

竹の種別による形状の違いとその力学特性に関する考察

Investigation of shape difference in different types of bamboos and mechanical properties

北海道大学工学部環境社会工学科
北海道大学大学院工学院
山梨大学大学院総合研究部
近畿大学農学部
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員 柳井 駿斗 (Hayato Yanai)
非会員 亀山 侑平 (Yuhei Kameyama)
非会員 島 弘幸 (Hiroyuki Shima)
非会員 井上 昭夫 (Akio Inoue)
正 員 佐藤 太裕 (Motohiro Sato)

1. はじめに

近年、生体の組成や形状を工学技術に適応させる生物形態模倣が注目されている。例として、カワセミの嘴の形状を模倣し、新幹線の先頭車両形状に取り入れることで空気抵抗を減少させる技術が実現されている。著者らは、生物模倣の観点から竹の力学的合理性について研究を行っている。これまでの著者らの研究において、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。これらの研究ではモウソウチク一種のみを対象としたが、竹は種類や個体ごとに形状が異なっている。しかし中空構造であり、節を有する点は共通している。このことから、種別により一見違って見える形状でも、共通する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られる。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詳細に考察することを目的とする。具体的には5種類の竹（モウソウチク、キンメイチク、クロチク、ハチク、マダケ）について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⁾を用いた。その結果を表-1に示す。

表-1 竹 5 種のサンプル数、平均節間数と平均高さ

種名	サンプル数	平均節間数	平均高さ [m]
キンメイチク	26	23	2.26
クロチク	25	28	3.30
ハチク	25	38	5.86
マダケ	10	56	14.9
モウソウチク	10	64	14.6

これより節間数、高さは種別で大きく異なることがわかる。5種の竹の節間ごとの外径と内径の大きさ、高さをプロットし作成したものを図-1に示す。形状比較を容易にするために外径と内径、高さを、その竹の最大

内径、最大外径、地際から先端までの高さでそれぞれ除し、相対化した。図-1より竹5種についてその形状が大きく異なることがわかる。また、その形状は地際（地表部）で膨らむ形状と梢端（先端）から地際に向け線形的に半径が大きくなる形状の2つに大別される。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。図-1より、クロチク、ハチク、マダケは完満型に、キンメイチク、モウソウチクはうらごけ型に分類される。

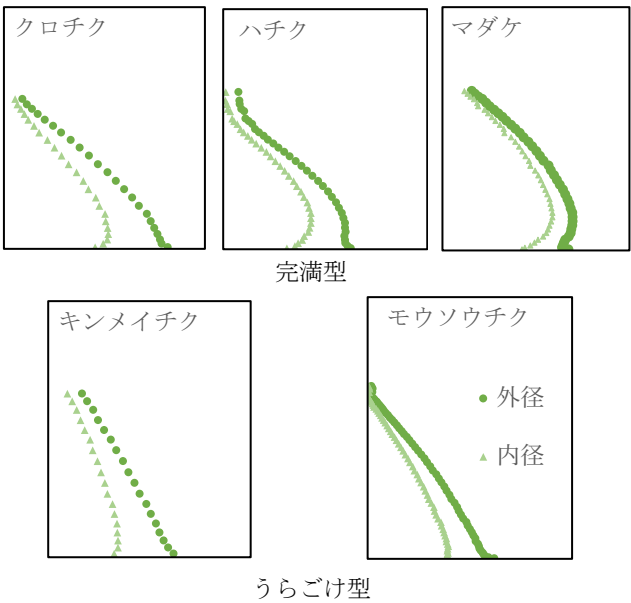


図-1 竹 5 種の形状比較

3. 竹 5 種の細長比

図-1に示した形状の大きく異なる竹5種について、ここでは座屈強さに影響を及ぼす細長比の違いを検証する。しかし、竹は地表から先端に向け断面の大きさが変化するため、ここでは平均断面を用いた。平均断面は、節間に、地際から梢端に向け $n = 1, 2, 3, \dots, n, \dots, N$ と節間番号を定め、節間番号 n までの節間の外径と内径の大きさを平均したものである。このとき、節間番号 n の節間における外径を r_n^{out} 、内径を r_n^{inn} と定義すると、外径と内径は以下の図-2のように表される。また、部材長さは節間番号 n の節間における高さ h_n とし、節間番号の定め方と高さ h_n を図-3に示す。

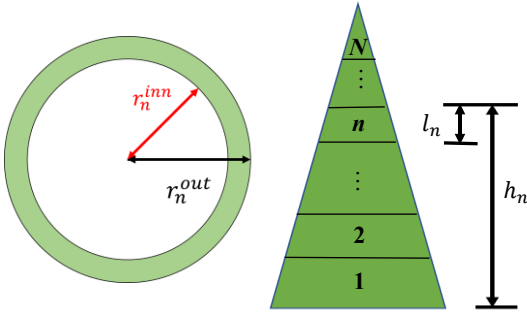


図-2 外径と内径

図-3 節間番号と高さ

以上より、平均断面における外径、内径をそれぞれ $\overline{r_n^{out}}$, $\overline{r_n^{inn}}$ と定めると次の式で表される。

$$\overline{r_n^{out}} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i^{out}}{n} \quad (1)$$

$$\overline{r_n^{inn}} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i^{inn}}{n} \quad (2)$$

この平均断面における外径、内径を用いた断面二次半径を i_n とすると i_n は式(3)で表され、平均断面における細長比を λ_n とすると λ_n は式(4)で表される。

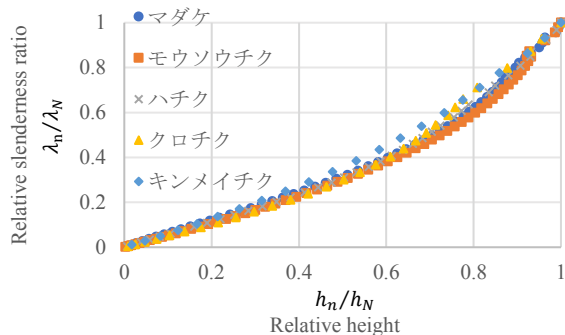
$$i_n = \frac{\sqrt{(\overline{r_n^{out}})^2 + (\overline{r_n^{inn}})^2}}{2} \quad (3)$$

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

4. 解析結果

4.1 竹5種の相対細長比の比較

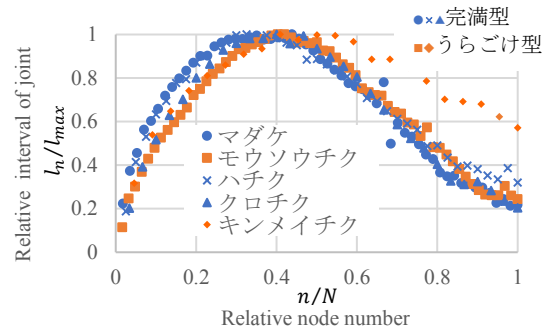
竹は高さが種別で異なるため、平均断面における細長比 λ_n と高さ h_n を、地際から梢端までの細長比 λ_N と高さ h_N でそれぞれ除して相対化した。それぞれ、相対細長比 λ_n/λ_N 、相対高さ h_n/h_N と呼ぶこととする。相対細長比と相対高さを比較したものを図-4 に示す。興味深いことに、図-4 より竹5種で形状が異なるにも関わらず λ_n/λ_N が一致することが読みとれる。

図-4 相対細長比 λ_n/λ_N と相対高さ h_n/h_N の関係

4.2 竹5種の相対節間長の比較

表-1 に示す通り、竹は種別で節間長と節間数がそれ

ぞれ異なる。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。図-3 より節間番号 n における節間長を l_n とし、節間番号 $1 \sim N$ の範囲における最大の節間長を l_{max} とする。細長比と同様に、節間長 l_n 、節間番号 n と最大の節間長 l_{max} と最大節間番号 N でそれぞれ除し、相対化する。それぞれ、相対節間長 l_n/l_{max} 、相対節間番号 n/N と呼ぶこととする。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。図-5 より、 n/N が $0 \sim 0.4$ の範囲において完満型は、 l_n/l_{max} の変化の割合がうらごけ型より大きいことが読みとれる。これは、完満型は相対節間番号 n/N が $0 \sim 0.4$ の範囲で相対高さ h_n/h_N の変化がうらごけ型よりも大きいといえる。

図-5 相対節間長 l_n/l_{max} と相対節間番号 n/N の関係

5. 形状差に関する考察とまとめ

前章から完満型の竹は、 n/N が $0 \sim 0.4$ の範囲において、うらごけ型の竹より相対節間長を大きくする傾向があるが、相対細長比は形状の違いによらず一致するという結果が得られた。完満型の竹が相対節間長を大きくしつつ、相対細長比をうらごけ型の竹に近づけるためには、 n/N が $0 \sim 0.4$ の範囲において、形状を適切に変化させる必要がある。このため、完満型の竹は膨らんだ形状をとっているといえる。これらをまとめると竹は形状や節間長が種別によりそれぞれ異なるが、本研究で定義した相対細長比を一致させる形状をとっていることが分かった。

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)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.