

## 菌根菌と海の声がコナラ苗木の生長に与える影響： 東日本大震災後の海岸防災林再生を目指して

Effects of mycorrhizal fungi and sea sound on the growth of  
*Quercus serrata* saplings for seaside protection forest regeneration  
after the Great East Japan Earthquake

武田 浩太\*

熊谷 唯\*

高橋 一秋\*\*

Kota TAKEDA

Yui KUMAGAI

Kazuaki TAKAHASHI

### 要旨

貧栄養の山砂で造成された盛土に苗木が植栽された場合、菌根菌との共生によって苗木の生長は良好になると考えられる。一方で、音楽や低・高周波の音は、植物の生長を促進、または抑制させる場合がある。海岸防災林再生のために植栽された苗木は、海からの音に晒されている。苗木の生産過程において、菌根菌の投与と海の声の暴露がコナラ苗木の生長に及ぼす影響を調査した。苗木48本を2つの列に別けて0.5 m 間隔で配置した。片方の列の苗木には市販の菌根菌の胞子を投与した。海岸で録音した音を列の起点に設置したスピーカーで再生し、音源から苗木までの距離(0.5～12.5 m)を変化させた。なお、発芽後2年目の前半まではバーミキュライトとパーライトを配合した貧栄養土壌を用いて、2年目の後半からは富栄養の人工土壌を客土して苗木を育てた。一般化線形混合モデル(GLMM)の結果、菌根菌の投与は1年目と2年間の苗木の生長に有意な正の効果を与え、音源からの距離は2年目の後半・2年間・3年間の苗木の生長に有意な負の効果を与えていた。したがって、菌根菌と海の声はともにコナラ苗木の生長を促進させた。

キーワード：音響実験、土壌改良材、補償成長反応、ペットボトル植木鉢、たねぶるじえくと

### Abstract

When saplings are planted on filled ground created using oligotrophic soil collected from mountain areas, their growth is improved via mutualism with mycorrhizal fungi. By way of contrast, music and high- and low-frequency sound can either facilitate or reduce plant growth. Saplings planted for seaside-protection forest regeneration are exposed to sound from the sea. We investigated the effects of mycorrhizal fungi and sea sound on the growth of *Quercus serrata* saplings. Forty-eight saplings were planted in two rows and at 0.5 m intervals. The saplings in one row were treated with commercial mycorrhizal fungi spores. Sound recorded at the coast was reproduced by speakers set at the start of each row, so that the distance (0.5–12.5 m) from the sound source to each sapling differed. Saplings were grown in oligotrophic soil consisting of perlite and vermiculite until the first half of the second year after germination, with eutrophic artificial soil material added at the beginning of the second half of the second year. The best GLMM (explain acronym) models found significant positive effects of mycorrhizal fungi on sapling growth at 1 and 2 years and significant negative effects of distance from the source of sea sound on sapling growth for the second half of the

second year, and at 2 years, and 3 years. Both mycorrhizal fungi and sea sound facilitated the growth of *Q. serrata* saplings.

**Keywords :** acoustic experiment, soil material, compensatory growth, plastic bottle sapling pot, Tane-Project

## I. はじめに

宮城県における海岸防災林造成の歴史は1600年から始まった(宮城県森林整備課 2012)。仙台藩主伊達政宗が宮城県仙台平野沿岸において、防潮のためにクロマツを植栽したことが起源である。その後も現在に至るまで海岸防災林の植栽・保育管理事業が続けられてきた。しかし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による大津波は、太平洋沿岸部に広がる海岸防災林を襲撃し、甚大な被害を与えた。その後、宮城県では海岸防災林の再生事業が行われている(林野庁 2013)。

海岸防災林は高潮・飛砂・潮風害・津波から農地や居住地を守る役割を担っている。被災後の再生事業においては、これらの災害防止機能に加え、生物多様性保全や憩いの場などの多面的機能の増強も求められている(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)。また、抵抗性クロマツのみを植栽して総延長140 km の被害林を再生できるほど苗木生産量に余裕がないこと、将来、マツノザイセンチュウによるマツ枯れなどの一斉病虫害被害が起こる可能性を否定できないことを考慮し、植栽樹種の対象として広葉樹も選定されることになった(宮城県森林整備課 2012)。宮県の場合、針葉樹のクロマツ・アカマツの他に、広葉樹のコナラ・ヤマザクラ・ケヤキ・クリが植栽樹種として推奨されている。また同時に、広葉樹の植栽は盛土による植生基盤の造成が前提だとし(宮城県森林整備課 2012)、その基盤材に砂丘地の砂を用いることが望ましいとする考え方が示された(森林総合研究所 2016)。これを受けて、盛土の造成が実施されることになったが、被災地では砂丘地が発達している地域がなく、砂丘地から砂を確保することができなかったため、近隣地域の山砂が用いられることになった(森林総合研究所 2016)。しかしながら、日本の過去の海岸防災林造成事業において、造成時に広葉樹が大規模に植栽された事例(森林総合研究所 2016)や山砂で造成された盛土に広葉樹が植栽された事例(「海岸防災林再生」ワークショップ2016～海岸防災林再生活動の輪を広げていこう

～ 2016年3月4日)は皆無に等しく、予想を超える課題が発生する結果となった。例えば、被災後の盛土造成地で行われた植栽実証実験によると、植栽後の苗木の生長は針葉樹と比較して広葉樹で悪いことが明らかにされている(東北森林管理局 2017)。広葉樹で生育不良が起こった原因としては、貧栄養土壌や土壌の透水不良などの影響の他に、海岸部の環境により発生する強風や潮害(井上ら 2015)、日射や乾燥した土壌(武田・金子 2007)の影響も考えられる。また、山砂は、一般的に保肥力が低いとされる砂岩(新潟県農林水産部 2005)で構成されていたため(村上 2015)、造成された盛土は貧栄養の土壌となってしまった(宮城県農林水産部 2018)。さらに、盛土造成後に進行した土壌硬化が原因とみられる土壌の透水不良や植栽苗木の根の伸長阻害が発生している(篠宮ら 2016)。

このように植栽後の苗木はさまざまな要因に影響を受けることが予想されるが、野生種の樹木の生長やその実生の定着・生長にとって菌根菌との共生が重要であることが知られている(鈴木・松崎 1994)。菌根菌が吸収する養分の一つにリン酸がある。植物は根付近にあるリン酸を養分として吸収するため、やがて根付近のリン酸は欠乏する(斎藤ら 1992)。リン酸は土壌中の移動速度が遅いため、欠乏状態が持続するという。一方、植物の根に寄生した菌根菌は、菌糸をリン酸欠乏域を越えて広く伸ばし、土壌中のリン酸を吸収することができる。菌根菌はリン酸を植物に供給し、植物からはエネルギー源となる炭素化合物を受け取ることで両者の相利共生関係が成り立っている(斎藤ら 1992)。例えば、奈良(2004)は、複数種の菌根菌を接種したミヤマナギ実生を富士山高山帯の貧栄養土壌に植栽する実験を行ったところ、菌根菌非接種の実生と比較して実生の地上部に含まれる窒素・リンの量が多くなり、生長も促進されたと報告している。また、岡部ら(1994)は、アカマツ・クロマツの苗木に菌根菌を植栽直前に接種させる処理を施したところ、感染率が100 % となり、植栽後の生残率と生長量が向上することを明らかにした。一般的に植物の生長を促

進させる手段の一つとして肥料があり、耐病・耐虫の機能を持つ種類もある。しかし、施肥を適切に行わなかった場合、水質汚濁や富栄養化、肥料成分由来の温室効果ガスの発生が起こることが問題視されている(農林水産省 2004)。したがって、菌根菌を用いた手法は、本来の生態系で成り立っている植物と菌根菌が相互に利用しあう生物間相互作用のプロセスを上手に活用した手法であるといえる。そのため、肥料のような環境負荷が発生しにくいというメリットが期待される。ところが、被災後の盛土造成に用いられた山砂には、菌根菌がほとんど生息していないことが明らかにされており、菌根菌の人為的な導入の必要性が指摘されている(森林総合研究所 2016)。菌根菌と共生関係を結ばせた苗木を植栽することで、貧栄養の土壌においても苗木の生長を促進させることが期待できるからである。現在、宮城県では、クロマツ苗木を対象に菌根菌の胞子を接種させてから植栽する実験が被災後に造成された盛土で行われている(森林総合研究所 2016)。しかしながら、広葉樹を対象に菌根菌を活用した苗木生産・植栽実験については事例がない。

一方で、植物の生長に影響を与える要因の一つとして「音」が知られている。その先行研究は、ロシアのドロシー・リアック夫人の実験にさかのぼることができる(佐藤 2012)。彼女は植物(トウモロコシ、カボチャ、ペチュニアなど)にクラシックとロックを聞かせたところ、音楽の種類によって植物の反応が異なり、クラシックで生長が良好になることを明らかにした。他にもマカラスムギを対象にクラシックと500 Hz の音を聞かせた場合は生長が促進されたのに対して、ロックと100 Hz 以下の音を聞かせた場合には生長が抑制されたという事例がある(佐藤 2012)。また、ロサキネンシスを対象にヴェディックチャンツ(ヒンドウ教の聖歌)とクラシックを聞かせた場合は生長が促進されたのに対して、ロックを聞かせた場合には生長が抑制されたという事例もある(Chivukula and Ramaswamy 2014)。これらの事例で共通する植物の反応は、ロックや100 Hz 以下の低音で生長が抑制されるといった反応を示したことである。海岸防災林再生地では、植栽後の広葉樹に絶え間なく海の音を聞かせている状況といえる。また、海の音にはロックと同様の低音が多く含まれていると考えられる。したがって、低い海の音に影響を受けて、植栽後の広葉樹の生長は抑制されると推測される。しかしながら、先行研究は全て農作物や園芸種を対象とした実験であり、野生種を対象に音が生長

に与える影響を実験した研究事例は皆無である。

被災後の海岸防災林再生事業において植栽されている広葉樹の一つにコナラが挙げられる。植栽樹種としてのコナラの特徴は、① 十分な樹高をもち、多様な森づくりや生物多様性の保全に適している樹種であること(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)、② 宮城県の里山広葉樹林の最優占種であり、生長が早く、種子の確保が容易であること(宮城県森林整備課 2012)、③ 被災した残存海岸防災林の調査で生残と種子生産が確認された樹種であること(高橋・高橋 2017)の3点である。このことから、将来、コナラは海岸防災林を構成する主要樹種になると考えられる。

本研究では、海岸防災林の主要樹種として期待される広葉樹のコナラに着目し、貧栄養土壌あるいは富栄養土壌の条件下で、以下に示す2点を明らかにすることで、苗木生産過程において、菌根菌と海の音がコナラ苗木の生長に正の影響を与えるのか、あるいは負の影響を与えるのかについて検証することを目的とした。

- (1)菌根菌の胞子の投与はコナラ苗木の生長を促進させるか?
- (2)海の音の暴露はコナラ苗木の生長を抑制させるか?

これらの結果に基づいて、将来、菌根菌と共生関係を結ばせたコナラ苗木を海の音が聞こえる海岸防災林再生地に植栽した場合に、予想されるコナラ苗木の反応について考察するとともに、苗木生産・植栽についての提案をまとめる。

## II. 方法

### 1. 苗木生産に用いた植木鉢と土壌

角形ペットボトル(2ℓ)の飲み口をカットして植木鉢(図-1a: 縦 8.5 cm、横 10.8 cm、高さ 23.5 cm)を作製した。苗木生産の1年目に用いた土壌は、十分な養分(窒素・リン酸・カリウム)を含まない土壌改良材のバーミキュライト(保水の機能)と真珠岩パーライト(保水・排水の機能)を1:1の割合で配合して作製し、植栽地における貧栄養土壌を再現した。2年目は、苗木の生長を促すために、植栽基盤材の人工土壌(保水・排水・肥料の機能)、土壌改良材のバーク堆肥(肥料の機能)、バーミキュライト、真珠岩パーライトを15:2:2:2の割合で配合して十分な養分を含む土壌を作製し、客土をした。具体的には、同様



のペットボトルの飲み口をカットして新たに作製した植木鉢(図-1b: 縦 8.5 cm、横 10.8 cm、高さ 22.8 cm)に富栄養土を入れてから、底をカットした1年目の植木鉢の下部に連結した(図-1c: 縦 8.5 cm、横 10.8 cm、高さ 38.0 cm)。これによって、貧栄養土壌と富栄養土壌の異なる条件下で苗木の生長を調査できることに加え、主根のルーピングによる苗木の生長不良を防ぐことができると考えた。なお、1年目、2年目ともに、根腐れを防止するために、植木鉢の底に0.2ℓの真珠岩パーライトを入れた。ここで用いた人工土壌は、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をはじめ、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働きを持つ(グリーンインフラの東邦レオ

<https://greeninfrastructure.jp/products/vivasoil/>)。

苗木生産に用いた4種類の土壌(付表-1: 人工土壌・パーミキュライト・真珠岩パーライト・パーク堆肥)の肥料成分を把握するために、農大式簡易土壌診断キット「みどりくん」を用いて、硝酸態窒素( $\text{NO}_3\text{-N}$  kg/10 a)、水溶性リン酸( $\text{P}_2\text{O}_5$  kg/10 a)、水溶性カリウム( $\text{K}_2\text{O}$  kg/10 a)を測定し(表-1)、1年目の土壌は貧栄養、2年目の土壌は富栄養であることを確認した。

## 2. 苗木の生産と管理

実験に用いるコナラの苗木(1年生実生)を確保するために、2016年10月に益岡公園「白石城」(宮城県白石市)で種子を採取し、長野大学(長野県上田市)の研究室に持ち帰ったのち、冷蔵庫(5℃)で種子を保管した。2017年4月に種子を水に入れて沈んだものを発芽能力がある健全種子として選別し、1年目の植

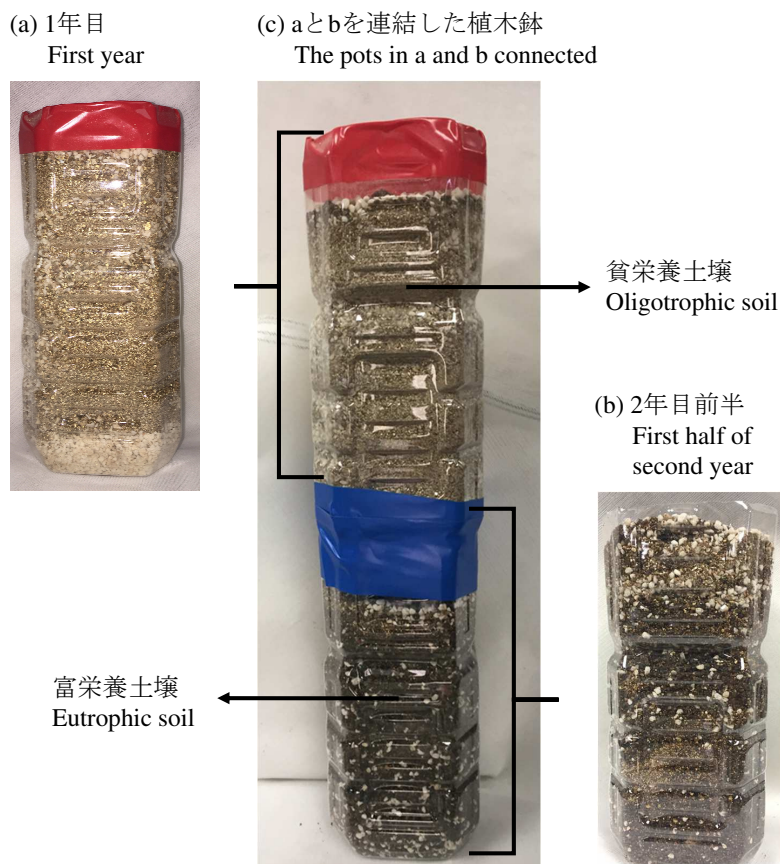


図-1. 1年目(a)、2年目前半(b)、aとbを連結した植木鉢(c)。

Figure 1. Plant pots in the first year (a), first half of second year (b), and the pots in a and b connected (c) .

表-1. 苗木生産に使用された土壌材の肥料成分.

Table 1. Fertilizer components of the soil materials used for growing saplings.

| 土壌材<br>Soil material             | 硝酸態窒素<br>Nitrate nitrogen<br>( $\text{NO}_3\text{-N}$ kg/10 a) | 水溶性リン酸<br>Water-soluble phosphate<br>( $\text{P}_2\text{O}_5$ kg/10 a) | 水溶性カリウム<br>Water-soluble potassium<br>( $\text{K}_2\text{O}$ kg/10 a) | pH  |
|----------------------------------|--|--|---|-----|
| 人工土壌<br>Artificial soil material | 40   | 10   | 41.6  | 4.7 |
| バーミキュライト<br>Vermiculite          | 0  | 8.5  | 10  | 4.5 |
| 真珠岩パーライト<br>Perlite              | 0  | 8  | 10  | 4.5 |
| バーク堆肥<br>Bark compost            | 2  | 40   | 75  | 6.5 |
| 配合土壌<br>Compounded soil          | 31.6   | 31.6   | 31.6  | 5   |

配合土壌は人工土壌、バーミキュライト、真珠岩パーライト、バーク堆肥を15 : 2 : 2 : 2の比率で構成された

The compounded soil was composed of artificial soil material, vermiculite, perlite, and bark compost at a ratio of 15 : 2 : 2 : 2

木鉢に1種子ずつ蒔き出した。2017年7月までに植木鉢48本から1個体ずつ発芽した実生(計48本)を実験対象とし、長野大学の校舎屋上にある苗木生産施設(付図-1: 全長14.8 m、幅2.12 m、高さ1.93 m、単管・塩化ビニール製波板・木材で作製)の中に0.5 m間隔(0.5 m ~ 12.5 m)の2列で配置した。苗木生産施設内に射し込む日光の遮断率を0% とするために、施設の屋根は作製しなかった。また、種子を蒔き出した2017年4月から実験を終了した2019年10月まで、4月~9月は週に3回、10月~12月は週に2回、植木鉢底部に開けた水抜き用の穴から水が出るまで十分に水を与えた。1月~3月は土壌が十分に水分を含んでいたため、水を与えなかった。

### 3. 菌根菌の投与

菌根菌は商品名「ミコリーザダッシュ」を用いた。本商品には外生菌根菌 (*Laccaria laccata*, *Laccaria bicolor*, *Pisolithus tinctorius*, *Rhizopogon amylopogon*, *Rhizopogon villosuli*, *Rhizopogon fulvigleba*, *Rhizopogon luteolus*, *Scleroderma citrinum*, *Scleroderma cepa*) と内生菌根菌 (*Gigaspora margarita*, *Glomus aggregatum*, *Glomus brasilianum*, *Glomus clarum*, *Glomus deserticola*, *Glomus etunicatum*, *Glomus monosporus*, *Glomus mosseae*,

*Rhizophagus irregularis*) の胞子が9種ずつ配合されている。2017年8月と9月、2018年8月の3回に別けて菌根菌を投与した。本商品は粉末状であるため、1袋(5 mg)を水道水5 ℓに溶かし込んだ菌根菌溶液を作ったのち、1回の投与で苗木1個体につき0.2 ℓずつ与えた。苗木生産施設に2列で配置した苗木48個体のうち、1列目の23個体を菌根菌投与の処理、2列目の25個体を菌根菌非投与の処理とした。

### 4. コナラ苗木と共生できる菌種の特定

本実験に先立って、「ミコリーザダッシュ」に含まれる菌種のうち、コナラ苗木と共生関係を結ぶことができる菌種の特定を試みた(熊谷 2019)。2014年10月に深山山麓少年の森「菱沼の郷」(宮城県山元町)で採取した種子を同様の植木鉢に蒔き出したのち、「ミコリーザダッシュ」を投与して2年間育てた99個体の苗木を調査対象とした。2016年10月に外生菌根菌である3種類(付図-2)の子実体(キノコ)の発生を確認した。これらの子実体を形態的な特徴から同定したところ、キツネタケ属 sp、ニセショウロ属 sp、サクラシメジ属 spであることが明らかになった。次に、これらの菌種が「ミコリーザダッシュ」由来かどうかを子実体の形態的な特徴から判断した。その結果、キツネタケ属 spについては「ミコリーザダッシュ」の*L. laccata*(キツネタケ

属キツネタケ)と*L. bicolor*(キツネタケ属)の2種のうちのいずれか、ニセショウロ属 spは*S. citrinum*(ニセショウロ属)と*S. cepa*(ニセショウロ属タマネギモドキ)の2種のうちのいずれかの菌種であると特定された。一方、サクラシメジ属 spは「ミコリーザダッシュ」に含まれる菌種ではなく、別由来であった。

子実体の発生を確認した植木鉢のコナラ苗木が菌根を形成しているかどうかを確認するために、子実体が発生した植木鉢6本を一部解体して計23本の根を採取した。各根から菌根化しているとみられた部分を切り取り、水道水で洗浄してからプレパラートを作成し、顕微鏡下で観察した。菌根の形態的特徴(菌根：5タイプ、菌糸：5タイプ)と色彩的特徴(透明度：2タイプ、菌根：6タイプ、菌糸：4タイプ)に関する独自の基準を作成して菌根タイプを分類した(付表-2、付図-3)。独自の基準の作成には、奈良・宮本(2014)の外生菌根図鑑を参考にした。

独自の基準に従って、コナラ苗木の根に形成された菌根タイプを分類した。その結果、キツネタケ属 spで2種類、ニセショウロ属 spで10種類、サクラシメジ属 spで5種類の固有な菌根タイプが特定できた(付表-3)。したがって、子実体が発生した植木鉢の苗木は菌根を形成し、これらの菌種と共生関係を結ぶことができると判断した。また、複数の子実体で共通する菌根タイプは、ニセショウロ属 spとキツネタケ属 spの間で1種類、ニセショウロ属 spとサクラシメジ属 spの間で1種類、ニセショウロ属 sp、キツネタケ属 sp、サクラシメジ属 spの3種間で1種類であった(付表-3)。異なる菌種が同じ菌根タイプを形成することはないと仮定すると、共通する菌根タイプが現れた理由として、その菌種はコナラと共生関係を結ぶことはできたが、生長が十分ではなく、子実体を発生させることができなかったと考えられる。

## 5. 海の音の暴露

海の音の収録は、「みやぎ海岸林再生みんなの森林づくり活動」(宮城県 <https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/sinrin/minmori.html>)の対象地である海岸防災林再生地(山元地区)の周辺で行った。ここは筆者らが植樹活動を実施している場所である「被災地里山救済・地域性苗木生産ネットワーク(通称:たねぶろじゅくとネットワーク)」(<https://tane-project.org/>)。海の音の録音は、砂浜の汀線から内陸へ0.5 m(北緯37°58′ 31.2″、東経 140°54′ 52.4″)と、そこから西へ、100 m、120 m、140 m、160 m、180 m、200 m、

220 mの計7地点で、ハンディレコーダー(型式：H6、ZOOM社製、記録フォーマット：WAV、サンプルレート：96 kHz)を用いて行った。録音した音を音声編集ソフト(WavePad マスター版 v 8.08、サンプルレート：6 Hz～192 kHz)を用いてFFT(高速フーリエ変換)を行って、周波数特性(海の音が有する周波数領域と各周波数の音量との関係)を可視化した。苗木生産施設に2列で配置した苗木の起点にスピーカー(型式：FS-4AS・PM-SUBmini2、FOSTEX社製、サンプルレート：40 Hz～40 kHz)と再生機(型式：SV016、ieGeek社製)を設置し、汀線から0.5 mの地点で録音した海の音を再生した。音源となるスピーカーから各植木鉢までの距離は0.5 m 間隔とし、最短を0.5 m、最長を12.5 mとした。

音源からの距離が0.5 m、3 m、5.5 m、8 m、10.5 m、12.5 mの6地点でスピーカーから発生する音を同様のハンディレコーダーで録音した。録音した音を同様の音声編集ソフトを用いて分析を行い、各地点の音の周波数特性を把握した。そのうえで、苗木に暴露させる音量を調整して、音源からの距離が0.5 m～12.5 mの範囲の周波数特性と、海岸防災林再生地の汀線から100 m～220 mの範囲の周波数特性を類似させた。図-2a-bに、実際の海の音とスピーカーで再生した海の音の周波数特性を示す。なお、汀線から100 m～220 mの範囲は、林帯の海側の縁から50 m～170 mの地点と一致しており、実際に広葉樹が植栽される可能性が高い範囲と考えた。海からの影響が強い林帯の最前線(海側の縁から50 mまで)は、クロマツの植栽が推奨されているため、最前線については本実験で再現する音の対象から外した。海の音を苗木に暴露させる期間は、実験開始の2017年7月から実験終了の2019年10月までとした。

## 6. 苗木の計測

コナラ苗木の生長量を求めるために、コンベックスを用いて幹の長さとして全ての枝の長さを計測した。1年目の計測は2017年に2回行った。コナラの場合、大型の種子ほど、子葉に蓄えられている養分量が多く、発芽後の初期生長期に投資できる養分量も多い(阿部ら 1997)。そこで、種子サイズに依存した初期生長の影響を排除するために、1回目の計測は子葉の養分を使い果し、発芽後の初期生長期がほぼ終了したとみられる7月25日に行った。2回目の計測は落葉が始まり、生長期がほぼ終了したとみられる11月3日に行った。

2年目の計測は富栄養土壌の植木鉢を連結した

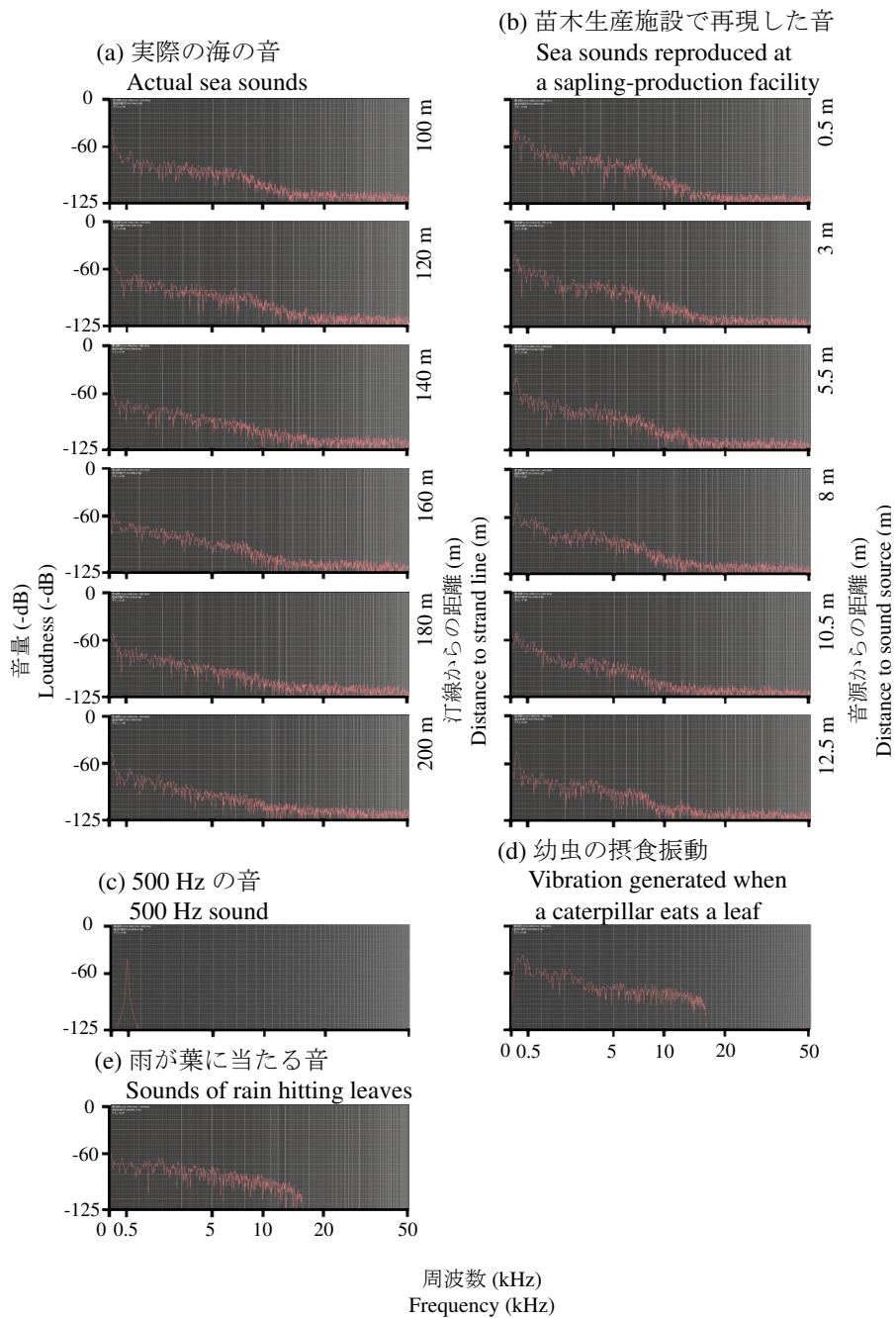


図-2. 実際の海の音(a)、苗木生産施設で再現した海の音(b)、500 Hz の音(c)、幼虫の摂食振動(d)、雨が葉に当たる音(e)の周波数.

Figure 2. Frequency of actual sea sounds (a), sea sounds reproduced at a sapling-production facility (b), 500 Hz sound (c), vibration generated when a caterpillar eats a leaf (d) and sounds of rain hitting leaves (e).



2018年8月8日と生長期がほぼ終了したとみられる11月2日に行った。なお、5月～10月の展葉期の中期に客土を行った理由は、越冬貯蔵栄養分を利用する展葉期前半と使い尽くして利用できない展葉期後半を分離して、生長量を求めるためである。落葉広葉樹は展葉期の初期に越冬貯蔵栄養分を優先的に利用する(近藤・大賀 2000)。本実験の場合、2年目の展葉初期には、前年に貧栄養土壌、菌根菌の投与、海の音の暴露の影響を受けながら蓄積されてきた越冬貯蔵栄養分が利用されることが予想された。そこで、前年の影響の一部が2年目の展葉期の初期に現れると仮定することにした。したがって、この仮定を前提とすると、展葉中期の8月に富栄養土壌を客土することで、貧栄養

土壌と富栄養土壌の異なる条件下での生長量を、展葉期前半と展葉期後半に分離して比較することができると考えた。

3年目の計測は生長期がほぼ終了したとみられる2019年10月11日に1回のみ行った。

## 7. データ解析

計測日毎に幹の長さや全ての枝の長さの積算値(以下、幹枝長)を求め、生長量は各計測日の幹枝長の差分として求めた。すなわち、1年目は2017年7月と同年11月、2年目前半は2017年11月と2018年8月、2年目後半は2018年8月と同年11月、3年目は2018年11月と2019年10月、2年間は2017年7月と2018年11月、3年間は2017年7月と2019年10月の幹枝

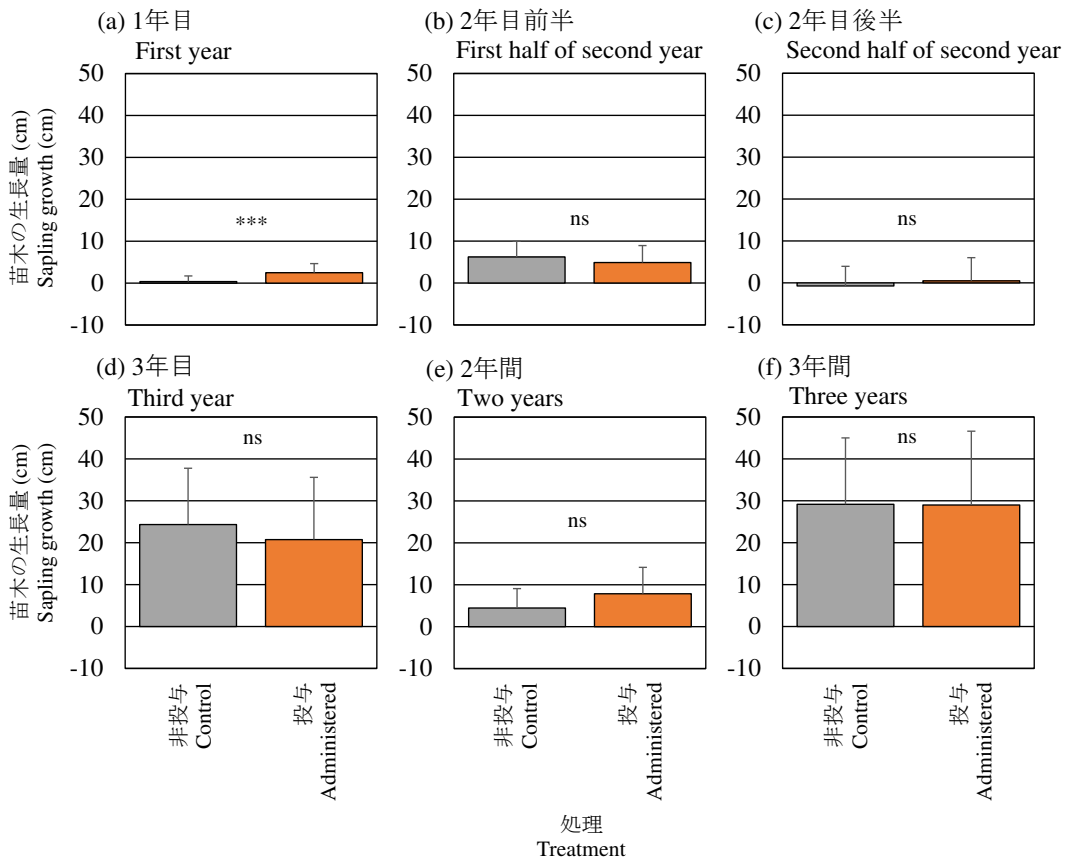


図-3. 1年目(a)、2年目前半(b)、2年目後半(c)、3年目(d)、2年間(e)、3年間(f)の菌根菌処理間のコナラ苗木の生長量の比較。\*\*\*:  $p < 0.001$ , ns: 有意ではない( $p \geq 0.05$ ),  $t$  検定。ひげは平均値と標準偏差を表す。

Figure 3. Comparisons of the growth of *Q. serrata* saplings with and without mycorrhizal fungi in the first year (a), first half of second year (b), second half of second year (c), third year (d), two years (e), and three years (f). \*\*\*  $p < 0.001$  and ns, not significant ( $p \geq 0.05$ ),  $t$ -test. Each bar indicates the mean  $\pm$  SD.



長の値を用いて、生長量を後者から前者を差し引いた差分として求めた。

菌根菌投与・非投与の処理間で苗木の生長量に違いがみられるかどうかを明らかにするために、*t*検定を行った。音源からの距離と苗木の生長量の間に相関があるかどうかを明らかにするために、Pearsonの積率相関係数(*r*)を求めた。また、苗木の生長量を応答変数、菌根菌投与・非投与と音源からの距離を説明変数とする一般化線形混合モデル(GLMM)を作成し、AICによるモデル選択を行った。生長量を求めた期間の始めの幹枝長をランダム変数とすることで、苗木サイズが生長量に与える影響を排除できると考えた。モデルに用いた確率分布は、正規分布(identity link 関数)である。解析にはフリーの統計ソフトR version 3.5.1 (R Development Core Team 2018)およびlme4、carパッケージを用いた。

### III. 結果

1年目の幹枝長の生長量は、菌根菌非投与で $0.36 \pm 1.35$  cm(平均値  $\pm$  標準偏差)、菌根菌投与では $2.49 \pm 2.17$ であり、両者の間には有意な差が認められた(図-3a: *t*検定、 $p < 0.001$ )。よって、菌根菌の投与によって苗木の生長が促進される効果を示された。一方、それ以外の期間実験の生長量については、菌根菌投与・非投与の処理間で有意な差は認められなかった(図-3b-f: *t*検定、 $p \geq 0.05$ 、2年目前半: 菌根菌非投与  $6.21 \pm 3.78$  cm、菌根菌投与  $4.89 \pm 4.08$  cm、2年目後半: 菌根菌非投与  $-0.74 \pm 4.68$  cm、菌根菌投与  $0.48 \pm 5.53$  cm、3年目: 菌根菌非投与  $24.33 \pm 13.43$  cm、菌根菌投与  $20.74 \pm 14.85$  cm、2年間: 菌根菌非投与  $4.45 \pm 4.63$  cm、菌根菌投与  $7.85 \pm 6.3$  cm、3年間: 菌根菌非投与  $29.2 \pm 15.84$  cm、菌根菌投与  $29.0 \pm 17.62$  cm)。なお、枯死した苗木の数は、1年目に1個体(菌根菌

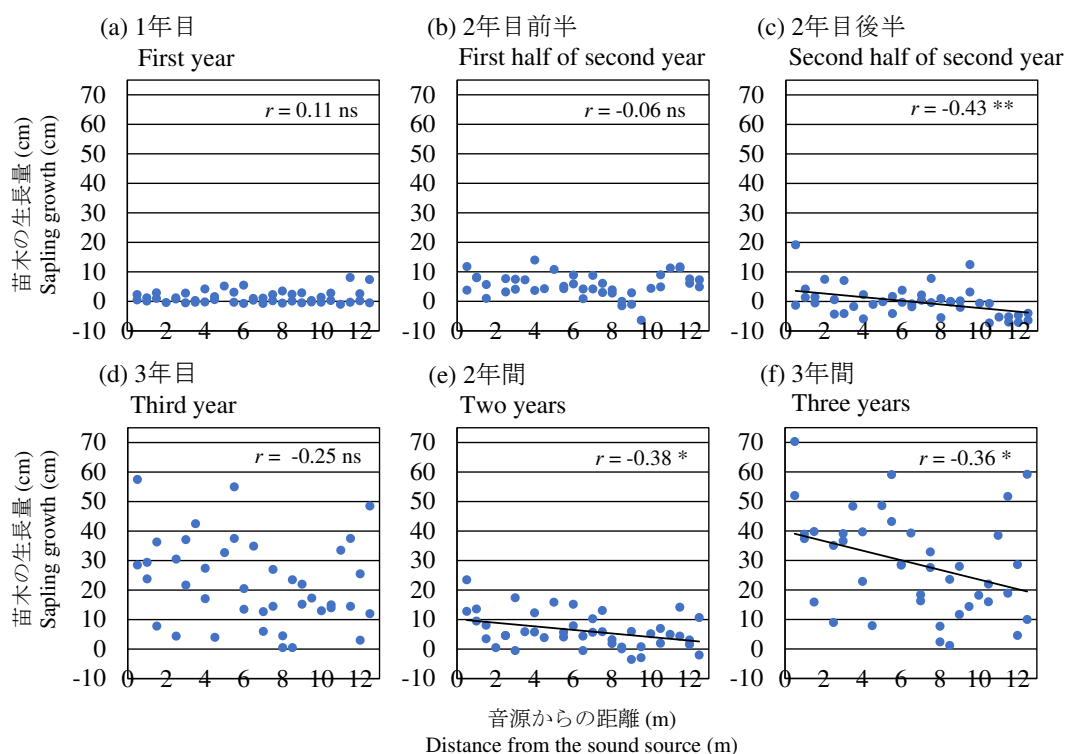


図-4. 1年目(a)、2年目前半(b)、2年目後半(c)、3年目(d)、2年間(e)、3年間(f)の音源からの距離とコナラ苗木の生長量の比較。\*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , ns: 有意ではない( $p \geq 0.05$ ), ピアソンの積率相関係数。

Figure 4. Relationships between distance from the source of sea sound and growth of *Q. serrata* saplings for the first year (a), first half of second year (b), second half of second year (c), third year (d), two years (e), and three years (f).

\*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , and ns, not significant ( $p \geq 0.05$ ), Pearson's product moment test.

表2. 菌根菌の投与と音源からの距離がコナラ苗木の生長に与える影響に関する一般化線形混合モデル(GLMM)の結果。  
Table 2. Results of the best generalized linear mixed models (GLMM) for the effects of administering mycorrhizal fungi and distance from source of sea sound on the growth of *Q. serrata* saplings.

| 実験期間<br>Experiment period                   | モデル<br>Model | AIC     | 応答変数<br>Response variable | 説明変数<br>Explanatory variable                 | 係数<br>Coefficient | p   |
|---|--------------|---------|---------------------------|--|-------------------|-----|
| 1年目<br>First year                           | Best         | 196.050 | 苗木の生長<br>Sapling growth   | 菌根菌投与<br>Administration of mycorrhizal fungi | 2.49              | *** |
| 2年目前半<br>The first half of the second year  | Best         | 238.357 | 苗木の生長<br>Sapling growth   | 菌根菌投与<br>Administration of mycorrhizal fungi | 4.79              | ns  |
| 2年目後半<br>The second half of the second year | Best(full)   | 265.803 | 苗木の生長<br>Sapling growth   | 菌根菌投与<br>Administration of mycorrhizal fungi | 4.29              | ns  |
| 3年目<br>Third year                           | Best(full)   | 332.078 | 苗木の生長<br>Plant growth     | 音源からの距離<br>Sound source distance             | -0.56             | **  |
| 2年間<br>Two years                            | Best(full)   | 272.255 | 苗木の生長<br>Sapling growth   | 菌根菌投与<br>Administration of mycorrhizal fungi | 27.18             | ns  |
| 3年間<br>Three years                          | Best(full)   | 342.218 | 苗木の生長<br>Sapling growth   | 音源からの距離<br>Sound source distance             | -0.98             | ns  |
|   |              |         |                           | 菌根菌投与<br>Administration of mycorrhizal fungi | 11.39             | **  |
|   |              |         |                           | 音源からの距離<br>Sound source distance             | -0.46             | **  |
|   |              |         |                           | 菌根菌投与<br>Administration of mycorrhizal fungi | 39.71             | ns  |
|   |              |         |                           | 音源からの距離<br>Sound source distance             | -1.63             | *   |

ns : not significant ( $p \geq 0.05$ ), \* :  $p < 0.05$ , \*\* :  $p < 0.01$ , \*\*\* :  $p < 0.001$   
ns : 有意ではない ( $p \geq 0.05$ ), \* :  $p < 0.05$ , \*\* :  $p < 0.01$ , \*\*\* :  $p < 0.001$

非投与 0個体、菌根菌投与 1個体)、2年目前半に4個体(菌根菌非投与 3個体、菌根菌投与 1個体)、3年目には7個体(菌根菌非投与 5個体、菌根菌投与 2個体)であった。

音源からの距離と幹枝長の生長量の間には、2年目後半(図-4c : Pearsonの積率相関係数 $r = -0.43$ 、 $p < 0.01$ )、2年間(図-4e :  $r = -0.38$ 、 $p < 0.05$ )、3年間(図-4f :  $r = -0.36$ 、 $p < 0.05$ )におい

て有意な負の相関が認められた。したがって、幹枝長の生長量は音源からの距離が減少するに連れて増加したことから、海の音の暴露によって苗木の生長を促進される効果が示された。一方、1年目(図-4a :  $r = 0.11, p \geq 0.05$ )、2年目前半(図-4b :  $r = -0.06, p \geq 0.05$ )、3年目(図-4d :  $r = -0.25, p \geq 0.05$ )については両者の間に有意な相関は認められなかった。

一般化線形混合モデル(GLMM)とAICによるモデル選択を行った結果、1年目、2年目後半、2年間、3年間では有意なモデルが得られた(表-2 :  $p < 0.05$ )。幹枝長の生長量に対して、1年目は菌根菌投与(AIC = 196.05,  $p < 0.001$ )が有意な正の効果を、2年目後半は音源からの距離(AIC = 265.8,  $p < 0.01$ )が有意な負の効果を与えていた。また、2年間の生長量は菌根菌投与(AIC = 272.25,  $p < 0.01$ )から有意な正の効果を、かつ音源からの距離(AIC = 272.25,  $p < 0.01$ )からは有意な負の効果を受けていた。3年間の生長量については音源からの距離(AIC = 342.21,  $p < 0.05$ )の有意な負の効果が認められた。したがって、有意なモデルが得られた実験期間については、菌根菌の投与および海の音の暴露が苗木の生長を促進させる効果を持つことが示された。一方で、2年目前半と3年目の生長量については有意なモデルが得られなかった(2年目前半 : AIC = 238.35, 3年目 : AIC = 332.07,  $p \geq 0.05$ )。

#### IV. 考察

##### 1. 菌根菌の効果について

1年目の貧栄養土壌の条件下で、菌根菌の投与はコナラ苗木の生長を促進させた。このことから、菌根菌を投与された苗木はいくつかの菌種と共生関係を結ぶことができたことで、貧栄養土壌からでも養分を吸収し、生長できたことが示唆された。よって、本研究の結果は、菌根菌を感染させた実生や苗木は植栽後の生長が良好になることを示した先行研究(奈良 2004 ; 岡部ら 1994)の結果と一致した。しかし、2年目前半の貧栄養土壌、2年目後半・3年目の富栄養土壌の条件下では、生長に与える菌根菌投与の効果は認められなかった。菌根菌の発芽・感染・生長は水分、温度、土壌の pH・養分などのさまざまな土壌環境の影響を受ける(斎藤ら 1992)。つまり、菌根菌の効果が1年目のみに認められ、2年目以降は認められなかった理由は、土壌環境の違いにあったのではないかと考えられた。

まず、土壌環境のうちの水分に着目し、菌根菌の効果が2年目以降に現れなかった理由について考察する。稲の場合、菌根菌の感染は陸稲では確認されるが、水稻では確認されないことが多く、これは土壌中の酸素濃度によって菌根菌の感染が左右されることによる(鈴木・松崎 1994)。本研究では、実験期間中は同じ条件で水を与えていた。また、植木鉢の底には根腐れを防止するために排水効果のある真珠岩パーライトを入れて、酸欠に陥りにくい状態にしていた。したがって、水分環境の変化が菌根菌の発芽・感染・生長に影響を及ぼしていた可能性は低いと考えられる。次に、土壌中の温度については、多くの菌根菌は気温が20℃以上で発芽することが知られている(鈴木・松崎 1994)。本研究の実験地である上田市の展葉初期～中期(5～8月)の平均気温は、約21.3℃(2017年)、約22.4℃(2018年)、約21.4℃(2019年)であった。各年の平均気温は20℃を上回っていたため、温度が菌根菌の発芽・感染・生長に影響を与えていたとは考えにくかった(気象庁 [http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec\\_no=48&block\\_no=0402&year=2018&month=&day=&view=a2](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=48&block_no=0402&year=2018&month=&day=&view=a2))。続いて、土壌の pH 値に着目すると、1年目の貧栄養土壌の pH は4.5、2年目後半以降の富栄養土壌の pH は5.0であった(表-1)。予備実験で、本実験に用いた菌根菌のうち、菌根菌投与後に子実体(キノコ)が発生し、コナラ苗木と共生できると特定された菌種は *L. laccata*、*L. bicolor*、*S. citrinum*、*S. cepa* であった。Sylvia and Sinclair(1982)によると、*L. laccata*は土壌の pH が5.0の時に菌糸の生長が最大となること、pH が5.0の時に宿主植物(ペイマツ *Douglas Fir Pseudotsuga menziesii*(Mirb.))の生長が最大の100%に達したとすると、pH が4.5の時に生長量は約90%になったことを報告している。また、*L. bicolor*は土壌の pH が6.6の時に菌糸の生長が最大となり(Jongbloed and Pauwels 1990)、*S. cepa*は土壌の pH が4.0～6.0の時に宿主植物(Timor white gum *Eucalyptus urophylla*)の生長が最大になったという(Aggangan et al. 1996)。これらの先行研究と比較すると、本実験期間中の pH 値は菌根菌が発芽・感染・生長できる生育可能範囲内であり、2年目後半以降の pH 値に至っては菌根菌の生長に好適な環境に近かった可能性がある。したがって、実験期間中の pH 値のわずかな変化が菌根菌の効果を失わせる主要な要因ではなかったと考えられる。

最後に、土壤中の養分に着目し、菌根菌の効果との関係についてみる。感染した菌根菌の生長には、宿主植物のリン栄養状態が影響を及ぼす(俵谷 1998)。つまり、植物がリン欠乏状態に陥ると、光合成産物(アミノ酸、糖、有機酸など)を根から滲み出させる量を増加させて、菌根菌の菌糸の生長を促進させる反応を示すようになる。したがって、菌根菌の発芽・感染・生長に影響を与えた要因は、土壤中のリン酸の変化であると予想される。本実験に用いた貧栄養土壌のリン酸濃度は10 mg/100 g(10 kg/10 a)、富栄養土壌では31.66 mg/100 g(31.66 kg/10 a)であったため、富栄養土壌を客土した2年目後半以降にリン酸濃度は増加したといえる。つまり、1年目の貧栄養土壌はリン欠乏状態であったため、コナラ苗木は菌根菌に光合成産物を供給して菌糸の生長を促進させようとしていたと考えられる。それに対して、菌糸は、苗木から供給された光合成産物を利用して菌糸をリン酸欠乏域を越えて伸ばすことができたのではないだろうか。そして、生長した菌糸は土壤中のリン酸を吸収し、コナラ苗木に供給していたと推測される。また、菌糸は窒素やカリウムなどの植物の生長にとって必要な養分も吸収し、宿主植物に供給することから(矢野 2006 ; 池見 2008)、1年目のコナラ苗木は菌根菌から供給された必須栄養素(窒素・リン酸・カリウム)を利用して生長を促進させることができたという推測が成り立つだろう。一方で、菌根菌の効果がみられなくなった2年目前半は、1年目と同様の貧栄養土壌であり、かつ1年目に生長できた菌糸が残っていたとみられるが、土壌中の養分を利用し尽くしていたため、苗木は生長できなかったのであろう。同様に、菌根菌の効果が現れなかった2年目後半以降は土壌条件が富栄養に変わったために、苗木はリン欠乏状態から脱する結果となり、菌糸の生長が促進されなかったと考えてよいだろう。さらに、土壌中のリン酸濃度が高くなり過ぎると、吸収の律速が起らず、宿主植物が菌根菌に感染していても生長促進の効果が現れにくいとの報告がある(鈴木・松崎 1994)。このことから、本実験では、富栄養土壌への移行後もコナラ苗木は菌根菌と共生していたが、土壌中の養分過多が原因で生長促進の効果が現れなくなったと推測できる。

## 2. 海の音の効果について

2年目後半の富栄養土壌、2年間・3年間の貧栄養・富栄養土壌の条件下で、海の音はコナラ苗木の生長を促進させた。本研究では、海の音はロックのように

低い音を多く含んでいるため、先行研究(佐藤 2012 ; Chivukula and Ramaswamy 2014)と同様に苗木の生長を抑制させると予想していたが、先行研究とは正反対の結果となった。植物は周囲の環境から刺激を受け取り、それに対してさまざまな反応を示すことが知られている(三輪 1984)。例えば、乾燥ストレスを受けると気孔を閉鎖し、水分の損失を防ぐといった反応は、刺激に対する植物のシンプルな反応の一つである(木下 2015)。したがって、コナラ苗木は海の音を何らかの刺激として受け取ったことで、生長を促進させる反応が起こったと考えることができるだろう。植物が何らかのストレスを受けた時に、新たな生長や繁殖を促進させて個体の適応度を維持しようとする反応は補償成長反応と呼ばれ、防御効果が認められる物質や構造を生産する反応は誘導防御反応と呼ばれている(水町 2008)。具体的には、食害ストレスを受けると、植物器官(根・葉・茎)の現存量を増加させる反応や、食害、傷害、病害ストレスを受けると、葉から通常とは異なる匂いを放出し、外敵を追い払う反応(細川 2005)などが知られている(大串 1995)。例えば、シロイヌナズナは貧栄養ストレス、アサガオは低温ストレス、シソは弱光ストレスを受けると、急いで開花・結実を促進させる反応を示すという(嶋川ら 2011)。

以降、植物の補償成長反応と誘導防御反応に着目して、海の音の効果が現れた理由を考察してみたい。Body *et al.* (2019)は、モンシロチョウの幼虫がシロイヌナズナの葉を摂食する際に発生する摂食振動をシロイヌナズナに24時間暴露させる実験を行ったところ、摂食振動を暴露させたシロイヌナズナは、香料物質である $\beta$ -イオノンの量を増加させる反応を示したことで、ジベレリン、サイトカイニン、オーキシン、アブシジン酸などの植物の生長を促進させるホルモンの濃度を低下させる反応を示したことを報告している。つまり、シロイヌナズナは幼虫による食害を振動によって認知し、誘導防御反応や生長を抑制させる反応を示したといえる。一方で、Ghosh *et al.* (2016)は、シロイヌナズナに250 Hz、500 Hz、1000 Hz、2000 Hz、3000 Hz の振動を1時間それぞれ暴露させる実験を行ったところ、24時間後にオーキシンの量が最も増加する振動が500 Hz であったことを報告している。これは、シロイヌナズナは500 Hz の振動に対して補償成長反応を示したことを意味している。そこで筆者は、Body *et al.* (2019)が実験に用いた摂食振動(YouTube <https://youtu.be/ndfo2NiaEIE>)と500 Hz の周波数特性を音



声編集ソフト(WavePad マスター版 v 8.08 )を用いてFFT(高速フーリエ変換)を行って可視化し、比較してみた。その結果、摂食振動は、100 Hz~600 Hz の間に高い音圧レベルを示す一山型のピークを持つことと、そのピークの中に500 Hz の周波数が高い音圧レベルで含まれていることが明らかになった(図-2c-d)。このことから、シロイヌナズナは500 Hz とその周辺の振動(100 Hz~600 Hz)を幼虫による食害によって発生した摂食振動と誤認し、その誤認からしばらく経ってから(24時間後に)補償成長反応を示したと解釈できるだろう。

水町(2008)によれば、コナラは食害を受けると、貧栄養土壌の条件下で葉中のフェノール類を増加させること、富栄養土壌の条件下では新たな枝を発生・生長させることが明らかにされている。フェノール類の一種であるポリフェノール類は葉を摂食する幼虫の消化酵素を阻害する物質である(今野 1996)。したがって、コナラは誘導防御反応と補償成長反応を示す樹種であるといえる。本研究において、海の音が生長に及ぼす正の効果は、2年目後半の富栄養土壌の条件下で認められた。そこで、この結果は、海の音を昆虫による葉の摂食振動と誤認したことで誘発された補償成長反応ではないかという仮説を立てて、先行研究と本研究で用いた振動・音の周波数特性を分析してみた。Body *et al.* (2019)が実験に用いた摂食振動の周波数特性を海の音の分析と同様の方法を用いて分析し、本実験において苗木生産施設で録音した海の音(図-2b : 0.5 m~12.5 m)の周波数特性と比較した。その結果、音圧レベルのピークが海の音では50 Hz~300 Hz 間、摂食振動では100 Hz~600 Hz間にあり、両者にはややズレがあるものの、両者で共通する周波数特性としては、500 Hz の周波数が相対的に高い音圧レベルで含まれていること、100 Hz~5000 Hz 間の周波数域では、周波数の増加に伴って音圧レベルが徐々に減少することが明らかになった(図-2b-d)。したがって、2年目後半のコナラ苗木は、音圧レベルが相対的に高い500 Hz とその周辺の周波数を含む海の音を摂食振動と誤認し、補償成長反応を示したのではないかという解釈が成り立つだろう。

植物は、昆虫による食害によって発生する摂食振動の他にも、自然界で発生するさまざまな音(つまり、空気の振動)に晒されている。その中でも植物にとって最も身近で高い音圧レベルを持つ音は、風が葉を揺らすことで発生する葉擦れの音と雨が葉に当たる音で

あろう。これらの音は、摂食振動と同様に、100 Hz~600 Hz 間の周波数域に一山型のピークを持つ可能性がある。もし、そうであれば、植物は葉擦れの音と雨の音に対しても補償成長反応を示すか、あるいは、何らかの方法で摂食振動と葉擦れの音と雨の音を区別し、補償成長反応を示さないことが推測される。小松ら(2000)は、都市公園とその周辺に植栽された樹高5 m 以上の緑化木(ポプラ・クスノキ・モウ・ソウチク・ケヤキ・クロマツ・シラカシ)を対象に、葉擦れの音の周波数特性を分析したところ、いずれの樹種でも、25 Hz~100 Hz 間の周波数域に一山型のピークを持つことと、風速の増加(0 m/s~1.9 m/s)に伴って1000 Hz~20000 Hz 間の周波数域の音圧レベルが増加し、2000 Hz~10000 Hz 間の周波数域に2つ目の緩やかなピークが発生することを明らかにしている。次に、筆者は、雨が葉に当たる音(YouTube <https://youtu.be/Go4YMAws6BU>)の周波数特性を、海の音の分析と同様の方法を用いて分析してみたところ、0 Hz~100 Hz 間の周波数域に一山型のピークを持つものの、100 Hz~5000 Hz 間の周波数域でも高い音圧レベルを維持している特徴が認められた(図-2e)。これらの分析から、葉擦れの音と雨が葉に当たる音には、500 Hz とその周辺の周波数が含まれてはいるが、100 Hz~600 Hz 間の周波数域に一山型のピークを持つ摂食振動とは明瞭に異なる周波数特性を持つといえるだろう。一方で、仮に、葉擦れの音や雨の音が発生するつど、昆虫による摂食振動と誤認して、補償成長反応と誘導防御反応を示す個体がいたとすると、その個体は不必要な資源投資を頻繁に行うことで、結果的に子孫を残すことが困難な適応度の低い個体となり、自然選択による進化の過程で排除されてきたのではないかと考えられる。したがって、植物は、適応度の低下に直接つながらない葉擦れの音や雨の音を周波数特性の違いから摂食振動と区別することができると考えるのが妥当であろう。

一方で、1年目の貧栄養土壌と3年目の富栄養土壌の条件下では、生長に与える海の音の効果は認められなかった。1年目に効果が認められなかった理由として、貧栄養土壌の条件下であったため、補償成長反応に投資する養分を獲得できなかったことが考えられる。コナラと同じブナ科のブナに窒素を付加すると、2年目に防御物質の量が減少したとする報告がある(日向ら 2010)。したがって、3年目に効果が現れなかった理由は、富栄養土壌の条件下では、海の音を摂

食振動と誤認しながらも、貧栄養ストレスを受けずに十分に生長できる条件が整っていたため、補償成長反応を示す必要がなかったと考えられるだろう。

### 3. 菌根菌の活用と植栽についての提案

本研究は、生産過程のコナラ苗木を対象に、菌根菌の投与と海の音の暴露がコナラ苗木の生長を促進するか否かを検証する実験を3年間行った。貧栄養土壌の条件下では、菌根菌の投与によって1年目の苗木の生長が促進される結果が得られた。これは苗木が菌根菌と共生関係を結ぶことができたことで、土壌中の少ない養分を吸収できたためと考えられる。また、2年目の中盤に富栄養土壌を苗木に客土したところ、海の音の暴露によって2年目後半の苗木の生長が促進される結果が得られた。これは海の音と幼虫が葉を摂食する際に発生する摂食振動の周波数特性が類似していたことから、苗木が海の音を摂食振動と誤認したことで補償成長反応が誘発されたためであろうと推測される。

以上の結果から、貧栄養土壌の海岸防災林再生地において、コナラ苗木を菌根菌と共生関係を結ばせてから植栽することは有効な手法であるといえるだろう。しかし、本実験では、富栄養土壌において菌根菌の効果が認められなかったことから、植栽時に施肥をする場合には、菌根菌の効果が現れにくいことが予想される。また、本実験に用いた「ミコリーザダッシュ」には外来の菌種も含まれていたことから、市販の菌根菌を安易に活用することは避けるべきである。さらに、熊谷(2019)は、長野県上田市、宮城県白石市、同県山元町でコナラ林に発生する子実体(キノコ)を調査したところ、コナラと共生関係を結ぶ菌根菌は地域によって異なることを示唆する結果を得ている。また、宮城県山元町の海岸防災林再生地にコナラ苗木を植栽する場合には、その周辺のコナラ林に自生する菌根菌と共生関係を結ばせる必要があることを指摘している。そのうえで、宮城県山元町のコナラ林で確認された12種類の外生菌根菌(アンズタケ、ホオベニシロアシグチ、アカヤマドリ、ヤマドリタケモドキ、アイシメジ、クリイロイグチ、タマゴタケ、ヌメリイグチ、チチタケ、ヒロハチチタケ、カワリハツ、シロハツ)を候補として選定している。したがって、苗木生産に菌根菌を活用する際には菌根菌の地域性に留意し、菌種の選定を慎重に行う必要があるだろう。

次に、貧栄養土壌の海岸防災林再生において、海の音の効果でコナラ苗木の補償成長反応を引き出し

て生長を促進させたい場合には、適量の施肥が必要であろう。その理由は、1年目の貧栄養土壌と3年目の富栄養土壌では海の音の効果が現れなかったのに対し、苗木が根を少しずつ伸ばして富栄養土壌の養分を利用し始めた2年目から海の音の効果が現れたからである。また、汀線に近いほど、海の音が大きいため、海から近い場所にコナラ苗木を植栽すれば、生長が促進されるという予想が成り立つ。しかし一方で、汀線に近いほど、海からの潮風や強風などの気象害を強く受けるため、コナラ苗木の生長不良も起こりやすいことも同時に予想される。また、コナラ苗木にとって、海の音が幼虫の摂食振動と誤認されたストレスであるとするれば、そのストレスを絶え間なく受け続けることで、コナラ苗木は補償成長反応への資源投資をし続けなければならない状況に晒されると予想もされる。だとすれば、海からの気象害の影響を受けづらく、海の音も適度に到達する林帯の陸側にコナラ苗木を植栽することが妥当であろう。これによって、コナラ苗木の補償成長反応が適度に起こり、生長もゆるやかに促進されることが期待できる。ちなみに、林帯の陸側は、林野庁が「望ましい海岸防災林再生のイメージ」として推奨していたコナラの植栽エリア(林野庁 2014)と偶然にも一致している。

最後に、本実験から得られた結果を受けて、コナラを海岸防災林再生地に植栽する場合には、植栽地から近いコナラ林で外生菌根菌の子実体を採集し、その胞子をコナラ苗木に投与して育てたのち、再生地の陸側に植栽することと、植栽後に適量の施肥をすることを提案したい。

### 謝辞

本研究の実験準備および苗木生産においては、長野大学環境ツーリズム学部里山再生学ゼミナールの井出 萌、川本謙伍、小猿夏海、佐伯幸祐、甘利大河、小出悠太郎、古幡奏未、神通川雅史、杉本美和、中島壮平、西田大輔、芳賀由奈、前田夏樹、吉久保綸美、藤原貴一、黒岩爽真、大和田樹里、横内はるひ、卒業生の吉田英正、伊藤貴則、石黒太加志、北島和輝、牧口未和、峰岸崇裕、森下知洋、豊田雄基、熊谷唯、スイホカの諸氏に協力いただいた。以上の方々に心からお礼を申し上げる。

本研究は、経団連自然保護基金(環境教育)【2016年度～2019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

ねぷろじえくと)】の支援を受けて実施された。

## 引用文献

- 阿部信之・木村憲一郎・橋本良二(1997) コナラおよびミズナラ実生の成長・発達と種子重. 岩手大学農学部演習林報告 28: 13-25
- Aggangan NS, Dell B, Malajczuk N (1996) Effects of soil pH on the ectomycor-rhizal response of *Eucalyptus urophylla* seedlings. *New Phytologist* 134 (3): 539-546.
- Body MJA, Neer WC, Vore C, Lin CH, Vu DC, Schultz JC, Cocroft RB, Appel HM (2019) Caterpillar chewing vibrations cause changes in plant hormones and volatile emissions in *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science* 10: 810
- Chivukula V, Ramaswamy S (2014) Effect of different types of music on *Rosa Chinensis* plants. *International Journal of Environmental Science and Development* 5 (5): 431-436
- Ghosh R, Mishra RC, Choi B, Kwon YS, Bae DW, Park S, Jeong M, Bae H (2016) Exposure to sound vibrations lead to transcriptomic, proteomic and hormonal changes in *Arabidopsis*. *Scientific Reports* 6: 33370
- グリーンインフラの東邦レオ(2019)製品情報 ビバソイル. (<https://greeninfrastructure.jp/products/vivasoil/> 2020年1月23日確認)
- 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> 2020年1月25日確認)
- 被災地里山救済・地域性苗木生産ネットワーク(2020)被災地里山救済・地域性苗木生産・植栽プロジェクト (通称: たねぷろじえくと). (<https://tane-project.org/> 2020年1月23日確認)
- 日向潔美・渡邊陽子・渡辺 誠・北岡 哲・飛田博順・上村 章・宇都木玄・小池考良(2010) 高CO<sub>2</sub>と窒素付加環境で生育した落葉広葉樹個葉の被食防衛物質の局在:2生育期間に渡る処理の影響. *日本森林学会北海道支部論文集* 58: 43-46
- 細川聡子(2005) においを介した植物間コミュニケーション. *におい・かおり環境学会誌* 36 (3): 153-155
- 池見辰生(2008) 菌根菌の産業利用. *日本微生物資源学会誌* 24 (2): 105-109
- 井上美那・香口成美・立石麻紀子・谷口武士・山本福壽・山中典和(2015) 海水による土壌冠水が東日本太平洋沿岸域に分布する木本17種の生育に及ぼす影響. *日本緑化工学会誌* 41 (1): 73-78
- Jongbloed RH, Pauwels GWFHB (1990) Effects of ammonium and pH on growth of some ectomycorrhizal fungi *in vitro*. *Acta Botanica Neerlandica* 39 (4): 349-358
- 木下俊側(2015) 環境変動に対する気孔開閉制御. *化学と生物* 53 (9): 608-613
- 気象庁(2020) 過去の気象データ検索. ([http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec\\_no=48&block\\_no=0402&year=2018&month=&day=&view=a2](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=48&block_no=0402&year=2018&month=&day=&view=a2) 2020年1月24日確認)
- 小松正史・加藤 徹・桑野園子・難波精一郎・近藤明・井上義雄・山口克人(2000) 樹木葉擦れ音の物理特性. *騒音制御* 24 (4): 268-276
- 近藤民雄・大賀祥治(2000) 落葉広葉樹でみられる春先の木部輸送. *九州大学農学部演習林報告* (81): 77-91
- 国土緑化推進機構(2016) 海岸防災林再生 ワークショップ2016 ～海岸防災林再生活動の輪を広げていこう～. 配布資料
- 今野浩太郎(1996) 食べられまいとする植物と食べようとする昆虫の攻防 -グリシンの栄養阻害物質中和作用. *化学と生物* 34 (9): 580-585
- 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
- 宮城県(2019) みやぎ海岸林再生 みんなの森林づくり活動について. (<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/sinrin/minmori.html> 2020年1月23日確認)
- 宮城県農林水産部(2018) 宮城県における海岸防災林の再生に向けた取り組み -植栽樹種選定に向けた検討を中心に-. ([https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/life/994039\\_1134901\\_misc.pdf](https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/life/994039_1134901_misc.pdf) 2020年1月25日確認)
- 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 2020年1月25日確認)
- 三輪敬之(1984)植物生体情報システム. 精密機械 50 (11): 1702-1708
- 水町衣里(2008)植食昆虫の食害に対するコナラ稚樹の補償成長反応及び誘導防御反応. 2007年度京都大学 博士論文
- 村上卓也(2015)特集「海岸林再生の現状と課題」盛土を伴う海岸防災林復旧工事と植栽までの手順. 日本緑化工学会誌 41 (2): 341-343
- 奈良一秀(2004)富士山火山荒原における外生菌根菌の一次遷移系列と外生菌根共生による植生遷移促進機能. 2003年度 博士論文
- 奈良一秀・宮本裕美子(2014)菌根写真集. ([http://www.edu.k.u-tokyo.ac.jp/nara\\_lab/home/ectomycorrhizas](http://www.edu.k.u-tokyo.ac.jp/nara_lab/home/ectomycorrhizas) 2020年1月23日確認)
- 新潟県農林水産部(2005)新潟県における土づくりのすすめ方 土壌の基礎知識. ([https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen\\_type/h\\_sehi\\_kizyun/pdf/ntuti4.pdf](https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/ntuti4.pdf) 2020年1月25日確認)
- 農林水産省(2004)農業生産活動に伴う環境影響について. ([https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/10/pdf/h160514\\_03\\_siryō.pdf#search=%27%E8%82%A5%E6%96%99+%E7%92%B0%E5%A2%83+%E8%BE%B2%E6%9E%97%E6%B0%B4%E7%94%A3%E7%9C%81+%E5%B9%B3%E6%88%9016%27](https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/10/pdf/h160514_03_siryō.pdf#search=%27%E8%82%A5%E6%96%99+%E7%92%B0%E5%A2%83+%E8%BE%B2%E6%9E%97%E6%B0%B4%E7%94%A3%E7%9C%81+%E5%B9%B3%E6%88%9016%27) 2020年1月25日確認)
- 岡部宏秋・江崎次夫・丸本卓哉・早川誠而・赤間慶子(1994)共生微生物の植生回復技術への適用 : (I)外生菌根菌の活用. 森林立地 36 (2): 56-63
- 大串隆之(1995)植物を介する昆虫種間の相互作用. 日本生態学会誌 45 (1): 33-42
- 林野庁編著(2013)東日本大震災からの復興. 平成25年度森林・林業白書. 40-43. 全国林業改良普及協会、東京
- 林野庁(2014)海岸防災林の再生 平成23年東北地方太平洋沖地震 巨大津波による被害と復旧. ([https://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/pdf/bousairin\\_pamphlet.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/pdf/bousairin_pamphlet.pdf) 2020年1月24日確認)
- 斎藤雅典・上田哲也・俵谷圭太郎(1992)VA菌根菌の分類と生理. 日本土壤肥料科学雑誌 63 (1): 103-113
- 佐藤優紀(2012)植物における音の影響. 化学と生物 51 (3): 196-197
- 嶋川 礼・白矢武士・石塚勇太・和田 楓・竹能清俊(2011)植物化学調節学会研究発表記録集. 46: 105
- 森林総合研究所(2016)ワンポイント解説 海岸林造成技術の高度化に向けて. ([https://www.ffpri.affrc.go.jp/thk/research/research\\_results/documents/3rd-chuukiseika40.pdf#search=%27https%3A%2F%2Fwww.ffpri.affrc.go.jp%2Fthk%2Fresearch%2Fresearch\\_results%2Fdocuments%2F3rdchuukiseika40.pdf%27](https://www.ffpri.affrc.go.jp/thk/research/research_results/documents/3rd-chuukiseika40.pdf#search=%27https%3A%2F%2Fwww.ffpri.affrc.go.jp%2Fthk%2Fresearch%2Fresearch_results%2Fdocuments%2F3rdchuukiseika40.pdf%27) 2020年1月25日確認)
- 篠宮佳樹・今矢明宏・高梨清美・坂本知己(2016)水たまりが生じた生育基盤盛土の物理性 -海岸防災林再生事業初期に造成された盛土の事例-. 森林総合研究所研究報告 15 (4): 151-159
- 鈴木源士・松崎克彦(1994)VA菌根菌の農業への利用. 化学と生物 32 (4): 238-246
- Sylvia DM, Sinclair WA (1982) Suppressive influence of *Laccaria laccata* on *F-usarium oxysporum* and on Douglas-fir seedlings. *Physiology and Biochemistry* 73 (3): 384-389
- 高橋一秋・高橋香織(2017)東日本大震災後の海岸防災林再生のための広葉樹種選定に関する提案: 生物多様性と生態系サービスの向上を目指して. 保全生態学研究 22 (2): 391-399
- 武田 宏・金子岳夫(2007)海岸防災林における常緑広葉樹の植栽成績. 新潟県森林研究所報告 48: 103-114
- 俵谷圭太郎(1998)アーバスキュラー菌根の形成機構と宿主リン栄養の影響. 土と微生物 51: 59-69
- 東北森林管理局(2017)『海岸防災林造成の植栽樹種・方法に関する実証実験』に関する調査結果. (<https://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/attach/pdf/171206-1.pdf> 2020年1月25日確認)
- 矢野勝也(2006)植物とVA菌根菌の窒素をめぐる駆け引き. 根の研究 15(1): 11-17
- YouTube (2014) *Pieris silhouette*. (<https://youtu.be/ndfo2NiaEIE> 2020年1月24日確認)
- YouTube(2016)Rain on leaves on a forest road in autumn - 10 hours video with sounds for relaxation and sleep. (<https://youtu.be/Go4YMAws6BU> 2020年2月16日確認)



付表-1. 苗木生産に用いた土壌の種類と機能.  
Appendix table 1. Types and functions of the soil materials used to grow the saplings.

| 土壌材                      | 種類                        | 効果                                       | 商品名               | 製造会社         |
|--------------------------|---------------------------|--|-------------------|--------------|
| Soil material            | Type                      | Function                                 | Product name      | Manufacturer |
| 人工土壌                     | 植栽基盤整備                    | 保水, 排水, 肥料                               | ビバソイル 30 0        | 東邦レオ         |
| Artificial soil material | Planting base material    | Water retention and drainage, fertilizer | Bbasoiru 30 0     | TOHO LEO     |
| バーミキュライト                 | 土壌改良材                     | 保水                                       | バーミキュライト 18 0     | コメリ          |
| Vermiculite              | Soil improvement material | Water retention                          | Bamikyuraito 18 0 | KOMERI       |
| 真珠岩パーライト                 | 土壌改良材                     | 保水, 排水                                   | パーライト 18 0        | コメリ          |
| Perlite                  | Soil improvement material | Water retention and water drain          | Paraito 18 0      | KOMERI       |
| バーク堆肥                    | 土壌改良材                     | 肥料                                       | バーク堆肥 40 0        | コメリ          |
| Bark compost             | Soil improvement material | Fertilizer                               | Bakutaihi 40 0    | KOMERI       |

付表-2. コナラ苗木の根に形成された菌根と菌糸の特徴と分類.

Appendix table 2. Features and types of mycorrhiza and mycelium formed in roots of *Q. serrata* saplings.

| 菌根or菌糸<br>Mycorrhiza or mycelium | 特徴<br>Features      | 分類<br>Types   |
|----------------------------------|---------------------|---|
| 菌根<br>Mycorrhiza                 | 形態<br>Morphology    | 親指型 (O)<br>Thumb<br>親指表面凹凸型 (Oo)<br>Uneven thumb<br>こん棒型 (Co)<br>Club<br>涙型 (Na)<br>Tear<br>ほうき型 (Ho)<br>Broom                |
|                                  | 透明度<br>Transparency | 透明 (To)<br>Transparent<br>不透明 (Hu)<br>Nebulous  |
|                                  | 色<br>Color          | クリーム (Cu)<br>Cream<br>まだら (Ma)<br>Mottled<br>黄土 (O)<br>Ocher<br>茶 (Cha)<br>Brown<br>こげ茶 (Ko)<br>Dark brown<br>黒 (Ku)<br>Black |

付表-2. 続き.

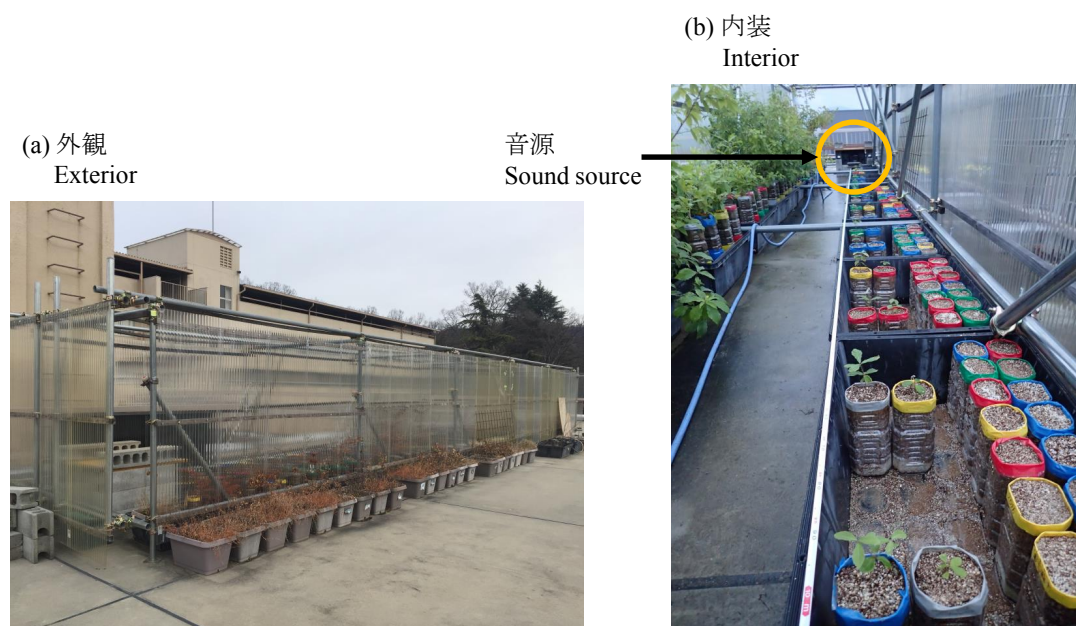
Appendix table 2. continued.

| 菌根or菌糸<br>Mycorrhiza or mycelium | 特徴<br>Features   | 分類<br>Types   |
|----------------------------------|------------------|---|
| 菌糸<br>Mycelium                   | 形態<br>Morphology | 無 (Na)<br>None<br>綿状 (Wa)<br>Cotton<br>糸状 (I)<br>Thread<br>まゆ状 (Ma)<br>Cocoon<br>まゆ状+糸状 (MI)<br>Thread and cocoon |
|                                  | 色<br>Color       | 無 (Na)<br>None<br>白 (Si)<br>White<br>グレー系クリーム (Cu)<br>Gray cream<br>黒 (Ku)<br>Black                               |

付表-3. 子実体(キノコ)が成長したコナラ苗木の根に形成された菌根と菌糸の特徴と分類.  
 Appendix table 3. Features and types of mycorrhiza and mycelium formed in roots of *Q. serrata* saplings in plant pots where mushroom fruit bodies grew.

| 特徴と分類<br>Features and types | 子実体 (キノコ)<br>Mushroom fruit bodies |                        |                        |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                             | キツネタケ属 sp                          | ニセシヨウロ属 sp             | サクラシメジ属 sp             |
|                             | <i>Laccaria</i> sp.                | <i>Scleroderma</i> sp. | <i>Hygrophorus</i> sp. |
| KoCuToWaCu                  | 4                                  |                        |                        |
| OKoHuNaNa                   | 1                                  |                        |                        |
| NaCuToNaNa                  | 2                                  | 3                      |                        |
| NaCuToWaCu                  | 9                                  | 3                      | 5                      |
| OCuToMaSi                   |                                    | 4                      |                        |
| OCuToMISi                   |                                    | 1                      |                        |
| OCuHuMISi                   |                                    | 1                      |                        |
| OChaHuMISi                  |                                    | 1                      |                        |
| OMaToNaNa                   |                                    | 2                      |                        |
| KoCuToNaNa                  |                                    | 1                      |                        |
| KoCuToMaSi                  |                                    | 1                      |                        |
| KoCuHuMaSi                  |                                    | 1                      |                        |
| KoChaToWaCu                 |                                    | 1                      |                        |
| KoMaToNaNa                  |                                    | 1                      |                        |
| KoCuHuMISi                  |                                    | 4                      | 1                      |
| OCuToWaCu                   |                                    |                        | 3                      |
| OChaToWaCu                  |                                    |                        | 1                      |
| OKoToWaCu                   |                                    |                        | 1                      |
| NaKoToWaCu                  |                                    |                        | 1                      |
| KoKoHuWaCu                  |                                    |                        | 1                      |





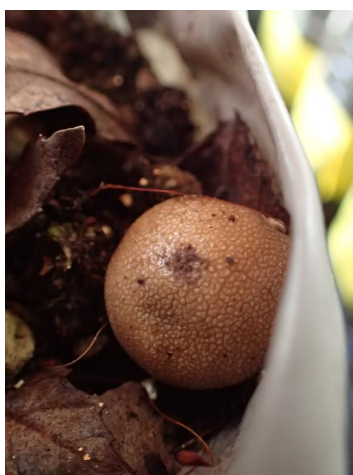
付図-1. 苗木生産施設の外観(a)と内装(b).

Appendix figure 1. Exterior (a) and interior (b) of a sapling-production facility.

(a) キツネタケ属 sp  
*Laccaria* sp.



(b) ニセショウロ属 sp  
*Scloderma* sp.

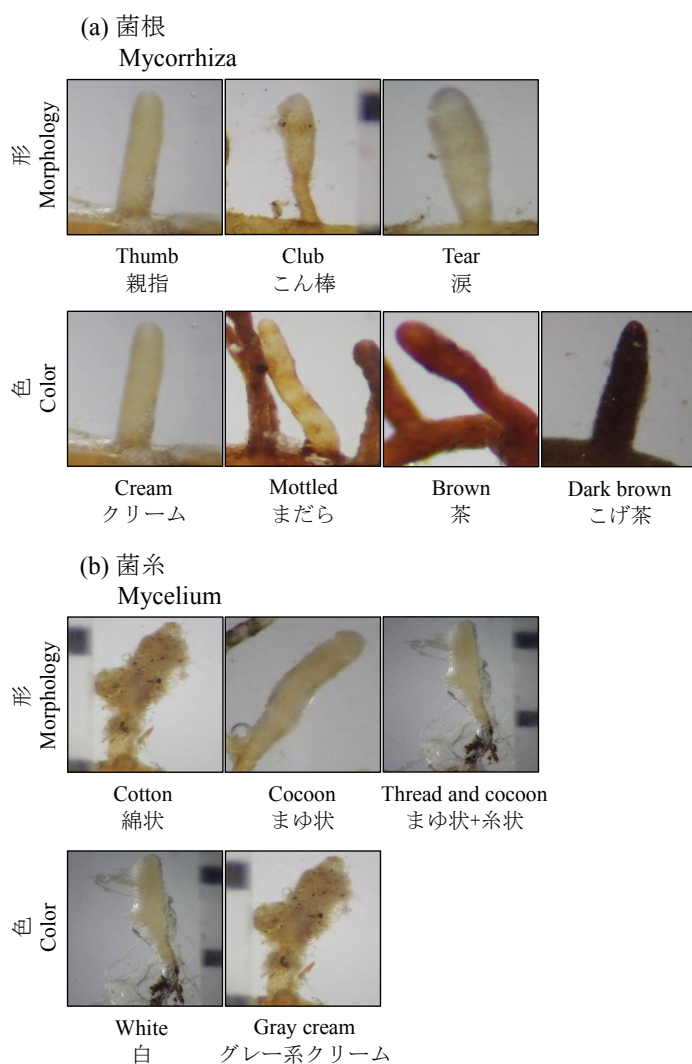


(c) サクラシメジ属 sp  
*Hygrophorus* sp.



付図-2. 植木鉢から発生した子実体(キノコ)のニセショウロ属 sp(a)とキツネタケ属 sp(b)とサクラシメジ属 sp(c).

Appendix figure 2. Mushroom fruit bodies of *Scloderma* sp. (a), *Laccaria* sp. (b) and *Hygrophorus* sp. (c) in plant pots.



付図-3. コナラ苗木の根に形成された菌根(a)と菌糸(b)のいくつかの形、色、特徴の分類。

Appendix figure 3. Some morphological features, types, and color of mycorrhiza (a) and mycelium (b) formed in roots of *Q. serrata* saplings.