

# 管理不全状態にある植物材料を 活用した軽量空間構造のデザイン —竹とヨシに関する実践的研究—

永井 拓生

環境建築デザイン学科

本論文は、著者の関連業績(1)～(3)をもとに、新たな考察を加え、大幅な加筆修正を行ったものである。また、(4)～(8)の成果の一部を文中で引用、参照した。

## 第1章 序論

過去においては人によって整備・保全がされ、生活・産業資源として利用されてきた材料が、現代では利用頻度が下がり、かつてのような管理が行き届かなくなった状態を、本論文では「管理不全状態」の植物材料と定義する。例えば、伐期を迎えながらも放置された人工樹林、拡大する放置竹林、湿地帯や湖岸におけるヨシ原の放置や荒廃等の問題があげられよう。本論文では、建築用材としての利用・研究事例が乏しい竹とヨシを研究対象とした。



図1 山裾に広がる放置竹林とヨシ原  
(撮影：黒目写真館)

まず、竹について具体的に見てみよう。竹は無限の植物資源と言われるほどに強い再生力を持ち、再生のサイクルを考慮して使用すれば、枯渇する心配がほとんどない材料である。3～5年程度の短期間で建築用材として利用可能となるため、数年程度利用するような仮設的な建築物など、資源の循環サイクルに調和した持続的な生産システムの構築に適していると言えよう。加えて、竹はアジアの広範囲にわたって分布し比較的容易に調達することができ、重量が軽く、手作業による

加工も容易なため、住民の自助による建設用材としても適している。

とりわけ、竹を仮設建築の材料として利用することは、大地震や津波による被害を受けた被災地における建設手段として有効である。近年の国内外の大災害を通じ、被災直後に地域の住民が一同に集まれるような場所を一刻も早く復旧することが、住民間の交流やコミュニティの維持に重要であることが強く再認識された。このような場合に、住民が自らの手で応急的な集会所の機能を果たす建築を素早く作ることでできる技術は重要である。竹はこのような場合に、非常に有効であろう。

次に、ヨシについて見てみよう。滋賀県近江八幡市の西の湖は琵琶湖の内湖として最大の面積を有し、かつては県内の景勝地として「湖岸八景」にも選出された美しいヨシ原が広がっていた。また、ヨシは葦簀や葦葺き等の地域産業を支える貴重な資源でもあった。しかし現在、生活の変化やヨシ産業の衰退に伴ってヨシの利用が大きく減少し、ヨシ原の大半が管理不全の状態となりつつある。さらに、湖岸の環境や水質・景観等の悪化により景勝地としての価値も失われる等、様々な側面で大きな損失が生じつつある。したがって、ヨシの有効な活用法の確立は、ヨシ産業の創出に加え、湖岸の環境維持・保全といった点からも、やはり重要な課題だと言えよう。

一方、竹とヨシは、素材としても様々な共通点を見出すことができる。いずれも非常に成長が早く(単位期間あたりの体積成長が樹木と比べ決して大きいわけではないが、使用可能な状態に至るまでの時間が短い)、そのため持続的な調達が容易である。また、丸パイプ状の断面と節を持ち、軽量である。加えて同程度の引張強度を有し、その平均値は国産木材として代表的な杉の設計強度を上回る。このため、構造材料として有用と考えられるが、反面、後述するように、いずれも機械的・物理的特性値のばらつきが非常に大きいという共通した短所がある。したがって、これらの素

材を建築材料・構造材料として用いるには、物理的特性のばらつきを解消する工夫を行い、工学的な評価手法を確立する必要がある。

本研究では、竹とヨシの構造材料としての有効活用を目的とし、工学的評価が可能な工法の提案、構造モデル化、および実際に設計・施工等を通じそれらの有効性の検証を試みている。以下に各章の概要を示す。

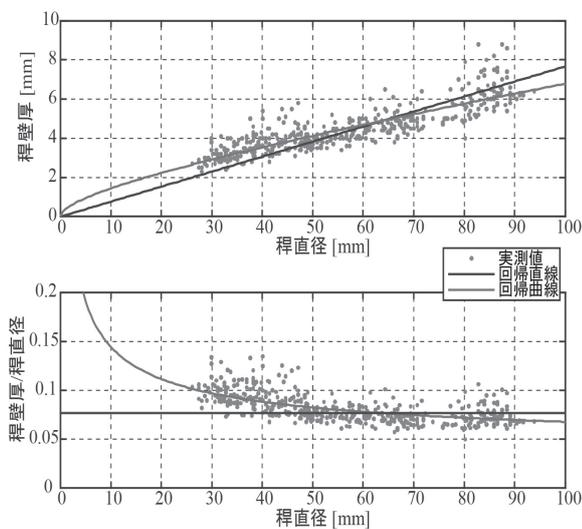


図2 マダケの稈直径と稈壁厚の関係

### 第3章 ロープ接合法による丸竹トラス梁の解析

著者らが過去に提案した丸竹同士のロープ接合法について、詳細なモデル化と、それを用いた実大のトラス構造の解析を行った。接合部の復元力特性においては、最大耐力および終局変位と縦材の直径が高い相関関係にあることが確認された。

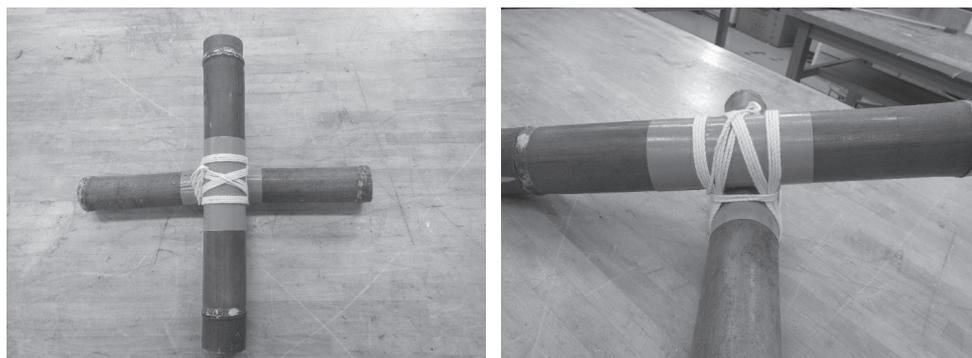


図4 ロープと布テープによる丸竹同士の接合

### 第2章 素材の性質と課題（竹・ヨシ）

竹とヨシの2つの素材を活用する意義について環境保全の観点から概観し、建築、構造用素材としての有効性や課題について論じた。次に、竹とヨシに関係する研究分野、使用の状況を概観するとともに、各素材の物理・機械的性質について述べた。本研究では、マダケ (*Phyllostachys bambuoides*) およびヨシ (*Phragmites Australis*) を研究対象とする。いずれも強度、ヤング係数の平均値は木材と同程度の性能を有するが、構造材料として用いるにあたっては、物性値のばらつきが大きいことが課題である。

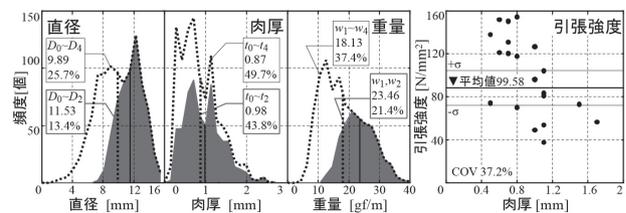


図3 ヨシの各特性値の分布

また、実大トラスの実験と数値解析の比較を通じ、弾性限内の荷重レベルにおける接合部モデルの有効性を確認した。実大試験は、降伏荷重付近の荷重レベルの検討に留まったが、弾性設計を前提とした使用については、提案したモデル化は十分に有効である。

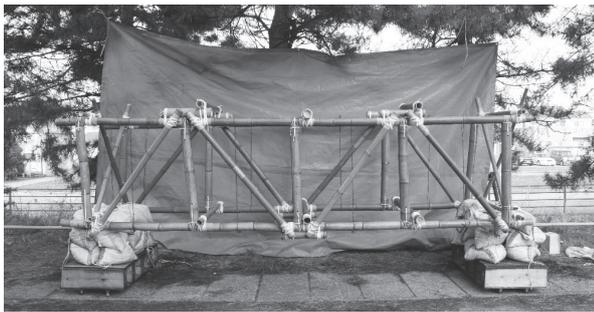


図5 丸竹トラスの実験

#### 第4章 丸竹の圧縮耐力の推定

丸竹を柱等の圧縮軸力を支持する構造材料として利用するためには、圧縮耐力の算定は不可欠である。丸竹は長さ方向に断面形状が変化する「変断面」部材だが、数値解析を通じ、座屈性状が等しい、等質・等断面部材へのモデル化が可能であることを示した。したがって、オイラー座屈強度を求めることができる。オイラー座屈強度式は実験値の下限值を包絡しており、設計耐力として有効である。

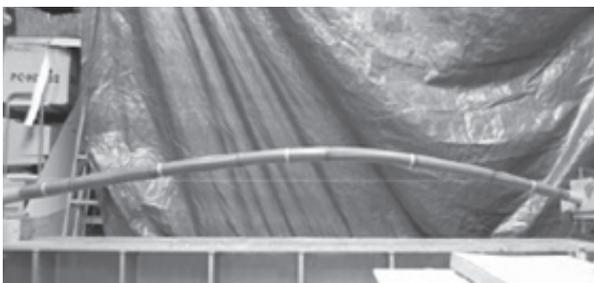


図6 丸竹の圧縮強度推定（撮影：山田貴大）

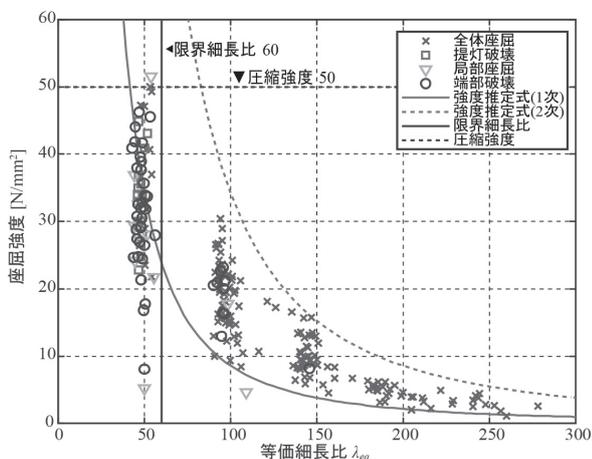


図7 圧縮試験と推定式の比較：  
座屈強度—等価細長比関係

#### 第5章 ヨシを用いたドーム型構造のデザイン

ヨシの「セミランダムトラス」構造を提案し、構造モデル化を行うとともに、同方法を用いた仮設パビリオン（ヨシドーム）の設計・施工について報告した。セミランダムトラスはヨシの本数に応じて剛性が比例する特徴があり、所定の方法を守り、施工を行うことで、人力作業でも十分に工学的評価が可能な、安定した性能を得られる。

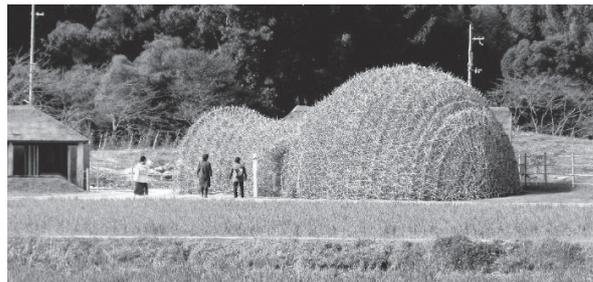


図8 ヨシドーム

#### 第6章 ヨシを用いた片持ち柱構造のデザイン

ヨシの「束ね柱」構造を提案し、構造モデル化を行うとともに、このシステムを用いた仮設パビリオン（ヨシパビリオン）の設計・施工について報告した。束ね柱はヨシの本数に剛性が比例する特徴があり、所定の方法を守り、施工を行うことで、人力作業でも十分に工学的評価が可能な安定した性能を得られる。また、ヨシドームで生じた課題である、ヨシの不使用材が生じることを改善し、ヨシの根元から穂先に亘る全長を余すことなく使うことを実現している。



図9 ヨシパビリオン（撮影：田口真太郎）

## 第7章 結論

本研究の総括と今後の課題・展望を述べた。本研究で対象とした工法は、いずれも人力作業による加工、組み立てが前提である。このため、接合方法もやはり手作業による簡易的なものである。こうした接合部は、当然、強度・剛性が母材よりも小さいので、架構全体の変形は、接合部での変形が大きな割合となる。一方、これらの接合方法は単純な方法ゆえに、所定の作業を精度よく行えば、優れて安定した性能が得られる。これにより、接合部を含む構造全体としては母材の特性値のばらつきは影響を薄め、工学的な扱いが可能になる。

手作業という言葉には一見、個人差やヒューマンエラーによる不確定性がつきもののような印象があると思うが、ばらつきの大きな素材と手作業による柔な接合の組み合わせによってむしろ工学的な評価に乗ってくるというのは、面白いストーリーではないだろうか。

## 謝辞

本研究の成果の一部は、科研費（15K21285, 16K00716）および滋賀県立大学COC（地（知）の拠点整備事業、2016年度）、滋賀県立大学教育研究高度化促進費（2018年度）の助成を受けたものである。

また、本研究は、著者が本学に就任して以降に行ったものであり、大変多くの方々より厚い協力、支援を得た。心から謝意を表す。各研究を行っている最中は、それが博士論文の一部になると考えもしなかった。本論文にそれらの成果の一部をまとめ、本学に提出させて頂いたことは、著者にとって大変誇りである。重ねて心からの謝意を表す。

著者の関連業績（全文査読付き論文のみを記す）

- (1) T. Nagai : Design and construction of temporary pavilion using reed as structural material, *Proceedings of the 12th Asian Pacific Conference on Shell & Spatial Structures, APCS2018, "Recent Innovations in Analysis, Design and Construction of Shell & Spatial Structures"*, Penang, Malaysia, pp. 310-320, 2018. 10
- (2) 永井拓生, 白井宏昌, 松岡拓公雄 : ヨシを構造材料として用いた仮設パビリオンの設計・施工, 日本建築学会技術報告集, Vol. 23, No. 55, pp. 875-880, 2017. 10, DOI : <https://doi.org/10.3130/aijt.23.875>

- (3) 永井拓生, 堀江健太, 後藤優治 : ロープ接合法を用いた竹トラス構造の実大試験と数値解析—竹を構造材料として用いた仮設建築物の設計に関する研究—, 日本建築学会技術報告集, Vol.23, No.53, pp. 99-102, 2017. 2, DOI : <http://doi.org/10.3130/aijt.23.99>
- (4) 永井拓生, 陶器浩一 : 竹の設計強度の算定および人力施工が可能な接合法の開発—竹を構造材料として用いた応急仮設建築物の設計・施工の実例—その2—, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.52, pp. 925-928, 2016. 10, DOI : <http://doi.org/10.3130/aijt.22.925>
- (5) T. Nagai : Analysis of bamboo truss structure with hand-made rope joint, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2016 Tokyo, Program & Short Abstract* p. 127, 2016. 9, Full paper in USB, CS8D-2, ID 1227
- (6) 陶器浩一, 永井拓生 : 竹を構造材料として用いた空間構造の設計および施工—竹を構造材料として用いた応急仮設建築物の設計・施工の実例—その1—, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.49, pp.1007-1012, 2015. 10, DO : <https://doi.org/10.3130/aijt.21.1007>
- (7) H. Toki, T. Nagai : Design and construction of bamboo spatial structure using bended bamboo arch and handmade joint, *Proceedings of IABSE Conference NARA, Elegance in Structures, International Association for Bridge and Structural Engineering*, pp. 368-369, 2015. 5, Full paper in CD-ROM, NS-8
- (8) T. Nagai, H. Toki : Aged changes of vibration characteristics and mechanical properties of actual bamboo building, *Proceedings of IABSE Conference NARA, Elegance in Structures, International Association for Bridge and Structural Engineering*, pp. 370-371, 2015. 5, Full paper in CD-ROM, NS-9