

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06165

研究課題名(和文) 化学処理－樹脂含浸圧密複合処理による木管楽器材料の開発

研究課題名(英文) Development of material for woodwind instruments with the combination of chemical modification and resin impregnation

研究代表者

小幡谷 英一 (Obataya, Eiichi)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：10312810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：単板に樹脂を含浸し、積層、圧密して作る樹脂含浸圧密積層材(CLVL)は、数十年前に発明された歴史のある素材であり、電気絶縁材や内装材、食器材として既に幅広く用いられている。ただ、既存のCLVLの寸法安定性は、管楽器の管体には十分ではなかった。本研究により、適切な原料(単板、樹脂)の選択や、化学処理との複合によって、従来のグラナディア材に匹敵する高い寸法安定性と気密性を備えたCLVLの製造が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの木管楽器の管体に使われているアフリカ産のグラナディア材は絶滅危惧種であり、このまま使い続けられれば、いずれ木管楽器を作れなくなる。本研究により、資源量が豊富で持続可能な国産木材を原料に、グラナディアに匹敵する性能を持った木質材料を作ることができるようになった。これは、希少な枯湯危惧種に頼らない持続可能な楽器生産につながるだけでなく、国産材の高付加価値化、ひいては国内林業の活性化にもつながる。

研究成果の概要(英文)：Resin-impregnated compressed laminated veneer lumber (CLVL) is an old material invented in 1950s, and now it is widely used for electrical insulation, interior materials, tableware and so on. However, its dimensional stability is not enough to be used for the material of woodwind instruments. In this study, we have clarified appropriate choice of raw material (wood and resin) and the effectiveness of previous chemical modification for the dimensional stability of the CLVL. These results allow industrial fabrication of woodwind material from abundant forest resources.

研究分野：木材工学

キーワード：木管楽器 グラナディア 樹脂含浸圧密積層材

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

クラリネットは、幅広いジャンルで活躍する木管楽器の一つであり、世界に 800 万人の奏者がいると言われている。多くの管体がアフリカ産グラナディア材 (*Dalbergia melanoxylon*) で作られており、グラナディア製クラリネットの年間生産量は 12 万台（中国を除く）に達する。グラナディアは成長が遅く、伐採までに 70 年以上かかる上、近年の需要増加に伴って絶滅が危惧されている。2017 年には他の *Dalbergia* 属（ローズウッド等）と共に CITES の付録 II に記載され、原木や加工品の輸出入が厳しく規制されるようになった。楽器生産国がストックしているグラナディア材は数年で払底すると予測されており、このままでは近い将来、質の高い木管楽器を作れなくなる。これは、楽器製造業という一産業の問題ではなく、音楽文化の危機と言っても過言ではない。

グラナディア材は密度が高く、強度や剛性が極めて高い。しかも、心材に含まれる疎水性樹脂や繊維の交錯により、他の重硬材（コクタン等）に比べてはるかに優れた寸法安定性や耐水性を示す。多くの管楽器メーカーが精力的に代替材を探索しているが、グラナディア材に替わる樹種はまだ見つかっていない。合成樹脂や木粉-樹脂混合物で作られた楽器が市販されているものの、音色や吹奏感がグラナディア製の楽器と大きく異なる上、衝撃に弱く破損しやすいため、奏者からはほとんど評価されていない。

グラナディア材は、他の木材と同様、木繊維が高度に配向した強異方性材料であり、その表面にはセル構造に由来する凹凸が顕れる。これらの特性を模倣するためには、木粉や樹脂を成形するのではなく、木材本来の繊維の配置や表面性状を保ったまま加工するのが合理的である。そこで、近年注目されているのが樹脂含浸圧密積層材 (CLVL) である。これは、木材単板に樹脂を含浸し、熱圧したもので、木材本来の強異方性や表面性状を保ちながら、グラナディアに近い強度や剛性を達成できる。ただ、既存の CLVL はグラナディア材に比べて寸法安定性が低いため、使用中の乾湿繰り返しによって管体が割れることがある。これは管体材料としては致命的な欠点である。この問題を解決するためには、木材を構成する細胞壁自体の寸法安定性や耐水性を高めるしかない。

木材の寸法安定性や耐水性を高めるには、アセチル化を始めとする化学処理が有効である。したがって、化学処理により寸法安定性を高めた上で、樹脂含浸圧密によって緻密化すれば、力学性能、寸法安定性いずれにおいてもグラナディアに匹敵する材料を作れると予想される。このように、汎用木材を用いてグラナディアの代替材を作るには、「化学処理による寸法安定化」と「樹脂含浸圧密による緻密化」を組み合わせた「複合処理」が最も有望であるが、過去の検討例が少なく、様々な問題（化学処理材-樹脂間の接着不良等）が想定されるため、どのような処理を組み合わせるのか、それによってどのような問題が起こるのか、その問題をどのように解決するのかが代替材開発の鍵である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、木材の物理・化学加工技術を組み合わせ、枯渇が危惧される木管楽器管体材の代替材を、持続可能な汎用木材や天然樹脂を用いて製造する技術を開発することである。本報告書では、従来の管体材の諸特性を概説した後、カバ材を用いた既存の CLVL の性能と、化学処理-樹脂含浸圧密複合処理による性能改善手法を詳述する。さらに、これまであまり例のない針葉樹材を用いた CLVL の性能を明らかにする。最後に、開発された素材を用いて作られた楽器の実用性能および実用化可能性と今後の課題について詳述する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1. 従来の木管楽器管体材の物性解明

新素材の開発に先立ち、性能の目標値を定めるために、リコーダー用およびクラリネット用に選別された 5 樹種（産地の異なるものを含めて 8 種）と汎用のブナ材を用いて、吸水に伴う質量と寸法の変化を測定した。短時間で吸水させるため、繊維方向を 5 mm にしたブロック試料を各種 3 個ずつ作製し、実験に供した。

一方、クラリネットメーカーで行われている試験法に倣い、従来材の気密性を評価した。まず、国内のリコーダーメーカーに依頼し、木管楽器用に選別された 10 樹種から円筒（外径 36 mm、内径 16 mm、高さ 60mm）を各 2 本作製し、実際の木管楽器製作と同じ方法で管の表面を研磨した。次に、管の両端をシリコン栓で塞ぎ、内部を真空にした後、内部の圧力を経時的に測定した。減圧停止から 1 分間の内圧変化  $\Delta P_1$  によって気密性を評価した。

#### 3.2. カバ CLVL の作製と物性評価

工業的に生産されている CLVL の製造条件を参考に、カバ単板を用いて種々の CLVL を作製し、その寸法安定性および気密性を測定した。あらかじめ 105°C で 12 時間以上炉乾して全乾質量と全乾寸法を測定した 50 mm 角の単板（1.3~1.4 mm 厚）を、フェノール樹脂（株利昌工業製）の 20~40w/w% メタノール溶液に 3 日間浸漬した。一部の単板はあらかじめアセチル化処理、糖含浸

処理、ポリエチレングリコール含浸処理を施した。風乾された 20 枚の単板を木目の向きを揃えて積層し、ホットプレスを用いて熱圧した。まず、重ねた単板を室温のホットプレスに挿入し、熱盤温度を徐々に上げながら加圧した。目標の厚さに到達した後、さらに 150℃ で 2 時間加熱し、樹脂を硬化させた。熱盤を冷却した後、試料を取り出し、繊維方向が 5mm になるよう切断し、ブロック状の試料を作製した。このブロック試料の質量と寸法を、105℃ で 12 時間以上加熱した後、および 1 週間以上水中浸漬した後に測定し、幅方向（単板の接線方向）および圧縮方向（単板の放射方向）の水膨潤率を測定した。

### 3.3. ヒノキ CLVL の作製と物性評価

1.2mm 厚のヒノキ単板を用いて CLVL を作製し、寸法安定性と気密性を評価した。ヒノキ CLVL については、単一の樹脂だけでなく、分子量分布の異なる樹脂を混合して含浸する「混合含浸」についても検討を行った。

### 3.4. 木管楽器の試作と評価

本研究で確立された手法を用いて、2 種の管楽器を試作し、加工性や実用品質の評価を行った。新型コロナウイルスの感染拡大に伴う海外渡航の制限によってクラリネットの試作ができなくなったため、急遽、世界的に評価の高い国内の木管楽器メーカー（竹山木管楽器製作所およびヨーゼフ）に依頼し、アルトリコーダーおよびオーボエを試作することにした。いずれも（株）利昌工業が製造した CLVL を用い、アルトリコーダーにはカバ製中密度を、オーボエにはヒノキ製高密度 CLVL を用いた。オーボエについては最も割れやすい上管のみを製作した。

## 4. 研究成果

### 4.1. 従来の木管楽器管体材の諸物性

管楽器製作者に対する聴き取りの結果、管体素材に求められるのは、1) 寸法安定性、2) 緻密さ、3) 気密性、であることがわかった。寸法安定性は、管楽器の場合特に重要な性能である。管楽器は、演奏中の奏者の呼気や唾液によって表面から吸湿・膨潤し、演奏後の乾燥によって収縮する。寸法変化の大きい素材は、吸湿・膨潤によってゆがみやすく、乾燥時に割れが生じやすい。したがって、数十年にわたって演奏される可能性のある高級木管楽器の場合には、きわめて高い寸法安定性が求められる。一方、緻密さと気密性は、音質や吹奏感に影響する因子である。音響学的には未だ証明されていないものの、管内壁の空隙構造が音色に影響を与えていると言われている。また、管楽器の場合、音程の正確さが管の旋削や穿孔の加工精度に強く依存するため、精密な加工が可能な緻密で加工性の良い（粘り強い、脆くない）素材が求められる。さらに、クラリネットやオーボエのように、音孔を硬質のパッドでふさいで音高を変える楽器の場合、パッドが音孔を完全にふさぐためには、表面の凹凸が小さい緻密な材でなければならない。結果的に、木管楽器の管体には、比較的密度が高く、大径の道管が局在しない散孔材が用いられることが多い。

様々な材料を比較した結果、グラナディア材の水膨潤率が小さく、膨潤の速度が非常に遅いことが明らかとなった。水膨潤率が小さいのは木理の交錯によるものと推察された。また、膨潤が遅いのは天然の疎水性樹脂を大量に含むためであることが明らかとなった。これらのことから、本研究で達成すべき寸法安定性のレベルを以下のように設定した。

横断面の最大膨潤率（無垢材ならば T 方向の膨潤率）：7%以下

膨潤速度：1 日の水中浸漬で最大膨潤率の半分以下

一方、気密性については、グラナディア、コクタン、ホンジュラスローズウッドの性能が高かった。ツゲは、最もポピュラーなリコーダーの素材であり、過去にはクラリネットにも使われていたが、グラナディア等と比べると気密性が低かった。指で音孔を塞ぐリコーダーと異なり、現代のクラリネットは硬質のパッドで同時に複数の音孔を塞ぐ仕組みになっており、表面が平滑で気密性の高い素材が求められる。本研究では、グラナディアの気密性を参考に、達成すべき気密性のレベルを以下のように設定した。

1 分間の空気の漏出による管内圧力の変化が 1kPa (0.01atm) を下回ること

### 4.2. カバ CLVL の特性

カバ材を原料とする CLVL は既に工業的に生産され、絶縁部品や摺動部品など既に様々な用途に活用されている。本研究ではまず、従来の方法で作られた CLVL の管楽器管体材としての性能を評価した上で、種々の複合処理による寸法安定性の改善を試みた。

カバ CLVL の最大水膨潤率をグラナディアと比較したものを図 1 に示す。一般的なフェノール樹脂 (AR) に比べて、分子量が低い樹脂 (MA) の方が水膨潤率が低くなった。また、単板をあらかじめアセチル化することにより (Ac+AR)、水膨潤率が著しく低下し、グラナディア (GR) に近い高い寸法安定性を示した。

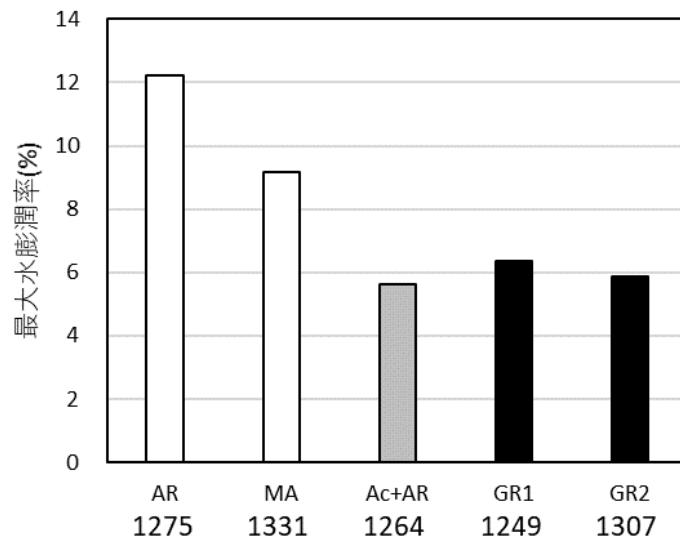


図 1. 種々のカバ CLVL の最大水膨潤率

AR : AR 樹脂を含浸、MA : MA 樹脂を含浸、Ac+AR : あらかじめアセチル化した単板に AR 樹脂を含浸、GR1 および GR2 : 木管楽器用グラナディア材. 数字は気乾密度 (kg/m<sup>3</sup>).

カバ CLVL について得られた知見は以下のように要約される。

- 1) 導入されたフェノール樹脂の一部が細胞壁に浸透し、細胞壁を膨潤させる（バルキング効果）。その程度は樹脂の種類（分子量分布）に依存する。
- 2) 木材中で硬化したフェノール樹脂の「バルキング効果」と「架橋」によって細胞壁の形状が固定され、CLVL の水膨潤が抑制される。
- 3) 分子量の低い成分をより多く含む樹脂を用いた方が CLVL の寸法安定性が高くなる。さらに、異なる樹脂を多段含浸することで CLVL の寸法安定性が向上する。
- 4) アセチル化と樹脂含浸を組み合わせることで、密度や寸法安定性がグラナディアに匹敵する CLVL を作ることができる。
- 5) 糖や PEG のような水溶性樹脂の含浸と樹脂含浸の複合は、寸法安定性を改善する方法としては有効でない。

#### 4.3. ヒノキ CLVL の特性

カバを用いた場合、あらかじめアセチル化しない限り、グラナディアに近い密度と寸法安定性を達成することができなかったが、ヒノキを用いることで、密度や寸法安定性がグラナディアに匹敵する CLVL が得られた。図 2 に、単一の樹脂（AR、ER）を含浸した場合と、混合樹脂（AR : ER = 1 : 1）を含浸した場合のヒノキ CLVL の最大水膨潤率を示す。異なる樹脂を混合した方が寸法安定性が高くなること、樹脂の種類によって最適な導入量があることがわかる。

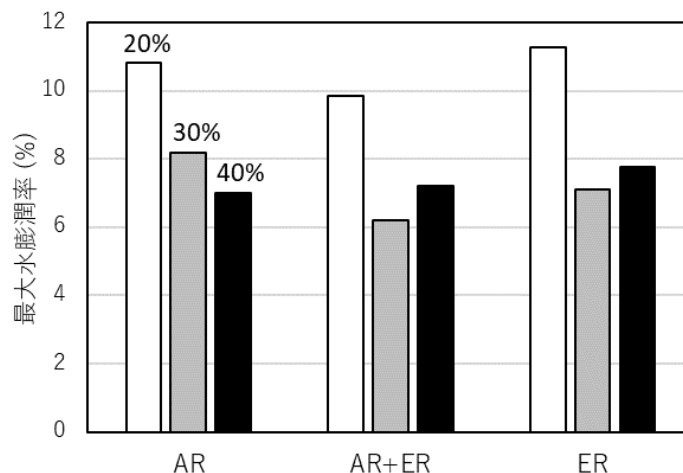


図 2. 種々のヒノキ CLVL の最大水膨潤率

AR : AR 樹脂を含浸、ER : ER 樹脂を含浸、AR+ER : AR と ER の混合樹脂を含浸. 図中の数字は含浸した樹脂液の濃度 (%).

異なる樹脂を混合することで寸法安定性が向上するのは、細胞壁に導入される樹脂と細胞内腔に導入される樹脂が異なる役割を担っているためである。細胞壁中に導入される低分子量成分はバルキング効果によって細胞壁自体の吸湿・膨潤を抑制する。一方、内腔に残留し、固化した高分子量成分は、圧縮によって接触した細胞壁間を接着するとともに、内腔形状を保持することにより、細胞形状の変化を伴う膨潤（いわゆる浮き輪効果）を抑制する。カバでは前者の寄与が大きく、ヒノキでは後者の寄与が大きい。フェノール樹脂のみを用いて寸法安定性の高いCLVLを作るためには、樹種に応じた適切な樹脂量と分子量分布の選択が必要であると言える。

#### 4.4. 圧密単板積層材の木管楽器への応用

素材の密度および寸法安定性に加え、製造の容易さやコストを考慮し、最も実用化可能性の高い素材として、カバ製の中密度CLVLとヒノキ製の高密度CLVLを作製した。さらに、このCLVLを用いて楽器（アルトリコーダー、オーボエ）を製作した。なお、当初の計画ではフランスのビュッフエ・クランポン社においてクラリネットを試作する予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大に伴って海外との往來が制限され、物品の輸送も遅れたことから、研究期間内にクラリネットを試作することができなかった。これについては、感染収束後に試作と実用化を進める予定である。

試作された楽器を図3に示す。加工性（切断、旋削、穿孔など）に問題はなく、加工後の割れや狂いも認められなかった。また、熟練した奏者が試奏したところ、音量、音質ともに従来材の楽器と遜色なかった。既存のCLVLの問題点である「臭い」もほとんどなく、楽器製作者からは非常に有望な素材であるとの評価を頂いた。

試作されたオーボエ上管を用いて過酷な乾湿繰り返し（水中浸漬8時間と50°Cでの炉乾16時間を繰り返す試験）を20回以上行ったが、割れは生じなかった。



図3 カバCLVL製リコーダー（左）とヒノキCLVL製オーボエ（右）

#### 4.5. まとめと今後の課題

単板に樹脂を含浸し、積層、圧密して作る樹脂含浸圧密積層材（CLVL）は、数十年前に発明された歴史のある素材であり、電気絶縁材や内装材、食器材として既に幅広く用いられている。ただ、既存のCLVLの寸法安定性は、管楽器の管体には十分ではなかった。本研究により、適切な原料（単板の樹種、樹脂の種類）や含浸方法が明らかとなり、管体用グラナディア材に匹敵する高い寸法安定性と気密性を備えたCLVLの製造が可能となった。今後は、今回試作できなかったクラリネットに加え、フルート、大型のバスクラリネット、ファゴットなど、様々な木管楽器の試作を行うとともに、グラナディアと同様、枯渇が危惧される希少材（ローズウッドやコクタンなど）の代替材として、三味線や二胡の胴、弦楽器の指板、マリンバの音板への適用を試みる予定である。国産材と国産技術を使った木管楽器素材の実現は、国内森林資源の高付加価値化と有効利用だけでなく、絶滅危惧種に頼らない持続可能な楽器製造につながると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Eiichi Obataya and Chen Shuoye	4. 巻 77
2. 論文標題 Significant and reversible dimensional changes in hydrothermally compressed cedar wood and its potential as humidity-sensitive actuator.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 European Journal of Wood and Wood Products	6. 最初と最後の頁 1021-1028
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00107-019-01463-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------