

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

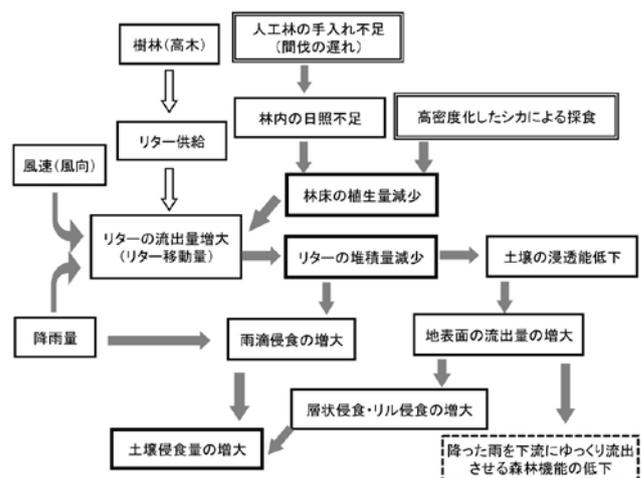


図1 現在の水源環境の主な課題
※石川（2007）一部改変

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の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

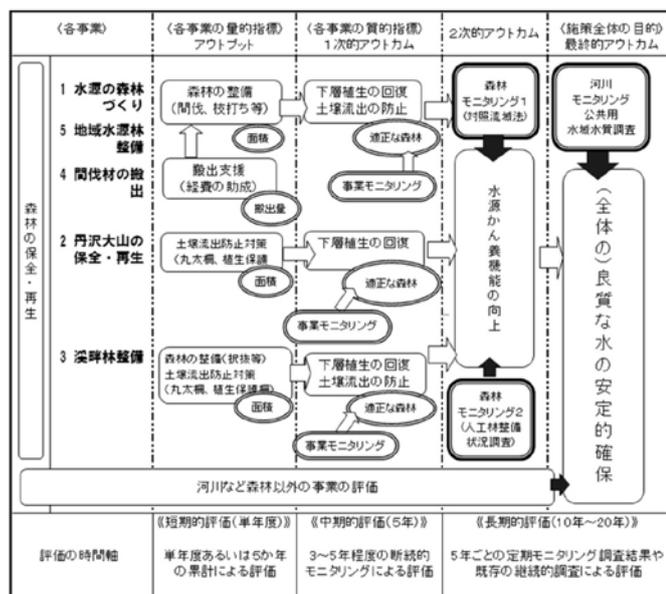


図2 水源環境保全・再生施策の評価体系
※水源環境保全・再生かながわ県民会議 (2012) 一部改変

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、B A R C I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域の地質は、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、水源林の施策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、シカの不嗜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策は、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

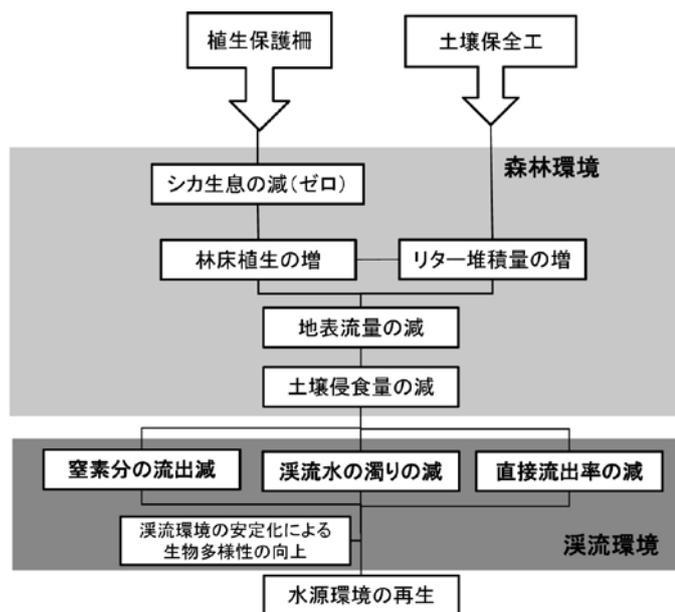


図4 シカと森林の適切な管理の効果検証における効果発現の筋書き

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
整備効果 検証指標	土壌理化学性
	中大型哺乳類生息状況
	水量、水質、水温
溪流・水環境	浮遊砂量、濁度、掃流砂量
	溪畔環境(照度、水温など)
	藻類、溪流動物
基盤情報	降水量(降雪量)、降雨水質 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で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/㎏²（平成14年度）から5頭/㎏²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。これらの現地での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・ナトウーラ・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—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
- 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—水源環境保全税による特別対策事業の点検結果報告書— (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) 丹沢山地の渓流水質. 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一、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