

# 構造材としての竹の力学特性に関する基礎的研究 - 竹の集成材と平板竹を接着した木梁の曲げ試験 -

高山 峯 夫 \*1

森 田 慶 子 \*2

大 野 敦 弘 \*3

## Fundamental study on the mechanical properties of bamboo as a structural material -Bending tests on wooden beams made of glued laminated bamboo and flat bamboo-

TAKAYAMA Mineo, MORITA Keiko, ONO Atsuhiko

### Summary

Numerous studies have been conducted on the use of bamboo in building structures. There have been studies on the mechanical properties of bamboo and joining methods, as well as efforts to construct structures using whole bamboos as they are. At the same time, research focusing on laminated bamboo has also been undertaken. In studies using laminated bamboo, experiments have been conducted on hybrid specimens combined with timber, but some studies have shown that the combination with laminated bamboo was effective, while other studies have shown no clear difference. Based on these existing studies, this study conducted experiments on beams made of laminated bamboo and other materials to investigate the possibility of using laminated bamboo as a structural material. The results of the experiments showed that the bending strength of laminated bamboo was almost twice as high as that of timber of the same dimensions. It was also found that the specimens with flat bamboo glued to the underside of the timber were expected to have improved load bearing capacity and deformation performance.

**Key Words** : Bamboo, Laminated Bamboo, Mechanical Property, Bending Test

## 1 はじめに

### 1.1 研究目的

近年は手入れの行き届いていない放置竹林の増加が問題となっている。放置竹林増加による植林地の侵食などが深刻化している。こうしたことを受けて、竹材の建築構造体への利用をめざした研究はこれまでも数多く行われてきている。竹材の力学的特性や接合法に関する研究(例えば<sup>1)2)3)</sup>や丸竹をそのまま活用して構造体を構築する取り組みも行われている<sup>4)</sup>。一方で、竹集成材に着目した研究にも取り組まれている<sup>5)6)7)</sup>。集成材を使った研究では木材と組み合わせたハイブリッド試験体の実験も行われているが、竹集成材と組み合わせる効果が出たという研究と、明確な差がでない研究報告もある。本研究ではこれらの既往の研究を踏まえ、竹集成材が構造材料とし

て活用できる可能性を検討するために竹の集成材などを使った梁の曲げ実験を行い、その有効性を検証した。

### 1.2 竹に関係するこれまでの研究

竹を対象とした研究は日本のみならず世界各地で行われている。ここでは主な研究について概要を紹介する。竹材の材料特性に関する研究<sup>8)</sup>では、木材と比較すると、丸竹材の縦圧縮強さは木材の最大値と同等の強さが確認でき、横圧縮は木材同様強度が確認できなかった。竹繊維の曲げ強さは木材の最小値と同等の強さが得られ、また引張強さはどの木材よりも高い強度性能が確認できた。マダケとモウソウチクにおける、竹の種類による強度差は大きくなかった。

竹材の接合法に関する研究<sup>5)</sup>では、従来から行われている縄で縛る接合法や、材同士を組み、込栓を打ち込むことで固定する接合法では、高い剛性や強度を確保することは難しい。そこで、強度・剛性に優れた竹材の新し

\*1 福岡大学工学部建築学科 教授・工博

\*2 福岡大学工学部建築学科 助教・博士 (工学)

\*3 福岡大学工学部建築学科 技師・博士 (工学)

い接合法が開発されている。竹材の使用用途によって適した接合法があるため、充填材を挿入し接合する方法、番線やロープなどで接合する方法ともに、施工性や強度などを改善していき、仮設建築物等への実用化を目指していく必要がある。

竹材を接合具とした木質構造用接合法の開発<sup>9)</sup>も取り組まれている。建設系廃棄物は他の廃棄物に比べリサイクル率が低く、全産業廃棄物に占める割合が高い。なかでも、木造住宅の解体によって排出される廃棄物は、他の構造に比べて対応が遅れており問題視されている。その理由のひとつに接合金物（くぎやビス等）と木材との分別の手間が挙げられている。そこで、竹材を利用した木質構造用接合技術が実用化されれば、接合部をチェーンソーやのこぎりのみで建物を解体できるだけでなく、竹材は木材と同様に自然素材であるため分別せずに、そのままパーティクルボード等にリサイクルできると考えられる。また、この竹接合具は、重量が10g程度と接合金物の約1/20で、接合部の軽量化が図られる。さらに、接合金物の製造時に排出される二酸化炭素の放出を抑えることができ、地球環境への負荷をより少なくすることができると考えられる。

筋違に竹材を用いた木造骨組に関する研究<sup>10)</sup>において、竹材を木造骨組の筋違に使用した片筋違の水平加力実験を行った結果、間柱の有無によって破壊性状や強度に差が見られた。間柱を取り付けた場合、間柱と竹筋違の取合部に問題があり、正加力時、負加力時の耐力・壁倍率はほぼ同等の値であった。それに対し、間柱を取り付けず、竹に何の切欠加工も加えなかった場合は、負加力時に筋違が座屈を起こさず、圧縮筋違として機能し続け、高い耐力・壁倍率を示した。竹を筋違として使用する場合、竹に切り込みなどの加工を加えず、そのまま使用したほうが耐力・壁倍率の上昇に効果があることが明らかになった。

竹材の工業製品化に関する研究<sup>11)</sup>では、竹集成材や圧密竹合板、竹繊維を活用した高強度材料、竹PSL<sup>※</sup>などは一定の強度を発揮するが、施工性や接着部、接合部

において多くの課題が残る。また実用化に向けては、寸法安定性やシロアリ、タケクイムシの虫害、長期荷重の影響など各種耐久性に関するデータを収集することも解決すべき課題である。

竹建築に関する研究<sup>12)</sup>において、竹は建築基準法において材料特性が定義されず、また耐火性に乏しく、これまで建築構造材料として用いられた例はほとんどない。しかし、緊急時の応急的な仮設建築に使用する限りにおいては、耐火に関する規定は除外される場合があり、現在は仮設構造物に関する研究が多く行なわれている。竹は世界中多くの地域で自生しており、災害時にも現地での調達が比較的容易で、輸送・建設コストを大幅に抑えることができ、重量が軽く手作業による加工が容易である。応急仮設住宅の建材として、竹には高い可能性があるとと言える。

## 2 試験体の作成方法

試験体は、木材（等級E90の杉の角材105mm角）と竹の集成材を組み合わせて製作した。最初に竹の集成材の製作方法について説明する。市販されている竹の集成材<sup>注1)</sup>は幅320mm、厚さ20mm、長さは2mとなっている。この集成材から幅100mmで長さ1mの薄板を切り出した。これらの薄板5枚を接着材で貼り合わせて、100mm×100mmの集成材を作成した。集成材を接着するときには、接着面に水性高分子イソシアネート系接着剤を塗布したあと（写真1参照）、重ね合わせてアムスラー型試験機で約60分圧縮した（写真2参照）。圧縮荷重は100kN（圧縮応力度1N/mm<sup>2</sup>相当）とした。木材と集成材、木材同士を接着する場合も同様の手法をとった。

集成材の性能を検証するために、集成材と木材を接着した試験体（WB試験体（図1）、BW試験体（図2））、および集成材を重ねて接着した試験体（BB試験体（図3））を製作した。比較のために木材を重ねて接着した試験体（WW試験体（図4））も用意した。

単材の性能を見るために単一材（B試験体（図5）とW試験体（図6））も用いた。なお、平板竹<sup>注2)</sup>の効果を

※ 竹ひごをナイロン繊維で織り合わせた竹製のマットを断面が円形あるいは角形に巻き重ねたもの。Parallel Strand Lumber



写真1：接着剤の塗布



写真2：圧着の状況

みるために木材の下面に平板竹を接着した試験体（WT試験体（図 7））を用意した。使用した平板竹の寸法は幅 60mm、長さ 900mm、厚さ 2～3mm で特殊な加工によって丸竹から平たい竹にしたものである。試験体の製

作では平板竹 1 枚を木材の下面中央に接着しただけであり、下面全面に接着はしていない。なお、平板竹には節があり不陸なので、接着する際には下にゴムシート（厚さ 4mm）を敷いて圧着した。

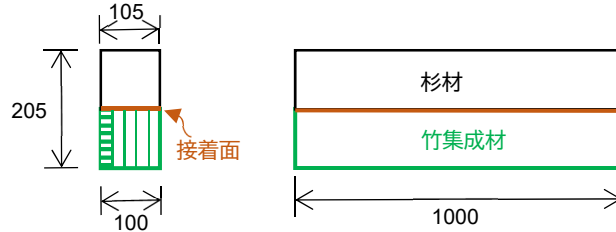


図 1：杉と竹集成材の重ね梁（WB-1 試験体）

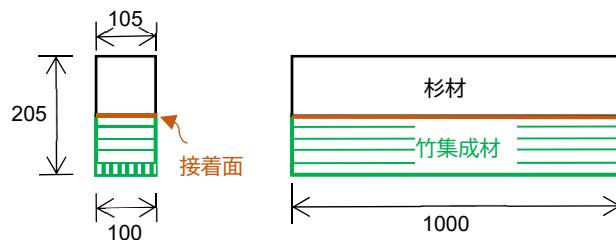


図 2：杉と竹集成材の重ね梁（BW-1 試験体）

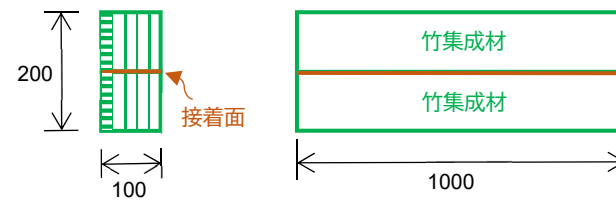


図 3：竹集成材の重ね梁（BB-1, BB-2 試験体）

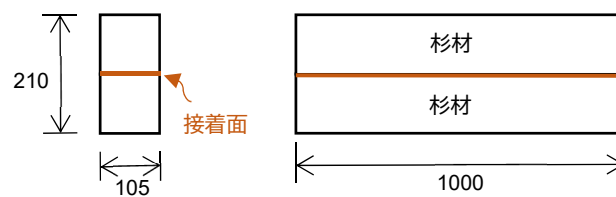


図 4：木材の重ね梁（WW-1, WW-2 試験体）

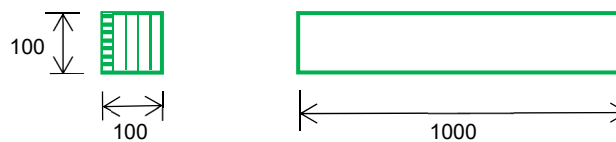


図 5：竹集成材の単一梁（B-1 試験体）

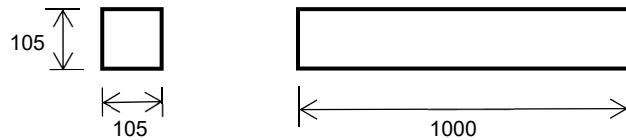


図6：木材の単一梁（W-1, W-2 試験体）

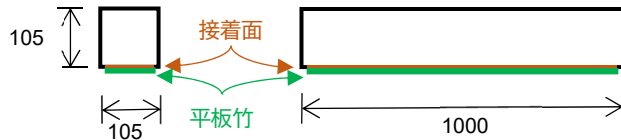


図7：木材に平板竹を接着した梁（WT-1～4 試験体）

3 材料試験片と試験結果

これまでも竹（孟宗竹）の素材試験は行われているが、本研究でも基礎的なデータを得ることを目的に竹の引張試験と圧縮試験を実施した。

竹の引張試験では、金属材料の引張試験方法（JIS Z 2241）の14B号試験片に準じて試験体を作成した（写真3）。試験片は2体作成し、両面にひずみゲージ（ポリエステル箔ゲージ、ゲージ長20mm）を添付して応力度とひずみ度の関係を求めた。表1に引張試験片の寸法を示す。

表1：引張試験片の寸法

	幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )
T1	19.20	5.89	113.1
T2	19.83	5.39	106.9



写真3：引張試験片の表と裏の状況



写真4：引張試験後の破断状況（試験片の横側）

図8に試験から得られた応力-ひずみ関係を示す。破断応力は200MPaと非常に高いものの、破断は脆性的で板厚方向に割裂した（写真4参照）。

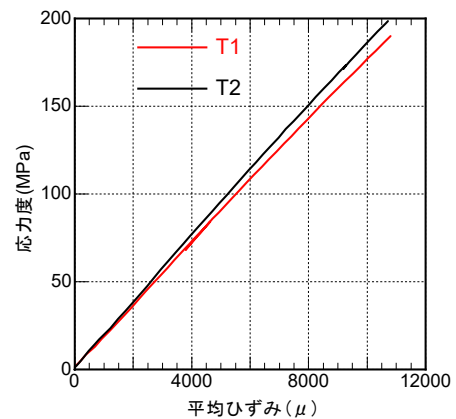


図8：竹の引張試験での応力-ひずみ関係

次に高さが異なる丸竹の圧縮試験を実施した。表2に圧縮試験体の寸法を示す。丸竹は上下面で断面寸法が若干異なっているため平均値を示している。

表2：丸竹の圧縮試験体の寸法

	高さ (mm)	外径 (mm)	内径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )
CS1	86.10	83.59	70.03	1636.88
CS2	88.52	84.36	70.41	1695.61
CL1	170.98	87.08	73.16	1751.43
CL2	190.23	90.69	75.82	1944.23

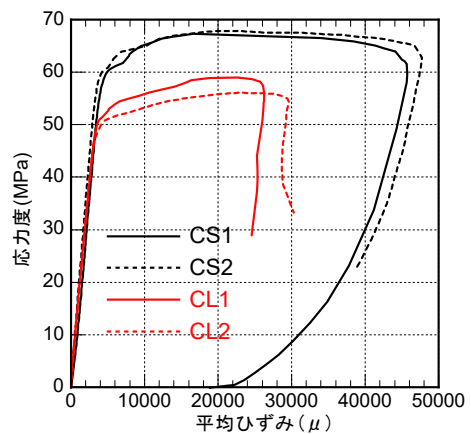


図9：丸竹の圧縮試験での応力-ひずみ関係

試験体には引張試験のときと同じひずみゲージを外側に3枚添付している。計測されたひずみの平均値と応力度の関係を図9に示す。この図から試験体の高さが高くなると降伏するような挙動が早まることがわかるが、それまでは弾性的な挙動を示している。降伏した後は変形(ひずみ)が進行し、最終的には写真5に示すように円周方向に割れて耐力を喪失する。

竹集成材(100mm×100mm)と杉材(105mm×105mm)の圧縮特性を得るために高さ100mmの試験体を製作して圧縮試験を実施した。圧縮試験の試験体の4側面にひずみゲージを貼付し圧縮ひずみを測定した。圧縮試験の状況を写真6に示す。

圧縮試験は圧縮荷重で250kN程度までの荷重を行った。いずれも試験体は各2体用意した。圧縮試験の結果を図10に示す。横軸のひずみ度はひずみゲージで計測したひずみ度の全平均値としている。竹集成材(CB試験体)と杉材(CW試験体)ともに線形挙動を示しているが、竹集成材の方が圧縮剛性は高いことがわかる。

ひずみ度が2000 $\mu$ 付近での剛性からヤング係数を算

出すると、木材は9,057 N/mm<sup>2</sup>で、竹集成材は10,907 N/mm<sup>2</sup>となった。竹の引張試験の結果(図8)からヤング係数を算出すると平均で18,278 N/mm<sup>2</sup>、同様に圧縮試験(図9)からは15,848 N/mm<sup>2</sup>が得られた。

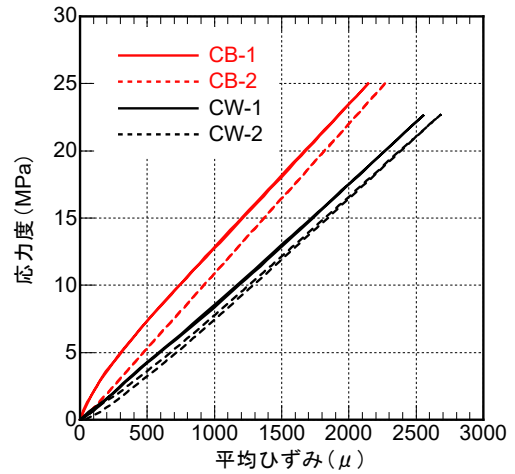


図10：竹集成材(CB)と杉材(CW)の圧縮試験の結果

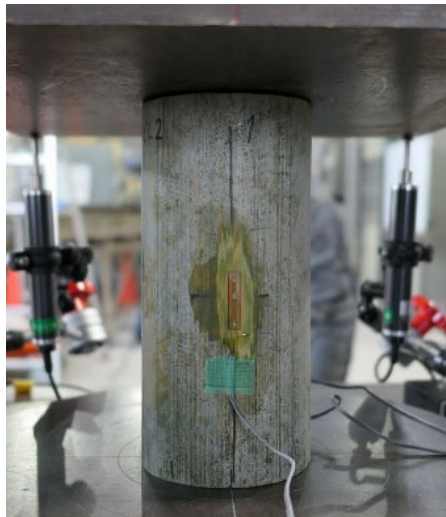


写真5：丸竹(CL1試験体)の圧縮試験(左)と最終状態(右)

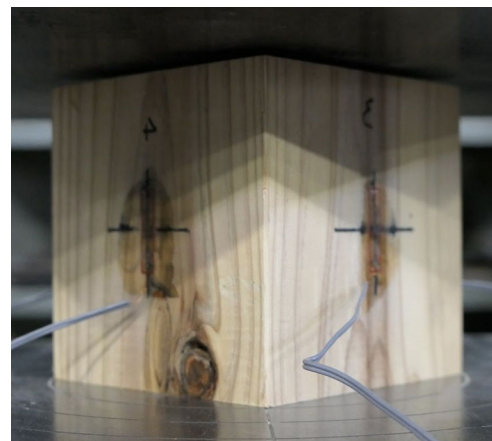


写真6：竹集成材(左)と木材(右)の圧縮試験の状況

#### 4 曲げ試験

製作した梁の曲げ試験をアムスラー型試験機（最大荷重 1000kN）で実施した（写真7参照）。曲げ試験では中央に集中荷重を与え、その載荷点の鉛直変形（梁の両側）を巻き込み型変位計で計測するようにした。載荷点（直径 30mm の円柱）から支点までの距離は 400mm となっている。なお支点と試験体との間には鉄板を設置し、めり込みを防止している。

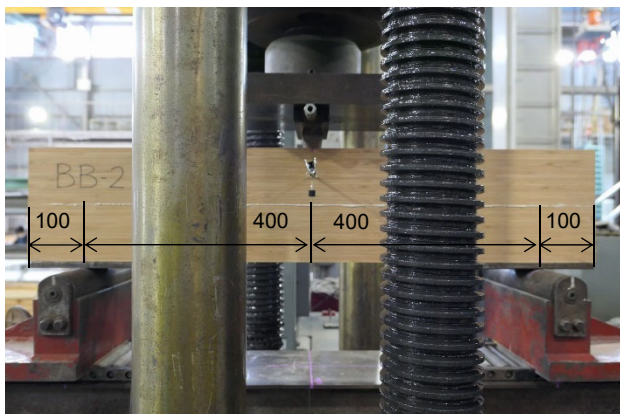


写真7：曲げ試験の実施状況

は、WW 試験体と荷重-変形関係に大きな違いは見られない。

同図からは竹集成材を使った梁の剛性と耐力が最も高いことがわかる。写真8にBB-2試験体の破断状況を示す。破断は梁を重ねた部分から生じているものの、接着面だけがずれて壊れたわけではないことがわかる。2段重ねではなく単一材で同じ断面積の梁が製作できればより高い性能を得られる可能性がある。



写真8：竹集成材の重ね梁の破断状況

#### 4.1 重ね梁の試験結果

図11に重ね梁の曲げ試験の結果を示す。BB試験体は竹の集成材を2段重ねて接着したもの、WW試験体は木材を重ねたもの、WBとBW試験体は木材と竹集成材を重ねたものである。

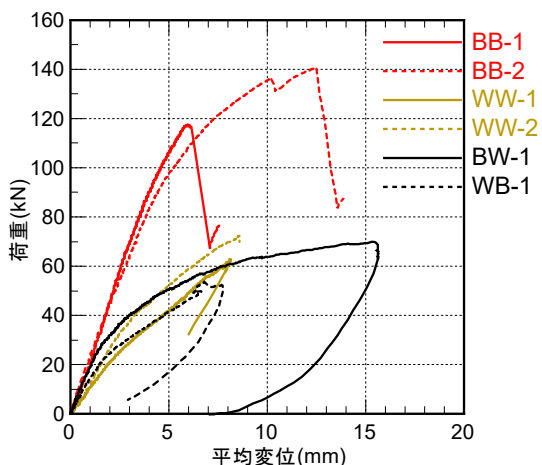


図11：重ね梁の曲げ試験の結果

WW試験体は木材が破断する前に載荷点が木材にめり込んでしまったため途中で載荷を中止している。木材と竹集成材を組み合わせた試験体（WB,BW試験体）

#### 4.2 単一梁の試験結果

図12に単一梁の曲げ試験の結果を示す。木材の下面に平板竹を接着したWT試験体では4体の試験を実施したが、特性のばらつきが大きい。荷重-変形関係からは木材単体と大きな違いは見られないものの、亀裂の進行を抑制し変形性能が向上したケース（WT-4）もある。写真9に示すように平板竹を接着していないところで亀裂が進行しており、平板竹を木梁の下面全体に接着すれば性能向上の可能性が期待できそうだ。

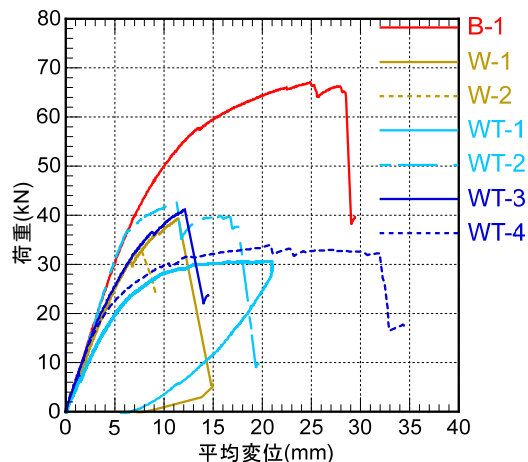


図12：単一梁の曲げ試験の結果



写真9：WT試験体の破断面の状況（下面）

B試験体の最大耐力は木梁よりも1.6倍ほど高く、変形能力も高いことがわかる。写真10に示すようにB試験体の破断面は集成材を構成する竹板が引張破断している。竹集成材の限界性能は集成材のフィンガージョイントの破断で決まるとの報告<sup>7)</sup>もあり、検討課題の一つであると思われる。



写真10：B試験体の破断状況（下面）

## 5 まとめ

本研究では、竹の材料試験と竹の集成材を組み合わせた梁の曲げ試験を実施した。竹の材料特性としては既往の研究でも指摘されているとおり高い引張強度がある一方で破断は脆性的である。そのため丸竹そのものを構造体として使うには安全率を大きく設定するなどの必要がある。

竹の集成材を使った曲げ試験では高い耐力を発揮することが明らかとなった。竹の集成材を構造体として活用できる可能性は高いと考えている。また、平板竹を木梁の下面全面に接着すれば木梁の変形性能を向上できる可能性も得られた。

竹は資源として枯渇する心配がほとんどなく、3～4年程度の短期間で十分に生育するため、数年程度利用する仮設的な建築に竹を利用できれば、資源の循環サイク

ルに調和した、低炭素で持続的な生産システムを生み出すことが期待できる。また竹の持続的な建築利用は、竹林や里山の環境保護という観点から地球環境の保全に貢献できる。

日本でも、今後さらなる建築基準の整備とともに、竹の利用法の体系化を行うことが必要となる。竹材を建築構造体として実用化するためには、寸法安定性やシロアリ、タケクイムシの虫害、長期荷重の影響など各種耐久性に関するデータを収集すること、竹建築資材の製造工程を見直し簡略化を図ることなどが重要になってくると考えられる。

## 謝辞

本研究で使用した竹（孟宗竹）はバンブーさわらの郷合同会社（代表 筒井護氏）から提供いただいた。また、本研究をすすめるうえで学部生の飯田愛華氏、吉崎優希氏および吉富美代氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

注1) 株式会社コスモ工房 <https://cosumo-kobo.jp/>

2) 株式会社ウッドスタイル <http://www.wood-style.com>

## 参考文献

- 1) 矢頭、井上、田中：竹材の引張強度試験法に関する実験的研究（その1）、日本建築学会九州支部研究報告、第39号、2000年
- 2) 藤川、田中、宮内ほか：丸竹の材料特性に関する基礎的研究（その1）、日本建築学会九州支部研究報告、第43号、2004年
- 3) 西川、足達、田中ほか：圧密竹合板の開発に関する基礎的研究（その1）、日本建築学会九州支部研究報告、第44号、2005年
- 4) 陶器、永井：竹を構造材料として用いた構造の設計および施工、日本建築学会技術報告集、第49号、2015年
- 5) 板垣：竹の建材としての利用技術の開発—竹複合集成材の力学特性—、日本建築学会東北支部研究報告会、2003年
- 6) 山本、楠ほか：竹集成材の曲げクリープ性状に関する実験的研究、日本建築学会大会梗概集、2007年
- 7) 本田山、陶器ほか：竹集成材の構造材料としての材料特性に関する研究（その1）～（その4）、日本建築学会外界梗概集、2019年～2020年
- 8) 池智大ほか：竹の建築構造材利用のための実験的研究（材料・部材性能(2)、構造III）、学術講演梗概集、pp33～34、2007年
- 9) 井上正文ほか：竹材の接合法開発に関する実験的研究（その4）実用化のための試作及び強度実験（建築構造）、日本建築学会九州支部研究報告集、43巻、

pp349 ~ 352、2004 年

- 10) 井上正文ほか：丸竹を用いた建築構造技術に関する研究、組立梁の曲げ実験について（建築構造）、日本建築学会九州支部研究報告集、47 巻、pp273 ~ 276、2008 年
- 11) 井上正文ほか：圧密加工技術を用いた木質構造用竹製接合具の強度性能向上、日本建築学会構造系論文集、632 巻、pp1805 ~ 1812、2008 年
- 12) 永井大輔ほか：Bamboo House Project 2008-2009、竹を使用した応急仮設住宅の提案（構造・構法(3)、建築デザイン）、建築デザイン発表梗概集、pp306 ~ 307、2010 年