

論文 (Original article)

穿孔抵抗による材内密度分布の推定の試み

山下 香菜^{1)*}・長尾 博文²⁾・加藤 英雄²⁾・井道 裕史²⁾

Estimating variations in wood density by drilling resistance

YAMASHITA Kana^{1)*}, NAGAO Hirofumi²⁾, KATO Hideo²⁾ and IDO Hirofumi²⁾

Abstract

To investigate the possibility of estimating the wood density from drilling resistance, drilling resistance data obtained by resistograph[®] were compared with wood density on small clear specimens of 27 hardwood species (air-dried density:256-995kg/m³) and Sugi (air-dried density:314-476kg/m³). There were significant relationships between the drilling resistance averages and the wood densities both in the green wood and in the air-dried wood, and equations for estimating wood density from drilling resistance were derived.

To investigate the possibility of estimating the density variation inside logs or structural members, the density estimated from the equations were compared with the density measured by soft X-ray densitometry on diametrical Sugi samples. In the green wood, the drilling resistance and the estimated densities increased with drilling depth much more than did the measured density variation, suggesting that it would be difficult to accurately estimate the density variation inside living trees and green logs. In the air-dried wood, however, the estimated density showed the same variation as the measured density, indicating that it could be possible to estimate the wood density variation. It would be possible to relatively compare the density variation patterns among rings, while estimating the density values of early wood and late wood separately would be difficult.

Key words : drilling resistance, resistograph[®], wood density, nondestructive testing, hardwood, sugi

要旨

穿孔抵抗による木材の密度推定の可能性を検討するために、国内で採取した広葉樹 27 樹種（気乾密度 256 ～ 995kg/m³）とスギ（気乾密度 314 ～ 476kg/m³）の小試験体を用いて、レジストグラフ[®]による穿孔抵抗の測定を行い、その出力値と密度との関係を調べた。出力値の平均値と密度との間には、生材と気乾材ともに有意な相関関係が認められ、出力値の平均値からの密度の推定式を作成した。丸太横断面の半径方向における木材密度の分布の推定可能性を検討するために、柎目板試験体を用いて穿孔抵抗の測定を行い、推定式による推定密度と実測密度を比較した。生材では、穿孔深さに伴って穿孔抵抗が増加し、推定密度が実測密度よりも大きくなることから、穿孔抵抗から立木や生材丸太で密度分布を推定することは難しいと考えられた。一方、スギおよび低・中密度の広葉樹の気乾材では穿孔深さに伴う穿孔抵抗の増加はみられず、密度分布の推定は可能であると考えられた。年輪内密度変化については、早材密度や晩材密度を定量的に推定することには限界があるが、変化パターンを相対的に比較することは可能であると考えられた。

キーワード：穿孔抵抗、レジストグラフ[®]、木材密度、非破壊的評価、広葉樹、スギ

1. はじめに

木材の密度は硬さや強度などに影響を及ぼす重要な材質指標の一つである。また、近年急増している大型木質構造の保守・管理を目的として、建築・土木部材などの劣化の程度や強度を非破壊的に評価することが求められており、木材内部における密度分布を評価することが要望されている。そこで、立木、丸太、製材の材質や建築部材の劣化度を非破壊的に評価できるような、簡便かつ精度の高い密度測定手法を確立するこ

とが求められている。

レジストグラフ[®](Rinn, 1989)は、最大幅が 3mm の細い金属棒（ニードル）を対象物へねじ込む際にニードルが受ける回転方向の抵抗（以下、穿孔抵抗とする）を測定する器具で、樹幹内部の空洞や木製電柱、建築部材の内部腐朽の検出等に利用されており、携帯に便利な形状になっている。その長所は、1) 穿孔が小さい、2) 数十 cm の深さまで測定可能である、3) 位置分解能が高い、すなわち、穿孔深さに応じた部位の情報が得

原稿受付：平成 17 年 9 月 7 日 Received Sep. 7, 2005 原稿受理：平成 17 年 12 月 21 日 Accepted Dec. 21, 2005

* 森林総合研究所木材特性研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 Department of wood properties, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: zaikana@ffpri.affrc.go.jp

1) 森林総合研究所木材特性研究領域 Department of wood properties, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI)

2) 森林総合研究所構造利用研究領域 Department of wood engineering, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI)

られる、などである。また、年輪内密度変化が検出される (Rinn *et al.*, 1996) など、高い精度で密度の測定が可能となることも期待される。穿孔抵抗と密度との関係については、生材 (Costello and Quarles, 1999)、気乾材 (Rinn *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2003) やボード (Winistorfer *et al.*, 1995) で検討されてきた。しかしながら、これらは限られた樹種や木質材料が対象であり、より一般的な密度の定量化を導いた報告、あるいは本邦産樹種への適用を検討した報告はない。

そこで、本研究では国内で採取した広葉樹とスギの小試験体を用いて、生材および気乾材での穿孔抵抗の平均値と密度との関係を明らかにし、穿孔抵抗から密度を導く推定式を求めた。次に、柁目板試験体を用いて、穿孔抵抗から得られた推定密度と実測密度とを比

較し、立木、丸太、建築部材の密度分布をレジストグラフ[®]によって推定する場合の精度や測定上の問題点を検討した。

2. 試料と方法

2.1 小試験体の穿孔抵抗と密度の測定

広葉樹 27 樹種及びスギの小試験体 (T30mm × R30mm × L40mm) を供試材料とした (Table 1)。あらかじめ、すべての試験体を恒温恒湿室 (20℃, 65%RH) にて調湿し、恒量に達した後、体積と質量を測定して気乾密度 (以下、ブロック気乾密度) を求めた。続いて、気乾状態において穿孔抵抗を測定し、その後、試験体を長期間水中に浸漬し、飽水 (生材) 状態にした後、再度穿孔抵抗を測定した。

Table 1. 供試樹種の密度とレジストグラフ出力値平均

Density and resistance average of each species.

種名 (D): 散孔材 (R): 環孔材 (P): 放射孔材	Species name	試験 体数 Number of samples	密度 Density (kg/m ³)	出力値平均 Resistance avg.			
				レンジ1 Range1		レンジ2 Range2	
				生材 Green wood	気乾材 Air-dried wood	生材 Green wood	気乾材 Air-dried wood
(R) キリ	<i>Paulownia tomentosa</i>	10	284	0.32	0.25	0.06	-
(D) ポプラ	<i>Populus spp.</i>	6	380	0.60	0.42	0.08	0.11
(D) アカメガシワ	<i>Mallotus japonicus</i>	11	425	0.71	0.71	0.09	0.11
(D) ギンドロ	<i>Populus alba</i>	10	436	0.82	0.75	0.13	0.13
(D) オオバボダイジュ	<i>Tilia maximowicziana</i>	4	444	0.65	0.38	0.11	-
(D) トチノキ	<i>Aesculus turbinata</i>	14	467	1.01	1.36	0.21	0.32
(D) コブシ	<i>Magnolia kobus</i>	4	483	1.14	1.42	0.17	0.38
(D) ケヤマハンノキ	<i>Alnus hirsuta</i>	4	522	1.36	1.05	0.31	-
(D) カツラ	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	12	546	1.05	1.44	0.22	-
(R) エノキ	<i>Celtis sinensis</i> var. <i>japonica</i>	13	566	1.45	1.74	0.33	-
(D) ミズバイ	<i>Symplocos glauca</i>	2	582	1.29	2.38	0.25	0.81
(D) シラカバ	<i>Betula platyphylla</i> var. <i>japonica</i>	4	585	1.49	-	0.39	0.86
(R) スダジイ	<i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i>	11	600	1.09	1.28	0.21	0.34
(R) ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i>	16	622	1.60	1.88	0.43	-
(D) エドヒガンザクラ	<i>Prunus pendula</i> f. <i>ascendens</i>	8	636	1.95	1.92	0.47	-
(D) トキワガキ	<i>Diospyros morrisiana</i>	3	646	1.62	2.65	0.44	0.90
(D) オオシマザクラ	<i>Prunus lamnesiana</i> var. <i>speciosa</i>	10	649	1.84	2.16	0.53	-
(D) タイワンフウ	<i>Liquidamber formosana</i>	7	652	1.61	2.35	0.40	0.86
(D) イタヤカエデ	<i>Acer mono</i>	4	691	2.35	3.19	0.68	0.97
(D) タブノキ	<i>Machilus thunbergii</i>	4	705	1.65	1.87	0.45	0.56
(R) ヤチダモ	<i>Fraxinus mandshurica</i> var. <i>japonica</i>	4	733	2.81	3.04**	0.88	1.09
(D) モッコク	<i>Ternstroemia gymnanthera</i>	3	808	2.72	3.46	0.88	1.50
(R) ハルニレ	<i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	4	829	3.22	*	1.10	1.38
(R) コナラ	<i>Quercus serrata</i>	6	847	3.05	3.46**	1.14	1.30
(D) イスノキ	<i>Distylium racemosum</i>	2	943	2.66	2.83	0.90	1.03
(P) アラカシ	<i>Quercus glauca</i>	14	953	*	*	1.32	1.76
(P) ウバメガシ	<i>Quercus phillyraeoides</i>	4	980	2.30	3.44**	0.74	1.48
広葉樹最大値	Hardwood Max.		995	3.42	3.64	1.53	2.72
広葉樹最小値	Hardwood Min.		256	0.18	0.06	0.04	0.07
スギ	<i>Cryptomeria japonica</i>	40	381	0.71	***	-	-
スギ最大値	Max.		476	0.91	***	-	-
スギ最小値	Min.		314	0.32	***	-	-

*: 出力値最大値が 4。The maximum resistance was 4.

** : 最大値が 4 以上となった試験体 1 個を除く。One specimen of which the maximum resistance was 4 was excluded.

***: 出力値最小値が 0。The minimum resistance was 0.

-: データなし。No data.

Note: 小試験体で測定した。The data was obtained from small clear specimens.

穿孔抵抗の測定にはレジストグラフ (IML-RESI F300, Rinntech 製) を用い、木表から木裏へ半径方向に測定した。ニードル (Rinntech 製) は、主軸の直径が 1.5mm、先端がバチ状でその最大幅は 3mm である。測定後、チャート紙に出力された出力値プロファイルを、スキャナー (GT-9800F, EPSON 製) で画像データとし、ソフトウェア Digimatic (スリースカンパニー製) を用いて測長した。チャート紙の出力範囲は 0 ~ 4 目盛であるが、その 1 目盛を出力値 1 とした。また、4 あるいは 0 の振り切れ値は解析データから除外した。なお、穿孔抵抗の測定は、すべての試験体についてレンジ 1 (softwood) で行い、一部の試験体についてはレンジ 2 (hardwood) でも行った。

2.2 柁目板試験体の穿孔抵抗と密度の測定

スギ丸太における材内密度分布の推定の可能性を検討するため、柁目板を用いて、穿孔抵抗および密度の半径方向の変化を測定した (Fig. 1)。供試材には高知産のスギ生材丸太 20 本を用いた。丸太の平均直径は 23.8cm (20.7 ~ 26.7cm)、年輪数の平均値は 34 (26 ~ 41)、年輪幅の平均値は 3.13mm (0.11 ~ 13.72mm) であった。これらの丸太から、髄を通る柁目板試験体 (T 方向 30mm、L 方向 150mm) を切り出した。穿孔抵抗は、生材状態および気乾状態 (20℃, 65%RH) で測定した。レジストグラフのレンジは 1 とし、剥皮した丸太表面 - 髄 - 丸太表面の半径方向に測定し、測定後、小試験体と同様の方法で出力値プロファイルのデジタル化を行った。密度の測定は、ブロックの容積密度数 (以下、ブロック容積密度数) と軟 X 線デンシトメトリによる気乾密度 (以下、実測密度) の 2 通りで測定した。ブロック容積密度数は、柁目板試験体から L 方向厚さ 20mm の試験体を採取し、半径方向 20mm のブロックに分割して、浮力法で測定した体積と全乾質量から求めた。実測密度は、柁目板試験体から L 方向厚さ 5mm の試験片を採取し、これを恒温恒湿下 (20℃, 65%RH) において、軟 X 線を照射

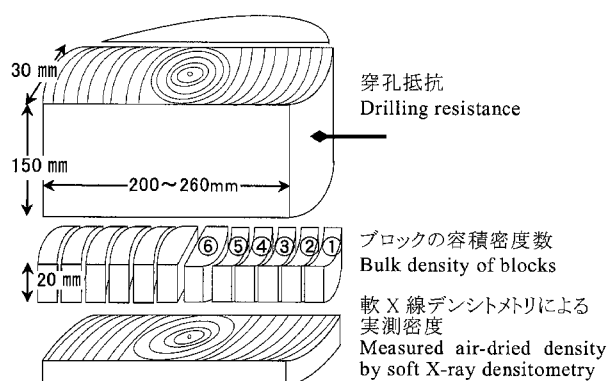


Fig. 1. 柁目板からの試験体の採取方法。

Sampling method from diametrical strip.

(20kVp, 22mA, 3.5min.) し、現像した後、ネガの光学濃度の半径方向の変化を測定 (Dendro2003, Walesch 社) し、試験片と一緒に撮影した標準吸収帯の光学濃度から得た検量線によって光学濃度から木材の密度に変換した。また、スギ以外のヒノキ、ケヤキ、ギンドロなど数種の針葉樹と広葉樹を含む樹種についても、丸太表面から髄までの柁目板試験体を用いて、気乾状態 (20℃, 65%RH) における穿孔抵抗と軟 X 線デンシトメトリによる気乾密度 (実測密度) の測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 小試験体における穿孔抵抗の平均値と気乾密度との関係

生材および気乾材の小試験体を用いて測定したレジストグラフの出力値プロファイルの例を Fig. 2 に示す。広葉樹材 (ケヤキ、モッコク) では、出力値は穿孔開始直後から増加した (増加区間) 後、安定に達する (安定区間) 傾向があり、増加区間は高密度樹種でより長い傾向を示した。一方、スギでは増加区間が短かったが、これは密度が低いことが原因と考えられた。そこで、増加区間を樹種毎に比較するために、穿孔深さを x 、出力値を y とし対数関数 $y = a \log x + b$ をあてはめ、あてはめ曲線の接線の傾きを微分式 $dy/dx = a/x$ によって求めた。次に、Fig. 3a に示すように増加区間と安定区間の境界を接線の傾きが 1 となる点と仮定し、出力値が安定に達する穿孔深さ D_a を求めた。その結果、Fig. 3b, c に示すように、密度と D_a との関係においては正の相関 ($P < 0.001$) が認められた。したがって、増加区間の長さは木材の密度に依存し、密度が高い樹種では増加区間が長いことがわかった。また、出力値を樹種間や生材と気乾材間で比較し、出力値と密度との関係を調べるために、試験体毎に安定区間における出力値の平均値を求め、これを「レジストグラフ出力値平均」とした。

Table 1 に生材および気乾材のレジストグラフ出力値平均とブロック気乾密度の樹種毎の平均値を示す。生材の出力値平均と比べて、総じて気乾材の出力値平均の方が大きかった。これは、ドリルの穿孔抵抗は含水率 5 ~ 20% で最大値となり、それ以上では減少し、繊維飽和点以上ではほぼ一定値となる (小松, 1978) のと同様の傾向を示したものと考えられる。ただし、キリやポプラなどのように一部の密度の低い樹種では生材の出力値が気乾材の出力値より大きいものがみられた。

小試験体におけるレジストグラフ出力値平均とブロック気乾密度との関係を生材、気乾材とに分けて Fig. 4 に示す。両者の関係から得られた回帰式を Table 2 に示す。レジストグラフ出力値平均は、生材、気乾材ともにブロック気乾密度との間に正の相関関係が認められ、累乗式あるいは直線式を用いることによっ

て密度を推定できることがわかった。ただし、密度が高いウバメガシ、イスノキ、タブノキ (Fig. 4, 円内) は、同じく密度が高いアラカシ、コナラ、モッコク、ヤチダモ、イタヤカエデに比べて出力値が小さかった (Table 1)。これについては、密度と穿孔抵抗の関係において、ドリルの穿孔抵抗は、密度と正の相関があるものの (小松, 1975)、南洋材では毛羽立ちやすい性質や交錯木理が影響することによって密度に対して穿孔抵抗が大きい樹種や小さい樹種がある (小松, 1977) という報告や、レジストグラフ出力値と密度との関係には樹種の組織構造が影響を及ぼす (Eckstein and Saß,

1994) という報告があり、これらのことが原因となっている可能性がある。このため、密度をより高精度で推定する場合には、対象とする樹種毎に穿孔抵抗と密度との関係を明らかにすることが望ましい。

3.2 樹幹内半径方向の密度分布の推定

スギの生材およびスギ、ヒノキ、ケヤキ、ギンドロの気乾材の柁目板試験体を用いて、穿孔深さ 100 ~ 200mm に至るまでの半径方向の密度分布の推定精度について検討した。レジストグラフのニードルは材の

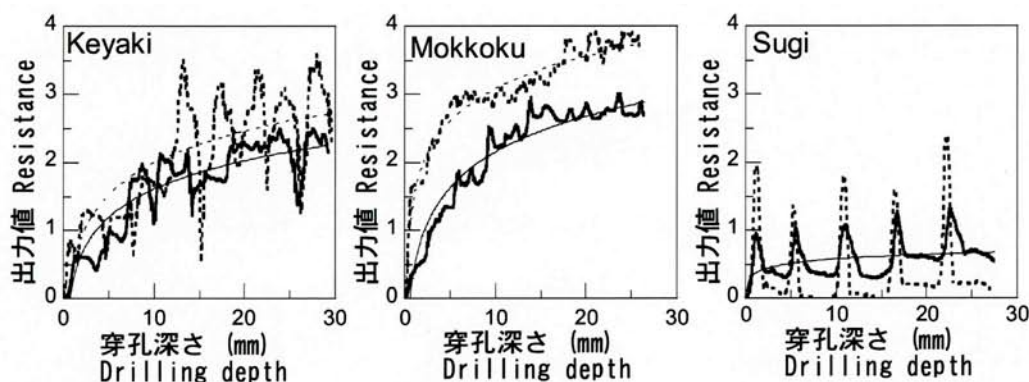


Fig. 2. 小試験体における生材と気乾材のレジストグラフ出力値.

Drilling resistances of green wood and air-dried wood of small clear specimens.

Legends: 太実線: 生材, 太点線: 気乾材, 細実線: 生材の回帰曲線, 細点線: 気乾材の回帰曲線.

Thick solid line: green wood; thick dotted line: air-dried wood; narrow solid line: regression curve of green wood; narrow dotted line: regression curve of air-dried wood.

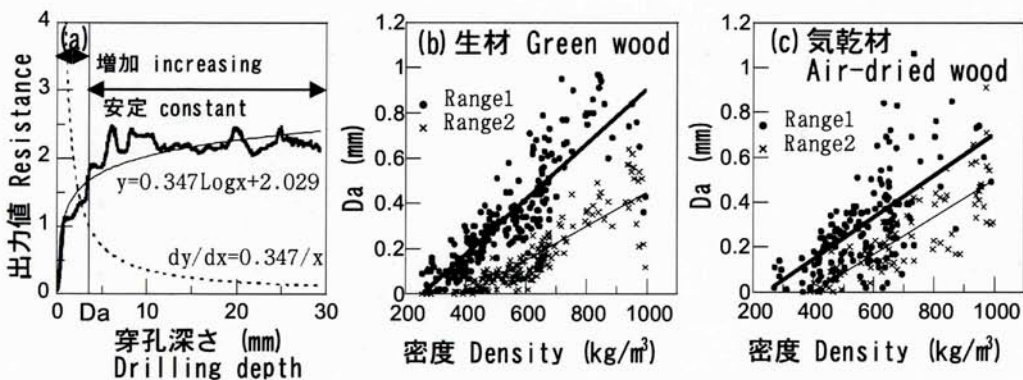


Fig. 3. 穿孔開始部位におけるレジストグラフ出力値の急増区間. (a): 回帰曲線のあてはめ、(b) と (c): 密度と急増区間との関係.

Increasing of the drilling resistance at the initial drilling depth. (a): Fitting of the regression curve, (b) and (c): relationship between density and drilling depth in increasing.

Notes: レジストグラフ出力値プロファイルに回帰曲線 $y = a \log x + b$ (x : 穿孔深さ, y : レジストグラフ出力値) をあてはめ、その接線の傾き a/x が 1 となる穿孔深さを Da とした。

$y = a \log x$ (x : drilling depth, y : drilling resistance) was fitted in the drilling resistance profile. Da is the drilling depth where a/x , the differential coefficient of the fitting curve is 1. Resistance average in Table 1 and Fig. 4 was calculated from the drilling resistance at drilling depth deeper than Da .

Legends: (a): 太線: レジストグラフ出力値, 細線: 回帰曲線, 点線: 回帰曲線の接線の傾き。

(a): thick line: drilling resistance; narrow line: regression curve; dotted line: the differential calculus of the regression curve.

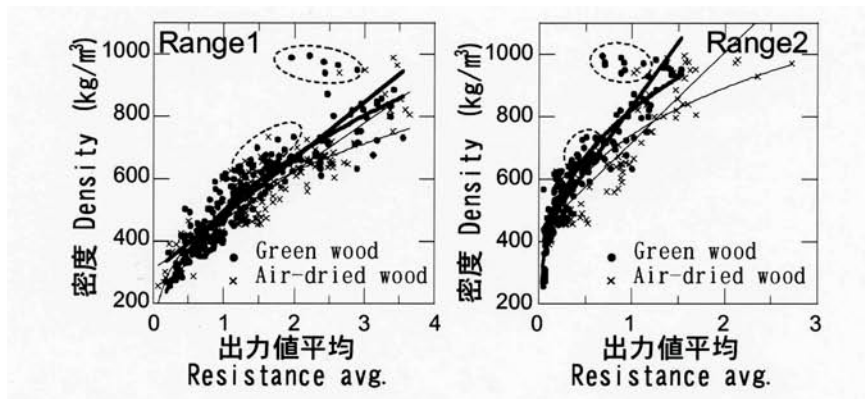


Fig. 4. 小試験体のレジストグラフ出力値平均とブロック気乾密度との関係。

Relationship between resistance average and density of small clear specimens.

Legends: 太線: 生材, 細線: 気乾材.

Thick line: Green wood; thin line: air-dried wood.

Notes: 回帰式を Table 2 に示す。点線円で囲まれた生材データは、密度のわりにレジストグラフ出力値平均が小さい樹種を示す。

Regression equations are shown in Table 2. Data for green wood in the dotted-line circle show the species with lower resistance average than the other species at similar density levels.

Table 2. 小試験体のレジストグラフ出力値平均とブロック気乾密度との関係

Relationship between resistance average and density of small clear specimens.

レンジ Range	生材 / 気乾材 Green wood / Air-dried wood	n	回帰式, 相関係数 Regression equation, Correlation coefficient	
			曲線回帰 Curvilinear regression	直線回帰 Simple linear regression
1	Green	220	$y=497x^{0.436}$, $R=0.91$ ***	$y=181x+303$, $R=0.89$ ***
	Air-dried	166	$y=494x^{0.334}$, $R=0.89$ ***	$y=155x+315$, $R=0.90$ ***
2	Green	194	$y=822x^{0.294}$, $R=0.92$ ***	$y=414x+420$, $R=0.89$ ***
	Air-dried	103	$y=743x^{0.264}$, $R=0.89$ ***	$y=289x+430$, $R=0.90$ ***

***: $P<0.001$.

x: 小試験体のレジストグラフ出力値平均 Resistance average of small clear specimens,

y: 小試験体の密度 (kg/m^3) Density of small clear specimens (kg/m^3).

深い部分にまで真っ直ぐに進入し、深い穿孔深さにおいても出力値プロファイルが得られ、材の外側から内部に至る平均的な密度の変化傾向を捉えることができた。そこで、出力値を小試験体で得られた推定式 (Table 2) に代入して推定密度 (以下、推定密度) を求め、これを軟 X 線デンストメトリ法で測定した実測密度あるいはブロック容積密度数と比較し、その推定精度を検討した。

スギ生材では、穿孔深さに伴って早材および晩材の推定密度がともに増加し、髄を通過した後はさらに増加するという、実測密度と異なる傾向が認められた (Fig. 5a)。そこで、穿孔深さ 20mm 毎にレジストグラフ出力値平均とブロック容積密度数との関係を調べたところ、穿孔深さが深くなるのに伴って、回帰曲線の傾きが小さくなり、容積密度数に対するレジストグラフ出力値平均が増加した (Fig. 6, Table 3)。生材の推定密度すなわち穿孔抵抗が穿孔深さに伴って増加する理

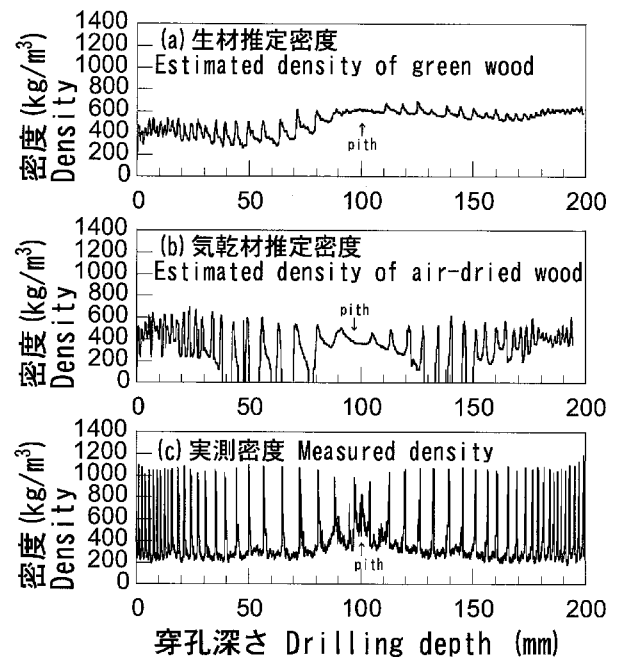


Fig. 5. スギの密度の半径方向変化。(a) 生材における推定密度、(b) 気乾材における推定密度、(c) 実測密度。

The radial density variations from bark to pith, and to bark in a Sugi strip. (a) Estimated density of the green wood, (b) estimated density of the air-dried wood and (c) measured density.

Notes: 密度推定には曲線回帰式 (Table 2) を用いた。実測密度は軟 X 線デンストメトリで測定した気乾密度。

The curvilinear regression equations in Table 2 were used to estimate density. The measured density is the air-dried density measured by soft X-ray densitometry.

由として、生材を切り屑にすると体積が2～4倍に膨脹する(遠藤ら, 1983)のためにスムーズに排出されないこと、あるいはドリル先端部が摩擦によって高温となるため(奥村ら, 1987)、高含水率の切り屑が圧縮されて硬化する(Eckstein & Saß, 1994)こと等の影響が考えられる。また、穿孔深さ100mmまでは、レジストグラフ出力値平均とブロック容積密度数との間にはそれぞれ、有意な相関($P<0.001$)が認められたのに対して、穿孔深さ100～120mmの丸太中央部では有意

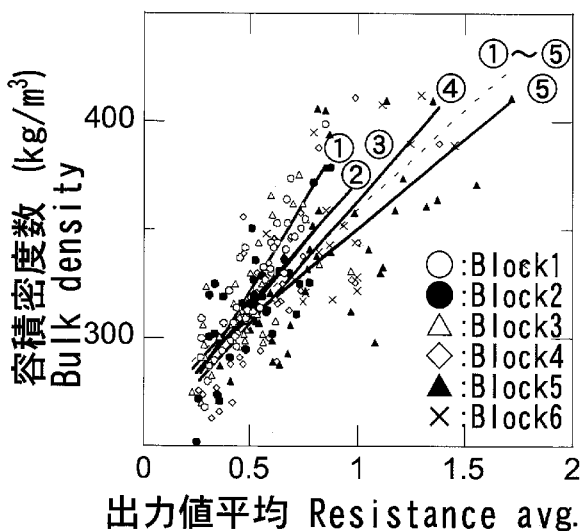


Fig. 6. スギ生材における穿孔深さ毎のレジストグラフ出力値平均とブロック容積密度数との関係。

Relationship between resistance average and bulk density of block by drilling depth in green Sugi.

Notes: 回帰式を Table 3 に示す。

Regression equations are shown in Table 3.

Table 3. スギ生材における穿孔深さ毎のレジストグラフ出力値平均とブロック容積密度数との関係。

Relationship between resistance average and bulk density of block by drilling depth in green Sugi.

ブロックNo. ¹⁾ Block No.	n	回帰式 Regression equation, 相関係数 Correlation coefficient
1	39	$y=165x+239$, $R=0.90$ ***
2	39	$y=120x+253$, $R=0.74$ ***
3	37	$y=113x+259$, $R=0.69$ ***
4	38	$y=113x+250$, $R=0.76$ ***
5	38	$y=82.2x+268$, $R=0.66$ ***
6	38	$y=25.7x+330$, $R=0.29$
1～5	191	$y=91.2x+268$, $R=0.73$ ***

***: $P<0.001$.

1): ブロック No. は Fig. 1 の通り。Block No. is shown in Fig. 1.

x: レジストグラフ出力値平均 Resistance average,

y: ブロック容積密度数 (kg/m^3) Bulk density of blocks (kg/m^3).

な相関が認められなかった。これには、丸太中央部の髄周辺で節が多いことが影響を及ぼしていると考えられる。

一方、スギ気乾材では、髄付近で晩材と早材の推定密度差が小さいという、実測密度と同様の傾向を示し(Fig. 5b)、穿孔深さに伴う穿孔抵抗、すなわち推定密度の増加傾向は認められなかった。ヒノキ、ケヤキ、ギンドロの気乾材においても同様で、推定密度の平均値は実測密度の平均値とほぼ一致した(Fig. 7)。以上のことから、気乾材では、穿孔抵抗によって半径方向の密度分布を推定できることが示された。ただし、本実験よりも穿孔深さが深い場合や高密度材においては、切り屑の排出が困難なために穿孔抵抗が増加する可能性がある。

年輪内密度変化を検出する可能性について検討した結果、レジストグラフ出力値から得られた推定密度においては、スギではヒノキに比べて早材密度と晩材密度の差が大きい、ケヤキの孔圏部では孔圏外部に比べて密度が低い、ポプラでは年輪の外側から内側に向かって密度が緩やかに減少するなど、樹種による年輪内密度変化パターンの特徴が検出された(Fig. 5, Fig. 7)。しかし、早材密度や晩材密度の値については、推定密度と実測密度とで異なる場合があった。この理由としては Fig. 4 に示すように、 300kg/m^3 以下の低い密度においては穿孔抵抗を検出することは困難であることがあげられる。また、晩材幅が狭い材では、晩材の短い距離の中で密度変化にレジストグラフが追従できないことが推測される。以上のことから、早材密度や晩材密度を定量的に推定することは難しいと考えられた。

なお、多くの樹種においては、年輪境界を検出することによって年輪幅を推定することができると考えられるが、散孔材等で年輪境界の密度差が小さい場合や年輪幅が狭い場合には穿孔抵抗の違いが検出されないので注意すべきである。

4. 結論

レジストグラフを用いて、立木、丸太、実大材を想定し、穿孔抵抗による木材密度の推定を試みた結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 小試験体のレジストグラフ出力値平均と気乾密度との間に有意な正の相関関係が認められ、生材、気乾材毎にレジストグラフ出力値平均から気乾密度を推定するための回帰式を得ることができた。なお、生材、気乾材ともに、穿孔開始部位では出力値が安定するまでの値が急激に増加する増加区間が存在し、増加区間と密度との間には有意な正の相関関係が認められた。
- 2) 実大材内部の密度分布について、気乾材では密度の半径方向変化をとらえることができ、推定が可能であることがわかった。しかし、生材では、穿

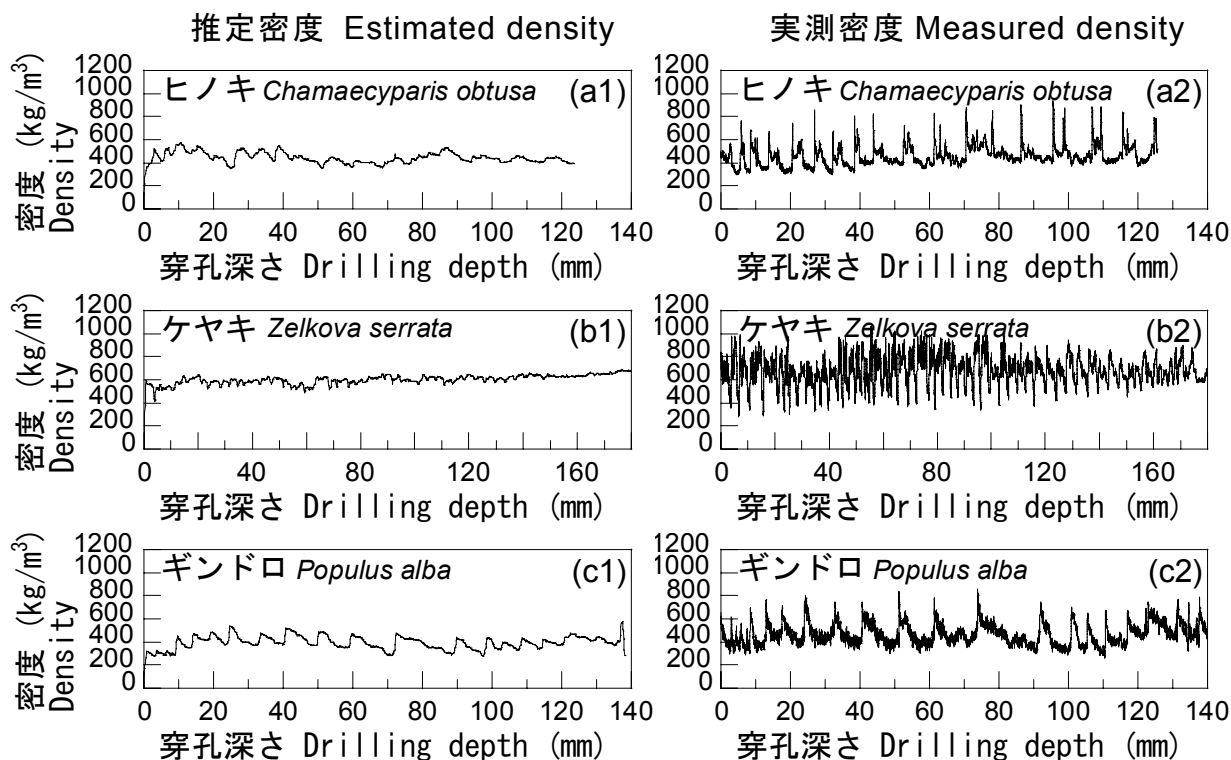


Fig. 7. 気乾材の推定密度 (1) および実測密度 (2) の半径方向変化. (a) ヒノキ、(b) ケヤキ、(c) ギンドロ.

The radial variations from bark to pith of the estimated density(1) and the measured density(2) in air-dried condition. (a)*Chamaecyparis obtusa*, (b)*Zelkova serrata*, (c)*Populus alba*.

Notes: Fig. 5 に同じ。

See the note in Fig. 5.

孔深さが深くなるのに伴って穿孔抵抗が増加する傾向がみられた。

- 3) 年輪内密度変化の推定については、早晚材の移行の緩急など定性的な比較は可能であり、年輪境界の前後の密度差が大きい場合には、年輪境界を検出することにより年輪幅を推定することができることがわかった。しかし、機械的な限界により年輪内密度変化の定量には制約があると考えられた。

謝辞

試料の入手にご協力頂いた小泉章夫北海道大学助教授に感謝します。試料の一部は、森林総研北海道支所、多摩森林科学園および四国支所から提供された。

引用文献

- Costello, L. R. and Quarles, S. L. (1999) Detection of wood decay in blue gum and elm: An evaluation of the resistograph[®] and the portable drill, *Journal of Arboriculture*, **25**(6), 311-318.
- Eckstein, D. and Saß, U. (1994) Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomisch interpretation, *Holz als Roh-und Werkstoff* **52**, 279-286.
- 遠藤展・森山実・中村繁夫・速水信也 (1983) 原木 1m³

当たりのオガ粉発生量について、北海道林産試験場月報, No.374.

- 小松正行 (1975) 木質材料の穴あけ加工性 (第1報) 日本産広葉樹のドリルによる穴あけ加工性, *木材学会誌*, **21**(10), 551-557.
- 小松正行 (1977) 木質材料の穴あけ加工性 (第3報) 南洋材のドリルによる穴あけ被削性と超硬丸鋸による被削性との比較, *木材学会誌*, **23**(12), 640-647.
- 小松正行 (1978) 木質材料の穴あけ加工性 (第4報) 木材の含水率の穴あけ加工性への影響, *木材学会誌*, **24**(1), 26-31.
- 奥村正悟・藏津洋・杉原彦一 (1987) 木材の穴あけ加工におけるドリルの温度, *木材学会誌*, **33**(4), 274-280.
- Rinn, F., Schweingruber, F. H., Schar, E. (1996) Resistograph and X-ray density charts of wood computative evaluation if drill resistance profiles and x-ray density charts of different wood species, *Holzforschung*, **50**, 303-311.
- Rinn, F. (1989) Eine neue Bohrmethode zur Holzuntersuchung, *Holzzentralblatt*, **115**(34), 529-530.
- Wang, S., Chiu, C., Liu, C. (2003) Application of the drilling resistance method for annual ring characteristics: evaluation of Taiwan trees grown with different thinning and pruning

- treatments, *Journal of wood science*, **49**, 116-124.
- Winistorfer, P. M., Xu W., Wimmer, R. (1995) Application of a drill resistance technique for density profile measurement in wood composite panels. *Forest Prod J.* **45**(6), 90-93.