

スギ樹皮小片を活用した高密度バインダレスボードの製造と性能 (第1報) 基礎物性に及ぼすマット含水率と熱圧縮スケジュールの影響

関野 登*・佐々木妙子**・谷内博規***

Manufacturing and performance of high density sugi bark boards
without synthetic resins (Part 1)
Effects of mat moisture content and hot-pressing schedule
on basic properties of the boards

Noboru SEKINO*, Taeko SASAKI** and Hironori TANIUCHI***

1. はじめに

近年、我が国では環境に関する法整備が急ピッチで進み、廃棄物処理法、資源有効利用促進法、建築資材再資源化法、グリーン購入促進法などが施行された。木材産業に着目すると、製材過程で必ず発生する樹皮は廃棄物処理法の対象であり、適切な焼却ないし廃棄に加えて、より積極的な利活用技術が求められる。周知のとおり国産材の主要樹種はスギであり、農林水産省「平成15年度素材需給統計」によれば全国のスギ素材生産量は699万 m^3 で、針葉樹全体の55%、国産材全体の46%を占める。スギ樹皮の発生原単位(全乾重量/原木材積)は径級により異なるが、径級14~18cmで24kg/ m^3 、20cm以上で20kg/ m^3 と報告されている(1)。したがって、スギ樹皮発生量(平成15年)は全国で14~17万トン(全乾重量)と推定される。

樹皮利用の歴史は古く、屋根葺きや外壁などにも使用されたが、最近の用途は多岐に渡る。平成8年の調査(2)によれば、樹皮の再利用率は73%(家畜敷料28%、土壤改良材・肥料26%、ボイラ燃料18%、きのこ培地1%)で、残り27%が焼却または廃棄となっている。スギ樹皮の

Received January 5, 2005

Accepted February 18, 2005

* 岩手大学農学部農林環境科学科森林科学講座

** 岩手大学農学研究科応用生物学専攻

***岩手県林業技術センター木材部

利用形態もほぼ同様と考えられるが、廃棄物処理法により不適切な焼却は禁止されており、資源化率向上に向けた新たな利用技術が望まれている。

スギ樹皮の利用促進に関する研究は種々の視点で行われており、抽出成分に関する研究 (3,4)、肥料化 (5, 6) やマルチング資材 (7) の研究、ペレット燃料化 (8) の研究、パルプ化 (9) や製紙化 (10) の研究、そしてボード成形に関する研究に分類できる。ボード成形の研究事例には、樹皮および木材小片の混合パーティクルボード (11)、樹皮小片ボードの機械的性質 (12)、セメント板の原料適性 (13)、舗装平板としてのブロック成形物 (14)、床暖房基材としての軽量厚物ボード (15, 16) などがある。これらは、いずれも結合剤を添加したボード成形であるが、最近ではスギ樹皮の自己接着機能を用いたバインダレスボードの試作事例 (17, 19) がある。しかし、製造条件とボード物性との関係は未だ不明瞭な状況にある。

バインダレス樹皮ボードの製造条件は、主にベイマツ樹皮を対象として1960年代から70年代にかけて北米で検討された。Chow (18) の報告に記載された既往の知見および彼の実験結果を列記すると、次の通りである。

- ①熱圧温度138℃の場合、マット含水率を12~20%とすることで比較的良好なボード材質が得られ、また圧縮圧を高める程、材質全体が改善された。ただし、パンク（マット内蒸気の膨張・噴出によるボードの内部割れおよび表面上の膨れ）防止のため、熱板の冷却システムが必要となる。
- ②熱圧温度180~200℃よりも低温領域でのベイマツ樹皮ボードの自己接着機能は、水分による熱可塑流動が主体であり、主たる化学結合は形成されない。
- ③熱圧温度を280~300℃まで高めると、強度と耐水性に優れる厚さ約6mmのボードが5~10分で成板可能となり、高温で熱分解されたフェノール抽出成分とリグニンが再重合して接着効果を発揮したと推測される。

上記の知見より、スギ樹皮ボードの自己接着機構も熱圧温度により異なると推測される。本研究では商業生産設備の点から受け入れられ易い200℃以下の熱圧温度を対象とするが、この温度域では、水と熱による樹皮成分の熱可塑流動が自己接着の主因と推測される。すなわち、ボード成形で留意すべき点として、①予め適切な水分を小片に付与する、②熱板に触れたマット表面が乾燥する前にマットを締め込む、③熱可塑流動に必要な水分が保持されるように密度を高める、④熱可塑流動がある程度進んだ段階で余分な水蒸気を排出する、などが挙げられる。

本研究では、スギ樹皮小片によるバインダレス高密度ボードの最適製造条件を探ることを目的に、マット含水率および熱圧スケジュールを変化させて目標密度1.0 g/cm³程度のボードを製造し、その基礎物性（機械的性質、寸法安定性、変色の程度、パンク発生の有無）を調べた。

II. 実験

1. 原料

水圧バーカーで剥かれ、ハンマーミルで破碎されたスギ樹皮小片（株式会社葛巻林業：CCパーク）を用いた。気乾状態の小片を篩分して粒度分布（重量比）を調べた結果、6.5 mesh (2.8mm) 残留が34%、16 mesh (1.0mm) 残留が24%、30 mesh (0.5mm) 残留が22%、それ以下の微小片が20%であった。ボード1枚の製造に必要な所定量（次項参照）の小片を秤量した後、含水率が20、30、40および50%となるように必要量の蒸留水を噴霧した。水分付与後の小片は、成板直前までプラスチック製の密閉容器内で1週間以上、養生された。

2. ボード製造条件

成板の目標寸法を300mm×300mm×5mm、目標密度を1.0 g/cm³とした。これより、ボード1枚の重量は450 gとなるが、成板直後は全乾状態に近いと仮定し、全乾重量で450 gの小片を上記の所定量とした。含水率調整された小片を、内寸300mm×300mmの木製フォーミングボックス内に均一に手撒きし（フォーミング後のマット高さは約40mm）、以下に示す熱圧条件でボードを製造（1枚/条件）した。なお、熱圧には岩手県林業技術センター所有のホットプレス（株式会社JTトーシ製、熱板寸法：45cm×45cm、最高温度：200℃、最大負荷：800 kN）を用いた。このプレスは荷重検知器による精密な圧力制御機能ならびに1/100mm精度の変位計測による位置制御機能を備えている。本実験ではこれらの機能を用い、成板に際してコールプレート間へのディスタンスバーの挿入は行っていない。

1) 熱圧温度、熱圧時間、圧縮圧力の決定

熱圧スケジュールの決定には、バインダレスで成形可能、かつ目標密度到達という条件を満たす温度・時間・圧力の目安が必要となる。そこで、予備検討として熱板の位置制御によって目標密度1.0g/cm³のボードを製造した。その際、温度は120～200℃の範囲で5水準、時間は3～11分の範囲で5水準、マット含水率は20～60%の範囲で5水準とし、これらを適宜組み合わせで計31条件で行った。その結果、目標密度到達には7MPa以上の圧縮圧が必要なこと、熱圧温度180℃であれば、5分程度で成板可能であることが分かった。また、位置制御では水蒸気の排出がマットの応力緩和に依存するため、パンク防止の制御が難しいことが判明した。以上の予備検討より、本研究で採用する熱圧温度と時間は180℃、300秒とし、圧縮圧力を7MPa以上とした。

2) 熱圧スケジュール

Fig.1に熱圧スケジュールの模式図を、Table 1に熱圧条件の一覧を示す。熱圧は、第1圧縮、息抜き、第2圧縮の3ステップで構成され、ハードボード（高密度木質繊維板）の商業生産で使われるパターン（22）に類似させた。また、本実験で行った熱圧は、息抜き時の圧力により二つに大別できる。一つは無負荷まで降圧する完全息抜きであり、もう一つは若干の圧力を残す

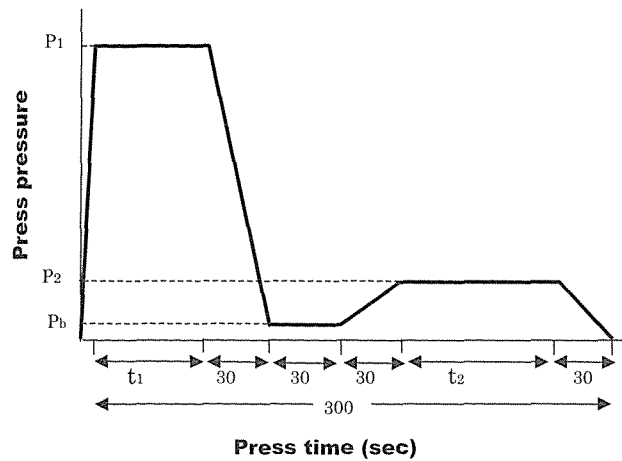


Fig. 1. A schematic draw of hot-pressing schedule. Press closing time of 10 seconds was eliminated from total pressing time of 300 seconds.

Table 1. Combinations of mat moisture content (MC) and hot-pressing schedule.

MC (%)	First press step P_1 (MPa), t_1 (sec)	Breathing step P_b (MPa)	Second press step ($P_2 = 2$ MPa) t_2 (sec)	Symbol
20	7 40	0	140	20-7-40
	7 60	0	120	20-7-60
	9 40	0	140	20-9-40
	9 60	0	120	20-9-60
30	7 40	0	140	30-7-40
	7 60	0	120	30-7-60
	9 60	0	120	30-9-60
	9 80	0	100	30-9-80
40	7 60	0	120	40-7-60 ^a
	7 80	0	100	40-7-80
	9 60	0	120	40-9-60 ^b
	9 80	0	100	40-9-80
50	7 60	0	120	50-7-60
	7 80	0	100	50-7-80
	9 60	0	120	50-9-60
	9 80	0	100	50-9-80
40	7 60	0	120	7-0 ^a
		0.25		7-0.25
		0.75		7-0.75
		1.00		7-1.00
	8 60	0	120	8-0
		0.25		8-0.25
		0.50		8-0.50
		0.75		8-0.75
	9 60	0	120	8-1.00
		0.25		9-0 ^b
		0.75		9-0.25
		1.00		9-0.75
				9-1.00

^{a, b} Symbols are different but the same letter shows the same pressing schedule.

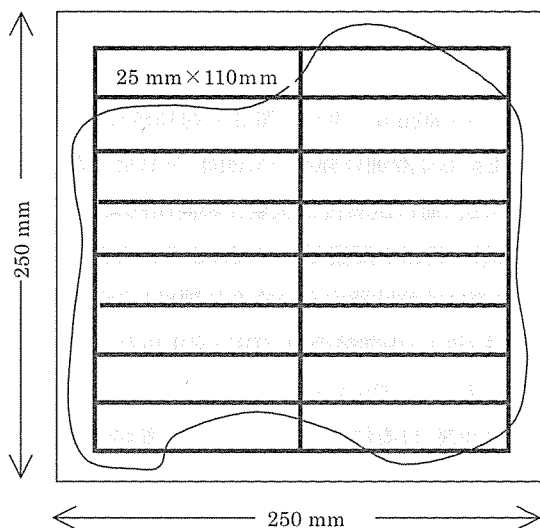


Fig.2 A cutting pattern of the test pieces.

不完全息抜きである。前者は4水準のマット含水率で実施され、各含水率で第1圧縮を4水準に変化させた。すなわち、2水準の圧力と2～3水準の保持時間の組合せとし、水分の蒸発潜熱を考慮して高含水率ほど長い保持時間を与えた。一方、後者はマット含水率40%で実施され、3水準の第1圧縮圧（保持時間は一定）に対して息抜き時の残圧を3～4水準で変化させた。また、両者とも、息抜き残圧の保持時間を30秒、第2圧縮圧を2MPaで統一した。ただし、熱圧時間は全体で300秒としており、第2圧縮圧の保持時間は第1圧縮圧のそれに応じて異なる。

3. 材質試験

1) 変色、パンク頻度および密度の測定

熱圧したボードを20℃60%RHの恒温恒湿室内で1週間以上養生した後、周囲低比重部を切断し、寸法25cm×25cmの試験体を得た。ボード表面は、スギ樹皮本来の褐色から暗褐色または黒へと変色したが、ボード周辺には未変色部分が残った。この変色は樹皮成分の変質あるいは熱可塑流動による高密度化の発現を示唆し、自己接着を判断する一要素と考えられる。そこで、色差計（日本電色工業：NR1）を用いて変色部の面積割合を求めた。目視で変色と見なされる基準は、JIS標準白色板に対する ΔL が-63以下に相当したため、この条件で試験体に変色境界線（Fig.2参照）を描き、試験体面積250mm×250mmに占める変色部の面積割合（表裏面の平均値）を得た。

寸法110mm×25mmの試験片を、Fig.2に示す木取りで16体採取し、各試験片の厚さおよび密度を測定した。続いて、各試験片の側面を観察し、パンクによる内部割れを目視で判別して、

その総延長 L を求めた。各試験片の周囲長(約270mm)に対する L の百分率を求め、その平均値をボードのパンク頻度と定義した。

2) 曲げ試験およびはく離試験

上記の試験片に対して、スパン80mm(ボード厚さの約16倍)、中央集中荷重方式で曲げ試験を行い、曲げ弾性率(MOE)および曲げ強度(MOR)を算出した。ただし、内部割れの著しい試験片は試験対象外とした。曲げ試験後、試験片の両端部より、25mm×25mmの試験片を多数採取した。これらの試験片側面を観察して成板による内部割れの著しいものを除外し、残部から1条件につき3~13体のはく離試験片を無作為に抽出した。JIS A5908に準じ、引張荷重速度2mm/分ではく離試験を行い、内部結合力(IB)を求めた。

3) 吸水厚さ膨張試験

上記25mm×25mm試験片の残部(1条件につき6~8片、一部の条件で欠測あり)を用いて、JIS A5908に準じた24時間吸水試験(20℃)を行った。吸水前の気乾時の厚さおよび重量を基準として、厚さ膨張率TSおよび吸水率WAを求めた。

Table 2. Aspects of boards produced with complete breathing conditions ($P_b = 0$ MPa).

Symbols	Colored area (%)	For 16 specimens with a dimension of 110 mm by 25 mm			
		Thickness(mm)	Density(g/cm ³)	Degree of inner crack ^a (%)	The number of specimen without crack
		Ave±std	Ave±std	Ave±std	
20-7-40	60	4.98±0.07	1.15±0.08	23±13	10
20-7-60	64	5.01±0.13	1.16±0.07	23±12	6
20-9-40	69	4.72±0.11	1.17±0.04	13±11	8
20-9-60	48	4.76±0.12	1.21±0.05	11±11	6
30-7-40	67	5.23±0.16	1.12±0.09	14±14	7
30-7-60	70	4.96±0.10	1.17±0.06	38±18	2
30-9-60	54	5.25±0.17	1.13±0.11	33±14	4
30-9-80	80	4.93±0.11	1.16±0.07	29±19	0
40-7-60	80	5.35±0.13	1.08±0.06	80±25	0
40-7-80	87	5.48±0.10	1.06±0.05	79±10	0
40-9-60	92	5.19±0.15	1.12±0.05	41±35	0
40-9-80	82	5.13±0.10	1.11±0.06	32±16	3
50-7-60	86	5.27±0.12	1.09±0.07	53±20	0
50-7-80	94	5.17±0.09	1.07±0.05	65±22	0
50-9-60	94	5.11±0.15	1.04±0.07	94±7	0
50-9-80	91	5.29±0.20	1.05±0.04	59±15	0

^a Percentage of crack length to specimen's perimeter

III. 結果および考察

1. 完全息抜き条件で製造されたボード

1) ボードの外観

Table 2に測定結果の一覧を示す。まず、変色面積の割合に着目すると、マット含水率20%では5~7割であったが、40%以上では8割以上となった。変色部は樹皮成分の変質あるいは熱可塑流動の現れと推測され、自己接着が生じた部分と考えられる。変色部がボード全体に広がることが望ましく、その観点からは条件30-9-80やマット含水率40%以上の全条件が適切と言える。しかし、マット含水率が高い場合、熱圧で発生する多量の水蒸気が適切に排出できなければ、顕著な内部割れを誘発する。事実、これらの条件では16試験体のほとんどに内部割れが観察され、パンク頻度は29~94%の範囲に分布した。その中で、変色面積割合が大きくパンク頻度の小さい条件としては、30-9-80、40-9-60、40-9-80が挙げられる。

次にボード厚さに着目する。マット含水率20%および30%では、目標厚さ5mmに対して±0.3mmの範囲内にあったが、40%および50%では+0.5mm以内の範囲に分布した。後者に見られる厚さ増加は、内部割れが一要因と考えられる。一方、当然ながら厚さはボード密度に影響し、薄いほどボード密度が高い傾向にある。なお、ボード密度は最低でも目標値1.0g/cm³を上回っている。これは、成板時の小片投入量が全乾基準であるのに対し、密度測定時はボード含水率が約12%であったことに起因する。

2) 曲げ性能および内部結合力

Table 3に測定結果の一覧を示す。まず、曲げ性能に着目すると、各条件でのMOEおよびM

Table 3. Mechanical properties and dimensional stability of the boards produced with complete breathing conditions ($P_b = 0$ MPa).

Symbols	Bending property		N	Internal bond strength		24-h water immersion		N
	MOE (GPa)	MOR (MPa)		(KPa)	N _o / N ^a	WA (%)	TS (%)	
	Ave ± std	Ave ± std		Ave ± std		Ave ± std	Ave ± std	
20-7-40	2.01 ± 1.06	15.1 ± 5.3	16	60 ± 37	6/10	72.3 ± 13.3	55.7 ± 8.9	8
20-7-60	2.09 ± 0.98	14.7 ± 6.0	16	132 ± 59	6/10	-	-	-
20-9-40	1.89 ± 0.75	14.3 ± 4.9	16	122 ± 52	10/13	-	-	-
20-9-60	1.38 ± 0.57	16.2 ± 4.2	16	-	-	-	-	-
30-7-40	1.31 ± 0.58	12.1 ± 4.5	16	65 ± 40	4/7	52.1 ± 22.5	36.0 ± 14.9	8
30-7-60	1.93 ± 0.79	16.2 ± 5.0	15	101 ± 51	2/6	39.1 ± 13.5	26.2 ± 12.2	8
30-9-60	1.58 ± 0.89	14.7 ± 6.5	16	130 ± 29	2/7	38.3 ± 12.6	26.7 ± 11.6	8
30-9-80	1.92 ± 0.73	14.6 ± 3.6	14	121 ± 66	1/6	35.7 ± 11.5	23.9 ± 8.3	8
40-7-60	1.18 ± 0.53	10.1 ± 3.4	16	56 ± 5	0/3	42.7 ± 6.0	26.9 ± 2.6	8
40-7-80	0.97 ± 0.42	8.3 ± 2.4	16	91 ± 41	1/3	37.4 ± 6.0	22.1 ± 3.9	8
40-9-60	1.71 ± 0.50	13.0 ± 3.3	16	51 ± 28	1/7	39.7 ± 7.8	25.0 ± 4.1	7
40-9-80	1.97 ± 0.50	14.0 ± 2.8	15	81 ± 52	1/6	35.5 ± 8.3	20.6 ± 3.8	8
50-7-60	1.72 ± 0.79	12.0 ± 5.4	14	60 ± 26	3/6	42.3 ± 11.9	21.2 ± 6.5	6
50-7-80	1.47 ± 0.69	10.3 ± 3.8	15	-	-	46.0 ± 12.0	21.3 ± 5.8	7
50-9-60	1.37 ± 0.41	8.1 ± 3.0	12	24 ± 5	0/3	39.1 ± 14.6	24.5 ± 8.3	7
50-9-80	1.00 ± 0.24	7.3 ± 1.6	12	86 ± 19	1/4	66.7 ± 7.0	35.6 ± 4.5	8

^aRatios of the number of specimen without crack to the total specimen's number

ORの平均値は、それぞれ1.0~2.1GPa、7~16MPaの範囲に分布した。一般に、ボードの曲げ性能は密度に影響されるが、本実験の場合、製造条件により若干の密度差が生じた。そこで、平均密度と曲げ性能の相関図 (Fig.3) をもとに考察を進める。マット含水率が高いほど密度は小さい傾向にあるが、MOEの場合、密度が同一ならばマット含水率の高い方が値は大きくなる傾向がある。この要因には変色面積割合の差異が挙げられる。未変色すなわち、弾性率の低い部分が試験片に多く含まれるほど、MOEが低くなると解釈できる。事実、条件20-9-60では密度が 1.21g/cm^3 と最大であるにも関わらず、変色面積割合が最小であるため、比較的小さなMOEとなっている。また、Fig.4はボード内での曲げ性能のバラツキ (変動係数) と変色面積割合の関係を示すが、マット含水率40%および50%では、変色部の面積拡大に起因してMOEが均質化する傾向が読み取れる。一方、破壊形態を観察した結果、マット含水率40%および50%では、各条件とも8割以上の試験体が水平せん断破壊を伴っていた。したがって、Fig.3に見るMORの密度依存性は、内部割れによる密度低下およびせん断破壊によるMOR低下の双方に起因すると解釈できる。また、MORのバラツキは変色面積割合にほとんど依存しなかった (Fig.4参照)。この理由として、最大曲げ応力が発生するスパン中央部は、ほぼ全ての製造条件で変色部に該当し (Fig.2参照)、未変色の影響を受けにくいことが挙げられる。

内部結合力 (IB) の平均値は、 $0.02\sim 0.13\text{MPa}$ の範囲に分布した。マット含水率40%以上では、いずれも 0.1MPa 以下のIBとなったが、多くの試験片に内部割れが含まれることが主因と言える。また、曲げ性能と同様、高含水率ほどボード密度が低いことも一因であろう。

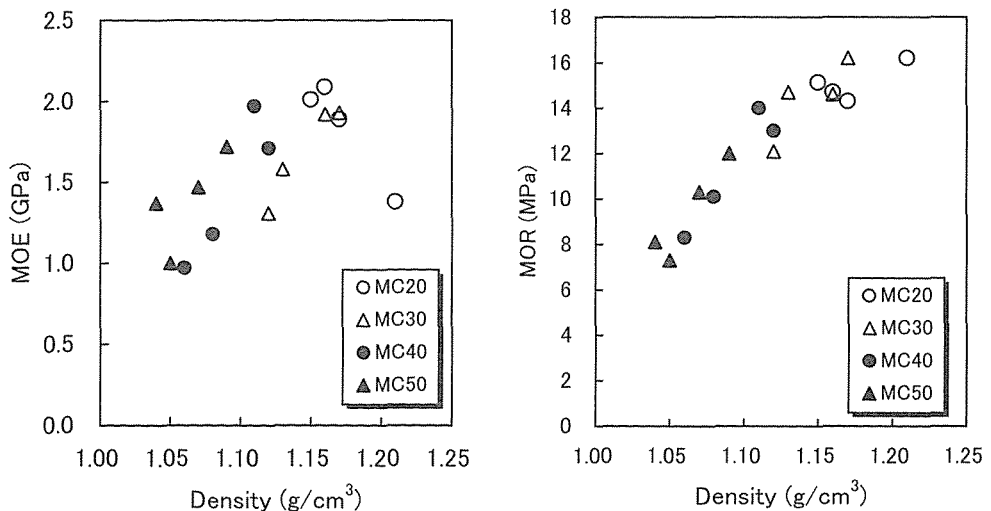


Fig.3. Relationship between bending properties and density for boards produced with a complete breathing. ($P_b = 0\text{ MPa}$)

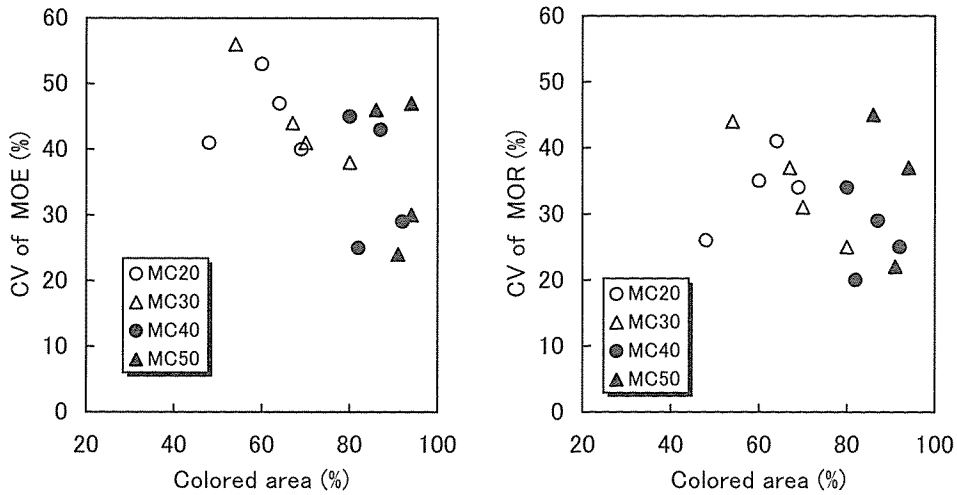


Fig. 4. Relationship between percentage of colored area and coefficient of variation (CV) of MOE and MOR.

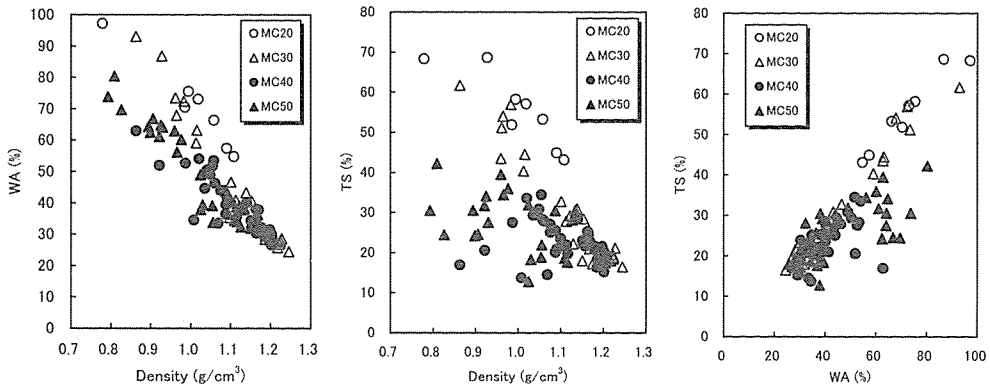


Fig.5. Relationships among density, water absorption (WA) and thickness swelling (TS) after a 24-hour water immersion test.

3) 耐水性

Table 3に示すように、常温水24時間吸水試験によるWAおよびTSの平均値は、それぞれ36～72%、21～56%の範囲に分布した。一般に、時間を限定した吸水試験では、厚さ膨張の駆動力となる吸水の程度には密度が関与する。そこで、試験片密度とWAおよびTSの関係をFig.5に示した。WAは密度増加につれて直線的に低下したが、密度 1.1g/cm^3 以下の範囲では、含水率40%および50%のプロット群が相対的に下方に位置した。同様の関係はTSにも認められる。これらの事実より、高いマット含水率で成板されると、樹皮成分の熱可塑流動による圧密固定

が促進され、吸水および厚さ膨張の抑制に寄与するものと解釈できる。このことはWA-TS関係に明瞭に反映されている。すなわち、吸水率50%以上（密度 1.1g/cm^3 以下に相当）では、WAが同じでも高い含水率の方がTSは小さく、耐水性の改善が明瞭に現れている。一方、密度 1.1g/cm^3 以上では、耐水性に及ぼすマット含水率の影響はほとんど認められなかった。また、耐水性に及ぼす第1圧縮の条件 (P_1, t_1) の影響は、Table 3を見る限り明瞭とは言い難い。圧縮条件はマット含水率と連動してボード密度に影響し、さらにボード密度がマット含水率と連動して耐水性を決定するものと解釈できる。

2. 不完全息抜き条件で製造されたボード

1) ボードの外観

Table 4に測定結果の一覧を示す。Table 2と重複するが、対照となる完全息抜き条件の結果も併せて掲げ、比較を容易にした。まず、変色面積の割合に着目する。完全息抜きと比べて、ほとんどの条件で変色割合は向上し、大多数が9割以上の値を示した。息抜き時の残圧がマット周辺部の蒸気抜けを抑制し、樹皮成分の熱可塑流動を促したものと解釈できる。一方、息抜き時の残圧 P_b は内部割れの抑制に著しい効果を示した。すなわち、第1圧縮圧7MPaでは $P_b=1$ MPaで、その他では $P_b=0.25\text{MPa}$ 以上の条件で、試験片の約半数以上に内部割れが全く観察されず、パンク頻度も数%に抑制できた。残圧が水蒸気の噴出を適度に抑えた結果と解釈できる。一方、ボード厚さおよび密度に着目すると、各条件の平均値を比較する限り、残圧の有無および程度による差はほとんど無いと言える。密度が目標値を若干上回っているのは前述と同様の理由による。

Table 4. Aspects of boards produced with incomplete breathing conditions ($P_b = 0.25\text{-}1.00$ MPa) .

Symbols	Colored area (%)	For 16 specimens with a dimension of 110 mm by 25 mm			
		Thickness (mm)	Density (g/cm^3)	Degree of inner crack ^a (%)	The number of specimen without crack
		Ave \pm std	Ave \pm std	Ave \pm std	
7-0	80	5.35 \pm 0.13	1.08 \pm 0.06	80 \pm 25	0
7-0.25	93	5.15 \pm 0.21	1.07 \pm 0.06	23 \pm 20	2
7-0.75	94	5.15 \pm 0.07	1.07 \pm 0.04	9 \pm 9	3
7-1.00	91	5.23 \pm 0.14	1.08 \pm 0.07	7 \pm 13	10
8-0	80	5.01 \pm 0.09	1.11 \pm 0.04	23 \pm 16	0
8-0.25	90	5.11 \pm 0.13	1.08 \pm 0.06	3 \pm 4	9
8-0.50	91	5.34 \pm 0.16	1.06 \pm 0.04	4 \pm 4	7
8-0.75	84	5.25 \pm 0.12	1.09 \pm 0.09	1 \pm 3	14
8-1.00	90	5.11 \pm 0.12	1.09 \pm 0.05	7 \pm 7	6
9-0	92	5.19 \pm 0.15	1.12 \pm 0.05	41 \pm 35	0
9-0.25	90	5.15 \pm 0.10	1.10 \pm 0.05	2 \pm 4	11
9-0.75	94	5.26 \pm 0.15	1.09 \pm 0.05	3 \pm 5	11
9-1.00	79	5.19 \pm 0.11	1.09 \pm 0.05	1 \pm 3	13

^a Percentage of crack length to specimen's perimeter

Table 5. Mechanical properties and dimensional stability of the boards produced with incomplete breathing conditions ($P_b = 0.25\text{-}1.00$ MPa).

Symbols	Bending property		Internal bond strength			24-h water immersion		
	MOE (GPa)	MOR (MPa)	N	(KPa)		WA (%)	TS (%)	N
	Ave±std	Ave±std		Ave±std	N _o / N ^a			
7-0	1.18±0.53	10.1±3.4	16	56±5	0/3	42.7±6.0	26.9±2.6	8
7-0.25	1.15±0.62	10.4±3.7	16	66±43	8/15	54.4±20.1	29.1±8.6	15
7-0.75	1.53±0.30	11.2±2.5	16	83±27	5/16	51.0±13.1	29.0±9.7	16
7-1.00	1.53±0.54	11.1±3.8	16	88±43	10/15	51.9±14.3	30.5±10.7	16
8-0	1.86±0.45	12.7±3.7	16	49±32	1/15	53.9±13.7	36.8±12.4	16
8-0.25	1.42±0.58	10.6±2.9	16	64±51	11/16	48.4±11.0	32.2±9.5	16
8-0.50	1.46±0.53	9.8±3.1	16	80±83	9/14	48.4±10.8	29.8±9.1	16
8-0.75	1.61±0.60	11.9±4.4	15	82±53	16/16	52.3±15.0	31.2±10.8	16
8-1.00	1.85±0.67	12.4±3.6	16	102±43	9/16	47.4±10.1	26.9±9.0	16
9-0	1.71±0.50	13.0±3.3	16	51±28	1/7	39.7±7.8	25.0±4.1	7
9-0.25	1.44±0.45	11.0±2.8	16	57±28	11/16	45.1±9.1	31.6±6.3	16
9-0.75	1.51±0.47	11.8±3.2	16	77±41	12/16	46.9±12.3	31.3±9.9	16
9-1.00	1.43±0.44	10.8±3.0	16	103±64	13/16	47.7±13.2	29.7±10.4	15

^a Ratios of the number of specimen without crack to the total specimen's number

2) 曲げ性能および内部結合力

測定結果の一覧をTable 5に示す。まず、MOEに着目すると、平均値は1.2~1.9GPaの範囲に分布した。第1圧縮圧7MPaでは、 $P_b \geq 0.75$ MPaの場合に完全息抜きよりも高いMOEを示したが、他の条件では同等以下となった。結果を精査するため、試験片密度とMOEの関係をFig. 6に示した。第1圧縮圧7MPaでは、同一密度でも $P_b \geq 0.75$ MPaの条件でMOEは高くなったが、8MPaおよび9MPaではこの傾向は認められない。ただし、9MPaの場合、MOEの密度依存性という点では、完全息抜きに比べて $P_b \geq 0.75$ MPaの方が依存性は大きい傾向にある。一方、MORの平均値は10~13MPaの範囲に分布し、残圧の影響は不明瞭であった。試験片密度とMOR

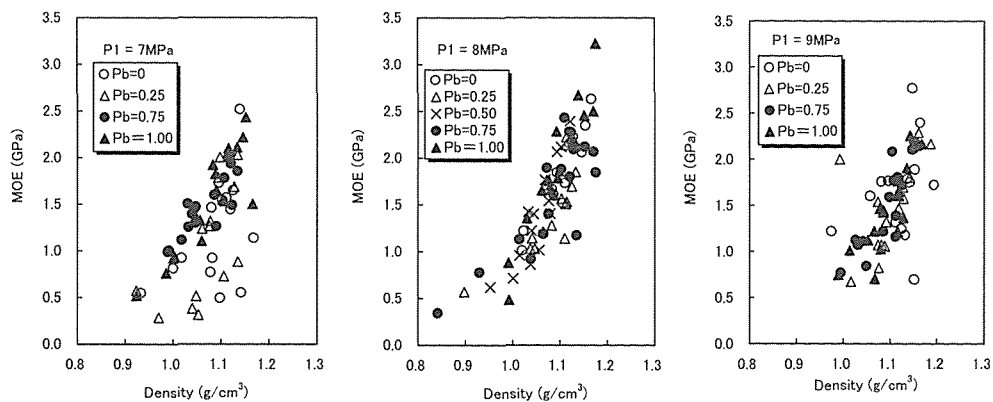


Fig.6. Relationships between density and MOE for boards produced with incomplete breathing conditions ($P_b = 0.25\text{-}1.00$ MPa).

の関係をFig.7に示すが、いずれの残圧条件もほぼ同様の密度依存性を示している。また、理由は不明であるが、9MPaでは残圧が低いと密度依存性が不明瞭になる傾向が伺える。

次に、IBに着目する。完全息抜き条件でのIBの平均値は約50KPaであったが、残圧付与により60~100KPaへと向上した。内部割れを伴わない試験片の数 (Table 5 参照) が残圧付与により急増しており、IB向上の主な要因は内部割れの減少と考えられる。一方、Fig.8に試験片密度とIBの関係を示すが、同一密度で比較した場合、残圧を高めた方が大きなIBを持つ傾向にある。ある程度の残圧を確保することで水蒸気の流出が遅延され、パンク発生が抑制されるとともに、樹皮成分の熱可塑流動が促進されて結合力が增強されたと解釈できる。

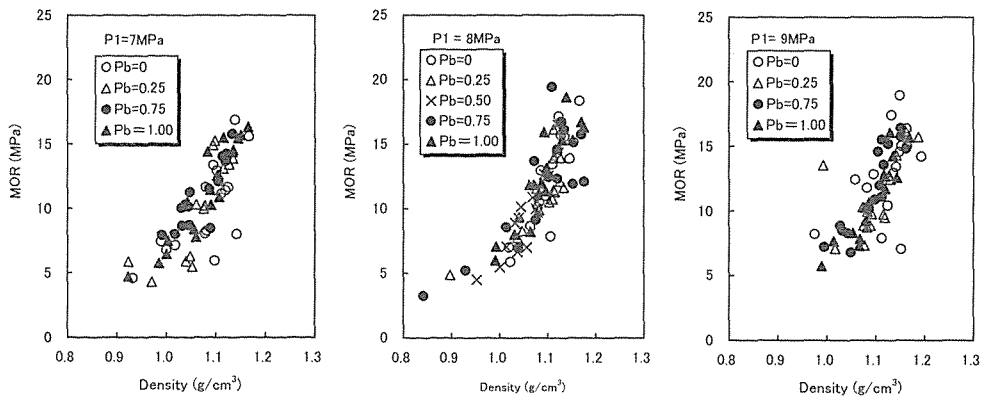


Fig.7. Relationships between density and MOR for boards produced with incomplete breathing conditions ($P_b = 0.25-1.00$ MPa).

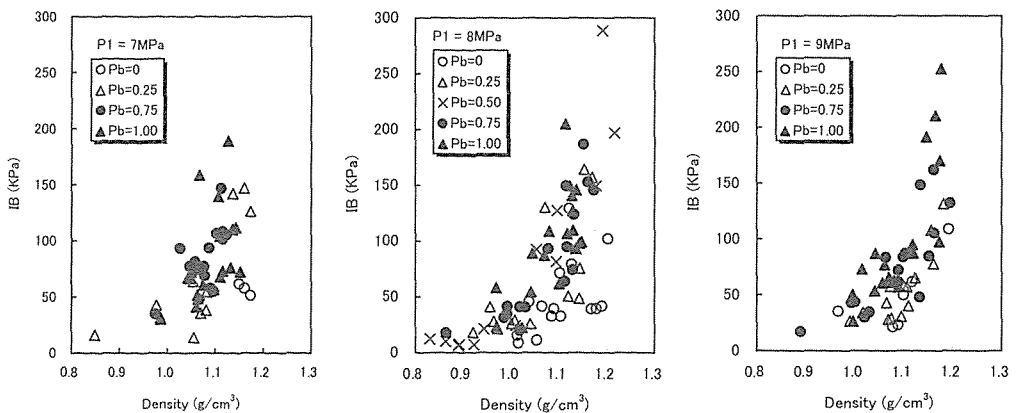


Fig. 8. Relationships between density and internal bond strength (IB) for boards produced with incomplete breathing conditions ($P_b = 0.25-1.00$ MPa).

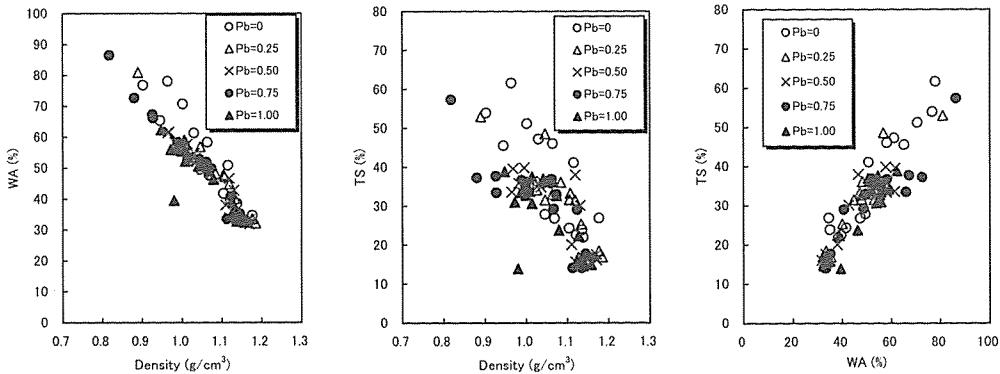


Fig. 9. Relationships among density, water absorption (WA) and thickness swelling (TS) after a 24-hour water immersion test for boards with incomplete breathing conditions at $P_1 = 8$ MPa.

3) 耐水性

Table 5に示すように、常温水24時間吸水試験によるWAおよびTSの平均値は、それぞれ38～54%、25～37%の範囲に分布した。平均値で見ると、残圧付与による耐水性の改善は認められなかった。結果を精査するため、前述と同様に試験片密度とWAおよびTSの関係をFig.9に示した。これらは第1圧縮8MPaの例であるが、同一密度で比較すると残圧を高めた方がWA、TSともに低くなる傾向が見られ、同じWAであればTSは幾分小さくなった。これらの事実は、ある程度の残圧の確保が耐水性の改善につながることを示唆し、前述したIBの増強が耐水性改善に寄与したものと推察できる。

3. 類似ボードとの物性比較

本実験条件の中で比較的優れたボード物性を示したのは、完全息抜きの場合が条件30-9-80、不完全息抜きの場合（マット含水率40%）が条件8-1.00であった。前者では、変色面積割合は80%で、MOEとMORはそれぞれ、1.9GPa、15GPa、IBは121KPa、TSは24%であった。ただし、約30%のパンク頻度を有した。一方、後者では変色面積割合は90%、MOEとMORはそれぞれ、1.9GPa、12MPa、IBは102KPa、TSは27%であった。また、パンク頻度は7%と小さかった。いずれにしても、両条件はほぼ近接した物性値を示したと言える。

いま、これらの値を類似ボードの物性と比較してみる。吉永ら(17)は、スギ樹皮小片（節目0.85mm通過の外樹皮）で密度0.84g/cm³の自己接着ボード（220×220×3mm）を製造し、9.0MPaのMOR、95KPaのIB、17%のTSを得ている。熱圧条件が不明のため直接比較は難しいが、機械的性質が本実験の値より低い理由は、ボード密度および小片粒度の差と考えられる。また、橋爪(19)はスギ樹皮の小片粒度を4段階に分級し、密閉型プレス（マット含水率：

約30%)を用いて目標密度範囲 $0.5\sim 1.1\text{g/cm}^3$ で自己接着ボード(220×250×10mm)を製造した。密度 1.0g/cm^3 の場合、小片粒度に応じて7~16MPaのMORを得ており、本実験の値と比較的合致している。また、TSは11~26%の範囲にあり、密閉処理による寸法安定効果(23)が現れている。一方、Chow(18)はベイマツ樹皮小片(マット含水率:5~7%)を用いた自己接着ボード(300×300×6.35mm、密度 $0.9\sim 1.0\text{g/cm}^3$)を、様々な熱圧温度と時間の組合せで製造した。本実験の熱圧条件に近い 200°C 、5分のボードでは、MORは1MPaと著しく小さく、IBは70KPa程度であった。これは低いマット含水率に起因して、樹皮成分の熱可塑流動が不十分であったためと推測される。しかし、温度 300°C では熱圧3分で1.4MPaのIBと12.5MPaのMORを得ており、 200°C 以下とは異なるメカニズムの自己接着を示唆している。

一方、市販ハードボード(HB)の密度は、 $0.9\sim 1.05\text{g/cm}^3$ であり、曲げ性能として30~55MPaのMORと2.8~5.6GPaのMOEを持つ(20、21)。また、IBは乾式製法と湿式製法で異なるが、乾式では1~2MPaの値を持つ(21、24)。HBの密度は本研究での目標密度と同等であるが、HBの曲げ性能は本実験で得られた値の2~3倍、IBは10~20倍である。

ここで、HBと樹皮小片ボードの強度物性の差について、ボード構成要素の性状から考察してみる。HBを構成する繊維束は、木材チップを飽和水蒸気($0.7\sim 0.9\text{MPa}$)で軟化させ、ディスクリファイナで機械的に解繊して得られ、長さは1~2mmで、両端に派生する細毛は要素間の絡み合いに寄与するという特徴を持つ(26)。一方、樹皮は単一の組織ではなく、二次師部(内樹皮)、一次師部・皮層・周皮(外樹皮)の集合体であり、木部組織と大いに異なる(25)。本実験で供試したスギ樹皮小片は、内樹皮・外樹皮を区別せずに得た破砕片である。形成層から分化した内樹皮にはボードの強度性能を担う厚壁の師部繊維があるが、師部繊維は相対的に強度物性の低い師細胞や師部柔細胞とともに周期的に配列している(25)。そのため、破砕小片は剥離し易い構造を持つと考えられる。また、外樹皮には内樹皮よりも長い一次師部繊維が存在し、コルク形成層で作られる周皮と層構造をなしている(25)。小片化の過程で外樹皮は微粉化され易い傾向にあり(17)、これらの微粉は接着成分として機能しない限り、ボードの強度面から見れば欠点部と扱える。このように樹皮小片はHBの構成要素である木部繊維束と比べてかなり異なる性状を有し、強度的には不利な側面を持つと言える。

また、乾式HB製造では、解繊時に低濃度のフェノール樹脂接着剤を対繊維乾重量で2~5%添加し(20)、前述のような高いIBを得ている。スギ樹皮ボードのIBは1オーダー小さな値に留まるが、木質繊維に比べて樹皮小片の性状が接着に不利に働くことに加え、自己接着の強度自体が合成高分子接着剤に比べて低いことが示唆される。なお、スギ樹皮の自己接着はヘミセルロースまたは糖分の熱可塑流動に起因すると指摘されているが(27)、樹皮にはデンプンを含有する多くの柔細胞が含まれることを考慮すると(25)、自己接着における糖分の寄与が推測される。事実、本実験で製造したボード表面には糖分らしき物質の析出が観察された。

IV. おわりに

得られた知見を整理すると次のようになる。マット含水率40%以上では自己接着の指標となる変色部の広がり良好となり、MOEの均質化や耐水性の向上が認められた。ただし、第1圧縮後に無負荷の息抜きを行うと、水蒸気噴出による内部割れが多く、IBは0.1MPa以下の値となった。しかし、息抜き時に適度な残圧(0.75MPa以上)を付与すると、変色部のさらなる広がりとともに内部割れは激減し、IBは改善された。

本実験条件の中で比較的優れたボード物性を示したのは、完全息抜きの場合が条件30-9-80、不完全息抜き(マット含水率40%)の場合が条件8-1.00であり、1.9GPaのMOE、12~15MPaのMOR、102~121KPaのIB、24~27%のTSを示した。これらは同密度の木質繊維板と比較して強度物性、寸法安定性ともに劣るが、用途次第では十分に使用可能と考えられる。木質繊維板に対して優位な点として、接着剤不使用および廃棄物利用による原料コストの削減、ボード原料調製段階での省エネ化(乾燥すべき水分量の低減)が挙げられる。ただし、樹皮排出が小規模かつ点在化していることを考慮すると、小規模プラントでの製造を目指すべきであろう。また、実用化に際しては、適切な用途開発、製造条件の最適化など課題山積であるが、今後の研究成果によっては、スギ樹皮の新たな利用技術に発展する可能性がある。

本研究の実施に当たり、終始有益なご助言を頂いた岩手大学農学部澤辺攻教授、同小藤田久義助教授に対し、厚く御礼申し上げます。

引用文献

- (1) 澤辺 攻：住田町木質エネルギー利用検討調査報告書(岩手県住田町)、6pp(2004)
- (2) 西村勝美：最新木材工業辞典、(社)日本木材加工技術協会、272pp(1999)
- (3) 芦屋竜矢、氏家正嗣、長濱静男、上野智子、坂井克己：木材学会誌47(3)、276-281(2001)
- (4) 小藤田久義、藤野陽治、佐々木達也、長谷部真、大田路一、鈴木幸一：木材学会誌47(6)、479-486(2001)
- (5) 鈴木修治、畑中博英、窪田泰之、松元浩、千木容：第52回日本木材学会大会研究発表要旨集、669(2002)
- (6) 溝邊正昭：木材工業54(5)、237-239(1999)
- (7) 野村和弘、有馬孝禮：第53回日本木材学会大会研究発表要旨集、526(2003)
- (8) 澤辺 攻、大石倫子、福島尚：第53回日本木材学会大会研究発表要旨集、531(2003)

- (9) 伊藤貴文、松山将壮：第34回日本木材学会大会研究発表要旨集、174 (1984)
- (10) 山田雅章：静岡県林業技術センター研究報告23、41-44 (1995)
- (11) S. Suzuki, F. Saito and M. Yamada: Mokuzai Gakkaishi, 40, 287 (1994)
- (12) T. M. Maloney: Forest Prod. J. 23, 30 (1973)
- (13) 川村恵洋、継田視明、屋代真、渡辺裕二：木材工業31 (12), 544-547 (1976)
- (14) 鈴木滋彦、末永淳詞、青木邦章：材料51(4), 392-397 (2002)
- (15) 山内秀文、馬霊飛、O.R. Pulido、佐々木光、桜庭司：第52回日本木材学会大会研究発表要旨集、576 (2002)
- (16) 田村靖夫編："スギ樹皮ボードに関する実証化試験事業報告書"、11pp (2001) (財) 秋田県木材加工推進機構
- (17) 吉永望、オーランド・ブリドウ、田村靖夫、土居修一：日本木材加工技術協会第15回年次大会講演要旨集、32-33 (1997)
- (18) S. Chow: Forest Prod. J. 25 (11), 32-37 (1975)
- (19) 橋爪 奨：三重林技セ研報12、13-19 (2000)
- (20) 鈴木正治 他編：木質資源材料、170pp、青海社、大津 (1999)
- (21) 関野 登：日本木材加工技術協会木質ボード部会第11回シンポジウム講演要旨集、60-83 (2002)
- (22) 森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック、543pp、丸善、東京 (2004)
- (23) 井上雅文、門河倫子、西尾治郎、則元京：木材研究・資料29、54-61 (1993)
- (24) 渡辺治夫、田中文男：木材学会誌11、98-103 (1965)
- (25) 南光浩毅：木材工業37 (1)、3-8 (1982)
- (26) 関野 登、末松充彦、藤元嘉安、木谷良明、王 潜：木材学会誌46 (4)、334-341 (2000)
- (27) 田村靖夫：木材工業57 (7)、287-291 (2002)

要 旨

スギ樹皮小片によるバインダレス高密度ボードの最適製造条件を探ることを目的に、マット含水率および熱圧スケジュール（息抜き時残圧の有無および程度）を変化させてボードを製造した。その結果、マット含水率40%以上では自己接着の指標となる変色部の広がり良好となり、曲げ弾性率の均質化や耐水性の向上が認められた。ただし、残圧なしで息抜きを行うと水蒸気噴出による内部割れが多く、内部結合力は0.1MPa以下の値となった。しかし、息抜き時に適度な残圧（0.75MPa以上）を付与すると、変色部のさらなる広がりとともに内部割れは激減し、内部結合力は改善された。比較的優れたボード物性を示したのは、息抜き時に残圧を付与しない場合はマット含水率30%で第1圧縮9MPa80秒の条件、残圧付与（マット含水率40%）

の場合は第1圧縮8MPaで残圧1MPaの条件であり、曲げ弾性率は1.9GPa、曲げ強度は12~15MPa、内部結合力は102~121KPa、24時間吸水膨張率は24~27%を示した。

Summary

A method of manufacturing high density bark boards using sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) bark particles without adhesive is reported in this paper. Five-millimeter-thick boards with a target density of 1.0 g/cm³ were fabricated at various mat moisture contents and hot-pressing schedules. The total pressing time and the pressing temperature were fixed at 5 minutes and 180 °C, respectively, while the hot-pressing schedule that consisted of three pressure steps was mainly changed at the first press pressure from 7 to 9 MPa and subsequent breathing pressure from 0 to 1 MPa. When made with mat moisture contents (MC) of 40% or more, the boards showed less variation in modulus of elasticity (MOE) on a board plane as well as an improvement in water resistance due to a great amount of colored area on the board surfaces that may be an evidence of self-bonding. However a breathing pressure of 0 MPa caused rapid eruption of steam, which caused many inner clacks. This resulted in less internal bond (IB) strength and modulus of rupture (MOR). Breathing pressure of more than 0.75 MPa effectively reduced inner clacks, resulting in an improvement in IB strength. Further, the colored area on board surfaces was expanded further by those breathing conditions. When providing a breathing period with some pressure, the best board performance was obtained with a combination of a first pressing pressure of 8 MPa and a breathing pressure of 1.0 MPa (a mat MC of 40%). Similarly, the best board performance was obtained at a combination of a mat MC of 30% and the first pressing step with a pressure of 9 MPa for 80 seconds, even though the breathing pressure was 0 MPa. These boards showed an MOE of 1.9 GPa, an MOR of 12-15 MPa, an IB of 102-121 KPa, and a thickness swelling of 24%-27% by a 24-hour water immersion.