

# マイコンを用いた電子楽器開発記①

## ～「無弦チェロ」の開発～

ものづくり大学 三井 実

### 1. はじめに

#### 1.1 最近の電子楽器事情とその特徴

1919年、ロシアのレフ・セルゲーエヴィチ・テルミン博士が世界初の電子楽器「テルミン」を発明した。1960年代になるとアナログシンセサイザが普及し始めた。これは発振器から作られた正弦波状の波形を変形したり、音量をコントロールしたり、複数の波形を重ね合わしたりする機能を有したものであった。1980年代になるとデジタルシンセサイザが普及し、今や電子楽器は音楽には無くてはならないものになっている。

近年、電子回路技術や、筐体設計・成形技術などのさらなる発展・一般化により、様々な電子楽器が次々と市販されるようになった<sup>[1-6]</sup>。以降に代表的なものを列記する。管楽器を電子楽器化したAKAI社製の「EWI (Electronic Wind Instrument)」<sup>[1]</sup>や、パーカッションや打楽器を電子楽器化したKORG社製の「WAVEDRUM」<sup>[2]</sup>、アコーディオンを電子楽器化したROLAND社製の「V-Accordion」<sup>[3]</sup>、さらにチェロを電子楽器化したYAMAHA社製の「サイレントチェロ」<sup>[4]</sup>や「サイレントバイオリン」<sup>[5]</sup>などは、元の楽器の演奏感とほぼ同一の動作で楽器演奏が可能である。これらはいずれも電子楽器であるゆえに、ヘッドホンから出音して静かに演奏・練習でき、簡単に音量の調整が可能である。さらに簡単に楽器の音色を変えられること、言い換えれば、元の楽器とは違う音を出せるという機能も有している。これらはアコースティック楽器（電気的な増幅

なしに演奏される楽器）に比べて大変便利な特長である。さらに録音について、アコースティック楽器はマイクを立てないと録音できないが、電子楽器は信号ラインの出力を録音機やアンプに接続すれば簡単に音を録ることができるため、レコーディングも簡単に行える。

また、パッドにより演奏を行うKORG社製の「KAOSSILATOR」<sup>[6]</sup>や、宇田道信氏が発明・開発した円筒を音階を選びながら演奏する「電子楽器ウダー」<sup>[7]</sup>、オタマジャクシをモチーフとしたデザインの明和電機「オタマトーン」<sup>[8]</sup>は、新たな操作感や新しいデザインなどの観点から、電子楽器の可能性を広げる新しい楽器ともいえる。

以上をまとめると、電子楽器の特長として、音量の調整が簡単に出来ること、音色を簡単に変化させることが出来ること、録音・再生システムの構成が簡便であること、新しい方式や操作性を有した楽器創成の可能性が高いことなどが挙げられる。

#### 1.2 電子楽器の本質とは？

そもそも楽器とは何であるか、辞書（大辞林）で調べてみると「音楽を演奏するために用いる器具」とある。さらに今流行のwikipediaでも調べてみると「音楽の素材としての音を発するための道具の総称」や「音楽に使用される音を出す器具」と載っている。いずれも楽器についての説明は、ほぼ同一であることがわかる。しかしながら、本質の理解のためには、もう少し掘り下げたい。図1に楽器のシステム図を示す。

図1よりシステムの中身をピアノ（もしくは他の



図1 楽器のシステム図

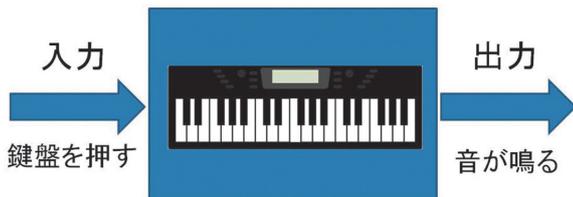


図2 シンセサイザのシステム図

楽器) とすると、入力は“鍵盤を押す”という人間の動作と見なすことができ、出力は音を発生させるシステムとして描ける。すなわち楽器とは「人間の何らかの動作を音に変換する器具」と理解出来る。

では、電子楽器をシステム図で理解するとどうであろう。図2にシンセサイザのシステム図を示す。図1と見比べると、電子楽器をシステムとしたときの、入力である“鍵盤を押す”動作も、出力である“音が鳴る”現象もピアノの場合と同一である。アコースティック楽器と電子楽器の大きな違いは、人間の何らかの動作を音に変換する仕組みに電子回路を用いている点である。したがって、“電子楽器とは何であろう？”という問に対しての本質的な答えは“人間の何らかの動作を電子回路により音へ変換する器具”と言うことができる。

### 1.3 誰でも新楽器創成時代

近年、Makerムーブメント<sup>[9]</sup>のおかげもあり、マイコンや各種センサが非常に安価に、かつ、簡単に入手できるようになった。さらに、マイコンやセンサの使い方を学習しようと思えば、それについて書かれた書籍や、インターネット上の記事などにも簡単に触れることが出来る時代になった。また、FabLab<sup>[10]</sup>や各種FAB工房<sup>[11]</sup>などの流行により、3Dプリンタや、NCルータ、レーザーカッターなどのいわゆるデスクトップファブリケーションが使用

できる環境が整い、筐体設計や製作に関わる技術も一般的になった。前節で述べたように、“人間の何らかの動作を電子回路により音に変換すれば”電子楽器になるわけなので、発想さえあれば、誰でも新しい電子楽器を開発・発明する機会を持っている時代が到来したのだと言える。

そこで今後、小生研究室にて開発してきた新しい電子楽器の開発、製作について連載していく。その中でまず第1回目として、2012年から開発され始め2015年にある程度完成の域に達した、弦の無いチェロの電子楽器である「無弦チェロ」を紹介したい。

## 2. 無弦チェロ開発の背景

### 2.1 チェロとは

チェロ（英名：Cello, Violoncello）とはヴァイオリン属の擦弦楽器である。楽器に張られた4本の弦に対して松脂を付着させた弓で擦り、弦を振動させ音を発生させる楽器である。弦の振動は駒によってボディに伝えられ増幅される。音域が広く、演奏者の技術次第では5オクターブ以上出すことが可能であるため楽曲の中で様々な役回りを演じられる楽器である。オーケストラや弦楽五重奏などでは低音部を担うことが多いが、ソロ楽器としても活躍することも多く、協奏曲やソナタが多数作曲されている。

演奏方法は図3のように楽器を支えるためのエンドピンを床に突き立て、両ひざの間に胴の部分を含みボディ裏上部を胸に当て安定させる。エンドピンには演奏時に楽器を支える役割の他に、床に振動を伝え共振させることで音量の増大や響きを豊かにする役目も担っている。

### 2.2 チェロの問題点

人気のあるチェロではあるが、演奏人口はいまだ少なくその数は伸び悩んでいる。またせっかく始めても続けられずやめてしまう人も多い。演奏団体にチェロを募集しているといった話をたびたび耳にする。それはチェロが演奏者にとって不便な点が多く、負担の大きい楽器であるためと考えられる。問題として以下の3点が挙げられる。



図3 チェロの演奏姿勢

- ・大きく重いことから携帯性や保管性が悪い
- ・音量が大きく低周波の振動も伴うため演奏環境が制限される
- ・楽器購入、調整、弦交換などの維持のためのコストが高い

まず携帯性における欠点について詳細を説明する。大きさは楽器本体では全長約1250mm、FRP（繊維強化樹脂）製のケースに入れるとなると約1300mmと楽器としてはかなり大型である。また重さは個体差があるものの楽器本体で約5kg、さらに

約5kgのFRPケースに入れて運搬となると合わせて10kgほどの重量になる。人が背負って持ち運ぶのが大変であるのはもちろん、車や公共交通機関での移動も容易ではない。まして航空機で移動する場合に至っては通常の手荷物として持ち込めず、また楽器の安全上貨物としても預けられないため、多くの場合別途1席分の料金を支払いその席に楽器を固定する必要が生じる。また保管に関しても、大きなスペースを必要とするだけでなく、楽器が木製で温度・湿度変化や紫外線に弱いため専用の場所を用意しなければならない。以上を鑑みると演奏者にとって負担が大きい。

次に演奏環境の問題点について詳細を述べる。チェロの音量は非常に大きく約85dBと言われており、これはギターをかき鳴らしたときやピアノの音量に匹敵する。さらにエンドピンによって引き起こされる床や建物の共振も大きな問題となるため、周囲への騒音や振動が憚られる場所（マンションや集合住宅など）では練習することが非常に困難である。また椅子に座り演奏する楽器であるため専用の椅子が必要であったり、弓を扱うためその椅子を中心に半径1メートルは障害物のないスペースが必要であったりとやはり演奏者にとって負担である。

最後に維持費が高い点について述べる。チェロを始めるにあたり、楽器本体は入門用ならば最低でも20万円、標準的な価格として80万円ほどかかってしまう。弓は別途購入する必要がある、初心者用であっても数万円から数十万円の決して安価でない価格帯で市販されている。また楽器に付随して必要な楽器ケースや松脂、エンドピン削り用のやすり、クロスやチューナーなども用意しなければならない。

演奏に必要な一式を揃えた後も消耗部品の交換やメンテナンスが必要である。弦は1本5千円～1万円程度で半年に1回は換えるべきと言われ、弓の毛替えは1回約1万円でこちらも半年に1回は換えるべきとされている。また弦と楽器との関係はかなり微妙なバランスで保たれているため良い響きを保つためには楽器店へ定期的なメンテナンスに出すことが推奨される。以上よりチェロの維持のためだけに必要なコストは、初期コストを除いても年間約10万円は

みるべきだと言われており、コストの点でも演奏者の大きな負担となっている。

以上のように、始めるには敷居が高く、続けにくいと挫折してしまう人も多い。実際チェロの演奏者数はあまり多いわけではなくチェリスト不足を訴える演奏団体も少なくない。また演奏者が少ないことにより起こる二次的な問題として、楽器や部品（弦など）の市場ニーズも小さいため価格が下がりにくい。またチェロを習うための教室も開かれにくく、特に地方では十分な教養が期待できない。こうして更に演奏者の負担は増え、チェロの演奏人口数の伸び悩みを解消することは難しくなってしまう。

### 2.3 従来品による問題解決方法

チェロの問題点を解決するために考案された商品はすでに開発され市販されている。代表的な例として「ミュート」と「エレキチェロ」の2つを挙げる。しかしながら、どちらも改善はするものの根本的解決には至っておらず、十分な対応策とは言い難い。そのためまずはそれら解決策の原理と効果、問題点の本質に関して考察を行った。

#### 2.3.1 ミュートによる音量減少の効果

まずミュートについて詳細を述べる。弦による振動は駒と呼ばれる木製の支柱によって楽器ボディに伝えられ共鳴させることでその響きを豊かにしている。その駒を挟み込むように取り付け振動を抑制することで音量を抑えるのがミュートである。チェロ本来の音色をある程度保ったまま音量を下げられ、また安価で着脱が手軽なため広く普及している。

しかしチェロは弦のみでも相当な音量を発生する。そのため駒の振動を軽減させるだけのミュートはその効果に対する評価は決して高くなく、実際測定すると約5~15dB減の効果しか望めない。また駒に直接取り付けるため、駒への傷や重さによる過負荷、外れた時に楽器を損傷するなどの懸念が付き纏うため使用を嫌う演奏者も多い。

#### 2.3.2 エレキチェロ

近年では共鳴板を持たないエレキチェロが登場

している。駒の部分に圧電素子を設け弦の振動を検出・修正・増幅してスピーカから発音する仕組みを持つことから、楽器の構造や発音の仕組みはエレキギターに近い。共鳴板を必要としないためコンパクトに持ち運べ、音量調整が電子的に可能なため練習用として使用される<sup>[4]</sup>。

しかしながら、弦を張っているため楽器ボディの長さや大きさは変わらず、前述のミュートと同様に弦自身の振動する音は発生してしまうため音量の抑制は十分とは言えない。また重量は約4kgとチェロと大差ないため運搬性にはやはり難がある。またチェロとしての再現性としては「別の楽器として認識した方がいい」との演奏家の評価が多く、チェロの代替とは成り得ていないようである。

### 2.4 問題点の考察

そもそもチェロは低音を含む広い音域を担う弦楽器である。弦楽器において低音を発するためには以下の3つの要素が必要となる。それは弦を長くすること、弦を太くすること、弦を張る張力を緩めることである。チェロはこれらの要素を踏まえバランスよく設計されており、人が演奏することを考えると今以上に最適化することは不可能だといわれている。しかしこれら3要素はいずれも楽器の巨大化、重量化、音量・振動の増大に寄与している。弦の長さによって楽器自体の長さも長くなり、強い張力(全体で約50kg)に耐えうるだけの強度を確保するための強靱なボディは重くなる。したがって、楽器の小規模化、軽量化は難しい。

また弦楽器は弦が振動することで音を発生し、その振動がボディに正しく伝わり全体に響くことで美しい音色を生んでいる。音量を制限するには音の元となる弦の振動を抑制するのが最適な解決方法だが、元の振動を崩してしまっただけでは美しい音色を生み出すことは難しい。楽器として最重要である美しい音色をつくるという事象と、音量を抑制するという事象はどうしても背反してしまう。

すなわち、以上のことから、発音の原理としている“弦の存在”がチェロの問題の原因であるといえる。弦楽器である現状のチェロの発音方式では2.2

節で述べた問題点の根本的な解決は難しい。

## 2.5 無弦チェロ開発のねらい

チェロの問題点を解決すべく、本研究開発<sup>[12]</sup>では演奏者を支援するため負担が少ないチェロの開発を目的とした。具体的には小型で軽く持ち運びや維持管理がしやすく、演奏する場所や時間の制限が少なく、コストが低く始めやすく続けやすい楽器の開発を目指した。またこの開発を通してチェロ演奏者数の増加を期待し、音楽業界の文化的・経済的發展にも寄与すべく、プロダクト化を視野に入れ、多くの人に親しまれるような楽器の開発を目指した。

根本的にチェロの問題を解決するには原因である弦を無くすることが最も効果的であると考えた。そこで本研究開発では、弦による発音機構を持たないチェロを開発する。弦を代替するため、演奏動作をセンサで検知、電子的に音声を生成、スピーカなどから音を出力する電子楽器としてチェロを再現するアプローチを試みた。そして、この楽器を「無弦チェロ」と名付けた。

## 3. 無弦チェロの製作

### 3.1 チェロの電子化に必要な要素

ここではチェロの電子楽器化に必要な機能的要素を挙げ、それぞれについて検討していく。まずは以下に電子チェロに必要な要素を挙げる。(図4参照)

- ・ 運指部：左手で押さえ音程を調整する
- ・ 擦弦部：右手で持つ弓を検知、音量や響きを調整
- ・ 筐体：楽器本体であり制御用回路などを内蔵する
- ・ 制御部：各センサから情報を受信し送信信号を生成する回路部分
- ・ 音源部：制御部からの信号を実際の音として出力するための部分

### 3.2 無弦チェロの設計と作成

前項で述べた要素から、無弦チェロの構成は以下のような設計指針を設定した。また以下の部分をまとめた構成を図5に示し、以降の項で詳細を説明する。

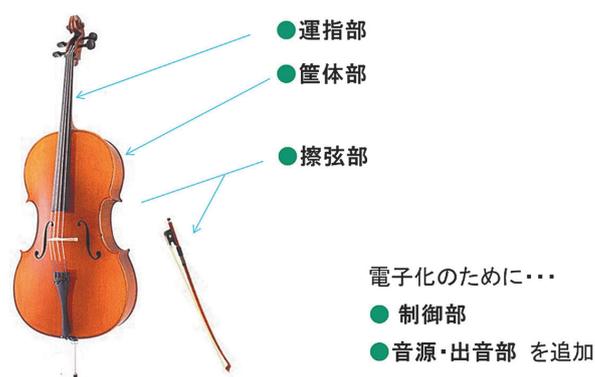


図4 チェロの電子化のために必要な部分

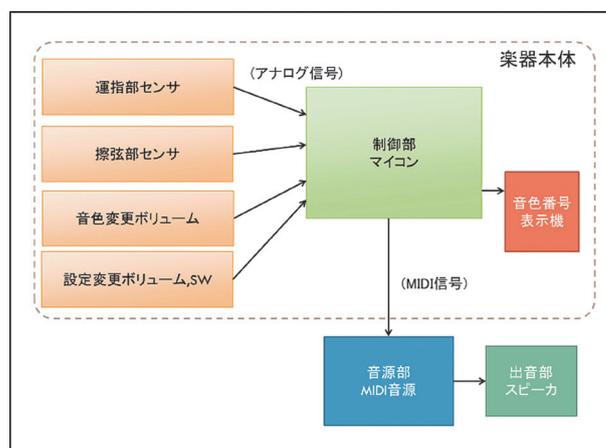


図5 無弦チェロのシステム図

#### 【擦弦部】

- ・ レバー型で各弦独立の可動板
- ・ 圧力センサを用いて弓の圧力を検知
- ・ 下方向の圧力のみを検出し試奏する

#### 【運指部】

- ・ センサを加工しより細くしたものを使用
- ・ ネックを細くし、曲面で構成して演奏性を向上

#### 【制御部】

- ・ マイコンを用いてセンサからの信号を、MIDI信号に変換しMIDI音源に出力
- ・ アナログ検出を少なくしレイテンシを抑える

#### 【筐体】

- ・ G-FRP（ガラス繊維強化樹脂）で薄く造形し容量を保ちながら軽量化
- ・ なめらかな曲面で構成する
- ・ 追加工や部品の後付けがしやすい構造にする

### 【音源部】

- ・MIDI音源を採用する
- ・外部のMIDI音源でも、内部のMIDI音源用ICでも音の出力が可能
- ・音源によって仕様が異なり音色や挙動に変化が生じることがあるため複数の音源を用意し動作を試す必要がある

#### 3.2.1 運指部の詳細

運指部は左手で弦を押さえ主に音程を調整するための部分である。「どの弦の、どこを押さえているか」を検知して連続的な情報を求められる。また、途中で引っ掛かりがない滑らかな表面で、チェロの指板長である600mm程度の長いセンサが必要とされる。そこでSparkFun社の感圧式接触位置センサ「softpot」500mmを採用した。図6に運指部の外観を示す。

また筐体のネック（指板）には接触位置センサ4本分を張り付けられるだけの幅が必要である。チェロのネックに近づけるため、センサの不必要な部分を切除し機械的限界まで幅を細く加工した。

#### 3.2.2 擦弦部の詳細

擦弦部の外観を図7に示す。擦弦部は右手に持つ

た弓で扱い、主に音量と音の響きを司る部分である。弦楽器の世界では「芸術は右手から生まれる」という言葉があるように擦弦部は重要な部分である。検知するにあたり応答性が速いこと、下方向の圧力を検知することを満たすため、圧力センサを用いた。チェロの弦を擦る位置とほぼ同一にレバー状の可動板を4つ配置しそれぞれの先に圧力センサを設け圧力を検出する擦弦センサユニットを製作し筐体に組み込んだ。ユニットはレーザーカッターで加工したアクリル材で構成されており、テコの原理で下へ押し、各弦にそれぞれセンサを配することで1弦ずつ独立して検知が行える。図8に擦弦ユニットの外観と詳細を示す。圧力センサには動作圧力が適切であること、サイズが小さいことからINTERLINKELECTRONICS社の



図6 運指部の外観

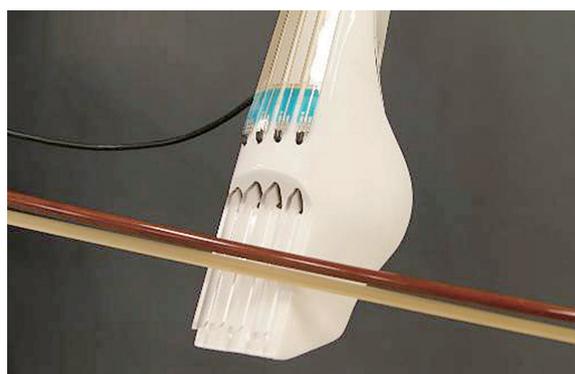


図7 擦弦部の外観図

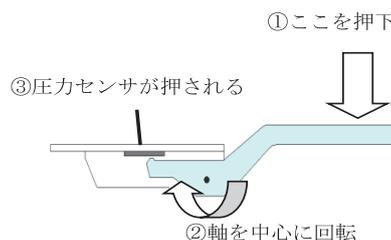
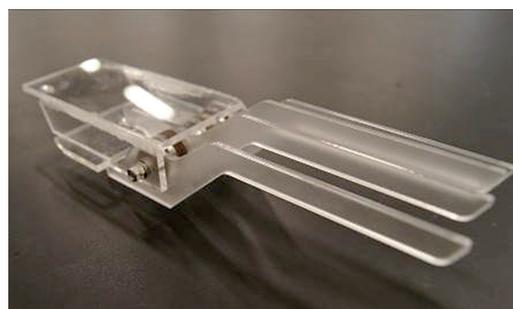


図8 擦弦部の仕組み

「FSR400SHORT」を採用した。

### 3.2.3 筐体の詳細

筐体の外観を図9に示す。筐体は指板に運指センサを取り付けられること、制御部やセンサ類を内蔵できること、蓋が開閉可能で回路のメンテナンスができること、チェロの演奏姿勢で演奏できること、それらを満たした上でできるだけ軽くコンパクトであることが求められる。さらに手に触れる部分はなめらかな曲面で、後から追加工や部品の後付けがしやすいよう平面の部分設けるといったことを考慮し設計した。材質には薄くても強度のあるG-FRPを用い、コンパクトかつ内容量を確保している。製作は以下の順番で行った。

- ① スタイロフォームとパテでマスタ型を手加工造形
- ② マスタ型を3Dスキャナーにかけ3Dデータ化
- ③ データを3DCADで設計、反転し雌型データ作成
- ④ スタイロフォームをNC加工機で雌型を削り出す
- ⑤ 削り出したパーツを組み立て、表面処理をして雌型を製作
- ⑥ 雌型にG-FRPをハンドレイアップで張り込み
- ⑦ 脱型し穴あけなど加工し、下地処理を行い塗装
- ⑧ 部品を組み付け完成

### 3.2.4 制御部の詳細

制御部では各種センサからの情報を処理し、音程や音量など音情報を判断、それをMIDI音源に送信するためにMIDI信号を生成し出力する。電子楽器で一番求められるのはレイテンシ（操作に対するタイムラグ）が小さいことである。一般的に楽器において許容されるレイテンシは20msまでと言われ、これ以上のタイムラグがあると演奏が成立しない。さらに動きの激しい演奏や繊細なタッチを求める演奏家にとっては20msでも遅いという。そこでレイテンシを小さくするため擦弦部に入力のある弦しか運指部の値を読まないようにするなど無駄を省くための工夫をした。マイコンには入門用Arduino UNOのポート数が強化されたArduino MEGAを採用した。

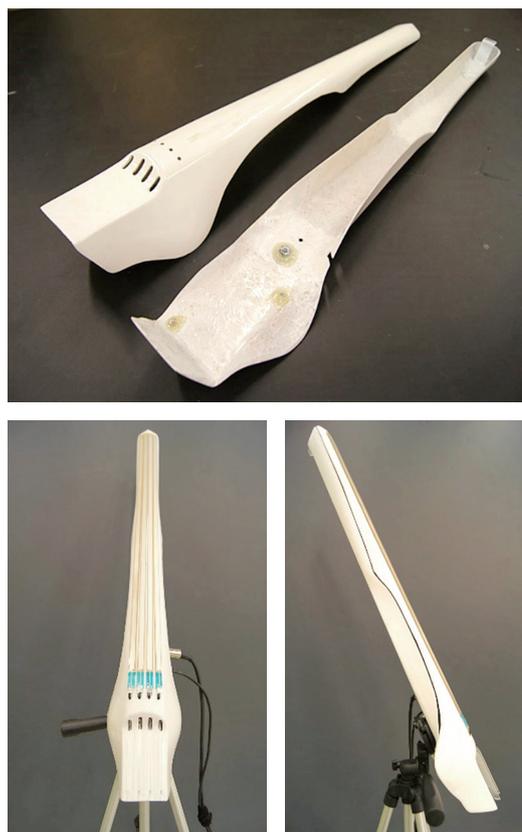


図9 筐体の外観図

### 3.2.5 音源部の詳細

音源部には誰もが扱いやすく市場に流通している汎用性の高いものが向いていると考え、電子楽器の統一規格である「MIDI (Musical Instrument Digital Interface)」を採用した。MIDIは現在出回っている電子楽器のほぼ全てに対応する規格で、異なるメーカーの電子楽器であっても連動して演奏・操作することを可能とする目的で生み出された。対応する周辺機器が多く、また参考文献なども入手しやすいため開発環境としても向いている。楽器としては、MIDI端子を設け、MIDI信号を外部に出力するまでを行い、実際に聞こえる音を出力する役割は外部のMIDI音源とスピーカなどが担う構成にした。また使用したMIDI音源は価格やサイズ、音種の多さからRoland社のSD-20を使用した。

## 4. 無弦チェロの対外的発表について

前節で述べた、運指部、擦弦部、筐体、制御部、

音源部を組み上げると図10のようになる。演奏のイメージとして、動画サイトに投稿した動画を紹介する（下記URLかYouTubeで「無弦チェロ」を検索<https://www.youtube.com/watch?v=6tttoxqDw6bU>）。

プロダクト化を視野に入れていたため、無弦チェロが完成してからは精力的に对外活動を行った。展示会への出展、コンテストへの出場、大学のPR活動の一環である各種イベントでの展示など機会があれば参加した。对外活動のねらいとして、ひとつは情報交換の機会をつくり、楽器やその製作活動を世間に発表し認知度を向上し情報提供や意見交換、協力者を仰ぎ研究に役立てるためである。さらに第三者からの評価を得るためであり、無弦チェロの評価として多くの一般の方に試奏・意見を頂きPDCAサイクルを回す機会を得た。また本研究で開発する楽器のユーザとなる対象は楽器経験者だけでなく未経験者も含むため、参加する对外活動の分野はあまり絞らず様々な種類の展示会などに赴くよう心がけた。さらに、学生への教育効果も非常に大きく、イベント出展ごとに新たな知見や意見を頂いたり、質問対応能力が向上したりと、開発チームにとって大変良い経験となった。出展したイベントを列記する。

#### 【2013年】

- ・ 特許出願（出願番号2013-153490）
- ・ MakerFaireTokyo2013出展，11月3-4日



図10 無弦チェロの外観

- ・ Gugen2013出展，9-11月
- ・ コラボさいたま2013出展，11月8-10日

#### 【2014年】

- ・ 全国手づくり楽器アイデアコンテスト2013出場，  
⇒（会長賞（最優秀賞）受賞）
- ・（株）YAMAHAの浜松工場にて技術交流会
- ・ 第16回日本感性工学会大会にて発表，9月4-6日
- ・ 埼玉スマイルウーマンフェスタ2014出展，9月13-14日
- ・ 大田区研究開発フェア2014出展，10月2-3日
- ・ 楽器フェア2014 出展，11月21-23日
- ・ GUGEN2014 出展，12月13-14

#### <参考文献>

- [1] AKAI EWI <http://ewi.akai-pro.jp/>
- [2] KORG WAVEDRUM [http://www.korg.com/jp/products/drums/wavedrum\\_global\\_edition/](http://www.korg.com/jp/products/drums/wavedrum_global_edition/)
- [3] ROLAND V-Accordion <https://www.roland.com/jp/products/fr-1xb/>
- [4] YAMAHA サイレントチェロ <http://jp.yamaha.com/products/musical-instruments/strings/silentcellos/>
- [5] YAMAHA サイレントバイオリン <http://jp.yamaha.com/products/musical-instruments/strings/silentcellos/>
- [6] KORG KAOSILATOR [http://www.korg.com/jp/products/dj/kaossilator\\_pro\\_plus/](http://www.korg.com/jp/products/dj/kaossilator_pro_plus/)
- [7] 電子楽器ウダー <http://uda.la/>
- [8] 明和電機 オタマトーン <http://www.maywadenki.com/otamatone/>
- [9] クリス・アンダーソン，“MAKERS—21世紀の産業革命が始まる”，NHK出版，2012。
- [10] FabLab JAPAN <http://fablabjapan.org/>
- [11] DMM.make <http://make.dmm.com/>
- [12] 早川 大，“弦の無いチェロ型電子楽器の研究・開発”，ものづくり大学修士プロジェクト論文，2015。

#### <謝辞>

本投稿にあたり，研究の公開を快諾してくれた小生研究室OBで無弦チェロ開発者の早川大君に深く感謝します。