

[木材学会誌 Vol. 53, No. 2, p. 104-109 (2007)]

## 残廃材を原料とした建築用バインダレス小片断熱パネル (第5報)<sup>†</sup>

### スギ樹皮小片パネルの熱伝導率と耐落下衝撃性<sup>\*1</sup>

関野 登<sup>\*2</sup>, 山内 剛<sup>\*3</sup>

## Binder-less Wood Chip Insulation Panel for Building Use Made from Wood Processing Residues and Wastes V. <sup>†</sup>

### Thermal conductivity and drop impact resistance of sugi bark chip panels<sup>\*1</sup>

Noboru SEKINO<sup>\*2</sup> and Go YAMAUCHI<sup>\*3</sup>

In this series of studies, a manufacturing technology was developed which uses wood flakes or shavings for binder-less insulation panels used in buildings. This paper describes the use of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) bark chips in our panels for the purpose of expanding the choice of potential raw materials. Bark chip panels ranging in density from 100 to 180 kg/m<sup>3</sup> were manufactured using bark chips of three different sizes. Thermal conductivity and drop impact resistance were tested and compared to our conventional panels made with wood flakes or shavings. The best panel performance which balances superior thermal insulation properties and superior drop impact resistance was obtained for panels with a density of 140 kg/m<sup>3</sup> (optimum panel density), irrespective of the bark chip size. The bark chip panels at that density showed better thermal insulation properties (a thermal conductivity of 0.07 W/mK) and better drop impact resistance than the sugi wood flake panels with the same density. When compared to the wood shaving panels, however, the thermal insulation properties of the bark chip panels were found to be inferior in terms of higher thermal conductivity, because the thermal conductivity of the wood shaving panels was lower (0.06 W/mK) due to the lower optimum panel density of around 100 kg/m<sup>3</sup> to maintain drop impact resistance.

**Keywords:** insulation panel, sugi bark, thermal conductivity, drop impact.

本断熱パネルの原料選択の拡大を目的に、スギ樹皮小片パネルを製造し、木部小片が原料の場合(スギ木部フレーク小片パネルおよびスギその他の木部プレーナー層パネル)との性能比較を行った。密度範囲100~180 kg/m<sup>3</sup>および3種類の樹皮小片サイズでパネルを製造したところ、断熱性と耐落下衝撃性を両立させる最適パネル密度は、いずれの小片サイズでも140 kg/m<sup>3</sup>となった。このときの熱伝導率は約0.07 W/mKであり、同じパネル密度でのスギ木部フレーク小片パネルの熱伝導率よりも若干小さく、耐落下衝撃性も樹皮小片の方が優れた。一方、スギその他の木部プレーナー層パネルでは、パネル密度を100 kg/m<sup>3</sup>程度に下げても耐落下衝撃性が確保され、約0.06 W/mKの熱伝導率が得られているため、スギ樹皮小片パネルの断熱性は木部プレーナー層パネルよりも劣ることが分かった。

## 1. 緒 言

最近の木質系断熱材の研究には、スギ樹皮を用いた低密度ボード<sup>1)</sup>、合成樹脂ファイバーを結合剤とした低密度ファイバーボード<sup>2)</sup>、低密度厚物ファイバーボードをコアとするサンドイッチパネル<sup>3)</sup>、波形段ボールの交差複層板をコアとするサンドイッチ

<sup>†</sup> Report IV: This journal 51 (6), 380-386 (2005).

<sup>\*1</sup> Received March 20, 2006; accepted September 15, 2006.

<sup>\*2</sup> 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka 020-8550

<sup>\*3</sup> (株)ヤマウチ Yamauchi Co. Ltd., Miyako 027-0025

パネル<sup>4)</sup>、などがある。これらは面材料として強度性能を併せ持つが、本研究で開発中の断熱パネルは木造住宅の構造部材間(間柱, 根太, 垂木など)への施工を想定しており, グラスウール等の断熱材の代替を目的とした非構造用の断熱部材である。

本断熱パネルは, 型枠中で常温圧縮された小片マットを薄板(形状安定板)で挟み, これら全体を建築用防湿シートで被覆したものであり, ①常温圧縮で生じる小片間摩擦力によるバインダレス成形, ②パネル幅方向の弾性力を利用した簡易施工, ③手作業解体の簡略化および小片再資源化の自由度を高めたりサイクル設計, などの特徴とする<sup>5)</sup>。

既報<sup>6-8)</sup>ではスギなどの木部小片を原料として, 断熱性と壊れ難さ(耐落下衝撃性)を両立させる最適製造条件を検討してきた。本報では原料選択の拡大を目的に, 小片化したスギ樹皮による断熱パネル(スギ樹皮小片パネル)を製造した。変化させた製造因子は, 小片サイズとパネル密度であり, 断熱性と耐落下衝撃性を両立させる製造条件を見出すとともに, 木部小片を原料とする場合(スギ木部フレック小片パネル, スギその他の木部プレーナー屑パネル)との性能比較を行った。

## 2. 実 験

### 2.1 原料および試験体

原料のスギ樹皮小片は3種類のサイズ(S, M, L)で, 平均寸法および小片マットの高密度はTable 1のとおりである。ただし, 高密度は既報<sup>1)</sup>と同様の方法により測定した。S小片は, 土壤改良や緑化基材用の市販品(株葛巻林業CCパーク)より, 目開き2.8 mmの篩で微粉を除去して調製した。一方, MおよびLは, 以下の方法で調製した。カッターヘッド型パーカーで剥皮されたスギ樹皮を製材工場より入手し, カッティングミル(Retsch製SM-100, 排出口スクリーン; 20 mmメッシュ)で破碎した。目開き6.7 mmの篩に残ったものをM小片, 11.2 mmの篩に残ったものをL小片とした。供試に先立ち, 小片は20°C 60% RHの恒温恒湿室内で十分に養生し, 供試時の含水率は12.1~12.6%であった。

Table 1. Dimensions and mat bulk density of sugi bark chip specimens.

Chip size	Dimensions (mm, ave $\pm$ std, $n=50$ )			Mat bulk density (kg/m <sup>3</sup> )
	Length	Width	Thickness	
S	9.41 $\pm$ 3.34	1.84 $\pm$ 0.60	0.35 $\pm$ 0.28	65
M	13.95 $\pm$ 7.71	2.60 $\pm$ 1.24	0.29 $\pm$ 0.19	60
L	16.30 $\pm$ 8.59	2.70 $\pm$ 1.04	0.39 $\pm$ 0.20	55

製造した断熱パネル(小型試験体)の外観および小片以外の原料の仕様をFig. 1に示す。試験体の寸法は, 熱伝導率測定寸法制約から200×200×50 mmとした。パネル密度は, 圧縮比(=パネル密度/マット高密度)を考慮して設定した。すなわち, 木部小片では圧縮比2~3の範囲内に断熱性と耐落下衝撃性を両立する条件が存在するため<sup>6-8)</sup>, 本実験ではこれを参考に, 小片サイズに応じてTable 2に示す3~5水準のパネル密度を設けた。ただし, パネル密度は圧縮後のマットのみの密度である。試験体の製造方法は既報<sup>6-8)</sup>と同様であり, 1条件につき2体を製造した。なお, 被覆材は第4報<sup>9)</sup>以降, 厚さ0.10 mmから0.15 mmに変更している。

### 2.2 熱伝導率 $\lambda$ の測定

ASTM C 518に準拠した1試料2熱流計方式を採用した。用いた装置および $\lambda$ 算出方法は既報<sup>7,8)</sup>と同一である。熱流方向は鉛直下向きであり, 高・低温熱板の温度をそれぞれ30°C, 20°Cとして, 平均材温25°Cでの $\lambda$ を求めた。測定は1試験体につき4回(上下逆転2回)行い, 1条件につき8データを収集した。なお, 各試験体は繰り返し測定直前まで20°C 60% RHで5日以上養生されており,  $\lambda$ 測定時の小片含水率は製造時とほぼ同一と見なせる。また,

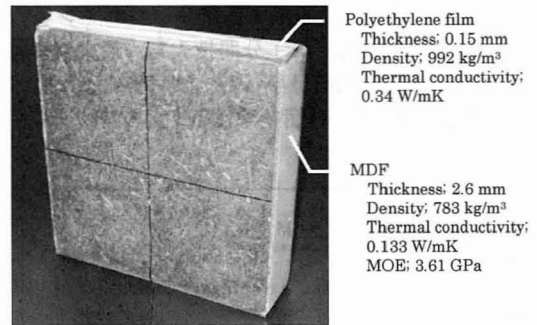


Fig. 1. View of a sugi bark chip panel specimen.

Table 2. Combinations of panel density and chip size, and their mat compression ratios (ratio of panel density to mat bulk density) for sugi bark chip panels.

Panel density (kg/m <sup>3</sup> )	Compression ratio		
	S <sup>a)</sup>	M <sup>a)</sup>	L <sup>a)</sup>
100	1.5	—	—
120	1.8	—	2.2
140	2.2	2.3	2.5
160	2.5	2.7	2.9
180	2.8	3.0	3.3

<sup>a)</sup> Chip size; see Table 1.

測定は試験体製造後8週間以内に行った。

### 2.3 残存応力の推定

本断熱パネルは接着剤無添加の小片マットであるため、強い衝撃に対してマットが崩壊する恐れがある。崩壊を防ぐには、小片間の摩擦力を衝撃時に小片に働く慣性力よりも大きく保つ必要がある。小片間摩擦力はマットの圧縮応力に依存するが、木部小片の場合、製造後2ヶ月程度で圧縮応力の低下は緩慢となった<sup>7,8)</sup>。そこで本実験では、製造8週間後に、次項に示す落下衝撃試験を行うとともに、試験直前に残存する圧縮応力を以下に示す方法(既報<sup>7,8)</sup>と同様)で推定した。

Fig. 2に試験体製造時の圧縮応力 $\sigma_0$ と圧縮弾性率 $E_0$ の関係を示す。第2報<sup>7)</sup>で述べたように、マット圧縮後30分経過してほぼ一定となった応力が $\sigma_0$ であり、その直後にマット圧縮方向に約2.5% (5mm)のひずみを与えて得た弾性率が $E_0$ である。本実験のスギ樹皮小片の場合、両者の関係は小片サイズに依らずFig. 2の回帰式で表現可能と言え。圧縮応力の推定は、この関係が製造後も長期にわたり成り立つと仮定して行った。すなわち、製造8週間後の圧縮弾性率を上記と同様の方法で測定し、これを回帰式に代入して残存圧縮応力を推定した。

### 2.4 落下衝撃試験

試験体を12rpmで回転するポリプロピレン製のドラム(内径45cm)に1分間投入し、最大落差45cmの落下衝撃を24回付与した。試験後に小片脱落の状態を目視観察し、耐衝撃性を下記の基準により

4レベルで評価した。

I ; ほとんど損傷なし

II ; 表面積の1/3以内での軽微な小片脱落

III ; 表面積の1/3を超える小片脱落

IV ; 内部に及ぶ小片脱落(深さ5mm以内)

ただし、この方法は規格に定められたものではなく、一連の本研究の小型試験体に対して採用している方法である。したがって、原料の差異による耐衝撃性の相対比較のみに有効であり、この試験による評価と実大製品が受ける運搬や施工時の事故的な耐落下等衝撃性との対応については、今後、別途検討する必要がある。

## 3. 結果および考察

ここでは、本断熱パネルの必須要件である耐衝撃性に関して先ず言及し、その結果を踏まえた断熱性能を他材料と比較していく。

### 3.1 耐落下衝撃性および残存応力との関係

落下衝撃試験直前の残存応力( $\sigma_0$ )および耐衝撃性の評価結果(各2試験体の平均的な観察結果)をTable 3に掲げた。なお、一連の本研究では、評価結果がレベルIまたはIIであれば、実用上支障ないものと推測している<sup>8)</sup>。以下、各小片パネルの耐衝撃性について、残存応力との関係から考察する。

S小片の場合、パネル密度 $100 \text{ kg/m}^3$ ではレベルIVであり、残存応力は $1 \text{ kPa}$ 以下であった。パネル内部からの小片脱離を伴い、明らかに小片間摩擦力が不足している。密度を $120 \text{ kg/m}^3$ に上げると残存応力は約 $4 \text{ kPa}$ となったが、評価はレベルIIIであった。同程度の残存応力を持つL小片 $140 \text{ kg/m}^3$ のパネルは、レベルIIの評価を得ており、S小片パネルは脱離し易い細かな小片を多く含むため耐衝撃性で不利な面が現れている。ただし、密度 $140 \text{ kg/m}^3$ 以上では $10 \text{ kPa}$ 以上の応力が残存し、評価はいずれもレベルIIとなった。

一方、M小片の場合、パネル密度 $140 \text{ kg/m}^3$ での残存応力は約 $1 \text{ kPa}$ と低いが、評価はレベルIIを満たした。また、L小片では密度 $120 \text{ kg/m}^3$ のとき残存応力は $1 \text{ kPa}$ 未満で評価もレベルIIIとなったが、密度 $140 \text{ kg/m}^3$ 以上ではM小片と同様に全てレベルIIを満たした。

以上の結果より、いずれの小片サイズでもパネル密度を $140 \text{ kg/m}^3$ 以上とすれば、耐落下衝撃性は確保できると考えられる。また、Table 3に示す応力残存率( $\sigma_8/\sigma_0 \times 100$ )はパネル密度が小さいほど小さくなる傾向があり、これは木部小片の場合<sup>8)</sup>と定性的に一致した。

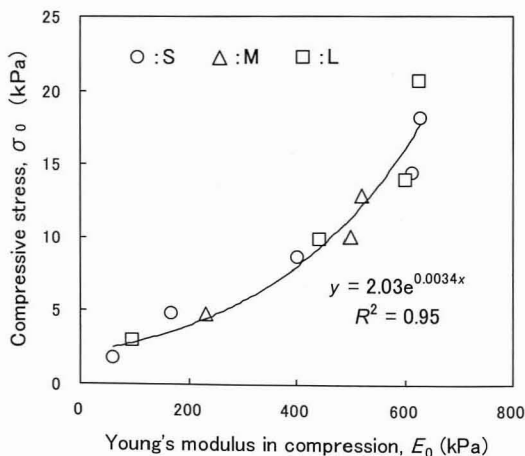


Fig. 2. Relationship between Young's modulus and compressive stress obtained for sugi bark chip panels.

Note: S, M and L show the size of sugi bark chips; see Table 1.

Table 3. Compressive stresses retained after 8 weeks ( $\sigma_s$ ) and results of the drop impact test for sugi bark chip panels.

Chip size <sup>a)</sup>	Panel density (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_s$ <sup>b)</sup> (kPa)	$\sigma_s/\sigma_0 \times 100$ <sup>c)</sup> (%)	Indices <sup>d)</sup>
S	100	0.74	42	IV
	120	4.14	86	III
	140	10.6	122	II
	160	17.0	118	II
	180	16.3	90	II
M	140	0.97	20	II
	160	8.08	80	II
	180	8.64	67	II
L	120	0.90	30	III
	140	4.93	50	II
	160	9.45	68	II
	180	25.5	124	II

a) See Table 1.

b) Mean values for two panel specimens predicted by measuring Young's modulus.

c) Percentile retained compressive stress of the initial one ( $\sigma_0$ ).

d) Indices of drop impact resistance: I; no damage, II; partial delamination of surface chips (less than one third of the whole area), III; partial delamination of surface chips (more than one third of the whole area), IV; partial mat collapse to a depth of 5 mm from the surface.

第1報<sup>6)</sup>で製造したスギ木部フレーク小片パネル(フレークの平均寸法;  $21 \times 5 \times 0.4$  mm, マット嵩密度;  $78 \text{ kg/m}^3$ )では, パネル密度 $120 \text{ kg/m}^3$ でレベルIV(残存応力は $6.5 \text{ kPa}$ ),  $140 \text{ kg/m}^3$ ではレベルIII( $11.4 \text{ kPa}$ )であった。したがって, 今回のスギ樹皮小片パネルは残存応力が低い割には耐落下衝撃性に優れると言える。その理由のひとつに, 小片表面の粗さが考えられる。すなわち, カッティングミルによる樹皮小片の方がフレーカーによる木部小片よりも表面が粗く, 小片間の摩擦係数が大きいことが推測される。一方, 第3報<sup>9)</sup>で製造したスギ木部プレーナー屑パネルでは, パネル密度 $100 \text{ kg/m}^3$ 程度でレベルIの耐衝撃性(残存応力は $15 \text{ kPa}$ 以上)が得られた。当該プレーナー屑のマット嵩密度は $34 \sim 42 \text{ kg/m}^3$ で, 今回の樹皮小片に対して $1/2 \sim 2/3$ の値である。すなわち相対的に高い圧縮比が得られるスギ木部プレーナー屑パネルの方がスギ樹皮小片パネルよりも耐衝撃性に優れると言える。

### 3.2 断熱性

Fig. 3は, 熱伝導率 $\lambda$ の測定結果をパネル密度との関係で示している。各条件8測定 of  $\lambda$  平均値は $0.067 \sim 0.082 \text{ W/mK}$ の範囲にあり, パネル密度の増加につれて $\lambda$ は大きくなる傾向にあった。また, 同一密度における小片サイズ間の有意差検定を行った結果, S小片パネルの $\lambda$ は, 密度 $120 \text{ kg/m}^3$ でのL小片,  $140 \text{ kg/m}^3$ でのM小片,  $180 \text{ kg/m}^3$ でのM小片に対して, 危険率5%で有意に小さい値となった。一方, 密度 $140 \text{ kg/m}^3$ でのL小片, 密度 $160 \text{ kg/m}^3$ で

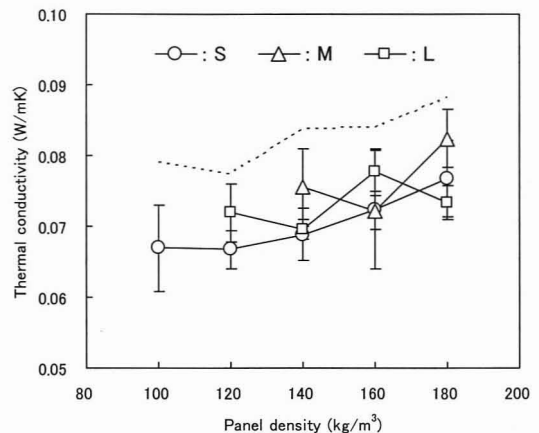


Fig. 3. Relationships between panel density and thermal conductivity (ave  $\pm$  std,  $n=8$ ) obtained for sugi bark chip panels.

Notes: S, M and L show the size of sugi bark chips; see Table 1. The broken line; sugi wood flake panels reported in Ref. 6).

のMおよびL小片, 密度 $180 \text{ kg/m}^3$ でのL小片に対しては, 有意差が認められなかった。したがって, S小片パネルの断熱性は, MまたはL小片パネルよりも若干優れる, 若しくは同等と判断できる。S小片パネルの $\lambda$ が他よりも小さかった理由として, 篩目 $2.8 \sim 6.7 \text{ mm}$ の範囲にある小片が相対的に大きな小片間の空隙を埋めることで, 対流抑制に寄与したことが考えられる。

落下衝撃試験の結果を考慮すると, 断熱性と耐衝

衝撃を両立させるパネル密度は $140 \text{ kg/m}^3$ 程度と言える。この密度での $\lambda$ は $0.069 \sim 0.075 \text{ W/mK}$ であり、Fig. 3に破線で示す前述のスギ木部フレック小片パネル（密度 $140 \text{ kg/m}^3$ で $0.084 \text{ W/mK}$ ）<sup>6)</sup>よりも断熱性が高くなった。これは樹皮と木部の組織構造の差異に起因すると思われる。樹木成長に伴う樹皮の発達過程では、師部繊維を含む二次師部内に次々と新しい周皮（コルク組織・コルク形成層・コルク皮層の3層構成）が形成され、また、師部組織は厚壁の師部繊維と薄壁の師細胞・師部柔細胞が周期配列している<sup>10, 11)</sup>。すなわち、樹皮は強度的に強い部分と弱い部分の層構造を持つため、本実験の小片化においては形状がフレック状になると同時に、小片両端には樹皮繊維が派生する傾向にあった。派生した繊維はパネルの小片間空隙の対流抑制に寄与すると考えられ、木部フレックのパネルと比べて $\lambda$ が小さくなった要因になりうる。また、例えばSuzukiら<sup>12)</sup>は、密度 $700 \text{ kg/m}^3$ のパーティクルボードをスギの木部小片と樹皮小片で製造し、樹皮100%ボードの $\lambda$ が木部100%に比べて1割程度低かったと報告している。また、北米の針葉樹でも同様な傾向がPlaceら<sup>13)</sup>によって報告されている。以上から、小片自体の $\lambda$ の差もこの一因となるものと考えられる。

次に、プレーナー屑が原料の場合と比較してみる。既報<sup>8)</sup>で製造したスギ木部プレーナー屑パネルでは密度 $120 \text{ kg/m}^3$ で $0.068 \text{ W/mK}$ 、また、カラマツ木部プレーナー屑パネルでは $135 \text{ kg/m}^3$ で $0.071 \text{ W/mK}$ の $\lambda$ を得ており、今回のスギ樹皮小片パネル（密度 $140 \text{ kg/m}^3$ で $0.069 \sim 0.075 \text{ W/mK}$ ）の $\lambda$ とほぼ同等である。プレーナー屑はカール状でパネル内に3次元ランダムに配向する傾向があり、熱流方向と繊維方向が一致する確率が小さくなることや小片間の対流抑制が樹皮小片以上に発揮され、小片自体の断熱性が樹皮に比べて劣ることを相殺したものと解釈できる。ただしプレーナー屑の場合は、パネル密度を $100 \text{ kg/m}^3$ 程度までに下げても耐衝撃性が確保できるため、断熱性の向上が期待できる。たとえば、実際のプレカット廃材であるベイマツ・ベイヒ混合プレーナー屑を用いて製造した実大厚さパネル（密度 $100 \text{ kg/m}^3$ ）では、 $0.056 \sim 0.061 \text{ W/mK}$ の $\lambda$ が得られている<sup>9)</sup>。

最後に、低密度スギ樹皮ボードの $\lambda$ と比較してみる。例えば山内ら<sup>1)</sup>は、ハンマーミルで破碎したスギ樹皮小片とMDI接着剤を用いて厚さ $9 \text{ mm}$ のボードを成形し、ボード密度 $250, 350, 450 \text{ kg/m}^3$ に対する $\lambda$ として、それぞれ、 $0.049, 0.057, 0.067 \text{ W/mK}$ を報告している。本実験での最適パネル密度（ $140$

$\text{kg/m}^3$ ）での $\lambda$ は約 $0.07 \text{ W/mK}$ であり、熱圧成形されたボードの断熱性より劣った。その要因は主として小片配列と熱流方向との関係にある。すなわち、平板プレスで熱圧成形されたボードでは小片が水平に堆積する傾向があるため、熱流方向が主に繊維直交方向となる。一方、本断熱パネルでは製法上の特徴から熱伝導率の大きな繊維方向が熱流方向に一致する場合があり、その傾向はフレック小片で強くなる。他の要因として、パネル密度がボードに比べて相対的に低いため小片間空隙が多く、対流熱伝達の差が関与していることも考えられる。

#### 4. 結 言

本実験の樹皮小片サイズの範囲では、パネルの耐落下衝撃性は密度 $140 \text{ kg/m}^3$ 以上で確保された。断熱性との両立を考慮すると、最適パネル密度は $140 \text{ kg/m}^3$ と言える。このときの熱伝導率は $0.069 \sim 0.075 \text{ W/mK}$ の範囲にあり、小片サイズが小さい場合、熱伝導率が相対的に小さくなる傾向も見られた。この熱伝導率の値は同密度でのスギ木部フレック小片パネルの熱伝導率よりも若干小さく、また、スギ樹皮小片パネルの方が耐落下衝撃性に優れることが分かった。一方、一連の本研究で最適原料とされる木部プレーナー屑パネルは、最適パネル密度が $100 \text{ kg/m}^3$ 程度と低く、熱伝導率は $0.056 \sim 0.061 \text{ W/mK}$ であり、今回のスギ樹皮小片パネルの断熱性はこれには及ばないことが判明した。ただし、樹皮自体の熱伝導率が木部よりも小さいことに着目すれば、プレーナー屑と樹皮小片の混合という新たな方法によって本断熱パネルの性能向上の可能性も示唆される。

#### 謝 辞

MDFをご提供頂いた株式会社ノダ、スギ樹皮をご提供いただいた二和木材株式会社に感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 山内秀文, 馬雲飛, Pulido, O. R., 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, 岐阜, 2002, p. 576.
- 2) 菊地伸一, 駒沢克己, 小橋一哉: 北海道林産試験場報 **16**(3), 1-6 (2002).
- 3) Kawasaki, T., Kawai, S.: *J. Wood Sci.* **52**(1), 75-83 (2006).
- 4) 篠原隆重, 瀧澤哲男: 特開 2004-183360.
- 5) 関野 登: 特許第3607254号 (2004).
- 6) 関野 登, 河村義大: 木材工業 **58**(8), 364-369

- (2003).
- 7) 河村義大, 関野 登, 山内英彦: 木材学会誌 **50**(4), 228-235 (2004).
  - 8) 河村義大, 関野 登, 山内英彦: 木材学会誌 **50**(6), 397-403 (2004).
  - 9) 関野 登, 河村義大, 山内 剛: 木材学会誌 **51**(6), 380-386 (2005).
  - 10) 南光浩毅: 木材工業 **37**(1), 3-8 (1982).
  - 11) 深澤和三: “樹体の解剖”, 海青社, 大津, 1997, pp. 64-67.
  - 12) Suzuki, S., Saito, F., Yamada, M.: *Mokuzai Gakkaishi* **40**(3), 287-292 (1994).
  - 13) Place, T. A., Maloney, T. M.: *Forest Prod. J.* **25**(1), 33-39 (1975).