

論文

用土を用いない新たなスギ挿し木発根手法の検討 —スギ挿し木苗の植物工場的生産技術の開発に向けて—^{*1}

栗田 学^{*2}・倉本哲嗣^{*3}・久保田正裕^{*2}・福山友博^{*3}・竹田宣明^{*4}・倉原雄二^{*2}・
松永孝治^{*2}・大塚次郎^{*2}・佐藤省治^{*5}・渡辺敦史^{*6}

栗田 学・倉本哲嗣・久保田正裕・福山友博・竹田宣明・倉原雄二・松永孝治・大塚次郎・佐藤省治・渡辺敦史：用土を用いない新たなスギ挿し木発根手法の検討—スギ挿し木苗の植物工場的生産技術の開発に向けて—九州森林研究 73: 57 - 61, 2020 造林面積の増加に伴いスギ挿し木苗の安定供給が求められている。そこで、スギの挿し木苗の安定的な生産技術の確立を目標に、植物工場的なスギ挿し木苗生産技術の開発を試みた。通常スギ穂の挿し付けは用土を用いておこなわれているが、我々は用土を用いずに発根が可能であることを明らかにした。また、用土を用いない挿し木発根システムに必要な要件について、挿し穂の挿し付けを12種類の異なる試験区でおこなった結果、散水装置による高頻度な散水が発根に最も重要であること、また、高湿度環境を維持することで発根の安定性が向上する可能性を明らかにした。さらに、用土を用いない新たな挿し木発根システムを用いることによって、露地挿しと比較し高い発根率が得られる可能性を示した。今回我々が示した、用土を用いない新たな挿し木発根システムは、スギ挿し木苗の安定生産及び生産性向上に貢献する可能性が考えられる。

キーワード：スギ挿し木苗、苗木生産、発根、空中挿し、エア挿し、植物工場

I. はじめに

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) は日本における主要な林業樹種であり、九州地域ではスギ挿し木苗を用いたクローン林業が古くよりおこなわれている。挿し木苗を利用した林業は、生産される木材の材質等特性の安定的な発揮が期待されるため、品質管理型林業として注目されている。九州地域のスギ人工林面積の78.4%が伐期に該当する40年生以上の林齢であり(林野庁, 2017)、そのような充実した蓄積を背景に、九州地域では全国のスギの素材生産量の約1/3を担っている(林野庁, 2019)。一方で、将来にわたり持続可能な木材生産を実現するためには伐採後の再造林が重要である。平成29年度の九州地域におけるスギの造林面積は年間約4,300haにのぼり(森林総合研究所林木育種センター, 2018)、ヘクタールあたりの植栽密度を2,500本と仮定すると、年間に必要とされる植栽用挿し木苗の数は約1,100万本に相当する。一般的にスギさし木苗は裸苗や、コンテナ苗として屋外環境下で生産される。そのため、その年の気象条件によって苗木の生産性が大きく変動するという課題がある。

近年、農業分野を中心に、植物工場による農作物の生産が実用化されている。植物工場を用いるメリットとしては、1) 気象条件に左右されず安定的な生産が見込めること、2) 栽培環境や生産システムを適切に設計することで生産性の向上が可能であるこ

と、等が挙げられる(安保ほか, 2015)。植物工場における農作物の生産において、水耕やロックウール耕など土壌を用いない栽培法が用いられている(安保ほか, 2015)。土壌を用いないことで、連作障害等の回避や、栽培ベッドの多段化が可能であるとともに、土の入れ替え等の重労働が省略できるため、労働生産性の向上も期待される。

今回我々は、スギ挿し木苗の植物工場的な生産手法の構築を目標に、3つの試験を設定した。まず1つ目の試験において、異なる挿し床材料を用いて発根試験を実施し、用土の必要性について検討した。次に、2つ目の試験として、用土を用いない挿し付け手法において、湿度や温度に関連する複数の条件を設定し、適切な挿し付け環境について検討した。最後に、3つ目の試験において、試験1, 2の結果を踏まえて開発した、用土を用いない新たなスギ挿し木発根システムにより、スギ精英樹15系統の発根試験をおこない、その結果から新システムの有効性について報告する。

II. 材料と方法

1. 供試材料

発根試験に用いた挿し穂は、森林総合研究所林木育種センター九州育種場(熊本県合志市)敷地内のスギ原種圃に植栽された採

^{*1} Kurita, M., Kuramoto, N., Kubota, M., Fukuyama, T., Takeda, N., Kurahara, Y., Matsunaga, K., Otsuka, J., Sato, S. and Watanabe, A.: Examination of new cuttings method for Sugi (*Cryptomeria japonica*) without using soil —Toward development of production technology for Sugi cuttings using plant factory—

^{*2} 森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター九州育種場 Kyushu Regional Breed. Office, Forest Tree Breed. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Forest Res. Man. Org., Koshi, Kumamoto 861-1102, Japan

^{*3} 現住所：森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター Forest Tree Breed. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Forest Res. Man. Org., Hitachi, Ibaraki 319-1301, Japan

^{*4} 現住所：森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター東北育種場 Tohoku Regional Breed. Office, Forest Tree Breed. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Forest Res. Man. Org., Takizawa, Iwate 020-0621, Japan

^{*5} 現住所：林野庁北海道森林管理局 Hokkaido Regional Forest Office, Forestry Agency of Japan, Hokkaido 064-8537, Japan

^{*6} 九州大学農学研究院 Fac. of Agric., Kyushu Univ., Fukuoka, 819-0395, Japan

穂母樹から採取した。試験1には挿し木発根性の異なる3系統(系統a, bおよびc)を用いた。系統aは挿し木発根性3, 系統bおよびcは挿し木発根性5と報告されている系統を用いた。なお, 挿し木発根性は1, 3, 5の3段階で指数評価されており, 指数値が大きいほど発根率が高い(九州地区林業試験研究機関連絡協議会, 1998)。試験2には系統d(挿し木発根性3)を用いた。試験3には系統d~rの15系統(系統e: 挿し木発根性5, 系統f~k: 挿し木発根性3, 系統l~r: 挿し木発根性1)を用いた。

挿し木試験に供試した穂は, 採穂母樹から荒穂を採穂後, 穂づくりまで水槽にて流水処理をおこなった。荒穂から穂長を30~35 cmに調整し, IBA液剤(バイエルクロップサイエンス社, オキシベロン液剤)40倍希釈, ベンレート(住友化学社, ベンレート水和剤)2,000倍希釈の溶液に一晩切り口を浸漬し, 挿し付けをおこなった。

2. 試験設定

試験1: 異なる挿し床材料を用いた発根試験

設定した試験区の様子を図-1に示す。2016年11月23日に採穂し, 11月25日に挿し付けをおこなった。露地挿しは九州育種場内の苗畑の土に直接挿し付けをおこなった(図-1, A)。箱挿しは, 育苗箱に詰めた鹿沼土(細粒)に挿し付けをおこなった(図-1, B)。水挿しは九州育種場温室内の水槽に水をはり, 水中に沈めたマルチキャビティコンテナ(JFA-300)に挿し付けをおこなった(図-1, C)。空中挿し(aerial rooting, 以下エア挿しとする)は温室内の散水装置付近に, 育苗箱を裏返し, 底面外側上にマルチキャビティコンテナを置いてその中に挿し付けをおこなった(図-1, D, E)。7時~10時までの3時間を除き, 1回/時間, 3分/回の自動灌水をおこなった。各試験区, 系統ごとに8本×2反復で挿し付けをおこなった。発根率の評価は2017年5月21日(6ヶ月後)におこなった。

試験2: エア挿しに必要な挿し付け条件の検討

2016年8月17日採穂し, 8月18日に挿し付けをおこなった。挿し穂は挿し付け容器(マルチキャビティコンテナ, または塩ビパイプ(径6 cm×18 cm), またはMスターコンテナ)に立てかけ(以下, 挿し付けセットとする), ガラス温室内に設定した各試験区に設置した。各試験区は挿し穂を立てかけた挿し付け容器の全体を取り囲む環境(上部環境: I, II, III, IV)と下の環境(下部環境: a, b, c)の組み合わせによって12種類の試験区を設定した(図-2)。上部環境I: 散水装置と挿し付けセットをビニールトンネルで覆った。上部環境II: 散水装置の近辺に挿し付けセットを設置(ビニールトンネル不使用)。上部環境III: 挿し付けセットをビニールトンネルで覆った(散水装置不使用)。上部環境IV: 散水装置もビニールトンネルによる覆いもおこなわず, 温室内に静置した。下部環境a: 水をはった容器あるいは水槽の上に挿し穂の基部を水中に入れない状態で挿し付けセットを設置。下部環境b: 鹿沼土の上に挿し付けセットを設置。下部環境c: 育苗箱を裏返し, 底面外側上に設置。散水装置の設定: 7時~10時までの3時間を除き, 1回/時間, 3分/回の自動灌水をおこなった。各試験区10本×1~3反復で挿し付けをおこなった。対照として, 温室内に箱挿し区, 水挿し区を設定した。試験

区内の環境データは, 温湿度データロガー(T&D社, おんどとり Jr)を用いて取得した。また取得した温湿度データから乾燥しやすさの指標としてVPD(Vapor Pressure Deficit)を下記のように算出した(橋田ほか, 2015)。

$$VPD(kPa) = (1 - U/100) \times 0.6108 \times 10^{(7.5 \times t / (t + 237.5))}$$

(f(t): 飽和水蒸気圧, U: 相対湿度, t: 気温)

発根率の評価は2016年11月20日(4ヶ月後)におこなった。

試験3: 露地挿しとエア挿しの発根率の比較

2018年3月27日に採穂し, 3月29日に挿し付けをおこなった。エア挿しは温室内に設置した作業台の上にスタイロフォームIB(ダウ加工社, 20 mm×3×6)を設置し, その上に150 ccスリット付きコンテナ(東北タチバナ社, MT-150-40P)あるいは塩ビパイプを置き, 挿し付けをおこなった。各系統10本×2反復で挿し付けをおこなった。17回/日, 4分/回の自動灌水をおこなった。露地挿しの発根率はスギ精英樹特性表作成データから算出した(九州地区林業試験研究機関連絡協議会, 1998)。露地挿しとエア挿しの発根率における Spearman の順位相関係数をもとめた。なお, 本研究における統計解析には R 3.5.1 (R Development Core Team, 2016)を用いた。発根率の評価は2018年9月17日(5.5ヶ月後)におこなった。



図-1. 異なる挿し床材料を用いた発根試験(試験1)の様子

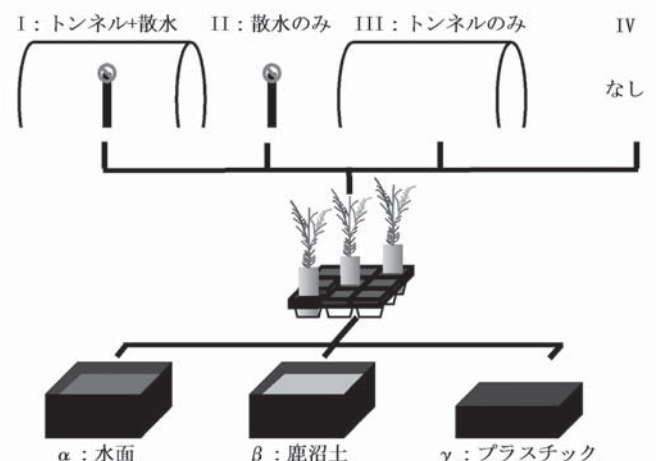


図-2. エア挿しに必要な挿し付け条件検討用の試験設計(試験2)

Ⅲ. 結果

1. 異なる挿し床材料を用いた発根試験（試験1）

挿し床材料に土（露地挿し，箱挿し），水（水挿し），空気（エア挿し）を用いて発根試験をおこなった（試験1）。発根率調査の結果を図-3に示す。A：露地挿しにおける系統a，系統b，系統cおよび3系統の平均発根率はそれぞれ0%，6.3%，37.5%，14.6%であった。B：箱挿しにおける系統a，系統b，系統cおよび3系統の平均発根率はそれぞれ50.0%，100%，100%，83.3%であった。C：水挿しにおける系統a，系統b，系統cおよび3系統の平均発根率はそれぞれ25.0%，56.3%，87.5%，56.3%であった。D：エア挿しにおける系統a，系統b，系統cおよび3系統の平均発根率はそれぞれ，37.5%，62.5%，100%，66.7%であった。

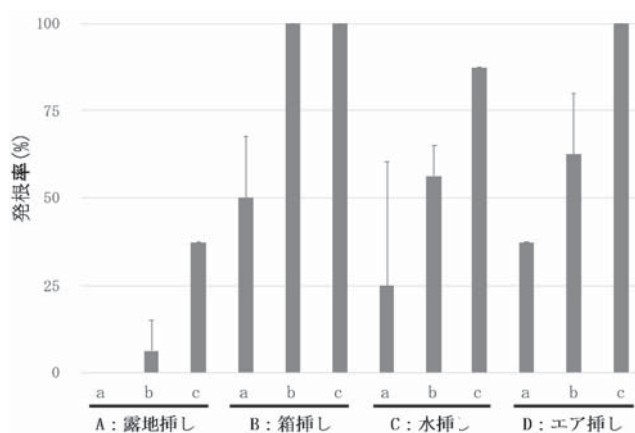


図-3. 異なる挿し床材料を用いた発根試験（試験1）の結果

2. エア挿しに必要な挿し付け条件の検討（試験2）

上部環境4種類（I～IV）と下部環境3種類（a～γ）を組み合わせて12種類の挿し付け試験区に（図-2），挿し付けセットを設置し，エア挿しでスギ挿し穂を安定的に発根させるために必要な挿し付け条件の検討をおこなった（試験2）。結果を図-4に示す。発根率は試験区I α，I βで100%，試験区I γ，II α，II β，II γはそれぞれ93.3%，70.0%，35.0%，45.0%を示した。一方，試験区III α～III γの発根率は0%を示し，上部環境IIIとIVでは下部環境にかかわらず発根が確認されなかった。下部環境が共通な試験区のうち，発根が確認された試験区II αと発根が確認されなかった試験区III αについて環境データを比較した結果，温湿度データ取得期間（9月2日～9月12日）において，試験区II αでは平均気温が25.1℃，平均湿度が68.6%，平均VPDが1.12を示し，試験区III αでは平均気温が27.0℃，平均湿度が79.3%，平均VPDが0.95を示した（図-5）。また，安定して高い発根率を示した試験区Iと比較的発根率にばらつきが生じた試験区IIのうち，下部環境が共通の試験区I γと試験区II γについて環境データを比較した結果，温湿度データ取得期間（9月23日～10月3日）において，試験区I γの平均気温が26.3℃，平均湿度が99.0%，平均VPDが0.0348を示し，試験区II γでは平均気温が25.2℃，平均湿度が86.6%，VPDが0.442を示した（図-6）。

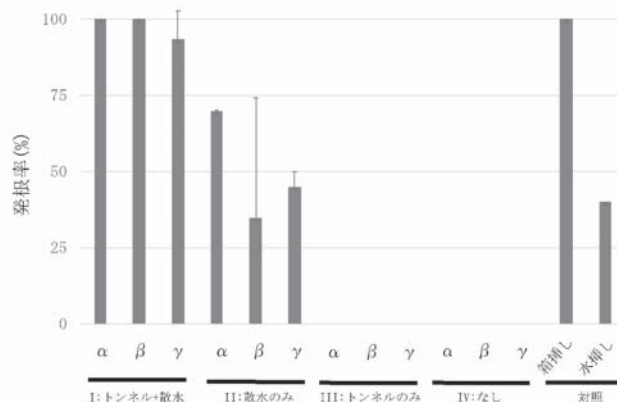


図-4. エア挿しに必要な挿し付け条件検討結果（試験2）
（α：水面上，β：鹿沼土上，γ：プラスチック上）

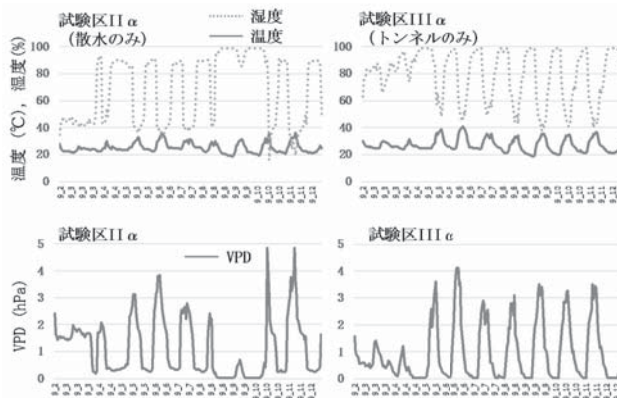


図-5. 試験2：エア挿しに必要な挿し付け条件検討時の環境条件（試験区II αと試験区III αの比較：散水・トンネルの有無）

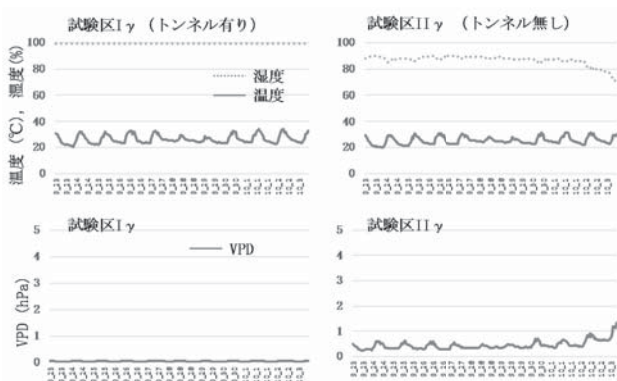


図-6. 試験2：エア挿しに必要な挿し付け条件検討時の環境条件（試験区I γと試験区II γの比較：トンネルの有無）

3. 露地挿しとエア挿しの発根率の比較（試験3）

これまでの知見により，発根特性の異なることが示されている15系統（系統d～r）について，エア挿しでの発根試験をおこなった（試験3）。結果を図-7に示す。露地挿しにおける15系統d～rの発根率は最高72.6%～最低3.9%で，平均40.3%である。同系統をエア挿しにより発根試験をおこなった結果，最高100%～最低50.0%を示し，平均発根率は87.3%を示した。また，露地挿し発根率とエア挿し発根率について順位相関係数を求めた結果，0.720 ($p < 0.05$)を示した。

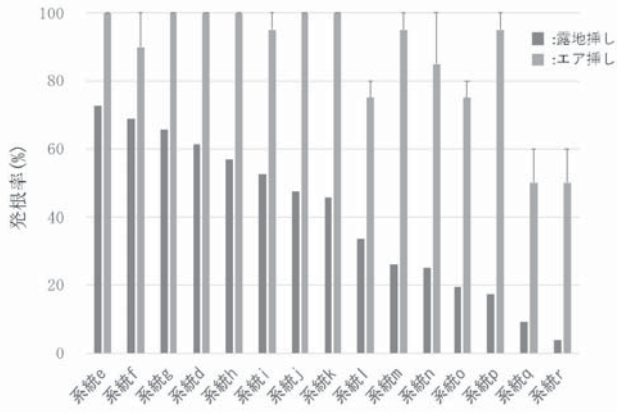


図-7. 15系統の露地挿しとエア挿しの発根率の比較（試験3）

IV. 考察

1. スギ挿し穂の発根におけるエア挿しの特徴

今回我々は、スギ挿し穂の発根において、挿し床材料としての土や水が必ずしも必要でないことを明らかにした。大平ほか(2016)は様々な用土を用いた挿し木発根試験をおこない、三相分析の結果、気相と液相の比が1:1で発根率が最大になることを示した。また、固相の機能としては、植物体の支持機能および気相および液相が分布する孔隙空間の形成があげられている(栗原, 1972)。今回我々がおこなったエア挿しでは、マルチキャビティコンテナ等挿し付け容器が固相の役割を果たし、発根部位の周囲には、エア挿しに特徴的な十分な気相と、頻度の高い散水によって供給される液相によって、発根に適した気相と液相の比率が再現され、用土を用いた場合と同様に発根した可能性が考えられる。

試験1に供試した系統の挿し木発根性はそれぞれ3, 5, 5であり、この発根特性は昭和33年から昭和47年に九州育種場の苗畑でおこなわれた露地挿しの結果により評価された(九州地区林業試験研究機関連絡協議会, 1998)。今回の試験で同様におこなった露地挿し試験の発根率が3系統とも低かったのは、挿し付け時期が11月、発根調査が5月であったことに起因すると推察される。森下・大山(1972)は、'スギは10℃でごくわずかながら発根活動が行われ、さしつけ後80日で7.2%の発根がみられている。'と記している。今回我々がおこなった挿し付け試験において、露地挿しをおこなった屋外では温室内と比較して気温が低く、発根に適した温度環境になっていなかった可能性が考えられる。実際に試験期間中の一部期間に該当する2月7日から3月23日までの45日間の平均気温を比較してみると、屋外と温室内はそれぞれ6.9℃と14.6℃を示し、7.7℃の差が確認された。一方で、温室内で同時期におこなった箱挿し、水挿し、エア挿しでは露地挿しに比較して高い発根率を示した(図-3)。これは、冬期に挿し付けをおこなう場合、温室内で挿し付けをおこなうことによって、屋外で挿し付けをおこなう場合と比較して、発根までの期間を短縮することが可能であることを示唆している。さらに、エア挿しは発根部位が土中に埋まらず地上部に存在するため、発根状況を目視で確認することが可能である。これにより挿し付け時期の違いや、挿し付け環境条件の違い、あるいは挿し付けに用

いる系統にかかわらず、発根の状況をリアルタイムで確認することが可能であり、スギの挿し木生産をおこなう上での利点の一つとなると考えられる。

2. エア挿しに必要なシステム要件

エア挿しにおいて、スギ挿し穂が発根するために必要な条件を明らかにするため、挿し付け環境を、挿し穂の上部環境と下部環境に分け、さらに各環境条件を高湿度(上部環境I, 下部環境a)~低湿度(上部環境IV, 下部環境γ)となるように想定して試験区を設定した(図-2)。上部環境IおよびIIのみ発根が確認されたという結果から、エア挿しによる挿し穂の発根には上部環境IとIIに共通する散水装置の重要性が明らかになった。下部環境が共通の試験区II a(発根率70%)と試験区III a(発根率0%)において、共通の一定期間の環境条件を比較すると、試験区II aと試験区III aの平均気温はそれぞれ25.1℃, 27.0℃を示し、温度については試験区間で大きな差異が認められなかったが、試験区II aの平均湿度は68.6%(VPDは1.12)、試験区III aの平均湿度は79.3%(VPDは0.95)となり、試験区II aの平均湿度は試験区III aに比較して10%程度低く、大気乾燥度合いが高いことが示された(図-5)。また、同様に下部環境が共通の試験区I γ(発根率93.3%)と試験区II γ(発根率45.0%)について、別の一定期間の環境条件を比較すると、試験区I γと試験区II γの平均気温はそれぞれ26.3℃, 25.2℃を示し、温度については試験区間で大きな差異が認められなかったが、試験区I γの平均湿度は99.0%(VPDは0.0348)、試験区II γの平均湿度は86.6%(VPDは0.442)を示し、試験区I γでは試験区II γに比較して、高湿度環境が維持されていた(図-6)。今回の我々の結果は、エア挿しの設定環境の湿度がある程度低くても、高頻度な散水によりスギ挿し穂の発根が可能であること、高湿度条件の維持(この場合はビニールトンネルの設置)は散水の効果をより安定的な発根に結び付ける可能性があることを示唆している。福井は'挿し穂の吸水は、主として切口からおこなわれ、茎表面からもわずかながら吸収される。これに対して、葉からの蒸散は普通におこなわれるため、挿し木当初は蒸散を制限する処理をおこなう必要があり、挿し木における乾燥・枯死は、茎の切口からの吸水と蒸散とのアンバランスによって生じる'と記し、Ishibashi and Terashima(1995)は気孔が水に濡れることによって素早く閉じることを示している。また、Burgess and Dawson(2004)は、セコイアの葉にトラップされた霧由来の水分が葉の表面から吸収されることを報告している。エア挿しは、高頻度の散水による挿し穂への断続的な葉水の付着が、スギの挿し穂における蒸散の抑制や挿し穂への水分の供給に効果を示し、挿し付け環境の湿度がある程度低くても、発根につながった可能性が考えられた。さらに、ビニールトンネルで作り出された高湿度を維持する環境は、葉水の蒸発にかかる時間を延長するという補助的な役割を果たし、その結果、挿し穂の乾燥のリスクが低減され、より安定的な発根を実現したのかもしれない。

3. エア挿し条件下における高い発根率の要因

露地挿し条件下で発根特性の異なる15系統を用い、エア挿し条件下での発根特性について評価をおこなった。露地挿し条件下

では15系統の平均発根率が40.3%であるのに対し、エア挿し条件下では平均発根率が87.3%を示した。露地挿し条件下では一般的に穂からの蒸散を抑える目的で寒冷紗等が活用されるが、屋外での気象条件の制御には限界があり、その年の気象条件によって発根の成否や発根率が大きく影響を受ける。今回我々が報告したエア挿しでは、穂の蒸散を抑制するために定期的にミスト散水をおこない、挿し穂に葉水が付着している状況を継続的に作り出している。さらに、エア挿しは自動換気システムおよびタイマー付き自動散水システムを有する九州育種場内のガラス温室でおこない、温湿度環境が屋外と比較し安定していたと考えられる。温室内のエア挿しでおこなう高頻度の散水が、スギの挿し穂における蒸散の抑制や水分の補給に効果を示し、穂の乾燥による枯死を抑制し、発根に必要な期間を健全な生理状態で生存させることが、屋外でおこなわれる露地挿し条件下での発根率と比較し、エア挿し条件下での発根率が高い傾向を示した理由の一つであると考えられる。しかし一方で、露地挿しでの発根率とエア挿しでの発根率では高い順位相関が確認された。これはスギの発根特性の系統間差は露地挿しとエア挿しで同様に認められることを示している。この結果は、露地挿しと比較してエア挿しで発根率が大きく向上した理由が、各系統の有する発根特性を超越し、発根能力自体を飛躍的に向上させたというよりは、乾燥による挿し穂の枯死のリスクを低く保つことによって、系統の有する発根特性を高度に発揮させることに成功した結果であると考えられる。

V. おわりに

今回我々が示したスギの新たな発根手法エア挿しは、施設内の制御環境において安定的な発根が期待でき、また、用土を用いないため作業の軽作業化やそれに伴う労働生産性の向上等が期待される。本技術を用いた挿し木苗生産技術を実用化するためにも、実用化レベルのスケールで活用した時の問題点の洗い出しや生産性を高める手段の検討など、引き続き研究を進める必要があると考えている。

VI. 謝辞

本研究の一部は農研機構産研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」の支援を受けておこなった。また、上記事

業に参画する宮崎大学の伊藤哲氏、平田令子氏、大分県農林水産研究指導センターの佐藤太郎氏、宮崎県林業技術センターの上杉基氏、三樹陽一郎氏、鹿児島県森林技術総合センターの永吉健作氏、長倉樹苗園の長倉良守氏、林田農園の林田尚幸氏、林田喜昭氏、森林総合研究所林木育種センターの近藤禎二氏には本研究に対して有益なご助言をいただいた。また、森林総合研究所林木育種センター九州育種場の多くの常勤・非常勤職員に試験材料の管理、試験準備にご協力いただいた。ここに深謝する。

引用文献

- R Development Core Team (2016) URL : <http://www.R-project.org>
- 安保重一ほか (2015) 植物工場の生産性向上, コスト削減技術とビジネス構築—今, 注目されている植物工場とは, その全容—, 245 pp
- Ishibashi and Terashima (1995) Plant, cell and environment 18: 431 - 438
- 大平峰子ほか (2016) 日林誌, 98: 265 - 272
- 九州地区林業試験研究機関連絡協議会 (1998) スギ精英樹特性表, 97 pp
- 栗原金吉 (1972) 日本ゴム協会誌, 45 (5): 529 - 535
- 森林総合研究所林木育種センター (2018) 平成 29 年版林木育種の実施状況及び統計, 63
- Burgess and Dawson (2004) Plant, cell and environment 27: 1023 - 1034
- 橋田祐二ほか (2015) Eco-Engineering, 27 (3): 91 - 98
- 福井博一 福井博一教授公式個人サイト, URL : <https://www1.gifu-u.ac.jp/~fukui/06-4-03.html> (2017年3月21日利用)
- 森下義郎・大山浪雄 (1972) 挿し木の理論と実際, 162 pp, 地球出版, 東京
- 林野庁 (2017) 森林資源の現況 URL : <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/index.html> (2019年11月5日利用)
- 林野庁 (2019) 森林・林業統計要覧2019 URL : http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi2019.html (2019年11月5日利用)
- (2019年11月8日受付; 2019年12月9日受理)