トドマツ精英樹等クローンにおける容積密度の樹高方向での 変動とピロディンを用いた非破壊的評価^{*1}

井城泰一^{*2}, 田村 明^{*2}, 西岡直樹^{*2}, 阿部正信^{*2}, 飯塚和也^{*3}

Longitudinal Changes of Basic Density and Non-Destructive Quality Evaluation Using the Pilodyn in Todomatsu (*Abies sachalinensis*) Plus Tree Clones^{*1}

Taiichi IKI^{*2}, Akira TAMURA^{*2}, Naoki NISHIOKA^{*2},
Masanobu ABE^{*2} and Kazuya IIZUKA^{*3}

The longitudinal changes in the basic density of disks (mean *Bd*) of todomatsu (*Abies sachalinensis*) were investigated using plus-tree clones and breeding-material clones. The relationship between Pilodyn penetration of a standing tree and mean *Bd* was also investigated. The patterns of longitudinal change of mean *Bd* differed among clones and could be classified into several types. The mean *Bd* of the region 1-3 m above ground could be used as an alternate value to the mean *Bd*, and including breast height was appropriate for a genetic comparison. A significant negative correlation between Pilodyn penetration of a standing tree with and without bark and mean *Bd* was obtained in both individuals and clones. Pilodyn penetration with bark was more useful than that without bark because it was easier. Therefore, it would be possible to evaluate the mean *Bd* in todomatsu based on the measurement of Pilodyn penetration with bark of standing trees at breast height. This method will allow us the non-destructive evaluation, and will be available as a good indicator of the wood quality of both individuals and clones.

Keywords: todomatsu, clone, longitudinal change, basic density, Pilodyn penetration.

トドマツ精英樹や育種母材のクローンを用いて、円板全体の容積密度（平均容積密度）の樹高方向の変動を調査した。また、立木状態で測定したピロディンによる打ち込み深さ（ピロディン値）と平均容積密度との関係を調査した。平均容積密度の樹高方向の変動パターンはクローンごとに異なっており、いくつかのタイプに分類できた。平均容積密度の最適な測定部位を検討した結果、地際からの高さ1~3m部位において樹幹を代表する値として用いることが可能であり、この地上高部位において遺伝的な違いを比較できると考えられた。立木状態で樹皮の上から測定したピロディン値（樹皮付きピロディン値）、樹皮を剥皮したピロディン値（ピロディン値）と平均容積密度の間には、個体値、クローン平均値とも有意な負の相関関係が認められた。測定の簡便さから、樹皮付きピロディン値が有効な指標であると考えられた。以上より、胸高部位でトドマツの立木の樹皮付きピロディン値を測定することで、非破壊的に個体やクローンの平均容積密度を評価する有効な材質指標になることが示唆された。

^{*1} Received May 14, 2007; accepted June 6, 2008. 本研究の一部は第56回日本木材学会大会（2006年8月、秋田）において発表した。

^{*2} 森林総合研究所林木育種センター北海道育種場 Forest Tree Breeding Center Hokkaido Regional Breeding Office, Forestry and Forest Products Research Institute, Ebetsu 069-0836, Japan

^{*3} 宇都宮大学農学部 Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Utsunomiya 321-8505, Japan

1. 緒 言

トドマツ (*Abies sachalinensis* Masters) は、北海道の郷土樹種であり、主要な造林樹種の一つである。その用途は多様であるが、主に構造材などの建築用材に多く使用されている。

木材は将来的に工業用原材料としての利用が予想されており¹⁾、客観的な指標として、材質が重要になっていくと考えられる。重要な材質指標の一つに容積密度がある。容積密度は、圧縮やせん断強さなどの木材の力学的性能や木材収量の指標として重要な材質形質である。また近年、地球温暖化の原因の一つと言われている二酸化炭素を固定する能力を評価する指標としても重要視されている。しかし、トドマツ造林木の欠点として、容積密度の低い材がしばしば現れることが指摘されている²⁻⁴⁾。容積密度の低い材が現れることは、構造材などの建築用材としてのトドマツ材の経済的価値を低くする原因の一つであり、木材利用や二酸化炭素の固定能力を考えると容積密度の高いトドマツが望まれる。トドマツの容積密度は、クローン間⁵⁻⁹⁾や家系間¹⁰⁾で有意な差のあることが報告されている。また、親子回帰から推定した狭義の遺伝率も比較的高いことから¹⁰⁾、トドマツの容積密度は遺伝的要因の寄与が高い形質であると考えられ、遺伝的改良によりその向上が期待できる。トドマツの人工造林は種子による実生苗が植栽されるため、材質形質の遺伝的改良を行うためには、設定済みの採種園を優れた形質のクローン構成へ、改良あるいは誘導することが重要となる。

容積密度の遺伝的改良を目指し、個体およびクローンの選抜を行うためには、樹幹内の変動を把握し、有効で効率のよい調査を行うための地上高部位を検討する必要がある。樹高方向の容積密度の変動は、スギ¹¹⁻¹⁴⁾やヒノキ^{13, 15)}、カラマツ^{13, 16)}で行われている。またスギでは、胸高部位の平均密度と樹幹全体の平均密度との間に強い正の相関関係があり、胸高部位の測定値で樹幹全体を代表できることが報告されている^{12, 14)}。トドマツにおいても、樹幹内の密度分布を三次元的に図示した報告¹⁷⁾や、胸高部の平均密度と樹幹全体の平均密度を比較した報告¹³⁾はある。しかし、その供試本数はあまり多くなく、また遺伝的に由来の明らかな育種素材を供試し、容積密度の樹高方向変動を検討した報告は見られない。

これまでトドマツの容積密度の測定は、間伐材などの伐倒木を対象に行われてきた。しかし、伐倒木による調査は、多くの時間や労力、経費を要する。また、検定林や採種園では、その本来の目的の維持

のため、材質評価を行う調査木の採取できるサンプル数やその選抜に制限がある。そこで立木状態で簡易的に容積密度を推定できる手法として、ピロディンやレジストグラフを用いた方法が検討されている。ピロディン (スイス連邦, PROCEQ 社製) は、電柱の腐朽度の検査用として開発されたもので、6 ジュールの力でストライカーピンを木材に打ち込み、その打ち込み深さを計測する機器である。これまで、ピロディンの打ち込み深さ (以下、「ピロディン値」とする。) と容積密度との関係を報告した例は多い¹⁸⁻²³⁾。日本においても、スギ^{20, 21)}、ヒノキ²²⁾やカラマツ²³⁾においてピロディン値と容積密度との関係を調べ、立木状態で非破壊的な方法として、その有用性が報告されている。しかし、トドマツを対象にピロディン値と容積密度との関係を検討した報告はない。

そこで本研究では、北海道江別市にある独立行政法人森林総合研究所林木育種センター北海道育種場 (以下、「北海道育種場」とする。) 内のトドマツ交配園に植栽されていたトドマツ精英樹と育種母材 (以下、「トドマツ精英樹等」とする。) を用いて、トドマツにおける樹幹全体の容積密度を評価する最適部位の検討を行うために、容積密度の樹高方向の変動を調べた。また、北海道育種場内の育種素材保存園に植栽されていたトドマツ精英樹等クローンを用いて、ピロディンによる容積密度の非破壊的評価法の有効性を検討するため、立木状態でピロディン値を、伐倒後に採取した円板より容積密度を測定し、その関係を調査した。

2. 材料と方法

2.1 トドマツ精英樹等クローンにおける容積密度の樹高方向の変動

樹高方向の容積密度の測定には、北海道育種場内にあるトドマツ交配園から供試木を得た。同交配園は1962年春、平坦地に単木混交植栽で設定された。2004年8月に供試木を伐倒し、7クローン18本の材料を得た。伐倒時の林齢は43年生であった。供試木の概要を Table 1 に示す。伐倒後、材長1mの丸太を地際から順に採取し、最大で13番玉まで丸太を得た。採取した丸太から端の部分を除いた節などの欠点のない部分より、厚さ約10cmの円板を採取した。円板より髓を含むストリップを切り出し、ビニール袋で密閉し測定まで-15℃の冷凍庫で保存した。なお、腐朽や節、あてなどの欠点を除いた計170個のストリップを容積密度の測定に供した。容積密度の測定前に、髓から2方向の年輪幅を測定した。容積

Table 1. Descriptions of sample trees from a seed orchard.

Clone name	kind of clone	Tree No.	$h^{(b)}$ (m)	DBH ^(c) (cm)	Number of log	Number of disk
Esashi101	Plus tree	1	14.7	33.0	13	9
		2	14.2	36.0	13	11
		3	15.2	30.0	13	10
Gamushi103	Plus tree	1	14.2	20.0	11	8
		2	12.9	28.0	10	5
Nayoro103	Plus tree	1	15.3	27.0	13	13
		2	13.1	27.0	10	10
		3	15.1	24.0	13	11
Rikubetsu102	Plus tree	1	14.4	33.0	12	8
		2	13.0	30.0	11	10
Shimokawa125	Plus tree	1	14.3	27.0	11	8
		2	14.7	24.0	11	9
		3	14.4	26.0	12	10
Akan101hi1	Breeding material ^(a)	1	11.5	17.0	8	6
		2	11.5	18.0	8	6
Hiroshima102	Breeding material	1	13.4	20.0	11	11
		2	15.8	24.0	13	13
		3	15.1	19.0	12	12

Legend: ^(a): grafting clone but not plus tree, ^(b): tree height, ^(c): diameter at 1.3 m above ground.

密度の測定に用いた試験体は髄から5年輪ごとにノミを用いて作成した。容積密度は数式 $Bd = W_0/V_g \times 1000$ により算出した。ここで Bd は容積密度 (kg/m^3), W_0 は全乾重量 (g), V_g は生材体積 (cm^3) である。生材体積は浮力法の定法に従って測定した。21年輪以降の容積密度は、まとめて一つの試験体として測定した。また円板全体の容積密度を評価するため、各試験体の面積を加重した容積密度（以下、「平均容積密度」とする。）を数式 $\text{Mean } Bd = \sum Bd_n \times A_n / \sum A_n$ より算出した。ここで $\text{Mean } Bd$ は平均容積密度 (kg/m^3), Bd_n は n 番目の試験体の容積密度, A_n は n 番目の試験体の面積 (cm^2) である。各試験体の面積は、髄からの距離を半径とする同心円を仮定して算出した。なお、1番丸太を地上高1m部位（地際から1mまでの部位）、2番丸太を地上高2m部位（地際からの高さ1mから2mまでの部位）と、各丸太を各地上高部位とし、それぞれの丸太から採取した円板より得た測定値を各地上高部位の測定値として解析に用いた。

2.2 立木状態のピロディン値と容積密度との関係

供試木は、北海道育種場内のトドマツ育種素材保存園より得た。同保存園は、1961年春と秋に、平坦地にクローンごとの列状植栽で設定された。伐倒時の林齢は44年生であった。伐倒前の2004年8月に、ピロディン値を測定した。測定は胸高部位付近において4方向で行い、その平均値を個体値とした。測

定は最初に樹皮の上から行い、その後、最初の測定付近の樹皮を剥皮し行った。供試木は2004年8月～9月にかけて伐倒した。伐倒木の胸高部位付近より厚さ約10cmの円板を採取し2.1節と同様な方法で年輪幅と容積密度を測定し、平均容積密度を算出した。円板から切り出したストリップより2方向の樹皮の厚さをデジタルノギスで測定し、その平均値を樹皮厚とした。樹皮が剥がれてしまい1方向しか測定できなかった個体は、その測定値を用いた。なお、あてなどの欠点があった個体を除いた44クローン135個体（各クローンあたり1～8個体）を容積密度の測定に供した。また、樹皮がすでに剥がれてしまっていた個体が10個体（すべて別クローン）あり、樹皮厚の解析に用いた個体は43クローン125個体であった。

2.3 統計解析

本研究で行った分散分析および回帰分析は、農林水産研究計算・情報センターの科学技術計算システムの統計解析ソフト SAS を用いて行った。

3. 結果と考察

3.1 樹高方向におけるトドマツ精英樹等クローンの平均容積密度の変動

3.1.1 樹高方向の平均容積密度の変動

各個体の平均容積密度の樹高方向の変動を Fig. 1 に示す。同一クローン内における各個体の平均容積

Fig. 1. Longitudinal changes of mean Bd and density ratio for individuals.

Legend: ■ : tree No. 1, ○ : tree No. 2, ▲ : tree No. 3, Bd : basic density.

Note: Solid lines show the longitudinal changes of mean Bd . Broken lines show the longitudinal changes of density ratio.

密度の変動パターンは、おおむね同様の傾向を示した。しかし、その変動パターンはクローンにより異なっていた。本研究で用いた供試材料では、地際に

近い部分から地上高が高くなるにつれて減少するが、地上高4~8m部位付近において増加し、梢頂付近で再び減少するタイプ(枝幸101号、陸別102号、

下川125号, 広島102号), 地際からほぼ一定で推移し梢頂付近で減少するタイプ(名寄103号), 地上高が高くなるにつれて増加し梢頂付近において減少するタイプ(俄虫103号, 阿寒101比1号)に分類できると考えられる。トドマツ精英樹クローンの容積密度の評価は, これまで胸高部位付近より円板を採取し行われてきた⁵⁻⁹⁾。そこで, 胸高部位を含む地上高2m部位の平均容積密度を1として他の地上高部位の平均容積密度を相対値に変換し(この値を以下, 「密度比」とする。), その樹高方向の変動もFig. 1に示す。なお, 陸別102号のNo. 2(■)の個体は, 地上高2m部位の平均容積密度を測定できなかったため図示していない。密度比の変動パターンも平均容積密度と同様に, 同一クローン内の各個体はほぼ同様の傾向を示したが, クローン間で異なっていると考えられる。しかし, ほとんどの地上高部位において密度比が0.9~1.1の間にあり, トドマツにおける同様の報告¹³⁾に比べやや大きな値を示したが, 胸高部位を含む地上高2m部位と他の地上高部位との平均容積密度の差は小さいと考えられる。

つぎに, 分割した各年輪部位の容積密度と年輪幅の樹高方向の変動をFig. 2およびFig. 3に示す。Fig. 2に名寄103号の3個体を, Fig. 3に広島102号の3個体を示す。名寄103号と広島102号は, 供試した個体数が多く, Fig. 1に示した平均容積密度の樹高方向の変動パターンが異なると考えられたクローンである。各年輪部位の容積密度の樹高方向の変動において, これら2クローン間の共通した特徴として, 各地上高部位において1~5年輪部位で低い容積密度を示し, 11~15年輪部位あるいは16~20年輪部位で高い容積密度を示す傾向にあった。また, 6~10年輪部位あるいは21年輪以降の年輪部位の容積密度は, その中間の値を示す傾向にあった。この傾向は, 他の5クローンの各個体においても共通していた。このように各年輪部位の容積密度の順位の変動は, 地上高間において小さいと考えられる。また, 分割した各年輪部位における年輪幅の樹高方向の変動は, 名寄103号で11~15年輪部位および16~20年輪部位が, 広島102号で6~10年輪部位および11~15年輪部位がそれぞれ広い年輪幅を示す傾向にあった。また両クローンとも, 21年輪以降の年輪部位において狭い年輪幅を示す傾向にあった。

Fig. 2およびFig. 3より, 各年輪部位の容積密度の順位の変動は地上高間において小さいと考えられたが, 各年輪部位の容積密度の樹高方向の変動パターンは, Fig. 1で示した平均容積密度の変動パターンと比べ, 年輪部位によって異なる傾向を示した。

そこで, 各年輪部位の容積密度が平均容積密度に対してあたえる影響を明らかにするため, 地上高部位毎に各年輪部位の容積密度と平均容積密度との相関係数を求め, その変動をFig. 4に示す。各地上高部位において辺縁に近い年輪部分で高い相関係数を示す傾向にあった。特に各地上高部位において21年輪以降の部位は相関係数が高く, 平均容積密度に対する影響が大きいと推察された。また, Fig. 3で示した広島102号のNo. 3における地上高1mおよび2m部位では, 他の地上高部位とは異なり, 1~5年輪部位の容積密度が高かった。その原因として, この部位の年輪幅が他の地上高部位と比べ狭かったことが考えられる。このように, 個々の年輪部位において年輪幅の大きさが容積密度に影響を与えている可能性が考えられた。そこで各年輪部位の容積密度に対する年輪幅の影響を明らかにするため, 地上高部位毎に各年輪部位の容積密度と年輪幅の相関係数を求めた。その結果, 相関係数を求めた全44個の年輪部位中35個の年輪部位において統計的に有意な相関関係が認められなかった。また, 有意な関係が認められた9個の年輪部位(2個が1%水準, 7個が5%水準であった。)においても相関係数は低かった。このため, 個々の年輪部位において容積密度に対する年輪幅の影響があると考えられたが, ほとんどの相関係数が低かったことからトドマツの樹幹全体における容積密度に対する年輪幅の影響は小さいと考えられる。

3.1.2 樹幹全体の平均容積密度を示す地上高部位の検討

前節の結果から, 平均容積密度の樹高方向の変動パターンはクローン間で異なると考えられた。そこで, 平均容積密度に対するクローンと地上高の影響を調べるため, 以下の式(1)に示した線型モデルを仮定して分散分析を行った。

$$y_{ijk} = \mu + C_k + H_j + (CH)_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

ここで y_{ijk} はクローン k の個体 i における地上高 j の測定値, μ は全平均, C_k はクローン k の効果, H_j は地上高 j の効果, $(CH)_{jk}$ はクローン k における地上高 j の効果, ε_{ijk} は誤差である。その結果をTable 2に示す。クローン間において1%水準で, 地上高間において5%水準で有意差が認められた。クローンと地上高の交互作用において有意差は認められなかった。分散分析の結果から, トドマツ精英樹等クローンにおける平均容積密度は, クローン間, 地上高間で異なり, 各地上高部位におけるクローン間差およびその順位の変動が小さいと考えられる。トドマツでは円板を採取する地上高部位を統一すること

Nayoro103

Tree No. 1

Tree No. 2

Tree No. 3

Fig. 2. Longitudinal changes of Bd and Arw of each specimen split into strips of 5 annual rings each in Nayoro 103.

Legend: ○ : specimen of 1-5 annual ring numbers from the pith, △ : specimen of 6-10 annual ring numbers from the pith, ● : specimen of 11-15 annual ring numbers from the pith, ◇ : specimen of 16-20 annual ring numbers from the pith, ▲ : specimen of 21-annual ring numbers from the pith, Bd : basic density, Arw : annual ring width.

により、平均容積密度の遺伝的違いを評価できると考えられる。また、 F 値は地上高に比べてクローンの方が大きかった。クローン間の平均容積密度の差が地上高間の差に比べて大きいと考えられる。スギ精英樹クローンにおける同様の報告¹⁴⁾では、地上高間において0.1%水準で有意な差が認められている。この結果から、トドマツはスギに比べ樹高方向の平均容積密度の変動が小さいと考えられる。

Fig. 2 および Fig. 3 より、各年輪部位の容積密度

の樹高方向の変動パターンは、Fig. 1 で示した平均容積密度の変動パターンと比べ、年輪部位によって異なる傾向を示した。そこで、各年輪部位の容積密度に対する地上高とクローンの影響を調べるため、式(1)で示した線型モデルを仮定し分散分析を行った。その結果を Table 3 に示す。すべての年輪部位においてクローン間に1%水準で有意差が認められた。また地上高間では、21年輪以降の部位において有意差が認められなかったが、その他の各年輪部位

Hiroshima102

Tree No. 1

Tree No. 2

Tree No. 3

Fig. 3. Longitudinal changes of Bd and Arw of each specimen split into strips of 5 annual rings each in Hiroshima 103.

Legend: See Fig. 2.

Fig. 4. Longitudinal changes of correlation coefficient between mean Bd and Bd of each specimen.

Legend: ○, △, ●, ◇, ▲: See Fig. 2, Bd: basic density.

Table 2. The result from ANOVA of mean Bd for both clone and height.

Factor	df ^(a)	SS ^(b)	MS ^(c)	F-value
Clone	6	23971.23	3995.20	20.76**
Height	12	4980.33	415.03	2.16**
Clone × Height	63	15103.99	239.75	1.25 n.s.
Error	97	18667.67	192.45	

Legend: ^(a): degrees of freedom, ^(b): sum of squares, ^(c): mean square, **: significant at 1% level, *: significant at 5% level, n.s.: not significant, Bd: basic density.

において1%水準で有意差が認められた。クローンと地上高の交互作用は、すべての年輪部位で有意差は認められなかった。各年輪部位の容積密度におけ

Table 3. The result from ANOVA of each specimen for both clone and height.

specimen ^(a) (Annual ring numbers from the pith)	Factor		
	Clone	Height	Clone × Height
1-5	15.52**	2.68**	0.93 n.s.
6-10	12.40**	3.33**	0.85 n.s.
11-15	11.83**	3.20**	0.94 n.s.
16-20	6.57**	3.12**	0.84 n.s.
21-	11.28**	1.29 n.s.	0.87 n.s.

Legend: ^(a): specimen which split a strip into 5 annual ring numbers from the pith, **: significant at 1% level, n.s.: not significant.

る分散分析の結果は、平均容積密度の結果とほぼ同様の結果であった。また F 値の大きさから、平均容積密度と同様に各年輪部位の容積密度においても、地上高間の差よりクローン間の差の方が大きいと考えられる。

個体間、クローン間の平均容積密度の比較を行うには、樹幹全体の平均容積密度を代表する地上高部位を明らかにする必要がある。樹幹全体の平均値と各地上高測定値との相関係数を求め、最も相関係数の高い地上高部位がその個体の樹幹全体の平均容積密度を精度よく推定できる最適部位であると考えられる。そこで各個体の樹幹全体の平均容積密度の平均値と各地上高部位の平均容積密度の相関係数を求め、その結果を Fig. 5 に示す。地上高 1~11 m 部位において 1% 水準で、12 m 部位において 5% 水準で有意な正の相関関係が認められた。地上高 13 m 部位では有意な相関関係は認められなかった。最も相関係数が高かった地上高部位は 7 m 部位であったが、地上高 2 m 部位および 3 m 部位における相関係数はそれぞれ 0.836、0.832 と高い値を示し、2 番

Fig. 5. Longitudinal changes of correlation coefficient between mean Bd at each height and its mean in the whole tree.

Legend: Bd: basic density.

目、3 番目に高かった。これらの結果より、トドマツでは、胸高部位を含む地際からの高さ 1~3 m の部位においてクローンや個体の平均容積密度の比較を行う最適な部位であると考えられる。

またトドマツの容積密度は、これまで胸高部位付近における測定結果が多く報告されている²⁻⁷⁾。そこで、樹幹全体の容積密度を推定するのに最適な年輪部位を明らかにするため、樹幹全体の平均値と地上高 2 m 部位における各年輪部位の容積密度との関係を Fig. 6 に示す。辺縁部の年輪部位ほど高い相関係数を示し、21 年輪以降の部位との相関係数は 0.814 (1% 水準で有意) と高い値を示した。この結果から、胸高部位の辺縁に近い 21 年輪以降の部位の容積密度を測定することにより、樹幹全体の平均容積密度の平均値を推定できる可能性が示唆された。

3.2 立木状態のピロディン値と平均容積密度との関係

3.2.1 トドマツ精英樹等 44 クローンの特性

供試したトドマツ精英樹等 44 クローン 135 本の樹高、胸高直径、樹皮の上から測定したピロディン値 (以下、「樹皮付きピロディン値」という。)、樹皮を剥皮し測定したピロディン値 (以下、「ピロディン値」という。)、平均容積密度、年輪幅、樹皮厚の平均値、最大値、最小値、変動係数を Table 4 に示す。また、各測定形質についてクローンを要因とした分散分析を行った結果も Table 4 に示す。すべての形質において 1% 水準で有意なクローン間差が認められた。 F 値は平均容積密度が最も高く、以下、樹皮付きピロディン値、ピロディン値、樹高、年輪幅、胸高直径、樹皮厚の順で高かった。平均容積密度は、樹高

Fig. 6. Relationship between Bd of each specimen in the region 1-2 m above ground and mean of mean Bd in the whole tree.

Legend: ○, △, ●, ◇, ▲: See Fig. 2, Bd: basic density, **: significant at 1% level, *: significant at 5% level, n.s.: not significant.

Table 4. Descriptions of sample trees from a clonal archive.

Factor		Avg.	Max.	Min.	CV (%) ^(g)	F-value
H ^(a)	(m)	13.2	18.2	7.0	17.95	4.56**
DBH ^(b)	(cm)	18.6	31.0	8.0	25.86	2.73**
Pp ^(c)	(mm)	21.4	27.5	15.5	10.79	5.12**
Pp with bark	(mm)	26.3	33.9	19.3	11.02	5.42**
Mean Bd ^(d)	(kg/m ³)	334	418	277	7.13	8.09**
Arw ^(e)	(mm)	2.56	4.06	1.02	22.35	2.83**
Bt ^(f)	(mm)	4.83	8.18	2.50	22.98	2.07**

Legend: ^(a): tree height, ^(b): diameter at 1.3 m above ground, ^(c): Pilodyn penetration, ^(d): basic density, ^(e): annual ring width, ^(f): bark thickness, ^(g): coefficient of variation, **: significant at 1% level.

や胸高直径といった成長形質と比べて, より遺伝的要因の寄与が高い形質であると考えられる。

3.2.2 ピロディン値と平均容積密度の関係

樹皮付きピロディン値, ピロディン値と平均容積密度との関係を Fig. 7 に示す。他の樹種における報告¹⁸⁻²³⁾と同様に, 樹皮付きピロディン値, ピロディン値とも 1%水準で有意な負の相関関係が認められた。ピロディン値を独立変数 (x), 平均容積密度を従属変数 (y) とした一次回帰式は, 樹皮付きピロディン値で $y = -5.81x + 486.55$, ピロディン値で $y = -8.43x + 514.41$ であった。樹皮付きピロディン値の方が, ピロディン値に比べて相関係数が低かった要因の一つとして, 樹皮厚の存在が考えられる。Table 4 より, 平均値における樹皮付きピロディン値とピロディン値の差と樹皮厚は, ほぼ同程度であった。また, 樹皮厚は変動係数が大きく, 分散分析の結果からクローン間差はあるものの, F 値が最も低かったことから, 他の形質に比べ個体間のバラツ

Fig. 7. Relationship between Pilodyn penetration both with and without bark and mean Bd.

Legend: Bd: basic density, Pp: Pilodyn penetration, **: significant at 1% level.

キが大きい形質であると考えられる。また, 樹皮付きでピロディン値を測定する際, 樹皮表面の凹凸はピロディン値に影響を与えられられる。しかし, トドマツの樹皮表面は比較的滑らか²⁴⁾であるので, 樹皮表面の形状が両ピロディン値の差にあたえる影響は小さいと考えられる。以上より, トドマツの樹皮厚の変異が個体間で大きいことの影響が, ピロディン値に比べて樹皮付きピロディン値の方が相関係数の低かった要因の一つとして考えられる。今回の調査で供試したトドマツ精英樹等クローンで, 1 クローンあたり 3 本以上調査したクローンは 27 クローンあり, それらのクローンの樹皮付きピロディン値, ピロディン値, 平均容積密度の平均値を求め, その関係を Fig. 8 に示す。個体値と同様に, 樹皮付きピロディン値, ピロディン値とも, 1%水準で有意な負の相関関係が認められた。また, 相関係数は個体値より高かった。ピロディン値を独立変数 (x), 平均容積密度を従属変数 (y) とした一次回帰式は, 樹皮付きピロディン値で $y = -6.47x + 505.94$, ピロディン値で $y = -8.81x + 523.83$ であった。両ピロディン値とも, 個体値およびクローン平均値において有意な負の相関関係が認められたが, 特に個体値において平均容積密度の値を正確に推定することは難しいと考えられる。

針葉樹を構造材として利用する際, 材のめり込み, 釘の保持力を考慮すれば, 容積密度は平均値 320 kg/m³, 最低 300 kg/m³ 以上が好ましいと言われている²⁵⁾。この 300 kg/m³ 以上を一つの選抜基準値とした場合, 今回供試した材料において, 樹皮付きピロディン値では 27.5 mm 以下, ピロディン値では 23.0

Fig. 8. Relationship between clonal mean value of Pilodyn penetration both with and without bark and that of mean Bd.

Legend: Bd: basic density, Pp: Pilodyn penetration, **: significant at 1% level.

Note: The arrows show the lower mean Bd clones.

mm以下を示した全個体で実際に測定した平均容積密度が 300 kg/m^3 を超えていた。Fig. 7で示した一次回帰式にこの値を代入し、平均容積密度を算出した結果、樹皮付きピロディン値で 327 kg/m^3 、ピロディン値で 321 kg/m^3 となった。このことから、実際に樹皮付きピロディン値およびピロディン値を用いて選抜を行う際には、選抜基準値を、安全率を見込んで若干高めに設定する必要があると考えられる。また、クローン平均値において 300 kg/m^3 以下の平均容積密度を示したクローンは3クローンあった。これら3クローンは、Fig. 8に矢印で示したクローンであり、樹皮付きピロディン値、ピロディン値とも高い値を示した。このことから、樹皮ありピロディン値およびピロディン値を用いて平均容積密度の低いクローンを特定することができ、それらを除去することで採種園の改良や体質改善に役立つと考えられる。

また、1本の測定時間を実際にストップウォッチで計測したところ、樹皮付きピロディン値は2人で45秒、ピロディン値は2人で120秒であった。遺伝的改良を行うためには、多くの個体の測定を行う必要があり、実際の検定においては、より簡便な樹皮付きピロディン値の方が、有効な指標であると考えられる。

4. 結 論

トドマツ精英樹等クローンにおける容積密度の樹高方向変動、ピロディン値と容積密度との関係を調べ、つぎの結論を得た。

- 1) トドマツ精英樹等クローンにおける平均容積密度の樹高方向の変動は、クローン毎で異なっており、いくつかのタイプに分類することができた。しかし、平均容積密度の地上高間の差、特に胸高部位を含む地際からの高さ1~2m部位と各地上高部位との差は小さいと考えられた。
- 2) 分散分析の結果から、平均容積密度はクローン間、地上高間で異なり、各地上高におけるクローン間差およびその順位の変動が小さいと考えられた。また、樹幹全体の平均値と各地上高部位における測定値の相関係数を求めたところ、ほぼすべての地上高部位で高い相関係数が認められたが、特に胸高部位を含む地際からの高さ1~3m部位において高かった。以上より、胸高部付近を含む地際からの高さ1~3mの部位において平均容積密度の遺伝的な違いを比較できると考えられた。
- 3) 樹皮ありピロディン値、ピロディン値と平均容積密度との間には、個体値およびクローン平均値と

も、有意な負の相関関係が認められた。樹皮付きピロディン値およびピロディン値を用いて選抜を行う際、その基準値を若干高めに設定することで、その値を上回る平均容積密度の高い個体を選抜することができると考えられた。また、クローン平均値を用いることで平均容積密度の低いクローンを特定することができると考えられた。両ピロディン値を比較した場合、測定の簡便さから、樹皮付きピロディン値が平均容積密度の評価に有効な指標であると考えられた。

以上より、2)の結論とあわせ、胸高部位において樹皮ありピロディン値を測定することにより、トドマツの個体およびクローンにおける平均容積密度の評価を立木状態で非破壊的に行うことができると示唆された。特に、ピロディンを用いた本方法により、平均容積密度の低いクローンを特定し、除去することで採種園の改良や体質改善に役立つと考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、林木育種協会北海道事務所と北海道育種場の職員の皆様に、ご協力をいただいた。また、林木育種センターや北海道育種場の皆様には、解析方法などに関してアドバイスを頂いた。また、本論文の審査者の方々には有益なご意見をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる。

文 献

- 1) 藤澤義武：林育研報 **15**, 31-107 (1998).
- 2) 宮島 寛：北大演報 **37** (3), 789-815 (1980).
- 3) 宮島 寛：北大演報 **38** (2), 305-321 (1981).
- 4) 宮島 寛：北大演報 **39** (2), 191-212 (1982).
- 5) 片寄 麟, 工藤 弘, 氏家政男：北大演報 **49** (2), 201-218 (1992).
- 6) Katayose, T., Ujiie, M., Kudoh, H.: *J. Jpn. For. Soc.* **74** (5), 426-430 (1992).
- 7) 工藤 弘, 片寄 麟, 氏家政男：北大演報 **50** (2), 179-205 (1993).
- 8) Kadamatsu, M., Kudoh, H., Ujiie, M.: *Res. Bull. Hokkaido Univ. For.* **51** (1), 14-20 (1994).
- 9) 飯塚和也, 織部雄一郎, 生方正俊：木材学会誌 **46** (5), 397-405 (2000).
- 10) 飯塚和也, 高倉康造, 生方正俊：木材学会誌 **47** (1), 44-51 (2001).
- 11) 加納 猛：林試研報 **134**, 141-148 (1961).
- 12) 矢幡 久, 宮島 寛, 西林寺隆, 古家宏俊, 児玉貴, 汰木達郎, 山本福寿, 久保田茂, 渡部 桂, 野

- 上寛五郎, 黒木晴輝: 九大演報 **57**, 149-173 (1987).
- 13) 藤原 健, 山下香菜, 平川泰彦: 森林総研研報 **3**(4), 341-348 (2004).
- 14) 田村 明, 高橋 誠, 飯塚和也: 日林北支論 **53**, 9-11 (2005).
- 15) 津島俊治: 大分県林業試験場県報 **16**, 1-66 (2006).
- 16) 高橋祐吉: 日林中支論 **35**, 85-88 (1987).
- 17) Hishinuma, Y., Nakata, R., Fukazawa, K.: *Res. Bull. Hokkaido Univ. For.* **49**(1), 23-35 (1992).
- 18) Cown, D. J.: *N. Z. J. For. Sci.* **8**(3), 384-391 (1978).
- 19) Taylor, F. W.: *Forest Sci.* **27**(1), 59-61 (1981).
- 20) 中田了五: 林木の育種 **212**, 15-16 (2004).
- 21) 武津英太郎, 福田陽子, 高橋 誠, 田村 明, 栗延 晋: 第117回日本森林学会大会学術講演集, 東京, 2006, L10.
- 22) 石栗 太, 榮澤純二, 齋藤康乃, 飯塚和也, 横田信三, 吉澤伸夫: 木材学会誌 **52**(6), 383-388 (2006).
- 23) 田村 明, 井城泰一, 坂本庄生, 西岡直樹, 笹島芳信, 黒沼幸樹: 北海道の林木育種 **45**(2), 1-3 (2002).
- 24) 林 将之: “樹皮ハンドブック”, 文一総合出版, 東京, 2006, p. 18.
- 25) 宮島 寛: 北大演報 **42**(4), 1089-1115 (1985).