<研究論文>

(受理:平成20年6月30日)

スギフレークチップを表層に用いた3層パーティクルボードの圧縮比および細孔構造が材質に及ぼす影響

瓦田 研介*・鈴木 吉助**・斉藤 吉之**・飯田 孝彦*・田村 靖夫***

要 旨

軽量・軟質のスギ間伐材から調製したフレークチップを表層に用いて表層圧縮比の異なる3層パーティクルボードを調製し、表層圧縮比および細孔構造が材質に及ぼす影響について調べた。その結果、目標ボード密度や表層比率が大きくなると表層圧縮比も高くなるが、芯層圧縮比はあまり変化しなかったことから、表層に配置された低密度のスギフレークチップは熱圧縮時に負荷された圧力を速やかに緩和していることが推察された。また、表層圧縮比が高くなると曲げ強さ、湿潤時曲げ強さおよび吸水厚さ膨張率が大きくなることがわかった。水銀圧入法によりボード表層の細孔分布を調べた結果、熱圧縮時に高い圧縮力がチップに負荷されると仮道管が変形して負荷された圧力を緩和するが、細孔は完全には閉塞せず、 $1\mu\text{m}$ 以下の細孔が開口しているため圧縮比が高くなっても十分吸水でき、吸水厚さ膨張率の原因であるスプリングバックを引き起こしていると考えられた。

1. 緒 言

代表的な国産針葉樹であるスギは軽量・軟質であるため、横方向に圧縮大変形を与えて密度を増大させると強度特性が向上することが知られている^{1,2)}。特にスギの表面物性を向上させる方法として横圧縮とフェノール樹脂初期縮合物の含浸による表面層圧密化処理も開発されている^{3~5)}。また、圧縮処理したスギ単板をLVL(単板積層材)の表層に用いると、曲げ強さ等が向上することが報告されている⁶⁾。

一方、パーティクルボード(以下PB)の材質には、チップ形状^{7~9)}やマット含水率¹⁰⁾に加えて圧縮比(ボード密度/原料チップ密度)が強く影響することがわかっており、単層PBの検討結果も報告されている^{11~13)}。ところが、スギから調製したフレークチップの軽量・軟質な特徴を生かしてPB表層を高度に圧密化してボード物性の向上を目指

した研究例は少ない。さらに、3層PBの表層は熱圧縮時に原料チップの圧縮変形に起因して仮道管など木材構成要素の細孔構造が変化していることが推察されるが、細孔構造の変化について検討した研究はほとんどない。そこで本研究では、表層圧密化によるボード物性の向上に必要な基礎的知見を得るため、スギフレークチップをボード表層に、廃材から製造したリサイクルチップを芯層に配置して表層圧縮比の異なる3層PBを製造し圧縮比が材質に及ぼす影響を検討した。また、表層の細孔構造を調べるため水銀圧入式細孔分布測定(MIP)を行い、熱圧縮による細孔構造や空隙率などの変化を調べた。

2. 実験方法

2.1 スギフレークチップの製造

直径約120~170mm、長さ約2mのスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don, 気乾状態)間伐材の丸太から帯鋸盤にて50mm×50mm程度の挽板を得た。この挽板をチップパーに投入して、切削チップを得た。このチップを室温の水中に一晩浸せきして十分膨潤させた後、リングフレイカーにてパーティクルを製造した。リングフレイカーのナイフ刃先とプレートの間の距離を0.6mmとした。50個のチップのチップ長さ、幅、厚さの平均値はそれぞれ、19.3, 4.8, 0.50mmであった。

* 地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター
東京都北区西が丘3-13-10 〒115-8586

** 東京ボード工業(株)
東京都江東区新木場2-12-5 〒136-0082

*** 秋田県立大学名誉教授
秋田県能代市海詠坂11-1 〒016-0876
(原稿受付日:平成20年6月9日)

2.2 パーティクルボードの製造方法

熱盤寸法 500×500mm のホットプレスを用いて、400×400×20 (目標厚さ) mm の3層ボードを各条件につき2枚ずつ試作した。PBの構成はスギフレックチップを表層に、リサイクルチップ (東京ボード工業 (株) 製) を芯層に配置した。リサイクルチップの粒度分布は、ふるいの目開き 1mm 未満 7%, 1mm 以上～4mm 未満 86%, 4mm 以上 7% であった。

十分に乾燥させたチップに対して、回転式接着剤噴霧装置を使用して、接着剤 (表層、芯層ともにメラミン-ユリア共縮合樹脂, 東京ボード工業 (株) 製) および硬化触媒 (30%硫酸アンモニウム水溶液を用いて接着剤の不揮発分に対して 3%) を塗装用スプレーガンによりチップに均一に噴霧した。目標ボード密度を 0.60, 0.65, 0.70g/cm³ とし、含脂率は、固形分比率でチップの全乾質量に対して表層 15%, 芯層 6.8% とした。表層比率はチップの質量比で 20, 30, 40% に設定した。ワックスエマルジョンは接着剤の質量に対して表層、芯層ともに 4% ずつ加えた。マット含水率が表層 17%, 芯層 7.5% に調整したマットに対して、熱盤温度 215℃, プレス初期圧力 3MPa (最大), 総プレス時間 3.5 分の熱圧縮によりボードを製造した。

2.3 性能評価試験

性能評価試験は、JIS A 5908:2003「パーティクルボード」に準拠して行った。試験した項目は、曲げ強さ、湿潤時曲げ強さ、吸水厚さ膨張率 (TS), はく離強さ (IB) である。曲げ試験は、万能材料試験機を用いて、平均変形速度 10mm/min で行った。

2.4 密度プロファイル測定

PBの厚さ方向密度プロファイル (分布) は、5×5cm にカットした気乾状態、表面未研磨の試料を、 γ 線を用いたデンシティープロファイラーを使用した。

2.5 水銀圧入法によるチップ及びPBの細孔分布解析

水銀圧入式細孔分布測定装置 (オートポア IV9500, 島津製作所製) を用いて、チップおよびボードの細孔分布図を求めた。なお、水銀と試料の接触角を 140° として細孔分布を算出した。PBの表面から厚さ約 2mm の表層部分を帯鋸盤で鋸断した後、約 10×20mm の大きさに切削して、105℃で 24 時間以上乾燥させたものを用いた。

3. 結果及び考察

3.1 PBの製造条件と圧縮比の関係

製造したPBの密度分布を密度プロファイル測定から調べ、Fig. 1 に示す方法で密度プロファイルを解析した。密度の最大値をピーク密度 (PD), ボード厚さの中心から厚

Fig. 1 Density profile along the thickness of the particleboard.
CD, core density; SD, surface density; PD, peak density; Pdi, distance from board surface at which PD is observed.

さの±20%の範囲内の密度の平均値を芯層密度 (CD), ピーク密度の表層からの距離を Pdi, ボード表面から厚さ方向に 2mm までの密度の平均値を表層密度 (SD) と定義して算出した結果を Table 1 に示す。また、水銀圧入法により求めたチップの全乾密度と SD, CD との比から表層圧縮比および芯層圧縮比を求め、目標ボード密度および表層比率との関係について Fig. 2 にそれぞれ示した。Fig. 2-A から、目標ボード密度が大きくなると表層圧縮比も増加し、目標ボード密度が 0.70g/cm³ の場合で表層圧縮比は 2.6 となった。ところが、芯層圧縮比は目標ボード密度が増加しても表層とは異なり 0.86～0.95 の範囲で大きく変化しなかった。次に目標ボード密度を 0.60g/cm³ とした PB の表層比率と圧縮比の関係を調べた結果 (Fig. 2-B), 表層比率が増加すると、表層圧縮比も増加した。一方、表層比率が増加しても、芯層圧縮比はやや増加傾向にあるもののほぼ一定であった。熱圧縮時のクロージングタイム (熱盤がマットに触れてからディスタンスバーに接触するまでの時間) が長くなると芯層温度の低下や芯層の圧縮圧力低下のために表層の高密度化が抑制され CD の増加が引き起こされることが知られている¹⁴⁾。目標ボード密度や表層比率を増加させると、スギフレックチップはかさ高いためにマット高さが高くなることなどが原因で、クロージングタイムが長時間化し CD が高くなることが予測されたが、本研究では SD が高く CD は低い密度プロファイルを示した。このことから、スギなどの低密度チップを表層に配置させるとマット高さは高くなるが熱圧縮時にボードに加えられた圧力が表層で速やかに緩和されるためにクロージングタイムは大きく変化しないことが推測された。

Table 1 Factors (PD, Pdi, CD, and SD) that define density profile of three-layer particleboard.

target board density (g/cm ³)	surface layer ratio (%)	PD ^{a)} (g/cm ³)	Pdi ^{b)} (mm)	CD ^{c)} (g/cm ³)	SD ^{d)} (g/cm ³)
0.60	40	0.98	1.06	0.50	0.80
0.65	40	1.07	0.50	0.55	0.86
0.70	40	1.00	0.42	0.53	0.91
0.60	20	0.86	0.80	0.48	0.75
0.60	30	0.98	0.88	0.49	0.79
0.60	40	0.98	1.06	0.50	0.80

a) PD, peak density of particleboard.

b) Pdi, distance from board surface at which PD is observed.

c) CD, core density of particleboard.

d) SD, surface density of particleboard within 2 mm from surface.

Fig. 2 Effects of manufacturing conditions (target board density (A) and surface layer ratio (B)) on compaction ratios of surface (●) and core (○) layers.

3.2 圧縮比が強度に及ぼす影響

PBの曲げ強さ、湿潤時曲げ強さ、吸水厚さ膨張率(TS)、はく離強さ(IB)を調べた結果をTable 2に示す。目標ボード密度が0.60から0.70g/cm³へ増加すると、曲げ強さ、湿潤時曲げ強さ、TSも増加したが、IBは一定の値をとる傾向を示した。目標ボード密度を0.60g/cm³として表層比率を20%から40%まで変化させた場合、表層比率が増加すると曲げ強さは変化しないが湿潤時曲げ強さが向上した。また表層比率が増加するとTSは増加するがIBは低下する傾向を示した。

ここで、PBの曲げ特性と表層圧縮比の関係を調べた結果をFig. 3に示す。川井らは、低比重・単層PBについて圧縮比と曲げ強さの関係を調べ、曲げ強度は圧縮比(0.5~2.0)に対して正の相関性があることが示されている¹¹⁾が、本研究で取り上げた表層圧縮比(2.1~2.6)の範囲でも、表層圧縮比が高くなると曲げ強さが向上した。一方、PDと曲げ強さの間には明確な関係がなかった。またPdiが大きくなると曲げ強さが小さくなる傾向が認められ、密度の最大値を示す位置が表層から内部へ移動すると曲げ強さが小さくなることが示唆された。

次に表層圧縮比とTS、IBの関係をFig. 4に示す。IBはTSとは異なり表層圧縮比に影響を受けないことがわかった。はく離試験では主に芯層で破壊するため表層よりも芯層圧縮比のほうが影響を及ぼすことが示されている¹⁴⁾。本研究で製造したPBの場合芯層圧縮比がほぼ一定であることからIBも表層圧縮比に影響されず一定の値を示したと考えられた。

一方、表層圧縮比が大きくなるとTSは増加した。これは、表層圧縮比が大きくなると、熱圧縮時に起きるドラインゲットも大きく、そのため水分を吸収した際に起きるドラインゲットの回復が大きくなることが原因の一つであると考えられた。川井らは、異なるチップを混合したボードのTSと圧縮比の関係から(1)式を提案している¹¹⁾。

Table 2 Mechanical properties of three-layer particleboard with surface layer of sugi chips.

target board density (g/cm ³)	surface layer ratio	MOR ^{a)} (MPa)		TS ^{b)} (%)	IB ^{c)} (MPa)
		dry conditions	wet conditions		
0.60	40	23.5±1.8	14.3±1.5	9.5±1.8	0.59±0.12
0.65	40	27.0±2.3	15.0±1.2	10.6±0.7	0.53±0.06
0.70	40	27.5±1.8	16.8±0.7	13.2±1.5	0.64±0.11
0.60	20	23.9±3.4	11.5±0.9	8.8±0.8	0.66±0.08
0.60	30	22.7±2.5	13.7±1.6	9.3±1.7	0.61±0.12
0.60	40	23.5±1.8	14.3±1.5	9.5±1.8	0.59±0.12

a) MOR, modulus of rupture.

b) TS, thickness swelling.

c) IB, internal bond.

Values represent the mean ± standard deviation.

Fig. 3 Relationship between compaction ratio of surface layer and bending properties.

Fig. 4 Relationship between compaction ratio of surface layer, thickness swelling (TS), and internal bond (IB).

$$TS(\%) = b + a\rho\left(\frac{w_1}{\rho_{r1}} + \frac{w_2}{\rho_{r2}}\right) \quad (1)$$

Fig. 5 Relationship between $\rho((w_1/\rho_{r1}) + (w_2/\rho_{r2}))$ and thickness swelling. ρ : target board density; w_1 : weight fraction of surface layer; ρ_{r1} : chip density of surface layer; w_2 : weight fraction of core layer; ρ_{r2} : chip density of core layer

ここで、 ρ は目標ボード密度、 w_1 、 ρ_{r1} は表層の質量分率と原料チップ密度、 w_2 、 ρ_{r2} は芯層の質量分率と原料チップ密度とする。(1)式を本研究で得られた実験データに適用した結果をFig. 5に示す。傾き a は 12.0、切片 b は -5.7、 $R^2=0.88$ であり、相関関係にあることがわかった。(1)式は、密度が異なるチップを混合した場合を想定したものであるが、3層構造を有し、表層と芯層の圧縮比が大きく異なるボードの場合でも(1)式を使ってTSを予測することは可能であることが明らかとなった。スギなどの軟質チップを表層に用いた場合、原料チップ密度が低く圧縮比が大きくなるほど、TSも大きくなることが示されており、寸法安定化が必要であることが示された。

3.3 熱圧縮による表層の細孔構造変化

木材や紙などの多孔質材料の細孔分布や空隙率の測定にMIP法が用いられる^{15~17)}。MIP法では、水銀に加わる圧力は水銀が圧入できる細孔径と反比例の関係にあることを

Fig. 6 Pore distribution of sugi chips (Δ) and particleboard for target board densities of 0.60 g/cm^3 ($\circ$), 0.65 g/cm^3 ($\square$), and 0.70 g/cm^3 ($\blacktriangle$).

利用して水銀を試料に圧入する。細孔直径は水銀の表面張力及び試料と水銀の接触角が既知であれば測定可能であり、木材と水銀との接触角は既報¹⁸⁾から 140° とした。スギフレックチップ及びPB表層(目標ボード密度 0.70 , 0.65 , 0.60 g/cm^3)のMIP法による細孔分布をFig. 6に示す。スギフレックチップは $1 \mu\text{m}$, $9 \mu\text{m}$ および $100 \mu\text{m}$ 付近に3つのピークを示していて、3つのピークを半径が大きいほうから α , β , γ とする。スギ材の早材仮道管の内径は $50 \mu\text{m}$ 程度である¹⁹⁾ ことから α は早材仮道管の内こうやチップ製造時に発生したチップの部分的な割れや損傷でできた空隙に由来していると思われる。 β は早材および晩材仮道管内こうと放射方向柔組織に由来すると思われるが、スギでは構成細胞のうち仮道管が 97.2% を占め、放射組織は 2.0% である¹⁹⁾ ことから、 β の多くは早材および晩材仮道管に由来していることが推察された。また、スギは仮道管が連結する部位に有縁壁孔があり、孔口の直径は $4 \sim 5 \mu\text{m}$ とされている¹⁹⁾ ことから、 γ は仮道管の壁孔に由来するものと思われた。このような細孔分布を持つスギフレックチップを表層に配置して目標ボード密度を 0.60 から 0.70 g/cm^3 としたPBの表層の細孔分布を調べると、 α , β が消失し、 γ より細孔半径が小さい $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ を中心とするブロードなピークを示した。そこで、細孔構造をさらに詳しく検討するため、表層圧縮比の異なるボード表層の細孔分布図をFig. 7に示す。表層圧縮比が大きくなると α が小さくなり、 β が徐々に細孔半径が小さいほうにシフトした。表層圧縮比が 2.5 以上では β は消失し、 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 付近の γ に収束した。この細孔分布の挙動は、表層圧縮比が 2.1 程度であると早材・晩材仮道管が開いているが、表層圧縮比が 2.1 よりも大きくなるとこれらの仮道管が横圧縮変形を起こして内こうが徐々に閉塞しながら

Fig. 7 Pore distribution of surface layer with compaction ratios of 2.1 ($\blacksquare$), 2.3 ($\circ$), 2.5 ($\square$), and 2.6 ($\blacktriangle$).

Fig. 8 Effects of compaction ratio of surface layer on total intrusion volume ($\circ$) and porosity ($\bullet$).

熱盤から負荷された圧力を緩和していることを示している。さらに、スギフレックチップ単体とは異なりPB表層には $0.01 \mu\text{m} \sim 0.1 \mu\text{m}$ に新たな分布(ピーク δ)が出現した。この領域の細孔は、熱圧縮によってチップ間に生じた微細空隙や硬化した接着剤の有する微細孔に起因したものであると考えられた。

次に、表層圧縮比と全細孔体積及び空隙率の関係をFig. 8に示す。表層圧縮比が高くなると全細孔体積および空隙率は減少するが空隙が完全に閉塞しているのではなく、表層圧縮比が最も高い 2.6 の場合でも、空隙率は 40.1% 、全細孔体積は 0.47 mL/g を示した。Bouguerraらは木材-セメント複合材料の吸水性と細孔構造について調べ、 $1 \mu\text{m}$ 以上のマクロ孔に比較して $2 \times 10^{-3} \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ の細孔が吸水性に影響することを示している²⁰⁾。これらの結果から、熱圧縮時に高い圧縮力がチップに負荷されても細孔は完全には閉塞せず、半径 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ の細孔や $0.03 \mu\text{m}$ 付近

の微細孔が開口しているために圧縮比が高くなっても十分に吸水でき、TSの原因である木材チップ自身の膨潤やスプリングバックを引き起こしていると考えられた。

4. 結 言

軽量・軟質のスギフレークチップを表層に配置して表層を高圧縮比にした3層PBの表層圧縮比および細孔構造が材質に及ぼす影響を調べた。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 密度プロファイルと原料チップ密度から表層および芯層圧縮比を求めて、製造条件との関係を明らかにした。目標密度や表層比率が大きくなると表層圧縮比は高くなるが、芯層圧縮比はほとんど変化しなかった。これは、低密度のスギフレークチップが熱圧縮で加えられた圧力を表層で迅速に緩和したことが原因であると推察された。
- 2) 表層圧縮比が高くなると曲げ強さ、湿潤時曲げ強さが向上することがわかった。
- 3) 表層圧縮比が高くなるとTSも大きくなることや、表層と芯層の圧縮比が大きく異なる3層PBでもTSを予測可能であることがわかった。
- 4) MIP法による細孔分布測定から、熱圧縮加工によりPB表層の仮道管内こうが閉塞し、 $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$ を中心とする幅広い分布を持つ細孔構造であることが判明し、熱圧縮で負荷された圧力をスギフレークチップの仮道管が変形することにより緩和していることが推察された。また、熱圧縮時に高い圧縮力がチップに負荷されても細孔は完全には閉塞せず、半径 $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$ の細孔や $0.03\mu\text{m}$ 付近の微細孔が開口しているために圧縮比が高くなっても十分に吸水でき、TSの原因であるスプリングバックを引き起こしていると考えられた。

謝辞

スギフレークチップの製造では(独)森林総合研究所の秦野恭典氏、密度プロファイル測定では(独)森林総合研究所の高麗秀昭氏、チップ形状の検討では秋田県立大学木材高度加工研究所の山内秀文氏の多大な協力と貴重な助言に感謝いたします。

本研究の一部は、(社)日本木材加工技術協会第25回年次大会(2007年9月、旭川)にて発表した。

引 用 文 献

- 1) 井上雅文, 則元 京, 木材研究・資料, 27, 31 (1991).
- 2) 井上雅文, 門河倫子, 西尾治郎, 則元 京, 木材研究・資料, 29, 54 (1993).
- 3) M. Inoue, M. Norimoto, Y. Otsuka and T. Yamada, *Mokuzai Gakkaishi*, 36, 969 (1990).
- 4) 井上雅文, 則元 京, 大塚康史, 山田 正, 木材学会誌, 37, 227 (1991).
- 5) 井上雅文, 則元 京, 大塚康史, 山田 正, 木材学会誌, 37, 234 (1991).
- 6) 易 庠華, 木下敏幸, 吉延匡弘, 関 惠元, 木材工業, 59, 588 (2003).
- 7) Z. C. Qinglin, W. J. N. Lee and S. Hiziroglu, *Forest Prod. J.*, 54, 226 (2004).
- 8) K. Miyamoto, S. Nakahara and S. Suzuki, *J. Wood Sci.*, 48, 185 (2002).
- 9) 須田久美, 川井秀一, 佐々木光, 木材学会誌, 33, 376 (1987).
- 10) E. D. Wong, M. Zhang, Q. Wang and S. Kawai, *J. Wood Sci.*, 44, 287 (1998).
- 11) 川井秀一, 須田久美, 佐々木光, 木材学会誌, 33, 385 (1987).
- 12) V. C. Mallari Jr., S. Kawai, S. Hara, T. Sakuno, I. Furukawa and J. Kishimoto, *Mokuzai Gakkaishi*, 35, 1-7 (1989).
- 13) 荒木博章, 熊本県林業研究指導所業務報告, 40, 23 (2002).
- 14) K. Miyamoto, S. Suzuki, T. Inagaki and R. Iwata, *J. Wood Sci.*, 48, 309 (2002).
- 15) W. Wang and N. Yan, *Wood and Fiber Science*, 37, 505 (2005).
- 16) J. Zhang, *Proceedings of Annual Meeting of the American Wood-Preserver's Association*, 100th, 171 (2004).
- 17) M. J. Moura, P. J. Ferreira and M. M. Figueiredo, *Powder Technology*, 160, 61 (2005).
- 18) 中戸莞二, 乾 一, 梶田 熙, 木材学会誌, 30, 637 (1984).
- 19) 原田浩ほか, “木材の構造”, 文永堂出版, 29 (1985).
- 20) A. Bouguerra, O. Amiri, A. Ait-Mokhtar and M. B. Diop, *Magazine of Concrete Research*, 54, 103 (2002).

<Original Paper>

Effects of Compaction Ratio and Porous Structure of Three-layer Particleboard with Surface Layer of Sugi (*Cryptomeria japonica*) Flake Chips on Board Properties

Kensuke KAWARADA*, Kichisuke SUZUKI**, Yoshiyuki SAITOH**,
Takahiko IIDA* and Yasuo TAMURA***

*Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute
3-13-10 Nishigaoka, Kita-ku, Tokyo 115-8586, Japan

**Tokyo Board Industries Co., Ltd.

2-12-5 Shinkiba, Kohto-ku, Tokyo 136-0082, Japan

***Akita Prefectural University

Noshiro-shi, Akita 016-0876, Japan

(Accepted for publication : June 30, 2008)

Abstract

This study examined the effects of the compaction ratio and porous structure of a three-layer particleboard (PB) on its mechanical properties. The PB was manufactured by using melamine-urea resin as the binder. The surface layer of the PB consisted of chips obtained from sugi thinnings. The effects of the compaction ratio of the surface layer on the mechanical properties of the PB were analyzed. The porous structure of the surface layer was examined by mercury intrusion porosimetry (MIP). The results are summarized as follows: (1) The compaction ratio of the surface layer increased with the increase of target board density and surface layer ratio, whereas the compaction ratio of the core layer was unchanged. Thus, rapid relaxation of the compressive stress occurred at the surface layer because of the low density of the sugi chips. (2) The bending strength increased with the compaction ratio of the surface layer. (3) Thickness swelling of PB consisted with high surface compaction ratio is predicable by using theoretical equation. (4) MIP revealed that the lumens of the tracheids in the surface layer were partly closed by hot pressing to relax the stress of hot platen, accordingly the porous structure demonstrated broad peak distribution around $0.6\sim 0.7\ \mu\text{m}$.

Key words : Particleboard, sugi, compaction ratio, porous structure, mercury intrusion porosimetry

(Received : June 9, 2008)