

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23611042

研究課題名(和文) 衝撃入力・音響応答理論に基づくサグラダファミリア教会ガウディ・ベルの設計

研究課題名(英文) Design of the Gaudi bell of Sagrada Familia based on the theory of acoustic response by impact input

研究代表者

戸井 武司 (Toi, Takeshi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：90286956

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ガウディ・ベルの設計手法の確立を目指し、衝撃入力から音として認知される予測過程を検討した。まず、ベルの設計として、数値解析による振動応答の予測を行い、実際の応答と比較した。その結果、有限要素解析での振動予測が可能である事を確認した。

次に、決められた形状の構造に対する衝撃応答を変化させるために、入力の制御として、ハンマーの設計および加振機による任意波形入力を検討した。ここで、振動と音圧は物理的な指標であり、実際に聴覚で認知される音を正確に反映していない。そこで、さらに設計段階で音として認知される成分を予測するピッチ分析を実施して、その効果を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a perceived sound to the auditory system is predicted as a method to design the Gaudi bell. As the first step for design, the numerical simulation to predict a structural vibration response is conducted as the result of compared with the actual measurement, and the applicability of FEA based approach is confirmed.

Next, the method to control the input function is investigated to change the vibration response with fixed structure. The method to design the hammer with an intended waveform is considered, and the pulse excitation by a shaker is applied to obtain the vibration response by an arbitrary shaped waveform. The acceleration and sound pressure are the physical quantity which is not perfectly matched with the characteristics of auditory perception. Therefore, the pitch analysis is applied to predict the actually perceived component, and the radiated sound from the designed Gaudi bell is verified.

研究分野：デザイン学

科研費の分科・細目：9041

キーワード：ガウディ・ベル ピッチモデル 衝撃応答

## 1. 研究開始当初の背景

スペインのバルセロナで今も建設が進められているサグラダファミリア教会は、信仰の場としての意義だけでなく、鐘の音楽を市民に提供する鐘楼としても構想されたことで、音響学分野でも重要な建築である。設計者であるアントニ・ガウディも 1914 年頃実際に“生誕のファザード”の鐘楼で鐘を鳴らし、音の伝搬実験をしたと伝えられ、教会の重要な機能として検討されたことが伺える。鐘楼と鐘を合体させ、1つの巨大な楽器にするというガウディの構想は世界に類がなく、学術的観点からも非常に重要なものである。

ガウディの設計では、パイプ状の大小の鐘を鐘楼内に合計 84 本を配置する予定であったと伝えられる。高さ 100 メートルに及ぶ鐘楼には数多くの窓があり、その窓から斜め下に向けたルーバー（しころ板）が突き出し、鐘の音の指向性を制御する設計が施されている。さらに、鐘楼の内部はいくつかの筒状の空間に区切られ、音の共鳴特性と伝搬特性への配慮が感じられる。上述したように、このような鐘楼と鐘は世界に類のないものであり、両者が一体となり新しい建築空間と音響空間を創造すると考えられる。

1936 年の内戦によって、ガウディが残した資料はほとんど焼失したため、鐘に関する詳しい構想や詳細な設計図は不明であり、長いチューブラ・ベルの形であると予測されているだけである。サグラダファミリア教会の資料室に展示されているガウディの実験室の写真を見ると、上下に開いた双曲面体の鐘らしきものが吊るされており、上下対称ではなく、下端の方が若干大きく開いているように見える。この形状はガウディが好みとしていた形と通じるものであり、この形を“ガウディ・ベル”の基本形と仮定することができる。

このような上下非対称なガウディ・ベルは上端を叩いたときの音のピッチと下端を叩いたときの音のピッチが、非対称性の度合いに応じて異なる。すなわち、ガウディ・ベルは 1 本で 2 つのピッチが得られる。このような鐘に関する研究は国内外において行われていない。さらに、鐘の断面を円ではなく、楕円にすることで、その長軸側と短軸側を叩くときの音のピッチは若干変えられる。すなわち、楕円断面をもつガウディ・ベルは理論的に 4 つのピッチを実現し得る。このような鐘はサグラダファミリア教会の鐘楼の限られた空間への設置を考慮すると、極めて効率的である。

しかし、このような形の構造の振動特性は単純に予測できず、簡単な理論式で固有振動数や振動モードの予測は難しい。そのため、奏でようとするピッチを持つ鐘を適切に設計することが望まれる。

## 2. 研究の目的

本研究では、衝撃入力から音として認知される音の予測過程を検討した。これより、設

計されたガウディ・ベルのピッチを予測し、目標とする音階を奏でるための具体的な設計手法の確立を目指す。本研究は、次の 3 つの目的を定めた。

### (1) 衝撃入力によるベルの応答予測

衝撃入力による応答の特徴は、構造が持つ多様な固有振動数および振動モードが同時に励起されることである。したがって、立体的な構造で必要な周波数成分だけの音を出すように設計することは非常に難しい。また、構造が持つ減衰特性によって、時間軸での応答も変化する。これらの点を考慮して、ガウディ・ベルの基本構造の応答の予測に有効な方法を検討する。

### (2) 衝撃入力の制御法の確立

衝撃入力で加振される周波数範囲は、接触面の特性および接触時間などによって変化する。このような因子を考慮して、衝撃入力の周波数特性の制御法を確立する。

### (3) ガウディ・ベルの音予測と検証

ベルからの放射音は構造の振動に起因するが、聴覚に認知されるピッチは単純に音圧のピークのみでは判断できない。そのため、認知される音の予測方法を確立する。また、実際にガウディ・ベルを試作し、その過程を検証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 衝撃入力によるベルの応答予測

ベルの周波数応答を設計するために、構造が持つ固有振動数および振動モードを的確に設計することが必要である。そのため、振動の数値解析と実験を並行しながら、倍音以外の成分を取捨選択できる設計法を検討した。有限要素解析に基づく予測により双曲面体の形状の固有振動数および振動モードを算出した。

### (2) 衝撃入力の制御法の確立

ベルへの衝撃入力を設計する方法として、ハンマーの設計法と加振器による任意波形入力を用いる制御法を検討した。ベルを打撃するハンマーは、その材質や形状などによって加振する周波数範囲が変わる。その入力関数に対する理論モデルを検討した。また、ハンマーより複雑な入力を与えるための方法として、加振器による任意波形入力を用いる制御法を検討した。

### (3) ガウディ・ベルの音予測と検証

音の高さの認知は周波数と線形的ではない上、ピッチと言う因子で表現される。ここでは、聴覚に認知されるピッチ予測モデルを適用して認知される成分を予測した。また、実際のガウディ・ベルを試作し、振動応答から予測された音のピッチ成分と実際のピッチ成分を比較し、提案した方法の検証を行う

た。

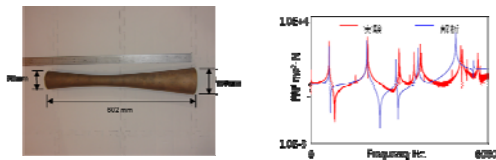
#### 4. 研究成果

##### (1) 衝撃入力によるベルの応答予測

ベルを設計する段階として、まず数値解析による振動応答の予測を行い、実際の応答と比較した。

ガウディ・ベルとして構想されている形状は、図 1(a)に示す両端が広がっている変形チューブラ・ベルである。このような形は固有振動数を理論式で導くのは困難である。冷却塔などを設計するための数値解析は報告(Nath, J. Sound Vib., 33, 1974; Calladine, J. Sound Vib., 82, 1982; Kang & Leissa, J. Sound Vib., 282, 2005; et. al.) されているが、本研究に適用可能な予測モデルはない。そのため、有限要素解析を利用してモード解析を行い、振動応答を予測した。

図 1(b)はガウディ・ベルの解析と実験の比較であり、低周波数領域でよい一致を示している。図 2 に示す固有周波数と振動モードも同様な傾向が得られており、有限要素解析での振動予測は可能であることが確認できた。



(a) ガウディ・ベルの形状例 (b) 解析と実験の比較

図1 ガウディ・ベル

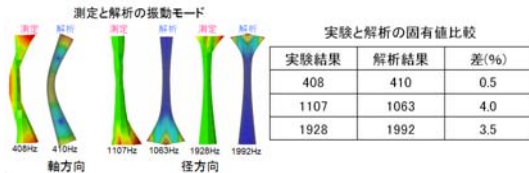


図2 ガウディ・ベルの固有周波数と振動モードの比較

##### (2) 衝撃入力の制御法の確立

決められた形状の構造に対する衝撃応答を変化させる方法として、入力の制御を検討した。衝撃入力は、図 3 に示す時間軸での接触関数によって周波数成分が変化する。この接触関数は表面の材質や面積、打撃方法などによって多様に変化させることができる。

図 4 にハンマーの加振面材質による入力関数の変化を示す。これらを用いて図 5 に示すベルを加振すると、図 6 のように特に高周波数成分の変化が観察できる。

このような接触関数に基づき、適切なクラップの設計が可能である。さらに正確な接触入力を求めるため、ヘルツの接触理論が適用できる。入力の予測式は次式である。(McLaskey & Glaser, J. Acoust. Soc. Am., 128, 2010)

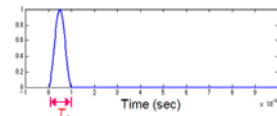
$$\text{Half sine model: } F \approx F_{\max} \sin(\pi t / t_H)$$

$$\tau_H \approx 4.53R_1 \left[ \frac{4\rho_1(\delta_1 + \delta_2)}{3V^2} \right]^{2/5}, F_{\max} \approx \frac{0.44\rho_1^{3/5}R_1^{1/2}V^{6/5}}{(\delta_1 + \delta_2)}, \delta_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}, \delta_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2}$$

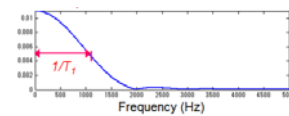
$$\sin^3 \text{ model: } F \approx F_{\max} \sin^3(\pi t / t_H), F_{\max} = 1.917 \frac{\rho^{3/5}R_1^2V^{6/5}}{(\delta_1 + \delta_2)^{2/5}}$$

上式で予測された半径 0.01m のブロンズ材質のハンマーを 1m/s で加振した時の入力関数を図 7 に示す。

ハンマーの加振面を変えることによる入力制御は、基本的にインパルス信号に異なる遮断周波数を持つ低域通過フィルター (LPF) を適用する事と同じ効果である。したがって、他のフィルターやより複雑な形の入力を行うことはできない。

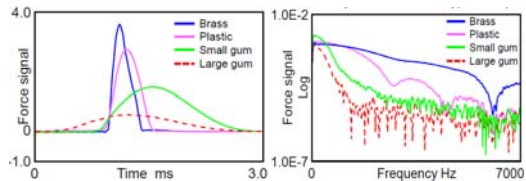


(a) 時間成分



(b) 周波数成分

図3 衝撃による入力



(a) 時間軸

(b) 周波数成分

図4 ハンマーの加振面材質による入力関数の変化

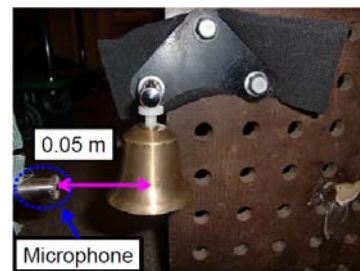


図5 加振実験用のベル

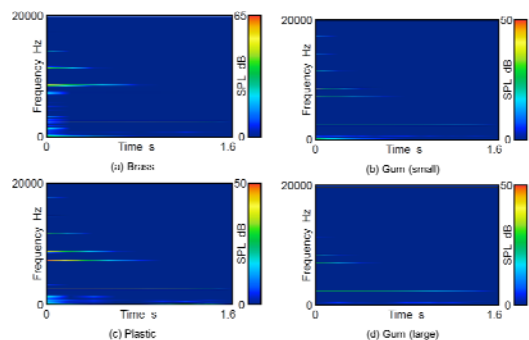


図6 ハンマーの材質によるベルの音変化

そこで、任意入力波形を用いる制御法として、加振器によるインパルス入力を実施した。図8は実験システムの構成を示し、図9は多様な波形を入力した際の加振力であり、その際のベルの音を図10に示す。ノッチフィルタ(NF)によって意図した成分を除くことや、ハイパスフィルタ(HPF)により低域だけ音圧を下げられることが確認できた。

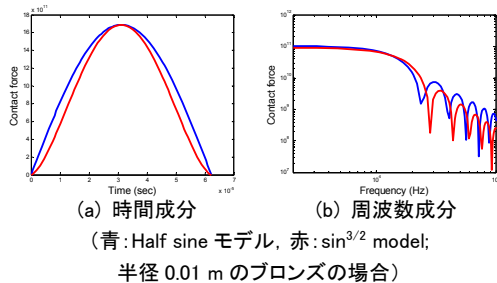


図7 ヘルツの接触理論で予測されたハンマー入力

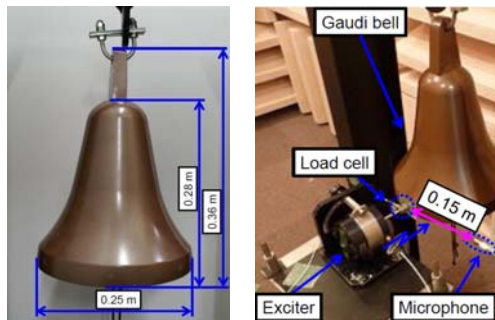


図8 加振器によるベルの音制御の実験風景

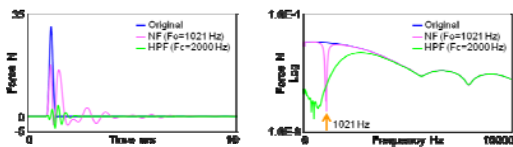


図9 加振器による任意入力波形

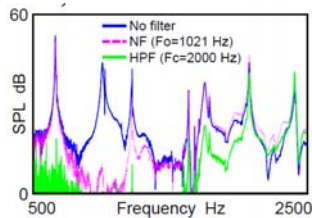


図10 入力変化によるベルの音変化

(3) ピッチ分析による認知成分の予測

振動と音圧は物理的な指標であり、実際に聴覚に認知される音を正確に反映するものではない。そのため、設計段階で音として認知される認知成分を予測するための方法として、ピッチ分析を適用した。

ピッチ抽出のためのアルゴリズムとして、Thehardt が提案した位置基盤理論(Placement

theory)を利用した(Thehardt, J. Acoust. Soc. Am. 71, 1982). 図11は2種類の打楽器の周波数分布を示し、複数のピークが存在する。その内、実際に音として聞こえる成分を把握するためピッチ分析を行った結果を図12に示す。ピッチは音圧分布での純音成分によるもの(Spectral pitch, SP)と、実際の周波数成分では存在しないが聴覚には認知される仮想ピッチ(Virtual pitch, VP)がある。この結果と実際の認知の相関を検討するため、聴音評価を行った。被験者は楽器演奏経験を持つ20歳前後の男女20人で、図12で得られた周波数の純音を聞かせ「純音が打楽器のピッチに聞こえるか」を点数で回答を得た。聴音評価で調べた結果は表1となり、重要な周波数成分と答えた純音と類似なピッチ成分が予測できることが分かる。

ピッチ分析は基本的に実際の音がどの高さに聞こえるかを把握するものであり、音圧の絶対レベルによっても変わる。したがって、シミュレーションで予測されたものとの偏差は常に存在するが、重要な成分はこの方法で事前に把握可能であると言える。

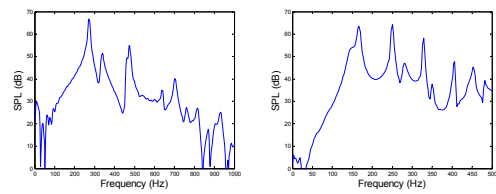


図11 打楽器の周波数スペクトラム

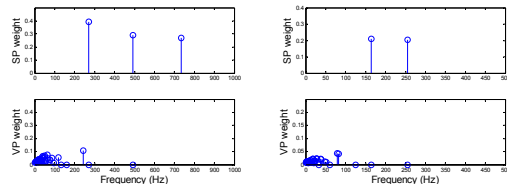


図12 打楽器のピッチ成分

表1 聴音評価結果—主に認知される周波数成分

(a) コンガ

周波数 (Hz)	272	336	459	474	641	702
音圧 (dB)	0	-27.7	-20.5	-12.9	-36.3	-39.2
評価値 (平均)	3.3	1.6	2.1	1.9	1.4	1.2

(b) ティンパニー

周波数 (Hz)	169	250	328	405
音圧 (dB)	-8.5	0	-8.2	-17.0
評価値 (平均)	2.0	1.8	2.7	1.5

(4) ベルの音予測法の提案と検証

本研究で得られた設計手法から音を予測する全体の流れは、次の手順に整理できる。

- 振動応答, または固有周波数の導出
- 重要な周波数成分の抽出



- 抽出された周波数を純音で合成
- ピッチ分析でピッチ成分の抽出

上記の純音合成は、固有周波数の純音を作り、指数関数を掛けて減衰を考慮して、足し合わせて音を作る。位置基盤理論のピッチ分析では周波数応答でピッチの抽出が可能であり、この過程で音を可聴化できる。

図 13 は製作した 2 種類のガウディ・ベルである。長さは同じ 720 mm であり、両端の形状と大きさを変えることで各端を加振した時の応答を変化させている。図 14 は加振実験の構成を示し、各試作品 A, B で実験と予測されたピッチを比較したのが、図 15, 図 16 である。基本的には実測された音の主なピッチが予測されることがわかる。

構造振動による音は、放射効率などの多様な因子の影響を受けるため、振動応答と傾向が異なることが一般的である。したがって、振動応答からピッチを抽出すると、実際のピッチとは差が生じる。しかし、打楽器のようなシステムは、比較的低い固有振動数と振動モードが明確な純音成分となり、かつモード密度も低い領域である。したがって、放射効率や空間伝達関数によって主な周波数成分が急激に変化することは考え難く、本研究で得られた振動応答からのピッチ成分の抽出が妥当であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 朝日洋平, 有光哲彦, 戸井武司, 入力制御による衝撃音のサウンドデザイン, 2013 年日本音響学会講演論文集(春), pp.1151-1152, 2013.03.15, 東京工科大学.
- ② Shigeru Yoshikawa, Wan-Ho Cho, Takeshi Toi, Strike notes and their pitches of some kinds of bells, Proc. of Acoustics 2012, 4pMUb5, 2012.05.17, Hong Kong.
- ③ Shigeru Yoshikawa, Visionary bells Gaudi envisaged for the Sagrada Familia Church, Arquitectura Catalunya in Hokkaido (カタルーニャ建築展 in 北海道), 2011.11.02, 北海道大学遠友学舎

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

戸井 武司 (TOI, Takeshi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 9 0 2 8 6 9 5 6

### (2) 研究分担者

吉川 茂 (YOSHIKAWA, Shigeru)

九州大学・芸術工学研究科・教授

研究者番号: 8 0 3 0 1 8 2 8



(a) 試作品 A (b) 試作品 B

図 13 ガウディ・ベルの試作

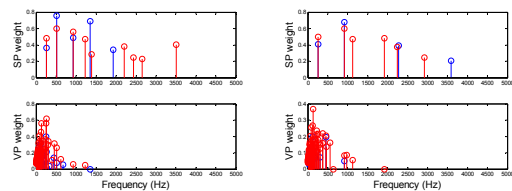


(a) 振動測定点



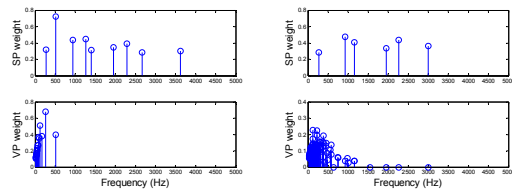
(b) 音測定点

図 14 ガウディ・ベルの加振実験風景



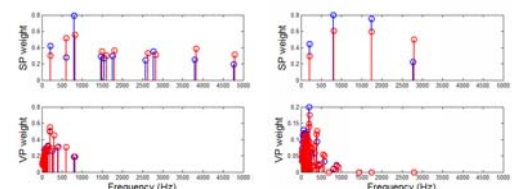
青: 振動 FRF からの計算, 赤: 純音合成からの計算

(a) 加振点 1, 応答点 1(予測) (b) 加振点 2, 応答点 2(予測)



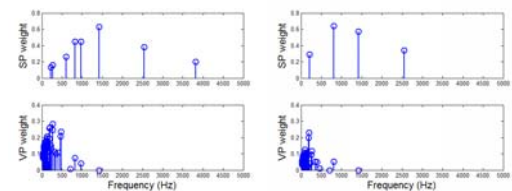
(c) 加振点 1, 測定点 1(測定) (d) 加振点 2, 測定点 2(測定)

図 15 試作品 A のピッチ



青: 振動 FRF からの計算, 赤: 純音合成からの計算

(a) 加振点 1, 応答点 1(予測) (b) 加振点 2, 応答点 2(予測)



(c) 加振点 1, 測定点 1(測定) (d) 加振点 2, 測定点 1(測定)

図 16 試作品 B のピッチ