

ISSN 2436-441X

研 究 報 告

第 2 9 号

2 0 2 2 . 4

秋田県林業研究研修センター

目 次

海岸林造成におけるクロマツコンテナ苗の優位性

..... 新田 響平 1 ~ 18

初期成長に優れたスギ次世代精英樹の開発

..... 佐藤 博文 19 ~ 39

マツタケ人工栽培に向けた新たな培地組成

..... 菅原 冬樹 40 ~ 57

海岸林造成におけるクロマツコンテナ苗の優位性

新田響平

Advantages of containerized *Pinus thunbergii* seedlings for development of coastal forest

Kyohei Nitta

要 旨

コンテナ苗について、スギ等の事例では高い活着が得られていることから、近年海岸林造成においてもその需要が高まっている。しかし、海岸林で主要な造林樹種であるクロマツのコンテナ苗による植栽事例は少なく、適用可能性や適正な植栽仕様が明らかとなっていない。そこで、様々な仕様により植栽し、その後の活着や成長を裸苗と比較した。植栽から1年後までの生存率は300cc, 150ccコンテナ苗でそれぞれ97%, 98%となっており、裸苗の25%よりも高かった。土壌改良や施肥の実施は、初期成長を促進する効果が確認されたが、競合植生による被圧の影響が大きいことから不要と考えられた。これらから、クロマツコンテナ苗は植え付けのみの植栽仕様で造成に利用できることが明らかとなり、裸苗と比較して活着成績、植栽効率の面で優位性を持つと考えられた。

I. はじめに

本県沿岸は全長約264 kmからなり、冬季風浪や台風などの厳しい自然災害から住宅や農地等の後背地を防護することが課題となっている(秋田県, 2016)。海岸林は潮害の防備、飛砂・風害の防備等の災害防止機能を有しており、農地や居住地を災害から守るなど地域の生活環境の保全に重要な役割を果たしている(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 2012)ことから、その適切な配置と管理が求められている。

海岸林は、主にクロマツ(*Pinus thunbergii*)が構成樹種であるため、マツ材線虫病によるマツ枯れ被害の対象となる。本県におけるマツ枯れ被害は1982年に初めて確認されて以降拡大し、2002年に被害量が最大となった。その後、被害量は減少してきているが、未だ収束には至っていない(秋田県農林水産部林業木材産業課, 2021)。また、初期の被害後に復旧した海岸林において再び被害が発生する例も散見され、計画的な防除と再生を進める必要がある。

現在、海岸林造成に使用されている主なクロマツ苗は2~3年生の裸苗である。金子・田村(2007)は、試験植栽されたクロマツ裸苗の1年後の生存率は植栽地によって大きく異なり、植栽年で50%以下に減少する事例がある一方で、70%以上を維持する事例もあることを報告した。この活着成績のばらつきは、より確実な被害地再生を考える上で大きな課題であり、安定した高い活着成績が期待できる苗と適正な植栽方法の開発が必要である。このような中、近年注目されている新しい植栽苗木の規格としてコンテナ苗がある。コンテナ苗は根系が乾燥しにくいために植栽時のストレスへの抵抗性が

高いとされることから (BCMOF, 2001), 乾燥しやすく貧栄養な砂丘環境への植栽で良好な活着成績が得られる可能性が高い。

コンテナ苗は, スギ (山川ら, 2013; 平田ら, 2014; 櫃間ら, 2015; 八木橋ら, 2016; 内村ら, 2017; 図子, 2018; 小谷ら, 2019; 酒井ら, 2019), ヒノキ (諏訪ら, 2016; 渡邊ら, 2017; 渡邊ら, 2021; 近藤・袴田, 2017; 酒井ら, 2019), カラマツ (原山ら, 2016; 成松ら, 2016) といった山地の造林樹種を中心に育苗, 造林が各地で実施され, その性能について報告がなされている。これらの研究事例によれば, コンテナ苗は従来の裸苗やポット苗と比較して遜色ない活着成績であること, 裸苗よりも植栽可能な期間が長いこと, 植栽効率が低いことなどが確かめられており, コンテナ苗の優位性は育苗の利便性や植栽の効率性にあるとされている (壁谷, 2016)。しかし, クロマツコンテナ苗の植栽事例は極めて少なく, 通年植栽の可能性 (八木橋, 2015) や植栽作業効率 (小倉ら, 2013; 森林総合研究所東北支所, 2016) に関する報告があるのみである。さらに, 日本海側で一般的な砂丘環境で活着成績等を検証した事例はなく, どの程度の活着が見込めるのか, 植栽時の土壌改良や施肥は必要か, といった技術的な課題の検討が不十分である。そこで, 本研究では海岸砂丘地におけるクロマツコンテナ苗の適用可能性を明らかにするため, 活着成績について裸苗と比較した。また最も適した植栽方法を検討するため, 複数の植栽仕様による植栽試験を実施し, 活着と成長について調査した。

II. 調査地と調査方法

1. 植栽試験地の概要

植栽試験は, 秋田県由利本荘市岩城勝手字中島地内の海岸砂丘地 (北緯 $34^{\circ} 34' 21''$, 東経 $140^{\circ} 3' 33''$, 標高 4m) で実施した。当該箇所は汀線から 170m の砂丘後背地に位置し, 前砂丘により直接的な潮風の影響が低減されている (図-1)。土壌は砂質土で構成される未熟土である (土じょう部, 1976)。また, メッシュ平年値 (気象庁 2012) における年平均気温は 11.2°C , 年降水量は 1,801.6mm である。

2. 試験地の設計

試験地に $5\text{ m} \times 10\text{ m}$ の植栽区を設定し, 1区あたり 24本 (植栽密度 4,800本/ha) のクロマツ苗を植栽した。試験に供した苗はクロマツの裸苗 (2年生小), コンテナ苗 300cc (JFA300リブ, 以下, 300cc) 及びコンテナ苗 150cc (JFA150リブ, 以下, 150cc) で, コンテナ苗はいずれも 2~3年生である。苗木はすべて同じ業者から購入した。コンテナ苗の培地組成はトップココピート 80%, 鹿沼土 20% である。植栽前の苗木の乾燥を防ぐため, 植栽前の苗木サイズの測定は実施せず, 植栽直後 (2015年 6月 3日) に実施した毎木調査結果 (調査方法, 解析方法は後述) を植栽時の苗木サイズとした (表-1)。

植栽方法について, 裸苗は秋田県治山事業で標準的に採用されている仕様を採用した (図-2, 仕様 A)。コンテナ苗については裸苗と同じ仕様に加え, コンテナ苗専用の植え付け器を用いた植え付けのみを実施する仕様 B と, それに 100g 施肥を伴う仕様 C, 小さい植穴掘削と 50g の施肥を実施する仕様 D, 植え付け器で植栽し, 50g の施肥をおこなう仕様 E の 5種類とした (図-2)。植栽区は,

300cc は仕様 A～D の 4 種類を各 3 区, 150cc は仕様 A～C の 3 種類を各 3 区, 仕様 D を 2 区, 仕様 E を 1 区とし, 区画位置による違いが相殺されるように配置した (図-3)。植栽は 2015 年 5 月 26 日に実施した。植栽当年 10 月に県治山事業により木製植栽区境界に防風柵が設置された。下列りは実施していない。

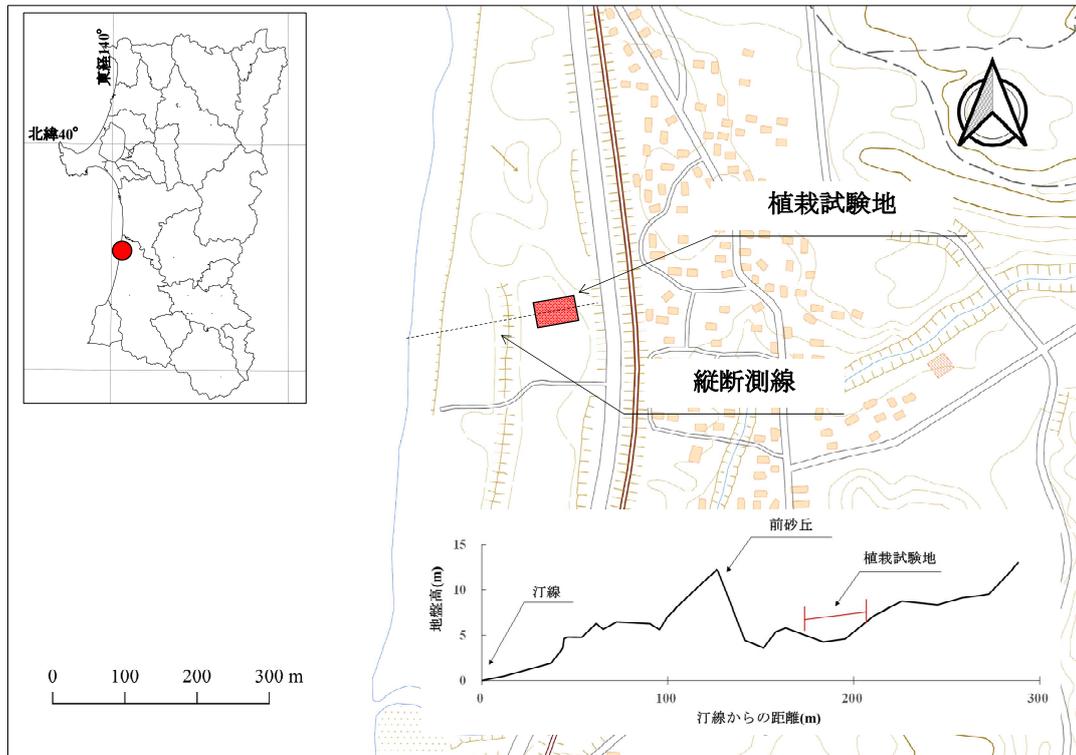


図-1 植栽試験地の位置図及び縦断図

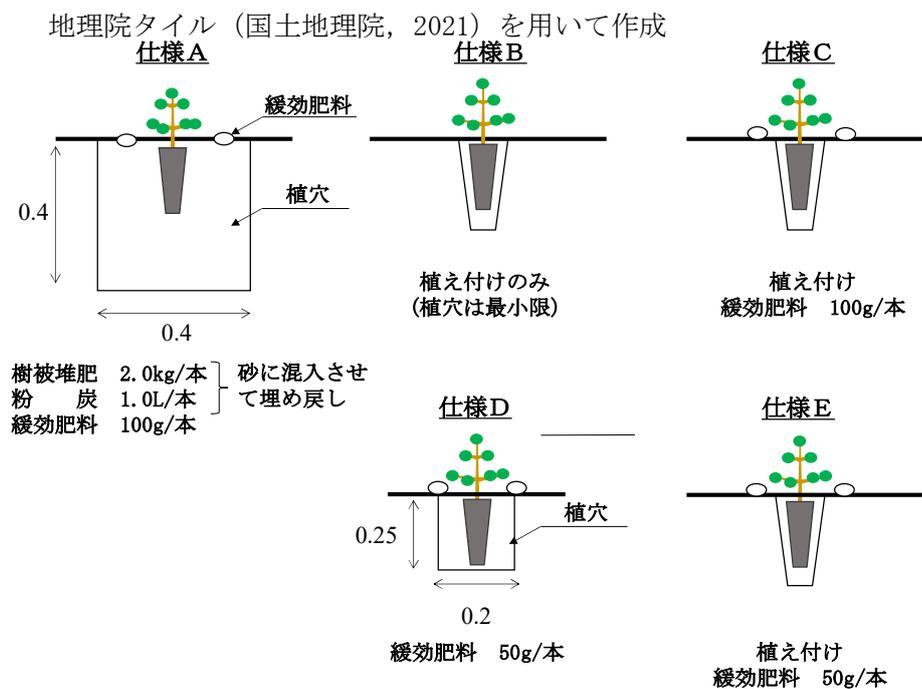


図-2 植栽仕様の模式図

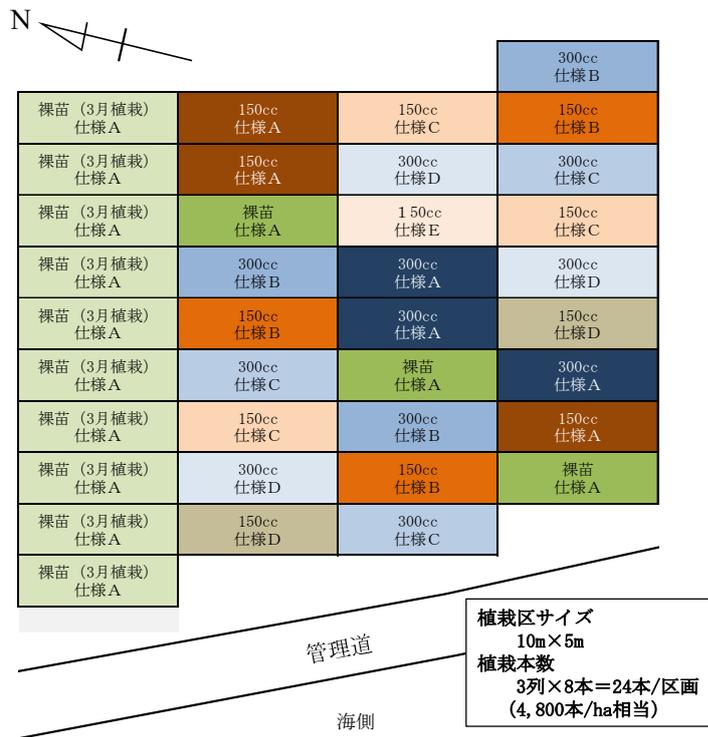


図-3 植栽区の配置

3. 調査方法

苗木の地際直径、樹高、生残・枯死状況について毎木調査を実施した。地際直径と樹高は測定時の地面を基準とし、根元直径についてはノギスを、樹高については検測桿を用いて測定した。生残・枯死状況については葉全体が褐変したものを枯死とし、緑の葉がわずかでもある場合は生存とした。測定した樹高と地際直径の値から苗木の形状比（樹高／地際直径）を算出した。また1植栽区における生存本数を植栽本数で除して区生存率とし、その反復平均値を調査時期毎に算出した。苗木の枯損は植栽後1年目に発生する事例が多いことから、植栽当年は6月3日（植栽直後）、7月14日、9月3日に、以降2016～2020年は3月か4月の春期に調査を実施した。また、試験地に隣接する県治山事業で3月に植栽された裸苗10区（以下、裸苗（3月植栽））についても9月3日時点から調査に追加した（図-3）。これら裸苗（3月植栽）区の植栽密度は6,400本/haで、植栽方法は本研究の仕様Aと同様である。

苗木の生存に競合植生が与える影響を評価するため、裸苗（3月植栽）区を除くすべての区で2015年9月3日に植生被度を目視で判定した。植生被度は苗木を中心とする50cm四方かつ高さ1mまでの範囲を対象とした。また植生による被圧程度を把握するため、山川ら（2016）に基づき次のC1～C4の4つのカテゴリにより目視で判定した。

- C1：苗木の樹冠が周辺の雑草木から半分以上露出している。
- C2：苗木の樹冠が周辺の雑草木から半分未満露出している。
- C3：苗木と雑草木の梢端が同じ位置にある。
- C4：苗木が雑草木に完全に覆われている。

植栽当年の気象条件を把握するため、試験地から最も近い秋田県由利本荘のアメダス観測点（試験地からの距離 20.8 km）における日平均気温と降水量、日照時間（気象庁，2021）を平年値と比較した。

4. 解析方法

植栽時点における苗木サイズを明らかにするため、植栽直後の 2015 年 6 月 3 日に調査した地際直径、樹高、形状比について Tukey-Kramer 法により苗木規格間で比較した。

裸苗と仕様 A 及び仕様 B で植栽されたコンテナ苗の活着成績については、植栽直後、1.5 ヶ月、3.5 ヶ月、並びに 2016 年 3 月を対象として Kaplan-Meier 法により苗木規格・植栽仕様別に生存曲線を算出し、Log-rank 検定を実施した。5 %有意水準で有意差が確認された場合、Bonferroni 検定を実施し、生存曲線間の違いを調べた。最も生存率が高かった仕様 B のコンテナ苗について、植栽後の成長を裸苗と比較するため、地際直径、樹高及び形状比について調査時期別に Tukey-Kramer 法による多重比較を実施した。また地際直径及び樹高の成長期毎の相対成長率を次式により算出し、Tukey-Kramer 法による多重比較を行った。

$$\text{相対成長率} = \ln(\text{成長後の値}) - \ln(\text{成長前の値})$$

コンテナ苗について、植栽仕様の違いが 5 年後までの生存に与える影響を明らかにするため、300cc と 150cc それぞれについて植栽直後と 1 年ごとに Kaplan-Meier 法により植栽仕様別に生存曲線を算出し、Log-rank 検定を実施した。5 %有意水準で有意差が確認された場合、Bonferroni の検定により、植栽仕様による違いを調べた。また成長への影響を明らかにするため、裸苗との比較と同様に地際直径、樹高、形状比及び地際直径と樹高の相対成長率について、植栽仕様と成長期毎に集計し、Tukey-Kramer の多重比較を行った。統計解析は統計パッケージ R4.1.0 (R Core Team, 2021) を使用した。

Ⅲ. 結果

1. 植栽時点における苗木のサイズ

植栽直後の毎木調査結果を表 1 に示す。平均地際直径（±標準誤差）は裸苗で 8.3 ± 0.2 mm, 300cc で 8.4 ± 0.1 mm, 150cc で 6.2 ± 0.1 mm となっており、裸苗と 300cc に比較して 150cc が有意に小さかった (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。平均樹高は苗木規格間で有意に異なり、300cc が 38.3 ± 0.4 cm で最も大きく、次いで 150cc が 30.7 ± 0.3 cm, 裸苗が 23.6 ± 0.5 cm となっていた。形状比もまた苗木規格間で有意に異なり、150cc が 50.8 ± 0.6 で最も大きく、次いで 300cc が 46.4 ± 0.6 , 裸苗が 28.7 ± 0.6 であった。

表－1 植栽時点における苗種別サイズ

	n	地際直径(mm)	樹高(cm)	形状比 ³⁾
裸苗	72	8.3 ± 0.2 ^{b 1) 2)}	23.6 ± 0.5 ^a	28.7 ± 0.6 ^a
300cc	288	8.4 ± 0.1 ^b	38.3 ± 0.4 ^c	46.4 ± 0.6 ^b
150cc	288	6.2 ± 0.1 ^a	30.7 ± 0.3 ^b	50.8 ± 0.6 ^c

1) 平均値±標準誤差。2) 異なるアルファベットは苗種間で有意に異なることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。3) 樹高/地際直径。

2. 裸苗との比較

植栽から1年目までの平均生存率の推移をコンテナ苗（仕様A, B）と裸苗で比較した（図－4）。コンテナ苗（仕様B）の生存率（±標準誤差）は期間を通じて最も高く、いずれも90%を超えていた。コンテナ苗（仕様A）は、9月調査時までには300ccで65.3±5.0%，150ccで63.9±17.4%へと低下し、植栽から1年後には300ccで52.8±3.7%，150ccで50.0±16.8%となっていた。裸苗の生存率は、植栽から9月調査時点には40.3±5.0%へ低下し、植栽1年後には25.0±2.4%へとさらに低下していた。また裸苗（3月植栽）では、9月調査時点で35.0±5.5%，1年目で31.3±5.5%であった。Kaplan-Meier法により算出された生存曲線間には有意差が認められ（Log-rank, $\chi^2=292$, $p < 0.05$ ）、事後検定の結果、コンテナ苗2種（仕様A）とコンテナ苗2種（仕様B）、そして裸苗の生存曲線はそれぞれ有意に異なっていた（Bonferroni, $p < 0.05$ ）。

最も生存率の高かったコンテナ苗（仕様B）と裸苗について、植栽から5年間の平均地際直径、平均樹高及び平均形状比の推移を図－5に示す。平均地際直径では、植栽3年目まではコンテナ苗150ccがコンテナ苗300cc、裸苗に比較して有意に小さかったが、コンテナ苗300ccと裸苗の間に有意差は確認されなかった（Tukey-Kramer, $p < 0.05$ ）。植栽4年目は3つの苗木規格間で有意に異なり、裸苗で最も大きく150ccが最も小さかった。植栽から5年目は有意ではないものの、4年目と同様の傾向が継続しており、各平均地際直径（±標準誤差）は裸苗で63.0±8.1mm、300ccで55.0±1.5mm、150ccで50.4±1.8mmであった。平均樹高は植栽時点で有意に異なり、300ccが最も大きく、裸苗が最も小さかった（表－1, 図－5）。植栽1年目には300ccのみ有意に大きかった（Tukey-Kramer, $p < 0.05$ ）。2年目には300ccと裸苗の間に有意差がなくなり、150ccのみ有意に小さかった。3年目は前年同様150ccのみが有意に小さく、有意ではないものの平均値では裸苗の樹高が300ccよりも高くなった。4年目以降は苗木規格間で差は見られず、5年目の各平均樹高（±標準誤差）は裸苗で165.0±14.8mm、300ccで166.8±4.6mm、150ccで158.0±5.3mmであった。平均形状比は植栽時点で有意に異なっており、150ccが最も高く、裸苗で最も低かった（表－1, 図－5）。植栽1年目はコンテナ苗2種の有意差はなく、裸苗のみ有意に小さかった（Tukey-Kramer, $p < 0.05$ ）。2年目以降は2種のコンテナ苗の形状比が減少して苗木規格間の有意差はなくなり、形状比30前後となった。

裸苗とコンテナ苗（仕様B）について、成長期別の成長率を比較した（図－6）。地際直径成長率につ

いて1成長期目は苗木規格間で差は見られず、その平均値（±標準誤差）は裸苗で 0.03 ± 0.03 、300ccで 0.05 ± 0.01 、コンテナ苗150ccで 0.07 ± 0.02 であった。2成長期以降は、いずれの苗木規格も1成長期目よりも高い成長率を示した。苗木規格間では、2成長期は有意差が認められなかった。3成長期目は300ccに比較して150ccで高かったが（Tukey-Kramer, $p < 0.05$ ）、2種のコンテナ苗と裸苗の間に有意差はなかった。4成長期は苗木規格間で有意に異なり、裸苗（ 0.61 ± 0.10 ）が最も高く、次いで150cc（ 0.47 ± 0.02 ）、300cc（ 0.42 ± 0.01 ）となっていた。5成長期は苗木規格間での有意差が見られなかった。樹高成長率について、1成長期においては苗木規格間での有意差は認められず、その平均値（±標準誤差）は裸苗で 0.06 ± 0.03 、300ccで 0.05 ± 0.01 、150ccで -0.02 ± 0.04 であった。2成長期以降は地際直径同様いずれも1成長期に比較して成長率が高くなる傾向が見られた。苗木規格間で比較した結果、2成長期は裸苗が 0.59 ± 0.06 、300ccが 0.24 ± 0.02 、150ccが 0.34 ± 0.04 となっており、裸苗がコンテナ苗2種に比較して有意に高かった（Tukey-Kramer, $p < 0.05$ ）。3成長期ではすべての苗木規格間で有意な差が見られ、裸苗（ 0.65 ± 0.06 ）が最も高く、次いで150cc（ 0.49 ± 0.02 ）、300cc（ 0.41 ± 0.02 ）であった。4、5成長期においては苗木規格間に有意差は認められなかった。

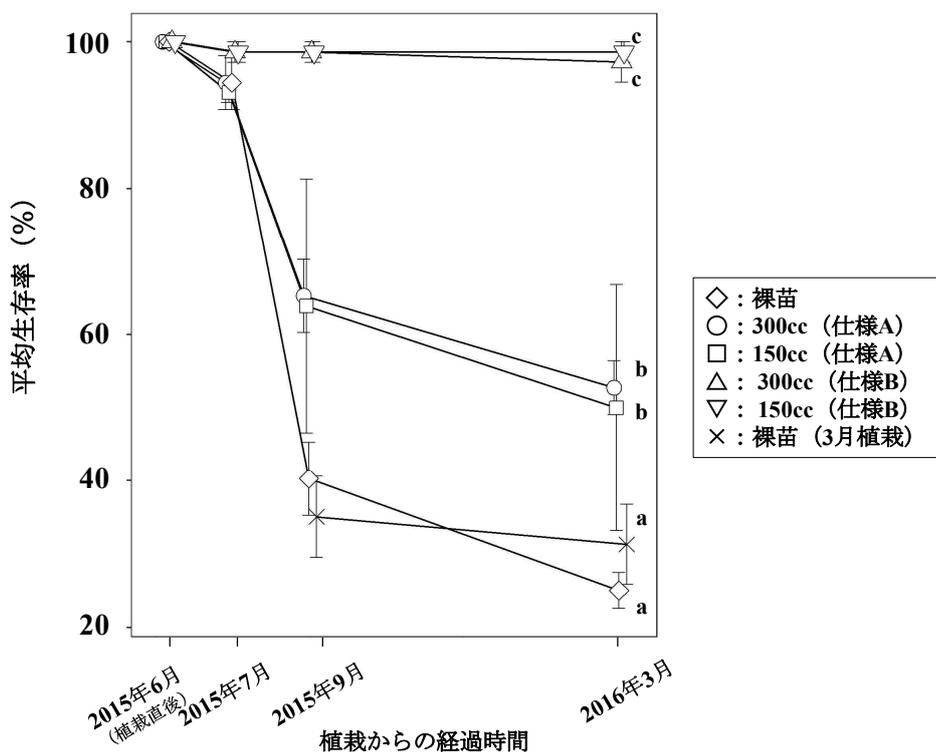
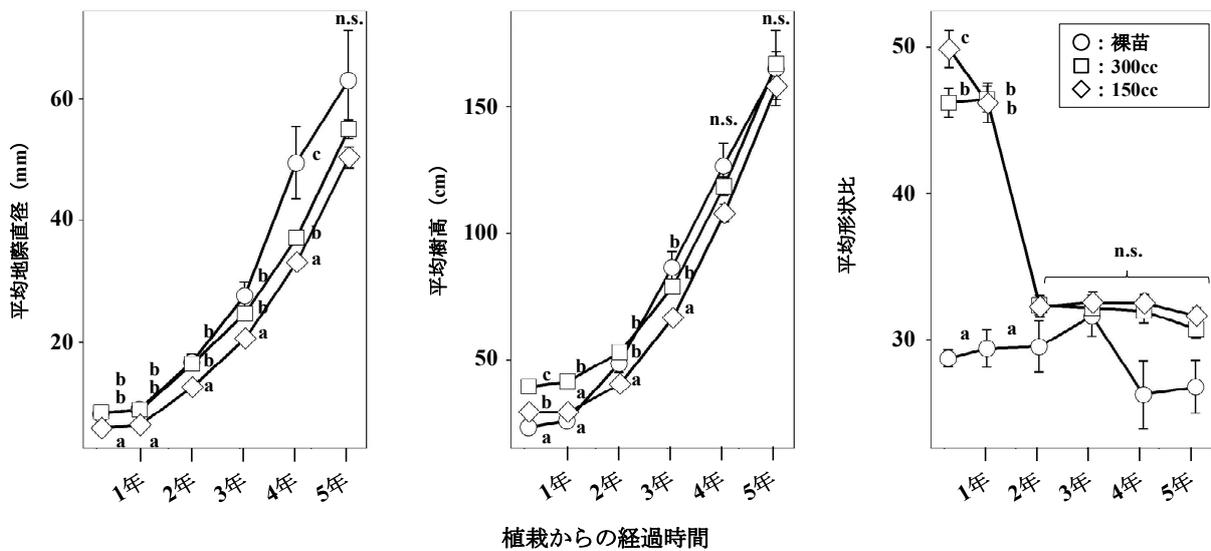
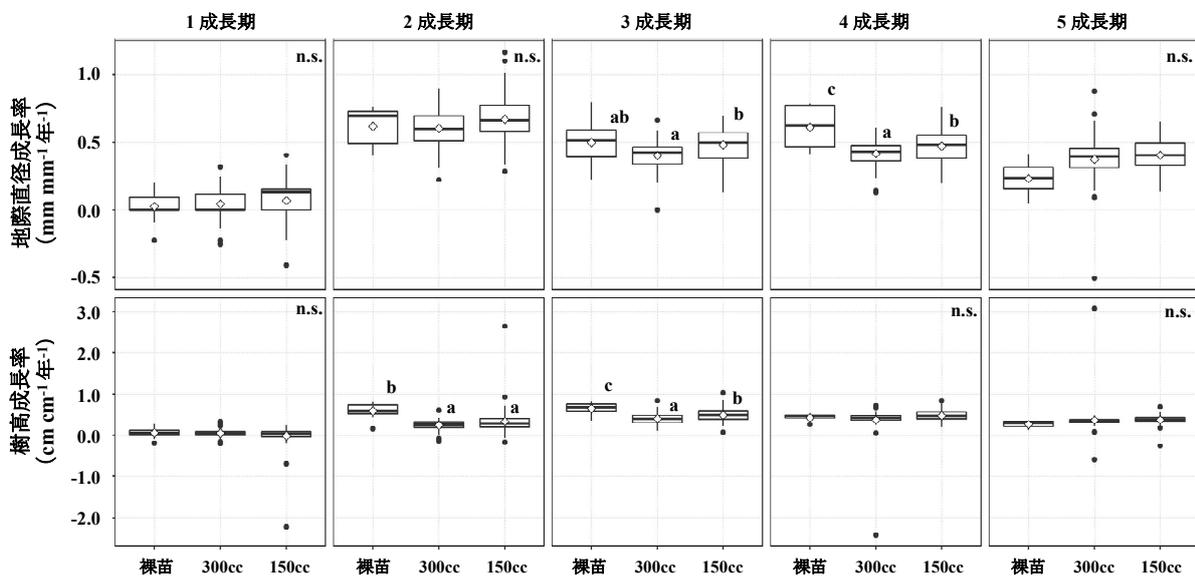


図-4 裸苗及びコンテナ苗（植栽仕様A、B）の植栽1年目までの平均生存率の推移
 エラーバーは標準誤差を示す。異なるアルファベットはKaplan-Meier法により算出された生存曲線間で有意差があることを示す（Bonferroni, $p < 0.05$ ）。



図－5 裸苗及びコンテナ苗（植栽仕様B）の植栽5年目までの成長
 エラーバーは標準誤差を、異なるアルファベットは調査時期別の苗種間で有意に異なることを示す（Tukey-Kramer, $p < 0.05$ ）。



図－6 裸苗及びコンテナ苗（植栽仕様B）の成長期別成長率
 箱はデータの四分位範囲、箱内の線は中央値、箱内の「◇」は平均値、ひげは四分位範囲の1.5倍の範囲に収まる最も離れたデータの最大と最小、「・」は外れ値を示す。また異なるアルファベットは苗種間で有意に異なることを示す（Tukey-Kramer, $p < 0.05$ ）。

3. コンテナ苗における植栽仕様の影響

植栽から5年目までの植栽仕様別の平均生存率の推移を図-7に示す。300ccの生存率は1年目に減少し、その後の変化は植栽仕様にかかわらず少なかった(図-7左)。5年目における平均生存率(±標準誤差)は仕様Aが $52.8 \pm 3.7\%$ 、仕様Bが $97.2 \pm 2.8\%$ 、仕様Cが $87.5 \pm 0.0\%$ 、仕様Dが $70.8 \pm 2.4\%$ であった。Kaplan-Meier法により算出された生存曲線間には有意差が認められた(Log-rank検定、 $\chi^2=204$, $p<0.05$)。事後検定の結果、すべての仕様間で有意差が認められ、仕様Bの生存曲線が最も高く、次いで仕様C, D, Aの順に低くなっていた(Bonferroni, $p<0.05$)。150ccの生存率も1年目までに減少し、いずれの仕様においてもその後の変化は少なかった(図-7右)。5年目における平均生存率は仕様Aが $47.2 \pm 17.4\%$ 、仕様Bが $97.2 \pm 1.4\%$ 、仕様Cが $72.2 \pm 17.4\%$ 、仕様Dが $72.9 \pm 2.1\%$ 、仕様Eが 33.3% であった。Kaplan-Meier法により算出された生存曲線間には有意差が認められ(Log-rank検定、 $\chi^2=238$, $p<0.05$)、事後検定の結果、仕様Bの生存曲線が他の仕様に比較して有意に高かった(Bonferroni法, $p<0.05$)。また仕様C, Dの生存曲線が仕様A, Eに比較して有意に高かった。

植栽から5年目におけるコンテナ苗の地際直径、樹高及び形状比を植栽仕様間で比較した(表-2)。地際直径について、300ccでは仕様AとCがBに比較して有意に大きかった(Tukey-Kramer, $p<0.05$)。仕様DはBよりもやや高い平均値を示したが、有意差は認められなかった。150ccでは仕様AとDが仕様B, Cに比較して有意に大きかった。仕様Eは他の仕様との間に有意差はなかった。樹高について、300ccでは仕様Cは仕様B, Dよりも有意に大きかった。仕様Aも仕様AとCと同程度に大きかったが、有意差は仕様Bとの間にのみ認められた。150ccでは仕様A, DがBよりも有意に大きかったが、CとEは他の仕様との間に有意差は確認されなかった。形状比について、300ccでは仕様Cが仕様A, Bに比較して有意に高かったが、各仕様間の差は小さかった。150ccについても仕様CとDの間にのみ有意差が見られたが、その差は小さかった。

コンテナ苗の成長期毎に地際直径及び樹高の成長率を植栽仕様間で比較した(地際直径:図-8, 樹高:図-9)。地際直径成長率において、300ccでは植栽仕様にかかわらず1成長期が最も低く、各仕様平均成長率は $0.04 \sim 0.13$ であった。2成長期には $0.61 \sim 0.69$ へと高くなったが、以降はやや低下し、 0.4 前後で推移していた(図-8上)。2成長期目においては植栽仕様間でも差があり、仕様A, Cが仕様Bに比較して有意に高かった(Tukey-Kramer法, $p<0.05$)。そのほかの成長期では植栽仕様間で有意な差は見られなかった。150ccにおいて全体的な傾向は300ccと同様で、1成長期が最も低い $0.06 \sim 0.22$ 、2成長期で $0.66 \sim 0.85$ へと向上した後、3~5成長期ではやや低い $0.41 \sim 0.51$ で推移していた(図-8下)。植栽仕様間で比較した結果、1成長期では、仕様C, Dが仕様A, Bに比較して有意に高かった。2成長期では仕様Aが仕様B, C, Dに比較して有意に高かった。3成長期で有意な差が見られたのは仕様Aと仕様Cのみであった。4, 5成長期では有意差は認められなかった。樹高成長率において、300ccの1成長期の成長率は 0 前後であったが、2成長期以降はやや高い $0.24 \sim 0.54$ の水準で推移していた(図-9上)。植栽仕様間では、1, 2成長期は有意差が確認され(Tukey-Kramer法, $p<0.05$)、いずれも仕様Bが1成長期では仕様Cよりも、2成長期では仕様A, Cよりも有意に低かった。150ccにおいても全体的傾向は300ccと同様であり、1成長期は成長率が 0 前後であったが、2成

長期以降は0.29~0.66の水準で推移していた(図-9下)。3成長期と5成長期では植栽仕様間で有意差が確認され、3成長期では仕様C、Dが仕様A、Bに比較して有意に大きかった。5成長期においては仕様AがDに比較して有意に大きかったが、それ以外の仕様間で差は認められなかった。

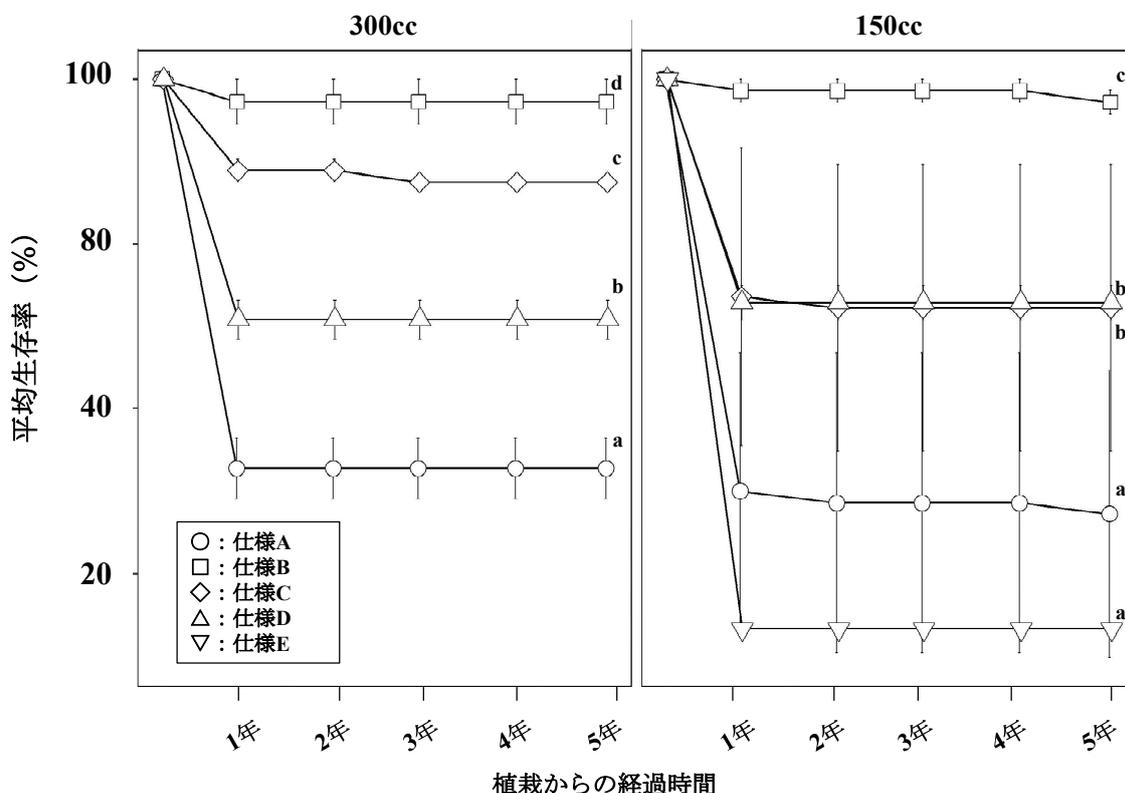


図-7 植栽5年目までのコンテナ苗の植栽仕様別生存率の推移
 エラーバーは標準誤差を示す。異なるアルファベットはKaplan-Meier法により算出された生存曲線間で有意差があることを示す (Bonferroni, $p < 0.05$)。

表-2 植栽5年目における植栽区別サイズ

植栽仕様	300cc			150cc		
	地際直径(mm)	樹高(cm)	形状比	地際直径(mm)	樹高(cm)	形状比
A	65.7 ± 2.0 ^{b 1) 2)}	199.0 ± 6.7 ^{bc}	30.3 ± 0.6 ^a	69.6 ± 3.5 ^b	203.1 ± 8.6 ^b	29.7 ± 0.9 ^{ab}
B	55.0 ± 1.5 ^a	166.8 ± 4.6 ^a	30.7 ± 0.6 ^a	50.4 ± 1.8 ^a	158.0 ± 5.3 ^a	31.6 ± 0.6 ^{ab}
C	64.3 ± 1.9 ^b	211.1 ± 6.0 ^c	33.2 ± 0.6 ^b	55.0 ± 1.7 ^a	177.9 ± 5.2 ^{ab}	32.8 ± 0.8 ^b
D	58.9 ± 2.3 ^{ab}	182.5 ± 5.1 ^{ab}	31.8 ± 0.7 ^{ab}	65.3 ± 3.0 ^b	191.2 ± 9.3 ^b	29.3 ± 0.8 ^a
E				54.8 ± 5.1 ^{ab}	159.3 ± 11.0 ^{ab}	29.3 ± 1.5 ^{ab}

1) 平均値±標準誤差。2) 異なるアルファベットは植栽仕様間で有意に異なることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。

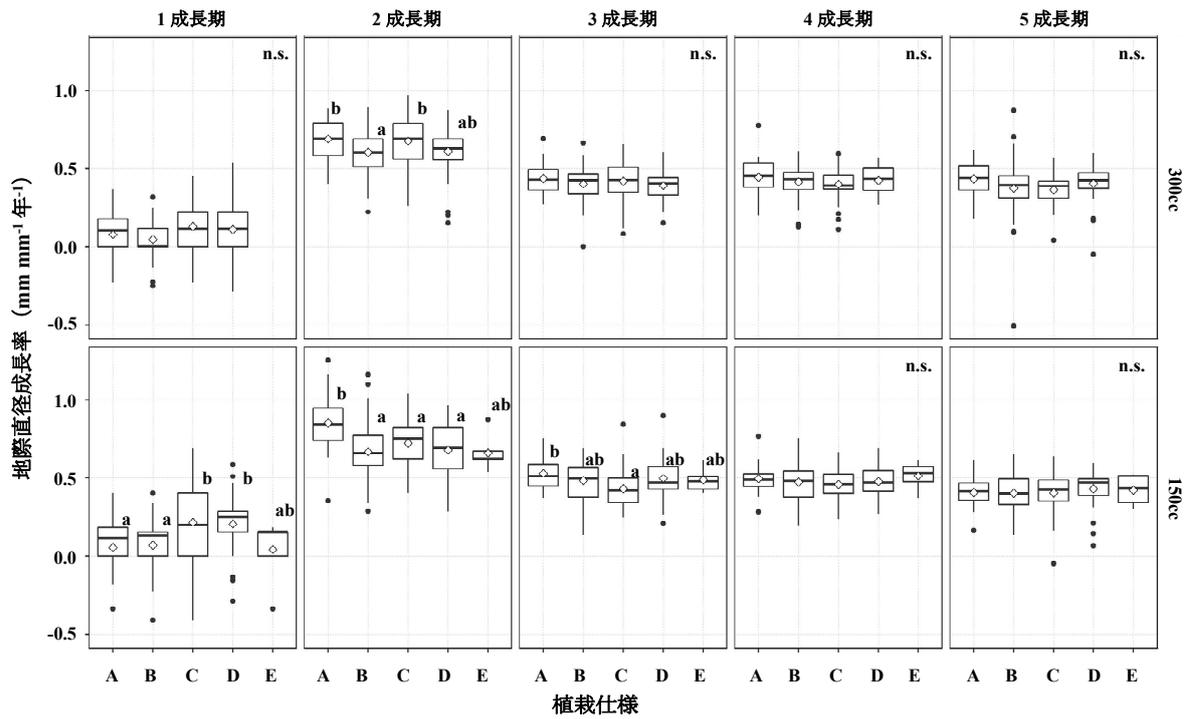


図-8 コンテナ苗の植栽仕様及び成長期毎の地際直径成長率
 箱ひげ図の定義は図-6に同じ。異なるアルファベットは調査時期別の植栽仕様間で有意に異なることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。

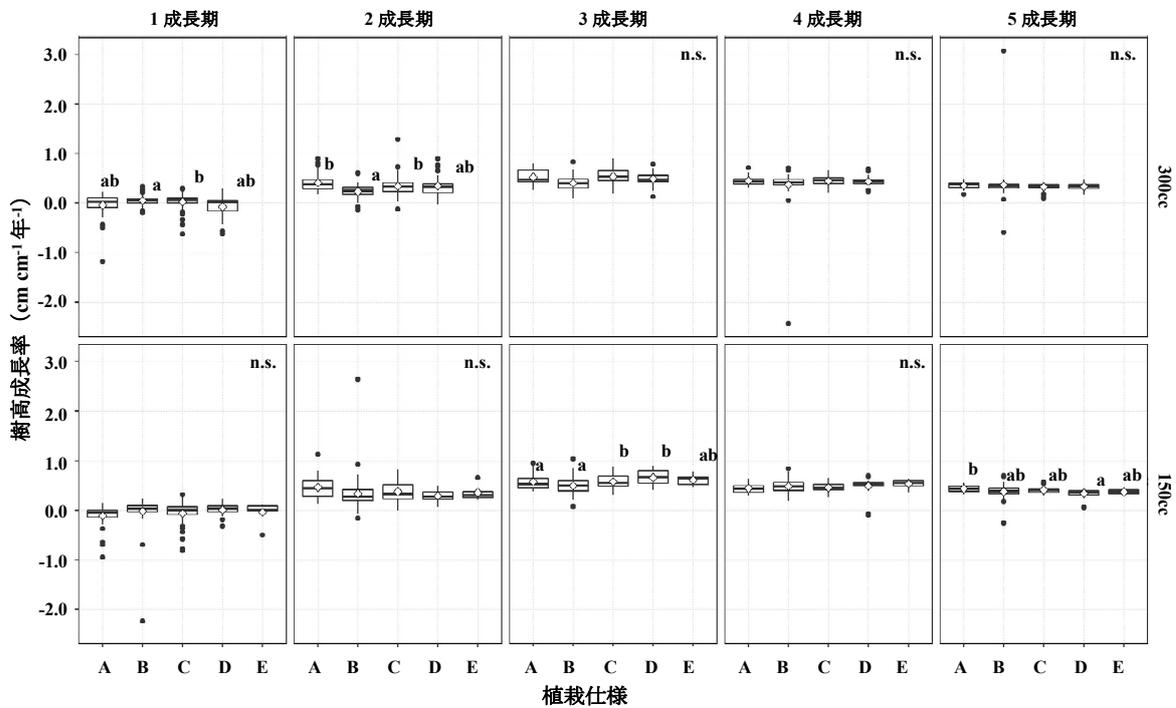


図-9 コンテナ苗の植栽仕様及び成長期毎の樹高成長率
 箱ひげ図の定義は図-6に同じ。異なるアルファベットは調査時期別の植栽仕様間で有意に異なることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。

4. 植栽初年度の環境

2015年9月時点における苗木周辺の植生被度を図-10に、被圧程度を図-11に示す。苗木規格にかかわらず、裸苗と同じ仕様である仕様Aの植生被度が60以上で最も高く、仕様C, D, Eについても40~60程度となっており、仕様Bに比較して有意に高かった(図-10, Tukey-Kramer法, $p < 0.05$)。また植生による苗木の被圧程度について、仕様Aは苗木規格にかかわらずC4に区分される状態の苗木の割合が40~60%と高かった(図-11)。また仕様C, D, E, Fについては苗木規格や仕様の違いによる明瞭な傾向は見られず、苗木のうち10~50%がC4に区分された。一方で、仕様BにおいてはC4に区分される個体は少ないか、確認されなかった。

2015年における4~12月の月平均気温の平年値との差、並びに月降水量と日照時間の平年値比を図-12に示す。月平均気温について、4月は平年値+1.2℃, 5月は+2.0℃, 6, 7月では+0.8℃であった。8, 9月は平年並みの気温であったが、10月は平年の-0.7℃, 11, 12月はそれぞれ平年の+1.4℃, +1.2℃となっていた。降水量について、4月(101%)は平年並みであったが、植栽を実施した5月は平年の40%程度となっていた。また6月以降の降水量も平年より少なく、特に8月は平年の35%であった。9月以降も降水量は平年よりもやや少ない傾向が続いていた。日照時間について、4月は112%で平年よりもやや長く、5~7月は120~130%となっており、平年よりも長かった。8, 9及び11月は平年よりも短く、10, 12月は平年よりも長かった。

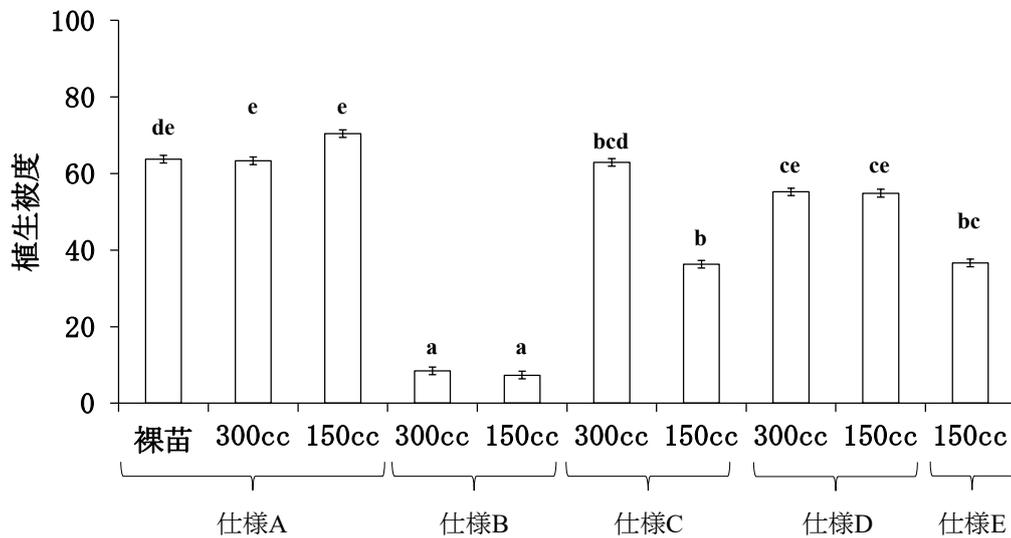


図-10 2015年9月時点における植栽木周辺の植生被度
エラーバーは標準誤差を表す。異なるアルファベットは有意に異なることを示す (Tukey-Kramer法, $p < 0.05$)。

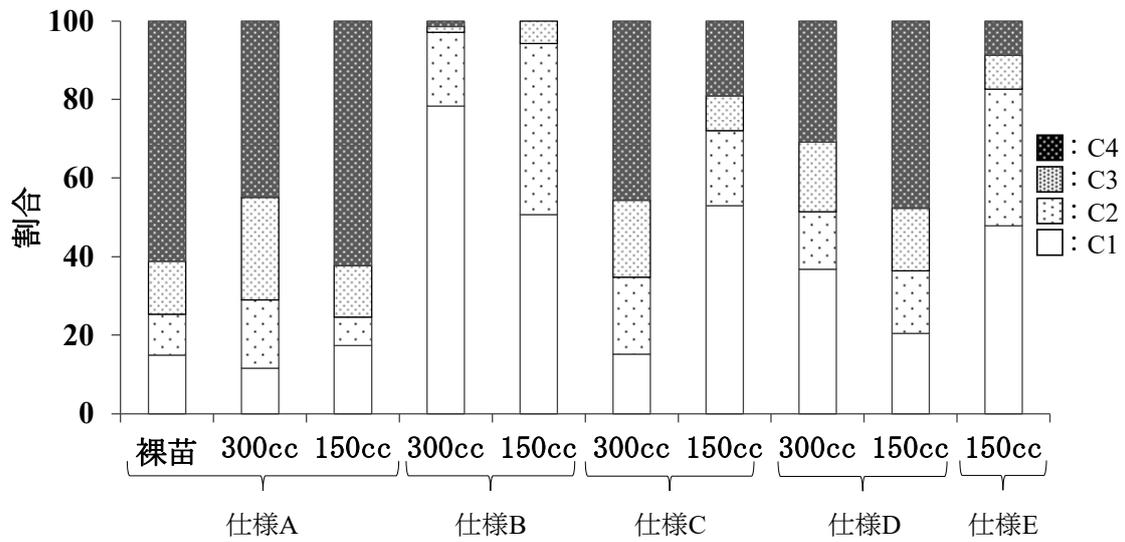


図-1 1 2015年9月時点における苗木規格及び植栽仕様毎の被圧程度カテゴリ別本数割合

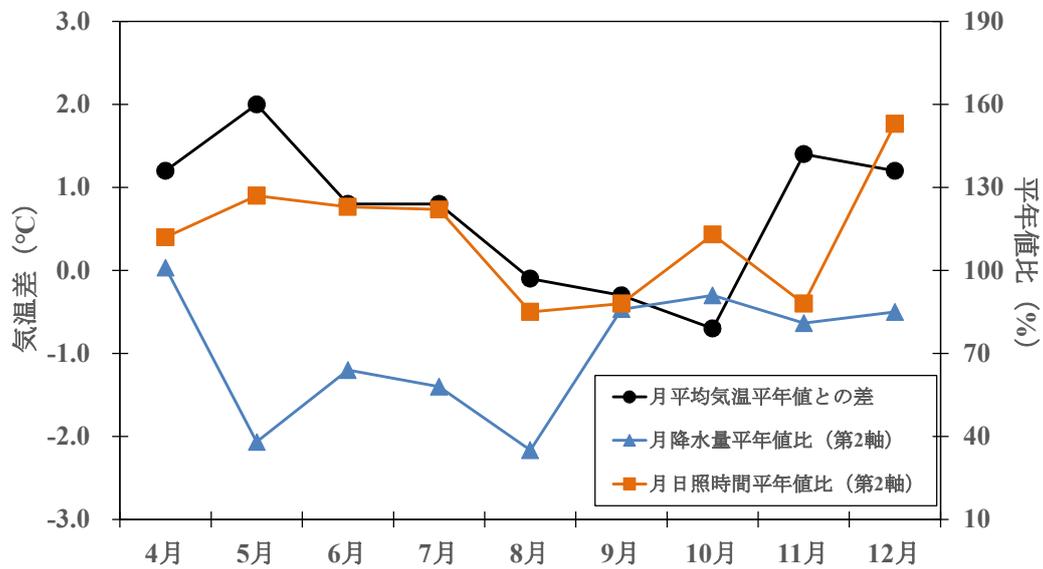


図-1 2 アメダス（本荘）における2015年4月から12月の平均気温の平年値との差（第1軸）と月降水量、月日照時間の平年値比（第2軸）

IV. 考察

1. コンテナ苗の活着成績と特性

海岸林造成におけるクロマツの植栽は当年成長が始まる前の春植えが一般的である（河合，2010）。本研究における植栽は5月26日であり，植栽時期の遅れが苗木の活着に影響した可能性がある。しかし，2015年9月時点における裸苗の生存率は，隣接する裸苗（3月植栽）の生存率と同程度となっており，植栽時期の異なる2つの裸苗の生存曲線間に有意差は確認されなかった（図-4）。このことから植栽時期が苗木の活着に与えた影響は少なかったと考えられる。

活着成績について，裸苗と同じ仕様で植栽されたコンテナ苗（仕様A）の1年目までの生存率は50%程度であり，裸苗（25%）に比較し有意に高かった（図-4）。さらに仕様Bで植栽されたコンテナ苗の生存率は，最も簡易な仕様であったにもかかわらず300ccと150ccともに95%以上で，裸苗やコンテナ苗（仕様A）よりも有意に高い生存率を維持していた。これらのことから，コンテナ苗は，同一の仕様で植栽した場合には裸苗よりも高い生存率となること，さらには土壌改良や施肥がない簡易な仕様でより良好な活着成績が期待できることが明らかとなった。

コンテナ苗と裸苗の活着に大きな差が生じた要因の1つとして，苗木周辺の競合植生が挙げられる。植栽当年9月に苗木周辺の植生について調査した結果，裸苗の周辺には被度60以上の植生が確認され，被圧程度C4に区分される苗木が60%以上確認された（図-10及び11）。一方で，最も簡易な仕様Bで植栽されたコンテナ苗における植生被度は10程度であり，被圧程度もC1やC2に区分される，すなわち被圧されていない個体が9割以上を占めた。この周辺植生の違いは植栽仕様によるものと推察される。裸苗は植え穴の中に，砂とともに堆肥と粉炭が混入する仕様となっており，さらに周辺地表に緩効性肥料の施肥を実施する。この土壌改良（堆肥と粉炭）と施肥は苗木の活着を促すためのものであるが，雑草木の繁茂にもつながった可能性が高い。実際，仕様Aで植栽されたコンテナ苗の周辺には裸苗と同程度の植生が確認され，仕様Cよりも生存率は低下していた（図-4及び図-7）。つまり，手厚い植栽仕様によって繁茂した競合植生が，苗木を被圧したために生存率の低下を招いたと考えられる。他方，コンテナ苗においては植栽時の土壌改良や施肥がなくても高い活着成績が期待できる。これにより裸苗よりも植栽効率が向上するだけでなく，競合植生が制限されるために下刈りコストの低減にもつながると予想される。この高い植栽効率や低い下刈りコストは，コンテナ苗の優位性の1つと考えられる。

2つ目の要因として考えられるのは植栽当年の気候条件である。2015年5月の平均気温は平年値に比較して2℃高く，その後の6月，7月も平年値よりも約1℃高かった（図-12）。降水量について，4月は平年並みであったが，5月は平年の4割程度，6，7月も6割程度であった。また，日照時間も4月から7月は平年よりも長かった。これらのことから植栽時の土壌は平年以上に乾燥していた可能性が高い。また植栽後数ヶ月間は平年に比較して高温少雨という環境条件が継続していた。これら高温と水分不足が前述の競合植生による被圧とともに裸苗の生存率低下に影響したと推察される。一方で，コンテナ苗はこの高温少雨という気象条件下でも高い生存率を維持していた。これはコンテナ苗が裸苗に比較して高い環境ストレス耐性をもつことを示唆している。コンテナ苗は根系が乾燥しにくいために環境ストレスへの抵抗性が高いとされる（BCMOF，2001）。本研究の植栽地は乾燥しやすい砂

質土壌であったことから、この特性が顕著に発揮されたものと推察される。この環境ストレスへの高い耐性はクロマツコンテナ苗の2つ目の優位性と考えられる。

2. 裸苗とコンテナ苗の成長の違い

八木橋ら（2015）は当年生のコンテナ苗を裸苗2年生とともに植栽し、植栽時の幹長の差は1成長期経過後になくなることを報告している。本研究における植栽時点の裸苗と2種のコンテナ苗の地上サイズは、地際直径、樹高、形状比いずれについても苗木規格間で有意差が確認された（表-1）。その後、2種のコンテナ苗（仕様B）の5年間の地上サイズを裸苗と比較した結果、地際直径においては植栽から5年で、樹高においては4年で苗間に差が見られなくなった（図-5）。成長率について見ると、1成長期目は地際直径・樹高ともに苗木規格間で有意差はなかったが（図-6）、2~4成長期では地際直径、樹高ともに裸苗がコンテナ苗に比較して高くなる時期が複数確認された。これは植栽時の土壌改良や施肥の効果であると推察される。しかし、5成長期目には地際直径・樹高苗ともに成長率の差は確認されなくなったことから、植栽時の地上サイズの差は植栽から4,5年でなくなるものと考えられた。また、形状比についても植栽初期はコンテナ苗が有意に高く、徒長気味だったが（表-1及び図-5）、2年目までに減少し、裸苗との有意差は消失した（図-5）。これらのことから裸苗とコンテナ苗は活着さえしてしまえば、数年後には成長や形質に大きな差はなくなる可能性が示唆された。

3. 海岸砂丘に適したコンテナ苗の植栽仕様

2成長期までの地際直径成長率は300cc、150ccとも仕様Bが他の仕様に比較して低い傾向が確認された。特に2成長期における地際直径成長率は300cc、150ccともに仕様Aが有意に高くなっていた（図-8）。仕様Aは裸苗と同一の、最も手厚い仕様であることから、土壌改良や施肥により苗木の肥大成長が促進されたと考えられる。3成長期目以降に植栽仕様による差が小さくなっているのは、苗木が定着し、自ら光合成や養水分の吸収を担うようになり、仕様の影響が相対的に少なくなったためであると推察される。樹高成長率について、300ccにおいては1,2成長期で仕様B以外が高くなる傾向が確認された（図-9）。このことから300ccにおいては施肥等により植栽初期の樹高成長が促進される可能性が高いと考えられた。一方で150ccでは、植栽仕様による有意な差は1,2成長期には確認されなかった。この理由としては、苗の物理的、あるいは生理的な反応が影響していると考えられる。150ccは初期の形状比が裸苗や300ccに比較して最も高く、徒長気味であった（表-1）。しかし、コンテナ苗（仕様B）の形状比は1,2年目にかけて急激に低下していた（図-5）。八木橋（2015）においても同様の結果が得られていることから、初期成長における形状比の低下はコンテナ苗の特性と思われる。一般に形状比は樹木の倒れにくさに関係している。徒長気味であった150ccコンテナ苗は、自身の物理的安定を得るために樹高成長よりも肥大成長を優先した可能性が高い。以上のことから、土壌改良や施肥は、特に植栽初期の肥大成長を促進するという意味で有効であると考えられる。

一方で、前述したように植栽時の土壌改良や施肥は競合植生の繁茂を助長する。植栽から5年間の植栽仕様別の生存率を比較した結果、300cc、150ccともに仕様B以外の仕様で有意に低くなっており、その生存率の低下は主に植栽から1年目に生じていた（図-7）。植栽年9月の苗木周辺の植生被度は

仕様 B 以外の仕様が有意に高く (図-10), 被圧程度も C4 に区分される苗木の割合が高かった (図-11)。これらのことから, 裸苗と同様, 競合植生による被圧が生存率低下を招いたと推察された。つまり, 植栽時の土壌改良や施肥は植栽後の成長, 特に肥大成長を促進する効果は認められるものの, 競合植生の繁茂を助長し, 生存率の低下を招くおそれがあると考えられる。前述したように植栽から 5 年後の地上サイズを比較したとき, 最も簡易な仕様 B と裸苗との間に有意な差はない (図-5)。裸苗と同等の生育を期待するのであれば土壌改良や施肥は生存率低下のリスクの方が大きく, むしろ不要であると考えられる。

4. おわりに

海岸林造成におけるクロマツの植栽密度は一般に 10,000 本/ha と山地に比較して密植である。これは早期の林冠閉鎖を期待するとともに, 初期生育の面で最良と判断されたためである (坂本, 2006)。本研究の結果, コンテナ苗が裸苗に比較して高い活着成績を示すことが明らかとなった。これにより低密度植栽の検討が可能となり, 造成コストの低減, そして松枯れ被害林の再生に貢献すると考えられる。しかし, 本研究の植栽試験地は砂丘後背地に位置し, 直接的な海風の影響が緩和された環境にある。より汀線に近い風衝地などでは生存率が低下する可能性が高いことから, 異なる立地環境における植栽試験の実施が必要である。またコンテナ苗の価格は裸苗よりも高価である。これは育苗実績が少なく, 最適な培地組成, 冠水, 施肥などの情報も不十分であるためと考えられる。今後これらの技術が確立され, 育苗コストの低減等がなされれば, 販売単価が下がり, コンテナ苗はより普及するものと予想される。さらに, 2011 年の東日本大震災以降, 海岸林には高い津波耐性を持つことが求められている。新田 (2021) は 5 年生クロマツコンテナ苗の根系調査を実施し, 裸苗に比較してコンテナ苗の T/R 比 (地上部重/地下部重) が高く, 根系の発達という点で今後も調査事例の蓄積が必要であるとしている。本研究においてはクロマツコンテナ苗の粉炭や堆肥といった土壌改良のみの植栽仕様については検討していないが, 根系の初期成長に土壌改良が関係している可能性は高い。コンテナ苗の特性が十分に検証され, 技術として体系化されることを期待する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 試験地造成に協力していただいた県由利地域振興局森づくり推進課の関係各位にこの場を借りて感謝申し上げます。また野外調査に協力していただいた林業研究研修センターの研究者諸氏並びに歴代の臨時職員の皆様に心からお礼申し上げます。

引用文献

秋田県 (2016) 秋田沿岸海岸保全基本計画。

秋田県農林水産部林業木材産業課 (2021) 秋田県森林・林業の概要。

BCMOF (2001) Effects of stock type on seedling performance in the northern interior of British Columbia: twenty-year results. British Columbia Ministry of Forest. Silviculture Note29 : 1-6

- 土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 (1975). 林試研報 280:1-28.
- 原山尚徳・来田和人・今 博計・石塚 航・飛田博順・宇都木 玄 (2016) 異なる時期に植栽したカラマツコンテナ苗の生存率, 成長及び生理生態特性. 日林誌 98 : 158-166
- 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会 (2012) 今後の海岸防災林の再生について.
- 平田令子・大塚温子・伊藤 哲・高木正博 (2014) スギ挿し木コンテナ苗と裸苗の植栽後 2 年間の地上部成長と根系発達. 日林誌 96 : 1-5
- 櫃間 岳・八木橋 勉・松尾 亨・中原健一・那須野 俊・野口麻穂子・八木貴信・齋藤智之・柴田 鏡江 (2015) 東北地方におけるスギコンテナ苗と裸苗の成長. 東北森林科学会誌 20 : 16-18
- 壁谷大介・宇都木 玄・来田和人・小倉 晃・渡辺直史・藤本浩平・山崎 真・屋代忠幸・梶本卓也・田中 浩 (2016) 複数試験地データからみたコンテナ苗の植栽後の活着及び成長特性. 日林誌 98 : 214-222
- 金子智紀・田村浩喜 (2007) 広葉樹を活用した海岸防災林造成技術の開発. 秋田県森技研報 17 : 37-60
- 河合英二 (2010) 海岸環境と海岸林. 日緑工誌 35(4) : 513-517
- 気象庁 (2012) メッシュ平年値 2010. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (参照 2021-12-19)
- 気象庁 (2021) 過去の気象データ・ダウンロード.
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (参照 2021-12-19)
- 国土地理院 (2021) 地理院地標準図タイル.
<https://cyberjapandata.gsi.go.jp/xyz/std/{z}/{x}/{y}.png> (参照 2022-2-16)
- 小谷二郎・千木 容・池田虎三・小倉 晃 (2019) 多雪地帯でのスギコンテナ苗の成長に対する苗木の大きさや植栽方法の影響. 石川県林試研報 50 : 6-11
- 近藤 晃・袴田哲司 (2017) ヒノキの 3 年生コンテナ大苗の植栽工期と初期成長-2 年生コンテナ普通苗との比較-. 静岡県農林技術研究所研究報告 10 : 91-97
- 成松真樹・八木貴信・野口麻穂子 (2016) カラマツコンテナ苗の植栽時期が植栽後の活着と成長に及ぼす影響. 日林誌 98 : 167-175
- 新田響平 (2021) 植栽から 5 成長期目までのクロマツコンテナ苗の根系. 令和 3 年度日本海岸林学会 宮城大会講演要旨集 : 20-21
- 小倉 晃・千木 容・小谷二郎・池田虎三・間明弘光 (2013) 石川県におけるマルチキャビティコンテナ苗の植栽コスト事例. -スギ・クロマツ-. 石川県林試研報 45 : 20-22
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 酒井 敦・北原文章・山中啓介・三島貴志・岩田若奈・島田博匡・奥田清貴・中島富太郎・山下由美子・藤井 栄・渡辺直史・鷹野孝司 (2019) 低コスト育林を目指した植栽試験におけるスギ・ヒノキ苗の活着率と初期成長. 日林誌 101 : 94-98
- 坂本知己 (2006) クロマツ海岸林の本数調整にともなう不安について. 山林 2006・9 (1468) : 28-36
- 森林総合研究所東北支所 (編) (2016) ワンポイント解説 海岸林造成技術の高度化に向けて.
- 諏訪錬平・奥田史郎・山下直子・大原偉樹・奥田裕規・池田則男・細川博之 (2016) 植栽時期の異な

- るヒノキコンテナ苗の活着と成長. 日林誌 98 : 176-179
- 内村慶彦・河野雄一・是枝久巳 (2017) 根鉢容量 150cc のスギコンテナ苗の生存率と初期樹高成長は裸苗や根鉢容量 300cc のコンテナ苗と異なるのか? -鹿児島県における春季植栽事例-. 森林立地 59 : 45-51
- 渡邊仁志・茂木靖和・三村晴彦・千村知博 (2017) ヒノキにおける実生裸苗と緩効性肥料を用いて育成した実生コンテナ苗の初期成長. 日林誌 99 : 145-149
- 渡邊仁志・茂木靖和・三村晴彦・千村知博 (2021) ヒノキ実生コンテナ苗の 4 年間の成長と下刈り年数短縮の可能性. 日林誌 103 : 232-236
- 八木橋 勉・中村克典・齋藤智之・松本和馬・八木貴信・柴田銃江・野口麻穂子・駒木貴彰 (2015) クロマツコンテナ苗の当年生苗利用と通年植栽の可能性. 日林誌 97 : 25-260
- 八木橋 勉・中谷友樹・中原健一・那須野 俊・櫃間 岳・野口麻穂子・八木貴信・齋藤智之・松本和馬・山田 健・落合幸仁 (2016) スギコンテナ苗と裸苗の成長と形状比の関係. 日林誌 98 : 139-145
- 山川博美・重永英年・久保幸治・中村松三 (2013) 植栽時期の違いがスギコンテナ苗の植栽後 1 年目の活着と成長に及ぼす影響. 日林誌 95 : 214-219
- 山川博美・重永英年・荒木眞岳・野宮治人 (2016) スギ苗木の樹高成長に及ぼす期首サイズと周辺雑草木の影響. 日林誌 98 : 241-246
- 関子光太郎 (2017) : 乾燥期に植栽したスギコンテナ苗と裸苗の活着, 生育及び積雪被害発生状況の比較. 森利誌 33 : 73-80

初期成長に優れたスギ次世代精英樹の開発

佐藤 博文・三浦 正嗣・丹羽 奎太

Development of elite tree for Sugi (*Cryptomeria japonica*) with excellent initial growth ability
in Akita Prefecture

Hirofumi Sato, Masatsugu Miura, Keita Niwa

要 旨

精英樹育種における次世代化の推進を目的として、下刈り経費の削減に有効な初期成長に優れたスギの開発に取り組んだ。候補木の選抜は、鹿角市から雄勝郡羽後町まで全県 8 か所の実生検定林における 30 年次から 32 年次調査データを用いて行った。被圧木等を除いた 7,816 本の調査木を対象として、材積成長が上位にある 433 本の机上選抜木を得た。これらの現地調査から採材に支障ない通直性を有し、剛性が周囲の個体より優れた候補木 47 個体を選抜した。5 月下旬から 6 月上旬に候補木の穂木を採取し、挿し木発根率と各候補木の 2 年生挿し木苗を用いて成長量を調べた。そして、発根率が 2.7% と極端に低かった 1 個体、苗高が第 1 世代精英樹の平均値 37.2 cm 以下となった 4 個体、移植後の得苗率が低く成長量を調査できなかった 3 個体の計 8 個体を候補木から除外した。また、これらの雄花着花性について、自然条件下での複数年にわたる調査とジベレリン 100ppm 水溶液を用いた着花促進処理による評価の結果を基に、最終的に絞り込んだ 16 候補木の中から秋田オリジナルとなる 9 品種を開発した。

I. はじめに

精英樹は、1955 年頃（昭和 30 年代初期）から全国的に展開された精英樹選抜事業において、木材生産力の増大を図るため、種穂の採取に供する母樹として各地から選抜された（林野庁，1980）。その育種目標は、成長が早いこと、単位面積当たりの収量が多いこと、通直であること、病虫害がないこと等であり、これまでにスギ、ヒノキ、マツなど約 9,100 本が選ばれている（田村ら，2017）。

秋田県では、1956 年から 1963 年までのあいだにこの事業で県内の民有林からスギ 70 系統、アカマツ 22 系統、クロマツ 14 系統を選抜し、これら精英樹採種園の造成と種子の生産、供給に取り組むとともに、スギについては県内 28 か所に検定林を設定し、様々な特性把握を進めてきた（秋田県林業技術センター，1998；林木育種推進東北地区協議会ら，2004）。このうち、18 か所の検定林では、30 年次定期調査を基に各精英樹から生産した実生苗の成長特性評価が 2020 年まで行われてきた（秋田県林業研究研修センター，2020）。そして、精英樹育種においては、昨今その結果を反映させた採種園の改良や次世代化を図るため、調査木の中で特に成長の良好な個体を第 2 世代精英樹（以下、エリートツリー）として開発を進め、より優れた種苗生産に用いるための新たな基盤整備が必要となっている（星ら，2013）。

エリートツリーの利点は、その優れた成長性にあり、造林初期費用の半分近くを占める下刈りコストの削減や伐期の短縮が可能となることから収益性の向上が期待できる(星・倉本, 2012; 袴田ら, 2014; 佐藤, 2021)。このため、本県で滞っている再造林を苗木の面から後押ししうる。エリートツリーの選抜基準は、表-1のとおりで、材積、幹の通直性、材の剛性及び雄花着花性について国が指定した基準を満たす必要がある(林木育種センター, 2012; 星・加藤, 2014)。また、同表右側に記載したようにエリートツリーや精英樹等の中でも、その材積成長が周囲の異なる家系の個体群による平均値 1.5 倍以上を示し、雄花着花性が低いものは、国の法律(林野庁, 2008)に基づき特定母樹とよばれる品種に指定されている。これらは、造林コスト削減の目的以外に、将来の脱炭素社会を見据えた二酸化炭素吸収源対策や花粉症対策等に有効な育種母材として需要と期待が高まりつつある(星・加藤, 2014; 田村ら, 2017; 川野・岡田, 2019)。

エリートツリーや特定母樹指定品種の多くは国が開発しているが、現時点での開発数は少なく、配布可能な区域も限られているため、育種基本区が同じ県には似通った品種が配布されてしまう可能性が高い(林木育種センター東北育種場, 2013)。このため、当該品種だけで種苗生産を行っていたのでは、本県の強みであるアキタスギというブランド力で他県のスギ材と差別化を図ることは困難と予想される。このような視点から、50年、100年先もアキタスギが持つ優れた材の特性を失うことなく、産地間競争に勝ち残れるように林業の成長化を図っていくためには、独自品種の開発が不可欠である。

県単独による特定母樹開発の取組については、2021年3月時点において、東北育種基本区では本県のほかに宮城県、山形県の3県、関東育種基本区では千葉県、静岡県、九州育種基本区では、福岡県、大分県、宮崎県及び鹿児島県の4県でみられ、計9県が進めている(東北育種基本区特定母樹等普及促進会議, 2021)。

以上のような背景から、当センターでは、精英樹の次世代化とオール秋田の種苗を用いて森林の若返りを図るため、秋田版エリートツリー(特定母樹の指定基準を満たす個体)の開発を行った。

II. 材料と方法

1. 材料

1) 供試検定林

候補木の選抜は、表-2及び図-1に示す8か所の実生検定林を対象とした。これらは、1979年から1986年のあいだに設定されたもので、北は鹿角市十和田山根から南は雄勝郡羽後町上仙道まで県全域にわたって位置している。標高は70m~438mまでで、大半がスギの標準的な分布域にある(林, 1951)。また、斜面の方位は様々で、傾斜は緩から中が多い。土壌型は、適潤性褐色森林土(BD)またはその亜型(BD-D)である。

供試木は、1検定林あたり15系統から26系統の精英樹と比較対照木(非精英樹)を採種母樹とした実生(F_i)である。各検定林は3ブロックで構成され、それぞれのブロックには1系統あたり50本の調査木が1.8m間隔で植栽されている。8検定林において調査可能な精英樹は64系統で、この数は全体の9割である(表-3)。

表-1 スギにおけるエリートツリーの選抜基準及び特定母樹の募集基準

項目	エリートツリー	特定母樹
成長量	次代検定林において単木材積が5段階評価で4以上	概ね10年生から20年生林分における単木材積が在来系統の概ね1.5倍以上
剛性	著しい欠点がないこと	候補木と同様の林分の個体の平均値と比較して優れている
通直性	著しい欠点がないこと	曲がりがないか、若しくは曲がりがあっても採材に支障ないもの
雄花着花性	一般的なスギ以下（自然着花では隣接林分の平均以下、ジベレリン着花では5段階評価の総合指数が4.0未満）	一般的なスギの概ね半分以下（5段階評価による総合指数が自然着花で2.0以下でかつ周囲対照木以下、ジベレリン着花で3.4以下）

出典：星ら（2014）による表を一部修正

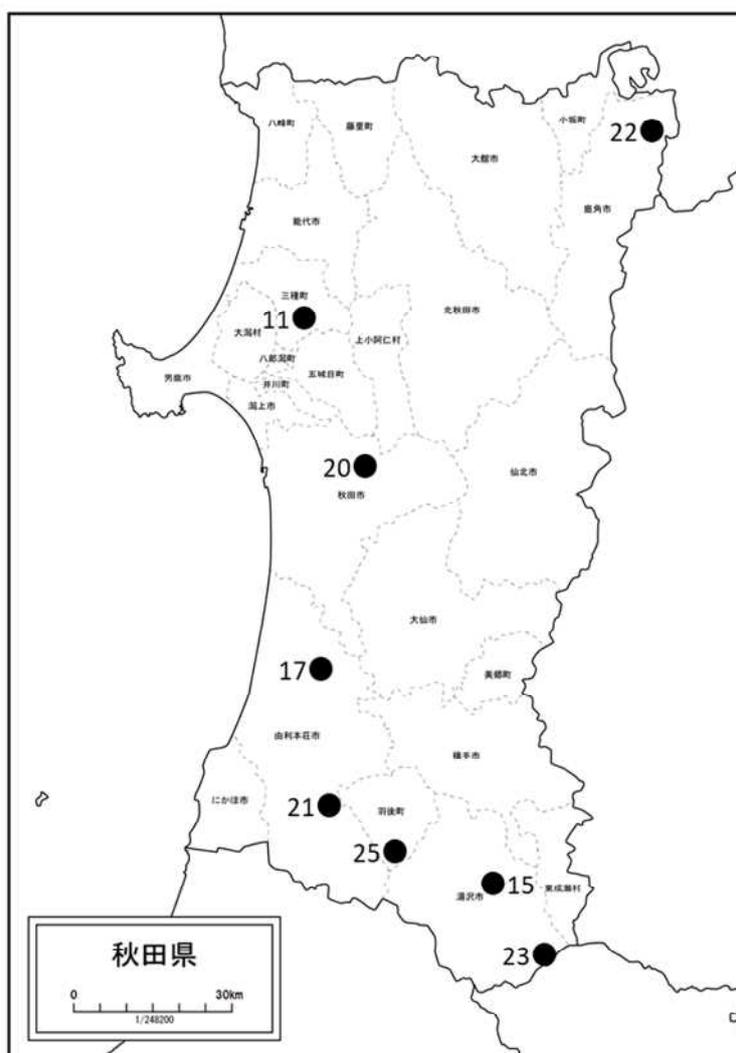


図-1 供試検定林の位置
注：図中の数字は検定林（東秋県）番号を示す。

表－２ 秋田版エリートツリーの選抜に用いた後代実生検定林の概況

検定林名	所在地	設定年	面積 (ha)	植栽本数	系統数	標高	方位	傾斜	土壌型	北緯	東経	最深積雪 (cm)	調査年
東秋県11号	山本郡三種町鹿渡	1979	1.5	4241	16	95	W	中	BD	40° 03' 06"	140° 07' 15"	70	2009
東秋県15号	湯沢市沼ノ岱山	1981	1.5	4500	22	160	SE	緩	BD-D	39° 09' 49"	140° 31' 27"	180	2012
東秋県17号	由利本荘市深沢	1982	1.5	4500	25	70	E	中	BD	39° 25' 58"	140° 03' 32"	46	2012
東秋県20号	秋田市上新城五十丁	1984	1.5	4500	26	130	SW-NE	緩・急	BD-D	39° 47' 34"	140° 08' 59"	42	2016
東秋県21号	由利本荘市鳥海町小川	1984	1.5	4500	25	334	N	中	BD-D	39° 09' 54"	140° 15' 15"	160	2014
東秋県22号	鹿角市十和田山根	1985	1.5	4500	26	370	SE	急	BD-D	40° 18' 39"	140° 48' 41"	130	2016
東秋県23号	湯沢市皆瀬	1985	1.5	4500	27	335	S	中	BD	39° 02' 12"	140° 39' 27"	171	2016
東秋県25号	雄勝郡羽後町上仙道	1986	1.5	4500	23	438	N	緩	BD	39° 06' 12"	140° 19' 35"	168	2017

2. 方法

1) 候補木の選抜

(1) 机上選抜及び現況調査

現地選抜に先立ち、供試 8 検定林の 30 年次から 32 年次調査結果を基に机上選抜を行った。樹高 (m 括約) 及び胸高直径 (cm 括約) 等の測定値から樹高が 10 m に満たない被圧木のデータを除き、検定林毎に平均値と標準偏差値を求めた。また、これらのデータを基に各個体の幹材積を算出した。幹材積の計算は、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所（以下、森林総研）が開発した幹材積計算プログラム（細田ら，2010）を用いて行った。このプログラムは、林野庁による立木幹材積表（東日本編）に対応している。個体の選抜に当たっては、算出した個々の材積を基に、単木材積の偏差値が 65 以上、傾幹幅が 30 cm 以下で林縁にない成長上位のものを机上選抜した。

机上選抜木の現況調査は毎年 5 月に実施し、まず、野帳との位置的な照合を行ったのち、通直性、病虫害の有無や周囲の状況等を調べた。中でも通直性については、曲がりがないか、曲がりがあっても採材に支障がないなど表－1 による特定母樹の基準について目視により観察を行い、特に問題のないものを選抜し、次項による剛性の調査に供した。

(2) 剛性の調査

現地選抜木の剛性は、FAKOPP（ハンガリー国 FAKOPP 社製）を用いて測定される応力波伝播速度（以下、 V_p ）を基に評価を行った。

V_p は次の方法により測定した。まず、樹幹の軸方向に対して平行になるよう上側にスタートセンサー及び下側にストップセンサーを打ち込んだ。測定区間長は 1.0 m とし、位置は地際からおおよそ 0.8 m ～ 1.8 m の部位とした。両センサーを打ち込む角度は、互いの先端部分が向き合うよう樹幹に対して約 45 度とした。そして、スタートセンサーをハンマーで叩き、打撃音がストップセンサーへ伝わる時間 (μs) を測定した。 V_p は、センサー間の距離 (1 m) をこの測定時間で除すことにより算出した。

測定は毎年 5 月中に行うこととし、立木位置の等高線に対して平行となる 2 方向からそれぞれ 3 回ずつ実施して、それぞれの平均値を個体値とした。現地選抜木と近い位置にある非選抜木 10 本以上を対照として同時に測定を行い、音速がこれらの平均値以上となる個体を選抜した。

表-3 秋田版エリートツリーの選抜に用いた検定林の設定時植栽系統及び本数

No.	系統	検定林名 (東秋県番号)								計 (本)
		11号	15号	17号	20号	21号	22号	23号	25号	
1	ケ鹿角 1号	271					150			421
2	ケ鹿角 2号	298					150			448
3	ケ鹿角 3号	284					150			434
4	ケ鹿角 4号		50	50	150	150	150	150	150	850
5	ケ鹿角 5号	289					150			439
6	ケ鹿角 6号			50			150	150	150	500
7	ケ北秋田 1号	278					150			428
8	ケ北秋田 2号	310					150			460
9	ケ北秋田 4号						150			150
10	ケ北秋田 5号	316					150			466
11	ケ北秋田 6号						150			150
12	ケ北秋田 7号	303					150			453
13	ケ北秋田 8号	311					150			461
14	ケ北秋田 9号	301					150			451
15	ケ北秋田10号			50			150			200
16	ケ北秋田11号						150			150
17	ケ北秋田12号						150			150
18	ケ北秋田13号						150			150
19	ケ南秋田 2号					150				300
20	ケ南秋田 3号				50	150	150			350
21	ケ南秋田 4号				50	150				200
22	ケ南秋田 7号									
23	ケ由利 1号					150	150		50	350
24	ケ由利 2号									
25	ケ由利 3号				50	150	150			350
26	ケ由利 4号	252			50	150	150	150		752
27	ケ由利 5号				50	150	150			350
28	ケ由利 6号	262			50	150	150	150		762
29	ケ由利 7号				50	150	150			350
30	ケ由利 8号				50	150	150	150	150	650
31	ケ由利 9号				50	150	150			350
32	ケ由利10号				50	150	150	150	150	800
33	ケ由利11号	251	50	50	150	150	150	150	150	651
34	ケ由利12号									
35	ケ由利13号									
36	ケ仙北 1号		50		150	150				350
37	ケ仙北 2号			50	150	150				350
38	ケ仙北 3号			50	150	150				350
39	ケ仙北 4号				150	150				300
40	ケ仙北 5号	260			150	150				560
41	ケ仙北 6号				50	150				200
42	ケ仙北 7号				50	150	150			350
43	ケ仙北 8号									
44	ケ仙北 9号									
45	ケ仙北10号				150					150
46	ケ雄勝 1号		50					150	150	350
47	ケ雄勝 2号		50					150	150	350
48	ケ雄勝 3号			50					50	100
49	ケ雄勝 4号		50					150	150	350
50	ケ雄勝 5号		50					150	150	350
51	ケ雄勝 6号							150	150	300
52	ケ雄勝 7号		50							50
53	ケ雄勝 8号		50					150	150	350
54	ケ雄勝 9号		50					150	150	350
55	ケ雄勝10号		50	50			150	150	150	550
56	ケ雄勝11号		50					150	150	350
57	ケ雄勝12号		50		150	150		150		500
58	ケ雄勝13号		50					150	150	350
59	ケ雄勝14号		50					150	150	350
60	ケ雄勝16号		50					150	150	350
61	ケ雄勝17号							150	150	300
62	ケ雄勝18号							150	150	300
63	ケ雄勝19号		50						50	100
64	ケ山本 1号					150	150			300
65	ケ山本 2号					150	150	150		450
66	ケ山本 3号	255	50	50	150	150	150	150	150	1,105
67	ケ山本 4号			50						50
68	ケ平鹿 1号		50	50	150	150		150		550
69	ケ平鹿 2号		50	50	150			150		400
70	ケ平鹿 3号		50		150			150		350
	対照木		50	50	150	150	150	150	150	850
	計(家系)	15	21	24	25	24	25	26	22	64
	計(本)	4,241	1,100	1,250	3,900	3,750	3,900	4,050	3,150	25,341

(3) 候補木の選抜

剛性の調査によって得た選抜木が、次の基準を満たすものを候補木と定めた。すなわち、選抜木と同じ斜面の上下約 5 m の範囲にあって、家系が異なる 10 本以上の個体群（対照木、枯死木、被圧木等を除く；以下、周囲対照木）から単木材積平均値を算出し、選抜木の単木材積がその 1.5 倍以上となるものを候補木とした。

材積の比較に際し、周囲対照木の材積平均値を精英樹のものから対照木のデータに換算するために、特定の係数 ($r=1.19$) で除した。この係数は、森林総研林木育種センター東北育種場（以下、林木育種センター）から提供されたもので、東北地方におけるスギ実生検定林 71 か所の 30 年次調査結果を基に算出した精英樹と対照木の平均的な材積比である（データ未発表）。

候補木からは穂木を採取したのち、挿し木によるクローン増殖、育苗を行うとともに、発根性、苗木成長性及び雄花着花性等に関して次項による調査を行った。

2) クローン増殖と成長量調査

(1) 挿し木発根率の調査

候補木の発根性を調べ、クローン増殖を行う目的で挿し木試験を行った。穂木は 5 月下旬から 6 月上旬に採取し、荒穂のまま一晩水あげした後、15 cm～20 cm の挿し穂を調製した。挿し穂の基部には切り返しをつけ、個体毎に束ねて 1 昼夜以上流水に浸漬した。

挿し床は、鹿沼土単用とした。挿し床の調製は次のように行った。まず、プラスチック製育苗箱（寸法 505 mm×奥行き 350 mm×深さ 100 mm）の底面に中粒を敷き詰め、挿しつけを行う上部には小粒を充填した。

挿し木は、案内棒を用いて斜め挿しを行った。挿しつけ前に、挿し穂の基部を発根促進剤（バイエルクロップサイエンス社製オキシベロン液剤：0.4%インドール酪酸）の原液に約 3 秒浸漬した。

挿しつけ後は適宜灌水を行い、その年の 10 月下旬から 11 月上旬に発根率の調査を行った。発根した苗木は、次項の成長量調査に供した。

(2) 候補木クローンの成長量調査

挿し木増殖した候補木クローンの苗木を用い、成長量の調査を行った。調査は、同じ生育条件となるように、苗木は全て林野庁が開発した 300 cc 容マルチキャビティコンテナ（遠藤，2007；以下 MC）に移植した。苗木は、移植に際して根元から 10 cm 程度の位置で根切りを行った。

培地組成は、ヤシ殻粉砕物（トップ社製ココピート）1 ℓに対し緩効性肥料（ジェイカムアグリ社製ハイコントロールトータル 391-100 日タイプ等の混合肥料）9 g、微量元素（新東化学工業社製クドミネラル）1 g の割合で加えたものとし、よく混和して用いた。

MCへ移植した苗は、室温 10℃のガラス温室で越冬後、翌春より屋外で懸架育苗を開始した。11月に候補木あたり 8 本の標準的な大きさの苗木の苗高、根元直径を測定して平均値を算出した。

3) 雄花着花性の調査と特定母樹申請木の確定

(1) 雄花着花性の調査

11月から12月にかけて、候補木の雄花着花性を調査した。方法は、林野庁が定めた特定母樹の指定基準（林野庁、2020）に従い、選抜地での自然着花時における雄花着生量を調査した。

この方法は、調査木の樹幹を上部、中部、下部の3つに区分けし、目視により雄花が着生している枝の割合と1枝当たりの雄花の着生数の割合について、1(なし)から5(非常に多い)の5段階による総合指数をもって個体の評価を行うものである。現地では、1候補木に対し2人から4人で東西南北の4方向から調査を行い、それぞれ雄花着生が最も多い割合となった方向の指数を採用した。

比較対照として、候補木と近い位置にある非選抜木10本以上についても同様に調査を行い、その平均値をもって調査林分の平均的な雄花着花性とした。

候補木及び比較対照木の雄花着花性については、複数年分の調査結果を平均して比較することとし、その総合指数平均値が2以下で、かつ比較対照木以下となった場合に基準を満たすものとした。

また、補助的な目的で、挿し木後育苗中の2年生MC苗(挿し木した年を1年生とした)1個体3本に対し、7月中旬にジベレリン(協和醸酵工業株式会社製ジベレリン協和粉末)の100ppm水溶液を散布し、その年の11月から翌3月までの間に雄花着生状況を調べた。評価は、苗木単位で前述のとおり5段階評価し、平均値を算出した。

(2) 特定母樹申請木の確定

候補木については、挿し木発根性、苗木成長性及び雄花着花性に関し、本研究の基準を満たした場合に特定母樹として林野庁に申請を行った。

III. 結果と考察

1. 候補木の選抜

1) 机上選抜

8検定林の平均樹高においては、東秋県20号の16.6mが最大で東秋県22号の13.1mが最小であった。平均胸高直径においては、東秋県17号と東秋県21号の24.2cmが最大で、東秋県22号の17.7cmが最小であった。また、平均幹材積においては、東秋県25号の0.384m³が最大で東秋県22号の0.170m³が最小であった。これら検定林中にある計7,816本の調査木の中から机上選抜した個体は、計433本であった(表-4)。

2) 剛性の調査

表-5に V_p の測定結果を示す。433机上選抜木の中から現地選抜した47個体の V_p は、東秋県23号の231雄勝9-27号3,825m/sが最高値で、次いで東秋県25号の251雄勝16-14号3,730m/s、東秋県11号の111鹿角5-46号3,705m/sの順であった。一方、最低値は東秋県25号の251山本3-13号3,122m/sであり、次に東秋県11号の111北秋田2-84号3,233m/sとなっていた。

表-4 秋田版エリートツリーの選抜に用いた検定林の調査年次, 平均樹高, 平均胸高直径, 平均幹材積, 机上選抜数及び現地選抜数

検定林名	調査年次*	調査数(本)**	平均樹高(m)	平均胸高直径(cm)	平均幹材積(m ³)***	机上選抜数(本)	現地選抜数(本)	備考
東秋県11号	31	1,393	13.6 ± 2.4	19.6 ± 4.4	0.219 ± 0.133	99	4	Ⅲブロックのみ Ⅰブロックのみ
東秋県15号	32	287	14.5 ± 2.7	22.6 ± 5.4	0.306 ± 0.177	23	7	
東秋県17号	31	408	15.0 ± 1.8	24.2 ± 4.8	0.342 ± 0.161	29	2	
東秋県20号	33	1,395	16.6 ± 2.6	23.0 ± 5.1	0.359 ± 0.185	96	13	
東秋県21号	31	1,072	14.6 ± 2.5	24.2 ± 5.9	0.348 ± 0.212	10	4	
東秋県22号	32	1,387	13.1 ± 2.0	17.7 ± 3.5	0.170 ± 0.082	72	3	
東秋県23号	32	807	13.8 ± 2.8	21.8 ± 4.1	0.262 ± 0.135	51	3	
東秋県25号	32	1,067	16.3 ± 2.9	24.0 ± 5.5	0.384 ± 0.207	53	11	
計		7,816				433	47	

* 林齢及び年次の基準は定植した年度を1年生(年次)とし, 以後年度毎に加算した。

** 調査数は樹高10 m未満の被圧木を除いた本数を示す。

*** 単木材積の平均値を示す。

V_p については, 32年生のスギ見本林で平均3,000(2,600~3,300) m/s(池田ら, 2000), 29年生のスギ精英樹クローンで平均2,214 m/s~3,164 m/s(藤澤ら, 2003b), 14年生のスギ精英樹の接ぎ木クローンで平均2,833(2,026~3,611) m/s(三嶋ら, 2011)などといわれている。

本調査結果において, 対照木の平均値は3,032 m/s~3,418 m/sの範囲にあり(いずれも東秋県21号), 既報の値より若干高めとなったが, 現地ではさらにそれ以上の V_p 値を示したものを選抜している。 V_p 値は動的ヤング率と高い相関関係にあり(藤澤ら, 2003a), 積雪地では雪圧による根元曲がりを引き起こしにくい性質(雪害抵抗性)が期待できる(工藤ら, 2021)。特に, 本県内陸南部のスギ林では, こうした雪害の発生が多く以前より大きな問題となっていることから(秋田県林務部, 1987), 今後は実証林や検定林等を通じてその抵抗性を調べる必要がある。

3) 現地選抜

既述の調査から, ①採材に支障がない程度の通直性が認められること, ②前項にて測定した V_p 値が対照木平均値以上であること, ③選抜木の幹材積が周囲対照木より算出した平均単木材積(対照木換算値)の1.5倍以上であることなど, 3条件を満たす健全な個体を選抜した。

その結果, 433机上選抜木の中から特に病虫害のないエリートツリー候補木(以下, 候補木)47個体を選抜した。候補木の幹材積は, 周囲対照木のそれと比較して最大3.92倍から最小1.56倍であった(表-6)。

2. クローン増殖と成長量調査

1) 挿し木発根率の調査

現地選抜した47候補木を挿し木試験に供した。その結果, 発根率においては, 最低2.7%(111北秋田2-84号)から最高100%(231雄勝9-19号)まで顕著な個体差が確認された(表-7)。

林木育種センター(2016)は, スギの挿し木に適した条件検索を行い, 挿し穂の長さは10 cm~20 cm, 床土には鹿沼土の小粒が良いとした上で, 3クローンを用いて1, 3, 5, 6, 9及び11月に挿し木を行い, 6月に最も発根率が低下したと報じた。本試験は, これとほぼ同様の条件で6月に挿し木を行っていることから, 観察された発根率の良否はそれぞれの候補木の増殖に関する1特性が反映したものと判断できる。

表-5 秋田版エリートツリー候補木及び対照木の応力波伝播速度

検定林名	系統名	応力波伝播速度 (m/s)		備考*
		個体値	対照木平均	
東秋県11号	111鹿角 5-46号	3,705	3,181	10
	111鹿角 5-47号	3,406		
	111北秋田 2-84号	3,233		
	111北秋田 5-84号	3,481		
東秋県15号	153雄勝 8-19号	3,615	3,236	15
	153雄勝10-10号	3,509		
	153雄勝13-19号	3,543		
	153雄勝16-46号	3,391		
	153雄勝19-31号	3,496		
	153鹿角 4-21号	3,469		
	153平鹿 3- 3号	3,563		
東秋県17号	171雄勝 3-33号	3,336	3,156	20
	171由利11-40号	3,536		
東秋県20号	201仙北10- 8号	3,510	3,055	11
	202雄勝12-28号	3,698	3,324	15
	202仙北 4-40号	3,427		
	202仙北10-20号	3,682		
	202平鹿 1-36号	3,520		
	202平鹿 2-30号	3,557		
	203雄勝12-32号	3,402	3,313	15
	203仙北 2-10号	3,602		
	203仙北 2-22号	3,477		
	203仙北 4-20号	3,631		
	203平鹿 3- 6号	3,495		
	203由利 1- 9号	3,316		
	203由利10-45号	3,668		
	東秋県21号	211南秋田 4-10号	3,613	3,418
213仙北 1- 7号		3,281	3,032	10
213仙北 1-10号		3,566		
213仙北 3-16号		3,431		
東秋県22号	222鹿角 5-28号	3,398	3,274	18
	222北秋田 4-44号	3,338		
	222北秋田11-44号	3,437		
東秋県23号	231雄勝 9-19号	3,549	3,220	15
	231雄勝 9-27号	3,825		
	231雄勝10- 3号	3,505		
東秋県25号	251雄勝 9-29号	3,495	3,112	15
	251雄勝10-17号	3,414		
	251雄勝11-21号	3,262		
	251雄勝11-45号	3,547		
	251雄勝13-41号	3,503		
	251雄勝16-10号	3,301		
	251雄勝16-14号	3,730		
	251雄勝18-17号	3,487		
	251山本 3-13号	3,122		
	251山本 3-37号	3,532		
	251由利10-17号	3,423		

*備考欄の数字は対照木の調査数(本)を示す。

表-6 秋田版エリートツリー候補木の樹高，胸高直径，単木材積及び基準材積と材積比

検定林名	系統名	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	単木材積A (m ³)	基準材積B* (m ³)	材積比 (A/B)
東秋県11号	111鹿角 5-46号	18.7	32	0.680	0.412 (11)	1.65
	111鹿角 5-47号	18.1	36	0.800	0.403 (14)	1.99
	111北秋田 2-84号	18.0	32	0.649	0.393 (11)	1.65
	111北秋田 5-84号	18.6	32	0.675	0.415 (12)	1.63
東秋県15号	153雄勝 8-19号	19.0	33	0.731	0.330 (16)	2.22
	153雄勝10-10号	18.8	30	0.612	0.314 (15)	1.95
	153雄勝13-19号	18.2	33	0.694	0.402 (16)	1.73
	153雄勝16-46号	17.8	32	0.640	0.274 (10)	2.34
	153雄勝19-31号	18.8	30	0.612	0.387 (16)	1.58
	153鹿角 4-21号	24.0	30	0.826	0.237 (14)	3.49
	153平鹿 3- 3号	16.0	35	0.655	0.323 (20)	2.03
東秋県17号	171雄勝 3-33号	18.2	36	0.806	0.330 (13)	2.44
	171由利11-40号	20.0	32	0.738	0.286 (12)	2.58
東秋県20号	201仙北10- 8号	22.0	33	0.875	0.364 (20)	2.40
	202雄勝12-28号	21.0	34	0.870	0.420 (14)	2.07
	202仙北 4-40号	23.0	31	0.830	0.367 (20)	2.26
	202仙北10-20号	22.0	30	0.742	0.348 (10)	2.13
	202平鹿 1-36号	24.0	31	0.874	0.318 (17)	2.75
	202平鹿 2-30号	22.0	34	0.921	0.376 (11)	2.45
	203雄勝12-32号	23.0	35	1.023	0.261 (17)	3.92
	203仙北 2-10号	22.0	33	0.875	0.317 (14)	2.76
	203仙北 2-22号	22.0	35	0.969	0.405 (17)	2.39
	203仙北 4-20号	19.0	36	0.850	0.351 (16)	2.42
	203平鹿 3- 6号	20.0	38	0.993	0.279 (16)	3.56
	203由利 1- 9号	24.0	35	1.078	0.403 (15)	2.67
	203由利10-45号	20.0	35	0.862	0.346 (20)	2.49
東秋県21号	211南秋田 4-10号	18.1	36	0.800	0.292 (17)	2.74
	213仙北 1- 7号	17.0	34	0.672	0.277 (15)	2.43
	213仙北 1-10号	17.3	36	0.757	0.299 (12)	2.53
	213仙北 3-16号	16.2	36	0.699	0.412 (11)	1.70
東秋県22号	222鹿角 5-28号	18.0	27	0.484	0.166 (18)	2.92
	222北秋田 4-44号	20.0	28	0.586	0.179 (18)	3.27
	222北秋田11-44号	18.0	27	0.484	0.212 (17)	2.28
東秋県23号	231雄勝 9-19号	21.0	27	0.585	0.254 (11)	2.30
	231雄勝 9-27号	22.0	29	0.700	0.445 (15)	1.57
	231雄勝10- 3号	21.0	29	0.661	0.424 (18)	1.56
東秋県25号	251雄勝 9-29号	21.0	33	0.827	0.453 (19)	1.83
	251雄勝10-17号	20.0	34	0.820	0.439 (14)	1.87
	251雄勝11-21号	20.0	34	0.820	0.448 (15)	1.83
	251雄勝11-45号	19.0	33	0.731	0.430 (12)	1.70
	251雄勝13-41号	22.0	32	0.830	0.533 (14)	1.56
	251雄勝16-10号	20.0	41	1.142	0.455 (13)	2.51
	251雄勝16-14号	20.0	35	0.862	0.445 (14)	1.94
	251雄勝18-17号	21.0	32	0.784	0.439 (16)	1.79
	251山本 3-13号	20.0	34	0.820	0.470 (13)	1.74
	251山本 3-37号	20.0	33	0.779	0.445 (13)	1.75
	251由利10-17号	21.0	36	0.961	0.545 (18)	1.76

* 周囲対照木の幹材積平均値（対照木換算値）であり，（ ）内の数値は調査本数を示す。

表-7 秋田版エリートツリー候補木の挿し木試験結果

検定林名	系統名	挿し木数 (本)	発根数 (本)	発根率 (%)
東秋県11号	111鹿角 5-46号	61	59	96.7
	111鹿角 5-47号	69	65	94.2
	111北秋田 2-84号	74	2	2.7
	111北秋田 5-84号	62	40	64.5
東秋県15号	153雄勝 8-19号	33	9	27.3
	153雄勝 10-10号	33	9	27.3
	153雄勝 13-19号	33	26	78.8
	153雄勝 16-46号	33	26	78.8
	153雄勝 19-31号	32	14	43.8
	153鹿角 4-21号	32	8	25.0
	153平鹿 3-3号	33	30	90.9
東秋県17号	171雄勝 3-33号	33	26	78.8
	171由利 11-40号	33	24	72.7
東秋県20号	201仙北 10-8号	47	44	93.6
	202雄勝 12-28号	54	51	94.4
	202仙北 4-40号	54	20	37.0
	202仙北 10-20号	53	50	94.3
	202平鹿 1-36号	54	40	74.1
	202平鹿 2-30号	58	52	89.7
	203雄勝 12-32号	60	58	96.7
	203仙北 2-10号	70	52	74.3
	203仙北 2-22号	49	42	85.7
	203仙北 4-20号	60	29	48.3
	203平鹿 3-6号	53	25	47.2
	203由利 1-9号	60	53	88.3
	203由利 10-45号	62	60	96.8
東秋県21号	211南秋田 4-10号	91	55	60.4
	213仙北 1-7号	74	26	35.1
	213仙北 1-10号	73	17	23.3
	213仙北 3-16号	76	60	78.9
東秋県22号	222鹿角 5-28号	60	51	85.0
	222北秋田 4-44号	60	43	71.7
	222北秋田 11-44号	60	42	70.0
東秋県23号	231雄勝 9-19号	60	60	100.0
	231雄勝 9-27号	55	54	98.2
	231雄勝 10-3号	54	43	79.6
東秋県25号	251雄勝 9-29号	60	48	80.0
	251雄勝 10-17号	66	49	74.2
	251雄勝 11-21号	66	48	72.7
	251雄勝 11-45号	110	48	43.6
	251雄勝 13-41号	65	50	76.9
	251雄勝 16-10号	99	96	97.0
	251雄勝 16-14号	60	42	70.0
	251雄勝 18-17号	95	58	61.1
	251山本 3-13号	98	48	49.0
	251山本 3-37号	86	48	55.8
	251由利 10-17号	64	47	73.4

ただし、スギの挿し木発根率は、同じ個体でも環境によって顕著に異なることが知られており（森下・大山，1972），本県の第1世代精英樹では，露地挿しと施設挿しの発根率に相関がみられていないこと（未発表データ）などから本結果だけで良否を判定するには難がある。

このような考えから，本試験では挿し木発根率が極端に低かった 111 北秋田 2-84 号を候補から除外した。

2) 候補木クローンの成長量調査

挿し木増殖後，移植して1成長期を経過した候補木の苗高，根元直径及び形状比等の成長量と比較対照にした第1世代精英樹の成長量（35 系統による平均値）を表-8 及び図-2 に示す。候補木の中で発根率が低かった 111 北秋田 2-84 号に加え，移植後に多くの苗が枯死した 213 仙北 1-10 号，251 雄勝 13-41 号の計 3 個体については，測定可能な苗木数を確保できなかったため，調査から除外した。

44 供試木の成績をみると，苗高の最高値は 52.5 cm（251 雄勝 11-45 号），最低値は 26.8 cm（153 雄勝 8-19 号）で平均値は 43.0 cm であった。根元直径の最高値は 5.1 mm（111 鹿角 5-46 号と 231 雄勝 10-3 号），最低値は 3.5 mm（251 雄勝 16-14 号）で平均値は 4.3 mm であった。また，これらを基に算出した形状比は，最高値が 120（211 南秋田 4-10 号），最小値が 68.7（153 雄勝 8-19 号）で平均値は 100 であった。一方，第1世代精英樹では，苗高の平均値が 37.2 cm，根元直径が 4.3 mm で形状比は 87 であった。

本結果では，優れた成長性を持つ品種の開発を主眼としていることから，第1世代精英樹の苗高の平均値である 37.2 cm を基準とし，それ以上の苗高となった候補木の成長を良好と評価し，満たなかったものを不良とした。これにより，苗が得られなかった 3 個体と 153 雄勝 8-19 号，153 鹿角 4-21 号，202 仙北 4-40 号，203 仙北 4-20 号及び 251 雄勝 9-29 号の計 8 個体を候補から除外した。

3) 雄花着花性の調査と特定母樹申請木の確定

(1) 雄花着花性の調査

調査結果を表-9 に示す。47 候補木のうち，自然着花時の雄花着生状況において特定母樹の申請基準を満たしたものは 33 個体あった。雄花着生指数の平均値において，評点が 1.0 と雄花着花性が最も低かったものは 8 個体あったが，このうちの 3 個体は東秋県 25 号に由来するものであった。一方，評点が高かったのは東秋県 11 号で，候補木が 2.5 から 3.0，対照木平均値が 3.35 といずれも調査木の中で高い傾向にあった。両者の位置をみると，東秋県 11 号は標高 95 m で西向き斜面，東秋県 25 号は標高 438 m で北向きの緩斜面に設定されている。これらの点を考慮すれば，雄花着花性には地理的な違いと，それに伴う気象要因の差異が影響しているものと思われる。

スギにおいて花粉症対策品種を開発するためには，15 年生以上の個体を対象に 5 年以上の現地調査を行う必要がある。また，雄花着花性については，総合指数の 5 年平均値で 5 段階評価中 1.3 以下と極めて低くなければ品種として認定されない（林野庁，2001）。このような点で，開発には 20 年以上の長期間を要し，基準も厳格である。

表-8 秋田版エリートツリー候補木等の2年生挿し木苗の成長性

検定林名	系統名	苗高 H (cm)	胸高直径 D (mm)	形状比 H/D
東秋県11号	111鹿角 5-46号	50.5	5.1	99
	111鹿角 5-47号	39.1	3.9	100
	111北秋田 2-84号	—	—	—
	111北秋田 5-84号	45.3	4.0	113
東秋県15号	153雄勝 8-19号	26.8	3.9	69
	153雄勝10-10号	40.8	4.2	97
	153雄勝13-19号	45.5	4.4	103
	153雄勝16-46号	46.6	4.3	108
	153雄勝19-31号	47.1	4.1	115
	153鹿角 4-21号	35.5	4.0	89
	153平鹿 3- 3号	44.8	5.0	90
東秋県17号	171雄勝 3-33号	42.5	4.3	99
	171由利11-40号	44.8	4.8	93
東秋県20号	201仙北10- 8号	43.9	4.6	95
	202雄勝12-28号	47.8	4.9	98
	202仙北 4-40号	34.2	4.0	86
	202仙北10-20号	44.3	4.0	111
	202平鹿 1-36号	46.0	3.9	118
	202平鹿 2-30号	42.1	4.2	100
	203雄勝12-32号	45.4	4.9	93
	203仙北 2-10号	39.6	4.5	88
	203仙北 2-22号	44.6	4.3	104
	203仙北 4-20号	36.7	3.8	97
	203平鹿 3- 6号	38.1	4.2	91
	203由利 1- 9号	45.1	4.8	94
	203由利10-45号	46.6	4.6	101
東秋県21号	211南秋田 4-10号	46.9	3.9	120
	213仙北 1- 7号	44.1	4.2	105
	213仙北 1-10号	—	—	—
	213仙北 3-16号	49.1	4.4	112
東秋県22号	222鹿角 5-28号	44.7	4.7	95
	222北秋田 4-44号	43.3	3.9	111
	222北秋田11-44号	46.8	4.8	98
東秋県23号	231雄勝 9-19号	48.1	4.6	105
	231雄勝 9-27号	42.5	4.6	92
	231雄勝10- 3号	46.8	5.1	92
東秋県25号	251雄勝 9-29号	36.9	3.9	95
	251雄勝10-17号	40.3	4.0	101
	251雄勝11-21号	43.0	4.5	96
	251雄勝11-45号	52.5	4.4	119
	251雄勝13-41号	—	—	—
	251雄勝16-10号	43.3	4.4	98
	251雄勝16-14号	41.2	3.5	118
	251雄勝18-17号	40.3	4.0	101
	251山本 3-13号	45.9	3.9	118
	251山本 3-37号	39.4	3.8	104
	251由利10-17号	41.0	3.9	105
比較対照	第1世代精英樹*	37.2	4.3	87

* 35系統の平均値 (2反復)

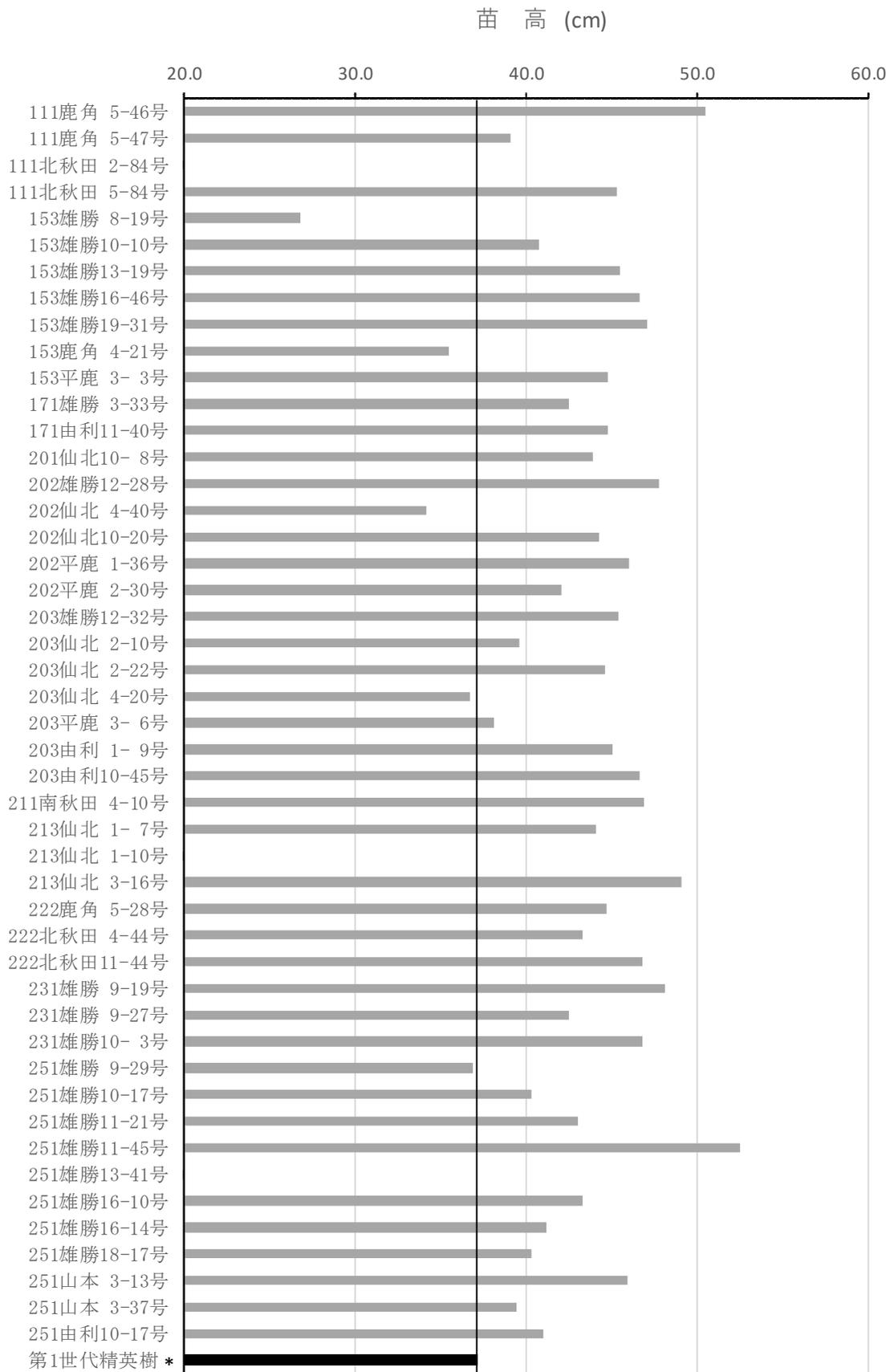


図-2 秋田版エリートツリー候補木等の2年生挿し木苗の苗高
*35系統の平均値(2反復)

表-9 秋田版エリートツリー候補木等の自然着花とジベレリン処理による雄花着花性

検定林名	系統名	自然着花 (調査年次)			自然着花 平均値	ジベレリン 平均値
		1	2	3		
東秋県11号	111鹿角 5-46号	3	3	—	3.00	3.00
	111鹿角 5-47号	3	3	—	3.00	3.33
	111北秋田 2-84号	2	3	—	2.50	—
	111北秋田 5-84号	3	3	—	3.00	2.67
	対照木平均値*	2.70	4.00	—	3.35	
東秋県15号	153雄勝 8-19号	2	2	—	2.00	4.50
	153雄勝10-10号	2	2	—	2.00	2.40
	153雄勝13-19号	2	2	—	2.00	3.50
	153雄勝16-46号	2	3	—	2.50	3.50
	153雄勝19-31号	2	3	—	2.50	3.50
	153鹿角 4-21号	1	2	—	1.50	1.50
	153平鹿 3- 3号	2	2	—	2.00	3.00
	対照木平均値*	2.20	2.90	—	2.55	
東秋県17号	171雄勝 3-33号	2	2	—	2.00	3.60
	171由利11-40号	3	3	—	3.00	5.00
	対照木平均値*	2.30	2.50	—	2.40	
東秋県20号	201仙北10- 8号	1	3	—	2.00	3.50
	202雄勝12-28号	1	1	—	1.00	2.00
	202仙北 4-40号	1	3	—	2.00	2.50
	202仙北10-20号	1	1	—	1.00	2.50
	202平鹿 1-36号	2	2	—	2.00	4.00
	202平鹿 2-30号	1	1	—	1.00	4.00
	対照木平均値*	1.90	2.20	—	2.05	
	203雄勝12-32号	3	3	—	3.00	3.00
	203仙北 2-10号	1	2	—	1.50	4.00
	203仙北 2-22号	1	2	—	1.50	4.00
	203仙北 4-20号	4	4	—	4.00	3.50
	203平鹿 3- 6号	1	2	—	1.50	2.00
	203由利 1- 9号	1	2	—	1.50	3.00
	203由利10-45号	1	2	—	1.50	2.20
	対照木平均値*	1.90	2.90	—	2.40	
東秋県21号	211南秋田 4-10号	1	1	—	1.00	3.33
	213仙北 1- 7号	3	4	—	3.50	4.00
	213仙北 1-10号	2	2	—	2.00	—
	213仙北 3-16号	2	2	—	2.00	3.67
	対照木平均値*	2.50	2.90	—	2.70	
東秋県22号	222鹿角 5-28号	3	2	—	2.50	2.00
	222北秋田 4-44号	1	1	—	1.00	3.50
	222北秋田11-44号	1	2	—	1.50	4.00
	対照木平均値*	1.20	1.10	—	1.15	
東秋県23号	231雄勝 9-19号	3	2	—	2.50	3.00
	231雄勝 9-27号	1	2	—	1.50	1.80
	231雄勝10- 3号	2	2	—	2.00	2.20
	対照木平均値*	2.90	2.30	—	2.60	
東秋県25号	251雄勝 9-29号	2	1	—	1.50	3.67
	251雄勝10-17号	—	1	1	1.00	3.00
	251雄勝11-21号	1	1	—	1.00	1.67
	251雄勝11-45号	1	—	2	1.50	2.00
	251雄勝13-41号	2	2	—	2.00	—
	251雄勝16-10号	—	2	1	1.50	1.00
	251雄勝16-14号	2	1	—	1.50	3.00
	251雄勝18-17号	—	3	3	3.00	2.67
	251山本 3-13号	—	—	1	1.00	4.33
	251山本 3-37号	—	—	2	2.00	3.00
	251由利10-17号	2	2	—	2.00	4.00
	対照木平均値*	1.60	1.40	3.30	2.10	

* 対照木平均値は同じ検定林内にある10個体の平均を示す。

一方、特定母樹の雄花着花性は、1本の現地選抜木について最低2年間の調査期間中に総合指数が最大でも2.0以下となればよい。このような差異から、特定母樹が実際花粉症対策にどの程度寄与するのか予測することは難しい。そこで、本研究では、候補木の2年生MC苗にジベレリン100ppm水溶液を散布し、その後の雄花着生状況についても調べた。育種センターでは、苗圃等に定植した挿し木苗にこの方法を適用し、評点において4.0未満のものをエリートツリー、3.4以下のものを特定母樹とする基準を定めている（林野庁、2020）。佐藤（2019）は、少花粉スギ5品種と雄花着花性が比較的高い精英樹計11系統の2年生MC苗に対し、7月中旬にジベレリン水溶液100ppmを散布してそれぞれの雄花着花性を調べたところ、全ての少花粉品種で評点が3以下になったことを報告した。こうした点で、3.4以下という基準は妥当なものと思われる。

以上から、本研究では自然着花とジベレリン処理による両基準をクリアした候補木を合格とした。その結果、東秋県15号から3個体、東秋県20号から6個体、東秋県21号から1個体、東秋県23号から2系個体、東秋県25号から6個体の計18個体を選抜することができた。

(2) 特定母樹申請木の確定

表-10に前項までの調査結果をまとめた。47候補木の挿し木発根性、苗木成長性及び雄花着花性について、本研究で定めたエリートツリーの選抜基準を満たす場合は○、そうでない場合は×を記した。その結果、全部で16個体が上記3基準を満たした。このうち153雄勝10-10号（図-3a）、153平鹿3-3号（図-3b）、202雄勝12-28号（図-3c）、203由利1-9号（図-3d）、203由利10-45号（図-3e）、211南秋田4-10号（図-3f）、231雄勝9-27号（図-3g）、231雄勝10-3号（図-3h）、251雄勝16-14号（図-3i）の計9個体を特定母樹として林野庁に申請し、認定を受けた（表-10）。残りの7個体については現在調査中（2021年度申請中の個体を含む）であり、現地で良好な状況が確認されれば順次申請を行う予定である。

本研究では、第1世代精英樹中の雄勝9号より1本、雄勝10号より2本、雄勝12号より1本、雄勝16号より1本、南秋田4号より1本、由利1号より1本、由利10号より1本及び平鹿3号より1本それぞれ優れたF₁を選抜したことになる。今後、これらを採種園に導入する際には、家系に偏りが生じないように品種開発を進めることが肝要である。

全国において特定母樹に指定されている第2世代品種は、2021年末時点でスギ200系統、ヒノキ85系統、カラマツ76系統及びトドマツ66系統の計427系統あり、スギでは精英樹から181系統、雪害抵抗性候補木から19系統が選ばれている。このうち秋田県に導入可能なスギは31系統あるが、そのうちの9系統は本研究で開発した秋田県オリジナル品種である。このような点で、今後のスギの育種や林業、木材産業の振興を図る上でメリットは大きい。そのうえ、秋田県の育種区では、採種園に雪害抵抗性候補木の第2世代品種も導入可能であることから、これらの交配によって生産された苗木には雪害抵抗性も期待できるだろう。

エリートツリーに関する研究は、近年盛んに行われているものの、そのほとんどは初期の成長や造林コストの削減に関するもので、主伐まで調査された報告はない。例えば、静岡県や九州、四国地域での知見によると、初期成長に優れた形質は遺伝し（袴田ら、2018）、挿し木や実生苗では、植え付け

表-10 秋田版エリートツリー候補木の各種特性調査結果

検定林名	系統名	挿し木 発根性	苗木 成長性	雄花 着花性	申請年	備考		
東秋県11号	111鹿角 5-46号	○*	○*	×*				
	111鹿角 5-47号	○	○	×				
	111北秋田 2-84号	×	×	×				
	111北秋田 5-84号	○	○	×				
東秋県15号	153雄勝 8-19号	○	×	×	2019	特定1-16**		
	153雄勝10-10号	○	○	○				
	153雄勝13-19号	○	○	×				
	153雄勝16-46号	○	○	×				
	153雄勝19-31号	○	○	×				
	153鹿角 4-21号	○	×	○				
	153平鹿 3- 3号	○	○	○	2019	特定1-17		
	東秋県17号	171雄勝 3-33号	○	○	×			
171由利11-40号		○	○	×				
東秋県20号	201仙北10- 8号	○	○	×	2020	特定2-37 行列がやや曖昧		
	202雄勝12-28号	○	○	○				
	202仙北 4-40号	○	×	○				
	202仙北10-20号	○	○	○				
	202平鹿 1-36号	○	○	×				
	202平鹿 2-30号	○	○	×				
	203雄勝12-32号	○	○	×				
	203仙北 2-10号	○	○	×				
	203仙北 2-22号	○	○	×				
	203仙北 4-20号	○	×	×				
	203平鹿 3- 6号	○	○	○				
	203由利 1- 9号	○	○	○			2020	特定2-38
	203由利10-45号	○	○	○			2020	特定2-39
	東秋県21号	211南秋田 4-10号	○	○			○	2020
213仙北 1- 7号		○	○	×				
213仙北 1-10号		○	×	×				
213仙北 3-16号		○	○	×				
東秋県22号	222鹿角 5-28号	○	○	×				
	222北秋田 4-44号	○	○	×				
	222北秋田11-44号	○	○	×				
東秋県23号	231雄勝 9-19号	○	○	×	2020	特定2-41		
	231雄勝 9-27号	○	○	○				
	231雄勝10- 3号	○	○	○			2020	特定2-42
東秋県25号	251雄勝 9-29号	○	×	×	※ 2020	令和3年度申請中 特定2-43		
	251雄勝10-17号	○	○	○				
	251雄勝11-21号	○	○	○				
	251雄勝11-45号	○	○	○				
	251雄勝13-41号	○	×	×				
	251雄勝16-10号	○	○	○				
	251雄勝16-14号	○	○	○				
	251雄勝18-17号	○	○	×				
	251山本 3-13号	○	○	×				
	251山本 3-37号	○	○	○				
	251由利10-17号	○	○	×				

* 本県の選抜基準を満たすものを○, 満たさなかったものを×で示す。

** 特定母樹としての指定番号を示す。



a) 153雄勝10-10号
(特定1-16)



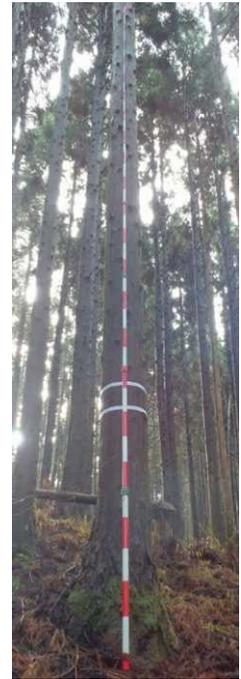
b) 153平鹿3-3号
(特定1-17)



c) 202雄勝12-28号
(特定2-37)



d) 203由利1-9号
(特定2-38)



e) 203由利10-45号
(特定2-39)



f) 211南秋田4-10号
(特定2-40)



g) 231雄勝9-27号
(特定2-41)



h) 231雄勝10-3号
(特定2-42)



i) 251雄勝16-14号
(特定2-43)

図-3 開発した秋田版エリートツリー
36

から2成長期までは第1世代精英樹より良好な成長性を示す(布・戸高, 2016; 藤本ら, 2017; 山岸ら, 2020)。しかし, その一方で植栽後の下刈りを省略した場合は, 期待したほどの上長成長が得られていないケースもみられる(平田ら, 2020; 中山ら, 2020)。こうした観点から, 本県のような多雪地域では, 西日本などで報じられている成長性やコストパフォーマンスをそのまま期待できるとは限らない。このため, その普及に当たっては, 実証試験や実生検定林等を通じて常に性能検証を進めながら慎重に行っていく必要がある。

木材価格の上昇が見込めない中で, 造林コストの削減は再生林の促進に欠かせない課題である(松本ら, 2015)。特に下刈り経費は, 造林初期費用の半分近くを占めるほどウエイトが大きいことから, その回数を減らすことがコスト削減に最も効果的である。このため, 昨今現場では大苗の活用が検討されており(長岐ら 2016; 宇都木ら 2017; 駒木ら, 2019), 初期成長の早いエリートツリーが果たす役割は大きいといえる。

エリートツリーは, 冒頭で触れたように花粉症発生源対策のほかにカーボンニュートラル社会の実現に向けた二酸化炭素吸収源としての役割にも期待が大きい。特に, 国は, 2021年に公開した新たな戦略のなかで, 森林・林業分野におけるエリートツリーの苗木生産について, 2030年に林業用苗木の3割, 2050年に9割を目指す考えを明らかにしている(農林水産省, 2021)。こうした時代の流れの中で画一化することなく, 秋田県から産出されるスギの数的, 質的な差別化が今後も図られるよう, 品種開発に取り組んでいく必要がある。

謝 辞

本研究の遂行にあたり, 検定林調査や品種開発にご協力いただいた林業研究研修センター職員の皆様に心から感謝いたします。どうもありがとうございました。

引用文献

- 秋田県林業技術センター (1998) 秋田県林業技術センター試験研究成果 2. 林木育種. 秋田県林業技術センター: 33-55
- 秋田県林業研究研修センター (2020) 初期成長に優れたスギ次世代精英樹の開発. 秋田県林業研究研修センター 令和2年度業務概要: 16p
- 秋田県林務部 (1987) 造林地の雪害・防除技術. 秋田県林務部, 秋田
- 遠藤利明 (2007) コンテナ苗の技術について. 山林 No. 1478: 60-68
- 藤本浩平・渡辺直史・山崎真・磯田圭哉・三浦真弘 (2017) スギ特定母樹コンテナ苗の植栽後2年間の地上部成長. 第128回日本森林学会大会: 526p

- 藤澤義武・柏木学・井上祐二郎 (2003a) ファコップを用いた材質優良個体の非破壊的選抜技術. 九州森林研究 No. 56: 180-181
- 藤澤義武・倉本哲嗣・平岡裕一郎・柏木学・井上祐二郎 (2003b) FAKOPP によるスギクローンの非破壊的材質評価. 第 53 回日本木材学会研究発表要旨集: 55p
- 袴田哲司・近藤晃・大場孝裕・渡井純・山田晋也・伊藤愛・野末尚希・山本茂弘 (2014) 造林の省力化に向けたエリートツリーの開発とコンテナ苗植栽. 森林遺伝育種 3: 189-191
- 林弥栄 (1951) スギの天然分布概説. (日本産重要樹種の天然分布 針葉樹 (1). 農林省林業試験場, 林業試験場研究報告 No. 48) 146-168
- 平田令子・小田樹・伊藤哲・山川博美・永井純一・釜稔 (2020) 下刈り省略下での特定母樹スギコンテナ中苗の成長と競合状態. 第 131 回日本森林学会大会: 704p
- 星比呂志・加藤隆一 (2014) 間伐特措法改正の下での林木育種センターにおける品種開発について. 森林遺伝育種 3: 78-81
- 星比呂志・倉本哲嗣 (2012) エリートツリーにより期待される施業の効率化 (特集 現地実証進む・低コスト造林. 現代林業 No. 555) 31-35
- 星比呂志・倉本哲嗣・平岡裕一郎 (2013) 今後のエリートツリーの活用による育種の推進. 森林遺伝育種 2: 132-135
- 細田和男・光田靖・家原敏郎 (2010) 現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法. 森林計画学会誌 44: 23-39
- 池田潔彦・大森昭壽・有馬孝禮 (2000) 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用 (3) スギ精英樹立木の材質評価. 木材学会誌 46: 558-565
- 川野康朗・岡田康彦 (2019) エリートツリーの開発・普及による「緑の国土強靱化」に向けて. 水利科学 63: 21-39
- 駒木貴彰・梶本卓也・八木橋勉 (2019) 再造林コスト削減の取組 — 低密度植栽と下刈り作業を中心に —. 東北森林科学会誌 24: 21-24
- 工藤佳世・佐藤博文・沈昱東・三浦正嗣・丹羽奎太・高田克彦 (2021) 秋田県におけるスギ雪害抵抗性品種の成長および材質特性. 第 71 回日本木材学会大会研究発表要旨集: 1P47
- 松本和馬・小谷英司・駒木貴彰 (2015) 東北地方における低コスト再造林の実用化と課題. 東北森林科学会誌 20: 1-15
- 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
- 森下義郎・大山波雄 (1972) 挿し木の理論と実際. 地球出版, 東京
- 長岐昭彦・新田響平・金子智紀・成田義人・和田覚・佐藤博文・野口麻穂子・八木貴信・玉城聡・織部雄一郎 (2016) 積雪地域のスギコンテナ苗植栽地における下刈りの省略方法. 第 127 回日本森林学会大会: 664p
- 中山葉月・伊藤哲・平田令子・平山知宏・山岸極・山川博美 (2020) スギ特定母樹裸中苗の植栽当年の成長に及ぼす初期形状比と下刈り省略の影響. 第 131 回日本森林学会大会: 416p

農林水産省 (2021) みどりの食料システム戦略. (<http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-7.pdf>), 2021年6月4日閲覧

布哲也・戸高竜一 (2016) エリートツリーと普通苗の生長量比較調査中間報告について. (http://www.green.go.jp/gijutsu/pdf/kenkyu_zorin/zorin_h28_05.pdf), 2021年5月31日閲覧

林木育種センター (2012) エリートツリー選抜実施要領. (平成24年3月27日付け23森林林育第350号) 最終改正 (平成29年3月30日付け28森林林育第387号)

林木育種センター (2016) 新世代種苗の増殖マニュアル. 林木育種センター, 日立

林木育種センター東北育種場 (2013) 第3回東北地区高速育種運営会議資料. 林木育種センター東北育種場, 盛岡

林木育種推進東北地区協議会・東北森林管理局・関東森林管理局・青森県・岩手県・宮城県・秋田県・山形県・新潟県・林木育種センター東北育種場 (2004) 東北育種基本区検定林の技術マニュアル 次代検定林の間伐指針 (改訂版). 林木育種センター東北育種場, 盛岡

林野庁 (1980) 精英樹選抜育種事業実施要領. (昭和55年5月31日付け55林野造第82号) 最終改正 (平成13年3月30日付け12林野研第174号)

林野庁 (2001) スギ花粉発生源対策推進方針. (平成13年6月19日13林整保第31号) 林野庁長官より都道府県知事あて 最終改正 (平成30年4月1日29林整森第285号)

林野庁 (2008) 森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法. (平成20年5月16日法律第32号) 最終改正 (令和3年3月31日法律第15号)

林野庁 (2020) 別紙1 特定母樹指定基準. (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/kanbatu/attach/pdf/boju-9.pdf>), 2020年4月25日閲覧

佐藤博文 (2019) スギ特定母樹の挿し木苗に関するいくつかの知見. 第130回日本森林学会大会学術講演集: 213p

佐藤博文 (2021) 大きい・強い・花粉が少ない次世代の秋田スギ新品種. JATAFF ジャーナル 9: 24-25

田村明・高橋誠・星比呂志 (2017) 優良品種の開発について — 花粉症対策品種 —. 森林遺伝育種 6: 8-12

東北育種基本区特定母樹等普及促進会議 (2021) 令和3年度東北育種基本区特定母樹等普及促進会議資料. 林木育種センター東北育種場, 盛岡

宇都木玄・原山尚成・上村章 (2017) 再造林に向けた低コスト林業への挑戦. 森林科学 80: 2-5

山岸極・伊藤哲・山川博美・平田令子・釜稔・永井純一 (2020) 複数系統のスギ特定母樹コンテナ中苗を用いた下刈省略試験1年目の苗の成長. 第131回日本森林学会大会: 703p

マツタケ人工栽培に向けた新たな培地組成

菅原冬樹

A new medium for artificial cultivation of *Tricholoma matsutake*

Fuyuki Sugawara

要 旨

マツタケの人工栽培を実現するためには、菌株の選択が重要であるとともに、菌糸体の増殖と子実体形成を促進する培地を開発する必要がある。そのためには、成分組成が明らかな合成培地の開発が重要であり、培養および子実体形成過程の栄養生理学的研究が必須であると考えられる。そこで、資化能の異なるマツタケ8菌株を用い、菌糸成長を促す緩衝剤、常量および微量元素等の種類と濃度について検討を行い、新たな培地の組成を決定した。この培地の特徴は、緩衝剤にMESとフマル酸を用い、窒素源をアンモニウム態からアミノ酸とし、モリブデン、ヨウ素、ホウ素を新たに添加し、諸成分含量を適正な濃度にしたことなどである。この培地を用いてマツタケを培養した場合、菌糸の成長速度が増し、菌糸体重量は既知の培地に比べ平均で約1.5倍に増加した。

I. はじめに

マツタケ (*Tricholoma matsutake*) は、日本を代表する食用きのこで、万葉集に歌われるなど古くから日本人になじみ深いきのことして食されてきた。しかし、近年は松くい虫被害や生活様式の変遷により、発生量が年々漸減しており、2020年には絶滅危惧種に指定された。マツタケはアカマツなどマツ属と共生する典型的な外生菌根菌で、シイタケやナメコ、マイタケなど木材腐朽菌と異なり、人工栽培に成功した報告はこれまでにない。マツタケの人工栽培に関する研究は1900年代初頭から行われており、これまでのところマツタケ発生地マツ林での手入れによる増産 (京都府, 1980; マツタケ研究懇話会, 1983; 滋賀県, 1987; 伊藤・岩瀬, 1997; 加計ら, 2000; 吉村文彦&まつたけ十字軍運動, 2010)、感染苗を用いた栽培 (Guerin-Laguette et al, 2000; Vaario et al, 2000; Yamada et al, 1999; 進藤・松下, 2009)、人工栽培 (柳, 2001; 近藤・大賀, 2011; 山中, 2012; 寺下・楠田, 2013) など、様々な手法が試みられてきた。これらの中で有効な技術とされるのは、マツ林での除伐や地掻きなどの施業による増産のみである。

三村 (1908) は、マツタケが外生菌根菌であること、発生地の土壌、地形、植生等を明らかにし、植木鉢で育てたアカマツの根にマツタケ胞子を接種するなどして人工栽培を試みたが成功に至らなかった。それ以降、子実体形成を目的とした報告は、純粋培養によるマツタケ子実体原基の形成 (小川・浜田, 1975)、マツタケ感染苗によるシロの形成 (枯木・川上, 1985)、採取したシロからのマツタケ子実体の形成 (Inaba et al, 1995)

などがあるものの、いずれも再現性が確認された人工栽培の例はない。マツタケの人工栽培を難しくしている大きな要因の一つに、菌糸の伸長速度が遅いことがある。一般にマツタケの培養は、これまで浜田培地 (浜田, 1950) や担子菌に用いられている MYG (麦芽エキス, 酵母エキス, グルコース) , PD (Poteto Dextrose) , MMN (Marx, 1969) 培地などで行われているが、これらの培地上での生育速度はどの担子菌よりも遅く、大量の菌糸体が得られる前に成長が停止してしまう。通常、菌糸体の増殖が進むと、栄養分が不足してくるとともに、菌自体の生産する有害な代謝産物が培地に蓄積する。このため、増殖速度が低下して、見かけ上、停止した状態となる。

これまでに報告されているマツタケの菌糸特性や栄養条件は、以下のとおりである。生育の至適 pH は 5.0 前後で、寒天培養における至適温度は 22~23℃だが、土壌での至適温度は 17.6~19.6℃であることが知られており、培地条件の違いにより生育に適した温度が変動する (Narimatu et al; 2019) 。栄養源については、炭素源や窒素源の検討が行われ、好適 C/N 比は 20 以上であり、グルコースとフルクトースの併用や酵母エキスほかの有効性と硝酸態窒素の無効性が知られている (川合・阿部, 1976) 。ビタミン類の検討では、チアミンとニコチン酸を併用することで、単独使用時より3倍成長することが知られ、葉酸, リボフラビン, ビオチン等も有効であることが明らかとなっている。また、核酸関連物質や植物ホルモンなどでは、低濃度のヌクレオシドやヌクレオチド, cAMP と theophyllin の併用等が有効とされているが、IAA (インドール-3-酢酸) , NAA (1-ナフタレン酢酸) , 2,4-D (2,4-ジクロロフェノキシ酢酸) , ジベレリン, カイネチン等に効果は認められていない (川合・寺田, 1976) 。その後、これらの知見を基に菌根菌 4 種を比較して作られた太田培地 (Ohta, 1990) とホンシメジを栽培する際に使用する改変太田培地 (太田, 1994, 1998) およびノークランズの培地等を基本に様々な改良培地が考案されている。

マツタケ菌糸の成長促進に関わる物質については、Tween 80 や Tween 40 などの界面活性剤や菌糸の親水性を高めるオリーブ油などの天然植物油を含む培地で培養することによって、マツタケ菌糸が迅速に増殖することが明らかにされた (Guerin-Laguette et al, 2003) ほか、イソロイシン (Kawagisi et al, 2004) , リグニン分解物 (Inaba et al, 1993) , ナガイモ (菅原ら, 2012) など多岐にわたって検討された。また、銀や亜鉛は、菌糸伸長速度や成長量に関与しないが、気中菌糸形成など形態に影響を与えるとされている (川邊ら, 1987; Tasaki, 2016) 。一方、微量元素としてホウ素やヨウ素, モリブデンなどはきのこの成長に必須である (山根, 1990) にもかかわらず、最適添加量についての報告は少ない。

マツタケの培養については、このように多くの知見が得られているものの、一定量増殖すると成長が停止するため、未だに栽培に必要な菌糸体量を得ることができていないのが現状である。そのうえマツタケをはじめとしたきのこの子実体形成メカニズムを解明するためには、成分組成が明らかな合成培地の開発が重要である。そこで、マツタケの栄養成長を促す緩衝剤, 常量元素および微量元素の種類と添加濃度について検討し、培養に適した培地組成を決定したので、その結果について報告する。

II. 材料と方法

1. 供試菌株

供試したマツタケ菌株の採取地, 宿主等を表-1に示す。供試菌株は、当センター保存菌株のうち成長性

に優れた岩手県産の子実体菌傘組織由来の2菌株と秋田県産の子実体菌傘組織由来の5菌株および太田(1990)の論文で供試された滋賀県産の子実体ラメラ由来菌株「Tm30」の計8菌株を供試した。

表-1 供試菌株

菌 株	採取地	分離部位	採取日	宿 主
滋賀*	滋賀県甲南	ラメラ	1983.10.13	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)
金峰山	秋田県横手市	菌傘組織	1997.9.28	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)
宮古	岩手県宮古	菌傘組織	1999.10.20	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)
上新城	秋田県秋田市	菌傘組織	2005.10.12	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)
八幡平	秋田県鹿角市	菌傘組織	2004.10.13	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)
阿仁	秋田県北秋田市	菌傘組織	2004.10.13	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)
南外	秋田県大仙市	菌傘組織	2014.9.29	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)
岩手	岩手県岩手町	菌傘組織	2008.9.24	アカマツ(<i>Pinus densiflora</i>)

*: 滋賀県森林センターから譲渡

2. 接種源の調整

接種源は、浜田寒天培地 (表-2) で、 22 ± 1 °C, 暗黒条件下で3週間培養した菌糸体先端部 1g (F.w.)に 20 ml の 50mM MES (2-Morpholinoethanesulfonic acid) 溶液を加え、ホモジナイザーで 10,000 rpm, 5 秒間粉碎した。この菌糸体懸濁液 5 ml を 100 ml 容三角フラスコを用いて 20 ml の改変 MMN 液体培地 (以下, mMMN, 表-2) に接種し、 22 ± 1 °C, 暗黒下で静置培養した。40 日間培養後、菌糸体を 50 mM MES 溶液で洗浄後、同溶液 100 ml を加え、ホモジナイザーで 10,000 rpm, 5 秒間粉碎して菌糸体懸濁液とし、これを接種源とした (川合・小川;1976)。浜田寒天培地は、エビオスを主体とした外生菌根用培地として用いられており、mMMN 培地は、外生菌根用に開発された MMN 培地を改変したもので、添加物に変更を加えた培地である。

3. 基本培地の検討

浜田, PD (Diffco 社製), FH (Vaario et al,1999), 太田 (以下, OT), 改変太田 (以下, mOT, 太田, 1998) および mMMN の 6 種の培地を用いて (表-2), マツタケの菌糸成長を調べた。PD 培地は真菌類で主に用いられ、ジャガイモ抽出物とグルコースから成る培地であり、FH 培地は樹木組織培養用の SH 培地を樹木の成長に適し、かつ菌根合成が可能となるように改変した菌根合成用培地である。また、OT 培地は、4 種の外生菌根菌培養用に開発された化合物から成る完全合成培地であり、mOT 培地は OT 培地のクエン酸を 1/2 に、リン酸 2 水素カリウムを 1/10, 硫酸マグネシウム 7 水和物を 1/5, 塩化カルシウム 2 水和物を 1/5 に減じ、HEPES (2-[4-(2-Hydroxyethyl)-1-piperazinyl] ethanesulfonic acid) を省いたホンシメジ栽培用に開発された培地である。100 ml 容三角フラスコに 1N HCl または 1N KOH により pH 5.2 に調整した供試培地を 20 ml 入れ、121°C, 20 分間滅菌した後、接種源を 5 ml 接種し、 22 ± 1 °C, 暗黒条件下で静置培養を行った。培養 30 日目にろ紙を用いて菌糸体をろ過し、水洗後、80 °C で 48 時間乾燥させ、重量を測定した。供試数はそれぞれ3本とし、3回繰り返し試験を行った。

4. 緩衝剤の検討

基本培地は OT とし、各種化合物を濃度別に調整した。緩衝剤として、HEPES と MES の供試濃度を 0 から 100 mM の濃度範囲で 5 段階 (0, 10, 25, 50, 100 mM) に、また、クエン酸、フマル酸、マレイン酸、*trans*-アコニット酸の 4 種については、6 段階 (0, 50, 100, 250, 500, 1000 mg / ℓ) の濃度とした。100 ml 容三角フラスコに pH を 5.2 に調整した供試培地を 20 ml 入れ、121℃、20 分間滅菌した後、接種源を 5 ml 接種し、22 ± 1 °C、暗黒条件下で静置培養を行った。培養 30 日目にろ紙を用いて菌糸体をろ過し、水洗後、80 °C で 48 時間乾燥させ、重量を測定した。供試数はそれぞれ 3 本とし、3 回繰り返し試験を行った。

表-2 供試培地組成

	PD	浜田	mMMN	太田	m太田	FH
	(mg / ℓ)					
約20%重量分のジャガイモ煮だし液*	1,000					
エビオス		5,000				
イーストエキス			2,000			
モルトエキス			3,000			
V-8 ジュースろ液*			10			
クエン酸				1,000	500	
(NH ₄) ₂ C ₄ H ₄ O ₆			1,000	1,000	1,000	
KNO ₃						2,500
KH ₂ PO ₄			500	1,000	100	
NH ₄ H ₂ PO ₄						300
MgSO ₄ ·7H ₂ O			150	1,000	200	400
CaCl ₂ ·2H ₂ O			50	50	10	200
FeCl ₃			12	50	50	
FeSO ₄ ·7H ₂ O						15
H ₃ BO ₃						0.5
ZnSO ₄ ·7H ₂ O				3	3	0.1
MnSO ₄ ·4H ₂ O				0.5	0.5	0.1
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O						0.01
KI						0.1
CuSO ₄ ·5H ₂ O				1	1	0.02
NiSO ₄ ·6H ₂ O				2	2	
CoSO ₄ ·7H ₂ O				0.5	0.5	
CoCl ₂ ·6H ₂ O						0.01
Na ₂ EDTA						20
アセチルアセトン*				0.03	0.03	
HEPES				7,000		
ミオイノシトール						100
塩酸チアミン			0.1	3	3	5
ニコチン酸				0.05	0.05	5
塩酸ピリドキシン				0.005	0.005	0.5
葉酸				0.03	0.03	
ビオチン				0.05	0.05	
塩化カルニチン				0.01	0.01	
硫酸アデニン				0.03	0.03	
塩化コリン				0.03	0.03	
1N HCl*		1.6				
グルコース	10,000	20,000	10,000	10,000	10,000	1,000

* : ml / ℓ 添加

5. 常量元素の検討

基本培地は OT とし、各種元素について濃度別に調整した。リン酸は KH₂PO₄ の添加量を 0 から 5 g の濃度範囲で 7 段階 (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 g / ℓ) に、カルシウムは CaCl₂·2H₂O の添加量を 0 から 250

mg の濃度範囲で 5 段階 (0, 25, 50, 100, 250 mg / ℓ) に、マグネシウムは $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ の添加量を 0 から 5 g の濃度範囲で 7 段階 (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 g / ℓ) とした。窒素源は、 $(\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ の添加量を 0 から 5 g の濃度範囲で 6 段階 (0, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 5.0 g / ℓ) とし、また、ビタミンフリーのカザミノ酸 (Difco 社製) の添加量を 0 から 10 g の濃度範囲で 6 段階 (0, 1.5, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 g / ℓ) とし、100 ml 容三角フラスコに供試培地を 20 ml 入れ、121℃、20 分間滅菌した後、接種源を 5 ml 接種し、 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 、暗黒条件下で静置培養を行った。培養 30 日目にろ紙を用いて菌糸体をろ過し、水洗後、80℃で 48 時間乾燥させ、重量を測定した。供試数はそれぞれ 3 本とし、3 回繰り返し試験を行った。

6. 微量元素の検討

基本培地は、OT とし、各種元素について濃度別に調整した。亜鉛は $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ の添加量を 0 から 10 g の濃度範囲で 7 段階 (0, 0.1, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 g / ℓ) に、モリブデンは $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の添加量を 0 から 1 mg の濃度範囲で 5 段階 (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 mg / ℓ) とした。ホウ素は H_3BO_3 を、ヨウ素は KI の添加量を 0 から 20 mg の濃度範囲で 6 段階 (0, 0.1, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0 mg / ℓ) とした。鉄は $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 FeCl_2 および FeCl_3 の 3 種の化合物について、添加量を 0 から 10 mg の濃度範囲で 7 段階 (0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 mg / ℓ) とし、100 ml 容三角フラスコに供試培地を 20 ml 入れ、121℃、20 分間滅菌した後、接種源を 5 ml 接種し、 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 、暗黒条件下で静置培養を行った。供試菌株は、亜鉛のみ滋賀の 1 菌株とし、その他の微量元素は 8 菌株を供試した。培養 30 日目にろ紙を用いて菌糸体をろ過し、水洗後、80℃で 48 時間乾燥させ、重量を測定した。供試数はそれぞれ 3 本とし、3 回繰り返し試験を行った。

7. アミノ酸の菌糸成長促進効果

カゼインの加水分解物であるカザミノ酸 1.5 g に相当する各種アミノ酸組成を表-3 に示す (岡本ら, 1960)。対照は OT 培地に $(\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ を 1.5 g / ℓ 添加した培地とし、緩衝剤、常量および微量元素の試験結果を基に調製した培地 (表-5) の窒素源をそれぞれ $(\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ 1.5 g / ℓ、ビタミンフリーのカザミノ酸 1.5 g / ℓ およびカザミノ酸 1.5 g に相当する各種アミノ酸を供試した。100 ml 容三角フラスコに供試培地を 20 ml 入れ、121℃、20 分間滅菌した後、接種源を 5 ml 接種し、 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 、暗黒条件下で静置培養を行った。培養 30 日目にろ紙を用いて菌糸体をろ過し、水洗後、80℃で 48 時間乾燥させ、重量を測定した。供試数はそれぞれ 3 本とし、3 回繰り返し試験を行った。

表－3 カザミノ酸 1.5g に相当するアミノ酸組成

アミノ酸名	略号	濃度(1,000ml当たり)	特性
アラニン	Ala	33.5 mg	中性脂肪族側鎖
システイン	Cys	4.5 mg	側鎖に水酸基と硫黄
アスパラギン酸	Asp	51.75 mg	酸性アミノ酸
グルタミン酸	Glu	219.5 mg	酸性アミノ酸
フェニルアラニン	Phe	35.5 mg	芳香族アミノ酸
グリシン	Gly	21 mg	中性脂肪族側鎖
ヒステジン	His	37.5 mg	塩基性アミノ酸
イソロイシン	Ile	94 mg	中性脂肪族側鎖
リシン	Lys	75 mg	塩基性アミノ酸
ロイシン	Leu	94 mg	中性脂肪族側鎖
メチオニン	Met	24.5 mg	側鎖に水酸基と硫黄
アスパラギン	Asn	30.75 mg	側鎖にアミド基を持つ
プロリン	Pro	157 mg	中性脂肪族側鎖
グルタミン	Gln	241.5 mg	側鎖にアミド基を持つ
アルギニン	Arg	57 mg	塩基性アミノ酸
セリン	Ser	35 mg	側鎖に水酸基と硫黄
トレオニン	Thr	46 mg	側鎖に水酸基と硫黄
バリン	Val	107 mg	中性脂肪族側鎖
トリプトファン	Trp	33 mg	側鎖のインドールが二環
チロシン	Tyr	42 mg	芳香族アミノ酸
ヒドロキシプロリン	Hyp	3 mg	

Ⅲ. 結果と考察

1. 基本培地の検討

浜田, PD, FH, OT, mOT および mMMN の6種の培地で液体培養した際の菌糸体量を図－1に示す。滋賀株では, OT で最も菌糸体量が増加し (153.6 mg) , mOT (138.6 mg) , mMMN (137.1 mg) , 浜田 (123.2 mg) , PD (81.3 mg) , FH (41.3 mg) の順となった。金峰山株では, OT で最も菌糸体量が増加し (165.8 mg) , mMMN (149.0 mg) , mOT (142.6 mg) , 浜田 (115.8 mg) , PD (100.7 mg) , FH (44.9 mg) の順となった。宮古株では, 浜田で最も菌糸体量が増加し (110.8 mg) , mMMN (107.6 mg) , PD (99.6 mg) , OT (94.6 mg) , mOT (73.1 mg) , FH (38.5 mg) の順であった。阿仁株では, OT で最も菌糸体量が増加し (167.3 mg) , mMMN (149.6 mg) , mOT (141.6 mg) , 浜田 (118.9 mg) , PD (97.3 mg) , FH (43.5 mg) の順となった。八幡平株では, 浜田で最も菌糸体量が増加し (119.9 mg) , OT (100.5 mg) , PD (70.7 mg) , mOT (68.3 mg) , mMMN (65.3 mg) , FH (45.3 mg) の順となった。岩手株では, PD で最も菌糸体量が増加し (139.8mg) , OT (122.6 mg) , mMMN (119.8 mg) , 浜田 (115.4 mg) , mOT (109.4 mg) , FH (42.5 mg) の順となった。上新城株では, PD で最も菌糸体量が増加し (123.5 mg) , 浜田 (118.3 mg) , mMMN (115.7 mg) , OT (90.8 mg) , mOT (73.8 mg) , FH (45.3 mg) の順となった。南外株では, mOT で最も菌糸体量が増加し (127.0 mg) , OT (118.8 mg) , mMMN (110.9 mg) , 浜田 (105.3mg) , PD (89.7 mg) , FH (38.3 mg) の順となった。

人工栽培成功の鍵は, 使用する菌株と培地の選択が重要である。供試した8菌株について, 既存培地を用いて培養特性を調査した結果, 供試菌株間で異なる培地選択性が認められた。宮古と八幡平株は浜田培地が適しており, 岩手と上新城株は PD 培地, 滋賀, 金峰山, 阿仁株は OT 培地, 南外株は mOT 培地で最も菌糸体量が増加した。PD 培地で最も成長する岩手と上新城株は, ジャガイモデンプンの資化能力が高く, 浜田培地で成長に秀でた宮古と八幡平株は, 酵母由来の成分を資化する能力に優れるなど, 菌株間で好適な培

地に差異が認められた。このようにマツタケの栽培化に向けては、菌株の選択が重要であるとともに、菌糸成長に関して幅広く多くの菌株に対応した培地を選択する必要がある。

供試した6種の培地のうち、化合物から構成された培地はOT, FHおよびmOT培地の3種である。OT培地は、供試全系統においてジャガイモ抽出物(PD)や酵母残渣(浜田), 酵母および麦芽抽出物(mMMN)を用いた培地と同等あるいはそれ以上の菌糸成長を示した。一方、FH培地で菌糸成長の抑制がみられた要因は、主な窒素源が硝酸態窒素であることと炭素源が他の培地の1/10以下と少なかったことに起因したと考えられる。また、mOT培地は、OT培地と比較してHEPESが無添加でクエン酸-KOH緩衝剤が1/2量であることに加え、一部の無機化合物添加量が1/2以下であったことが、菌糸成長がOT培地と同等あるいはそれ以下となったと考えられる。

上記の結果を基に、全供試菌株で一定量の成長を示したOT培地を基本培地として選定し、新たな培地調製に向けて各種元素について検討した。

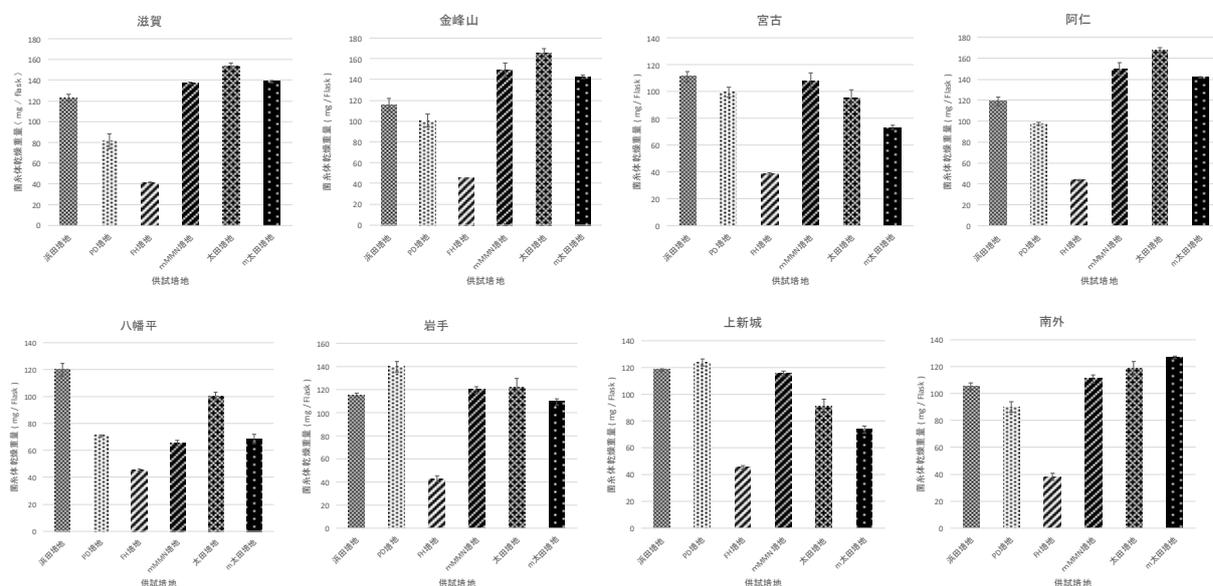


図-1 基本培地における菌糸成長

2. 緩衝剤の検討

HEPESとMESの菌糸生長促進効果について、菌株別に菌糸体量を測定した結果を図-2に示す。滋賀株において、緩衝剤無添加で菌糸体量が131.53 mgで、HEPES 100 mMで213.13 mg、MES 100 mMで197.57 mgと徐々に増加した。供試した全ての菌株において、100 mMまで菌糸体量が有意に増加し、HEPESとMESの有効性が確認された。全菌株間で50 mMまでは、HEPESとMESで有意な差は認められなかったが、阿仁と南外株で100 mMにおいて、MESと比較してHEPESで有意 ($p < 0.05$) に菌糸体量が増加したが、その他の菌株では有意差は認められなかった。

緩衝剤については、細胞培養、組織培養など生化学分野で広く使用されている代表的な緩衝剤であるHEPESとMESについて検討した。OT培地ではHEPESを7 g/l (29.4 mM) 添加するが、HEPESはpH 6.8~8.2の緩衝液を作るのに適しており、MESはpH 5.5~7.0の緩衝液を作るのに適している。本研究において、

HEPES と MES に菌糸体増殖効果が確認されたが、50 mM 以下では両化合物間で有意差が認められないこと、マツタケ菌の至適 pH は 5 前後であることから、緩衝剤は MES が適していると考えられた。添加濃度は、下記の pH 緩衝剤を同時に添加すること、また、浸透圧ストレスを回避するため、本試験結果で推察された至適濃度である 100 mM の 1/2 量である 50 mM とした。

次に、クエン酸、フマル酸、マレイン酸、trans-アコニット酸の 4 種について、菌株別に菌糸体量を測定した結果を図-3に示す。供試したクエン酸、フマル酸およびアコニット酸は、解糖系におけるクエン酸回路の重要な成分であるとともに、菌糸成長において炭素源として利用されていると考えられる。また、マレイン酸は、フマル酸の幾何異性体であり、担子菌類のプロトプラスト調製時の pH 調整剤として最も適した酸として知られている。アコニット酸は菌糸体内で cis 型で存在するが、自然界においては trans 型で存在しており、cis 型アコニット酸は熱に弱く、培地調製の際、trans 型に変わることが知られているため、本実験では trans 型アコニット酸を使用した。

クエン酸は、滋賀、金峰山、宮古、阿仁、八幡平、岩手、南外株で増殖効果がみられたが、上新城株で添加効果は認められなかった。フマル酸は、全菌株で増殖効果が認められた。マレイン酸は、滋賀、金峰山、宮古、阿仁、南外の5株で増殖効果が認められたが、八幡平、岩手の2株で増殖効果は認められず、上新城株では抑制がみられた。trans-アコニット酸は、滋賀以外の菌株で増殖効果がみられた。全供試化合物において、1 g より多く添加した際の菌糸体乾燥重量は示していないが、1 g 以上添加しても増殖効果は認められず、抑制的に作用した。また、クエン酸には、カルシウムイオンをキレートする性質があり、カルシウムイオンに依存する実験系には使用できないことから、pH 緩衝剤は全菌株に増殖効果が認められたフマル酸とし、最適添加量は 1 g / l と考えられた。

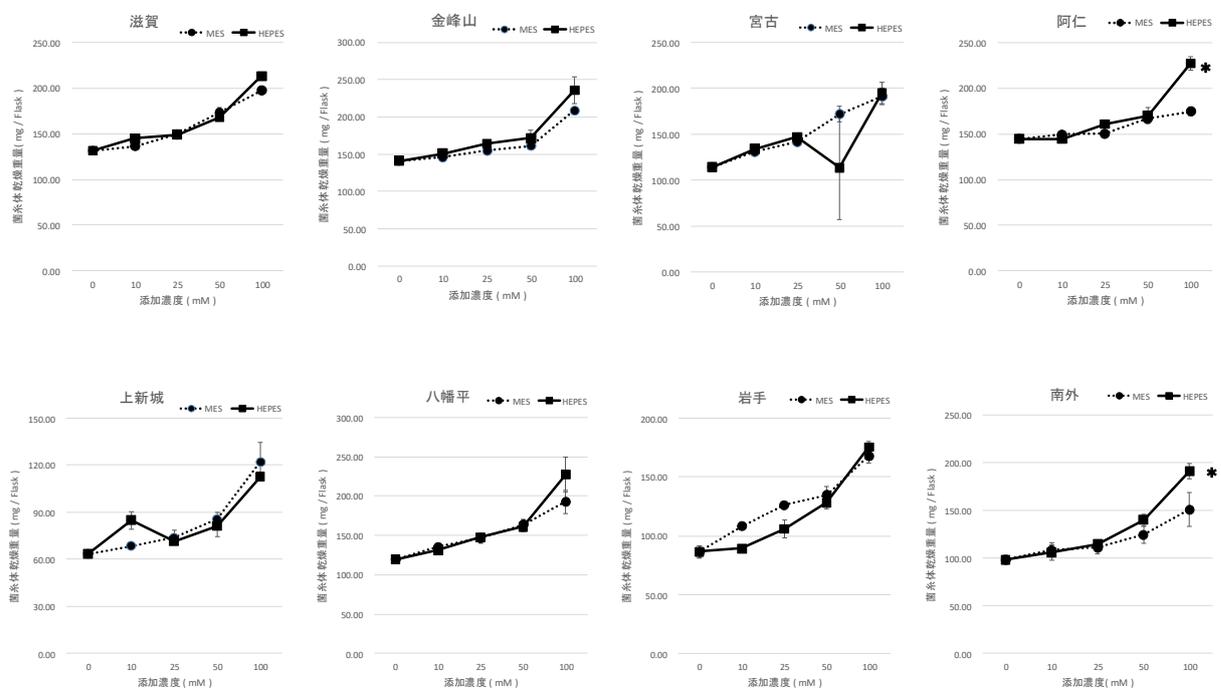


図-2 菌糸成長に及ぼす緩衝剤の影響 (HEPES, MES)

*: 有意水準5%で差あり

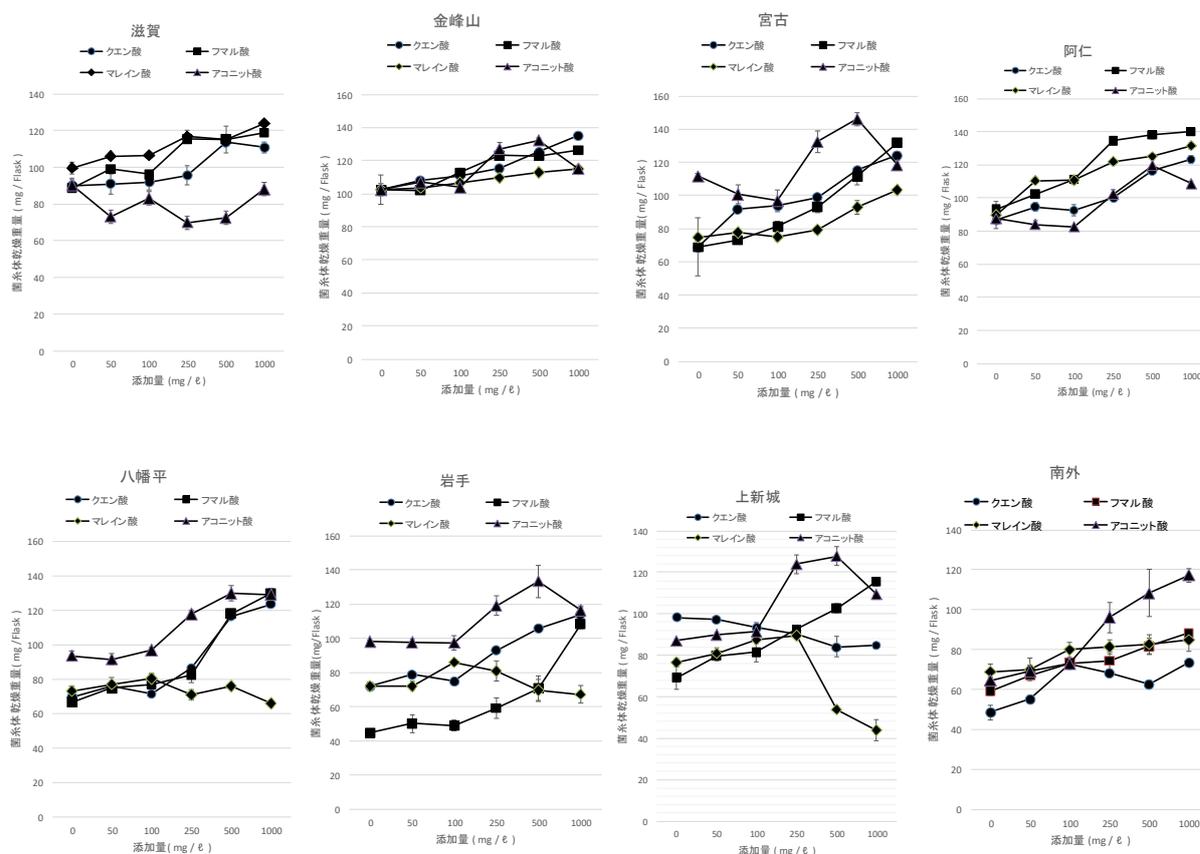


図-3 菌糸成長に及ぼす pH 緩衝剤の影響 (クエン酸, フマル酸, マレイン酸, アコニット酸)

3. 常量元素の検討

1) リン酸

KH_2PO_4 を用いてリン酸による菌糸体増殖効果を調べた結果は、図-4に示すとおり、供試した全菌株でリン酸の添加効果が認められた。滋賀株では、無添加で菌糸体量 26.97 mg だったものが、0.1 g 添加することで 110.3 mg と急激に菌糸体量が増加し、その後 0.25 g 添加で 120.40 mg、5.0 g 添加で 142.63 mg と緩やかに増加した。この傾向は、供試した全ての菌株で認められた。岩手と上新城株以外の6菌株では 1 g と 5 g 添加の菌糸体量に有意差は認められないことから、 KH_2PO_4 の最適添加量は 1 g/l と考えられる。

2) カルシウム

$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を用いてカルシウムによる菌糸体増殖効果を調べた結果を図-5に示す。 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ による有意な菌糸体増殖効果は認められなかったが、金峰山、岩手、八幡平、上新城および南外株で、50 mg の添加で菌糸体量が最大値を示し、南外株を除く 4 菌株で無添加区と比較して、有意に菌糸体量が増加した ($p < 0.05$)。また、滋賀、宮古、および阿仁株では、250 mg まで添加したが、促進あるいは抑制効果は認められず、定常状態で推移したことから、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の最適添加量は 50 mg/l と考えられる。

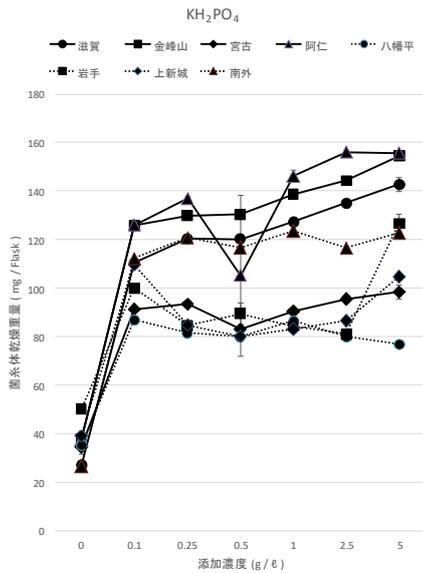


図-4 菌糸成長に及ぼす KH_2PO_4 の添加効果

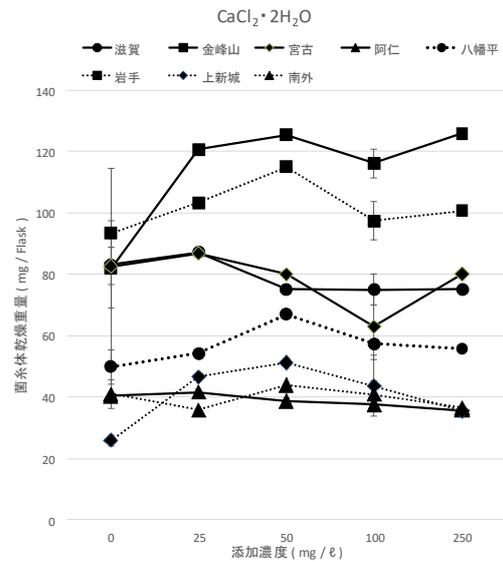


図-5 菌糸成長に及ぼす $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の添加効果

3) マグネシウム

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ を用いてマグネシウムによる菌糸体増殖効果を調べた結果を図-6に示す。供試した全菌株でマグネシウムの有意な添加効果が認められた ($p < 0.05$)。阿仁株では、無添加で菌糸体量 16.23 mg, 0.1 g 添加で 119.48 mg と急激に増加し、その後 5.0 g 添加で 136.27 mg と緩やかに増加した。この傾向は、供試した全ての菌株で認められ、0.1 g 以上しても定常状態で推移した。ただし、金峰山、八幡平、岩手および南外株は、2.5 g で最大値を示し、5 g で減少に転じた。以上の結果より、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ の最適添加量は 2.5 g / ℓ と考えられる。

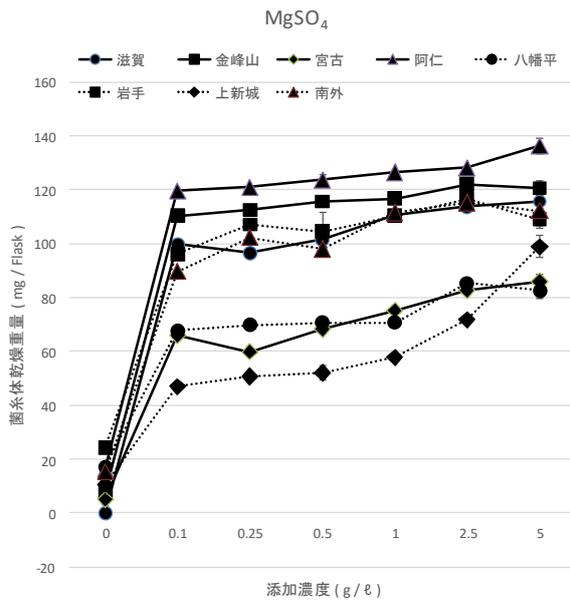


図-6 菌糸成長に及ぼす $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ の添加効果

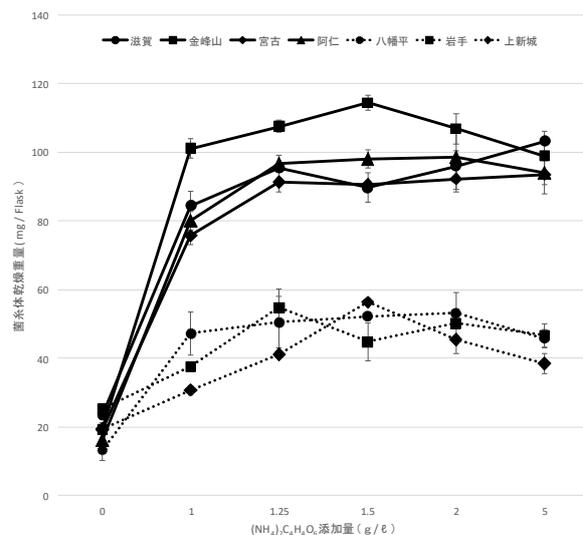


図-7 菌糸成長に及ぼす $(\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ の添加効果

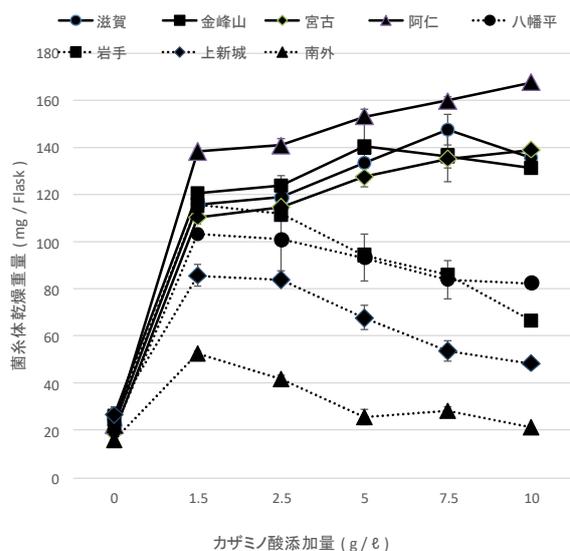


図-8 菌糸成長に及ぼすカザミノ酸の添加効果

4) 窒素源

(NH₄)₂C₄H₄O₆ を用いて窒素源による菌糸体の増殖効果を調べた結果を図-7に示す。(NH₄)₂C₄H₄O₆ は、供試した全菌株で無添加区と比較して、1 g 以上の添加区で有意な添加効果が認められた (p<0.05)。金峰山株では、無添加で菌糸体量 19.3 mg, 1.0 g 添加で 101.03 mg と指数関数的に増え、1.5 g 添加で 114.4 mg と最大値を示し、それ以降 5 g まで添加すると徐々に減少した。この傾向は全菌株で認められたため、(NH₄)₂C₄H₄O₆ の最適添加量は 1.5 g/l と考えられた。

次に、カザミノ酸を用いた窒素源による菌糸体の増殖効果を調べた結果を図-8に示す。カザミノ酸の最適濃度を調べた結果、供試した全菌株で無添加区と比較してカザミノ酸の有意な添加効果が認められた (p<0.05)。阿仁株では、無添加で菌糸体量が 22.40 mg, 1.5 g 添加で 138.24 mg と急激に増加し、10.0 g 添加で 167.57 mg と緩やかに増加した。この傾向は、滋賀、金峰山、宮古株でも同様に認められたが、1.5g から 10 g までの添加量間での有意差は認められなかった。また、八幡平株では、無添加で菌糸体量が 20.27 mg, 1.5g 添加で 103.25 mg と最大値を示し、添加量が増すに従い菌糸体量は減少した。この傾向は、岩手、上新城、南外株で同様に認められ、1.5 g/l で最大値を示したことから、カザミノ酸の最適添加量は 1.5 g/l と考えられる。

4. 微量元素の検討

1) 亜鉛

ZnSO₄·7H₂O を用いて亜鉛による滋賀株の菌糸体増殖効果を調べた結果を図-9に示す。その結果、無添加区と比較して 0.1 から 10.0 g/l の添加濃度範囲で有意な菌糸体量の増加を確認した。亜鉛は炭酸脱水素酵素に含まれ、欠乏すると成長抑制やアミノ酸吸収が抑制されることが知られており (山根, 1990), 栄養成長に欠かせない微量元素である。無添加区で菌糸体量は 123.90 mg, 0.1 g 添加で 171.40 mg と急激に増

加し、0.5 g 添加で 176.10 mg と最大値を示し、それ以上添加しても菌糸体量は定常状態を推移することから、最適添加量は 0.5 mg / ℓ と考えられた。

2) モリブデン

微量元素であるモリブデンは、ニトロゲナーゼなど酵素として菌体内で酸化還元反応を触媒する作用を示す重要な元素であるため（山根，1990），栄養成長に欠かせない微量元素である。そのため、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を用いてモリブデンによる菌糸体増殖効果を調べた結果を図-10に示す。最大で 1.0 mg まで添加したが、供試した全菌株で菌糸成長へ及ぼす影響は認められなかった。また、基礎培地として検討した菌根合成用 FH 培地の元となる植物組織培養用に開発された SH 培地や MS 培地では、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の添加量が 0.1~0.25 mg / ℓ とされていることから、マツタケにおける新たな培地における添加量は 0.25 mg / ℓ とした。

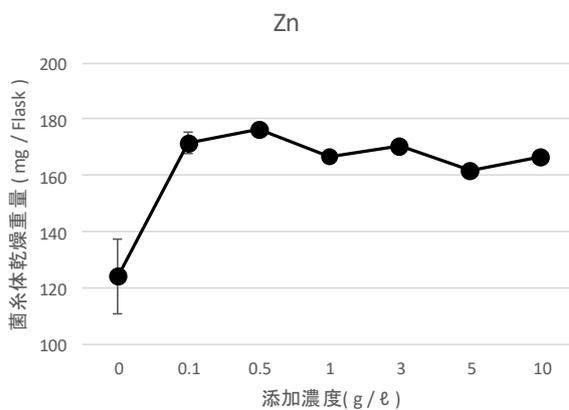


図-9 菌糸成長に及ぼす $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ の添加効果

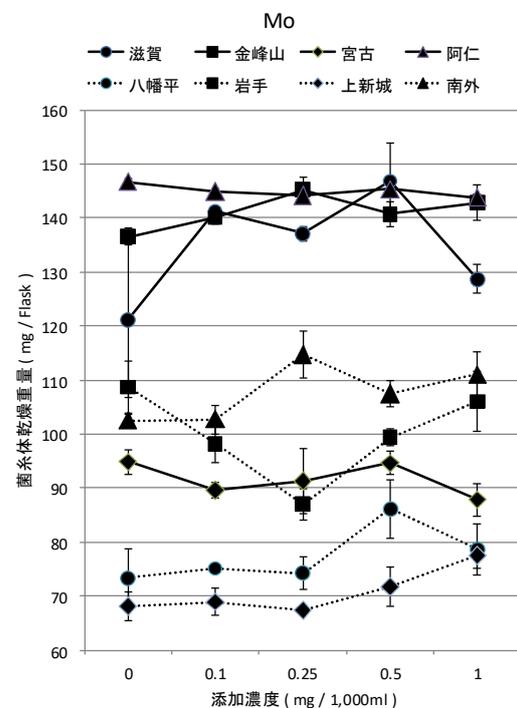


図-10 菌糸成長に及ぼす $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の添加効果

3) ホウ素

ホウ素は生体維持に必須な元素であることから、 H_3BO_3 を用いてホウ素による菌糸体増殖効果を調べた結果、20 mg まで濃度範囲において、菌糸成長へ及ぼす影響は認められず、無添加と同程度の菌糸体量で推移した（図-11）。南外株は、無添加で菌糸体量が 57.50 mg、1 g 添加で 68.07 mg と最大となり、20 g 添加で 51.27 mg と徐々に減少し、金峰山と岩手株が同様な反応を示した。また、阿仁株は、無添加で菌糸体量が 78.83 mg、10 mg で 80.53 mg で最大となり、20 mg で 74.83 g と減少し、滋賀株で同様な反応を示した。宮古、八幡平および上新城株は、添加区の菌糸体量は無添加区と同程度の定常状態で推移した。また、モリブデン同様、基礎培地として検討した菌根合成用 FH 培地の元となる植物組織培養用に開発された SH 培地や MS 培地等では、 H_3BO_3 の添加濃度が 3~6.2 mg / ℓ とされていることから、マツタケにおける新たな培地における

添加量は 5 mg / ℓ とした。

4) ヨウ素

ヨウ素はホウ素同様、生体維持に必須な元素であることから、KI を用いてヨウ素による菌糸体増殖効果を調べた結果を図-12に示す。宮古株は、無添加で菌糸体量が 43.40 mg、0.5 mg で 51.97 mg と最大値を示し、それ以降 20 mg で 37.37 mg と徐々に減少し、滋賀、阿仁、八幡平、岩手および上新城株で同様な傾向を示した。一方、金峰山および南外株は添加による菌糸体量への影響は認められず、無添加区の同程度の定常状態で推移した。また、ホウ素同様、基礎培地として検討した菌根合成用 FH 培地の元となる植物組織培養用に開発された SH 培地や MS 培地等では、KI の添加濃度が 0.75~1.0 mg / ℓ とされていることから、マツタケにおける新たな培地における添加量は 1.0 mg / ℓ とした。

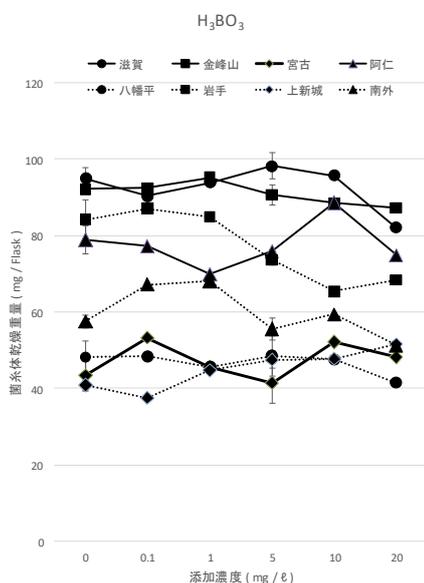


図-1-1 菌糸成長に及ぼす H₃BO₃ の添加効果

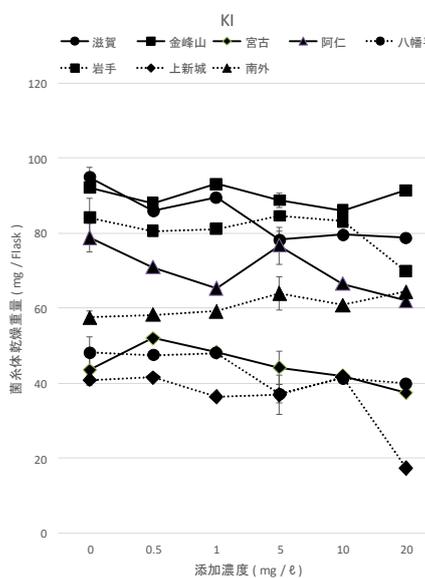
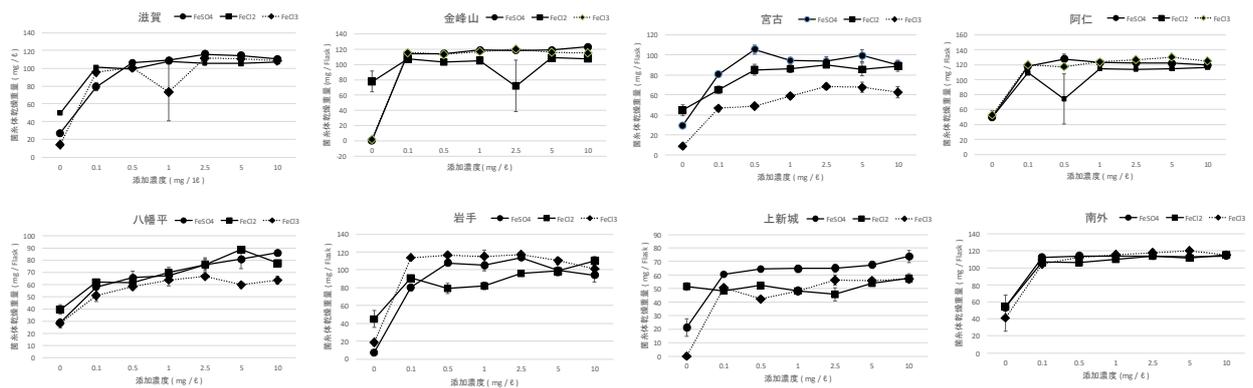


図-1-2 菌糸成長に及ぼす KI の添加効果

5) 鉄

鉄の沈殿を防ぐため、キレート剤としてアセチルアセトン^①を 30 μℓ / ℓ 添加し、FeSO₄・7H₂O、FeCl₂ および FeCl₃ の 3 種の化合物を用いて鉄による菌糸体増殖効果を調べた結果を図-13に示す。その結果、3種の鉄化合物の添加効果が認められ、無添加と比較して 0.1~10.0 mg / ℓ の範囲で有意な菌糸体量の増加を確認した (p<0.05)。南外株では、FeSO₄・7H₂O 無添加で菌糸体量 53.9 mg、0.1mg の添加で 112.43 mg とそれ以上添加しても菌糸体量は平衡状態を推移した。同様に FeCl₂ 0.1 mg の添加で菌糸体量 106.53 mg、FeCl₃ においても 0.1 mg の添加で 104.43 mg とそれ以上添加しても菌糸体量は平衡状態を推移した。供試した全菌株において、同様な傾向を示した。FeSO₄・7H₂O は、全供試菌株で良好な菌糸体成長を示したが、FeCl₂ は、FeSO₄・7H₂O と比較して金峰山と岩手株で若干菌糸体量が劣り、FeCl₃ も FeSO₄・7H₂O と比較して宮古や八幡平株で若干菌糸体量が劣った。また、菌株によっては、最大添加量である 10 mg でやや菌糸体量が緩やかに減少する傾向もみられることから、化合物種を FeSO₄・7H₂O とし、その最適添加量は 5 mg / ℓ と考えられた。



図－13 菌糸成長に及ぼす鉄の影響(FeSO₄·7H₂O, FeCl₂, FeCl₃)

5. アミノ酸の菌糸成長促進効果

マツタケの菌糸体増殖に及ぼす窒素源の至適濃度を明らかにするため、(NH₄)₂C₄H₄O₆ とカザミノ酸について調査した結果、その最適添加量は、(NH₄)₂C₄H₄O₆ で 1.5 g/l、カザミノ酸で 1.5 g/l と考えられた。カザミノ酸は各種アミノ酸から構成されており、個々のアミノ酸量も知られていることから(岡本ら, 1960)、新たに開発する培地では、カザミノ酸 1.5 g/l に相当する各種アミノ酸の添加量を表-3に示すアミノ酸組成で供試した。OT 培地と新たに開発した培地に(NH₄)₂C₄H₄O₆ を 1.5 g/l 添加した場合を比較すると、全菌株で新たに開発した培地において菌糸体量が増加し、阿仁と上新城株を除く6菌株で有意に増加し (p<0.05)、新たに開発した培地の有用性が示唆された(表-4)。

また、窒素源を各種アミノ酸で置換した新たに開発した培地と(NH₄)₂C₄H₄O₆ とした OT 培地を比較すると、アミノ酸を用いた新たな培地での菌糸体量指数 (アミノ酸置換/OT 培地酒石酸アンモニウム 1.5 g×100) は、滋賀株で 146、金峰山株 133、宮古株 180、阿仁株 131、八幡平株 153、岩手株 140、上新城株 117、南外株 171 と全供試菌株で増加が認められ、OT 培地と比較して、新たに開発した培地では上新城株以外で有意差が認められた (p < 0.05, Dunnett test)。以上の結果より、窒素源を(NH₄)₂C₄H₄O₆ やカザミノ酸から各種アミノ酸に置換することで、菌糸成長速度が増し、菌糸体重量が既知の培地に比べて平均で約 1.5 倍に増加した。

近年、微生物からヒトを含む生物において、アミノ酸が重要な生理機能を有することが解ってきた (Mendel; 1974)。植物では病原菌からの防御にグルタミン酸 (Glu) がシグナル物質として作用しており (Toyota et al, 2018)、木材腐朽菌であるアミスギタケでは、培地成分からトレオニン (Thr)、リシン (Lys)、チロシン (Tyr) の3種のアミノ酸を除去すると子実体原基を形成することから、細胞内の遊離 Thr, Lys, Tyr などのアミノ酸によって子実体原基形成が常に抑制された状態にあることが明らかとなった (Tanaka et al, 1995; 菅原ら, 2004)。マツタケがアミスギタケと同様の作用機作で栄養成長から生殖成長へ転換するのかわらかではないが、今回、新たに開発した培地では、窒素源をアミノ酸に置換できたことから、マツタケ人工栽培に向けてアミノ酸の生理機能解明が可能となった。

表-4 アミノ酸の菌糸成長促進効果

系統名	太田培地	新たに開発した培地			菌糸体量指数 ^{a)}
	酒石酸アンモニウム	酒石酸アンモニウム	カザミノ酸	アミノ酸置換	
滋賀	84.63 ± 1.25	101.50 ± 1.59 *	110.80 ± 0.90 *	123.93 ± 1.76 *	146
金峰山	93.30 ± 2.24	117.74 ± 3.53 *	110.40 ± 1.07 *	124.10 ± 0.26 *	133
宮古	55.53 ± 3.16	89.44 ± 3.80 *	65.17 ± 1.62 *	99.73 ± 2.87 *	180
阿仁	111.53 ± 1.76	114.70 ± 2.14	116.20 ± 0.00	146.20 ± 2.80 *	131
八幡平	52.27 ± 0.64	95.84 ± 2.14 *	68.53 ± 2.77	80.13 ± 4.73 *	153
岩手	35.67 ± 1.60	61.30 ± 3.87 *	46.33 ± 0.75	65.03 ± 6.42 *	140
上新城	51.83 ± 1.37	55.07 ± 3.97	58.63 ± 2.59	68.87 ± 3.42	117
南外	48.10 ± 7.03	97.07 ± 0.59 *	74.67 ± 3.19 *	82.13 ± 7.56 *	171

数値は平均値 ± 標準誤差を示す

a) アミノ酸置換の菌糸体量/太田培地(酒石酸アンモニウム)の菌糸体量 × 100

*: 太田培地(酒石酸アンモニウム1.5g)と比較して有意差ありを示す(p < 0.05, Dunnett test)

本研究により、マツタケ8菌株の菌糸成長に及ぼす緩衝剤、常量元素および微量元素の化合物種と濃度について検討し、マツタケの培養に適した新たな培地組成を決定した(表-3, 5)。新たな培地組成は、以下のとおりである。蒸留水1ℓあたり Glucose 10 g, Fumaric acid 1.0 g, アミノ酸 1.5 g (Ala 33.5 mg, Cys 4.5 mg, Asp 51.75 mg, Glu 219.5 mg, Phe 32.5 mg, Gly 21 mg, His 37.5 mg, Ile 94 mg, Lys 75 mg, Leu 94 mg, Met 30.75 mg, Asn 30.75 mg, Pro 157 mg, Gln 241.5 mg, Arg 57 mg, Ser 35 mg, Thr 46 mg, Val 107 mg, Trp 33 mg, Tyr 42 mg, Hyp 3 mg), KH₂PO₄ 1.5 g, MgSO₄·7H₂O 2.5 g, CaCl₂·2H₂O 50 mg, MES 12 g, FeSO₄·7H₂O 5 mg, MnSO₄·4H₂O 0.5 mg, ZnSO₄·7H₂O 0.5 mg, CoSO₄·7H₂O 0.5 mg, CuSO₄·5H₂O 1 mg, NiSO₄·6H₂O 2 mg, Acetylacetone 30 μℓ, Na₂MoO₄·2H₂O 0.25 mg, KI 1 mg, H₃BO₃ 5 mg, 塩酸チアミン 3 mg, ニコチン酸 50 μg, 葉酸 30 μg, ビオチン 50 μg, 塩酸ピリドキシン 5 μg, 塩化カルニチン 10 μg, 硫酸アデニン 30 μg, 塩化コリン 30 μg, pH 5.2 とした。炭素源やキレート剤, マンガン, コバルト, 銅, ニッケルおよびビタミン類については, 川合・寺田 (1976) と太田 (1990) が化合物種と濃度等を詳細に検討しており, 新たな培地では同化合物を同量を添加した。新たに開発した培地の特徴は, 基本培地である OT 培地と比較して緩衝剤を HEPES から MES に, クエン酸をフマル酸に改め, 窒素源である酒石酸アンモニウムをアミノ酸に置き換えその添加量を 1.5 倍とし, MgSO₄·7H₂O を 1.0 g から 2.5 g に増加したことにある。また, 成長に必須な微量元素であるモリブデン, ヨウ素およびホウ素を新たに追加した。さらに, FeCl₃ 50 mg を FeSO₄·7H₂O 5 mg に改め, ZnSO₄·7H₂O の添加量を 3 mg から 0.5 mg と各種成分を適正な濃度にしたことで, OT 培地と比較して菌糸成長量を大きく改善した。

表－5 マツタケに適した新たな培地組成

物質名	濃度(1,000ml当たり)
Glucose	10 g
Fumaric acid	1 g
Amino acids*	1.5 g
KH ₂ PO ₄	1 g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	2.5 g
CaCl ₂ ·2H ₂ O	50 mg
FeSO ₄ ·7H ₂ O	5 mg
MnSO ₄ ·4-6H ₂ O	0.5 mg
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.5 mg
CoSO ₄ ·7H ₂ O	0.5mg
CuSO ₄ ·5H ₂ O	1 mg
NiSO ₄ ·6H ₂ O	2 mg
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.25 mg
KI	1 mg
H ₃ BO ₃	5 mg
MES**	12 g
Acetyl acetone	30 μℓ
Thiamine·HCl	3 mg
Nicotinic acid	50 μg
Folic acid	30 μg
Biotin	50 μg
Pyridoxine-HCl	5 μg
Carnitine chloride	10 μg
Adenine·H ₂ SO ₄	30 μg
Choline chloride	30 μg

* : アミノ酸組成(表3)参照

** : 2-Morpholinoethanesulfonic acid

以上、本研究では、マツタケの菌糸成長を促す緩衝剤、常量元素および微量元素等の種類と濃度について検討を行い、培養に適した新たな培地の組成を決定した。しかし、新たな培地は、菌糸体増殖等の栄養成長には優れているが、富栄養な培地組成であるため、子実体形成には抑制的に作用すると考えられる。今後、マツタケの子実体形成に向けては、培地基材の検討や菌株の選抜が重要であり、長期間、継続的に成長可能で、浸透圧に影響を与えない炭素源等の検証が必要である。最後に、本培地がマツタケ人工栽培に向けて、担子菌類での子実体形成に関与していると考えられるアミノ酸の機能性やメカニズムを解明するきっかけとなることを期待する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、甲南大学特別客員教授田中修先生からはご指導ご鞭撻を賜り、感謝の念に堪えません。また、太田明博士からは菌株の提供にご協力頂いたことに改めて感謝致します。さらに、研究を進めるにあたり、終始ご協力いただいた由利地域振興局の鈴木博美氏に感謝申し上げます。最後に、本報告の執筆にあたり、適切にご指導、ご助言を頂いた秋田県林業研究研修センターの諸氏に対し、厚く御礼を申し上げ、感謝の意を表します。

引用文献

- Guerin-Laguette A, Vaario L M, Gill W M, Lapeyrie F, Matsushita N and Suzuki K (2000) Rapid in vitro ectomycorrhizal infection on *Pinus densiflora* roots by *Tricholoma matsutake*. *Mycoscience* 41 : 389-393.
- Guerin-Laguette A, Vaario L-M, Matsushita N, Shindo K, Suzuki K and Lapeyrie F (2003) Growth stimulation of a Shiro-like, mycorrhiza forming, mycelium of *Tricholoma matsutake* on solid substrates by non-ionic surfactants of vegetable oil. *Mvcol Proer* 2 (1) : 37-44
- 浜田稔 (1950) マツタケの生理生態的研究 [予報]. *植物学雑誌* 63 : 40-41
- 伊藤武・岩瀬剛二 (1997) マツタケ 果樹園感覚で殖やす育てる. 農山漁村文化協会, 181pp. 156.
- Inaba K, Yoshida T, Mitsunaga T and Koshijima T (1993) Acceleration of the growth of *Tricholoma matsutake* mycelium by a fraction of sulphite pulping waste. *Mokuzai Gakkaishi*39(6) : 710-715
- Inaba K, Yoshida T, Takano Y, Mayuzumi Y, Mitsunaga T and Koshijima T (1995) An instance of the fruiting-body formation of *Tricholoma matsutake*. *Environ Control Biol* 33 : 59-64
- Kawagishi H, Hamajima K, Takanami R, Nakamura T, Sato Y, Akiyama Y, Sano M and Tanaka O (2004) Growth promotion of mycelia of the Matsutake mushroom *Tricholoma matsutake* by D-isoleucine. *Biosci Biotechnol Biochem* 68(11) : 2405-2407
- 加計康晴・松下範久・鈴木和夫 (2000) アカマツ林の外生菌根菌に及ぼす施業の影響. *東大演報* 104:147-156.
- 川邊誠一郎・田所美穂・星野卓二・浜田博喜 (1987) マツタケ(*Tricholoma matsutake* Sing.)の人工培養(第一報)マツタケ子実体からの菌糸の分離と培養. *岡山理科大学紀要* 22 : 13-23
- 川合正充・阿部重雄 (1976) まつたけの培養に関する研究, 第一報まつたけの栄養生長におよぼす C 源および N 源の影響. *日菌報* 17 : 159-167
- 川合正充・寺田治 (1976) まつたけの培養に関する研究, 第二報まつたけの栄養生長におよぼすビタミン類、核酸関連物質、植物ホルモンおよび金属イオンの影響. *日菌報* 17 : 168-174
- 川合正充・小川真 (1976) まつたけの培養に関する研究, 第 4 報種菌培養の検討と菌床栽培の試み. *日菌報* 17 : 499-505
- 枯木熊人・川上嘉章 (1985) マツタケ菌感染苗によるシロの人工形成. *広島県林試研報* 20 : 13-23
- 近藤民雄・大賀祥治 (2011) マツタケ菌床栽培を目指して—水環境の立場から— *九大演報* 92 : 1-3
- 京都府 (1980) マツタケ山の造成. 123pp, 京都府, 京都.
- Marx D H (1969) The influence of ectotrophic mycorrhizal fungi on the resistance of pine roots to pathogenic infection and soil bacteria. *Phytopathology* 59: 153—163
- Mendel Friedman (1974) *Protein-Metal Interactions*. Plenum Press New York
- 三村鐘三郎 (1908) 松茸人工繁殖試験. *林業試験報告* 7:93-108
- マツタケ研究懇話会 (1983) マツタケ山のつくり方. 創文, 163pp.
- Narimatsu M, Yamaguchi M, Yamanaka T, Gisusi S, Azuma T, Tamai Y and Kawai M (2019) Comparison of

- mycelial growth of different *Tricholoma matsutake* strains in soil medium at varying temperatures. *Asian Jour. Biotech. Bioresource Tech.* 5(4) : 1-8
- 岡本季彦・竹森栄子・水野伝一 (1960) 細菌の栄養に関する研究第 12 報ペプトンの再検討その3各種日本産ペプトンおよびカザミノ酸のアミノ酸組成. *日本細菌学雑誌* 15(11) : 1184-1188
- 小川真・浜田稔 (1975) 純粋培養によるマツタケ子実体原基の形成. *日菌報* 16(4) : 406-415
- Ohta A (1990) A new medium for mycelial growth of mycorrhizal fungi. *Trans Mycol Sci Japan* 31 : 323-334
- Ohta A (1994) Production of fruit-bodies of a mycorrhizal fungus, *Lyophyllum shimeji*, in pure culture. *Mycoscience* 35 : 147-151
- 太田明 (1998) ホンシメジの実用栽培のための栽培条件. *日菌報* 39 : 13-20
- 滋賀県 (1987) マツタケ増産のてびき. 58pp, 滋賀県, 大津
- 進藤克美・松下範久(2009) 非滅菌環境下におけるマツタケとアカマツの菌根合成. *東京大学農学部演習林報告* 120:1-9
- 菅原冬樹・藤田拓也・田中修 (2004) きの子実体原基形成のメカニズム : 無窒素培養に秘められたアミノ酸の効果とは? *化学と生物* 42(12) : 778-780
- 菅原冬樹・阿部実・菱川敬太・田中修 (2012) マツタケ栽培技術の開発ーマツタケ林におけるマツタケ菌の増殖およびキノコ相調査ー. *秋田県森林研報* 21 : 82-102
- Tanaka O, Fujita S and Sugawara F (1995) Primordial formation of fruit-body in *Favolus arcularius* induced by distilled-water culture in complete darkness. *Mem Konan Univ Sci Ser* 42(1) : 135-142
- Tasaki T, Kondo R (2016) Zn²⁺, a key factor of colony morphogenesis of *Tricholoma matsutake*. *J Wood Sci* 62 : 460-471
- 寺下隆夫・楠田瑞穂 (2013) マツタケ人工栽培における課題と今後の展望. *近畿大学農学部紀要* 46 : 343-353
- Toyota M, D Spencer, Sawai-Toyota S, J Wang, T Zhang, J Koo, G A Howe, S Gilroy (2018) Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science* 361 : 1112-1115
- Vaario L M, Tanaka M, Ide Y, Gill W M, and Suzuki K (1999) In vitro ectomycorrhiza formation between *Abies firma* and *Pisolithus tinctorius*. *Mycorrhiza* 9 : 177-183.
- Vaario L-M, Guerin-Laguette A, Gill W M, Lapeyrie F and Suzuki K (2000) Only two weeks are required for *Tricholoma matsutake* to differentiate ectomycorrhizal Hartignet structures in roots of *Pinus densiflora* seedlings cultivated on artificial substrate. *J For Res* 5 : 293-297
- 柳園江 (2001) 実験室におけるマツタケ子実体形成の関門. *植物の生長調節* 36(1) : 68-76
- Yamada A, Kanekawa S, Ohmasa M (1999) Ectomycorrhiza formation of *Tricholoma matsutake* on *Pinus densiflora*. *Mycoscience* 40 : 193-198
- 山中高史 (2012) マツタケ人工栽培技術開発に向けた研究. *森林総合研究所研究報告* 11(3) : 85-95
- 山根靖弘 (1990) 生体中の微量元素の役割. *保健物理* 25 : 269-277
- 吉村文彦&まつたけ十字軍運動 (2010) まつたけ山“復活させ隊”の仲間たち. *高文研*. 182pp.

研究報告（第 29 号）

令和 4 年 4 月発行

編 集 編集委員長 戸部 信彦

編集委員 菅原 冬樹，長岐 昭彦，佐藤 博文，眞坂 京子

発 行 秋田県秋田市河辺戸島字井戸尻台 4 7 - 2

秋田県林業研究研修センター

郵便番号 019-2611

T E L 018-882-4511

F A X 018-882-4443

U R L <http://www.pref.akita.lg.jp/rinken/>

(美の国あきたネットからアクセス)

e-mail forest-c@pref.akita.lg.jp

BULLETIN
OF
THE AKITA FOREST RESEACH AND TRAINING CENTER

No.29 2022.3

Advantages of containerized *Pinus thunbergii* seedlings
for development of coastal forest

Kyohei Nitta 1 ~ 18

Development of elite tree for Sugi (*Cryptomeria japonica*)
with excellent initial growth ability in Akita Prefecture

Hirofumi Sato, Masatsugu Miura, Keita Niwa
..... 19 ~ 39

A new medium for artifical cultivation of *Tricholoma*
matsutake

Fuyuki Sugawara 40 ~ 57