

ヴァイオリンの構造・音響連成数値シミュレーション Coupled numerical simulation of structure and acoustic of violin body

横山 真男[†] 吉田小百合^{††} 堀西基^{††}

Masao YOKOYAMA[†] Sayuri YOSHIDA^{††} Yuki HORI^{††}

[†] 明星大学情報学部 〒191-0042 東京都日野市程久保 2 丁目 1-1

^{††} 株式会社文京楽器 〒112-0002 東京都文京区小石川 2-2-13

[†] Faculty of Information, Meisei University 2-1-1 Hodokubo, Hino-Shi, Tokyo, 191-8506, Japan

^{††} 2-2-13 Bunkyo Gakki Co., Ltd. Koishikawa Bunkyo ku, Tokyo 112-0002, Japan

Abstract The numerical simulations of the mode vibrations of violin and the radiation patterns around violin are performed by the finite element method using COMSOL Multiphysics™. The objective of this study is to clarify the relationships among the properties of wood, the mode vibrations and the acoustic radiations. 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 and the acoustic pressure around body are shown in this paper.

1. はじめに

ヴァイオリンのモード振動や周辺音場の解析は 1970 年代頃から行われ[1,2]、近年では数値シミュレーションによる解析も進んでいる[3,4]。しかし、木材の機械的性質であるヤング率や比重などの変化が、本体の共鳴に重要な振動モードである mode 5 (いわゆるリングモード) にどう影響するのかといった定性的・定量的な解明には至っていない。さらに、その楽器の振動による周辺音場の連成問題としてのシミュレーションも少ないといえる。本研究では、これまで高精度な 3D スキャナを用いてヴァイオリンの裏板・裏板をスキャンし有限要素法による数値シミュレーションを行ってきた[5]。今回は、イタリアのガルネリー族の製作し

たオールド楽器をマイクロ CT スキャンにて 3D 形状を取得し、魂柱やバスバーを含む本体まるとの数値シミュレーションに成功した。

2. 数値シミュレーションについて

2.1 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。東京都産業技術総合研究所にあるマイクロ CT スキャナを用いて、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 Guarneri Giuseppe Filius Andrea の作品(1698 年)をスキャンした。Guarneri(ガルネリ)一族は 17 世紀から 18 世紀にかけてイタリアのクレモナの町で名器を多く生産した家系で、特に Baltoromeo Giuseppe は

Guarneri del Gesu (Gesu はイエスを意味する) と称され、彼の楽器はストラディバリ以上の価格で取引されることもある。

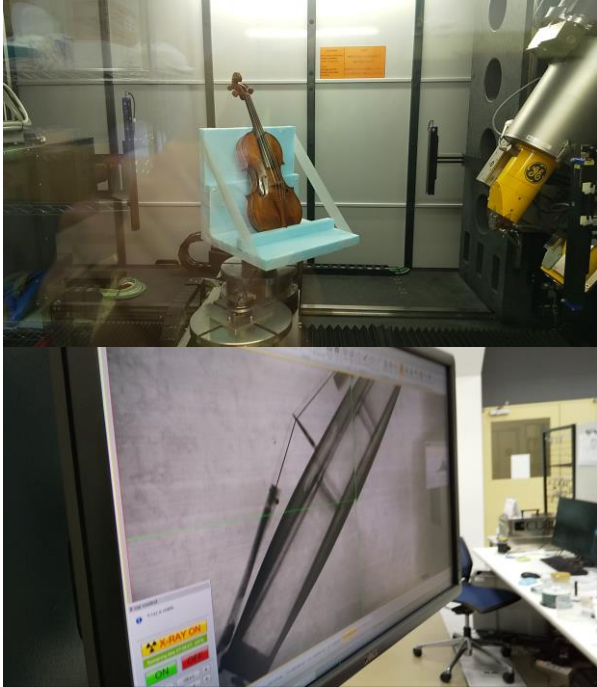


Fig.1 Micro CT scanner at Tokyo metropolitan industrial technology research institute.

Fig.1 は都産技研でのスキャンの様子である。マイクロ CT スキャナは小さい物体であれば $10\mu\text{m}$ の精度で計測できる装置である。しかし、本研究のようにヴァイオリン全体を含むとなると、カメラと楽器の距離を離さなければならず、今回はスクロールも含めて全体をとるため、結局 $0.2\sim 0.3\text{mm}$ の精度となった。楽器は図のように斜めになるように発泡スチロールの台座を作り、1 回転するようにしてスキャンする。図の下のように魂柱やバスバー、コーナブロックなど内部まで詳細に座標が観察できていることが分かる。しかし、スキャンしたデータは多くのノイズやハレーションを含んでおり、後処理として CAD ソフトを用いてそれらを補正する必要がありこの作業が困難を極めた。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 COMSOL Multiphysics™ にインポートし 3 次元のジオメト

リデータを作成する。ただし、今回は COMSOL Multiphysics で解析する際の性能の限界ため、メッシュ数は最適化により 1/10 程度に減らしている。自動メッシュ機能により四面体メッシュが生成され (メッシュ数は約 2M)、有限要素法でモード周波数が計算される。

2.2 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には、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は Fig.2 のように製材され、物理的特性は木目方向 (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 方向の直行異方性でモデル化した。

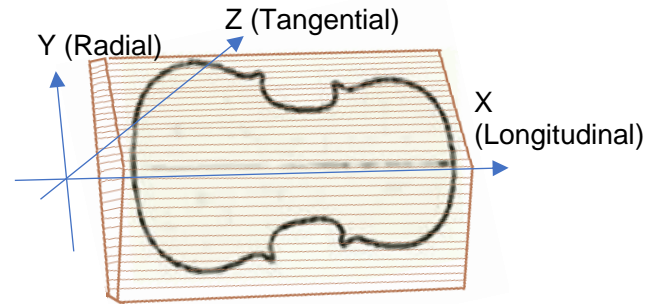


Fig.2 Orthotropic of violin plate

Table 1 Values for Orthotropic properties for setting in numerical simulation ³⁾

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
Poisson's ratio μ_{LR}	0.424	0.372
μ_{RT}	0.774	0.435
μ_{LT}	0.476	0.467

* G_{RT} is assumed by the average of other hard woods

直交異方性の設定値については、表 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[6]で計測された代表値を用いた。ここで、 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。ヤング率 E_L についても文献[6]のメープルの代表値である 12.6GPa を用いた。これらの値はスキャンした楽器の実際の物性値とは異なるため、今後、数値シミュレーションに与える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。しかし、完成したヴァイオリンから木材の正確なヤング率や比重等の計測は現実的には困難である。

3. シミュレーション結果

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。よって、本研究のように CT スキャン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。なお、今回の解析ではネックを取り除いた本体のみの解析を行った。ネックの振動や音への影響はもちろんあるが、现阶段では計算コストなどの制約もあり、楽器の共鳴箱である本体のみの振動と周辺音場に絞って計算を行った。

Table 2 Frequencies of A0, A1, B1-, B1+ and CBR[7]

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 (near B1-)

ここで、Table 2 にヴァイオリン本体の振動モードを示す[7]。A0 は breath mode と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[7]。

Fig.3 は本体の表板側と裏板側の振動モード A0、CBR、B1+の計算結果である。Kreit[7]のクラドニ法による振動モードの観察に近い形状が得られている。表板/裏板だけの状態ではノードラインは対称であるが、バスバーや魂柱がセットされた本体ではノードラインは非対称となる。なお、モード周波数については、Green[6]の代表値で行ったところおおよそ近い値であるものの実測値でないため、现阶段では単純な比較や評価はできないが付記しておく。

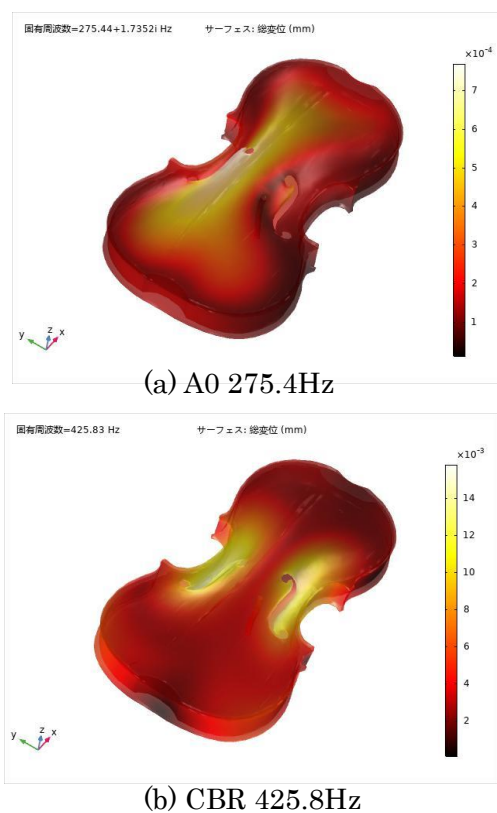
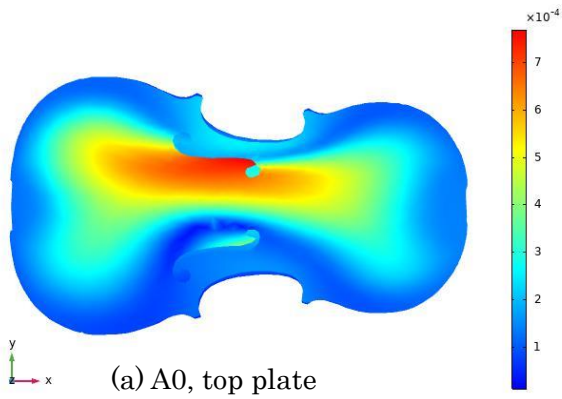
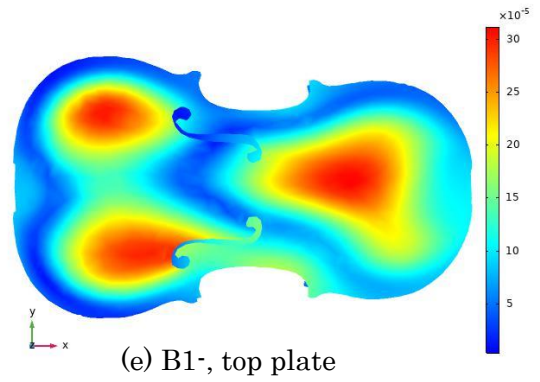


Fig.3 Displacement of violin in mode A0 and CBR

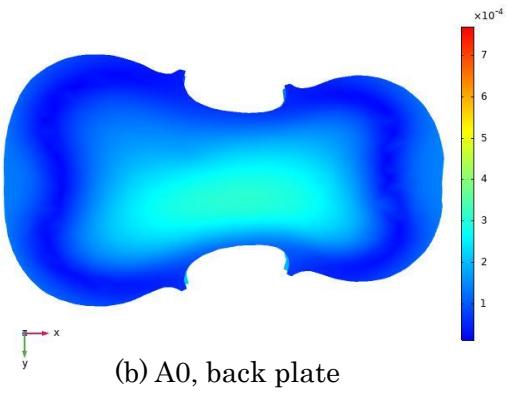
固有周波数=275.44+1.7352i Hz サーフェス: 総変位 (mm)



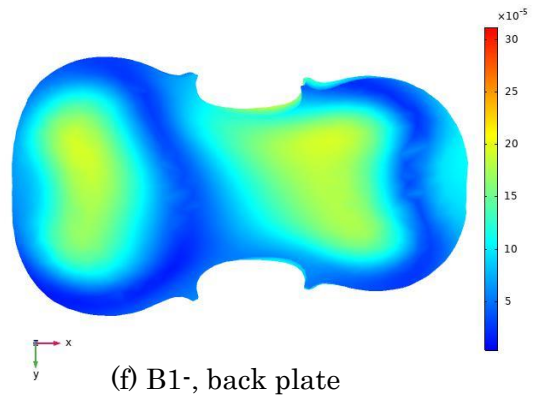
固有周波数=476.56+0.68721i Hz サーフェス: 総変位 (mm)



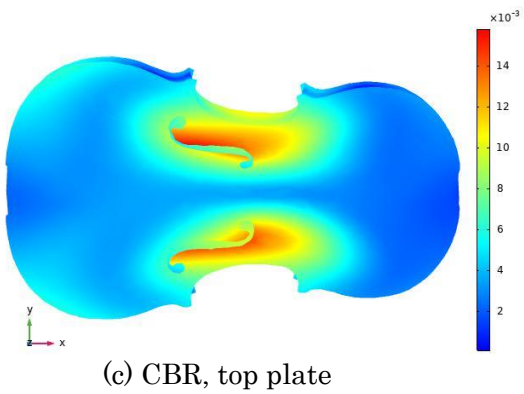
固有周波数=275.44+1.7352i Hz サーフェス: 総変位 (mm)



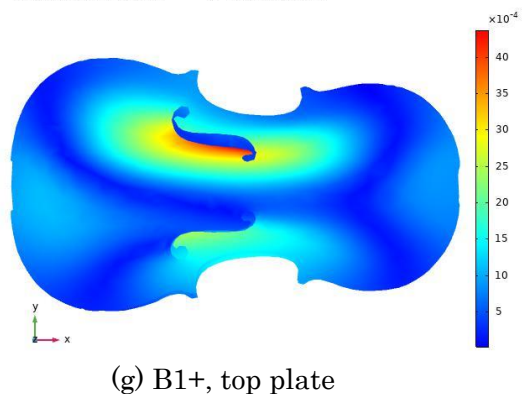
固有周波数=476.56+0.68721i Hz サーフェス: 総変位 (mm)



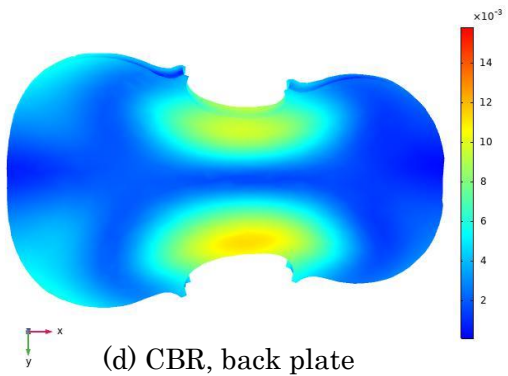
固有周波数=425.83 Hz サーフェス: 総変位 (mm)



固有周波数=556.49+1.538i Hz サーフェス: 総変位 (mm)



固有周波数=425.83 Hz サーフェス: 総変位 (mm)



固有周波数=556.49+1.538i Hz サーフェス: 総変位 (mm)

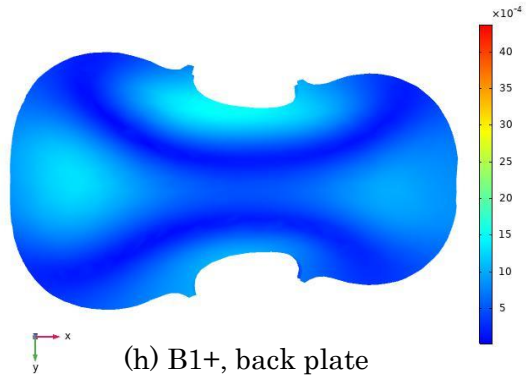


Fig.4 Displacement and node line of top / back

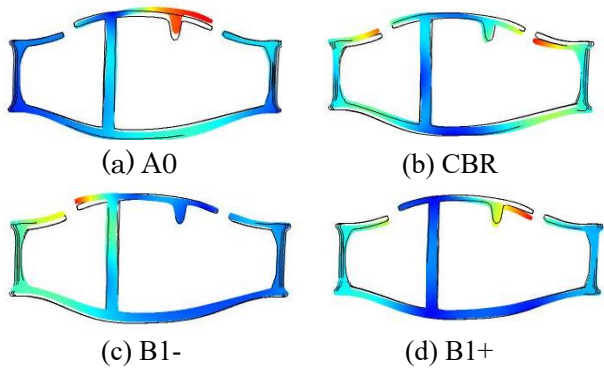


Fig.5 Displacement of y-z plane at sound post.

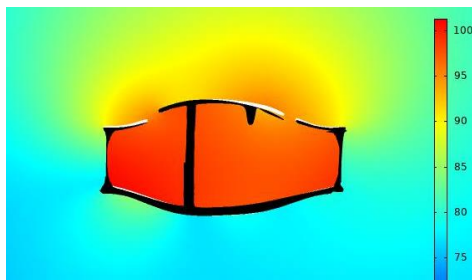
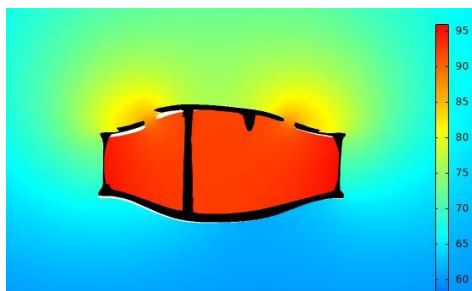
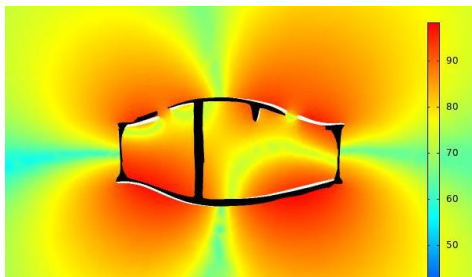
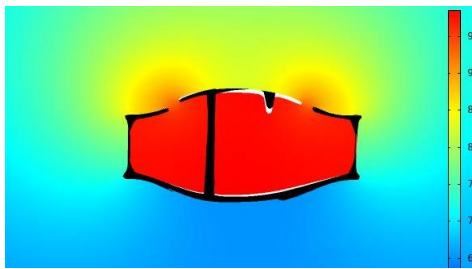


Fig.6 Acoustic radiation in y-z plane at sound post (dB).

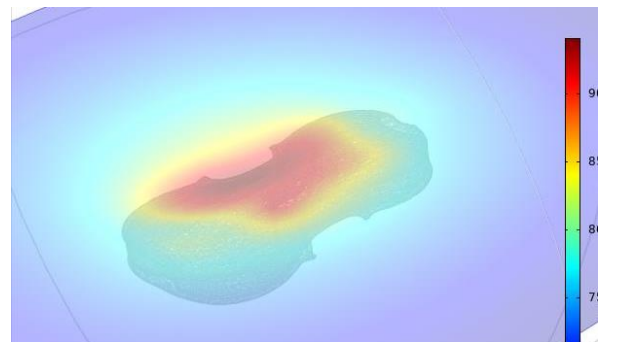
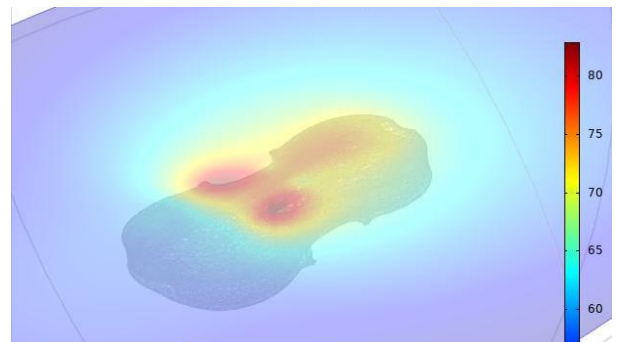
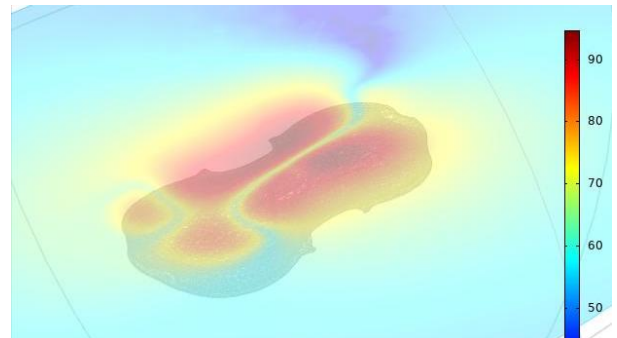
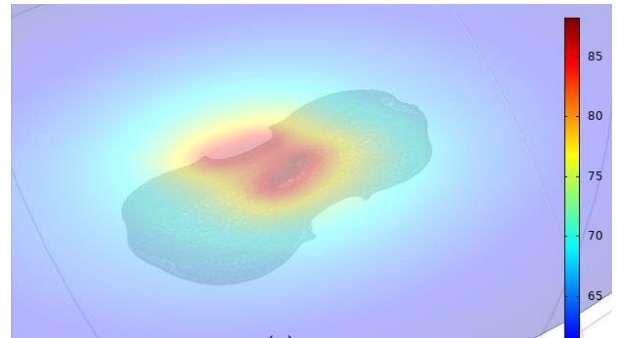


Fig. 7 Acoustic radiation around violin (Sound pressure level, dB)

Fig.4 は、A0、CBR、B1-および B1+の表板／裏板の変位とノードラインを示す。A0 や B1+の裏板のノードラインは Kreit[7]の示したクラドニ法による実験結果に近い形状が得られた。

Fig.5 は、魂柱を含むネック側から見た y-z 断面の振動の様子を示している。縦の棒が魂柱であり、右の上の板(表板)についている突起がバスバーで、さらに両側の孔が f 字孔である。A0 モードのように表板が上下に収縮するときは、魂柱を軸にバスバーの位置が大きく上下に変動している。CBR のように左右にねじれるように振動するときは f 字孔の周囲が大きく変位している（カラー画像では赤色に変異の大きいところで青に変位の少ないところを表している）。

Fig.6 は、楽器の内外の音圧レベル (dB)を表している。f 字孔からの音の放出がみられ、内部の音圧が高い。左右にねじる CBR モードでは中央で音圧分布が分かれている。A0 と B1-は表板の振動に関係するモードであるため上側の音圧が高く、CBR や B1+では裏板の下側にも大きく音が放射しているという結果が得られた。

Fig.7 は周辺の音圧分布(dB)を示したものである。f 字孔の音圧が高いことから、f 字孔が音場へ与える影響が大きいことが分かる。CBR では左右交互に音が放射されている。

4. おわりに

本研究では、COMSOL Multiphysics を用いた有限要素法によるヴァイオリンの本体の振動モードと周辺音場の連成数値シミュレーションを行った。将来は弦の加振による楽器の振動と音場の解析にまで拡張したい。そのために、現在、スーパーコンピュータの利用による大規模数値計算による解析の検討を行っている。

参考文献

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

[2] Bissinger, G. "Contemporary generalized normal mode violin acoustics" Acta Acustica united with Acustica 90.4 (2004): 590-599.

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

[4] Ravina, E. "Violins characterization through vibro-acoustic experiments" In Acoustics 2012 (2012).

[5] 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).

[6] 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.

[7] Kreit, P. "The Sound of Stradivari." (2018).