

シンバルの構造最適化による音質の研究

糸田 克也

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

正田 義明

法政大学工学部機械工学科

岩原 光男 長松 昭男

法政大学工学部機械工学科

音質に関する研究の対象として、打楽器シンバルを採用した。最初に、シンバルをモデル化するため、実験モード解析と計算モード解析を行った。そして、シンバルのモデル化後、設計条件を板厚、制約条件を固有振動数として、シンバル音質向上のための構造最適化を試みた。また、構造最適化によって音質が向上したのかを確かめるため放射音の計算を行った。

1. 緒論

振動は私たちと深いかわりを持っている。会話は喉と空気と鼓膜の振動を利用する事によって成立し、弦や鋼線を振動させて作られた音に癒される人間は、振動なしでは生きられない。また、振動や音は人間に対して様々な影響を与える。人間が直接身近に使う機械や物では、振動が小さいことや心地よく振動することが大きい商品価値になってきた。今後更に厳しくなる設計条件を満たすために、振動問題を設計開発の段階で予知すべきである。

近年、振動現象の予想と現象解明にモード解析が使用され、モード解析は実験モード解析と計算モード解析に分けられる。実験モード解析では、打撃試験により周波数応答関数を実験的に求め、その中に含まれる系の動的な性質をモード特性の形で抽出する一連の方法である。計算モード解析では対象物を有限要素法でモデル化し、計算によってモード特性を求める。そして、実験モード解析結果と計算モード解析結果とを比較する。

本研究では、さらに板厚が固有振動数に影響することを考慮し、擬似最小二乗法による構造最適化を行った。この手法により、技術者の勘や経験に頼ること無く、少ない繰返し計算で効率良い構造最適化が可能となる。また、実際に構造最適化後でシンバル音質が向上するのか、放射音計算を試みた。

2. 実験モード解析

実験モード解析手法として、非線形最適化法が提案されている。非線形最適化法は周波数領域法である偏分反復法を正確に多点応答に拡張したものである。この手法を使い実験対象のモード特性を求める。

実験モード解析の対象は、音質の研究も行う事から、打楽器のシンバルを用いた。インパルス・ハンマを用いた打撃加振で、加速度ピックアップを固定、ハンマを移動し、FFT装置を用いて応答を得る加振点移動で行った。打撃試験は5回平均で行い、1軸加速度ピックアップによってZ軸方向の応答を処理した。

Fig.1 にシンバルの加振点と計測点を示す。ハンマによりZ方向に計127点を垂直に加振した。

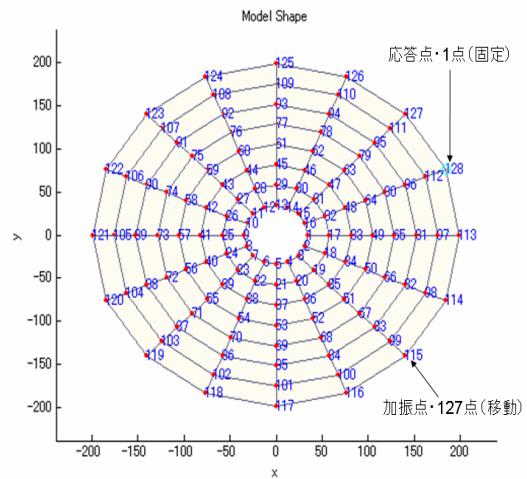


Fig.1 Measuring Points and Excitation Points

3. 有限要素法による計算モード解析

Fig.2 にシンバルの有限要素モデルを示す。モデル作成には Solid Works と Altair Hyper Mesh を使用し、計算には MSC/NASTRAN を使用した。

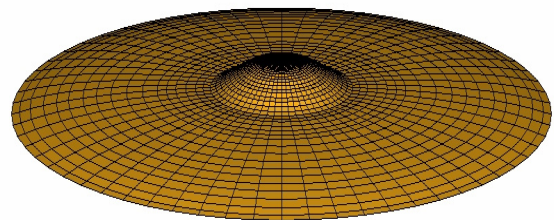


Fig.2 FEM Model

4. 計算と実験の比較、考察

Fig.3 に、実験モード解析と計算モード解析の固有振動数(1000Hz まで)の比較を示す。点線は誤差±5%の線である。

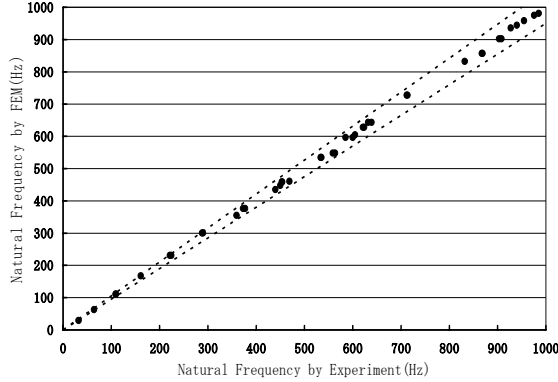


Fig.3 Comparison of Natural Frequency

グラフからわかる通り、実験モード解析と計算モード解析の固有振動数に誤差が生じてしまった。

理由としては、実験対象のシンバルは弓状に湾曲していて、表面には音溝と呼ばれる溝が刻まれ、ハンマリング加工も施されているので、寸法、特に板厚を測るのが非常に困難であった。シンバルメーカーの企業秘密により正確な材料定数がわからなかった。実験対象のシンバルがハンドメイドであった。などにより正確なモデルを作成することが困難であったからと思われる。しかし、固有振動数は多少の誤差であったので、モード解析は正しく行えたと考える事ができる。

5. 構造最適化

板厚が固有振動数に影響することを考慮し、擬似最小二乗法による板厚変更によって構造最適化を行った。設計変数は板厚、制約条件は固有振動数である。この方法は、技術者の経験やノウハウの有無により大きく左右される事はなく、制約条件の中から変更量ベクトル最小で固有振動数を移動する事が可能である。構造変更方法の式を以下に示す。

$$[z]\{\Delta t\} = \{\Delta f\} \dots\dots\dots(1)$$

$[z]$: 感度マトリックス

$\{\Delta t\}$: 板厚の変更ベクトル

$\{\Delta f\}$: 固有振動数の変更ベクトル

感度マトリックス $[Z]$ は、列数が設計変数の数で行数が対象としている固有振動数である。

式(1)は、式の数より変数が多い連立方程式となり無数の解 $\{\Delta t\}$ が存在するが、 $\{\Delta t\}$ の変更量ベクトル最小という条件を付加すると $\{\Delta t\}$ は一意に決まり、

$$\{\Delta t^*\} = [z]^T ([z][z]^T)^{-1} \{\Delta f\} \dots\dots\dots(2)$$

となる。式(2)は擬似最小二乗法として知られている。

昨年度卒業された先輩の研究から、280~355Hz までの音圧を 0 とした音の評価が高いという結果が得られている。そこで本研究では、280~355Hz の固有振動数をもつモードを、板厚変更の繰返し計算をする事によって移動させ無くした。その時の、計算回数による固有振動数の移り変わりを Fig. 4 に示す。また、構造最適化後の有限要素モデルを Fig.5 に示す。ちなみに、構造最適化後の最小板厚は 0.1149mm、最大板厚は 1.2781mm であった。

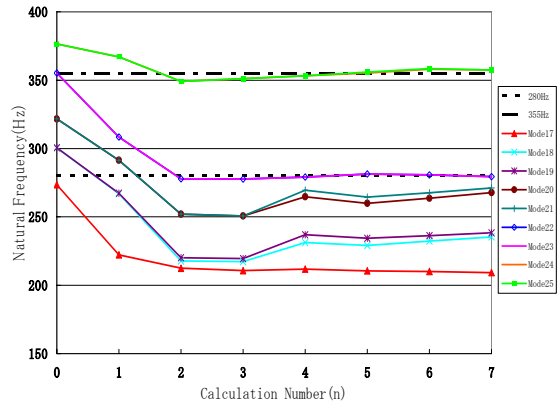


Fig.4 Change of Natural Frequency by Structure optimization

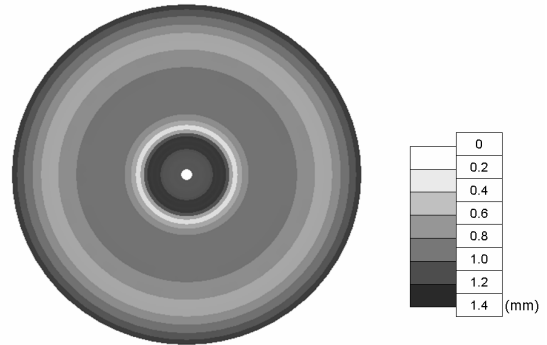


Fig.5 Structure optimization of board thickness by FEM

6. 構造最適化後の放射音

放射音計算は周波数領域で行われる。有限要素法への入力ファイルを読み込み、表面各要素の面積・方向余弦、音圧測定点との距離を算出する。

有限要素法の出カファイルからモード特性を読み込み、式(3)により表面速度を算出する。

$$\{\dot{x}\} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{ri} F_i}{-m_r \omega^2 + j c_r \omega + k_r} \{\phi_r\} j \omega e^{j \omega t} \dots\dots\dots(3)$$

$\{\phi_r\}$, ϕ_{ri} : r 次固有モードベクトル, その i 行目成分
 m_r, c_r, k_r : r 次のモード質量, モード減衰係数, モードモード剛性

式(4)により測定点の速度ポテンシャルと音圧を計算する。

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\xi_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} dS \dots\dots\dots(4)$$

r : dS と点 P 間の距離 k : 波数, $2\pi/\text{波長}$

そして、周波数領域において力と音圧を掛けることにより応答を得て、逆フーリエ変換により時間領域のデータにする。周波数領域により得られた構造最適化前、構造最適化後の音圧応答周波数グラフを Fig.6、Fig.7 にそれぞれ示す。

計算条件の設定では、加振設定番号の点は外周から中心に向かって 24.4mm の点とした。また、計算条件で大変重要な減衰比は、実験モード解析で求めた周波数応答関数をグラフ化し、そのグラフから計算して求めた。

その結果として、音のデータを作成、再生し、スピーカーから聞いたがシンバルに似ている程度の音にしかならなかった。原因としては、減衰比をもとめる際に、きれいな山の形をしている周波数応答関数ばかりではないので、すべての減衰比を計算する事はできなかった。そこで、近似曲線を使って減衰比を求めたからであると考えられる。

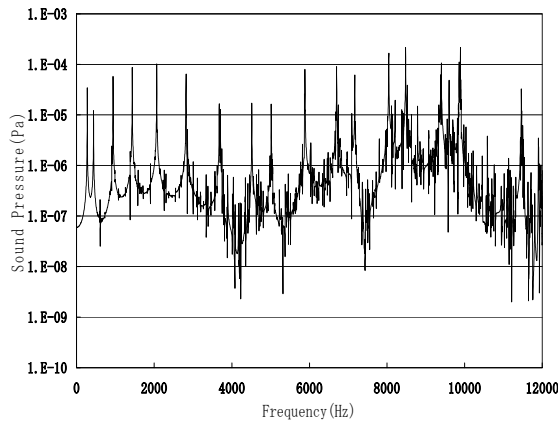


Fig.6 Sound pressure response in frequency domain before

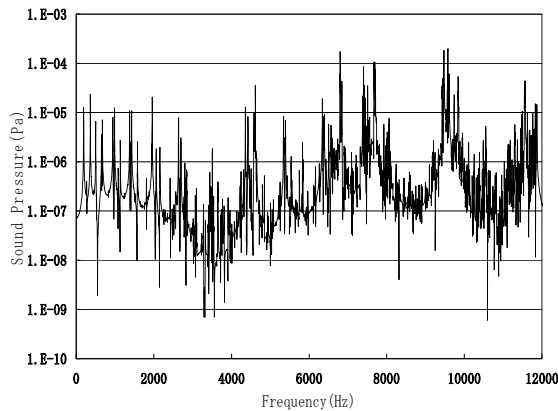


Fig.7 Sound pressure response in frequency domain after

7. 結論

1. 実験モード解析を打楽器シンバルに適用した結果、1000Hz までに 40 個の固有振動数を得て、計算モード解析で得た固有振動数と誤差の範囲内で一致した。
2. 擬似最小二乗法による板厚変更の構造最適化を、少ない繰り返し計算によって、行うことができた。
3. シンバルの音であるとは言い難いが、シンバルに似ている放射音を求める事ができた。
4. 今後の課題としては、シンバルの放射音を実際のシンバル音に近づける事である。そのためには、音質に大きな影響を及ぼす減衰比を、さらに正確な値とするために減衰比について学ぶ事である。また、実験モード解析の質を高めるために、計測技術を向上させる事である。

参考文献

- [1]長松昭男、”モード解析入門”、コロナ社、1993
- [2]戸川隼人、”有限要素法へのガイド”、サイエンス社、1979
- [3]岩原光男、長松昭男、”動特性を考慮した構造物の最適化法”、日本機械学会論文集 第 523 号 C 編、1990-3
- [4]岩原光男、岩佐幸紀、長松昭男、長尾裕史、寺西幸弘、天津成美、”ゴルフクラブ放射音の基礎的検討”
- [5]辻和幸、”用具製品の構造変更による音質向上(修士論文)”、2004

キーワード.

モード解析、構造最適化、擬似最小二乗法、放射音

Summary.

Research of tone quality by structural optimization of cymbals

Katsuya Kumeda

Graduate School of Engineering, Hosei University

Yoshiaki Shoda

Department of Mechanical Engineering, Hosei University

Mitsuo Iwahara Akio Nagamatsu

Department of Mechanical Engineering, Hosei University

We targeted in the research on tone quality, and adopted the percussion instrument cymbals. To model cymbals, the calculation mode was analyzed first as the experiment mode analysis. After cymbals were modeled, the design condition was tried, and, board thickness and the restriction condition were assumed to be a character frequency, and structural optimization for the cymbals tone quality improvement was tried. Moreover, to confirm whether tone quality had improved by structural optimization, the radiation sound was calculated.

Keywords.

Modal Analysis, Structure Optimization, Pseudo-least Square Method, Radiation Sound