

原著論文

森林林床火災 5 年後の林床環境の変化と

羽化トラップにより捕獲された土壌無脊椎動物群集の動態

才木道雄<sup>\*1</sup>・鈴木智之<sup>\*2</sup>

Changes in forest floor environment and the dynamics  
of soil invertebrate communities captured  
by emergence trap after 5 years of forest floor fire

Michio SAIKI<sup>\*1</sup>, Satoshi SUZUKI<sup>\*2</sup>

要旨

森林火災から5年経過した被害地の環境調査と土壌無脊椎動物の捕獲調査を行った。被害地ではハエ目、チョウ目、ハチ目など一部の分類群の捕獲数が少なく、林床の高温化などの環境変化が影響を及ぼしているものと推察された。調査の前年に設置された防鹿柵の効果は限定的で、大型哺乳動物を排除すると土壌無脊椎動物の個体数が増加するという単純な結果にはならなかったが、火災による環境変化で負の影響を受けたと思われるハエ目、チョウ目、ハチ目では、柵の設置により個体数減少が抑制されている傾向がみられた。

キーワード：森林火災、土壌無脊椎動物、ハエ目、防鹿柵、林床環境

Abstract

An environmental survey and soil invertebrate trapping study were conducted at a site 5 years after damage caused by a forest fire. The species of certain taxa, such as those in the insect orders Diptera, Lepidoptera, and Hymenoptera, were captured less frequently in the fire-affected areas, which is assumed to reflect the high temperature of the forest floor. The limited effects of deer-exclusion fences, installed in the year prior to the survey, contrasts with our prediction that the populations of soil invertebrates would increase in response to the elimination of large mammals. However, the fences tended to reduce the adverse effects of fire on the abundances of Diptera, Lepidoptera, and Hymenoptera.

**Keywords:** Forest fire, Soil invertebrate, Diptera, Deer-exclusion fence, Forest floor environment

1. はじめに

生態系に与える火の影響の解明は生態学的に重要である。日本とは異なり落雷等により自然発

\*1 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林秩父演習林

The University of Tokyo Chichibu Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

\*2 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林北海道演習林

The University of Tokyo Hokkaido Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

生する火災が多いアメリカでは、火の履歴、可燃物の燃えやすさの評価、火の動態など、様々な成果があげられている（後藤・大谷，1988）。植生の構造や配列を理解するという点だけにとっても火事跡の生態学的研究は重要といえるが、火事を災害としてとらえることが多かった日本では火生態学的研究は盛んとはいいがたい（津田，1995）。近年になって火災や野焼き等の人工的な火入れが植生に与えた影響（五十嵐ら，2001；佐野，2009）や植生回復過程（後藤ら，1989；廣野ら，2001）についての報告があるものの、動物を対象とした報告はきわめて少ない。森林生態系における分解者として火災被害後の森林の回復過程にも重要な役割を果たしていると考えられる土壌無脊椎動物については、被害後の経過年数が異なる森林での比較（頭山ら，1989）や被害初期段階の影響（才木・鈴木，2021；山口ら，2000）を扱った報告がわずかにあるが、同一の被害地を対象として被害地の環境変化に注目した中・長期的な影響を評価した研究はほとんどみあたらない。

才木・鈴木（2021）は、埼玉県秩父市にある東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林秩父演習林（以下、秩父演習林）で2017年に発生した森林火災の被害地とそれに隣接する無被害地を対象に羽化トラップを用いた土壌無脊椎動物の捕獲調査を行い、被害翌年における火災の影響を報告した。被害地ではその後も樹木の枯死が進行するなど環境の変化が著しいことから、被害から5年経過した2022年に被害地の環境調査と土壌無脊椎動物の捕獲調査を行った。また、2021年に調査対象地に防鹿柵が設置されているため、その影響についても検証した。その結果、林床環境の変化に起因すると思われる土壌無脊椎動物への影響がみとめられたので報告する。

## 2. 方法

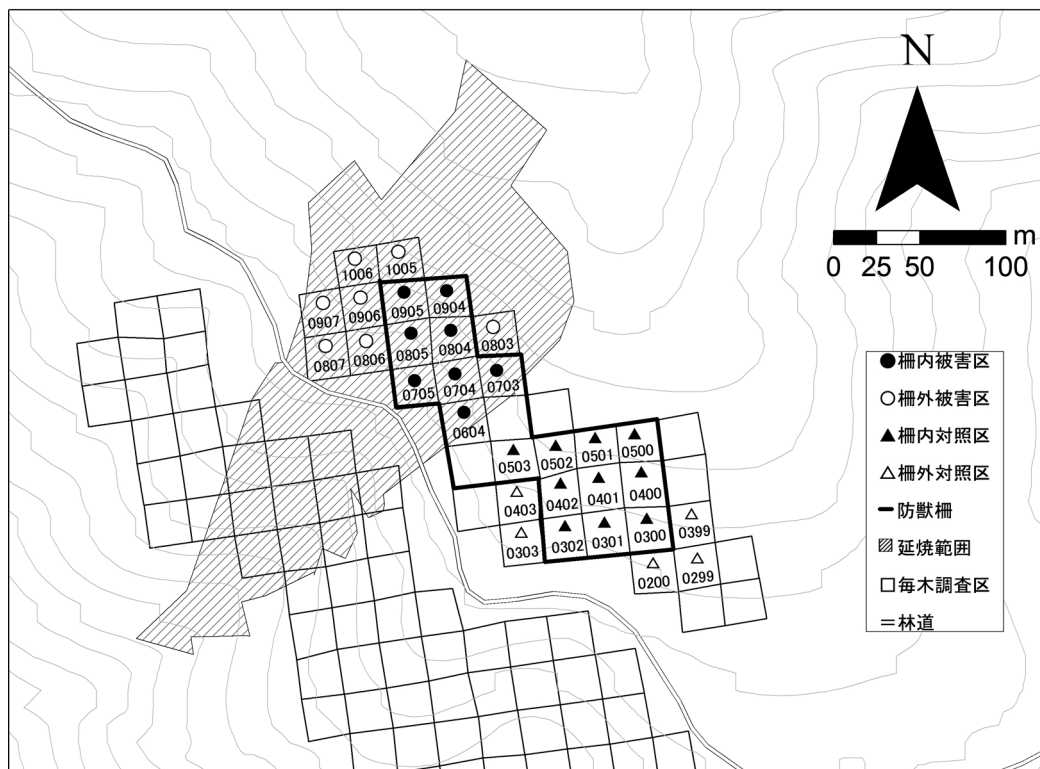
### 2.1 調査地の概要

調査地は埼玉県秩父市にある秩父演習林入川地区の標高約1,260 mのイヌブナ *Fagus japonica*, ツガ *Tsuga sieboldii*, ブナ *F. crenata* が優占する天然林である（北緯35.9392°, 東経138.8017°）。2017年11月21日、調査地では約4.5 haにわたって主に落葉落枝や樹木の地際部に延焼被害をもたらした森林火災が発生した。延焼範囲には太平洋山地帯のイヌブナ、ツガ、ブナ優占林の動態を解明するために設置された大面積プロット（東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林秩父演習林，2012）の毎木調査区が含まれていた。被害翌年の2018年に行った調査では、毎木調査区内の被害地15区画を被害区、等高線方向に隣接する無被害地15区画を対照区としたことから、本報告でも同じ区画を被害区および対照区とした。また、調査地には2021年12月に防鹿柵が設置されたことから、調査は被害区の有無と柵の内外をかけあわせた4処理区（柵内被害区：8区画、柵内対照区：10区画、柵外被害区：7区画、柵外対照区：5区画）に分けて行った（図-1）。

### 2.2 調査方法

被害区と対照区における林内環境の変化を明らかにするため、2018年の調査地点と同じ30地点（才木・鈴木，2021）で林冠空隙率と林床合計被覆率を計測した。ただし、このうち被害区2地点（区画No.0704, 0806）と対照区10地点（区画No.0299, 0200, 0300, 0301, 0303, 0400, 0401, 0500, 0501, 0503）は2022年の調査時に標識杭が消失していたため、2018年の林冠の撮影画像を参考におおよその位置を再現した。なお、被害区の林冠空隙率は2018年以降毎年、林床合計被覆率と対照区の林冠空隙率は2018年と2022年の2回のみ撮影と計測を行った。林冠空

隙率は魚眼レンズで地上から撮影した林冠画像を全天写真解析プログラム (CanopOn2 <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>) を用いて解析し、被害区と対照区での差の有無について統計検定を行った (Welch T test)。解析の際は白色系統の倒木の一部分が空隙と誤認識される傾向にあったため、地面が入らないように解析範囲を調整した。林床合計被覆率は植生とリターによる林床の被覆率で (初ら, 2010)、本研究では撮影した林床画像の 50 cm 四方を対象範囲として画像解析ソフト (GIMP) でゆがみ補正を行った後、目測で被覆率を計測し、被害区と対照区での差の有無について統計検定を行った (Wilcoxon signed-rank test)。また、林床合計被覆率は羽化トラップの設置点でも同様に計測し統計検定を行ったが、対象範囲は羽化トラップの大きさにあわせて 60 cm 四方とした。土壌無脊椎動物の捕獲は羽化トラップ (60 cm×60 cm×60 cm) を用いて行った。トラップは 4 処理区の任意の地点に二つずつ設置し、2 週間ごとにトラップ内容物を回収した後、それぞれの処理区の中で毎回異なるように場所を変えて再設置を繰り返した (反復回数 10 回)。捕獲期間は 2022 年 5 月～2022 年 10 月で、捕獲した土壌無脊椎動物は目レベルで分類してエタノール標本にした。ただし、土壌から羽化する個体数が多いことから羽化数を論ずるうえで重要な分類群と考えられるハエ目については科レベルで分類した。非飛翔性を除く土壌無脊椎動物への火災被害の影響を検証するため、被害の有無と回収日を固定効果、トラップをランダム効果として回収日ごとの捕獲数を一般化線形混合モデル (ポアソン分布を仮定) で解析した。ま



図－1. 調査地。数字は毎木調査区の区画番号を示す。

Fig.1. Survey site. The number denotes the parcel number.

た、柵の設置に伴う被害と柵の交互作用を検証するため、被害の有無と柵の有無、被害の有無と柵の有無の交互作用、回収日を固定効果、トラップをランダム効果として回収日ごとの捕獲個体数を一般化線形混合モデル（ポアソン分布を仮定）で解析した。交互作用が有意であった分類群は柵内と柵外にわけてそれぞれ被害の影響を検証した。固定効果については、各パラメータが0から有意に乖離しているかどうかをWald検定で検定した。なお、トラップの転倒や破損により内容物が回収できなかった四つ分は解析対象から除外した（いずれも8月12日～8月25日設置分で柵内被害区二つと柵内対照区および柵外対照区の各一つ）。統計解析には、R version 3.5.1 (R Core Team, 2018) とその lme4 パッケージを使用した。また、羽化の時期と環境変化の影響を考察するため、ハエ目のうち捕獲数が100個体を越えた科については回収日ごとに捕獲数を集計し、時期的な変化を明らかにした。

### 3. 結果

#### 3.1 林冠空隙率と林床合計被覆率

被害区の林冠空隙率は2019年には低下した地点がみられたものの2020年には1地点を除いて増加傾向に転じ（図-2）、2022年には5.7～49.4%となった。2022年における対照区の林冠空隙率は2.4～13.6%であり、被害区とは統計的に有意な差がみとめられた（Welch T test,  $P < 0.01$ ）。延焼により2018年には林床に堆積した落葉が激減していた被害区では落葉落枝や倒木が新たに供給された。そのため、林床合計被覆率は被害区が3～100%、対照区が7～100%（平均値±標準偏差はそれぞれ  $52.2 \pm 31.2\%$ ,  $71.6 \pm 29.8\%$ ）で有意な差はなかった（Wilcoxon signed-rank

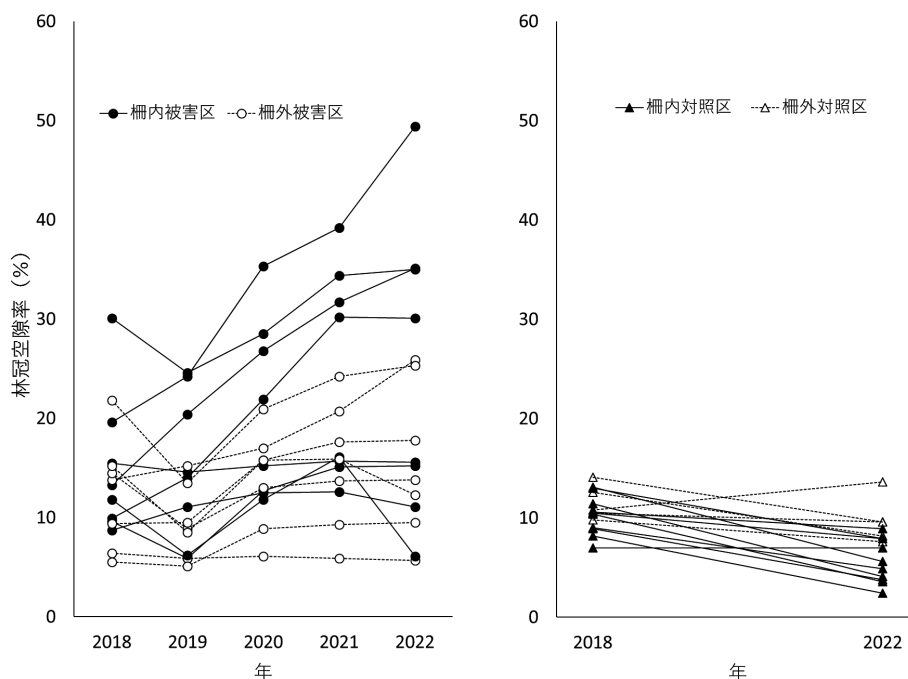


図-2. 林冠空隙率の経年変化

Fig.2. Annual change in canopy openness

test,  $P=0.07$ )。ただし、被害区では落葉等に覆われずに裸地化している部分も多くみられ、実際に羽化トラップを設置した地点の林床合計被覆率は被害区が23~100%, 対照区が61~100%で、有意な差がみとめられた (Wilcoxon signed-rank test,  $P<0.01$ )。

### 3.2 土壌無脊椎動物捕獲数

羽化トラップで捕獲された非飛翔性を除く土壌無脊椎動物は、被害区が12目7,358個体、対照区が12目10,780個体だった (表-1)。このうち被害区に比べて対照区の捕獲数が多かったのはハエ目 ( $P<0.001$ )、チョウ目 ( $P<0.001$ )、ハチ目 ( $P<0.001$ )、反対に被害区の捕獲数が多かったのはハサミムシ目 ( $P<0.001$ )、バッタ目 ( $P<0.05$ )、コウチュウ目 ( $P<0.001$ ) で、それ以外の分類群は有意な差はみとめられなかった (表-1)。被害の影響と柵の効果の交互作用は、ハエ目 ( $P<0.001$ )、チョウ目 ( $P<0.001$ )、ハチ目 ( $P<0.001$ ) では正の影響が、アミメカゲロウ目 ( $P<0.05$ ) とコウチュウ目 ( $P<0.05$ ) では負の影響がみとめられた (表-1)。柵内ではアミメカゲロウ目 ( $P<0.05$ )、ハエ目 ( $P<0.001$ )、ハチ目 ( $P<0.05$ ) は被害区よりも対照区で捕獲数が多かった (表-1)。柵外ではコウチュウ目 ( $P<0.001$ ) は対照区よりも被害区で捕獲数が多く、ハエ目 ( $P<0.001$ )、チョウ目 ( $P<0.001$ )、ハチ目 ( $P<0.001$ ) は被害区よりも対照区で捕獲数が多かった (表-1)。なお、柵外におけるアミメカゲロウ目、柵内におけるコウチュウ目とチョウ目は被害の影響による捕獲数に有意な差はみとめられなかった (表-1)。

捕獲された土壌無脊椎動物のうち最も多かったのはハエ目で、柵内被害区が21科2,637個体、柵内対照区が23科3,706個体、柵外被害区が29科1,766個体、柵外対照区が24科3,822個体だった (表-2)。捕獲された非飛翔性を除く土壌無脊椎動物に占めるハエ目の割合は柵内被害区が64.0%, 柵内対照区が69.6%, 柵外被害区が54.5%, 柵外対照区が70.1%だった。被害区に比べて対照区の捕獲数が多かったのはナミキノコバエ科 ( $P<0.001$ )、クロバネキノコバエ科 ( $P<0.001$ )、タマバエ科 ( $P<0.001$ )、チョウバエ科 ( $P<0.001$ )、ヌカカ科 ( $P<0.001$ )、ユスリカ科 ( $P<0.001$ )、シギアブ科 ( $P<0.05$ )、オドリバエ科 ( $P<0.001$ )、シマバエ科 ( $P<0.001$ )、反対に被害区の捕獲数が多かったのはツノキノコバエ科 ( $P<0.05$ )、セダカバエ科 ( $P<0.001$ )、ノミバエ科 ( $P<0.001$ )、キモグリバエ科 ( $P<0.05$ )、イエバエ科 ( $P<0.001$ ) で、それ以外の分類群は有意な差はみとめられなかった (表-2)。被害の影響と柵の効果の交互作用は、ヒメガガンボ科 ( $P<0.001$ )、ツノキノコバエ科 ( $P<0.01$ )、クロバネキノコバエ科 ( $P<0.001$ )、ヌカカ科 ( $P<0.001$ )、ユスリカ科 ( $P<0.001$ )、ノミバエ科 ( $P<0.001$ )、シマバエ科 ( $P<0.001$ ) では正の影響が、オドリバエ科 ( $P<0.001$ ) では負の影響がみとめられた。捕獲数が100個体を超えた7科の捕獲数の時期的な変化は概ね3タイプに分けられた (図-3)。ノミバエ科は7月初旬~中旬にかけて発生数が多く、8月に減少したものの9月になって再び増加した。タマバエ科、ユスリカ科、オドリバエ科は5月中旬~下旬にかけて発生数が多く、6月に減少したものの、6月下旬~7月上旬にかけて再び微増した。ナミキノコバエ科、クロバネキノコバエ科、ヌカカ科は5月中旬~6月中旬、6月下旬~7月中旬、8月下旬~9月中旬にかけて発生数が多かった (図-3)。

## 4. 考察

2018年に行った調査では、火による直接的な影響と落葉落枝や腐朽木が消失したことによる間接的な影響により、被害区ではハエ目、チョウ目、ハチ目の捕獲数が少なかった (才木・鈴木, 2021)。これらの分類群は2022年でも捕獲数が少なく (表-1)、火災被害から5年経過後も負の



表-1. 羽化トラップで捕獲された土壌無脊椎動物  
Table 1. Number of soil invertebrates captured per emergence trap

	被害区合計	対照区合計	(柵内被害区)	(柵内対照区)	(柵外被害区)	(柵外対照区)	被害の効果 <sup>1</sup>	柵の効果 <sup>2</sup>	交互作用 <sup>3</sup>
カワゲラ目	3	0	(1)	(0)	(2)	(0)	ns	ns	ns
ハサミムシ目	<b>105</b>	61	(68)	(31)	(37)	(30)	ns	ns	ns
ナナフシ目	5	2	(5)	(0)	(0)	(2)	ns	ns	ns
バッタ目	<b>37</b>	18	(21)	(6)	(16)	(12)	ns	ns	ns
カジリムシ目	35	50	(15)	(28)	(20)	(22)	ns	ns	ns
アザミウマ目	43	30	(14)	(11)	(29)	(19)	ns	ns	ns
カメムシ目	93	91	(47)	(57)	(46)	(34)	ns	+	ns
アミメカゲロウ目	8	16	(2)	(13)	(6)	(3)	ns	+	-
コウチュウ目	<b>598</b>	437	(220)	(197)	(378)	(240)	+	-	-
シリアゲムシ目	0	1	(0)	(1)	(0)	(0)	ns	ns	ns
ハエ目	4403	<b>7528</b>	(2637)	(3706)	(1766)	(3822)	-	ns	+
チョウ目	33	<b>68</b>	(28)	(29)	(5)	(39)	-	ns	+
ハチ目	1995	<b>2478</b>	(1061)	(1246)	(934)	(1232)	-	ns	+
合計	7358	10780	(4119)	(5325)	(3239)	(5455)			

\*1, \*2, \*3は被害の有無と柵の有無、被害の有無と柵の有無の交互作用を固定効果とした一般化線形混合モデルの解析結果

\*1：+は被害なしに比べて被害ありの正の影響，-は負の影響，nsは5%水準有意差なし

\*2：+は柵なしに比べて柵ありの正の影響，-は負の影響，nsは5%水準有意差なし

\*3：+は被害ありと柵ありに正の影響，-は負の影響，nsは5%水準有意差なし

被害区と対照区の間有意差がみとめられた場合は数値の大きなほうを太字とした

表-2. 羽化トラップで捕獲されたハエ目

Table 2. Number of Diptera captured per emergence trap

	被害区合計	対照区合計	(柵内被害区)	(柵内対照区)	(柵外被害区)	(柵外対照区)	被害の効果 <sup>1)</sup>	柵の効果 <sup>2)</sup>	交互作用 <sup>3)</sup>
ヒメガガンボ科	31	19	(27)	(4)	(4)	(15)	—	—	+
ガガンボ科	0	1	(0)	(0)	(0)	(1)	ns	ns	ns
ケツメカ科	1	1	(0)	(0)	(1)	(1)	ns	ns	ns
ツノキノコバエ科	19	8	(16)	(1)	(3)	(7)	ns	ns	+
ナミキノコバエ科	78	260	(51)	(160)	(27)	(100)	—	+	ns
クロバネキノコバエ科	1594	2361	(861)	(1026)	(733)	(1335)	—	—	+
タマバエ科	212	336	(122)	(201)	(90)	(135)	—	+	ns
チョウバエ科	6	56	(4)	(42)	(2)	(14)	—	+	ns
ニセケバエ科	10	5	(3)	(1)	(7)	(4)	ns	ns	ns
ヌカカ科	397	790	(240)	(306)	(157)	(484)	—	—	+
ユスリカ科	1318	3218	(934)	(1748)	(384)	(1470)	—	+	+
キアブモドキ科	2	0	(0)	(0)	(2)	(0)	ns	ns	ns
シギアブ科	2	10	(0)	(7)	(2)	(3)	ns	ns	ns
オドリバエ科	49	75	(15)	(57)	(34)	(18)	+	+	—
セダカバエ科	58	27	(34)	(17)	(24)	(10)	+	ns	ns
アシナガバエ科	31	35	(8)	(13)	(23)	(22)	ns	ns	ns
ヤリバエ科	2	1	(1)	(1)	(1)	(0)	ns	ns	ns
ノミバエ科	462	222	(263)	(71)	(199)	(151)	ns	—	+
ハナアブ科	1	1	(0)	(0)	(1)	(1)	ns	ns	ns
アタマアブ科	0	2	(0)	(0)	(0)	(2)	ns	ns	ns
ミバエ科	0	1	(0)	(1)	(0)	(0)	ns	ns	ns
シマバエ科	27	58	(24)	(28)	(3)	(30)	—	ns	+
ヒメコバエ科	1	0	(1)	(0)	(0)	(0)	ns	ns	ns
ハナホソバエ科	0	1	(0)	(0)	(0)	(1)	ns	ns	ns
キモグリバエ科	19	7	(9)	(6)	(10)	(1)	+	ns	ns
トゲハネバエ科	1	0	(0)	(0)	(1)	(0)	ns	ns	ns
フンコバエ科	7	3	(3)	(1)	(4)	(2)	ns	ns	ns
ショウジョウバエ科	11	5	(4)	(5)	(7)	(0)	ns	ns	ns
ホソショウジョウバエ科	1	0	(0)	(0)	(1)	(0)	ns	ns	ns
ミギワバエ科	1	0	(0)	(0)	(1)	(0)	ns	ns	ns
ヒメイエバエ科	0	2	(0)	(2)	(0)	(0)	ns	ns	ns
イエバエ科	53	18	(13)	(5)	(40)	(13)	+	ns	ns
クロバエ科	3	0	(0)	(0)	(3)	(0)	ns	ns	ns
ニクバエ科	1	0	(0)	(0)	(1)	(0)	ns	ns	ns
ヤドリバエ科	5	5	(4)	(3)	(1)	(2)	ns	ns	ns
	4403	7528	(2637)	(3706)	(1766)	(3822)			

\*1, \*2, \*3は被害の有無と柵の有無、被害の有無と柵の有無の交互作用を固定効果とした一般化線形混合モデルの解析結果

\*1: +は被害なしに比べて被害ありの正の影響, -は負の影響, nsは5%水準有意差なし

\*2: +は柵なしに比べて柵ありの正の影響, -は負の影響, nsは5%水準有意差なし

\*3: +は被害ありと柵ありに正の影響, -は負の影響, nsは5%水準有意差なし

被害区と対照区の間有意差がみとめられた場合は数値の大きなほうを太字とした

影響を受けていることが示唆された。

ハエ目は土壌から羽化する個体数が非常に多いことが知られている。例えば、牡鹿半島の落葉樹林では羽化トラップで捕獲される昆虫に占めるハエ目の割合が初夏に 86.8%で秋に 88.8% (Shimazaki and Miyashita, 2000), 横浜市のスダジイ優占林では捕獲された全有翅昆虫に占めるハエ目の割合が 88% (須島・伊藤, 2005) にも達するという報告がある。本調査地では非飛翔性を除いた土壌無脊椎動物に占めるハエ目の割合は、2018 年で被害区が 61.7%, 対照区が 69.1% (才木・鈴木, 2021), 2022 年も被害区が約 60%, 対照区が約 70%で先行研究と比べると全体的に低く、特に対照区に比べて被害区で低い傾向にあった。2018 年に行った調査で捕獲数が 50 個体を超えたナミキノコバエ科、クロバネキノコバエ科、タマバエ科、ヌカカ科、ユスリ

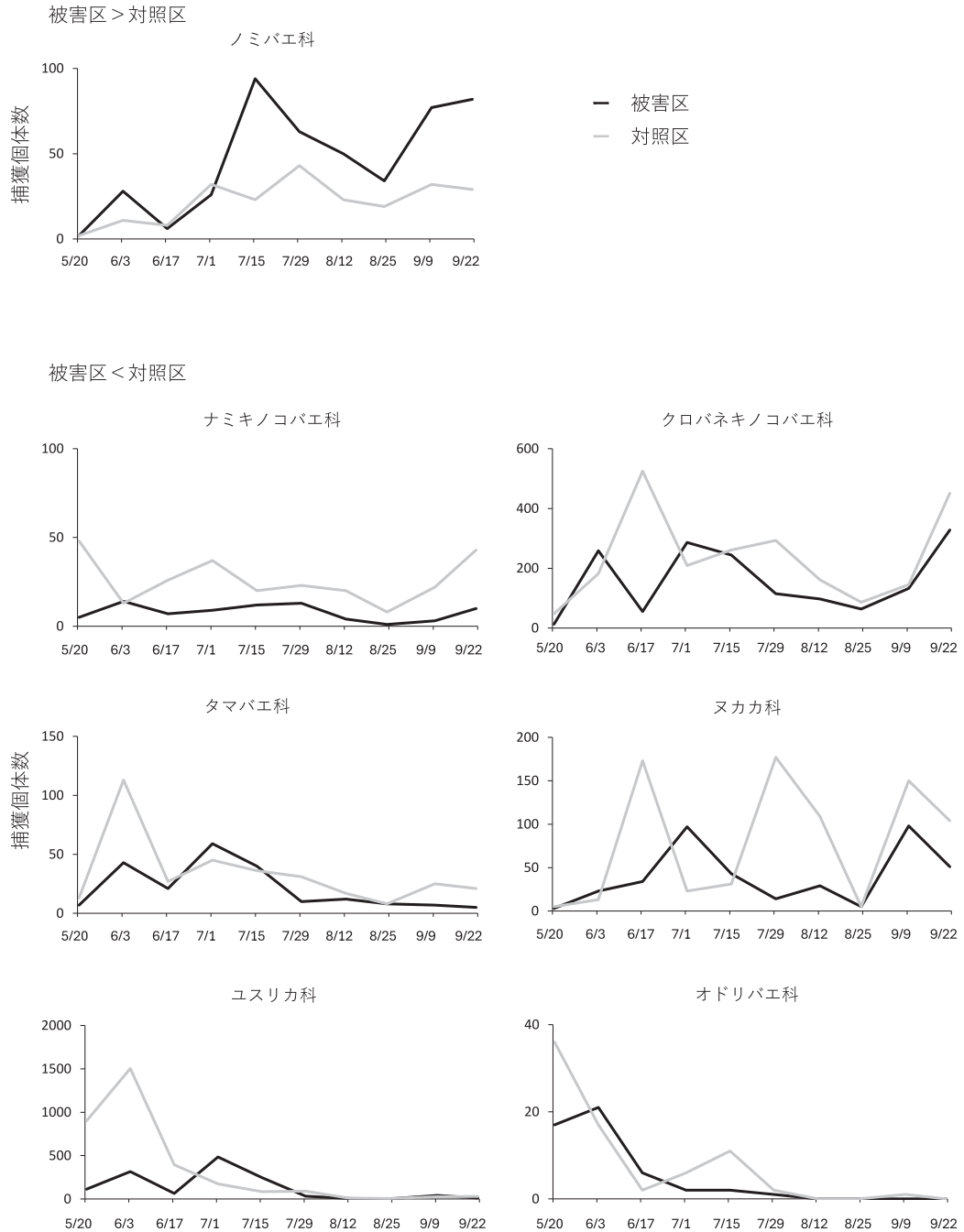


図-3. 主要なハエ目の羽化消長

Fig.3. Emergence patterns of major dipteran species



カ科、オドリバエ科、ノミバエ科は全て被害区での捕獲数が少なかったが、これらの分類群のうちノミバエ科を除く6科は2022年でも被害区での捕獲数が少なかった(表-2)。その他の科でも対照区に比べて被害区での捕獲数が少ない分類群が多くみられることから、ハエ目では火災被害から5年が経過しても負の影響を受けている分類群が多かったものと考えられる。

被害区では火災以前の2014年時点で977本の生存木が確認されていたが(原口ら, 2019), 火災被害から約4年が経過した2021年9月にはそのうちの44.1%にあたる431本が枯死した(秩父演習林未公表データ)。このような樹木の枯死の進行は被害区の林内環境に著しい変化をもたらしたと考えられる。2018年における被害区の林冠空隙率は5.5~30.1%で対照区と有意な差はなかったが(才木・鈴木, 2021), 2020年以降は1地点を除いて増加傾向に転じ(図-2), 2022年には対照区と有意な差がみとめられた。コナラ林, ブナ林, 造林予定の開放地において微気候の観測を行った橋詰ら(1987)は, 夏季の林内における地表面温度の最高温度が27~28℃だったのに対し, 開放地では56.6℃を記録し, 平均温度でも梅雨期を除いて開放地が最も高かったことを報告している。ハエ目への高温の影響は多くの研究事例があり, 例えば, 飼育下のオオチョウバエ(森原・安江, 1981)や菌食性のタマバエ(古川ら, 2023)では温度上昇によって発育が促進されるものの, 高温になりすぎると発育遅延, 幼虫や蛹の死亡等の高温障害が生じることが知られている。また, 一般に厚く堆積した落葉層はハエ目の生息に適しており, 例えばマツに甚大な被害をもたらすマツパノタマバエは林床に堆積した落葉の除去管理を行うことで被害率が低減することが知られている(岸ら, 1995)。本調査地でも林冠空隙率の高かった被害区では夏季にかなりの高温条件下にさらされたものと推察され, さらに被害区の羽化トラップ設置点では林床が落葉等により十分に覆われているとはいえない状態だったことから, このような林床環境の変化がハエ目など一部の土壤無脊椎動物に負の影響を及ぼしたものと考えられる。

ハエ目の主要な分類群の捕獲数の時期的な変化に注目すると(図-3), 5~6月に対照区での捕獲数が増加するナミキノコバエ科, クロバネキノコバエ科, タマバエ科, ヌスカカ科, ユスリカ科, オドリバエ科では被害区での捕獲数が少なかった(表-2)ことから, 林床環境の変化は主に春~初夏に発生数が増加する分類群に対して特に大きく影響したものと思われる。ただし, 7月以降に捕獲数が増加するノミバエ科(図-3)は2018年に被害区での捕獲数が少なかったものの2022年には被害区での捕獲数が多くなった(表-2)。また, 柵外被害区は捕獲科数が最も多く, 捕獲数はわずかながらもキアブモドキ科, トゲハネバエ科, ホソショウジョウバエ科, ミギワバエ科, クロバエ科, ニクバエ科は柵外被害区でしか捕獲されなかった(表-2)。このように, 一部の分類群では落葉落枝による林床の被覆率の低下や地表面温度の高温化に対して正の影響を受けている可能性が示唆された。

大型哺乳類は土壌の踏み固めにより土壌の物理性を改変する(Binkley *et al.*, 2003)。そのため, 防鹿柵により大型哺乳類が排除された柵内よりも, 柵外の土壌硬度は高く, リターの堆積が少なくなることが知られている(金子ら, 2020)。また, 防鹿柵の設置により柵内ではリターや土砂の流亡が抑制され, 土壌表層の安定化がはかられる(塚越ら, 2012)。防鹿柵の設置に伴う柵内のこうした環境変化は土壤無脊椎動物に正の効果を及ぼすと考えられている。例えば, シカの生息密度が高い地域では, 設置から4年以上経過した防鹿柵内では低下した土壤無脊椎動物の生息密度が回復すること(伊藤ら, 2007), 樹木の伐採により土壤無脊椎動物の個体数が減少するものの防鹿柵の設置により個体数減少が抑制されること(才木ら, 2010)が知られている。本研究では, 目レベルではカメムシ目とアミメカゲロウ目(表-1), ハエ目ではナミキノコバエ科, タ

マバエ科、チョウバエ科、ユスリカ科、オドリバエ科（表-2）で対照区における柵の正の効果が検出され、これらは先行研究で指摘されているような要因によって個体数が増えたと考えられる。一方、被害区での捕獲数が少なく火災による負の影響がみとめられたハエ目、チョウ目、ハチ目は被害の影響と柵の效果に正の交互作用がみとめられ（表-1）、柵の設置が被害による負の影響を軽減している、または相殺していることが示唆された。特に火災による落葉落枝の減少と地表面温度の高温化により被害から5年経過後も負の影響を受けていると思われるハエ目では、柵外被害区に比べて柵内被害区の捕獲数が多い分類群が多く、捕獲数の多かったクロバネキノコバエ科を含む7科は被害の影響と柵の效果に正の交互作用がみとめられた（表-2）。捕獲された土壌無脊椎動物に占めるハエ目の割合も2018年の61.7%から2022年には柵内被害区では64.0%に増加し、柵外被害区では54.5%に減少するなど、設置から一年未満であっても防鹿柵の設置による正の効果が確認された。伐採と火災とで攪乱の形態は違うものの、防鹿柵の設置による大型哺乳類の排除と土壌表層の安定化は、環境変化に伴う土壌動物の個体数減少を抑制する傾向があるという先行研究を支持する結果となった。オドリバエ科で、柵内では被害に負の影響があったにも関わらず、柵外では正の影響があった（表-2）が、この原因は不明である。コウチュウ目では、被害の影響と柵の效果に有意な負の交互作用があり（表-1）、柵内では被害による影響がほとんどないのに対して、柵外では被害に正の効果がみられた。コウチュウ目は落葉落枝の減少や地表面温度の高温化には比較的頑健で、他の分類群や病原菌の減少を介して柵外被害区で多くなった可能性がある。

今回、柵の效果や柵との交互作用が検出されなかった分類群についても、防鹿柵内の土壌無脊椎動物の回復には一定期間の経過が必要であることが指摘されていることから（伊藤ら、2007）、柵設置からの期間が短いために柵の効果が検出されなかった可能性がある。柵の設置が火災後の土壌動物群集の変動に与える影響を正確に評価するためには、継続的な調査が必要と考えられる。

## 謝辞

本研究は「サントリー天然水の森 東京大学秩父演習林プロジェクト研究助成金」の助成を受けて行った。土壌無脊椎動物の分類は志津木真理子氏にご協力いただいた。英文の作成にあたり Editage（www.editage.jp）の英文校正を受けた。ここに記して御礼申し上げる。

## 引用文献

- Binkley, D., Singer, F., Kaye, M., and Rochelle, R. (2003) Influence of elk grazing on soil properties in Rocky Mountain National Park. *Forest Ecology and Management* 185(3): 239-247.
- 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. *日林誌* 92 (5) : 261-268.
- 古川晶啓・澤島拓夫・徳田誠 (2023) 野外から採集した菌食性幼生殖タマバエの室内累代飼育、および温度が *Mycophila* 属の一種の幼生殖期の発育に及ぼす影響. *応動昆* 67 (2) : 57-61.
- 後藤義明・曲沢修・森澤猛 (1989) 北関東における林野火災跡地の植生回復—再生初期段階の種組成および現存量—. *日緑工誌* 15 (1) : 8-12.
- 後藤義明・大谷義一 (1988) 林野火災の概念と研究動向. *森林立地*, 30 (2) : 41-56.
- 原口竜成・齋藤俊浩・吉田弓子・高德佳絵・丹羽悠二・五十嵐勇治 (2019) 秩父演習林大面積プロットにおける毎木調査資料 (2014 年) 【修正版】. *演習林 (東大)* 61 : 75-81.
- 橋詰隼人・坂本大輔・和田弘次 (1987) 鳥取大学蒜山演習林の落葉広葉樹における微気候の観測. *広葉樹研究*

4: 223-256.

- 廣野正樹・嶋一徹・タンジャマハマドゥ・山本裕三・千葉喬三 (2001) 山火事跡地斜面における植生回復について—山火事後2年間の変化—. 日緑工誌 27 (1): 32-37.
- 五十嵐陽子・竹村歩美・岸洋一 (2001) 東京農工大学唐沢山演習林に発生した地表火の樹木に及ぼした影響. 日林誌 83 (4): 351-354.
- 伊藤雅道・辰田秀幸・尾崎泰哉 (2007) 第5節土壌動物と菌類 I 丹沢山地におけるシカによる環境変化が土壌動物群集へ及ぼす影響. 丹沢大山総合調査学術報告書: 353-356.
- 金子命・原ゆかり・保原達 (2020) エゾジカが高密度化した洞爺湖中島における土壌および植物の諸特性. 森林立地 62 (1): 1-16.
- 岸洋一・小倉健夫・寺崎正孝 (1995) 落葉採取により減少したマツバノタマバエ被害. 日林関東支論 46: 99-100.
- 森原修・安江安宣 (1981) オオチョウバエの発育に及ぼす温度の影響. 農学研究 59: 81-86.
- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- 才木道雄・三次充和・塚越剛史・井口和信・村川功雄・前原忠・鈴木牧 (2010) シカの強度影響下における広葉樹二次林の土壌動物相. 演習林 (東大) 49: 23-28.
- 才木道雄・鈴木智之 (2021) 東京大学秩父演習林で発生した森林火災が土壌無脊椎動物に与えた影響. 関東森林研究 72 (1): 73-76.
- 佐野淳之 (2009) 火入れが森林植生に与える影響—蒜山地域における火入れ実験の試み—. 森林科学 55: 14-17.
- Shimazaki, A. and Miyashita, T. (2000) Abundance and taxonomic composition of insects emerging from soil to above-ground ecosystems in forests. *Edaphologia* 65: 5-12.
- 須島充昭・伊藤雅道 (2005) 横浜市内の森林における双翅目, 特にクロバネキノコバエ科の土壌からの羽化個体数. *Edaphologia* 77: 11-14.
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林秩父演習林 (2012) 秩父演習林第10期教育研究計画 (2011 (平成23) 年度~2020 (平成32) 年度). 演習林 (東大) 51: 177-266.
- 頭山昌郁・中越信和・高橋史樹 (1989) 林野火災跡地の植生回復と地表生息性節足動物群集の動態. 日生態学誌 39: 107-119.
- 津田智 (1995) 火の生態学—植物群落の再生を中心として—. 日生態学誌 45 (2): 145-159.
- 山口恵子・高橋史樹・頭山昌郁 (2000) アカマツ林の山火事後初期段階における中型土壌動物相, 特にササラダニ相の季節変化. *Edaphologia* 65: 25-34.
- 塚越剛史・三次充和・鈴木祐紀・米道学・里見重成・阿達康真・軽込勉・鈴木牧・山田利博 (2012) 伐採と防鹿柵の設置が広葉樹二次林のリター・土砂移動量に与える短期的影響. 演習林 (東大) 52: 307-317.

(2023 年 12 月 18 日受付)

(2024 年 3 月 25 日受理)