



新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業
「地域の竹資源を活用した環境調節機能を持つ
複合建築ボードの開発」
成果資料集



序 文

わが国には、マダケ、モウソウチクをはじめとする多数の竹類が生育している。現在の日本の竹資源蓄積量は4百万tを超えるが、このうち利用されているのはわずか4%程度にすぎない。さらに、利用されないまま放置された竹林が周辺の里山へ侵入して森林を破壊するなど、深刻な環境問題が全国的に生じている。

全国の5割近くの竹材を生産する大分県と鹿児島県では、竹の接合部材や竹製車椅子、展開竹建材・竹炭パネルなどの研究開発を行っており、また、伝統的な竹産業を有する京都府では、放置竹林拡大防止事業を行うとともに、同志社大学ではこれを側面から支援すべく水・熱・圧力による竹材の物性変化に関する研究を行ってきた。しかし、現在のところ十分な成果が上がっていない。

森林総合研究所では、適切な竹資源の利用を積極的・有機的に発展させる目的で、大分県産業科学技術センター、鹿児島県工業技術センター、同志社大学と共同し、平成18年度より先端技術を活用した農林水産研究高度化事業(平成20年度は新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業)において「地域の竹資源を活用した環境調節機能を持つ複合建築ボードの開発」を実施して、環境負荷の低い製造技術により木造住宅の床・壁材等として使用可能な竹複合建築ボードを製造する技術の開発研究を行った。

その結果、加圧蒸気処理による薬剤に頼らない生物劣化(カビや虫害)の抑制技術、省力的で環境に配慮した面材料の製造技術、鋼材に匹敵する強度を持つ軸材料や接合具を製造する圧密化処理技術、竹炭と竹繊維を複合することで強度性能が高く VOC その他の健康阻害ガスを吸着するボードの製造技術などについて成果を得た。

本研究成果の活用により、現在未利用の竹資源を用いた、安心・安全な居住空間の開発、環境負荷の少ない高耐久・高機能木質材料の開発、木材製品からの揮発性化合物の削減などが期待される。ここに本書を刊行し、広く関係者の参考に供する次第である。

平成21年2月

独立行政法人 森林総合研究所
理事長 鈴木 和夫

新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業
「地域の竹資源を活用した環境調節機能を持つ複合建築ボードの開発」
成果発表会資料集

序文 独立行政法人 森林総合研究所 理事長 鈴木和夫

目 次

第1章 竹建築ボードの生物劣化及び強度性能の弱点克服に必要な処理技術

1.1 竹材の生物劣化とその抑制に関する技術課題	小谷公人	1
1.2 竹材における防虫性試験法の開発	古曳博也、小谷公人、二宮信治、 中原 恵、(故)鈴木憲太郎	5
1.3 加圧蒸気処理した竹材の生物劣化抑制	古曳博也、小谷公人、山本幸雄、 玉造公男、阿部 優、中原 恵、西村 健	6
1.4 加圧蒸気処理竹材を原料とした竹パーティクルボードの生物劣化抑制	古曳博也、 二宮信治、北嶋俊朗、山本幸雄、玉造公男、小谷公人、阿部 優、大村和香子	8
1.5 竹繊維の分離技術および竹繊維の利用	則元 京	12
1.6 竹繊維を用いたボードの調製と性能評価	杉山真樹	18
1.7 竹繊維を用いたピンおよびプレートの調製と性能評価	杉山真樹	23
1.8 絞り加工法による圧密竹釘の開発	大内成司	28

第2章 竹建築ボードの機能性及び付加価値の付与に必要な製造技術

2.1 炭化物の構造を電気的手法で推定する	久保島吉貴	32
2.2 竹炭の電気特性	久保島吉貴、鈴木養樹	35
2.3 炭化物の調湿・吸着性能	小幡 透	43
2.4 竹炭の調湿および吸着性能	小幡 透	44
2.5 竹建築ボードの調湿および吸着性能	小幡 透	47
2.6 自己接着性を利用した接着剤削減技術	井口よう子、宮本康太、渋谷龍也	50
2.7 エレメント製造工程の省力化技術	井口よう子、宮本康太、渋谷龍也	52
2.8 竹建築ボードの開発	日高富男、向吉郁朗、新村孝善、渋谷龍也	54

第3章 竹複合建築ボードの実用化に必要な最適製造・利用技術

3.1 竹を用いた構造材料に関する既往の研究と残された課題	渋谷龍也	60
3.2 軸材料としての設計・施工方法	宮武 敦、平松 靖、新藤健太	66
3.3 面材料としての設計・施工方法	渋谷龍也	71
3.4 性能の最適化を図る断面設計法	渋谷龍也、古曳博也、小谷公人、 山本幸雄、大内成司、福留重人、小林 功	76

執筆者一覧	78
-------	----

1.1 竹材の生物劣化とその抑制に関する技術課題

1.1.1 竹材の劣化とその影響¹⁾

竹材は、古くから建築材料として利用されてきた。例えば、数奇屋建築の土壁下地の小舞（こまい）竹や庭園の竹垣など、これら竹材を使用してきた職人の方々は、一般的な木材と比べた竹材の弱点を「割れ・虫・カビは、竹の三悪」と端的に語っている。つまり、丸い竹稈のまま使用すると縦に割れてしまうこと、竹材特有の乾材害虫による食害を受けること、梅雨時のような高温多湿な環境下ではカビが発生すること、これらを竹材利用上の劣化と捉えて留意するよう伝えていると考えることができる。

このような竹材利用上の劣化を広義に捉えると、図 1.1.1 に示すように竹材の劣化因子は、カビ、虫、腐朽菌などの生物劣化と、日射光、雨水、温湿度変化などの気象劣化が挙げられる。屋外においては、この気象劣化と生物劣化が相互に作用し合って竹材の劣化を促進させると考えられる。

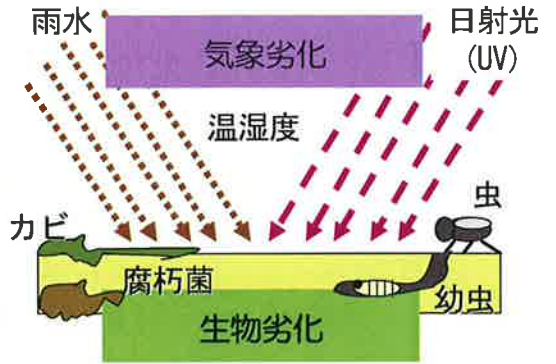


図 1.1.1 竹材の劣化因子¹⁾

これらの劣化因子が竹材に与える影響を大別すると表 1.1.1 のように強度低下と美観低下に区分することができる。竹材は、その形状からしても中空のため耐久性を期待できない材料であることから、屋外利用においては例えば竹垣などであり、強度低下が致命傷となるような用途での利用は少ない。つまり、従来の用途は、一定期間その機能を果たせば、朽ち果てることを長所とした取替えができる消耗品的用途での利用が行われてきたと考えることができる。今後、竹材を強度的な高耐久性を必要とする屋外での構造材や接地外構材として利用するならば、木材同様に防腐・防虫処理や寸法安定化処理が必要となる。

一方の美観低下は、主に竹材の屋外利用における重要な技術課題であり、特に日射光による表層剥落と生物劣化のカビ汚染は、竹材の美観を 1 年足らずのうちに著しく損ねている^{2,3)}。この美観低下は、主に日射光とカビの複合した外的作用によって、竹材表層が影響を受けたものとして捉えることができ、美観低下を抑制する表面処理技術を検討する必要がある。

表 1.1.1 竹材の劣化因子とその影響

因子 影響	生物劣化			気象劣化		
	カビ	虫	腐朽菌	日射光(UV)	雨水	温湿度変化
強度低下	—	食害侵食	組織分解	—	成分溶脱	膨潤収縮割れ
美観低下	表層汚染	侵入脱出孔痕	—	表層風化剥落	溶出・塵汚染	—

1.1.2 竹材の気象劣化

竹材の気象劣化では、日射光に含まれる紫外線の影響が大きい。地上に到達する紫外線は一般的に 300~400nm といわれているが、300nm 付近の短波長はエネルギーが強く、リグニンなどが光分解の主役と考えられている⁴⁾。竹材の表皮に紫外線を照射すると、化学的には C-C 結合が光分解し、C=O 結合等の光酸化が増加するとともに、写真 1.1.1 のように表層の組織の粗化やクラックが生じる⁵⁾。このようなことから、表層における紫外線の光化学反応による分解は、剥落風化を引き起こすと考えられる。

雨水や温湿度も、水分と熱と捉えれば光酸化反応を促進する働きを持つとされ、日射光との

複合作用が劣化機構を複雑なものとしている。竹材においても、紫外線照射で表層が粗化されると、それまで疎水性であった表皮面が水のぬれ広がる性質を示し親水性となる⁵⁾。ぬれ広がることと剥落が重なり、組織成分の溶脱、水分の滞留、温湿度変化による竹材の膨潤や収縮が起こる。その結果、竹材内に応力が発生し基材割れも起こると考えられる。

1.1.3 竹材の生物劣化とその要因

竹材において、木材に比べて顕著な劣化因子は生物劣化であるとされ、その要因としては、竹材の組織と成分組成が、木材と異なった状態で構成されているためであると推察することができる。

写真 1.1.2 に示すように、竹材の組織⁶⁾は表皮側ほど靱皮繊維の集合体である維管束細胞の面積密度が高く、逆に内皮側内層部は柔細胞組織の面積比が高くなる。この柔細胞組織中には水溶性成分である糖分やでんぷん⁷⁻⁹⁾が木材のそれに比べて多く、これらの成分がカビや竹材を食害する乾材害虫の栄養源となるとともに、高温多湿な環境下では材中に水分を吸湿し、カビや腐朽菌の発生しやすい環境条件をつくるものと考えられる。

また、竹材中の糖分やでんぷんの含有率は、季節変動することが確認されており、地域によって前後するが、図 1.1.2 に示すようにマダケで 6 月頃¹⁰⁾、モウソウチクは 3 月頃¹¹⁾が、これらの最も多い時期とされ、最大で糖分 10w%前後、でんぷん 8w%前後となる¹⁰⁻¹²⁾。この竹材種による時期の差は、竹の発筍期の違いに由来すると考えられ、含有率が少ない時期は、マダケでは 12 月頃、モウソウチクでは 9 月頃と考えられている。

カビは、高温多湿となる梅雨期～夏にかけて、吸湿性の糖分とでんぷんを栄養源として多く発生する。カビの発生する限界温湿度と竹材含水率の関係は、湿度 70%で、30℃の場合における含水率 11%付近にあると推定される¹³⁾。竹材に発生するカビについては、岩本らが発生する菌種¹⁴⁾、発生しやすい竹材部位¹⁴⁾、発生環境としての温湿度の影響¹³⁾、pH との関係¹⁵⁾、防カビ効力¹⁶⁾、竹材成分との関係⁷⁾等について報告している。また、スギやベイツガ等の針葉樹と比べ、ゴムノキやモウソウチクはカビ感受性が顕著とした報告¹⁷⁾もある。

竹材を食害する乾材害虫¹⁸⁾は、チビタケナガシクイ、タケトラカミキリ、ヒラタキクイムシが代表的なものである。その生育環境として温度 20℃以上となる季節の 4～8 月の間に成虫となって竹材内部から飛び出して活動し、再び竹材中に産卵する。虫害は、主に成虫による穿孔と写真 1.1.3 に示す孵化した幼虫による内部食害である。竹材の代表的な乾材害虫であるチ



写真 1.1.1 紫外線による表層粗化⁵⁾

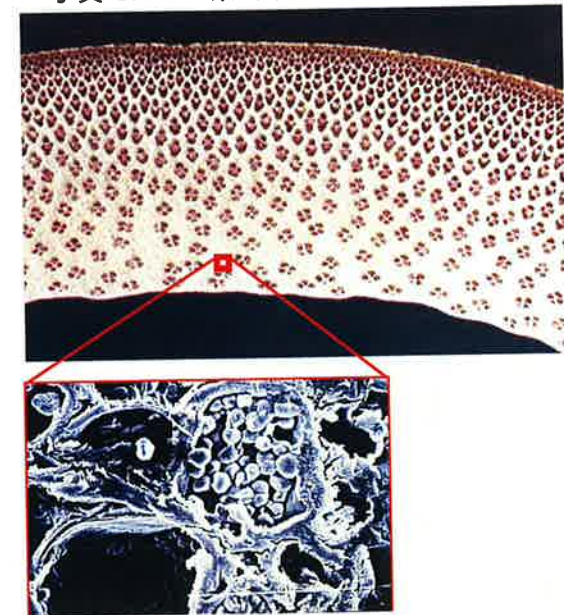


写真 1.1.2 柔細胞組織中のでんぷん

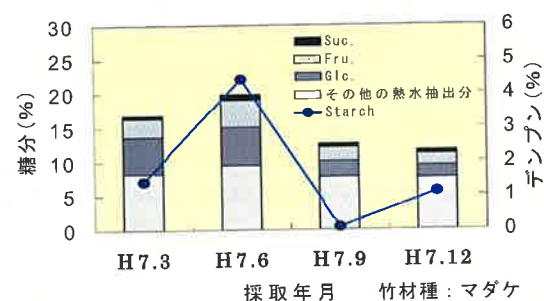


図 1.1.2 糖分・でんぷんの季節変動¹⁰⁾

ビタケナガシクイの場合、卵は 3～7 日間で孵化し幼虫となり、幼虫は平均 41 日間食害し、その間に 4 回脱皮して蛹になる。この蛹は約 4 日間で成虫となるが、成虫となって約 3 日間後には材を食害し始め、卵より成虫が出現するまでの期間は平均 51 日間という報告¹²⁾がある。また井上¹²⁾は、竹材中の遊離糖やでんぷんを栄養源として消化し、消化できないセルロースなどを粉末にして排出している。

季節変動する竹材中の糖分やでんぷんの含有率と図 1.1.3 に示すように採取月別竹材でチビタケナガシクイの食害評価結果¹⁹⁾の相関は高く、特にでんぷんは最も食害に関係¹²⁾すると考えられている。これらのことは、竹材を使用してきた職人の方々が語る「竹は秋に伐れば、虫がつかない」という経験則とほぼ一致している。

腐朽菌は、カビとは異なり竹材内部に侵入し、主にセルロースやヘミセルロースの分解吸収を行うものを褐色腐朽菌と総称し、リグニンも含めて分解するものを白色腐朽菌と呼ぶ。マダケ油抜材の腐朽による重量減少率は、褐色腐朽菌のオオウズラタケで約 11.3%、白色腐朽菌のカワラタケで約 16.5%であり²⁰⁾、木材ではスギ、カラマツ、ラジアタパインの辺材部と同程度²¹⁾とされ、耐朽性は屋外で 2.5 年以下に区分される。また、白色腐朽菌のウスバタケによる竹材部位別の腐朽性についてモウソウチクを用いて実験した結果、半径方向では内部が腐朽しやすく、繊維方向では竹稈の中上層部が腐朽しやすいという報告²²⁾もある。実際、直接土壌中にマダケ丸竹材を長さの半分程度まで埋没させ接地したステークテストにおいては、写真 1.1.4 のように地中部よりも地際部の白色腐朽が激しく 2 年程度で折れてしまう²³⁾。

以上のように竹材の生物劣化は、一般的な木材とは異なる一軸傾斜性を有する組織及び柔細胞中の糖分やでんぷんなどの成分組成と季節変動する含有率の影響を無視することはできず、竹材を利用する上では、それらが竹材特有のカビ、虫害、腐朽の発生要因となることを充分理解しておく必要がある。

1.1.4 生物劣化を抑制する処理技術の現状と課題

従来、竹材のカビ、虫害、腐朽などの生物劣化を抑制する処理技術の多くは、一部竹材用に検討された薬剤処理プラント²⁴⁾などを除いて、各種薬剤効力及び処理方法などを含め、木材における各種薬剤処理技術を参考として、竹材への適用の検討がなされてきた。

薬剤としては、有機錫系や塩素化フェノール系の防かび剤や砒素やクロムを含む防腐防虫剤等の使用及び販売の規制によって、これに替わる各種新規薬剤が実用化されている。これらの多くは木材使用を目的として開発されたもので、有効成分は低毒性でありながら、抑制効力は

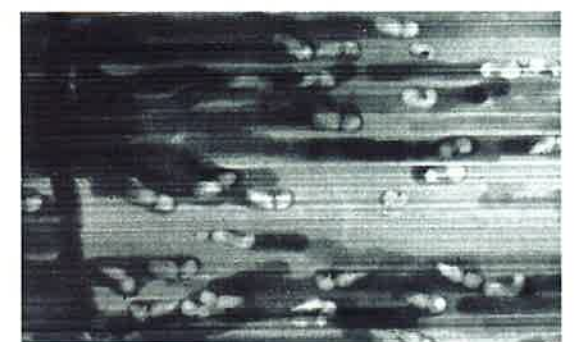


写真 1.1.3 竹材中を食害する幼虫¹⁹⁾
供試虫:チビタケナガシクイ(X線写真)

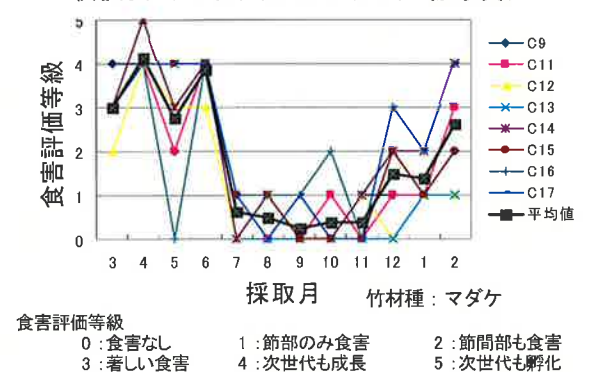


図 1.1.3 採取月別竹材と食害の関係¹⁹⁾
供試虫:チビタケナガシクイ



写真 1.1.4 ステークテスト
における腐朽

従来品と同程度とされているが、竹材における使用濃度や処理条件についての詳細な検討はほとんどされていないことが多い。例えば製竹所では、防カビや防虫を目的とした薬剤を指定濃度とした薬液中に浸漬して処理する方法が一般的に行なわれているが、竹材の浸漬処理も木材に準じた浸漬時間で木材同様の吸収量があると思われるがちである。しかし、供試材料寸法を繊維方向5×接線方向2×半径方向0.5-0.8cmとした含水率約50%の青竹と約10%の油拔竹を指定濃度の防カビ薬液中に浸漬処理した結果、浸漬時間10分の見かけ上の薬液吸収量は、青竹で約0.1g未満、油拔竹で約0.2g前後となり、拡散吸収量を考慮しても、木材でカビが発生しやすいとされている南洋材同等以下であった。これは、薬液が有効成分の実効濃度(a.i)に達したとは言いがたく、JIS Z 2911:1981 カビ抵抗性試験においても比較した市販防カビ剤6種のうちカビの発育が認められなかった薬剤は、油拔竹に浸漬した1種のみ²⁰⁾であった。このことから、竹材における薬剤の抑制効力を期待するためには、薬液の吸収量を高める処理方法を再検討する必要があることを示唆している。

また、竹材の内部を食害する乾材害虫や組織を分解する腐朽菌の場合は、竹材の内部組織中に薬剤を注入する必要があることから、加圧注入法による竹材の注入性の検討を行なって、毛細管浸透式に高い相関を示すことや図1.1.4に示すとおり竹材の含水率、形状と注入量の関係が報告²⁵⁾されている。

さらに、ホルムアルデヒドやVOCガス等の発生を伴う薬剤については、近年使用する用途や製品が限られ、室内等の内装建築部材としての使用は事実上困難となっている。よって薬剤処理技術は、今後、薬剤選択、薬剤濃度、処理方法等を総合的に検討した上で、限定された用途や製品のためにのみ使用される方向に向かうと考えられる。

薬剤処理技術以外の竹材における新たな処理技術としては、生物劣化の要因となる糖分やでんぷんを抽出処理によって除去し、JISに準拠したカビ抵抗性試験の結果、カビ抑制効果は認められたが、供試菌全ての発生を抑制することはできなかったとする報告²⁶⁾や化学修飾処理の一つであるアセチル化処理による防虫効果を検討し、アセチル化重量増加率10%以上で実用上十分な防虫効果が得られたとする報告^{27,28)}、さらに樹脂注入処理として低分子量フェノールを用いてその防虫効果を検討した報告^{29,30)}などがある。

いずれの処理技術にしても、現状では、竹材の用途や製品に付加したい抑制効果の程度によって、さらに詳細な検討を行なうことが求められているだけでなく、実用化までに処理コストをはじめとする経済性等についても改善し向上しなければならない課題が残されている。

1.1.5 建築ボード等における生物劣化の研究と技術確立

近年、竹材をできるだけソリッドな形状のまま利用してきたこれまでの用途や製品と異なり、竹材を木質ボード類の木材代替資源として捉えて、竹積層材フローリングや竹パーティクルボード等のエレメント化した形状で工業的な建築ボード等の製造を検討する技術開発や研究開発が、各地でさまざまに取り組まれる状況となっている。

これら竹材をエレメント化して利用する用途や製品におけるカビや虫害などの生物劣化及びその抑制処理技術の検討は、中国製竹集成材に施された各種処理について防虫効果を調べた報告³¹⁾がある程度で、これまでほとんど行なわれていない。

これまで生物劣化が顕著とされた竹材を工業的に利用する上では、エレメント化する工程で生物劣化の要因とされる組織や成分組成等の処理を行なうことが比較的簡易になることから、

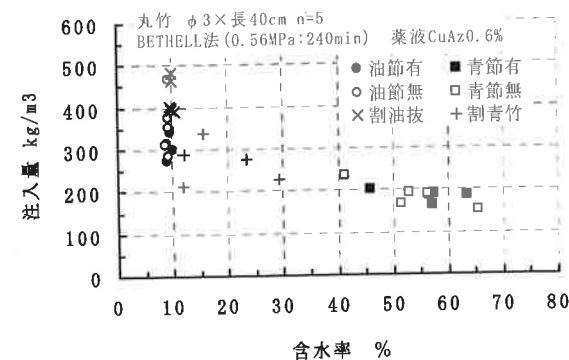


図 1.1.4 各種竹材の加圧注入量²⁵⁾

特に糖分やでんぷんなどの要因成分を抽出除去する処理技術などが、今後、積極的に開発され、処理条件等を含めてその抑制効果を検討することが重要となる。そのためには、製品性能試験としても準用できる試験法を含めた研究を継続しながら、生物劣化の抑制に関する技術の確立を目指すことが重要である。

1.1.6 文献

- 1) 小谷公人, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター平成 11 年度研究報告, 137-142(2000)
- 2) 小谷公人, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター平成 9 年度研究報告, 139-144(1998)
- 3) 小谷公人, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター平成 10 年度研究報告, 157-160(1999)
- 4) 木口 実: 木材保存, 19, 262-271(1993)
- 5) 小谷公人, 川村二郎: *Bamboo J.*, 13, 79-83(1995)
- 6) 木材工業ハンドブック, 林業試験場編, 丸善, 910(1959)
- 7) 岩本博道, 志賀正幸: 発酵研究所報告, 14, 17(1958)
- 8) 衛藤武一, 他 3 名: 大分県別府産業工芸試験所昭和 54 年度技術開発研究費補助事業普及講習会用テキスト, 22(1980)
- 9) 森田慎一: *Bamboo J.*, 3, 77(1985)
- 10) 二宮信治, 他 3 名: *Bamboo J.*, 15, 48-55(1998)
- 11) 善本知孝, 森田慎一: 東京大学農学部附属演習林報告, 74, 9-15(1985)
- 12) 井上嘉幸: 木材保存, 17, 180-184(1962)
- 13) 岩本博道, 他 2 名: 発酵研究所報告, 13, 11-19(1957)
- 14) 岩本博道, 栗原一男: 発酵研究所報告, 11, 125(1955)
- 15) 岩本博道, 他 2 名: 発酵研究所報告, 13, 21(1957)
- 16) 岩本博道, 他 2 名: 発酵研究所報告, 14, 1 (1958)
- 17) 王 体科, 他 4 名: 木材保存, 15, 33(1989)
- 18) 木材保存の知識: 日本木材保存協会編, 日本木材保存協会, 55-57(1986)
- 19) 衛藤武一: 竹編組技術資料集 応用編, 大分県別府産業工芸試験所編, 大分県, 78-84(1992)
- 20) 小谷公人, 他 2 名: 大分県産業科学技術センター平成 7 年度研究報告, 106-111(1996)
- 21) 木材加工技術ハンドブック, 奈良県林業試験場編, 奈良県林業試験場, 269(1991)
- 22) 芝本武夫, 井上嘉幸: 東京大学農学部附属演習林報告, 47, 189(1954)
- 23) 小谷公人: 未発表資料(1998)
- 24) 薬剤の真空加圧注入による銘竹の防虫効果, 近畿銘竹防虫協議会(1997)
- 25) 小谷公人, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター平成 8 年度研究報告, 113-118(1997)
- 26) 二宮信治, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター平成 8 年度研究報告, 50-55(1997)
- 27) 二宮信治, 他 1 名: 大分県産業科学技術センター平成 11 年度研究報告, 133-136(2000)
- 28) 二宮信治: 大分県産業科学技術センター平成 13 年度研究報告, 109-114(2002)
- 29) 二宮信治, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター平成 14 年度研究報告, 103-107(2003)
- 30) 二宮信治, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター平成 15 年度研究報告, 77-81(2004)
- 31) 二宮信治, 他 1 名: 大分県産業科学技術センター平成 12 年度研究報告, 127-131(2001)

1.2 竹材における防虫性試験法の開発

1.2.1 研究の目的

竹材は竹稈柔細胞内にでんぷんや遊離糖などを含有しているため、生物劣化の生じやすい素材である。特に乾材害虫による食害は、一度発生すると破壊的となるため、その対策は必要不

可欠である。木材においては、シロアリやヒラタキクイムシなどの害虫を対象とした食害抵抗性試験法に関する規格、規約^{1,2)}が確立されているのに対し、竹材には存在しない。そこで、竹材における防虫性試験法について検討を行うこととした。対象となる害虫は、竹材の代表的な乾材害虫であるチビタケナガシクイ(*Dinoderus minutus* (Fabricius))である(写真1.2.1)。チビタケナガシクイの生態に関する文献調査、人工飼育環境下(恒温恒湿器内)での飼育・増殖の経験をもとに、日本木材保存協会の木材の防虫性試験法²⁾を参考に検討を行った。



写真 1.2.1 チビタケナガシクイ

1.2.2 竹材の防虫試験法の確立

チビタケナガシクイの生態や食害特性に関する調査、各食害試験法の評価結果などを比較検討して、図 1.2.1 に示すような竹材の防虫性試験法の開発を行った。試験は、無処理試験片(control)と処理試験片を一对として供試虫にどちらかの穿孔食害を選択させる[個別選択試験]と、各試験片を単独とし供試虫が穿孔食害する対象が強制されている[個別強制試験]の2法を定めた。供試虫は人工試料(そば粉を水練りして半紙に包んで気乾状態にしたもの)にて飼育した活性の高い成虫を用いることとし、一試験片当りの投入数は20頭とした。恒温恒湿器内28℃75%RHで飼育し28日間(4週間)を食害期間とした。この期間が経過した時点で食害穿孔痕数(個)及び試験片重量を測定し、平均重量減少率(%)を算出する。さらに6カ月間、1カ月おきに第二世代の発生状況を調査するため平均発生成虫数(頭)、平均重量減少率(%)を測定する。本試験名は「処理竹材の食害抵抗性試験方法」である。

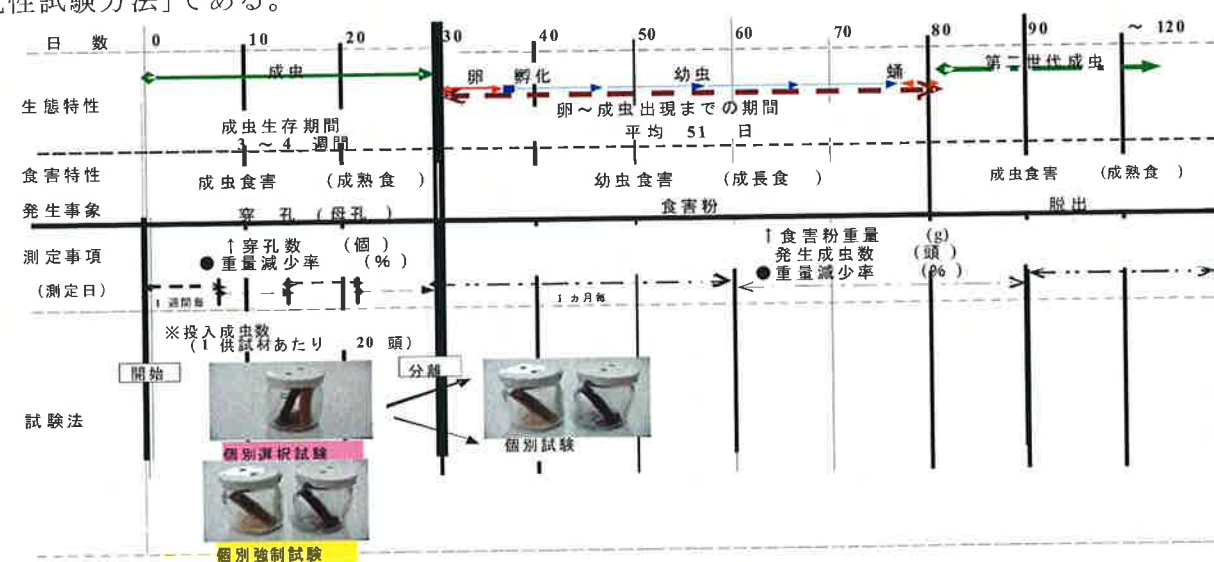


図 1.2.1 処理竹材の食害抵抗性試験方法の概略図

1.3 加圧蒸気処理した竹材の生物劣化抑制

1.3.1 研究の目的

防カビ防虫剤等の薬剤を使用せずに竹材に生じるカビや虫害などの生物劣化を制御する技術として、加圧蒸気処理が効果³⁻⁵⁾を持つとの報告がある。要因として、生物劣化の主要因である竹材中のでんぷんや遊離糖等の成分が溶脱・変化しているものと考えられた。生物劣化抑制に効果のある加圧蒸気処理条件を見出すため、新たに圧力・温度及び処理時間等をパラメーター

として竹材を処理し、でんぷんの成分分析と乾材害虫による食害抵抗性試験を行った。

1.3.2 実験方法

供試竹材は、3月伐採の大分県産モウソウチクと5月伐採の大分県産マダケの中からヨード呈色反応によりでんぷん含有量の比較的高いものを選択して用いた。試験片は、供試竹材の同一部位からの2枚を作製することとした。すなわち無処理(control)用として1枚と処理用として1枚を取り、割竹状(W40×H8-12×L120mm)に試験片を作製した。

加圧蒸気処理は、大分県竹芸・訓練支援センター(別府市)に設置の加圧蒸気処理装置(写真1.3.1)を用いた。装置の昇圧時間と昇温時間にタイムラグが生じたため本実験では、処理開始時間は所定圧力到達時点とした。処理時間は30、60分とし、処理圧力(温度)は0.3MPa(130℃)、0.5MPa(150℃)、0.7MPa(165℃)の3条件、処理条件を比較する目的で常圧蒸煮処理(100℃)及び0.5MPaの水熱処理(液相)も加え、計5条件とした。処理の途中にドレイン排気は行わなかった。



写真 1.3.1 加圧蒸気処理装置

各条件で処理された試験片及び無処理試験片は、寸法W40×H8-12×L100mmに加工し、8日間風乾後、7日間以上28℃75%RHの恒温恒湿器内で調湿した。

チビタケナガシクイによる食害抵抗性試験は、1.2.2に記載の方法で実施した。モウソウチクについては[個別選択試験]で、マダケについては[個別強制試験]で行った。

でんぷんの分析は、試験片の一部を小片化し、その約1gをカッターミル式粉碎機(回転数25000rpm)で粉末状にしたものをエタノールで遊離糖を抽出した後、残渣からでんぷんを過塩素酸で抽出、さらに加水分解して測定溶液を調整した。測定は、測定溶液をグルコースC-IIテスト(和光純薬工業(株)製)により呈色させ、比色計にて吸光度を測定しグルコース量を求め、これに0.9を乗じてでんぷん含有量(w%)とした。でんぷん含有に換算した場合の検出限界は、0.1w%であった。

1.3.3 結果及び考察

竹材の加圧蒸気処理条件と食害抑制の関係を表1.3.1に示す。4週後の成虫食害の状況については、食害穿孔数(頭)及び重量減少率(%)では、明確な優位性は見出せなかった。しかし、加圧蒸気処理の圧力(温度)を高くするほど、穿孔痕数及び重量減少率ともに減少する傾向を示した。次世代の発生状況を調査する内部食害試験では、無処理材からは幼虫食害に起因する重量減少や脱出した第二世代成虫の大量発生が確認されたのに対し、加圧蒸気処理材からは、処理時間に関係なく幼虫に起因する食害粉の発生及び第二世代成虫の発生も少量となった。中でも0.7MPa(165℃)にて処理した竹材については最も効果の高い値を示した。水熱(液相)処理についても、加圧蒸気処理材と同様に成虫による食害及び第二世代成虫の発生について低減できる結果を示した。

でんぷん含有量の状況を図1.3.1に示す。加圧蒸気処理を行っても無処理材と同程度であり、処理時間による含有量の変化も認められなかった。これらの結果は、割竹状のソリッド竹材に単に加圧蒸気処理を実施しても、でんぷんの溶脱や変化は少なく、よって、成虫食害による穿孔等の被害は少なからず受けることを示した。しかし、加圧蒸気処理した竹材では成虫食害後の幼虫の内部食害を抑制する可能性を示していることから、でんぷん量の変化以外の要因

が次世代抑制に影響しているものと考えられた。

表 1.3.1 竹材の加圧蒸気処理条件と食害抑制の関係

竹材処理条件		竹材			
		成虫食害試験 (4週後)		内部食害試験 (6ヶ月後)	
処理	圧力 (MPa) 時間 (min)	穿孔痕数 (個)	重量減少率 (wt%)	発生成虫数 (頭)	重量減少率 (wt%)
無処理		25 - 40 - 60	1.9 - 4.6 - 7.6	20 - 106 - 154	14.5 - 50.9 - 67.1
蒸気処理	常圧 30	29 - 34 - 36	3.8 - 5.3 - 6.6	32 - 80 - 127	36.3 - 44.0 - 51.7
	60	22 - 32 - 44	3.0 - 4.5 - 6.5	95 - 101 - 106	50.1 - 56.8 - 63.6
	0.3 30	24 - 29 - 32	2.2 - 3.5 - 4.9	6 - 8 - 10	4.0 - 8.6 - 13.2
	60	32 - 40 - 49	1.6 - 2.6 - 3.1	6 - 9 - 11	2.6 - 4.3 - 5.9
	0.5 30	14 - 22 - 28	1.7 - 2.9 - 4.5	2 - 3 - 3	1.5 - 2.2 - 2.8
	60	19 - 24 - 29	1.3 - 2.0 - 2.8	3 - 8 - 12	0.9 - 3.2 - 5.4
	0.7 30	13 - 20 - 25	1.8 - 2.4 - 3.2	1 - 1 - 1	0.5 - 1.4 - 2.3
	60	23 - 28 - 32	1.3 - 1.6 - 2.0	3 - 4 - 4	1.3 - 1.7 - 2.1
水熱処理	0.5 30	14 - 16 - 21	1.9 - 3.0 - 4.5	3 - 4 - 5	2.1 - 2.9 - 3.8
	60	7 - 11 - 16	1.4 - 1.5 - 1.6	0 - 3 - 6	1.6 - 1.6 - 1.6

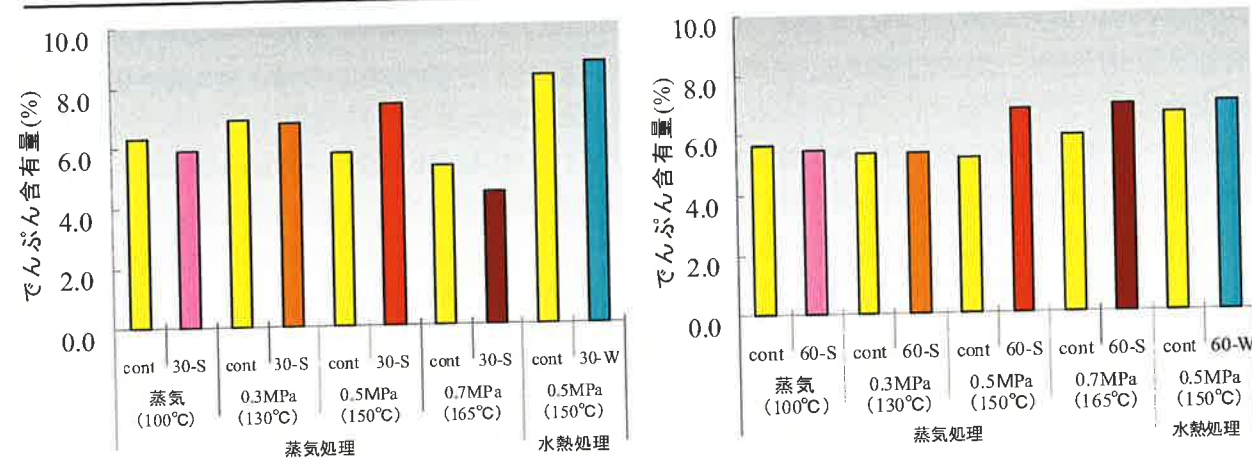


図 1.3.1 各種加圧蒸気処理条件のでんぷん含有量

1.3.4 文献

- 1) 日本規格協会: JIS K 1571 木材保存剤の性能試験方法及び性能基準(2004)
- 2) 社団法人日本木材保存協会: 木材保存の知識, 244-261(1986)
- 3) 二宮信治, 他 3 名: *Bamboo J.*, 15, 48-55(1998)
- 4) 二宮信治: 大分県産業科学技術センター平成 12 年度研究報告, 125-126(2001)
- 5) 二宮信治, 他 1 名: *Bamboo J.*, 18, 63-69(2001)

1.4 加圧蒸気処理竹材を原料とした竹パーティクルボードの生物劣化抑制

1.4.1 研究の目的

生物劣化抑制効果が高く、ボード用のエレメント(粉碎原料)として適用可能な加圧蒸気処理条件や粉碎加工条件を確立することを目的に、0.7MPa(165°C)の加圧蒸気処理をした竹材を、乾式粉碎または湿式粉碎したエレメントを用いて竹パーティクルボード(以下、竹ボードという)を製作、チビタケナガシクイによる食害抵抗性試験、JIS に準じたシロアリ(防蟻性能)試験及びカビ(カビ抵抗性)試験を実施した。生物劣化抑制と成分の関係や竹ボードの物性との関係について検討した。

1.4.2 実験方法

供試竹材は、3 月伐採の大分県産モウソウチクの中からヨード呈色反応によりでんぷん含有

量の比較的高いものを選択して用いた。試験片は、各供試竹材の同一部位から 6 枚を作製することとした。すなわち無処理(control)用として 2 枚と処理用として 4 枚を取り、割竹状(W 40×H 8-12×L 1000mm)に試験片を作製した。

加圧蒸気処理は、大分県竹工芸・訓練支援センター(別府市)に設置の加圧蒸気処理装置(写真 1.3.1)を用いた。本実験では、処理圧力(温度)は 0.7MPa(165°C)とし処理開始時間は圧力到達時間とした。処理時間は 30、60 分とし、処理途中約 10 分置きにドレイン排気を行なった。加圧蒸気処理時のスケジュールを図 1.4.1 に示す。加圧蒸気処理後は、室内にて 1 カ月以上養生乾燥させた。

エレメント製造(粉碎加工)は、試験片を長さ方向に約 50mm に切断した後、目開き 10mm スリットのカッティングミルにて一次粉碎した(乾式粉碎: 写真 1.4.1)。さらに一次粉碎したエレメントに十分な水分を加え 60 分以上なじませた後、クリアランス 2mm のディスクリファイナーにて流水しながら二次粉碎した(湿式粉碎: 写真 1.4.2)。その後 60°C の熱風乾燥器で 3 日間乾燥した。なお、加圧蒸気処理 60 分のエレメントは団子状になりやすかったため、さらに目開き 10mm スリットのカッティングミルにて粉碎した。

得られたエレメントは、接着剤(水溶性フェノール樹脂接着剤・樹脂率 43%)と混合し、各条件につき 2 枚ずつ製板した(設計厚さ 12mm、設計密度: 0.6g/cm³、0.8g/cm³)。原料全乾重量に対して 20% の水分を添加し、接着剤(RC=10%)を原料に吹き付けた後、手作業でフォーミングし、ストップバーを用いて熱圧製板した。作製スケジュールを図 1.4.2

に示す(圧縮温度: 180°C、圧縮時間 15min)。

生物劣化の評価のうち、チビタケナガシクイによる実験は 1.2.2 に記載の[個別強制試験]方法により実施した。

シロアリによる実験は、JIS K 1571 木材保存剤の性能試験方法及び性能基準に記載の防蟻性能試験に準じて実施した。試験体は寸法が W 20×L 20mm で、規格では実施することになっている耐候操作(25°C 水中で 8 時間かくはん後、60°C の循環式乾燥機中で 16 時間乾燥。この操作を 10 回繰り返す)は行わず気乾状態とした。飼育容器 1 個に職蟻 150 頭と兵蟻 15 頭を投入し、温度 28°C の暗所で 21 日間飼育した。食害評価項目は質量減少率(%)とした。

かび抵抗性試験は、JIS Z 2911 かび抵抗性試験方法に準じて行った。試験体は寸法が W 30×L

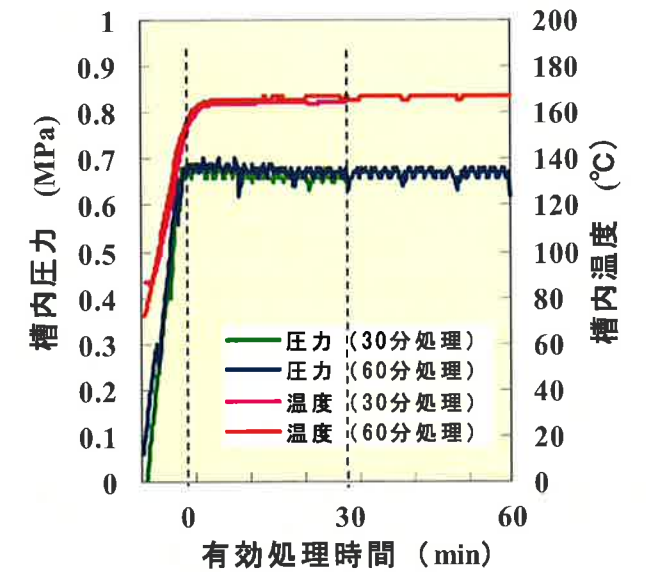


図 1.4.1 加圧蒸気処理のスケジュール(0.7MPa)



写真 1.4.1 カッティングミル



写真 1.4.2 ディスクリファイナー

30mm で、5 種のかびを混合した孢子懸濁液を試験体表面に噴霧器で吹き付け、水で湿したろ紙を敷いたシャーレに入れ、蓋をして 28℃の恒温器内で 4 週間培養した。評価項目は菌糸の発育状況の 3 段階評価及び発育面積比率(%)とした。

竹ボードの物性は、硬さ試験にて調べた。JIS Z 2101 木材の試験方法の硬さ試験を参考にした。寸法が W 20×L 20mm の試験体の表面または側面に直径 10mm の鋼球を圧入速度毎分約 0.5mm で圧入させ、硬さを求めた。

エレメントの成分分析は、でんぷん、遊離糖、有機酸及び PH について実施した。各エレメント全量をミルミキサーで粉碎し、良く混合したものを試験片とした。でんぷんの分析は、試験片約 1g を精秤し 80%(V/V)エタノールで遊離糖を抽出した後、F-キット スターチ(ロシュ製)を使用して測定した。そして測定後、質量と含水率の補正を行った。遊離糖及び有機酸の分析は、試験片約 1g を精秤し、H₂O を 10ml 加え 30 分間抽出後、サンプル 900μl に 20%スルホサリチル酸 100μl を加え、高速液体クロマトグラフィーで測定した。そして測定後、質量と含水率の補正を行った。PH の分析は、試験片 1g を精秤し、H₂O を 10ml 加え 30 分間抽出後、測定した。

1.4.3 結果及び考察

各種処理した竹ボードの食害抵抗性試験の結果(チビタケナガシンクイ)を表 1.4.1 に示す。4 週後の成虫食害の状況については、重量減少率はどの条件の竹ボードも 0.0~1.9(%)と同様な値を示し明確な優位性は見出せなかった。しかし、穿孔痕数は無処理のエレメントを使用したものは多く、加圧蒸気処理したエレメントは減少する傾向を示した。粉碎方法による違いについては、乾式粉碎したエレメントに比べ湿式粉碎の方が、穿孔痕数が少なくなる傾向を示した。また、竹ボードの密度の違いについては、設定密度 0.6g/cm³ の竹ボードに比べ 0.8g/cm³ の竹ボードの方が、穿孔痕数が少なくなる傾向を示した。

表 1.4.1 各種処理した竹ボードの食害抵抗性試験の結果

竹材処理条件		ボード密度 (g/cm ³)	竹パーティクルボード		成虫食害試験 (4週後)		内部食害試験 (12週後)	
			処理条件	粉碎方法	穿孔痕数 (個)	重量減少率 (wt%)	発生成虫数 (頭)	重量減少率 (wt%)
0.7MPa	無処理	0.62	乾式		48 - 97 - 127	1.3 - 1.9 - 2.6	0	1.7 - 1.7 - 1.8
		0.83	乾式		10 - 24 - 35	0.0 - 0.7 - 1.3	0	0.0 - 0.1 - 0.2
		0.65	湿式		17 - 43 - 60	0.5 - 0.9 - 1.3	0	0.5 - 0.6 - 0.7
		0.87	湿式		9 - 11 - 13	0.3 - 0.6 - 1.0	0	0.4 - 0.4 - 0.4
30分処理	湿式	0.87			2 - 9 - 13	0.1 - 0.1 - 0.1	0	(0.7) - (0.3) - 0.1
		0.66	乾式		11 - 18 - 29	0.7 - 1.4 - 2.1	0	0.9 - 0.9 - 1.0
60分処理	乾式	0.89			11 - 14 - 17	(0.1) - 0.0 - 0.0	0	(0.9) - (0.6) - (0.3)
		0.67	湿式		3 - 8 - 12	0.2 - 0.5 - 0.8	0	0.2 - 0.3 - 0.5
		0.88	湿式		0 - 3 - 5	0.2 - 0.4 - 0.6	0	0.2 - 0.2 - 0.2

穿孔痕が存在するのに係わらず重量減少率が比較的低かったのは、かじった程度の穿孔痕が多く、その穿孔深さも比較的低かったためであると思われる。成虫が穿孔途中で他の部位に移

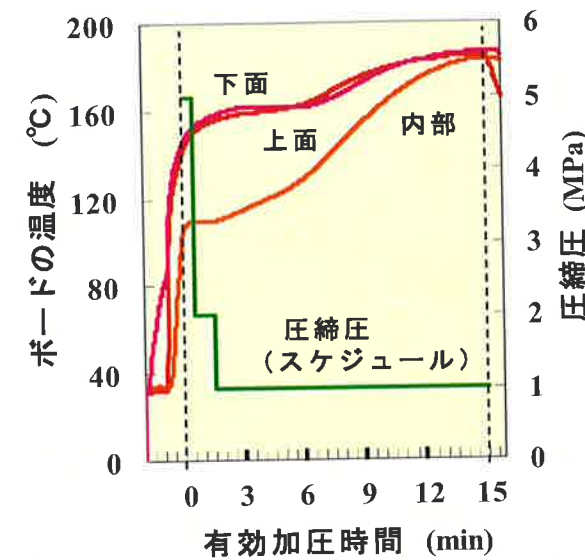


図 1.4.2 竹ボード製作スケジュール

動したか、あるいは完全に食害を諦めてしまったものと考えられる。比較的食害被害の少なかった加圧蒸気処理したエレメント及び湿式粉碎したエレメントは、何らかの竹材中の成分が溶脱・変化していることが影響しているものと考えられ、また設定密度 0.8g/cm³ の竹ボードは、ボード硬さに影響しているのではないかと考えられる。

第二世代の発生状況を調査する内部食害試験では、どの条件の竹ボードも幼虫食害に起因する重量減少はほとんど無く、また第二世代成虫の発生も確認できなかった。成虫による穿孔が確認されても、産卵し幼虫となって増殖する際の内部食害の進行がなく、第二世代成虫が発生しなければ、チビタケナガシンクイによる生物劣化はある程度抑制できるものと判断できた。

図 1.4.3 にシロアリの食害試験の結果を示す。3 週後の質量減少率は、比較対照のスギ辺材に比べ各種竹ボードは約 1/2~1/4 程度抑制される値を示した。竹ボードの密度の違いについては、設定密度が 0.6g/cm³ の竹ボードに比べ 0.8g/cm³ の竹ボードの方が低くなる傾向を示した。エレメントの加熱蒸気処理の有無については、無処理の方が低くなる傾向を示し、また粉碎方法については、乾式粉碎の方が低くなる傾向を示した。今回実験に供した竹ボードでは、60 分処理、湿式粉碎、設定密度 0.6g/cm³ の条件で作製した竹ボードにおいて最も被害の高い値を示した。

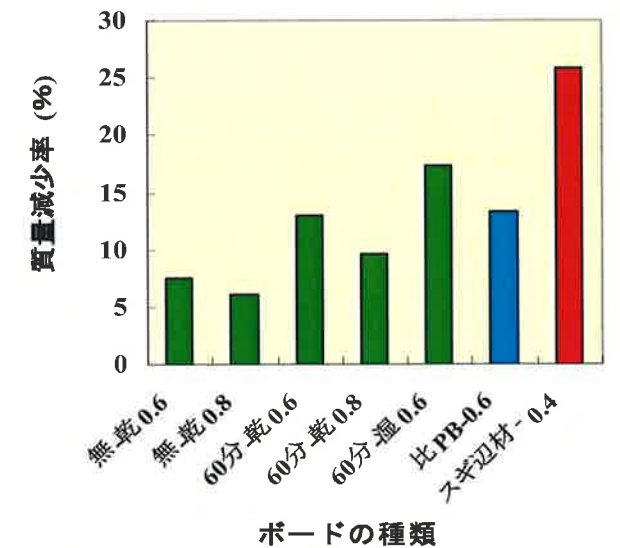


図 1.4.3 シロアリ食害状況(3 週後)

シロアリは一般的に硬い材より軟らかい材を好んで加害する習性¹⁾がある。よって密度の高い竹ボードより低い竹ボードを好む傾向がみられた。エレメントの違いについては、無処理材で乾式粉碎したもので被害が抑制される傾向を示したが、一つ一つのエレメントの形状が粗い小片形をしているために食害を拒む要因になっているものと考えられる。一方加圧蒸気処理材で湿式粉碎したものは、一つ一つのエレメントが微細な繊維形状をしているためにかえって食害しやすくなっているものと考えられる。

図 1.4.4 にかび抵抗性試験の結果を示す。4 週後の菌糸発育面積割合(%)は、比較対照の市販パーティクルボードに比べ約 1/7~2/3 程度抑制される値を示した。無処理のエレメントに比べ加圧蒸気処理したエレメントは低下する傾向を示した。また、粉碎方法による違いについては、乾式粉碎したエレメントに比べ湿式粉碎の方が低くなる傾向を示した。以上の結果から、加圧蒸気処理材(0.7MPa 60 分)を湿式粉碎したエレメントは、かびの発育を抑制することが認められた。

表 1.4.2 に竹ボードの物性(硬さ)の結果を示す。設定密度 0.6g/cm³ の竹ボードに比べ設定密度を 0.8g/cm³ とした竹ボードにおいて高い

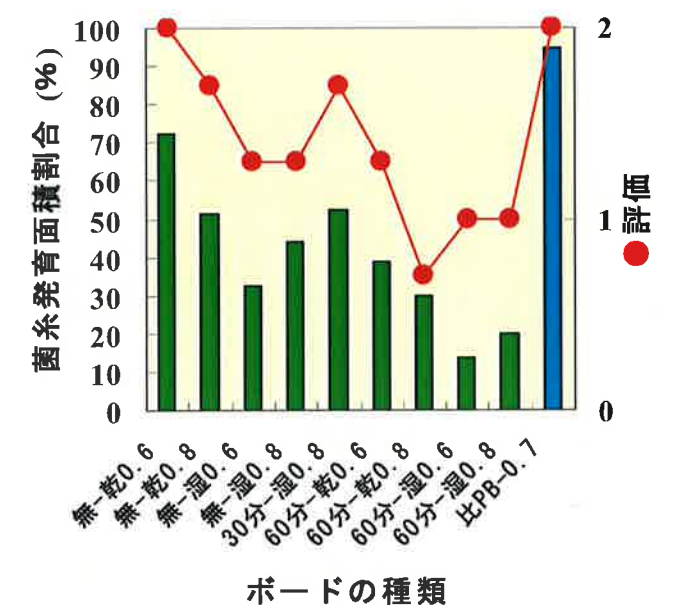


図 1.4.4 かび抵抗性試験の結果(4 週後)

値を示した。チビタケナガシクイ及びシロアリの食害試験結果から、設定密度の高い竹ボードは食害被害の抑制される傾向を示したが、表 1.4.2 のデータから硬い竹ボードは食害抑制に貢献することが明らかになった。

エレメントの成分について、図 1.4.5 に各種処理条件竹材の成分含有状況を、図 1.4.6 に各種処理条件竹材の遊離糖の含有状況を示す。でんぷんについては、湿式粉碎することにより加熱蒸気処理をしなくても乾式粉碎の約 1/2～2/3 程度まで除去が望める結果を示した。遊離糖については、加圧蒸気処理 0.7MPa 60 分によって無処理材の半値に、さらに湿式粉碎することにより除去される傾向を示した。加圧蒸気処理 0.7MPa 60 分によってグルコース及びフラクトースの含有量が低下し、ヘミセルロースの加水分解に由来すると思われるキシロースが生成された。さらに、湿式粉碎することにより全てが除去された。有機酸分析では、無処理ではリンゴ酸が主体であったが、高压(高温)での処理条件となるほど酢酸、ギ酸等の成分量の増加が確認された。湿式粉碎することにより、加熱蒸気処理の有無に係わらずリンゴ酸、ギ酸、酢酸のいずれも除去された。加熱蒸気処理材を湿式粉碎したエレメントを用いて作製した竹ボードの多くは顕著な生物劣化抑制傾向を示したが、遊離糖の除去が影響しているのではないかと考えられる。

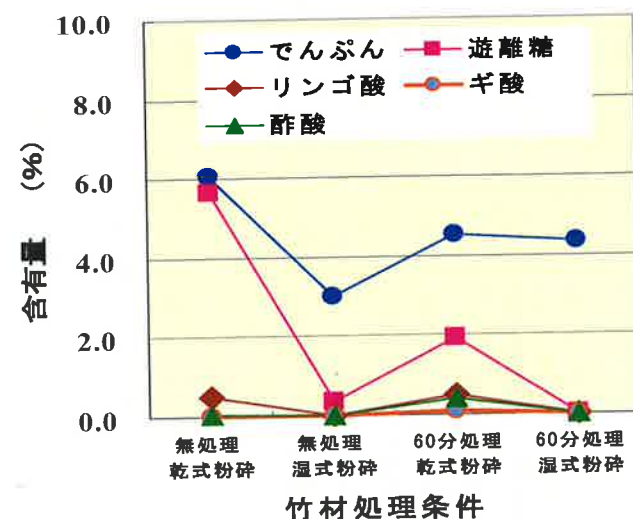


図 1.4.5 各種竹材処理条件における成分含有状況
1.4.4 文献

1) 日本家屋害虫学会: 家屋害虫事典, 125-127(2007)

1.5 竹繊維の分離技術および竹繊維の利用

1.5.1 竹材利用の現状

現在、竹林は、営業林としては成り立たず、放置されている場面が多く見受けられる。竹林

表 1.4.2 竹パーティクルボードの物性(硬さ)

竹材処理条件		常態		硬さ		
処理条件	粉碎方法	ボード目標密度	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	(平面) (N/mm ²)	(側面) (N/mm ²) (平均) (N/mm ²)
無処理	乾式	0.6	0.62	5.9	8.98	9.65 9.32
	乾式	0.8	0.83	5.8	32.85	24.78 28.82
	湿式	0.6	0.65	6.6	19.13	16.22 17.68
	湿式	0.8	0.87	5.9	31.96	20.98 26.47
30分処理	湿式	0.8	0.87	5.6	33.56	19.16 26.36
	乾式	0.6	0.66	4.9	16.57	5.12 10.85
60分処理	乾式	0.8	0.89	5.1	34.03	26.72 30.38
	湿式	0.6	0.67	4.8	14.18	4.08 9.13
	湿式	0.8	0.88	5.2	32.22	19.79 26.01
	湿式	0.8	0.88	5.2	32.22	19.79 26.01
比較 PB			0.74	8.7	20.85	9.56 15.21
比較 MDF			0.78	7.4	13.59	5.62 9.61
比較 OSB			0.62	8.4	7.13	13.44 10.29

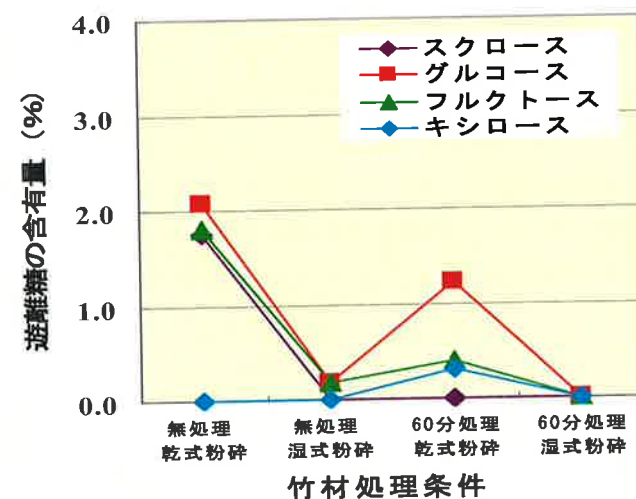


図 1.4.6 各種竹材処理条件における遊離糖の含有状況

は、かつては竹材や筍の生産の場として利用され、環境浄化と資源生産の両機能を果たしてきた。しかし、現在では、竹林が森林に侵入し樹木を駆逐し、その結果、土砂崩れなどの環境問題を引き起こしている。

竹林面積は、1915～1921 年には約 12 万 ha であったが、政府の補助金政策により、1939 年には約 16 万 ha に増加した。第 2 次世界大戦が勃発すると、食糧の増産のため、かなりの竹林が農地へ変換されたため、1947 年には約 11 万 ha に減少した。戦後、住宅の建設が急増したために、土壁の小舞(こまい)として竹材が使われたため、竹林栽培面積は、約 17 万 ha まで増加した¹⁾。しかし、1970 年頃に全国一斉にマダケが開花・枯死したこと、1980 年代には水煮筍が中国などから多量に輸入されるようになったこと²⁾、戦後の石油産業の著しい発展により、安価なプラスチック成形品が箆、籠などの竹編組製品の代替品として使用されるようになったこと、竹材を使用しない住宅工法に変化したことなどの理由で、竹材の利用は、次第に減少した。竹林面積は、1960 年代と現在とでほとんど変化なく、約 15 万 ha であるが、栽培竹林は、6 万 ha 弱であり、残りは放置竹林となっている。

竹は成長が非常に速く、約半年で成竹になり、その材質は 3～4 年で安定することから、バイオマス資源として非常に重要である。最近、徐々にではあるが、竹材の利用の試みが増え、かなりは実用化されつつある。たとえば、竹炭・竹酢液やフローリング材などは既に利用されており、肥料、飼料、敷料は、実用化の段階にあり、竹繊維強化複合材料などは研究段階にある。

ここでは、単軸型と連軸型の竹材の二、三の材質の比較、竹材の構造、竹材からの竹繊維の分離、竹繊維の利用などについて紹介する。

1.5.2 単軸型と連軸型の竹

竹は、東洋特有の植物ではなく、世界に広く分布している。日本、韓国、中国、北米の温帯域には、単軸型の竹類が、アフリカ、東南アジア、南米などの熱帯域の低地には、連軸型(株立型)が、標高 2,000m 以上の高地では温帯性竹類が生育している。また、亜熱帯地域には、温帯性竹類と熱帯性竹類が折衷したような竹類が生育している¹⁾。単軸型の竹は、マダケやモウソウチクのように、竹稈(かん)が分散して生育するもので、竹の地下茎の各節についている芽子からタケノコが伸びて、稈となる。全ての芽子が発芽しないので、稈は竹林で点在して存在する。このため、散生型の竹とも呼ばれる。一方、連軸型の竹では、成長を終えた稈の基部についている大型の芽が伸びて稈となる(仮軸分岐)。したがって、稈は株立ち状となるので、群生型の竹とも呼ばれる³⁾(写真 1.5.1)。

このように、温帯性竹類と熱帯性竹類は非常に異なった生育型を示す。生育型だけでなく、染色体数も異なっている。竹類は世界で、少なくとも 88 属 1,162 種があると言われている⁴⁾。温帯性竹類と熱帯性竹類は、生態的に非常に異なっているが、竹稈の組織構造は、両者で類似している。

単軸型の竹材 3 種(マダケ: *Phyllostachys bambusoides*、ハチク: *Phyllostachys nigra* var. *henonis*、モウソウチク: *Phyllostachys pubes-cens*)と連軸型の竹材 3 種(ゴンボン: *Gigantochloa pseduarundinaceae*、タリ: *Gigantochloa apus*、ゾウタケ: *Dendrocalamus giganteus*)について二、三の材質を調べた。マダケ、ハチク、モウソウチクは、日本の有用竹で、マダケは、緻密で強靱な性質をもち、籠などの竹編組製品、弓、竹刀、尺八などに利用される。筍は食用でない。ハチクは、割裂性に富み、茶筌など茶器に利用



写真 1.5.1 連軸型の竹 (*Dendrocalmus giganteus*)

される。筍は食用である。モウソウチクは、筍の生産、小舞、パルプの原料に利用される。ゴンボンとタリは、インドネシアの有用竹で、建築材料をはじめ多くのものに利用される。ゾウタケは、竹稈の太さが 30cm にもなる世界最大級の竹である。

維管束の分布が比較的均一な竹稈の部位から試料を採取し、20℃、60%RH の条件で調湿した後、両端自由の振動測定を行った。得られた内部摩擦の対数 $\log Q^{-1}$ と比動的ヤング率の対数 $\log E'/\gamma$ の関係を図 1.5.1 に示す。両者の関係は、直線(相関係数 0.76)で近似できた。連軸型の竹材 3 種とマダケは、一般に、 $\log E'/\gamma$ が大きく、 $\log Q^{-1}$ が小さい傾向を示した。ハチクとモウソウチクは、 $\log E'/\gamma$ の値が小さく、ハチクでは $\log Q^{-1}$ の値が最も大きかった。これらの竹材について得られた $\log Q^{-1}$ と $\log E'/\gamma$ の関係は、20℃、65%RH で測定された 22 種の針葉樹材について得られている結果と類似した⁵⁾。

20℃、60%RH の条件で行った静的曲げ試験の結果では、連軸型と単軸型の竹材にかかわらず、強度と密度の間には原点を通る直線で近似できた。連軸型の竹材は、単軸型の竹材に比べて約半分の破壊ひずみを示した。一例として、図 1.5.2 に、ゴンボンとマダケの応力-ひずみ曲線を示す。日本産の竹材は、熱帯産の竹材より粘り強いことが示された。

X 線回折図より求めたマダケの結晶化度を 1 としたとき、ハチクで 0.76、モウソウチクで 0.55、ゴンボンで 1.16、タリで 0.83、ゾウタケで 0.88 であった。(200)の回折図より、回折角 $2\theta=25.5^\circ$ に固定し、繊維の長軸を鉛直方向に一致させて回転させ(極角)、山本らが示した方法で、極角 0° をピークとした回折図の変曲点における接線からマイクロフィブリルの傾角を推定した。マダケは 7.7° 、モウソウチクは 3.4° 、ハチクは 5.0° 、ゴンボンは 3.4° 、タリは 16.8° 、ゾウタケは 4.1° であった。タリを除き、マイクロフィブリル傾角の推定値は非常に小さかった。(200)面の回折について、シェラー式を用いて求めたマイクロフィブリル幅は、いずれも約 3nm であった。TEM 観察によって厚壁繊維の多層壁において 0° に近いマイクロフィブリル傾角をもつ層が大半を占めていることが示されている⁶⁾。

1.5.3 竹材の構造

マダケの竹稈の横断面の一部分を写真 1.5.2 に示す。大雑把に見ると、竹稈は、柔細胞の基本組織(柔細胞)中に、維管束が散在している構造をもつ。

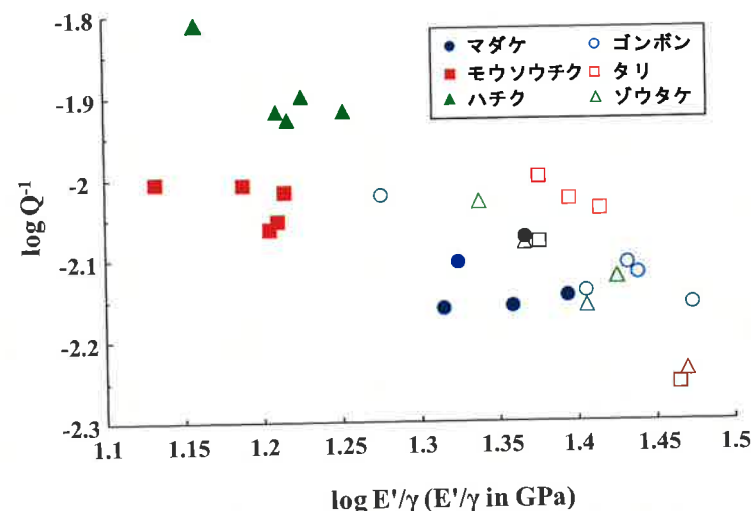


図 1.5.1 連軸型と単軸型竹材の内部摩擦の対数 $\log Q^{-1}$ と比ヤング率の対数 $\log E'/\gamma$ の比較

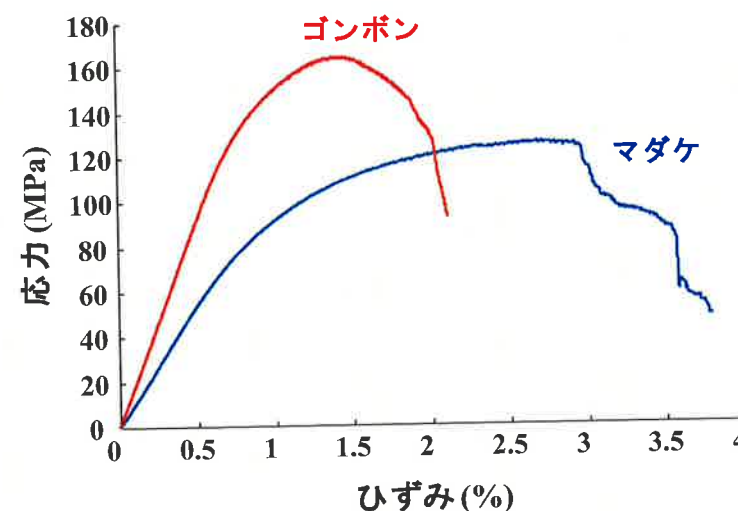


図 1.5.2 連軸型の竹ゴンボンと単軸型の竹マダケの応力-ひずみ曲線の比較

柔細胞は、壁が薄く、長さが約 0.1mm、幅が約 $30\mu\text{m}$ の細胞である。数は少ないが、細胞軸方向に短い立方体状の柔細胞も存在する。これは竹稈が成熟した後もほとんど木化せず、細胞活動を続ける。維管束の分布は、表皮側で密であり(体積分率約 60%)、髄に向って疎となっていく(体積分率 10%)。また、その形状は、縦長で小型から、丸くて大型に変化していく。写真 1.5.3 には、一つの維管束を含む部分を拡大した顕微鏡写真を示す⁷⁾。道管と師管の間は柔細胞で、それらの外周部は、厚壁の繊維の集合体である維管束鞘によって囲まれている。繊維は、肥厚した多層の細胞壁をもつ長さ約 1.5mm、幅約 $15\mu\text{m}$ の寸法の細胞である。Parameswaran らは、竹の繊維について TEM 観察に基づいて壁構造モデルを構築した⁶⁾。このモデルによると、壁は、中間層、一次壁に次いで S0 から S8 までの二次壁で構成され、S0 はマイクロフィブリル傾角が 50° で壁厚が小さく、奇数壁はマイクロフィブリル傾角が非常に小さくて厚壁で、偶数壁はマイクロフィブリル傾角が $85\sim 90^\circ$ で非常に薄壁である。このモデルが竹種によらず普遍的なものであるか否かは現在のところ不明で、検証が望まれる。

1.5.4 竹繊維の分離

竹材から長い繊維束を分離する方法として、蒸煮爆砕法、アルカリ処理法、物理的にかきとる方法などがある。蒸煮爆砕法は、竹材を入れた耐圧容器中に高温の水蒸気を導入して蒸煮した後、排出弁を開いて大気中に水蒸気を急激に放出して処理する方法などがある。処理の難易は、竹齢と深く関係している。図 1.5.3 に、モウソウチクの解繊の程度と 175°C で処理した時間の関係を示している。解繊の程度が 1~5 は、それぞれ 0~20%、20~40%、40~60%、60~80%、80~100%解繊していることを示している。処理時間 1 は、30 分間処理後を表す。2~9 は、順次 15 分間隔で処理後の回数を表す。0 年生の竹は、完全に解繊するのに長時間を要する。竹齢が増すにつれて、解繊に要する時間は短縮される。処理竹材を水中で揉み洗いすると、長繊維が得られる。

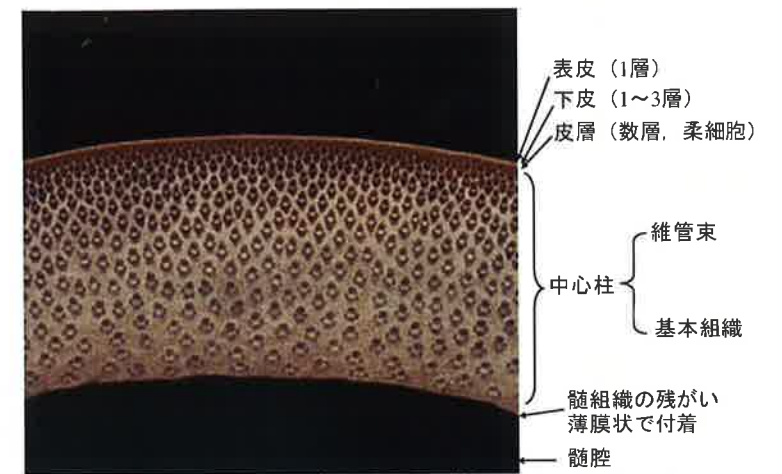


写真 1.5.2 マダケ竹稈の横断面の構造

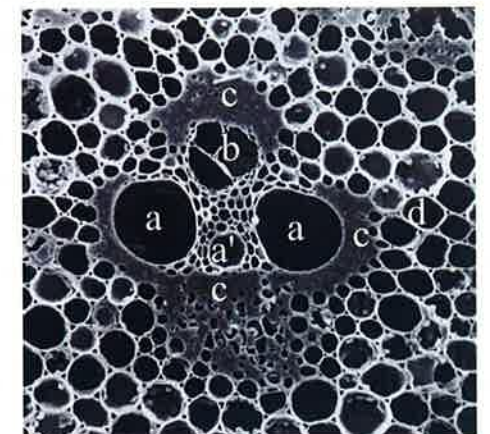


写真 1.5.3 マダケの竹稈横断面の顕微鏡写真(a: 後生道管、a': 原生道管、b: 師管、c: 厚壁繊維、d: 柔細胞)⁷⁾

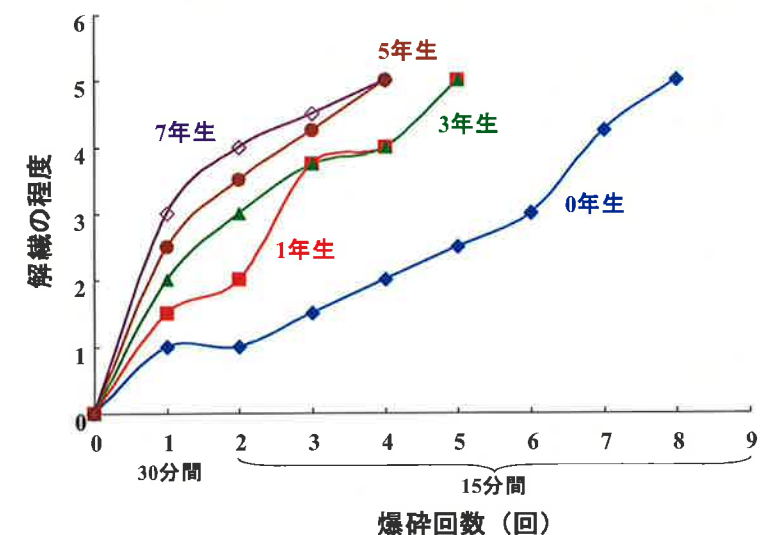


図 1.5.3 爆砕処理によるモウソウチクの解繊度と爆砕回数の関係

アルカリ処理法は、竹材を 0.5~1 規定の水酸化ナトリウム水溶液を用い、約 70℃で 10 時間程度処理して繊維を分離する方法である。処理竹材を櫛で解し、水洗すると長い繊維束が得られる。竹材を高温の水蒸気または薄い水酸化ナトリウム水溶液で処理すると、ヘミセルロースが加水分解されて低分子化し、細胞壁構造が緩み、維管束鞘が分離され易くなる。アルカリ処理法で分離したマダケの長繊維を SEM 観測したものを写真 1.5.4 に示す。繊維の集合体である半月状の維管束鞘が認められる。また、柔細胞が少し表面に残存している。蒸煮爆砕法で分離した長繊維では、維管束鞘の表面に柔細胞が不規則に残存し、かなり表面が荒れた様子が認められるが、維管束鞘には損傷が少ないと考えられる。蒸煮爆砕法で分離した繊維束は剛直で黒褐色であるのに対し、アルカリ処理法で分離したものは、薄い褐色でしなやかである。物理的にかきとる方法は、青竹を割裂機で 3 分割し、それらをロールプレスで展開した後、反毛機(表面に多くの針状の突起の付いた円筒の回転体)の間に通し、繊維をかきとるものである。中国で行われている方法である。

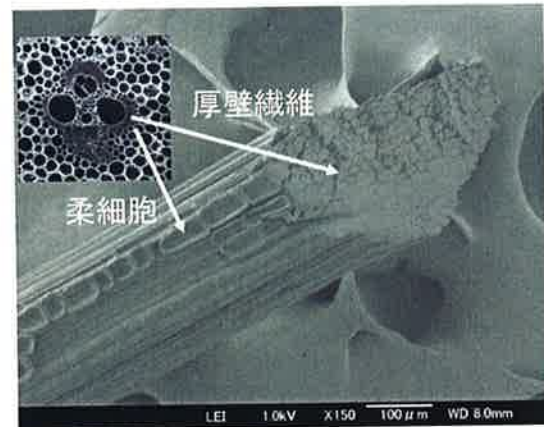


写真 1.5.4 アルカリ処理により分離したマダケの維管束鞘の SEM 写真

短い繊維を得るには、破碎する方法、マシニングセンタを用いる方法⁷⁾、植繊機を用いる方法⁸⁾などがある。破碎する方法は、竹材を破碎機で細かく破碎し、節で分別して針状の繊維束を得る方法である。マシニングセンタを用いる方法は、竹稈を固定し、エンドミルを用いて表皮側から周囲を渦状に切削していく方法である。植繊機は、神鋼造機(株)によって肥料や飼料の製造のために開発された機械である。筒の中にスクリーが取り付けられており、排出口に向かってピッチが小さくなっている。投入口から入れられた竹片が排出口に向かって、加圧、混練、昇温、摩砕、膨潤作用によって、構造が緩み、潰され、スクリーの先端に取り付けられた 2 枚刃のカッターで切断されて、排出口に設けられた多くの穴から繊維状となって押し出される。

分離した繊維束あるいは繊維の軸方向の引張強度については、Deshpande ら⁹⁾、藤井ら¹⁰⁾、高木ら¹¹⁾、その他の報告がある。Deshpande らは、竹小片(竹種不明)を 0.1 規定の水酸化ナトリウム水溶液に最高 72 時間処理後水洗し、1 時間室温の条件下で放置し、プレス内でそれらを 1.25~2cm 厚さのマット状に置いて 10ton の荷重を 10 秒間加えて 8~20cm 長さの竹繊維束を分離した。得られた 5 本の繊維束の長さをそろえて、一度にそれらに引張荷重を加え、破壊荷重と断面積より平均 645MPa の引張強度を得た。藤井らは、1 本のマダケの異なる種々の採取位置から、手作業で繊維束を取り出し、それらについて引張試験を行って、繊維束の引張強度は、採取位置によらず平均約 600MPa であることを示した。

高木らは、爆砕処理によってモウソウチクの繊維束を分離し、処理温度、時間、竹の採取部位の影響を調べた。処理時間を 40 分間と固定し、170、180、190℃で処理すると、平均値で比べると、繊維束の引張強度は、170、180、190℃の処理でそれぞれ平均 530、420、410MPa と処理温度とともに減少するが、190℃の処理では、強度の信頼区間幅が非常に小さくなることを示した。また、処理温度を 190℃と固定し、処理時間を 20、30、40、60 分間と変化させると、平均で 490 から 400MPa まで、処理時間が長くなるにつれて引張強度が低下していくことを示した。さらに、異なるモウソウチクについて、地上 1、7、11m の位置で採取した試料を 190℃、30 分間の条件で処理して得られた繊維束の引張強度は、それぞれ、670、650、350MPa であり、竹稈の先端から 1/3 の部位からは、高強度の繊維束は得られないことを示した。同じ条件で処

理しても非常に異なる強度値が得られたことについては、個体差や竹齢の違いが関係しているのではないかと推測した。以上の結果より、竹繊維束の軸方向の引張強度は、軟鉄より大きく、鋼鉄に匹敵することが分かる。

1.5.5 竹繊維の利用

軽量で優れた強度的性質をもつ FRP には、炭素繊維またはガラス繊維とエポキシ樹脂などの合成高分子の母材が使用されている。しかし、FRP については、再資源化や廃棄の点で問題が指摘されており、これらの繊維を環境負荷の少ないバイオマス資源由来の材料で代替する研究が進められている。

Deshpande ら⁹⁾は、ポリエステル樹脂に、機械的方法と上に示したアルカリ処理で得た竹繊維を強化材とする複合材料を調製し、異なる方法で得た竹繊維の効果には差がないが、15%の竹繊維の添加で、ポリエステル樹脂だけの場合に比べて、強度、ヤング率ともに飛躍的に増加することを報告している。Yamamoto ら¹²⁾は、PP(無水マレイン酸変性 PP/P=5/95)と竹を破碎し、節で分別した竹繊維を混練し(竹繊維の重量分率 51%)、190℃のホットプレス圧縮成形した竹繊維強化複合材料を調製している。しかし、疎水性の PP と親水性の繊維は、相溶化剤の添加によっても相溶性が悪いため、爆砕処理で得た竹繊維を用いた。竹繊維がある程度疎水化するために、複合材料の強度が 15%(35.1MPa)、ヤング率が 30%(4.69GPa)増加したことを報告した。紫藤ら¹³⁾は、爆砕繊維をさらに増加させ、重量分率を 60%まで増加させると、強度が約 40MPa、ヤング率が 5.2GPa に増加したことを示した。藤井ら¹⁰⁾は、母材に生分解性樹脂(LunareSE:日本触媒(株))を繊維に手作業で得た竹繊維を用いて調製された生分解性複合材料(竹繊維の分率不明)を調製し、その引張強度は 85.5MPa、ヤング率 8.5GPa であることを報告した。

一方、竹材から爆砕処理やアルカリ処理で分離した長繊維束を用いて、高強度の木質系材料を調製し、それを住宅部材に利用する研究が始められている¹⁴⁾。分離した繊維を束ね、それに樹脂濃度 5~20%のイソシアネート系樹脂接着剤(MDI)あるいはフェノール系樹脂接着剤(PF)を含浸させた後、成型用治具に挿入し、加熱プレスを用いて、温度 140℃、圧力 5~50MPa の条件で 30 分間圧縮して配向材料(FOM)を調製した。アルカリ処理法によって分離した繊維を用いて調製した FOM のヤング率と密度の関係を図 1.5.4 に、曲げ強度と密度の関係を図 1.5.5 に示す。比較のため、マダケの繊維方向の結果を同図に示す¹⁵⁾。フェノール系樹脂接着剤を用いた場合、密度 1.27~1.37g/cm³、ヤング率 38~46GPa、曲げ強度 388~454MPa、イソシアネート系樹脂接着剤を用いた場合、密度 1.25~1.34g/cm³、ヤング率 38~46GPa、曲げ強度 478~599MPa

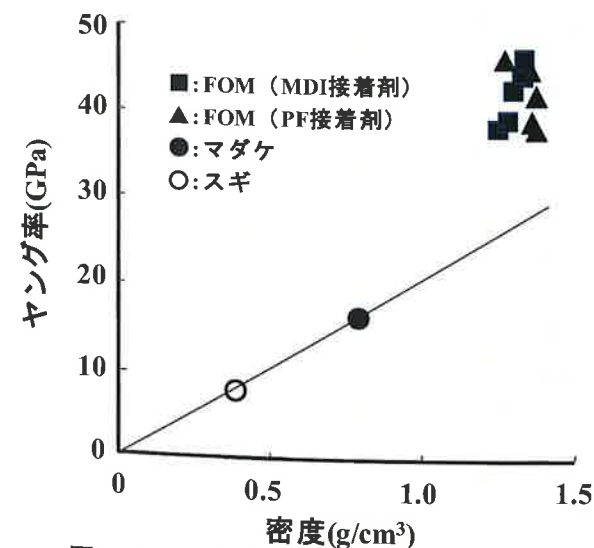


図 1.5.4 繊維配向材料のヤング率と密度の関係

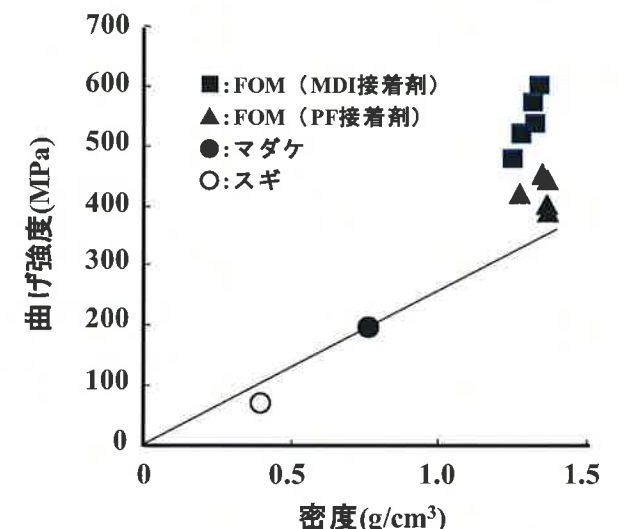


図 1.5.5 繊維配向材料の曲げ強度と密度の関係

を示す FOM を調製した。また、この FOM より、3、4 および 5mm 角、長さ 70 および 90mm、先端角度 60°の釘を調製し、スギ製材およびカラマツ集成材に対する釘の打ち込み、引き抜きおよび一面せん断試験などの釘の性能試験を行い、CN90 に匹敵する性能を得た。

1.5.6 むすび

最近、中国において竹のフローリングが盛んに生産され、性能が良く、外観も美しいため、日本、ヨーロッパ、米国などにも多く輸出されている。わが国の建材メーカーは、より安価な生産を求めて、東南アジアの竹に注目している。しかし、東南アジアの竹を利用したいが、材質は、日本産のものと異なるだろうかとこの質問をよく受ける。温帯性竹類(単軸型)と熱帯性竹類(連軸型)の材質を比較した研究は、見当たらないので、不十分であるが、両者について材質試験を行ったので紹介した。

竹材に含まれる繊維を利用したいが、分離の方法がわからないので教えてほしいとの質問を良く受ける。そこで、私が知るかぎりの情報を紹介した。竹材の繊維を分離することは、非常に困難であり、今後より容易に分離する方法の開発が望まれる。また、わずかではあるが、竹繊維の利用の実例について紹介した。竹繊維は、鋼鉄に迫る強度をもつため、金属の代替としても期待できるため、竹繊維の今後の利用を期待する。

1.5.7 文献

- 1) 内村悦三: 竹の魅力と活用, 創森社, p.61-63(2004)
- 2) 京大地球環境学研究会: 地球環境学のすすめ, 丸善, p.224-226(2004)
- 3) 上田弘一郎: 竹と日本人, 日本放送出版協会, p.200-203(1983)
- 4) 内村悦三: 竹の魅力と活用, 創森社, p.34(2004)
- 5) 則元 京: 木材学会誌, 28, 407-413(1982)
- 6) Parameswaran, N., Liese, W.: *Cellulose Chem. Technol.*, 14, 587-609(1980)
- 7) 腰 希申, 他 4 名: *Bamboo culm anatomy of china*, 93(2002)
- 8) 小川圭二: 第 2 回同志社大学竹の高度利用研究センターWS, 同志社大学(2006)
- 9) Deshpande, A. P., Rao, M. B., Rao, C.L.: *J. Appl Polym.Sci.*, 76, 83-92(2000)
- 10) 藤井透, 大窪和也: *SEN-I GAKKAISHI (繊維と工業)*, 59, 84-88(2003)
- 11) 高木均, 他 5 名: *材料*, 52, 353-356(2003)
- 12) Yamamoto, Y., Oukubo, K., Fujii, T.: *Proc.of the International Workshop on "Green"Compo, Tokushima*, p.30-34(2002)
- 13) 紫藤貴之, 大窪和也, 藤井透: *Bamboo J.*, No.19, 15-23(2002)
- 14) 則元 京, 他 5 名: *Bamboo Voice*, No.24, 2-6(2005)
- 15) 井口よう子: *木材工業*, 58, 157-164(2003)

1.6 竹繊維を用いたボードの調製と性能評価

1.6.1 研究の目的

竹材は、強度的性質に非常に優れているため、その特性を活かした利用法が期待できる。しかし、竹稈は中空の円筒形をしているために、竹材の利用の範囲が極めて制約される。竹材は、そのほとんどが柔細胞からなる基本組織と通導組織である維管束により構成されている。維管束は、細胞壁が肥厚した厚壁繊維の集合体である維管束鞘によって保護されている。竹材の体積の約 50%を占める維管束鞘は、柔細胞に比べて密度が大きく、繊維方向の強度が極めて高い。竹材からこの維管束鞘を分離し、成形することにより、寸法に制約のない高強度材料が調製可能であると考えられる。

そこで本章では、竹材から維管束繊維を得る手法としてアルカリ処理および植繊機による解繊を適用し、得られた繊維からランダム配向ボードを調製し、これらの強度性能、耐水性、防蟻性能を評価することにより、木質建築物の部材としての適用の可能性について検討した。

1.6.2 竹繊維の分離とボードの調製

1.6.2.1 解繊処理とエレメントの調製

竹材として、大分産の 4 年生マダケ(*Phyllostachys bambusoides*)を用いた。竹材から化学的な解繊手法としてアルカリ処理、物理・機械的な手法として植繊機による解繊を行い、繊維束および繊維を分離し、計 4 種類のボード製造用のエレメントを調製した。

アルカリ処理は、あらかじめ竹材をおおむね 5mm(放射方向)×50mm(接線方向)×400mm(繊維方向)に切断し、約 70℃の 2 規定水酸化ナトリウム水溶液中で 5 時間処理した。処理後の竹材をステンレス製の櫛で掻き、約 35cm 長の繊維束と、絡み合った繊維束からなる残渣を分離した。これらを水洗、乾燥後、約 1cm 長に切断して、それぞれエレメント A および B とした。

植繊機による解繊は、あらかじめ竹材を 5mm×5mm×50mm 程度の小片に切断し、40 分間煮沸処理後、植繊機(神鋼造機(株)製、型式 SM-05-075、回転数 120rpm)で処理した。写真 1.6.1 に植繊機の外観を示す。写真前方の筒の中にスクリーが取り付けられており、排出口に向ってピッチが小さくなっている。植繊機に投入された竹小片は、加圧、混練、昇温、すり潰し、膨潤作用によって、構造が緩み、潰され、スクリーの先端に取り付けられた 2 枚刃のカッターで切断され、排出口に設けられた多くの穴から繊維状となって押し出される。この繊維状のものを乾燥し、30 メッシュの篩に通し、メッシュを通らなかったものをエレメント C とした。一方、前処理として蒸煮を行わず、全乾状態の小片を植繊機で処理したところ、粉末混じりのパーティクルが得られた。これを乾燥後、30 メッシュの篩に通し、粉末を取り除いたものをエレメント D とした。得られたエレメント A~D の写真を写真 1.6.2 に示す。



写真 1.6.1 植繊機
(神鋼造機(株)、SM-05-075)

1.6.2.2 アセチル化エレメントの調製

竹繊維ボードへの耐水性と耐久性付与を目的として、エレメントのアセチル化を試みた。アルカリ処理により得られたエレメント A およびエレメント B を、無水酢酸中で 120℃、10 時間処理した。十分水洗し、室温で風乾後、100℃で 5 時間乾燥した。得られたエレメントをエレメント A(a)およびエレメント B(a)とした。

1.6.2.3 ボードの調製

接着剤として、イソシアネート系樹脂接着剤(群栄化学工業(株)製 PMDI、以下 MDI)を使用した。ボー



エレメントA



エレメントB



エレメントC



エレメントD

写真 1.6.2 エレメント A、B、C および D の外観

ドの含脂率が 10wt%になるようエレメントに接着剤を噴霧後、ホットプレス(小松機械工業(株)

製、パワーウッドマシン OWMA-1 型)により、圧縮圧力約 10MPa、圧縮時間 10 分、圧縮温度 140℃の条件で開放系プレス成形を行い、5mm×300mm×300mm のランダム配向ボードを調整した。また、エレメント C についてのみ、圧縮温度 180℃、圧縮時間 10 分の条件で密閉系プレス成形によるボード調整を行った。以後、エレメント A、B および C から得られたファイバーボードを FB-A、FB-B、FB-C、エレメント D から得られたパーティクルボードを PB-D と呼ぶことにする。

調整した計 10 種類のボードについて、その種類を表 1.6.1 に示す。各ボードの目標密度は、エレメント A、B を用いた開放系プレスでは 0.4~1.2g/cm³ の範囲で 3 段階、エレメント C、D を用いた開放系プレスでは 0.4~1.2g/cm³ の範囲で 5 段階に設定した。その他のボードについては目標密度を 1.2g/cm³ とし、実際に得られたボードの密度は 0.8~1.2g/cm³ の範囲であった。

1.6.3 竹繊維ボードの性能評価

1.6.3.1 性能評価の方法

調製したボードの性能(強度、耐水性、シロアリに対する食害抵抗性)について、曲げ強さ試験、吸水率および吸水厚さ膨張率試験、防蟻性能試験により評価した。曲げ強さ試験は、幅約 30mm、厚さ約 4~6mm、長さ約 200mm の試験片について、スパン 160mm、変位速度 5mm/min で中央集中荷重による三点曲げ試験を行い、曲げ強度およびヤング率を測定した。吸水率および吸水厚さ膨張率試験は、5mm×50mm×50mm の試験片を用い、JIS A 5905(2003)の方法に準じて 24 時間水浸操作後の吸水率および吸水厚さ膨張率を算出した。防蟻性能試験は、5mm×20mm×20mm の試験片を用い、JIS K 1571(2004)の方法に準じて、イエシロアリによる 3 週間の食害試験後の質量減少率および死虫率を測定した。

1.6.3.2 強度的性質

エレメント A、B、C および D を用いて調整したボードについて、曲げ強度と密度の関係、ヤング率と密度の関係を図 1.6.1 に示す。いずれのボードにおいても、曲げ強度およびヤング率は、密度の上昇とともに急激に増大した。同一密度で比較すると、FB-A の曲げ強度およびヤング率は他と比較して高い値を示し、密度約 1.2g/cm³ の試料における強度、ヤング率はそれぞれ約 120MPa および約 11GPa、密度 1.0g/cm³ に換算すると 92.3MPa および 8.7GPa であり、極めて高い値を示した。

エレメント A、B、C の電界放射走査顕微鏡(日本電子(株)、JSM-6700F)写真を写真 1.6.3 に示す。エレメント A において、竹稈の横断面に認められている半月状の維管束鞘が、破壊されず原型をとどめており、さらに維管束鞘の表面においても個々の繊維細胞には損傷がほとんど認められなかった。また、繊維細胞の表面に僅かに柔細胞の付着が認められた。これに対して、エレメント B では、維管束鞘は部分的に解れ、太さが不均一の繊維束や繊維が長さ方向に大きく湾曲し、エレメント同士が絡み合っていた。エレメント C では、維管束鞘の繊維細胞の集合は潰されており、種々の長さ引きちぎられた繊維細胞と柔細胞の断片が観察された。分離された繊維束の長さ方向の強度は 0.370~0.713GPa と報告されており¹⁻⁵⁾、繊維束鞘の構造が最も維持されているエレメント A を用いて調整した FB-A が、他よりも高い曲げ強度およびヤング率を持つに至ったと考えられる。植繊機により解繊して得られたエレメント C を用いて調整した FB-C について、曲げ強度およびヤング率はともに FB-A より低いものの、1.0g/cm³ 以上の

密度で、40MPa 超の曲げ強度、4GPa 超のヤング率を有しており、木質構造用の面材料として十分な強度は確保していると言える。エレメント D は、竹小片を植繊機で機械的に破碎して得られたやや細長く凹凸のある形状をしたパーティクルであり、その中には維管束鞘と柔細胞から構成される基本組織が残存していた。PB-D の曲げ強度、ヤング率は他と比較して低い値を示したが、これは解繊が不十分であることや、エレメントの形状が不均質で大きいことによると考えられる。

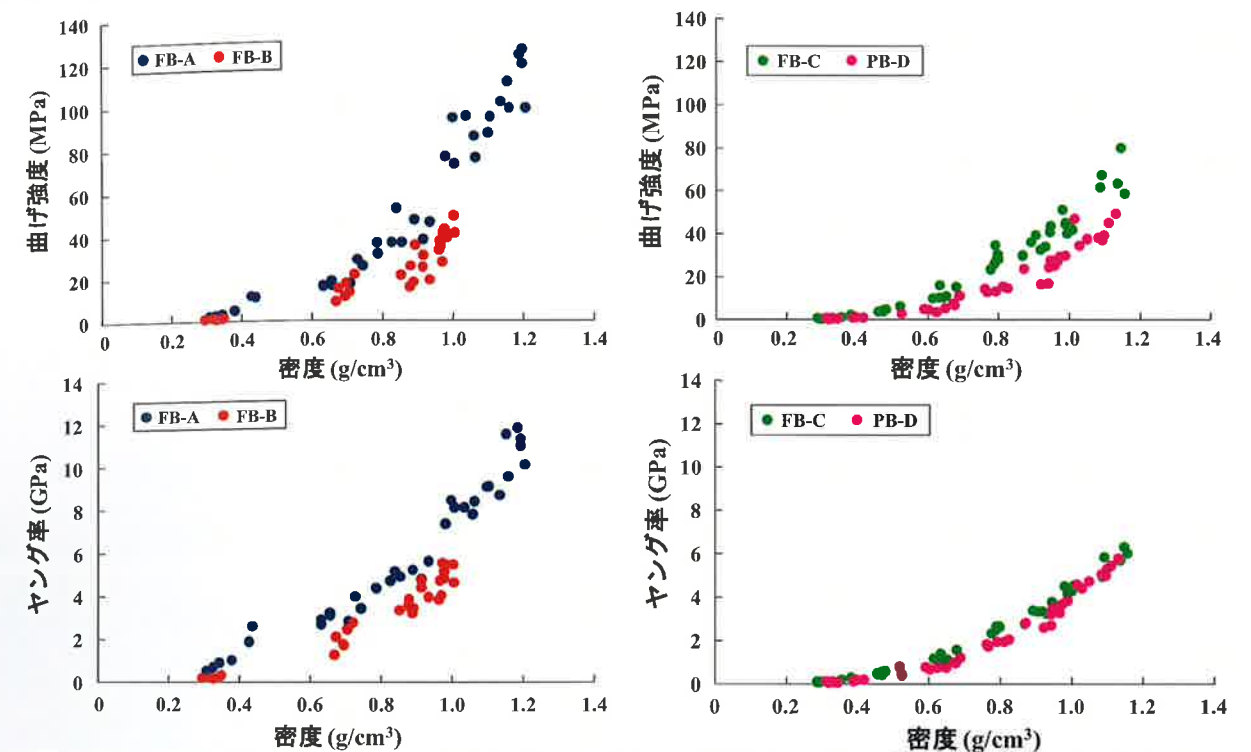


図 1.6.1 エレメント A、B、C および D を用いて調整したボードの曲げ強度およびヤング率と密度の関係

アルカリ処理で得られたエレメントにアセチル化を行った場合、無処理エレメントを用いたファイバーボードの曲げ強度およびヤング率が、密度 1.0g/cm³ に換算して、FB-A では 93.9MPa および 8.4GPa、FB-B で 38.4MPa および 5.4GPa であったのに対して、アセチル化を行ったものは、FB-A(a)で 43.2MPa および 5.4GPa、FB-B(a)で 22.1MPa および 3.7GPa となり、曲げ強度とヤング率はともに低下した。これは、アセチル化処理によってエレメントの水酸基がアセチル基で置換されることにより疎水化したため、親水性のイソシアネート樹脂接着剤との接着力が低下したためと考えられる。しかし、最も強度的性質の低かった FB-B(a)においても曲げ強度は 20MPa を超えており、住宅部材用の面材料としては十分な強度性能を有していると言える。

植繊機による解繊で得られたエレメント C を用い、開放系プレスにより成形した FB-C と密閉系プレスによる FBc-C の 2 種類のファイバーボードの曲げ強度およびヤング率を同程度の密度で比較すると、ともに密閉系プレスによる FBc-C のほうが高い値を示した。密閉系でのボード調整により強度性能の向上が得られた理由としては、密閉されていることによりエレメントに含まれていた水分がボード内に留まり、エレメントに水蒸気処理と同じ作用をした結果、エレメントが熱軟化し、圧縮されているエレメント同士の接触面積が増大し、接着力が増大したことが考えられる⁶⁾。

1.6.3.3 耐水性

調製したボードの耐水性について、密度約 1.0g/cm³ の試料における吸水率および吸水厚さ膨張率を表 1.6.2 に示す。エレメント A、B、C、D で比較すると、植繊機による解繊により得ら

れたエレメント C を用いて調整した FB-C が最も高い耐水性を示した。FB-C は密度約 1.0g/cm^3 において、20%を下回る吸水率および 13%を下回る吸水厚さ膨張率を示しており、既存の木質系ボードと同等の耐水性を有していると言える⁷⁾。エレメント C は、前述のとおり維管束鞘が潰され繊維細胞まで解されているために、維管束鞘がそのまま残っているエレメント A に比べて接着表面が大幅に増加し、接着強度が増したためと考えられる。

アルカリ処理で得られたエレメント A および B にアセチル化を行った場合、ファイバーボードの吸水率および吸水厚さ膨張率はともに顕著に低下した。アセチル化処理によりエレメントの吸湿性が低下し、寸法安定性が付与された結果と考えられることから、エレメントの前処理としてのアセチル化はボードの耐水性向上に極めて有効であることが明らかとなった。

植繊機で解繊したエレメント C に関して、開放系プレスと密閉系プレスによる成形を比較した場合、密閉系で成形した FBc-C は、開放系の FB-C よりも低い吸水率と吸水厚さ膨張率の値を示した。密閉系プレス成形により竹繊維ボードの耐水性の向上が期待できる。密閉系プレスで成形した FBc-C の吸水率および吸水厚さ膨張率は密度約 1.0g/cm^3 において 7.1%および 6.2%であり、木材の素材に匹敵する耐水性を有していると言える。

1.6.3.4 シロアリに対する食害抵抗性

調製したボードの防蟻性能について、イエシロアリによる 3 週間の食害試験後の質量減少率および死虫率を表 1.6.3 に示す。植繊機で解繊したエレメント C を用いて調整した FB-C が質量減少率 3%、死虫率 73%であり、最も高い防蟻性能を示した。これは、エレメント C の接着表面が極めて大きく、繊維表面が樹脂によって完全にコーティングされたため、シロアリによる食害が妨げられたためと考えられる。一方、アルカリ処理により得られたエレメント A を用いて調整した FB-A では、質量減少率は 4%と極めて優れた値を示したが、死虫率は 14%で低い値にとどまった。

アルカリ処理で得られたエレメントにアセチル化を行うことにより、質量減少率は低下し、死虫率は増加したことから、前処理としてのアセチル化は防蟻性能向上に効果があることが明らかになった。

植繊機による解繊で得られたエレメント C について、開放系プレスと密閉系プレスを比較すると、質量減少率はほとんど変化しないが、死虫率は密閉系プレスにより顕著に低下した。これは、密閉系プレスによる水蒸気処理の効果により、エレメント中のヘミセルロースなどの成



写真 1.6.3 エレメント A、B および C の SEM 写真

表 1.6.2 竹繊維ボードの吸水率および吸水厚さ膨張率

種類	密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	吸水厚さ 膨張率 (%)
FB-A	1.11	30.9	42.9
FB-A(a)	0.91	5.9	0.2
FB-B	0.95	18.5	26.5
FB-B(a)	1.06	9.1	12.1
FB-C	1.01	12.6	8.8
FBc-C	0.99	7.1	6.2
PB-D	1.00	22.3	16.0

分が分解し、低分子化した分解生成物がシロアリの栄養源となったためと考えられる。

1.6.4 まとめ

竹材からアルカリ処理および植繊機を用いて、繊維束および繊維を取り出し、それらをエレメントとして、木質構造物用のファイバーボードおよびパーティクルボードを調製した。また、それらボードについて、三点曲げ試験、膨潤試験およびシロアリによる食害試験を行い、ボードの性能を評価した。得られた主な成果を次に示す。

- (1) アルカリ処理で解繊した繊維のエレメントで調製したファイバーボードは、密度が約 1.2g/cm^3 において、曲げ強度およびヤング率は、それぞれ約 120MPa、約 11GPa と極めて高い値を示した。一方、吸水率および吸水厚さ膨張率は、非常に大きく、耐水性で劣っていたが、前処理としてエレメントをアセチル化処理することによって、吸水率および吸水厚さ膨張率は、ともに著しく改善された。
- (2) 植繊機で得た繊維のエレメントで調製したファイバーボードは、密度 1.0g/cm^3 に換算すると、曲げ強度およびヤング率は 43.8MPa および 4.2GPa であった。密閉系プレスによる成形により、曲げ強度およびヤング率はともに約 13%増大した。密度約 1.0g/cm^3 の試料の吸水率および吸水厚さ膨張率は 15.3%および 12.4%であったが、密閉系プレスによる成形により、それぞれ 8.9%および 7.6%に減少し、耐水性が向上した。
- (3) 植繊機で得た繊維のエレメントで調製したファイバーボードの防蟻性能試験では、3 週間経過時の質量減少率は 3%、死虫率は 73%であり、極めて良好な結果が得られた。
- (4) 植繊機で得た繊維のエレメントで調製したファイバーボードは、木質構造物用の面材料として十分な強度、耐水性、シロアリに対する食害抵抗性を備えている。

1.6.5 文献

- 1) Amada, S. et al.: *Composites*, 28B, 13-20(1977)
- 2) 高木 均, 他 5 名: 材料, 52, 353-356(2003)
- 3) 藤井透: 材料, 50, 556-557(2001)
- 4) 紫藤貴之, 大窪和也, 藤井 透: *Bamboo J.*, No.19, 15-23(2002)
- 5) Deshpande, A. P., Rao, M. B., Rao, C. L.: *J. Appl. Polymer Sci.*, 76, 83(2000)
- 6) 木質新素材ハンドブック編集委員会編: 木質新素材ハンドブック, 技報堂出版, p.414-416 (1996)
- 7) 今村祐嗣, 他 3 名編著: 建築に役立つ木材・木質材料学, 東洋書店, p.47(1999)

1.7 竹繊維を用いたピンおよびプレートの調製と性能評価

1.7.1 研究の目的

現在、木質構造物は、住宅から大型建築物に至るまで、その建築に合わせた多種多様な接合具が使用されている。その種類には、釘、ピン、ボルト、プレートなどがある。2002 年に、建設リサイクル法が施行され、住宅など建築物の解体に際して、現場での分別解体が義務づけられた。木質構造物を例にとると、木材や木質材料と金属製の接合具とを分別する必要があるが、木竹材を原料とした接合具が利用できれば解体時の分別が不要となり、手間とコストの面で大きな利点がある。また、一般的な住宅には 6 万本もの接合具が使用されており¹⁾、接合具を従

表 1.6.3 竹繊維ボードのシロアリに対する食害抵抗性

種類	質量減少率 (%)	死虫率 (%)
コントロール (スギ心材)	22	20
FB-A	9	14
FB-A(a)	4	30
FB-B	16	8
FB-B(a)	7	42
FB-C	3	73
FBc-C	4	32
PB-D	8	47

来の金属製のものから木竹材を原料とした接合具に置き換えることができれば、建築物全体の重量を軽量化することが可能となり、建築物の耐震性向上も期待できる。

そこで本章では、竹繊維を用いて木造建築物に利用可能な接合具であるピンとプレートとを調製し、これらの接合具の性能試験を行った。さらに、これらを用いた接合部を提案し、その性能を調べた。さらに、それらの接合具を用いた接合部を提案し、接合性能を評価することにより、木質建築物での接合部としての適用の可能性について検討した。

1.7.2 竹繊維の分離とピンおよびプレートの調製

1.7.2.1 竹繊維の調製

竹繊維として、大分産マダケ(*Phyllostachys bambusoides*)からアルカリ処理により解繊して得られたマダケ繊維と、インドネシア産の竹からアルカリ処理により得られた繊維を輸入したインドネシア産竹繊維を用いた。

マダケ繊維は、大分産の4年生マダケの竹稈を約35cmの長さに切断し8分割したものを、約70℃の2規定水酸化ナトリウム水溶液中で5時間処理することにより調製した。これを十分に水洗後、ステンレス製の櫛で掻くことにより、長い繊維束と絡み合った繊維束からなる残渣に分離し、これらをさらに十分に水洗、自然乾燥した。前者は櫛を通して繊維束表面に付着した柔細胞を除去、後者は約1cm長に切断し、それぞれ接合具の調製に供した。以後、それぞれを長繊維、短繊維と呼ぶ。同様に、インドネシア産竹繊維も長繊維と短繊維に分離し、接合具の調製に供した。

1.7.2.2 ピンおよびプレートの調製

接着剤は、イソシアネート系樹脂接着剤(群栄化学工業(株)製 PMDI、以下 MDI)をアセトンで30%に希釈し(MDI30%、アセトン70%)使用した。

ピンの調製には、インドネシア産長繊維とマダケ長繊維を用いた。インドネシア産長繊維210g、マダケ長繊維210gに30%MDIアセトン溶液300gを含浸させた。これを、気乾状態にし、治具(写真1.7.1)に入れ、ホットプレス(小松機械工業(株)製、パワーウッドマシーン OWMA-1 型)により、圧縮圧力19.6MPa、圧縮時間30分、圧縮温度140℃で圧縮後、60分間冷却させた。試料両端を丸鋸で切り落とし長さ26cmにし、断面形状12、16、20mm角のピンを切り出した。半数の角ピンをベルトサンダーによりφ12、16、20mmに削り、サンドペーパーで表面を滑らかに仕上げ、丸ピンとした(写真1.7.2)。

プレートの調製には、インドネシア産の長繊維と短繊維、マダケの長繊維と短繊維を用いた。プレートは5層構造(長繊維2層、短繊維3層)および3層構造(長繊維1層、短繊維2層)のものを作成した。

いずれのプレートも、長繊維330gに30%MDIアセトン溶液300gを含浸させたものと、短繊維150gに30%MDIアセトン溶液45.3gをスプレーガンで噴霧させたものを、30cm×30cmのフォーミングボックスを用いて、長繊維層は同一方向に、短繊維層はランダムに配列後、圧縮圧力約19.6MPa、圧縮時間10分、圧縮温度140℃の条件で熱板成型することにより調製した。



写真 1.7.1 ピン調整用の治具



写真 1.7.2 丸ピン(φ12mm)

5層構造のプレートは、最外層から短-長-短-長-短(短:短繊維層、長:長繊維層)とし、2つの長繊維層の配向が平行のプレート(5||)と垂直のプレート(5⊥)を調製した。3層構造のプレートの層構造は、短-長-短とした。プレートの厚さは特に記述のない限り10mmに統一した。

1.7.3 ピンおよびプレートの性能評価

1.7.3.1 ピンの曲げ性能および二面せん断性能

ピンの曲げ性能は、インドネシア産長繊維を用い調製した12mm角の角ピンおよびφ12mmの丸ピンについて、スパン200mm、変位速度2mm/minで中央集中荷重による三点曲げ試験により評価した。最大応力およびヤング率はともに丸ピンの方が優れた結果を示した(図1.7.1)。丸ピンでは破壊時に曲げ破壊が起こるのに対し、角ピンでは中立軸付近でせん断破壊が生じていた。理論上、円形断面と比較して長方形断面はせん断応力が1.125倍になる²⁾ことから、角ピンよりも丸ピンの方が優れた曲げ性能を示したと考えられる。φ12mmの丸ピンの曲げ強度およびヤング率は、3本の平均で369MPaおよび54GPaであり、軟鋼並みの強度性能を示した。

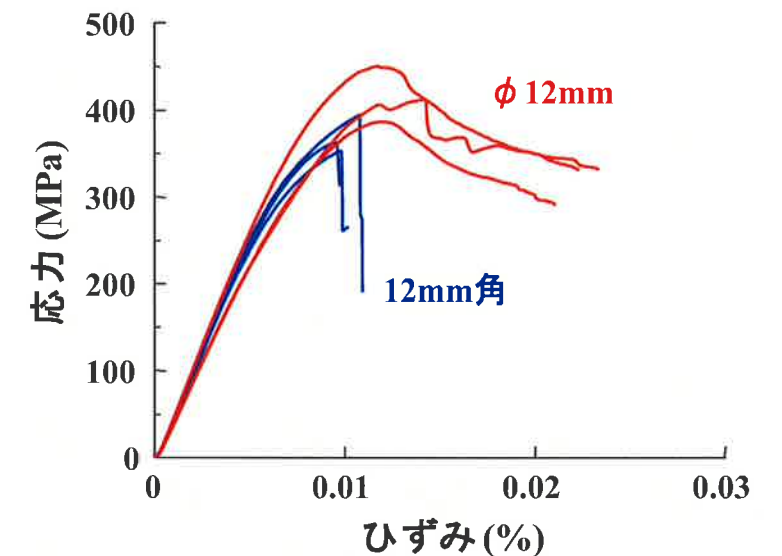


図 1.7.1 φ12mmの丸ピンと12mm角の各ピンの曲げ試験における応力-ひずみ曲線の比較

ピンの二面せん断性能は、インドネシア産長繊維を用い調製したφ12、16、20mmの丸ピンについて、主材および側材にはカラマツ(*Larix leptolepis*)集成材(強度等級E105-F300)を用いて測定した。完全弾塑性モデルを適用して算出したφ12、16、20mmの丸ピンの降伏応力および塑性率は、それぞれ6.76kNおよび2.95、10.6kNおよび4.10、16.0kNおよび5.29であった。

1.7.3.2 プレートのせん断性能

プレートのせん断試験は、インドネシア産およびマダケの長繊維と短繊維を用い調製した5層プレート(5⊥、5||)について、材料試験機を用いて変位速度2mm/minで行い、試験体にかかる荷重と治具に対するプレートの相対変位を、荷重が最大荷重の0.8倍に低下するまで測定した。なお、プレート5||の場合は長繊維層が荷重方向に平行な場合と垂直な場合の2種類の試験を行った。

荷重-変位曲線を図1.7.2に示す。5層のプレートは、非常に高い塑性率を示した。荷重の増大とともにピンの周辺でプレートの表層が外側に広がり、荷重を負担する断面積が増大したこと、荷重の増大とともにプレートとピンの隙間に短繊維が入り込み、ピンの固定の度合いが増加したことが理由として挙げられる。プレート5||で長繊維層の配向が荷重方向に垂直な場合、長繊維層で圧縮せん断破壊を起こし、プレートは最も早く破壊した。プレート5⊥では、荷重方向に対して平行な長繊維層が、垂直な長繊維層よりも先に破壊を起こし、剥離を起こした。これは、荷重方向に垂直な長繊維層と平行な長繊維層の剛性が大きく異なるためと考えられる。プレート5||で長繊維層の配向が荷重方向に平行な場合、強度性能はプレート5⊥と同等もしくは優れている上、長繊維層でせん断破壊は起こらないため、プレート5||を長繊維層と荷重方向が平行になるように使用するのが適当であることが明らかになった。2つの長繊維層を直交させることは強度に寄与しないことから、プレートを5層にする必要はなく、このことは3層

プレートのせん断試験の結果からも裏付けられた。

1.7.3.3 ピンとプレートで構成した試験体のせん断性能

接合具としてマダケ長繊維で調製した $\phi 12$ のピンと厚さ10mmおよび5mmに調整した3層構造のプレート、主材としてカラマツ集成材(強度等級E105-F300)を組み合わせた試験体について、せん断試験を行った。プレートの長繊維層の配向が荷重方向に対して平行な場合と垂直な場合、カラマツ集成材の繊維方向が荷重方向に平行な場合(主材-縦)と垂直な場合(主材-横)について試験を行った。

得られた荷重-変位曲線を図1.7.3に示す。10mm厚さのプレートを用いた場合、プレートではなくピンで破壊した。このとき試験体の変位(靱性)は極めて大きい値を示したが、これはピンの強度が大きくプレートで破壊が生じるものの、破壊点に達した後も荷重をほぼ維持し続けるプレートの特性が効果的に働いた結果であると考えられる。これらの結果から、本実験で用いた竹繊維ピンおよびプレートは接合具として十分な強度性能を有していることが明らかになった。

1.7.4 竹繊維を用いたピンおよびプレートの構造体接合部への応用

1.7.4.1 接合部を構成するピンおよびプレート

マダケの長繊維から調製した $\phi 12$ mmのピンおよび3層プレートを用いた。プレートは、7本のピンで固定する厚さ10mmの凸型プレート(図1.7.4)と4本のピンで固定する厚さ5mmの長方形プレート(図1.7.5)の2種類を作成した。

1.7.4.2 凸型プレートを使用した接合部

凸型プレートを用いた接合部は、プレート1枚と長さ110mmのピン7本(柱部3本、梁部4本)を用いて、図1.7.6に示すように、カラマツ集成材の柱(200mm $\times$ 50mm $\times$ 1800mm)と梁(200mm $\times$ 50mm $\times$ 1600mm)を接合した。柱を下面に寝かせて加力フレームに固定し、オイルジャッキを用いて梁端部に加力を与え、ロードセルにより荷重を、試験体の7ヶ所に設置した電気式変位型により変位を測定した(写真1.7.3)。荷重は正負交番の繰返しとし、梁の変位が1/300、1/200、1/120、1/60、1/30、1/15radを経験した後、破壊に至らしめた。プレートは長繊維層の配向方向が荷重方向に対して平行と垂直の2方向について各2回試験を行った。

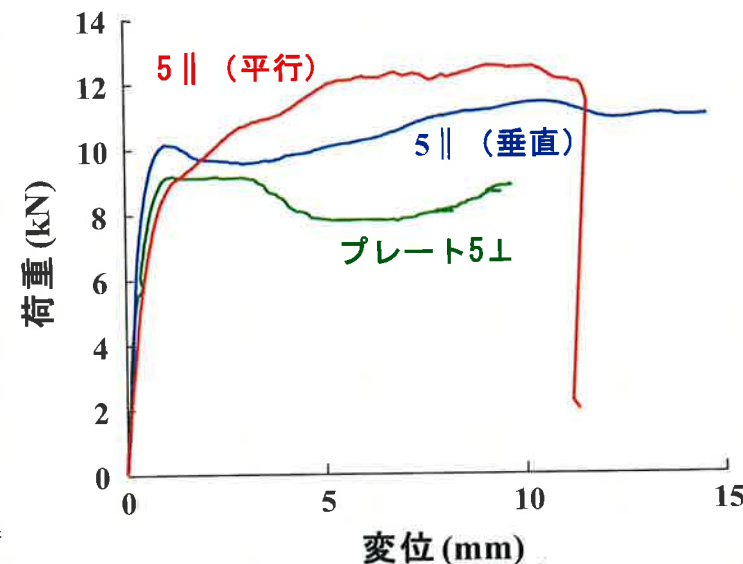


図 1.7.2 繊維配向の異なる5層プレートのせん断試験における荷重-変位曲線の比較

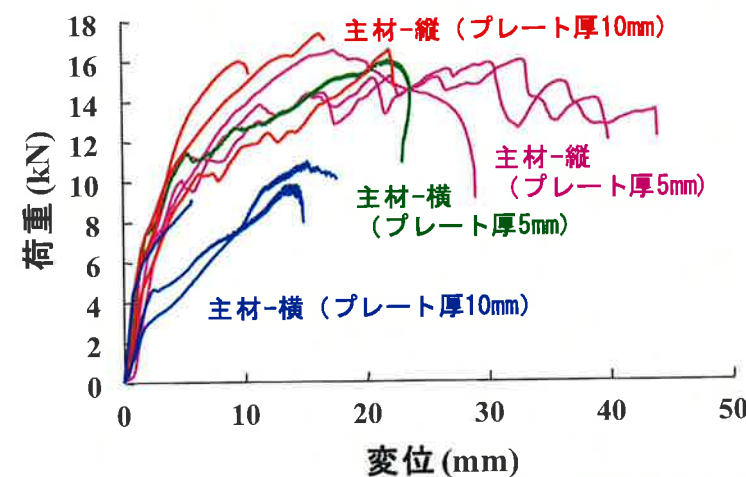


図 1.7.3 ピンとプレートで構成した試験体のせん断試験における荷重-変位曲線に及ぼすプレート厚、主材の向きの影響

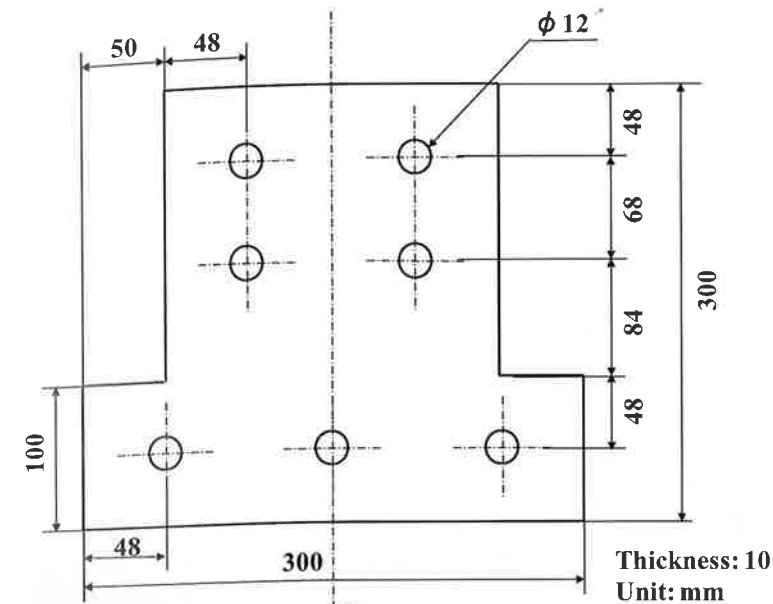


図 1.7.4 凸型プレートの寸法

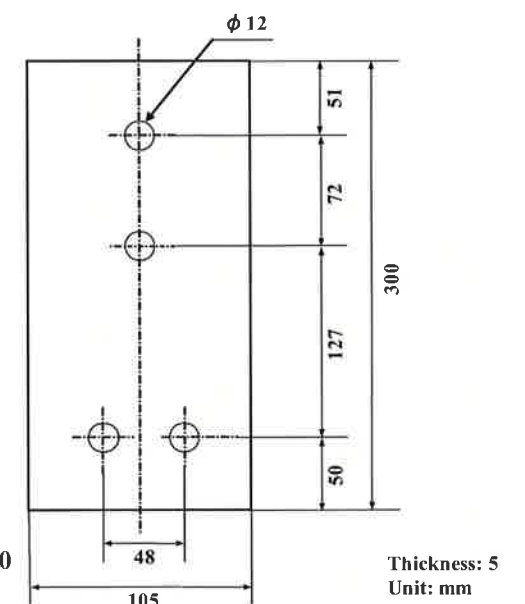


図 1.7.5 長方形プレートの寸法

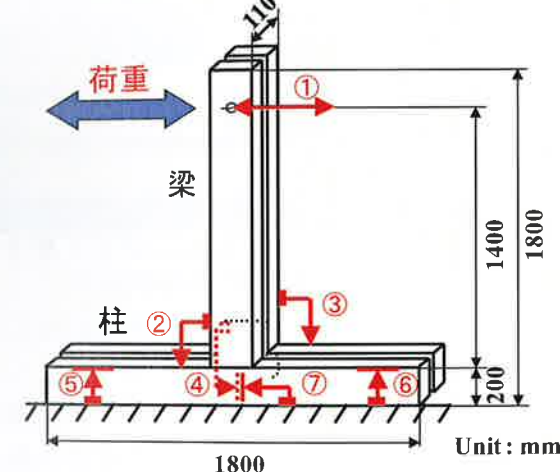


図 1.7.6 長方形プレートを使用した接合部の荷重-変位曲線

垂直配列のプレートを用いた場合はピンに破壊が、平行配列の場合にはプレートに亀裂破壊が生じた。降伏荷重、最大荷重、初期剛性は、垂直配列のほうが平行配列に比べて大きい値が得られた(表1.7.1)が、構造体の接合として十分な降伏荷重は得られなかった。いずれの場合も、梁の接合部のプレートとピンはともに破壊しなかったことから、柱の接合部の強化が必要である。繰返し変形による梁の傾きが1/120、1/60radのとき、荷重の低下率は10%以内であったが、1/30radを超えた場合以上、10~15%の低下率となった。

1.7.4.3 長方形プレートを使用した接合部

長方形プレートを用いた接合部は、カラマツ集成材の柱(105mm $\times$ 105mm $\times$ 800mm)と土台(105mm $\times$ 105mm $\times$ 1000mm)を、柱と土台に設けたスリットにプレート1枚を挿入し、長さ105mmのピン4本(柱部2本、土台部2本)で固定することにより接合したもの、柱(105mm $\times$ 105mm $\times$ 550mm)と土台(105mm $\times$ 105mm $\times$ 1000mm)にスリットを2本ずつ設け、プレート2枚と

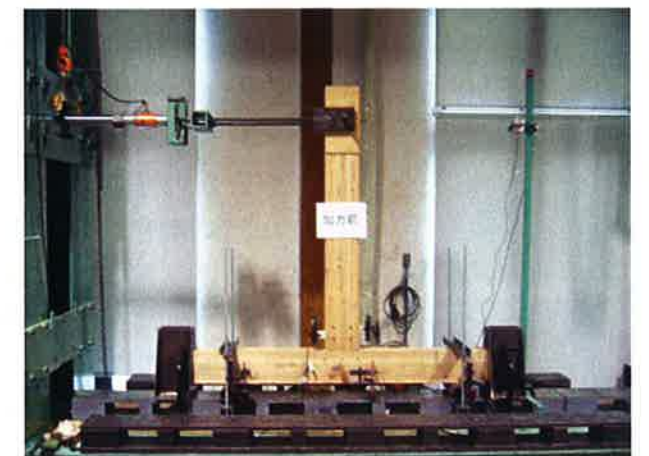


写真 1.7.3 長方形プレート2枚を使用した接合部の測定の様子

表 1.7.1 凸型プレートを使用した接合部の強度性能

	最大荷重 (kN)	降伏応力 (kN)	初期剛性 (N/mm)	エネルギー (J)
平行配列	1.81	0.96	29.73	16.10
	1.48	0.88	27.31	10.47
垂直配列	1.91	1.09	36.44	17.28
	1.91	1.01	32.44	12.14

ピン4本で接合したものの2種類について試験を行った。土台を固定し、柱上端をチャックで掴み、上方に引張荷重を作用し、接合性能を評価した。

プレート1枚を使用した場合の降伏耐力は、平均11.4kNであり、Zマーク金物のT型金物(降伏値12kN)よりも高い値が得られた(図1.7.7)。よって、この接合部ではプレート1枚で十分な接合強度が得られる。プレート2枚を使用した場合、降伏耐力は平均で20.1kNであり、破壊はピンとプレートでなく土台で発生した(写真1.7.4)。これらの結果から、本研究で開発した竹繊維ピンとプレートは、木質建築物用の接合に十分利用可能であることが明らかになった。

1.7.5 まとめ

竹材から長繊維束を分離し、それらを一軸方向に配向させて成形することにより、木造建築物用のピンと、長繊維束と短繊維を用いてプレートを作成し、それらの接合具としての性能試験を行った。また、調製したピンとプレートを用いた接合部の提案を行い、その接合性能を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 竹材をアルカリ処理して分離した長繊維を一軸配向させて調製したφ12の丸ピンの曲げ強度およびヤング率は、それぞれ369MPaおよび54GPaであり、軟鋼並みの強度性能を示した。
- (2) 竹の長繊維と短繊維を用いて調製したプレートは非常に高い塑性率を示した。3層構造のプレートを、長繊維層の繊維配向方向が荷重方向と平行になるように使用した場合、最も高い強度性能を示した。
- (3) 竹繊維を用いて調製したピンおよびプレート、主材としてカラマツ集成材を用いて構成した試験体でせん断試験を行った結果、試験体の変位(靱性)は極めて大きい値を示しており、竹繊維ピンおよびプレートは接合具として十分な強度性能を有していた。
- (4) カラマツ集成材の土台と柱の接合部に竹繊維を用いて調製したピンとプレートを使用した接合部は、実用に供せられる優れた接合性能を示した。

1.7.6 文献

- 1) 井上雅文, 森 拓郎: 低環境負荷・資源循環型木造エコ住宅に関する研究開発, 平成14年度 京都大学木質科学研究所内プロジェクト研究成果報告書, p.21-30(2003)
- 2) 藤井 透, 他3名: 標準 材料の力学, 日刊工業新聞社, p.87-90(2001)

1.8 絞り加工法による圧密竹釘の開発

1.8.1 研究の目的

竹材の木口面を見ると、基本組織である柔細胞中に維管束が散在していることが分かる。この維管束中には、竹材の強度維持のための骨格となる維管束鞘(靱皮繊維)が多く含まれており、この量が強度に大きな影響を及ぼすと考えられる^{1,2)}。前項では、この維管束鞘を分離し、それ

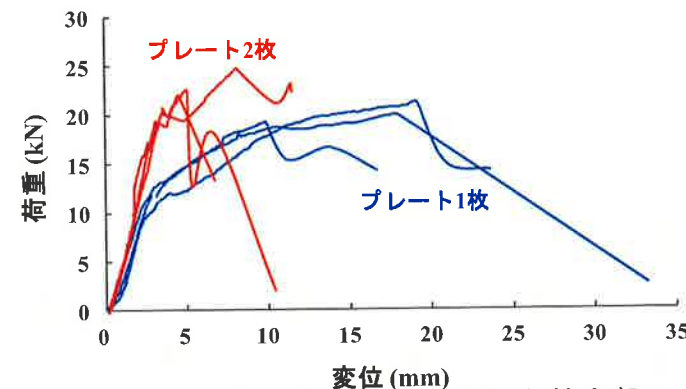


図1.7.7 長方形プレートを使用した接合部の荷重-変位曲線



写真1.7.4 長方形プレート2枚を使用した接合部の破壊の様子

らを圧密化して、木質建築物用の接合具である釘およびピン等の提案を行っているが、本項では、経済性、量産化の観点から維管束鞘を取出すのではなく、竹材そのものを圧密化し、接合具の製造方法を検討した。竹材の断面形状が台形状のものをテーパ状の筒状金属治具中に押し込み、絞り加工を行い、全周囲からの圧密化を図り、竹釘の調整を試み、その物性を評価した。

1.8.2 絞り加工法による圧密化技術

筆者は、既往の研究で絞り加工法による圧密竹接合具の開発を行ってきた³⁾。この方法はテーパ状の筒状金属治具の挿入口の断面積にほぼ相当する竹材を束ねて挿入し、加圧しながら押し込み、テーパの部分で徐々に圧密化を図る方法である。この時、金属治具は、約150℃に加熱しておき、竹材の熱軟化を促進させる。圧密竹接合具の場合は、写真1.8.1の青線①で示すように、竹材の表皮側が台形断面の短辺(上底)側に、内皮側が長辺(下底)側になるように加工を行う。その台形ヒゴの長辺(下底)側が外側になるように8本を束ねて八角柱状にし、絞り加工を行うと柔らかい柔細胞が多く占める内皮側が選択的に圧密され均一化が図られる。圧密前の八角柱の対角線の長さは約25mmで、圧密後の直径は18mmとなり、断面積比で約40%の圧密化が図られ、密度が1.25g/cm³程度の圧密材が得られる。この方法の圧密化の様子を写真1.8.2に示す。

本研究では、この方法を利用し、大分県産のモウソウチクの節間部を用い、圧密竹釘の調整を試みた。写真1.4.3.1の赤線②で示すように、圧密竹接合具とは逆形状の表皮側が台形断面の長辺(下底)側になるように加工し(上底2.5mm、下底9mm、高さ9mm、長さ160mm)、上記方法で同様に圧密化を図った。表皮側を長辺(下底)側にすることにより、表皮側の維管束の分布密度が高くなるため、その部分から高密度の竹釘を調整することが可能となる。写真1.6.3に表皮側を長辺(下底)側にした圧密材を示す。

1.8.3 圧密竹釘の製造方法

絞り加工法により得られた圧密材を1本毎にバラバラし、表皮に近い部分(写真1.8.3の黒丸)から竹釘材料を削りだす。加工方法は、今回開

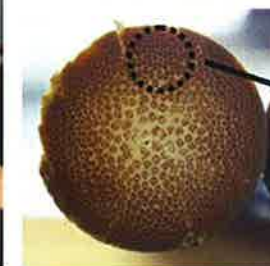


写真1.8.3 表皮側を長辺(下底)側にした圧密材

発した竹材突き加工機によって行った(写真1.8.4)。この装置は、竹材の割裂性に優れた性質を利用したものである。固定された円形状の刃物に竹材をエアシリンダーで押し込んでいくことによって、刃物の径に沿った竹釘材料を製造することができる。1本毎の圧密材から最大径でφ4.5mmの竹釘材料を製造することが可能となった。

1.8.4 釘側面抵抗試験



写真1.8.1 竹材の加工形状

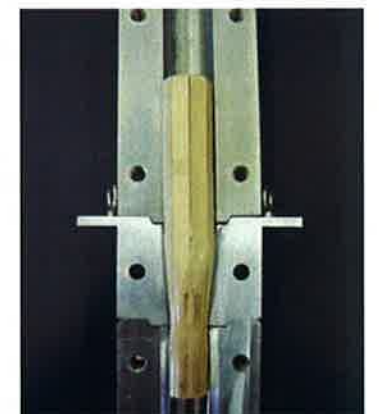


写真1.8.2 絞り加工による圧密化の様子

今回は、 $\phi 4.5\text{mm}$ の竹釘材料を $\phi 2.5\text{mm}$ 、 $\phi 3.0\text{mm}$ 、 $\phi 3.5\text{mm}$ に加工し、先端部を鋭角に尖らせ、長さ 50mm の竹釘を製造した。それら 3 種類の竹釘と、比較対象として CN50 及び CN65 を試験に供した。試験体数は、それぞれ 6 体とし、試験方法は ASTM D1037 を参考に試験を行った。試験速度は、 2mm/min とした。それぞれの釘を打ち込む基材には MDF(長さ 100mm 、幅 50mm 、厚さ 12mm)を使用した。MDF の幅の中心軸の材端から 9mm 及び 26mm の距離の位置に下孔をあけ、釘を打ち込んだ。下孔の径は、竹釘 $\phi 2.5\text{mm}$ 、 $\phi 3.0\text{mm}$ 、 $\phi 3.5\text{mm}$ に対し、それぞれ $\phi 2.0\text{mm}$ 、 $\phi 2.5\text{mm}$ 、 $\phi 3.0\text{mm}$ 、CN50($\phi 2.9\text{mm}$) 及び CN65($\phi 3.3\text{mm}$)に対し、それぞれ $\phi 2.5\text{mm}$ 、 $\phi 3.0\text{mm}$ とした。図 1.8.1 に試験状況を示す。

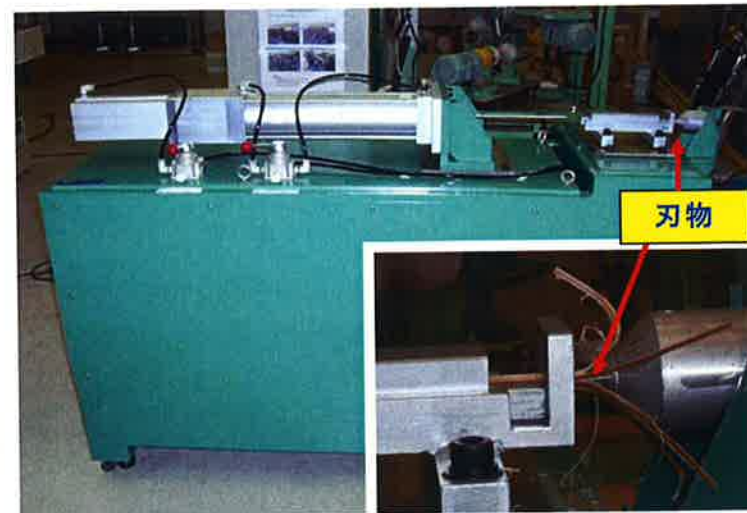


写真 1.8.4 開発した竹材突き加工機

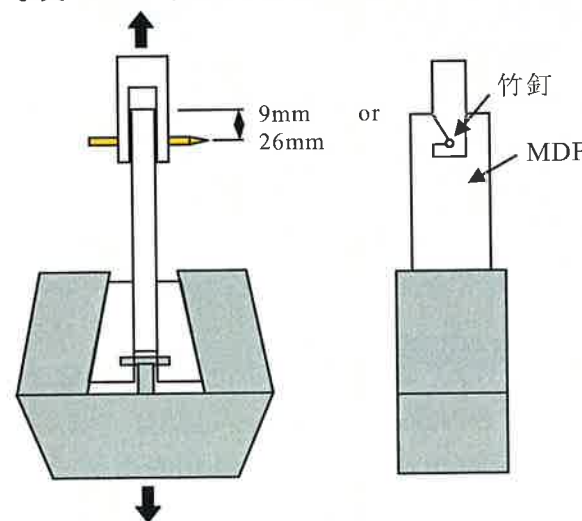


図 1.8.1 釘側面抵抗試験の状況

1.8.5 結果及び考察

釘側面抵抗試験の結果を表 1.8.1 に示す。図 1.8.2 に最大耐力とその時の変位量について示す。今回製造した竹釘の密度は、釘径の違いによる差は見られず $1.21\sim 1.25\text{g/cm}^3$ という結果となった。竹釘の釘径と最大耐力及び初期剛性の関係を見ると、釘径が大きくなるに従い、両者共に大きくなる傾向が見られた。MDF の材端からの距離と最大耐力の関係は、竹釘において差は、ほとんど見られなかった。CN65 に関しては、 26mm の方が 25%ほど高い値を示した。釘

表 1.8.1 釘側面抵抗試験の結果

種類	試験体名	釘径 (mm)	材端からの 距離(mm)	平均密度 (g/cm^3)	最大耐力 (N)	変位量 (mm)	初期剛性 (N/mm)
竹釘	B2.5-9	2.5	9	1.22	594.7	2.3	425.5
	B2.5-26	2.5	26	1.23	584.3	2.3	466.2
	B3.0-9	3.0	9	1.21	823.6	2.3	722.4
	B3.0-26	3.0	26	1.21	870.7	2.5	686.5
	B3.5-9	3.5	9	1.24	1155.1	2.6	948.3
	B3.5-26	3.5	26	1.25	1063.8	2.8	837.9
鉄釘	CN50-9	2.9	9		2542.5	6.6	2086.3
	CN50-26	2.9	26		2682.1	11.2	2587.9
	CN65-9	3.3	9		2750.9	5.3	3154.9
	CN65-26	3.3	26		3438.4	13.1	2862.8

径が同程度の竹釘(B3.0)と CN50 を比較すると、最大耐力においては、竹釘(B3.0)が CN50 の 32% 程度の値にとどまった。図 1.8.2 を見ると分かるように、竹釘のデータは非常にバラツキが少ない結果となった。

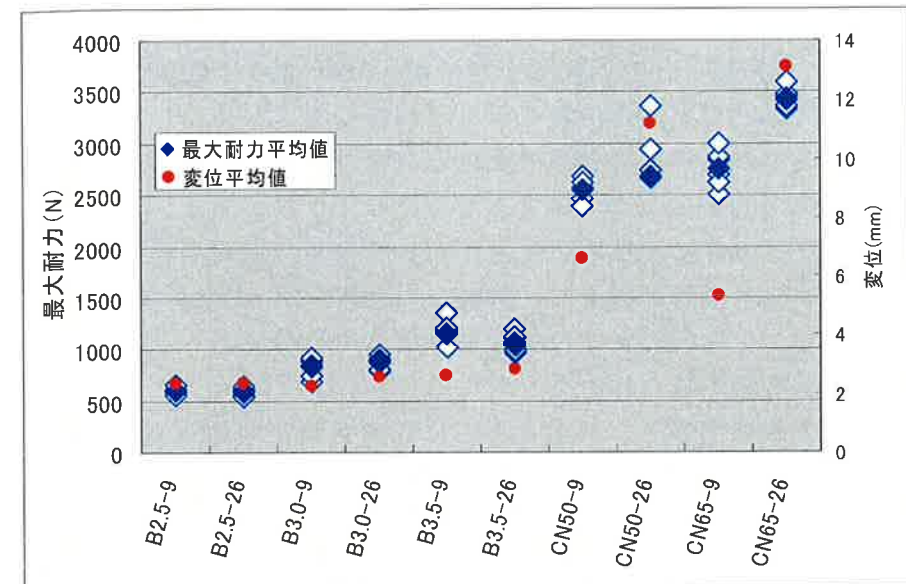


図 1.8.2 釘側面抵抗試験における最大耐力と変位の関係

今回製造した竹釘を実際に合板等に打ち込みが可能かどうか検証するため、打ち込み実験を行った。その結果、合板に下孔加工処理をせずに、金槌で打ち込んだが、曲がり折れ等の破損が発生することなく約 30mm 打ち込むことができた。比較対象として非圧密の竹釘を打ち込んだが、折れて打ち込むことができなかった。写真 1.8.5 にその状況を示す。



写真 1.8.5 打ち込み実験の様子

1.8.6 文献

- 1) 中馬 丞, 広橋光治, 大釜敏正, 笠原康弘: 材料, 39, 847-851(1990)
- 2) 大内成司, 他 3 名: 大分県産業科学技術センター研究報告, 108-111(2002)
- 3) 大内成司, 他 6 名: 大分県産業科学技術センター研究報告, 51-55(2007)

第2章 竹建築ボードの機能性及び付加価値の付与に必要な製造技術

2.1 炭化物の構造を電気的手法で推定する

2.1.1 加熱による木材の変化

木材を無酸素状態で加熱する場合、詳細な科学的解明は未だなされてはいないものの、一般的に 60~200℃において熱減成、160~450℃で熱分解、260~800℃では木炭化、600~1800℃で炭素化、1600~3000℃において黒鉛化が起こるとされている¹⁻⁵⁾。

この過程は、1500℃までの化学反応主体の変化と、それ以上の温度における三次元規則性の増加と結晶成長を伴う物理的変化の二つに大きく分けることが出来る。化学変化は熱力学的により安定な化学構造になるように進行すると考えられている。炭化過程における木炭中の官能基は、基本的には木材中の水酸基が減少し、300℃付近ではカルボニル基が生成し、600℃以上になると芳香環が生成し、化学的に安定な黒鉛型の構造に移行することが示唆されている。さらに高温では黒鉛の結晶構造が見られるようになる⁶⁾。

木材を不活性雰囲気中で加熱すると、昇温とともに炭素含量が増加し、600℃を越えると 90%以上に達する。それ以上の温度で加熱しても炭素含量はわずかに増加するが、酸素、水素が存在し、完全な炭素単一素材になることはない⁶⁾。

木材を加熱すると、質量減少が 120~140℃付近から起こり始め、セルロースは 200~300℃、リグニンは 350~450℃で分解する。木炭の収率は 300~400℃で急速に減少し、450℃で最小となり、それ以上の温度ではあまり変化しない。収縮率もこの温度域で著しく増加する⁶⁾。

木材を 3000℃まで加熱しても、基本的な細胞形状や配列様式はほとんど変わらない。しかし、気体や液体の通導箇所となる壁孔壁は破壊されている。このことが、木炭の通導性を良くし、環境浄化材料としての機能の向上に寄与していると考えられる⁶⁾。

以上を基に、木材を無酸素条件で加熱した場合に関しては、柳沼⁷⁾によって以下のようにまとめられている。

熱減成過程では、水分が蒸発し、有機物の熱分解が始まる。ヘミセルロースの熱分解が始まり、熱に弱い高分子成分が壊れて低分子に変わって行く。熱分解過程では、セルロースの熱分解が起こり、セルロースの分子の形が消えてしまう。リグニンの分解も始まり、やがてほとんどの有機物は分解してしまふ。木炭化過程では、熱分解が進み、完全に木炭化する。一部の木炭は炭素化へと向かう。一般的な炭焼きの温度(黒炭窯)はこの加熱温度の範囲である。炭素化過程では、木炭化が終わって、炭素原子がお互いに手を結んだ形に変わって行く。一部は六角形の形が連なったグラファイトの構造が作られる。黒鉛化過程では、炭素原子は最も安定な形のグラファイト構造(図 2.1.1)となり平面的に広がる形を持つ結晶へと形づくられて行く。

2.1.2 加熱温度と木材の性質の関係

上記のように、木材は加熱温度が上昇すると、細胞構造が変化するため、性質も変化する(図 2.1.2)。例えば、吸着性能は、加熱温度が低いと表面が酸性になり、高いほど塩基性が強くなる。これは、加熱温度が高くなれば、酸性表面の酸性官能基が減少し、塩基性官能基が増加するためである。また、炭に含まれる灰分によっても塩基性となる。よって例えばアンモニアのような塩基性物質を吸着する場合には、表面が酸性の方が良い⁸⁾。加熱温度が低い場合は化学的な吸着で、高いと物理的吸着となる。さらに、木材は 3000℃まで加熱温度を上昇する過程で、耐熱性、耐酸化性、耐火性、耐熱衝撃、高度な寸法安定性など、本来の木材とは全く異なる性質を獲得する。このことに加え、金属と比較して極めて軽いことから、高度の電磁波遮蔽性能が求められる建材や、航空機、車両、船舶、宇宙船などの部材として幅広い用途が期待されている¹⁾。このように、木材は加熱温度が変化すると性質も変化するが、そのうち代表的なものが

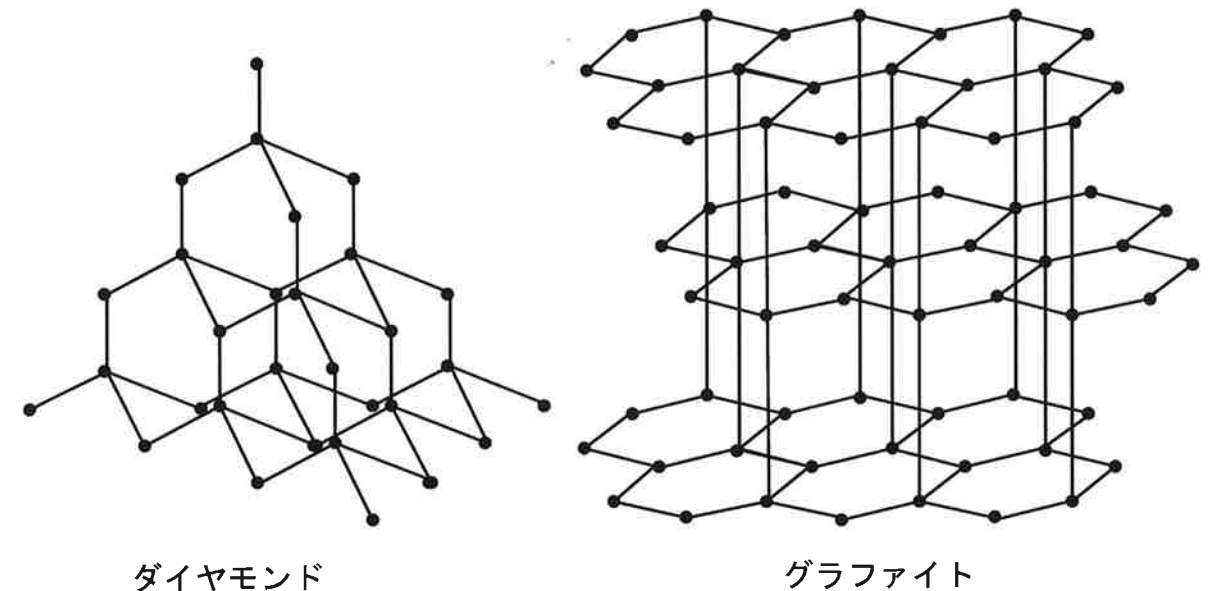


図 2.1.1 木材の加熱温度と性質の変化

電気的性質である。

炭化温度と導電性の関係は、おおまかには常温から 500℃では絶縁体、500~1000℃で半導体、1000℃以上で導体と言える。ここで、絶縁体は比抵抗が $10^{12} \Omega \text{ cm}$ 以上、不良導体は比抵抗が $10^4 \sim 10^{12} \Omega \text{ cm}$ の範囲、半導体が $10^{-4} \sim 10^4 \Omega \text{ cm}$ 、良導体が $10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 以下である。また、比抵抗は、一辺が 1cm の立方体に電気を流した場合に換算した抵抗のことで、抵抗が試験体の大きさに影響されることから用いられる量であり単位は $[\Omega \text{ cm}]$ である⁷⁾。

木炭の炭化温度と電気抵抗の関係を図 2.1.3 に示す⁹⁾。炭化温度が 400~500℃では比抵抗が $10^8 \sim 10^5 \Omega \text{ cm}$ と大きいため、導電性はなく電気は流れない。炭化温度が 800℃以上になると、比抵抗が $10^{-2} \Omega \text{ cm}$ くらいまでに減少するため、少し電気を通す半導体的な性質を示すようになる。さらに炭化温度を上昇させると比抵抗が減少し、良導体に近付いて行く。幾つかの樹種の木材および木材以外

の材料を原料とする炭化物の炭化温度と電気抵抗の関係を図 2.1.4 に示す。

木材および木材以外の材料を原料とする炭化物の製造条件と物性の関係、それに基づく炭化物の用途に関しては数多く提案されているが、この製造条件は炭化温度が中心である。このた

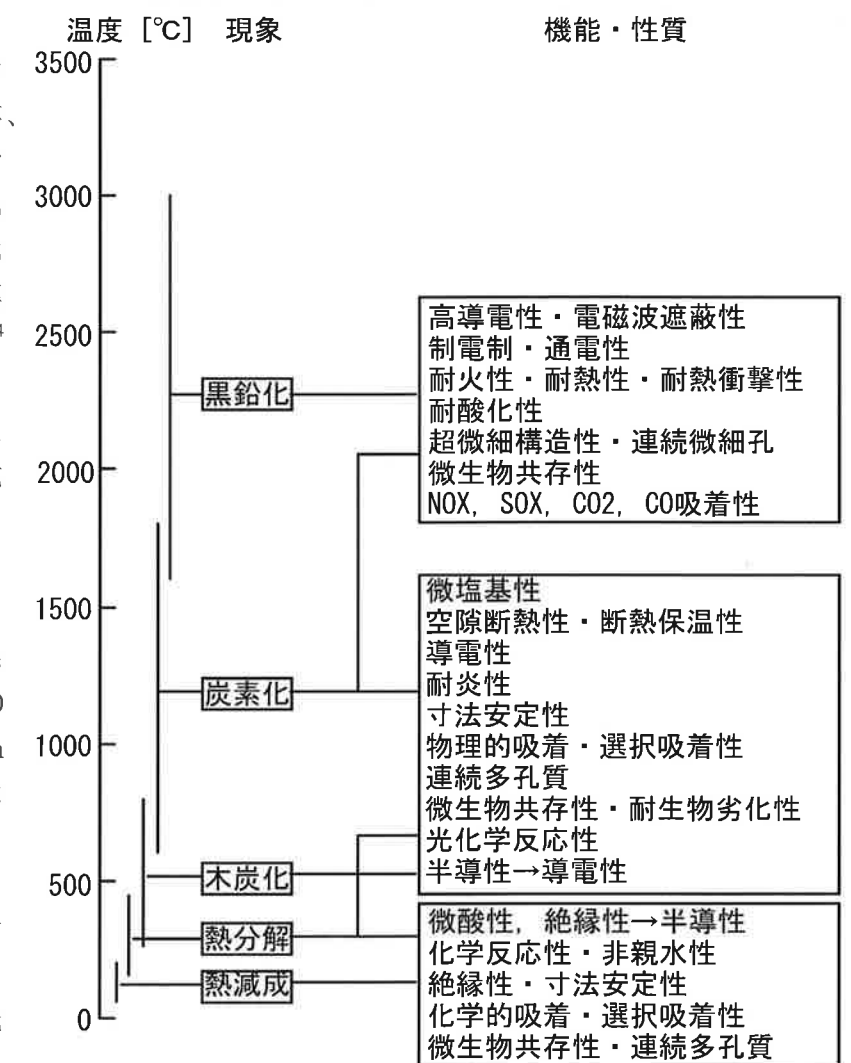


図 2.1.2 木材の加熱温度と性質の変化¹⁻⁵⁾

め、炭化時間や昇温速度の影響^{11, 12)}は必ずしも十分に検討されているとは言えない。

2.1.3 木炭精錬計

このような木炭の電気的性質を利用したものに木炭精錬計がある。木炭精錬計は、木炭表面の電気抵抗を測定して炭化度を知るものである¹⁰⁾。

電気抵抗によって表される精錬の程度とは、加熱処理が炭化物の性質におよぼした変化の程度を総体的に示したものである。木炭の個々の性質、すなわち硬度、比重、発熱量、成分そのものを表すものではない。これらは加熱により変化はするが、その変化の状態は必ずしも連続的、かつ定量的ではない。製炭に用いられる加熱温度である500~900℃くらいの範囲では、電気抵抗はその他の性質よりも比較的に敏感にほぼ定量的に木材の質的变化を表すと考えられる。また、製炭において木材の加熱による質的变化を電気抵抗値で推定する場合にはその指数だけで十分であり、しかも精密な電位差計法、あるいは粉末圧縮による測定法等の精密な測定方法は必要とせず、 $10^8 \Omega$ 程度を直読出来る簡単な電気抵抗計で十分である⁹⁾。

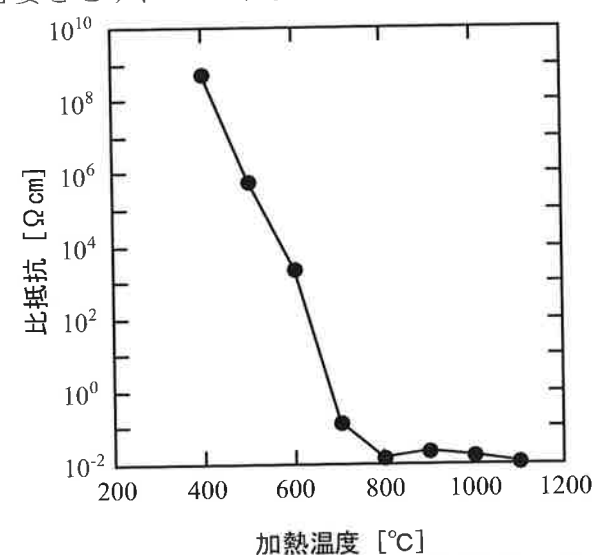


図 2.1.3 木材の電気抵抗と加熱温度の関係⁹⁾ (コナラ黒炭)

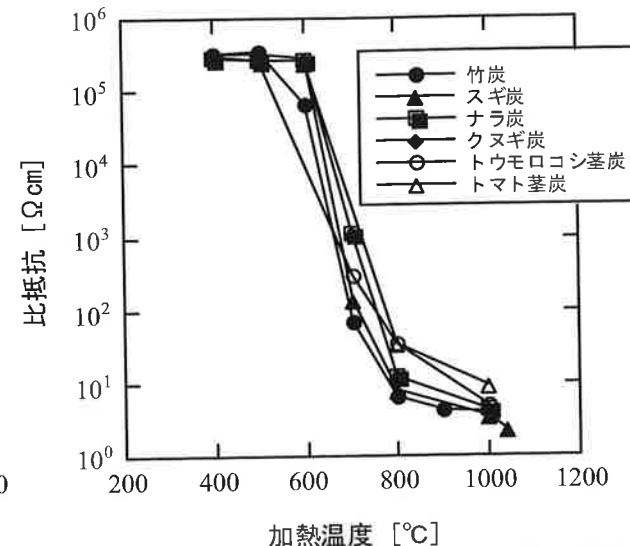


図 2.1.4 様々な原料による炭化物の電気抵抗と加熱温度の関係⁷⁾

2.1.4 文献

- 1) 石原茂久: WOOD MIC, 12, 33-37(1994)
- 2) 石原茂久: 木材研究・資料, 32, 23-29(1996)
- 3) 石原茂久: 木材学会誌, 42, 717-723(1996)
- 4) 石原茂久: 木質複合材料技術研究組合編「木質複合材料研究成果報告書」, 209-217(1998)
- 5) 石原茂久: 日本木材学会編「木材の科学と利用技術 VIII 5.木質系材料の炭素化による新展開」, 1-10(2004)
- 6) 今村裕嗣: 平成 13-15 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))研究成果報告書, 1-10(2004)
- 7) 柳沼力夫: 炭のすべてがよくわかる 炭のかがかく, 誠文堂新光社, 51-78 (2003)
- 8) 立本英機, 炭活用研究会: トコトンやさしい炭の本, 日刊工業新聞社, 46-47(2002)
- 9) 岸本定吉: 林試験報, 65, 135-217(1953)
- 10) 立本英機: おもしろい炭のはなし, 日刊工業新聞社, 163-165(2000)
- 11) 岸本定吉, 古屋剛, 雲林院源治: 日本林学会誌, 33, 144-147(1951)
- 12) 新村孝善, 西元研了, 宮原浩嘉, 池本正二: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 12, 41-45 (1998)

2.2 竹炭の電気特性

2.2.1 研究目的

平成 18 年の総合科学技術会議の答申を受け、バイオマス資源の有効利用に関して様々な政策が政府より提唱された。バイオマス資源の活用には、近年再生産可能な天然資源として注目されている木材や竹材の活用も含まれている。

一方、竹林は現在森林の退廃を増大させる要因の 1 つとして考えられ、早急な管理技術の開発が望まれている。同時にその用途開発も要望されている。

今までに竹材利用拡大策として、内装用複合ボードやフローリング加工床材など様々な用途が考案・作製されてきた。いずれも竹独特の構造に由来する滑らかさを特徴としている。

近年では竹炭は、有効な VOC 吸着材料の 1 つとして、非常に注目されていて¹⁾、調湿材としての活用するための製造方法と性能について報告されている²⁾。製造した竹炭の細孔や比表面積に関する報告も多く、モウソウチクに関しても、その特性について検討されている³⁻⁶⁾。これらは、主に吸着・吸湿材料としての利用を想定しているが、その試験方法や解析は、主にガス吸着を中心であり、平衡状態である必要があるために測定や解析に非常に時間がかかる。しかし、生成した竹炭の性能についての簡便な評価方法は見あたらない。

短時間で炭の特性を評価する方法として精錬計が開発されている。しかし、炭の特性は温度・賦活方法など作製条件による差が多いため、今までの精錬計の評価方法では精度の高い、また履歴の判断が出来ない試料には適用しにくい状態であった。

精錬計は電気抵抗を利用しているので、電気特性による分類を考える。石原は、160~450℃は熱分解、260~800℃は木炭化、600~1800℃は炭素化、1600~3000℃で黒鉛化に分類し⁷⁾、500℃までは絶縁体、500~800℃は半導体、800℃~では高導電体のように仕分けしている。また、藤原ら⁸⁾は、竹炭の電気抵抗について炭化温度との関係には樹種に関係ないことや吸湿性能について論じている。しかし、その電気特性や焼成温度、昇温速度、比表面積相互の関係の解明はまだ不十分である。

そこで、本研究では、各種条件で焼成した竹炭の電気特性を調べ、主に空隙量(比表面積)との関係について検討することを目的とした。これらの関係を明らかにすることで、職人の経験や技術に基づいていた今までの竹炭製造工程の簡便化が図られ、品質性能向上にも寄与できると考えられる。

2.2.2 実験

2.2.2.1 試料

実験には、鹿児島県産のモウソウチク(*Phyllostachys pubescens* 約 4~5 年生)を用いた。節ごとに幅 2~3cm 長さ 20cm の短冊状にした竹炭焼成用の試料を作製した。

2.2.2.2 焼成処理

焼成処理には、光洋サーモシステム(株)製小型電気ボックス炉(KBF668N-S)を用いた。初期水分の影響を排除するため、竹材を予め全乾状態にして焼成前の重量を測定した後、 P_2O_5 入りのデシケーターに入れ、焼成直前まで室温で保存した。焼成過程における試料内の温度を確認するため、竹の端部に穴を空け、K 型熱電対を差し込みそのまま炉内の所定の位置に静置した。図 2.2.1 に示すように焼成時には 2~4l/min の窒素ガスを炉内に導入しながら、所定の温度まで昇温させた。焼成終了後も炉内が室温付近まで冷却するまで窒素ガスを流し続けた。

焼成の設定温度は 400、500、600、650、700、750、800 および 900℃であり、それぞれの設定温度での保持時間は 0、0.5、1、2、3h であった。昇温速度は各条件とも 3℃/min 一定にした。所定のプログラム終了後、空冷による自然冷却を行った。設定温度での焼成終了後、竹炭の重

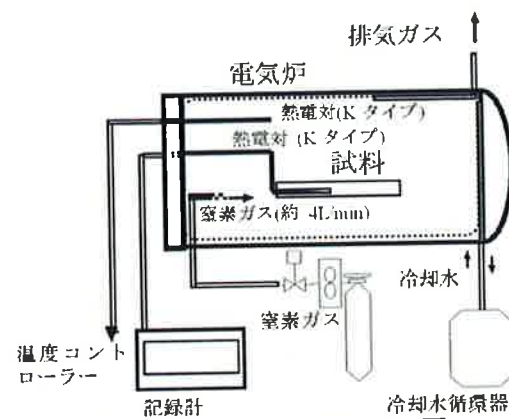


図 2.2.1 加熱系

量と電気特性を求めた。

また、保持時間 3h、昇温速度 1、3、5、10℃/min および上記電気ボックス炉による最速値の条件で竹炭を焼成した。設定温度は 400℃、700℃および 900℃であった。

図 2.2.2 に焼成中における炉内の温度と試料中の温度の時間変化を示す。設定温度と試料内部温度との偏差は小さく、炉内温度が設定温度に到達した後、直ちに試料中の温度も追従したことが確認出来た。

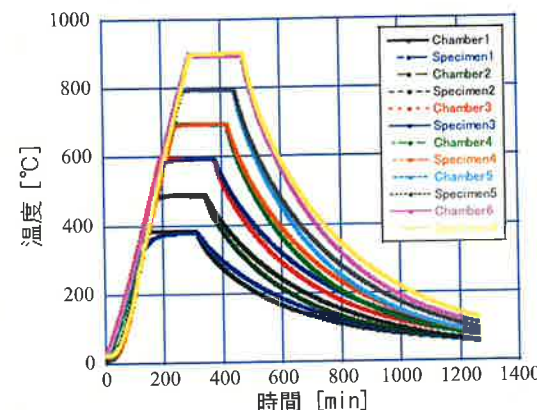


図 2.2.2 焼成過程における炉内および試料内温度

2.2.2.3 ガス吸着による比表面積および細孔分布測定

得られた竹炭の比表面積および細孔分布について基礎的知見を得るため、約 0.2～0.3g の竹炭粉末を 250℃で 15 時間脱気前処理を行い、ドライアイスメタノール溶媒(温度約-80℃)を用いて比表面積測定を行った。BET 式で比表面積を求めた。なお、一連の測定は島津テクノロジーにて行い、装置は島津マイクロメリテックス ASAP-2010 を用いた。

2.2.2.4 インピーダンス、位相角および電気容量測定

通常、焼成した炭は直流回路を用いた精錬計でその精錬度を評価する。その場合、電気抵抗率は 10^8 から $10^9 \Omega/\text{cm}$ の範囲でその指数から 1～8 段階に分類される⁹⁾。その他、体積抵抗の測定からシールド効果を論じている報告¹⁰⁾もある。

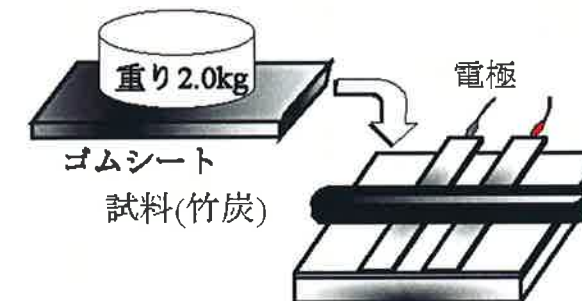
本研究ではインピーダンス、位相角および電気容量を測定した。インピーダンスは交流回路において交流の流れを妨げる全体の働きであるので、直流回路の抵抗と同じようなものであると考えることが出来る。また、従来の直流による木炭精錬計では試料表面の情報を捉えることを主としていたのに対して、交流ではより試料内部の情報を得ることが出来る。さらに、直流法で得られるのは電気抵抗のみであるのに対し、交流法では電気抵抗に加え、コンデンサの電気容量やコイルの自己インダクタンスも求めることが出来る。このように交流法の方がより多岐に渡る竹炭の情報を得ることが出来ると考えられるので、本研究では交流を用いた。

測定には HIOKI(株)製 LCR メーター(3531(DC～100kHz)、3532(50Hz～5MHz))をそれぞれ用いた。両者の相違は測定周波数範囲のみで、確度に差はなく、3531 は主に直流抵抗測定など低周波数域の測定に用い、通常の特性評価には 3532 を用いた。幅 2～3cm、厚さ 0.5cm、長さ 20cm に加工した試験体は、インピーダンス測定前に厚さ測定を行った。試験体は、完全な平板では

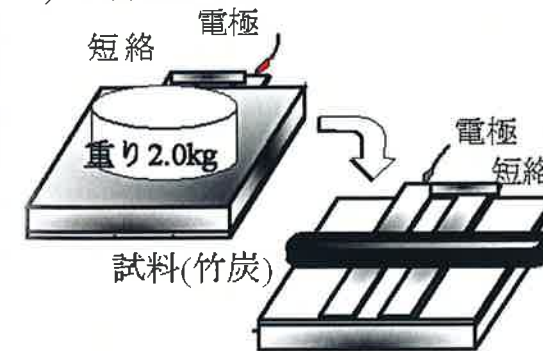
なく湾曲面を有しているため、通常の対向式平行板電極では電極と試料との接触性が低く、安定した測定値を得ることは難しい。そのため、2kg の荷重を加え、接触性を高めた。常温(約 20℃)において周波数 100Hz～5MHz の範囲でインピーダンス、位相角および電気容量をそれぞれ次の 3 通りの方法による測定結果の比較を行い性能評価した。

・表面電気抵抗測定：図 2.2.3a のように表面電気抵抗には、テフロンシートを貼った台座上に幅 1cm、厚さ 1mm、長さ 5cm のステンレス板(電極間距離 1cm)を貼りつけて電極とした。電界深度は電極間距離の 1/2 に相当する¹¹⁾としてこのような配置にした。試料の片面を電極部に接地させ、試料の上から絶縁ゴムシートを置き、その上から 2kg の重りを置き接触性を高めた。

a) 表面抵抗測定



b) 体積抵抗測定



c) 4 端子法による抵抗測定

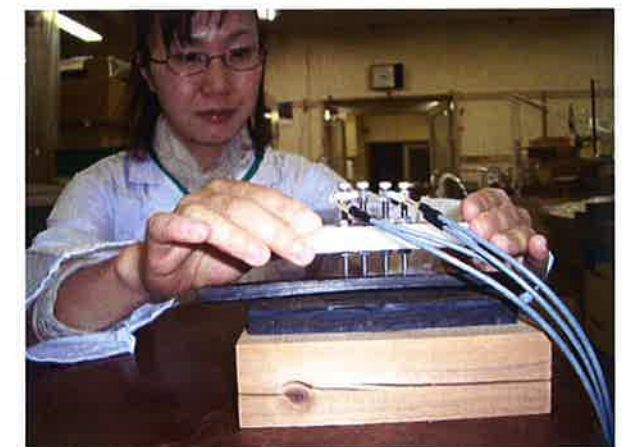
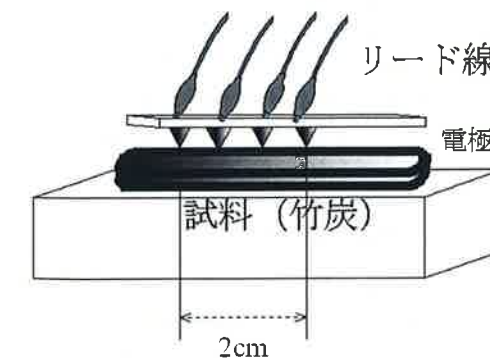


図 2.2.3 電気特性の測定

・体積電気抵抗測定：ステンレス電極部をステンレスクリップで短絡させたもの2つ用意し、図 2.2.3 b のように中央に試料を挟み込んで測定を行った。測定値のバラツキを防ぐため、絶縁ゴムシートの上から 2kg の重りを置き、接触性を高めた。

・4 端子表面電気抵抗測定：図 2.2.3 c のように JIS K7194¹²⁾ に準じた針状電極(4 端子、端子間距離 5mm、電圧印加部 1cm、電流計測部 2cm)を用いた。印加電圧はすべて 3V に設定した。

2.2.2.5 吸湿試験

焼成した竹炭の吸湿性を評価するために、タバイエスペック(株)製のチャンバー(PR-4G)でそれぞれ温度 20℃一定、相対湿度(RH)を 45、65、75、85%に設定しながら、竹炭の平衡含水率を求めた。チャンバー内にはメトラー(株)製上皿電子天秤とヴァイサラ(株)製の温湿度センサーを設置し、一定時間間隔(5 分)でコンピューターに重量データおよび温度・湿度データを RS232C で収集した。なお、測定開始前に竹炭は、真空乾燥器で予め脱気し、絶乾重量の測定を行った後、P₂O₅ 入りのデシケーターに入れた。45%RH に設定運転しているチャンバー内の天秤上に試料を置き、恒量になるまでの重量変化を記録した。約半日間、重量変化がない場合に恒量に達したとして、次のステップ 65%RH に切り替えた。これを 85%RH の時まで繰り返した。

2.2.3 結果及び考察

2.2.3.1 収率

各条件で焼成した竹炭の収率を表 2.2.1 に示す。収率は電気ボックス炉から取り出した直後の重量と全乾重量の比である。今回の値は 29.3~46.6%で、炭窯で焼成した炭の値 13.8~27.1%⁹⁾ よりも大きかった。保持温度が高くなるに連れて収率は低下したが、保持時間に対しては、ほとんどの温度域で竹炭の収率は変化が小さい傾向であった。収率の一番大きい 400℃でも、保持時間に依存せず、収率変動は 5%以内に収まる傾向を示した。

表 2.2.1 竹炭の収率

保持時間 [h]	設定温度 [℃]							
	400	500	600	650	700	750	800	900
0	46.1	37.5	34.0	32.1	31.8	29.6	31.0	29.6
0.5	46.6	35.4	33.0	31.9	32.0	29.7	30.5	29.5
1	43.1	34.2	32.1	31.7	32.3	30.0	31.3	29.6
2	41.2	33.9	30.2	29.8	31.0	31.3	30.4	29.3
3	39.4	34.4	32.7	30.0	30.9	30.7	29.6	30.4

単位 [%]

2.2.3.2 電気特性の測定方法の検討

電気特性への焼成時間による影響について、それぞれの温度で保持時間ごとのインピーダンスの測定結果の一例を図 2.2.4 に示す。10kHz の値を代表値として用いた。

ここで、電気抵抗(インピーダンス)や電気容量は試料の厚さの影響を受ける。図 2.2.4 および後述の図 2.2.6 より、電気特性は 8 桁、6 桁といった極めて大きな変化を示した。一方、竹炭の厚さ変動は、いずれの場合も約 10%の範囲内で収まった。よって、電気特性の変化に対しては、炭化による収縮に由来する試料厚さが減少することによる電極間距離の縮小の影響は小さく、焼成による竹炭内部における相対的な伝導成分の増加あるいは抵抗成分の減少が主に寄与すると考えられる。

表面および体積抵抗の値は、400℃および 500℃で保持時間 0~3h によって変化を示さなかった。600℃では 0~3h で変化がやや認められ、特に 700℃では 0~3h で大きく変化する傾向を示した。800℃および 900℃では低温焼成と同様に 0~3h では大きな差は認められなかった。同様な傾向は、人見らが¹³⁾スギ材・ヒノキ材について、600~700℃の間で、大きく低下することを報告している。これらの結果から 600~700℃以外では焼成時間と電気特性の関係は低く、ほぼ

初期時の 1h 以内に電気的特性は決定されることが示唆された。

前述のように、収率は保持時間によって変化しなかったが、竹炭の電気特性も保持時間に対して変化しないとは言えないということが分かった。すなわち収率のみから竹炭の性能を予測するのは困難であり、電気特性を測定する必要があると言えた。

また、表面電気抵抗測定、体積電気抵抗測定および 4 端子表面抵抗測定の結果を比較すると、設定温度に対する上記の傾向はこれら 3 つの測定方法の結果に共通していた。さらにインピーダンスの変化も広範囲に渡っていたので、精度も十分であると考えられる。よってこれらの測定方法の中で一番簡便な方法は表面電気抵抗測定であり、実用的であると考えられる。

2.2.3.3 絶縁体から導電体への変化

650~750℃の温度域で保持時間によってインピーダンス変化率が大きくなった要因を明らかにするために、インピーダンスおよび位相角の周波数特性について検討した。1 例として、インピーダンス変化率が最も大きかった 700℃で焼成した結果を図 2.2.5 に示す。0~1h の範囲では、インピーダンスは保持時間が増すに連れて急激に減少したため保持時間が長くなると絶縁体から導電体へ近付いたと考えられる。このことから前述のように 1h 以内に竹炭の電気的特性は決定されることが示唆された。

位相角は、図示はしないが、400~600℃の温度で焼成した竹炭では-90° 付近でほぼ一定の挙動を取り、逆に 900℃では位相角は周波数の増加により途中で極性が正で上昇する傾向を示した。特に位相角の負から正への符号変化が、650~750℃での竹炭の大きな特徴である。通常木材や竹材のような絶縁体では位相角は負で、金属では正であることから、650~750℃で

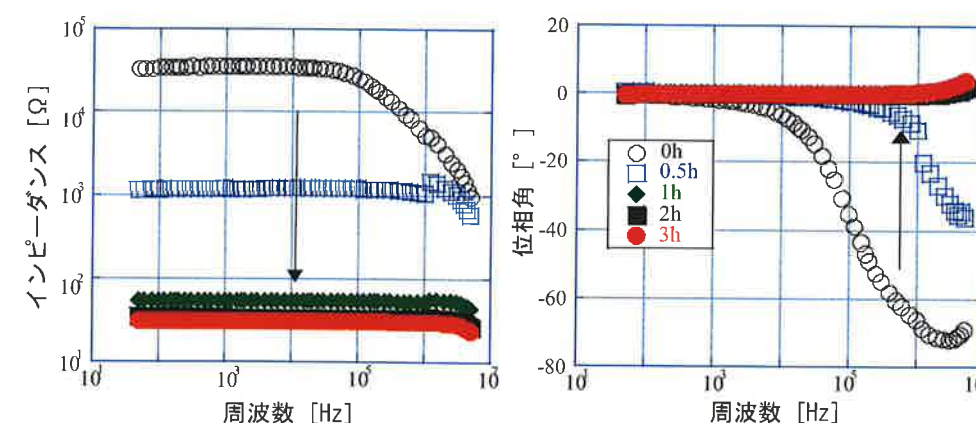


図 2.2.5 竹炭のインピーダンスと位相角の周波数特性 (焼成温度 700℃、表面電気抵抗測定)

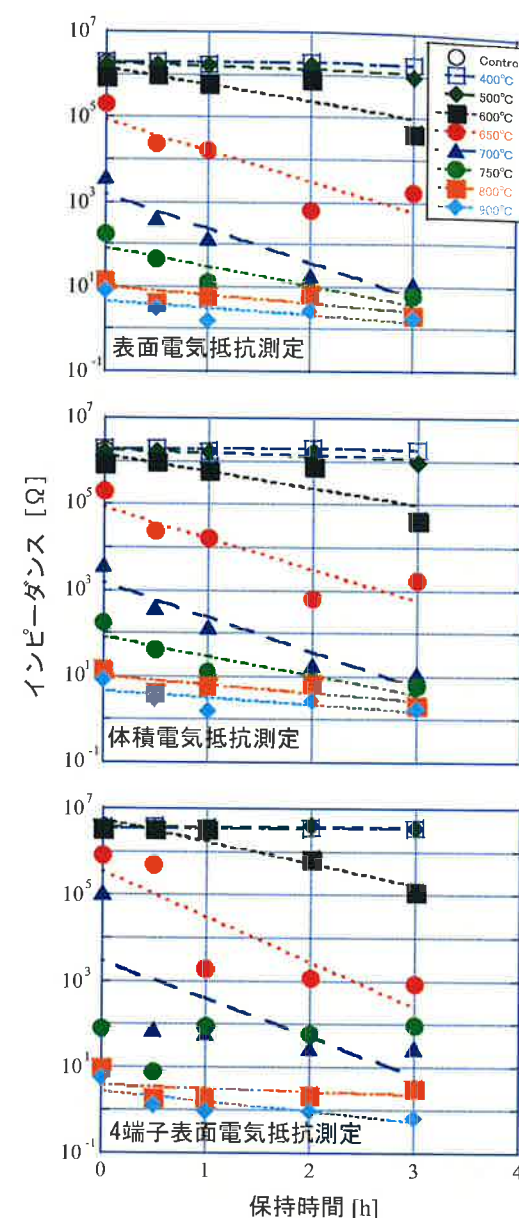


図 2.2.4 竹炭のインピーダンス

定されることを示唆している。

これらの現象を説明するためには、電気的特性と竹炭の内部構造との関係を明らかにする必要があるが、竹炭内部の構造変化と結びつけた詳細な報告は少ない。

例えば杉元らは、500℃で熱処理された木材の誘電緩和を求め、Maxwell-Wagner の不均一論に基づく界面分極による緩和を認めている^{14,15)}。ただし、内部の構造と伝導との関係を明らかにすることが、課題として残されている。

Hata らは、700℃で炭化した木炭についてタマネギ状粒体の存在¹⁶⁾やナノダイヤモンド構造の存在¹⁷⁾の関与などを報告している。Nishiyama ら¹⁸⁾は、高温で焼成した木炭について、X線回折やラマン分光法によって微細構造の分析を試みている。特に、焼結温度が1000℃を超えると木材で見られた回折角のピークは見られなくなる。また、600℃より高温領域では、脱水反応と炭素が芳香環凝縮の増加により増える。これはXPSでも800～1000℃の温度で芳香環の増加を認めている。さらに劇的な木炭の電気伝導形成は化学的構造の変化により、 π 電子系で構成されたためによる。一方、Ishimaru ら¹⁹⁾は、700℃より高温で処理すると電気良電体である黒鉛に見られる Sp^2 -結合に変わって、絶縁体である Sp^3 -結合を有する結晶化が進行することを報告している。

タケ類の灰分については、モウソウチクの灰分中にSiが木炭よりも多く含まれていることが報告されている²⁰⁾。Siは、半導体物質として知られ²¹⁾、電気的特性に大いに影響を及ぼすと考えられるが、焼成中に他の元素とどのように結合変化するのか、バルク状態での電気特性と結びつけるまでには至っておらず、さらに検討を進める必要がある。

2.2.3.4 空隙の増加

図 2.2.6 に示すように、設定温度の上昇に伴い電気容量は増大し、その増大は特に600～700℃で急激であり、700℃を超えると800℃、900℃とほぼ同一レベルに達した。これは空隙の増加を示している。従って、前項で示したように竹材実質は絶縁体から導電体へ向かって変化し、さらに実質に空隙が発生したと考えられる。ただし、電気容量は密度に依存しているため、大きな空隙では増加しない。よって焼成過程で大きな空隙は閉じられ、微小な空隙が増加した可能性がある。

安部²²⁾は、活性炭の細孔径の増大による電気二重層キャパシタンスへの応用・実用化を考えており、結果として炭の電気容量と空隙との関係が密接であることを示唆している。

したがって、この性質変化は空隙構造の変化に起因すると考え、続いて吸放湿特性を検討した。様々な温度で焼成した竹炭の吸湿特性を図 2.2.7 に示す。おおよそ低温で焼成した竹炭より高温で焼成した竹炭の方が平衡含水率は高くなる傾向を示した。

すなわち、400℃より900℃で焼成した竹炭の方が、吸湿能は向上し、高湿度側では平衡含水率は大きくなった要因には、メソ細孔など微小な空隙が低温焼成のものよりも多数存在する結果、毛管凝縮によるものと考えられている²³⁾。しかし、メソ孔に吸湿特性が起因するのではなく、マイクロ孔に起因するという説²⁴⁾もあり、この機構については現在検討中である。

このような吸湿現象について、空隙と処理温度との関係を比表面積から検討した。

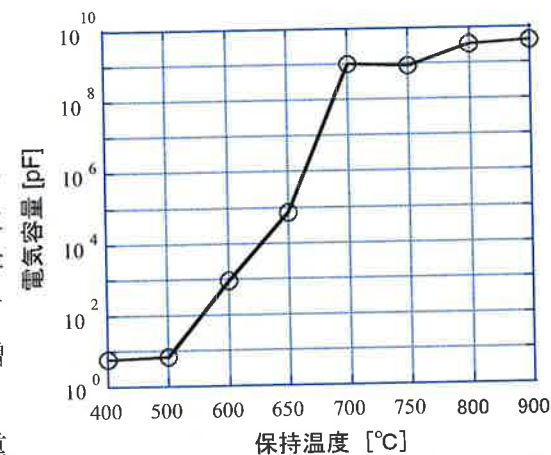


図 2.2.6 竹炭の電気容量と設定温度の関係(保持時間 3h、測定周波数 10kHz)

図 2.2.8 に 0～3h で焼成した竹炭の設定温度ごとおよび保持時間ごとの比表面積の変化を示す。設定温度が増加すると比表面積も増加した。700℃付近でやや変曲点を示し、900℃まではほぼ同じ傾向であったが、900℃3h では急激に比表面積が低下した。新村ら²⁵⁾は、クロマツでも比表面積と温度との関係で、600℃付近で極大になることを報告している。スギ材でも同様に比表面積と温度との関係に変曲点があるという報告²⁶⁾がある。この特性は、前述したように電気的特性とも密接な関係があると考えられ、電気的特性・挙動から比表面積を評価することも可能になると考えられる。

設定温度 400℃では 0～1h の範囲で増大し、それ以外の設定温度では 3h で減少した。すなわち、焼成が進むと一度増大し、さらに焼成が進むと減少するのではないかと考えられる。900℃3h が特異的に下がっているが、900℃で長時間焼結すると賦活

収率が下がり、ヨウ素吸着性能は向上することは報告されている²⁷⁾。さらに、この温度ではマイクロ孔が発達していると考えられる。その他に、600℃でマイクロ孔が新生され、それ以上の温度では既存の細孔が消失することも報告されている²⁸⁾。その他の温度域では、処理時間での変化は小さく、初期においてほぼ所定の細孔が有する性質に達したものとみなすことができる。すなわち、保持時間による比表面積の変化傾向と図 2.2.4 に示すインピーダンスの変化傾向は一致していると考えられる。

以上のことから、竹炭の比表面積と焼成温度および電気的特性とは、密接な関係にあり、電気的特性の測定によって、焼成竹炭の吸湿など吸着性能の評価が可能であることが明らかになった。

2.2.3.5 昇温速度の影響

インピーダンス、電気容量の昇温速度に対する変化を図 2.2.9 に示す。全ての設定温度においてインピーダンスと電気

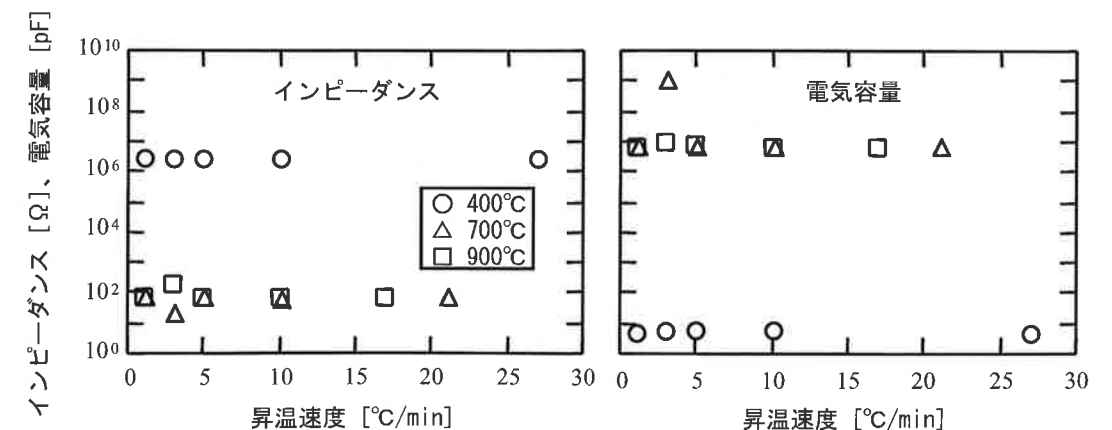


図 2.2.9 インピーダンス、電気容量と昇温速度の関係

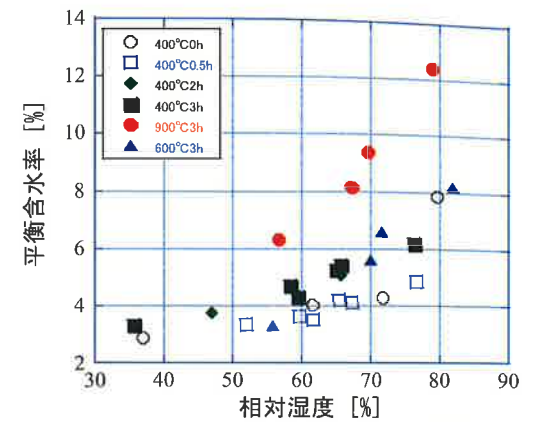


図 2.2.7 竹炭の吸湿特性

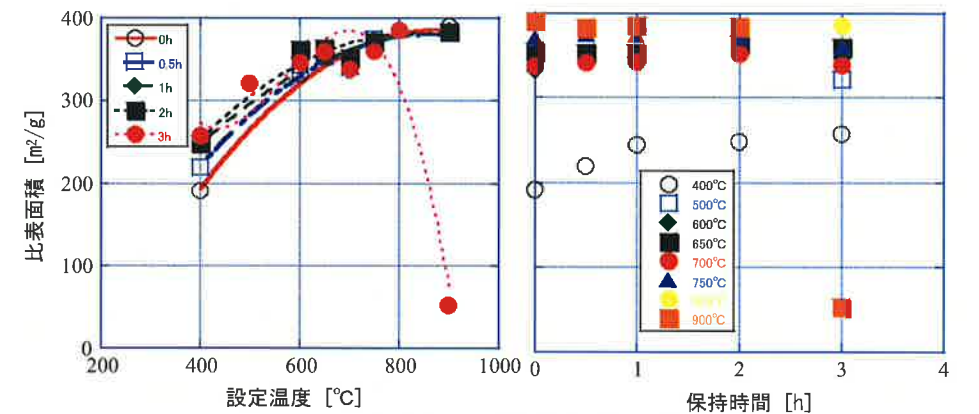


図 2.2.8 竹炭の比表面積

容量は昇温速度に依存せず、一定の値を示した。よって、この温度域では電気特性に与える影響は小さいと判断される。

2.2.4 まとめ

熱処理竹材の電気的特性について、焼成温度、焼成時間および昇温速度との関係を検討した。その結果、次のような結果が得られた。

- (1) 収率は、設定温度が高くなるに連れて低下したが、保持時間に対しては、ほとんどの温度域で竹炭の収率は変化が小さい傾向であった。この収率変化のみから竹炭の性能を予測するのは困難であると言えた。
- (2) 電気特性の変化に対しては、炭化による収縮に由来する厚さ減少による電極間距離の縮小の影響は小さく、焼成による竹炭内部の変化が主に寄与すると考えられた。
- (3) 表面電気測定法、体積電気測定法および4端子表面抵抗測定法の中で一番簡便な方法は表面電気抵抗測定法であり、実用的であると考えられた。
- (4) インピーダンスの急減と位相角の急増が設定温度 600~750℃、保持時間 0~1h で生じたことから、この温度・時間範囲で竹材の絶縁体から導電体へ向かう変化が急激に生じていると推察された。
- (5) 設定温度の上昇に伴い電気容量、平衡含水率および比表面積が増大したことから、竹材実質に空隙が発生し、一部例外はあるもののおよそ空隙は焼成温度の上昇と共に増大すると推察された。
- (6) 竹炭の比表面積と設定温度および電気的特性とは、密接な関係にあり、電気的特性の測定によって、焼成竹炭の吸湿など吸着性能の評価が可能であることが明らかになった。
- (7) インピーダンスおよび電気容量は昇温速度に対してほぼ一定の値を示すことが明らかになった。

2.2.5 文献

- 1) 小谷公人: (社)日本木材加工技術協会, 最新木材工業事典, 290-291(1999)
- 2) 谷田貝光克: (社)日本木材加工技術協会, 最新木材工業事典, 242-243(1999)
- 3) 岩崎訓, 長谷川貴洋, 大爺和実, 澁谷康彦, 安部郁夫: 炭素, 220, 270-275(2005)
- 4) 安部郁夫, 岩崎 訓, 浅見浩二, 千田二郎: 炭素, 208, 114-119(2003)
- 5) 安部郁夫, 長谷川貴洋, 澁谷康彦, 岩崎 訓: 炭素, 215, 241-245(2004)
- 6) 松岡真悟, 豊田信行, 得居輝: 愛媛県林業技術センター研究報告, 23, 1-10(2005)
- 7) 石原茂久: 木材学会誌, 42, 717-723(1996)
- 8) 藤原 敏, 嶋 一徹, 千葉喬三: 木材学会誌, 49, 333-341(2003).
- 9) 森林総合研究所: 木材工業ハンドブック改訂4版, 丸善, 1017-1032(2004)
- 10) 松永一彦, 新村孝善, 西 和枝, 國生徹郎: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 12, 47-52(1998)
- 11) 神原 周: 高分子実験学講座4 高分子の物性II, 共立出版, 149-172(1957)
- 12) 日本工業規格 導電性プラスチックの4探針法による抵抗率試験方法 JIS K 7194(1994)
- 13) 人見充則, 計良善也, 立本英機, 安部郁夫, 川舟功朗, 幾田信生: 炭素, 160, 247-254(1993)
- 14) Sugimoto, H., Norimoto, M.: *J. Soc. Mat. Sci. Japan*, 52, 362-367(2003)
- 15) Sugimoto, H., Norimoto, M.: *Carbon*, 42, 211-218(2004)
- 16) Hata, T., Imamura, Y., Kobayashi, E., Yamane, T., Kikuchi, K.: *J. Wood Sci.*, 46, 89-92(2000)
- 17) Ishimaru, K., Vystavel, T., Bronsveld, P., Hata, T., Imamura, Y., Hosson, J. D.: *J. Wood Sci.*, 47, 414-416(2001)

- 18) Nishimiya, K., Hata, T., Imamura, Y., Ishihara, S.: *J. Wood Sci.*, 44, 56-61(1998)
- 19) Ishimaru, K., Hata, T., Bronsveld, P., Nishizawa, T., Imamura, Y.: *J. Wood Sci.*, 53, 442-448(2007)
- 20) 雲林院源治, 杉浦銀治, 谷田貝光克: 木材学会誌, 33, 71-76(1987)
- 21) 物理学辞典編集委員会: 物理学辞典改訂版, 培風館, 1670-1671(1992)
- 22) 安部郁夫: 廃棄物の炭化処理と有効利用, NTS, 14-27(2001)
- 23) 安部郁夫: 吉田弘之の編多孔質吸着材ハンドブック, フジ・テクノシステム, 56-68(2002)
- 24) 秋友水季, 鈴木里佳, 石丸 優, 飯田生穂, 古田裕三: 木材学会誌, 52, 228-234(2006)
- 25) 新村孝善, 西元研了, 宮原浩嘉, 池本正二: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 12, 41-45(1998)
- 26) 北村寿宏, 田口 剛, 片山裕之: 木材学会誌, 48, 272-279(2002)
- 27) 松永一彦, 新村孝善, 西 和枝, 神野好孝, 國生徹郎: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 13, 23-29(1999)
- 28) 栗本康司, 鹿野厚子, 沢辺攻: 木材学会誌, 50, 106-115(2004)

2.3 炭化物の調湿・吸着性能

2.3.1 炭化物の吸着剤としての利用

木炭・竹炭をはじめとする炭化物は昔より様々な地域で生産されており、燃料はもとより土壌改良、水質浄化、床下調湿、脱臭など多様な用途で用いられているが、最近ではこれらをさらに発展させた新たな利用方法が開発されている。

これらの利用法のうち吸着について見てみると、炭が水質浄化などの機能を持つことは古くから知られており、18世紀の後半に木炭がアンモニアなどのガスを吸着する力を持っていること、ワインの脱色に効力があることが見出されて以来といわれている^{1),2)}。

吸着には物理吸着と化学吸着があり、炭化物でも両方の吸着が起こっている。一般には吸着量への寄与は物理吸着によるところが大きく、物理吸着量が少なくなると化学吸着の寄与が影響するようになる。物理吸着は van der Waals 力の中の London 分散力によって起こり、この力は分子間距離が短いほど強く、距離が長くなると極端に弱くなる。また分子サイズが大きくなるほど強くなる(図 2.3.1)³⁾。すなわち、細孔壁からの距離が近いほど吸着力が強くなり、また物質同士の力も働くために物質量が多いほど吸着力が強くなる。

ところで、木炭製造業者には備長炭のように硬くて焼き締まった木炭が『良い炭』という考え方が強い。確かに燃料としては火持ちが良いなどの理由からこの考え方は正しいが、吸着剤として使用する場合には逆に間違っていることが多い。物理吸着機能を発現させるにはナノオーダーのミクロ孔を無数に生成させなければならず、当然木炭は多孔性になり密度も強度も低下する。いままで良いとされていた木炭よりもむしろ製造に失敗したいわゆる消し炭のような木炭が吸着剤として良い可能性がある³⁾。また、物理吸着能力を向上させる炭化方法と化学吸着能力を向上させる炭化方法は異なることに注意しなければならない。ある炭化方法により得られた炭化物をある用途に用いて結果がよかったからといって、他の用途でも良い結果が得られるとは限らない。例えば、400℃程度の比較的低温で炭化して得られた炭化物は、多くの酸性官能基が存在するためにアンモニアなどの塩基性物質の吸着性能が高いと報告されている⁴⁻⁶⁾。重要なことは、用途別に最適な炭化方法を適用することで



(1) 細孔径の大きさ



(2) 吸着質分子の大きさ

図 2.3.1 London 分散力の比較

ある。

吸着剤として炭化物を製造する際に、得られる炭化物の吸着能力に影響を与える因子として、原料となる木材の樹種、炭化温度、炭化時間などがある。様々な樹種の木材から製造された木炭の比表面積およびよう素吸着性能を表 2.3.1 に示す⁷⁾。木材自体に空隙の多い針葉樹(表 2.3.1 ではクロマツ炭)は比表面積が大きくなる結果が得られている。

また、吸着剤として一般的によく耳にするものに活性炭がある。冷蔵庫脱臭用などとして多数の商品が市販されている。活性炭の原料は炭であり、加熱して炭化できる物質はすべて原料にすることができる³⁾。活性炭の製造には、炭化に加えて賦活という工程が行われており、水蒸気賦活、空気賦活、薬品賦活などがある⁸⁾。得られた活性炭の比表面積は炭化物の数倍あるが、高温で賦活するために、アンモニア等の塩基性物質の吸着には向いていない。

吸着という点で脱臭以外の炭の利用法として調湿がある。400、600、800℃で炭化したヒノキ炭の相対湿度 90%および 55%での水蒸気吸着量を測定した結果、600℃の木炭が吸着量の差が最大になったというデータが得られている³⁾。この理由としては、600℃の木炭が最も細孔径が大きく、湿度を下げたときに水蒸気が脱着しやすいと考えられている。活性炭も炭化物を賦活して製造するために、炭化物よりも細孔径が大きくなることから調湿性能が高い³⁾。

2.3.2 文献

- 1) 石崎信男: 炭素は七変化, 研成社(1993)
- 2) 今村祐嗣: 多孔質吸着材ハンドブック, フジテクノシステム, 49-55(2005)
- 3) 安部郁夫: 吸着技術講習会要旨集, 1-14(2003)
- 4) 岸本定吉, 橋田敏洋: 木材学会誌, 15, 208-213(1969)
- 5) 人見充則, 他: 炭素, 160, 247-254(1993)
- 6) 小幡 透, 日高富男, 西 和枝, 新村孝善: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 21, 31-40(2007)
- 7) 新村孝善, 西元研了, 宮原浩嘉, 池本正二: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 12, 41-45(1998)
- 8) 例えば, 真田雄三, 鈴木基之, 藤元 薫編: 新版活性炭, 44-53(1992)

2.4 竹炭の調湿および吸着性能

2.4.1 研究目的

「炭焼き」は昔から各地で行われており、その方法は昔ながらの土窯から電気炉のような機械的な方法まで様々である¹⁻⁵⁾(以下、炭化炉と表現する)。用いられている炭化炉の大きさも様々で、大きなものほど内部の温度差が大きく、炉内の場所によって得られた炭の性状も異なる。よって、均一な炭を製造するのは困難であるのが現状である。

一方、竹は特に九州地方に多く存在し、2.2.1 項でも前述のように、森林荒廃の一因になっている。また、竹材の利用についても、山村における労働力不足、竹材需要の低下などにより、

竹林整備がなかなか進まないのが現状である。

ところで、炭は以前より調湿・脱臭効果があることは知られており¹⁻⁵⁾、脱臭剤等にも利用されている。竹炭についても同様の効果があり、未利用の竹材を炭化して、得られた炭化物を利用する研究も行われている⁶⁾。しかし、炭の持つ吸着性能等については理論的な解明はまだ明らかにされていない。そこで本研究では、炉内の温度差がほとんどないような小型の炭化炉を用いて炭化温度の異なる竹炭を製造し、炭化温度における物性、特に調湿・吸着性能を明らかにすることを目的とする。

2.4.2 実験方法

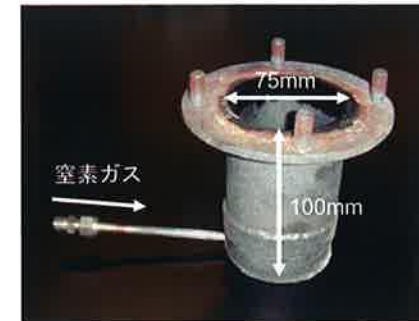
原料は 5 年生以上の鹿児島県産モウソウチクを用いた。乾燥後、図 2.4.1 に示す炭化炉を用いて窒素気流(約 100ml/分)中、昇温速度 3℃/分、炭化温度(設定温度)400~900℃の 100℃毎、炭化温度に達してからの保持時間 3 時間の条件で炭化を行った。得られた竹炭は振動ミルにより粉碎し、以下の各種物性試験に用いた。

- ・炭素分: 全炭素・全窒素分析計を用いて燃焼酸化-熱伝導度測定法により測定した。
- ・金属成分分析: 竹炭を電気マッフル炉で灰化後、硝酸-水=1:1 溶液を加えて加熱分解後、濾液を JIS K 0102 に準拠して原子吸光光度計により測定した。
- ・pH、よう素吸着性能: JIS K 1474 に準拠した。
- ・比表面積: 窒素ガス吸着 BET 法により測定した。
- ・調湿性能: 竹炭を秤量瓶に量り取り、これを小型恒温恒湿器にセットし、温度は 25℃一定とし、相対湿度を 50%および 90%に変化させた時の竹炭の含水率を求めた。方法の詳細は 2.5.2.1 項参照。

・吸着試験: 吸着ガスはホルムアルデヒド、アンモニア、トルエンを用いた。吸着試験は以下の方法で行った。

- (1) 試料の準備: 前項で得られた炭化温度別竹炭の粉末(絶乾状態のもの)をシャーレに 1.0g 量り取り、これを 10L テドラーバッグに封入して中の空気を吸引した。
- (2) 吸着ガスの調整: ホルムアルデヒド(またはアンモニア、トルエン)の液体試薬をマイクロシリンジで所定量分取し、これを容積約 100L のテドラーバッグ中に入れ、空気ポンプから空気を導入しながら液体試薬を気化させた。液体試薬の分取量と空気の導入量を調整することにより、吸着ガスの初期濃度を調整した。なお、原ガス濃度は、ホルムアルデヒド 20ppm、アンモニア 23ppm、トルエン 30ppm とした。
- (3) 吸着ガスの導入: (2)で調整したガスの入ったテドラーバッグを試料が封入されたテドラーバッグと連結し、吸着ガスを約 10L 導入した。

- (4) 濃度の推移: (株)ガステック製ガス採取器およびガス検知管を用いて、テドラーバッグ内の気体を所定量採取することにより濃度を測定し、経時変化を追跡した(図 2.4.2)。



炭化炉本体



炭化装置全様

図 2.4.1 炭化装置



図 2.4.2 テドラーバッグ法による竹炭のガス吸着試験

2.4.3 結果および考察

得られた竹炭の物性を表 2.4.1 に示す。炭化時の実際の炉内温度は設定温度より若干低かった。pH は炭化温度の上昇に伴い酸性官能基が消失するために徐々に高くなる傾向を示した。炭素分は炭化温度の上昇に伴い、

表 2.4.1 竹炭の物性

炭化温度 (°C)	炉内温度 (°C)	pH	収率 (%)	全炭素 (%)	よう素吸着 (mg/g)	比表面積 (m ² /g)
400	371	9.5	34.2	78.4	60	0.5
500	466	9.8	30.1	85.4	240	129
600	563	9.8	28.4	87.0	290	263
700	655	9.9	27.3	89.3	350	276
800	739	10.0	27.0	90.3	320	273
900	835	10.0	25.9	89.3	250	177

熱分解により水素や酸素を含む有機成分が消失していくために高くなった。よう素吸着性能および比表面積は炉内温度が 600~700°C で極大となった⁷⁾。これ以上の温度では、竹炭が焼き縮まったために、これらの値は減少傾向になったと考えられる。

次に、竹炭の吸放湿試験結果を図 2.4.3 に示す。炭化温度によらず調湿効果は見られたが、炭化温度の高いほうが含水率は高く、高湿度時と低湿度時の差が大きいことから、高温炭化物のほうがより高い調湿効果が期待できる。

ホルムアルデヒド吸着試験では、炭化温度の違いによる吸着速度の差はほとんど見られなかった(図 2.4.4)。原ガス調整の際に用いたホルムアルデヒド溶液は弱酸性であるが、原ガスは少量の試薬を気化させ、大量の空气中に拡散させているためにほぼ中性を示すことから、化学吸着はほとんど見られなかった。また、今回行った試験の濃度では比表面積値の違いによる差も見られなかった。高濃度のホルムアルデヒドガスを吸着させる場合には差が見られることも考えられるが、実生活において高濃度のホルムアルデヒドガスの暴露は考えられないので、ここでの議論は省略する。

アンモニア吸着試験では、低温炭化物のほうが吸着速度は速かった(図 2.4.5)。これは、炭化温度が低いと竹炭中に酸性物質が残存しており、また、アンモニアガスは塩基性を示すことから、酸-塩基の化学吸着が優先的に起こった結果であると推察される。

トルエン吸着試験では、比表面積値の大きな竹炭が吸着速度は速かった(図 2.4.6)。トルエンは中性ガスであるために化学吸着ではなく、物理吸着が起こっていると推察される。

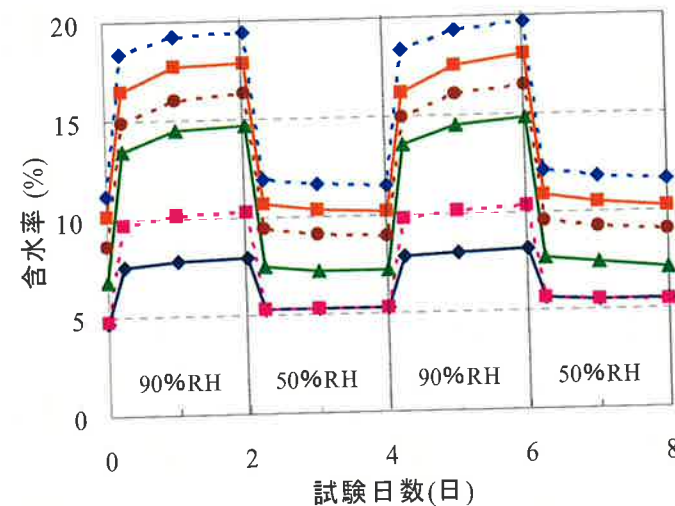


図 2.4.3 竹炭の吸放湿試験

—●— 400°C -■- 500°C —▲— 600°C
-◆- 700°C —▼- 800°C -+ - 900°C

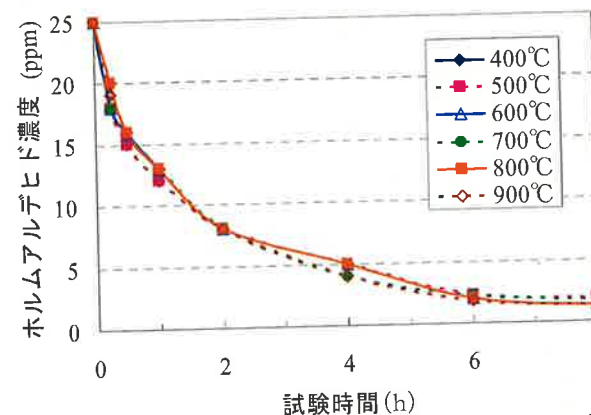


図 2.4.4 竹炭のホルムアルデヒド吸着試験

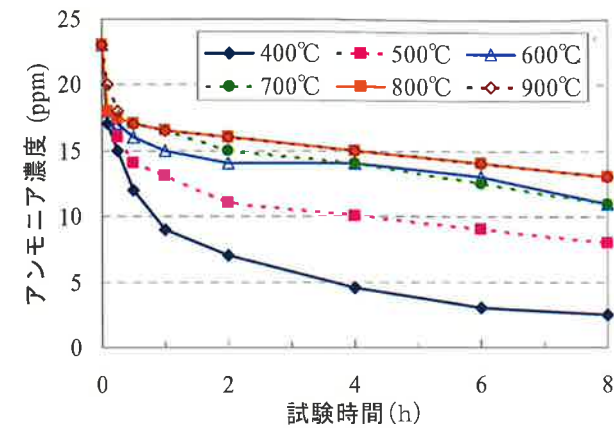


図 2.4.5 竹炭のアンモニア吸着試験

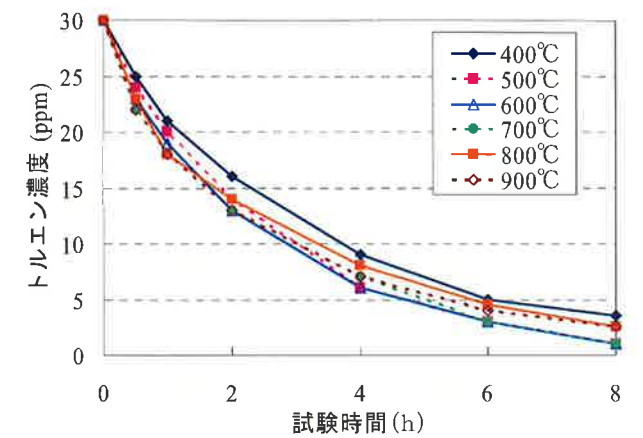


図 2.4.6 竹炭のトルエン吸着試験

2.4.4 文献

- 1) 炭焼きの会編: 炭と木酢液, 59-101(1991)
- 2) 岸本定吉: 木炭の博物誌, 133-170(1984)
- 3) 杉浦銀治, 古谷一剛: 木炭はよみがえる, 144-166(1988)
- 4) 樋口清之: 木炭, 22-25(1993)
- 5) 内村悦三, 谷田貝光克, 細川健次監修: 竹炭・竹酢液の利用事典, 27-72(1999)
- 6) 例えば, 小幡 透, 日高富男, 西 和枝, 新村孝善: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 21, 31-40(2007)
- 7) 小幡 透, 日高富男, 西 和枝, 新村孝善: 木質炭化学会第 5 回研究発表会講演要旨集, 19-20 (2007)

2.5 竹建築ボードの調湿および吸着性能

2.5.1 研究目的

未利用の竹材を炭化し、得られた竹炭を利用して建築用資材を開発する研究¹⁻⁴⁾は行われているが、吸着性能等については未知の部分も多い。本研究では、後述の竹建築ボードの含水率を求めることにより竹建築ボードの調湿性能を明らかにするとともに、ガス吸着試験を行い竹建築ボードの VOC 等吸着性能を明らかにすることを目的とする。

2.5.2 実験方法

2.5.2.1 吸放湿試験

試験片は 2.8 項で後述する竹建築ボードを 100mm 角に切断して準備し、定温乾燥機で乾燥させ絶乾重量を求めた。これらを 25°C、50%RH の小型恒温恒湿器(図 2.5.1)にセットし、恒量になったところで試験を開始した。

吸放湿試験は、50%RH から 90%RH に設定を変更し 90%RH を 2 日間保持し、次に 90%RH から 50%RH に変更し 2



図 2.5.1 竹建築ボードの吸放湿試験

左: 小型恒温恒湿器全様 右: 竹建築ボードの吸放湿試験の様子

日間保持した。これを2回繰り返した。

2.5.2.2 ガス吸着試験

吸着ガスはホルムアルデヒド、アンモニア、トルエンを用いた。吸着試験は以下の方法で行った。

(1) 試料の準備：次項表 2.5.1 の条件で製造された竹建築ボードを 120mm 角に切断後、裏面および小口面はすべて、表面は 100cm² 露出するようにアルミテープでシールした。これを 10L テドラーバッグに封入して中の空気を吸引した。

(2) 吸着ガスの調整：ホルムアルデヒド(またはアンモニア、トルエン)の液体試薬をマイクロシリンジで所定量分取し、これを容積約

100L のテドラーバッグ中に入れ、空気ボンベから空気を導入しながら液体試薬を気化させた。液体試薬の分取量と空気の導入量を調整することにより、吸着ガスの初期濃度を調整した。なお、原ガス濃度は、ホルムアルデヒド 20ppm、アンモニア 15ppm、トルエン 30ppm とした。

(3) 吸着ガスの導入：(2)で調整したガスの入ったテドラーバッグを試料が封入されたテドラーバッグと連結し、吸着ガスを約 10L 導入した。

(4) 濃度の推移：(株)ガステック製ガス採取器およびガス検知管を用いて、テドラーバッグ内の気体を所定量採取することにより濃度を測定し、経時変化を追跡した(図 2.5.2)。



図 2.5.2 テドラーバッグ法による竹建築ボードのガス吸着試験

2.5.3 結果および考察

吸放湿試験に用いた竹建築ボードの製造条件を表 2.5.1 に、吸放湿試験結果を図 2.5.3 に示す。あまり差は見られないが、竹繊維の量が増加すると若干含水率が下がる傾向が見られた。

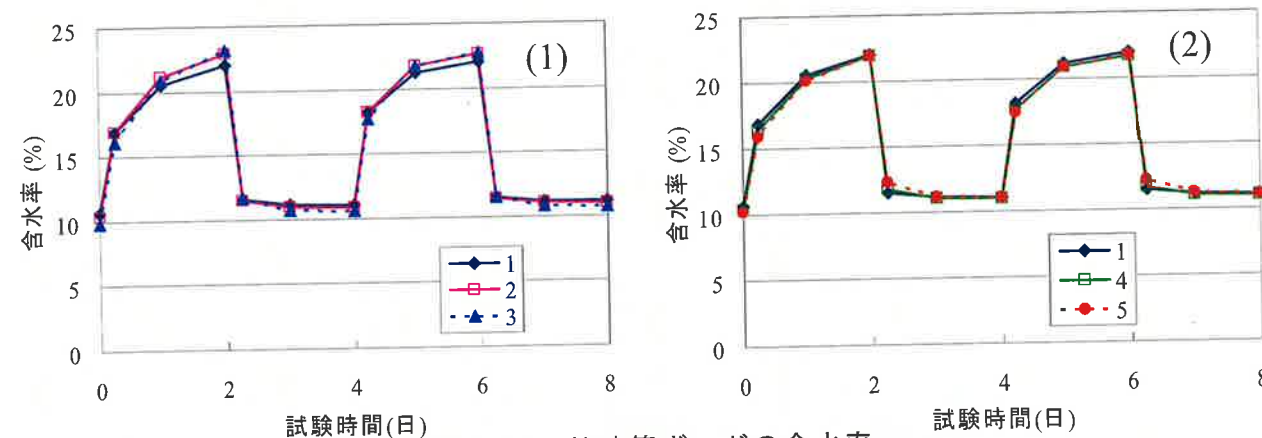


図 2.5.3 竹建築ボードの含水率

(1) グルコマンナン、竹繊維量を変化 (2) 竹炭、竹繊維の合計量一定

ホルムアルデヒド吸着試験の結果を図 2.5.4 に示す。ボード中のグルコマンナンと竹繊維の量を変化させた図 2.5.4(1)では、グルコマンナンと竹繊維の量が増加するにつれて、ホルムアル

デヒドの吸着速度は若干遅くなる結果が得られた。竹炭と竹繊維の重量の合計が一定である図 2.5.4(2)では、ホルムアルデヒドの吸着速度に差は見られなかった。

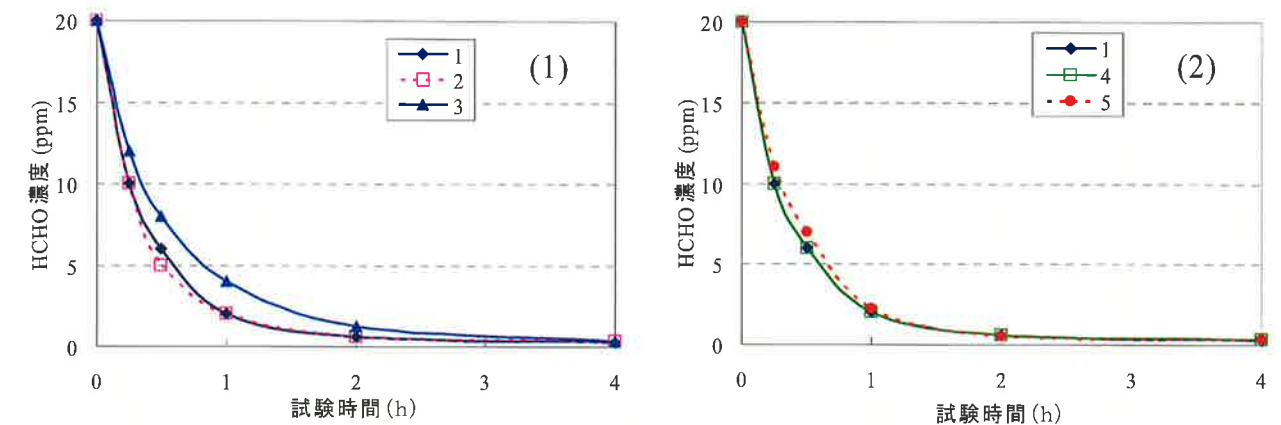


図 2.5.4 竹建築ボードのホルムアルデヒド吸着試験

(1)グルコマンナン、竹繊維量を変化 (2)竹炭、竹繊維の合計量一定

アンモニア吸着試験の結果を図 2.5.5 に示す。ボード中の原料の量が増加しても吸着速度に差は見られなかった。

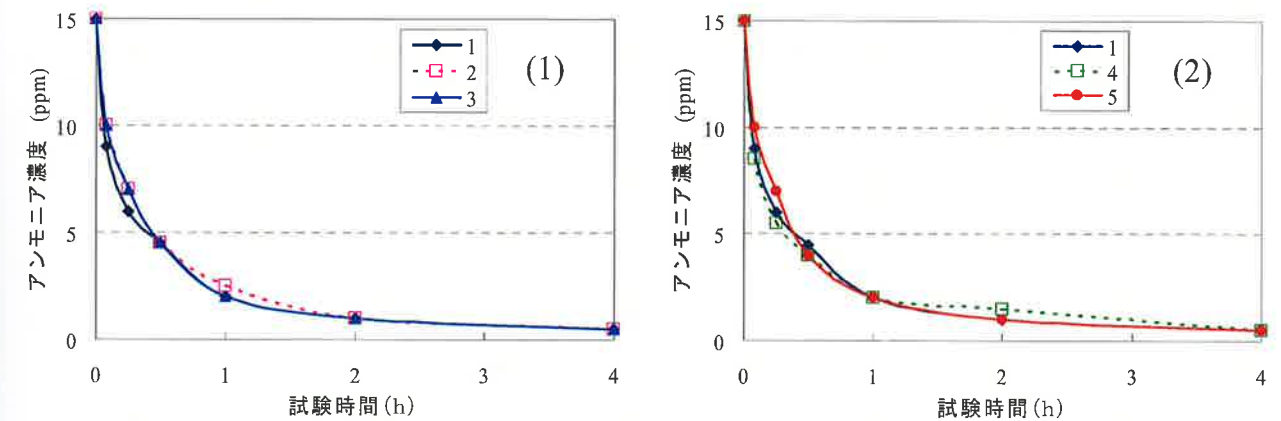


図 2.5.5 竹建築ボードのアンモニア吸着試験

(1)グルコマンナン、竹繊維量を変化 (2)竹炭、竹繊維の合計量一定

トルエン吸着試験結果を図 2.5.6 に示す。グルコマンナンや竹繊維の量が増加するにしたがい、トルエンの吸着速度は遅くなるという結果が得られた。

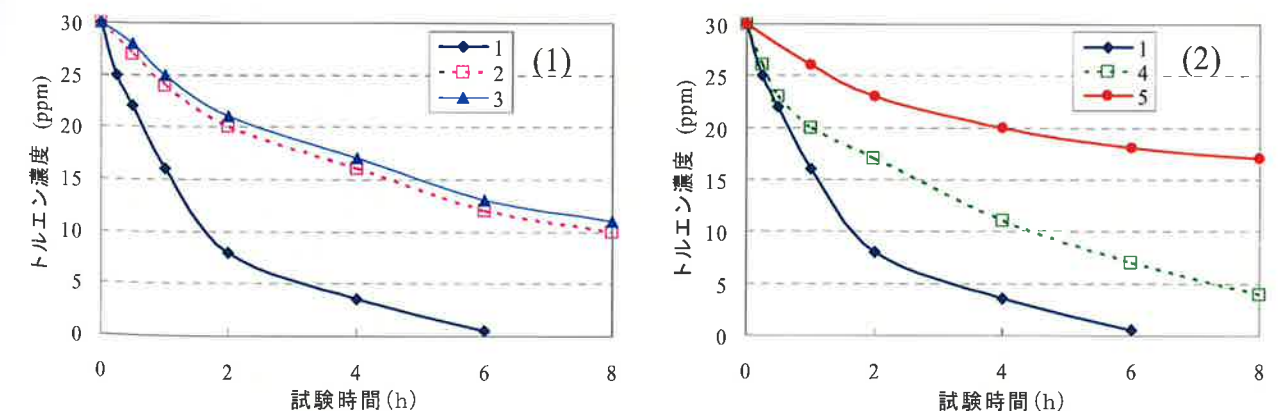


図 2.5.6 竹建築ボードのトルエン吸着試験

(1)グルコマンナン、竹繊維量を変化 (2)竹炭、竹繊維の合計量一定

このように、吸着ガスによって吸着速度に差が見られたが、ホルムアルデヒドやアンモニアは分子サイズが小さいために、ボード中に竹繊維等が含まれていても細孔中に分子が進入しやすいと考えられる。一方、トルエンの分子サイズはホルムアルデヒドやアンモニアと比較する

と大きく、竹繊維等の存在により竹炭の細孔中に分子が進入しにくくなると推察される。また、グルコマンナンが増加すると、竹炭とグルコマンナンの接触面積も増加するために、細孔入口が狭くなり、また竹繊維を混合した場合には、竹繊維中に残存している糖分等の成分がプレス成型中に染みだし、細孔入口を塞いでいる恐れがあることも吸着速度が遅くなる一因と考えられる。

2.5.4 文献

- 1) 小幡透, 日高富男, 西 和枝, 新村孝善: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 21, 31-40(2007)
- 2) Shibano, K., Yoshizawa, S., Ogawa, Y.: Proc. 2nd Inter. Sympo. On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing(EcoDesign 2001), 1110-1113(2001)
- 3) 柴野一則, 吉澤秀治, 後藤純雄, 小川 游, 須川修身, 矢島博文: 炭素, 220, 300-309(2005)
- 4) Asada, T., Yamada, A., Ishihara, S., Komatsu, T., Nishimaki, R., Taira, T., Oikawa, K.: Tanso, 211, 10-15(2004)

2.6 自己接着性を利用した接着剤削減技術

2.6.1 研究の目的

竹は成長が早く3~4年で材質が安定し、優れた強度性能を有する資源として、その利用に関心が寄せられている¹⁾。ボード開発についても数々の検討がなされているが²⁾、効率良く均質なエレメントを製造する方法、繊維束の強度を活かした性能設計、加工時に排出される粉末残渣の活用による原料の利用効率向上など、ボード原料としての竹の利用を多角的に考えることが重要である。木粉・竹粉の用途の一つとして自己接着性に着目した成形方法があり、接着剤使用量の軽減によるコスト・環境への負荷の軽減が期待できる。そこで本研究では、蒸煮処理後に破碎する方法³⁾で得たエレメントを用いて、その混合比および接着剤添加率の2因子に着目し、ボードの製造を試み、その物性を評価した。

2.6.2 実験方法

原料として竹齢4~5年生の大分県産マダケ(3月伐採)を用いた。蒸煮処理(1.0MPa、10min)を施したチップをハンマールで破碎し、得られたエレメントを繊維(10~40mesh)および粉(40mesh pass)と定義して分級し(写真2.6.1)、繊維混合率(FC:繊維重量/エレメント総重量×100)および接着剤(水溶性フェノール樹脂接着剤・樹脂率43%)添加率(RC)を変えて計18条件設定し、各条件につき2枚ずつ製板した(写真2.6.2、原板寸法:150×100×厚さ4mm、設計密度:1.0g/cm³)。原料全乾重量に対して20%の水分を添加し、接着剤(RC=5%、10%)を原料に吹き付けた後、手作業でフォーミングし、ストッパーを用いて熱圧製板した(圧縮温度:180℃、閉鎖時間:40sec、圧縮時間5~10min)。20℃、65%RH環境下にて養生した後、中央集中荷重による曲げ破壊試験を常態および湿潤状態(70℃、2hr温水浸漬)にて行い、曲げ強さ(MOR)、曲げヤング率(MOE)を測定した(試験体寸法:25×90×厚さ4mm、スパン:60mm)。また、20℃、24hr常温水浸漬後の吸水厚さ膨潤率(TS)および吸水率(WA)を測定した(試験体寸法:25×25×厚さ4mm)。

2.6.3 結果および考察



写真2.6.1 各分画のエレメント
上:10-40mesh, 下:40mesh pass
スケールバー:10mm

各ボードの物性試験結果を表2.6.1に示す。接着剤添加率0%の場合、繊維混合率に関係なく、常態MORは約20MPaであったが、接着剤を添加した場合、繊維混合率の増加に伴ってMORは高くなる傾向を示し、34~50MPaの性能範囲となった。また、接着剤添加率0%の常態MOEは、接着剤添加ボードのそれらより若干低いものの、約4GPaと繊維混合率に関係なく高い値を示した。このように、比例限以内の応力レベルにおいては接着剤添加の有無にかかわらず同様な剛性を示したが、比例限以降の応力には、接着剤添加によるエレメント間の結合力の向上が影響し、MORの差異として示されたと考えられる。また、接着剤を添加した場合、繊維混合率が高いほど表面積あたりの接着剤付着量が多くなるので、繊維混合率の増加に伴い強度が増加したと考えられる。常態MORでは接着剤添加率5%と10%とで差異が認められなかったが、湿潤MORについては、その強度残存率が接着剤5%添加で40%台、10%添加で50%台と、接着剤添加率の増加による効果が認められた。TSおよびWAは接着剤添加率0%の場合、繊維混合率の増加に伴って増加する傾向を示した。エレメントは主に繊維細胞で構成されており、その密度は1.0g/cm³以上と大きいので⁴⁾、圧縮時のエレメント自体の圧縮率は小さく、その結果、吸水時におけるエレメントの寸法回復に伴う膨潤率も小さいと考えられる。よって自己接着のみの結合(接着剤添加率0%)の場合、厚さ膨潤は、主にボードの空隙への水の浸透に伴う接着点の解離によって生じ、また、繊維混合率が高いほど、圧縮前のマット厚は厚くなるので回復も大きくなり、より高いTSを示したと考えられる。また、自己接着

繊維混合率:0% 繊維混合率:100%
接着剤添加率:0% 接着剤添加率:10%

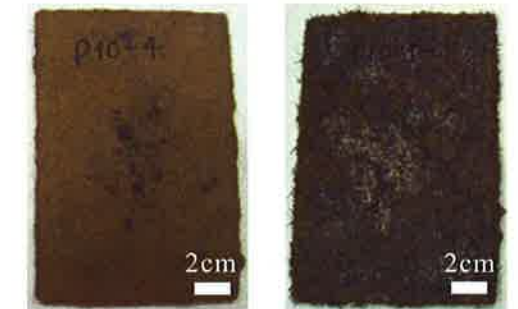


写真2.6.2 製造したボードの外観

表2.6.1 竹ボードの物性試験結果

RC (%)	FC (%)	ρ (g/cm ³)	MOR(MPa)			MOE(GPa)			TS (%)	WA (%)
			常態	湿潤	残存率(%)	常態	湿潤	残存率(%)		
0	0	1.01	22.4	2.69	12.0	4.05	0.42	10.4	19.5	45.8
	20	1.03	20.7	2.86	13.8	3.70	0.31	8.4	19.3	36.2
	40	1.01	21.0	2.93	13.9	3.50	0.37	10.6	21.3	38.7
	60	1.03	20.2	2.38	11.8	3.68	0.30	8.2	21.7	38.4
	80	1.02	17.8	2.08	11.7	3.33	0.24	7.2	25.8	41.2
	100	1.05	20.7	3.25	15.7	3.70	0.29	7.8	26.9	45.5
5	0	1.04	38.7	16.9	43.7	4.17	1.57	37.6	8.06	28.2
	20	1.07	34.2	19.3	56.4	4.07	1.62	39.8	5.02	19.4
	40	1.09	45.5	25.2	55.4	4.84	1.90	39.2	6.49	22.2
	60	1.11	47.6	25.6	53.8	4.76	2.18	45.8	6.41	17.1
	80	1.11	46.7	22.1	47.3	4.87	2.10	43.2	5.99	17.2
	100	1.09	49.5	28.9	58.4	4.66	2.66	57.1	5.73	15.5
10	0	1.09	39.5	24.1	61.1	4.25	1.89	44.5	5.85	20.0
	20	1.12	43.5	28.8	66.1	4.50	2.11	46.9	3.45	14.7
	40	1.13	43.3	25.5	58.8	4.70	2.13	45.3	4.43	14.2
	60	1.14	47.9	32.6	68.0	4.72	2.51	53.2	3.13	11.1
	80	1.12	50.7	33.1	65.3	5.16	2.63	51.0	3.38	16.1
	100	1.11	47.9	32.6	68.0	4.80	2.66	55.4	4.32	14.5

の場合、粒度の細かい粉元素が多いほど、重量あたりの元素の接着密度が大きくなること、空隙の充填効果が得られやすくなることが、TS 抑制に寄与したと考えられる。なお、温水浸漬によって TS が 20%以上、MOR 残存率が 15%以下となった点から、本研究で製造したボードの自己接着に寄与している成分は、水に可溶性糖分あるいはヘミセルロースなどに由来すると考えられ、耐水性は良好ではなかったが、5%の接着剤添加で TS は 8%以下となり、耐水性が向上した。WA は接着剤を添加した場合、繊維混合率の増加に伴い減少する傾向を示したが、表面積あたりの接着剤付着量の差異が影響したと考えられる。以上より、常態では自己接着によっても 20MPa の MOR を有するボードの製造が可能であり、さらに接着剤を添加することで強度および耐水性が向上し、繊維混合率との組み合わせ方で目的に応じたボードの性能設計が可能であることがわかった。

2.6.4 文献

- 1) 井口よう子: 木材工業, 58, 157-264(2003)
- 2) 例えば, 松本久美子, 他 4 名: 木材学会誌, 47, 111-119(2001)
- 3) 井口よう子, 他 2 名: 第 58 回日本木材学会大会, 118-1300(2008)
- 4) 井口よう子, 他 3 名: 木材学会誌, 45, 77-84(1999)

2.7 エlement製造工程の省力化技術

2.7.1 研究の目的

竹を原料としたボード開発において留意すべき点として、効率良く均質なElementを製造することや、繊維束の強度性能を活かせるよう設計することなどが挙げられる。そこで本研究では、まず省力的な繊維状木質Elementの製造方法として破碎を取り上げ、繊維収率および作業効率の観点からElementの製造条件について検討した。さらに、原料の利用率向上も図るため、繊維以外の粉末残渣もElementとして活用し、繊維と粉に分級したElementの混合比および接着剤添加率を変えて製造したボードの物性試験結果をもとに、より実用性を考慮した製造条件に絞ってボードを製造し、その物性を評価した。

2.7.2 実験方法

原料として竹齢 4~5 年生以上の鹿児島県産モウソウチク(10 月伐採)、竹齢 4~5 年生の大分県産マダケ(3 月伐採)、スギ間伐材を用いた。Element製造に際し、原料の前処理方法(無処理・24hr 常温水浸漬・1hr 煮沸・5min 蒸煮・10min 蒸煮・15min 蒸煮:蒸煮処理の水蒸気圧は 1.0MPa)および加工装置(ハンマーミル:写真 2.7.1・シングルディスクリファイナー:写真 2.7.2)について検討し、Elementの収率および形状、作業効率において良好な製造条件を決定した。ボード製造には、竹齢 4~5 年生の大分県産マダケ(3 月伐採)を用い、調製後に分級したElementを、繊維(10~40mesh)および粉(40mesh pass)と定義し、繊維混合率(FC:繊維重量/Element総重量×100)および接着剤(水溶性フェノール樹脂接着剤・樹脂率 43%)添加率(RC)を変えて条件を設



写真2.7.1 ハンマーミル

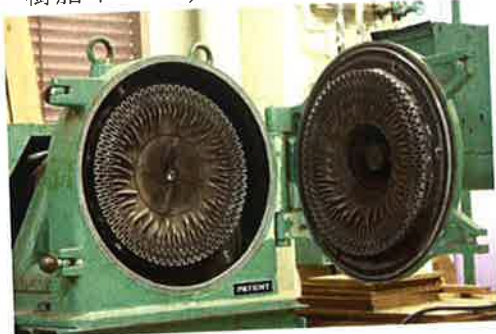
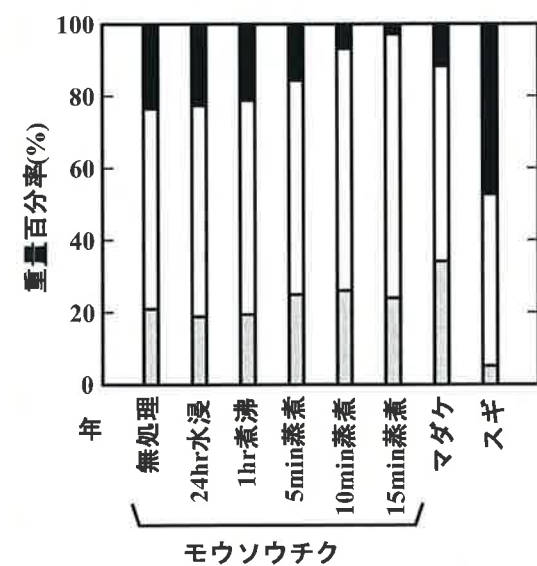


写真2.7.2 シングルディスクリファイナー

定し、各条件につき 2 枚ずつ製板した(原板寸法:230×220×厚さ 9mm、設計密度:0.8g/cm³)。原料全乾重量に対して 20%の水分を添加した後、接着剤(RC=5%、10%)を噴霧し、手作業でフォーミングし、位置制御式ホットプレスにより製板した(圧縮温度:180℃、圧縮時間:10min)。20℃、65%RH 環境下にて養生した後、JIS A 5908 に準じて常態および湿潤状態(70℃、2hr 温水浸漬)における、曲げ強さ(MOR)および曲げヤング率(MOE)を測定した(試験体寸法:50×220×厚さ 9mm、スパン:135mm)。また、はく離強さ(TS)および 20℃、24hr 常温水浸漬後の吸水厚さ膨潤率(TS)を測定した(試験体寸法:50×50×厚さ 9mm)。

2.7.3 結果および考察

Element製造時のチップの前処理は、チップをある程度軟化させ、粉碎時に繊維束(維管束鞘)を分離しやすくすることを目的として行った。各前処理条件におけるElementの粒度分布を図 2.7.1(マダケ・スギは 10min 蒸煮処理)に、得られた繊維状Elementの SEM 像を写真 2.7.3 に示す。水浸および煮沸処理の場合、10mesh 以上の粗い分画が 2 割以上と高く、繊維状Elementは得られたものの全体的に剛直で、未処理チップから得たElementの特徴と差異が認められなかった(写真左)。一方、蒸煮処理チップより得た繊維状Elementは端部がほぐれており、Element同士がからまりやすい形状を呈していた(写真右)。これは高温高压の蒸気下において組織全体が軟化し、部分的に組織の熱分解が進行したためであると考えられる。ただし処理時間が 5min の場合、繊維状Elementの収率が低く、チップ内部まで処理効果が及んでいなかったと考えられた。一方、処理時間が 15min の場合、収率に差異は認められなかったものの、全体的にElementが細かかったことから、過剰に組織の熱分解が進行し、チップが脆くなったことが影響していると推察された。10min 蒸煮処理のElement粒度分布を比較すると、モウソウチク・マダケは大差なく、スギは 10mesh 以上の粗い分画が 4 割以上を占めていたことから、本研究で検討を行った前処理方法は竹材に適しているといえる。よって本研究では、チップの前処理として 1.0MPa にて 10min の蒸煮処理(繊維状Element収率:約 67%)が適切であると判断された。また、加工装置によるElement収率の差異は認められず、竹の場合、ハンマーミル(下網目開き:2×13mm)による破碎でも繊維状のElementが得られることがわかった。



モウソウチク
□: #40pass □: #40-10 ■: #10on
図 2.7.1 前処理条件と粒度分布

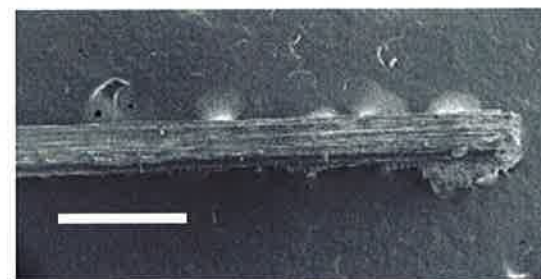


写真2.7.3 繊維状ElementのSEM像(スケールバー:500μm)

以下、この条件で得たElementを用いて製造したボードの物性試験結果(表 2.7.1)について述べる。常態 MOR は、接着剤添加率 0%の場合、繊維混合率に関係なく約 6MPa であったが、5%の接着剤添加により繊維混合率 100%のボードで 27MPa に向上した。さらに 10%の接着剤添

加により繊維混合率 60%のボードも 29MPa に達したことから、エレメント破砕時に発生する粉末を分別せずに原料として利用できることが示唆された。湿潤 MOR の条件間の差異は、常態のそれとほぼ同様な傾向を示した

表 2.7.1 竹ボードの物性試験結果

RC (%)	FC (%)	ρ (g/cm ³)	常態曲げ		残存率(%)		IB (MPa)	TS (%)
			MOR(MPa)	MOE(GPa)	MOR	MOE		
0	60	0.75	6.33	2.02	3.79	1.44	0.064	24.5
	80	0.76	5.52	1.80	5.98	2.59	0.034	26.7
	90	0.75	5.65	1.78	4.61	1.63	0.028	33.2
	100	0.80	6.25	1.76	4.96	2.63	0.018	31.1
	60	0.73	16.9	3.05	43.8	41.1	0.209	6.66
5	100	0.78	27.2	3.73	48.6	49.5	0.701	8.53
10	60	0.78	29.2	3.74	50.7	53.1	1.01	5.18
	100	0.76	26.4	3.48	53.9	49.4	1.13	5.21

ほぼ同様な傾向を示した。25%の竹チップは、接着剤添加率 0%の MOR 残存率は約 5%と非常に低く、接着剤添加により 40~50%に向上した。TS は接着剤添加率 0%の場合、25~33%であったが、接着剤添加により 10%以下に抑制された。エレメントは主に繊維細胞で構成されており、その密度は 1.0g/cm^3 以上と大きいので²⁾、圧縮時のエレメント自体の圧縮率は小さく、その結果、吸水時におけるエレメントの寸法回復に伴う膨潤率も小さいと考えられる。よって接着剤添加率 0%のように、自己接着成分によつてのみエレメントが結合している場合、厚さ膨潤は、主にボードの空隙への水の浸透に伴う接着点の解離によつて生じると考えられる。そして、接着剤添加によりエレメント間の結合力が向上したことに加え、エレメント自体の膨潤率の低さも寄与して、TS は抑制され、また強度残存率も向上したと考えられる。以上の結果から、エレメントの製造方法については、竹チップに短時間の蒸煮処理を施した後、破碎する方法により、収率約 6 割で繊維状エレメントが得られることがわかった。ボードの性能については、エレメントの混合比、接着剤添加率の組み合わせ方により、MOR が 5~30MPa の範囲でボードの性能設計ができ、5%の接着剤添加で耐水性が向上することが分かった。

2.7.4 文献

- 1) 井口よう子, 他 2 名: 第 58 回日本木材学会大会, PI016(2008)
- 2) 井口よう子, 他 3 名: 木材学会誌, 45, 77-84(1999)

2.8 竹建築ボードの開発

2.8.1 研究の目的

2.8.1 研究の目的

竹は3～5年で再生産が可能なことから、持続可能なバイオマス資源として最適な材料である。これらの竹を有効利用するために炭化し、得られた竹炭を用いて建築用ボードが開発されている¹⁻⁴⁾。しかし、これらのボードの中には強度が低く作業性に劣るものもあり、紙くず等の混合により強度の向上を図った例もある⁴⁾。そこで、本研究では竹を蒸煮処理し、解繊した竹繊維を混合することにより強度の高い竹建築ボードの開発を目指した。

2.8.2 実験方法

2.8.2.1 竹繊維の試作方法

2.8.2.1 竹繊維の試作方法

原料として竹齢 4～5 年生以上の鹿児島県産モウソウチク(10 月伐採)を用いた。軸方向に 2～4 割りとしたモウソウチクをスラブチップパー((株)太平製作所製 15T 型)で目標長さ 25mm としてチップ化した後、蒸煮装置(大江工業(株)製ラボミキサー)を用いて加圧蒸気処理を施した。処理条件は、蒸気圧 1.0MPa、温度維持時間 15 分とした。蒸煮スケジュールを図 2.8.1 に示す。蒸煮処理後の竹チップをハンマーミル(下網目開き:2×13mm)によって破碎し、得られたエレメントは 105℃の電気乾燥器で 24 時間乾燥した。

2.8.2.2 竹建築ボードの試作方法

原料の竹炭は、市販品(鶴田竹活性炭試作組合製)を使用し、粒径を 3.3mm 以下に調整した。ボード成型におけるバインダーは、こんにゃくの主成分であるグルコマンナン(微粒子こんにゃく粉:(株)荻野商店製)を用いた^{5,6)}。ボードは図 2.8.2 に示す工程で試作し、成型したボードは風乾後、85℃の定温器で一晩乾燥させた。

工程 1: ポリ容器に竹炭, グルコマンナン,
竹繊維及び水を入れてハンドミキサー
を用いて十分に攪拌する。

工程 2: 300mm 角の型枠の底に障子紙を敷く。

工程 3: 型枠の中に工程 1 で混合した材料を均等に敷き詰める。

工程 4: 材料を障子紙で覆う。

工程 5: ホットプレスで成型してボードを完成させる。

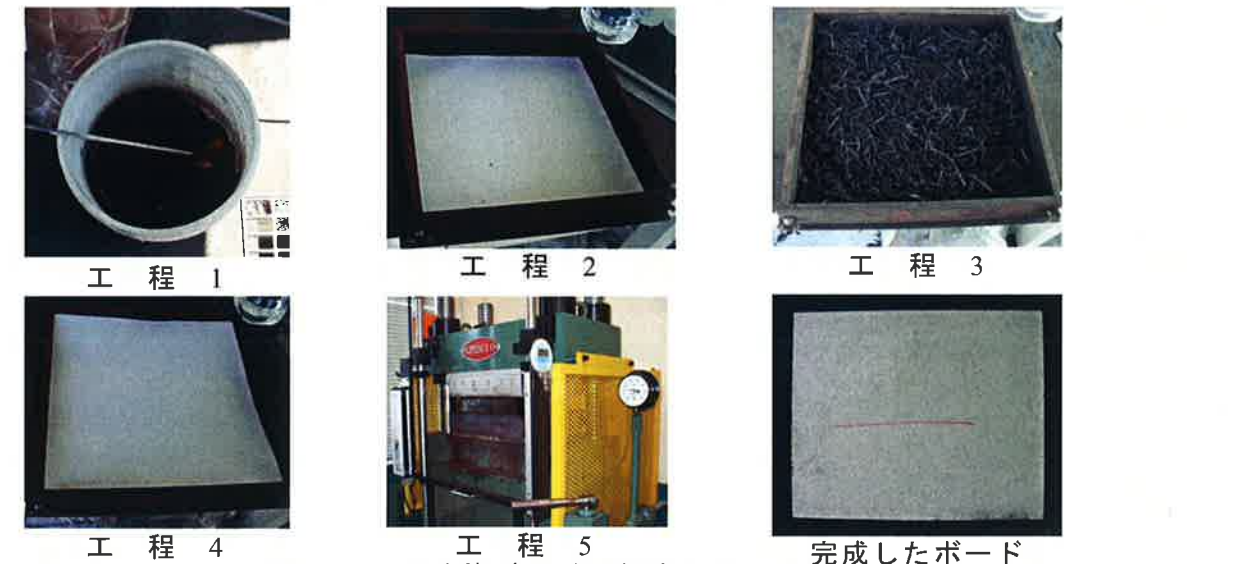


図 2.8.2 竹建築ボードの製造方法

2.8.2.3 竹建築ボードの試作条件の検討

(1) プレス条件

ボードの成型に当たりプレス条件を検討するために、竹炭 200g、グルコマンナン 20g に水 100ml を加え、プレス温度を 3 条件(90℃, 100℃, 110℃)、プレス時間を 3 条件(7 分, 10 分, 13 分)でボードの試作を行い、曲げ強度を測定した。なお、曲げ試験方法については 2.8.2.4 項に後述する。

(2) 表面素材

竹炭を用いたボードは、そのままでは表面に竹炭が露出し、触ると汚れる恐れがある。そこで、不織布等で被覆し、表面に竹炭が露出しないようにするために、表面に用いる素材について検討した。表面素材なし、ポリエステル不織布(厚さ 0.2mm:旭化成(株)製)、ポリ乳酸不織布(厚さ 0.4mm:ユニチカ(株)製)および障子紙(厚さ 0.1mm:有泉商店製)で被覆したボードを試作し、曲げ強度を測定した。なお、試作条件は、竹炭 200g に水 100ml とグルコマンナン 20g を用い、このときのプレス条件は温度 100℃、時間 10 分、圧力は 5.1MPa とした。以降の項目についてもプレス成型はこの条件で行った。

(3) バインダー量

竹炭 300g に水 100ml とグルコマンナン 18~36g を添加してボードを試作した。表面には障子紙を用い、以降のボードの試作でも障子紙を用いた。

(4) 竹繊維の添加(竹建築ボード)

① 生の竹繊維の混合

竹炭 200g, グルコマンナン 20g, 水 150ml に生竹繊維(長さ 10mm)または竹粉(1mm)を 0~20g 添加してボードを試作した。なお、竹繊維を混合したボードを竹建築ボードとする。

② 蒸煮処理した繊維長の異なる竹繊維の混合

蒸煮処理した竹繊維を 3.35mm と 2.0mm の 2 つの篩を用いて篩別し、長繊維(3.35mm 以上)、中繊維(3.35-2.0mm)及び短繊維(2.0mm 未満)とし、それぞれの繊維を 0~15g 混合した竹建築ボードを試作し、竹の繊維長による曲げ強度への効果を調べた。

③ 含脂率を一定にした竹建築ボードの試作

一定量の竹炭に、混合する竹繊維の量に応じてグルコマンナン量を変化させる条件でボードを試作し、曲げ強度への効果を調べた。詳細は、表 2.8.3 に後述する。なお、竹繊維は②の長繊維、中繊維の混合物を使用した。

④ 重量を一定にした竹建築ボードの試作

竹炭と竹繊維の量を変化させて、グルコマンナン量を固定し、重量が一定となる条件でボードを試作し、曲げ強度への効果を調べた。なお、竹繊維は②の長繊維、中繊維の混合物を使用した。

2.8.2.4 竹炭ボード及び竹建築ボードの曲げ強度試験

試作したボードは、精密万能強度試験機((株)島津製作所製 AG-100KNE 形)を用いて強度試験を行った。試験方法は、「JIS A 1408 建築用ボード類の曲げ及び衝撃試験」に準拠し、長さ 300mm×幅 240mm に切断した試験体を 5 mm/分の速度で試験を行った。なお、障子紙の繊維方向と直交するように荷重をかけた。

2.8.3 結果及び考察

2.8.3.1 エLEMENTの収率

使用チップに対する全乾重量ベースの収率を表 2.8.1 に示す。一般に竹材のチップ化工程でディスクチップパーを用いた場合、表皮部分の靱性が高いことから切断できず、著しく収率が低下する。また、ELEMENT調製工程で切削装置を用いると、装置中での粘性が高く、風送装置への排出が滞ることが多い。本研究で用いた工程の場合、作業中に飛散してしまう微小粒度の分画を除き、ほぼ全て回収できることから、他回収率が得られた。なお、加圧蒸気処理条件は、2.6、2.7 の検討を元に、ELEMENTとして利用可能な 10mesh pass の分画および自己接着寄与成分である 40mesh pass の分画の両者の収率を指標として、選択したものである。

表 2.8.1 ELEMENT試作時の収率

工程	含水率(%)	収率(%)
チップ化	5.4	94.6
蒸煮	10.3	94.6
解繊	10.3	87.1
乾燥	0.9	82.5

2.8.3.2 プレス条件

プレス温度、プレス時間を変化させて試作した竹炭ボードの曲げ強度試験結果を図 2.8.3 に示す。時間 10 分、温度 100℃のときに曲げ強度は最大値(5.2MPa)を示した。なお、この時のプレス圧は 5.1MPa であったので、ボードのプレス条件は、温度 100℃、時間 10 分、プレス圧 5.1MPa とした。

2.8.3.3 表面素材の効果

竹炭ボードの曲げ強度試験結果を図 2.8.4 に示す。障子紙を用いた場合に 4.2MPa と最も高い

強度が得られた。これは、グルコマンナンの分子構造と障子紙の主成分であるセルロースが類似の構造を有しているために、接着性が良好であったと推察される。

2.8.3.4 バインダー量の検討

竹炭とグルコマンナンの配合割合を変えてボードを試作し、ボード成型に必要なグルコマンナン量を検討した。竹炭ボードの曲げ強度試験結果を図 2.8.5 に示す。竹炭 300g に対してグルコマンナンが 30g のとき 4.6MPa と高い値を示した。すなわち、グルコマンナン量が竹炭の 1 割のとき最も強度が高くなることが明らかになった。

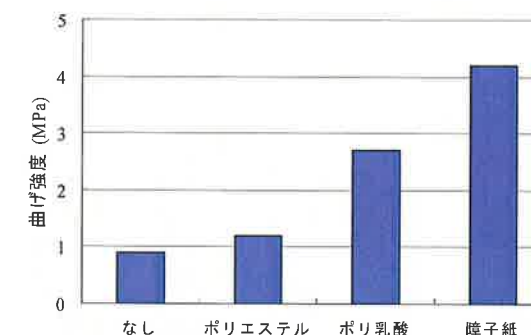


図 2.8.4 表面素材の種類と曲げ強度

2.8.3.5 竹繊維の添加

① 生の竹繊維の混合

蒸煮処理を行っていない生の竹繊維(長さ 10mm)または竹粉(長さ 1mm)を竹炭に混合して試作したボードの曲げ強度試験結果を図 2.8.6 に示す。生の竹繊維の混合量が増加してもボードの曲げ強度は向上しなかった。これは 2.8.2 項で前述のように、熱処理を行わない繊維状ELEMENTは全体的に剛直であったために竹繊維同士が絡みにくく強度への効果が小さかったものと推察される。

また、竹粉の混合量が増加するとボードの曲げ強度は低下する傾向が見られた。これは、竹粉はその繊維長が短いため繊維同士の絡みもほとんど期待されず、また竹炭とグルコマンナンとの接着力も弱いことから、強度への効果が小さかったものと推察される。

② 蒸煮処理した繊維長の異なる竹繊維の混合

蒸煮処理した竹繊維を篩別して得られた 3 種類の繊維長の竹繊維を用いて試作した竹建築ボードの曲げ試験結果を図 2.8.7 に示す。

蒸煮処理を行った竹繊維を混合した竹建築ボ

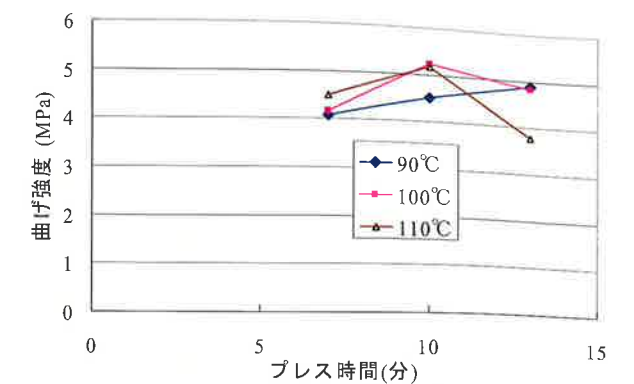


図 2.8.3 プレス条件と曲げ強度

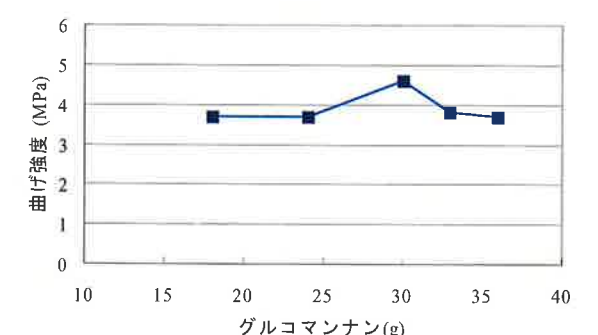


図 2.8.5 グルコマンナン量と曲げ強度の関係

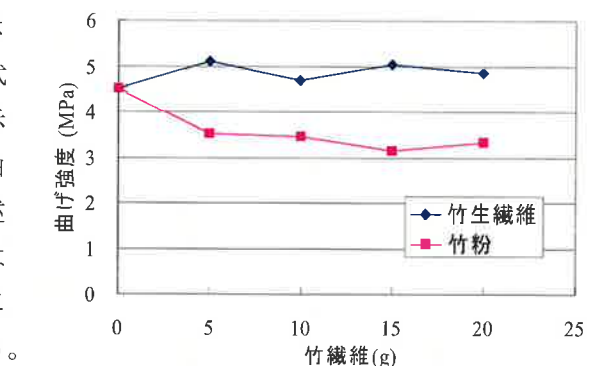


図 2.8.6 生の竹繊維の混合量と強度の関係

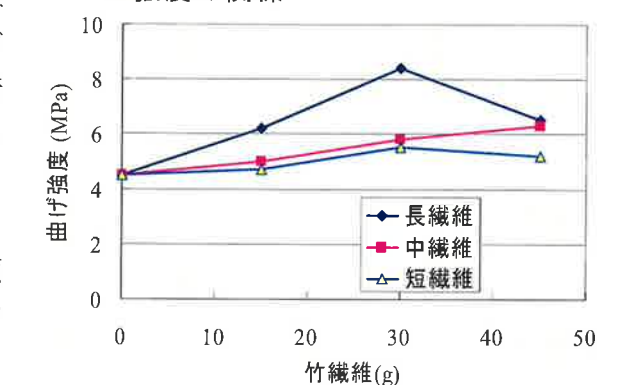


図 2.8.7 竹繊維の長さとの曲げ強度の関係

ドでは、繊維の混合量が多くなるほどボードの曲げ強度が高くなる傾向が見られた。その傾向は長繊維と中繊維で見られ、特に長繊維では顕著であった。これは、蒸煮処理により竹繊維が柔軟性を帯びたことから繊維同士が良く絡み合い、曲げ強度への効果が現れたためと推察された。ただし、短繊維では、絡みにくいために強度への効果が他の繊維に比べて小さかったものと推察された。

③含脂率一定の竹建築ボード

含脂率一定の条件で試作した竹建築ボードの構成を表 2.8.2 に、得られた竹建築ボードの曲げ試験結果を図 2.8.8 に示す。さらに、試作した竹建築ボードの密度と曲げ強度の関係を図 2.8.9 に示す。

含脂率一定の条件で試作した竹建築ボードは、竹繊維量とグルコマンナン量が増加するに従って曲げ強度が向上した。また、密度と曲げ強度に高い相関が見られた。これは、蒸煮処理された柔軟な竹繊維の混合割合が増えることにより繊維同士が絡みやすくなり曲げ強度が高くなったと考えられた。

④重量一定の竹建築ボード

重量一定の条件で試作した竹建築ボードの構成を表 2.8.3 に、得られた竹建築ボードの曲げ試験結果を図 2.8.10 に示す。さらに、試作した竹建築ボードの密度と曲げ強度の関係を図 2.8.11 に示す。

重量が一定となる条件で試作した竹建築ボードでは、竹炭の量が減る一方で竹繊維の量が増加するに伴いボードの曲げ強度が増加した。また、密度と曲げ強度との間には非常に高い相関が見られた。これは、竹繊維の割合が変化することに、由来することが考えられた。

竹建築ボードにおける竹繊維の混合割合が増えることで、より多くの繊維が絡み合うことにより曲げ強度が顕著に向上することが分かった。

2.8.4 結言

以上のような条件で竹建築ボードを試作し、次のことが明らかになった。

- ①竹建築ボードの試作には表面素材に障子紙を使用することで曲げ強度が向上した。
- ②竹建築ボードに混合する竹繊維は蒸煮処理した長繊維を使用することで曲げ強度が向上した。

表 2.8.2 含脂率一定の竹建築ボードの構成

ボード構成	竹炭 (g)	グルコマンナン (g)	竹繊維 (g)
1型	300	30	0
2型	300	31.5	15
3型	300	33	30
4型	300	34.5	45
5型	300	36	60

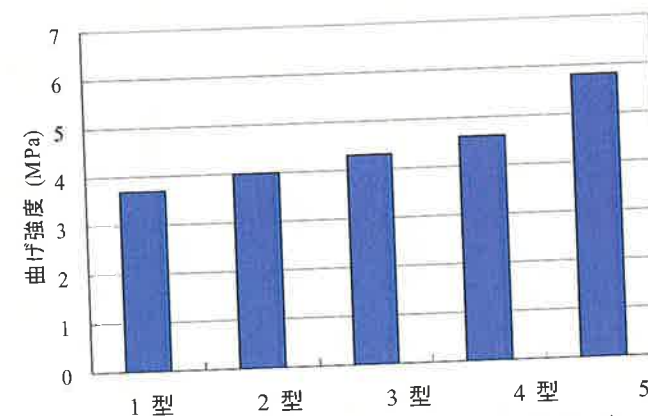


図 2.8.8 含脂率を一定にした竹建築ボードの曲げ強度

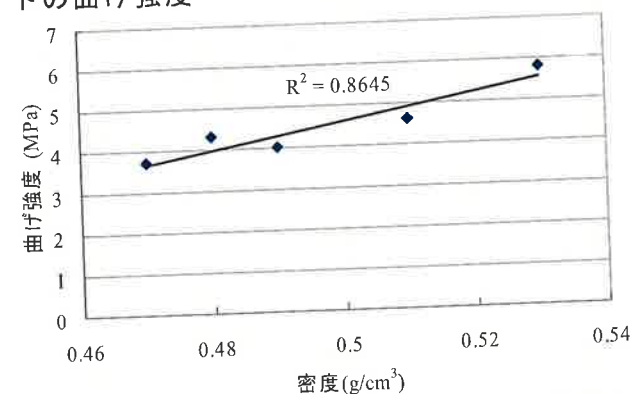


図 2.8.9 含脂率を一定にした竹建築ボードの密度と曲げ強度の相関

表 2.8.3 重量一定の竹建築ボードの構成

ボード構成	竹炭 (g)	グルコマンナン (g)	竹繊維 (g)
6型	300	30	0
7型	285	30	15
8型	270	30	30
9型	265	30	45
10型	240	30	60
11型	200	30	100
12型	150	30	150

③竹建築ボードに混合する竹長繊維の量が増加するに伴い曲げ強度が向上した。

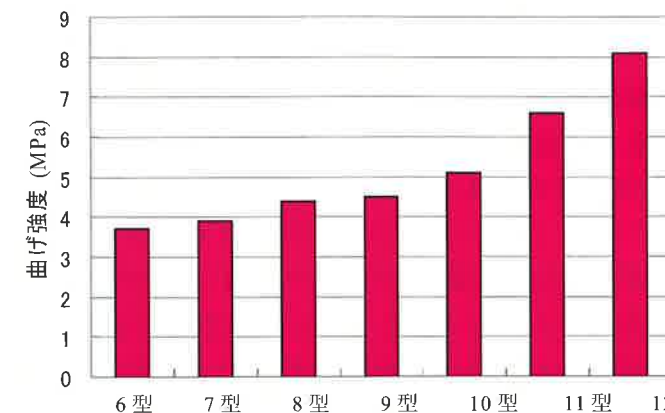


図 2.8.10 重量一定の竹建築ボードの曲げ強度

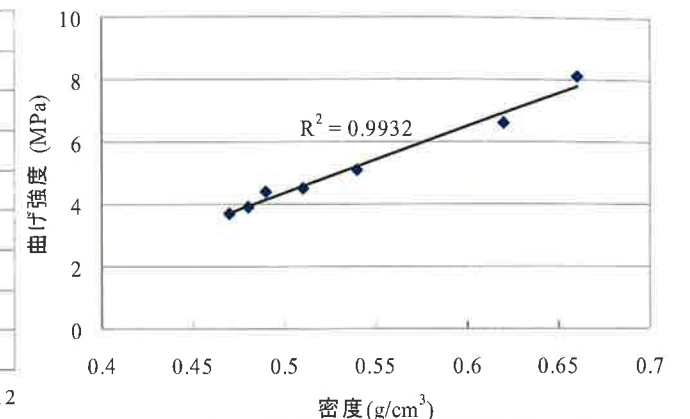


図 2.8.11 重量一定の竹建築ボードの密度と曲げ強度の相関

2.8.5 文献

- 1) Shibano, K., Yoshizawa, S., Ogawa, Y.: Proc. 2nd Inter. Sympto. On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing(EcoDesign 2001), 1110-1113(2001)
- 2) 柴野一則, 吉澤秀治, 後藤純雄, 小川 游, 須川修身, 矢島博文: 炭素, 220, 300-309 (2005)
- 3) Asada, T., Yamada, A., Ishihara, S., Komatsu, T., Nishimaki, R., Taira, T., Oikawa, K.: Tanso, 211, 10-15(2004)
- 4) 小幡 透, 日高富男, 西 和枝, 新村孝善: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 21, 31-40 (2007)
- 5) 森田慎一, 新村孝善, 松永和彦, 茆原早準: 特許第 3357020 号
- 6) 日高富男, 新村孝善, 小幡 透, 茆原早準: 特開 2008-087348

第3章 竹複合建築ボードの実用化に必要な最適製造・利用技術

3.1 竹を用いた構造材料に関する既往の研究と残された課題

3.1.1 竹材利用の必要性

近年、竹材・竹炭・竹製品の輸入増加や竹材代替資材の普及により地域竹材の需要低下、竹材伐採技能者の高齢化・後継者不足による竹材生産量の減少等が進んでいる。未利用のまま放置された竹林の増加や、里山周辺林への侵入等の問題が全国的に生じており、竹資源の蓄積量に対する利用率は大きく低下している。

国内の主要な竹資源供給地域は九州であり、大分県と鹿児島県で全国の約50%近くの竹材を生産している。これまで両県では、竹産業を中山間地域の経済を支える主要な産業と位置づけてきたが、大きな経済的効果は得られておらず、「おおいた産業活力創造戦略」や「かごしま竹の里づくり事業」などの施策において、竹資源の有効利用の推進を図っている。また京都府では、「緑の公共事業アクションプラン」によって放置竹林拡大防止事業を行っている。さらに、各県では「森林環境税」制度の導入を含め、里山環境の保全を目的とした荒廃竹林の施業管理の実施を検討している。これら各県の施策的要請に応え、現在未利用の竹資源の活用を図ることは、里山環境保全と竹産業振興にとって急務である。

竹は古くから日用品や工芸品に多く用いられ、これまで、もっとも身近な素材の一つであった。竹林の生長の速さや外観から、竹材についても神秘的な印象や清涼感・清潔感が惹句として用いられることが多い。しかし、今日の建築に用いられる材料に対しては、長期間性能を担保することが求められるため、感性のみに訴えかける手法では竹材利用を促進することは難しいと考えられる。竹の特徴・利用に関する総説¹⁻⁵⁾は多くみられるが、建築物の構造材料として利用することに主眼を置き、包括的に論じた文献はない。本稿では、竹材を用いた構造材料の開発に関する状況と課題について述べる。

3.1.2 竹資源量の推定

竹類は世界で約90属1200種あり、全竹林面積は1,400万～2,000万haといわれ、その約80%が熱帯アジア地域に集中している⁶⁾。これは、世界における森林の年間消失面積約1,130万ha(全森林面積の約0.3%)⁷⁾を越えるもので、アジア地域においては森林の年間消失面積のおよそ3倍程度となる。アジア各国では、砂漠防止・環境緑化・木質資源確保等を目的として、更新が容易で成長の早い竹が注目されており⁸⁾、今後、蓄積量が増大することが予想される。

我が国で見られる竹種は世界の1割程度⁹⁾であり、総竹林面積は約15.6万ha、竹材生産量は1,290千束(2005年)¹⁰⁾である。マダケ林の蓄積量:33.5トン/ha¹¹⁾、モウソウチク林の蓄積量:129.7トン/ha¹²⁾、竹林面積の構成比率¹³⁾マダケ林:約37%、モウソウチク林:約46%と仮定してマダケ・モウソウチクの蓄積量を推定すると、それぞれ193万トン、930万トン、合計で約1,123万トンとなる。竹材生産量を1束=25kg(気乾状態)として¹⁴⁾換算すると3.2万トンとなり、竹材の生産量は推定蓄積量のおよそ0.3%に過ぎない。日本の木材蓄積量40.4億m³(2002年)¹⁰⁾を気乾密度0.5g/cm³として換算すると20.2億トンとなるため、竹材蓄積量は木材蓄積量の0.6%となる。優良モウソウチク林の蓄積量は293トン/haであるとする調査事例¹⁵⁾があることから、適切な竹林管理は蓄積量増加に寄与するものであるといえる。

また、竹は短期間で生長するため、CO₂の固定に必要な期間が短く、CO₂削減の観点からみると、使用期間の短い用途にも使用することができる。竹を適切に使用することによって、環境保護に寄与できる可能性があるといえる。

3.1.3 竹材を用いた構造材料開発の意義

竹資源の有効利用を促進するためには、既存竹産業より大きな市場規模を持つ産業分野を対

象とし、資源利用率を少しでも高める方策が必要となる。我が国の木造住宅における資材使用量に関する調査¹⁶⁾によると、床面積1m²あたりの資材使用量は、在来軸組構法住宅(筋かい耐力壁仕様)の場合、構造用軸材料0.13m³、合板0.0058m³、桝組壁工法住宅の場合、構造用軸材料0.15m³、合板0.036m³とされる。近年の木造住宅の着工戸数は約54万戸と一定しており、そのうち桝組壁工法住宅の着工戸数は96,000戸(2005年)である¹⁷⁾ため、これらの数値と木造住宅1戸あたりの平均床面積¹⁷⁾106.6m²を用いて、構造材の潜在的需要量を算出すると、軸材料約769万m³、面材料約311万m³となる。軸材料の気乾密度0.5g/cm³、面材料の気乾密度0.6g/cm³として換算すると、我が国の構造材の総需要量は571万トンとなり、巨大な市場規模を持つ。

竹材を活用し、これらの用途における要求性能を満たす建築材料が実用化されれば、地域資源の有効活用の促進に加え、地域の竹産業の活性化も期待できる。また、これまで建築物の環境調節機能は、構法上の工夫や装置によって確保されていたため、施工費用やランニングコストの上昇の原因となっていた。同様の性能を単体で実現できる部材は、中山間地域での雇用創出等、経済効果も大きいと考えられる。

3.1.4 竹材利用の歴史

竹材がもっとも身近な工業材料であった最大の理由は、我が国には竹が豊富に存在し、入手が容易であったことであるが、竹材の持つ性質を活用し、用途ごとに要求される性能を満たす製品を開発するための努力もなされてきた。竹材の主な特長とそれらを利用した製品を挙げると、以下の通りである^{14,18,19)}。

機械的性質

割裂性:籠・うちわ・扇子の骨・茶筌・簾、柔軟性:弓・籠・ざる・竹刀・釣り竿、剛性:梯子・物干し竿・竹箸・串・垂木・杖

物理的性質

中空性:笛・箏、寸法安定性:定規、表面平滑性・美粧性:額縁・盆、長繊維束:紙パルプ

竹棹(丸竹)は中空な円筒状であり、節によって接合されたパイプ構造になっており、節間盤が隔壁の役割を果たすことで、断面の変形を防ぐことができる。また、竹材は軸方向に平行に配向した維管束が連なっているため、繊維方向の強度・寸法安定性能が高い性質を持つ。さらに、維管束が表皮に近いほど多く存在することから、材の表皮に近い部分ほど強度性能が高い²⁰⁾傾斜材料であるため、曲げ性能上有利な断面構成となっている。一方、表皮が堅く緻密であるという竹材の特徴は、表面から水分が蒸発しにくく、乾燥性が低いという欠点ともなる。さらに、糖分やでんぷんの含有率が高いため、高含水率状態のままで保存されると生物劣化を生じやすく、通常は油ぬきと呼ばれる乾留処理によって乾燥性を向上させ、十分に乾燥した後に使用する。また、水蒸気や薬剤処理によって糖分やでんぷんを除去する場合もある。これらの技術は、竹材に対する需要が高かったことから開発されたものであるが、これまで竹材で作られていた製品は、他の材料で代替されることが多くなっている。

3.1.5 竹材の基礎的性質

表3.1.1に代表的な竹材(モウソウチク、マダケ)と木材(針葉樹材:スギ、ヒノキ、広葉樹材:ケヤキ、シラカシ)の基礎的性質^{21,22)}を示す。竹材と木材の強度性能を比較すると、竹材は総じて高い性能を示す。とくに、曲げ強さ、圧縮強さ、引張強さが高く、スギの各性能値に対して、モウソウチクは1.9～2.2倍、マダケは2.1～2.7倍の数値を示すが、密度が同程度の広葉樹材とは同水準の値である。維管束鞘自体の長さは木材の仮道管や木繊維と同程度であるが、繊維の配向度が高いため、割裂性が高い。図3.1.1は、竹材とスギ材の曲げ試験における荷重-変形関係²³⁾を示したものである。これをみると、竹材は加力方向によって荷重-変形関係の性状が

大きく異なり、前述の傾斜材料である特徴が現れている。

物理的性質を比較すると、乾燥過程の横断面内(横方向)収縮率も木材とほぼ同じ値を示すが、軸方向の収縮率は、維管束の配向の効果により、木材のおよそ 1/3 程度となり²²⁾、高い寸法安定性能を示す。熱伝導率は、材料の密度とともに高くなる傾向があるため、密度がほぼ同じケヤキ、シラカシと比較すると、竹材の熱伝導率は木材とほぼ同じであることがわかる。

モウソウチク気乾材の水分拡散係数(cm^2/s)の測定例²⁴⁾によると、軸方向では 3.8(外層)~4.8(内層)でありヒノキ(13.7)、ブナ(10.9)の 1/3 程度、接線方向では 0.23(外層)~0.41(内層)でありヒノキ(0.97)、ブナ(0.92)の 1/2~1/4 程度と木材より低い値を示す。

化学的な成分については、抽出成分に含まれる糖分や灰分が多く、生材時の吸湿性や生物劣化の要因となる。竹材自体は、木材と同様にセルロース、ヘミセルロース、リグニンから構成され、組成は木材とほぼ同じである²⁵⁾。

表 3.1.1 竹材と木材の基礎的性質の比較^{21,22)}

樹種	密度 (g/cm^3)	曲げヤング 係数(GPa)	曲げ強さ (MPa)	圧縮強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	せん断強さ (MPa)	平均収縮率 ^a (%)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
モウソウチク	0.76	12.5	140	75.0	170	16.5	0.27	0.140
マダケ	0.80	15.0	185	75.0	245	16.5	0.27	0.145
スギ	0.38	7.5	65	35	90	6	0.25	0.087
ヒノキ	0.44	9	75	40	120	7.5	0.23	0.095
ケヤキ	0.69	12.0	100	50.0	125	12.5	0.28	0.143
シラカシ	0.83	13.5	120	60.0	195	17.5	0.38	0.176

^a 含有水分率1%の変化に対する数値, ^b 横断面の接線方向, ^c 横断面の半径方向。

3.1.6 代替資源としての利用

竹材は、かつては主要な工業材料のひとつであり、とくに、物資が不足していた太平洋戦争前後の時期には、金属や木材の代替資源として多用されていた。例えば、鉄筋の代わりに竹材を用いた竹筋コンクリートが構造物に使用されていたが、竹材の持つ糖分がセメントの硬化阻害を起こすこと、セメントのアルカリによって竹材が経年的に劣化すること、表面が平滑なため竹材の付着強度が低いことなどの問題があり、戦後は用いられなくなった。

木質ボード類の原料としての利用については、1963~1965 年、北海道岩内において、ネマガリダケを原料としてコタツ天板用のパーティクルボードを製造していた事例^{26,27)}がある。同工場の生産能力は 1,000 トン/年と、現在のパーティクルボード工場よりかなり小さい規模であったが、竹が材質的には木材代替資源として利用可能であることを示している。なお、短期間で操業を停止した理由として、安定的な原料調達が難しかったことが挙げられている^{26,27)}。

竹材をボード類原料の木材代替資源として考える場合、製品の性能は木材を原料とした場合とほぼ同じであるため、付加価値を高めることは難しい。したがって、量的・経済的に工場経営が成立する規模に見合う範囲で安定的に原料を供給できるかどうかが鍵となる。木質ボード類の製造は装置産業であるため、生産規模が大きいほど設備に投資した費用の償却が容易となる。竹は、短期間で生長するため、蓄積量を回復することは木材より容易であるが、竹林の単位面積あたりの収穫量を増加させると持続的な更新ができなくなり、集荷範囲を広げると竹棹

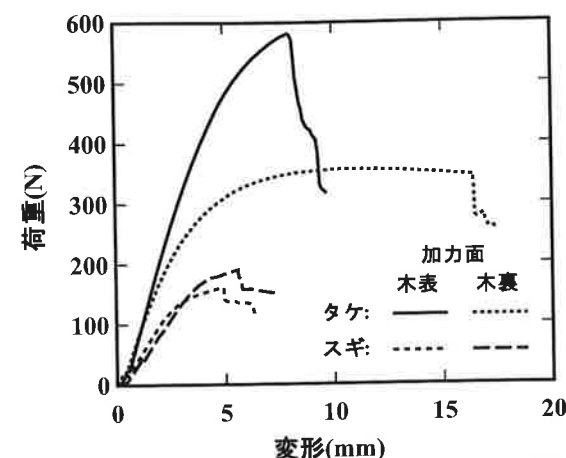


図 3.1.1 竹材と木材の荷重-変形関係²³⁾

が中空であるため輸送コストが著しく増大してしまう。建設リサイクル法の施行等によって、木造住宅の解体材など、木質廃材の再利用が問題となっている²⁸⁾が、現在有効なリサイクル手段は木質ボードの原料とすることしかないと、輸送コストが上昇すると、廃木材由来の原料に対する競争力が持てないことは大きな問題であろう。輸送コストを低減させるためには、収穫現場で 1 次加工を行うことが有効であるが、竹材を対象とした加工機械に関する研究・開発²⁹⁾は現時点では多くみられない。

3.1.7 竹の特長を活かした材料開発

竹の特徴のうち、一般的な木材より高強度であることを利用するためには、エレメント加工時になるべく細分化しないことが得策である。そこで、軸方向に沿って割裂または切断した竹材の表皮と随腔表面を平らに切削または鋸断し、得られた短冊状のエレメントを積層・接着した集成材が開発されている³⁰⁾。この方法の場合、強度性能にもっとも寄与する表皮部分が大幅に失われてしまうため、高い強度性能は期待できず、原料歩留まりも低下してしまう。したがって現在では、構造材ではなく主にフローリング材として利用されている。原料歩留まりと強度性能の向上を目的として、表皮部分を除去せず、割裂・細片化した棒状のエレメントを圧縮成型した材料が開発されている³¹⁾が、表皮と随腔表面の接着性改善が課題となっている。

円筒状の材を平板化する技術については、中国では温水浸漬・加熱処理後にプレスで展開する方法³²⁾によって平板化した竹を用いて合板の生産が行われており、日本では高周波加熱により竹材を軟化させ、展開する方法³³⁾が開発されている。高周波加熱で展開した平板も既にフローリング材等としての市販実績があるが、接着性向上のため、化学処理やサンドブラストによる物理処理によって表面処理を行う必要がある³⁴⁾。

竹の強度性能と割裂性を活かした材料としてゼファーボードに関する研究³⁵⁾がある。縦に 2~4 割にした竹を V 字状の溝のついた 2 つのローラーの間を通して圧壊すると、すだれ状またはのしのか状の繊維の束が得られる。この繊維の束をゼファーシートと呼び、小片切削工程より簡便な装置で省エネルギー的に加工可能な点が特長である。また、アスベストなどの鉱物繊維の代替材料として、セメントボードのフィラー(骨材、強化繊維)として用いた場合の製造条件と性能についても研究が行われ、竹に含まれる糖分によるセメントの硬化不良を抑止する方法³⁶⁾が検討されている。

3.1.8 構造材料に関する研究開発

パーティクルや繊維のように小さなエレメントに加工すれば、エレメント表面に表皮部分が含まれていても、その割合が低くなるため、接着強さは低下しない³⁷⁻³⁹⁾。エレメント間の接着性能を向上させる方法として、竹材を半径方向に薄く剥いで製造するストランドを用いたボードに関する研究が行われている⁴⁰⁾。この場合、エレメントが比較的大きいため、高い曲げ性能が得られ、エレメント表面が表皮と随腔表面のみではないため、接着強さも高い値を示す。

竹材を構造材料として用いる場合には、その耐久性・耐候性についても考慮する必要がある。防腐・防黴については薬剤処理の効力について検討⁴¹⁾されているが、防腐効力が高い薬剤は接着性を阻害するため、強度低下の原因となる可能性がある。薬剤による防腐処理を行わない場合には、強い塗膜を形成する塗料を用いて塗装することが一般的であるが、塗装を施すと吸・放湿性などの竹本来の性能が失われてしまうことに注意が必要である。また近年では、環境に配慮した生物劣化抑制方法として、加圧蒸気処理に関する研究⁴²⁾が行われている。0.7MPa(165℃)60 分で乾材害虫の食害による重量減少率が約 70%抑制される。乾燥性については、繊維方向の水分移動が主であり、材の厚さ方向の位置によって異なる⁴³⁾ため、強度向上を目的としてエレメント寸法を大きくしすぎると、カールや含水率のバラツキが生じやすくなる。

竹の表皮を利用することは美観上の要求が高く、製造工程の簡略化の観点からも望ましいが、耐候性が低く、退色しやすいことが問題となる。表面改質による染着性・塗膜付着性の向上方法⁴⁴⁾や、無機塩の含浸による退色防止方法⁴⁵⁾について研究されているが、さらに効率が良く、簡便な方法が望まれている。

竹棹をそのまま利用する方法としては、樹脂含浸処理と表面改質を併用して寸法安定性と耐候性を向上させた屋外建築物のユニット部材や接合方法に関する研究^{46,47)}がある。建築物としての安全性を向上させるためには、竹棹の断面寸法・形状や強度性能が異なる場合でも対応可能な構造・設計手法の開発が必要となる。

また、竹を用いた接合具の開発⁴⁸⁾も行われており、製材の再利用や従来の磁力選別で除去できないステンレス釘の代用に有効であると考えられる。

3.1.9 構造材料に要求される性能

建築基準法第37条や告示等によると、構造上重要な部位に使用される建築材料は、JAS規格・JIS規格等の材料規格によって認証された製品、または、指定建築材料(木質接着成形軸材料・木質複合軸材料・木質断熱複合パネル・木質接着複合パネル)として国土交通大臣の認定を受けた材料のいずれかでなければならない⁴⁹⁻⁵¹⁾。

竹材を原料とした材料開発を検討する場合、竹材が必ずしも木材と同等とみなされないことに注意が必要である。すなわち、JAS規格においては竹材を原料とした製品は木質材料としての認証の対象とならず、原料に関する規定が存在しないJIS規格においては認証が可能であるが、JIS規格が対象とする木質材料は、パーティクルボードと繊維板(ファイバーボード)のみである。建築基準法においても、指定建築材料等の認定対象とはならず、材料の劣化については、性能の維持に必要な項目の評価が求められている⁵²⁾。これは、比較的大きな構成要素からなる材料の場合、その性能が原料の性質に依存するため、性質の変動や耐久性に関する保証が得られない原料の使用を制限するためであると考えられる。したがって、木材と比較してどの程度の性能を保証可能であるか明らかにしない限り、竹材を用いた材料開発を行う余地は極めて限定されているといわざるを得ない。

さらに、指定建築材料に求められる性能は、曲げ・せん断・圧縮などの基本的な強度物性値に加え、事故的水掛かり・含水率・荷重継続時間に関わる強度性能の調整係数や接着耐久性など多岐にわたっており、使用環境や長期使用による性能低下を勘案して、強度性能の統計的な下限値を導出することとされている¹⁶⁾。竹材を用いた新規材料が指定建築材料として法的な位置付けを得るためには、これらの強度性能値を整備する必要がある。

3.1.10 法的位置付けの有用性

前述した要求性能を担保するためには、既存の制度に関する十分な理解が必要となる。例えば、竹材を用いたフローリングは、木質系とみなされないことから、ホルムアルデヒド発散材料の規制対象外であり、大臣認定の性能評価対象やJAS認証の対象とならない。しかし、同一の目的で使用される木質系フローリングの場合、ホルムアルデヒド放散量に関する等級があり、その性能が担保されていることから、木質材料と競争力を持つためには、性能保証を行う必要がある。そこで、告示対象外建材の表示に関するガイドライン⁵³⁾に基づき、ホルムアルデヒド放散量を自主的に表示している製品が多い。自主表示制度は、製品の性能を製造者自らが担保するものであり、評価方法は既に確立した手法に従う必要はあるものの、必ずしも既存材料より高い性能が求められるわけではない。この他にも、環境負荷の観点から既存材料との差別化を図るための制度として、グリーン購入法⁵⁴⁾やエコマーク制度⁵⁵⁾などがあり、性能が明示されていることから使用者の材料選択の基準に用いられている。これら法規制上の位置付けを明確

にすることは実用化促進に寄与する重要な要素である。

3.1.11 むすび

竹材利用に関する検討は、資源問題や環境問題に対応するためにも、今後ますます重要となると考えられる。竹材の利用に関する近年の研究は、歴史的利用法と同様に竹材の特徴を利用し、欠点を補うことで、新しい材料を開発することを目指すものといえる。今後、構造材料としての実用化を図るためには、用途に応じて必要とされる強度・耐久性を十分に把握し、その性能を達成するための製造方法について検討する必要がある。

3.1.12 文献

- 1) 中原 恵: 木材工業, 50, 52-56(1995)
- 2) 小谷公人: 木材工業, 51, 8-12(1996)
- 3) 井口よう子: 木材工業, 58, 157-164(2003)
- 4) 平野陽子: 木材工業, 59, 443-447(2004)
- 5) 則元 京: 木材工業, 61, 430-435(2006)
- 6) Uchiyama, E.: Bulletin of Forestry and Forest Products Research Institute, 301., 79-118(1978)
- 7) Food and Agriculture Organization of the United Nations: State of the World's Forests 1997, Words and publications, 187-189(1997)
- 8) 張 彬淵, 他2名: 木材工業, 50, 198-203(1995)
- 9) 井鷲裕司: 林業技術, 672, 19-22(1998)
- 10) 平成19年版森林・林業白書参考付表, 林野庁編, (社)日本林業協会, 2, 21(2007)
- 11) 渡辺政俊, 上田弘一郎: 富士竹類植物園報告, 21, 9-26(1976)
- 12) 渡辺政俊: *Bamboo J.*, 3, 7-17(1985)
- 13) 竹利用新素材合板等の研究会: 竹利用新素材合板等の研究会報告書(案)(未出版)
- 14) 上田弘一郎: 有用竹と筍, 博友社, 104-105, 48-49(1963)
- 15) 渡辺政俊: 富士竹類植物園報告, 4, 44-47(1959)
- 16) 渋沢龍也: 林業経済, 60(3), 17-29(2007)
- 17) 住宅着工統計, 国土交通省総合政策局情報管理部(2006)
- 18) 上田弘一郎: 竹づくし文化考, 京都新聞社, 40-43(1986)
- 19) 室井 綽: 竹類一特性・鑑賞と栽培一, 加島書店, 219-226(1963)
- 20) 鈴木 寧: 東京大学農学部演習林報告, 36, 135-156(1948)
- 21) 木材工業ハンドブック, 森林総合研究所監修, 丸善, 192-195(2004)
- 22) 野村隆哉: 木質環境の科学, 山田 正編, 海青社, 54-59(1987)
- 23) 渋沢龍也: 未発表資料(2007)
- 24) 鈴木 寧, 青山経雄: 東京大学農学部演習林報告, 46, 211-223(1954)
- 25) 森田慎一: 竹の魅力と活用, 内村悦三編, 創森社, 43-48(2004)
- 26) 岩下 睦: パーティクルボード産業史(建材産業史5別刷), 日本建築学会建築経済委員会建材産業史小委員会, 16(1997)
- 27) 上田弘一郎: 竹と人生, 明玄書房, 352-369(1970)
- 28) 建築解体廃棄物リサイクルプログラム, 建設省(1999)
- 29) 例えば, 松岡 清: *Bamboo Voice*, 11, 19-23(2000)
- 30) 例えば, 遠矢良太郎, 他2名: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 3, 65-72(1989)
- 31) 藤井 毅, 宮武 敦: 日本国公開特許, 特開平 7-195313(1995)
- 32) 川井秀一: 木材工業, 49, 90-92(1994)

- 33) 米藏 優, 他 3 名: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 4, 103-116(1990)
- 34) 張 斉生, 他 4 名: 木材工業, 45, 16-20(1990)
- 35) 例えば, Nugroho, N., Ando, N.: *J. Wood Sci.* 46, 68-74(2000)
- 36) 例えば, 馬 霊飛, 他 5 名: 木材学会誌, 44, 425-432(1998)
- 37) 藤元嘉安, 他 4 名: 木材工業, 53, 212-217(1998)
- 38) Zhang, M., et al.: *Mokuzai Gakkaishi*, 41, 903-910(1995)
- 39) 松本久美子, 他 4 名: 木材学会誌, 47, 111-1119(2001)
- 40) 張 敏, 他 4 名: 木材学会誌, 42, 854-861(1996)
- 41) 小谷公人, 他 2 名: 日本木材加工技術協会第 14 回年次大会講演要旨集, 26-27(1996)
- 42) 小谷公人, 他 7 名: 大分県産業科学技術センター 2006 年度研究報告書, 45-50(2007)
- 43) 山之内清竜: 木材工業, 44, 371-374(1989)
- 44) 川村二郎, 小谷公人: 木材学会誌, 38, 417-423(1992)
- 45) Chang, S-T.: *Mokuzai Gakkaishi*, 43, 487-492(1997)
- 46) 中原 恵, 他 2 名: 日本木材加工技術協会第 13 回年次大会講演要旨集, 53(1995)
- 47) 林 知行, 他 3 名: 木材工業, 54, 420-425(1999)
- 48) 例えば, 宮内裕之, 他 4 名: 日本建築学会学術講演梗概集(東海), C-1 構造 III, 47-48(2003)
- 49) 建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件, 建設省, 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1446 号(2000)
- 50) 枠組壁工法又は木質プレハブ工法を用いた建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件, 国土交通省, 平成 13 年 10 月 15 日国土交通省告示第 1540 号(2001)
- 51) 建築基準法施行令第四十六条第四項表一(一)項から(七)項までに掲げる軸組と同等以上の耐力を有する軸組及び当該軸組に係る倍率の数値, 建設省, 昭和 56 年 6 月 1 日建設省告示第 1100 号(1981)
- 52) 植本敬大: 木質構造の設計, 日本建築学会関東支部, 53-60(2008)
- 53) 建築基準法によるホルムアルデヒド規制に基づく告示対象外建材の表示方法に関するガイドライン作成について, (社)日本建材・住宅設備産業協会(2005)
- 54) 国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律, 平成 12 年 5 月 31 日法律第 100 号
- 55) エコマーク商品類型 No.111「木材などを使用したボード Version2.0」, (財)日本環境協会エコマーク事務局(2004)

3.2 軸材料としての設計・施工方法

建築の構造部材として使用される木質材料のうち、木材を接着剤で積層接着して製造した軸材料には、構造用集成材、構造用単板積層材(LVL)、PSL などの構造用接着成型軸材料がある。また、2 種類以上の木質材料を接着により複合構成した I 型梁のようなものもある。これらのうち、構造用集成材については日本農林規格(JAS)に示される品質、LVL については JAS または平成 12 年建設省告示 1446 号(以下、告示 1446 号)の木質接着成型軸材料に対して示される技術的基準に則った品質、また、PSL などの木質接着成型軸材料や I 型梁のような木質複合軸材料については告示 1446 号に則った品質が要求される。

3.2.1 集成材

「集成材の JAS」(平成 19 年農林水産省告示 1052 号)では、集成材について「ひき板又は小

角材等をその繊維方向を互いにほぼ平行にして、厚さ、幅及び長さの方向に集成接着した一般材」、また、構造用集成材については「集成材のうち、所要の耐力を目的としてひき板又はこれらを幅方向に合わせ、又、長さ方向にスカーフジョイント、ファインガージョイントで接合して調整したラミナを積層接着したもの(一部省略)であって、主として構造物の耐力部材としてもちいられるもの」と定義している。構造用に使われる集成材には構造用集成材と化粧はり構造用集成柱があり集成材の JAS に規定されている。JAS では、製品の曲げ性能、ラミナの品質、接着の程度、含水率、ホルムアルデヒド放散量に関する試験方法と基準値が定められている。

JAS 認定された製品には、品名、強度等級、接着の程度、樹種、寸法等が表示されている。製品の品名を示すものとしては、断面寸法に応じた大断面、中断面、小断面の区分(名称)がある。また、ラミナ構成については、異等級構成構造用集成材(対称構成)、異等級構成構造用集成材(非対称構成)、同一等級構成構造用集成材、特定異等級対称構成集成材がある。

集成材の強度性能について、JAS では、ひき板(ラミナ)を目視等級もしくは機械的等級区分法により強度区分するとともに、それらラミナの断面構成を規定することで保証するシステムとなっている。JAS の認定にあたって実施される強度性能試験としては、初期試験で行う実大集成材の曲げ試験と日常的なラミナの性能試験とがある。いずれの試験においても規格に定められた最低基準値を満たすことが求められる。製品の曲げ性能は、曲げヤング係数(E、特定対称異等級構成については ME)と曲げ強さ(F)との組合せ(E-F あるいは ME-F)で表示される。構造用集成材に使用される接着剤の使用環境に関する定義と使用できる接着剤の種類を表 3.2.1 に示す。JAS に適合した構造用集成材に対しては、平成 12 年度建設省告示 1024 号(以下告示 1024 号)により圧縮、引張り、曲げ、せん断、めり込みの基準強度が定められている。また、木構造設計規準・同解説(以下設計規準)¹⁾には基準材料強度や基準弾性係数が示されている。構造用集成材の曲げ、引張り、圧縮の基準弾性係数は、JAS に規定されているラミナの断面構成にしたがって等価断面法で算出される。

表 3.2.1 接着に関する使用環境の定義と使用できる接着剤

使用環境		使用環境A	使用環境B	使用環境C
定義		構造用集成材の含水率が長期間継続的に19%を超える環境、直接外気にさらされる環境、太陽熱等により長期間高温になる環境、構造物の火災時でも高度の接着性能を要求される環境その他の構造物の耐力部材として、接着剤の耐水性、耐候性又は耐熱性について高度な性能が要求される使用環境をいう。	構造用集成材の含水率が時々19%を超える環境、太陽熱等により時々高温になる環境、構造物の火災時でも高度の接着性能を要求される環境その他の構造物の耐力部材として、接着剤の耐水性又は耐熱性について通常の性能が要求される使用環境をいう。	構造用集成材の含水率が時々19%を超える環境、太陽熱等により時々高温になる環境その他の構造物の耐力部材として、接着剤の耐水性又は耐熱性について通常の性能が要求される使用環境をいう。
	積層	レゾルシノール レゾルシノール・フェノール	レゾルシノール レゾルシノール・フェノール	レゾルシノール レゾルシノール・フェノール 水性高分子イソシアネート
接着剤		レゾルシノール レゾルシノール・フェノール メラミン	レゾルシノール レゾルシノール・フェノール メラミン	レゾルシノール レゾルシノール・フェノール メラミン 水性高分子イソシアネート メラミンユリア
	たて継			

せん断弾性係数は、製材と同様で曲げヤング係数の 1/15 となっている。なお、ブロックせん断試験の基準値、目視等級区分によるラミナの曲げ性能、化粧はり構造用集成柱の曲げ性能等は樹種毎に定められており、JAS 認定される集成材はこれらの樹種を使用する必要がある。

設計に必要な調整係数のうち、強さに及ぼす試験体寸法の影響、試験体含水率の影響、長期荷重に対する考え方を以下に述べる。

集成材の曲げ強さは試験体寸法(特に梁せい)の影響を受けることが知られている²⁾。この影響

を補正するための係数を寸法調整係数(K_s)といい、標準梁せい(h_0)の試験体曲げ強さに対する任意の梁せい(h)の集成材の曲げ強度の比として 3.2.1 式で求められる。ここに、 α は 1/9、標準梁せいは異等級構成集成材では 300mm、同一等級構成集成材では 100mm である。告示 1024 号で示される曲げに対する基準強度も同様である。

$$K_s = \left(\frac{h_0}{h} \right)^\alpha \quad \text{式(3.2.1)}$$

JAS では集成材製品の含水率を 15%以下にすること、また、構造用集成材の適正製造基準ではひき板の含水率を 8~15%に調整すること求めている。構造用集成材の含水率は 12%くらいである。木材の強度性能は含水率の影響を受けることが知られており、JAS に規定される集成材の強度試験においては、測定された各試験体の強度性能はそれぞれの試験体の含水率に応じた含水率調整係数を用いて標準含水率である 12%時の強さに補正することになっている。含水率調整係数は製材すなわち木材と同じと考えられている。含水率 1%あたりの変化率として一般的に知られている数値としては、曲げ強さで 4%、曲げヤング係数で 2%、せん断強さで 3% などがある³⁾。

木材に荷重が作用した場合に生じる変形量は荷重の継続時間の延長に伴って増加すること(クリープ変形)、木材の破壊強さは荷重の継続時間の延長に伴って小さくなること(荷重継続期間の影響)が知られている。集成材のクリープ性能は製材と同等という報告があり⁴⁾、式(3.2.2)に係数 $a=0.2$ 、 $N=0.2$ を代入してクリープ変形係数(C_{cp})が得られる。集成材の強さに対する荷重継続時間の影響は具体的な実験により検証された例はないが、国土交通省告示や木質構造設計規準・同解説¹⁾では製材と同等であると考えられている。

$$C_{cp} = 1 + at^N \quad \text{式(3.2.2)}$$

木材を常時含水率が高くなる環境や土等に接触して使用する場合は、保存処理を行う必要がある。JAS では集成材の保存処理に関する規定がないが、優良木質建材等認証制度(以下 AQ という)では集成材の保存処理材の性能区分を規定している。保存処理の方法には、保存処理したラミナを積層接着するもの、油性保存薬剤を集成材に加圧注入するもの、水性保存薬剤を集成材に加圧注入したのち乾燥処理するもの、加圧注入以外の方法により所定の薬剤量を注入するものがある。保存処理材の性能区分は、薬剤の注入量と浸潤度により規定されている。

3.2.2 構造用単板積層材

単板積層材 JAS(平成 19 年農林水産省告示 701 号)では、構造用単板積層材(以下 LVL)について「ロータリーレース又はスライサー等により切削した単板を主としてその繊維方向を互いにほぼ平行にして積層接着した一般材であって、主として構造物の耐力部材として用いられるもの」と定義している。

曲げ強度性能については、製品のヤング係数の区分(E)と製造上の単板の積層数及びたて継ぎの分散に応じた等級(特級、1 級、2 級)がある。一定長さの単板から長尺の LVL を製造するにあたっては、単板を長さ方向につぐ必要がある。単板のつぎ方にはスカーフジョイント、ラップジョイント(重ねつぎ)並びにバッドジョイントがある。隣接する単板のつぎ目の距離を避距と言い単板の厚さの倍数で表すが、この避距と LVL の強度性能には強い関係があり、一定の曲げ強さを得るのに必要な避距は接着層を垂直にして荷重したときは 10 倍以上、接着層を水平にして荷重したときは 30 倍以上とされている⁵⁾。また、LVL は単板の裏割れがあることもあって、LVL の強度は単板の積層方向と荷重の向きの関係により変化することもあり、JAS では曲げ試験やせん断試験において、接着層に直交方向(平使い：H)と平行方向(縦使い：V)それぞれで試験することになっている(図 3.2.1)。

JAS に適合した LVL に対しては、告示 1024 号により圧縮、引張り、曲げ、せん断、めり込みの基準強度が定められている。せん断性能は、JAS の水平せん断試験により決定される。LVL 製造に用いられる単板は用途・性能・経済性に適していれば樹種をとくに選ばない。告示による基準強度のうちめり込みについては樹種により区分されており、JAS でも使用比率の高いものから樹種を表示することになっている。

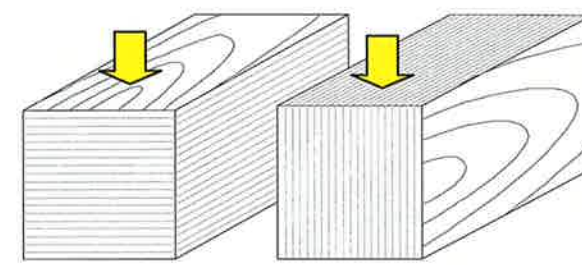


図 3.2.1 接着層と荷重方向の関係と称呼

LVL の寸法調整係数は式(3.2.1)に $h_0=300\text{mm}$ 、 $\alpha=0.136$ を代入して求める。LVL は製品の適正な接着性能を得るために単板の含水率を低くし、また、積層接着工程において接着剤を硬化させるために 130~150℃で加熱圧縮するなどされるため、製品時の含水率は多くの場合 10%以下と低くなる。LVL の JAS では、集成材と同様試験体の強度性能は標準含水率 12%時のものに含水率影響係数を用いて補正することになっている。LVL の含水率影響係数はデータも少なかったことから製材と同等とされてきたが、最近の研究では木材より若干小さくなることが報告されている⁶⁾。

LVL の長期荷重に対する性能評価はあまり多く報告されているわけではないが、クリープ変形係数⁷⁾も荷重継続期間影響係数⁸⁾も製材とほぼ同じと見なすことができることを示している。

保存処理に関する規定は集成材同様 JAS では規定されていないが、AQ では防腐・防蟻処理構造用単板積層材として接着剤混入型と製品への加圧注入型の 2 種類が規定されており、住宅用土台などに利用されている。

3.2.3 構造用接着成型軸材料(SCL)

集成材や単板積層材(LVL)に続く材料として 1970 年以降に開発・実用化されたのが PSL や OSL、LSL などの新軸材料である。PSL は Parallel Strand Lumber、OSL は Oriented Strand Lumber、LSL は Laminated Strand Lumber の略称で、いずれも民間企業により開発されたものである。PSL は単板を幅方向に裁断して製造したストランドを、繊維方向を揃えて積層接着した材料をいう。用途としては、大断面大スパンの梁や桁から柱、まぐさ、枠組み材などがある。また、防腐などの薬剤注入が容易であることを利用した製品もある。OSL、LSL は、ウェファー状の削片を裁断して製造したストランドを配向して積層接着した材料である。用途としては、建築材料として床根太、柱材、床下地材のほか、家具や建具の枠材などがある。

これらの新軸材料は、ストランドの製造工程で節が除去されること、フォーミング時にストランド端部が分散され目切れも少なくなること、また、接着剤の硬化過程で圧密されることなどから強度性能が高くかつばらつきが少ないことなどが長所と考えられる。一方、エレメント間の隙間や接着の機構が点接着であることから、含水率変化による寸法変化、耐水性、耐久性が懸念される。

建築基準法 37 条に基づいて、これらの木質接着成型軸材料の性能を評価して建築材料として国土交通大臣が認定する仕組みが整備されている。試験項目および実際の値について PSL(等級：150)および LSL(等級：90)の例を参考として表 3.2.2 に示す。

接合性能についてはストランドの積層方向と荷重の方向の关系到配慮する必要がある。鋼板挿入型ドリフトピン接合による接合強度試験では、積層面に垂直にドリフトピンを打ち込む場合と積層面に平行に打ち込む場合、靱性に差があることが示されている⁹⁾。

3.2.4 I 型梁

表 3.2.2 告示 1446 号の試験項目と木質接着成型軸材料の測定値例

告示1446号の試験項目		PSL等級: 150	LSL等級: 90
1	寸法等の規定	30mm×45mm以上	25mm×45mm以上
2	含水率の基準値	15%以下	15%以下
4	曲げ(エッジ, フラット)	48.5 N/mm ²	27.9 N/mm ²
	曲げ弾性係数	14.71 kN/mm ²	8.83 kN/mm ²
	せん断(エッジ)	3.5 N/mm ²	3.8 N/mm ²
5	せん断(フラット)	2.6 N/mm ²	2.6 N/mm ²
	せん断弾性係数	919 N/mm ²	552 N/mm ²
	めり込み(エッジ)	9.0 N/mm ²	12.7 N/mm ²
6	めり込み(フラット)	6.2 N/mm ²	6.0 N/mm ²
	引張り(繊維方向)	38.3 N/mm ²	17.7 N/mm ²
	圧縮(繊維方向)	41.2 N/mm ²	17.7 N/mm ²
含水率調整係数(含水率15%時の強度性能に対する含水率20%時の強度性能の比)			0.9
	曲げ	0.87	0.87
	曲げ弾性係数	0.94	0.92
7	せん断(エッジ)	0.77	0.92
	せん断(フラット)	0.86	0.87
	せん断弾性係数	0.94	0.82
	めり込み(エッジ, フラット)	0.69	0.82
8	荷重継続時間の調整係数	曲げ, せん断, めり込みに対して0.55	曲げ, せん断, めり込みに対して0.55
9	クリープ調整係数	曲げ, せん断, めり込みの弾性係数に対して0.5	曲げ, せん断, めり込みの弾性係数に対して0.5
10	事故的水濡れの調整係数	1.0 事故的水掛かりが生じないよう措置する	1.0 事故的水掛かりが生じないよう措置する
11	接着耐久性	0.5	0.5
防腐処理による力学的特性値の低下率			
	使用環境	I	II
	曲げ	0.89	0.75
	曲げ弾性係数	0.95	0.89
12	せん断(エッジ)	0.8	0.66
	せん断(フラット)	0.87	0.79
	せん断弾性係数	0.95	0.89
	めり込み	0.72	0.53
			0.42

指定建築材料の木質複合軸材料の代表格となる材料である。フランジに製材や LVL などの木質軸材料、ウェッブに合板や OSB など木質面材料を用いて I 型の断面を持つ軸材料を構成したものである。材料の断面積が同じもの同士を比較するならば、I 型梁は最も効率的に高い曲げ剛性を得ることができ、かつ、単位長さあたりの軽い材料とすることができる。枠組壁工法や木造軸組構法建築物を中心に、その床根太や屋根たる木として利用されている。国内で流通している製品としては、LVL をフランジ、OSB をウェッブに用いた海外からの完成品もしくはその国内での組立品がほとんどであったが、最近、フランジに道産のトドマツ製材(縦つぎ材)、ウェッブに道産カラマツ合板を用いた製品が建築基準法 37 条に基づいて国土交通省大臣の認定を受けた¹⁰⁾。

3.2.5 竹フローリング材の物理的・機械的性質の測定例

3.1.7 で述べられているように、竹を用いた建築用軸材料には、円筒状の竹材を平板化しこれを積層接着して製品化する LVL 的なものと、竹材を軸方向に割裂または切断して得られた短冊状のエレメントを積層接着する PSL 的な製品とが考えられよう。ここで、写真 3.2.1 に示すような竹製板(幅 120mm×厚 31mm×長さ 2,000mm)40 枚の試作を竹フローリングメーカーに依頼して製造し、物理的・機械的な性質を調べた例を示す¹¹⁾。40 枚の平均値と変動係数は、密度 721kg/m³・6.9%、縦振動法によるヤング係数 11.2kN/mm²・11.7%、静的曲げによるヤング係数 10.5 kN/mm²・12.7%、含水率 9.3%・1.8%であった。また、密度とヤング係数の相関が非常に高いこと(図 3.2.2)、縦振動法によるヤング係数の測定法が有効であること(図 3.2.3)が明らかになった。さらに、告示 1446 号にあるサイドマッチによる試験体を採取した場合、隣り合う試験体間の密度やヤング係数の相関も高く、木質材料の評価法を適用することも可能であると考えられた。これらのことは、竹製品であっ



写真 3.2.1 竹製板

ても木材を評価する手法が適用できることを示していると考えられる。

3.3.6 文献

- 1) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 402-407(2006)
- 2) 例えば, 藤田和彦, 他 8 名: 日本建築学会学術講演梗概集(中国), C-1 構造 III, 275-276(2008)
- 3) 木材工業ハンドブック, 林業試験場監修, 丸善, 177(1973)
- 4) 例えば, 荒武志朗, 有馬孝禮: 木材学会誌, 41, 359-366(1995)
- 5) 例えば, 藤井 毅: 木材工業, 37(8), 367-374(1982)
- 6) 新井貴子, 他 6 名: 日本木材学会大会研究発表要旨集 (CD-ROM), 57:PD010(2007)
- 7) 中井孝: 日本木材学会大会研究発表要旨集, 38, 113(1988)
- 8) 山口修由, 中島史郎: 日本建築学会学術講演梗概集(関東), C-1 構造 III, 27-28(2006)
- 9) 黄 権煥, 小松幸平: 木材学会誌, 49(4), 275-286(2003)
- 10) 大橋義徳: *J. Timber Engineering*, 19(1), 7-12(2006)
- 11) 宮武 敦: 未発表資料

3.3 面材料としての設計・施工方法

面材料を木造建築物の耐力要素(構造用材)として用いる場合、要求される主要な性能は、建築物が崩壊しないことと居住性能に影響を与えるような変形を生じないことである。また、長期間にわたって使用されることから、初期の性能がどの程度維持されるのかも重要な性能である。ここでは、主要な面材料の特徴と要求される性能および設計・施工方法について解説する。

3.3.1 構造用合板の要求性能

構造用合板とは、建築物の構造上重要な部位に使用する合板であり、強度の等級区分として 1 級と 2 級がある。JAS 規格¹⁾の上では、1 級と 2 級の違いは、規定されている強度試験などの種類であるが、実際上は、1 級は主としてラワン合板、2 級は針葉樹合板である。

1 級の構造用合板は、高度な構造的利用を考慮して基準が作られている。板面の品質は 9 つに分類され、アルファベット 2 文字の記号(A-B~D-D)によって、表板・裏板の板面の品質を表す。各種の強度を保証するため、0° 方向(長手方向)および 90° 方向(短手方向)のそれぞれに関する曲げ剛性試験・曲げ強度試験に加え、面内せん断試験が義務付けられており、板面の品質に応じて適合基準が定められている。また、板面の品質によらず、試験の結果から保証される曲げヤング係数と曲げ強さを記号 E と F で表示してもよい。

2 級の構造用合板は、壁・床・屋根の下地材などの用途を考慮して基準が作られている。下地材の一般的な使い方では強度は十分な余裕があるため、義務付けられている強度試験は 0° 方向の曲げ剛性試験のみとなっている。特殊な仕様により構造計算が必要となる場合などを想定し、曲げ強度を適切に推定できるように単板構成に関する断面性能として有効断面係数比を表示するものもある。

さらに、接着剤の水に対する耐久性によって特類と 1 類の類別がある。使用する用途・部位(使用環境)に応じて適切な耐久性が得られるように類別を選択する必要がある。

3.3.2 構造用パネルの要求性能

JAS 規格²⁾によると、パネルとは、「木材の小片を接着し板状に成型した一般材又はこれにロ

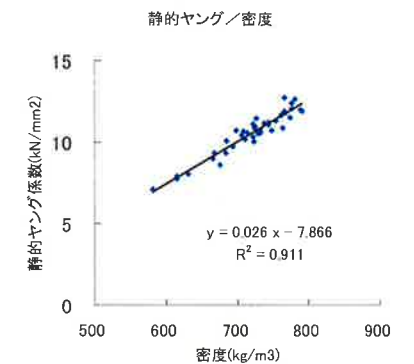


図 3.2.2 密度と静的曲げヤング係数の関係

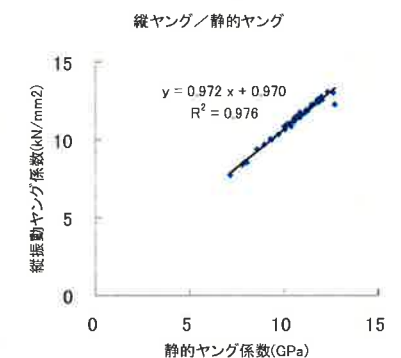


図 3.2.3 縦振動法によるヤング係数測定の有効性

「パーティクルレース、スライサー等により切削した単板を積層接着した一般材」であり、構造用パネルとは、「パネルのうち、主として構造物の耐力部材として用いられるもの」と定義されている。構造用パネルに該当する材料は、ウェファースボード、OSB の他に、強度性能の向上のためにパーティクルボードの表裏面(中心層も含む場合がある)に単板を配置したコンポジットパネルがあるが、今日の中心的な材料は OSB である。OSB はその製造方法からパーティクルボードの一種に分類されるが、エレメントを配向することにより高い強度性能を持つ。

構造用パネルは常態および湿潤曲げ性能によって4つの等級に区分される。常態曲げ性能は、強度による区分であるが、湿潤曲げ性能は、実際の使用時に近い条件下の強度性能と接着の程度の両者を規定するものである。各等級の曲げ性能の基準値は床下地や屋根下地に用いた際の許容スパンを想定し、その際の要求性能から定められている。強度性能の適合基準値は製品の厚さの関数として表されている。曲げ強さや曲げヤング係数が同じであっても、負担可能な荷重やたわみ量はそれぞれ断面係数と断面2次モーメントに依存する。言い換えれば、曲げ性能の低い材料であっても厚さを増せば、性能の要求水準を満たすことができる。厚さを性能の一部と認め、曲げ性能が同じ場合に厚い製品が高い等級に格付け可能なことは大きな特徴である。

3.3.3 パーティクルボードの要求性能

3.3.3 パーティクルボードの要求性能
パーティクルボードとは、木材などの小片(パーティクル)を主な原料として、接着剤を用いて熱圧成型した材料である。パーティクルは木材チップから加工されるため、原料の選択性が極めて広い。表裏層には細かいパーティクルを使用することで表面に平滑性を与え、心層には大きいものを使用することで強度を向上させるため、通常パーティクルボードは3層構造となっている。パーティクルボードの用途は造作・家具が中心であるが、近年は床下地材としての利用が増加している。JIS A 5908³⁾では、曲げ強度・接着剤・ホルムアルデヒド放散量による区分が設けられている。接着剤による区分には P・M・U タイプの3種類があり、耐水性能の違いを表す。Pタイプは2時間煮沸後(B試験)、Mタイプは70℃温水2時間浸漬後(A試験)の湿潤状態の曲げ強度(曲げ強度区分の基準値に対する残存率:50%)によって性能を担保する。

3.3.4 ファイバーボードの要求性能

3.3.4 ファイバーボードの要求性能

ファイバーボード(繊維板)とは、主に木材などの植物繊維を成型した材料である。ファイバーボードは密度・製法によって、インシュレーションボード・MDF・ハードボードに分類される。インシュレーションボードとハードボードは、ウェットプロセス(湿式法)によって製造される。高い含水率状態から乾燥されるため、紙と同様に接着剤を添加しなくてもファイバー間の結合が得られる。インシュレーションボードは、ファイバーのマットを脱水・乾燥させた材料である。空隙が多く密度が低いため、畳床・外壁などの断熱材に使用される。ハードボードは、ファイバーマットを熱圧縮して成形した材料である。打ち抜き・曲げ加工などの二次加工性に優れており、自動車の内装部品等の成型品や梱包材として使用される。MDFとは、Medium Density Fiberboard の略称で、ドライプロセス(乾式法)によって接着剤を用いて製造される。エレメントが極めて小さく均質であることから、表面が滑らかで加工性が高いため、近年、造作・家具用途に普及している。JIS A 5905⁴⁾では、インシュレーションボードは密度 0.35g/cm^3 未満、ハードボードは 0.80g/cm^3 以上とされ、MDF は 0.35g/cm^3 以上でドライプロセスによるものと規定されている。インシュレーションボードには畳床用(T-IB)・断熱材用(A-IB)・外壁下地用(S-IB)の3つの種類があり、厚さ毎に曲げ強度・熱抵抗などの基準がある。ハードボードには、耐水性向上のために油・樹脂などによる特殊処理を施したものの(テンパードボード)と施さないもの(スタンダードボード)があり、曲げ強度による区分が設けられている。MDFには、パーティクルボードと同様に曲げ強度・接着剤・ホルムアルデヒド放散量による区分が設けられている。

3.3.5 ストレスト・スキンパネル

ストレスト・スキンパネルとは、枠材と棧木を組んだ骨組材の上面または上下両面に面材料を張った床パネル、屋根パネルなどであり、パネルが面外に曲げ変形を生じる際に、被覆材(スキン材)として張った面材料にも応力が発生し、外力を負担するパネルという意味である。このパネルは、接着パネル工法と呼ばれるプレハブ住宅などに広く使われている。このパネルの力学的特徴は、中立軸から離れたところに大きな面積を有するスキン材を配し、このスキン材にも応力を負担させるため、剛性や強度が大きく向上する点にある。骨組材の構成により縦棧型、横棧型、格子棧型などがある。スキン材と骨組材の接合には釘着や接着が用いられるが、接着接合を用いた方がその効果は大きくなる。接着接合を用いたものを使用する場合には、建築基準法第 37 条に基づく指定建築材料の大臣認定を受ける必要がある。同認定制度では「木質接着複合パネル」と呼ばれる。

3.3.6 フォームコアパネル

フォームコアパネルは、ポリスチレン・ポリウレタンなどのプラスチックフォーム(発泡プラスチック)をコア(心層)材として、その両面に合板・OSBなどの面材料を接着したサンドウィッチ状の材料である。強度性能が優れているとともに、コア材は高い断熱性能を持つため、これまで施工により確保していた構造物の安全性能と断熱性能を材料によって達成できることが特徴である。屋根・壁・床下地等に使用される。

フォームコアパネルを対象とした JIS・JAS 規格等は存在しないため、使用にあたっては、建築基準法第 37 条に基づく指定建築材料の大臣認定を受ける必要がある。同認定制度では「木質断熱複合パネル」と呼ばれる。

3.3.7 仕様規定による設計・施工方法

3.3.7.1 耐力壁

耐力壁は、地震力・風圧力などの水平力と固定荷重・積載荷重などの鉛直荷重に抵抗する壁であり、もっとも重要な性能は水平力に抵抗することである。軸組構法、パネル工法、枠組壁工法などいずれの構造においても、製材の枠材に面材料を打ちつけた耐力壁は、水平力に対して高い抵抗性を持っている。耐力壁は面材料の持つ大きな面内せん断剛性を利用したもので、面材料の特徴をもっとも活かした使い方の一例である。

2 階建て以下、高さ 13m 以下、軒高 9m 以下、延べ面積 500m² 以下の建築物において耐力壁を運用する際には、壁倍率の数値を用いた壁量計算のみで設計が可能である。壁倍率とは、壁の長さ 1m あたり 1.96kN の許容せん断耐力を有する壁(たとえば、厚さ 1.5cm 以上で幅 9cm 以上の木材の筋かいを入れた軸組構法の耐力壁)を 1.0 倍として、当該耐力壁の許容せん断耐力がその何倍にあたるかを示す数値である。壁量計算では、壁倍率と壁の長さの積(存在壁量)が、床面積に応じて決まる必要壁量(地震力に対する必要壁量)と見付面積に応じて決まる必要壁量(風圧力に対する必要壁量)以上であることを確認する。したがって、壁倍率の大きな耐力壁を用いれば壁の長さを短くすることができるが、耐力壁が偏在すると建築物の性能の低下を招くため、耐力壁は釣合いよく配置する必要がある。

壁倍率は、使用する面材料の種類・厚さ、接合具(釘、ビスなど)の種類・留め付け間隔等を含む壁の仕様に対して与えられる。軸組構法の面材張り耐力壁の壁倍率(表 3.3.1)は 1.0～2.5 倍であるが、枠組壁工法(たて枠相互の間隔が 50cm 以下の場合)では 1.0～3.5 倍となっている。下地材を両面に張った場合など、複数の仕様を併用した場合には、壁倍率は加算してよいが、倍率の上限は 5.0 とされる。同じ面材料を使用しても、接合に用いる釘を太くする、間隔を狭くするなど、接合仕様を変えた場合、国土交通大臣の指定を受けた試験機関で面内せん断試験の

結果に基づく評価を受けることで、壁倍率の認定を取得することができる。仕様規定に基づく施工の場合、接合具の種類・間隔(=本数)は厳守しなければならない。

表 3.3.1 木造軸組構法の壁倍率

面材		釘		倍率
種類	厚さ	種類	間隔(cm)	
構造用合板 (大壁、真壁受材タイプ)	7.5以上	N50	@15以下	2.5
" (真壁貫タイプ)	7.5以上	"	"	1.5
構造用パネル	—	"	"	2.5
ハードボード	5.0以上	"	"	2.0
パーティクルボード	12.0以上	"	"	2.5
硬質木片セメント板	12.0以上	"	"	2.0
フレキシブル板	6.0以上	GFN40,GNC40	"	2.0
石綿パーライト板	12.0以上	"	"	2.0
石綿けい酸カルシウム板	8.0以上	"	"	2.0
炭酸マグネシウム板	12.0以上	"	"	2.0
パルプセメント板	8.0以上	"	"	1.5
構造用せっこうボードA種	12.0以上	"	"	1.7
構造用せっこうボードB種	12.0以上	"	"	1.2
強化せっこうボード	12.0以上	"	"	0.9
せっこうボード	12.0以上	"	"	0.9
シーシングボード	12.0以上	SN40	外周@10以下、その他@20以下	1.0
ラスシート(角波亜鉛鉄板)	0.4以上	N38	@15以下	1.0
" (ラスシート)	0.6以上	"	"	1.0

3.3.7.2 水平構面

床下地、屋根下地(野地板)など水平構面に使用される面材料は、床組・小屋組材と一体となって、固定荷重・積載荷重などの鉛直力に抵抗すると同時に、地震力・風圧力などの水平荷重によって生ずるせん断力を耐力壁に伝達する役割を担う。建築基準法では、木質建築物を建てる場合に使用する面材料については、耐力壁を除いて特に制限はないが、「住宅金融公庫木造住宅工事共通仕様書」では構造用合板、構造用パネルまたはパーティクルボードを使用するように定められている。床下地の場合、構造用合板では厚さ 12mm 以上の 1 類、構造用パネルでは全ての等級(厚さによらない)が使用可能であり、パーティクルボードでは厚さ 15mm 以上の 13P または 13M タイプ(P、M タイプは接着剤の種類による区分)以上とされる。屋根下地の場合、構造用合板は厚さ 9mm 以上の 1 類、構造用パネルは全ての等級、パーティクルボードは厚さ 12mm 以上の 13P または 13M タイプ以上とされる。また、面材毎に接合に使用する釘の種類とその間隔が定められている。

水平構面の耐力は構造方法によって大きく異なる。建築基準法では、火打ち材を使用した場合と同等以上の性能が要求されるが、品確法(住宅の品質確保の促進等に関する法律)に基づく「日本住宅性能表示基準」では、その性能は存在床倍率という数値で示されている。存在床倍率は壁倍率と同様、1m あたりの許容せん断耐力 1.96kN を基に算出される。床倍率を用いた床の設計にあたっては、上階からの荷重の受け方、地震力・風圧力に対する必要壁量、耐力壁線間距離に応じて決まる必要床倍率を存在床倍率が満たすようにする。

3.3.8 構造計算に基づく設計・施工方法

木質材料の性能には個体差があるため、強度性能の評価には統計的手法が必要となる。すなわち、一定の信頼性(確率)の元にその材料が破壊しない応力の水準や変形性能を設計するための弾性係数を決める必要がある。木質系面材料では軸材料と異なり、国土交通省によって法的に(告示により)強度特性値を与えられた製品は存在しない。その推奨値または運用上使用可能

表 3.3.2 木造軸組構法の存在床倍率

面材		施工方法		倍率
種類	厚さ	釘種類	間隔等	
① 構造用合板(1級又は2級) 構造用パネル(1級又は2級)	12mm以上	鉄丸釘N50	根太(相互の間隔が340mm以下の場合に限る)に対し150mm以下の間隔で打ち付ける	1.0
② "	"	"	根太(相互の間隔が500mm以下の場合に限る)に対し150mm以下の間隔で打ち付ける	0.7
③ "	"	"	①又は②において、横架材上端と根太上端の高さの差を根太せいの1/2以下とする	(①又は②)×1.6
④ "	"	"	①又は②において、横架材上端と根太上端の高さを同一に納める	(①又は②)×2.0
⑤ 構造用合板	24mm以上	鉄丸釘N75	四周をはり等の横架材又は構造用合板の継ぎ手部分に補強のために設けられた受け材に対し、15cm以下の間隔で打ち付ける	3.0
⑥ "	"	"	四周をはり等の横架材又は構造用合板の短辺の外周部分に各1列、その間に1列以上となるように15cm以下の間隔で打ち付ける(はり等の横架材の間隔が1m以下の場合に限る)	1.2
⑦ 厚さ12mm以上、幅180mm以上の板材		鉄丸釘N50	根太(根太相互の間隔が340mm以下の場合に限る)に対し、150mm以下の間隔で打ち付ける	0.3
⑧ "		"	根太(根太相互の間隔が500mm以下の場合に限る)に対し、150mm以下の間隔で打ち付ける	0.2
⑨ "		"	⑦又は⑧において、横架材上端と根太上端の高さの差を根太せいの1/2以下とする	(⑦又は⑧)×1.2
⑩ "		"	⑦又は⑧において、横架材上端と根太上端の高さを同一に納める	(⑦又は⑧)×1.3
⑪ 断面の短辺が90mm以上の製材又はこれと同等の耐力を有する火打ち材		—	平均して5m ² ごとに1本以上となるよう配置する(主たる横架材(火打ち材に取り付くもの、以下同じ)のせいが105mm以上のものに限る)	0.15
⑫ "		—	⑪において、火打ち材を平均して3.3m ² ごとに1本以上となるよう配置する	0.3
⑬ "		—	⑪において、火打ち材を平均して2.5m ² ごとに1本以上となるよう配置する	0.5
⑭ "		—	⑪、⑫又は⑬において、主たる横架材のせいが150mm以上のもの	(⑪、⑫又は⑬)×1.2
⑮ "		—	⑪、⑫又は⑬において、主たる横架材のせいが240mm以上のもの	(⑪、⑫又は⑬)×1.6
⑯ ①から⑩の1、⑪から⑮の1のうち、2つ以上を併用した床組等		—	—	それぞれの和

この表において、「構造用合板」は構造用合板の日本農林規格(昭和44年農林省告示第1371号)に規定する特類又は1類を、「構造用パネル」は構造用パネルの日本農林規格(昭和62年農林水産省告示第360号)に規定する1級、2級又は3級を、「鉄丸釘N50」はJIS A 5508-1992に定めるN50又はこれと同等の品質を有する釘をいう。

な値は「木質構造設計規準・同解説⁵⁾」や「2007年枠組壁工法建築物構造計算指針⁶⁾」により提案されている。JAS規格などの認証を受けている材料は、定期的な抜き取り試験を実施して製品が一定の水準にあることを確認しているため、規格の適合基準値に個体差に影響する因子を勘案して強度特性値を導出する。また、建築物においては長期間外力が作用するため、荷重継続時間の影響についても考慮する必要がある。「木質構造設計規準・同解説」では、250年(半永久的と仮定)を基準として許容応力度を導出し、建築物の使用目的に応じて使用期間を設定し、許容応力度を割り増す方式を採用している。「2007年枠組壁工法建築物構造計算指針」では材料の強度性能の下限値(基準強度)に荷重継続時間に係る強度調整係数等を乗じて低減を見込み、短期・長期の荷重に対する許容応力度を算出する方式を採用している。両文献では許容応力度の算出の方式が異なるため、注意が必要である。

3.3.8.1 構造用合板の許容応力度

構造用合板 1 級の許容応力度は、「木質構造設計規準・同解説」において提案されている。基

準許容応力度は、JAS 規格の強度試験の適合基準に対して曲げで 1/4、圧縮で 1/3.5 の値となっている。構造用合板 2 級の主要な用途は、壁・床・屋根の下地である。合板を張った壁・床・屋根については、構面の性能が実験的に評価されていた。しかし、枠組壁工法建築物の技術基準に関する告示の改正により、従来の仕様によらず面材の許容応力度等を用いて壁・床・屋根の設計を行うことが可能になったことから、現在では 2 級の構造用合板に関する基準許容応力度等も提案されている。

なお、実際の設計にあたっては、基準許容応力度に荷重継続期間(短期: 5 分相当=2.0、中短期: 3 日相当=1.60、中長期: 3 ヶ月相当=1.43、長期: 50 年相当=1.10)・寸法効果・含水率等の影響を勘案する係数を乗じて許容応力度を決定することとされている。また、各合板の基準弾性係数には、JAS 規格の適合基準の値を用いる。

3.3.8.2 構造用パネルの許容応力度

構造用パネルの基準強度・基準弾性係数は「2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針」において提案されている。各数値は構造用パネルの JAS 規格適合基準値と同じである。なお、長期許容応力度は、基準強度に安全率(2/3)、荷重継続時間に関わる調整係数(1.1/2)、事後的な水掛かりなどを考慮した係数(3/4)を乗じて算出することとされている。

3.3.8.3 接合部の性能

構造物の性能を設計するためには、使用される軸材料・面材料の性能だけではなく、接合部の性能が必要となる。JIS 規格に基づく釘等の主要な接合具については、「2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針」において許容耐力・降伏耐力・すべり剛性等が提案されている。接合部の性能は、使用される軸材料・面材料の種類のほかに、打ち込みの深さや方向など影響因子が多いため、十分な検討が必要である。

3.3.9 文献

- 1) 農林水産省: 合板の日本農林規格, 平成 15 年 2 月 27 日農林水産省告示第 233 号(2003)
- 2) 農林水産省: 構造用パネルの日本農林規格, 昭和 62 年 3 月 27 日農林水産省告示第 360 号(1987)
- 3) (財)日本規格協会: JIS A 5908: 2003 パーティクルボード(2003)
- 4) (財)日本規格協会: JIS A 5905: 2003 繊維板(2003)
- 5) (社)日本建築学会編: 木質構造物設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 丸善, 348-352(2002)
- 6) 枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編: 2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針, (社)日本ツーバイフォー建築協会, 147-158(2007)

3.4 性能の最適化を図る断面設計法

第 1 章、第 2 章では、竹材を用いた建築材料において目標とすべき、個別の性能を向上させるための最適条件について検討した。その結果、

- ・生物劣化を抑制する加圧蒸気処理条件としては、0.7MPa 60 分が適していること
- ・生物劣化の要因となる成分の除去にはエレメントの湿式解繊が適していること
- ・省力的に竹エレメントを製造する加圧蒸気処理条件としては 1.0MPa 10 分が適していること
- ・効率的に竹エレメントを製造するためにはエレメントの乾式破碎が適していること
- ・竹エレメントのみを用いたボードを効率的に製造するためには、10~40 メッシュ程度の短繊維が適していること
- ・竹エレメントと竹炭を複合したボードの強度性能向上には長繊維が適していること

- ・竹エレメントと竹炭を複合したボードの強度性能は繊維混合率とともに増加すること
- ・竹エレメントと竹炭を複合したボードのトルエンの吸着性能はエレメント混合率とともに低下すること

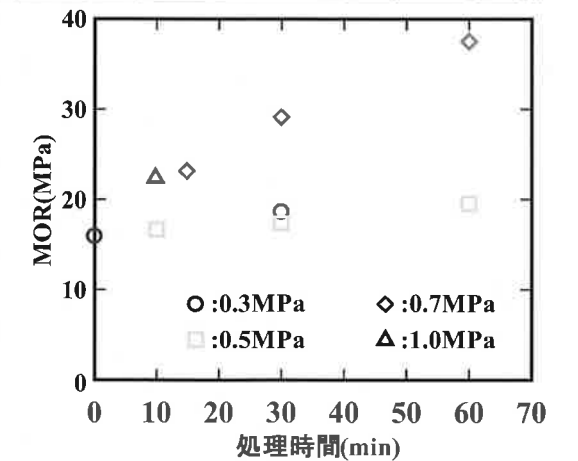
などが明らかとなった。各項目における最適条件は必ずしも一致しておらず、いずれかの最適条件を採用すると、他の性能を達成できない可能性がある。したがって、実際の製造条件を決定する際には、複数の項目における性能を確認する必要がある。以下、1.4 および 2.7 において製造した竹建築ボードを例に、生物劣化抑制効果・強度性能・製造効率について考察する。

表 3.4.1 に竹建築ボードの物性一覧を示す。無処理と処理圧力 0.3~0.7 のものは、1.4 で製造したボード、処理圧力 1.0 のものは 2.7 で調製したエレメントを用いて 1.4 と同じ方法で製造したボードである。竹材の蒸気処理時間が増加すると、常態曲げ性能は向上する(図 3.4.1)。とくに圧力が高いほどその傾向は顕著であり、生物劣化抑制効果の傾向と一致している。湿潤時の曲げ性能は増加の傾向が明確でなく、基準値(MOR $\geq$ 50%)は満たしているものの、算出される強度残存率は漸減している。この理由は、蒸気処理によってエレメントに劣化が生じていることの影響である可能性があるが、極めて高いはく離強さ(JIS 規格基準値:IB $\geq$ 0.3MPa)が得られたこと、吸水厚さ膨張率(基準値:TS $\leq$ 12%)は向上することから、本研究の範囲では実用上の問題はないと考えられる。接着剤添加率(RC)を低減した場合、強度性能も一様に低下するが、JIS 規格における M タイプの要求性能を満足する範囲であった。

表 3.4.1 竹建築ボードの物性一覧

圧力 (MPa)	時間 (分)	RC (%)	ρ (g/cm ³)	常態曲げ		湿潤A曲げ		残存率(%)		IB(MPa)	TS(%)
				MOR(MPa)	MOE(GPa)	MOR(MPa)	MOE(GPa)	MOR	MOE		
無処理			0.86 (0.015)	15.9 (1.31)	3.29 (0.182)	14.1 (1.12)	1.65 (0.187)	88.6	50.2	1.71 (0.418)	4.28 (0.623)
0.3	30		0.85 (0.015)	18.7 (0.65)	3.75 (0.168)	14.7 (0.84)	1.66 (0.101)	78.9	44.4	1.90 (0.520)	4.71 (0.472)
	10		0.84 (0.010)	16.6 (1.35)	3.11 (0.056)	13.8 (0.61)	1.51 (0.126)	82.9	48.7	2.02 (0.260)	5.68 (0.567)
0.5	30		0.86 (0.023)	17.3 (0.98)	3.18 (0.131)	14.5 (1.06)	1.56 (0.073)	83.4	49.1	1.87 (0.265)	4.92 (1.381)
	60	10	0.85 (0.015)	19.5 (1.22)	3.27 (0.072)	12.9 (1.59)	1.34 (0.161)	66.2	41.1	2.17 (0.434)	5.11 (0.649)
	15		0.86 (0.017)	23.2 (3.14)	3.84 (0.145)	16.8 (1.29)	1.75 (0.211)	72.4	45.6	1.94 (0.231)	4.11 (0.447)
0.7	30		0.88 (0.018)	29.1 (1.11)	4.27 (0.160)	20.8 (1.80)	2.24 (0.182)	71.5	52.4	1.68 (0.402)	3.00 (0.294)
	60		0.90 (0.017)	37.5 (2.48)	4.69 (0.143)	26.4 (3.80)	2.57 (0.240)	70.5	54.9	1.85 (0.149)	2.34 (0.419)
			0.79 (0.049)	22.4 (6.85)	3.50 (0.583)	14.8 (4.87)	1.95 (0.446)	66.0	55.6	2.46 (0.594)	3.57 (1.348)
1.0	10	5	0.77 (0.042)	16.7 (2.36)	3.10 (0.205)	8.7 (0.98)	1.25 (0.173)	52.4	40.4	1.66 (0.297)	8.25 (1.172)

現実的な製造条件を決定するためには、生物劣化抑制効果・強度性能・製造効率の 3 者の最適化を図る必要がある。3.3.7.2 で述べたとおり、構造用途には 13M タイプ以上(MOR $\geq$ 13MPa)であれば使用可能であるため、その要求性能を満たす範囲で、物劣化抑制効果と製造効率がもっとも高くなる条件を選択すればよい。処理圧力の増加は、処理時間の短縮に繋がることから、製造効率上有利であるが、より高い処理圧力を得るためには、高性能の処理装置が必要となる。



今日の建築物には高度な性能が要求されるため、図 3.4.1 蒸気処理時間と MOR の関係 構造安全性・居住快適性に関する性能を数値で示すことは、建築材料の普及にとってもっとも重要な条件である。3.2、3.3 で述べたように要求される性能の項目・水準は、材料の種類および用途ごとに規定されている。しかし、既存の木質材料で十分対応可能な範囲であり、必ずしも高い性能が要求されるわけではない。建築物の強度性能、耐久性能、居住性能は、これまで建築現場による施工によって確保していたものであり、これらの複数の性能を部材単体で確保することができれば、工期の短縮と施工の合理化により、経済的効果も高いと考えられる。

執筆者一覧
(*は編集委員)

森林総合研究所複合材料研究領域複合化研究室 渋沢龍也*
森林総合研究所複合材料研究領域チーム長 宮武 敦*
森林総合研究所複合材料研究領域積層接着研究室 平松 靖*
森林総合研究所複合材料研究領域積層接着研究室 新藤健太*
森林総合研究所複合材料研究領域積層接着研究室 宮本康太*
森林総合研究所木材改質研究領域機能化研究室 杉山真樹*
森林総合研究所木材改質研究領域木材保存研究室 大村和香子*
森林総合研究所木材改質研究領域木材保存研究室 西村 健*
森林総合研究所木材特性研究領域物性研究室 鈴木養樹*
森林総合研究所木材特性研究領域物性研究室 久保島吉貴*
森林総合研究所木材特性研究領域物性研究室 井口よう子
森林総合研究所加工技術研究領域木材乾燥研究室 小林 功*
森林総合研究所複合材料研究領域 (故)鈴木憲太郎
大分県産業科学技術センター 古曳博也
大分県産業科学技術センター 小谷公人
大分県産業科学技術センター 玉造公男
大分県産業科学技術センター 二宮信治
大分県産業科学技術センター 北嶋俊朗
大分県産業科学技術センター 山本幸雄
大分県産業科学技術センター 大内成司
大分県竹工芸・訓練支援センター 阿部 優
大分県商工労働部産業技術開発室 中原 恵
鹿児島県工業技術センター 新村孝善
鹿児島県工業技術センター 小幡 透
鹿児島県工業技術センター 日高富男
鹿児島県工業技術センター 向吉郁朗
鹿児島県工業技術センター 福留重人
元同志社大学(京都大学名誉教授) 則元 京

独立行政法人森林総合研究所では、第2期中期計画の成果として下記の重点分野ごとに成果集を刊行しております。

地球温暖化対策に向けた研究(温暖化対策)

森林と木材による安全・安心・快適な生活環境の創出に向けた研究(安全・安心)

社会情勢変化に対応した新たな林業・木材利用に関する研究(林業・木材利用)

新素材開発に向けた森林生物資源の機能解明(生物機能)

森林生態系の構造と機能の解明(生態系解明)

新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業

「地域の竹資源を活用した環境調節機能を持つ複合建築ボードの開発」成果資料集

平成21年2月27日 発行

編集 独立行政法人 森林総合研究所

発行 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

Tel: 029-873-3211 Fax: 029-874-3720

印刷所 茨城青写真製本株式会社

ISBN 978-4-902606-45-4



独立行政法人 森林総合研究所

