

微分音を含む任意の音数の音律のデザインと それを用いたメロディ打ち込みインタフェースの提案

平井 辰典^{1,a)}

概要：ピアノロールはコンピュータを用いた音楽制作において重要な役割を担ってきた。本稿では、ピアノロールによるメロディの打ち込みを自由な音律に拡張するインタフェースを提案する。これまでのピアノロールでは、12 平均律を基本とした 1 オクターブあたり 12 音の鍵盤配列によって音を入力する方式が取られてきた。一部のソフトウェアでは、キャリブレーションによって 12 平均律以外の音律にチューニングした鍵盤を使用することも可能ではあるが、1 オクターブあたりの鍵盤数が 12 という数に縛られていた。ピアノロールによる入力方式は、鍵盤に慣れているユーザにとっては便利な方式であるが、微分音などの 12 平均律とは異なる高さの音を使用したい場合には煩雑なピッチ編集作業を行わざるを得ない状況にある。本稿では、ユーザが微分音を含む自由な周波数の音を用いて自由な音数で音律をデザインするためのインタフェースと、デザインされたオリジナルの音律を用いてメロディを打ち込むためのピアノロールの拡張にあたるインタフェースを提案する。提案インタフェースでは、既存の音律を編集したり、外部の音声ファイルを基に音律を生成したりすることができる。また、メロディの作成と音律の編集を行き来することができるため、曲内で転調するかのごとく音律を切り替えることもでき、より自由な音楽表現の実現可能性がある。提案インタフェースで生成したメロディについて、主観評価実験を行い、12 平均律などの聴きなれた音律のメロディに比べて作成できるメロディがどの程度聴くに耐えられるかを評価した。

1. はじめに

コンピュータによる音楽制作において、ピアノロールはもはや替えがきかないほど重要なインタフェースであると言える。音楽制作に使われる DAW ソフトではピアノロール上に音符を打ち込んでいく作業が一般的であり、弦楽器や管楽器などの本来鍵盤で演奏されないような楽器の音でさえもピアノロールによって入力されることがある。ピアノの鍵盤は、1 オクターブあたり 12 個の音により構成され、それらは 7 個の白鍵と 5 個の黒鍵に分けられている。このようなピアノの鍵盤によるオクターブ表現は、親しみのある人にとっては便利であるが、演奏可能な音が 12 平均律に含まれる音に限定されてしまうという制約が存在する。

12 平均律は、1 オクターブの周波数を 12 個に量子化した音律である。ピアノロールを使う場合、鍵盤楽器とはかけ離れた演奏スタイルの楽器であっても 12 平均律による音の入力を行うことになる。例えば、バイオリンのようなフレットレスの弦楽器の場合、1 オクターブあたりに鳴らせる音の周波数の種類は 12 個に限られていない。しかし、ピ

アノロールを使って音を入力しようとする、1 オクターブあたりの周波数の種類は 12 個に量子化されてしまう。バイオリンでは、純正律のように、12 平均律以外の音律による演奏も行われるが、ピアノロールが採用されている DAW ソフトで使う場合には 12 平均律が基本となっている。多くのソフトには、キャリブレーションによりチューニングを変更する機能が備わっており、1 音ずつチューニングを変更して 12 平均律以外の音律による音の入力も実現可能ではある。しかし、鍵盤というインタフェースに起因する 1 オクターブあたり 12 という音数の制限を取り払うことはできない。そのため、既存のピアノロール単体では 17 平均律などの微分音を含む解像度の高い音律を用いたメロディの打ち込みは困難である。より柔軟かつ自由度の高い音楽表現を実現するためには、この 1 オクターブあたり 12 個の音数の制限を取り除く必要がある。

本稿では、ユーザが自由な周波数かつ自由な音数の音律をデザインするインタフェースと、さらにその音律を使ってメロディを入力するためのピアノロールを拡張したインタフェースを提案する。提案インタフェースでは、ユーザがオリジナルの音律をデザインすることを可能とし、既存のピアノロールの表現範囲の外側にあるような音を使ったメロディの打ち込みを実現する。

¹ 駒澤大学
Komazawa University
^{a)} thirai@komazawa-u.ac.jp

音律に縛られない音楽表現はすでに部分的に実現している。例えば、サンプラーという楽器は、サンプリングした自由な音を使って音楽を構成する電子楽器である。しかし、サンプラーという楽器単体ではメロディや伴奏を構成することは難しい。そこで、提案インタフェースの機能の一つとして、外部の音声ファイルをサンプリングし、音声データに含まれる複数の支配的な周波数を鍵盤の音高として取り込み、新たな音律を生成する機能を実装した。例えば、鳥の鳴き声や波音、風の音などの音声ファイルを基に音律を生成することができ、その音律を使ってメロディを制作することを可能とする。

2. 関連研究

微分音に関連した研究は、n-EDO (n Equal Divisions of the Octave) という文脈で、主に 12 平均律以外の n 平均律に関連して研究されている。微分音の音楽理論研究者である Erv Wilson は、31 平均律などの n-EDO における音楽理論について研究し、鍵盤の拡張である generalized keyboard に関する研究を行った [1]。新しい音律に関する音楽理論の研究は、音律を開拓する上で重要であるが、音楽は、その理論が確立されていなくとも作ることができる。実際に太古の昔に演奏されてきた音楽は音楽理論とは関係ないところから生まれたものと言える。本研究で提案するものは、新しい音律についての理論に先だて音楽の方を作るためのツールである。

微分音を演奏するための楽器についての研究もこれまでにいくつか行われてきている。Bailey らは、微分音を演奏できるクラリネットを提案し [2]、Dabin らは 3D プリンターによって制作した微分音用フルートを提案した [3]。これらの新しい楽器は、既存の音律の枠の外にある音を鳴らすことができる楽器であるが、物理的な楽器の場合には、音律を柔軟に変更することが困難である。もし、奏者が様々な音律で音楽を演奏したいと考えた場合には、音律毎に楽器をデザインし、違った楽器で演奏しなければいけない。その実例として、これまでに微分音を演奏することができる様々な種類のギターが提案されてきている [4]。しかし、ギターの場合はフレットという部品が固定されていることによって柔軟な音律の変更を実現することが難しい。そのため、ギターは音律毎にデザインされる楽器である。フレットレスギターも存在するが、その自由度と引き換えに、音律が規定されない状態での演奏が求められてしまい、演奏の難易度は高い。

他にも微分音楽の発展に貢献する研究として、チューニングの手法に関する研究 [5] や微分音の知覚に関する研究 [6] など様々なアプローチから研究が行われてきた [7]。一方で、新たなツールを提案してユーザに自由な音律の音楽を制作可能な環境を提供するようなアプローチも事例ベースの観点で微分音楽の発展に寄与すると考えられる。

Bosanquet により 1870 年台に提案された微分音の演奏を可能とする generalized keyboard は、後に微分音の研究者である Erv Wilson により拡張された [8]。Generalized keyboard により、微分音の演奏は可能であるが、我々が慣れ親しんでいる既存の鍵盤との構造的な違いが大きいいため、既存の音楽制作フローの一部に直接導入するためには、音の入力方法を大きく変更する必要があるが難しい。また、頻繁に音律を変更して演奏することを考えたとき、どの鍵盤にどの音が割り当てられている状態なのかを直感的に理解することは難しい。コンピュータのキーボードの文字配列が変わると従来のタイピングができなくなってしまうように、直感的に演奏できるかどうか重要な要素と言える。

いくつかのソフトウェアでは、ユーザが任意の音律を作成する機能や、自由な周波数の音を打ち込むための機能を提供している。例えば、Scala というソフトウェアでは、あらゆる音律のチューニングデータを制作できる [9]。Scala では音律の作成までは可能だが、音楽制作の部分までは網羅していないため、チューニングデータは既存のピアノロールなどに読み込むことが想定されている。ソフトウェアシンセサイザである PianoTeq^{*1}や Serum^{*2}では、12 平均律以外の音を鳴らすためのキャリブレーション機能が実装されている。これらのソフトでは、Scale Workshop^{*3}などの外部のサイトで作成したチューニングファイルをインポートして使用することもできる。しかし、既存のソフトウェアシンセサイザは 1 オクターブあたりの鍵盤数が 12 個に固定されたピアノロールを使って音符を打ち込むことを前提にデザインされているため、12 という音数の制約に引っ張られてしまう。Leimma^{*4}は、オクターブを環状に表現してその円周上に音を配置することで自由な音律をデザインすることを可能とするブラウザベースの web アプリケーションである。Leimma により新たな音律をデザイン可能であるが、その後の音楽制作の部分については網羅されていない。

本稿で提案するインタフェースでは、自由な音律のデザインだけでなく、ピアノロールによる打ち込みの部分までも拡張することで、より柔軟かつ自由な音によるメロディの打ち込みを実現する。提案インタフェースを構成する音律デザインのためのインタフェースについては、PianoTeq や Leimma でも採用されているオクターブの環状表現を参考に実装する。オクターブの環状表現による音律の表現はこれまでも行われてきており、特に新しい方法ではない。本提案インタフェースが他のソフトウェア等と比べて新規性を有する部分は、音律のデザインだけでなく、メロディの打ち込みまでも網羅している点にある。これにより、音

*1 <https://www.modartt.com/pianoteq>

*2 <https://xferrecords.com/products/serum>

*3 <https://sevish.com/scaleworkshop/>

*4 <https://isartum.net/leimma>

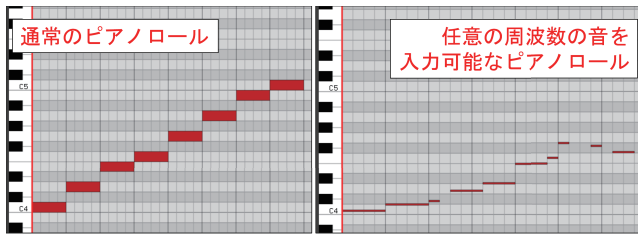


図 1 任意の周波数の音を入力可能なピアノロールの実装

律の編集とメロディの作成を行き来でき、曲の途中で音律を変更したり、フレーズを構成する1音だけ別の音律の音にするといったことが可能となる。さらに、本提案インタフェースでは、外部の音声ファイルをインポートして音律を生成する機能も備えている。

3. 自由な周波数の音からなるメロディを打ち込むための方法

本章では、どのようにピアノロールを拡張して微分音を含む自由な周波数の音を入力できるようにするべきかについて検討する。本研究の初期試行では、ピアノロールのピッチ方向(縦方向)における量子化(12平均律の量子化)を撤廃するようなインタフェースを実装した。

既存のピアノロールと本研究の初期に実装したピッチ方向に自由な高さでメロディを打ち込みできるように拡張したピアノロールとの比較を図1に示す。このインタフェースでは、ピアノロールの縦方向に自由な高さで音を入力できるようになっており、その高さに応じ、微分音を含む任意の音高の音を鳴らすことができる。この単純なインタフェースにより、自由な音高によるメロディの作成という目的は果たされたかに見えたが、このインタフェースでは、その自由度の高さのあまりに、メロディにおける規律が失われてしまうという問題が生じた。実際にこのインタフェースでいくつかのメロディを入力してみたところ、同様の高さの音を同じ周波数で鳴らせなければ、終始チューニングがずれた音楽を聴いているような感覚になり、違和感を感じてしまうという知見が得られた。

既存のソフトウェアシンセサイザであるMetaSynthは、ここで実装したピアノロールの拡張と似たような音の入力を可能としており、時間方向及びピッチ方向の量子化がなされていない状態で音を入力できる。このようなインタフェースにより音律の枠に捉われない音楽を制作できるが、その自由度の高さから、既存のピアノロールと比べて音楽としてまとめることが難しかったり、聴き手が違和感を感じるような音が出力されるケースが増えてしまうという問題が挙げられる。微分音の導入は、表現可能な音楽の幅を広げることに繋がるが、微分音を使った音楽の制作はその自由度の高さに応じて難易度も上がってしまうと考えられる。特に、音楽理論が確立されていないような音律では、制作者の直感に従って音を決めていくことになり、手

探りの状態を抜け出せず、作業量は増加してしまう。

入力可能な音の自由度を上げるという目的は保持しながらも、入力した音が音楽として成立するために必要な要素として、インタフェースの方で制約を設けることを考えた。既存のピアノロールでは、1オクターブあたりの音数を12個にするという制約を課すことで、12平均律とその上に築かれた音楽理論の下で音楽として成立する音が作りやすい状況を保証していた。その考えに基づきながらも、入力可能な音の自由度を上げるというアプローチとして、ピアノロールへの音の打ち込み時の自由度を上げるのではなく、ピアノロールに割り当てられた音をデザインする際の自由度を上げる手法を提案する。それにより、メロディを打ち込む際には既存のピアノロールと同様の手順で打ち込むことができ、実際に鳴る音は事前にユーザが編集した自由な音律となる。既存のピアノロールと異なる点は、音数が12個に限られない点と、各鍵盤に割り当てられている音の高さが自由に変更できる点にある。また、打ち込み途中に音律を変更したり、複数の音律の音を混ぜて打ち込みできることも従来のピアノロールとは違う。これらの違いが制作可能な音楽の表現の幅を広げることに繋がると期待してインタフェースを実装する。

4. 提案インタフェースの全体像

本章では、提案インタフェースの全体像について記述する。提案システムは2つのインタフェースから構成されている。1つは音律を作成するインタフェースで、もう1つは作成された音律を用いてメロディを打ち込むインタフェースである。図2に音律を作成するためのインタフェースのスクリーンショットを示す。本インタフェースは、まず音律を作成し、その後、作成した音律を使ってメロディの打ち込みを行うという流れで使用することを想定している。

図2左側の①の円状のインタフェースは、セント単位^{*5}で音律を構成する音を追加・変更・削除できる機能である。円上の直線は鍵盤に対応しており、図2①の例の場合、1オクターブあたり10個の鍵盤があることに対応している。この鍵盤の個数は12個に縛られておらず、ユーザが自由に追加・削除できる。各鍵盤の周波数の値はインタフェース右側の②に低い音から順番にリスト化されて表示される。この音律作成インタフェースはPianoTeqのAdvanced Tuning機能を参考に実装しており、webアプリケーションであるLeimmaでも類似の音律作成機能を提供している。

4.1 既存の音律テンプレートの読み込み

提案インタフェースは既存のピアノロールの拡張として実装している。そのため、ピアノロールのできるメロディの打ち込みもできるようになっている必要がある。ピアノ

^{*5} セントは1オクターブを1,200分割した単位であり、12平均律の場合100セントが半音に対応する。

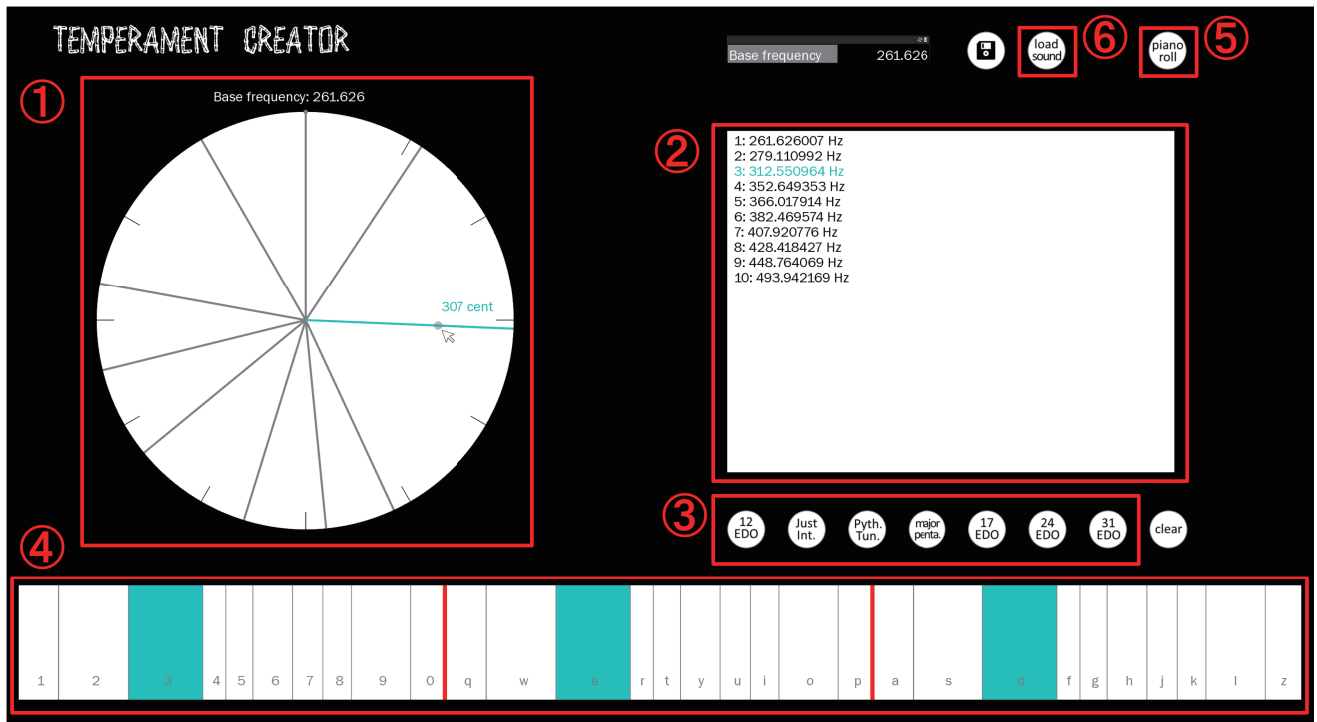


図 2 音律作成インタフェース

ロールでの打ち込みは、12 平均律の音の入力にあたるが、そのような既存音律は、本インタフェースではテンプレートとして用意している。③の複数の音律テンプレートから所望のものを選択することで、各音律の鍵盤と周波数配列が読み込まれる。12 平均律の他にも、純正律やピタゴラス音律、メジャーペンタトニックスケール、17、24、31 平均律のテンプレートを用意している。これらの音律についてはボタンクリック一つで読み込むことができる。これらのテンプレートの 1 オクターブあたりの音数は 12 個である必要はなく、異なる音数の音律であっても同じスキームで扱えるようなインタフェースデザインとなっている。

音律作成時には、実際にそれぞれの音の高さを確かめながら作業を行う必要があるため、インタフェースの下部④には、作成した音律に対応する簡易的な鍵盤が提示される。鍵盤は 3 オクターブ分表示される仕様で、コンピュータのキーボードを用いて簡易的に演奏可能である。各鍵盤の幅は音程に対応している。幅が広い鍵盤は次の鍵盤との間の音程が広いことを示しており、これによって、右に行くほど高い音であるという直感的な認識の下に音律を作成できる。平均律の場合、鍵盤の幅は一定となるが、微分音を扱う場合には、必ずしも鍵盤間の音程が一定とは限らない。そこで、このように鍵盤の幅によって音高間の飛び飛びな音程をわかりやすくしている。これは、ギターなどのフレットがある弦楽器において、フレットの位置を柔軟に変更するような操作に対応する。実際にフレットの位置を変えるにはギターそのものを作り直す必要があるが、ソフトウェア上でならその必要はない。

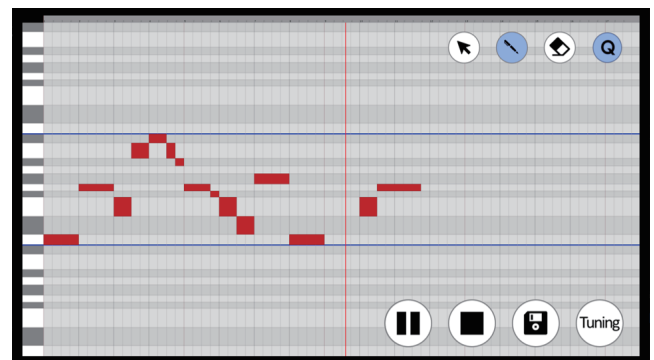


図 3 ピアノロールを模したメロディ打ち込みインタフェース（各鍵盤は音程に応じて異なる高さを持つ）

多くの楽器で、音程の間隔は半音で統一されている。演奏技法などで半音以外の音程を表現することも可能なことが多いが、基本設計は半音の音程間隔であることが多い。音程間隔が半音単位だという前提の下でなら鍵盤の幅は一定でも差支えないが、微分音を導入して音程間隔が不規則となるような音律の場合には、鍵盤の幅が音の高さを直感的に理解する上で重要な要素となる。この鍵盤の表現により、ユーザはフレットレスギターやバイオリンを演奏するのと同じように左に行くほど低い音、右に行くほど高い音が出るという前提の下で演奏することができる。これにより generalized keyboard などと比べてより直感的に音を扱うことができる。

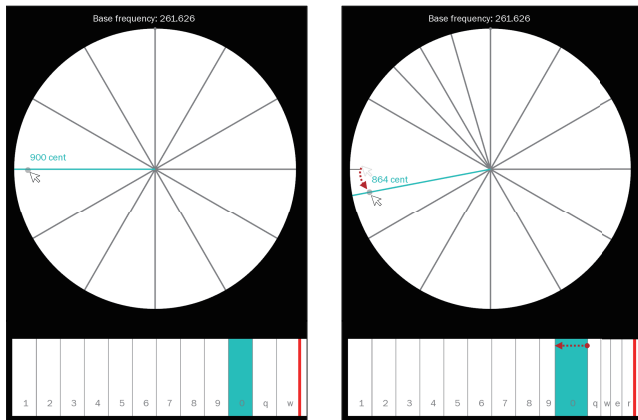


図 4 テンプレートの音律のカスタマイズ（12 平均律にいくつか音を追加し、音高を編集する例。鍵盤幅は音程に応じて変化）

4.2 ピアノロールを拡張したメロディ打ち込み インタフェース

音律が決まったら、インタフェース右上⑤のピアノロールボタンをクリックすることで、メロディ打ち込みインタフェースに切り替えられる。メロディ打ち込みインタフェースのスクリーンショットを図 3 に示す。

図 3 のインタフェースは、一般的なピアノロールと同様のデザインで、上下方向がピッチに、左右の方向が時間（小節）に対応している。従来のピアノロールとの見た目の違いはユーザが自由に音律を設定できるという点のみであるため、ピアノロールを使ったことがあるユーザであればすぐに使いこなすことができるようになっている。ここで、12 平均律に縛られていない状況ではピアノの鍵盤のような白鍵と黒鍵の違いに意味はなくなるため、本インタフェースにおける明るい鍵盤と暗い鍵盤の違いは、上下の鍵盤の違いを見分けやすくするためだけにある。

現在の実装では、提案インタフェースで打ち込んだメロディを再生するための音として 2 種類の音色が実装されている。一つはサイン波の音、もう一つは矩形波の音である。音色の種類は音楽制作において重要な要素であるが、この点については今後、外部音源を読み込めるような実装とすることで拡張できると考えている。

4.3 音律の再カスタマイズ

図 3 のメロディ打ち込みインタフェースの右下の Tuning ボタンをクリックすることで、音律作成インタフェースに戻ることができる。これにより、メロディの編集途中であっても再度音律をカスタマイズできる。

図 4 に音律作成インタフェースで 12 平均律の構成音の一部の音高を編集してオリジナルの音律を作成している例を示す。図 4 のように、オクターブを表す円を分割する直線を一本を動かすことで、該当する音に割り当てられた周波数を変更できる。また、直線を追加したり、削除したりすることで 1 オクターブあたりの鍵盤数も変更できる。

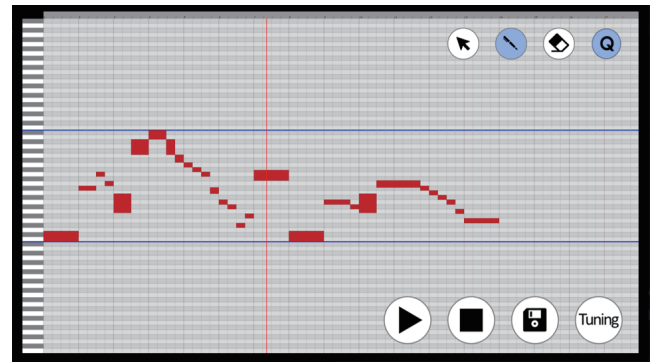


図 5 複数の音律を混合させたメロディの入力例

一般的な楽器のチューニングでは、A4 の音の周波数を 440Hz もしくは 442Hz にし、それを基準に他の音の高さを調節する。一方で、1 オクターブあたりの鍵盤数を固定しない状態でのチューニングについて考えると、A4 の周波数を基準とするよりも、オクターブ内で最も低い音を基準としてその他の音の周波数を決めた方が都合が良い。1 オクターブの鍵盤数を極端に少なくする場合を考えると、必ずしもその音律に A4 の音が含まれるとは限らないためである。そこで、本インタフェースではオクターブ内で最も低い音（12 平均律における C の音）の周波数を基準周波数として、その他の音の周波数をセント単位で設定できるように実装している。基準周波数は円状のインタフェースとは別に用意されているスライダーで調整できる。

4.4 一つのメロディへの複数の音律の適用

音律作成インタフェースとメロディ打ち込みインタフェースとの間の行き来の回数には制限がなく、ユーザが好きなだけ音律を変更しながらメロディを編集できる。これを利用することで、提案インタフェースの特徴的な機能である複数の音律の混合が実現する。音楽において、一曲内に複数の調を展開する転調の概念は一般的である。それと同様に、本インタフェースでは一曲内に複数の音律を展開することも可能となる。例えば、メロディの前半を 12 平均律で作成し、後半を 17 平均律で作成するといったことも可能となり、このような選択肢が与えられることで、作成可能なメロディのバリエーションは膨大なものとなる。

図 5 には、カスタマイズしたオリジナルの音律によるメロディ（図 3 のメロディ）の合間に 24 平均律によるメロディを挿入した際のメロディ打ち込みインタフェースの画面を示す。このように、メロディの制作途中であっても柔軟に音律のカスタマイズができるため、一音単位で自由な高さの音を採用することができる。つまり、音律の編集を通じて初期試行で実装したピッチ方向に自由な高さで入力可能なピアノロール（図 1 右）と同様の自由度を再現できる。メロディ制作時に、作曲者が意図的に音を外したいと考えることがあるが、12 平均律の枠内で作曲する場合、音

を外す際の選択肢は数種類に絞られている。一方で、提案インタフェースであれば、外す音を周波数レベルでデザインできるため、多様な選択肢を提供可能である。

4.5 外部音声ファイルからの音律の生成

音律作成インタフェースを用いた音律の作成は、円上を数回クリックする操作だけで比較的簡単に実現可能ではあるが、音楽を制作することを考えたときに、聴き心地が良い音律や違和感の少ない音律というものは簡単に作れるものとは言い難い。12 平均律が定着するまでに様々な音律の変遷の歴史があったことを考えると音律の作成という行為自体は簡単なものではない。用意されたテンプレートを基に音律のカスタマイズを行えば、音の響きに問題が少ない音律は作りやすいが、その場合には音律のオリジナリティの方が犠牲となってしまう。音律作成の難しさとオリジナリティとのトレードオフの問題に対応するために、本インタフェースに外部音声ファイルからの音律の生成機能を実装した。これは、既存の外部音声ファイルをインポートすることで音律を自動的に作成する機能で、図 2⑥の load sound ボタンをクリックすることで使用できる。

日常の音を音楽の一部として取り入れるサンプリングという表現手法は一般的であるが、提案インタフェースでは日常の音に含まれる周波数を基に音律を作成する機能である。例として、鳥の鳴き声の音声ファイルをインポートすることで、鳥の鳴き声に含まれる周波数の音が割り当てられた鍵盤をデザインできる。

鳥の鳴き声の周波数が 12 平均律に含まれる周波数とずれていても不快に思うことはない。このことから、鳥の鳴き声や波の音などの日常のありふれた音は音楽の一部、とりわけ音律として採用することも可能なのではないかと考え、日常の音を積極的に音楽に昇華する方法として外部音声ファイルからの音律生成機能を実装した。実際にこの機能で生成された音律が音楽的に良い音律となるかどうかはその音律がどのように使用されるかによると考えられるが、0 から音律を作成するよりも明確なイメージを持った上で音律が作成できるようになる機能であると考えている。

図 6 に鶏の鳴き声の音声ファイルをインポートして音律を生成した例を示す。円状インタフェースの背景に表示されている薄い赤色の線は、音声のスペクトルを示しており、この例では上位 7 つのピークの周波数を鍵盤に割り当てる音として採用している。このスペクトルのピークを参考に、ユーザがさらに音の数を増やしたり、逆に気に入らない音を別のピークの方向へ動かすといったこともできる。この機能では、音声ファイル全体のスペクトルを算出して支配的な周波数を選択する方法を取っているため、短い音声ファイルをインポートすることを想定している、

音声データには多様な高さの音が含まれていることが多く、そのままでは構成音が 1 オクターブの範囲内に収まら

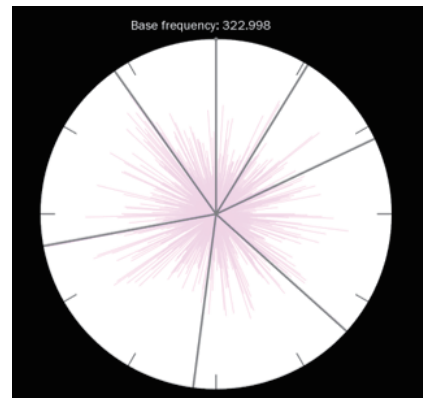


図 6 外部音声ファイルからの音律の生成（薄い赤色の線はインポートされた音声データのスペクトルを表す）

ないことが多い。そこで、生成される音律が 1 オクターブの範囲内に収まるような処理を施す。具体的な手順としては、まず、200 から 600Hz の範囲内で最も支配的なスペクトルのピークを探し、その周波数を基準周波数として設定し、基準周波数の値からその 2 倍の周波数までの範囲を 1 オクターブの範囲とする。音声データに含まれるスペクトルのピークで、オクターブの範囲外にあるものについては、オクターブ等価性を利用して範囲外の音の周波数に対して 2 の累乗をかけて範囲内に収めるような処理を施す。上記の処理により、実際には 700Hz の高さのピークの音が 350Hz の音に変換される。これにより、基準となる音の倍音がそのまま採用されてしまうことなどがあるため、すでに採用された周波数に近い音になってしまうピークは採用しないようにするフィルタリング処理も加えている。

5. 提案インタフェースで作成した音律の例

表 1 に、提案インタフェースで作成されたいくつかの音律の例を示す。ID1 から 4 の音律（ID2 はスケール）はテンプレートの読み込みで作成されたものである。提案インタフェースの最も単純な使用法は用意されたテンプレートを選択し、それをそのまま使用するというものである。または、テンプレートの音律を自分好みにチューニングすることもでき、これは楽器のチューニングに対応する操作と言える。12 平均律のテンプレートをそのまま使用する場合、提案インタフェースは従来のピアノロールと同等となる。

ID5, 6 の音律は、提案インタフェースの円上をランダムにクリックすることで作成した音律である。このような音律を使って聴くに堪えうるメロディが作れるかどうかはそのユーザ次第となる。メロディ制作時になかなかうまくメロディが作れない場合には、音律の方を改善したりといった作業もできる。このようなメロディと音律に関する試行錯誤を繰り返すことで、メロディの独自性とオリジナリティを追求可能である。試行錯誤の繰り返しにより、1 オクターブ内の音数は増加していくことが予想される。しかし、提案インタフェースには音数の制限がないため、ユー

表 1 提案インタフェースで作成した音律の例

ID	音律	音律を構成する周波数 [Hz]
1	12 平均律	[261.63, 277.18, 293.67, 311.13, 329.63, 349.23, 369.99, 392.00, 415.31, 440.00, 466.16, 493.88]
2	C メジャーペンタトニック	[261.63, 293.67, 329.63, 392.00, 440.00]
3	純正律	[261.63, 279.07, 294.33, 313.96, 327.04, 348.84, 370.64, 392.45, 418.60, 436.05, 470.93, 490.56]
4	24 平均律	[261.63, 269.29, 277.18, 285.31, 293.66, 302.27, 311.13, 320.24, 329.63, 339.28, 349.23, 359.45, 369.99, 380.84, 392.00, 403.48, 415.31, 427.47, 440.00, 452.89, 466.16, 479.82, 493.88, 508.36]
5	ランダムな 5 音 による音律 (2 種類)	[261.63, 290.81, 362.37, 419.01, 473.63], [301.88, 331.39, 393.37, 464.32, 539.25]
6	ランダムな 12 音 による音律 (2 種類)	[288.06, 310.53, 323.34, 338.66, 362.94, 392.49, 406.08, 426.86, 464.17, 497.83, 517.09, 550.42], [261.63, 274.87, 285.51, 297.45, 313.34, 321.20, 343.34, 394.58, 421.05, 476.53, 494.03, 511.49]
7	鶏の鳴き声から生成した 7 音	[341.30, 423.10, 506.52, 540.17, 580.01, 629.65, 681.66]
8	波音から生成した 7 音	[323.00, 343.19, 365.71, 416.46, 463.43, 532.34, 603.61]

ザが納得いくまで 1 オクターブあたりの鍵盤の数を増やしていくことができる。Web アプリケーションの Leimma でも似たような音律作成インタフェースが提供されているが、Leimma ではメロディの作成や音律の再編集ができない。

ID7, 8 の音律は外部音声ファイルをインポートして生成された音律である。ID7 の音律は 2.5 秒の長さの鶏の鳴き声の音声データのスペクトルを抽出し、そのピークを基に生成された音律である。ID8 は、1.5 秒の長さの波音の音声データから生成された音律である。ここでは、それぞれ 7 つのピーク情報を使って音律を生成したが、インタフェース上にスペクトルが可視化されているため、ユーザが好みに応じてピークの位置にさらに鍵盤を追加することも容易である。

表 1 に示した音律は、あくまでも提案インタフェースで作成した音律の一部の例に過ぎず、提案インタフェースを用いることでユーザは自由に音律をデザインできる。同様に、ユーザはメロディ打ち込みインタフェースで、自由にメロディも入力できる。これにより、従来の 12 平均律の制約から外れた自由な音楽の制作が実現できると考えている。

6. メロディに関する主観評価実験

本章では、提案インタフェースで作成した音律を使って制作したメロディに対する主観評価実験を行った。理想的には、実際にインタフェースを使ってもらった際のユーザビリティや表現力の向上等に関する評価を行うべきだが、インタフェースの完成度を上げる作業に先駆けた初期評価としてメロディがどれほど聴くに堪えるものかを評価した。

従来のピアノロールでメロディを制作する場合であっても、良いメロディも作れば悪いメロディも作れる。これらはすべてユーザの創造性に委ねられる部分であるが、基本的な出力音が不快な音や違和感を感じる音であれば、メロディに対する不快感や違和感も生じやすくなってしまうことが懸念される。そこで本稿では表 1 に示した音律（従

来の 12 平均律を含む 8 種類）を使用して複数のメロディを制作し、それらを聴いた時に被験者が違和感を感じるかどうかを評価する。評価にあたって音律間の公平性を保つため、メロディについては乱数を使ってランダムに生成した。そのため、12 平均律のメロディであっても通常は使用されない音の並びも含まれる状況での評価となっている。

ここでメロディの評価は、メロディの良し悪しではなく、聴いた時に違和感を感じるか否かという点のみに焦点を絞って行った。もしも、12 平均律以外の音律の上に生成されたメロディに対する評価と、12 平均律のメロディに対する評価との間に顕著な差がない場合には、良いメロディを作る潜在的な可能性がある音律だと期待できる。ただし、この評価結果から良いメロディを作れることが保証されるわけではなく、音律によってもたらされる違和感についての評価のみが行われるもので、良いメロディを作ることができるか否かはユーザに委ねられるという点に注意されたい。

6.1 実験条件

6.1.1 評価対象

主観評価実験では、表 1 の 8 種類の音律を用いてランダムに生成されたメロディ（各音律 2 種類のメロディ、計 16 メロディ）を対象として評価を行った。ID5 と 6 の音律については、それぞれの音律で 1 メロディずつ生成することで、実験に用いられた音律が偶然良かった（悪かった）可能性をなるべく抑えられるようにした。各音律 2 種類のランダムなメロディを生成している理由も、評価対象のメロディが偶然違和感がなかった（あった）という可能性を抑えるためである。被験者にはランダムに生成されたメロディを聴いてもらい、それぞれのメロディに違和感を感じたかどうかを三段階で評価してもらった。

評価対象のメロディは、すべて四分音符のみで構成される四拍子四小節分（計 16 音）の BPM120 のメロディとした。ID5 と 6 以外の音律についてはそれぞれの音律で 2 種類のメロディを生成し、ID5 と 6 の音律については一つの

音律につき一つのメロディを生成した。ランダムに生成された 16 音からなるメロディには、休符は含まれず、ID4 の 24 平均律のように音数が多い音律の場合にはまったく使用されなかった音も存在した。

ID1 から 3 の音律（及びスケール）は、十分に確立された音律であり、多くの音楽家によって頻繁に使用されている。特に ID2 の C メジャーペンタトニックスケールは、ヨナ抜き音階と呼ばれることもある有名な音階であり、この構成音はランダムに鳴らしても比較的聴き心地の良いメロディとなりやすい。ID4 の 24 平均律は、微分音を含む音律ではあるが、12 平均律に四分音の音程が追加された音律となっており、その構成音の半分は 12 平均律にも含まれている。

ID5 から 8 の音律は、提案インタフェースによって生成されたオリジナルの音律である。ただし、これらの音律は手で丁寧にデザインされた音律ではなく、ID5 と 6 については、音律作成インタフェースの円上をランダムに複数回クリックすることで作成された音律である。ID7 と 8 の音律についても、外部音声ファイルを使って生成された音律をそのまま使用しており、違和感が軽減するような構成音の調整（チューニング）は一切行わずに使用している。これは言うなれば、手作りの弦楽器を一切チューニングせずに演奏するような状態に近いものである。

6.1.2 評価方法

11 名の被験者（18-22 歳の男女）に生成された 16 種類のメロディを聴いてもらい評価してもらった。メロディの評価は違和感のみを焦点とし、各メロディに対し「1：違和感があった」、「2：どちらとも言えない」、「3：違和感はない」の三段階で主観評価してもらった。評価値が高いほどメロディに対して感じられた違和感が少なかったことを意味する。評価に先立って、被験者には相対音感や絶対音感があるかどうかを申告してもらった。その結果、11 名の被験者の中には絶対音感を持つ被験者はおらず、2 名が相対音感を持っていた。

従来の音律を含む ID1 から 4 の音律を使って生成されたメロディと、提案インタフェースで作られた ID5 から 8 の音律を使って生成されたメロディの評価値を比較することで、提案インタフェースを使って作られたメロディは従来のメロディに比べてどれほど違和感を感じられるものなのかを評価する。

6.2 評価結果

主観評価実験の結果を表 2 に示す。評価対象となった 8 種の音律の中で、C メジャーペンタトニックスケールを使って生成されたメロディが最も高い評価値を得て、誰からほとんど違和感を感じられないという結果となった。これは当然の結果とも言え、C メジャーペンタトニックスケールの構成音はランダムに並べられたとしてもメロディ

表 2 評価結果

音律 (ID)	評価値 の平均 (1 - 3)	評価値の 平均 (相対 音感あり)	評価値の 平均 (相対 音感なし)
1	2.55	2.25	2.61
2	2.77	3.00	2.72
3	2.18	2.25	1.78
4	1.86	2.25	2.28
5	2.23	2.00	2.28
6	2.00	2.00	2.00
7	2.23	2.00	2.28
8	1.77	2.00	1.72
1 - 4 の平均	2.34	2.44	2.32
5 - 8 の平均	2.06	2.00	2.07

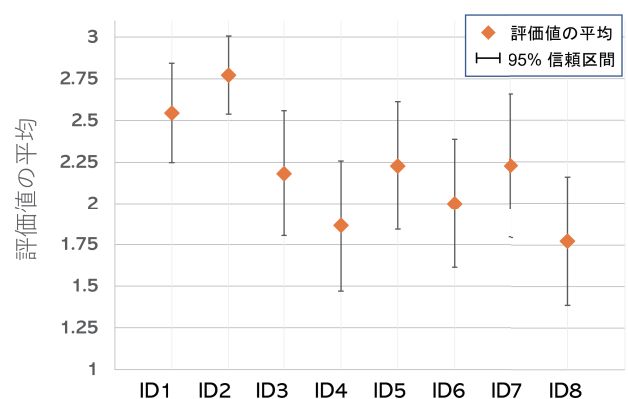


図 7 主観評価実験の評価値の平均と 95%信頼区間

として成立しやすいことを示している。五音音階であり、不協和の関係にある音が含まれないこともこのような評価結果に繋がったと考えられる。

本評価実験において最も重要な点は、12 平均律に対する評価と比べてその他の音律に対する評価が、どの程度の違和感を感じられるのかという点である。12 平均律は我々が長く慣れ親しんできた音律であり、多くの被験者がその構成音の周波数に馴染みが深いと考えられるからである。

それぞれの音律を使って生成されたメロディに対する評価値の間で有意差検定を行ったところ、ID8 の音律以外の音律については、12 平均律 (ID1) のメロディの評価値との間に有意な差はなかったという結果となった。主観評価実験の結果得られた評価値の平均と有意差検定の結果の 95% 信頼区間を示したグラフを図 7 に示す。この結果、ID2 の C メジャーペンタトニックスケールを除外して考えると、ID1 の 12 平均律と ID8 の波音から生成された音律の評価値の間にだけ有意水準 5% で有意差があった。さらに、ID3 の純正律や ID4 の 24 平均律と、ID4 から 8 の音律の評価結果の間には顕著な差がないことがわかる。この結果から、どの音律もメロディ制作時の創意工夫によって、あまり違和感を感じられないようなメロディを作ることができる可能性を秘めていると考えられる。ただし、ID8 の音律のよ

うに、違和感を感じるという評価が比較的多かった音律もあり、そのような場合には、チューニングによって違和感を感じづらいような音律に修正していくことも可能であると考えられる。例えば、基準周波数のみを外部音声ファイルから決定して、残りの構成音をペンタトニックスケールのルールに則て決めるなどの方法でより違和感を感じられない音律を作ることができると考えられる。

また、限られた被験者に関するデータではあるが、相対音感が評価結果に及ぼす影響はほとんどなかった。絶対音感を持つ被験者はいなかったことから、その点については評価できなかったが、微分音に対する違和感は絶対音感を持つ人に顕著に現れるのではないかと予想している。

本評価実験は、限られた評価対象の音律と、さらに限られたメロディのサンプルに対して主観的に評価されたものである。さらに、インタフェースそのものの評価ではなくランダムに生成されたメロディの評価に留まっている。つまり、本研究における本質的な評価実験とはなっていないことには注意されたい。提案インタフェースのユーザビリティや表現力の向上に寄与するかどうかなどの点についての評価は今後の課題である。この点については、DAWソフトウェアの操作の習熟度や慣れなども大きく関わってくるものであり、被験者の選定やタスクの設定が難しく、その評価方法については今後検討していきたい。

どのようなツールでも、ユーザの創意工夫によって創造性に溢れる作品を生み出す潜在的な可能性を秘めていると考えられ、今後、作曲支援の可能性とその影響についても検討していきたい。特に、新たに提案されたツールを従来の枠（今回の場合は従来の音律）の中で評価することはできないため、新たな評価方法についても検討していく予定である。

7. 議論

本稿では、ユーザが自由に音律をデザインした音律を使ってメロディを制作可能なピアノロールの拡張にあたるインタフェースを提案した。音律という概念は長い間特に西洋音楽において固定された状態で使われており、ユーザがそれに抗う手段はチューニングなどの限られた方法のみであった。楽器そのものをデザインしなおすことは容易ではなく、1オクターブが12個の音で構成されているという状況を打破することは、多くの楽器では叶わなかった。1オクターブあたり12個の音で作られる音律の解像度は低いとはいき切れないが、少なくとも既存の音律から作られるメロディ同士が部分的に似てしまうことは珍しくない。より解像度の高い1オクターブの分割が新鮮なメロディを作るための手軽な方法だとも考えられ、提案インタフェースではより高解像度な音律もより低解像度な音律もどちらもカバーしたようなピアノロールの拡張を実現している。

12平均律はこれまでの音楽の歴史で最も多くの曲が作ら

れた音律である。とはいえ、12平均律の歴史も音楽全体の歴史から見れば浅く、西洋音楽以外、特にアジアやアラブの音楽では他の音律が使われてきた。さらに、現代音楽では微分音を含む12平均律外の音律が重要な役割を担うことも多い。実際に、近年の音楽には脱西洋音楽の動きも見られる。Ableton社のDAWソフトであるLiveのプラグインとして2022年3月にはMicrotuner^{*6}という微分音を使用可能な機能が発表された。これらの事例は、12平均律以外にも魅力的な音律が存在しうることを示唆する好例である。新しい音律の探求は新しい音楽の探求にも繋がるものと期待している。

Helmholtzによる音の不協和度によると[10]、12平均律の構成音は必ずしも不協和度が低い音だけで構成されているわけではない。隣り合う音同士を同時に鳴らした際に生じる不協和は大きく、不協和度という観点のみに重きを置くのであれば12平均律よりも純正律の方が良い響きの音による音律であると言える。それに対して、簡単に転調できるなどの理由から12平均律が現在最も一般的な音律となっている。これらの事実から、音律というものはもっと自由かつ柔軟に定義されてもいいのではないかと考えている。

音律は楽器のデザインに影響を与えるため、物理的な楽器で音楽を演奏することを考えると音律が変わる状況は受け入れづらい。一方で物理的な楽器の制約がないコンピュータによる音楽制作においては12平均律に必要以上に縛られることはないと考えられる。しかし、バイオリンのような本来音律の縛りがなければの楽器でさえも、ピアノロールにより無理やり12平均律に縛られてしまっているケースが見受けられる。コンピュータ音楽において12平均律の制約を緩めるためにはピアノロールの再デザインは必要なことだと考えられる。本稿ではピアノロールの拡張という形でそれを提案している。将来的には、コンピュータによる音楽制作において誰もが自由にオリジナルの音律をデザインし、それらの事例が集まることでさらに良い音律が生まれてくるような未来を期待している。

12平均律以外の音律の音は多くの場合聴き馴染みのない音である。これは単純に慣れの問題であり、12平均律以外の音律の音に触れる機会が増えれば、12平均律同様に感じられる可能性は期待できる。このためには12平均律外の音楽の総量が増える必要があり、本インタフェースはそのための一歩として提案している。そのために今後提案インタフェースのVSTプラグイン化を検討している。

新しい音律には、従来のよく知られた音楽理論がほとんどの場合適用できない。そのため、初めて触れる音律における音楽制作支援技術が必要となると考えられ、これについても今後の研究課題である。

^{*6} <https://www.ableton.com/ja/packs/microtuner/>

現状では、本インタフェースの対象はメロディのみであり、伴奏については検討していない。音楽制作について考える場合には、伴奏や和音、調などについての検討も不可欠であり、それらも今後の課題である。音律が変わるということは、それらの音楽的な要素の多くも変わることであり、メロディだけでは不十分である。メロディを足がかりに、今後、様々な音楽要素についても検討の幅を広げていきたい。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K20301 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Narushima, T.: *Microtonality and the tuning systems of Erv Wilson*, Routledge (2017).
- [2] Bailey, N. J., Cremel, T. and South, A.: Using Acoustic Modelling to Design and Print a Microtonal Clarinet, *Proceedings of the 9th Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM14), Berlin, Germany*, pp. 4–6 (2014).
- [3] Dabin, M., Narushima, T., Beirne, S. T., Ritz, C. H. and Grady, K.: 3d Modelling and Printing of Microtonal Flutes (2016).
- [4] Schneider, J.: The Microtonal Guitars of Harry Partch, *Soundboard Scholar*, Vol. 1, No. 1, p. 5 (2015).
- [5] Sethares, W. A.: Adaptive tunings for musical scales, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 96, No. 1, pp. 10–18 (1994).
- [6] Bailes, F., Dean, R. T. and Broughton, M. C.: How different are our perceptions of equal-tempered and microtonal intervals? A behavioural and EEG survey, *PloS one*, Vol. 10, No. 8, p. e0135082 (2015).
- [7] Balzano, G. J.: The Group-Theoretic Description of 12-Fold and Microtonal Pitch Systems, *Computer Music Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 66–84 (online), available from <http://www.jstor.org/stable/3679467> (1980).
- [8] Keislar, D.: History and Principles of Microtonal Keyboards, *Computer Music Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 18–28 (online), available from <http://www.jstor.org/stable/3680175> (1987).
- [9] Manuel Op De Coul: Scala. <https://www.huygens-fokker.org/scala/>.
- [10] Helmholtz, H. L.: *On the Sensations of Tone*, Dover, New York (1954).