

ダケカンバ材の野球バット適性の評価*1

富田夏生*2, 村田功二*2, 仲村匡司*2, 秋津裕志*3, 大崎久司*3

Use of Dakekanba Wood for Baseball-bats*1

Natsuki TOMITA*2, Koji MURATA*2, Masashi NAKAMURA*2,
Hiroshi AKITSU*3 and Hisashi OHSAKI*3

Dakekanba (*Erman's birch*) is a pioneer species that has not been used sufficiently in practical applications even though it is the most abundant wood source in the Hokkaido prefecture. We believe that it has potential as a valuable material for use in baseball bats. Assuming that the critical factor for baseball bats is an impact strength, we elucidated the relationships between slope of grain (*SoG*) and impact strength or impact fracture energy of dakekanba wood by conducting impact bending tests. Results revealed that the Hankinson equation could be used to calculate these relationships to impact strength because they were similar to those considered in previous studies of impact fracture energy. Cylindrical wood specimens such as bat grips were assessed in the impact bending tests, and dakekanba wood was compared with woods used for commercial bats. After impact strength were corrected based on *SoG* and density, both strength and fracture energy of dakekanba wood were found to be nearly the same as those of commercial wood species for baseball bats. Prototype bats of dakekanba wood were manufactured and experimentally used by a baseball club at Kyoto University. The prototypes were confirmed to have sufficient durability, as no bats broke during their one-week trial use. On a questionnaire survey, players responded with "good" or "normal" regarding bat feeling, flown distance, etc. after hitting with the prototypes. Our study reveals that dakekanba wood has good potential as a baseball-bat material.

Keywords : baseball bat, dakekanba, impact strength, impact fracture energy, Hankinson equation.

ダケカンバは北海道の先駆種でもあり蓄積量も多いが十分な活用がなされてこなかった。そこで価値の高い活用方法としてバット用材としての評価方法とその適正を検討した。バット用材に最も要求される物性を衝撃曲げ強度と考え、ダケカンバ材の繊維傾斜と衝撃曲げ強度および衝撃曲げ破壊エネルギーの関係を調べた。既存の報告に近い傾向が衝撃曲げ強度でも確認でき、ハンキンソン式の適用が可能であった。バット用材のグリップを模した試験体で衝撃曲げ試験を行い、既存のバット用材と比較した。密度および繊維傾斜を補正した結果、ダケカンバは既存のバット用材と破壊エネルギーと強度の両方で同等の性能を示した。実際に硬式野球バットを試作し、大学野球部で試打を行った。一週間の試打で破損は見られず実用に耐えうる事が確認できた。アンケートの結果では打球感や飛距離などでも「良い」や「普通」の回答が大半をしめ、実用上問題がないことが確認できた。

*1 Received June 17, 2019; accepted June 26, 2019. 本研究の一部は、日本木材学会大会(2018年3月、京都)で発表した。

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

*3 地方独立行政法人北海道立総合研究機構林産試験場 Hokkaido Research Organization Forest Products Research Institute, Asahikawa 071-0198, Japan

Corresponding author: K. Murata (murata@kais.kyoto-u.ac.jp)

1. 緒 言

現在国内で使用される野球の木製バットの多くは輸入材を利用して製造されており、国産材を利用したバットを手に入れることが難しくなっている。かつて日本ではヤチダモやアオダモなどの国産樹種がバット原料の主流であったが^{1, 2)}、優良な資源の減少によりそれらの供給が困難となった³⁾。米国でもホワイトアッシュが木製バットの主原料であったが、近年はシュガーメープルが多用されるようになり、日本でも輸入材であるメープル製のバットがほとんどを占めることとなった。しかし、国内の野球用バットはアマチュアを含めると年間20万本の需要があるとされており、これらの需要を国産材で補うことができれば国内の林業の活性化をもたらし、地方創成に貢献できるものと考えられる。

米国ではホワイトアッシュに代わる木製バット用材としてシュガーメープル、次いで第3の樹種としてイエローバーチが使用されている。そこでイエローバーチと同じカンバ属のダケカンバ (*Betula ermanii*) に注目した。ダケカンバは北海道を代表するパイオニアプランツの一つであり、成長が比較的早く掻き起こしなどにより造林も容易である。現在は支障木や針葉樹人工林の侵入木として伐採され出材されるが、主にパルプ用材として利用されている。ダケカンバの密度は約700 kg/m³であり、バットに利用される木材の密度範囲である550~750 kg/m³に一致する。より付加価値の高いバット用材としての利用が考えられることから、本研究ではダケカンバのバット用材としての適性を検討することとした。

米国メジャーリーグ (MLB) において木製バットの主原料がアッシュからシュガーメープルへとシフトした。それに伴いバットの危険な分離破損 (MPF, catastrophic multi-piece failures) が増加し問題となった。そこで2000年代後半に大規模な調査が実施された。その結果、MPFの発生は木材の繊維傾斜と関係していることが明らかとなった⁴⁾。MLBでは安全性を重視し、MPFの原因である繊維傾斜角 (*SoG*, slope of grain) に規定を設けることとなった⁵⁾。これまでのバット適正の評価では静的曲げ強度や衝撃曲げ破壊エネルギーには注目するものの繊維傾斜の影響は考慮されていなかった。ダケカンバはシュガーメープルと同じ散孔材であり板目面での繊維傾斜が分かりにくく、場合によっては性能が過小評価される可能性がある。本研究ではダケカンバ材の *SoG* の影響について考慮し、MPFの原因とさ

れる *SoG* と強度の関係について衝撃曲げ試験によって検討することとした。衝撃曲げ試験では一般的に破壊エネルギー (吸収エネルギー) が得られ、それらと *SoG* との関係が説明されている⁵⁾。本研究ではバット用材の評価としては繊維傾斜の影響と強度も重要であると考え、衝撃曲げ強度と繊維傾斜角との関係を考慮したバット用材適正の評価方法を検討した。その結果に従いダケカンバ材のバット用材の適性を評価した。また実際にダケカンバ材を使ってバットを試作し、使用感などを調査した。

2. 実験方法

2.1 試験体

ダケカンバ材の *SoG* と衝撃曲げ強度の関係を調べるため、*SoG* の異なるダケカンバ試験体 (北海道産・中温乾燥材) を用意した。スパンの大きな曲げ試験では *SoG* の大きな試験体を得ることは難しく、スパン60 mm の小型シャルピー衝撃曲げ試験機を用いた。*SoG* が0°と22.5°では10 (半径方向, R) × 7 × 100 mm, *SoG* が45°, 67.5°と90°では15 (R) × 12 × 100 mm の長方形試験体をそれぞれ8体用意し、含水率は8.6 ± 0.3%であった。*SoG* は板目面で測定した繊維方向 (L) と試験体長軸方向に対する角度を *SoG* とし、荷重面は木口かまき目面、またはその中間とした。試験体の密度は *SoG* が0°と22.5°では485 ± 20 kg/m³, *SoG* が45°, 67.5°と90°では784 ± 40 kg/m³であった。*SoG* によって試験体が異なるのは、0°と90°では強度に差がありすぎて同じ形状や密度の試験体では同一の小型シャルピー衝撃曲げ試験機での評価ができなかったためである。

バット用材の強度比較を行うための衝撃曲げ試験用試験体を準備した。ダケカンバ (含水率: 9.5 ± 0.1%), シュガーメープル (*Acer saccharum*) (含水率: 8.9 ± 0.1%), ホワイトアッシュ (*Fraxinus americana*) (含水率: 8.7 ± 0.3%), ヒッコリー (*Carya tomentosa*) (含水率: 8.8 ± 0.2%) を用意し、バットのグリップを模した直径23 mm の円柱形試験体に加工した。ダケカンバは北海道大学附属雨龍研究林および三井物産 (株) 似湾山林から切り出した材を中温乾燥したものであり、その他の材はバット用材として実績のある樹種であり北米産人工乾燥材である。また試験体長さはシャルピー衝撃曲げ試験機のスパン240 mm に合わせて320 mm とした。また各樹種から無作為に選んだ5体の試験体について全乾法 (105℃ × 24 h) で含水率を求めた。

2.2 繊維傾斜の測定（インクドット法）

円柱形試験体のまさ目面と板目面の *SoG* を測定した。メープルやダケカンバなどの散孔材板目面の *SoG* は測定が難しいため、グリップエンドから12インチ（305 mm）離れた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⁴⁾。*SoG* は繊維が試験体長軸に沿った基準線から10 mmの幅で外れるまでの距離を X mm とし、なす角 θ を式 (1) によって求めた。また測定点付近で繊維方向が複雑に変化し *SoG* の測定が難しいものは、測定点から長軸方向に前後10 mm離れた点で測定を行い、その平均値を用いた。板目面、まさ目面の *SoG* ($^\circ$) をそれぞれ *TaSoG*, *RaSoG* とし式 (2) より全体の繊維傾斜角 *TrueSoG* を求めた⁶⁾。

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

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

2.3 衝撃曲げ強度の評価

2.3.1 *SoG* との関係

ひょう量4Jの計装化シャルピー式衝撃曲げ試験機（米倉製作所、計装化シャルピー式衝撃試験機A1170）を用い、スパン60 mmで衝撃曲げ試験を行った。計装化シャルピー式衝撃曲げ試験機は脆弱材料のシャルピー衝撃値を求める試験機を計装化したものであり、ハンマー部分にロードセルが埋め込まれている。トリガーレベルは0.2 V、測定時間は16.383 ms、サンプリング間隔1 μ s または0.1 μ s、サンプリング周波数1 MHzに設定した。さらに衝撃曲げ試験後に破断面の観察を行った。収録された荷重値から最大荷重（曲げ強度）および破断に要したエネルギーを求めた。実験は12月（平均気温5 $^\circ$ C）に室内で行った。

2.3.2 バット用材の衝撃曲げ強度

10 kgfのシャルピー式衝撃曲げ試験機（スパン240 mm）を用い、バットのグリップを模した円柱形試験体で荷重面を板目面方向とまさ目面方向に分けて衝撃曲げ試験を行い、破断面の形状を確認した。

このとき、衝撃振り子の後部に15 gの加速度計（神栄テストマシナリー、小型三軸加速度ロガー AccStick）を設置し、衝撃曲げ吸収エネルギー U [J/mm^2]（式3）に加えて、衝撃時の加速度を測定し最大加速度 a_{\max} [m/s^2] とし、衝撃曲げ強度 σ_{\max} [MPa] を求めた（式4）。加速度計はトリガーモード即時計測、測定時間2.5 s、サンプリングレート1.25 ms、計測レンジ200 G、フレーム長2000（記録可能周波数250）と設定した。また試験後に破断面の観察を行った。準備した試験体を Table 1 に示す。

$$U = \frac{W}{\pi(d/2)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{8ml}{\pi d^3} a_{\max} \quad (4)$$

ここで W は破壊に要した仕事量、 d は試験体の直径。 m は振り子の質量（10 kg）、 l はスパン、 d は直径である。実験から得られたデータは非常に変動が大きく、衝撃曲げ強度と衝撃吸収曲げエネルギーについて値が上位2位までのものと下位2位までのデータは棄却した。実験は11月（平均気温18 $^\circ$ C）に室内で行った。

2.4 バットの試作

2.4.1 静的強度試験

北海道大学雨籠研究林および三井物産（株）似湾山林から切り出し中温乾燥したダケカンバ材を使用してミズノテクニクス養老工場で硬式用木製バットを試作した。試作したバットのうち最も軽いもの（844 g）を静的曲げ試験に供した。万能材料試験機オートグラフ（島津製作所 AG-I/100 kN）を使用して、クロスヘッド速度5 mm/min、バットのグリップエンドから50 mm離れた点を支点の一つとし、スパン600 mm、荷重点はグリップエンド側の支点から400 mmの地点、荷重面をまさ目面とした非対称3点曲げ試験を行った（Fig. 1）。実験は11月（平均気温18 $^\circ$ C）に室内で行った。本試験は重心付近を荷重して試打前におおよその最大荷重を知るために経験的に実施されている方法を参考にした。

Table 1. Specimens of dakekanba and bat-material species for impact bending tests.

| | Flat-grain specimen | | | Edge-grain specimen | | |
|-------------|---------------------|------------------------------------|---|---------------------|------------------------------------|---|
| | Number | Density (kg/m^3) | <i>TrueSoG</i> ($^\circ$) ¹⁾ | Number | Density (kg/m^3) | <i>TrueSoG</i> ($^\circ$) ¹⁾ |
| dakekanba | 27 | 650 \pm 57 | 7.1 \pm 3.4 | 26 | 635 \pm 55 | 6.4 \pm 3.1 |
| sugar maple | 25 | 706 \pm 27 | 5.3 \pm 3.6 | 25 | 705 \pm 42 | 5.5 \pm 2.9 |
| white ash | 27 | 683 \pm 56 | 3.5 \pm 1.7 | 28 | 684 \pm 65 | 4.0 \pm 1.9 |
| hickory | 25 | 816 \pm 79 | 3.9 \pm 1.5 | 25 | 822 \pm 74 | 4.1 \pm 1.9 |

1) Refer to Eq. 2.

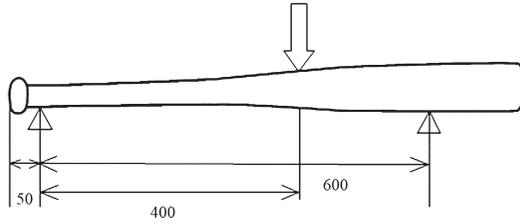


Fig. 1. Bending test of baseball bat (mm)

2.4.2 試打

試作したバットのうち適切な重さ(約900 g)のもの13本を使用感の調査に供した。京都大学硬式野球部に所属する男子大学生13名に調査を行った。1週間の期間を設け、一本当たり30球以上使用しその使用感について従来使用しているバット材と比較した。評価項目は、打球感、飛び、耐久性、しびれなどについて3段階の評価とした。

3. 結果と考察

3.1 SoGと強度の関係

SoGの異なるダケカンパ試験体の衝撃曲げ試験結果の例を Fig. 2 に示す。ここではロードセルの出力(V)を最大値で除した相対値の時間変化を示している。 θ の小さい試験体($\theta=0$)では破壊に1 msほど要しているが、SoGが増加すると短くなり $\theta=90$ では0.4 ms程度で破断している。なお初期に見られる振動は接触時の弾性波の影響と考えられる。ロードセルの出力から試験機付属のアプリケーションソフトで最大荷重と破断に要した仕事量を求め、式(5)と式(6)から衝撃曲げ強度と衝撃吸収エネルギーを求めた。さらに試験体には密度に差があるため、密度で除した比曲げ強度(Specific strength)と比曲げ破壊エネルギー(Specific fracture energy)を求めた(Figs. 3, 4)。これらの計算結果をもとにハンキンソン式⁷⁾にフィッティングし係数 n を求め

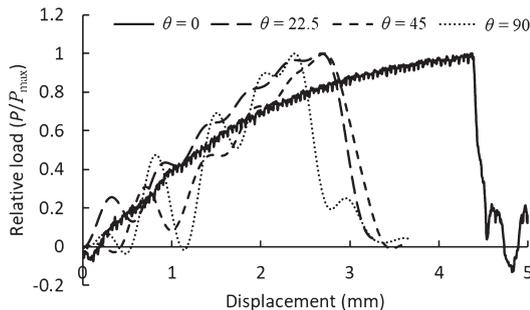


Fig. 2. Output of load cell in impact bending tests of dakekanba.

た(式(7))。

$$\sigma = 3pl/2dh^2 \quad (5)$$

$$g = w/dh \quad (6)$$

$$f = \frac{PQ}{P\sin^n\theta + Q\cos^n\theta} \quad (7)$$

ここで p は荷重、 l は曲げスパン、 d と h は試験体の幅と高さ、 w は破壊に要した仕事量、 P と Q はそれぞれ $\theta=0$ および $\theta=90$ の強度または破壊エネルギーである。繊維方向に対する繊維直交方向の物性の比 Q/P は、比衝撃強度で約0.13、比衝撃破壊エネルギーで約0.07となった。Woodhand bookに記載された impact bending では衝撃曲げ破壊エネルギーが使われ $Q/P=0.05$ となっている⁵⁾。本実験でも比破壊エネルギーでは近い結果が得られ、SoGが大きくなると破壊が脆性的になるため、曲げ破壊エネルギーがより低下すると考えられる。またWood handbookでは曲げ試験でのハンキンソン式の係数は $n=2$ とされている。本実験の結果は幾分か大きくなっていたが、試験体によってスパン梁せい比が異なった影響などが考えられる。衝撃曲げ試験で

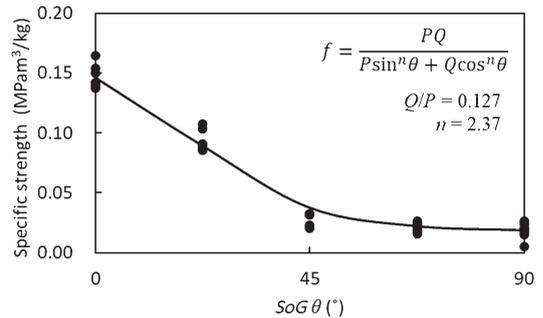


Fig. 3. Relationship between SoG and specific fracture strength.

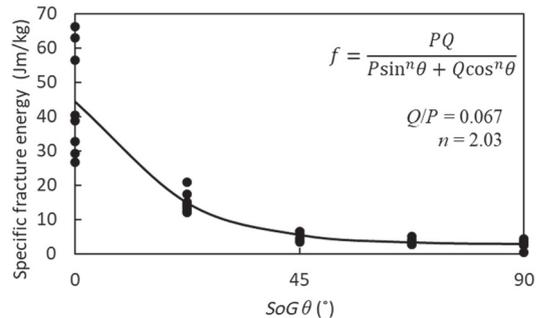


Fig. 4. Relationship between SoG and specific fracture energy.

の繊維傾斜角との関係はこれまで破壊エネルギーで評価されハンキンソン式が適用された。曲げ強度との関係は静的試験のものが用いられていた⁵⁾。本実験により衝撃曲げ強度でも静的試験同様に繊維直交方向の値は繊維方向の10%程度 ($Q/P=0.127$) であり、またハンキンソン式の係数も2程度 ($n=2.37$) であることが分かった。

SoG による試験体の破断面の違いを観察した (Fig. 5)。試験体の破断面形状は SoG が 22.5° 以上

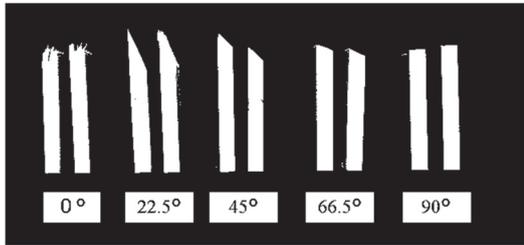


Fig. 5. Fracture surface of dakekanba small-specimens in impact bending tests.

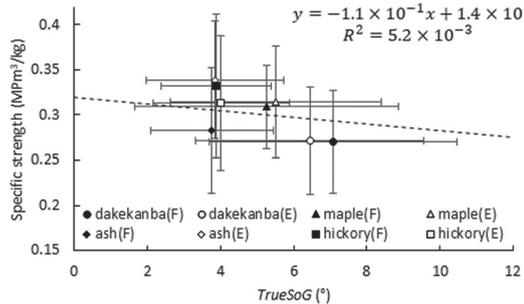


Fig. 6. Specific strength of bat-grip-like, cylindrical specimens in impact bending. F: flat-grain specimen, E: edge-grain specimen, error-bar: standard deviation.

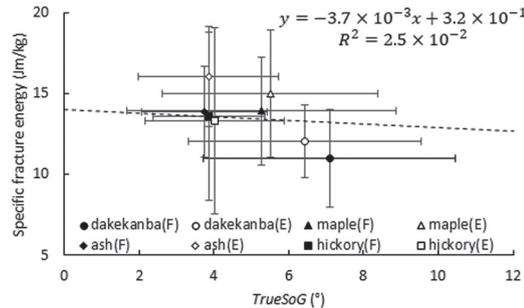


Fig. 7. Specific fracture energy of bat-grip-like, cylindrical specimens in impact bending. F: flat-grain specimen, E: edge-grain specimen, error-bar: standard deviation.

で繊維傾斜方向に沿った破断面が観察された。0°の試験体は繊維傾斜方向に沿った破断面が観察されず、繊維を切断していた。試験体の破断面積や細胞レベルでの破断面の違いが破断に要する時間や仕事に影響したと考えられる。

3.2 ダケカンバとバット用材の比較

円柱状試験体による10 kgf シャルピー衝撃曲げ試験機での実験結果を Figs. 6, 7 に示す。使用した加速度計のサンプリング間隔1.25 ms ではあったが、既往の文献⁵⁾での破壊時間や最大加速度前後で複数のサンプリングを確認できることから破壊過程での最大加速度は測定できたと判断できた。しかし得られた結果の中にはピークが二点存在するものや、マイナス側に現れるものも存在し、前節と同様に弾性波などの影響と考えられる。このような結果を表したものは解析には含めなかった。樹種ごとの密度が異なったので、得られた結果を密度で除し比衝撃曲げ破壊エネルギー (以下、比衝撃破壊エネルギー)、比衝撃強度とした。樹種の違いもあり、ばらつきは大きい。比衝撃破壊エネルギー、比衝撃強度ともに TrueSoG との関係に着目すると平均値及び最大値

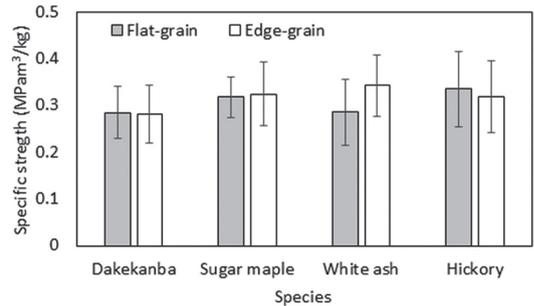


Fig. 8. Specific strength collected at TrueSoG = 0 of dakekanba and bat materials in impact bending.

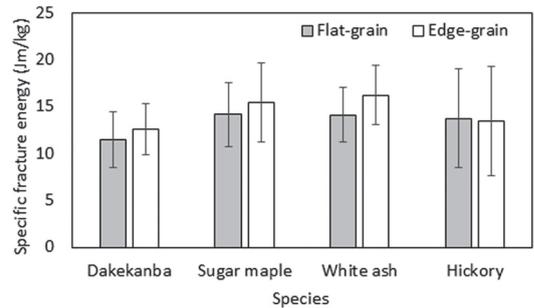


Fig. 9. Specific fracture energy collected at TrueSoG = 0 of dakekanba and bat materials in impact bending.

側の包絡線は減少する傾向にあり、繊維傾斜と強度の関係が確認された。

樹種間で *SoG* に違いがあるため、前節で得られた結果からハンキンソン式をもとに式 (8) で $\theta = 0$ に補正し、樹種間の比衝撃強度や比衝撃破壊エネルギーを比較した (Figs. 8, 9)。ハンキンソン式では指数 n は破壊モードに依存するが、繊維傾斜角の影響は樹種間では似ているとされているので⁹⁾、ダケカンバで得られた結果を他の樹種にも適用した。

$$P=f=(\frac{\sin^n \theta}{Q/P} + \cos^n \theta) \tag{8}$$

ここで Q/P と n は、前節の実験から比衝撃強度では $Q/P = 0.127$, $e = 2.37$, 比衝撃破壊エネルギーでは $Q/P = 0.067$, $n = 2.03$ とする。ダケカンバは比衝撃破壊エネルギーだけでなく比衝撃強度でも他のバット用材とほぼ同様の値となった。ホワイトアッシュのまさ目 (Edge-grain) のみ比衝撃強度は $P = 0.01$ で、比衝撃破壊エネルギーは $P = 0.05$ でダケカンバの物性とは有意差が見られた。ダケカンバがバット用材として十分な比衝撃強度と比衝撃破壊エネルギーを有していることが分かった。

衝撃曲げ試験後、樹種による破断形態の違いを検討するため試験片を観察した (Fig. 10)。平滑もしくは階段状の破断面 (①), 斜めに破壊したもの (②), ①と②の中間に位置する断面 (③), 完全に二つに破壊されなかったもの (④) の4種類に分類した (Table 2)。いずれの樹種でも①が最も多い破

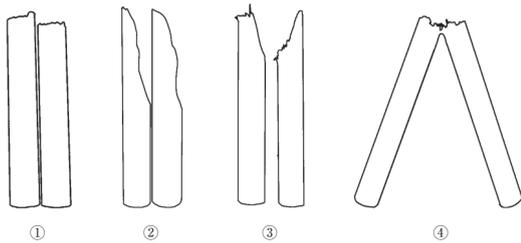


Fig. 10. Shapes of fracture surface of cylindrical specimens.

壊形態であったが、ダケカンバとメープルでは③が多く、アッシュとヒッコリーでは④が多かった。ダケカンバとメープルの *SoG* がわずかに大きく、樹種による違いより繊維に沿ってき裂が進展したことが影響したと考えられる。

3.3 試作バットの曲げ試験と試打

試作したバットによる非対称曲げ試験の結果、最大荷重3277 N という結果を得ることができた。荷重点下のバットの直径を35 mm とした場合、荷重点下での最大応力は104 MPa と見積もられる。これは経験的に知られたバットに必要とされる条件である荷重2200~2300 N を十分に超える結果であり、試打は可能と判断された。

試打は実戦ではなく、トスバッティングやピッチングマシンでの打撃で行われた。試打によるアンケートの結果では、打球感 (feeling), ボールの飛び (flown distance), 耐久性 (durability) に関しては「良い (good)」か「普通 (normal)」が大半を占め、実用上は問題ないと判断できた (Fig. 11)。しびれ (numbness) に関しては少数ではあるが感じる

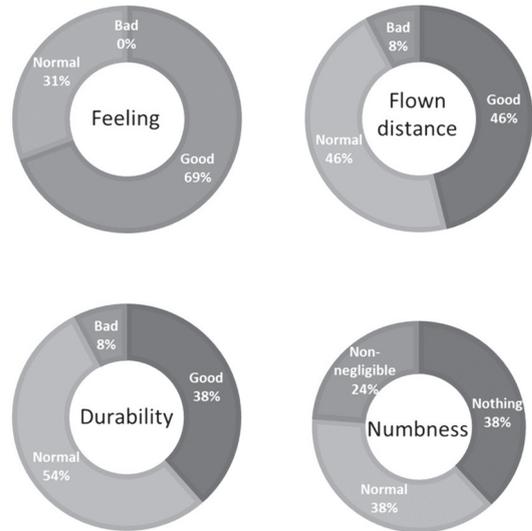


Fig. 11. Questionnaire survey of trial hitting by Baseball club at Kyoto University.

Table 2. Shapes of broken sections.

| broken type ¹⁾ | dakekanba | sugar maple | white ash | Hickory |
|---------------------------|-----------|-------------|-----------|---------|
| ① (%) | 51 | 53 | 54 | 40 |
| ② (%) | 8 | 14 | 7 | 10 |
| ③ (%) | 24 | 20 | 7 | 4 |
| ④ (%) | 16 | 12 | 31 | 46 |
| <i>TrueSoG</i> (°) | 6.8 | 5.4 | 3.8 | 3.9 |

1) Refer to Fig. 10.

(non-negligible) という回答があった。一週間の試打で、一本当たりおよそ50~1000球の打撃に使用されたが破壊は確認されなかった。また、打球感に関してメープルバットと変わらないと感じたという意見や、竹バットと似ていると感じたという意見も得られた。

4. 結 論

ダケカンバ材の衝撃曲げ試験を行い、繊維傾斜角と強度の関係を調べた。また衝撃曲げ破壊エネルギーと衝撃曲げ強度について既存のバット用材と比較した。さらに、硬式野球用バットを試作し、試打を行った。検討の結果、以下の結論を得た。

1. 小型シャルピー衝撃曲げ試験の結果、繊維方向に対する繊維直交方向の比率は衝撃曲げ強度で0.127、衝撃曲げ破壊エネルギーで0.067であった。またハンキンソン式を適用すると係数は強度と破壊エネルギーで $n=2.37$ と $n=2.03$ となった。これまで評価されてこなかった衝撃曲げ強度でもハンキンソン式の適用が可能であることが分かり、バット用材適正の評価方法で衝撃曲げ強度も有効であることが分かった。
2. バットのグリップを模した試験体で衝撃曲げ試験を行い、密度と繊維傾斜角を補正した結果、ダケカンバは衝撃曲げ破壊エネルギーだけでなく衝撃曲げ強度でも既存のバット用材と同等の性能を有することが分かった。
3. ダケカンバで硬式野球バットを試作し、大学野球部で試打を実施した結果、十分な耐久性が確認でき、実用上問題がないことが確認できた。

謝 辞

本研究では、実験の遂行ならびに試験体加工にあたりミズノテクニクス株式会社桑原広明氏、知多カリモク株式会社平野葵氏ならびに京都大学生存圏研

究所田中聡一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) 村木達男：木製バットの資源はどうなっているか. 林産試だより1985年6月号, 6-9 (1985).
- 2) 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).
- 3) 武藤吾一, 小泉章夫：バット用材としてのアオダモ, ホワイトアッシュおよびシュガーメープルの材質特性. 北海道大学演習林研究報告 64(2), 113-122 (2007).
- 4) Drane, P., Sherwood, J., Colosimo, R., Kretschmann, D.: A study of wood baseball bat breakage. *Proc. Eng.* 34, 616-621 (2012).
- 5) Wood handbook, Forest Products Laboratory, USA, 2010, pp. 5-30.
- 6) Kretschmann, D.E., Bridwell, J.J., Nelson, T.C.: Effect of changing slope of grain on ash, maple, and yellow birch bending strength, Proceeding of WCTE2010, Trentino, Italy, 2010.
- 7) Hankinson, R.L.: Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain, Air Service Information Circular 259, 1921.
- 8) 太田正光, 浅野猪久夫, 岡野 健：脆心材の力学的性質に関する研究(第2報) 衝撃曲げ破壊について. 木材学会誌 25(1), 7-13 (1979).
- 9) Gustafsson, P.J.: Fracture perpendicular to grain - structural applications. "Timber engineering", Thelandersson, S., Larsen, H.J. ed., Wiley, Chichester, England, 2003, p. 120.