岩波書店
- 坂本照正・吉武佐紀子（2013）山地溪流の付着生物群集への生態学的アプローチ，神奈川県自然環境保全センター報告，10：145 - 162
- 白木克繁・若原妙子・石川芳治・鈴木雅一・内山佳美（2007）Ⅰ 大洞沢の降雨と流出。405-409。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。
- 白木克繁・片岡宏介・工藤司（2013）貝沢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
- 水源環境保全・再生かながわ県民会議（2012）かながわ水源環境保全・再生の取組の現状と課題ー水源環境保全税による特別対策事業の点検結果報告書ー（平成22年度実績版）。
- 田村 淳・山根正伸（2005）丹沢山地のニホンジカ

生息地におけるスギ・ヒノキ高齢林での間伐後
4年間の下層植生の変化. 第116回日本森林学
会講演要旨集

田村 淳・永田幸志・小林俊元・栗林弘樹・山根正
伸 (2007) 第1次神奈川県ニホンジカ保護管理
事業における植生定点モニタリング, 神自環
保セ報4:7-20.

戸田浩人・白木克繁・石川芳治・内山佳美・笹川裕史・
鈴木雅一 (2007) 丹沢山地の溪流水質. 410-
415. 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.

辻千智・戸田浩人・崔東寿 (2013) 神奈川県の貝沢
試験流域における窒素動態特性、神奈川県自然
環境保全センター報告、10:91-99

内山佳美・鈴木雅一 (2007) 丹沢大山地域における
森林資源の変化と森林管理・利用の変遷. 474-
478. 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.

内山佳美・山根正伸 (2008) 森林における水環境モ
ニタリングの調査設計—大洞沢における検討
事例—, 神奈川県自然環境保全センター報告、

5:15-24.

内山佳美・山根正伸 (2013a) 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・山根正伸 (2013b) 西丹沢ヌ
タノ沢試験流域における平成23年度の台風に
よる土砂流出の概況, 神奈川県自然環境保全セ
ンター報告、10:115-122

横山尚秀・内山佳美・山根正伸 (2013a) 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・佐藤壮・山根正伸 (2013b)
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

吉武佐紀子・福島 博 (2007) 付着藻類から見た丹
沢. 344-352. 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.

吉武佐紀子・坂本照正 (2013) 大洞沢、貝沢の付着
藻類植生, 神奈川県自然環境保全センター報
告、10:123-144

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

内山佳美*・山根正伸**

Installation of the observation system for monitoring study based on paired catchment experiment methods

Yoshimi UCHIYAMA*, Masanobu YAMANE**

要 旨

水源環境の保全・再生施策にかかる森林の事業実施効果を流域スケールで検証するために、県内4か所に対照流域法による試験流域を選定し、平成20年度から毎年1か所ずつ気象・水文観測施設を整備した。各試験流域では、現場条件に合わせて量水堰等の施設を設置し、気象と水文の観測地点を設けた。各試験流域の観測は、常時自動で行い、データを定期的に自然環境保全センターへ転送するシステムとした。水文観測に欠かせない水位・流量換算式も順次決定した。通常の施設の保守に加えて、洪水時の量水堰への土砂の堆積の際には、堆積土砂の測定と浚渫工事を行った。今後は、この気象・水文観測を基盤とした水源環境のモニタリングを着実に継続することによって、施策の順応的な推進や水源林の管理に有効な科学的情報を提供していく計画である。

I はじめに

現在、神奈川県が行っている水源環境の保全・再生施策においては、森林における事業の実施効果を流域スケールで下流への水や土砂の流出と結びつけて検証し、その結果を事業の見直しに反映させていく順応的な対応が欠かせない(内山ほか, 2013a)。これまでの小面積スケールのモニタリングでは、ニホンジカの高密度化等により衰退した林床植生が事業の実施によって回復し、降った雨が地中に浸透しやすくなり降雨の際に地表面を素早く流れる水が減少することが明らかになっている(石川ほか, 2007)。しかし、それが流域スケールで下流への水や土砂の流出に与える効果には、流域の地形や地質、気象条件などの立地環境も関係し、その機構は単純

ではない。

自然環境保全センターでは、森林における事業の効果を流域スケールで検証するため、平成19年度より「対照流域法によるモニタリング調査」を開始した(内山ほか, 2013a)。これは、隣り合う2つの小流域で降雨等の気象と河川流量等の水文の観測を継続しながら、一方の流域を整備することによって、整備前後の比較だけでなく整備の有無による流域スケールの水や土砂の流出の違いを把握する調査である。

現在は、県内の4か所に設定した各試験流域において、事業の効果検証のためのモニタリング調査を開始したところである。本稿では、選定した4か所の試験流域と各試験流域に整備した観測システムの概要について報告する。

* 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)

** 神奈川県環境農政局 水・緑部 自然環境保全課 (〒231-8588 横浜市中区日本大通 1)

Ⅱ 県内4か所の試験流域の選定

本調査のための試験流域は、県内の水源地域の地形や地質の異なる4地域それぞれの源流に位置する小流域に設定した。これは、地質の違いから流域のもともとの水流出特性が異なること（虫明ほか、1981）、シカの影響など水源環境の課題が各地域で異なることから、それぞれの地域ごとに事業効果を検証する必要があると考えられたためである。

各地域における試験流域は、平成19年度から毎年1箇所ずつ選定した。選定にあたっては、河川流量を正確に測定するための量水堰を設置できる箇所がかなり限られたことから、土地造成や林道建設などの人為的な地形改変のない10ha未満の森林流域が2つ以上確保でき、年間を通して水量があり、道の近くなどアクセスのよいところに量水堰の設置に適した箇所がある流域を候補地とした。表1の選定条件により各候補地を総合的に評価して地域ごとの試験流域を決定した。

選定した試験流域は、東丹沢の大洞沢試験流域、

表1 試験流域の選定条件

区分	選定条件
現場条件	年間を通して沢の水量があること
	ダムサイトに適した地点があること
	流域内に人為的な土地の改変がないこと
	道路（車道）から近いこと
	量水堰の排土などの維持管理が可能であること
	集水面積が数haから数十ha程度であること
	商用電源や電話回線の確保が容易であること
社会条件	上記のような流域が2つ以上セットで確保できること
	土地所有者の承諾が得られること（県有地が最もよい）
	既存の計画や事業との調整が可能なこと

相模湖の貝沢試験流域、西丹沢のヌタノ沢試験流域、南足柄のフチヂリ沢試験流域（以下、それぞれ沢名で呼ぶ。）である（図1、表2）。なお、南足柄地域では、量水堰の設置に適した小流域が確保できなかったため、量水堰を設置せずに自然の河道で水文観測を行う約42haと約34haの2流域を試験流域とした。選定した試験流域の区域内には、県有地だけでなく市町村の管理地や私有林も含まれたため、それぞれの土地の所有者との調整を行った。

Ⅲ 各試験流域における気象・水文観測の概要

平成20年度から毎年1か所ずつ、モニタリングの基礎データを取得するための気象・水文観測システムを各試験流域に整備した。各試験流域では、現地の状況に応じて、雨量等の気象観測を1～2地点、



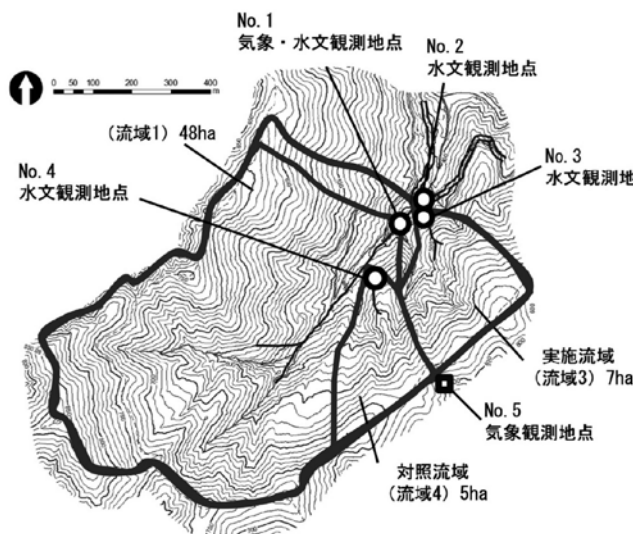
図1 選定した各試験流域の位置

表2 各試験流域の自然条件と選定理由

試験地	地域／市町村	選定年度／ 施設整備年度	区域面積 (ha)	自然条件等	試験地選定理由
東丹沢 「大洞沢試験流域」	宮ヶ瀬湖上流 清川村	H19／H20	58	新第三系丹沢層群 人工林、シカ影響	県有地で本流の既設量水堰の水文観測実績がある上、2つの支流に新たに量水堰を設けることが可能である。
相模湖 「貝沢試験流域」	津久井湖上流 相模原市	H20／H21	96	小仏層群（頁岩） 人工林	100ha程度のほぼ流域全体が、水源の森林づくり事業の対象地となっており、流域内の複数の支流と本流に量水堰を新規に設けることが可能である。
西丹沢 「ヌタノ沢試験流域」	丹沢湖上流 山北町	H21／H22	7	深成岩（石英閃緑岩） 広葉樹、シカ影響	流域面積が小さく、流域試験が比較的容易である。既設の治山堰の下流に量水堰を設置することが可能である。
南足柄 「フチヂリ沢試験流域」	狩川上流 南足柄市	H22／H23	76	外輪山噴出物、 人工林	常水のない沢が多い当地域の中で、流域面積は大きいものの年間を通して水量があり流域内に林道や土地の造成地がない。

流量等の水文観測を2～5地点それぞれ設けた（図2）。すべての試験流域で観測項目を統一し、気象

観測は、気温、湿度、風向、風速、全天日射量、雨量であり、水文観測は、水位、水温、濁度とした。デー



大洞沢試験流域

区域面積 58ha（県道70号より上流域）

気象1地点、水文4地点



又タノ沢試験流域

区域面積 7ha（県道76号より上流域）

気象1地点、水文2地点

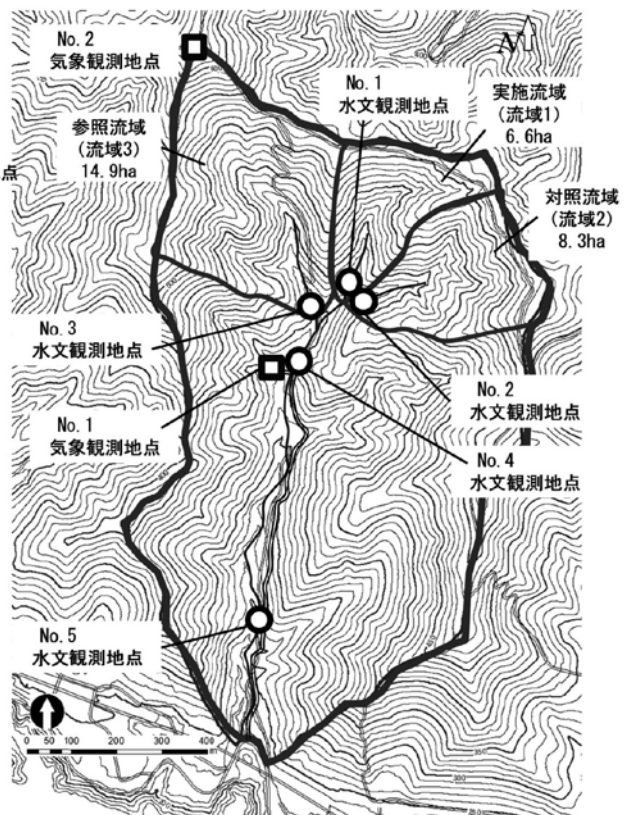
フチヂリ沢試験流域

区域面積

フチヂリ沢 42.3ha（足柄林道より上流域）

クラミ沢 33.8ha（足柄林道より上流域）

気象1地点、水文2地点



貝沢試験流域

区域面積 96ha（国道20号より上流域）

気象2地点、水文5地点



図2 各試験流域における観測地点の配置

タの記録間隔は、すべて10分とした。

フチヂリ沢以外の試験流域の各水文観測地点に

は、源流河川で正確に流量を測定するために必要な
量水堰を設けた(写真1、図3、図4)。大洞沢のNo.3、



- ① 大洞沢試験流域 No.1 水文観測地点の量水堰(昭和55年度設置)
- ② 大洞沢試験流域 No.3 水文観測地点の量水堰(平成20年度設置)
- ③ ヌタノ沢試験流域 A 沢水文観測地点の量水堰(平成22年度設置)
- ④ 貝沢試験流域 No.1 水文観測地点の量水堰(平成21年度設置)
- ⑤ フチヂリ沢試験流域 フチヂリ沢観測地点(平成23年度設置)※記録・電源装置
- ⑥ フチヂリ沢試験流域 フチヂリ沢観測地点(平成23年度設置)※センサ一部

写真1 各試験流域の水文観測施設

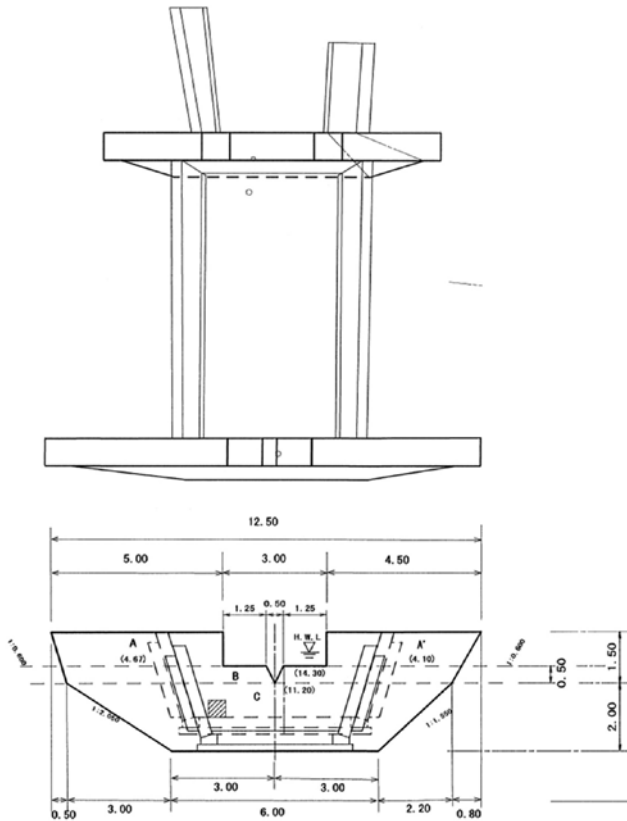


図3 大洞沢試験流域のNo.3水文観測地点の量水堰の構造

No.4 水文観測地点では、既設の上下流に並ぶ治山堰堤2基の間に量水堰堤と三面張水路を取付けることによって量水堰を整備した。本流での観測経験から、量水堰に土砂が堆積することも予想されたため、京都大学の穂高観測所のヒル谷堰堤の構造を参考に量水堰に排砂口を設けた。ヌタノ沢もA沢とB沢ともに既設の治山堰堤の下流側に水叩き部と水路部を取付けて量水堰を整備した。貝沢のNo.5 水文観測地点は過去の取水堰の跡地を利用して堰板を設置し、それ以外のNo.1～4 水文観測地点では、既設の治山堰堤が無く、私有地のために将来撤去する可能性も考慮して、ダムサイトに適した箇所に堰板を設置して、自然の河道を生かして量水堰を整備した。

IV 常時観測・データ転送システムの概要

大洞沢、貝沢、ヌタノ沢の観測システムは、商用電源により常時自動で観測され、観測データは現地記録装置に記録されるとともに、通信設備により定期的に自然環境保全センター内のパソコンに自動転送される仕組みである（図5～7、表3）。これ

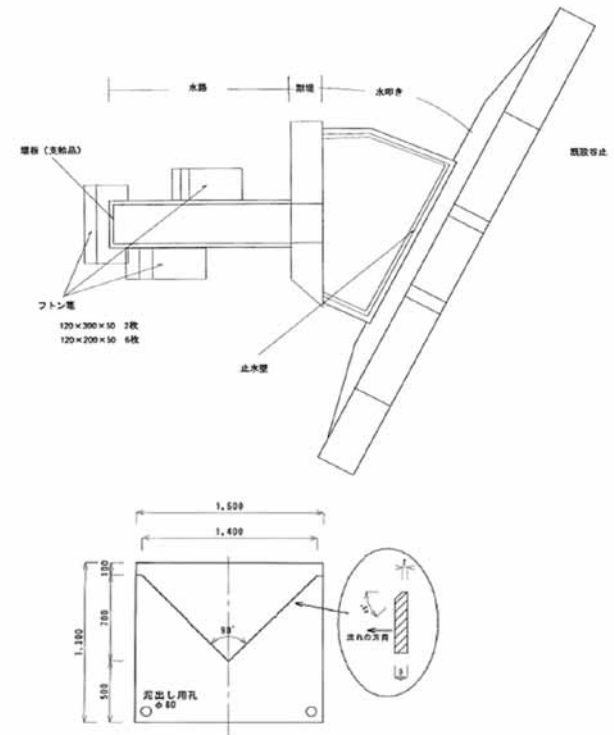


図4 ヌタノ沢試験流域のA沢水文観測地点の量水堰の構造

までの丹沢山地における気象観測の経験から、電源供給と通信の確実性を重視して、太陽光発電や無線通信でなく、近傍の電柱から試験流域まで電線とNTT 光回線を延伸し、試験流域内の観測地点間はすべて電線と同軸ケーブルまたは光ケーブルを転がし配線で接続した。また、商用電源であっても落雷等で停電する可能性があるため、平成21年度以降に整備した貝沢とヌタノ沢では、停電時でも測定・記録が継続されるようバックアップロガーを配備した。平成20年度に整備した大洞沢は、水位計のみ別途ロガー式水位計を量水堰に併設している。また、各試験流域とも複数の監視カメラを備え、遠隔地からインターネットで監視することができる。特に、貝沢とヌタノ沢は、監視カメラの画像が10分ごとに保存され、洪水時の量水堰の越流状況など観測の記録としても活用できる。さらに、大洞沢では、平成23年度より基本システムに追加してインターネット回線により自動採水器を遠隔操作できるサブシステムを構築した。

フチダリ沢については、各観測地点が離れているうえ、付近にも商用電源と有線の通信回線が導入さ

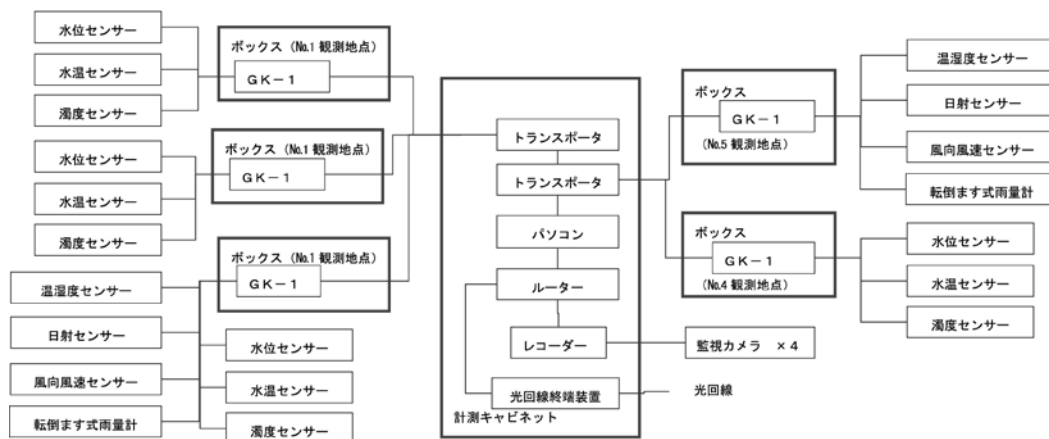


図5 大洞沢試験流域の観測システム概要

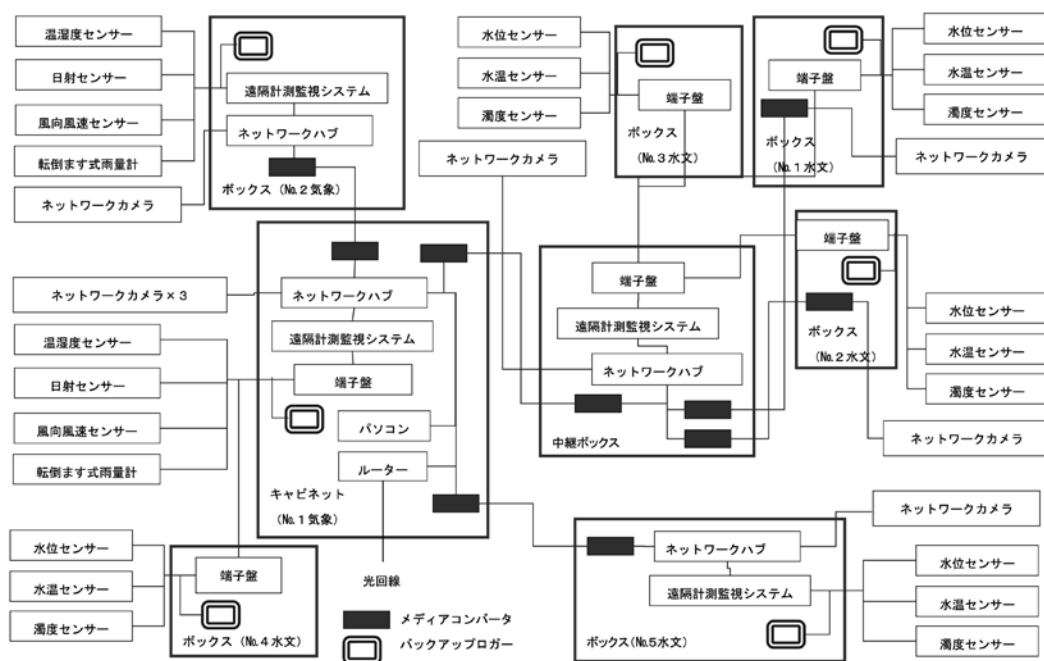


図6 貝沢試験流域の観測システム概要

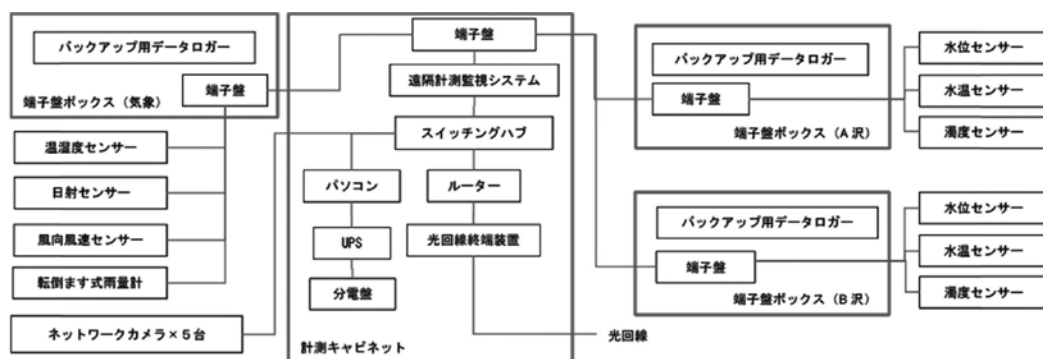


図7 ヌタノ沢試験流域の観測システム概要

表3 各試験流域における主な使用機器

試験地	分類	名称	型番・形式	メーカー	数量
大洞沢	計測	温湿度計	HT-20	山武	2
		風向風速計	WS-D	山武	2
		全天日射計	SL-30	山武	2
		転倒ます式雨量計	N78	日本エレクトリック・インスルメント	2
		圧力式水位計	ATM_N型	光進電気工業	3
		超音波水位計	UIZ-LS400	ウイジン	1
		水温計	C-PT-5	クリマテック	4
		濁度計	COP-TC-3000	オブテックス	4
		監視カメラ	SCR367	MESSOR	4
	記録通信	記録	GK20	山武	5
		記録（カメラ用）	AD-N4	キャロットシステムズ	1
		トランスポート	-	山武	2
		パソコン	T3400	DELL	1
		ルータ	BHR-4RV	バッファロー	1
貝沢	計測	温湿度計	HD9008TRR	デルタオーム	2
		風向風速計	YG-5103-LM	ヤング	2
		全天日射計	LP PRA03	デルタオーム	2
		転倒ます式雨量計	OW-34-BP	大田計器製作所	2
		圧力式水位計	UIZ-GY1000A	ウイジン	5
		水温計	UIZ-PT100	ウイジン	5
		濁度計	TC-500	オブテックス	5
		ネットワークカメラ	BB-HCM735	パナソニック	8
	記録通信	記録	2300	日置電機	1
		パソコン	OptiPlex	DELL	1
		ルータ	RT58i	ヤマハ	1
ヌタノ沢	計測	温湿度計	HD9008TRR	デルタオーム	1
		風向風速計	YG-5103-LM	ヤング	1
		全天日射計	LP PRA03	デルタオーム	1
		転倒ます式雨量計	OW-34-BP	大田計器製作所	1
		圧力式水位計	UIZ-GY1000A	ウイジン	2
		水温計	UIZ-PT100	ウイジン	2
		濁度計	TC-500	オブテックス	2
		ネットワークカメラ	BB-HCM735	パナソニック	5
	記録通信	記録	2300	日置電機	1
		パソコン	OptiPlex760	DELL	1
		ルータ	RT58i	ヤマハ	1
フチザリ沢	計測	温湿度計	HD9009TRR	デルタオーム	1
		風向風速計	YG-5103VM	ヤング	1
		全天日射計	LP PRA03AV	デルタオーム	1
		転倒ます式雨量計	OW-34-BP	大田計器製作所	1
		圧力式水位計	UIZ-WL500	ウイジン	3
		水温計	LR9603	日置電機	2
		濁度計	TC-500	オブテックス	2
	記録通信	記録（気象）	UIZ-DPNS-LABO II	大田計器製作所	1
		記録（水文）	LR5092	日置電機	1
		FOMAカード	-	NTTドコモ	1
	電源	ソーラーパネル	NTN20	日天	1
		バッテリー	PE12V40	ジーエス・ユアサ	1

※フチザリ沢の転倒ます式雨量計は、電源供給量の関係からヒーターなしの仕様である。

堆積土砂量の測定と浚渫工事を行った（内山ほか、2013）。大洞沢のNo.1 水文観測地点の量水堰は満砂すると 100 m³を超える堆積土砂量になるため、重機を用いて浚渫工事を行った。大洞沢のNo.3、No.4 水文観測地点と、貝沢、ヌタノ沢の各量水堰は、堆積土砂量の規模が比較的少なく現場も狭いことから人力による浚渫工事を行った。

さらに、長期間の観測では、センサー等の機器の定期的な更新も必要である。今後の観測施設・システムの運用にあたっては、機器の計画的な更新も含めて、日ごろからきめ細かく保守や修繕を行って、観測の精度を保つ必要がある。

VI おわりに

水源環境保全・再生のための事業の効果を流域スケールで検証するために、県内の4か所に試験流域を設けて、観測システムを整備して運用を開始した。今後は、各地域で行われる水源環境の保全・再生のための対策に沿った事業効果の検証を行う計画である。それと同時に、各地域で基本的な気象・水文観測を着実に継続することによって、県内のそれぞれの水源地域の水や土砂の流出の特性を明らかにしていく計画である。このような県内4か所の気象・水文観測を基盤とした水源環境のモニタリング調査によって、今後は、森林における水源環境の保全・再生対策の順応的な推進や将来的な水源林管理の在り方の検討に対して有効な科学的情報を提供できると考えている。

VII 謝 辞

本研究では、試験流域の選定や量水堰等の観測施

設・システムの設計の全般にわたり、東京農工大学の石川芳治教授、東京大学の鈴木雅一教授をはじめとした多くの先生方に細部にわたりご指導を賜った。それぞれの試験流域は、森林所有者である地元市町村や森林組合、個人の方々のご理解、ご協力のお陰で設定することができた。また、森林所有者との調整や構造物の設置に関する法的な手続きについては、庁内関係所属に多くの支援をいただいた。さらに、量水堰等の土木工事の設計・積算や施工時の現場指導にあたっては、石渡和夫氏に多大なるご支援を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

VIII 文 献

- 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
- 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―地下部における水移動の影響―，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
- 内山佳美・山根正伸・横山尚秀・山中慶久（2013a）神奈川県における水源環境保全・再生施策の検証手法とその実施状況，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・山根正伸（2013b）西丹沢ヌタノ沢における平成23年度の台風による土砂流出の概況，神奈川県自然環境保全センター報告，10：115-122

東丹沢堂平における土壌保全工の土壌侵食軽減効果の評価

石川芳治*・内山佳美**

Effect of soil conservation structures on reducing erosion at Dodaira, East Tanzawa Mountains

Yoshiharu ISHIKAWA*, Yoshimi UCHIYAMA**

要 旨

東丹沢堂平地区ではシカの採食圧により林床植生が衰退し、このため激しい土壌侵食が発生している。リターを林床上に捕捉・定着させることで、土壌侵食の軽減を図るための9種類の土壌保全工の土壌侵食調査プロットを試験的に施工した。これらの土壌侵食調査プロットにおいて樹冠通過雨量、土壌侵食量、リター流出量、林床合計被覆率（林床植生被覆率+林床リター被覆率）等の現地観測を行い、9種の土壌保全工の土壌侵食軽減効果を検討した。その結果、全ての土壌保全工において、設置直後から土壌侵食量が大幅に軽減された。設置直後において最も土壌侵食軽減効果の高かったヤシネット工、竹ネット工では、土壌保全対策を行っていない無処理の土壌侵食調査プロットと比較すると、土壌侵食量は1/100以下となった。土壌侵食軽減効果の高低、軽減効果発揮の遅速、経年による効果の増減などにより各土壌保全工をグループ分けした。これらの成果は、丹沢堂平地区の林床植生衰退地において土壌保全工の計画、設置を行う際に、現地の状況に応じて適切な対策手法を選ぶための資料として用いることができると考えられる。

I はじめに

東丹沢の堂平地区では約30年前からシカの採食により林床植生であるスズタケが衰退し、これに伴って林床におけるリター（落葉・落枝）の堆積量も減少し、最近では林床が裸地化し、広い範囲にわたって土壌侵食が進行し深刻な問題となっている。表層土壌の侵食は樹木の根を露出させ、倒木の要因となっているだけでなく、林床に生息する生物相に影響を与え、さらに土壌が流下する溪流の生態系にも悪影響を与えている。流出した土壌は濁水となって水源を汚濁し、また貯水ダムに流入して堆砂を進行させ貯水ダムの利用可能年数の低下をひきおこす

可能性がある。このように堂平における土壌侵食はブナ林のみならず、それに繋がる溪流における生態系、貯水ダムに関連する水資源などに大きな影響を与えており、早急に土壌侵食を軽減する必要がある。

林床植生衰退地における土壌侵食を防止・軽減する手法としては、林床植生を回復する手法（北原, 2002）、リターなどの被覆物を林床上に設置する手法（村井ら, 1973）、斜面勾配を緩くする手法（駒村, 1978）が有効であると考えられる。平成16～17年に丹沢堂平地区で実施した調査から、リター堆積量の季節変化が土壌侵食量の季節変化に影響を与えていることが明らかになった（若原ら, 2008）。そこで、上層木より供給されるリターを林床上に捕

* 東京農工大学大学院 農学研究院 (〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8)

** 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)

捉・定着させることで、土壌侵食の抑制を期待するリター捕捉手法を用いた土壌保全工がいくつか提案された。これらの土壌保全工が丹沢の堂平地区に適するか否かを検討するため異なる種類の土壌保全工が平成17年12月および平成18年10月に現地において設置された。本研究では平成17、18年度に神奈川県が清川村堂平地区で試験的に施工を行った土壌保全工の土壌侵食調査プロット44個および平成16年度に堂平地区に設置した土壌侵食調査プロット4個、計48個の土壌侵食調査プロットについて、土壌保全工の土壌侵食軽減効果を追跡することにより、丹沢堂平地区のブナ林に適する土壌保全工を明らかにするとともに、丹沢堂平地区以外の水源の森林エリアにおける土壌保全にも活用できるように、土壌保全工による土壌侵食軽減状況および土壌保全工による林床植生回復状況を明らかにし、土壌保全工による土壌侵食軽減効果の評価を行うことを目的とする。

Ⅱ 土壌保全工の種類

平成16年～17年に堂平地区において実施した土壌侵食調査結果から、林床植生が衰退した斜面における土壌侵食量はリター堆積量の多寡により大きく異なり、リター堆積量が多いと土壌侵食量も減少することが明らかとなった。一方、堂平地区では上層木（ブナ林）から毎年秋期には多量のリターが供給される（約400g/m²）ため、このリターを斜面上に捕捉することによりリター堆積量を維持できれば土壌侵食の軽減に大きな効果を発揮することが期待できる。このため、リターを捕捉することにより土壌侵食を軽減する土壌保全工を検討して平成17年12月および平成18年10月に次に示す9種類の土壌保全工が神奈川県により堂平地区に試験的に施工された。

1 リター捕捉ネット工

写真1に示すように斜面上下方向1m×等高線方向2mの格子状に高さ0.4mで網目の大きさ約1cmのヤシ繊維でできたネット（以下ヤシネットと呼ぶ）を設置した。



写真1 リター捕捉ネット工



写真2 リターロール工（タイプB）

2 リターロール工 A、B

ヤシネットを巻いて直径約20cmのロール状にし、写真2に示すようにこれを1m×2mの格子状に設置してリターを捕捉しようとするものである。ロールの中に現地のリターを詰めて細粒の土壌が下方へ流出するのを軽減しようとしたものがタイプAであり、ロール内にリターを詰めていないものがタイプBである。タイプAはリターの採取と詰める作業に時間がかかり施工性は悪かった。

3 リター捕捉土嚢工

ネットやロールの代わりに土嚢袋を2段に積んで、写真3に示すように1m×2mの格子状に設置してリターおよび土壌を捕捉しようとするものである。土嚢袋としては麻袋を用いたものと竹繊維ネットを用いたものの2種類がある。土嚢の中には現地



写真3 リター捕捉土嚢工（麻袋）

採取の土砂を詰めたが、この作業に手間がかかり、施工性は極めて悪い結果となった。

4 木製筋工および木製筋工+ネット伏工

木製筋工の横木により土壌の斜面下方への流出を軽減することと、木製筋工の横木の間の地表面を竹繊維ネットあるいはヤシネットで覆うことにより土壌侵食自体を軽減しようとするものである。木製筋工は直径約10cmの丸棒加工した丸太を2本積んで横木とし、これを1m間隔で杭木により斜面に固定したものである（写真4）。通常は等高線方向のみに横木を配置するが、試験施工では区画を明確にするために2m間隔で縦木を1本、斜面上下方向に設置している。伏工としては竹繊維ネットあるいはヤシネットで地表面を覆った。



写真4 木製筋工+ネット伏工（竹繊維ネット）

5 急斜面用植生保護柵

植生保護柵の目的はシカの影響を排除することにより林床植生を回復し、このことにより土壌侵食を軽減しようとするものである。しかしながら植生保護柵を急斜面に設置することは施工性（材料運搬と設置）、耐久性、維持管理から不明の点も多い。そこで、ここでは特に斜面勾配が 30° 程度以上の急斜面に設置するのに適した異なるタイプ（構造、材料）の植生保護柵をいくつか設置してその現地適用性を比較検討することとした。大きさは、等高線方向に8m、斜面上下方向に2mとして、柵の高さは基本的には約1.5～1.8mとした（写真5）。さらに、ここでは、植生保護柵を等高線状に千鳥状に設置することで、斜面全体の土壌侵食および土砂流出を防止する方法も検討することとした。



写真5 急斜面用植生保護柵工

6 リター捕捉金網工

金属製の網によりリターを捕捉し堆積させることにより土壌侵食を軽減することを目的としている。写真6に示すように、2枚の $4\text{m} \times 1\text{m}$ の金属網（横方向の網目間隔10cm、縦方向の網目間隔5cm）を等高線方向に「λ」型（ 45° ）に設置し、これらを上下に1m離して計2列を設置した。

7 対照用無処理の土壌侵食調査プロット

土壌保全工を設置した場合の土壌侵食量と比較するために、土壌保全工を設置しない（無処理の）対照用の土壌侵食調査プロット（幅2m、長さ5m）を平成17年12月および平成18年10月にそれぞれ8か所および5か所、計13箇所設置した。



写真6 リター捕捉金網工

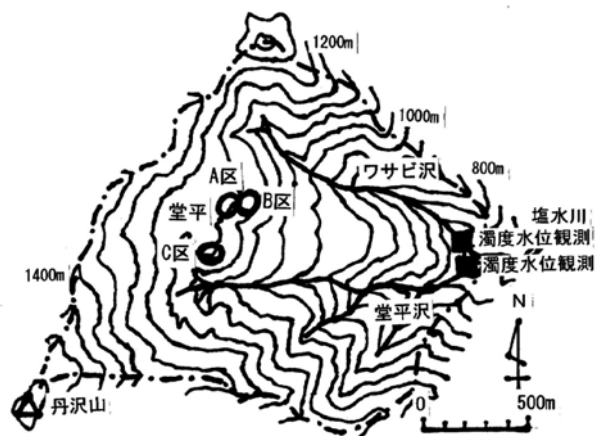
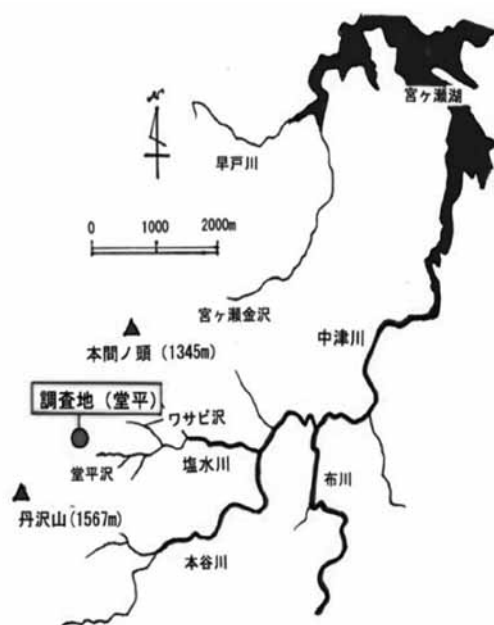
図2 堂平地区の地形図と土壌侵食調査
A区、B区、C区の位置図

図1 堂平地区位置図

Ⅲ 調査地概要および土壌保全工の配置

1 調査地概要

調査地は神奈川県愛甲郡清川村の東丹沢、堂平地区（図1）である。堂平地区は相模川流域の宮ヶ瀬ダム上流の中津川左支川である塩水川流域に位置し、表層は厚さ2～3mのローム（火山灰）で覆われており、透水性は比較的良好である。基盤は凝灰質の砂岩・泥岩からなる。斜面勾配は5°～36°であり、標高は約1150～1225mである。植生はヤマボウシ・ブナ群集で、高さ25～30mのブナが卓越している。林床植生は約30年前まではスズタケが

卓越していたが、現在ではシカの採食によりほとんど見られず、モミジイチゴ、バライチゴ、オオバノヤエムグラ、アザミ類等のシカの不着好性植物が一部で見られる。堂平地区における土壌侵食調査地は図2に示すように南東向きの斜面にあるA区とB区およびそこから約400メートル離れた南向きの斜面（C区）の3区域からなり、日射は比較的良好である。林内の林床植生はシカの採食圧により衰退しているが、A区、B区とC区の一部では、シカによる採食を防ぐために植生保護柵が設置されているので、植生保護柵内では林床植生はある程度回復している。調査箇所のブナ林の立木密度は366本/haで平均直径は26.9cmである。なお、丹沢山地は昭和40年に国定公園に指定されている。

2 土壌保全工および土壌侵食調査プロットの配置

丹沢堂平地区のA区、B区には計53個の土壌保全工（平成17年12月に24か所、平成18年10月に29か所）および13箇所の対照用無処理の土壌侵食調査プロットが設置された。これらのうちの31か所（平成17年12月に16か所、平成18年10月に15か所設置）の土壌保全工および13か所の対照用無処理の土壌侵食調査プロットについては区画の下部に土壌侵食量および流出リター量を測定するために捕捉用マットを設置した。図3にA区、B区における土壌保全工および対照用無処理の土壌侵食調査プロットの配置を示す。表1にA区およびB区の土壌保全工の工種別の土壌侵食調査プロットの数量

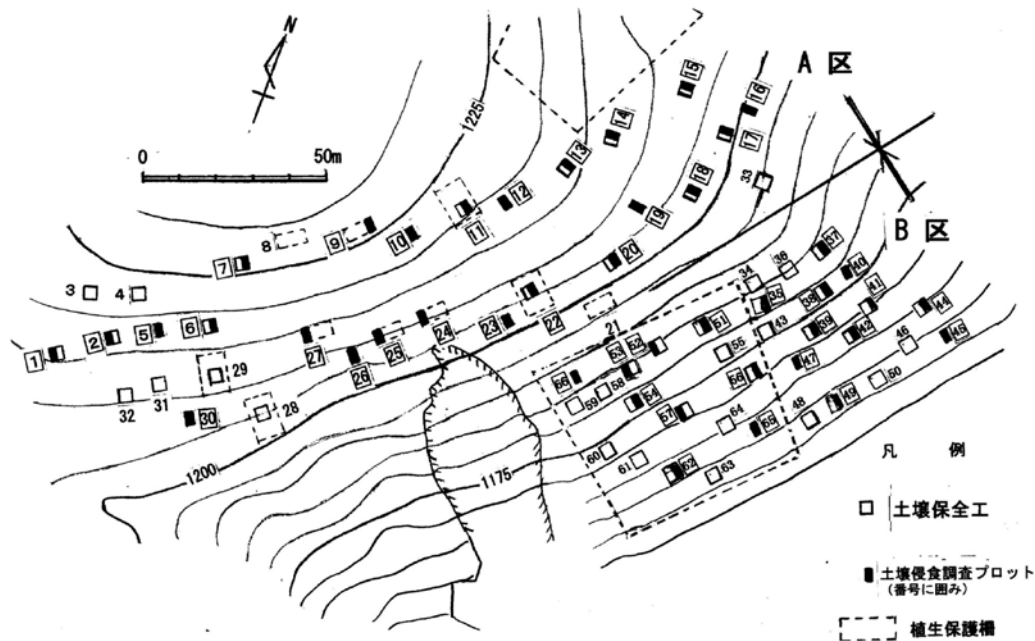


図3 A区、B区における土壌保全工および土壌侵食調査プロットの配置図

表1 A区およびB区の工種別の土壌侵食調査プロットの数量一覧表

工法別の調査プロット	A区 (2005年12月設置)	B区 (2006年10月設置)	工法別合計
木製筋工+竹ネット工	1	4	5
木製筋工+ヤシネット工	1	3	4
木製筋工のみ	2	—	2
リター捕捉ネット工	3	—	3
リターロール工A	1	—	1
リターロール工B	2	2	4
土嚢工	2	—	2
植生保護柵工	4	—	4
金網筋工	—	6	6
無処理のプロット	8	5	13
土壌侵食調査プロット合計	24	20	44

を表す。C区に設置された土壌侵食調査プロット(すべて無処理で4箇所)の配置を図4に示す。

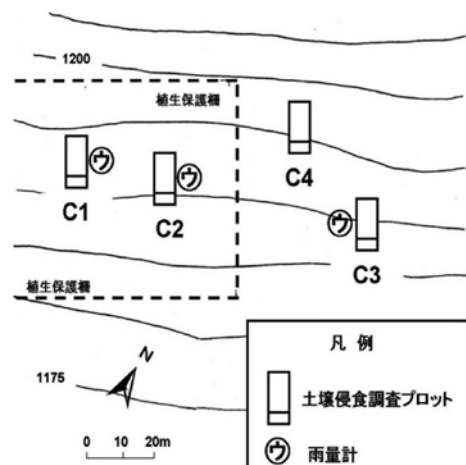


図4 C区内の土壌侵食調査プロットと雨量計の配置図

IV 調査方法

1 樹冠通過雨量の測定

樹冠通過雨量は図4に示すC区の林内に設置した3個の雨量計（大田計器製作所製、No. 34-T, 転倒柵型、1転倒0.5mm）およびデータロガー（ウジン社製、UIZ3639）を用いて平成18年～平成23年の4月～11月の間測定した。この3個の雨量計で測定した樹冠通過雨量の平均値を以下では単に樹冠通過雨量と呼ぶこととする。

2 土壌侵食量の測定

土壌侵食調査プロット（無処理）の模式図を図5に示す。プロットの下部に設置した土砂捕捉マットに堆積した土砂およびリターの採取は平成18年～平成23年の4月～11月の間、毎月1回行った。採取した土砂およびリターは実験室に持ち帰り、洗浄により土砂とリターに分離した後に、105℃で48時間をかけて乾燥してそれぞれの絶乾質量を測定した。積雪などにより調査が困難となる冬季は観測を行わなかった。

3 林床合計被覆率の測定

各土壌侵食調査プロットについて、林床合計被覆率を調査するために、毎月1回の土砂およびリター採取時に各土壌侵食調査プロット内の地表面の上に、1m×1mのコドラートを置いて写真撮影を行い、撮影した写真を用いてPhotoshopにより林床合計被覆率を測定した。その方法は、まず「変形」ツ

ル中の「遠近法」によりゆがみを処理し、コドラート中の部分を正方形にして切り出し、次に切り出した部分のピクセル数（全ピクセルとする）を測定し、次に「自動選択」ツールにより林床植生と同一色調の部分およびリターと同一色調の部分の写真7に示すようにそれぞれ選択し、それぞれのピクセル数を計測した。最後に、植生部分のピクセル数を全ピクセル数で割って得た値を林床植生被覆率、リター部分のピクセル数を全ピクセル数で割って得た値をリター被覆率とし、植生被覆率とリター被覆率の合計値を林床合計被覆率とした。また、写真上露出している土砂の面積率+林床合計被覆率=100%から、露出している土砂の面積率を測定して、林床合計被覆率を計算することもできる。



(a) 1m×1m コドラート写真



(b) 灰色部分は植生、白い部分はリター
写真7 林床植生・リター被覆率測定図

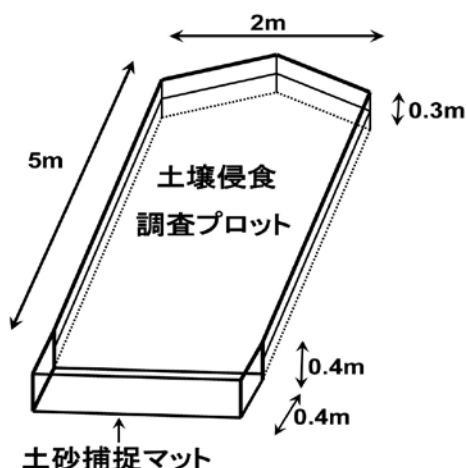


図5 土壌侵食調査プロットの模式図

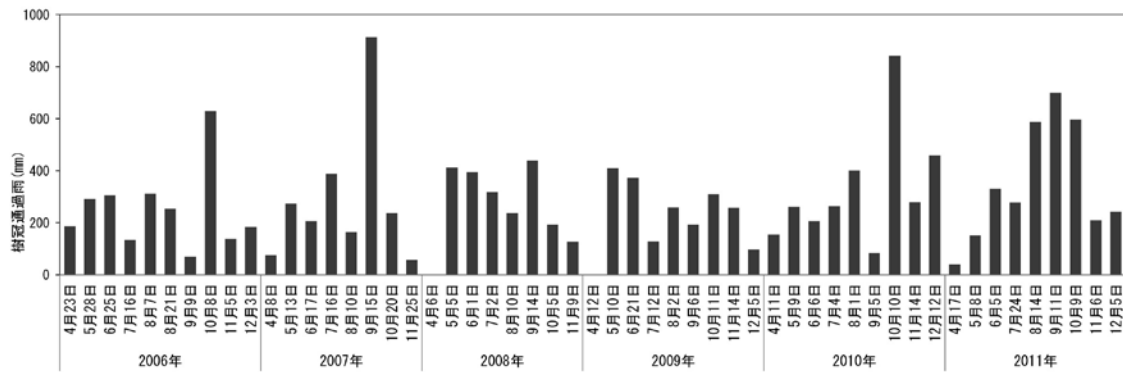


図6 2006年～2011年の4月～11月の月別積算樹冠通過雨量

V 結果および考察

1 樹冠通過雨量

図6に2006年(平成18年)～2011年(平成23年)の月別の樹冠通過雨量を示す。なお、各月の区切りは土壌侵食量の調査日となっている。2006年の3月31日～12月3日(248日)、2007年の3月25日～11月25日(246日)、2008年の4月6日～11月9日(218日)、2009年の4月12日～12月5日(238日)、2010年の3月28日～12月12日(259日)および2011年の3月30日～12月4日(248日)の間の樹冠通過雨量の合計はそれぞれ2502.0mm、2315.0mm、2120.6mm、2123.3mm、2420.9mm、3135.3mmである。2011年は6年間では降雨量が最も多い年であった。

2 土壌侵食量の経年変化

図7には、A区の各土壌保全工における平成18年(2006)～平成23年(2011)の年別積算土壌侵食量(工種別プロット当たりの平均値)を示す。A区の土壌保全工の土壌侵食量については、平成18年4月23日から平成23年11月6日までの6年間、毎月1回(冬期を除く)調査した。図8にはB区の各土壌保全工における平成19年(2007)～平成23年(2011)の年別積算土壌侵食量を示す。B区の土壌保全工の土壌侵食量については、平成19年4月22日から平成23年11月20日までの5年間、毎月1回(冬期を除く)調査した。A区、B区ともに積雪などにより調査が困難となる冬季(12月～3月)は観測を行わなかったため、4月に観測された冬期(前年12月～その年の3月)の土壌侵食量はその年

の土壌侵食量と見なして加えている。

図7、8より、土壌保全工を設置していない無処理の土壌侵食調査プロットでも、土壌侵食量は経年により徐々に減少していることがわかった。一方、土壌保全工を設置した土壌侵食調査プロットでは、設置した年には土壌侵食量は急激に減少するが、その後は経年により土壌侵食量が増加している工種と減少している工種がある。また、年により増加、減少と変化している工種もある。平成23年はそれまでの6年間では最も降雨量が多かったこともあり、特にB区において土壌侵食量が増加している。A区、B区を通じて土壌侵食量が最も少ないのは、リター捕捉ネット工である。しかし、土壌保全工の設置時点の林床合計被覆率は異なるため、各年の積算土壌侵食量の多寡のみから単純に各土壌保全工の土壌侵食軽減効果を評価することはできない。このため、林床合計被覆率と樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量の関係式を用いて土壌保全工の土壌侵食軽減効果を評価する必要がある。

3 林床植生、リターおよび林床合計被覆率の月別変化

図9、10にA区およびB区の土壌侵食調査プロットにおける平成22年(2010)、平成23年(2011)の各プロットを平均した林床植生被覆率、リター被覆率および林床合計被覆率の月毎の変化を示す。林床植生被覆率は春季(4～6月)に低く、夏季(7月～9月)に高く、秋季(10月～11月)にまた小さくなる。一方、リター被覆率は春季(4～6月)には高く、夏季(7月～9月)に小さくなり、秋季(10

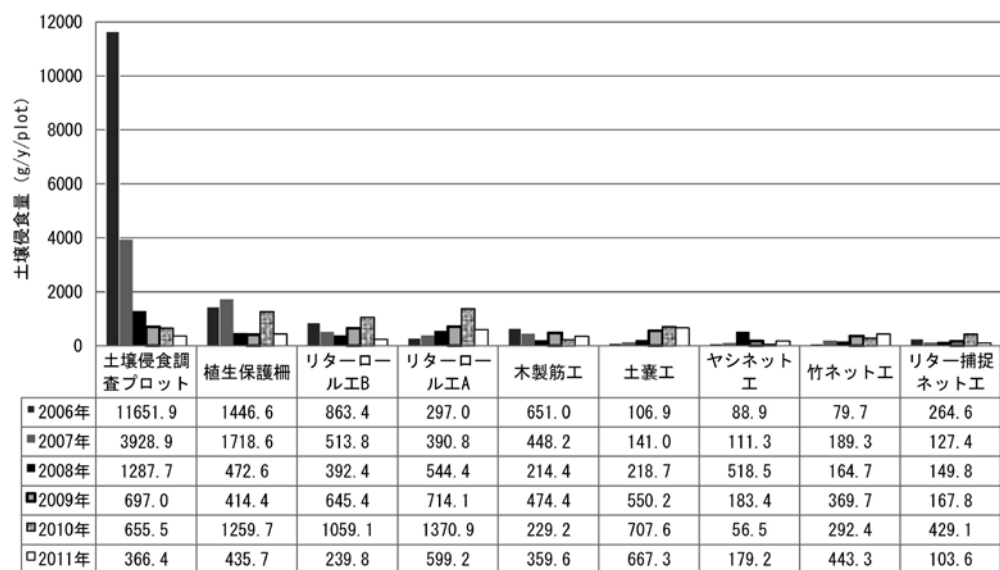


図7 A区の土壌保全工における2006～2011年の年別積算土砂侵食量（工種別プロット平均）

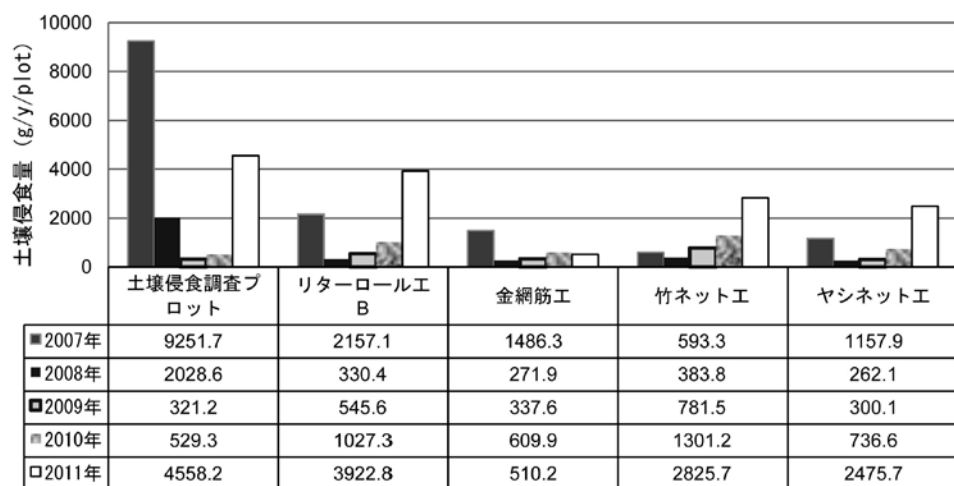


図8 B区の土壌保全工における2007～2011年の年別積算土壌侵食量（工種別プロット平均）

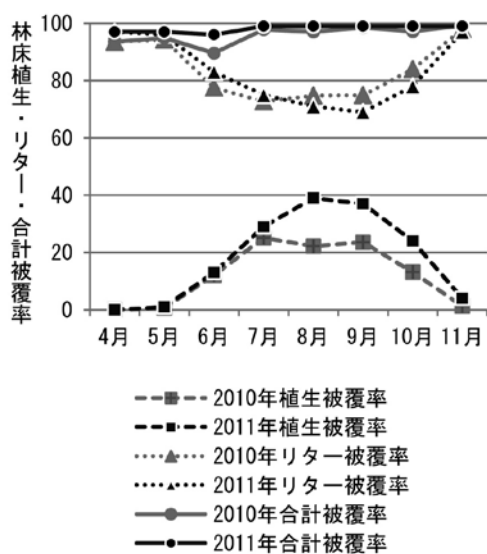


図9 2010年、2011年のA区における林床植生・リターおよび林床合計被覆率の月別変化

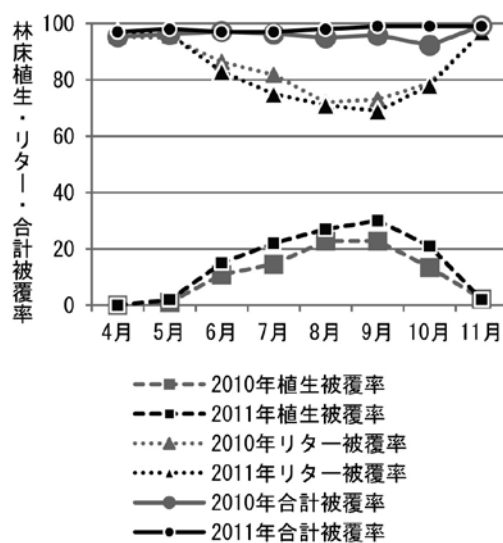


図10 2010年、2011年のB区における林床植生・リターおよび林床合計被覆率の月別変化

月～11月)に大きくなることがわかった。林床合計被覆率は一年中変化が小さく、95%～100%と高い値を示す。平成18年(2006)～平成23年(2011)の経年変化をみると、林床合計被覆率は毎年上昇しているが、平成22年(2010)には100%に近くなったことから、平成22年(2010)～平成23年(2011)では頭打ちとなりほぼ一定であることがわかる。

4 各土壌保全工における林床植生被覆率と樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量

樹冠通過雨量および林床植生被覆率、林床合計被覆率の季節変化に伴い、夏季(7～9月)には春季(4～6月)や秋季(10～11月)に比べて林床植生被覆率および林床合計被覆率が高いが樹冠通過雨量が多いため、土壌侵食量は多い。このため、夏季(7～9月)の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量を用い、林床植生被覆率は各年の7～9月の平均値を用いて、これらの関係を検討した。

A区およびB区の調査6年間(平成18年(2006)～平成23年(2011))および5年間(平成19年(2007)～平成23年(2011))の7～9月における雨量1mmあたりの土壌侵食量と林床植生被覆率の関係を図11、12に示す。

図11より、A区の無処理の土壌侵食調査プロットでは一時的に植生は回復したが、平成23年(2011)時点では調査開始時の平成18年(2006)と同程度の植生被覆率を示す結果となった。B区の無処理の土壌侵食調査プロットでは少しずつ植生被覆率が増加している。これはB区の無処理の土壌侵食調査プロットの半数は植生保護柵内にあるためと考えられる。

A区において調査6年目の平成23年(2011)時の植生被覆率が設置時の平成18年(2006)時を上回った土壌保全工は「保護柵、ロール工B、ロール工B+保護柵、捕捉ネット+保護柵、竹ネット工」の5工種であり、これらの土壌保全工に関しては植生の回復がみられた。ただし、竹ネット工においては植生被覆率が年々回復しているにもかかわらず、土壌侵食量が増加している。これは、植生の回復による土壌侵食軽減効果よりも竹ネットの腐朽に伴う土壌侵食量の増加が強く影響しているためと考えられる。B区において調査5年目の平成23年(2011)

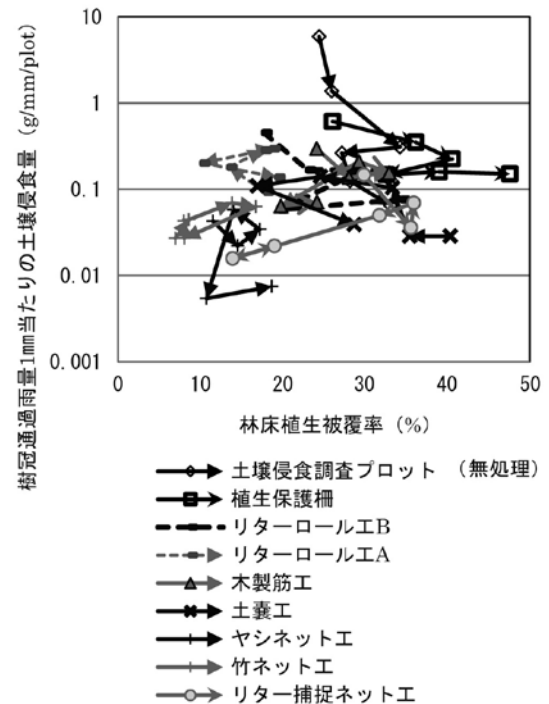


図11 A区の各土壌保全工における2006年～2011年の7月～9月の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床植生被覆率
(各折線の左から2006～2011年の順番)

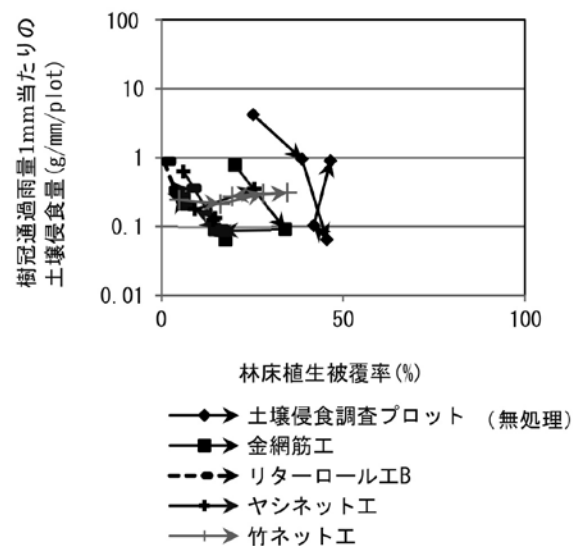


図12 B区の各土壌保全工における2007年～2011年の7月～9月の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床植生被覆率
(各折線の左から2007～2011年の順番)

時の植生被覆率が設置時の平成19年(2007)時を上回った土壌保全工は「ロール工B、ヤシネット工、竹ネット工」の3工種であり、これらの土壌保全工に関しては植生の回復がみられた。このため、全体

的には土壌侵食量は減少してきている。

また、その他の土壌保全工に関しては調査2、3年目において多少植生が回復した土壌保全工もいくつかみられたが、調査5、6年目の植生被覆率が調査開始時を下回る結果となり、最終的に植生は減少したと判断した。これは植生保護柵の外では、依然としてシカによる採食圧を受けていることと、リターの堆積が進んだためにかえって林床植生が生育し難くなったことも一因と考えられるが、今後のさらなる検討が必要である。

5 各土壌保全工における林床合計被覆率と樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量

初ら(2010)による堂平地区の土壌侵食調査プロットにおける調査から、樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床合計被覆率の間には強い負の相関があり、その関係は式(1)で表されることが分かっている。

$$E = 65 \text{ EXP}(-0.0615 \times F) \quad (R^2 = 0.81, p < 0.001) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、Eは雨量1mm当たりの土壌侵食量(g/mm/プロット)であり、Fは林床合計被覆率(%)である。なお、林床合計被覆率が減少すると土壌侵食量が増加する原因の一つは、林床合計被覆率が減少すると浸透率が低下して地表流出量が増加することにある(海虎ら, 2012)。

土壌侵食量の月別変化を観ると、夏季(7～9月)には春季(4～6月)や秋季(10～11月)に比べて樹冠通過雨量が多いため、年間の土壌侵食量に占める割合も夏季(7～9月)が多い。このため、夏季(7～9月)の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と、夏季(7～9月)の林床合計被覆率の平均値を用いて、両者の関係から土壌保全工の土壌侵食軽減効果を検討した。

図13にA区の各種の土壌保全工における平成18年(2006)～平成23年(2011)の夏季(7～9月)の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床合計被覆率の関係を示す。図14にB区の各種の土壌保全工における平成19年(2007)～平成23年(2011)の夏季(7～9月)の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床合計被覆率の関係を示す。なお、図13および図14における直線は式(1)を表している。

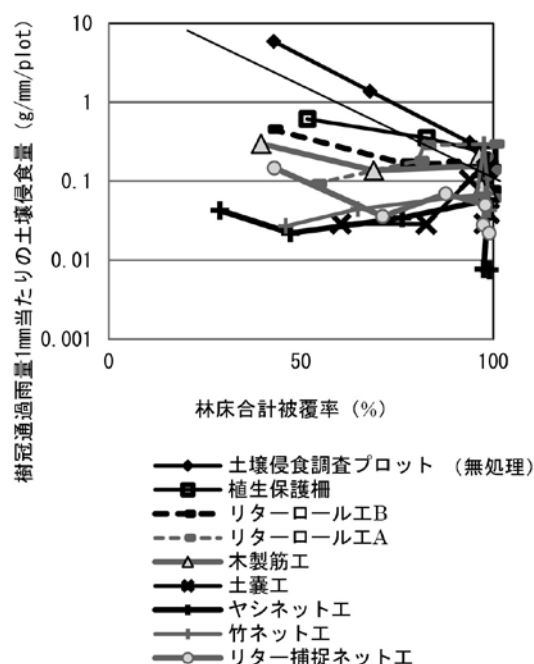


図13 A区の各土壌保全工における2006年～2011年の7月～9月の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床合計被覆率
(各折線の左から2006～2011年の順番)

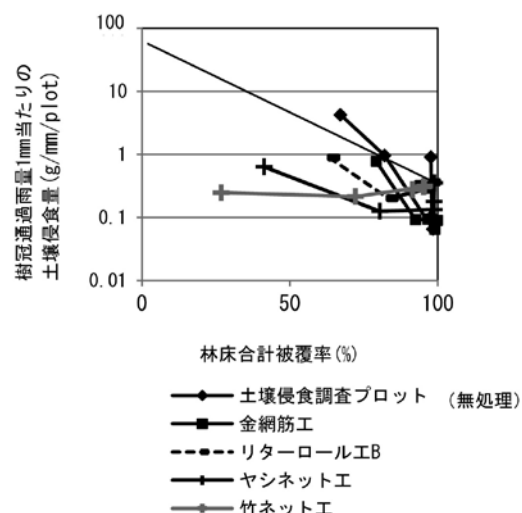


図14 B区の各土壌保全工における2007年～2011年の7月～9月の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床合計被覆率
(各折線の左から2007～2011年の順番)

図13、14より土壌保全工を設置していない無処理の土壌侵食調査プロットにおいては、初ら(2010)の結論と同様に、林床合計被覆率が経年により増加するにつれて、樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食

量は次第に減少していることがわかった。また、すべての土壌保全工において、林床合計被覆率が経年により増加していることがわかった。これは、林床植生の増加によるものも一部あるが、大部分はリター被覆率の増加によっている。土壌保全工が設置されてから4年目（B区は3年目）には、ほとんどの土壌保全工の林床合計被覆率が95%以上になったことがわかった。樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量は、経年により減少する工種がある一方で経年により増加する工種もあり、工種により異なる。同じ林床合計被覆率の場合、ほとんどの土壌保全工において、無処理の土壌侵食調査プロットと比較すると、樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量は少ないことがわかった。すなわち、土壌保全工により土壌侵食量は減少することが確認された。しかしながらその差は経年により、縮まるものが多い。

6 各土壌保全工の土壌侵食軽減効果の評価

図13、14から、各土壌保全工において林床合計被覆率と樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量の関係は異なることが分かる。各土壌保全工について土壌侵食軽減効果を評価する場合には、堂平地区における土壌侵食調査プロットのデータから得られた近似曲線式(1)（図13、14では直線で表わされている）に近いほど土壌保全工が設置されていない状態に近くなることから、土壌保全工による土壌侵食軽減効果は低いと評価でき、逆に近似曲線式(1)から下の方向に離れるほど土壌保全工による土壌侵食軽減効果は高いと評価できる。また、近似曲線式(1)により、林床合計被覆率が100%の場合、樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量は0.14 (g/mm/plot)であることが計算できる。樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量が0.14 (g/mm/plot)の線をX軸に平行に引いて、これとは別に近似曲線から下の方向に樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量が1/10になる平行線を引き、これら2本の線を繋ぐと図15の点線のようになる。近似曲線と点線で囲まれる範囲を土壌侵食軽減効果が「低」の区域と定義する。同様に、樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量が0.10 (g/mm/plot)の線をX軸に平行に引き、これとは別に近似曲線から下の方向に樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量が1/100になる平行線を引き、これら2

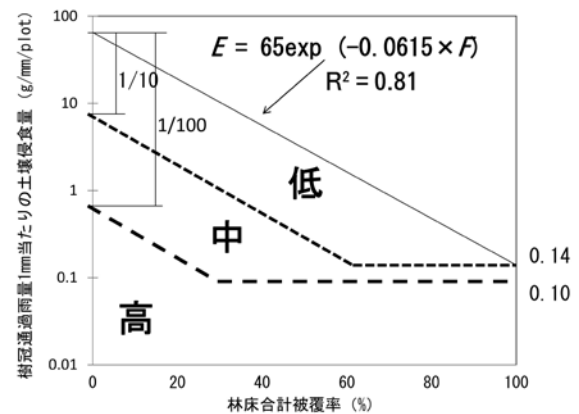


図15 土壌保全工の効果評価手法の模式図

本の直線を繋ぐと図15の破線になる。破線の下区域を土壌侵食軽減効果が「高」の区域と定義し、破線と点線の間の範囲を土壌侵食軽減効果が「中」の区域と定義する。このようにすると、図15に示すように、土壌侵食軽減効果が「高」、「中」、「低」の3つの範囲に区分できる。

A区およびB区の各土壌保全工の設置された年は、A区が平成18年(2006)、B区は平成19年(2007)と異なるためA区およびB区に設置された土壌保全工の土壌侵食軽減効果を評価するためには、それらの土壌保全工が設置されてから同一の年数が経過した時点での林床合計被覆率および樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量の平均値を用いて評価する必要がある。図13、14の結果をまとめると図16になる。図16には各土壌保全工が設置された1年目から6年目まで(B区のもの5年目まで)の林床合計被覆率と樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量の変化を示す。

図16を用いて各土壌保全工の土壌侵食軽減効果を評価した結果を表2に表す。ほとんどの土壌保全工において設置直後は土壌侵食量が軽減されるが、設置初期および数年間の土壌侵食量の軽減効果が大きいものと小さいものがある。さらに、経年により土壌侵食軽減効果が増加するものと低下するものがある。このことから、土壌保全工の土壌侵食軽減効果の発現の経年変化により、表2に示すように大きくは3種のグループに分けられる。1つ目は土壌侵食軽減効果が高く、早い時期に軽減効果を発揮し経年により増加する。2つ目は土壌侵食軽減効果が高

表2 土壌保全工の土壌侵食軽減効果評価一覧表

	土壌侵食軽減効果		
	高	中	低
効果発揮が早く、 経年により増加	リター捕捉ネット工 金網筋工		
効果発揮が早く、 その後効果はほぼ一定	土嚢工、ヤシネット工、竹ネット工	木製筋工 リターロール工A	
効果発揮が遅い			植生保護柵工 リターロール工B

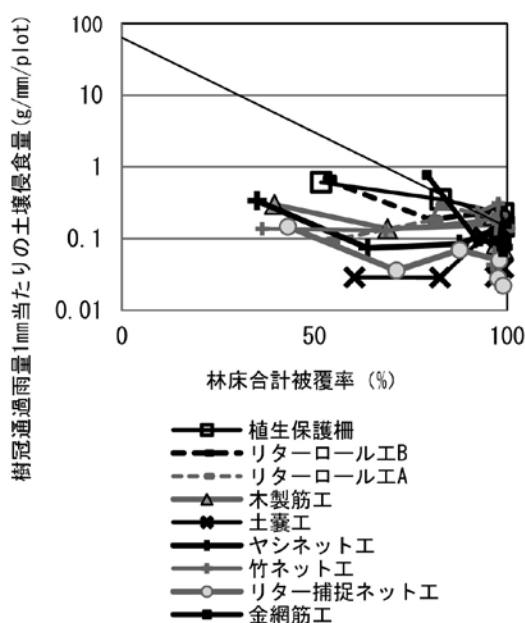


図16 すべての土壌保全工における施工後1年目～6年目（5年目）の樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量と林床合計被覆率
 （各折線の左のプロットが1年目、その右が2年目、3年目…の順番）
 6年目はA区の2011年、5年目はA区の2010年とB区の2011年

く、早い時期に軽減効果を発揮するがその後、軽減効果は増加しない。3つ目は土壌侵食軽減効果がやや高く、早い時期に軽減効果を発揮するがその後、軽減効果は横ばいになる。4つ目は土壌侵食軽減効果が低く、効果の発揮が遅いものである。

図16および表2の結果を基に、丹沢堂平地区のシカの採食による林床植生衰退地において、土壌保全工を計画・設置する際には、土壌侵食の状態、林床植生・リター堆積の多寡、シカの生息密度管理の状況などを考慮して適切な土壌保全工を選ぶことが必要である。

VI まとめ

丹沢堂平地区のシカの採食による林床植生衰退地に設置した土壌保全工について樹冠通過雨量、土壌侵食量、リター流出量、林床合計被覆率（林床植生被覆率+林床リター被覆率）等の現地観測を行い、林床合計被覆率と樹冠通過雨量1mm当たりの土壌侵食量の関係等を用いて土壌保全工の土壌侵食軽減効果の評価を行った。その結果、ほとんどの土壌保全工において、設置直後から土壌侵食量を軽減できた。設置直後において最も土壌侵食軽減効果の高かったヤシネット工、竹ネット工では、対策していない無処理の土壌侵食調査プロットと比較すると、土壌侵食量は1/100以下となったと判断される。また、各土壌保全工において、土壌侵食軽減効果は経年により高まるものと徐々に低下するものがあることを明らかにした。さらに、土壌侵食軽減効果の高低、軽減効果の経年変化により各土壌保全工をグループ分けした。これらの成果は、丹沢堂平地区の林床植生衰退地において土壌保全工の計画、設置を行う際に、現地の状況に応じて適切な対策手法を選ぶための資料として用いることができると考えられる。

基本的に土壌保全工は応急的・短期的に土壌侵食を軽減するための手法であり、長期的に土壌侵食を軽減するためには林床植生を回復させる必要がある。シカの採食圧がある状態では土壌保全工により急速に林床植生を回復させることは難しく、シカの生息密度を減少させるか、植生保護柵を設置するかの方法が必要である。林床植生の回復には林内照度や土壌の硬度等も影響していると考えられるためこれらについても調査を行う予定である。

本研究をふまえ、今後、流域スケールでの土壌保全対策の検証も必要である。このためには土壌侵食

量のうちの大きな割合を占める細粒土砂の溪流への流出に関して溪流における浮遊土砂量の観測等を行い、斜面における土壌侵食量との関係を検討することが必要である。堂平地区には、今回の解析において用いなかった土壌侵食調査プロットの土壌侵食データが多数あり、これらの多数のデータを基に土壌侵食量、地表流流出量、林床合計被覆率と溪流における浮遊土砂量の関係を解析することにより、土壌保全工の効果評価を斜面から流域へ拡張することが可能と考えられる。

VII 引用文献

- 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壌侵食量の関係、日本森林学会誌 92(5), 261-268
- 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流出率に与える影響、日本森林学会誌 94(4), 167-174
- 北原曜 (2002) 植生の表面侵食防止機能、砂防学会誌 54(5), 92-101
- 駒村富士弥 (1978) 治山・砂防工学、森北出版、61-66
- 村井宏・岩崎勇作・石井正典 (1973) 落葉地被物の侵食防止効果についての実験、第 84 回日林講, 377-379
- 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壌侵食量の季節変化－丹沢山地堂平地区のシカによる影響－、日本森林学会誌 90(6), 378-385

東丹沢堂平における流域スケールでの土壌保全対策効果の検証

石川芳治*・内山佳美**

Evaluation of soil conservation measures in watershed scale at Dodaira, East Tanzawa Mountains

Yoshiharu ISHIKAWA*, Yoshimi UCHIYAMA**

要 旨

東丹沢堂平地区では近年シカの採食圧により林床植生が衰退し、急勾配の斜面を中心として激しい土壌侵食が発生している。土壌侵食を軽減するために、最近ではシカの保護管理および土壌保全工の設置等の種々の対策が実施されてきている。このような対策の効果を明らかにするためにはプロットスケールでの効果の検証とともに流域スケールでの効果の検証も必要である。このため堂平地区の斜面におけるプロットスケールでの土壌侵食量の観測を行うとともに堂平地区を流域に含む堂平沢（流域面積約 141ha）とワサビ沢（流域面積約 91ha）の下流において濁度および水位を測定して、浮遊土砂量を測定した。その結果、斜面土壌侵食量と溪流における浮遊土砂量には強い相関関係が認められた。これらの成果は、丹沢堂平地区の土壌侵食対策の効果検証のための資料として用いることができると考えられる。と考える。

I はじめに

東丹沢の堂平地区では約 30 年前からシカの採食により林床植生であるスズタケが衰退し、これに伴って林床におけるリター（落葉・落枝）の堆積量も減少し、最近では林床が裸地化し、広い範囲にわたって土壌侵食が進行し深刻な問題となっている。表層土壌の侵食は樹木の根を露出させ、倒木の要因となっているだけでなく、林床に生息する生物相に影響を与え、さらに土壌が流下する溪流の生態系にも悪影響を与えている。流出した土壌は濁水となって水源を汚濁し、また貯水ダムに流入して堆砂を進行させ貯水ダムの利用可能年数の低下をひきおこす可能性がある。このように堂平における土壌侵食はブナ林のみならず、それに繋がる溪流における生態

系、貯水ダムに関連する水資源などに大きな影響を与えており、早急に土壌侵食を軽減する必要がある。

堂平地区における土壌侵食量を減少させて溪流における生態系への影響を減少させるために神奈川県では種々の対策を実施してきている。堂平地区では神奈川県によるシカの保護管理の成果が上がっており、図 1 に示すように堂平地区におけるシカの生息密度は最近では急速に低下している（神奈川県、2011）。このような対策の効果もあり、堂平地区では、最近の数年間については林床植生も回復傾向にある。さらに、堂平地区では土壌保全工を試験的に施工して、土壌侵食量の低減効果を検討してきている。これまでに実施した土壌保全対策の効果を検証するためには、プロットスケールのモニタリングとともに、流域スケールでのモニタリングを行い、シ

* 東京農工大学大学院 農学研究院（〒183-8509 東京都府中市幸町 3-5-8）

** 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）

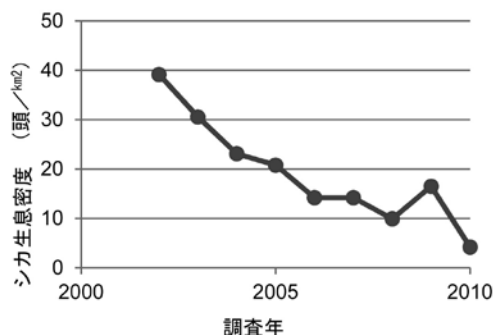


図1 丹沢堂平地区におけるシカの生息密度の変化 (神奈川県、2011)

カの保護管理や土壌保全対策の効果を広域的に検証していく必要がある。しかしながら、土壌保全工やシカの保護管理が流域スケールでの土砂の流出に与える影響の評価手法については未解明の部分も多い。このため本研究では、土壌保全対策を実施している堂平地区を流域に含む堂平沢とワサビ沢の下流において濁度および水位を測定して、流域スケールでの浮遊土砂量を観測し、降雨量と土壌侵食量および浮遊土砂量の関係等について検討することにより、流域スケールでの土壌保全対策の効果を評価する手法の確立のための基礎的データを得ることを目的とする。

II 調査地

調査地は、神奈川県愛甲郡清川村の東丹沢堂平地区と堂平地区を流域に含むワサビ沢と堂平沢の2流域である(図2)。堂平地区は相模川流域の宮ヶ瀬ダム上流の支流である塩水川流域に位置し、地表層は厚さ2～3mのローム(火山灰)で覆われ、表層土壌の透水性は比較的良好である。基盤の地質は海成火砕岩類を主体とする新第三紀層丹沢層群である。標高は約1,190mであり、斜面勾配は5度～33度程度である。この地域の植生はヤマボウシブナ群集で、高さ25～30mのブナが卓越している。林床植生は約30年前まではスズタケが卓越していたが、現在ではシカの採食により衰退してほとんどみられず、林床植生被覆率は1～18%程度であり、モミジイチゴ、バライチゴ、オオバノヤエムグラ、アザミ類等のシカの不嗜好性植物が一部に見られる。調査箇所のブナ林の立木密度は366本/haで平均直径は26.9cmであり、斜面の方位は南および東



図2 堂平地区位置図

向きで日射条件は比較的良好である。

浮遊土砂量を観測したワサビ沢と堂平沢の2流域は、堂平地区を流域内に含み、標高710m地点を流域出口として合流している(図3)。ワサビ沢流域と堂平沢流域の流域概況を表1、2に示す。両流域ともほぼ同じような流域地形特性を持っていると考えられる。

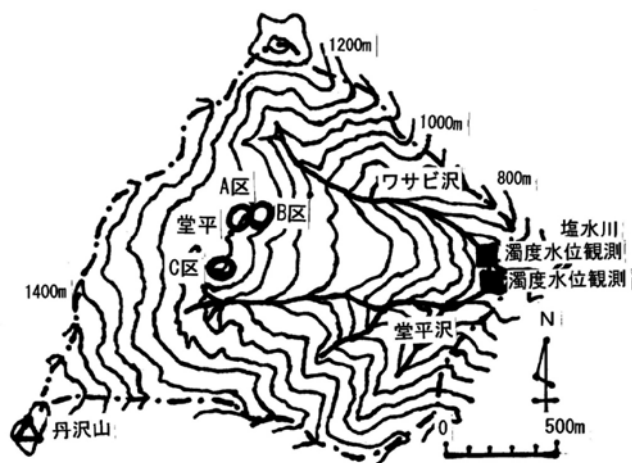


図3 堂平地区斜面の位置とワサビ沢、堂平沢の流域図

表1 ワサビ沢流域の流域概況

流域面積	$A=0.91\text{km}^2$	流域内最高標高	$H_{\max}=1360\text{m}$
主流長	$L=1.19\text{km}$	最低標高	$H_{\min}=710\text{m}$
流域平均幅	$A/L=0.77\text{km}$	標高差	$H_{\max}-H_{\min}=650\text{m}$
流域周囲長	$M=3.59\text{km}$	流域内水源標高	$H_{\text{水源}}=1140\text{m}$
形状係数	$B/L=2.02$ (B : 流域平均幅)	主流平均勾配	$(H_{\text{水源}}-H_{\text{観測}})/L=0.36$ ($\theta=20^\circ$)
		流域の平均傾斜	32.6° (Horton法) 32.4° (寺田法)
谷密度	6.83km^{-1}		

表2 堂平沢流域の流域概況

流域面積	$A=1.41\text{km}^2$	流域内最高標高	$H_{\max}=1560\text{m}$
主流長	$L=1.88\text{km}$	最低標高	$H_{\min}=710\text{m}$
流域平均幅	$A/L=0.75\text{km}$	標高差	$H_{\max}-H_{\min}=850\text{m}$
流域周囲長	$M=4.87\text{km}$	流域内水源標高	$H_{\text{水源}}=1390\text{m}$
形状係数	$B/L=3.32$ (B : 流域平均幅)	主流平均勾配	$(H_{\text{水源}}-H_{\text{観測}})/L=0.36$ ($\theta=20^\circ$)
		流域の平均傾斜	29.0° (Horton法) 28.9° (寺田法)
谷密度	6.87km^{-1}		

Ⅲ 調査方法

堂平地区の林床植生衰退地における降雨量（樹冠通過雨量）と土壤侵食量の関係を検討するために、図3に示すC区内の勾配33度の斜面に幅2m、長さ5mの土壤侵食調査プロットを4箇所設置した（図4）。C区内の各土壤侵食調査プロットにおいて2009年～2011年の毎年4月～11月の間、1週間～2週間毎に降雨量（樹冠通過雨量）と土壤侵食量を観測するとともに、林床合計被覆率（林床植生被覆率＋リター被覆率）を測定するために1m×1mのコドラートをプロット内に置き写真撮影を行った。なお、堂平地区のA区とB区には土壤侵食対策工を設置した。

堂平地区を流域の一部に含むワサビ沢と堂平沢の下流（合流点の直上流）において平成21年（2009）4月12日～12月6日、平成22年（2010）4月3日～12月12日および平成23年（2011）3月30日～12月4日の約3年間（冬期を除く）水位（流量）、濁度（浮遊土砂濃度）を測定した。

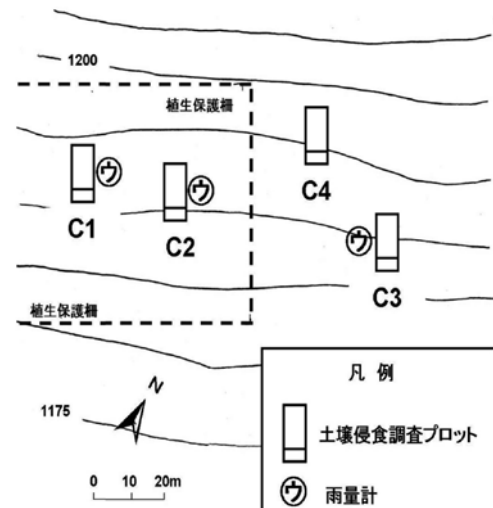


図4 堂平地区C区内の土壤侵食調査プロットと雨量計の配置図

1 水位と溪流流量

図3に示すワサビ沢、堂平沢の下流地点に圧力式水位計（HI-NET社製、HM-500-02-30）、をそれぞれ1個ずつ設置して10分毎に自動観測を行った。水位計の設置地点において、水位の異なる時期に、プロペラ式流速計（KENEK社製、VR-201）を用いて流速分布を測定し、さらに流水部の断面積、水深の測

定を行い、溪流の流量を算出した。数回の流量と水位データとの関係から水位～流量曲線を作成し、この曲線を用いて水位データから流量を求めた。なお、水位計の出力値から水位を算出するためには出力値と水位の関係についてもキャリブレーションを行った。ワサビ沢流域、堂平沢流域における水位計の設置状況を写真1、2に示す。

2 濁度と浮遊土砂量

ワサビ沢、堂平沢流域の最下流部（水位計の設置箇所と同一地点）に濁度計（OPTEX 社製、TC-3000）を設置して10分間隔で濁度データを自動記録した。記録は、データロガー（ウイジン社製、UIZ3635）により行った。ワサビ沢流域、堂平沢流域に設置した濁度計を写真1、2に示す。

濁度計では、河川流水中を浮遊流下する浮遊土砂と有機物を合わせた濁質物質が計測される。そこで、濁度計の出力値から濁質物質濃度を求めるために、濁質物質濃度と濁度計の出力値の関係を求めるためにキャリブレーションを行った。キャリブレーションには堂平地区の斜面表層から採取した土壌を0.25mmメッシュのふるいに通した土壌を用いた。なお、ワサビ沢で採取した濁水において測定した結

果では、濁質物質のうち、約70%が浮遊土砂であったため、濁質物質濃度の70%を浮遊土砂濃度とした。キャリブレーション結果を用いて濁度計の出力値から濁質物質濃度を求め、その70%を浮遊土砂濃度として算定し、それに流量を乗じた値を浮遊土砂量とした。

3 雨量と斜面土壌侵食量

図3に示す堂平地区のC区の約33度の斜面上4箇所に土壌侵食調査プロットを設置し、さらに同じ斜面上に樹冠通過雨量を測定するための雨量計（大田計器製作所製、No.34-T、転倒杓型、1転倒0.5mm）を計3個設置した（図4）。雨量計の降雨量データはデータロガー（ウイジン社、UIZ3639）により1～2分毎に自動的に記録した。3個の雨量計の平均値を以下では単に雨量（樹冠通過雨量）と呼ぶ。土壌侵食量については、土壌侵食調査プロットの下部に土砂捕捉マット（幅40cm、深さ40cm、高さ40cm、長さ2m）を設置し（図5）、土砂捕捉マット内に堆積した土砂及びリターを4～11月の間に1週間～2週間毎に1回採取し、実験室に持ち帰り、洗浄により土砂とリターに分離して105℃で2日間乾燥した後、それぞれの絶乾質量を測定した。植生保護柵の外にあるC3の土壌侵食調査プロットにおける2009年～2011年における7～9月の平均林床植生被覆率は1%、平均林床合計被覆率（林床植生被覆率+リター被覆率）は29%である。



写真1 ワサビ沢に設置した水位計、濁度計



写真2 堂平沢に設置した水位計、濁度計

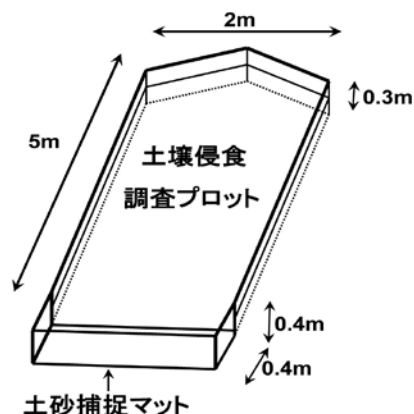


図5 土壌侵食調査プロットの模式図

IV 結果および考察

1 土壌侵食量と浮遊土砂量

1 イベントの降雨（1雨）における斜面での土壌侵食量と溪流における浮遊土砂量の関係を、季節ごとに分けて分析した。ここで、連続した降雨量のある降雨を1イベントの降雨（一雨）とし、24時間以上降雨がない状態が続いた場合、別のイベント降雨とした。1イベント降雨における総浮遊土砂量を浮遊土砂量とした。土壌侵食量の値は、図4に示すC3の土壌侵食調査プロットの測定値を用いた。C3の土壌侵食調査プロットの林床植生および堆積リターは人為的に取り除いたため、4～12月の林床合計被覆率はほぼ0%である。季節は、4～6月を春季、7～9月を夏季、10～12月を秋季とした。ワサビ沢における浮遊土砂量と土壌侵食量の関係を図6に示す。また、堂平沢における浮遊土砂量と土壌侵食量の関係を図7に示す。両溪流とも土壌侵食量と浮遊土砂量の関係には正の相関があることが分かった。したがって、土壌侵食と浮遊土砂は別々の現象ではなく、流域における斜面の土壌侵食が溪流への浮遊土砂流出に影響を与えていると考えられる。また、ばらつきは春季、秋季に比べて夏季において少なかった。このことから、斜面の土壌侵食と溪流への浮遊土砂流出は夏季において強く関係していると考えられる。

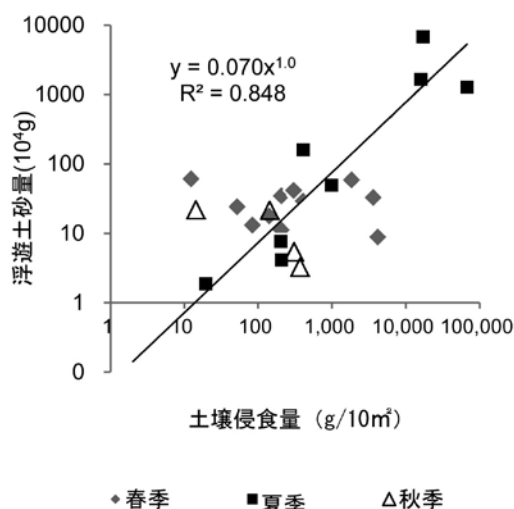


図6 ワサビ沢における浮遊土砂量と土壌侵食量の関係 (2009-2011年)

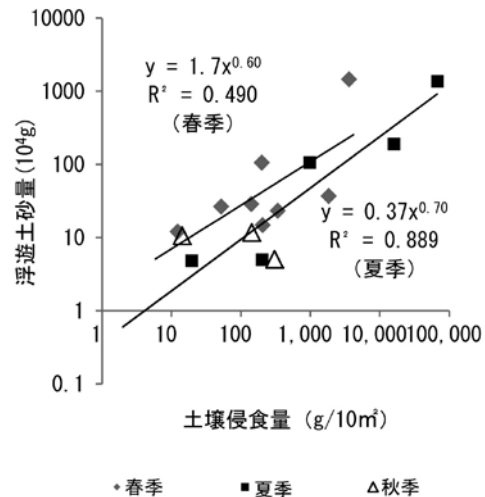


図7 堂平沢における浮遊土砂量と土壌侵食量の関係 (2009-2011年)

2 ピーク流量と浮遊土砂量

ワサビ沢における一イベントごとのピーク流量と浮遊土砂量の関係を季節ごとに分けて分析した結果を図8に示す。また、堂平沢における同様の結果を図9に示す。図8、9から浮遊土砂量はピーク流量に対して指数関数的に増大することが分かった。また、同一の流量に対して夏季では、春季と秋季に比べて浮遊土砂量が大きくなる傾向が見られる。ピーク流量と浮遊土砂量の相関は、春季と夏季で小さく、秋季に大きいことが分かった。

3 雨量と浮遊土砂量

ワサビ沢と堂平沢において、1イベント降雨における雨量と浮遊土砂量の関係を季節ごとに分けて分析した。

(1) 最大10分間雨量と浮遊土砂量

ワサビ沢と堂平沢において最大10分間雨量と浮遊土砂量の関係を季節ごとに分けて分析した。ここでの最大10分間雨量とは、1イベントの降雨における最大の10分間雨量を意味する。季節毎に分けた場合のワサビ沢における最大10分間雨量と浮遊土砂量の関係を図10に、堂平沢における最大10分間雨量と浮遊土砂量の関係を図11に示す。最大10分間雨量と浮遊土砂量の結果から、データにばらつきがあり、最大10分間雨量が大きくても浮遊土砂量があまり大きくならない降雨が見られた。このことから、最大10分間雨量と浮遊土砂量との関係は弱いと考えられる。

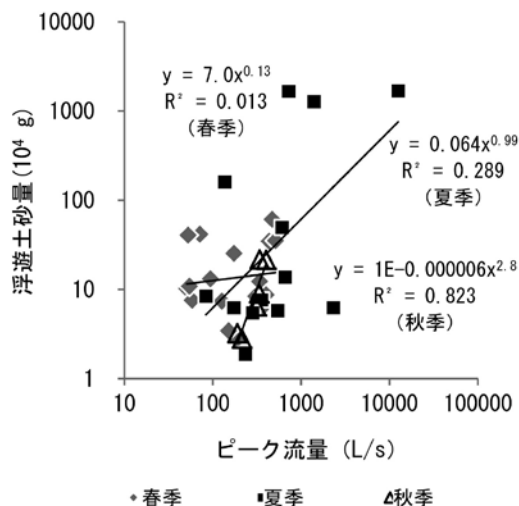


図8 ワサビ沢におけるピーク流量と浮遊土砂量の関係 (2009-2011年)

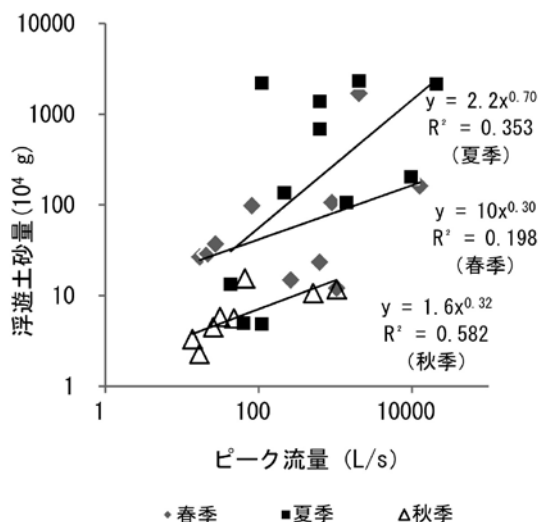


図9 堂平沢におけるピーク流量と浮遊土砂量の関係 (2009 - 2010年)

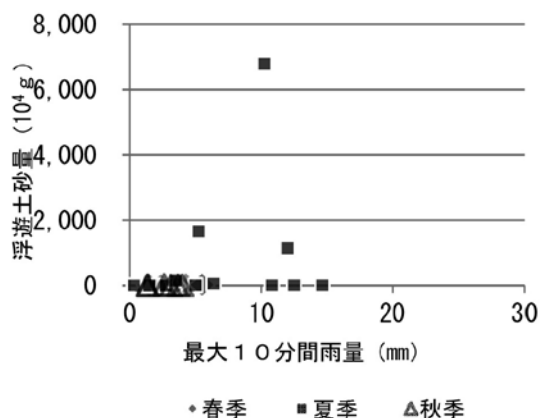


図10 ワサビ沢における最大10分間雨量と浮遊土砂量の関係 (2009-2011年)

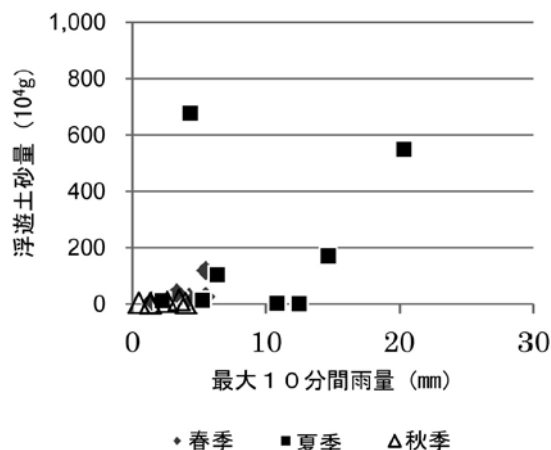


図11 堂平沢における最大10分間雨量と浮遊土砂量の関係 (2009-2011年)

(2) 一雨雨量と浮遊土砂量の季節変化

一雨雨量と浮遊土砂量の関係を、季節ごとに分けて分析した。ワサビ沢における一雨雨量と浮遊土砂量の関係を図12に示す。堂平沢における一雨雨量と浮遊土砂量の関係を図13に示す。一雨雨量と浮遊土砂量には正の相関があることが分かった。また、同一の雨量に対し夏季では、春季や秋季に比べて浮遊土砂量が大きくなる傾向が認められる。

(3) 一雨雨量と浮遊土砂量の季節ごとの経年変化
一雨雨量と浮遊土砂量には季節変化があることが分かったので、季節別に一雨雨量と浮遊土砂量の経年変化(2009～2011年)を分析した。ワサビ沢における春季、夏季、秋季の一雨雨量と浮遊土砂量との

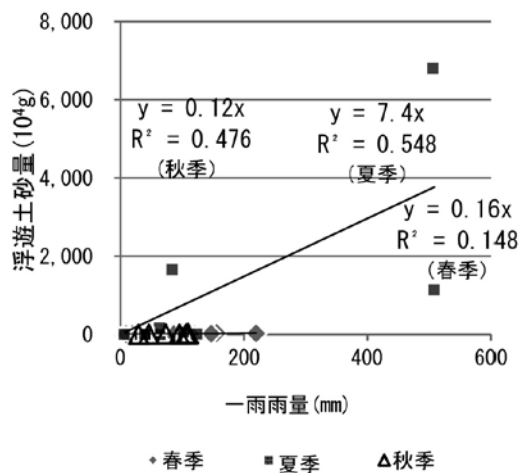


図12 ワサビ沢における一雨雨量と浮遊土砂量の関係 (2009-2011年)

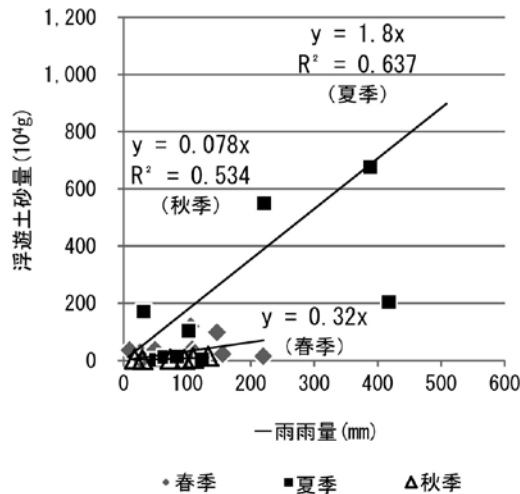


図 13 堂平沢における一雨雨量と浮遊土砂量の関係 (2009-2011 年)

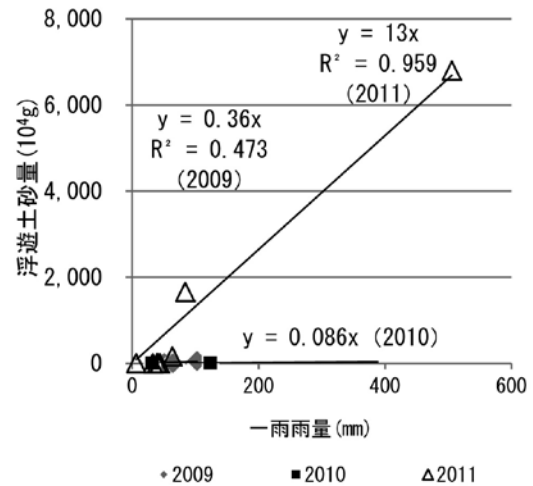


図 15 ワサビ沢における夏季の一雨雨量と浮遊土砂量の関係 (経年変化)

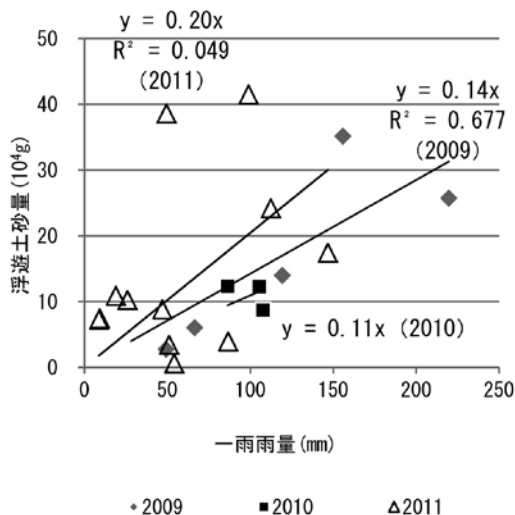


図 14 ワサビ沢における春季の年別一雨雨量と浮遊土砂量の関係 (経年変化)

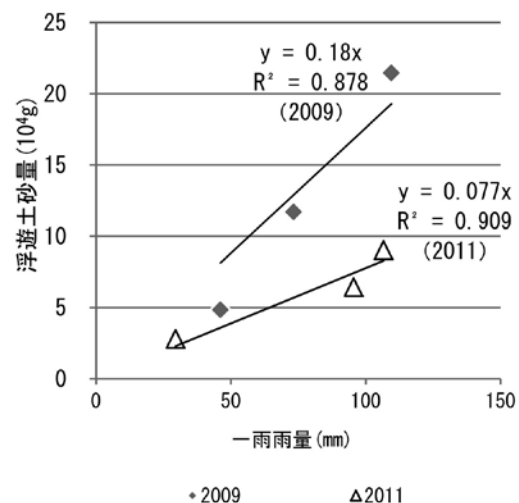


図 16 ワサビ沢における秋季の一雨雨量と浮遊土砂量の関係 (経年変化)

関係を図 14、15、16 に示す。また、堂平沢における春季、夏季、秋季の一雨雨量と浮遊土砂量との関係を図 17、18、19 に示す。

図 14～19 を基に、2009～2011 年の間の、同一規模の一雨雨量に対するワサビ沢と堂平沢の浮遊土砂量を季節ごとに比較すると表 3 のようになる。

表 3 より、春季と夏季では溪流の浮遊土砂量は 2009 年から 2011 年へと増加傾向にあり、堂平地区の A 区、B 区で見られた林床合計被覆率の増加の影響が溪流の浮遊土砂量の減少につながっていないと判断される。この理由として、2011 年は台風 12 号、

台風 15 号という降雨量の大きなイベントが発生したことが原因の一つとして考えられる。なお 2009 年の 4 月～11 月の総雨量は 2123mm、2010 年の 4 月～11 月の総雨量は 2420mm、2011 年の 4 月～11 月の総雨量 3135mm とこの 3 年間では毎年増加している。一方、秋季では、溪流の浮遊土砂量は減少傾向にあり、林床合計被覆率の増加の影響が浮遊土砂量の減少に影響している可能性がある。

2009 年から 2011 年の観測結果からは堂平地区における土壌保全対策に伴う影響が溪流における浮遊土砂量の減少に直ちに影響しているとは認められな

表3 同一規模の一雨雨量に対する浮遊土砂量の増減（経年変化）

溪流	季節	2009→2010年	2010→2011年	2009→2011年
ワサビ沢	春季(4-6月)	減少	増加	増加
	夏季(7-9月)	減少	増加	増加
	秋季(10, 11月)	2010年のデータ無し	2010年のデータ無し	減少
堂平沢	春季(4-6月)	増加	増加	増加
	夏季(7-9月)	増加	ほぼ横ばい	増加
	秋季(10, 11月)	増加	減少	減少

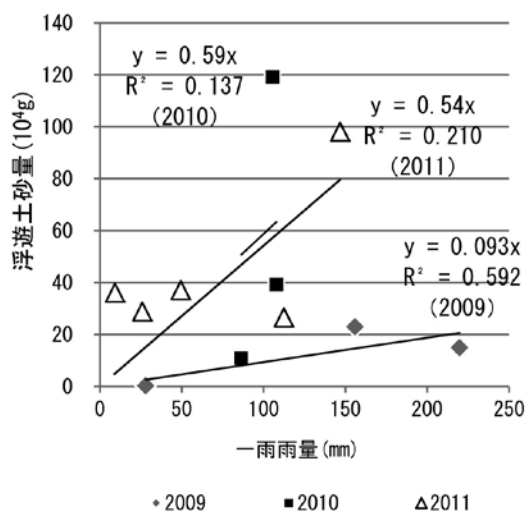


図17 堂平沢における春季の年別一雨雨量と浮遊土砂量の関係（経年変化）

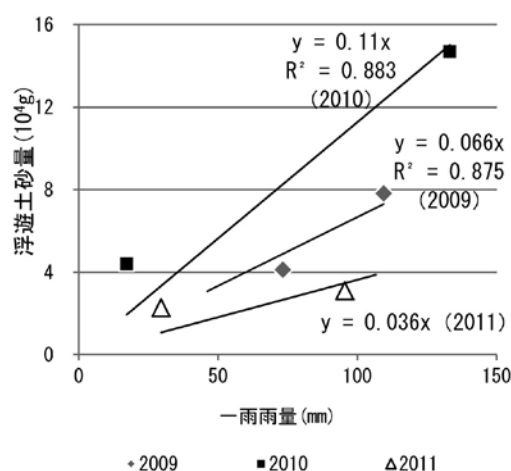


図19 堂平沢における秋季の一雨雨量と浮遊土砂量の関係（経年変化）

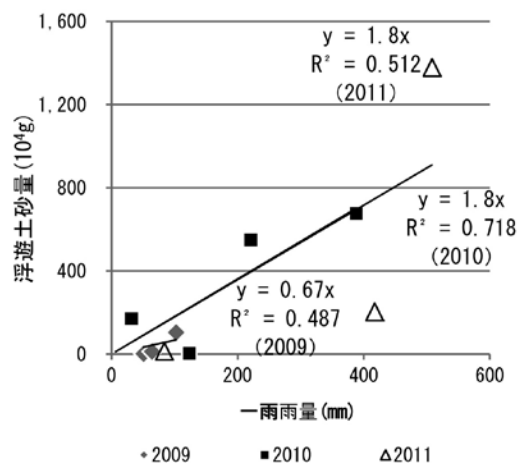


図18 堂平沢における夏季の一雨雨量と浮遊土砂量の関係（経年変化）

かったが、斜面全体の土壌侵食量が溪流の浮遊土砂となって流出するにはある程度の時間差が必要とも考えられる。このことから、斜面における土壌保全対策が浮遊土砂量に与える影響（効果）を判断するにはある程度の期間の現地観測が必要と考えられる。

V まとめ

丹沢堂平地区ではシカの採食により林床植生が衰退し、急勾配の斜面を中心に激しい土壌侵食が発生している。このような土壌侵食を減少させるための土壌保全対策として、土壌侵食対策工を設置するとともにシカの保護管理によりシカの生息密度を減少させる努力がなされてきている。

水源環境保全・再生の観点からは、このような土壌保全対策による土壌侵食軽減の効果を検証するこ

とが必要とされる。このためには斜面におけるプロットスケールでの土壌侵食軽減効果を検証すると同時に、流域スケールでの土壌侵食軽減効果を検証することも重要である。しかし、流域スケールでの土壌保全対策の効果の評価手法については未解明の部分も多い。堂平地区のように関東ロームが斜面の表面に厚く堆積している流域では、流域スケールでの土壌侵食軽減効果の検証方法として、溪流における浮遊土砂量の減少を検討することが有効と考えられる。このため土壌保全対策を実施している堂平地区を流域に含む堂平沢（流域面積約 141ha）とワサビ沢（流域面積約 91ha）の下流において濁度および水位を測定して、流域スケールでの浮遊土砂流出モニタリングを行い、これらと堂平地区の斜面におけるプロットスケールでの土壌侵食量のモニタリング結果と比較検討を行った。この結果、堂平地区では斜面におけるプロットスケールの土壌侵食量と溪流における流域スケールの浮遊土砂量に強い相関があることが分かった。一方、一雨雨量と浮遊土砂量には季節変化が認められ、夏季では一雨雨量の増加により浮遊土砂量も増加する傾向が認められた。季節毎に、一雨雨量と浮遊土砂量の関係を求め、2009、2010、2011 年と 3 カ年の経年変化を検討した結果、明確な減少傾向は認められず、同一の一雨雨量に対する浮遊土砂量からは堂平地区における土壌保全対策の効果が直ちに浮遊土砂量の減少になって現れていないことが分かった。斜面における土壌

侵食量の減少が溪流の浮遊土砂量の減少に繋がるためにはある程度の時間が必要であることが予想されるので、今後更に観測を継続して検証を行う必要がある。

堂平地区における総合的で長期にわたる土壌侵食量観測、浮遊土砂量観測の成果を基に、今後、溪流における浮遊土砂量の予測手法の開発や、土壌保全対策の効果の評価手法を確立する必要がある。このためには、土壌侵食機構と、浮遊土砂供給プロセスを明らかにし、斜面土壌侵食と溪流の浮遊土砂量の相関性だけでなく、侵食土砂の流出機構（斜面から溪流への移動過程と移動機構）を明らかにしていく必要がある。例えば斜面単位での土壌侵食の時間変化を降雨量の時間変化と合わせて解析することにより土壌侵食機構がさらに明らかになると考えられる。また、今回の解析において用いなかった堂平地区における多数の土壌侵食調査プロットの土壌侵食量、地表流流出量、林床合計被覆率と溪流における浮遊土砂量および流量の関係を総合的に解析することにより、土壌保全対策の効果評価を斜面（プロットスケール）から流域スケールへ拡張することが可能と考えられる。

VI 引用文献

神奈川県（2011）平成 23 年度神奈川県ニホンジカ保護管理事業実施計画、23

