

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：57403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K00225

研究課題名(和文) ヴァイオリン製作・調整における駒及び魂柱の最適位置の検討

研究課題名(英文) Investigating the optimal position of the bridge and soundpost when making and tuning a violin.

研究代表者

西村 勇也 (Nishimura, Yuya)

熊本高等専門学校・電子情報システム工学系C Iグループ・准教授

研究者番号：60585199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：多岐に渡るバイオリン調整の中から評価が一貫して揺るがない楽器の指向特性をターゲットとして「駒と魂柱の調整のみでどのように指向特性が変化するのが」について、CTスキャンによる魂柱位置の把握と無響室での演奏音を収録し指向特性の評価を実施した。複数台のバイオリンを用いた実験の結果、職人による魂柱調整によって放射特性が大きく変化することが明らかとなり、先鋭(遠鳴りの音)となる条件を様々な魂柱位置から抽出した。先鋭となる条件は、魂柱と表裏の板との接地面積に大きく依存することが明らかとなり、更に共振周波数の理論計算からバイオリン筐体内の共振周波数の発生と先鋭さに相関があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、バイオリンが調整によって生まれ変わる可能性を秘めていることを楽器職人は理解しているにもかかわらず、これまで研究されてこなかったという点に加え、調整技術は技術・伝統の継承や職人育成のため習熟の必要があることから社会的意義は極めて高い。音響工学を専門とする研究代表者とバイオリン職人が職業的枠組みを超えて、工学理論と洗練された職人の感性とが有機的に結び付けば、17-8世紀に製作された銘器バイオリンの音響法則の解明と、その法則を反映したより優れたバイオリン製作・調整技術が開発される潜在的可能性を有している。本研究は可能性の一要素となり職人の技術継承を推進する意味でも学術的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：This study focused on the directivity characteristics of the violin, which have been evaluated with consistent and stable evaluation over a wide range of violin tunings. In order to find out "how the directivity characteristics can be changed only by adjusting the bridge and the soundpost", the position of the soundpost was determined by a CT scan and the directivity characteristics were evaluated by recording the sound of a performance in an anechoic chamber. The results of the experiments with several violins showed that the radiation characteristics were significantly changed by the adjustment of the soundpost by the craftsman, and the conditions for a sharp (far-sounding) sound were selected from different positions of the soundpost. In addition, theoretical calculations of the resonance frequency showed that there is a correlation between the generation of resonance frequency inside the violin body and sharpness.

研究分野：音楽音響

キーワード：楽器音響 ヴァイオリン 魂柱 放射特性 共振周波数 調整 CTスキャン

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

バイオリン製作は1500年代中期に始まり、今日までさまざまな技法・流派により製作・調整されている。製作・調整の大半は職人のこれまでの試行錯誤や経験的な勘などの工房内ノウハウの蓄積に頼って行われており、門外不出とされている。また、製作指導書や文献は極めて少なく、その多くは音響学的に正しいか否かの判断が付かないことが多い。

1978年にL. Cremerらの研究によって明らかになった<sup>[1]</sup>“バイオリンの銘器は鋭い指向特性を持つ”に始まりこれまでバイオリンの指向性について様々な研究がなされている。現代も銘器を作るためにバイオリン工房ではAntonio Stradivariusを代表とする歴史上の名匠が作った銘器を研究し製作を続けている。

バイオリンの歴史的研究<sup>[2]</sup>から1700年代に製作された銘器と呼ばれるバイオリンは、表裏の板の固有振動数が半音から全音(約30[Hz])異なるよう成形されていることが判明し、現在ではこの手法による製作が一般的に普及している。さらに、近年の研究では板の固有振動のみでなく、図1に示す表板の左右2ヶ所あるf字孔によるエアトーン(筐体内空気による共鳴音)との関係が重要であると結論付けている。このように表裏の板のみを論じて、未だ銘器を生む製作方法が確立しておらず、職人は日々試行錯誤を重ね製作せざるを得ない。



図1 表板とf字孔

またバイオリン職人は製作だけではなく、既存の楽器をも調整するスキルが必要である。300年前に作られた銘器が今もなお演奏家の要求を満たしているのは職人による調整の賜物であり、銘器であっても調整次第では模造品以下の音質になってしまう。つまり腕の良い職人が調整を施し、奏者を満足させることで工房の信頼を得ることができるのである。

本研究は「音響工学的観点によるバイオリン職人の技術継承支援」をタイトルに掲げ、音響学的に正しい手法によるバイオリン工房の持続可能性を支援する必要性があることから構想に至った。

### 2. 研究の目的

バイオリンの研究はこれまで様々なパーツで行われ、最も重要とされる表板・裏板については振動解析、ニス・接着剤の化学的特性や木材の乾燥方法など多岐に渡る。本研究がターゲットとしている楽器の指向性については、L. Cremerらのストラディバリウスを用いた研究などがあるが、いずれも楽器の「個体差」について論じた研究である。

バイオリンが調整によって生まれ変わる可能性を秘めていることは明白であり、本研究は「駒と魂柱のみの調整で如何にして鋭い指向特性を得ることができるか」について「駒」と「魂柱」の位置関係にターゲットを絞り、評価が一貫して揺るがない楽器の指向性を評価基準としてバイオリン職人との連携により、音響工学的観点から調整技術の定量的な指針を提供し、職人の技術継承支援を目的としている。

駒と魂柱をターゲットとする理由について、表板と裏板は製作時に緻密に寸法を決定する必要があり、製作後は厚み以外の形状変更はできない。板厚は固有振動数に関係し、さらにf字孔によるエアトーンとの兼ね合いが音色を左右する大きなパラメータとなるのは上述した通りである。このように表板と裏板は最重要パーツである反面、固有振動数を測定するためには当然楽器を分解する必要がある。事実、一度分解した楽器を再度組上げたときの組み立て誤差や駒と魂柱の位置関係が再現できないことより、音響の変化点が膨大になる。

一方、駒と魂柱の調整は楽器を分解する必要がない。駒は直接手で触れて調整でき、魂柱はf字孔から治具を用いて調整が可能である。いずれも接着剤などで固定されておらず調整による破損のリスクも無く、調整位置の再現性が非常に高いと言える。このことから本研究ターゲットの魂柱と駒は十分適切であると言える。

### 3. 研究の方法

駒と魂柱の調整とは、図2に示す「駒」と「魂柱(こんちゅう)」のバランス調整を行うものであり時間にして数十分の作業である。実はこのバランス調整こそが職人の腕の見せ所であり、経験や勘が必要である。バランス調整は駒と魂柱の位置を最適化することである。この位置関係は音色をはじめ音量や指向性に大きく関係するが、指導書や文献といったマニュアルは皆無である。奏者によって音色や音量の嗜好は異なるため調整方法は奏者の依頼に応じて調整することが多いが、指向性についてはL. Cremerの研究で述べられた通り、一貫して鋭い楽器が良いとされる。この「駒と魂柱のみの調整で如何にして鋭い指向特性を得ることができるか」を以下の研究手順(図3)により取組む。

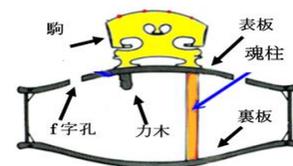


図2 筐体内の魂柱と駒

- (1)バイオリンの筐体・駒・魂柱のX線CT測定により寸法・位置関係を明らかにする。
- (2)理論計算によって楽器の筐体内共振周波数・音圧の解析を行う
- (3)無響室でのバイオリンの実演奏音収録により空間放射特性(指向性)を測定する。
- (4)バイオリン職人による駒・魂柱のバランス調整を実施する。

(5)調整後のバイオリンに対し研究手順(1)～(4)を再度行い駒・魂柱の移動度と指向性の変化を解析する。この手順を複数回繰り返して、調整による位置関係と指向性の相関指標を作成する。

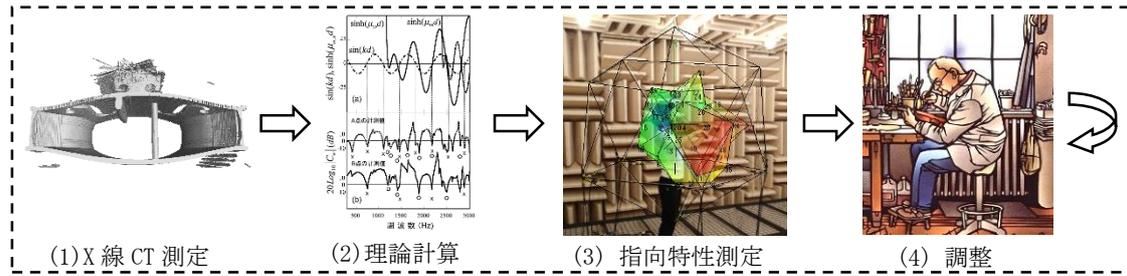


図3 研究手順

本研究は2017年度挑戦的研究(萌芽)にて採択された「音響工学的観点によるバイオリン職人の技術継承支援」(7K18472)によって得られた複数台のバイオリンを用いた研究結果を更に発展させ、図4の魂柱調整位置の概略案に示す通り、基準となる魂柱位置からA点、B点のように位置を変更し、その際の指向特性がどのように変化するかを解明することにより、調整位置と指向特性の指標を作成する。

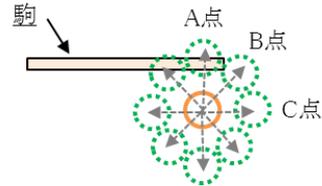


図4 魂柱調整位置の概略案

理論計算によるバイオリン筐体内の共振周波数の解析として、直方体ユニットの筐体内部音圧  $P_L$  の一般式(1)を導出した。

$$P_L = j Z_w \left[ -\frac{1}{\sin(kL)} \{ U_0 - U_L \cos(kL) \} + \sum \left\{ \frac{1}{\mu_{m,n} \sinh(\mu_{m,n} L)} U_0 D_{m,n}^a + \frac{\cosh(\mu_{m,n} L)}{\mu_{m,n} \sinh(\mu_{m,n} L)} U_L D_{m,n}^b \right\} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \right] \quad (1)$$

この一般式からユニット内の共振周波数の関係式を得ることができ、ユニット寸法や開口面積などパラメータを変更することにより内部共振の発生周波数や音圧レベルが変化する。つまり、筐体をバイオリン寸法に変更し開口部をf字孔、音源を駒及び魂柱とすることにより応用が可能となる。

バイオリンの筐体内には多数の共振と高い音圧が必要である。弓によって擦弦された運動エネルギーが弦振動となり、駒・表板・魂柱・裏板の順に伝わり筐体内で音を増幅させ音響エネルギーとして放射される。この共振による音響エネルギーと指向性との関連について明らかにする。

#### 4. 研究成果

研究手順に則りバイオリン職人に魂柱のみの調整を依頼し、調整前後の楽器によるX線CT測定【手順(1)】、バイオリン筐体と魂柱位置による共振周波数の理論計算【手順(2)】、本校所有の無響室での指向特性測定【手順(3)】、調整後のバイオリンに対して再び職人による調整【手順(4)】を繰り返して行うものである。X線CT測定の結果(一例)を図5に示す。

図5は1880年にパリでAuguste Sebastien Phillippe Bernardelによって製作されたバイオリンに対して魂柱のみの手順(1)、調整前後の状態を示しており、CT画像をメッシュデータ(STL形式)とし、魂柱の移動度を詳細に測定した。図5(A)は表板・駒・魂柱の位置関係を示しており、僅かに魂柱のみが移動している様子がわかる。魂柱の位置を拡大したものが図5(B)である。X線CTの解像度は非常に高いため、今回の調整による魂柱の移動は5.49[mm]と詳細に計測可能である。図5(C)はバイオリン筐体の断面図であり、魂柱の傾きを計測している。取得したX線CT画像から手順(2)の理論計算を行い、共振周波数の理論計算を行った。

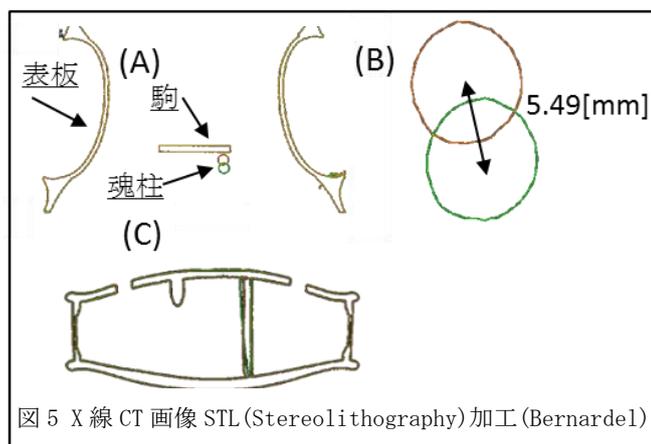


図5 X線CT画像 STL(Stereolithography)加工(Bernardel)

手順(3)では無響室にて正二十面体の均等密度配置となる42点にマイクロフォンを設置し、指向特性の測定を実施している。各マイクロフォンから中心までの距離は90[cm]とし、中心点がバイオリンの駒となるように設置し、演奏中に奏者の体が動かないよう注意して演奏するが、演奏時に奏者が微動することによる音圧レベルの変化は、演奏音が65dB程度に対して概ね±0.5dBであり、指向特性を測定する上では全く問題にならない値である。図6及び図7にそれぞれ調整前後の指向特性を示す。音圧レベルをベクトル量とカラースケールで表している。調整により指向特性が先鋭化し、バイオリンのスクロール(先頭部)からの放射音が尖鋭さを増してい

ることが確認できる。この研究結果から僅か 5.49[mm]の魂柱の移動により大きな指向特性の変化が確認できた。

また、1993年にイタリアでMario Gaddaにより製作されたバイオリンにおいても同様の手順で調整による位置関係と指向性の相関指標を作成した際のCT画像の一例を図8に、調整前後の指向特性図を図9及び図10に示す。僅か0.65[mm]の移動により大きく指向性が変化していることがわかる。調整前の図6及び図9では奏者の中心(バイオリンの駒)から様々な方向に音が伝搬している。ここで重要なのは調整前後でバイオリンから発せられる音圧レベルに変化は殆ど無いため調整後の図7及び図10は先鋭化が増ただけで音圧レベルに変化は無い。つまり調整によってバイオリンから発せられる音響パワーが先鋭化したことにより「遠鳴り」の状態に変化したこととなる。遠鳴りとは楽器の音響特徴を表現する表現語であり、例えばコンサートホールで遠くの客席まではっきりと音が届くことを表している。一方、「そば鳴り」とは奏者の近くでははっきりと聞こえるが、遠くの客席では明瞭度が落ちる音のことを表している。このように指向特性とは聴取者へ与える影響が非常に大きく、楽器の評価量(音響特徴量)として重要な要素である。

以上の手順を複数台のバイオリンを使用して調整による位置関係と指向性の相関指標を作成し、研究成果を発表した。

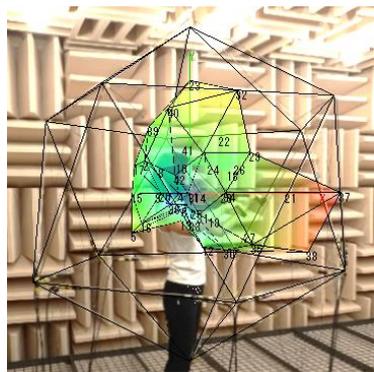


図6 調整前指向特性(Bernardel)

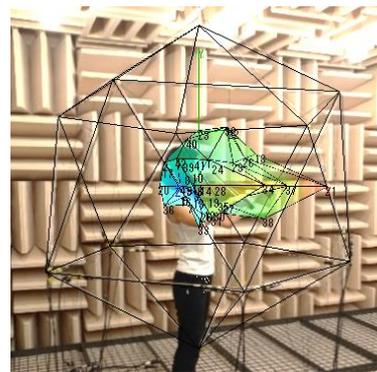


図7 調整後指向特性(Bernardel)

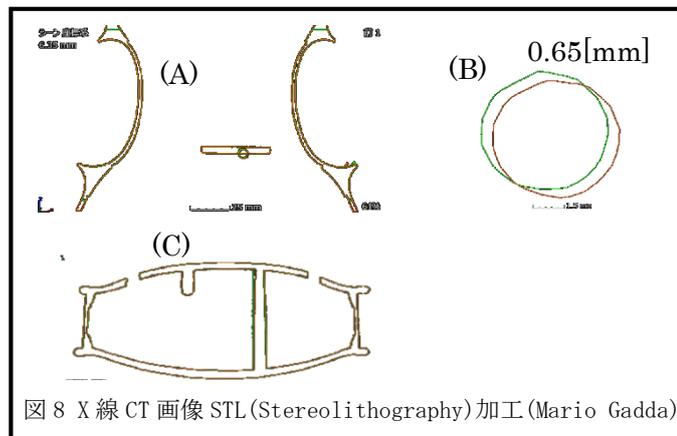


図8 X線CT画像 STL(Stereolithography)加工(Mario Gadda)

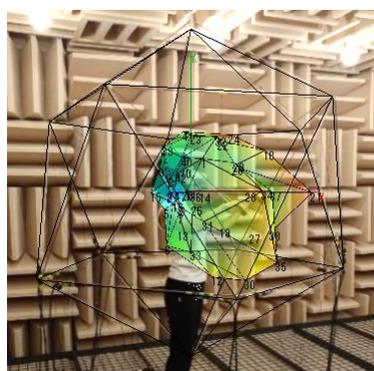


図9 調整前指向特性(Mario Gadda)

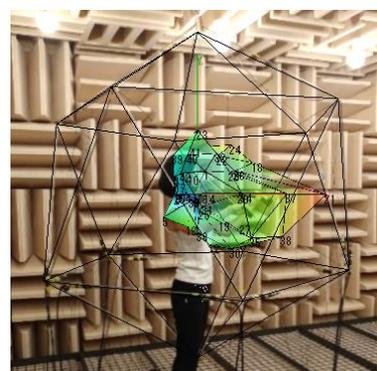


図10 調整後指向特性(Mario Gadda)

次に図4で示した魂柱の調整位置と指向特性の指標については、特定の魂柱位置に対して顕著に指向特性が異なる結果を得ることができた。特定の魂柱位置とは魂柱の保持角度(表裏の板となす角)が垂直に近い状態であり、直径約6[mm]の魂柱の底面と表裏の板との接触面積に大きく依存することが明らかとなったが、同時に魂柱の製作精度が非常に重要であることも明らか

となった。魂柱の調整位置は更に詳しく調査する必要がある。

理論計算においてはバイオリン管体内部の共振が指向特性の先鋭さに関連することが明らかとなった。図 11 は調整前後のバイオリン管体内部の共振について調査した理論計算であり、図の実線と比較し破線で示す周波数特性はより共振点が多いことが分かる。共振点の増加により多数の固有モードが表裏の板に現れ放射特性は先鋭さを増すことが明らかとなった。

共振周波数と放射特性との関係については、より詳しい調査が必要である。

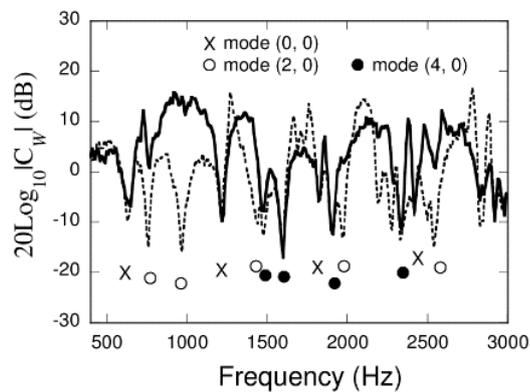


図 11 異なる魂柱位置による管体内部共振の発生

[1] L, Cremer, "On the Radiation of Closed Body Surfaces", Acta acustica, Vol29, pp. 137-147(1973)

[2] C.M.Hutchins, "The physics of violins", Scientific American Nov.78-92(1962)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yuya Nishimura, Sohei Nishimura	4. 巻 182
2. 論文標題 An acoustic performance of elliptical soundproof vent hole unit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 108205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apacoust.2021.10	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimura Sohei, Nishimura Yuya, Thulan Nguyen	4. 巻 168
2. 論文標題 Acoustic performance of an elliptical cavity on the application for soundproof ventilation units installed in dwelling walls	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apacoust.2020.107418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuya Nishimura, Sohei Nishimura	4. 巻 5
2. 論文標題 Four-Poles Parameter of an Elliptical Cavity Having the Outlet on the Body	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Journal of Engineering Research and Science	6. 最初と最後の頁 763-766
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24018/ejers.2020.5.7.1998	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------