

スギ成木および実生におけるアーバスキュラー菌根菌の感染率の季節変化

誌名	日本森林学会誌
ISSN	13498509
著者名	畑,邦彦 木本,遼太郎 曾根,晃一
発行元	日本森林学会
巻/号	100巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 3-7
発行年月	2018年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



スギ成木および実生におけるアーバスキュラー菌根菌の感染率の季節変化

畑 邦彦^{*1}・木本遼太郎¹・曾根 晃 一¹

スギにおけるアーバスキュラー菌根菌（以下、AM 菌）の感染率の季節変化を明らかにするため、鹿児島大学農学部附属高限演習林において、2012 年 1 月から 2013 年 11 月にかけて毎月 1 回スギの成木および実生から根を採取して組織染色を行い、根内の AM 菌を顕微鏡で確認した。その結果、今回調査を行った全ての月の全調査個体で AM 菌の感染が確認された。感染率は成木、実生とも 1 月から 5 月までは低かったが、6 月に急上昇後、8 月にかけて一度低下してから再び上昇し、成木は 9 月と 11 月、実生は 10 月をピークに再び低下するというパターンを示した。感染率は実生より成木の方が高い傾向が見られた。また、成木、実生とも感染率の季節変化は 2 年間で極めて類似していた。感染率は平均気温と全体として有意な正の相関を示したが、詳しく見ると、およそ 22℃をピークにそれ以下では気温と共に感染率が上昇、それ以上では低下する傾向を示した。降水量も感染率と有意な正の相関を示したが、これは主に気温と感染率の相関を反映した間接的な関係と思われる。

キーワード：アーバスキュラー菌根、スギ、感染率、季節変化、気温

Kunihiko Hata,^{*1} Ryotaro Kimoto,¹ Koichi Sone¹ (2018) Seasonal Changes in the Colonization Rates of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Roots of Mature Trees and Seedlings of *Cryptomeria japonica*. J Jpn For Soc 100: 3-7 In order to examine the seasonal changes in the colonization rates of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the roots of *Cryptomeria japonica*, we collected roots from mature trees and seedlings in Takakuma Experimental Forest of Kagoshima University from January 2012 to November 2013. We stained sample fine root segments and observed AM fungi by microscopy. As a result, all the individuals of *C. japonica* examined in this study were colonized by AM fungi. Colonization rates were low from January to May for both mature trees and seedlings. They drastically increased in June and then decreased until August. They recovered after summer from September till November for mature trees and till October for seedlings, and decreased again. Colonization rates showed quite similar patterns of seasonal change between the two years both for mature trees and seedlings, but were generally higher in mature trees than in seedlings. Colonization rates showed significant positive correlation with mean air temperature in total, but more precisely, they increased with the increase in temperature below 22℃, but decreased above that temperature. Precipitation also showed significant positive correlation with colonization rates, but this seem to be an indirect relationship reflecting the relationship between colonization rate and air temperature.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi, *Cryptomeria japonica*, colonization rate, seasonal change, air temperature

I. は じ め に

アーバスキュラー菌根菌（以下、AM 菌）はグロムス門に属する真菌類で、150 種程度が知られている（西田 2007）。AM 菌は極めて幅広い種類の植物の根と菌根共生を行い、その対象は陸上植物の 80% 以上といわれている（秋山・林 2009）。その中には我が国における代表的な造林樹種であるスギ *Cryptomeria japonica* やヒノキ *Chamaecyparis obtusa* も含まれている。アーバスキュラー菌根は一般にリンをはじめとする無機栄養分と水分の吸収促進や感染に伴う根の保護といった機能を持っており、それらの機能により、成長量や成長速度の上昇、葉の栄養状態の向上、種子生産量の増加、耐乾性、耐病性、重金属に対する耐性の向上といった効果を宿主植物に付与する（西田 2007；磯部ら 2002）ことが知られている。したがって、スギやヒノキでも同様の効果が発生していることが予想される。

このように、AM 菌は植物にとってきわめて重要な共生菌であり、潜在的には我が国の人工林においても重要な役割を果たしている可能性がある。しかし、日本国内における研究は農作物を中心とする草本植物を対象としたものが大半であり（例えば阿部・石川 1999；磯辺・坪木 1999；唐澤ら 2001；岡ら 2012）、樹木では AM 菌に関する研究

自体があまりなされていない（例えば山原ら 2005）。最も重要な造林樹種であるスギでさえ論文の形で発表された研究の事例は少ない。その中で、Mizoguchi (2000) は AM 菌を調べる上でのスギの根のサンプリング方法について、Fujimaki *et al.* (2001) はスギのアーバスキュラー菌根が Paris-type と Arum-type の中間であることや、斜面上の位置によって感染率に差がないことを報告している。また、著者らはスギにおけるアーバスキュラー菌根の感染状況、特に季節的な変化を明らかにするため、スギの成木および実生の根の組織染色を行い、AM 菌がどの程度感染しているか顕微鏡観察によって確認した（木本ら 2013）。その結果、AM 菌は成木、実生を問わず極めて高頻度でスギの細根に感染していることが明らかとなった。一方、細根内の感染密度は調査月によって変化が見られ、成木の方が実生より全体的に AM 菌の感染率が高いといったことも明らかとなった。ただし、この研究は 2011 年 6 月～10 月の 5 カ月というごく限られた期間で行われたものであり、年間を通じた季節変動や年ごとの変動は明らかになっていない。そこで今回は通年調査をおおよそ 2 年行うことにより、スギの成木および実生における AM 菌の感染密度の季節変動および年次変動を明らかにすることを試みた。

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: k8788282@kadai.jp

¹ 鹿児島大学農学部 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-24 (Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1-21-24 Koorimoto, Kagoshima, Kagoshima 890-0065, Japan)

(2017 年 5 月 8 日受付：2017 年 10 月 24 日受理)

II. 材料と方法

1. 試料の採取

試料として用いたスギの成木および実生の細根は鹿児島大学農学部附属高隈演習林第4林班15小班の83年生（調査開始時）スギ人工林から採取を行った。この林分の下層植生はヤブニッケイ *Cinnamomum japonicum*, ホソバタブ *Machilus japonica*, タブノキ *Machilus thunbergii*, シロダモ *Neolitsea sericea*, ユズリハ *Daphniphyllum macropodum*, キブシ *Stachyurus praecox*, アカメガシワ *Mallotus japonicus*, ハリエンジュ *Robinia pseudoacacia*, ノイバラ *Rosa multiflora*, フユイチゴ *Rubus buergeri*, ナガバモミジイチゴ *Rubus palmatus*, イヌビワ *Ficus erecta*, マテバシイ *Lithocarpus edulis*, ヤマハゼ *Toxicodendron sylvestris* (*Rhus sylvestris*), ミズキ *Cornus controversa* (*Swida controversa*), ウツギ *Deutzia crenata*, コガクウツギ *Hydrangea luteo-venosa*, ヒサカキ *Eurya japonica*, イズセンリョウ *Maesa japonica*, アオキ *Aucuba japonica*, ネズミモチ *Ligustrum japonicum*, フジウツギ *Buddleja japonica*, ムラサキシキブ *Callicarpa japonica*, クサギ *Clerodendrum trichotomum* といった木本, ススキ *Myscanthus sinensis*, カラムシ *Boehmeria nipononivea*, コアカソ *Boehmeria spicata* といった草本, シダ類で構成されていた。林縁はススキが優占種であり, 林内はシロダモ, ノイバラ, フユイチゴ, ナガバモミジイチゴ, アオキが多かった。下層はほぼこれらの草本や木本に覆われていた。林冠は閉鎖していた。15小班は東に向かって流下する沢を挟む谷となっており, 南北の斜面を含む。面積は9.20 ha, 標高は550~570 m だった。調査を行った範囲におけるスギ成木の胸高直径は平均43.7 cm, 標準偏差16.6 cm であった。

調査は2012年の1月24日, 2月21日, 3月20日, 4月16日, 5月12日, 6月26日, 7月16日, 8月20日, 9月10日, 10月3日, 11月7日, 12月12日, 2013年1月17日, 2月14日, 3月21日, 4月16日, 5月22日, 6月18日, 7月16日, 8月19日, 9月19日, 10月19日, 11月11日に行った。スギ成木の場合, 各調査日につき任意の5個体を選択し, それぞれの個体の根元をシャベルで掘った。そこから伸びる根を先端までたどり（それぞれの根の長さは概ね1 m 以内であった）, スギ1個体当たり1本, 先端から利用可能と思われる比較的若い部分まで（13~25 cm）根を切り取り, これを供試根として採取した。なお, 一度採取を行ったスギ個体は採取後最低でも半年間は採取に使わなかった。実生については, 自然落下した種子から発芽して生育していると思われる樹高約10~50 cm 程度のスギ個体から任意に5個体を選択し, 各個体を周囲の土ごと掘り返して採取した。実生の根の長さは4~20 cm であり, 各個体について1本を供試根として用いた。なお, 実生はスギ林内にはあまり存在せず, 主に林縁部から採取した。ただし, 実生を採取した林縁部は隣接する広葉樹林のために被陰しており, 明るさは林内と大きく変わらなかった。

2. 根の脱色および染色

採取した成木と実生の根はそのままメッシュサイズ

500 μ m の篩に載せ, 手で揉み洗いせずに水道水の水流だけで土を洗い落とした。洗浄後, 成木の供試根は先端から4 cm から20 cm の長さを切り取って以降の作業に用いた（全体として実生と成木で採取した根の長さが大きく違っていたため, 実生の供試根とサイズを揃えるためである）。供試根は採取後24時間以内に10% KOH 溶液に浸漬し, 室温で1週間から3週間かけて脱色を行った。このときKOH 溶液は濁るたびに入れ替えた。KOH 処理は最終的に溶液が透明か若干黄色に濁る程度になるまで行った。KOH 処理を行った供試根は蒸留水で3~4回洗浄した後に30%過酸化水素水に浸漬し, 数分間70~90℃に加温することにより漂白を行った。漂白後, 蒸留水で3~4回洗浄し, 多量の蒸留水に浸漬して1時間, 70~90℃で加温した。その後, 0.05%のコットンブルーを含む乳酸に浸漬して約30分間70~90℃で加温することにより供試根を染色した。染色後, 試料は3~4回水洗し, 乳酸を入れた試験管内で保存した。

3. 顕微鏡観察

染色した供試根から新鮮な細根を各個体当たり12本切り取って試料断片とした（切り取ったのは各細根の先端から柔らかい部分まで, 断片の長さは0.5~1.7 cm）。それぞれの断片はスライドグラス上で乳酸を滴下し, 押し潰し法を用いてプレパラートに封入した（プレパラート当たり3断片）。したがって, 各調査日, 調査地当たりでは成木, 実生とも細根60断片を調査したことになる。

プレパラートはノマルスキー型蛍光微分干渉顕微鏡（OLYMPUS BX-33-FLD-2）を用いて観察した。AM 菌の感染は根の組織内菌糸, 樹枝状体, 嚢状体のいずれかを含む細胞が存在するかどうかで判別した。

各試料断片の観察時には顕微鏡の倍率を100倍にし, 接眼マイクロメーターをセットした。視野内におけるマイクロメーターの中心の目盛り（以後, 中心線と呼ぶ）の線上に組織内菌糸, 樹枝状体, 嚢状体のいずれかを含む細胞が存在しているかを観察した。試料断片の端から0.5 mm の場所を最初の中心線として, 0.5 mm ごとにプレパラートをずらして中心線を設置した。したがって, 観察した中心線の数断片の長さによって異なる（断片の長さ（mm）/0.5 となる）。上記構造のいずれかを含む細胞がかかっている中心線を感染中心線として, その数を試料断片ごとに求めた。

4. 解析

感染密度の指標として, 各試料断片当たりの感染率を以下の式を用いて求めた。

$$\text{感染率 (\%)} = (\text{感染中心線数} / \text{観察中心線数}) \times 100$$

感染中心線数は組織内菌糸, 樹枝状体, 嚢状体のいずれかを含む細胞がかかっていた中心線の数。観察中心線数は観察した全ての中心線の数。

実生および成木における感染率の調査日間の比較はKruskal-Wallis 検定を用いて行った。また, 感染率と気温, 降水量の関係を検討するため, 調査日前30日間の降水量の総計（以下, 単に降水量）と平均気温（以下, 単に平均気温）を求めた（気象庁 2012, 2013: 調査地から約15 km

と最も近い鹿屋観測所のデータを用いた)。なお、調査日前 30 日間の気象データを用いたのは、当該調査回とその 1 回前の調査の間の期間の気象条件を代表する数値として当該調査回の感染率との関係の検討に用いるためである(感染率の調査が月に 1 回であることと、日数を統一するために一律 30 日とした)。感染率と平均気温、感染率と降水量、平均気温と降水量について、Spearman の順位相関係数 r_s を算出し、検定を行った。

III. 結 果

成木における感染率の平均値は(図-1)、2012 年には 1 月の 27% から 3 月の 52% まで上昇後、5 月の 45% までやや低下し、6 月には 75% まで上昇した。7 月、8 月にかけては 38% まで低下し、9 月に 73% まで上昇した。10 月には 51% に低下し、11 月に 59% まで上昇し、12 月になると 30% まで低下した。感染率の調査日間の差は有意であった(Kruskal-Wallis 検定: $H=224.154$, $df=11$, $p<0.0001$)。2013 年には、1 月に 27% から 4 月の 47% まで上昇した後、5 月に 43% とやや低下し、6 月に 72% まで上昇した。7 月、8 月は 41% まで低下し、9 月は 66% に上昇した。10 月には 56% に低下し、11 月は 66% まで上昇した。感染率の調査日間の差は有意であった(Kruskal-Wallis 検定: $H=211.445$, $df=10$, $p<0.0001$)。これら 2 年間の変動パターンは極めて類似していた。

実生における感染率の平均値は(図-2)、2012 年には 1 月の 30% から 3 月の 27% までやや低下し、4 月に 35% までやや上昇、5 月に 19% まで低下、6 月に 63% まで上昇し

7 月、8 月は 31% まで低下、9 月、10 月は 45% まで上昇し、11 月、12 月は 18% まで低下した。感染率の調査日間の差は有意であった(Kruskal-Wallis 検定: $H=176.607$, $df=11$, $p<0.0001$)。2013 年には 1 月の 26% から 2 月に 30%、3 月に 28%、4 月に 29%、5 月に 24% とわずかな上昇と低下を交互に繰り返した後、6 月に 56% まで上昇、7 月、8 月に 34% まで低下し 9 月、10 月に 50% まで上昇、11 月に 45% まで低下した。感染率の調査日間の差は有意であった(Kruskal-Wallis 検定: $H=129.897$, $df=10$, $p<0.0001$)。これら 2 年間の変動パターンは極めて類似していた。

この 2 年間に於ける調査日前 30 日間の降水量と平均気温の変化を見ると(図-3)、気温はこの 2 年間の変動が極めて近かったのに対し、降水量はこの 2 年間で大きく異なっていた。感染率と平均気温および降水量の関係をみると(図-4~7)、平均気温、降水量とも全体としては感染率と有意な正の相関が成木でも実生でもあったが(平均気温: 成木 $r_s=0.493$, $p=0.0208$; 実生 $r_s=0.555$, $p=0.0093$; 降水量: 成木 $r_s=0.619$, $p=0.0037$, 実生 $r_s=0.524$, $p=0.0140$)、平均気温については、約 22℃ をピークとして、それ以下では平均気温の上昇に伴って感染率が上昇する傾向が、それ以上では低下する傾向が見られた。一方、平均気温と降水量自体にも有意な相関が見られたため($r_s=0.555$, $p=0.0092$)、どちらかと感染率との相関が間接的なものである可能性も考えられた。そこで、散布図上で降水量については平均気温の高低、平均気温については降水量の多少で

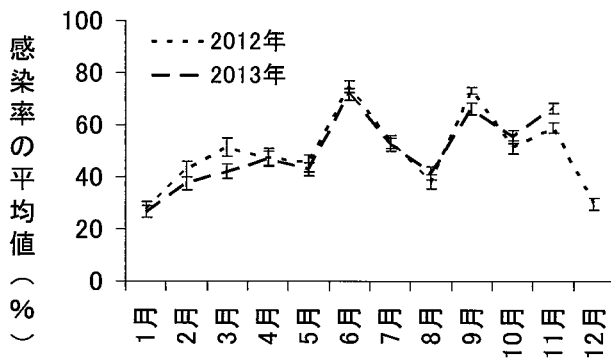


図-1. 成木における感染率の平均値の季節変動
バーは標準誤差。

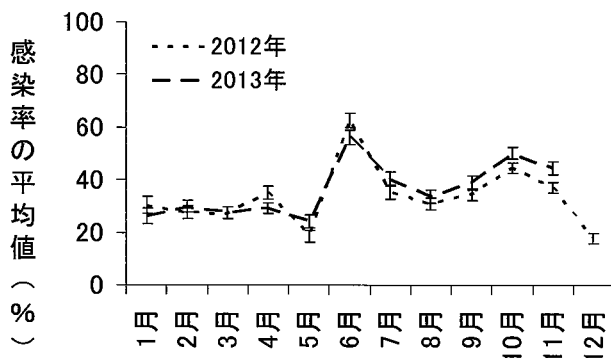


図-2. 実生における感染率の平均値の季節変動
バーは標準誤差。

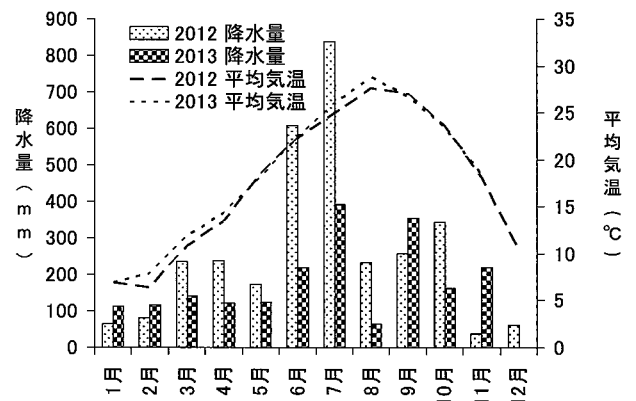


図-3. 調査日前 30 日間の降水量 (mm) と平均気温 (°C) の変化

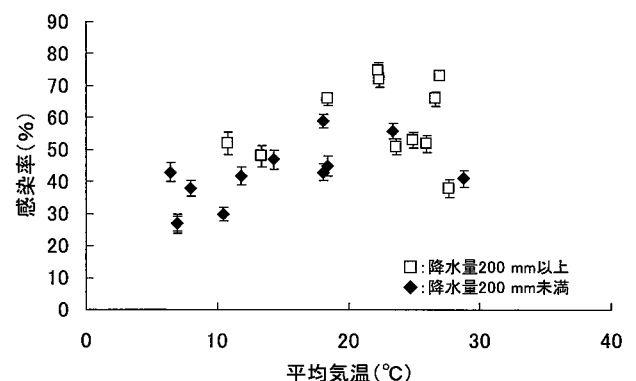


図-4. 成木における調査日前 30 日間の平均気温と感染率の関係
バーは標準誤差。

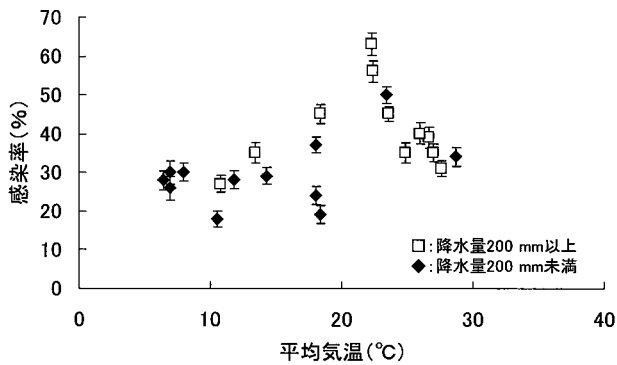


図-5. 成木における調査日前 30 日間の降水量と感染率の関係
バーは標準誤差。

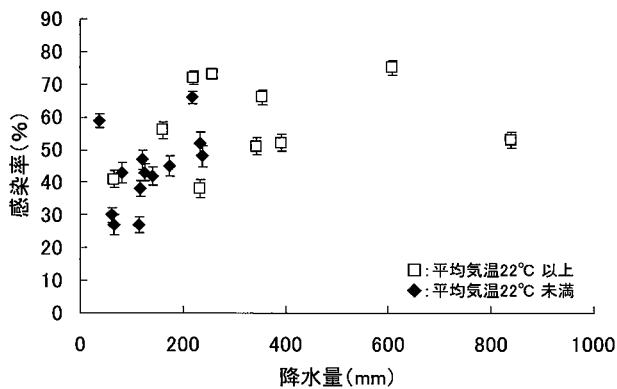


図-6. 実生における調査日前 30 日間の平均気温と感染率の関係
バーは標準誤差

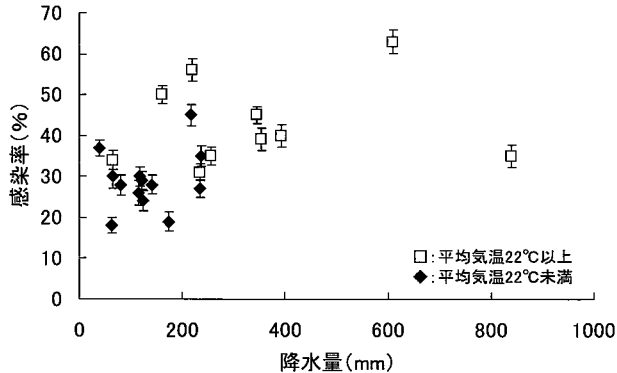


図-7. 実生における調査日前 30 日間の降水量と感染率の関係
バーは標準誤差

それぞれ二分してみると（平均気温は 22℃、降水量は中央値に近い 200 mm を基準として区分した）、平均気温と感染率の関係については（図-4, 5）、成木、実生とも降水量が 200 mm 以上の場合には上記で見られた 22℃ をピークに感染率が上下するという関係が顕著に見られ、降水量が 200 mm 未満の場合でも類似の傾向が見られた。ただし、22℃ 以下では、200 mm 以上が比較的高い感染率を示した。降水量と感染率の関係については（図-6, 7）、成木、実生とも平均気温 22℃ 未満が左下に固まる一方 22℃ 以上は右上に広がって見られ、降水量 600 mm 程度まではやや上昇傾向が見られたものの、それぞれの群内では明瞭な関係という程ではなかった。以上のように、感染率に対する平均気温の影響は降水量が多くても少なくても比較的明瞭に見

られたのに対し、感染率に対する降水量の影響は平均気温の高低で分けると明瞭には見られなくなった。

IV. 考 察

今回の調査では、スギは成木、実生共に AM 菌が 2 年間全ての個体で感染しており、感染率の 2 年間の季節変動のパターンは概ね一致した。そのパターンとしては、実生、成木とも感染率が 5～6 月に上昇後 6～8 月に低下、晩夏～初秋に再び上昇後秋から冬にかけて低下する（実生は 10 月、成木は 9 月と 11 月がピーク）という傾向を示した。このように、感染率の顕著な上昇と低下がいずれも 1 年に少なくとも 2 回生じた。感染率の上昇のメカニズムとしては、未感染の細根への新規の感染の増加と既に感染している細根内における感染密度の上昇、低下のメカニズムとしては、老化に伴う感染根の死滅や、未感染もしくは感染密度の低い新規の根の加入、あるいは生育条件の悪化に伴う菌糸の死滅や密度低下といったものが考えられる。ただし、異なる季節における上昇または低下が同じメカニズムによって生ずるとは限らない。これを明らかにするためには、感染率だけでなく、細根自体がどれくらい感染しているかという感染頻度や細根自体の動態も並行して見て行く必要があると思われる。例えば、今回データとしては示していないが、感染中心線の見られなかった細根の割合は、実生、成木とも最小値は 0% で、これは感染率の高い時期に見られたが、冬期の感染率低下時には成木で 5～10% 程度、実生で 10～30% 程度になった。それに対して、夏期の感染率低下時にはこの割合は成木では 0% を保ち、実生でも 5% を超えることはなかった。すなわち、冬期における感染率の低下時には感染頻度の低下もある程度は生じていると考えられる一方、夏期における感染率の低下時には感染頻度の低下はほとんど起きていないと考えられた。これは夏期と冬期における感染率の低下が異なるメカニズムによって生じていることを示唆すると思われる。ただし、感染中心線の観察のみでは実際の感染頻度を正しく反映するとは限らないので、これはあくまで示唆以上のものではない。一方、スギの細根の動態に関しては、細根のバイオマスが夏期まで増加後減少すること、枯死した細根は夏期に多く他の季節に低いことが報告されている（Konôpka *et al.* 2006）。このことは、生じたばかりの細根が夏期に多く加入していることを意味するが、夏期に感染頻度がほぼ下がっていないというのが正しいとするならば、夏期における感染率の低下が未感染の細根の新加入によるとは考えにくいということになる。ただ、現時点で推測以上の考察は困難なので、このことを明らかにするには更に詳細な調査が必要と思われる。

さて、こういった AM 菌の感染率やその上昇・低下に影響する要因としては、気温や降水量といった気象要因、土壌含水率やリン酸等の土壌栄養といった土壌要因（小島ら 2009）、宿主植物の栄養状態（俵谷 1998）といったものが考えられる。この中で、今回は調査日前 30 日間の平均気温と降水量について検討したが、単純な相関という意味では平均気温、降水量とも全体としては感染率と有意な

正の相関が見られた。しかし、平均気温と感染率に関しては単純な線形の関係ではなく、約 22℃ をピークにそれ以下では気温とともに感染率が上昇、それ以上では低下という一山型の関係が見られた。この関係が妥当だとすると、感染率が低下する夏期は気温が高過ぎるため、冬期は気温が低過ぎるために感染率が下がったということになる。こういった一山型のグラフは、真菌類の成長曲線に一般的に見られる、最適温度までは上昇、それ以上では低下というパターンに近く、AM 菌の感染率の変化に温度変化に伴う菌そのものの活性の変化が関わっている可能性を示唆すると考えられる。一方、降水量に関しては、平均気温の高低で分けると各群内では感染率との関係が明瞭には見られなくなるので、降水量と感染率の全体的な相関は降水量と平均気温の関係を反映して生じる間接的な相関の部分が大きいと思われる。感染率の変動に対する降水量の影響がそれほど大きくないという推測は、感染率の変動パターンが極めて類似していたこの 2 年間に於いて、平均気温は両年の変動が極めて近かったのに対し、降水量はこの両年で大きく異なっていたことから示唆される。ただし、図-4、図-5 で平均気温が 22℃ 以下の場合に降水量が多い群の方が感染率が高くなる傾向や、図-6、図-7 で降水量 600 mm 程度まで降水量とともに感染率が増加する傾向は見られるので、感染率に対する降水量自身の影響も限定的あるいは副次的にはあるかもしれない。

この調査の 1 年前に同じ調査地で行われた木本ら (2013) の調査では、半年分のみの結果だが、感染率が 6 月に高く、夏期に低下し、秋期に回復するというパターンや、実生は成木よりやや低いといった傾向は今回と共通して見られた。しかし、夏期の低下は今回に比べてかなり顕著であったし、感染率の低下と回復の時期には 1 カ月程度ずれが見られた。このように、AM 菌の季節変動は比較的安定しているとはいえ、年によっては多少異なってくると考えられた。

今回調査を行った 2 年間を通して、成木、実生を問わず調査の対象とした全スギ個体において AM 菌の感染が確認された。すなわち、少なくとも今回の林分ではスギは実生、成木共に安定した共生関係を保っていると考えられる。アーバスキュラー菌根は植物の成長や生存に対してしばし

ば極めて大きな影響を持っていることが知られており (山田 2003)、今後はスギにおいてもアーバスキュラー菌根を重要な共生者として注目していく必要があると思われる。

本研究を始めるに当たって御指導、御助言いただきました筑波大学の阿部淳一助教に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 阿部淳一・石川真一 (1999) 海浜砂丘草本植生における菌根共生：VA 菌根菌の生態。日生誌 49: 145-150
- 秋山康紀・林 英雄 (2009) アーバスキュラー菌根共生における共生シグナルとしてのストリゴラクトン。日農薬会誌 34: 306-309
- Fujimaki R, Tateishi T, Kohzu A, Saito M, Tokuchi N (2001) Characterization of arbuscular mycorrhizal colonization of 4 plant species in a Japanese red cedar plantation. Soil Microorganisms (土と微生物) 55: 121-128
- 磯部勝孝・坪木良雄 (1999) インゲンマメ栽培におけるアーバスキュラー菌根菌の利用に関する研究—接種菌種間でのインゲンマメの生育の違い—。日作紀 68: 112-117
- 磯部勝孝・村上 学・立石 亮・野村和成・井上弘明・坪木良雄 (2002) アーバスキュラー菌根菌の感染がインゲンマメの根の形態に及ぼす影響。日作紀 71: 91-95
- 唐澤敏彦・笠原賢明・建部雅子 (2001) 緑肥作物の導入によるアーバスキュラー菌根菌の増殖とトウモロコシ栽培への利用。土肥誌 72: 357-364
- 木本遼太郎・曾根晃一・畑 邦彦 (2013) 鹿児島大学農学部附属高隈演習林のスギ成木及び実生におけるアーバスキュラー菌根菌の感染状況。九森研 66: 17-20
- 気象庁 (2012, 2013) 気象庁ホームページ 気象観測データ。http://www.jma.go.jp/jma/index.html
- 小島知子・斎藤雅典・小野 敦・安藤 貞・菅原和夫 (2009) 日本各地におけるアーバスキュラー菌根菌相。日草誌 55: 148-155
- Konôpka B, Noguchi K, Sakata T, Takahashi M, Konôpková Z (2006) Fine root dynamics in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation throughout the growing season. For Ecol Manage 225: 278-286
- Mizoguchi T (2000) Methodological studies of *Cryptomeria japonica* D. Don root sampling and measurement techniques for simultaneous analysis of root and arbuscular mycorrhiza dynamics. 森林立地 42: 29-35
- 西田貴明 (2007) アーバスキュラー菌根菌が地上部の植食性昆虫に及ぼす影響—植物と昆虫の相互作用研究における地下部からの視点—。日生誌 57: 412-420
- 岡 紀邦・唐澤敏彦・岡崎圭毅・建部雅子 (2012) 菌根菌を利用したダイズ生産。北農 79: 54-59
- 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
- 山田明義 (2003) 菌根共生。(土壤微生物生態学。堀越孝雄・二井一禎編、朝倉書店)。44-60
- 山原美奈・河合昌孝・大場広輔 (2005) コウヤマキ (*Sciadopitys verticillata*) にみられた *Paris*-type のアーバスキュラー菌根。日林誌 87: 157-160