

# 合成音への表現力付与のための擦弦楽器の発想伝達関数の推定 Synthesis of Performance Expression of Bowed String Instruments Using “Expression Mark Functions”

小泉 悠馬

Yuma Koizumi

法政大学情報科学部デジタルメディア学科

E-mail: yuma.koizumi.8e@stu.hosei.ac.jp

## Abstract

This paper proposes a method for synthesis of performance expression of bowed string instruments. A method using a transfer function for expression mark is proposed. “Expression mark functions” is estimated from recorded performance sounds, using spectrum of string motion and filter of resonant properties of the instruments. Bowed string motion is a triangular wave called the Helmholtz motion, and it can be determined from bowed string position. Changes of waveform from expression performance is estimated by Non-negative Matrix Factorization. Resonant properties of an instrument is measured as TSP response using a “direct conduction speaker.” The expression mark functions is extracted by decomposing the actual performance using these data. For evaluation of the quality of the synthesized sound, synthesized sound were compared using expression mark functions and MIDI. In all expression mark, almost all audience could recognize a change in tone. MOS for the “dolce” and “marcato” were appreciated as 4.0.

## 1 序論

多くの音楽愛好家の間でコンピュータ音楽がポピュラーになっている。しかし、市販のシンセサイザの音源では、音色の変化による表現の自由度は少ない。コンピュータ音楽の発展のためには、芸術の分野で特に重視される表現力を与えなければならない。シンセサイザで制作可能な表現の自由度を増すことで、コンピュータ音楽のさらなる発展を目指す。

特に擦弦楽器では、ただ弦を擦って音を出しているわけではない。奏者は、その曲想や個性を活かすために表現力を伴った音で演奏をする。弦を抑える左手はピブラートをかけ、弦を擦る右手は様々な奏法を駆使し音色を変化させる。

合成音を直感的に制御するためには、スペクトル制御や正弦波合成による合成よりも、物理情報を用いて合成するほうが、実際の奏法に近い形で制御できるため容易である。物理パラメータ推定の手法として、先行研究では、センサー付きの弓や楽器を用いて擦弦中の物理情報を取得しパラメータを推定する手法 [1][2] などが存在する。しかし、これらの手法はパラメータが数値的に求まるものであり、ユーザーによる制御が難しい。また擦弦楽器の発振機構は、人間が直接的に制御するためのものであるため、細やかな演奏を再現する計測が極めて困難であるため、物理情報のみを用いた合成は難しい。これは、擦弦楽器は、擦弦楽器や打楽器より人間が音を制御する時間が長く、また、弦や駒などの個々の励振機構を推定しても、表現を伴う演奏中にこれらがどのような振動を起こすかの計測が困難であるためであると考えられる。

しかし、擦弦楽器の音色は明確な音高を持つので、発想記号による音色の変化は調波構造の変化であり、またそれは弦の振動の変化である。そこで本研究では、パラメータにより生成される擦弦振動が、楽器本体で共鳴し放射されるまでの間に、弦の振動を発想記号を元に演奏した弦の振動に変換する FIR フィ

ルタである“発想伝達関数”を仮定する。発想伝達関数を用いて弦の振動を変化させることにより、発想記号特有の表現力を持った音色を生成する。

## 2 表現力を持った楽器音の生成

合成音の音色変化を用いた表現力付与の先行研究には、実際の楽器音のスペクトルデータベースを用意し、そこから振幅や位相コントロールして合成する手法が存在する [3]。しかし、スペクトル制御による合成は専門的知識が必要であり、理解が難しく一般的ではない。表現力のような個人性の強いスキルの制御パラメータは、ユーザーが直感的に制御できるパラメータであるほうが望ましい。

擦弦楽器は表現を元に、主に擦弦時の弓の位置  $p$ 、圧力  $f$ 、速度  $v$  の擦弦情報をコントロールし弦の振動を作り出す。その弦の振動が楽器の中で共鳴を起こし放射される。本研究では、奏法のイメージから直感的に合成音を生成するために、発想伝達関数を生成する。

図 1 は発想伝達関数を用いた音の生成過程である。擦弦情報により擦弦振動を決定し、そこに発想伝達関数を畳み込むことにより、現実の弦の振動波形に近い弦の振動波形を生成する。その弦の振動波形に胴の共鳴特性をフィルタリングすることにより、表現力を持った音を合成する。

発想伝達関数は、演奏音声から弦の振動と楽器の共鳴特性を取り除くことにより推定される。発想伝達関数を推定するにあたり、物理的に説明可能な範囲の弦の運動と、楽器の共鳴特性について考える。



図 1. 発想伝達関数を用いる合成音の生成過程

### 2.1 弦の振動

擦弦中の弦の運動は、Helmholtz により、駒と枕により固定される弦が描く放物線上をなぞる三角波として知られている [4]。この運動は stick and slip 現象によるものであり、弓に弾かれた弦が臨界点まで引っ張られ、臨界点に到達すると滑り、また摩擦により弓に引っ張られるという現象が繰り返されたものである。この運動はヘルムホルツ振動と呼ばれ、時間波形は鋸波のような形をしている (図 2,4)。

図 2 の波形において、鋸波の立ち上がり部分は slip 現象により引き起こされ、下がる部分は stick 現象により引き起こされている。時間波形の頂点位置の比率は、擦弦位置の比率  $\beta$  とほぼ一致し、図 4 のように変化をする。 $\beta = 1/9$  の位置を擦弦すると、一周期の  $8/9$  が stick 現象であり、 $1/9$  が slip 現象となる。鋸波は、立ち上がりが急になるほど高調波が多く含まれる波である。図 3,5 では、4kHz 以上の高次モードの成分が、 $\beta = 1/30$  の波形の方が多く含まれていることが確認できる。擦弦楽器において、駒の近くを擦弦するほど音に輝きが増すのはこのためである。ヘルムホルツ振動は以下の式のように表すことができる。

$$y(t) = \sum_1^{\infty} \frac{(-1)^{(n+1)}}{n^2} \phi_n(\beta) \sin(\omega_n t) \quad (1)$$

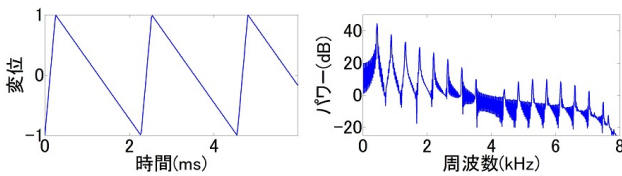


図 2.  $\beta = 1/9$  の位置を擦弦した弦の振動波形例 図 3.  $\beta = 1/9$  の位置を擦弦した弦の振動スペクトル

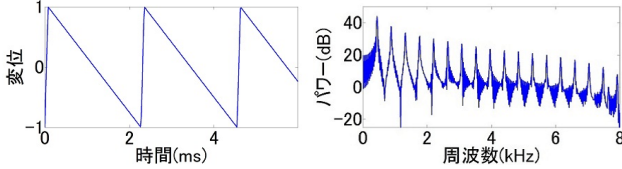


図 4.  $\beta = 1/30$  の位置を擦弦した弦の振動波形例 図 5.  $\beta = 1/30$  の位置を擦弦した弦の振動スペクトル

しかしヘルムホルツ振動は振動の観測位置が擦弦位置と一致する場合のみに観測される振動である [5]。擦弦位置  $x$  (観測位置/弦長) 以外の位置で振動を観測した場合、 $1/\beta$  のモードの影響により、ヘルムホルツ波以外の波形が観測されている。これは、観測位置により各モードのゲインが変化するためである。

擦弦方法による振幅の変化は、 $x = \beta$  の時の各モードのゲインが式 (1) のように表されることから以下のように表される。

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) \frac{(-1)^{(n+1)}}{n^2} \phi_n(\beta) e(p_t, f_t, v_t) \sin(\omega_n t) \quad (2)$$

ここで、 $\phi_n(x) = \sin(n\pi x)$ 、 $e(p_t, f_t, v_t)$  は擦弦方法により変化する各モードのゲインに関する係数である。

駒 (端点) での弦の振動は  $x = 1$  で観測される信号である。しかし駒は、実際には弦を完全に固定しておらず、駒自体も振動するため  $x \neq 1$  である。本研究では  $x = 0.97$  とする。

また、速度と位置と圧力の関係がうまく釣り合わない場合、 $\beta = x$  であったとしても、ヘルムホルツ波とは異なる波形が生じることがある [2]。しかし、擦弦楽器の演奏は擦弦情報の関係が釣り合う範囲で行われるため、本研究では考慮しない。

## 2.2 楽器の共振

弦楽器の音の生成過程をソースフィルタモデルでとらえると、楽器本体はデジタルフィルタと考えることができる。音源から、複雑な音響系を通過して受音点にいたるまでの特性は、インパルス応答を計測することにより明確にすることができる。一般的には継続時間の短いパルスを発生させてその応答を取得する方法があるが、信号のエネルギーが非常に小さいため、S/N 比が悪い。そこで安定したインパルス応答計測を行うため、TSP (Time Stretched Pulse) 応答を計測する [6]。

弦から駒に伝わる振動が胴体に伝わることによりどのような変化に伴い放射されるか測定するために、駒に TSP 信号の振動を与え、胴から放射される音を測定する。先行研究では、無響室でスピーカーから TSP 信号を流し、レコード針を楽器に取り付けそこから振動を計測する手法 [7] が存在するが、この手法は大規模な設備が必要となる。

本研究では、直接駆動型スピーカーである「ピタッとスピーカー\*1」を測定に用いる。このスピーカーは吸盤により貼り付けられたものに振動を与え、そこから音を放射するものである。このスピーカーを楽器の駒部分に取り付け TSP 信号を流すことにより、駒に TSP 信号の振動を伝える。バイオリンの個体によっては、接着型スピーカーが駒より大きいものもあるため、バイオリンはあご当ての部分にスピーカーを接着し測定する。駒の振動は楽器の胴体へと伝わり、本体で共鳴した TSP 応答が出力される。

しかし、スピーカーを通して TSP 応答を測定すると、出力信号にはスピーカーの特性が乗っていると考えられ、周波数領域では、 $R = DI$  となる。ここで  $R$  は観測信号、 $D$  はスピー

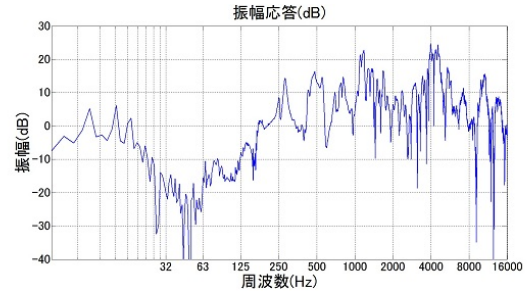


図 6. 直接駆動型スピーカーを用いて計測したバイオリンの本体の振幅応答

カー特性、 $I$  は楽器の共鳴特性である。スピーカーの特性を測るために、スピーカーのみから TSP 応答を観測する。そして、スピーカーの周波数応答の逆フィルタを用いて  $R$  から取り除くことにより、楽器の共鳴特性を推定する。

防音室で TSP 応答を 10 回測定し、それらを同期加算し、そこから直接駆動型スピーカーの周波数特性を取り除いた。図 6 は、直接駆動型スピーカーを用いて計測したバイオリンの振幅応答である。125Hz 周辺から応答が上昇し、4kHz 周辺から応答が減衰する結果が得られた。これは、先行研究 [7] のものと似た応答であり、直接駆動型スピーカーによる計測は十分可能と考えられる。しかし、30Hz 付近の応答は減衰しており、これは楽器の個体差と、スピーカーから出力することが出来ない帯域であるためと考えられる。本研究では、上記の方法で計測したインパルス応答を楽器の共鳴特性フィルタとして使用する。

## 3 発想伝達関数の推定手法

実際の演奏音も図 1 のような流れで生成されていると仮定すると、周波数領域の生成音  $Y$  は、 $Y = SEI$  と、表現できる。ここで  $S$  は弦の振動、 $E$  は発想伝達関数、 $I$  は楽器の共鳴特性である。 $S$  は弦の振動により推定可能であり、 $I$  は観測したインパルス応答を利用できる。よって発想伝達関数  $E$  は、推定した弦の振動波形に楽器の共鳴特性を掛けたものを実際の演奏から取り除くことにより、 $E = Y/SI$  のように計算できる。

### 3.1 弦の振動の変化の推定

実際の演奏では擦弦情報一定ではないため、波形は時々刻々と変化していく。演奏中の弦の振動に近い弦の振動波形  $S$  を生成するためには、振動の時間変化を推定する必要がある。

実際の弦の振動は、擦弦時の非常に多くの要因によって変化するため、擦弦情報のみで一意に同定することは難しいが、演奏で用いられる範囲の弦の振動の各モードのゲインは式 (2) のように表すことができる。また、図 2,4 のヘルムホルツ波の頂点位置の変化からわかるように、擦弦情報による特徴的な弦の振動が存在する。しかし、擦弦情報の微小な変化によるモード振幅への影響は大きくない。そのため、振幅スペクトルは厳密には線形結合ではないが、擦弦の振動は、いくつかの特徴的な弦の振動のスパースな線形結合で近似できると考えられる。

弦の振動は式 (2) のように表すことができるので、演奏音声の FFT 演算で得られるスペクトルの値は、式 (2) における  $\sin(\omega_n t)$  の係数である。式 (2) における  $e(p, f, v)$  は、演奏音声と  $e(p, f, v)$  を考慮せずに合成した音声のゲインの差分であると考えられる。本研究では、擦弦の位置と圧力の変化に着目し、2 つの擦弦情報を変化させて演奏した演奏音声から  $e(p, f, v)$  を推定する。

弦の振動の変化の推定には非負値行列分解 (NMF) を用いる。NMF とは、与えられた非負値行列  $V$  に対し  $V \approx WH$  となるような非負値行列  $W, H$  を決定するアルゴリズムである [8]。また、初期値として定まった基底を与え、基底  $W$  に対して更新規則を実行せずアクティベーションのみを計算することにより、 $V$  における  $W$  の強度  $H$  を計算することができる。

$V$  をパワースペクトルの時間変化、 $W$  を特徴的な  $n$  個のパワースペクトル、 $H$  を  $n$  個のパワースペクトルの時間ごとの重みとする。 $W$  の初期値は、式 (2) における  $e(p, f, v)$  を変化させた 16 種類の特徴的な弦の振動と、発音時の雑音成分の近似としてのピンクノイズに楽器の共鳴特性をかけたものとする。

\*1 <http://www.devicenet.co.jp/pita/>

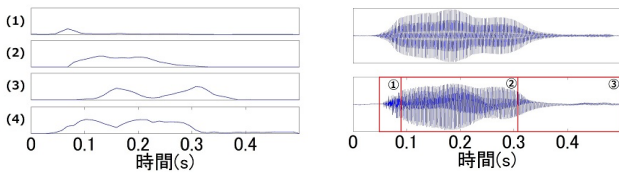


図 7. NMF によるバイオリンの marcato 音の解析 図 8. 推定された弦の振動 (上) と実際の演奏波形 (下)

図 7 は、バイオリンの marcato(はっきりと)で演奏した図 8 下図の G の音 (390Hz) を NMF で解析したものである。図 7 において、(1) がピンクノイズ、(2) が  $(\beta=1/13, f = \text{強い})$  の弦の振動、(3) が  $(\beta=1/9, f = \text{強い})$  の弦の振動、(4) が  $(\beta=1/9, f = \text{普通})$  の弦の振動である。他のアクティベーションは存在する値が極めて小さいため省略した。ここでの発音、持続、余韻部分は、図 8 下図における ①、②、③ とする。発音の部分でピンクノイズが立ち上がった理由は、弦の非線形の運動による雑音成分が発生するためである。また、後半の余韻の部分で高調波の少ない (3) が立ち上がった理由は、弓を弦から離れた時の弦の余韻は、弦の固有モードへと収束し、高調波成分から減衰するためである。擦弦方法による弦の振動の変化を近似できているため、NMF による弦の振動の推定は有効であると考えられる。

周期的な波形を生成する方式の一つに Wavetable 方式がある。Wavetable 方式とは、サンプリングした 1 周期分のデータを繰り返し、完全に周期的な信号を合成する方式である。しかし、完全に周期的な音は非常に不自然な音となる。そこで、同じ周期で異なる音色の波形を Wavetable 合成し、それらに時間的に変化する重みをかけ、加算合成することにより、変化に富む音を生成する手法がある [9]。アクティベーションを Wavetable 方式における時間軸方向の重み係数として用い、各特徴的な弦の振動を加算合成する。図 8 上図は、推定したアクティベーションから合成した弦の振動波形である。

### 3.2 発想伝達関数の推定

楽器の共鳴特性フィルタと弦の振動のスペクトルを用いて発想伝達関数を推定する。擦弦楽器の波形は、発音、持続、余韻などいくつかの区間で異なっており、各部分別々に発想伝達関数を推定する必要がある。また、解放弦の場合と弦を抑えた場合の波形も異なり、弦によっても波形が異なる [5]。そのため、一つの発想記号ごとに、(弦の本数 × 解放弦の場合と抑えた場合 × 区間数) 種類の伝達関数を求める必要がある。本研究では、波形が異なる区間を手動で切り取った  $n$  個 (3 区間程度) の区間で、 $E_n = Y_n / (S_n I)$  で、発想伝達関数を推定する。

本研究では、発想伝達関数の 30 次の線形予測係数 (LPC) フィルタを求め、包絡のみを取得した。本研究では発想記号が決まると音色のイメージが決定するものとし、発想伝達関数を FIR フィルタでモデル化する。

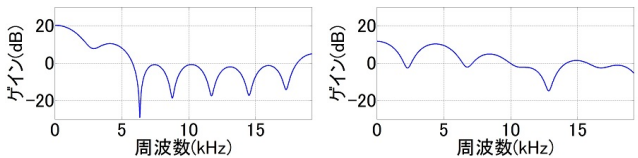


図 9. feroce の G 音 (786Hz) の発音部の発想伝達関数 図 10. dolce の G 音 (786Hz) の発音部の発想伝達関数

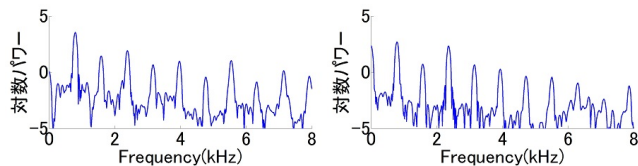


図 11. feroce の発音部 図 12. dolce の発音部

図 9 は、バイオリンの feroce(荒々しく)音の発音部、図 10 は、バイオリンの dolce(甘く、やわらかく)音の発音部の発想伝達関数である。4kHz 以下の振幅応答に、15dB ほどの変化が

見られる。これは feroce は音の立ち上がりから大きな圧力と速い弓速で、基本波の強い力強い発音をするのに対し、dolce は少ない圧力で、やわらかく基本波の少ない発音をする差が表れているものと考えられる (図 11,12)。

今回の試行では、実際の演奏の時間波形から波形が切り替わったと確認できる箇所を探し、そこから 1024 点分 (21ms 程度) のデータを手動で切り出し、DFT 演算を行う。弦の振動の推定波形も同じ点から 1024 点切り出し同様に DFT し、周波数領域で実際の演奏から推定波形を除算したものを IDFT し、発想伝達関数を推定している。

## 4 発想伝達関数を用いた楽音の合成

### 4.1 擦弦情報による弦の振動の変化

NMF を用いて推定した弦の振動  $S$  は以下ようになる。

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) b_{(n,t)} \sin(\omega_n t) \quad (3)$$

擦弦情報の変化は、音色が変化することから各モードのゲインを変化に起因すると考えられる。擦弦情報による音色の変化を含めた式 (3) は以下のように書くことができる。

$$S(p, f, v) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) b_{(n,t)} c(p, f, v) \sin(\omega_n t) \quad (4)$$

ここで  $c(p, f, v)$  は擦弦情報によるゲインの変化である。

擦弦情報を用いて音色を変化させるためには、各モードのゲインを変化させる必要がある。そこで、発想記号を用いずに擦弦情報を変えて演奏した波形から、擦弦情報の変化による各ゲインの変化を推定する。一般的な擦弦情報で演奏した演奏音声のゲインから、擦弦情報を変えて演奏した演奏音声との差分をとり、擦弦情報による音色の変化とする。

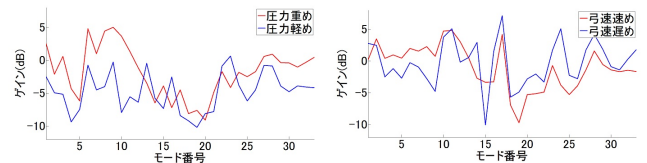


図 13. 圧力による各モードのゲインの変化 図 14. 速度による各モードのゲインの変化

図 13,14 は、一般的な演奏の圧力と擦弦情報を変化させて演奏した演奏音声との各モードのゲインの差分である。圧力、速度ともに 10 次モード以下に大きな変化がみられ、圧力においては重い弓が全てのモードにおいて大きなゲインを持ち、速度においては速い弓が 1 次モード以外において大きなゲインを持つ。本研究では  $c(p, f, v)$  にこのモード振幅の差を用いることにする。

### 4.2 合成音の周波数変調

発想記号によりビブラートの速さや幅は変化する。表現力豊かな楽音の合成するためには、ビブラートも変化させる必要がある。そこで、発想記号により演奏される実際の演奏音から、瞬時周波数を用いてビブラートの特徴を抽出する [10]。

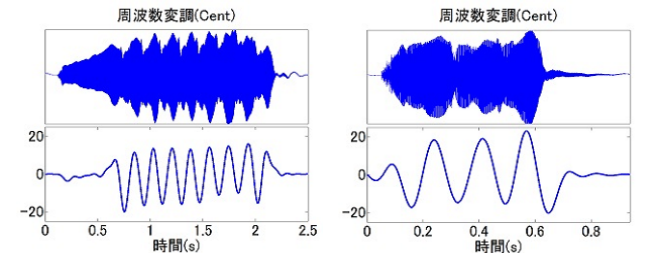


図 15. appassionate 図 16. feroce

図 15,16 は、appassionate(情熱的に)と feroce で演奏されたバイオリンの E 線の 1st ポジションの中指の G(787Hz) の音を

解析した結果である。単位時間当たりのピブラートの回数に差は見られないが、feroce はアタックと同時に大きなピブラートがかかっているのに対し、appassionato は持続部からピブラートがかかり始めているのが確認できる。

本研究では、入力された発想記号から、推定されたピブラートを元に周波数変調を決定し、楽音合成を行う。

#### 4.3 楽音の合成

図 1 の流れのように合成を行う。NMF で推定した弦の振動波形のゲインに擦弦情報から推定されたゲインの変化を適応し、周波数変調を行う。その弦の振動波形に発想伝達関数を畳み込み、最後に楽器の共鳴特性を畳み込む。

今回の試行では、各弦において発音、持続、余韻の各区間について発想伝達関数を推定した。各区間の切り替えは台形窓を用いて行う。切り替えの点数は、0.3 秒ほど取るのが望ましいが、区間の長さによっては難しい。しかし、急激な切り替えではノイズが混入する恐れがあるため、最低でも 0.1 秒分以上の点数を取ることが望ましい。

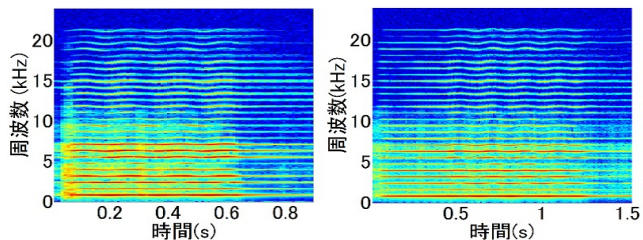


図 17. feroce 生成音 ( $f$ =強い) 図 18. dolce 生成音 ( $f$ =普通)

図 17,18 は生成された楽音である。feroce の方が、発想伝達関数により、3 次モードまでのゲインが強くなり、圧力変化により 10 次モードまでのゲインに差が見られる。また、ピブラートにも変化が見られる。

#### 5 評価

音色の評価は通常言葉によって行われ、明確に対応する物理量はない。本研究では、5 種類の発想記号 (marcato, leggero (軽やかに), feroce, dolce, appassionato) について、発想伝達関数を用いた合成音と、MIDI で生成した G 音 (786Hz) を用いて、擦弦楽器を 3 年以上経験している 20 人に聴衆実験を行った。

実験では、グループを 2 つに分割し、発想記号に対する合成音の合致度を 5 段階のオピニオン評価法を用い MOS 値を評価した。グループ 1 は合成音のみを評価し、グループ 2 は、MIDI が合成音かを伏せた上で MIDI と合成音の両方を評価する。最後に、両グループともに合成音についてコメントをしてもらう。

表 1. MOS 値 (Group1)

発想記号	合成音
marcato	4.0
leggero	3.2
feroce	3.0
dolce	4.0
appassionato	2.7

表 2. MOS 値 (Group2)

合成音	MIDI
3.8	2.2
3.5	2.8
3.6	3.5
3.5	2.2
3.3	3.0

表 1,2 にオピニオン試験の結果を示す。オピニオン評価ではグループ 1 では dolce と marcato において MOS 値が 4.0 となった。appassionato のコメントには迫力が感じられないとのコメントが多く、feroce のコメントには荒々しさが認知できないというものが多かった。これらの発想記号では力強さを表現するために式 (2) で表すことが可能な圧力よりも大きな圧力を掛けているためと考えられる。NMF の基底に演奏音声から推定したゲイン差を含めたところ、音色に改善が見られた。グループ 2 では dolce, marcato, leggero で有意差が認められた。

全ての発想記号の合成音において音色の変化が認知できるか、と二択の質問をしたところ、20 人中 15 人の被験者から、音色の変化が認知できるとコメントされた。これがグループ 2 において MIDI よりも合成音の MOS 値が上回った原因と考えられる。全ての発想記号において音色変化が認知できなかった

と答えた被験者は、主に marcato と leggero の変化が認知できなかったとコメントした。これは、両発想記号ともに音の長さを短く演奏する似た発想記号であるためと考えられる。これらの発想記号の差をより明確に表現するために、leggero で多く用いられる spiccato 奏法 (弓を弦に落とすように発音し、極端に音の長さを短くする方法) を考慮する必要がある。

#### 6 結論

本研究では、合成音への表現力付与のために、発想記号によるイメージと奏法の変化を近似する発想伝達関数の推定を行った。非負値行列分解を用い弦の振動波形を推定し、インパルス応答を用い楽器の共鳴特性を推定し、この 2 つを実際の演奏波形から取り除くことにより、発想伝達関数を推定した。推定した弦の振動に、発想伝達関数をフィルタリングし各モードのゲインを変化させ、楽器の共鳴特性をフィルタリングすることにより、全ての発想記号において発想伝達関数を用いた合成音が MIDI の MOS 値を上回り、dolce と marcato において MOS 値が 4.0 となった。発想伝達関数による音の合成は MIDI よりも変化に富む合成音を生成することが可能であると考えられる。また発想伝達関数は、生成された弦の振動を、奏者が表現を付与するように擦弦した弦の振動に近づける有効なフィルタであると考えられる。

擦弦振動の生成の問題点として、擦弦情報に起因した擦弦振動の変化を実際の演奏音声から推定しており、物理的な根拠が弱い。本研究では弦の振動を特徴的な弦の振動の線形結合であると仮定して推定を行ったが、先行研究ではそのような成果は上がっていない。また、アクティベーションの連続性とスパース性に関する制約を行っていないため、擦弦運動解析に対応した NMF の改良が必要である。

発想伝達関数の問題点の一つとして、フィルタであるため、存在しない周波数は操作できないという点があげられる。弦の振動では固有モードのみが振動すると仮定しているため、調波構造外の周波数は存在しない。しかし、今回用いた擦弦パラメータのみでは説明できない非線形の問題により、基本周波数の整数倍以外の音も生成される。改善案として、NMF の基底に、録音した波形も用いる手法を検討する。

#### 参考文献

- [1] Young, D. "A system for understanding violin bowing technique through measurement of physical dynamics" J. Acoust. Soc. Am. vol.119, Issue 5, pp. 3441-3441 (2006)
- [2] Young, D., et. al. "Playability evaluation of a virtual bowed string instrument" In: Proceedings of the Conference on New Instruments for Musical Expression, NIME (2003)
- [3] R. Dannenberg, et. al. "Combining Instrument and Performance Models for High-Quality Music Synthesis" J. New Music Research, vol.27, No.3, pp. 211-238 (1998)
- [4] 近藤 正夫 "バイオリンの発音機構" 日本音響学会誌 49(3), 184-192, 1993-03-01
- [5] 村上 智之 "擦弦振動の平均法による解析" 日本機械学会論文誌. C 編 62(598), 2102-2109, 1996-06-25
- [6] Suzuki, Y. "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses" J. Acoust. Soc. Am. 97(2), 1119-1123, 1995
- [7] Farina, A., et. al. "Realisation of "virtual" musical instruments: measurements of the impulse response of violins using MLS technique" Proceedings of CIARM95. Ferrara, Italy.
- [8] D.D.Lee, et. al. "Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization" Nature, 788-791, 1999
- [9] B.J.Robert "Wavetable Synthesis 101, A Fundamental Perspective" AUDIO ENGINEERING SOCIETY, Pages: 1-27
- [10] 中野倫靖, 他 "楽譜情報を用いない歌唱力自動評価手法," 情報処理学会論文誌 48(1), 227-236, 2007-01-15