

クレモナを中心としたヴァイオリン製作と音響研究

Acoustic research and violin making in Cremona

横山 真男[†]

Masao YOKOYAMA[†]

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

[†] Faculty of Information, Meisei University 2-1-1 Hodokubo, Hino-Shi, Tokyo, 191-0042 Japan

Abstract 本論文は多くのヴァイオリン研究のテーマの中から特に製作工程と音響工学の関連について述べています。また、ヴァイオリン製作の中心的都市のクレモナでの研究と製作活動を紹介し、音響研究の小史や現在のクレモナのヴァイオリン博物館での音響研究にも触れます。なお、本音楽音響研究会における招待講演にあたり高校生や一般の方も多数来場とのことより、極力平易な用語で基礎的な説明も含むように試みました。

1. はじめに

なぜストラディヴァリを始めグアルネリー族(ファミニー、スクールともいう)やアマティー族のように、17、18世紀のクレモナで作られた楽器が人気なのでしょう。これらの時代に作られたヴァイオリンをオールド・ヴァイオリンと呼んでいますが、非常に音が良いといわれ、外観も素晴らしく美しさや貫禄も備えています。

しかし、この「良い音」という表現ですが、何をもって「良い音」なのかという価値の判断基準は大変難しいことです。これは、絵画や人物の美しさや、料理やワインの美味しさを定義するのが難しいのと同じで、数値的に表すのは難しく、また人それぞれ基準や尺度が違います。ヴァイオリンの音色を語るうえで一つの大きな命題がここにあります。

ヴァイオリンの研究の多くは、楽器の振動や放出された音のスペクトルの解析をすることから始まります。ヴァイオリンの板がどの周波数でよく共鳴するのかを調べる固有振動(モード、mode)解析や、演奏音やタップ音をマイクで録音してどの周波数(帯)の成分が多く含まれるかを調べるスペクトル解析は楽器の特徴を分析する第1歩となっています。また、物理的な測定値として、ヤング率(縦弾性率)、内部音速、内部摩擦、周波数応答関

数などがあります。そして、この「良い音」の研究は多くの学術分野にまたがり、ホール音響としての建築学や人間の音がどう音を感じるかといった認知科学や心理学などにまで関連します。ただ、こういった研究のためのデータ収集と分析はとてつもなく変動要因が多いため、これまで世界の楽器研究者が精力的に研究してきましたが、なかなか決定的な結論は出ていません。

本論文では、ストラディヴァリ等が活躍したイタリアのクレモナを始め、世界でどの様なヴァイオリン研究がなされているか、楽器の構造や製作と音響の関連といった基礎知識も踏まえながら紹介していきたいと思います。

2. ヴァイオリン製作と音響研究の歴史

2.1 ヴァイオリンの誕生

今日のようなヴァイオリンの完成形は16世紀、レオナルド・ダ・ビンチやガリレオ・ガリレイ、メルセンヌ等が活躍していた後期ルネサンス時代までさかのぼります(表1)。現在の説では、イタリアのクレモナで活躍したアンドレア・アマティ(Andrea Amati, 1505 - 1577)が完成させたと言われています[1]。アンドレアの孫のニコロ・アマティ(Nicolò Amati, 1596-1684)、そして弟子のストラディヴァリ(Antonio Stradivari, 1644 - 1737)やグアル

表 1 History of violin maker, researchers and music.

Year	Violin maker	Research	Composer and History
1500	Old violin (- 1800 ca) Amati, A.(1511-1581) Tieffenbrucker, K. (1514-1570) Gasparo da Salò(1542-1609)	Leonardo da Vinci(1452-1519) Galileo Galilei (1564 - 1642)	Renaissance Period(1400-) Josquin Des Prez (1450-1521) Protestant Reformation (Luther 1517-) Monteverdi, C (1567-1643)
1600	Amati, N.(1596-1684) Stainer J.(1619-1683) Stradivari, A.(1644-1737) Klotz M.I(1656-1743)	Mersenne, M. (1588-1648) Newton, I. (1642-1727)	Baroque Period(1600-) Orfeo (Monteverdi, 1607) Vivaldi, A. (1678-1741) Bach, J.S. (1685-1750)
1700	Guarneri “del Gesù” (1698-1744) Storioni, L.(1744-1816) Tourte, F.X. (1748-1835) Modern bow developed by Tourte	 Chladni, E.(1756 - 1827)	Classical Period(1750-) Viotti, G.B.(1755-1824) Mozart, W.A (1756-1791) Beethoven, L.v (1770-1827)
1800	Semi-old violin Pressenda, G.F.(1777-1854) Vuillaume, J.B.(1798-1875) Peccatte, D.(1810-1874) Sartory, E.N. (1871-1946)	Savart, F. (1791-1841) Helmholz,H.(1821 -1894)	Romantic Period(1820-) “24 Capricci” (Paganini, 1810) Sym. 9 “Choral” (Beethoven, 1824)
1900	Modern violin Fagnola, A. (1866-1939) Sacconi, S. (1895-1973) International School of Violin making(1938)	Raman, C.(1888-1970) Saunders, F.(1875-1963) Backhaus, H. (1885-1958) Meinel, H. (1904-19??) Cremer, L. (1905-1990) Hutchins, C.M. (1911 - 2009)	Schoenberg, A(1874-1951) Modern Period (1910-) Twelve-tone music (Schoenberg)

ネリ・デル・ジェズ(Joseph Guarneri, “del Gesù”, 1698 - 1744)により黄金期を迎えます。

同じ頃、オーストリアチロル地方のアプサムのシュタイナー(Jacob Stainer, 1617 - 1683)やドイツのミッテンヴァルトのクロッツ(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す。音楽史上では、ルネッサンス後期のモンテヴェルディから、バッハやヴィヴァルディのバロック時代です。

この時代、音量の面でストラディヴァリやガアルネリの試行錯誤が見られます。楽器がよく鳴るように長さや幅が少しずつ変化していましたが、他にも、ヴァイオリンの音量と音色を左右するアーチの高さと形状が変わります。アマティのアーチの高さ(表板/裏板の底面からアーチの最高点まで)は20mmでしたが、ストラディヴァリがアマティの影響をまだ受けていたころは17~18mmで、後期1700年頃に入るとそれが14~16mmに下がり、そしてガアルネリ・デル・ジェズに至っては13mm~14mmと低くなっていきました。ただ、アーチの高さが音量を決めるのではなく、アーチの形状や板の厚さ、密度も同時に関連があるため一概には難しいのですが、ストラディヴァリは1700年初頭にかけてサイズとアーチの試行錯誤の時期を経て黄金期の作品にたどり着いたと言われます。

2.2 ヴァイオリンの音響研究の始まり

さて、ヴァイオリンの登場と同じころ物理学としての音響研究も始まります。音そのものの研究は大変古く、紀元前500年頃にまでさかのぼり、ピタゴラス(Pythagoras)がドレミの音階の元であるいわゆるピタゴラス音律を発見しました。その音階は、やがて音響学の父とも称されるメルセンヌ(Mersenne, M. 1588 – 1648)により12音平均律のとなり今日に至ります。また、彼は弦の振動についても弦をはじいた時のピッチが弦の長さによって決まり、弦の固有振動数、長さ、密度、張力の数学的な理論を打ち立てました。そして、後ほど説明しますが、振動モードの計測手法を考案したクラドニ(Chladni, E., 1756 - 1827)がいます。

19世紀前後のころになってやっと“ヴァイオリンの音響研究”が徐々に始まります。しかし、クレモナでのヴァイオリン製作に関しては19世紀に入ると、ストリオーニ(Lorenzo Storioni, 1744-1816)とチェルーティ(Giovanni Battista Ceruti, 1756 - 1817)を最後に廃れてしまいます。次世紀に入りヴァイオリン製作のメッカとしての再興まで空白時期を過ごすこととなります。

さて、歴史上分かっている最初のヴァイオリン研究は高校物理でもお馴染みの物理学者サヴァール(Savart, F. 1791-1841)と、フランスのヴァイオリン製作者の代表格ヴィヨーム(Vuillaume, J.B. 1798

- 1875)による共同研究が最初となっています。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ました。

そして、ヴァイオリンの音響的な改造が始まりました。当初のアマティヤストラディヴァリの作った楽器はバロック・ヴァイオリンと呼ばれています。先述の大きなコンサートホールでの演奏に見合うように、ネックを長くして弦長を長く、またネックの本体への差し込み角度を上げて駒を高くしました。こうすることで弦の張力および駒が表板を押す圧力が上がり、結果的にヴァイオリンの音量は上がることになります。また、魂柱も太くバスバーも大きくなりました。

音響研究で最も外せない人物は、ヘルムホルツ(Helmholz, H. 1821 -1894)です。弦の振動原理、波動方程式など音の物理現象を扱う上で必ず登場する人物です。その後、20世紀の世界的な音響物理の分野では、Saunders (1875 - 1963)、Backhaus (1885 - 1958)、Raman (1888 - 1970)、Meinel (1904 - 1977)、Cremer (1905 - 1990)、Hutchins(1911 - 2009)とヴァイオリンの研究に貢献した人たちが続き、現在では、Jansson、Woodhouse、Bissinger、Schleske、Stephanek、Gough等が最新技術をヴァイオリン研究に導入し非常に多くの功績を残しています。

また、クレモナの楽器製作者としてストラディヴァリ研究に貢献した人として、サッコーニ(Sacconi, S. 1895 - 1973)が有名です。特に著書の”Secret of Stradivarius”が有名で、博物館(Museo del Violino)のコレクションやヴァイオリン製作学校(Scuola Internazionale di Liuteria Cremona)に貢献した人物でもあります。また、クレモナにはもう一つ私立の製作学校(Academia Cremonensis)があり、その創設に貢献した弓製作者ルッキ(Lucchi G. 1942 - 2012)がいます。また、彼は学者・技術者でもあり彼の開発した木材の内部音速を超音波で測

る簡便な装置 Lucchi Mater は工場や製作者により使われています。

2.3 クレモナのヴァイオリン博物館におけるヴァイオリン研究

ヴァイオリン製作の盛んなクレモナでは近年盛んに研究が行われ、ミラノ工科大学とパヴィア大学の研究チームがヴァイオリン博物館と共同で、クレモナに残る歴史的楽器の音響とニスの研究を行っています。

ヴァイオリンの振動モードの解析という、かつてはクラドニ法と呼ばれる方法が行われてきました。しかし、この方法はヴァイオリンの箱を開けたりするため非常に楽器に対するダメージが多く、現在、歴史的に貴重なヴァイオリンにはこの方法は使えません。ダメージを与えない(非侵襲的)



図1 Scanning violin surface by 3D scanner



図2 3D audio Rendering at semi-anechoic room (Politechnico di Milano, Musical Acoustic Lab)

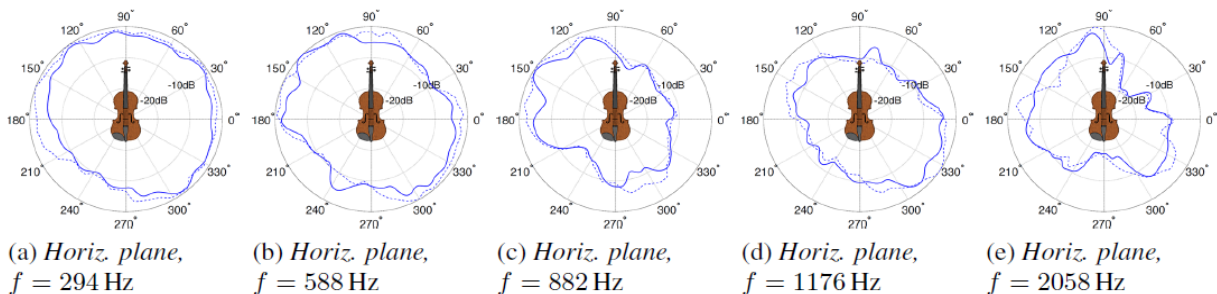


図3 3D radiation pattern of the violin in the horizontal plane (by Corradi et al.[2])

音響特性を測る方法を探っており、今は近接音場ホログラフィ法や 3D スキャナで取り込んだ形状データを基にした数値シミュレーションによる方法が取られています(図 1)。また、格子状に並べたマイクロホンアレイで、ヴァイオリンから出る音のピッチ毎の放射特性の分析が行われています(図 2, 3)。音色の研究としては、オントロジーと呼ばれる音の表現を表す言葉(柔い-硬いなど)と周波数特性の一つ MFCC との相関関係や、ニスの下地と音色の関係もパヴィア大学との共同研究で行われ、音響学だけでなく認知科学、化学まで総合的な研究に取り組んでいます[2, 3]。

なお、パヴィア大学のチームは紫外線を用いたニスの成分分析を進めており、約 500 年前の当時一般的だったリンシードオイルとコロフォニウムのオイルニスが使われ、また下地にはカゼインや動物性ゼラチンに由来するプロテインが含まれる材料が使われてたことが分かってきています[4]。

3. ヴァイオリンの製造工程と音響研究

3.1 ヴァイオリンの構造

ヴァイオリンは、図 4 のような構造になっています。表板が針葉樹のスプルース(Spruce)、裏板と横板が広葉樹のカエデ(Maple)でできています。この共鳴箱の本体にカエデのネックが取り付けられ、その先端にはペグボックスが彫られスクロール(渦巻)の装飾が施されます。このペグボックス内でペグ(糸巻、ツゲや黒檀など)を使って弦を巻き付けます。

外側のパーツ類にはあと、左手の指で弦を押さえるための指盤、弦の振動を伝える駒、本体の下側から弦を張るために固定するエンドピンとテールピースがあります。

一方、内側には低い弦(太い弦、G 線、図 4 手前側)の側にバスバーと、高い弦(細い、E 線)弦の側

に魂柱があります。これらは家の屋台骨のように表板にかかる圧力を支えるのではなく、魂柱は駒により駆動された表板の振動の支点と裏板への伝達を担い、バスバーは楽器の上部 Upper-bout と下部 Lower-bout の伝達を担います。なお、魂柱はニカワで接着されておらず音色の調整のために動けるよう、ただ表裏の板に挟まれるようにして垂直に立っているだけです。そして、表板には音の放射や魂柱の調整、また楽器の顔だちとしても重要な f 字孔という穴が開けられています。

さてここで、多くの関心が集まるオールド・ヴァイオリンと現代のヴァイオリンの音色の違いはどこに起因するのか? という問いに関してですが、筆者の考えでは本体の木材の機械的性質が挙げられると思います。オールド・ヴァイオリンの本体の木は 300~400 年も作られてから時間が経っています。本体の寸法や厚さといった点では、マイクロ CT スキャンといった技術により先ほどの 2.2 節の諸研究者により測定がされマイクロの単位で詳細が分かっています。なお、本体以外のネックや駒、その他パーツ類は、オールド・ヴァイオリンも現代のヴァイオリンも同じものを使います。

仮にマイクロの単位で同じ構造でストラディヴァリと同じ楽器を作ったとすると、あとは木材の機械的性質の違いが残るわけですので、やはり木材の物性値と振動・音響特性の差分を考えることとなります。これまでに木材の繊維組織のセルロース等に結合する水や、ニスを塗る前の下地の処理など諸説があり、かつては製作者や研究者は木材の経年変化を促進させオールド楽器のもつ音色に近づけるために、薬品や熱処理によってなんとかできないかと工夫をしてきました。しかし、どうしてもオールド楽器のような音色の再現に至る結果は出ていません。

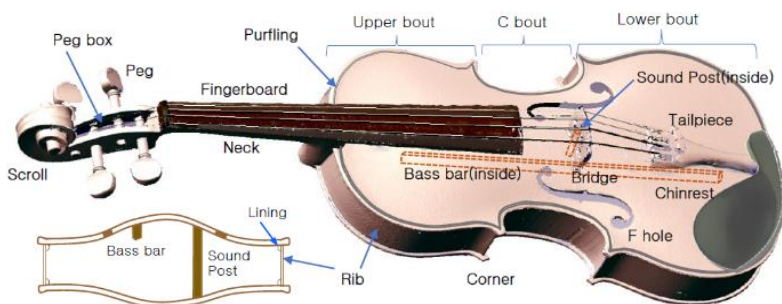


図 4 Structure and parts of violin.



図 5 Val di Fiemme and abete rosso (Paneveggio).

3.2. 木材の選択

良い音のするヴァイオリン作りは何からスタートするか？製作者はまず木を選ぶところから始めます。音色の良し悪しの根源は木材の質にかかっているのです、この材料選びにこだわります。材料のグレードで楽器の基本的な価格や評価が変わってしまうほどです。木目の間隔と均質さ、繊維の方向、杳の美しさ、虫食いがいいか等々をよく見ます。

イタリア北東部にあるドロミテ山地に Val di Fiemme と呼ばれる良い表板材(Abete Rosso)が取れる森林があり(図 5)、古くからクレモナではドロミテの製材所に訪れ木材を調達しています。製作学校では学生もツアーを組み森林と製材所を見して自分の目で木材を見ることも教わります。裏板のメイプルは、旧ユーゴスラビアのダルマチア地方やバルカン山地のものが人気があります。

この木材選びの時に、内部音速を計測してある程度の音響特性を測る(自分の製作の統計データとして記録する)製作者もいます。ここで、良い音のための基準となる木目に沿った方向の内部音速の値は表 2[5,6]とされています。

表 2 Limit of internal velocity for tone woods(m/s)

Wood	max.(Lucchi)	min.(Lucchi)	min.(Kreit)
Spruce	6300	4350	5950
Maple	5200	3300	4850
Pernambuco	6130	4350	-
Boxwood	3900	3300	-
Ebony	4000	3140	-

Lucchi[5]によると、木目が詰まっている(年輪の幅が狭い)と密度が高くなりますが、密度が高いとこの内部音速も高くなります。スプルースの木材の外側と内側では、内部音速は内側の方が高い傾向にあり、はぎ合せるときに内側の内部音速がより高いところを使う方がよいとしています。木目方向に対して斜めになり横断する方向につれ内部音速が低くなっていることも指摘しています。なお、Kreit[6]による最低値は高めで、木目を横断する方向についてはスプルースとメイプル共に 1950m/s 以上であることとしています。

以上より、木目に対して極力まっすぐであり内部音速が適正值内で高い材料・部位を選びます。

さて、ここで、奏者や楽器店でよく耳にする裏板の 1 枚板と 2 枚板について記しておきます。ヴ

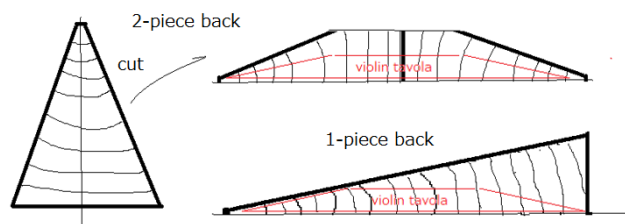


図 6 Cutting wood in 1 piece-back and 2 piece-back

ァイオリンの裏板は図 6 の断面図のように、2 枚板では楔型(Quarter Cut)を 2 つに分けてその外側を背中同士ではぎ合わせます。1 枚板の場合はそのままはぎ合せをせずに使います。Lucchi の指摘によると、2 枚板では材質が左右対照になりやすく、1 枚板では非対称に必然的になります。上記の内部音速にしても左右が異なるので機械的性質(弾性や硬さなど材料の性質の総称)としては非対称です。また、木材の表皮近くは内部音速の値が良くないことがあり、切り取った材料で適正範囲でない部位も程度我慢しなければいけないときもあります。

音の面でいえば 2 枚板の方が左右の材質が均等であったりより音質の良い部位をつかったりというメリットはあります。しかし、美しい杳の材料で見た目を尊重するために 1 枚板を好む場合もありますし、左右の音響バランスをしっかり加味して削ることができれば問題はなく、必ずしも 2 枚板のほうが音が良いかというと、そうではなく製作家の腕に寄りけりでありケースバイケースです。

3.3 板のアーチと厚みと固有振動モードの測定

さて、木材がそろったら楽器の柱となる表裏の板を固定するブロック部分を作ります。C-Bout という中央部の凹みの角 4 ヶ所、上下の 2 ヶ所の 6 個を作り、ブロックのカーブをきれいに削り、厚さ 1.1-1.2mm のメイプルの横板を特殊なカーブをもったアイロンで曲げ、ニカワで接着します(図 7)。



図 7 Stradivari's forms. Ribs and blocks on inside-style form (author's).

※以降写真は筆者がかつてクレモナで製作の勉強していた時の撮影

この時に使う型(フォーム)がヴァイオリンの形を決めるモデルとなりますが、横板の内側に型を使うやり方と外側に使うやり方があります。横板の内側に 1.7-2.0mm 程の厚さのライニングという補強と表裏の板を接着する細長い板を張り付けてコーナーを整形すると枠が出来上がります。

次に、表と裏の板を削り出します。かつては工場製の安価な量産製品は合板を熱でプレスして曲げて使っていました。もちろん、個人の製作者はすべて削り出しです(全部を手でせつせと削るか、NC ルータである程度の目標値まで削るかは製造規模によるが、結果音質には関係ない)。近年は比較的安い量産品も削り出しになっていることが多くなりました。

この辺りの工程は製作者によっていくらか違いがあると思いますが、外側のアーチを作り、パフリング(象嵌)をいれ、内側を削ります。逆に、内側のアーチを完成させ蓋をしてから外側を削り完成させるやり方もあります。板の厚みは、中心部が厚く徐々に薄くなり、表板で約 3.5mm から 2.0mm、裏板は 4.1mm から 2.3mm になりますが、この値はモデルと木材の硬さにより全く変化します。

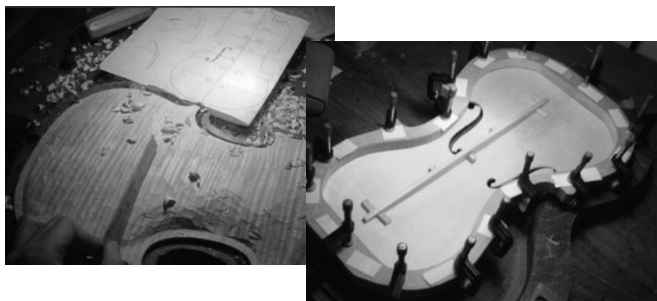


図 8 Making arch and setting bass bar.

この表板と裏板のアーチの形状と厚さをどうするか音が響的に最大の山場となります。昔から今でもタップトーンを聞いて、そのピッチで削る「頃合い」を測っています。音響工学と振動工学の言葉では、その板の持つ固有振動周波数を聞いていることとなります。おおよその厚さまで削り、板



図 9 Vibration mode by Chladni method(mode 2)

のたわみ具合とタップトーンから少しずつ調整を行い表3の固有振動周波数の目標値に近づけていきます。表3値はストラディヴァリやグアルネリを測定したときの値です[6]。

表3 Approximate Mode frequencies of free top / back plate (Hz), Moisture Content:6%[6].

Plate	mode 2	mode 5
Top plate, without f hole, bass bar	155	340
with f hole	138	310
with bass bar and f hole	(160)	345
Back plate	155 - 160	340 - 350

クラドニ法は、表板または裏板に極小の粒を撒き、下からスピーカーなどである周波数の音波を当て、板の振動モードを観測する手法です(図9)。共鳴する周波数の音波を当てると、板は共鳴して振幅の大きい腹と振動しない節ができ、その節に粒が集まります。その時の周波数と粒が集まった形状で板の共鳴状態を判断します。板状の物体の固有振動周波数とモード(節の数と位置)は板の形状と密度、硬さ、厚みで決まります。

ヴァイオリンでは、mode 2とmode 5という節の形からそれぞれXモード、リングモードとも呼ばれるモードがあります。ヴァイオリンの響きに関係するとして製作者や研究者が測定していた値です。特にmode 5は、先程のタップトーンとして聞けるピッチで、図9の装置がない時は板のupper boutやlower boutの縁から3cmあたり内側を指で挟みぶら下げ持ち(モード振動の節に当たる場所)、板の端や真ん中あたりを軽くコンコンと叩き、その響く音のピッチをチューナーなどで測ります。

mode 2の振動は板の中心部付近の硬さと縦方向の弾性に影響し、mode 2がまだ目標値より高ければ縦方向の板の厚みを薄くする、アーチの傾斜を調整するなどを行います。一方、mode 5は横方向のねじれやすさに関係し、同じく横方向のアーチの厚さと形状を調整していくようにします。

周波数が高い時はまだ板が厚く薄く削る必要があります。削ると徐々にピッチは下がっていきま(削り過ぎてしまうと戻せなく、ピッチを上げることはできないので要注意)。例えば、図9の右の写真(mode 2, X mode)では中心部で粒子がシミのように広がり、中心部がまだ厚いことが分かります。板の縁の内側に縦長の輪を形成するmodo 5についても、リング形になっていなければ中心部から上下方向へ、左右がいびつであれば左右方向へ

それぞれ厚みやアーチなどを調整するなど、アーチと厚さの調整のための指標となります。

表板の場合、まず表3の1行目、f字孔とバスバー無しの場合の値になるようにアーチを削ります。次に、f字孔をあけた時の値、バスバーを付けた時に、それぞれの値になるように調整します。f字孔を開けると板の中央部が柔軟になり mode 5では元より30Hzほどが下がり、バスバーはそれを取り戻すように35Hzと少し上げることになります。なお、修理の際のようにニスが塗っている場合は、重さが約2g重くなりこの周波数は5~7Hz高くなります。

3.4 共鳴箱としての振動モードと音響測定

表裏のアーチ、f字孔、バスバー取り付けが完成したら横板とニカワで接着します。これ以降、ヴァイオリンは、プレートとしてではなく共鳴箱としての音響測定になります。

測定方法はインパクトハンマと FFT アナライザー(Fast Fourier Transfer Analyzer)を使用します。これは小さなハンマで軽くコツツと駒を叩き、その音を測定用マイクで拾って周波数応答関数や周波数スペクトルを計算します。そうすると、図10の模式図のようにいくつかのピークが出てきます。ストラディヴァリなどの計測から目標値は表4の範囲とされています。

表 4 Frequencies of A0, A1, B1, B1+, CBR [6] etc.

mode with sound post, white vn	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 ⁻)

A0は breath mode と呼び板全体が上下に振動する吸込み湧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ていています。次に CBR

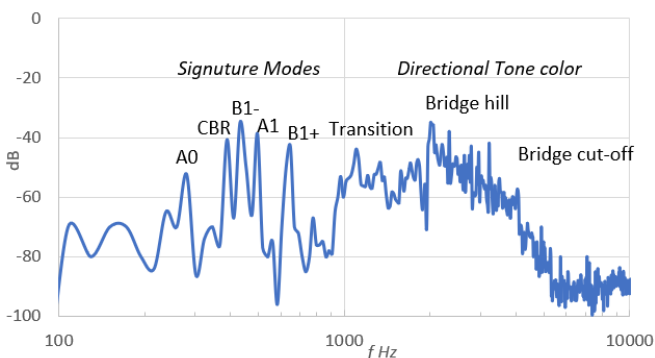


図 10 Vibration mode A0, A1, B1, B1+ and CBR

(Center Bout Rotation)モードというねじれモード、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)があります。Kreitは、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指摘しています。なお、ニスを塗るとこの値は5-8Hz上昇します。A1モードは本体内部の共鳴に関連しますが、模式図のように分かれて見れないこともあり B1-モードに重なったりします。

魂柱は、直径 6.2mm ほどの太さのスプールの円柱の棒です。本体内側のアーチを想像しながら両端を斜めに削り、上下の板にぴったりと合うように設置されます。f字孔から中に立てるとやっとならびとして演奏して音が出せるようになります。魂柱の役割は表板と裏板の振動の橋渡しになるのですが、振動と音響の点では両側の板の振動モードの節にもなり、駒の振動モーメントの軸になり、A0モードの加振を促進したり固有モードの周波数を上げたりすることが報告されています。

魂柱の位置についてはおおよそ E 線側の駒の足の端より、テールピース側に 2-3mm と間を開けますがこれは楽器の音色とバランスに応じて前後左右します。なお、ストラディヴァリの A0モードは魂柱なしで 242-246Hz だったのが、魂柱ありで 272-276Hz と少し上がります。グアルネリでは魂柱なしで 253Hz、魂柱ありで 280-290Hz とストラディヴァリに比べやや高めだという報告もあります。板の厚さ、容積、f字孔などが総じてこの違いを生じさせていると思われます。

ニスが塗られ、魂柱や駒などパーツがセットされると、やっとならびが弾ける状態になりますが、弓で弾いた演奏音の音色の分析は非常に多くの要因を含みさらに難しくなります。

とはいえ、分析の基本的な手法がありまして、演奏音のスペクトル解析がその一つです。図11はスペクトル解析の一例ですが、録音したヴァイオリンの演奏音の一部を切り取り FFT の計算をした結果で、横軸に周波数を、縦軸にその周波数におけるパワーを示したものです。近年、筆者は図にあるようなスペクトルの概形であるスペクトル包絡、SN比(Q値)、フォルマントなどに着目し、Deep Learning といった最近の AI の技術も用いて楽器の

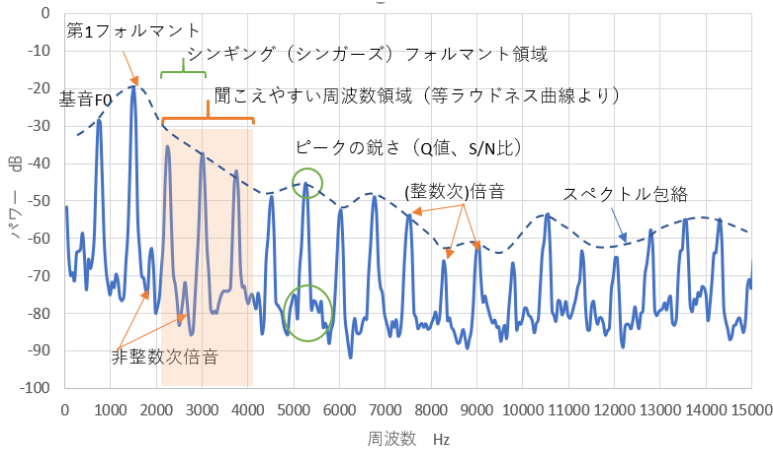


図 11 Power spectrum and envelope (Stradivari 1698, E string)

音色の分類を試みています。

4. おわりに～クレモナにおける製作の今と音響研究の役割

現在、クレモナには、100 人以上のプロの製作家が活動しています。また、国際的な製作学校が公立と私立の 2 カ所があり、学生数は 200 人弱ほどもいます。世界各国から学びに来てやがてプロとなりクレモナで工房を開く、もしくは自国に戻り製作家(Liutaio)もしくは修理職人(Restauro)として活動しています。クレモナで学んだスタイルを活かして製作している製作家が世界に散らばったため、今日のヴァイオリン製作はかつてのようなローカルな特色が薄れつつあると言えます。国際的な製作コンクールなどを見れば、ドイツ、フランス、英国、東欧などのヨーロッパ圏のみならず、日本、韓国、中国などのアジア各国までクレモナスタイルの楽器を作る人は大勢います。一方で、2012 年にクレモナのヴァイオリン製作がユネスコの無形文化世界遺産に登録されたことも受け、最近イタリア内部でもヴァイオリン製作に注目が集まり、この仕事に興味を示す若手や跡を継ぐ若手が増えつつあるようです。

最後に、クレモナで活躍する製作家たちが音響研究に寄せる期待についてインタビューをした所感です。やはり、一番多いのは音色の調整に関することが多く、例えば魂柱、駒、バスバーなどの位置や材質等が音にどのようにどれだけ影響するか、定性的・定量的な指標に関心があるようです。もちろん熟練の勘で分かるようになりますが、科学的に何か裏付け(もちろん現実に合点がいくも

の)が得たいものと理解できます。もう一つは、木材の性質と音響の分析で、これはどの木材を選ぶべきかといった選定の基準、および加工処理をどうすべきか、その処理によって音響特性がどう変わるのかを同じく定性的・定量的に知りたいとこのことです。これらの要望に関する研究はこれまでもあったはずですが、まだ製作の現場のマエストロ達には腑に落ちているものではなく、もう少し我々研究者の努力が必要のようです。

本文で述べたような音響測定はすべての製作家が利用して(信用して)いるわけではありません。例えばタプトーンを聴くといったようなアナログな手法は皆さん使いますが、高度な計測器を用いた測定となると少数です(計測器が高価だということもある)。ただ、製作時の目安として統計データをきちんと記録し活用している製作家もいます。我々研究者がより客観的な数値目標が示せると、製作家のよりどころとなる貢献になるようです。

謝辞

本文を作成するにあたり、クレモナに在住する多くの製作家、ヴァイオリン博物館の研究室の皆様には貴重なご意見を頂き、また音楽音響研究会の幹事の皆様には招待講演という貴重な場を頂き、この場をお借りして感謝をいたします。

参考文献

- [1] Buen A. "A brief introduction into the violin acoustics history". In: *Proc. of the Baltic-Nordic Acoustics Meeting* (2006). p. 8-10.
- [2] Corradi R., et al. "A multidisciplinary approach to the characterization of bowed string instruments: the musical acoustics lab in cremona." *Proc. of the ICSV22* (2015).
- [3] Setragno F., et al. "Feature-based analysis of the impact of ground coat and varnish on violin tone qualities." *Acta Acustica united with Acustica 103.1* (2017) 80-93.
- [4] Spinella, A., et al. "A step forward in disclosing the secret of stradivari's varnish by NMR spectroscopy." *J. Polymer Science A: Polymer Chemistry 55.23* (2017) 3949-3954.
- [5] Lucchimeter. homepage [http:// www.lucchimeter.com/](http://www.lucchimeter.com/)
- [6] Kreit, P. "The Sound of Stradivari." (2017).