

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：52201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26580020

研究課題名(和文) 利用目的に合ったハンドベルの製作に関する研究

研究課題名(英文) Study on production of handbell suitable for purpose of use

研究代表者

田中 好一(tanaka, koichi)

小山工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：00141870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、C#7のハンドベルに限定し、その材料に銅合金とアルミニウム合金、炭素鋼の計12種類のベルを製作し、被削性やベルの音色の違いを調べた。その結果、ベルを切削するときの被削性はアルミ合金が最もよく、銅合金や炭素鋼では切削工具が食い込み、寸法誤差が大きくなることが分かった。またベルの音色は、銅合金の残響音が最も長く楽器としては最良であり、アルミ合金や鉄鋼材料では音の減衰が大きく、楽器としての価値は低くなる。また、アルミ合金の鋳物品と圧延材のC#7のベルの比較では、圧延材のベルと鋳物品のベルの音色には余り多くの変化は見られなかったが、鋳物品の基本周波数は圧延材に比べ若干低くなる傾向を示した。

研究成果の概要(英文)：This study examined the sound pitch of the 12 kinds of handbell of C#7 that were made of copper alloy, aluminum alloy, and carbon steel. Moreover, the machinability was also examined. As the results, it is indicated that the machinability of the handbell made of aluminum alloy was the best. In the case of copper alloy and carbon steel, the cutting tool cut into the material and dimension error became large. The reverberant sound of handbell made of copper alloy was the longest and was the best as a music instruments. But, in the case of the handbell made of aluminum alloy and carbon steel, the decay of sound was large. So, the value as musical instruments lowers. The difference between the tone of the handbell made of aluminum alloy casting and that of aluminum alloy rolled material was small. But, the basic frequency of handbell made from aluminum alloy casting was a little low compared with that of the rolled material.

研究分野：機械工作

キーワード：ハンドベル FEM解析 被削性 鋳造品 圧延材 音色

1. 研究開始当初の背景

現在、ハンドベルの生産量はアメリカの2大メーカーが主流で、日本ではここ数年前に1社が製造・販売に至っている程度である。しかし、現在市販されるハンドベルに共通する点は、ベル本体が青銅製のため重く、高価であるということが言える。これらのことは、これからハンドベルを始めようとする初心者や予算の少ない団体にとって、簡単に購入し、練習することが出来ないことになり、近年ハンドベルのブームに伴い、安くて、軽く、取り扱いが簡単な、多種多様な利用目的に合ったハンドベルへの要望も多い。本研究者は、任意の音高(平均律法で求めた周波数を基準値とする)のハンドベルをCADシステムと有限要素法(FEM)による振動解析で周波数を確認しながら形状を決定し、それらのCDAデータをもとに、アルミニウム及び黄銅の加工用の圧延材をCNC旋盤で加工する工作方法について検討し報告してきた。しかし、加工用の圧延材をCNC旋盤で丸棒から削り出す工作方法では、加工時間が非常に長く切削工具の摩耗量も多くなり、材料費に加え加工費が増加し、利用目的の一部である安いハンドベル作りには限界があるという背景がある。

2. 研究の目的

本研究では、利用目的に合ったハンドベル材料の選定方法の確立と材料に適したハンドベルの製造方法の確立を目的とする。

(1) 最初に、アルミニウム合金や銅合金及び炭素鋼の圧延材でハンドベルを製作し、各々の材料別ハンドベルの発生音を分析することにより、ハンドベルの材料と音色の関係を明らかにする。

(2)次に、ハンドベルの加工時間を短縮し、製作費を低く抑えるためには、見込み代の付いたハンドベルを鋳造で鋳物品として作り、それらの鋳物品を旋盤で加工する方法が必要となる。そこで、アルミ合金材を用いてハンドベルを鋳造で製作するための方法を具体化し、鋳物品と圧延材との音色の違いを明らかにする。

3. 研究の方法

(1)ハンドベルは、ハンドベルの本体であるキャストリング及び、それを支えるハンドル及びハンドガードからなる。本研究が対象とするハンドベルの部位は、本体であるキャストリング(ベル本体)のみであり、その材質を変えて作った場合の音色の違いを分析し、楽器としての音の感じ方、製作のし易さ、加工性等を定量化して分類することである。ベルの製作方法は、任意の材料でC#7のハンドベルをパソコン用のAutoCADで設計し、有限要素法解析で周波数を確認する。そのCADデータを元に、CNC旋盤を用いてハン

ドベルを加工する。その後、切削加工したアルミニウム系及び黄銅系、炭素鋼のハンドベルが、設計通りの形状及び寸法に加工されたかを本校所有の3次元測定機で測定し、その加工状態を確認する。また、製作した各種材料のハンドベルの音を、本校地域連携共同開発センターの無響室で録音すると共に、音響解析装置で分析し、設計段階のFEM解析で求めた所望の音高(周波数)と比較し、適合しているか否かを検証する。その後、各種材料のハンドベルの音質、使い易さ、加工性と加工誤差等を検討する。また、各種材料で製作したハンドベルは、本校ハンドベル部の定期演奏会において使用してもらい、来場者からその音についてアンケート調査をした。

(2)次に、ハンドベルの材料や加工時間を最小限に抑えるため、シェルモールド鋳造装置の製作を行った。シェルモールド鋳造法は、ハンドベルの模型となるマッチプレートを本研究で購入したニクロム線加熱用サポート器で加熱し、マッチプレートの表面をレジンサンドで覆い表面に付着させる。その後、レジンサンド内に含まれる樹脂がプレート表面で熱硬化するため、それをプレートから剥がし、ハンドベルのシェル鋳型として完成する。そして、本校所有のつばゆを用い、アルミニウム合金(A6061材の圧延材)を溶解し、シェル鋳型に鋳込みすることでベル本体の鋳物品を製作する。その後、この鋳物品を機械加工で仕上げ、周波数による音高の検査や音響解析を行った。そして、A6061の圧延材から製作したハンドベルと一旦溶かしてから固めて作ったA6061材製ハンドベルの鋳物品の音質を調べ、その違いについて比較・検討した。但し、実際に鋳物品を製作すると内部に気泡が発生し、ハンドベルの音質に悪影響を及ぼすことが考えられ、欠陥のない鋳造方法の検討も行った。

なお、本研究の人的体制としては、研究代表者である機械工学科の田中好一が本校5年生の卒業研究の中で製作し、ハンドベルの音響解析や音質感の分類には、本研究の分担者である小山高専電気電子創造工学科の平田克己准教授が行った。

4. 研究成果

(1)本研究では、製作するハンドベルの音高をC#7(基本周波数は2217Hz)に限定し、各種材料のハンドベルを設計・製作した。使用した材料は、銅合金系ではC1100(タフピッチ銅)、C3604(快削黄銅)、C4641(ネーバル黄銅)、C7521(洋白)を使用し、アルミニウム合金系では、A2024、A5056、A6061、A7075を用い、炭素鋼ではSS400、S25C、S45C、S55Cの合計12種類の圧延材を用いて製作し検討した。ハンドベルの設計においては、マルマーク社製C#7のハンドベルを3次元測定器で寸法を測定しCAD図面とし、

ベル形状を一体化させる。その後、形状は変えないで ANSYS による FEM 解析で基本周波数が 2217Hz になるよう拡大・縮小しながらスケージングし寸法を決定した。但し、C7521 (洋白) は流通している材料の直径が大きいもので 60mm であるため、外形を先に決定し、その範囲内で肉厚を調整し設計した。なお、FEM 解析で使用した各材料の物性値は、ネットや材料購入先から得た値であり、その一部を表 1 から表 3 に示した。材料の切削加工では、本校所有の CNC 旋盤 (中村留製の旋盤 SC-200) で行い、内側はドリルと中ぐりバイトで切削し、外側の切削は、切削力による材料の変形を最小限にするため、内側をアルミ製の治具で押さえて切削した。

表 1 FEM 解析で用いた銅合金の物性値

材料 物性値	C1100	C3604	C4641	C7521
ヤング率 (GPa)	118.00	92.94	103.00	125.00
密度 (kg/m ³)	8890	8423	8410	8730
ポアソン比 (-)	0.33	0.34	0.35	0.32

表 2 アルミニウム合金の物性値

材料 物性値	A2024	A5056	A6061	A7075
ヤング率 (GPa)	74.00	70.56	68.60	72.00
密度 (kg/m ³)	2770	2640	2700	2800
ポアソン比 (-)	0.34	0.33	0.33	0.34

表 3 炭素鋼の物性値

材料 物性値	SS400	S25C	S45C	S55C
ヤング率 (GPa)	206.00	206.00	206.00	210.00
密度 (kg/m ³)	2862	2862	2862	2862
ポアソン比 (-)	0.30	0.30	0.30	0.30

今回製作した圧延材の C#7 のベル 1 2 個を図 1 に示した。同図からわかるように黄銅製ベルに比べ、アルミニウム製及び炭素鋼製のベルは、全体的に大きいことが分かる。また、図 2 は C#7 のハンドベルで、比較のために (1) はマルマーク社のもの、(2) は快削黄銅 (C3604) のパワースペクトルの例 (横軸に周波数、縦軸に音圧) を示した。同図中においての周波数成分は、ベルの音高を決定する基本周波数を表し、以上の周波数は部分音を示す。また、表 4 は 1 2 種類のベルを設計する段階で目標とした FEM 解析の基本周波数及び製作した 1 2 種類のベルの基本周波数の実測値を示した。今回製作したベルの

音は、基本周波数()や部分音の周波数(~)共に同じような位置で現れた。しかし、FEM 解析による基本周波数と実測値では、全体的に実測値の方が小さい値を示していた。この原因としては、物性値の見積もり誤差やベルの内側を切削するとき切削工具がたわみ、工具変形によるベルの寸法不良が考えられるが、現在その原因を調査中である。

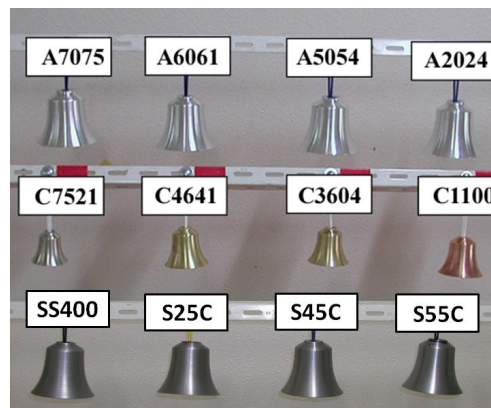


図 1 製作した圧延材のベル

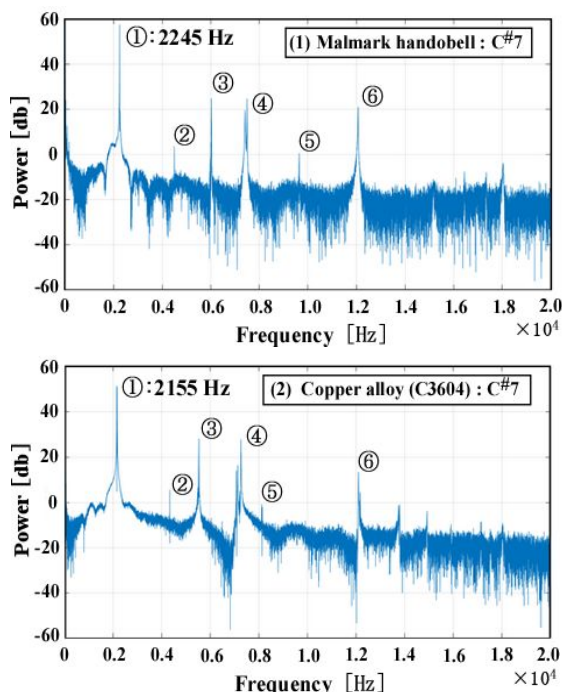


図 2 圧延材ベルのパワースペクトル

表 4 製作した圧延材ベルの基本周波数

	FEM解析の設定 周波数①(Hz)	自作ベルの 周波数②(Hz)	差異 (%) 【((②-①)/2217) × 100】
C1100	2217	2211	-0.3
C3604	2219	2166	-2.4
C4641	2217	2175	-1.9
C7521	2209	1828	-17.2
A2024	2209	2088	-5.5
A5056	2217	2112	-4.7
A6061	2216	2142	-3.3
A7075	2216	2100	-5.2
SS400	2209	2088	-5.5
S25C	2217	2112	-4.7
S45C	2216	2142	-3.3
S55C	2216	2100	-5.2

また、製作したベルのアンケート結果（アンケート数 110 名）では、黄銅製とアルミ製のベルの好みの質問に対し、黄銅製が約 83% を占めた。アルミニウム製の方が良いと答えた人の理由としては、音は多少劣るが軽くて扱いやすいと答えている。また、「楽器としてふさわしい材料は何か？」の質問では、C4641 が最も多かった。その結果を図 3 に示した。なお、炭素鋼のベルは、アンケート調査までに製作が間に合わなく、調査できなかった。

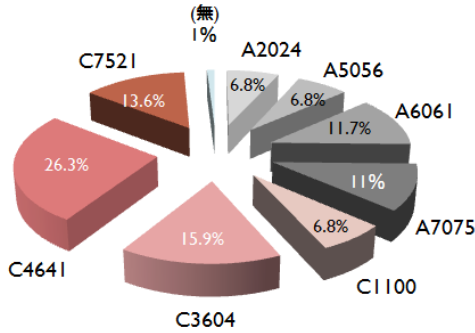


図 3 ハンドベルにふさわしい材料

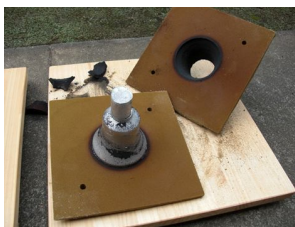
(2) 平成 27 年度は、アルミニウム圧延材 A6061 から C#7 のベル鋳物を製作するため、比較的簡単に鋳型が製作できるシェルモールド鋳造法を採用した。シェル鋳型を製作するため、簡単な造形装置を製作し、上型と下型のシェル鋳型を製作した。図 4 にはシェルモールド鋳造で製作したアルミニウム鋳物の製作方法の様子を示す。なお、溶けたアルミニウムを流し込む湯口は、圧力を上げて鋳込み不良を少なくするため、ベル本体より高い位置とした。なお、アルミニウムの鋳込み作業は、安全のため同図のように鋳型を鋳物砂で覆って行った。そして、アルミニウム圧延材 A6061 をるつぼで溶解し、鋳込み（温度は約 1000 K）作業を行い、の鋳型ばらしを行った。その後、ベルの鋳物は湯口を帯ノコ盤等で除去し、ベル鋳物を製作した。



シェル鋳型



湯の鋳込み作業



鋳型ばらし



ベル鋳物

図 4 シェルモールド鋳造による製作

製作したアルミニウム製（A6061）のベル鋳物は、別途製作した冶具を CNC 旋盤に固定し、それにベルの鋳物を設定する。図 5 は外形切削するときの冶具を示し、その時の切削加工は、圧延材のベル製作と同条件とした。

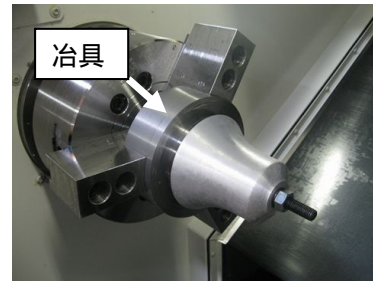


図 5 ベル鋳物の外形切削

今回製作したアルミニウム製ベル鋳物の一部を図 6 に示す。今回の研究では、気泡の無い鋳物製品を作ることが 1 つの目的であったが、同図に示すようにその表面には直径 1mm 以下の気泡が場所によって見受けられた。

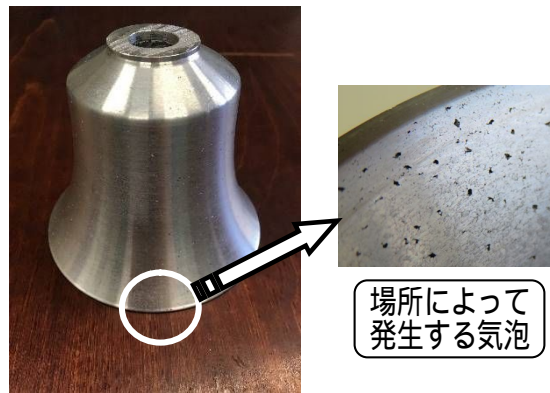


図 6 アルミニウム製（A6061）鋳物のベル

そして、鋳物材のベルと圧延材ベルを無響室で打音・録音し、音の周波数測定した結果を表 5 に示す。表 5 を見ると分かるように鋳物材のベルは、圧延材のベルより周波数が約 100Hz 低く、音の減衰も大きいことが分かった。なお、T.D ロッシングらの研究によるとハンドベルの振動周波数は、材料のヤング

表 5 鋳物材と圧延材のアルミベルの比較

鋳物材ハンドベル	2042 [Hz]
圧延材ハンドベル	2142 [Hz]

率の平方根に比例し密度の平方根に反比例することを明らかにしている。従って、今回製作した鋳物材のハンドベルには、気泡が部分的に発生していることを考えると、鋳物製ベルの見かけの密度が圧延材のベルに比べ小さかったこと、圧延材（A6061）を溶かして固めたことにより、鋳物材製のベルのヤング率が圧延材より小さくなったこと、この 2 つのパラメータの変化の大小が結果的に振動周波数の低下に影響したものと考え

られる。なお、現在その物性値を実験的に調査している途中である。また、シェル鑄型への鑄込み作業は、るつぼ炉内のアルミニウムの温度を 1180K まで加熱したのち、湯くみに移して鑄込んだ。なお、今回の鑄込み作業だけでは、なぜ気泡が発生して、鑄型外に放出できなかったのか、その原因解明までには至らなく、今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

田中好一、平田克己、伊澤 悟、柴田洋一、生井智展、原田隆介、堀 三計、自作ハンドベルに関する研究(第 1 報)、日本音響学会 2015 年 秋季研究発表会講演論文集, pp.749-750

中山峻志、平田克己、田中好一、寶坂友希菜、ハンドベルの材質による音響特性の比較、日本音響学会 2016 年 春季研究発表会講演論文集, pp.945 ~ 946

寶坂 友希菜、平田克己、田中好一、中山峻志、ハンドベルの自作に向けた音響放射特性の解析、日本音響学会 2016 年 春季研究発表会講演論文集, pp.947 ~ 948

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 好一 (TANAKA, Koichi)

小山工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：00141870

(2)研究分担者

平田 克己 (HIRATA, Katsumi)

小山工業高等専門学校・電気電子創造工学科・准教授

研究者番号：50353248