

竹の種別比較による特徴的な形状および構造力学的特性の抽出

北海道大学大学院工学院	学生会員	○柳井 駿斗
北海道大学大学院工学院	非会員	●亀山 侑平
山梨大学大学院総合研究部	非会員	●島 弘幸
近畿大学農学部	非会員	●井上 昭夫
北海道大学大学院工学研究院	正員	●佐藤 太裕

1. はじめに

竹は中空円筒構造を有する特異な植物であり、優れた力学的合理性を有する。これまでの著者らの植物模倣科学の観点からの研究において、中空円筒構造を有する竹の中でもモウソウチクを対象に、維管束を適切に配置することにより曲げ剛性を上昇させている¹⁾ことや、竹の「節」の存在が曲げに対する抵抗を高めている²⁾ことを明らかにしている。これらの研究で対象としたモウソウチク以外にも竹の種類は非常に多く存在するが、中空構造であり、節を有する点は竹に共通する特性であるといえる。しかし、竹は種類ごとに平均高さや形状などが異なっていることが知られている。我々は、種別で異なる形状でも、共通する力学的性質が存在するならば、その性質は竹が成長し、自身を支える上で構造的に重要な要因であると考えた。このことに着目し、本研究では、竹の種別による形状についての詳細な考察を目的とする。具体的にはマダケ属に分類されるモウソウチク (*Phyllostachys pubescens*, 以降PP)、マダケ (*Phyllostachys bambusoides*, 以降PB)、クロチク (*Phyllostachys nigra* var. *henosis*, 以降PNH)、ハチク (*Phyllostachys nigra* Munro, 以降PN)、キンメイチク (*Phyllostachys bambusoides* f. *castillonis*, 以降PBC)の5種で寸法などを計測した結果から、形状に関する構造力学的な相違性および共通性を見出すことを試みる。

2. 竹5種の形状比較と分類

本研究で比較に用いる5種の竹について、いずれも九州地方で計測を行ったデータ³⁾を平均したものをを用いた。これを表-1に示す。この図より、竹の節間数や高さは種別で大きく異なっていることが読み取れる。また、節間に地際（地表部）から梢端（先端）に向け $n = 1, 2, \dots, N$ と節間番号を定め、竹の外径、内径、高さ、節間長を図-1、図-2のように定義した。ここで5種の竹で節間ごとの外径、内径、高さを、その竹の最大外径、最大内径、梢端までの高さで除し、相対化したものを図-3に示す。この図より、竹5種の形状が大きく異なることが読み取れる。また、その形状を地際で膨らむ形状(PNH, PN, PB)と地際から梢端に向け線形的

表-1 竹5種のサンプル数, 平均節間数, 平均高さ

種名	サンプル数	平均節間数	平均高さ (m)
PBC	26	23	2.26
PNH	25	28	3.30
PN	25	38	5.86
PB	10	56	14.9
PP	10	64	14.6

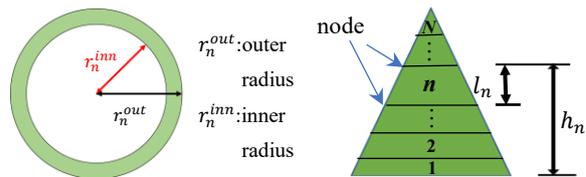
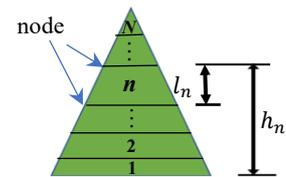
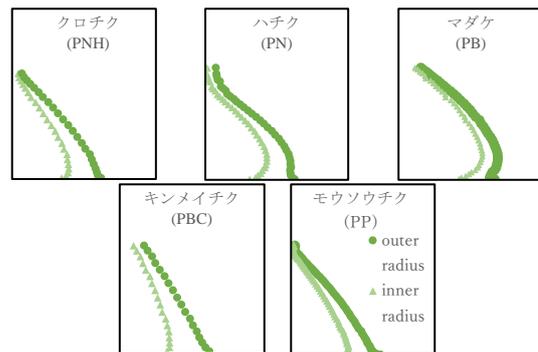
図-1 竹断面の
外径, 内径図-2 節間番号と
節間番号nの
節間長 l_n と高さ h_n 

図-3 竹5種の形状比較

に半径が小さくなる形状(PBC, PP)の2つの型に大別した。ここでは前者を「完満型」、後者を「うらごけ型」と呼ぶこととする。

キーワード 竹, 生物形態模倣, 植物模倣科学, 細長比

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学工学部 TEL011-706-6177

3. 竹5種の相対細長比

図-3に示した形状の大きく異なる竹5種について、以下に定義する相対細長比の違いを検証する。竹は地際から梢端に向け断面の大きさが変化するため、この量を定義するのに際し、ここでは平均断面を用いた。平均断面は節間番号 n までの節間の外径と内径を平均したものである。また、部材長さは節間番号 n の節間の高さ h_n とした。平均断面における外径、内径をそれぞれ、 \bar{r}_n^{out} 、 \bar{r}_n^{inn} とすると、それぞれ式(1)、(2)で表され、また、平均断面の断面二次半径 i_n 、平均断面を用いた細長比 λ_n は式(3)、(4)で表される。

$$\bar{r}_n^{out} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i^{out}}{n} \quad (1)$$

$$\bar{r}_n^{inn} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i^{inn}}{n} \quad (2)$$

$$i_n = \frac{1}{2} \sqrt{(\bar{r}_n^{out})^2 + (\bar{r}_n^{inn})^2} \quad (3)$$

$$\lambda_n = \frac{h_n}{i_n} \quad (4)$$

この細長比 λ_n を地際から梢端までの細長比 λ_N で除したものを相対細長比 λ_n/λ_N として定義した。

4. 比較結果

4.1. 竹5種の相対細長比の比較

竹は高さが種別で異なるため、節間番号 n の節間までの高さ h_n を、地際から梢端までの高さ h_N で除して相対化した。これを相対高さ h_n/h_N と呼ぶこととする。相対細長比と相対高さを比較したものを図-4に示す。この図より、非常に興味深いことに、竹5種で形状が異なるにも関わらず λ_n/λ_N が一致することが読みとれる。

4.2. 竹5種の相対節間長の比較

竹は種別で節間長と節間数が異なる。ここに竹の形状差が表れる要因があると予想し、節間長と節間番号の比較を行った。相対細長比と同様、節間長 l_n 、節間番号 n を最大の節間長 l_{max} 、最大節間番号 N でそれぞれ除し相対化した、相対節間長 l_n/l_{max} 、相対節間番号 n/N を用いて比較を行う。相対節間長と相対節間番号を比較したものを図-5に示す。この図より、相対節間番号 $0 \leq n/N \leq 0.4$ の範囲において、完満型は、相対節間長 l_n/l_{max} がうらごけ型より大きいことが読みとれる。

4.3. 竹5種の相対体積の比較

節間長以外の節に関わる要素として、節間毎の体積について同様に比較を行った。ここで、節間番号 n の節間の体積 V_n を節間の最大体積 V_{max} で除したものを相対体積 V_n/V_{max} とし、相対体積と相対節間番号を比較したものを図-6に示す。この図より、竹5種で相対体積 V_n/V_{max} が一致することが読み取れる。

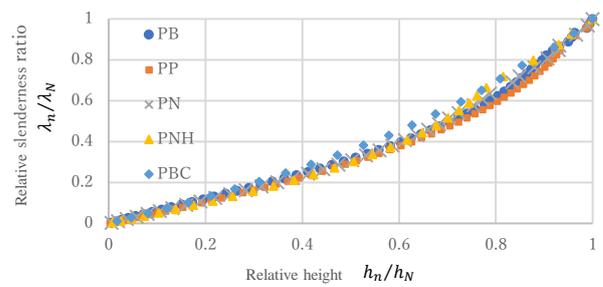


図-4 相対高さとの相対細長比の関係

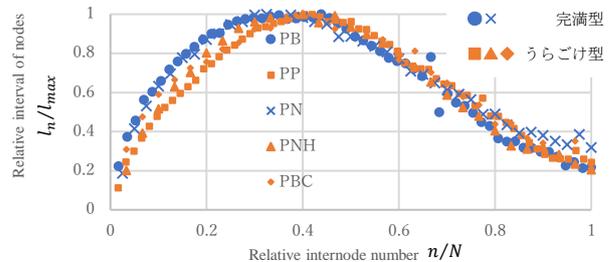


図-5 相対節間番号と相対節間長の関係

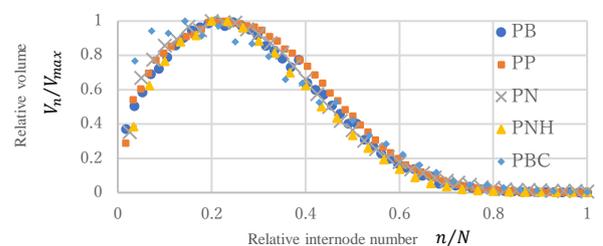


図-6 相対節間番号と相対体積の関係

5. 竹5種の形状の違いに関する考察とまとめ

前章より、5種で相対節間長の違いがみられたものの、相対細長比と相対体積は一致することがわかった。相対体積が5種で一致することより、 $0 \leq n/N \leq 0.4$ の範囲における l_n/l_{max} の違いが、断面の大きさに影響を与え、形状の違いとして表れたといえる。形状が違う5種の竹でこれらの量が一致することは、塔状構造物の力学的合理性にこれらの量が関係することを示唆するものであるといえよう。

謝辞

本研究は科研費基盤研究(A)(研究課題番号: 18H03818, 研究代表者: 佐藤太裕), 新学術領域研究(課題番号: 19H05359、代表: 島)により実施されたことを付記し関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) M. Sato, A. Inoue, and H. Shima: Bamboo-inspired optimal design for functionally graded hollow cylinders, PLOS ONE, 0175029, 2017.
- 2) 佐藤太裕, 谷垣俊行, 佐藤輪佳, 島弘幸, 井上昭夫: 竹の節・組織構造が織り成す円筒体としての合理的な構造特性の理論的解明, 土木学会論文集, Vol.72, pp.25-34, 2016.
- 3) A. Inoue, M. Shimada, M. Sato, H. Shima: Estimation of culm volume reduction factors in five bamboo species (*Phyllostachys* spp.), J. For. Res., pp. 2069-2078, 2017.