

実モデルを用いたヴァイオリンの大規模振動試解析

Large scale vibration analysis of a violin using a real model

小嶋 美宇¹⁾, 塩谷 隆二¹⁾, 横山 真男²⁾, 武居 周³⁾, 矢川 元基¹⁾
Misora Kojima, Ryuji Shioya, Masao Yokoyama, Amane Takei and Genki Yagawa

- 1) 東洋大学 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100, E-mail: shioya@toyo.jp)
- 2) 明星大学 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)
- 3) 宮崎大学 (〒889-2155 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)

The numerical simulations of the mode vibrations of violin are performed by the finite element method using super computer and the software. The geometry of violin is scanned by micro CT scanner and the orthotropic properties of spruce and maple, such as the Young’s modulus, the rigidity modulus and the Poisson’s ratio, are set in the parameters of numerical simulation. The shapes of the main mode vibration are shown in this paper.

Key Words : Vibrations, Violin, Numerical Simulation, Eigenvalue analysis

1. はじめに

ヴァイオリンの振動解析は、近年の数値シミュレーションによって解析が進んでいる[1-3]. しかし、楽器の音色 (Timbre) の良し悪しの議論はいまだに経験的であり主観的である. これまでにも多くの科学者や製作者がヴァイオリンの名器として知られるStradivariusの作品を様々な角度から分析し、音色の美とは何かを説明しようと試みてきた. 本研究では、実際のStradivariusによるヴァイオリンをスキャンしたモデルを用いた大規模振動解析の試みについて紹介する. また、三次元解析が可能なソフトウェアを用いて木材の性質によってヴァイオリンの振動数がどのように変化していくのかを調査した.

2. 数値シミュレーションについて

(1) マイクロ CT スキャンとメッシュ生成

数値シミュレーションに用いる 3D のジオメトリデータの取得について概要を示す. マイクロ CT スキャナ(精度, 0.1mm)を用いて、17 世紀から 18 世紀のイタリアのヴァイオリン製作者の一人であるAntonio Stradivari(1719 年)の楽器をスキャンした. スキャン時のエラーやノイズである断片や小孔を除去したのちSTLファイルとして保存した. そのポリゴンデータをADVENTUREClusterのBuilderにインポートした. メッシュの要素種別は四面体二次要素に設定し、基本節点間隔は30mmで定めた.

(2) 木材の直行異方性の考慮

ヴァイオリンに用いられるような木材を計算対象とする場合では、木材の直行異方性を数値シミュレーションに設定する必要がある. ヴァイオリンの材料の物理的特性を、木目方向 (Longitudinal) とそれに直交する年輪方向 (Radial) , そして年輪の周方向 (Tangential) の3方向の直交異方性でモデル化した. 直交異方性の設定値については、Table 1 に示すように、ヤング率 (縦弾性係数,

Young’s modulus) , 剛性率 (Rigidity modulus) , ポアソン比 (Poisson’s ratio) であり、それぞれの値は文献[4]で計測された代表値を用いた. ここで、Table 1の E_T , E_R と剛性率の各値は長さ方向のヤング率 E_L に対する比率である. また、Table 2はポアソン比に対する比率である.ヤング率 E_L については、文献[4]のメープルの代表値である12.6GPa を、また、スプルースは9.9Gpaを用いた. ヴァイオリンの材料には主にスプルースとメープル、黒檀などが用いられる. 密度は、スプルースが $0.36 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, メープルが $0.63 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ である. 黒檀は等方性材料とみなし、比重 $1.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, ヤング率1,200kg/m³ , ポアソン比0.2とした. しかし、これらの値はスキャンしたヴァイオリンの実際の物性値とは異なるため、今後のオールド楽器の物性値をどう計測するかを検討する必要がある.

Table 1 Values for Orthotropic properties for setting in numerical simulation

Property	Maple	Spruce
Young’s module E_R / E_L	0.132	0.078
E_T / E_L	0.065	0.043
Rigidity modulus G_{LR} / E_L	0.111	0.064
G_{RT} / E_L	0.021	0.003
G_{LT} / E_L	0.063	0.061

Table 2 Values for Orthotropic properties for setting in numerical simulation

Property	Maple	Spruce
Poisson’s ratio μ_{LR}	0.424	0.372
μ_{RT}	0.774	0.435
μ_{LT}	0.476	0.467
Density(kg/m ³)	0.63×10^3	0.36×10^3

(3) 有限要素法解析

商用ソフトウェアであるADVENTUREClusterを用いて、固有値解析、モーダル周波数応答解析を行った。求める周波数は、文献[3]より200Hzから500Hzの範囲とした。Intel Xeon W-2223, 256GBByteのメモリを搭載したWindowsサーバを用いて2Coreでの計算を行った。

3. シミュレーション結果

(1) ヴァイオリンの振動モード

実際のヴァイオリンの板の厚みは均一ではなく、中央部が厚く周辺部へかけて緩やかに薄くなっている。数値シミュレーションにおいても、この厚みを考慮しないと正しい計算結果が得られなく、表面のアーチの形状のみをスキャンするだけでは不十分である[3]。よって、本研究のように3Dモデリングなどにより楽器の内側の座標の取得による正しい厚みの情報が重要である。また、スーパーコンピュータを用いてさらなる大規模振動解析を行った。今回は、モード振動の条件下でメープルとスプルースの2種類の材料について調査した。ここで、Table 3 にヴァイオリン本体の振動モードを示す[1,2]。A0 は breath mode とも呼び表板全体が上下に振動する吸込み湧き出しの単極子のような振動モードで、音量に関連すると言われる。また、CBR (Center Bout Rotation)モードというねじれモードや、表板の振動に関連する B1-と裏板の振動に関連する B1+(Corpus mode)がある。B1-は音のダイナミクスや音色(明るい, 暗い)に、そして B1+はパワーに関係すると言われている。今回の研究では計算コストなどの制約もあり、楽器の表板のみの振動と周辺音場に絞って計算を行った。

Table 3 Frequencies of A0, A1, B1-, B1+ and CBR[1,2]

Mode	Frequency
A0 (first cavity mode)	270 - 290
CBR (Center bout rotation)	380 - 420
B1- (corpus mode, body mode)	445 - 465
B1 + (corpus mode, body mode)	520 - 540
A1 (second cavity mode)	460

(2) 楽器の周波数

固有値解析の結果では、節点数430,340、要素数247,183、計算時間は96,754.2秒という結果が得られた。周波数350HzのときにA0モードの振動に近い解析結果が出力された。Fig.1は350Hzにおける、ヴァイオリンの真上(表板側)から見た振動の様子を示している。Fig.2は350Hzにおける、ヴァイオリンの真下(裏板側)から見た振動の様子を示している。

モーダル周波数応答解析については、現在解析中であり、解析終了後に振動モードを分析する予定である。

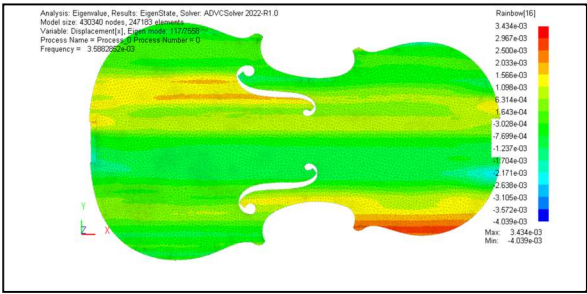


Fig.1 Displacement of violin (Front Side)

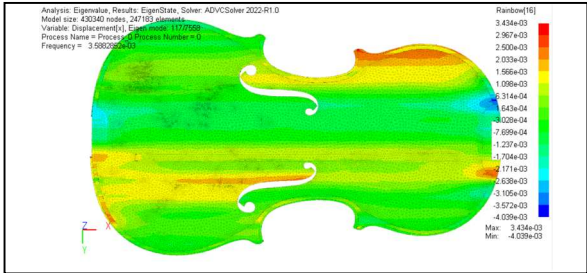


Fig.2 Displacement of violin (Back Side)

4. おわりに

本研究ではヴァイオリンの実物モデルを用いた大規模振動解析を行った。今回は表板のみの解析を実現したが、今後、すでにモデル化を終えている部材を追加し、ヴァイオリン全体解析を行う予定である。さらに、弦の加振による楽器の振動と音場の解析に拡張する予定である。

参考文献

[1] Woodhouse J., "The acoustics of the violin: a review." Reports on Progress in Physics 77.11 (2014) 115901.

[2] Gough, C. E. "A violin shell model: vibrational modes and acoustics" The Journal of the Acoustical Society of America 137.3 (2015): 1210-1225.

[3] Yokoyama, M., DE Lucia, R. R., Antonacci, F., & Sarti, A. Influence of orthotropic properties on vibration of violin top plates, Proceedings of International Conference on Acoustics 2019 (2019).

[4] Green, D. W., Winandy, J. E., and Kretschmann, D. E. "Mechanical properties of wood. Wood handbook: wood as an engineering material" Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: (1999): 4.1-4.45, 113.