

Title	<総合論文>リグノセルロース系原料を用いた高性能木質複合ボードの開発研究
Author(s)	張, 敏
Citation	木材研究・資料 (1997), 33: 33-70
Issue Date	1997-12-20
URL	http://hdl.handle.net/2433/51415
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

リグノセルロース系原料を用いた高性能木質複合ボードの開発研究

張 敏*

The Study of High Performance Bio-Based Composite Boards Manufactured
from Lignocellulosic Materials

Min ZHANG*

(平成9年8月31日受理)

1. はじめに

地球環境保全に関する問題が、人類の大きな関心を呼んでいる。21世紀への人類文明の進展を図るためには、今まで取り組まれてきた材料および技術開発研究の視点を、地球環境保全と持続的な資源利用に変換し、1次、2次および3次産業をバランスよく営む新たな社会システムの構築が必要である^{1~7)}。森林の水土保全、大気浄化、気候調節および生態平衡機能が環境の劣化防止に重要になっている。言い換えれば、森林を木材生産等の「物質資源」としてのみならず、その生育・生産過程における「環境資源」としての重要性が増している^{8~11)}。

森林の持つ生物資源生産機能と環境保全機能を最大限に活用するために、早生森林資源や種々の農産廃棄物を含むリグノセルロース系原料の有効利用が大切である。竹は代表的な非木材リグノセルロース系早生森林資源であり、アジアおよび北アメリカに広く分布し^{12~19)}、その生長は樹木に比べて著しく早く、モウソウ竹の場合は4~5年で利用できるまでに生長する。したがって、竹の植林・工業的な加工利用システムが構築されれば、森林保護および環境保全に大きな役割を果すものと思われる。一方、ジュートや砂糖キビは熱帯および亜熱帯地域で多く生産されているが、その工業化の利用は、十分に進んでいない^{20, 21)}。一般に、農産廃棄物は加工しやすい特徴があり、原料化が容易であるほか、それを用いた製品は使用後の廃棄においても、生分解性があるので、環境への負荷が極めて低いものと思われる。したがって、種々の農産廃棄物を有効利用することにより、省エネルギー加工、リサイクル性や安全廃棄性に優れた木質エコマテリアルの開発が期待できる。

本研究は、早生森林資源および未利用リグノセルロース系資源の有効利用の方途を探り、森林保護・環境保全を図ると同時に、これらの資源利用に不可欠の技術課題に取り組み、新しい構造用木質パネルの開発を目指したものである。特に、ジュート、竹およびバガスに着目し、これらを原料とするファイバーボード、これらと広葉樹ファイバーとの混抄による複合ファイバーボードのほか、パーティクルボードや、配向性ストランドボード (OSB) およびこれらを基材にした3層構造複合ボードの試作を行い、それらの材質に及ぼすエレメント寸法・形状、接着剤添加率、フェイス/コア構成比および蒸気噴射条

*木質材料構造機能分野 (Laboratory of Structural Function)

Keywords: jute, bamboo, bagasse, composite board, steam-injection press, mechanical property, dimensional stability, Finite Element Method

件などを検討した。

2. リグノセルロース系原料を用いた高性能複合ファイバーボード

広葉樹、針葉樹および非木材リグノセルロース系のジュート、竹および綿ファイバーのほか、無機質ガラスファイバーおよび合成系ポリエステルファイバーの寸法および引張強度を測定し、各ファイバーの形状・形態の比較を行なった。特に、リグノセルロース系ファイバーの引張強度と寸法との関係について検討した。

また、ファイバーボード製造において必要な実験用のファイバー乾燥および接着剤塗付装置、ならびにマットのフォーミング装置を設計・試作し、ジュート・ウッドファイバー複合ボードの製造に用いた。特に、ジュートファイバーの高強度および細長い形状・形態の特長や、ジュートとウッドファイバーの混合比が、ボードの性質に及ぼす影響を検討・解析した。

2.1 リグノセルロース系原料ファイバーの寸法・形状および力学的性質

2.1.1 背景と目的

木質ファイバーに他の天然繊維、合成繊維あるいは無機繊維などを混抄することにより、木質ファイバーボードの強度などの性能を改善することが期待される。この時、製品の力学的性質に対して大きな影響を与える因子として、ファイバーの長さや直径およびその自身の強度性能を挙げることができる。従来の投影拡大法や目盛を付けた光学顕微鏡によるファイバー寸法の測定は、操作が不便で、精度も低いという欠点がある。ここでは画像解析システムを用いて、リグノセルロース系ファイバーおよびガラスとポリエステルファイバーの寸法・形状を測定し、それらの形態の特徴を明らかにした。また、リグノセルロース系ファイバーの寸法と強度との関係については明らかにするとともに、その原因について考察した。

2.1.2 実験

a. ファイバーの寸法・形状の測定

供試したファイバーは、PDDR (Pressurized double disc refiner) およびPSDR (Pressurized single disc refiner) によって解繊した広葉樹ラワン類 (*Shorea* spp.) および針葉樹スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) のファイバーと、反毛機によって解繊した3種類の非木材リグノセルロース系原料ファイバー、すなわち、ジュート (*Corchorus capsularis* L.)、モウソウ竹 (*Phyllostachys pubescens* Mazel) および綿 (*Gossypium* spp.) ファイバーである。さらに、無機質のガラスファイバーおよび合成高分子のポリエステルファイバーを加え、計7種類のファイバーを用いた。

ファイバーの寸法・形状の測定には、ドイツKONTORN BILD ANALYSE社製の画像解析システム (IBAS) (Interaktive Bild-Analyse System) を用いた。直径の測定は、上記7種類のファイバーの横断面を円と仮定し、光学顕微鏡を通じて入力して、100~300倍に拡大した画像をトレースし、それぞれの直径を測定した。但し、ファイバーの長さ方向では直径が必ずしも一定ではないので、両端および中央部の直径を3点測定し、それらの平均値を用いた。長さの測定は、広葉樹と針葉樹ファイバーの場合は32倍に拡大し、他のファイバーの場合は拡大せずに、直接長さを測定した。その後、ファイバーの長径比 (長さ/直径) を算出した。

試験体数は広葉樹、針葉樹および竹ファイバーについては200本、ジュートと綿ファイバーについては60本、ガラスとポリエステルファイバーについては30本であり、それぞれ無作為に選んだ。

b. ファイバーの引張試験

引張試験に先立って、ファイバーの含水率を測定した。なお、計算に用いた全乾重量は温度65℃の条件で一週間乾燥した値を用いた。リグノセルロース系ファイバーの気乾含水率は6~9%の範囲にある。これに対してポリエステルファイバーとガラスファイバーは疎水性のファイバーであり、ほとんど吸湿

しないことがわかった。

ファイバーの引張試験は新興通信（株）製TOM 500万能試験機を用いて行った。引張速度はポリエステルファイバーの場合2mm/minであり，他のファイバーの場合はすべて1mm/minである。

ファイバーの引張試験にはJIS L1069に準拠して厚紙による支持体を用いた^{22, 23)}。接着剤にはシアノアクリレート系ゼリー状瞬間接着剤を用い，両接着点間のファイバーは，接着時に可能な限り通直に保ち，ねじれなどが生じないように，十分に注意した。支持体を試験機のチャックに固定した後，厚紙の連結部分を切り，引張試験を行った。支持体へのファイバーの取り付けを図1に示す。

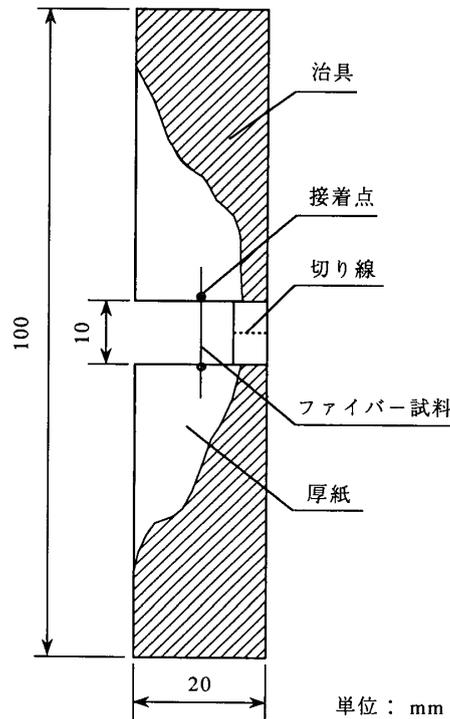


図1 ファイバー引張試験支持体

供試ファイバーは原料ファイバーから無作為に抽出した。サンプル数は広葉樹，針葉樹及び綿ファイバーの場合各60本，ジュートと竹ファイバーでは各100本，ガラスとポリエステルファイバーでは各30本とした。約90%の試料は両接着点間のファイバーで破壊し，残りは接着点で破壊した。したがって，後者の試験値は結果から除外した。

2.1.3 結果と考察

a. ファイバーの寸法・形状および力学的性質

測定した7種のファイバーの寸法・形状及び力学的性質を表1に示す。

引張強度の測定精度にはチャックと厚紙の滑り，ファイバーの接着点の緩みなどが影響するが，引張強度および引張ヤング率はファイバーの半径の2乗に反比例するので，ファイバーの直径の測定が，それらの精度に大きな影響を与えると考えられる。

供試リグノセルロース系ファイバーはいわゆる単繊維ではなく，そのほとんどが繊維束であるので，破壊の形態は複雑であり，必ずしも最も細い所で破壊するとは限らない。したがって，ガラス，ポリエステル，綿など引張伸びが大きいファイバーを除き，破壊した部分の近傍の直径を破壊後に測定し，引張強度の算出に用いた。

このように測定精度を配慮して，種々の工夫を行ったが，測定結果のバラツキは大きく，破壊は繊維

表1 ファイバーの寸法・形状および力学的性質

ファイバー種類	比重*	長さ(mm)	直径(μ m)	長径比	引張ヤング(tonf/cm ²)	引張強度(kgf/cm ²)	比ヤング率(tonf/cm ²)	比強度(kgf/cm ²)	伸度(%)
広葉樹	0.60	4.6 (1.8)	146.0 (59.0)	29 (15)	59 (49)	1,300 (1,100)	98	2167	2.43 (1.07)
針葉樹	0.50	7.7 (2.7)	212.0 (94.0)	43 (23)	61 (41)	1,400 (1,000)	122	2800	2.47 (0.91)
ジュート	1.43	39.0 (8.7)	56.0 (24.0)	810 (360)	340 (210)	5,000 (3,300)	238	3846	1.67 (0.49)
竹	0.80	30.0 (12.5)	130.0 (55.0)	270 (160)	130 (70)	3,000 (1,800)	163	3750	2.51 (0.82)
綿	1.50	28.7 (4.8)	15.2 (1.7)	1,900 (380)	120 (55)	4,800 (1,900)	80	3200	4.43 (1.59)
ガラス	2.50	48.4 (1.1)	13.4 (2.2)	3,700 (600)	680 (220)	19,000 (5,000)	272	7600	2.77 (0.65)
ポリエステル	1.38	68.3 (2.2)	40.5 (3.8)	1,700 (170)	46 (27)	5,200 (600)	33	3768	20.4 (2.75)

注：括弧内の数値は標準偏差

*：文献^{24), 25), 28)} および³⁵⁾による

束の組成、構造に敏感に影響されていることが推察される。また、引張ヤング率は、ファイバーの接合点の変形、厚紙の変形、厚紙とチャックの滑りなど、多くの因子の影響を受けているので²⁹⁾、その絶対値は信頼性に乏しいかもしれないが、諸ファイバー間の比較には十分役立つ値が得られたと考えている。

表1からリグノセルロース系ファイバーの中では、ジュートファイバーの引張強度が最も高いと認められた。ファイバー（繊維束）の引張強度は単繊維細胞壁の強度および単繊維間の結合強度によって決定されると考えられる。細胞の断面における細胞壁と細胞腔の断面積の比、すなわち壁腔比はファイバーの強度に直接影響を与える因子の一つであると推定される。綿単繊維の細胞は非常に内腔が小さく、壁腔比が15~20であり、ジュートのそれは8.5~15、竹では4.5~7.5、木材では0.3~1.0と順次内腔が大きくなっている^{29)~30)}。そのため、リグノセルロース系ファイバーの中では、ジュート、綿および竹ファイバーの強度は木材ファイバーのそれより2~4倍高くなっている。

実質的なファイバーの力学的性質をみるために、強度およびヤング率を比重で除した値、すなわち比強度および比ヤング率で比較すると、リグノセルロース系ファイバーでは、ジュートが最も高い。木材フ

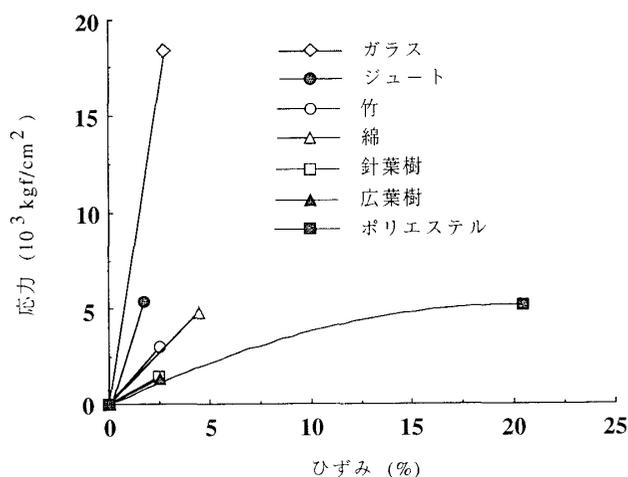


図2 各種ファイバーの引張応力-ひずみ曲線

ファイバーと混抄して補強するファイバーとしてはジュートファイバーが最も優れていると考えられる。

図2に各種ファイバーの引張応力-ひずみ曲線を示す。リグノセルロース系ファイバーの中では、ジュートファイバー、次いで竹ファイバーや綿ファイバーの剛性が優れていることが認められた。全体の応力-ひずみ曲線を見ると、リグノセルロース系ファイバーはポリエステルとガラスファイバーの中間に位置する。

b. ファイバーの直径と引張強度の関係

ファイバーの長さまたは直径が増すと、その中に分布する欠点の数も増す。長さまたは直径に対して、力学的性質がどのように変化するかは興味ある問題でこれまでに多く検討されている²⁹⁾。本実験においても、リグノセルロース系ファイバーの引張強度および引張ヤング率に及ぼすファイバーの寸法・形状の影響が認められた。

図3にリグノセルロース系ファイバーの直径と引張強度の関係を示す。図より、ファイバーの直径の

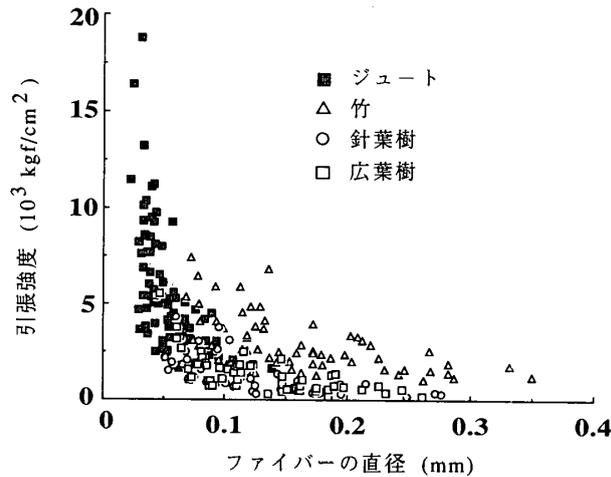


図3 各種天然ファイバーの直径と引張強度の関係

増大に伴って、その引張強度は著しく低下することがわかる。綿ファイバーは極めて細く、直径が18 μmに過ぎないので、ここでは省略しているが、その直径と引張強度の関係も同図と同様であった。また、各種リグノセルロース系のファイバーの直径と引張ヤング率の関係についても同様の傾向を示している。

同図の内容を個々のファイバーについて見ると、ジュートファイバーの直径と引張強度の相関は他に比べて最も大きい。この現象を解釈するために、各種リグノセルロース系ファイバーの単繊維の形態に着目して考察してみる。針葉樹ファイバーの直径および長径比は広葉樹のそれより大きい。すなわち、文献^{26, 27)}によれば、スギ、マツ類の針葉樹単繊維の平均直径は40 μm以上、その長径比は60以上であり、一方、ラワン類等の広葉樹単繊維の平均直径は15～25 μm、その長径比は40～60である。木材に比べると、竹やジュートの単繊維直径は小さくて、長径比が大きく、細長い繊維であると言える。例えば、竹単繊維の平均直径は12～16 μm、長径比は140以上であり、ジュート単繊維のそれらは20～25 μmおよび75～200である^{25, 28)}。図3に示されているファイバーの直径から、供試された広葉樹、針葉樹ファイバーと竹ファイバーはすべて繊維束であり、ジュートファイバーのみは少数の単繊維の混ざった繊維束であることが明らかである。

単繊維の引張強度は細胞壁の強度に直接関係するのに対し、繊維束の場合は単繊維間の接合点および単繊維の末端部に存在する欠陥の増加に伴って、引張強度が低下するものと考えられる。同図に示しているように、単繊維の混ざったジュート繊維束は、その直径と強度の関係が、繊維束のみの竹や針葉樹および広葉樹の場合より著しく明瞭である。ジュート単繊維の引張強度はその繊維束のそれより極めて

大きく、かつファイバーの直径と強度の相関が非常に高かった。

2.1.4 結論

1) 綿ファイバーは極めて細長く、寸法の均一性が高く、引張強度はジュートに次いで高かった。また、ジュートファイバーも細長く、寸法が比較的均一で、引張強度はポリエステルファイバーより高かった。広葉樹と針葉樹ファイバーは太短くて、寸法の分散が大きく、引張強度はジュートの1/4、竹の1/2程度であった。竹ファイバーの寸法ならびに分散はジュートと木材ファイバーの間であった。

2) ジュートファイバーの比強度および比ヤング率は最も大きく、竹がそれに続き、ウッドファイバーボードの補強材料として、ジュートファイバーが最も優れていることが推定された。

3) リグノセルロース系ファイバーの力学的性質に及ぼすその寸法の影響が大きいことが認められた。特に、ファイバー直径の増加に伴ってその引張強度および引張ヤング率は著しく低下した。

2.2 ジュート・ウッドファイバー複合ボードの製造とその性質

2.2.1 背景と目的

ジュートは双子葉植物のシナノキ科に属し、一年生の草本植物である。その韌皮の組織構造は上皮、表皮、コルク層、韌皮繊維束、柔組織からなる韌皮部と木質部からなっている²⁵⁾。韌皮繊維束からなるジュートファイバーの引張強度は大きく、木材の5倍に達する値を持ち、引張伸度は木材より小さい³⁰⁾。ジュートファイバーは、穀物などの包装、カーペット、製紙用原料として従来から利用されているが、ファイバーボードや、ウッドファイバーとの混抄による複合ボードへの利用を試みた例は少ない。

一方、従来のウッドMDFの強度や成形性を改善するために、他の天然ファイバー、合成ファイバーおよび無機ファイバーを混抄することが考えられる。しかし、ファイバーの寸法・形状および力学的性質や、ファイバー間の混合比などが製品の性質に及ぼす影響は明らかになっていない。

このような状況から、ジュートファイバーと広葉樹ファイバーを用いたジュート・ウッドファイバー複合ボードを試作し、両ファイバーの形状・形態および混合比がボードの材質への影響を調べた。

2.2.2 実験

a. ファイバー乾燥および接着剤添加装置、ならびにマットのフォーミング装置の試作

ファイバーボードの製造実験において、ファイバーの乾燥および接着剤塗付装置、ならびにマットのフォーミング装置が必要不可欠である。試作した気流循環式パイプ型のファイバー乾燥および接着剤添

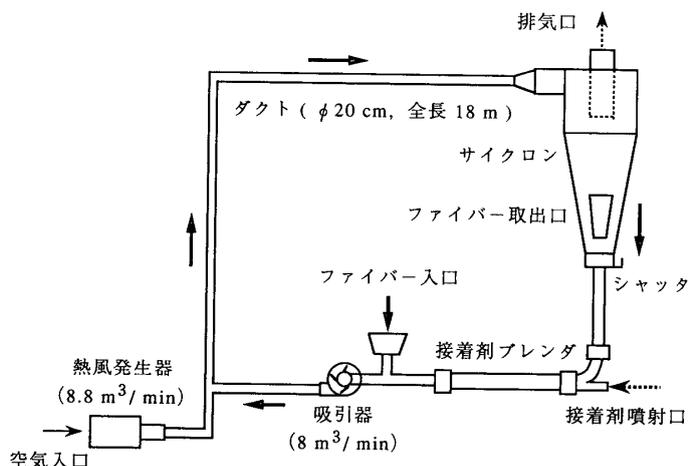


図4 ファイバーの乾燥・接着剤添加の模式図

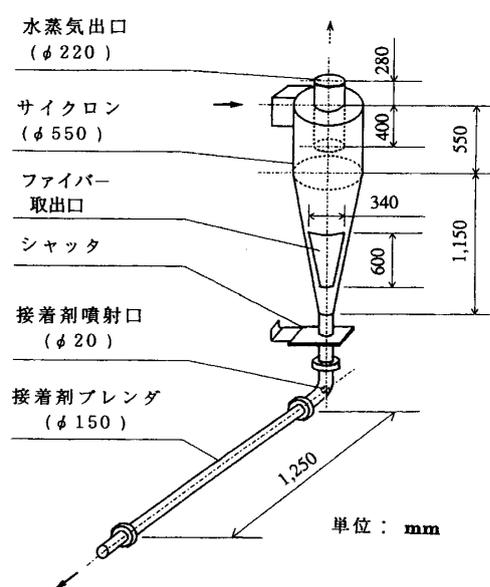


図5 サイクロンと接着剤ブレンダーの構造

加装置のフローチャート，ならびにサイクロンと接着剤ブレンダーの構造を図4と図5に示している。

ファイバー乾燥または接着剤を添加する際，サイクロンの取り出し口を閉め，シャッターを開けて，吸引器の入口からファイバーを導入した。ファイバーは熱気流の乾燥管を通して乾燥され，サイクロンに入り，螺旋運動のように，サイクロンの内壁に沿って回りながら下降する。水蒸気が混ざった気体はサイクロンの中心部を回転しつつ排気口へ上昇して排出されることになる。所定の含水率まで，このような循環乾燥を行なう。

一方，気流はサイクロンの円錐部に達すると，回転半径が小さくなるので，回転モーメント一定の原理から速度は大きくなって³¹⁾，なお回転下降をつづける。高速風送される途中のファイバーはその流れが急激に乱れるので，一種の攪拌状態となり，接着剤ブレンダーに入る。ここで，気流の流動方向に沿って接着剤を噴霧添加する。

マットのフォーミング装置のフローチャートおよびフォーミングボックスの構造を，図6および図7に示した。

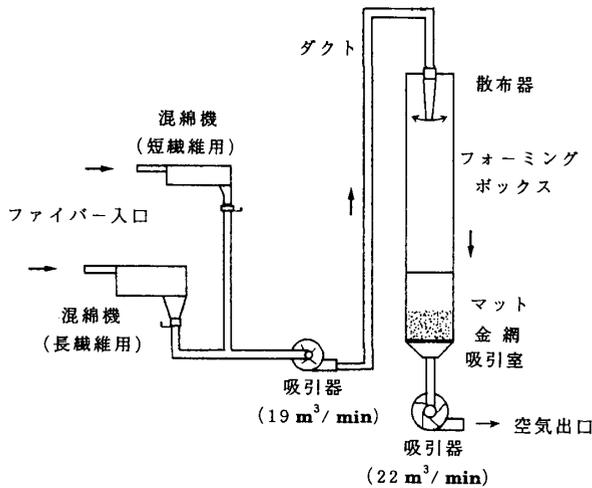


図6 ファイバーマットのフォーミングの模式図

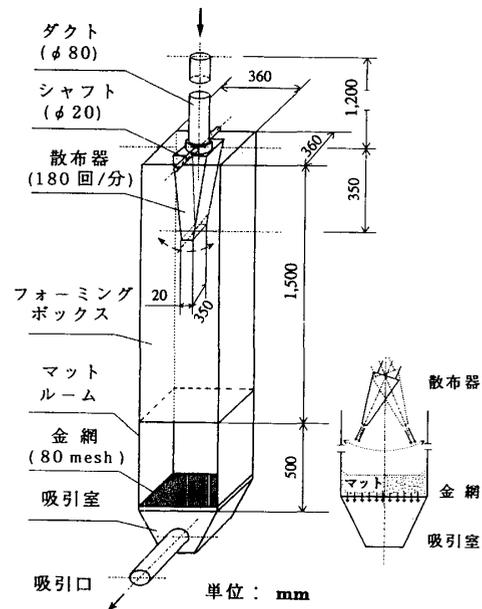


図7 フォーミングボックスの構造

ファイバーはサンプルオープナー（細長いファイバー用）またはサンプルカード（太短いファイバー用）で十分に分散させながら導入し，吸引器の入口から，送風ダクトを通して散布口に送られる。散布器は振り子型で左右に往復運動し，ファイバーをフォーミングボックスの中に降雪状に落下させる。同時に，金網の下に設置したブローアでフォーミングボックスの気流を吸引し，吸引室の吸引風力は金網に均一分布され，金網の上に均一なマットを形成させる。

b. 供試材料

ボードの製造に供試したファイバーは，2.1で用いたファイバーと同じ，すなわち，PDDRにより解繊されたラワン類 (*Shorea spp.*) 広葉樹ファイバーと，タイ産ジュート (*Corchorus capsularis L.*) ファイバーである。両ファイバーの寸法・形状および力学的性質を表1に示した。ジュートファイバーとウッドファイバーの混抄には，サンプルオープナーを用いて，均一になるまで十分に混合した。

c. 複合ボードの製造および材質試験

ボード寸法を $300 \times 300 \times 5$ (mm) とし，目標密度を 0.45, 0.65, 0.85 および 1.00 g/cm^3 の4段階とした。ジュートファイバーとウッドファイバーの混合比は 1/0, 3/1, 1/1, 1/3 および 0/1 の5水準とし

た。ファイバーの全乾重量に対し、10%のイソシアネート樹脂接着剤（群栄化学工業株式会社製，UL-4811）を噴霧塗布した。なお、粘度調整のために20%のアセトンを混合した。熱圧温度160℃，熱圧時間2分で成板した。ボード密度の増加に伴って初期圧力を30～60 kgf/cm²に増加した。ボードの厚さを制御するためにディスタンスバーを使用した。

常態および湿潤曲げ試験については，JIS A 5906および同規格の湿潤時曲げ強さB試験法に従って行い，試験片のスパンと厚さの比を20とした。はく離試験については，JIS A 5906に従って行った。吸水厚さ膨張率と吸水率の試験には，繰り返し促進劣化処理（気乾→全乾→25℃水中に24時間浸せき→全乾→70℃水中に24時間浸せき→全乾→4時間煮沸→全乾）を行った。なお，湿潤曲げ試験片を用いて，その処理前後の長さを測定し線膨張率を求めた。各試験については試験片数を5体とした。

2.2.3 結果と考察

a. 曲げ性質に及ぼす混合比の影響

図8に気乾ボードの曲げ強度とジュートファイバーとウッドファイバーの混合比（J/W）との関係を

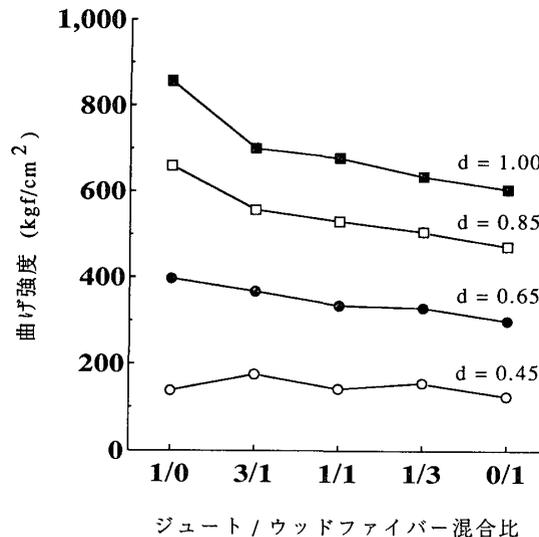


図8 ファイバーの混合比と曲げ強度の関係
注：d：ボード密度（g/ccm³）

示した。図から，低密度の場合は，J/WはMORにほとんど影響しないが，ボード密度の増加に伴って，J/Wが高い程曲げ強度が改善される傾向が明らかとなっている。

破壊の形態をみると，J/Wの増加に伴い，また，ボード密度の低下に伴い，ボードの中層におけるせん断破壊が生じ易い傾向が顕著となった。ジュートファイバーの平均比重が1.43，ウッドファイバーのそれが0.60未満であることを考えると，J/Wの増加およびボード密度の低下に伴って，ファイバーマットの圧密度（Compaction ratio）が著しく低下し，ファイバー間の密着性が悪くなり，ファイバー間のすべり破壊がファイバーの切断に先行し易くなるものと解釈される。このことが，低密度においては，ジュートファイバーの混合効果が十分発揮されない原因となっている。

複合ボードの曲げヤング率と両ファイバーの混合比の基本的な関係をみると，MORの場合と同様な傾向が見られた。すなわち，ジュートファイバーの比率の増加に伴い，いずれのボード密度の場合も曲げヤング率が増加することが認められた。

b. はく離強度に及ぼす混合比の影響

複合ボードのはく離強度（IB）とJ/Wの関係を図9に示している。同図から，ボードの密度が0.45 g/cm³の場合，ジュートファイバーの比重が1.43であるので，ジュートファイバーのみのボードでは，

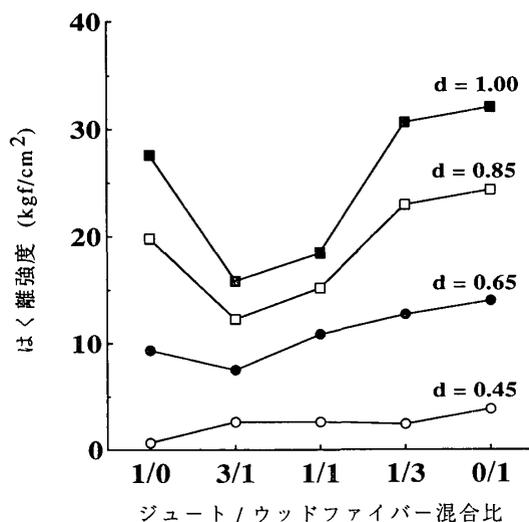


図9 ファイバーの混合比と曲げ強度の関係
注：d：ボード密度 (g/ccm³)

空隙が体積の2/3を超え、ファイバーの間の接着力が非常に弱くなり、ボードのはく離強度は非常に低くなっている。しかし、比重0.60のウッドファイバーの混入量の増加に従って、圧密度が増し、接触や接着面積が大きくなるので、ボードのIBは増大する。

密度が0.65 g/cm³以上のボードでは、J/Wが3/1のあたりで、IBの極小値が見られ、その後、ウッドファイバーの混入量の増加に伴いIBは向上する。一方、同じ密度では、ウッドファイバーのみによるボードはジュートファイバーのみによるボードより高いIBを有する。この傾向は次の理由で説明できる。

ファイバーボードのIBに影響する因子には、ファイバーの絡み合い、ファイバー間の接触・接着面積、単位面積当たりの接着剤量、圧密度などの因子が考えられる^{32~34)}。ファイバーを円柱と考え、その木口面積を無視すると、混合ファイバーの総側表面積Aと圧密度Cは次の式で表わされる³⁰⁾：

$$A = A_j + A_w = 2V_b D_b \left(\frac{P_j}{R_j D_j} + \frac{P_w}{R_w D_w} \right)$$

$$C = \frac{V_j + V_w}{V_b} = D_b \left(\frac{P_j}{D_j} + \frac{P_w}{D_w} \right)$$

式中P, V, R, Dはそれぞれ重量比, 体積, 半径および密度であり, 脚符b, j, wはそれぞれボード, ジュートファイバーおよびウッドファイバーを意味している。なお, 圧密度の計算には, 接着剤の添加量は考慮されていない。

J/Wの変化に伴うファイバーの総表面積およびボードの圧密度の変化を図10に示す。図から、ジュートファイバーの比率の減少に従って、混合ファイバーの総表面積は減少し、その減少率はボードの密度と関係なく大きくなる。ボード圧密度は、ジュートファイバー比率に反比例して大きくなり、その増加率はボード密度の増加に従って著しくなる。

総表面積が減少すると、ファイバーの単位面積当たりの接着剤量が大きくなるので、ボードのはく離強度に及ぼすこれら両者の影響はある程度相殺されていると考えるならば、残る問題はファイバー間の接触・接着面積が、寸法の異なる2種類のファイバーの混合比によって異なるかどうか、またその結果としてIBがどのように影響されるかの検討することである。異なる混合比のジュートとウッドファイバーの本数の比N_j/N_wは、ボードの密度と関係なく次式によって計算できる³⁰⁾。

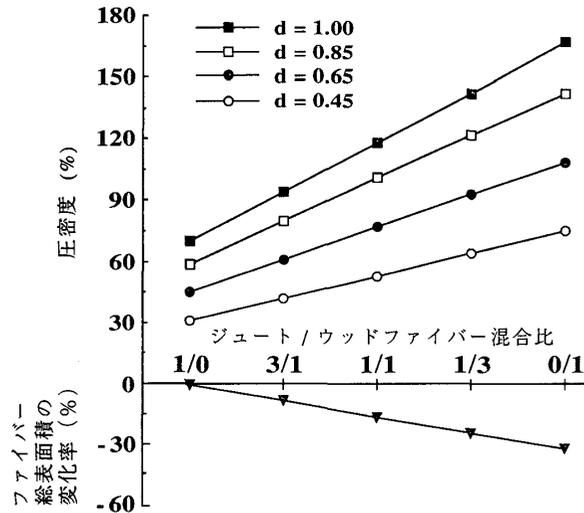


図10 ボード密度およびファイバーの総表面積に及ぼすファイバー混合比の影響
注：d：ボード密度 (g/cm³)

$$\frac{N_j}{N_w} = \frac{P_j L_w R^2 D_w}{P_w L_j R_j^2 D_j}$$

上式において、Lはファイバーの長さである。J/Wが3/1、1/1および1/3の場合、上式からN_j/N_wはおおよそ5/2、4/5および1/4となる。

今、両ファイバーの混合に伴うマットの圧密度と結合点の変化を定性的に考察するために、両ファイバーを均一に混合し、直交配列した場合のマットの仮想構造をモデル化すると、その断面は図11のようになる。

図から、J/W = 3/1、すなわちN_j/N_w ≅ 5/2のとき、ファイバーの側面と断面の間の接触点数が最も少なくなり、ボードの厚さ方向におけるファイバーの側面と断面の間の結合が最も弱く、IBが最小の値となることが予測される。さらに、ウッドファイバーの含有量の増加に伴って、ファイバー間の接触点数は多くなり、100%に達すると、ファイバー間の接触点が多いだけでなく、ボードの圧密度も最も高くなるので、ファイバー間の密着性が高くなり、はく離強度の向上に役立っているものと思われる。

c. 寸法安定性に及ぼす混合比およびファイバーの寸法・形状の影響

乾湿繰り返し促進劣化試験の結果より、ジュートファイバーの比率の増加に伴ってボードの厚さ膨張率は増加することが認められた。また、高密度ボードの場合、J/W = 3/1において最大の厚さ膨張率を持っている。この現象は図11に示しているボード内のファイバーの接触点の数に関係があると思われる。

ボードの面内の寸法安定性については、図12にJ/Wと線膨張率(LE)の関係を示した。図から明らかのように、LEはジュートファイバーの比率の増加に従って小さくなっている。ジュートファイバーは細長いファイバーであり、長さ方向の伸びが非常に小さいので^{34, 35)}、ウッドファイバーに混抄することによって、複合ボードに良好な面内寸法安定性を与えると思われる。また、密度とLEの関係は多少複雑であるが、密度0.65 g/cm³のものが最も良い面内寸法安定性を持っており、密度0.45 g/cm³のものがこれに次ぎ、密度0.85と1.00 g/cm³のものは最も大きな伸びを示した。これについてはボード圧密度の差異による影響が考えられる。

2.2.4 結論

1) 低密度(0.45 g/cm³)のジュート・ウッドファイバー複合ボードでは、ジュートファイバーの混抄は、ファイバー間のすべりが発生するため、強度性能の改善にあまり役立たなかった。しかし、密度

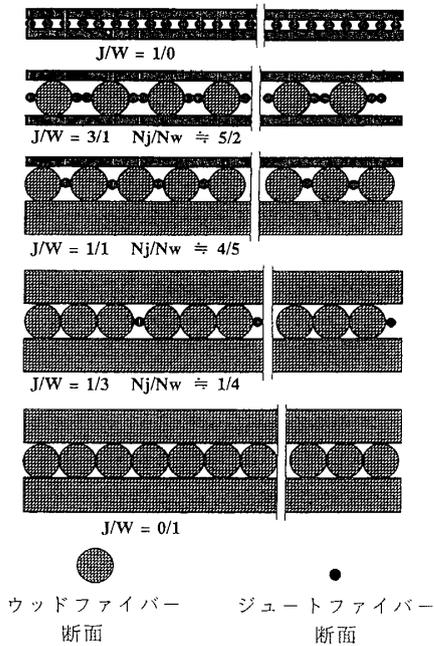


図11 ファイバーマットの構造モデル
 注：J/W：ジュート/ウッドファイバー混合比，
 Nj：ジュートファイバー本数，
 Nw：ウッドファイバー本数

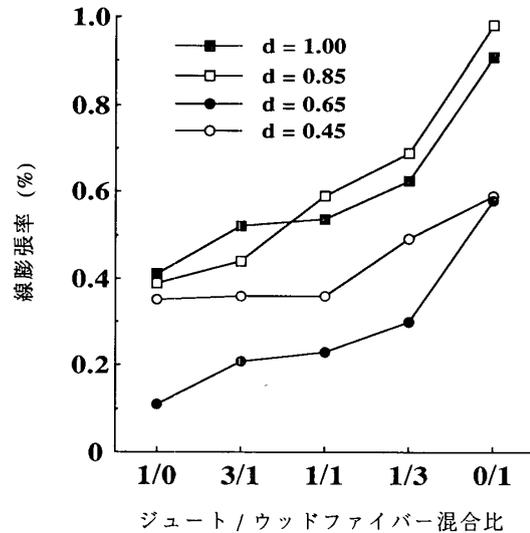


図12 ファイバーの混合比と線膨張率の関係
 注：d：ボード密度 (g/cm³)

0.65 g/cm³以上では、ボードの圧密度が増加し、ファイバー間の結合力の増加に伴ってジュートファイバーの高強度性能が発揮される。ジュートとウッドファイバーの混合比は3/1の場合、はく離強度が最も小さくなり、厚さ膨張率も最も高くなった。この主因は太さの著しく異なる両ファイバーの接触面積が最も小さくなるためと考えられる。

2) ボードの諸性質に及ぼすジュートとウッドファイバーの混合比の影響は、ボード密度の増加に伴って増大する傾向が明らかとなった。ジュートとウッドファイバーの混合比が1/3の場合、複合ボードの性質が全般的に改善され、常態および湿潤状態下の曲げ強度が増加するほか、面内の寸法安定性も顕著に向上することが認められた。しかしながら、密度が0.65g/cm³以上のボードにおいて、ジュートファイバーの比率が25%を超えると、ボードのはく離強度は著しく低下し、厚さ膨張率も高くなっている。

3. リグノセルロース系原料を用いた高寸法安定性パーティクルボード

まず、モウソウ竹を原料とするパーティクルボードを製造し、竹の半径方向における部位、接着剤添加率およびパーティクル寸法が材質に及ぼす影響を明らかにした。また、蒸気噴射プレスによる竹パーティクルボードの寸法安定性の改善について検討し、その耐朽・耐蟻性をホットプレスで成板したボードのそれらと比較した。

同様に、蒸気噴射プレス法を用いて、高寸法安定性のバガスパーティクルボードを製造し、蒸気噴射条件がボードの諸性質に及ぼす影響を調べ、最適噴射条件を検討した。

3.1 竹パーティクルボードの性質と蒸気噴射プレスによる寸法安定性の改善

3.1.1 背景と目的

竹稈は外層表皮、中層基本組織ならびに維管束および内層髄腔によって構成され^{18, 36~39)}、これらの化学的組成^{38, 40)}、細胞構造^{15, 18)}、繊維形態^{18, 26)}、物理的および機械的性質^{36, 38, 41)}には、大きな差異が存在している。竹素材の部位による接着性の良否については、既往の研究により明らかにされてきたが⁴²⁾、

竹の異なる部位をそれぞれ原料とし、パーティクルのようにエレメントが非常に小さいボードの接着性や、強度性能および寸法安定性などについての研究はあまり見られない。

一方、蒸気噴射処理による木材素材およびリグノセルロース系原料を用いたボードの寸法安定性の改善に、非常に有用であることが認められている⁴³⁻⁵⁰⁾。竹にはヘミセルロース成分が多く含まれるほか、種々の抽出成分、例えば、糖分、デンプン、蛋白質および脂肪などが、木材より遥かに多く含まれ、また、これらの含有量は部位によって著しく異なることが知られている^{41, 51)}。

将来、竹をボード原料として広範に利用していくためには、組成や構造や性質が著しく異なる部位を各々原料としたボードを試作し、その材質を明らかにすることが必要である。

3.1.2 実験

a. 原料の調製

供試した竹は京都府宇治市産5～6年生のモウソウ竹 (*Phyllostachys pubescens* Mazel) であり、夏季に伐採され、竹幹の平均高さは10m、直径12cm、肉厚1.2cmであった。

採取した竹幹の一部については、厚さ1～2mmの外層表皮を剥ぎ取った。これを平均長さ約5cmの小片に切断した後ハンマーミルで粉碎し、通直で針状の外層表皮（以下、外層）パーティクルを調製した。外層表皮を除いた竹稈と未処理竹稈を、円周に沿って6～8等分に割り、ゼファー製造機でこれを数回輾圧して、基本組織の柔細胞を十分に潰し、維管束繊維と分離した状態にした後、丸のこでこれを平均長さ5cmのチップに切断した。その後、ハンマーミルを用いてこれらを細長い針状の中内層（以下、中内層）パーティクルと、外層表皮を除去しない竹（以下、全層）パーティクルを調製した。なお、原料に用いた外層表皮、それを除去した竹稈、および未処理竹幹の比重は、それぞれ1.10、0.65および0.85程度である^{36, 38)}。

また、振動篩を用いパーティクルの大きさによってニードル型の粗大パーティクル（以下、ニードル）と、微細パーティクル（以下、パーティクル）の2水準の分級を行なった。ニードルとパーティクルを円柱と見なした場合の平均寸法および長径比（長さ/直径）を表2に示した。

表2 竹パーティクルボードの寸法・形状

	パーティクル			ニードル		
	外層	中内層	全層	外層	中内層	全層
長さ (mm)	14.0	13.8	13.4	23.6	23.4	24.8
直径 (mm)	0.17	0.18	0.17	0.27	0.26	0.27
長さ/直径	93.2	86.3	86.8	87.6	107.1	100.3

b. ボードの製造および材質試験

ボードの寸法は300×300×6 (mm) とし、目標密度を0.60および0.75 g/cm³の2水準に設定した。接着剤は群栄化学工業（株）製のイソシアネート樹脂（品番 UL-4811）を用い、添加率はパーティクルに対しては全乾重量の6%および10%の2水準、ニードルに対しては10%のみとした。所定量のパーティクルをロータリーブレンダーに入れて回転攪拌し、スプレーガンを用いて接着剤を噴霧添加した。なお、予めアセトンに接着剤重量比20%添加して、粘度を調整した。ホットプレス成板の場合、熱盤温度は160℃、熱圧時間2分、初期圧30 kgf/cm²であった。ディスタンスバーを用いてボードの厚さを制御した。蒸気噴射プレス成板の場合、未処理竹幹（全層）によるパーティクルのみを用い、上述の接着剤を10%噴霧添加した。蒸気温度は180℃（10.2気圧）、噴射時間を1分および3分とした。マットの周囲をディスタンス・バーを兼ねたフレームで囲って、蒸気をシールした。

常態曲げ試験および湿潤曲げ試験（B試験）については、JIS A 5908に従って行なった。試験片のス

パンと厚さの比は20とした。硬さ試験については、JIS Z 2117に準拠してブリネル硬さを測定した。はく離試験については、JIS A 5908に従って行なった。吸水厚さ膨張率の測定には、繰り返し促進劣化処理（気乾→25℃水中に24時間浸せき→全乾→70℃水中に24時間浸せき→全乾→4時間煮沸→全乾）を行なった。なお、湿潤曲げ試験片を用いて、線膨張率を測定した。各試験における試験片数はそれぞれ5体とした。

耐湿性試験は、未処理竹幹（全層）によるパーティクルを用い、接着剤を10%添加したボードについてのみ行なった。塩化マグネシウム（ $MgCl_2$ ）、塩化コバルト（ $CoCl_2$ ）および硫酸カリウム（ K_2SO_4 ）の飽和水溶液を入れたデシケーター内（20℃恒温）に、30×30（mm）の全乾試験片を静置した。 $MgCl_2$ 、 $CoCl_2$ および K_2SO_4 の飽和水溶液と平衡する相対湿度（RH）は、それぞれ33%、67%および98%である。均一な湿度環境をつくるために、ファンを用いて容器内の空気を循環させた。試験片をその中に2週間ずつ放置し、重量が恒量になるのを確かめたのち、3湿度条件下における吸・放湿両過程での平衡含水率と厚さ膨張率を測定した。また、全乾状態から吸湿を始める最初の段階（RH33%）に吸湿量の経時変化曲線を求めた。いずれのボードについても試験片数は5体とした。

耐朽・耐蟻性試験は、未処理竹幹によるパーティクルを用い、接着剤を10%添加し、密度が0.60g/cm³のボードについてのみ行なった。耐朽性試験は、（社）日本木材保存協会規格第3号—1992の木質材料の耐朽性試験方法に準拠して行なった。25×25（mm）の試験片を、砂の培養基に生育させた褐色腐朽菌オオウズラタケ（*Tyromyces palustris* Murr., TYP）、および白色腐朽菌カワラタケ（*Coriolus versicolor* Quel., COV）の上に直接に設置し、3ヶ月間強制腐朽させ、重量減少率を測定した。耐蟻性試験は、同規格（第11号—1981の防蟻薬剤の効力試験方法—総合試験）に準じて行なった。イエシロアリ（*Coptotermes formosanus* Shiraki）飼育槽の砂の上に、無作為に試験片を並べ、12週間経過後取り出し、選択摂食試験による食害率（重量減少率）を求めた。なお、各試験における試験片数はそれぞれ6体とした。

3.1.3 結果と考察

a. 強度性能

図13と図14に、外層、中内層および全層から得た寸法が異なるパーティクルによるボードの曲げ強度（MOR）と、曲げヤング率（MOE）を示した。

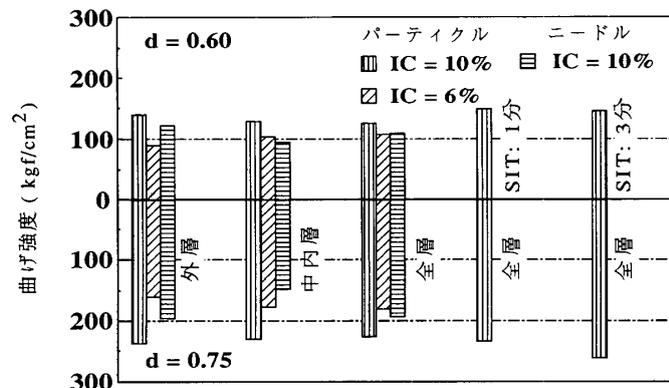


図13 異なる部位を用いた竹パーティクルボードの曲げ強度
注：d：ボード密度（g/cm³），IC：イソシアネート樹脂接着剤の添加率，SIT：蒸気噴射時間

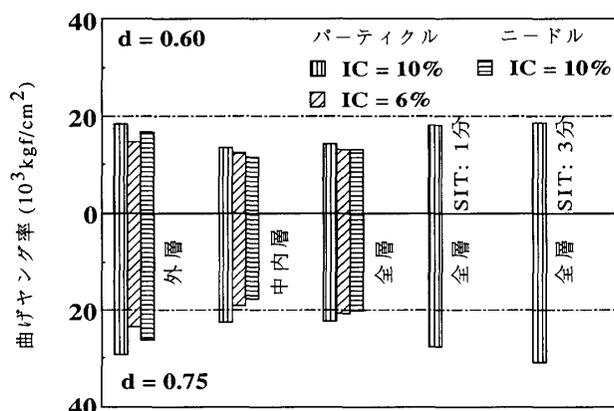


図14 異なる部位を用いた竹パーティクルボードの曲げヤング率
 注：d：ボード密度 (g / cc³), IC：イソシアネート樹脂接着剤の添加率, SIT：蒸気噴射時間

まず、原料採取部位と接着剤添加率についてみると、添加率が10%の場合、パーティクルの大きさによらず、外層を用いたボードのMORは若干高い値を示し、MOEについてはより明白な差異が認められた。これについては、よく知られているように、モウソウ竹の外層表皮の強度は中内層の2倍以上^{36, 38)}であるため、原料自体の高強度・高ヤング率がボードの曲げ性能に寄与したと考えられる。しかしながら、接着剤添加率を10%から6%に低下させると、いずれのボードも、MORは15%~30%、MOEは10%~20%程度減少し、特に、外層ボードの減少率は最も大きい。このことは、接着剤添加率が比較的低い場合(6%)には、硬化阻害成分^{41, 42, 52)}の影響が大きく、添加率の増加に伴って、接着性が改善されることを示唆している。一方、中内層および全層を用いたボードの間では、MORおよびMOEのそれぞれで、明らかな差が認められなかった。外層表皮を除くことによってボードの接着性が改善された反面、高強度を持つ表皮部を欠いているため、これら二つの効果が相殺されたものと推察される。

ニードルを用いた場合、外層ボードのMORやMOEは最も大きく、全層ボードのそれらは中内層ボードより高い値を示している。表2によれば、ニードルの平均長さおよび直径はそれぞれパーティクルの1.7および1.6倍である。これを近似的に円柱と考えれば、ニードルの比表面積はパーティクルの約2分の1となり、したがって単位面積当たりの接着剤塗布量は約2倍となる。前述のように、接着剤量が増加すると、接着性が改善されるので、外層表皮自身の高強度が発現されると考えることができる。したがって、比較的高い接着剤添加率下では、異なる部位を用いた竹ボードのMORおよびMOEは、原料自身の強度に依存し、原料強度に応じた曲げ性能(外層>全層>中内層)が得られている。

熱圧方式についてみると、全層を用い蒸気噴射プレスで成板したボードでは、高いMORとMOEを示しているが、噴射時間の増加に伴って、それらは必ずしも増加しない。噴射時間の増加は接着剤の硬化反応には有利であるが、同時に繊維の劣化も引き起こすため⁴⁰⁾であると考えられる。

図15にボードのはく離強度 (IB) を示した。図によると、部位の差異、接着剤添加率、パーティクルの寸法およびプレス方式によって、IBの値に明らかな差が認められた。

まず、原料採取部位による影響についてみると、中内層ボードのIBは最も高く、外層ボードのそれは最も低い。中内層ボードの場合、表層皮質部の除去によって接着性が向上し、ボードの圧密度も増加するので、IBが大きくなると考えられる。原料の比重によれば、中内層ボードの圧密度は、外層ボードの約1.7倍、全層ボードの1.3倍以上になるので、はく離強度の向上に大きく寄与したと思われる。また、接着剤添加率の影響がMORやMOEの場合に比べて、より明瞭に表れている。すなわち、添加率の減少に伴ってIBは急減し、特に、外層ボードの場合、半分以下の値となっている。

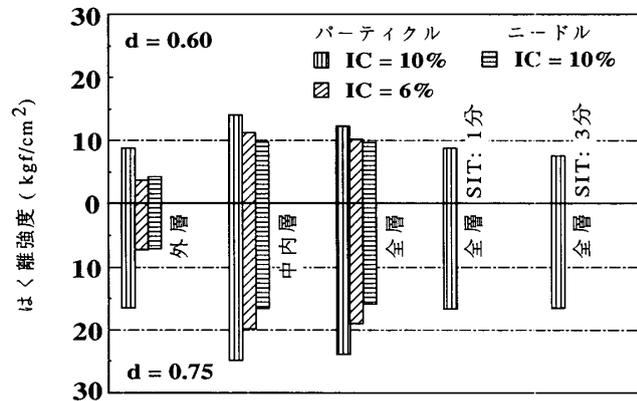


図15 異なる部位を用いた竹パーティクルボードのはく離強度
注：d：ボード密度 (g / ccm³), IC：イソシアネート樹脂接着剤の添加率, SIT：蒸気噴射時間

ニードルを用いたボードはいずれもIBが低い傾向が見られた。これについて、パーティクルが大きいほど、単位面積当たりの接着剤の塗布量が増加するが、それら相互の接触が著しく悪くなるため、有効接着面積が顕著に減少すると考えられる。熱圧方式について見ると、蒸気噴射プレスで成板したボードのIBが顕著に小さくなっている。これは従来の研究結果^{48, 53, 54)}と一致しているが、ボードのMORおよびMOEが低下しないことを考慮すると、本実験では、いずれも比較的短時間の高圧水蒸気処理であるものの、コアでは蒸気がたまりやすく、これが接着層の形成に何らかの影響を与えたのではないかと思われる。

b. 耐水・耐湿性

耐水・耐湿性を示す一例として、密度0.60 g / cm³のボードの繰り返し促進劣化処理による厚さ変化を図16に示した。

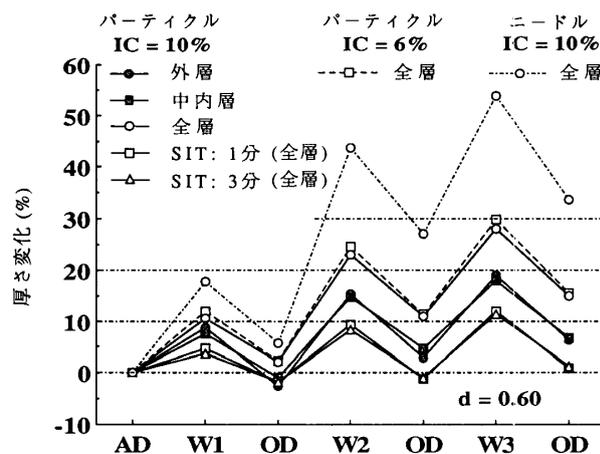


図16 劣化処理による竹パーティクルボードの厚さ変化
注：AD：気乾, OD：全乾, W1：常温水に24時間浸せき, W2：熱水 (70℃) に24時間浸せき, W3：4時間煮沸,
d：ボード密度 (g / ccm³), IC：イソシアネート樹脂接着剤の添加率, SIT：蒸気噴射時間

異なる部位を用いたボードの吸水厚さ膨張率 (TS) を比較すると、接着剤添加率が10%の場合、外層ボードのTSは中内層ボードとほぼ同じであり、全層ボードより遥かに小さくなっている。外層ボードのはく離強度は中内層ボードに比べて低いが、一方で圧密度が低く、生じる内部応力が小さいために、結果としてこれらの影響が相殺されたためであろうと判断される。

ニードルを用いた場合、ボードのTSは著しく大きくなった。この原因として、パーティクル相互の有効接着面積の減少や内部応力の増加が考えられ、これらが水中浸せきによるパーティクルの接着点(面)の破壊やスプリングバックを助長していると推察される。

一方、蒸気噴射プレス成板した全層ボードのTSは著しく低下し、2つの噴射条件で成板したボードのTSはいずれも、ホットプレス成板したボードの約半分に制御され、処理後のスプリングバックもほとんど生じなかった。したがって、蒸気噴射プレス法が、抽出成分や多糖類を多く含む非木材リグノセルロース系原料を用いたボードの寸法安定性の改善に、顕著な効果を発揮することが確認された。

全層パーティクルボードの吸湿厚さ膨張率を図17に示した。図より、成板方法によって大きな差異が

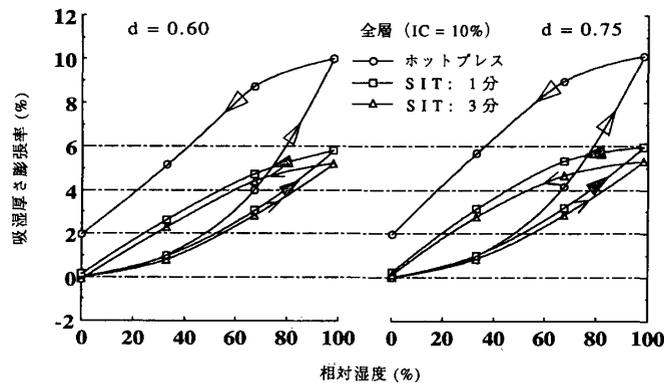


図17 各プレス法による竹パーティクルボードの吸湿厚さ膨張率
注：d：ボード密度 (g/ccm³)，SIT：蒸気噴射時間

現われ、また、蒸気噴射時間の延長に伴って厚さ膨張率が低下する傾向も認められた。ホットプレス成板したボードの残存膨張率は2%であるのに対し、蒸気噴射プレスの場合には残存膨張率がほとんど認められなかった。すなわち、蒸気噴射プレスがボードの吸湿寸法安定性の向上に非常に役立つことが確認できた。また、蒸気噴射プレスを用いた場合、吸湿厚さ膨張率に及ぼすボード密度の影響は観察されなかった。これは、エレメントの内部応力が解除され、ドラインセットが固定されたことによると考えられる。

c. 耐朽・耐蟻性

密度0.60 g/cm³の全層パーティクルボードの強制腐朽試験およびイエシロアリ選択摂食試験の結果を図18に示した。

耐朽性についてみると、ボードの重量減少率は成板方式によって明らかな差が認められるが、蒸気噴射時間や腐朽型(褐色腐朽、白色腐朽)による差異は認められなかった。例えば、ホットプレスで製造したボードの重量減少率は、蒸気噴射プレスボードの場合より大きく、40%前後の高い減少率を示した。この値は、木質パーティクルボードが35%未満^{55, 56)}であるのを上回っている。竹は糖分、デンプン、蛋白質および脂肪などの抽出成分を多く含んでいるので、菌類による腐朽が進行しやすいと判断できる。蒸気噴射プレス成板したボードでは、多くの抽出成分が高圧水蒸気処理によって溶脱・変質するため、その重量減少率が小さくなったと推定される。

一方、重量減少率に及ぼす噴射時間や腐朽型の影響がほとんど認められなかったことについては、2噴射条件がいずれも短時間処理であるため、抽出成分が大量に溶脱したが、ヘミセルロースやその他の

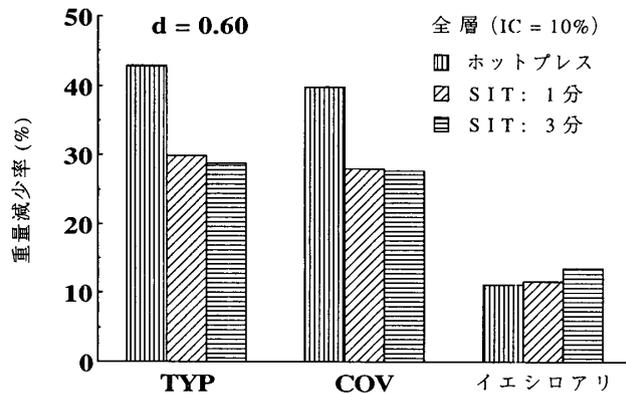


図18 各プレス法による竹パーティクルボードの耐朽・耐蟻性
 注：d：ボード密度 (g / ccm³)，SIT：蒸気噴射時間，TYP：褐色腐食菌 (*Tyromyces palustris* Murr.)，COV：白色腐食菌 (*Coriolus versicolor* Quel.)

多糖類の分解が少ないためと推察される。褐色腐朽菌は主にホロセルロースを分解し、白色腐朽菌はホロセルロースとリグニンをほぼ均一に分解する^{38, 57, 58)}といわれているが、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの3主成分による強固なマトリックスが破壊されない処理条件のもとでは、噴射時間および腐朽型の影響が小さいものと考えられる。

耐蟻性についてみると、各ボード間で大差がなく、いずれも約10%の食害率を示している。シロアリによるセルロースの分解機構は、シロアリ自身のセルラーゼによる部分的分解と、それに続く原生動物体内での最終的分解というプロセスである⁵⁹⁾。高压(温)・長時間の水蒸気処理の場合は、ヘミセルロースの分解が進行し、セルロース成分が露出されるため、シロアリ自身のセルラーゼによる分解が激しくなると考えられる。しかし、本実験では蒸気処理時間が短いので、前述のように、細胞壁のマトリックスが大きく破壊しない限り、蒸気噴射プレスにおける噴射時間やプレス法による差異はほとんど見られない。

しかしながら、木材やバガスパーティクルボードの食害率が20%~40%^{55, 56)}程度であるのに比べて、竹パーティクルボードのそれは10%程度であり、かなり低くなっている。この原因についてさらに検討する必要があるが、一般の木材やバガスより竹の材質が硬いため、シロアリは外部から攻撃しにくいことが一因と推察される。

3.1.4 結論

1) 異なる部位による竹パーティクルボードの材質について、中内層を用いたボードは、表皮の除去によって接着性が向上し、そのはく離強度が向上した。また、吸水厚さ膨張率も最も小さくなった。しかしながら、強度の高い外層表皮を除いたことによる曲げ性能の低下も認められた。

2) 接着剤添加率と材質との関係を見ると、外層表皮によるボードの曲げ強度、曲げヤング率およびはく離強度は、接着剤添加率に大きく影響されることが明らかとなった。例えば、添加率が10%から6%に減少すると、これらの材質は20%~55%まで急減した。ただし、全層竹(未処理)ボードの材質に対しては、接着剤添加率の影響が比較的小さく、ボード密度が低いほどその影響がさらに小さくなることが認められた。

3) パーティクルの寸法による影響をみると、粗大パーティクルボードの力学的性質は、いずれも微小パーティクルボードより15%~50%程度低下し、吸水厚さ膨張率はほぼ2倍になることが明らかとなった。

4) 成板方式による材質への影響について、蒸気噴射プレス成板したボードの曲げ強度や曲げヤング率は、ホットプレス成板したボードより高いが、はく離強度は著しく低下した。また、蒸気噴射プレス

によってボードの耐水性や耐湿性は顕著に改善され、さらに、噴射時間の増加に伴って向上することが認められた。一方、耐朽・耐蟻性試験の結果より、蒸気噴射プレスボードでは、褐色腐朽菌および白色腐朽菌による重量減少率が、ホットプレスボードのそれより低く、シロアリによる食害率はほとんど同等程度と観察された。

3.2 蒸気噴射プレスによるバガスパーティクルボードの高寸法安定化

3.2.1 背景と目的

現在、世界的視野からみると、砂糖キビの総生産量は14億トンに及び、その搾り滓であるバガスの場合、水分を1/2とし、繊維分の豊富な外皮を利用すれば、毎年5億トン程度を資源として見込むことができる²⁰⁾。したがって、バガスを木質系パネルや複合材料の原料として高度有効利用するための技術開発が、今後とも重要な課題となろう。

既往の研究^{21, 60)}では、ホットプレスを用いたバガスファイバーボードはバガスパーティクルボードより優れた寸法安定性を有することが認められた。このような高寸法安定性は、解繊時の高温・高圧蒸気による軟化処理によるものと推定された^{48, 54, 61)}。このことから、逆に、パーティクルボードの寸法安定性の改善には、高圧水蒸気処理を兼ねた蒸気噴射プレス法を熱圧成形に適用することが有効であると示唆された。

しかし、木質ファイバーを用いたMDFの熱圧成形に蒸気噴射プレス法を適用したデータを見ると⁴⁸⁾、180℃相当温度では1分、160℃では3分以上の処理で、ボード寸法安定性が改善される反面、繊維の劣化を引き起こすため、強度性能が低下することがわかった。ただし、この条件は極めて小さいエレメントを用いた場合に限ってあてはまり、エレメントがより大きいパーティクルを用いた場合の高圧蒸気処理による影響については、明らかになっていない。また、バガスは多糖類を多く含有しているので^{26, 62)}、蒸気処理によってこれが溶脱あるいは変質し、ボードの耐水・耐湿性、および耐生物劣化性にどのような影響を及ぼすかについては、調べる必要がある。

3.2.2 実験

a. 原料調製

本実験で用いたバガス原料は、ケインセーパレーター (Cane separator) によって、表層のワックスおよび柔細胞の多い髄を除去した砂糖キビ (*Saccharum officinarum* L.) の皮質部分の搾り滓 (比重0.40 ~ 0.50) である。これをハンマーミルで数回粉碎し、平均寸法14.5 × 1.1 × 0.4 (mm) の細長い針状のパーティクルを調製し、ボードの製造に供試した。

b. ボードの製造および材質試験

気乾状態のバガスパーティクルに、イソシアネート樹脂接着剤 (群栄化学工業株式会社製 UL-4811) を10% (固形分重量比) 噴霧添加した。熱圧成形には蒸気噴射プレス法を用い、次のような10条件を選んだ。すなわち、熱圧温度が160℃ (6.3気圧) の場合には、熱圧時間を45秒、1.5分、3分、5分、7分および9分の6条件とし、180℃ (10.2気圧) では、30秒、1分、3分および5分の4条件とした。マットの周囲をディスタンス・バーを兼ねたフレームで囲って、蒸気をシールした。一方、比較のために、ホットプレスを用いて熱圧温度160℃、熱圧時間6分の条件下でボードを製造した。いずれの場合もボードの寸法は385 × 365 × 12 (mm) とし、目標密度を0.65 g/cm³に設定した。

常態および湿潤状態の曲げ強度と曲げヤング率、はく離強度、吸水厚さ膨張率、および線膨張率などの材質試験については、3.1.2で述べた試験法を適用した。各試験の試験片数は5体とした。

耐湿性試験および耐朽性試験についても、同様に3.1.2で述べた試験法を用いた。試験片数は各条件について5~6体とした。

3.2.3 結果と考察

a. 強度性能

図19に、各種蒸気処理条件で成板したボードの曲げ強度（MOR）と曲げヤング率（MOE）を示した。

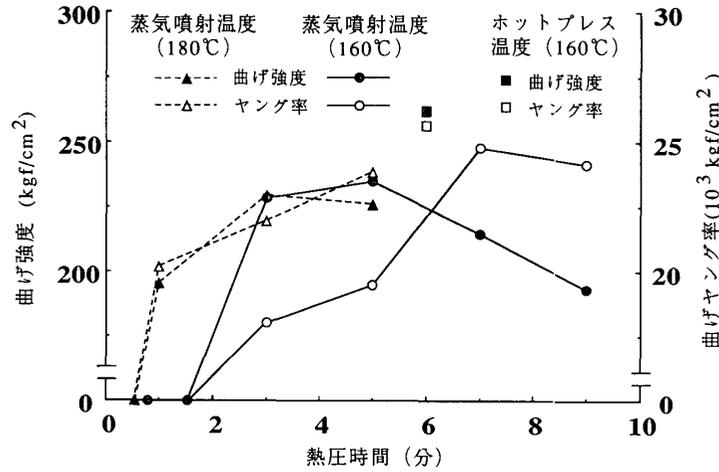


図19 蒸気温度および熱圧時間がバガスパーティクルボードの曲げ強度および曲げヤング率に及ぼす影響

なお、蒸気温度160℃、熱圧時間45秒および1.5分、ならびに180℃、30秒のもとで成板したボードは、ボード中央部に層間はく離、いわゆるパンクが認められた。熱圧時間が短すぎることによる接着剤の未硬化、含有水分の気化による蒸気圧の上昇などが原因と考えられる。したがって、ここではこれらの条件のデータを除外し、他の7つの噴射条件で成板したボードとホットプレスで成板したボードの性質を比較検討する。

図によると、蒸気噴射プレスにより、ボードのMORおよびMOEは全般的に若干低下する傾向が認められた。例えば、処理条件が160℃、7分および180℃、3分と5分で処理したボードのMORおよびMOEは、ホットプレスの場合に比べて、9割程度の値を示している。蒸気温度180℃で成板したボードのMOEを除き、MORおよびMOEについては、極大値が存在することが認められた。MORおよびMOEの両方を考慮して、最適条件を選ぶとすれば、蒸気温度160℃では5分～7分、一方、蒸気温度180℃では3分～5分であると判断される。MDFの最適熱圧条件¹⁰⁾をみると、蒸気温度160℃では1.5分～3分、180℃では1分～1.5分であり、これに比べると、本実験のバガスパーティクルボードの場合は、適正時間範囲がかなり長くなっている。これはエレメントの寸法がファイバーに比べると大きいことによると考えられる。

図20は蒸気噴射プレスとホットプレスで成板したボードのはく離強度（IB）を示している。

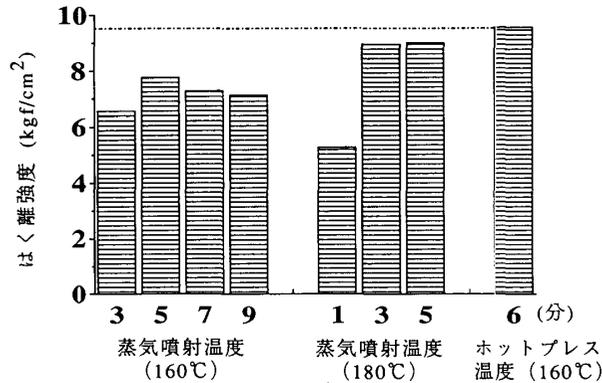


図20 蒸気温度および熱圧時間がバガスパーティクルボードのはく離強度に及ぼす影響

図より、曲げ性質の場合と同様に、蒸気噴射プレスで成板したボードのIBは、ホットプレスで成板したボードのIBに比べて、全般的に低くなっている。160℃、3分および180℃、1分の熱圧条件下で成板したボードについては、圧縮時間の不足による接着剤の未硬化が原因であると考えられる。他の熱圧条件の場合には、長時間の高温・高圧水蒸気の処理によって、細胞壁構成成分が分解され、それに伴って水酸基が減少し、イソシアネート樹脂接着剤の接着性が低下することをうかがわせている。また、イソシアネート樹脂接着剤の一部がボード内部の水分との反応によって消費されることも一因と推察される。

b. 耐水・耐湿性

促進劣化処理したボードの厚さ変化を図21に示した。図から、蒸気温度あるいは噴射時間の増加に伴

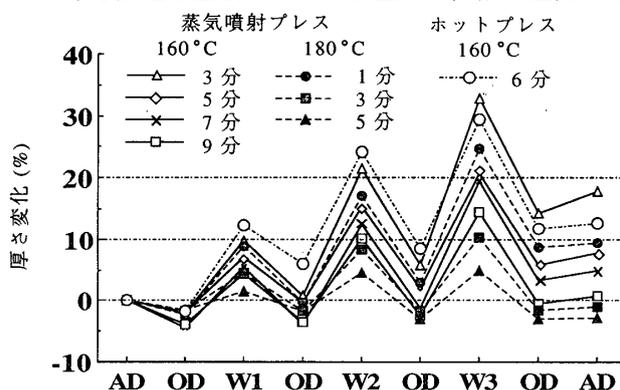


図21 促進劣化処理によるバガスパーティクルボードの厚さ変化

注：AD：気乾，OD：全乾，W1：常温水に24時間浸せき，W2：熱水（70℃）に24時間浸せき，W3：4時間煮沸

って、厚さ膨張率は顕著に低下することが認められた。特に、蒸気温度160℃、熱圧時間9分および180℃、3分と5分の成板条件のボードでは、促進劣化処理後のスプリングバックがほとんど認められず、寸法安定性が非常に優れていることが明らかとなった。

図22および図23に、ホットプレスおよび蒸気噴射プレスにより製造された5種類のボードの吸（放）湿等温曲線、および吸湿による厚さ膨張率をそれぞれ示した。

図22によると、ホットプレスで成板したボードは最も高い吸湿率を示し、蒸気温度160℃、熱圧時間

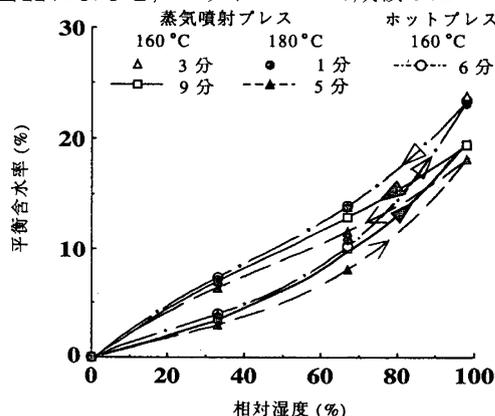


図22 バガスパーティクルボードの吸湿等温曲線

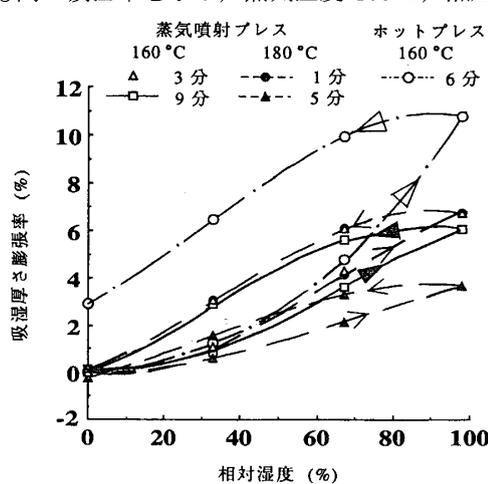


図23 バガスパーティクルボードの吸湿厚さ膨張率

3分および180℃、1分の蒸気プレス条件下で成板したボードの吸（放）湿等温曲線は、これと同程度の値を示している。蒸気噴射プレスで成板したボードは、蒸気温度が高いほど、また処理時間が長いほど疎水化を促し、平衡含水率を低める効果が大きい、前者の影響がより大きいと言える。また、同図より、5種類のボードでは、吸湿と放湿過程の含水率の差はほぼ同じ程度であり、大きな違いが認められなかった。

図23において、蒸気温度180℃、圧縮時間1分の熱圧条件下で成板したボードの吸湿厚さ膨張率は、160℃、3分の場合とほぼ同様であった。図によると、ホットプレスで成板したボードは、高湿度下（RH 98%）における厚さ膨張率が著しく大きくなり、また、吸湿による厚さ膨張は放湿過程においてその回復量が小さく、繰返し試験終了後の残存膨張率（回復不可の膨張）は3%に及んでいる。これに対し、蒸気噴射プレスで成板したボードは、いずれも吸・放湿過程における厚さ膨張率が著しく小さく、繰返し試験終了後の残存膨張率も認められなかった。また、蒸気圧力あるいは噴射時間の増加に伴って、ボードの吸湿厚さ膨張率の抑制効果は顕著になる。

図24に、各種湿度下における単位吸湿量に対するボードの厚さ膨張率を示した。図より、ホットプレ

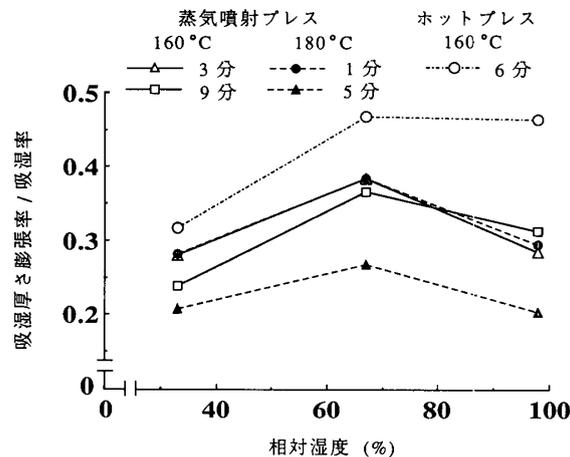


図24 バガスパーティクルボードの単位吸湿量に対するボードの厚さ膨張率

スの値に比べると、蒸気噴射プレスのそれはいずれも小さく、特に、高温・長時間処理では、1/2～1/3にまで改善されることがわかる。

図22、図23および図24に示したように、吸湿厚さ膨張率に及ぼす蒸気噴射条件の影響は、吸湿率への影響より大きいことがわかる。高圧蒸気処理によってボード寸法安定性が改善されるのは、細胞壁に含まれている多糖類が高温・高圧下でこれが分解や溶脱あるいは変質することによると推定される^{48, 54, 63, 64}。処理条件が厳しいほどヘミセルロースの分解や、一部セルロースの低分子化が著しくなると考えられる。

c. 耐朽・耐蟻性

オオウズラタケ (TYP)、カワラタケ (COV) の強制腐朽試験による結果を図25に示した。

ラワンや針葉樹パーティクルボードの場合、同様な耐朽性試験方法で評価すると、重量減少率が35%未満^{55, 56, 65}であるのに対し、図に示すように、バガスパーティクルボードではいずれも比較的高い値を示している。これは多糖類成分が多いなどバガスの化学組成によるものと考えられる。

褐色腐朽菌オオウズラタケの場合、蒸気噴射プレスで成板したボードの重量減少率は、ホットプレスで成板したボードより高く、また噴射時間および蒸気圧の増加に伴って大きくなっている。特に、蒸気温度180℃、熱圧時間5分で成板したボードの重量減少率は著しく大きく、50%以上の値を示している。

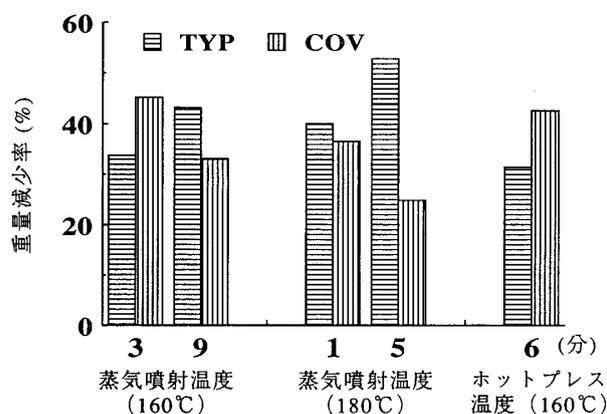


図25 バガスパーティクルボードの耐朽性
 注：TYP：褐色腐食菌 (*Tyromyces palustris* Murr.),
 COV：白色腐食菌 (*Coriolus versicolor* Quel.)

このことは、高温・高圧水蒸気の長時間処理によって、バガスの細胞壁に含まれるヘミセルロースの分解が引き起こされ、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンによる強固なマトリックスがよりルーズになって、褐色腐食菌による分解が生じやすくなったためと考えられる。

一方、白色腐食菌カワラタケの場合、ボードの重量減少率については、前者と対照的な傾向が見られた。この理由については、蒸気噴射時間の増加に伴い、バガスに含まれる糖分が熱分解され、白色腐食菌の生育を阻害するフルフラールが生じるのではないかと推察される。しかし、今後蒸気噴射プレスによる木材成分の変化とも関連させて検討する必要がある。

イエシロアリの選択摂食試験によるボードの重量減少率（食害率）を図26に示した。

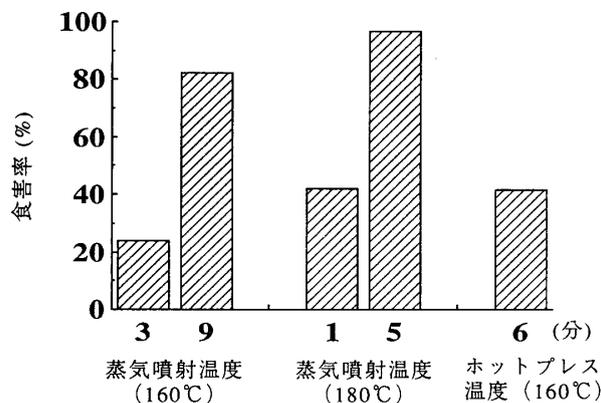


図26 バガスパーティクルボードの耐蟻性

ボードの耐朽・耐蟻性には、原料エレメントの大きさや樹種以外に接着剤の種類や添加率も性能に影響を及ぼす因子と考えられる。このうち、イソシアネート系樹脂接着剤については生物劣化に対して抵抗性を増大させることはないが、樹脂添加率の増加につれて耐蟻性は向上すると報告されている⁽⁶⁾。本実験では、接着剤添加率を10%の比較的高い水準としたが、それでも、ホットプレスで成板したボードは40%強の高い食害率を示した。バガスには糖分などシロアリの好む成分が多く含まれ、これがシロアリの誘引あるいは摂食の促進に作用したと考えられる。また、蒸気噴射プレスをういた場合、長い噴射時間および高い蒸気温度で成板したボードは、シロアリによる攻撃を受けやすくなり、蒸気温度180°C、噴射時間5分の成板条件では形もなくすべて食害される状況も見られた。

以上のように、シロアリの食害の促進は、厳しい蒸気プレス条件によってバガスの化学組成に変化が

生じたために起こったと考えられる。ただし、これが土居らが蒸煮処理カラマツ材で見出したシロアリの食害現象⁶⁷⁾と関係があるのか今後検討していく必要がある。

3.2.4 結論

1) 蒸気噴射プレス法を用いたバガスパーティクルボードの力学的性質は、ホットプレスで成板したボードのそれと比べると、曲げ強度、曲げヤング率およびはく離強度は若干低下し、また、蒸気温度および熱圧時間の増加につれて曲げ強度は低下する反面、曲げヤング率やはく離強度は向上する傾向が認められた。

2) 寸法安定性について、ホットプレスと蒸気噴射プレスの間で大きな差異が認められた。蒸気温度および熱圧時間の増加に伴って、ボードの寸法安定性および耐水性は顕著に向上することが明らかとなった。

一方、蒸気プレス条件が高圧・長時間になるほど、ボードの吸湿寸法安定性は著しく向上した。また、蒸気温度（圧力）を高める方が処理時間を長くするよりも、ボード耐水・耐湿性の改善に有効であることが明らかとなった。

3) 耐朽性については、蒸気プレス条件が高圧・長時間になるほど、褐色腐朽菌による腐朽が著しく生じやすくなるが、白色腐朽菌による腐朽の場合、同様な傾向は認められなかった。耐蟻性については、最も厳しい蒸気プレス条件（180℃、5分）で製造したボードは、すべて食害されることが観察された。

以上のことから、力学的性質、寸法安定性および耐久性を総合的に考えると、最適蒸気プレス条件は、蒸気温度160℃の場合には3分～7分、180℃の場合には1分～3分であると判断される。

4. リグノセルロース系原料を用いた高強度3層構造複合ボード

竹（以下バンブー）ファイバーまたは薄く剥いだバンブーストランドをフェイス材とし、ウッドファイバーをコア材とした3層構造を有する比較的低密度の竹/木複合ボードを試作した。

続いて、繊維が豊富なバガス外皮の高強度を生かし、そのストランドをフェイスに配向させ、バガスパーティクルをコア材とした3層構造の複合ボードを蒸気噴射プレスによって製造した。

フェイスとコアの構成比を変え、複合ボードの厚さ方向における密度分布を調べて、材質に及ぼすこれらの影響を検討した。さらに、有限要素法（Finite Element Method, FEM）を用いて、バガス3層構造複合ボードについて弾性応力解析を行なった。

4.1 3層構造竹/木複合ボードの製造とその性質

4.1.1 背景と目的

近年、東アジアにおいて、竹を原料とする種々の木質材料が開発されている。例えば、ファイバーボード⁶⁸⁾、パーティクルボード^{69, 70)}、配向性パーティクルボード⁷¹⁾および合板^{72~74)}のほか、また木材や無機質材料^{75, 76)}との複合材料などがあげられる。

このうち複合材料については、厚い竹板や竹ゼファー⁷⁷⁾を表面材として木材と複合した集成材、LVL、パーティクルボードなどが、いずれも竹の高強度・高剛性を生かしたものである。また、ウッドファイバーにバンブーファイバーを混抄した複合ファイバーボード⁷⁸⁾では、面内寸法安定性や耐水性の向上を目指している。しかしながら、前者の複合ボードはいずれも高密度になり、後者の場合には高強度のものを得にくい問題が残されている。したがって、竹を原料として、軽量、高強度・高剛性および高寸法安定性を持つ複合ボードの開発が最も期待される。

4.1.2 実験

a. 原料の調製

コア原料は2.1で用いたファイバー、すなわち、PDDRにより解繊されたラワン（*Shorea spp.*）ファイバー（WF）である。フェイス原料には、2.1で用いたバンブー（*Phyllostachys pubescens* Mazel）ファイバー（BF）および実験室で調製したバンブーストランド（BS）の2種類を用いた。WFおよびBFの寸

法・形状および力学的性質を表1に示した。

BSは竹薄剥ぎ機で製造したものである。すなわち、竹原料を約1mの長さに切断したのち、6～8本に短柵状に割裂し、内外節を取り除いた。これを竹薄剥ぎ機に通して厚さ方向に薄く剥いだのち、長さおよび幅方向を切断し、それぞれ約100mmおよび10mmの寸法を持つストランドを調製した。調製されたストランドの平均寸法は $100 \times 10 \times 0.75$ (mm) である。

b. 複合ボードの製造および材質試験

ボードの寸法は $380 \times 365 \times 6$ (mm) とし、目標密度を 0.60 g/cm^3 に設定した。竹/木重量比 (BFまたはBSとWFの比) は $1/0$, $3/1$, $1/1$, $1/3$ および $0/1$ の5水準とした。ファイバーおよびストランドの全乾重量に対し、それぞれ10%および8%のイソシアネート樹脂接着剤 (群栄化学工業株式会社製, UL-4811) を噴霧塗布した。粘度調整のために20%のアセトンを添加した。

BFとWFの混合による複合ファイバーボード (BF-WF) の製造では、まず、サンプルカードを用いて両ファイバーが均一になるまで十分に混合した。その後、気流循環式パイプ型ブレンダーおよびフォーミング装置を用いて、接着剤を添加し、ファイバーマットを成形した。3層構造のファイバーボード (BF/WF/BF) の場合、構成比に応じたBFおよびWFをフェイスBF→コアWF→フェイスBFの順に、3層構造のマットをフォーミングした。フェイスにストランドを用いた3層複合ボード (BS/WF/BS) の場合、まず、手撒き型配向用ボックスを用い片面のフェイスBSを配向成形し、次いでその上にコアのウッドファイバーマットをのせ、最後に、残り片面のBSを配向し、3層構造を有するマットを成形した。いずれのボードも熱圧温度 160°C 、熱圧時間2分、初期 40 kgf/cm^2 で成板した。なお、ボードの厚さを調節するためにディスタンスバーを使用した。

材質試験に先立ち、Raytest Isotopenme β geräte GmbH社製の γ 線透過による厚さ方向密度分布測定器を用いて、それぞれの複合ボードの厚さ方向における密度分布を調べた。曲げ強度、はく離強度、吸水厚さ膨張率および線膨張率などの試験については、2.2.2で述べた試験方法を用いて行なった。材質試験に用いた試験片数はいずれも5体である。

4.1.3 結果と考察

a. 力学的性質

曲げ強度の発現機構を解明するために、3種類の複合ボード (BF-WF, BF/WF/BF, BS/WF/BS) の厚さ方向における密度分布を調べた。その結果、3種類の複合ボードについては、同じ重量比であっても、全く異なる密度分布を示すことが判明した。その一例として、図27に竹/木重量比 (BFとWFの混合比またはフェイスとコアの構成比) が最も大きい場合 ($3/1$) の3種類の複合ボードの厚さ方向における密度分布を示した。

同図によると、BF-WFの厚さ方向における密度分布は、比較的均一な分布を示すのに対し、3層構造を持つBF/WF/BFボードはフェイスの密度が低く、コアの密度が高い、いわゆるコンプライ (Comply) 構造を示し、逆に、BF/BS/BFボードはフェイスの密度が高く、コア密度が低いサンドイッチ (Sandwich) 構造を示している。このように大きな構造上の差異は、エレメント (BF, WF, BS) の寸法・形状および密度などによると考えられ、複合ボードの性質に及ぼす影響は大きい。

図28に複合ボードの曲げ強度 (MOR) および曲げヤング率 (MOE) と、竹/木重量比の関係を示している。

図によると、BF-WFとBF/WF/BFボードのMORおよびMOEは共に同程度の値を示し、ウッドファイバーボード ($0/1$) のそれと大差がないことが認められた。BF/WF/BFボードの場合、フェイスのBFはコアのWFより硬く、かつ反毛機によって繊維化されているため、その寸法や形状係数⁷⁹⁾はPDDRにより解繊されたWFよりはるかに大きい。そのため、熱圧成板時にBFの圧縮変形はWFより遅れ、BF/WF/BFはコンプライ構造になると推察される。図27によると、最表層のBF密度は 0.45 g/cm^3 程度し

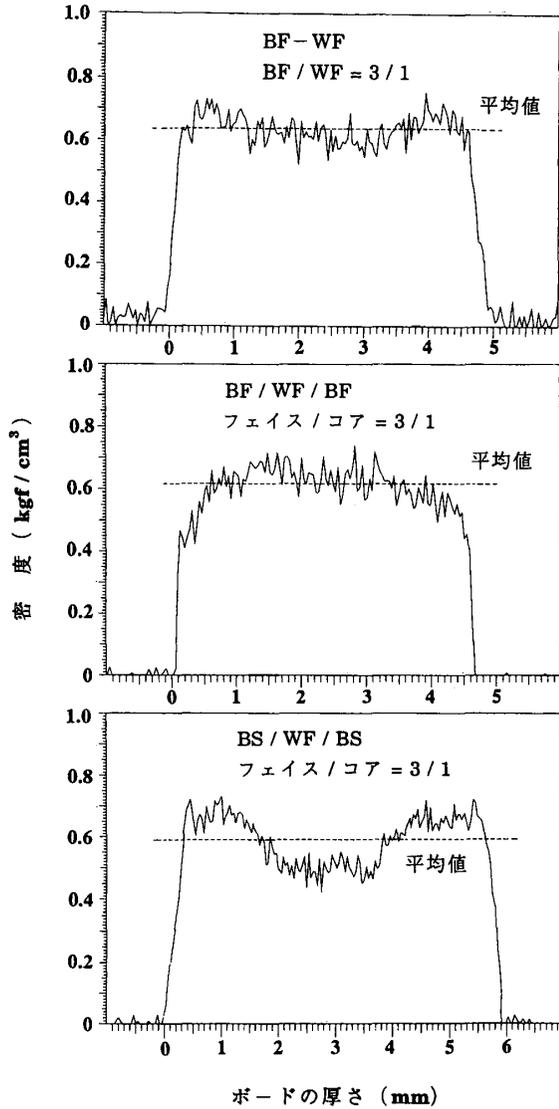


図27 各種複合ボードの厚さ方向における密度分布
注：BF：バンブーファイバー，WF：ラワンファイバー，BS：バンブーパーティクル

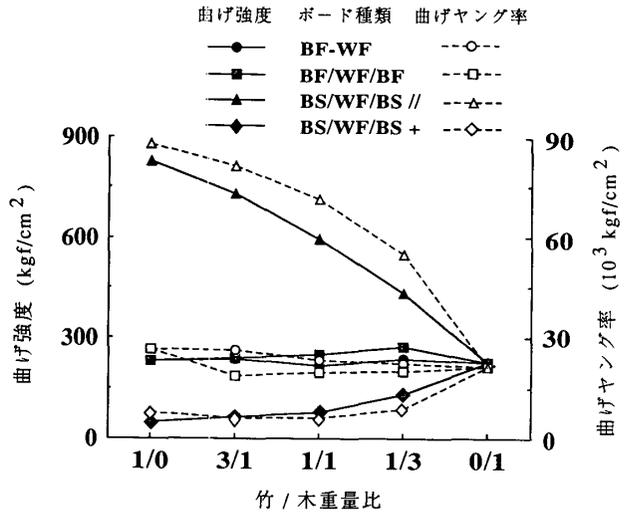


図28 各種複合ボードの曲げ強度および曲げヤング率に及ぼす竹/木重量比の影響
注：//：配向方向，+：直交方向

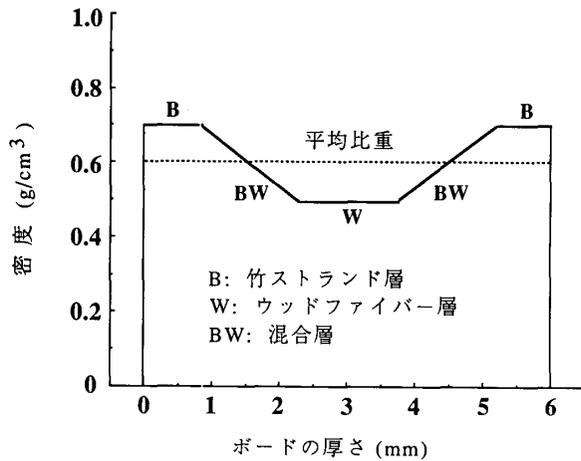


図29 竹ストランド/ウッドファイバー複合ボードの厚さ方向における密度分布モデル

がなく、フェイス層の密度もボード全体の平均密度 0.60 g/cm^3 より低くなっているため、BF間のすべり破壊が先行しやすい⁸⁰⁾。このために、BF自身が持っている高強度・高ヤング率³⁰⁾は、ボードのMORやMOEにはほとんど寄与しないものと推察される。

一方、BS/WF/BSボードの場合、フェイスストランドの配向方向と直交方向のMORは、フェイス構成比の増加に伴って、異方性を増し、最大17倍の差を示している。したがって、フェイスBSの配向により高い増強効果が得られることを示している。配向方向のMORおよびMOEは共に、フェイス構成比の増加に伴って著しく増加し、BSボードの配向方向の曲げ性能は、WFボードの3倍以上の値を示している。逆に、直交方向のそれらは、フェイスの比率の増加に伴って漸減する傾向が見られた。本実験では、複合ボードはいずれも厚さ6mmの薄物であるが、フェイスに用いたBSは厚いため、その分布層数が少なくなっており、このことが直交方向のMORとMOEに大きく影響したと考えられる。したがって、さらに薄いBSを用いた厚物を製造すれば、直交方向の強度性質が維持されると推察できる。

図27に示したBS/WF/BSボードの密度分布図をモデル化すると、図29のような5段式(B-BW-W-BW-B)の模式図が得られた。BはBS層、BWはBSとWFの混合層、WはWF層と考えられる。混合層としてのBWが存在し、明瞭なフェイスとコアの界面層がないので、界面層での破壊が全般的に緩和される傾向にある。複合梁の数値解析⁶¹⁾の結果をみると、明確な界面層が存在しないために、複合ボードの曲げ強度の向上に役立つことが明らかとなった。また、B層の密度は芯層Wより4割高くなっているため、BS同士間の接着にも有利であることがわかる。用いたBSは繊維方向に沿って薄く剥いだものであるため、繊維の切断や損傷が極めて少なく、竹自身の高強度を保ちながら、複合ボードの強度の向上に大きく寄与すると考えられる。また、BS/WF/BSボードの最表層密度(図27参照)はボード全体の平均密度より高くなっているため、特にそのMOEに大きく寄与すると推定される。

各種木質材料の最大比強度と比ヤング率を図30に示す。BS/WF/BS複合ボード(構成比3/1)また

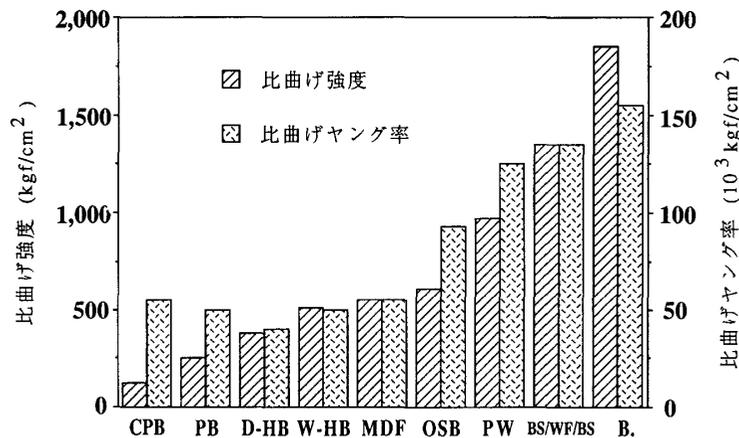


図30 各種木質材料の比強度および比ヤング率

注：1. CPB：セメントパーティクルボード，PB：パーティクルボード，D-HB：乾式ハードボード，W-HB：湿式ハードボード，MDF：中密度ファイバーボード，OSB：配向性ストランドボード，PW：合板，BS/WF/BS：3層構造竹/木複合ボード，B：竹

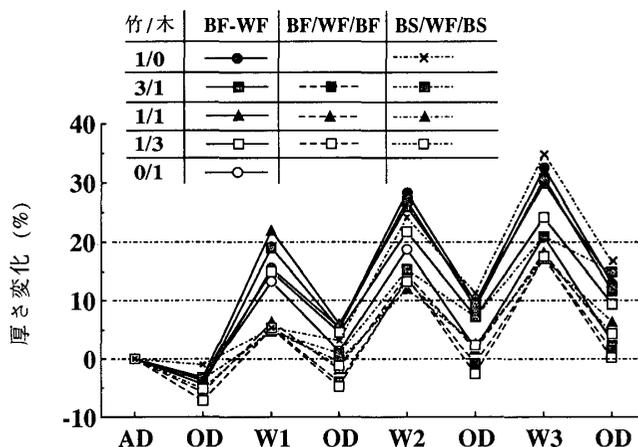


図31 促進劣化処理による各種複合ボードの厚さ変化

注：AD：気乾，OD：全乾，W1：常温水に24時間浸せき，W2：熱水(70℃)に24時間浸せき，W3：4時間煮沸

は竹OSBの配向方向の比強度および比ヤング率はかなり大きく、いずれも合板の場合より高い値を示し

た。したがって、これらボードは軽量・高強度を有する竹/木複合材料であると考えられる。

b. 寸法安定性

繰り返し促進劣化処理によるボードの吸水厚さ変化を図31に示した。図によると、BF/WF/BFとBS/WF/BSの2種類の複合ボードは、常温水中浸せき後の厚さ膨張率が5%程度であり、優れた寸法安定性を示している。

このことから、このような複合ボードは最も合理的な3層構造を持つことが推察される。すなわち、BF/WF/BFの場合、コンプライ構造(図27参照)を持ち、フェイスBFのドライグセット(圧縮時の変形固定)量が当然のことながら小さい。また、湿潤状態でフェイスBFの絡み合いにより、コアWFの膨張も抑制され、その結果、ボード全体の吸水膨張が抑制されると考えられる。BS/WF/BSの場合、前述のように、フェイスBSは竹の接線方向に剥いだ薄いストランドであり、2次的に重ねて配向されているため、相互の接触が良好であり、立体的に無理な重なりが少ない^(63, 82)。そのためボードの厚さ方向におけるBS自身およびフェイス全体の膨張が小さいと考えられる。また、BS/WF/BSボードはサンドイッチ(図27参照)構造になり、コアの密度が低くなっているため、そのドライグセット量が小さく、したがって、その回復量も小さくなるものと推定される。

一方、熱水(70℃)浸せきおよび煮沸におけるBS/WF/BSボードの厚さ膨張率については、竹/木構成比が大きい場合(3/1またはOSB)、それらの値が高くなり、また、乾燥時の残存膨張率も高くなっている。しかし、4時間煮沸後の膨張率がそれぞれ21%、35%を超えないことから、一部のBSにおいてのみ接着欠陥が存在すると考えられる。したがって、接着剤をさらに均一に塗布したり、接着剤の添加率を一層高くすれば、寸法安定性を向上することができると推察される。

図32は、竹/木複合ボードと各種木質材料の吸水厚さ膨張率(常温水中24時間浸せき)の比較を示

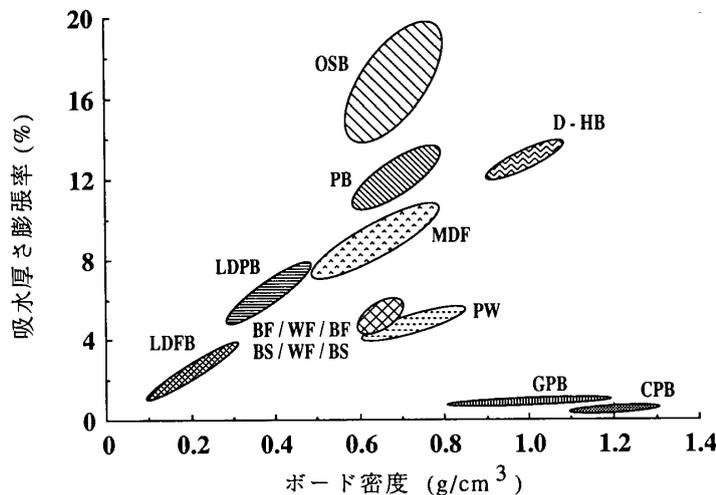


図32 各種木質材料の吸水厚さ膨張率(常温水中24時間浸せき)

注：LDFB：低密度ファイバーボード，LDPB：低密度パーティクルボード，BF/WF/BF，BS/WF/BS：3層構造竹/木複合ボード，PW：合板，MDF：中密度ファイバーボード，PB：パーティクルボード，OSB：配向性ストランドボード，D-HB：乾式ハードボード，GPB：石こうパーティクルボード，CPB：セメントパーティクルボード

した図である。図より、3層構造を有する竹/木ボードは、複合することによりその寸法安定性が、単純なフェイス材(BS，BF)あるいはコア材(WF)で製造したボード(OSBあるいはMDF)のそれより、著しく改善されることが明らかとなった。

4.1.4 結論

1) BF-WF複合ファイバーボードでは、ウッドファイバー(WF)にバンブーファイバー(BF)を混入することにより、複合ボードの耐水性および面内の寸法安定性が顕著に改善された。BF/WF比が低水準(1/3)の場合においても、ボードの線膨張は全般的に抑制された。

2) BF/WF/BF 3層複合ファイバーボードは、コンプライ構造を有し、寸法安定性や耐水性が優れ、フェイスBF比率の増加に伴ってこれらは著しく向上することが認められた。

3) BS/WF/BS 3層複合ボードは、サンドイッチ構造を有し、その配向方向の曲げ強度および曲げヤング率は、フェイスBS比率の増加に伴い顕著に増加した。また、配向方向の比強度は合板より大きく、軽量、高強度・高剛性を持つ複合材料と認められた。特に、フェイス/コア比が低水準(1/3)の場合には、複合ボードは高強度を保ちながら、優れた耐水性や寸法安定性を持つことが明らかとなった。

一方、竹を原料としたOSBは、竹薄剥ぎ機によるストランドの加工が容易であるという特長のため、その生産性が高く、かつ優れた強度性能を持つことが明かとなった。

4.2 3層構造バガス複合ボードの性質とその弾性応力解析

4.2.1 背景と目的

3.2では、蒸気噴射プレスを用いてバガスパーティクルボードを製造し、ボードの力学的性質や耐水・耐湿性などへの噴射条件の影響を検討した。その結果、高温・高圧蒸気処理によってボードの寸法安定性が著しく改善される反面、あまりに長時間・高圧処理条件下では繊維の劣化が激しく、強度性能が低下することがわかった。しかし、構造用途にボードの寸法安定性を求める一方で、強度性能の維持や改善も必要不可欠である。

一方、東アジアではバガスパーティクルボードやファイバーボードの工業化生産¹⁹⁾も一部の地域で行なわれているが、そのほとんどが単純な構造のものであるので、ボードの強度ならびに寸法安定性において、多くの問題が残されている。農産廃棄物の形態は多様であり、その形態と用途に応じて利用することが重要である。例えば、バガスは廃棄の段階で繊維が繋がっているため、ラインドの形態で利用すれば、構造用として繊維強度を活かせる²⁰⁾。また、竹のように繊維質が表皮に集中している原料では、その複合構造を活かすことによって、単なる木材や合板の代替材や補完材料としてではなく、新しい素材としての可能性が生まれてくると考えられる²⁰⁾。

このようなことから、蒸気噴射プレス法を用い、バガス表皮繊維の高強度を生かし、異なるエレメントによる多層構造複合化によって、材質改善をはかることが考えられる。

4.2.2 実験

a. 原料の調製

用いたバガス原料は、3.2で用いたものと同じ、すなわち、表層のワックスおよび柔細胞の多い髄を除去した砂糖キビ(*Saccharum officinarum* L.)の皮質部分の搾り滓(比重0.40~0.50)である。フェイス材として、寸法約100×15×1.1(mm)のバガスストランド(B'S)を調製した。また、これをハンマーミルで数回粉碎し、平均寸法14.5×0.4×1.1(mm)の細長い針状のパーティクル(B'P)を調製し、コア材に供試した。

b. 複合ボードの製造および材質試験

ボードの寸法は385×365×12(mm)とし、目標密度を0.65 g/cm³に設定した。イソシアネート樹脂接着剤(群栄化学工業株式会社製 UL-4811)を用いて、フェイスストランドおよびコアパーティクルに対し、それぞれ8%および10%(固形分重量比)を噴霧添加した。蒸気噴射プレス条件は、3.2で得られた結果に基づいて、熱圧温度が160℃(6.3気圧)の場合には、噴射時間を7分、180℃(10.2気圧)では3分とした。マットの周囲をディスタンス・バーを兼ねたフレームで囲って、蒸気をシールした。フェイス/コア構成比(重量比)は1/1, 1/3, 0/1の3水準とした。所定の構成比になるように、

ストランド、パーティクル、ついでストランドを3層に手撒き散布によってフォーミングした。なお、フェイスのストランドは多数のプレートを並べた機械的配向装置を用いて1方向に配向させた。配向装置のプレート間隔は25mm、自由落下距離は約50mmであった。

さらに、数値解析用の材料定数を得るために、蒸気温度160℃、噴射時間7分の熱圧条件のもとでバガスストランドボードを製造した。

材質試験の前に、4.1.2で用いた密度分布測定器によって、各ボードの厚さ方向における密度分布を調べた。常態および湿潤曲げ試験、吸水厚さ膨張率の試験および線膨張率試験については、3.1.2で述べた試験方法を用いた。木ねじ保持力試験については、JIS A 5908に準拠して行なった。各試験の試験片数はいずれも5体である。

c. 有限要素法による弾性応力解析

フェイス / コア構成比の変化に伴い、複合ボード内における応力およびその分布がどのように変化するか、また、力学的性質にどのように影響するかを、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) によって明らかにする必要がある。ここでは、フェイスのバガスストランドボードを3次元異方性材料とし、コアのバガスパーティクルボードを2次元異方性 (面内方向は等方性) 材料として取り扱った。なお、荷重点および支持点の応力集中や乱れを十分に考慮し、それらの近傍における要素分割をより細かくして、応力解析の信頼性を高めた。

解析モデルの寸法は曲げ試験片と同じ寸法、すなわち200×40×12 (mm) であり、スパンを180mmとした。荷重方式は中央集中荷重であり、荷重点を中心に左右対称であるので、左側半分についてのみ解析を行なった。フェイスとコアの厚さの比 (H_f / H_c) については、後述のように、比較的均一な厚さ方向密度分布の測定結果が得られたので、ここではこれを無視し、その重量比を概算値 (すなわち、1/1および1/3の2水準) として用いた。

図33に要素分割の例を示した。ここでは、各要素中央の応力値に基づいて、線形外挿法で各節点の応力値を求めて、応力分布図を作成した。

解析の一例として、蒸気温度160℃で7分間噴射成板した複合ボードの解析についてのみ述べる。本実験では2次元解析 (xy平面) を行なうので、フェイスおよびコアの長さ方向 (x軸) および厚さ方向 (y軸) の材料定数について、バガスストランドボードおよびパーティクルボードの実験値を基にしてそれぞれ推定した。すなわち、フェイスのスパン方向における引張ヤング率 E_x および45°方向における引張ヤング率 E_{45} は、曲げヤング率 $50.3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ および $30.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ の1.1倍³⁵⁾を用いた。また、ポアソン比 μ_{xy} および配向方向に対する45°方向のポアソン比 μ_{45} は0.60および0.40^{84), 85)}とした。せん断弾性率 G_{xy} および引張ヤング率 E_y は、Jenkin式^{84), 85)}

$$G_{xy} = \frac{E_{45}^0}{2(1+\mu_{45}^0)}$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{4}{E_{45}^0} - \frac{1-2\mu_{xy}}{E_x} - \frac{1}{G_{xy}}$$

により、 $G_{xy} = 11.8 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ および $E_y = 24.9 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ を得た。同様な方法で、コアの E_x および E_{45} は曲げヤング率 $27.3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ および $27.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ の1.1倍を用い、ポアソン比 μ_{xy} および μ_{45} は0.55および0.40と仮定し、 $G_{xy} = 10.6 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ および $E_y = 22.9 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ を算出した。

4.2.3 結果と考察

a. 力学的性質

図34に、蒸気温度160℃で7分間噴射成板した場合の異なるフェイス / コア比のバガス複合ボードの厚さ方向密度分布を示している。

図によると、3水準の構成比 (1/1, 1/3, 0/1) を持つボードはいずれも厚さ方向における密度分布

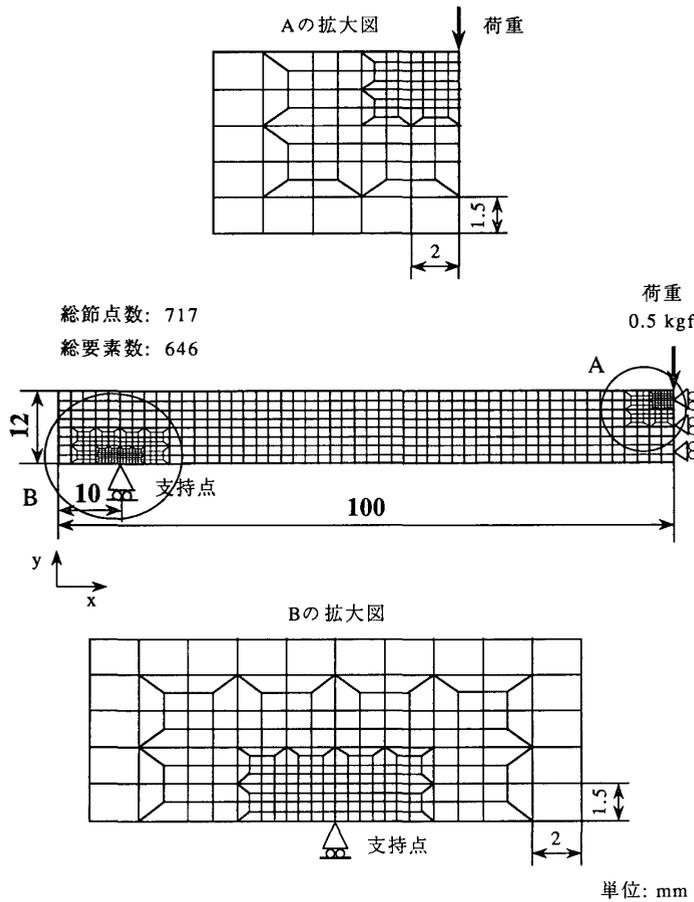


図33 有限要素法の要素分割図

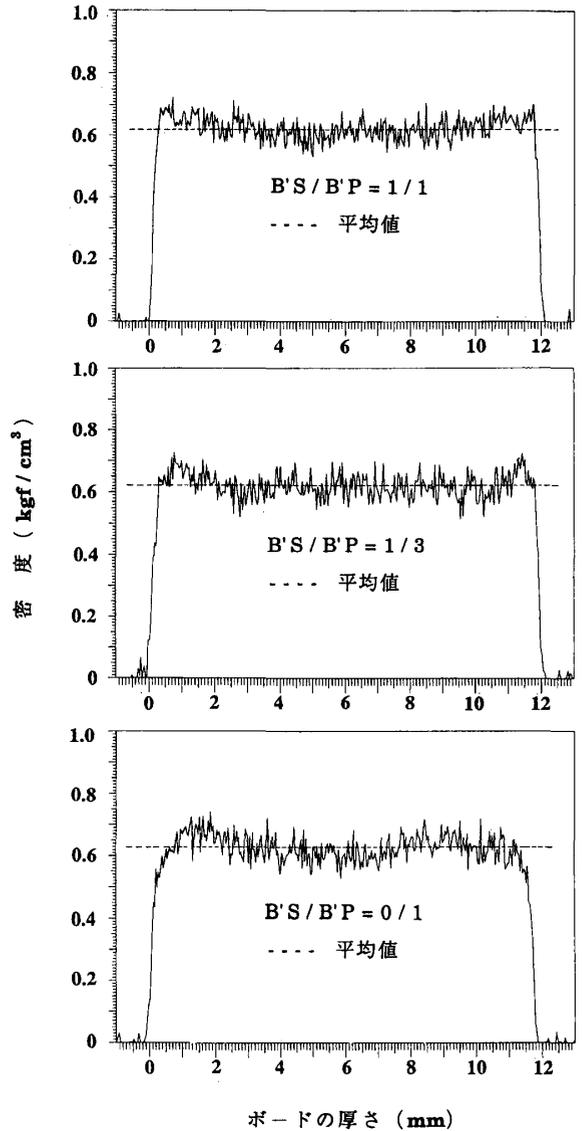


図34 バガス複合ボードの厚さ方向における密度分布
注：B'S：バガスストランド，B'P：バガスパーティクル

がかなり均一である。これは蒸気噴射プレスによるものと考えられる。しかし、一般に表層に現れる圧密層は、フェイスストランド比率の増加に伴い、次第に最表層側に移行していくことが認められた。例えば、3層構造を有する複合ボード（1/1，1/3）の場合、最表層の密度がいずれもボード全体の平均密度以上になり、この傾向は1/1の場合により明瞭であるが、単純構造のパーティクルボード（0/1）は、その最表層の密度がボード全体の平均密度以下になっている。このことから、フェイスストランドは圧縮時の圧縮変形が大きく、表面が圧密化されやすいことがわかる。当然ながら、表面圧密化はボードの曲げ性能などに大きく影響する。

図35にフェイス/コア構成比とボードの曲げ強度(MOR)および曲げヤング率(MOE)の関係を示した。

図より、配向方向のMORおよびMOEはフェイス率の増加に伴って著しく向上することがわかる。これはフェイスストランドの配向によって、バガス繊維の高強度が生かされたためである。一方、直交方向のMORおよびMOEは、3層構造によって急激に減少するが、フェイス比率1/3～1/1への増加に

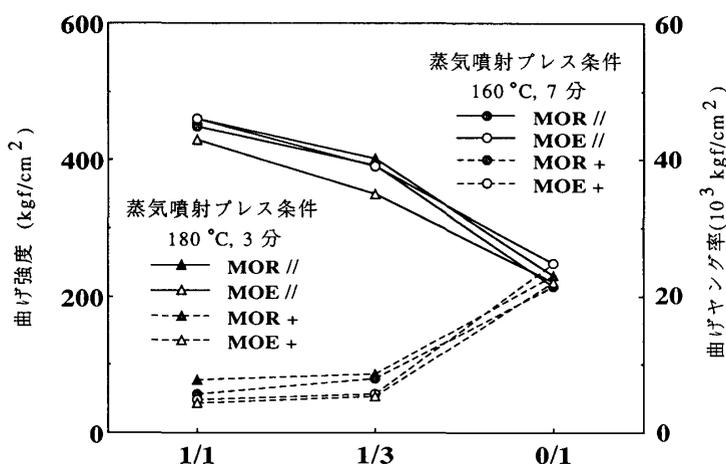


図35 バガス複合ボードの曲げ強度および曲げヤング率に及ぼすフェイス/コア重量比の影響

注：MOR：曲げ強度，MOE：曲げヤング率，//：配向方向，+：直交方向

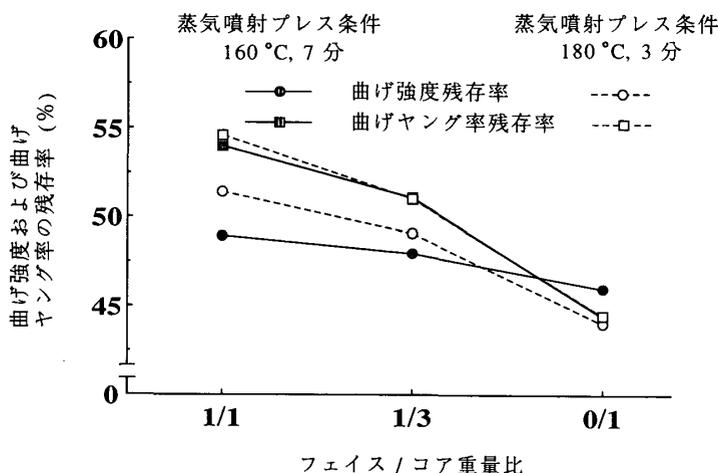


図36 バガス複合ボードの曲げ強度および曲げヤング率の残存率に及ぼすフェイス/コア重量比の影響

対しては、ほとんど変化が見られない。したがって、3層構造複合ボードでは、配向したストランドフェイス比率はボードの直交方向の曲げ性能にあまり大きく影響しないことが明らかとなった。

図36にフェイス/コア構成比とボードの曲げ強度および曲げヤング率残存率の関係を示した。残存率の計算については、湿潤状態下の曲げ強度および曲げヤング率と常態下のそれらの比とした。

図に示したように、フェイス/コア構成比の増加に伴ってボードの曲げ強度および曲げヤング率の残存率がともに増加することが認められた。特に、曲げヤング率の残存率はバガスパーティクルボードが45%であるのに対し、ストランドの比率が50%のボードでは55%に増加した。この理由について、まず、フェイスに用いたストランドが幅広く、かつ長いもので、その単位面積当たりの接着剤量が多く、また、2次元的に配向され、ストランド相互間の接着が良好であるためと考えられる。また、前述のように、フェイスストランドが圧密化され、蒸気噴射処理によって圧縮変形が固定される^{43, 65, 86)}と同時に、ヘミセルロースの部分的な変質が生じるため^{48, 63)}、耐水性が向上したと考えられる。

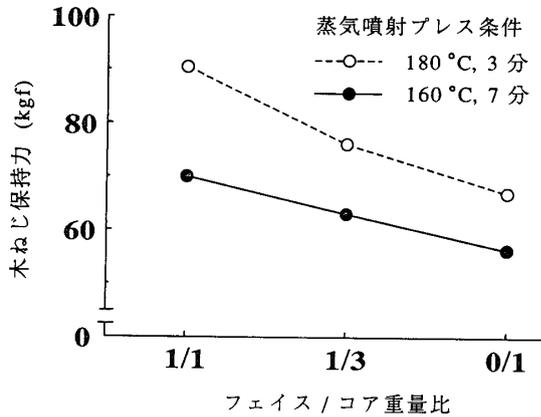


図37 バガス複合ボードの木ねじ保持力に及ぼすフェイス/コア重量比の影響

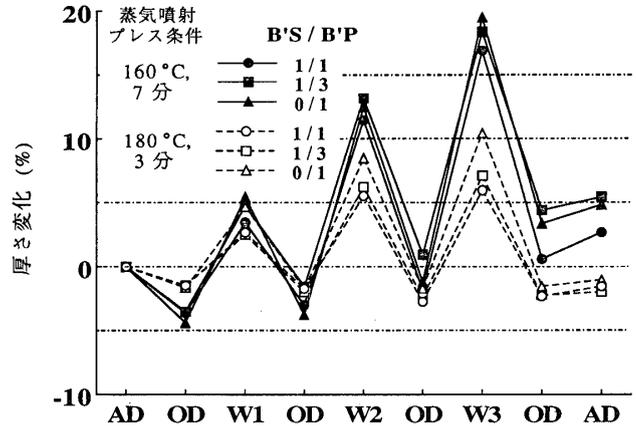


図38 促進劣化処理によるバガス複合ボードの厚さ変化
注：AD：気乾，OD：全乾，W1：常温水に24時間浸せき，W2：熱水（70℃）に24時間浸せき，W3：4時間煮沸
B'S：バガスストランド，B'P：バガスパーティクル

図37にフェイス/コア構成比とボードの木ねじ保持力の関係を示した。図より、フェイス比率の増加につれて木ねじ保持力が増加する傾向が認められた。これについては、ストランドの寸法がパーティクルより遥かに大きく、その形状・形態による効果や表面圧密化の寄与が考えられる。したがって、フェイスに配向したストランドは、木ねじ保持力の向上にも有効であると判断できる。

b. 寸法安定性

各種ボードの繰返し促進劣化処理の結果を図38に示している。図によると、各蒸気噴射条件で製造したボードは、フェイス比率の増加に伴って、それらの吸水厚さ膨張率（TS）が低下する傾向が認められた。前述のように、ストランド間の良好な接着、その形状・形態および表面圧密化による効果が寸法安定性の向上に寄与するものと思われる。

また、蒸気温度180℃で3分噴射成板したボードは、いずれの浸水条件（常温水、熱水、煮沸）でも160℃、7分の熱圧条件で成板したボードのTSの半分以下であり、また、常温水中24時間浸せき後のTSは2.5%～5%、4時間煮沸後のTSでも5.5%～10%の範囲にとどまった。さらに、繰返し促進劣化処理後のスプリングバックもなく、160℃、7分の条件で成板したボードに比べて、さらに優れた寸法安定性を示した。このことから、蒸気圧（温度）を高める方が処理時間を長くするよりも、ボードの耐水性の改善に有効であることが明らかとなった。

図39にボードの線膨張率（LE）を示した。図によると、バガス複合ボードのLEは全般に小さく、通常の木質パーティクルボードの半分以下であることがわかる。さらに、フェイスストランドの配向による効果も明らかである。フェイス比率が50%に達すると、複合ボードの線膨張率はパーティクルボードの約半分まで抑制された。したがって、薄くて長い形状を持つストランドフェイス材の配向が、ボード面内における寸法安定性の向上に大きく寄与すると推察される。

一方、同図に示された傾向によれば、蒸気噴射プレスの熱圧条件180℃、3分で成板したボードはいずれの構成比でも、そのLEが160℃、7分で成板したボードのそれより大きくなり、吸水厚さ膨張率の場合と対照的な結果となった。これはポアソン類似の効果によるものと考えられる。

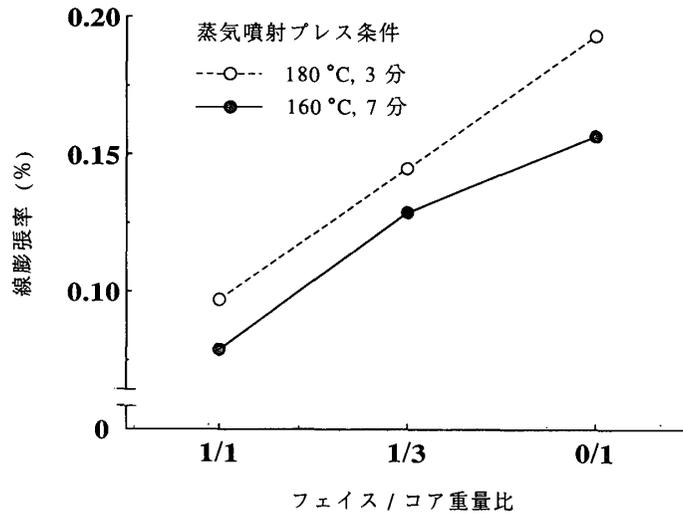


図39 バガス複合ボードの線膨張率に及ぼすフェイス/コア重量比の影響

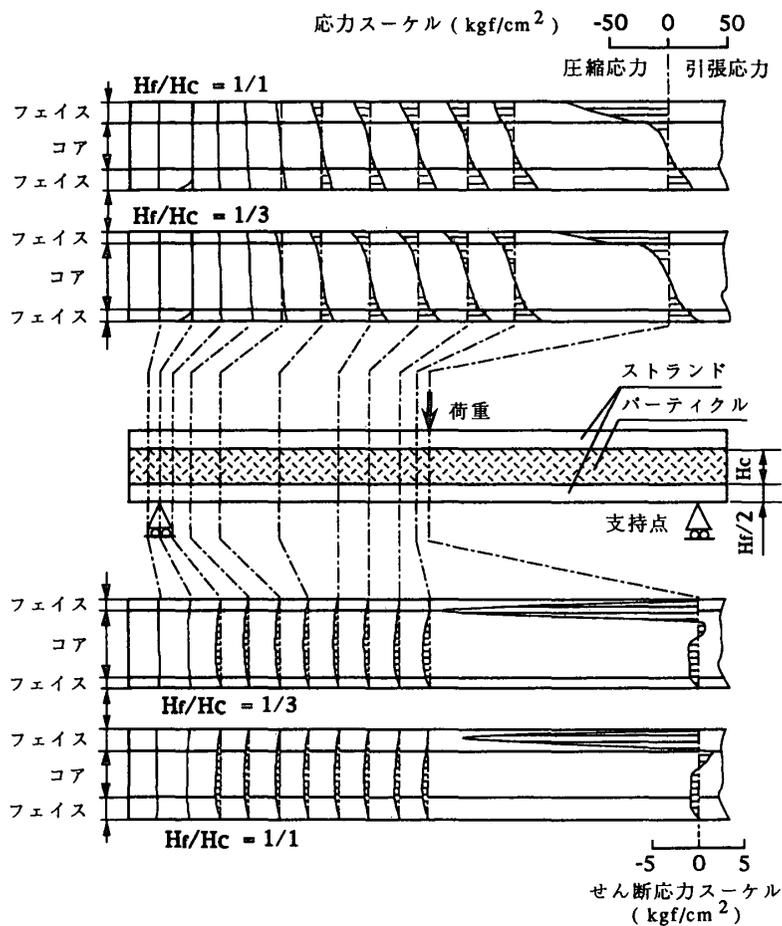


図40 各フェイス/コア比による応力分布の相違
注： H_f ：フェイスの厚さ， H_c ：コアの厚さ

c. 応力分布

図40に、応力分布の一例として、蒸気噴射プレスの成板条件160℃、7分のもとで作られた3層構造複合ボードの曲げ応力（垂直応力）およびせん断応力の分布を示す。

まず、曲げ応力については、支持点の直上で応力の乱れが見られたほか、荷重点の直下で圧縮応力が最も大きく、反対側の引張応力より遥かに大きくなっていることが認められた。ただし、2水準のフェイス/コア構成比においても、最大応力はフェイスに存在するので、フェイス材料の高強度が有効に生かされる。一方、図によると、フェイス/コア比が1/3の場合、表面応力の最大値は1/1の場合より若干大きいものの、フェイス比率の減少に伴う応力傾斜および応力集中の傾向は認められなかった。

せん断応力については、図に示したように、いずれの断面においてもボードの表面応力がゼロであり、特に、荷重点の直下の圧縮側のフェイスあるいはフェイスとコアの界面における応力集中が著しくなっている。また、せん断応力は、フェイス/コア構成比に大きく影響されることが認められた。例えば、フェイス/コア比が1/3の場合、フェイスとコアの界面層におけるせん断応力が1/1の場合に比べると、ほぼ20倍の値になっている。このように、界面層に大きなせん断応力が存在するために、この部分におけるせん断破壊が最も発生しやすいと推察される。

フェイス/コア構成比が違う場合のボードの曲げ強度に関する比較は、それぞれの表面応力の比によって評価できる⁸⁷⁾が、ここでは、ボード弾性範囲における曲げヤング率の実験値と有限要素法による計算値との比較を行なった。両者の値および誤差率を図41に示している。同図により、フェイス/コア構

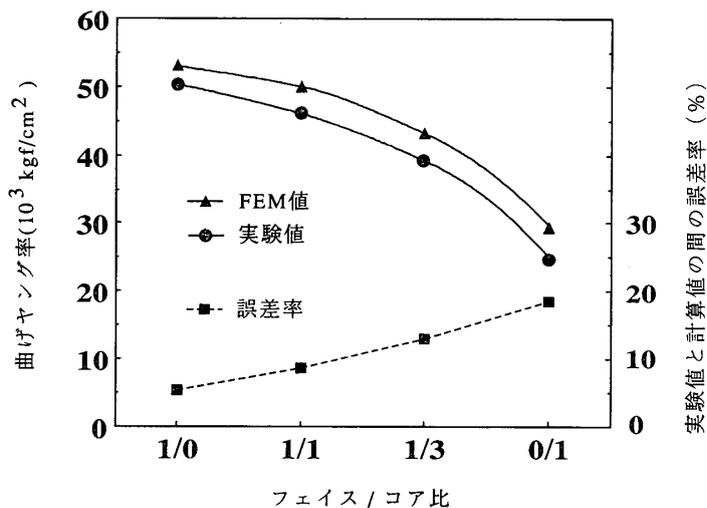


図41 曲げヤング率の実験値と計算値の比較

成比が1/0から0/1に減少すると、計算値は実験値より5.4%から18.5%大きくなっている。本実験ではMOEの計算において、たわみを求める際、曲げモーメントの作用だけを考慮しており、せん断力によって生じた附加的なたわみ⁸⁸⁾や、荷重点におけるめりこみ変形によるたわみ⁸⁹⁾を考慮していない。したがって、これらの影響により計算値が高くなっていると考えられる。特に、フェイス/コア比が0/1の場合、めりこみ変形による影響が最も大きいため、MOEの計算値と実験値の差が最も大きくなっている。一方、ボードの構造欠陥およびその材質のバラツキも実験値を低くする原因と推察される。

4.2.4 結論

1) フェイスのパガスストランドの配向効果によって、複合ボード配向方向の強度性能が著しく向上した。また、フェイス比率の増加に伴って曲げ強度、曲げヤング率、湿潤状態の強度残存率、および木ねじ保持力などが増加することが認められた。

2) フェイスストランドの配向によって、複合ボードの寸法安定性は顕著に改善された。成板条件による影響を見ると、蒸気温度180℃で3分間噴射成板したボードの吸水厚さ膨張率は、160℃、7分で成板したボードのそれより遥かに小さく、また、フェイス比率の増加に伴ってこれが著しく低下した。しかし、線膨張率については逆の傾向が認められた。

以上のことから、フェイスにストランドを配向させ、蒸気噴射プレスを用いて、比較的軽量、高強度および高寸法安定性を持つバガス複合ボードの製造が可能であることが明らかとなった。

3) 有限要素法による弾性応力解析の結果より、荷重点および支持点での応力集中や応力の乱れが明らかであった。特に、フェイス/コア比がせん断応力に与える影響は、曲げ応力の場合に比べて遥かに大きいことが認められた。

5. まとめと今後の課題

本論文では、ジュート、竹およびバガスなどの非木材リグノセルロース系原料を用いた新しい木質材料の開発に関する基本的な研究を行なった。

1) 画像解析システムを用いて、ジュート、竹、綿のような非木材リグノセルロース系原料ファイバー（繊維束）、ならびに広葉樹と針葉樹ファイバーの寸法・形状を測定し、その力学的性質との関係を調べた。リグノセルロース系ファイバーでは、直径の増加に伴って、その引張強度および引張ヤング率が著しく低下することが認められた。また、試作したファイバー乾燥装置および接着剤塗付装置、ならびにマットのフォーミング装置を用いて、ジュート・ウッドファイバー複合ボードを製造し、その材質について検討・解析した。ジュートファイバーとウッドファイバーの混合比が1/3のとき、複合ボードの性質が全般的に改善され曲げ強度が増加するほか、面内の寸法安定性も顕著に向上することが認められた。

2) モウソウ竹の外層表皮と中内層、および両者を分離しないもの（全層）をそれぞれ原料とするパーティクルボードを製造し、材質について調べた。その結果、原料とする竹幹の部位や、接着剤添加率およびパーティクル寸法の違いによって、ボードの性質が大きく影響されることが明らかとなった。また、蒸気噴射プレス成板したボードでは、優れた耐水性および耐湿性を持つことが認められた。一方、竹パーティクルボードは木質パーティクルボードより腐朽しやすいことがわかったが、シロアリの食害に対してある程度の抵抗性を持っていることも認められた。

一方、蒸気噴射プレス法を用いて製造したバガスパーティクルボードは、力学的性質がホットプレスで成板されたボードのそれらに比べ幾分劣ることが認められたが、その寸法安定性は、蒸気温度（蒸気圧）および噴射時間の増加に伴って著しく改善された。また、吸・放湿過程における厚さ膨張率も非常に小さく、優れた耐湿性を持つことが明らかとなった。しかしながら、バガスパーティクルボードは他の木質ボードに比べて腐朽しやすいことが認められ、さらに、蒸気圧および噴射時間の増加に伴って、特に褐色腐朽菌のオオウズラタケによる腐朽が激しくなる傾向が認められた。また、イエシロアリによる選択摂食試験によっても、蒸気圧や噴射時間の増大につれて食害率が顕著に大きくなったことを示した。

3) ウッドファイバー（WF）、バンブーファイバー（BF）および薄く剥いだバンブーストランド（BS）を用いて、BFとWFの混合による複合ファイバーボード（BF-WF）、フェイスにBFまたはBS、コアにWFを用いた3層構造複合ボード（BF/WF/BF、BS/WF/BS）を製造し、それらの材質を検討した。WFにBFを混抄することにより、BF-WFボードの面内寸法安定性が顕著に改善された。BF/WF/BFボードはコンプライ構造を有し、フェイスBF比率の増加に伴い、耐水性や寸法安定性が著しく向上した。一方、BS/WF/BSボードについては、サンドイッチ構造を有し、フェイスBSの配向効果により、その比強度（MOR/密度）と比ヤング率（MOE/密度）は、合板よりも高い値を示した。

なお、蒸気噴射プレスを用いて、3層構造を有するバガス複合ボードを製造し、その材質について検

討し、有限要素法によって複合ボード内における応力分布を求めた。フェイスストランドを配向させた複合ボードの力学的性質は、配向方向の曲げ強度と曲げヤング率、湿潤状態の強度残存率、および木ねじ保持力など、いずれもフェイス率の増加に伴って顕著に増加した。寸法安定性について、蒸気温度180℃で3分間噴射成板したボードの吸水厚さ膨張率は、160℃で7分間噴射成板したボードのそれより遙かに小さいことが認められた。また、フェイス率の増加に伴って配向方向の線膨張率は著しく低下した。一方、有限要素法による応力解析の結果より、荷重点および支持点での応力集中が示され、フェイスとコアの界面層におけるせん断応力は、フェイス/コア比によって大きく影響されることが明らかとなった。

4) 早生森林資源や農産廃棄物を含む非木材リグノセルロース系原料は、膨大な蓄積量を有し、様々な原料形態を持っているが、それらの特徴を最大限に生かすことにより、近い将来、特に森林資源が少ない地域で重要な役割を果たすことが予想される。今後は、配向した非木材リグノセルロース系原料とセメントや石こう等との複合によって、優れた耐朽性や耐火性と高強度、高寸法安定性を合わせもつ無機系複合材料に関する開発研究の発展が期待される。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、終始丁寧なる御指導と多くの御教示を賜った京都大学木質科学研究所川井秀一教授に深甚の謝意を表します。また、実験および論文の作成に際して、御助力や御助言を頂いた同研究所石原茂久教授、高橋旨象教授、今村祐嗣助教授、瀧野真二郎助手、畑俊充助手、および梅村研二博士、岸本芳昌氏に深く感謝いたします。

特に、本研究前半の遂行にあたり、多くの御指導と鞭撻を賜った佐々木光先生（京都大学名誉教授、秋田県立農業短期大学附属木材高度加工研究所教授）に厚く御礼申し上げます。

なお、学外にあっては、奨学金を頂いた（財）ロータリー米山記念奨学会ならびに京都伏見ロータリークラブ、（財）ユアサ国際教育学術交流奨学財団、（財）市川国際奨学財団、日本学術振興会および多くのご支援やご激励を頂いた皆様に、心より深く謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) 木質新素材ハンドブック編集委員会：木質新素材ハンドブック，技報堂出版，p. 32-35 (1996)
- 2) 大熊幹章：日本木材大会40周年記念大会特別企画パネルディスカッション「化石資源から木質資源へ」，東京，p. 1, (1995)
- 3) 岡部敏弘：ウッドセラミックス，内田老鶴圃，p. 4-8 (1996)
- 4) 志水一允：日本木材大会40周年記念大会特別企画パネルディスカッション「化石資源から木質資源へ」，東京，p. 6-15 (1995)
- 5) 林野庁：木材需給と木材工業の現状，林産行政研究会，p. 74-78 (1995)
- 6) 産業技術会議：産業と地球環境，産業技術会議，p. 605-612 (1990)
- 7) U. SUNDBERG, C. R. SILVERSIDES : Operational Efficiency in Forestry, Kluwer Academic Publishers, p. 273-276, (1989)
- 8) 農林統計協会：林業白書，日本林業協会，p. 148-159 (1995)
- 9) 只木良也：日本木材大会40周年記念大会特別企画パネルディスカッション「化石資源から木質資源へ」，東京，p. 1-5 (1995)
- 10) Forest Products Laboratory : WOOD ENGINEERING HANDBOOK, Prentice Hall, p. 2-5, (1990)
- 11) 日刊木材新聞社：新しい木質建材，日刊木材新聞社，p. 145-158 (1995)
- 12) 青木尊重：Bamb. J., No. 3, 95-99 (1985)
- 13) 張 彬淵，張 勤麗，張 敏：木材工業，50 (5), 198-203 (1995)
- 14) 劉 恵民，石 卓功，張 敏，川井秀一：木材工業，51 (2), 76-80 (1996)
- 15) 野村隆哉：Bamb. J., No. 5, 92-107 (1987)
- 16) T. AOKI : *ibid.*, No. 4, 2-21 (1987)

- 17) Y. KOZUKA, M. MONTILEL : *ibid.*, No. 8, 84-91 (1990)
- 18) 腰 希申他4名：中国主要竹材微觀構造，大連出版社，p. 1-5 (1992)
- 19) 雲南森林編写委員会：雲南森林，雲南科技出版社，p. 318-334 (1984)
- 20) 川井秀一：木材工業，**49** (8)，354-360 (1994)
- 21) 張 敏：京都大学修士論文「複合ファイバーによる木質ボードの製造とその性質」，p. 1-3，(1994)
- 22) 古川郁夫：“針葉樹材の縦引張破壊のフラクトグラフィ的研究”，鳥取大学農学部演習林報告，No. 12，p. 7-11 (1980)
- 23) 林 毅：“複合材料工学”，日科技連，p. 963-972 (1971)
- 24) 張 敏，岸本芳昌，川井秀一，佐々木光：第43回日本木材学会大会要旨集，盛岡，p. 431 (1993)
- 25) 繊維学会：“図説繊維の形態”，朝倉書店，p. 78-184 (1982)
- 26) 東北林学院：繊維板製造学，中国林業出版社，p. 4-20 (1981)
- 27) 機能紙研究会：“化繊紙から機能紙へ”，ユニ出版株式会社，p. 49-809 (1988)
- 28) 繊維学会：“繊維物理学”，丸善(株)，p. 1-204 (1962)
- 29) 桜田一郎：“繊維，放射線，高分子”，高分子化学刊行会，p. 57-67 (1961)
- 30) 張 敏，岸本芳昌，川井秀一，佐々木光：木材研究・資料，No. 31，32-39 (1994)
- 31) 井伊谷鋼一：“集塵装置”(新版)，日刊工業新聞社，p. 128-139 (1963)
- 32) 川井秀一，佐々木光：木材学会誌，**35** (3)，218-226 (1989)
- 33) 藤田彰介，佐野弥三郎，岩下 睦：“ファイバーボード，パーティクルボードの加工”，森北出版，p. 1-22 (1970)
- 34) 北原覚一，丸山憲一郎：“ファイバーボード，パーティクルボード”，森北出版，p. 152-170 (1962)
- 35) 日本材料学会木質材料部門委員会：“木材工学辞典”，工業出版，p. 751-774 (1981)
- 36) 林業試験場編：“木材工業ハンドブック”，丸善(株)，p. 910-919 (1958)
- 37) 島地 謙，須藤彰司，原田 浩：“木材の組織”，森北出版，p. 241-245 (1976)
- 38) 北京林学院：“木材学”，中国林業出版社，p. 274-285 (1983)
- 39) 山田 正：“木質環境の科学”，海青社，p. 54-56 (1987)
- 40) 森田慎一：*Bamboo J.*, No. 3, 77-81 (1985)
- 41) K. -L. YE : *Wood Ind.*, **7** (2), 33-36 (1993)
- 42) 張 齋生，楊 萍，沢田 豊，川井秀一：木材工業，**45** (1)，16-20 (1990)
- 43) 井上雅文：APAST, No. 17, 5-9 (1995)
- 44) 三輪義保他4名：第45回日本木材学会大会要旨集，東京，p. 241 (1995)
- 45) 井上雅文他5名：同上，東京，p. 243 (1995)
- 46) 関野 登，井上雅文：第46回日本木材学会大会要旨集，熊本，p. 253 (1996)
- 47) 門河倫子，藤井賢信，西尾治郎，井上雅文：第43回日本木材学会大会要旨集，盛岡，p. 433 (1993)
- 48) 岡本広志他4名：木材学会誌，**40** (4)，380-389 (1994)
- 49) 張 敏他4名：第46回日本木材学会大会要旨集，熊本，p. 487 (1996)
- 50) 張 敏，川井秀一，楊 萍，本田貴久：木材学会誌，**43** (4)，310-317 (1997)
- 51) G. Q. CHEN : The Study of Bamboo-Wood Composite Material, Doctor's Thesis, Nanjing For. Univ., p. 1-3 (1990)
- 52) L. F. MA : *J. of Zhejiang For. Coll.*, **11** (3), 65-71 (1987)
- 53) 張 敏他4名：木材学会誌，**42** (11)，1082-1089 (1996)
- 54) 井上雅文，門川倫子，西尾治郎：木材研究・資料，No. 29，54-61 (1993)
- 55) 今村祐嗣，西本孝一：同上，No. 18，162 (1983)
- 56) 今村祐嗣：木材工業，**42** (7)，306-312 (1987)
- 57) 成 俊卿：“木材学”，中国林業出版社，p. 795-797 (1985)
- 58) 日本木材保存協会：“木材保存学”，(株)文教出版，p. 54-57 (1982)
- 59) 吉村 剛：木材研究・資料，No. 29，39-53 (1993)
- 60) 張 敏，川井秀一，佐々木光：日本木材学会四十周年記念大会(第45回大会)発表要旨集，東京，p. 221 (1995)
- 61) 井上雅文，則元 京：木材研究・資料，No. 27，31-41 (1991)
- 62) D.-Y. YUAN : *Wood Ind.*, **4** (3), 40-45 (1990)
- 63) H. E. HSU : *Wood Sci. & Technol.*, No. 22, 281-289 (1988)

- 64) 広瀬六郎：木材工業, **35** (1), 105-110 (1980)
- 65) K. FUKUDA, M. VICENTE, T. HARAGUTHI : *Mokuzai Gakaishi*, **35** (10), 938-943 (1989)
- 66) 今村祐嗣, 西本孝一, 元木英生：木材学会誌, **32** (10), 842-845 (1986)
- 67) 土居修一：日本木材学会四十周年記念大会 (第45回大会) 発表要旨集, 東京, p. 462 (1995)
- 68) T. -Y. ,WANG, Q. LI, H. -L. PAN : *Wood Ind.*, **5** (1), 6-10 (1991)
- 69) T. -Y. CHEN, Y. -S. WANG : *J. of For. Sci.* , **14** (2), 39-60 (1981)
- 70) 張 敏, 川井秀一, 佐々木光：第45回日本木材学会大会要旨集, 東京, p. 220 (1995)
- 71) Yin S.-Z. : *J. of Nanjing For. Univ.*, **11** (3), 65-71 (1987)
- 72) *ibid.*, **12** (4), 13-20 (1988)
- 73) *ibid.*, **13** (1), 32-38 (1989)
- 74) *ibid.*, **13** (2), 13-18 (1989)
- 75) G. -Q. CHEN, : *J. of Bamboo. Res.*, **11** (1), 59-66 (1992)
- 76) 馬 靈飛他5名：木材学会誌, **42** (1), 34-42 (1996)
- 77) 澤田 豊他4名：第38回日本木材学会大会要旨集, 旭川, P. 188 (1988)
- 78) M. ZHANG, S. KAWAI, H. SASAKI : *Mokuzai Gakaishi*, **41** (10), 903-910 (1995)
- 79) 農林水産省林業試験場：“改訂3版 木材工業ハンドブック”, 丸善株式会社, P.627-630 (1982)
- 80) 張 敏, 川井秀一, 佐々木光：木材学会誌, **40** (8), 816-823 (1994)
- 81) 王 潜, 佐々木光, 楊 萍, 川井秀一：同上, **38** (10), 914-922 (1992)
- 82) 須田久美, 川井秀一, 佐々木光：同上, **33** (5), 384-392 (1987)
- 83) J. PABLO, T. SAKUNO, Y. TAKAMURA : Studies on the Production and Properties of Board from Sugar Cane Rind, '96 日本MRSシンポジウムD「植物系新材料の最近の進歩」研究発表要旨集, 千葉, p. 137-140 (1996)
- 84) 浅野猪久夫：木材の事典, 朝倉書店, p. 154-166 (1991)
- 85) 中戸莞二：木材工学, 養賢堂, p. 141-153 (1985)
- 86) 井上雅文, 則 元京, 大塚康史, 山田 正：木材学会誌, **37** (3), 234-240 (1991)
- 87) 楊 萍, 張 敏, 川井秀一：第46回日本木材学会大会要旨集, 熊本, p. 543 (1996)
- 88) チモシヨンコ：材料力学 (上巻), 東京図書株式会社, p. 165-169 (1984)
- 89) 董 玉庫他4名：木材学会誌, **40** (5), 481-490 (1994)