

梵鐘の構造音響弱連成解析

清野 多美子*

Structure-acoustic coupled analysis of temple bell

Tamiko Seino*

梵鐘の打突による振動を音源とした音の広がり、有限要素法の構造解析ソフト Advance/FrontSTR と有限要素法の音響解析ソフト Advance/FrontNoise を利用した弱連成解析の事例で紹介する。

Keywords: シミュレーション、連成解析、音響解析、振動解析

1. はじめに

構造物の振動により発生する騒音を数値解析する方法の一つとして、時刻歴応答の振動解析の結果を利用して周波数領域で音響解析を実施する構造音響連成解析がある。ここでは梵鐘の打突による音の広がりを解析した事例を、弊社で開発販売する有限要素法の汎用構造解析ソフト Advance/FrontSTR と有限要素法の汎用音響解析ソフト Advance/FrontNoise を利用し、実施方法と合わせて紹介する。

2. 解析概要

対象形状は実際の梵鐘の断面図から概寸を読み取り、高さ 91.5cm、口外径 64cm の大きさの梵鐘としてスケーリングして使用した。解析モデルは、断面形状から軸対称モデルとして作成している。また解析は 1/2 対称モデルで実施した。

構造解析は時間領域で実施し、音響解析は周波数領域で実施した。両方の解析ソフトに付属するツールである Advance/REVOCAP_PrePost を使用し、振動解析結果の高速フーリエ変換、および音響解析の音源となる境界条件のマッピングを実施している。解析実施手順のフローチャートを、図 1 に示す。

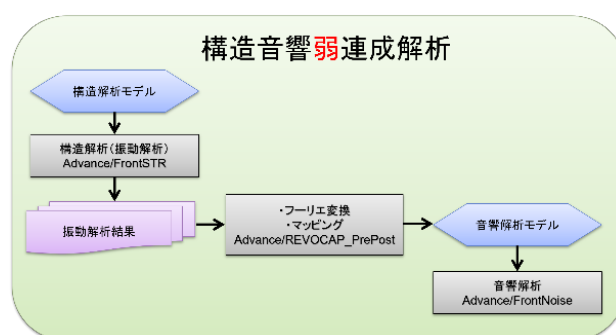


図 1 解析実施手順

3. 構造解析

3.1. 構造解析条件

振動解析のモデルを図 2 に示す。梵鐘を吊るす竜頭となる上面位置を完全固定とし、撞木に寄って打たれる撞座の領域に対しインパルス荷重を与え、自由振動による解析を実施した。またレイリー減衰を適用した。材料にはリン青銅を想定し、表 1 の物性値を使用した。

表 1 構造材料物性値

ヤング率	1.10×10^5 [MPa]
ポアソン比	0.33
密度	8.80×10^{-9} [t/mm ³]

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2nd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

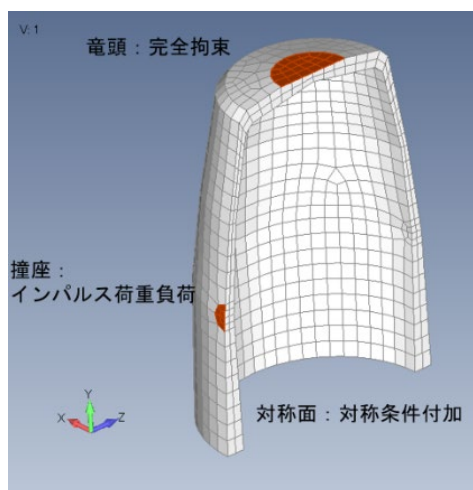


図 2 荷重・境界条件図

3.2. 構造解析結果

振動解析の結果として図 3 に示すような最大変位が 1.5mm の変位時刻歴を得た。梵鐘は図 4 の変形図のように打突方向に揺れを繰り返し、徐々に振動は減衰していく。

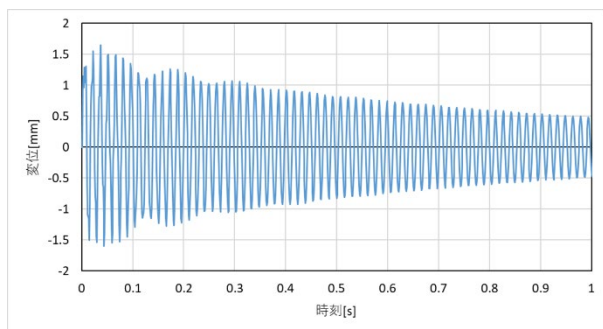


図 3 代表点の打突方向変位時刻歴

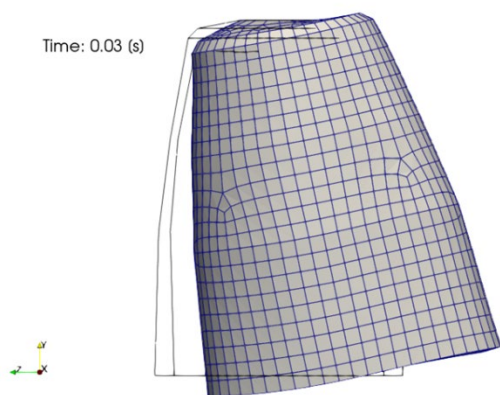


図 4 100 倍変形図

4. フーリエ変換およびマッピング

構造解析モデルの全節点の変位時刻歴をフー

リエ変換により周波数領域に分解した。図 3 の代表点におけるフーリエ変換結果は図 5 のように求められ、65Hz および 205Hz でピークとなっていることが分かる。

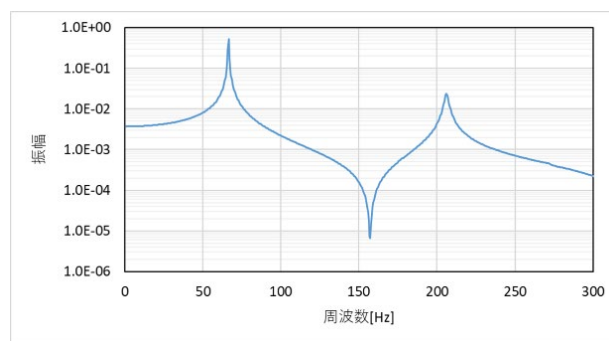


図 5 代表点の変位振幅の周波数特性

フーリエ変換の結果を音響解析メッシュに音響解析の面音源としてマッピングを行った。マッピング前後の結果を図 6 に示す。異なるメッシュ間で値が適切にマッピングされていることが確認できる。

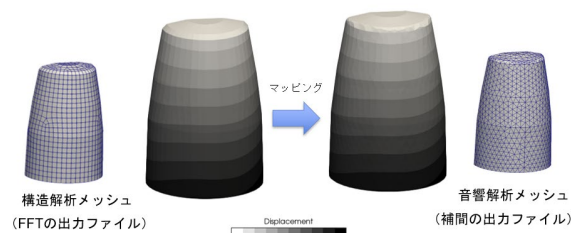


図 6 マッピング前後の値比較

5. 音響解析

5.1. 音響解析条件

梵鐘の下端部までの高さを地面から 1.5m とし、解析領域を半径 3m として音響解析モデルを作成した (図 7)。地面は完全反射境界、半球のドーム面には無限境界を定義した。

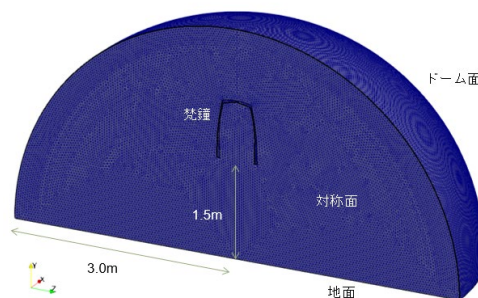


図 7 音響解析モデル

5.2. 音響解析結果

受音点位置における音圧の周波数特性を図 8 に示す。また音圧レベルがピークとなる 65Hz 及び 205Hz の音圧レベル分布図を図 9、図 10 に示す。どちらも撞座位置からほぼ対称に音が広がっていく様子を確認することができた。櫻井ら[1]による日本のお寺の梵鐘の音楽的調査の結果から、梵鐘の音響スペクトルは、低いピークで 41～129Hz、次の高次部分音が 109～312Hz となっており、本解析結果と一致している。

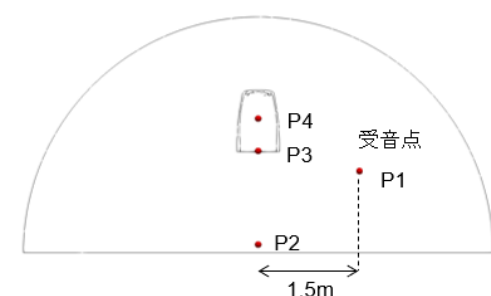
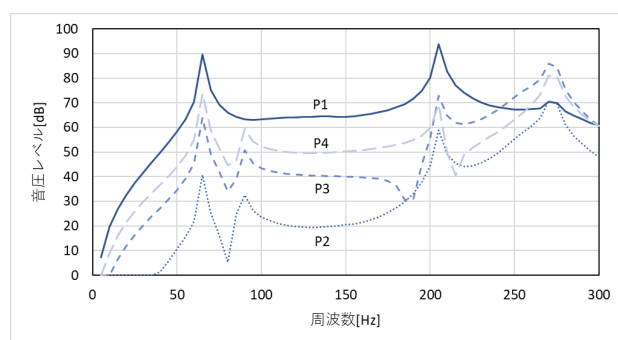


図 8 受音点における音圧の周波数特性

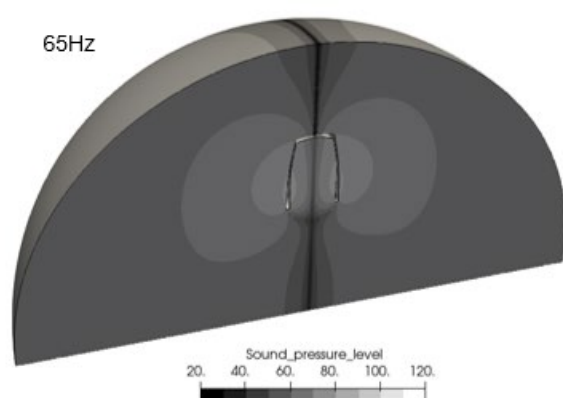


図 9 ピーク周波数 65Hz の音圧レベル分布図

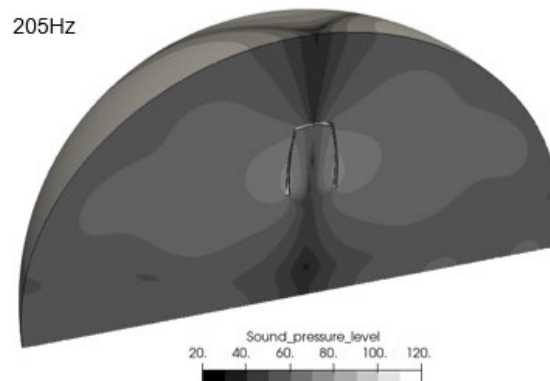


図 10 ピーク周波数 205Hz の音圧レベル分布図

6. おまけ

鐘の中央真下の位置では、音波が打ち消しあって音が小さくなる。前述の解析結果でも、鐘から離れた位置よりも、鐘の真下の位置の方が音圧が小さくなっていることが確認できる。

1922 年、日本を訪れていたアインシュタインは知恩院を訪問した際に、実際に鐘の真下に立ち、僧に鐘をついてもらって、鐘の真下では音が小さくなる現象を自ら体験したとの逸話が残されている。

参考文献

- [1] 櫻井他,日本の梵鐘の部分音と振動モードについて,人間環境科学 27 巻 3～13,2020

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイル（カラー版）がダウンロードできます。（ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。）