# 竹節の形態組織構造から学ぶ軽量最適化構造の創造設計

## Creative Design of Optimized Light Structures learned from Geometrical and Organizational Structure of a Bamboo with Nodal Structures

○有尾 一郎* ・ 中沢 正利**
Ichiro ARIO and Masatoshi NAKAZAWA

*博士 (工学) 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)
**工博 東北学院大学工学部環境建設工学科 (〒 985-8537 多賀城市中央 1 丁目 13-1)

**ABSTRACT** Several approaches have been used to achieve a least-weight or stiffness-maximization design. In this paper, bamboo structures that realize a rational profile in the biomechanical method are studied from the viewpoint of the mechanical properties of cylindrical structures. First, the organizational structure of bamboo test pieces and their nodal diaphragm are investigated experimentally, and the results are reflected in the bamboo test pieces' structural pier model. Second, the feedback model is applied to a cylindrical steel pier which was buckled locally by the Hyogoken-Nanbu Earthquake. The local buckling strength of this pier, the bamboo model and the feedback model are compared to find out the optimization design for a cylindrical structure with a nodal diaphragm.

***Keywords :*** 竹, 円筒構造, バイオメカニックス, 対称構造物, 最適構造
*bamboo, cylindrical structure, biomechanics, symmetric structures, optimization structures*

## 1. はじめに

近年，バイオメカニックスの最適化則において，骨の形態形成をもとに考えたといわれる Roux [1)]による「最小材料最大強度説」や Hertel [2)]による「Light Structure」などの各種生体材料の形態や構造特性の点から構造物を創造・設計する試みが行なわれてきた．また，Claus ら[3)]による，樹木がどのようにして樹体内部の力学的最適化を図り，複雑に織りこまれた軸方向と放射方向の最適化の部分的あるいは全体的破壊が，どのようにして様々な破断様式をもたらすかを分かりやすく解説している．

自然界ではあらゆる生物があらゆる環境下で適応している．そのような生物の形態や材料組織は一般にきわめて複雑で，それらの創生メカニズムはほとんど未知であるが，長い年月を経てきていることからある意味で最適化則に準じているととらえられている[4),5)]．そのような最適化則の構造モデルとして，尾田 [6),7)]によって竹材真かん部における維管束鞘分布と引張強さとの関係を明らかにしている．自然界で受ける風雪等を外力として，竹材の維管束鞘を一種の強化繊維とモデル化し，重量最小化の設計目的で繊維含有率分布を求め，生体の観察による工学的なアプローチとして興味深い研究である．このように，生物の構造組織にみる最適化設計の試みは，いくつかの工学的成果を挙げてきている．

本研究は，我々がこれまで蓄積してきた竹の組織構造の研究に関する力学諸量を再提示するとともに，竹(モウソウチク) の構造形態の観察と計測調査を通して，その構造の力学的役割をさらに理解し，バイオメカニックの視点から最適な円筒橋脚の設計概念に適用を試みるものである．円筒断面は，断面積あたりの比剛性は高く，力学的に有用且つ効率的な構造である．特に，自生している竹の円筒構造の仕組みを工学的に理解することは，円筒系シェル構造物の座屈耐荷力向上や理想的な最適設計概念に適する鍵が隠されているものと考える．竹は，円筒構造，節部の存在，高さ方向での寸法変化による構造形態を持つ[1]．また，竹

[1] 戦前から，竹は工学的に研究されており，その利用法の一つとして，竹筋コンクリートによる土木構造物が数多く設計された[8)]．

には独特の節構造が存在することで，橋梁のダイヤフラム構造と類似する力学的役割を担っているものと概念的には考えられているが，現状では生体構造の研究から具体的な設計法には至っていない．

我々はモウソウチクの組織構造に形態形成や座屈防止効果の仕組みが備わっているものと考え，実際の鋼製円筒橋脚の座屈設計に対して，この竹の形態特性を工学的に利用することにより，円筒橋脚の最適化設計の一例を試みるものである．すなわち，生体の円筒節構造の構造形態の特性を活かし，竹の最適化則に基づく鋼製円筒橋脚の工学的設計に利用する方法を提案するものである．

## 2. 竹の形態と構造特性

竹の組織構造はいくつかの文献 9)~11)等によって詳細に調べられている．この章ではモウソウチクの構造形態の観察を通して，竹材を一つの理想構造物とし，生物の形態や材料組織の形態形成を知る一つの手がかりを得るために，この生体の構造特性の調査を実施した．

### 2.1 モウソウチクの形状

自然のモウソウチクの高さは10~25mに成長するが，今回実験に用いた竹は全長 $H$ =17.6mほどであった．このモウソウチクのかん部の形状を**図–1**に示す．ここに，$h/H$ は無次元化された高さ方向の座標系である．**図–1**(b) は根元の節からカウントし，節部の外径および内径の一部を計測し，それらを根元の最大値で無次元化しプロットしたものである．最初に枝が発生する節は下から38/74番目の節で高さ9.39mの位置であった．真かん部の断面はほぼ円筒形断面であり，計測の結果より，竹筒厚さ $t$ はかん基部に近いほど厚かったが，ほぼその高さに対応する外径の1割程度の大きさであった．この形状の特徴は，根元付近の節の多さと断面の拡がり，地表に接するような滑らかな形状であった．力学的に理想的な円錐形の形態である．

また，節部の断面形状から断面積，断面係数，断面二次モーメントの分布を基部での値で無次元化したものと細長比の逆数の分布を**図–2**(a) に示す．半径 $r$ は竹の高さ方向にほぼ線形に減少する[2]．厚さ $t$ は半径 $r$ に線形に比例すると近似できるので，断面係数 $W$ が $r^3$ に，断面二次モーメント $I$ が $r^4$ に比例しており，かん部の曲げ剛性は高さに応じて非線形な関係にある．このほか，節間長を節部で支持された柱モデルとしたときの細長比の逆数も計算し，根元付近は耐荷性能が非線形的に高い傾向にあることが確かめられた．さらに，節高さにおける諸量を節単位で調べた．各節間あたりの節間長 $dL_i$ の分布，節の外径 × 節間長の投影面積 $dA_i$，および容積 $dV_i$ を，それぞれの最大値で無次元化した比率の調査結果を**図–2**(b) に示す．

### 2.2 孟宗竹の断面組織

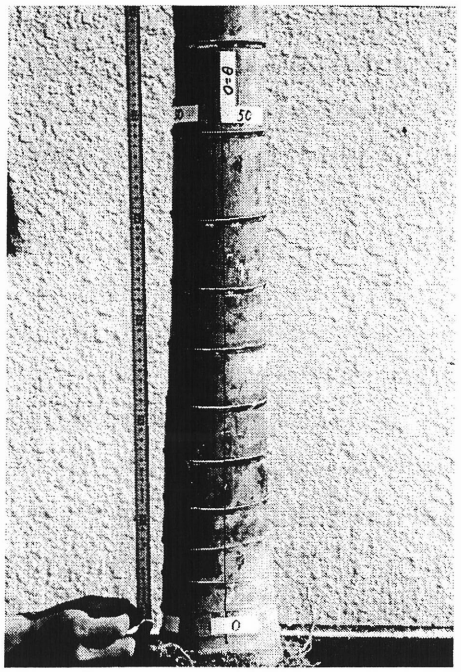
孟宗竹の維管束を繊維強化材とみなすと，孟宗竹は繊維強化複合材料とみることができる．孟宗竹のかん部断面は，中空円筒形になっているので，実断面部を同心円状に平均的に何層かの積層構造とみることができる．ここでは，孟宗竹のかん部断面を各層で弾性特性が異なる積層板とみなし，その生体構造を工学的に検討する．

孟宗竹は稈の軸と同じ繊維配向角を持ち，その断面内の繊維分布を2値化画像 (437×533pixels) で表現したものを**図3**(a) に示す．繊維分布は斑点状に同心円状に分散しており，図の上部の表皮側は繊維の密度が高く，内側は低く分布している．この分布を定量的にとらえるために，1列あるいは1行あたりのピクセルの平均密度を維管束鞘含有率 $V_f$ としてデジタル計測した．

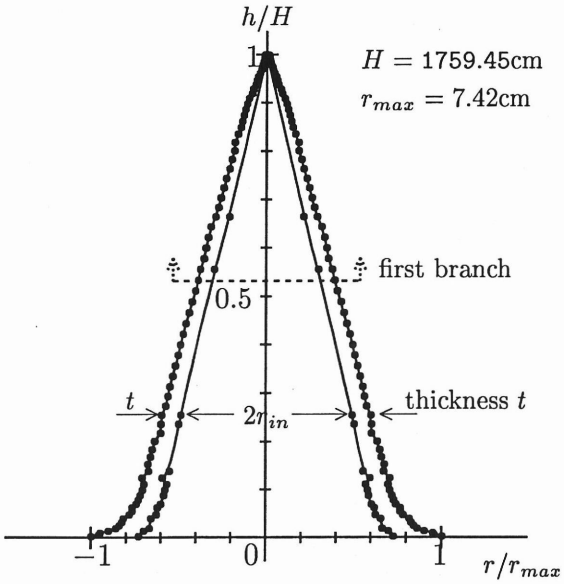
**図–3**(b) に示すような節部の縦断面を観察すると，節部で真かん部の厚さが増加し，それに伴って維管束が拡がっている様子が確認できる．その内の何本かは隔壁内部に入り込み，断面拘束効果を担っている．また，この部分で維管束が複雑に絡み合うことにより，支持力を失うが，局部的に滑らかに断面積を増加させるとともに，曲げによる局部座屈を起こしたような形状を有しており，柔と剛を兼ね備えた組織構造を持っているものと考えられる．竹材の強靭さや割裂性に富む性質はこの維管束鞘を構成する厚壁繊維の量と分布，すべての要素が軸方向に平行して配列していることによるところが大きい．維管束鞘のような力を担う組織が，特に稈の外縁に発達し，曲げモーメントに抵抗できる合理的な構造を持っている．

その結果，周方向に対しては**図4**(a) に，真かん部の厚さ方向に対しては**図4**(b) にそれぞれ示す．図中の横軸は，それぞれの方向のピクセル数を，縦軸はその列 (あるいは行) 当たりの平均密度をそれぞれ表す．**図4**(a) の周方向に対する繊維密度の値は，平均0.6を示しており，周方向に対して多少ばらつきがあるものの

[2] 半径は，外径・内径 $\phi/2$ を指すが，ここでは主として外径の1/2とする．

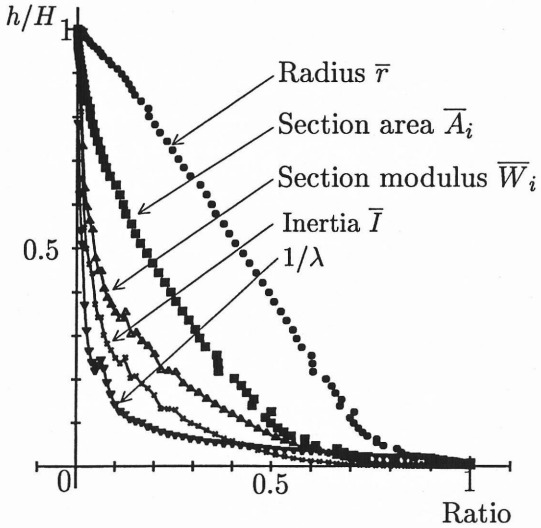


(a) 根元付近の節間隔

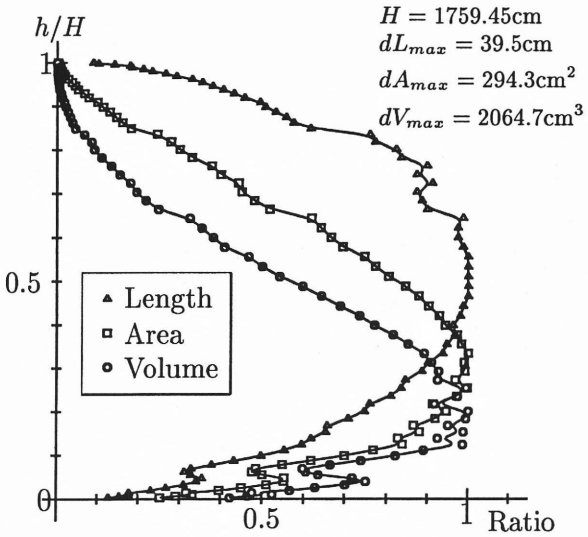



(b) サンプルした竹の形状

**図–1** かん部の形状




(a) かん部の断面積 $A_i$, 断面係数 $W_i$, 断面二次モーメント $I$ の比率および細長比の逆数の分布



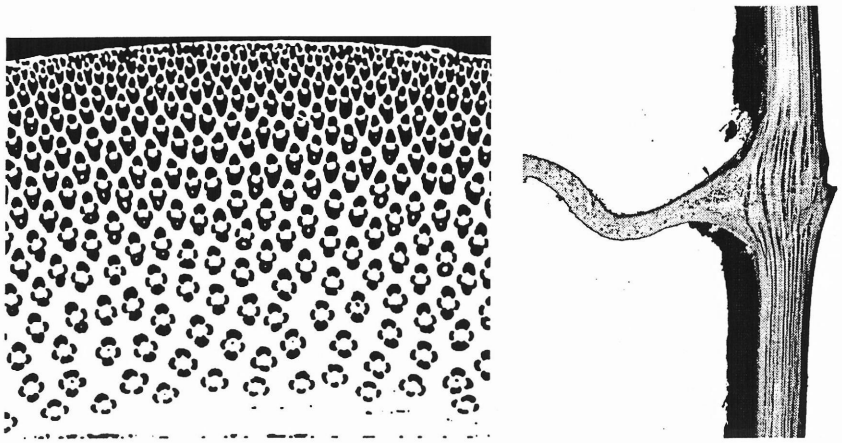

(b) 節単位の容積, 投影面積および節間長の比率
$dL_i$:節間長,$dA_i$:節間の投影面積,$dV_i$:節間の体積

**図–2** 竹節単位の諸量

ほぼ一定値となった．これに対して，**図** 4(b) の厚さ方向に対しては，多少のばらつきがあるものの，基部の厚さ $t_{max}$ で無次元化した厚さ $t^* = t_i/t_{\max}$ に対する平均密度は

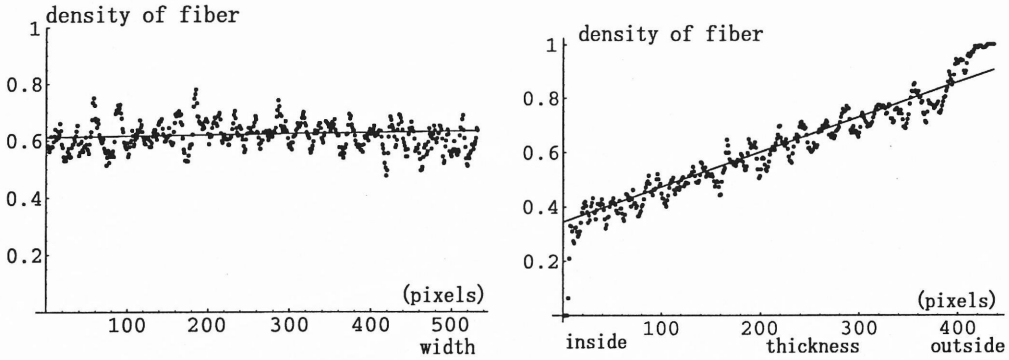
$$V_f(t^*) = 0.345 + 0.561t^*, \quad 0 \le t^* \le 1$$

という回帰直線の関係が得られた．



(a) 維管束密度分布 (2 値化画像処理)[12)]　　(b) 節部の縦断面

**図–3** 孟宗竹の断面




(a) 周方向の維管束密度分布　　(b) 厚さ方向の維管束密度分布

**図–4** デジタル 2 値化画像による維管束密度分布[12)]

### 2.3 竹かん部に作用する荷重の算定

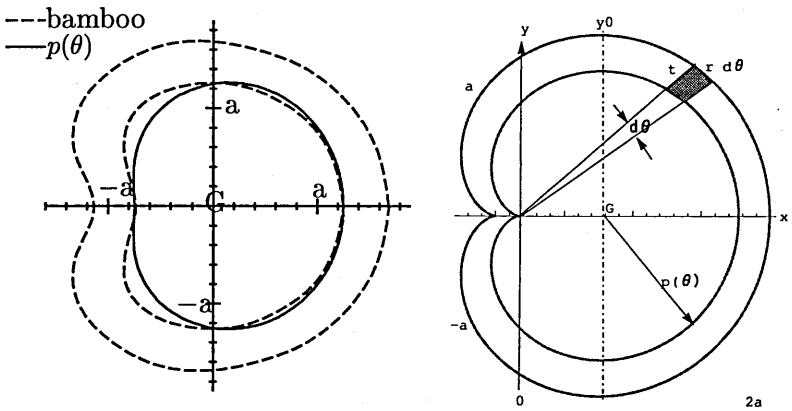
本節では自生している環境下における最適な力学的均衡を持つものとして考え，材料特性および構造特性より，抵抗力を概算する．モウソウチクを観察すると，若竹の発芽期にはヤング係数が低く，過分の外力で容易に折れてしまう．現実にこの時期に根元付近から折れるモウソウチクは少なくない．この時期が竹の軸方向力に対して最も負荷が大きく，一方，成長した時期には風等による曲げ外力が竹の耐荷力に大きく影響しているものと考えられる．発芽期に成長した竹はその後ほとんど形状が変わらない．我々は得られた断面諸量から外力を算定することとする．

根元から $i$ 番目の節の圧縮側の縁端応力は

$$\sigma_i = \frac{w_i}{A_i} + \frac{M_i}{W_i} \leq \sigma_m \tag{1}$$

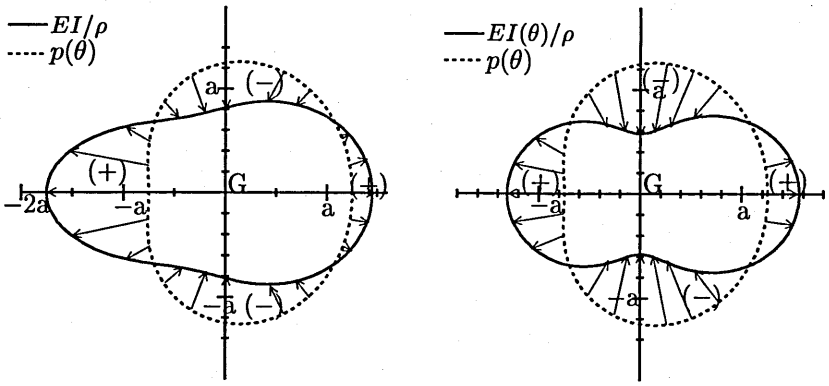
で得られる．ここに $w_i$ はその節 $i$ より上部の自重を，$A_i$ は節 $i$ での断面積を，$M_i$ は節 $i$ でのモーメントを，$W_i$ は節 $i$ での断面係数を，$\sigma_m$ は材料強度をそれぞれ表す．この変数 $w_i$ を発芽期のかん部の重量として近似すると，

$$\begin{aligned} w_i &= \rho \sum_{j=i}^{n} dV_j = \rho \sum_{j=i}^{n} dA_j dL_j \\ &\simeq \frac{1}{3}\rho A_i z, \quad z = H - h \end{aligned} \tag{2}$$




(a) 断面形状の近似　　(b) カージオイド曲線モデル

**図–5** 枝分かれ付近の断面




(a) $M(\theta)$ の増減変化　　(b) $M(\theta)$ の増減変化 ($I(\theta)$ を考慮)

**図–6** 断面剛性ダイヤグラム

となる．ここに，$\rho$ は平均単位重量相当分をさす．これを式 (1) に代入し，材料強度 $\sigma_m$ を限度とすると最大曲げモーメント $M(h)$ は

$$M(h) \leq \left(\sigma_m - \frac{\rho z}{3}\right) W(h) = \left(\sigma_0 + \frac{\rho h}{3}\right) W(h), \tag{3}$$

$$\sigma_0 \equiv \sigma_m - \frac{\rho H}{3} = \sigma_m - \frac{w_0}{A}$$

となる．ここに $\sigma_0$ は変数 $h$ に関与せず，材料強度と竹の自重による圧縮応力との差として表される．また，$W(h)$ は図–2(a) の関数形を持つ．例えば，$\sigma_0$ が 0 に近く材料強度が自重と釣り合うようなときには節間長分布のように中間付近で $M(h)$ が最大値を持つこととなり，根元の抵抗曲げモーメントが低く抑えられる．逆に，$\sigma_0$ が材料強度に近く自重が無視できるようなときには根元で最大となる抵抗曲げモーメント分布となる．このモーメント分布から連続した荷重強度分布 $q(h)$ が求められ，真かん部における最大抵抗力の概算を知ることができる．

### 2.4 枝分かれ付近の断面

モウソクチクの枝はある程度の高さの節から 2 本ずつ枝分かれする．枝の付け根の方向は各節毎にほぼ 180° の反転して，交互に存在する．この節間に注目すると枝の付け根から主幹に 2 つの筋を持つ凹みが上側の節まで伸びている．凹みの大きさは上側の節に近づくにつれ小さくなる傾向にある．図–5(a) の枝付け

表–1 $x$ および $y$ 軸に関する断面係数と断面二次半径

| | $y$ | $x_{\mathrm{right}}$ | $x_{\mathrm{left}}$ |
|---|---|---|---|
| 断面係数 | $\frac{7\pi}{3\sqrt{3}}a^2t$ | $\frac{11\pi}{10}a^2t$ | $\frac{11\pi}{8}a^2t$ |
| 断面二次半径 | 0.829 $a$ | 0.935 $a$ | |

根付近の断面をカージオイド曲線で近似することを考える．ここではこのような枝の発生に伴う対称性の破れに伴う断面剛性の変化を考えることとする．

**(1) 対称性の喪失に伴う断面剛性**

図–5(a) に示す，枝分かれ部の断面を図–5(b) のようなカージオイド曲線

$$r(\theta) = a(1+\cos\theta), \quad a > 0 \tag{4}$$

で近似し，厚さもほぼ一定と見なす．極座標系上の重心位置 $G_r$ を $M/A$ で定義すると，

$$G_r \equiv M_r/A = \frac{2a^2t\int_0^\pi(1+\cos\theta)^2\mathrm{d}\theta}{2at\int_0^\pi(1+\cos\theta)\mathrm{d}\theta} = \frac{3}{2}a \tag{5}$$

となるので，$x$ 方向の重心位置 $G_x$ は

$$G_x = G_r\cos\theta = G_r(G_r/a-1) = \frac{3}{4}a \tag{6}$$

と求められる．

$y_0$ 軸に関する断面剛性 $I_G$ は

$$\begin{aligned} I_G &= \int_A (r\cos\theta - G_x)^2\,\mathrm{d}A \\ &= t\int_0^{2\pi}\left(r\cos\theta - \frac{3}{4}a\right)^2 r\,\mathrm{d}\theta = \frac{11\pi}{8}a^3t \end{aligned} \tag{7}$$

が求められる．同一の厚さを持つ半径 $a$ の中空円断面の剛性と比較すると

$$\frac{I_G}{I^G_{\mathrm{circ.}}} = \frac{11\pi a^3t}{8}\frac{1}{\pi a^3t} = 1.375 \tag{8}$$

と剛性が向上する．同様に，$x$ 軸に関する断面剛性 $I_y$ は

$$I_y = \int_A (r_y(\theta))^2\,\mathrm{d}A = a^3t\int_0^{2\pi} r^3\sin^2\theta\mathrm{d}\theta = \frac{7\pi}{4}a^3t \tag{9}$$

となり，その比率は $I_y/I^G_{\mathrm{circ.}} = 1.75$ となる．中空円断面と比較して $x$ および $y$ 軸に関する断面剛性の大きいことが数値的にも確認できた．すなわち，竹の枝分かれ部の構造も，枝に作用する風荷重等の負荷に対して剛性を高く確保する構造が自然に (自発的に) 形成されていると言えよう．この断面における力学的諸量を表–1 にまとめた．

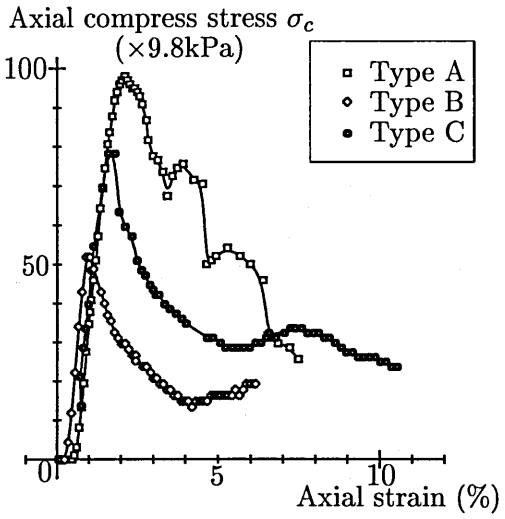
**(2) 断面内の抵抗曲げモーメント**

竹の枝が発芽することにより，風や自重等の外力をかん部に伝えるが，竹自身にとっては作用力を受けることになる．この枝の大きさ，分岐位置や方向等は竹の全体構造と密接な関係があると考えられる．

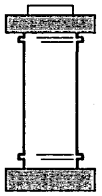
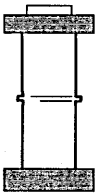
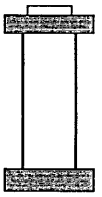
節部直下の断面はほぼ円筒形を成し，枝分かれ後の真かん部の断面はカージオイド形を成していると仮定し，我々はこの断面形成の力の釣合いを考えてみたい．

カージオイド形の重心位置を座標系の中心とすると，内径距離 $p(\theta)$ は

$$p(\theta) \equiv \sqrt{(r\sin\theta)^2 + (r\cos\theta - G_x)^2} \tag{10}$$




図–7 各タイプの平均軸圧縮応力ー軸ひずみ曲線

| 種類 | Type A | Type B | Type C |
|---|---|---|---|
| 供試体高さ $L$(cm) | 26.8 | 36.5 | 22.9 |
| 平均厚さ $t$(cm) | 0.855 | 0.705 | 0.625 |
| 半径 $R$(cm) | 3.225 | 3.280 | 3.140 |
| 断面 $A = 2\pi Rt$(cm$^2$) | 17.3 | 14.5 | 12.3 |
| 形状 |  |  |  |
| 平均最大荷重 (kN) | 18.83 | 6.86 | 12.36 |
| 最大応力 (MPa) | 9.60 | 5.09 | 7.68 |

図–8 軸圧縮試験結果

と定義できる．図–5(a) の関数 $p(\theta)$ に示す．$p(\theta)$ については内径のみ示した．この関数を $\theta$ に沿って微分し，近似的に曲率 $\rho$ と抵抗曲げモーメントの関係

$$-\frac{1}{\rho} \simeq \frac{\mathrm{d}^2 p(\theta)}{\mathrm{d}\theta^2} = \frac{M(\theta)}{EI} \tag{11}$$

を利用すると，

$$M(\theta) = -\frac{EI}{\rho} \tag{12}$$

となり，さらに $\theta$ に関する断面二次モーメントを考慮すると

$$M(\theta) = -\frac{EI(\theta)}{\rho} \tag{13}$$

が得られる．このモーメント分布を図–6(a) および (b) にそれぞれ示す．図–6(a) は $EI$ が一定のときの $M(\theta)$ の増減分布のダイヤグラムであり，図–6(b) は $I(\theta)$ も考慮したときの $M(\theta)$ である．それぞれ形状 $p(\theta)$ を基準として $\theta$ まわりに $M(\theta)$ をプロットしたものである．このように $M(\theta)$ が最大値を示す箇所は，枝分かれ部の方向に一致する．すなわち，枝分かれ部では竹の断面変化 (偏平化) によって抵抗力が増加し，材料強度内で抵抗できるように最適な形状を形成していることがわかる．

## 3. モウソウチクの強度実験

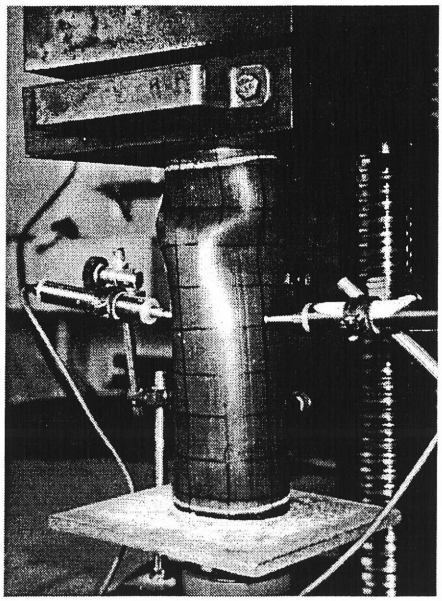
我々は生態系の円筒形構造を持つモウソウチクの材料力学的特性を理解するために，モウソウチクの座屈実験および解析を行なった．実験は軸圧縮試験を行い，同時に弾性座屈解析を行なうことにより検証した．

### 3.1 軸圧縮座屈試験

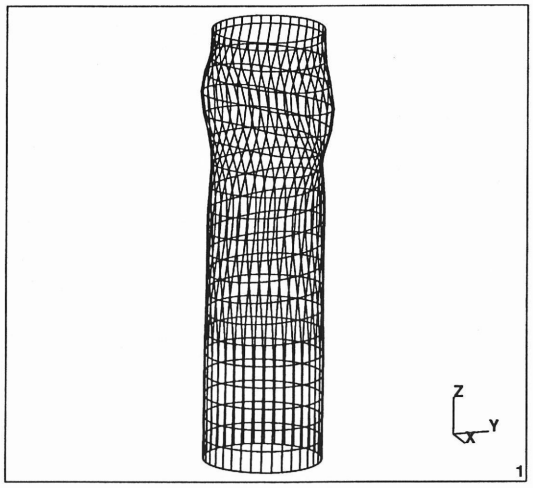
供試体は次の 3 タイプの円筒形構造に分けた．1 つは両端部に節が 2 つ存在する Type A，中間部に節が 1 つ存在する Type B，およびはじめから節を含まない Type C の 3 種類の供試体について実験を行った．

各タイプの平均軸応力ー軸ひずみ曲線を図–7 に示す．試験結果より，3 タイプの軸方向の弾性係数は $E_c$ = 662.0MPa(6750kgf/cm$^2$) であるが，最大軸圧縮応力は Type A が 9.60MPa(98.0kgf/cm$^2$)，Type B が 5.09MPa(51.9kgf/cm$^2$)，および Type C が 7.68MPa(78.3kgf/cm$^2$) で，境界条件に鋭敏な感度を持つ結果を得た．

Type C は境界部で大きく変形し，上側の境界付近では凸型の変形を，下側の境界付近では凹型の変形をそれぞれ発生した．Type B は供試体の高さ中央部分に節が存在したが，強度は小さかった．この原因として，節付近に屈服現象が現れたことによるものと考えられる．両端に節を残した Type A では幾何学的特徴を持つ座屈変形となった．上端部の節の下部で面外変形が現れ，軸方向に 1 波と周方向に 2 波の座屈波形を



(a) 竹のダイヤモンドパターン変形 (Type A)




(b) 最小座屈解析の変形結果

**図–9** 竹節かん部の座屈実験と最小座屈変形

確認した (**図–9**(a) 参照). 半波長は周方向に 10cm, 軸方向に 12cm 程度であった. 最終的に座屈変形の峰に沿って組織が割けた.

### 3.2 円筒節構造の弾性座屈解析

竹の座屈強度の再現性を確認するため, 実際の竹筒は初期形状や材料分布の不整が存在するが, ここでは均一な材料から成る完全系モデルとした (ポアソン比 $\nu = 0.3, E = 6.4$MPa). また竹材は異方性材料であるが, ここでは等方性材料を仮定し, Marc [14] を用いて軸力載荷による円筒節構造の弾性座屈解析を行なった.

座屈実験において両端に節を持つ Type A を有限要素法の円筒シェルモデルとして取り扱う. 4 節点要素を用い, メッシュ分割は周方向に 36 分割, 高さ方向に 20 分割とし, 実験で用いた供試体に基づいて筒厚さおよび円筒半径を高さに応じて一致するように要素を作成した. 両端の節モデルは下端部では回転と変位を拘束した剛な節とし, 上端部では断面変形を生じない剛要素を設定し $z$ 方向変位以外の自由度は拘束した円筒竹節構造の座屈解析モデルを作成した.

解析結果は最小臨界荷重 87.07kN(8885kgf) を算出し, 古典座屈理論と同様に 0.3 倍で耐荷力を失う[15] とすると 26.1kN (2665kgf) と求められた (**表–2** 参照). この軸対称系構造モデルを完全系として解析した. 最小座屈荷重時の座屈変形を**図–9**(b) に示す. 座屈波形の半波数は周方向および軸方向とも 2 であり, 上部の筒厚さと半径が下部より小さいために, 波形位置が上半部に発生している. この解析結果は実験の座屈波形とよく類似し, 境界部の節による断面拘束効果がよく現れていると言える. このように竹の円筒節構造の座屈波形の再現が確かめられた.

円筒径厚比による材料の降伏荷重算定を求めるにあたり, Plantema[16] より径厚比 $R/t$ と材料の降伏応力の関係式

$$\frac{R}{t} \leq \frac{E}{16\sigma_Y} \tag{14}$$

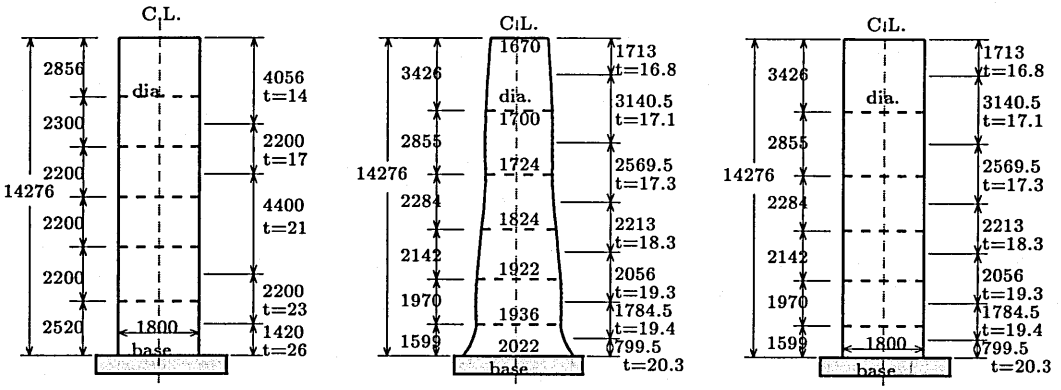
を利用すると, 参考とすべき降伏荷重は**表–2** のように求められる.

## 4. 竹かん基部構造を応用した円筒橋脚の検討

**図–1** に示す竹のかん基部の構造形態を理想の最適構造物と仮定し, 震災で局部座屈を起こした鋼製円筒橋脚「神 P585 上り」に適用し, このときの竹モデルおよびその特性をフィードバックさせた還元モデルの

**表–2** 各手法による座屈荷重と降伏荷重

| 座屈荷重 (kN) | Type A | Type B | Type C |
|---|---|---|---|
| 実験値 | 18.83 | 6.86 | 12.36 |
| 有限要素 (0.3 倍) | 26.12 | — | — |
| $P_{\min}$ | 15.14 | 8.49 | 5.92 |
| $P_Y$ | 18.96 | 10.12 | 12.92 |




(a) 橋脚の構造　(b) 竹かん基部モデル　(c) 還元モデル

**図–10** 円筒橋脚の解析モデル

**表–3** 最小固有値の解析結果 ($\times 9.8 * 10^7$kN($= 10^7$kgf))

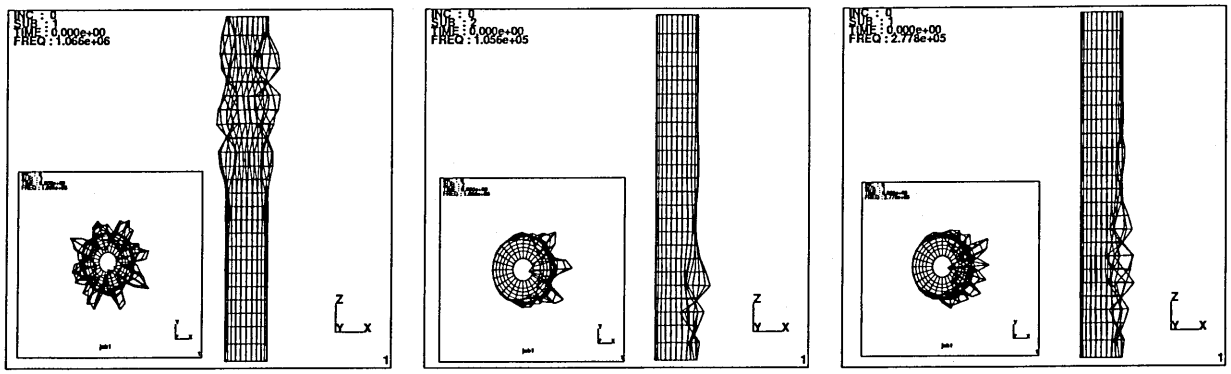
| 作用力 | 橋脚 | 竹モデル | 還元モデル |
|---|---|---|---|
| 圧縮力 ($P_{cr}$) | 2.56 | 2.94(1.14) | 3.14(1.23) |
| 圧縮と水平力 ($P\&H=P/3$) | 0.67 | 0.66(0.99) | 0.60(0.90) |
| 水平力 ($H_{cr}$) | 0.25 | 0.25(1.00) | 0.23(0.92) |
| 圧縮と水平力 ($H\&P=3H$) | 0.22 | 0.22(1.00) | 0.20(0.91) |

局部座屈に対する耐荷力を調査し，生物学的な形態から最適な構造設計の一例を検討する．ここに，この鋼製橋脚の機械的性質は，ヤング率 $E = 200$[GPa]($2.1 \times 10^6$kgf/cm$^2$)，ポアソン比 $\nu = 0.3$，降伏応力度 $\sigma_Y = 327$[MPa](3340kgf/cm$^2$)，SM490A であったので，これを以下，解析モデルの条件とした．

橋脚の円筒柱部 (**図–10**(a)) を解析の対象とし，これと同一の部材重量となるように円筒半径，板厚およびダイヤフラム間隔を実際の竹かん基部の形状 (竹の基部から 6 パネル分を取り出した) に相似的に適合させ，**図–10**(b) に示すような橋脚モデルを作成した．すなわち，かん基部の 1 節間長はダイヤフラム間隔に相当し，円筒半径および板厚の変化はモウソウチクのかん基部の半径および筒厚さに対応させた．さらにこのかん基部モデルを橋脚の一定な円筒半径に還元したときの還元モデル (**図–10**(c)) についても併せて構造解析を行なった．

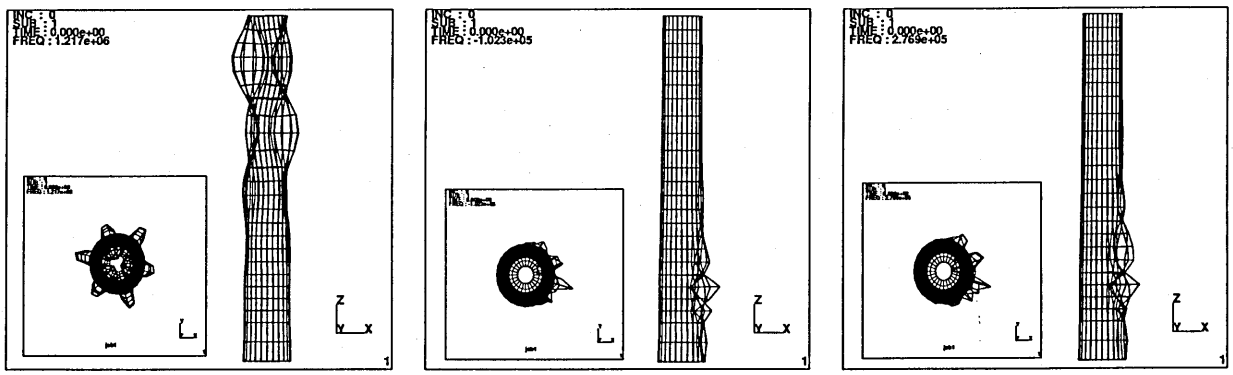
解析は軸圧縮力 $P$ 作用下の線形座屈解析，上端部に水平力 $H$ が作用したときの座屈解析，および $P/H = 3$ の荷重分配比率を考慮した線形固有値解析を行なった．また，**図–11**～**図–13** には，それらに対応する座屈モードをそれぞれ示す．圧縮力に対しては，橋脚上部での周方向への局部座屈波形が認められ，水平力が加わると，橋脚下部での曲げ座屈に支配されていることが分かる．

**表–3** に各種モデルを各荷重作用下における最小固有値を示す．( ) 内の数値は橋脚の値に対する比率を表す．橋脚をもとに体積一定の条件下で設計を試みた結果，竹かん基部モデルに水平力および圧縮と水平力



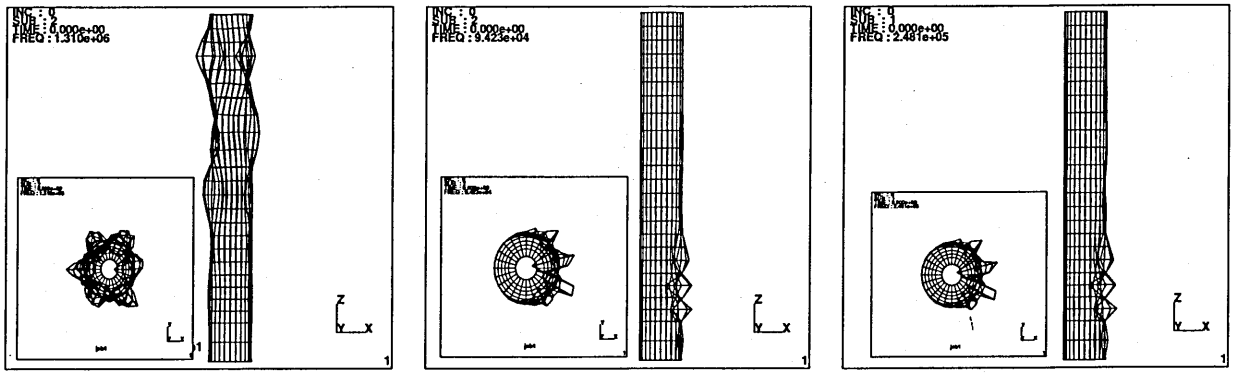
(a) 圧縮力　(b) 水平力　(c) 圧縮と水平力

**図–11** 橋脚モデルにおける最小固有値の座屈変形モード



(a) 圧縮力　(b) 水平力　(c) 圧縮と水平力

**図–12** 竹かん基部モデルにおける最小固有値の座屈変形モード



(a) 圧縮力　(b) 水平力　(c) 圧縮と水平力

**図–13** 還元モデルにおける最小固有値の座屈変形モード

が作用したときの固有値は橋脚の値とほぼ変わらない耐荷力を示すが，圧縮力については1.14倍に向上した．この設計では生物の形態構造を実際に橋脚に具現化することにより，軸圧縮力作用下の座屈耐荷力を高めた一例を示したと言える．また，円筒半径を変化させるテーパー部の製作上の困難を考慮して，橋脚と同一の一定半径に還元させたモデルでは，圧縮耐荷力については改善されているが，水平力が作用するとその座屈耐荷力が低下している．これは竹のかん基部構造そのものから半径のみ変化させただけでは，やはり円筒の半径，肉厚，ダイヤフラム間隔の総合的なバランスが崩れてしまうためと考えられる．

本来の材料特性が鋼と異なる竹材の最適形状を橋脚に適用することによって，強度的なメリットが得ることになるか，どうかは不明であったが，このようなバイオメカニックス的手法でも工学的な利点，あるいは工学的価値を得ることができた．特に竹かん基部モデルは最も大きい耐荷性能を示すが，橋脚もそれに次ぐ性能を有し，本研究で行った線形座屈解析の範囲内では最適設計の達成度は両者とも比較的高いと言える．一方，還元モデルでは圧縮座屈耐力はかなり向上しているが，水平荷重に対する曲げ座屈耐荷力は不足しており，円筒橋脚の肉厚やダイヤフラム間隔に対するさらなる検討が必要と考えられる．

## 5. 結 語

本研究は，モウソウチクの生体構造の計測と力学的実験，線形座屈解析の構造解析を通して，その組織構造の力学的な仕組みを理解し，理想的な最適化構造として設計の対象とした．ここに，本研究から得られたことを以下にまとめる．

1. モウソウチクの形状および枝分かれ部に対して力学的な考察を行い，かん部においては座屈実験と解析を通して竹の形態構造の最適性を理解した．
2. 竹の円筒節構造や節の不等間隔による構造形態は，その環境下で外力と平衡した結果として最適化された理想的な形状であった．これを円筒橋脚に適用することにより大きな耐荷性能を得ることができた．また，製作上の困難さを考慮して一定半径にフィードバックさせた還元モデルでは，竹かん基部モデルほどの性能は得られなかったが，テーパー肉厚分布やダイヤフラム間隔の改良によって耐荷力の向上が期待できる．
3. 観察により強化繊維である維管束鞘の含有率が，半径方向に対して非線形に増加していることが分かり，枝分かれ部の断面形状を構造調査することによって，断面剛性に対する強度的効率が高いことが分かった．
4. 本来の材料特性が鋼と異なる竹材の最適形状を橋脚に適用することによって，強度的なメリットが得ることになるか，どうかは不明であったが，このようなバイオメカニックス的手法でも工学的な利点，あるいは工学的価値を得ることができた．
5. 本実験結果から，モウソウチクの組織構造は強化繊維部と強度には直接寄与しないが柔軟性を発揮する基地組織の二つの組織複合材料が円筒節構造という高効率な構造体を構成することによって，軽量で柔軟性があり，重量に対する比強度が高い，理想的な構造物を構成できる可能性を示唆するものとして，工学的に大変意義深い調査結果を得た．

## 参考文献


1) Roux, W. : Gesammelte Abhandlungen einer Entwicklung-mechanick der Organismen, Iu. II, Engelman, 1895.
2) Hertel, H. : Structure-Form-Movement, Reinhold Pub. Co., 6, 1963.
3) Claus M., Hans K. : 堀大才・松岡利香 訳, 材-樹木のかたちの謎, 1999.
4) バイオメカニズム学会編：生物に学ぶバイオメカニズム, 工業調査会, 1987.
5) 日本機械学会：構造・材料の最適設計, 技報堂出版, 1989.
6) 尾田 十八：竹のバイオメカニクス, バイオメカニズム学会誌, 5-1, pp.7-13, 1981.
7) Oda, J. : Minimum weight design problems of fiber-reinforced beam subjected to uniform bending, Trans. ASME., Ser. R., 107-1, pp.88-93, 1985.
8) 茂庭忠次郎：竹の研究, 土木技術社, 1943.
9) 島地謙・須藤彰司・原田浩：木材の組織, 森北出版, 1976.
10) 佐伯 浩：走査電子顕微鏡図説 木材の構造, 日本林業技術協会, 1982.
11) 原田 浩：木材の科学 1 木材の構造, 文永堂出版, 1990.
12) 有尾 一郎・森田 千尋・陶山 裕之・佐藤 英一・藤井 堅：竹の異方性組織構造に観る複合積層モデルに関する力学的考察, 機械学会論文集 A 編-生体材料のバイオエンジニアリング-, 69(677), pp.148-153, 2003.
13) 有尾一郎・関谷安男・藤井堅：孟宗竹の組織構造に観る複合構造の最適性に関する一考察, 土木学会 構造工学論文集, 46A, pp.1693-1702, 2000.
14) Marc マニュアル K6, Vol. A ～ E, 日本マーク (株), 1995.
15) Kármán, von T. and Tsien, H-S. : The buckling of Thin Cylinderical Shells under Axial Compression, J. of the Aeronautical Sciences, Vol. 8, No.8, 1941.
16) Plantema, F. J. , Report 280, Nat. Luchtvaartlabatorium, Amsterdam, 1946.