

丸竹の形状・伐採時期と物理的・力学的特性の関係の解明に関する基礎的研究

Fundamental study on clarification of relationship between shape, harvested conditions of round bamboo and physical, mechanical properties

滋賀県立大学環境科学研究院 講師 永井拓生

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. 研究計画の概略

本研究では、竹の種別（マダケ・モウソウチク）、伐採時期、含水率、形状をパラメータとして、それらと竹の力学的特性との関係を解明し、工学的な評価やモデル化を行うことを目的とする。竹の物性に関する工学的評価、さらには建築利用を促進するためには、物性に影響する様々なパラメータ（種別、伐採時期、含水率等の物理的性質）を整理し、各パラメータと物性との関係を入念に明らかにする必要がある。そこで、以下について調査を行う。

（1）マダケとモウソウチクの比較

国内では、マダケとモウソウチクが多く生殖し、いずれも高さ15m前後に成長し、建築用材として十分な材籍を持つ。しかし、両者の形状の特徴や強度には大きな違いがある。本研究では、マダケとモウソウチクに関し以下の項目について同様の調査を行い、物性の比較と工学的モデル化を行う。

（2）竹の「伐採時期と物性」の関係の解明

竹は伐採時期により成長量や吸水量が大きく異なると言われている。過去のマダケに関する調査（1～8月に調査、2～7月は未確認）によれば、8月に伐採したマダケの竹稈の平均含水率は20%程度であり、その後上昇し、10～1月は90～100%と非常に大きくなる傾向が観察されている。本研究では、1年間に亘り、定期的に一定の条件下（同様の竹林、日照条件、2年生以上であること等）で竹のサンプルを採取し、伐採時期と含水率を始めとした物理的特性、強度等の力学的特性を実験により調査する。また、力学的特性が伐採時期によるものか、含水率によるものか、といった因果関係を明らかにする。

（3）竹の「形状と物性」の関係の解明

竹の形状は、主に①竹稈長さ、②竹稈径、③稈径厚、④節間距離によって特徴づけられる。これらは同種の個体間においても大きく異なる場合がある。過去の研究によれば、竹稈の断面形状の違いにより、引張強度が変動する傾向が見られる。竹の形状と、竹の座屈特性や曲げ特性等の力学的特性とがどのように関係するか、実験により明らかにする。これには、（2）で伐採した竹を用いる。

（実験調査によって得られた新しい知見）

2. 丸竹の曲げ破壊メカニズムと曲げ強度推定

詳細は発表論文1,5)に譲り、本節では概要のみ述べる。中空円筒断面を持つ細長い部材が曲げモーメントを受けることで直交断面のせいが縮み、やがて局部座屈に至る現象は Brazier 効果と呼ばれ、多くの研究がある。丸竹が曲げを受ける場合にも Brazier 効果は生じるが、

竹稈に局部座屈が生じることはほとんどなく、稈壁の割裂破壊が先行する場合が多い。これは、竹の特徴である「節」によって局部座屈が抑制されるか、もしくは竹稈の円周方向の破壊が先行するためである。本年度は、Brazier 効果に関する先行研究をもとに定式化を行い、実験との比較を通じ、丸竹の曲げ破壊メカニズムおよび曲げ強度の推定について考察した。

図 2.1 に曲げ試験で得られた繊維方向曲げ応力度－繊維直交方向曲げ応力度関係の一例を示す。曲げ応力度は、各方向の歪みの計測値に曲げ試験および横圧縮試験より得られた曲げヤング係数を乗じ、応力度に換算したものである。「Theoretical」は Brazier 効果理論による理論値で、同じく実験により得られた各方向ヤング係数と試験体の寸法値を用い計算した。マダケ (*P. bam.*) では両者の曲線はよく整合しているが、モウソウチク (*P. ed.*) では理論値より実験の繊維直交方向の応力が小さく、しかも早期に塑性化を生じている。「×」「+」は実験で得られた各方向の曲げ強度である。曲げ試験の繊維直交方向の最大応力度は、同方向の強度に比べマダケ、モウソウチクともに約 6 N/mm^2 程度小さく、強度に達する前に破壊を生じている。したがって、丸竹には Brazier 効果が確実に認められるものの、曲げ破壊の決定的な理由と考えるのは難しそうである。曲げ強度の推定にあたっては、载荷治具付近の応力集中の影響を定量的に評価すべきと考えられる。

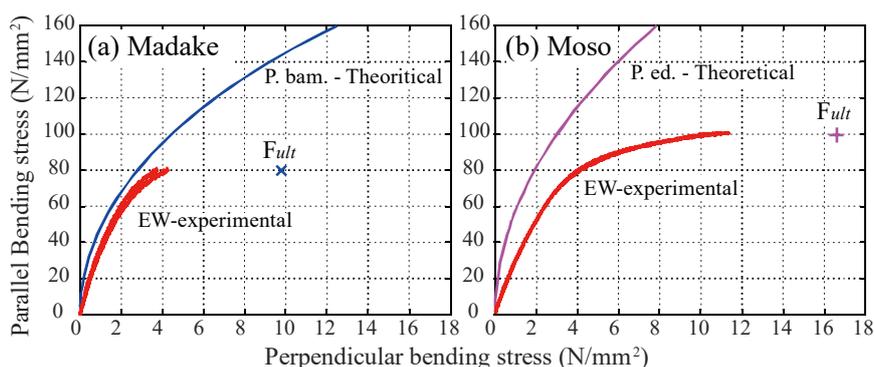


図 2.1 曲げを受ける丸竹の繊維方向と繊維直交方向の曲げ応力度

3. 竹の含水率測定

3.1. 概要

本節の内容は発表論文 2)として現在投稿中である。竹を構造材料として用いるには、力学的性質を把握することが重要であるが、木材と同様、含水率が力学的性質に大きく影響することが知られている¹⁾。ISO22157²⁾では、力学試験を行った試料について、実験の度に含水率の測定を行うこととしているが、含水率の測定方法は「 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ で 24 時間加熱し、その後少なくとも 2 時間毎に質量の測定を行う」と定められており、一度の試行に少なくとも 26 時間以上を要することになる。したがって、多くの力学試験を行うためには、含水率の測定に多大な時間が割かれることになる。そこで、本研究では、高温 ($130 \sim 200^\circ\text{C}$) で加熱し、短時間で ISO の方法と同等の精度で含水率を推定する方法について検討する。

3.2. 実験方法

本研究では日本のマダケとモウソウチクを対象とし、上記 ISO の定める含水率測定方法 (以下「ISO の方法」) と、ISO の方法より高温で加熱した方法 (以下「本方法」) で含水率を推定し、比較する。桐生ら³⁾によれば、竹齢 1 年以上が経過したモウソウチクの主要成分は、セルロース、リグニン、ヘミセルロースであり、これらが質量の 90 % 以上を占める。

また、栗山⁴⁾は、ナラおよびマツに含まれるこれらの成分に関し、長時間の加熱により変質するが、150℃以下の加熱では成分の変質速度が緩やかになることを確認している。したがって、ISOの方法を上回る温度であっても、水分の蒸発と主要成分の変質が同時に生じないような加熱温度を設定できれば、加熱時間の短縮が期待できる。

加熱開始時刻を $t=0$ 、加熱中の試料の質量を $m(t)$ 、加熱前の試料の質量を m_0 とし、 $\alpha(t)$ を式(3.1)のように定める。乾燥が進み試料が全乾状態となったとき、 $\alpha(t)$ は含水率と一致する。また、式(3.2)のように、 $\alpha(t)$ の時間微分を $\beta(t)$ と表す。

$$\alpha(t) = \frac{m_0 - m(t)}{m(t)} \times 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

$$\beta(t) = \frac{d\alpha}{dt} \quad [\%/ \text{min}] \quad (3.2)$$

後述するように、乾燥が進むと質量の時間変化が緩やかになり、 β はほぼ一定の値 (β_c とする) に収束する。 β が β_c に達した時刻を t_1 とし、この時刻に試料が全乾状態に達したとみなし、 $\alpha(t_1)$ をその試料の含水率とする。以上の手順を「本方法①」とする。また、実用上は、 β が必ずしも一定値に収束していなくとも、 β が十分に小さいある閾値以下になった時刻 t_2 における $\alpha(t_2)$ を含水率とみなすことも可能と考えられ、これを「本方法②」とする。

実験には加熱乾燥式水分計 ML-50 (エー・アンド・デイ社製) 3 台を用い、2 台で ISO の方法、1 台で本方法による実験を行う。3 台の実験に用いる試料は、含水率を可能な限り等しくするため、5 mm 程度の小片に細かく砕き、十分に混ぜた後、質量を 3 等分したものをを用いる。

3.3. 結果と考察

表 3.1 に示すように、加熱温度と含水率が異なる 21 通りの試料について実験を行った。実験 1~3, 15~17 では表中で示す 170℃以上の温度で最初の 1 時間加熱し、その後 160℃で 7 時間加熱している。その他の実験では表中に示す温度で 8 時間加熱した。また、質量の測定は 1 分間隔で行った。同表中、ISO の方法 (ISO①, ISO②) で測定した含水率が w_1, w_2 である。また、 ε_1 はこれら 2 つの含水率の差の程度を表しており、式(3.3)で計算したものである。いずれの実験においても 2 つの含水率の差は小さく抑えられており、 ε_1 は最大 2.9% である。また、 ε_2 は ISO の方法に対する本方法の誤差の程度を表し、 w_1, w_2 の両方に対し式(3.4)で計算したものである。

表 3.1 各実験の諸元および実験結果

実験	竹種別	ISO①		ISO②		ε_1 [%]	本方法		本方法①				本方法②				
		m_0 [g]	w_1 [%]	m_0 [g]	w_2 [%]		加熱温度 [°C]	m_0 [g]	β_c [%/min]	t_1 [min]	$\alpha(t_1)$ [%]	$\varepsilon_{s①}$ [%]	$\varepsilon_{s②}$ [%]	t_2 [min]	$\alpha(t_2)$ [%]	$\varepsilon_{s①}$ [%]	$\varepsilon_{s②}$ [%]
1	マダケ	7.3	14.3	7.4	13.9	2.8	200 → 160	7.7	0.0030	81	17.6	22.8	26.2	75	17.6	22.8	26.2
2		10.5	39.2	10.4	39.2	0.1		10.8	0.0016	80	44.9	14.5	14.3	72	44.9	14.5	14.3
3		11.2	59.2	11.3	59.2	0.1		11.5	0.0020	80	64.3	8.8	8.6	74	64.3	8.8	8.6
4		25.8	55.0	26.4	54.8	0.3	160	25.8	0.0076	266	60.4	9.8	10.2	144	58.8	7.0	7.3
5		10.8	137.0	10.4	134.1	2.2	150	11.0	0.0045	73	141.1	3.0	5.2	63	141.1	3.0	5.2
6		20.2	107.3	20.0	109.0	1.6		20.1	0.0055	102	107.8	0.5	1.1	86	107.7	0.4	1.2
7		30.1	123.0	30.4	122.8	0.1		30.0	0.0113	317	123.4	0.3	0.4	143	120.8	1.7	1.7
8		30.1	117.0	30.0	115.3	1.5		30.1	0.0079	160	115.4	1.3	0.1	121	114.9	1.7	0.3
9		15.6	46.9	15.5	45.9	2.1		14.7	0.0024	437	45.4	3.0	1.0	86	43.2	7.9	6.0
10		29.3	115.5	29.4	114.1	1.2		29.6	0.0039	164	114.3	1.0	0.2	140	114.2	1.1	0.1
11		30.2	102.3	29.9	102.0	0.3	30.0	0.0058	201	103.3	1.0	1.3	132	102.8	0.4	0.8	
12		30.0	107.0	30.1	108.4	1.3	30.0	0.0036	179	107.0	0.1	1.3	137	106.7	0.3	1.6	
13		30.0	102.9	30.1	105.9	2.9	30.1	0.0048	168	106.6	3.6	0.7	129	106.3	3.3	0.4	
14		30.1	112.4	30.3	112.3	0.1	30.1	0.0050	163	111.7	0.6	0.5	124	111.4	0.9	0.8	
15	モウソウチク	30.6	61.3	30.3	61.9	1.0	200 → 160	30.4	0.0063	200	67.3	9.8	8.7	84	66.3	8.2	7.1
16		30.4	57.0	30.2	57.6	1.0	180 → 160	30.4	0.0096	288	62.3	9.5	8.3	112	60.0	5.3	4.2
17		30.5	62.3	30.5	61.6	1.2	170 → 160	30.4	0.0087	455	70.0	12.3	13.6	160	66.5	6.6	7.9
18		30.5	60.2	30.7	60.6	0.6	160	30.2	0.0076	349	64.6	7.4	6.7	137	62.2	3.3	2.7
19		30.5	62.3	30.5	61.6	1.2	150	30.4	0.0052	335	64.2	3.0	4.2	130	62.3	0.0	1.2
20		30.4	57.0	30.2	57.6	1.0	140	30.3	0.0035	380	59.4	4.3	3.2	136	57.9	1.6	0.5
21		30.3	60.7	30.4	61.3	1.0	130	30.5	0.0021	258	61.3	1.1	0.1	140	60.6	0.1	1.1

本方法①, ②のいずれにおいても, 加熱温度が 160°C以上の実験 1~4, 15~18 では ε_2 が大きい, それ以外の実験ではほとんどが 3% 以下となっており, ISO の方法とほぼ同様の測定結果が得られている。したがって, 加熱温度は 150°C以下が望ましいと考えられる。また, 本方法②では, β が 0.02 %/min に達した時刻を t_2 とし, $\alpha(t_2)$ を含水率の推定値とした。質量が他よりも小さい実験 9 を除き, ε_2 は本方法①と同程度であり, 十分な精度で推定できている。また, 実験 9 以外の 150°C以下の試験では, t_1 と比べ t_2 は最大で 240 分程度も短く, 非常に効率的であると言える。

図 3.1 は実験 7 (マダケ), 図 3.2 は実験 19 (モウソウチク) の $m(t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$ の推移であり, β は 55 分頃に最大となり, 質量の変化速度が緩やかになる。その後, β は 120 分前後からはほぼ一定の値に収束しており, 全乾状態になったと考えられる。図 3.3 はマダケの加熱後の試料の写真であり, 加熱温度が高いほど, 試料の変色が顕著である。

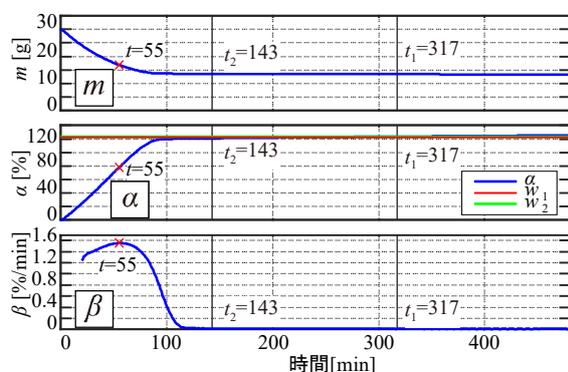


図 3.1 マダケの実験結果 (実験 7)

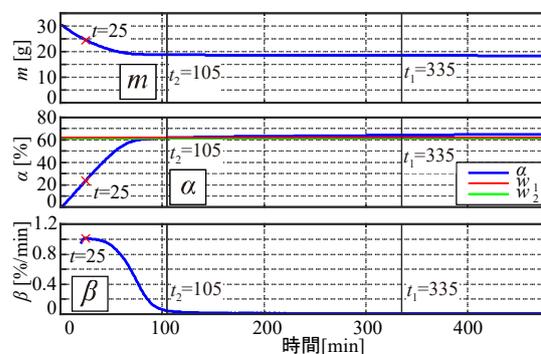


図 3.2 モウソウチクの実験結果 (実験 19)



図 3.3 マダケの加熱後の試料

本節の参考文献

- 1) David J. Trujillo., L.F. López.: *18 - Bamboo material characterization, Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition)*, K. A. Harries, B. Sharma eds., Woodhead Publishing, Sawston, UK, pp. 491-520, 2019.
- 2) ISO 22157: *Bamboo Structures - Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo Culms* -, International Organization for Standardization, 2019.
- 3) 桐生智明, 神代圭輔, 古田裕三: 成長に伴うモウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) の物性発現機構 (第 2 報), 木材学会誌, Vol. 63, No. 1, pp. 14-20, 2017.
- 4) 栗山旭: 木材の 200°Cまでの加熱処理による化学的变化について, 材料, Vol. 169, No. 16, pp. 16-20, 1967.

4. 竹建築事例の調査と分類

詳細は発表論文 3)に譲り、本節では概要のみ述べる。竹材を利用する際には、天然素材であるため性質にばらつきが大きい、異方性が顕著である、生物劣化被害を受けやすい、といった制約条件に対応する必要がある。そこで、これらの制約条件への対策や、竹材の形状に対応する使用方法に着目し、事例分析を行った。

調査対象は、2011～2015 年に出版された竹建築に関する文献 5 件から収集した 126 事例とした。文献に記載の情報に加え、各々の建築事例に対し、ウェブサイトから収集可能な情報も集めた。事例の概要（建築年・用途・所在地等）に加え、竹材の種類・処理方法、構法、接合部の構成、などの情報を整理した。なお、竹材の処理方法については収集できた情報が少なかったため、追加で竹材を専門に扱う業者・設計者のウェブサイトも調べ、処理方法について記載のある竹材業者 7 社および設計者 2 組の情報を整理した。

（ 発 表 論 文 ）

（10.5 ポ）

- 1) 永井拓生：丸竹の曲げ破壊メカニズムおよび曲げ強度推定に関する考察－Brazier 効果理論と実験の比較－，日本建築学会大会（北海道），投稿中，2022. 9.
- 2) 木原湧，永井拓生：高温加熱による竹の含水率測定に関する基礎的研究，日本建築学会大会（北海道），投稿中，2022. 9.
- 3) 有村美千路，山田宮土理，永井拓生：竹材の建築への活用に関する基礎的研究－建築事例調査に基づく竹材の活用方法の分析－，日本建築学会大会（北海道），投稿中，2022. 9.
- 4) 木原湧，永井拓生：高温加熱による竹の含水率測定に関する基礎的研究，第 72 回日本木材学会大会，オンライン，I16-02-1115，2022. 3.
- 5) 永井拓生：純曲げを受ける丸竹の力学的特性に関する考察，第 16 回コロキウム構造形態の創生と解析 2021，日本建築学会，pp. 107-112，2021. 10.