

音声評価手法を用いたチェロの倍音スペクトラム特性に関する検討

松 村 誠¹

An application study of speech analysis method for overtone spectra of cello

Makoto MATSUMURA¹

The tonal characteristic properties of cellos were discussed in terms of their overtone spectra and similarity of those male and female singing voice. A method of speech analysis, linear predictive coding (LPC) with soft program Praat was used to determine the formants of cello overtone spectra. Each analyzed cello data have a good characteristic distribution of female vowels in the Pfitzinger plot. In comparison of Pfitzinger plot parameter with violin and cello, the plot points width of h(Height) are almost the same region, but b(Backness) are 1.5~3.8 region of violin, 3~8 region of cello. The role of Pfitzinger plot parameter b and h to produce the cello tone color, b is the major role for making the same tone of other string, and h is major for higher position tone.

キーワード：音声評価手法、フォルマント、IPA 音声チャート、チェロの倍音スペクトラム、チェロの音色特性、Pfitzinger プロット

Keywords：Speech analysis, Formants of vowel, IPA vowel chart, Formant data of Cello, tonal properties of cello, Pfitzinger plot

1. 緒言

弦楽器チェロの音色、音質の改善に有効な音響的評価方法が考えられないかの思いで、弦楽器の研究文献を収集・検討をおこなっている。これまでの研究は^{(1)~(7)}弦楽器の振動応答を中心としたものが大半で、音質、音色への関係が少なく具体性に欠けることに違和感と疑問を持ち、楽器音そのものの倍音スペクトラムに注目、音響的な評価手法への何かのきっかけにならないかと検討を進めている。これまでに、FEM の振動応答解析で倍音スペクトラムの作成の試みや⁽¹⁰⁾、魂柱位置、弓の位置、弓の傾斜による応答倍音スペクトラムの変化などを報告⁽¹¹⁾しつつ、上記の目標を達成すべく模索してきた。倍音は楽器の部品（エンドピン、テールピース、テールガット、弦、弓、松脂の種類等）、演奏技術、演奏環境等いろいろな条件に敏感で、些細な個々の次数の倍音変化にとらわれがちであった。大局的な見方が必要ではないかと考えているとき、偶然でもあるが声の倍音スペクトラムは複雑で、倍音の崩落線の形状変化のピークの位置関係（第1のピーク F1 と第2のピーク F2 の位置）で母音が決まることの記憶に基づき、弦楽器に適用事例がないかを調査し、数件のヴァイリンに関する最近の検討文献^{(8)、(9)}を見つけた。チェロに関する報告は見当たらないことと、前述の文献はストラディバリやガルネリなどの銘器の音色とソプラノの音色との類似性に関する音質特性研究を中心としたものであり、筆者は弦楽器本体の特殊性や構造、形状、部品などがどのように音質や音色特性に影響を与えるかが興味を中心であり、これらも含めて検討したのでここに報告する。

2. チェロデータの取得と音声評価手法

本報告で使用したチェロ、録音機器、解析ソフトウェア及び音声評価概要とその手法について以下に示す。

2.1 供試体チェロと使用機器及びソフトウェア

使用したチェロ、録音機器及び解析ソフトは以下のとおりである。

- 録音機：Lesson Master(Victor)、
Linear PCM Recorder DR-05(TASCAM)
- 解析ソフト
FFT アナライザ：Overtone Analyzer (Sygt Software)
DigiOnSound5 (CyberLink)
LPC アナライザ：Praat⁽¹²⁾
- 供試チェロ：Gergono (独製 1897年)
Fiorini (伊製 1900年代初頭)

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1に示す。

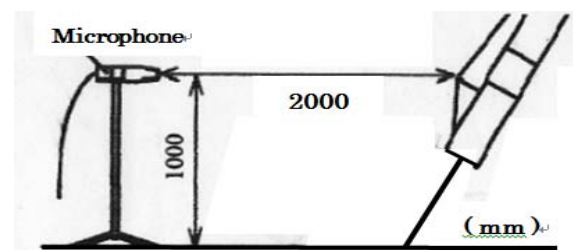


図1. チェロとマイクロフォンの位置関係

Fig. 1 Recording Microphone position

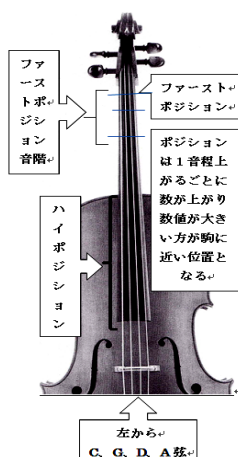


図2 チェロの音程位置

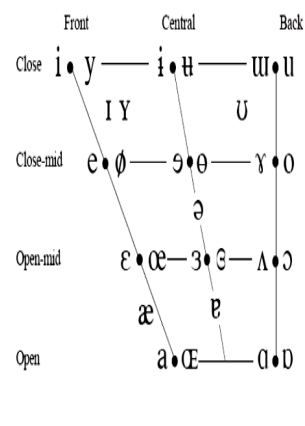


図3 IPAの母音チャート

Fig.2 Fingering position Fig.3 IPA Vowel Chart⁽¹⁴⁾

なお、チェロの音データは、C、G、D、A弦の各開放弦と、それぞれの弦をスロウで2オクターブ音階を録音したものである。本報告で使用するチェロの音程位置及び用語の説明の概略図を図2に示す。また、以下の検討に必要とする音程の表示法は、ドレミファソラシドをC、D、E、F、G、A、B、Cとし、楽譜の五線紙の高音部記号の下1線の音階ド、88鍵のピアノの真ん中の音のド(C)をC4と表示する。するとこのC4の1オクターブ下(上)の音程はC3(C5)となる。チェロは図2の左から、C2、G2、D3、A3の4弦で構成されており、それぞれの弦を指で押えて音程が作られる。C弦は、開放弦のC2音から順にD2、E2、F2・・・となるが、これをC-C2、C-D2、C-E2・・・と表示(すなわちC弦のC2、D2、E2音である)、他の弦でも同じようにG-D4、D-C3、A-C3などのように表示すると、どの弦のどのポジションの音程かが明確になる。

2.2 音声評価手法

人間の声の中核となる母音は、IPA (International Phonetic Alphabet) によって図3に示す母音チャート⁽¹⁴⁾が定められ、母音の音色を決定するのは舌の位置(前、

後)と唇の形(丸み加減)、口(顎)の開閉度である。

母音チャートの母音を分類する基準として、口(顎)の開閉度を縦軸に、舌の最上部の前後を横軸とした図3に示すチャートを定め、下向き台形図の中心のa母音より上側をHighVowel領域、下側をLowVowel領域、左側をFrontVowel領域、右側をBackVowel領域と呼んでいる。図中に“i・y”と記号が二つ並んでいるが、前者のiは非円唇、後者yが円唇である。この図からも判るように、口の開閉度や舌の位置は定量的(普遍的)なものではなく、聴覚的な印象上で決められるものとされている。この図を用いて定量的な数値で評価検討ができるようになったのは、Pfitzinger氏の研究成果によるもので⁽¹⁵⁾、図4に示す音声の倍音スペクトラムの包絡線のピーク値F1とF2周波数と基本周波数(F0)とによって下記の(1)及び(2)式で求められるようになった。x軸は舌の位置を表し(Backness、bと表示)、y軸は口の開閉度を高さ(Height、hと表示)としている。具体的な図は後述の図10、11、12をご覧頂きたい。

$$b = 1.782 \times \ln(F1) - 8.617 \times \ln(F2) + 58.29 \dots (1)$$

$$h = 3.122 \times \ln(F0) - 8.841 \times \ln(F1) + 44.16 \dots (2)$$

上記の母音とヴァイオリンの音の相関関係は、図4⁽⁸⁾のAに示すソース・フィルターモデルで示されるように、音声は声帯が、ヴァイオリンは弦が音源となり、音声は声道、ヴァイオリンは駒を含めた本体がフィルターの役割を務め倍音のFFTスペクトラムとなり音声や楽音となる。このアウトプットの包絡線のピーク値がフォルマント周波数と呼ばれ、それぞれF1、F2、F3、F4で構成されるLinear Predictive Coding(以後LTCと呼ぶ)スペクトラムである。したがって、母音の同一性は、口の開閉度と舌の位置を示す図3の台形チャートの中の位置によって決定するので、F1、F2が決まれば、上記(1)、(2)式を用いて音声評価を行うb、hを求めることができる。

2.3 LPCによるフォルマント解析

音声のLPCによるF1、F2周波数を求めるフォルマント解析は、十数年に及ぶ実験を含む検証で十分に洗練されてきているようだが、他の分野例えばヴァイオリンなどの楽音用はまだ作成されていない。従ってここでは使用実績が多く、またHwan-Chin Tai氏⁽⁸⁾らがヴァイオリン音質の評価に適用性が高いと検討確認し解析ソフトPraat(5.2.28版)⁽¹²⁾を同氏の使用条件に合わせて使用した。

3. 音声評価手法によるチェロの音質音色分析

チェロの音質を決める倍音スペクトラムをソフトウェアPraatでフォルマント解析を行い、IPAの母音チャートを作成・分析し、男女の音声、ヴァイオリンの音と比較検討によるチェロの音色特性を評価するとともに、弦楽器の特徴であるいろいろな弦のポジションでの同一音程、開放弦音と指押さえ音色音質特性の違い、音楽表現への有効性と弦楽器(チェロ)の発音メカニズム等について検討する。

3.1 チェロ、ヴァイオリン音と女性音声との比較評価

供試チェロ音の基音(演奏時の音程:以降F0と表示する)

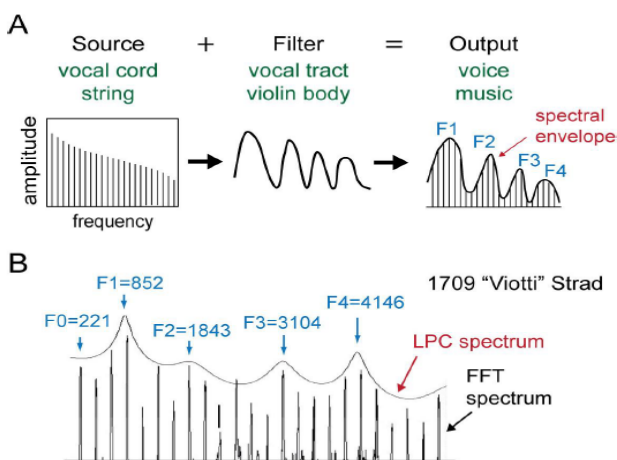
図4 LPC フォルマント解析の概念図⁽⁸⁾

Fig.4 The concept of LPC formant analysis

とこの F0 音の倍音スペクトラムについて解析ソフト Praat から得たフォルマント周波数 F1 と F2 (図 4 参照) の関係を図 5 に示す。図 5 の F1、F2 の関係は、Gergono チェロの場合実線で示す関係に比較的乗っているが、Fiolini チェロのプロット点は散在し特定の関係は見られないが、ストラディバリ等の名器でも同様で⁽⁸⁾、必ずしも特別ではない。

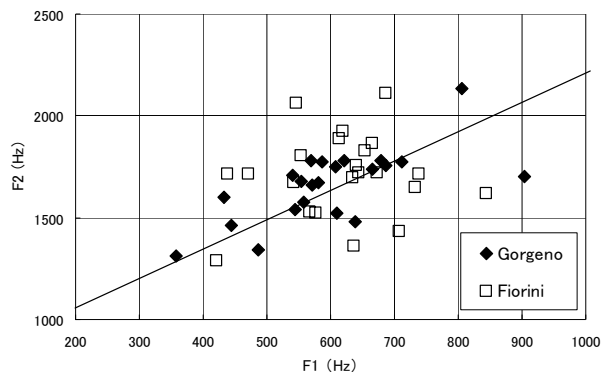


図 5 2 台の供試チェロの F1,F2 特性

Fig.5 F1vs.F2 of two test Cellos

男女の音声、ヴァイオリン音⁽⁹⁾、チェロ音の基音 F0 と F1,F2 の関係を図 6 に示す。図中の中実印が F1、中抜き印が F2 周波数であり、図中の 100~140Hz の男性音は、F2 周波数がチェロよりも低く（この周波数領域には女性音、ヴァイオリン音はない）、200~250Hz 女性音の領域ではヴァイオリン（○印であるがチェロの□印といくつか重なっている）、チェロともに女性音とほぼ同じ領域である。

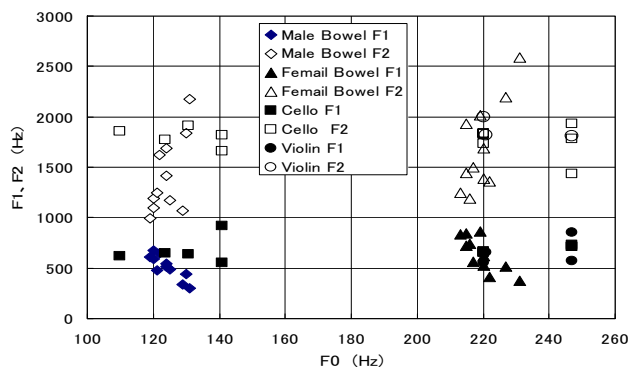


図 6 男女音声⁽⁸⁾、ヴァイオリン⁽⁹⁾、チェロの F0vs.F1、F2 特性

Fig 6 F0vs.F1、F2 of Male, Female Violin and Cello

図 7 には、チェロと同じ音域、音色ではないかと言われているバリトンの少し高音周波数領域⁽¹⁶⁾で、F1、F2 周波数をヴァイオリン、チェロと比較して示した。図 7 では、バリトンの F2 は弦楽器よりも低く、チェロはむしろヴァイオリンの F2 に近く、図 6、7 からチェロのフォルマント特性はバリトンよりもヴァイオリンや女性の音声のフォルマント特性に近い事が判る。

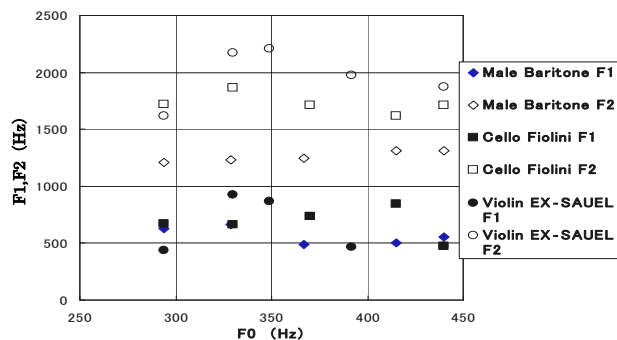


図 7 バリトン、ヴァイオリン、チェロの F0vs.F1、F2
Fig.7 F0vs.F1、F2 of Baritone⁽¹⁶⁾、Violin⁽⁸⁾ and Cello

Nagyvary 氏は楽器の音色や響きなどの楽音の放射特性に大きな役割を持つのが F1 フォルマントであり⁽⁹⁾、図 8、9 のように横軸に基音の F0、縦軸に F1 フォルマントと基音の差 ($F1 - F0$) として整理すると、音色や音の響きの状況を示す状況が強調されて判りやすくなるとし、例えば、縦軸の 200Hz 以下では、図 8 に示すガルネリのヴァイオリンでの実例での音色が Dark、Fat、Sonorous（弦楽器特有の音色表現であろうが、渋く深みのある、ふくよかで豊か、響き渡るとでも言うのであろうか）で、この音色をもたらすのは 1 次倍音が 2 次倍音以上より強く大きいからであり、また縦軸が 200Hz 以上の音色は、上記の表現に比し、より Thin で Shallow で、まさにソプラノ音色であると説明。また、図 8 のヴァイオリンプロット図で Ex-Ole Bull は、200Hz 以下の領域の音程が多く深い深みのある音色であるが、一方 EX-Sauel は F0 が通常の 250~600Hz の間でも上下に大きく振れ、深い深みだけでなくストラディバリ並みのソプラノ音と輝かしさを併せ持つ銘器と賞賛している⁽⁹⁾。この分析法をチェロに適用したのが図 9 で、上記の意味あいからするとチェロデータの散らばり具合はややおとなしく、渋みや深みに少し欠ける音色なのかもしれない。世界の銘器ガルネリヴァイオリンのような音色とまではいかないが、供試チェロの範囲では上記の用語らしい音色になっており、且つ 200Hz の以下のデータは、1 次倍音が強いことが確認できた。図 9 のチェロのケースでは、後述の検討で詳細を説明するが、図 10 の $h=6$ の境界と一致する 300Hz 位がこの音色変化の境界ではないかと考えている。

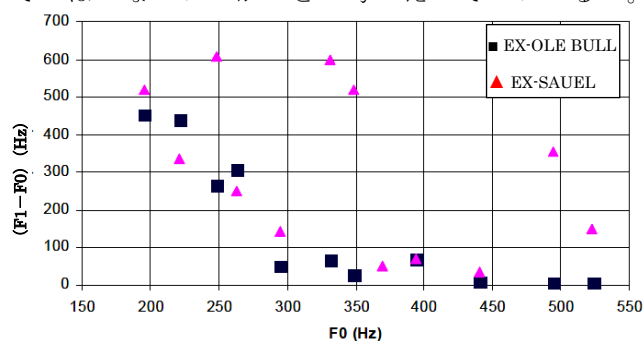


図 8 ガルネリヴァイオリンの F0vs. ($F1 - F0$)
Fig.8 F0 vs. ($F1 - F0$) of Guarneri violin⁽⁹⁾

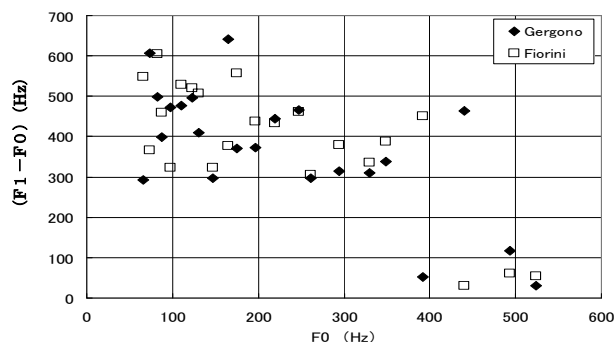


図9 供試チェロの F0 vs. (F1 - F0) 特性

Fig.9 F1 vs. (F1 - F0) of Cello

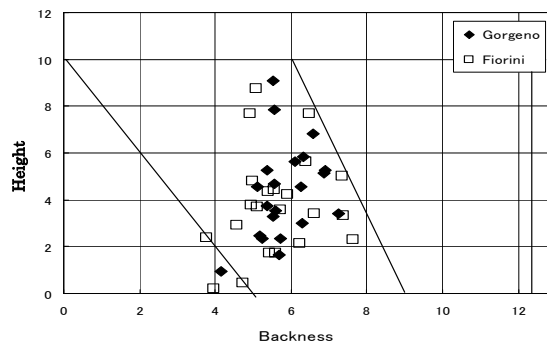


図10 チェロの Pfitzinger プロット b-h 特性図

Fig.10 Pfitzinger plot of cello

図10は、供試チェロ2台のデータから求めたIPAの母音チャート図のPfitzingerプロット表示図である。図11のデータは世界の銘器ガルネリのヴァイオリンの先行報告(図10のヴァイオリンは最下音程のG2からC5の12音階スケール音程)にほぼ合わせて、チェロは図2に示すC、G、D、A4弦のファーストポジションと上記ヴァイオリンの最高音程C5までの20音程としている。併せて女性のソプラノによる歌唱時のいろいろな欧州圏の母音音声をもとめた母音チャートのPfitzingerプロット表示図を図12⁽⁹⁾に示す。チェロの音は、図10のb値が6~10の口(顎)を閉める母音領域(高母音領域)では女性音声や、ヴァイオリン音に比すと劣るものの、h=6以下の領域、口(顎)を開けた領域(低母音領域)では図12のソプラノの領域と類似しており、豊かな母音音色を持っていると言える。またチェロの図10のh=6以下の低母音領域は4弦のファーストポジションであるC2からD4までの16音全数がこの口(顎)を開くこの領域に所属し、h=6以上の口(あご)を閉じる高母音領域はハイポジションの音程のものである。図11のヴァイオリンの音色でも、図12の“EE”、と“WE”領域は、欠けていて、図12からこの領域を除くと、ソプラノ音声はむしろチェロの楽音領域と良い類似を示している。h=6より上部の口を開いた領域ではヴァイオリンの音質の方が全体に分布しており、この領域ではヴァイオリンは音色表現能力が高いのであろう。一方、両弦楽器ともに図12の舌の後方部のBackVowel領域を表現する音声、母音の“MOO”、“UN”、“MON”、“OH”、“UN”“TEE”などの母音色はほとんどないのが特徴である。ただ、本検討の弦楽器では、第1ポジションだけの音(ヴァイオリンも低音程音だけなので第2、3ポジションどまりであると推定される)つまり指板の竿部分での基本的な演奏音で、プロ演奏者にとってこの領域の演奏使用頻度は多いとは言えないはずであり、報告以外のさらなるハイポジションでの音質、音色を確認する必要がある。また、弦楽器制作にも関わっているJ.Nagyvary氏は、これまでのヴァイオリン製作者は後舌音領域の音色を狙って製作していない⁽⁹⁾とも述べていて、後舌音領域の音色を発する新しいヴァイオリンの可能性がないとも言えないようだ。

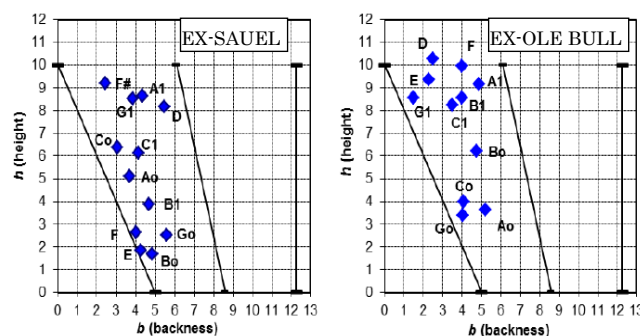


図11 ガルネリヴァイオリンの Pfitzinger プロット図

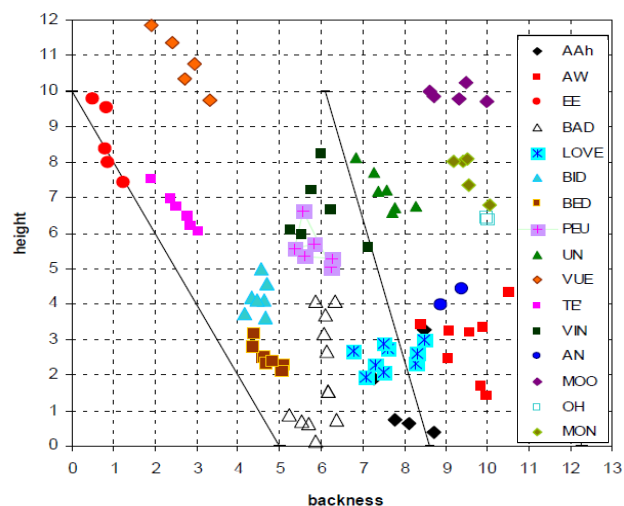
Fig.11 Pfitzinger plot of Garneri violin⁽⁹⁾

図12 ソプラノ音声の欧州母音 Pfitzinger プロット

Fig.12 Pfitzinger plot of soprano European vowel⁽⁹⁾

3.2 同音程、同系列音程の音質・音色特性評価と検討

弦楽器の特徴は、弦を変えることで可能な3~4種類の同一音程音を使い分けして曲にふさわしい音色で演奏できることであり、これらの同一音程とこれに関係するハイポジション音の音質、音色差をPfitzingerPlot図により検討してみることとする。各弦それぞれ2オクターブスケール採取データの範囲(チェロのコンチェルトやソナタもほぼこの範囲で演奏が可能)だと4弦で同じ音程を出せるのはA3、B3、C4

だけで、この3音の一例 C4 は C-C4、G-C4、D-C4、A-C4 となる。A 弦の A-A3、-B3、-C4 は、0、1、2 ポジションとファーストポジション音であり、図 10 にプロットされている。同じように D 弦は A 弦の4度上で4、5、6 ポジション、G 弦は同じく4度上の8、9、10 ポジション、C 弦は12、13、14 ポジションとハイポジション音であり図 10 にはない新しい音程である。従って同一音程ではあるがそれぞれのポジションが4度ずつ異なる状況下での同一音程の母音特性について調べる。ドイツ製の Gergono、イタリア製の Fiorini の2台のチェロの3音の b-h 線図を図 13 に示す。図 13 では、それぞれのプロット点は大きく分散しているようだが、Fiorini チェロの A3、B3、C4 のそれぞれ4音は、ほぼ h の値がおよそ 3.3、4.0、5.7 の線上に分布し、b の値の分布幅は3~4 の舌位置の変化領域になっているが、Gergono チェロでは b、h ともに値の分布幅が2~3 程度内で分散している。従って同じ音程の場合、弦が変わりポジションが大きく変わっても口の形の h の変化がほとんどなく、舌の位置の b の変化に依存しているのがイタリア製のチェロ Fiorini であり、一方、変化の程度は少ないが b、h ともに変化して弦、ポジションの変化に対応して同じ音程を維持させているのがドイツ製の Gergono である。両チェロの b、h の変化傾向に共通性を持っているとは言えなさそうで、両チェロの音程作りの観点からも共通点は少なく、楽器個有の特性、特徴なのであろう。この違いはそれぞれの音の場所で母音色が異なり、製作者の所属する伊と独の国柄あるいは母音の音の捉え方の違いによるものなのであろうか。

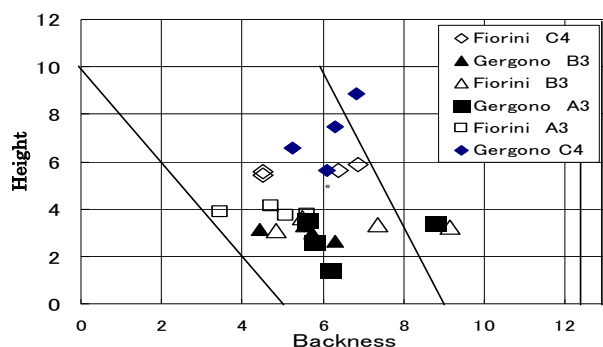


図 13 4 弦の A3、B3、C4 の Pfitzinger プロット

Fig.13 Pfitzinger plot of A3, B3,C4 tone of 4 strings

図 14 は図 13 の 4 弦による同一音程 A3、B3、C4 の b、h 挙動を、図 8、9 で示した音質音色の基本的な特性部分の低次数倍音スペクトラムの代表である F1 特性の特徴をよく表すことのできる F0 と F1—F0 の関係についてまとめたものである。図には A3 の 220Hz、B3 の 247 Hz、C4 の 262 Hz は両チェロとも同じ周波数のため、プロット点が重なるので少し離して表示している。図 14 で縦軸の F1—F0 値の大きさの順番をそれぞれの音程について示してあるが、この順番は図 13 の h の大きさの順番とほぼ同じであるので Fiorini の各音程のプロット点は集中しており、Gergono の場合は大きく分散している。

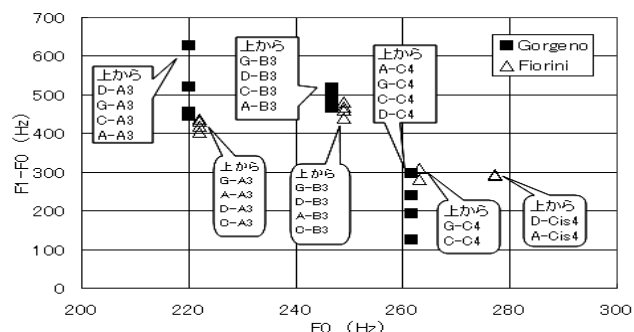


図 14 A3, B3, C4 音の F_0 vs. $F_1 - F_0$

Fig.14 F1 vs. (F 1 -F 0) of A3,B3,C4 tone

図 8、9 の説明で上述したように F1-F0 値の変化の大きい方が、音の放射特性や音色の変化への寄与は大きいので、F1 と強い関係のある（上述の（2）式参照） h の変化が大きいことと、図 14 で A、D 弦差の大きい独製の Gergono チェロの方が b 、 h の両方にに関わり音色の多様性があると言える。

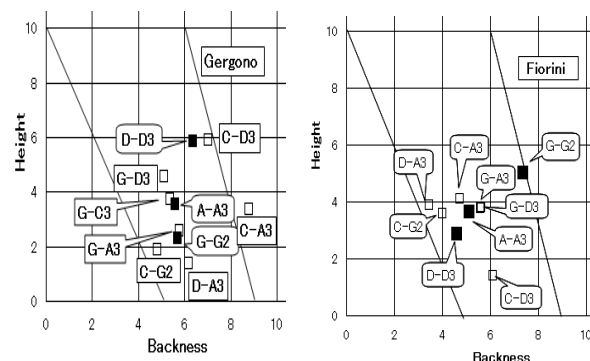


図 15 開放弦音と指押さえ音の Pfitzinger プロット図

Fig.15 Pfitzinger plot of open and fingerd tone

図 15 は、中実印の開放弦音 G2、D3、A3 と同音の中空き印の指押さえ音（左隣りの下位弦の第 4 ポジション音）の Pfitzinger プロット図で、左図の (a) がチェロ Gergono、右図 (b) がチェロ Fiorini のプロットに関係する部分のみを示したものである。なお、C2 チェロの音は、最低音程なので指押さえ音がない。図 15 の調査は同一音程である開放弦音と指押さえ弦音との音質・音色等の相違の要因は何かを調べるためで、環境及び境界条件には開放弦音は弦の両固定端が剛であり、指押さえ音は片方が指であるので柔らかい（少しビブラートもかかっている可能性あり）、また開放弦音は弦長がすべて一定であるが、指差し音は弦と音程によって異なり、また弦の存在場所（駒の位置、音に大きな影響を持つ魂柱位置、力木位置などの位置関係）によってそれぞれの音程の条件が異なるので、共通で統一的な特性が得られるはずはないものと考えている。以上のことを前提にして、開放弦音が b 、 h 値がどのように変化すれば、指押さえ音になるかを調べた。まず Fiorini チェロの場合は、G-G2 開放弦音を、C-G2 の指押さえ音にするには、 b が 3.5 下がり、 h が 0.74 下がる必要がある。以下煩雑になるので数値は省略し b, h の上げ、下げだけを記載すると D-D3 に関しては、G-D3 では b, h を

ともに高くし、C-D3 ではbを高く、hを低くする。A-A3 の場合は図13でhがほぼ等しいとしているので、D-A3とC-A3のbを低くし、G-A3のbを高くする。Gergono チェロの場合はG-G2の開放弦に対しC-G2は、b、hともにひくくする。D-D3の開放弦に対し、G-D3はb、hともに低くし、C-D3はb、hともに高くする。A-A3の開放弦に対してはD-A3、G-A3、C-A3のいずれに対してもbは高くし、hは低くすればよい。以上が開放弦音を指押し音になるb、hの変化が必要条件であるが、残念ながらこれらに共通的な特徴は見当たらないので、以下には大局的なb、hの変化状況の特徴等を簡条書きする。

- ① Gergono チェロのb、h特性はb値およそ6の開放弦特性を中心に、指押さえ音がb値5~7の間に、h値は1.5~6の間の縦長に分布していて、h値の大きな変化がこのチェロの特徴である。
- ② Fiorini チェロのb、h特性はbの変化幅(3.4~7.4)はhの変化幅(1.4~5)より大きく、bの変化はGergono チェロの2倍あり、bの大きな変化による音色がFiorini チェロの大きな特徴である。

次に、図16には、C音系列(C弦のオクターブ音の4音程：-C2、-C3、-C4、-C5)、同様にG、D、A弦の各オクターブ4音程の音系列について、供試Gergono、Fiorini 2台のチェロに関するPfitzingerプロットのs-h特性図を、左図にGergono、右図にFiorini、(a)にC音系列、(b)にG音系列、(c)にD音系列、(d)にA音系列を示す。ここでは各弦ともにほぼ同じ開放弦の3オクターブの音程特性を比較できるので、チェロ特有のC、G、D、A音程それぞれの特性の比較検討を行う。(a)のC音系列は、両チェロともにb値が約6の縦軸近辺に点在し、Gergono チェロがb値が約5~9、h値が約4~9の間に分布し、Fiorini チェロはb値が約4.5~7、h値が約0.5~7.7の間に縦長に分布している。以下同じように比較的hの大きい縦長の図が続いていて、Gergono チェロでは(b)はb値が約2~7、h値が約2~9.5、(c)ではb値が約0~9、h値が約5~7、(d)ではb値が約5~8.5、h値が約1.5~6、Fiorini は(b)ではb値が約3.5~6.5、h値が約3.5~8、(c)はb値が4.5~5.5、h値が約1.5~7.5、(d)はb値が約3.5~6、h値が約2~9となっている。

以上をまとめると、2台のチェロの共通点としてC、G、D、A音の系統音は、舌の位置はほぼ中央で(Gergono チェロが約6、Fiorini チェロが約5と若干異なっている)、口(顎)の開度が高音程になるに従いhの値が増加し(この図16では、両チェロともにh値は1~9辺りまで変化している)、口が閉じる方向になっていく部分が特徴であると言える。Fiorini チェロも図13、15のb-h特性では見られなかったh値の大きな変動がここでは発生している。また、h値が6を超えるのも1例しかなく、この共通事例から外れる例がA弦に多いのは、何か特別な理由があるのかもしれない。さらに、Gergono チェロのb、h特性の全てに、台形領域を外れたプロット点が、それぞれの弦で存在していることもこのチェロの特徴の一つであろう。

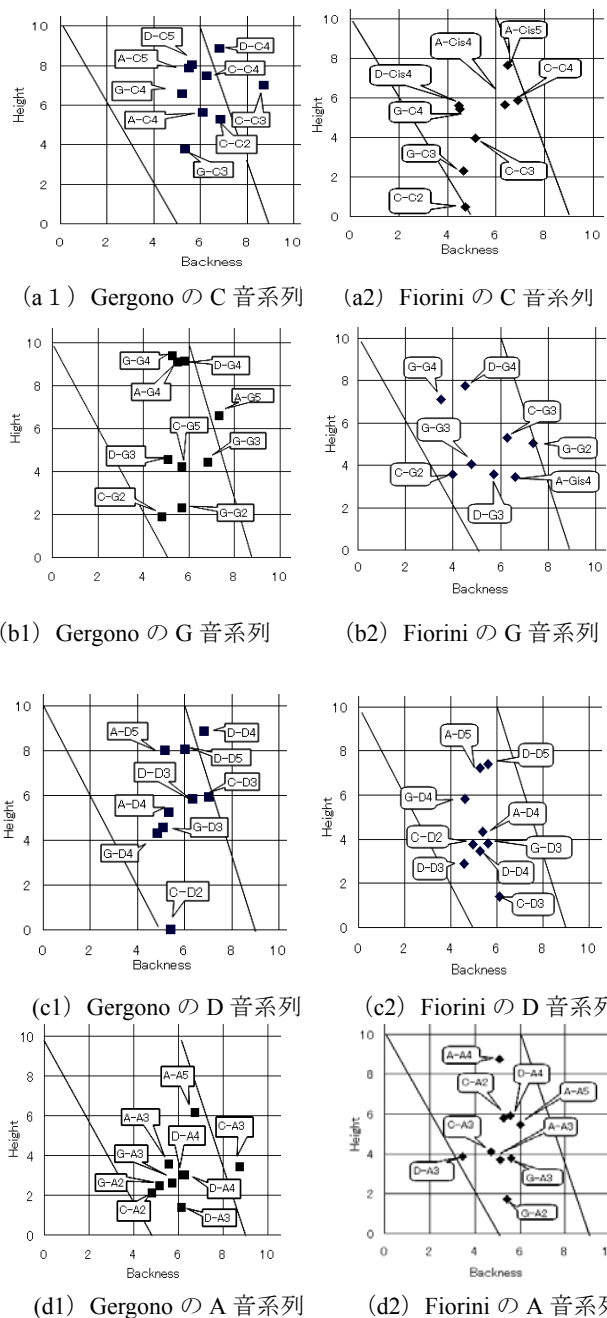


図16 同系列音のPfitzingerプロット

Fig.16 Pfitzinger plot of same tone series

次に、エマソン・カルテットのチェロ奏者で、近年は室内楽やソロ演奏の分野で活動しているDavid Finckel氏が、チェロのミニレッスンとして公開しているYouTube Talk100⁽¹³⁾の最後に駒を取り替えたスケール音の比較事例を発表されていた。その録音をダウンロードさせていただいたが、残念ながら音程取りの指使いが不明、録音条件の差などの理由により、本供試チェロとの比較検討用資料として活用することとした。駒の取替や開放弦音の比較等、本報告内容に合致する分析結果を以下に示す。図17は上記2台のチェロと同じ2オクターブのPfitzingerプロットb-h特性で、仏駒とベルギー駒のいずれのデータもh=6以上のハイパワエル領域のプロット点が本報告の図10より多く、図11に示すガルネ

リのヴァイオリンに似た特性を示している。この差は、図 10 のデータはすべてファーストポジションデータで、ヴァイオリンおよびフィンケル氏のチェロのデータは指使いがわからないが、ハイポジションデータの可能性が高いこと、ヴァイオリンは楽器自体が銘器中の銘器であること、フィンケル氏の音は米国ボストンの Jordan Hall の録音でかつ 4 弦連続の勢いのある 4 オクターブスケールであること、本報告のデータは個人の家の室内録音でゆっくりの各弦 2 オクターブスケールによることなどの差という理由も考えられるが、いずれにせよ、チェロもヴァイオリンとほとんど同じような母音特性を持つということが判る。また、図 18 示す F_0 と $F_1 - F_0$ の関係では、図 8 に示す供試 2 台のチェロより上下に幅広く点在しており、深みのある渋さやヴァイリン並みの輝く音色で、音色の変化に富む楽器であることを示している。

図 19 は開放弦 4 弦の Pfitzinger プロットで、3 台のチェロの特性が判り興味深い。3 台のチェロの特性は、図 19 の縦軸 $b=6$ を中心に分布しており、Finckel 氏のチェロは仏、ベルギー駒ともに 4 弦の h の変化が大きく、口（顎）を大きく開いた明るい音色からやや閉じた音色まで幅広い。また、仏、ベルギー駒の特性差が舌の位置に相当する b の変化に、明確に現れており興味深い。この駒の性能が b の変化をもたらしていると考えると h が上下に大きく変化して 4 弦の特性差を強調できているのは、ホールの効果で拡大されている可能性はあるが、フィンケル氏のチェロの楽器本体の演奏表現可能範囲を大きく出来るという点で優れた特性ということができそうである。しかしながら、開放弦音の場合 Finckel 氏の You Tube 演奏と供試チェロとの演奏法に大きな差は出せないはずなので、供試チェロと併せて 3 台のチェロの F_0 と $(F_1 - F_0)$ 特性を図 20 に比較示した。図 20 では、図 8 と図 18 の低周波数域での伊、独 2 台のチェロと Finckel 氏のチェロとに現れたような大きな差、縦軸の 200Hz 以下のデータはなく、Finckel 氏のチェロと伊、独の 2 台の供試チェロのデータ間では大差ない特性である。とすると図 15、16 の両特性はすごく早い音階録音と演奏技術の加わった勢いのある演奏効果が加味されたと考えたほうが良いようである。

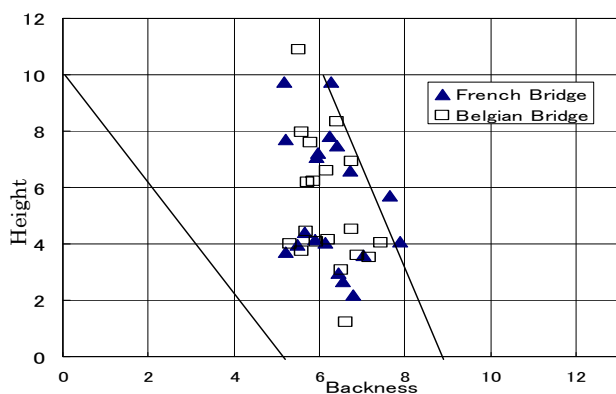


図 17 D.Finckel 氏チェロ音階の Pfitzinger プロット
Fig. 17 Pfitzinger plot of D.Finckel's Cello scale

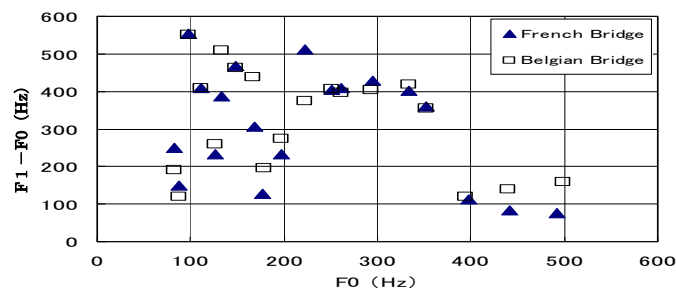


図 18 D.Finckel 氏チェロ音階の F_0 vs. $F_1 - F_0$ 特性
Fig. 18 F_0 vs. $F_1 - F_0$ of D.Finckel's Cello scale

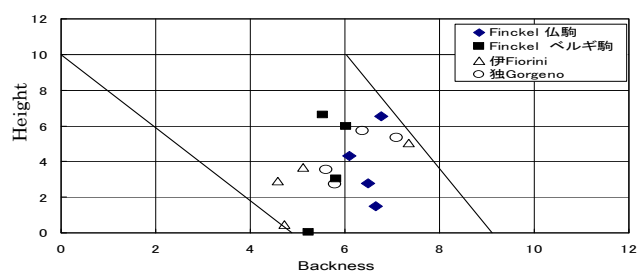


図 19 3 台のチェロの開放弦音 Pfitzinger プロット
Fig. 19 Pfitzinger plot of open tone for 3 cellos

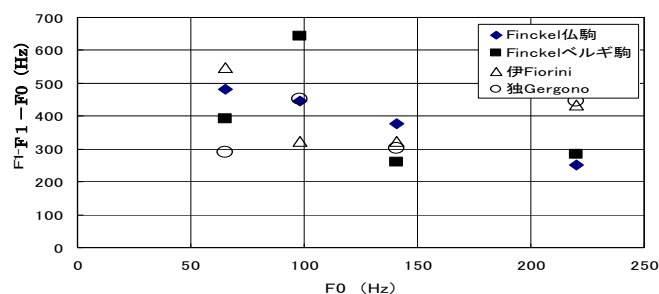


図 20 3 台のチェロの F_0 vs. $F_1 - F_0$ 特性
Fig. 20 F_0 vs. $F_1 - F_0$ of open tone for 3 cellos

3・3 チェロ音質・音色特性評価の考察

フォルマント解析によるソプラノ、バリトンの音声と、ヴァイオリンとチェロの弦楽器の F_1, F_2 の比較評価では、チェロの 1、2 次のフォルマント周波数は、1 次フォルマントはソプラノ、バリトン、ヴァイオリンとほぼ等しいが、2 次フォルマントはバリトンではなく、むしろソプラノやヴァイオリンの音に近い値であった。これは弦楽器特有の母音特性がソプラノの母音特性と共通することが近い値であることの理由であると思われる。

上記 3. 2 項の音質・音色検討で図 7、13、19 などの F_0 vs. $(F_1 - F_0)$ 特性において、Nagybary 氏は 200Hz が音質音色の変化の境界値で、200Hz 以下では音色は豊かで深く渋い音に、それ以上は薄い華やかさのある音としていて、この境界以下で一次倍音が他の倍音を凌ぐ大きさであることによるものであるとしている。この一次倍音が大きいことは本報告でも確認できたが、約 300Hz (本報では 290Hz であった)

以下でかつPfifingerプロット図で丁度 $h=6$ に相当する値以上の領域でもほぼこの条件を満足するようであり、両図間の関連付け、また、図 17、19 間の特性差が、Pfifinger プロット図の h の上下差をもたらす理由が判明するなどのメリットもあり両図の関係は貴重である。

チェロのファーストポジションによる各弦 4 音程の Pfifinger プロット点はすべて図 7 の $h=6$ 以下の低母音、後母音である口を開き、舌の位置が後方領域に有り、この領域内では、図 9 に示すソプラノの母音特性によく似ている。また、 $h=6$ 以上の高母音領域には、図 12 及び図 15 に示す指押さえで高いポジション位置の音程が高母音領域に相当し、これらもソプラノの母音特性とよく似ていることや、図 16 の David Finckel 氏の 2 オクターブスケールのプロット点が 6 以上の領域に多数有りこちらもヴァイオリン以上にソプラノ母音特性に類似しているためチェロの音質音色特性はソプラノによく似た母音特性であると言って良いと考える。

次に Pfifinger 式で求めた b 、 h について、検討を行う。図 9、16 の供試チェロ 2 台と Finckel 氏のチェロの 2 オクターブスケールの $b-h$ 特性は、 b 、 h の分布領域やそれらの分布状況もほぼ同じである。図 11 のガルネリヴァイオリンは b 値の分布が 1.5~6 の前舌領域であるのに比し、チェロの方は約 3~8 の中間舌領域であるが、これらの主要分布帯域幅はそれぞれの楽器で約 3 であり、ややヴァイオリンの分布の方が大きい。また、口の開口度 h は 0~12 の全領域に分布していて、こちらはヴァイオリンチェロともに同じような分布状況である。ヴァイオリンとチェロの母音特性の違いである b の値は、2.2 項の (1) 式をヴァイオリンやチェロの F1、F2 で検討すると F2 の影響の方が強くほとんど F2 で決まると言ってもよい。このことはヴァイオリンの F2 がチェロより大きいことになるが、図 6 を見ると F1 はチェロと大小が交互しているが F2 の方はヴァイオリンの方が大きいことでも裏付けられており、従ってチェロの音色の方が、ヴァイオリンに比すと b 値の分布がやや奥側になっていることで、ややこもり気味の少し暗めの音になっていることも理解できる。また、(2) 式で求める h の値は F1 の影響が一番大きいのでほぼ F1 で決まり、3.2 項での結果では h の変化が b の変化に比し大きく、かつ母音特性を決める大きな役割を持つことが示されていたことや、上記の F0vs.F1-F0 特性で音質や音色が判断できることも容易に理解できる。

次に、3.2 項で検討した同音程、同系列音程の音声評価手法による検討結果について、図 12 のソプラノ音声との比較検討を行う。図 10 に関しては、2 台の供試チェロは、ファーストポジションによる音程群でありほぼ同じ領域にあり、図 12 の欧州母音領域の部類によると、BID、PEU、AW、BAD、LOVE 音域と $h=6$ より上部位置の VIN 母音に相当している。図 13 の A3、B3、C4 音程の b 、 h 特性の場合、Gergono チェロは高 h 領域での VIN と低 h 領域の BAD、Fiorini チェロは $h=4$ 近傍の PUE、BID、BAD、LOVE 音域と両チェロの音色は明確に異なる母音領域となっていて、この音色の違いは 3.2 項の図 13 の分析で上述した独製のチェロ Gergono は b 、

h 両方の変化による母音特性と伊製のチェロ Fiorini は h の変化が少なく b の変化主体の母音特性とによる両チェロの違いを示したものと思われる。

図 14 の同音程の開放弦音と指押さえ音との b 、 h 特性では、Gergono チェロの場合、開放弦音は PUE、BAD 音域、指押さえ音は PUE、BAD、UN、AW 音域内にあり、Fiorini チェロの開放弦音は PUE、VIN 音域、指押さえ音は BID、BAD 音域に集中して分布している。ここでは、 b 値の変化幅が大きい事の特徴を持つ Fiorini チェロの母音音色の特徴は両チェロ共通母音特性となり目立たなくなってしまうているが、ここでも図 13 の場合と同じように Gergono チェロは、 b 、 h の両者の変化による音程であり、Fiorini チェロは b 主導の音程であることに変化はない。

同系列音の b 、 h 特性分析の図 16 の C 音系列では、Gergono チェロは h 値が 6 以上の高 h 領域で VIN 音域、6 以下の領域では PEU 音域、台形領域外の UN 母音領域である。一方 Fiorini チェロは高 h 領域の VIN 音域、低 h 領域の PEU 音域とそのさらに下部の AW 音域とから成り立っていて、両チェロには共通の母音領域が比較的多い。(b) の G 音系列は、Gergono チェロは b 値が 4~6 で、 $h=9$ 以上の 3 音程はソプラノにもない母音領域、台形外の領域の UN、低 h 領域の BAD 音域である。Fiorini チェロは高 h 領域の VIN、低 h 領域の BID、BAD 音域から成り立ち、両チェロ間の母音領域の違いは少なくない。(c) の D 音系列は、Gergono チェロは、高 h 領域の VIN、 $h=6$ 周辺の PUE 音域、台形外の領域の UN 音域、低 h 領域の BAD 音域、Fiorini チェロは高 h 領域の VIN 音域、低 h 領域の BAD 音域と両チェロは比較的類似の母音特性を有している。A 音系列では、Gergono チェロは、低 h 領域の上から PEU、BID、AW 音域と台形外の TE 音域、Fiorini チェロは高 h 領域では VIN 音域、低 h 領域では BID および UN 音域の母音特性となっていてこれらの母音領域の違いは少なくない。この図 16 では、図 13、14 とことなり Fiorini チェロの b 、 h 特性でも h の変化が Gergono チェロ同様に大きく変化していて、両チェロの音色領域が上述のように同じであることが少なくない要因であろう。なお、Gergono チェロの C、G、D、A 全系列にあった台形外の母音特性 UN、AW 音域はガルネリヴァイオリンにもない特性であり、このチェロの音色の特徴とおもわれる。

以上より、チェロの b 、 h 特性の b 値はおよそ 4~8 の領域であり、 h 値はおよそ 0~10 の変化であるが、図 12 のソプラノの母音特性は b 、 h の上記範囲ではともに 3~4 種類の母音特性が存材しているので、 b 値の方が母音変化の感度が 2 倍ほど高い。この点を考えると b 値の変化が大きい Fiorini は音色の変化に富む楽器と言えそうである。

4. 結言

チェロの倍音スペクトラムをフォルマント解析により求めた F1、F2 フォルマント周波数を IPA 音声チャートにプロットして母音評価を行う音声評価手法を活用して、チェロの音質・音色評価を行い、以下の結果を得た。

- 1) チェロの音質・音色の母音特性は、女性音声のソプラノの母音特性の前舌音領域の特性にヴァイオリンの銘器にも遜色のない良い近似を示す。
- 2) Pfitzinger による IPA チャート評価式の縦軸、口(顎)の開度を表す h と舌の頂部位置の前後を表す b について、弦楽器の特徴である開放弦音、指押え音、4 弦の同一音程、4 弦の C、G、D、A 音程の 2、3 高オクターブ音などの音質音色の比較評価を行うとともに、どのような条件が、口(顎)の開度 h や舌頂部位置の b の変化をもたらすかを調べ、 b 、 h の音色作りの影響度を調べた。主要結果を以下に示す。
 - ① 音質・音色を決める口(顎)の開度 h と舌の頂部位置 b は、ガルネリヴァイオリンの場合 b が 1.5~6 の前舌領域であるのに対し、チェロは 3~8 と中間舌位置からやや後舌の領域で、ヴァイオリンよりやや籠り気味の音色である。なお、口の開度に関しては 0~12 と共にほぼ同じである。
 - ② チェロ 4 弦の各弦の 2 オクターブ音階では、同じ音程が A3、B3、C4 と 3 音程が有り、これらの音程は開放弦から第 1 4 ポジションにいたる広範囲の音程取りから成り立っている。これらの同一音どうしを供試チェロ 2 台で比較すると伊製のチェロ Fiorini は、 h の変化は少なく b の変化主体の音程音色であるのに比し、独製のチェロ Gergono は b 、 h 共に変化するが、 h の変化が主体である。この異なる音程音色をもたらす原因は、楽器主要素材の特性あるいは製作国の言語母音特性に起因するものか、単なる機器固有の特性であるかは今後の検討課題である。
 - ③ 開放弦と指押え音、開放弦音と同一音程の指押え音の場合も、上記②の両チェロの特性とほぼ同じで、開放弦の音程が指押え音の場合、Gergono チェロは主として h の変化で、Fiorini チェロの場合は b 値の変化が中心である。
 - ④ 各弦の開放弦音とその開放弦の 2、3、4 オクターブ音程の 4 弦で奏された 8 音程をその同系列音毎に整理した b 、 h 特性は、供試チェロ間で若干の相違はあるが、両チェロともに b の変化は少なく主として h の変化によるもので、音程が高くなると h 値が増加(口が閉じる方向)する h 主導型となり、上記②③とは異なる様相を示している。
- 3) Nagyvary 氏が主唱する F0vs.(F1-F0)特性は、音の響きや放射特性の評価とともに上記 IPA チャートと併用すると、 $b-h$ 特性との相間関係が明確となり便利で、チェロの場合には、F1-F0 値の約 300Hz が $h=6$ に相当し、音質音色の変化のしきい値にもなっている。

以上、長年の念願であった、チェロの音質・音色評価に有効な楽器音の倍音スペクトラムで定量的な評価ができるようへの目標の第一ステップを歩み始めることができ

たのではないかと感じている一方、上記結論の②~④については目標とする課題解決には至っているとはとても言えない状況でもある。また、実際の音質音色改善に役立たせるためには、新旧の材料データ、本体構造差、関連部品、種々の条件データの積み重ねが重要であり必須でもある。さらに、前報報告のように、弓の使用法(傾き、駒の近くの奏法)の違いで倍音の 5 kHz をはるかに超えた領域で音色音質の変化にかなりの役割を持っていることを目の当たりにすると、本報の 5. 5 kHz 以内でフォルマント解析を済ませる音声手法の限界を感じており、弦楽器主体の少なくとも 10 kHz 程度までの評価手法が開発されることをも期待したい。

最後に、チェロ Fiorini のスケールデータを快く試奏していただいた勝田聡一氏、また YOUTUBE のミニレッスン Talk100 のデータを活用させていただいた David Finckel 氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) Hutchins, C.M., Editor "Research Papers in Violin Acoustics 1975-1993, Vol. I, II", Acoustical society of America (1996)
- (2) 安藤重典: 「楽器の音響学」, 音楽之友社, p133-145 (1996)
- (3) B.A. Yankovskii: "Method for the objective appraisal of violin tone quality", Soviet Physics-Acoustics, Vol. 11, p289. 1965
- (4) Heinrich Duennwald: "Deduction of objective quality parameters on old and new violins", Catgut Acoustics. Soc. J, vol. 1 No. 7, pp1-5 (1991)
- (5) Anders Buen: "On timbre parameters and sound levels of recorded old violins", J. Violin. Soc. Am., VSA Papers: Summer 2007, Vol. 111, No. 1
- (6) Erik Jansson: "Acoustics for Violin and Guitar Makers, Ch. VII The function of the violin", Kungl. Tekniska Hogskolan op. cit., p7.6, 7.21, 2002
- (7) Thomas D. Rossing: "The Science of String Instruments" Springer, p248
- (8) Tai, H.C., Chung, D.T. "Stradivari Violins Exhibit Formant Frequencies Resembling Vowels Produced by Females" Savart Journal (2012)
- (9) Joseph Nagyvary, "A Comparative Study of Power Spectra and Vowels in Guarneri Violins and Operatic Singing" Savart Journal (2013)
- (10) 松村誠: 「弦楽器チェロの周波数応答解析による倍音スペクトラムの検討」, 明星大学理工学部研究紀要, No. 49, pp15-18 (2013)
- (11) 松村誠: 「弦楽器チェロの倍音スペクトラム特性に関する検討」, 明星大学理工学部研究紀要, No. 50, pp19-24 (2014)
- (12) Boersma P. "Praat system for doing phonetics by computer". *Glott International* 5, 341-345. (2001)
- (13) D. Finckel: "Talk 100: Bridges and strings", YouTube David Finckel Cello Talks,
- (14) IPA Vowel Diagram, <http://www.phonetics.ucla.edu/course/chapter1/vowels.htm>
- (15) Pfitzinger, H.R., "Towards functional modeling of relationships between the acoustics and perception of vowels. *ZAS Papers in Linguistics* 40, 133-144. (2005)
- (16) Kartin Neumann et al. "The Interplay between Glottis and Vocal Trac during the Male Passagio" *Folia Phoniatr Logop.* 57, pp308-327, (2005)