用土の理学的性質がスギのさし木発根性に及ぼす影響*

大平 峰子^{**1}・花岡 創²・平岡裕一郎¹・栗田 学³・井城 泰一⁴
三浦 真弘⁵・渡辺 敦史⁶

スギのさし木発根性に関する高精度の形質データの取得に向け、発根性に影響する環境要因の一つである用土の検討を行った。ミスト灌水条件下で12種類の用土に精英樹3クローンをさし木し、用土の理学的性質と発根率およびさし木苗の根長との関係を分析した。まず用土の理学的性質の主成分分析により、透水性および保水性という2軸によって用土を分類できることを明らかにした。これらの用土間で発根率および根長の差が認められた。さらに、用土の透水性と保水性を示す性質を説明変数としてDIC（偏差情報量基準）値によるモデル選択を行った結果、気相と液相の比およびその二次項を説明変数としたモデルが最適モデルとして採択された。このモデルによって気相と液相の比が約1.0で発根率が最大となる負の二次曲線状の関係が予測され、気相と液相の比が発根率の変動を把握するための指標となることが示唆された。発根率の最適条件に該当するのが鹿沼土小粒およびココナツハスクであり、ココナツハスクより鹿沼土小粒で根長が大きかったことから、鹿沼土小粒がスギのさし木増殖ならびにさし木苗の根系形質評価に最適な用土であると考えられた。

キーワード：スギ、さし床、三相分布、発根率、根長

Mineko Ohira,^{**1} So Hanaoka,² Yuichiro Hiraoka,¹ Manabu Kurita,³ Taiichi Iki,⁴ Masahiro Miura,⁵ Atsushi Watanabe⁶ (2016) **Effects of Physical Characteristics of Rooting Media on the Rooting of *Cryptomeria japonica* Cuttings.** J Jpn For Soc 98: 265–272

In the present study, we evaluated the effects of rooting medium, which is one of the environmental factors, on the rooting of *C. japonica* cuttings. The relationship between the physical characteristics of 12 media types and the rooting traits of cuttings of three different clones was analyzed under mist irrigation. Using principal component analysis of the data on physical characteristics of the media, we observed that the media could be classified according to two axes: permeability and retentivity of water. The rooting percentages and root lengths differed for the different media. Besides, using generalized linear mix modeling, a model including the air : water content ratio and its quadratic term as explanatory variables was determined to be the best, based on the deviance information criterion values. The model predicted that the rooting percentage peaked at an approximate air : water content ratio of 1.0. On matching the small particle size kanuma-soil and coconut fiber to the best air : water content ratio, the root length in kanuma-soil was observed to be longer than in coconut fiber. These findings suggest that the air : water content ratio is a good indicator of the rooting percentage and small particle size kanuma-soil is suitable for the propagation of *C. japonica* cuttings and for evaluating the rooting traits of the cuttings under mist irrigation.

Key words: *Cryptomeria japonica*, propagation media, three phases, rooting percentage, root length

I. は じ め に

一般的に、他殖性植物である林木では、種子繁殖によって形質を固定することが難しい。一方で、さし木による増殖は、母材料と同一の遺伝子型の苗木を増やすことができるため、優れた母材料が得られれば直ちに形質を固定して利用することができる。スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) では、第2世代精英樹等の開発が進み、さし木増殖は優良形質クローンの迅速な普及に対して期待される。し

かし、比較的さし木発根が容易なスギでも発根性には個体間差が存在するため（横山・前田 1956）、林業上極めて重要な特性であるスギさし木発根性について、育種改良を視野に入れた取り組みが必要である。特に、最近、スギでもゲノム情報を利用したゲノム育種もしくは分子育種が試行されつつある（Uchiyama *et al.* 2014）。ただし、従来育種または分子育種に関わらず形質の改良を行うためには、多数の個体を対象として質の高い形質データを取得することが必要であり（平岡 2014）、実際、材質（三嶋ら 2011）

*本研究の一部は第124回日本森林学会大会でポスター発表した。

**連絡先筆者（Corresponding author）E-mail: sasamine@affrc.go.jp

¹ 国立研究開発法人森林総合研究所林木育種センター 〒319-1301 茨城県日立市十王町伊師 3809-1 (Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Product Research Institute, 3809-1 Ishi, Ibaraki, Japan)

² 国立研究開発法人森林総合研究所林木育種センター北海道育種場 〒069-0836 北海道江別市文京台緑町 561-1 (Hokkaido Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Product Research Institute, 561-1 Bunkyo-daimidori-machi, Ebetsu, Hokkaido 069-0836, Japan)

³ 国立研究開発法人森林総合研究所林木育種センター九州育種場 〒861-1102 熊本県合志市須屋 2320-5 (Kyushu Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Product Research Institute, 2320-5 Suya, Koshi, Kumamoto 861-1102, Japan)

⁴ 国立研究開発法人森林総合研究所林木育種センター東北育種場 〒020-0621 岩手県滝沢市大崎 95 (Tohoku Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Product Research Institute, 95 Osaki, Takizawa, Iwate 020-0621, Japan)

⁵ 国立研究開発法人森林総合研究所林木育種センター関西育種場 〒709-4335 岡山県勝田郡勝央町植月中 1043 (Kansai Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Product Research Institute, 1043 Uetsunaka, Shoo, Katsuta, Okayama 709-4335, Japan)

⁶ 九州大学大学院農学研究院 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1 (Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan)

(2016年2月19日受付、2016年8月16日受理)

および雄花着花量（坪村ら 2013）では、測定精度に配慮した評価が行われてきた。

精度の高い形質評価を行うためには、形質に影響する環境条件を定量的に評価するとともに、それら環境条件の変化に対する形質の変動を評価することで、形質値を最大化する条件を明らかにし、その条件下で得た形質値を遺伝子型と対応させることが望まれる。そのため、発根性に大きな影響を持つ環境要因を整理する必要があるが、その一つに用土を挙げることができる。用土は、さし木の発根率やさし木苗の根系に大きな影響を与え（森下・大山 1972b）、用土のみを変えた条件で、カンツバキ（*Camellia sasanqua* Thunb. 'Shishigashira'）の発根率が10～100%と大きな違いがみられたことが報告されている（町田 1974）。スギにおいても、露地（宮崎 1957；鹿野 1966）や温室内のミスト灌水下（鈴木 1973）で数種類の用土を比較し、その発根率の違いが報告されている。しかし、これらの報告では用土の種類を検討しただけであり、発根性に影響を及ぼす具体的な理学的要因を特定するには至っていなかった。用土による発根性の変動は、保水性・透水性に関連する理学的性質の違いに起因すると指摘されていることから（森下・大山 1972b）、多くの用土について複数の理学的性質を定量的に評価するとともに、発根性との関連性を評価することで、発根性を最適化する条件を導くことができると考えられる。

そこで本研究では、スギを対象としてさし木に関する適切な形質データの取得に向け、発根性に影響する要因の一つである用土に焦点を絞り、その理学的性質と発根性の関係性について検討を行った。具体的には、12種類の用土と精英樹3クローンを用いて、1) 用土の理学的性質の定量的評価を行い、2) 理学的性質のうちさし木の発根率およびさし木苗の根長に影響を与えるものを特定するとともに、3) その理学的性質の変化に対する発根率および根長の変動を評価し、発根率および根長が最大化される条件を明らかにすることを目的とした。

II. 材料と方法

1. 植物材料

さし木試験には、北関東育種区内の比較的近接する地域から選抜されたスギ精英樹3クローン（若松 101 号、大田原 3 号、大田原 4 号）を使用した。これらのクローンのさし木発根率は、複数回の試験結果を基に5段階（値が大きいほど発根率が高い）で評価されており（関東林木育種場 1991）、その指数は若松 101 号で1、大田原 3 号で3、大田原 4 号で5である（独立行政法人森林総合研究所林木育種センター 2014）。森林総合研究所林木育種センター（茨城県日立市、北緯 36°69′、東経 140°69′）構内に植栽された17年生の個体から採穂した。これら採穂木は地上高約 2.5 m で断幹されており、採穂時の樹高は5～7 m 程度であった。また、採穂部位は樹冠の中央から下部とし、日当たりが悪く細い枝や徒長した枝を避けた。

2. 用土の種類とその理学的性質の測定

さし床の用土として、パーライト（微・小・中粒）、鹿沼土（微・小・中粒）、赤土、赤玉土（小・中粒）、砂、パーミキュライト小粒およびココナツハスクの12種類を設定した。これらを育苗箱（アイリスオーヤマ製、菜園プランター 550 型、幅 55 cm × 奥行 34 cm × 深さ 17 cm）に入れ、さしつけ直前に十分灌水した。

各用土について、飽和透水係数、有効水分保持量、pH（ H_2O ）（以後、pH とする）、仮比重および三相分布を測定した。全ての用土は粒を潰さないよう 100 mL の円筒に充填し、測定に供試した。飽和透水係数は定水位法によって測定した。有効水分保持量については、pF 1.8 時の値を加圧板法、pF 3.8 時の値を遠心法で測定し、両者の差を有効水分保持量として算出した。pH については、乾土 10 g に水 25 mL を加えて振とうして1時間以上放置し、測定前にかき混ぜた懸濁液を pH メーターで測定した。また、pF 1.8 時における固相の体積と質量（仮比重）を実容積法によって測定した。

三相分布の測定にあたっては、できるだけさし穂の切口に近い部分の状態を知るため、深さ 3～8 cm の試料を 100 mL の採土円筒で採取した。試料を 105℃ で 24 時間乾燥させ、乾燥前後の重量差を液相の質量および体積とした。また、前述した固相の体積と質量から各用土の真比重を求め、乾燥した土の重量を真比重で除して固相の体積を算出した。なお、さし床は灌水前後で液相の割合が変わるため、最も液相の変動が大きいと考えられる時間帯、すなわち晴天日の正午および午後 2 時にミスト灌水を行い、正午の灌水直後および午後 2 時の灌水の直前に試料を採取して固相および液相の平均値を求めた。

3. さし木実験の条件、発根率および根系形質の測定方法

2012 年 4 月 10 日に長さ 30 cm 程度の荒穂を採取し、半日流水に浸け、同日に長さ 15 cm のさし穂に整えた。さし穂の基部は返し切りし、さしつけ直前にオキシベロン粉剤 0.5（バイエルクロップサイエンス（株）製、0.5% IBA）を切口に塗布した。それぞれの用土に3クローン各 10 本ずつさしつけ、用土は4回反復を設けてランダムに配置した。実験全体では1,440本のさし穂を使用した。さし床はガラス温室内に設置し、ブーム式頭上散水装置（アクアウィング、（株）誠和製）を日中2時間おきに6回往復させた。1往復にかかる時間は約2分に設定した。

2012 年 10 月 30 日に根を切らないようさし穂を掘り取って発根の有無を確認し、反復ごとに発根率を算出した。また、発根した苗のうち、各用土・クローンの組み合わせから、目視で発根量が多いと考えられる苗を順に最大 10 本選び、合計 331 本のさし木苗を根系形質の測定に供した。供試したさし木苗を丁寧に水洗いして根系から用土を落とし、さし穂および根系全体をそれぞれスキャナー（EPSON 社製、Perfection V 700）で画像として取り込み、全ての根の長さの合計（以後、根長とする）およびさし穂の投影面積（以後、葉投影面積とする）を根系画像解析ソ

フト WinRHIZO REG 2009 (Regent Instruments Inc.) で計測した。

4. 解析方法

データの統計解析には R version 3.2.2 (R Development Core Team 2015) を用いた。複数の理学的性質から用土の総合的な評価を行うため、用土の三相の体積、有効水分保持量、飽和透水係数、pH および仮比重の7因子のデータを標準化し、関数 princomp を用いて主成分分析を行った。また、三相分布の用土間差を検定するため、関数 chisq.test を用いて χ^2 検定を行った。

発根の有無に対する用土の効果を調べるため、関数 glmer を用いて一般化線形混合モデルによるロジスティック回帰分析を行った。発根の有無 (発根=1, 未発根=0) を目的変数とし、用土を固定効果、クローンおよびブロックをランダム効果とした。誤差構造として二項分布を指定し、リンク関数にロジット変換を使用した。さらに、一般化線形混合モデルの結果に対し、関数 glht および関数 cld による用土間の多重比較検定 (Tukey 法) を行った。

根長についても、発根の有無と同様に関数 glmer を用いて一般化線形混合モデルによる分析を行った。形質値の分布から誤差構造を決定し、正規分布を指定した。リンク関数には恒等変換を用いた。用土、葉投影面積を固定効果、クローンをランダム効果とし、最適なモデルを選択するため、ステップワイズ法による変数削減を行い、AIC (赤池情報量基準, Akaike information criteria) が最も小さいモデルを最適モデルとした。なお、葉投影面積を説明変数に指定した理由は、さし穂の葉面積によって形成される根系に影響があることが懸念されるためであり、本研究で使用了材料では同一の長さに調整しても個々のさし穂の葉量が異なっていたためである。また、一般化線形混合モデルの結果に対し、用土間の多重比較検定 (Tukey 法) を行った。

用土の理学的性質と発根性の関係を調べるため、一般化線形混合モデルによる重回帰分析を関数 MCMCglmm (Hadfield 2010) によって行った。発根率および根長を目的変数、誤差構造は発根率・根長とも正規分布を指定し、用土の理学的性質のうち透水性と保水性に関連する性質 (飽和透水係数と有効水分保持量、気相と液相および気相:液相の比) とその二次項をそれぞれ説明変数、クローンをランダム効果とした。なお、説明変数の次数を二次項までとしたのは、用土の乾燥と過湿状態の間に最適な発根条件があると仮定したためである。最適なモデルを選択するため、モデル1 (飽和透水係数・有効水分保持量)、モデル2 (気相・液相) およびモデル3 (気相と液相の比) についてそれぞれステップワイズ法による変数削減を行い、すべてのモデルの中で DIC (deviance information criterion) 値が最も小さいモデルを最適モデルとした。なお、DIC は AIC に類似した指標で、Spiegelhalter *et al.* (2002) によって提案された偏差情報量基準であり、関数 MCMCglmm のマルコフ連鎖モンテカルロ法によって得られる確率標本によって推定することができるため、この関

数を用いたモデル選択の基準として使用した。また、最適モデルから予測値を算出し、最適モデルに採用された説明変数と予測値の関係を図示した。

III. 結 果

1. 用土の理学的性質

さし床として使用した各用土の三相分布を図-1に示す。三相の割合には用土間で有意な差が認められた (χ^2 検定; $p < 0.001$)。パーライト3種では気相の割合が59~62%であり、赤土およびパーミキュライトにおける液相の割合はそれぞれ64%となり、砂では固相の割合が49%とそれぞれ他の用土と比較して高い傾向を示した。また、パーライト3種、鹿沼土および赤玉土の小粒・中粒では、粒径が異なっても三相分布に大きな差はみられなかった。

各用土のpF 1.8~3.8間の有効水分保持量、飽和透水係数、pH および仮比重を表-1に示した。パーライト3種は飽和透水係数が 4.7×10^{-3} 以上であり、また仮比重が $0.09 \sim 0.13 \text{ g/cm}^3$ と他の用土に比べて軽かった。赤玉土2

図-1. さし木用土の三相分布

χ^2 検定, $p < 0.001$.

表-1. 用土の理学的性質

用 土	粒径 (mm)	有効水分保持量* (L/m ³)	飽和透水係数 (m/s)	pH (H ₂ O)	仮比重 (g/cm ³)
パーライト微粒	0.5~2.5	190	4.7×10^{-3}	6.5	0.13
パーライト小粒	2.5~8.0	144	$>7.0 \times 10^{-3}$	6.6	0.09
パーライト中粒	8.0~15.0	102	$>7.0 \times 10^{-3}$	6.4	0.10
鹿沼土微粒	1.0~2.0	281	9.8×10^{-4}	5.7	0.28
鹿沼土小粒	2.0~4.0	272	5.0×10^{-4}	5.9	0.33
鹿沼土中粒	4.0~7.5	294	2.2×10^{-4}	5.6	0.27
赤土	—	145	3.8×10^{-4}	5.2	0.52
赤玉土小粒	2.5~5.0	77	4.4×10^{-3}	5.2	0.60
赤玉土中粒	5.0~7.5	71	3.9×10^{-3}	5.0	0.59
砂	0.4~1.5	33	5.9×10^{-4}	6.8	1.16
パーミキュライト小粒	1.0~2.0	327	1.9×10^{-4}	6.9	0.32
ココナツハスク	—	243	7.8×10^{-4}	5.4	0.16

*有効水分保持量は pF 1.8~3.8 間の値である。

図-2. 用土の理学的性質に関する主成分得点分布と固有ベクトル

種は三相分布が鹿沼土と似ていたが、有効水分保持量が $71 \sim 77 \text{ L/m}^3$ と鹿沼土 3 種 ($272 \sim 294 \text{ L/m}^3$) より低かった。pH はパーライト 3 種、砂、パーミキュライトで $6.4 \sim 6.9$ であり、鹿沼土 3 種、赤土、赤玉土 2 種およびココナツハスクはそれらよりやや低い $5.0 \sim 5.9$ であった。

用土の三相の割合、有効水分保持量、飽和透水係数、pH および仮比重の 7 因子のデータを用いて主成分分析を行った結果、第 1 主成分の寄与率が 43.2%、第 2 主成分の寄与率が 34.6% となり、第 2 主成分までの累積寄与率が 77.8% となった。第 1 主成分と第 2 主成分による主成分スコア値および各性質の固有ベクトルを図-2 に示す。気相、液相および固相の固有ベクトルは相反する 3 方向に分かれた。第 1 主成分に寄与した因子の因子負荷量は、気相で 0.96、飽和透水係数で 0.72、仮比重で -0.83、固相で -0.75、第 2 主成分については、有効水分保持量で 0.92、液相で 0.76 であった。また、パーライト 3 種、鹿沼土 3 種および赤玉土 2 種は、それぞれ同じ基質の用土が近い位置にプロットされ、鹿沼土およびパーライトでは粒子の大きさによって第 2 主成分スコア値が異なる傾向がみられた。

2. 用土による発根率の違い

図-3 に各用土の発根率、表-2 に一般化線形混合モデルで解析した発根の有無に対する各用土の係数推定値と Tukey の多重比較の結果を示した。3 クローン全てで高い発根率を示した用土は鹿沼土小粒およびココナツハスクであり、発根の有無に対するココナツハスクの係数は 3.04 と全ての用土で最も高く推定された。パーライト 3 種での発根の有無に対する係数は鹿沼土 3 種、赤玉土 2 種、砂、パーミキュライトおよびココナツハスクのそれより有意に

図-3. 各用土でのさし木発根率

エラーバーは標準偏差を示す。

低く推定され (Tukey の多重比較検定; $p < 0.05$), 赤土の係数 (0.65) は鹿沼土 3 種、赤玉土小粒、砂、パーミキュライトおよびココナツハスクより有意に低かった (Tukey の多重比較検定; $p < 0.05$)。また、異なる粒径を用いた用土 (パーライト、鹿沼土および赤玉土) では、いずれも小粒での発根率が高い傾向がみられた。

3. 用土によるさし木苗の根長の違い

図-4 に各用土で発根したさし木苗の根長を示した。根長は用土によって異なり、3 クローンの根長の平均値は 132 cm (パーライト中粒) から 483 cm (鹿沼土小粒) の幅を示した。根長を目的変数とした一般化線形混合モデルにおける AIC によるモデル選択の結果、全ての要因 (用

表-2. 一般化線形混合モデルで解析した発根の有無および根長に対する用土の係数推定値と多重比較の結果

	発根の有無			根長		
	係数推定値	標準誤差	多重比較**	係数推定値	標準誤差	多重比較**
切片*	-1.27	0.47		117.69	52.21	
パーライト微粒	対照	—	ef	対照	—	de
パーライト小粒	0.36	0.30	e	20.63	38.32	de
パーライト中粒	-1.01	0.37	f	-88.49	49.27	e
鹿沼土微粒	1.99	0.30	ac	141.10	38.18	bc
鹿沼土小粒	2.69	0.32	ab	261.51	39.01	a
鹿沼土中粒	1.91	0.30	bc	122.48	38.04	bd
赤土	0.65	0.30	de	-48.22	40.03	e
赤玉土小粒	1.91	0.30	bc	237.98	38.21	ab
赤玉土中粒	1.52	0.30	cd	240.82	38.13	ab
砂	2.48	0.32	ab	115.45	38.15	cd
パーミキュライト小粒	2.12	0.31	ac	117.32	38.04	cd
ココナツハスク	3.04	0.34	a	39.68	38.40	cde
葉投影面積	—	—		1.82	0.51	

*パーライト微粒の値を対照とした。**Tukey法の多重比較により、異なるアルファベット間に5%水準で有意な差があることを示す。

図-4. 各用土で発根したさし木苗の根長

エラーバーは標準偏差を示す。

土および葉投影面積)を説明変数とするモデルが採択された。このモデルで解析した根長に対する各用土の係数推定値と Tukey の多重比較検定の結果を表-2 に示した。根長に対する推定係数値が最も高かったのは鹿沼土小粒 (261.51) であり、赤玉土中粒 (240.82) と赤玉土小粒 (237.82) がそれに次いだ。発根率で最も係数が高かったココナツハスクでは、根長に対する係数推定値は 39.68 を示し、鹿沼土小粒より有意に低かった (Tukey の多重比較検定; $p < 0.05$)。一方、パーライト 3 種および赤土の係数推定値 (-88.49~20.63) は鹿沼土微・小粒および赤玉土 2 種より有意に低かった (Tukey の多重比較検定; $p < 0.05$)。

4. 用土の理学的性質と発根性の関係

発根率および根長を目的変数とし、用土の各理学的性質のうち透水性と保水性に関連する性質とその二次項を説明変数とした一般化線形混合モデルによる DIC 値を表-3 に示した。発根率および根長を目的変数としたとき、DIC 値

が最も低かったのは気相と液相の比およびその二次項を説明変数とした場合であった。DIC 値が最も低かったモデルを最適モデルとして採用し、そのモデルによる解析結果を表-4 および表-5 に示した。説明変数である気相と液相の比の二次項の係数は負の値を示し、目的変数との関係は負の二次曲線状であることが示された。さらに、最適モデルによる発根率および根長の予測値と気相と液相の比との関係を図-5 に示した。クローンの効果を除いた発根率の予測値は、気相と液相の比が約 1.0 でピークを示す負の二次曲線状であった。一方、根長の予測値は発根率と同様負の二次曲線状であり、0.2 以下および 1.8 以上のとき低下する傾向がみられたが、明確なピークは予測できなかった。

IV. 考 察

1. さし木用土の理学的性質の特徴

三相分布を含む用土の理学的性質の主成分分析において、気相の割合と飽和透水係数のベクトルが共に第 1 主成分の正の方向となっており、飽和透水係数が高いほど透水性が高く気相が相対的に高いことが示された (図-2)。また、液相の割合と有効水分保持量のベクトルの向きが共に第 2 主成分の正の方向となっており、有効水分保持量が多い土は液相が多くなる傾向が示された。これらのことから、第 1 主成分は透水性の高低、第 2 主成分は保水性の高低を示すといえる。

図-2 に従えば、ココナツハスクは第一象限に位置したことから、透水性・保水性共に高く、逆に第三象限に位置した砂は、透水性・保水性共に低いといえる。また、鹿沼土 3 種および赤玉土 2 種の第 1 主成分スコア値が 0 前後であり、鹿沼土 3 種の第 2 主成分スコア値が正の値、赤玉土 2 種のそれが負の値であったことから、これら 5 種の用土の透水性は中程度であり、鹿沼土の保水性はやや高く、赤玉土の保水性はやや低いと解釈できる。パーライト 3 種、鹿沼土 3 種および赤玉土 2 種についてはそれぞれ同じ基質の用土に近い位置にプロットされたことから、用土の理学

表-3. 発根率および根長を目的変数とした一般化線形混合モデルにおける DIC 値

説明変数						発根率	根長	備 考
飽和透水係数	+	(飽和透水係数) ²	+	有効水分保持量	+	(有効水分保持量) ²	-6.13	モデル1のフルモデル
飽和透水係数	+	(飽和透水係数) ²	+			(有効水分保持量) ²	-12.63	モデル1の最小 DIC モデル
飽和透水係数	+	(飽和透水係数) ²	+	有効水分保持量	+	(有効水分保持量) ²	448.92	モデル1のフルモデル
		(飽和透水係数) ²	+			(有効水分保持量) ²	447.99	モデル1の最小 DIC モデル
気相	+	(気相) ²	+	液相	+	(液相) ²	-19.05	モデル2のフルモデル
気相	+	(気相) ²					-20.22	モデル2の最小 DIC モデル
気相	+	(気相) ²	+	液相	+	(液相) ²	441.60	モデル2のフルモデル
気相	+	(気相) ²	+	液相			438.00	モデル2の最小 DIC モデル
気相：液相	+	(気相：液相) ²					-24.45	モデル3のフルモデル, 最小 DIC モデル
気相：液相	+	(気相：液相) ²					437.95	モデル3のフルモデル, 最小 DIC モデル

*下線の値は各形質の最小の DIC 値を示す。

表-4. 発根率を目的変数とした場合の最適モデルの解析結果

説明変数	係 数	95% 下限値	95% 上限値	eff. samp	pMCMC	
切片	0.68	0.35	1.00	1000	0.026	*
気相：液相	-0.09	-0.14	-0.03	1127	0.002	**
(気相：液相) ²	-0.13	-0.19	-0.09	1000	<0.001	***

*, **, ***それぞれ5%, 1%, 0.1% 水準で有意であることを示す。

表-5. 根長を目的変数とした場合の最適モデルの解析結果

説明変数	係 数	95% 下限値	95% 上限値	eff. samp	pMCMC	
切片	373.99	276.95	467.20	683.5	0.008	**
気相：液相	-13.20	-46.50	25.62	972.7	0.456	
(気相：液相) ²	-71.52	-99.30	-39.47	1000	<0.001	***

, *それぞれ1%, 0.1% 水準で有意であることを示す。

的性質は第1に基質の種類によって特徴付けられると考える。一方、鹿沼土およびパーライトでは粒子の大きさによって第2主成分スコア値が異なる傾向がみられたことから、第2に粒子のサイズによって保水性が変化する場合があるといえる。保水性が粒径によって変化する傾向は用土によって異なり、鹿沼土では大きいほど、パーライトでは小さいほど保水性が高くなる傾向がみられ、赤玉土では大きな差がなかった。矢橋ら(1992)は鹿沼土で大粒径ほど多量に微細間隙を持ち保水性が高いこと、高ら(1994)は赤玉土では粒径による保水性および透水性の差がそれほど大きくないことを報告しており、本研究の結果は過去の報告と一致していた。

以上のように、本研究では基質や粒径が異なる12種類の用土について理学的性質を定量的に評価するとともに、その性質に基づいて用土を分類することができた。

2. 用土の理学的性質とスギのさし木発根性の関係

本研究の結果、スギのさし木の発根率およびさし木苗の根長は、用土の種類によって影響を受けることが明らかとなった(図-3, 4)。さらに、用土の理学的性質のうち気相と液相の比によって発根率および根長の変動が説明できることが示唆された(表-3, 4, 5)。特に発根率については、気相と液相の比が約1.0でピークを示す単純な二次曲線状の関係を示したことから(図-5)、気相と液相の比はスギ

のさし木発根率の変動を把握するための普遍性の高い指標になることが示唆された。

用土の気相と液相の比は、用土の酸素と水分の条件について判断する目安として他の樹種でも検討されている。小笠原(1961)は、アカマツ・クロマツの1年生さし穂について、さし床の気相と液相の比がアカマツで1:1、クロマツで0.5:1のときに発根が最良であったと報告している。同様に、宮島(1957)はヒノキでその比率が0.8:1前後で適当であると述べている。これらの樹種と比較して易発根性であるスギではこの比率を示した報告はなく、本研究で初めて具体的な値(1:1)が推定された。森下・大山(1972b)は、樹種によって最適な気相と液相の比は異なるものの、0.5~1:1程度が適当な範囲であることを示しており、本研究で示したスギの気相と液相の比率はこの範囲内である。一方、気相と液相の比によって説明できることから、固相の割合は発根率には直接的な影響を及ぼす可能性が低いと考えられる。ただし、異なる粒径を用いた用土(パーライト、鹿沼土および赤玉土)で中粒では小粒よりさし木発根率が低かったことから、土の粒子の大きさは保水性や透水性とは異なる理由で発根率に影響を与えている可能性が高いと考える。志佐・万豆(1957)は中粒での発根率がやや劣る理由として、非毛管孔隙が大きすぎてさし穂と団粒の接触が悪かった可能性を指摘しており、本研究の結果にも同様の原因が当てはまるかもしれない。以上のことから、スギのさし木の発根には気相と液相の比が1.0に近い用土で、かつ団粒状構造を持つ場合は小粒である条件が最適であることが示唆された。本研究で使用した12種類の用土においてミスト灌水下でこの条件に当てはまるのはコナツハスクか鹿沼土小粒であるが、発根率だけでなく根系を発達させることを考慮すれば、根長の値がより大きかった鹿沼土小粒がスギのさし木増殖ならびにさし木苗の根系形質評価に最適な用土であることが示唆された。

気相と液相の比が1.0から正負に外れると発根率が低下し、0.2以下および1.8以上で根長の値が著しく小さくなると予測された(図-5)ことから、用土の透水性が低く液相が増加する場合は過湿、逆に液相が減少する場合は乾燥によって両形質の値が低下するといえる。他の樹種でも同

図-5. 最適モデルにより予想した気相と液相の比とさし木発根率およびさし木苗の根長の関係

様な報告があり、Gislerod (1983) がショウジョウボク (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) のさし木用土において過湿状態で不定根の発生および根の伸長が阻害されたことを報告している。森下 (1964) はトゲナシハリエンジュ (*Robinia pseudoacacia* L. f. *inermis* (Mirb.) Rehder) のさし木で、用土の水分が多いほど腐敗しやすく、その理由として腐敗菌の活動が活発になることを指摘している。一方、一般的に用土の水分が少なくなれば根原基の発達に必要な酸素がさし穂基部に供給される (Haissig 1986) が、根を持たないさし穂では蒸散量過多による水分消失の危険性に晒される (森下・大山 1972 a)。こうした状態はさし木増殖には不向きであるため、気相と液相の比を把握することで増殖の失敗を防ぐことが可能になる。また、乾燥・過湿の条件下では発根率のクローンの差がみられた (図-3) ことから、当該条件下におけるさし木試験を実施することで、クローンによる乾燥あるいは過湿への耐性の評価やその機構の解明に繋がると考えられる。

用土の pH については、最も高い値を示したバーミキュライト小粒 (6.9) と最も低い値を示した赤玉土中粒 (5.0) の間ではほとんど発根率に差がみられなかった (図-3) ことから、5.0~6.9 の範囲ではスギのさし木発根率に及ぼす影響が小さいと考えられる。一方、平野 (1998) は pH 2.0 でスギのさし木発根率の低下を報告している。これらのことから、極端な酸性あるいはアルカリ性では発根率に影響する可能性があるが、今回の試験では明らかにできなかった。

本研究の成果から、さし木発根性に影響を及ぼす要因を用土の種類という定性的データから気相と液相の比という定量的データに変換することができた。今回得られた知見は、さし木増殖の効率化のみならず、スギさし木発根性をより定量的に評価するためにも重要であると考えられる。

3. まとめ

本研究でスギのさし木発根性と用土の理学的性質の関係について検討した結果をまとめた。

1) 粒径・基質が異なる 12 種類のさし木用土の理学的性

質 (三相、飽和透水係数、有効水分保持量、仮比重および pH) を測定するとともに、これらの値を用いた主成分分析によって透水性・保水性に基づく分類を行った。

2) 一般化線形混合モデルの解析によって、用土の理学的性質のうち気相と液相の比がさし木発根率およびさし木苗の根長の変動を説明するのに最適であると判断された。発根率は気相と液相の比と単純な二次曲線状の関係であると予測されたことから、気相と液相の比は発根率に対して普遍性の高い指標になると考えられる。

3) 気相と液相の比が約 1.0 で発根率が最大になると予測された。気相と液相の比が 1.0 から高低に外れると、過湿および乾燥により発根率および根長の値が低下すると考えられる。

4) 供試した用土のうち、ミスト灌水下で発根率の最適条件に当てはまるのはココナツハスクか鹿沼土小粒であった。鹿沼土小粒で根の伸長が阻害されなかったことから、鹿沼土小粒がスギのさし木増殖ならびにさし木苗の根系形態評価に最適な用土であることが示唆された。

発根率および根の調査を行うにあたり、林木育種センターの職員、非常勤職員のご協力を頂いた。ここに感謝の意を申し上げる。この研究は、農林水産省プロジェクト研究「森林資源を最適利用するための技術開発」の「新世代林業種苗を短期間で作出する技術の開発」および JSPS 科研費 JP24780160 の一部として行われた。

引用文献

- 独立行政法人森林総合研究所林木育種センター (2014) 関東育種基本区スギ精英樹特性表 (2016 年 2 月現在) <http://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/sinhijnnsyu/documents/tokuseihyo-sugi.pdf>
- Gislerod HR (1983) Physical conditions of propagation media and their influence on the rooting of cuttings. III. The effect of air content and temperature in different propagation media on the rooting of cuttings. *Plant Soil* 75: 1-14
- Hadfield JD (2010) MCMC methods for multi-response generalized linear mixed models: the MCMCglmm R package. *J Stat Softw* 33 (2): 1-22
- Haissig BE (1986) Metabolic processes in adventitious rooting of cuttings. In: *New root formation in plants and cuttings*. Jackson MB

- (eds) Martinus Nijhoff, 141-189
- 平野恭弘 (1998) モデル実験系における酸性物質のスギ苗根系に与える影響. 名大森研 17: 25-74
- 平岡裕一郎 (2014) 成長形質を対象とした次世代育種の可能性. 森林遺伝育種学会誌 3: 161-163
- 関東林木育種場 (1991) 精英樹特性表. 農林水産省林野庁関東林木育種場
- 高 錫九・矢橋晨吾・雨宮 悠・早野美智子 (1994) 団粒性用土「赤玉」の粒径別保水・透水機能について. 千葉大園芸学報48: 141-146
- 町田英夫 (1974) さし木発根過程の観察. (さし木のすべて. 町田英夫, 誠文堂新光社). 17-33
- 三嶋賢太郎・井城泰一・平岡裕一郎・宮本尚子・渡辺敦史 (2011) 関東育種基本区におけるスギ精英樹クローンの立木材質の評価. 木材学会誌 57: 256-264
- 宮島 寛 (1957) 挿木によるヒノキ苗の増殖に関する研究 (第3報) 挿木用土と発根との関係について. 九州大学農学部演習林報告 29: 81-96
- 宮崎 紳 (1957) 挿付床. (図説苗木育成法. 宮崎紳, 高陽書院). 386-388
- 森下義郎 (1964) さし木の腐敗とその防止および回避. 林試研報 165: 1-306
- 森下義郎・大山浪雄 (1972 a) さしつけ後の乾燥とその防止. (造園木の手引き/さし木の理論と実際. 森下義郎・大山浪雄, 地球出版). 37-47
- 森下義郎・大山浪雄 (1972 b) さし床における環境条件と発根. (造園木の手引き/さし木の理論と実際. 森下義郎・大山浪雄, 地球出版). 146-168
- 小笠原健二 (1961) クロマツ, アカマツのサシキの発根におよぼす用土の理学的性質の影響. 京大演習林報 33: 361-367
- R Core Team (2015) R: A language and environment for statistical computing. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- 鹿野昭年 (1966) スギさし木床土別発根状況比較試験. 前橋営林局林業技術研究集録: 166-169
- 志佐 誠・万豆剛一 (1957) Soil conditioner の園芸的利用に関する研究 (第4報) バラの挿木床への利用, ならびに土壌構造と挿木の発根との関係について. 園学雑 26: 251-260
- Spiegelhalter DJ, Best NG, Carlin BP, Linde van der A (2002) Bayesian measures of model complexity and fit. J R Stat Soc 64: 583-639
- 鈴木 正 (1973) オートミスト利用によるさし木苗の育成 (Ⅲ) 最適散水量, 用土とスギ精英樹クローンの発根. 日林誌 55: 112-115
- 坪村美代子・武津英太郎・渡辺敦史 (2013) 関東育種基本区におけるスギ精英樹クローン雄花着花量の評価. 日林誌 95: 156-162.
- Uchiyama K, Miyamoto N, Takahashi M, Watanabe A, Tsumura Y (2014) Population genetic structure and the effect of historical human activity on the genetic variability of *Cryptomeria japonica* core collection in Japan. Tree Genet Genomes 10: 1257-1270
- 矢橋晨吾・雨宮 悠・高 錫九・高橋 悟・田中弥寿男 (1992) 園芸用土の物理製に関する研究 1. 鹿沼土の間隙構造と水分特性. 千葉大園芸学報 46: 129-134
- 横山 緑・前田千秋 (1956) スギ精英樹繁殖に関する研究 (I). 日林誌 38: 301-305