

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7698899号
(P7698899)

(45)発行日 令和7年6月26日(2025.6.26)

(24)登録日 令和7年6月18日(2025.6.18)

(51)国際特許分類

F I

B 2 7 K 5/00 (2006.01) B 2 7 K 5/00 A

請求項の数 17 (全49頁)

(21)出願番号	特願2022-564340(P2022-564340)	(73)特許権者	520159592
(86)(22)出願日	令和3年4月22日(2021.4.22)		ユニバーシティ オブ メリーランド,
(65)公表番号	特表2023-524653(P2023-524653 A)		カレッジ パーク
(43)公表日	令和5年6月13日(2023.6.13)		アメリカ合衆国, メリーランド州 2 0
(86)国際出願番号	PCT/US2021/028541		7 4 2 カレッジ パーク リージェンツ
(87)国際公開番号	WO2021/216803		ドライブ 7 8 0 9 リー ビルディング
(87)国際公開日	令和3年10月28日(2021.10.28)	(74)代理人	0 1 3 4 ユーエム ベンチャーズ
審査請求日	令和6年4月9日(2024.4.9)		110002066
(31)優先権主張番号	63/013,955	(72)発明者	弁理士法人筒井国際特許事務所
(32)優先日	令和2年4月22日(2020.4.22)		フー, リアンビン
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)	(72)発明者	アメリカ合衆国, 2 0 8 5 4 メリーラ
			ンド州, ロックビル, デモクラシー レ
			ーン 1 0 4 0 7
			シャオ, シャオリアン
			中華人民共和国, 1 5 0 0 4 0 ヘイロ
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 成形可能および成形されたセルロース系構造材料、ならびにその成形および使用のためのシステムおよび方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項1】

(a) 天然に存在するセルロース系材料の断片に1つまたは複数の化学処理を施して前記天然に存在するセルロース系材料の断片の微細構造を維持しながら少なくとも一部のリグニンを除去することで部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を作製するステップであって、前記微細構造は、前記天然に存在するセルロース系材料の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在するセルロース系縦方向細胞を含む、ステップと、

(b) 前記ステップ(a)の後、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を部分的に乾燥させて水分の一部を除去するステップであって、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料は、前記部分的に乾燥させたときの水分含量が少なくとも35wt%であり、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料における第1のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも小さい断面サイズを有し、かつ実質的に潰れており、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料における第2のセルロース系縦方向細胞の内腔は、前記第1のサイズよりも大きい断面サイズを有し、かつ少なくとも部分的に開いている、ステップと、

(c) 前記ステップ(b)の後、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を、実質的に平坦な平面構成から非平面的な3次元構成に成形するステップと、

(d) 前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片をさらに乾燥して付加的な水分を除去するステップであって、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片は

、前記さらに乾燥したときの水分含量が15wt%以下であり、それにより、前記断片の形状を前記非平面的な3次元構成にセットし、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の剛性のあるモノリシック断片を形成する、ステップと、
を含む、
方法。

【請求項2】

前記延在方向に垂直な方向における前記天然に存在するセルロース系材料の断片の厚さは、0.1mm～10mm（両端含む）の範囲である、請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記非平面的な3次元構成に成形するステップは、前記断片を折り畳むステップ、または前記断片を曲げるステップ、またはこれらの任意の組み合わせを含む、請求項1に記載の方法。

10

【請求項4】

前記剛性のあるモノリシック断片上に保護層またはコーティングを形成するステップをさらに含み、前記保護層または前記コーティングは、前記剛性のあるモノリシック断片の再水和を防止するように構成される、請求項1に記載の方法。

【請求項5】

前記ステップ（c）の間の前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片の水分含量は、少なくとも50wt%である、請求項1に記載の方法。

【請求項6】

20

前記天然に存在するセルロース系材料は、硬材、軟材、竹、草、または葦である、請求項1に記載の方法。

【請求項7】

前記天然に存在するセルロース系材料は、硬材を含み、前記第1のセルロース系縦方向細胞は、前記硬材の繊維または仮導管を含み、前記第2のセルロース系縦方向細胞は、前記硬材の導管を含み、または

前記天然に存在するセルロース系材料は、軟材を含み、前記第1および前記第2のセルロース系縦方向細胞は、仮導管を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項8】

前記第2のセルロース系縦方向細胞のそれぞれの内腔は、前記ステップ（b）の部分的乾燥の後で、かつ前記ステップ（c）の成形の前の断面サイズが前記ステップ（a）の前の前記天然に存在するセルロース系材料における断面サイズよりも小さい、請求項1に記載の方法。

30

【請求項9】

前記1つまたは複数の化学処理を施す前記ステップ（a）は、前記天然に存在するセルロース系材料のリグニン含有量が0.1%～99%（両端含む）低減されて、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

前記1つまたは複数の化学処理を施す前記ステップ（a）は、前記天然に存在するセルロース系材料のヘミセルロース含有量が0.1%～99%（両端含む）低減されて、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

40

これらの任意の組み合わせである、

請求項1に記載の方法。

【請求項10】

前記天然に存在するセルロース系材料は、硬材であり、前記ステップ（a）の後の前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片のリグニンの量は、少なくとも10wt%であり、または

前記天然に存在するセルロース系材料は、軟材であり、前記ステップ（a）の後の前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片のリグニンの量は、少なくとも12.5wt%であり、または

前記天然に存在するセルロース系材料は、竹であり、前記ステップ（a）の後の前記部

50

分的に脱リグニンした竹の断片のリグニンの量は、少なくとも13wt%である、
請求項1に記載の方法。

【請求項11】

前記ステップ(d)のさらなる乾燥は、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を空気またはガス流にさらすステップ、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を空気またはガスの停滞量にさらすステップ、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を室温にさらすステップ、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を室温以上の温度に加熱するステップ、またはこれらの任意の組み合わせを含む、

請求項1に記載の方法。

10

【請求項12】

前記ステップ(d)の後、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の前記剛性のあるモノリシック断片と、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の1つまたは複数の他の剛性のあるモノリシック断片とを組み立てるステップ、または、

前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の前記剛性のあるモノリシック断片と、前記セルロース系材料の1つまたは複数の他の断片とを組み立てるステップ、または、

前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の前記剛性のあるモノリシック断片と、非セルロース系材料の1つまたは複数の他の断片とを組み立てて複合構造体を形成するステップ、または、

これらの任意の組み合わせ、

20

をさらに含む、

請求項1に記載の方法。

【請求項13】

前記1つまたは複数の化学処理は、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)、硫酸ナトリウム(Na_2SO_4)、硫化ナトリウム(Na_2S)、 Na_nS (ここで、 n は整数である)、尿素($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)、亜硫酸水素ナトリウム(NaHSO_3)、二酸化硫黄(SO_2)、アントラキノン($\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_2$)、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($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)、過ギ酸(CH_2O_3)、過酢酸($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$)、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)、またはこれらの任意の組み合わせによる処理を含む、

30

請求項1に記載の方法。

【請求項14】

前記ステップ(d)の後、

前記非平面的な3次元構成は、複数回折り畳まれるか曲げられることで形成された繰り返し起伏構成を有するように形成され、前記起伏構成は、少なくとも1つのピークと少なくとも1つの谷とを含む繰り返しパターンを有し、

前記方法は、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の前記剛性のあるモノリシック断片を第1の支持板および第2の支持板と結合してハニカム構成を有する構造材料を形成することをさらに含み、

40

前記起伏構成における折り畳みまたは曲げは、第1の方向に平行なそれぞれの軸の周りであり、

前記第1および第2の支持板は、前記第1の方向に関して前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の前記剛性のあるモノリシック断片の両側に、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の前記剛性のあるモノリシック断片を挟むように配置される、

請求項1に記載の方法。

【請求項15】

前記ステップ(c)の形成と、前記ステップ(d)のさらなる乾燥は、同時に行われる、

50

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 1 6】

前記ステップ (d) のさらなる乾燥は、加熱圧搾を使用して、前記部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を乾燥および緊密化することを含む、

請求項 1 に記載の方法。

【請求項 1 7】

請求項 1 ～ 1 6 のいずれか 1 項により形成される構造体。

【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、2020年4月22日に出願された「Foldable, Structural Plant-Based Materials and Methods of Making, Folding, and Cutting the Same」と題する米国仮特許出願第63/013,955号の利益を主張するものであり、その全体が参照により本明細書に組み込まれている。

【0002】

本発明は、一般に、天然に存在するセルロース系材料の加工に関し、より詳細には、成形可能な断片および成形された構造材料を作製するための繊維状の植物性材料の成形および使用に関する。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

本明細書に記載の主題の実施形態は、木材またはその他の繊維状の植物性材料（竹など）を、その機械的強度を著しく増大させながら、任意の3次元（3D）形状に加工することができる「トップダウン」アプローチを提供する。一部の実施形態において、天然植物性材料は、少なくとも一部のリグニンを除去するように1つまたは複数の化学処理（部分的な脱リグニンなど）が施される。これにより、天然植物性材料を軟化させることができる。その後、部分的に脱リグニンした植物性材料を乾燥させることで、植物の微細構造の導管および繊維が収縮する。一部の実施形態において、乾燥後に、材料を流体（水など）中で「衝撃」を受けさせて、導管を選択的に開かせる。この急速な「流体衝撃」プロセスは、圧縮のための空間と高い歪みを支える能力を提供する、特有の部分的に開いたしわのある細胞壁構造体を形成する。これにより、材料の折り畳みおよび成形が容易になる。代替的に、一部の実施形態において、材料を部分的にのみ乾燥させることで、導管が実質的に開いたままになる。これにより、材料の折り畳みおよび成形が可能になる。これらの成形可能な植物性材料を用いて実現することができる様々な形状および構造は、その後、残りの流体を除去するために（例えば、15wt%以下の水分含量を有するように）さらに乾燥させることで所定の位置に設定される。これにより、剛性のある3次元の成形された植物性構造体を形成することができる。

【0004】

一部の実施形態において、本明細書に記載の細胞壁加工プロセスは、植物性材料の固有の異方性微細構造を維持することができ、細胞壁内のセルロース系繊維の間の相互作用を強化することができる。このような相互作用は、加工された植物性材料の機械的特性をさらに強化することができる。したがって、一部の実施形態において、部分的に脱リグニンした植物性材料を3次元の形状に成形し、構造材料または複合構造材料の一部を形成することができる。例えば、一部の実施形態において、ハニカムコア材は、（例えば、ロール間回転切断によって作製された）ベニヤ板から形成され得る。ハニカムコア材と支持板（アルミニウム板など）とを組み合わせ得られた構造材料は、Al合金と同様の300MPa以下の引張強さを示すことができるが、密度はわずかに0.75g/cm³以下であり、より低コストである。本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態に

10

20

30

40

50

よれば、その他の3次元構造および用途も可能である。

【0005】

本明細書の革新的技術のいずれかを組み合わせて、または個別に使用することができる。本明細書は、以下の詳細な説明の中でさらに詳述する概念の選択を簡略化した形態で紹介するために提供される。本明細書は、特許請求の範囲に記載の主題の重要な特徴または本質的な特徴を特定することを意図したものではなく、また、特許請求の範囲に記載の主題の範囲を限定するために使用されることを意図したものでもない。本明細書に記載の技術の上述した、ならびにその他の目的、特徴および利点は、添付の図面を参照して記載する以下の詳細な説明からより明確になるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0006】

以下、添付の図面を参照して本発明の実施形態を説明する。添付の図面は、必ずしも縮尺通りに描かれているわけではない。基本的な特徴の図および説明を補助するために、一部の要素が簡略化または省略されている場合がある。図において、同様の参照符号は、同様の要素を示している。

【図1】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片を形成し、そこから成形された構造材料を形成するための方法を模式的に示すプロセスフロー図である。

【図2A】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片を形成するために使用され得る天然木材の放射状、縦方向、および回転切断片を示す図である。

【図2B】セルロース系縦方向細胞 (longitudinal cells) を含む天然木材の微細構造を模式的に示す断面図である。

【図2C】天然木材の縦方向の木材成長方向に垂直な方向における断面の走査型電子顕微鏡検査 (SEM) による画像である。

【図2D】天然木材におけるセルロース繊維の階層的な配列構造を示す模式図である。

【図3A】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片を形成するために使用され得る天然竹材セグメントを模式的に示す部分断面図である。

【図3B】天然竹材セグメントの断面を示す上面図である。

【図3C】図2Bに示す天然竹材セグメントの稈の拡大図である。

【図3D】図3Cに示す稈壁の階層的な微細構造のさらなる拡大図である。

【図4A】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、流体衝撃処理を使用した木材の成形可能な断片の第1の例示的形成法における様々な段階を示す図であり、様々な段階における木材の断面のSEM画像および概略図、ならびに様々な段階における木材の縦方向細胞壁を形成するセルロース細胞の概略図を含んでいる。

【図4B】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、流体衝撃処理を使用しない木材の成形可能な断片の第2の例示的形成法における様々な段階を示す図であり、様々な段階における木材の断面のSEM画像および概略図、ならびに様々な段階における木材の縦方向細胞壁を形成するセルロース細胞の概略図を含んでいる。

【図5A】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、例示的な折り畳み軸または曲げ軸を有する天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片の斜視図である。

【図5B】例示的な折り畳み位置または曲げ位置を有する、図5Aの成形可能な断片の側面図である。

【図5C】図5Bの成形可能な断片の例示的な折り畳みを示す図である。

【図6】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片における例示的な折り畳み構成を示す図である。

【図7】本明細書に記載の主題の1つまたは複数の実施形態による、天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片における例示的な曲げ構成を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 8】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片における例示的な繰り返し起伏構成を示す図である。

【図 9】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、金型を使用して図 8 の起伏構成を有するように天然に存在するセルロース系材料の成形可能な断片を形成するための例示的な製造設備を示す図である。

【図 10 A】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、流体衝撃処理を使用して図 8 の起伏構成を有するように天然木材の成形可能な断片を連続的に形成するための例示的な製造設備を模式的に示す側面図である。

【図 10 B】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、流体衝撃処理を使用せずに図 8 の起伏構成を有するように天然木材の成形可能な断片を連続的に形成するための別の例示的な製造設備を模式的に示す側面図である。

10

【図 11 A】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、図 8 の起伏構成を有する規則的に配置された成形された断片によって形成された例示的な多層構造体の側面図である。

【図 11 B】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、図 8 の起伏構成を有する対称的に配置された成形された断片によって形成された例示的な多層構造体の側面図である。

【図 12 A】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、図 8 の起伏構成の上面図であり、構造体セグメントを形成するための例示的な切断面を示す図である。

【図 12 B】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、ハニカム構成を有する構造材料を形成するための、起伏構成の成形された構造体セグメントの例示的な組み立てを示す側面図である。

20

【図 12 C】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、複合構造体を形成するための、ハニカム構造材料と 1 対の支持板との例示的な組み立てを示す斜視図である。

【図 12 D】本明細書に記載の主題の 1 つまたは複数の実施形態による、図 12 C の組み立てによって形成された複合構造体を模式的に示す側面図である。

【図 13 A】木材の成形された断片（3 次元の成形された木材）の剛性および密度を、天然木材種およびポリマーで比較したグラフである。

【図 13 B】木材の成形された断片（3 次元の成形された木材）によって形成されたハニカム構成を有する複合構造体と、アルミニウム（A1-5052）によって形成されたハニカム構成を有する複合構造体との比圧縮強度を示すグラフである。

30

【図 14 A】成形不可能な木材、成形可能な木材、および 3 次元の成形された木材の製造における含水量の経時変化を示すグラフである。

【図 14 B】乾燥状態における収縮した木材の画像である。

【図 14 C】湿潤状態における成形可能な木材の画像である。

【図 15 A】穴の縁において木材繊維の破損をもたらす圧縮された木材に穴を形成するためのプロセスフローの比較例を示す図である。

【図 15 B】穴の縁において木材繊維の破断を回避するために成形可能な木材に穴を形成するための例示的なプロセスフローを示す図である。

40

【発明を実施するための形態】

【0007】

【一般的な注意事項】

本明細書において、本明細書に記載の実施形態の特定の側面、利点および新規な特徴を説明する。本発明の方法およびシステムは、いかなる場合においても限定的であると解釈されるべきではない。本発明は、単独で、ならびに互いと様々な組み合わせおよび副組み合わせで、本明細書に記載の様々な実施形態のすべての新規且つ非自明の特徴および側面に向けられている。該方法および該システムは、特定の側面または特徴またはそれらの組み合わせに限定されるものではない。また、本明細書に記載の実施形態は、1 つまたは複数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要求しない。任意の実施

50

形態または実施例での技術は、任意の1つまたは複数の他の実施形態または実施例で記載された技術と組み合わせることができる。本明細書に記載の技術の原理が適用され得る多くの可能な実施形態を鑑みて、図に示す実施形態が例示的なものであり、本明細書に記載の技術の範囲を限定するものではないことに留意されたい。

【0008】

本明細書に記載の方法の一部の操作は、便宜上、特定の連続した順序で記載されているが、これらの順序は、後述する特定の用語によって特定の順序であることが明示されない限り、並べ替えられることを包含することに留意されたい。例えば、特定の順序で記載されている操作は、並べ替えて行われてもよく、同時に行われてもよい。さらに、簡略化のために、添付の図面には、本明細書に記載の方法と他の方法とが組み合わせられて使用されることに関する様々な方法が示されていない場合がある。また、本明細書では、本明細書に記載の方法を説明するために、「提供する」または「達成する」などの用語を使用する場合がある。これらの用語は、実際に行われる操作を大きく抽象化したものである。これらの用語に対応する実際の操作は、特定の実施形態に応じて異なる場合があり、当業者であれば容易に識別することができる。

【0009】

本明細書に記載の数値範囲は、特に明示されない限り、端点を含む範囲内の離散点の各々を指すことに留意されたい。特に明示されない限り、本明細書または特許請求の範囲で使用される構成要素の数、分子量、割合、温度および時間などを表すすべての数値は、「約」という用語によって修飾されることに留意されたい。したがって、特に暗黙的または明示的に示されない限り、または文脈が当業者によってより明確な構造を有すると適切に理解されない限り、本明細書に記載の数値パラメータは、当業者に知られているように、所望の特性および／または標準的な試験条件／方法における検出限界に依存する場合がある概算値である。本明細書に記載の先行技術から本発明の実施形態を直接且つ明示的に区別する場合、「約」という用語が記載されていない限り、実施形態の数値は概算値ではない。「実質的に」、「ほぼ」、「約」または同様の用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、特にそうでないことが明示されない限り、その値の10%前後の数値を含むことを意図している。

【0010】

方向およびその他の相対的な参照は、添付の図面および本明細書に記載の原理の説明を容易にするために使用される場合があるが、限定を意図したものではない。例えば、「内側」、「外側」、「上」、「下」、「上部」、「下部」、「内部」、「外部」、「左」、「右」、「前」、「後ろ」、「背面」などの特定の用語が使用される場合がある。これらの用語は、特に図に示す実施形態に関して相対的な関係を扱うときに、ある程度の明確さを提供するために、適宜使用される。しかしながら、これらの用語は、絶対的な関係、位置および／または配向を意味することを意図していない。例えば、物体に関して、「上部」は、単に物体をひっくり返すことで「下部」になり得る。それにもかかわらず、同じ部分であることに変わりはなく、物体にも変化はない。

【0011】

本明細書において使用される用語「備える」(comprising)という用語は「含む」(including)を意味し、単数形の定冠詞または不定冠詞(a、an、the)は、文脈が他に明示しない限り、複数の要素も含む。「または」という用語は、文脈が他に明示しない限り、記載された代替要素のうちの単一の要素、または2つ以上の要素の組み合わせを意味する。

【0012】

本明細書に記載の様々な構成要素、パラメータ、および動作条件などには代替例が存在するが、それらの代替例が必ずしも同等であることを意味するものではなく、また、同等に機能することを意味するものでもない。また、特に明示されない限り、代替例が好ましい順序で列挙されていることを意味するものでもない。特に明示されない限り、以下に定義される群のいずれかを置き換えまたはその状態から戻すことができる。

【0013】

他に説明がない限り、本明細書で使用されるすべての技術用語および科学用語は、本発明が属する技術分野の当業者に一般的に理解される用語と同じ意味を有する。本明細書に記載の方法および材料に類似する、またはそれらと同等の方法および材料は、本発明の実施または試験に使用することができるが、その適切な方法および材料は後述する。これらの材料、方法および実施例は、例にすぎず、本発明を限定することを意図していない。本明細書に記載の主題の他の特徴は、以下の詳細な説明および特許請求の範囲から明確になるであろう。

【0014】

[用語の概要]

以下の特定の用語および略語の説明は、本明細書に記載の主題の様々な側面の説明を容易にし、本明細書に記載の主題の実施において当業者を補助するために提供される。

【0015】

「天然に存在するセルロース系材料」：成長した本来の状態における植物界の任意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を介した切断部分）。一部の実施形態において、天然に存在するセルロース系材料は、木材（例えば、硬材または軟材）、竹（例えば、モウソウチク、*Phyllostachys vivax*、コウチク、マダケ、およびクロチクを含むがこれらに限定されない任意のタケ亜科のもの）、アシ（例えば、ヨシ（*Phragmites australis*）、ダンチク（*Arundo donax*）、ビルマアシ（*Neyraudia reynaudiana*）、クサヨシ（*Phalaris arundinacea*）、コウボウ（*Glyceria maxima*）、ノガリヤス（*Calamagrostis*種）、カミガヤツリ（*Cyperus papyrus*）、ミクリ（*Sparganium*種）、ガマ（*Typha*種）、cape thatching reed（*Elegia tectorum*）、および thatching reed（*Thamnochortus insignis*）のいずれか）、または草（例えば、イネ目またはイネ科から選択される種）を含む。代替的にまたは追加的に、一部の実施形態において、天然に存在するセルロース系材料は、リグニン、ヘミセルロース、およびセルロースからなる任意のタイプの繊維状の植物であり得、これは、細胞によって形成された内腔の一部の直径が他の物よりも大きい微細構造を有する。

【0016】

「縦方向の成長方向」：根または幹から成長する方向であり、植物の細胞壁を形成するセルロース細胞は、一般に、縦方向の成長方向に整列している。場合によっては、縦方向の成長方向は、一般に垂直であってもよく、その水分の蒸散の流れの方向に対応していてもよい。これは、植物の中心部分から外向きに延在して概ね水平でありえる放射状の成長方向とは対照的である。

【0017】

「脱リグニン」：天然に存在するセルロース系材料から天然に存在するリグニンの一部（例えば、少なくとも0.1%）またはほぼすべて（例えば、99%未満）を除去すること。脱リグニン前後のセルロース系材料内のリグニン含有量は、当該技術分野において既知の技術を用いて評価することができる。これは、例えば、参照により本明細書に組み込まれる、米国国立再生可能エネルギー研究所（NREL）発行の「Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass」におけるLaboratory Analytical Procedure（LAP）TP-510-42618（08-03-2012版）、およびASTMインターナショナル発行の「Standard Test Method for Determination of Carbohydrates in Biomass by High Performance Liquid Chromatography」におけるASTM E1758-01（2020）に記載されている。

【0018】

「水分含量」：植物性材料の微細構造内に保持される流体、典型的には水の量。一部の

10

20

30

40

50

実施形態において、水分含量（MC）は、例えば、植物性材料を（例えば、103℃で6時間）オープン乾燥することによって得られる重量の変化を計算するオープン乾燥試験によって決定することができる。これは、次式によって得ることができる。

【0019】

【数1】

$$MC(\%) = \frac{\text{乾燥前の重量} - \text{乾燥後の重量}}{\text{乾燥後の重量}} \times 100$$

【0020】

代替的にまたは追加的に、水分含量は、当該技術分野で既知の技術、例えば、電気式水分計またはその他の技術を用いて評価することができる。これは、例えば、参照により本明細書に組み込まれる、ASTM国際発行の「Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-based Materials」におけるASTM D4442-20（2020）に記載されている。

【0021】

「モノリシック」：複数の小片を接合してまたは組み合わせて（例えば、積層化して）形成された単一の断片と比較される、単一の連続的な断片。

【0022】

疲労なし：塑性変形、切り欠きまたは折り目の形成、破断、およびほつれなどの材料破壊を示すことなく、繰り返し折り畳んだり曲げたりすることができること。

【0023】

「成形」：曲げ、折り畳み、押下、押圧、または（例えば、セルロース系材料を除去することなく）非破壊的に材料の断片を所望の形状に成形すること。

【0024】

3次元（3D）構成：（セルロース細胞が共通の方向に沿って実質的に整列している）実質的に平坦な平面構成とは対照的に、3次元構成は、少なくとも1つの外面が同一平面でない部分を有するように、またはそのうちの一部分のセルロースナノ繊維が他の部分のセルロースナノ繊維と整列しないように、または断片が全体的に平面6面体の形状を有さないように、またはそれらの任意の組み合わせで、単一のモノリシック断片が成形される。

【0025】

〔序論〕

本発明の実施形態において、天然に存在するセルロース系材料の微細構造は、材料に、より高い柔軟性を提供するように修飾され得る。この修飾は、1つまたは複数の化学処理（例えば、部分的な脱リグニン）によって天然材料からリグニンのすべてではなく一部を除去することを含むことができる。一部の実施形態において、この修飾により、天然材料の微細構造のセルロース系縦方向細胞が実質的に保持される。しかしながら、十分なリグニンが除去されて、隣接する細胞間に隙間が形成される場合がある。部分的に脱リグニンした材料を化学処理後に乾燥させたときに、微細構造の細胞の内腔が収縮するか、そこにしわが生じる。一部の実施形態において、部分的に脱リグニンした材料は、完全に乾燥させる（例えば、水分含量が15wt%以下であるように）ことで、内腔が実質的に潰れる。乾燥後に、部分的に脱リグニンした材料は、短期間（例えば、5分未満）流体に部分的または全体的に浸漬することで再水和され得る。再水和された材料は、天然材料よりも柔軟である。代替的に、一部の実施形態において、部分的に脱リグニンした材料は、部分的に乾燥させる（例えば、水分含量が35wt%以上であるように）ことで、少なくとも一部の内腔が潰れるかまたは収縮される。また、部分的に乾燥させた材料は、天然材料よりも柔軟であってもよい。

【0026】

一部の実施形態において、より柔軟な、すなわち成形可能なセルロース系材料は、例え

10

20

30

40

50

ば、折り畳み、曲げ、圧縮金型の使用、またはその他の任意の技術によって、任意に成形することができる。一部の実施形態において、成形可能なセルロース系材料は、まず、例えば10mm以下の厚さを有する薄い平坦な断片として提供されてもよい。次いで、成形可能な材料は、任意の方向、任意の位置、および任意の角度方向（例えば、 $0 \sim 180^\circ$ （両端含む））について折り畳まれるか、曲げられるか、その他の成形が行われて、任意の複雑な3次元構造に形成され得る。例えば、一部の実施形態において、成形可能なセルロース系材料は、折り紙および／または切り紙と同様に、複雑な3次元構造を作製するために切断され得、および／または折り畳まれ得る。

【0027】

セルロース系材料が十分な流体含有量（例えば、水分含量が35wt%以上）を保持している限り、材料は、成形可能性／柔軟性を維持することができる。特定の形状（例えば、水分含量が15wt%以下であるように）を有するように構成された材料を完全に乾燥させることで、材料は形状を保持するように「セット」される。これにより、それ以上の成形によって塑性変形する剛性のある成形された構造を形成することができる。得られた成形材料は、元の天然材料よりも機械的特性が強化されている。例えば、一部の実施形態において、成形材料は、構造材料として使用されるか、または他の材料と統合されて複合構造材料を形成することができる、剛性のあるモノリシック断片である。代替的に、一部の実施形態において、成形可能な材料は、柔軟な基板またはその他の支持構造体として使用するために、その柔軟性を維持するように水和状態に維持されてもよい。

【0028】

本明細書に記載の細胞壁の工学的アプローチは、軽量の構造材料としての天然植物性材料（木材、竹、草など）の能力を、従来の平面構造から、より汎用性の高い複雑な3次元設計および構成要素へと根本的に拡大することができる。

【0029】

〔方法の実施例〕

図1は、天然に存在するセルロース系材料から成形可能な構造体を形成するための例示的な方法100、およびその後のその使用法を示している。一部の実施形態において、植物性材料は、木材、竹、草、または葦である。しかしながら、他の実施形態において、植物性材料は、リグニン、ヘミセルロース、およびセルロースからなる任意のタイプの繊維状の植物であり得る。これは、細胞によって形成された一部の内腔の直径が他の物よりも大きい微細構造を有する。例えば、天然に存在するセルロース系材料の微細構造は、第1の縦方向細胞（繊維、ミクロフィブリル、または仮導管など）の壁によって形成され且つ第1の断面サイズを有する第1の内腔と、第2の縦方向細胞（導管など）の壁によって形成され且つ第1の断面サイズよりも大きい第2の断面サイズを有する第2の内腔と、を有することができる。

【0030】

該方法100は、プロセスブロック102で開始することができる。ここで、天然のセルロース系材料の断片が準備される。例えば、プロセスブロック102の準備は、天然のセルロース系材料の断片を親植物から切断、除去、または分離することを含むことができる。一部の実施形態において、切断によって、セルロース系材料を実質的に平坦な平面構造に成形することができる。ここで、セルロース繊維の方向は、構造体の平面に対して平行に延在している。任意選択で、一部の実施形態において、準備は、天然のセルロース系材料の断片の前処理を含むことができる。例えば、その後の加工に備えて望ましくない材料または汚染を除去するための洗浄、その後の処理に備えて天然のセルロース系材料を特定の形状に成形（短冊状にスライスするなど）すること、セルロース系材料（例えば、蒸気処理を使用して）を軟化させるまたは平坦化すること、またはこれらの任意の組み合わせを含むことができる。

【0031】

プロセスブロック104において、セルロース系材料には、1つまたは複数の化学処理が施されて、例えば、その処理に関連する化学溶液に天然のセルロース系材料（またはそ

の一部)を浸漬することで、そこから少なくとも一部のリグニンが除去される。一部の実施形態において、各化学処理または一部の化学処理のみが、処理に関連する溶液を天然のセルロース系材料の細胞壁および内腔に完全に浸透することを促すように真空下で実施され得る。代替的に、一部の実施形態において、化学処理は、周囲圧力条件下または上昇した圧力条件下(例えば、6~8バール以下)で実施され得る。一部の実施形態において、各化学処理または一部の化学処理は、周囲温度(例えば、23℃以下)と化学処理に関連する溶液が沸騰する高い温度(例えば、70℃~160℃以下)との間の任意の温度で実施され得る。一部の実施形態において、天然のセルロース系材料の微細構造に対する破壊を最小限に抑えるため、溶液は攪拌されない。

【0032】

一部の実施形態において、浸漬時間は、0.1時間~96時間の範囲であり得、例えば、4時間~12時間(両端含む)の範囲であり得る。溶液中への浸漬時間は、除去されるリグニンの量、断片のサイズ、溶液の温度、処理の圧力、および/または攪拌の回数であってもよい。例えば、より少ないリグニン除去量、より小さい断片サイズ、より高い溶液温度、より高い処理圧力、および攪拌は、より短い浸漬時間と関連していてもよく、より多いリグニン除去量、より大きい断片サイズ、より低い溶液温度、より低い処理圧力、および攪拌なしは、より長い浸漬時間と関連していてもよい。

【0033】

一部の実施形態において、化学処理の溶液は、アルカリ性溶液を含む。一部の実施形態において、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 (ここで、 n は整数である)、尿素($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)、亜硫酸水素ナトリウム(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($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)、過ギ酸(CH_2O_3)、過酢酸($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$)、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)、またはこれらの任意の組み合わ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み合わせは、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$ 、 $\text{NaOH} + \text{尿素}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaOH} + \text{AQ}$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S} + \text{AQ}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{AQ}$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{AQ}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{AQ}$ 、 $\text{NaHSO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{AQ}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{AQ}$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_n\text{S}$ (ここで、 n は整数である)、 $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH} + \text{CH}_3\text{OH} + \text{AQ}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{NaOH}$ 、 $\text{CH}_3\text{OH} + \text{HCOOH}$ 、 $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 、および $\text{NaClO}_2 + \text{酢酸}$ を含むことができるが、これらに限定されるものではない。

【0034】

化学処理は、天然のセルロース系材料のリグニン含有量が所望の量まで低減されるまで継続され得る(またはその後の溶液で繰り返され得る)。リグニン含有量は、所望の用途に応じて、0.1%(リグニン含有量が天然のセルロース系材料の元のリグニン含有量の0.1%)~99%(リグニン含有量が天然のセルロース系材料の元のリグニン含有量の99%)の範囲で低減され得る。例えば、天然のセルロース系材料を可能な限り多く保持することが望ましい場合がある一部の実施形態において、リグニン含有量の低減は、例えば、天然のセルロース系材料の元のリグニン含有量と比較してリグニン含有量が10%を超えないように低減されるような比較的小さいものとすることができる。一部の実施形態において、元のリグニン含有量の少なくとも90%が除去されるように(例えば、90%~100%のリグニンが除去されるように)、より多くのリグニンが除去され得る。一部の実施形態において、リグニン含有量は、天然のセルロース系材料の元のリグニン含有量と比較して、50%以下低減される。一部の実施形態において、化学処理は、リグニン含有量の低減と同時に、例えば、リグニン含有量の低減量と同じまたはそれよりも少ない程

10

20

30

40

50

度にヘミセルロース含有量を低減させる。

【0035】

一部の実施形態において、天然のセルロース系材料が硬材の場合、プロセスブロック104における脱リグニン後のリグニン含有量は、少なくとも10wt%（例えば、10wt%～15wt%（両端含む））の範囲）であり得る。一部の実施形態において、天然のセルロース系材料が軟材の場合、プロセスブロック104における脱リグニン後のリグニン含有量は、少なくとも12.5wt%（例えば、12.5wt%～17.5wt%（両端含む））であり得る。一部の実施形態において、天然のセルロース系材料が竹の場合、プロセスブロック104における脱リグニン後のリグニン含有量は、少なくとも13wt%（例えば、13wt%～18wt%（両端含む））であり得る。天然植物性材料からリグニンを除去することで、細胞内腔を拡大させ、親水性を向上させることができる。

10

【0036】

一部の実施形態において、プロセスブロック104は、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ように、化学処理の後に任意のすすぎステップをさらに含むことができる。例えば、脱リグニンしたセルロース系材料は、1つまたは複数のすすぎ溶液に部分的にまたは完全に浸漬され得る。すすぎ溶液は、脱イオン（DI）水、アルコール（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み合わせなどの溶媒であり得るが、これに限定されるものではない。例えば、すすぎ溶液は、等容量の水およびエタノールで形成され得る。一部の実施形態において、すすぎは、例えば、微細構造の破壊を回避するために、攪拌せずに実施され得る。一部の実施形態において、すすぎは、その都度新しい混合すすぎ溶液を使用しながら複数回（例えば、少なくとも3回）繰り返されてもよい。

20

【0037】

該方法100は、決定ブロック106へ進むことができる。ここで、流体衝撃法が実施されるかどうか判定される。流体衝撃が実施されないと判定された場合、該方法100は、決定ブロック106からプロセスブロック108へ進むことができる。ここで、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料は、部分的に乾燥される。例えば、プロセスブロック108の部分乾燥は、セルロース系材料が少なくとも35wt%（例えば、50wt%以上）の水分含量を有するように実施される。また、流体衝撃が実施されないと判定された場合、該方法100は、決定ブロック106からプロセスブロック110へ進むことができる。ここで、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料は、完全に乾燥される。例えば、プロセスブロック110の完全乾燥は、セルロース系材料が15wt%以下（例えば、約8wt%～約12wt%（両端含む））の水分含量を有するように実施される。

30

【0038】

プロセスブロック108またはプロセスブロック110における乾燥は、空気乾燥プロセス、真空補助式乾燥プロセス、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、またはこれらの任意の組み合わせを含むがこれらに限定されない伝導、対流、および／または放射加熱プロセスのいずれかを含むことができる。例えば、空気乾燥プロセスは、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料を静的または移動する空気中で自然乾燥させることを含むことができる。ここで、空気は、室温（例えば23℃）またはそれより高温（例えば23℃超）など、任意の温度であってもよい。例えば、真空補助式乾燥プロセスは、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料を、例えば、真空チャンバまたは真空オープンで、例えば1パール未満の減圧にさらすことを含むことができる。例えば、オープン乾燥プロセスは、オープン、ホットプレート、またはその他の伝導、対流、または放射加熱装置を使用して、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料を高温（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、凍結乾燥プロセスは、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の温度をその中の流体の凝固点以下（例えば、0℃未満）まで下げて、圧力を下げてその中の凍結した流体を昇華（例えば、数ミリパール未満）させることを含むことができる。例えば、臨界点乾燥プロセスは、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料を流体（例えば、液体二酸

40

50

化炭素)に浸漬して、流体の臨界点(例えば、二酸化炭素の場合は7.39MPa、31.1℃)を超えて竹セグメントの温度および圧力を増大させ、次いで、圧力を徐々に解放して、気体状となった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、電子レンジまたはその他のマイクロ波発生装置を使用して、マイクロ波領域の周波数(例えば、300MHz~300GHz)、例えば、915MHz以下または2.45GHz以下の周波数を有する電磁放射線にさらすことで、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料内の誘電加熱を誘発することを含むことができる。

【0039】

一部の実施形態において、プロセスブロック110における完全乾燥によって、脱リグニンしたセルロース系材料が収縮して、細胞壁に著しい座屈が生じる。一部の実施形態において、縦方向細胞によって形成された内腔が潰れる場合がある(例えば、チャンネル壁の対向する表面が接触するように完全に潰れるか、少なくとも著しく狭くなる)。プロセスブロック110における乾燥後に、該方法100は、プロセスブロック112へ進むことができる。ここで、流体衝撃法を使用して、乾燥したセルロース系材料が再水和される。例えば、乾燥したセルロース系材料は、再水和された材料が少なくとも35wt%(例えば約50wt%)の水分含量を有するように、短時間(例えば3分以下の秒単位での数分間)、流体(例えば、水、アルコール、またはこれらの任意の組み合わせ)に部分的にまたは完全に浸漬され得る。1つまたは複数の実施形態によれば、流体への浸漬以外の再水和のための方法も可能である。例えば、加湿された環境にさらすことで再水和を実現することができる。

【0040】

一部の実施形態において、再水和は、細胞壁を再膨張させ、より大きい内腔(第2の縦方向細胞によって形成された第2の内腔など)が再び開く一方で、より小さい内腔(第1の縦方向細胞によって形成された第1の内腔など)が実質的に潰れたままである状態にするのに有効である。流体衝撃によって導入された膨張は、細胞壁構造体にしわを生じさせることができる。これにより、セルロース系材料は、損傷することなく厳しい引張および圧縮に対応することができるようになる。

【0041】

プロセスブロック108またはプロセスブロック112の後に、セルロース系材料が少なくとも35wt%の水分含量を有する状態で、該方法100は、決定ブロック114へ進むことができる。ここで、事前成形修飾が望ましいかどうか判定される。このような修飾が望ましい場合、該方法100は、プロセスブロック116へ進むことができる。ここで、非機械加工法(例えば、修飾のために多量の材料を除去しない)を使用して、穴、開口部、凹部、またはその他の表面修飾を形成する。修飾は、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の水分含量が少なくとも35wt%である状態且つ実質的に柔軟/成形可能な状態である間に行うことができる。その結果、セルロース繊維は、破断することなく、穴、開口部、または凹部の形成の周りに曲がるように十分な運動性を保持することができる。

【0042】

プロセスブロック116における修飾の後、または決定ブロック114において修飾が望ましくないと判定された場合、該方法100は、プロセスブロック118へ進むことができる。ここで、セルロース系材料は、3次元構成などの所望の構成を有するように成形される。プロセスブロック118における成形は、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料が所望の構成を有するようにその次垂料を曲げる、折り畳む、押す、(例えば金型を使用して)成形する、または非破壊的に(例えば材料を除去することなく)成形することを含むことができる。成形中、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の水分含量は少なくとも35wt%であるため、実質的に柔軟/成形可能な状態にある。その結果、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料は、成形された構成を容易に採用し、損傷することなく元の成形前の構成に戻ることができる。

【0043】

該方法 100 は、決定ブロック 120 へ進むことができる。ここで、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料を成形された構成に設定すべきか、または部分的に脱リグニンしたセルロース系材料を柔軟／成形可能な状態に維持すべきかが判定される。成形可能な材料としてセルロース系材料を維持することが望ましい場合、該方法 100 は、プロセスブロック 122 へ進むことができる。ここで、その水分含量は、35 wt % 以上に維持される。セルロース系材料を成形された構成に設定することが望ましい場合、該方法 100 は、プロセスブロック 124 へ進むことができる。ここで、セルロース系材料は、水分含量が 15 wt % 以下まで低減するように、成形された構成を維持しながら完全に乾燥される。プロセスブロック 124 における乾燥は、プロセスブロック 110 に関して上述したのと同様に実施されてもよい。代替的にまたは追加的に、一部の実施形態において、乾燥は、例えば、成形可能なセルロース系材料を同時に成形および乾燥するために加熱圧搾を使用することで生じる成形の副産物であり得る。このような実施形態において、成形は、完全に乾燥する前にセルロース系材料をさらに緻密化するのに有効であり得る。この緻密化は、成形材料の機械的特性をさらに向上させることができる場合がある。完全に乾燥した部分的に脱リグニンしたセルロース系材料は、剛性を有し、塑性変形なしにさらなる成形が不可能である。これにより、成形された構造体が形成される。

【0044】

一部の実施形態において、該方法 100 は、プロセスブロック 122 またはプロセスブロック 124 からプロセスブロック 126 へ進むことができる。ここで、任意選択で外部修飾が適用され得る。例えば、セルロース系材料は、水分の進入または水分の排出を防止して、材料を所望の成形可能な状態（例えば、柔軟な状態）または成形された状態（例えば、剛性のある状態）に維持するように、密閉され得る。一部の実施形態において、密閉は、セルロース系材料を密閉または制御された環境におくことで実施される。代替的にまたは追加的に、密閉は、セルロース系材料の露出した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実現され得る。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、シラン疎水性のコーティング、またはセルロース系材料の内外への水分の移動を防止するか、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、例えば、その後の使用のためにセルロース系材料を準備するための機械加工または切断などの破壊的修飾を含むことができる。

【0045】

該方法 100 は、プロセスブロック 128 へ進むことができる。ここで、成形可能な状態または成形された状態にある部分的に脱リグニンしたセルロース系材料を、特定の用途で使用するか、特定の用途で使用するために適合させることができる。一部の実施形態において、成形された部分的に脱リグニンしたセルロース系材料は、例えば、非植物性材料（金属、金属合金、プラスチック、セラミック、複合材料など）と共に組み立てられて不均一性複合構造体を形成する、構造材料として使用され得る。代替的に、一部の実施形態において、成形可能な部分的に脱リグニンしたセルロース系材料は、例えば、ロボット作動用の骨格または電子機器の基板として、柔軟な基板または構造体として使用され得る。

【0046】

該方法 100 のブロック 102 ～ 128 の一部を、1 回実施するものとして説明したが、一部の実施形態において、特定のプロセスブロックの複数回の繰り返しを、次の決定ブロックまたはプロセスブロックに進む前に採用することができる。また、該方法 100 のブロック 100 ～ 128 を、個別に図示および説明したが、一部の実施形態において、プロセスブロックを組み合わせる共に（同時または順次）実施してもよい。例えば、上述したように、プロセスブロック 124 における乾燥およびプロセスブロック 118 における成形を同時に実施してもよい。さらに、図 1 は、ブロック 102 ～ 128 の特定の順序を示しているが、本明細書に記載の主題の実施形態において、これに限定されるものではない。実際、特定の実施形態において、ブロックは、図に示すものとは異なる順序で、または他のブロックと同時に実施されてもよい。例えば、プロセスブロック 116 における修飾は、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料が成形可能なままの状態です。

ック 1 1 8 における成形の後に実施され得る。

【 0 0 4 7 】

〔木材での実現〕

図 2 B ～ 図 2 C に示す硬材の例示的な部分 2 1 2 に示すように、天然木材は、木材の成長方向 2 1 0 に延在する（例えば、その長さに垂直な平面における最大断面寸法、すなわち直径が 4 0 μm ～ 8 0 μm （両端含む）である）導管 2 1 4 と、（例えば、その長さに垂直な平面における最大断面寸法、すなわち直径が 1 0 μm ～ 3 0 μm （両端含む）である）繊維 2 1 6 と、を含む縦方向細胞によって形成された複数のチャネルまたは内腔を有する特有の 3 次元多孔質構造を有する。天然木材の細胞壁は、主に、セルロース（4 0 w t % ～ 5 0 w t %）、ヘミセルロース（2 0 w t % ～ 3 0 w t %）、およびリグニン（2 0 w t % ～ 3 5 w t %）からなり、この 3 成分が互いに絡み合うことで強固で剛性のある壁構造を形成する。天然に存在するセルロースは、層的な構造を示す。例えば、図 2 D に示すように、天然木材の細胞 2 1 8 は、内腔 2 1 6 を取り囲む複数のセルロース繊維 2 2 0 を有し、これは、内腔 2 1 6 に対して実質的に平行に延在する。セルロース繊維 2 2 0 は、比較的高い表面積を提供する凝集した（例えば束として）3 次元ネットワークの形態で対応する高アスペクト比のマイクロフィブリル 2 2 2 に分離され得る。セルロースマイクロフィブリル 2 2 2 は、1 2 ～ 3 6 本の直鎖状ポリマー分子鎖 2 2 6 からなるエレメンタリーナノフィブリル 2 2 4 にさらに細分化され得る。各ポリマー分子鎖 2 2 6 は、強固な共有結合によって接続された数千の繰り返しグルコース単位で形成されており、これは、高秩序の結晶構造で配置されている。ポリマー分子鎖 2 2 6 は、隣接する分子鎖の官能基間の分子内水素結合によって、エレメンタリーナノフィブリル 2 2 4 を形成する高密度な配置に保持される。

【 0 0 4 8 】

天然木材の断片は、その縦方向の成長方向 2 1 0 に対してどの方向にも切断され得る。セルロース繊維 2 1 8 が成長方向に自然に整列しているので、切断方向は、最終的な構造における細胞の内腔の方向を決定する。この方向は、最終的な成形可能または成形された木材構造の機械的特性に影響を与える可能性がある。例えば、一部の実施形態において、天然木材の断片は、縦方向細胞の内腔が縦方向に切断された木材断片 2 0 6 の主面（例えば最大表面積）と実質的に平行に向けられるように、木 2 0 0 の幹 2 0 2 から垂直または縦方向（例えば、縦方向の木材成長方向 2 1 0 と平行）に切断され得る。代替的に、一部の実施形態において、天然木材の断片は、縦方向細胞の内腔が水平方向に切断された木材断片 2 0 4 の主面に対して実質的に垂直に向けられるように、水平または半径方向（例えば、縦方向の木材成長方向 2 1 0 に垂直）に切断され得る。代替的に、一部の実施形態において、天然木材の断片は、縦方向細胞の内腔が回転切断された木材断片 2 0 8 の主面と実質的に平行に向けられるように、回転方向（例えば、縦方向の木材成長方向 2 1 0 に対して垂直且つ幹 2 0 2 の周方向に沿った方向）に切断され得る。一部の実施形態において、天然木材の断片は、縦方向、半径方向、および回転方向の切断の間に任意の他の方向で切断され得る。いずれの切断方向についても、天然木材の断片の厚さは、主面に対して垂直な方向で測定することができ、1 0 mm 以下であってもよい。

【 0 0 4 9 】

図 4 A を参照すると、流体衝撃処理を使用して木材の成形可能な断片を形成する際の様々な段階が示されている。上述したように、天然木材 4 0 2 は、導管 4 0 4 と、セルロース、ヘミセルロース、およびリグニンからなる繊維細胞 4 0 8 と、を有する。特に、木材 4 0 2 の縦方向の成長方向に延在する内腔 4 0 6 および内腔 4 1 0 を形成する細胞の壁は、セルロースフィブリル 4 1 2 がヘミセルロースとリグニンの接着マトリックス 4 1 4 によって結合された複合構造体 4 1 6 を示す。これは、強度と剛性に優れている。折り畳み可能な構造体を得るために、初期段階 4 0 0 における天然木材 4 0 2 には、1 つまたは複数の化学処理を介して脱リグニンプロセス 4 1 8 が施される。化学処理によるリグニン除去効率は、木材のサイズ、化学処理時間、温度、および化学処理条件（例えば、真空下または圧力下）、および／または化学薬品の選択などの要因によるものであり得る。例えば

、木材のリグニン含有量を55%以下、およびヘミセルロース含有量を67%以下低減させるために、NaOHとNa₂SO₃の沸騰溶液に天然木材402を部分的にまたは完全に6時間浸漬し、その後、1つまたは複数のすすぎ液または洗浄液を使用することができる。例えば、天然木材が硬材の場合、段階400における木材断片402は、セルロース45.1wt%、ヘミセルロース18.7wt%、およびリグニン21.3wt%の組成を有することができる。脱リグニン418後に、段階420における脱リグニンした木材断片422は、セルロース40.1wt%、ヘミセルロース6.1wt%、およびリグニン9.5wt%の組成を有することができる。

【0050】

疎水性リグニン成分の部分的な除去（残存リグニン434がマイクロフィブリル412間で互いに絡み合う）により、親水性セルロースの割合が高いことを特徴とする細胞壁436が水438を吸収するため、木材のサイズが軟化し、穏やかに膨張する。このように、脱リグニンした木材422は、リグニンおよびヘミセルロースの部分的な除去により、導管424および繊維428の壁が薄くなる一方で、内腔426および内腔430の断面サイズが大きくなる。さらに、部分的な脱リグニンによって細胞壁同士が分離432する。これも木材の体積膨張の一因となる。例えば、部分的に脱リグニンした木材422の水分含量は、75wt%以下であり得、脱リグニンした木材422の体積は、元の天然木材402の体積よりも14%~20%大きくすることができる。

【0051】

脱リグニン418後に、部分的に脱リグニンした木材422は、その水分含量が15wt%未満（例えば8wt%~12wt%）になるまで乾燥439される。段階440で得られた乾燥した木材442は、例えば細胞壁からの水分蒸発のために、収縮した形状を有することができる。微細構造の観点からは、乾燥後の導管446は、内腔444が木材の横方向（T）に沿って約1.5μm、木材の半径方向（R）に沿って約13.6μmであるように収縮される。その一方で、乾燥した木材442におけるより小さいサイズの繊維448は、T方向に沿った寸法がほぼ0μm、R方向に沿った寸法が9.6μmであり、実質的に潰れた状態とすることができる。その結果、乾燥した木材の微細構造は、例えば、乾燥した木材442の体積が段階420における部分的に脱リグニンした湿潤木材422の体積よりも59%~63%少なくなるように、T方向およびR方向に大きな変形空間を示す。その一方で、細胞壁456内では、隣接するマイクロフィブリル412が水分蒸発の毛管効果によって集束され、水素結合450がマイクロフィブリル412のセルロースに形成され得る。

【0052】

乾燥439後に、乾燥した木材442は、流体衝撃処理458を使用して、その水分含量が35wt%超（例えば、50wt%以上）になるまで再水和される。段階460で得られた成形可能な木材462は、水の再吸収のために、膨張することができる。例えば、成形可能な木材462の体積は、乾燥した木材442と比較して67.6%増大することができる。ここで、成形可能な木材462の体積は、元の天然木材402の体積よりも小さい場合がある。その微細構造の観点からは、流体衝撃処理によって、より大きいサイズの導管466の内腔464は、元の導管404と比較して、よりしわが多くてより柔軟な構成を有するが、拡張しており、少なくとも部分的に開いている。流体衝撃処理458中に、導管466の再開口は急速（例えば、3秒などの秒単位）に起こる可能性があるが、より小さい繊維468の形態は、処理時間（例えば、3分などの分単位）の間、比較的变化しない。その一方で、より小さい繊維468は、再水和にもかかわらず、実質的に閉じたままである。細胞壁の微細構造のこのような選択的な開口は、次の2つの同時効果を提供することができる：（1）部分的に開いた導管は、圧縮と引張の両方の変形に対応することができる空間を成形可能な木材462内に形成し、「アコーディオン状」に、折り畳まれながら厳しい圧縮と引張を受けることができ（例えば、破壊することなく180°まで）、（2）高密度の実質的に閉じた繊維468は、強度を強化するための機械的支持を提供することができる。細胞壁476内では、水470の再導入によって、乾燥状態でセ

10

20

30

40

50

ルロースミクロフィブリル 412 を相互連結していた水素結合 450 を破断させることができる。これにより、ミクロフィブリルは、互いに対してより容易に移動することができるようになる。

【0053】

水分含量は、成形可能な木材 462 の弾性率および歪みに大きな影響を与える場合がある。例えば、水分含量 100% の場合、成形可能な木材 462 は、水分含量 10 wt % のみの乾燥した木材 442 と比較して、弾性率が 92 倍低下し、T 方向に沿った歪みが 8.8 倍増加する場合がある。このように、脱リグニンした木材は、水分含量を変化させるだけで、実質的に剛性のある状態と柔軟／成形可能な状態に変化することができる。より高い水分含量（例えば、25%～35 wt % 超）では、この弾性率の変化により、優れた折り畳み能力を実現することができる。

10

【0054】

折り畳み能力は、水分含量だけに依存するものではない。むしろ、成形可能な木材 462 の折り畳み能力は、乾燥によって導入された空間収縮と、再水和によって導入された流体潤滑とに起因する協力的な効果である。したがって、水分含量が十分でありながら微細構造の収縮／しわがない湿潤な天然木材 402 の場合、木材 402 を破断させることなく曲げることができない。同様に、微細構造の収縮／しわが生じているが水分含量が不十分な乾燥した木材 442 の場合、木材 442 を破断させることなく曲げることができない。しかしながら、成形可能な木材 462 は、微細構造の収縮／しわの発生と十分な水分含量との両方を兼ね備えているため、木材 462 は、破断することなく容易に折り畳まれ得る。

20

【0055】

一部の実施形態において、図 4A における乾燥および流体衝撃処理を部分乾燥に置き換えることで、同様の効果を得ることができる。例えば、図 4B は、流体衝撃処理の代わりに部分乾燥を使用して木材の成形可能な断片を形成する際の様々な段階を示している。天然木材 402 の脱リグニン 418 は、図 4A に関して上述したのと同様に起こり得る。しかしながら、段階 420 の後に部分的に脱リグニンした木材 422 を完全に乾燥させる代わりに、木材 422 は、その水分含量が低減されるが 35 wt % 以上（例えば、50 wt % 以下）となるまで部分乾燥 478 される。このように、段階 480 で得られた部分的に乾燥した木材 482 は、同様の微細構造を得ることができる。ここで、導管 484 の内腔 486 がしわのある細胞壁で少なくとも部分的に開いたままであり、より小さい繊維 488 が実質的に潰れるか、少なくとも狭まっている。さらに、細胞壁 496 内に保持された水 438 は、柔軟性に必要な潤滑性を提供するように作用することができる。したがって、部分的に乾燥した木材 482 は、優れた折り畳み能力を示すことができ、成形可能な木材とみなすことができる。

30

【0056】

これらの細胞壁の工学的技術から得られた成形可能な木材 462 または 482 は、機械的な曲げ、折り畳み、およびねじりによって様々な形状に加工され得る。所望の構成が得られると、成形可能な木材 462 または 482 は、乾燥されてその形状にセットまたは固定される。これにより、実質的に剛性のある（例えば、塑性変形または破断なしにさらに加工することができない）成形された最終的な木材構造体が形成される。成形可能な木材 462 および 482 の優れた折り畳み能力および乾燥後の成形された木材の優れた安定性は、例えば、独立した構造材料または複合構造材料の一部として、複雑な 3 次元形状を設計および製造することができる可能性を提供する。

40

【0057】

〔竹での実現〕

上述した説明では木材に焦点を当てたが、異なるサイズの内腔を形成する縦方向細胞を有する他の繊維状の植物性材料も、同じ効果を得るように処理することができる。例えば、竹は、木材について上述したのと同様に処理することで、成形可能な部分的に脱リグニンした竹を得ることができる。

【0058】

50

図3Aは、天然に存在する状態の竹セグメント300の部分断面図である。セグメント300は、中空の内部領域316を取り囲む稈壁302を有する。内部領域316は、結節ダイヤフラム310によって形成された結節308によって、稈壁302の長さに沿って内部結節領域312に分割される。稈壁302は、リグニンのマトリックスに埋め込まれた、縦方向328（例えば、竹の成長方向または竹セグメント300の中空の内部領域316によって画定される軸と実質的に平行な方向）に沿って延在する繊維を有する。1つまたは複数の枝部314は、特定の内部結節領域312から延在することができ、新しい竹セグメントに関する稈壁がそこから成長することができる根となり得る（これにより、例えば、新しいセグメントに関する異なる縦方向を画定することができる）。

【0059】

稈壁302内では、竹は、階層的な細胞構造栄養素輸送を提供する多孔質細胞と機械的支持を提供する高密度細胞を含む階層的な細胞構造を示す。例えば、図3B～図3Dは、竹セグメント300の断面を示しており、特に、稈壁302を構成する柔組織細胞322、導管324、および繊維束326の微細構造を示している。繊維束326は、高度に整列され、縦方向328と実質的に平行に延在しており、柔組織細胞322は、縦方向328に対して平行または垂直に延在することができる。各導管324は、縦方向328に沿って延在する開いた内腔を画定する。さらに、繊維束326を形成するエレメンタリー繊維は、その中心に不規則な小さい内腔を有してもよい。繊維束326、柔組織細胞322、および導管324は、リグニンおよびヘミセルロースからなる低強度のポリマーマトリックスを介して互いに接着している。

【0060】

木材の実施例と同様に、竹300の部分的な脱リグニンにより、それぞれの細胞壁による水が吸収されて、竹が軟化してサイズが穏やかに拡大することができる。このようにして、細胞の対応する内腔が拡大され得る。一部の実施形態において、導管の内腔およびエレメンタリー繊維が収縮するように部分的に脱リグニンした竹を完全に乾燥させて（例えば、水分含量が15wt%以下）、その後、竹は、繊維の内腔が実質的に閉じたまままたは少なくとも狭められたままで、導管の内腔を選択的に開かせるように流体衝撃法を介して再水和され得る（例えば、水分含量が35wt%以上）。これにより、成形可能な竹が実現される。代替的に、一部の実施形態において、部分的に脱リグニンした竹を部分的に乾燥させる（例えば、水分含量が35wt%以上）。これにより、成形可能な竹が実現される。

【0061】

〔成形例〕

図5A～図5Cを参照すると、成形可能な部分的に脱リグニンしたセルロース系材料502は、所望の3次元構成を得るために折り畳まれ得る。その後、成形可能な材料を乾燥させて、構成を設定することができる。これにより、剛性のある成形された構造体が形成される。例えば、セルロース系材料502の微細構造は、天然植物の縦方向の成長方向504に沿ってそれぞれ延在する開いた導管506と実質的に潰れた繊維細胞508とを含むことができる。セルロース系材料502は、縦方向の成長方向504に垂直な方向に、10mm以下である厚さtを有することができる。成形可能な材料502は、厚さ方向に垂直な平面の任意の方向について曲げられ得るか折り畳まれ得る。成形可能な材料502は、180°にわたる角度520を介して折り畳まれ得るか曲げられ得る。例えば、成形可能な材料502の第1の部分524および第2の部分526が折り線522について互いに対して曲げられたときまたは折り畳まれたときに、図5Cに示すように、材料502は、内角528（例えば、材料502の第1の部分524および第2の部分526の間の角度）および外角530（例えば、曲げられたまたは折り畳まれた部分の元の位置と、曲げられたまたは折り畳まれた部分の最終位置との間に形成される内角528に対する補助角）を形成することができる。内角528は、0°（例えば、第1の部分524および第2の部分526が接触している状態）～180°の範囲であり得る。

【0062】

図5B～図5Cは、縦方向の成長方向504に垂直な折り線について折り畳まれる状態を示しているが、本明細書に記載の主題の実施形態は、これらに限定されるものではない。むしろ、図5Aに示すように、材料502は、縦方向の成長方向504に垂直な方向512、縦方向の成長方向504と平行な方向516、縦方向の成長方向504に対して45°の方向514または518、または512～518の間の任意の方向について折り畳まれるか曲げられる。さらに、成形可能なセルロース系材料は、十分な水分含量（例えば、35wt%以上）を保持する限り、破断または変形（例えば、疲労のない動作）なしに複数回折り畳んだり展開したりすることができる。

【0063】

一部の実施形態において、成形可能なセルロース系材料は、3次元構造を作製するために、折り紙または切り紙と同様に1回または複数回折り畳まれ得る。例えば、図6A～図6Lは、半折りパターン602、3つ折りパターン604、4つ折りパターン606、巻4つ折りパターン608、巻々4つ折りパターン610、開き観音折りパターン612、観音折り込みパターン614、Z折りパターン616、アコーディオン折りパターン618、スタッシュ折りパターン620、トルコ折りパターン622、およびミウラ折りパターン624など、成形可能なセルロース系材料で採用することができる様々な折りパターンを示している。また、図に示す折りパターン以外のものも可能である。さらに、基本的な折りパターンを組み合わせることで、より複雑な構造の成形可能なセルロース系材料を形成することができる。

【0064】

代替的に、一部の実施形態において、成形可能なセルロース系材料は、3次元構造を形成するために（例えば、曲率半径を有するように）曲げられ得る。例えば、図7Aには、離散的な折り目または折り線ではなく、弧状または曲線状部分702を形成するように曲げられた成形可能なセルロース系材料700が示されている。図7Bには、成形可能なセルロース系材料をロッドに巻き付けて乾燥させた別の実施例が示されている。これにより、中心軸706のまわりにコルク栓状または螺旋状構成を有する成形されたセルロース系材料704が形成される。別の実施例において、成形可能なセルロース系材料をロール成形して乾燥させることで、多層シリンダを作製することができる。曲げおよび折り畳みの任意の組み合わせによって、その他のより複雑な形状を形成することができる。曲げ、折り畳み、ねじり、金型成形、またはその他の成形であっても、成形可能なセルロース系材料は、所望の構成で材料を乾燥させることで、剛性のある成形された構造体に変換することができる。

【0065】

[構造材料例]

一部の実施形態において、成形可能なセルロース系材料は、適切な3次元構成に折り畳まれ、曲げられ、または成形され得、その後、それを乾燥させて、構成を設定することができる。このような3次元の成形されたセルロース系材料は、構造材料または複合構造材料の構成要素として役立つことができる。例えば、図8は、構造材料またはその構成要素としてのセルロース系材料の例示的な繰り返し起伏構成を示している。この起伏のあるまたは波状の構造材料800は、成形可能なセルロース系材料の単一のモノリシック断片を形成することができる。図に示す構成を有するように成形可能な材料を折り畳んだ後に、成形可能な材料を乾燥させて、材料の剛性を増大させることで形状を設定することができる。

【0066】

起伏のある構造材料800は、谷型領域814を介在させた上側ピーク領域810の繰り返しパターンから形成される。図8には、2つのピーク領域810と単一の谷型領域814のみが示されているが、本発明の実施形態は、それぞれ数十、数百、数千、またはそれ以上のピーク領域810および谷型領域814を含むことができる。各ピーク領域810は、上向き傾斜部材804と下向き傾斜部材808との間に位置する、実質的に平坦なまたは平面であってもよい上部部材806によって画定される。各谷型領域814は、下

向き傾斜部材 808 と上向き傾斜部材 804 との間に位置する、実質的に平坦なまたは平面であってもよい下部部材 802 によって画定される。谷型領域 814 は、上向き傾斜部材 804 および下向き傾斜部材 808 を、隣接するピーク領域 810 と共有すると考えてもよい。上部部材 806 および下部部材 802 は、異なる部材 802 ~ 808 間の明確な境界を有する実質的に平坦なまたは平面として図に示されているが、実際の実施形態は、異なる部材間に丸められたまたは徐々に移行する部分、または非平面構成を有してもよい。材料 800 は、材料の一方の側におけるピーク領域 810 の形成が、材料の反対側における対応する谷型領域を形成するように構成され得、その逆もまた可能である。

【0067】

図 8 に示す起伏パターンは、上向き傾斜部材 804 とそれに隣接する下部部材 802 および上部部材 806 との接合部を形成する適切な折り線、ならびに下向き傾斜部材 808 とそれに隣接する下部部材 802 および上部部材 806 との接合部を形成する折り線において、成形可能なセルロース系材料を折り畳むか曲げることで形成され得る。一部の実施形態において、このような接合部を形成する折り線は、天然植物の縦方向の成長方向と平行に延在してもよい。このような構成において、得られた成形材料は、折り線と平行な方向の荷重、例えば、部材 802 ~ 808 の露出した縁に直接または間接的に加わる荷重を支持するように配置され得る。代替的に、一部の実施形態において、このような接合部を形成する折り線は、天然植物の縦方向の成長方向に垂直に延在してもよい。このような構成において、得られた成形材料は、折り線に垂直な方向の荷重、例えば、下部部材 802 および／または上部部材 806 に直接または間接的に加わる荷重を支持するように配置され得る。

【0068】

図 8 の起伏パターンを有する成形されたセルロース系材料を成形するには、プレス金型を採用したバッチ製造設備を使用することができる。例えば、図 9 は、バッチ作業を採用した例示的な製造設備を示している。例えば、成形可能なセルロース系材料 904 は、所望の起伏パターンを有する金型の上部取り付け盤 902 a と下部取り付け盤 902 b との間でバッチ設備 900 (例えば、油圧プレス) に配置され得る。プレス段階 910 において、上部取り付け盤および下部取り付け盤が一緒になって、その間の成形可能なセルロース系材料 904 をプレスすることができる。これにより、対応する折り線を有する所望の起伏パターンに材料 904 を折り畳むか曲げることができる。一部の実施形態において、プレス段階 910 は、例えば、一方または両方の取り付け盤 902 a および 902 b の加熱によって、プレスされている間の材料 904 を加熱するステップを含むことができる。この加熱は、金型内の材料 904 を乾燥させるのに有効であってもよい。解放段階 920 において、得られたセルロース系材料 906 は、所望の起伏構成を有する実質的に剛性のあるものであり得る。代替的に、一部の実施形態において、プレス段階 910 は、加熱せずに、取り付け盤 902 a および 902 b の間の成形可能な材料 904 が剛性のある成形された構造体に変換するのに十分な水分を取り除くのに十分な圧力および／または期間をかけて実施され得る。代替的に、一部の実施形態において、プレス段階 910 は、加熱せずに実施され得、解放段階 920 における取り付け盤 902 a および 902 b から開放された材料が、その後乾燥させることができるまで成形可能であってもよい。図 9 に示す設備は、セルロース系材料の元の縦方向の成長方向に対して任意の方向で折り線を有する起伏パターンを形成するために使用され得る。

【0069】

代替的に、図 8 の起伏パターンを成形するには、ロール加工を採用した連続的な製造設備を使用することも可能である。例えば、大型の木材シートは、回転切断によって得られ、その後、部分的な脱リグニンのための化学処理のための第 1 のステーション、乾燥のための第 2 のステーション、流体衝撃処理のための第 3 のステーション、および成形のための第 4 のステーションを介して連続的に加工され得る。例えば、図 10 A は、連続作業を採用した例示的な製造設備 1000 を示している。天然木材 1002 は、丸太または円筒形の棒の形状であってもよく、ここで、内腔は、紙面に対して垂直な方向に延在している

。天然木材 1002 は、例えば、回転旋盤 1004 によって連続的に切断されて、その後の加工のために天然木材の薄い連続層 1006 に分離され得る。天然木材の層 1006 は、例えば、方法 100 におけるプロセスブロック 104 に関して上述したように、化学溶液 1010 に木材 1006 を浸漬して、木材からリグニンを部分的に除去するなど、製造プロセスにおける次のステップのためのステーション 1008 に搬送され得る。一部の実施形態において、ステーション 1008 のサイズとステーション 1008 を通る木材層 1006 の搬送速度は、化学処理のための所望の浸漬時間に対応してもよい。したがって、層 1006 の一部が収容ステーション 1008 に入るときから、乾燥ステーション 1012 に向けて出るときまでの時間は、所望の量のリグニン除去のための浸漬時間に対応している。

【0070】

脱リグニンステーション 1008 の後に、部分的に脱リグニンした木材は、乾燥ステーション 1012 に搬送されてもよい。乾燥ステーション 1012 は、例えば、方法 100 におけるプロセスブロック 110 に関して上述したように、木材の含水量を 15 wt % 以下まで低減するために、任意のタイプの対流、伝導、または放射加熱を適用することができる。例えば、乾燥ステーション 1012 は、約 2 分間 80 °C 以下の温度に加熱された空気を使用した強制空気乾燥を採用することができる。乾燥ステーション 1012 の後に、乾燥した木材は、流体衝撃ステーション 1014 に搬送されてもよい。ここで、木材は、例えば、方法 100 におけるプロセスブロック 112 に関して上述したように、流体 1016（例えば、水、アルコール、またはそれらの組み合わせ）に浸漬される。特に、流体衝撃ステーション 1014 は、そこを通過する木材の水分含量が 35 wt % であるように、木材を再水和させることができる。これにより、ステーション 1014 を出る成形可能な木材 1018 を得ることができる。

【0071】

流体衝撃ステーション 1014 の後に、成形可能な木材 1018 は、成形ステーション 1020 に向けられ得る。ここで、1026 で示すように、成形可能な木材 1018 に所望の起伏パターンを押し付けるように、パターン付きローラ 1022 および 1024 は相補的な形状を有する。しかしながら、図 10A に示す設備は、木材の元の縦方向の成長方向と平行に延在する折り線を形成するためにのみ使用することができる。一部の実施形態において、上部ローラ 1022 および下部ローラ 1024 は、成形可能な木材 1018 の厚さよりも小さい距離で互いから一定の距離に留まる。これにより、パターンを形成する際に木材をさらに高密度化する押圧力が適用される。一部の実施形態において、成形中に、一方または両方のローラ 1022 および 1024 を加熱することができる。これにより、例えば、成形中に木材 1018 の温度を室温よりも高くして、木材を柔軟な成形可能な状態から剛性のある成形された状態に移行させることができる。代替的にまたは追加的に、ローラ 1022 および 1024 は加熱されずに、成形ステーション 1020 またはその後のステーションにおいて成形可能な木材 1018 を乾燥させるために、別の加熱機構を設けてもよく、成形ステーション 1020 を含む環境またはそれに続く環境が加熱されてもよい。

【0072】

図 10B は、図 8 の起伏パターンを用いて成形された木材を形成するように連続作業を採用した別の例示的な製造設備 1050 を示している。天然木材 1052 は、丸太または円筒形の棒の形状であってもよく、ここで、内腔は、方向 1054 に沿って延在している。天然木材 1052 は、例えば、回転旋盤 1056 によって連続的に切断されて、その後の加工のために天然木材の薄い連続的なベニヤ板 1058 に分離され得る。ベニヤ板 1058 は、例えば、方法 100 におけるプロセスブロック 104 に関して上述したように、化学溶液にベニヤ板 1058 を浸漬して、木材からリグニンが部分的に除去される脱リグニンステーション 1060 に搬送され得る。一部の実施形態において、ステーション 1060 のサイズとベニヤ板 1058 の搬送速度は、化学処理のための所望の浸漬時間に対応してもよい。脱リグニンステーション 1060 の後に、部分的に脱リグニンしたベニヤ板

1062は、部分乾燥ステーション1064に搬送されてもよい。部分乾燥ステーション1064は、例えば、方法100におけるプロセスブロック108に関して上述したように、木材の含水量を35wt%まで低減するために、任意のタイプの対流、伝導、または放射加熱を適用することができる。例えば、乾燥ステーション1064は、約2分間80℃以下の温度に加熱された空気を使用した強制空気乾燥を採用することができる。

【0073】

乾燥ステーション1064の後に、得られた成形可能な木材は、成形ステーション1066に向けられ得る。ここで、1072で示すように、成形可能な木材に所望の起伏パターンを押し付けるように、パターン付きローラ1068および1070は相補的な形状を有する。しかしながら、図10Bに示す設備は、木材の元の縦方向の成長方向1054と平行に延在する折り線を形成するためにのみ使用することができる。一部の実施形態において、上部ローラ1068および下部ローラ1070は、成形可能な木材の厚さよりも小さい距離で互いから一定の距離に留まる。これにより、パターンを形成する際に木材をさらに高密度化する押圧力が適用される。一部の実施形態において、成形中に、一方または両方のローラ1068および1070を加熱することができる。これにより、例えば、成形中に木材の温度を室温よりも高くして、木材を柔軟な成形可能な状態から剛性のある成形された状態に移行させることができる。代替的にまたは追加的に、ローラ1068および1070は加熱されずに、成形ステーション1020またはその後のステーションにおいて成形可能な木材1018を乾燥させるために、別の加熱機構を設けてもよく、成形ステーション1020を含む環境またはそれに続く環境が加熱されてもよい。

【0074】

なお、図9～図10Bに示す製造設備は、図8の起伏パターン以外の形状構成を有する成形されたセルロース系材料の製造にも適用され得ることに留意されたい。しかしながら、図に示す起伏パターンは、構造材料を形成する際に特に有用であり得る。一部の実施形態において、起伏構成を有する複数の成形されたセルロース系材料は、1つまたは複数の支持板と組み立てられて、規則的に配置された多層構造体、対称的に配置された多層構造体、ハニカム複合体、または任意の他の支持構造体を形成することができる。

【0075】

図11Aは、例えば、第1の成形された断片1102および第2の成形された断片1104を含む、成形されたセルロース系材料の規則的な配置を採用した多層構造体1100を示している。第1の成形された断片1102は、上部支持板1106と中間支持板1108との間に配置され、（例えば、エポキシ、糊、またはその他の接着剤を使用して）そこで任意に結合され、第2の成形された断片1104は、下部支持板1110と中間支持板1108との間に配置され、（例えば、エポキシ、糊、またはその他の接着剤を使用して）そこで任意に結合され得る。例えば、支持板1106～1110の各々は、1mmの厚さを有する金属板（例えば、アルミニウムまたはアルミニウム合金）であり得、成形された断片1102および1104の各々は、2mmの厚さを有することができる。

【0076】

規則的な配置において、成形された断片1102および1104の起伏パターンは、例えば、第1の断片1102の谷1112が第2の断片1104の対応する谷1116とそれぞれ整列し、第1の断片1102のピーク1114が第2の断片1104の対応するピーク1118とそれぞれ整列して、厚さ方向1120について整列することができる。一部の実施形態において、成形された断片1102および1104のセルロース系材料は、縦方向の成長方向が起伏パターンの折り畳まれた部分と平行になるように（例えば、紙面に対して垂直に）配置される。代替的に、一部の実施形態において、成形された断片1102および1104のセルロース系材料は、縦方向の成長方向が起伏パターンの折り畳まれた部分に垂直になるように（例えば、紙面に対して平行に）配置される。

【0077】

図11Bは、例えば、第1の成形された断片1132および第2の成形された断片1134を含む、成形されたセルロース系材料の鏡面对称配置を採用した別の多層構造体11

30を示している。第1の成形された断片1132は、上部支持板1106と中間支持板1108との間に配置され、（例えば、エポキシ、糊、またはその他の接着剤を使用して）そこで任意に結合され、第2の成形された断片1134は、下部支持板1110と中間支持板1108との間に配置され、（例えば、エポキシ、糊、またはその他の接着剤を使用して）そこで任意に結合され得る。例えば、支持板1106～1110の各々は、1mmの厚さを有する金属板（例えば、アルミニウムまたはアルミニウム合金）であり得、成形された断片1132および1134の各々は、2mmの厚さを有することができる。

【0078】

鏡面对称配置において、成形された断片1132および1134の起伏パターンは、中間支持板1108に関して互いに鏡面对称であり得、例えば、第1の断片1132の谷1142が第2の断片1134の対応するピーク1146とそれぞれ整列し、第1の断片1132のピーク1144が第2の断片1134の対応する谷1148と整列している。一部の実施形態において、成形された断片1132および1134のセルロース系材料は、縦方向の成長方向が起伏パターンの折り畳まれた部分と平行になるように（例えば、紙面に対して垂直に）配置される。代替的に、一部の実施形態において、成形された断片1132および1134のセルロース系材料は、縦方向の成長方向が起伏パターンの折り畳まれた部分に垂直になるように（例えば、紙面に対して平行に）配置される。

【0079】

図11A～図11Bにおいて、支持板は、セルロース系材料の各ピーク領域の上部部材および各谷型領域の下部部材の平面に対して平行に（例えば、紙面に対して垂直に）配置される。しかしながら、一部の実施形態において、支持板は、セルロース系材料の各ピーク領域の上部部材および各谷型領域の下部部材の平面に垂直に（例えば、紙面に対して平行に）配置される。さらに、図11A～図11Bにおいて、支持板は、厚さ方向に沿って隣接する成形されたセルロース系の間に配置される。しかしながら、一部の実施形態において、隣接する成形されたセルロース系材料は、介在する板または部材なしに、互いに直接結合され得る。

【0080】

例えば、図12A～図12Dは、隣接する成形されたセルロース系材料が互いに直接結合されてハニカム（例えば、六角形パターン）コア1210を形成し、支持板1232および1234がセルロース系材料1200の各ピーク領域1214の上部部材および各谷型領域1212の下部部材の平面に垂直に配置されている構成を示している。例えば、各成形されたセルロース系材料1200は、図10Bの連続的な設備を使用して構築することができる。連続的な設備によって生成された成形材料のサイズは、構造複合体の所望の厚さよりも大きい場合があるので、成形材料1200は、1つまたは複数の切断面1202および1204において別々の断片に切断され得る。縦方向の成長方向（および材料の縦方向細胞の延在方向）は、図10Bの連続的な設備を使用して折り線と平行になり、例えば、図12Aにおける方向1206に沿っている。代替的に、一部の実施形態において、例えば、図9のバッチ加工設備を使用して、縦方向の成長方向が折り線に垂直になり、例えば、図12Aにおける方向1208に沿っている状態で、セルロース系材料を作製することができる。

【0081】

複合構造体1230におけるハニカムコア1210は、図12Bに示すように、複数の成形されたセルロース系材料1200を鏡面对称の配置で互いに隣接するように配置することで形成することができる。谷1212およびピーク1214の対向面1222および1224上のエポキシ接着剤は、隣接する材料1200を共に結合させることができる。ハニカムコア1210は、組み立てられると、図12C～図12Dに示すように、上部支持板1232と下部支持板1234との間に配置され得る。ハニカムコア1210と支持板1232および1234の対向面との間のエポキシ接着剤は、支持板1232および1234とコア1210とを結合させることができる。得られた複合構造体1230は、コア1210を形成する各成形されたセルロース系材料1200内のセルロース繊維の延在

方向と平行になるように、方向 1 2 0 6 に沿って支持板 1 2 3 2 ~ 1 2 3 4 の間に荷重が加えられ得る。

【0082】

一部の実施形態において、一方または両方の支持板 1 2 3 2 ~ 1 2 3 4 は、金属、金属合金、セラミック、ガラス、複合体、またはポリマーなどの非セルロース系材料から形成され得る。例えば、各支持板 1 2 3 2 ~ 1 2 3 4 は、1 mm の厚さを有する金属板（例えば、アルミニウムまたはアルミニウム合金）であり得、ハニカムコア 1 2 1 0 は、2 mm の厚さを有することができる。代替的に、一部の実施形態において、一方または両方支持板 1 2 3 2 ~ 1 2 3 4 は、ハニカムコアの成形材料を形成する材料と同じまたはそれとは異なるセルロース系材料から形成され得る。図 1 2 A ~ 図 1 2 C は、組み立てられた成形材料の起伏パターンによって形成された六角形状を示しているが、本明細書に記載の主題の実施形態は、これに限定されるものではない。むしろ、ハニカムコア内の繰り返し形状は、起伏パターンの適切な調整によって、例えば、三角形、長方形、菱形、楕円形、または他の任意の形状とすることができる。

【0083】

〔製造例と実験結果〕

〔第 1 の実施例：オーク材〕

第 1 の実施例において、オーク材を原料として使用した。部分的な脱リグニン、乾燥、および流体衝撃後に、成形可能なオーク材を、湾曲した形状を有するように成形し、その後、乾燥させて剛性のある成形された構造体を形成した。湾曲した木材は、機械的強度が高く、曲率が低く、密度も低かった。特に、得られた湾曲した木材は、345 MPa という高い引張強さを示した。これは、流水前処理によって曲げられた従来の木材の 3 倍である。その一方で、湾曲した木材の比強度は、135 から 318 MPa · cm³ / g に増加した。

【0084】

〔第 2 の実施例：シナノキ材〕

第 2 の実施例において、3 次元の成形木材を製造するためにシナノキ材を使用した。まず、天然木材板（シナノキ材、典型的なサンプル寸法：3.18 mm × 30 cm × 20 cm）を 2.5 M NaOH と 0.4 M Na₂SO₃ の沸騰水溶液で 2 日間処理し、その後、複数回水に浸漬して化学物質を除去した。次いで、部分的に脱リグニンした木材を室温で 30 時間空気乾燥させて、乾燥した木材中間体を形成した。これを、水に 3 分間浸漬して（すなわち、「流体衝撃」プロセスを経て）成形可能にした。最後に、成形可能な木材を所望の構造体に成形し、室温で 30 時間空気乾燥させて材料から水分を除去して、3 次元の成形された木材を実現した。

【0085】

3 次元の成形された木材は、木材繊維の方向に沿って 300 MPa 以下の引張強さおよび 60 MPa の圧縮強度など、軽量の構造用途に対して機械的特性が向上した。これは、天然の原木材のものよりもそれぞれ 6 倍および 2 倍高い値である。3 次元の成形された木材機械的特性の向上は、ミクロスケールでは細胞壁が高密度に互いに絡み合い、ナノスケールでは細胞壁内のセルロースナノフィブリルが良好に整列している高密度な構造によるものである。また、3 次元の成形された木材の強度および比剛性は、AL-5052 よりもさらに高い。密度が 0.75 g / cm³ と低くて軽量であることから、3 次元の成形された木材は、386.8 MPa / (g / cm³) の高い比引張強さを有していた。これは、AL-5052 (84.4 MPa / (g / cm³)) の最大 5 倍である。さらに、図 1 3 A の材料剛性対密度に関する Ashby プロットに示すように、3 次元の成形された木材の比剛性は、硬材、軟材、およびポリマーの比剛性を超えており、構造材料としての可能性が示唆されている。

【0086】

〔第 3 の実施例：複合構造体〕

3 次元の成形された木材の低い密度、高い機械的強度、および優れた成形能力は、従来

10

20

30

40

50

はポリマーまたはA l-5052合金などの金属から形成されていたハニカム構造体などの大型設計、軽量化設計および耐荷重設計ならびに製造に幅広い汎用性をもたらす。3次元の成形された木材ハニカム構造体を、木材繊維の方向に沿って成形した。3次元の成形された木材ハニカムユニットは、図13Bに示すように、A l-5052のハニカムユニット ($46.8 \text{ MPa} / (\text{g} / \text{cm}^3)$) と同等の比圧縮強度 ($51.6 \text{ MPa} / (\text{g} / \text{cm}^3)$) を示した。

【0087】

組み立てられた3次元の成形された木材ハニカムコアの圧縮特性および曲げ特性を評価するために、コアを2つのアルミニウム板を挟んで複合構造体を作製した。複合構造体は、 9.1 MPa の圧縮強度および $91.0 \text{ MPa} / (\text{g} / \text{cm}^3)$ の比圧縮強度(密度 $0.1 \text{ g} / \text{cm}^3$ 基準)を示した。これは、A l-5052のハニカム構造体よりも高い値である。さらにこの材料の能力を実証するために、複合構造体を使用して、 1588 kg の自動車の重量を支持した。これは、3次元の成形された木材ハニカムコア自体の重量の1526倍に対応している。拡張性を実証するために、 $80 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ の寸法を有する3次元の成形された木材ハニカムコアの例を作製した。

【0088】

成形された木材および成形可能な木材と他の構造材料とを比較すると、成形された／成形可能な木材は、優れた機械的特性を示すことができた。耐荷重能力に関しては、成形された木材とA l合金のハニカムユニット(例えば、高さ 1.5 cm 、幅 2 cm 、長さ 4.4 cm 、それぞれの重量 1.3 g および 3.1 g 、それぞれの密度 $0.10 \text{ g} / \text{cm}^3$ および $0.23 \text{ g} / \text{cm}^3$)は共に、構造的な変形または破壊なしに、 $100 \sim 200 \text{ lbs}$ を支えることができた。紙製のハニカムユニットは、そのような重量によって容易に破壊された。また、比圧縮強度は、成形された木材ハニカムユニットが最も高く($51.6 \text{ MPa} / (\text{g} / \text{cm}^3)$)、これは、紙製ハニカムユニットよりもはるかに高く($2.1 \text{ MPa} / (\text{g} / \text{cm}^3)$)、また、A l-5052のハニカムユニット($46.8 \text{ MPa} / (\text{g} / \text{cm}^3)$)よりも高かった。折り畳み能力について、紙、A l-5052、および成形可能な木材の破れまたは破壊前の折り畳み／展開サイクルは、それぞれ10時間、3時間、および100時間超であった。これにより、成形可能な木材材料の優れた柔軟性が確認された。

【0089】

[第4の実施例：細胞壁構造体]

図14Aは、天然木材から3次元の成形木材までの製造プロセスを示す模式図である。3次元の成形木材を製造するために、まず、天然木材を脱リグニンして木材細胞壁の脆いリグニン成分を部分的に除去し、次いで、30時間かけて完全に空気乾燥させた。図14Bに示すように、乾燥によって細胞壁が収縮して、大小のチャネル(例えばそれぞれ導管および繊維)が閉じられ、収縮した木材中間体を得られた。次いで、収縮した木材を水に短時間(例えば、3分間)浸漬して「衝撃」を与え、成形可能な木材を得られた。成形可能な木材は、図14Cに示すように、膨張時に導管および繊維に「しわ」が生じる特有の細胞壁構造体を有する。この成形可能な木材を折り畳み、任意の形状に成形し、最後に乾燥させることで固定して、3次元の成形された木材を得られた。

【0090】

対照材として、天然木材を同じ手順で部分的に脱リグニンした後に、水による衝撃処理を行わずに対照材を空気乾燥させ、成形可能な木材と同じ含水量である $50 \text{ wt} \%$ にしたものを用意した。得られた対照材は、しわのある細胞壁構造体にしわが生じず、天然木材と同様の開放された細胞の微細構造を示したが、リグニンが部分的に除去されているため、細胞壁がより薄く、分離していることが確認された。この対照材(成形不可能な木材と呼ぶ)は、成形可能な木材と同じ水分含量であるにもかかわらず、柔軟性に欠け、細胞壁構造体にしわが生じていないため、曲げられたときに破断してしまう。また、対照実験では、乾燥天然木材(空間収縮なし、水潤滑剤なし)、湿潤な天然木材(空間収縮なし)、湿潤な脱リグニン木材(空間収縮なし)、および収縮した木材(水潤滑剤なし)のいずれ

も、空間収縮および／または水潤滑性がないため、折り畳み能力が劣ることがわかった。

【0091】

しわのある細胞壁構造体が、どのように折り畳み時に機械的応力の解放を可能にし、材料の破断を防止するかについてさらに調査するために、シミュレーションを実施した。繊維スケールの力学的モデリングにより、成形可能な木材に公称60%の歪み変形（引張または圧縮）を施しても、成形可能な木材のすべての細胞壁の歪みレベルが極めて低い（最大主引張歪み0.47%、圧縮歪み2.66%）ことが示された。その一方で、成形不可能な木材の細胞壁における最大主引張歪みは、全伸び12.5%の条件下で2.3%と高く、成形可能な木材のものよりも著しく高かった。両方の材料が脱リグニンプロセスを経たにもかかわらず、成形不可能な木材繊維および導管は開いていて緩やかにしか接触していないのに対して、乾燥／水による衝撃プロセスを経た成形可能な木材のしわのある細胞壁では細胞構造がより閉じていて、より接触していた。その結果、成形可能な木材は細胞壁同士が十分に水素結合しており、折り畳み中の剥離に強いのに対し、成形不可能な木材は容易に破壊され得ることが特徴であった。

【0092】

[[第5の実施例：穴の形成]]

シナノキ材を、それぞれ長さ5cm×幅5cm×厚さ5mmのサイズを有する複数のブロック1500に切断した。各木材ブロック1500に化学処理1502を施し、特に、 NaOH (2.5 mol L^{-1}) と Na_2SQ_3 (0.4 mol L^{-1}) の溶液に12時間浸漬して、リグニンおよびヘミセルロースを部分的に除去した。次いで、図15Aの比較例1520において、部分的に脱リグニンした木材ブロックに加熱圧搾1504を施し、その後、脱リグニンしたブロックを通るように2mmの釘1508（または針などのその他の鋭い先端の細長い部材）を押すか挿入1506して、穴1510が形成される。しかしながら、得られた構造体1512において、ブロック内のセルロース繊維1522は、釘穴1510の縁1514で破断され得る。

【0093】

その一方で、図15Bの実施例1540において、部分的に脱リグニンしたブロックは、（例えば、乾燥および流体衝撃を介した再水和によって、または部分的または完全に乾燥させないことによって、または釘の挿入1546前にブロックを乾燥させないことによって）成形可能な形態に維持される。したがって、セルロース繊維1556が破断することなく穴1550の縁の周りで撓むのに十分な運動性を示すように、2mmの釘1546を湿潤状態で木材に挿入することができる。その後、ブロックを24時間加熱圧搾して、釘穴1550の直径を固定した。得られた構造体1552について、木材の厚さは、天然木材ブロック1500の5分の1に低減し、高密度の木材は、任意の把持部形成前の1504後における高密度の木材と同様の機械的特性を示すことができた。ただし、得られた構造体1552は、穴1550の縁におけるセルロース繊維の破断を回避することができる。

【0094】

[[本明細書に記載の技術の追加の実施例]]

本明細書に記載の主題の上述した実装例を鑑みて、本願は、以下の付記において追加の実施例を記載する。なお、単独の付記の1つの特徴、または付記を組み合わせで2つ以上の特徴、および任意選択で、1つまたは複数のさらなる付記の1つまたは複数の特徴との組み合わせも、本願の開示に含まれる実施例であることに留意されたい。

【0095】

[[付記1]]

(a) 天然木材の断片に1つまたは複数の化学処理を施して天然木材の断片の微細構造を維持しながら少なくとも一部のリグニンを除去することで部分的に脱リグニンした木材の断片を作製ステップであって、微細構造は、天然木材の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在するセルロース系縦方向細胞を含む、ステップと、

(b) 部分的に脱リグニンした木材の断片を乾燥させて水分を除去するステップであっ

て、これにより、セルロース系縦方向細胞の少なくとも一部の内腔が潰れ、乾燥した断片の水分含量が15wt%以下になる、ステップと、

(c) 部分的に脱リグニンした木材の乾燥した断片に流体衝撃処理を実施して部分的に脱リグニンした木材の再水和された断片を得るステップであって、流体衝撃処理は、乾燥した断片を水分にさらすことを含み、再水和された断片の水分含量は、少なくとも35wt%である、ステップと、

(d) 部分的に脱リグニンした木材の再水和された断片を、実質的に平坦な平面構成から非平面的な3次元構成に成形するステップと、
を含み、

部分的に脱リグニンした木材の再水和された断片における第1のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも小さい断面サイズを有し、実質的に潰れており、部分的に脱リグニンした木材の再水和された断片における第2のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも大きい断面サイズを有し、少なくとも部分的に開いている、
方法。

【0096】

〔付記2〕

延在方向に垂直な方向における天然木材の断片の厚さは、10mm以下（例えば、4mm以下）である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1に記載の方法。

【0097】

〔付記3〕

(d) のステップの間の再水和された断片の水分含量は、少なくとも50wt%である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1または2に記載の方法。

【0098】

〔付記4〕

(a) 天然木材の断片に1つまたは複数の化学処理を施して天然木材の断片の微細構造を維持しながら少なくとも一部のリグニンを除去することで部分的に脱リグニンした木材の断片を作製ステップであって、微細構造は、天然木材の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在するセルロース系縦方向細胞を含む、ステップと、

(b) 部分的に脱リグニンした木材の断片を部分的に乾燥させて水分の一部を除去するステップであって、部分的に脱リグニンした木材の部分的に乾燥した断片の水分含量が少なくとも35%である、ステップと、

(c) 部分的に脱リグニンした木材の部分的に乾燥した断片を、実質的に平坦な平面構成から非平面的な3次元構成に成形するステップと、
を含み、

部分的に脱リグニンした木材の部分的に乾燥した断片における第1のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも小さい断面サイズを有し、実質的に潰れており、部分的に脱リグニンした木材の部分的に乾燥した断片における第2のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも大きい断面サイズを有し、少なくとも部分的に開いている、
方法。

【0099】

〔付記5〕

延在方向に垂直な方向における天然木材の断片の厚さは、0.1mm～10mm（両端含む）の範囲（例えば、0.5mm以上且つ10mm以下）である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～4のいずれか1項に記載の方法。

【0100】

〔付記6〕

非平面的な3次元構成に成形するステップは、断片を折り畳むステップ、または断片を

10

20

30

40

50

曲げるステップ、またはこれらの任意の組み合わせを含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 1～5 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0101】

〔付記 7〕

非平面的な 3 次元構成に成形するステップの後に、

(e) 断片を乾燥させて水分を除去して、断片の形状をセットし、非平面的な 3 次元構成を有する、部分的に脱リグニンした木材の剛性のあるモノリシック断片を形成するステップをさらに含み、

剛性のあるモノリシック断片の水分含量は、15 wt % 以下である、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 1～6 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

【0102】

〔付記 8〕

(e) のステップの前に、

水分含量が少なくとも 35 wt % である、部分的に脱リグニンした木材の断片の厚さ方向に延在する少なくとも 1 つの穴または開口部を形成するステップをさらに含み、

形成のステップは、非機械加工法を用いることを含む、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 7 に記載の方法。

【0103】

〔付記 9〕

(a) のステップの後、且つ (b) のステップの前に、

部分的に脱リグニンした木材の断片の厚さ方向に延在する少なくとも 1 つの穴または開口部を形成するステップをさらに含み、

形成のステップは、非機械加工法を用いることを含む、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 1～8 のいずれか 1 項に記載の方法。

20

【0104】

〔付記 10〕

少なくとも 1 つの穴または開口部を形成するステップは、断片に、針、釘、またはその他の鋭い先端を有する細長い部材を押すか挿入するステップを含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 9 に記載の方法。

30

【0105】

〔付記 11〕

乾燥 (e) のステップは、空気またはガス流にさらすステップ、空気またはガスの停滞量にさらすステップ、真空にさらすステップ、室温にさらすステップ、室温以上の温度に加熱するステップ、またはこれらの任意の組み合わせを含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 7～10 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0106】

〔付記 12〕

剛性のあるモノリシック断片上に保護層またはコーティングを形成するステップをさらに含み、保護層またはコーティングは、剛性のあるモノリシック断片の再水和を防止するように構成される、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 7～11 のいずれか 1 項に記載の方法。

40

【0107】

〔付記 13〕

部分的に脱リグニンした木材の剛性のあるモノリシック断片と、部分的に脱リグニンした木材の 1 つまたは複数の他の剛性のあるモノリシック断片とを組み立てるステップ、または

部分的に脱リグニンした木材の剛性のあるモノリシック断片と、木材の 1 つまたは複数の他の断片とを組み立てるステップ、または

50

部分的に脱リグニンした木材の剛性のあるモノリシック断片と、非木材材料（ポリマー、金属、金属合金、セメント、ガラス、セラミックなど）の1つまたは複数の他の断片とを組み立てて複合構造体を形成するステップ、または

これらの任意の組み合わせをさらに含む、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記7～12のいずれか1項に記載の方法。

【0108】

〔付記14〕

水分にさらす(c)のステップは、部分的にまたは完全に流体に浸漬するステップ、または加湿された環境下で流体蒸気にさらすステップ、またはこれらの任意の組み合わせを含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～13のいずれか1項に記載の方法。

10

【0109】

〔付記15〕

(c)のステップの間の部分的に乾燥した断片の水分含量は、少なくとも50wt%である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記4～14のいずれか1項に記載の方法。

【0110】

〔付記16〕

天然木材は、硬材を含み、第1のセルロース系縦方向細胞は、硬材の繊維または仮導管を含み、第2のセルロース系縦方向細胞は、硬材の導管を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～15のいずれか1項に記載の方法。

20

【0111】

〔付記17〕

天然木材は、軟材を含み、第1のセルロース系縦方向細胞および第2のセルロース系縦方向細胞は、仮導管を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～15のいずれか1項に記載の方法。

【0112】

〔付記18〕

第2のセルロース系縦方向細胞のそれぞれの内腔は、乾燥(b)のステップの後の断面サイズが(a)のステップの前の天然木材における断面サイズよりも小さい、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～17のいずれか1項に記載の方法。

30

【0113】

〔付記19〕

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然木材のリグニンの0.1%～99%（両端含む）が除去されて、部分的に脱リグニンした木材の断片が作製されるように実施され、または

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然木材のヘミセルロースの0.1%～99%（両端含む）が除去されて、部分的に脱リグニンした木材の断片が作製されるように実施され、または

40

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～18のいずれか1項に記載の方法。

【0114】

〔付記20〕

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然木材のリグニンの50%以下が除去されて、部分的に脱リグニンした木材の断片が作製されるように実施され、または

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然木材のヘミセルロースの50%以下が除去されて、部分的に脱リグニンした木材の断片が作製されるように実施され

50

、または

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 1 ～ 19 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0115】

〔付記 2 1〕

1 つまたは複数の化学処理を施す (a) のステップは、天然木材のリグニン含有量が 10 % 以下低減されて、部分的に脱リグニンした木材の断片が作製されるように実施され、または

1 つまたは複数の化学処理を施す (a) のステップは、天然木材のヘミセルロース含有量が 10 % 以下低減されて、部分的に脱リグニンした木材の断片が作製されるように実施され、または

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 1 ～ 20 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0116】

〔付記 2 2〕

天然木材は、硬材であり、(a) のステップの後の部分的に脱リグニンした木材の断片のリグニンの量は、少なくとも 10 wt % であり、または

天然木材は、軟材であり、(a) のステップの後の部分的に脱リグニンした木材の断片のリグニンの量は、少なくとも 12.5 wt % である、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 1 ～ 21 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0117】

〔付記 2 3〕

1 つまたは複数の化学処理のうちの少なくとも 1 つは、1 つまたは複数の化学溶液への部分的または全体的な浸漬を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 1 ～ 22 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0118】

〔付記 2 4〕

1 つまたは複数の化学溶液は、アルカリ性溶液を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 23 に記載の方法。

【0119】

〔付記 2 5〕

1 つまたは複数の化学溶液は、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)、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 (ここで、 n は整数である)、尿素 ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)、亜硫酸水素ナトリウム (NaHSO_3)、二酸化硫黄 (SO_2)、アントラキノン ($\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_2$)、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 ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)、過ギ酸 (CH_2O_3)、過酢酸 ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$)、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)、またはこれらの任意の組み合わせを含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 23 または 24 に記載の方法。

【0120】

〔付記 2 6〕

1 つまたは複数の化学溶液は、 NaOH と Na_2SO_3 の沸騰溶液を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記 23 ～ 25 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

20

30

40

50

【0121】

〔付記27〕

(a)のステップの前に、回転切断技術を用いて天然木材の実質的に円筒形の部分を切断して、天然木材の断片をベニヤ板として形成するステップをさらに含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～26のいずれか1項に記載。

【0122】

〔付記28〕

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～27のいずれか1項に記載の方法によって形成された成形可能な木材構造体。

【0123】

〔付記29〕

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記1～27のいずれか1項に記載の方法によって形成された剛性のある成形された木材構造体。

【0124】

〔付記30〕

構造材料であって、

部分的に脱リグニンした木材の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片であって、乾燥したモノリシック断片の各々は、複数回折り畳まれるか曲げられることで形成された繰り返し起伏構成を有するように形成され、起伏構成は、少なくとも1つのピークと少なくとも1つの谷とを含む繰り返しパターンを有し、乾燥したモノリシック断片のそれぞれの水分含量は、15wt%以下である、少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片と、

少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片に結合した第1の支持板および第2の支持板と、

を備える構造材料。

【0125】

〔付記31〕

起伏構成における折り畳みまたは曲げは、第1の方向と平行なそれぞれの軸について実施され、支持板は、第1の方向に関して乾燥したモノリシック断片の両側に、モノリシック断片を挟むように配置され、構造材料は、ハニカム構成を有する構造材料、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30に記載の構造材料。

【0126】

〔付記32〕

少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片の隣接するものの対向面は、互いに結合されている、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30または31に記載の構造材料。

【0127】

〔付記33〕

乾燥したモノリシック断片の各々は、 1.5 g/cm^3 未満（例えば、 1 g/cm^3 以下）の密度、少なくとも 140 MPa （例えば、 200 MPa 以上）の引張強さ、少なくとも 40 MPa の圧縮強度、少なくとも $115\text{ MPa/(g/cm}^3)$ （例えば、 $300\text{ MPa/(g/cm}^3)$ 以上）の比引張強さ、またはこれらの任意の組み合わせを有する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～32のいずれか1項に記載の構造材料。

【0128】

〔付記34〕

構造材料は、少なくとも 3 MPa （例えば、 5 MPa 以上）の圧縮強度、少なくとも $30\text{ MPa/(g/cm}^3)$ （例えば、 $50\text{ MPa/(g/cm}^3)$ 以上）の比圧縮強度、またはこれらの任意の組み合わせを有する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～33のいずれか1項に記載の構造材料。

【0129】

〔付記 35〕

乾燥したモノリシック断片の各々は、複数のピークと複数の谷とを有する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～34 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

〔0130〕

〔付記 36〕

乾燥したモノリシック断片の各々は、第 1 の支持板および第 2 の支持板の両方と接触している、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～35 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

〔0131〕

〔付記 37〕

支持板の一方または両方は、実質的に平坦な平面構成を有する部分的に脱リグニンした天然木材の別の乾燥した断片を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～36 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

〔0132〕

〔付記 38〕

第 1 の支持板および第 2 の支持板の一方または両方は、1 つまたは複数の非木材材料（例えば、ポリマー、金属、金属合金、セメント、ガラス、セラミック、複合体、またはこれらの任意の組み合わせ）から形成される、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～37 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

〔0133〕

〔付記 39〕

少なくとも 2 つの乾燥したモノリシック断片への水分の浸入を防止するように密閉されている、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～38 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

〔0134〕

〔付記 40〕

少なくとも 2 つの乾燥したモノリシック断片の外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、

少なくとも 2 つの乾燥したモノリシック断片は、保護層またはコーティングによって水分の浸入に対して密閉されている、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～39 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

〔0135〕

〔付記 41〕

第 3 の支持板をさらに備え、
起伏構成における折り畳みまたは曲げは、第 1 の方向と平行なそれぞれの軸について実施され、

第 1 の支持板および第 2 の支持板は、第 1 の方向に実質的に垂直な第 2 の方向に関して第 1 の乾燥したモノリシック断片の両側に配置され、

第 2 の支持板および第 3 の支持板は、第 2 の方向に関して第 2 の乾燥したモノリシック断片の両側に配置される、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～40 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

〔0136〕

〔付記 42〕

側面視において、第 1 の乾燥したモノリシック断片の起伏構成のピーク部分は、第 2 の乾燥したモノリシック断片の起伏構成の対応するピーク部分と実質的に整列している、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記 30～41 のいずれか 1 項に記載の構造材料。

【0137】

〔付記43〕

側面視において、第1の乾燥したモノリシック断片の起伏構成のピーク部分は、第2の乾燥したモノリシック断片の起伏構成の対応する谷型部分と実質的に整列している、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～41のいずれか1項に記載の構造材料。

【0138】

〔付記44〕

部分的に脱リグニンした木材の乾燥したモノリシック断片のそれぞれの微細構造における木材のセルロース系縦方向細胞は、実質的に潰れており、縦方向細胞の各々は、天然木材の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～43のいずれか1項に記載の構造材料。

10

【0139】

〔付記45〕

部分的に脱リグニンした木材のモノリシック断片のそれぞれの潰れた縦方向細胞の壁を形成するセルロースナノ繊維は、延在方向と実質的に平行に延在する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～44のいずれか1項に記載の構造材料。

【0140】

〔付記46〕

少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片のための木材は、硬材または軟材を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～45のいずれか1項に記載の構造材料。

20

【0141】

〔付記47〕

部分的に脱リグニンした木材の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片の各々は、天然木材の断片のそれぞれのリグニン含有量を0.1%～99%（両端含む）低減することで作製され、または

部分的に脱リグニンした木材の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片の各々は、天然木材の断片のそれぞれのヘミセルロース含有量を0.1%～99%（両端含む）低減することで作製され、または

30

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～46のいずれか1項に記載の構造材料。

【0142】

〔付記48〕

部分的に脱リグニンした木材の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片の各々は、天然木材の断片のそれぞれのリグニン含有量を50%以下低減することで作製され、または

部分的に脱リグニンした木材の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片の各々は、天然木材の断片のそれぞれのヘミセルロース含有量を50%以下低減することで作製され、または

40

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～47のいずれか1項に記載の構造材料。

【0143】

〔付記49〕

部分的に脱リグニンした木材の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片の各々は、天然木材の断片のそれぞれのリグニン含有量を10%以下低減することで作製され、または部分的に脱リグニンした木材の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片の各々は、

50

天然木材の断片のそれぞれのヘミセルロース含有量を10%以下低減することで作製され、または

これらの任意の組み合わせである、

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～48のいずれか1項に記載の構造材料。

【0144】

〔付記50〕

部分的に脱リグニンした木材の乾燥したモノリシック断片のそれぞれのリグニンの量は、少なくとも10wt%である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記30～49のいずれか1項に記載の構造材料。

10

【0145】

〔付記51〕

成形可能な木材構造体であって、

水分含量が少なくとも35wt%である、部分的に脱リグニンした天然木材のモノリシック断片を含み、

モノリシック断片は、微細構造を有し、天然木材の第1のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも小さい断面サイズを有し、実質的に潰れており、天然木材の第2のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも大きい断面サイズを有し、少なくとも部分的に開いており、

セルロース系縦方向細胞は、天然木材の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在する、
成形可能な木材構造体。

20

【0146】

〔付記52〕

水分含量は、少なくとも50wt%である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記51に記載の木材構造体。

【0147】

〔付記53〕

第2のセルロース系縦方向細胞の内腔ごとに、モノリシック断片における断面サイズは、部分的な脱リグニン前の天然木材における断面サイズよりも小さい、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記51～52のいずれか1項に記載の木材構造体。

30

【0148】

〔付記54〕

モノリシック断片は、 0° ～ 180° （両端含む）の角度範囲で曲げられるか折り畳まれることで弾性変形するように構築されている、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記51～53のいずれか1項に記載の木材構造体。

【0149】

〔付記55〕

モノリシック断片は、少なくとも100回の折り畳みサイクルで疲労なしに弾性変形可能である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記51～54のいずれか1項に記載の木材構造体。

40

【0150】

〔付記56〕

成形された木材構造体であって、

非平面的な3次元構成に成形されて、その後乾燥させて水分を除去した、水分含量が15wt%以下の請求項51に記載の成形可能な木材構造体を含む、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記51～55のいずれか1項に記載の木材構造体。

【0151】

50

〔付記 5 7〕

非平面的な 3 次元構成は、モノリシック断片について、折り紙折り形状または切り紙折り形状を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 6 に記載の木材構造体。

〔0 1 5 2〕

〔付記 5 8〕

成形された木材構造体であって、

非平面的な 3 次元構成に成形された部分的に脱リグニンした天然木材の乾燥したモノリシック断片を含み、乾燥したモノリシック断片の水分含量は 15 wt % 以下であり、

乾燥したモノリシック断片の微細構造は、木材のセルロース系縦方向細胞の内腔を有し、内腔は、実質的に潰れており、縦方向細胞の各々は、天然木材の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在する、
成形された木材構造体。

〔0 1 5 3〕

〔付記 5 9〕

非平面的な 3 次元構成は、モノリシック断片において少なくとも 2 つの曲げられたまたは折り畳まれた部分を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 6 ～ 5 8 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

〔0 1 5 4〕

〔付記 6 0〕

少なくとも 2 つの曲げられたまたは折り畳まれた部分におけるモノリシック断片の厚さは、モノリシック断片の曲げられていないまたは展開された部分の厚さと実質的に同じである、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 9 に記載の木材構造体。

〔0 1 5 5〕

〔付記 6 1〕

曲げられたまたは折り畳まれた部分のうちの少なくとも 1 つは、延在方向と実質的に平行な軸について曲げられているか折り畳まれている、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 9 ～ 6 0 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

〔0 1 5 6〕

〔付記 6 2〕

曲げられたまたは折り畳まれた部分のうちの少なくとも 1 つは、180°未満の内角を形成する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 9 ～ 6 1 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

〔0 1 5 7〕

〔付記 6 3〕

曲げられたまたは折り畳まれた部分のうちの少なくとも 1 つは、135°以下の内角を形成する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 9 ～ 6 2 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

〔0 1 5 8〕

〔付記 6 4〕

曲げられたまたは折り畳まれた部分のうちの少なくとも 1 つは、延在方向と交差する軸について曲げられているか折り畳まれており、または

曲げられたまたは折り畳まれた部分のうちの少なくとも 1 つは、延在方向と平行な軸について曲げられているか折り畳まれており、または

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 9 ～ 6 3 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

〔0 1 5 9〕

〔付記 6 5〕

乾燥したモノリシック断片は、折り畳まれるか曲げられることで塑性変形するように構築されている、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 6 ～ 6 4 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0160】

〔付記 6 6〕

乾燥したモノリシック断片の外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、保護層またはコーティングは、モノリシック断片への水分の浸入を防止する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 1 ～ 6 5 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0161】

〔付記 6 7〕

天然木材は、硬材または軟材を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 1 ～ 6 6 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0162】

〔付記 6 8〕

天然木材は、硬材を含み、第 1 のセルロース系縦方向細胞は、硬材の繊維または仮導管を含み、第 2 のセルロース系縦方向細胞は、硬材の導管を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 1 ～ 6 7 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0163】

〔付記 6 9〕

天然木材は、軟材を含み、第 1 のセルロース系縦方向細胞および第 2 のセルロース系縦方向細胞は、仮導管を含む、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 1 ～ 6 7 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0164】

〔付記 7 0〕

モノリシック断片は、天然木材のリグニン含有量を 0.1% ～ 99% 低減することで作製され、または

モノリシック断片は、天然木材のリグニン含有量を 0.1% ～ 99% 低減することで作製され、または

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 1 ～ 6 9 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0165】

〔付記 7 1〕

モノリシック断片は、天然木材のリグニン含有量を 50% 以下低減することで作製され、または

モノリシック断片は、天然木材のリグニン含有量を 50% 以下低減することで作製され、または

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 1 ～ 7 0 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0166】

〔付記 7 2〕

モノリシック断片は、天然木材のリグニン含有量を 10% 以下低減することで作製され、または

モノリシック断片は、天然木材のリグニン含有量を 10% 以下低減することで作製され、または

これらの任意の組み合わせである、
本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 5 1 ～ 7 1

10

20

30

40

50

のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0167】

〔付記 7 3〕

モノリシック断片のリグニンの量は、少なくとも 10 wt % である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 51～72 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0168】

〔付記 7 4〕

モノリシック断片の厚さは、少なくとも 0.1 mm（例えば、0.5 mm 以上）であり、または

モノリシック断片の厚さは、10 mm 以下であり、または

モノリシック断片の厚さは、0.1 mm～10 mm（両端含む）（例えば、0.5 mm 以上且つ 10 mm 以下）である、

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 51～73 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0169】

〔付記 7 5〕

モノリシック断片の厚さは、延在方向に実質的に垂直な方向に沿っている、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 74 に記載の木材構造体。

【0170】

〔付記 7 6〕

モノリシック断片は、厚さの方向に垂直な平面において第 1 の寸法と第 2 の寸法を有し、第 1 の寸法および第 2 の寸法は、互いに直交しており、第 1 の寸法および第 2 の寸法の少なくとも一方は、厚さよりも少なくとも 10 倍大きい、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 74～75 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0171】

〔付記 7 7〕

モノリシック断片の縦方向細胞の壁を形成するセルロースナノ繊維は、延在方向と実質的に平行に延在する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の木材構造体、特に付記 51～76 のいずれか 1 項に記載の木材構造体。

【0172】

〔付記 7 8〕

（a）天然に存在するセルロース系材料の断片に 1 つまたは複数の化学処理を施して天然に存在するセルロース系材料の断片の微細構造を維持しながら少なくとも一部のリグニンを除去することで部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を作製ステップであって、微細構造は、天然に存在するセルロース系材料の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在するセルロース系縦方向細胞を含む、ステップと、

（b）部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を乾燥させて水分を除去するステップであって、これにより、セルロース系縦方向細胞の少なくとも一部の内腔が潰れ、乾燥した断片の水分含量が 15 wt % 以下になる、ステップと、

（c）部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の乾燥した断片に流体衝撃処理を実施して部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の再水和された断片を得るステップであって、流体衝撃処理は、乾燥した断片を水分にさらすことを含み、再水和された断片の水分含量は、少なくとも 35 wt % である、ステップと、

（d）部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の再水和された断片を、実質的に平坦な平面構成から非平面的な 3 次元構成に成形するステップと、
を含み、

部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の再水和された断片における第 1 のセルロー

10

20

30

40

50

ス系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも小さい断面サイズを有し、実質的に潰れており、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の再水和された断片における第2のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも大きい断面サイズを有し、少なくとも部分的に開いている、

方法。

【0173】

〔付記79〕

(d)のステップの間の再水和された断片の水分含量は、少なくとも50wt%である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78に記載の方法。

【0174】

〔付記80〕

(a)天然に存在するセルロース系材料の断片に1つまたは複数の化学処理を施して天然に存在するセルロース系材料の断片の微細構造を維持しながら少なくとも一部のリグニンを除去することで部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を作製ステップであって、微細構造は、天然に存在するセルロース系材料の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在するセルロース系縦方向細胞を含む、ステップと、

(b)部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片を部分的に乾燥させて水分の一部を除去するステップであって、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の部分的に乾燥した断片の水分含量が少なくとも35%である、ステップと、

(c)部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の部分的に乾燥した断片を、実質的に平坦な平面構成から非平面的な3次元構成に成形するステップと、を含み、

部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の部分的に乾燥した断片における第1のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも小さい断面サイズを有し、実質的に潰れており、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の部分的に乾燥した断片における第2のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも大きい断面サイズを有し、少なくとも部分的に開いている、

方法。

【0175】

〔付記81〕

非平面的な3次元構成に成形するステップの後に、

(e)断片を乾燥させて水分を除去して、断片の形状をセットし、非平面的な3次元構成を有する、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の剛性のあるモノリシック断片を形成するステップをさらに含み、

剛性のあるモノリシック断片の水分含量は、15wt%以下である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78～80のいずれか1項に記載の方法。

【0176】

〔付記82〕

天然に存在するセルロース系材料は、繊維状の植物である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78～81のいずれか1項に記載の方法。

【0177】

〔付記83〕

繊維状の植物は、硬材、軟材、竹、草、または葦である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記82に記載の方法。

【0178】

〔付記84〕

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然に存在するセルロース系材料のリグニン含有量が0.1%～99%（両端含む）低減されて、部分的に脱リグニンし

10

20

30

40

50

たセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然に存在するセルロース系材料のヘミセルロース含有量が0.1%~99%(両端含む)低減されて、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

これらの任意の組み合わせである、

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78~83のいずれか1項に記載の方法。

【0179】

〔付記85〕

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然に存在するセルロース系材料のリグニン含有量が50%以下低減されて、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然に存在するセルロース系材料のヘミセルロース含有量が50%以下低減されて、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

これらの任意の組み合わせである、

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78~84のいずれか1項に記載の方法。

【0180】

〔付記86〕

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然に存在するセルロース系材料のリグニン含有量が10%以下低減されて、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

1つまたは複数の化学処理を施す(a)のステップは、天然に存在するセルロース系材料のヘミセルロース含有量が10%以下低減されて、部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の断片が作製されるように実施され、または

これらの任意の組み合わせである、

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78~85のいずれか1項に記載の方法。

【0181】

〔付記87〕

天然に存在するセルロース系材料は、硬材であり、(a)のステップの後の部分的に脱リグニンした木材の断片のリグニンの量は、少なくとも10wt%であり、または

天然に存在するセルロース系材料は、軟材であり、(a)のステップの後の部分的に脱リグニンした木材の断片のリグニンの量は、少なくとも12.5wt%であり、または

天然に存在するセルロース系材料は、竹であり、(a)のステップの後の部分的に脱リグニンした竹の断片のリグニンの量は、少なくとも13wt%である、

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78~86のいずれか1項に記載の方法。

【0182】

〔付記88〕

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78~87のいずれか1項に記載の方法によって形成された成形可能な構造体。

【0183】

〔付記89〕

本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の方法、特に付記78~87のいずれか1項に記載の方法によって形成された剛性のある成形された構造体。

【0184】

〔付記90〕

構造材料であって、

10

20

30

40

50

部分的に脱リグニンしたセルロース系材料の少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片であって、乾燥したモノリシック断片の各々は、複数回折り畳まれるか曲げられることで形成された繰り返し起伏構成を有するように形成され、起伏構成は、少なくとも1つのピークと少なくとも1つの谷とを含む繰り返しパターンを有し、乾燥したモノリシック断片のそれぞれの水分含量は、15wt%以下である、少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片と、

少なくとも2つの乾燥したモノリシック断片に結合した第1の支持板および第2の支持板と、
を備える構造材料。

【0185】

〔付記91〕

起伏構成における折り畳みまたは曲げは、第1の方向と平行なそれぞれの軸について実施され、支持板は、第1の方向に関して乾燥したモノリシック断片の両側に、モノリシック断片を挟むように配置され、構造材料は、ハニカム構成を有する、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造材料、特に付記90に記載の構造材料。

【0186】

〔付記92〕

成形可能な構造体であって、

水分含量が少なくとも35wt%である、部分的に脱リグニンした天然に存在するセルロース系材料のモノリシック断片を含み、

モノリシック断片は、微細構造を有し、天然に存在するセルロース系材料の第1のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも小さい断面サイズを有し、実質的に潰れており、天然に存在するセルロース系材料の第2のセルロース系縦方向細胞の内腔は、第1のサイズよりも大きい断面サイズを有し、少なくとも部分的に開いており、

セルロース系縦方向細胞は、天然に存在するセルロース系材料の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在する、
成形可能な構造体。

【0187】

〔付記93〕

水分含量は、少なくとも50wt%である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造体、特に付記92に記載の構造体。

【0188】

〔付記94〕

成形された構造体であって、非平面的な3次元構成に成形されて、その後乾燥させて水分を除去した、水分含量が15wt%以下の本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の成形可能な構造体、特に付記92～93のいずれか1項に記載の成形可能な構造体を含む、成形された構造体。

【0189】

〔付記95〕

成形された構造体であって、

非平面的な3次元構成に成形された部分的に脱リグニンした天然に存在するセルロース系材料の乾燥したモノリシック断片を含み、乾燥したモノリシック断片の水分含量は15wt%以下であり、

乾燥したモノリシック断片の微細構造は、セルロース系材料のセルロース系縦方向細胞の内腔を有し、内腔は、実質的に潰れており、縦方向細胞の各々は、天然に存在するセルロース系材料の縦方向の成長方向と実質的に平行な延在方向に沿って延在する、
成形された構造体。

【0190】

〔付記96〕

天然に存在するセルロース系材料は、繊維状の植物である、本明細書に記載の付記また

10

20

30

40

50

は実施例のいずれかに記載の構造体、特に付記 9 0 ～ 9 5 のいずれか 1 項に記載の構造体。

【0191】

〔付記 9 7〕

繊維状の植物は、硬材、軟材、竹、草、または葦である、本明細書に記載の付記または実施例のいずれかに記載の構造体、特に付記 9 6 に記載の構造体。

【0192】

〔結論〕

図 1 ～ 図 1 5 B、および付記 1 ～ 9 7 について図示または説明した上記特徴は、いずれも図 1 ～ 1 5 B および付記 1 ～ 9 7 について図示または説明した他の特徴と組み合わせることができ、本明細書で図示していない、または具体的に説明していない材料、構造、方法、装置、および実施形態を提供することができる。例えば、図 1 5 B について説明した湿潤穴の形成に関する特徴は、図 4 A ～ 図 1 2 D もついで説明した構造および方法など、本明細書に記載の他の材料に適用され得る。また、1 つまたは複数の検討される実施形態によれば、他の組み合わせおよび変形例も可能である。本明細書に記載の特徴のすべては、互いに独立しており、構造的に不可能な場合を除いて、本明細書に記載の他の特徴と組み合わせて使用され得る。

【0193】

本明細書に記載の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して、図示された実施形態は、本明細書に記載の技術の好ましい例に過ぎず、本明細書に記載の技術を限定するものではないことに留意されたい。むしろ、本明細書に記載の技術の範囲は、添付の特許請求の範囲によって定義される。したがって、本出願人は、これらの請求項の範囲および精神の範囲内にあるすべてのものが本発明であると主張することができる。

10

20

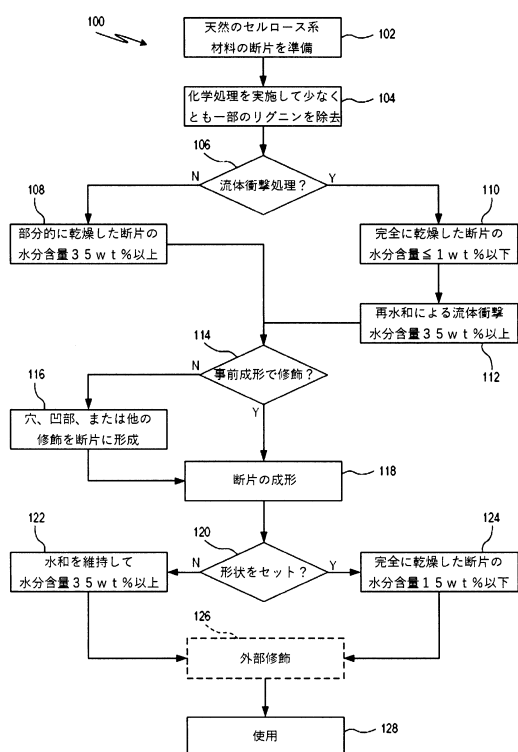
30

40

50

【図面】

【図 1】



【図 2 A】

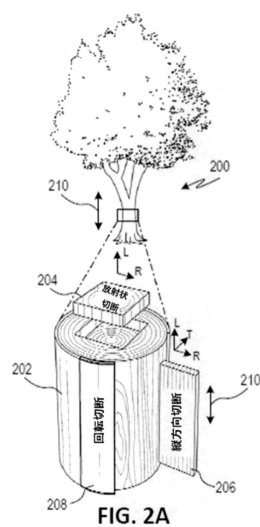


FIG. 2A

【図 2 B】

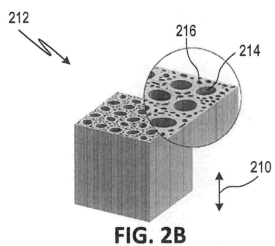


FIG. 2B

【図 2 C】

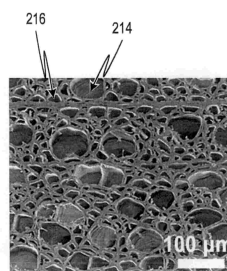
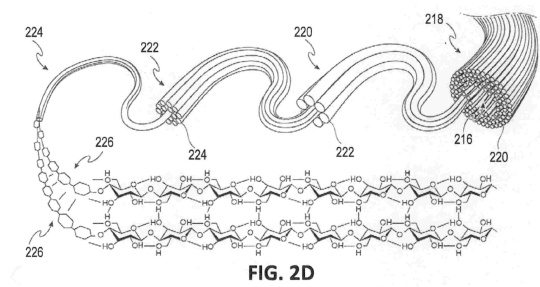
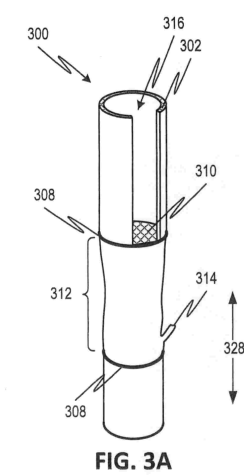


FIG. 2C

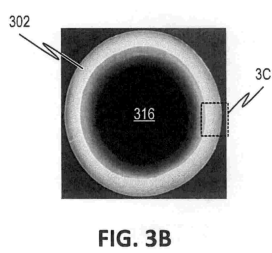
【図 2 D】



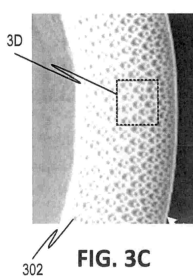
【図 3 A】



【図 3 B】



【図 3 C】



10

20

30

40

50

【図 3 D】

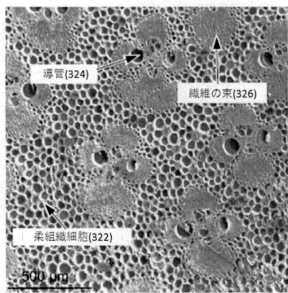


FIG. 3D

【図 4 A】

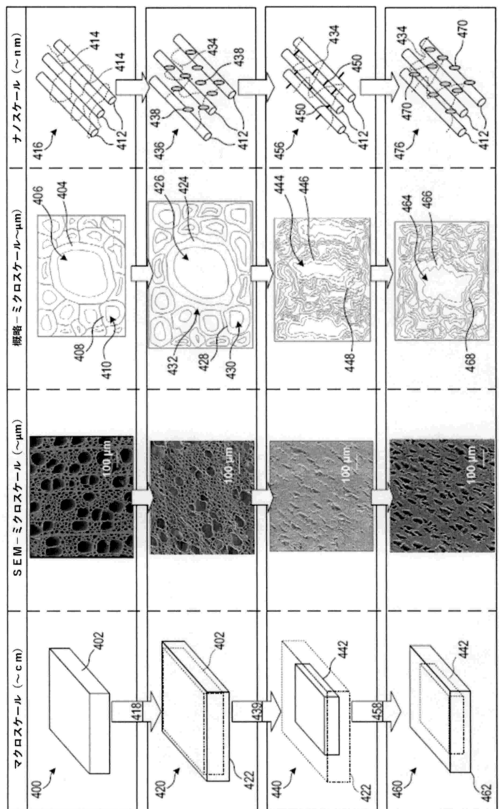


FIG. 4A

【図 4 B】

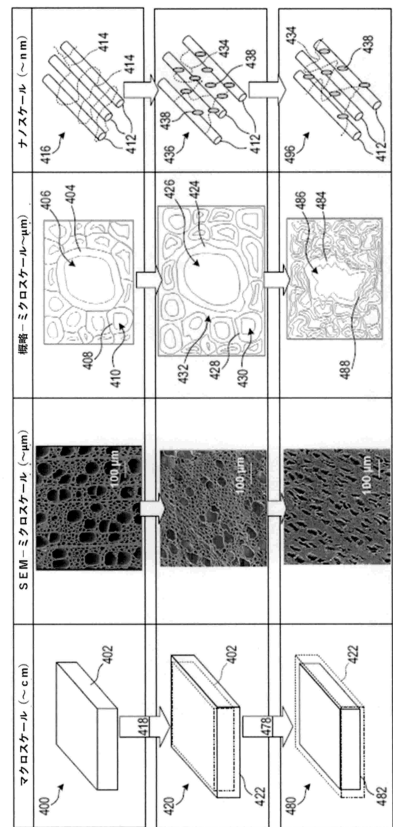


FIG. 4B

【図 5 A】

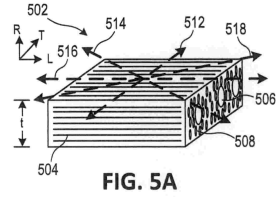


FIG. 5A

【図 5 B】

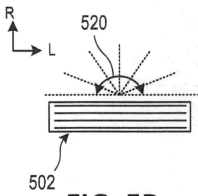


FIG. 5B

【図 5 C】

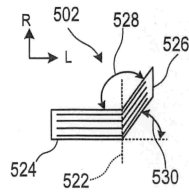
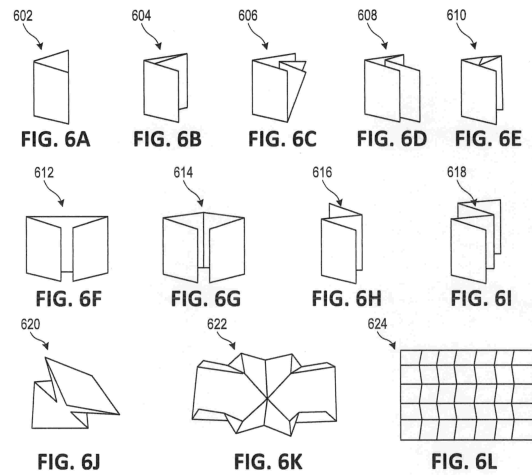
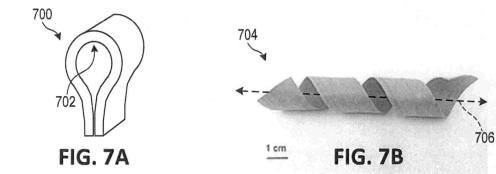


FIG. 5C

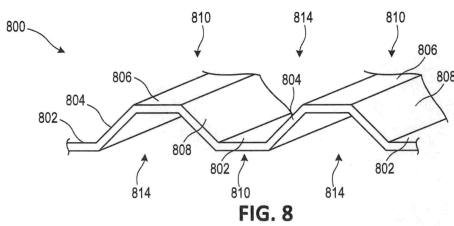
【図 6】



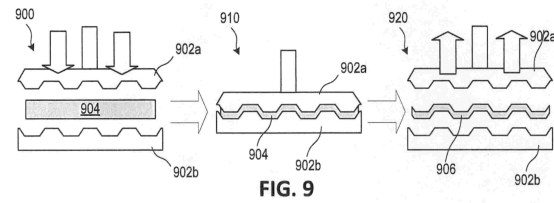
【図 7】



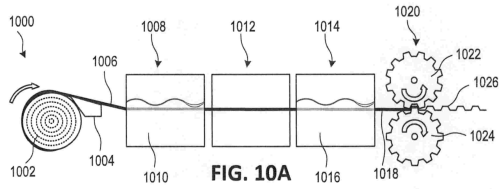
【図 8】



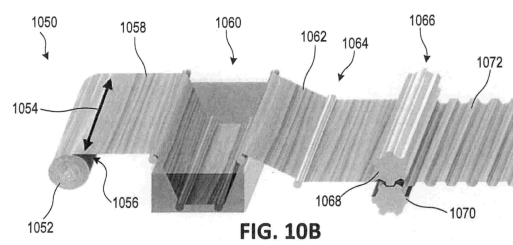
【図 9】



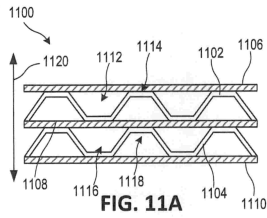
【図 10 A】



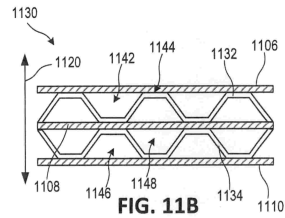
【図 10 B】



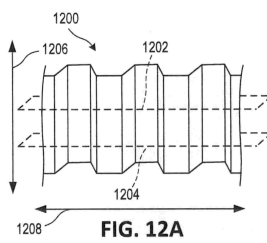
【図 1 1 A】



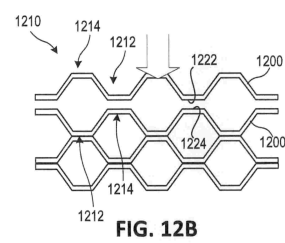
【図 1 1 B】



【図 1 2 A】



【図 12 B】



10

20

30

40

50

【図 1 2 C】

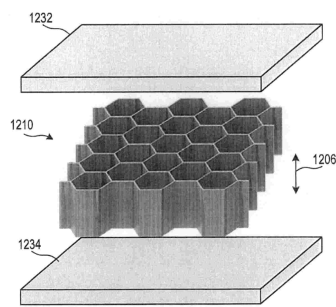


FIG. 12C

【図 1 2 D】

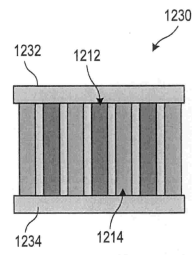


FIG. 12D

10

【図 1 3 A】

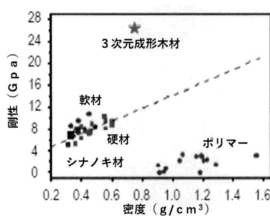


FIG. 13A

【図 1 3 B】

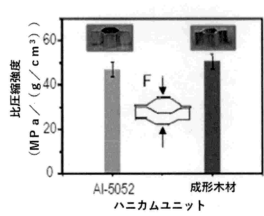


FIG. 13B

20

【図 1 4 A】

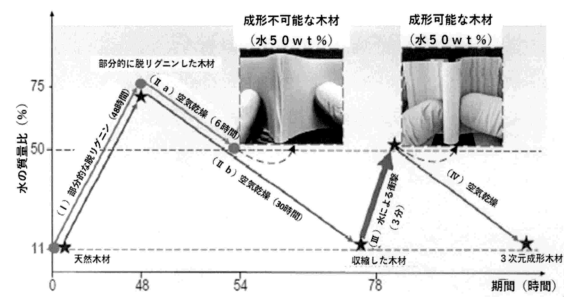


FIG. 14A

【図 1 4 B】

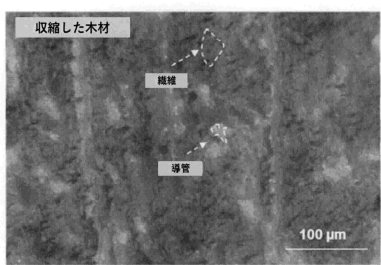


FIG. 14B

30

40

50

【図 14 C】

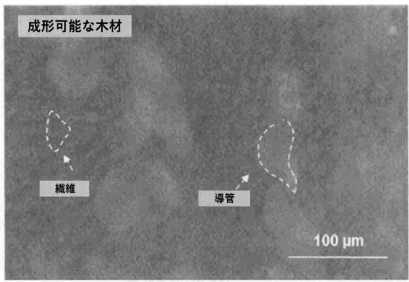


FIG. 14C

【図 15 A】

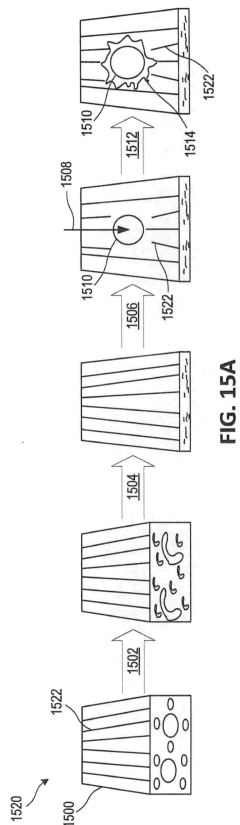


FIG. 15A

【図 15 B】

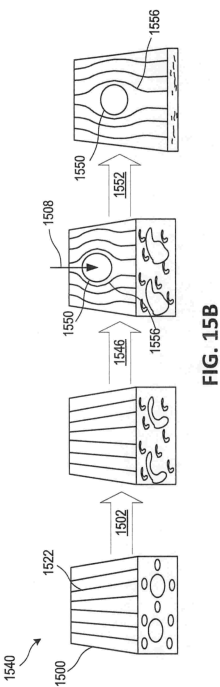


FIG. 15B

10

20

30

40

50

フロントページの続き

ンジャン, ハルビン, シアンファン ディストリクト, ヘーシン ロード 26, ノースイースト
フォレストリー ユニバーシティ

(72)発明者 チェン, チャオジー

アメリカ合衆国, 21784 メリーランド州, サイクスビル, オールド フレデリック ロード
13239

(72)発明者 リウ, ユー

アメリカ合衆国, 20740 メリーランド州, バーウィン ハイ츠, ケベック プレイス 6103

審査官 星野 浩一

(56)参考文献 国際公開第2018/187238 (WO, A1)

特表2019-505420 (JP, A)

特開平11-170216 (JP, A)

特開2015-077740 (JP, A)

国際公開第2019/055789 (WO, A1)

特開2011-000883 (JP, A)

特開2016-027958 (JP, A)

特開2000-229305 (JP, A)

特開平05-092403 (JP, A)

国際公開第2018/191181 (WO, A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

B27K 5/00