

# シホウチクの断面形状から得られる力学的合理性の考察

Investigation on mechanical rationality in cross-sectional shape of square bamboo

北海道大学工学部環境社会工学科	○学生員	古川 菜生	(Nao Furukawa)
北海道大学大学院工学院	非会員	亀山 侑平	(Yuhei Kameyama)
北海道大学大学院工学院	非会員	鎌田 弥成	(Minari Kamata)
山梨大学大学院総合研究部	非会員	島 弘幸	(Hiroyuki Shima)
近畿大学農学部	非会員	井上 昭夫	(Akio Inoue)
北海道大学大学院工学研究院	正員	佐藤 太裕	(Motohiro Sato)

## 1. はじめに

長い年月をかけて進化した生物は、構造的に優れた機能を保有している。それら生物の構造を研究し、工学へと応用させ、人工的に再現することを生物形態模倣 (Biomimetics) という。今日では、蜘蛛の糸を応用した、高伸縮性・高強度の繊維の開発や、カタツムリの殻の構造を模倣して作られた、汚れが付きにくい壁などが開発されている。

本研究では、著者らがこれまで生物形態模倣の観点から研究を進める竹について、特にその断面形状に着目した。竹は一般的には中空円筒構造をとっているが、中には断面形状が丸みを帯びた四角形となっている特異な「シホウチク」と呼ばれる竹も存在する(図-1)。モウソウチクのような円筒形の竹に関しては、著者らの先行研究により、中空円筒構造が維管束の傾斜的な配列や複数の節の配置によって、曲げに対しての抵抗性を高めていることが明らかになっている。円形断面を有するモウソウチクに対して、なぜシホウチクが四角形断面を有するのか非常に不思議であるが、何らかの力学的合理性を有しているとも考えられる。本研究では丸みを帯びた四角形であるシホウチクの断面形状を記述する手法を提案し、断面二次半径の導出を試みた。さらに得られた断面二次半径を円形断面と比較することにより、シホウチクの断面形状が有する構造力学的性質について検討を行った。



(a) モウソウチク断面 (b) シホウチク断面  
図-1 竹の断面図

## 2. シホウチクの断面モデルの作成

シホウチクの断面形状の特徴として、内側は真円に近い形状をとっており、外側は角張った形状をしている。よって内側形状と外側形状を別々に考えることのできるモデルとする必要がある。そこで以下の手順でシホウチクの断面のモデル化を行った。(図-2)

まず、1辺の長さを  $L$  とする正方形を  $xy$  軸座標上に、図心が原点となるようにおく ( $L$  は定数)。次に、正方形の頂点  $A$  ( $\frac{L}{2}, \frac{L}{2}$ ) から、正方形の上辺との角度が  $\theta_{inn(out)}$

( $45^\circ \leq \theta_{inn(out)} < 90^\circ$ )  $\theta_{inn(out)}$  は定数) となるような直線を引き、その直線が  $y$  軸と接する点を次のように表す。

$$(x, y) = (0, \frac{L}{2}(1 - \tan \theta_{inn(out)})) \quad (1)$$

中心を(1)、半径  $R_{inn(out)}$  として次の式(2)及び(3)で表される弧を描く。ここで、正方形頂点  $A$  からそれぞれの半径方向に沿った内側表面までの長さを  $h_{inn}$ 、外側表面までの長さを  $h_{out}$  とすると次の式が成り立つ。

$$x = R_{inn(out)} \cos \alpha \quad (2)$$

$$y = R_{inn(out)} \sin \alpha + \frac{L}{2}(1 - \tan \theta_{inn}) \quad (3)$$

$$\theta_{inn(out)} \leq \alpha \leq (180^\circ - \theta_{inn(out)}) \quad (4)$$

$$R_{inn(out)} = \frac{L}{2 \cos \theta_{inn(out)}} + h_{inn(out)} \quad (5)$$

ここで、

$$h_{inn} < h_{out} \quad (h_{inn(out)} \text{ は定数}) \quad (6)$$

とする。さらに、正方形の頂点  $A$  ( $\frac{L}{2}, \frac{L}{2}$ ) を中心として、次の式で表される弧を描く。

$$\begin{cases} x = h_{inn(out)} \cos \alpha + \frac{L}{2} \\ y = h_{inn(out)} \sin \alpha + \frac{L}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$(90^\circ - \theta_{inn(out)}) \leq \alpha \leq \theta_{inn(out)} \quad (8)$$

これらの手順を、正方形の他の頂点  $B, C, D$  それぞれに対して行い、図-2のような断面モデルを作成した。

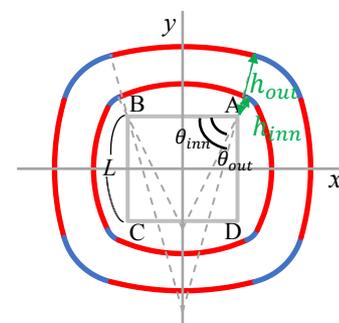


図-2 シホウチク断面モデル

## 3. 断面二次モーメントの算出

前章で得られた断面モデルから、断面積と断面二次モー

ーメントを算出した。断面モデルは原点に対して点対称であるので、図-3 のように第一象限の断面積と断面二次モーメントを求め、それを4倍することで断面モデル全体の値を求めることができる。

断面積と断面二次モーメントは図-3 のように、それぞれの外側と内側の差で求めることができる。したがって、外側の曲線で囲まれた面積を $A_{out}$ とし内側の曲線で囲まれた面積を $A_{inn}$ とすると、全体の断面モデルの総断面積 $A$ は、式(9)のように表される。

$$A = 4 \times (A_{out} - A_{inn}) \quad (9)$$

また同様に、外側の曲線で囲まれた図形の断面二次モーメントを $I_{xout}$ 、内側の図形の断面二次モーメントを $I_{xinn}$ とすると、断面モデルの断面二次モーメントは式(10)のように表される。

$$I_x = 4 \times (I_{xout} - I_{xinn}) \quad (10)$$

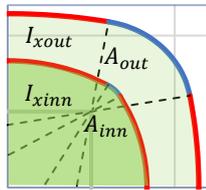


図-3 断面モデル

#### 4. 断面形状の変化に対する断面二次半径の変化

前章より、断面二次半径 $i$ は式(11)のように表される。

$$i = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (11)$$

ここで、 $\theta_{inn} = \theta_{out} = 45^\circ$ つまり断面が中空円筒のときの断面二次半径を $i_0$ とおく。中空円筒の場合と比べ、断面二次半径がどれだけ改善されたかを示す割合を、改善率 $\eta$ として、式(12)のようにおく。

$$\eta = \frac{i}{i_0} \quad (12)$$

$\theta_{inn}, \theta_{out}$ それぞれを固定して、他方を変化させたときの断面形の変化の様子と、断面二次半径の改善率 $\eta$ を、図-4、図-5、図-6 及び図-7 に示す。

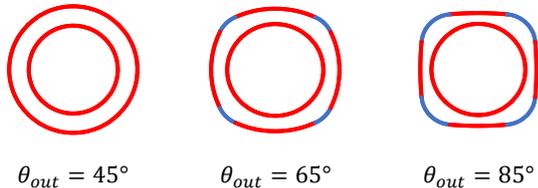


図-4  $\theta_{out}$ の変化に伴う断面形状の変化( $\theta_{inn} = 45^\circ$ )

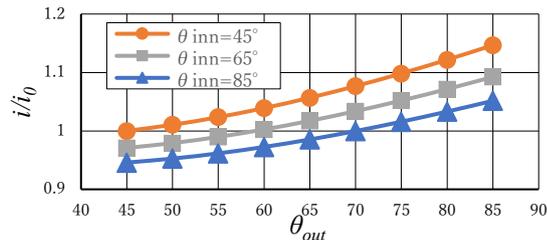


図-5 断面二次半径の変化 (内側固定)

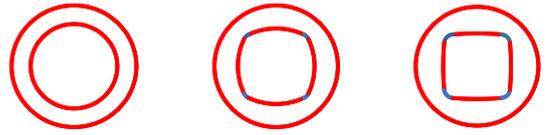


図-6  $\theta_{inn}$ の変化に伴う断面形状の変化( $\theta_{out} = 45^\circ$ )

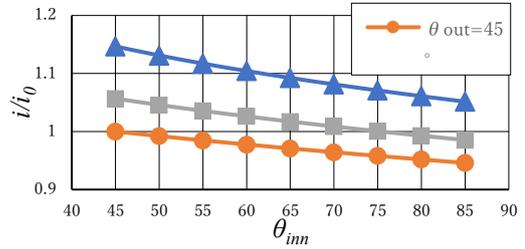


図-7 断面二次半径の変化 (外側固定)

図-5 より、 $\theta_{out}$ が大きくなるほど、断面二次半径の改善率 $\eta$ が大きくなる。また、内側の固定角度が小さいほど、つまり内側の断面形が真円に近いほど $\eta$ が大きくなっていることが分かる。一方で、図-7 より、 $\theta_{inn}$ が大きくなるほど、つまり内側断面形が角張っていくほど、 $\eta$ は小さくなっている。また、外側の固定角度が大きいくほど $\eta$ が大きくなっていることが分かる。

これらの結果より、今回用いた断面モデルでは $\theta_{out}$ が大きく、 $\theta_{inn}$ が小さくなるほど $\eta$ が大きくなることが分かる。つまり、外側断面形が角張り、内側断面形が円に近くなるほど、中空円筒と比較し断面二次半径が大きくなることが分かる。実際のシハウチクの断面は内側が真円に近く、外側は角張っている。したがって、今回の結果からシハウチクの断面形状は断面二次半径という観点から合理的であるといえる。

#### 5. おわりに

本研究により、断面モデルから実際のシハウチクの形状合理性の一端を示すことができた。今後の研究では、本研究で用いた断面モデルを利用して、シハウチクの維管束配列を解析することにより、その配列が曲げ剛性に対して与える影響及びその力学的合理性について考察していく。そして、その維管束配列に関する理論値と実測値を比較し、そこに整合性があるのかを調べていく。

#### 6. 謝辞

本研究は科研費基板研究(B)(研究番号:18KT0037, 研究代表者:佐藤太裕)により実施されたことを付記し、関係者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, e0175029, 2017.