

木琴音板の振動特性と里山広葉樹材での代替の検討*1

村田功二*2, 松本佳也*2,3, 仲村匡司*2

Vibration Performance of Xylophone Bars and Study of Alternatives Involving Satoyama Hardwood Species*1

Koji MURATA*2, Kaya MATSUMOTO*2,3 and Masashi NAKAMURA*2

Xylophones are fabricated using valuable tropical hardwood. Considering the effect of xylophone shape on flexural vibration, we examined the possibility of using hardwood from Satoyama as a substitute material for tropical hardwood. Focusing on the first-, third-, and fifth-order flexural vibration modes, we compared rosewood and Satoyama hardwood in terms of the ascending vibration region and the damping behavior thereafter. The first, third, and fifth flexural vibrations are excited immediately after the start of the vibration, and the third and fifth vibrations disappeared immediately. The amplitude of the third vibration exceeds that of the first vibration and is 1.5 to 2 times larger in the xylophone-shaped bar. The amplitudes of the fifth vibration of the rectangular and xylophone-shaped bars are approximately 1/4 and 1/2 of that of the first vibration, respectively. The logarithmic decrement in the first vibration of rosewood is less than that of Satoyama hardwood, and rosewood cannot be replaced easily with Satoyama hardwood to achieve the desired vibration damping.

Keywords: vibration performance, xylophone bar, alternative wood species, Satoyama hardwood.

木琴には貴重な熱帯産広葉樹材が使用されている。木琴音板の形状がたわみ振動に与える影響を考え、熱帯産広葉樹の代替材としての里山広葉樹の活用の可能性を検討した。特に、1次と3次および5次のたわみ振動モードに着目し、振動の立ち上がり部分とその後の減衰に関してローズウッドと里山広葉樹材とを比較した。振動開始直後には1次、3次および5次のたわみ振動が励起し、3次と5次の振動はすぐに減衰した。3次振動モードの振幅は1次振動モードの振幅に対して大きく、中央部を削った木琴音板の形状では1.5～2倍であった。削っていない矩形型音板の5次振動モードの振幅は1次振動モードの4分の1程度に対して、木琴音板形状では2分の1程度であった。ローズウッドの1次振動モードの対数減衰率は里山広葉樹材に比べて小さく、振動の減衰の点では里山広葉樹材での代替は難しい。

1. 緒 言

木琴 (xylophone) にはローズウッド (*Dalbergia* spp.) やアフリカンパドック (*Pterocarpus soyauxii*)

などが使用され、いずれも熱帯産の広葉樹材である。特に、ローズウッドはワシントン条約附属書 I (*Dalbergia nigra*) および附属書 II (*Dalbergia* spp.) に記載され、天然林保護の観点から利用には注意が必要である。近年、楽器用材として熱帯産材を温帯の地域産材で代替する試みがあり、代表的な活動にギター用材を検討したレオナルド・ギター・リサーチ・プロジェクトがある¹⁾。日本は里山林の荒廃により獣害やナラ枯れが問題となっており、里山資源の活用が検討されている^{2,3)}。薪炭林として比較的短期で伐採・活用されていた里山林は、エネルギー革命などにより放置され、樹齢50年を超える広葉樹

*1 Received April 3, 2023; accepted May 30, 2023.

*2 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

*3 Present address: パナソニック株式会社 Panasonic Corporation, Kadoma 571-8501, Japan

Corresponding author: K. Murata (murata.koji.4e@kyoto-u.ac.jp)

が大半を占めるようになった⁴⁾。直径が30 cmを超えるシラカシ (*Quercus myrsinifolia*), コナラ (*Quercus serrata*), ヤマザクラ (*Cerasus jamasakura*) などがあるが, 大径の広葉樹材は家具や内装材などの用材用途として利用価値があるにも関わらず十分な活用がなされていなかった。これら国内の里山から入手できる広葉樹材 (国産里山広葉樹材) の活用は地域経済への貢献が期待できる。

木琴に使用される木材についてはこれまでも多くの報告がある。Wegst はアッシュビープロットによって楽器用材の特徴をまとめた⁵⁾。木琴の木材は損失係数 ($\tan \delta$) が小さく, 平均的な音響放射係数ではなくピークレスポンスが高いことが重要であるとしている。ピークレスポンスの向上は損失係数に対する音響放射係数の比率を向上させることが必要であるとした。損失係数が小さい木琴音板は高音部の減衰が小さいためにより明るい音となる。また, 表面やマレットの硬さも音質に影響するとしている。そのような理由でアマゾンローズウッド (*D. spruceana*), ホンジュラスローズウッド (*D. stevensonii*) やチンチャン (*D. oliveri*) などのツルサイカチ属やアフリカンパドックなどが適しているとした。Aramaki らは, 木琴用木材の選択のために音質と種々の物理パラメータの関係を検討した⁶⁾。木材の内部摩擦が最も重要なパラメータであるとしながら, 周波数に依存する減衰とスペクトル

帯域幅の2つが木琴用の木材の選択に重要であるとした。Brémaud らはアフリカンパドックについて内部摩擦と抽出成分の関係を考察した⁷⁾。Danihelová らはホンジュラスローズウッドの代替としてハリエンジュ (*Robinia pseudoacacia*) を検討し, 熱処理と圧密化によって低グレードの木琴用に使用可能であるとした⁸⁾。これら既存の報告⁵⁻⁸⁾を参考に, 本研究では木琴音板の形状が振動特性に与える影響を明確にし, その観点から国産里山広葉樹材による木琴用材の可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体と木琴音板の加工

供試材料として家具工房から入手した良質のローズウッド (紫檀), シラカシ, コナラ, ヤマザクラを使用した。物性測定用として300 mm (L) × 40 mm (R) × 7 mm (T), 木琴音板用として300 mm (L) × 40 mm (R) × 20 mm (T) の試験体を同一の板材から切り出した。試験体は $23.3 \pm 0.7^\circ\text{C}$, $33.4 \pm 11.7\%\text{RH}$ の環境で1カ月以上調湿した。

木琴音板の振動性能評価用として, 矩形形状 (Fig. 1(a)) のほかに木琴音板形状に加工した。木琴音板の形状としては青木の分類に従って, 中央がアーチ型に削られているものをシロフォン型, 中央部が平らに薄く削られているものをマリンバ型とした⁹⁾。ともに中央部の厚さはもとの矩形型の半分の

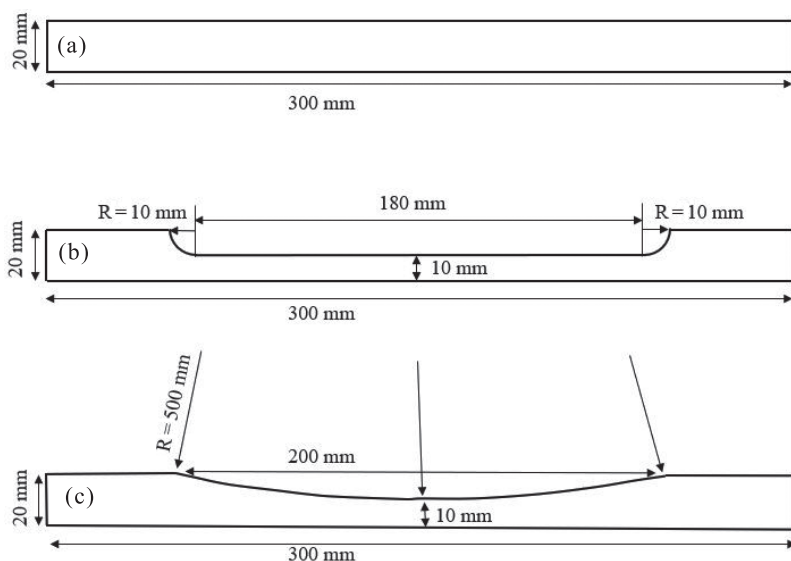


Fig. 1. Side view of wood specimen; (a) rectangular type, (b) marimba type, (c) xylophone type.

R: curvature radius.

10 mm とした。シロフォン型ではアーチ型は曲率半径を500 mm (Fig. 1(c)) とし、マリンバ型では中央部は厚さが均一でコーナー部は曲率半径が10 mm (Fig. 1(b)) になるように1軸NCルータ(NC16-ROA, SHODA(株))で加工した。この形状によりシロフォン型は鋭く明るく、マリンバ型は柔らかく、余韻が長くしっとりとした響きとされる。

2.2 物性の測定

供試材料の物性を縦振動およびねじり振動法で測定した。長さ300 mm(L)、厚さ7 mm(T)の試験体の中央を柔らかいタオルで保持した。縦振動法では加速度ピックアップ(PCB353B15, (株)東陽テクニカ)を木口面に取り付け、反対側からハンマーで打撃した。加速度信号は収録モジュール(NI9234, National Instruments)を介してパソコンに収録し、MATLAB®(R2022b, MathWorks®)で周波数解析を行った。ねじり振動法では幅40 mm(R)の試験体のまさ目面の角に加速度ピックアップを配置し、別の角をハンマーで加振した。解析によって得られた基本振動数 f (Hz)を使って縦振動法では式(1)によって繊維方向の弾性率 E (GPa)、ねじり振動法では式(2)によってせん断弾性率 G (GPa)を求めた。

$$E = 4l^2 \rho f^2 \quad (1)$$

$$G = 4l^2 \rho f^2 \frac{\left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right)}{k} \quad (2)$$

ここで l は試験体長さ、 ρ は密度、 f は振動数、 a 、 b はそれぞれ矩形断面の長辺と短辺、 k は係数($k = 0.894$)である¹⁰⁾。

2.3 木琴音板の振動モード

実験によって得られた物性値をもとに有限要素法によって振動モード解析を行い、固有振動数を予測

した。解析にはFUSION 360 (Autodesk®)を使用した。同アプリケーションソフトは等方性材料に対応しており、異方性材料の解析ができない。そこで、木材を繊維方向の弾性率とせん断弾性率、およびポアソン比からなる等方性材料と仮定して解析を行った。ポアソン比は等方性材料にのみ対応しているFUSION 360では0.5以上の値は入力できないので0.40とした。シミュレーションモデルでは材端から67 mmの位置で直径1 mmのナイロンワイヤーで固定した。

2.4 木琴音板形状の振動性能評価

木琴音板の振動特性をたわみ振動法によって測定した。木琴音板の中央に加速度ピックアップを設置し、反対側から木製マレットで5回ずつ加振して振動波形を縦振動法と同様の方法で収録した。振動データのサンプリングレートは51200 Hzで、収録時間は2秒間とした。試験体は矩形試験体のたわみ振動の節の位置である材端から67 mmの位置で2本のナイロンコートワイヤー(直径0.3 mm)で支持した。ワイヤーにはおもりを吊り下げて張力を与え、試験体の重みで支持金具に接触しないようにした。軸受けで自由に回転する木製シャフトに木製マレットが固定されており、木製シャフトが回転することで木製マレットが振り子のように試験体を打撃した(Fig. 2)。打撃力は木製マレットの振り出し高さを試行錯誤で調整し、適度な加振強度を決定した。

加速度ピックアップから得られた信号をMATLABのFFT関数やSpectrogram関数で解析を行った。Spectrogram関数は短時間窓FFT(STFT)であり、window幅5.0 ms(256点)、オーバーラップ4.7 ms(240点)、回転因子数(巡回周波数)256とした。

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau - t) x(t) e^{-i \cdot 2\pi f \cdot \tau} d\tau \quad (3)$$

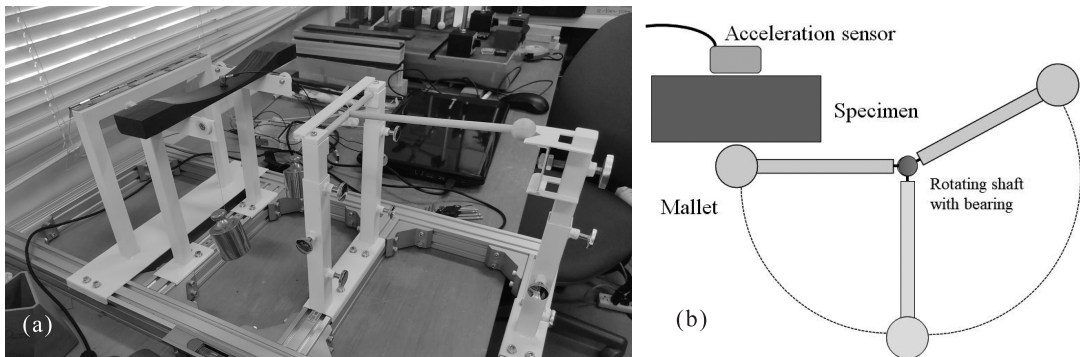


Fig. 2. Experimental setup for impact vibration test ; (a) setup for impact test, (b) impact section.

ここで t は時間, f は周波数, $w(t)$ は窓関数である。時間経過とともに信号が周波数ごとに指数関数的に減少すると仮定すると, パワースペクトルは次のように表される。

$$P(t, f) = |\exp[-2\varepsilon(f) \cdot t] \cdot X^2(0, f)| \quad (4)$$

ここで $\varepsilon(f)$ は周波数 f での減数係数で, 両辺の対数から求めることができ (式 (5)), 周波数 f で除することで対数減衰率 λ を求めることができる。

$$\ln[P(t, f)] = -2\varepsilon(f) \cdot t + 2 \ln|X(0, f)| \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\varepsilon(f)}{f} \quad (6)$$

3. 結果と考察

3.1 ローズウッドと里山広葉樹材の物性値

縦振動法とねじり振動法によって測定したローズウッドおよび3種類の里山広葉樹材の物性値を Table 1 にまとめる。含水率は60℃の減圧条件で24時間乾燥した状態を全乾重量として全乾法で求めた。減圧には油回転真空ポンプ (PD-102, ヤマト科学(株), 到達圧力6.7 Pa) を使用した。抽出成分の影響のためかローズウッドの含水率が低くなった

が, ローズウッドの密度が一番大きく, 縦弾性率やせん断弾性率はおおむね密度に比例する結果となった。

3.2 有限要素法解析による振動モード解析

等方性材料と仮定して Table 1 の物性値とポアソン比 (0.40) を使って有限要素法解析で得た振動モード毎のたわみ振動数を Table 2 に示す。本研究では, 試験体中央を加振するので1次 (基本振動), 3次および5次の振動モードが励起すると考えた (Fig. 3)。1次振動に対する3次振動モードおよび5次振動モードの比率は, 樹種によって多少の変動はあるが主に形状に依存していることがわかる。たとえば, 矩形型では3次振動モードは1次振動モードの約5倍であるが, マリンバ型では6.3倍, シロフォン型では7.7倍である。基本たわみ振動周波数に対する高次たわみ振動の周波数の比率は樹種よりも木琴音板の形状に依存している。また, マリンバ型およびシロフォン型の基本振動数は約400 Hz の場合には3次振動モードは2000~3000 Hz, 5次振動は6000~8000 Hz であった。

3.3 木琴音板のたわみ振動解析

有限要素法によるモード解析の結果を参考に, 木琴音板のたわみ振動解析の結果から1次振動モー

Table 1. Mechanical properties of wood specimen obtained via impact test.

Species	N	Density (kg/m ³)	M.C.* (%)	Elastic modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)
Rosewood	5	1163 ± 23	1.4	18.5 ± 0.8	2.19 ± 0.06
Shirakashi	5	945 ± 22	6.9	16.4 ± 1.4	1.70 ± 0.06
Konara	5	720 ± 51	6.1	13.2 ± 2.0	1.12 ± 0.06
Yamazakura	5	663 ± 18	4.7	14.6 ± 1.7	1.20 ± 0.18

*Moisture content calculated based on oven-dried weight under vacuum at 60 °C.

Table 2. Vibration frequencies of deflection vibration mode obtained via FEM analysis.

Specimen Type	Species	f_1^* (Hz)	f_3^* (Hz)	f_3/f_1	f_5^* (Hz)	f_5/f_1
Rectangular	Rosewood	906.6	4809	5.3	10296	11.4
	Shirakashi	945.6	5016	5.3	10738	11.4
	Konara	979.6	5296	5.4	11081	11.3
	Yamazakura	1073.0	5798	5.4	12140	11.3
Marimba	Rosewood	386.8	2698	7.0	7188	18.6
	Shirakashi	403.4	2814	7.0	7497	18.6
	Konara	414.7	2892	7.0	7707	18.6
	Yamazakura	454.2	3169	7.0	8444	18.6
Xylophone	Rosewood	453.3	3695	8.2	8651	19.1
	Shirakashi	472.7	3854	8.2	9023	19.1
	Konara	486.0	3961	8.2	9275	19.1
	Yamazakura	532.5	4340	8.2	10162	19.1

* f_1 , f_3 , and f_5 indicate the vibration frequencies of the first, third, and fifth modes, respectively.

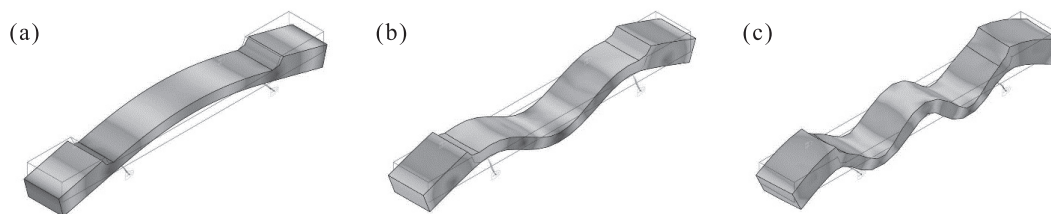


Fig. 3. Deflection vibration mode; (a) first mode, (b) third mode, (c) fifth mode.

ド、3次振動モードおよび5次振動モードの周波数を同定した。FFT解析によって得られた振動モードの周波数を Table 3 に示す。有限要素法解析の結果と同様の傾向を示したが、5次振動モードでは計算値と実験値では違いが大きくなった。

Fig. 4 に短時間窓 FFT 解析 (STFT) によって得られたローズウツドのスペクトログラムの例を示す。複数の周波数の振動が励起しており、時間とともに減衰していく様子がわかる。その減衰の様子は

周波数ごとに異なっており、試験体の形状でも異なることがわかる。1次と3次および5次の振動モードに該当する周波数の減衰の様子を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。STFT の窓関数の幅を 5.0 ms に設定しているため、サンプリング区間 2 s で解析した Table 1 のデータに比べて周波数分解能は劣っていた。矩形型とマリンバ型では周波数が異なっているが、矩形型に比べてマリンバ型の減衰が遅いことがわかる。また、3次振動モードは初期には1次振動

Table 3. Vibration frequencies of deflection vibration mode obtained via vibration test.

Specimen type	Species	f_1^* (Hz)	f_3^* (Hz)	f_3/f_1	f_5^* (Hz)	f_5/f_1
Rectangular	Rosewood	925.2	4430	4.8	9169	9.9
	Shirakashi	933.4	4363	4.7	8844	9.5
	Konara	1025.6	4568	4.5	8843	8.6
	Yamazakura	1157.2	5098	4.4	9605	8.3
Marimba	Rosewood	386.5	2405	6.2	6265	16.2
	Shirakashi	391.0	2316	5.9	5748	14.7
	Konara	413.1	2428	5.9	5963	14.4
	Yamazakura	459.0	2725	5.9	6496	14.2
Xylophone	Rosewood	481.6	3366	7.0	7933	16.5
	Shirakashi	443.4	3259	7.4	7428	16.8
	Konara	477.7	3389	7.1	7429	15.6
	Yamazakura	543.2	3769	6.9	8052	14.8

* f_1 , f_3 , and f_5 indicate the vibration frequencies of the first, third, and fifth modes, respectively.

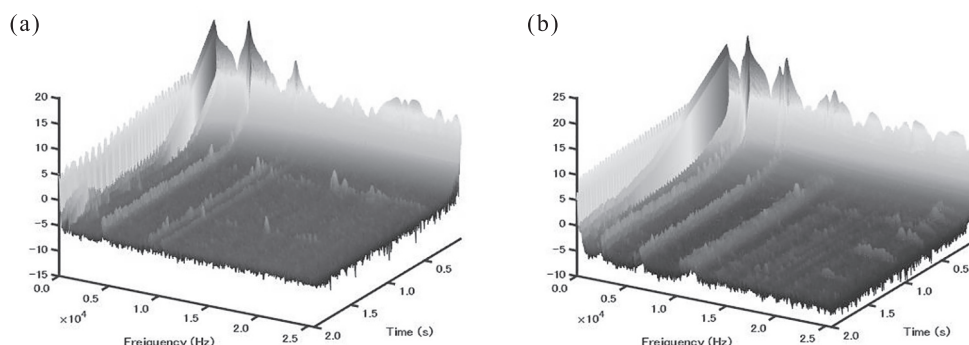


Fig. 4. Spectrogram of rosewood specimen obtained via STFT; (a) rectangular type, (b) marimba type.

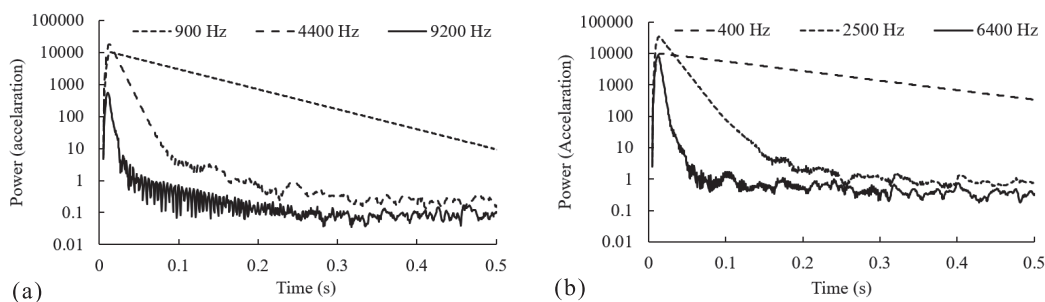


Fig. 5. Time-series variations in acceleration signal extracted from spectrogram (rosewood); (a) rectangular type, (b) marimba type.

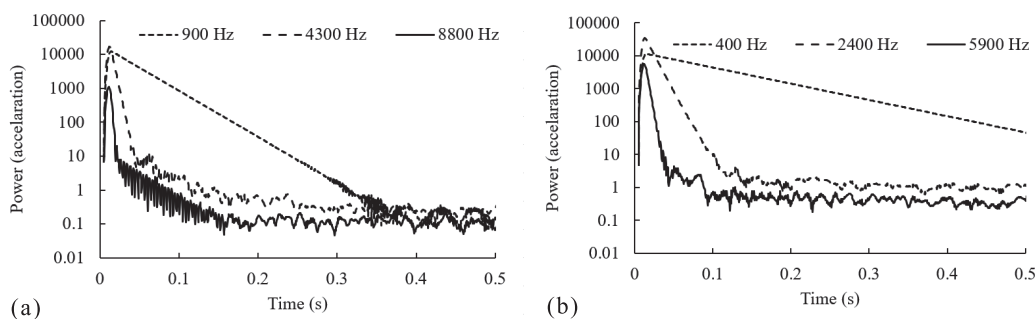


Fig. 6. Time-series variations in acceleration signal extracted from spectrogram (shirakashi); (a) rectangular type, (b) marimba type.

モードよりも振幅が大きくなり、そして、すぐに減衰していることがわかる。高次周波数は音色に関係しており、特に立ち上がり部分では3次と5次の周波数成分が多く、早く減衰することで音色が変化していることがわかる。また、3次と5次の振動では2段階の減衰が確認できる。ピアノや弦楽器で2段階の減衰が確認されており、音色に影響することが指摘されている¹¹⁻¹³⁾。本実験では3次振動モードと5次振動モードの減衰は1次振動モードに類似しており、共鳴によって励起している可能性がある。しかし、振幅は非常に小さく、音色への効果は限定的である。

振動モードごとの振幅の時間変化について、初期のピーク高さと減衰に注目した。1次振動モードに対する3次および5次の振動モードのピーク高さ比の比較をFig. 7に示す。矩形形状では1次振動モードと3次振動モードの振幅のピーク高さ比はほぼ同じであるのに対して、木琴音板形状では3次振動モードは1.5～2倍になっていた。5次振動モードではピーク高さ比は矩形形状では1次振動モードの20～25%であるのに対して、木琴音板形状では半分

程度となっていた。マリンバ型の方がシロフォン型より5次振動モードの相対ピーク高さ比は大きかった。人の声では基音・第2倍音が強いと柔和で落ち着いた音質となり、第3倍音が強いと音の輪郭が明瞭になる¹⁴⁾。木琴音板形状では3次振動モードの成分が強くなることで音の輪郭が明瞭になっていると考えられる。樹種ごとの比較ではローズウッ드의相対ピーク高さ比がほかの樹種に比べて大きく、より音が明瞭であろう。

振動モードごとの対数減衰率の比較をFig. 8に示す。Fig. 4およびFig. 5では矩形型の減衰がマリンバ型に比べて早いように見えたが、振動1周期当たりの減衰を示す対数減衰率では形状の影響は大きくなく、樹種による影響が大きいことがわかる。3次振動モードの対数減衰率は1次振動モードの値よりかなり大きく、3次振動モードの影響は振動開始のごく初期であることがわかる。樹種ごとの比較では、1次振動モードではローズウッ드의対数減衰率は他樹種に比べて小さく、かつ3次振動モードではローズウッドとシラカシは似た傾向を示していた。3次振動モードの対数減衰率ではローズウッドとシラカ

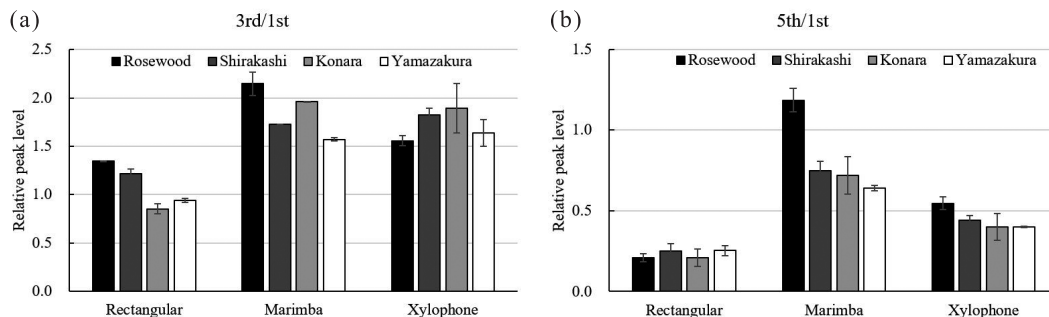


Fig. 7. Normalized peak level of acceleration signal based on first deflection vibration mode; (a) third vibration mode; (b) fifth vibration mode. Error bars indicate standard deviations.

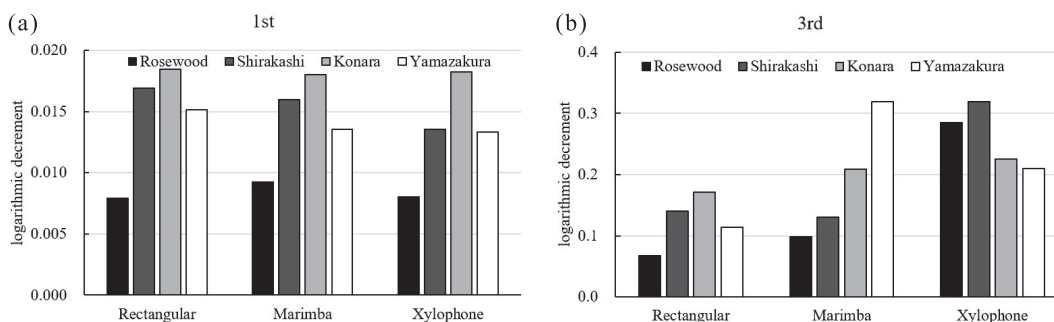


Fig. 8. Comparison of effect of bar-shape on the logarithmic decrement of acceleration signal by tree species; (a) first vibration mode, (b) third vibration mode.

シは他の樹種にくらべて、マリンバ型では小さく、シロフォン型では大きかった。振動の減衰の点ではローズウッドはもっとも優れ、今回検討した3樹種の里山広葉樹材でローズウッドの代替は難しい。

4. 結 論

マリンバやシロフォンなどの木琴音板形状であることがたわみ振動に与える影響を検討し、熱帯産の貴重なローズウッドを国内の里山から入手できる広葉樹材で代替が可能か検討した。1次と3次および5次のたわみ振動モードに着目し、振動の立ち上がり部分とその後の減衰の点から木琴音板形状の特徴にしたがって、ローズウッドと国産里山広葉樹材を比較した。検討の結果、以下の結論を得た。

1. 矩形型音板と木琴型音板（マリンバ型、シロフォン型）の中央を加振することで、1次、3次および5次のたわみ振動が励起され、有限要素法解析と合わせて各振動モードの周波数を同定できた。
2. 短時間窓FFT（STFT）によって各振動モードの時間変化を得ることができた。振動の直後に

は1次振動モード、3次振動モードおよび5次振動モードのたわみ振動が励起し、3次振動モードと5次振動モードの振動はすぐに減衰していた。3次振動モードと5次振動モードのたわみ振動の減衰は2段階あり、1段目の減衰は早く、2段目は1次振動モードの減衰に類似していた。

3. 3次のたわみ振動モードの振幅（加速度）は1次振動モードの振幅に対して大きく、木琴音板の形状では1.5～2倍であった。5次振動では矩形型音板の振幅は1次振動の4分の1程度に対して、木琴音板形状では2分の1程度であった。木琴音板形状では高次振動の割合が大きく、音の明瞭さに影響を与えているかもしれない。
4. ローズウッドの1次振動の対数減衰率は3種の里山広葉樹材に比べて小さく、振動の減衰の点では里山広葉樹材での代替は難しい。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費助成事業（科学研究費補助金）基盤研究(B)（一般）課題番号20H01740

(代表 東原貴志) の助成を受けたものである。実験の遂行ならびに試験体準備にあたり京都大学大学院の澤田 豊氏, 知多カリモク株式会社 平野 葵氏, 株式会社カンディハウス 伊丹英明氏, 石谷林業(株) 石谷樹人氏には多大な協力をいただいた。この場を借りてお礼申し上げる。

文 献

- 1) Leonarudo Guitar Research Project. <https://leonardo-guitar-research.com/> 2023年 3 月 7 日参照.
- 2) 村田功二: 関西支部第8回早生植林材研究会シンポジウム 生物多様性と里山の管理・活用. 木材工業 77(3), 98-101 (2022).
- 3) 村田功二: 産学官共催セミナー 里山の資源を考える. 木材工業 78(3), 108-111 (2023).
- 4) 村田功二, 中野真央, 山田範彦, 仲村匡司, 村井洸大, 伊藤真浩: 里山広葉樹アベマキの用材利用についての考察. 木材工業 77(7), 256-261 (2022).
- 5) Wegst, U.G.K.: Wood for sound. *Am. J. Bot.* 93(10), 1439-1448 (2006).
- 6) Aramaki, M., Baillères, H., Brancheriau, L., Kronland-Martinet, R., Ystad, S.: Sound quality assessment of wood for xylophone bars. *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 2407-2420 (2007).
- 7) Brémaud, I., Amusant, N., Minato, K., Gril, J., Thibaut, B.: Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). *Wood Sci. Technol.* 45, 461-472 (2011).
- 8) Danihelová, A., Čulík, M., Němec, M., Gejdoš, M., Danihelová, Z.: Modified wood of black locust - alternative to honduran rosewood in the production of xylophones. *Acta Phys. Pol.* 127(1), 106-109 (2015).
- 9) 青木 務: 木製楽器の音色と官能評価 (I) - 木琴を用いての評価 -. 木材工業 46(9), 407-411 (1991).
- 10) 日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル (2011). <https://www.howtec.or.jp/files/libs/1828/201712121507021978.pdf> 2023年 3 月 7 日参照.
- 11) Hundley, T.C., Benioff, H., Martin, D.W.: Factors contributing to the multiple rate of piano tone decay. *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 1303-1309 (1978).
- 12) Woodhousea, J.: A necessary condition for double-decay envelopes in stringed instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 150, 4375-4384 (2021).
- 13) 西宮康治朗, 照屋武志, 羽地龍志, 谷口真吾: 三線の棹材に用いられる木材の動的ヤング率と減衰係数の評価および楽器としての音響特性評価. 木材学会誌 68(1), 43-52 (2020).
- 14) 猪本 修, 大村優華: ヒトの声を題材にした音と音色の物理教材. 日本科学教育学会研究会研究報告 34(10), 5-10 (2020).