

マツ材線虫病抵抗性クロマツ「ハイパーマツ黒」のさし木苗得苗率の向上

宮原文彦*・檜崎康二

産学官共同で開発した、マツ材線虫病にきわめて強いクロマツ「ハイパーマツ黒」をさし木によりクローン増殖する際の、得苗率を高めるための試験を実施した。さし穂の太さを 4mm と 6mm を境に 3 区分して太さ別、さし木時期別、さし床加温の有無別の発根率を調査したところ、太さが 6mm 未満のさし穂をさし木の適期である 12～2 月にさし木し、電熱温床でさし床を 25℃ に加温することで、発根率が 12 月期で 42%、2 月期で 23% 向上した。発根個体を 6 月に床替えし、その後 1 年 8 ヶ月育苗した 2 年生苗の規格苗得苗率は、4mm 以上のさし穂をさし木した方が高かった。以上の結果から、ハイパーマツ黒のさし木では 4mm 以上 6mm 未満のさし穂を適期にさし床を加温してさし木することで 2 年生苗の得苗率が向上することが明らかとなった。2 年生苗の主軸の曲がりを防ぐためには、できるだけ冬芽がまっすぐなさし穂を使用することが望ましいが、苗の主軸の曲がりにはハイパーマツ黒さし木苗の利用上問題にならないことを確認した。本研究を含めてこれまで合計 6 回実施された試験の結果から求めたハイパーマツ黒 73 クローンの平均発根率は 52.8% であった。ハイパーマツ黒全 73 クローンのうち、親系統が漏れなく含まれていることと発根率が高いことを条件に、発根率上位の 44 クローンに絞り込むことで平均発根率は 52.8% から 64.5% に向上した。

[キーワード：発根率，クロマツ，さし木，得苗率]

Improvement of Seedling Yield Rate by Cuttings of Pine Wilt Disease Resistant Japanese Black Pine as "Hyper Black Pine". MIYAHARA Fumihiko and Koji NARAZAKI (Fukuoka Agriculture and Forestry Research Center, Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. For. Res. Cent.* 5:53-61 (2019)

An experiment was conducted to increase the seedling yield rate of Japanese black pine, using cuttings of 73 clones that were highly resistant to pine wilt disease ("hyper black pines"). The cutting rooting rate was investigated by dividing the cutting diameter into three categories, with 4 mm and 6 mm as the lower and upper limit, respectively. Electrothermal sheets were used to heat the cutting bed heating to 25 °C. The rooting rate of the cuttings improved by 42% in December and 23% in February when the cutting diameter was below 6 mm in the relevant period (December to February). Rooted cuttings were individually transplanted into polyvinyl pots and cultivated for one year and eight months. Two-year-old seedlings were then selected by size; the yield rate of seedlings with a cutting diameter of ≥ 4 mm was higher than seedlings with a < 4 mm cutting diameter. A cutting diameter of ≥ 4 mm and < 6 mm was therefore considered suitable. Based on tests conducted six times in total (including the study described in this paper), the average rooting rate of the 73 hyper black pine clones was 52.8%. The average rooting rate improved from 52.8% to 64.5% when the analysis was based on the 44 clones with the highest rooting rate, and the inclusion of parent lines composed of each of the original 73 clones without omission.

[Keywords: cuttings, Japanese black pine, rooting rate, seedling yield rate]

結 言

全国の松林にまん延している激害型のマツ枯れ被害は、マツノマダラカミキリによって運ばれて松に取りつくマツノザイセンチュウ（以下、線虫）が原因として知られている（岸 1988, 二井 2003）。この激害型マツ枯れ被害（以下、マツ材線虫病）に対して、西日本の林木育種場（当時）や各県の研究機関が共同でマツ材線虫病に強い抵抗性クロマツ 16 クローンを選抜し（藤本ら 1989）、それらのつぎ木苗による採種園が各地に造成された。この採種園では抵抗性クロマツ 16 クローン同士の自然交配種子が採取され実生苗が生産されている。この実生苗は抵抗性を持っていない従来のクロマツよりは抵抗性が高いものの（戸田 2004）、交配によって親よりも抵抗性が低い苗ができる可能性があることや自然交配のため園外からの花粉汚染で苗の抵抗性が低下する危険性を持っていることから、福岡県で林業種苗を生産している福岡県樹苗農業

協同組合（以下、福岡県苗組）では採種園産の苗に線虫を強制接種し、健全に生き残った苗（以下、接種検定苗）だけを出荷することで苗の抵抗性を維持している（宮原 1997）。

しかし、①この強制接種作業は毎年 7 月下旬の真夏に苗畑で育成しているクロマツ苗 1 本 1 本に一定量の線虫を接種しなければならないため、作業者にとってはかなりの労働負担となっていること、②この接種により約半数の苗が部分枯れや枯死して廃棄されるため、接種検定苗の歩留まりが低いこと、③強制接種に使用している線虫よりもさらに強い系統が自然界に存在していることから、2008 年に国立大学法人九州大学、独立行政法人森林総合研究所林木育種センター九州育種場（当時）、独立行政法人森林総合研究所関西支所（当時）、九州各県林業試験研究機関、天草地域森林組合の共同で、マツ材線虫病にさらに強いクロマツの開発とさし木によるクローン増殖技術の開発により苗木段階での強制接種を不要とするシ

ステムが開発された(大平ら 2010)。その中でマツ材線虫病にきわめて強くさし木発根性の良いクロマツ 73 クロウンが「ハイパーマツ黒」と名づけられた。この 73 クロウンは、そのさし木苗が海岸林内などに植栽され成長した後に互いに交配して自然に更新する次世代以降の芽生えが遺伝的に多様であることも考慮して、種子親と花粉親の組合せが異なるクロウンが選ばれている(大平ら 2010)。

共同研究各機関にはハイパーマツ黒 73 クロウンの原種が配布され、それをもとにクロウン増殖された苗で原種園の整備と採穂園用母樹の増殖が開始された。福岡県苗組でも 2010 年度から採穂園用母樹のさし木苗生産を開始したが、生産現場では 73 クロウン全体の平均発根率の低さがさし木苗生産に影響しており、さし木技術の改善が求められていた。また、過去 4 回行われた既往のクロウン別発根率データ(未発表)においても発根率が極めて低いクロウンが存在していたため、クロウン別発根率データをさらに蓄積し、発根不良クロウンの有無の確認と除去(絞り込み)の検討が求められていた。その他の問題点として、発根した苗の主軸が直立しないという主軸曲がり苗が発生していたことから、苗の形状の面での現状把握と対策が求められていた。

そこで、「ハイパーマツ黒」の健全な規格苗(2年生苗出荷時の苗高 25cm 以上、根元直径 7mm 以上)の得苗率向上技術を確立するための試験を実施した。

材料および方法

1 さし穂の太さと発根率

材料は、福岡県農林業総合試験場資源活用研究センター(以下、センター)構内のハイパーマツ黒原種園(以下、原種園)で保存されている 73 クロウンのうち、2014 年度は過去のクロウン別発根率データ(共同研究機関の未発表結果も含めた過去 4 回のクロウン別発根率データ(未発表))(以下、既往のデータ)で平均発根率が 71%以上(以下、高)であった 3 クロウンと 41~70%(以下、中)であった 3 クロウンの合計 6 クロウンを供試した(第 1 表)。2015 年度は同様の区分で 2014 年度と同じクロウンを半数含む合計 6 クロウンを供試した(第 1 表)。供試クロウンはいずれも前年春に剪定しており、その後葉束の間から発生した萌芽枝をさし穂として使用した。

さし穂は、前年枝の太さが直径 4mm 未満のものを「S」、4mm 以上 6mm 未満のものを「M」、6mm 以上のものを「L」に区分した。なお萌芽枝を使用するクロマツのさし木で採取されるさし穂の太さは通常 5mm 前後であった。

クロウンごとの太さ別供試本数を第 1 表に示した。各クロウンとも太さごとに 2014 年度は 24 本×3 回繰返し、2015 年度は 16 本×3 回繰返しを基本としたが、さし穂が少なかった太さでは、繰返し数は変えずに採穂できた本数を 3 分割して供試した。

さし穂の長さは、冬芽を除く前年枝の部分を概ね 5cm に調製した。供試したさし穂の冬芽の長さは揃えていな

第 1 表 ハイパーマツ黒のさし穂の太さ別さし木試験における供試本数

クロウン名	発根程度 ¹⁾	年度	さし穂の太さ		
			S	M	L
F	高	2014	72	72	24
L	高	2014	72	72	49
CC	高	2014	72	72	57
E	中	2014	72	63	45
X	中	2014	72	66	50
HH	中	2014	72	62	26
H	高	2015	48	48	36
L	高	2015	42	48	36
CC	高	2015	36	48	30
X	中	2015	48	48	30
AA	中	2015	48	48	30
II	中	2015	48	48	33

- 1) 過去 4 回のクロウン別発根率データにより、高：平均発根率が 71%以上、中：41~70%のクロウン
- 2) さし穂の太さは、S：4mm 未満、M：4mm 以上 6mm 未満、L：6mm 以上
- 3) 各年度の各太さとも 3 回繰返し
- 4) さし穂が少なかった太さでは、繰返し数は変えずに採穂できた本数を 3 分割して供試した

いが概ね 2cm 程度であり、さし付け時点ではまだ伸長し始めていなかった。さし穂の切り口は約 45 度で切り、さらに裏側から返し切りを行った。さし木床は幅 36cm×長さ 51cm×深さ 10.5cm の育苗箱を使用し、パーミキュライト小粒のみを詰めて用土とした。発根促進処理として、さし付け直前にさし穂の基部をインドール酪酸 0.4%溶液(バイエルクロップサイエンス(株)製、オキシベロン™液剤液)に 5~10 秒間浸漬した後、約 4cm の深さでさし付けた。育苗箱へのさし付け方法は、2014 年度は各育苗箱表面をひもで 3 分割し、各処理(クロウン・サイズ)あたり 8 本×3 列を基本とし、本数が少ない処理は適宜 3 列あるいは 2 列で、各処理の配置はランダムにさし付けた。2015 年度は各育苗箱の表面を 4 分割し、8 本×2 列を基本として、各処理の配置はランダムにさし付けた。

さし木した育苗箱は、センターガラス室(幅 6.4m、長さ 18.6m、側面の高さ 2.0m、棟の高さ 4.0m)内の農業用ビニールシートでトンネル状(幅 0.9m、高さ 0.45m、長さ 2014 年度は 7m、2015 年度は 4m)に密閉した中に配置し、遮光率 50%の黒寒冷紗で遮光した。灌水は概ね 1 週間に 1 回の間隔でビニールトンネルをめくり、水道水を育苗箱の底から水が流れ出す程度に灌水した。さし木ならびに発根調査の時期は、2014 年度は 2015 年 2 月 6 日にさし木、同年 6 月 26 日に調査、2015 年度は 2016 年 3 月 31 日にさし木、同年 7 月 20 日に調査した。発根の有無はさし穂を育苗箱から掘りあげて調査した。

調査後、発根個体は上面直径 10cm、底面直径 7.5cm、深さ 9cm の底穴 4 ヶ所開き黒ビニールポットに床替えした。用土は、ピートモスとパーライト等が混合されたアグリシステム社(福岡県久留米市)製のクロマツ用培土を使用した。床替えしたポット苗は 20 穴トレイに並べてセンター内のミストガラス室で育苗した。2015 年 2 月にさし木し同年 6 月に床替えした苗について、2017 年 2 月に

苗高を測定し 25cm 以上の苗の割合を規格苗比率とした。また、さし木した本数に対する規格苗の本数割合を得苗率とした。

2 電熱温床さし木による発根率の向上

さし木試験は、2016 年 12 月下旬と 2017 年 2 月上旬、電熱温床（以下、温床）の有無別に、センターと福岡県苗組（福岡県朝倉市三奈木）の 2 ヶ所で実施した。材料は、センター原種園内のクローンのうち、既往データで平均発根率が中以上の 6 クローン（E, F, G, I, L, BB）で、さし穂の太さが 6mm 未満の萌芽枝を供試した。供試本数は、各クローンとも処理（さし木時期×試験場所×温床の有無）ごとに 25 本ずつの 2 回繰返しとした。育苗箱へのさし付け方法は 2 試験場所とも同様で、各育苗箱表面を 3 分割し、各クローンとも 8～9 本×3 列でクローンの配置はランダムにさし付けた。

温床処理は、センターでは 1 と同じガラス室内で、1 とは別の農業用ビニールシートでトンネル状（長さ 2m）に密閉した中に配置した育苗箱それぞれの底に幅 0.3m×長さ 0.6m の電熱シートを敷設した。福岡県苗組ではビニールハウス（幅 5.4m、長さ 30m、側面の高さ 1.3m、棟の高さ 2.7m）の中に敷設した幅 0.9m×長さ 5m の電熱マットの上に育苗箱を並べ、センターと同様に農業用ビニールシートでトンネル状（幅 0.9m、高さ 0.45m、長さ 6m）に密閉し、遮光率 50% の黒寒冷紗で遮光した。いずれの場所の温床も用土表面に置いたセンサーで制御しており、用土表面温度が 15℃以下になるとヒーターのスイッチが入り、25℃以上になるとスイッチが切れるように設定した。対照区は、2 試験地ともそれぞれの同じハウス内で温床を敷き設したトンネルから離れた箇所に別のトンネルを設置し温床なし区とした。さし穂の調製方法、用土、さし付け方法および灌水方法は 1 と同様の方法で実施した。

2 ヶ所の試験地の温床あり区となし区それぞれの育苗箱 1 箱ずつで地温を T&D 社製温度記録計（おんどとり Jr.™, TR-52）を用いて測定記録した。測定は育苗箱の中心付近で直径 2mm の温度センサーの先端が深さ約 5cm となるように固定し、2016 年 12 月から 2017 年 5 月まで毎正時に測定した。日平均地温は 0 時から 23 時までの 24 データを平均して求めた。

発根調査は 2 ヶ所とも 2017 年 6 月にさし穂を育苗箱から掘りあげて調査した。

3 さし穂の形状と主軸曲がり発生率

材料は、センター原種園内のクローンのうち、既往のデータで平均発根率が高であった 3 クローンを供試した（第 2 表）。

さし穂の前年枝部の延長線と冬芽のなす角度（以下、冬芽岐出角）によってさし穂を 3 区分した。すなわち、冬芽岐出角が 10 度未満のものを直、10 度以上 30 度未満のものを小曲がり、30 度以上のものを大曲がりとして区分した。クローンごとのさし穂の形状別供試本数を第 2 表に示し

第 2 表 ハイパーマツ黒のさし穂の形状と主軸曲がり発生試験における供試本数

クローン名	さし穂の形状		
	直	小曲がり	大曲がり
G	42	72	48
I	42	84	84
M	42	72	60

- 1) さし穂の形状で、直は冬芽岐出角が 10 度未満、小曲がりは 10 度以上 30 度未満、大曲がりは 30 度以上のものとした
- 2) 各クローンとも、直穂は 3 回繰返し、曲がり穂は 6 回繰返し
- 3) さし穂が少なかった小曲がりや大曲がり形状では、繰返し数は変えずに採穂できた本数を 6 分割して供試した

た。14 本×3 回または 6 回繰返しを基本としたが、さし穂が少なかった小曲がりや大曲がりでは、繰返し数を変えずに採穂できた本数を 6 分割して供試した。育苗箱へのさし付け方法は、各育苗箱表面を 5 分割し、7 本×2 列を基本として各処理（クローン・曲がり）の配置はランダムにさし付けた。

さし穂の長さの調製、発根促進処理、さし木環境ならびに灌水等の育苗条件は、1 と同じ方法で行った。さし木は 2015 年 2 月 9 日に実施し、発根ならびにビニールポットに鉢上げ後の当年生主軸（以下、主軸）の曲がり角度調査は同年 7 月 23 日から 8 月 19 日までに実施した。鉢上げ時期の主軸はさし木時の冬芽が伸長したもので、その曲がり角度調査は冬芽岐出角と同じ区分で測定した。調査後の発根個体は 1 と同様の方法で黒ビニールポットに床替えし、1 と同じミストガラス室で育苗した。18 ヶ月育苗した 2 年生苗 283 個体について、2017 年 1 月に苗高と主軸の曲がり状況を調査した。2 年生苗の主軸の曲がり程度は、さし穂軸の延長線と伸長した主軸のなす角度が 10 度未満を直、10 度以上 30 度未満を小曲がり、30 度以上を大曲がりとした。

さし穂や苗の主軸の形状は直から大曲がりまで順序関係があることから、3×3 の分割表をもとに Spearman の順位相関係数の検定により、さし穂形状と床替え時の苗の形状の間の関連性、そして床替え時の苗の形状と 2 年生苗の主軸の形状の間の関連性について検定した。

4 ハイパーマツ黒のクローン別発根率の把握とクローンの絞込み

材料は、センター原種園ならびにそこからクローン増殖して福岡県苗組が造成した採穂園から 2014 年度は 72 クローン、2016 年度は 71 クローンを供試した。

供試本数は、2014 年度は各クローンあたり 48 本×2 回繰返しを基本とし、採穂本数が少なかったクローンも採穂できた本数を 2 分割して供試した。2015 年度は各クローンあたり 50 本×2 回繰返しを基本としたが、採穂本数が少なかったクローンは繰返し無しとした。さし付け

は、いずれの年も育苗箱表面を2分割し9~10本×5列ずつクロウンの配置はランダムにさし付けた。

さし木は2015年1月下旬と2017年2月上旬にいずれも福岡県苗組の2と同じビニールハウス内で電熱温床を設置して実施した。使用したさし穂の太さは両年ともに直径6mm未満とした。さし木方法、育苗条件は1と同じ方法で行い、発根の有無はいずれの年も6月にさし穂を育苗箱から掘りあげて調査した。

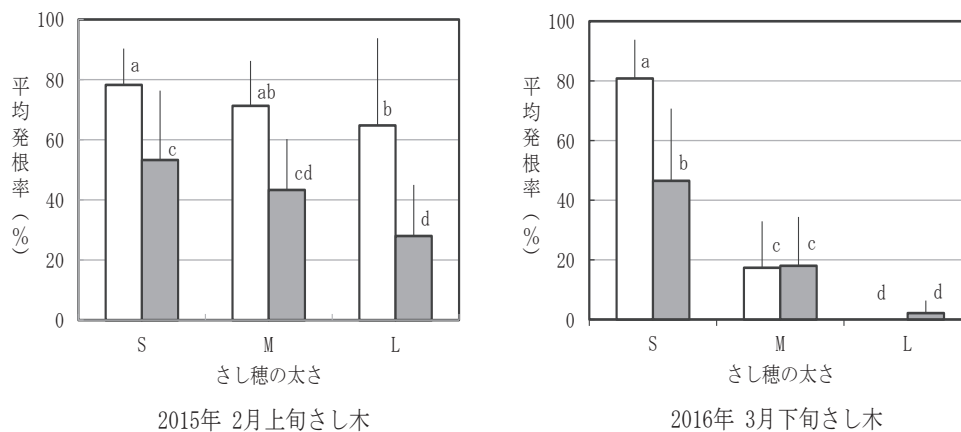
クロウン別の平均発根率は、今回行った2回のデータと過去4回行われた既往のデータ(未発表)を含めた6回の結果をもとに算出した。過去4回の試験は、2008年と2010年の春に熊本県合志市須屋の独立行政法人森林総合研究所林木育種センター九州育種場(当時)で、2011年春にセンター(当時、福岡県森林林業技術センター)で、そして2013年春に福岡県苗組で実施したものである。

ハイパーマツ黒73クロウンは、それぞれの種子親と花粉親が共同研究機関によるDNA分析で明らかにされており、種子親14家系、花粉親13家系の組合せで構成されている(第4表)。そこで、クロウンの絞込みは、今回までの合計6回の平均発根率が高い順に73クロウンを並べ、各クロウンまでの親家系の累積出現率(上位からその順位までに出現している種子親家系の出現率と花粉親家系の出現率の平均)が100%となること、すなわち、73クロウンを構成している親遺伝子がもれなく含まれていることを条件に検討した。

結果

1 さし穂の太さと発根率

2015年2月上旬のさし木と2016年3月下旬のさし木

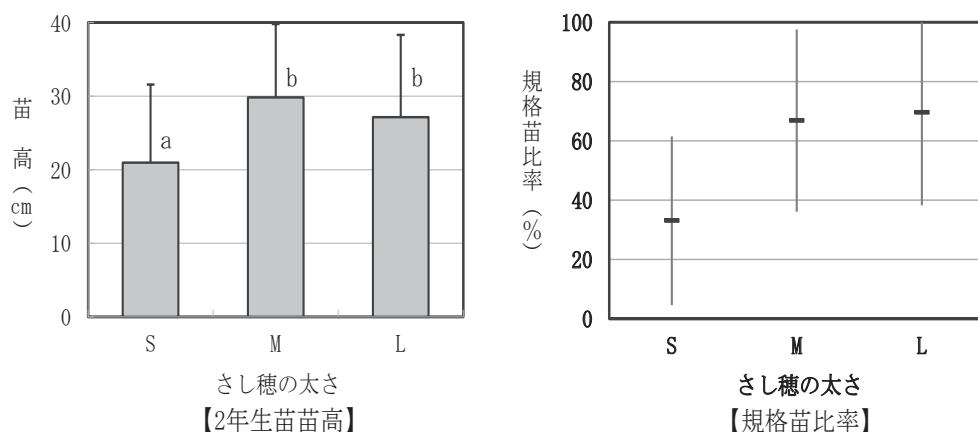


第1図 ハイパーマツ黒のさし木におけるさし穂の太さ別・発根特性別の発根率

- 1) さし穂の太さは、S: 4mm未満, M: 4mm以上 6mm未満, L: 6mm以上
- 2) 白抜きは既往データによる発根程度が高いグループ、灰色は中程度のグループ
- 3) 図中の誤差線は、供試クロウンの標準偏差を示す
- 4) 左図において、a-b間、c-d間に5%、a-c間、b-d間に1%の水準で有意差あり
右図において、a-b間に5%、a-c間、b-c間、c-d間に1%の水準で有意差あり
(いずれもBonferroniの多重比較検定による)

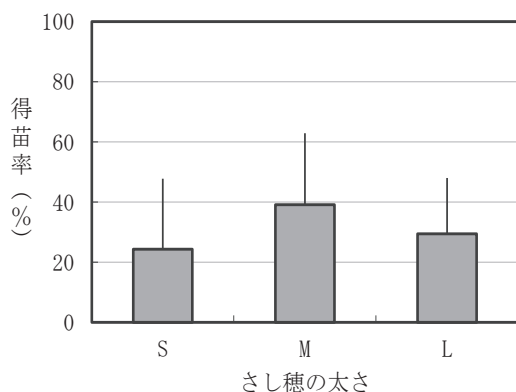
それぞれの発根率を、供試クロウンの発根特性(高,中)とさし穂の太さについて二元配置の分散分析を行った結果、いずれの時期も発根特性、さし穂の太さ間に1%ないし5%水準の有意差が認められた。供試クロウンの発根特性別、さし穂の太さ別の平均発根率を第1図に示した。2015年2月さし木での平均発根率は、発根特性が高いグループでSが78.2%、Mが71.3%、Lが64.8%、低いグループでSが53.2%、Mが43.3%、Lが28.0%であった(第1図,左)。2016年3月のさし木では、発根特性が高いグループでSが80.9%、Mが17.4%、Lが0.0%、低いグループでSが46.5%、Mが18.1%、Lが2.1%であった(第1図,右)。いずれの年もさし穂の太さが増えるほど発根率が低下したが、2016年3月のさし木の場合はその低下状況が著しかった。発根特性とさし穂の太さについてBonferroniの多重比較検定を行ったところ、2015年2月のさし木ではいずれの太さにおいても発根特性間に1%、いずれの発根特性間においても太さ4mm未満のSと6mm以上のLの間に5%の水準で有意差が認められた(第1図,左)。2016年3月のさし木では太さSにおいて発根特性間に5%、そしていずれの発根特性においてもSとM、MとL間に1%の水準で有意差が認められた(第1図,右)。

2015年2月にさし木し同年6月に床替えした苗の2年生時(2017年2月)の平均苗高は、Sのさし穂からの苗では20.9cm、Mでは29.8cm、Lでは27.2cmであった(第2図,左)。苗高について分散分析を行った結果、さし穂の太さ間に1%の水準で有意差が認められた($P=0.000$)。Bonferroniの多重比較検定を行ったところ、Sのさし穂からの2年生苗の苗高は1%の水準でMやLからの苗の苗高よりも有意に低かった(第2図,左)。2年生苗の規格苗比率(=規格苗本数/床替え本数)は、Sのさし穂か



第2図 ハイパーマツ黒のさし木におけるさし穂の太さ別の2年生苗木高（左）と規格苗木比率（右）

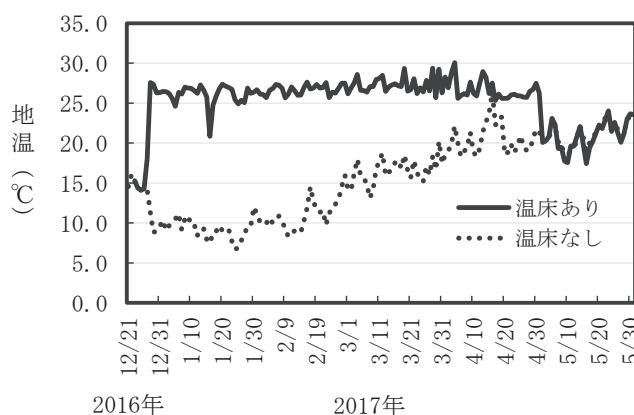
- 1) さし穂の太さは、S: 4mm 未満, M: 4mm 以上 6mm 未満, L: 6mm 以上
- 2) 図中の誤差線は、供試 6 クロウンの標準偏差を示す
- 3) 左図中の異なる英文字間には Bonferroni の多重比較検定により 1%水準で有意差があることを示す
- 4) 右図中の各サイズ間には有意差なし
- 5) 規格苗木の条件は、2年生苗木出荷時の苗木高が 25cm 以上、根元直径が 7mm 以上
- 6) 規格苗木比率 = 規格苗木本数 / 床替え本数



第3図 ハイパーマツ黒のさし木におけるさし穂太さ別の2年生苗木得苗木率

- 1) さし穂の太さは、S: 4mm 未満, M: 4mm 以上 6mm 未満, L: 6mm 以上
- 2) 図中の誤差線は、供試 6 クロウンの標準偏差を示す
- 3) 図中の各サイズ間には有意差なし
- 4) 得苗木率 = 規格苗木本数 / さし木本数

らの苗木では 33.1%, M では 66.8%, L では 69.6% であった (第 2 図, 右)。規格苗木比率は供試した 6 クロウン間の差が大きかったため、分散分析ではさし穂の太さ間で有意差は認められなかったが ($P=0.099$), S のさし穂からの苗木は、M や L からの苗木に比べて低い傾向であった。さし穂の太さ別の 2 年生苗木得苗木率 (= 規格苗木本数 / さし木本数) は、S のさし穂からの苗木では 24.3%, M では 39.1%, L では 29.4% であった (第 3 図)。得苗木率についても供試した 6 クロウン間の差が大きかったため、さし穂の太さ



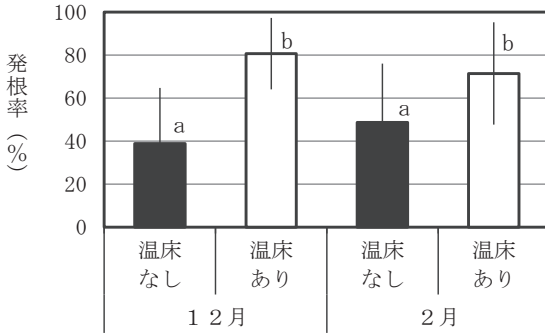
第4図 ハイパーマツ黒のさし木における電熱温床の有無別の日平均地温の推移

- 1) 調査地点は、福岡県苗組試験区 (福岡県朝倉市三奈木)

間に有意差は認められなかったが、M の得苗木率が高い傾向であった。

2 電熱温床さし木による発根率の向上

福岡県苗組における電熱温床の有無別の日平均地温の推移を第 4 図に示した。電熱温床区の地温は 1~2 月も 25°C 前後を維持していたが、温床なし区は 10°C 前後であった。なお、センターにおける温床区の地温の推移は福岡県苗組とほぼ同様であったが、温床なし区ではやや高く



第5図 ハイパーマツ黒のさし木における時期別・電熱温床の有無別の発根率

- 1) 発根率は、センターと福岡県苗組の平均を示す
- 2) 図中の誤差線は、供試 6 クロンの標準偏差を示す
- 3) 異なる英文字間には 1%水準で有意差あり

13~15℃で推移していた。試験地間での発根率はクローン間や温床の有無間で同様の傾向を示していたので、2試験地の発根率をまとめ、クローンと温床の有無について二元配置で分散分析した結果、クローン間で有意確率 $P=0.001$ 、温床の有無間で $P=0.000$ とそれぞれについて 1%水準で有意な差が認められた。供試した 6 クロンすべてにおいて電熱温床の設置により発根率が向上しており、クローンをまとめた平均発根率は 12 月期では温床なし区の 38.8% に対して温床区は 80.7%、2 月期では温床なし区の 48.7% に対して温床区は 71.5% であり、温床処理によって発根率が 12 月期は 42%、2 月期は 23% 向上した (第 5 図)。

3 さし穂の形状と主軸曲がり発生率

さし穂の形状別の発根率ならびに標準偏差は、直の穂で $65.9 \pm 15.1\%$ 、小曲がりの穂で $50.8 \pm 18.2\%$ 、大曲がりの穂で $54.5 \pm 20.3\%$ であった。発根率についてさし穂冬芽の曲がり程度で分散分析を行った結果、曲がり程度には有意差が認められず ($P=0.109$)、冬芽の曲がりは発根率には影響しないことが明らかとなった。

さし穂冬芽の曲がり程度と 2 年生苗の主軸曲がりについて Spearman の順位相関係数検定を行った結果、1% の水準で両者の関連性が認められた ($P=0.000$, 第 3 表)。

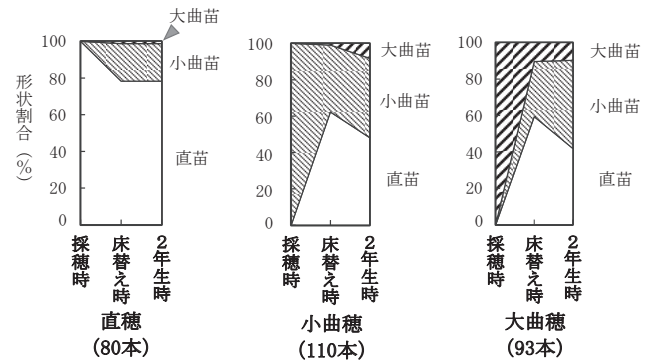
2 年生苗における主軸の状態について、冬芽が直だったさし穂由来の苗では主軸が直の苗 (以下、直苗) の比率が 76%、小曲がり (以下、小曲) 苗の比率は 19% であった (第 6 図, 左)。小曲穂由来の苗では直苗比率は 47%、小曲苗比率は 42% (第 6 図, 中)、大曲がり (以下、大曲) 穂由来の苗では直苗比率 41%、小曲苗比率 47% であった (第 6 図, 右)。2 年生時において床替え時よりも直苗比率が小曲穂由来で 14%、大曲穂由来で 17% 低下した (第 6 図, 中, 右)。

第3表 ハイパーマツ黒のさし穂冬芽の形状と 2 年生苗主軸の形状との関連性

さし穂冬芽の形状	2 年生苗時の形状別本数			合計
	直苗	小曲苗	大曲苗	
直	63	16	1	80
小曲がり	53	48	9	110
大曲がり	39	45	9	93

$P = 0.000^{**}$

- 1) **は、Spearman の順位相関係数の検定により、さし穂冬芽の形状と 2 年生時の主軸の形状に 1% の水準で関連性が認められたことを示す



第6図 ハイパーマツ黒のさし穂形状別の 2 年生時における苗の主軸の形状割合

4 ハイパーマツ黒のクローン別発根率の把握とクローンの絞込み

2015 年 1 月の 72 クロンの平均発根率は 42.8%、2017 年 2 月の 71 クロンの平均発根率は 53.3% であった。これまでの福岡県や共同研究機関の合計 6 回にわたるクローン別発根率の順位について、ケンドールの一致係数 (W) を求めた結果、1% の水準で順位に一貫性が認められた ($W=0.45$, $\chi^2=227.74$, $\chi^2(0.01, df72)=100.42$)。

2015 年 1 月と 2017 年 2 月、そしてこれまでの福岡県や共同研究機関の結果を合わせた合計 6 回の結果から求めた各クローンの平均発根率は 86.4~19.5% の範囲に分布し、全体の平均発根率は 52.8% であった (第 4 表)。各クローンの過去 6 回のさし木試験における最低発根率と最高発根率を第 4 表に示した。クローンによっては最低から最高までの範囲が広いものもあったが、全体的に平均発根率の高いクローンの方が最低発根率や最高発根率が高い傾向がうかがえた。73 クロンを平均発根率が高い順に並べ換え、親家系の累積出現率を求めた結果、第 44 位のクローンで累積出現率が 100% となり当初の 73 クローンそれぞれを構成していた両親家系のいずれかが漏れなく含まれた (第 4 表)。これら発根率上位の 44 クローンに絞り込むことによって平均発根率は 52.8% から 64.5% に向上した (第 4 表)。

第4表 ハイパーマツ黒の合計6回の試験による各クローンの発根率順位と平均発根率、最低・最高発根率ならびに両親の家系とその累積出現率

クローン	発根率 順位	各クローンの合計6回の試験における			種子親家系	花粉親家系	上位からその順位までの	
		平均発根率	最低発根率	最高発根率			平均発根率	親家系の 累積出現率
		%	%	%			%	%
A	1	86.4	76.0	100.0	波方37	津屋崎50	86.4	7.4
B	2	85.3	56.3	97.0	波方37	大瀬戸12	85.8	11.3
C	3	82.2	67.7	100.0	波方73	大瀬戸12	84.6	14.8
D	4	81.5	66.0	97.0	波方37	大瀬戸12	83.8	14.8
E	5	80.5	57.3	96.0	波方37	川内290	83.2	18.7
F	6	79.7	65.0	93.8	夜須37	波方73	82.6	26.1
G	7	78.9	42.7	93.0	津屋崎50	三崎90	82.1	33.5
H	8	77.7	49.0	96.0	波方37	志摩64	81.5	37.4
I	9	77.2	50.0	94.0	波方37	大分8	81.0	41.2
J	10	76.8	20.0	100.0	願娃425	波方73	80.6	44.8
K	11	76.6	55.0	97.0	吉田2	波方73	80.2	48.4
L	12	74.4	40.0	88.0	津屋崎50	波方37	79.7	52.2
M	13	74.2	65.0	85.0	願娃425	願娃425	79.3	56.0
N	14	72.6	60.0	83.0	三崎90	波方73	78.8	59.6
O	15	69.3	27.0	90.0	波方73	小浜30	78.2	63.5
P	16	69.1	49.0	92.3	波方37	小浜30	77.6	63.5
Q	17	68.5	33.3	90.0	吉田2	願娃425	77.1	63.5
R	18	68.0	45.3	83.0	津屋崎50	波方73	76.6	63.5
S	19	68.0	37.0	91.0	波方37	吉田2	76.1	67.3
T	20	66.7	53.0	78.0	波方73	三崎90	75.7	67.3
U	21	65.2	39.6	93.0	吉田2	土佐清水63	75.2	71.2
V	22	63.7	32.0	84.0	志摩64	波方37	74.7	74.7
W	23	63.0	29.2	100.0	川内290	土佐清水63	74.1	78.3
X	24	62.8	7.0	97.0	川内290	津屋崎50	73.7	78.3
Y	25	61.6	31.0	82.0	波方37	波方73	73.2	78.3
Z	26	61.3	13.0	83.0	波方37	土佐清水63	72.7	78.3
AA	27	60.4	27.0	80.0	大分8	津屋崎50	72.3	81.9
BB	28	60.2	14.6	80.0	大分8	波方37	71.8	81.9
CC	29	58.1	31.0	92.7	小浜30	津屋崎50	71.4	85.4
DD	30	55.5	10.0	80.0	夜須37	志摩64	70.8	85.4
EE	31	55.4	20.0	90.0	津屋崎50	大分8	70.3	85.4
FF	32	54.6	30.0	90.0	大分8	土佐清水63	69.9	85.4
GG	33	53.0	10.0	82.0	三崎90	波方37	69.3	85.4
HH	34	51.2	20.0	77.1	吉田2	大分8	68.8	85.4
II	35	51.1	20.0	70.0	波方73	波方37	68.3	85.4
JJ	36	50.8	20.0	80.0	土佐清水63	吉田2	67.8	89.0
KK	37	50.8	24.0	80.0	大分8	三崎90	67.4	89.0
LL	38	50.3	15.0	73.0	土佐清水63	願娃425	66.9	89.0
MM	39	50.1	19.0	90.0	三崎90	大分8	66.5	89.0
NN	40	49.7	30.0	90.0	大瀬戸12	土佐清水63	66.1	92.6
OO	41	49.7	10.2	77.0	大分8	波方73	65.7	92.6
PP	42	49.6	25.0	70.0	波方73	吉田2	65.3	92.6
QQ	43	49.1	24.0	85.0	波方73	田辺54	64.9	96.4
RR	44	48.7	8.0	100.0	田辺54	波方73	64.5	100.0
SS	45	48.3	16.7	73.0	三崎90	川内290	64.2	100.0
TT	46	47.5	16.0	90.6	小浜30	土佐清水63	63.8	100.0
UU	47	46.2	15.1	90.0	志摩64	三崎90	63.4	100.0
VV	48	45.9	17.7	70.0	小浜30	大瀬戸12	63.1	100.0
WW	49	45.4	10.0	67.0	田辺54	土佐清水63	62.7	100.0
XX	50	45.1	19.0	80.0	津屋崎50	願娃425	62.4	100.0
YY	51	44.6	19.0	75.0	波方73	志摩64	62.0	100.0
ZZ	52	44.5	10.0	75.0	波方73	波方73	61.7	100.0
AAA	53	42.1	10.0	85.9	土佐清水63	大分8	61.3	100.0
BBB	54	40.4	17.0	52.1	三崎90	大瀬戸12	60.9	100.0
CCC	55	39.5	20.8	59.0	三崎90	津屋崎50	60.5	100.0
DDD	56	38.2	0.0	84.0	夜須37	大分8	60.1	100.0
EEE	57	35.9	0.0	73.0	願娃425	津屋崎50	59.7	100.0
FFF	58	34.7	9.4	63.0	小浜30	波方73	59.3	100.0
GGG	59	34.5	13.0	65.0	志摩64	大瀬戸12	58.9	100.0
HHH	60	33.7	0.0	74.0	志摩64	川内290	58.4	100.0
III	61	32.4	5.0	68.0	波方73	大分8	58.0	100.0
JJJ	62	31.9	9.4	45.0	波方73	土佐清水63	57.6	100.0
KKK	63	31.2	0.0	65.0	田辺54	津屋崎50	57.2	100.0
LLL	64	29.7	7.3	60.0	三崎90	土佐清水63	56.7	100.0
MMM	65	29.6	0.0	60.0	津屋崎50	土佐清水63	56.3	100.0
NNN	66	28.7	3.1	63.0	志摩64	波方73	55.9	100.0
OOO	67	28.1	11.1	60.0	願娃425	土佐清水63	55.5	100.0
PPP	68	27.4	10.0	50.0	志摩64	津屋崎50	55.1	100.0
QQQ	69	25.9	10.0	49.0	田辺54	波方37	54.7	100.0
RRR	70	23.1	3.0	70.0	波方37	三崎90	54.2	100.0
SSS	71	21.5	5.0	32.7	土佐清水63	津屋崎50	53.7	100.0
TTT	72	20.2	7.0	37.0	土佐清水63	志摩64	53.3	100.0
UUU	73	19.5	0.0	45.0	夜須37	土佐清水63	52.8	100.0
全73クローンの平均発根率		52.8			(14家系)	(13家系)		

- 1) 両親家系の網かけセルは、上位から見て初めて出現した家系を示す
- 2) 親家系の累積出現率は、各順位までの種子親、花粉親それぞれの家系の累積出現率の平均を示す

考 察

クロマツはこれまでさし木の発根が困難な樹種とされてきたが(森下・大山 1972, 町田 1974, 関西地区林業試験研究機関連絡協議会育苗部会 1980), 石松 (1998) がクロマツのさし木を報告して以来多くの研究が報告されてきた(森・宮原 2002, 森ら 2004, 佐々木ら 2004, 大平ら 2005, 2009, 真崎 2008, 松永ら 2009)。

さし穂の太さについて, 松永ら (2009) は 3 月下旬のさし木において 4mm 以上のさし穂の発根率が 4mm 未満のさし穂と比べて有意に低下することを報告している。筆者らの 2016 年 3 月下旬のさし木においても供試したクロマツの発根特性にかかわらず太さ 4mm 以上 (M と L) の発根率が有意に低下していた。一方で, さし木した年度は異なるものの, 筆者らの 2015 年 2 月上旬のさし木においては供試クロマツの発根特性の違いが顕著であり, さし穂の太さについては, 6mm 以上 (L) のさし穂の発根率が 4mm 未満 (S) のさし穂に対して有意に低かった。

クロマツのさし木を行っている苗木生産者に聞き取りしたところ, 多くの生産者は発根後の苗木の成長を考慮してできるだけ太いさし穂をさし木したがる傾向にあった(未発表)。今回, 2015 年 2 月にさし木し同年 6 月に床替えした苗が 2 成長期経過し満 2 年生となった 2017 年 2 月の苗高は, S のさし穂からの 2 年生苗の苗高が M や L からの苗の苗高よりも有意に低く, 規格苗比率は, さし穂の太さ間では有意差は認められなかったものの, S のさし穂からの苗の規格苗比率が, M と L からの苗に比べて低い傾向であったことは, 前述した生産者の意向と一致していると思われた。

さし木したのから 2 年生規格苗が得られる割合である得苗率は, さし穂の太さ間に有意差は認められなかったものの, M の得苗率が高い傾向であった。S の得苗率が低かったのは, さし木時点での発根率は高いものの 2 年生時の苗高が低く規格苗比率が低かったこと, 一方, L の得苗率が低かったのは, 発根すれば規格をクリアできるまでに成長できるものの発根率そのものが低かったことが原因と思われた。以上のことから, 得苗率を向上させるためには, M サイズ (太さ 4mm 以上 6mm 未満) のさし穂を用いてさし木の適期にさし木することが有効と考えられた。

電熱温床によるさし木床加温の効果については森・宮原 (2002), 森ら (2004) により発根率が有意に向上したとする報告がある。また, 大平ら (2007) は 10 月に行った電熱温床さし木で温床なしの 3 月さし木と同等の発根率が得られ, さし木労務の分散が図れるとしている。ハイパーマツ黒は 73 クロウンで構成された複合クロウン群であり, できるだけ多くのクロウンが均等に増殖される必要がある。そこで, 発根率を向上させるとともに, さし木時期を分散させることで苗木生産労務の軽減につなげる目的で電熱温床による冬期のさし木床加温を行った。今回は既往のデータで平均発根率が 41~70% 程度のクロウンの発根率向上を目指した。その結果, 供試した 6 クロ

ウンすべてにおいて電熱温床により発根率が, 12 月さし木では 42%, 2 月さし木では 23% 向上しいずれの時期でも 70% 以上の発根率を示したことから, さし木の適期は 12~2 月であり, 電熱温床により発根率を向上させることができた。

以上のことから, ハイパーマツ黒のさし木発根率の向上とその後の規格苗得苗率を向上させるためには, 大平ら (2010) の方法をもとに, さし木の適期である 12 月から 2 月に太さ 4mm 以上 6mm 未満のさし穂を電熱温床シート等で加温したさし床にさし木することが有効で, さし木作業やその後の管理等の労務を分散させることも可能になると考えられた。

発根した苗の主軸が育苗期間中に著しく曲がり出荷できなくなる現象について, さし穂の前年枝に対する冬芽の岐出角度で区分してさし木苗を育成した結果, さし穂の形状と 2 年生苗の主軸の形状との間に有意な関連性が認められたことから, さし穂を採取する際にはできるだけ直の穂を集めることが望ましかった。また, 床替え時に新梢が直に伸びていた苗が 2 年生時に小曲がりとなった割合が, 小曲さし穂由来で 14%, 大曲さし穂由来で 17% 出現した原因の一つとして, 育苗段階での隣接している苗からの側方圧が考えられた。ポット苗を入れて並べたトレイの中で苗の大きさに偏りがあつたり苗の片側が開放空間であった場合に一部の苗が側方圧を避けて開放空間側に主軸が曲がる現象が観察されたことからである。実際の生産現場では床替え苗の大きさのある程度揃えて並べていることから, 開放空間は連続して並べたトレイ群の周囲 1 列分だけであり, 育苗中の見回り時に時々トレイの向きを入れ替えることによって主軸曲りは改善されると考えられた。また, 一般に健全な苗の条件として, 苗高/根元直径の値が 50 以下という目安がある(林野庁, 2000)。今回は 2 年生苗の根元直径は測定していないが, 一部に細くて苗高の高い苗が見うけられ, そのような形状の苗に育苗段階での主軸曲りが生じた可能性がある。今後は灌水や施肥の方法などについての検討が必要と考えられた。

一方, 2 年生苗を利用する側(植栽工事発注者)に主軸曲がりについての許容程度を聞き取り調査した結果, 風衝地である海岸防風林に植栽する場面が多いことから, 工事発注者側はそれほど直苗にこだわっておらず小曲苗でも問題なく使用していることが明らかになった。直穂, 小曲穂, 大曲穂のいずれのさし穂でも, 2 年生苗の主軸の形状は, 直苗と小曲苗の合計割合が 90% 前後であったことから, さし穂の冬芽岐出角については, 直穂を採ることが望ましいが苗木生産上はそれほど重要な問題ではないと思われた。

ハイパーマツ黒の生産は, 多数のクロウンをできるだけ均等に増殖し, 海岸現地などにランダム配置で植栽されることが開発当初からのコンセプトであるが, 開発直後の原種クロウンをさし木増殖する段階から低発根率クロウンの存在が認められていた。苗木生産者からも発根率が低いクロウンの除去が望まれていたことから, 今回,

過去 4 回のクローン別発根率データの他に、反復区を設けたさし木試験を複数年実施してデータを追加したことでハイパーマツ黒 73 クローンの品種ごとの発根傾向を把握できたものと考えている。なお、本試験においては、原種木が枯死した 1~2 クローンがクローン別発根試験に供試できなかったが、それらは既往のデータにおいても発根率が極めて低かったクローンであったことから、結果への影響は少なかったと考えられた。過去のクローン別さし木試験については共同研究機関で実施されたものもあり、試験場所やさし木年次・時期が異なったが、それぞれの試験においては同一の条件下で実施されていることから、クローン間の比較は可能と考えている。

73 クローンを平均発根率が高い順に並べ換え、親家系の累積出現率が 100%となる第 44 位までのクローンに絞り込むことによって、当初の 73 クローンそれぞれを構成していた両親家系の遺伝子を漏れなく含むとともに平均発根率が約 12%向上した。これら 44 クローンから生産されたさし木苗は両親家系の構成比率にばらつきはあるものの、苗が海岸現地にランダムに植栽された後の自然交配による次世代以降の種子の遺伝的な多様性は維持できるものと思われた。

福岡県では、絞り込まれた 44 クローンによるハイパーマツ黒採穂園が造成されつつある。また、本研究の成果は研究に協力いただいた福岡県苗組に逐次技術移転しており、「筑前ハイパークロマツ」の名称で生産・出荷され始めている(福岡県 2016)。今後、拡充された採穂園からの採穂可能本数が増加すれば、本研究の成果を活用してマツ材線虫病に極めて強い「筑前ハイパークロマツ」苗の増産が進み、福岡県のみならず県外の海岸クロマツ林の復旧造林が進むものと考えている。

謝 辞

福岡県樹苗農業協同組合マツ部会には電熱温床さし木ならびにクローン別発根率試験の一部について多大の協力をいただくとともに採穂母樹の管理方法などについて多くの示唆をいただきました。また苗木・花き部にはさし木苗の育成方法などについて多くの示唆をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

引用文献

藤本吉幸・戸田忠雄・西村慶二・山手廣太・冬野劭一(1989) マツノザイセンチュウ抵抗性育種事業—技術開発と事業実施 10 か年の成果—。林木育種場研報 7: 1-84。
 福岡県(2016)白砂青松再生へ苗木植栽,「筑前ハイパークロマツ」開発,松くい虫に強靱性。西日本新聞,2016年4月8日朝刊,福岡県版。

二井一禎(2003)マツ枯れは森の感染症—森林微生物相互関係論ノート—。文一総合出版,東京,p.33-54。
 石松 誠(1998)マツノザイセンチュウ抵抗性クロマツの挿し木による増殖。日林九支研論 51: 47-48。
 関西地区林業試験研究機関連絡協議会育苗部会(1980)樹木のふやし方。農林出版(株),東京,p.27。
 岸 洋一(1988)マツ材線虫病—松くい虫—精説。トーマスカンパニー,東京,p.1-292。
 町田英夫(1974)さし木のすべて。誠文堂新光社,東京,p.144,149。
 真崎修一(2008)挿し付け深さがクロマツの挿し木発根性に及ぼす影響。九州森林研究 61: 110-111。
 松永孝治・大平峰子・倉本哲嗣(2009)さし穂サイズと採穂台木の形態的要因がクロマツさし木苗の生産効率に与える影響。日林誌 91: 335-343。
 宮原文彦(1997)スーパーまつ生産技術の民間移転。現代林業 375: 53。
 森 康浩・宮原文彦(2002)クロマツの挿し木増殖における発根条件の検討(Ⅱ)用土,前処理,電熱温床の効果。九州森林研究 55: 134-135。
 森 康浩・宮原文彦・後藤 晋(2004)クロマツのマツ材線虫病抵抗性種苗生産における挿し木技術の有効性。日林誌 86: 98-104。
 森下義郎・大山浪雄(1972)造園木の手引き／さし木の理論と実際。地球出版(株),東京,p.279-281。
 大平峰子・倉本哲嗣・平岡裕一郎・岡村政則・藤澤義武(2005)クロマツのさし木発根性と成長に及ぼす用土および施肥の影響。九州森林研究 58: 155-156。
 大平峰子・宮原文彦・森 康浩・宮崎潤二・真崎修一・山田康裕・白石 進(2007)さし木繁殖によるマツ材線虫病抵抗性クロマツ苗生産技術の開発。林木の育種「特別号」2007: 29-32。
 大平峰子・倉本哲嗣・藤澤義武・白石 進(2009)マツ材線虫病抵抗性クロマツのさし木苗生産における密閉さしの有効性。日林誌 91: 266-276。
 大平峰子・宮原文彦・森 康浩・大川雅史・宮崎潤二・真崎修一・吉本貴久雄・佐々木義則・山田康裕・三樹陽一郎・田上敏彦・小山孝雄・宮里 学・鳥羽瀬正志・黒田慶子・岡村政則・松永孝治・白石 進(2010)クロマツの第二世代マツ材線虫病抵抗性種苗生産システムの構築。林木の育種 235: 1-5。
 佐々木峰子・倉本哲嗣・平岡裕一郎・岡村政則・藤澤義武(2004)クロマツのさし木発根性に及ぼす摘葉・摘芽の影響。日林誌 86: 37-40。
 戸田忠雄(2004)アカマツおよびクロマツのマツ材線虫病抵抗性育種に関する研究。林木育種センター研報20: 83-217。
 林野庁(2000)林業技術ハンドブック。全国林業改良普及協会,東京,p.413。