

釣り鐘型風鈴の発音性状に関する研究

日大生産工(院) ○中澤 宗太郎

日大生産工 塩川 博義

日大生産工 豊谷 純

日大生産工 中川 一人

1. はじめに

日本の伝統的建築は遮音性能が低く、中と外の音が共存している。しかし近年では密閉性の高いコンクリートやサッシが用いられるようになり、内外の音が分離しているのが現状である。また、環境共生住宅の重要性が近年問われているが、風鈴を縁側に吊るし涼しさや静けさを感じることは日本の伝統住宅における環境共生の文化である。

本研究は日本における住宅の音環境づくりを考えることを目的として、風鈴の音色の音響的構造を分析する。本報では、釣り鐘型風鈴の3Dモデルを用いて音響シミュレーション解析を行い、実測値と比較検討し、「うなり」や超音波に着目して風鈴の発音性状の特徴を分析したので、その結果を報告する。

2. 実験に使用する風鈴

今回の実験で使用した風鈴を Fig.1 に示す。小田原風鈴は、高さ 47.5mm、幅 41.4mm、厚さ 3.05mm であり、材料は砂張（青銅）である。南部風鈴は高さ 47mm、幅 50mm、厚さ 2.6mm で、材料は铸铁である。有田焼風鈴は高さ 54.2mm、幅 72.8mm、厚さ 3.6mm で、材料は磁器である。

3. 解析方法

3-1. 風鈴の音響スペクトル解析方法

録音は無響室でPCMレコーダー（24 ビット、サンプリング周波数 192kHz）を用いる。風鈴の音をオーバーロードしないように録音し、そのWAVデータからDFT 解析を行い、周波数特性を求める。

3-2. 風鈴のモード解析方法

風鈴の大きさを3Dスキャナーで計測し、モデル作成ソフトのblenderで3Dモデルを作成する。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。

3Dモデルを有限要素解析ソフトのANSYSを用いて固有値解析を行う。物体に力を与えるといくつかの振動が重ね合わせて発生する。それを一つ一つの振動に分解することがモード解析である。

モード解析を行う際の各風鈴の密度、ヤング率、ポアソン比は、材料の一般的な数値を使用する。砂張の密度は 8.86g/cm^3 、ヤング率は 119.65GPa 、ポアソン比は 0.345 、铸铁の密度は 7.28g/cm^3 、ヤング率は 152.3GPa 、ポアソン比は 0.27 で、磁器の密度は 2.4g/cm^3 、ヤング率は 63GPa 、ポアソン比は 0.23 である。

風鈴の3Dモデルを使ってコンピュータ・シミュレーションによるモード解析を行い、実際



Fig.1 3種類の風鈴

A Study on Characteristics of Generated Sound for Wind Bells

Sotaro NAKAZAWA,
Hiroyoshi SHIOKAWA, Jun TOYOTANI and Kazuto NAKAGAWA

に測定した音と比較する。また、その時に共振周波数の挙動をアニメーションにより視覚化し、発音性状を検討する。なお、シミュレーション結果で求められた振動形状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変形である。

4. 実験結果と考察

各風鈴の周波数特性をFig.2、Fig.7およびFig.14に示す。グラフは横軸が周波数 (Hz)、縦軸が相対音圧レベル(dB)である。また、ピークレベルが大きい基本周波数および倍音成分を図中のピーク(A)や(B)のように示し、それらの周波数を各図下部に示す。

4-1. 小田原風鈴

小田原風鈴の音の周波数特性をFig.2に示す。また、図中に示されている基本周波数や倍音成分に対応する振動モードの振動形状をFig.3～Fig.6に示す。

Fig.2 より、基本周波数 であるピーク(A)と(B)とでは 22.5Hz、約 2.5 倍音であるピーク(D)と(E)とでは 88.9Hz の周波数差が見られ、「うなり[※]」が生じている。

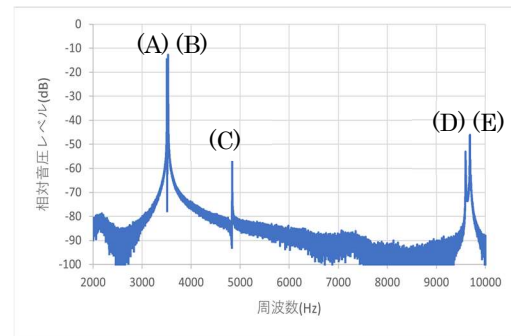
また、ピーク (A)は 3508.6Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 3991.8Hz であり、振動形状を Fig.3 に示す。これによれば、風鈴の下部が縦と横に伸び縮みするような挙動の振動が起きている。

ピーク (B)は 3531.1Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 4153.3Hz であり、振動形状を Fig.4 に示す。これによれば、(B) は(A)の振動形状を 45 度傾けたものになっている。次にピーク(D)は 9598.7Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 10733Hz であり、振動形状を Fig.5 に示す。これによれば、(D)では風鈴の下部が 3 角形を描くような挙動の振動が起きている。(D)と対になるようなピーク(E)は 9687.6Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 11099Hz であり、振動形状を Fig.6 に示す。これによれば、(E)では(D)の振動形状を 30 度傾けたものになっている。

なお、モード解析においてピーク(A)と(B)との周波数差は 161.5Hz で、ピーク(D)と(E)との周波数差は 366Hz である。また、ピーク(C)は ANSYS 上で認識できない。

4-2. 南部風鈴

南部風鈴の音の周波数特性をFig.7に示す。また、図中に示されている基本周波数や倍音成



(A)3508.6Hz (B)3531.1Hz (C)4838.2Hz
(D)9598.7Hz (E)9687.6Hz

Fig.2 小田原風鈴の周波数特性

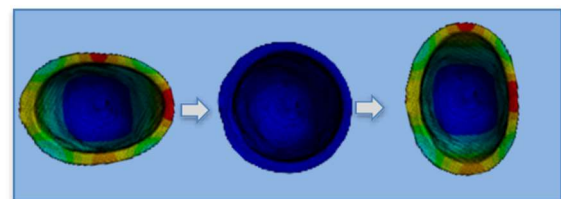


Fig.3 ピーク(A) に対応する周波数
(3991.8Hz)の振動形状

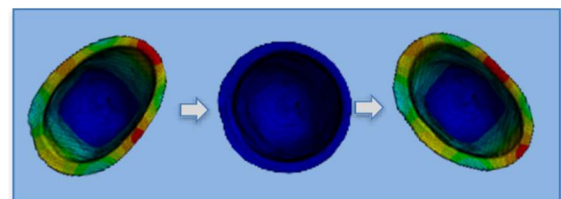


Fig.4 ピーク(B) に対応する周波数
(4153.3Hz)の振動形状

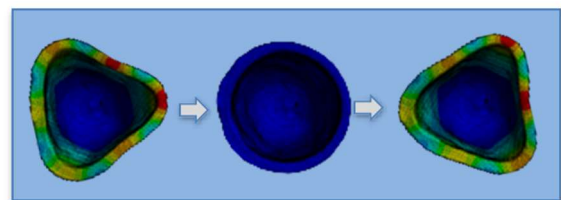


Fig.5 ピーク(D) に対応する周波数
(10733Hz)の振動形状

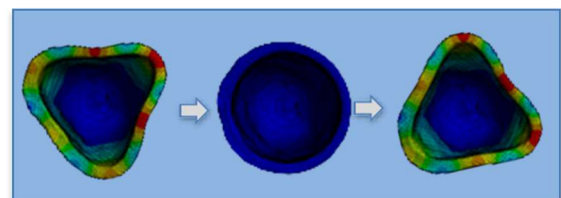


Fig.6 ピーク(E) に対応する周波数
(11099Hz)の振動形状

分に対応する振動モードの振動形状をFig.8～Fig.11に示す。

Fig.7 より、基本周波数 であるピーク(A)と

(B)とでは 30.4Hz、約 2.5 倍音であるピーク(C)と(D)とでは 36.4Hz、超音波(人に聴こえない音域)であるピーク(E)と(F)とでは 4.1Hz の周波数差が見られ、それぞれ「うなり[※]」が生じている。

また、ピーク (A)は 3816.6Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 3209.1Hz であり、振動形状を Fig.8 に示す。これによれば、風鈴の下部が縦と横に交互に伸び縮みするような挙動の振動が起きている。

ピーク(B)は 3847Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 3228.4Hz であり、振動形状を Fig.8 に示す。これによれば、(B) は(A)の振動形状を 45 度傾けたものになっている。

次にピーク(C)は 10024.7Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 8169.6Hz であり、振動形状を Fig.10 に示す。これによれば、(C)では風鈴の下部が 3 角形を描くような挙動の振動が起きている。(C)と対になるようなピーク(D)は 10061.1Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 8214.2Hz であり、振動形状を Fig.11 に示す。これによれば、(D)では(C)の振動形状を 30 度傾けたものになっている。

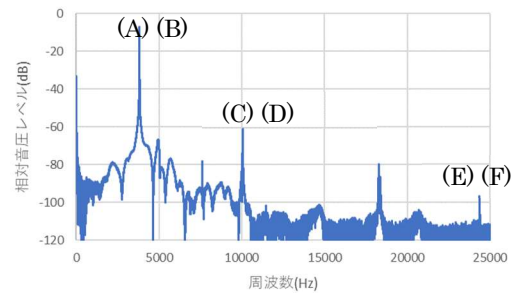
また、南部風鈴は超音波を出しており、本研究ではそれらに対してのモード解析も行った。

ピーク(E)は 24369.8Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 22489Hz であり、振動形状を Fig.12 に示す。これによれば、(C)と(D)と同様に南部風鈴の下部が 3 角形を描くように変形しているが、風鈴の上部が下部と逆の形を描くような挙動の振動をしている。(E)と対になるようなピーク(F)は 24373.9Hz である。これに対応するモード解析から求めた周波数は 22523Hz であり、振動形状を Fig.13 に示す。これによれば、(F)では(E)の振動形状を 30 度傾けたものになっている。

また、ピーク(E)と(F)における振動形状の結果は、風鈴上部の変形が超音波を発音させていることを表している。なお、シミュレーションにおいてピーク(A)と(B)との周波数差は 19.3Hz、ピーク(C)と(D)との周波数差は 44.6Hz、ピーク(E)と(F)との周波数差は 34Hz である。

4-3. 有田焼風鈴

有田焼風鈴の音の周波数特性を Fig.14 に示す。また、図中に示されている基本周波数や



(A)3816.6Hz (B)3847.0Hz (C)10024.7Hz
(D)10061.1Hz (E)24369.8Hz (F)24373.9Hz

Fig.7 南部風鈴の周波数特性

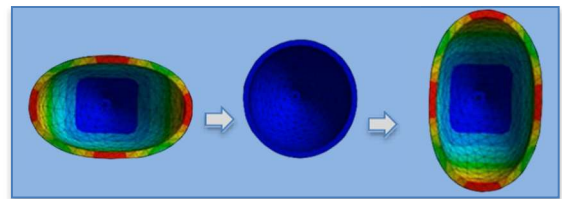


Fig.8 ピーク(A) に対応する周波数
(3209.1Hz)の振動形状

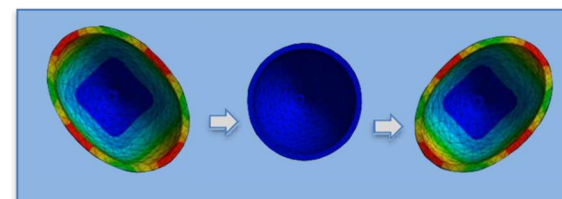


Fig.9 ピーク(B) に対応する周波数
(3228.4Hz)の振動形状

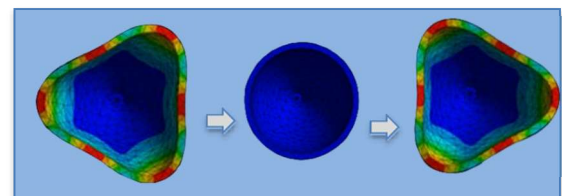


Fig.10 ピーク(C) に対応する周波数
(8169.6Hz)の振動形状

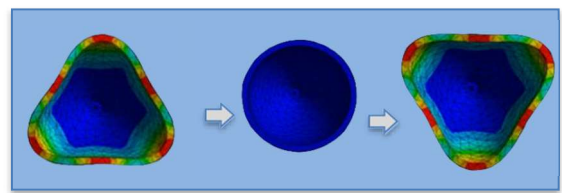


Fig.11 ピーク(D) に対応する周波数
(8214.2Hz)の振動形状

倍音成分に対応する振動モードの振動形状を Fig.15～Fig.17 に示す。Fig.14 より、基本周波数であるピーク(A)と(B)とでは 8.3Hz の

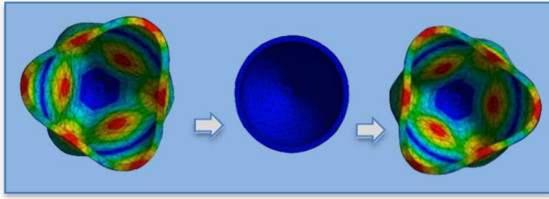


Fig.12 ピーク(E) に対応する周波数 (22489Hz)の振動形状

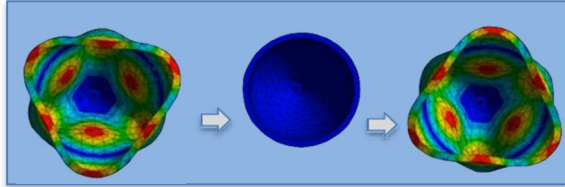


Fig.13 ピーク(F) に対応する周波数 (22523Hz)の振動形状

周波数差が見られ、「うなり^調」が生じている。

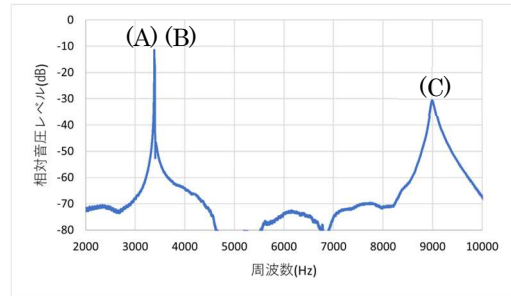
また、ピーク (A)は3387.4Hzである。これに対応するモード解析から求めた周波数は3496.3Hzであり、振動形状をFig.15に示す。これによれば、風鈴の下部が縦と横に交互に伸び縮みするような挙動の振動が起きている。ピーク (B)は3395.7Hzである。これに対応するモード解析から求めた周波数は3503.5Hzであり、振動形状をFig.16に示す。これによれば、(B)は(A)の振動形状を45度傾けたものになっている。次にピーク(C)は9010.1Hzである。これに対応するモード解析から求めた周波数は9238Hzであり、振動形状をFig.17に示す。これによれば、(D)では風鈴の下部が3角形を描くような挙動の振動が起きている。

なお、シミュレーション上においてピーク(A)と(B)との周波数差は7.2Hzである。また、シミュレーションではピーク(C)と対となるピーク値 (9250.7Hz) が検出されたが、実測では観測できない。

5. まとめ

風鈴の発音性状において、それぞれの振動形状に回転方向に45度あるいは30度ずれた振動が対となって発生し、そのわずかな周波数差により「うなり」が発生し、その大きさは材質によって異なることを明らかにした。

【注】文献4)では、二つの純音の周波数差が20Hz以下であるときを「うなり」と呼び、20Hz以上で臨界帯域幅(臨界帯域幅を超えると2音が分離して聴こえる)のものを「粗さ(roughness)」と呼んでいるが、本論ではいずれも「うなり」としている。



(A) 3387.4Hz (B) 3395.7Hz (C)9010.1Hz

Fig.14 有田焼風鈴の周波数特性

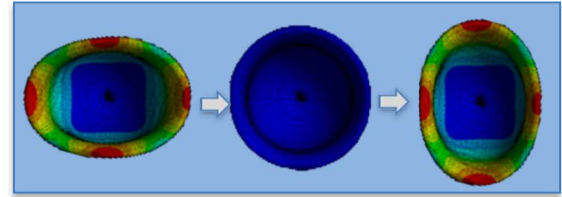


Fig.15 ピーク(A) に対応する周波数 (3496.3Hz)の振動形状

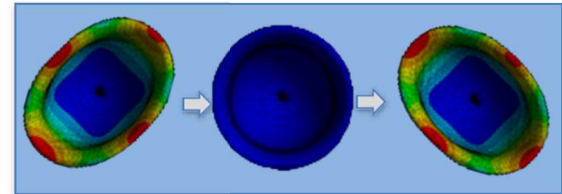


Fig.16 ピーク(B) に対応する周波数 (3503.5Hz)の振動形状

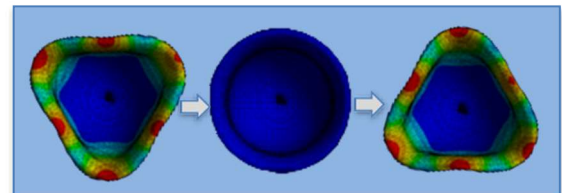


Fig.17 ピーク(C) に対応する周波数 (9238Hz)の振動形状

【謝辞】本研究の一部は、JSPS 科研費 JP21H00485 (基盤研究 (B),研究代表者: 塩川博義, 課題名: 音響解析を用いた金属製打楽器の変遷—「うなり」の文化としての東洋音楽史—,令和3~7年度)を受けて行われた。

【参考文献】

- 1) 塩川博義, “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—”, サウンドスケープ 19巻, p.73-75, (2019)
- 2) 加山幸雄, 石川正臣, (1987), 『モーダル解析入門』, オーム社
- 3) 西口磯春, 高澤嘉光, “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)
- 4) Diana Deutsch:音楽の心理学 (上), 西村書店, (1990), 17-20