Vol.2020-MUS-127 No.26
Vol.2020-SLP-132 No.26
2020/6/7

スペクトル包絡によるヴァイオリンの音色の識別

横山真男[†1]

概要：本研究では、ヴァイオリンの演奏音をスペクトル解析したときに得られるスペクトル包絡におけるピーク周波数の分布パターンを用いて、各楽器の音色の識別可能性の検証を行った．ヴァイオリン奏者や楽器ディーラーを対象にしたアンケートによる識別実験を行ったところ、分布パターンが似ている楽器の音色は似た音色と感じ、分布パターンが似ていない楽器は違う音色と感じることが分かった。なお、本稿は既発表の論文[1]を改めて日本語による研究紹介としてまとめたものである。

キーワード：ヴァイオリン, スペクトル包絡, フォルマント周波数, 音色

Distinction of timbre of violin by spectral envelope

MASAO YOKOYAMA[†1]

Abstract: Focusing on the distribution pattern of the peak frequencies in spectrum envelope, the distinction of the timbre was tested through the experiment by using a questionnaire. When the sounds of two violins which the distribution patterns of peak frequencies were completely different from each other, the subjects perceived these two violins were not similar in timbre. Through the experiment, it was revealed that the shape of distribution pattern and the difference between distribution patterns could contribute to the identification of the timbre of the violin. This paper is arranged and summarized in Japanese based on previous published paper[1].

Keywords: Violin, Spectrum envelope, Formant frequency, Timbre

1. はじめに

音楽的によく訓練されたプロフェッショナルな音楽家でなくても、なんとなくヴァイオリンの音色の違いを感じることができる。ただ、それがどんな音色であるかを表現するとなると個人の感性であり、またその音色が好きかどうかも人それぞれ違う。例えるなら、ワインのように高いか安いか、また、どんな香りがするかの説明はさておき、とりあえずワインの味の違いは何となく分かる。そこで、プロフェッショナルなソムリエはその味や香りの特徴をさまざまな言葉で表現や評価ができるのであるが、美味しいと評価されたワインは有名になり高値で売られる。ヴァイオリンも同じく、プロフェッショナルな演奏家やディーラーは音色を区別して、柔らかい、硬い、明るい、暗いなどと表現し､魅力的な音がする楽器は評価され高値で売られる。

このようにヴァイオリンの音色の区別や表現は一般的に感覚的に行われ、定量的・定性的な科学的な解明は容易ではない。その原因は、振動する楽器本体の形状が複雑であることだけでなく、さらに、弓、弦、駒、魂柱、バスバー等、楽器に関連するすべてのパーツが音色に影響することが挙げられる。そして、演奏者が弓を動かすときの、速度、圧力、駒からの距離といった要素も音色に影響する。さらに、演奏される環境が評価を変え、音の放射やホール音響や聴覚､心理など､実に多くの分野にまたがっており、我々はこれらの要因が全て複合された音を聴いている。その点で、構造分析から放射、音色まで総合的な研究もされてきた[2-6]。

本研究では音色の識別に、音声信号処理分野における人の声道特性を示すフォルマント周波数に着目した。フォルマントとは、音波を離散フーリエ変換することで得たパワースペクトルの包絡線上に現れる、いくつかの局所的ピークとして観測される。人間の音声は声帯が振動することで発生した音源が声道（喉、鼻、口）といったフィルタを経由して発せられるため、その声道の形状に応じてある周波数で共鳴しスペクトル包絡線にいくつかのピークが生じる。古くより音声認識技術において、母音のアやイなど識別はそれらの母音のフォルマント周波数の位置（周波数）が違うことを利用して処理されてきた。もちろん、ヴァイオリンには人間の声道のような管はないが、フォルマント周波数を観測することで楽器から発せられた演奏音の共鳴特性が含まれるものと思われる。なお、このフォルマント周波数は楽器本体のモード周波数に一致するかどうかは分からない（未確認）ということを付け加えておく。以降、本論文では、このヴァイオリンの演奏音から得られたスペクトル包絡のピークを、便宜的にフォルマントと呼び以降説明で用いる。

†1 明星大学 Meisei University

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MUS-127 No.26
Vol.2020-SLP-132 No.26
2020/6/7

弓で演奏された音は（特にロングトーンでは）準定常な音波であるので、フォルマント解析のようにスペクトル包絡のピークを分析することによって音色の分類ができる可能性がある。Tai and Chung らは、音声解析ソフトウェアである Praat を用いてストラディバリやグァルネリといったイタリア製の名器と人間のフォルマント周波数を観測し音質について比較を行っている[7]。

さて、本研究におけるリサーチクエスチョンは、つぎの二つである。まず、フォルマント周波数の分布が似ていればその 2 つの音は音色が同じないし近いと言うことができるのか、つまり、スペクトル包絡のピークの周波数の位置が似たようなヴァイオリンは音色も似ていると人は感じるのか、という疑問である。もう一つは、フォルマント周波数の分布の違いで、人は音色の印象がどう変わるのか、という問題である。例えば、我々が「柔らかい音」という表現とフォルマント周波数の分布になにか相関があるのかということである。本論文では 1 つ目の課題に対する実験とその結果を報告する。

本研究により期待される効果は、このフォルマント周波数の分布用いて、定量的・定性的に音色を表現できるようになる。例えば、私たちが楽器店に行ってヴァイオリンを選定して買う時（もしくはディーラーが売る時）、いま買おうとしているヴァイオリンの音色がイタリアの名器であるストラディバリウス（もしくはグァルネリ）にどれだけ近いのか、どれだけオールド楽器らしい音なのか、柔らかさ度合や明るさ度合がどれだけあるのか、などが数値的に示せるようになることが期待される。

2. ヴァイオリンの演奏音の録音

本研究では、開放弦（左手指で弦を押さえない状態）と楽曲を演奏したときの両方の音を録音し、音の立ち上がりと終わりを除いた中間部分を対象にスペクトル包絡（フォルマント解析）を解析した。

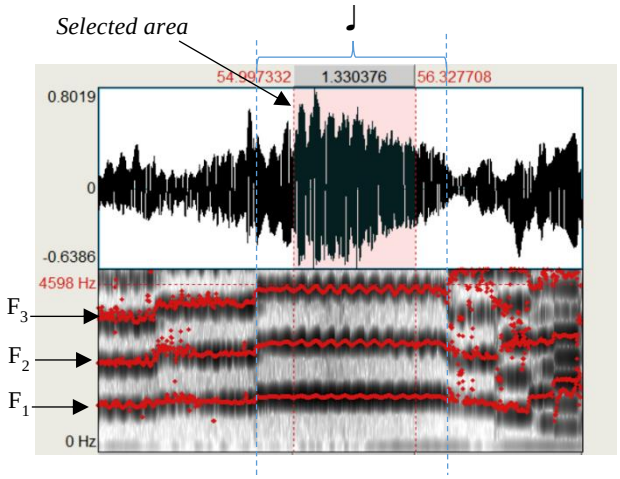


Figure 1 Selection of sound wave and acquisition of peaks of spectral envelope by Praat software (“Meditation from Thaïs,” F#6, with vibrato).

スペクトル包絡の導出の概要については以下の通りである．入力音波をある周期（フレーム長）で区切り，窓関数をかけて離散フーリエ変換を行うとパワースペクトルが得られる．さらに対数変換によって得られた対数スペクトルを逆離散フーリエ変換すると，再び時間領域に戻りケプストラムが得られる．ケプストラムの低次部分をフィルタにかけて再び離散フーリエ変換すると，再度周波数領域に移行してスペクトル包絡が得られる．

本研究では，ヴァイオリンの音波からスペクトル包絡のピークを取得するのに音波解析ソフトの Praat を利用した．Praat は多くの音声解析の研究で用いられてきたが近年では楽器の解析にもしばし使われている[7,8]．ヴァイオリンの演奏音源は， Table 1 に示す 12 本のイタリア製オールド楽器について，1 人のプロフェッショナルのヴァイオリン奏者により開放弦と楽曲「タイスの瞑想曲」の演奏をそれぞれ 2 回ずつ録音したものである．録音機器は FFT アナライザ(OROS 30)を使用し，マイクロホンは¼インチ，周波数応答は 20Hz~20kHz(± 2dB) で，ダイナミックレンジは 30dB~143dB である．録音を行った部屋は，広さ 4 畳ほどの残響の少ない部屋である．マイクはヴァイオリンの f 字孔から 5cm ほど離した位置に固定し録音を行った．弦は全楽器同じもの(Dominant)に張り替えて統一し，弓と松脂も同じものである．

Fig. 1 に示すように，録音された音波の中から，目視で安定している区間のデータを選びフォルマント周波数を解析した．演奏音の開始と終わりはノイズや立ち上がりの影響から切り取り，フォルマント周波数を時間平均で平均値を計算した．

Table 1. Violins for test.

Violin maker (all Italian maker)	**year**
Stradivari 1	1698
Stradivari 2 “Tartini”	1711
Santo Serafin	1700 ca
Tononi	1711
Balestrieri	1780
Pressenda	1838
Rocca	1845 ca
Fabris	1870
Scarampella	1907
Fagnola	1923
Genovese	1927
Michetti	1929

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MUS-127 No.26
Vol.2020-SLP-132 No.26
2020/6/7

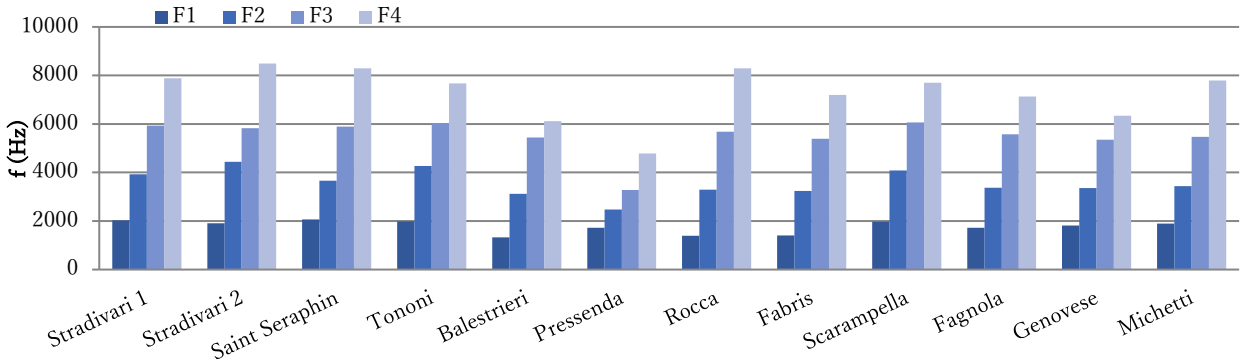
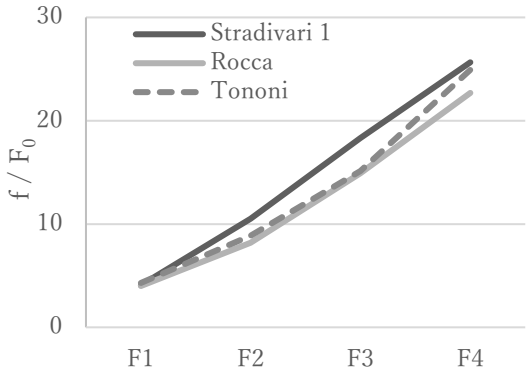


Figure 2 Formant Frequencies of E string (F1 – F4)

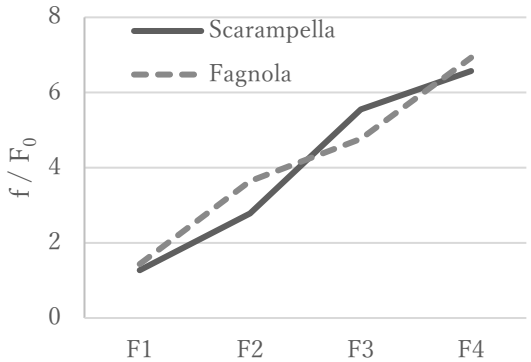
3. パターンの解析

Table 1 のヴァイオリンのフォルマント周波数の解析例から一部（開放弦の E 線）を Fig.2 に示す。左から古い順に各楽器のフォルマント周波数（F1～F4）を示すが、各楽器でその値は異なり年代の特徴はこれらからは見られなかった。第 1 から第 4 フォルマントまでの周波数の分布パターンには，直線，ジグザグ，凸カーブ，第 1 フォルマントが上昇などいくつかのパターンがみられた.

観測されたパターンのいくつかを Fig.3 に示すが，Fig.3(a)のストラディバリのフォルマント周波数はしたに凸になったカーブを描いている。また Fig.3(b)はジグザグの例である.



(a) Straight and Curving (D4, Musical piece)



(b) Zigzag (H5, Musical piece)

Figure 3 Distribution patterns of formant frequencies

ここで，横軸は第 1 から第 4 フォルマント(F1 - F4)の番号で，縦軸はフォルマント周波数を演奏音の基音 *f*0 それぞれで割ったものである．すなわち、グラフは基音に対して何倍音にフォルマント周波数が出ているかを示している。

4. 音色の識別実験

このようなパターンの違いが音色の識別に寄与するかどうかについて，Table 2 のようにパターンの異なるいくつかの音源の組を用意してアンケートによる音色の識別実験を行った．あるパターンの音源 A に対し，別のパターン B と，A に似たパターン X の計 3 つを順に聴いてもらい，3 つ目の X が前の A と B のどちらに近かったかを判別してもらうアンケートである．被験者は演奏家と製作家，ディーラーによる 10 人である．また、A と B の順番は被験者毎に変えて提示した。

ヴァイオリン音は WAV ファイルをパソコンで再生し、被験者はそれを Audio Technica 社 D1000 ヘッドフォンで聞く。このヘッドフォンは、WAV ファイルをデジタルデータがそのまま直接ヘッドフォンに送られるシステムで、途中のアンプやケーブルの影響をなるべく少なくする効果がある。

Fig.4 は Table 2 の音源が具体的に曲中のどの音かを楽譜で示したものである．識別率 *R*(0.0～1.0)は，被験者が A と X が似ていると答えた時を正答(1 点)として，各音源の組(1-8)に対してそれぞれ被験者数で割って集計した値である．Table 3 は、Table 2 の各音源の組に対する *R* の結果である。この結果から開放弦と楽曲の違いや音高の違いによる影響は見られていない。

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MUS-127 No.26
Vol.2020-SLP-132 No.26
2020/6/7

Table 2. Combination of violins for the listening experiment. A and X have similar distribution pattern. The pattern of B is different from A and X. The subjects of this experiment listened to A and B, and next listened to X and then answered as to which timbre of X was similar to A or B.

(2-a) Open Strings

Test No.	Pitch	A	B (different with A)	X (similar to A)
1	E5	Balestrieri	Stradivari 1	Genovese
2	A4	Stradivari 1	Fagnola	Rocca
3	D4	Stradivari 1	Fagnola	Rocca
4	G3	Rocca	Stradivari	Tononi

(2-b) Musical piece “Meditation from Thaïs”

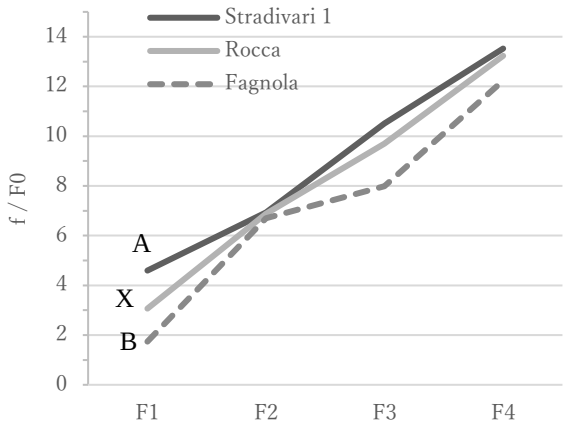
Test No.	Pitch	A	B (different with A)	X (similar to A)
5	F#5	St. Seraphin	Stradivari 1	Balestrieri
6	F#6	Pressenda	Stradivari 1	Fagnola
7	B5	St. Serafin	Stradivari 1	Fagnola
8	D5	St. Serafin	Stradivari 1	Fagnola
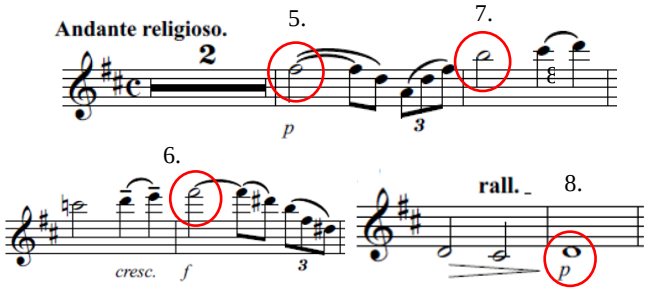


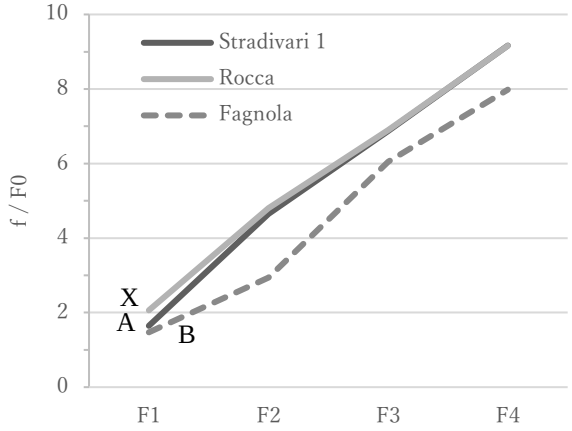
Figure 4 Musical notes used in the experiment (The number on note indicates the test no. in Table 2-b).

Table 3 Result, ratio *R* (subjects judged A and X are similar).

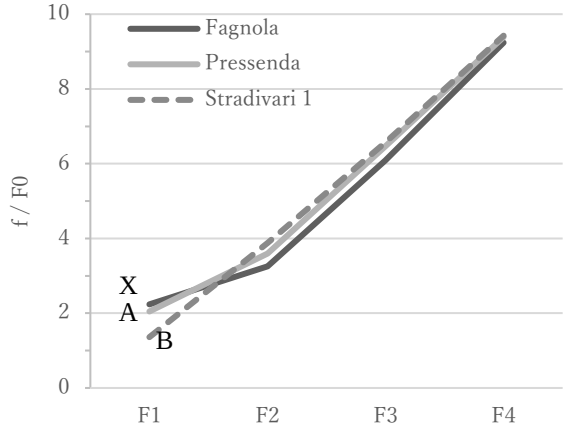
Test No.	Ratio (*R*)
1	0.5
2	0.9
3	1.0
4	0.6
5	0.3
6	0.8
7	0.5
8	0.7



(a) No.3 (Open string D, *R* = 1.0)



(b) No. 2 (Open string A, *R* = 0.9)



(c) No.6 (Musical piece F#6, *R* = 0.8)

Figure 5 Distribution patterns of peak frequencies which the *R* is high. In the test number 2, 3, and 6 (*R* is 0.9, 1.0, 0.8, respectively), the pattern of A and X is similar but that of B is quite different with A and X.

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-MUS-127 No.26
Vol.2020-SLP-132 No.26
2020/6/7

Fig.5 に識別率上位のヴァイオリンのフォルマント周波数の分布を示す。いずれも A と X のフォルマント周波数の分布パターンが似ていて、B の分布パターンが異なるケースであった。識別率 $R = 1.0$ の Fig.5(a)（Table 2 の音源の組番号 No.3）では、3 本の第 2 フォルマントの周波数がほぼ等しく 7 倍音に見られ、A と X の第 3 フォルマントは 10 倍音くらい、第 4 フォルマントは 13 倍音くらいと関係性が似ている。共にほぼ直線型の分布パターンである。しかし、B のヴァイオリンは見ての通りジグザグのパターンで A や X とは大きく異なっている。同様に Fig.7(b)（音源の組番号 No.2）も同様に A と X は F1 がやや低いが比較的直線的であるのに対し、B はジグザグのパターンであるため、音色が違って聞こえたものと思われる。Fig.7(c)のように第 1 フォルマントが同じように高い A と X に対して、B は直線的であるケースも R が高い値であった。

このように、フォルマント間の周波数差は楽器の音色の違いに影響していると言える。これは、第 1 フォルマントと第 2 フォルマントの周波数差で人の発する音声において母音が識別できるのと同様の理屈であろう。本研究のように第 3、第 4 フォルマントまで調べると、ヴァイオリンでも音色の違いとして識別できるものと思われる。

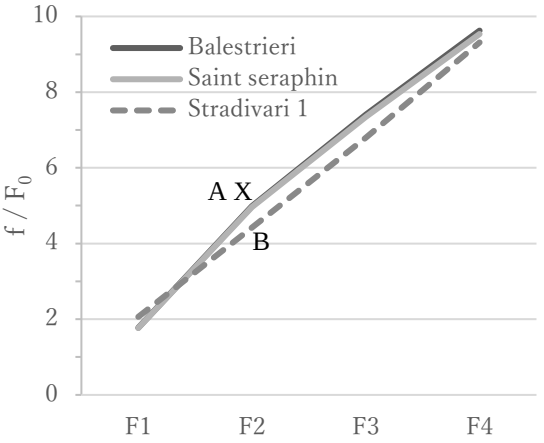
一方、識別が困難だった、すなわち音色が似ているというフォルマント周波数の分布パターンについても結果を示す。Fig.6 に識別率が悪かった場合のフォルマント周波数の分布を示す。Fig.6(a)では X と A のフォルマント周波数の分布が非常に近く、B のそれもまた近い。また、Fig.6(b)は、A と X の第 3 フォルマントと第 4 フォルマントの関係が似ているが、第 1 フォルマントと第 2 フォルマントの倍音の関係は A と B が似ているという例である。どちらも識別率は悪く Fig.6(a)では 0.3、Fig.6(b)では 0.5 であり、回答時の被験者は A と B のどちらに近いか悩んでいる様子が見られた。よって、フォルマント周波数の分布パターンが似ていて F1-F4 のフォルマント周波数の距離もそれぞれ近い（Fig.6(a)では約 0.6 倍音以内）と、音色も似ているように聞こえていると考えられる。

5. まとめ

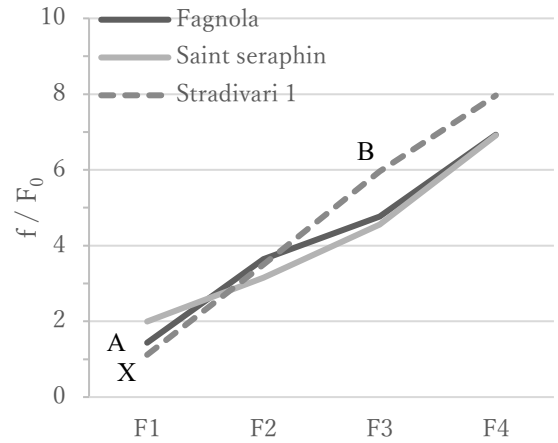
12 本のイタリア製のオールド・ヴァイオリンについて開放弦と演奏音を近距離場で録音し、パワースペクトルの包絡線に現れるピーク周波数（フォルマント周波数）と音色の識別可能性について実験を行った。

第 1 から第 4 のフォルマント周波数の分布パターンには、直線、カーブ、ジグザグなどのパターンが見られた。フォルマント周波数の分布パターンが異なると違う音色と識別され、逆に近いと音色の識別が似ていて識別が難しいという結果が得られた。フォルマント周波数の類似関係がヴァイオリンの音色の識別に関与していることが言える。よって、本稿の冒頭にも述べた例のように、楽器店でヴァイオリンを購入するときにフォルマントの分布パターンを調べることで、音色の嗜好に合った楽器の選定・購入が可能となる期待が持てる。その楽器がストラディバリに似ているのかグァルネリに近いのか、はたまた別の名器に似ているのか、等といったように購入の手助けになるかもしれない。しかし、本研究で用いた楽器の分布パターンはその製作者のとある 1 楽器であって、まだ製作者の傾向を示すには数が少なすぎるのが課題である。製作者の傾向をつかむには相当数の多くの楽器の音源の収集が必要である。

今後の課題については、フォルマント周波数の分布パターンと音色の相関についての問題がある。どの様なフォルマント周波数の分布が、どの様な音色を表す言葉である印象語（柔らかい-硬い 等）に対応するのかといった関連を調べる必要がある。今アンケート実験を行っておりデータの収集中である。



(a) No.5 (Musical piece F#5, R=0.3)



(b) No.7 (Musical piece B5, R=0.5)

Figure 6. Distribution patterns of peak frequencies which the R is low, which subjects cannot distinguish the difference of timbre of A, B and X.

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

参考文献

[1] Yokoyama, M., Possibility of distinction of violin timbre by spectral envelope, Applied Acoustics (2020) 157:107006.
[2] Ravina, E. “Violins characterization through vibro-acoustic experiments” In Acoustics 2012 (2012).
[3] Schleske, Martin. "Empirical tools in contemporary violin making: Part I. Analysis of design, materials, varnish, and normal modes." Catgut Acoust. Soc. J 4.5 (2002): 50-64.
[4] Corradi, R. et al. "A Multidisciplinary Approach To The Characteri-Zation Of Bowed String Instruments: The Musical Acoustics Lab In Cremona." Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22). 2015.
[5] Gren, P., Tatar, K., Granström, J., Molin, N. E., and Jansson, E. V. Laser vibrometry measurements of vibration and sound fields of a bowed violin. Measurement science and technology, (2006) 17(4), 635.
[6] Curtin, J., Tap tones and weights of old Italian violin tops. Journal violin society of America, (2005) 20(2), 161.
[7] Tai, H. C., and Chung, D. T. Stradivari violins exhibit formant frequencies resembling vowels produced by females. Savart Journal, (2012) 1(2).
[8] Nagyvary, J., A comparative study of power spectra and vowels in Guarneri Violins and Operatic Singing. (2013) Savart Journal, 1(3).

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan