

## 育苗中の物理的刺激がスギコンテナ苗の 形状および植栽後の成長に及ぼす影響

小笠 真由美\*・山下 直子\*・北川 涼\*・藤井 栄\*\*・飛田 博順\*\*\*

### Abstract

Mayumi Y. Ogasa, Naoko Yamashita, Ryo Kitagawa, Sakae Fujii, Hiroyuki Tobita: The impact of mechanical stimulation on the growth of containerized *Cryptomeria japonica* seedlings during the nursery phase and after planting. Ap. For. Sci.

Containerized conifer seedlings often exhibit a high height-to-diameter ratio. To investigate the effect of mechanical stimulation on suppressing height growth, containerized seedlings of *Cryptomeria japonica* were subjected to shaking for 3 or 30 min, or stroked 1 or 10 times on their crowns, while monitoring their growth throughout the season. Factors influencing growth rate after planting in the field were also analyzed. Seedlings stroked 10 times were 15% shorter in height than those in the control (untreated) group at the end of the growing season. The height growth of seedlings shaken for 3 or 30 min was initially suppressed but ultimately comparable to that of the control seedlings by the end of growing season. No significant effects of treatment history on seedling height growth were observed after planting in the field. The height growth 1 year after planting was negatively correlated with canopy openness, while the height growth 2 years after planting was positively correlated with soil electric conductivity and negatively correlated with soil hardness. These results suggest that height growth is constrained by stroking the crown during the container nursery phase, but it was affected more by environmental factors after planting than treatment history.

**Key words:** crown, elongation growth, environmental factor, height constriction, shaking

### 要旨

コンテナ苗は高い育苗密度と十分な施肥、灌水の下で育苗されるため、しばしば徒長気味の形態になることが問題となっている。本研究では、育苗中にスギ (*Cryptomeria japonica*) コンテナ苗を3分間もしくは30分間振とうする(揺らす)処理、およびコンテナ苗の樹冠を1往復もしくは10往復撫でる処理が、1成長期中の個体サイズおよび、植栽後の成長に及ぼす影響を調査し、伸長成長の抑制効果を検証した。その結果、コンテナ苗の樹冠を10往復撫でる処理により1成長期後のコンテナ苗の苗長が対照区の苗と比べて15%低くなった。揺らす2処理区では5週間の処理期間中に苗長が抑制されたものの、その効果は1成長期後には認められなくなった。これらの苗を植栽した結果、植栽後の樹高成長に育苗時の処理の履歴は認められなかったのに対し、植栽1年後の樹高成長には開空率が負の効果を、植栽2年後の樹高成長には開空率に加え土壌の電気伝導度が正の効果を、土壌硬度が負の効果を示した。このことから、コンテナ苗の樹冠を撫でる処理によって伸長成長の抑制が可能であること、また、植栽後の苗の成長には育苗中の物理的刺激的履歴より、植栽地の環境条件が与える効果が大きいことが明らかとなった。

**キーワード:** 環境要因, 樹冠, 樹高抑制, 振とう, 伸長成長

### I はじめに

コンテナ苗とは、マルチキャビティコンテナ(以下、コンテナ)のキャビティ(育成孔)で栽培され、根鉢が付いた状態で出荷される苗である。コンテナ苗は、再造林コストの低減策として裸苗に代わり近年急速に利用が普及・拡大しており(小笠ら 2021)、裸苗に比べて植栽効率が(旗生ら 2017)、根鉢ごと植栽されることで移植後のプランティングショックを受けにくい(Yamashita *et al.* 2016)という利点がある。

一方、国内で普及しているコンテナは150 cc コンテナで育苗密度が296本 $m^{-2}$ 、300 cc コンテナでも178本 $m^{-2}$ であり(齋藤ら 2019)、裸苗の出荷前の育苗密度(25本 $m^{-2}$ 、宮崎 1966)と比べて極めて高い。さらに、コンテナ苗は

十分な肥料・灌水の下で栽培されるため(小笠ら 2021)、コンテナ苗は形状比(樹高:直径比)の高い形態になりやすい。形状比の高いコンテナ苗は、裸苗と比較して山への植栽後に伸長成長より肥大成長に成長様式をシフトするために樹高成長が鈍くなる(八木橋ら 2016、櫃間ら 2015)。また、形状比の高い苗は、大苗であっても植栽後に倒伏しやすく、下草に被圧され起き上がれないまま枯死する割合も高い(野宮ら 2016)。コンテナ苗の出荷規格として樹高と直径に加えて形状比を加える自治体もある(近藤ら 2019)。一方で、林野庁より、2023年5月に山林用主要苗木の標準規格(昭和33年12月24日付け33林野造第16622号林野庁長官通知)の一部改正が行われ、スギ実生コンテナ苗の直径の下限値が3.5 mm から4.0

\* 森林総合研究所関西支所, 〒612-0855 京都 (Kansai Res. Ctr., For. and For. Prod. Res. Inst., Kyoto 612-0855)

\*\* 徳島県立農林水産総合技術支援センター, 〒779-3233 徳島 (Tokushima Pref. Agric., For., and Fish. Tech. Supp. Ctr., Tokushima 779-3233)

\*\*\* 森林総合研究所, 〒305-8687 つくば (For. and For. Prod. Res. Inst., Tsukuba 305-8687)

mm に引き上げられるとともに、形状比が設定された上限値 (110) を超えないことが新たに推奨事項となり、形状比がより低い苗の育苗技術の開発が急務である。

また、育苗技術の向上によりコンテナ苗の育苗期間の大幅な短縮や需要に合わせた育苗も可能となりつつあるが(藤井 2016)、コンテナ苗の需要は安定的ではないために、規格に達した苗の出荷の目処が立たず、苗の成長が続いた結果形状比が高くなり、残苗の発生の原因となっている(小笠ら 2021)。このように、植栽後の伸長成長の抑制を避けるためにも、伸びすぎによる残苗の発生を抑えるためにも、コンテナ苗の育苗において、出荷規格近くまで達した苗の伸長成長のコントロールは解決すべき課題である。

植物が物理的な刺激を受けることで成長速度が抑制されたり組織構造が強固になることを接触形態形成 (thigmomorphogenesis) と呼ぶ。風衝地の樹木の矮化や、木材のあて材形成も、広義の接触形態形成であり(Badel *et al.* 2015)、植物が生育環境に適応するための機能である。植物は物理的刺激を受けると直ちに師部輸送の停止や細胞内のカルシウムイオンの増加が起こった後、一次成長(伸長成長)が停止する(Telewski 2006, 2021)。植物のこの機能を利用し、農業分野では古くから野菜苗の徒長防止技術として苗を撫でるなどの処理が行われてきた(川崎・楊 1986, 正木・坂上 1987, 田中・島地 1992)。これはコンテナ苗の徒長防止技術としても利用が期待されるが、林業分野では、トドマツ (*Abies sachalinensis*) およびアカエゾマツ (*Picea glehnii*) の裸苗を対象として物理的刺激による徒長抑制効果が確認されているのみである(石田 1979)。本研究では、スギを対象にコンテナでの育苗中に物理的刺激による矮化处理としてコンテナを振とうする処理もしくは樹冠を撫でる処理を行い、各物理的刺激が育苗中の苗の形態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。また、そうして育てた苗の植栽後の成長を追跡することで、植栽後の成長に育苗中の物理的刺激の履歴が及ぼす影響についても解析した。

## II 材料と方法

1. 材料 徳島県産の3年生(2019年時)の150cc (JFA-150) スギコンテナ苗を用いた。培地成分は、元肥として化成肥料 10 g/L (N-P-K=16-5-10, ハイコントロール 650 (180日タイプ), ジェイカムアグリ, 東京) を混和したココナッツハスク 100%であった。試験期間中、コンテナは降雨遮断のための透明の波板を屋根に張った小屋の中で、鋼管に懸架した。施肥の不均一性が苗の成長に与える影響を除くため、試験中(2019年)は追肥を行わず、十分な灌水の下で育苗した。

2. 物理的刺激処理 2019年6月10日から7月18日

の約5週間にわたり、週2~3回の頻度でスギコンテナ苗を対象に物理的刺激処理を行った。処理開始時期は、スギ主軸の当年成長部位の木化が進み、触っても折れにくい時期を目安に決定した。物理的刺激として、主軸への刺激としてコンテナ苗を振とうする処理区(以下、揺らす処理区)と、主軸の成長点への刺激として樹冠を撫でる処理区(以下、撫でる処理区)を設けた。

揺らす処理区について、コンテナ苗をコンテナごと振とう機(レシプロシユーカー, SR-I, タイテック株式会社)に固定し、150回/minの強度で苗を振とうさせた。振とう機の耐荷重の範囲内に収まるよう、コンテナ中の苗をいくつか間引いて減らした上で振とうさせた。育苗中の密度効果をなくすため、揺らす処理の後、間引いた苗は元の育苗コンテナに挿し戻した。揺らす時間の効果を検証するため、3分間揺らす処理区(n=32)と30分間揺らす処理区(n=36)の2処理区を設けた。

撫でる処理は、ホウキでコンテナ苗の樹冠(コンテナごとの林冠)を撫でることで実施した。ホウキの接触範囲は、コンテナ苗の苗長の先端から3分の1の高さを目安とした。用いたホウキの穂幅は45cmであった(大型赤シダホーキ, SJ05-17, コーナン)。撫でる頻度の効果を検証するため、1往復撫でる処理(n=51)と10往復撫でる処理(n=50)の2処理区を設けた。

物理的刺激処理期間の終了後は、通常通りに育苗を行った。物理的刺激処理によって主軸先端が折れる個体が見られたことから、処理期間終了後にその本数を全ての個体に対して調査し、折損率を求めた。成長期間中、対照区も含めた計5処理区の苗のうち20本/処理区を対象に、毎月、苗の主軸長および地際直径を測定したが、折損による苗長減少の効果を排除するために折損個体は成長の解析から除外したため、解析された個体数は14~20本/処理区であった(ただし、無傷の個体と成長終了時の個体サイズが同等であった対照区の折損個体1個体のみ、解析に含む)。主軸長と地際直径の比から形状比を算出した。

3. 植栽試験 物理的刺激処理を実施した翌年の春(2020年3月3日)、森林総合研究所関西支所構内の実験林(京都市伏見区, 34°56'29.544"N, 135°46'29.1606"E)に苗を植栽した(図-4, 黒丸の凡例)。植栽後の調査を行った2020~2022年の京都市の平均気温は16.9°C, 平均年降水量は1,713mmであった(気象庁)。植栽地の土壌は風化変質赤黄色土(Inceptisol)に分類され、土性区分は埴壤土であった(Tanikawa *et al.* 2021)。植栽個体数は、3分間揺らす処理区で32本, 30分間揺らす処理区で36本, 1往復撫でる処理区で51本, 10往復撫でる処理区で50本, 対照区で54本の計223本であった。植栽密度は2,500本/ha(植栽間隔2m)とした。各処理区の苗は

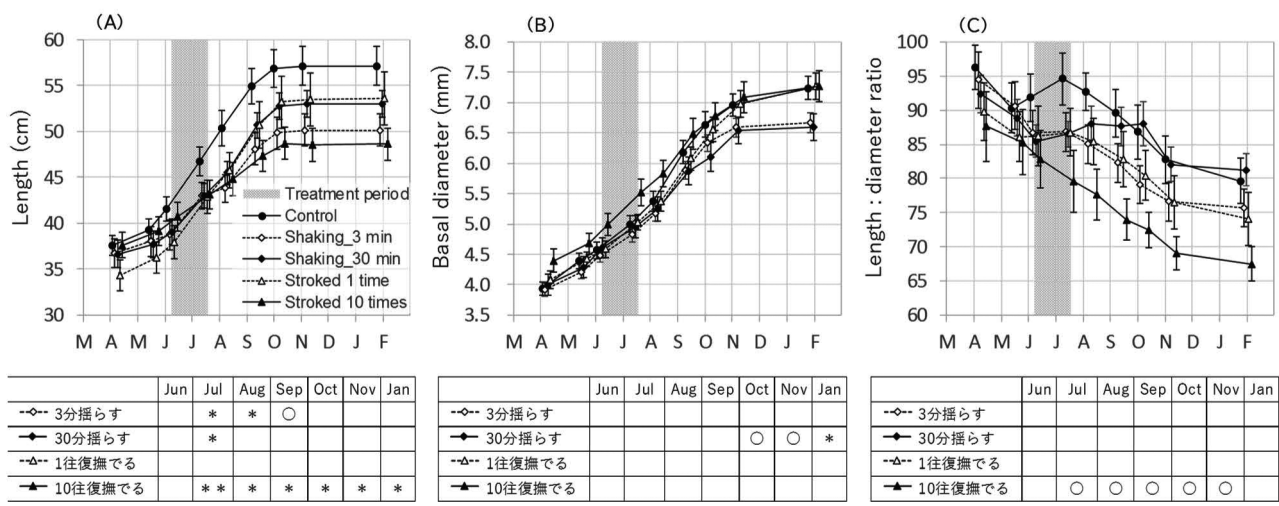


図-1 2019年の育苗期間中における各処理区のスギコンテナ苗の個体サイズ（平均値±標準誤差）の推移（上段）と個体サイズに対する各処理区の影響（下段）

Fig. 1 Changes in the size (mean ± SE) of containerized *Cryptomeria japonica* seedlings (upper panels) and the effects of each treatment on seedling size (lower panels) in 2019.

図中の網掛け部分は処理期間を表す。3回目の測定日は2019年6月4日および5日に実施しており、物理的刺激処理開始直前の値である。便宜上、物理的刺激処理区のデータは、対照区とx軸方向へ凡例順に3日ずつずらして表示している。アスタリスクは、各月について、対照区と比べて有意差のあった処理区を表す。\*、 $P < 0.05$ 、\*\*、 $P < 0.01$ 。若干有意差のあった処理区は○で示した ( $P < 0.1$ )。The shaded area in each panel indicates the treatment period. The third measurement date was June 4-5, 2019, and is the value used immediately before the start of each treatment. The data of each treatment group are shown shifted by 3 days from the control group in the x-axis direction for convenience. Treatments with an asterisk indicate a significant difference from the control. \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ . A marginally significant difference is shown as an open circle ( $P < 0.1$ ).

ランダムに配置した。エッジ効果を軽減するため、植栽地の周囲1列および切り株等による植栽不適であった欠損地点には、予備のスギコンテナ苗を植栽した。植栽当年中は下刈りを行わず、翌年から年2~3回の頻度で下刈りを行った。植栽後、成長期の期首の個体サイズ（樹高、地際直径）を測定した。その後2年間、期首（3月）に個体サイズを追跡調査した。苗木の生死は植栽2年後に調査した。

植栽地の微環境が苗の成長に与える影響を考慮するため、2020年9月に開空率、土壌の電気伝導度（EC）、土壌硬度を、2021年10月に土壌含水率を8m間隔で測定した。環境測定は計46か所で行った。開空率は、魚眼レンズ（FCON-T02, オリンパス）を接続したデジタルカメラ（TG-6, オリンパス）を用いて地点ごとに1.3mの高さの全天空写真を撮影した後、全天写真解析プログラム（CanopOn2, <http://takenaka-akio.org/etc/canopon2/>）により二値化された全天空写真から開空率を求めた。土壌ECを測定するための土壌は環境測定点の付近4か所から採集した。採集した土壌は十分に風乾させた後、風乾土10gに対し蒸留水50mLを加え、振とう機で30分間攪拌し、懸濁液のECをEC計（CM-25R, 東亜ディーケーケー株式会社）を用いて求めた。4か所の土壌ECの平均値を環

境観測点の値として用いた。土壌硬度および土壌含水率も同様に、環境測定点の付近4か所で計測し、解析には地点平均値を用いた。土壌硬度の測定には山中式土壌硬度計を（標準型、藤原製作所）、土壌含水率の測定には土壌水分計（ML3, Delta-T Devices, Cambridge, UK）を用いた。

8m間隔で得られた環境条件の測定値から、"gstat"パッケージ（Pebesma 2004）を用いてIDW（Inverse Distance Weighting）法によって内挿補完し、植栽した苗の地点の環境値を推定した（図-4）。これらの推定された環境値を用いて、植栽後の経過年数ごとに苗の成長との関係を解析した。解析にはR（version 4.2.2）を用いて行った。

4. 統計解析 育苗中の物理的刺激がコンテナ苗の形態に及ぼす影響を明らかにするため、個体サイズを計測した月ごとに一般化線形混合モデル（GLMM）で解析を行った。応答変数は苗長、地際直径、もしくは形状比であり、説明変数は各処理区とした。育苗コンテナの違いの効果を考慮するため、ランダム効果としてコンテナ番号を指定した。また、処理前の個体サイズの影響を相殺するため、6月の個体サイズ（2019年6月9日計測）をオフセット項に指定した。ただし、処理前の6月の解析

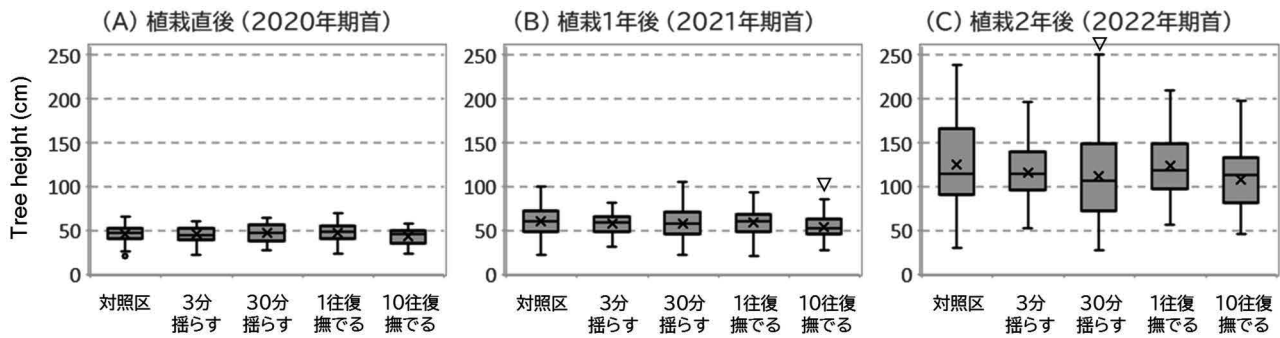


図-2 各処理区のスギコンテナ苗の実験林への(A)植栽直後、(B)植栽1年後、および(C)植栽2年後の樹高

Fig.2 Tree height of containerized *Cryptomeria japonica* seedlings in each treatment (A) at the time of planting, (B) 1 year and (C) 2 years after planting in the experimental forest.

×は平均値を表す。▽は対照区と比べて若干有意差があった処理区を表す (P < 0.1)。

"×" indicates the mean value. Treatments with ▽ are statistically marginally different from the control (P < 0.1). X-axis indicates the control, treatment with shaking for 3 min, 30 min, stroked 1 time, and 10 times.

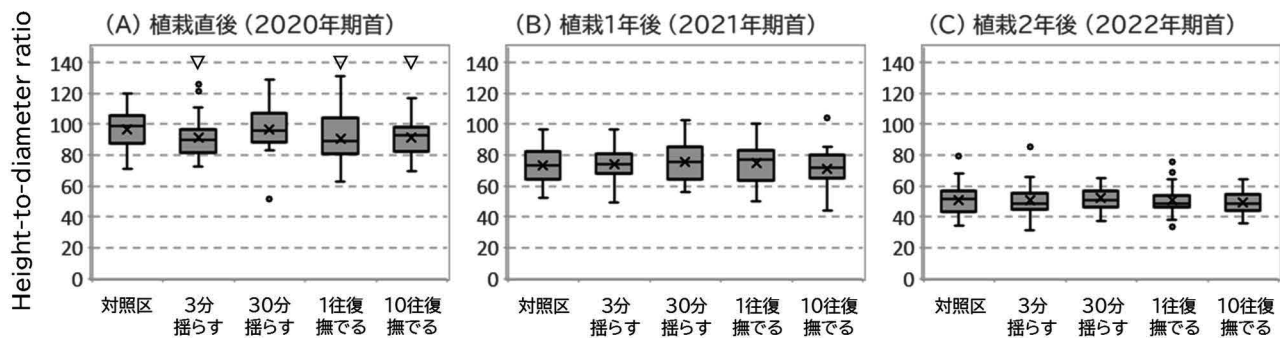


図-3 各処理区のスギコンテナ苗の実験林への(A)植栽直後、(B)植栽1年後、および(C)植栽2年後の形状比

Fig.3 Tree height:basal diameter ratio of containerized *Cryptomeria japonica* seedlings in each treatment (A) at the time of planting, (B) 1 year, and (C) 2 years after planting in the experimental forest.

×は平均値を表す。▽は対照区と比べて若干有意差があった処理区を表す (P < 0.1)。

"×" indicates the mean value. Treatments with ▽ are statistically marginally different from the control (P < 0.1). X-axis indicates the control, treatment with shaking for 3 min, 30 min, stroked 1 time, and 10 times.

および形状比の解析にはオフセット項を含めなかった。物理的的刺激処理が主軸先端の折損に与える影響は、誤差を二項分布、リンク関数にロジット関数を指定し一般化線形モデル (GLM) で解析した。

植栽後の苗の成長に育苗中の物理的的刺激処理の履歴が与える影響を明らかにするため、植栽後の期首の樹高および形状比について、GLMMで解析を行った。応答変数は樹高もしくは形状比であり、説明変数は各処理区とした。樹高について解析する際、オフセット項として前年期首の樹高を指定した。このとき、苗地点ごとに算出された環境条件 (開空率, 土壌 EC, 土壌硬度, 土壌含水率) の推定値は、ランダム効果として扱った。

育苗中の物理的的刺激の履歴に加え、環境条件が苗の成長に及ぼす効果を明らかにするため、植栽後の期首の樹

高を応答変数に、各処理区および各種環境条件を説明変数に指定し、GLMで解析を行った。樹高について解析する際、前年期首の樹高をオフセット項とした。

育苗中の物理的的刺激の履歴および環境条件が苗の植栽2年後の苗の生残に及ぼす効果は、誤差を二項分布、リンク関数にロジット関数を指定し GLMで解析した。

統計解析は、R (version 4.0.2) を用いて行った。GLMMは lmerTest パッケージを (Kuznetsova et al. 2017), GLMは stats パッケージ (R Core Team 2020) を用いて解析し、説明変数の回帰係数の有意性検定を行った。

### III 結果

1. 育苗中の物理的的刺激の影響 物理的的刺激処理の開始前は処理区間で個体サイズに有意差は認められなかつ

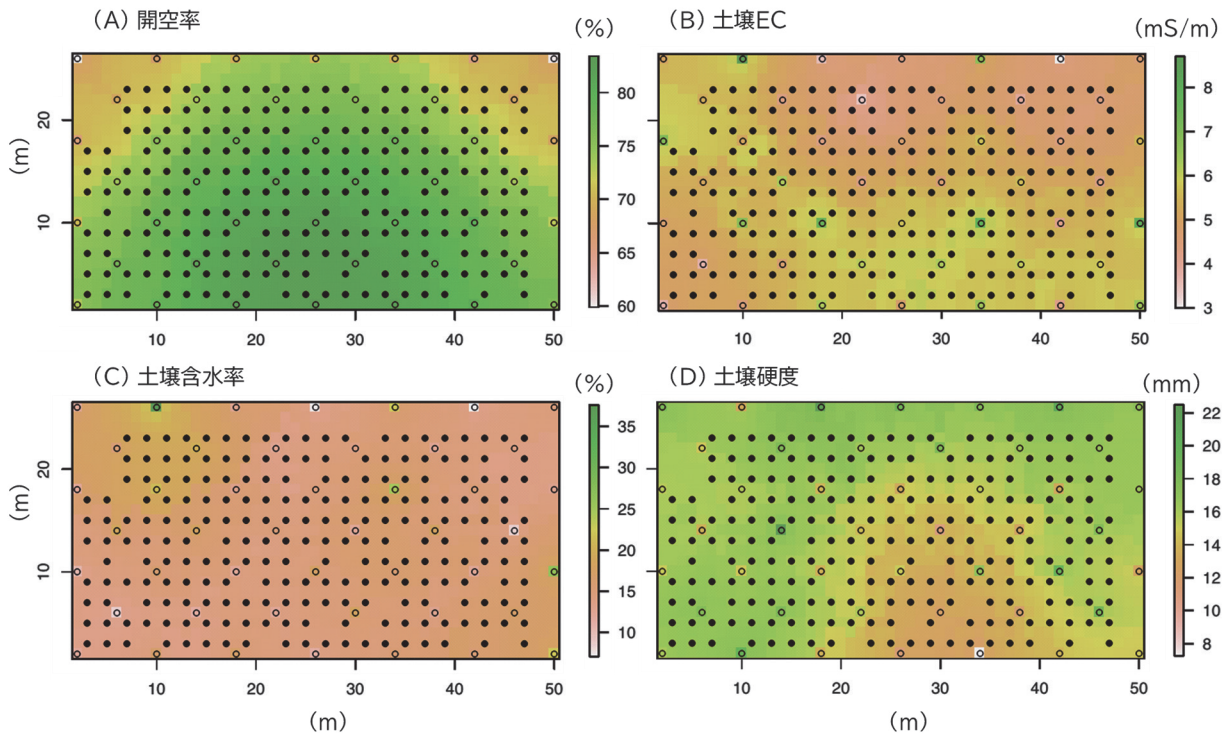


図-4 スギコンテナ苗植栽地(30 × 50 m)における(A)開空率, (B)土壌EC, (C)土壌含水率, (D)土壌硬度  
 Fig. 4 (A) Canopy openness, (B) soil electric conductivity, (C) soil water content, and (D) soil hardness in the experimental forest planted with containerized *Cryptomeria japonica* seedlings.

○は各種環境条件の測定点を、●は植栽した苗の地点を表す。  
 "○" indicates the measurement point for each factor and "●" indicates the planted seedlings.

た ( $P > 0.05$ , 図-1)。処理開始から1ヶ経過後した2019年7月11日には、3分揺らす処理区、30分揺らす処理区、および10往復撫でる処理区で苗長が有意に小さく、10往復撫でる処理区ではその効果が成長期終了時まで持続した(図-1)。地際直径では、30分揺らす処理区で10月以降に小さい傾向が見られ、1月には直径が有意に小さかった。形状比では、10往復撫でる処理区で処理開始後の7月から有意ではないものの、低い値を示す傾向があり、それは成長期の終了まで継続した( $P < 0.1$ , 図-1)。6月の処理開始から約7ヶ経過後した2020年1月には、10往復撫でる処理区の苗長は対照区の苗長よりも平均値にして15.0%小さかった。

処理期間後の主軸先端の折損率は、3分揺らす処理区で13%、30分揺らす処理区で9%、1往復撫でる処理区で17%、10往復撫でる処理区で27%、対照区で7%であり、10往復撫でる処理区で主軸先端の折損個体がわずかに多かった( $P < 0.1$ )。

2. 植栽後の成長に対する物理的刺激的履歴の影響  
 植栽後の樹高に各処理が与える影響を解析したところ、樹高に対して各処理が与える効果は検出されなかった(図-2A)。植栽1年後および2年後に、10往復撫でる処理区および30分揺らす処理区でそれぞれ樹高が小さい

傾向があったものの、育苗中の物理的刺激的履歴が樹高成長量に及ぼす影響は認められなかった(図-2BC)。形状比について見ると、植栽直後では3分揺らす処理区、1往復撫でる処理区、および10往復撫でる処理区で処理履歴のわずかに有意な効果が検出されたものの( $P < 0.1$ , 図-3A)、植栽後1年後および2年後には、どの処理区でも形状比への有意な効果が認められなかった(図-3BC)。

植栽後のスギコンテナ苗の樹高成長に、育苗中の物理的刺激的履歴に加え、植栽地の環境条件(図-4)が与える影響も含めて解析したところ、植栽1年後に、10往復撫でる処理区でわずかに負の効果が認められたが( $P < 0.1$ )、植栽2年目には見られなくなった(表-1)。一方、植栽1年後、2年後ともに開空率において樹高成長に対する有意な負の効果が検出された(表-1)。植栽2年後には、樹高成長に対して土壌ECに正のわずかに有意な効果が、土壌硬度に負のわずかに有意な効果が認められた(ともに $P < 0.1$ , 表-1)。

3. 植栽後の生残に対する物理的刺激的履歴の影響  
 植栽2年後の苗の生存率は、30分揺らす処理区で生存率が低い傾向にあったものの(89%,  $P < 0.1$ , 表-1)、生存率は3分揺らす処理区で97%、1往復撫でる処理区で98%、10往復撫でる処理区で100%、対照区で98%であ

り、どの処理区でも概ね高い値を示した。

#### IV 考察

本研究ではコンテナ苗への育苗中の物理的刺激が苗の形態に与える影響を解析し、揺らす処理、撫でる処理の両方の物理的刺激において、育苗中の伸長成長および直径成長の抑制効果が確認された。6月中旬からの5週間にわたって行った処理の伸長成長抑制効果は、10往復撫でる処理区において1成長期末まで持続した(図-1)。1往復撫でる処理区では対照区と比較して伸長成長に差が認められなかったことから、伸長成長抑制効果の程度は樹冠への物理的刺激の頻度によって調整可能であることが示唆された。

樹冠を10往復撫でる処理によって伸長成長が有意に抑制され、形状比は低い傾向にあった(図-1)。2023年5月に一部改正された山林用主要苗木の新たな標準規格によると、スギコンテナ苗の5号規格は苗長が30cm以上(改正前と変更なし)、地際直径が3.5mm以上から4.0mm以上へと引き上げられるとともに、新たに推奨事項として形状比が110以下であることが明記された。本研究における処理当年の4月時点において、育苗中の成長解析個体のうち、苗長30cm以上のみを満たす個体は全体の87%であったが、同時に地際直径の規格(4.0mm以上)も満たす個体は47%に留まった(データ非掲載)。コンテナ苗の新たな標準規格に推奨事項として形状比の上限値が設定されたことから、今後は、特に直径規格に満たない苗に対して、追肥による全体的な成長促進だけでなく、本研究で行った苗の樹冠を撫でる処理等により、既に苗長規格に達した苗の伸長成長を抑えつつ形状比を推奨値以下に留めるための育苗技術が有効となると考えられる。

一方で、有意ではないものの、27%の個体でスギの主軸の上部が折損した。揺らす処理区および対照区での主軸折損率は7~13%であったことから、10往復撫でる処理区における折損原因には、撫でる処理自体による折損と、個体サイズ計測時等の苗への不可避な接触による折損の両方が含まれていると考えられる。春に芽吹いてすぐはスギの新芽は触れると折れて脱落しやすいことから、物理的刺激処理は、当年伸長部分に触れても折れない程度に主軸上部が成熟し固くなり始めた6月中旬から開始したものの、それだけでは折損個体を低減することは難しかった。今回、樹冠を撫でる処理に用いたハウキは通称“赤シダ”から作られており、穂の繊維が太く硬いことから(石塚ら 2020)、スギの樹冠を撫でた際に主軸が屈曲するような強い力学的な負荷がかかっていたと考えられる。今後樹冠を撫でる処理を実行する際には、主軸の折損を抑えるため、このようなハウキの穂ではなく、棒状のものを用いる

表-1 GLMによる各処理の履歴および植栽地の環境条件が植栽後のスギコンテナ苗の樹高成長および生残に与える影響

Table 1 GLM for the effects of treatment history during cultivation and environmental factors after planting on tree height growth and survival of containerized *Cryptomeria japonica* seedlings

	Height growth 1 year after planting			Height growth 2 years after planting			Survival rate 2 years after planting					
	Estimate	SE	t-value	P-value	Estimate	SE	t-value	P-value	Estimate	SE	t-value	P-value
Intercept	123.71	41.19	3.00	0.0030**	439.13	103.35	4.25	0.0000***	-20.25	33.60	-0.60	0.5467
Shaking for 3 min	-1.26	2.47	-0.51	0.6112	-3.95	6.18	-0.64	0.5233	-0.39	1.45	-0.27	0.7903
Shaking for 30 min	-3.36	2.38	-1.41	0.1596	-8.80	6.11	-1.44	0.1509	-1.96	1.17	-1.68	0.0925+
Stroked 1 time	-1.33	2.13	-0.63	0.5323	-0.53	5.35	-0.10	0.9209	0.01	1.44	0.01	0.9955
Stroked 10 times	-3.91	2.14	-1.82	0.0695+	-8.54	5.35	-1.60	0.1123	16.55	2383.00	0.01	0.9945
Canopy openness	-1.43	0.37	-3.84	0.0002***	-4.80	0.94	-5.13	0.0000***	0.11	0.27	0.39	0.6986
Soil water content	0.08	0.71	0.11	0.9093	-0.19	1.79	-0.11	0.9158	-0.65	0.41	-1.58	0.1145
Soil EC	1.56	2.54	0.62	0.5384	11.68	6.38	1.83	0.0685+	1.87	1.60	1.17	0.2428
Soil hardness	-0.56	0.93	-0.60	0.5498	-4.06	2.33	-1.74	0.0828+	1.07	0.82	1.30	0.1936

+, P < 0.1; \*\*, P < 0.01; \*\*\*, P < 0.001

方がよいだろう。ただし、主軸が折損しても間もなく腋芽が新たな主軸に置き換わっていたことから（データ非掲載）、樹形やその後の成長への影響は小さいと考えられる。

揺らす処理による伸長成長抑制効果は、処理期間終了後間もなく解消された一方で、揺らす処理区の肥大成長は成長期の後期に他の処理区よりも小さかった（図-1）。樹木は曲げ応力（bending stress）に対して二次木部であて材を形成し、力学的負荷に耐えられる組織構造をもつことが知られている（Badel *et al.* 2015）。*Pinus sylvestris* では、主軸の曲げ応力に対して木部および樹皮の成長が促進された（Valinger *et al.* 1995）。本研究では樹木のこれらの性質を利用し、主軸を揺らすことによって肥大成長の促進を試みたが、予想に反して、肥大成長の促進および苗の形状比の低減には至らなかった。あて材の形成は細胞壁の肥大と（Badel *et al.* 2015）仮道管の生産頻度の増加をもたらすが（吉澤ら 2016）、力学的負荷の発生時にはあて材が形成され、力学的負荷の消失後は正常材の形成にシフトする（Yoshizawa *et al.* 1985）。このことから、本研究における揺らす処理の条件（週 2～3 回の頻度で 3 分間もしくは 30 分間の振とう処理を 5 週間継続）では、力学的負荷が生じる時間が極めて限られており、明確なあて材形成およびそれに伴う肥大成長が見られなかったと考えられる。揺らすことによって苗に力学的負荷を与え続けることは実務上困難であるが、一方、苗を傾斜条件下で育苗するとあて材が形成され（Yoshizawa *et al.* 1985）、スギコンテナ挿し木苗においても平坦地で育てられた苗と比較して直径が増加し、形状比が低減されることが報告されている（三樹 2019, 2021）。このことから、あて材形成による肥大成長の促進技術としては、曲げ応力による力学的負荷を主軸に与えるよりも、三樹（2019）による傾斜刺激のように、育苗期間中に継続して力学的負荷を与えることが有効であると考えられる。

育苗時に 10 往復撫でる処理により伸長成長が低減されたが（図-1）、植栽直後には処理区間で樹高および形状比に有意な差は認められなかった（図-2, 3）。これは、植栽時の植え穴の深さのばらつきによって、植栽直後に処理区間で見られた苗高および形状比の差が見られなくなったためであると考えられる。

一方、植栽後の成長には、育苗時の処理の履歴ではなく、植栽地の開空率が負の影響を与えており（表-1）、全植栽地点の開空率の範囲内（69%～83%）において、開空率が低いほど有意に樹高が高かった。光条件を相対照度で評価した安藤・宮本（1972）によると、苗畑に植栽したスギ苗（植栽密度 25 本  $m^{-2}$ ）において、相対照度 100% から 59%にかけて暗くなるにつれて樹高（40.3 cm から 61.0 cm へ）および TR 比が高くなった。本研究においても、開空率は樹高だけでなく植栽後の形状比に負の効果

を示しており（データ非掲載、GLM,  $P < 0.001$ ）、これは光の獲得を優先させるために肥大成長よりも樹高成長が高められた結果であると考えられた。

また、この植栽地は、2019 年夏の台風の倒木跡地であり、元々強風を受けやすい立地でもあることから、開空率の低い外側の植栽地ほど苗の樹高が高かったのは、外周の高木による防風効果が寄与している可能性も考えられた。実際、植栽後に春の爆弾低気圧の通過時や夏の台風通過後には、強風に煽られ傾斜する苗が開空率の高い領域で多く確認された（データ非掲載）。

植栽 1 年後時点では、開空率が苗の樹高に影響を与える要因として検出されたのに対し、植栽 2 年後にはこれに加えて土壌の EC に正の効果が、土壌硬度に負の効果が新たに若干検出された（ $P < 0.1$ 、表-1）。植栽当年の成長には土壌養分条件よりも光条件が影響を与えた点は、苗畑におけるスギ実生苗の栽培試験の結果（山下・金塚 1998）と一致した。本植栽地における土壌 EC は  $5.25 \pm 1.30$  mS/m（mean  $\pm$  SD,  $n = 46$ ）と表層土壌としては低い値を示しているもの（梨本ら 1993, 小舘 2013）、土壌の養分状態が相対的に高い地点で樹高が高い傾向にあることは、植栽後 2 年間の間に根系がコンテナ苗の根鉢から十分に発達し、光条件だけでなく植栽地点の土壌養分状態が植栽後の成長量に影響を与え始めていることを示唆している。さらに、土壌硬度が高いほど樹高が低い傾向があったことは、根系の土壌への貫入抵抗の高さが根系の発達、さらには地上部の成長にも負の影響を与え始めていることを示唆している。

## V 結論

本研究から、育苗中にコンテナ苗の樹冠を 10 往復撫でる処理によって伸長成長が抑制されることが明らかとなった。10 往復撫でる処理によって一部の苗で主軸が折損したものの、植栽後のコンテナ苗の成長には、これらの育苗時の処理の履歴よりも、むしろ植栽地点の環境条件が強く影響することが明らかとなった。植栽 1 年後には開空率が、植栽 2 年後には開空率に加えて土壌 EC および土壌硬度が成長に影響を与え始めたことから、植栽後の苗の成長を左右する環境条件は、苗の地上部および地下部の発達とともに変化していくことが示唆された。コンテナ苗の樹冠を撫でる処理は、伸び過ぎによる残苗発生を抑え、形状比を規格内に調整するために重要であり、生産者が育苗時の見回りの際に行うことができる育苗技術である。今後は、処理の程度や継続期間を変え、処理の効果をより詳細に明らかにすることで、伸長成長の抑制に向けたコントロールの高度化が可能になると期待される。

## 謝辞

本研究は、農林水産省による戦略的プロジェクト研究推進事業「成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発（18064868）および森林総合研究所の「家族責任がある研究者のための支援制度」による支援を受けた。森林総合研究所関西支所の榎山真司氏、近口貞介氏、田中まゆみ氏、神谷千夏氏、相馬智子氏、埜村照代氏、樋口綾子氏には、本試験を通して多大なるご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

安藤 貴, 宮本知子 (1972) スギ苗の生長に及ぼす光の強さと植栽密度の影響. 日本林学会誌 54: 47-55.

Badel E, Ewers FW, Cochard H, Telewski FW (2015) Acclimation of mechanical and hydraulic functions in trees: impact of the thigmomorphogenetic process. *Front. Plant Sci.* 6:266.

藤井 栄 (2016) 実生スギコンテナ苗生産期間短縮の試み. 徳島県立農林水産総合技術支援センター研究報告 3:15-20.

旗生 規, 今富裕樹, 鹿島 潤, 伊藤崇之, 猪俣雄太, 山口 浩和, 山田 健 (2017) コンテナ苗植栽作業および植栽器具の評価. 森林利用学会誌 32: 72-76.

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, 柴田銃江 (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.

石田守雄 (1979) 接触刺激による徒長抑制効果. 北方林業 31: 296-300.

石塚森吉, 松見靖子, 堀 正彦 (2020) アジアの草ぼうき (grass broom) のサプライチェーンを探る. 海外の森林と林業 108: 13-18.

川崎重治, 楊 健 (1986) 接触刺激による果菜苗の徒長防止効果 第2報 トマトとキュウリについて. 農業および園芸 61: 64-66.

近藤 晃, 袴田哲史, 山本茂弘 (2019) 1年で山行き可能なスギコンテナ苗の育苗—秋季にコンテナ容器へ直播きする方法—. 静岡県農林技術研究所研究報告 12: 41-46.

Kuznetsova A, Brockhoff PB, Christensen RHB (2017) lmerTest package: Tests in linear mixed effects models. *J. Stat. Softw.* 82: 1-26.

正木 敬, 坂上 修 (1987) 葉茎葉類の苗の発育に及ぼす接触刺激効果. 東北農業研究 40: 289-290.

三樹陽一郎 (2019) 宮崎県におけるコンテナ苗の現状と研究事例. 森林遺伝育種 8: 178-182.

三樹陽一郎 (2021) スギコンテナ苗の形状比を低くする傾斜育成法の実用性—傾斜処理の期間および植栽後

の成長—. 九州森林研究 74: 61-63.

宮崎 榊 (1966) 図説苗木育成法. 改訂増補版. 335-339pp. 高陽書院

梨本 真, 高橋啓二, 芦原昭一 (1993) 関東・甲信地方におけるスギ社寺林の衰退地と健全地の土壌化学性の比較. 環境科学学会誌 6: 121-130.

野宮治人, 山川博美, 重永英年, 平田令子, 伊藤 哲, 園田清隆 (2016) スギポット大苗植栽後1年間の主軸の傾きと活着に対する支柱の効果. 日本森林学会誌 98: 20-25.

小笠真由美, 藤井 栄, 飛田博順, 山下直子, 宇都木 玄 (2021) 山林用針葉樹コンテナ苗における育苗方法の現状と課題—全国のコンテナ苗生産者に対するアンケート調査より—. 日本森林学会誌 103: 105-116.

小舘誓治 (2013) 尾根型斜面地におけるマツ枯れ被害度と土壌環境との関係. 人と自然 24: 1-7.

Pebesma EJ (2004) Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Comput. Geosci.* 30: 683-691.

R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>.

齋藤隆実, 小笠真由美, 飛田博順, 小黒芳生, 矢崎健一, 壁谷大介, 宇都木 玄 (2019) スギコンテナ苗における根鉢の物理的性質の定量的評価. 日本森林学会誌 101: 145-154.

田中和夫, 島地英夫 (1992) 接触刺激を利用したトマトの高密度苗生産. 生物環境調節 30: 59-64.

Tanikawa T, Ikeno H, Todo C, Yamase K, Ohashi M, Okamoto T, Mizoguchi T, Nakao K, Kaneko S, Torii A, Inagaki Y, Nakanishi A, Hirano Y (2021) A quantitative evaluation of soil mass held by tree roots. *Trees* 35: 527-541.

Telewski FW (2006) A unified hypothesis of mechanoperception in plants. *Am. J. Bot.* 93: 1466-1476.

Telewski FW (2021) Mechanosensing and plant growth regulators elicited during the thigmomorphogenetic response. *Front. For. Glob. Change* 3:574096.

Valinger E, Lundqvist L, Sundberg B (1995) Mechanical bending stress applied during dormancy and (or) growth stimulates stem diameter growth of Scots pine seedlings. *Can. J. For. Res.* 25: 886-890.

Yamashita N, Okuda S, Suwa R, Lei TT, Tobita H, Utsugi H, Kajimoto T (2016) Impact of leaf removal on initial survival and growth of container-grown and bare-root seedlings of Hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*). *For. Ecol. Manag.* 370: 76-82.

山下多聞, 金塚 洲 (1998) 異なる光環境と施肥強度のもとで栽培されたスギとヒノキの2年生実生の成長. 島



根大学生物資源科学部研究報告 3: 47–52.

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. 日本森林学会誌 98: 139–145.

吉澤伸夫, 平岩季子, 林 徳子, 船田 良 (2016) 圧縮あて  
材. あて材の科学 樹木の重力応答と生存戦略 (吉澤  
伸夫監修), pp.88–105. 海青社, 滋賀.

Yoshizawa N, Koike S, Idei T (1985) Formation and structure  
of compression wood tracheids induced by repeated  
inclination in *Taxus cuspidata*. Mokuzai Gakkaishi 31:  
325–333.

(2023 年 10 月 12 日受理)