

奈良県産スギ材の乾燥温度および年輪幅が音響的性質に及ぼす影響

清川陽子・岩本頼子・有山麻衣子*・酒井温子

奈良県産スギ材の楽器利用を促進するため、乾燥温度や年輪幅の大小が、音響的性質に与える影響を調査した。ここでは、両端たわみ自由振動法により得られる比動的ヤング率 (E/ρ) および損失正接 ($\tan\delta$) を、音響的性質の指標とした。

E/ρ および $\tan\delta$ について、乾燥温度の異なる 3 種類 (60°C、45°C および 27°C) の材で比較すると、いずれにも有意な差は認められなかった (有意水準 5%)。

また、試験体を平均年輪幅の大小で、すなわち 0.9~2.0mm と 2.0~4.7mm の 2 つの群に分け、各群間で E/ρ および $\tan\delta$ を比較したところ、いずれにも有意な差は認められなかった (有意水準 5%)。

以上から、60°C までの人工乾燥と 0.9~4.7mm の範囲の年輪幅の差違は、奈良県産スギ材の音響的性質に影響を及ぼさないことが明らかになった。

1. はじめに

密植・多間伐・長伐期施業という細やかな施業体系で育林された吉野スギ等、奈良県産スギ材は、年輪幅が狭く、強度が高く、見た目にも美しいという優れた特徴をもつ。この特徴を活かせる用途として、楽器への利用の可能性を検討している。

従来、ピアノや弦楽器等の響板に関する音響的性質の評価には、比動的ヤング率 (以降、 E/ρ と記す) および損失正接 (以降、 $\tan\delta$ と記す) が用いられており、高品質とされる材ほど E/ρ が大きく、 $\tan\delta$ が小さいことが指摘されている^{1, 2)}。

バイオリンの表板等、弦楽器の響板には、伝統的にオウシュウトウヒやペイトウヒなどのトウヒ属の木材が主に用いられてきたが、奈良県産スギ材とトウヒ属の木材の E/ρ および $\tan\delta$ を比較したところ、奈良県産スギ材は、オウシュウトウヒ材の中の特に優れた個体よりも E/ρ がやや小さくなる傾向があるものの、一般的なオウシュウトウヒ材やペイトウヒ材とは類似の値であった^{3, 4)}。また、表板に奈良県産スギ材を使用して製作されたバイオリンとオウシュウトウヒ材を使用したバイオリ

ンについて、空間放射特性の比較を行ったところ、両者は同様の放射指向性の強さを有することが明らかとなっている^{5, 6)}。

このように、奈良県産スギ材は、トウヒ属の木材と同等の優れた音響的性質を有し、バイオリン等の弦楽器の表板の材料として有用であると考えられるが、これまでの検討で使用してきたスギ材は、約 5 年以上天然乾燥され、平均年輪幅も 1.4mm と非常に狭く、均一でまっすぐな木目をもつ希少なものであった。

そこで、今後、奈良県産スギ材を楽器用材として供給することを想定し、今回は、乾燥温度や年輪幅の差違が音響的性質に与える影響について調査した。

2. 材料と方法

2.1 木材試験体

2.1.1 乾燥温度がスギ材の音響的性質に与える影響

奈良県産スギ生材の柁目板 (接線方向 30mm、放射方向 125~250mm、繊維方向 2100mm) 10 体 (いずれも別個体、平均年輪幅 1.8mm) から、図 1 に示すように繊維方向に連続して長さ 500mm の試験材を 3 枚ずつ採取し

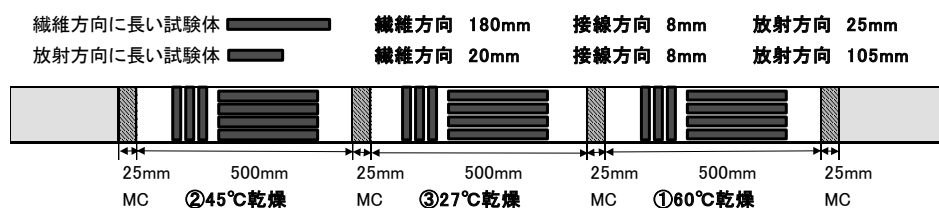


図 1 乾燥温度の異なる試験材の採取位置

MC : 全乾法による含水率測定用試片採取位置

* 現 奈良県 水循環・森林・景観環境部 景観・自然環境課

た。また、各試験材の間で、繊維方向 25mm の試片を採取し、全乾法で含水率を求め、それらの値から試験材の乾燥前の含水率を推定した。

各試験材について、両木口面をエポキシ樹脂により封じた後、次の①～③の 3 種類の乾燥温度を設定し人工乾燥を行った。推定含水率が概ね 11%程度となった時点で乾燥を終了した。①および②の乾燥スケジュールを表 1 に示す。また、各試験材の含水率の変化を図 2 に示す。

- ① 60℃乾燥：乾球温度 60℃一定、相対湿度 90% (90%RH) から 52%RH へ段階的に低下
- ② 45℃乾燥：乾球温度 45℃一定、78%RH から 52%RH へ段階的に低下
- ③ 27℃乾燥：2 週間天然乾燥後、エアコンを稼働した室内(27℃40%RH)で 1 カ月間静置

表 1 乾燥スケジュール

①60℃乾燥

生材	乾球温度	湿球温度	温度差	相対湿度	蒸気圧差	
処理時間	ステップ	℃	℃	%RH	hPa	
8	1	60	60	0	100	0
8	2	60	58	2	90	19
16	3	60	57	3	86	28
16	4	60	55	5	77	45
16	5	60	53	7	69	61
24	6	60	51	9	62	76
36	7	60	49	11	55	89
137	8	60	48	12	52	96
8	9	60	52	8	66	69

②45℃乾燥

生材	乾球温度	湿球温度	温度差	相対湿度	蒸気圧差	
処理時間	ステップ	℃	℃	%RH	hPa	
6	1	45	45	0	100	0
36	2	45	41	4	78	21
48	3	45	40	5	73	25
48	4	45	39	6	69	30
48	5	45	37	8	60	38
222	6	45	35	10	52	46

乾燥後、各試験材から繊維方向に長い試験体(接線方向 8mm、放射方向 25mm、繊維方向 180mm)を 4 体ずつ、また放射方向に長い試験体(接線方向 8mm、放射方向 105mm、繊維方向 20mm)を 3 体ずつ採取し、恒温恒湿室(20℃65%RH)で恒量になるまで調湿した。なお、② 45℃での乾燥工程で試験材 10 体のうち 1 体に割れが生じた。割れを含む試験体は、今回の測定には不適であるため、②の条件については繊維方向に長い試験体は全数が 39 体、放射方向に長い試験体は全数が 27 体となっ

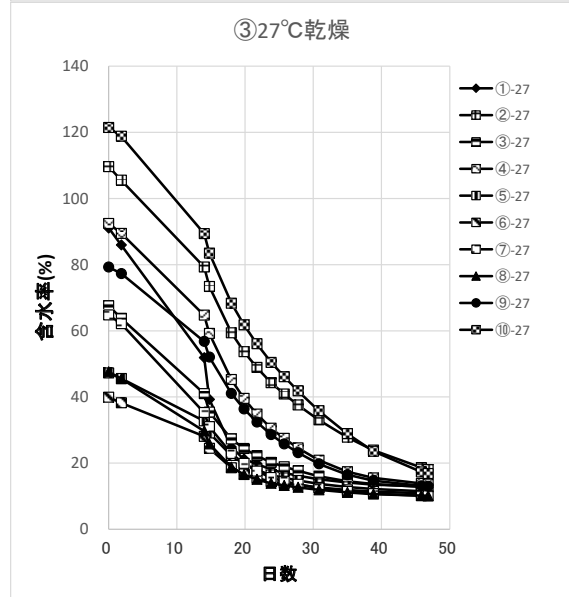
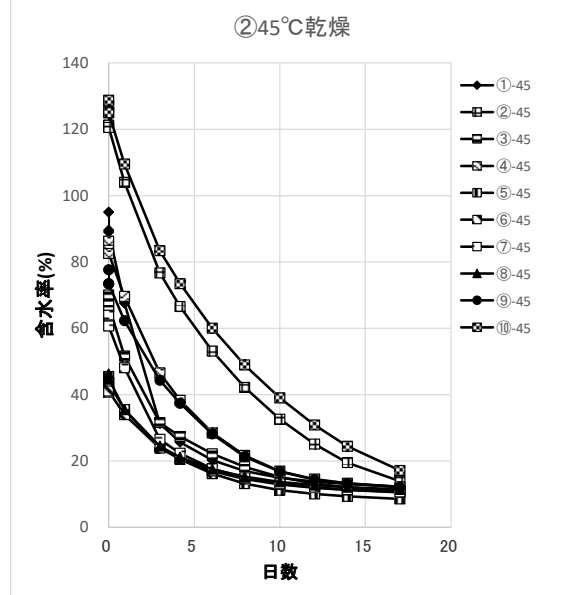
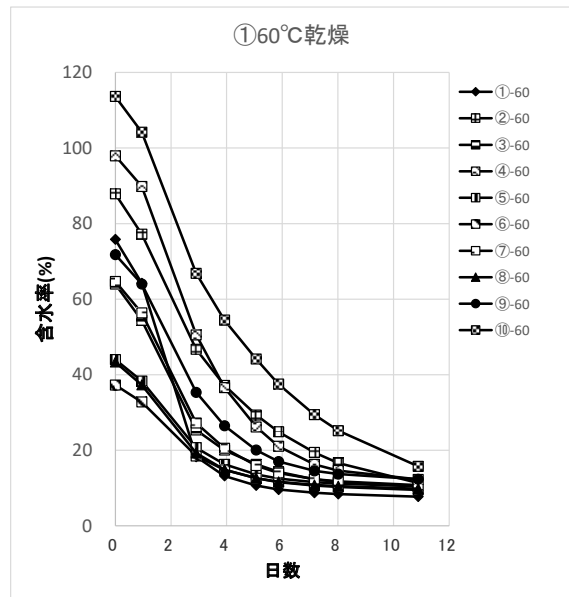


図 2 乾燥温度ごとの含水率の変化

た。また、①～③において、繊維方向に長い試験体 39～40 体のうち、辺材または辺材を含む試験体は各 4 体であり、放射方向に長い試験体 27～30 体では各 9 体であった。その他は全て心材であった。

2.1.2 年輪幅の差がスギ材の音響的性質に与える影響

天然乾燥した奈良県産スギ桎目板（接線方向 16～33mm、放射方向 135～180mm、繊維方向 1010～1365mm）9 体（いずれも別個体）から、図 3 に示すように繊維方向に長い試験体（接線方向 8mm、放射方向 25mm、繊維方向 180mm）を 3 体ずつ採取し、恒温恒湿室（20℃65%RH）で恒量になるまで調湿した。なお、2.1.1 と同様に試験体採取時に含水率測定用試片を採取し、全乾法により得られた値をもとに各試験体の全乾重量を算出し、調湿後の含水率を推定した。

また、上記試験体の他に、天然乾燥した奈良県産スギ材の音響的性質の測定値を既往の研究論文⁴⁾から引用し、年輪幅の計測値を加え、今回の測定結果と合わせて考察した。

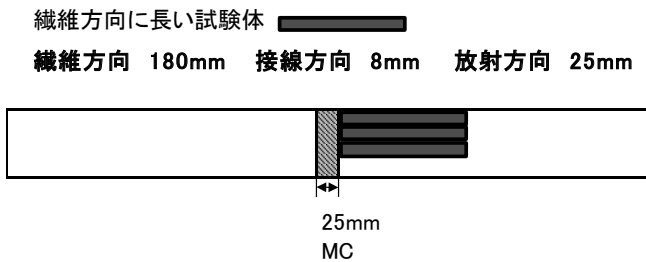


図 3 年輪幅の異なる試験体の採取位置
MC：全乾法による含水率測定用試片採取位置

2.2 測定方法

音響的性質の測定は、恒温恒湿室（20℃65%RH）内で、両端たわみ自由振動法を用いて行った。測定装置の概要を図 4 に示す。1 次モードの節に細い絹糸をかけて水平に吊し、試験体の中心を木製ハンマーで軽く打撃した。音圧をマイクロフォン（M1-1235（株）小野測器製）で検出し、プリアンプ（M1-3111（株）小野測器製）を搭載した電源アンプ（SR-2210（株）小野測器製）と A/D コンバーター（DS-3200（株）小野測器製）を介して、パソコンに保存した。FFT 解析（FFT 解析ソフトウェア DS-0321（株）小野測器製）により得られた 1 次モードの共振周波数（ f_r ）から、次式により E/ρ を求めた。

$$f_r = \frac{m_n^2 h \sqrt{E/\rho}}{4\sqrt{3} \pi l^2}$$

m_n ：モード次数（n）で決まる定数。 m_1 は 4.73
 l ：試験体の長さ、 h ：試験体の厚さ、 ρ ：試験体の密度
また、共振周波数における振動の減衰について FFT 解析機能を用いて、ヒルベルト変換法（対数減衰率法）による減衰比測定を行い、繊維方向もしくは半径方向における損失正接（ $\tan\delta$ ）に変換した。
各試験体に対して測定を 5 回を行い、その平均値をその試験体の値とした。

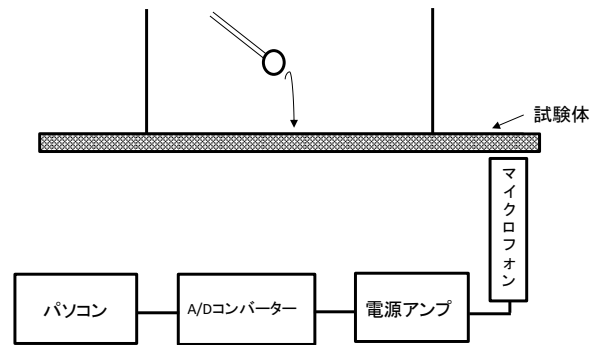


図 4 音響的性質の測定装置略図

3. 結果と考察

3.1 乾燥温度がスギ材の音響的性質に与える影響

表 2 に、各温度条件で調整した試験体について測定結果を示す。平均値で比較すると、繊維方向に長い試験体では、60℃乾燥における E/ρ は大きく、 $\tan\delta$ が小さいように見えたが、分散分析の結果、いずれの値も乾燥温度間で有意な差は認められなかった（有意水準 5%）。また、放射方向に長い試験体については、27℃乾燥における $\tan\delta$ が大きいように見えたが、繊維方向に長い試験体と同様に、いずれの値も乾燥温度間で有意な差は認められなかった（有意水準 5%）。

以上から、試験を行った温度範囲、すなわち 60℃までの人工乾燥であれば、繊維方向に長い試験体、放射方向に長い試験体のいずれにおいても、音響的性質に影響を及ぼさなかったといえる。伝統的に楽器の響板用の木材には、長期間の天然乾燥が行われているが、迅速な材料調達が望まれる場合には、60℃までの人工乾燥も検討の余地がある。

表 2 乾燥温度が異なる試験体の音響的性質

繊維方向に長い試験体					
乾燥条件		ρ (kg/m ³)	E/ρ (Mpa·m ³ /kg)	$\tan \delta$ ($\times 10^{-2}$)	含水率 (%)
①60°C乾燥 (n=40)	平均値	388	25.1	0.663	12.4
	標準偏差	28	3.4	0.074	1.0
②45°C乾燥 (n=39)	平均値	386	24.5	0.677	13.7
	標準偏差	28	2.9	0.062	1.0
③27°C乾燥 (n=40)	平均値	388	24.4	0.67	14.4
	標準偏差	27	3.0	0.065	0.9

放射方向に長い試験体					
乾燥条件		ρ (kg/m ³)	E/ρ (Mpa·m ³ /kg)	$\tan \delta$ ($\times 10^{-2}$)	含水率 (%)
①60°C乾燥 (n=30)	平均値	389	1.8	1.484	12.0
	標準偏差	23	0.3	0.113	1.1
②45°C乾燥 (n=27)	平均値	372	1.6	1.481	13.3
	標準偏差	71	0.5	0.284	1.2
③27°C乾燥 (n=30)	平均値	388	1.7	1.541	14.0
	標準偏差	27	0.3	0.146	1.1

n : 試験体数

3.2 年輪幅の差がスギ材の音響的性質に与える影響

年輪幅の差による音響的性質を検討した結果を、表 3 に個別別に示した。 E/ρ は、既往の研究論文⁴⁾の値に比べて、個体 No.5 のようにやや大きい値や、個体 No.2 のようにやや小さい値が含まれていた。

表 3 年輪幅が異なる試験体の音響的性質 (個別別)

個体No.	平均年輪幅 (mm)	ρ (kg/m ³)	E/ρ (Mpa·m ³ /kg)	$\tan \delta$ ($\times 10^{-2}$)	含水率 (%)
1	1.86	405	27.1	0.535	12.0
(n=3)	標準偏差 0.343	34	0.069	0.022	
2	3.39	414	13.0	0.791	12.0
(n=3)	標準偏差 0.117	40	0.904	0.045	
3	2.50	355	25.8	0.582	11.3
(n=3)	標準偏差 0.308	43	0.752	0.021	
4	2.80	386	18.7	0.732	11.2
(n=3)	標準偏差 0.119	9	4.432	0.098	
5	2.64	359	28.7	0.574	10.2
(n=3)	標準偏差 0.072	7	0.549	0.016	
6	2.84	375	25.5	0.583	10.7
(n=3)	標準偏差 0.315	16	0.530	0.020	
7	1.06	413	26.2	0.577	11.7
(n=3)	標準偏差 0.149	4	0.317	0.002	
8	2.69	325	21.8	0.563	10.3
(n=3)	標準偏差 0.760	14	0.658	0.065	
9	3.12	389	16.1	0.738	11.9
(n=3)	標準偏差 1.334	47	4.238	0.100	

n : 試験体数

次に、一般的にバイオリン表板用に販売されているトウヒ属の木材の年輪幅は、1~2mm であることから、表

4 では、平均年輪幅の大小を 2.0mm を閾値として 2 群に分けて、音響的性質の平均値を示した。ここでは、過去の測定値⁴⁾もあわせて、合計 54 体の値を使用している。

表 4 年輪幅が異なる試験体の音響的性質 (試験体ごとに年輪幅で分類)

年輪幅	平均年輪幅 (mm)	ρ (kg/m ³)	E/ρ (Mpa·m ³ /kg)	$\tan \delta$ ($\times 10^{-2}$)	含水率 (%)	
小 2.0mm未満 (n=32)	平均値	1.48	403	24.0	0.657	13.7
	標準偏差	0.35	26	3.1	0.089	1.1
大 2.0mm以上 (n=22)	平均値	2.83	371	21.6	0.645	11.1
	標準偏差	0.59	36	5.8	0.108	0.7

n : 試験体数

また、図 5 では $\tan \delta$ について、図 6 では E/ρ について、試験体 54 体の個々の測定値を示した。両図からわかるように、値は年輪幅に関係なく同様にばらついていて、各値について対応のない t 検定の結果、いずれにも有意な差は認められなかった(有意水準 5%)。

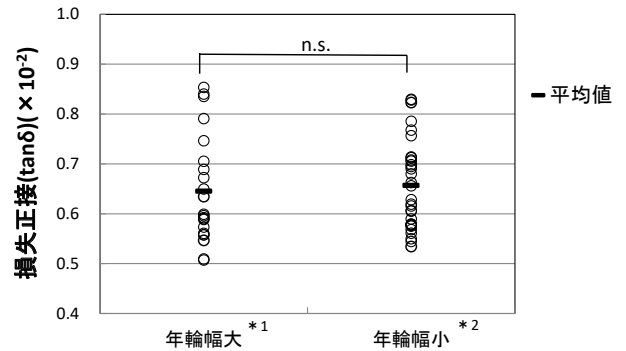


図 5 年輪幅が異なる試験体の $\tan \delta$
*1、*2 : 表 4 参照
n. s. 有意差なし ($p > 0.05$)

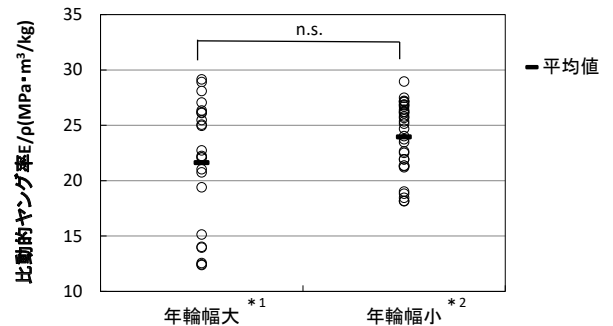


図 6 年輪幅が異なる試験体の E/ρ
*1、*2 : 表 4 参照
n. s. 有意差なし ($p > 0.05$)

平均年輪幅と E/ρ 、 $\tan\delta$ との関係については既往研究があり、小野は、シトカスプルー材（トウヒ属の一種）において年輪幅と両者の間には明確な相関関係は見出されなかった⁷⁾。一方、久保島らは、ドイツトウヒにおいて、平均年輪幅が大きくなると E/ρ はやや低下する傾向があること、また $\tan\delta$ との間にはそれほどの相関は見られないことを示した⁸⁾。しかし、ここでは、平均年輪幅の最大は 8mm であり、今回供試した材よりも幅が広いものまで含んでいることから、異なる傾向が出た可能性がある。

以上の結果から、年輪幅は楽器用材の選定において視覚的に確認ができる特徴であり、仕上がった楽器の視覚的な良さや、楽器製作時の切削加工のしやすさ等、様々な影響が考えられるが、今回供試した 4.7mm までの範囲であれば、音響的性質の良否には影響がないといえる。楽器製作者は、響板の選定にあたり木材を指ではじいて音を確認するが、この動作の重要性が感じられる。

なお、1. はじめにでも述べたように、奈良県産スギ材の E/ρ および $\tan\delta$ は、弦楽器の表板として伝統的に使われている、一般的なオウシュウトウヒ材やペイトウヒ材と類似の値であり^{3, 4)}、音響的性質に優れることがすでに明らかとなっている。年輪幅にこだわらず、楽器用材としての利用が望まれる。

4. まとめ

奈良県産スギ材の音響的性質について、乾燥温度や年輪幅の差違が与える影響を調べた。

その結果、60℃、45℃および 27℃の 3 条件の乾燥温度で調整されたスギ材間で、 E/ρ 、 $\tan\delta$ に有意な差は認められず、今回の試験範囲である 60℃程度までの人工乾燥は、音響的性質に影響を及ぼさないことが明らかになった。

また、平均年輪幅についても、0.9~4.7mm の範囲であれば、 E/ρ ならびに $\tan\delta$ に有意な差は認められず、年輪幅の大小が音響的性質に影響を与えないことが確認された。

バイオリンやギターの表板の選定にあたっては、見た目の美しさや製作時の切削加工のしやすさは重要な要素であり、それらの特徴から奈良県産スギ材の中でも年輪幅の狭いものが選択されることは理解できるが、今回の結果から、音響的性質の点から選択可能な材料の範囲が明確になり、今後、材料調達が容易になると期待される。

なお、奈良県産スギ材の弦楽器の響板としての音響的性質は今回の報告のとおりであるが、それらを用いた楽

器の音響については、その他の要因も影響することから、別途評価する必要がある。

引用文献

- 1) 則元京：楽器用材の物性(第1報)ピアノ響板材の選別について. 木材学会誌. 28(7), 407-413 (1982)
- 2) 矢野浩之, 松岡一郎, 椋代純輔：バイオリン用材の音響的性質. 木材学会誌. 38(2), 122-127 (1992)
- 3) 牧勝弘, 有山麻衣子：楽器用材への利用に向けた奈良県産スギ材の振動特性の解析. 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会講演論文集. 講演番号 2-3-2, 大分, 2018.
- 4) Katuhiro Maki, Maiko Ariyama : Analysis of vibration characteristics of Japanese cedar from Nara Prefecture for string instruments. *Acoustical Science and Technology*, 41(2), 481-488 (2020)
- 5) 牧勝弘, 有山麻衣子：奈良県産スギ材を使用したバイオリンの音響空間放射特性. 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会講演論文集. 講演番号 2-3-3, 大分, 2018.
- 6) Katuhiro Maki, Maiko Ariyama : Acoustic spatial radiation characteristics of a violin made of Japanese cedar wood produced in Nara Prefecture. *Acoustical Science and Technology*, 40(3), 217-220 (2019)
- 7) 小野晃明：楽器響板用シトカスプルー材の振動特性に関する研究. 京都大学, 1980, 博士論文.
- 8) Yoshitaka Kubojima, Takeshi Okano, Masamitsu Ohta : Effect of annual ring widths on structural and vibrational properties of wood. *Mokuzai Gakkaishi*, 43(8), 634-641 (1997)

(2021年4月6日 受理)