

擦弦楽器チェロの倍音スペクトラム特性に関する検討

松 村 誠¹

Tone Quality of cello based on the overtone spectrum Makoto MATSUMURA¹

In order to investigate the tonal character of cello sound, the overtone frequency spectra of the individual A,D,G,C open string and all open string obtained 6 cellos were weighed up the properties of peak overtone frequency spectra recorded Bach cello suite played on cello by illustrious players. The effect of overtone sensitivity of sound post position, the tilting angle of bowing bar and contact point of strings between fingerboard and bridge were evaluated.

キーワード：チェロの倍音スペクトラム特性、魂柱の適正位置、弓の弦接触位置、弓の接触角度

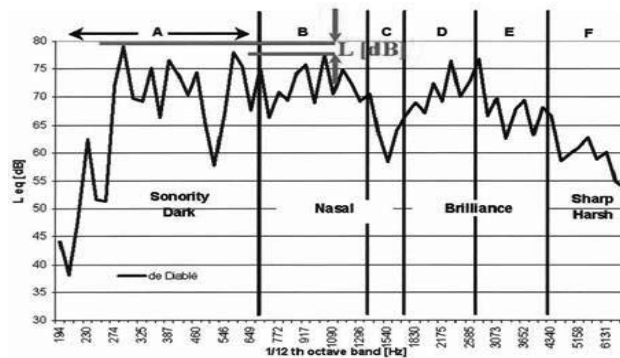
Keywords : Overtone Spectrum of cello, overtone sensitivity of sound post position, contact point of string, contact angle of bar

1 緒言

擦弦楽器の音質を評価する研究方法として、楽器の発する音そのものを採取し分析した倍音構造によるものと、楽器の発する音そのものではなく、楽器の共鳴体としての振動応答特性の共振周波数とその応答値特性により音質特性の評価を行う二つの方法の流れがある。この後者の共振振動応答を用いた研究では、旧ソ連時代の Yankovski らが数十年をかけ大きな成果⁽¹⁾を上げ、その後も多くの研究者がそれぞれ改良を加えた打撃応答周波数曲線（アドミッタンス曲線とも読んでいる）による研究を行っている。小さな振り子の打撃をヴァイオリンの駒に当てて得た共振周波数特性を Yankovski はヴァイオリンとの音質比較のためにいくつかの周波数帯域に分け、この特性と楽器の音色の特徴を専門の演奏家と製造者が聴き比べ客観的に評価し、このインパルスによる応答周波数特性の最適であったという 1/3 オクターブ帯域中のスペクトルと楽器の音色の主観的評価との詳細評価を行うことにより、ヴァイオリンの音質良否の比較検討が出来るとしている。この評価で最高得点は 1736 年製の Stradivari の周波数応答特性の中心が 1250Hz の円形ドーム形で、これをパターンの標準として他の楽器を相対評価を行っている⁽²⁾。

この方法にも近いが独の Duannwaldt⁽³⁾は、Stradivari を含むイタリアの古楽器、工場での大量生産の楽器、現代の専門家による楽器約 600 台で、ヴァイオリンの駒を正弦波加振し、その音をマイクロフォンで録音した音の倍音特性を分析検討し、6 分割の周波数帯域で音の特徴を図 1 に示すような Sonority Nasal, Brilliance, Sharp/Harsh に分類し評価している。この論文でも Stradivari や Garunerius が優れているとの結果になっている。図 1 はこの Duannwaldt の手法を活用した Buen の論文⁽⁴⁾から引用したもので、この評価法により、市販の CD から得た 1/2 オクターブバンドの倍音特性のデ

ータによりイタリアの名楽器を中心に楽器の音質の評価検討をおこなっている。録音演奏から得た倍音研究は、倍音自身が楽器の特性を十分に示すものではあると思われるが、楽器の中でも楽器とは無関係の弦の種類、弓、楽器の付属品例えばチェロのエンドピン、松脂、そのほか特に演奏技術や演奏者によって倍音が大きく変化することがよく知られており、楽器本体自身の倍音特性を演奏音から検討することにはかなりの難しさが伴うものと思われる。



- Bass: $L [dB] = L_{max} (244Hz - 325Hz) - L_{max} (649Hz - 1090Hz)$.
- Nasal: $ACD-B [dB] = L_{eq}(190-650Hz \text{ and } 1300Hz-2580Hz) - L_{eq}(650Hz - 1300Hz)$.
- Clarity: $DE-F [dB] = L_{eq}(1640Hz \text{ to } 4200Hz) - L_{eq}(4200Hz \text{ to } 6879Hz)$

図 1 ヴァイオリン音質の評価ダイアグラム⁽⁴⁾

Fig.1 Overtone evaluation diagram of violin

しかしながら、演奏音ではなく楽器音そのものの音を使用した楽器の音質評価研究は筆者の調査範囲では少なく、上記の評価例等に相当する本格的な研究報告は見当たらなかった。

以上、弦楽器の音質評価研究が小振り子の打撃の応答振動特性による研究に集中していて、楽器音の直接の倍音による音質研究例が少ないのは、倍音特性による音質評価が

1 明星大学理工学部総合理工学科機械工学系 元客員教授 材料強度、構造強度設計

難しいからかもしれない。しかしながら、基本的な楽器音として開放弦を中心とする単音や、4弦を包絡した倍音スペクトラム等の特性データを採取し、それらの特徴や細かな変化事例をまとめて評価検討し、問題提起を行うことも重要であると思い本検討に取り掛かることにした。また、併せて魂柱位置のある定位置から上下左右に移動させた場合の倍音特性の変化とその移動効果、指板と駒の間を5等分した位置での弓奏法（弓の毛を弦にフラットに当てるおよび約45度に傾けて当てる）による倍音の変化とその効果でどのように倍音特性が変化するかについて評価検討を行った。

2・1 楽器音の採取と試験方法

楽器音を採取の際のチェロとマイクロフォンの位置関係を図2、使用した機器及びソフトを以下に示す。

録音機：Lesson Master(Victor)、
 Linear PCM Recorder DR-05(TASCAM)
 FFT アナライザ：Overtone Analyzer (Sygt Software)
 DigiOnSound5 (CyberLink)
 WavePad (NCH ソフトウェア)
 Cello : Fiolini (伊製 1900年代)
 Wiltfer (独製 1965年)

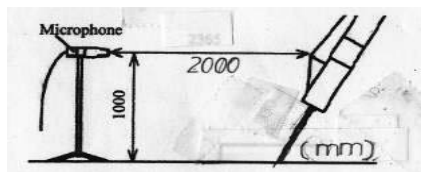


図2. チェロとマイクロフォンの位置関係
 Fig. 2 Recording Microphone position

2・2 チェロの倍音スペクトラム

本稿で取り扱うチェロの音質特性を検討する上で、目的や解析ソフトにより若干異なる倍音スペクトラム特性を用いているのでそのスペクトラム名と内容を以下に示す。なお、楽器音は、人為要素を少なくするため特別な目的以外すべて、開放弦 A,D,G,C の4弦の単音である。以下に本報告で使用用語の説明を行う。

開放弦単独の倍音スペクトラム：A,D,G,C 弦個々の倍音応答特性スペクトラム

単独開放弦の LTAS：採取データの各周波数応答値の平均値による倍音値スペクトラム

四弦を包絡した LTPS：採取応答値データ全ての周波数において倍音のピーク値による倍音周波数特性スペクトラム

4弦を包絡した LTAS：採取データの周波数倍音応答値すべてのそれぞれの平均値倍音周波数特性スペクトラム

ここで、応答値のピークと平均値の違いだけで同じような LTPS と LTAS の両方を採用しているが、LTAS は市販 CD などのように少し長い時間のデータ処理ソフトがないので、LTPS を比較評価用として採用している。

3 チェロの倍音スペクトラム特性の検討

本章では、楽器音の検討として実機チェロの各開放弦、および市販 CD の演奏音の倍音特性と実機チェロによる魂柱位置、弓の接触場所、弓の接触角度の変化に伴う倍音特性の変化、感受性について調べる。

3・1 楽器音の倍音スペクトラム特性

実機6台のチェロの音色データを採取し、その代表事例として20世紀初頭のイタリア製のチェロ Fiolini の楽器音の倍音スペクトラム特性例、4開放弦を包絡した倍音の周波数応答特性 (LTPS) を図3に、1965年の独製 Wiltfer チェロ倍音周波数応答特性 (LTPS) を図4に示す。この2楽器の特性と比較検討のために、楽器音以外にも技術要素や技能要素多く含んだ倍音事例となるが、市販 CD からムスチラフ・ロストロポービッチのチェロ演奏による高音が鳴り響くことで有名なバッハの無伴奏組曲6番の Preliud (約5分) を LTPS 化した倍音周波数応答特性 (LTPS) を図5に示す。

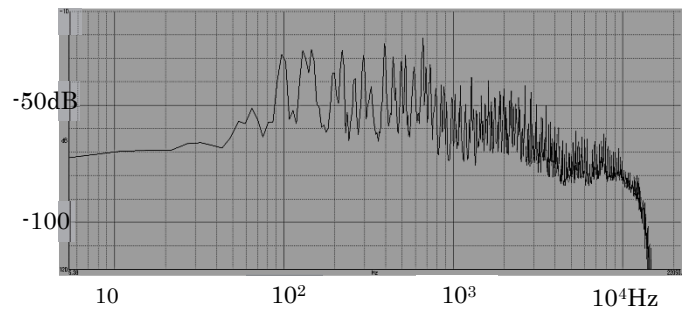


図3 チェロ Fiolini(伊)の開放4弦の倍音特性 (LTPS)
 Fig.3 Fiolini(Italy) Overtone spectrum of open strings(LTPS)
 縦軸は倍音応答値、横軸は倍音周波数

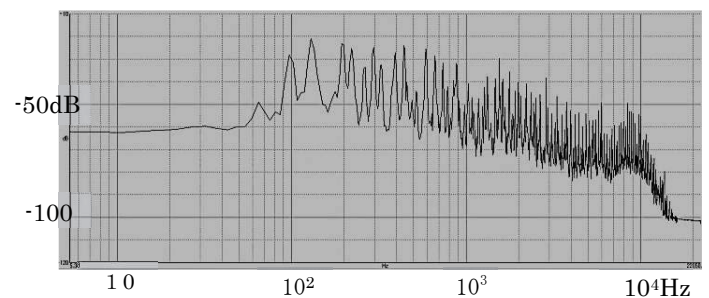


図4 チェロ Wiltferi (独) の開放4弦の倍音特性(LTPS)
 Fig.4 Wiltfer(Germany) Overtone spectrum of open strings (LTPS)
 縦軸は倍音応答値、横軸は倍音周波数

Fiolini、Wiltfer の両チェロともに4開放弦の倍音周波数特性 LTPS は、低周波数領域の図1に示すA領域とB領域の差 L[dB]がほとんどなく、チェロの Bridge Hill 相当部分⁽⁶⁾ (駒の Rocking 固有振動数近傍の高応答値帯域をさし、ヴァイオリンは約3000Hz、チェロは2000Hzである)の2000Hz近辺の倍音応答値がヴァイオリンのように高くなっていない。

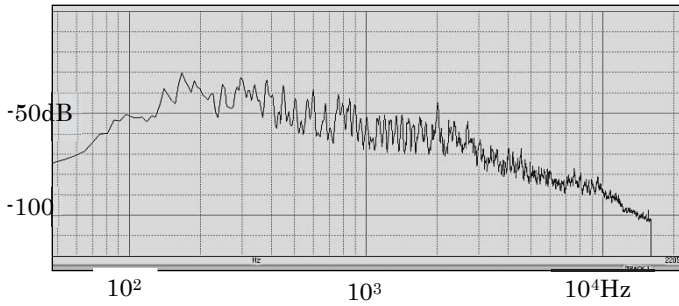


図 5 ロストロポービッチのチェロの倍音特性(LPTS)

Fig.5 LPTS of M. Rostropovich obtained from CD
縦軸は倍音応答値, 横軸は応答周波数

また、CD から得たロストロポービッチのチェロ（彼は”Dupol” Stradivari Cello 1711 を所持しており、その楽器で演奏しているはずである）の LPTS 特性は、図 1 に示す L [dB] は明確に現れているが、やはり 2000Hz 近辺の倍音応答値はそれほど高くない。Yo-Yo Ma のストラディバリもしくはドメニコ・モンタニアーナの銘器で演奏しているはずの倍音特性でも、図 5 とほぼ同じ傾向の特性を示している。他の著名なチェリストの CD データも同じような特性傾向であるので、ヴァイオリンとチェロのこの Bridge Hill 帯域の倍音応答特性の違いは、チェロの楽器固有の特徴である可能性が考えられる。

チェロには緒言のヴァイオリンの図 1 で示したような評価研究の報告例が見当たらない。そこで、図 5 のロストロポービッチの倍音周波数特性を Andrea Guarneri のヴァイオリンの周波数特性⁽⁹⁾ に合うように、横軸のチェロの周波数特性はほぼヴァイオリンの約 1/2 の共振周波数特性となっていること、Bridge Hill に関連する周波数帯域を支配するヴァイオリンの駒の共振周波数が約 3000Hz、チェロの駒は約 2000Hz であることを考慮して縮尺を縮め、ヴァイオリンとチェロを上下に並べると図 6 となる。そしてこの図に、図 1 に模した音色特性推定周波数帯域を図 6 の下部に示した。図 1 に基づく図 6 でチェロの音質良否の評価条件は、Corpus 領域の A₀, T₁, C₃ の各周波数応答がしっかりし、L [dB] がプラスの値となること、Nasal 領域では弱めの応答値、Bridge Hill 領域の 1 kHz~2 kHz 近傍で高い応答値を示すことである。評価図の応答値（市販 CD から取得）と図 3、4 とでは差があり、同等条件としての比較評価は難しいが、このサンプル評価図をもとに図 3、4 検討してみると、両図ともに A 領域と B 領域の差の L[dB] がほとんどなく、B, C の Nasal(鼻音)領域の応答値が高く、図 4 の D, E 領域で応答値に凸凹があり輝き音にムラがあること等で音色上に課題がありそうなのが判る。さらに音色及び音質の評価検討を試みるために、Fiolini, Wiltfer 2 台のチェロの開放弦 A, D, G, C4 弦のそれぞれ単音の倍音スペクトラムを図 7, 8 に示す。図 7, 8 とともに当該倍音以外の他弦の共振による応答値が混入しているが、図中で n 次倍音とは、図中の各弦の周波数に n 倍をかけ、該当図で n 倍周波数の応答値が n 次倍音である。

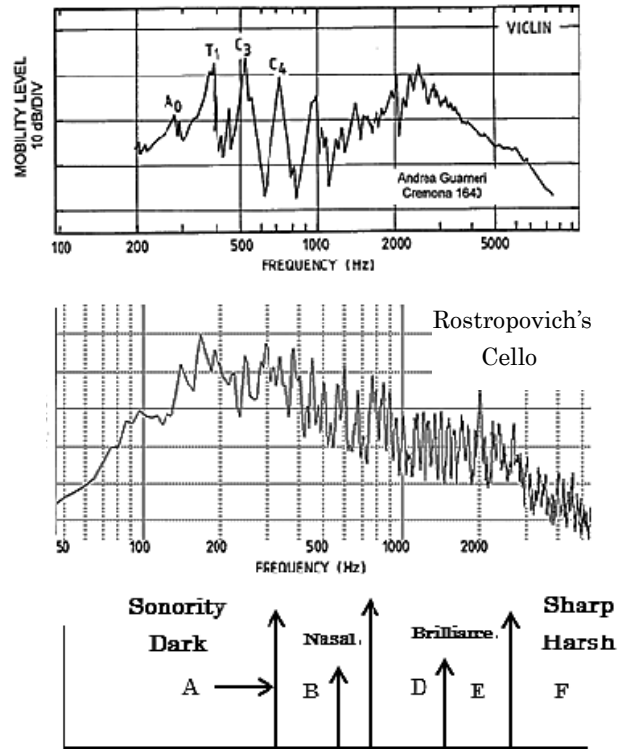
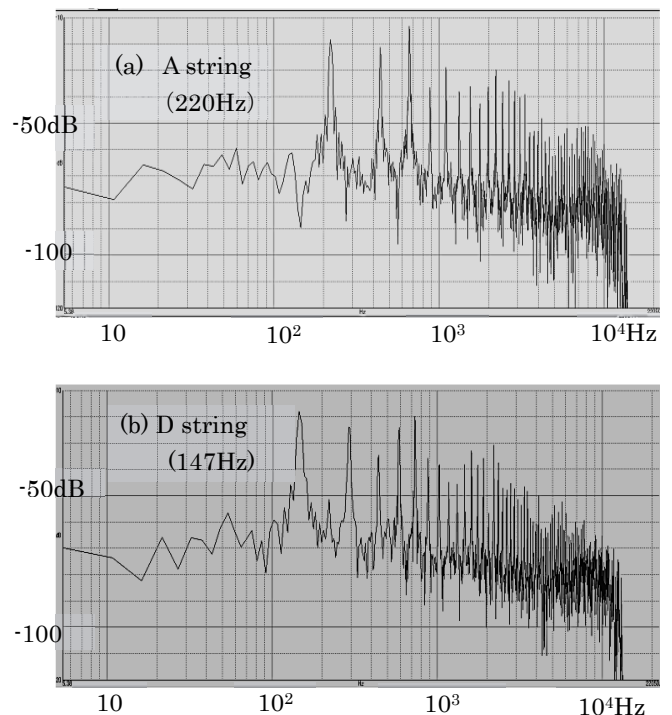


図 6 チェロの倍音スペクトラム評価図サンプル

Fig.6 Overtone evaluation diagram sample of cello

また、これらの図では倍音が 1 万 5000Hz ほどでなくなっているように見えるが、これはマイクロフォンの性能によるもので PCM レコーダーでは 2 万 Hz を越した倍音が存在していることを確認している。



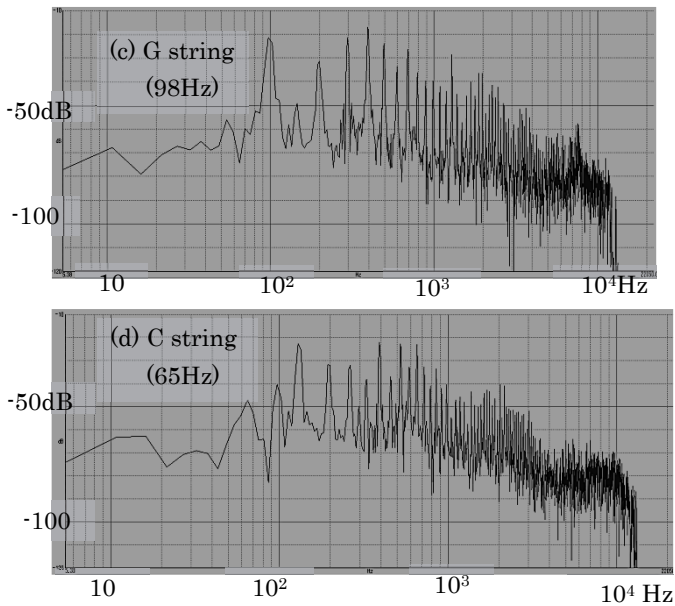


図7 Filioni の開放弦単音の倍音スペクトラム (LTAS)

Fig.7 Filioni Cello open string overtone spectra (LTAS)

図中の括弧内周波数は、1次倍音(基音)である

開放全4弦の倍音応答特性については前頁記述通りであるが、図7, 8の個別開放弦の倍音スペクトラムを見ると更に楽器の音響評価が具体的に可能となる。図7, 8のA弦を比較すると、高音の輝きを発揮できる Bridge Hill 近傍の1000~3000Hzで倍音応答値のばらつきや低さで図8のWiltfer

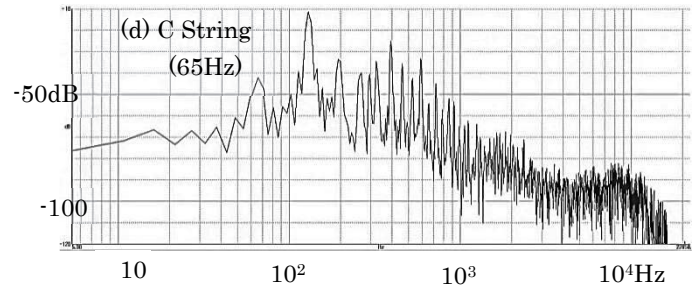
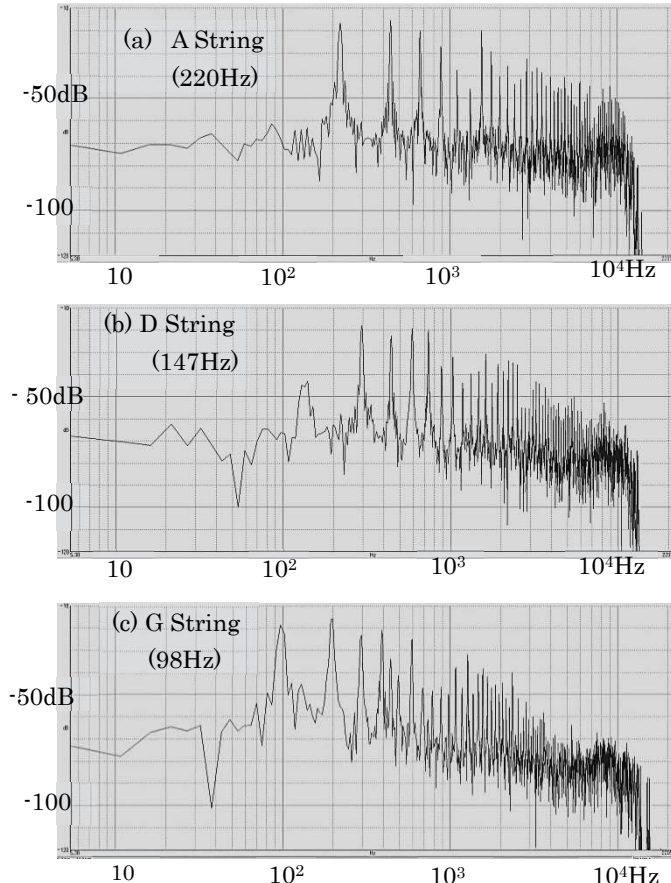


図8. Wiltfer の個々の開放弦の倍音スペクトラム(LTAS)

Fig.8 Wiltfer Open string overtone spectrum(LTAS)

図中の括弧内周波数は、1次倍音(基音)である

の楽器の音質に課題があると言えよう。D,G,C弦も同じように2000Hz以上の輝きを発揮する帯域で図8の倍音応答値の低いことから輝き音不足としての課題がある。また、基音の応答が高いと音が明瞭になり、各次数倍音も例えば奇数倍音が偶数倍音よりも応答値が高いと音色は硬く、逆に偶数倍音が高いと柔らかくなるなどの管楽器の音響特性に合致する傾向等、色々と興味深い結果を示している。具体的に明確な評価結果や音色にどのような変化・影響を与えているのか等、さらなる検討が必要と考えている。さらにこれら図7, 8に示した開放弦の倍音スペクトラムは、種々の僅かな条件の変更に対し、いずれかの次数の倍音応答値が反応し変化している。残念ながら音色、音質特性という観点ではどのような変化、反応なのか、さらなる解明・検討が必要である。これらも今後の主要課題と考えている。

3.2 魂柱位置による倍音特性の変化

魂柱の適正位置を倍音特性で評価するために、一般的な魂柱設置点oを中心とした魂柱の配置図を図9に示す。この図に基づき、音響測定を行いそれらの分析結果のうち変化が表れた位置のA弦倍音スペクトラムを図10に示す。

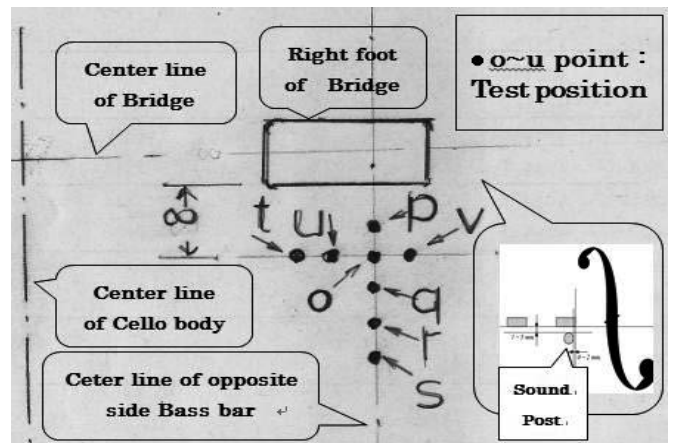


図9 魂柱位置が倍音構造に及ぼす影響の魂柱配置図

Fig.9 Sound post position of overtone sensitivity test

魂柱はチェロの筐体の中にある上板と裏板をつなぐ音響上重要な役割を持つ(直径6mm)丸棒。その配置を点oからv点までの7箇所、それぞれの間隔を2mm目標に位置を設定。

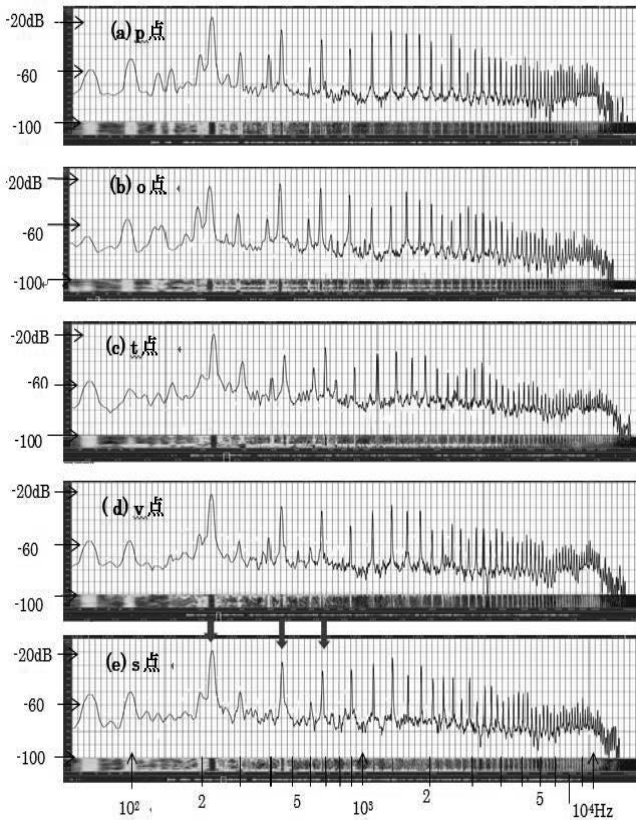


図 10 優位な変化を示し場所の A 弦の倍音特性 (LTAS)
Fig.10 A overtone spectra of sensitive change position (LTAS)

縦軸は倍音応答値で 1 目盛が -10dB、横軸は応答周波数で対数目盛、最下段の太矢印は左から 1 次、2 次、3 次倍音で、以下のピークが次の倍音である

なお、魂柱は同じものを使用している。魂柱位置の評価検討は、ここに提示した以外にも開放 4 弦を合わせた包絡 LTPS、各 4 弦 2 オクターブの包絡 LTPS でも行ったが、それらの差は少なく判別しにくいので比較的明確な差が出た図 10 に示す各弦単独の倍音スペクトラムで検討した。図 10 は A 弦のもので、p 点の応答値が 17 次倍音程度 (約 4000Hz) まで総合的に高い (o 点も p 点にやや劣る程度)。しかしながら、駒から垂直 y 方向の p, q, r, s 点の倍音スペクトラム間では大きな差はなく、特に D, G 弦では y 方向の魂柱の移動による応答値の差はすべて有意差があると判断できなかった。x 軸方向の t, u, o, v 点に関しても同様で、やや u 点が優れているようには見えるが、いずれも大差はなかった。ところでこの録音データをイヤホン及びスピーカーで聴音するとイヤホンでは q 点と u 点が聴きやすく、o 点、p 点と続くが、p 点は少し高めで輝きがある。そのほかの部位は o, p, u 点に比べ音質的にやや劣っている。スピーカーでは o, u 点が聴きやすく p, q, s 点は硬く窮屈な音感であった。以上をまとめると魂柱の適正位置は倍音特性調査の範囲内では予想に反して幅広いことが判った。ここでヴァイオリンの作り、あるいは補修の本で魂柱の位置に関する資料^{(7),(8)}によると、

図 9 の横方向では力木とチェロの中心線に対し対象位置に近い部位で、垂直方向では駒からの寸法が 2~10 mm、チェロの適正間隔寸法は約倍程度であると言われているので、5~15 mm 程度であるので、上記の試験結果は垂直方向では納得できる値で、横方向の x 軸では楽器の中側にも倍音に影響の少ない領域があることが判った。さらなる魂柱適正位置の検討には、演奏効果を加えた倍音特性と感度の良い聴音試験を混じえた詳細検討が必要と思われる。

3-3 弓と弦の接触位置及び接触角度の倍音特性について

楽器奏者のあいだでは、弓を駒に近づけると倍音が増え強く緊張感のある音が出ることが知られている。著名なヴァイオリン奏者の Ivan Galamian は、自著の“演奏及び指導の原理”で弓の奏法で重要なのは、弓の擦弦速度、弓の弦に対する圧着力、弓の接する場所の 3 点を挙げていて、特に良い音色を出すには弓を持つ手、腕 (弓を握るには) は自然でリラックスせよと強調している⁽⁵⁾。そして音色を輝かせるには弓を 45 度に傾けて (弦をこする弓の毛を傾けて弦と接触する面積を少なめにする) 弦と接するのが良いとしている。そこで、弓を駒に近づけ、さらに弓を 45 度に傾けると、それぞれにどのような倍音特性の変化が表れるのかを調査することにした。弓で擦弦する位置を図 11 に示すそれぞれ 1, 2, 3, 4, 5 の 5 箇所 (A 弦の第 4 開放弦 A, D, G, C と D 弦の第 4 ポジション A) のそれぞれの単音を通常の音階を弾く弦に柔らかい弓タッチとし、これらの位置と弓毛の角度による倍音の変化特性を調べる。

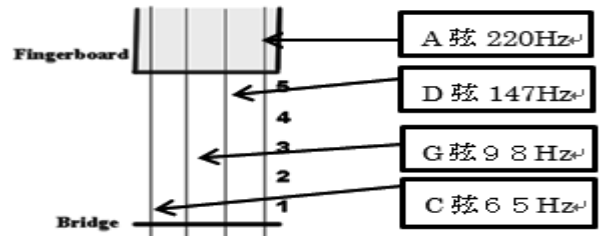


図 11 チェロの弓と接触する部分の概要図

Fig.11 Bowing contact position

試験の結果、5, 4, 3, 2 の順で倍音応答値は若干は大きくなるものの位置による倍音特性の変化は大きくないので、代表として A 弦の倍音特性について図 12 の左側の最上段に最も使用頻度の高い指板近くの位置の 4 を、中段に駒直近の 1 の位置の開放弦の倍音スペクトラム特性を、そして最下段に演奏音の左指で押さえた A 音 (開放弦 A と同じ音階音、駒近くの位置の 1 の位置で D 弦の第 4 ポジション) の倍音スペクトラム特性を示し、これらはいずれも弓毛を弦と並行にした倍音特性である。右側の上, 中, 下段には、左側と同じ条件で弦に弓を 45 度に傾けて当てたそれぞれ該当の倍音スペクトラム特性曲線を示す。

図 12 の最上段の左右ともに弓位置 4 の倍音スペクトラムは 5kHz 以上で弓を傾けた方が大きく、中段の駒近くの弓位置では、基音を始め全周波数領域で応答値が上段の 4 の位

置の応答値に比し高くなり、かつ G,D,C 音 (図中の A 倍音以外の共振音) が大きく減少している。弓の弦に対する接触角度の違いでも左側の弦に平行 (角度 0) の応答値より右側の 45 度に傾けて弓を弦に当てている右側応答値の方がほぼ全周波数帯域 (3, 4 倍音を除く) で高く特に 2 kHz 以上の高周波数領域では圧倒している。この弓の弦に対する接触角度の効果は、演奏時の楽曲音に近い最下段に示す倍音では、弦に対しフラットの場合、弦を押さえる片方の境界条件が指になって減衰が大きく開放弦の効果の応答値よりも音量が下がるので、中段より倍音応答値が小さくなっているが、それでも左右を比較すると傾きを持たせた方

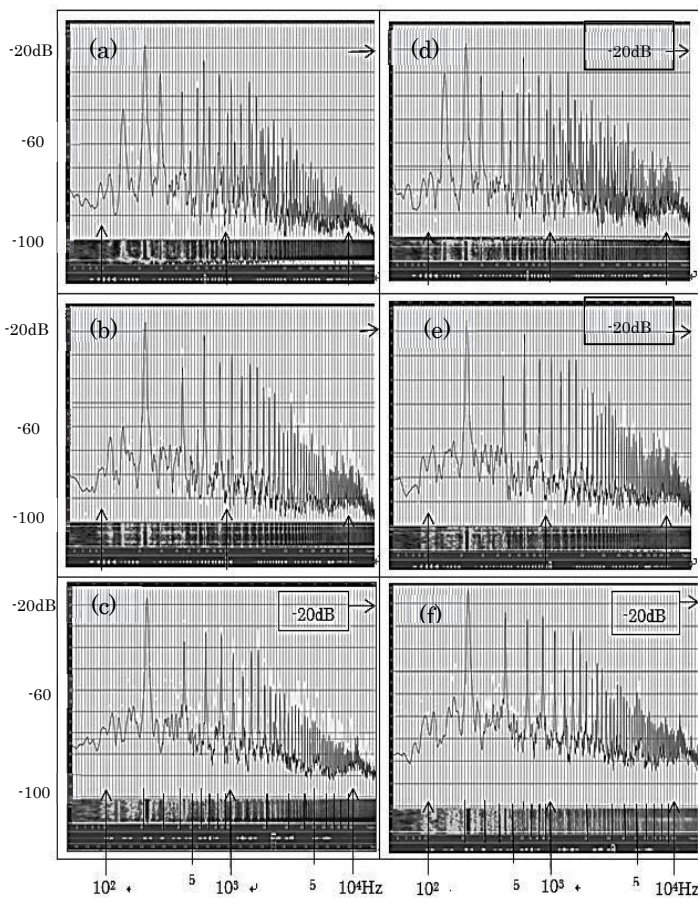


図 12 弓の接触位置と角度の倍音特性変化

Fig.12 Bow position and tilting of overtone characteristy

上図の右側は弓毛を弦に平行に接触させた奏法
左側は 45 度に傾けて接触させた奏法での倍音
特性曲線上図の縦軸は倍音応答値 dB、1 目盛が
-10dB、横軸は応答周波数で対数目盛。

が倍音応答値は大きく、1000Hz より高音領域ではさらに弓の傾き効果が大きくなる。この弓を傾けて倍音に与える効果についてはヴァイオリンでも bowing machine(弓の自動操作マシン)により試験が行われていて⁽⁴⁾、図 13 に示すように 1.5 倍音位 (D 弦なので約 4500Hz) から上の高倍次倍音周波数側で弓の傾き効果が出ていることがわかる。以上より弓の位置の効果では、駒に近いほど高周波

数倍音の応答値が上昇し音の輝きを増すとともに緊張感や音色の鋭さを増すようである。弓の接触角度の効果では、45 度に傾けたほうが並行にしたよりも 1kHz 以上の高温領域で応答値が上がり輝きを増すと同時に、図 8 により鋭さや荒々しさをます効果が大きいことが判った。

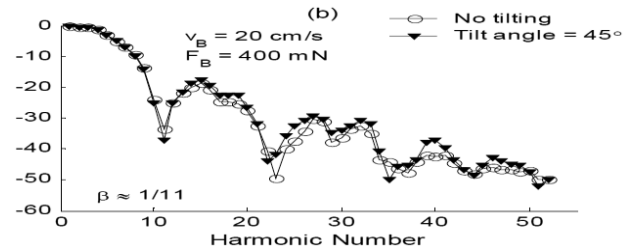


図 13 弓の毛の弦に対する接触角度の倍音への影響

Fig.13 Bow tilting effect on overtone spectra

4 結言

実機チェロおよびイタリアのストラディバリの銘器を使用した市販 CD から得た楽器音の倍音スペクトラム特性によるチェロの音質特性評価を試み、以下に示すようなことが判った。

- 1) チェロの音質評価を、同じ弦楽器で研究の多いヴァイオリンの Duanwaldt, Buen らによる評価ダイアグラムをチェロ用に横軸の周波数の縮尺変更で修正し活用を試みた。駒の主共振周波数領域での応答値がチェロの場合若干低い傾向にあること以外は、ほぼ同じ傾向を示しており有効活用できそうである。
- 2) 実機の C, G, D, A の 4 弦を包絡した倍音スペクトラム特性は、市販 CD から得た倍音特性とほぼ同じ傾向を示し、単独の開放弦だけの倍音スペクトラム特性による個別倍音次数の詳細変化を調べるとさらに楽器音の詳細情報が得られ、音質評価に有効である。
- 3) 魂柱のセット位置差による倍音全体特性の変化は、予想に反して少なかったが、録音データの聴音では倍音以上の優位差を感じられるので、個別倍音次数の応答値等さらなる詳細分析評価が必要である。
- 4) 弦に弓を当てる場所及び弓を斜めに当てる効果については、演奏効果として知られている駒近傍で倍音特性が優れ (応答値が高い)、弓を斜めに当てると特に高音側の倍音応答値が増すことが判った。

最後にチェロの師、勝田聡一氏に貴重なチェロ Filioni 等の音データを採取させて頂き、感謝申し上げます。

参考文献

- (1) B.A.Yankovskii: 「Method for the objective appraisal of violin tone quality」,Soviet Physics-Acoustics,Vol.11,p289-1965
- (2) 安藤由典:「楽器の音響学」、音楽之友社、p133、
- (3) Heinrich Duennwald: 「Deduction of objective quality parameters on old and new violins」、Catgut Acoust.Soc.J,vol.1,No.7,pp1-5(1991)
- (4) Anders Buen: 「On timbre parameters and sound levels of recorded old violins」、J.Violin.Soc.Am.;VSA Papers:Summer 2007,Vol. 111,No. 1)
- (5) Erwin Schoonderwaldtetal 「Effect of the width of the bow hair on the violin stringspectrum」 Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference,August6-9,2003(SMAC 03)
- (6) Erik Jansson: 「Acoustics for Violin and Guitar Makers,Ch.VII The fuction of the violin」.Kungl Teknika Hogskolan op.cit., p7.6, 7.21, 2002
- (7) 無量塔 蔵六:「楽器の事典ヴァイオリン」、(株) ショパン、p312
- (8) Ichi Hiroki: www.violinshop.co.jp/MN/anime.html、
- (9) Thomas D.Rossing: 「The Science of String Instruments」 Springer, p248