

水源林整備としての間伐が人工林生態系の生物多様性に及ぼす効果の検証 —調査の開始の経緯と進捗状況について—

谷脇 徹*・田村 淳*,**

Verification of effectiveness of thinning for the water source forestation on biodiversity in plantation ecosystems: starting process and progress of a survey

Toru TANIWAKI *, Atsushi TAMURA *, **

I. はじめに

神奈川県は、2007 年度（平成 19 年度）から 2026 年度（令和 8 年度）までの 20 年間の計画で、「良質な水の安定的確保」を目的とした水源環境の保全・再生施策に取り組んでいる。この施策では、手入れ不足の人工林、すなわち林内が暗く、林床植生が乏しく、水源かん養機能の基盤となる土壌の流出が生じている人工林において、林床植生を増加させ、土壌保全機能を高めるための対策として、林内の光環境を改善するための間伐や、ニホンジカによる採食から林床植生を保護する柵の設置等の事業を行っている。事業の効果については、林床植生の増加状況を指標とした検証が行われている（田村ら 2013）。施策評価の枠組みとしては、事業のより多面的な効果を把握するため、森林水文学分野で用いられる対照流域法による水源かん養機能の検証（内山 2025）に加えて、生物多様性保全機能への波及効果についても検証を行うことが求められている。

そこで県では、生物多様性保全機能に着目した事業効果の検証に向けて、間伐が林床植生（森林生態系における生産者）の増加を通じて、土壌動物（同分解者）や、昆虫類、鳥類および哺乳類（同消費者）

に及ぼす効果（図 1）を把握するための調査（以下、生態系調査）を 2013 年度（平成 25 年度）から実施している。本稿では、2026 年度（令和 8 年度）に終了する施策の最終評価とその後の取組に向けた資料として、調査を実施するに至った経緯や、全国的にみても前例のない水源林整備地での生物多様性に係る総合的な調査を実施するうえで必要となった各種検討事項、および現時点での調査解析の実施状況について解説する。

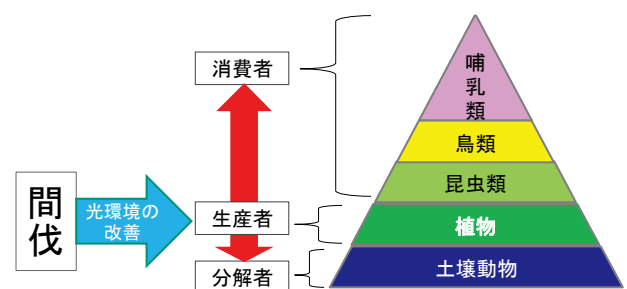


図 1 間伐が人工林生態系の生物多様性に及ぼす効果の模式図

II. 生態系調査の実施の経緯

県は、水源かん養機能を高度に発揮する森林づくりを進めるため、1997 年度（平成 9 年度）から手

* 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 神奈川県厚木市七沢 657）

** 現：神奈川県自然環境保全センター自然保護公園部野生生物課（〒243-0121 神奈川県厚木市七沢 657）

入れ不足の私有林を対象として、森林所有者に代わって間伐などの森林整備を行う「水源の森林づくり」事業に取り組んでいる。2007年度(平成19年度)からは、県民からの超過課税(水源環境保全税)を財源とした「かながわ水源環境保全・再生施策」が始まり、水源の森林づくり事業も当施策に位置付けられ、取り組みを促進、拡充してきた。超過課税を財源とするかながわ水源環境保全・再生施策では、有識者や関係団体、一般公募委員で構成される「水源環境保全・再生かながわ県民会議(以下、県民会議)」が組織され、事業の成果を県民目線で評価し、評価結果を事業にフィードバックする「県民参加型税制」のしくみが構築された。

生態系調査の必要性は、県民会議により指摘された。すなわち、2011年度(平成23年度)の第19回(第2期第11回)県民会議において、『水源環境保全・再生施策の効果を多面的に把握し、成果を分かりやすく県民に説明するため、現行の調査・評価手法の中に、水循環を考慮した森林生態系の要素を加味する』ことの必要性が指摘された(神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課2025a)。これを受けて、2012年度(平成24年度)に学識経験者によるワークショップが2回開催され、『水源かん養機能の向上に対する機能評価の実施には時間的な制約があることから、相互補完的な施策評価の枠組みとして、森林生態系の健全化に対する機能評価の実施を、別途組み入れる』ことが提案された(イー・アンド・イーソリューションズ株式会社2013)。このような県民会議による提案を受けて、県では2013年度(平成25年度)から生態系調査に着手した。

Ⅲ. 調査地で行われる森林整備

生態系調査は、水源の森林づくり事業の効果検証の一環で実施するものであり、調査の前提として、調査地でどのような森林整備が行われているかの理解が不可欠となる。ここでは「水源林整備の手引き」(神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課2022)を参考として、水源林整備としての間伐の基本的な考え方について情報を整理しておきたい。なお、実際の間伐では、確保時の森林の状態や、立地条件など現地のような状況により、柔軟な対応が求められた。

生態系調査で調査対象とする森林は「水源協定林」である。森林所有者との協定(借り上げなど)に基

づいて人工林や広葉樹林を整備する水源協定林は、私有林を水源林として公的管理・支援を行う際の6つの手法(水源協定林のほか、協力協約、長期施業受委託、環境保全分収林、水源分収林、買取り)(神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課2025b)の一つであり、確保面積が最も大きく、水源施策を代表する手法である。水源協定林として確保した手入れ不足のスギ・ヒノキ人工林で目指すのは、短期的には林床植生の増加を通じて土壌保全機能を高めること、中長期的には針広混交林、すなわちスギ・ヒノキと多様な広葉樹とが混交した森林に誘導することであり、そのために間伐等の森林整備が行われている。間伐の方法としては、標準的なスギ・ヒノキ単層林の林分では、20年の契約期間のうちに、スギ・ヒノキの本数密度を500～600本/ha程度まで下げることが目標に、間伐を2～3回繰り返し実施することを基本的な考え方とする。丹沢の高齢級人工林の事例では、林床植生の植被率、現存量および種数は、間伐後3～5年程度増加し続けたのち、11年後まで横ばいで推移する(Tamura and Yamane 2017)とされ、この事例に基づく、間伐の間隔を概ね5～10年程度とし、間伐により林床植生が十分に増加するのを待ってから、次の間伐を行うのが効果的であると考えられる。間伐の対象木としては、最初は劣勢木が優先され、2～3回目の間伐では上層木も含まれる。このような段階的な間伐により、林床植生への間伐の効果は、間伐の回数を重ねることに累積することが期待された。

Ⅳ. 調査方法の検討

(1) 調査項目の選定

生態系調査では、間伐に伴う人工林生態系の変化を次のように想定した。まず間伐により、上空を遮る枝葉が減少して明るくなった林内では、林床植生が増加する。その後、動物の食物資源や採餌場所、営巣場所、隠れ家などが増加、多様化することで生息環境が改善され、その結果、動物の種数や個体数も増加することを想定した。このことを検証するために、林分や林床植生の状態と、林内環境の変化に反応する可能性がある動物について生息状況を調査することとした。

林分や林床植生の調査については、すでに水源の森林づくり等の事業効果を検証するための調査実績

表1 各分類群の調査方法一覧

分類群等		調査回	調査時期	調査区画	調査方法	機能群等(参考文献)
植物	林床植生	1～3巡目	7～8月	2m×2m小プロット10個(20m×20m固定プロット内)	地上高1.5m以下の植物種数と種ごとの被度を記録し、小プロット10個全体としての植物種数と積算被度を算出	樹木、草本・つる(神奈川県植物誌調査会2018)
	更新木	1～3巡目	9月	2m×2m小プロット10個(20m×20m固定プロット内)	樹高1.5m以下のすべての個体の樹種および樹高(1.5mスチールメジャーで計測)を記録	高木種、小高木種、低木種(神奈川県植物誌調査会2018)
	林分構造	1～3巡目	9月	20m×20m固定プロット	樹高1.5m以上のすべての個体(植栽木を含む)の樹種、樹高(検測線あるいは超音波樹高測定器で計測)および胸高直径(10mスチールメジャーで計測)を記録	高木種、小高木種、低木種(神奈川県植物誌調査会2018)
土壌動物	ササラダニ	1巡目	9～10月	20m×20m固定プロット内3箇所	5m×5m範囲で採取した2リットルのリター・腐植質・表層土壌からツルグレン装置でササラダニを抽出	M群(接門類)、G群(離門類無翼類)、P群(離門類有翼類)(青木1983)
	ミミズ	1～2巡目(丹沢は2巡目未実施)	7～8月	20m×20m固定プロット内10箇所	25cm×25cm範囲の深さ10cm土壌中のミミズを採取	大部分が既知種に同定されず生態情報が不明なためグループ分け不可
昆虫類	植食性甲虫(ハムシ・ゾウムシ)	1～3巡目	6月	20m×20m固定プロット	林床植生を対象に捕虫網を用いた15分間のスウィーピングで植食性甲虫を採集	樹木食、草本・つる食(Charles & Bassett 2005)
	地表性甲虫(オサムシ)	1～3巡目	9月	20m×20m固定プロットを横断する5m間隔2行×10列の20箇所	直径8cm×高さ12cmのプラスチックコップ20個をコップ上端が地表面と同じ高さになるように設置(ピットホールトラップ)し、1週間後に回収して地表性甲虫を採集	大型(≥20mm)、中型(≥10mm)、小型(<10mm)(Fujita et al. 2008; Iida et al. 2016)
	アリ	1～3巡目	6月、9月	20m×20m固定プロット、5m間隔2行×10列の20箇所	上述の植食性甲虫と地表性甲虫の採集時にアリも採集	森林型、生息地ジェネラリスト型、開放地型(寺山1997; Maet & Sato 2004; 江原ら2013)
鳥類		1～2巡目	5～6月(繁殖期)、1月(冬期:1巡目のみ)	20m×20m固定プロットを含む25m×25m区画	繁殖期4:30～9:30、冬期7:00～12:00に区画内の樹木や林床植生、地表に一時的に滞在した鳥類の種数と種ごとの個体数を双眼鏡による目視および鳴き声により記録(7日間以上開けて2回実施)	樹冠採食型、樹幹採食型、低木採食型、地上採食型、フライキャッチ型(奥田ら2012、2013)
哺乳類	小型哺乳類(野ネズミ)	1巡目	9～10月	20m×20m固定プロットを含む10m間隔5行×5列の25箇所	シャーマントラップ25個を3晩設置して野ネズミの捕獲数を毎日記録(記録後放逐)	アカネズミ・ヒメネズミ(Nishikata 1981)
		2020年度以降補足調査	8～9月(丹沢は年度により6～11月)	18地点の20m×20m固定プロットを含む10m間隔3行×5列～5行×5列の15～25箇所	・林床植生の状態を考慮して選定した18地点で実施 ・シャーマントラップ15～25個を5晩程度設置して野ネズミの捕獲数を毎日記録(記録後放逐) ・糞のDNA分析による食物利用植物種調査	アカネズミ・ヒメネズミ(Nishikata 1981)
	中大型哺乳類	1～3巡目	夏期、冬期	20m×20m固定プロット周辺	2台の自動撮影カメラを90日以上設置して中大型哺乳類の撮影頻度を記録	タヌキ、イノシシ、ニホンノウサギ、ハクビシン、ニホンテン(大石ら2023)
		2024年度以降補足調査	通年	20m×20m固定プロット周辺	2台の自動撮影カメラを通年で設置して中大型哺乳類の撮影頻度を記録	タヌキ、イノシシ、ニホンノウサギ、ハクビシン、ニホンテン(大石ら2023)

が多くあった。そこで、これらの調査に関するノウハウの蓄積を活かし、後述するような調査実施上の様々な制約を勘案したうえで、生態系調査用に改良した調査プロットを設定し、地上高1.5m以下の林床植生および更新木調査と、樹高1.5m以上の林分構造調査を実施することとした(表1)。すなわち、林分構造調査用に20m×20m固定プロットを全地点に1個ずつ設定し、固定プロットの中心付近には、林床植生および更新木調査用に2m×2m小プロットを10個ずつ(2m×10mを2個ずつ)設定した(図2)。

一方、動物の調査については、ニホンジカや病害虫を除き、調査の実績とノウハウの蓄積に乏しく、間伐の効果を検出しようとしたときに、どのような分類群の動物を対象として、どのような調査を行えばよいかが不明であった。そこで、調査対象とする動物分類群の選定にあたっては、県民会議によって示された以下の考え方(イー・アンド・イーソリュー

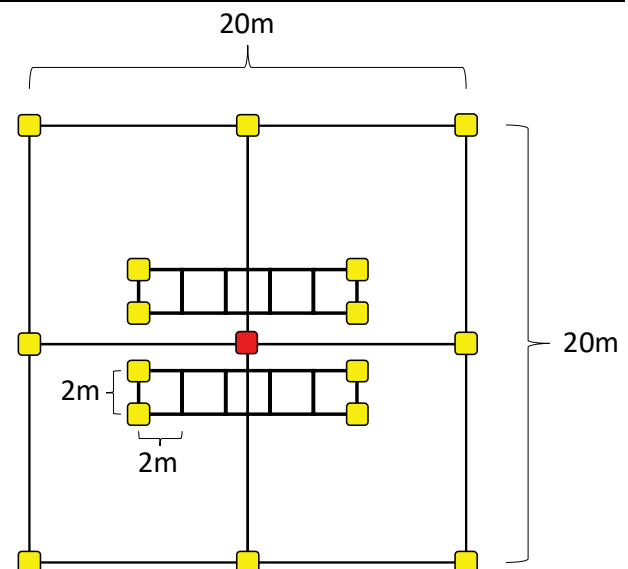


図2 毎木調査用 20m×20m 固定プロットにおける林床植生調査用 2m×2m 小プロット 10 個 (2m×10m を 2 個ずつ) の配置模式図

20m×20m 固定プロットには10m 間隔の格子状に赤色(中心)および黄色のプラスチック杭を設置。2m×2m 小プロットについては各 2m×10m の 4 角に黄色のプラスチック杭を設置。

ジョンズ株式会社 2013) を参照した。すなわち、分類群の選定の考え方としては、『多角的視点から森林生態系の状況を把握するため、生態的ニッチ(それぞれの種に特有の生息環境要因)が異なっていたり、食物連鎖上の位置が異なっている対象種群、或いは群集を複数選定することが必要』であり、『比較的早い段階から自然の豊かさへの変化や生物多様性の向上が読み取れ、現実的に調査可能な種群に注目して検討することが重要』とされた。そのうえで、具体的な森林生態系の要素として、①植生、②土壌、③野生動物の3区分が提案された。そして、それぞれの区分の内容として、①植生—土壌—ニホンジカ—森林整備等の関連性の把握、②有機物のたまり具合や土壌動物、土壌の発達度の評価、③飛翔性昆虫や地上性徘徊昆虫、水生昆虫、鳥類の生息状況に加え、キーストーン種(ニホンジカ)とアンブレラ種(クマタカ、ツキノワグマ)の個体群の評価が示された。

以上のように、県民会議から、森林生態系に係る総合的な調査が提案されたことを踏まえ、生態的ニッチや食物連鎖上の位置が異なる動物として、土壌動物(分解者)と昆虫類、鳥類および哺乳類(消費者)を対象とすることとした(図1)。そのなかで、環境指標として用いられていて情報の蓄積があり、それ故に上述の20m×20m固定プロット(図2)の範囲において間伐による林床植生の増加への応答が想定され、調査の実現可能性が高い複数の分類群を検討した。その結果、土壌動物ではササラダニおよびミミズ、昆虫類では植食性甲虫(ハムシ・ゾウムシ)、地表性甲虫(オサムシ)およびアリであり、鳥類のほか、哺乳類では小型哺乳類(野ネズミ)および中大型哺乳類を調査対象とすることとした。各分類群の調査方法については、既往文献や専門家の意見を参考にして、各分類群の調査で用いられている方法を、上述20m×20m固定プロット(図2)内とその周辺での調査用に改良した(表1)。調査時期は、出現期間を広くカバーするのが理想であったが、広域多地点で調査を実施するうえでの予算等の制約により、分類群ごとの代表的な出現時期に絞り込むこととした(表1)。なお、県民会議から提案された分類群のなかで、溪流や河川を生息環境とする水生昆虫については、すでに水源かん養機能の検証のなかで調査が行われていた(例えば石綿ら2013)ので、生態系調査では扱わないこととした。

また、アンブレラ種とされたクマタカやツキノワグマについては、個体数が少ないうえに行動圏が広く、20m×20m固定プロットでの局所的な調査では、生息は確認されるもののその頻度は低く、間伐や林床植生との関係を見いだすのは困難であったため、調査対象から除外した。

(2) 調査地の選定

水源協定林は、県の北西部から南西部にかけての広範囲(城山ダム、宮ヶ瀬ダムおよび三保ダムの上流域を中心とする水源の森林エリア約60,900ha)に分布する森林で広く確保(平成9年度から令和5年度までに約12,986ha)されている(神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課2025b、c)。しかし、確保時の立木密度および林床植生の状態や、確保後の経過年数および整備の進捗状況は、林分によって様々であり、そのなかから条件を絞り込み、間伐と林床植生との関係を検証するのに適した林分を選定する必要があった。

そこで、調査地選定の条件として、まず地質やニホンジカの生息状況等に差異のある小仏山地、丹沢山地および箱根外輪山の3地域において、代表的な林相であるスギ林、ヒノキ林および広葉樹林の3種類から選定することとした(図3)。3種類の林相は、近い場所で1組ずつ選定することを基本とした。次に、間伐後の植生の増加にはタイムラグがある(Tamura and Yamane 2017)ことを念頭に、間伐の有無および間伐後の経過年数の違いに主眼を置き、①未間伐、②1回目の間伐後1～3年経過および③4～8年経過の地点を選定した。地点数については、林分および林床植生の状態や動物の生息状況が地点によってばらつくことが想定され、傾向を見いだすのに、統計的な検出力を考慮した地点数(サンプル数)を確保する必要があった。ただし、予算、研究員の体制、委託会社の対応可能な業務量など、調査実施上の様々な制約があることを勘案し、各地域の林相ごとに、少なくとも9地点ずつを確保する方針とした。また、ニホンジカの採食影響が大きい丹沢山地では、柵内地点を追加で組み合わせる調査地も設けた。以上の考え方にに基づき、水源林の台帳をもとに、GIS上で条件に合う候補地を絞り込んだうえで、現地をすべて踏査し、林分および林床植生の状態のほか、周辺環境やアクセスのしやすさなども考慮して調査地を選定した。以上により選定した地点

数は、小仏山地 27 地点（スギ林 9 地点、ヒノキ林 9 地点、広葉樹林 9 地点）、丹沢山地 38 地点（スギ林 14(3) 地点、ヒノキ林 13(1) 地点、広葉樹林 11(2) 地点、カッコ内は柵内地点数）、箱根外輪山 21 地点（スギ林 9 地点、ヒノキ林 9 地点、広葉樹林 3 地点）の合計 86 地点と大規模なものとなった（表 2）。なお、箱根外輪山の広葉樹林の地点数は、調査に適した林分が少なかったため、3 地点に留まった。すべての調査地で諸条件を揃えることは困難であり、スギ・ヒノキ林における林齢（31～95 年）、成立密度（225～1,800 本/ha）、平均胸高直径（21～42cm）のほか、斜度（6～40°）や斜面方位など地形の要素は、地点によってばらついた。標高についてもばらつきがあったが、植生の種構成が大きく変化しない範囲（標高 135～620m）とした。一

部の地点は 2 巡目調査で別地点に変更する必要があったが、合計地点数に変更はない。

（3）調査のスケジュールおよび進め方の検討

水源協定林で繰り返し行われる間伐の効果を検証するには、一時点だけの調査では不十分であり、事業の進捗に応じた調査を定期的に行う必要があった。そこで、水源林での間伐の間隔（概ね 5～10 年程度）と、間伐後の植生増加に必要な期間（3～5 年程度）（Tamura and Yamane 2017）を考慮し、4 年程度の間隔で調査を実施する計画とした。そして、予備調査を 2013 年度（平成 25 年度）に実施したうえで、1 巡目調査を 2014～2015 年度（平成 26～27 年度）、2 巡目調査を 2017～2019 年度（平成 29～令和元年度）に実施した（表 3）。ただし、2 巡目

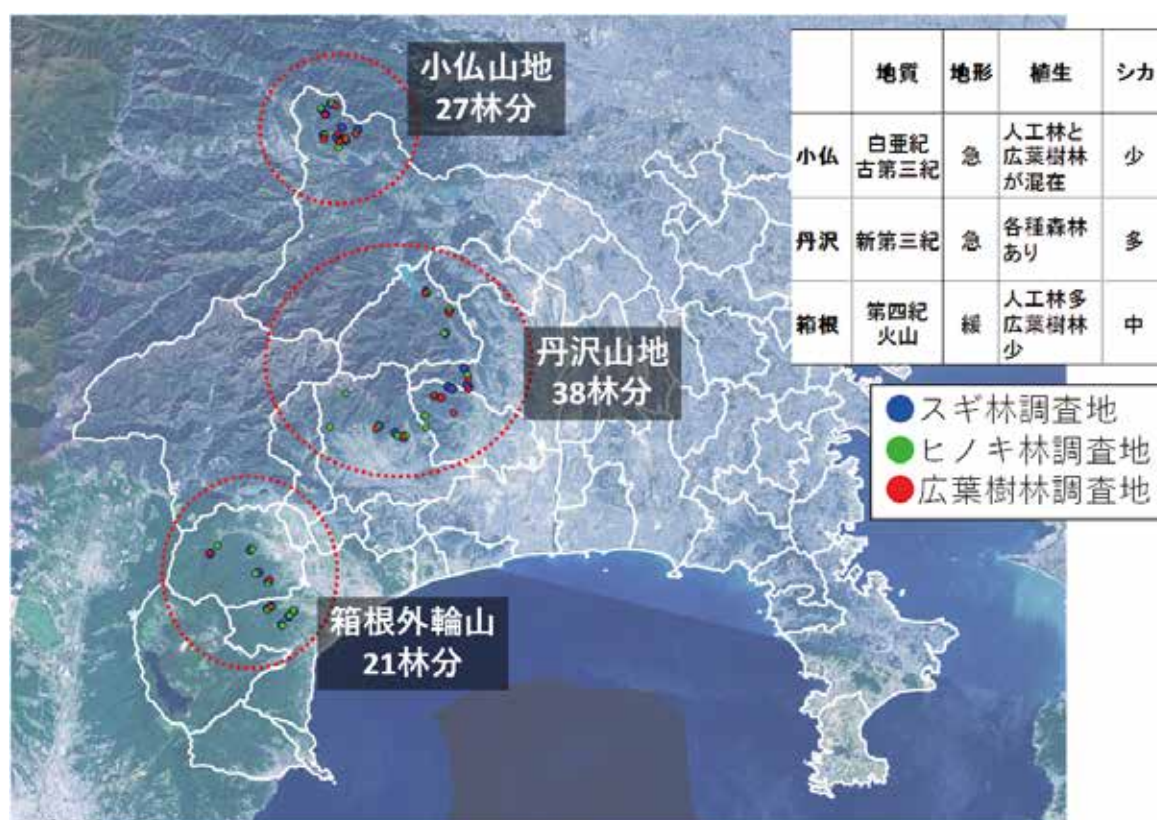


図3 調査地点の位置図（初期設定時点）

表2 各地域の林相別および間伐前後の調査地点数の集計

地域	スギ林		ヒノキ林		広葉樹林		計
	間伐前	間伐後	間伐前	間伐後	間伐前	間伐後	
小仏山地	3	6	3	6	3	6	27
丹沢山地	4	10(3)	3	10(1)	3	8(2)	38(6)
箱根外輪山	3	6	3	6	1	2	21
合計	10	22(3)	9	22(1)	7	16(2)	86(6)

調査が完了した時点では、水源林整備で目標とする500～600本/haに達していない地点が多数あり、より事業が進捗した段階での調査を行う必要があったため、3巡目調査を2022～2023年度（令和4～5年度）に実施した（表3）。各回の調査にあたっては、時点ごとの見直しを行い、前回の調査結果や予算、配置された研究員の専門性などを考慮し、対象とする分類群を段階的に絞り込む必要があった。具体的には、ササラダニは1巡目まで、ミミズは2巡目途中まで（丹沢は未実施）、鳥類は2巡目までとなった（表1）。小型哺乳類（野ネズミ）の調査は1巡目でいったん終了したが、専門とする研究員が配置されたことにより、2～3巡目の補足調査として、2020年度以降、林床植生の状態を考慮して選定した18地点（各地域スギ・ヒノキ林で林床植生が多い1地点、中庸の1地点、少ない1地点の3地点、広葉樹林で同様の3地点、計6地点ずつ）に絞り込んで実施するようになった（表1）。また、中大型哺乳類については、限られた時期の調査では傾向を見出すのが難しい種が多かったことから、補足調査として、通年での調査を2024年度以降実施している（表1）。一連の現地調査は、1巡目の植生調査は研究員が直営で実施したが、それ以外の調査は、調査会社への業務委託により実施した。

生態系調査はノウハウの蓄積が乏しいなかで実施しているため、調査方法および得られた結果の解釈や解析方法について、専門家から助言を得ながら進めていく必要があった。そこで、特に初回（1巡目）調査（予備調査を含む）については、現地調査から解析までの期間にあたる2013～2016年度（平成25～28年度）に、毎年1回プロジェクト委員会を開催し、有識者7名（森林施業、植生、土壤動物、昆虫、動物など各分野の専門家）に意見を伺いながら調査を進める体制とした。また、ササラダニとミ

ミズの調査は、それぞれの分類群の専門家の指導を受けながら実施した。あわせて、とりまとめ結果の評価を受けるため、外部有識者（3～4名）を委員とする成果評価部会を、2015年度（平成27年度、1巡目調査期間中）、2018年度（平成30年度、2巡目調査期間中）および2024年度（令和6年度、3巡目調査終了後）に開催した。2019年度（令和元年度）には、2巡目までの調査結果を総合的に解析するため、大学への総合評価研究委託を実施した。このように森林生態系調査には、多くの外部有識者の協力を得ながら進めてきた経緯がある。

V. 調査の実施状況

以上の方法で実施してきた調査により、水源林整備としての間伐が森林生態系に及ぼす効果について情報が蓄積された。現地調査はすでに3巡目まで実施済みであるが、調査項目と調査地点数が多いために得られたデータは膨大であり、現在はデータの整理と解析を順次進めている段階にある。本稿では、現時点でまとまった解析結果が得られている項目について概要を紹介する。なお、間伐の効果検証を目的とする本稿では、スギ・ヒノキ林の調査結果を紹介する。

（1）植物

植物については、1～2巡目の調査結果を間伐の実施状況の違いから3パターンに分けて集計した（図4）。すなわち、①1～2巡目調査間に1回目の間伐が実施された地点（15地点）、②1巡目調査前に1回目の間伐が実施されたが、1～2巡目調査間には間伐が実施されなかった地点（18地点）、③1巡目調査前に1回目の間伐が実施され、1～2巡目調査間に2回目の間伐が実施された地点（26地点）

表3 第2期～第4期水源環境保全・再生実行5か年計画期間中の調査スケジュール

地域	第 2 期 5 か年計画					第3期 5 か年計画					第4期 5 か年計画					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	
小仏山地		予備調査	1 巡目調査		補足調査 ・ 総合解析	2 巡目調査			補足調査	補足調査	3 巡目調査	補足調査	補足調査	補足調査	補足調査	最終とりまとめ
丹沢山地				1 巡目調査				2 巡目調査				補足調査	3 巡目調査			
箱根外輪山			1 巡目調査				2 巡目調査					3 巡目調査	補足調査			

の3パターンに分けて集計した。なお、図4の林床植生の積算被度（出現した植物種ごとの被度の合計値）と植物種数については、Taniwaki et al. (2024) で解析に用いた1巡目データに、新たに得られた2巡目データを追加して再解析したものである。Taniwaki et al. (2024) は1回目間伐に対する林床植生の時系列変化を1時点（1巡目のみ）のデータから推定したものであったが、本稿では、同一地点の2時点のデータを用いることにより、2回目間伐

を含め、間伐に対する林床植生の実際の反応を示した点に新規性がある。この集計結果をみると、1～2巡目調査間に間伐を行った地点では、1回目と2回目のどちらの間伐の場合でも、林床植生の積算被度が有意に増加したことが分かる（図4）。調査開始時には、劣勢木を対象とした間伐によって林床植生が増加するかどうかの情報が乏しかったが、調査を進めるなかで、当初の想定どおり、手入れ不足の人工林で行った水源林整備としての間伐は林床植生

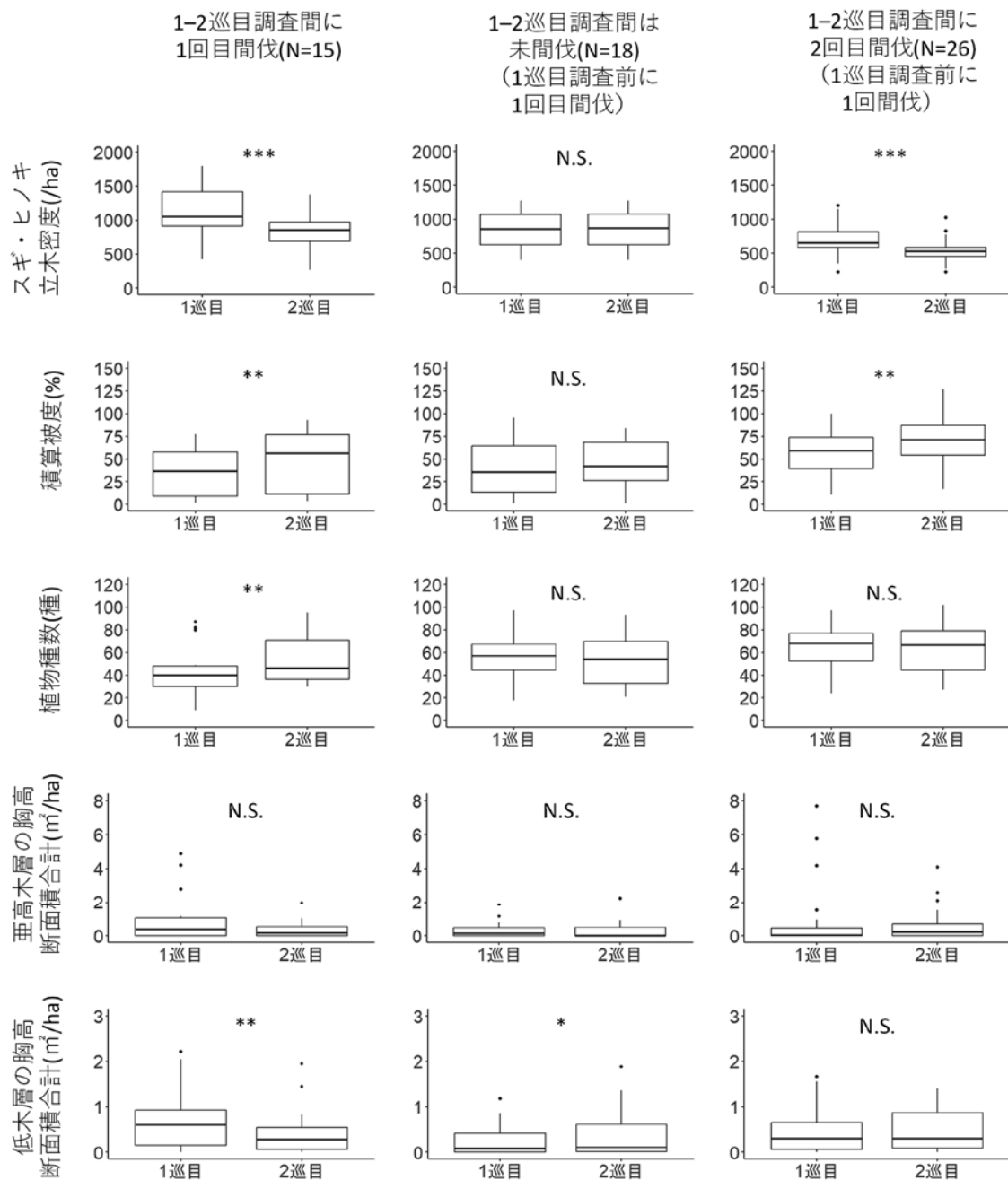


図4 1～2巡目調査間での間伐の有無による立木密度、林床植生の積算被度および植物種数、亜高木層（樹高5～10m）および低木層（樹高1.5～5m）の胸高断面積合計の比較

箱ひげ図は、ひげ下端が最小値、箱下端が第一四分位、箱内横線が中央値、箱上端が第三四分位、ひげ上端が最大値を示し、黒丸は外れ値を示す。***は0.1%水準、**は1%水準、*は5%水準で有意差があることを示す（ウィルコクソンの符号順位検定）。

を増加させ、水源かん養機能の基盤となる土壌保全機能の向上に資することを期待できる結果が得られた。1回目の間伐は、植物の種多様性（種数）を有意に増加させることも分かった（図4）。植物種数への同様の効果が2回目間伐でみられなかった（図4）要因は不明であり、今後検討する必要がある。

一方、材分構造については、2巡目の調査時点では、間伐による階層構造の発達の様子がみられているとはまだ言えない。すなわち、亜高木層（樹高5～10m）の資源量を指標する胸高断面積合計には、1回目と2回目のいずれの間伐でも、有意な変動はみられていない（図4）。一方、低木層（樹高1.5～5m）の胸高断面積合計は、1回目の間伐直後に有意に減少しており（図4）、この減少は間伐作業時に作業員の安全確保上不可欠となる除伐によるものと考えられた。ただし、低木層の資源量は1巡目と2巡目の間に間伐を行わないと有意に増加する（図4）ので、短期的には除伐の影響で減少しても、目標とする立木密度に到達して間伐が完了し、その後の時間経過に応じて増加することが考えられる。中長期的に針広混交林への誘導を目指すにあたっては、高木種の更新状況を評価する必要があることから、今後の階層構造や更新木調査では、高木種、小高木種、低木種（神奈川県植物誌調査会2018）のように、生活型によるグループ分けを行い解析する必要がある（表1、後述の機能群）。

（2）動物

ア．解析方法の検討

動物については、当初は委託で得られた種数や個体数のデータ（例えば昆虫類ではスウィーピングやピットホールトラップで捕獲されたすべての分類群の種数や個体数の合計値）をそのまま解析に用いていたが、間伐や林床植生との関係を見出すことがほとんどできなかった。また、動物間での食物連鎖を想定した解析も試みたが、広域多地点での調査であるが故に、各分類群の調査期間が限定されるうえに調査時期が一致しておらず、どの種がどの種を捕食しているかの具体的な情報がなかったこともあり、動物間の関係を見いだすことはできなかった。加えて、群集構造を解析しようとしても、種構成の地域差の影響が大きく、林内環境の変化への応答がみられる種の抽出も困難であった。このため、解析では

一旦行き詰まりを見せたが、2019年度（令和元年度）に実施した大学への総合評価研究委託において、各分類群は、似たような生態的特性を有した複数の種群、すなわち機能群に分けられ、機能群が異なると、林床植生等の林内環境への応答も異なることが指摘された。そこで、既往文献を参考に、種ごとの生態情報を収集整理したうえで、各分類群をさらに機能群にグループ分けすることとした。

イ．機能群へのグループ分け

各分類群の機能群へのグループ分けの考え方は次のとおりである。

ササラダニの機能群としては、分類体系で分けられたM群（接門類Macropylina）、G群（離門類無翼類Brachypylna: Gymnonta）、P群（離門類有翼類Brachypylna: Poronota）（青木1983）を用いた（表1）。森林土壌では、G群の種数割合が高木林の存在しない環境より高くなることが知られている（青木1983）。

ミミズについては、林床植生との関係が指摘されている（例えば関・小金澤2010）が、生態系調査で得られた種の大部分が既知種に同定されず、種ごとの生態情報が不明であったため、機能群に分けずに用いることとした（表1）。得られたミミズ標本が精査された結果、2種は新種であることが判明し、1種は国内初記録として報告された（Ito et al. 2023）。

植食性甲虫（ハムシ・ゾウムシ）の機能群としては、樹木食型と草本・つる食型を用いた（表1）。この分け方は、樹木食型が林内の各階層に分布する広葉樹を利用し、林床より樹冠に多く生息するのに対して、草本・つる食型の生息場所はほとんど林床に限られる（Charles and Basset 2005）ことを考慮したものである。

地表性甲虫（オサムシ）の機能群としては、体サイズが大きい種のほうが生息環境の改変に対する感受性が高い（Fujita et al. 2008; Iida et al. 2016）ことを踏まえて、大型（体長20mm以上）、中型（10mm以上20mm未満）、小型（10mm未満）を用いた（表1）。

アリの機能群については、植生の景観に対応した種群（寺山1997; Maeto and Sato 2004; 江原ら2013）として知られる森林型（高木が優占あるいは散生する環境に生息する種）、生息地ジェネラリス

ト型（高木が優占する環境から高木を欠く開放的な環境まで広く生息する種）、開放地型（高木を欠く開放的な環境に生息する種）を用いた（表 1）。

鳥類については、営巣型や採食型により植生の改変への反応が異なることが知られている（奥田ら 2012、2013）が、繁殖期の行動圏（なわばり）を含めた営巣環境を評価するには、25m × 25m の調査区画では面積が小さ過ぎることから、機能群としては営巣型ではなく、採食型を用いることとした。採食型は、奥田ら（2012、2013）を参考に、樹冠採食型、樹幹採食型、低木採食型、地上採食型、フライキャッチ型に分けられた（表 1）。

小型哺乳類（野ネズミ）については、捕獲されるのはほとんどがアカネズミとヒメネズミであり、これら 2 種とも林床植生（ササ）が多いほうが生息数が多くなる（田中ら 2006）ことから、基本的には一つの機能群として種を区別せず扱うが、必要に応じて森林環境への異なる選好性（Nishikata 1981）を考慮することとした。あわせて、間伐による林床植生の増加が小型哺乳類（野ネズミ）の食物資源に及ぼす影響を検証するため、トラップ内で排泄された糞の DNA 分析を行い、どのような植物種を食物として利用しているのかを調べている（表 1）。

中大型哺乳類については、自動撮影カメラによって撮影された動物各種を機能群としてグループ分けした既往研究がないため、種ごとで扱うこととした。林床植生との関係を解析するには、撮影頻度が高く、地域差の影響が小さい種を対象とする必要があったことから、これまでの撮影状況（大石ら 2023）を参考として、タヌキ、イノシシ、ニホンノウサギ、ハクビシン、ニホンテンを用いることとした（表 1）。ニホンジカについては、撮影頻度は最も高いが、地域差が極めて大きく（大石ら 2023）、林床植生が増加したことに対する反応を検出することは困難であった。

ウ. 機能群の解析—昆虫類 1 巡目調査の事例—

動物では、上述のように機能群に分けたとしても、種数や個体数を植生のように時系列（1 巡目と 2 巡目）で比較しても、間伐の効果を適切に検出することは難しかった。この原因としては、限られた期間の調査しか行っていないが故に、年による生息数や発生時期等の違い、あるいは調査期間中の気象条件の違いに左右された可能性がある。一方、林床植生

については、間伐によって増加することが確認されていることから、動物については時系列でなくとも、時点ごとに林床植生の多寡と動物の生息状況との関係を解析することで、間接的ではあるものの、間伐—林床植生—動物の一連の関係を検証することが可能と考えられた。このような 3 つ以上の変数間の関係を一体的に評価することができる解析手法を模索し、構造方程式モデリングによる解析を昆虫類の 1 巡目調査結果を対象として行うこととした（Taniwaki et al. 2024）。1 巡目調査では、①未間伐、② 1 回目の間伐後 1 ～ 3 年経過および③ 4 ～ 8 年経過の地点が選定されていることから、間伐後の時間経過という時間の変化を空間による変化で代用し（クロノシーケンス法）、間伐後にタイムラグをもって増加する林床植生に対する昆虫類の応答を、8 つの機能群の種数に着目して解析した。以下にその概要を解説する。

植食性甲虫（ハムシ・ゾウムシ）では、樹木食型、草本・つる食型とも、間伐後 4 ～ 8 年経過して増加した採食対象となる植物（樹木、草本・つる）の積算被度に応じて種数が増加する有意な経路が示された（図 5）。とくに樹木食型は草本・つる食型より反応が顕著であり、間伐後 4 ～ 8 年経過したことにより種数が増加する有意な経路もみられた（図 5）。このような機能群による反応の違いは、採食対象となる植物の林内での分布様式の違い（Charles and Basset 2005）に起因する可能性がある。筆者は、樹木食型は草本層に加えて亜高木層や低木層にも生息することから、間伐前から調査林分に生息する群集が間伐後の林床植生の増加に反応できるため、主に草本層に生息し調査林分の周辺から飛来して来る必要がある草本・つる型よりも、林床植生における種数が増加しやすいのではないかと考えている。

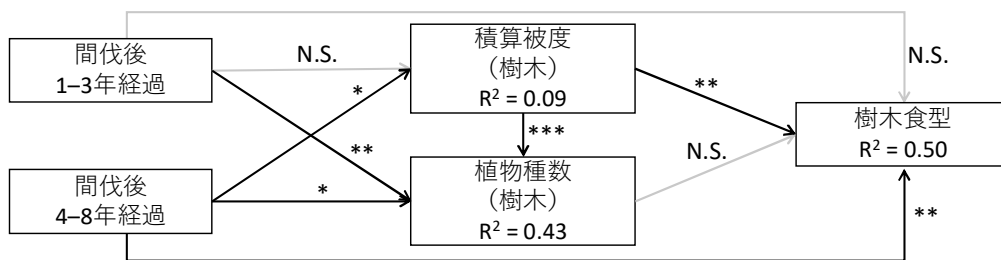
地表性甲虫（オサムシ）では、大型のみで、間伐後 4 ～ 8 年経過して増加した積算被度に応じて種数が増加する有意な経路が示された（図 5）。これらの大型種には、開放地を主な生息場所とする種は含まれていない。森林において分散能力が低い種の生息は、林冠が閉じた状態の比較的湿潤な環境と関連しており（Koivula 2002）、大型で分散能力の低い種は、攪乱の程度が増すにつれて減少する可能性が高く（Rainio and Niemelä 2003）、生息場所や隠れ家として機能する林床植生の減少に伴い減少するとされる（上田ら 2009）。水源林整備としての間伐は、

スギ・ヒノキ植栽木によって成立した森林を維持しながら林床植生を増加させており、大型種を減少させるような攪乱影響を与えることなく、その生息場所を好ましい環境に改善したと考えることができる。

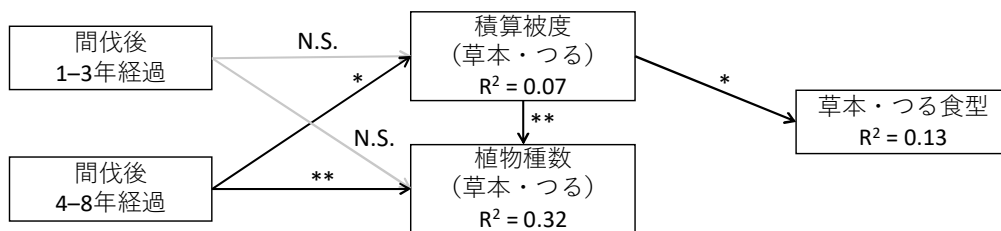
アリでは、生息地ジェネラリスト型のみで、間伐後4～8年経過したことで種数が増加する経路が有

意であり（図5）、何らかの時間的要因〔例えば丸太や切り株が腐朽して営巣場所として利用できるようになるまでの時間（Blüthgen and Feldhaar 2009; Tanaka et al. 2023）など〕が種の増加と関連している可能性が指摘された。また、生息地ジェネラリスト型では、間伐後4～8年経過して増加した積算被度に応じて種数が増加する有意な経路が、

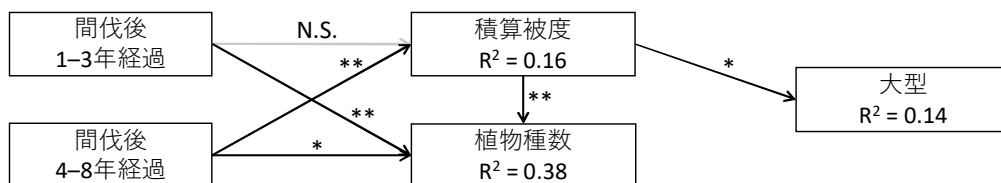
(a) 樹木食型（植食性甲虫）



(b) 草本・つる食型（植食性甲虫）



(c) 大型（地表性甲虫）



(d) 生息地ジェネラリスト型（アリ）

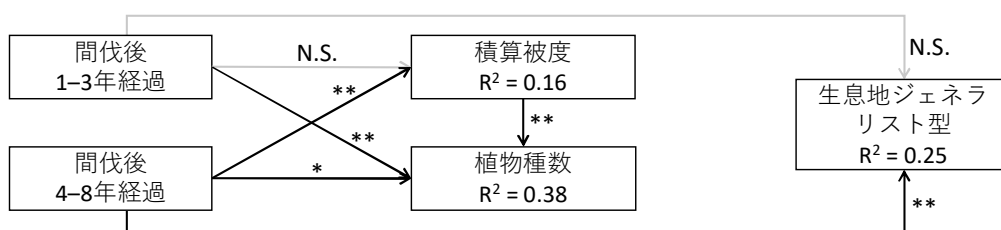


図5 各機能群の構造方程式モデリングにおけるベストモデル

(Journal of Forest Research の許諾を受けて Taniwaki et al. (2024) より抜粋のうえ一部改変)

黒色の矢印は有意な正の相関関係があること、灰色の矢印は正の相関関係に有意差がないこと、***は0.1%水準水準で有意差がないことを示す。ここでは6つの経路パターンのモデルから選択された有意なモデルのなかで、ベストモデルのみを示す。

ベストモデルではないものの有意な他のモデルで示されている (Taniwaki et al. 2024)。間伐を含む森林施業は生息地ジェネラリスト型の移入を促進するとされており (山本ら 1994; Yamauchi and Ogata 1995; Maeto and Sato 2004; Yoshimura 2009; 江原ら 2013)、生態系調査でも同様の結果が得られた。間伐による林床植生 (積算被度) や木質資源の増加は、利用可能な食物資源 (植物だけでなく、無脊椎動物などの動物由来のものも含む) や営巣環境を増加させ、生息地ジェネラリスト型の生息場所を好ましい環境に改善したと考えることができた。アリではまた、間伐や伐採が森林型を減少させ、開放地型を増加させることが知られている (山本ら 1994; Yamauchi and Ogata 1995; Maeto and Sato 2004; Yoshimura 2009; 江原ら 2013) が、同様のことは今回の調査で確認されていない。水源林整備としての間伐は、間伐前から林内に生息する森林型を保全しながら、林外を主な生息地とする開放地型の移入を抑制するのに効果的な手法であると考えられる。

以上の構造方程式モデリングを用いた間伐—林床植生—昆虫類の一体的な解析により、間接的な解析ではあるものの、水源林整備として実施される攪乱影響を抑えた間伐は、地表性甲虫 (オサムシ) やアリにおいて、森林以外を主な生息場所とする種の移入を抑制しながら、林床植生の増加を通じて、また何らかの時間的要因と相まって、林床に生息する種の多様性を時間差をもって増加させる効果があると考えられる結果が得られた。このような昆虫類への間伐の効果は、林床植生への間伐の効果が発揮されている期間 [Tamura and Yamane (2017) の事例では間伐後少なくとも 11 年] であれば、持続的に発揮される可能性がある。

エ. 総合解析に向けた予備解析の状況

以上の解析を参考にしながら、現在は 3 巡目調査までに得られた各分類群・機能群データの総合解析を進めており、解析結果は別途報告する予定であるが、以下に現時点で得られている 1 巡目と 2 巡目データの予備解析の結果概要を紹介する。

各機能群のなかで、1 巡目、2 巡目とも、林床植生の増加に応じて種数あるいは個体数が増加する傾向がみられたのは、上述の樹木食型および草本・つる食型の植食性甲虫 (ハムシ・ゾウムシ)、大型の

地表性甲虫 (オサムシ) および生息地ジェネラリスト型のアリに加えて、ミミズ、地表採食型の鳥類、ニホンノウサギであった (未発表)。また、ササラダニでは調査を実施したのは 1 巡目のみであったが、森林性の指標となる G 群の種数割合の増加と草地性の指標となる P 群の種数割合の減少という異なる応答が 2 つの機能群でみられている (未発表)。小型哺乳類 (野ネズミ) では、1 巡目調査では林床植生との関係は見いだせなかったが、補足調査として、林床植生の状態を考慮して選定した 18 地点で重点的な捕獲調査を行っている (表 1)。このような小型哺乳類 (野ネズミ) の補足調査により、スギ・ヒノキ人工林では、林床植生を食物資源として利用する頻度が広葉樹林より高く、林床植生が増加すると、生息数が増加することに加えて多様な植物種を利用できるようになることを示唆する結果が得られている (大石 2021、未発表)。以上のように、スギ・ヒノキ人工林において林床植生との結びつきが強い機能群が徐々に明らかとなってきた。

そのほか、鳥類では、スギ・ヒノキ人工林を利用する確率が高い種が 12 種いることが指摘された (遠藤ら 2020)。また、中大型哺乳類では種構成の地域差が示され、とくに箱根地域では 1 巡目より 2 巡目のほうがニホンジカの撮影頻度が高く、定着状況の指標となる雌の比率も高くなり、ニホンジカの定着が急速に進んだことが示唆されている (大石ら 2023)。なお、キーストーン種とされたニホンジカについては、県民会議から植生—土壌—ニホンジカ—森林整備等の関連性を把握することが提案されており、この一連の関連性、とくにニホンジカの採食影響下で、林床植生に対する間伐の効果がどのように発揮されるかについて検証を進める必要がある。

VI. おわりに

生態系調査は、水源環境保全・再生施策の多面的な効果を把握し、県民にとって分かりやすい成果を得るために、県民会議からの提案を受けて、生き物の視点を盛り込んだ新たな施策評価の枠組みとして実施している。これまでの調査で得られたデータは膨大であり、まだ解析の途中段階ではあるが、現時点での昆虫類を中心とした解析からは、水源協定林において 500 ~ 600 本/ha の立木密度を目指して段階的に行う間伐が、水源かん養機能の向上だけで

なく、生物多様性機能の向上にも寄与すると考えて差し支えない結果が得られている。とくに昆虫類の地表性甲虫（オサムシ）とアリにおいて1回目の間伐が、開放地型の移入を抑制しつつ、森林を生息場所とする種群を保全しながら、それら種群の多様性を向上させたことは、水源林整備としての間伐が、人工林生態系への攪乱影響を抑えながら、生物多様性機能を向上させる特徴を持つ手法であることを示唆している。昆虫類以外の分類群でも同様のことが言えるかどうかを検証する必要がある。また、その後間伐の回数を重ね、段階的に立木密度を減少させると、林床植生への間伐の効果が累積的かつ一定期間は持続的に発揮されることが期待されるが、同時に攪乱影響も増大することが予想されるので、そのような状況のなかで、各機能群がどのように反応するかを、3巡目までのデータ解析を進めて検証する必要がある。

VII. 謝辞

生態系調査の現地調査は、アジア航測株式会社、株式会社地域環境計画、株式会社CTI アウラ（現CTI リード）、株式会社地域開発コンサルタンツ、新日本環境調査株式会社日本工営都市空間株式会社、一般財団法人自然環境研究センターおよび中外テクス株式会社への調査業務委託として、また総合評価研究は東京農工大学への研究委託として実施したものである。多くの有識者の方々に評価委員や調査指導をお願いした。委託の発注業務は歴代の研究員が担当した。各位の多大なるご尽力に感謝申し上げます。

VIII. 引用文献

- 青木淳一（1983）三つの分類群の種数および個体数の割合によるササラダニ群集の比較（MGP 分析）．横浜国立大学環境科学研究センター紀要 10(1) : 171-176.
- Blüthgen N, Feldhaar H (2009) Food and shelter: how resources influence ant ecology. In: Lach L, Parr C Abbott K, editors. Ant ecology. Oxford: Oxford University Press; pp. 115-136.
- Charles E, Basset Y (2005) Vertical stratification of leaf-beetle assemblages (Coleoptera: Chrysomelidae) in two forest types in Panama. Journal of Tropical Ecology 21(3): 329-336.
- 江原秀宗・石井弘明・前藤 薫（2013）スギ列状間伐林における下刈りに対するアリ群集構造の反応．日本森林学会誌 95(2) : 95-100.
- 遠藤幸子・成瀬真理生・近藤博史・田村淳（2020）スギ・ヒノキ人工林を利用する確率の高い鳥類種の推定．日本森林学会誌 102(3) : 147-156.
- Fujita A, Maeto K, Kagawa Y, Ito N (2008) Effects of forest fragmentation on species richness and composition of ground beetles (Coleoptera: Carabidae and Brachinidae) in urban landscapes. Entomological Science 11(1): 39-48.
- イー・アンド・イーソリューションズ株式会社(2013) 水源環境保全・再生施策に係る森林水循環を考慮した森林生態系効果把握手法等検討業務委託報告書. 119pp + 付属資料 250pp.
- Iida T, Soga M, Koike S (2016) Effects of an increase in population of sika deer on beetle communities in deciduous forests. ZooKey. 625: 67-85.
- 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.
- Ito M, Sakai H, Tamura A (2023) Descriptions of two new species of the genus *Amyntas* (Annelida: Oligochaeta: Megascolecidae) and a new record of *Amyntas righii* Hong & James, 2001 from Kanagawa Prefecture, Central Japan. Edaphologia 112: 9-16.
- 神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課 a : 第 19 回（第 2 期第 11 回）水源環境保全・再生かながわ県民会議審議結果. https://www.pref.kanagawa.jp/docs/pb5/cnt/f7006/kenmin_kaigi/19_kenmin_kekka.html (2025 年 1 月 9 日確認)
- 神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課 b : 水源の森林づくり事業について. <https://www.pref.kanagawa.jp/docs/pb5/suigendukurizigyoku.html> (2025 年 1 月 9 日確認)
- 神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課 c : 水源

- の森林づくり進捗状況（実績）. <https://www.pref.kanagawa.jp/docs/pb5/sintyoku.html> (2025 年 1 月 9 日確認)
- 神奈川県環境農政局緑政部水源環境保全課 (2022) 水源林整備の手引き（第 4 版）. https://www.pref.kanagawa.jp/documents/21846/suigenrinseibi_tebiki_r4_3.pdf (2024 年 12 月 25 日確認)
- 神奈川県植物誌調査会編 (2018) 神奈川県植物誌 2018. xviii+1720+128pp. 神奈川県植物誌調査会, 小田原
- Koivula M (2002) Alternative harvesting methods and boreal carabid beetles (Coleoptera, Carabidae). *Forest Ecology and Management* 167(1-3):103-121.
- Maeto K, Sato S (2004) Impacts of forestry on ant species richness and composition in warm-temperate forests of Japan. *Forest Ecology and Management* 187(2-3):213-223.
- Nishikata S (1981) Habitat preference of *Apodemus speiosus* and *A. argenteus*. *Journal of the Japanese Forestry Society* 63(5):151-155.
- 大石圭太 (2021) 森林生態系に対する水源林整備効果の把握調査—森林性野ネズミを指標として—. 緑の斜面 74:3-4.
- 大石圭太・山根正伸・谷脇 徹・田村 淳 (2023) 神奈川県の水源地整備地における中大型哺乳類の種構成とニホンジカの生息状況. 神奈川県自然環境保全センター報告 17:61-71.
- 奥田 圭・關 義和・小金澤正昭 (2012) 栃木県奥日光地域におけるニホンジカの高密度化による植生変化が鳥類群集に与える影響. *日本森林学会誌* 94(5):236-242.
- 奥田 圭・關 義和・小金澤正昭 (2013) 栃木県奥日光地域における繁殖期の鳥類群集の変遷: 特にニホンジカの高密度化と関連づけて. *保全生態学研究* 18(2):121-129.
- Rainio J, Niemelä J (2003) Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodiversity & Conservation* 12(3):487-506.
- 關 義和・小金澤正昭 (2010) 栃木県奥日光地域の防鹿柵外におけるミミズ類の増加要因—シカによる植生変化の影響—. *日本森林学会誌* 92(5):241-246.
- Tamura A, Yamane M (2017) Response of understory vegetation over 10 years after thinning in an old-growth cedar and cypress plantation overgrazed by sika deer in eastern Japan. *Forest Ecosystems* 4:1-10.
- 田村 淳・山根正伸・武田 潤・久富寛之 (2013) 神奈川県の水源地の施業地においてシカが林床植生に及ぼす影響. 神奈川県自然環境保全センター報告 11:53-60.
- 田中美江・斉藤麻衣子・大井圭志・福田秀志・柴田 叡式 (2006) 大台ヶ原におけるササの繁殖とネズミ類の生息状況—特に防鹿柵の設置と関連づけて—. *日本森林学会誌* 88(5):348-353.
- Tanaka M, Baek S, Tochigi K, Naganuma T, Inagaki A, Dewi BS, Koike S (2023) Conditions affecting ant nesting in stumps in a temperate coniferous planted forest. *Forest Ecology and Management* 537:120976.
- Taniwaki T, Tamura A, Sashimura N, Naruse M, Tochigi K, Komine H, Koike S (2024) Indirect effects of low-impact thinning on insect communities in forest floor of coniferous plantations. *Journal of Forest Research* 29:316-325.
- 寺山 守 (1997) 多様性保護の視点からの環境保全—アリ群集を用いた研究例を中心に—. *生物科学* 49(2):75-83.
- 内山佳美 (2025) 神奈川県による森林の水源地かん養機能評価の試み—水源環境保全・再生施策における事業効果検証のためのモニタリング—. 神奈川県自然環境保全センター報告 19:17-33.
- 上田明良・日野輝明・伊東宏樹 (2009) ニホンジカによるミヤコザサの採食とオサムシ科甲虫の群集構造との関係. *日本森林学会誌* 91(2):111-119.
- 山本哲也・頭山昌郁・中村克典・日鷹一雅・高橋史樹 (1994) スギの天然生林と人工林における林床無脊椎動物相の比較. *Edaphologia* 51:19-32.
- Yamauchi K, Ogata K (1995) Social structure and reproductive systems of tramp versus endemic ants (Hymenoptera: Formicidae) of

the Ryukyu Islands. Pacific Science
49(1):55-68.

Yoshimura M (2009) Impact of secondary forest
management on ant assemblage composition
in the temperate region in Japan. Journal
of insect conservation, 13:563-568.