

東日本大震災後の海岸防災林再生地に植栽されたコナラ苗木の根元周辺 をハビタットとして利用する土壤動物 ～土壤改良材とマルチング材の影響～

The effects of soil amendments and mulch on soil animals living near the roots
of *Quercus serrata* saplings planted in a seaside-protection forest regeneration
area after the Great East Japan Earthquake

中 島 壮 平*

高 橋 一 秋**

Souhei NAKAJIMA

Kazuaki TAKAHASHI

要約

東日本大震災後の海岸防災林再生では、松くい虫被害の拡大や森林の有する多面的機能の発揮などへの対応といった観点から、これまでに実績のあるクロマツ・アカマツに加え、広葉樹も植栽することが推奨された。しかし、植栽された広葉樹の生残率は低いなど、多くの課題が残された。この原因として、山砂を用いて植物の生育基盤となる盛土が造成されたため、土壤の硬化が徐々に進み、水はけが悪くなってきたこと、もともと土壤が貧栄養であったことなどが指摘されている。本研究では、これらの課題の対策として、肥料や土壤改良材の導入、マルチング材や防風柵の設置が効果的であろうという考えに至った。また、これらの対策は同時に、土壤動物のハビタットとしての土壤環境を改善すると考えた。そこで本研究では、土壤動物の群集構造に及ぼす土壤改良材導入・マルチング材設置の影響、マルチング材の種類の影響、マルチング材設置からの経過時間の影響を明らかにすることによって、仮説「土壤改良材の導入とマルチング材の設置が土壤動物にとって好適なハビタットを作り、苗木周辺の土壤動物群集が豊かになる」を検証することを目的とした。調査は、「みやぎ海岸林再生みんなの森林づくり活動」対象地(山元地区)の海岸防災林再生地の一区画(20m×50m)で行った。調査に用いた苗木はコナラ、土壤改良材は人工土壤・パーミキュライト・パーライト・パーク堆肥、マルチング材はジュート麻・麻・ヤシマット・ワラとした。土壤ブロックを2018年8月、2019年9月、2020年7月と9月に採取したのち、その中の中型土壤動物を自作した簡易ツルグレン装置を用いて抽出した。大型土壤動物の採集はハンドソーティング法を用いて、2020年7月と9月に行った。全調査を通して、13目19科27種2684個体の土壤動物が確認された。最も個体数が多かった種はアリ類であった。土壤動物の個体数と種類数は、ともに裸地よりマルチング材を設置した苗木の方が高かったが、マルチング材を設置した苗木と設置しなかった苗木では有意な違いが認められなかった。しかし、総個体数の偏りを処理間で比較すると、マルチング材を設置した苗木が最も多く、次いでマルチング材を設置しなかった苗木、裸地の順であった。また、土壤動物の個体数と種類数は、ともにマルチング材の種類で有意な違いが認められなかったが、総個体数の偏りを処理間で比較すると、ジュート麻が最も多かった。したがって、土壤改良材導入・マルチング材設置が土壤動物のハビタットとしての土壤環境を改善する効果を持つことと、その効果がマルチング材の材質や構造によって異なることが示唆された。さらに、土壤動物の個体数と種類数は、いずれもマルチング材を設置してからの時間経過に伴って右肩上がりに増加するような影響を受けることなく、むしろ総個体数は1年目が多く、4年目が少なくなる傾向が認められた。生態系改変者であるミミズ類とヤスデ類は2年目に最も個体数が多かった。その理由としては、マルチング材の経年劣化によって地表面が露出したことと、時間の経過に伴って、競争

関係や敵対関係が激しくなり、土壌動物の群集構造が徐々に単純化していった可能性が考えられた。以上の結果から、本研究の仮説を支持する結果がおおむね得られた。

Abstract

In seaside-protection forests planted after the Great East Japan Earthquake, it was recommended that broadleaf trees be planted in addition to Japanese black pine *Pinus thunbergii* and Japanese red pine *Pinus densiflora* to cope with the increasing damage caused by pine weevils and fulfill the multifunctional role of these forests. However, the broadleaf trees planted had low survival rates. One major reason is that the embankments created from mountain sand gradually hardened, negatively affecting drainage, and the mountain sand was originally poor in nutrients. Therefore, this study examined whether fertilizers, soil amendments, mulch, and windbreak fences addressed these problems. We postulated that these measures would also improve the soil environment as a soil animal habitat. This study tested the hypothesis that the introduction of soil amendments and mulch created suitable habitat for soil animals and enriched the soil animal community around saplings by clarifying the effects of introducing soil amendments and mulch on the soil animal community structure and the effects of the type of mulch and the time elapsed since the mulch was added. We investigated a 20 × 50 m² plot in a seaside forest regeneration area in Miyagi Kaigan-rin Saisei Minna no Mori-zukuri katsudo (Yamamoto Chiku). We used *Quercus serrata* saplings, artificial soil, vermiculite, perlite, and bark compost as soil amendments, and jute hemp, hemp, cocoa mat, and straw as mulches. Soil blocks were collected in August 2018, September 2019, and July and September 2020, and the medium-sized soil animals in the blocks were extracted using simple Tullgren apparatuses of our own design. Large soil animals were collected in July and September 2020 by hand sorting. In total, 2684 soil animals representing 27 species in 13 orders and 19 families were identified. The species with the most individuals were ants. The numbers of soil animals and species were both higher around saplings with mulch compared to bare ground, but there was no significant difference between saplings with and without mulch. However, when the bias in the total number of soil animals was compared among treatments, soil animals were most abundant around saplings with mulches, followed by saplings without mulch, and bare ground. The numbers of soil animals and species did not differ significantly among mulch treatments, although jute hemp had the greatest number of soil animals. The results suggest that the introduction of soil amendments and mulch improved the soil environment as a soil animal habitat and this effect depended on the material and structure of the mulch. Neither the number of soil animals nor species was affected by the passage of time since the mulch was added, although the total number of soil animals tended to be higher in the first year and lower in the fourth. The numbers of earthworms and millipedes, which are ecosystem engineers, were highest in the second year, perhaps because the ground surface was gradually exposed due to the age-related deterioration of the mulch and the simplification of the soil animal community with the passage of time due to intense competition. Therefore, our results generally support the study hypothesis.

キーワード：山砂、人工土壌、ジュート麻、アリ類、生態系改变者、ミミズ類、ヤスデ類、競争関係、敵対関係、たねぶろじえくと

Key words: mountain sand, artificial soil, jute hemp, ant, ecosystem engineer, earthworm, millipede, competitive relationship, hostile relationship, Tane-project

はじめに

林野庁は、東日本大震災から2か月後の2011年5月に、被災した海岸防災林を再生することを目的として「東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会」を設置し、具体的な検討を開始した(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会 2012; 宮城県森林整備課 2012)。その中で、植栽対象の樹種として、これまでに実績のあるクロマツ・アカマツを代表的な樹種とするが、近年の松くい虫被害の拡大や松葉かきなどの管理の必要性、生物多様性の保全や多面的機能の発揮の観点から、広葉樹も対象とすることが望ましいという見解が示された。これを受けて、ヤマザクラ、コナラ、クリなどの広葉樹の植栽が進められていったが、1年後の生残率は25%~70%と低く、幹が枯れた後に萌芽更新を繰り返している苗木も多い(OISCA「東日本大震災復興 海岸林再生プロジェクト H26 年度広葉樹植栽の現在の状況」<http://www.oisca.org/kaiganrin/blog/?p=12025> 最終確認日2021年1月24日)。このように、広葉樹の生残率が低くなってしまった理由としては、当然ながら、海風や日照りなどの沿岸部に特徴的な厳しい気象環境を挙げることができるが、それ以外にも、植物の生育基盤となる盛土が周辺の丘陵地帯から採取された山砂を用いて造成されたことが指摘されている(村上 2017)。具体的には、土壌の硬化が徐々に進み、水はけが悪くなってきたこと、もともと土壌が貧栄養状態であったことなどが挙げられる。また、丘陵地帯を切り崩して地面深くから採取された山砂には、土壌形成に密接に関与する土壌動物が著しく少ないことが予想される。

土壌動物の種多様性は地上に比べて遥かに高く、36万種にも及ぶと推定されている(金子・伊藤 2004)。土壌を物理的・化学的に改変する土壌動物は、植物の生長に不可欠な土壌が形成されていくプロセスで重要な役割を担っている(金子・伊藤 2004; 金子 2007; 阿部 2017; 長谷川ほか 2017)。土壌動物が持つ機能群は、微生物食者・落葉変換者・生態系改変者・根食者・捕食者の5つに分類され、それぞれ土壌形成に果たす役割が異なっている(Lavelle et al. 1997)。原生動物や線虫などの小型土壌動物の多くが微生物食者であり、バクテリアや菌類を摂食する。落葉変換者はミズズヤシロアリ、ヤスデやダンゴムシなどの中型・大型土壌動物であり、微生物とデトリタスと一緒に摂食し、消化管内で細かく粉碎したのち、圧縮された糞の形で排泄する。そのうち、土壌形成に及ぼ

す影響が大きい機能群が生態系改変者と呼ばれ、特に、ミズズヤシロアリ、ヤスデのような土食性の大型無脊椎動物は、土壌団粒や孔隙の形成、土壌有機物の分解を促進することによる物質循環など、土壌の物理的・化学的な改変に果たす役割が大きい(金子 2004; 豊田 2004; Lavelle et al. 2006; Blouin et al. 2013; 阿部 2017)。植物の根を摂食したり、光合成産物を吸汁したりする根食者としては、線虫、甲虫やセミの幼虫、アブラムシなどが知られ、小型のクモやダニ類、体の細長いムカデ類などは捕食者とされる。また、これらの機能群間や個々の種間では、複雑な生物間相互作用がみられる(三木 2006)。

一方で、広葉樹の枯死や生育不良を防ぐ対策として、2つのことが提案されている(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会 2012; 宮城県森林整備課 2012)。一つは、肥沃な客土を用いて苗木を深く植え付けたのち、立ワラや敷ワラを用いて保水機能を向上させることである。もう一つは、風力を緩和し、飛砂を防ぐために、人工砂丘や防風工を設置することである。すなわち、肥料や土壌改良材の導入、マルチング材や防風柵の設置によって、広葉樹の良好な生長が期待できると考えられる。また、これらの対策は同時に、沿岸部の裸地に特有な厳しい気象環境を緩和し、土壌動物のハビタットとしての土壌環境を改善すると予想される。山砂で造成された盛土面には、土壌動物のハビタットとなるリター層がなく、土壌の温度・水分の変化も激しいため、土壌動物にとって劣悪なハビタットだといえるであろう。そこで本研究では、「土壌改良材の導入とマルチング材の設置が土壌動物にとって好適なハビタットを作り、苗木周辺の土壌動物群集が豊かになる」を仮説として定めることとした。

本研究では、以下の示す3つの疑問を解き明かすことで、仮説を検証することを目的とした。

- ①土壌動物の群集構造は、土壌改良材の導入とマルチング材の設置を行った苗木周辺の土壌、土壌改良材の導入のみ行った苗木周辺の土壌、苗木を植栽していない裸地で異なるか?
- ②土壌動物の群集構造は、マルチング材の種類によって異なるか?
- ③土壌動物の群集構造は、マルチング材を設置してからの年数によって異なるか?

方法

調査地

調査は「みやぎ海岸林再生みんなの森林づくり活動」対象地(山元地区)の海岸防災林再生地(宮城県山元町山寺須賀)の一区画(20m×50m)で行った(図1)。この区画では、たねぷろじえくと(正式名:被災地里山救済・地域性苗木生産・植栽プロジェクト)が2016年3月から植栽活動を行っている(たねぷろじえくと(被災地里山救済・地域性苗木生産ネットワーク)

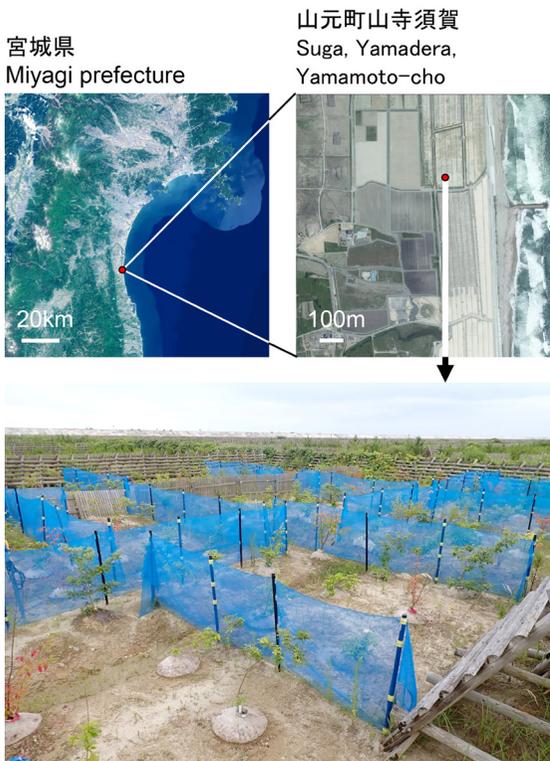


図1. 調査地。「みやぎ海岸林再生みんなの森林づくり活動」対象地(山元地区)の海岸防災林再生地(宮城県山元町山寺須賀)の一区画(20m×50m)。この地図は、国土院発行の2万5千分1地形図(デジタル版)を使用したものである。

Figure 1. Map showing the study area. A 20 × 50 m² plot in a seaside-protection forest regeneration area (Suga, Yamadera, Yamamoto, Miyagi Prefecture) in the target area Miyagi Kaigan-rin Saisei Minna no Morizukuri katsudo (Yamamoto Chiku). This map is based on Digital Topographic Map 25000 published by the Geospatial Information Authority of Japan.

「たねぷろじえくと(正式名:被災地里山救済・地域性苗木生産・植栽プロジェクト)」<https://tane-project.org/>最終確認日2021年1月24日)。2019年6月までに、446本の苗木が植栽されている(コナラ323本、ヤマザクラ58本、クヌギ30本、ヤマグワ15本、ネムノキ5本、ムラサキシキブ5本、ミズナラ3本、ズミ2本、ヤマブキ2本、アカマツ1本、スギ1本、ヒノキ1本、サンショウ1本)。

植栽苗木、土壌改良材、マルチング材

「たねぷろじえくと」のメンバーによって、生産・植栽されたコナラの苗木を調査対象とした。これらの苗木は、宮城県南部の山林(深山山麓少年の森「菱沼の郷」(山元町)、白石城「益岡公園」(白石市)、宮城県蔵王野鳥の森自然観察センター「ことりはうす」(蔵王町))で採取された種子から3年間育てられたのち、植栽された。植栽する際に、4種類の土壌改良材を「人工土壌:パーミキュライト:真珠岩・黒曜石パーライト:バーク堆肥=30L:4L:4L:4L」の比率で配合し、苗木1本につき42Lずつ根系の周りに導入した(図2)。「土壌改良材導入・マルチング材設置の影響」と「マルチング材の種類の影響」に関する調査では、真珠岩パーライトを導入した苗木を調査対象とした。「マルチング材設置からの経過時間の影響」に関する調査では、真珠岩パーライトを導入した苗木(植栽後から3年後と4年後)と黒曜石パーライトを導入した苗木(植栽から1年後と2年後)を調査対象とした。マルチング材については、ジュート麻(直径約55cmの円形)、麻(一辺約50cmの正方形)、ヤシマット(一辺約50cmの正方形)、ワラ(一辺約50cmの正方形)の4種類を用いた(図3)。

なお、主な土壌改良材として用いた人工土壌は、植物にとって過酷な環境条件下にある都市緑化のために開発された「ビバソイル」(商品名)である。この人工土壌には、湿性多孔質鉱物に有機養分や植物の生育に必要な養分がプレミックスされており、植物に必要な有効水分を多量にかつ長期的に保持する機能を有する(東邦レオ株式会社「グリーンインフラの東邦レオ湿性多孔質軽量人工土壌/雨水貯留浸透機能付き植栽基盤材 ビバソイル」 <https://greeninfrastructure.jp/products/vivasoil/> 最終確認日2021年1月24日)。黒曜石パーライトには芙蓉パーライト株式会社製の「ビーナスライト20号」(商品名)を、ジュート麻には株式会社テザック製の「育樹マット」をそれぞれ用い



4種類の土壌改良材を混ぜる作業
Mixing the four different soil amendments



苗木1本分の土壌改良材(42リットル)
Soil amendment material for one sapling (42 liters)



土壌改良材を導入する植栽穴
A planting hole for introducing the soil amendment material



コナラ苗木を植栽する様子
Planting a *Quercus serrata* sapling

図2. コナラの苗木を植栽する際に用いた4種類の土壌改良材(人工土壌、パーミキュライト、黒曜石パーライト、バーク堆肥)と植栽風景。

Figure 2. Four soil amendments (artificial soil, vermiculite, obsidian perlite, and bark compost) used for planting *Quercus serrata* saplings and vegetation.

た。パーミキュライト、真珠岩パーライト、バーク堆肥はホームセンター「コメリ」で、麻、ヤシマット、ワラはホームセンター「ムサシ」でそれぞれ購入した。

土壌ブロックの採取

2018年8月11日、2019年8月10日、2020年9月6日に、土壌ブロックを採取した。2018年は「土壌改良材導入・マルチング材設置の影響」を調査するために、植栽から1年が経過した苗木を対象に、ジュート麻を

設置していた苗木10本、マルチング材を設置していなかった苗木8本、裸地(コントロール)8か所から土壌ブロック(縦10cm×横10cm×マルチング材の下の地表面から深さ10cm)を1個ずつ採取した。2019年は「マルチング材の種類の影響」を調査するために、植栽から2年が経過した苗木を対象に、ジュート麻を設置していた苗木8本、麻を設置していた苗木8本、ヤシマットを設置していた苗木8本、ワラを設置していた苗木8本、マルチング材を設置していなかった苗木

(a) ジュート麻 (1年後)
Jute hemp after 1 year(b) マルチング材なし (1年後)
No mulch after 1 year(c) 裸地
Bare ground(d) 麻 (2年後)
Hemp after 2 years(e) ヤシマット (2年後)
Cocoa mat after 2 years(f) 藁 (2年後)
Straw after 2 years(g) ジュート麻 (2年後)
Jute hemp after 2 years(h) ジュート麻 (3年後)
Jute hemp after 3 years(i) ジュート麻 (4年後)
Jute hemp after 4 years

図3. 土壌動物の調査を行った処理。土壌動物の群集構造に及ぼす土壌改良材導入・マルチング材設置の影響は(a)~(b)、マルチング材の種類の影響は(d)~(g)、マルチング材設置からの経過時間の影響は(a)、(g)~(i)の処理を調査対象とした。

Figure 3. Treatments investigated. The effects of adding soil amendments and mulch on the community structure of soil animals were investigated in treatments (a) and (b), the effects of the type of mulch were investigated in treatments (d)–(g), and the effects of the time elapsed since mulching were investigated in treatments (a), (g)–(i).

8本から土壌ブロック(縦5cm×横5cm×マルチング材の下の地表面から深さ5cm)を1個ずつ採取した。2020年は「マルチング材設置からの経過時間の影響」を調査するために、植栽時にジュート麻を設置していた苗木を対象に、植栽から4年が経過した苗木10本、植栽から3年が経過した苗木8本、植栽から2年が経過した苗木10本、植栽から1年が経過した苗木10本、植栽時にジュート麻を設置しておらず植栽から3年が経過した苗木8本、裸地(コントロール)10か所から土壌ブロック(縦5cm×横5cm×マルチング材の下の地表面から深さ5cm)を1個ずつ採取した。

ツルグレン法による中型土壌動物の抽出

加藤ほか(2013)を参考にして、簡易型ツルグレン装置(図4)を使い捨てカイロとペットボトルを用いて自作した。土壌ブロックを採取してから4日以内に、ツルグレン装置を用いて、1サンプルずつ12時間かけて中型土壌動物を抽出した。その後、99.5%のエチルアルコールで処理し、保管した。



図4. 簡易型ツルグレン装置。使い捨てカイロとペットボトルを用いて自作した。

Figure 4. Simple Tullgren apparatus made from a disposable body warmer and a plastic bottle.

ハンドソーティング法による大型土壌動物の採集

手づかみと、吸虫管を用いてマルチング材と土壌改良材の間をハビタットとして利用している大型土壌動物を現地で採集した。採集後ただちに、99.5%のエチ

ルアルコールで処理し、保管した。ハンドソーティング法を用いた調査は、2020年に土壌ブロックを採取した苗木と裸地で、2020年7月30日と同年9月6日の2日に分けて行った。

土壌動物の同定、生物間相互作用と機能群の特定

採集した土壌動物を双眼実体顕微鏡下で(7~45倍)で観察し、形態的な特徴から種の同定を試みた。種までの同定が難しい場合は、目や科のレベルまでの同定を行った。同定後、各種・各種群の個体数を求めた。なお、アリ塚が形成されていた苗木の場合には、各種・各種群の正確な個体数を求めることが難しくかったため、個体数を100とした。図鑑『日本産土壌動物』(青木 2015)とWebサイト(アリ類データベース作成グループ2008「日本アリ類画像データベース」<http://ant.miyakyo-u.ac.jp/J/> 2021年1月24日最終確認日)を用いて、種の同定を行い、各種・各分類群の食性や体サイズも調べた。

得られた情報から、各種・各種群の機能群と生物間相互作用を特定した。機能群については、微生物食者・落葉変換者・生態系改変者・根食者・捕食者の5つを対象とした(Lavelle et al. 1997)。生物間相互作用については、競争関係、敵対関係、相利共生関係の3つを対象とした。競争関係はある種とある種が同じ餌資源を利用する場合、敵対関係はある種がある種を捕食する関係にある場合、相利共生関係はある種とある種が互いに利用し合う関係にある場合とした。ある2種・種群の捕食関係を判断するのが難しい場合は、体サイズが大きい種・種群が小さい種・種群を捕食するとみなした。ただし、アリ類のように集団で狩りをする種・種群については、体サイズが小さくても捕食する側の種・種群とした。

データ解析

土壌動物の群集構造を把握するために、苗木1本(あるいは裸地1か所)当たりの土壌動物の個体数と種類数、1処理当たりの個体数をベースとした種・種群別構成比(1処理当たり、それぞれの種・種群が何個体ずつ存在するのか)、総個体数と総種類数、生物間相互作用の総数を分析した。Kruskal-Wallis検定とBonferroni補正のMann-Whitney U検定による多重比較検定を用いて、苗木1本(あるいは裸地1か所)当たりの土壌動物の個体数と種類数を処理間で比較した。1処理当たりの個体数は種・種群の違いによ

て偏りがみられるか、総個体数と総種類数、ある2つの種・種群間の生物間相互作用の総数は処理によって偏りがみられるかを把握するために、カイ二乗検定あるいはFisherの正確確率検定を行った。

結果

種構成、機能群、生物間相互作用

全調査を通して、13目19科27種2684個体の土壤動物が確認された(表1a-c)。個体数が最も多かった種はトビイロシワアリ(1486個体)であり、次いでケアリ属spp. (874個体)、クロヤマアリ(174個体)、ワラジムシ(27個体)、トゲダニ亜科spp. (20個体)、ニホントゲイシムカデ(18個体)、ヒメツチトビムシ亜科spp. (13個体)、オカダングムシ(11個体)、ナガツチトビムシ亜科spp. (10個体)の順であり、それ以外の種・種群の個体数は一桁であった。機能群別にみると、微生物食者が4種群(ヨツコブゴミムシダマシ、タマキノコムシ科spp.、ナガツチトビムシ亜科spp.、ヒメツチトビムシ亜科spp.)、落葉変換者が3種(オカダングムシ、ワラジムシ、ナメクジ)、生態系改変者が2種群(ナガミズ目 spp.、ヤケヤスデ)、根食者が1種(コメツキムシ科spp.)、捕食者が16種群であった。生物間相互作用については、競争関係と敵対関係の2つが確認された(表2a, b)。ある2つの種・種群間で39組の競争関係と24組の敵対関係が確認された。

土壌改良材導入とマルチング材設置の影響

土壤動物の個体数と種類数は、ともに「裸地」より「マルチング材(ジュート麻)を設置した苗木周辺」の方が有意に高い値を示した(表1a; Bonferroni法による多重比較検定, $p < 0.05$)。しかし、「裸地」と「マルチング材を設置しなかった苗木周辺」、「マルチング材を設置した苗木周辺」と「マルチング材を設置しなかった苗木周辺」の間では、有意差が認められなかった(表1a; Bonferroni法による多重比較検定, $p \geq 0.05$)。1処理当たりの個体数をベースとした種・種群別構成比(1処理当たり、それぞれの種・種群が何個体ずつ存在するの)は処理間で有意な偏りが認められた(表1a; Fisherの正確確率検定, $p < 0.001$)。総個体数は処理間で有意な偏りが認められ、「マルチング材を設置した苗木周辺」で最も多く、次いで「マルチング材を設置しなかった苗木周辺」、「裸地」の順であった(表1a; カイ二乗検定, $p < 0.001$)。総種類数、競争関係と敵対関係の総数については、処理間で

有意な偏りが認められなかった(表1a; カイ二乗検定あるいはFisherの正確確率検定, $p \geq 0.05$)。

確認された機能群は、「マルチング材を設置した苗木周辺」の微生物食者が2種群(ナガツチトビムシ亜科spp.、ヒメツチトビムシ亜科spp.)、根食者が1種群(コメツキムシ科 spp.)、捕食者が4種群、「マルチング材を設置しなかった苗木周辺」の微生物食者が2種群(ナガツチトビムシ亜科spp.、ヒメツチトビムシ亜科spp.)、根食者が1種(コメツキムシ科 spp.)、「裸地」の微生物食者が1種群(ヒメツチトビムシ亜科spp.)、捕食者が1種群であった。

確認された生物間相互作用の総数は、「マルチング材を設置した苗木周辺」の競争関係が2組、敵対関係が2組、「マルチング材を設置しなかった苗木周辺」の競争関係が1組、敵対関係が0組、「裸地」の競争関係・敵対関係が0組であった。

マルチング材の種類の影響

土壤動物の個体数と種類数は、マルチング材の種類(ジュート麻、麻、ヤシマット、ワラ)によって有意に異ならなかった(表1b; Bonferroni法による多重比較検定, $p \geq 0.05$)。1処理当たりの個体数をベースとした種・種群別構成比(1処理当たり、それぞれの種・種群が何個体ずつ存在するの)は処理間で有意な偏りが認められた(表1b; Fisherの正確確率検定, $p < 0.001$)。総個体数は処理間で有意な偏りが認められ、「ジュート麻」で最も多く、次いで「ワラ」、「ヤシマット」、「麻」、「マルチング材なし」の順であった(表1b; カイ二乗検定; $p < 0.001$)。総種類数、競争関係と敵対関係の総数については、処理間で有意な偏りが認められなかった(表1b; カイ二乗検定あるいはFisherの正確確率検定, $p \geq 0.05$)。

確認された機能群は、「ジュート麻」の微生物食者・落葉変換者・生態系改変者が0種群、根食者が1種(コメツキムシ科 spp.)、捕食者が4種群、「麻」の微生物食者が1種群(ナガツチトビムシ亜科spp.)、落葉変換者が1種(ササラダニ目spp.)、生態系改変者・根食者が0種、捕食者が2種群、「ヤシマット」の微生物食者・落葉変換者・生態系改変者・根食者が0種、捕食者が2種群、「ワラ」の微生物食者・落葉変換者・生態系改変者が0種群、根食者が1種(コメツキムシ科 spp.)、捕食者が2種群、「マルチング材なし」の微生物食者が1種群(ナガツチトビムシ亜科spp.)、落葉変換者・生態系改変者・根食者が0種、捕食者が2種

群であった。

確認された生物間相互作用の総数は、「ジュート麻」の競争関係が1組、敵対関係が0組、「麻」「ヤシマット」「ワラ」の競争関係と敵対関係がともに0組、「マルチング材なし」の競争関係が0組、敵対関係が1組であった。

マルチング材設置からの時間経過の影響

土壌動物の個体数と種類数は、マルチング材(ジュート麻)を設置してからの経過時間(1年後、2年後、3年後、4年後)によって有意差に異ならなかった(表1c; Bonferroni法による多重比較検定, $p \geq 0.05$)。1処理当たりの個体数をベースとした種・種群別構成比(1処理当たり、それぞれの種・種群が何個体ずつ存在するの)は処理間で有意な偏りが認められた(表1c; Fisherの正確確率検定, $p < 0.001$)。総個体数は処理間で有意な偏りが認められ、「1年後」で最も多く、次いで「3年後」、「2年後」、「4年後」、「マルチング材なし」、「裸地」の順であった(表1c; カイ二乗検定, $p < 0.001$)。総種類数と競争関係の総数については、処理間で有意な偏りが認められなかった(表1c; カイ二乗検定あるいはFisherの正確確率検定, $p \geq 0.05$)。敵対関係の総数は処理間で有意な偏りが認められ、「2年後」で最も多く、次いで「1年後」、「3年後」、「4年後」、「マルチング材なし」、「裸地」の順であった(表1c; Fisherの正確確率検定, $p < 0.05$)。確認された機能群は、「4年後」の微生物食者が1種群(ナガツチトビムシ亜科 spp.)、落葉変換者が1種(ワラジムシ)、生態系変換者が1種(ヤケヤスデ)、根食者が0種、捕食者が10種群、「3年後」の微生物食者が0種群、落葉変換者が1種(オカダンゴムシ)、生態系変換者が1種(ヤケヤスデ)、根食者が0種、捕食者が7種群、「2年後」の微生物食者が0種群、落葉変換者が3種(オカダンゴムシ、ワラジムシ、ナメクジ)、生態系変換者が2種群(ナガミズ目 spp.、ヤケヤスデ)、根食者・捕食者が0種群、「1年後」の微生物食者が3種群(ヨツコブゴミシダマシ、ナガツチトビムシ亜科 spp.、ヒメツチトビムシ亜科 spp.)、落葉変換者が2種(オカダンゴムシ、ワラジムシ)、生態系変換者が2種群(ナガミズ目 spp.、ヤケヤスデ)、根食者が0種、捕食者が9種群、「マルチング材なし」の微生物食者が0種群、落葉変換者が1種(オカダンゴムシ)、生態系変換者・根食者が0種、捕食者が7種群、「裸地」の微生物食者・落葉変換者・生態系変換者・根食者が0種、

捕食者が4種群であった。

確認された生物間相互作用の総数は、「4年後」の競争関係が13組、敵対関係が5組、「3年後」の競争関係が10組、敵対関係が6組、「2年後」の競争関係が13組、敵対関係が13組、「1年後」の競争関係が13組、敵対関係が10組、「マルチング材なし」の競争関係が8組、敵対関係が3組、「裸地」の競争関係が2組、敵対関係が0組であった。

考察

土壌改良材導入とマルチング材設置の影響

マルチング材を設置した苗木周辺での土壌動物の個体数と種類数は、ともに裸地での値より高かったが、マルチング材を設置しなかった苗木周辺での値とは有意な違いが認められなかった。これは、土壌改良材の導入とマルチング材の設置によって、土壌動物のハビタットとしての環境が裸地よりも改善されたが、マルチング材が設置されなくても土壌改良材の導入だけで、ハビタットの環境改善が起こっていたことが推測できる。また、苗木を植栽すること自体が、土壌動物に餌となる根や落葉を提供し、苗木の根元周辺に日陰の環境が提供されるようになるため、マルチング材の設置がなくてもハビタットの環境改善が起こっていたことが示唆された。しかし、土壌動物の個体数と種類数は、裸地とマルチング材を設置しなかった苗木の間でも有意な違いが認められなかった。この理由としては、土壌改良材が導入されただけでは、ハビタットの環境改善が起こらなかった可能性も考えられるが、苗木周辺を主なハビタットとして利用する土壌動物が裸地へも徐々に侵入し始めている可能性や、そもそもサンプル数が少なく有意差が出にくかった可能性も考えられる。一方で、総個体数の偏りを処理間で比較すると、裸地よりマルチング材を設置しなかった苗木の方が、マルチング材を設置しなかった苗木より設置した苗木の方が、それぞれ多かった。これらの結果を総合的に考えると、マルチング材の設置と土壌改良材の導入が土壌動物群集を豊かにする効果は、発揮されていたと考えても良いであろう。また、それぞれの種・種群に着目すると、本調査の全体で、ジュート麻を設置した処理では、捕食者のニホントゲイシムカデ・トゲダニ亜科 spp.、微生物食者のナガツチトビムシ亜科 spp.・ヒメツチトビムシ亜科 spp.が採集された。また、現地調査でジュート麻を外してめくり上げる時に、ジュート麻の裏面にトビムシ類やダニ類が観察されることが多

表1. 土壌動物の群集構造に及ぼすマルチング材設置の影響、マルチング材の種類の影響、マルチング材設置からの経過時間の影響。アルファベットの違いは、各影響の処理間で有意差があることを示す ($p < 0.05$, Bonferroni法による多重比較検定)。nはサンプル数。カイ二乗検定あるいはFisherの正確確率検定による有意性は、アスタリスクとnsで示す (ns; $p \geq 0.05$, *; $p < 0.05$; **, $p < 0.001$)。

目 Order	科 Family	種 Species	食性 Food habit	(主な餌資源) (Main food resource)	機能群 Functional group	
1	イシムカデ目 Lithobiomorpha	トゲイシムカデ科 Henicopidae	ニホントゲイシムカデ <i>Lamyctes guamius koshiyamai</i>	動物食性 Zoophagous	(トビムシ) (Springtails)	捕食者 Predator
2	オビヤスデ目 Polydesmida	ヤケヤスデ科 Paradoxosomatidae	ヤケヤスデ <i>Oxidus gracilis</i>	腐食性 Saprophagous	(落葉) (Litter)	生態系改変者 Ecosystem engineer
3	クモ目 Araneae	イソツグモ科 Anyphaenidae	イソツグモ <i>Anyphaena pugil</i>	動物食性 Zoophagous	(飛翔性昆虫) (Flying insects)	捕食者 Predator
4		エビグモ科 Philodromidae	エビグモ属 spp. <i>Philodromus</i> spp.	動物食性 Zoophagous	(飛翔性昆虫) (Flying insects)	捕食者 Predator
5		カニグモ科 Thomisidae	オオクマエビスグモ <i>Lysiteles okumae</i>	動物食性 Zoophagous	(飛翔性昆虫) (Flying insects)	捕食者 Predator
6			カニグモ属 spp. <i>Xysticus</i> spp.	動物食性 Zoophagous	(飛翔性昆虫) (Flying insects)	捕食者 Predator
7		シボグモ科 Ctenidae	シボグモ <i>Anahita fauna</i>	動物食性 Zoophagous	(節足動物) (Arthropods)	捕食者 Predator
8		ハエトリグモ科 Salticidae	ヒナタハエトリグモ属 spp. <i>Heliophanus</i> spp.	動物食性 Zoophagous	(飛翔性昆虫) (Flying insects)	捕食者 Predator
9	ゲジ目 Scutigeroomorpha	ゲジ科 Scutigeridae	ゲジ <i>Thereuonema tuberculata</i>	動物食性 Zoophagous	(クモ・バッタ類) (Spiders, grasshoppers)	捕食者 Predator
10	コウチュウ目 Coleoptera	オサムシ科 Carabidae	オサムシ科 spp. Carabidae spp.	雑食性 Omnivorous	(ミミズ・カタツムリ) (Earthworms, snails)	捕食者 Predator
11		ゴミシダグマン科 Tenebrionidae	ヨソツゴミシダグマン <i>Basanus eroylolides</i>	腐食性 Saprophagous	(菌類) (Fungi)	微生物食者 Microbial feeder
12		コメツキムシ科 Elateridae	コメツキムシ科 spp. Elateridae spp.	植物食性 Phytophagous	(植物の根) (Plant roots)	根食者 Root feeder
13		タマキノコムシ科 Leiodinae	タマキノコムシ科 spp. Leiodinae spp.	腐食性 Saprophagous	(菌類) (Fungi)	微生物食者 Microbial feeder
14	ダニ目 Acari	ササラダニ亜目 spp. Oribatida spp.	ササラダニ亜目 spp. Oribatida spp.	腐食性 Saprophagous	(落葉) (Litter)	落葉変換者 Litter transformer
15		トゲダニ亜科 spp. Mesostigmata spp.	トゲダニ亜科 spp. Mesostigmata spp.	腐食性 Saprophagous	(土壌線虫) (Soil nematodes)	捕食者 Predator
16	トビムシ目 Collembola	ツチトビムシ科 Isotomidae	ナガツチトビムシ亜科 spp. Anurophorinae spp.	腐食性 Saprophagous	(菌類・土壌動物の糞) (Fungi, Soil animal droppings)	微生物食者 Microbial feeder
17		ヒメツチトビムシ亜科 spp. Proisotominae spp.	ヒメツチトビムシ亜科 spp. Proisotominae spp.	腐食性 Saprophagous	(菌類・土壌動物の糞) (Fungi, Soil animal droppings)	微生物食者 Microbial feeder
18	ナガミズ目 Haplotaenida	ナガミズ目 spp. Haplotaenida spp.	ナガミズ目 spp. Haplotaenida spp.	腐食性 Saprophagous	(土壌) (Soil)	生態系改変者 Ecosystem engineer
19	ハチ目 Hymenoptera	アリ科 Formicidae	クロヤマアリ <i>Formica japonica</i>	雑食性 Omnivorous	(昆虫の死骸・植物性の蜜・アブラムシの蜜) (Dead insects, plant and aphid nectar)	捕食者 Predator
20			トビイロシワアリ <i>Tetramorium tsushimae</i>	雑食性 Omnivorous	(夏: 小昆虫, 冬: 種子) (Summer: small insects, winter: seeds)	捕食者 Predator
21			ヒメハリアリ <i>Panera japonica</i>	動物食性 Zoophagous	(小昆虫) (Small insects)	捕食者 Predator
22			ケアリ属 spp. <i>Lastus</i> spp.	雑食性 Omnivorous	(昆虫の死骸・植物性の蜜・アブラムシの蜜) (Dead insects, plant and aphid nectar)	捕食者 Predator
23	バッタ目 Orthoptera	コオロギ科 Gryllidae	エンマコオロギ <i>Teleogryllus enma</i>	雑食性 Omnivorous	(動物・植物) (Animals, plants)	捕食者 Predator
24	マイマイ目 Stylommatophora	ベッコウマイマイ科 Helicariionidae	ベッコウマイマイ科 spp. Helicariionidae spp.	動物食性 Zoophagous	(土壌線虫) (Soil nematodes)	捕食者 Predator
25	ワラジムシ目 Isopoda	オカダゲコムシ科 Armadillididae	オカダゲコムシ <i>Armadillidium vulgare</i>	雑食性 Omnivorous	(落葉) (Litter)	落葉変換者 Litter transformer
26		ワラジムシ科 Porcellionidae	ワラジムシ科 <i>Porcellio scaber</i>	腐食性 Saprophagous	(落葉) (Litter)	落葉変換者 Litter transformer
27	有肺目 Pulmonata	ナメタジ科 Philomycidae	ナメタジ <i>Meghimatium bilineatum</i>	雑食性 Omnivorous	(植物) (Plants)	落葉変換者 Litter transformer
28					個体数の中央値 Median number of individuals	
28					種類数の中央値 Median number of species	
30					総個体数 Total number of individuals	
31					総種類数 Total number of species	
32					2種間の競争関係の総数 Total number of competitive relationships between two species	
33					2種間の敵対関係の総数 Total number of hostile relationships between two species	

Table 1. The effects of soil amendments and mulch, type of mulch, and time elapsed since mulching on the soil animal community structure. Different letters indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$, Bonferroni's multiple comparison test); n, sample size. Significance by chi-square tests or Fisher's exact probability tests are indicated by asterisks and ns (ns; $p \geq 0.05$, *; $p < 0.05$; **, $p < 0.001$).

	土壌改良材導入 ・マルチング材設置の影響 Effects of soil amendments and mulch			マルチング材の種類の影響 Effects of the type of mulch					マルチング材設置からの経過時間の影響 Effects of the time elapsed since Jute hemp mulching (years elapsed)					合計 Total	
	マルチング材 Mulch		裸地 Bare ground	マルチング材 Mulch					マルチング材(ジュート麻) Mulch (Jute hemp)						裸地 Bare ground
	ジュート麻 Jute hemp	なし None		ジュート麻 Jute hemp	麻 Hemp	ヤシマット Cocoa mat	ワラ Straw	なし None	4年後 4 years	3年後 3 years	2年後 2 years	1年後 1 year	なし None		
n=10	n=8	n=8	n=8	n=8	n=8	n=8	n=8	n=10	n=8	n=10	n=10	n=8	n=10		
1	3			1			2			2	2	8		18	
2									1	1	3			5	
3									3		3	1	2	9	
4										1			1	2	
5													1	1	
6										1				1	
7									1		1			2	
8									2				1	3	
9											1			1	
10												1	2	3	
11													1	1	
12	1	1		1			1							4	
13													1	1	
14						2								2	
15	1		1	2	2	5	4	2	1			1		20	
16	1	4		1				1	2				1	10	
17	2	9	2											13	
18												3		3	
19				1		14	15		14	4	113	1	6	6	174
20	104								395	270	348	324	19	26	1486
21									1						1
22	35			27	12				4	369	4	402	20	1	874
23									1	1	2	5			9
24													1		1
25										2	2	6	1		11
26									14		11	2			27
27												2			2
28	2 ^a	1.5 ^{ab}	0 ^b	0.5 ^a	0 ^a	0 ^a	1 ^a	0.5 ^a	9.5 ^a	53 ^a	7.5 ^a	14 ^a	5 ^a	3.5 ^a	
28	1 ^a	1 ^{ab}	0 ^b	0.5 ^a	0 ^a	0 ^a	1 ^a	0.5 ^a	2.5 ^a	1.5 ^a	3 ^a	2 ^a	2 ^a	1 ^a	
30	147	14	3 ^{**}	32	17	19	20	5 [*]	440	651	495	756	51	34 ^{**}	
31	7	3	2 ns	5	4	2	3	3 ns	13	9	13	14	8	4 ns	
32	2	1	0 ns	1	0	0	0	0 ns	13	10	13	13	8	2 ns	
33	2	0	0 ns	0	0	0	0	1 ns	5	6	13	10	3	0 [*]	

Table2の続き

(b) 敵対関係
Hostile relationships

A種	Species A	(機能群)	(Functional group)	B種	Species B	(機能群)	(Functional group)
エンマコオロギ	<i>Teleogryllus emma</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ オカダンゴムシ	<i>Armadillidium vulgare</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
エンマコオロギ	<i>Teleogryllus emma</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガミズ目 spp.	<i>Haploaxida</i> spp.	(生態系変換者)	(Ecosystem engineer)
エンマコオロギ	<i>Teleogryllus emma</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ワラジムシ	<i>Porcellio scaber</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
オサシムシ科 spp.	Carabidae spp.	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガミズ目 spp.	<i>Haploaxida</i> spp.	(生態系変換者)	(Ecosystem engineer)
オサシムシ科 spp.	Carabidae spp.	(捕食者)	(Predator)	⇒ ベッコウマイマイ科 spp.	Helicariomidae spp.	(捕食者)	(Predator)
クロヤマアリ	<i>Formica japonica</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ オカダンゴムシ	<i>Armadillidium vulgare</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
クロヤマアリ	<i>Formica japonica</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガミズ目 spp.	<i>Haploaxida</i> spp.	(生態系変換者)	(Ecosystem engineer)
クロヤマアリ	<i>Formica japonica</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ワラジムシ	<i>Porcellio scaber</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
ケアリ属 spp.	<i>Lastus</i> spp.	(捕食者)	(Predator)	⇒ オカダンゴムシ	<i>Armadillidium vulgare</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
ケアリ属 spp.	<i>Lastus</i> spp.	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガミズ目 spp.	<i>Haploaxida</i> spp.	(生態系変換者)	(Ecosystem engineer)
ケアリ属 spp.	<i>Lastus</i> spp.	(捕食者)	(Predator)	⇒ ワラジムシ	<i>Porcellio scaber</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
ゲジ	<i>Thereuonema tuberculata</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ エンマコオロギ	<i>Teleogryllus emma</i>	(捕食者)	(Predator)
ゲジ	<i>Thereuonema tuberculata</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ オカダンゴムシ	<i>Armadillidium vulgare</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
ゲジ	<i>Thereuonema tuberculata</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ジボクモ	<i>Anahita fauna</i>	(捕食者)	(Predator)
ゲジ	<i>Thereuonema tuberculata</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガミズ目 spp.	<i>Haploaxida</i> spp.	(生態系変換者)	(Ecosystem engineer)
ニホトグアイシムスカデ	<i>Thereuonema tuberculata</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ワラジムシ	<i>Porcellio scaber</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
ニホトグアイシムスカデ	<i>Lamyctes guamus koshiyamae</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガシチトビムシ亜科 spp.	Anurophornae spp.	(微生物食者)	(Microbial feeder)
ニホトグアイシムスカデ	<i>Lamyctes guamus koshiyamae</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ヒメツチトビムシ亜科 spp.	Proisotominae spp.	(微生物食者)	(Microbial feeder)
トビイロシワアリ	<i>Tetramorium tsushimae</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ オカダンゴムシ	<i>Armadillidium vulgare</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
トビイロシワアリ	<i>Tetramorium tsushimae</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガミズ目 spp.	<i>Haploaxida</i> spp.	(生態系変換者)	(Ecosystem engineer)
トビイロシワアリ	<i>Tetramorium tsushimae</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ワラジムシ	<i>Porcellio scaber</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
ヒメハリアリ	<i>Ponera japonica</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ オカダンゴムシ	<i>Armadillidium vulgare</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)
ヒメハリアリ	<i>Ponera japonica</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ナガミズ目 spp.	<i>Haploaxida</i> spp.	(生態系変換者)	(Ecosystem engineer)
ヒメハリアリ	<i>Ponera japonica</i>	(捕食者)	(Predator)	⇒ ワラジムシ	<i>Porcellio scaber</i>	(落葉変換者)	(Litter transformer)

かった。これは、細かい繊維で作られたジュート麻の内部には、トビムシ類やダニ類の棲み処となる小さな空隙が数多くできるためだと考えられる。トビムシ類は土壌中の空隙が増加すると個体数が増加し、そのことがさらに捕食者であるトゲダニ類を増加させる場合がある(金子ほか 2018)。また、自然界では、多くの生物種が直接的・間接的に複雑な生物間相互作用に関与しており、それらの相互作用が群集構造に重要な影響を及ぼす(坂田 2000)。これらの報告と同様の現象が、本研究でも起こっていたと考えられる。すなわち、ジュート麻の設置によって、トビムシ類が増加し、その捕食者であるダニ類が増加し、さらにその捕食者であるムカデ類が増加する、といった敵対関係の連鎖が起こっていたと解釈できるだろう。また、マルチング材を設置した処理でのみ、ニホントゲイシムカデ、トビイロシワアリ、ケアリ属 spp.が採集され、これらのアリ類は土壌改良材の地中にコロニーを形成し、繁殖を行っていた(図5)。さらに、ムカデ類は、ある程度、土壌が形成され、安定した環境にならないと生息できない(青木 2015)。このことから、マルチング材の設置と土壌改良材の導入は土壌動物にとって好適なハビタットを創出していたと考えられる。



図5. ジュート麻の下の土壌改良材の中に形成されたトビイロシワアリのコロニー

Figure 5. A *Tetramorium tsushimae* colony in the soil amendment material under jute hemp.

マルチング材の種類の影響

本研究では、マルチング材の種類によって材質や構造が異なるため、土壌動物の群集構造に影響を及ぼすだろうと予想していた。土壌動物の個体数と種類数

は、ともにマルチング材の処理間で有意な違いが認められなかったが、総個体数の偏りを処理間で比較すると、ジュート麻が最も多かった。これは、ジュート麻の材質や構造が、その他のマルチング材と比べて、土壌動物のハビタットとしての環境を改善する効果が高かったことを示唆している。ジュート麻は厚みがあり、繊維の密度が高いことから、植栽地の厳しい気象環境を緩和し、土壌中の環境を安定化させる効果が高かったであろう。また、前述したように、土壌中の空隙の量が個体数の増加につながるトビムシ類やダニ類(金子ほか 2018)は、ジュート麻の繊維の内部にできる空隙をハビタットとして利用していた可能性がある。これらのことから、マルチング材の材質や構造の違いが土壌の物理的な環境(温度・土壌水分など)に違いをもたらし、さらにマルチング材自体が土壌動物のハビタットとしての量や質にも違いをもたらしたと考えられる。その結果として、土壌動物の群集構造を変化させていたのであろう。

マルチング材設置からの時間経過の影響

豊かな森林生物群集が成立し得るための条件は、林床にリター層や下層植生が発達していることである(頭山・中越 1994)。また、リター層に生息している土壌動物は、林の成長や土壌の成熟に伴って、その群集構造を徐々に発達させていく(青木・原田 1985)。本研究では、マルチング材を設置してから時間が経過すると、土壌動物の働きによって土壌が成熟していき、土壌動物の群集構造が豊かになるだろうと予想していた。しかし予想とは反して、土壌動物の個体数と種類数は、いずれも時間経過に伴って右肩上がりに増加するような影響を受けることなく、むしろ総個体数は1年目が多く、4年目が少なくなる傾向が認められた。特に、生態系改変者であるヤケヤスデとナガミミズ目 spp.も、1年目に個体数のピークを迎え、その後、減っていったことも特筆すべき結果といえる。このような群集構造の変化が起こった理由としては、2つの可能性が考えられる。一つ目は、マルチング材の経年劣化によって地表面が露出してきたことである(図3g-i)。マルチング材の経年劣化によって、土壌動物のハビタットとしての環境が徐々に悪化していったと考えられる。

もう一つは、時間の経過に伴って、競争関係や敵対関係が激しくなり、土壌動物の群集構造が徐々に単純化していった可能性である。競争関係の総数はマルチング材設置からの経過時間によって変化しなかった

のに対し、敵対関係の総数が2年後にピークを迎え、3年後、4年後と減少していき、最終的に1年後よりも下回っていた。これは、マルチング材の設置によってハビタットとしての環境が改善され、1年目は多様な土壌動物に利用されるようになったが、2年日以降は環境取容力を上回ってしまい、徐々に群集構造が縮小していった可能性が考えられる。敵対関係の総数がピークを迎えた2年目には、捕食者が関与する敵対関係が13組も確認された。その中で、優占する種群はアリ類(トビイロシワアリ、クロヤマアリ、ケアリ属 spp.)であった。これのアリ類が利用する餌は類似しているため、同じ資源をめぐる競争関係も発生しやすい状況にあったと考えられる。実際、調査中に、アリ類が餌を巣に運ぶ途中で、餌を奪い合う行動が観察されたこともあった。しかし一般的には、トビイロシワアリとクロヤマアリの間では、餌の探索行動を妨げる行動は確認されず、両者には相互関係が働いていないとされてきた。阿部(1971)によると、数十mg程度の餌を運ぶ場合には、トビイロシワアリより大型のクロヤマアリの方が有利となるが、100mgを超える餌を運ぶ場合は、クロヤマアリより集団で餌を取りに行く小型のトビイロシワアリの方が逆に有利となるとされ、一部のアリ類は餌を重さによって使い分けることによって競争を回避している可能性があるという。本研究の調査地でも、このような餌資源の使い分けによって、アリ類の同所的な共生が成立していた可能性も考えられる。

また、飛翔性昆虫を餌として利用する地上徘徊性のクモ類(イツツグモ、エビグモ属 spp、オオクマエビスグモ、ヒナタハエトリグモ属 spp.)が、いずれの処理でも観察された。クモ類は互いに棲み分けをすることで知られている(越智・片桐 1973)。本調査で観察されたクモ類は、お互いに距離を保ちながら、苗木の枝や葉を利用してクモの巣を張って、飛翔性昆虫を捕獲していたことが推測される。

土壌動物が苗木の生長に与える影響

本調査で確認された生態系改変者は、ヤケヤスデとナガミズ目 spp. であった。落葉変換者でもあるミミズ類は、貧栄養状態にある森林土壌中では代謝が鈍くなってしまう微生物の生息環境を改変し、彼らの活動に必要なエネルギーを供給するため、微生物の代謝を活性化させる(Lavelle 1988)。同様に落葉変換者のヤスデ類は、落葉を他の土壌動物が利用しやすい餌資源に変化させることで(Lavelle et al. 1997)、微生物

物の群集構造を改変し(Byzov et al. 1998 ; Oravec et al. 2002)、有機物の無機化を促進させる。これら2種群が土壌形成に及ぼす効果によって、苗木の生長が促進されていた可能性が考えられる(長谷川 2016)。しかしながら、ヤケヤスデとナガミズ目 spp. は、マルチング材の設置から時間が経過するに連れて、徐々に個体数を減少させていった。これは、マルチング材の経年劣化によって、土壌の物理的な環境の変化が変化していったからだと考えられる。ミミズ類とヤスデ類はリター層が発達した土壌環境を好むとされる(安藤ほか 2009 ; 尾崎ほか 2009)。これらの生態系改変者にとって適した環境を維持するためには、マルチング材の定期的な交換が必要であろう。

トビムシ類とササラダニ類は、ともに陸上生態系で個体数が最も多い小型節足動物である(金子 2004)。特に、トビムシ類は、微生物との相互作用を通じて養分循環を促進させる重要な役割を担っている(金田 2018)。トビムシ類が落葉に寄生するカビ類を低頻度で摂食すると、カビ類の活性が一時的には低下するが、やがて代償成長が起こることでカビ類の活性が向上していき、窒素無機化が促進される場合があるという(Hanlon 1981 ; Ineson et al. 1982)。これに類似した現象がダニ類でも起こるとされる(Persson 1989)。また、トビムシ類とダニ類は、ある種類の菌類を選択的に摂食することから、菌類の群集構造や機能に影響を及ぼし、さらに、その間接効果として植物の生長を抑制させたり、逆に促進させることがある(中森・長谷川 2011)。また、トビムシ類と彼らが摂食する落葉に寄生するカビ類、トビムシ類が摂食する菌根菌、さらに菌根菌が共生する植物との間には複雑な相互作用が働いている(金田 2018)。例えば、トビムシ類が活性の弱った菌根菌糸を摂食することで、菌糸中の養分が無機化され、再び植物が利用できるようになる場合もある(Kaneda and Kaneko 2008)。また、カビ類が寄生する落葉がなく、菌根菌しかない場合、トビムシは菌根菌を摂食するため、植物の生長は抑制されるが、落葉がある場合には、菌根菌よりもカビ類を摂食するため、養分循環が促進され、植物の生長も促進される(Klironomos and Kendrick 1996)。さらに、このような相互作用は、トビムシ類の生息密度や土壌中のリン酸濃度にも影響を受ける(金田 2018)。土壌中のリン酸濃度が低いと、植物の生長は促進されるが、高くなるに連れて、生長が抑制され、やがて影響がなくなってしまう、一方で、トビムシ類については、生息密度が低い

と($<1,000\text{m}^{-2}$)、影響はないが、高くなるに連れて、植物の生長が促進あるいは抑制される効果が高まっていき、やがてこれらの効果がともに弱まっていくと考えられている(Lussenhop 1996)。

山砂で造成された植栽地は、土壌中のリン酸濃度が低く、リター層も形成されていないことから、落葉に寄生するカビ類も少ないと考えられる。また、本調査からトビムシ類の生息密度も低いことが示された。さらに、苗木と菌根菌との関係を見ると、植栽地の苗木は、外生菌根菌と内生菌根菌の胞子が9種ずつ配合されている菌根菌(商品名:ミコリーザダッシュ)を投与して生産され、植栽されたものである。これらの菌種のうち、*Laccaria laccata*(キツネタケ属キツネタケ)、*L. bicolor*(キツネタケ属)、*Scleroderma citrinum*(ニセシヨウロ属)、*S. cepa*(ニセシヨウロ属タマネギモドキ)のいずれかと共生関係を結び(熊谷 2019)、植栽地で子実体を発生させていることが確認されている(図6)。これらのことを踏まえると、トビムシ類によるカビ類や菌根菌の摂食を発端とする一連の相互作用が、苗木と菌根菌の相利共生関係に影響を与え、苗木の生長を促進したり、抑制していた可能性は低いと推測される。

一方で、本調査中に、クリオオアブラムシに取りつかれたコナラの苗木が頻りに観察された。クリオオアブラムシはクリの他に、コナラやミズナラにも寄生する(吉富・安達 2013)。また、クリオオアブラムシが分泌する蜜をケアリ属 spp.が摂食している行動も観察された(図7)。このことから、これらの昆虫種の間には相利

共生関係が成立していたと考えられる。クリオオアブラムシはアリ類と共生関係を結ぶことで、テントウムシ類の幼虫などの天敵から身を守っていたのであろう。もし、そのような共生関係が成り立っていたとしたら、クリオオアブラムシから光合成産物を吸引された苗木は、その生長が抑制されていたか、あるいは枯死に至っていた可能性も考えられる。

おわりに

本調査を通じて、本研究で定めた仮説「土壤改良材の導入とマルチング材の設置が土壤動物にとって好適なハビタットを作り、苗木周辺の土壤動物群集が豊かになる」を支持する結果がおおむね得られたといえるだろう。生物の混入が極めて少ないと考えられる山砂を用いて造成された植栽地で本調査を行うことで、「裸地」への苗木の植栽、土壤改良材の導入、マルチング材の設置が、土壤動物群集の形成にどのような影響を及ぼしていくのかの一端を、土壤動物の機能群(微生物食者・落葉変換者・生態系改変者・根食者・捕食者)や生物間相互作用(競争関係・敵対関係・相利共生関係)の視点から明らかにすることができた。また、生態系改変者であるミズミズ類やヤスデ類が土壤形成や苗木の生長にとって重要な役割を果たしている可能性、土壤動物と苗木を利用する菌根菌や昆虫との間に相互作用があること、その相互作用を通じて苗木の生長に影響を与えている可能性も指摘できた。今後は、土壤動物の優占種であるトビムシ類やダニ類の



図6.コナラ苗木周辺に発生したキツネタケ属spp.の子実体。

Figure 6. Fruiting bodies of *Laccaria* spp. around a *Quercus serrata* sapling.



図7.クリオオアブラムシが分泌する蜜を摂食しているケアリ属spp.。

Figure 7. *Lasius* spp. feeding on honeydew secreted by *Lachnus tropicalis*.

生態や機能が明らかにされれば、土壌動物群集が土壌形成や苗木の生長に与える影響がより詳しく理解できるかもしれない。

謝辞

本研究は、経団連自然保護基金(環境教育)【2013年度～2020年度採択、プロジェクト名:被災地里山救済・地域性苗木生産・植栽プロジェクト(通称:たねぶるじゅくと)】の支援を受けて実施された。長野大学里山再生学ゼミナールの学生19名(熊谷 唯、井出 萌、小猿 夏海、佐伯 幸祐、川本 謙伍、武田 浩太、古幡 奏未、小出 悠太、甘利 大河、吉久保 綸美、芳賀 由奈、前田 夏樹、神通川 将司、西田 大輔、杉本 美和、大和田 樹里、横内 はるひ、藤原 貴一、黒岩 爽真)にはフィールド調査にご協力いただいた。特に、武田 浩太氏、古幡 奏未氏、熊谷 唯氏には、貴重なアドバイスもいただいた。以上の方々にはこの場を借りて深く感謝したい。

引用文献

- 青木 淳一(編・著)(2015) 日本産土壌動物: 分類のための図解検索, 第二版. 東海大学出版部, 神奈川
- 青木 淳一, 原田 洋(1985) 環境保全林の形成と土壌動物群集(特にササラダニ群集)の変化. 横浜国立大学環境科学研究センター紀要, 12(1):125-135
- 阿部 進(2017) 土壌生態系サービスを支える土壌動物の役割: 1. 土壌動物と土壌生態系サービス. 日本土壌肥料学雑誌, 88(2):153-157
- 阿部 琢哉(1971) 草地に生息する4種アリ間の食物分配について: 1 食物とその採集行動. 日本生態学会誌, 20(6):219-230
- 安藤 麻菜, 喜多 知代, 河原 輝彦, 菅原 泉(2009) 針葉樹人工林と広葉樹二次林とのミミズ 群集の比較. 東京農大農学集報, 53(2):144-151
- Blouin M, Hodson ME, Delgado EA, Baker G, Brussaard L, Butt KR, Dai J, Dendooven L, Peres G, Tondoh JE, Cluzeau D, Brun JJ (2013) A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64(2):161-182
- Byzov BA, Kurakov AV, Tretyakova EB, Thanh VN, Luu NDT, Rabinovich YM (1998) Principles of the digestion of microorganisms in the gut of soil

- millipedes: specificity and possible mechanisms. *Applied Soil Ecology*, 9(1):145-151
- Hanlon RDG (1981) Influence of grazing by collembola on the activity of senescent fungal colonies grown on media of different nutrient concentration. *Oikos*, 36(3):362-367
- 長谷川 元洋 (2016) 地上部と地下部の連携における土壌生物の役割について—間接的な経路に着目して—. *森林科学*, 77:14-17
- 長谷川 元洋, 藤井 佐織, 金田 哲, 池田 紘士, 菱拓雄, 兵藤 不二夫, 小林 真 (2017) 土壌動物をめぐる生態学的研究の最近の進歩. *日本生態学会*, 67(2):95-118
- 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会 (2012) 「今後における海岸防災林の再生について」 <https://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/kaiganbousairinsaisyuuhoukoku.pdf>, 2021年1月24日最終確認日
- Ineson P, Leonard MA, Anderson JM (1982) Effect of collembolan grazing upon nitrogen and cation leaching from decomposing leaf litter. *Soil Biology and Biochemistry*, 14(6):601-605
- 金子 信博 (2004) 土壌の生成と土壌動物. *科学と生物*, 42(6):408-415
- 金子 信博 (2007) 土壌生態学入門—土壌動物の多様性と機能. 東海大学出版部, 神奈川
- 金子 信博, 伊藤 雅道 (2004) 土壌動物の生物多様性と生態系機能 (<特集2>土壌生態学の新展開). *日本生態学会誌*, 54(3):201-207
- 金田 哲 (2018) 土壌生態系サービスを支える土壌動物の役割: 5. 土壌生態系におけるトビムシの役割. *日本土壌肥料学雑誌*, 89(5):401-407
- Kaneda S, Kaneko N (2008) Collembolans feeding on soil affect carbon and nitrogen mineralization by their influence on microbial and nematode activities. *Biology and Fertility of Soils*, 44(3):435-442.
- 金子 信博, 井上 浩輔, 南谷 幸雄, 三浦 季子, 角田 智詞, 池田 紘士, 杉山 修一 (2018) 有機リンゴ圃場の土壌動物多様性—慣行リンゴ圃場および森林との比較—. *Edaphologia*, 102:31-39
- 加藤 良一, 谷原 一弥, 長根 智洋, 鈴木 隆 (2013) 使い捨てカイロとペットボトルを用いた簡易型ツルグレン装置. *山形大学紀要*, 15(4):41-52
- Klironomos JN, Kendrick WB (1996) Palatability

- of microfungi to soil arthropods in relation to the functioning of arbuscular mycorrhizae. *Biology and Fertility of Soils*, 21(1):43–52.
- 熊谷 唯 (2019) 海岸防災林再生地に植栽するコナラ地域性苗木の生産に適した外生菌根菌の探求. 2018年度 長野大学 卒業論文
- Lavelle P (1988) Earthworm activities and the soil system. *Biology and Fertility of Soils*, 6:237–251
- Lavelle P, Bignell D, Lepage M, Wolters V, Roger Pierre-Armand, Ineson P, Heal OW, Dhillion S (1997) Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33(4):159–193.
- Lavelle P, Decaëns T, Aubert M, Barot S, Blouin M, Bureau F, Margerie P, Mora P, Rossic JP (2006) Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42(1): S3–S15
- Lussenhop J (1996) Collembola as mediators of microbial symbiont effects upon soybean. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(3):363–369
- 三木 健 (2006) 生物多様性と生物間相互作用からの物質循環研究: 新しい方法論の芽生え. *日本生態学会誌*, 56(3):240–251
- 宮城県森林整備課 (2012) 「海岸防災林に適した植栽樹種に関する調査報告書—宮城県における海岸防災林に適した樹種の選定と種苗の供給について—」<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/113397.pdf>, 2021年1月24日最終確認日
- 村上 卓也 (2017) 仙台湾地区における東日本大震災からの海岸防災林復旧の取組み. *水利科学*, 60(6):105–126
- 中森 泰三, 長谷川 元洋 (2011) 土壌動物と微生物の相互作用: その多様性と機能 (日本生態学会 編) *微生物の生態学*, 149–165. 共立出版, 東京
- Oravec O, Nyiro G, Márialigeti K (2002) A molecular approach in the analysis of the faecal bacterial community in an African millipede belonging to the family Spirostreptidae (Diplopoda). *European Journal of Soil Biology*, 38(1):67–70
- 尾崎 浩司, 中田 昌彦, 長坂 有料 (2009) 森林の多面的機能に関わる土壌・生物要因の林相間比較 (5). *46:157–161*
- Persson T (1989) Role of soil animals in C and N mineralisation. *Plant Soil*, 115(1):241–245
- 坂田 宏志 (2000) アブラムシの好蟻性を決定する要因: アリによる捕食と蜜源間のアリを巡る競争. *日本生態学会誌*, 50(1):13–22
- 頭山 昌郁, 中越 信和 (1994) 都市緑地の構造とアリ類の棲息. *日本緑化工学会誌*, 20(1):13–20
- 豊田 鮎 (2004) 森林土壌生態系の腐食連鎖におけるヤスデ類の機能 (<特集2>土壌生態学の新展開). *日本生態学会誌*, 54(3):227–234
- 吉富 博之, 安達 修平 (2013) 島根県のアブラムシ. *ホシザキグリーン財団研究報告*, 16:219–240