

波形単板構造体の圧縮強度

著者	小幡谷 英一, 柴沼 菜穂, 阿部 眞理, 白石 照美, 足立 幸司, 山内 秀文
雑誌名	木材学会誌
巻	61
号	4
ページ	268-273
発行年	2015
権利	日本木材学会
URL	http://hdl.handle.net/2241/00129257

波形単板構造体の圧縮強度^{*1}

小幡谷 英一^{*2}、柴沼 菜穂^{*2}、阿部 眞理^{*3}、白石 照美^{*3}、足立 幸司^{*4}、山内 秀文^{*4}

5

Compressive strength of corrugated veneer structures ^{*1}

Eiichi OBATAYA ^{*2}, Naho SHIBANUMA ^{*2}, Mari ABE ^{*3}, Terumi SHIRAISHI ^{*3}, Koji

ADACHI and Hidefumi YAMAUCHI ^{*4}

10

15

20 ランニングタイトル：波形単板構造体の圧縮強度

*1 Received, 2014. 本研究の一部は第 60 回日本木材学会大会（2010 年 3 月，宮崎）において報告した。

25 *2 筑波大学生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan

*3 拓殖大学工学部 Faculty of Engineering, Takusyoku University, Tokyo 193-0985, Japan

*4 秋田県立大学木材高度加工研究所 Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University, Noshiro 016-0876, Japan

Corresponding author : E.Obataya (obataya.eiichi.fu@u.tsukuba.ac.jp)

30

Abstract

Thin spruce veneer was corrugated to make wooden honeycomb elements for the lightweight core of sandwich panels. Wood honeycomb core (VHC) is a honeycomb element in which the fiber direction of the veneer is aligned in the thickness direction of the panel. Corrugated veneer core (CVC) is similar to corrugated cardboard, in which the fiber direction of the veneer is aligned in the direction of the wave. The cores were put between two sheets of plywoods to make sandwich panels and their compressive strength (σ_c) and compressive Young's modulus (E_c) in the thickness direction were measured. The density (ρ_c) of VHC and CVC varied from 10 to 130 kg/m³. The specific strength (σ_c/ρ_c) of VHC was 7 to 20 times greater than that of paper honeycomb. The ρ_c and E_c of CVC were almost the same as those of paper honeycomb while its rupture energy was about 3 times greater than that of paper honeycomb. Finer wave resulted in greater ρ_c and σ_c of CVC, and greater σ_c/ρ_c was achieved by smaller curvature with thicker veneer. Plural veneers could be glued during corrugation, but such a plied-CVC showed smaller σ_c/ρ_c than mono-layered CVC probably because of failure in gluing.

15

Keywords: Corrugated veneer; honeycomb; lightweight panel; compressive strength.

要 旨

シトカスプルス単板を波形に加工することにより、軽量パネルのコアとして利用可能なハニカム構造体を作製し、パネル厚さ方向の圧縮強度 (σ_c) および圧縮ヤング率 (E_c) を測定した。得られたコアの密度 (ρ_c) は 10~130 kg/m³ であった。単板の繊維方向をパネルの厚さ方向に向けたハニカム型波形単板コア (VHC) の比圧縮強度 (σ_c/ρ_c) は紙製ハニカムのその約 7~20 倍であった。単板の繊維方向を波の進行方向に向けた段ボール型単板コア (CVC) の σ_c や E_c は紙ハニカムのそれらと同程度かやや低かったが、降伏に至るまでの歪エネルギーは紙ハニカムのその約 3 倍であった。CVC の ρ_c や σ_c は波が緻密なほど高かったが、薄い単板を用いて緻密な波形を作るより、厚い単板で粗い波形を作る方が σ_c/ρ_c が高かった。複数の単板を積層して成形した場合、欠膠によると思われる σ_c の低下が認められた。

(386 字)

1. 緒 言

軽量化と単純化は近年の材料開発における重要な課題である。材料の軽量化は省エネにつながり、材料の単純化は使用後の再生利用を容易にする。木材は元来軽い材料であるが、それをさらに軽量化した材料の一つが木質軽量パネルである。木質軽量パネルは、紙ハニカムや木枠などの軽い芯材（コア）を、合板や繊維版などの表板（フェース）で挟んだサンドイッチパネルの一種で、壁材や家具材として既に幅広く利用されている。ただ、非木質材料をコアに用いると、使用後の再生利用が難しくなる。木材のみからなるパネルとしては、木枠をコアに用いたフラッシュパネルがあるが、圧縮強度の低い中空部分を補強するため、非木質材料が挿入されていることが多い。

10 単一の素材で構成され、圧縮強度にむらのない木質軽量パネルを作るためには、木材や木質系材料を用いて、軽量かつ緻密なコアを作る必要がある。過去には、ストランドやパーティクルを波形に成形した波形ストランドコア¹⁾や波形パーティクルコア²⁾が提案されている。一方、単板を用いた軽量コアについては、宮下ら³⁾による提案があるものの、その成形方法や実用性能について詳しく検討された例はない。

15 木質軽量パネルに限らず、サンドイッチパネルの最大の特徴は、高い比曲げ剛性である。パネルの曲げ剛性はフェースの剛性、フェース間の間隔、およびコアのせん断剛性によって決まるが、局所的な曲げ荷重が加わる場合には、コアの圧縮強度も重要である。一般に軽量コアは圧縮強度が低いため、特にフェースが薄い場合、荷重点直下でコアが圧壊することがある。コアの圧壊によってフェース間の間隔が縮小すると、その部分の曲げ剛性が
20 低下し、フェースの剛性が活かされないまま、パネルが容易に屈曲する。したがって、フェースの剛性を最大限に生かすためには、コアの圧縮強度が十分に高くなければならない。

そこで本研究では、木材のみを用いて、厚さ方向の圧縮に強い軽量パネル用のコアを作ることを試みた。具体的には、単板を波形に成型した「波形単板コア」を作製し、波の形状や単板の厚さ、単板の積層がその圧縮強度に与える影響を検討した。

25

2. 実 験

2.1 単板の波形加工

今回作製した2種類の波形単板コアの構造を Fig.1 に示す。厳密にはいずれもハニカム構造体であるが、本論文では便宜上、単板の繊維方向（L 方向）をパネルの厚さ方向に向けたものをハニカム型単板コア構造体（Veneer honeycomb core, VHC）、単板の L 方向を波の進行方向に向けたものを段ボール型単板コア構造体（Corrugated veneer core, CVC）と呼ぶことにする。

コアの材料として、気乾密度 370 kg/m^3 のシトカスプルース（*Picea sitchensis*）追い柱材をロータリースライサーで切削して作製した 0.3、0.5 mm 厚の単板および 0.8 mm 厚のスライズ単板を用いた。これらの単板を常温水中に 12 時間以上浸漬して湿潤させた後、梯子状の型枠に押し込んで波形に成形した。さらに、成形した単板を型枠ごと 40°C のオーブン中に入れ、一昼夜乾燥することにより、波形形状を一時的に固定した。CVC については、1 枚の単板を成形したものに加え、接着剤を塗布した単板を 2~4 枚重ねて成形した波形積層コアも作製し、実験に供した。VHC については、波型単板単体の剛性が低く、そのままでは積層できないため、型枠に入った状態で片面に平らな単板を貼付し、それを複数枚積層してブロック状にした後、ブロックを 10 mm 厚に鋸断して板状の試料を作製した。

Table 1 に波の形状を示す。最も緻密な SS サイズは一般的な梱包用段ボールに近い形状であり、S、M、L サイズは、波形が同じで寸法だけが異なる。比較のために、梱包用の紙ハニカム（PH）および紙製段ボール（CP）についても測定を行った。

2.2 パネルの作製

100×200 mm 角の波形単板コアの両面に、ヘラを用いて酢酸ビニル樹脂接着剤（コニシ社製 CH-18）を塗布し、3 mm 厚の 3 プライ合板を貼り付けた後、0.5~1 kPa で圧縮し、 40°C のオーブン中で接着剤を乾燥硬化させた。CVC についてはそれ自体の圧縮強度が低いため、成形時の型枠に入れた状態で合板を貼付、圧縮し、接着剤が乾燥硬化した後に型枠を外した。これらのパネルを Table 1 に示す寸法に裁断し、 25°C 、相対湿度 60%RH の雰囲気中で

1 週間以上調湿した後、次に述べる圧縮試験を行った。CVC については、波のサイズに応じて、1 つの試料に少なくとも 3 つの波が含まれるように裁断した。なお、通常、木質材料の試験は 20°C、65%RH の雰囲気中に行なうべきであるが、今回は設備の都合上、25°C、60%RH の雰囲気中で調湿および試験を行った。この雰囲気中におけるスプルース材試料の
5 平衡含水率は 10.5~11.3%（平均で 10.8%）であった。

2.3 パネル厚さ方向の圧縮試験

25°C、相対湿度 60%RH の恒温恒湿室中で、パネル厚さ方向の全圧縮試験を行った。荷重速度は 2 mm/min であった。応力-歪曲線における初期の直線部分の傾きをパネルの圧縮
10 ヤング率 (E_c) とし、最初の降伏点における応力を圧縮強度 (σ_c) とした。

3. 結果および考察

3.1 波形単板コアの密度

今回作製した種々のコア構造体について、気乾密度 (ρ_c) の平均値と標準偏差を Table 1
15 に示す。同一構造の試料間で ρ_c のばらつきはほとんどなかったが、波が緻密なほど、単板が厚いほど ρ_c が大きかった。また、波の形状が同じ場合、VHC の ρ_c が CVC のそれより大きかった。これは、VHC を作製する際、波形形状を保持するために平らな単板を挿入したためである。

3.2 ハニカム型単板コア (VHC) の圧縮特性

20 VHC の σ_c 、 ρ_c 、 E_c の平均値と標準偏差を Table 1 に示す。また、VHC の σ_c と ρ_c の関係を Fig.2 に、 E_c と ρ_c の関係を Fig.3 に示す。 σ_c と E_c の密度依存性が類似していたことから、以下では主に σ_c について述べる。VHC の σ_c は ρ_c の約 1 乗に比例し、波が緻密なほど ρ_c 、 σ_c が大きくなった。また、同程度の ρ_c で比較すると、0.3 mm 厚の単板を用いたものに比べて、
25 0.8 mm 厚の単板を用いたものの σ_c が高かった。これは、ハニカムの形状が同じであればハニカム壁が厚いほど座屈しにくいためと考えられる。VHC の比圧縮強度 (σ_c/ρ_c) は、PH

のそのの 7~20 倍、CP のそのの 30~80 倍であった。このような高い比圧縮強度は、剛直な木材繊維方向が厚さ方向に向けられていることによる。ただ、VHC の σ_c/ρ_c は木材繊維方向のそれに比べると 1/10 程度と低く、木材放射方向のそれと同程度であった。すなわち、VHC においては、木材繊維方向の本来の強度が活かされていない。これは単板表面の裏割れによるものと考えられる。今回用いた単板は、合板等に用いられる一般的なロータリー単板に比べてかなり薄く、目視できるような割れは認められなかったが、その表面には微細な割れが発生していると考えられる。割れが生じた単板表面は、コアの密度には寄与するが圧縮応力の分担には寄与しない。また、その部分が欠点となって単板が座屈しやすくなるため、比圧縮強度が低下すると考えられる。

10 VHC は、成形時に単板が割れやすいという難点があるものの、単板を曲げるのに大きな力を必要としないため、成形自体は比較的容易である。また、既存の紙ハニカムに比べてはるかに圧縮に強く、木材と同程度の耐湿性、耐久性が期待できること、木質系のフェースと組み合わせることで再利用が容易な木質軽量パネルを作れることなどから、軽量家具等への応用が期待される。

15 3.2 段ボール型単板コア (CVC) の圧縮特性

CVC の σ_c 、 ρ_c 、 E_c の平均値と標準偏差を Table 1 に示す。また、CVC の σ_c および E_c と ρ_c の関係を Fig.2 および Fig.3 にそれぞれ示してある。VHC と同様、 ρ_c が大きいほど σ_c 、 E_c が高かったが、同程度の ρ_c で比較すると、CVC の σ_c 、 E_c は VHC のそれらのおよそ 1/10 であった。CVC の σ_c や E_c が VHC のそれらに比べて低かったのは、単板の繊維方向が荷重方向から約 45°傾いているためである。一方、CVC は同じ構造の CP に比べて軽量、高強度で、その σ_c/ρ_c は CP の 1.1~5.8 倍に達した。

25 波のサイズが異なる CVC の σ_c と ρ_c の関係を Fig.4 に示す。総じて、波が緻密なほど ρ_c や σ_c が大きく、波のサイズが同じであれば単板が厚いほど ρ_c や σ_c が大きかった。ただ、同程度の密度で比較すると、薄い単板で緻密な波を作るより、厚い単板で粗い波を作る方が強度が高くなった。たとえば、0.8 mm 厚の単板を使った M サイズの CVC (Fig.4 中の□) と

0.3 mm厚の単板を使ったSSサイズのCVC(Fig.4中の◇)を比べると、 ρ_c は同程度(40 kg/m³)であったが、前者の方が σ_c が大きかった。この理由として、薄い単板ほど表面割れの影響が大きいこと、波が緻密なほど屈曲部分が損傷しやすいことなどが考えられる。

5 段ボールタイプのハニカム構造体の場合、厚さ方向の圧縮特性はハニカム壁の曲げ剛性によって決まる。したがって、CVCの比強度を高めるためには厚い単板を用いるのが合理的である。しかし、厚い単板の繊維方向を大きく曲げるのは容易ではない。そこで、比較的曲げやすい薄い単板を複数枚積層することで、ハニカム壁の曲げ剛性を高められないかと考えた。Fig.5に、積層成形したCVCの σ_c を単層CVCのそれと比較したものを示す。Mサイズ、Lサイズいずれの場合にも積層数とともに σ_c が増加したが、同時に ρ_c も増加した。

10 結果的に、同じ ρ_c で比較すると、積層CVC(Fig.5中の■▲)の σ_c が単層CVC(Fig.5中の□△)のそれより低くなった。この原因の一つは単板間の接着不良と考えられる。今回は、重ねた単板を梯子状の型枠に押し込むことで積層CVCを作製したが、この方法では、型枠に接触しない部分(平面に近い部分)を十分に圧縮することができない。そのため、各所に生じた欠膠によって、 σ_c が低下したと考えられる。また、厚さ0.3 mmの薄い単板の場合、

15 接着剤の塗布による ρ_c の増加も無視できない。

重ねた単板を確実に圧縮するためには、単板の全面に密着するような型が必要である。しかし、全面に密着する型を用いると、接着剤を乾燥させることができない。波形単板を積層する際には、溶剤の揮発を必要としない熱硬化性の接着剤や、熱可塑性の樹脂シートを用いるのが合理的と考えられる。積層して成形したCVCはドライグセットによって成

20 形した単層CVCに比べて形状が安定しており、その後の加工がしやすいなど多くの利点があるため、その成形方法について今後さらに検討する価値がある。

Fig.6に、CVCとPHの圧縮応力-歪線図の一例を示す。ハニカム軸方向で力を支えるPHの場合、5%程度の歪でハニカム壁が座屈し、その後は速やかに応力が低下した。一方、単板がたわむことによって力を支えるCVCの場合、歪が15%を超えるまで降伏せず、降伏

25 点を越えた後も大きな応力が維持された。Fig.6に示したCVCの降伏歪エネルギー(降伏

点までの応力-歪線図の下部の面積)は、PHのその2.9倍であった。 σ_c に関して言えば、CVCの性能はPHと同程度であるが、降伏に要するエネルギーが大きいと言う意味では、CVCの方がPHよりつぶれにくいと言える。

今回の実験に用いた試料は、梯子状の型を用いて手作業で成形したものであるが、洗濯
5 板状のゴム板とロールプレスを用いれば連続成形も可能である。その一例を Fig.7 に示す。
これは、単板を梯子状の型と柔軟な型の間挟み、ロールプレスに挿入するもので、送り
出された単板を型枠ごと乾燥することにより波形単板が得られる。CVCは、VHCと異なり、
波の方向に容易に屈曲するため、曲面を有する軽量パネルのコアとして利用できる。また、
特徴的な断面を活かした意匠性の高い家具などへの応用も期待される。

10

4. 結 論

単板を波形に成形した「波形単板コア」について、繊維の向きや波のサイズが厚さ方向
の圧縮特性に与える影響を明らかにした。得られた結果は以下のように要約される。

- 1) 単板の繊維方向を厚さ方向に向けたハニカム型波形単板コア (VHC) は優れた圧縮特
15 性を示し、その比圧縮強度は紙ハニカムのその7~20倍であった。
- 2) 単板の繊維方向を波の進行方向に向けた段ボール型単板コア (CVC) の圧縮強度や圧
縮ヤング率は紙ハニカムと同程度かやや低かったが、同程度の密度の紙ハニカムに比
べて降伏に至るまでの歪エネルギーが大きく、つぶれにくいコアであると推察された。
- 3) CVCの場合、薄い単板を用いて緻密な波形を作るより、厚い単板で粗い波形を作る方
20 が圧縮強度が高かった。複数の単板を積層して成形した場合、欠膠によると思われる
強度の低下が認められた。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (課題番号: 23580224) の助成を受けて行われた。記
25 して謝意を表す。

文 献

- 1) Yadama, V.: Sustainable Lightweight Wood-Strand Panels for Building Construction. Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe – Timber Committee, Geneva, Switzerland, 5 2010, pp.SD1-SD7.
- 2) 林 宏次、近江正陽、富永洋司、伏谷賢美、福田清春：単板強化波形パーティクルボードの製造と曲げ強さに及ぼす密度の影響．木材学会誌 **47**(5), 420-430(2001).
- 3) 宮下健児、阿部眞理、白石照美：スギ材の有効利用の現状と家具部材への加工方法の提案．日本デザイン学会第 55 回春季研究発表大会概要集, 2008, p.D02.

Table 1. Dimensions, densities and compressive properties of materials tested.

	t_v ^{a)} (mm)	Size	D ^{a)} (mm)	λ ^{a)} (mm)	$a \times b$ ^{b)} (mm)	n ^{c)}	ρ_c (kg/m ³)	σ_c (MPa)	E_c (MPa)	
Veneer honeycomb core (VHC)	0.3	SS	3	10	30×30	15	80.0 (3.9)	3.1 (0.2)	84 (14)	
		S	4	12	30×30	15	63.0 (3.2)	2.1 (0.1)	60 (18)	
		M	8	24	30×30	15	34.0 (1.6)	1.1 (0.1)	18 (7)	
	0.8	S	4	12	30×30	15	129 (4)	11 (1)	581 (13)	
		M	8	24	30×30	15	93.0 (2.8)	6.9 (0.6)	308 (13)	
		L	12	36	30×30	15	65.3 (2.5)	4.5 (0.6)	169 (7)	
Corrugated veneer core (CVC)	0.3	SS	3	10	35×70	11	40.3 (2.3)	0.26 (0.04)	1.8 (0.3)	
		S	4	12	35×70	16	34.1 (1.7)	0.18 (0.03)	2.1 (0.4)	
		M	8	24	60×70	10	17.6 (2.2)	0.046 (0.011)	0.87 (0.25)	
		L	12	36	60×70	10	12.7 (1.3)	0.015 (0.001)	0.36 (0.1)	
	0.5	M	8	24	35×70	10	26.9 (1.8)	0.14 (0.02)	2.5 (0.5)	
		L	12	36	35×70	10	17.7 (1.6)	0.065 (0.006)	1.84 (0.3)	
		0.8	M	8	24	25×75	12	40.2 (2.4)	0.34 (0.03)	3.4 (0.5)
			L	12	36	25×75	12	27.4 (1.8)	0.17 (0.04)	2.6 (0.4)
Paper honeycomb (PH)				30×30	5	42.9 (0.5)	0.19 (0.02)	6.7 (1.6)		
Corrugated paper (CP)				30×30	5	65.2 (0.8)	0.073 (0.002)	1.7 (0.4)		

a): Thickness of veneer (t_v), diameter of mold (D) and wavelength (λ) are illustrated in Fig.1., b):

width of samples, c) number of samples tested. Values in parenthesis indicate standard deviations.

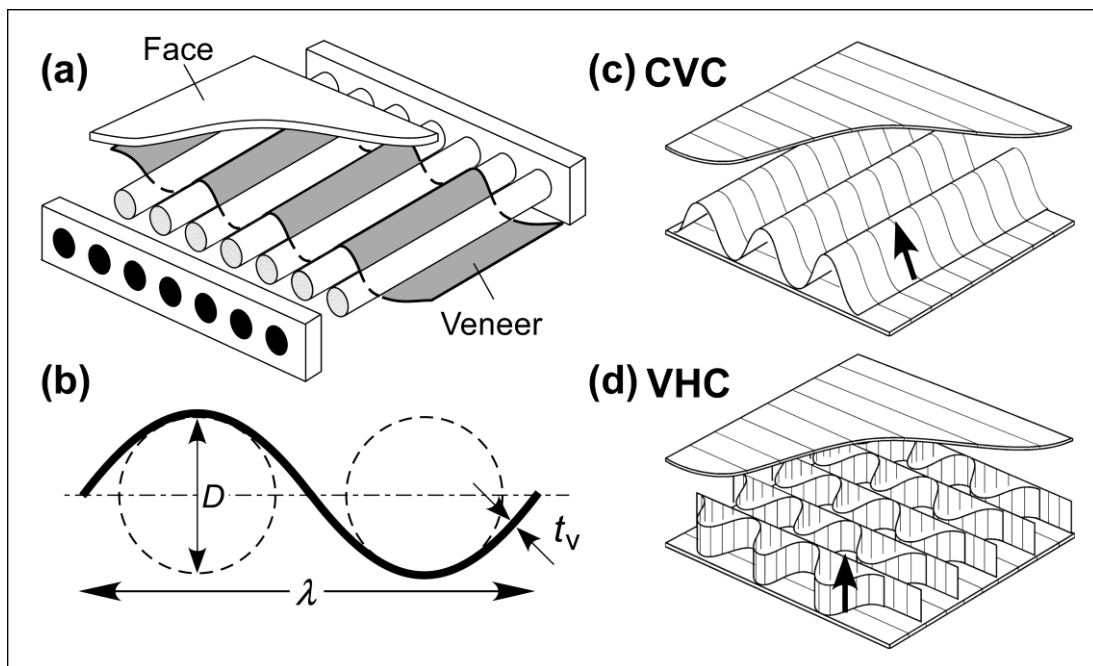


Fig.1. Corrugation using a ladder-like metal frame (a), shape of corrugated veneer (b), structure of corrugated veneer core (c) and of veneer honeycomb core (d).

Note Arrows in (c) and (d) indicate the fiber direction of the veneer.

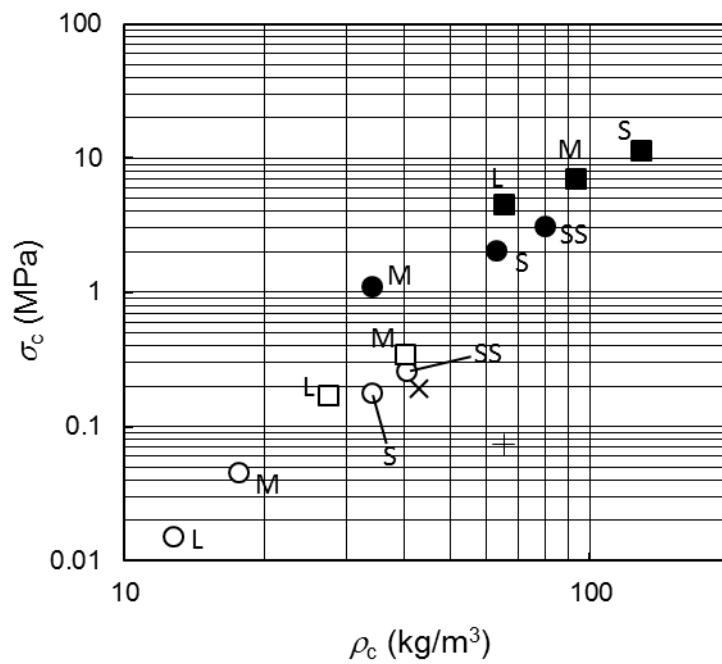


Fig.2. Average values of compressive strength (σ_c) of materials tested as a function of their densities (ρ_c).

Legend ×: Paper honeycomb core (PH), +: corrugated cardboard (CP), ●■: veneer honeycomb core (VHC), ○□: corrugated veneer core (CVC), ●○: $t_v = 0.3$ mm, □■: $t_v = 0.8$ mm.

Note For abbreviations beside plots, see Fig.1 and Table 1.

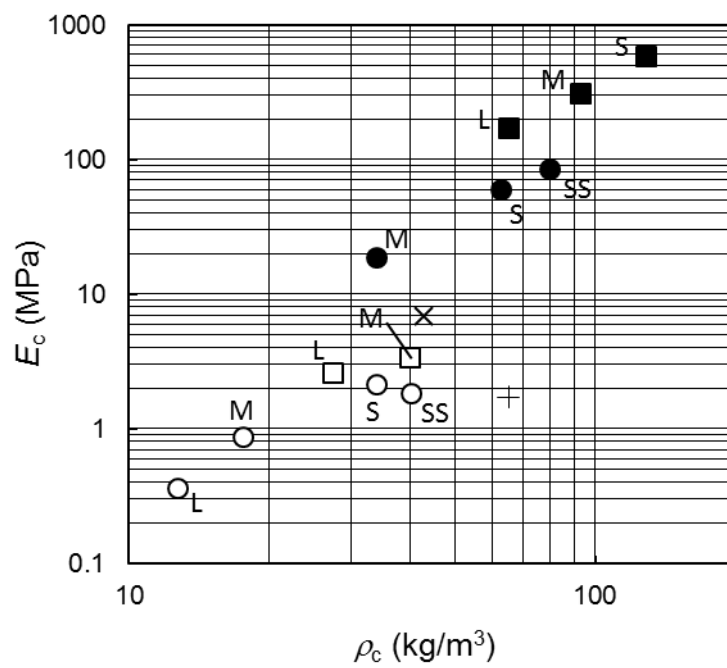


Fig.3. Average values of compressive Young's modulus (E_c) of materials tested plotted against their densities (ρ_c).

Legend See Fig.2.

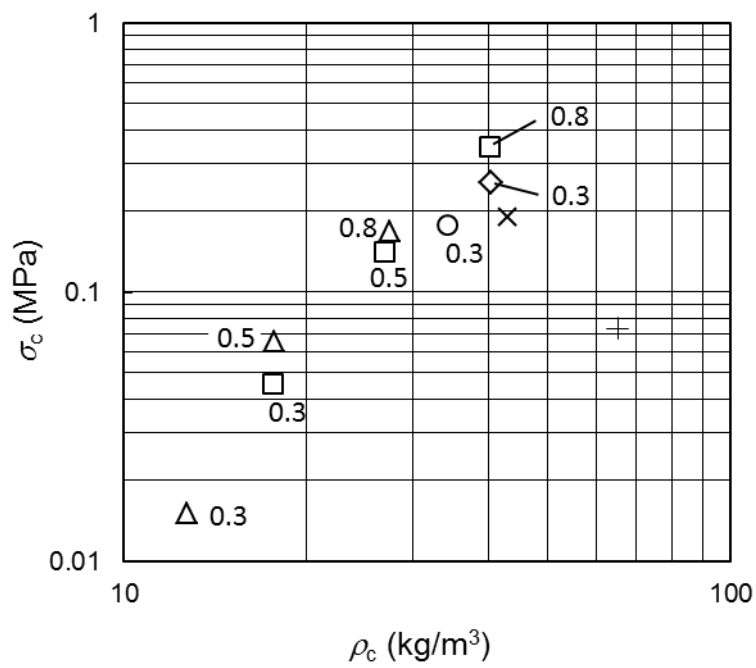


Fig.4. Average values of compressive strength (σ_c) of PH, CP and CVCs as a function of their densities (ρ_c).

Legend ×: PH, +: CP, ◇: CVC-SS, O: CVC-S, □: CVC-M, △: CVC-L.

Note For abbreviations beside plots, see Fig.1 and Table 1. Values beside plots indicate the thickness of veneer (t_v , mm).

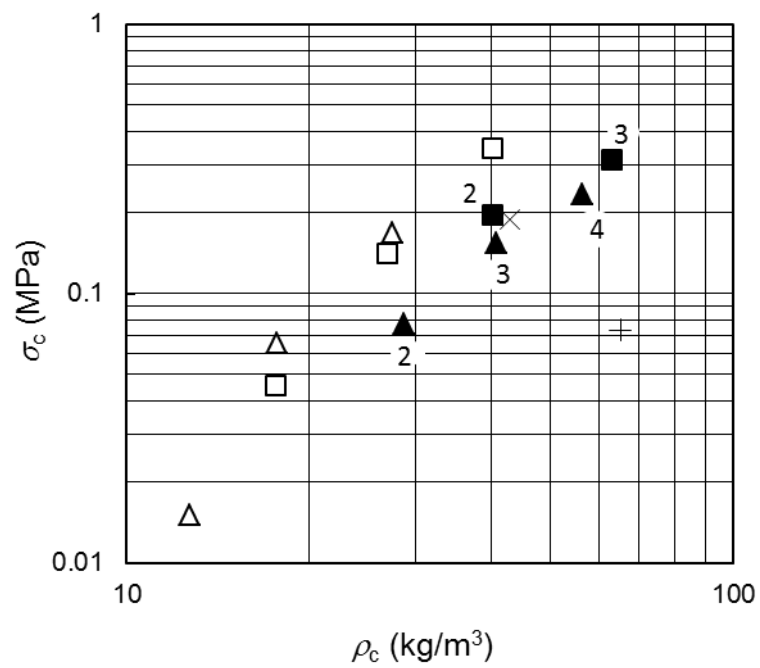


Fig.5. Compressive strength (σ_c) of PH, CP and multi-layered CVCs as a function of core densities (ρ_c).

Legend \times : PH, $+$: CP, \square : mono-layered CVC-M, \triangle : mono-layered CVC-L, \blacksquare : multi-layered CVC-M, \blacktriangle : multi-layered CVC-L.

Note For abbreviations beside plots, see Fig.1 and Table 1. Numbers beside plots indicate the number of layers.

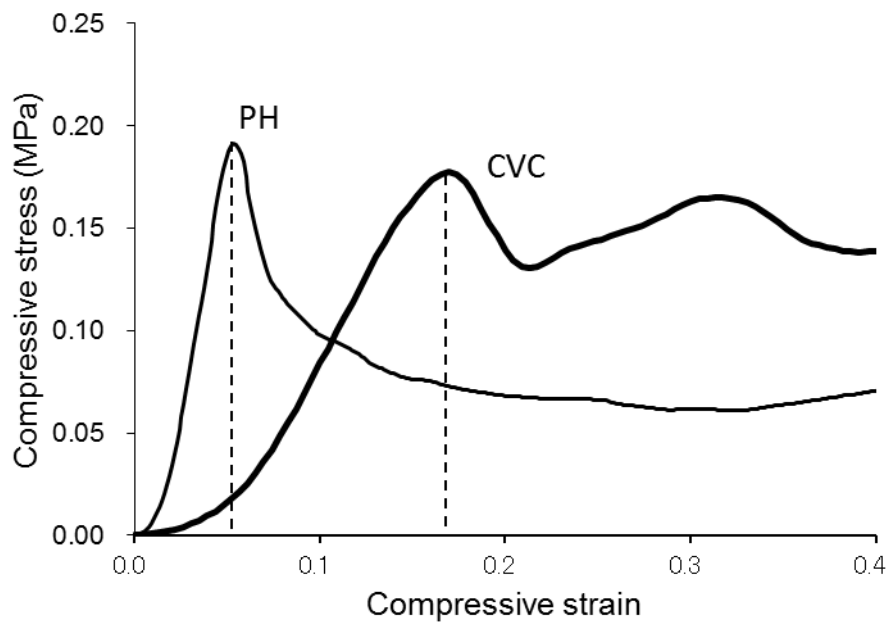


Fig.6. Compressive stress-strain curves of PH ($\rho_c=43 \text{ kg/m}^3$) and CVC-S ($\rho_c=34 \text{ kg/m}^3$).

Note For abbreviations, see Fig.1 and Table 1.

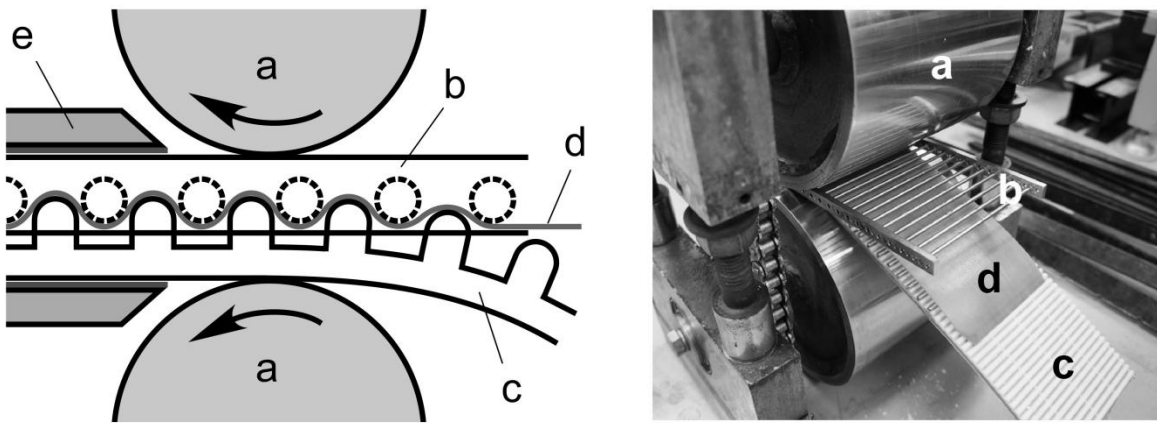


Fig.7. Continuous corrugation of veneer using a double roll press.

Legend **a:** Rolls, **b:** metal ladder, **c:** wavy rubber reinforced with metal belt, **d:** veneer, **e:** guiding frame.

Fig.1. Corrugation using a ladder-like metal frame (a), shape of corrugated veneer (b), structure of corrugated veneer core (c) and of veneer honeycomb core (d).
Note Arrows in (c) and (d) indicate the fiber direction of the veneer.

Fig.2. Average values of compressive strength (σ_c) of materials tested as a function of their densities (ρ_c).
Legend \times : Paper honeycomb core (PH), +: corrugated cardboard (CP), \bullet \blacksquare : veneer honeycomb core (VHC), \circ \square : corrugated veneer core (CVC), \bullet \circ : $t_v = 0.3$ mm, \square \blacksquare : $t_v = 0.8$ mm.
Note For abbreviations beside plots, see Fig.1 and Table 1.

Fig.3. Average values of compressive Young's modulus (E_c) of materials tested plotted against their densities (ρ_c).
Legend See Fig.2.

Fig.4. Average values of compressive strength (σ_c) of PH, CP and CVCs as a function of their densities (ρ_c).
Legend \times : PH, +: CP, \diamond : CVC-SS, \circ : CVC-S, \square : CVC-M, \triangle : CVC-L.
Note For abbreviations beside plots, see Fig.1 and Table 1. Numbers beside plots indicate the number of layers.

Fig.5. Compressive strength (σ_c) of PH, CP and multi-layered CVCs as a function of core densities (ρ_c).
Legend \times : PH, +: CP, \square : mono-layered CVC-M, \triangle : mono-layered CVC-L, \blacksquare : multi-layered CVC-M, \blacktriangle : multi-layered CVC-L.
Note For abbreviations beside plots, see Fig.1 and Table 1. Numbers beside plots indicate the number of layers.

Fig.6. Compressive stress-strain curves of PH ($\rho_c=43$ kg/m³) and CVC-S ($\rho_c=34$ kg/m³).
Note For abbreviations, see Fig.1 and Table 1.

Fig.7. Continuous corrugation of veneer using a double roll press.
Legend **a**: Rolls, **b**: metal ladder, **c**: wavy rubber reinforced with metal belt, **d**: veneer, **e**: guiding frame.