

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公表特許公報(A)

(11)公表番号
特表2025-517378
(P2025-517378A)

(43)公表日 令和7年6月5日(2025.6.5)

(51)国際特許分類

F I

テーマコード (参考)

B 2 7 K 3/02 (2006.01) B 2 7 K 3/02 A 2 B 2 3 0

B 2 7 K 5/06 (2006.01) B 2 7 K 5/06 B

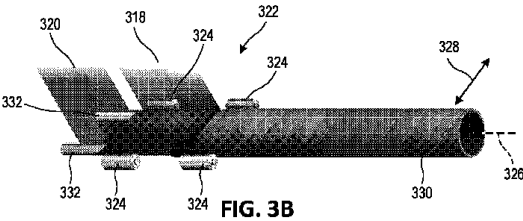
審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全65頁)

(21)出願番号	特願2024-568431(P2024-568431)	(71)出願人	520159592
(86)(22)出願日	令和5年5月16日(2023.5.16)		ユニバーシティ オブ メリーランド,
(85)翻訳文提出日	令和7年1月7日(2025.1.7)		カレッジ パーク
(86)国際出願番号	PCT/US2023/022351		アメリカ合衆国, メリーランド州 2 0
(87)国際公開番号	WO2023/224971		7 4 2 カレッジ パーク リージョンツ
(87)国際公開日	令和5年11月23日(2023.11.23)		ドライブ 7 8 0 9 リー ビルディング
(31)優先権主張番号	63/364,794		0 1 3 4 ユーエム ベンチャーズ
(32)優先日	令和4年5月16日(2022.5.16)	(74)代理人	110002066
(33)優先権主張国・地域又は機関			弁理士法人筒井国際特許事務所
	米国(US)	(72)発明者	フー, リアンビン
(81)指定国・地域	AP(BW,CV,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ		アメリカ合衆国, 2 0 8 5 4 メリーラ
	,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),		ンド州, ロックビル, デモクラシー レ
	EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(		ーン 1 0 4 0 7
	AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,	(72)発明者	リウ, ユー
	FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV		アメリカ合衆国, 2 0 7 4 0 メリーラ
	最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 円周方向に延びる高密度化された繊維性植物材料を有する構造体およびその製造システム、製造方法ならびにその使用

(57)【要約】

構造体は、中心軸の周りにラッピングされた1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤをラッピングすることによって形成することができる。ラッピングされた木材ベニヤは、円周方向に延びる木材壁を形成することができる。接着剤は、各木材ベニヤの1つ以上の表面部分上に提供することができる。木材ベニヤは、in situリグニン修飾、部分的脱リグニン、または完全脱リグニンによって、リグニンが損なわれ得る。円周方向に延びる木材壁は、中空部材、例えば、チューブ、パイプ、カップ、タンク、またはボトルを形成することができる。代替的に、円周方向に延在する木材壁は、例えば、ロッド、バット、クラブ、またはダボを形成するために、中央部材を取り囲むことができる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

円周方向に延在する木材壁を形成するように、中心軸の周りにラッピングされた 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを含む、構造体。

【請求項 2】

各木材ベニヤの 1 つ以上の表面部分に接着剤が提供される、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 3】

前記接着剤が、エポキシ、ポリ酢酸ビニル（PVA）、ポリウレタン、カルボキシメチルセルロースナトリウム（CMC）、シアノアクリレート、カゼイン、尿素－ホルムアルデヒド、脂肪族樹脂、接触セメント、レゾルシノール－ホルムアルデヒド、フェノールホルムアルデヒド、動物コラーゲン由来の膠、またはこれらの任意の組合せを含む、請求項 2 に記載の構造体。

10

【請求項 4】

前記円周方向に延在する木材壁が本質的に、前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤと、前記接着剤とからなる、請求項 2 に記載の構造体。

【請求項 5】

前記円周方向に延びる木材壁が、前記中心軸に実質的に平行な方向に沿って 50～90 MPa の圧縮強度を示す、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 6】

高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの各々は、崩壊した縦方向の木材細胞の壁を形成するセルロースナノファイバーを含み、前記セルロースナノファイバーが、前記木材の縦方向の成長方向と実質的に整合している、請求項 1 に記載の構造体。

20

【請求項 7】

高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの各々は、少なくとも 400 MPa の長手方向の成長方向に沿った引張強度を有する、請求項 6 に記載の構造体。

【請求項 8】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの少なくとも 1 つの長手方向の成長方向が、前記中心軸に実質的に平行である、請求項 6 に記載の構造体。

【請求項 9】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの少なくとも 1 つの長手方向の成長方向が、前記中心軸を含む平面に対して実質的に垂直である、請求項 6 に記載の構造体。

30

【請求項 10】

高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの各々の長手方向の成長方向が、中心軸に対してゼロではない角度にある、請求項 6 に記載の構造体。

【請求項 11】

前記長さ方向と前記中心軸との間の前記角度は、10°～80°（両端値を含む）である、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

前記長さ方向と前記中心軸との間の前記角度は、ほぼ 45°である、請求項 11 に記載の方法。

40

【請求項 13】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの第 1 のものの長手方向の成長方向の配向が、前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの第 2 のものの長手方向の成長方向の配向と交差する、請求項 10 に記載の構造体。

【請求項 14】

前記第 1 および第 2 の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの長手方向の伸長方向が、実質的に 90°の角度で交差する、請求項 13 に記載の構造体。

50

【請求項 15】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの少なくとも 1 つが、少なくとも $1 \text{ g} / \text{cm}^3$ の密度を有する、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 16】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの少なくとも 1 つが、約 $1.3 \text{ g} / \text{cm}^3$ の密度を有する、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 17】

前記円周方向に延びる木材壁の内径は、少なくとも 5 mm である、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 18】

前記円周方向に延びる木材壁の軸に沿った長さが、少なくとも 5 cm である、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 19】

前記円周方向に延在する木材壁が、前記中心軸に実質的に平行な方向に沿った圧縮下で少なくとも $45 \text{ J} / \text{g}$ の比エネルギー吸収を示す、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 20】

前記円周方向に延びる木材壁の断面形状が、円形、三角形、または長方形である、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 21】

前記構造体は、軸方向の両端が開口する中空部材を形成する、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 22】

前記中空部材は、チューブまたはパイプである、請求項 21 に記載の構造体。

【請求項 23】

円周方向に延在する木材壁は、軸方向の一方の端部で開口する中空部材を形成し、前記構造体は、中空部材の軸方向の反対側の端部を閉鎖する 1 つ以上の第 2 の部材をさらに備える、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 24】

前記 1 つ以上の第 2 の部材が、天然木、金属、ポリマー、高密度化された木材、または高密度化されたリグニン含有木材から形成される、請求項 23 に記載の構造体。

【請求項 25】

前記構造体が、閉鎖端チューブ、カップ、タンク、またはボトルを形成する、請求項 23 に記載の構造体。

【請求項 26】

前記円周方向に延在する木材壁が、その周りにラッピングされる 1 つ以上の中央部材をさらに備える、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 27】

前記 1 つ以上の中央部材が、天然木材ロッド、金属ロッド、ポリマーロッド、コルクロッド、高密度化された木材ロッド、リグニンが損なわれた木材ロッド、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ロッド、またはこれらの任意の組合せを含む、請求項 26 に記載の構造体。

【請求項 28】

前記構造体が、ロッド、バット、クラブ、またはダボロッドを形成する、請求項 26 に記載の構造体。

【請求項 29】

(a) 円周方向に延在する木材壁の内面部分の上に配置された 1 つ以上の第 1 の非木材層、

(b) 円周方向に延在する木材壁の外表面部分上に配置された 1 つ以上の第 2 の非木材層、または

(a) および (b) の両方、

10

20

30

40

50

をさらに含む、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 30】

前記非木材層のうちの 1 つ、幾つか、または全てが、金属、ポリマー、またはコンクリートを含む、請求項 29 に記載の構造体。

【請求項 31】

1 つ以上の第 1 の非木材層の総厚さは、木材壁の半径方向に沿った円周方向に延びる木材壁の総厚さの 50 % 以下であり、および／または 1 つ以上の第 2 の非木材層の総厚さは、木材壁の半径方向に沿った円周方向に延びる木材壁の総厚さの 50 % 以下である、請求項 29 に記載の構造体。

【請求項 32】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの 1 つ、幾つか、または全てが、その中に修飾リグニンを含み、前記修飾リグニンが、天然木材中の天然リグニンの高分子鎖よりも短い高分子鎖を有する、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 33】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの 1 つ、幾つか、または全てにおける前記修飾リグニンの含有量が、前記天然木材における前記天然リグニンの含有量の少なくとも 90 % である、請求項 32 に記載の構造体。

【請求項 34】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの 1 つ、幾つか、または全てにおける前記修飾リグニンの含有量が、少なくとも 20 重量 % である、請求項 32 に記載の構造体。

【請求項 35】

前記 1 つ以上の高密度化、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの 1 つ、幾つか、または全てが、セルロース系微細構造体内に固定化されたアルカリ化学物質の塩を含む、請求項 32 に記載の構造体。

【請求項 36】

前記塩が、実質的に pH 中性である、請求項 35 に記載の構造体。

【請求項 37】

前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの 1 つ、幾つか、または全てが、少なくとも部分的に脱リグニンされた木材を含む、請求項 1 に記載の構造体。

【請求項 38】

前記少なくとも部分的に脱リグニンされた木材のリグニン含有量が、天然木材のリグニン含有量の 10 % ～ 99 % (両端値を含む) である、請求項 37 に記載の構造体。

【請求項 39】

少なくとも部分的に脱リグニンされた木材は、広葉樹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた木材のリグニン含有量は、1.8 重量 % ～ 24.8 重量 % (両端値を含む) であり、

または、少なくとも部分的に脱リグニンされた木材は、針葉樹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた木材のリグニン含有量は、2.5 重量 % ～ 34.7 重量 % (両端値を含む) である、請求項 37 に記載の構造体。

【請求項 40】

前記少なくとも部分的に脱リグニンされた木材のリグニン含有量が、10 重量 % 以下である、請求項 37 に記載の構造体。

【請求項 41】

前記少なくとも部分的に脱リグニンされた木材のリグニン含有量が、天然木材のリグニン含有量の 10 % 未満である、請求項 37 に記載の構造体。

【請求項 42】

少なくとも部分的に脱リグニンされた木材は、広葉樹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた木材のリグニン含有量は、2.5 重量 % 未満であり、または

10

20

30

40

50

少なくとも部分的に脱リグニンされた木材は、針葉樹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた木材のリグニン含有量は、3.5重量%未満である、請求項37に記載の構造体。

【請求項43】

前記高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、前記円周方向に延在する木材壁の半径方向に沿って3mm以下の厚さを有する、請求項1に記載の構造体。

【請求項44】

前記高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、300μm以下の、前記円周方向に延在する木材壁の半径方向に沿った厚さを有する、請求項1に記載の構造体。

【請求項45】

前記高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、100～250μmの範囲内の、前記円周方向に延在する木材壁の半径方向に沿った厚さを有する、請求項1に記載の構造体。

【請求項46】

前記円周方向に延在する木材壁の1つ以上の表面上に形成された保護層またはコーティングをさらに備える、請求項1に記載の構造体。

【請求項47】

前記1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、前記木材の長手方向の成長方向に実質的に垂直な方向に圧縮されており、それにより、前記木材の微細構造体内のセルロース系細胞壁によって形成された管腔が、実質的に崩壊される、請求項1に記載の構造体。

【請求項48】

前記1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、15重量%以下の含水量を有する、請求項1に記載の構造体。

【請求項49】

前記中心軸に平行な方向に沿った前記円周方向に延びる木材壁の長さが、前記中心軸に垂直な方向に沿った前記円周方向に延びる木材壁の厚さの少なくとも10倍である、請求項1に記載の構造体。

【請求項50】

請求項1～49のいずれか一項に記載の構造体を複数含む、エネルギー吸収システム。

【請求項51】

さらに、一対の支持部材を含み、前記複数の構造体は、前記一対の支持部材の間に挟まれている、請求項50に記載のエネルギー吸収システム。

【請求項52】

前記支持部材が、天然木、金属、ポリマー、高密度化された木材、または高密度化され、リグニンが損なわれた木材から形成される、請求項51に記載のエネルギー吸収システム。

【請求項53】

各構造体の中心軸は、支持部材のそれぞれの対向する表面部分に対して実質的に垂直である、請求項51に記載のエネルギー吸収システム。

【請求項54】

各構造体の中心軸は、前記複数の構造体のうちの他の構造体の中心軸と実質的に平行である、請求項51に記載のエネルギー吸収システム。

【請求項55】

各構造体が、前記円周方向に延びる木材壁のそれぞれの軸方向端部に結合された端部キャップをさらに備え、前記端部キャップが、前記支持部材のそれぞれの対向面部分と接触している、請求項51に記載のエネルギー吸収システム。

【請求項56】

前記複数の構造体のうちの1つ、幾つか、または全ての少なくとも一部が中空である、請求項51に記載のエネルギー吸収システム。

【請求項57】

(a) 1つ以上の天然木ベニヤを1つ以上の化学処理に供して、1つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤを形成すること、

(b) (a)の後に、木材の長手方向の成長方向と交差する方向に沿って1つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤを圧縮して、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを形成すること、

(c) (b)の後、円周方向に延在する木材壁を形成するように、中心軸の周りに1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤをラッピングすること、
を含む、方法。

10

【請求項58】

(b)の後、かつ(c)の前に、各木材ベニヤの1つ以上の表面部分上に接着剤を提供することをさらに含む、請求項57に記載の方法。

【請求項59】

前記接着剤が、エポキシ、ポリ酢酸ビニル(PVA)、ポリウレタン、カルボキシメチルセルロースナトリウム(CMC)、シアノアクリレート、カゼイン、尿素-ホルムアルデヒド、脂肪族樹脂、接触セメント、レゾルシノール-ホルムアルデヒド、フェノールホルムアルデヒド、動物コラーゲン由来の膠、または上記のものの任意の組合せを含む、請求項58に記載の方法。

20

【請求項60】

(b)の後、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの各々が、崩壊した縦方向の木材細胞の壁を形成するセルロースナノファイバーを含み、セルロースナノファイバーが、木材の縦方向の成長方向と実質的に整合している、請求項57に記載の方法。

【請求項61】

(c)のラッピングは、前記1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのうちの少なくとも1つの長手方向の成長方向が、前記中心軸に実質的に平行であるようなものである、請求項60に記載の方法。

【請求項62】

(c)のラッピングは、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの各々の長手方向の成長方向が、中心軸に対してゼロではない角度であるようなものである、請求項60に記載の方法。

30

【請求項63】

前記長手方向の伸長方向と前記中心軸との間の前記角度は、10°～80°(両端値を含む)の範囲内である、請求項62に記載の方法。

【請求項64】

前記長手方向の伸長方向と前記中心軸との間の前記角度は、ほぼ45°である、請求項62に記載の方法。

【請求項65】

(c)のラッピングは、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの第1の長手方向の成長方向の配向が、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの第2の長手方向の成長方向の配向と交差するようなものである、請求項60に記載の方法。

40

【請求項66】

(c)のラッピングは、前記1つ以上の高密度化され、リグニンを含む木材ベニヤの前記第1および第2の長手方向の伸長方向が、実質的に90°の角度で交差するようなものである、請求項65に記載の方法。

【請求項67】

(c)のラッピングは、

(c1) 1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを型の上に配置

50

すること、

(c 2) 第 1 の時間の後、円周方向に延在する木材壁の少なくとも一部分が中空であるように、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤから型を除去すること、

を含む、請求項 5 7 に記載の方法。

【請求項 6 8】

前記型が、円形、三角形、または長方形の断面を有する、請求項 6 7 に記載の方法。

【請求項 6 9】

(c) のラッピングは、1 つ以上の第 1 の非木材層の上に、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを配置することを含み、

(c) の後、1 つ以上の第 1 の非木材層は、円周方向に延在する木材壁の内面部分の上に保持される、

請求項 5 7 に記載の方法。

【請求項 7 0】

(d) (c) の後、円周方法に延在する木材壁の内面部分の上に、1 つ以上の第 1 の非木材層を配置すること、

(e) (c) の後、円周方向に延在する木材壁の外表面部分の上に、1 つ以上の第 2 の非木材層を配置する工程、または

(d) および (e) の両方、

をさらに含む、請求項 5 7 に記載の方法。

【請求項 7 1】

前記非木材層のうちの 1 つ、幾つか、または全てが、金属、ポリマー、またはコンクリートを含む、請求項 6 9 ~ 7 0 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7 2】

(a) の、1 つ以上の化学処理に供することは、

(a 1) 1 つ以上の天然木ベニヤに 1 つ以上の化学溶液を浸透させること、および

(a 2) 1 つ以上の化学溶液を浸透させた 1 つ以上の天然木ベニヤを、少なくとも 80 °C の第 1 の温度に第 1 の時間だけ供して、1 つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤを形成すること、

を含む、

(c) の後、1 つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤ中に保持されたリグニンは、

(a) の前の 1 つ以上の天然木ベニヤ中の天然リグニンよりも短い巨大分子鎖を有する、請求項 5 7 に記載の方法。

【請求項 7 3】

(c) の後、リグニンが損なわれた木材ベニヤの各々は、前記木材ベニヤの実質的に崩壊したセルロース系微細構造体内に固定化された前記 1 つ以上の化学溶液の pH 中性塩を含む、請求項 7 2 に記載の方法。

【請求項 7 4】

前記塩が、(a 2) の間に、前記 1 つ以上の化学溶液と、前記 1 つ以上の化学溶液によって生成された前記 1 つ以上の天然木ベニヤ中の天然ヘミセルロースの酸性分解生成物との反応によって形成される、請求項 7 3 に記載の方法。

【請求項 7 5】

前記 1 つ以上の化学溶液が、アルカリ溶液を含む、請求項 7 2 に記載の方法。

【請求項 7 6】

前記 1 つ以上の化学溶液は、p-トルエンスルホン酸、NaOH、NaOH + Na₂SO₃ / Na₂SO₄、NaOH + Na₂S、NaHSO₃ + SO₂ + H₂O、NaHSO₃ + Na₂SO₃、NaOH + Na₂SO₃、NaOH / NaH₂O₃ + AQ、NaOH / Na₂S + AQ、NaOH + Na₂SO₃ + AQ、Na₂SO₃ + NaOH + CH₃OH + AQ、NaHSO₃ + SO₂ + AQ、NaOH + Na₂S_x (式中、AQ はアントラキノンである)、NaOH が LiOH または KOH によって置換された NaOH を有する上

10

20

30

40

50

記のいずれか、または上記のものの任意の組合せを含む、請求項 7 2 に記載の組成物。

【請求項 7 7】

前記第 1 の温度は、120～160℃（両端値を含む）である、請求項 7 2 に記載の方法。

【請求項 7 8】

前記第 1 の時間は、1～5 時間（両端値を含む）の範囲内である、請求項 7 2 に記載の方法。

【請求項 7 9】

前記 1 つ以上の天然木ベニヤに浸透した前記 1 つ以上の化学溶液の少なくとも 90 % が、（a 2）の間に消費される、請求項 7 2 に記載の方法。

10

【請求項 8 0】

（a 2）の、第 1 の温度に供することが、蒸気を使用して、1 つ以上の天然木ベニヤをその中の 1 つ以上の化学溶液と共に加熱することを含む、請求項 7 2 に記載の方法。

【請求項 8 1】

（a）の 1 つ以上の化学処理に供することは、1 つ以上の化学溶液中に第 2 の温度で第 2 の時間だけ部分的または完全に浸漬し、1 つ以上の天然木ベニヤから少なくとも幾らかのリグニンを除去することを含む、請求項 5 7 に記載の方法。

【請求項 8 2】

前記 1 つ以上の化学溶液が、アルカリ溶液を含む、請求項 8 1 に記載の方法。

【請求項 8 3】

前記 1 つ以上の化学溶液は、水酸化ナトリウム（NaOH）、水酸化リチウム（LiOH）、水酸化カリウム（KOH）、硫酸ナトリウム（Na₂SO₃）、硫酸ナトリウム（Na₂SO₄）、硫化ナトリウム（Na₂S）、Na_nS（n は整数）、尿素（CH₄N₂O）、重亜硫酸ナトリウム（NaHSO₃）、NaH₃O₃、二酸化硫黄（SO₂）、アントラキノン（C₁₄H₈O₂）、メタノール（CH₃OH）、エタノール（C₂H₅OH）、ブタノール（C₄H₉OH）、ホルム酸（CH₂O₂）、ペルオキシ水素（H₂O₂）、酢酸（CH₃COOH）、ブチル酸（C₄H₈O₃）、ペルオキシギ酸（CH₂O₃）、ペルオキシ酢酸（C₂H₄O₃）、アンモニア（NH₃）、トシル酸（p-TsOH）、次亜塩素酸ナトリウム（NaClO）、亜塩素酸ナトリウム（NaClO₂）、二酸化塩素（ClO₂）、塩素（CH₂O₂）、水（H₂O）または上記のものの任意の組合せを含む、請求項 8 1 に記載の方法。

20

30

【請求項 8 4】

前記 1 つ以上の化学溶液が、NaOH および Na₂SO₃ の沸騰溶液を含む、請求項 8 1 に記載の組成物。

【請求項 8 5】

（i） 第 2 の温度は、100～160℃（両端値を含む）であり、

（i i） 第 2 の時間は、0.1～96 時間（両端値を含む）の範囲内であり、または

（i）および（i i）の両方である、

請求項 8 1 に記載の方法。

【請求項 8 6】

（a）の、1 つ以上の化学処理に供することは、1 つ以上の天然木ベニヤ中の天然リグニンを 1 %～90 %（両端値を含む）除去して、1 つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤを形成する、請求項 8 1 に記載の方法。

40

【請求項 8 7】

（a）の、1 つ以上の化学処理に供することは、1 つ以上の天然木ベニヤ中の天然リグニンの 90 % 超を除去して、1 つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤを形成する、請求項 8 1 に記載の方法。

【請求項 8 8】

前記 1 つ以上の天然木ベニヤは、前記長手方向の成長方向に実質的に垂直な方向に沿って第 1 の厚さを有し、前記 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤが

50

、前記長手方向の成長方向に実質的に垂直な方向に沿って第2の厚さを有し、前記第1の厚さが、前記第2の厚さの少なくとも2倍である、請求項57に記載の方法。

【請求項89】

前記第1の厚さが、0.02mm以上1.5mm以下（両端値を含む）の範囲であり、前記第2の厚さが、300μm以下である、請求項88に記載の方法。

【請求項90】

（b）の圧縮が、プレス時間の間、少なくとも5MPaの第1の圧力で、1つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤをプレスすることを含む、請求項57に記載の方法。

【請求項91】

第1の圧力は、5～20MPa（両端値を含む）の範囲であり、
プレス時間は、少なくとも5分であり、または
上記の両方である、

10

請求項90に記載の方法。

【請求項92】

（b）の圧縮することが、少なくとも80℃のプレス温度に供しながら、1つ以上のリグニンが損なわれた木材ベニヤをプレスすることを含む、請求項57に記載の方法。

【請求項93】

（c）の間に、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤは、30～40重量%の範囲の含水量を有し、

前記方法は、（c）の後に、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを15重量%以下の含水量を有するように乾燥させることをさらに含む、請求項57に記載の方法。

20

【請求項94】

前記（c）の間、前記1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの厚さが、1～3mm（両端値を含む）の範囲内である、請求項93に記載の方法。

【請求項95】

（c）の間、前記1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの含水量が、15重量%以下である、請求項57に記載の方法。

【請求項96】

（c）の間、前記1つ以上の高密度化

30

【請求項97】

（a）の前に、ロールカット技術を用いて天然木の実質的に円筒形の部分を切断して、前記1つ以上の天然木ベニヤを形成することをさらに含む、請求項57に記載の方法。

【請求項98】

（c）の後、

円周方向に延在する木材壁に軸方向荷重を掛け、

前記軸方向荷重を掛けることは、円周方向に延在する木材壁の一方または両方の軸方向端部が、花びら型破損モードを示すようにするものであること、
をさらに含む、請求項57に記載の方法。

【請求項99】

（c）の後に、円周方向に延在する木材壁を、流体運搬チューブまたはパイプとして使用することをさらに含む、請求項57に記載の方法。

40

【請求項100】

（c）の後に、円周方向に延びる木材壁を、断熱構造材料として使用することをさらに含む、請求項57に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

（関連出願の相互参照）

本出願は、2022年5月16日に提出された「高密度化された木材ベースの中空構造

50

体およびその製造および使用」という名称の米国仮出願第 63 / 364, 794 号の利益を主張し、その全体は、参照により本明細書に組み込まれる。

【0002】

(連邦支援研究に関する表明)

本発明は、米国エネルギー省、高等研究プロジェクト庁エネルギー (ARPA-E) によって与えられた DEAR0001025 の下で、および国防高等研究プロジェクト庁 (DARPA) によって与えられた HR00112320009 の下で、政府の支援によってなされた。米国政府は、本発明について一定の権利を有する。

【0003】

本開示は、一般的には、繊維性植物材料の加工に関し、より詳細には、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料、例えば、木材または竹製のベニヤをラッピングすることによって形成される構造体に関する。

10

【背景技術】

【0004】

中空部材を必要とする構造体用途では、金属 (例えば、アルミニウム) は、その比較的強い機械的特性、ならびにそのような金属を様々なサイズおよび形状に (例えば、鑄造によって) 形成する既存の製造能力のために、典型的に使用されてきた。例えば、アルミニウムチューブは、建物 (例えば、正面デザイン、カーテンウォール、および / または窓枠) の製造および構築に使用されてきた。例えば流体輸送のための中空部材の他の用途は、典型的にはプラスチックおよびコンクリート、ならびに金属を使用する。しかしながら、金属、コンクリート、およびプラスチック部品の製造は、温室効果ガスの排出を生じさせる可能性があり、プラスチック廃棄物は、著しい汚染源となり得る。木材は、金属、コンクリート、およびプラスチックに対してより持続可能な代替物であると考えられてきたが、従来の木材ベースの中空構造体は、一般に、そのような用途には不十分な機械的特性を有する。

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

開示される主題の実施形態は、とりわけ、上述の問題および欠点のうちの 1 つ以上に対処し得るものである。

30

【課題を解決するための手段】

【0006】

開示される主題の実施形態は、円周方向に延在する壁を形成する、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを有する構造体を提供する。幾つかの実施形態では、1 つ以上の繊維性植物材料ベニヤが *in situ* リグニン修飾または脱リグニン (例えば、部分的または完全に) に供され、繊維性植物材料の長手方向の成長方向と交差する方向にプレスすることによって高密度化され、次いで、中心軸の周りにラッピングして巻き付けられるかまたは成形されて、円周方向に延在する壁を形成する。幾つかの実施形態では、円周方向に延在する壁は、チューブまたはパイプなどの中空構造体を形成する。あるいは、幾つかの実施形態では、円周方向に延在する壁は、例えば、ダボまたはロッドなどの中空構造体の一部を形成する。

40

【0007】

特定の角度で中心型軸の周りにラッピングして巻き付けられたベニヤを使用することによって、原料繊維植物材料の寸法限界 (例えば、樹幹または竹柄のサイズ) を克服することができ、それによって、任意の所望のサイズ (例えば、長さ、直径、壁厚など) および形状 (例えば、円形、三角形、長方形など) の構造体を達成することができる。さらに、繊維性植物材料壁を形成するベニヤ層の数、ベニヤ層および / または壁の厚さ、構造体の直径、および / またはベニヤ層内のセルロース繊維の配向を適切に選択することによって、得られる構造体の機械的特性を所望の用途に合わせることができる。例えば、幾つかの実施形態では、エネルギー吸収特性が向上した木材チューブが独特の花びら状の破損挙動

50

を示すことによって、木材の弱い方向を利用するように製造することができる。

【0008】

1つ以上の実施形態では、構造体は、円周方向に延在する壁を形成するように、中心軸の周りにラッピングされた1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを含むことができる。

【0009】

1つ以上の実施形態では、エネルギー吸収システムが複数の構造体を含むことができる。各構造体は、円周方向に延在する壁を形成するように、中心軸の周りにラッピングされた1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを含むことができる。

10

【0010】

1つ以上の実施形態では、方法は、1つ以上のリグニンが損なわれたベニヤを形成するために、1つ以上の天然繊維植物材料ベニヤを1つ以上の化学処理に供することを含むことができる。幾つかの実施形態では、1つ以上の化学処理は、ベニヤ中のリグニンをin situで修飾することができ、ベニヤを部分的に脱リグニンすることができ、またはベニヤを完全に脱リグニンすることができる。本方法は、繊維性植物材料の長手方向の成長方向と交差する方向に沿って、1つ以上のリグニンが損なわれたベニヤを圧縮して、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤを形成することをさらに含むことができる。本方法はまた、円周方向に延在する壁を形成するように、中心軸の周りに1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤをラッピングすることを含むことができる。

20

【0011】

本開示の様々な革新のいずれも、組み合わせて、または別々に使用することができる。この概要は、以下の詳細な説明においてさらに説明される概念の選択を簡略化された形態で紹介するために提供される。この概要は、特許請求される主題の主要な特徴または本質的な特徴を特定することを意図するものではなく、特許請求される主題の範囲を限定するために使用されることも意図するものでもない。開示された技術の前述および他の目的、特徴、および利点は、添付の図面を参照して進められる以下の詳細な説明からより明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0012】

30

以下、実施形態について、必ずしも一定の縮尺で描かれていない添付の図面を参照して説明する。適用可能な場合、幾つかの要素は、基礎となる特徴の例示および説明を助けるために、簡略化されるか、またはそうでなければ図示されない場合がある。図面全体を通して、同様の参照番号は、同様の要素を示す。

【図1A】図1Aは、開示される主題の1つ以上の実施形態による、天然木の半径方向、長手方向、および回転方向切断片、ならびに天然木の半径-接線面における断面を示す図である。

【図1B】図1Bは、開示される主題の1つ以上の実施形態による、部分的脱リグニンおよび高密度化された木材ベニヤの簡略化された概略図である。

【図1C】図1Cは、天然木ベニヤおよび高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤのマクロスケールおよびマイクロスケール画像を示す。

40

【図1D】図1Dは、開示される主題の1つ以上の実施形態による、木材ベニヤのリグニン修飾および高密度化の簡略化された概略図である。

【図1E】図1Eは、開示される主題の1つ以上の実施形態による、木材の幹からのベニヤの連続切断を示す簡略化された概略図である。

【図1F】図1Fは、開示される主題の1つ以上の実施形態による、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを形成するための製造設定を図示する、簡略化された概略図である。

【図1G】図1Gは、開示される主題の1つ以上の実施形態による、回転切片を伴う天然竹セグメントの簡略化された部分破断図を図示する。

50

【図 1 H】図 1 H は、図 1 G の天然竹セグメントの茎の拡大画像（上部）と、茎壁の階層的微細構造体を示すさらなる拡大画像（下部）とを示す。

【図 2 A】図 2 A は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する木材壁を形成するための、中心型軸に平行なセルロース繊維を伴う、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピングを図示する、簡略化された概略図である。

【図 2 B】図 2 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、多層の円周方向に延在する木材壁を形成するために、中心型軸に平行なセルロース繊維を用いて、複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを同時にラッピングするための製造設定を示す簡略化された概略図である。

【図 2 C】図 2 C は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、多層の円周方向に延在する木材壁を形成するために、複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤをラッピングするための円筒型を使用する製造プロセスを示す簡略化された概略図である。

10

【図 2 D】図 2 D は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円筒形チューブを形成するための、中心型軸に平行なセルロース繊維を伴う、複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピングを図示する。

【図 2 E】図 2 E は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、図 2 D のラッピング配向に基づいて製作された円筒形チューブのマクロスケールおよびマイクロスケール画像を示す。

【図 2 F】図 2 F は、図 2 E の円筒チューブ内のセルロース繊維の画像を示す。

20

【図 3 A】図 3 A は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する木材壁を形成するための、中心型軸に対して角度を成すセルロース繊維を伴う、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピングを図示する簡略化された概略図である。

【図 3 B】図 3 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、多層の円周方向に延在する木材壁を形成するために、中心型軸に対して角度を成すセルロース繊維を用いて、複数のリグニンが損なわれた木材ベニヤを同時にラッピングするための製造設定を示す簡略化された概略図である。

【図 3 C】図 3 C は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、多層の円周方向に延在する木材壁を形成するための、中心型軸に対して別の角度でセルロース繊維を伴う、別の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピングを図示する、簡略化された概略図である。

30

【図 4 A】図 4 A は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円筒状チューブを形成するための、中心型軸に対してほぼ 45° の角度でセルロース繊維を有する、多数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピングを図示する。

【図 4 B】図 4 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、図 4 A のラッピング配向に基づいて作製された円筒形チューブのマクロスケールおよびマイクロスケール画像を示す。

【図 4 C】図 4 C は、図 4 B の円筒形チューブの異なるベニヤ層におけるセルロース繊維の画像を示す。

40

【図 4 D】図 4 D は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円筒状チューブを形成するための、中心型軸に対して交差する 45° の角度でセルロース繊維を有する、多数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピングを図示する。

【図 4 E】図 4 E は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、図 4 D のラッピング配向に基づいて製作された円筒形チューブのマクロスケールおよびマイクロスケール画像を示す。

【図 4 F】図 4 F は、図 4 E の円筒チューブの異なるベニヤ層におけるセルロース繊維の画像を示す。

【図 5】図 5 は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する木材壁を形成するための、中心型軸を含む平面に実質的に垂直なセルロース繊維を伴う、高密

50

度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピングを図示する簡略化された概略図である。

【図 6 A】図 6 A は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、単一の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをラッピングすることによって形成される中空チューブの簡略断面図を示す。

【図 6 B】図 6 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、単一の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをラッピングすることによって形成された別の中空チューブの簡略断面図を示す。

【図 6 C】図 6 C は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、複数の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをラッピングすることによって形成される中空チューブの簡略断面図を示す。

10

【図 6 D】図 6 D は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをラッピングすることによって形成される複合パイプの簡略断面図を示す。

【図 6 E】図 6 E は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤをラッピングすることによって形成され得る例示的なチューブ断面の画像である。

【図 7 A】図 7 A は、開示された主題の 1 つ以上の実施形態による、中心軸の周りにラッピングされた 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤによって形成された、円周方向に延在する木材壁のエネルギー吸収構造を示す。

20

【図 7 B】図 7 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する木材壁が軸方向圧縮荷重を受けたときの例示的なエネルギー吸収挙動を示す。

【図 7 C】図 7 C は、図 7 B の円周方向に延在する木材壁の軸方向端部における花びら破損モードを示す。

【図 8 A】図 8 A は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する壁の使用のための軸方向負荷構造の簡略化された断面図である。

【図 8 B】図 8 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、複数の円周方向に延在する壁を採用するエネルギー吸収システムを示す。

【図 8 C】図 8 C は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、複数の円周方向に延在する壁を採用するエネルギー吸収システムを示す。

30

【図 9 A】図 9 A は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する壁によって形成される閉端中空構造体の簡略化された断面図である。

【図 9 B】図 9 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する壁によって形成される閉端中空構造体の簡略化された断面図である。

【図 9 C】図 9 C は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、中央部材を取り囲む円周方向に延びる壁によって形成される中実構造体の簡略断面図である。

【図 9 D】図 9 D は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、中央部材を取り囲む円周方向に延びる壁によって形成される中実構造体の簡略断面図である。

【図 9 E】図 9 E は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、天然木芯の周りに複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤをラッピングすることによって作製された中実ロッドの画像である。

40

【図 9 F】図 9 F は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、天然木芯の周りに複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤをラッピングすることによって作製された中実バットの画像である。

【図 10 A】図 10 A は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを形成するための方法を図示する簡略化されたプロセスフロー図である。

【図 10 B】図 10 B は、開示される主題の 1 つ以上の実施形態による、円周方向に延在する壁を形成するために、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをラッピングするための方法を図示する簡略化されたプロセスフロー図である。

50

【図 1 1】図 1 1 は、異なる製造およびチューブパラメータのために、高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤをラッピングすることによって形成された円筒形チューブの圧縮強度のグラフである。

【図 1 2 A】図 1 2 A は、中心型軸（フラットラッピング）に平行な木材繊維を有する高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤで形成された円筒形チューブ、アルミニウムで形成された円筒形チューブ、および炭素繊維布で形成された円筒形チューブについて、カー変位曲線を比較するグラフである。

【図 1 2 B】図 1 2 B は、中心型軸（フラットラッピング）に平行な木材繊維を有する高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤで形成された円筒形チューブ、アルミニウムで形成された円筒形チューブ、および炭素繊維布で形成された円筒形チューブについて、エネルギー吸収を比較するグラフである。

【図 1 3 A】図 1 3 A は、円筒チューブのガス透過性を決定するための、高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤで形成された円筒チューブのガス圧力対時間のグラフである。

【図 1 3 B】図 1 3 B は、コンクリートで形成された円筒パイプと、中心型軸（フラットラッピング）に平行な木材繊維を有する、高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤで形成された円筒パイプの曲げ強度を比較するグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0013】

一般的な考慮事項

本明細書の目的のために、本開示の実施形態の特定の態様、利点、および新規な特徴が本明細書に記載される。開示された方法およびシステムは、決して限定的であると解釈されるべきではない。代わりに、本開示は、単独で、ならびに互いの様々な組合せおよび下位組合せで、開示される様々な実施形態の全ての新規かつ非自明な特徴および態様を対象とする。方法およびシステムは、任意の特定の態様、特徴、またはそれらの組合せに限定されず、開示される実施形態は、任意の 1 つ以上の特定の利点が存在すること、または問題が解決されることを必要としない。任意の実施形態または実施例からの技術は、他の実施形態または実施例のうちの任意の 1 つ以上において説明される技術と組み合わせることができる。開示された技術の原理が適用され得る多くの可能な実施形態を考慮すると、図示された実施形態は、例示的なものに過ぎず、開示された技術の範囲を限定するものとして解釈されるべきではないことを認識されたい。

【0014】

開示される方法のうちの幾つかの動作は、便利な提示のために特定の順番で説明されるが、特定の順序付けが、以下で説明される特定の言語によって必要とされない限り、この説明の方式は、並べ替えを包含することを理解されたい。たとえば、連続して説明される動作は、場合によっては並べ替えられるか、または同時に実行され得る。さらに、簡略化のために、添付の図面は、開示された方法が他の方法と併せて使用され得る様々な方法を示していない場合がある。さらに、説明は、開示された方法を説明するために、「提供する」または「達成する」のような用語を使用することがある。これらの用語は、実行される実際の操作の高レベルの抽象化である。これらの用語に対応する実際の動作は、特定の

【0015】

数値範囲の開示は、特に断りのない限り、端点を含む範囲内の各離散点を指すものと理解されるべきである。別段の指示がない限り、本明細書または特許請求の範囲で使用される、成分の量、分子量、百分率、温度、時間などを表す全ての数は、用語「約」によって修飾されると理解されるべきである。したがって、別段の暗示的または明示的な指示がない限り、または文脈がより明確な構造を有すると当業者によって適切に理解されない限り、記載される数値パラメータは、当業者に知られているように、求められる所望の特性および／または標準試験条件／方法下での検出の限界に依存し得る近似値である。議論された先行技術から実施形態を直接的かつ明示的に区別する場合、実施形態番号は、「約」と

10

20

30

40

50

いう単語が列挙されない限り、近似ではない。「実質的に」、「およそ」、「約」、または同様の言語が特定の値と組み合わせて明示的に使用される場合は常に、明示的に別段の定めがない限り、その値の10%までの変動が意図される。

【0016】

方向および他の相対参照は、本明細書における図面および原理の説明を容易にするために使用され得るが、限定することを意図されない。例えば、「内側」、「外側」、「上」、「下」、「頂部」、「底部」、「内部」、「外部」、「左」、「右」、「前」、「後」、「後側」などの特定の用語が使用され得る。このような用語は、適用可能な場合、特に例示された実施形態に関して、相対的な関係を扱うときの説明の幾つかの明瞭さを提供するために使用される。しかしながら、このような用語は、絶対的な関係、位置、および／または向きを暗示することを意図するものではない。例えば、物体に関して、「上」部分は、単に物体を裏返すことによって「下」部分になり得る。それにもかかわらず、それは依然として同じ部分であり、対象物トは同じままである。

10

【0017】

本明細書で使用される場合、「含む (comprising)」は、「含む (including)」を意味し、また単数形「a」または「an」または「the」は、文脈が明らかにそうでないことを示さない限り、複数の言及を含む。用語「または」は文脈が明らかにそうでないことを示さない限り、言及された代替要素の単一の要素または2つ以上の要素の組合せを指す。

20

【0018】

本明細書に記載される様々な構成要素、パラメータ、動作条件などの代替があるが、それらの代替が必ずしも同等であり、および／または等しく良好に機能することを意味しない。また、特に明記しない限り、選択肢が好ましい順序で列挙されていることも意味しない。特に明記しない限り、以下に定義する基のいずれも、置換されていても置換されていなくてもよい。

【0019】

別段の説明がない限り、本明細書で使用される全ての技術用語および科学用語は、本開示が属する技術分野の当業者に一般に理解されるのと同じ意味を有する。本明細書に記載のものと類似または同等の方法および材料を本開示の実施または試験において使用することができるが、適切な方法および材料を以下に記載する。材料、方法、および実施例は、例示に過ぎず、限定することを意図するものではない。本開示の主題の特徴は、以下の詳細な説明および添付の特許請求の範囲から明らかになるであろう。

30

【0020】

用語の概要

以下は、開示される主題の様々な態様の説明を容易にし、開示される主題の実施において当業者を案内するために提供される。

【0021】

繊維状の植物材料： 植物界の光合成真核生物の一部（例えば、機械的手段またはその他の手段で切断された部分）で、成長した本来の状態のままのもの。幾つかの実施形態では、繊維質植物材料は、木材（例えば、広葉樹または針葉樹）、竹（例えば、竹科のいずれか、例えば、モソウ、三日月葦、ビリディス、竹、およびニグラ）、葦（例えば、ヨシ (*Phragmites australis*)、オオヨシ (*Arundo donax*)、ビルマ葦 (*Neyraudia reynaudiana*)、カナリア葦 (*Phalaris arundinacea*)、葦スウィートグラス (*Glyceria maxima*)、小葦 (*Calamagrostis species*)、紙葦 (*Cyperus papyrus*)、バー葦 (*Sparganium species*)、葦メイス (*Typha species*)、ケープサッチング葦 (*Elegia tectorum*)、サッチング葦 (*Thamnochortus insignis*)、またはイネ科植物（例えば、イネ目またはイネ科から選択された種）のいずれか）を含む。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、植物材料は、リグニン、ヘミセルロース、およびセ

40

50

ルロースから構成される任意のタイプの繊維性植物であり得る。例えば、植物材料は、バガス（例えば、サトウキビまたはソルガム茎の加工残渣から形成される）またはわら（例えば、イネ、コムギ、キビ、またはトウモロコシなどの穀類植物の加工残渣から形成される）であり得る。

【0022】

木材： リグニンおよびヘミセルロースのマトリックス中に埋め込まれたセルロース繊維を含む、天然に存在する木の本体。幾つかの実施形態では、木材は、広葉樹（例えば、18～25重量%の範囲の天然リグニン含有量を有する）、または針葉樹（例えば、限定されないが、バスウッド、オーク、ポプラ、アッシュ、アルダー、アスペン、バルサ木材、ブナ、バーチ、チェリー、バターナッツ、チェストナッツ、ココボロ、エルム、ヒッコリー、メイプル、オーク、パダウク、プラム、クルミ、ヤナギ、イエローポプラ、バルドサイプレス、スギ、ダグラスフィア、フィア、ヘムロック、カラマツ、パイン、レッドウッド、スプルース、タマラック、ジュニパー、およびイチョウ、であり得る。

10

【0023】

長手方向の成長方向（L）： 繊維状植物材料がその根またはその本体から成長する方向（例えば、図1Aの木100からの幹102の方向L）。繊維性植物材料の繊維細胞、導管、および／または仮道チューブの細胞壁を形成するセルロースナノファイバーは一般に、長手方向と整合され得る。場合によっては、繊維性植物材料の長手方向は、概して垂直であってもよく、および／または植物の水蒸散流の方向（例えば、木の根から）に対応してもよい。長手方向は、繊維状植物材料の半径方向および接線方向に対して実質的に垂直であり得る。

20

【0024】

半径方向成長方向（R）： 繊維性植物材料の中心部分から外側に延びる方向（例えば、図1Aの木100からの幹102の方向R）。幾つかの実施形態では、繊維状植物材料の光線細胞（例えば、図1Aの微細構造体110の光線細胞120）は、半径方向に沿って延在することができる。場合によっては、繊維性植物材料の半径方向は、概ね水平であってもよい。半径方向は、繊維状植物材料の長手方向および接線方向に対して実質的に垂直であり得る。

【0025】

接線方向成長方向（T）： 繊維性植物材料の特定のカットにおける長手方向および半径方向の両方に実質的に垂直な方向（例えば、図1Aの木100からの幹102の方向T）。場合によっては、繊維性植物材料の接線方向は、概ね水平であってもよい。幾つかの実施形態では、接線方向は、繊維性植物材料の成長リングに従うことができる（例えば、幹102の円周方向に沿って）。

30

【0026】

ベニヤ： 接線方向に沿って（例えば、樹幹または竹セグメントから）切断され、3mm以下の厚さを有する、繊維性植物材料の連続片。幾つかの実施形態では、厚さに垂直な平面における繊維性植物材料の連続片の寸法が厚さよりもはるかに大きく、例えば、少なくとも1桁大きいことができる。幾つかの実施形態では、ベニヤの厚さは、300μm以下、例えば、100～250μmの範囲内であり得る。幾つかの実施形態では、ベニヤは、（例えば、図1Aの回転方向切断片108を得るために）回転方向切断技術を使用して繊維性植物材料から切断することができる。

40

【0027】

リグニンが損なわれた繊維性植物材料： その中の天然リグニンをin situ修飾するために1つ以上の化学処理によって修飾された、その中の天然リグニンを部分的に除去する（すなわち、部分的脱リグニン）、またはその中の天然リグニンを完全に除去する（すなわち、完全脱リグニン）繊維性植物材料。幾つかの実施形態では、リグニンが損なわれた繊維性植物材料は、セルロース系細胞壁によって形成された天然繊維性植物材料の天然微細構造体を実質的に保持することができる。

【0028】

50

部分的脱リグニン：天然に存在する繊維状植物材料からの天然リグニンの一部（例えば、少なくとも1%）の除去であって、全て（例えば、90%以下）の除去ではない。幾つかの実施形態では、部分的脱リグニンは、天然繊維植物材料を1つ以上の化学処理に供することによって実施することができる。リグニン含有量は、当該技術分野における公知の技術、例えば、ASTMインターナショナルが発行する「バイオマス中の構造的炭水化物およびリグニンの決定」に関する研究分析手続き（LAP）TP-510-42618、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）が発行するバージョン08-03-2012、およびASTMインターナショナルが発行する「高性能液体クロマトグラフィーによるバイオマス中の炭水化物の決定の標準試験方法」に関するASTM E1758-01（2020）を用いて評価することができる。幾つかの実施形態では、部分的脱リグニンプロセスが、例えば、2020年7月16日に公開された「強靱な構造用木材、およびその製造および使用のための方法」という名称の米国特許出願公開第2020/0223091号に記載されているようなものであり得、この脱リグニンプロセスは、参照により本明細書に組み込まれる。

10

20

30

40

【0029】

完全脱リグニン：天然に存在する繊維状植物材料からの天然リグニンの実質的に全て（例えば、90~100%）の除去。幾つかの実施形態では、完全脱リグニンは、天然繊維植物材料を1つ以上の化学処理に供することによって実施することができる。完全脱リグニンの前後の繊維性植物材料内のリグニン含量は、部分脱リグニンについて上述したものと同一または類似の技術を用いて評価することができる。幾つかの実施形態では、完全な脱リグニンプロセスは、例えば、2020年7月30日に公開された「喜ばれる木材およびその製造方法ならびに使用」という名称の米国特許出願公開第2020/0238565号に記載されているようなものであり得、この脱リグニンプロセスは、参照により本明細書に組み込まれる。

【0030】

リグニン修飾：天然に存在する繊維性植物材料中の天然リグニンの1つ以上の特性を、繊維性植物材料中の修飾されたリグニンを除去することなく修飾すること。幾つかの実施形態では、in situ修飾の前および後の繊維性植物材料のリグニン含有量は、例えば、in situ修飾繊維性植物材料は、天然リグニン含有量の少なくとも95%（例えば、天然リグニン含有量の1%以下、または0.5%以下を除去する）を保持するように、実質的に同じであり得る。幾つかの実施形態では、繊維性植物材料は、リグニンを解重合するために（例えば、OH⁻との化学反応によって）in situで修飾することができ、解重合されたリグニンは、繊維性植物材料微細構造体内に保持される。リグニン修飾の前後の繊維状植物材料内のリグニン含有量は、当該技術分野における公知の技術、例えば、ASTMインターナショナル、および／またはパルプ・製紙工業技術協会（TAPPI）、規格T222-om-83、「木材中の酸不溶性リグニンの標準試験方法」によって公表された、「バイオマス中の構造的炭水化物およびリグニンの決定」に関する研究分析手続き（LAP）TP-510-42618、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）によって発行されたバージョン08-03-2012、ASTM E1758-01（2020）を使用して評価することができ、これらの全ては、参照によって本明細書に組み込まれる。幾つかの実施形態では、リグニン修飾プロセスは、例えば、2023年3月2日に公開された「線維植物材料のリグニン修飾のための無廃棄物処理、およびリグニン修飾繊維性植物材料」と題された国際公開WO2023/028356号に記載されているようなものであり得、リグニン修飾プロセスは、参照により本明細書に組み込まれる。

【0031】

含水量：繊維性植物材料の微細構造体内に保持される流体、典型的には水の量。幾つかの実施形態において、含水量（MC）は例えば、オープン乾燥（例えば、103℃で6時間）によって達成された植物材料の重量変化を、式：

50

$$MC(\%) = \frac{\text{乾燥前重量} - \text{乾燥後重量}}{\text{乾燥前重量}} \times 100$$

を使用して計算することによって、オープン乾燥試験によって決定することができ、代替的にまたは追加的に、当技術分野における公知の技術、例えば、ASTM国際によって発行された「木材および木材ベースの材料の直接含水量測定のための標準試験方法」のためのASTM D4442-20(2020)に開示された電気湿度計または他の技術を使用して、含水量を評価することができる。

【0032】

高密度化された繊維性植物材料：天然の微細構造体中のセルロース系細胞によって形成されたルミナが実質的に崩壊し、高密度化され、繊維性植物材料の密度が高密度化前の天然繊維性植物材料の密度よりも大きくなるように、プレスに供された繊維性植物材料。幾つかの実施形態では、リグニンが損なわれた繊維性植物物質の高密度化は、少なくとも 1 g/cm^3 、例えば、 $1.15 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ （例えば、約 1.3 g/cm^3 ）の密度を生じ得る。幾つかの実施形態では、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの高密度化は、ベニヤの厚さを、例えば、少なくとも2倍減少させることができる。例えば、高密度化は、ベニヤ厚さを $0.02 \sim 1.5 \text{ mm}$ の範囲の第1の値から $300 \mu\text{m}$ 以下の第2の値まで減少させることができる。幾つかの実施形態では、高密度化プロセスは、例えば、2020年7月16日に公開された「強靱な構造用木材、およびその製造および使用のための方法」という名称の米国特許出願公開第2020/0223091号、および／または2023年3月2日に公開された「繊維性植物材料のリグニン修飾のための無廃棄物処理、およびリグニン修飾繊維性植物材料」という名称の国際公開WO2023/028356号に記載されているように、本明細書に高密度化プロセスを参照として組み込むことができる。

【0033】

導入部

本明細書では、軸（例えば、共通の中心軸）の周りに1つ以上の繊維性植物材料ベニヤ層をラッピングするかまたは成形することによって形成され、それによって円周方向に延在する壁を形成する中空または中実構造体が開示される。繊維性植物材料ベニヤ層の少なくとも1つは、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤであってもよい。繊維性植物材料ベニヤ層を作製するために、天然繊維性植物材料を、例えば、回転方向切断によって、天然繊維性植物材料ベニヤに切断することができる。次いで、その中のリグニンは、1つ以上の化学的処理を介して損なわれて、繊維状植物材料ベニヤを軟化させることができる。軟化した繊維性植物材料ベニヤは、機械的にプレスされて、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを生じることができる。高密度化されたベニヤの厚さは、ベニヤが破断することなく容易に曲げられ、成形され得るように、十分に小さくすることができる（例えば、 $< 1 \text{ mm}$ ）。幾つかの実施形態では、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの表面の少なくとも一部は、接着剤（例えば、その表面上の実質的に均一なコーティング）でコーティングされ、次いで、繊維性植物材料ベニヤ内のセルロース繊維方向に対して（例えば、螺旋または交差螺旋）に沿って（例えば、平坦な成形）またはある角度で（例えば、螺旋または交差螺旋）成形され得る。成形構造体の壁厚は、繊維状植物材料ベニヤ層の数を変更することによって選択することができる（例えば、同時にまたは連続的に成形される）。幾つかの実施形態では、円周方向に延在する繊維性植物材料壁によって形成される構造体が構造用途で使用するために十分に高い機械的強度（例えば、比較可能なアルミニウム合金チューブよりも高い $50 \sim 90 \text{ MPa}$ の圧縮強度）を示すことができる。代替的にまたは追加的に、円周方向に延びる繊維性植物材料壁によって形成される構造体は、エネルギー吸収の増強を示すことができる。幾つかの実施形態では、円周方向に延在する繊維性植物材料壁は、チューブまたはパイプなどの中空構造体を形成する。あるいは、幾つかの実施形態では、円周方向に延

在する繊維性植物材料壁は、例えば、ダボまたはロッドなどの固体構造体の一部を形成する。

【0034】

高密度化、リグニンが損なわれたベニヤ

天然木は、様々な相互接続された細胞を含む、および／またはそれによって画定される独特の三次元多孔質微細構造体を有する。例えば、図1Aは、縦方向に延びる細胞領域内の木材繊維細胞116の六角形アレイ内に導管112が配置される広葉樹微細構造体110を示す。導管および繊維細胞は、木材の長手方向Lに沿って延在することができる。したがって、各導管112の管腔は、長手方向Lに実質的に平行である延長軸114を有することができる、各繊維細胞116の管腔は、長手方向Lに実質的に平行である延長軸118を有することができる。接線方向Tに沿って隣接する領域間に配置される、複数の光線細胞120が配置される半径方向に延在する細胞領域である。光線細胞120は、木材の半径方向Rに沿って延在することができる。したがって、各光線細胞120の管腔は、木材の半径方向Rに実質的に平行な延長軸122を有することができる。細胞内ラメラは、導管112、繊維細胞116、および光線細胞120の間に配置され、細胞を相互接続するように機能する。針葉樹は、広葉樹と同様の微細構造体を有することができるが、木材の長手方向Lに延在する仮道チューブによって導管および木材繊維が置き換えられている。

10

【0035】

元の木片の切断方向は、最終構造体における細胞管腔の配向を決定することができる。例えば、幾つかの実施形態では、天然木片は、樹木100の幹102から垂直または長手方向（例えば、長手方向の木材成長方向Lに平行）に切断され得、その結果、長手方向に延在する細胞の管腔は、長手方向に切断された木片106の主面（例えば、最大表面積）に実質的に平行に配向される。長手方向に切断された木片106において、接線方向Tは、主面に対して実質的に垂直であり得る。あるいは、幾つかの実施形態では、天然木片は、長手方向に延在する細胞の管腔が半径方向に切断された木片104の主面に対して実質的に垂直に配向されるように、水平方向または半径方向に（例えば、長手方向の木材成長方向Lに対して垂直に）切断され得る。あるいは、幾つかの実施形態では、天然木片は、長手方向細胞の管腔が回転方向切断木片108の主面に実質的に平行に配向されるように、回転方向（例えば、長手方向木材成長方向Lに垂直であり、幹102の円周方向に沿って）に切断され得る。幾つかの実施形態では、天然木片は、長手方向切断、半径方向切断、および回転方向切断の間の任意の他の配向で切断することができる。幾つかの実施形態では、木片の切断方向が最終加工木材の特定の機械的特性を決定し得る。

20

30

【0036】

図1Bは、円周方向に延在する木材壁を形成する際に使用するための木材ベニヤ134の脱リグニンおよび高密度化のための態様を示す。脱リグニン前の初期段階132では、木材ベニヤ134は、木材の天然微細構造体におけるセルロース系細胞壁によって形成された開放管腔136を有することができる。例えば、微細構造体は、ヘミセルロースおよびリグニン接着性マトリックス144によって一緒に結合されたセルロースフィブリル142の複合体140から形成された、長手方向に延在する繊維細胞壁を有することができる、これは、強くかつ剛性である。木材ベニヤ134を1つ以上の化学溶液に浸漬することによって、リグニンマトリックス144を溶解し、その後の洗浄によってベニヤから除去することができる。例えば、化学溶液は、 NaOH （ LiOH または KOH ）、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SO}_3$ ／ Na_2SO_4 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH}／\text{NaH}_2\text{O}_3 + \text{AQ}$ 、 $\text{NaOH}／\text{Na}_2\text{S} + \text{AQ}$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{AQ}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH} + \text{CH}_3\text{OH} + \text{AQ}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{SO}_2 + \text{AQ}$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}_x$ （式中、AQはアントラキノンである）、である。

40

【0037】

脱リグニン後の後続の段階148において、リグニンが損なわれた木材ベニヤ150は

50

、セルロースフィブリル 1 4 2 の配列を保持する微細構造体 1 5 2 を有することができるが（開いた管腔 1 3 6 と同様に）、リグニンの含有量は減少する。幾つかの実施形態では、木材ベニヤ 1 5 0 の微細構造体 1 5 2 は、少なくとも幾つかのリグニン 1 5 4 を保持することができる。しかしながら、リグニンが損なわれた木材ベニヤ 1 5 0 はその天然状態では、木材ベニヤ 1 3 4 よりも著しく柔らかく、それによって、ベニヤ 1 5 0 が圧縮されて最終段階 1 5 6 で高密度化されたベニヤ 1 6 0 を形成することを可能にし、ここで、図 1 B の 1 6 2 および図 1 C の画像に示されるように、以前に開いたセルロース系管腔 1 3 6 は、実質的に折り畳まれる。幾つかの実施形態では、高密度化のためのプレスは、木材ベニヤの長手方向の成長方向（L）に実質的に垂直な、または少なくとも交差する方向に沿ってもよい。

10

【0038】

幾つかの実施形態では、天然木ベニヤ 1 3 4 の幅 W_1 は高密度化され、リグニンを含む木材ベニヤ 1 6 0 の幅 W_2 の少なくとも 2 倍（例えば、少なくとも 3～5 倍）であり得る。幾つかの実施形態では、厚さ W_2 は、ベニヤ板 1 3 4 の W_1 と比較して、60%、70%、または 80% を超えて低減され得、および／またはプレスは、1.1:1～10:1 の圧縮率（ $W_1:W_2$ ）をもたらし得る。例えば、 W_1 は 5 mm 以下（例えば、0.02 mm 以上 1.5 mm 以下の範囲）であり得、 W_2 は 3 mm 以下（例えば、300 μ m 以下、例えば、100～250 μ m の範囲）であり得る。幾つかの実施形態では、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ 1 6 0 は天然木ベニヤ 1 3 4 と比較して、増加した密度を有することができる。例えば、高密度化された木材ベニヤ 1 6 0 は少なくとも 1.15 g/cm³（例えば、少なくとも 1.2 g/cm³、または少なくとも 1.3 g/cm³）の密度を有することができ、一方、天然木ベニヤは 1.0 g/cm³ 未満（例えば、0.9 g/cm³ 未満、または 0.5 g/cm³ 未満）の密度を有することができる。

20

【0039】

図 1 D は、円周方法に延在する木材壁を形成する際に使用するための木材ベニヤ 1 3 4 のリグニン修飾および高密度化のための態様を示す。図 1 B の例と同様に、リグニン修飾前の初期段階 1 7 0 における木材ベニヤ 1 3 4 は木材の天然微細構造体におけるセルロース系細胞壁によって形成された開いた管腔 1 3 6 を有することができ、微細構造体は、ヘミセルロースおよびリグニン接着マトリックス 1 4 4 によって互いに結合されたセルロースフィブリル 1 4 2 の複合体 1 4 0 から形成された長手方向に延びる繊維細胞壁を有することができる。木材ベニヤ 1 3 4 は例えば、天然管腔 1 3 6 を介して、1 つ以上の化学物質を浸透または注入することができる。活性化すると（例えば、80～180℃などの高温での加熱を介して）、浸透した化学物質は、in situ で天然リグニンを修飾することができる。例えば、活性化後の後続の段階 1 7 4 において、天然リグニンの高分子鎖をより小さなセグメント 1 7 8 に分解することができ、それにより、未変性微細構造体の開いたセルロース系管腔 1 3 6 を依然として保持しながら、変性木材ベニヤ 1 7 2 のためのより柔軟な複合体 1 7 6 が得られる。

30

【0040】

幾つかの実施形態では、浸透した化学物質は、水溶液中で水酸化物（OH⁻）イオンを生成する化学物質、例えばアルカリ性化学物質を含むことができる。木材のアルカリへの長期間の曝露はセルロースを分解する可能性がある（これは次に、機械的特性の低下をもたらす可能性がある）ので、浸透した化学物質の量および／または加熱の持続時間は、木材ベニヤ内の全てのアルカリ化学物質が完全に反応して中性軟化木材ベニヤを得ることを確実にするように選択することができる。例えば、浸透されたアルカリ性化学物質（例えば、NaOH）からの OH⁻イオンはリグニン中のフェノール性水酸基と反応することができ、同時に、OH⁻イオンは、リグニン高分子中の結合結合を破壊させ、したがって、リグニン高分子鎖を短くすることもできる。修飾されたリグニンの結果として、木材ベニヤは軟化される。

40

【0041】

50

加えて、リグニン分解生成物は浸透アルカリ性化学物質（例えば、 NaOH ）と反応して、フェノールの塩（例えば、フェノールのナトリウム塩）を形成することができる。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、木材ベニヤに浸透したアルカリ化学物質が天然のヘミセルロースと反応して、その修飾（例えば、分解）を引き起こすことができる。例えば、 OH^- イオンは剥離反応によってヘミセルロースの分解を引き起こし、それによって酸性分解生成物を生成する可能性がある。これらの酸性生成物はアルカリ化学物質（例えば、 NaOH ）と反応して、最終加工植物材料内に固定化され得る中性塩を形成し得る。例えば、ヘミセルロース分解生成物は浸透アルカリ化学物質（例えば、 NaOH ）と反応して、アルデュロン酸の塩（例えば、アルデュロン酸のナトリウム塩）を形成することができる。

10

【0042】

代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、木材ベニヤに浸透したアルカリ化学物質が天然セルロースと反応して、その修飾（例えば、分解）を引き起こすことができる。例えば、 OH^- イオンは、剥離反応によってセルロースの分解を引き起こす可能性がある。分解生成物はアルカリ化学物質（例えば、 NaOH ）と反応して、最終的な高密度化木材ベニヤ182内に固定化され得る中性塩を形成し得る。例えば、セルロース分解生成物は浸透アルカリ化学物質（例えば、 NaOH ）と反応して、グルコン酸塩（例えば、グルコン酸塩のナトリウム塩）を形成することができる。セルロース鎖中の還元末端基は、アルカリ条件下で脱離しやすく、それによって、新しい還元基を露出させることができる。新しい還元末端の生成は、セルロース巨大分子からの還元末端の反復除去を可能にすることができる。したがって、かなりの量のグルコン酸塩（例えば、ナトリウム塩）を形成することができる。幾つかの実施形態では、最終in situリグニン修飾木材中のグルコン酸塩が（例えば、フェノールの塩および／またはアルデュロン酸の塩と比較して）優勢であり得る。

20

【0043】

リグニン修飾複合材176の結果として、軟化木材ベニヤ172は、より容易に高密度化され得る。幾つかの実施形態では、高密度化のためのプレスは、木材の長手方向の成長方向（L）に実質的に垂直な、または少なくとも交差する方向に沿ってもよい。例えば、高密度化段階180中に、リグニン修飾ベニヤ172を圧縮して、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤ182を形成することができ、ここで、図1Dの184に示されるように、前に開いたセルロース系管腔136が実質的に圧潰される。幾つかの実施形態では、天然木ベニヤ134の幅 W_1 は高密度化され、リグニンを含む木材ベニヤ182の幅 W_3 の少なくとも2倍（例えば、少なくとも3～5倍）であり得る。幾つかの実施形態では、厚さ W_3 は、ベニヤ134の W_1 と比較して、60%、70%、または80%を超えて低減され得、および／またはプレスは、1.1:1～10:1の圧縮率（ $W_1:W_3$ ）をもたらし得る。例えば、 W_1 は5mm以下（例えば、0.02mm以上1.5mm以下の範囲）であり得、 W_3 は3mm以下（例えば、300 μm 以下、例えば、100～250 μm の範囲）であり得る。幾つかの実施形態では、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ182は天然木ベニヤ134と比較して、増加した密度を有することができる。例えば、高密度化された木材ベニヤ182は少なくとも1.15g/cm³（例えば、少なくとも1.2g/cm³、または少なくとも1.3g/cm³）の密度を有することができ、一方、天然木ベニヤ134は1.0g/cm³未満（例えば、0.9g/cm³未満、または0.5g/cm³未満）の密度を有することができる。

30

40

【0044】

図1Fを参照すると、天然木材から高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを形成するための例示的なプロセスセットアップが示されている。天然木は丸太または円筒形の棒（例えば、木幹102）の形態であってもよく、管腔はページに垂直な方向に延在する（例えば、長手方向の成長方向）。切断段階188において、天然木は例えば、回転旋盤190を使用して切断され、後続の処理のために天然木の薄い連続ベニヤ層134を分離することができる。幾つかの実施形態では、天然ベニヤ134は、切断段階188か

50

ら、例えば脱リグニン段階などのリグニン修飾段階 191 に直接搬送することができる。図示の例では、ベニヤ 134 が処理ステーション 192 の化学溶液 194 に浸漬されて、その中のリグニンを少なくとも部分的に除去し、したがって、リグニンが損なわれたベニヤ 150 をもたらす。あるいは、幾つかの実施形態では、リグニン修飾段階 191 は、リグニン修飾のために、例えば、その中のベニヤ 134 の一部に化学溶液を浸透させるための処理ステーションと、浸透したベニヤを加熱して所望の in situ 修飾を行うための後続のステーションとを用いて構成することができる。

【0045】

リグニン修飾段階 191 の後、リグニン修飾ベニヤ 150 は、長手方向の成長方向に実質的に垂直な、または少なくとも交差する方向にプレスするために、圧縮ステーション 196 に直接搬送することができる。図 1 F に示す例では、一對のローラ 198 を用いて、間にリグニンが損なわれたベニヤ 150 を機械的に押圧し、高密度化され、リグニン傷害ベニヤ 160 を出力する。しかしながら、限定はしないが、単一の静止ローラ、（例えば、所望の圧縮時間を累積的に提供するための）複数の連続する静止ローラ、単一もしくは複数の可動フラットプラテン、単一もしくは複数の可動ローラ、または前述の任意の組合せなどの、1 つ以上の企図される実施形態によれば、他のプレス構造も可能である。代替的にまたは追加的に、圧縮ステーション 196 は、プレス前またはプレス中にベニヤ 150 および／またはローラ 198 の一方または両方を加熱するように構成することができる。1 つ以上の企図される実施形態によれば、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤを形成するための他のシステムおよび構造も可能である。

【0046】

上記および本明細書の他の箇所の説明は木材ベニヤに焦点を当てているが、開示される主題の実施形態はこれらに限定されない。むしろ、回転切断ベニヤのリグニン修飾、高密度化された、およびラッピングは限定されないが、天然竹などの他の繊維性植物材料に適用することができる。図 1 G は、自然発生状態にある竹セグメント 151 の部分破断図を示す。セグメント 151 は、内部節隔膜 157 によって形成される節 155 によって、莖壁 153 の長さに沿って内部節領域 159 に分割される、中空内部領域 163 を囲む莖壁 153 を有する。莖壁 153 はリグニンマトリックスに埋め込まれた竹セグメント 151 の長手方向 L（例えば、竹成長方向、または中空内部領域 163 によって画定される軸に実質的に平行な方向）に沿って延びる繊維を有する。1 つ以上の分岐スタブ 161 は特定の内部節領域 159 から延在することができ、そこから新しい竹セグメントのための莖壁が成長し得る（たとえば、したがって、新しいセグメントのための異なる長手方向を画定する）根として働くことができる。

【0047】

莖壁 153 内で、竹は、栄養輸送を提供する多孔質細胞および機械的支持を提供する高密度細胞を有する階層的細胞構造体を示す。例えば、図 1 H は竹セグメント 151 の断面の画像を示し、特に、莖壁 153 を構成する実質細胞 165、導管 167、および繊維束 169 の微細構造体を示す。繊維束 169 は高度に整合され、長手方向 L に実質的に平行に延在するが、実質細胞 165 は長手方向 L に平行または垂直であり得る。繊維束 169 の密度は、外面に最も近い竹 151 の外側部分が中空内部領域 163 に最も近い竹の内側部分とは異なる機械的特性を有するように、半径方向に沿って増加することができる。

【0048】

各導管 167 は長手方向 L に沿って延在する開いた管腔を画定することができる。さらに、繊維束 169 を形成する基本繊維は、その中心に不規則な小さい管腔を有することもできる。繊維束 169、実質細胞 165、および導管 167 は、リグニンおよびヘミセルロースから構成されるポリマーマトリックスを介して互いに接着する。天然の微細構造体はまた、繊維の長手方向壁上のピット開口部、実質細胞によって導入される多孔性、および／または隣接する繊維間の開いた細胞間隙を示すことができる。元の竹片の切断方向は、最終構造体における細胞管腔の配向を決定することができる。例えば、天然竹片は回転方向に（例えば、長手方向の成長方向 L に垂直に、セグメント 151 の円周方向に沿って

）切断され得、その結果、長手方向細胞の管腔は、回転方向切断竹片 171 の主面に実質的に平行に配向される。開示される主題の実施形態は高密度化および／またはさらなる加工のために竹を軟化させるために、竹片中の天然ポリマーマトリックスを損なう可能性がある。

【0049】

高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤのラッピング

幾つかの実施形態では、成形軸の周りに 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤをラッピングして巻き付けることによって形成される、結果として生じる円周方向に延在する壁の強度は、円周方向に延在する壁の直径、壁の厚さ（例えば、各木材ベニヤの厚さおよび木材ベニヤ層の数）、および／または木材ベニヤの配向（例えば、中心軸に対する長手方向の成長方向および／またはセルロース繊維の方向）によって影響され得る。幾つかの実施形態では、例えば図 2 A に示されるように、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ 202 を、長手方向の成長方向 206 が成形軸 204 に実質的に平行である状態でラッピングして巻き付けることができる。図 2 A に示す例では、初期段階 200 の単一のベニヤ 202 が成形軸 204 の周りにラッピングされて、段階 208 で円周方向に延在する木材壁 210 を形成する。木材壁 210 は、成形軸 204 に実質的に中心を置いて、それに平行に延在することができる。単一のベニヤ 202 の重なり合う縁部分に接着剤を塗布して、壁 210 を、ラッピングしてラッピングされた円周方向に延在する構造に固定することができる。

10

【0050】

幾つかの実施形態では、図 2 B に示すように、複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ 214、216 を成形軸 226 の周りに同時にラッピングして、円周方向に延在する多層木材壁 224 を形成することができる。図 2 B に示す例では、長手方向の成長方向 218 は、成形軸 226 に実質的に平行である。第 1 および第 2 の木材ベニヤ 214、216 は複数のローラ 222 を備えるローリングステーション 220 の入力端部内に、実質的に平面の向き（例えば、成形軸 226 に平行）で供給され得る。ローラ 222 は、ベニヤ 214、216 を成形軸 226 の周りの位置に徐々に曲げて、多層木材壁 224 を形成することができる。幾つかの実施形態では、接着剤は、ベニヤ 216 に面するベニヤ 214 の表面の一部または全部、および／またはベニヤ 214 に面するベニヤ 216 の表面の一部または全部に塗布することができる。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、接着剤は、最も外側のベニヤ層（例えば、ベニヤ 216）の重なり合う縁部分に塗布されて、壁 224 をラッピングされた円周方向に延在する構造に固定することができる。

20

30

【0051】

幾つかの実施形態では、図 2 C に示すように、複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ 234、242 を、成形軸 250 の周りに順次ラッピングして、円周方向に延在する多層木材壁 254 を形成することができる。図 2 A ～ 図 2 B の例と同様に、各ベニヤ 234、242 の長手方向の成長方向は、成形軸 250 に実質的に平行であり得る。図 2 C に示す例では、成形部材 232（例えば、円筒形ロッド）を使用して、ベニヤ 234、242 のラッピングされた形状（または少なくとも最も内側のベニヤ層 238 のラッピングされた形状）を画定する。第 1 の段階 230 では、第 1 の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤ 234 が成形部材 232 の円周の周りにラッピングされ、それによって、第 2 の段階 236 で最も内側のベニヤ層 238 を形成する。幾つかの実施形態では、ラッピングの前に、接着剤は成形部材 232 に面するベニヤ 234 の表面の一部または全部、および／または成形部材 232 の露出面の一部または全部（例えば、ベニヤ 234 に面する）に塗布することができる。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、接着剤は、例えば、第 1 の段階 230 のラッピングの前、その間、またはその後、ラッピングされたベニヤ層 238 の重なり合うまたは当接する縁部分に塗布され得る。

40

【0052】

第 3 の段階 240 では、第 2 の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤ 242 が最

50

内ベニヤ層 2 3 8 の円周の周りにラッピングされ、それによって、第 4 の段階 2 4 4 で最外ベニヤ層 2 4 6 を形成する。幾つかの実施形態では、第 3 の段階 2 4 0 のラッピングの前に、接着剤はベニヤ層 2 4 2 の最も内側のベニヤ層 2 3 8 に面する表面の一部または全部、および／またはベニヤ層 2 3 8 の露出表面の一部または全部（例えば、ベニヤ 2 4 2 に面する）に塗布され得る。代替的または追加的に、幾つかの実施形態では、接着剤は、例えば、第 3 の段階 2 4 0 のラッピングの前、その間、またはその後に、ラッピングされたベニヤ層 2 4 6 の重なり合うまたは当接する縁部分に塗布され得る。接着剤は、乾燥すると、成形部材 2 3 2 を第 5 段階 2 4 8 で除去することができ、それによってベニヤ層 2 3 8、2 4 6 を残して、円周方向に延びる木材壁 2 5 4 を形成する。成形部材 2 3 2 を取り外した後、木材壁 2 5 4 は、開いた内部容積 2 5 2 を有する中空構造体を形成する。幾つかの実施形態では、成形部材 2 3 2 の取り外しは成形軸 2 5 0 に平行な方向に沿って、成形部材 2 3 2 および木材壁 2 5 4 の一方または両方を互いに対して変位させることによって行うことができる。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、成形部材 2 3 2 が部分的にまたは完全に溶解することによって、またはそうでなければ *in situ* で除去することによって（たとえば、溶融、昇華、エッチングなどによって）除去することができる。

10

【0053】

図 2 A ～図 2 C は木材壁の円周の全体にわたって延在する各ベニヤ層を図示するが、開示される主題の実施形態はそれらに限定されない。むしろ、幾つかの実施形態では、円周方向に延在する木材壁の 1 つ、幾つか、または各層は円周の一部分のみにわたって延在する複数のベニヤで形成することができる（例えば、各ベニヤは、断面図において半円形状を有する）。加えて、単一のベニヤ層が図 2 A に示され、2 つのベニヤ層が図 2 B ～図 2 C に示されているが、1 つ以上の企図される実施形態によれば、任意の数のベニヤ層（例えば、3 つ以上）も可能である。実際、図 2 E ～図 2 F は図 2 D のフラットラッピング配向に従って形成されるが、3 つ以上のベニヤ層を有する円筒形木材チューブ 2 6 0 を示す。図 2 D ～図 2 F では、円筒形木材チューブ 2 6 0 が複数の高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤ層によって形成され、中空内部容積 2 6 4 を囲む、円周方向に延びる木材壁 2 6 2 を有する。各木材ベニヤ層は、その長手方向の成長方向 2 6 6（およびその中のセルロース繊維方向）が成形軸およびチューブ 2 6 0 の長さに実質的に平行に延びるように配向される。

20

30

【0054】

幾つかの実施形態では、例えば図 3 A に示すように、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ 3 0 2 を、成型軸 3 0 4 に対して角度 3 0 8（例えば、ゼロでない、直交しない角度、例えば約 45°）で長手方向伸長方向 3 0 6 にラッピングすることができる。図 3 A に示す例では、初期段階 3 0 0 における単一のベニヤ 3 0 2 が段階 3 1 0 において円周方向に延在する木材壁 3 1 4 を形成するように、成形軸 3 0 4 の周りにラッピングして巻き付けられる。木材壁 3 1 4 は実質的に成形軸 3 0 4 の中心に位置し、それに平行に延在することができるが、その中にセルロース繊維の配向 3 1 2（例えば、螺旋構造を有する）は成形軸 3 0 4 に非平行である。単一のベニヤ 3 0 2 の重なり合う表面部分に接着剤を塗布して、壁 2 1 0 をラッピングされた円周方向に延びる構造に固定することができる。幾つかの実施形態では、ラッピングのための角度付き配向の使用が任意の長さ（例えば、成形軸 3 0 4 に平行な方向に沿って少なくとも 1 m）の円周方向に延在する木材壁 3 1 4 の形成を可能にすることができる。

40

【0055】

幾つかの実施形態では、図 3 B に示すように、複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ 3 1 8、3 2 0 を成形軸 3 2 6 の周りに同時にラッピングして、円周方向に延在する多層木材壁 3 3 0 を形成することができる。図 3 B に示す例では各ベニヤ 3 1 8、3 2 0 の長手方向の成長方向 3 2 8 は成形軸 3 2 6 に対して非平行であるが、ベニヤ 3 1 8、3 2 0 の長手方向の成長方向の向きは実質的に同じである。その結果、木材壁 3 3 0 の各ベニヤ層内のセルロース繊維は、同じ角度で実質的に平行である。図 3 B に示す

50

例では、第1および第2の木材ベニヤ318、320は内部ローラ332および外部ローラ324を備えるローリングステーション322の入力端部に、オフセット配向で（例えば、成形軸326を含む平面を横切って）供給することができる。ローラ324、324は、ベニヤ318、320を成形軸326の周りの位置に成形して、多層木材壁330を形成することができる。幾つかの実施形態では、接着剤は、ベニヤ320に面するベニヤ318の表面の一部または全部、および／またはベニヤ318に面するベニヤ320の表面の一部または全部に塗布することができる。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、接着剤は、壁330を円周方向に延在する構造に固定するために、最も外側のベニヤ層（例えば、ベニヤ層320）の重なり合う縁部分に塗布され得る。

【0056】

幾つかの実施形態では、円周方向に延在する木材壁を形成する複数の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤはそれらの長手方向の成長方向に対して異なる配向を有することができる。例えば、図3Cに示すように、連続する段階340における第2のベニヤ342を、予めラッピングされたベニヤ302の周りにラッピングすることができる。ベニヤ342は成型軸線304に対して、その長手方向の伸長方向346を角度348（例えば、角度308の非ゼロの非直交角度、例えば、約45°）でラッピングすることができる。幾つかの実施形態では、第2のベニヤ342が第1のベニヤ302の方向とは反対の方向に（例えば、第1のベニヤが左螺旋を形成する場合、第2のベニヤが右螺旋を形成する）、しかし同じ角度でラッピングされ得る。したがって、異なる層中のセルロース繊維はチューブ軸326に対して同じ角度を呈するが、反対の巻き上げ方向を呈する。幾つかの実施形態では、反対のラッピング方向が所望の壁厚に達するまで、各後続のラッピング層に対して継続することができる。図3Cに示す例では、段階350で得られる木材壁358は、セルロース繊維の配向312をその中に有する最も内側のベニヤ層314と、セルロース繊維の別の配向352をその中に有する最も外側のベニヤ層354とを含む。幾つかの実施形態では、多層木材壁358内の配向312、352は交差螺旋構造とみなすことができる。幾つかの実施形態では、配向312、352は例えば、約90°の角度356を形成することができる。

【0057】

図3A～図3Cは木材壁の円周の全体にわたって延在する各ベニヤ層を図示するが、開示される主題の実施形態はそれらに限定されない。むしろ、幾つかの実施形態では、円周方向に延在する木材壁の1つ、幾つか、または各層は円周の一部分のみにわたって延在する複数のベニヤから形成され得る（例えば、各ベニヤが断面図においてC字形を有する）。加えて、単一のベニヤ層が図3Aに示され、2つのベニヤ層が図3B～図3Cに示されているが、1つ以上の企図される実施形態によれば、任意の数のベニヤ層（例えば、3つ以上）も可能である。実際、図4B～4Cは図4Aの螺旋構造に従って形成されるが、2つより多いベニヤ層を有する円筒形木材チューブ400を示し、図4E～4Fは図4Dの交差螺旋構造に従って形成されるが、2つより多いベニヤ層を有する別の円筒形木材チューブ410を示す。図4A～図4Cでは、円筒形木材チューブ400は、複数の高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤ層によって形成され、中空内部容積402を囲む、円周方向に延びる木材壁406を有する。各木材ベニヤ層（例えば、図4Aおよび図4Cの第1層408a～第2層408b）は、その長手方向の成長方向404（およびその中のセルロース繊維方向）が成形軸およびチューブ400の長さに対してある角度で延在するように配向される。図4D～図4Fでは、円筒形木材チューブ410は、複数の高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤ層414a～414cによって形成され、中空内部容積412を取り囲む、円周方向に延びる木材壁416を有する。各木材ベニヤ層414a～414cは、そのそれぞれの長手方向の成長方向418a～418cで、成形軸およびチューブ410の長さに対してある角度で配向される。しかしながら、各木材ベニヤ層414a～414cについて、それぞれの長手方向の成長方向418a～418cは、それに直接隣接する木材ベニヤ層の方向とは反対の方向にある。例えば、第1および第3層414a、414cは同じ方向（例えば、実質的に平行）に沿った配向を

10

20

30

40

50

有し、一方、第2層414bの方向は、図4Fに示されるように、第1および第3層と反対の配向を有する。

【0058】

幾つかの実施形態では、例えば図5に示すように、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤ502を、長手方向の伸長方向506を円周方向に整合させてラッピングすることができる（例えば、その中のセルロースファイバーの配向512が例えば、成型軸504を含む平面508に対して、約90°の角度516になるように）。図5に示す例では、初期段階500における単一のベニヤ502が段階510において円周方向に延在する木材壁514を形成するように、成型軸504の周りにラッピングされる。木材壁514は、成型軸504に実質的に中心を置いて、それに平行に延在することができる。単一のベニヤ502の重なり合う表面部分に接着剤を塗布して、壁514を、ラッピングされた円周方向に延びる構造に固定することができる。

10

【0059】

繊維状植物材料製ベニヤによって形成されたチューブ

幾つかの実施形態では、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは中空構造体、例えば、実質的に円筒形のチューブまたはパイプを形成するようにラッピングされ得る。例えば、図6Aは、単一の繊維性植物材料ベニヤ606を含む中空構造体600を示す。ベニヤ606は、中心軸の周りにラッピングされて、内部容積604を囲む円周方向に延びる繊維性植物材料壁602を形成する。図6Aに示す例では、ベニヤ606の対向する側縁部が互に対向し、および／または当接することができ、それによって接合部608を形成する。幾つかの実施形態では、接合部608に接着剤を塗布して、ベニヤ606を所望のラッピング形状に固定することができる。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、ベニヤ616は、例えば、図6Bの中空構造体610の円周方向に延びる壁612によって示されるように、内部容積614を囲み、接合部618を形成するために、円周方向に沿って（例えば、側縁部分で）それ自体と重なり得る。接合部618は、ベニヤの残りの部分と比較して、半径方向に沿って増加した厚さを有することができる。幾つかの実施形態では、接合部618に接着剤を塗布して、ベニヤ616を所望のラッピング形状に固定することができる。代替的にまたは追加的に、ベニヤ606および／またはベニヤ616の幾つかのまたは全ての表面は接着剤が乾燥すると、ベニヤの剛性が増加し、それによってベニヤを所望のラッピングされた形状に保持するように、接着剤でコーティングすることができる。

20

30

【0060】

幾つかの実施形態では、複数の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤをラッピングして、中空構造体、例えば、実質的に円筒形のチューブまたはパイプを形成することができる。例えば、図6Cは、円周方向に延在する繊維性植物材料壁630を形成する4つのベニヤ層622、624、626、および628を含む中空構造体620を示す。最も内側の繊維性植物材料ベニヤ622は、内部容積632を囲むように中心軸の周りにラッピングされ、一方、他のベニヤ624～628は、より半径方向内側のベニヤの上に連続的にラッピングされる。図示の例では、各ベニヤの反対側の側縁部は、互に対向および／または当接することができ、それによって、それぞれの接合部を形成する（明確にするために、図6Cでは、634のみがラベル付けされている）。幾つかの実施形態では、各接合部が例えば、壁630の強度を高めるために、構造体620の円周方向に沿って、他の接合部、または壁630内の隣接するベニヤの少なくとも接合部からオフセットされ得る。幾つかの実施形態では、接着剤を各ベニヤ接合部（例えば、634）に塗布して、ベニヤを所望のラッピング形状に固定することができる。代替的にまたは追加的に、各ベニヤの露出された半径方向表面またはその一部は別のベニヤの対向する半径方向表面に接着するために、接着剤でコーティングすることができる。代替的または追加的に、ベニヤ622、624、626、および／または628の幾つかのまたは全ての表面は接着剤が乾燥すると、ベニヤの剛性が増加し、それによってベニヤを所望のラッピングされた形状に保持するように、接着剤でコーティングすることができる。

40

50

【0061】

幾つかの実施形態では、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤによって形成された中空構造体は1つ以上の非植物材料（例えば、非木材）層と組み合わせて複合構造体を形成することができる。例えば、図6Dは、中心軸の周りに1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤをラッピング、内部容積644を囲むことによって形成された円周方向に延在する壁642を有する複合中空構造体640を示す。壁642の内面上に、第1の非植物層646を配置することができる。代替的にまたは追加的に、第2の非植物層648は、壁642の外面上に配置することができる。幾つかの実施形態では、第1の非植物層646、第2の非植物層648、またはその両方はコンクリート、金属、またはポリマーで形成することができる。幾つかの実施形態では、第1の非植物層646、第2の非植物層648、または両方の厚さは円周方向に延在する繊維性植物材料壁642の厚さ未満、例えば、繊維性植物材料壁厚の50%以下であり得る。幾つかの実施形態では、第2の非植物層648は、例えば、ベニヤがラッピングされ、任意の接着剤が乾燥した後に、繊維性植物材料壁642上に提供され得る（例えば、堆積、コーティング、積層など）。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、第1の非植物層646は、例えば、ベニヤがラッピングされ、任意の接着剤が乾燥した後に、繊維性植物材料壁642上に提供され得る（例えば、堆積、コーティング、積層など）。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、第1の非植物層646は、（例えば、チューブまたはパイプとして）実施することができ、繊維性植物材料ベニヤをその周りにラッピングして壁642を形成する成形部材として使用することができる。

【0062】

上記の議論は主に円筒形断面を有する中空構造体に焦点を当ててきたが、開示される主題の実施形態はそれに限定されない。実際、1つ以上の考えられる実施形態によれば、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の任意の断面形状が可能である。例えば、図6Eは、円形断面650と、三角形断面652と、矩形断面654とで製造された中空木材構造体を示す。

【0063】

エネルギー吸収構造体

幾つかの実施形態では、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、セルロース繊維に沿った方向に強く（例えば、約650MPaの機械的強度を有する）が細胞繊維に垂直な方向には比較的弱く（例えば、約20MPaの機械的強度を有する）ことができる。その結果、円周方向に延びる木材壁702を形成するための平らに包まれた配向（例えば、成形軸706に平行な長手方向の成長方向708）は図7Aのセットアップ700に示されるように、成形軸706に平行な力（例えば、軸方向に沿った力）を受ける場合には比較的強いが、成形軸706に垂直な力（例えば、径方向に沿った力）を受ける場合には比較的弱い異方性であり得る。加えて、図7Aのように軸方向圧縮を受ける場合、フラットラッピングされた木材チューブ702は、等方性材料で作られたチューブとは異なる独特の破損モードを示すことができる。幾つかの実施形態では、この破損モードがフラットラッピングされた木材壁702のエネルギー吸収能力を増加させることができる。

【0064】

図7B～7Cの試験進行710に示されるように、2つの端部キャップによって軸方向に圧縮されて装填されると、フラットラッピングされた木材チューブ702はチューブ702の一端または両端から始まり、2つの端部キャップが近づくにつれて軸方向に沿って安定して前進する、花びら破損モード712で破断する。対照的に、アルミニウム製の等方性チューブが同様の軸方向圧縮を受けるとき、破損は座屈によるチューブの厳しい局部的歪みの特徴とする。図8Aを参照すると、圧縮装填のための例示的な構造800が示されており、端部キャップ802a、802bは、フラットラッピング木材チューブ804の反対側の軸方向端部に挿入され、それらの間に中空容積806を有する。図示の例では、各端部キャップ802が25.5mmの外径D1、12.67mmの内径D2、10.

8 mmのフランジ高さH 1、および10.1 mmのインサート高さH 2を有し、木材チューブ804は12.75 mmの内径D 3、100 mmのフランジ対フランジ長さH 3、および0.64 mmの壁厚tを有した。

【0065】

圧縮歪の約2%では、チューブの異方性機械的挙動のために、端部キャップと接触しているチューブ704の端部で軸方向に沿って複数の亀裂が開始する。2つの端部キャップが互いにさらに接近することにつれて、初期亀裂は軸方向に沿って平行に伝播し、亀裂の後にチューブが細片に分割されることになる。図7B~7Cに示すように、クラックが軸方向に沿って連続的に伝播し、チューブの花びら状の破損形態を形成することにつれて、これらの高密度化され、リグニンが損なわれた木材ストリップが外側にカールする。

10

【0066】

幾つかの実施形態では、フラットラッピング木材壁における花びら破損モードによって提供される高エネルギー吸収がエネルギー吸収デバイス（例えば、自動車バンパー、建物破碎保護材等）において活用することができる。例えば、図8Bは、一対の支持部材814a、814bの間に配置された、フラットラッピングされた木材チューブ804のレイ812（各々の長手方向の成長方向808がチューブ804の軸と整合している）によって形成されたエネルギー吸収構造体810を示す。支持部材814a、814bは任意の材料（例えば、アルミニウムなどの金属）で形成することができる。幾つかの実施形態では、支持部材814a、814bはそれぞれの端部キャップ（例えば、図8Aの圧縮キャップ802と同様であり、図8Bには示されていない）を介して木材チューブ804に結合することができる。したがって、支持部材814a、814bの間に十分な力（例えば、衝撃または圧縮）を加えることは、チューブ804のうちの1つ以上の花びら破損によって吸収および／または放散され得る。図8Bには3つのチューブ804のみの線形レイ812が示されているが、開示される主題の実施形態はそれに限定されない。むしろ、1つ以上の企図される実施形態によれば、任意の数のチューブ804およびその配置が可能であり、例えば、図8Cのエネルギー吸収構造体820におけるアルミニウムプレート826a、826bの間のチューブ824の矩形レイ822などが可能であるが、これらに限定されない。

20

【0067】

繊維状植物材料ベニヤによって形成された閉鎖端部および固体構造体

30

上記および本明細書の他の箇所の説明は開放端中空構造体に焦点を当てているが、開示される主題の実施形態はそれに限定されない。むしろ、幾つかの実施形態では、中心軸の周りに1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをラッピングすることによって形成される円周方向に延在する壁は、閉鎖端部の中空構造体および／または中実構造体的一部分とすることができる。例えば、図9Aは内部容積910を取り囲む円周方向に延在する繊維性植物材料壁902を有する、閉鎖端部の中空構造体900（例えば、閉鎖端チューブ、カップ、タンク、またはボトル）を示す。第2の部材904は、壁902の反対側の端部908が開いたままであり得る一方で、壁902の一方の端部906に結合され得、それを閉じ得る。第2の部材は任意の材料、例えば、天然繊維性植物材料、金属、ポリマー、コルク、コンクリート、高密度化された繊維性植物材料、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料、またはそれらの任意の組合せで形成することができる。図9Aに示す例では、第2の部材904が壁902の外側部分の上に延在し、および／またはそれに取り付けることができる。代替的にまたは追加的に、第2の部材914は例えば、図9Bの構造体912によって示されるように、壁902の内側部分の上に延在し、および／またはそれに取り付けることができる。

40

【0068】

図9Cは、中心部材924を取り囲む、円周方向に延在する繊維性植物材料壁922を有する中実構造体920（例えば、ロッド、ダボ、バット、またはクラブ）を示す。中央部材924は、任意の材料、例えば、天然繊維性植物材料、金属、コルク、コンクリート、高密度化された繊維性植物材料、リグニンが損なわれた繊維性植物材料、高密度化され

50

、リグニンが損なわれた繊維性植物材料、またはそれらの任意の組合せで形成することができる。例えば、図 9 E は、木材コアの周りに 10 層の高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤをラッピングすることによって形成された加工された固体構造体を示し、図 9 F は、木材コアの周りに 90 層の高密度化され、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤをラッピングすることによって形成された加工された固体構造体を示す。図 9 C に示す例では、中央部材 924 は、軸方向長さの木材壁 922 内に收容される。しかしながら、幾つかの実施形態では、中央部材は、繊維性植物材料壁の一方または両方の端部を越えて延在してもよい。例えば、図 9 D の中実構造体 926 内の中央部材 928 は、円周方向に延在する木材壁 922 の第 1 の端部 930 から延在する延長部分 932 を有する。

【0069】

製造方法

図 10 A を参照すると、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを製造するための方法 1000 が示されている。方法 1000 は、天然繊維植物材料のベニヤが調製される処理工程 1002 で開始することができる。例えば、処理工程 1002 の調製は天然繊維植物材料のベニヤを、親構造体（例えば、樹木）から切断、除去、または別様に分離することを含むことができる。幾つかの実施形態では、切断は、ベニヤを実質的に平坦な平面構造体に形成することができ、セルロース繊維の方向は構造体の平面に平行に延びる。任意選択で、幾つかの実施形態では、調製することは天然繊維植物材料のベニヤの前処理、例えば、後続の処理のための調製、後続の処理のための調製（例えば、ストリップへのスライス）における特定の形状への繊維性植物材料の形成、または前述の任意の組合せにおいて、任意の望ましくない材料または汚染を除去するための洗浄を含むことができる。幾つかの実施形態では、処理工程 1002 の調製は、回転方向切断によって 1 つ以上のベニヤを得ることを含む。

【0070】

方法 1000 は、決定工程 1004 に進むことができ、ベニヤがリグニン修飾または脱リグニンを受けるかどうか決定される。脱リグニンが望ましい場合、方法 1000 は処理工程 1006 に進み、ここで、天然繊維植物材料ベニヤは例えば、処理に関連する化学溶液中に天然繊維植物材料ベニヤ（またはその一部）を浸漬することによって、少なくとも幾らかのリグニンをそこから除去するために、1 つ以上の化学処理に供される。幾つかの実施形態では、各化学処理または幾つかの化学処理のみを真空下で実施することができ、その結果、処理に関連する溶液は天然繊維植物材料ベニヤの細胞壁および管腔に完全に浸透するように促される。あるいは、幾つかの実施形態では、化学処理は、周囲圧力条件または高圧条件（例えば、 $\sim 6 \sim 8$ バール）下で実施することができる。幾つかの実施形態では、それぞれの化学処理または幾つかの化学処理は、周囲温度（例えば、 $\sim 23^{\circ}\text{C}$ ）と、化学処理に関連する溶剤が沸騰している高温（例えば、 $\sim 70 - 160^{\circ}\text{C}$ ）との間の任意の温度で実施することができる。幾つかの実施形態では、溶液が天然繊維植物材料の微細構造体への破壊の量を最小限にするために攪拌されない。

【0071】

幾つかの実施形態では、浸漬時間は、0.1 時間 $\sim$ 96 時間、例えば、1 時間 $\sim$ 12 時間（両端値を含む）の範囲であり得る。溶液内への浸漬時間の量は、除去されるリグニンの量、繊維状植物材料のタイプ、ベニヤのサイズ、溶液の温度、処理の圧力、および／または攪拌の関数であってもよい。例えば、より少量のリグニン除去、より小さいベニヤサイズ（例えば、厚さ）、より高い溶液温度、より高い処理圧力、および攪拌は、より短い浸漬時間に関連し得るが、より多量のリグニン除去、より大きいベニヤサイズ、より低い溶液温度、より低い処理圧力、および攪拌無しは、より長い浸漬時間に関連し得る。

【0072】

幾つかの実施形態では、化学処理の溶液は、アルカリ溶液を含む。幾つかの実施形態では、化学処理の溶液は、水酸化ナトリウム（ NaOH ）、水酸化リチウム（ LiOH ）、水酸化カリウム（ KOH ）、亜硫酸ナトリウム（ Na_2SO_3 ）、硫化ナトリウム（ Na_2S ）、 Na_nS （式中、 n は整数である）、尿素（ $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ）、亜硫酸ナトリウム

10

20

30

40

50

(NaHSO_3)、二酸化硫黄(SO_2)、アントラキノン(AQ)($\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_2$)、メタノール(CH_3OH)、エタノール($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、ブタノール($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$)、ギ酸(CH_2O_2)、過酸化水素(H_2O_2)、酢酸(CH_3COOH)、酪酸($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)、ペルオキシギ酸(CH_2O_3)、ペルオキシ酢酸($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$)、アンモニア(NH_3)、トシル酸($p\text{-TsOH}$)、次亜塩素酸ナトリウム(NaClO)、亜塩素酸ナトリウム(NaClO_2)、二酸化塩(ClO_2)、塩素(Cl_2)または上記の物質の任意の組合せを含むことができる。化学処理のための化学物質の例示的な組合せとしては、限定されないが、 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{S}$ 、 $\text{NaOH}+$ 尿素、 $\text{NaHSO}_3+\text{SO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaHSO}_3+\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH}+\text{AQ}$ 、 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{S}+\text{AQ}$ 、 $\text{NaHSO}_3+\text{SO}_2+\text{H}_2\text{O}+\text{AQ}$ 、 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SO}_3+\text{AQ}$ 、 NaHSO_3+AQ 、 $\text{NaHSO}_3+\text{Na}_2\text{SO}_3+\text{AQ}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_3+\text{AQ}$ 、 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{S}+\text{Na}_n\text{S}$ (n は整数)、 $\text{Na}_2\text{SO}_3+\text{NaOH}+\text{CH}_3\text{OH}+\text{AQ}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}+\text{NaOH}$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}+\text{HCOOH}$ 、 $\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}$ 、および NaClO_2 +酢酸が挙げられ得る。

【0073】

決定工程1008で、繊維状植物材料ベニヤ中のリグニン含有量の所望の減少が達成されるまで、化学処理を継続することができる(または後続の溶液で繰り返すことができる)。リグニン含有量は所望の用途に応じて、0.1%(リグニン含有量は天然繊維植物材料中の元のリグニン含有量の0.1%である)と99%(リグニン含有量は、天然繊維植物材料中の元のリグニン含有量の99%である)との間に減少させることができる。例えば、可能な限り多くの天然繊維性植物材料を保持することが望ましい場合がある幾つかの実施形態では、リグニン含有量の減少は、例えば、リグニン含有量が天然繊維性植物材料の元のリグニン含有量と比較して10%以下減少するように、比較的小さくすることができる。幾つかの実施形態では、より多量のリグニンを除去することができ、例えば、元のリグニン含有量の少なくとも90%が除去される(例えば、90~100%のリグニンが除去される)。幾つかの実施形態では、リグニン含有量が天然繊維植物材料中の元のリグニン含有量と比較して50%以下減少する。幾つかの実施形態では、化学処理は、リグニン含有量と同時に、例えば、リグニン含有量の減少と同程度またはそれより少ない程度まで、ヘミセルロース含有量を減少させる。幾つかの実施形態では、繊維性植物材料ベニヤが広葉樹または竹である場合、処理工程1006の脱リグニン後のリグニン含有量は少なくとも10重量%(例えば、10~15重量%の範囲)であり得る。幾つかの実施形態では、繊維性植物材料ベニヤが針葉樹である場合、処理工程1004の脱リグニン後のリグニン含有量は、少なくとも12.5重量%(例えば、12.5~17.5重量%を含む)であり得る。

【0074】

幾つかの実施形態では、処理工程1006および/または決定工程1008(例えば、処理工程1014に進む前)は化学処理の後に、例えば、脱リグニンプロセスから生じる残留化学物質または微粒子を除去するために、任意選択のすすぎステップをさらに含むことができる。例えば、脱リグニンベニヤは、1つ以上のすすぎ溶液中に部分的にまたは完全に浸漬することができる。すすぎ溶液は、溶媒、例えば、脱イオン(DI)水、アルコール(例えば、エタノール、メタノール、イソプロパノールなど)、またはこれらの任意の組合せであり得るが、これらに限定されない。例えば、すすぎ溶液は、等量の水およびエタノールで形成することができる。幾つかの実施形態では、すすぎは例えば、微細構造体の破壊を回避するために、攪拌せずに行うことができる。幾つかの実施形態では、すすぎは、各反復について新鮮な混合物すすぎ溶液を使用して、複数回(例えば、少なくとも3回)反復されてもよい。

【0075】

代わりに、決定工程1004においてリグニン修飾が望まれる場合、方法1000は処理工程1010に進むことができ、ここで、天然繊維植物材料ベニヤはその中のリグニンを修飾するために、1つ以上の化学物質で浸透させることができる。例えば、幾つかの実

施形態では、浸透は、1つ以上の化学物質を含有する溶液中に、真空下で天然繊維植物材料ベニヤを浸漬することによって行うことができる。幾つかの実施形態では、化学溶液がOH⁻イオンを有するか、さもなければ溶液中にOH⁻イオンを生成することができる少なくとも1つの化学構造要素を含むことができる。幾つかの実施形態では、溶液中の化学物質のうちの1つ、幾つか、または全ては、アルカリ性であり得る。幾つかの実施形態では、化学溶液は、p-トルエンスルホン酸、NaOH、LiOH、KOH、Na₂O、またはそれらの任意の組合せを含む。化学物質の例示的な組合せとしては、p-トルエンスルホン酸、NaOH、NaOH+Na₂SO₃/Na₂SO₄、NaOH+Na₂S、NaHSO₃+SO₂+H₂O、NaHSO₃+Na₂SO₃、NaOH+Na₂SO₃、NaOH/NaH₂O₃+AQ、NaOH/Na₂S+AQ、NaOH+Na₂SO₃+AQ、Na₂SO₃+NaOH+CH₃OH+AQ、NaHSO₃+SO₂+AQ、NaOH+Na₂S_x（式中、AQはアントラキノンである）、NaOHがLiOHまたはKOHで置き換えられた上記のいずれか、または上記のものの任意の組合せが挙げられ得るが、これらに限定されない。

10

【0076】

例えば、幾つかの実施形態では、木材ベニヤ（例えば、バスウッド）は、容器内の化学溶液（例えば、2～5% NaOH）に浸漬することができる。次いで、容器を真空ボックスに入れ、真空にかけることができる。このようにして、ベニヤ内の空気を排出して負圧を形成することができる。真空ポンプがオフにされると、ベニヤ内の負圧はその中の自然なチャンネル（例えば、縦方向の細胞によって画定される管腔）を通してベニヤ内に溶液を吸い込むことができる。このプロセスは、ベニヤの内側のチャンネルが化学溶液で満たされ得るように（例えば、約2時間）、2回以上（例えば、3回）繰り返すことができる。このプロセスの後、含水量は～10.2%（例えば、天然木の場合）から～70%以上に増加することができる。幾つかの実施形態では、化学浸透は、例えば、室温（20～30℃、例えば、～22～23℃）で、加温せずに行うことができる。幾つかの実施形態では、化学溶液は、ベニヤのセルロース系微細構造体の破壊を回避するために攪拌されない。

20

【0077】

方法1000は、処理工程1012に進むことができ、ここで、修飾は、浸透ベニヤを高温、例えば、80℃（例えば、80～180℃、例えば、120～160℃）を超える高温に供することにより活性化され得、それにより、軟化ベニヤ（例えば、天然繊維植物材料ベニヤと比較して軟化されたもの）をもたらす。幾つかの実施形態では、処理工程1012の高温への曝露は、蒸気加熱を介して、例えば、密閉反応器内で生成された蒸気を介して、フロースルー反応器内の蒸気流を介して、および／または過熱蒸気発生器からの蒸気を介して達成することができる。代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、処理工程1012の高温への曝露が例えば、蒸気を別個に使用することなく、1つ以上の加熱要素からの熱エネルギーの伝導および／または放射を介して、乾式加熱によって達成することができる。幾つかの実施形態では、処理工程1012の間、浸透ベニヤは例えば、1～5時間の第1の時間（例えば、ベニヤのサイズに応じて、より厚いピースはより長い加熱時間を必要とする）、高温にさらされ得る。幾つかの実施形態では、第1の期間の後、浸透ベニヤの加熱によって生成された任意の蒸気は例えば、反応器の圧力解放（例えば、リリース弁）を開くことによって解放され得る。例えば、幾つかの実施形態では、圧力解放は、修飾ベニヤ中の約50%の水分を除去するのに効果的であり得る。例えば、幾つかの実施形態では、軟化したベニヤは、30～50重量%（両端値を含む）の範囲の含水量を有することができる。幾つかの実施形態では、ベニヤをさらに乾燥させて、ベニヤの含水量を減少させることができるが、繊維性植物材料ベニヤは、その軟化した性質を失わせる水分が多過ぎることはない（例えば、含水量が約8～10重量%以上になるように）。幾つかの実施形態では、予備乾燥が、繊維状植物材料ベニヤの含水量を30重量%超（例えば、30～50重量%）から、例えば、10～20重量%（例えば、～15重量%）の範囲内に低減するのに有効であり得る。水分は、加熱および／または予備乾燥（例えば、蒸発による）を介して軟化ベニヤから除去され得るが、除去された水分はin situリ

30

40

50

グニン修飾からの残留塩および／または化学物質を実質的に含まなくてもよい。むしろ、幾つかの実施形態では、化学物質が修飾によって実質的に消費され得、残留塩は、軟化ベニヤの微細構造体内に保持され得る。

【0078】

処理工程1012または決定工程1008の後、方法は、処理工程1014に進むことができる。ここで、任意選択のプリプレス修飾を実行することができる。幾つかの実施形態では、プリプレス修飾は、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの内部修飾を含むことができる。「内部」という用語は処理工程1014の修飾を指すために使用されるが、幾つかの実施形態では、修飾は、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの外部特徴ならびに内部特徴に適用されてもよく、一方、他の実施形態では、修飾は、他の特徴に影響を及ぼすことなく、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの内部特徴または外部特徴のいずれかに適用されてもよいことが企図される。幾つかの実施形態では、内部修飾は、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの表面上に非天然粒子を形成すること、堆積させること、またはそうでなければ提供することを含むことができる。そのような表面は、少なくとも内面、例えば、管腔を裏打ちする細胞壁を含むことができるが、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの外表面も含むことができる。リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの表面上に組み込まれた非天然粒子は、他の特性の中でも特に、疎水性、耐候性、耐食性（例えば、耐塩性）、および／または耐炎性などの特定の有利な特性を有する最終構造体を刺激することができる。例えば、幾つかの実施形態では、疎水性ナノ粒子（例えば、 SiO_2 ナノ粒子）は、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの面上に形成され得る。

【0079】

代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、内部修飾は、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの表面化学を修飾するさらなる化学処理を実施することを含むことができる。例えば、幾つかの実施形態では、さらなる化学処理は、銅酸塩（CDDC）、アンモニア性銅第四級（ACQ）、クロム酸ヒ酸銅（CCA）、アンモニア性亜鉛ヒ酸塩（ACZA）、ナフテン酸銅、酸クロム酸銅、クエン酸銅、アゾール銅、8-ヒドロキシキノリン酸銅、ペンタクロロフェノール、ナフテン酸亜鉛、ナフテン酸銅、クレオソート、二酸化チタン、プロピコナゾール、テブコナゾール、シプロコナゾール、ホウ酸、ホウ砂、有機ヨウ化物（IPBC）、および $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ のうちの少なくとも1つを含むことができる。

【0080】

代替的にまたは追加的に、幾つかの実施形態では、処理工程1014の内部修飾は、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤに1つ以上のポリマー（またはポリマー前駆体）を浸透させて複合材料を形成することを含むことができる。例えば、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、真空下でポリマー溶液中に浸漬することができる。ポリマーは、軟化した植物材料の細孔に浸透することができる任意のタイプのポリマー、例えば、合成ポリマー、天然ポリマー、熱硬化性ポリマー、または熱可塑性ポリマーであり得る。幾つかの実施形態では、ポリマー浸透繊維性植物材料複合体は、例えば、ベニヤの厚さが1mm以上である場合、引き続き高密度化され、ベニヤを、破断、亀裂、または他の方法でベニヤの構造体を損なうことなくラッピングすることを可能にすることができる。幾つかの実施形態では、ポリマー浸透は、ベニヤの乾燥後であるが、処理工程1016のプレスの前に行うことができる。あるいは幾つかの実施形態では、ポリマー浸透は、乾燥後、および／またはベニヤの部分プレス後であるが、処理工程1016のプレスの前に行うことができる。

【0081】

例えば、幾つかの実施形態では、ポリマーは、エポキシ樹脂、ポリビニルアルコール（PVA）、ポリエチレングリコール（PEO）、ポリアミド（PA）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリブチレンテレフタレート（PBT）、ポリトリメチレンテレフタレート（PTT）、ポリアクリロニトリル（PAN）、ポリカプロラクタム（PA6

）、ポリ（*m*-フェニレンイソフタルアミド）（PMIA）、ポリ-*p*-フェニレンテレフタレート（PPTA）、ポリウレタン（PU）、ポリカーボネート（PC）、ポリプロピレン（PP）、高密度ポリエチレン（HDPE）、ポリスチレン（PS）、ポリカプロラクトン（PCL）、ポリブチレンサクシネート（PBS）、ポリブチレンアジペートテレフタレート（PBAT）、ポリ（ブチレンサクシネート-コ-ブチレンアジペート）（PBSA）、ポリヒドロキシブチレート（PHB）、ポリ（3-ヒドロキシブチレート-コ-3-ヒドロキシバレレート）（PHBV）、ポリ（グリコール酸）（PGA）であり得る。ポリピロール（PPy）、ポリチオフエン（PTh）、ポリフッ化ビニリデン（PVDF）、ポリフッ化ビニル（PVF）、エチレンビニルアルコール（EVOH）、ポリ塩化ビニリデン（PVDC）、ポリキシリレンアジパミド（MXD6）、ポリエチレン（PE）、ポリ塩化ビニル（PVC）、ポリ（メチルメタクリレート）（PMMA）、アクリロニトリルブタジエンスチレン（ABS）、ポリイミド（PI）、ポリエチレンイミン（PEI）、ポリ乳酸（PLA）、オクタデシルトリクロロシラン（OTS）、ポリ八面体シルセスキオキサン（POSS）、パラメチルスチレン（PMS）、ポリジメチルシロキサン（PDMS）、ポリ（エチレンナフタレート（PEN）、アクリロニトリルブタジエンスチレン-メチルメタクリレート（ABSM）のグラフト共重合体、ドデシルトリメトキシシラン（DTMS）、ロジン、キチン、キトサン、タンパク質、植物油、リグニン、ヘミセルロース、カルボキシメチルセルロース、セルロースアセテート、デンプン、寒天、またはこれらの組合せであることができる。

10

20

【0082】

方法1000は、処理工程1016に進むことができ、ここで、リグニンが損なわれたベニヤは、その長手方向の成長方向と交差する方向にプレスされる。幾つかの実施形態では、プレスは、長手方向の成長方向に実質的に垂直な方向であることができ、一方、他の実施形態では、プレスは、長手方向の成長方向に垂直な力成分を有することができる。いずれの場合においても、プレスは、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの厚さを減少させ、それによってその密度を増加させると共に、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの断面内の天然管腔（例えば、導管、各繊維の管腔、実質細胞など）、空隙、および／または間隙を（少なくとも部分的に）崩壊させるのに有効であり得る。幾つかの実施形態では、プレスは、単一の方法（例えば、半径方向Rに沿って）に沿って行うことができ、例えば、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの厚さを減少させる（例えば、プレス前のリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤと比較して、少なくとも5：2の寸法の減少）。

30

40

【0083】

幾つかの実施形態では、プレスは、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの事前の乾燥なしに、またはリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤがその中に少なくとも幾らかの水または他の流体を保持している状態で、実施され得る。したがって、プレスは、その寸法が減少し、密度が増加すると同時に、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤから少なくとも幾らかの水または他の流体を除去するのに効果的であり得る。幾つかの実施形態では、別個の乾燥プロセスをプレスプロセスと組み合わせることができる。例えば、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、最初に圧縮されて、高密度化を引き起こし、そこから少なくとも幾らかの水または流体を除去し、その後、乾燥プロセス（例えば、空気乾燥）が続き、残りの水または流体を除去することができる。あるいは、幾つかの実施形態では、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、最初に乾燥させて、少なくとも幾らかの水または流体をそこから除去することができ（例えば、湿度チャンバ内での最初の乾燥、その後、室温での空気乾燥、その結果、植物材料の含水量は、15重量%超、例えば、10重量%に近づくが、そのままである）、続いて、プレスすることによって、高密度化を引き起こすことができる（および、潜在的に、水または他の流体の除去、例えば、10重量%未満、例えば、3～8重量%の含水量にすること）。

【0084】

幾つかの実施形態では、プレスは、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの細胞

50

壁のセルロース系繊維間の水素結合形成を促進し、それによって、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの機械的特性を改善することができる。さらに、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの表面上またはリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤ内に（例えば、処理工程 1014 の内部修飾を介して）形成された任意の粒子または材料は、プレス後に保持することができ、内部表面上の粒子／材料は、崩壊した管腔および絡み合った細胞壁内に埋め込まれる。

【0085】

プレスの圧力およびタイミングは、プレス前のリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのサイズ、プレス後のリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの所望のサイズ、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤ（もしあれば）内の水または流体含有量、プレスが行われる温度、相対湿度、内部修飾（もしあれば）からの材料（例えば、浸透ポリマー）の特性、および／または他の要因の要因であり得る。例えば、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、少なくとも 1 分～数時間（例えば、1～180 分を含む）の期間、加圧下に保持することができる。幾つかの実施形態では、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、3～72 時間（両端値を含む）加圧下に保持することができる。幾つかの実施形態では、プレスは、0.5 MPa～20 MPa（両端値を含む）、例えば、5 MPa の圧力で実施することができる。幾つかの実施形態では、プレスは、加熱せずに（例えば、冷間プレスで）行われてもよく、一方、他の実施形態では、プレスが加熱（例えば、熱間プレス）を用いて行われてもよい。例えば、プレスは、20℃～160℃、例えば、100℃以上で行われてもよい。

【0086】

方法 1000 は、任意の処理工程 1018 に進むことができ、ここで、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、外部修飾を受け得る。「外部」という用語は、処理工程 1018 の修飾を指すために使用されるが、幾つかの実施形態では、修飾は、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの内部特徴ならびに外部特徴に適用されてもよく、一方、他の実施形態では、修飾は、他の特徴に影響を及ぼすことなく、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの内部特徴または外部特徴のいずれかに適用されてもよいことが企図される。幾つかの実施形態では、外部修飾は、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの 1 つ以上の外部表面上にコーティングを形成すること、堆積させること、またはそうでなければ提供することを含むことができる。コーティングは、疎水性、耐候性、耐腐食性（例えば、耐塩性）、および／または耐炎性などであるが、これらに限定されない特定の有利な特性を有する、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを刺激することができる。例えば、コーティングは、油性塗料、疎水性塗料、ポリマーコーティング、および／または耐火性コーティングを含むことができる。幾つかの実施形態では、耐火性コーティングは、ナノ粒子（例えば、窒化ホウ素ナノ粒子）を含むことができる。代替的または追加的に、幾つかの実施形態では、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのためのコーティングは、窒化ホウ素（BN）、モンモリロナイト粘土、ヒドロタルサイト、二酸化ケイ素（SiO₂）、ケイ酸ナトリウム、炭酸カルシウム（CaCO₃）、水酸化アルミニウム（Al(OH)₃）、水酸化マグネシウム（Mg(OH)₂）、炭酸マグネシウム（MgCO₃）、硫酸アルミニウム、硫酸鉄、ホウ酸亜鉛、ホウ酸亜鉛、ホウ酸、ホウ砂、トリフェニルホスフェート（TPP）、メラミン、ポリウレタン、ポリリン酸アンモニウム、ホスフェート、ホスファイトエステル、リン酸アンモニウム、硫酸アンモニウム、ホスホネート、リン酸二アンモニウム（DAP）、リン酸二水素アンモニウム、リン酸一アンモニウム（MAP）、リン酸グアニル尿素（GUP）、グアニジン、二水素リン酸、五酸化アンチモン、または上記の物質の任意の組合せを含むことができる。

【0087】

幾つかの実施形態では、処理工程 1018 の任意選択の外部修飾は、水分の進入または水分の退出を防止するために、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを密封することを含むことができる。幾つかの実施形態では、密封は、ベニヤを密封ま

たは制御された環境に置くことによる。代替的にまたは追加的に、封止は、ベニヤの露出表面上に設けられた保護層またはコーティングによって達成することができる。例えば、保護層またはコーティングは、ポリウレタンコーティング、塗料、シラン疎水性コーティング、または繊維性植物材料へのまたは繊維性植物材料からの水分の移動を防止するか、または少なくとも制限するのに有効な任意の他のコーティングであり得る。代替的にまたは追加的に、外部修飾は、破壊的修飾、例えば、その後の使用のために高密度化されたベニヤを準備するための機械加工または切断を含むことができる。

【0088】

方法1000は、処理工程1020に進むことができ、ここで、例えば、図10Bに関して説明したように、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤは、中心軸の周りにラッピングされて、円周方向に延びる壁、またはその少なくとも一部を形成することができる。方法1000の工程1002～1020は、1回実行されるものとして説明されたが、幾つかの実施形態では、特定の処理工程の複数の繰り返しが、次の決定工程または処理工程に進む前に使用され得る。加えて、方法1000の工程1002～1020が別々に図示され、説明されているが、幾つかの実施形態では、処理工程と一緒に（同時に、または連続して）組み合わせられ、実行され得る。さらに、図10Aは、工程1002～1020の特定の順序を示しているが、開示される主題の実施形態は、それに限定されない。実際、特定の実施形態では、工程が図示されたものとは異なる順序で、または他の工程と同時に生じてよい。幾つかの実施形態では、方法1000は、図10Aの工程1002～1020のうちの幾つかのみを備え得る。

【0089】

図10Bを参照すると、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤから円周方向に延在する壁を形成するための方法1022が示されている。方法1022は、ベニヤの厚さが評価される決定工程1024で開始することができる。厚さが1mm以下である場合（またはベニヤが、厚さが1mmを超え、ポリマーが浸透している場合）、方法1022は、処理工程1026に進むことができ、そこで、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの1つ以上の表面（または表面部分）に接着剤を塗布することができる。例えば、接着剤は、中空チューブを形成するために円筒形の型の周りにラッピングする前に、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの表面上に均一にコーティングすることができる。幾つかの実施形態では、エポキシによって接着されたベニヤは、約5.5kNの剪断力を示すことができる。例えば、接着剤は、エポキシ、ポリ酢酸ビニル（PVA）、ポリウレタン、シアノアクリレート、カゼイン、尿素ホルムアルデヒド、脂肪族樹脂、接触セメント、レゾルシノールホルムアルデヒド、フェノールホルムアルデヒド、カルボキシメチルセルロースナトリウム（CMC）、動物コラーゲン由来の膠、または前述のものの任意の組合せであり得る。方法1022は、処理工程1028に進むことができ、ここで、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤは、成形軸（例えば、成形部材、ローラ、および／または開放空間）の周りにラッピングされて、円周方向に延在する層を形成することができる。幾つかの実施形態では、ラッピングは、長手方向の成長方向が成形軸（例えば、フラットラッピング）に平行に延びる、長手方向の成長方向は、成形軸（例えば、螺旋ラップ）に対してある角度でまたは長手方向の成長方向が円周方向（例えば、フープラップ）に平行に延びる、場合がある。

【0090】

ベニヤの厚さが1mmより大きい（および／またはベニヤがポリマーを浸透していない）場合、方法1022は、決定工程1024から決定工程1032に進むことができ、そこで、流体ショック処理が実行されるべきかどうかが決定的される。流体ショックが実行されないことが決定される場合、方法1022は、決定工程1032から処理工程1042に進むことができ、ここで、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤを部分的に乾燥させることができる。例えば、処理工程1042の部分乾燥は、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤが少なくとも30重量%（例えば ≥ 50 重量%）の含水量を有するようにすることができる。そうではなく、流体ショックが実行されることになると決定され

る場合、方法 1022 は、決定工程 1032 から処理工程 1034 に進むことができ、ここで、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤは、完全に乾燥される。例えば、処理工程 1034 の完全乾燥は、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤが 15 重量%以下（例えば、～8～12 重量%未満、例えば 3～8 重量%を含む）の含水量を有するようなものであり得る。

【0091】

処理工程 1042 または処理工程 1034 のいずれかの乾燥は、導電性、対流性、および／または放射性的加熱プロセスのいずれかを含むことができ、空気乾燥プロセス、真空支援乾燥プロセス、オープン乾燥プロセス、凍結乾燥プロセス、臨界点乾燥プロセス、マイクロ波乾燥プロセス、または上記のものの任意の組合せを含むが、これらに限定されない。例えば、空気乾燥プロセスは、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤ材を、静止空気または移動空気中で自然に乾燥させることを含むことができ、この空気は、室温（例えば、23℃）または高温（例えば、23℃を超える）などの任意の温度であり得る。例えば、真空支援乾燥プロセスは、例えば、真空チャンバまたは真空オープン内で、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤを、例えば、1 バール未満の減圧に供することを含むことができる。例えば、炉乾燥工程は、炉、ホットプレート、または他の伝導性、対流性、もしくは放射性的加熱機器を使用して、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤを高温（例えば、23℃超）、例えば、70℃以上で加熱することを含むことができる。例えば、凍結乾燥工程は、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの温度を、その中の流体の凝固点未満（例えば、0℃未満）まで低下させ、次いで、圧力を低下させて、その中の凍結流体を昇華させる（例えば、数ミリバール未満）ことを含み得る。例えば、臨界点乾燥プロセスは、流体（例えば、液体二酸化炭素）中に高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤを浸漬すること、流体の臨界点（例えば、二酸化炭素については、7.39 MPa、31.1℃）を越えて高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの温度および圧力を上昇させること、次いで、圧力を徐々に解放して、現在の気体流体を除去することを含むことができる。例えば、マイクロ波乾燥プロセスは、電子レンジまたは他のマイクロ波発生装置を使用して、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤ内で、マイクロ波レジーム（例えば、300 MHz～300 GHz）の周波数、例えば、～915 MHz または～2.45 GHz の周波数を有する電磁放射線に曝露することによって、誘電加熱を誘発することを含むことができる。

【0092】

幾つかの実施形態では、処理工程 1034 の完全乾燥が高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの収縮を引き起こし、これは、次に、細胞壁の著しい崩壊を引き起こす。幾つかの実施形態では、長手方向細胞によって形成される管腔が潰れ得る（例えば、チャンネル壁の対向面が接触するように、または少なくともチャンネルの幅が著しく狭くなるように、完全に潰れる）。処理工程 1034 の乾燥後、方法 1022 は、処理工程 1036 に進むことができ、ここで、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤは、流体ショック技術を使用して再水和される。例えば、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤは、再水和された材料が少なくとも 30 重量%（例えば、約 50 重量%）の含水量を有するように、短時間（例えば、数分、例えば、3 分以下、例えば、数秒程度）、流体（例えば、水、アルコール、またはそれらの任意の組合せ）中に部分的または完全に浸漬され得る。1 つ以上の実施形態によれば、流体への浸漬以外の再水和方法も可能である。例えば、再水和は、加湿環境への曝露によって達成することができる。

【0093】

幾つかの実施形態では、再水和が細胞壁を再膨張させ、より大きな管腔（例えば、導管）が再開することを可能にし、一方、より小さな管腔（例えば、繊維細胞）は、実質的に崩壊したままである。流体ショックによって導入された膨潤は、細胞壁構造体にしわを作り出すことができ、これは、軟化した繊維性植物材料が損傷することなく、激しい張力および圧縮に適応することを可能にすることができる。

【0094】

処理工程 1036 または処理工程 1042 のいずれかの後に少なくとも 30 重量%の含水量を有する軟化繊維性植物材料では、方法 1022 は、処理工程 1038 に進むことができ、ここで、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの 1 つ以上の表面（または表面部分）に水性接着剤を塗布することができる。例えば、接着剤は、中空チューブを形成するために円筒形の型の周りにラッピングする前に、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの表面上に均一にコーティングすることができる。例えば、水性接着剤は、ポリ酢酸ビニル（PVA）、カルボキシメチルセルロースナトリウム（CMC）、水性ポリウレタン、動物コラーゲン由来の膠であり得る。方法 1022 は、処理工程 1040 に進むことができ、ここで、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤは、成形軸（例えば、成形部材または開放空間のいずれか）の周りにラッピングされて、円周方向に延在する層を形成することができる。幾つかの実施形態では、ラッピングは、長手方向の成長方向が成形軸（例えば、フラットラッピング）に平行に延びる場合、または、長手方向の成長方向が成形軸（例えば、螺旋ラップ）に対してある角度でまたは長手方向の成長方向が円周方向（例えば、フープラップ）に平行に延びる、場合がある。処理工程 1040 のラッピングの間、高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの含水量は、少なくとも 30 重量%であり得、したがって、実質的に可撓性／成形可能な状態であり得る。その結果、ベニヤは、その厚さが 1 mm より大きいにもかかわらず、亀裂を生じることなく、所望の円周方向に延在する形状を容易に採用することができる。

10

【0095】

方法 1022 は、処理工程 1028 または処理工程 1040 のいずれかから決定工程 1030 に進むことができ、ここで、別のベニヤ層が円周方法に延びる壁に追加されるべきかどうか決定される。追加の層が望まれる場合、方法 1022 は、決定工程 1024 に戻ることができる。そうでない場合、方法は、決定工程 1044 に進むことができ、そこで、成形後修飾が望まれるかどうか決定される。幾つかの実施形態では、成形後の修飾は、ワニス、塗料、染み、油、ワックス、または前述のもの任意の組合せを、円周方向に延在する壁の 1 つ以上の表面（例えば、内側、外側、および／または露出した表面）に塗布することを含むことができる。例えば、壁を形成するラッピングされた層は、水分の侵入または水分の流出を防止し、それによって壁の成形された（例えば、剛性の）状態を維持するために、密封され得る。代替的にまたは追加的に、シーリングは、繊維性植物材料の露出表面上に設けられた保護層またはコーティングによって達成することができる。例えば、保護層またはコーティングは、ポリウレタンコーティング、塗料、シラン疎水性コーティング、または繊維性植物材料へのまたは繊維性植物材料からの水分の移動を防止するか、または少なくとも制限するのに有効な任意の他のコーティングであり得る。代替的にまたは追加的に、成形後の修飾は、破壊的修飾、例えば、後続の使用のためにリグニン修飾された繊維性植物材料を調製するための機械加工または切断を含むことができる。

20

30

【0096】

幾つかの実施形態では、成形後修飾は、複合構造体を形成することを含むことができ、その場合、方法は、決定工程 1044 から処理工程 1046 に進むことができる。処理工程 1046 において、円周方法に延在する壁の内面上に非植物層を設けることができ（例えば、堆積、コーティング、積層など）、および／または円周方法に延在する壁の外面上に別の非植物層を設けることができる。幾つかの実施形態では、非植物層は、金属、ポリマー、またはコンクリートを含むことができる。決定工程 1044 で修飾が望まれない場合、または処理工程 1046 の後、方法は、処理工程 1048 に進むことができ、ここで、中心軸の周りに 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをラッピングすることによって形成された壁は、構造用途、エネルギー吸収（例えば、地震または他の自然災害における建物、車両バンパー、航空機エジェクタシートなどのためのクラッシュ保護）、および流体輸送などであるが、これらに限定されない、1 つ以上の用途で使用する。例えば、幾つかの実施形態では、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤで形成されたチューブは、～90 MPa の圧縮強度を有することができ、これは、Al 合金チューブよりも高い。

40

50

【0097】

方法1022の工程1024～1048のうちの幾つかは、1回実行されるものとして説明されたが、幾つかの実施形態では、特定の処理工程の複数の繰り返しが、次の決定工程または処理工程に進む前に使用され得る。加えて、方法1022の工程1024～1048が別々に図示され、説明されているが、幾つかの実施形態では、処理工程と一緒に（同時に、または連続して）組み合わせられ、実行され得る。さらに、図10Bは、1024～1048の特定の順序を示しているが、開示される主題の実施形態は、それに限定されない。実際、特定の実施形態では、工程は、図示されたものとは異なる順序で、または他の工程と同時に生じてよい。幾つかの実施形態では、方法1022は、図10Bの工程1024～1048のうちの幾つかのみを備え得る。

10

【0098】

作製例と実験結果

天然木ベニヤ（バスウッド、典型的な試料寸法：0.5mm×30cm×20cm）を、2.5M NaOHおよび0.4M Na₂SO₃の沸騰水溶液で1時間処理し、続いて水中に数回浸漬して化学物質を除去した。部分的脱リグニンプロセスは、木材のリグノセルロース細胞壁からリグニンを約70%、ヘミセルロースを約85%除去した。次に、部分的に脱リグニンされた木材ベニヤを105℃、5MPaの加圧下で5分間プレスして、密度が0.4g/cm³から1.3g/cm³に増加する高密度の脱リグニンベニヤを形成した。高密度化された脱リグニンベニヤの引張強度は、～650MPaであり、天然木ベニヤ（66MPa）よりも約10倍高かった。なお、高密度化された脱リグニンベニヤの引張強度は、セルロース繊維配向方向に沿って試験されるが、木材の異方性のため、セルロース繊維配向方向に垂直な方向の強度は、はるかに低い（20.5MPa）。

20

【0099】

チューブは、高密度化され、脱リグニンされたベニヤを、木材繊維の方向に、またはある角度および接着で、円筒形の型上にローリングすることによって達成された。エポキシ（クリア溶着5分、J-B溶着）を使用して、チューブ壁内の隣接する層を接着した。ラッピングのための3つの戦略を採用した。第1の戦略は、セルロース繊維整合方向に沿って円筒形の型上で高密度化され、脱リグニンされたベニヤをラッピングし、エポキシで接着することであった。SEM形態研究は、図2E～2Fに示されるように、異なるスーパーウッドベニヤ層が互いにしっかりと接着され、繊維がチューブの軸に平行であることを明らかにする。第2の戦略は、図4A～図4Cに示すように、45°の角度で円筒形の型上に高密度化され、脱リグニンされたベニヤをラッピングし、各層を同じ角度でラッピングした。その結果、各層のセルロース繊維は、同じ角度で平行である。このようにして、任意の長さの木材チューブを達成することができる。第3の戦略は、高密度化され、脱リグニンされたベニヤを、交差螺旋ラッピングで型の上に巻き上げることであった。具体的には、第1の層上のスーパーウッドベニヤが45°の角度で左螺旋に巻き上げられる場合、次の層は、図4D～図4Fに示されるように、同じ角度で反対方向（右螺旋）に巻き上げられ、目標壁厚に達するまで繰り返される。したがって、異なる層中のセルロース繊維は、チューブ軸に対して同じ角度を呈するが、反対の巻き上げ方向を呈する。

30

【0100】

得られるチューブの圧縮強度は、直径、壁厚、ねじれ方向などを含む、チューブ構造体の様々なパラメータに依存し得る。図11に示されるように、14mmの内径を有するチューブは、40mmの内径を有するチューブよりも高い圧縮強度を示す。チューブの製造中にラップアップ角度が45°から90°に増加すると、圧縮強度が増加する。また、図11に示すように、肉厚の増加に伴って圧縮強度が増加する。これは、円周方向に延在する木材壁の機械的変形が原材料（例えば、木材種）、木材ベニヤ（例えば、厚さ、切断方向）、化学処理（例えば、リグニン対セルロース繊維）、チューブ（例えば、直径、ラッピング方向、ベニヤ層数、および層間の接着剤）に依存するマルチスケール挙動であり得ることを示す。

40

【0101】

50

交差螺旋ラッピング（繊維方向は、チューブ軸方向から45°離れている）によって調製されたチューブは、また、圧縮荷重下で、しかしより複雑な様式で、花びら破損を示す。軸方向圧縮下で、交差螺旋ラッピングによって調製されたチューブは、高密度化され、脱リグニンされた木材ベニヤの異方性のために、セルロース繊維方向に沿った端部の複数の位置で最初に破断する。さらに、圧縮荷重は、チューブの分割を45°に沿って進行させる。分割後、ストリップは、螺旋形状にカールし、半径方向に突き出る。しかしながら、45°の角度で巻き上げることによって調製されたチューブは、花びら破損モードを示さなかった。代わりに、ラッピングされたベニヤの2つの層の間の接着剤が引き裂かれる。

【0102】

高密度化され、脱リグニンされた木材ベニヤチューブの独特の破壊モードは、等方性アルミニウムチューブの破壊と比較して、破壊過程中的エネルギー吸収の劇的な増加につながる。図12(a)は、フラットラッピングチューブ1204、アルミニウムチューブ1202、炭素繊維布チューブ1206の軸方向圧縮試験における力-変位曲線を示している。アルミニウムチューブの圧縮破損は、チューブの座屈の開始に対応する、かなり小さい変位での圧縮力における鋭いピークを特徴とし、次いで、ゼロへの力の急激な低下が続く、変形が座屈領域で局在化し、アルミニウムチューブの破損をもたらすと、構造的完全性の損失を示す。対照的に、フラットラッピングチューブ1204の力-変位曲線は、小さい変位（花びらの開始に対応する）でピークに達するが、次いで、穏やかなレベルに低下し、試験の終了まで、大きい変位にわたってかなり一定のままである。炭素繊維布チューブ1206の力-変位曲線は、同様の傾向を示すが、ピーク後に力が劇的に低下する。力-変位曲線の下領域は、チューブの破損プロセスによって吸収されるエネルギーを測定する。フラットラッピングによって調製されたチューブは、アルミニウムチューブ（7.41±0.38 J/g）、炭素繊維チューブ（41.80±0.83 J/g）、および交差螺旋ラッピングチューブ（20.68±1.71 J/g）よりも7.3倍、1.3倍、および1.5倍高い54.22±2.18 J/gの強力な高比エネルギー吸収を示す。

【0103】

異なる状況下での木材チューブのエネルギー消散性能をさらに調査するために、静的試験（軸方向圧縮試験）および動的試験（落下塔試験）を実施し、破損挙動およびチューブによって吸収されるエネルギー量を調査した。異なる幾何学的寸法を有する2つのフラットラッピングチューブ、すなわち、40 mm×0.75 mm×100 mmおよび14 mm×0.75 mm×100 mm（内径×壁厚×長さ）のものを静的試験に使用した。40 mmの試料の内径は、アルミニウム合金チューブの破壊モードに類似する典型的な局部座屈破損を示す。しかしながら、14 mmの試料の内径は、他のタイプの市販のチューブでは、ほとんど見られないヒマワリ花びら様の破損モードを呈する。木材チューブは、その薄い円形壁を幾つかの花びらに分割することによって徐々に割れ、花びらは、試験中にそれ自体がカールする。花びら状モードでの壁分割中のかなりの量のエネルギー消散のために、花びら状破損試料（55.3 J/g）の静的圧縮荷重下での有効エネルギー吸収は、局部座屈試料（0.37 J/g）のそれより～150倍高い。

【0104】

40 mm木材チューブの内径のエネルギー消散を増加させるために、チューブの一端にプレ切断を適用した。これらのプレ切断から開始されたクラックは、圧縮キャップがさらに変位することにつれて軸方向に沿って伝播する。プレ切断サンプルの実効エネルギー吸収は、13.32 J/gであり、プレ切断なしのサンプルの実効エネルギー吸収よりも36倍高い（図S19の力-変位曲線下の面積から計算）。

【0105】

木材チューブを動的に試験するために、落下塔を使用した。チューブは、鋼板の自重によって予め装填された。鋼球は、ある高さから落下し、鋼板の中心に衝突し、木材チューブに動的に衝突した。花びら様破損モードのため、試料の動的ショック試験における有効エネルギー吸収は、48.34 J/gであり、静的試験（55.3 J/g）におけるもの

10

20

30

40

50

と同等であった。したがって、木材チューブは、静的および動的負荷の両方の下で顕著なエネルギー吸収性能を示す。

【0106】

さらに、3つの連続ショック試験を同じ3つの木材チューブに対して行った。最初のショック試験の後、チューブは、底部端部キャップと接触する端部で花びら状になり始める。2回目のショック試験後、チューブの下端の花びら形成は、さらに進み、チューブの上端も花びら形成を開始する。第3のショック試験後、両端の花びら形成は、さらに進行する。木材チューブは、静的圧縮荷重下で木材チューブに匹敵するレベルで動的ショックエネルギーを吸収することができる。さらに、木材チューブは、花びらによって部分的に破砕された後でさえ、構造的完全性を保持する。木材チューブの破断されていない部分は、後続の試験において動的ショックエネルギーを吸収し続けることができる。これは、特に動的ショックの際に、エネルギー吸収のための非常に有効な構造的構成要素としての潜在的な用途を示唆する、独特かつ望ましい特徴である。

10

【0107】

素晴らしいエネルギー吸収に加えて、木材チューブはまた、良好な熱伝導率を示し、これは、木材チューブが建設において使用され得ることを示唆する。例えば、スーパーウッドチューブは、カーテンウォールドアフレームのためのアルミニウム合金チューブに取って代わることができる。開示された木材工学プロセスは、パイプの製造にも適用され、木材パイプは、高密度化され、リグニンが損なわれた木材ベニヤの緻密な構造体に起因して、良好なガスバリア特性を示す。図13Aに示すように、木材チューブの透磁率は、 $2.0 \times 10^{-17} \text{ }^2/\text{s}$ であり、大部分の高分子の透磁率よりも低く、鋼チューブに匹敵する。したがって、木材チューブは、石油およびガス（例えば、 H_2 および天然ガス）輸送に適しているが、 H_2 脆化の問題はない。

20

【0108】

また、開示された技術は、例えば、アルミチューブの代わりに低熱伝導率を有するカーテンウォール、ガス輸送（例えば、 H_2 、天然ガス）のために使用することができるが、 H_2 脆化の問題がない低透過率を有するチューブ、およびコンクリートパイプの代わりに良好な曲げ強度を有するチューブの調製を可能にする。製作された実施例では、木材パイプが16cmの直径で構築された。木材チューブは、図13Bに示されるように、30.5MPaの曲げ強度を示し、これは、コンクリートパイプのそれよりも約5倍高い。

30

【0109】

チューブおよびパイプに加えて、木材ロッドはまた、45°の角度で天然木材コア上に高密度化され、脱リグニンされた木材ベニヤを交差螺旋ラッピングすることによって製造され、これは、図9Eに示されるように、得られる製品のショック特性を改善することができる。図9Fに示すように、天然木材ロッド上に高密度化され、脱リグニンされた木材ベニヤの90層にラッピングすることによって、直径5cmの野球バットも作製した。

【0110】

開示された技術のさらなる例

開示された主題の上述の実装を考慮して、本出願は、以下に列挙される付記における追加の例を開示する。単独での付記の1つの特徴、または組み合わせて取られた付記の2つ以上の特徴、および任意選択で、1つ以上のさらなる付記の1つ以上の特徴と組み合わせたさらなる例も、本出願の開示の範囲内に含まれることに留意されたい。

40

【0111】

付記1.

円周方向に延在する繊維性植物材料壁を形成するように、中心軸の周りにラッピングされた1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを含む構造体。

【0112】

付記2.

接着剤が、各繊維状植物材料ベニヤの1つ以上の表面部分上に提供される、本明細書の

50

いずれかの項または例、特に、付記 1 に記載の構造体。

【0113】

付記 3.

接着剤は、エポキシ、ポリ酢酸ビニル（PVA）、ポリウレタン、カルボキシメチルセルロースナトリウム（CMC）、シアノアクリレート、カゼイン、尿素-ホルムアルデヒド、脂肪族樹脂、接触セメント、レゾルシノール-ホルムアルデヒド、フェノールホルムアルデヒド、動物コラーゲン由来の膠、または前述の任意の組合せを特に含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 2 の構造体。

【0114】

付記 4.

円周方向に延在する繊維性植物材料壁が本質的に、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤおよび接着剤からなる、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 2～3 のいずれか 1 つの構造体。

【0115】

付記 5.

円周方向に延在する繊維性植物材料壁が、中心軸に実質的に平行な方向に沿って 50～90 MPa の圧縮強度を示す、本明細書のいずれかの付記または例、特に、付記 1～4 のいずれか 1 つの構造体。

【0116】

付記 6.

高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの各々は、崩壊した長手方向の繊維性植物材料細胞の壁を形成するセルロースナノファイバーを含み、セルロースナノファイバーは、繊維性植物材料の長手方向の成長方向と実質的に整合している、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～5 のいずれか 1 つの構造体。

【0117】

付記 7.

高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの各々は、少なくとも 40 MPa のその長手方向の成長方向に沿った引張強度を有する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～6 のいずれか 1 つの構造体。

【0118】

付記 8.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの少なくとも 1 つの長手方向の成長方向が、中心軸に実質的に平行である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～7 のいずれか 1 つの構造体。

【0119】

付記 9.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの少なくとも 1 つの長手方向の成長方向が、中心軸を含む平面に実質的に垂直である本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～8 のいずれか 1 つの構造体。

【0120】

付記 10.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの少なくとも 1 つの長手方向の成長方向が、中心軸に対してゼロではない角度にある、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～9 のいずれか 1 つの構造体。

【0121】

付記 11.

長手方向の成長方向と中心軸との間の非ゼロ角度が、一連の 10°～80°である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 10 の構造体。

【0122】

付記 12.

10

20

30

40

50

長手方向の伸長方向と中心軸との間の非ゼロ角度は、ほぼ45°である。本明細書のいずれかの項または例、特に、付記10～11のいずれか1つの構造体。

【0123】

付記13.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの第1の長手方向の成長方向の配向が、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの第2の長手方向の成長方向の配向と交差する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記10～12のいずれか1つの構造体。

【0124】

付記14.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの第1および第2のもの長手方向の成長方向が、実質的に90°の角度で交差する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記13の構造体。

【0125】

付記15.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの少なくとも1つが、少なくとも 1 g/cm^3 、または少なくとも 1.15 g/cm^3 の密度を有する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～14のいずれか1つの構造体。

【0126】

付記16.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物素材ベニヤのうちの少なくとも1つが、約 1.3 g/cm^3 、または $1.3\sim 1.5\text{ g/cm}^3$ （両端値を含む）の厚さを有する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～15のいずれか1つの構造体。

【0127】

付記17.

円周方向に延在する繊維性植物材料壁の内径が、少なくとも5mm、少なくとも1cm、または少なくとも10cmである、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～16のいずれか1つの構造体。

【0128】

付記18.

その軸に沿った円周方向に延在する繊維性植物材料壁の長さが、少なくとも1cm、少なくとも10cm、または少なくとも1mである、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～17のいずれか1つの構造体。

【0129】

付記19.

円周方向に延在する繊維性植物材料壁が、中心軸に実質的に平行な方向に沿った圧縮下で少なくとも 45 J/g の比エネルギー吸収を示す、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～18のいずれか1つの構造体。

【0130】

付記20.

円周方向に延在する繊維性植物材料壁の断面形状は、円形、三角形、または長方形である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～19のいずれか1つの構造体。

【0131】

付記21.

構造体は、軸方向両端部で開口する中空部材を形成する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～20のいずれか1つの構造体。

【0132】

付記22.

中空部材は、チューブまたはパイプである、本明細書のいずれかの項または例、特に、

10

20

30

40

50

付記 1 ～ 2 1 のいずれか 1 つの構造体。

【 0 1 3 3 】

付記 2 3 .

円周方向に延在する繊維性植物材料壁は、一方の軸方向端部で開口する中空部材を形成し、構造体は、中空部材の反対側の軸方向端部を閉鎖する 1 つ以上の第 2 の部材をさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1 ～ 2 0 のいずれか 1 つの構造体。

【 0 1 3 4 】

付記 2 4 .

1 つ以上の第 2 の部材が、天然繊維性植物材料、金属、ポリマー、コルク、セメント、高密度化された繊維性植物材料、または高密度化されたリグニン含有繊維性植物材料から形成される、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 2 3 の構造体。

【 0 1 3 5 】

付記 2 5 .

閉鎖端チューブ、カップ、タンク、またはボトルを形成する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 2 3 ～ 2 4 のいずれか 1 つの構造体。

【 0 1 3 6 】

付記 2 6 .

円周方向に延在する繊維性植物材料壁は、その周りにラッピングされる 1 つ以上の中心部材をさらに備える、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1 ～ 2 0 のいずれか 1 つの構造体。

【 0 1 3 7 】

付記 2 7 .

1 つ以上の中心部材が、天然繊維性植物材料ロッド、金属ロッド、ポリマーロッド、コルクロッド、高密度化された繊維性植物材料ロッド、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ロッド、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ロッド、または前述の任意の組合せを含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 2 6 の構造体。

【 0 1 3 8 】

付記 2 8 .

ロッド、バット、クラブ、またはダボロッドを形成する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 2 6 ～ 2 7 のいずれか 1 つの構造体。

【 0 1 3 9 】

付記 2 9 .

(a) 円周方向に延在する繊維性植物材料壁の内面部分の上に配置された 1 つ以上の第 1 の非植物層、

(b) 円周方向に延在する繊維性植物材料壁の外表面部分上に配置された 1 つ以上の第 2 の非植物層、または

(a) および (b) の両方、を含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1 ～ 2 2 のいずれか 1 つの構造体。

【 0 1 4 0 】

付記 3 0 .

一部または全ての非植物層は、金属、ポリマー、またはコンクリートで構成される、本明細書中のいずれかの項または例、特に、付記 2 9 のいずれか 1 項の構造体。

【 0 1 4 1 】

付記 3 1 .

1 つ以上の第 1 の非植物層の合計厚さは、繊維性植物材料壁の半径方向に沿った円周方向に延在する繊維性植物材料壁の合計厚さの 5 0 % 以下であり、および / または 1 つ以上の第 2 の非植物層の合計厚さは、繊維性植物材料壁の半径方向に沿った円周方向に延在する繊維性植物材料壁の合計厚さの 5 0 % 以下である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 2 9 ～ 3 0 のいずれか 1 つの構造体。

【0142】

付記32.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、その中に修飾リグニンを含み、修飾リグニンが天然繊維植物材料中のネイティブリグニンよりも短い高分子鎖を有する、本明細書中のいずれかの項または例、特に、付記1～31のいずれか1つの構造体。

【0143】

付記33.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てにおける修飾リグニンの含有量が、天然繊維性植物材料における天然リグニンの含有量の少なくとも90%である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～32のいずれか1つの構造体。

10

【0144】

付記34.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの1つ、幾つか、または全てにおける修飾リグニンの含有量が、少なくとも20重量%である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～33のいずれか1つの構造体。

【0145】

付記35.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、セルロース系微細構造体内に固定化されたアルカリ化学物質の塩を含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～34のいずれか1つの構造体。

20

【0146】

付記36.

塩は、実質的にpH中性である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記35の構造体。

【0147】

付記37.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの1つ、幾つか、または全てが、少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料を含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～31のいずれか1つの構造体。

30

【0148】

付記38.

少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料のリグニン含有量が、天然繊維性植物材料のリグニン含有量の10%～99%（両端値を含む）である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記37の構造体。

【0149】

付記39.

少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料は、広葉樹または竹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料のリグニン含有量は、1.8重量%～24.8重量%（両端値を含む）であるか、または少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料は、針葉樹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料のリグニン含有量は、2.5重量%～34.7重量%（両端値を含む）である本明細書のいずれかの項または例、特に、付記37～38のいずれか1つの構造体。

40

【0150】

付記40.

少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料のリグニン含有量が、10重量%以下である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記37～38のいずれか1つの構造体。

50

【0151】

付記41.

少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料のリグニン含有量が、天然繊維性植物材料のリグニン含有量の10%未満である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記37～38のいずれか1つの構造体。

【0152】

付記42.

少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料は、広葉樹または竹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料のリグニン含有量は、2.5重量%未満であるか、または少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料は、針葉樹であり、少なくとも部分的に脱リグニンされた繊維性植物材料のリグニン含有量は、3.5重量%未満である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記37～38のいずれか1つの構造体。

10

【0153】

付記43.

高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの1つ、幾つか、または全てが、3mm以下の、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の半径方向に沿った厚さを有する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～42のいずれか1つの構造体。

【0154】

付記44.

高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、300μm以下で円周方向に延在する繊維性植物材料壁の半径方向に沿った厚さを有する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～43のいずれか1つの構造体。

20

【0155】

付記45.

高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの1つ、幾つか、または全てが、100～250μm（両端値を含む）の範囲の、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の半径方向に沿った厚さを有する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～44のいずれか1つの構造体。

30

【0156】

付記46.

円周方向に延在する繊維性植物材料壁の1つ以上の表面上に形成された保護層またはコーティングをさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1のいずれか1つの構造体。

【0157】

付記47.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの1つ、幾つか、または全てが、繊維性植物材料の長手方向の成長方向に実質的に垂直な方向に圧縮されており、その結果、繊維性植物材料の微細構造体中のセルロース系細胞壁によって形成される管腔が実質的に崩壊している、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～46のいずれか1つの構造体。

40

【0158】

付記48.

1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの1つ、幾つか、または全てが、15重量%以下の含水量を有する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記1～47のいずれか1つの構造体。

【0159】

付記49.

中心軸に平行な方向に沿った円周方向に延在する繊維性植物材料壁の長さが、中心軸に

50

垂直な方向に沿った円周方向に延在する繊維性植物材料壁の厚さの少なくとも 10 倍である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～48 のいずれか 1 つの構造体。

【0160】

付記 50.

繊維性植物材料は、広葉樹、針葉樹、または竹である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～49 のいずれか 1 つの構造体。

【0161】

付記 51.

複数の構造体を含み、複数の構造体のうちの各構造体は、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 1～50 のいずれか 1 つに従う構造体を含むエネルギー吸収システム。

10

【0162】

付記 52.

一対の支持部材であって、前記複数の構造体は、前記一対の支持部材の間に挟まれている、支持部材をさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 51 のエネルギー吸収システム。

【0163】

付記 53.

支持部材が、天然繊維性植物材料、金属、ポリマー、コンクリート、高密度化された繊維性植物材料、または高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料から形成される、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 52 のエネルギー吸収システム。

20

【0164】

付記 54.

各構造体の中心軸は、各支持部材のそれぞれの対向する表面部分に実質的に垂直である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 52～53 のいずれか 1 つのエネルギー吸収システム。

【0165】

付記 55.

各構造体の中心軸は、複数の構造体のうちの他の構造体の中心軸と実質的に平行である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 52～53 のいずれか 1 つのエネルギー吸収システム。

30

【0166】

付記 56.

各構造体は、円周方向に延在する繊維性植物材料壁のそれぞれの軸方向端部に結合された端部キャップをさらに備え、端部キャップは、それぞれの支持部材の対向面部分と接触している、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 51～55 のいずれか 1 つのエネルギー吸収システム。

【0167】

付記 57.

複数の構造体のうちの 1 つ、幾つか、または全ての少なくとも一部分が中空である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 51～56 のいずれか 1 つのエネルギー吸収システム。

40

【0168】

付記 58.

(a) 1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤを 1 つ以上の化学処理に供して、1 つ以上のリグニンが損なわれたベニヤを形成すること、

(b) (a) の後に、繊維性植物材料の長手方向の成長方向を横切る方向に沿って 1 つ以上のリグニンが損なわれたベニヤを圧縮して、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤを形成すること、

(c) (b) の後、円周方向に延びる繊維性植物材料壁を形成するように、中心軸の周りに 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤをラッピングして巻き付け

50

ることを含む方法。

【0169】

付記59.

(b)の後かつ(c)の前に、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの1つ、幾つか、または全ての1つ以上の表面部分上に接着剤を提供することをさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記58の方法。

【0170】

付記60.

接着剤が、エポキシ、ポリ酢酸ビニル(PVA)、ポリウレタン、カルボキシメチルセルロースナトリウム(CMC)、シアノアクリレート、カゼイン、尿素-ホルムアルデヒド、脂肪族樹脂、接触セメント、レゾルシノール-ホルムアルデヒド、フェノールホルムアルデヒド、動物コラーゲン由来の膠、またはこれらの任意の組合せを含む、本明細書中のいずれかの項または例、特に、付記59の方法。

【0171】

付記61.

(b)の後、高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの各々は、崩壊した長手方向の繊維性植物材料細胞の壁を形成するセルロースナノファイバーを含み、セルロースナノファイバーが、繊維性植物材料の長手方向の成長方向と実質的に整合している、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記58～60のいずれかの方法。

【0172】

付記62.

(c)のラッピングは、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤのうちの少なくとも1つの長手方向の成長方向が中心軸に実質的に平行であるようなものである、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記58～61のいずれかの方法。

【0173】

付記63.

(c)のラッピングは、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの少なくとも1つの長手方向の成長方向が中心軸に対してゼロではない角度にあるようなものである、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記58～62のいずれか1つの方法。

【0174】

付記64.

長手方向の伸長方向と中心軸との間の非ゼロ角度は、両端値を含む100～800の範囲内にある、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記63に記載の方法。

【0175】

付記65.

長手方向の伸長方向と中心軸との間の非ゼロ角度は、約450である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記63～64のいずれか1つの方法。

【0176】

付記66.

(c)のラッピングが、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの第1の長手方向の成長方向の配向が、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの第2の長手方向の成長方向の配向と交差するようなものである、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記58～65のいずれか1つの方法。

【0177】

付記67.

(c)のラッピングが、1つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤの第1および第2の長手方向の成長方向が実質的に900の角度で交差するよう

10

20

30

40

50

なものである、付記 58～66 のいずれか 1 つの方法。

【0178】

付記 68.

(c) のラッピングが、以下のことを含む、本明細書におけるいずれかの項または例、特に、付記 58～67 のいずれか 1 つの方法：

(c1) 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを、型の上に配置すること、

(c2) 第 1 の時間の後に、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤから型を除去し、その結果、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の少なくとも一部分が中空であること。

10

【0179】

付記 69.

型は、円形、三角形、または長方形の断面を有する、本明細書におけるいずれかの項または例、特に、付記 68 に記載の方法。

【0180】

付記 70.

(c) のラッピングは、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを 1 つ以上の第 1 の非植物層の上に配置することを含み、

(c) の後、1 つ以上の第 1 の非植物層は、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の内面部分の上に保持される、本明細書におけるいずれかの項または例、特に、付記 58～69 のいずれか 1 つの方法。

20

【0181】

付記 71.

(d) (c) の後、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の内面部分上に 1 つ以上の第 1 の非植物層を配置すること、

(e) (c) の後、1 つ以上の第 2 の非植物層を、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の外表面部分の上に配置すること、または

(d) および (e) の両方、を含む、本明細書におけるいずれかの項または例、特に、付記 58～70 のいずれか 1 つの方法。

30

【0182】

付記 72.

非植物層の 1 層、幾つか、または全てが、金属、ポリマー、またはコンクリートで構成される、本明細書中のいずれかの項または例、特に、付記 70～71 のいずれか 1 つの方法。

【0183】

付記 73.

(a) の、1 つ以上の化学処理に供することは、

(a1) 1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤに 1 つ以上の化学溶液を浸透させること、

40

(a2) (a1) の後、1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤに、少なくとも 80℃ の第 1 の温度、第 i の時間だけ供し、1 つ以上のリグニンが損なわれたベニヤを形成すること、

を含み、

(c) の後、1 つ以上のリグニンが損なわれたベニヤに保持されたリグニンは、(a) の前の 1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤにおける天然リグニンよりも短い高分子鎖を有する、

本明細書におけるいずれかの項または例、特に、付記 58～72 のいずれか 1 つの方法。

【0184】

付記 74.

50

(c)の後、各リグニンが損なわれたベニヤが、ベニヤの実質的に崩壊したセルロースベースの微細構造体内に固定化された1つ以上の化学溶液のpH中性塩を含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73の方法。

【0185】

付記75.

塩が、(a2)の間に、1つ以上の化学溶液によって生成される1つ以上の天然繊維植物材料ベニヤ中の天然ヘミセルロースの酸性分解生成物と1つ以上の化学溶液との反応によって形成される、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73～74のいずれか1つの方法。

【0186】

付記76.

1つ以上の化学溶液が、アルカリ溶液を含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73～75のいずれか1つの方法。

【0187】

付記77.

1つ以上の化学溶液が、p-トルエンスルホン酸、NaOH、NaOH+Na₂SO₃/Na₂SO₄、NaOH+Na₂S、NaHSO₃+SO₂+H₂O、NaHSO₃+Na₂SO₃、NaOH+Na₂SO₃、NaOH/NaH₂O₃+AQ、NaOH/Na₂S+AQ、NaOH+Na₂SO₃+AQ、Na₂SO₃+NaOH+CH₃OH+AQ、NaHSO₃+SO₂+AQ、NaOH+Na₂S_x(式中、AQはアントラキノンである)、NaOHがLiOHまたはKOHで置き換えられた上記のいずれか、または上記のものの任意の組合せである、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73～76のいずれか1つの方法。

【0188】

付記78.

第1の温度が、120～160℃(両端値を含む)である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73～77のいずれか1項に記載の方法。

【0189】

付記79.

第1の時間が、1～5時間(両端値を含む)の範囲である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73～78のいずれか1つに記載の方法。

【0190】

付記80.

1つ以上の天然繊維植物材料ベニヤに浸透した1つ以上の化学溶液の少なくとも90%が、(a2)の間に消費される、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73～79のいずれか1つの方法。

【0191】

付記81.

(a2)の第1の温度に供することが、蒸気を使用して、1つ以上の化学溶液をその中に含む1つ以上の天然繊維植物材料ベニヤを加熱することを含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記73～80のいずれか1つの方法。

【0192】

付記82.

(a)の1つ以上の化学的処理に供することが、1つ以上の天然繊維植物材料ベニヤから少なくとも幾らかのリグニンを除去するために、第2の温度で第2の時間、1つ以上の化学溶液中に部分的または完全に浸漬することを含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記58～72のいずれか1つの方法。

【0193】

付記83.

1つ以上の化学溶液が、アルカリ溶液を含む、本明細書のいずれかの項または例、特に

10

20

30

40

50

、付記 8 2 に記載の方法。

【0194】

付記 8 4 .

1 つ以上の化学溶液が、水酸化ナトリウム (NaOH)、水酸化リチウム (LiOH)、水酸化カリウム (KOH)、亜硫酸ナトリウム (Na_2SO_3)、硫酸ナトリウム (Na_2SO_4)、硫化ナトリウム (Na_2S)、 Na_nS (式中、 n は整数)、尿素 ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)、重亜硫酸ナトリウム (NaHSO_3)、 NaH_2O_3 、二酸化イオウ (SO_2)、アントラキノ ($\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_2\text{OI}$)、メタノール (CH_3OH)、エタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、ブタノール ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$)、ギ酸 (CH_2O_2)、過酸化水素 (H_2O_2)、酢酸 (CH_3COOH)、ブチル酸 ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)、ペルオキシギ酸 (CH_2O_3)、ペルオキシ酢酸 ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$)、アンモニア (NH_3)、トシル酸 ($p\text{-TsOH}$)、次亜塩素酸ナトリウム (NaClO)、亜塩素酸ナトリウム (NaClO_2)、二酸化塩素 (ClO_2)、塩素 (Cl_2)、水 (H_2O)、または上記のものの任意の組合せを含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 8 2 ~ 8 3 のいずれか 1 つの方法。

10

【0195】

付記 8 5 .

1 つ以上の化学溶液が、水酸化ナトリウムおよび Na_2SO_3 の沸騰溶液を含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 8 2 ~ 8 4 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0196】

20

付記 8 6 .

(i) 第 2 の温度は、 $100 \sim 160^\circ\text{C}$ であり、

(ii) 第 2 の時間は、 $0.1 \sim 96$ 時間 (両端値を含む) の範囲内であり、または

(i) および (ii) の両方である、

本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 8 2 ~ 8 5 のいずれか 1 つの方法。

【0197】

付記 8 7 .

(a) の 1 つ以上の化学的処理に供することが、1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤ中の天然リグニンを $1\% \sim 90\%$ (両端値を含む) 除去して、1 つ以上のリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを形成する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 8 2 ~ 8 6 のいずれか 1 つの方法。

30

【0198】

付記 8 8 .

(a) の 1 つ以上の化学処理に供することが、1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤ中の天然リグニンの 90% 超を除去して、1 つ以上のリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤを形成する、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 8 2 ~ 8 6 のいずれか 1 つの方法。

【0199】

付記 8 9 .

1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤが、長手方向の成長方向に実質的に垂直な方向に沿って第 1 の厚さを有し、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤが、長手方向の成長方向に実質的に垂直な方向に沿って第 2 の厚さを有し、第 1 の厚さが、第 2 の厚さの少なくとも 2 倍である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 5 8 ~ 8 8 のいずれか 1 つの方法。

40

【0200】

付記 9 0 .

第 1 の厚さが、 $0.02\text{ mm} \sim 1.5\text{ mm}$ (両端値を含む) の範囲であり、および／または第 2 の厚さが、 $300\text{ }\mu\text{m}$ 以下である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 8 9 のいずれか 1 つの方法。

【0201】

50

付記 9 1 .

(b) の圧縮が、プレス時間の間、少なくとも 5 MP a の第 1 の圧力で、1 つ以上のリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをプレスすることを含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 5 8 ~ 9 0 のいずれか 1 つの方法。

【 0 2 0 2 】

付記 9 2 .

第 1 の圧力は、5 ~ 2 0 MP a (両端値を含む) の範囲であり、

プレス時間は、少なくとも 5 分であり、または

上記の両方である、

本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 9 1 の方法。

10

【 0 2 0 3 】

付記 9 3 .

(b) の圧縮が、少なくとも 8 0 °C のプレス温度に供しながら、1 つ以上のリグニンが損なわれた繊維性植物材料ベニヤをプレスすることを含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 5 8 ~ 9 2 のいずれか 1 つの方法。

【 0 2 0 4 】

付記 9 4 .

(c) の間に、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤは、3 0 ~ 4 0 重量% (両端値を含む) の範囲の含水量を有し、

方法は、(c) の後に、1 5 重量% 以下の含水量を有するように 1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤを乾燥することをさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 5 8 ~ 9 3 のいずれか 1 つの方法。

20

【 0 2 0 5 】

付記 9 5 .

(c) の間、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの厚さが、1 ~ 3 mm (両端値を含む) の範囲内である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 9 4 の方法。

【 0 2 0 6 】

付記 9 6 .

(c) の間に、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの含水量が、1 5 重量% 以下である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 5 8 ~ 9 3 のいずれか 1 つの方法。

30

【 0 2 0 7 】

付記 9 7 .

(c) の間に、1 つ以上の高密度化され、リグニンが損なわれたベニヤの厚さが、1 m m 未満である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 9 6 の方法。

【 0 2 0 8 】

付記 9 8 .

(a) の前に、1 つ以上の天然繊維植物材料ベニヤを形成するために、ロールカット技術を使用して天然繊維植物材料の実質的に円筒形の部分をカットすることをさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 5 8 ~ 9 7 のいずれか 1 つの方法。

40

【 0 2 0 9 】

付記 9 9 .

(c) の後に、円周方向に延在する繊維性植物材料壁を軸方向荷重に供することであって、円周方向に延在する繊維性植物材料壁の一方または両方の軸方向端部が、花びら型破損モードを示すように供すること、をさらに含む、本明細書におけるいずれかの項または例、特に、付記 5 8 ~ 9 8 のいずれか 1 つの方法。

【 0 2 1 0 】

付記 1 0 0 .

(c) の後に、円周方向に延在する繊維性植物材料壁を流体運搬チューブまたはパイプ

50

として使用することをさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 58～99 のいずれか 1 つの方法。

【0211】

付記 101 .

(c) の後に、円周方向に延在する繊維性植物材料壁を断熱構成材料として使用することをさらに含む、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 58～100 のいずれか 1 つの方法。

【0212】

付記 102 .

繊維性植物材料が、広葉樹、針葉樹、または竹である、本明細書のいずれかの項または例、特に、付記 58～101 のいずれか 1 つの方法。

10

【0213】

結論

例えば、図 1A～13B および付記 1～102 に関して、本明細書に図示または説明される特徴のいずれかを、例えば、図 1A～13B および付記 1～102 に関して、本明細書に図示または説明される任意の他の特徴と組み合わせて、本明細書に他に図示または具体的に説明されない材料、システム、デバイス、構造体、方法、および実施形態を提供することができる。本明細書に記載される全ての特徴は、互いに独立しており、構造的に不可能な場合を除いて、本明細書に記載される任意の他の特徴と組み合わせて使用することができる。開示された技術の原理が適用され得る多くの可能な実施形態を考慮すると、図示された実施形態は、例に過ぎず、開示された技術の範囲を限定するものとして解釈されるべきではないことが認識されるべきである。むしろ、範囲は、以下の特許請求の範囲によって定義される。したがって、本発明者らは、これらの特許請求の範囲の範囲および趣旨の範囲内に入る全てを特許請求するものである。

20

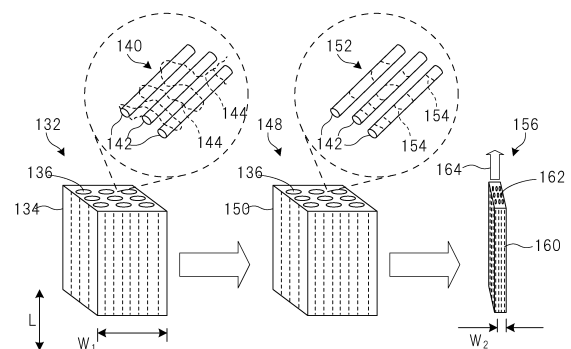
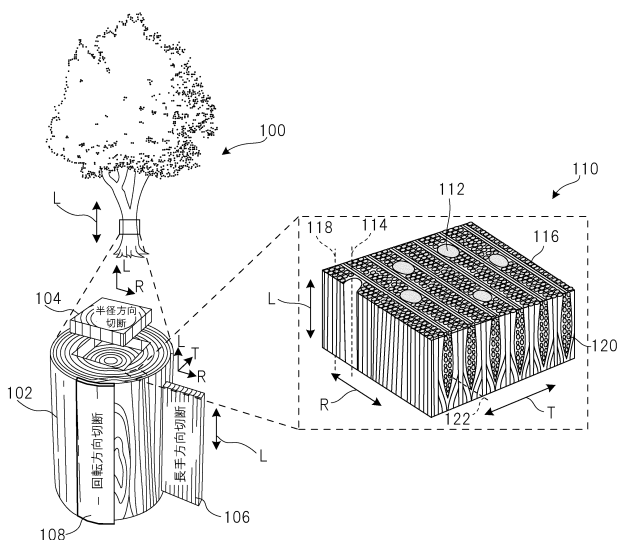
【図面】

【図 1A】

【図 1B】

図 1A

図 1B



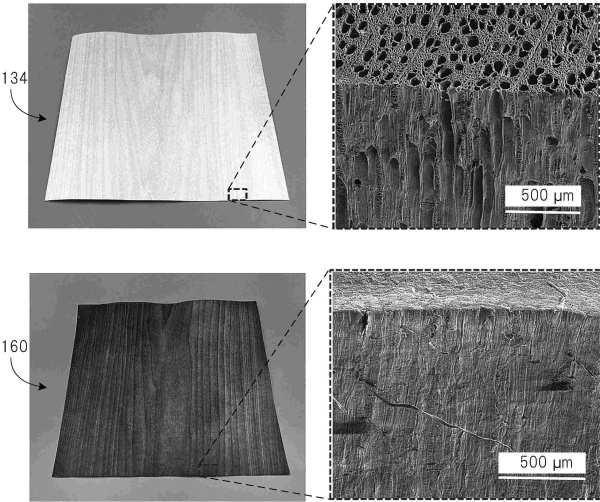
30

40

50

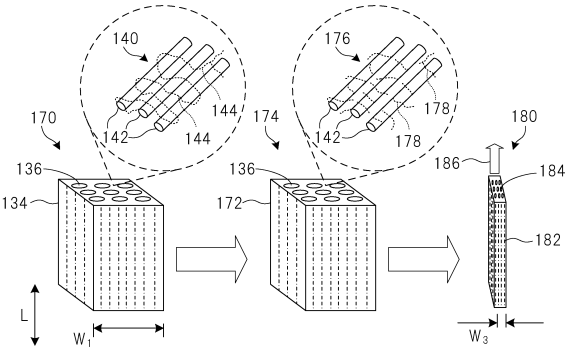
【図 1 C】

図 1C



【図 1 D】

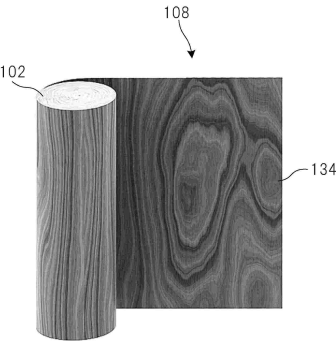
図 1D



10

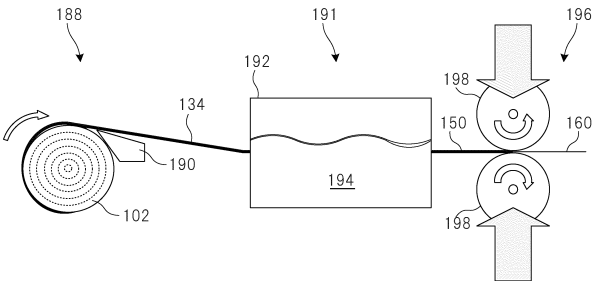
【図 1 E】

図 1E



【図 1 F】

図 1F



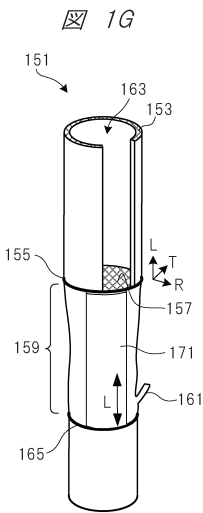
20

30

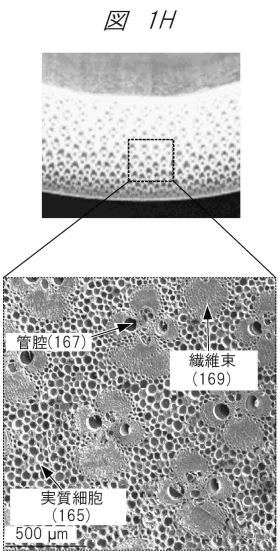
40

50

【図 1 G】

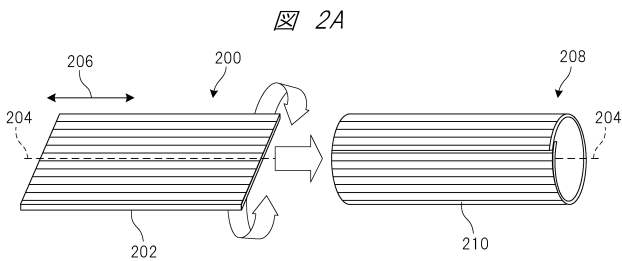


【図 1 H】

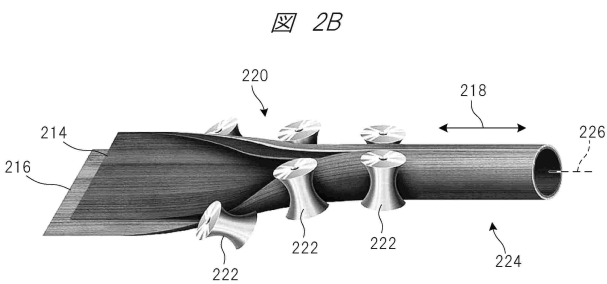


10

【図 2 A】



【図 2 B】



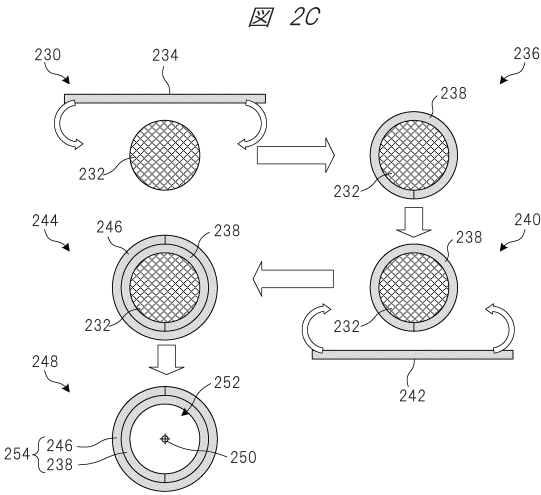
20

30

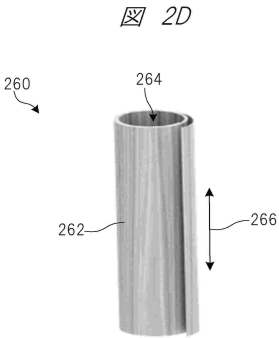
40

50

【図 2 C】

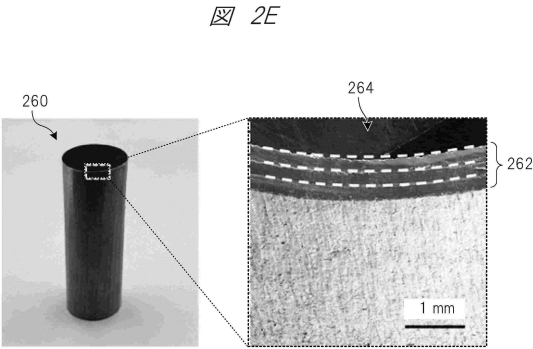


【図 2 D】

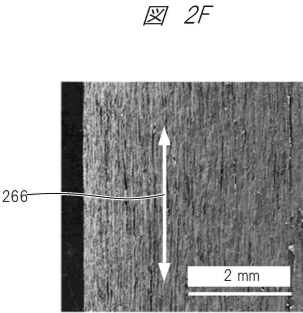


10

【図 2 E】

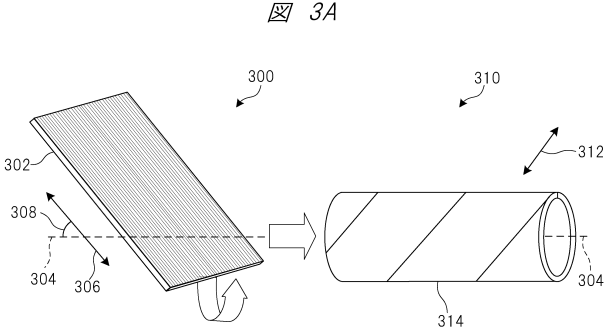


【図 2 F】

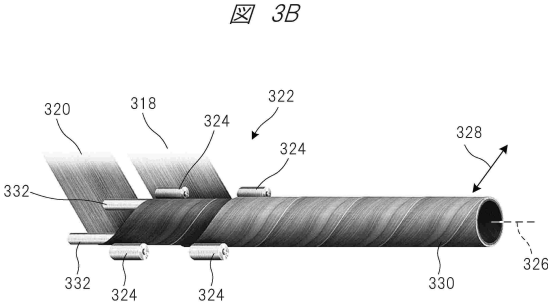


20

【図 3 A】



【図 3 B】



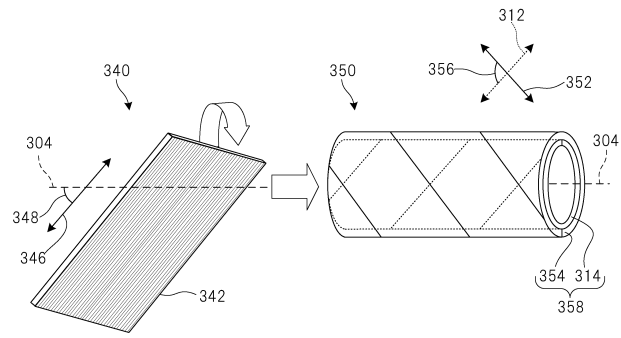
30

40

50

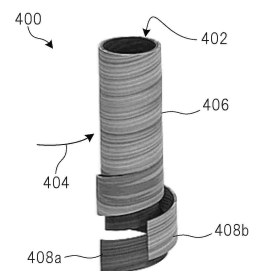
【図 3 C】

図 3C



【図 4 A】

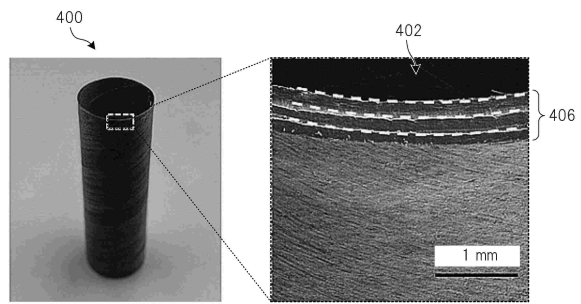
図 4A



10

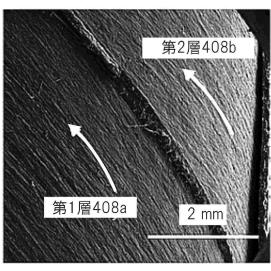
【図 4 B】

図 4B



【図 4 C】

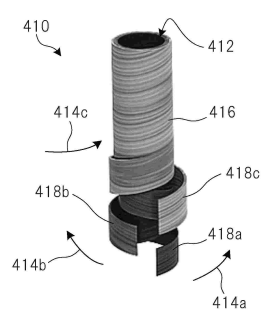
図 4C



20

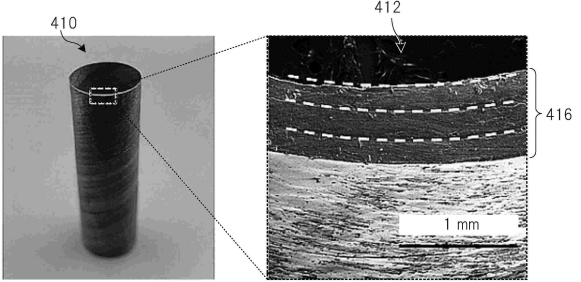
【図 4 D】

図 4D



【図 4 E】

図 4E

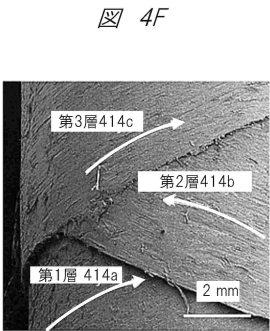


30

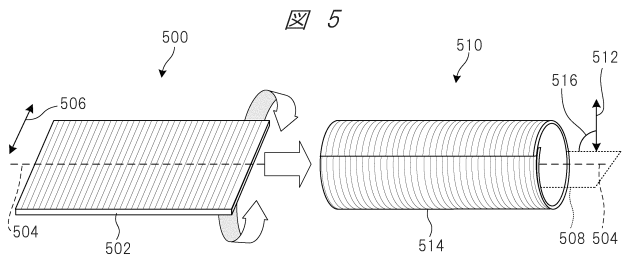
40

50

【図 4 F】

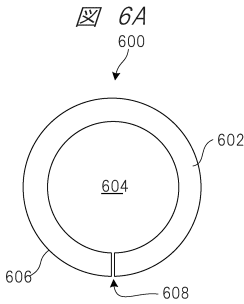


【図 5】

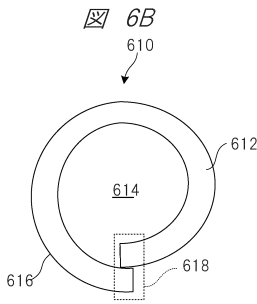


10

【図 6 A】

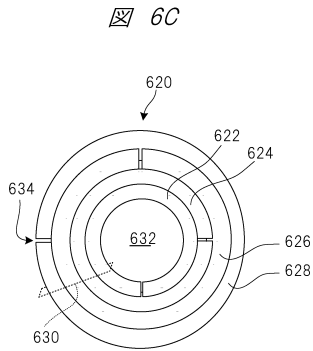


【図 6 B】

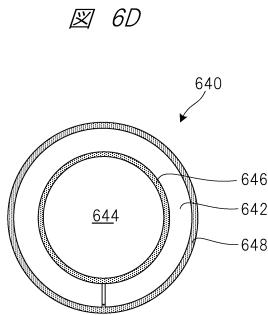


20

【図 6 C】



【図 6 D】

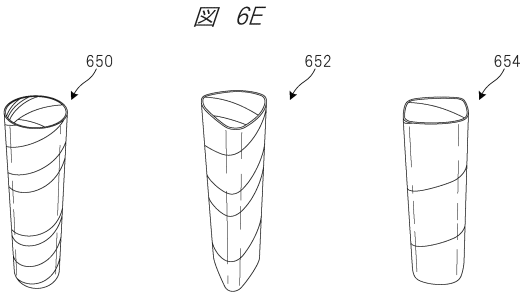


30

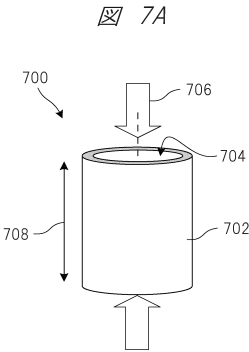
40

50

【図 6 E】

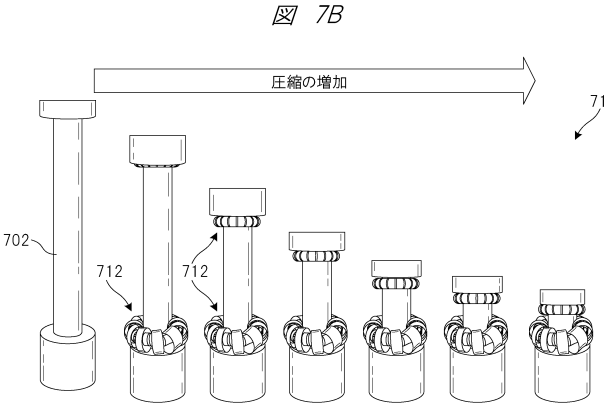


【図 7 A】

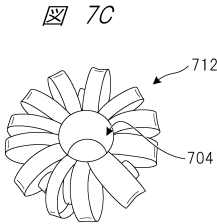


10

【図 7 B】

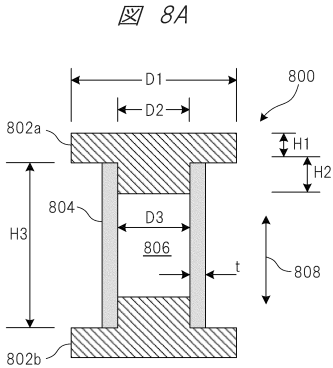


【図 7 C】

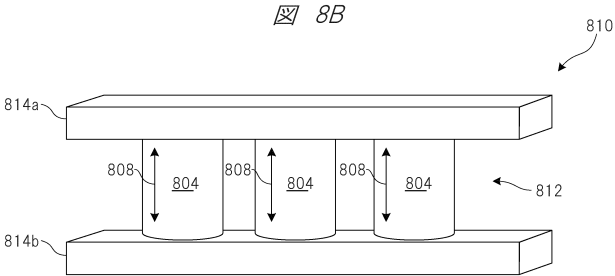


20

【図 8 A】



【図 8 B】

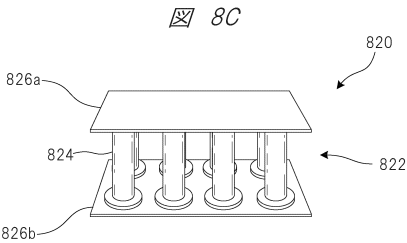


30

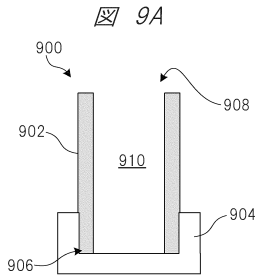
40

50

【図 8 C】

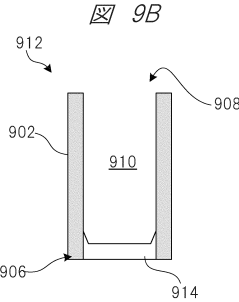


【図 9 A】

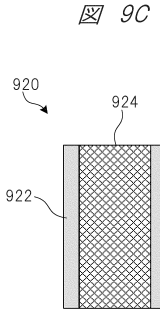


10

【図 9 B】

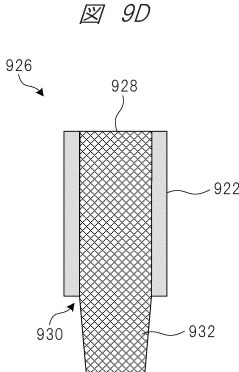


【図 9 C】

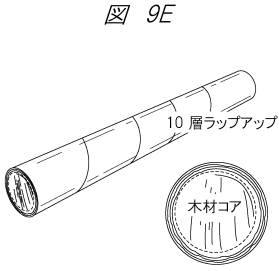


20

【図 9 D】



【図 9 E】

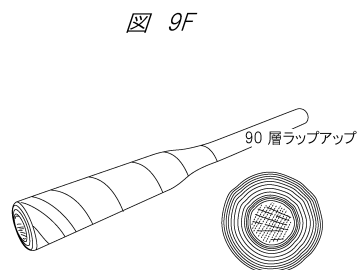


30

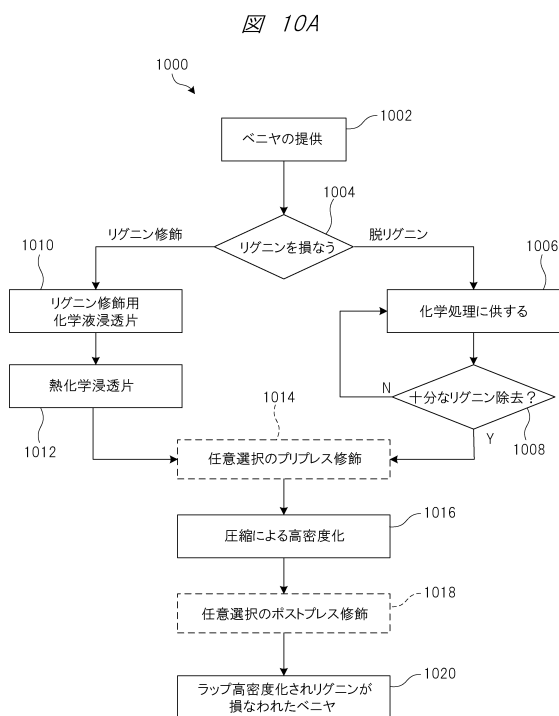
40

50

【図 9 F】



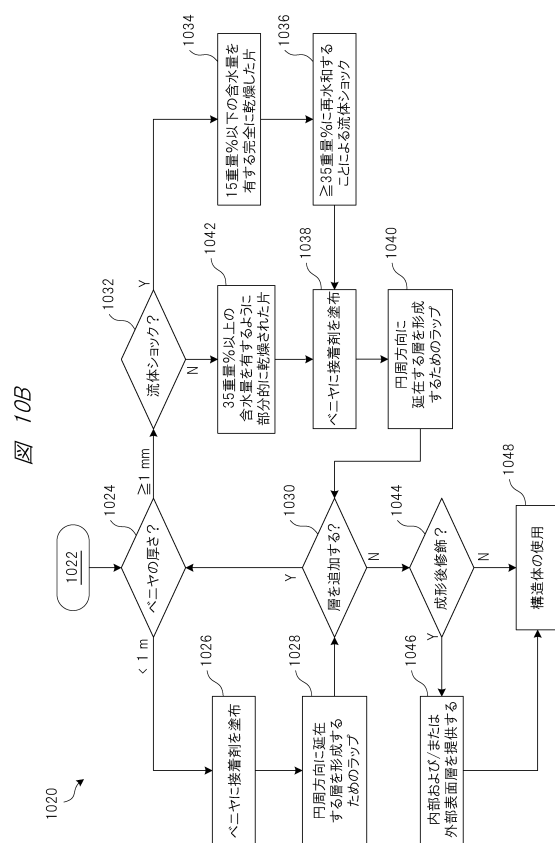
【図 10 A】



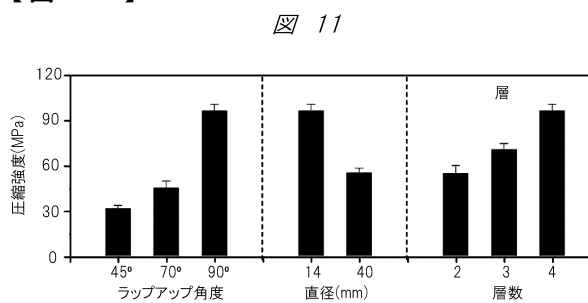
10

20

【図 10 B】



【図 11】

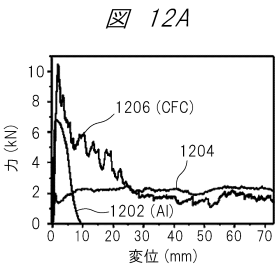


30

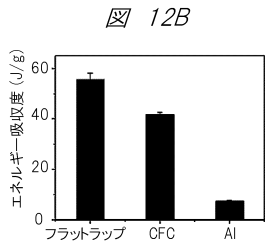
40

50

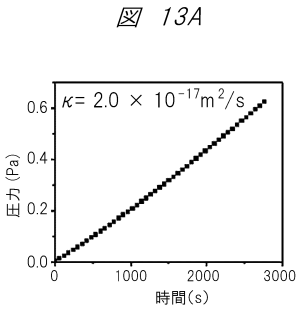
【図 1 2 A】



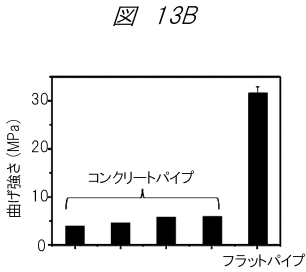
【図 1 2 B】



【図 1 3 A】



【図 1 3 B】



10

20

30

40

50

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US2023/022951

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
IPC(8) - INV. - B27D 1/08; B32B 21/04; C08L 97/02 (2023.01) ADD. - B27K 5/06; B32B 21/08; B27N 3/08 (2023.01) CPC - INV. - B27D 1/086; B27K 5/007; B32B 21/042; C08L 97/005 (2023.08) ADD. - B27K 2240/10; B27K 5/06; B32B 21/08; B27N 3/08 (2023.08) According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) See Search History document		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched See Search History document		
Electronic database consulted during the international search (name of database and, where practicable, search terms used) See Search History document		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2020/0238565 A1 (UNIVERSITY OF MARYLAND COLLEGE PARK) 30 July 2020 (30.07.2020) entire document	1-4, 6, 7, 15, 16, 43-45, 47
Y		13, 14
X	WO 2021/216803 A1 (UNIVERSITY OF MARYLAND COLLEGE PARK) 28 October 2021 (28.10.2021) entire document	1, 6, 8-12, 17, 18, 20-22, 26, 37-42, 46, 48, 49
Y		5, 8, 13, 14, 23-25, 27-31
Y	US 2022/0040881 A1 (UNIVERSITY OF MARYLAND COLLEGE PARK) 10 February 2022 (10.02.2022) entire document	5, 8
Y	WO 2013/108055 A1 (MILIOTIS) 25 July 2013 (25.07.2013) entire document	23-25
Y	CN 102894847 A (NI) 30 January 2013 (30.01.2013) see machine translation and original	27-31
E, A	WO 2023/028356 A1 (UNIVERSITY OF MARYLAND COLLEGE PARK) 02 March 2023 (02.03.2023) entire document	1-49
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 06 September 2023		Date of mailing of the international search report OCT 11 2023
Name and mailing address of the ISA/ Mail Stop PCT, Attn: ISA/US, Commissioner for Patents P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450 Facsimile No. 571-273-8300		Authorized officer Taina Matos Telephone No. PCT Helpdesk: 571-272-4300

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2022)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/US2023/022351

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:
See extra sheet(s).

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☒ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

1-49

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US2023/022351

Continued from Box No. III Observations where unity of invention is lacking

This application contains the following inventions or groups of inventions which are not so linked as to form a single general inventive concept under PCT Rule 13.1. In order for all inventions to be examined, the appropriate additional examination fees need to be paid.

Group I: claims 1-48 are drawn to structures.

Group II: claims 50-56 are drawn to energy absorbing systems.

Group III: claims 57-100 are drawn to methods.

The inventions listed in Groups I-III do not relate to a single general inventive concept under PCT Rule 13.1, because under PCT Rule 13.2 they lack the same or corresponding special technical features for the following reasons:

The special technical features of Group I, structures, are not present in Groups II and III; the special technical features of Group II, energy absorbing systems, are not present in Groups I and III; and the special technical features of Group III, methods, are not present in Groups I and II.

Additionally, even if Groups I-III were considered to share the technical features of a structure comprising: one or more densified, lignin-compromised wood veneers wrapped around a central axis, so as to form a circumferentially-extending wood wall, these shared technical features do not represent a contribution over the prior art as disclosed by WO 2021/216803 A1 to University of Maryland College Park (hereinafter, "Maryland").

Maryland teaches a structure (pg 1 in 14-26 wood or other fibrous plant materials (e.g., bamboo) into arbitrary three-dimensional (3-D) shapes... The different shapes and structures) comprising: one or more densified (pg 14 in 29-31 the shaping can be effective to further densify the cellulose-based material prior to fully drying, which densification may further improve the mechanical properties of the molded material.), lignin-compromised (pg 1 in 17-18 natural plant material is subjected to one or more chemical treatments to remove at least some lignin therefrom (e.g., partial delignification)) wood veneers (see Figs 6A-k and 7A-7B that shows multiple wood configurations/veneers) wrapped around a central axis, so as to form a circumferentially-extending wood wall (pg 22 in 4-7 FIG. 7B illustrates another example, where a moldable cellulose-based material was wrapped around a rod and dried, thereby forming a molded cellulose-based material 704 in a corkscrew or helix configuration around central axis 706.).

The inventions listed in Groups I-III therefore lack unity under Rule 13 because they do not share a same or corresponding special technical feature.

フロントページの続き

,MC,ME,MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,
ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,C
O,CR,CU,CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,I
R,IS,IT,JM,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,MG,MK,MN,MU,MW
,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL
,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW
ンド州, バーウィン ハイツ, ケベック プレイス 6 1 0 3

(72)発明者 リー, テン

アメリカ合衆国, 2 0 8 5 4 メリーランド州, ポトマック, ルーアン レーン 9 0 3 2

(72)発明者 チェン, チオンユー

アメリカ合衆国, 2 0 7 0 5 メリーランド州, ベルツビル, ナロウ トレイル テラス 1 1 3 0 5

F ターム (参考) 2B230 AA30 BA03 CC11 EA11