

# 梵鐘におけるうなりの発生性状に関する研究

## —真栄寺の梵鐘を例にして—

### A Study on the Characteristics of the Interference Beat of Japanese Temple Bell - the Bell in Shin'ei-ji Temple -

●塩川 博義

Hiroyoshi SHIOKAWA

日本大学生産工学部

College of Industrial Technology,

Nihon University

キーワード：梵鐘、うなり、モード解析、うなり周波数

Keywords: Japanese Temple Bell, Interference Beat, Modal Analysis, Beat Frequency

#### 要旨

うなりとは、周波数が僅かに異なる二つの音を鳴らす事により音が互いに干渉しあい、振幅がゆっくりと変化していく合成波である。このうなりは日本の梵鐘や、屋外での演奏を主としたインドネシア・バリ島のガムラン音楽などに用いられ、東洋の音文化に根づいている。

本研究では、いろいろなうなりを伴う発音体の振動モードを分析する。本報では千葉県我孫子市にある真栄寺の梵鐘を例に鐘の音のうなりがどのように発音するのかをモード解析によって分析している。

梵鐘の振動を解析していくと、それらは同じような振動形状の中心軸に対し角度が回転したものと対になって存在していることがわかる。この二つの振動の僅かな周波数差が梵鐘の音色の大きな特徴であるうなりを作りだしていることを明らかにした。

#### Summary

The interference beat occurs in the sound of Japanese temple bells as well as those of Balinese Gamelan music in Indonesia, which is in most cases performed at open-air theatres, and is rooted in the oriental sound culture. In the series of studies, the present authors investigate the vibration modes of the sounding bodies with respect to generated beats. In this paper, taking the bell of Shin'ei-ji Temple in Abiko, Chiba Prefecture as an example, analyzes the vibratory phenomena of the generation of beats by means of the technique of modal analysis. Analysis of the vibration of the temple bell indicates that there exist a pair of vibrations at the angle with one of which is rotated with respect to the central axis of the same vibration shape to make the other. It was found that the slight frequency difference between the two vibrations creates the beat that is a major feature of the tone of the temple bell.

## 1 序論

うなりとは、周波数が僅かに異なる二つの音を鳴らす事により音が互いに干渉しあい、振幅がゆっくりと変化していく合成波である。このうなりは日本の和鐘や、屋外での演奏を主としたインドネシア・バリ島のガムラン音楽などに用いられ、東洋の文化に根づいている。

本研究では、いろいろなうなりを伴う発音体の振動モードを分析する。本報では千葉県我孫子市にある真栄寺の梵鐘を例に鐘の音のうなりがどのように発音するのかをモード解析によって分析する。

## 2 真栄寺の梵鐘

### 2.1 真栄寺の梵鐘および 3D モデル

真栄寺の梵鐘および AutoCAD で作成した 3D モデルを Fig.1 および 2 に示す。3D モデルは中身が詰まったソリッドモデルでなくてはならない。駒の爪以外の部分の厚さは測定の精度が高くないため、昭和期に作成された多くの梵鐘の厚みである 15mm として作成した<sup>1)</sup>。また、形状と周波数の関係を求めるため、駒の爪および撞座以外の装飾的部位は作成しない。

### 3 梵鐘の形状と名称

モデルの各部分の名称を Fig.2 に示す。本研究において重要部分である駒の爪、撞座および乳について解説する。

駒の爪は梵鐘下端部の厚みが急激に増加している部分である。過去の研究から梵鐘の音の周波数に大きく関わるということがわかっている<sup>2)</sup>。真栄寺の梵鐘においては幅 80 mm として 3D モデルを作成した。

撞座は対角線上に 1 組、対になって存在する。梵鐘の非対称性に関わると考えられる。乳は梵鐘上方の突起部分であり、視覚的に特徴のある装飾である。乳の数は時代によ



Fig.1 真栄寺の梵鐘

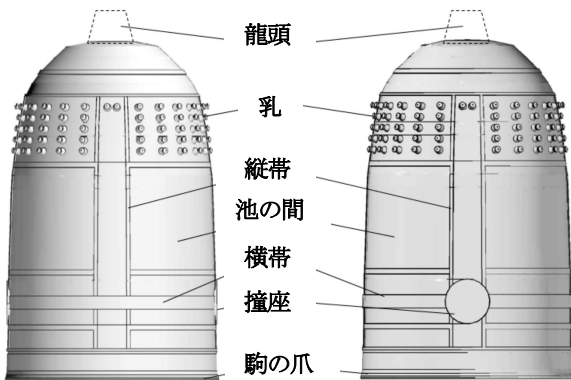


Fig.2 梵鐘のモデルおよび各部名称

り変化しているが、本報で扱う真栄寺の梵鐘は、撞座方向に対して、斜め方向の4方向に5×5の25個と撞座方向とその垂直方向にそれぞれ2個、合計108個ある。

#### 4 梵鐘の周波数特性

鐘楼から約5m離れた場所で、梵鐘の音を Wave Recorder (サンプリング周波数 96k Hz, 録音モード 16ビット) で録音する。録音したデジタルデータを9.5秒間

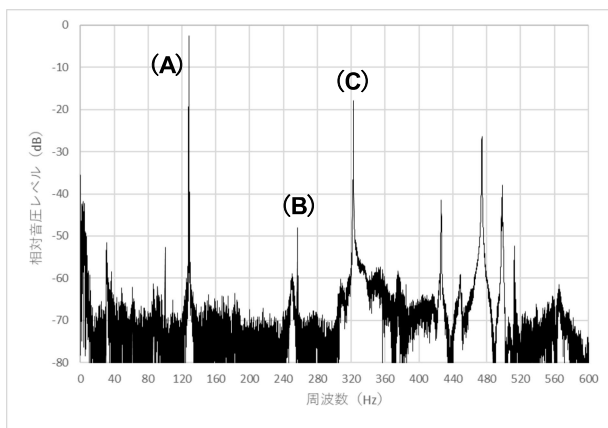


Fig.3 音源の周波数特性

取り込み FFT を用いて求めた周波数特性を Fig.3 に示す。(A)部分は 127.9 Hz および 128.3 Hz であり、2.5 秒周期のうなりが生じている。(B)部分は、256.1 Hz および 256.6 Hz であり、2.0 秒周期のうなりが生じている。(C)部分は 321.6 Hz および 322.5 Hz で、約 1.0 秒周期のうなりが生じている。

#### 5 モード解析方法

梵鐘の 3D モデルを有限要素解析ソフトの ANSYS を用いてモード解析を行い、固有値を算出する。梵鐘は青銅で造られた連続体であり、他の固有値解析と同様に次式から求める。

$$\rho A \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} + EI \left( \frac{\partial^4 \gamma}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 \gamma}{\partial y^4} + \frac{\partial^4 \gamma}{\partial z^4} \right) = 0 \quad (1)$$

但し、 $\rho$  は密度、 $A$  は断面積、 $E$  はヤング率、 $I$  は下端部の周長、 $\gamma$  はたわみの変位

境界条件は龍頭がある頭頂部を固定する。メッシュの分割は 3 次元四面体要素を採用する。以下に基本形状における計算に用いた青銅の材料データおよび緒元を下記に示す。

ポアソン比：0.35

ヤング率： $8.0 \times 10^{10}$

密度：8500.0 kg/m<sup>3</sup>

要素形状：3次元四面体 1次要素

節点数：112192 要素数：58467

#### 6 結果および考察

本計算で得られた有限要素法によるモード解析結果を Fig.4 から Fig.6 に示す。いずれも上から見た固有モード図である。なお、この変形は模式的に示したものであるため実際には目に見えない程度の大きさの変形である。

実測値(A) ( 127.9 Hz および 128.3 Hz ) に対応する固有振動数は 118.95 Hz と 119.13 Hz であり、鐘を撞く部分の撞座方向とその垂直方向に振動したものと、それと中心軸に対し 45° 回転した同様な形状の振動が起きている。これらから、約 5.6 秒周期のうなりが生じる。

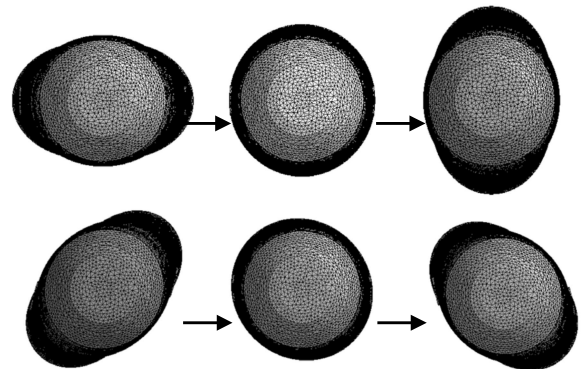


Fig.4 118.95 Hz (上) および 119.13 Hz (下) の固有モード

実測値(B) ( 256.1 Hz および 256.6 Hz ) に対応する固有振動数は 255.41 Hz と 255.46 Hz であり、三角形のような形状で振動したものと、それと中心軸に対し 30° 回転した同様な形状の振動が起きている。これらから、20 秒周期のうなりが生じる。

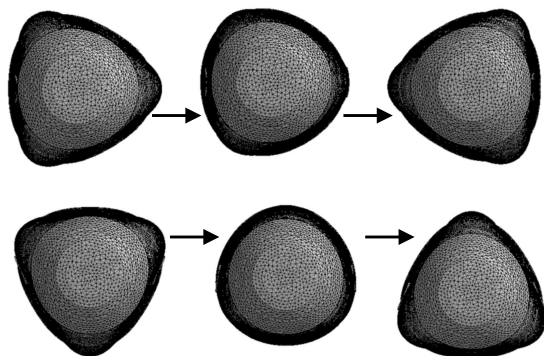


Fig.5 255.41 Hz (上) および 255.46 Hz (下) の固有モード

実測値(C) ( 321.6 Hz および 322.5 Hz ) に対応する固有振動数は 313.0 Hz と 313.2 Hz であり、90° ずつ 4 方向に突き出すような形状で振動したものと、それと中心軸に対し 22.5° 回転した同様な形状の振動が起きている。これらから、5 秒周期のうなりが生じる。

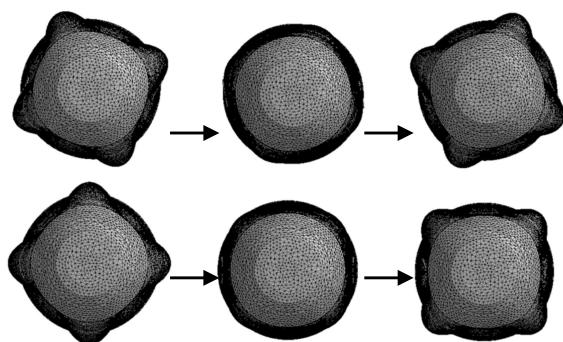


Fig.6 313.0 Hz (上) および 313.2 Hz (下) の固有モード

これ以外にも五角形、六角形の振動やねじれた形状になる振動などが起きることをシミュレーションによって確認したが、音のエネルギーが小さいため本報では扱わない。

このように梵鐘の固有モードを解析していくと、同じような形状のふたつの振動が、角度がずれて対になっていることがわかる。この二つの固有モードの僅かな振動数差が梵鐘の音色の大きな特徴であるうなりを作りだしている。3D モデルは正確な回転体であるため、ANSYS 上の結果では、本来、同形状の振動において振動数差は発生しないが、撞座があることにより 0.2 Hz 程度の振動数差を再現している。さらに現実の梵鐘は歪みや密度の偏りなどの要因で二つの振動の差が大きくなると考えられ、真栄寺の梵鐘における実際の音は約 0.4~1.0 Hz の周波数差となっている。

(C)部分より高い部分音と振動形状の比較については実際の音と解析結果との差が大きくなるため難しい。形状の更に正確な測定と材料データを正確なものにする必要がある。また梵鐘の発音機構は側面の振動が大きいのに対し、上下方向の振動は極めて小さい。そのため上下方向に発音される音はほとんど無い。

## 7 結論

梵鐘の発音性状について、それぞれの振動形状に同形状で中心軸に対し回転方向にずれた振動がもうひとつ存在し、その 2 つの振動の僅かな周波数差によりうなりが発生することを明らかにした。

### 謝辞

本研究における梵鐘の録音および測定で、浄土真宗本願寺派 真栄寺の関係者にご協力を頂いた。また、測定および解析には、平成 29 年度卒業生福川碧都君の労を多とした。ここに深謝する。

### 参考文献

- 1) 大熊常靖, "梵鐘の音の減衰時間に関する時代変遷," 日本音響学会誌 53, 208-214, (1997)
- 2) 西口磯春, 高澤嘉光, "和鐘の発音機構の解析—有限要素法によるモード解析—," 日本音響学会誌 53, 844-850, (1997)
- 3) 加川幸雄, 石川正臣, (1987) 『モーダル解析入門』, オーム社
- 4) 大熊常靖, "梵鐘の音の部分音に関する時代変遷," 日本音響学会誌 54, 119-126, (1998)

### 録音

真栄寺の梵鐘の音

