

ダケカンババットの振動特性と反発性能^{*1}

村田功二^{*2}, 富田夏生^{*2,3}, 仲村匡司^{*2}, 秋津裕志^{*4},
大崎久司^{*4}, 浦上 晃^{*5}, 池田真一^{*6}

Restitution Performance and Vibration Properties of Dakekanba (*Betula ermanii*) Baseball-bats^{*1}

Koji MURATA^{*2}, Natsuki TOMITA^{*2,3}, Masashi NAKAMURA^{*2},
Hiroshi AKITSU^{*4}, Hisashi OHSAKI^{*4}, Akira URAKAMI^{*5}
and Shinichi IKEDA^{*6}

In our previous study, the wood from the dakekanba tree (*Betula ermanii*), which is native to Japan, was found to be a material suitable for baseball bats. We hypothesized that the 'tapping sound' of a dakekanba bat is related to the grain angle (*SoG*, slope of grain) of the wood. In this study, we examined the vibration properties of dakekanba bats and investigated the effects of *SoG* on the vibration properties. Additionally, we measured the ball-bat coefficient of restitution (*BBCOR*) of the dakekanba bat and other bat types. The primary natural longitudinal vibration frequency was found to be related to the *SoG* and correlated with the function of grain angles derived based on the orthotropic elastic theory. The tapping sound may be a useful factor for evaluating the performance of a baseball bat. When a ball impacted the bat at 120 km/h, the *BBCOR* of the dakekanba bats was higher than that of both the maple and ash bats. Moreover, the loss tangent of longitudinal vibration exhibited a negative correlation with the *BBCOR* of the dakekanba bats in comparison with the other bat types. Loss tangent reflects energy loss in vibration. Thus, it can be concluded that the energy loss that occurs during ball impact may affect the restitution performance.

Keywords : baseball bat, dakekanba, vibration property, *SoG*, *BBCOR*.

これまでの研究で国産材であるダケカンバ (*Betula ermanii*) が野球バットとして利用できることが分かった。ダケカンババットについて打音に関係するだろうと考えられる繊維傾斜角とバットの振動特性の関係を調べ、タモバットおよびメープルバットと比較した。また、反発性能としてボール・バット反発性能 (*BBCOR*) を測定し、振動特性との関係を調べた。その結果、縦

^{*1} Received April 28, 2020; accepted August 7, 2020. 本研究の一部は第69回日本木材学会大会 (2019年3月, 函館) において発表した。

^{*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: 株式会社リクルートマーケティングパートナーズ Recruit Marketing Partners Co. Ltd., Tokyo 141-0021, Japan

^{*4} 北海道立総合研究機構林産試験場 Forest Products Research Institute, Hokkaido Research Organization, Asahikawa 071-0198, Japan

^{*5} 富山県産業技術研究開発センター生活工学研究所 Toyama Industrial Technology Research and Development Center Human Life Technology Research Institute, Nanto 939-1503, Japan

^{*6} 株式会社ロンウッド Lonwood Co. Ltd., Nanto 939-1626, Japan

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

振動の固有振動数は繊維傾斜角と関係し、直交異方性弾性体として導かれた弾性率の換算式とよく適合した。打音は繊維傾斜角と関係し、バットの性能の指標となりうることが確認できた。各種バットに球速120 km/hで衝突させたときのBBCORを測定した結果、ダケカンババットは最も優れた反発性能を示した。またBBCORはバットの内部摩擦と負の相関がみられ、衝撃によるエネルギー損失が反発性能と関与する可能性がある。

1. 緒 言

アメリカではホワイティアッシュ (*Fraxinus americana*) が長年にわたりバット用材として使われてきたが、1990年代にシュガーメープル (*Acer saccharum*) がそれに置き換わった¹⁾。さらに2010年ごろからイエローバーチ (*Betula alleghaniensis*) が使用され始め、現在はメジャーリーグの選手の10-15%がイエローバーチバットを使用しているともいわれている²⁾。一方、日本ではかつてはヤチダモ (*F. mandshurica* var. *japonica*) やアオダモ (*F. lanuginosa*) がバット用材として使われ、現在は9割以上の選手が輸入材のシュガーメープルを主としたハードメープルバットを使用しているとされる。富田らはイエローバーチと同じカバノキ属であるダケカンバ (*Betula ermanii*) が野球バットに利用できることを示した³⁾。ダケカンバは国産材であり、北海道では資源量も多く⁴⁾、掻き起こし施業により更新も容易で持続性が高い樹種である。年間20万本の需要があるとされる国内の木製野球バット市場を鑑みると、国産材をバット用材として用いることは国内の林業の活性化をもたらす、地方創成に貢献できるものと考えられる。

野球バットに適する材は経験で評価され、職人や選手は角材やバットを床に落下させたときの衝撃音から良し悪しを判断してきた。浦上らは野球バットの反発性能評価基準の一つであるボール・バット反発係数 (BBCOR: Ball-Bat Coefficient of Restitution) をハードメープルバットで測定し、床に落下させたときの衝撃音の高さと比較した⁵⁾。その結果、衝撃音と高さとBBCORに相関がみられた。しかしこの2つの現象を結びつける説明はなされていない。プレー中に生じる危険なバットの分離破損⁶⁾には繊維傾斜角の影響が大きいとされ、メジャーリーグではハードメープルバットの繊維傾斜角 (SoG, Slop of Grain) は3度以下と規定されている⁷⁾。安全性の点からも野球バットの客観的な品質評価は重要であり、メープルと同じ繊維走向の判定が難しい散孔材のダケカンバでも同様に評価されるべきである。本研究では、ダケカンババットの打音に関係するであろう固有振動数と反発性能 (BBCOR)

の関係を考察し、他のバット用材と比較することで反発性能に関係する因子を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体

北海道産ダケカンバ原木10本 (平均末口径24.6 cm) から角材 (約120×10×10 cm) に製材し、高周波減圧乾燥により含水率を8~10%に調整した。その後に硬式バット用に選別した角材から硬式用バットを20本作製した。バットの製作に使用した角材20本の平均密度は645±19 kg/m³であった。また公式試合で使用されているシュガーメープル、タモ (*Fraxinus* sp.) の硬式用バットをそれぞれ1本ずつ用意した。バットの加工はすべて (株) ロンウッドで行い、形状はすべて同じで塗装はされていない。全ての試験体は湿度のコントロールがない室内で2週間程度調湿した。各バットについて、重量、繊維傾斜角 (SoG)、固有振動数を測定した。

2.2 繊維傾斜の測定

試験体のまさ目面と板目面の繊維傾斜角度 (SoG) を測定した。散孔材板目面のSoGは測定が難しいため、板目面に滴下したインクの滲みで繊維走行を確認するインクドット法で測定した^{3,7)}。SoGは繊維が試験体長軸に沿った基準線から1 cmの幅で外れるまでの距離をX cmとし、なす角θを式 (1) によって求めた。測定はグリップエンド側から約30 cm離れた地点で行った。板目面、まさ目面のSoG (°) をそれぞれTaSoG, RaSoGとし式 (2) より全体の繊維傾斜角度 TrueSoGを求めた。

$$\theta = \tan^{-1}(1/X) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

$$\text{TrueSoG} = \sqrt{(\text{TaSoG})^2 + (\text{RaSoG})^2} \quad (2)$$

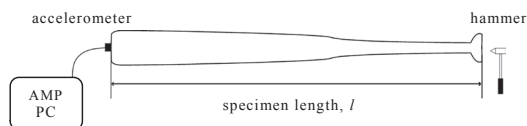


Fig. 1. Schematic of apparatus used to measure longitudinal vibration.

2.3 固有振動数の測定 (縦振動法)

それぞれのバットの固有振動数は縦振動法によって測定した (Fig. 1)。バットのグリップエンド側に加速度ピックアップ (株東陽テクニカ, PCB 353B15) を設置した。バレル先端をインパクトハンマー (株東陽テクニカ, PCB086C03) で5回ずつ加振して振動波形を収録した (National Instruments NI-9402)。減衰性能を評価するため、加速度ピックアップから得られた信号を MATLAB (Math Works, 2018b) の Spectrogram 関数を利用して短時間窓 FFT 解析 (STFT) を行った。振動データのサンプリングレートは51200 Hz であり、window 幅 5.0 ms (256 Hz), オーバーラップ 4.7 ms (240 Hz), 回転因子数 (巡回周波数) 256に設定した。

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

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、振幅スペクトルは次のように表される。

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

ここで $\varepsilon(f)$ は周波数 f での減衰比で、両辺の対数から求めることができ (式 (5)), 周波数 f での損失正接 ($\tan \delta$) や内部摩擦 Q^{-1} 値が計算される。本研究では基本周波数の損失正接 ($\tan \delta$) に注目した。

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

$$\tan \delta(f) = Q^{-1}(f) = \frac{\varepsilon(f)}{\pi f} \quad (6)$$

2.4 バットの反発性能 (BBCOR)

BBCOR 測定については富山県産業技術研究開発センター生活工学研究所の衝撃力負荷装置を用いて測定した (Fig. 2)。試験体にはタモ、シュガーメープルを1本ずつと、ダケカンバのバットは20本のうち、固有振動数が最も高いもの、最も低いもの、そして平均値に最も近いものの3本を用いた。それらのダケカンババットの固有振動数は、高いものから順に2686 Hz, 2553 Hz, 2429 Hzであった。バットのグリップ部分を回転可能に固定し、バレル先端から15 cm の地点に120 km/h の速さでボールを衝突させ、式 (7) によって BBCOR の値 (e) を得た⁸⁾。

$$e = \frac{v_r}{v_i} (1 + r) + r \quad (7)$$

$$r = \frac{mb^2}{I} \quad (8)$$

ここで、 v_i と v_r はそれぞれボールの衝突速度と反

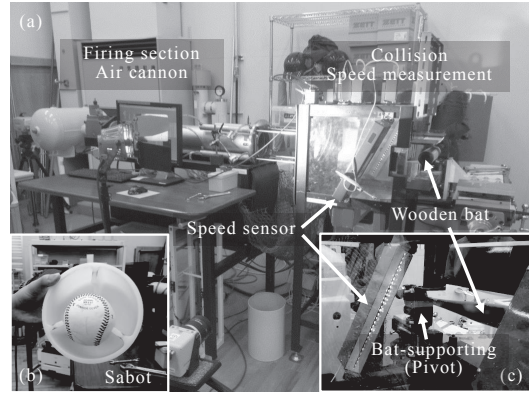


Fig. 2. (a) Air cannon testing system for Ball-Bat Coefficient of Restitution (BBCOR), (b) sabot to fire a ball, (c) collision and speed measurement section. A wooden bat imitation is shown for demonstration.

発速度, r はバットの回転モーメントなどを考慮した反発因子, m はボールの質量, b は支点から衝突点までの距離, I は支点に対するバットの回転モーメントである。ボールは Fig. 2 に示される装弾筒 (sabot) に置かれ、無回転で発射した。ボールの縫い目でバットに衝突しないようにボールの位置を配慮し、全ての実験で同一の硬式球を使用した。この衝撃力負荷装置 (BBCOR 測定装置) は金属製および FRP 製のバットを想定して開発されたものであり、木製バットでの実験で行うと Fig. 2c で示されるバット支持部 (Pivot) での破損がみられた。そこで試行錯誤により破損が生じない120 km/h を衝突速度とした。

3. 結果と考察

3.1 固有振動数と BBCOR の関係

縦振動法によって得られた各種バットの固有振動数を Table 1 に示す。試験体数に大きな差があるがダケカンバ (dakekanba) の固有振動数はタモ (ash) やメープル (maple) より高くなった。減衰比や内部摩擦 ($\tan \delta$) は振動の減衰能に関係し、打撃によるしびれとの関連も考えられる。バットによる打撃は曲げ変形であり縦振動とは必ずしも一致しないが、経験的にタモバットはあまりしびれないとされる。タモの $\tan \delta$ はメープルよりも大きいので経験的な感覚と矛盾しない。ダケカンバはメープルと同等であり、腕に伝わる振動の減衰はメープルバットに近い可能性がある。しかし打撃時のしびれに関しては分からないことが多く、さらに詳しい検討が必要であろう。

Table 1. Primary natural frequency and *SoG* of baseball-bat specimens.

Species	N	Weight (g)	Primary natural frequency (Hz)	$\tan \delta$	<i>TrueSoG</i> (degree)
Ash	1	886.7	2430	0.0250	5.0
Maple	1	865.6	2423	0.0146	1.0
Dakekanba	20	879.5 $\pm 26.5^*$	2583 $\pm 64^*$	0.0141 $\pm 0.0038^*$	3.6 $\pm 2.2^*$
	Min.	830.5	2453	0.0107	1.0
	Max.	916.0	2684	0.0257	7.8

*standard deviation.

既往の研究³⁾ではハンキンソン式により *SoG* と衝撃曲げ強度には関係があることが確認された。固有振動数は弾性率と関係し、木材の弾性率 E_θ は直交異方性弾性体として主軸との角度 θ の換算式が得られる⁹⁾。

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\mu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (9)$$

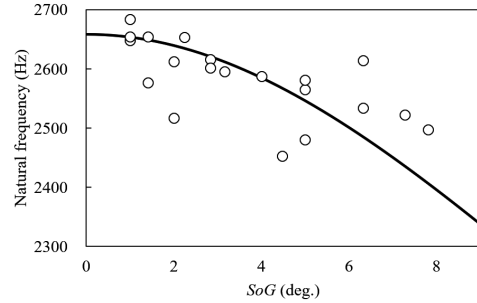
ここで E_1 と E_2 はそれぞれ直交座標に対応する弾性率であり、 G_{12} と μ_{12} はそれぞれせん断弾性率とポアソン比である一方、長さ l の断面積が一定の棒状試験体の縦振動の固有振動数 f は下記の式で得られる。

$$f = \frac{n}{2\pi l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (10)$$

ここで ρ は材料の密度であり、 n は振動モードの次数である。バットの断面は一定ではないが、全ての試験体は同じ形状であるとして形状因子 $H(n, l)$ を仮定すると、バットの縦振動の固有振動数 f と繊維傾斜角 θ の関係として以下が得られる。ここで、木材の繊維方向の弾性率を E_L 、それに直交する方向の弾性率を E_T とする。

$$\begin{cases} f = H(n, l) \sqrt{\frac{E_\theta}{\rho}} \\ \frac{1}{E_\theta} = \frac{1}{E_L} \left[\cos^4 \theta + \frac{1}{E_T/E_L} \sin^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{LT}/E_L} - \frac{2\mu_{LT}}{E_T/E_L} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right] \end{cases} \quad (11)$$

ここで l はバットの長さ、基本振動数の場合の振動モードの次数は $n=1$ である。直交異方性材料としてのダケカンバの諸物性 (E_T , G_{LT} , μ_{LT}) は不明なので Wood handbook に掲載されている同じカバノキ属のイエローバーチのデータを引用し、 $E_T/E_L = 0.050$, $G_{LT}/E_L = 0.068$, $\mu_{LT} = 0.451$ とした¹⁰⁾。ダケカンババットで得られた固有振動数と式 (11) を非線形最小二乗法でフィッティングして得られた曲線

Fig. 3. Relationship between slope of grain (*SoG*) and primary natural frequency. circle: measured data, line: fitted curve.

を Fig. 3 に示す。測定値にばらつきはあるものの式 (11) は *SoG* と実測された固有振動数の関係をよく表している。繊維傾斜角はバットの強度指標として重要である^{3,7)}。固有振動数もバットの性能を評価する指標になりうることが確認された。浦上⁵⁾の実験より、同じ樹種ではバットの衝撃音と反発性能には相関が確認されている。式 (11) より固有振動数に弾性率と *SoG* が影響することが確認されたので、バットの反発性能には長さ方向の弾性率つまり曲げ弾性率が影響すると考えられる。

3.2 反発性能に関する因子

ダケカンババット3本とタモバットとメープルバットそれぞれ1本の *BBCOR* を測定した結果を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。*BBCOR* は3回の衝突によって得られた値の平均値とした。ボールの衝突速度が 120 km/h の時、3種類のバットの中でダケカンババットの *BBCOR* が最も高かった。Fig. 4 では反発性能と関係すると考えられた固有振動数との関係を示した。固有振動数が最も低いダケカンババットは、今回用いたタモバットとメープルバットとほぼ同じ固有振動数であった。しかしそれらの *BBCOR* は大きく異なった。また3本のダケカンババットでは *BBCOR* がほぼ同じにも関わらず、固有振動数には

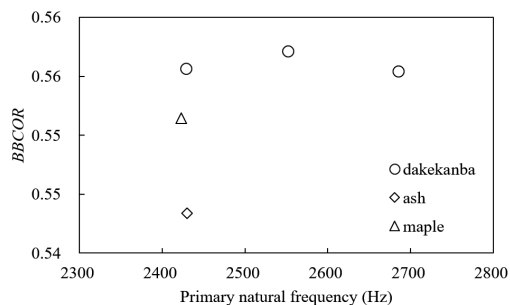


Fig. 4. Relationship between primary natural frequency in longitudinal vibration and *BBCOR* of baseball bats. *BBCOR* is the average of three collisions at 120 km/h.

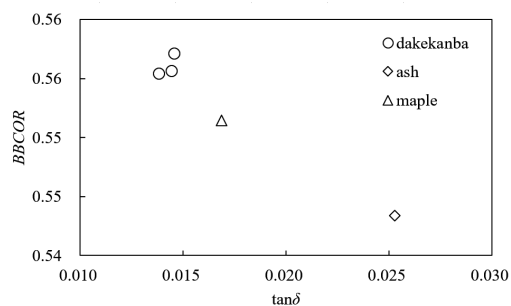


Fig. 5. Relationship between loss tangent ($\tan\delta$) in longitudinal vibration and *BBCOR* of baseball bats. *BBCOR* is the average of three collisions at 120 km/h.

差が見られた。バットの反発性能には縦振動の固有振動数、つまり縦弾性率の他にも影響する因子があると考えられる。

次に基本振動の減衰比から求めた損失正接 ($\tan\delta$) と *BBCOR* の関係を Fig. 5 に示す。それらには負の相関がみられ、損失正接が大きいと反発性能が低下する傾向があった。内部摩擦によって振動エネルギーは熱エネルギーと変わり散失するとされる。ボールの衝突時にバットに運動エネルギーが伝わるが、いくらかは内部摩擦によって失われ、反発時にボールに伝えられる運動エネルギーが減少する。バット内部でのエネルギー損失が大きいほど、反発性能が低下する可能性があることが示された。

本研究では木製バットの損失正接と *BBCOR* に相関がみられる結果となったが、試験手法の関係から、ダケカンババットの *BBCOR* 測定は 3 本、それ以外は 1 本だけとなった。しかし木材の物性には個体差の影響が大きく、さらに多くの試験体での測定が期待される。

4. 結 論

ダケカンババットの性能評価を目的として、繊維傾斜角 (*SoG*)、打音による判定 (固有振動数や損失正接)、反発性能 (*BBCOR*) を測定し、関係を考察した。その結果、以下の結論を得た。

1. バットの長さ方向の縦振動を測定した結果、*SoG* が大きいと固有振動数が低下する傾向にあった。直交異方性弾性体として木材の繊維方向の弾性率を *SoG* に従って座標変換した結果、固有振動数の変化とほぼ一致した。同じ樹種間では衝撃音と反発性能に相関がみられることから、繊維傾斜角がバットの剛性および反発性能に影響していると考えられる。また、打撃検査が品質評価に利用可能であることが確認された。
2. ダケカンバ、タモ、メープルのバットの縦振動試験の結果と *BBCOR* を比較したところ、基本固有振動と *BBCOR* には相関がみられなかった。損失正接 ($\tan\delta$) と *BBCOR* には負の相関がみられ、バットの内部摩擦つまりエネルギー損失が反発性能に影響する可能性がある。

本研究ではバットの縦振動のみを評価したが、実際の打撃は曲げ変形と表面圧縮が生じている。今後は実際の変形に即した物性評価を検討する必要がある。

文 献

- 1) Boltz, B., Jan Wiedenbeck, J.: Strike one! Aluminum. Strike two! Maple. Will EAB be strike three? Proceedings of symposium on ash in North America, Princeton, WV USA, 2010, pp. 26-31.
- 2) Fitzpatrick, F.: Ashes of an industry: A Pennsylvania tradition is dying, one baseball bat at a time. The Philadelphia Inquirer (June 14, 2018), <https://www.inquirer.com/philly/sports/baseball-bats-emerald-ash-borer-louisville-sluggers-20180614.html> 2020年4月22日参照。
- 3) 富田夏生, 村田功二, 仲村匡司, 秋津裕志, 大崎久司: ダケカンバ材の野球バット適性の評価. 木材学会誌 66(1), 39-45 (2020).
- 4) 大崎久司, 村上 了, 秋津裕志: 北海道厚真町産カンバ人工林材の材質特性. 木材学会誌 65(4), 189-194, (2019).
- 5) 浦上 晃, 上野 実, 羽柴利直, 池田真一, 大島賢二: 木製バットの打音による反発性能判定

- に関する研究. 富山県産業技術研究開発センター研究報告 **32**, 71 (2018).
- 6) 海老原 徹, 鷺見博史, 中野達夫: アオダモ, ヤチダモ材の衝撃曲げ性能に及ぼす人工乾燥および含水率の影響. 木材学会誌 **31**(12), 1040-1046 (1985).
- 7) Kretschmann, D.E., Bridwell, J.J., Nelson, T.C.: Effect of changing slope of grain on ash, maple, and yellow birch bending strength. Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, Trentino, Italy, 2010, 2, pp. 1014-1023.
- 8) Smith, L.V., Nathan, A.M., Duris, J.G.: A determination of the dynamic response of softballs. Sports Eng., DOI 10.1007/s12283-010-0041-4 (2010).
- 9) 棚橋英光, 清水秀丸, 鈴木祥之: パステルナータ・モデルに基づく直交異方性木材の部分圧縮による弾性表面変位. 日本建築学会構造系論文集 **609**, 129-136 (2006).
- 10) Forest Products Laboratory: "Wood Handbook", United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, USA, 2010, pp. 5-2.