

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

誌名	日本森林学会誌
ISSN	13498509
著者名	齋藤,隆実 小笠,真由美 飛田,博順 矢崎,健一 壁谷,大介 小黒,芳生 宇都木,玄
発行元	日本森林学会
巻/号	101巻4号
掲載ページ	p. 145-154
発行年月	2019年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



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

齋藤隆実^{*1}・小笠真由美¹・飛田博順¹・矢崎健一¹・壁谷大介¹
小黒芳生²・宇都木玄¹

コンテナ苗の出荷作業を効率よく行うには、根鉢が適度に形成された苗木を選ぶことが有効である。本研究では、根鉢の物理的性質を定量的に評価する指標とその測定手法を考案し、各指標に対する育成孔の形状の影響や、各指標と苗木の地上部の形態的特徴との関係を明らかにすることを目的とした。リブ型とスリット型の150ccコンテナでスギ苗木を育成し、2成長期目の初め(6月)と終わり(11月)にそれぞれ測定に用いた。根鉢の物理的性質として、根鉢の硬さ(山中式土壌硬度計による指標硬度)、根鉢の崩れやすさ(落下の衝撃による脱落土壌量)、根鉢の抜き取りにくさ(育成孔からの引き抜き力)を評価した。また、苗高、地際直径、根のバイオマスを測定した。その結果、根のバイオマスの増加とともに脱落土壌量は小さくなったが、指標硬度と引き抜き力は大きくなった。各指標は測定原理が簡明で結果を理解しやすく、根系の発達状況をよく反映していると考えられた。各指標を用いた評価により、根のバイオマスが等しければリブ型と比べてスリット型では根鉢が崩れやすく抜き取りやすいこと、根鉢の物理的性質は苗高より地際直径と強い関係があることが示唆された。

キーワード: 出荷, 根のバイオマス, 山中式土壌硬度計, 脱落土壌量, 引き抜き力

Takami Saito,^{*1} Mayumi Y. Ogasa,¹ Hiroyuki Tobita,¹ Kenichi Yazaki,¹ Daisuke Kabeya,¹ Michio Oguro,² Hajime Utsugi¹ (2019)
Estimating Physical Properties of the Root Ball in Containerized Japanese Cedar (Sugi) Seedlings. *J Jpn For Soc* 101: 145-154

To improve the shipping operation of multi-cavity container seedlings, it is necessary to select seedlings with appropriate root balls. The aim of this study was to develop indices and measurement methods evaluating the physical properties of the root ball, and to clarify the effects of the cavity type of container on the indices and the relationship between the indices and the above-ground morphological characteristics of seedlings. Seedlings of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) cultivated in rib and slit types of multi-cavity containers were used for measurements before (June) and after (November) the second growing season of the seedlings. Root ball hardness (hardness index obtained by a Yamanaka-type soil hardness scale), root ball collapsibility (detached soil amount after dropping of a root ball), and difficulty of extracting a root ball (pull-out force of extracting a root ball from a cavity) were measured. Height, root-collar diameter and root biomass of the seedlings were also measured. As root biomass increased, the detached soil decreased whereas the hardness index and the pull-out force increased. These results suggest that the indices are easily understandable owing to simple measurements and have close relationships with root growth. In addition, the root balls of the seedlings in slit-type containers are easier to collapse, and easier to extract from the containers than those of the seedlings with the same root biomass in rib-type containers. Moreover, the physical properties of the root ball have closer relationships with root-collar diameter, than with the height, of the seedlings.

Key words: shipping operation, root biomass, Yamanaka-type soil hardness scale, detached soil, pull-out force

I. はじめに

日本国内の多くの人工林が植栽木の更新に適した時期になっている(林野庁 2017)。しかし、再造林にかかる費用が木材の売却から得られる収益と比べて高すぎるのが課題となっている(梶本・宇都木 2016)。再造林にかかるコストを抑えるために、伐採に用いた林業機械を利用して造林地の地拵えを行い、さらに苗木の植栽までを連続して行う施策が行われている(梶本ら 2016; 林野庁 2017)。この一貫作業システムを効果的に運用するために、これまでの裸苗に代わりコンテナ苗が広く利用されるようになってきた(宇都木ら 2017)。

コンテナ苗を利用することで、再造林のための多くの作業を軽減できる可能性がある。一般的に裸苗の育成においては、床替えにともなう根切り作業が毎年必要で、出荷までに2年以上を要する(戸田 2007)。一方、コンテナ苗の育成においては、床替えや根切りは不要なので生産作業を

省力化でき、また、温室栽培を併用することで一年程度の短期間で出荷できる可能性もある(壁谷ら 2016)。さらに、造林地での植栽においては、植え付け作業に熟練を要せず、裸苗より単位時間当たりの植栽本数が多い(大矢ら 2016; 近藤・袴田 2016)ことも利点である。このように、育苗と植栽については、コンテナ苗を導入し作業工程を工夫することによって労働負荷を軽減できることが明らかになってきた。しかしながら、育成した苗木を植栽する過程で必要となる出荷作業については、依然として労働負荷が高いままである。

コンテナ苗の最大の特徴は根鉢にある(遠藤 2007)。ここで根鉢とは、育成孔の内部において根と培地とが組織的に入り組み圧密されたことによって塊状に形成された苗木の地下部分を指している。根鉢は、苗木の成長に必要な水分と養分を、出荷後もある程度の期間保持することができる。この根鉢の機能が、コンテナ苗の植栽可能条件を裸苗より緩いものにしていく(Dominguez-Lerena *et al.* 2006;

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: takamihappy@gmail.com

¹ 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所林業研究部門植物生態研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 (Department of Plant Ecology, Forestry and Forest Product Research Institute, Forest Research and Management Organization, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan)

² 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所林業研究部門森林植生研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 (Department of Forest Vegetation, Forestry and Forest Product Research Institute, Forest Research and Management Organization, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan)

(2018年5月23日受付; 2019年5月9日受理)

Grossnickle and El-Kassabya 2016)。実際に、国内の主要造林樹種についても、植栽時期を拡張できた事例がある(山川ら 2013; 八木橋ら 2015; 諏訪ら 2016; 原山ら 2016; 成松ら 2016)。その他にも、再造林地での苗木の保管(藤本ら 2016)や弱光・乾燥処理に対する応答(染谷・丹下 2017)、細根からの電解質漏出率(飛田ら 2016)についても検討がなされた。これらの研究により、根鉢に起因するコンテナ苗の生理的性質が明らかになってきた。

一方で、出荷作業の効率に大きく影響する根鉢の物理的性質については検討されていない。根鉢の物理的性質とは、ここでは作業員が実際に手で苗木を取り扱うという工程で、作業効率に影響を及ぼしうる根鉢の性質を指している。根鉢の物理的性質は、とりわけ苗木を育苗施設から出荷する段階で重要になる。苗木を出荷するためには根鉢を育成孔から抜き取る必要がある。その際に、根鉢の中で根系が十分に発達している、培地が崩れないことが重要である(遠藤・山田 2009; 林野庁 2018)。一方、根鉢が過剰に形成されている場合には、苗木を育成孔から取り出すことが困難になる。苗木を強く引くと苗木を傷める場合があるし(島根県中山間地域研究センター 2018)、また、底面から棒で押し上げると根鉢に損傷を与えることもある(遠藤 2009)。さらに、根鉢が硬く締まっていると、植栽後に生存率や成長、活着率が低下することも指摘されている(South and Mitchel 2006; Landis *et al.* 2010)。したがって、苗木の出荷作業を効率よく行うには、根鉢が適度に形成された苗木をコンテナから抜き取ることが有効である。そのためには、抜き取り作業を始める前に、適切な苗木の選択を可能にする技術が必要である。

この技術の基礎として、根鉢の物理的性質を定量的に評価しなければならない。これまで、植栽後のコンテナ苗の生存や成長を予測する指標は検討されてきたが(Mattsson 1996; Jacobs *et al.* 2005, Grossnickle and MacDonald 2018)、根鉢の物理的性質を表す指標やその測定方法についての検討は乏しい。根鉢の物理的性質を一元的に評価することは難しいが、根鉢の物理的性質がいくつかの要素となる性質から構成されていると見なせば評価が可能になる。まず、根鉢の形成を示す基本的な性質として、根鉢の硬さが考えられる。その上で、出荷作業中に苗木の損傷や労働の増大のようになりスクの原因になる性質として、根鉢の崩れやすさおよび根鉢の抜き取りにくさが考えられる。

根鉢の硬さに関連して、これまで機械移植に適した野菜苗の育苗方法の研究において、ソイルブロックの硬さを手持式果実硬度計で測定した例がある(増淵・鹿野 1984)。コンテナ苗の根鉢を対象にする場合、根鉢の素材や大きさを考慮すると、ポケット型の山中式土壌硬度計(山中式ポケット型、株式会社藤原製作所、東京都)が測定に適していると考えられる。山中式土壌硬度計によって測定された指標硬度は、土壌硬度(ち密度)の指標として広く利用されてきた(日本ペドロロジー学会 1997)。また、山中式土壌硬度計は、土壌以外にも果実などの硬度も測定できる(山中・松尾 1962)。根鉢の硬さは、培地や根の性質に加えて根系の立体的な構造が生み出す弾性的な性質も影響してい

ると考えられる。山中式土壌硬度計の指標硬度を利用すれば、多様な要素により成立しているコンテナ苗の根鉢の硬さを定量的に評価できると考えられる。

次に、根鉢の崩れやすさに関連して、衝撃に対する根鉢の耐崩壊性を評価するために、一定の高さから苗を自由落下させる落下試験が有効と考えられている(増淵・鹿野 1984)。落下後/落下前の重量比を根鉢強度とする。野菜のセル成形苗などでは、この値が根鉢の壊れにくさを表す指標として用いられた(Dihingia *et al.* 2017; 岡田ら 2002; 石川ら 2006; 白石ら 2006; 山浦ら 2013)。他にも指標として、根鉢の圧縮(Saito *et al.* 1983)や引き裂き(藤原ら 1999)に対する抵抗値や、抜き取り後にセルトレイに培地が残らなかった苗の割合が用いられた(後藤ら 2000)。一方、コンテナ苗の研究では、落下試験を行って目視で判定した根鉢の崩れ具合を指標とした例があるのみである(渡部 私信)。コンテナ苗の根鉢はセル成形苗の根鉢と比べて培地の量が多い。しかし、セル苗と同様に一定の高さからの自由落下の衝撃を利用して根鉢の崩れやすさを定量的に評価できると考えられる。

最後に、根鉢の抜き取りにくさについては、これまで野菜や花卉などで調べられてきた。引き抜きに必要な力は、セル成形苗を移植した後の根張りの程度を表す抵抗値として(福岡ら 1996; 吉岡ら 1998; 山崎ら 2011)、あるいは移植機や収穫機が植物を抜き取るために必要な力として(土肥ら 2001; 石川ら 2006)測定されてきた。一方、樹木では主に緑化や斜面崩壊を防ぐ目的で、根の引き抜き抵抗力が数多く測定されてきた(例えば、山寺ら 2002; Genet *et al.* 2008; Stokes *et al.* 2009; 山瀬ら 2015)。しかし、コンテナで育成中の苗木について、育成孔から根鉢を抜き取る際の引き抜き力を計測した例は見あたらない。過去の研究成果を踏まえると、コンテナ苗でも引き抜き力を測定することで、根鉢の抜き取りにくさを定量的に評価できると考えられる。

本研究は、根鉢の物理的性質を定量的に評価する指標とその測定方法を考案し、測定した各指標に対する育成孔の形状の影響や、各指標と地上部の形態的特徴との関係を明らかにすることを目的とした。各指標の背景を理解し測定結果の妥当性を検証するために、根の成長の状況を表す根のバイオマスとの関係を求めた。さらに、これらの指標は、苗木をコンテナから抜き取る前に把握できることが望ましい。そこで、コンテナ型の影響や、地際直径あるいは苗高との関係を検討した。

II. 材料と方法

1. 育苗条件

コンテナ苗は森林総合研究所(茨城県つくば市)の育苗施設(ビニールハウス)内で育成した。実験には、スギ(*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L.f.) D. Don)の単一系統(中々条2)の実生苗を使用した。2016年3月に住友林業筑波研究所で、種子をセルトレイ(エクセルトレイ, 512穴, みのる産業, 岡山県)に播種し育苗した。2016年5月10日に、この幼苗を150 ccのコンテナ(多孔育成容器)に

植栽した。コンテナは縦 30 cm×横 45 cm で育成孔を 40 穴備えているので、植栽密度は約 296 本 m^{-2} である。コンテナ型はリブ型 (JFA-150) とスリット型 (株式会社東北タチバナ, 岩手県) との二種類あり、育成孔の形状が異なっている。リブ型の育成孔の形状は、開口部内径が 53 mm, 底面部内径が 32 mm, 高さが 130 mm の円筒形で、内側の側面上に開口部から底面部までつながる突起 (高さ幅ともに 1 mm) を等間隔に 8 本備えている (図-1)。スリット型の育成孔の形状は、開口部内径が 50 mm, 底面部内径が 32 mm, 高さが 120 mm の円筒形である。上部側面に長さ 37 mm, 幅 2.5 mm の隙間が 8 カ所, 下部側面に長さ 30 mm, 幅 2.5 mm の隙間が 8 カ所ある。

育苗培地はヤシガラ破砕物 (スーパーココ, 日本地工株式会社, 埼玉県) に適量の水を混合して作成した。この培地をコンテナ内に充填した後, 別のコンテナの底部を上から押しつけることで培地を圧縮した。さらに育成孔が培地で満たされるまで, 培地の追加と圧縮を繰り返した (遠藤・山田 2009)。後日検証したところ, 乾燥したスーパーココと水を 5:1 (体積比) で混合し, コンテナへ充填すると乾物密度は約 $0.11 g m^{-3}$ であった。これを圧縮して充填すると約 $0.14 g m^{-3}$ になり, 乾物密度は約 1.2 倍になった。したがって, 苗木を栽培した培地の乾燥密度はおよそ $0.14 g m^{-3}$ であったと推察される。苗木を植栽した後, コンテナをビニールハウス内の育苗棚 (高さ 90 cm) の上に設置した。コンテナの底面は空中に解放された状態であった。施肥は 2016 年 5 月 16 日および 9 月 28 日に, Osmocote Exact Mini (N-P-K 16-8-11 3~4 カ月; Everris, オランダ) を 1 株につき 0.9 g と与えた。施肥量は遠藤・山田 (2009) を参考にした。

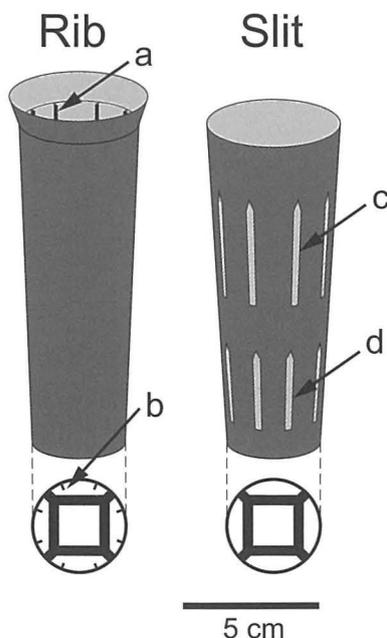


図-1. コンテナの育成孔の模式図

Schematic diagram of cavities in two types of container.

Rib type containers have eight ribs on inner surface of each cavity. These ribs run from (a) an aperture to (b) a bottom of a cavity. Slit type containers have four upper slits (c: 37 mm in length) and four lower slits (d: 30 mm) on a lateral side of each cavity.

2. 測定の方法と時期

本研究の目的のためには多様な地上部の大きさ, 様々な根のバイオマスを持つ苗木を測定することが有効である。そこで, 灌水頻度と測定時期をそれぞれ 2 種類ずつ設定した。灌水を毎日 9:00 と 17:00 に行った苗木と, 1 日おきの 9:00 に行った苗木とを使用した (表-1)。灌水時には株元に配線したチューブから水を 10 分間滴下した。

根鉢の物理的性質の測定は 2017 年 6 月 19-21 日, および 2017 年 11 月 27, 28 日に行った。測定を行った時点で, 苗木は 2 成長期目の初め, あるいは 2 成長期目の終わりであった。測定には, これら 2 回の測定時期ごとに別々の苗木を使用した。コンテナの内部での位置に関わらず, 小さな苗木から大きな苗木まで, 大きさの幅ができるだけ広くなるように苗木を選んだ。材料をランダムに選択していないので, 地上部の形態に関する測定値について, リブ型とスリット型との間で平均値の比較は行わなかった。

根鉢の物理的性質の測定は, 灌水終了後 2 時間から 1 日経過した後に, ビニールハウスの中で行った。測定時には全ての根鉢の土壌は適度に水分を含み塑性状態であった。ひとつひとつの苗木について, 以下に述べる引き抜き力, 指標硬度, 脱落土壌量, 地上部の形態を, この順に連続して測定した。また, 苗木をコンテナから抜き取った直後に苗木の写真を撮影した。最後に, 実験室に持ち帰って根のバイオマスを測定した。

3. 引き抜き力

根鉢をコンテナから抜き取るまでの間の最大荷重を測定し, 引き抜き力とした。苗木の幹の地際から約 1 cm および約 15 cm の位置にプチルゴム自己融着テープ (No.15, 日東電工株式会社, 大阪府) を巻いた (図-2 (a))。次に, ポリプロピレン荷造り紐を用いて長さ約 70 cm の二重紐を作成した。この二重紐の両端をプチルゴムテープ上にひばり結びで固定した。

引き抜き力の測定は測定者と測定補助者の二人一組で行った。測定者が二重紐を吊りばかりのフックにかけ, 吊りばかり本体を両手に持ってゆっくりと上方に引き上げた。このとき, 補助者はコンテナが苗木とともに持ち上がらないようにコンテナの端を持って下方に押しつけた。根鉢がコンテナから完全に抜き取られるまでの間に, 吊りばかりに記録された最大の荷重を読み取った。荷重が 20 kgf より小さい測定にはデジタル手秤 (70109, シンワ測定株式会社, 新潟県) を使用し, 20 kgf 以上の測定にはハン

表-1. 測定に供試した苗木の特徴

Characteristics of the sample seedlings.

Variables	Unit	Container type	
		Rib	Slit
Number of individuals		33 (17)	30 (15)
Root-collar diameter	(mm)	5.22 ± 1.65	5.36 ± 1.72
Height	(cm)	53.2 ± 17.4	56.4 ± 18.9
Root biomass	(g)	3.66 ± 2.74	3.72 ± 2.83
Height:diameter ratio	($cm mm^{-1}$)	104 ± 18	106 ± 20

Number in parentheses indicates the number of individuals which were irrigated two times every day. Number with \pm operator indicates mean \pm standard deviation.

ディスケール (393-50, 株式会社カスタム, 東京都) を使用した。

注意点として, 荷造り紐を幹の1カ所に直接結びつけると, 測定中に樹皮が剥離し正しく測定できない場合があった。そこで, あらかじめ幹の上下2カ所にプチルゴムテープを巻き付け, その上に荷造り紐を結びつけた。この工夫によって幹と紐の結び目に集中する力が分散され, 樹皮が被る障害を回避することができた。

4. 指標硬度

ポケット型山中式土壌硬度計を用いて, 根鉢側面の指標硬度を測定した。土壌硬度計を根鉢 (高さ約12 cm) の底面から約4 cm上方の周囲3カ所と, 上端から約4 cm下方の周囲3カ所の合計6カ所に当てて測定した (図-2 (b))。土壌硬度計の三角錐 (コーン) を根鉢側面に垂直にゆっくりと押しつけ, 最大の指標土壌硬度 (mm) を読み取った (山中・松尾 1962)。

測定時の注意点として, まれにコーンの先端が根に直接当たり, 測定値が明らかに過大になることがあった。このときは, 測定箇所を少しずらして再測定を行った。一つの根鉢につき6点の測定値を平均し, その根鉢の指標硬度として利用した。

5. 脱落土壌量

落下による衝撃によって, 根鉢から脱落した培地の重量を測定した。まず, 苗木全体の重さを電子天秤 (PB3002, メトラー・トレド株式会社, 東京都) で測定した。幹をつかんで根鉢の中央の高さが1 mになるように苗木を持ち

上げ, いったん静止してからその場で手を離れた (図-2 (c))。苗木は根鉢を下にして自由落下し, 地面に置いたプラスチックトレイに衝突した。衝突した瞬間には, 根鉢の底面は多くの個体で地面と平行であった。落下後, 再び苗木全体の重さを測定した。落下前後の重さの差を脱落土壌量とした。

本研究では, 育成孔から取り出した時点で根鉢の形があり, コンテナ苗として認識できる苗について試験を行った。苗木をコンテナから抜き取るときに, 根鉢が崩壊して培地が育成孔に残った個体は, 測定に供試しなかった。また, 根鉢の形はあるものの未発達な個体 (リブ型3個体, スリット型1個体) では, コーンを複数回刺すことによって根鉢が崩れることが予想された。そこで, 上下1カ所ずつの測定に止め, 落下試験前の重量測定も培地が根鉢から脱落しないように慎重に行った。その他の個体では根鉢がある程度形成されており, 土壌硬度計のコーンを根鉢に刺すことで根鉢が崩れたり培地が脱落したりすることはなかった。したがって, 同一の根鉢に対して, これら3項目の測定を連続して行うことの影響は小さいとみなした。

6. 地上部の形態と根のバイオマス

根鉢の物理的性質と苗木の形態的特徴との関係を理解するために, 供試した苗木の地上部の形態および地下部の性質を測定した。苗高を折れ尺で, 地際直径をデジタルノギスで測定した。苗高については, 根鉢上端から主軸先端までの長さとした。地際直径については, 根鉢上端付近の幹について直交する二方向の直径の平均値とした。根のバイオマスについては, 電子天秤で測定した乾燥重量とした。ビニールハウス内において, 根鉢の物理的性質の測定および地上部の形態を測定した後, 苗木をビニール袋に入れて実験室に持ち帰り, 最長で16日間冷蔵庫 (4 °C) に保管した。苗木の解体時には, まず地上部と根鉢とを分離した。根鉢を流水中で揉みほぐすことで根鉢から培地を丁寧に分離し, 根を取り出した。流水中に離脱した細根はざるで受け止め回収した。その後, 根を高温乾燥機 (70 °C) で3日以上乾燥させた後, 電子天秤を用いて秤量した。

7. 統計解析

得られたデータを一般化線型モデル (GLM: Generalized Linear Model) を用いて解析した。応答変数として「根のバイオマス」, 「指標硬度」, 「脱落土壌量」, 「引き抜き力」を指定したモデルをそれぞれ構築した。説明変数として, 全てのモデル中でコンテナ型を指定した。また, 解析の目的に応じて, 連続値である「地際直径」, 「苗高」, 「根のバイオマス」を別々にそれぞれのモデル中で説明変数として指定した。一つの応答変数について, 説明変数を取捨選択して作成可能な全てのモデルを検討した。これらのモデルの赤池情報量規準 (AIC) を求め, AIC が最小となったモデルを最も予測力の強い最適モデルとして採用した。

説明変数に設定した連続値について, log 変換したモデルと log 変換しないモデルとを比較して, 最小 AIC がより小さいモデルを採用した。また, 多重共線性のために, 相関係数の高い「地際直径」と「苗高」は同一モデル中に指定できなかった。このため, 一つの応答変数に対して説明

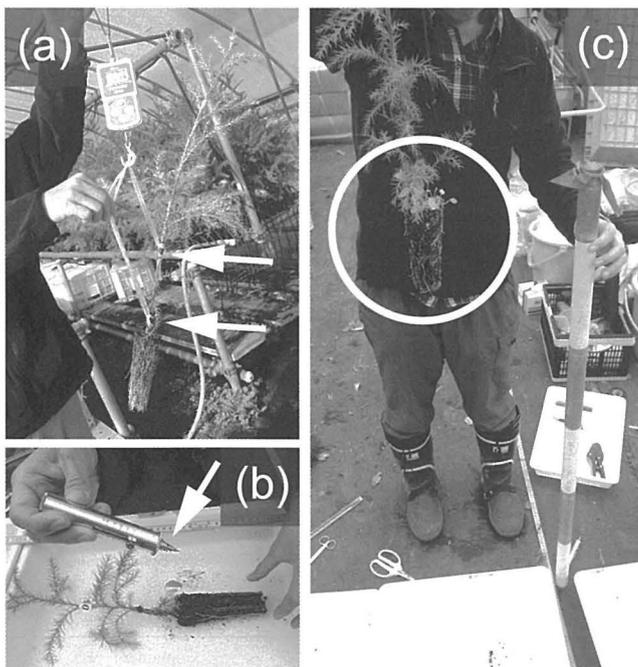


図-2. 測定の様子

Photos of the measurements

(a) 根鉢の引き抜き力の測定, (b) 指標硬度の測定, (c) 脱落土壌量の測定
 (a) pull-out force measurement, two ends of a looped string (arrows) were fastened to the rubber tape on the stem; (b) hardness index measurement, the cone (arrow) of Yamanaka-type soil hardness scale was pushed to a root ball until the brim of the scale attached to a root ball; (c) detached soil measurement, a seedling with a root ball (circle) was dropped from 1 m in height.

変数として「地際直径」を含むモデルと、「苗高」を含むモデルとを別々に作成し、最小 AIC がより小さいモデルを採用した。

統計解析には統計ソフト R version 3.4.3 (R Core Team 2017) を利用し、モデルの計算には glm 関数、変数の取捨選択と AIC の計算には MuMIn パッケージの dredge 関数を使用し、同時に MASS パッケージの stepAIC 関数で結果を検証した。応答変数はガンマ分布に従うと仮定し、リンク関数に log を設定した。ただし、「指標硬度」を応答変数とするモデルでは、説明変数の根のバイオマスの増大に対して応答変数の分散の増大が見られなかった。そのため、等分散性を仮定し分布関数として正規分布を設定した。

III. 結 果

1. 地上部の形態と根のバイオマス

測定に供試した苗木の地際直径、苗高、根のバイオマス、形状比の平均値を表-1 に示した。地際直径の範囲はリブ型で 2.22~7.76 mm、スリット型で 2.67~8.36 mm だった。また、苗高の範囲はリブ型で 25.5~95.5 cm、スリット型で 23.5~95.5 cm だった。根のバイオマスの範囲はリブ型で 0.17~9.24 g、スリット型で 0.24~8.82 g だった。さらに、地際直径と苗高は相関が強かった (図-3、リブ型 $R=0.85$ 、スリット型 $R=0.86$)。形状比の範囲はリブ型で 61~155、スリット型で 68~154 で、ともにほとんどの個体が 60 から 140 の範囲に含まれた。

2. 地上部の形態と根のバイオマスとの関係

AIC を基準としたモデル選択の結果、応答変数を根のバイオマスとしたときに、説明変数に地際直径 (図-4(a))、

あるいは苗高 (図-4(b)) を含むモデルが選択された。両モデルでコンテナ型は説明変数に含まれなかった。さらに、説明変数に地際直径を含むモデルは、苗高を含むモデルより AIC が小さかった (表-2) ことから、前者が後者より予測力の強い最適モデルとして選択された。最適モデルより、地際直径の増大に対して根のバイオマスは指数関数的に増大すると推測された。例えば、地際直径が 3, 5, 7 mm の個体では、根のバイオマスはそれぞれ 0.64, 2.59, 6.54 g と予測された。

3. 根のバイオマスと根鉢の物理的性質との関係

モデル選択の結果、指標硬度、脱落土壌量、引き抜き力を応答変数としたそれぞれのモデルにおいて、根のバイオマスが説明変数として選択された。まず、根のバイオマスと指標硬度との関係 (図-5(a)) では、根のバイオマスは正の効果があり、根のバイオマスが大きくなるにつれて指標硬度は大きくなった (表-3)。コンテナ型は変数として選択されなかった。最適モデルから、例えば、根のバイオマスが 4, 6, 8 g のとき、指標硬度はそれぞれ 10.2, 15.0, 19.8 g と予測された。

次に、根のバイオマスと脱落土壌量との関係 (図-5(b)) では、根のバイオマスは負の効果があり、根のバイオマスが大きくなるにつれて脱落土壌量は急激に小さくなった (表-3)。例えば、観察された脱落土壌量は最大で 67.3 g だったが、根のバイオマス量が 2 g 以上の個体に限ると最大でも 3.6 g だった。また、コンテナ型は正の効果があり、根のバイオマスが等しいとき脱落土壌量はリブ型に対してスリット型で 170% と推測された。例えば、根のバイオマスが 1 g のときに、脱落土壌量はリブ型で 5.6 g、スリット型

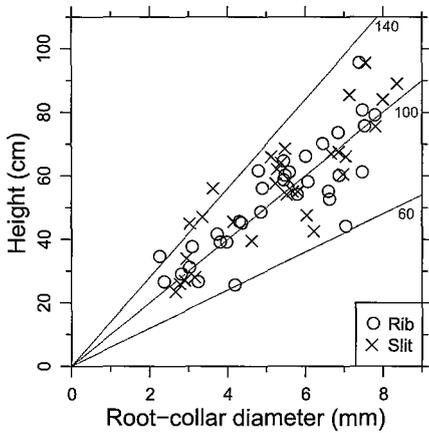


図-3. 地際直径と苗高との関係
The relationship between root-collar diameter and height of the sample seedlings.
Lines in gray indicate certain values of height:diameter ratios indicated by the numbers beside the line.

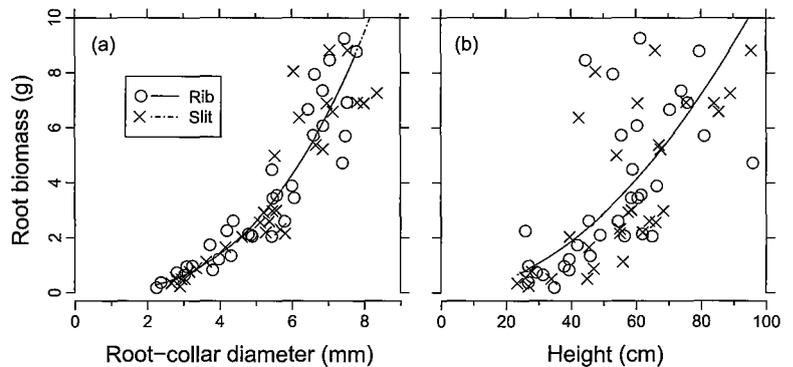


図-4. (a) 地際直径、あるいは (b) 苗高と根のバイオマスとの関係
The relationship between (a) root-collar diameter or (b) height and root biomass of the sample seedlings.

表-2. 根のバイオマスを最もよく予測する一般化線型モデルの切片および係数の推定値

Parameters of models with the best predictive ability for the physical properties of root balls estimated by GLM.

Response	Unit	Intercept	log(Diameter)	log(Height)	Distribution	Link	AIC
Root biomass	(g)	-3.48 ***	2.75 ***	—	Gamma	log	141.3
		-6.57 ***	—	1.95 ***			

"Intercept" indicates an intercept of the equation for both types of containers. "log(Diameter)" and "log(Height)" indicates a natural logarithm of diameter and that of height, respectively. "—" indicates a parameter which was not used in GLM. *** indicate statistical significance at $P < 0.001$ level.

で9.6 gと予測された。

最後に、根のバイオマスと根鉢の引き抜き力との関係(図-5(c))では、根のバイオマスは引き抜き力に対し正の効果があり(表-3)、根のバイオマスが大きくなるにつれて引き抜き力は大きくなった。また、コンテナ型は負の効果があり、根のバイオマスが等しいとき引き抜き力はリブ型に対してスリット型で56%と推測された。例えば、根

のバイオマスが6 gのとき、引き抜き力はリブ型で10.8 kgf、スリット型で6.0 kgfと予測された。ただし、スリット型の引き抜き力はばらつきが大きく、リブ型と同程度の個体もあった。

4. 地上部の形態と根鉢の物理的性質との関係

モデル選択の結果、応答変数を指標硬度としたときに、説明変数に地際直径(図-6(a))、あるいは苗高(図-6(b))を含むモデルが選択された。両モデルでコンテナ型は説明変数に含まれなかった。さらに、説明変数に地際直径を含むモデルは、苗高を含むモデルよりAICが小さかった(表-4)ことから、前者が後者より予測力の強い最適モデルとして選択された。地際直径と指標硬度との関係(図-6(a))には、コンテナ型に関わらず明瞭なX切片が見られた(2.87 mm)。地際直径は正の効果があり、直径が大きくなるにつれて指標硬度は大きくなった。最適モデルから、例えば、地際直径が3, 5, 7 mmのとき、指標硬度はそれぞれ0.51, 8.29, 16.06 mmと予測された。

同様に、応答変数を脱落土壌量としたときに、説明変数に地際直径(図-7(a))、あるいは苗高(図-7(b))を含むモデルが選択された。また、両モデルでコンテナ型が説明変数に含まれた。さらに、説明変数に地際直径を含むモデルは、苗高を含むモデルよりAICが小さかった(表-4)ことから、前者が後者より予測力の強い最適モデルとして選択された。地際直径は負の効果があり、直径が大きくなるにつれて脱落土壌量は小さくなった。また、リブ型と比べてスリット型で正の効果があり、地際直径が等しいとき脱落土壌量はリブ型に対してスリット型で199%だった。例えば、直径が3 mmのとき、脱落土壌量はリブ型で13.2 g、スリット型で26.4 gと予測された。

さらに、応答変数を引き抜き力としたとき、説明変数に地際直径(図-8(a))、あるいは苗高(図-8(b))を含むモデルが選択された。また、両モデルでコンテナ型が説明変数に含まれた。さらに、説明変数に地際直径を含むモデルは、苗高を含むモデルよりAICが小さかった(表-4)ことから、前者が最適モデルとして選択された。地際直径は正の効果があり、直径が大きくなるにつれて引き抜き力は大きくなった。また、リブ型と比べてスリット型で負の効果があり、地際直径が等しいとき引き抜き力はリブ型に対してスリット型で49%だった。例えば、直径が7 mmのとき、引き抜き力はリブ型で13.0 g、スリット型で6.4 gと予測された。

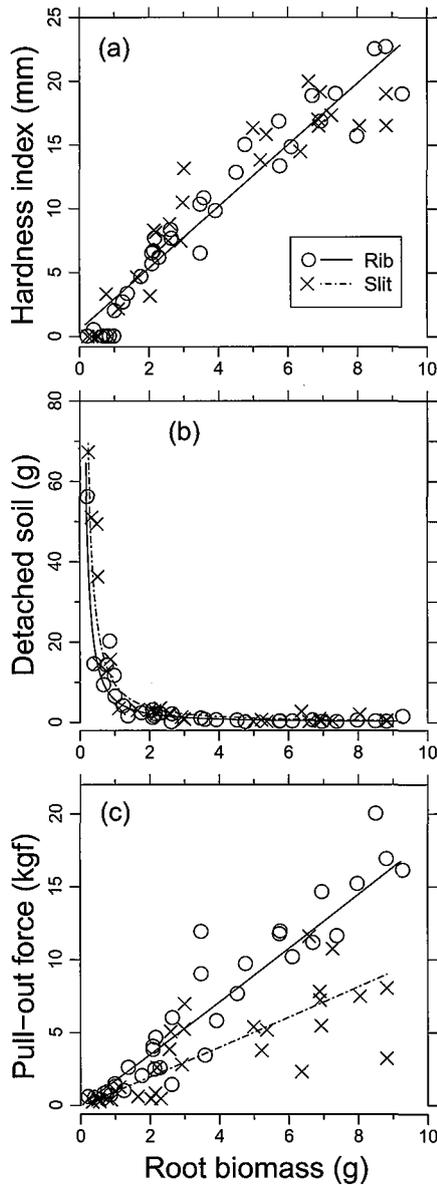


図-5. 根のバイオマスと (a) 指標硬度, (b) 脱落土壌量, (c) 引き抜き力との関係

The relationship between root biomass and (a) hardness index, (b) detached soil or (c) pull-out force of the sample seedlings.

表-3. 根鉢の物理的性質を最もよく予測する一般化線型モデルの切片と係数の推定値

Parameters of models with the best predictive ability for the physical properties of root balls estimated by GLM.

Response	Unit	Intercept	Root	log(Root)	TypeSlit	Distribution	Link
Hardness index	(mm)	0.54 n.s.	2.41 ***	—	NA	gaussian	identity
Detached soil	(g)	1.73 ***	—	-1.38 ***	0.53 *	Gamma	log
Pull-out force	(kgf)	0.53 ***	—	1.03 ***	-0.58 ***		

"Intercept" indicates an intercept of the equation for both types of containers. "log(Root)" indicates a natural logarithm of root biomass. "TypeSlit" indicates a difference of response variables from Rib type container to Slit type container. "—" and "NA" indicate parameters which were not used in GLM and omitted by the model selection procedure, respectively. * and *** indicate statistical significances at $P < 0.05$ and $P < 0.001$ level, respectively. n.s. indicates no-significance at $P \geq 0.05$ level.

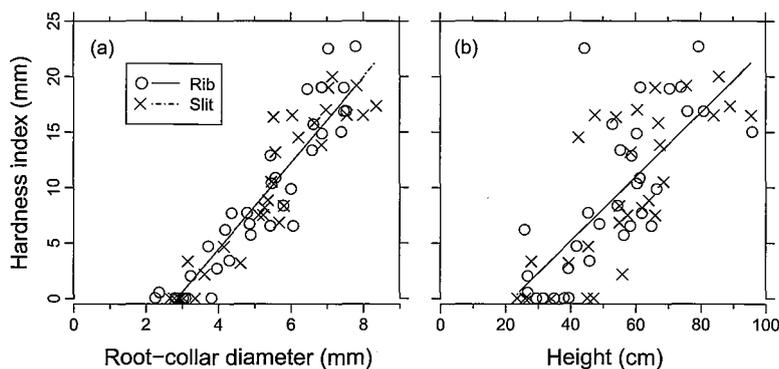


図-6. (a) 地際直径, あるいは (b) 苗高と指標硬度との関係
The relationship between (a) root-collar diameter or (b) height and hardness index obtained by Yamanaka-type soil hardness scale.

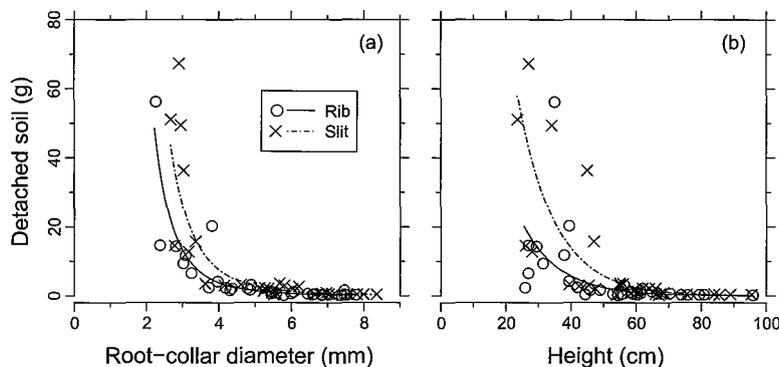


図-7. (a) 地際直径, あるいは (b) 苗高と脱落土壌量との関係
The relationship between (a) root-collar diameter or (b) height and detached soil from the root balls after dropping of the seedlings from 1 m in height.

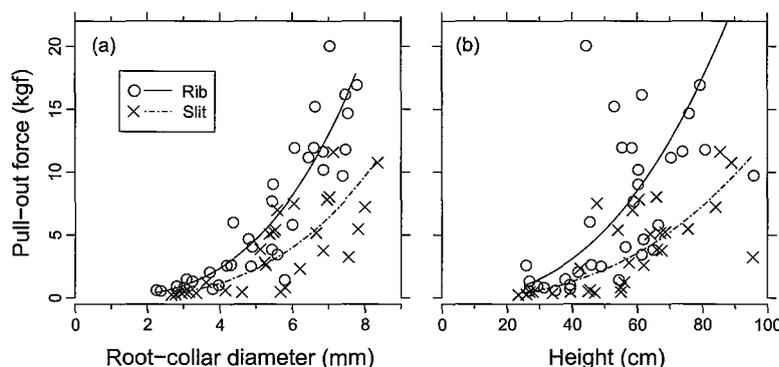


図-8. (a) 地際直径, あるいは (b) 苗高と引き抜き力との関係
The relationship between (a) root-collar diameter or (b) height and pull-out force of the root balls from containers.

表-4. 根鉢の物理的性質を最もよく予測する一般化線型モデルの切片および係数の推定値

Parameters of models with the best predictive ability for the physical properties of root balls estimated by GLM.

Response	Unit	Intercept	Diameter	log (Diameter)	Height	log (Height)	TypeSlit	Distribution	Link	AIC
Hardness index	(mm)	-11.15 ***	3.89 ***	—	—	—	NA	gaussian	identity	300.2
		-6.44 **	—	—	0.29 ***	—	NA			376.7
Detached soil	(g)	7.33 ***	—	-4.32 ***	—	—	0.69 **	Gamma	log	209.0
		5.22 ***	—	—	-0.09 ***	—	0.88 **			243.6
Pull-out force	(kgf)	-3.36 ***	—	3.04 ***	—	—	-0.71 ***	Gamma	log	240.6
		-8.08 ***	—	—	—	2.50 ***	-0.87 ***			290.3

"Intercept" indicates an intercept of the equation for both types of containers. "log (Diameter)" and "log (Height)" indicates a natural logarithm of diameter and that of height, respectively. "TypeSlit" indicates a difference of response variables from Rib type container to Slit type container. "—" and "NA" indicate parameters which were not used in GLM and omitted by the model selection procedure, respectively. ** and *** indicate statistical significance at $P < 0.01$ and $P < 0.001$ level, respectively.

IV. 考 察

1. 地際直径と根のバイオマス

地際直径が根のバイオマスの良い指標になることは、過去の研究でも指摘されてきた (Grossnickle 2012)。また、地際直径の方が、苗高より根のバイオマスとの関係が強いことについては、スギコンテナ苗を用いた過去の研究で報告されていた (杉原・丹下 2016)。本研究は、先行研究より広い地際直径の範囲で、地際直径と根のバイオマスとの強い関係を示し、また、両者の関係がコンテナ型に依存しないことを示した (図-4(a), 表-2)。

この地際直径と根バイオマスとの関係は、150 cc コンテナで通常の養分条件で栽培された実生苗であれば一般的にあてはまるものと考えられる。この理由として、測定材料にコンテナ型ごとに2通りの灌水頻度で栽培した苗木をほぼ同数用いたこと (表-1)、コンテナ内での位置に関係なく苗木を選んだことが挙げられる。ただし、育苗中の水分や養分条件が非常に悪い苗木にはあてはまらない可能性がある。今後、様々なスギ系統や育苗条件で地際直径と根のバイオマスとの関係を検証していく必要がある。

2. 根のバイオマスと根鉢の硬さ

結果から (図-5(a), 表-3)、コンテナ型に関わらず根のバイオマスが大きくなるにつれて指標硬度は大きくなった。また、指標硬度は根のバイオマスに関わらず回帰曲線からの分散がほぼ等しいことから、根鉢の硬さは根量と強い関係があると考えられた。このしくみを理解するため根鉢を観察すると、根のバイオマスが小さい個体では、根鉢の中で根の体積は小さく根系は単純だった。(図-9(a), (c))。一方で、根のバイオマスが大きい個体では根の体積が大きく根系が複雑な構造をしていた (図-9(b), (d))。これらの結果から、根のバイオマスが大きくなるにつれて根鉢の中で根の体積が大きくなり、根鉢が育成孔壁面を押し広げようとする力が働いたと推察される。その反作用として、壁面が根鉢を圧迫し根鉢が圧密されたことで、指標硬度が大きくなったと考えられる。また、根系の構造が根鉢全体に発達して培地を保持していることも指標硬度に貢献したと考えられる。このように、土壤硬度計の指標硬度には、根や培地の性質、さらに根系の構造が関係していると考えられる。したがって、指標硬度は、根鉢に外部から力が加わったときに、根鉢の変形しにくさを評価できるという意味で、根鉢の硬さの指標として有効であると考えられる。本研究のような指標硬度による根鉢の硬さの評価は、測定原理が同じであれば、果実硬度計を用いても (増淵・鹿野 1984) 可能だと考えられる。

3. 根のバイオマスと根鉢の崩れやすさ

測定結果 (図-5(b), 表-3) を理解するために、根鉢表面を観察した。根のバイオマスが小さい個体では、比較的太い根が根鉢表面に散在し、根系の構造は単純で根と培地との繋がりは弱かった (図-9(a), (c))。一方で、根のバイオマスが大きい個体では、複雑な立体構造をした根系が根鉢表面を覆っており、また、細根が培地を細かく分断し取り囲んでいた (図-9(b), (d))。これらの観察を踏ま

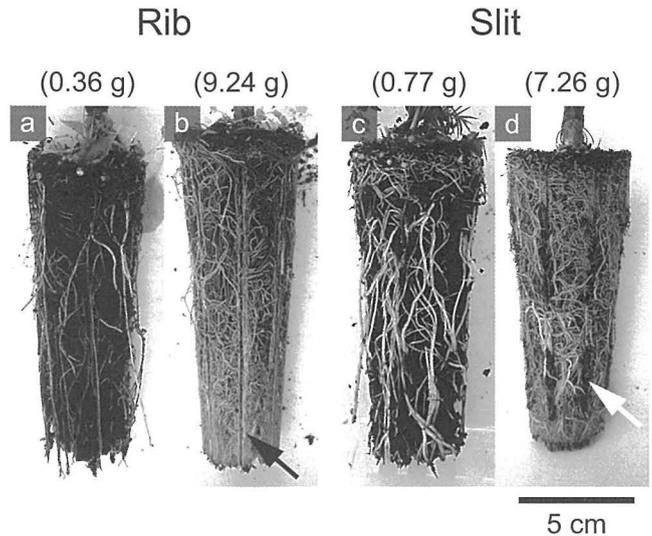


図-9. 根のバイオマスの増大にともなう根鉢の変化

Photos of the root balls which grown (a), (b) in rib type container and (c), (d) in slit type container.

(a), (b) リブ型コンテナ, (c), (d) スリット型コンテナ。

The numbers in parentheses indicate root biomass of each root ball. The black arrow indicates the roots distributed linearly along the rib on an inner surface of a cavity. The white arrow indicates the air-pruning on a root ball surface, which formed inside the slit on an inner surface of a cavity.

ると、根のバイオマスが大きくなるにつれて、根と培地との連結が強くなったと考えられる。その結果、根鉢が地面との衝突によって衝撃を受けても培地が根鉢から外れにくくなり、脱落土壌量が小さくなったと考えられる。したがって、脱落土壌量は、根鉢に外部から力が加わったとき、根や培地が離脱して根鉢の形が保てなくなるような性質を評価できるという意味で、根鉢の崩れやすさの指標として有効であると考えられる。ただし、育成孔の容量が異なる根鉢を比較する場合には、測定結果の解釈に注意する必要がある。

4. 根のバイオマスと根鉢の抜き取りにくさ

測定結果 (図-5(c), 表-3) のしくみを理解するために、根鉢表面を観察した。根のバイオマスが小さい個体では、根鉢表面に細根は少なく培土が露出していた (図-9(a), (c))。一方で、根のバイオマスが大きい個体では、根鉢表面に多くの細根が観察された (図-9(b), (d))。これらの観察から、根のバイオマスが小さい個体では、育成孔壁面に密着している根の表面積は小さく、引き抜き時に主に培地と壁面との間に摩擦力が働いていたと推察される。根のバイオマスが大きくなるにしたがって、根鉢表面の細根が多くなり、また壁面が根鉢を圧迫する力も大きくなることで、引き抜き時の摩擦力が大きくなったと考えられる。このように、根鉢の抜き取りにくさは、根鉢側面の根系と育成孔壁面との間に生じる摩擦力によって規定されることが考えられる。したがって、引き抜き力は、根鉢が育成孔から離れる過程で働く最大の摩擦力を評価できるという意味で、根鉢の抜き取りにくさの指標として有効と考えられる。

根鉢の引き抜き力を、物理学的な手順を踏まえた上で精度良く測定することを目的とするならば、実験室に設置した引っ張り試験機を用いて、一定の速度で引き抜いて測定

することが理想的だと考えられる（例えば、福岡ら 1996）。しかし、国内に散在する育苗現場で、専門的な試験装置を必要とする測定を行うことは困難であろう。また、根鉢を手動で引き抜く測定は、引き抜き速度が機械ほどは安定しないものの、その測定値は万能引っ張り試験機で得られた値と大差ないことが示されている（吉岡ら 1998）。したがって、市販の吊りばかりを用いた簡易的な方法で、コンテナ苗の根鉢の引き抜き力を測定することは、実用上有効なことだと考えられる。

5. 地際直径と根鉢の物理的性質

地上部の形態と根鉢の物理的性質との関係についての解析では、応答変数として指標硬度（図-6）、脱落土壌量（図-7）、引き抜き力（図-8）を設定した。いずれの応答変数でも、説明変数に地際直径を設定したモデルの方が、苗高を設定したモデルより予測力の強いモデルとして選択された（表-4）。このしくみとして、地際直径と根のバイオマスとの関係が、苗高と根のバイオマスとの関係より強いことが挙げられる（図-4、表-2）。一方、根のバイオマスは指標硬度、脱落土壌量、引き抜き力と関係があるので（図-5）、地際直径は苗高よりこれら3指標との関係が強かったと考えられる。

地際直径が小さい個体から大きい個体にかけて、根鉢の物理的性質に連続的な違いが見られた。コンテナ型に関係なく地際直径がおよそ3 mm以上の個体で根鉢に硬さが安定的に表れ、直径の成長に比例して根鉢が硬くなることがわかった（図-6(a)）。このとき、地際直径がおよそ4 mmを超えると、根鉢はほとんど崩れなくなり（図-7(a)）取り扱いやすくなるといえる。一方で、地際直径がさらに大きな個体では徐々に抜き取りにくくなり（図-8(a)）、およそ7 mmを超えると1人で抜き取ることは難しくなると考えられる。したがって、地際直径を手がかりに、根鉢が適度に形成された苗木を推測できる可能性が示された。

6. コンテナ型による根鉢の物理的性質の違い

最適モデルによると、根のバイオマスが等しいときに、リブ型と比べてスリット型で脱落土壌量が多い（170%）ことが推測された（図-5(b)）。この理由を考えるために根鉢を観察した。リブ型では根鉢表面が全体的に通直な根で覆われていた（図-9(b)）一方で、スリット型では、育成孔壁面の隙間にあった根鉢の部分では、空気根切りによって根系が発達していなかった（図-9(d)）。したがって、リブ型では根鉢全体の根系が培地を捕らえて、培地が外れにくかった一方で、スリット型では表面の根系が部分的にほぐれて、培地が外れやすかったと考えられた。ただし、根のバイオマスが大きい個体では脱落土壌量が小さいので、コンテナ型間に差があっても、実用上の意味は小さい。

同様に最適モデルによると、根のバイオマスが等しいときに、リブ型と比べてスリット型は、引き抜き力が小さい（56%）ことが推測された（図-5(c)）。この理由として、育成孔の内壁面の表面積が、リブ型よりスリット型で小さいことが挙げられる。リブ型の表面積は約183 cm²に対してスリット型の表面積は約141 cm²なので、スリット型はリブ型の約77%しかない。また、根鉢表面を観察すると、

リブ型は育成孔内面の肋に沿って根が直線的に伸長していた（図-9(b)）。一方で、スリット型では細根が様々な方向に伸長し、また、育成孔壁面の隙間の部分で根鉢は窪み根が茶変色していた（図-9(d)）。したがって、リブ型と比べてスリット型で引き抜き力が小さい理由は、育成孔壁面に密着している根の表面積が小さいので、根鉢表面と壁面との間に働く摩擦力が小さいからと考えられた。

V. おわりに

本研究は、スギコンテナ苗の根鉢の物理的性質の指標として①「指標硬度」、「脱落土壌量」、「引き抜き力」を提案し、それらの測定方法を示した。いずれの指標も測定原理が簡明なので、多くの人が値の意味を直感的に理解できると考えられる。また、②各指標は根のバイオマスと強い関係があったことから、根鉢の物理的性質を的確に評価できると考えられる。さらに、これらの指標を用いて評価した結果、③リブ型と比べてスリット型で根鉢が崩れやすく抜き取りやすいこと、④地際直径が根鉢の物理的性質をよく反映することが明らかになった。これらの現象は、根鉢の物理的性質を定量的に評価したことによってはじめて明確にすることができた。①から④の成果をより確実にするためには、今後、育成孔の容量の異なるコンテナ苗について同様の試験を行い、結果を比較検討することが有効である。さらに、本研究の成果は、出荷に適した根鉢を持つ苗木を選び出す技術に応用できる。地際直径から根鉢の物理的性質を推定する技術は、コンテナ苗の出荷作業の効率を向上することを通じて再造林コストの削減に貢献できると期待される。

謝 辞

本研究は生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）」の支援を受けて行った。また、本研究では住友林業筑波研究所で育成した小型プラグ苗を使用した。さらに、本稿を改訂するにあたり、編集担当者と3名の査読者から貴重なご意見をいただいた。ここに、お礼を申し上げる。最後に、本研究で提案したような簡素な試験に興味を持っていただいたすべての関係者に感謝いたします。

引用文献

- Dihingia PC, Kumar GVP, Sarma PK, Neog P (2017) Production of soil block seedlings in plug trays for mechanical transplanting. *Int J Veg Sci* 23: 471-485
- 土肥 誠・野波和好・浅尾俊樹 (2001) ホウレンソウ収穫ロボットの研究（第1報）収穫期におけるホウレンソウの力学特性。農業生産技術管理学会誌 8: 37-41
- Dominguez-Lerena S, Herrero Sierra N, Carrasco Manzano I, Ocaña Bueno L, Peñuelas Rubira JL, Mexal JG (2006) Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *For Ecol Manag* 221: 63-71
- 遠藤利明 (2007) コンテナ苗の技術について。山林 1478: 60-68
- 遠藤利明・山田 建 (2009) JFA-150 コンテナ育苗・植栽マニュアル。平成20年度新育苗・造林技術開発事業報告書。林野庁。74-90
- 遠藤 貞 (2009) コンテナ苗のそだてかた～コンテナ苗の普及拡大にむけて～。紋別地区種苗協議会。http://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/kikaku/pdf/24happyu_s_09.pdf
- 藤本浩平・山崎 真・渡辺直史・山崎敏彦 (2016) 架線系一貫作業システムの実用化に向けて。森林技術 897: 16-19
- 藤原隆広・吉岡 宏・佐藤文生 (1999) キャベツセル成型苗の形態的・物理的性状が全自動移植機による機械定植適応性に及ぼす影響。農業研究 34(2): 77-84

- 福岡信之・吉岡 宏・清水恵美子・藤原隆広 (1996) キャベツ・ブロッコリーセル成型苗の根の呼吸活性と定植後の発根力との関係. 園芸学会雑誌 65: 95-103
- 後藤丹十郎・景山詳弘・小西国義 (2000) カーネーションおよびシチュコンカスミソウのセル成型育苗に関する研究—セルの容量と育苗期間が移植後の生長と切り花品質に及ぼす影響—. 園芸学会雑誌 69: 749-757
- Genet M, Kokutse N, Stokes A, Fourcaud T, Cai X, Ji J, Mickovski S (2008) Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. For Ecol Manag 256: 1517-1526
- Grossnickle SC (2012) Why seedlings survive: influence of plant attributes. New Forest 43: 711-738
- Grossnickle SC, El-Kassaby YA (2016) Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison. New Forest 47: 1-51
- Grossnickle SC, MacDonald JE (2018) Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes. Forests 9: 283
- 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, 成長および生理特性. 日林誌 98: 158-166
- 石川順也・和田 修・小山佳彦 (2006) シンテッポウユリ機械移植のためのセル成型育苗技術の開発. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 農業編 54: 18-21
- Jacobs DF, Salifu KF, Seifert JR (2005) Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. New Forest 30: 235-251
- 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および成長特性. 日林誌 98: 214-222
- 梶本卓也・宇都木玄 (2016) プロジェクト「コンテナ苗を活用した低コスト再造林技術の実証研究」の紹介. 森林遺伝育種 5: 101-105
- 梶本拓也・宇都木玄・田中 浩 (2016) 低コスト再造林の実現にコンテナ苗をどう活用するか—研究の現状と今後の課題—. 日林誌 98: 135-138
- 近藤 晃・袴田哲司 (2016) コンテナ苗の植付けに用いる改良型ディブルの試作とその性能評価. 日緑工誌 42(1): 240-243
- Landis TD, Dumroese RK, Haase DL (2010) The Container Tree Nursery Manual. Volume 7, Seedling Processing, Storage, and Outplanting. Agric. Handbk. 674. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture Forest Service. P. 23
- Mattsson A (1996) Predicting field performance using seedling quality assessment. New Forest 13: 223-248
- 増渕尊重・鹿野昭一 (1984) 機械移植を前提とした露地野菜育苗法の研究. 第1報 育苗用土の種類とソイルブロックの物理的特性. 農作業研究 51: 13-20
- 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
- 日本ペドロロジー学会 (1997) 土壌調査ハンドブック改訂版. 博友社. 83-84
- 岡田彰夫・山浦浩二・十川和士・西村融典 (2002) レタスのセル成型苗における苗の性状と全自動移植機への適応性. 香川県農業試験場研究報告 55: 25-32
- 大矢信次郎・齋藤仁志・城田徹央・大塚 大・宮崎隆幸・柳澤信行・小林直樹 (2016) 長野県の緩傾斜地における車両系伐出作業システムによる伐採・造林一貫作業の生産性. 日林誌 98: 233-240
- 林野庁 (2017) 平成 29 年度版森林・林業白書, 第1章成長産業化に向けた新たな技術の導入. 13
- 林野庁 (2018) コンテナ苗基礎知識. P. 8. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/syubyou/attach/pdf/syubyou-7.pdf>
- R Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Saito T, Wang J-K, Ai F, Aoyama T, Funada S, Watanabe K, Tojo S (1988) Physical requirements of seedling blocks used in an automatic vegetable transplanter. 農業施設 19: 22-28
- 白岩裕隆・鹿島美彦・野口安男・井上 浩 (2006) 全自動ネギ移植機に対応したセル成型育苗法の改良並びに周年利用体系の確立. 鳥取県園芸試験場報告 7: 19-28
- 染谷祐太郎・丹下 健 (2017) 弱光・灌水制限条件に置かれたスギコンテナ苗の水分生理特性の変化. 森林立地 59(2): 53-60
- South DB, Mitchell RG (2006) A root-bound index for evaluating planting stock quality of container-grown pines. South Afri For J 207: 47-54
- Stokes A, Atger C, Bengough AG, Fourcaud T, Sidle RC (2009) Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. Plant Soil 324: 1-30
- 杉原由加子・丹下 健 (2016) スギコンテナ苗の形状と植栽当初の蒸散速度. 日林誌 98: 146-150
- 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
- 島根県中山間地域研究センター (2018) スギ・ヒノキのコンテナ苗生産の手引き (改訂版). https://www.pref.shimane.lg.jp/admin/region/kikan/chusankan/shinrin/shcn_kai.data/kontenanaetebiki_kai.pdf
- 飛田博順・原山尚徳・小笠真由美・矢崎健一・北尾光俊・上村 章・諏訪錬平・山下直子・奥田史郎・壁谷大介・落合幸仁・山田 健・宇都木玄・梶本卓也 (2016) スギ・ヒノキコンテナ苗の根の電解質漏出率. 関東森林研究 67: 105-108
- 戸田浩人 (2007) 森林・林業実務必携 (東京農工大学農学部. 森林・林業実務必携編集委員会編). 4 章育林. 朝倉書店. 43
- 宇都木玄・原山尚徳・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
- 八木橋勉・中村克典・齋藤智之・松本和馬・八木貴信・柴田鏡江・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: 257-260
- 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
- 山寺喜成・楊 喜田・宮崎敏孝 (2002) 植栽木と播種木との引き抜き抵抗力の相違について. 日緑工誌 28(1): 143-145
- 山中金次郎・松尾憲一 (1962) 土壌硬度に関する研究 (第1報) 土壌硬度と含水量との関係. 日本土壌肥科学雑誌 33: 343-347
- 山瀬敬太郎・谷川東子・池野英利・藤堂千景・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘 (2015) 異なる土壌環境下における根系構造と引き抜き抵抗力との関係. 日緑工誌 41: 301-307
- 山浦浩二・高田憲彰・内藤和男 (2013) 野菜用半自動多条移植機における移植ユニットの改良. 農業生産技術管理学会誌 19(4): 119-124
- 山崎敬亮・熊倉裕史・浜本 浩・齋藤弥生子 (2011) 72 穴セル成型苗を利用したイチゴ促成栽培における育苗条件および圃場の窒素含量が生育や収量に及ぼす影響. 園芸学研究 10: 521-529
- 吉岡 宏・清水恵美子・福岡信之・藤原隆広・佐藤文生 (1998) 苗の引き抜き抵抗を利用したキャベツセル成型苗の発根力評価. 園学雑誌 67: 584-594