

研究題目	手作りハンドベルに関する基礎研究	報告書作成者	田中好一
研究従事者	田中好一、柴田洋一		
研究目的	<p>天使のハーモニーとも呼ばれる“ハンドベル”は、正式名をイングリッシュハンドベルといい、今から約400年前にイギリスの教会で聖歌隊が賛美歌とともに、ハンドベルを鳴らしたのが始まりと言われている。本格的な楽器として登場したのは、19世紀以降アメリカに渡ってからのことで、教会を中心に広まったようである¹⁾。</p> <p>また、日本にハンドベルが入って来たのは1960年代初頭で、本格的に演奏活動が始まったのは、宣教師M.I.ケリーがチームを結成した1970年と言われている。その後、1976年に日本ハンドベル連盟²⁾が結成され、現在では約600を超えるチームが活動を行っており、ハンドベルの音色は世界中の人々の心を魅了している。</p> <p>小山市では、ハンドベルを『小山ブランド』の一つとして定め、その普及に努めている。しかし、ハンドベルは国内のメーカーが殆んど無いため、もっぱら高価な輸入品(5オクターブセットで約300万円)を購入しなければならない。そこで、小山市では3セットを所有し、希望者に貸し出しており、本研究申請者が勤務する小山高専では、音楽の授業やハンドベル同好会が利用するとき、小山市から借用しているが、他の小中学校や市民サークルも順番を待っており、その利用状況は非常に厳しい状況である。</p> <p>また、ハンドベルは楽器としての性質上、高音域ほど小さな形状で、その重さは約200グラム、低音域になると大きくなり、約8キログラムにもなり、低音域のハンドベルを演奏するには、大きな力が必要となる。従って、ハンドベルを演奏するには、楽器本来の姿である『老若男女を問わず、みんなで楽器を演奏し、気軽に楽しむ』とすることがなかなか難しいことも事実である。</p> <p>このようなハンドベルの演奏に対し厳しい状況のもと地域社会からは、ハンドベルを開発したいという技術相談が小山高専にあり、本研究室では、ここ数年前から“安くて、軽く、取り扱いが簡単な高専生れのハンドベル”を合言葉に、オリジナルなハンドベルを作るための基礎研究を行ってきた。</p> <p>そこで本研究では、これまでの研究成果をもとに、ハンドベルの形状や材質を変えて実際に設計・製作し、設計するときに行う有限要素法によるハンドベルの振動解析結果と、実際に製作したハンドベルの音の周波数を測定し、両者を比較・検証することを主目的とする。</p> <p>【参考文献】</p> <p>1) 楽器の物理学: N.H.フレッチャー / T.D.ロッシング著、岸 憲史 / 久保田 秀美 / 吉川 茂(訳)、シュプリンガー・ジャパン社</p> <p>2) 日本ハンドベル連盟: ハンドベル連盟の歴史と歩み, http://www.handbell.org/.</p>		

<p>研究内容</p>	<p>代表的なハンドベルのメーカーは、アメリカの2大メーカーとされ、独自の製作方法でその音色も微妙に異なる。従って、その製造方法も明らかにされていない部分が多く、各々のメーカーのノウハウとして受け継がれている。</p> <p>ハンドベルの製造方法は、各メーカーのカタログ¹⁾を参考に考えると、次のように推察することが出来る。はじめに、任意の音階(周波数)のハンドベルの形状を決定する(ハンドベルの形状と大きさの設計)。そして、見込み代の付いた模型を作り、その模型を用いて型を作る(鑄型の製作)。この鑄型に溶かした材料を流し込み(鑄込み作業)、ハンドベルの原型である鑄物品を作る。その後、鑄物品は旋盤などの工作機械で切削加工され、表面を鏡のように綺麗にするため鏡面仕上げが行われる。最終的には、目的の音階(周波数や音色のチェック)に出来たかを検査し、購入者へ出荷される。また、ハンドベルの材料は、銅とスズの合金である青銅が使われることが多く、銅とスズの混合割合は、およそ8:2が最も美しい音色と言われている。しかし、ハンドベル表面の色を比較し判断すると、各メーカーの混合割合は、微妙に異なっているものと考えられる。</p> <p>今回の研究では、ハンドベルの音階に対する周波数f_nは平均律法で算出した。すなわち、1オクターブの周波数(振動数)を等比数列で表すもので、その式は以下のように表すことができる。</p> $f_n \text{ (Hz)} = f_0 \times (2^{1/12})^n \quad \dots\dots \quad \text{但し: } f_0 = 440 \text{ (Hz)、 } n = 0, 1, 2, \dots, 12$ <p>本研究では、ハンドベルを製作するにあたり、以下に示す4項目について、主として検討した。</p> <p>(1): 色々な音階のハンドベルをパソコン上で設計するには、ハンドベルの大まかな形状や寸法が必要となる。そこで、市販のハンドベルの形状をノギスで測定し、音階(周波数)とハンドベルの形状との関係を調べた。</p> <p>(2): 市販のハンドベル(D 7: 2349 Hz)を3次元測定機で測定し、その形状データをもとにD 7用のモデルハンドベルを作成した。そして、このD 7モデルを有限要素解析ソフトで振動解析し、理論上の振動周波数を求めた。なお、その材料には、アルミニウム(6061材)、青銅(C 5191 材)、真鍮(C 3604 材)、炭素鋼(SS 400材)の4種類の物性値を用いて計算した。</p> <p>(3): 設計したD 7用ハンドベルのCAD データをCNC旋盤に転送し、4種類の材料のハンドベルを製作した。そして、実際に切削加工した4種類のハンドベルは、無響室で音を収録と周波数分析し、有限要素法で振動解析した理論上の周波数と製作したハンドベルの周波数を比較し、検討した。</p> <p>(4): また、3次元測定器で製作したハンドベルの形状を測定し、設計通りの寸法に加工できたかを検証した。</p> <p>【参考文献】</p> <p>(1) マルマークハンドベル取扱説明書: (日本代理店) 聖文舎ハンドベル販売株式会社</p>
-------------	--

研究概要報告書

(1/1)

<p>研究のポイント</p>	<p>任意の音階(周波数を基準に考える)のハンドベルを製作するには、先ず、3次元CADシステムと有限要素法振動解析システムを用い、振動解析の周波数値と音階の周波数を比較しながら、試行錯誤によってハンドベルの形状と大きさをパソコン上で決定する。そして、得られたCDAデータをCNC旋盤に転送し実際に機械加工する。しかし、実際に製作したハンドベルの音を録音し周波数分析すると目的の音階(周波数)に比べ差が生ずる場合が多い。この原因としては、<u>有限要素法で求めた理論上の振動周波数に誤差があるのか</u>、又は、<u>切削加工中の材料の変形や切削工具の変形によってハンドベルの寸法に誤差が生じたのか</u>が考えられる。</p> <p>本研究では、有限要素法による振動解析の計算誤差はほぼ無いものと仮定し、製作したハンドベルの形状を3次元測定機で計測し、設計図の寸法に対しどの部分に誤差が生じやすいかを調べ、主として切削加工上の誤差原因を明らかにした。</p>
<p>研究結果</p>	<p>本研究の結果を要約すると次のように示される。</p> <p><u>(1)</u>：音階がG3(196Hz)～C8(4186Hz)の市販のハンドベルを用い、各部の寸法(測定箇所は図1に示す)を調べると、図2と図3のように表すことができる。周波数(音階)の上昇と共に、ハンドベルの(a)の寸法は、ほぼ0.5乗に従い減少する。<u>(2)</u>：図4は、D7のハンドベルを要素分割した計算モデルである。このモデルを用い、有限要素法振動解析ソフト(ANSYS 8.0)を用いて数値計算し、振動特性を調べた。なお、表1は計算で用いた4種類の材料の物性値を示した。解析結果において、最も大きなエネルギーを持つ振動モードを基本周波数として求め、4種類の材料ごとに整理したものを表2に示す。表2より基本周波数は、材料の種類によって大きく異なることが分かる。<u>(3)</u>：次に図4に示したハンドベルの形状データをCNC旋盤に転送し、材料を4種類に変えて切削した。また、完成した4種類のハンドベルの音を無響室で録音し、周波数分析をした。その結果の一例を図5に示し、表3には材料ごとに整理した周波数の結果を示す。有限要素解析で求めた周波数(表2)と製作したハンドベルの周波数(表3)を比較すると、どの材料においても製作したハンドベルの周波数の方が小さい。<u>(4)</u>：図6は4種類のハンドベルの内径と外径を3次元測定機で測定し、肉厚を求めた様子を示した。図7にはハンドベルのZ方向の距離に対し、設計時の寸法と実際の肉厚の寸法差を示した。製作したハンドベルの肉厚は、開口部(Z軸がゼロ)に近いほど薄くなっており、この肉厚の減少が周波数の低下を招いたものと考えられる。今回の切削加工では、材料の内側を旋盤で切削したあと、外径を切削するとき内側に押え治具を取付けて切削した。このとき、押え治具を固定する心押し台の加圧力(図8の矢印)が大きかったため、ハンドベルの内側から押し広げた状態で加工することになり、結果として肉厚の薄いハンドベルになったものと推察できる。従って、ハンドベルの発生周波数の精度を上げるには、押え治具の工夫や心押し台の加圧力を小さくすることが重要となる。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>今回の研究により、任意の音階のハンドベルが色々な材料で、ほぼ設計が可能となり、加工するときの問題点が明らかとなった。今後の課題としては、軽くて、安い材料として「アルミニウムや真鍮」にしぼり、可能な限り多くのハンドベルを製作し、小山工業高専ハンドベル部の定期演奏会等で発表したいと考えている。また、得られた研究成果は、日本音響学会等で発表していく予定である。</p>

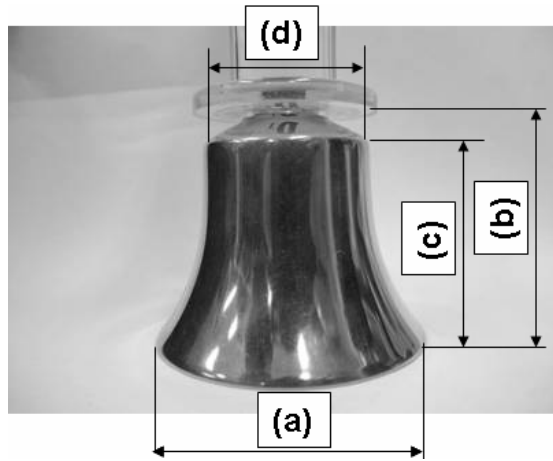


図1 測定したハンドベルの各部の名称
(マルマーク社製)

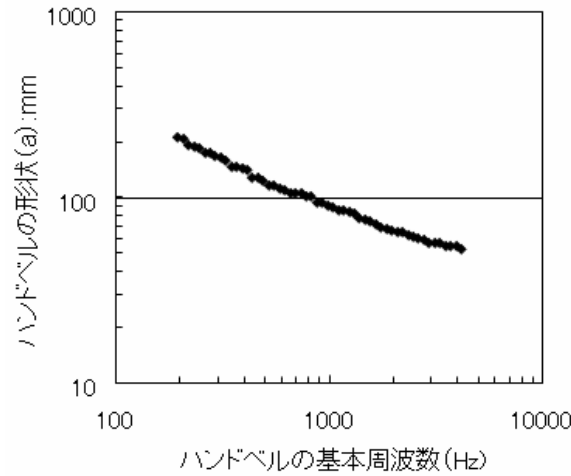


図2 各音階のハンドベル周波数と形状(a)の関係

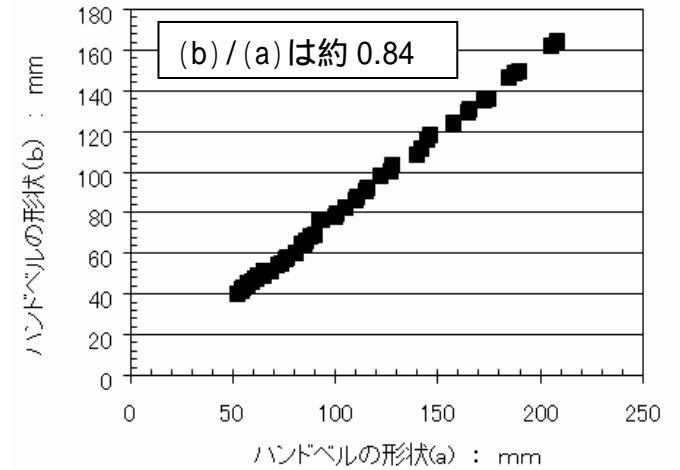


図3 ハンドベルの形状(a)と(b)の関係

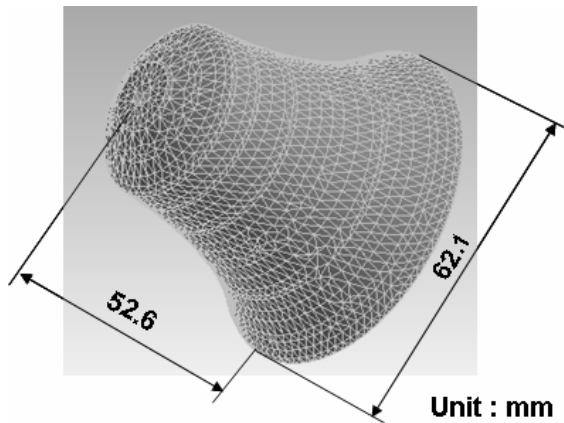


図4 有限要素法用の D7 モデルハンドベル

表1 有限要素法で用いた材料の物性値

ハンドベルの種類	ヤング率 (GPa)	密度 (kg/m ³)
アルミニウム (A6061材)	71.6	2686
真 鍮 (C3604材)	105.6	8423
青 銅 (C5191材)	115.4	8866
炭素鋼 (SS400材)	217.1	7850

注：有限要素解析は、市販の振動解析ソフト (ANSYS 8.0)を用いた

表2 有限要素法による振動解析の結果

ハンドベルの種類	有限要素解析による基本周波数 (Hz)
アルミニウム (A6061材)	3744
真 鍮 (C3604材)	2576
青 銅 (C5191材)	2624
炭素鋼 (SS400材)	3781

注：音階 D7 の周波数は 2349(Hz)とする

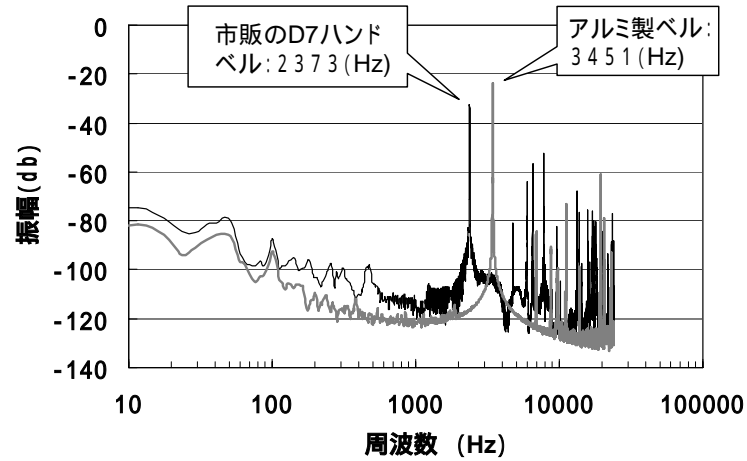


図5 製作したハンドベルの音の周波数測定結果

表3 無響室による周波数測定結果

ハンドベルの種類	無響室による周波数測定結果 (Hz)
市販のD7ハンドベル	2373
アルミニウム (A6061材)	3451
真 鍮 (C3604材)	2361
青 銅 (C5191材)	2461
炭素鋼 (SS400材)	3510

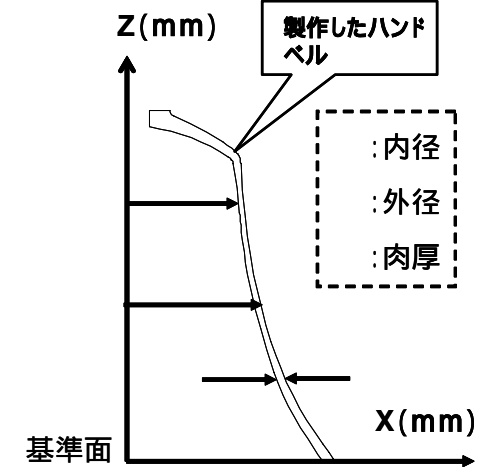


図6 3次元測定機によるハンドベルの計測

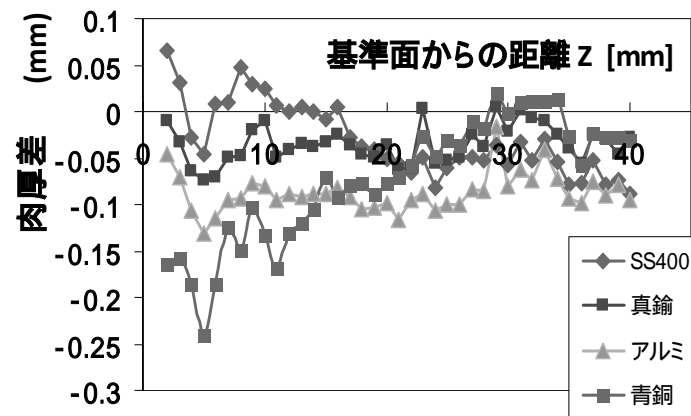


図7 基準面からの肉厚の加工誤差

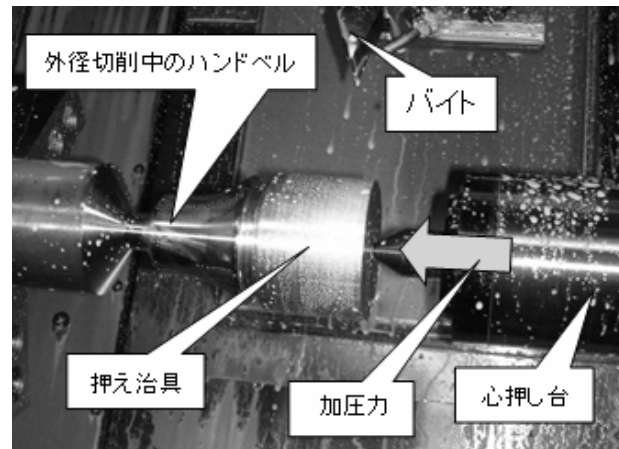


図8 加工誤差における心押し台の影響

(注: フローチャート図, ブロック図, 構成図, 写真, データ表, グラフ等 研究内容の補足説明にご使用下さい。)