

有限要素法による青銅製ガムラン用鍵盤の3次元固有値解析 - その3 音板の反りによる固有値の変化 -

日大生産工(院) ○原澤 悠 日大生産工 塩川 博義
日大生産工 豊谷 純

1 はじめに

本研究では、既報¹⁾に続き、インドネシア・バリ島における民族楽器ガムランの青銅製音板に対して、その形状と音響特性との関係を明らかにする事を目的としている。

ガムランの音板は音階に応じて厚みや音板の長さ、また断面形状も台形のものから丸くかまぼこ型になるものなど様々な形状のものが存在する。この断面形状の固有値への影響は既報¹⁾において、ガムランの台形型の断面形状が長方形断面形状のものよりも固有値を高めるということを明らかにしている。また、ガムランの音板は西洋の鉄琴などの音板と違い長手方向に直線ではなく山なりに反った独特の形状をしているという特徴がある。この反りの度合いは音板により異なっており、この反りも音板の固有値に影響を与えていると考えられる。

本報では、このガムラン特有の反りの度合いによる固有値への影響を検証するため、3種類の基本周波数の異なる音板を元に反りの度合いを変えた3Dモデリングを複数個作成し、3次元有限要素法解析を行い検証したので報告する。

2 測定方法

Fig.1 に示すように3種類の基本周波数の異



Fig.1 異なる音高の音板



Fig.2 実験方法

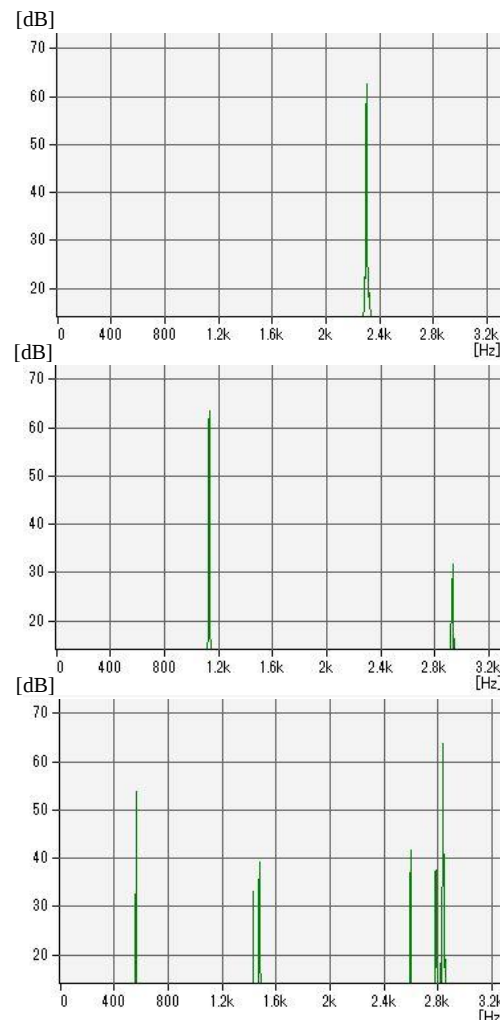


Fig.3 各音板のFFTパワースペクトル

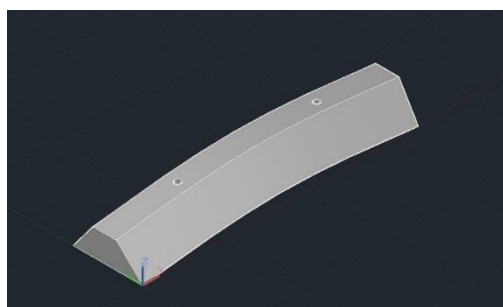
Three-Dimensional Eigenvalues Analysis by Finite Element Method of Keyboard for Gamelan
- Eigenvalues Change by Warping of The Sound Board -
Yuu HARASAWA, Hiroyoshi SHIOKAWA and Jun TOYOTANI

なる音板を用いて測定を行った。測定用の音板は3つとも本来音板を台座に止めるための穴が開いていないため、Fig.2のように長手方向において振動の節に当たる端から長さの1/4の地点を押えて音板を叩いて振動させ測定した。3種類の測定した音源からFig.3に示すようにFFTパワースペクトルを求める。

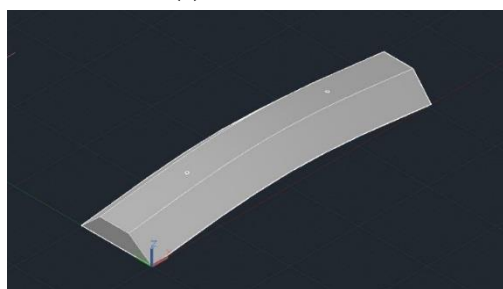
実験により、低音の音板の基本周波数は558 Hz、中音の音板のそれは1126 Hz、高音の音板のそれは2296 Hzである。

3 3Dモデリングの作成

本報ではFig.4に示すように3DCADを用いて各音板のモデリング作成を行う。作成したモデリングは、測定した音板と同様の反り具合のタイプから1mmずつ反りの度合いを大きくしていったものと小さくしていったものを音板ごとに作成する。反りの度合いが大きくなるもの



(a)高音の音板



(b)中音の音板



(c)低音の音板

Fig.4 各基本周波数の音板の3Dモデリング

は、Fig.5に示すように底面から15mmの高さになるまで作成する。反りの小さくなるものはFig.6に示すように直線になるまで作成する。各音板とも16個ずつモデリングを作成する。また、各モデリングにはANSYSによる有限要素法解析を行う際にモデリングを固定するための穴を長手方向の長さ1/4の地点と3/4の地点の所に設定する。

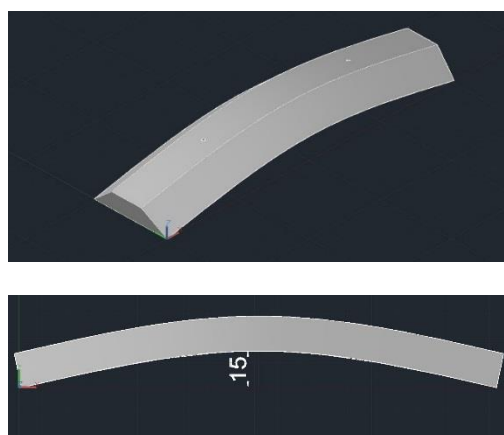


Fig.5 度合いが大きい音板

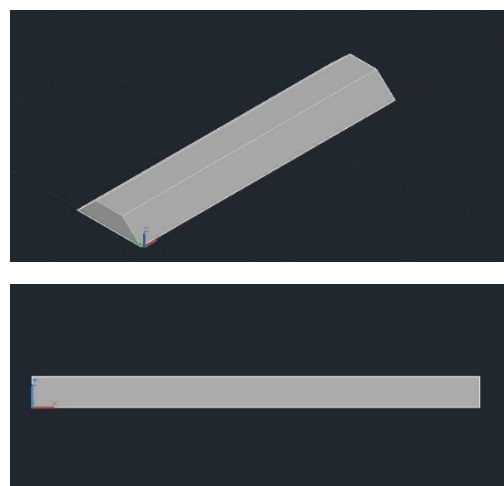


Fig.6 反りがない音板

Table 1 各音板の実物時の寸法(mm)

	高音	中音	低音
長手方向	169.0	204.0	252.0
短手方向	42.0	51.0	62.0
厚さ	18.0	14.0	9.5
反り高さ	7.0	9.5	10.5
固定穴 1(1/4)	42.3	51.0	63.0
固定穴 2(3/4)	126.8	153.0	189.0

4 基礎方程式

本報では、有限要素法でモード解析を行い、様々な形状のガムラン用音板の固有値を算出する。ガムラン用音板も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事が出来る。 ρ は密度、 A は断面積、 E はヤング率、 l は音板の長さ、たわみの変位 γ とする。

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

5 境界条件と数値計算方法

境界条件は Fig.7 に示すように音板の最下部分の節点を固定した。既報²⁾では X,Z 方向のみ拘束条件を設定していたが、本報では全自由度とする。3 次元のメッシュ分割はデータ作成が非常に煩雑になるために、有限要素計算には、著名な ANSYS を用いて、要素分割と数値解析、結果表示を行う。

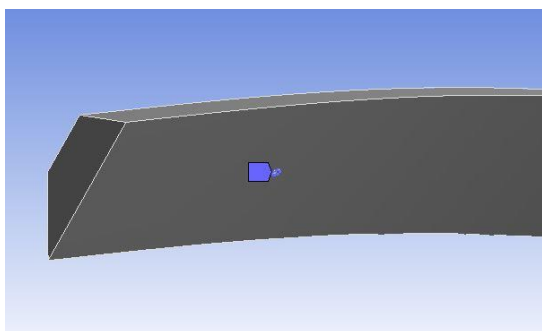


Fig.7 モデリングの固定位置

6 数値計算例

まず基本形状として、実験により測定を行った3つの音板の3Dモデリングを有限要素法によるモード解析を行う。メッシュの分割は Fig.8 に示されるように3次元六面体要素を採用した。以下に中音域音板の基本形状における計算に用いた緒元を表記する。

ポアソン比：0.35

ヤング率： 8.0×10^{10}

密度：8500.0 kg/m³

要素形状：3次元六面体 1次要素

節点数：36337 要素数：7840

3つの音域の違う音板の基本形状のモデリングを上記の緒元に基づき行い、ANSYS による固有値の解析結果と実験値の誤差を Table 2 に

示す。既報²⁾により2次モードの際に基本周波数に近似する事が確認されているので、解析結果には2次モード時の値を用いる。Table 2 に示す結果により固有値解析結果と実験値がほぼ一致したため上記のポアソン比、ヤング率、密度、要素形状の緒元を用いて反りを変化させたモデリングの解析を行う。

Table 2 実験値と解析値の相対誤差(Hz)

	高音	中音	低音
実験値	2296.0	1126.0	558.0
解析値	2200.0	1164.7	518.3
誤差	4%	-3%	8%

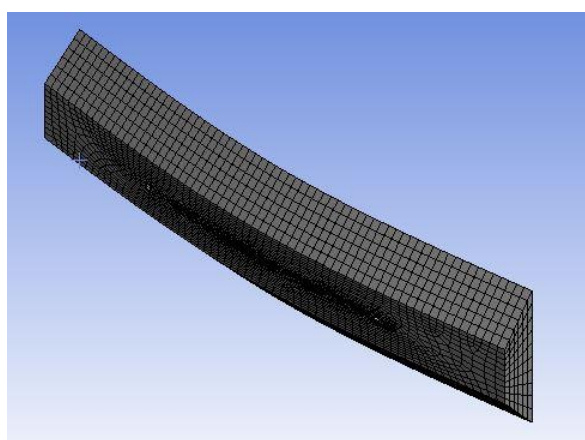


Fig.8 要素分割図

7 数値計算結果および考察

中音域音板の有限要素法によるモード解析を行った際の結果を Fig.9 に示す。そして反りを底面からの高さ 15 mm にしたものを Fig.10、底面からの高さを 0 mm にしたものを Fig.11 に示す。また、各音域の音板の反りの変化における固有値解析の結果を Fig.12 に示す。点が解析した値であり、実線がその回帰直線である。グラフに示す通り音板に反りを加えると固有値が高まることが確認できる。

上昇率は低音の音板が一番低く、高音の音板が一番高いことがわかる。高音域の音板の上昇率が一番高い理由として、音板の長手方向の長さが短いため、反りの度合いによる固有値への影響が大きいためと考えられる。また、周波数の変動幅については、高音域の音板は中音域、低音域の音板よりも厚さがあるため、振動が厚さの影響を顕著に受けるために周波数の変動幅が大きく乱れるものと考えられる。

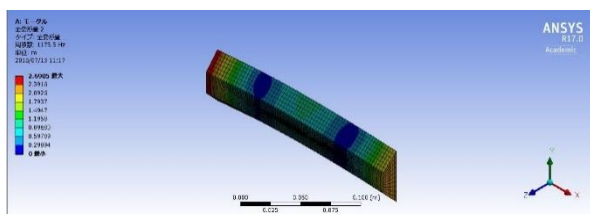


Fig 9 実物モデリングの中音域音板

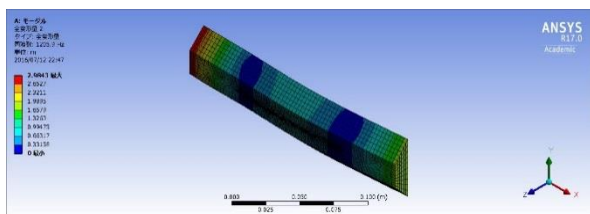


Fig.10 反りの度合いが大きいモデリング

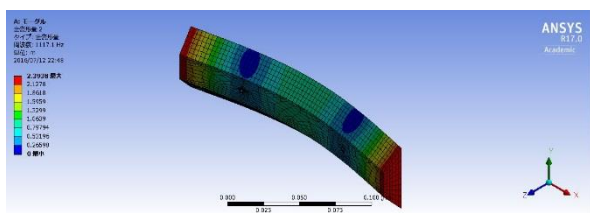


Fig.11 反りの度合いが小さいモデリング

8 まとめ

本論では、ガムラン用音板の反りによる固有値への影響を解明するために3Dモデリングを作成し3次元有限要素法を用いてモード解析を行った。その結果反りの度合いを大きくしていくと固有値が高くなるということが確認できた。また、固有値の変化は、高音の音板のほうが大きくなるが、高音の音板は厚さがあるため周波数の変動幅が大きくなるということも分かった。今後は調律で行われる音板を削ることによる固有値の変化について明らかにする予定である。

謝辞

本研究は、国の科学研究費補助金制度による助成（基盤研究(C)，研究代表者：塩川博義，課題名：音響解析を用いたインドネシア・バリ島のガムランの変遷，研究課題番号：25370114，平成25～28年度）を受けて実施している。

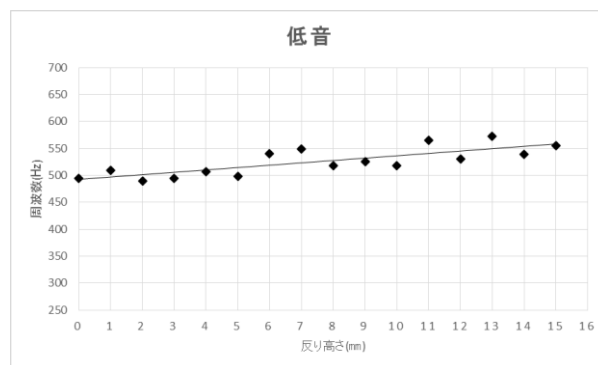
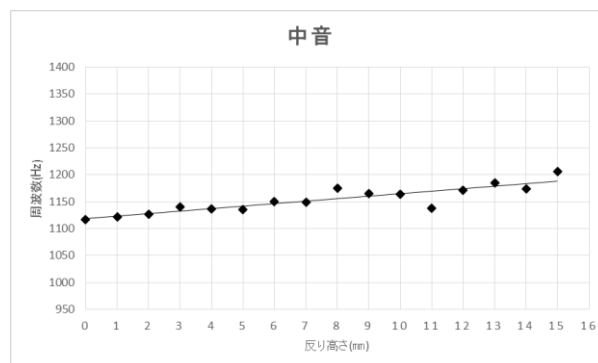
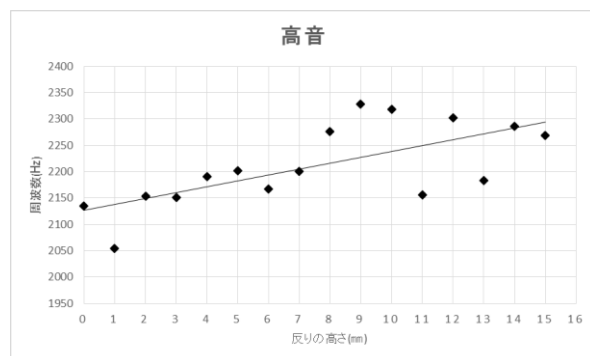


Fig 12 各音板の反りによる固有値の変化

参考文献

- 1) 豊谷，塩川，有限要素法による青銅製ガムラン用鍵盤の3次元固有値解析 その2、日本音響学会 2013 年秋季研究発表会公演論文集，日本音響学会，2013 年，2-3-10，895-896
- 2) 豊谷，塩川，有限要素法による青銅製ガムラン用鍵盤の3次元固有値解析，日本音響学会 2012 年秋季研究発表会公演論文集，日本音響学会，2012 年，1-10-8，897-898