

ヴァイオリンの音色研究における数値シミュレーションと可視化*

横山 真男¹

Numerical Simulation and Visualization of Timbre of Violin*

Masao YOKOYAMA¹

1. はじめに

ヴァイオリンの音色に関する研究例として、ヴァイオリン本体のモード振動と周辺音場の連成シミュレーションおよびニューラルネットワークを用いた音色の識別実験について紹介する。数値シミュレーションについては、レーザースキャナを用いて実際のヴァイオリンの3Dモデルを取得し、有限要素法により表板/裏板のモード振動と周辺音場を可視化することを試みている。ヴァイオリン本体は木材(スプルース, カエデ)でできているため直行異方性を考慮し、弾性係数や厚み, 密度等が変化したときの振動モードと周辺音場への影響に関するパラメトリックな解析を行っている。一方, 音色の識別については, 音声言語処理でも用いられる音波のスペクトル解析から得られるスペクトル包絡とフォルマント周波数を用いた識別可能性の検証を行っている。アンケートによる試聴実験およびスペクトル包絡をニューラルネットワークで学習させた音色の識別実験について説明する。

2. ヴァイオリン研究小史と数値シミュレーション

ヴァイオリンが今日みられるような形状になったのは16世紀後期ルネサンス時代であるとされている。弦楽器自体のルーツはずっと前にさかのぼるようだが, 現段階の定説では, イタリアのミラノから100km弱ほど南東にあるクレモナにて活躍したアンドレア・アマティ(Andrea Amati, 1511 - 1581)が完成させたとされている。ちょうどレオナルド・ダ・ビンチ(1452 - 1519)とガリレオ・ガリレイ(1564 - 1642)にまたがる時期である。音楽史上では, ルネサンス後期の作曲家モンテヴェルディ(おなじくクレモナ出身)から, バッハやヴィヴァルディのバロック時代である。その後, アンドレアの孫のニコロ・アマティ(Nicolò Amati, 1596-1684), そして弟子のA.ストラ

ディヴァリ(Antonio Stradivari, 1644 - 1737)やJ.グアルネリ(Joseph Guarneri, 1698 - 1744, 通称デル・ジェズ “del Gesù”, キリストの意)によりクレモナにおけるヴァイオリン製作の黄金期を迎える。同じ頃, オーストリアのチロル地方のアプサムのJ.シュタイナー(Jacob Stainer, 1617 - 1683)やドイツのミッテンヴァルトのM.クロッツ(Matthias I Klotz, 1656 - 1743)とその一族もヴァイオリン製作の聡明期の重要な製作者たちである。オールド・ヴァイオリンというとこれら18世紀までの楽器を指す。

ヴァイオリンの研究が始まったのは, フランスの物理学者のサヴァール(Savart, F. 1791-1841)とヴァイオリン製作者のヴィヨーム(Vuillaume, J.B. 1798 - 1875)による共同研究が最初といわれている。彼らは, すでにこのころからストラディヴァリやグアルネリの分析をしていた。近代的なヴァイオリン研究はアメリカのCatgut Acoustical Society(現 Violin Society of America)におけるハッチンスらの功績が大きく, 現代では音響や構造のみならず, 演奏, 聴覚, 心理など各分野にまで広まっている。

さて, 本稿で述べるヴァイオリンの振動モードや周辺音場, 音色の解析はこれまでに多くの研究が行われてきた^{1),2)}。ただ, ヴァイオリン研究の難しさは, まず対象が木工製品であることによる。楽器の形状や寸法はストラディヴァリの頃にすでに確定しているものの, 製作者の意図や個性で微妙に差異があることもさながら, 自然の木が材料なので仮に完全に同じ寸法で作ったとしても同じ振動特性や音色にはならない。人間と同じく1本1本全て異なるのである。

ならば, 音声言語処理のように統計的手法で解析すればよいのでは, と思われるかもしれないが, ヴァイオリン1つ作るのに多くの時間とコストがかかるため, パラメトリック試験のために数多く作るといったことは困難である。ましてや, 名器といわれるイタリアのオールド楽器は今や文化財としての価値を持つため, 1本のデータ計測をするだけでも大変な手続きを踏まなければいけないので, 統計的な手法のための満足なサンプル数は望めない。

* 原稿受付 2020年3月31日

¹ 正会員 明星大学情報学部 (〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1,

E-mail: masao.yokoyama@meisei-u.ac.jp)

さらに、一本一本手で削られた本体のアーチや板の厚み等における 0.1mm の違いが音色を分け、魂柱やバスバー、駒、弦をはじめ多くのパーツが取り付けられていて、それら一つ一つが音に大きく影響する。さらに、演奏者の持つ弓や弓毛、松脂、さらにその時々演奏者の弾く力加減や速度に、計測する部屋の音響、録音機器などなど、変動要因は数えるときりがない。

そこで、数多い変動要因を減らし定性的・定量的に振動や音響の特徴を捉えるのに、コンピュータによる数値解析が考えられる。これまでも有限要素法や境界要素法による数値シミュレーションが行われてきており、300 年以上も経つオールド楽器の振動や音響の解析に役立つことが期待されている。というのも、歴史的な文化財でもあるイタリアのオールド楽器は分解してクラドニ法のような実験をすることはもちろん、インパクトハンマなどによる振動解析もすることはほぼ許されない現状があるからである。よって、近年は貴重な楽器の振動特性や音響特性の予想に非侵襲な手法として数値シミュレーションに期待が寄せられている。しかし、現段階では定性的・定量的な解明には至っていない。特に、楽器の振動と周辺音場を同時に計算される連成解析は最近始まったばかりである。

3. 有限要素法によるモード振動解析

4.1 3D モデル作成と数値シミュレーションの手法

著者は、クレモナ市にあるヴァイオリン博物館にて専属で音響研究をしているミラノ工科大学のチームと共同で、高精度な 3D スキャナを用いてヴァイオリンの表板と裏板をスキャンし、ヴァイオリンの材料の物理的特性の変化させた時のモード振動と周辺音場の影響の解析を行っている⁴⁾。3D レーザースキャナは解像度が最小 0.01mm の Romer ABSOLUTE ARM を使用し、ヴァイオリンの裏板の表面（外側）と内側の両面をスキャンした。Polyworks™ (InnovMetric Software)を用いてその内外のデータを合わせ、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 STL ファイルとして保存した。そのデータを COMSOL Multiphysics™ にて 3 次元のジオメトリデータを作成し自動メッシュ機能により四面体

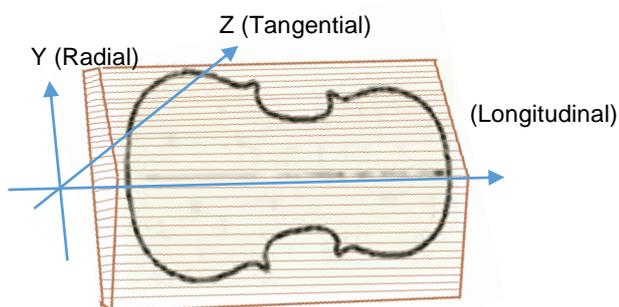


Fig.1 Orthotropic property and axes of violin plate.

メッシュを生成した。

ここで、構造計算に与える表板材のスプルースと裏板材のカエデの物性値であるが、比重については、実際にスキャンした楽器の表板／裏板の容積(近似値)と質量から概算は求められる。しかし、弾性係数やポアソン比、せん断係数といった機械的性質は、すでにアーチが削られ湾曲した完成形では計測が困難である。従って文献³⁾にある代表値で計算を行った(Table 1)。また、COMSOL Multiphysics™ で設定する木材の直交異方性の軸については、ヴァイオリンの材料は Fig.1 のように製材されるため、木目方向 (Longitudinal) とそれに直交する年輪方向 (Radial), そして年輪周方向 (Tangential) を設定した。

Table 1 Values for Orthotropic properties for setting in numerical simulation³⁾

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

4.2 計算結果と評価

Fig.2 に 3D スキャナで取り込んだヴァイオリンの裏板のモード振動についてのシミュレーション結果を示す。また、Fig.3 に同じヴァイオリンの裏板のクラドニ法によるモード振動の実験結果を示す。クラドニ法は、任意の周波数の純音を発生させるスピーカーの上に水平に板を置き、軽い粒子を均一に撒き、スピーカーから出る音波の周波数を徐々に変化させ、写真のようにノードが現れた時の入力周波数とそのノードの形状を観察する実験である。

これらの Fig.2 と Fig.3 よりノードラインの形状はよく似ていることが見て取れる。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て、この厚みのグラデーションでないで正しい計算結果が得られない。ちなみに、表面のアーチ形状だけのモデルで、いわゆるシェルで仮想的な様な厚みで計算したが、このような実際の楽器のようなノードラインは得られなかった。

一方、モード周波数については、数値シミュレーション結果では mode 2 = 150.3 Hz, mode 5 = 311.5 Hz であり、一方、実験では mode 2 = 171 Hz, mode 5 = 352 Hz と両結果に差があった。シミュレーションに与えたカエデの縦弾性係数は、文献³⁾の代表値 $E_L=12.6\text{GPa}$ で剛性率等は Table 1 の通りである。密度はサンプルの木

材と同じ 0.637 g/cm^3 である．前述のように，ヴァイオリンのように薄く湾曲された形状の木材の物性値は正確には測れないため，代表値と現実の値が異なっていることが原因でありこの点は今後の課題である．

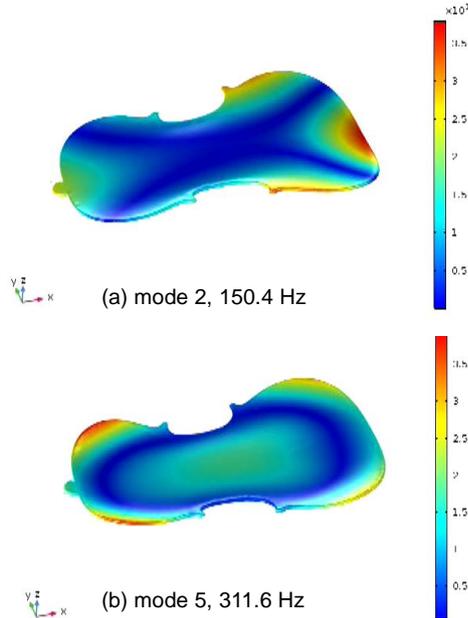


Fig.2 Mode shapes of back-plate of violin, (a) mode 2 (x-mode), (b) mode 5 (ring mode).

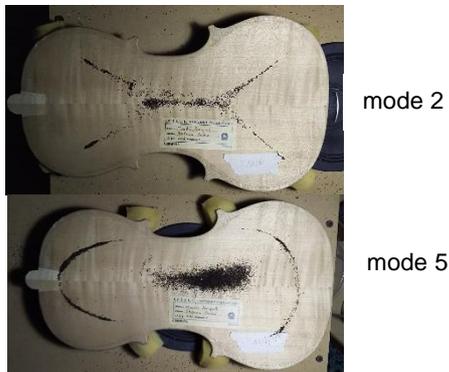


Fig.3 Mode shapes (mode 2, 171 Hz and 5, 352 Hz) of back-plate of violin by Chladni Method.

Fig.4 は，板の厚みおよび縦弾性係数を変化させた場合のモード周波数(mode 5)の変化を計算した結果である．例えば，中心部の厚みを実際の楽器の取りうる範囲である 3.5mm から 4.2mm の範囲で変動させたところ， 0.1mm の厚みの変化に対し 5Hz 程度で線形に推移することが見て取れる．この様に，わずかな削りの差が音響に影響を与えていることが分かる．

Fig.5 は，ヴァイオリンの表板／裏板が mode 5 で振動した場合に引き起こされる板の周辺音場の計算結果である(口絵も参照)．色の濃淡は音圧を表し，左が $x-z$ 平面，右が $y-z$ 平面の断面図である(軸は Fig. 1 を参照)． $x-z$ 平面の $x=195\text{mm}$ (縦線)は駒が立つ位置である．音場は四面体メッシュによる有限要素法で空気(音速 343m/s)と

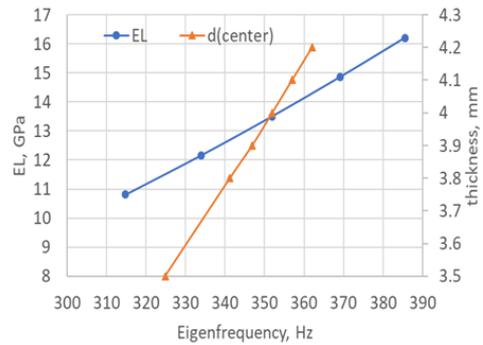
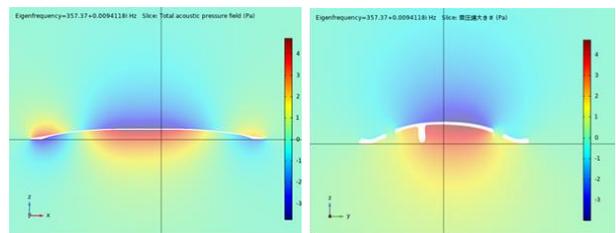
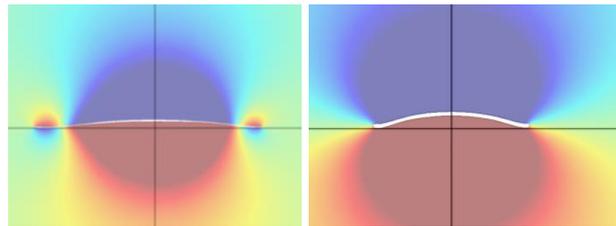


Fig.4 Change of mode 5 eigenfrequency by the difference in elasticity and thickness d_{center} .



(a) top plate, mode 5



(b) back plate, mode 5

Fig.5 Radiation pattern from top / back-plate of violin vibrating in mode 5.

して計算している．mode 5 のリング状のノードに囲まれた範囲で音圧の変動が大きくなっているのが見て取れる．今後は，横板も含め共鳴箱としての全体的な構造・音響連成問題として解くことを試みていく．

4. スペクトル包絡と音色解析

4.1 フォルマント周波数を用いた音色識別実験

スペクトル包絡は音声信号処理において音響信号から得られる重要な情報である．音声データから離散フーリエ変換でパワースペクトルを求めると，音素に応じてある周波数帯に強いパワーが現れ，その包絡線を求めると局所的なピークがいくつか観測される．これは音源である声帯から発せられた音波が，声道である喉や鼻，口，歯，唇などを経てフィルタリングされたことに起因する．このパワースペクトルの包絡線に現れるピーク周波数を周波数の低い方から順に第1，第2，第3，第4フォルマント周波数と呼ぶ．本章では，このスペクトル包絡とフォルマント周波数をヴァイオリンの音色の識別に応用する実験をいくつか行ってきたのでここに紹介したい(詳細は文献⁵⁾)．

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

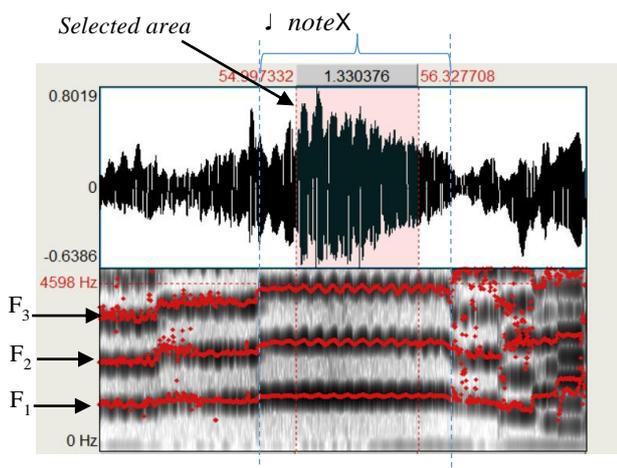


Fig.6 Selection of sound wave and acquisition of peaks of spectral envelope by Praat software (“Meditation from Thaïs,” F#6, with vibrato).

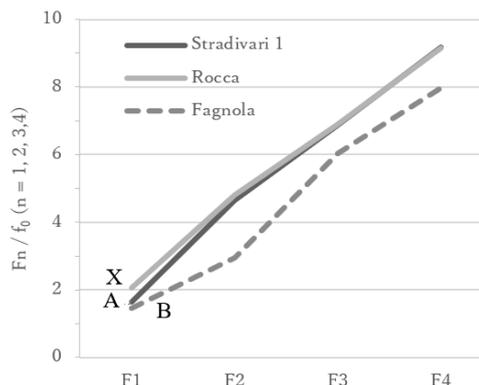
のピークを取得するのに音波解析ソフトの Praat を利用した。Praat は多くの音声解析の研究で用いられてきたが近年では楽器の解析にもしばしば使われている⁶⁷⁾。ヴァイオリンの演奏音源は、Table 3 に示す 21 本のイタリア製オールド楽器から日本製の工場製新作について、1 人のプロフェッショナルのヴァイオリン奏者により開放弦と楽曲「タイスの瞑想曲」の演奏をそれぞれ 2 回ずつ録音したものである。録音機器は FFT アナライザ(OROS 30) を使用し、マイクロホンは $\frac{1}{4}$ インチ、周波数応答は 20Hz~20kHz(± 2dB) で、ダイナミックレンジは 30dB~143dB 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 ほど離れた位置に固定し録音を行った。弦は全楽器同じものに張り替えて統一し、弓と松脂も同じものである。

Fig. 6 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。

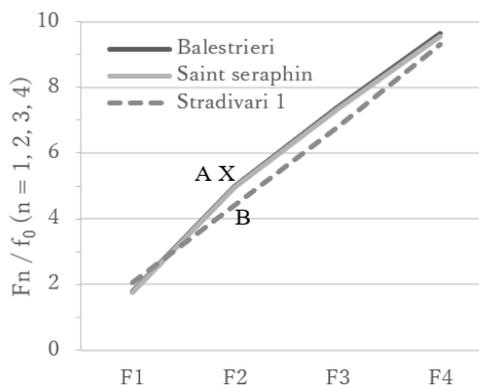
21 本のヴァイオリンのフォルマント周波数を観察したところ、第 1 から第 4 フォルマントまでの周波数の分布パターンとして、直線、ジグザグ、凸カーブ、第 1 フ

ォルマントが上昇などいくつかのパターンが得られた。その一例を Fig.7 に示すが、フォルマント周波数 Fig.7(a) の A と X はほぼ直線だが B はジグザグである。また、Fig.7(b) の A と X はやや上に凸のカーブであるが、B は直線である。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基音 f_0 で割ったものである。

このようなパターンの違いがヴァイオリンにおいても



(a) No. 2 (Open string A, $R = 0.9$)



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

Fig.7 Distribution patterns of peak frequencies which the R is high (a) and low (b). the pattern of A and X is similar but that of B is different with A and X.

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者、ディーラーによる 10 人である。なお、Fig.8 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。正答率 $R(0.0 \sim 1.0)$ 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。

アンケート結果は、Fig.7(a)のように X が A に近く、

かつ B とはパターンが異なる場合には、容易に X が A と似た音色と判断できたため R の値は高く、一方、Fig.7(b)のように X が A にも B にも近い場合は、A か B のどちらに近いかが判断できず R の値は低いという結果になった。

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 first listened to A and B, and then 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 from 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 from 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



Fig. 8 Musical notes used in the experiment (The number on note indicates the test no. in Table 2-b).

以上、フォルマント周波数の分布のパターンから音色の識別について、第1フォルマントから第4フォルマントまで観測することで音色の類似性と識別ができることが分かった。これは、音声認識システムにおいて発話された母音を識別する時に、フォルマント周波数の分布パターンを利用しているのと同様である。

4.2 ニューラルネットワークによる音色識別

次いで紹介する研究は、今度は人間の耳ではなくコンピュータが自動でヴァイオリンの音色を識別して、例えばヴァイオリンの鑑定機のようなものを作れないかという試みである。テストに用いたヴァイオリンを Table3 に示すが、録音データについては先ほどの 4.1 で述べたのと同じである。

Table 3. Violins for training data and test data.

Violin maker (country)	year
Catenali (Italy)	1690 ca
A.Stradivari (Italy)	1698
Pietro Guarneri (Italy)	1700 ca
Santo Serafin (Italy)	1700 ca
Gragnani (Italy)	1760
Balestrieri (Italy)	1780
Pressenda (Italy)	1838
Fabris (Italy)	1870
Scarpampella (Italy)	1907
Fagnola (Italy)	1923
Genovese (Italy)	1927
Michetti (Italy)	1929
Guerra (Italy)	1941
Bisiacchi (Italy)	1953
Garinberti (Italy)	1967
New violin middle class A (Japan)	2015
New violin middle class B (Japan)	2015
New violin Economic A (Japan)	2015
New violin Economic A (Japan)	2015
New violin Stradivari Copy (Japan)	2015
New violin Guarneri Del Gesu Copy (Japan)	2015

ケプストラム分析および深層学習をするプログラムは、Python および TensorFlow をバックエンドとするライブラリの Keras を用いて実装し、波形分割、ケプストラム分析、データセット生成、ニューラルネットワークにより学習、評価の各処理を行う構成となっている。プログラムの処理概要は以下のようになっている。

まず、録音音源を 0.03 sec ずつ切り取り、ハニング窓をかけて多くの短区間の音データに分割する。ケプストラム分析にかけてスペクトル包絡を抽出し、ヴァイオリンを識別するラベルの値と共に csv ファイルに格納し学習および評価データとする。なお、設定したケプストラム次数(C)の値が大きいくほど得られるスペクトル包絡の形が複雑になる。本研究では FFT のサンプル数を 2048 点、ケプストラム次数を 20-80 に設定した。ラベルは、開放弦についてはヴァイオリン 21×弦 4 の 84 のラベルを振っている。また、楽曲については、音高一つずつに振るのは困難であるので今回はヴァイオリン毎の 21 のラベルを振っている。

次いでケプストラムデータを学習用データセットと評価用データセットに分ける。この時、評価用データセットは学習用データセットとは同じ楽器であるが違う区間を間欠的に取り出して使っている。すなわち、一つのヴァイオリンから得た全ケプストラムデータのうち 5%の

データを間欠的に選び評価用データとし、残りを学習用データにした。ネットワークは、全結合ニューラルネットワーク 3 層で、入力数は 1024, 1 層と 2 層の出力数は 512, 3 層の出力数はラベル数と同じで、活性化関数は ReLU 関数を用いている。学習率は 0.1 でドロップアウトは 0.2 に設定した。

評価結果として、まず開放弦のみのデータセットで学習および評価を行い、弦ごとに正答率をまとめた結果を Fig.9 に示す。E 線では $C = 80$ が最もよい識別率であるが逆に G 線では $C = 80$ の値が低い。全体的にみると 60 が最も良く、次いで 40 がケプストラム次数の設定値として良いことがこのグラフから分かる。

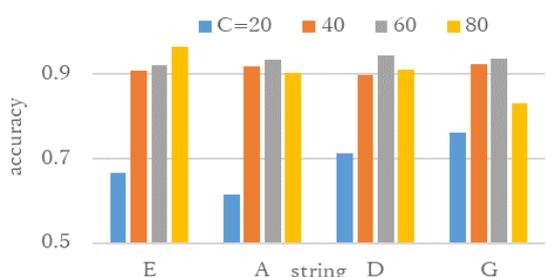


Fig.9 Difference of accuracy in the strings of violin.

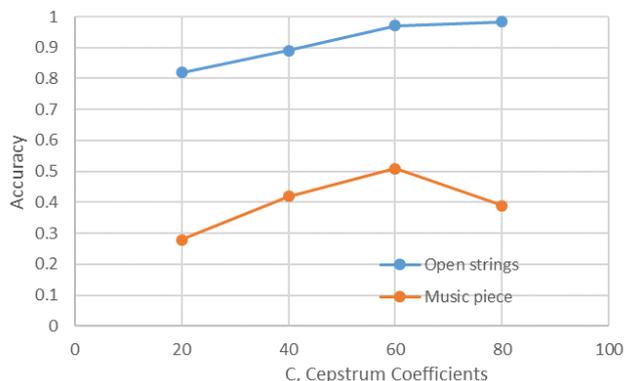


Fig.10 Accuracy, open string VS music piece.

Fig.10 は、開放弦と楽曲それぞれの正答率である。開放弦は準定常な波形であるため楽器の識別が良くなされたが、楽曲に関してはビブラートや強弱といった表現が含まれるため、識別率はおよそ 50%前後であった。ケプストラム次数については開放弦と同様、程よく包絡線が得られる $C = 60$ が最も識別率が良かった。

最後に、このニューラルネットワークによる音色の識別の応用例として、本プログラムを使って、ある新作楽器がどんな音色かを可視化することについて触れる。

Fig.11 は、イタリア製の名器を学習データにして、新作ヴァイオリンを評価データとした結果である。新作楽器がどんな名器の音色に近いのかを示していて、これは楽器を購入する人や販売・製造するメーカー側にとって音色の指標ツールとなると思われる。つまり、ヴァイオリンを買おうとしている購入者が、そのヴァイオリンがど

んな有名な楽器に似ているのか、例えばストラディヴァリに近いのかグァルネリに近いのかが数値的にわかるようになる。検証に用いた新作ヴァイオリンはオールド楽器の P.グァルネリ、モダン楽器のビジアッキやガリンベルティの音色に近く、またこの製作者の作風と音色の傾向がでていることが分かる。

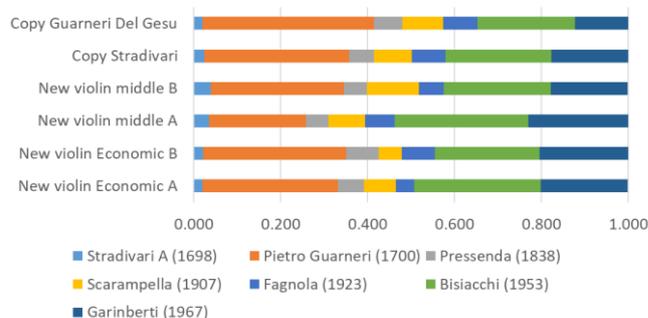


Fig.11 Timbre similarity of new violins against 7 famous violins (Stradivari, Guarneri, Fagnola etc.)

5. まとめ

ヴァイオリンの音色の研究として、製作者のための振動モードと音響放射の数値シミュレーションと、購入者や販売メーカーに役立つであろう音色の可視化の技術について研究を行っておりそのいくつかを紹介した。本稿の紹介内容はまだ開発・発展途上ではあるが今後の楽器研究や楽器愛好家の一助になればと思う次第である。

謝辞 本研究にあたって、楽器の提供をして頂いた(株)文京楽器、また数値シミュレーションの共同研究者であるミラノ工科大の F.アントナッチに感謝を表す。また、本研究の一部は、一般財団法人カワイサウンド技術・音楽振興財団の助成によるものである。

参考文献

- 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.
- Curtin, J., Tap tones and weights of old Italian violin tops. *JOURNAL-VIOLIN SOCIETY OF AMERICA*, (2005) 20(2), 161.
- Green, D. W., Winandy, J. E., and Kretschmann, D. E., Mechanical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material* Madison, Forest Products Laboratory (1999) 4.1-4.45, 113.
- Yokoyama, M., Influence of orthotropic properties on vibration of violin top plates, *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, (2019) pp. 6438-6445.
- Yokoyama, M., Possibility of distinction of violin timbre by spectral envelope, *Applied Acoustics* (2020) 157:107006.
- Tai, H. C., and Chung, D. T. Stradivari violins exhibit formant frequencies resembling vowels produced by females. *Savart Journal*, (2012) 1(2).
- Nagyvary, J., A comparative study of power spectra and vowels in Guarneri Violins and Operatic Singing. (2013) *Savart Journal*, 1(3).