

# 技術科教員養成における木材加工技術修得のための ホーン型スピーカー教材の提案

鈴木 健文\*・松本 金矢\*\*・中西 康雅\*\*

Development of Wood Working Teaching Materials  
about Horn Type Speaker for Technology Teacher-training

Yoshifumi SUZUKI\*, Kin'ya MATSUMOTO\*\* and Yasumasa NAKANISHI\*\*

## 要 旨

技術・家庭科技術教育分野の教員養成において、木材加工技術の指導力として手加工だけでなく機械加工技術に関する内容を修得させる必要があり、そのための教材としてスマートフォン用ホーン型スピーカーを提案する。教材開発のための手法として、音響伝達特性を予測する音響特性解析プログラムを開発した。開発したプログラムの有効性を検証するため、ホーン型スピーカーを製作し音響特性測定実験を行い、解析結果と比較した。また、教材として用いるスマートフォン用ホーン型スピーカーを設計し、製作に必要な機械加工工程を明らかにするとともに、音響測定実験により特性を明らかにした。

キーワード：教材開発、木材加工、ホーン型スピーカー、音響解析、周波数応答関数、音響測定

## 1. はじめに

1998 年に教育職員免許法が改正され、中学校教諭普通免許に必要とされる教科に関する科目が一種 40 単位から 20 単位に、二種 20 単位から 10 単位に削減されたため、教科専門科目の大幅な縮小を余儀なくされ、三重大大学教育学部技術教育コースでは木材加工における機械加工技術に関する内容は取り扱うことができなくなった。折しも 2004 年に国立大学が法人化された結果、大学が一つの事業所として取り扱われ、加工機械等の管理に対して労働安全衛生法が適用されることになったため、専門管理者の不在から木材加工のための大型加工機械を維持することができなくなりそれらを廃棄したことも、木材加工実習から機械加工技術の内容を削除した大きな要因の一つである。

一方、日本産業技術教育学会では、中央教育審議会の教員の資質能力向上特別部会の検討内容を踏まえ、2005 年度より中学校技術科教員養成においてどのような教科内容を修得させるべきであるかをまとめ、「技術科教員養成修得基準」<sup>1)</sup>を發表し、学習指導要領の改訂に合わせて見直しを行っている。これによると、木材加工分野の木製品の設計・製作において、手加工に加え機械加工の内容を指定している。具体的には、

糸のこ盤や丸のこ盤、角のみ盤、ボール盤に加え、手押しかな盤や自動かな盤などが取り上げられている。

学校現場での木材加工において、これら機械加工を取り入れた実践はほとんど行われていないのが現状であるが、指導者である教員には、これらの加工技術が求められている。実践に用いる手加工用木材を準備するための事前加工や教材研究、加工ジグの製作など、機械加工が必要な場面は少なからず存在するためである。したがって、木材加工実習において、学校現場にも導入されている小型の木材加工機械を用いた加工に関する技術を修得させる必要があり、それらを学ぶための新たな教材を開発することが求められている。

本研究では、機械加工技術を修得させるための教材として、スマートフォン用のホーン形パッシブスピーカーを提案する。これは、携帯プレーヤーの小型スピーカーの前に取り付けるホーンを、集成材等の板材を機械加工することで製作するものであり、音圧と周波数特性を改善するためのものである。スマートフォン用スピーカーに関しては、鄭ら<sup>2)</sup>が薄板の曲げ木を利用した教材を開発しており、その音響特性を正弦波加振による音圧測定により評価しているが、形状と音圧の関係を設計時に予測するためには、音響シミュレーションが不可欠であると思われる。

\* 三重大大学大学院教育学研究科

\*\* 三重大大学教育学部

そこで有限要素法音圧解析プログラムを開発し、設計時の音響特性シミュレーションを行うとともに、製作後には音圧特性測定実験を組み入れた複合教材とする。

## 2. ホーン型スピーカーの音響特性

### 2.1 エクスポネンシャルホーンの遮断周波数

ホーンのうちでよく使われるものは、エクスポネンシャルホーンであり、断面積が

$$S(x) = S_0 e^{mx} \quad (1)$$

で表されるような指数関数的変化をするものである。

ここで  $S_0$  はホーンの音源部の断面積、 $m$  はホーンの断面積の変化の程度を表す定数で拡がり係数と呼ばれる。

またエクスポネンシャルホーンの周波数特性は、急激に 0 に近づく点があり、拡がり係数  $m$  によって変化する。このときの周波数を遮断周波数  $f_c$  と呼び、エクスポネンシャルホーンの遮断周波数  $f_c$  は、音速  $c$  を用いて

$$f_c = \frac{mc}{4\pi} \quad (2)$$

で表すことができる。

### 2.2 有限要素法による音響特性シミュレーション

ホーン内部のような閉空間において調和励振を受け、線形で粘性を無視した圧縮性完全流体の運動方程式と連続の式はそれぞれ次式となる。

$$\text{grad } p = \rho \omega^2 U \quad (3)$$

$$p = -E \text{div} U \quad (4)$$

ここで、 $p$  は圧力、 $U$  は粒子変位ベクトルである。 $\omega$  は固有円振動数、 $\rho$  と  $E$  はそれぞれ空気密度と体積弾性率である。有限要素法における要素内の音圧  $p$  と節点の音圧  $p_e$  との関係を適当な形状関数  $N_i (i=1,2,\dots)$  を用いて次式のように近似する。

$$p = N^T p_e \quad (5)$$

$$N^T = \{N_1, N_2, N_3, \dots\} \quad (6)$$

これより、固有値問題は次式で表せる。

$$Mx = \omega^2 Kx \quad (7)$$

ここで、 $M$  はイナータンスマトリックス、 $K$  はエラストランスマトリックスであり、二次元問題では、次式で表すことができる。

$$M = \frac{1}{\rho} \iint \left( \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N^T}{\partial y} \right) dx dy \quad (8)$$

$$K = \frac{1}{E} \iint (NN^T) dx dy \quad (9)$$

また、室内の伝達関数を求めてホーン型スピーカーとの相互作用を求める。

固有円振動数  $\omega$  の点音源で励振された室内の伝達関数は次式で表される。

$$p_\omega(r) = iQ\omega\rho \sum \frac{p_n(r)p_n(r_0)}{K_n(k^2 - k_n^2)} \quad (10)$$

ここで、 $Q$  は体積速度、 $p_n$  は  $n$  次モードの音圧、 $K_n$  は定数、 $k = \omega/c$  である。また、 $k_n$  は複素数であるので、次のように表される。

$$k_n = \frac{\omega_n}{c} + i \frac{\delta_n}{c} \quad (11)$$

さらに、 $\delta_n \ll \omega_n$  を仮定すれば、次式のように変形できる。

$$p_\omega(r) = iQc^2\omega\rho \sum \frac{p_n(r)p_n(r_0)}{(\omega^2 - \omega_n^2 - 2i\delta_n\omega_n)K_n} \quad (12)$$

ここで、周波数を変数と考えると、この式は室内の 2 点  $r$  と  $r_0$  の伝達関数となっている。

### 2.3 ホーン型スピーカーの音響特性測定実験

音源部面積 2500mm<sup>2</sup>、開口面積 30000mm<sup>2</sup>、長さ 500mm、高さ 50mm のエクスポネンシャルホーンを製作し、ホーンを付けたときと付けていないときの比較を行った。

また、音響特性解析プログラムによる固有値解析および音響伝達特性の解析を行い、ホーンの測定結果と比較した。解析モデルは、実験を行った部屋全体をモデル化し、5m×3m の空間を 10000 要素に分割し、ホーンの音源部が接していない側面を音圧がゼロになるように拘束した。ホーン部の解析モデルを図 1 に示す。

図 2 にホーンなしとホーン有りの測定結果と解析結

果の音響伝達特性（ゲイン）を示す。ホーンなしの場合の想定結果とホーンありの場合の測定結果を比較すると、音圧レベルが 10dB 以上大きくなっており、低音の再生特性も向上していることがわかる。

解析結果と測定結果を比較すると、図 3 に示す 1 次の固有振動数の実測値は 162Hz、解析値は 152Hz であり、6.6%の誤差である。また、ホーンの 1 次以外のピークは部屋の共振モードであるが、それらの周波数も比較的近い値を示しているといえる。この結果から、音響解析モデルは、ホーン型スピーカーの固有振動数の推定に有効であると考えられる。

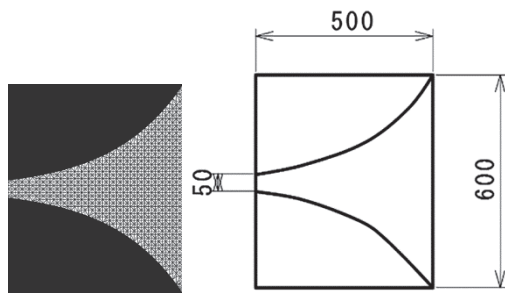


図 1 ホーン型スピーカーの音響解析モデル

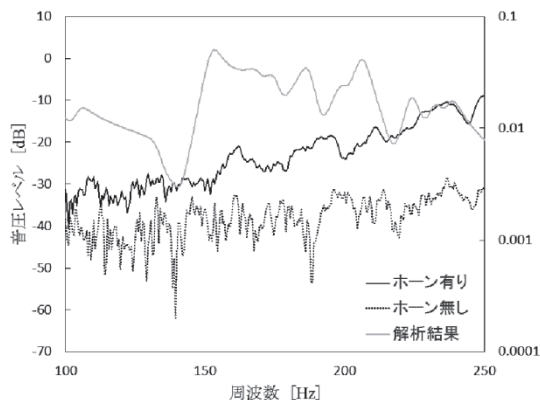


図 2 音響伝達特性の比較

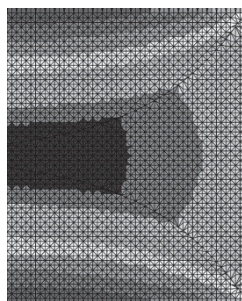


図 3 ホーン型スピーカーの 1 次モード

### 3. スマートフォン用ホーン型スピーカー教材の提案

#### 3.1 教材の設計

木材加工における機械加工技術を修得するための実習教材として、スマートフォン用ホーン型スピーカーを提案する。

近年は音楽観賞用にスマートフォンなどの携帯型音楽プレーヤーが用いられることが多く、従来の CD やラジオ放送を再生するためのオーディオ機器の利用は減少している。携帯型音楽プレーヤーは音響出力が小さく、出力機器として主にイヤープラグが利用されるが、内耳に対する負荷が大きく、長時間の使用による難聴などの障がいも懸念されている。携帯プレーヤーの外部出力端子を利用し、オーディオアンプで増幅することで、オーディオスピーカーから音を出力することも可能であるが、再生場所が特定されたり接続が面倒である等の理由で利用されることが少なく、そもそも一般家庭にそれらの再生装置が導入されていない場合も多い。スマートフォン等では、ほとんどの機種で再生用の外部スピーカーを搭載しているが、スピーカーの大きさが制限されるため、音圧レベルが低く、特に低音の再生能力が低いことが問題である。

ここで提案するホーン型スピーカーは、スマートフォンの外部スピーカーの音を改善するためのもので、ホーン型スピーカーにスマートフォンを差し込むことで外部スピーカーがホーンのドライバーとなり、再生音圧レベルを上げるとともに低音の再生能力を高めることを目的としている。大きさは可搬性を考慮してスマートフォンよりやや大きい程度とするが、前章で音響特性が音道の長さで開口部の面積によって変化することが明らかとなったため、音道を伸ばすことは困難であるので、開口部面積を大きくする工夫を取り入れる。すなわち音道を横方向に広げるだけでなく、厚肉の板材を用いることにより、上下方向にも音道を広げ、開口端面積を大きくする。

材料に松の集成材を取り入れ、木口を 45°で切断することで開口端の上下・左右方向のホーン形状を実現する。その際に、スライドソーあるいは昇降盤による傾斜切断を用いる。また、開口部のホーン形状はベルトサンダーを用いて研削する。さらに、スマートフォンを差し込む挿入口は、板材に角のみ盤を用いて加工する。これにより、機械加工法を習得することが出来る。

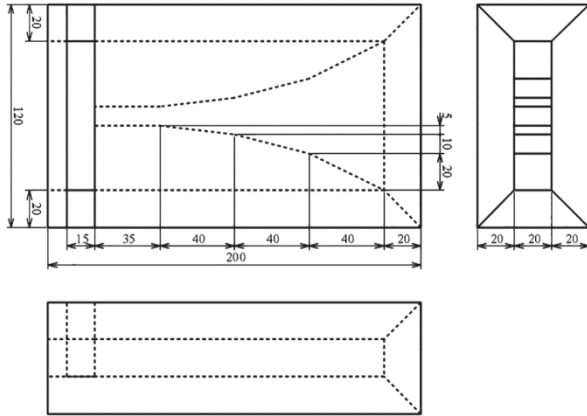


図4 スマートフォン用ホーン型スピーカー

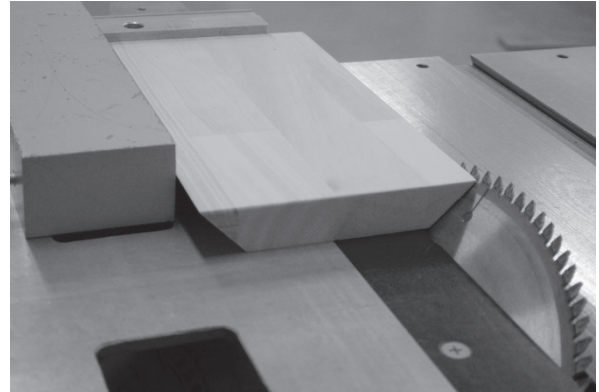


図6 昇降盤による傾斜切断

### 3.2 製作の詳細

ホーン型スピーカーを製作する手順を以下に説明する。

#### (1) けがき

松の集成材  $t20$  に、部品のけがきを行う。スライドソーや昇降盤などの機械加工による切断では、手加工によるのこぎり引きのような切断面のずれが生じないため、切りしろはほぼこの身の板厚分とすることが出来る。ただし、切断装置のストロークに限界があるため、部品取りをする材料を、1辺300mm程度の大きさに切断しておく。

#### (2) 切断・研削・穴あけ加工

スライドソーを用いて、けがいた切断線に沿って切断する。傾斜切断するには、スライドソーあるいは昇降盤の歯を必要な角度に傾斜させるが、この身のそりが発生することがあるため、角度に若干の誤差が生じる。そのため、 $45^\circ$  で切断して留め継ぎするためには、端部に隙間が出来ないように若干角度を小さくする。また、傾斜切断では、板の斜め方向に切断力が掛かるため、部材の固定に十分注意をする必要がある。

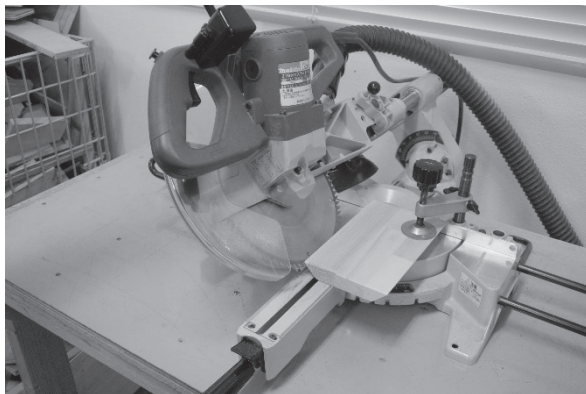


図5 スライドソーによるホーン部品の傾斜切断

#### (3) 研削によるホーン部の曲面の仕上げ

ベルトサンダーを用いて書き込んだカーブに沿って開口部を削る。常にベルト部と部品の研削部が平行になることを意識して行う。また、摩擦による引き込み力が大きいため、しっかりと部品を保持する必要がある。研削中は常に部品の傾きを変化させ、なめらかな曲面を構成するように注意する。

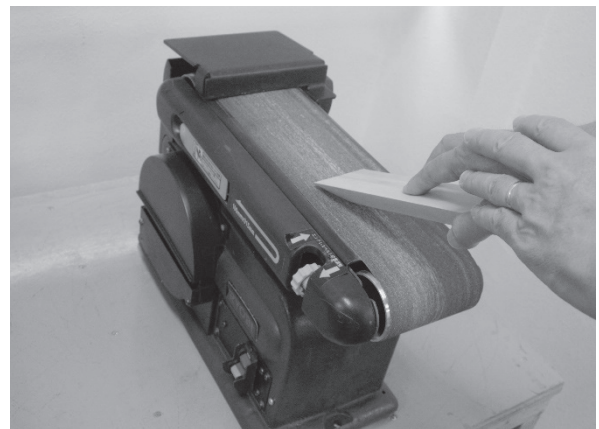


図7 ベルトサンダーによるホーン部の研削

#### (4) 穴あけ加工による差し込み口の製作

角のみ盤を用いて、携帯プレーヤーの差し込み口を作成する。けがき線に沿って角のみを当て、ゆっくりとほぞを切る。部品の下に捨て材を敷き、ほぞ下の開口部分の割れを防ぐ。



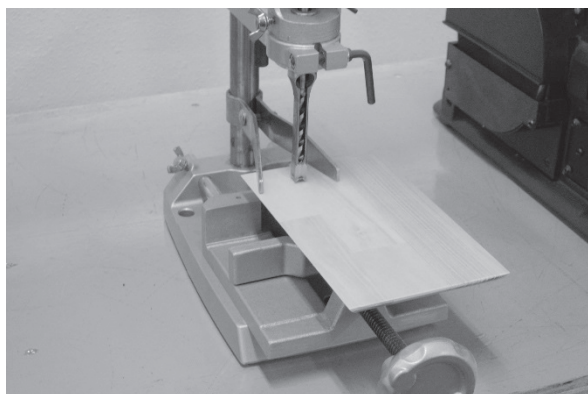


図8 角のみ盤による穴あけ加工

#### (5) 接着

接着面に木工用接着剤を塗布し、部材を組み合わせてビニールひもで縛る。留め継ぎとするため、一般的な端金による固定ではずれが生じやすいため、ひもで縛る方法をとる。ひもを結んだ段階では緩みが生じるため、ひもと部材との間にくさび状の木片を差し込み、強く締め付けるようにする。

#### (6) 塗装

松の集成材は、無垢材であるため、木目が美しく、無塗装で木目を活かすことも出来るが、汚れの染み込みを防ぐために、透明ニス塗る。底面は設置する家具等の表面との癒着を防ぐために塗装はしない。

図9に完成品を示す。



図9 完成したホーン型スピーカー

### 3.3 音響特性測定結果

製作したスマートフォン用ホーン型スピーカーを用いて、音響特性測定実験を行った。測定に用いたスマートフォンは、富士通製 ArrowsNXF-04G で、測定に用いたのはジャズの演奏を録音したもので、ピアノ・サックス・ドラム・ウッドベースで演奏されたものである。楽曲全体(3分40秒)の音響スペクトルを平均化した。

スマートフォンの外部スピーカーで再生したもの(ホーン無し)と、ホーン型スピーカーに挿入して再生したもの(ホーン有り)を比較した結果を図10に示す。これによると、ホーン型スピーカーによって音圧レベルが15dB以上上昇していることがわかる。

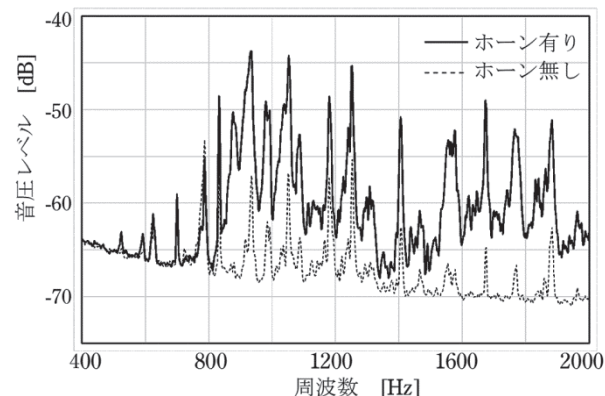


図10 音響スペクトルの比較

## 4. おわりに

技術科教員養成における木材加工分野の機械加工技術修得のための教材として、スマートフォン用ホーン型スピーカーを提案した。ホーン型スピーカーを設計するための音響特性解析プログラムを開発し、音響特性測定実験結果と解析結果の比較を行った。また、具体的なスマートフォン用ホーン型スピーカーを製作し、その音響特性を明らかにした。提案した教材は、機械加工の基礎技術を利用する教材として有効で、また音響特性を向上させることが明らかとなり、実用性も高いものであることがわかった。

### 参考文献

- 1) 技術科教員養成修得基準, 日本産業技術教育学会, (2011)
- 2) 大高裕輝・白井貴大・中村講介・鄭基浩, 薄板曲木を用いた音響教材の開発—ホーンの形状と音響特性の関係究明, 日本産業技術教育学会第32回東海支部大会講演論文集, pp.109-110
- 3) 西山静雄, 音響振動工学, pp.69-73
- 4) ハインリッヒ・クットルフ, 室内音響学—建築の響きとその理論—, pp.60-63