

クロマツ実生を利用した海岸林再生技術の開発

2015 年度～2017 年度

中島寛文*

要 旨

マツ枯れにより荒廃が進んだ海岸クロマツ林を早期に回復させるため、菌根菌と苗木コンテナを活用することで高い活着率・成長量を期待できるクロマツコンテナ苗の作成を試みた。まず、苗木作成時に活用できる菌根菌を探索するため、海岸クロマツ林の菌根性子実体の発生状況を調査した。次に、子実体発生地海岸の海岸土壌を用いてクロマツを育成し、菌根菌接種源として海岸土壌を利用できるかどうかを調べた。そして、菌根菌の接種源として海岸土壌を用いたクロマツコンテナ苗を作成した。その結果、菌根性子実体の発生状況から、若いクロマツはショウロとの共生関係が強い可能性が示唆された。また、ショウロが優占的に発生した場所の土壌を用いてクロマツを育てるとショウロの菌根を形成させることができたが、TR比が大きくなることも分かった。ショウロを含む様々な菌根性子実体が優占した海岸土壌を活用して育てたコンテナ苗も今のところ順調に生育している。今後、コンテナ苗の菌根形成状況、TR比、植栽後の活着率・成長量を調査することで、どの菌根菌に感染したクロマツコンテナ苗が海岸地域に適しているかを明らかにしていく。

I はじめに

海岸クロマツ林は、高い公益的機能を持つことが知られている（村井 1997）。しかしながら、マツ材線虫病によるクロマツの枯死被害が進み（愛知県 2009）、海岸クロマツ林の公益的機能の低下が懸念されている。マツ枯れ跡地では、早期に海岸クロマツ林の回復を図ることができれば公益的機能の早期回復が期待できるが、海岸に近い場所では、植栽した苗木の活着率が低いことから、海岸クロマツ林の再生がなかなか進まない場所もある。そのような場所においても、海岸クロマツ林の再生を達成できる苗木の開発が求められている。

ここで、クロマツが海岸地域のような過酷な環境下で健全に生育する上で、菌根菌と共生関係が

重要であることが知られている。菌根菌は、クロマツの養分・水分の吸収効率を高める働きを持っており（van der Heijden *et al.* 2015）、結果としてクロマツの生残率や成長量を高めることに繋がる。つまり、菌根菌を有効活用できれば、水分環境に乏しく、貧栄養な海岸地域において、高い活着率を示す苗木を開発できるかもしれない。

そこで、本研究では、まず海岸地域にどのような菌根菌が存在しているかを菌根性子実体の発生状況を調査することで明らかにした。その際、菌根性子実体発生地の植生も併せて調査し、それらの関連性も明らかにした。また、菌根菌の接種源としての海岸土壌の利用可能性を明らかにするとともに、海岸土壌を活用して、菌根菌を接種したクロマツコンテナ苗の作成を試み、高い活着率・

Hirofumi NAKASHIMA: Development of reforestation technique with *Pinus thunbergii* seedlings at a coastal pine forest suffering from pine wilt disease in Aichi Prefecture, Japan

*現新城設楽農林水産事務所

成長量を期待できるクロマツコンテナ苗の開発を目指した。

II 方法

1. 海岸地域における菌根菌の調査

(1) 調査地の設定

愛知県田原市の海岸クロマツ林において、様々な林相の海岸クロマツ林が含まれるように 2 m × 50 m の帯状の調査ラインを 8 本 (L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8) 設定した (図-1)。更に、調査ラインを 5 m 間隔で分割し、分割されたそれぞれの 2 m × 5 m の長方形区を調査プロットとし、各調査ラインに 10 か所ずつ設定した。調査プロットは、0-5 m を No.1、5-10 m を No.2…45-50 m を No.10 と番号を付し、調査ライン番号と分割番号を組み合わせると p1.1 (調査ライン L1 の分割番号 No.1) のように区別した (図-1)。

(2) 菌根性子実体の調査

各調査プロットにおいて、菌根性子実体 (以下、子実体) の種と発生個体数を調査した。子実体の同定は可能な限り種まで行い、種まで同定できなかったものについては、属または科までの分類に留めた。調査は 2016 年 1 月から 12 月にかけて、月に 1 回の頻度で行った。ダブルカウントを避け

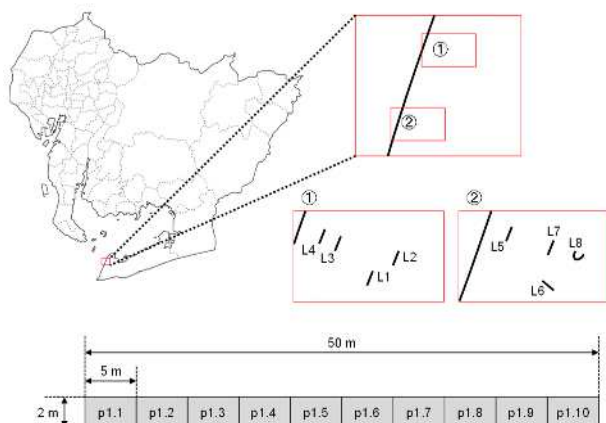


図-1 帯状の調査ラインと調査ラインの分割 (調査プロット)

るため、子実体の傍に旗を設置し、次回の調査時に子実体が劣化した状態で残っていた場合は、子実体を調査ラインの外に除去するとともに旗を回収した。

(3) 植生調査

2016 年 10 月に各調査プロットに出現した全ての植物について、階層別の優占度 (ブラウン・ブランケ法 ; Braun-Blanquet 1964) を目視により評価した (+、1、2、3、4、5 の 6 段階による調査)。木本は種まで同定し、草本は草本類としてまとめ、階層は、0-50 cm を草本層、50-200 cm を低木層、200-500 cm を亜高木層、500 cm 以上を高木層とした。

(4) 子実体群集と植生との関係

各プロットにおける子実体群集を、その類似性に基づきクラスタリングするため、Bray-Curtis 指数を類似度とした非計量多次元尺度法、および非階層型クラスタリング手法である K-means 法を実行した。なお、Gap 統計量の最大数をクラスタ数とした。また、指標種分析により、各クラスタの指標種を明らかにした。

各プロットの植生については、Bray-Curtis 指数を用いた非計量多次元尺度法、および階層型クラスタリング手法 (Ward 法) により、類似した植生を持つ調査プロットから順に結合させていくデンドログラムを作成した。なお、作成したデンドログラムから、結合までの距離が比較的長いところで植生をクラスタリングした。

クラスタリングした子実体の各クラスタを、植生データを基に作成したデンドログラムに当てはめ、どのような植生において、どのような子実体群集が形成されているかを Fisher の正確確率検定および多重比較 (Benjamini & Hochberg 法により有意水準を調整) により明らかにした。

2. 菌根菌接種源としての海岸土壌の利用

(1) 土壌の採取

前述の調査ライン上において、ショウロ (p8.10)、ヒメコガネツルタケ (p7.7)、ツチグリ (p1.10) の各子実体が優占的に発生した場所の子実体直下の表層土壌 (以下; ショウロ土壌、ヒメコガネ土壌、ツチグリ土壌) を 2016 年 7 月に 5 kg ずつ採取した。なお、採取後、試験に供試するまで 5 °C の冷蔵庫で保存した。

(2) 海岸土壌を用いたクロマツの育成

海岸土壌を用いたクロマツの育成を、50 ml の遠沈管を用いて行った。アルミ箔で遮光した遠沈管の底に錐 (きり) で穴を開けてから底に少量の綿を詰め、その上に各海岸土壌を充填した (遠沈管 32 本/各土壌)。海岸土壌を充填した遠沈管の半数 (16 本ずつ) は、オートクレーブを用いて 121 °C で 60 分間滅菌し、菌根菌を除去した。全ての遠沈管にクロマツ種子を一粒ずつ播種し、25 °C、長日条件 (16L8D) に設定した恒温器内で育て、4、5 日に一回の頻度で散水を行った。

30 日間育てたクロマツを、葉、茎、根に分け、葉を 60 °C で 48 h、茎、根を 105 °C で 48 h 乾燥させた後、それぞれの乾燥重量 (mg) (以下; 乾重) を測定し、TR 比 (= (葉+茎) の乾重/根の乾重) を算出した。

各処理につき 5 個体のクロマツについては、側根の一部を無作為に切り取り、その根の全ての根端を実体顕微鏡下 (model SMZ645、Nikon) で観察した。根端が菌根か非菌根かを判定して、菌根の場合はさらに色と形態で大別し、それぞれの数を計数するとともに、観察した根の長さ (根長)

(mm) を測定した。大別した各菌根の DNA を抽出し、ITS 領域の PCR 増幅後に塩基配列を決定してから BLAST 解析で種推定を試みた。

(3) 統計解析

クロマツの地上部の乾重 (葉+茎)、地下部の乾重 (根)、TR 比を応答変数に、海岸土壌の処理 (滅菌・非滅菌) を説明変数にした一般化線形モデル

(GLM) を海岸土壌ごとに作成し、説明変数の効果の有無を尤度比検定で評価した。応答変数の誤差構造としてガンマ分布を仮定し、リンク関数は log とした。

菌根形成率 (=菌根数/根端数) を切り取った根ごとに算出し、海岸土壌ごとに処理間で比較した。また、根端数を応答変数に、海岸土壌の処理を説明変数にした GLM を海岸土壌ごとに作成し、尤度比検定により説明変数の効果を評価した。応答変数の誤差構造としてポアソン分布を仮定し、リンク関数は log とした。また、根長の違いによる根端数の増減を考慮するために、offset 項として根長を GLM に組み込んだ。

3. 菌根菌接種コンテナ苗の作成

(1) コンテナ苗の作成

コンテナ苗の作成には、1 セルあたりの容量が 150 cc と 300 cc のスリット入り苗木コンテナ (MT-150-40P、MT-300-24P、東北タチバナ) を用いた。コンテナの基本培地として、ココピート (有限会社エコロ) とバーク堆肥 (有限会社エコロ) を体積比 1:1 で混合したものを用いた。また、菌根菌の接種源として、“1. 海岸地域における菌根菌の調査” において、クラスタリングされた各子実体群集の海岸土壌を用いた。対照区には、基本培地のみ、接種区には、基本培地と海岸土壌を体積比 1:1 で混合したものを用いた。

(2) クロマツの育成条件及び生育・菌根形成

コンテナ苗の元肥として、ハイコントロール 650 (ジェイカムアグリ株式会社) を用いた。150 cc コンテナには、1 セルあたり 3 g、300 cc コンテナには、1 セルあたり 5 g となるようにハイコントロール 650 を培地に混合した。また追肥として、200 倍に希釈したヨーゲンアクセル (サンアグロ株式会社) を 1 セルあたり 5 ml 程度散布した。処理条件として、元肥および追肥を行った区 (以下、

元肥+追肥)、追肥のみを行った区(以下、追肥のみ)、施肥を行わなかった区(以下、無施肥)の3処理区を設けた。

2015年10月に採取したクロマツ種子を、2017年3月に各コンテナの各セルに1粒ずつ播種した。クロマツコンテナ苗は、当センターのガラス室内で育てた。散水頻度は1日1回で、2017年3月から10月の間は朝9時に30分間、2017年11月から2018年2月の間は朝9時に5分間散水した。追肥の散布頻度は、7~10日に1回で、2017年6月から10月まで散布した。なお、殺菌剤・殺虫剤は、菌根菌の生育に悪影響を及ぼす可能性がある(中島ら 印刷中 b)、基本的には散布をしなかった。ただし、2017年10月にマツノミドリハバチと思われる虫が発生したので、直ちに1回のみスミチオン乳剤(日本農薬株式会社)(1000倍希釈)をコンテナ1枚あたり約125ml散布した。

約1年間クロマツを生育させ、各処理区のクロマツ苗木の生残率(=生残個体数/総セル数)、樹高、根元径を調査した。

(3) 統計解析

クロマツの1月末時点での生残率、樹高、根元径を応答変数とし、セル容量(150cc、300cc)、施肥条件(無施肥、追肥のみ、元肥+追肥)、混合した海岸土壌の種類を説明変数としたGLMを作成し、尤度比検定により各説明変数の有意性を解析した。応答変数の誤差構造として、生残率については二項分布を仮定(リンク関数: logit)し、樹高・根元径についてはガンマ分布を仮定(リンク関数: log)した。

すべてのデータ解析には統計解析ソフトR(R project 2017 version 3.4.0)を用いた。

III 結果

1. 海岸地域における菌根菌の調査

(1) 確認された菌根性子実体

菌根性子実体は、全体で8科10属19種、計597個体が確認された。菌根性子実体の発生数は、それぞれツチグリ(222個体)、キチチタケ(98個体)、ヒメコガネツルタケ(79個体)、ショウロ(59個体)、コツブタケ(43個体)、アミタケ(33個体)、チチアワタケ(24個体)、ハツタケ(12個体)、ヌメリイグチ(6個体)、カキシメジ(4個体)、ベニタケ属 sp.1(ケショウハツ?ニオイコベニタケ?) (4個体)、コテングタケ(4個体)、テングタケ(2個体)、ニセショウロ(2個体)、ササタケ(1個体)、ベニタケ属 sp.2(ドクベニタケ?) (1個体)、フウセンタケ科 sp. (1個体)、ベニタケ属 sp.3(1個体)、シモコシ(1個体)だった。

(2) 菌根性子実体群集と植生との関係

菌根性子実体の群集を、類似度に基づきクラスタリングしたところ、6つのクスタター(以下;子実体クスタター)に分類することができた(図-2)。各子実体クスタターにおいて、最も多く確認された種と指標種をみていくと、子実体クスタター①では、ツチグリが最も多く確認され、コツブタケ($P < 0.01$)が指標種だった。子実体クスタター②では、キチチタケが最も多く確認され、キチチタケ($P < 0.05$)とアミタケ($P < 0.01$)が指標種だった。子実体クスタター③では、ヒメコガネツルタケが最も多く確認され、ハツタケ($P < 0.01$)が指標種だった。子実体クスタター④では、ツチグリが最も多く確認された種であり、指標種だった($P < 0.01$)。子実体クスタター⑤では、ヒメコガネツルタケが最も多く確認され、チチアワタケ($P < 0.01$)が指標種だった。子実体クスタター⑥では、ショウロが最も多く確認された種であり、指標種だった($P < 0.01$) (表-1)。

類似度に基づきクラスタリングしたデンドログラムから、Bray-Curtisの非類似度が3のところ植生構造を4つのクスタター(以下;植生クスタター)に分類した(図-3)。各植生クスタターに

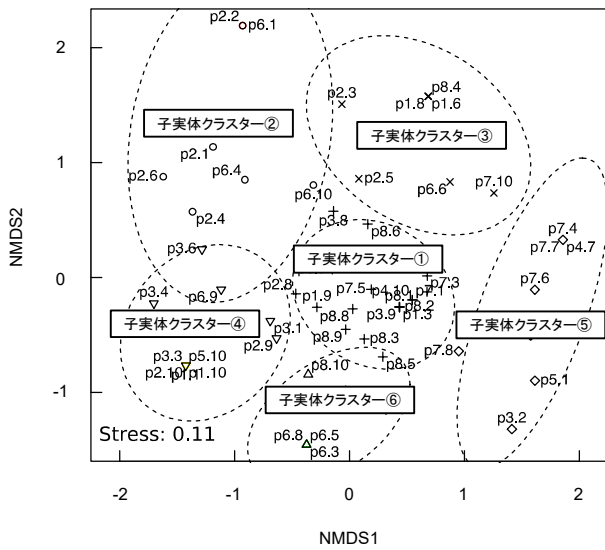


図-2 子実体群集のクラスタリング

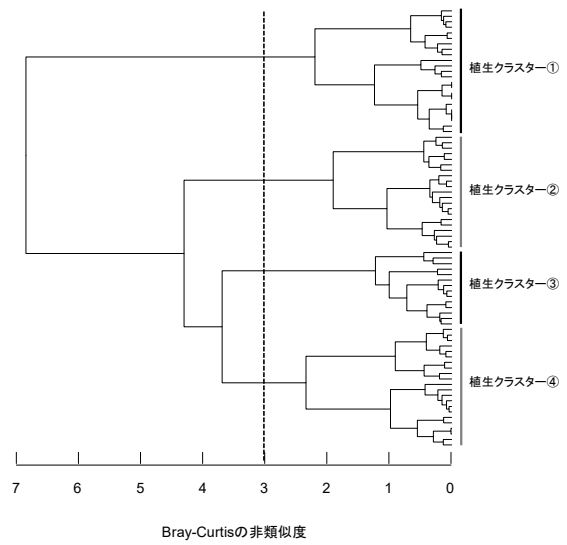


図-3 植生構造のクラスタリング

表-1 子実体クラスターと指標種

| 子実体クラスター No. | 種 | 発生数/プロット数 | 指標種解析 (P) |
|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 1 | ツチグリ | 2.333 | |
| | コツブタケ | 1.944 | <0.01 |
| | キチチタケ | 1.111 | |
| | ショウロ | 1.111 | |
| | ヒメコガネツルタケ | 0.778 | |
| | ヌメリイグチ | 0.333 | |
| | アマタケ | 0.167 | |
| | ハツタケ | 0.056 | |
| 2 | キチチタケ | 9.500 | <0.05 |
| | アマタケ | 4.833 | <0.01 |
| | ツチグリ | 0.667 | |
| | テングタケ | 0.167 | |
| | ベニタケ属sp. 1 | 0.167 | |
| 3 | ヒメコガネツルタケ | 4.000 | |
| | キチチタケ | 1.889 | |
| | ハツタケ | 1.222 | <0.01 |
| | カキシメジ | 0.444 | |
| | ショウロ | 0.444 | |
| | チチアワタケ | 0.333 | |
| | コツブタケ | 0.222 | |
| | ベニタケ属sp. 1 | 0.222 | |
| 4 | アマタケ | 0.111 | |
| | テングタケ | 0.111 | |
| | ツチグリ | 17.000 | <0.01 |
| | コテングタケ | 0.400 | |
| | キチチタケ | 0.400 | |
| | コツブタケ | 0.200 | |
| | フウセンタケ属sp. 1 | 0.100 | |
| 5 | ショウロ | 0.100 | |
| | ベニタケ属sp. 1 | 0.100 | |
| | チチアワタケ | 0.100 | |
| | ヒメコガネツルタケ | 3.625 | |
| | チチアワタケ | 2.250 | <0.01 |
| 6 | コツブタケ | 0.125 | |
| | ベニタケ属sp. 2 | 0.125 | |
| | ショウロ | 5.667 | <0.01 |
| 7 | ツチグリ | 1.000 | |
| | コツブタケ | 0.500 | |
| | チチアワタケ | 0.333 | |
| | ニセショウロ | 0.333 | |
| | ササタケ | 0.167 | |

*ベニタケ属sp. 3 (1個体) およびシモコシ (1個体) は、解析から除いた。

表-2 植生クラスターと被度

| 植生クラスターNo. | 階層 | 植生 | 被度 (mean ± SD)* |
|-------------|-------------|---------|-----------------|
| 1 | 高木 | クロマツ | 1.35 ± 1.77 |
| | | トベラ | 0.01 ± 0.03 |
| | 亜高木 | ハゼノキ | 0.00 ± 0.02 |
| | | クロマツ | 0.02 ± 0.04 |
| | 低木 | トベラ | 0.40 ± 0.89 |
| | | ハゼノキ | 0.10 ± 0.29 |
| | | ハマゴウ | 0.06 ± 0.21 |
| | | ニセアカシア | 0.01 ± 0.03 |
| | | アカメガシワ | 0.00 ± 0.02 |
| | | 草本類 | 0.68 ± 0.92 |
| | | クロマツ | 0.44 ± 0.94 |
| | | ツタ | 0.09 ± 0.42 |
| | | ナリハノイバラ | 0.04 ± 0.21 |
| | | ハマゴウ | 0.04 ± 0.21 |
| トベラ | 0.01 ± 0.03 | | |
| アカメガシワ | 0.00 ± 0.02 | | |
| ハゼノキ | 0.00 ± 0.02 | | |
| 2.78 ± 1.20 | | | |
| 2 | 高木 | クロマツ | 0.77 ± 1.29 |
| | | クロマツ | 0.46 ± 0.85 |
| | 亜高木 | ウバメガシ | 0.05 ± 0.22 |
| | | クロマツ | 2.29 ± 0.72 |
| | 低木 | ウバメガシ | 0.01 ± 0.03 |
| | | ウバメガシ | 0.24 ± 0.62 |
| | | ハゼノキ | 0.11 ± 0.30 |
| | | ハマゴウ | 0.01 ± 0.05 |
| | | アカメガシワ | 0.00 ± 0.02 |
| | | ヤマウルシ | 0.25 ± 0.54 |
| | | クロマツ | 0.79 ± 0.81 |
| | | クロマツ | 0.00 ± 0.02 |
| | | ウバメガシ | 0.15 ± 0.36 |
| | | ハマゴウ | 0.01 ± 0.03 |
| アカメガシワ | 0.01 ± 0.03 | | |
| ナリハノイバラ | 0.01 ± 0.03 | | |
| ハゼノキ | 0.01 ± 0.03 | | |
| 草本類 | 0.69 ± 0.76 | | |
| 1.79 ± 1.37 | | | |
| 3 | 高木 | クロマツ | 1.72 ± 0.98 |
| | | クロマツ | 0.14 ± 0.36 |
| | 亜高木 | ハゼノキ | 0.07 ± 0.27 |
| | | クスノキ | 0.07 ± 0.27 |
| | 低木 | ウバメガシ | 1.02 ± 1.34 |
| | | クロマツ | 0.10 ± 0.26 |
| | | ウバメガシ | 0.15 ± 0.36 |
| | | ハゼノキ | 0.09 ± 0.27 |
| | | アカメガシワ | 0.08 ± 0.27 |
| | | クスノキ | 0.07 ± 0.27 |
| | | トベラ | 0.07 ± 0.27 |
| | | マサキ | 0.07 ± 0.27 |
| | | イヌビロ | 0.01 ± 0.03 |
| | | フサアカシア | 0.01 ± 0.03 |
| 草本類 | 0.14 ± 0.53 | | |
| ウバメガシ | 0.38 ± 0.48 | | |
| クロマツ | 0.11 ± 0.26 | | |
| アカメガシワ | 0.09 ± 0.27 | | |
| ネズミモチ | 0.09 ± 0.26 | | |
| フサアカシア | 0.07 ± 0.27 | | |
| トベラ | 0.02 ± 0.04 | | |
| ハゼノキ | 0.02 ± 0.04 | | |
| イヌビロ | 0.01 ± 0.03 | | |
| クスノキ | 0.01 ± 0.04 | | |
| ツタ | 0.01 ± 0.03 | | |
| ハイネズ | 0.01 ± 0.03 | | |
| ヒメユズリハ | 0.01 ± 0.03 | | |
| 草本類 | 1.12 ± 1.51 | | |
| 4 | 高木 | クロマツ | 0.01 ± 0.04 |
| | | クロマツ | 1.91 ± 0.96 |
| | 亜高木 | ウバメガシ | 0.27 ± 0.63 |
| | | クロマツ | 0.27 ± 0.63 |
| | 低木 | ウバメガシ | 1.51 ± 1.49 |
| | | ウバメガシ | 0.50 ± 0.80 |
| | | アカメガシワ | 0.19 ± 0.50 |
| | | ハゼノキ | 0.18 ± 0.39 |
| | | イヌビロ | 0.05 ± 0.21 |
| | | クスノキ | 0.00 ± 0.02 |
| | | クロマツ | 0.01 ± 0.04 |
| | | ウバメガシ | 0.16 ± 0.34 |
| | | ハマゴウ | 0.24 ± 0.42 |
| | | アカメガシワ | 0.14 ± 0.35 |
| ヒラドツツジ | 0.14 ± 0.47 | | |
| トベラ | 0.01 ± 0.03 | | |
| イヌビロ | 0.00 ± 0.02 | | |
| ナリハノイバラ | 0.00 ± 0.02 | | |
| 草本類 | 0.04 ± 0.05 | | |

*被度の平均値・標準偏差は、「不在」を「0」、「+」を「0.1」として算出

おける特徴をみていくと、まず、全てのクラスターにおいて、高木層、亜高木層でクロマツ成木が多かった。植生クラスター①では、低木層、草本層に草本類が発達しており、草本層では、クロマツも少し確認された。植生クラスター②では、低木層、草本層にクロマツが非常に多く発達していた。植生クラスター③では、低木層を中心にウバメガシが優占しており、複数種の広葉樹も確認された。植生クラスター④では、草本層から亜高木層までウバメガシが生育していた（表-2）。

植生クラスターに子実体クラスターを当てはめ（図-4）、各植生クラスターにおける子実体クラスターの比率を比較したところ、有意な違いが認められた（ $P < 0.01$ ）。多重比較の結果、植生クラスター①と植生クラスター②、③、④の子実体クラスターの比率、植生クラスター②と植生クラスター③の子実体クラスターの比率に有意な違いが認められた（ $P < 0.05$ ）（図-4）。

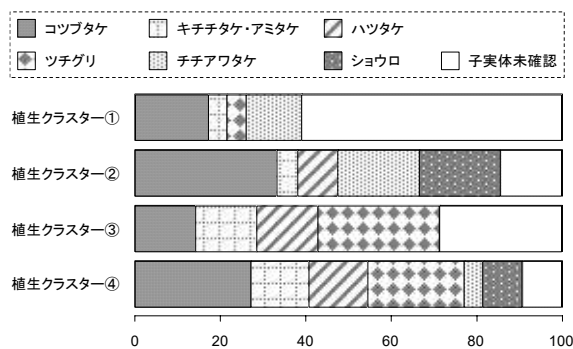


図-4 各植生への子実体群集の当てはめ

2. 菌根菌接種源としての海岸土壌の利用

(1) 菌根菌の感染状況

クロマツは、非滅菌の土壌でのみ菌根を形成し、その割合は、全体で 70.4%であった。根端数は、土壌に関わらず、非滅菌の土壌で有意に多かった（ $P < 0.001$ ）（図-5）。DNA 解析により、ショウロ土壌では、クロマツに最も多く菌根を形成していたのがショウロであった（75.4%）。一方、ヒメコガネ土壌では、未同定の菌根菌 1 が 48.9%、ツチグリ土壌では、*Wilcoxina mikolae* が 97.4%と最も多く菌根を形成していた（図-6）。

チグリ土壌では、*Wilcoxina mikolae* が 97.4%と最も多く菌根を形成していた（図-6）。

(2) クロマツの初期成長

クロマツの地上部の乾重は、どの土壌においても、処理間で有意な違いは認められなかった。一方、クロマツの地下部の乾重は、ヒメコガネ土壌では滅菌した土壌と非滅菌土壌の間に有意な違いは認められなかったものの、ツチグリ土壌では滅菌した土壌に比べて非滅菌の土壌で小さい傾向があり（ $P = 0.057$ ）、ショウロ土壌では有意に小さかった（ $P < 0.001$ ）（図-7）。TR 比は、ショウロ土壌でのみ、滅菌した土壌より非滅菌の土壌で有意に高かった（ $P < 0.05$ ）（図-8）。

3. 菌根菌接種コンテナ苗の作成

(1) クロマツコンテナ苗の生育状況

クロマツコンテナ苗の生残率は、セル容量や施肥の違いによって異なり、150 cc より 300 cc で高く（ $P < 0.01$ ）、無施肥、追肥のみ、元肥+追肥の

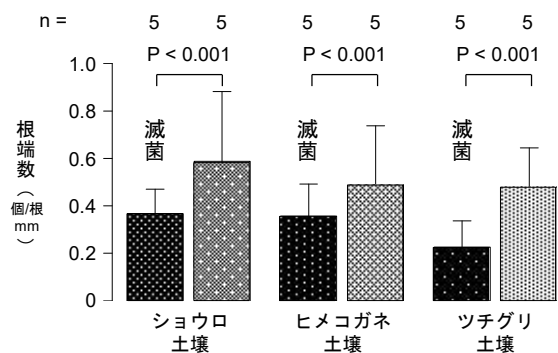


図-5 各土壌における根端数 (中島ら 印刷中 a)

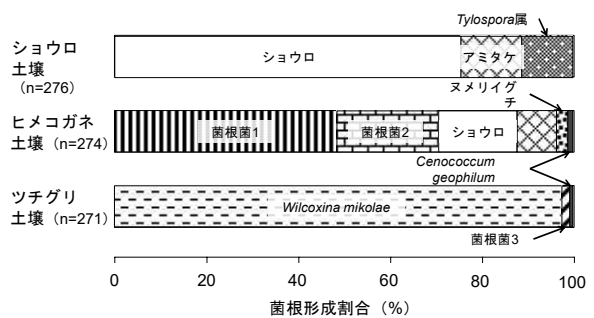


図-6 菌根菌の感染状況 (中島ら 印刷中 a)

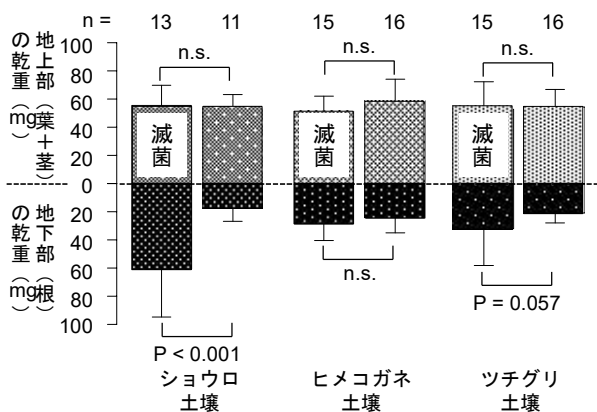


図-7 地上部と地下部の乾重比較
(中島ら 印刷中 a)

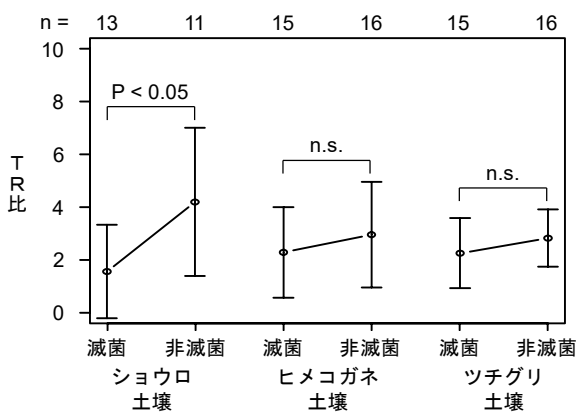


図-8 TR比の比較
(中島ら 印刷中 a)

順に低くなった ($P < 0.001$)。また、混合した土壌の違いによっても異なり ($P < 0.05$)、対照群と比較して、子実体クラスター③ (指標種: ハツタケ)の土壌を混合した場合に生残率が低かった (図-9)。

クロマツコンテナ苗の樹高は、セル容量の違いの影響は認められなかったが ($P > 0.05$)、施肥の違いにより異なり、無施肥、追肥のみ、元肥+追肥の順に大きくなった ($P < 0.001$)。また、混合した土壌の違いによっても異なり ($P < 0.001$)、対照群と比較して、子実体クラスター④ (指標種: ツチグリ)の土壌を混合した場合に樹高が大きく、子実体クラスター⑤ (指標種: チチアワタケ)の土壌を混合した場合に樹高が小さかった (図-10)。

クロマツコンテナ苗の根元径は、セル容量の違いの影響は認められなかったが ($P > 0.05$)、施肥の違いにより異なり、無施肥、追肥のみ、元肥+追肥の順に大きくなった ($P < 0.001$)。これらは、樹高と同様の結果だった。また、混合した土壌の違いによっても異なり ($P < 0.001$)、対照群と比較して、子実体クラスター② (指標種: キチチタケ・アマタケ)、④ (指標種: ツチグリ)の土壌を混合した場合に根元径は大きかった (図-11)。

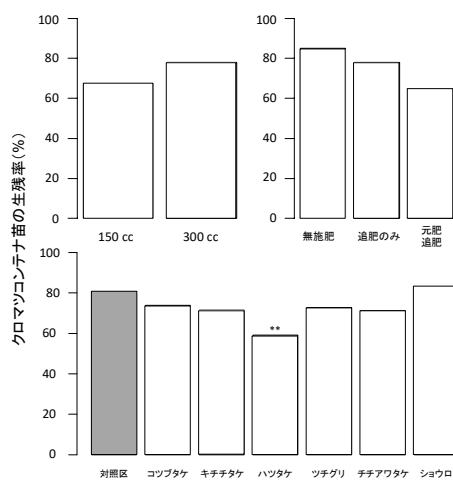


図-9 クロマツコンテナ苗の生残率
(**は対照区と比較して有意に異なることを示す。)

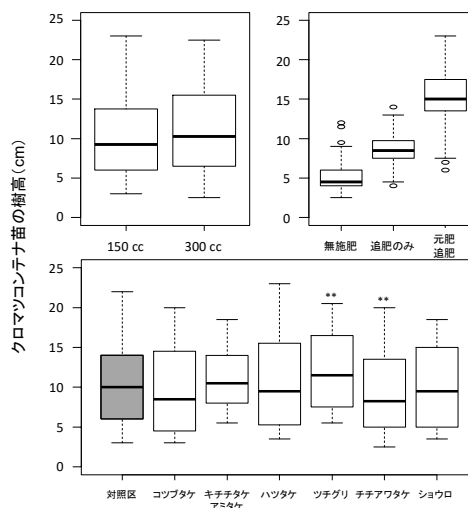


図-10 クロマツコンテナ苗の樹高
(**は対照区と比較して有意に異なることを示す。)

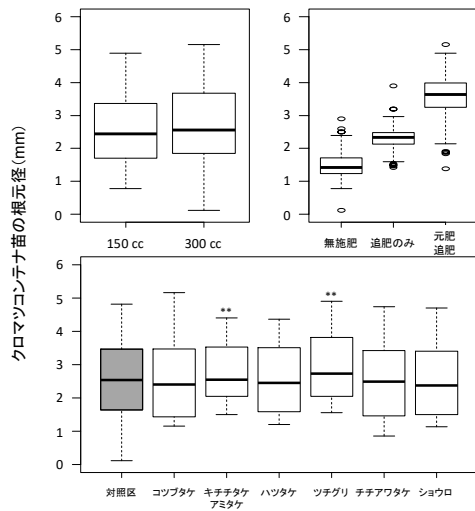


図-11 クロマツコンテナ苗の根元径
(**は対照区と比較して有意に異なることを示す。)

IV 考察

まず、菌根性子実体群集と海岸クロマツ林の林分構造との関係について考察する。菌根性子実体群集については、今回のように子実体の観察により調査した例は限られているが（小川 1979、松本ら 1995）、その中で報告されている菌根菌種は、ショウロ、ハツタケ、ヌメリイグチ等、本研究においても確認できた種も多かったもので、それらは海岸地域において普遍的な菌根菌であると考えられる（表-1）。海岸クロマツ林の林分構造については、植生クラスター①から④にかけて遷移過程を示していると考えられる（表-2）。すなわち、植生クラスター①から②にかけて下層にクロマツ実生が発達して、その後、土壌が肥沃化するに伴ってウバメガシを始めとする広葉樹が発達し（植生クラスター③）、ウバメガシは高木層に向けて成長していく過程となっていると考えられる（植生クラスター④）。この植生の遷移に伴って、菌根性子実体の群集構造にも違いが認められ（ $P < 0.05$ ）、植生クラスター①のような草本類が優占し下層がほとんど発達していない場合、子実体が発生しなかったクラスターの割合が高く、植生クラスター②のように若いクロマツ（クロマツ実生）

が優占してくるとショウロを指標種とする子実体クラスターの割合が多くなり、植生クラスター③、④のようにウバメガシの侵入が多くなるとツチグリを指標種とする子実体クラスターの割合が多くなった（図-4、表-1、2）。これらのことから、海岸クロマツ林では、土壌の肥沃化や、それに伴う広葉樹の侵入によって、菌根菌の群集構造も遷移していく可能性があり、特にクロマツ実生はショウロと、ウバメガシはツチグリと強い共生関係を築いている可能性が示唆された。

次に、海岸土壌の菌根菌接種源としての利用可能性について考察する。前述の結果より、クロマツ苗（≒実生）に感染させるべき菌根菌の第一候補としてショウロが考えられた。ここでは、ショウロが優占した場所の土壌を含め、異なる菌根性子実体が優占した場所の土壌を用いてクロマツを生育させた。その結果、海岸の土壌を用いることで、クロマツ実生に菌根を形成させることが可能であることが分かった（図-6）。また、第一候補のショウロ土壌を用いた場合は、クロマツにショウロの菌根を形成させることができた。しかしながら、ツチグリ土壌では、ツチグリ菌根を形成させることができなかったことから、採取した土壌で発生していた子実体相が必ずしも菌根相を反映するとは限らないことも分かった（図-6）。すなわち、菌根菌の感染のし易さが菌根菌種間で異なる可能性がある。もしくは、ショウロ属菌の中には地中に埋土胞子として数年以上存続する種もあるため（Bruns et al. 2009）、ショウロも同じように埋土胞子として長期間生存し、埋土胞子を感染源としてショウロが優占して菌根を形成したとも考えられる。一方、菌根菌種に関わらず、どの菌根菌に感染した場合も根端数を増加させることが分かった（図-5）、菌根形成は、クロマツ生残率を高めるのに貢献すると考えられる（Nakashima et al. 2016）。つまり、ショウロに限

らず、苗木に菌根菌を感染させると、海岸地域での活着率を高める上で重要であると考えられる。本調査では、更に地下部の乾重のみ菌根の形成により小さくなる傾向が認められた（図-7）。このことから、根に配分された光合成産物が菌根菌へと分配されることが示唆された。また、ショウロ土壌でのみ根の乾重が有意に小さく、TR 比が有意に高かったことから（図-7、8）、ショウロは他の菌根菌より多くの光合成産物を要求する種である可能性が示唆された。ただし、海岸地域で植栽する場合に、TR 比が高いと、海からの強風により根返りを引き起こす可能性も考えられるので、菌根菌（特にショウロ）を接種した苗木を作成する際に TR 比に注意を払う必要があるかもしれない。

最後に、海岸土壌を用いてクロマツコンテナ苗を作成した場合のクロマツの生育状況について考察する。前述の結果から、海岸土壌だけを用いた場合には、クロマツに菌根形成を誘導することができたので、海岸土壌は菌根菌の接種源として利用できる可能性がある。しかし、海岸土壌をコンテナ苗の作成に活用する場合、海岸土壌だけでは、根鉢の安定性や保水性に乏しいため、コンテナ苗の基本培地と海岸土壌を 1:1 で混合した培地を用いてクロマツコンテナ苗を作成した。まず、苗木コンテナのセル容量が違っていても樹高・根元径に差は見られなかったもので、セル容量の違いによりクロマツの成長が妨げられることはないと考えられることができる（図-9、10、11）。生残率は、セル容量 150 cc で低かっただけでなく、施肥の量が多くなるにつれて低くなった。加えて、樹高・根元径は、当然ながら施肥の量が多いほど大きかった（図-9、10、11）。これらのこと踏まえると、今回、コンテナの培地に海岸土壌を混合したため、培地の保水性が低下し、更に施肥によりクロマツが大きく成長し、より多くの水分を必要としたため、

セル容量が小さく、かつ、クロマツが大きく成長した時に水不足を生じやすく生残率の低下を引き起こした可能性が考えられる。苗木生産を考えると施肥は不可欠なので、今回は朝 1 回 30 分の散水を行ったが、散水頻度を増やすか、散水時間を増やす等の対策により、生残率を高めることができるかもしれない。また、混合する土壌の違いにより、対照群に比べクロマツの生残率、成長量（樹高・根元径）に有意な違いが認められる場合もあったが（図-9、10、11）、その違いは小さく、現段階では、どの海岸土壌が有効であるかの判断はできなかった。今後は、生育状況を継続して観察するとともに、作成したクロマツコンテナ苗の菌根菌感染状況および、DNA 解析等により感染している菌根菌種の特定を行い、どの程度地上部の子実体相が地下部を反映するかを明らかにする必要があるだろう。また、苗木の TR 比を調べるとともに、海岸地域に植栽した際の活着率・成長量を調査することで、海岸地域により適したクロマツコンテナ苗を選定していく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、名古屋大学大学院生命農学研究科の肘井直樹教授、三重大学大学院生物資源学研究科の松田陽介教授には、多大なるご助言・ご支援をいただきました。この場を借りて、深く御礼申し上げます。

引用文献

- 愛知県（2009）渥美半島の海岸林造成と防災の歴史. 102pp
- Braun-Blanquet J (1964) Pflanzensozioecologie: grundzüge der vegetationskunde. 865pp. Zweite, umgearbeitete und vermehrte Auflage, Springer-Verlag : Wien.
- Bruns TD, Peay KG, Boynton PJ, Grubisha LC,

- Hynson NA, Nguyen NH, Rosenstock NP (2009) Inoculum potential of *Rhizopogon* spores increases with time over the first 4 yr of a 99-yr spore burial experiment. *New Phytologist* 181:463–470
- van der Heijden MGA, Martin FM, Selosse MA, Sanders IR (2015) Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist* 205:1406–1423
- 松本則行・本間広之・田中修 (1995) 海岸クロマツ林における菌根菌の遷移. 新潟県林業試験場研究報告 37:19–25
- 村井宏 (1997) 日本の海岸林–多面的な環境機能とその活用–. 513pp. ソフトサイエンス社. 東京
- Nakashima H, Eguchi N, Uesugi T, Yamashita N, Matsuda Y (2016) Effect of ectomycorrhizal composition on survival and growth of *Pinus thunbergii* seedlings varying in resistance to the pine wilt nematode. *Trees* 30:475–481
- 中島寛文・栗田悟・松田陽介・肘井直樹 (印刷中a) 異なる菌根性子実体が優占した海岸土壌で育てたクロマツ実生の初期成長と菌根形成状況. 中部森林研究
- 中島寛文・栗田悟・松田陽介・肘井直樹 (印刷中b) スミパインの空中散布が *Cenococcum geophilum* を繁栄させる? 樹木医学研究
- 小川眞 (1979) 海岸砂丘のクロマツ林における微生物相. 林業試験場研究報告 107–124
- R Development Core Team (2017) R: a language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0