マツ材線虫病抵抗性クロマツの挿し木苗生産システムの開発

誌名	福岡県森林林業技術センター研究報告
ISSN	13418092
著者名	森,康浩 宮原,文彦 後藤,晋
発行元	福岡県森林林業技術センター
巻/号	7号
掲載ページ	p. 1-19
発行年月	2006年7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

マツ材線虫病抵抗性クロマツの挿し木苗生産システムの開発

森　康浩・宮原　文彦・後藤　晋*

Clonal propagation of nematode-resistant Japanese black pine plantlet by cutting.

Yasuhiro MORI, Fumihiko MIYAHARA and Susumu GOTO

森　康浩，宮原　文彦，後藤　晋：**マツ材線虫病抵抗性クロマツの挿し木苗生産システムの開発** 福岡県森林研報７：１～ 19，2006　マツ材線虫病抵抗性クロマツの効率的な苗木生産システムを開発するため，接種検定に合格したクロマツ健全個体から挿し木増殖を行い，挿し木苗の増殖効率，マツ材線虫病抵抗性，現地適応性を検討した。挿し木の環境条件を検討した結果，２～４月に鹿沼土とバーミキュライトの混合土に穂を挿し付けて，ガラス温室でミスト灌水を行うという方法で挿し木を行った。この方法での平均発根率は，35.5 %とやや低い値であったが，電熱温床を用いて挿し床を加温した結果，54.7 %へと有意に向上した。また，挿し穂の切り口を市販のオキシベロン液剤 100 倍希釈液（IBA:0.004 %）に一昼夜浸漬した後にオキシベロン粉剤（IBA:1.0 %）塗布を行うか，オキシベロン液剤原液（IBA:0.4 %）に数秒間だけ浸漬するという方法が発根に効果的であった。採穂園の造成を想定すると，採穂母樹の加齢による発根率の低下が懸念され，どのくらいの期間まで採穂母樹として使用可能かについて検討する必要がある。そこで，同じ採穂母樹について３年生から９年生まで毎年挿し木を行った結果，少なくとも８年生時点までは発根率の低下が認められないことが明らかになった。また，採穂母樹ごとに発根率の年次相関を調べた結果，発根の難易が採穂母樹によってある程度決まっていることが示唆された。次に，挿し木苗の抵抗性を調べるため，接種検定に合格した個体から増殖した挿し木苗に接種検定を行った。その結果，健全率は３年間で，61.0 ～ 71.1 %と高いレベルで安定しており，接種検定不合格個体から増殖した挿し木苗や現行の抵抗性苗木の健全率を毎年上回った。さらに，強病原性のマツノザイセンチュウを複数回接種しても発病しない個体から増殖した挿し木苗は，接種後の健全率が 97.7 %と極めて高い値を示した。一方，挿し木苗は２年生時点での得苗率（規格に合致する苗木の割合）が 16.6 %と低く，挿し付け後２年で出荷するには，挿し穂のサイズや施肥などの管理方法についてさらに検討する必要があると思われた。しかし，３年生時点での得苗率は 74.6 %と高まり，これらを海岸林に植栽した結果，植栽後３年目時点でも 94.1 %と高い活着率を示した。

以上の結果から，採穂母樹を強病原性のマツノザイセンチュウを用いた接種検定で厳しく選抜し，２年生で出荷できるように改良できれば，挿し木による抵抗性苗木生産システムは，現行の実生苗方式に比べて，生産性，抵抗性が改良され，現地適応性も備えた，有効な手段となると考えられた。

キーワード：クロマツ，クローン，挿し木，マツノザイセンチュウ，マツ材線虫病抵抗性

なお，本研究は国庫助成研究「有用林木遺伝資源植物のバイテクによる保存と増殖技術の開発」（平成８～ 15 年度）を用いて実施したものである。また，データの一部は日本林学会誌第 86 巻 2 号 p98-104，日本森林学会誌第 88 巻 3 号 p197-201 に掲載された。*東京大学北海道演習林

1．はじめに

マツ材線虫病は，マツノザイセンチュウ（*Bursaphelenchus xylophilus,* 以下，線虫とする）という体長1 mmに満たない線虫が引き起こすマツの萎凋病である（森林総合研究所，1999)。行政用語では，「マツクイムシ被害」ともいわれている。日本のみならず，韓国や福岡県の友好姉妹都市である中国の江蘇省でも発生しており（二井，2003)，東アジアを中心に被害が拡大している。近年では，ポルトガルでヨーロッパ初の被害報告があり（Mota *et al.*, 1999)，世界的にも深刻な問題になっている。日本では，昭和54年(1979年)が被害のピークとされ，その後，被害量は漸減している（林野庁，2005)。福岡県における平成16年度(2004年度)の民有林の被害量は555 m^3で被害はやはり減少傾向にあるが（福岡県，2005)，これについてはマツそのものが壊滅的な被害で減少したためだと考えられ，決して楽観視はできない。

福岡県では，防風防砂林であるクロマツ（*Pinus thunbergii*）の保全に対する県民の要望が高く，5つの住民団体が保全活動を続けている。クロマツを本病から守るには，線虫の媒介者であるマツノマダラカミキリ（*Monochamus alternatus*）を防除する方法が効果的である。そのために，海岸クロマツ林をもつ地元自治体では農薬スミチオンをヘリコプターなどで毎年散布している。しかし，農薬の効果は永年的に持続するものではないので，毎年多額の予算を投じて散布しなければならない。また，環境問題に敏感な現代社会においては，今後は農薬散布が受け入れにくくなることも予想される。そこで，福岡県では根本的な解決策として，マツ材線虫病抵抗性（以下，抵抗性とする）を備えた苗木を生産し，これを被害跡地に植栽していく施策が展開されている。

福岡県で生産されている抵抗性のクロマツの苗木は，「筑前スーパーくろまつ」と呼ばれている（宮原，1997)。この苗木の生産は，抵抗性のクロマツ同士が交配するように設計した採種園から種子を採取し，実生苗を育てることから始まる。その後，これら育苗した苗木1本1本に病原体の線虫を接種し，一定期間経過後に発病しなかったものだけが，「筑前スーパーくろまつ」として出荷されている。この接種作業は「筑前スーパーくろまつ」の生産において非常に重要な行程である。なぜなら，抵抗性のクロマツ同士が交配してできた苗木といっても，必ずしも抵抗性を持っているとは限らないからである。したがって，この接種作業は，できた苗木が抵抗性かどうかを検定するという意味をもつ。しかし，接種検定作業は，苗木の生産者と消費者の双方にデメリットをもたらす。つまり，生産者にとってのデメリットは，線虫を培養するための設備と管理が必要なこと，また，炎天下で苗木1本1本に接種検定を行わなければならないなど，生産性が非常に悪い点である。一方，消費者にとってのデメリットは，この接種検定作業そのもののコストや接種検定で苗木の約半数が枯死するというロスが苗木価格に反映されるため，1本が640円（福岡県森林組合連合会，2006）と非常に高い苗木を購入しなければならないことである。

このような背景から，接種検定の不要な苗木生産システムを確立する必要が出てきた。そこで，われわれは，接種検定に合格した貴重な抵抗性の苗木をクローン増殖しようと考えた。つまり，一度接種検定で抵抗性を確認した苗木のクローンは，もとの苗木と遺伝子が同じなので，増殖した苗木を出荷のたびに検定する必要がなくなるという戦略である。

最初のアプローチとして，まず組織培養技術により苗木をインビトロで（試験管内で）クローン増殖することにした。その結果，培養期間を短縮させたり増殖率を高める培養条件を探索でき（後藤，1999a)，試験管内での発根まで成功した（後藤・宮原，1997)。しかし，培養シュートの伸長を効率よく促進できず，大量増殖は困難であると判断された。

そこで，挿し木によるクローン増殖を試みた。クロマツなどマツ属（*Pinus*）の挿し木は古くから大変困難とされ（戸田，1953；小笠原，1962；大山・豊島，1965；町田，1973；Kozlowski and Pallardy, 1997)，クロマツの挿し木は一般に行われてこなかった。本研究では，これまで検討されてこなかったクロマツの挿し木に取り組み，その実行

可能性について検討した。さらに，得られた挿し木苗のマツ材線虫病抵抗性についても検討した。最後に，得られた知見をもとに，挿し木による抵抗性苗木の生産システムの構築の可能性について考究した。

2．用土の検討

・目的

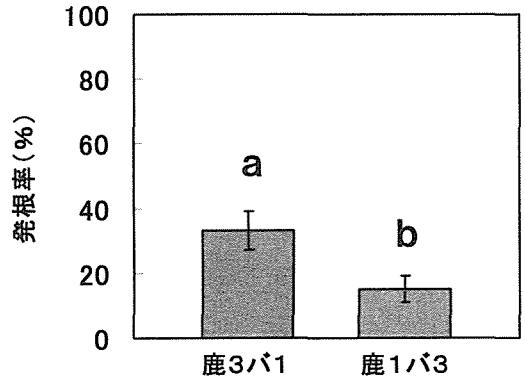
日本では，古くから様々な樹木の挿し木に鹿沼土が使われてきた(佐々木ら，1977；三上ら，1978；戸田・藤本，1983；徳岡・竹岡，1990；徳岡，1993)。鹿沼土は多孔性団粒状の火山灰性土壌で，通気性とともに粒子に保水性もある，優れた挿し木用土の一つである（町田，1973)。一方，バーミキュライトは諸外国でもよく用いられる用土の一つである（Goh *et al.*，1995；Tartoura *et al.*，2004)。バーミキュライトは，蛭石（ひるいし）（黒雲母が風化したもの）を高熱で焼いた無菌的な土壌で，これも保水性と通気性がある（町田，1973)。その他，挿し木の用土としては，赤土，川砂，パーライト，ピートモスなどがあるが，最もポピュラーな鹿沼土とバーミキュライトの混合用土を試すことにした。その際，混合比を検討するため，鹿沼土とバーミキュライトの混合比を３：１にした場合と，比率を１：３と逆にした場合とで発根率を比較した。

・実験と方法

採穂母樹は，抵抗性クロマツ「川内ク－290号」と「志摩ク－64号」の実生家系から挿し木増殖した５年生の14個体と，「志摩ク－64号」家系の７年生実生苗４個体の計18個体とした。各採穂母樹から，２月中旬に10～20本ずつ当年枝を採取した。これら当年枝は一昼夜流水にさらして水上げした後，冬芽の根元から５ cm の部位を鋭利なナイフで斜めにカットした。さらに，針葉を５～６束と冬芽を１個だけ残し，他の針葉と冬芽は全て除去して，挿し穂を調製した。その後，オキシベロン原液の100倍希釈液（IBA：0.004 %）に一昼夜浸漬し，さらに挿し付け直前にオキシベロン粉剤（IBA：1.0 %）を切り口に塗布した。挿し床は，鹿沼土３：バーミキュライト１の混合土（以下，鹿３バ１区とする）と，鹿沼土１：バーミキュライト３（以下，鹿１バ３区とする）の混合土の２種を用意し，育苗箱に敷き詰めた。両用土とも粒径は中粒のものを用いた。採穂母樹の要因を排除するため，１つの採穂母樹から得られた挿し穂の半数は鹿３バ１区に，残り半数を鹿１バ３区に挿し付けた。灌水は，１日４回（３分／回）のガラス室内ミスト灌水とした。８ヶ月後の10月下旬に発根調査を行い，採穂母樹ごとに算出した発根率の平均を両区で比較した。

・結果と考察

両区の平均発根率を図－１に示す。発根率は鹿１バ３区が16.4 %であったのに対し，鹿３バ１区では32.7 %と有意に高かった（対応のあるｔ検定：$p < 0.01$)。鹿沼土もバーミキュライトも中粒を用いたが，前者の方が粒径はかなり大きいため，鹿沼土を多くした方がバーミキュライトを多くした場合よりも水はけがいいと考えられる。鹿沼土とバーミキュライトでは含有養分の質や量が全く異なるため断言はできないが，水はけのいいことが発根に有利な影響を及ぼした可能性もある。各用土の単価は，バーミキュライト13.0円／Ｌに比べ，鹿沼土が26.2円／Ｌと２倍も高い。したがって，発根率に違いがなければバーミキュライトが多い方が有利と考えられる。しかし，両試験区で発



図－１．鹿沼土とバーミキュライトの混合比が発根率に及ぼす影響

平均発根率±標準誤差を示す。
異なるアルファベットは，有意差があったことを表す（対応のあるｔ検定，$p < 0.01$)。

根率に有意差がみられたので，発根した挿し木苗1個体あたりの用土コストを計算した。育苗箱1箱（16L）あたり30本挿し付けて今回の発根率が得られたと仮定すると，鹿1バ3区では53.02円／個体であったのに対し，鹿3バ1区では37.37円／個体となった。したがって，発根率まで考えると，鹿沼土を多く配合した鹿3バ1区の方が低コストで挿し木苗が得られると考えられた。

3．挿し付け時期の検討

・目的

挿し木に適する時期は，樹種によってそれぞれ異なる（町田，1973）。クロマツでも過去に挿し木適期を調べた報告はいくつかみられるが（石川，1968；石松，1998），それぞれ挿し付け条件や材料が異なり，今のところ適期について統一した見解は得られていない。そこで，材料と条件を揃えた上でクロマツの挿し木適期を明らかにすることにした。不定根を発生させるのに必要な養分は，挿し穂に用いる枝の残留養分に依存すると考えられる。クロマツでは，一般に4月頃から前年枝の頂点につけた冬芽が伸長を始める。したがって，挿し穂として用いる前年枝に蓄積された養分の状態が4月以降とその前では異なると考えられる。そこで，冬芽の伸長前の2月中旬と冬芽の伸長が観察され始めた4月中旬に挿し木を行い，発根率を比較した。

・実験と方法

試験は，2002年と2003年の2ヵ年にわたって行った。

2002年の採穂母樹は，抵抗性クロマツ「川内ク－290号」の実生家系から挿し木増殖した3年生の31個体とした。2月20日と4月19日に，同じ採穂母樹からそれぞれ3本ずつ当年枝を採取した。これら当年枝はいずれも前項2の試験と同様に，5 cmの挿し穂を調製した後，オキシベロン原液の100倍希釈液（IBA：0.004 %）に一昼夜浸漬し，挿し付け直前にオキシベロン粉剤（IBA：1.0 %）を切り口に塗布するという処理を行った。なお，挿し床には育苗箱に前項の試験で挿し木に有利と考えられた鹿沼土3：バーミキュライト1の混合土を敷いたものを用いた。灌水条件も前項の試験と同様のミスト灌水を行った。翌年2月5日に発根調査を行い，発根率を比較した。

2003年の採穂母樹は，抵抗性クロマツ「川内ク－290号」と「志摩ク－64号」の実生家系から挿し木増殖した4年生の17個体と，「志摩ク－64号」家系の6年生実生苗4個体の計21個体とした。2月19日と4月16日に，同じ採穂母樹からそれぞれ5本ずつ当年枝を採取した。実験の条件は2002年の試験と全く同様にし，同年12月17日に発根調査を行い，発根率を比較した。なお，2003年の試験では，挿し付け時に全ての穂の冬芽の長さをノギスを使って測定した。

・結果と考察

2ヵ年にわたる2月挿しと4月挿しの発根率について，表－1に示す。2002年では，2月が46.2 %，4月が48.4 %，2003年では，2月が26.7 %，4月が26.7 %と，いずれの年も2月挿しも4月挿しも有意差がなかった（対応のあるt検定：$p > 0.05$）。

表－1．2月挿しと4月挿しの発根率

挿し付け日	採穂母樹数	挿し付け数	発根率（%） 平均値 ± 標準誤差
2002年 2月20日	31	93	46.2 [a] ± 6.5
4月19日	31	93	48.4 [a] ± 6.7
2003年 2月19日	21	105	26.7 [a] ± 6.9
4月16日	21	105	26.7 [a] ± 5.7

異なるアルファベットは，その年の2月と4月の結果に有意差があったことを表す（対応のあるt検定，$p < 0.01$）。

次に，2003年の挿し付け時に冬芽の長さを測定したので，発根した挿し穂としなかった挿し穂の2つのグループに分けて，冬芽の長さを比較した（表－2）。その結果，2月挿しで発根したグループの平均値は20.9mm，発根しなかったグループは25.1mm，4月挿しで発根したグルー

プは38.1mm，発根しなかったグループは47.7mm と，いずれも発根しなかったグループの方が有意に冬芽の長さが長かった（t 検定，$p < 0.05$）。これは，挿し穂として用いる当年枝の養分が冬芽の伸長に消費され，不定根形成に必要な養分がその分不足したことが原因の一つとして考えられた。また，佐々木ら（2004）は挿し付けの際，冬芽の一部または全部を除去すると発根性が向上することを報告しており，その理由の一つとして我々の考察と同じように，冬芽の伸長による栄養物質の消費が抑制されたことを挙げている。これらのことから，2～4月に挿し木を行う場合，冬芽があまり伸長していないものを挿し穂として選んだ方が発根しやすいと考えられた。

表－2．発根した穂と未発根の穂の冬芽長さの違い

挿し付け日	発根の有無	挿し穂数	冬芽長さ（mm） 平均値 ± 標準誤差
2003年 2月19日	発根	28	20.9 [a] ± 1.7
2月19日	未発根	77	25.1 [b] ± 1.1
2003年 4月16日	発根	28	38.1 [a] ± 3.1
4月16日	未発根	77	47.7 [b] ± 2.9

異なるアルファベットは，それぞれの挿し付け日において，発根と未発根の挿し穂の結果に有意差があったことを表す（対応のある t 検定，$p < 0.05$）。

一方，冬芽の長さとしては4月の方が2月に比べて明らかに伸長しており，もしも冬芽が長いと発根に不利であるという仮説が正しいならば，4月挿しの方が不利である。しかし，結果的に2月挿しも4月挿しも発根率が変わらなかったことから，冬芽のステージ以外の要因，例えば，気温や地温が2月よりも4月の方が適していた可能性もある。これについては，次項で検討する。

4．発根促進処理方法の検討

前項までの試験結果から，ミスト室で鹿沼土3：バーミキュライト1の混合土に挿し木をすると発根成績が最もよかった。挿し付け時期については，2月と4月では，発根率はほとんど変化しないことが明らかになった。本項では，基本的にこれらの条件を採用して，さらに発根率を向上させるための処理を開発することを目的とした。

1）電熱温床の効果

・目的

前項3の挿し付け時期の試験結果から，挿し穂の冬芽のステージとしてはあまり伸長していない2月の状態がよく，環境としては2月よりも4月のよい可能性が示唆された。そこで，冬芽がまだ伸長しきっていない2月に採穂し，温かい挿し床環境を人工的につくることで発根率を向上できないかと考えた。挿し木では，地温を温めるのに電熱温床を使うことがある。アカマツ（*Pinus densiflora*）（沖村，1961），マツ属（*Pinus*）数種（大山・豊島，1965），秋田スギ（*Cryptomeria japonica*）（武田，1970），ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）（塩川，1995）など，針葉樹の挿し木には挿し付け後の地温を電熱温床で加温することによって発根率が向上することが知られている。そこで，クロマツでも効果がみられるかを調べることにした。

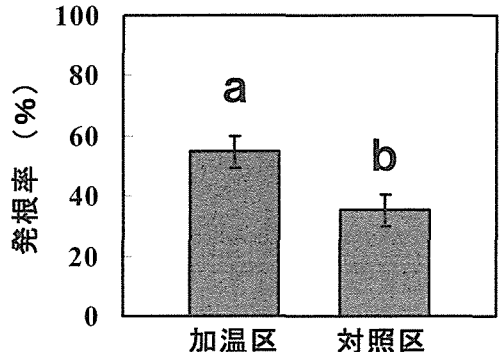
・実験と方法

採穂母樹は，抵抗性クロマツ「川内ク－ 290 号」家系の6年生実生苗 32 個体とした。各採穂母樹から，2月下旬に7～ 10 本ずつ当年枝を採取した。挿し穂の調製は前項までの方法で行い，挿し付け直前にオキシベロン粉剤（有効成分：IBA 1.0%）を切り口に塗布した。なお，オキシベロン液剤への浸漬は行わなかった。挿し床は，電熱温床によって加温した挿し床（以下，加温区とする）と，電熱温床を使わない挿し床（以下，対照区とする）を用意し，いずれも鹿沼土3：バーミキュライト1の混合土を育苗箱に敷き詰めた。加温区は，保温効果を上げるため用土の底に厚さ1 cm の発泡スチロール板（25 × 45cm）を敷き，その上に 30 × 60cm の（有）國領電気製作所製の電熱温床マッ

ト「ファーマット」(S－125) を重ねて敷設した。さらに，用土表面の温度を感知し，15 ℃～ 25 ℃に保つことのできる（有）國領電気製作所製サーモスタット「園芸チャーム」を設置し，挿し付け開始から6月上旬まで床温を 15 ～ 25 ℃に維持した。採穂母樹による発根の難易の違いを排除するため，1つの採穂母樹から得られた挿し穂の半数は加温区に，残り半数を対照区に挿し付けた。灌水は前項までと同様のミスト灌水を行い，排水を良くするため，桟木を用いて育苗箱を約5°傾けた。1年2ヵ月後の翌年4月上旬に発根調査を行い，採穂母樹ごとに算出した発根率の平均を両区で比較した。

・結果と考察

加温区と対照区の発根率を図－2に示す。発根率は，対照区が 35.5 %であったのに対し，加温区では 54.7 %と有意に高かった（対応のある t 検定，$p < 0.01$)。町田 (1973) は，発根に適当な挿し床内の温度は多くの樹種で 23 ±2 ℃程度がよいが，挿し穂の蒸散抑制のためには挿し床上部の温度はこれよりやや低めにした方がよいとしている。本試験の挿し付け時期は2月下旬であり，地上の環境は，挿し穂の蒸散抑制のためには適期であるが，挿し床内部の温度は適温よりかなり低いと考えられる。加温区では，電熱温床により挿し床内部が加温され不定根の誘導が起こり，高い発根率が得られたと考えられた。



図－2．発根に及ぼす加温の効果

平均発根率±標準誤差を示す。
異なるアルファベットは，有意差があったことを表す（対応のある t 検定，$p < 0.01$)。

2）植物ホルモン処理の効果

・目的

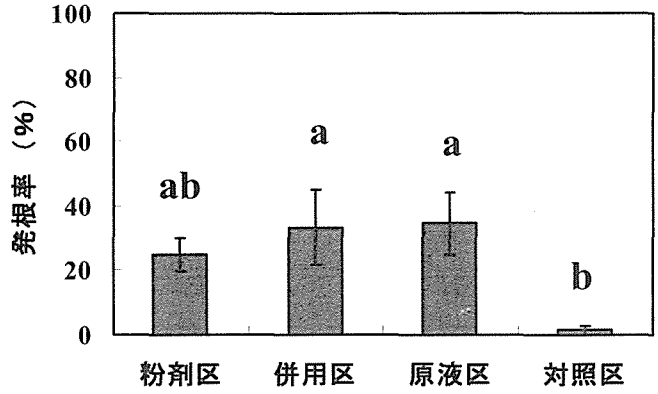
不定根発生には，植物ホルモンの一つであるオーキシンが中心的な役割を担うといわれており (Blakesley 1994；De Klerk *et al* 1999)，世界中の多くの植物の挿し木に IBA(インドール-3-酪酸) が用いられている (Hartman *et al* 1990)。日本では，園芸用のオーキシン剤として，IBA を有効成分とするオキシベロン（バイエルクロップサイエンス株式会社製）が市販され，様々な樹木の挿し木に用いられている（上中ら，1986；川村，1988)。オキシベロンは，タルク粉末に混ぜた粉剤と液剤とが市販されている。クロマツの発根を促進するには，このホルモン剤をどのように処理すべきか検討した。

・実験と方法

採穂母樹は，抵抗性クロマツ7家系の6年生実生苗9個体とした。各採穂母樹から，2月中旬に 32 本ずつ当年枝を採取した。挿し穂の調製は前項までの方法で行い，4つの試験区を設けて，以下に示すようなホルモン処理を行ってから挿し付けした。各試験区の処理内容は，①挿し付け直前にオキシベロン粉剤（IBA：1.0 %）を切り口に塗布したもの（以下，粉剤区とする)，②オキシベロン原液の 100 倍希釈液（IBA：0.004 %）に一昼夜浸漬後，さらに挿し付け直前にオキシベロン粉剤（IBA：1.0 %）を切り口に塗布したもの（以下，併用区とする)，③挿し付け直前にオキシベロン原液（IBA：0.4 %）に切り口を数秒間浸漬したもの（以下，原液区とする)，④ホルモン処理は一切行わなかったもの（以下，対照区とする）である。挿し床は，鹿沼土3：バーミキュライト1の混合土を育苗箱に敷き詰めたものを用いた。採穂母樹の要因を排除するため，1つの採穂母樹から得られた挿し穂を8本ずつ，各試験区に割り振って挿し付けた。灌水は前項と同様にミスト灌水とした。10 ヶ月後の 12 月中旬に発根調査を行い，採穂母樹ごとに算出した発根率の平均を各試験区で比較した。

・結果と考察

各オキシベロン処理別の発根率について，図－3に示す。平均発根率は粉剤区が 25 %，併用区が 33 %，原液区が 35 %，対照区が1%であった。Tukey の範囲検定により多重比較したところ，原液区と対照区，併用区と対照区の間に有意な差が認められた。対照区はほとんど発根することはなく，オーキシン処理がクロマツの挿し木に必須であることが確かめられた。後藤（1999b）は，本試験と同じ条件で併用区と粉剤区の発根率を比較し，前者が 87.5 %，後者が 50.0 %と併用区が非常に高かったことを報告している。しかし，後藤(1999b)の報告では両区の採穂母樹が異なるため，併用区に用いた採穂母樹がもともと発根しやすかった可能性が指摘されていた。一方，原液での処理については，石松（1999）が 40 倍希釈液に浸漬した処理と同程度以上の効果があったことを報告し，その後，宮崎（2003，2004，2005，2006），佐々木ら（2003，2004），大平ら（2005a）が使用している常法である。しかし，これらの報告では併用処理との比較はない。今回，採穂母樹の要因を排除して同じ条件でこれらの処理を比較した結果，オキシベロンの液剤を用いた併用処理または原液処理が発根促進に有効であることが明らかになった。



図－3．オキシベロン処理別の発根率の比較

平均発根率±標準誤差を示す。
異なるアルファベットは，有意差があったことを表す（Tukey の範囲検定，$p < 0.01$）。

5．採穂母樹の加齢と個体差の影響

・目的

事業レベルでの挿し木苗生産を行うには，採穂母樹を定植して採穂園を造成することが必要である。しかしながら，採穂母樹が加齢とともに発根しにくくなるという現象が多くの樹種で指摘されており（Gardner，1929；大山，1962；町田，1973；Hackett,1988；宮島，1989；Eriksson and Ekberg，2001），採穂母樹が何年まで発根能力を維持できるかは，耐用年数を知る上で明らかにすべき課題である。また，スギやヒノキでは品種ごとに発根率が異なることが知られており（戸田・藤本，1983；上中ら，1986；宮島，1989），クロマツでも発根率に個体差があると考えられる。個体ごとに発根の難易があるかどうかは，それによって挿し木増殖効率が大きく左右されるため，苗木生産システムを確立する上で欠かせない情報の一つである。本項では，採穂母樹が3年生から9年生に成長するまで毎年同じ条件で挿し木を行い，採穂母樹の加齢と個体差が発根率に及ぼす影響を調査した。

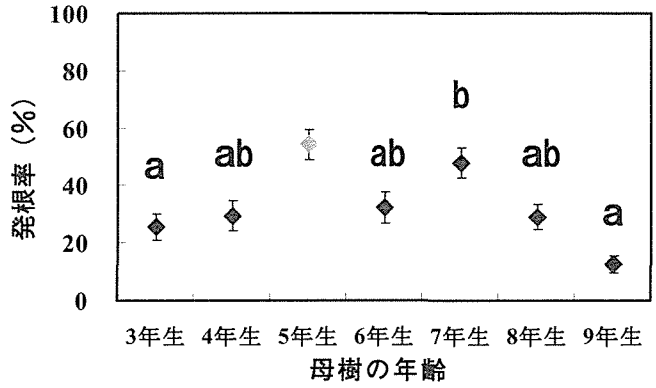
・実験と方法

採穂母樹は，抵抗性クロマツ「川内ク－ 290 号」の実生苗 36 個体とした。各採穂母樹から，1998 年から 2004 年まで毎年2月中下旬に5～ 10 本ずつ当年枝を採取した。採穂母樹の一部が試験期間中に枯死や衰弱などにより採穂できなくなったが，最低 30 個体は採穂母樹として使用を続けた。挿し穂の調製は前項までの方法で行い，挿し付け直前にオキシベロン粉剤（有効成分：IBA 1.0%）を切り口に塗布した。なお，2000年の挿し木では，挿し付け時期とホルモン処理方法の2条件がその他の年と異なるため，参考までに発根率のみを示し，統計解析は行わなかった。挿し床は，前項までと同様に鹿沼土3：バーミキュライト1の混合土を育苗箱に敷き詰めたものを用いた。灌水も前項までと同様のミスト灌水を行った。いずれの年も挿し付け当年の7月～翌年4月に発根調査を行い，採穂母樹ごとに

算出した発根率の平均を各年で比較した。

・結果と考察

採穂母樹の年齢と発根率の関係を図－4に示す。各採穂母樹の平均発根率は採穂母樹の年齢が3年生時に 25.6 %，4年生時に 29.5 %，5年生時に 54.3 %（他の年と条件が異なる），6年生時に 35.5 %，7年生時に 47.9 %，8年生時に 29.0 %，9年生時に 12.6 %と変化した。Tukey の範囲検定により多重比較したところ，7年生時の発根率が3年生時（5%水準）や9年生時（1%水準）に比べて有意に高いという結果となった。挿し木を行っているガラス温室内は周囲の気温や湿度に多少の影響を受けるため，挿し付け開始後3ヵ月間の月平均気温や月降水量（気象庁の久留米アメダスのデータ）を各年で比較した。しかし，7年生時の 2002 年だけが発根率が高くなったことを裏付ける気象データは得られなかった。また，採穂母樹の当年枝の発育ステージが 2002 年だけ異なっていた可能性もあるが，その点は未確認であり，今のところ原因は不明である。前述のとおり，樹木の挿し木では採穂母樹の加齢により発根率が低くなることが知られており，クロマツにおいても，年齢の高い採穂母樹からの挿し木の発根率は極めて低いことが報告されている（小笠原，1962）。しかし，この報告は異なる個体を採穂母樹に用いて得られた結果であり，材料の個体差の影響は検討されていない。本試験では，毎年同じ個体を採穂母樹として用い，個体差の影響を排除して試験を行った。その結果，採穂母樹が8年生までは発根率の急激な低下は認められなかった（図－4）。これは，採穂母樹の年齢が3～5年になると急激に発根しにくくなるとする大山・豊島（1965）の報告や，4～6年が発根率の衰え始める移行期であるとする Browne *et al.*（1997）の報告と異なっていた。Copes（1983）は，ダグラスファー（*Pseudotsuga menziesii*）の挿し木試験において，採穂母樹の年齢が上がっても発根率が低下しないことを報告し，毎年の剪定によって採穂母樹の生理活性が保たれたのが要因ではないかと考察している。本試験では採穂母樹に対して夏期に剪定を実施しており，また，採穂自体も剪定を兼ねている。したがって，本試験でも剪定により挿し穂の生理的齢（橋詰・谷口，1981）が若く保たれ，発根率の低下が回避できたのではないかと考えられる。しかしながら，9年生時は他の年に比べて発根率が減少している。今後も引き続き経過を見守る必要があるが，将来的に採穂園の造成を行った場合，採穂母樹は8年程度で植え替えが必要と考えられた。



図－4．採穂母樹の加齢が発根に及ぼす影響

平均発根率±標準誤差を示す。
異なるアルファベットは，有意差があったことを表す（Tukey の範囲検定，$p < 0.05$）。
◆：5年生時は，他の年と条件が異なるので，統計解析は行わなかった。

次に，これら採穂母樹ごとの発根率について年次相関を求めた（表－3）。その結果，3年生時と9年生時の相関係数は 0.12 と低かったが，その他は各年齢間で相関係数は 0.44 ～ 0.67 と統計的に有意であった。これまでに，クロマツの発根率の個体差を指摘する報告は多く挙げられるが（戸田，1953；大山・豊島，1965；石松，1999；後藤，

表－3．採穂母樹ごとの発根率の年次相関

	採穂母樹の年齢					
採穂母樹の年齢	3	4	6	7	8	9
3	–	–	–	–	–	–
4	0.46 **	–	–	–	–	–
6	0.56 **	0.44 *	–	–	–	–
7	0.55 **	0.67 **	0.61 **	–	–	–
8	0.51 **	0.46 **	0.62 **	0.54 **	–	–
9	0.12 NS	0.60 **	0.48 **	0.54 **	0.47 **	

値は相関係数を表す（NS $p > 0.05$、* $p < 0.05$、** $p < 0.01$）。

1999b；宮崎，2003)，本試験においても，発根の難易が採穂母樹ごとに決まっており，その傾向は挿し付ける年が違っても変わらないことが示唆された。特に，本試験に用いた採穂母樹の中には，7年間の平均発根率が 60 %以上のものが3個体認められた。仮に，これら3個体のみを用いて挿し木を行った場合，平均発根率はそれぞれ3年生で53 %，4年生で74 %，6年生で85 %，7年生で90 %，8年生で80 %，9年生で43 %となる。このように，発根率の高い個体を採穂母樹として選抜すれば結果として発根率が向上し，効率的な挿し木苗生産が可能になると考えられた。

6．挿し木苗の抵抗性

本研究の目標は，「線虫接種検定に合格した苗木から挿し木増殖すれば抵抗性の高い苗木が得られること」を前提に，接種検定の省略を図ることである。しかし，接種検定に合格した苗木のクローンが本当に抵抗性が高いかどうかについては，宮崎・石松（2002）の報告以外に例がなく，データが極めて少ない。そこで本項では，挿し木苗の抵抗性を調べ，この前提が成り立つのかを検証した。さらに，抵抗性の高い挿し木苗を効率的に生産していくために，採穂母樹の選抜方法を検討し，その効果を実証した。

1）検定合格クローンの抵抗性

・目的

上述の前提を証明するためには，挿し木苗の絶対的な評価よりも相対的な評価の方が示しやすい。そこで，接種検定に合格した採穂母樹群と不合格の採穂母樹群の双方から挿し木を行い，得られた挿し木苗に接種検定を行い，両者の抵抗性を比較した。なお，接種検定に合格した採穂母樹群から挿し木を行えば，毎年安定した抵抗性レベルをもつ苗木が生産できるかどうかを調べるために，この試験は3年間繰り返し行った。

・実験と方法

接種検定に合格した採穂母樹群と不合格の採穂母樹群をつくるため，「川内ク－290号」家系の実生苗38個体に，以下の方法で線虫の接種検定を行った。つまり，1999年7月に実生苗1個体につき線虫島原個体群（藤本ら，1989）約6,000頭を改良剥皮接種法（藤本ら，1989）で接種した結果，健全15個体，部分枯れ23個体の2つに分けられた。そこで，両個体群を採穂母樹として，2000年4月，2001年2月，2002年2月と連続する3年間に，前項5の方法で挿し木を行った。発根した挿し木苗はいずれも挿し付けた翌年の春に苗畑に移植し，さらに次の年の春に別の苗畑に床替えした。それぞれ床替えが完了した2002～2004年の7月に，つまり，挿し木苗が2年生になった時点で接種検定を行った。接種条件は，採穂母樹に対するものと同様とし，接種から6ヵ月以上経過した時点で病徴の進展を観察し，健全，部分枯れ，枯死の3段階に分類した（以下，接種に対する病徴進展の観察では，同様に3段階の評価を行った)。この結果をもとに，各接種年とも1クローンあたり複数個体に接種を行うことができた挿し木苗のみを対象に，以下の解析を行った。各接種年ごとに，接種検定に合格した健全採穂母樹群から増殖した挿し木苗と不合格の部分枯れ採穂母樹群から増殖した挿し木苗とに分けて，健全，部分枯れ，枯死の本数割合を集計した。また，挿し木苗の抵抗性が採穂母樹と接種年のどちらに影響を受けるかを調べるために，採穂母樹の抵抗性（健全，部分枯れ）と接種年を要因にして，健全率についての二元配置の分散分析を行った。さらに，挿し木苗の抵抗性がクローンごとに決まっているかどうかを調べるために，採穂母樹ごとに挿し木苗の健全率を算出し，各接種年間での年次相関を求めた。

・結果と考察

採穂母樹の抵抗性別にみた挿し木苗の3年間の接種結果を表－4に示した。健全採穂母樹群から増殖した挿し木苗の健全率は，2002年が61.0 %，2003年が66.7 %，2004年が71.1 %といずれの接種年も60 %を上回った。また，健全，部分枯れ，枯死の本数割合を各接種年間で比較したところ有意差は認められず（χ^2検定，$p > 0.05$)，この

傾向は接種年間で変わらず安定していた。一方，接種検定で不合格の部分枯れ採穂母樹群から増殖した挿し木苗の健全率は，2002年が35.1％，2003年が19.6％，2004年が58.4％と，年変動が大きかった。さらに，健全，部分枯れ，枯死の本数割合は接種年間で有意に異なっており（χ^2検定，$p < 0.01$），接種反応結果は接種年ごとにばらついた。このことから，健全採穂母樹群から増殖した挿し木苗は，部分枯れ採穂母樹群からの挿し木苗に比べて健全率が常に高く，年変動も小さいことが明らかになった。現在，福岡県におけるクロマツの抵抗性苗木の事業生産では，抵抗性採種園産の自然交配実生苗に対して，本研究と同様に，島原個体群を1個体あたり約6,000頭接種し，健全個体を「筑前スーパーくろまつ」として出荷している。これら事業生産における健全率は，2002年が約33％，2003年が約42％，2004年が約55％である（福岡県樹苗農業協同組合，私信）。本試験では，健全採穂母樹群から増殖した挿し木苗は，同じ3年間の健全率が61～71％であることから，現行の「筑前スーパーくろまつ」よりも生産効率が高まる可能性が示された。

表－4．採穂母樹の抵抗性別にみた挿し木苗の3年間の接種結果

採穂母樹の抵抗性	挿し木年	接種年	採穂母樹数 (本)	1採穂母樹あたり接種本数 mean ± SD (本)	延べ接種本数 (本)	接種結果 健全 (本)	健全 (%)	部分枯れ (本)	部分枯れ (%)	枯死 (本)	枯死 (%)
健全	2000	2002	13	4.5 ± 2.8	59	36	61.0	13	22.0	10	16.9
	2001	2003	12	4.8 ± 1.8	57	38	66.7	11	19.3	8	14.0
	2002	2004	11	6.9 ± 5.9	76	54	71.1	14	18.4	8	10.5
部分枯れ	2000	2002	20	5.6 ± 2.4	111	39	35.1	41	36.9	31	27.9
	2001	2003	18	5.1 ± 2.4	92	18	19.6	38	41.3	36	39.1
	2002	2004	18	4.9 ± 2.6	89	52	58.4	26	29.2	11	12.4

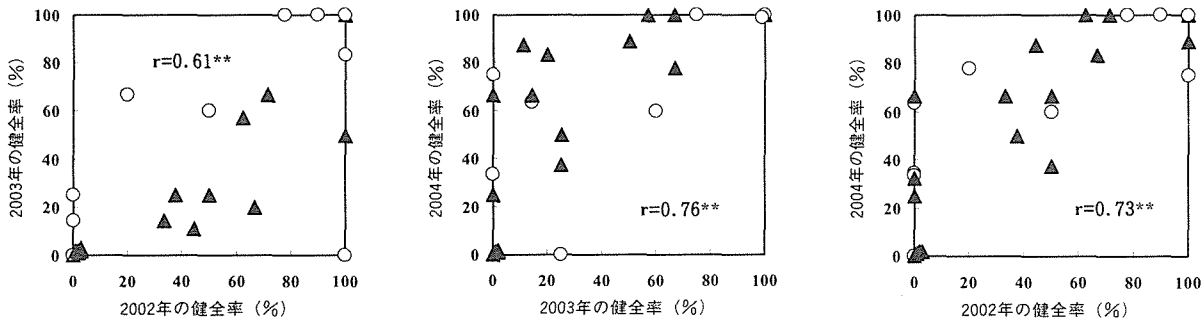
採穂母樹には接種検定を行った川内ク－290号の自然交配実生苗を用い，健全を示した採穂母樹群（15個体）と部分枯れを示した採穂母樹群（23個体）に分けて示した。複数個体の挿し木苗が得られなかった採穂個体を解析から除去したため，各接種年の採穂母樹数は健全で11～13個体，部分枯れで18～20個体となっている。

次に，採穂母樹ごとにみた健全率について二元配置分散分析の結果を表－5に示す。その結果，採穂母樹の抵抗性のみに有意差が認められ（$p < 0.01$），接種年と交互作用には有意差が認められなかった（$p > 0.05$）。このことからも，健全採穂母樹群から挿し木を行えば，生産年によって抵抗性レベルが左右されにくい，品質の安定した苗木生産ができる可能性が示された。

表－5．採穂母樹ごとの健全率についての二元配置分散分析の結果

要因	自由度	平方和	平均平方	F値	有意確率
採穂母樹の抵抗性	1	1.242	1.242	9.276	0.003
接種年	2	0.692	0.346	2.582	0.081
交互作用	2	0.197	0.099	0.735	0.482
残差	86	11.517	0.134		

また，採穂母樹ごとにみた健全率に関する接種年間での相関係数は0.61～0.76と，いずれの場合も1％水準で有意な正の相関を示した（図－5）。つまり，挿し木苗の抵抗性は接種年によらず採穂母樹の遺伝的性質で決まっている部分が大きいと考えられた。したがって，抵抗性の高い採穂母樹を選抜することが，抵抗性の高い挿し木苗を安定して生産する上で重要だと考えられた。しかし一方で，本試験では，健全採穂母樹群に属していながら，挿し木苗の健全率が3年間とも常に30％を下回るような抵抗性の低い採穂母樹も検出された。これは，採穂母樹の接種検定の際，接種時に十分な頭数の線虫が樹体内に侵入しなかったなど何らかの影響で，もともと抵抗性の低い採穂母樹が発病せず「健全」と誤判定されたためではないかと考えられた。したがって，1回の接種検定では採穂母樹の抵抗性判定における過誤を十分に排除できない可能性が示唆された。



図－5． 採穂母樹ごとにみた健全率についての年次相関

r は相関係数（有意確率** $p < 0.01$），○は健全を示した採穂母樹クローン，▲は部分枯れを示した採穂母樹クローンを表す。

2）強病原性線虫の接種検定による採穂母樹選抜の効果

前項6の1）では，接種検定に合格した健全採穂母樹群から挿し木を行うことで，現行の抵抗性苗木よりも効率よく安定した品質の苗木生産が可能であることを示した。その一方，採穂母樹をたった1回の接種検定で選抜することの問題点も指摘した。本研究の最終的な目標は，未接種で挿し木苗を出荷することであり，そのためには生産される挿し木苗の中に抵抗性の低い苗木が出現するのをなるべく抑える必要がある。そこで，本項では強病原性の線虫を使って採穂母樹の接種検定を行い，抵抗性が高い採穂母樹のみを厳しく選抜して挿し木増殖を行った。その結果，抵抗性の低い挿し木苗の出現が抑制されたかどうか，採穂母樹の選抜効果を実証した。

・実験と方法

強病原性線虫による接種検定を行った採穂母樹は，抵抗性クロマツ採種園産の自然交配実生苗 12 家系である。遺伝的な偏りをできるだけ排除し，多様な両親組み合わせになるように，本試験では，後藤ら（2002）が RAPD マーカーで花粉親を明らかにした 18 個体を用いた。これらは1年生の 1999 年7月に1個体あたり約 6,000 頭の線虫島原個体群を接種して，健全であることを確認した。その後，3年生時の 2001 年7月に強病原性線虫の Ka-4（Aikawa *et al.*, 2003）を1個体あたり約 6,000 頭接種して，2002 年7月に病徴の進展を調べた。健全個体には，さらに4年生時の 2002 年7月に同じく強病原性線虫の唐津3（秋庭ら，2002）を1個体あたり約 6,000 頭接種し，2003 年7月に病徴の進展を調べた。以上のように，強病原性線虫による2回の接種検定に対する反応を予め調べておいたこれらの採穂母樹から，3年生時の 2002 年2月に 10 本ずつ挿し木を行い，1採穂母樹あたり2～9個体，合計 90 個体の挿し木苗を生産した。これらは，2003 年春に苗畑に移植した後，床替えせずに2年生の 2004 年7月に唐津3を1個体あたり約 6,000 頭接種し，2005 年2月に病徴の進展を調べた。

・結果と考察

島原個体群に対しては健全を示した 18 個体の採穂母樹に強病原性の Ka-4 を接種した結果，15 個体が健全で，3個体が部分枯れを示した。次に，Ka-4 を接種後も健全であった 15 個体に翌年唐津3を接種した結果，9個体が健全で，6個体が部分枯れを示した。すなわち，採穂母樹は強病原性線虫による2回の接種検定で常に健全を示した9個体（採穂母樹番号：H1 ～ H9）と2回の接種検定のいずれかで部分枯れを示した9個体（採穂母樹番号：P1 ～ P9）の2つに分けられた。これら2つの採穂母樹群から得られた挿し木苗について，接種結果を表－6に示す。2回の強病原性線虫の接種検定で常に健全を示した採穂母樹群からは，得られた挿し木苗の健全率が 97.7 %と非常に高く，群内のどの採穂母樹からも接種で枯死する挿し木苗は発生しなかった。一方，2回の接種検定のいずれかで部分枯れを示した採穂母樹群からは，得られた挿し木苗の健全率は 87.0 %であり，採穂母樹の一つ（P8）から得られた挿し木

苗の一部が枯死した。

近年，九州各地の被害林分から強病原性の線虫系統が新たに分離されている（秋庭ら，2001，2002，2003，2004）。線虫の病原力は林分間や宿主個体間でも変異があることが知られており（清原，1989），現地に適応する抵抗性苗木を生産するためには，島原個体群以外の強病原性線虫に対する抵抗性についても検討する必要がある。本研究で採穂母樹の接種検定に用いた Ka-4 は，抵抗性クロマツの２年生実生苗に対する発病率（接種した苗木に対する部分枯れと枯死の合計の本数割合）が 64 ～ 78 %と島原個体群の 53 ～ 56 %に比べて高かった（佐々木ら，2001，2002）。また，唐津３の発病率は 88 ～ 89 %と Ka-4 よりもさらに高かった（佐々木ら，2001，2002）。同様に，抵抗性クロマツの２年生実生苗を用いた秋庭ら（2002，2003，2004）および佐々木ら（2003）の報告でも，唐津３は島原個体群より常に発病率が高かった。このように発病率の高い強病原性線虫による２回の接種検定で常に健全を示した採穂母樹群からであれば，今回用いた３系統のうち最も病原力が強いと考えられる唐津３を接種した場合でも，挿し木苗の健全率は 97.7 %に達した。また，採穂母樹ごとにみると，２回の接種検定のいずれかで部分枯れを示した採穂母樹群からは，得られた挿し木苗の中に枯死したものが認められたが，常に健全を示した採穂母樹群からは，挿し木苗の枯死は発生しなかった。したがって，採穂母樹候補に対して強病原性線虫による接種検定を行えば，枯死木を生み出すような抵抗性の低い採穂母樹を除外でき，相対的に抵抗性の高い採穂母樹群を選抜できると考えられる。なお，複数回の接種検定により，１回の接種検定だけでは防ぎきれない接種作業時の偶発的あるいは人為的なミスなどをカバーできた可能性も考えられる。このように抵抗性の高い採穂母樹群を選抜できれば，生産される挿し木苗において抵抗性の低い苗木の割合を抑えられると考えられた。今回の健全率から考えれば，強病原性線虫による接種検定を少なくとも２回行って選抜した採穂母樹群から生産した挿し木苗に関しては，未接種で出荷できると判断でき，採穂母樹選抜の効果が示された。

表－６．　採穂母樹の強病原性線虫に対する抵抗性別にみた挿し木苗の接種結果

強病原性線虫に対する抵抗性	採穂母樹番号	採穂母樹 種子親（抵抗性ランク）	×	採穂母樹 花粉親（抵抗性ランク）	供試数（本）	接種結果 健全（本）	接種結果 部分枯れ（本）	接種結果 枯死（本）	健全率（%）
健全	H1	小浜ク－30（3）	×	津屋崎ク－50（3）	2	2	0	0	100
	H2	頴娃ク－425（2）	×	津屋崎ク－50（3）	2	2	0	0	100
	H3	志摩ク－64（3）	×	波方ク－73（5）	2	2	0	0	100
	H4	土佐清水ク－63（4）	×	三崎ク－90（4）	5	5	0	0	100
	H5	大瀬戸ク－12（1）	×	波方ク－73（5）	5	5	0	0	100
	H6	志摩ク－64（3）	×	津屋崎ク－50（3）	6	6	0	0	100
	H7	波方ク－37（4）	×	津屋崎ク－50（3）	6	5	1	0	83
	H8	大瀬戸ク－12（1）	×	土佐清水ク－63（4）	7	7	0	0	100
	H9	吉田ク－2（3）	×	波方ク－37（4）	9	9	0	0	100
	合計				44	43	1	0	97.7
部分枯れ	P1	川内ク－290（2）	×	三崎ク－90（4）	2	2	0	0	100
	P2	三崎ク－90（4）	×	波方ク－37（4）	2	2	0	0	100
	P3	大分ク－8（1）	×	大瀬戸ク－12（1）	2	1	1	0	50
	P4	波方ク－73（5）	×	夜須ク－37（3）	5	5	0	0	100
	P5	大分ク－8（1）	×	波方ク－37（4）	5	4	1	0	80
	P6	波方ク－37（4）	×	大瀬戸ク－12（1）	6	6	0	0	100
	P7	川内ク－290（2）	×	大瀬戸ク－12（1）	7	7	0	0	100
	P8	田辺ク－54（2）	×	川内ク－290（2）	8	4	1	3	50
	P9	吉田ク－2（3）	×	頴娃ク－425（2）	9	9	0	0	100
	合計				46	40	3	3	87.0

各採穂母樹の種子親および花粉親の抵抗性ランクは，５段階評価で数値が高いほど実生後代の抵抗性が高いことを示す（九州地区林業試験研究機関連絡協議会育種部会、1999）。

7．挿し木苗の得苗率

・目的

造林用の苗木には，植栽後の健全な育成を保証するため，大きさに規格が設けられている。したがって，苗木生産者としては，一定期間でこの規格に合致する苗木を生産しなくてはならない。海岸林に植栽される2年生クロマツ苗の規格は，苗高 25 ～ 50cm，根元径 7.0mm 以上，3年生以上はポット苗とし，苗高 30 ～ 70cm，根元径 7.5mm 以上と定められている（福岡県森林組合連合会，2006）。挿し木苗もこれと同等の規格が必要になると思われる。そこで，本項ではガラス温室で挿し木を行った苗木を露地の苗畑に床替えした場合，どのくらいの本数割合で規格を満たすのか，得苗率を調査した。

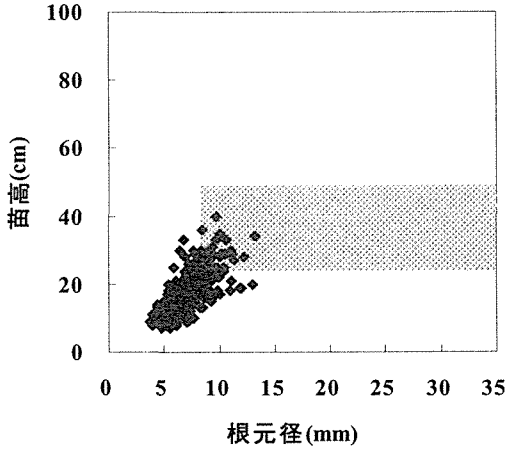
・実験と方法

供試したのは，2002 年2月に抵抗性クロマツ 15 家系 57 個体から挿し木増殖した 228 個体と，2003 年2月に抵抗性クロマツ 11 家系 67 個体から挿し木増殖した 277 個体とした。これらは，挿し付けして約1年後の 2003 年と 2004 年の春にそれぞれ野外の苗畑に 20cm 間隔で移植した。その後，どちらの個体群も 2005 年2月に根元径と苗高をノギスと物差しで測定した。つまり，前者は苗畑へ移植後に2年間床替えせず養生した時点で測定し，後者は1年間だけ養生した時点で測定した。したがって，挿し付けから3年間が経過した苗木ということで前者を3年生挿し木苗，2年間が経過した苗木ということで後者を2年生挿し木苗と呼ぶことにする。なお，両者とも挿し付け時の挿し穂の長さは5 cm であった。また，苗畑には元肥として硫安 100g/m²，苦土石灰 30 ～ 50g/m²，48 化成 100g/m²を施肥し，その後の追肥は行わなかった。

・結果と考察

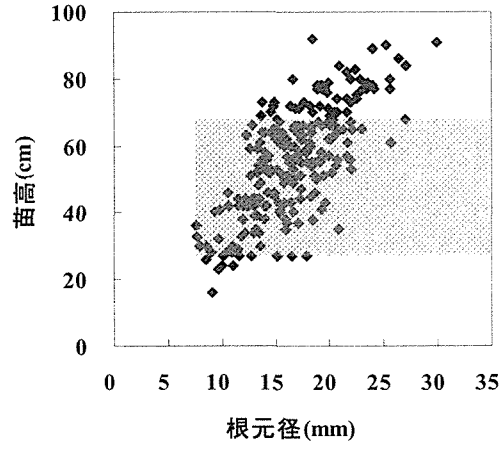
2年生挿し木苗のサイズについて，図－6に示す。平均は，根元径 7.4mm，苗高 18.4cm となった。これらを福岡県の2年生クロマツ実生苗の規格と照らし合わせると，規格に合致したものは 46 個体であり，得苗率（全体に対する規格苗の本数割合）は 16.6 %と低かった。次に，3年生挿し木苗のサイズについて，図－7に示す。平均は，根元径 16.8mm，苗高 56.0cm となった。3年生実生苗の規格と照らし合わせると，規格に合致したものは 170 個体であり，得苗率は 74.6 %とかなり高まった。

このように，2年生挿し木苗の場合，根元径や苗高不足が原因で規格に合致しない個体が多かった。一方，3年生挿し木苗の場合，根元径不足は0 %，苗高不足は全体の7 %に過ぎなかったものの，苗高超過が原因で規格に合致し



図－6．2年生挿し木苗のサイズ

プロットは供試した個々の苗木のサイズを表す。
網掛けはクロマツ2年生実生苗の規格（根元径 7.0mm 以上，苗高 25 ～ 50cm）を表す。



図－7．3年生挿し木苗のサイズ

プロットは供試した 1 個々の苗木のサイズを表す。
網掛けはクロマツ3年生実生苗の規格（根元径 7.5mm 以上，苗高 30 ～ 70cm）を表す。

ない個体が 18 %と多かった。本試験はできるだけ多くの家系やクローンを用いて行ったので，同じ条件で挿し木苗を育成すると，平均的には同様な結果になると思われる。したがって，３年生苗まで育成すれば高い得苗率で出荷できる可能性はあるが，このままでは２年生苗での出荷は難しいと考えられた。今後はこの課題をクリアするために，あまり細い枝を挿し穂として用いないようにし，挿し穂も長めに調製するなど，挿し穂の段階でサイズをコントロールしておくことが必要と思われた。しかし，挿し穂を長くすると発根率が低下することが報告されており（宮崎，2006），どのくらいの長さに調製するかについては十分な検討が必要である。発根した挿し木苗を野外に移植する季節を早めたり，苗畑での施肥量を増やすなど，育苗管理技術の検討も今後必要になると思われる。

８．挿し木苗の現地適応性

・目的

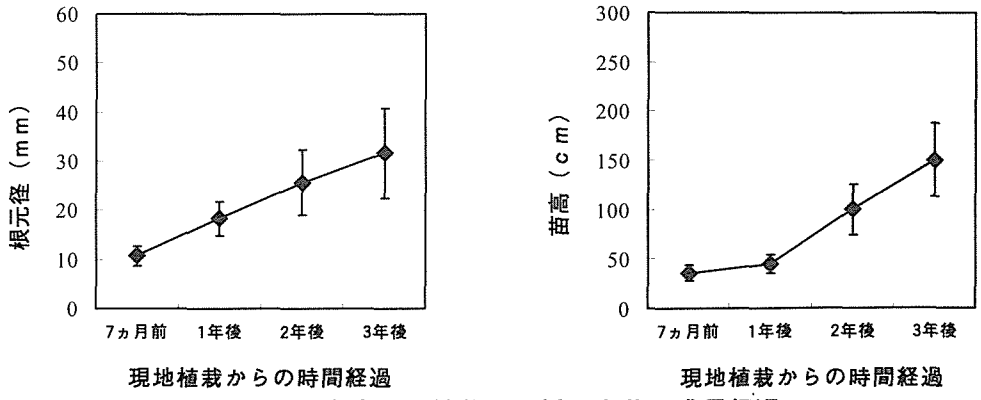
抵抗性クロマツ苗の多くは沿岸部の比較的厳しい環境下に植栽される。したがって，生産した挿し木苗が実際に現地で健全に成長するかを実証する必要がある。本項では，前項６の１）の接種検定試験で健全だった苗木のうち，出荷規格を満たした３年生挿し木苗を現地植栽したので，植栽後３年間の状況と成長経過を報告する。

・実験と方法

2003 年２月中旬に，前項６の１）で接種検定を行い健全だった３年生挿し木苗のうち，出荷規格である根元径 7.5mm 以上，苗高 30 ～ 70cm を満たした 68 本を岡垣町国有林内に植栽した。植穴は径 30cm ×深さ 30cm とし，苗木１本あたり１Ｌのバーク堆肥（シーアイ・バーク）を植穴に投入した。さらに，植栽後は苗木の周囲に固形肥料のまるやま１号を苗木１本あたり 60 ｇ施肥した。植栽間隔は，１ｍ×１ｍ間隔（10,000 本／ ha 換算）とし，長さ 1.5 ｍの竹１本支柱で苗木を支えた。これら苗木の根元径と苗高について，植栽する７ヵ月前の 2002 年７月中旬，植栽から１年経過した 2004 年２月中旬，２年経過した 2005 年３月初旬，３年経過した 2006 年２月下旬に，それぞれノギスと樹高棒で測定した。なお，植栽地の概況は前生樹を皆伐した 0.4ha の一部で，北側は遊歩道を隔てて海に面しており，遊歩道との間には防風フェンスが施工されている。南側は前世樹のトベラやマサキなどの雑木林となっており，西側は 2000 年度に，東側は本試験苗木とほぼ同じ時期に，それぞれクロマツ実生苗が植栽されている。

・結果と考察

植栽した 68 本は，植栽後１年時で 64 本が活着し，活着率は 94.1 %となった。その後，植栽後３年時に至るまで活着した 64 本は全て健全に成育していた。供試苗木の根元径と苗高の年変化を図－８に示す。根元径と苗高の平均は，それぞれ植栽７ヵ月前は 10.7mm と 36.0cm，１年後は 18.3mm と 45.3cm，２年後は 25.6mm と 100.3cm，３年後は 31.7mm と 150.2cm，と成長した。苗高の伸長量は植栽後１年間は小さかったが，その後は１年に約 50cm ずつ順調に



図－８．　海岸林に植栽した挿し木苗の成長経過

バーは平均値±標準偏差を表す。

成長している。本試験では，現行の抵抗性クロマツの生産手法である実生苗との成長比較を行っていないため，実生苗との違いを直接議論するはできない。しかし，Foster *et al*（1987）は，同じマツ属のテーダマツ（*Pinus taeda* L.）で挿し木苗と実生苗の初期成長を比較した結果，挿し木苗が実生苗より必ずしも成長が悪くないことを報告している。また，Stelzer *et al*（1998）もテーダマツの挿し木苗と実生苗の10年目の成長形質を比較しているが，両者の違いは実質的にみられないとしており，同じマツ属のクロマツの挿し木苗も実生苗と遜色なく現地に適応できると予想される。

9．おわりに

従来，クロマツは発根性が低いため挿し木は困難といわれてきたが，本研究では発根性を向上させるための技術改良を試みた結果，一定の成果を上げることができた。また，接種検定に合格した採穂母樹から挿し木を行えば，毎年，現行の実生苗方式より抵抗性の強い苗木生産を効率的に行えることが明らかになった。一方，挿し木苗の2年生での出荷は厳しく，この点については検討を要するが，挿し木苗を海岸林に植栽しても，活着や成長の面でも十分適応できるという結果も示した。生産コストについても，大平ら（2005b）は未接種の挿し木苗生産にかかる費用は1万本あたり244万円であり，接種作業が必須である現行の実生苗方式に比べて140万円のコストダウンが望めると試算している。このように，本研究で提唱した挿し木方式による抵抗性苗木生産の有効性は高い。今後は，本研究で示したように，強病原性線虫による複数回の接種検定により抵抗性の高い採穂母樹群を選抜し，それらの挿し木発根性が高いことを確認できれば，抵抗性の挿し木苗生産を事業レベルで実現できると考えられた。

しかし一方，このようなクローン苗による造林が進むとクロマツ林の遺伝的多様性が低下する危険性がある。集団全体の遺伝的多様性が低下すると，マツ材線虫病以外の病虫害や気象害などに対する危険性が高くなる可能性がある。これらの点を考慮して，アメリカ南東部などではクローン林業に対して法的な制限が課されつつある（Stelzer and Goldfarb, 1997）。本研究で対象とするクロマツの抵抗性苗木は，沿岸部の比較的厳しい環境下に植栽され，植栽地の環境条件も多様であることが予測されるため，なるべく多数のクローンを混交することが望まれる（勝田，1995）。したがって，採穂母樹の選抜対象範囲としてはより多くの抵抗性家系を使用することが重要である。また，本研究でも示されたように，発根率など生産性については個体間で差異が生じる可能性があるため，生産苗木全体において一部の家系やクローンの頻度が大きくならないよう，採穂母樹の遺伝的構成のバランスをコントロールする必要があると考えられる。現在，福岡県は，九州大学，林木育種センター，九州各県の林業研究機関，天草森林組合とともにプロジェクトチームを組んで，生産性や抵抗性はもちろん，遺伝的多様性にも配慮した採穂母樹の選抜作業を実行中であり，選抜後に採穂園を造成して挿し木苗を生産するという実用化が待ち望まれる。

ところで，抵抗性のメカニズムについては，未だに不明な点が多い。抵抗性苗木生産が実用化されても，それがなぜ抵抗性を発揮したのかが未解明のままでは根本的な解決にならない。過去に，モノテルペンの一種β－ミルセンが線虫に対して強い誘因力を持ち（Ishikawa *et al.*, 1986），分散型第4期幼虫の脱皮や増殖を促進するため（Hinode *et al.*, 1987），木部中のβ－ミルセン含量は抵抗性個体のスクリーニングの指標となるという報告がある（Ishikawa *et al.*, 1987）。一方，β－ミルセン含量と抵抗性には関連が認められないとする報告もあり（Kuroda *et al.*, 1991），統一した見解は得られていない。また，殺線虫活性をもつピノシルビンやピノシルビンモノモチルエーテルなどのファイトアレキシンが抵抗性に関与しているとみる報告がある一方（Suga *et al.*, 1993；黒田，1999），ピノシルビンは抵抗性のマツに特徴的な成分ではないとの報告もある（梶原ら，未発表）。この一要因として，材料の遺伝的要因と環境要因が複合的に作用して，再現性が得られないことも考えられる。これについて，本研究で示した挿し木技術を利用して半兄弟家系や全兄弟家系からクローン苗を予め増殖しておき，クローン苗を確保した後に接種検定を行え

ば，結果的に同一家系から「抵抗性が高い」クローン群と「抵抗性が低い」クローン群が増殖できる。このように，遺伝的なばらつきの少ない材料の中で接種反応の異なるクローン群同士の違いを比較すれば，抵抗性に結びつくより確かな知見を得ることができると思われる。今後は，このような抵抗性メカニズムの解明にクローン苗を利用することも有効であると考えられる。

10. 謝辞

本研究を進めるにあたり，森林総合研究所の相川拓也氏，同九州支所の秋庭満輝氏，林木育種センター九州育種場の大平峰子氏には，接種検定用の線虫を分譲していただきました。福岡県樹苗農業協同組合には，事業用苗木生産時の健全率についてデータを教えていただきました。福岡森林管理署の方々には，挿し木苗の現地植栽にご理解とご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

11. 引用文献

Aikawa, T., Kikuchi, T., and Kosaka, H. (2003) Demonstration of interbreeding between virulent and avirulent populations of *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda：Aphelenchoididae) by PCR-RFLP method. Appl.Entomol.Zool.38：565-569.

秋庭満輝・石原　誠・佐橋憲生・佐々木峰子・戸田忠雄（2001）クロマツ５家系に対するマツノザイセンチュウの病原力の変異．112 回日林学術講：306.

秋庭満輝・石原　誠・中村克典・佐々木峰子・岡村政則・佐橋憲生（2002）同一林分内のアカマツ枯死木から分離されたマツノザイセンチュウの病原力．113 回日林学術講：672.

秋庭満輝・石原　誠・佐々木峰子・岡村政則・佐橋憲生（2003）被害拡大期のアカマツ林におけるマツノザイセンチュウ個体群の病原力と遺伝的構造．114 回日林学術講：756.

秋庭満輝・石原　誠・佐橋憲生・佐々木峰子・岡村政則・富樫一巳（2004）野外林分におけるアカマツの病徴進展とマツノザイセンチュウの病原力．115 回日林学術講：263.

Blakesley, D (1994) Auxin metabolism and advetitious root initiation. In Biology of Advetitious Root Formation, T.D. Davis and B.E. Haissig, eds (New York:Plenum Press), pp.143-154.

Browne, R.D., Davidson, C.G., Steeves, T.A. and Dunstan, D.I. (1997) Effects of ortet age on adventitious rooting of jack pine (*Pinus banksiana*) long-shoot cuttings. Can.J.For.Res.27：91-96.

Copes, D.L. (1983) Effects of annual crown pruning and serial propagation onrooting of stem cuttings from Douglas-fir. Can.J.For.Res.13：419-424.

De Klerk, G.J., Van der Krieken, W. and De Jong, J.C. (1999) The formation of adventitious roots：new concepts, new possibilities. In vitro Cell Dev.Biol.－Plant 35：189-199.

Eriksson, G. and Ekberg, I. (2001) An introduction to Forest Genetics. 126pp, SLU Repro Press, Uppsala.

Foster, G.S., Lambeth, C.C. and Greenwood, M.S. (1987) Growth of loblolly pine rooted cuttings compared with seedlings. Can.J.For.Res.17：157-164.

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－．林育研報 7：1-84.

福岡県（2005）福岡県森林・林業・木材産業の動向と課題－平成 16 年度森林・林業白書－．64pp，福岡県水産林務部林政課，福岡.

福岡県森林組合連合会（2006）平成17年度福岡県林業用苗木価格表.

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－. 222pp, 文一総合出版, 東京.

Gardner, F.E. (1929) The relationship between tree age and the rooting of cuttings. Proceedings of American society for Horticultural Science 26：101-104.

Goh, C.J., Lakshmanan, P., Lee, C.L., Loh, C.S. and Tanaka, M. (1995) A simple and efficient method for clonal propagation of *Casuarina sumatrana*(de Vriese)L.Johnson.Plant Growth Regulation 17：115-120.

後藤　晋・宮原文彦（1997）抵抗性クロマツの組織培養（Ⅰ）－発根条件の検討－, 日林九支研論 50, 57-58.

後藤　晋（1999a）クロマツ成熟胚の液体培養における培養期間と不定芽増殖率, 110回日林学術講, 257-258.

後藤　晋（1999b）クロマツの挿し木増殖における発根条件の検討. 日林九支研論 52：57-58.

後藤　晋・宮原文彦・井出雄二(2002)クロマツ種苗のマツ材線虫病抵抗性に対する花粉親の寄与.日林誌 84：45-49.

Hackett,W.P. (1988) Donor plant maturation and adventitious root formation In: Davis TD, Hassig BE, Sankhla N (eds) Advances in plant sciences series. Adventitious root formation in cuttings. Dioscorides, Portland, OR, 11-28.

Hartman,H.T.,Kester,D.E. and Davis,F.T.(1990)Plant propagation：principles and practices. Englewood Cliffs, NJ：Prentice-Hall, 246-247.

橋詰隼人・谷口紳二（1981）低台式採穂園方式によるヒノキ優良木家系の挿木増殖および挿穂の生理的齢と挿木の発根性との関係に関する二, 三の研究. 鳥大演報 13：1-17.

Hinode,Y.,Shuto,Y. and Watanabe,H.(1987)Stimulating effects of β－Myrcene on molting and multiplication of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Agric.Biol.Chem.51：1393-1396.

石川広隆（1968）マツ・カラマツ類を中心としたさし木困難樹種の不定根の形成に関する基礎的研究　そのⅠ　さし木発根の内的条件に関する研究. 林試研報 214：77-109.

Ishikawa, M., Shuto, Y. and Watanabe, H. (1986) β－Myrcene, a potent attractant component of pine wood for the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Agric.Biol.Chem.50：1863-1866.

Ishikawa,M.,Kaneko,A.,Kashiwa,T. and Watanabe,H.(1987)Participation of β－Myrcene in the susceptibility and / or resistance of pine trees to the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Agric.Biol.Chem.51：3187-3191.

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.

石松　誠（1999）マツノザイセンチュウ抵抗性クロマツの挿し木について. 林木の育種特別号：20-23.

勝田　柾（1995）クローナルフォレストリーの育種戦略. 第2回林木遺伝育種セミナー：3-7.

川村忠士（1988）カラマツの材質優良木クローンと13年生採穂台木におけるさし木発根性の違い. 日林東北支誌 40：86-87.

清原友也（1989）マツ材線虫病の病原学的研究. 林試研報 353：127-176.

Kozlowski, T.T. and Pallardy, S.G. (1997) Growth control in woody plants. Academic Press, Toronto.

Kuroda, K., Yamada, T. and Ito, S. (1991) *Bursaphelenchus xylophilus* induced pine wilt:Factors associated with resistance. Eur.J.For.Path.21：430-438.

黒田宏之（1999）マツ枯損防止のための新戦略構築. 京都大学木質科学研究所 木材研究・資料 35：32-46.

九州地区林業試験研究機関連絡協議会育種部会（1999）ヒノキ精英樹・抵抗性マツ特性表. 58pp, 熊本.

町田英夫（1973）さし木のすべて. 261pp, 誠文堂新光社, 東京.

三上　進・佐々木文夫・渡辺　操（1978）カラマツのさし木増殖試験. 日林東支発論 30：204-205.

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.

宮島寛（1989）九州のスギとヒノキ．pp275，九州大学出版会，福岡.

宮崎潤二・石松　誠（2002）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（Ⅱ）－挿し木苗の抵抗性－．九州森林研究 55：153-154.

宮崎潤二（2003）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（Ⅲ）－育苗コストを抑えるための挿し木方法等の検討－．九州森林研究 56：188-189.

宮崎潤二（2004）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（Ⅳ）－挿し付け時期と発根率－．九州森林研究 57：311-312.

宮崎潤二（2005）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（Ⅴ）－簡易なビニールトンネルを利用した密閉挿しの検討－．九州森林研究 58：157-158.

宮崎潤二（2006）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（Ⅵ）－挿し穂の長さが発根率および苗高に与える影響－．九州森林研究 59：237-238.

Mota, M. M., Braasch, H., Bravo, M. A., Penas, A. C., Burgermeister, W., Metge, K., and Sousa, E. (1999) First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe. Nematology 1 (8)：727-734.

小笠原隆三（1962）クロマツのさし木に関する基礎的研究（第Ⅰ報）発根が困難である原因について．日林誌 44：276-281.

沖村義人（1961）マツ類のさし木に関する研究（第6報）．日林誌 43：272-276.

大平峰子・倉本哲嗣・平岡裕一郎・岡村政則・藤澤義武（2005a）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・倉本哲嗣・平岡裕一郎・谷口亨・藤澤義武（2005b）抵抗性マツ育種戦略におけるさし木増殖システムの役割．日本森林学会大会発表データベース 116 ：96.

大山浪雄（1962）さし木困難樹種の発根能力増進に関する研究．林試研報 145：1-135.

大山浪雄・豊島昭和（1965）マツ属のさし木の発根能力とその増進法．林試研報 179：99-125.

林野庁（2005）平成16年度森林・林業白書（森林及び林業の動向に関する年次報告）．222pp，（社）日本林業技術協会，東京.

佐々木峰子・秋庭満輝・戸田忠雄・岡村政則（2001）マツノザイセンチュウ個体群の病原力とクロマツ家系の関係．林木育種センター九州育種場年報 29：51-54.

佐々木峰子・平岡裕一郎・岡村政則・藤澤義武・秋庭満輝（2002）マツノザイセンチュウ抵抗性クロマツの特性－実生後代の諸特性と抵抗性の関係－．113回日林学術講：649.

佐々木峰子・倉本哲嗣・岡村政則・平岡裕一郎・藤澤義武・秋庭満輝（2003）マツノザイセンチュウ抵抗性クロマツ実生家系におけるさし木発根性と抵抗性の関係．114回日林学術講：551.

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.

佐々木義則・諫本信義・小山田研一・中尾稔（1977）クヌギ林分の造成に関する研究（Ⅲ）－クヌギさし木の発根率のおよぼす $AgNO_3$ および IBA の影響－．日林九支研論 30：115-116.

森林総合研究所（1999）樹木の渇きのシグナルを捕らえる－水不足を知るための新たな取り組み－．研究の“森”から 76.

塩川　彰（1995）実践面からみたさし木造林の進め方と問題点．第2回林木遺伝育種セミナー：37-41.

Stelzer, H.E. and Goldfarb, B. (1997) Implementing clonal forestry in the southeastern United States：SRIEG satellite workshop summary remarks. Can.J.For.Res.27：442-446.

Stelzer,H.E.,Foster,G.S.,Shaw., D.V. and McRae,J.B.(1998)Ten-year growth comparison between rooted cuttings and seedlings of loblolly pine. Can.J.For.Res.28：69-73.

Suga, T., Ohta, S., Munesada, K., Ide, N., Kurokawa, M., Shimizu, M. and Ohta, E. (1993) Endogenous pine wood nematicidal substances in pines,*Pinus massoniana,P.strobus* and *P.palustris*.Phytochemistry 33：1395-1401.

武田英文（1970）電熱温床による秋田スギさし木試験．日林北支講 19：99-102.

Tartoura, K., Rocha, A. and Youssef, S.(2004)Synergistic interaction between coumarin 1, 2-benzopyrone and indole-3-butyric acid in stimulating adventitious root formation in *Vigna radiata*(L.) Wilczek cuttings：I.Endogenous free and conjugated IAA and basic isoperoxidases. Plant Growth Regulation 42：253-262.

戸田良吉（1953）マツ類のサシキについて－総合抄録－．林試研報 65：61-85.

戸田忠雄・藤本吉幸（1983）ヒノキのさし木に関する研究（Ⅰ）－精英樹クローンのさし木発根性－．日林九支研論 36：129-130.

徳岡正三・竹岡政治（1990）ヒノキの密閉ざしにおける吸水と発根．日林誌 72(5)：420-425.

徳岡正三（1993）ほふく伸長する2，3のヒノキ科植物のさし木．日林誌 75(2)：145-149.

上中久子・高木哲夫・藤本吉幸（1986）九州産スギ精英樹さし木発根促進処理効果．日林九支研論 39：51-52.