

平成 29 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「竹の流動成形による高音質な薄肉・複雑形状スピーカー振動板の実用化」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 3 月

担当局 中部経済産業局
補助事業者 公益財団法人 科学技術交流財団

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2	研究体制	4
1-3	成果概要	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	5

第2章 本 論

【1. 素材検討課題：竹材の品質評価と成形・音響特性に優れた竹流動成形素材の開発】		
【1-1】	竹素材の品質評価および供給・流通ルート開発	6
【1-2】	成形性ならびに音響特性を満足する竹の樹脂含浸処理方法の開発	11
【1-3】	優れた音響特性・耐久性が得られる含浸竹の成形条件の検討	14
【2. 金型構造の開発】		
【2-1】	金型材質・表面改質条件の検討	17
【2-2】	プレスモーションの検討	18
【3. 金型温調システムの開発】		
【3-1】	セグメント金型の温度制御方法の検討	20
【3-2】	高速生産に向けた昇温、保持、降温パターンの検討	21
【3-3】	大型成形品への対応	22
【4. スピーカーコーン振動板の性能評価】		
【4-1】	スピーカーコーンの音響特性評価	23
【4-2】	スピーカーコーンの聴感評価とハイレゾ基準クリア	24

最終章	全体総括	25
-----	------	----

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発は、特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、以下の項目に対応する。

(三) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(3) 川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

ア. 高機能化・精密化・軽量化、エ. 高感性感、カ. 生産性・効率化の向上、低コスト化
以上の川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）に対しては、本研究開発では、『高音質を再現する竹高含有振動板（スピーカーコーン）の高生産成形』を実現する金型技術を開発することが対応している。

本技術において、核となる技術は国立研究開発法人産業技術総合研究所の『木質流動成形』であり、技術開発においては、総括研究機関であるチヨダ工業株式会社との共同特許を使用する。ウッドコーンや竹繊維振動板については、大手メーカーが数多くの特許を有しているが、『流動成形』を利用したものは、我々の提案以外に見当たらない。

本研究開発の目的及び目標は、以下の通りである。

(三) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(3) 川下分野横断的な共通の事項

②上記を踏まえた高度化目標

ア. 当該技術が持つ物理的な諸特性の向上

に対応する高度化目標（課題）及び技術的目標値の概要と具体的課題として

更なる音質の向上を目指すうえで、振動板の弾性率（音速・伝播速度）と内部損失の双方を増加させる。そのために、竹繊維を高い比率で含有させながら任意に繊維配向性を変化させた高密度化薄肉成形を実現する、熱硬化性樹脂含浸竹の流動成形用金型システム（金型動作機構・金型基材コーティング・温度制御の機構）を開発する。特に、大型コーン成形の高速生産においては、高精度に金型温度と分布を制御できるハイサイクル温度調整に対応可能な金型構造を実現する。

これにより、紙製振動板の2倍以上の音響特性を発揮するスピーカー振動板素材を創出する。すなわち、振動板の中の音の伝搬速度（弾性率／密度の平方根）を【紙製振動板の2倍以上：約5000m/s】にする。熱硬化性樹脂の含浸処理によって、内部損失を0.07以上に増加させる。また、耐湿性能、耐熱性を向上させて、空気中の水分の吸着を抑え、物性安定性を向上させる。【吸水率：煮沸試験において質量増加率1%以下】【熱たわみ温度120℃以上】

以上の目標達成のためには、素材である竹の品質確保と含浸処理技術ならびに成形性の向上と最適条件の導出が重要な課題となる。

一方、これまでの金型・装置では、単純な圧縮成形を行うのみであり、竹を用いた場合には、薄肉複雑形状の成形が困難で、板厚1.2mm程度が限度であった。プレスモーション制御と厳密な温度調整によって、これを0.5mm以下まで薄くすることで軽量化を達成し、振動板の性能を向上させる。さらに、金型の加熱・冷却装置を流動成形加工用に最適化することにより、製造時間の短縮と成形品の品質安定を図る【10分/プレス】。本事業開始までの試作品は実験室レベルで直径50mmであるが、これらの技術開発によりハイレゾ対応フルレンジスピーカーで主流となる直径160mm以上の成形を可能とする大型の金型システムを構築する。

以上の目標に対して、以下の研究項目を実施した。

【1. 素材検討課題：竹材の品質評価と成形・音響特性に優れた竹流動成形素材の開発】

【1－1】竹素材の品質評価および供給・流通ルート開発

【1－2】成形性ならびに音響特性を満足する竹の樹脂含浸処理方法の開発

【1－3】優れた音響特性・耐久性が得られる含浸竹の成形条件の検討

【2. 金型構造の開発】

【2－1】金型材質・表面改質条件の検討

【2－2】プレスモーションの検討

【3. 金型温調システムの開発】

【3－1】セグメント金型の温度制御方法の検討

【3－2】高速生産に向けた昇温、保持、降温パターンの検討

【3－3】大型成形品への対応

【4. スピーカーコーン振動板の性能評価】

【4－1】スピーカーコーンの音響特性評価

【4－2】スピーカーコーンの聴感評価とハイレゾ基準クリア

1－2 研究体制

総括研究代表者：山田満雄 チヨダ工業株式会社

副総括研究代表者：三木恒久 産業技術総合研究所

研究実施者・機関

山田哲也 チヨダ工業株式会社

日比敦史 チヨダ工業株式会社

竹田 博 名古屋木材株式会社

豊嶋 勲 愛知県森林・林業技術センター

桐生智明 産業技術総合研究所

研究体制・課題を図1に示す。

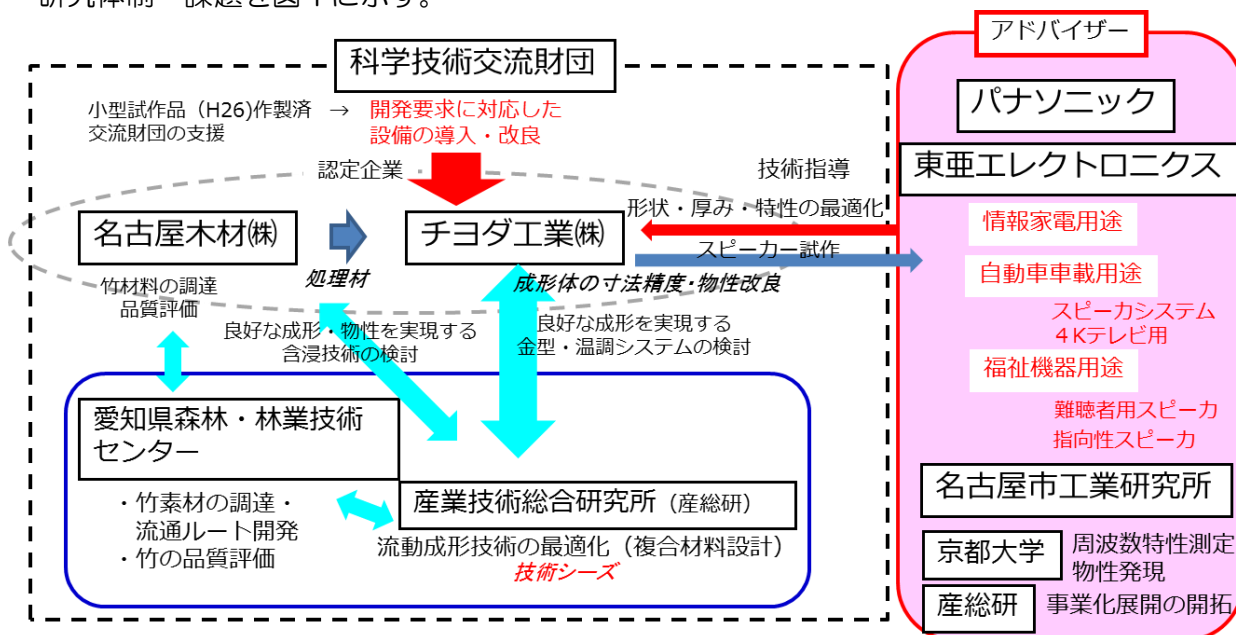


図1 研究体制・課題

1-3 成果概要

素材供給・品質に関する課題では、本事業で確保した愛知県内竹伐採実証フィールドで採取した竹について、現場で迅速に品質評価するための方法（動的弾性率、音速、密度、含水率などの測定方法）を確立した。その一方で、実証フィールドで見られる放置竹林被害の解消のために、本事業で提案した「腰高伐採」により、過剰な竹の成長を抑えられることが確認できた。適正な竹の利用と健全な里山の回復のために重要な知見を得た。竹製品のコスト試算のために、国内での成功例を参考に竹素材の供給コストを試算した。竹の供給体制について、愛知県方式を提案した。

得られた竹の成形前処理に関する課題では、竹齢などに合わせて、フェノール樹脂含浸による重量増加率 $20 \pm 5\%$ を達成するためのアルカリ煮沸・予備圧縮など処理条件を見出した。目標としていた 160mm 長さの竹についても問題なく適用できることを確認した。

フェノール樹脂含浸竹から得られる成形体の音響特性向上のために、独自開発した「解繊前躯体」ならびに「複合化技術」に関してそれぞれ特許出願を行うとともに、それぞれ伝播速度 4815m/s、内部損失 0.08 の音響特性を示す竹成形体を得た。単独の数値でみるとそれぞれほぼ目標を達成したと判断できる。しかし、両特性を同時にクリアする振動板は事業期間内で得ることができていないが、特許出願技術を組み合わせるなどで、伝播速度と内部損失の両方が向上する振動板が得られる可能性を見出した。

金型に関する課題では、特許出願を行った表面処理ならびに薄肉成形品を得るための金型構造などを採用した $\phi 200\text{mm}$ 大型振動板成形用金型を作製し、プレスモーションを種々に調整した 3 種類の成形方式（前方押出し、後方押出し、解繊+前方押出し）の検討により $\phi 160\text{mm}$ の薄型竹振動板の成形に成功した。素材配置と成形方式の検討により、実際に成形した大型振動板に良好な音響特性を付与できることも確認しつつ、スピーカー振動板としての各種評価を実施し、キャビネットを含めて音の作り込みを行っている。生産性の向上のために、金型加熱・冷却用熱媒流路の加工の適所配置を行い、目標とする昇・降温 10 分/プレス以内を実現した。

上記大型スピーカー振動板ならびに製造装置開発と並行して、既に開発済みの小型スピーカー用振動板は関連会社での性能評価を実施中であるとともに、チヨダ工業ブランドでのスピーカーユニットのインターネット販売を決定した。木質流動成形および小型スピーカーユニットのアピール方法として、各種マスメディアへのアプローチを考えている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

山田満雄（チヨダ工業株式会社 TEL(0561)38-0005 FAX(0561)38-5191）

三木恒久（国立研究開発法人産業技術総合研究所 中部センター産学官連携推進室

TEL：052-736-7391 FAX：052-736-7403

chubu-counselors-ml@aist.go.jp）

第2章 本 論

【1. 素材検討課題：竹材の品質評価と成形・音響特性に優れた竹流動成形素材の開発】

【1－1】竹素材の品質評価および供給・流通ルート開発

（実施内容）音響特性に優れた竹成形スピーカー振動板を製造するうえで、音響特性も優れた原材料を選択するほうが望ましい。また、伐採時期による竹素材の物性の変化を把握し調整することによって、成形品の物性の安定化も図ることができる。このため、現場での竹素材の品質管理方法として図2に示す“タッピング法による動的ヤング率測定”に着目し、その方法の確立と影響を与える因子について検討する。その一方で、図 3 のように竹素材が安定的に供給できる体制について調査・検討し、効率的伐採方法の検証と伐採→割竹化→搬出のためのコスト試算を行う。

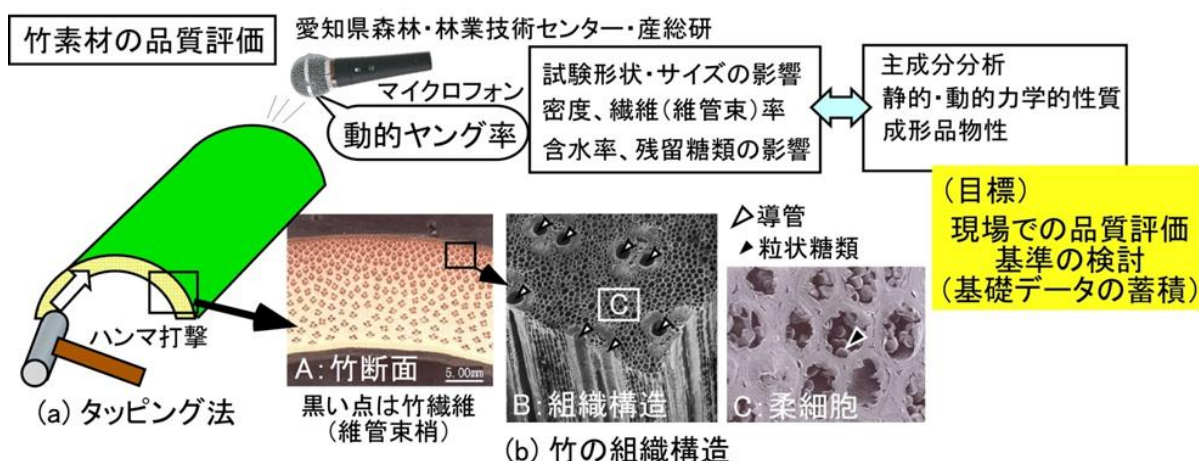


図2 竹素材の品質評価方法と目標

竹材の流通経路の開発（コスト調査） 愛知県森林・林業技術センター・名古屋木材・チヨダ工業



図3 供給体制・ルートの開発と放置竹林解消策

（成 果）

本事業初年度において、愛知県西尾市および豊橋市の両フィールドで腰高伐採と通常伐採（地際で伐る）試験区を各フィールドに設け、皆伐後翌年度以降の再生本数、再生量（体積）を比較した。2年半のモニタリングの結果、図4に示すように腰高伐採の試験区では、再生本数、再生量ともに大幅に減少した。このことは、伐採による放置竹林根絶に向けた伐採作業の省力化、低コスト化に繋がると考えられた。

試験地 西尾市 (面積 0.22ha)
豊橋市 (面積 0.12ha)

伐採法 腰高伐採 (約1mで高切り)

地際伐採 (通常の切り方) 伐採時期: 毎年1~2月

測定 皆伐後、次年度以降の再生本数、胸高直径、樹高

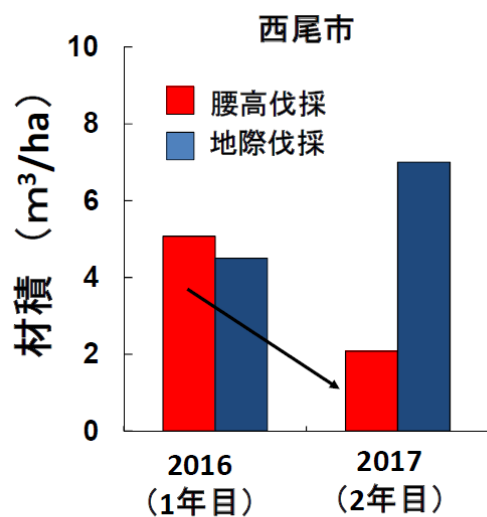
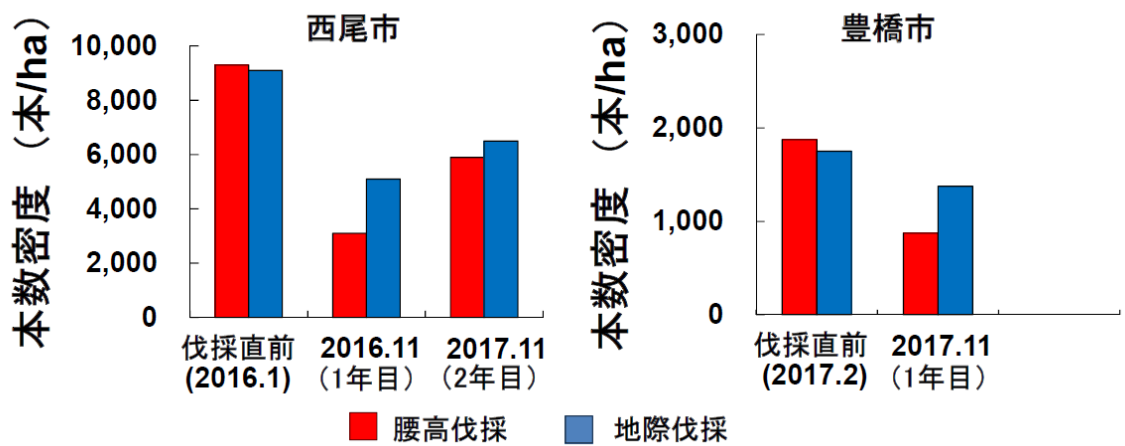
3回目伐採直前試験区の景観 (2018.2)



腰高伐採区

地際伐採区

一伐採前と再生タケの本数密度変化一



※ 材積は Suga et.al. (2011) の式による

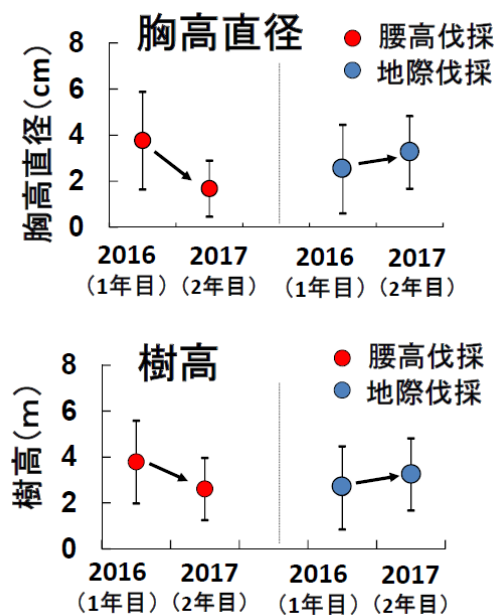


図4 腰高伐採による放置竹林解消の効果

次に、トラック進入が可能な路網のある西尾フィールドとトラックへの素材積み込みが可能な道路まで約 300m ある豊橋フィールドでの労働生産性を調査し、生産コスト、供給コストを試算した。その結果、西尾フィールドでは、労働生産性 1.3t/人日、豊橋フィールドでは 0.5t/人日であった。これらの労働生産性から得られた。生産コストは、人件費を 15,000 円/人日とすると、トラック進入路のある西尾フィールドは 18,100 円/t、豊橋フィールドは、48,500 円/t と試算された。さらに工場着の供給コストについては、西尾フィールド 25 円/kg、豊橋フィールド 56 円/kg となった。これについて、愛知県では、伐採・集積までを森と緑づくり税で全額補助している。この事業により上記の 2 フィールドが実施された場合の供給コストは、西尾 6 円/kg、豊橋 30 円/kg に抑制できることがわかった。

他県での供給コスト事例調査では、竹製品で成功実績のある高知県の竹ステアリングを生産している事業体での調査を行った。この場合、森林組合が事業体から要求される材質が得られる竹林を確保し、素材供給コスト大凡 25 円/kg で安定的に供給する仕組みとなっていた。また、タケノコ生産量全国一位の福岡県では、竹炭生産を実施する事業体を調査した。この場合、タケノコ生産者が竹林整備で発生した素材を工場に持ち込み、事業体がい取りする仕組みとなっている。供給コストは 6 円/kg であった（表 1）。このように既存の竹素材の供給・流通ルートがある地域では、供給コストが一定であり、安定的な供給体制が整備されていることを確認した。一方、愛知県（図 5）では、森林組合等を通じた供給ルートは構築できたが、年間を通じた素材の安定供給、供給コストの安定化など解決すべき仮題は多い。

表 1 供給コスト調査結果

県名	素材生産者 または 買い取り者	供給コスト	竹程 の条件	用途	備考
高知	森林組合	25 円/kg ※	2.2m 長 末口 110mm 以上、 厚み 9mm 以上	集成材 ステアリング	伐採・集積に約 36 万/ha 補助あり ※300 円/本で供給 12kg/本として計算
福岡	八女市 バンブーテクノ	6 円/kg	3m 長	竹炭生産	タケノコ生産者がバンブーテクノに持ち込み
愛知	森林組合	補助あり: 6~30 円/kg 補助なし: 25~56 円/kg	—	—	伐採・集積まで全額補助 生産性 0.5~1.3t/人日 人件費 15,000 円/人日として試算

愛知県での供給可能性

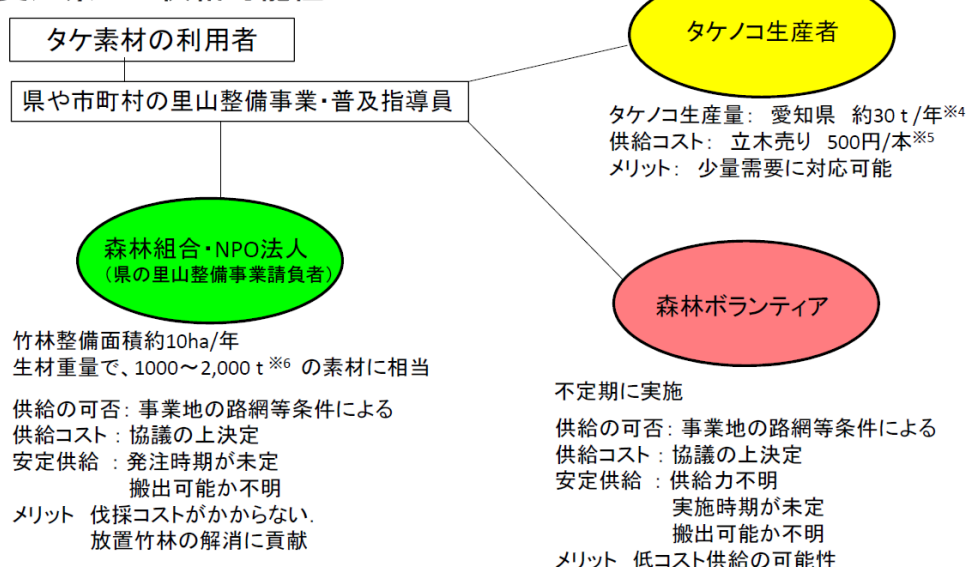


図 5 愛知県での竹素材の供給体制

立竹段階でヤング率の高い個体を選別する方法として、応力波伝播速度と縦振動法によるヤング率のデータベース群を得て、応力波伝播速度だけにより、第二四分位（中央値）以上の竹素材を得る採取効率を解析した（図6）その結果、混入率 5%[① / (①+②)]を許容する場合には採取効率は 1/5 となった（図7(a)）。さらに胸高直径で予め応力波伝播速度の測定対象を小さい胸高直径群に絞れば、その採取効率は 1/3 に向上することが明らかとなった（図7(b)）。このように地域産タケ材の応力波伝播速度と動的ヤング率の関係データベースを構築することで、立竹段階での高ヤング率の竹素材を効率的に得られることが示された。

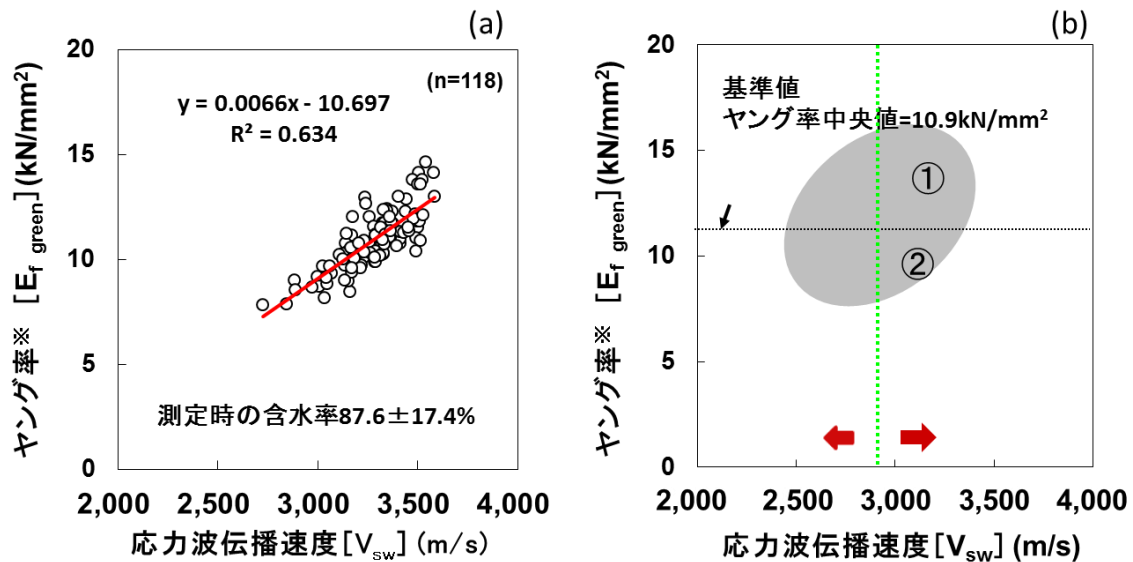


図6 (a)竹素材の応力波伝播速度とヤング率の関係データベース
(b)応力波伝播速度のみによる竹素材の仕分け模式図
仕分けられたヤング率基準以上の竹素材（①）と基準以下（②）の竹素材

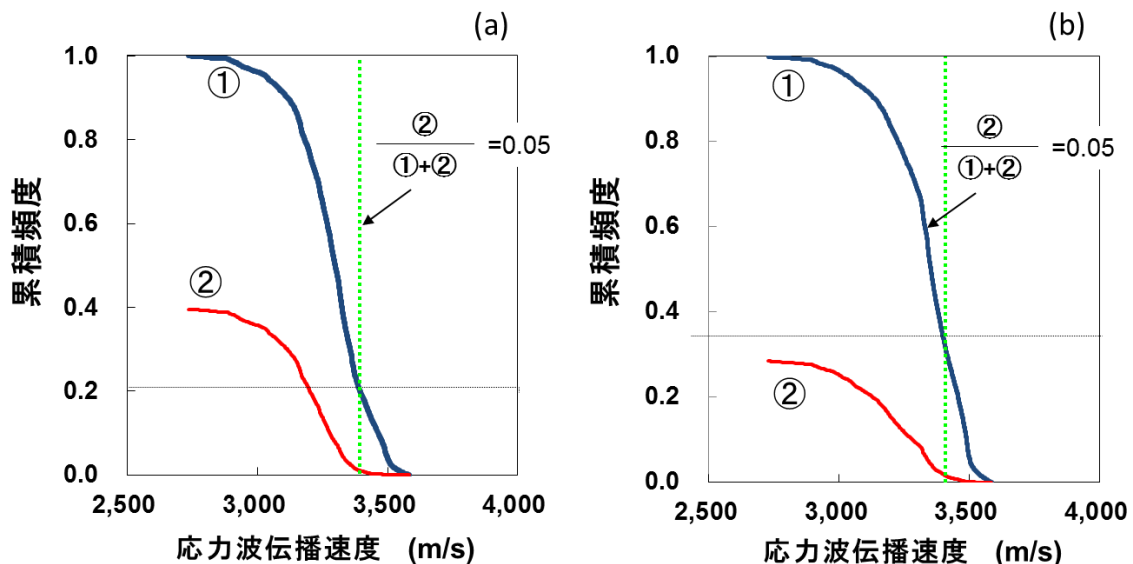


図7 応力波伝播速度のみから得られる基準以上の竹素材（①）と基準以下の竹素材の累積頻度
(a) 基準以下の竹素材（②）の混入率 5%を許容するとして得られた基準以上の竹素材の採取効率
(b) 図3(a)データベースのうち、胸高直径 113mm 以下のデータベースを構築して得られる基準値以上の竹素材の採取効率

現場評価での課題は、竹に含まれる含水率のバラツキにより生じる測定値の変化である。本検討では、図8のように音速（伝播速度）ならびに共振周波数（動的ヤング率）と含水率とが線形関係があることを見出し、現場で2条件の含水率における共振周波数を得ることによって、乾燥状態での値を推定できることを示した（図9）。

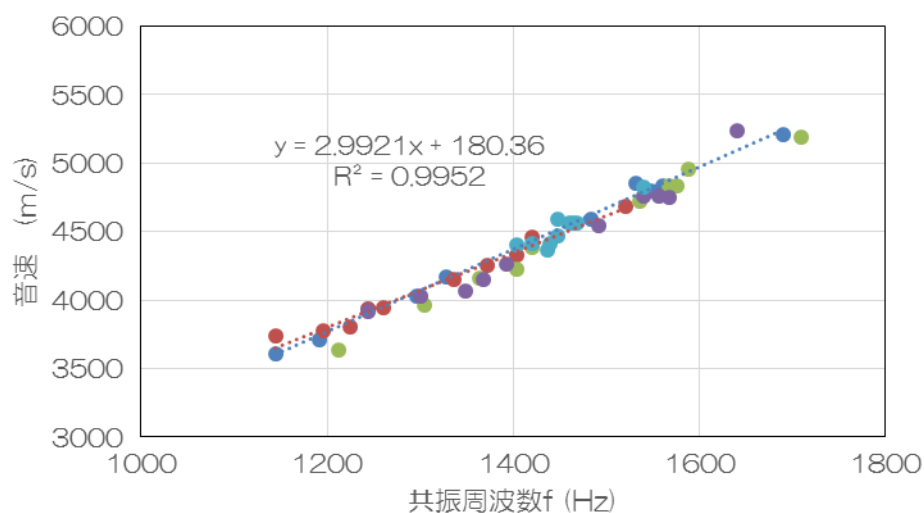


図8 ファコップから得られる音速と打撃法取得の固有振動数の関係

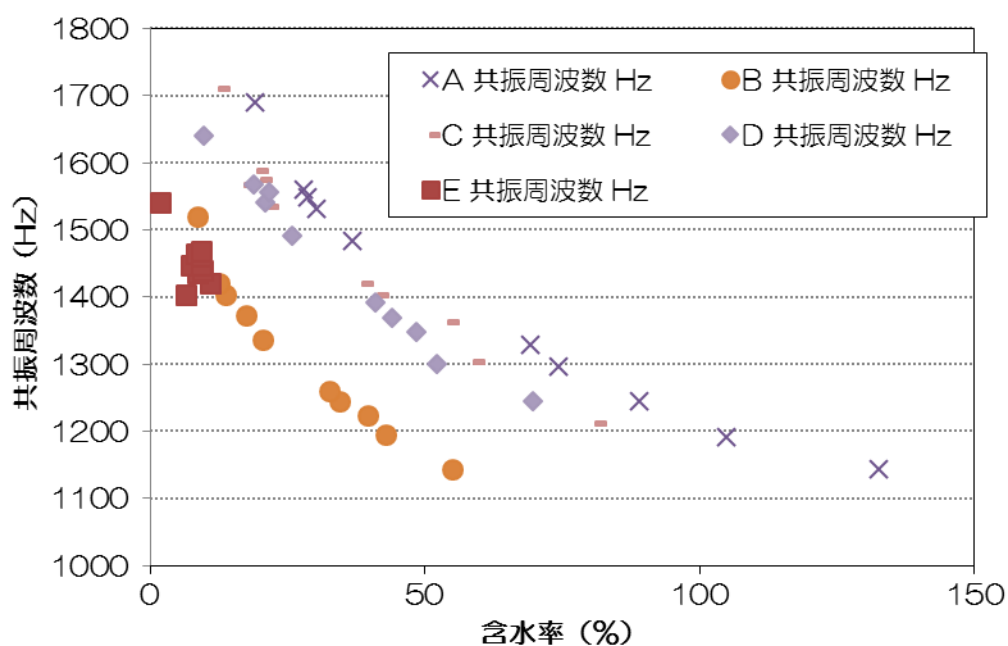


図9 共振周波数の含水率依存性

【1－2】成形性ならびに音響特性を満足する竹の樹脂含浸処理方法の開発

（実施内容）竹は図2の組織構造に示したように、竹繊維（維管束梢）で囲まれた導管のみが薬液の通導ルートとなり、断面のみからの液体流入に限られるため、難注入性（含浸性）材である。

また、繊維以外の柔細胞には、伐採時期によっては内部に粒状糖類（図中 C）を蓄えていることがあり、これが溶媒中に拡散することによって、熱硬化性樹脂（フェノール樹脂など）と反応し、良好な薬液含浸を阻害する。このため、良好な薬液含浸を行うためには、通導ルートを物理的に導入する予備圧縮や、煮沸や弱アルカリ処理による抽出成分除去処理が効果的な前処理と考えられる。第一段階として、図10に示すように小試験片において、抽出成分除去や予備圧縮の効果について実験的検討を行い、含浸ムラ（樹脂含浸による質量の分布や呈色反応で判断）を低減できる含浸条件について検討する。その後、実大の160mm（長さL方向）の竹を用いて、減圧・加圧スケジュールを検討し、含浸ムラが低減される条件と所要の含浸量を確保するための最速時間を導出する。

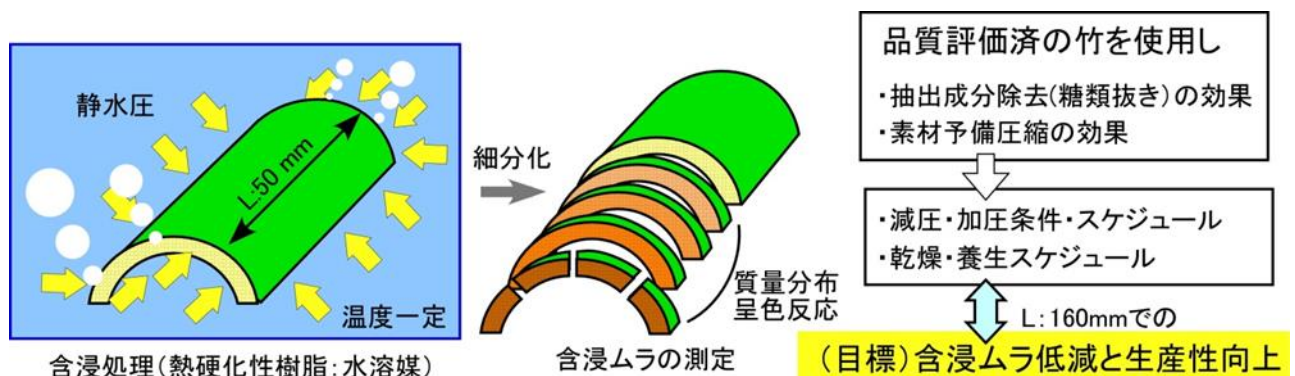


図10 含浸前処理検討による含浸性の向上

（成 果）

実証フィールド（西尾市）から採取した以下の竹を用いた検討を実施した。

- | | | |
|----------|--------------|-------|
| A（当年生） | ：L300、R5、T30 | × 6本 |
| B（不明） | ：L250、R7、T40 | × 12本 |
| C（竹かん上部） | ：L300、R5、T30 | × 9本 |
| D（不明） | ：L250、R5、T30 | × 12本 |
| E（枯死） | ：L300、R5、T40 | × 12本 |

以上の試料について、L160mm、接線方向20mmに調整し含浸前処理を施した。無処理Nを対照として、「水で6時間煮沸B」「0.1%NaOH水溶液で6時間煮沸A」「94MPa予備圧縮P+B処理」「P+A」の5条件を小試験片で実施した検討から選定・着目し、各前処理による樹脂含浸阻害を引き起こす糖分などの除去作用について、重量減少率を指標に検討した。その後、固形分濃度30%のフェノール樹脂水溶液を通常減圧・加圧方式で行った。重量増加率は、風乾したのち、35℃減圧乾燥し恒量になるまで乾燥した後の重量変化から算出することに加えて、L80mmまでを3分割して内部樹脂率の分布を調べた。

各試料における含浸前処理で生じた重量減少率の結果を図11に示す。水煮沸に比べてアルカリ煮沸処理が、未圧縮に比べて圧縮処理が重量減少率を大きくしており、糖類除去が効果的に進行した。竹材の種類に着目すると、当年生Aにおいて重量減少率がすべての処理条件で大きく発生している。これは当年生竹の特徴である低分子糖類（でんぷん）を多く含むためである。逆に、劣化（枯死）材でも分解の影響が生じたと考えられ、重量減少率は高い傾向にあった。

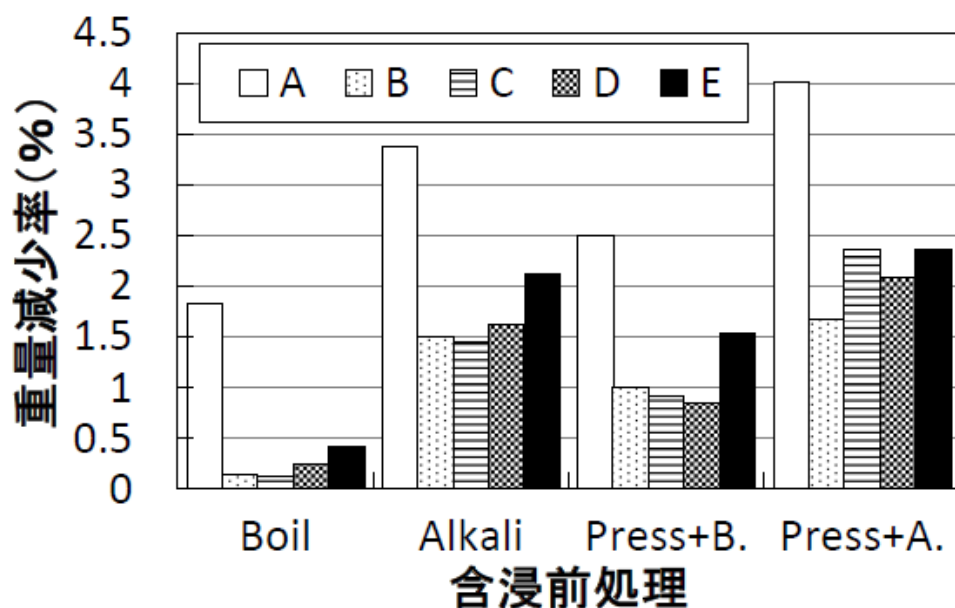


図1-1 含浸前処理による糖類など除去効果

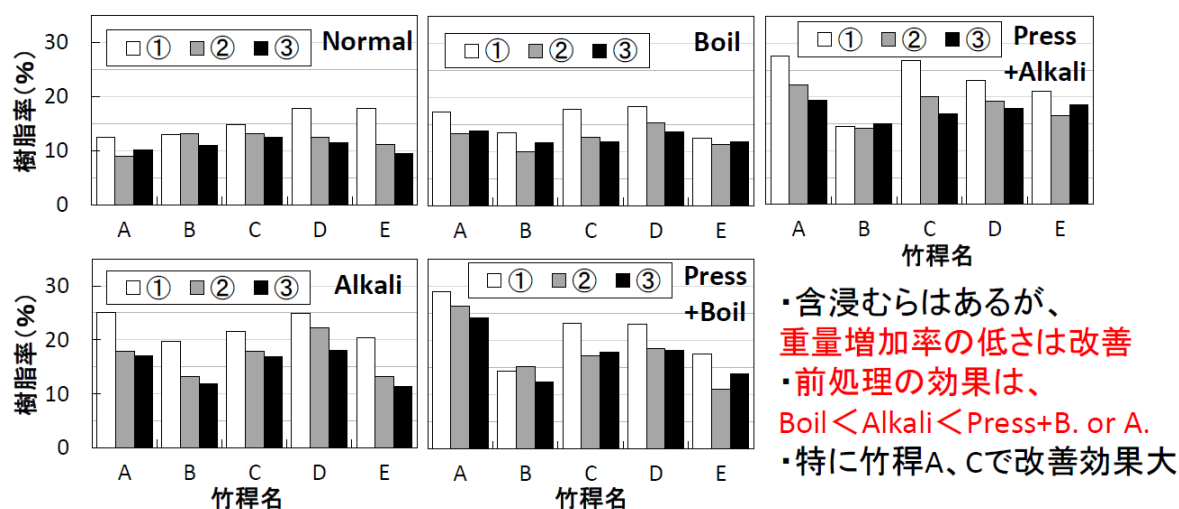


図1-2 含浸前処理を施した竹のフェノール樹脂含浸による重量増加率とその分布

図1-2に、各試料のフェノール樹脂含浸後の重量増加率の結果を示す。凡例①～③は L25mm に分割された含浸竹試料を示し、①が再端部、③は L160mm における中心部付近となる。竹材の端部ほど重量増加率（樹脂率）が大きく、中央部ほど小さい傾向は、いずれの試料においても確認された。前処理に着目すると、無処理と水煮沸処理の差は僅かであるが、アルカリ処理を施すことによって樹脂率は向上させることができた。更に、予備圧縮を併用することによって、より樹脂率の向上を図ることができた。アルカリ処理と予備圧縮を併用することによって、C～D の成竹材においても樹脂率とその分布を抑えられることができ、目標である重量増加率 $20 \pm 5\%$ を達成した。

未圧縮試料と圧縮試料の樹脂の含浸状態の違いを把握するために、試料の繊維方向の中央で分断し、フェノール樹脂を呈色させて樹脂の分布を評価した（図1-3）。未圧縮試料は、含浸前の断面写真と比較すると師管（維管束に囲まれた部分）の周辺が一部

呈色していた（(c)点線内）。維管束鞘は元々黒っぽく見えるため、呈色の判別は不可能。柔組織は全く染まっていなかった。

一方で、圧縮試料は処理によって導入された亀裂の周辺が染まっていた。特に、亀裂に沿った柔組織が染まっている部分が多くみられた。

フェノール樹脂の固形分濃度が低い水溶液を用いて、竹材の均一含浸を行うことのできる巨大ひずみ処理を考案し、特許出願を行った（特願 2017-102221）。これによって、より均質な成形体を得られることを確認した。

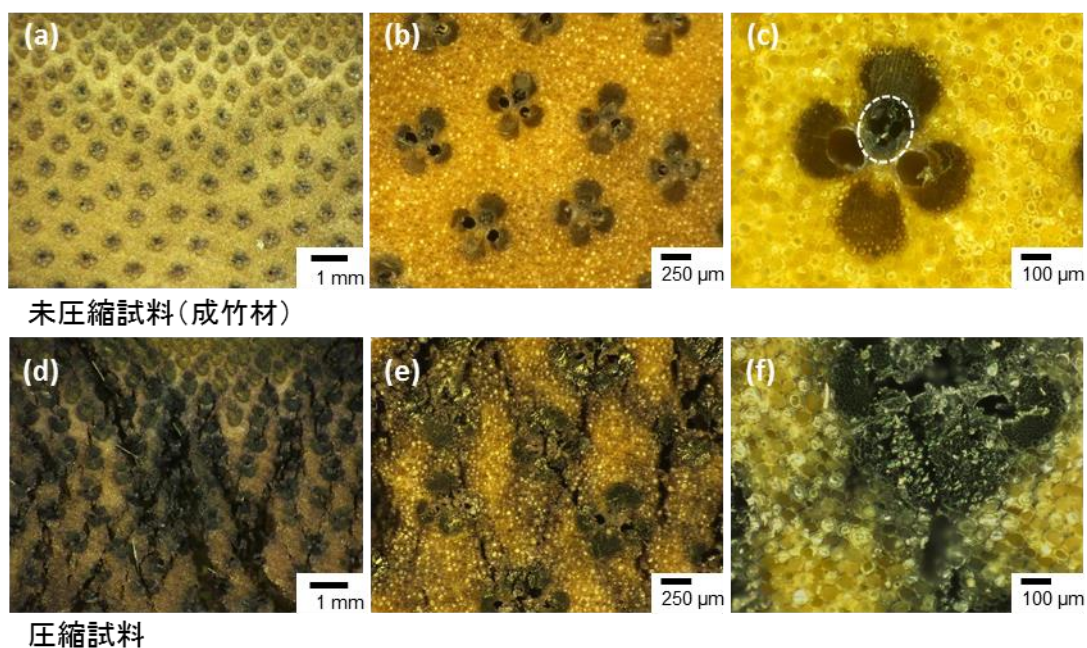


図 1 3 予備圧縮による竹組織変化とフェノール樹脂の存在状態（呈色反応）

【1－3】優れた音響特性・耐久性が得られる含浸竹の成形条件の検討

（実施内容）【1-2】で熱硬化性樹脂を含浸された竹について、熱分析を用いて軟化・硬化挙動を把握する（図14）。それらの挙動は、樹脂の種類や分子量、含浸量によって変化するため、各樹脂条件において軟化温度、硬化温度の導出を行う。同時に、軟化温度域での図中(a)の圧縮実験による含浸竹の変形挙動から、樹脂種類、含浸量、竹素材繊維率が及ぼす降伏変形抵抗への影響について把握する。これらの実験的検討を基にして、図中(b)の成形実験における温度条件の導出を行う。

成形実験では、流動時の面圧をコントロールできる型を作製し、複動プレスによる逐次圧縮法による薄板成形を行う。ここでの逐次圧縮法は、パンチ④とフランジ⑤の相対変位の制御により実施し、パンチ④により発生した圧縮面力が流動開始の応力に達すると、フランジ部⑤を戻し竹が側方へ押し出されつつも常に背圧が作用するようにコントロールされる。この面圧制御によって、単純圧縮法で生じる側方押出部の引張応力状態による欠陥発生低減と熔融樹脂による液体潤滑作用の持続によって、成形性が向上し、薄肉の成形体を得ることができる。まずは、矩形状小試験片への背圧制御成形実験を実施し、金型エレメント④⑤の相対変位制御による薄板化の効果、音響特性に及ぼす繊維配高度の影響、各種耐久性を実施し、性能評価を行う。目標を満足するために、成形前の竹の繊維の配置方向や含浸条件へのフィードバックも実施する。

（成果）図15に、フェノール樹脂含浸竹の熱分析（示差走査熱量分析 DSC）結果の一例を示す。採用したフェノール樹脂は低分子レゾールであり、重量平均分子量約400である。図から、竹に含浸されたフェノール樹脂は、1st 昇温において 100℃以上で発熱挙動が現れ、約 150℃付近にピークを示した。これが、樹脂の効果に伴う発熱現象であり、成形性や形状固定において重要な因子となるため、100～160℃の温度域において圧縮試験を行い、流動変形挙動を検討した。図16に、平坦工具で矩形断面に加工した含浸竹試料の圧縮荷重 F—ストローク s 線図の一例を示す。なお、潤滑剤の工具表面塗布の影響も検討した。圧縮過程において、試料の流動変形は荷重上昇過程での変曲点として現れる（図中▼）。潤滑剤を使用しない条件において、流動開始時の荷重 F は、工具温度 140℃付近で最小となった。この荷重が小さい条件が、金型に対する負荷や成形力を考慮した場合に望ましいこ

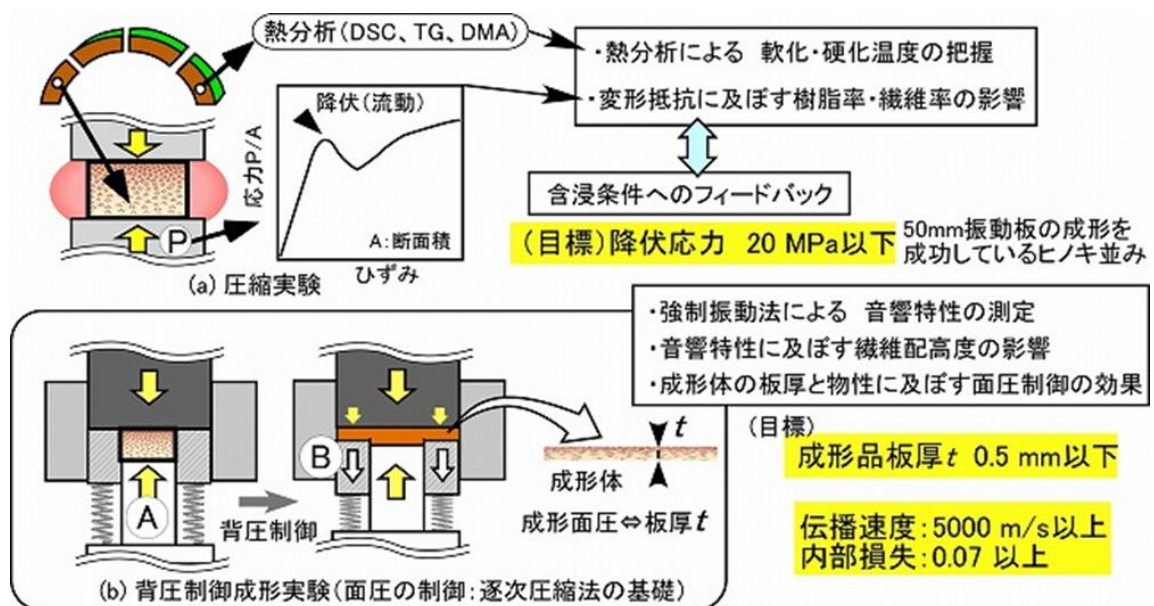


図14 優れた音響特性・耐久性が得られる成形条件の検討の概要

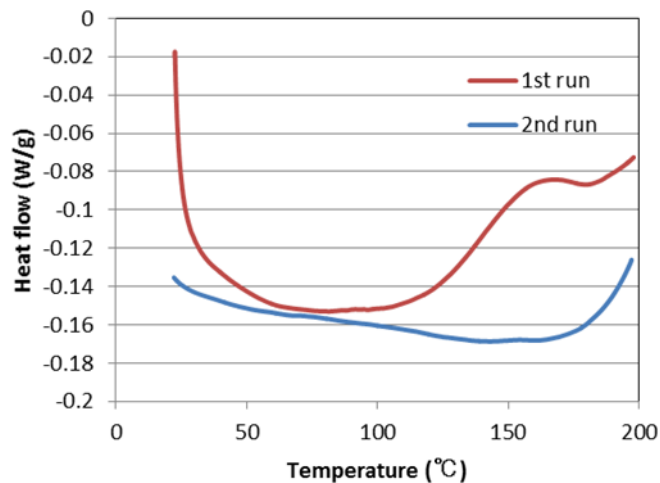


図 15 フェノール樹脂含浸竹の熱分析結果

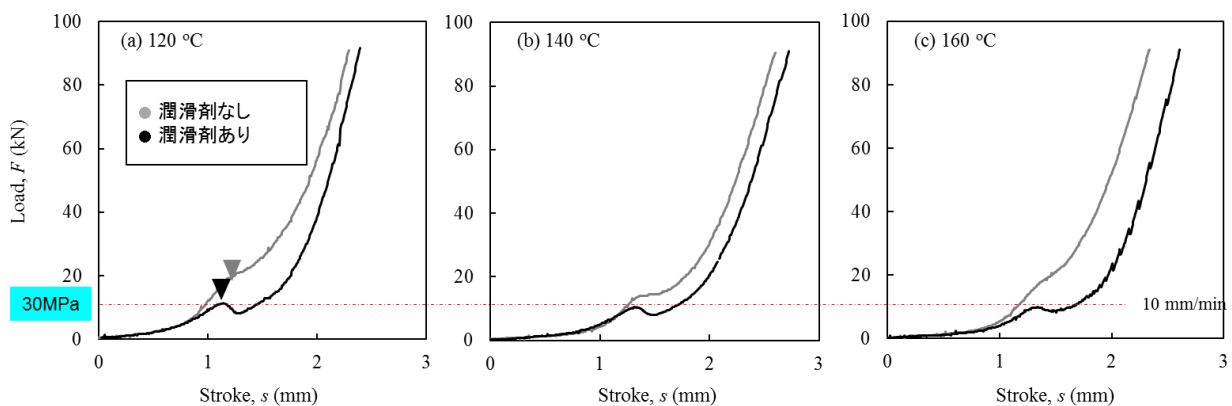


図 16 圧縮試験による含浸竹の流動変形挙動の評価

と判断されるため、潤滑剤が無い条件においては工具・金型温度の設定・管理は非常に重要であることが推察された。他方、潤滑剤を使用した場合、流動開始荷重のレベルおよび変動は小さく、流動開始後の荷重増加も低い。したがって、本事業で目指す大型の薄肉成形品の製造においては選定した潤滑剤の使用は必須と考えられる。

変形抵抗は約 30MPa であり、目標とする変形抵抗 20MPa まで軟化させるためには、更なる樹脂率の増加、もしくは、素材処理が必要であることが判明した。この原因として、含浸前処理として良い影響を与えていたアルカリ処理であるが、流動変形において潤滑作用をもたらす低分子糖類（ヘミセルロースなど）も除去することから、変形抵抗は大きくなってしまったことを明らかにした。含浸と成形を両立させる前処理が必要と判断するとともに、得られる製品の均質化を目的とした強ひずみ加工（前述）とその制御方法を考案した。これらを取りまとめて、特許出願が完了した（特願 2016-226616：木質流動成形用金型）。

本研究項目で得られた基礎的知見についての成果発表（日本木材学会中部支部）で、優秀発表賞を受賞するなど、外部からも高い評価を得た。また、竹齢による成分・構造変化を調べた結果が Journal of Biodiversity Management & Forestry にアクセプトされた。

振動板の素材には比弾性率が高く内部損失の大きいものが求められる。しかし、一般にこれらの特性はトレードオフの関係にあり、それぞれの特性を向上させながら最適なバランスをとることが重要になる。工業技術として生産が確立された紙・パルプは、これらの性能を比較的バランスよく満たし、現在最も広く利用されている。

一方で、紙に代わる新しい素材を振動板に採用することにより、さらなる高性能化を達成しようという研究が活発に行われてきた（図17）。1970年代から金属材料の採用が進み、アルミニウム、チタン、マグネシウム製の振動板が作製された。金属材料は薄くすることで軽量化でき、弾性率が高い反面、内部損失が小さいので固有振動が発生しやすい。このため、主に高音用ユニットへの利用に止まっている。1980年代からポリエステル、アラミド、ポリプロピレン、炭素繊維強化樹脂などの高分子系材料による振動板が開発され、主に中低音用ユニットに利用されている。絹などの繊維を構造基材にし、強度確保や物性改善を目的に高分子材料を含浸させた振動板も開発されている。スピーカーとしては、得意とする音域ごとにユニットを選択して、すべての周波数帯の音を再現できるように調整しており、ハイレゾに対応するスピーカーシステムも創出されつつある。

2000年代に入ると、紙の原料となる木や竹などの天然系素材が良質の音響特性を示すことが注目され、木材の薄板をスタート材にした振動板の開発や、竹から抽出した繊維束を紙に含有させた振動板が開発された。音響特性・音質は、紙と比べて優れていることが報告されているものの、製造過程が複雑でコスト高になること、良質の素材供給が必要となること、コーン形状振動板での性能のばらつきが生じたりするなど、製造工程や品質上の課題も多く、主流にはなっていない。

本研究開発で得られた振動板素材①～⑤は、伝播速度 4815m/s、内部損失 0.087 を個別に達成している状況であり、それらを複合化するべく素材改良・成形条件を検討している。伝播速度の更なる向上のため、複合化技術については、特許出願を行った。

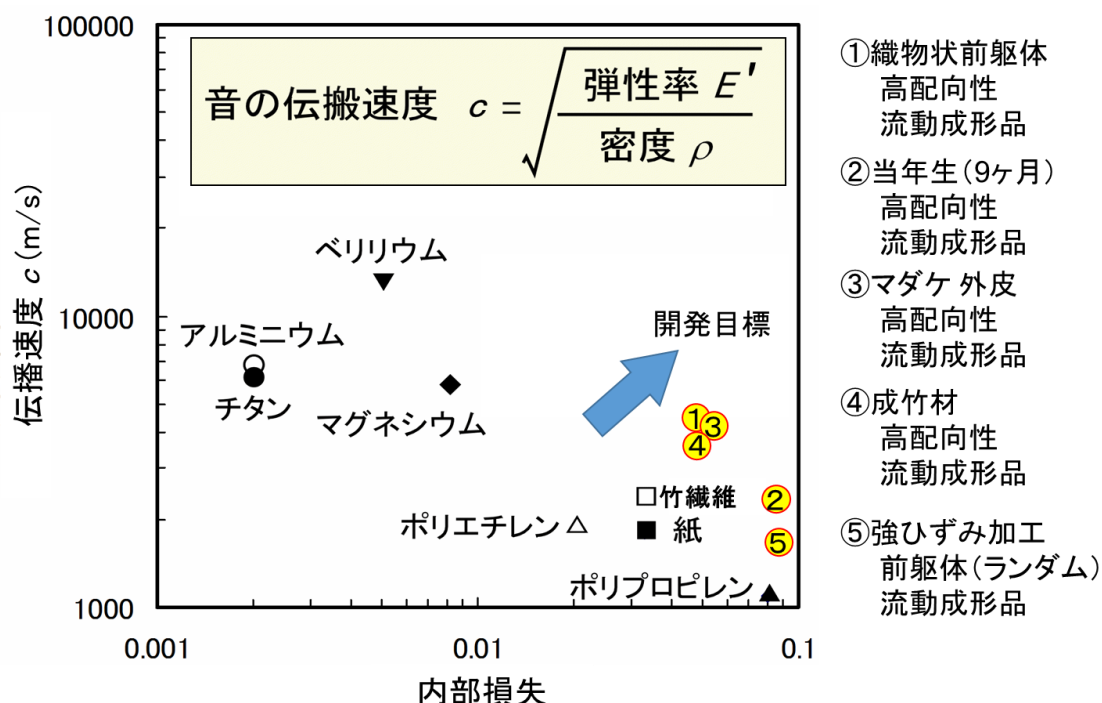


図17 開発品と既存振動板の比較

【2. 金型構造の開発】

【2-1】金型材質・表面改質条件の検討

（実施内容）表面処理条件（コーティング種、仕上げ面粗度）を変化させた平坦工具間での含浸竹の摺動実験（図18）から、加熱時の摩擦係数を測定し、目的を達成できる条件を選定する。選定した金型材質・表面処理を用いて【1-3】での圧縮実験・成形実験における変形能向上や荷重低減効果についても確認し、有効性を実証する。なお、鋼材 SKD11 の窒化クロムコーティングを施したものの基本条件とする（これまでのヒノキ材の検討で有効な条件である）。

（成果）

フェノール樹脂による重量増加率が 20%程度に含浸された竹と未含浸竹について、繊維方向ならびに繊維率の異なる素材条件下での摺動実験を行い、摩擦挙動を把握した。フェノール樹脂の存在によって、摩擦係数は、大凡 0.3→0.1 以下に低減でき、繊維率の影響も無視できるようになることがわかった。当所目標としていた、摩擦係数 0.05 以下となる条件が繊維直交摺動条件で獲得できた。また、これまでヒノキ材で実績のある、鋼材 SKD11 の窒化クロムコーティング・鏡面仕上げを施した工具条件が竹でも有効であることが確認できた。

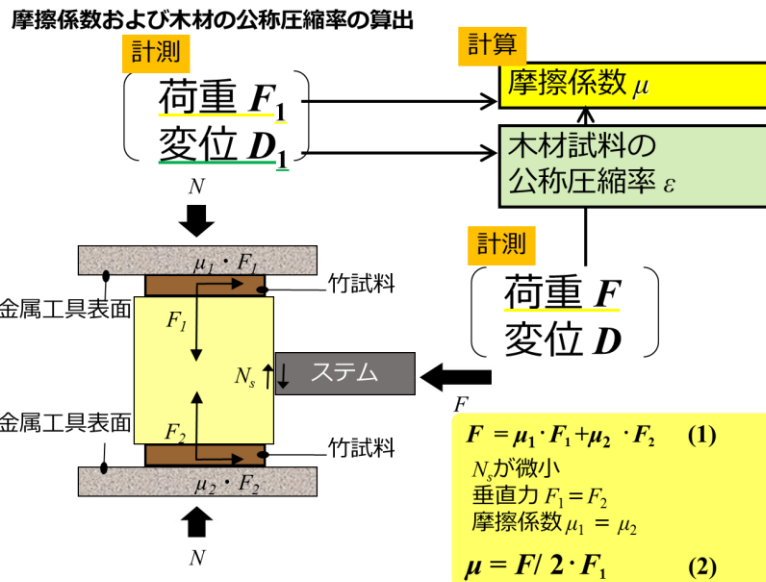


図18 摺動試験による摩擦係数の算出

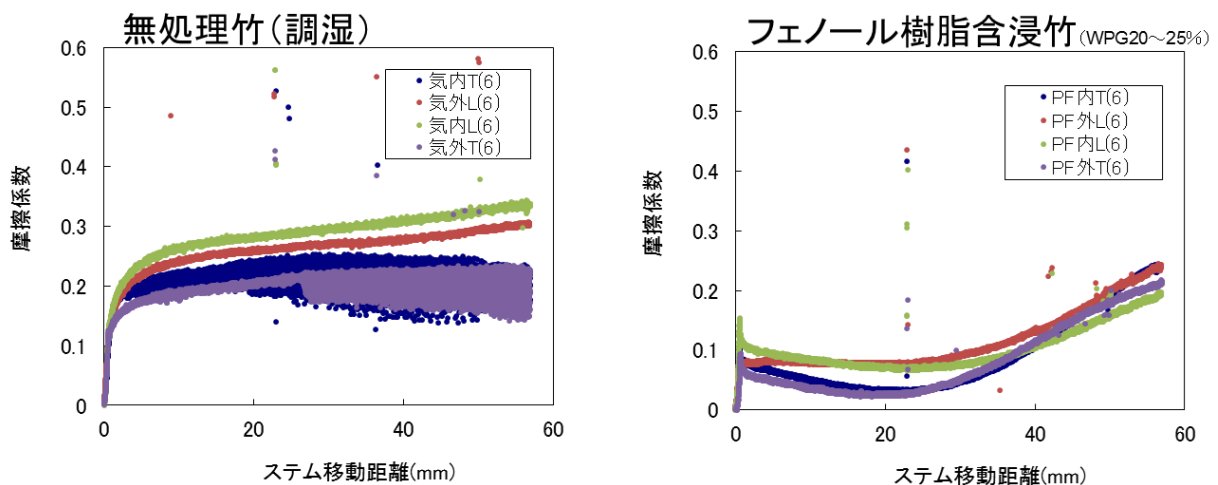


図19 無処理竹、フェノール樹脂含浸竹の摩擦係数の変化

【2-2】プレスモーションの検討

（実施内容）図20左(a)のように、①②③の相対変位、背圧制御するためのエレメント分割金型（キャビティ内径 200 mm程度）を作製し、【1-3】成形実験で得られた面圧制御を再現できるプレスモーションを大型複動油圧サーボプレス（導入予定）との連携で実現する。エレメント金型摺動部におけるクリアランスの調整など精密加工が要求される。最終的には、【3-1,2,3】との刷り合わせを行い、図20中程の(c)プレス・温度スケジュール設定が可能なシステムを確立する。

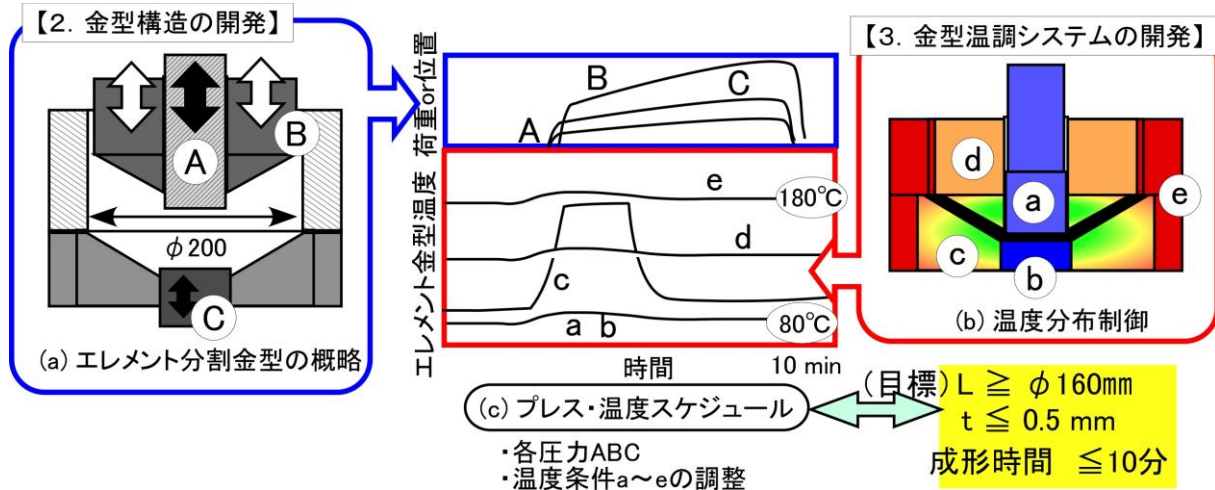


図20 金型システム開発の概要

（成果）図21に示す有限要素法によるシミュレーションを実施し、金型応力分布と型構造の検討を行った。竹と同程度の降伏応力であり均質な材料として純アルミニウムをモデル材料として、変形解析を行った。モーションは、後方押し出し方式を行ったところ、図22に示すように、素材（ブランク）と金型表面の摩擦係数によって成形の可否（薄肉化）が決まることがわかった。また、摩擦係数が過大となると金型破損に繋がることが予想された。

【応力・変形解析用モデル】

- モデル材質
金型：S45C、成形体：A1100
- 初期温度：25℃
- 周辺に対する熱伝達率：50 W/(m²・K)、固体に対する熱伝達率：20000 W/(m²・K)
- プレス速度：1mm/s

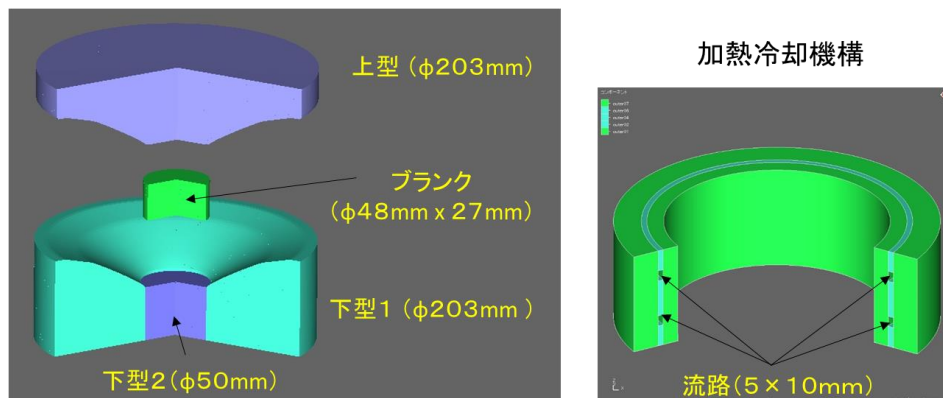


図21 変形シミュレーションモデルおよび加熱冷却機構図

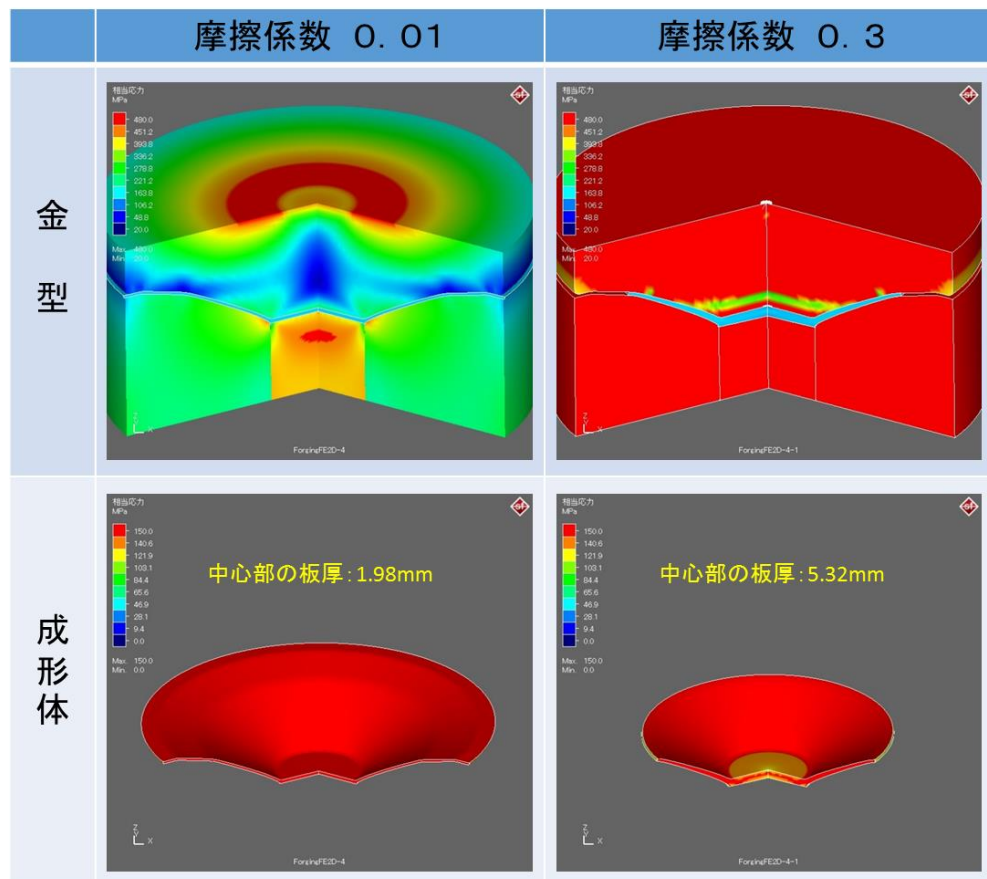


図2.2 モデル材料の薄肉化、金型応力分布に及ぼす摩擦係数の影響

このことは、【2-1】で検討した素材と工具表面での摩擦係数を可能な限り低下させることに加えて、成形方式や材料配置を適切かする必要があることを示唆している。

シミュレーションを元にして、前方押し、後方押し、単純圧縮における素材配置を検討した結果により、金型構造を決定した。さらに、スピーカーコーンの振動解析から振動特性の優れたスピーカーコーン形状（肉厚分布）を導出した。解析と実験結果のトライアンドエラーにより、図2.3に示す凹凸型の形状とそのモーションを導出した。

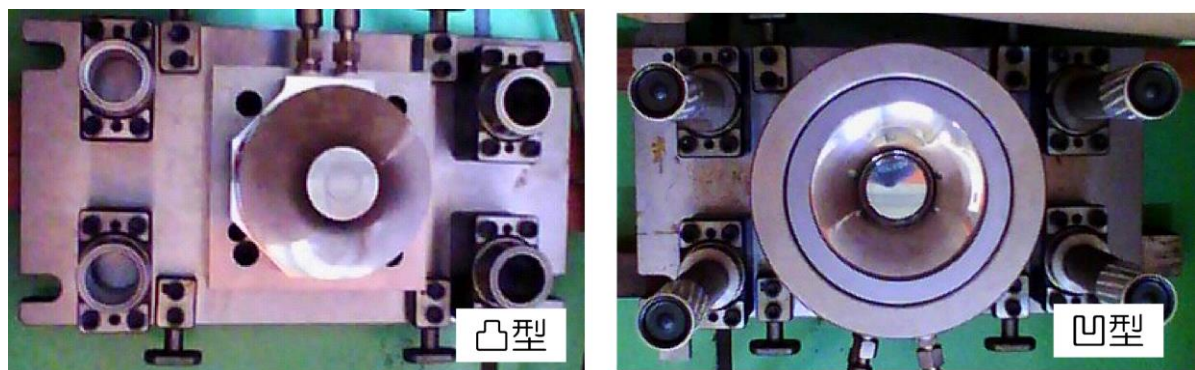


図2.3 スピーカーコーン成形金型の外観

【3. 金型温調システムの開発】

【3-1】セグメント金型の温度制御方法の検討

（実施内容）図20右(b)のように、セグメントに分割された金型部品①～⑤において、個々の温度設定が可能な断熱方法および温度制御方法を、熱伝導解析などの手段によって検討する。また、冷却管のサイズと配置が及ぼす金型強度低下について、FEM 解析を通じて検証し、適切な冷却管のサイズ・配置を検証し、金型作製に反映する。入力に対する温度出力について、個々の金型部品①～⑤の表面温度実測だけでなく、サーモグラフィなどによって分布も確認する。

（成 果）

作製上の簡便さ・コスト面の優位性から、図21に示すジャケットタイプの加熱・冷却機構をベースに熱伝導解析を行った。流路内に配置された熱源から熱の供給が行われる。実際にも温調器で加熱された水を用いる方式を採用した。解析結果によると、断熱材の使用は不可欠であり、適正配置を行うことが必要である。しかし、図21下部の昇温プロファイルから、熱源温度を高温に設定しておいても、型の目標温度 150℃を得るためには 10 分以上時間を必要とするため、本ジャケット方式では課題目標達成は困難であることが予想された。

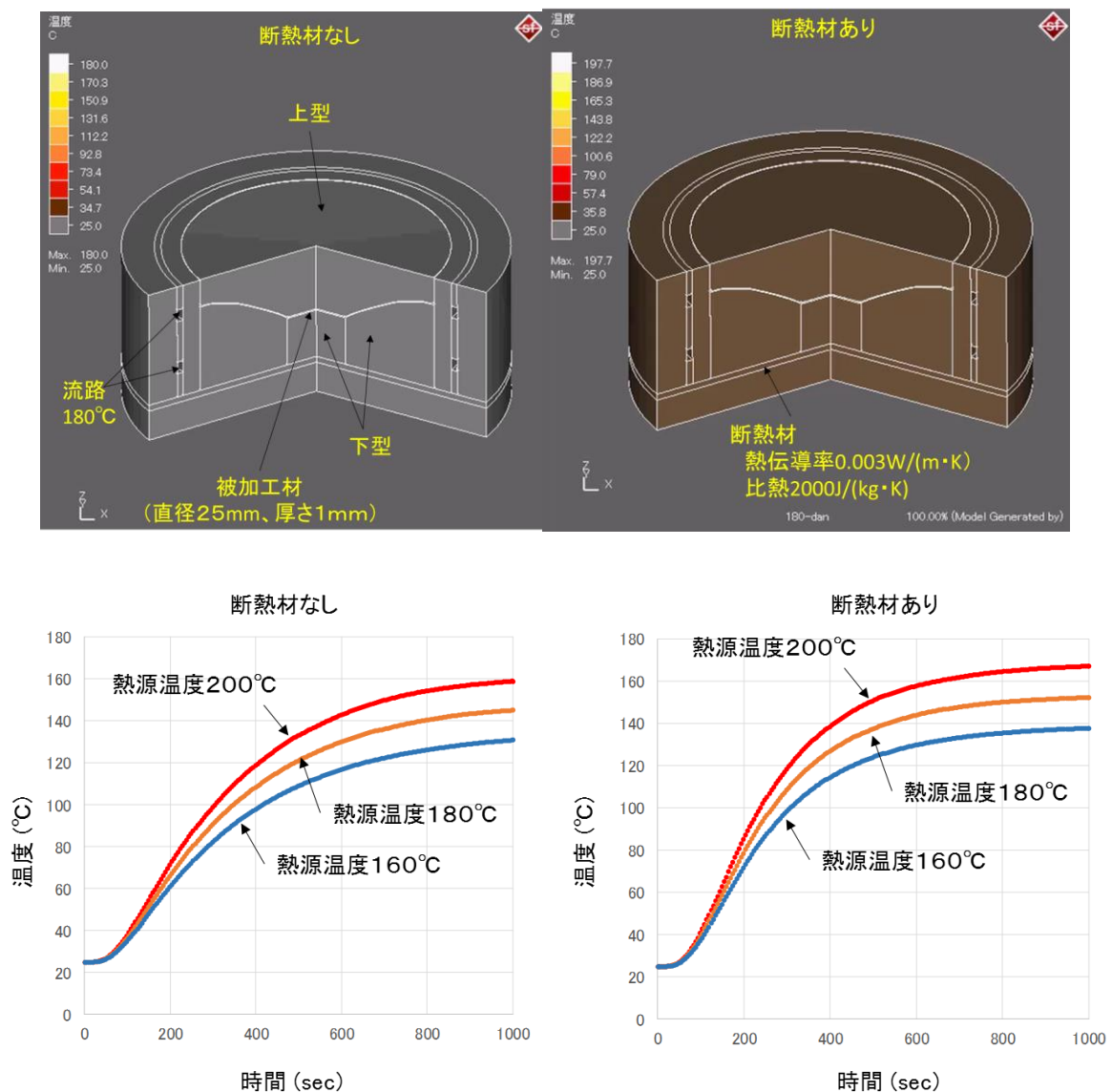


図24 スピーカーコーン成形金型の外観

【3－2】高速生産に向けた昇温、保持、降温パターンの検討

（実施内容）金型温調器との連動によって、目的の成形サイクルを実現できる金型構造条件について検討する。断熱部の調整ならびにプレスモーションとの刷り合わせを行い、図20中(c)のプレス温度スケジュールの設定が可能なシステムを確立する。

（成 果）

導入したプレス装置および金型温調機の種々の調整を行い、作製した金型にて昇降温が可能なシステムを構築した。ジャケット方式に比べて内部熱源流路の接触面積を増加させた新方式の加熱・冷却機構を金型に組み込みと同時に断熱材の適正配置を行った。サーモグラフィの結果を図25に示す。ジャケット方式による加熱・冷却に比べて、新方式においては、加熱開始5分までに目的温度 150℃を達成すると同時に、冷却過程では、わずか2分以内に 100℃以下の温度にまで容易に冷却ができるシステムを開発した。

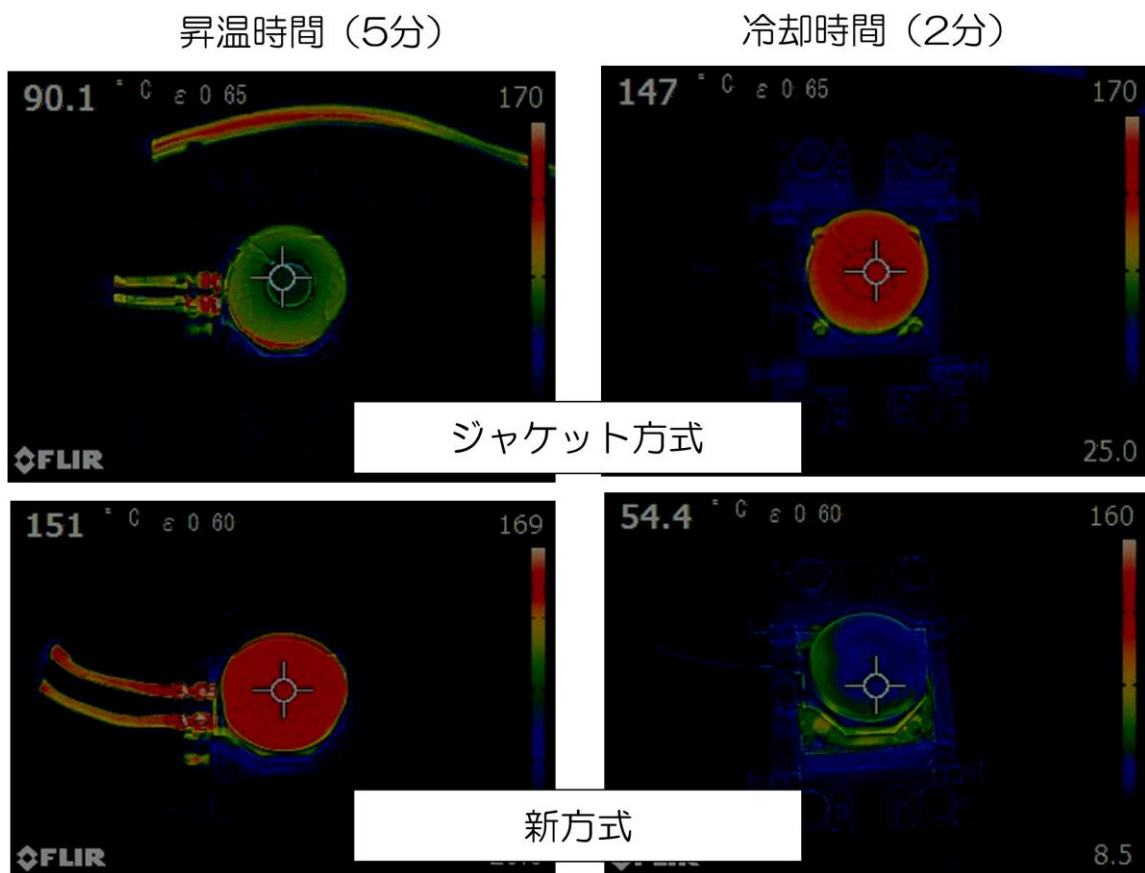


図25 加熱冷却機構の改良による急速加熱・冷却の実現

【3-3】大型成形品への対応

（実施内容）図20(c)のプレス・温度スケジュールと含浸竹の配置や繊維方向を変化させたプレス実験を行い、成形可能な条件を見出す。

（成果）

図26右上に金型モーション④⑤ならびに、素材配置（赤色）条件を模式化した。素材に対して、④⑤の荷重制御、位置制御とそのタイミングが重要なパラメーターである。その中で、3条件の主要な成形方式（前方押し、後方押し、解繊前駆体処理と後方押しを組み合わせた方式）を見出した。(c)～(e)に示すように、含浸竹を素材にして十分に充填・成形された成形品が得られた。また、目標とする薄肉厚も達成することができた。竹繊維の配向や繊維率などにより音質が変化するため、成形可能な条件の中において、含浸竹の条件を変化させた試作をトライできる状況になった。木材だけでなく竹を原料とした流動成形品を作製するための金型システムを確立するとともに、各種ノウハウを構築することができた。

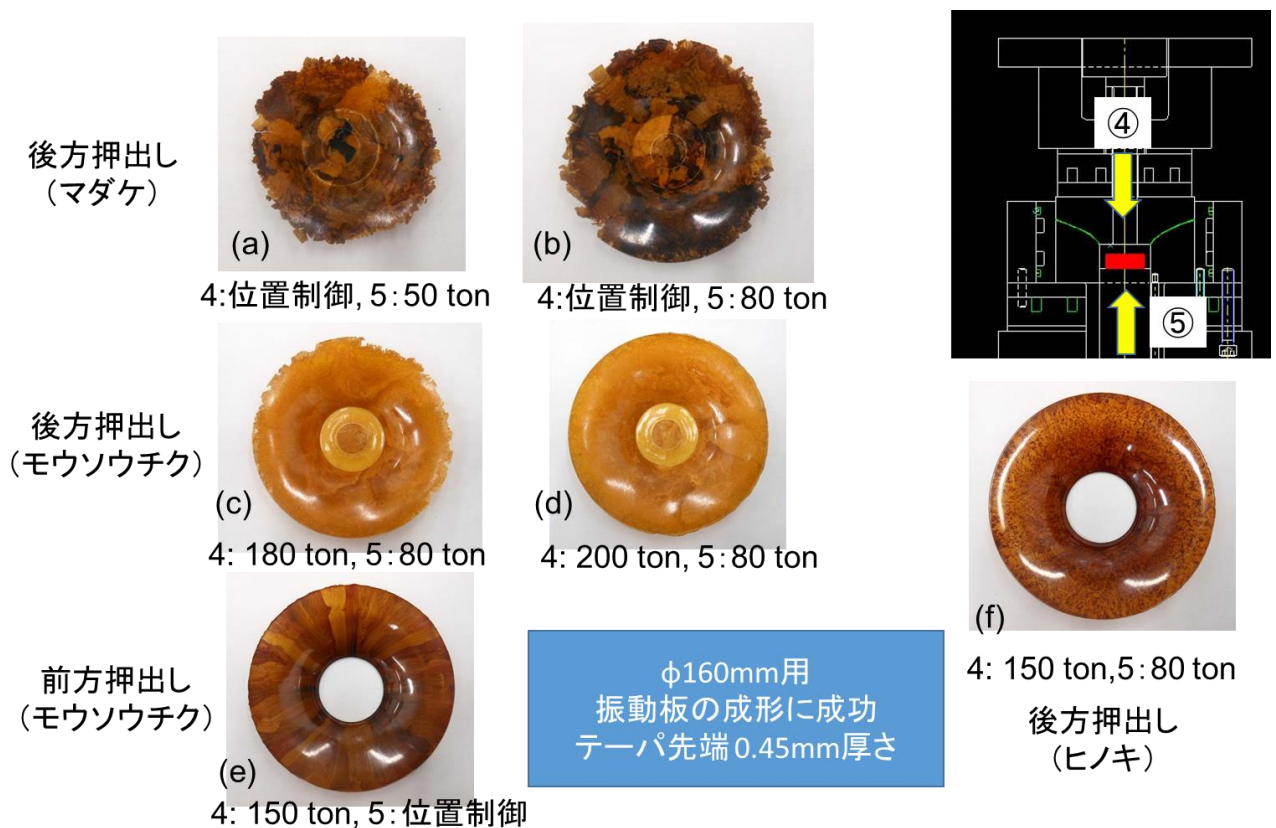


図26 φ160 mm成形品製造のための成形方式・条件・素材条件の検討

【4. スピーカーコーン振動板の性能評価】

【4-1】スピーカーコーンの音響特性評価】

（実施内容）外部研究機関での無響室依頼試験に際して周波数特性を評価する。測定結果に及ぼす素材や製造条件の影響について、総合的に検討し、上記項目へのフィードバックを行う。

（成果）

【3-3】で得られた $\phi 160\text{mm}$ 薄肉流動成形スピーカーコーンを用いてスピーカーユニットを試作するとともに、その定量・定性評価のための大容量キャビネットを準備した（図27(a)）。そのスピーカーシステムを用いた音質評価を実施し、(b)に示すような周波数特性を取得している。対照として、(c)200 mmフルレンジのロングセラー品である LE8T（JBL 社）との比較検討を行っている。また、スピーカーユニットの音質を忠実に評価するために平面バッフル形式による評価も実施した。得られた音質については、有識者を含めた総合的評価を行っている。

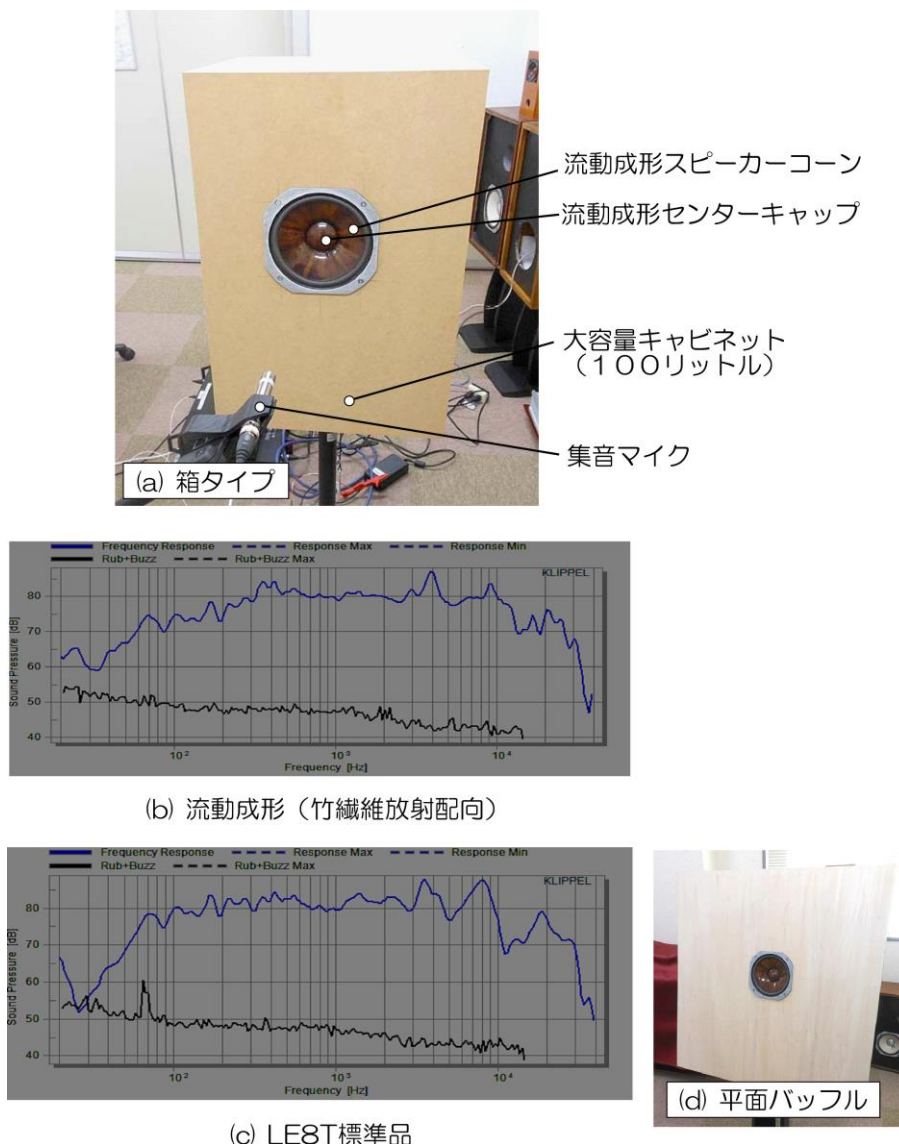


図27 $\phi 160\text{ mm}$ 成形品の音質評価

【4－2】スピーカーコーンの聴感評価とハイレゾ基準クリア

（実施内容）アドバイザーへの協力を仰ぎ、ハイレゾ基準をクリアするべく課題を精査する。アドバイザーが採用している駆動方式・部品を用いて、本研究開発品（竹流動成形振動板）の優位性を見出すことが目的である。

（成果）

スピーカーを販売する企業への小型振動板の評価を依頼し、良好な結果を得た。その企業を通じた事業化（製品化）を進めるとともに、大型スピーカーの事業化前に、市場調査、宣伝を兼ねて小型スピーカーシステムをチヨダ工業が独自に製品化するための検討も開始した。特に、振動板だけでなくキャビネットを含めた総合的な判断を実施している。そのほか、各種イベントへの参加、クラウドファンディング等を使ったPR機会を増やす予定である。

最終章 全体総括

各参画機関での課題に対する個々の検討結果とそれらの刷り合わせ検討によって、良好な研究成果が得られている。また、開発技術・製品の普及・宣伝活動により、ニッチではあるが音響マニアの間での認知度も上がってきている。

素材供給・品質に関する課題では、本事業で確保した愛知県内竹伐採実証フィールドで採取した竹について、現場で迅速に品質評価するための方法（動的弾性率、音速、密度、含水率などの測定方法）を確立した。その一方で、実証フィールドで見られる放置竹林被害の解消のために、本事業で提案した「腰高伐採」により、過剰な竹の成長を抑えられることが確認できた。適正な竹の利用と健全な里山の回復のために重要な知見を得た。竹製品のコスト試算のために、国内での成功例を参考に竹素材の供給コストを試算した。竹の供給体制について、愛知県方式を提案した。

得られた竹の成形前処理に関する課題では、竹齢などに合わせて、フェノール樹脂含浸による重量増加率 $20 \pm 5\%$ を達成するためのアルカリ煮沸・予備圧縮など処理条件を見出した。目標としていた 160mm 長さの竹についても問題なく適用できることを確認した。

フェノール樹脂含浸竹から得られる成形体の音響特性向上のために、独自開発した「解繊前躯体」ならびに「複合化技術」に関してそれぞれ特許出願を行うとともに、それぞれ伝播速度 4815m/s、内部損失 0.08 の音響特性を示す竹成形体を得た。単独の数値で見るとそれぞれほぼ目標を達成したと判断できる。しかし、両特性を同時にクリアする振動板は事業期間内で得ることができていないが、特許出願技術を組み合わせるなどで、伝播速度と内部損失の両方が向上する振動板が得られる可能性を見出した。

金型に関する課題では、特許出願を行った表面処理ならびに薄肉成形品を得るための金型構造などを採用した $\phi 200\text{mm}$ 大型振動板成形用金型を作製し、プレスモーションを種々に調整した 3 種類の成形方式（前方押出し、後方押出し、解繊+前方押出し）の検討により $\phi 160\text{mm}$ の薄型竹振動板の成形に成功した。素材配置と成形方式の検討により、実際に成形した大型振動板に良好な音響特性を付与できることも確認しつつ、スピーカー振動板としての各種評価を実施し、キャビネットを含めて音の作り込みを行っている。生産性の向上のために、金型加熱・冷却用熱媒流路の加工の適所配置を行い、目標とする昇・降温 10 分/プレス以内を実現した。

総括研究代表機関であるチヨダ工業では試作機も完成しており、今後アドバイザーである関係企業と連携しながら、試作機をオーディオショップに置いてショップ店員やお客様の生の声を拾い上げるとともに、展示会等に出展して客観的に評価していただけるオーディオ評論家の意見を収集していく。

また、本技術におけるスピーカー以外への事業展開として、自動車内装品・文具・食器・楽器等、これまで技術的・コスト的要因から木質材料での製品化を断念していたプラスチック部品製造メーカー等の業界に対し、本事業参画機関からも情報を収集した上、木質流動成形装置の販売や新商品の事業化提案ができるよう合せて検討していく。