成長に伴うモウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) の 物性発現機構 (第 1 報)

曲げ弾性率と柔細胞および繊維細胞の細胞壁厚・壁率の関係^{*1}

桐生智明^{*2}, 三好由華^{*2}, 古田裕三^{*2}

The Mechanism of Improvement of Physical Properties of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with Increasing Age I.

Relationship between modulus of elasticity in bending
and cell wall thickness and/or percentage of cell walls^{*1}

Tomoaki KIRYU^{*2}, Yuka MIYOSHI^{*2} and Yuzo FURUTA^{*2}

The purpose of this study is to elucidate the factors related to improvement of the physical properties of bamboo as a material with increasing age. Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) at various times (40 days~9 years) since shooting were used for test samples in the green condition. The modulus of elasticity in bending (MOE) when loaded on the endodermis or the epidermis side was determined. In addition, at each endodermis and epidermis side, the thickness of parenchyma and fibrous cell walls and the percentages of cell walls of parenchyma and vascular bundles were measured. Results obtained are as follows. The MOE of bamboo is affected not only by the density of the entire woody substance but also by the types of cells in which the cell wall thickness increases, that is, parenchyma cells or fibrous cells, and by their radial location, that is, endodermis side or epidermis side. The MOE obtained by endodermis-side loading is greatly affected by the thickness of parenchyma cells and the percentages of cell walls of parenchyma, and the MOE obtained by epidermis-side loading is greatly affected by the thickness of fibrous cells and the percentages of cell walls of vascular bundles.

Keywords : moso bamboo, aging process, green condition, modulus of elasticity, cell wall thickening.

成長に伴うモウソウチクの力学的性質の変化に関わる因子を明らかにするために、発筍から40日~9年が経過した竹稈から採取した飽水状態の竹材を用いて、内皮側もしくは外皮側から負荷した際の曲げ弾性率を測定した。また、弾性率に影響を与えられとされる容積密度、柔細胞および繊維細胞の細胞壁厚、柔組織および維管束鞘の細胞壁率を、内皮側と外皮側で測定し、曲げ弾性率とこれらの関係を検討した。その結果、竹齢の増加に伴う曲げ弾性率の増加は、材全体の密度増加のみでは説明できず、細胞壁実質が増加する細胞の種類や存在位置によって寄与の大きさが異なることが明らかとなった。また、内皮側負荷時の曲げ弾性率には柔細胞の細胞壁厚や壁率が、外皮側負荷時には繊維細胞の壁厚や壁率が、より大きく関与することが示された。

^{*1} Received October 23, 2015; accepted January 6, 2016.

^{*2} 京都府立大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Science, Kyoto Prefectural University, Kyoto 606-8522, Japan

Corresponding author: Y. Furuta (furuta@kpu.ac.jp)

1. 緒 言

タケは、針葉樹や広葉樹などの樹木と同様に細胞壁に多くのリグニンを堆積させる木化植物である。その材は、柔軟性に富み、負荷方向にもよるが、特に繊維方向において、木材を上回る力学的性能を有している。タケの力学的性質は、竹程が伸長成長する過程だけでなく、それ以降も向上することが知られている¹⁾。成長過程における材質の変化については、柔細胞と繊維細胞によって、また、それらの半径方向の位置によって、リグニンの堆積や細胞壁の肥厚する時期が異なること²⁾、竹齢の増加に伴って細胞の壁厚や壁層数が増加すること³⁻⁵⁾などが明らかになっており、そのような細胞壁実質の量や、実質を構成する成分の量などといった竹材を構成する各オーダーの要素とともに、発筍から3、4年までの期間で力学的性質が向上するとされている。以上のような、タケの成長に伴う材を構成する要素の変化と力学的性質の変化の関係を明らかにすることは、竹材の優れた力学的性質の発現機構を解明する上で重要な意味を持つとともに、生物としてのタケが成長する中で自らの材質を向上させる方法を知ることにも繋がると思われる、興味を持たれる。

竹材の力学的性質発現機構に関する既往の検討の中で、特に細胞壁実質の量に着目した検討は、試験片全体の密度や、竹材のある一部分の細胞壁厚にのみ着目しているものがほとんどであるうえに、材の力学的性質が大きく変化する発筍直後から当年生の竹程を用いた検討例は少ない。更に、Nakajima ら⁶⁾は、竹材を曲げた際に発生する細胞の変形の様態が、柔細胞と繊維細胞で異なることを明らかにしており、この結果は、竹材を構成する細胞の種類と存在位置について、より詳細に区別したうえで、曲げ特性との対応を議論する必要があることを示していると考えられる。そこで本研究では、発筍後、約1か月から9年目までの竹齢の異なる竹程から採取した竹材を供試試料とし、曲げ弾性率、容積密度を測定するとともに、細胞壁厚と壁率を内皮側付近・外皮側付近および柔細胞・繊維細胞ごとに測定し、それらの結果を総合的に考察することで、タケの成長に伴う力学的性質の変化と上述の細胞壁構成要素の変化の関わりについて検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試試料

供試竹程には、京都府立大学附属鷹峰演習林産の当年生（平成21年4月17日発筍）のモウソウチク

(*Phyllostachys pubescens*) の竹程を、5月29日、6月11日、7月9日、7月30日、8月24日、10月2日に各1本ずつ、さらに、1年生（平成20年発筍）、4年生（平成17年発筍）、9年生（平成12年発筍）の竹程を、5月29日に各1本ずつ採取して用いた。このとき、竹程の胸高直径がおおよそ10 cm であり、竹程ができるだけ通直である竹程を選択した。当年生の竹程も含め、採取した竹程の程高は、概ね16 m 前後であり、その竹林の平均的な程高とほぼ同様であったことから、既に伸長成長はほぼ完了した竹程であると考えられる。また、7月9日以降に採取した当年生の竹程と数年生の竹程は葉を展開していた。それぞれの竹程の地際の節間を第1節間とし、概ね胸高位置に存在する第9節間およびその上下の2節間より、各測定に用いる試料を作製した。以降、本文中では、それぞれの試料を発筍からの経過日数もしくは年数で表記する（例えば、5月29日に採取した当年生の試料は、発筍から43日の試料、1年生の試料は、発筍から1年の試料などと表記する）。

曲げ弾性率測定用の試験片は、生材状態の第9節間から、以下のように作製した。すなわち、節間の上下端の節および節周辺の湾曲部を切り落とした後、接線方向が約15 mm の繊維方向試験片をナタで切り出し、外皮および内皮をサンダーで削り取り、直方体形状の試験片を各竹齢につき10本ずつ作製した。このとき、サンダーによる切削は、試験片形状を直方体にするための最小限に止めた。試験片の作成に際し、個体ごとに第9節間の長さや程の厚みが異なったため、試験片の繊維方向および半径方向の寸法は、試験片毎に異なるが、竹齢の増加に伴って増減するような傾向は見られなかった。なお、試験片の半径方向寸法は、概ね8~10 mm の間に分布した。作成した試験片は、生材状態を維持したまま腐敗しないように低濃度のホルムアルデヒド水溶液中で低温保存するとともに、竹程の採取から出来る限り期間を空けずに測定に用いた。曲げ試験に供した立方体形状の試験片は、引き続き、容積密度の測定に用いた。

細胞壁厚および細胞壁率測定のための木口面観察用薄片は、第9節間中央部から、以下のように作成した。すなわち、程壁の木口断面の半径方向寸法を三等分したうちの内皮側と外皮側それぞれから、剃刀を用いて、径が概ね3 mm の薄片を切り出した。それらは、生材状態を維持したまま測定に用いた。

2.2 曲げ弾性率の測定

曲げ試験は、万能試験機（島津製作所製オートグ

ラフ)を用い、3点曲げの中央集中荷重方式、クロスヘッド速度5 mm/min、板目面負荷で行った。なお、試験片ごとに厚さ(半径方向寸法)が異なるため、スパンはそれぞれの試験片の半径方向寸法の14倍の長さとした。緒言でも述べたように、Nakajimaら⁶⁾は、負荷方向によって繊維細胞と柔細胞の曲げ性能への影響の仕方が異なる可能性を示している。そこで、試験片10本のうちの5本については内皮側から負荷し、残りについては外皮側から負荷を行った。以上の実験操作は、試験片の乾燥を防ぐために速やかに行い、測定終了時には、試験片表面に付着した水が消失していないことを確認した。この試験で得られた荷重-たわみ線図と試験片寸法およびスパンから、曲げ弾性率を算出した。

2.3 容積密度の測定

曲げ弾性率の測定後の試験片から、各竹齢につき比較的体積の大きい1本を選択し、105℃送風乾燥機内での恒量を測定し、その重量を生材時の寸法で除すことで容積密度を算出した。

2.4 細胞壁厚および細胞壁率の測定

内皮側および外皮側の切片をそれぞれ顕微鏡で観察し、平均的な形状を持つ維管束を3つずつ選び出し、維管束とその周辺に存在する柔組織が映るようにデジタル写真を撮影した。細胞壁厚および細胞壁率の測定には、画像解析ソフトImage-Jを用いた。

細胞壁厚については、隣接する2つの柔細胞もしくは2つの繊維細胞の、細胞壁と内腔の境界面間の距離(細胞壁2枚分の厚さ)を測定し、その半分の値をそれぞれ柔細胞と繊維細胞の細胞壁厚とした。距離の測定は、1つの維管束鞘内および柔組織内で10箇所ずつ測定箇所を選択し、各竹齢で計30箇所ずつ行った。

細胞壁率の測定は以下のように行った。デジタル写真をトリミングし、柔組織のみもしくは維管束鞘のみを含むデジタル写真を得た。その後、細胞内腔および細胞間隙を赤色で、それ以外の細胞壁実質部を白色で塗りつぶした。そうして得られた二色の画像全体の面積に対する白色部分の面積の割合を細胞壁率とした。

上記の繊維細胞の細胞壁厚および細胞壁率の測定は、師部の維管束鞘を対象として行った。また、維管束の中心側と外側で細胞壁の肥厚の時期が異なることが明らかとなっていることから⁴⁾、細胞壁厚の測定では測定箇所が維管束鞘内に偏りなく分布するように注意し、細胞壁率の測定ではトリミング後の画像内に維管束の中心側から外側までの繊維細胞が含まれるように注意した。

3. 結果と考察

3.1 曲げ弾性率

曲げ弾性率の測定結果をFig.1に示す。内皮側負荷、外皮側負荷ともに、竹齢の増加に伴い曲げ弾性率が上昇した。特に発筍後43日から84日までの約40日間で著しく上昇し、それ以降の期間では9年までに徐々に上昇したが、内皮側負荷では発筍後169日から1年までの約200日間の間で再び大きな上昇が認められた。このような、竹齢の増加に伴う竹材の弾性率の上昇は、例えば、野村¹⁾により、当年生から12年生までの期間で認められており、大内⁷⁾も、1年生から7年生の期間で認めるなど、多数の報告があり、本結果もそれらと同様の結果であった。

内皮側負荷と外皮側負荷で比較すると、本実験の竹齢の範囲では全域にわたって外皮側負荷での弾性率が高かった。Nakajimaら⁶⁾は、マダケ材を曲げた際の細胞の変形を観察し、内皮側から負荷した場合には内皮側に存在する柔細胞が顕著にせん断変形するのに対して、外皮側から負荷した場合には繊維細胞も柔細胞も顕著には変形しないことを報告している。中馬⁸⁾や井口⁹⁾は、モウソウチクを用いて力学試験を行い、試験片に占める維管束鞘の割合から複合則を用いて繊維細胞と柔細胞それぞれの引張弾性率や動的曲げ弾性率を算出し、柔細胞の弾性率が繊維細胞に比べて著しく低いことを報告している。竹材は、内皮側に柔細胞が、外皮側に繊維細胞が多く存在する傾斜材料であり、曲げ変形の際の中立軸は外皮側に寄ることで内皮側での負荷が大きくなる。つまり、内皮側負荷時には、細胞内腔が大きく、また、せん断変形が容易な柔細胞への負荷が大

Fig. 1. Modulus of elasticity in bending (MOE) of moso bamboo at various times since shooting.

Legend: Error bars mean 95% confidence interval.

きくなることによって曲げ変形が容易になるため、外皮側負荷時に比べて内皮側負荷時の曲げ弾性率が小さくなったと考えられる。以上の曲げ弾性率の測定結果と、容積密度、細胞壁厚および細胞壁率との関わりについては、総合考察の項で述べる。

3.2 容積密度と細胞壁厚および細胞壁率

容積密度、細胞壁厚、細胞壁率の測定結果を Fig. 2, Fig. 3 および Fig. 4 に示す。全体的な傾向として、容積密度、細胞壁厚、細胞壁率は竹齢の増加とともに増加しており、この結果は、過去に行われた様々な検討結果²⁻⁵⁾と一致していた。

細胞壁厚については、竹齢が低い段階では、柔細胞と繊維細胞の双方において、内皮側と外皮側の差は小さかったが、竹齢が高くなると、柔細胞では外皮側、内皮側の順で細胞壁の肥厚が進み、最終的には外皮側に比べて内皮側で細胞壁が厚くなること、

Fig. 2. Bulk density of moso bamboo at various times since shooting.

Fig. 3. Cell wall thickness of moso bamboo at various times since shooting.

Legend: Error bars mean 95% confidence interval.

また、繊維細胞では内皮側に比べて外皮側での細胞壁の肥厚が顕著であることが、明らかとなった。

細胞壁率については、柔組織では、若年時においては内皮側と外皮側の差が大きい、発筍から169日経過した以降はその差が小さくなり、発筍後169日から1年の期間で顕著な増大が認められた。維管束では、内・外皮側の差は、本研究の期間において総じて小さく、発筍後43日から56日の期間に顕著に増大し、その後、発筍から1年までの間に徐々に増大していた。

3.3 総合考察

Fig. 5 に、各竹齢について、曲げ弾性率を容積密度で除して算出した比曲げ弾性率を示す。比曲げ弾性率は、発筍後43日から84日にかけては大差がなく、比較的高い値を示しているが、発筍後84日以降では竹齢の増加とともに明らかな低下を示している。この結果は、弾性率の増加が、密度増加によって説明できるという既往の報告に反する新たな結果と言える。更に、比曲げ弾性率の値の大小から、発筍後43

Fig. 4. Percentages of cell walls in the cross sectional image of moso bamboo at various times since shooting.

Legend: Error bars mean 95% confidence interval.

日から84日にかけて形成される竹材実質は、曲げ弾性率に大きく寄与するが、それ以降に形成される竹材実質の寄与は比較的小さいことを示唆すると解釈できる。このことについて、更に検討するために、Fig. 6 に、試料を採取した各期間における曲げ弾性率の増加量を対応する期間の容積密度の増加量で除した値を示す。つまり、各期間に竹材が得た単位密度が増加させた曲げ弾性率の大きさであるが、発筍後43日から84日では比較的高い値を示しているのに対して、発筍後84日から105日以降で低い値を示すなど、この結果は、上述の Fig. 5 に示された結果から得られた密度と曲げ弾性率の関係に対する解釈をより明確に示すものと言える。

また、Fig. 6 において、発筍後56日から84日の外皮側負荷時の値と発筍後169日から1年の内皮側負

荷時の値が、外皮側負荷時に比べて特に高くなっている。Fig. 2, Fig. 3 および Fig. 4 によると、材全体の容積密度が増加している中で、顕著な細胞壁実質の増加が認められたのは、発筍後56日から84日の外皮側の繊維細胞と、発筍後169日から1年での内皮側の柔細胞においてであり、Fig. 1 によると、発筍後56日から84日には外皮側負荷時の曲げ弾性率が上昇し、発筍後169日から1年には内皮側負荷時の曲げ弾性率が上昇している。この結果と3.1節に記載した Nakajima ら⁶⁾ の報告内容とを併せて考えると、外皮側負荷時の曲げ弾性率には外皮側の繊維細胞の細胞壁実質量が大きく関与し、内皮側負荷時には内皮側の柔細胞の細胞壁実質量が大きく関与する、つまり、曲げの圧縮側により多く存在する細胞が材全体の曲げ弾性率に大きく影響していると考えられる。

竹材の利用を考える場合、これらの検討結果を考慮したうえで、その利用目的に合わせて伐採する竹齢を選択する必要があると考えられる。これに関して、「竹材としては4年生のものが良質であり、それ以上の年数を経ると材質は劣化する」と言われているが、曲げ弾性率については、本研究の結果、少なくとも発筍から9年までの期間において増加することが確認された。ただし、材質の良し悪しは、曲げ弾性率によってのみ決まるものではないことから、今後、この通説の妥当性を科学的に判断するには、曲げ強度や破断時のたわみの大きさなどの、今回検討しなかった曲げ特性や、他方向の力学的性質、耐朽性などについても検討すべきであろう。

ここで、タケの成長と力学的性質の発現機構と、その生物としての合理性について考察を行う。本研究で竹稈を採取した全期間において、竹材の弾性率と容積密度は竹齢の増加とともに上昇していたが、その中でも伸長成長を終了した直後の期間において、主に繊維細胞の細胞壁を内・外皮側の双方で肥厚させることで、竹材は効率よく曲げ弾性率を獲得していた。その後は、外皮側に存在する柔細胞や繊維細胞の細胞壁を肥厚させており、円筒構造である竹稈の中で、より大きく力のかかる外縁部が優先的に強化されている。タケは、この期間に葉を展開するが、同時に風による曲げの力がより竹稈に大きく作用するようになり、竹稈が折れる危険が増加すると考えられる。つまり、発筍からできるだけ早い段階で効率よく竹稈を支える組織構造を得ることは、竹が早期にかつ安全に炭素固定を開始できるという点でも合理的であると解釈できるだろう。また、その後の期間において細胞壁の肥厚が顕著なのは、

Fig. 5. Specific modulus of elasticity in bending (MOE/ρ) of moso bamboo at various times since shooting.

Legend: Error bars mean 95% confidence interval.

Fig. 6. Increase in modulus of elasticity per unit increase in bulk density for each period.

Fig. 3 に示された通り, 内皮側の柔細胞と外皮側の繊維細胞であり, それぞれの場所に多く存在する細胞をより大きく肥厚させている点も理にかなった細胞壁実質の形成であると考えられる。

本報告では, 竹材の密度や細胞の壁厚, 壁率といった比較的大きな構成要素に着目したが, 木材の材質には, 細胞壁を構成する成分の量や質が関わっていることが広く知られている^{10, 11)}。ことから, 以上の検討のみで竹材の力学的性質を変化させる機構について説明しきっているとは言い難い。これについて, タケでは, セルロースの結晶化度の増加が伸長成長終了時点で落ち着くこと^{1, 12)}や, 0.5年生と4年生でマイクロフィブリル傾角がほぼ変わらないこと⁴⁾が示されており, 結晶性の構成要素についてはほぼ不変であると予想されることから, 今後は, 細胞壁のマトリクス部分を構成する成分の量や質と力学的性質の関わりについて検討を行なう。

4. 結 論

モウソウチク材の力学的性質発現機構に関して明らかにすることを目的として, 成長に伴う曲げ弾性率の変化と容積密度, 細胞壁厚および細胞壁率について検討を行い, 以下の結論を得た。

1. 曲げ弾性率は, 伸長成長終了後から少なくとも9年までの期間で上昇を続けていた。この曲げ弾性率の増加は, 単純に密度増加によるものではなく, 顕著に曲げ弾性率が増加する発筈から105日までの期間では, 特に外皮側の繊維細胞壁の肥厚が大きく関わっていると考えられた。
2. 負荷方向によって, 曲げ弾性率が顕著に増加する期間が異なっており, 内皮側負荷時は発筈後43日から56日および発筈後169日から1年の期間で増加し, 外皮側負荷では発筈後43日から84日の期間で顕著に増加した。発筈後169日から1年の期間では特に内皮側の柔細胞の細胞壁が肥厚し, 発筈後43日から84日の期間では特に外皮側の繊維細胞の細胞壁がそれぞれ肥厚していた。つまり, 竹材の曲げ弾性率には, 内皮側負荷時には内皮側に存在する柔細胞の細胞壁実質量が, 外皮側負荷時には外皮側に存在する繊維細胞の実質量が, 特に大きく関与することが明らかになった。

文 献

- 1) 例えば, 野村隆哉: 竹の生長について. 木材研究・資料 15, 6-33 (1980).
- 2) 宇野昌一: 竹稈の成立と木質化の推移. “竹材の性質とその適用”, 西ヶ原刊行会, 東京, 1939, pp. 1-10.
- 3) 竹内叔雄: 生長. “竹の研究”, 養賢堂, 東京, 1932, pp. 113-124.
- 4) 井口よう子, 外崎真理雄, 黒田克史, 阿部 久: 若竹および成竹の竹稈内における動的粘弾性の変動. *Bamboo Journal* 23, 8-14 (2006).
- 5) 福島和彦, 船田 良, 杉山淳司, 高部圭司, 梅澤俊明, 山本浩之: タケ細胞壁の形成過程. “木質の形成 バイオマス科学への招待 第2版”, 海青社, 大津, 2011, pp. 81-84.
- 6) Nakajima, M., Furuta, Y., Ishimaru, Y., Ohkoshi, M.: Cooling set and its recovery in water-saturated bamboo under large bending deformation. *J. Wood Sci.* 55(2), 100-106 (2009).
- 7) 大内成司, 中原 恵, 阿部 優, 寒竹慎一: 同一竹林における竹材の曲げ強度特性について. 大分県産業科学技術センター研究報告書, 108-111 (2002).
- 8) 中馬 丞, 広橋光治, 大釜敏正, 笠原康弘: モウソウチクの複合構造と引張特性. 材料 39 (442), 847-851 (1990).
- 9) 井口よう子, 伏谷賢美, 中馬 丞, 小澤雅之, 久保隆文, 佐藤敬一: 竹材の振動特性に及ぼす維管束鞘の体積率の影響. 木材学会誌 43(3), 391-398 (1997).
- 10) 佐藤快信, 伏谷賢美, 久保隆文: 熱と水分による木材の軟化に及ぼす構造因子の影響. 木材学会誌 33(12), 921-928 (1987).
- 11) 例えば, 古田裕三, 相澤秀雄, 矢野浩之, 則元京: 膨潤状態における木材の熱軟化特性 (第4報) 木材の熱軟化特性に与える細胞壁成分の影響. 木材学会誌 43(9), 725-730 (1997).
- 12) 谷口栄一: 繊維素物質の結晶領域に関する化学的研究 (第14報) アカマツ並びに筈の生長過程に於ける微細構造の変化について. 木材学会誌 2(4), 152-157 (1956).