

## 熱プレス法によって作製された竹粉成形体の力学特性

高橋明宏・稲森隆晃<sup>1</sup>・黒木智也<sup>2</sup>・山元直行・豊廣利信Mechanical Properties of Consolidated Bamboo Powder Prepared  
Thermo-Pressing MethodAkihiro TAKAHASHI, Takaaki INAMORI<sup>1</sup>, Tomoya KUROKI<sup>2</sup>, Naoyuki YAMAMOTO  
and Toshinobu TOYOHIRO

(Received October 1, 2009)

**Abstract** In this study, the powder of bamboo (*phyllostachys pubescens*) were consolidated by thermo-pressing method. Mold temperature are range of 100°C to 190°C and a constant mold pressure is 200MPa. Compressive test was carried out to measure the mechanical properties. Damage behavior was observed on surface of the consolidated bamboo powder deformed at maximum stress point. Crack density,  $\gamma$  was proposed to explain the damage level. From mechanical point of view, the optimum was mold temperature, 140°C. Above 160°C, crack density is increasing with mold temperature. Brittleness morphologies was observed at mold temperature 180°C and 190°C. The different models were exhibited in the crack propagation resistance.

**Keywords** [Consolidated bamboo powder, Thermo-pressing method, Mechanical properties, Crack density]

## 1 序論

地球温暖化に影響を及ぼしている要因の一つとして、森林の減少が挙げられている<sup>1)</sup>。緑色植物は、葉から水分を水蒸気として排出する蒸散作用によって温度の調整を行うため、南米アマゾンや他の密林が集積する地域では雨量や気流などに影響を与えると考えられている。また、それらの植物は二酸化炭素を取り入れて酸素を排出するといった光合成を行っている。現在、森林破壊によって、年間21億トンの二酸化炭素が放出されており、これが温室効果ガスとなって地球温暖化を加速させているという報告がある。森林減少の原因には、パルプ製紙用資材、プランテーション開発への転用や、燃料用木材の採取、建築資材のための伐採などがある。つまり、木材使用目的にはそれぞれの各国ごとの必要理由に依存しているため、食い止めることは容易なことではない。

最近、木材に替わる新たな天然資源の一つとして

竹が注目されている。竹は日本やアジア諸国に多く生育し、わずか数年といった短期間で成長する。これは成長に数十年を費やす木材資源との決定的な違いといえる。故に、竹を効率的に使用することができれば、木材資源よりも有効的持続資源といえる。一方で、竹林を含む里山で管理問題が浮上している。放置された竹が森林や住宅街へ侵入し、社会問題として報道されている<sup>2)</sup>。森林環境税を用いて伐竹をメインとする行政的施策が実施されているが、刈り取った竹を活かすための議論は十分とはいえず、余剰竹を利活用するための工業的利用技術に関する研究が社会的な要請となっている。本来、竹繊維は数ある植物の中でも高強度であり、木炭と竹繊維を使用したセメント系複合材料の開発<sup>3)</sup>や、竹繊維補強ポリマーセメントペーストの基礎的性の質の評価<sup>4)</sup>等の研究が行われている。竹繊維は高いところで400MPa以上のもの引張強さを有する結果が報告されているため複合材料の強化繊維として有望視されている<sup>5)</sup>。

1 豊橋技術科学大学

2 旭化成株式会社

Toyohashi Univ. of Tech.

ASAHI KASEI CORP.

ある自動車メーカーでは、竹繊維に植物由来のプラスチックであるポリブチレンサクシネートを配合した自動車内装用複合材料を開発している<sup>6)</sup>。

以前より本研究室では、竹繊維を利用したアプリケーションの開発を目指し、様々な手法を用いて竹繊維およびそれに類する試験片の強度特性を解明している。実例として、竹繊維の高温雰囲気中での引張強度<sup>7)</sup>や、熱プレス法によって成形した竹粉成形体の曲げ強度や破壊靱性<sup>8)</sup>などが調査されている。また、竹繊維を微細化することによってニアネットシェイプが可能となり、接着剤の使用を省いたバインダレス成形体の作製を可能とする。石油由来の有機合成系接着剤を用いた合板やパーティクルボードの開発も実際にあるが、やがてはそれもゴミとなり、接着剤の存在がリサイクルを妨げる種となる。その点、バインダレスにすることによっての利点は、接着剤を使わず再び粉状にし、リサイクルが可能となる。昨年度の研究では、熱プレス法にて成形した竹粉成形体の最適な竹粉粒度、および成形温度変化に伴う圧縮強度特性の変化が調査された<sup>9)</sup>。その研究では、プレス圧が200MPaという高圧条件下の中で、成形温度160℃までの成形体の圧縮特性が調査されているが、それ以上の成形温度は調査されておらず、損傷挙動の機構も十分明らかにされていない。また、竹粉を用いた成形体に関して、圧縮力学特性に特化した研究というのは数ある研究の中でも非常に少ない。そこで本研究では昨年度に引き続き、竹粉成形体の圧縮特性に及ぼす成形温度の影響を中心に調査した。成形温度範囲を拡張し、成形温度200℃までの成形体の圧縮力学特性、および圧縮負荷に伴うクラック発生の詳細な調査と強度物性に与える影響の損傷力学評価を行うことを目的として実験を行ったので、その結果について報告する。

## 2 実験方法

### 2.1 竹粉

実験で使用した竹は孟宗竹である。これを粉体機で微細化し、その後100℃未満の温度で一昼夜乾燥処理を施し、さらにふるいを用いて粒子サイズが0.15mm (150 $\mu$ m) 以下になるように分級した。Fig.1は本実験で使用した竹粉の拡大写真である。針状の竹繊維と塊状の木質組織が識別可能な状態で粉化している様子が認められた。特に断らない限り、本実験で行ったが全ての試験片において、この0.15mm以下の竹粉を使用した。

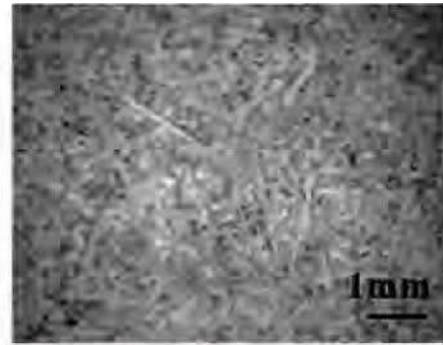


Fig.1 Photograph of the bamboo powder used on this study

### 2.2 成形体の作製

金型作製の効率化、および試験片の変形応力の均一化を図るため、試験片形状は円柱形とした。成形体作製のための金型材料は、S45C材を用いた。以下に作製プロセスの詳細を述べるが、次に金型構成と竹粉充填方法について説明する。平板状の台座の上に機械加工で直径8mmの穴を開けた筒状の下型を置き、その穴の中に慎重に竹粉を充填させた。その上から穴と同径の直径をもったプランジャーを押し当て、熱プレスを施した。Fig.2は成形体のプレス工程を模式的に示した温度-時間プロファイルである。まず、常温から昇温を開始し、同時に圧力を作用させた。圧力は昇温開始から成形体(試験片)取出しまで、200MPa(負荷荷重1tf)で一定とした。所定温

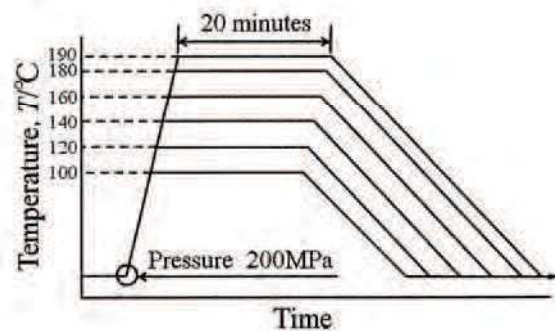


Fig.2 Temperature-Time profile for the thermo-pressing process on this study

度に達した後、その温度で20分間保持させた。保持後ヒーターの電源を切り、ドライヤーを用いて強制空冷した。金型の温度が常温まで低下したところで圧力を除去し、専用のジグを用いて成形体を取り出した。保持温度のレンジは373~463K(100~190℃)とした。なお、金型の昇温速度および降温速度の定量的な調査は行っていない。最終的な円柱形試験片のサイズは、直径 $8\pm 0.01$ mm、高さ $8\pm 1.00$ mmの範囲内であった。

2.3 圧縮試験

圧縮試験は材料万能試験機（島津製作所製 オートグラフ AG-1 容量 250kN）を用いて行った。圧縮試験での操作は次の通りである。まず、試験片を試験機の下型ジグの中央に置き、試験片に上型ジグの中央が位置するように静かに置いた。この際、試験片のたる型変形を抑え、試験片高さ方向のひずみを均一化させて試験結果の再現性を得るために、厚さ 0.1mm のテフロンシートを上下ジグと試験片の間にそれぞれ 2 枚ずつ敷いた。その後、一定負荷速度で圧縮負荷を開始した。ディスプレイ上に表示される応力ひずみ曲線から破断を確認した後、クロスヘッドを停止させ、その後除圧した。各々の試験片にて同様の試験を行い、得られたデータを基に圧縮強さ、降伏点、ヤング率、降伏ひずみ、破断ひずみ等諸特性を求めた。なお、負荷速度は 1mm/min（ひずみ速度  $2.1 \times 10^{-3}$  [1/sec]）であり、室温・大気中にて圧縮試験を実施した。

2.4 クラック密度

成形温度 100℃、120℃、140℃、160℃、180℃および 190℃の試験片をそれぞれ用意し、通常の圧縮試験を行った。この時、試験片に発生した応力の最高点でクロスヘッドを停止した。この後試験片を取り出し、試験片側面を互いに直行する 4 方向からデジタルカ

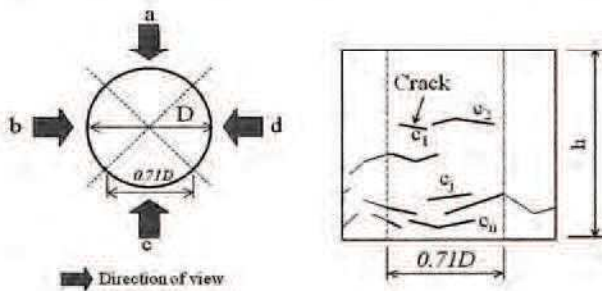


Fig.3 Schematic illustrations of the observed orientation and a range of measurement of the crack density,  $\gamma$

メラを用いて撮影をした。Fig.3 に示すように、一面あたりに測定できる範囲は他の撮影面との干渉がある程度避けるため、直径を  $D$  とする  $0.71D$  の範囲とした。そして側面全てのクラック長さを合計し、その試験片の側面積で割ると単位面積当たりの見かけのクラック量を求めることができる。これを仮に「クラック密度  $\gamma_i$  (/mm)」とし、成形温度の相違によるクラック密度を算出した。クラック密度は次式で求めた。

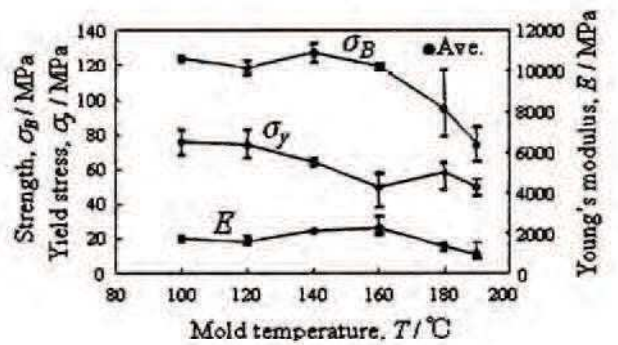
$$\gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_j}{h_i \cdot \pi D_i} \quad (1)$$

ここで、 $h_i$  は試験片高さ、 $D_i$  は試験片直径、 $\sum_{j=1}^n c_j$  は総クラック長さとする。なお、 $i$  は試験片番号、 $j$  は一表面あたりに存在するクラックの番号、 $n$  は一表面あたりに存在するクラックの総数である。

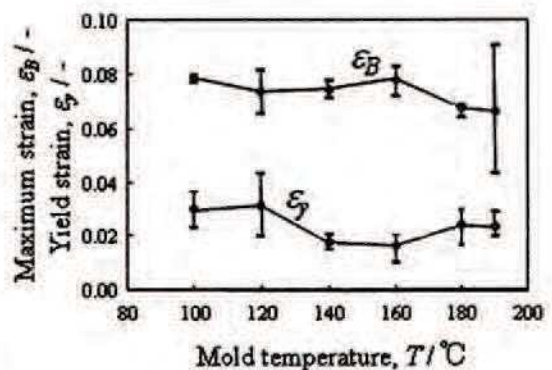
3 実験結果

3.1 竹粉成形体の圧縮力学特性

Fig.4(a) は成形温度を変化させたときの圧縮強さ、降伏点およびヤング率である。横軸に成形温度、縦軸に圧縮強さ、降伏点およびヤング率を示している。



(a) Strength, yield stress and Young's modulus



(b) Maximum strain and yield strain

Fig.4 Mechanical properties for the consolidated bamboo powder as a function of mold temperature

本研究での最適温度は 140℃となった。そのときの圧縮強さは 127MPa であった。また、100℃から 160℃までの範囲であれば圧縮強さには大差ない結果とな

った。この圧縮強さについて言及すると、190℃は140℃から比較すると41%低下した。160℃から190℃にかけて、圧縮強さが比例的に減少している傾向も見られた。降伏点は100℃から190℃までに若干低下してはいるものの、低下率は34%であった。降伏点は、圧縮強さほど低下率は大きくなかった。ヤング率は160℃で最高値を記録した。180℃以降は比例的に低下し、190℃のヤング率は160℃のそれより57%低下する結果となった。Fig.4 (b) は縦軸に圧縮ひずみと降伏ひずみを示したものである。圧縮ひずみは100℃~190℃まで大きな変化見られなかった。また、100℃と160℃の圧縮ひずみは同程度で最高値を示した。降伏ひずみは120℃が最も高く、140℃で最も低くなる結果となった。140℃は120℃のそれに比べ43%低下した。

### 3.2 試験片表面のクラック密度

試験片後の表面観察 Fig.5 は圧縮荷重最高点で停止したときの成形温度 100℃~190℃の試験片の表面損傷の様子である。

本研究で多く取り扱った160℃、180℃および190℃の試験片は、それ以下の成形温度の試験片と比較すると黒褐色が強く表れた。黒色濃度は成形温度に比例して増していった。逆に表面の光沢は成形温度を高くする程失われていった。また、100℃を除くどの



Fig.5 Photographs of damage morphologies of the consolidated bamboo powders deformed at maximum stress point. Mold temperatures are in the range of 100℃ to 190℃. The compression axis is vertical

試験片にも下部の方に主としてクラックが生成した。クラック生成の比率、すなわちクラック密度の推移は次に説明する。

### 3.3 成形温度変化に伴うクラック密度の推移

Fig.6 は成形温度を変化させたときのクラック密度の推移である。横軸に成形温度、縦軸にクラック密度 $\gamma$  (単位/mm) を示している。Fig.6 より100℃から140℃までのクラック密度はほぼ横ばいの傾向を示すことが認められ、160℃以上になると、比例的に増加していることが分かった。成形温度が180℃や190℃のような高温になると、著しくクラック密度が増加した。190℃の平均クラック密度は100℃のその約7倍クラックが多く発生したこととなる。

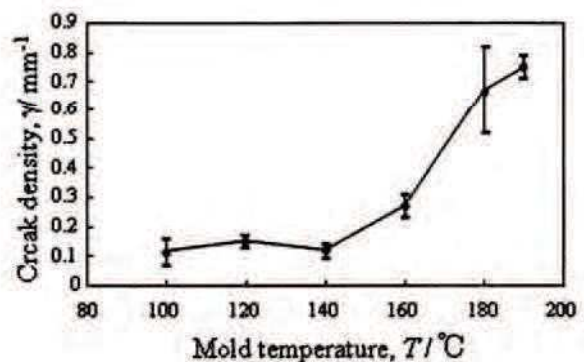


Fig.6 Variation of crack density as a function of mold temperature for the consolidated bamboo powder

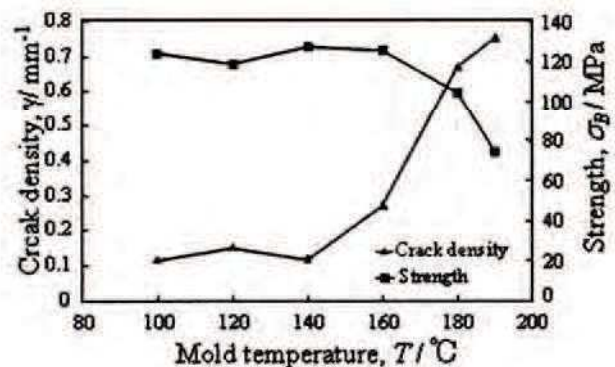


Fig.7 Influence of the crack density on strengths of the consolidated bamboo powder at various mold temperature

## 4 考察

### 4.1 圧縮強度とクラック密度の相関

実験より圧縮強さは140℃の成形温度で最高値を記録し、成形体にとって最適な成形温度だと考えられる。Fig.7 は圧縮強さとクラック密度を、成形温度変化について同グラフ上に示したものである。140℃以降の成形温度では圧縮強さは低下の一方をたどった。一方、クラック密度は140℃までが比較的少ない

クラック密度を保ったままであるが、160℃以降となると著しく増大した。これら二つのことからクラック密度が高いほど圧縮強さが低いという傾向にあることが分かった。つまり、クラックが多く確認されるものほど脆性を示すということである。

#### 4.2 クラック密度増加の要因

Fig.8は成形温度160～190℃の成形範囲における成形直後の成形体平均密度と平均高さを示したものである。Fig.8に示されたように成形温度が高い程平均高さは減少する結果となった。なお平均密度はどの成形温度でもほぼ一定となった。成形体の作製過程において、充填した竹粉量は作製者の目分量によるものであるため、正確に一定ではない。あくまで目分量であるが、同様の竹粉量を入れたにもかかわらず、成形体はいわば縮む傾向が見られた。

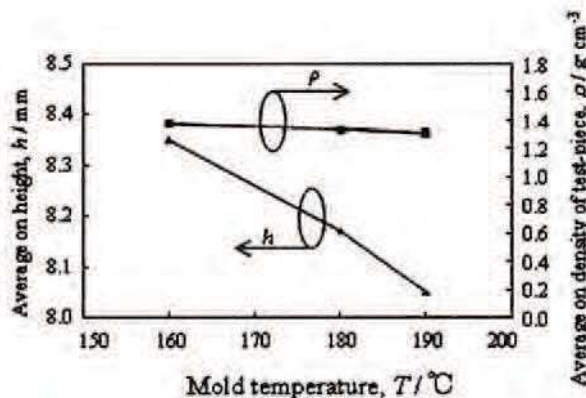


Fig.8 Average height and average on density of test piece for the consolidated bamboo powder at various mold temperature

成形過程において比較的高温の成形温度では、温度保持中に金型内から「パチ」という気泡が割れたような音が確認された。この音は成形体内に存在する水分が外気へ蒸発するときの音だと考えられる。これを踏まえると、成形温度の高い成形体では水分量が減少し、成形体内の成分がより緻密な体制をとり、結果的に成形体が縮むような機構になったと考えられる。ただ単に水分が蒸発しただけでは密度が減少するため、成分が緻密化したと考えられる。これを基にクラック密度との相関を考えてみる。Fig.8はクラック発生のメカニズムを成形温度別に示したものである。ここに成形温度の低い成形体、すなわち水分をある程度含む成形体と成形温度の高い成形体、すなわち水分をほとんど含まず成分同士が緻密化された成形体を比較する。

Fig.9のように比較的低い成形温度(140℃を代表し

とる)の成形体内では水分が存在しているため、水分を含む空間が図のように存在すると仮定すると、鋭利な角度を持ったクラックが水分に直撃しても、水分が空洞のような役割を果たし、鋭利だった角度も急激に大きな角度をとる。ゆえに次のクラックを進展させるために要するエネルギーが相対的に高くなり、いわゆる crack arrest 効果を生む<sup>10)</sup>。結果的にクラックがあまり表面上に現れなかったと考えられる。それに対し成形温度が比較的高温(180℃を代表にとる)の成形体内は水分がほとんど無く、成分が緻密となっているためクラックの進展を妨げるような要因がなく、前者より数倍ものクラックが表面に発生したと考えられる。また、水分が減少したことによって表面の光沢が失われたことにも説明がつく。

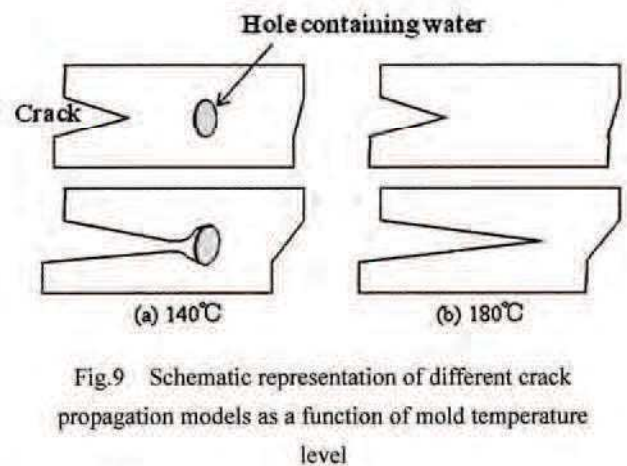


Fig.9 Schematic representation of different crack propagation models as a function of mold temperature level

#### 4.3 強度低下の要因

一般に竹の分子構成はセルロース、ヘミセルロース、リグニンの三成分が主である<sup>11)</sup>。セルロースは多糖類の一種であり膨大なブドウ糖のユニットから成る鎖状構造の炭水化物である。化学式では  $(C_6H_{10}O_5)_n$  で表され、最も成形体の強度に寄与する物質である。ヘミセルロースはセルロースと同様、成形体の骨組みの役割を担っているが、分子量がセルロースほど大量ではないので先に熱分解されることが分かっている。なお、ヘミセルロースも炭水化物であり、炭素、水素、酸素から成っている。リグニンとは、セルロースやヘミセルロース間に充填されている物質であり、非常に複雑な構造を持った柔細胞である<sup>12)</sup>。

本来これら三成分は分子量が高く、分解するのは困難だと言われている。しかし、熱を与えると熱分解・熱軟化が起こることも明らかにされている。昨年度は強度低下の要因の一つに、リグニンの軟化作用を挙げた。文献には、リグニンは含水率 20%で軟

化温度が78~128℃であることが記されている<sup>12)</sup>。リグニン含有量が低下すると繊維の骨組となるセルロースの強度を無効化すると考えられる。

また、ヘミセルロースは180~210℃で熱分解を誘起すると言われ<sup>13)</sup>、三つの成分の中で最初に分解される。本研究の結果のように、180℃からは著しく強度は低下しているため、強度低下の一要因としてヘミセルロースの熱分解が示唆される。さらに、真空中で同実験を行ったところ160℃が最も高い圧縮強度を示した<sup>9)</sup>。このことから大気中の酸素が竹繊維に影響を及ぼしていることも考えられる。これらの様々な要因が絡み合い、圧縮強度に寄与したと考えられる。高温ほど熱分解や軟化作用が起こりやすくなるため、クラック密度の増大にも影響すると示唆された。

## 5 結論

竹粉成形体の成形温度を100~190℃として作製し、圧縮強度および圧縮的破壊損傷挙動の観察を行った。得られた知見をまとめると以下ようになった。

- 1) 圧力200MPa、熱プレス時間20分の条件下であると、力学的観点から成形温度は140℃が最適な成形温度であった。
- 2) 竹粉成形体の圧縮強さとクラック密度の間には、反比例関係の傾向が見られた。
- 3) 160℃から化学変化が影響し比較的大きな破壊が見られた。成形温度180℃以上の成形体は、圧縮強度が著しく低下し脆性破壊の形態を呈した。

## 謝辞

竹類に関する多くの御指導と御助言を御教授下さいました、京都市洛西竹林公園専門員 農学博士 渡邊 政俊様に深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 清岡高敏:竹資源,(2001),18-45,マネジメント社
- 2) 朝日新聞,平成20年1月27日
- 3) 佐藤嘉昭,大谷俊浩,清原千鶴,荒川堅太郎,永松静也,平居孝之:自然素材を活用した建築ボードの開発:木炭と竹繊維の有効利用,日本建築学会九州支部研究報告集,pp.49-52,2002
- 4) 大濱嘉彦,出村克宣,近藤敏:竹繊維ポリマーセメントペーストの基礎的性質(材料・施工系),日本建築学会東北支部研究報告集,pp.265-268,1994
- 5) 村雲未知夫:爆砕法を用いて採取した様々な竹繊維束の引張強度とアルカリ処理効果,都城高専平成18年度卒業論文,2007
- 6) 広田民郎:自動車の製造と材料の話,グランプリ出版,pp.213-217,2007
- 7) 栄徳幸祐:爆砕処理法によって採取した竹繊維の高温引張試験,都城高専平成19年度卒業論文,2008
- 8) 徳森龍太:竹粉成形体の破壊靱性に及ぼす竹粉粒度と成形温度の影響,都城高専平成19年度卒業論文,2008
- 9) 黒木智也:竹粉成形体の圧縮強度特性に及ぼす成形温度の依存性,都城高専平成19年度卒業論文,2008
- 10) Richard W. Hertzberg : Deformation and fracture mechanics of engineering materials, John Wiley & Sons, pp.355-363, 1976
- 11) 内村悦三:竹の魅力と活用,創森社,pp.43-46,2004
- 12) 今村博之,安江保民,岡本一,横田徳郎,後藤輝男,善本知孝:木材利用の化学,共立出版(株),pp.294-305,1983
- 13) 自然流炭焼き窯「炭焼き達人」ホームページ,<http://www.tesaki.co.jp/sumiyaki/index.html>